

2013.07.04 BEANSプロジェクトセミナー

メーター級 大面積マイクロシステム を実現する集積化技術 (Macro BEANS)

伊藤寿浩

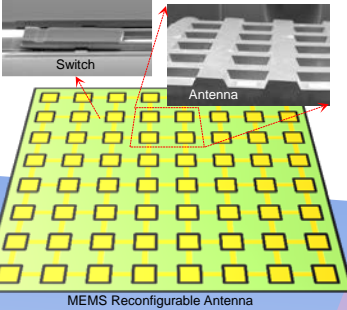
産業技術総合研究所・集積マイクロシステム研究センター

Macro BEANSの全体像

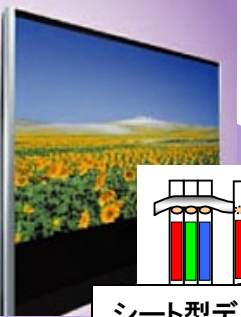
大面積エネルギーハーベスティングデバイス



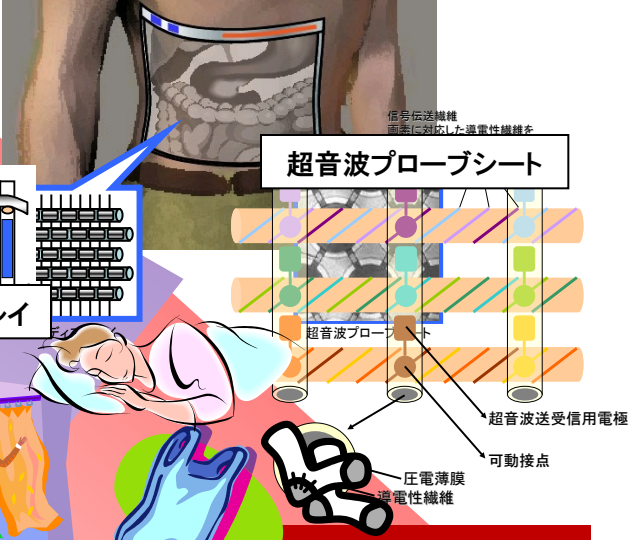
大面積通信デバイス



大面積映像デバイス



シート型健康管理デバイス



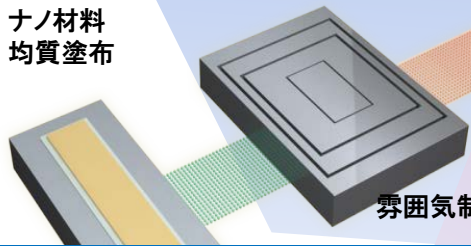
光電効果・ピエゾ抵抗効果・熱電効果・ゼーベック効果・ペルチェ効果を利用した大面積Siデバイス

メーター級大面積デバイス

マイクロ・ナノ構造を有する高品位機能膜をメーター級の基板に真空プロセス装置を用いずに形成する製造技術を開発する

大気圧プラズマ成膜

ナノ材料均質塗布



雰囲気制御

非真空高品位ナノ機能膜大面積形成プロセス技術

シート型ディスプレイ



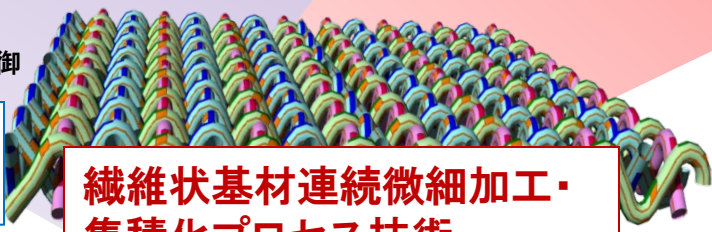
ウェアラブル発電



安全安心ジャケット

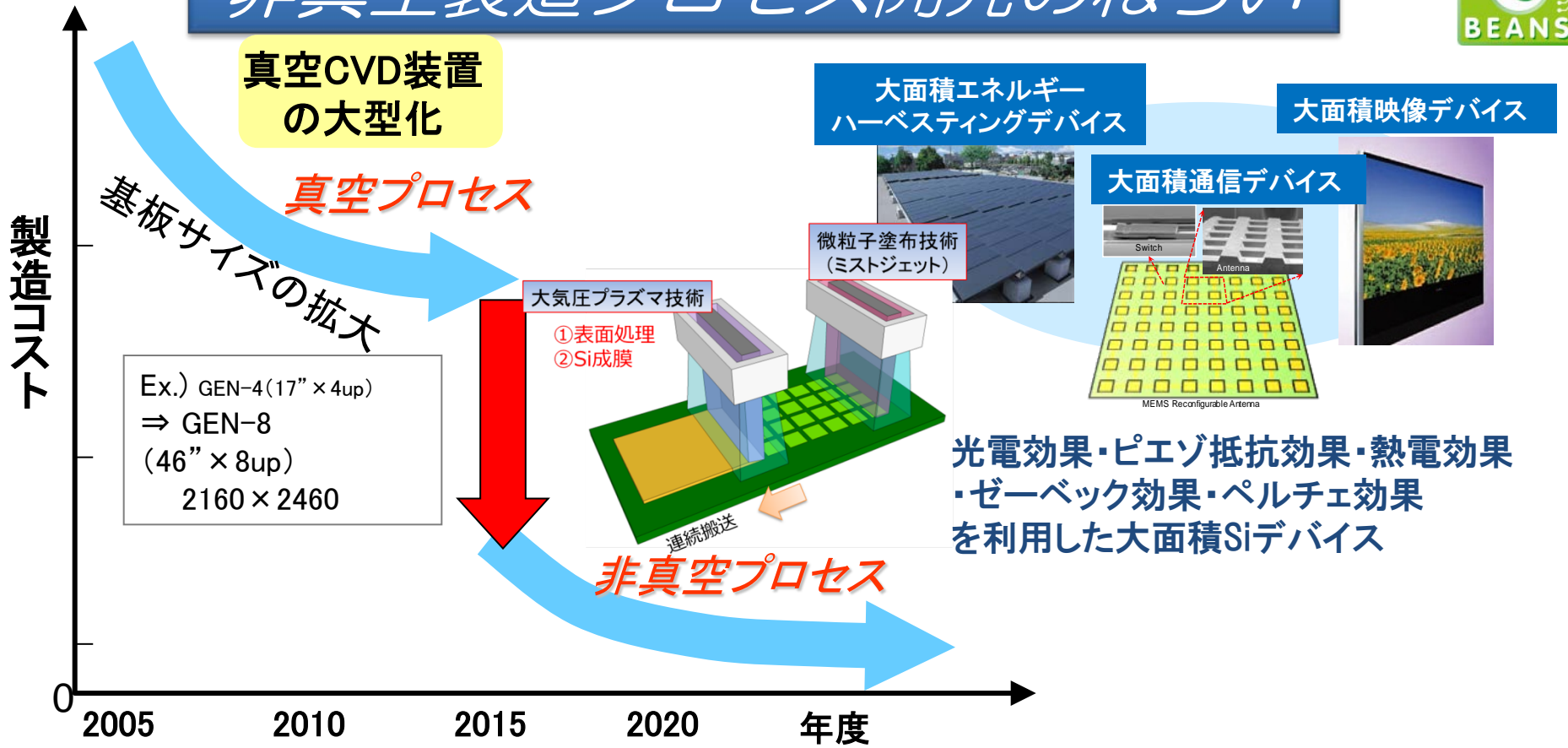
フレキシブルシートデバイス

フレキシブルシートデバイスを基板の大面積化を伴うことなく実現する、製織技術などを活用した新たな製造技術を開発する



繊維状基材連続微細加工・集積化プロセス技術

非真空製造プロセス開発のねらい



大型真空チャンバー・特殊ガス設備からの脱却
=> 設備投資・ランニングコストの大幅低減

非真空製造プロセスの実現に向け開発する要素技術

① 大気圧プラズマ技術

② ナノ材料均質塗布技術

③ 局所環境制御技術

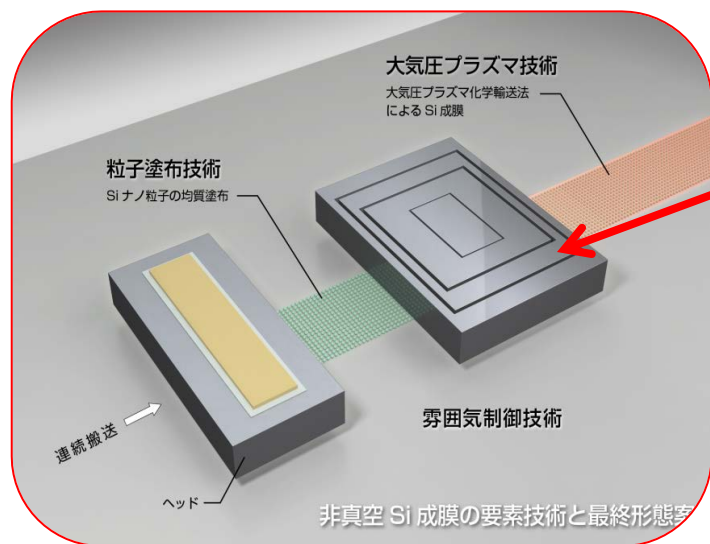
大気圧下 高品位シリコン成膜技術の開発



研究概要

非真空・大面積に対応するために

- ◆大気圧下で適用可能 ⇒ 大気圧プラズマ技術
- ◆チャンバーレスに対応可能 ⇒ SiH₄などを用いないプラズマ化学輸送法



制御した霧囲気条件下において
大気圧プラズマ化学輸送法による
シリコン成膜を開発

★課題

- ・導電率制御
- ・成膜スピード
- ・大気開放系でのSi成膜

〔プラズマ化学輸送法〕+ 〔霧囲気制御〕

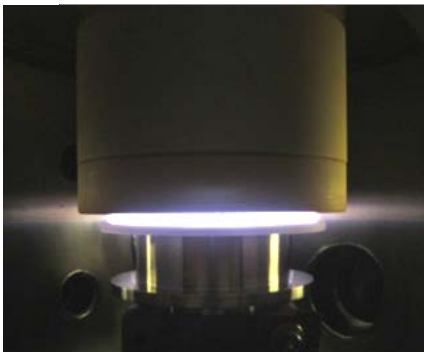
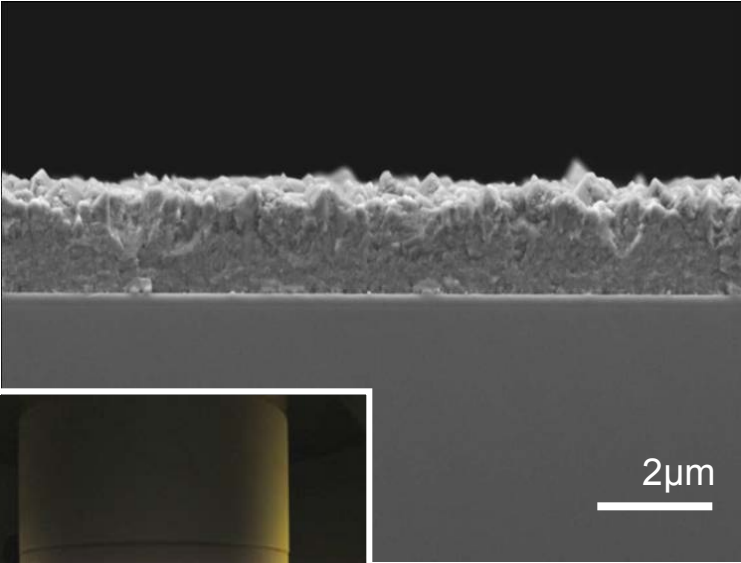
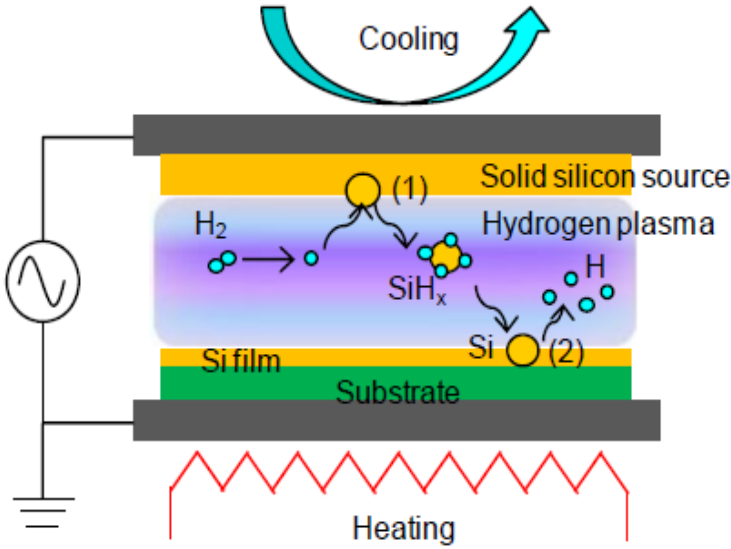
成膜寄与種生成

開放型成膜

大気圧下 (700 Torr) でのシリコン成膜

成膜原理 プラズマ化学輸送法

H₂、シリコンターゲット使用 (SiH₄フリー)

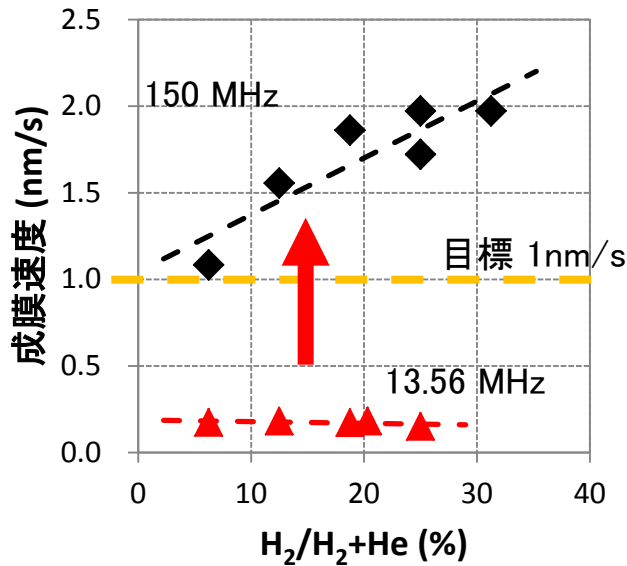


大気圧成膜Siの断面SEMと放電の様子

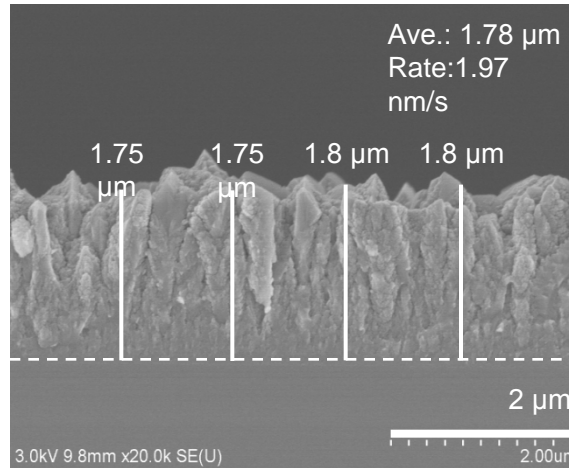


成膜速度の高速化

超高周波（150 MHz）による成膜速度高速化（最高118 nm/min）を実現



成膜速度の水素濃度依存性



シリコン膜断面SEM像
(シリコン基板上)

ホール効果測定結果
(石英基板上)

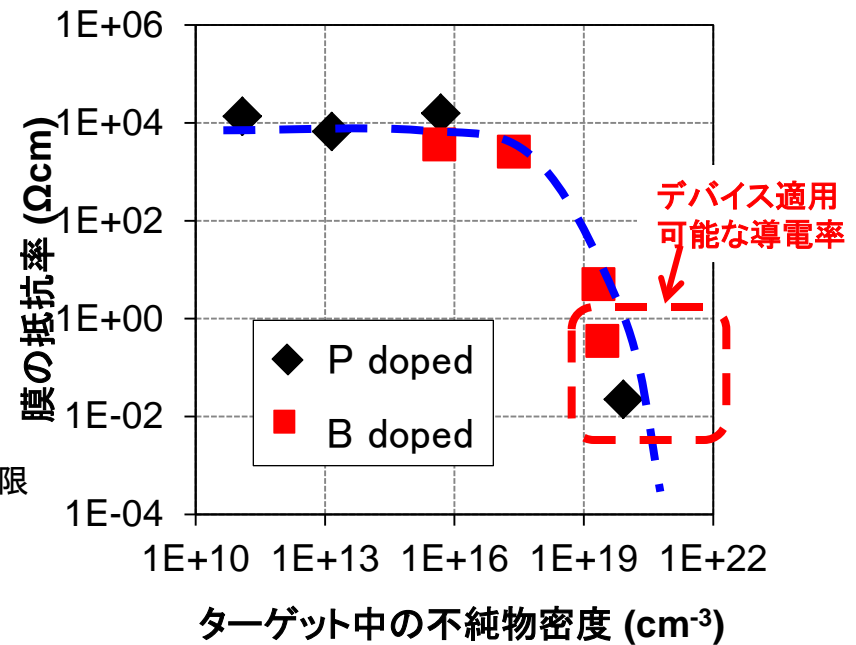
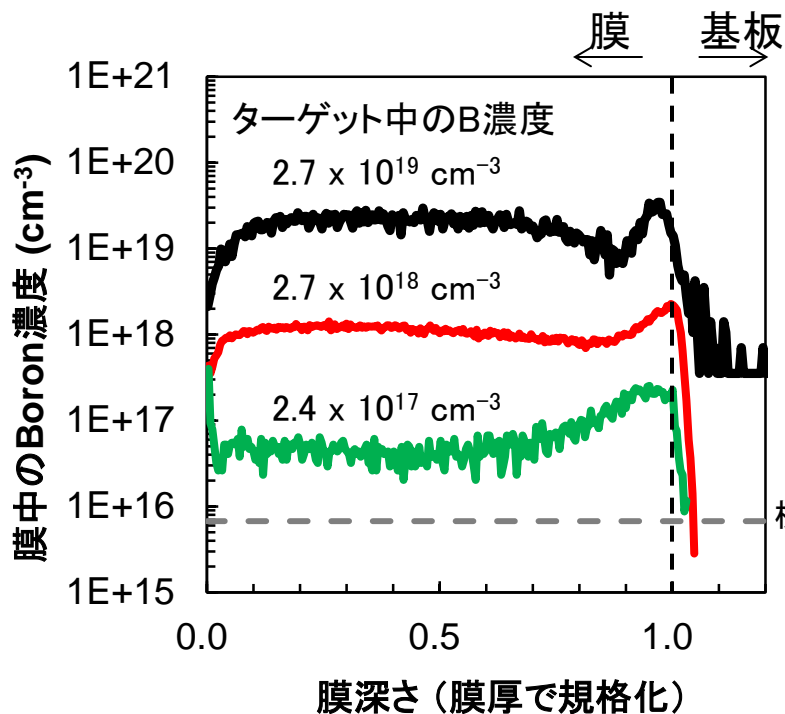
比抵抗	$5.1 \times 10^5 \Omega\text{cm}$
キャリアタイプ	N
キャリア濃度	$9.3 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$
移動度	$1.3 \text{cm}^2/\text{Vs}$

構成材の低誘電率化と下部電極GND強化により電力損失を抑制し、安定放電を実現
150MHz電源を用いた成膜により膜厚均一性±10%以下, 電子移動度 $1.32 \text{cm}^2/\text{Vs}$,
成膜速度 118 nm/分を達成

固体ソースによる荷電子制御プロセスの開発



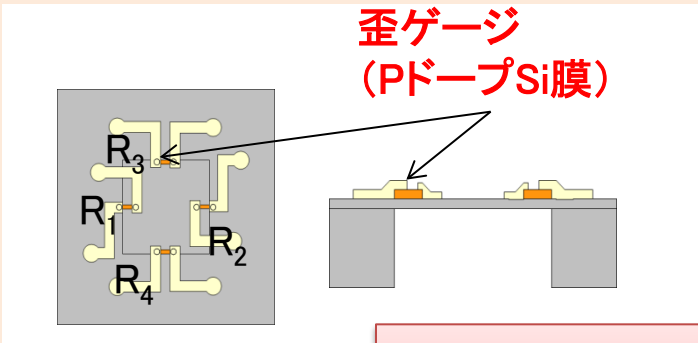
固体ソースによる荷電子制御プロセスを開発～ドーパントがターゲット中の濃度に比例してドーパされることを確認



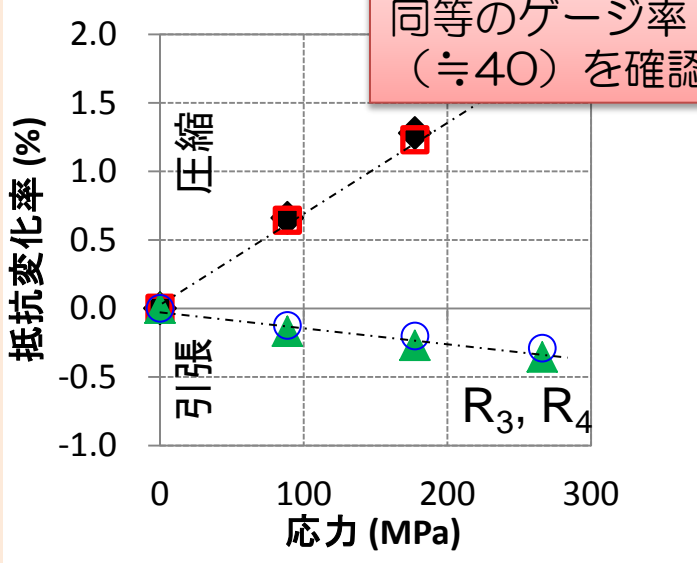
P(B-doped)/N(P-doped)型で導電率 $10^{-1} \Omega\text{cm}$ を達成

デバイス適用性検証

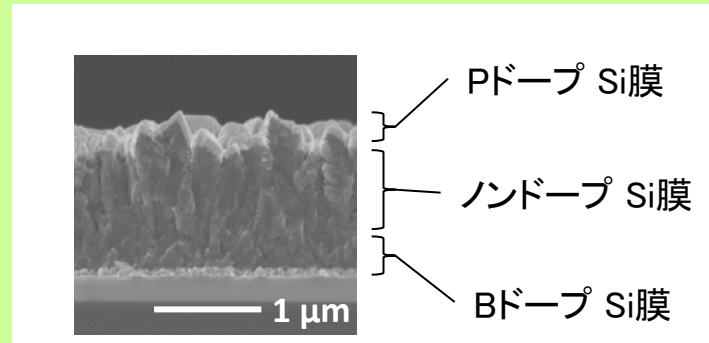
歪抵抗効果デバイス



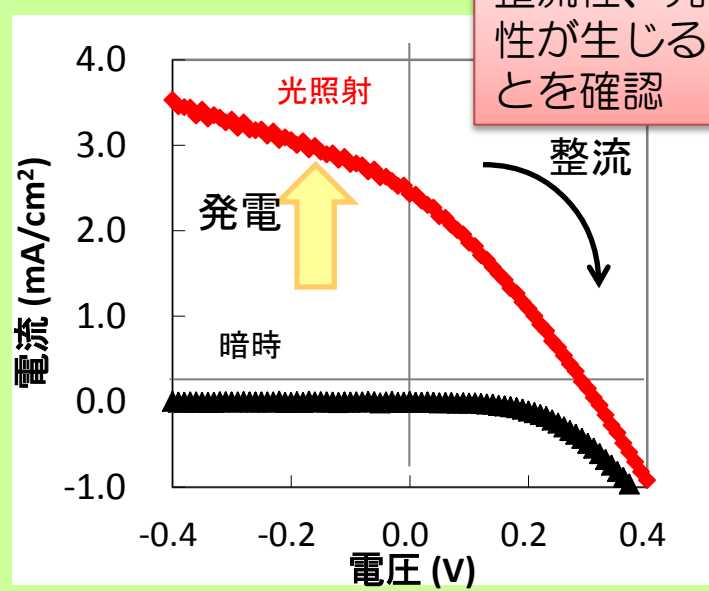
従来の低圧CVD膜と同等のゲージ率 (≒40) を確認



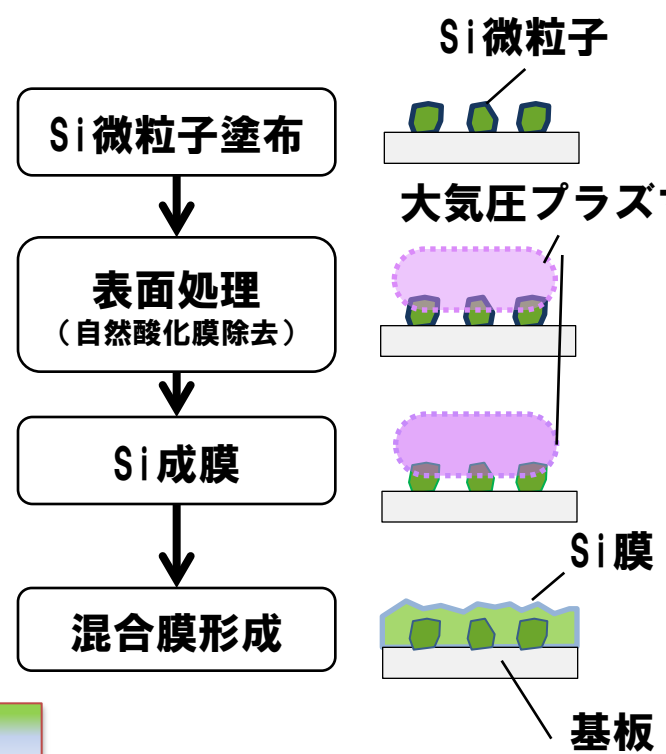
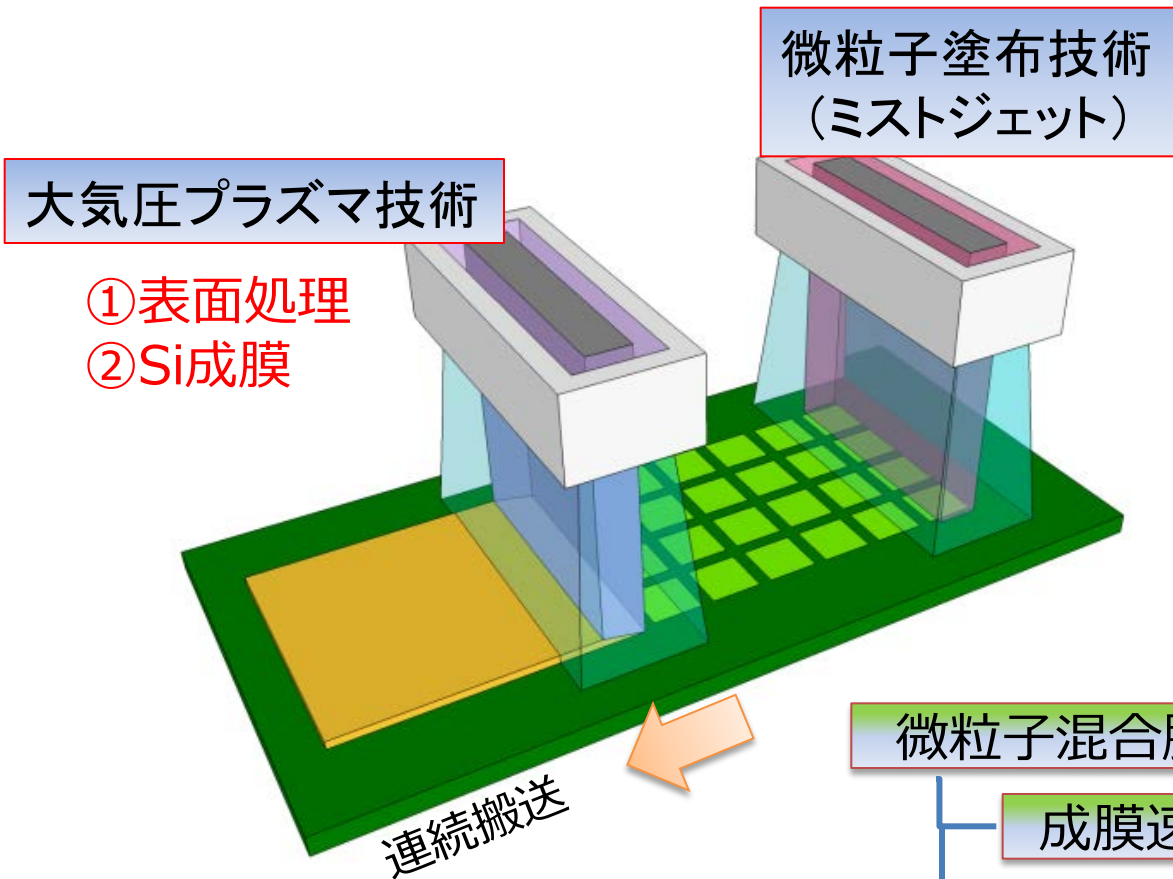
光電変換デバイス



整流性、発電性が生じることを確認



微粒子塗布と大気圧プラズマ成膜による 混合膜形成プロセスの開発



微粒子混合膜

成膜速度向上

- ・大気圧プラズマ成膜の補完
- ・膜形成核

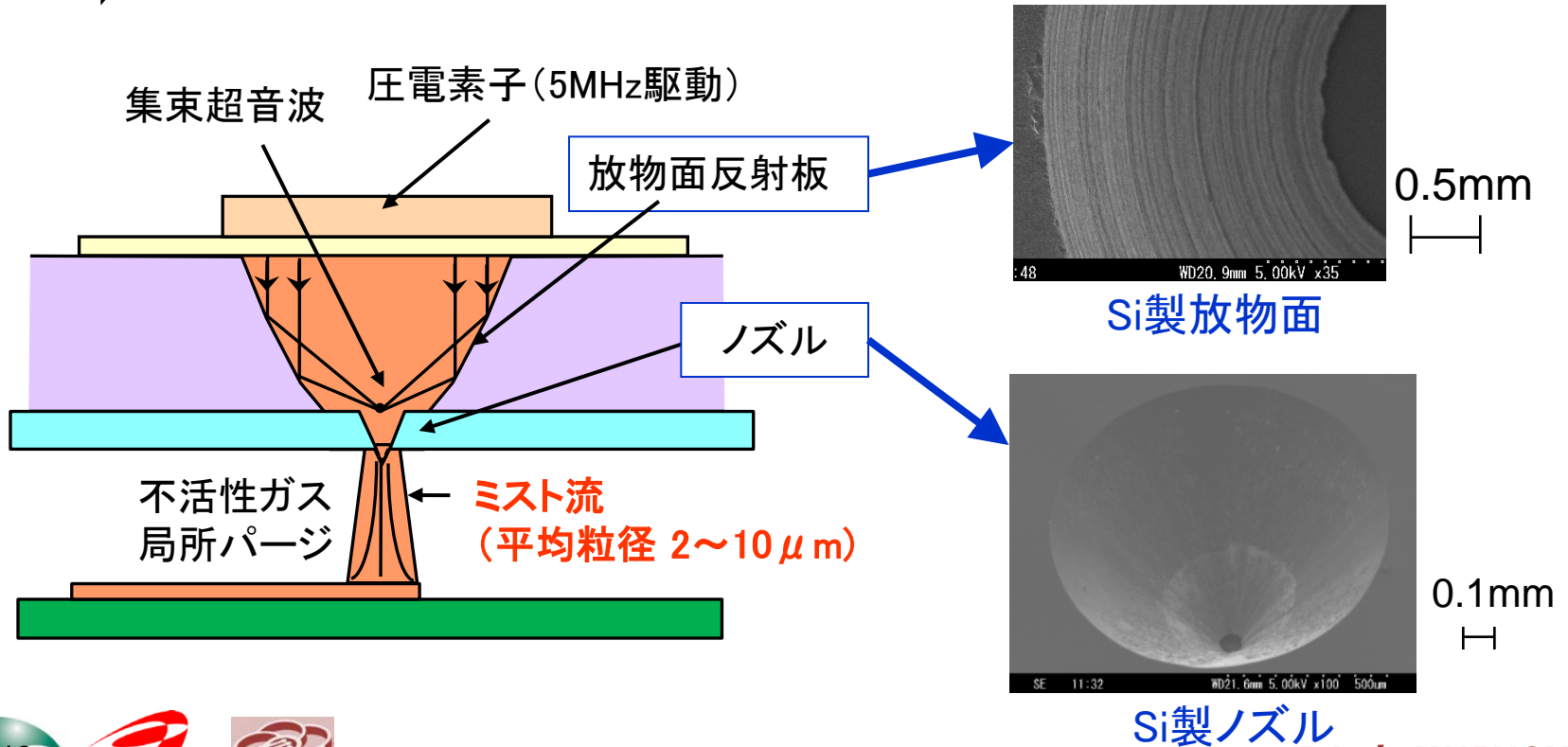
微粒子による組成 (P or N)制御

ミストジェットSi粒子塗布技術

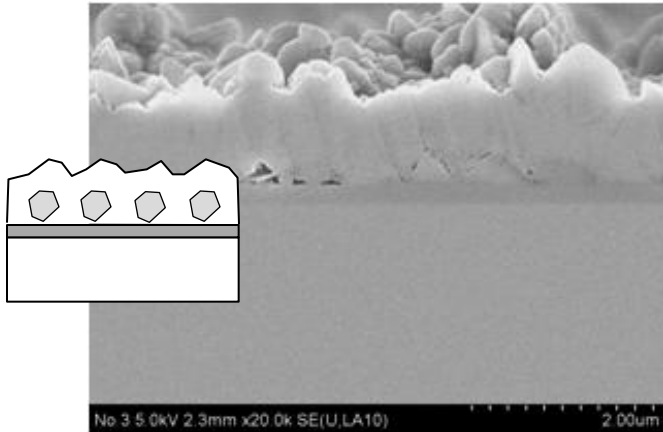
特長

1. 超音波エネルギーの利用により平均粒径数 μm のSi粒子群(ミスト)を連続的に吐出可能 → 機能膜の均質化
2. 吐出径が小さいため、Si微粒子分散液の蒸発が早い

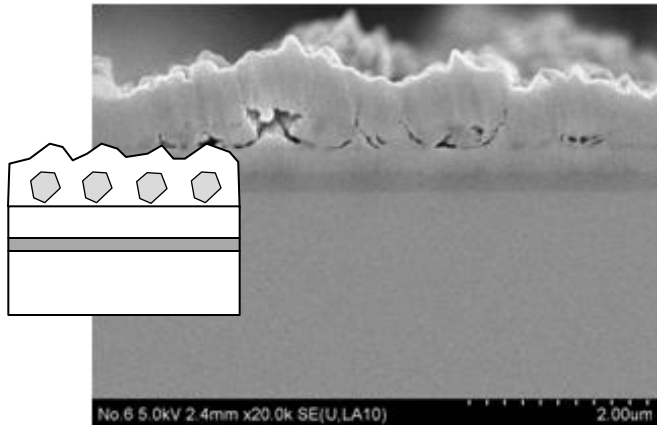
ねらい: Si粒子分散液の均質塗布、かつ高純度な塗布膜形成



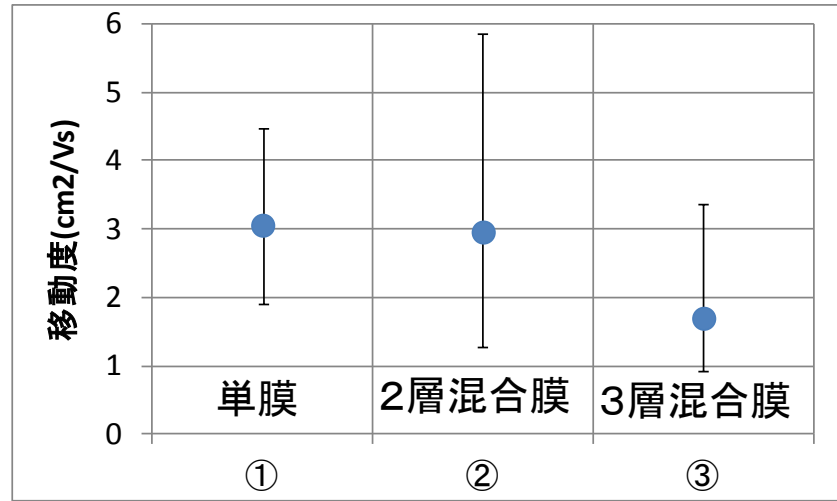
混合膜形成結果



2層混合膜
Si膜(1um)/Si粒子/基板



3層混合膜
Si膜(0.6um)/Si粒子/Si膜(0.3um)/基板



- 単結晶シリコンと同等のバンドギャップ値1.1eV
- 大気圧プラズマシリコン単膜と同等の移動度：1.7~3.0 cm²/Vsecを混合膜で達成

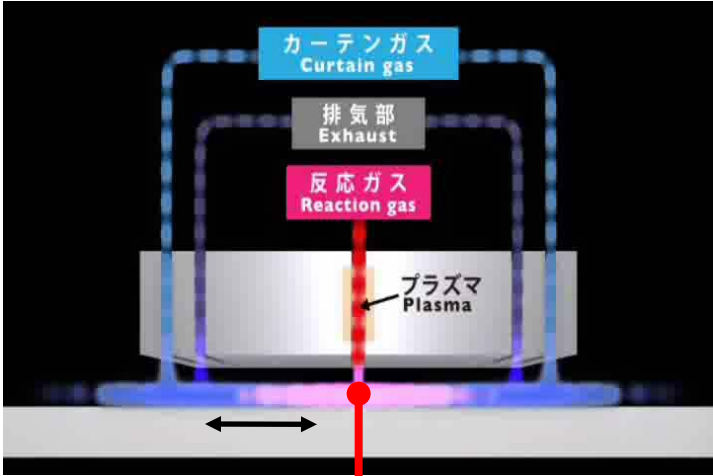
局所環境 雰囲気制御技術の開発

開放系で擬似的な密閉清浄空間を形成

- ◆ **反応ガス**の外部への漏洩防止
- ◆ **大気成分**の内部への侵入防止

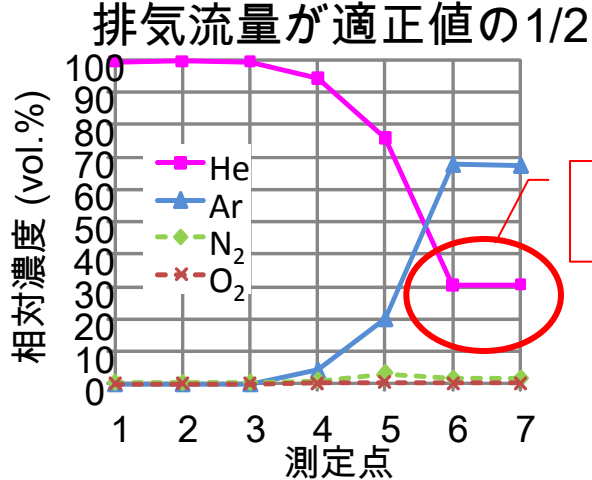
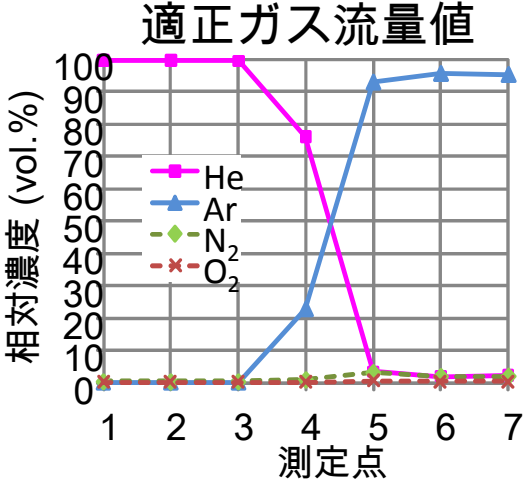
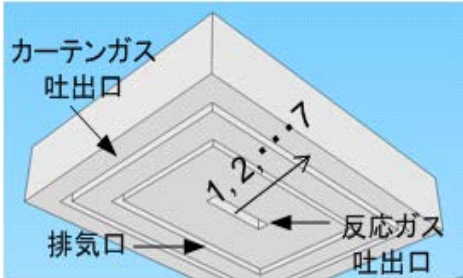
独自のガスカーテン構造

- ・カーテンガスを排気の外周に設ける
- ・ヘッド下面を陽圧にする流量制御



ガス質量分析器(常圧対応Q-mass)

- ①ガス流量設定への流体シミュレーション活用
- ②実機による検証(ガス分析)

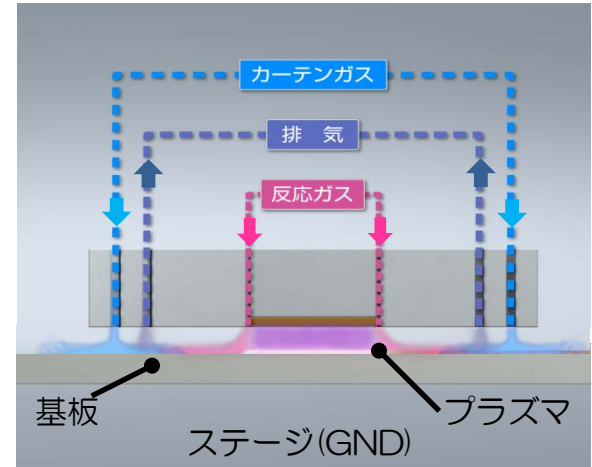


反応ガスの外部漏洩

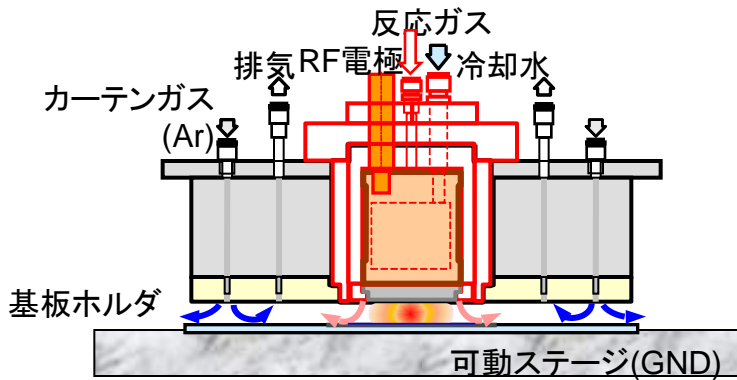
ガスカーテン構造による擬似的な密閉清浄空間の形成を実証

大気開放系でのシリコン成膜

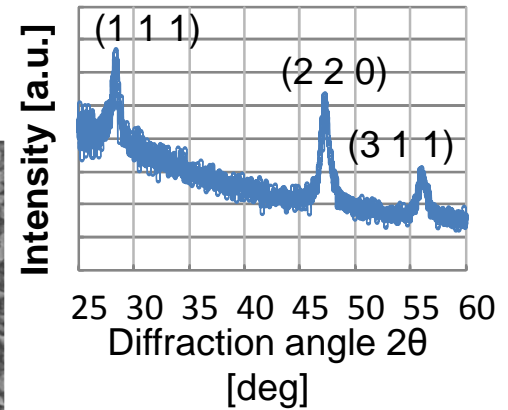
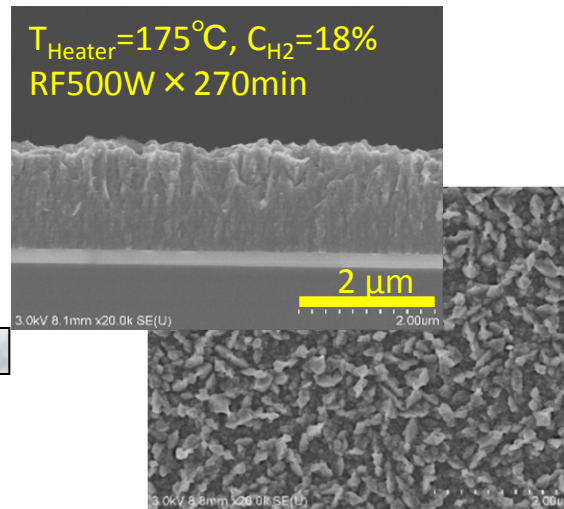
ガスカートーン構造により、Si膜形成が可能な局所清浄環境を実現
 ⇒開放型大気圧プラズマにより、密閉型機と同等（多結晶構造、成膜速度/13.56MHz）のSi成膜



ガスカートーン構造



霧囲気制御ヘッド構造(平行平板型)



Si膜のSEM写真とXRD測定結果

非真空高品位ナノ機能膜 大面積形成プロセス技術の開発 ～まとめ～

(1) 大気圧プラズマ成膜

- ✓ 超高周波（150 MHz）による成膜速度高速化（最高118 nm/min）を実現
- ✓ 固体ソースによる荷電子制御プロセスを開発～ドーパントがターゲット中の濃度に比例してドーピングされることを確認
- ✓ 歪抵抗効果デバイス：従来の低圧CVD膜と同等のゲージ率（ ≈ 40 ）を確認，光電変換デバイス：整流性、発電性が生じることを確認

(2) ナノ材料均質塗布技術

大気圧プラズマシリコン単膜と同等性能の混合膜を実現

(3) 局所環境制御技術

ガスカートーン構造により、Si膜形成が可能な局所清浄環境を実現
⇒世界で初めて開放型大気圧プラズマによりSi成膜に成功、密閉型機と同等（多結晶構造、成膜速度/13.56MHz）のSi成膜を実現

纖維狀基材連続微細加工・集積化プロセス技術開発

(1) Continuous coating process of high-quality functional films

— Multilayer Dye-coating Process

①機能薄膜連続被覆

(2) High-speed continuous 3D nano/micro-machining process

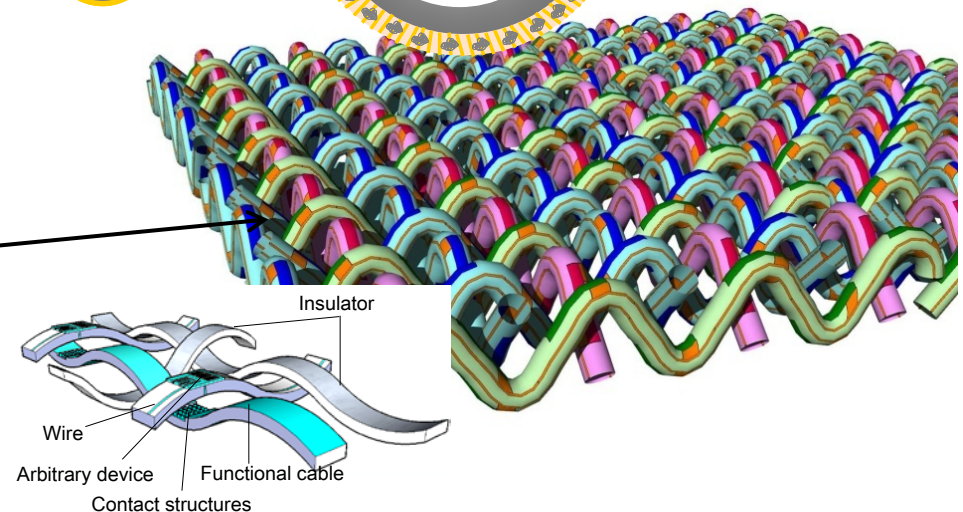
— Reel-to-Reel Continuous Deposition & Patterning

②連続微細加工

(3) Weaving integration process of hetero functionalized fibers

— Movable-contact Structure
— Woven Device Design & Aligned Weaving Integration

③製織集積化



繊維状デバイス的高速連続製造工程

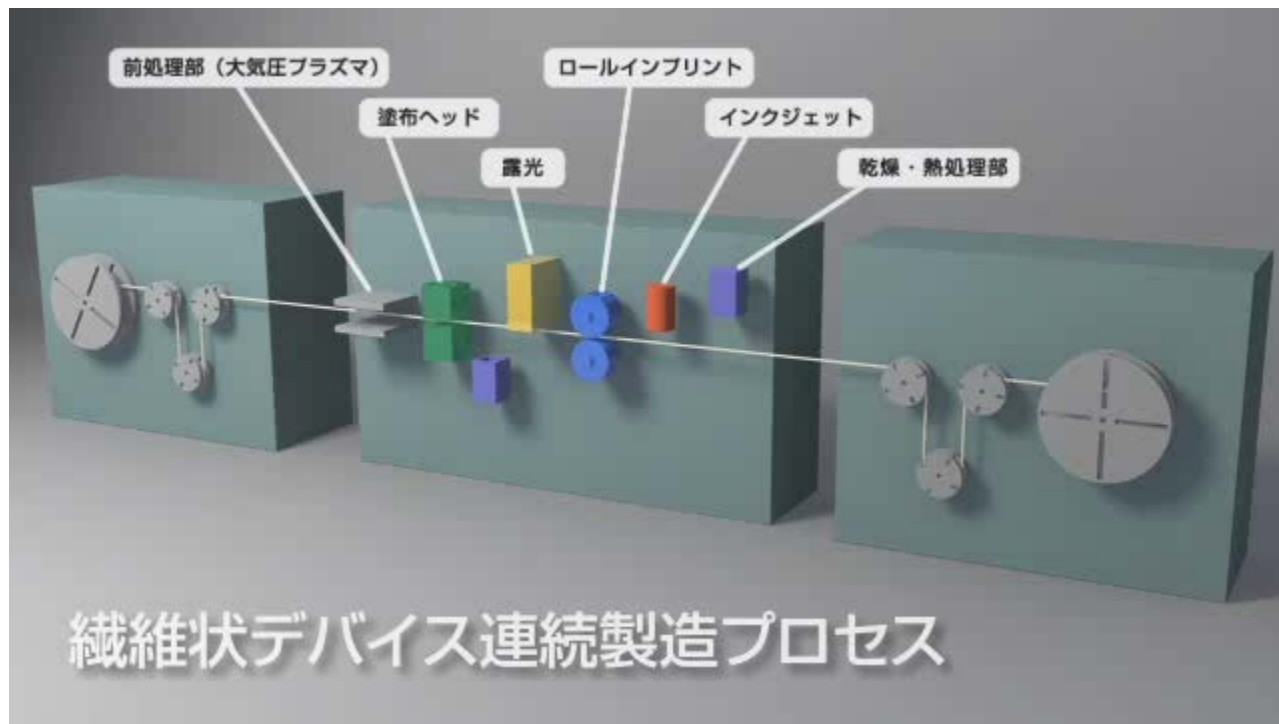


【繊維状デバイスに求められる要素】

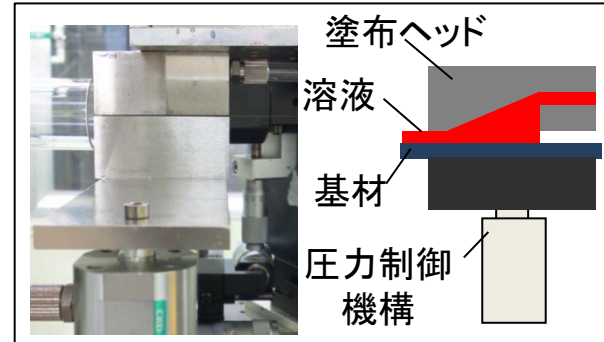
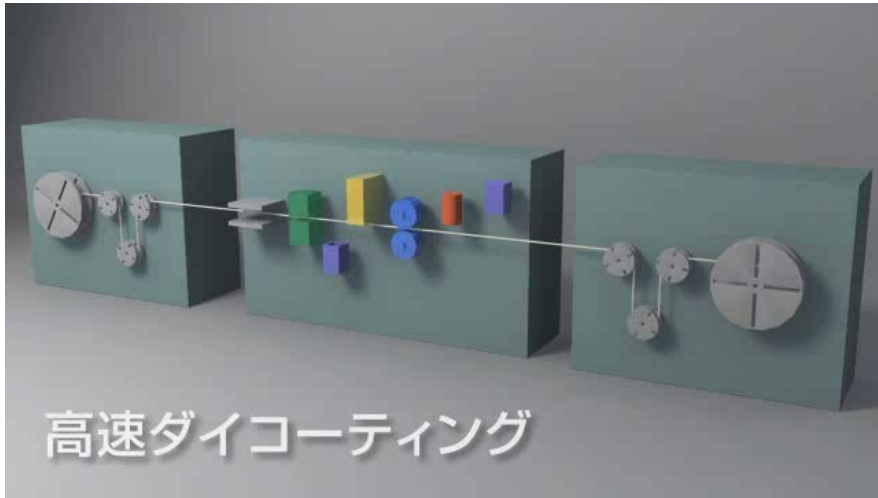
- ・高速かつ連続的な機能性薄膜形成
- ・高速かつ連続的なパターン形成
- ・可動接点構造形成

【基本プロセス】

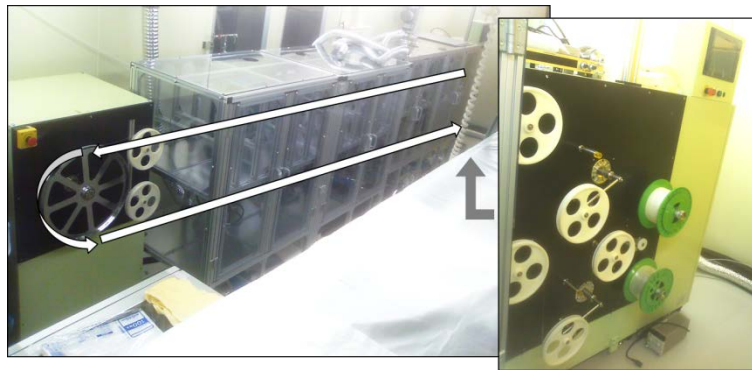
- ・高速ダイコーティング技術
- ・連続インプリント技術
- ・連続露光プロセス
- ・インクジェット
- ・中空基材内への構造形成



R2R高速ダイコーティング技術



コーティング成膜プロセス



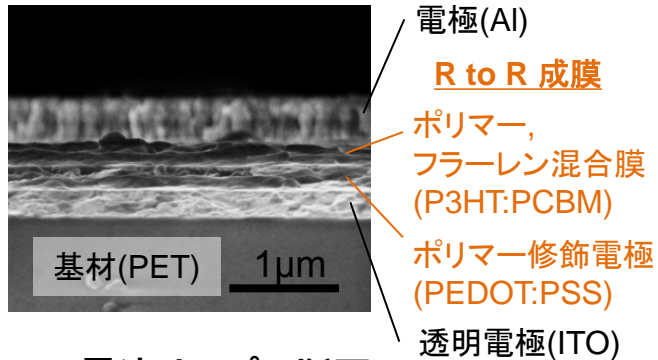
連続成膜装置



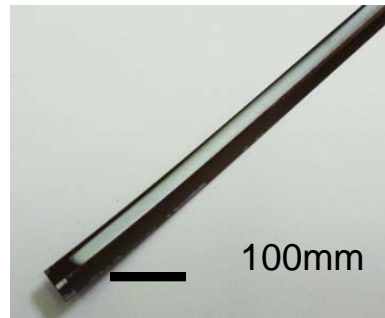
巻き取った成膜済基材
(PET, 幅5mm)

繊維状有機薄膜太陽電池の試作

太陽電池材料の成膜にプロセスを適用



電池サンプル断面

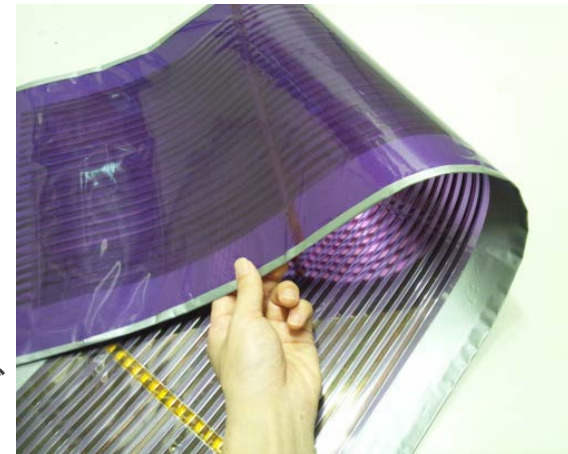


繊維状有機薄膜太陽電池

有機薄膜太陽電池材料を連続成膜

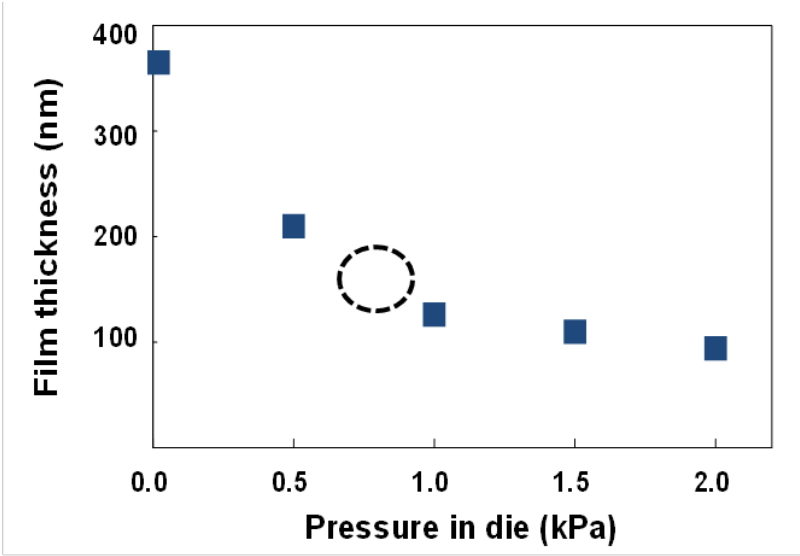


平面集積
・配線
・パッケージング

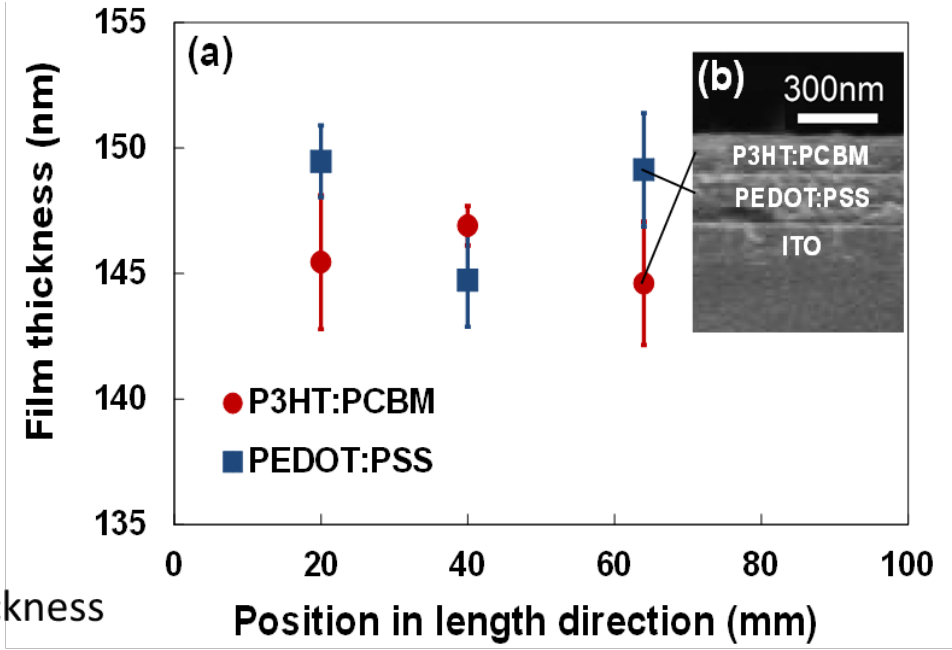


試作フレキシブル発電シート

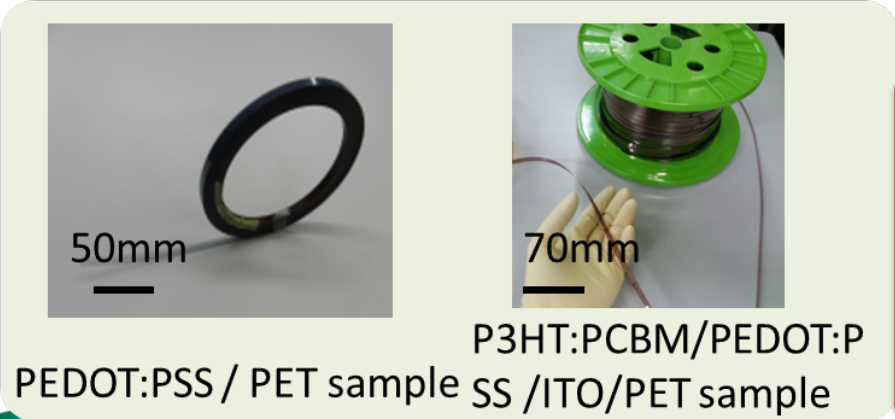
R2R高速ダイコーティング～膜厚制御技術



Effect of pressure at cavity in die on film thickness

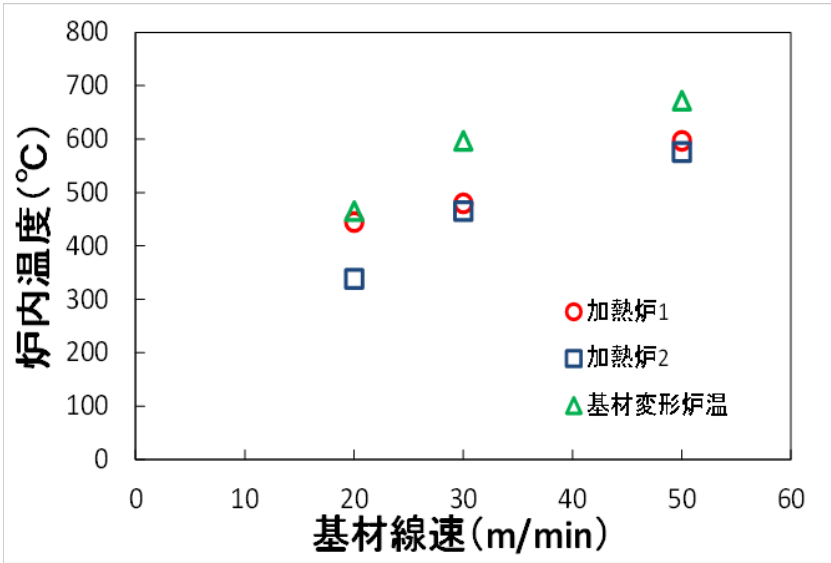
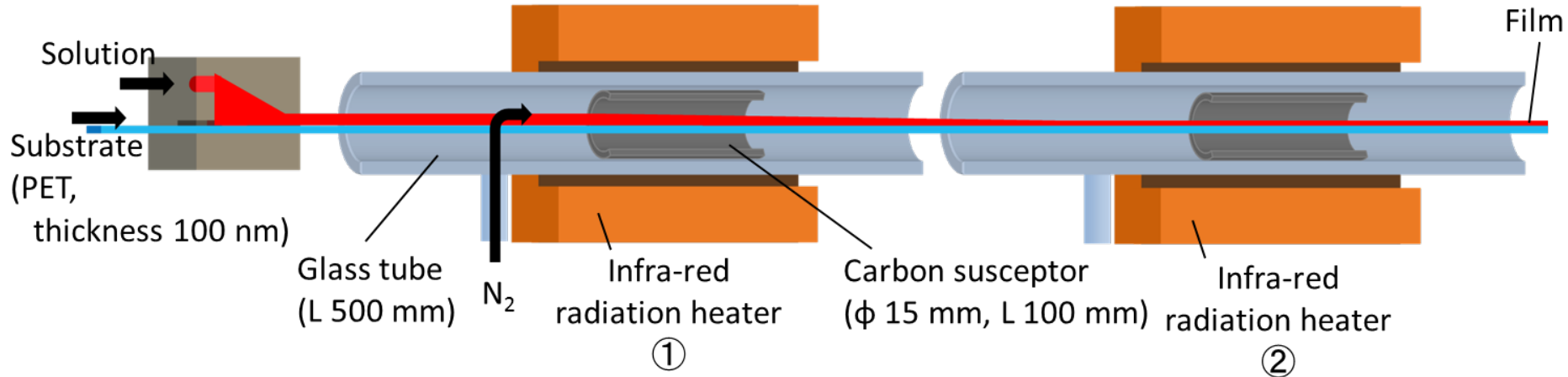


Thickness measurement of die coated films



基板の厚さばらつき数 μm に対応可能な液圧制御による高速膜厚制御手法を開発
 \Rightarrow 100 nmレベルの薄膜を $\pm 5\%$ で成膜可能

R2R高速ダイコーティング～高速成膜



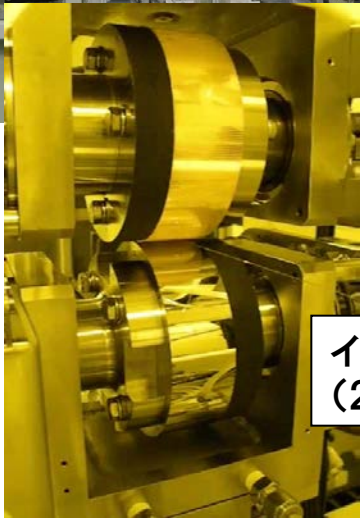
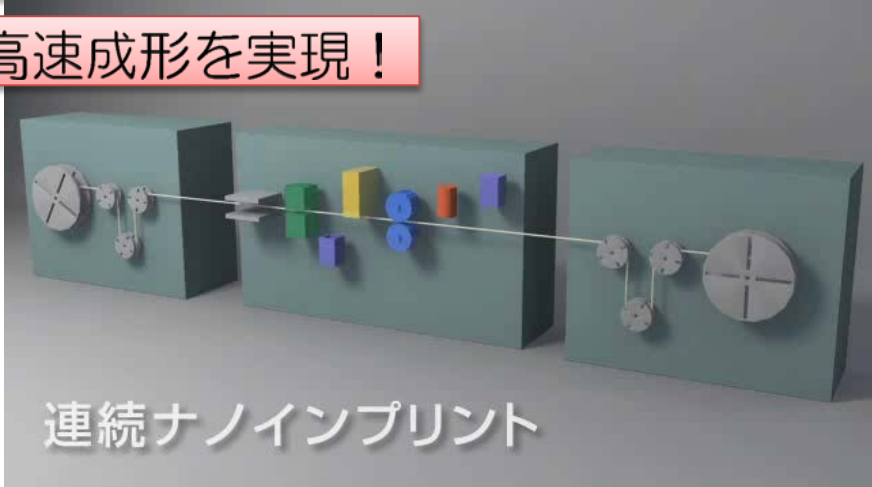
50m/minでの成膜を実現した溶液

半導体膜	P3HT:PCBM	トルエン溶液
絶縁膜	PMMA	メチルエチルケトン溶液
圧電膜	PVDF	メチルエチルケトン溶液
導電膜	PEDOT:PSS	水分散液

熱処理プロセスの最適化による高速成膜
 ⇒各機能性薄膜について、基材搬送速度
 50m/minでの成膜を実現

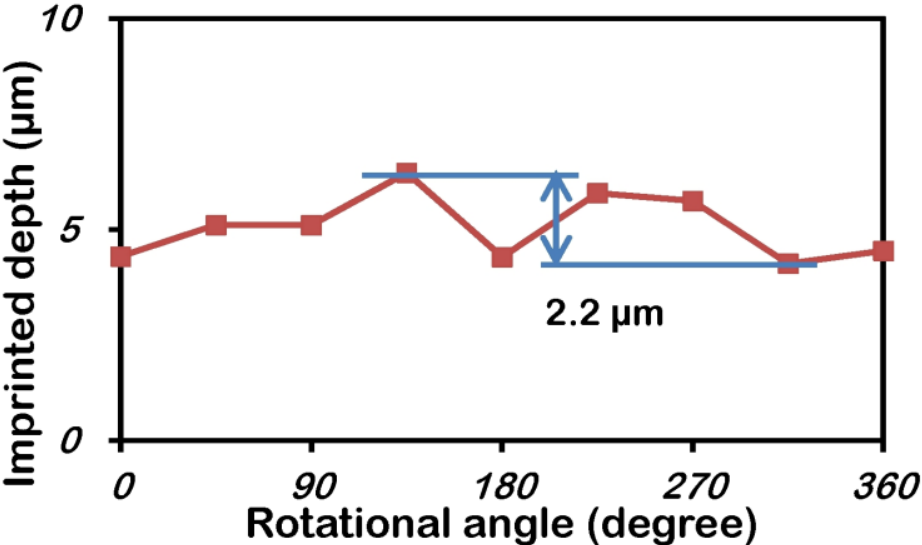
R2R高速立体インプリント

20 m/minでの高速成形を実現！



インプリント状況
(20m/min)

$\phi 250\mu\text{m}$ POFで直径変動(3.6 μm)以下に抑制

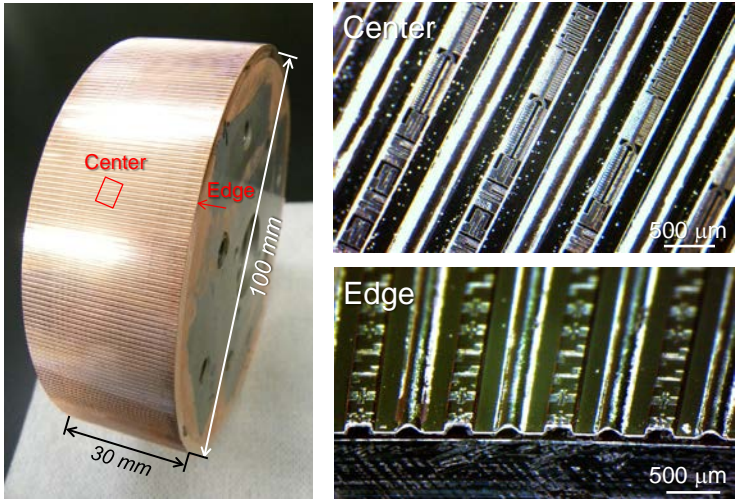


インプリントパターン深さ変動

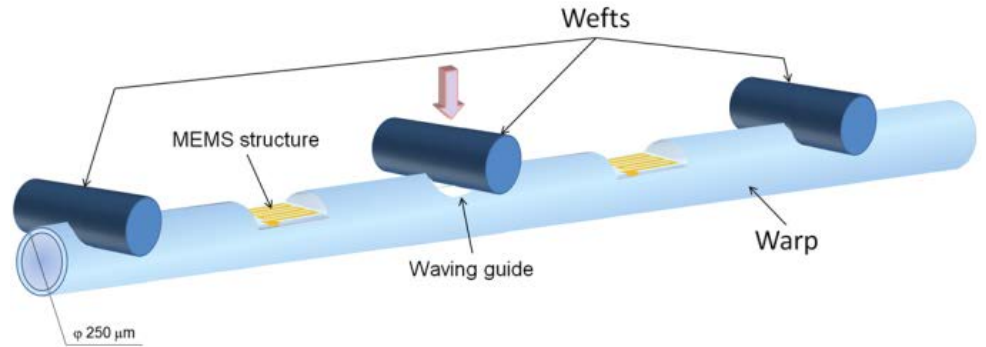
高速荷重制御機能付き
リールツールリール熱インプリントシステム

複合パターンの一括転写

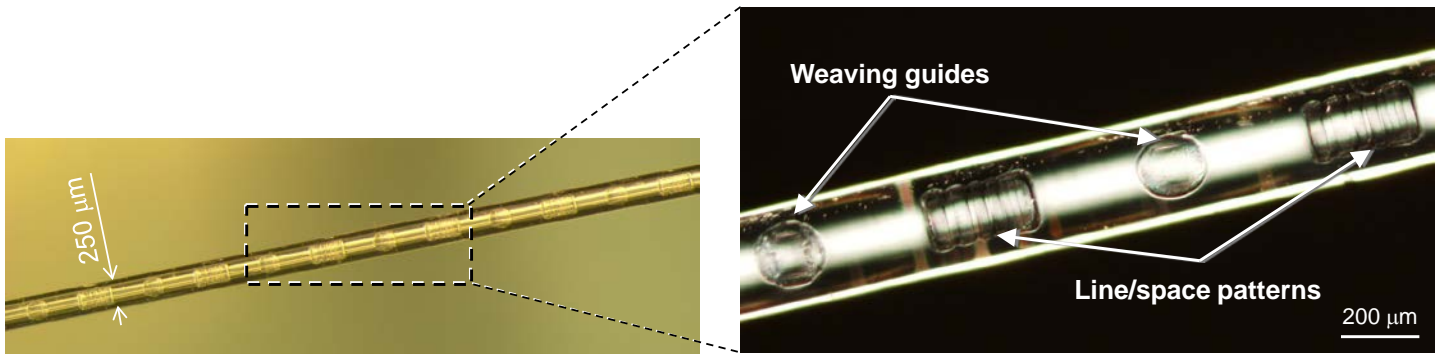
円筒モールドによる複合パターンの一括転写に成功！



シームレス円筒モールド

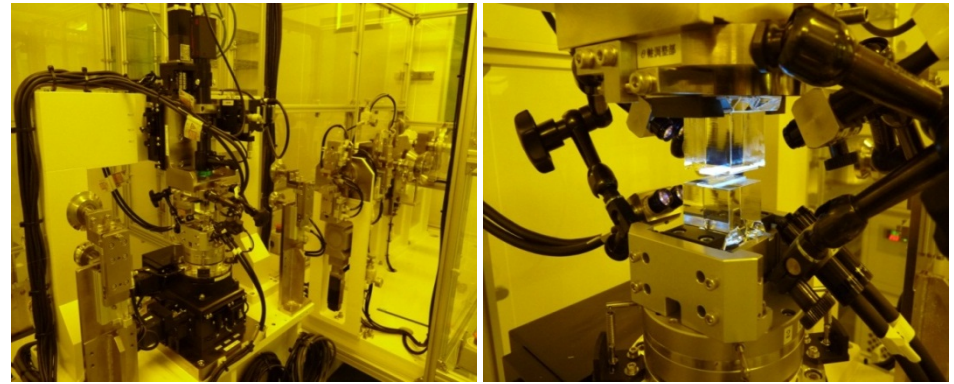
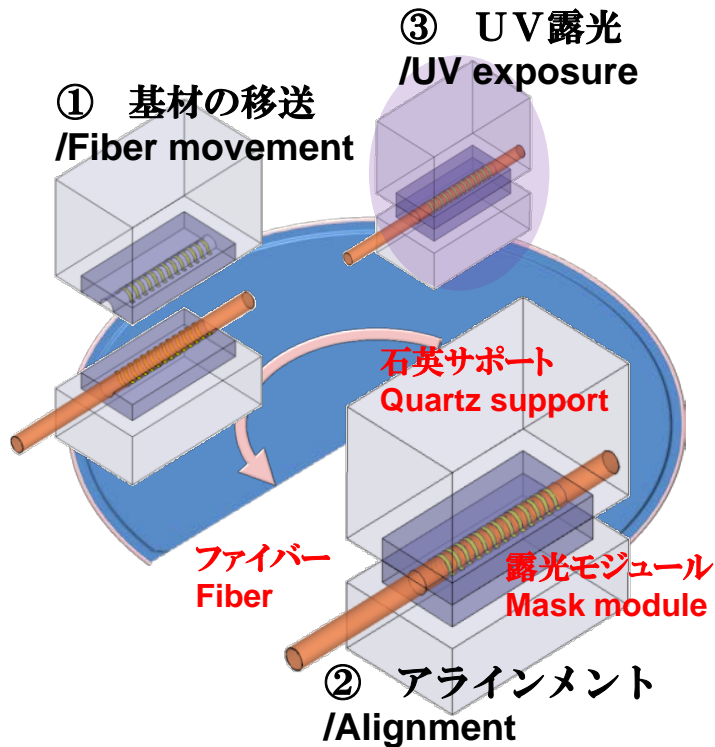


$\phi 250 \mu\text{m}$ POF表面に製織ガイドとMEMSパターンを一括成形



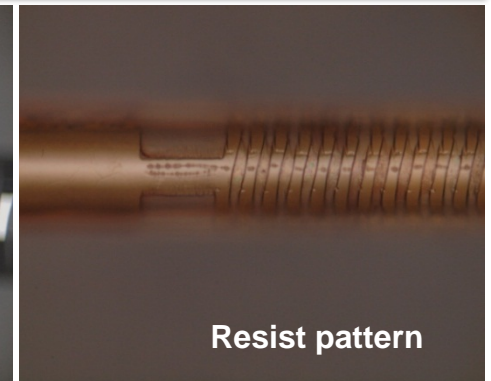
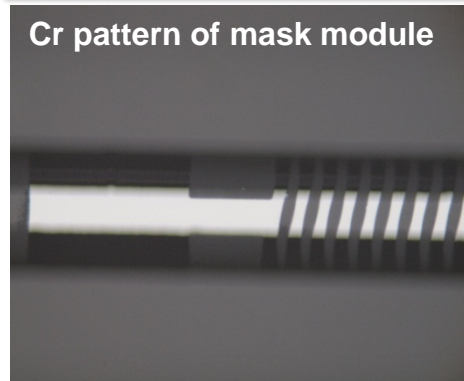
POF表面の成形パターン

R2R3次元露光プロセス



3D Photolithography System

Cr pattern of mask module

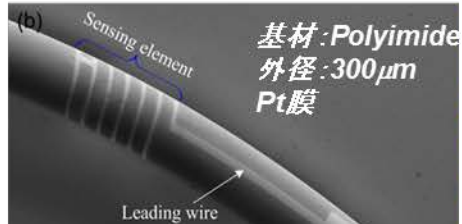
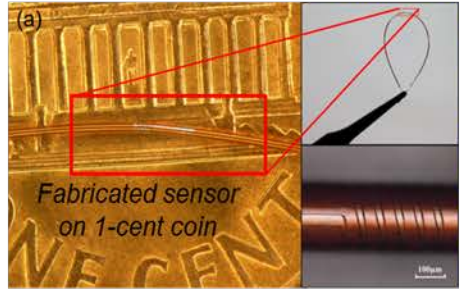
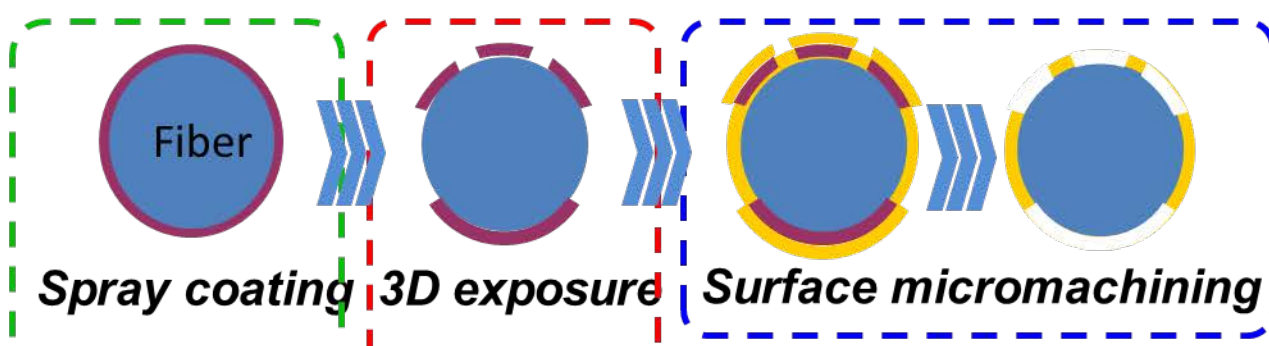


Resist pattern

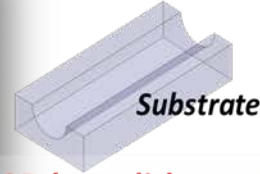
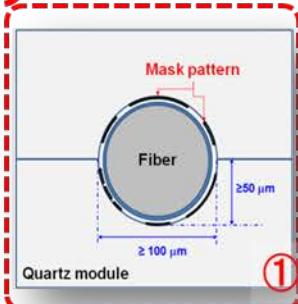
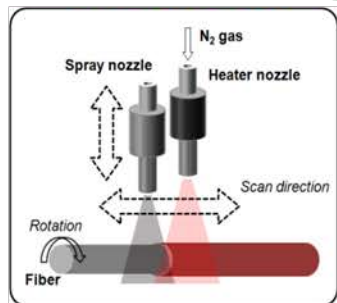
Stepping-forwardly Continuous
Photolithography Process

Photolithography results
(Quartz fiber with the diameter of 125 μ m)

R2R3次元露光プロセス(2)

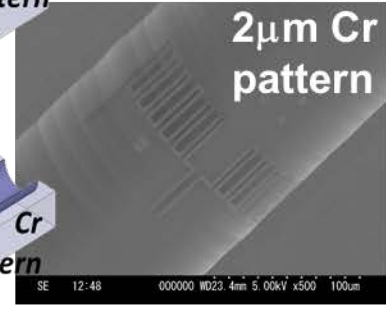


抵抗型繊維状温度センサーを試作

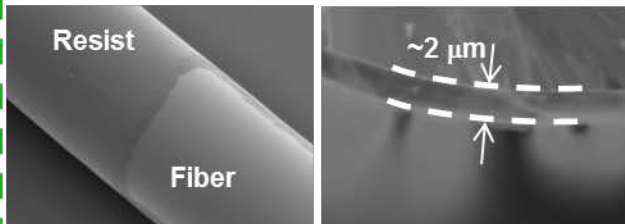
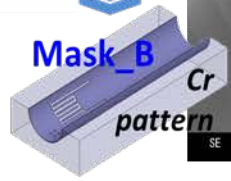


① 3D laser lithography

最小2 μ mパターンのMEMS露光モジュールを開発



Lift-off

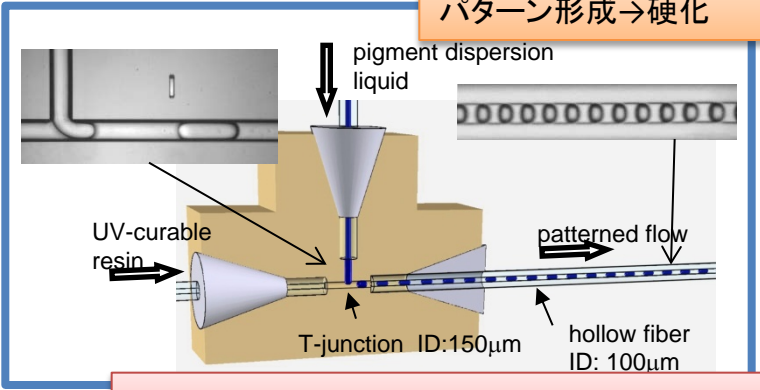


繊維状基材用レジストコーティング技術を開発

中空基材内パターン形成プロセス

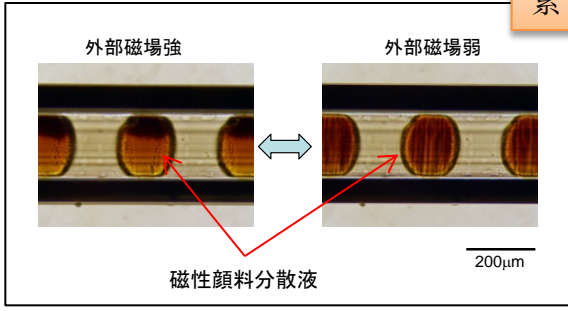
■ プロセス概要

T型マイクロ流路による
パターン形成→硬化

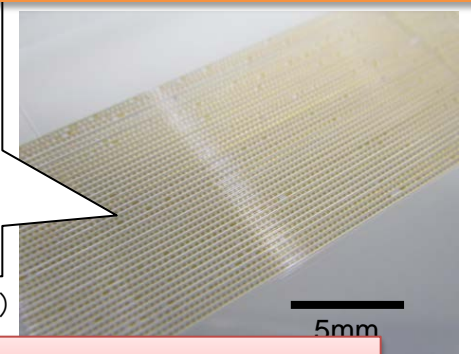


■ 表示素子試作

外部磁気による粒子駆動を実証
素子密度90dpi相当、寸法2cm角以上



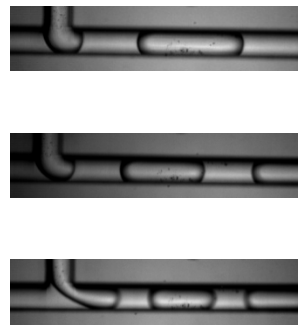
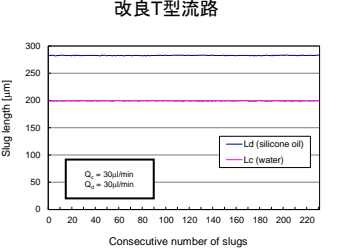
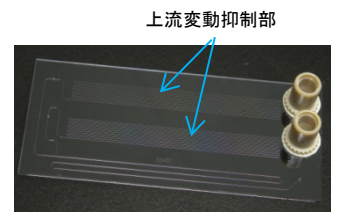
● 混合条件検討により長尺化(300mm超)



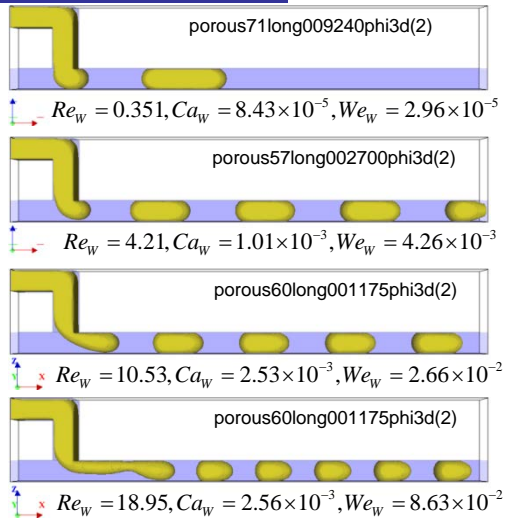
マイクロスケール混相流を応用する細管基材内構造形成技術を開発

■ パターン形成均一性向上

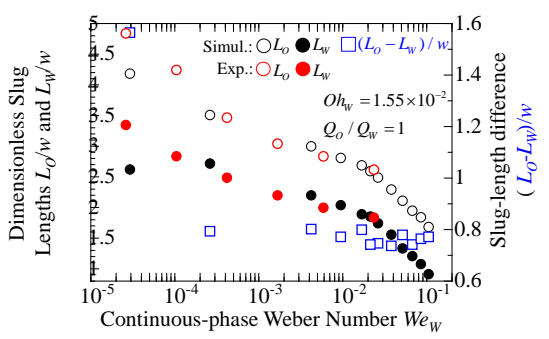
■ パターン形成シミュレーション手法確立



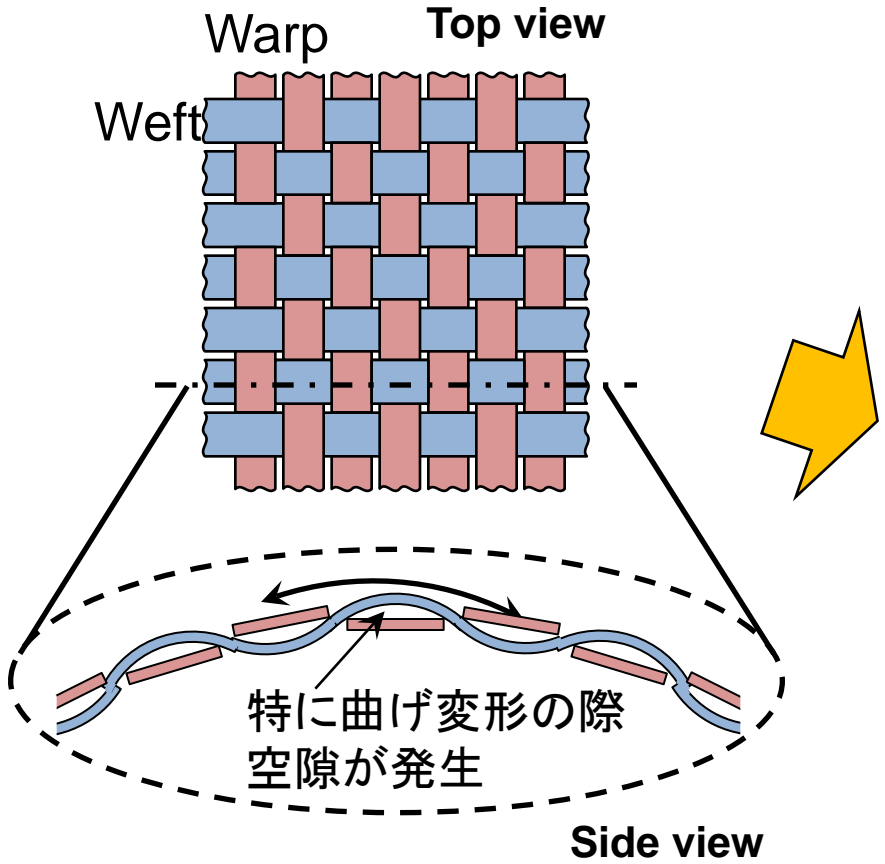
変動係数0.1~0.2%



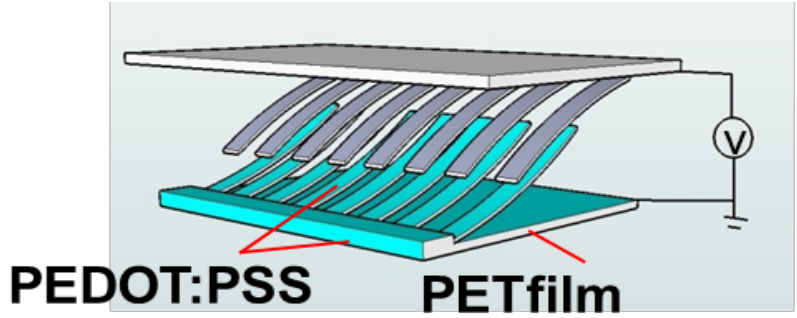
界面モデル(Phase Field法)の拡張
解法(FEM, LBM)の数値安定性向上
形成パターンの定量的予測可能に



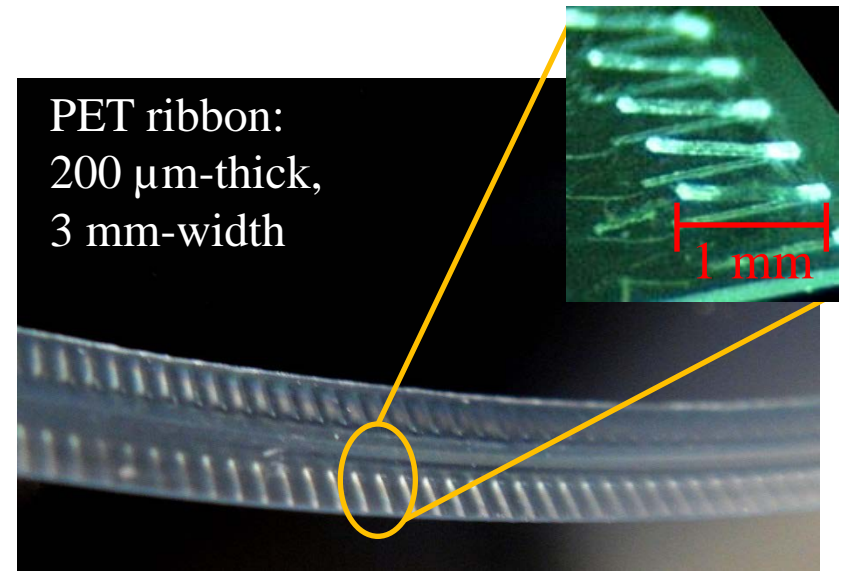
Electronic Textile用接点構造



接触の安定化が必要



Spring Contact Structure

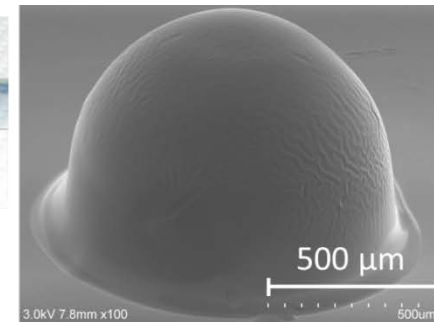
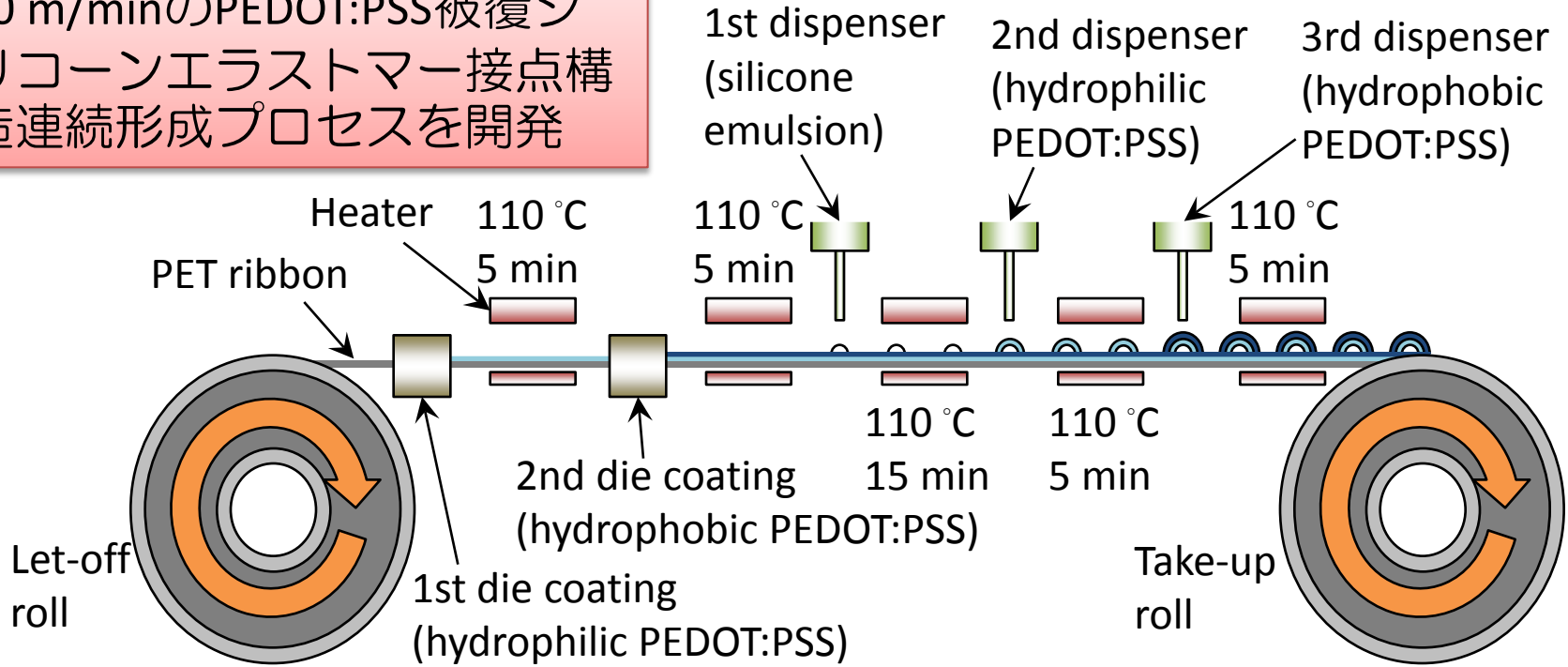


S.Khumpuang, et al: IEEE MEMS-2011

T. Itoh, UMEMSME/AIST

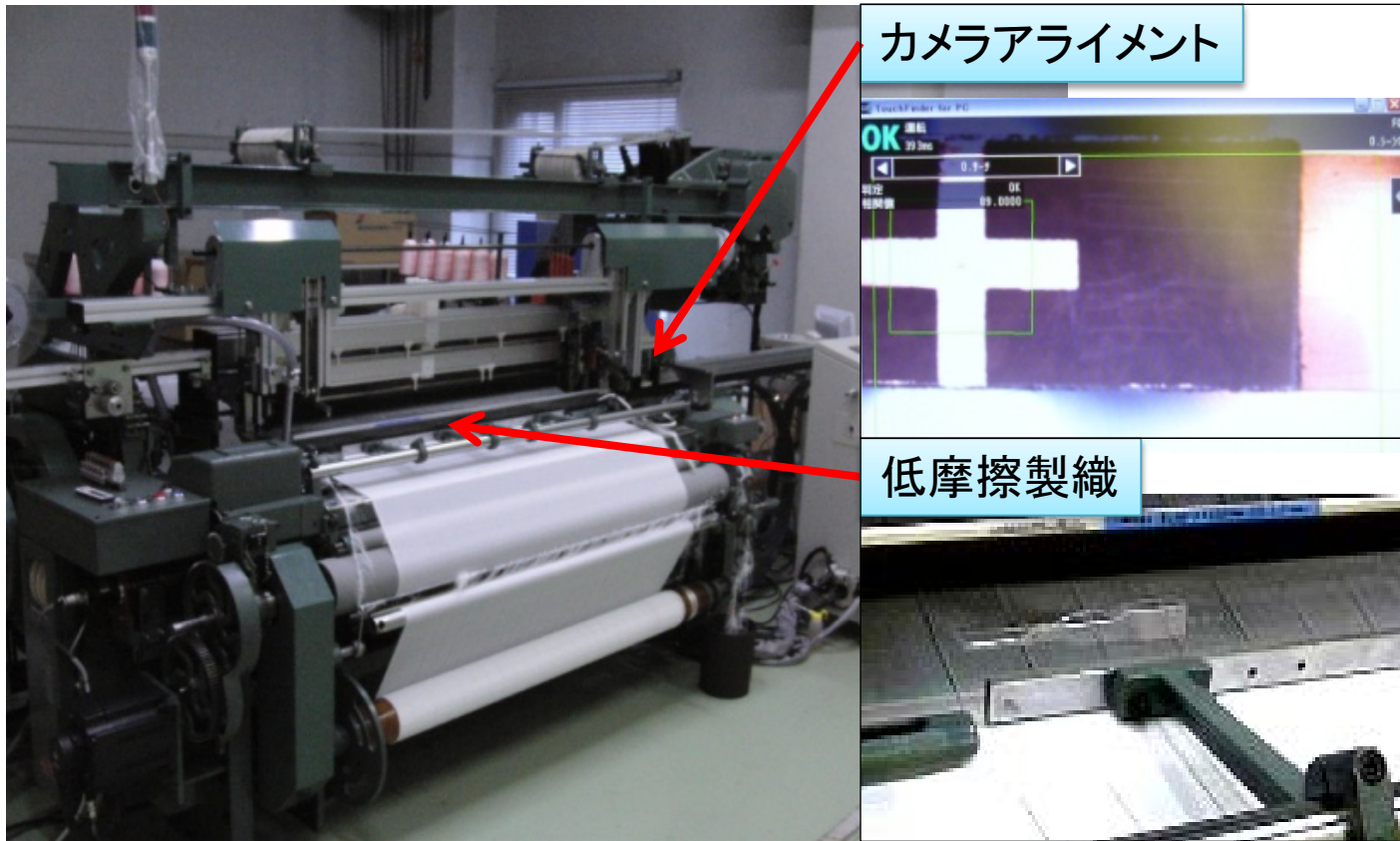
R2Rディスペンシングによる接点構造形成

20 m/minのPEDOT:PSS被覆シリコンエラストマー接点構造連続形成プロセスを開発



製織集積化プロセス

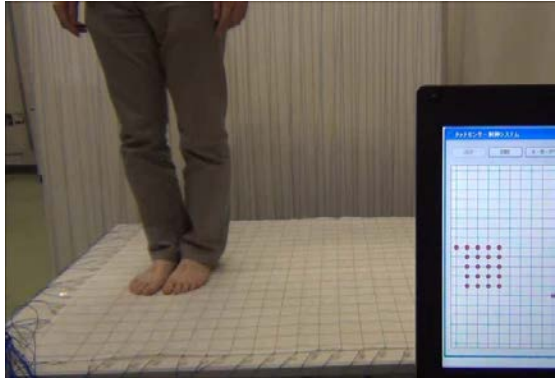
機能膜形成・加工した機能性繊維状基材をアライメントし、低摩擦で素子機能を破壊しないように連続製織（大面積化）できるプロセスを開発



製織集積化によるメートル級デバイス試作



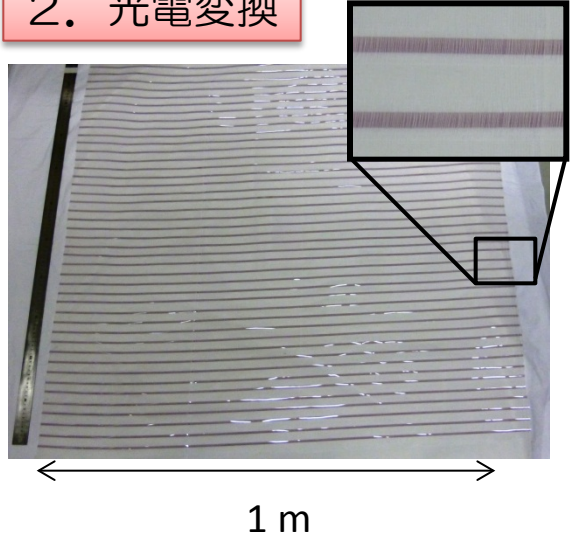
0. タッチセンサ



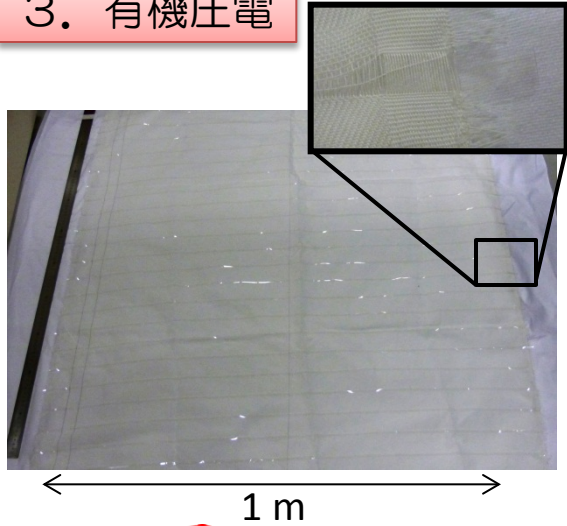
1. LED実装



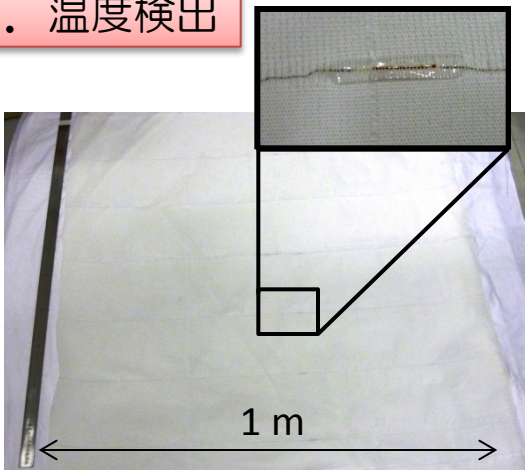
2. 光電変換



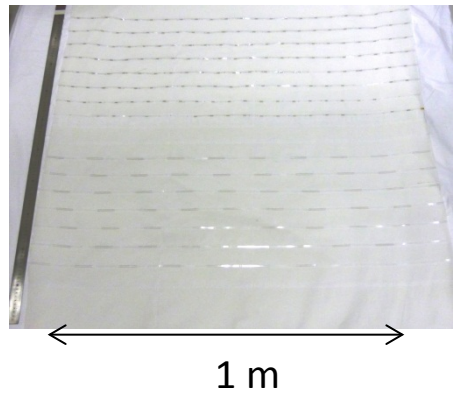
3. 有機圧電



4. 温度検出



5. 圧力検出



繊維状基材連続微細加工・ 集積化プロセス技術の開発 ～まとめ～

(1) 機能薄膜連続被覆

- ✓ 100 nmレベルの薄膜を膜厚変動±5%以内で成膜可能
- ✓ 代表的な機能性薄膜について、基材搬送速度50 m/minの成膜を実現

(2) 連続微細加工

- ✓ 20 m/minの高速熱ローラーインプリントを実現
- ✓ 3次元露光システムによる最小2 μm パターンのリソグラフィープロセスを開発

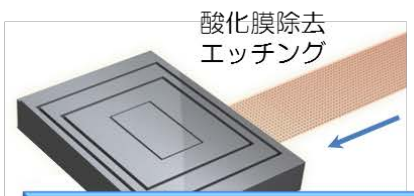
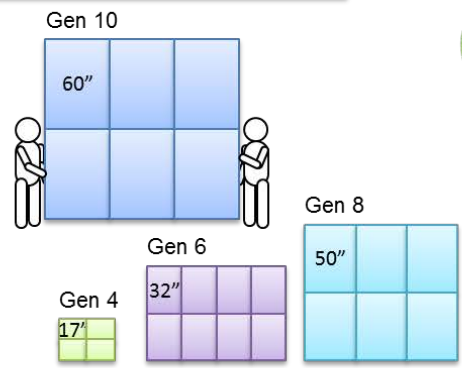
マイクロスケール混相流を応用する細管基材内構造形成技術を開発

(3) 製織集積化

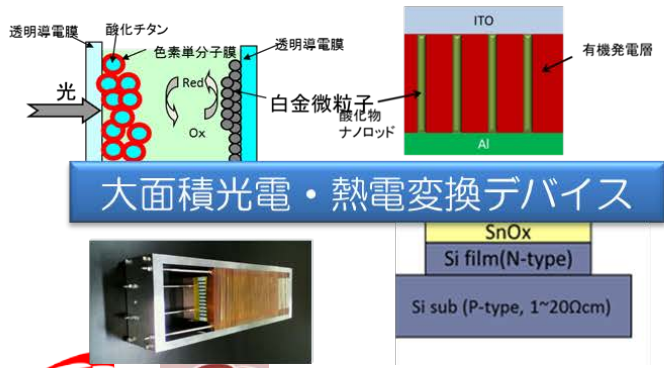
- ✓ 20 m/minのシリコンエラストマー接点構造製造プロセスを開発
- ✓ 自動織機（ウィービング装置）による6種類のメートル級フレキシブルデバイスを試作

Macro BEANS プロセスの展開

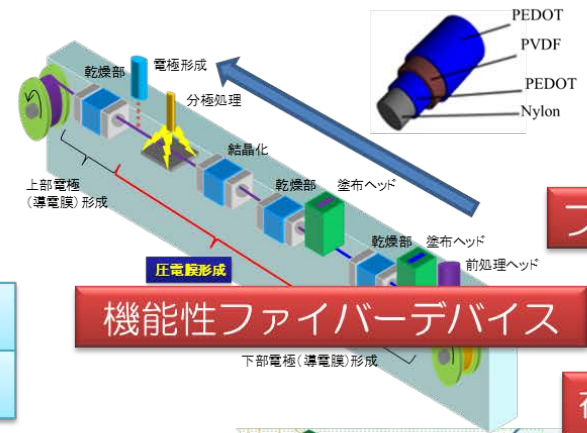
大気圧シリコン成膜



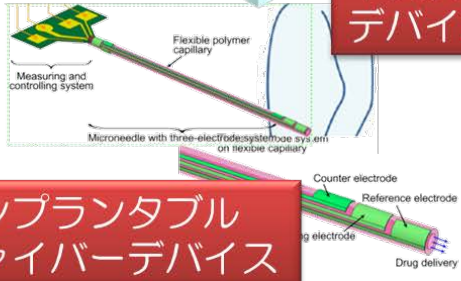
大気圧高濃度水素プラズマによる表面処理



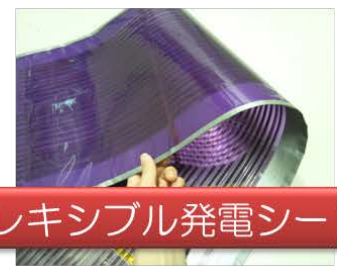
大面積光電・熱電変換デバイス



機能性ファイバーデバイス



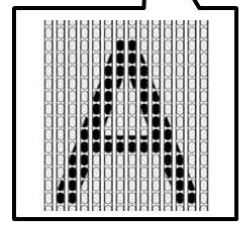
インプラント用ファイバーデバイス



フレキシブル発電シート



布状反射型表示デバイス



ヘルケア・介護支援センサシート

