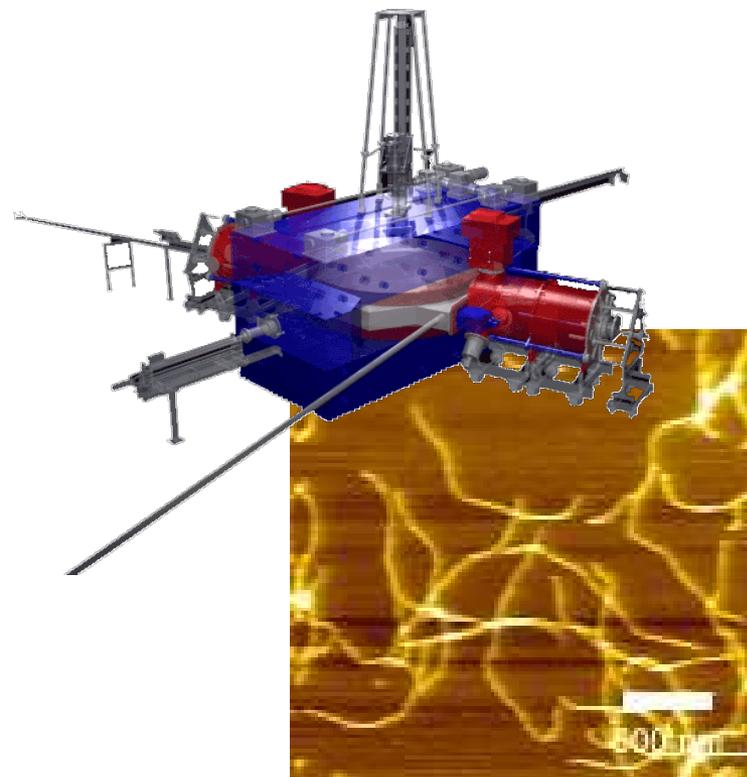


単一粒子の飛跡を利用した ナノワイヤの形成技術

Synthesis of Nanowires by **S**ingle **P**article **N**ano-fabrication **T**echnique

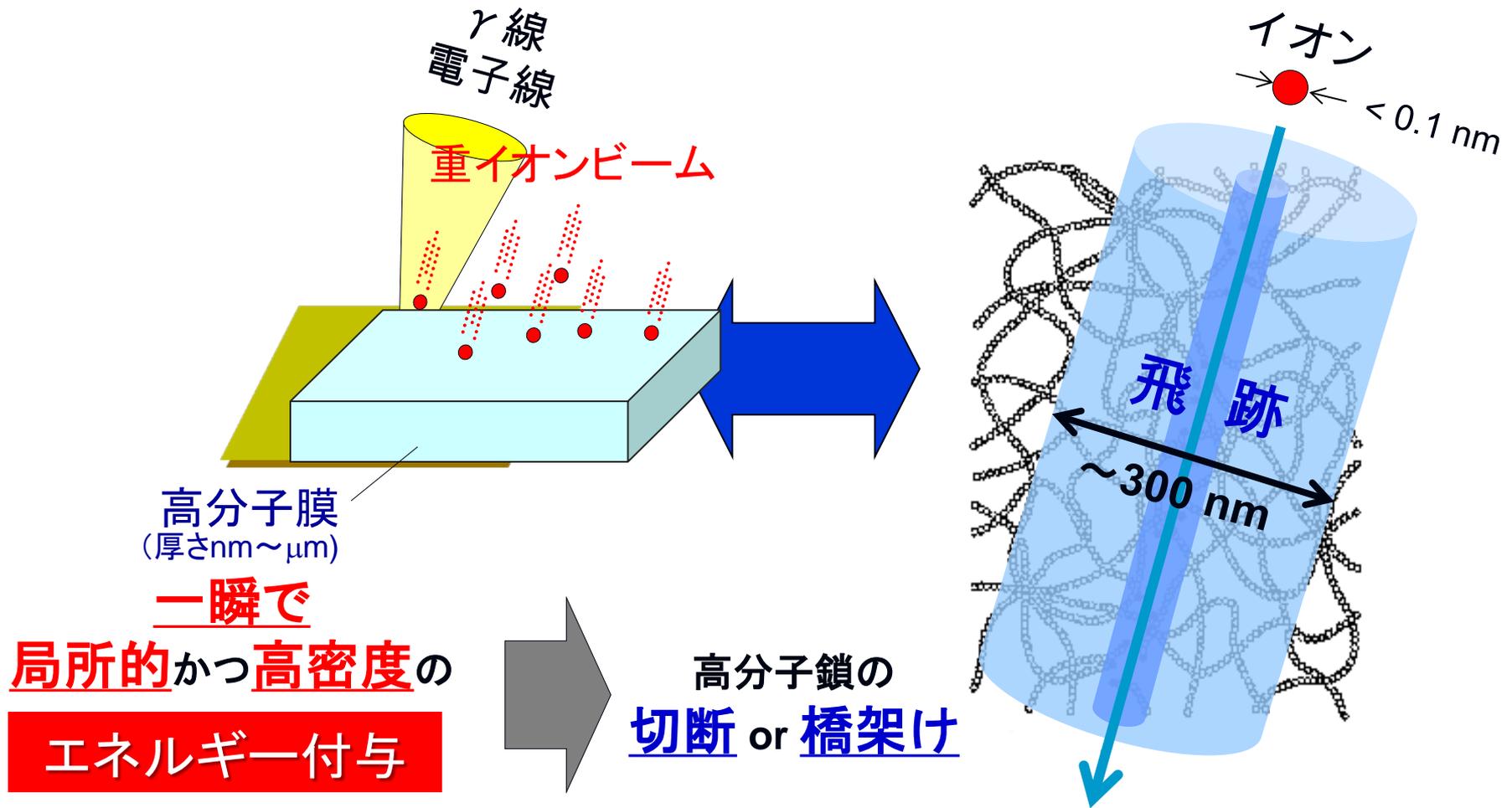


日本原子力研究開発機構
量子ビーム応用研究センター
先端機能材料創製研究ディビジョン
先進触媒材料研究グループ

八巻 徹也

http://www.taka.jaea.go.jp/eimr_div/index_j.html

“単一粒子の飛跡”とは？



単一粒子ナノ加工技術

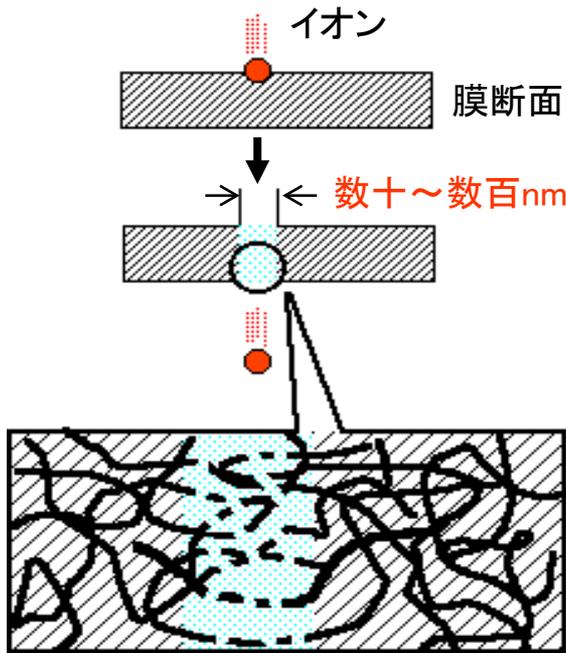
Single Particle Nano-fabrication Technique

イオンビームの粒子一つによる
世界最小の高分子ナノ加工ツール

SPNTによるイオン穿孔膜の形成

イオンビームの粒子一つで、高分子鎖を切断しナノ細孔を形成

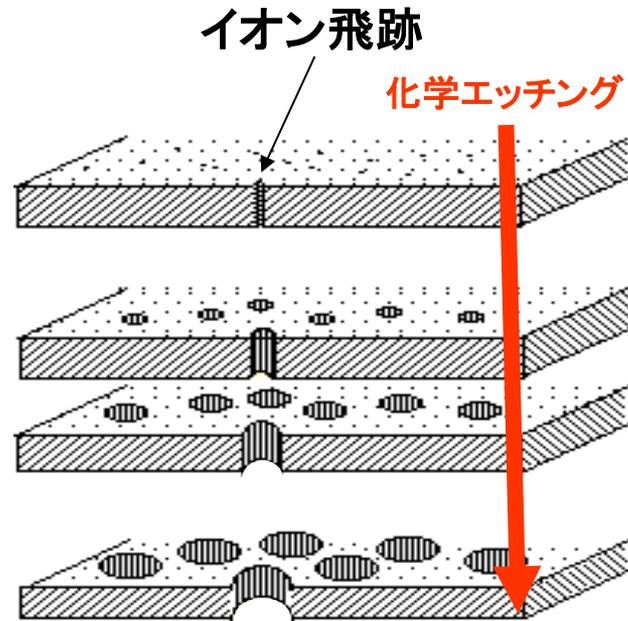
イオン照射



イオン飛跡

イオン種
エネルギー
フルエンス

化学エッチング

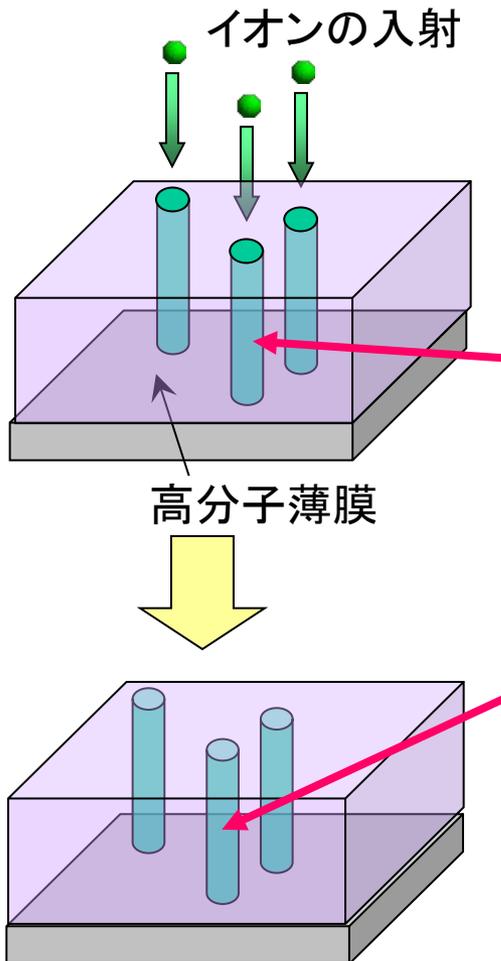


形状
孔径
密度
配列
制御可能

エッチング剤の種類
(濃度・温度)
前処理の有無

SPNTによるナノワイヤの形成

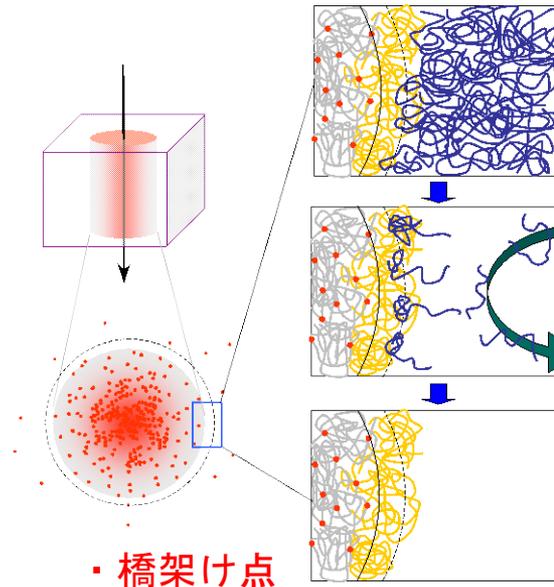
イオンビームの粒子一つで、高分子鎖を橋架けしナノワイヤを形成



高エネルギーのイオンビームは、その粒子の飛跡に沿った直径数ナノから数十ナノの空間内のみ大きなエネルギーを付与します

その軌跡部分の高分子材料が橋架けされ、溶媒に不溶になります

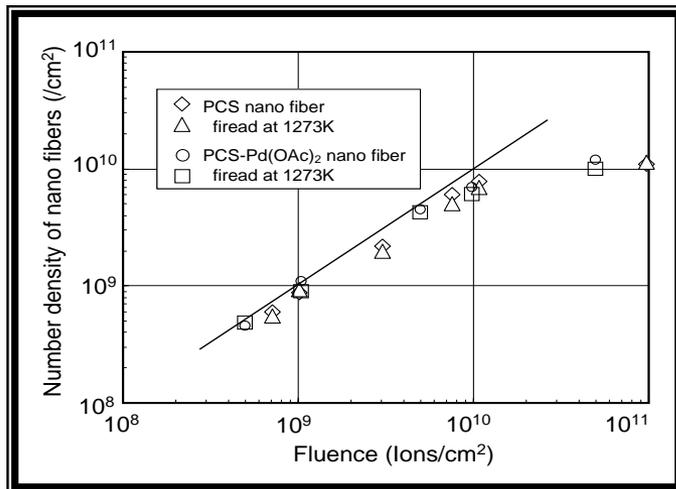
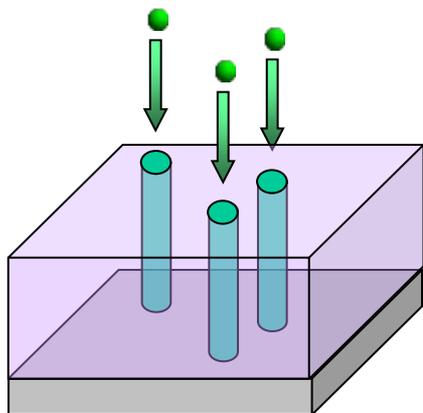
橋架けしていない部分を溶媒で洗い流してナノサイズの架橋部分を残します



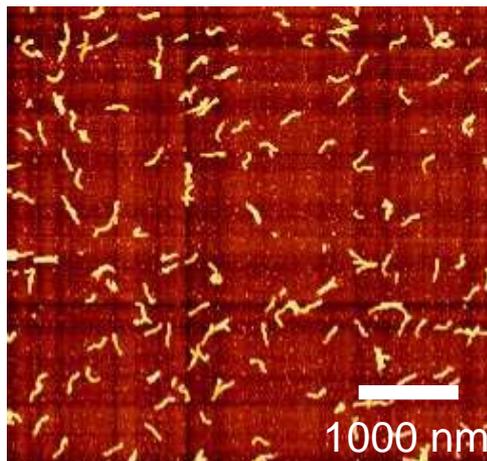
溶媒等で洗浄すると、橋架けしていない分子鎖は溶けて脱離します。

橋架けとは分子同士が繋がらうことです。分子があちこちで繋がらうことで、溶媒に溶けなくなります。

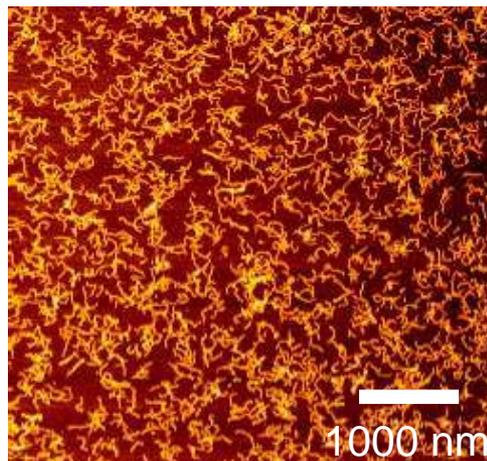
★本数の制御



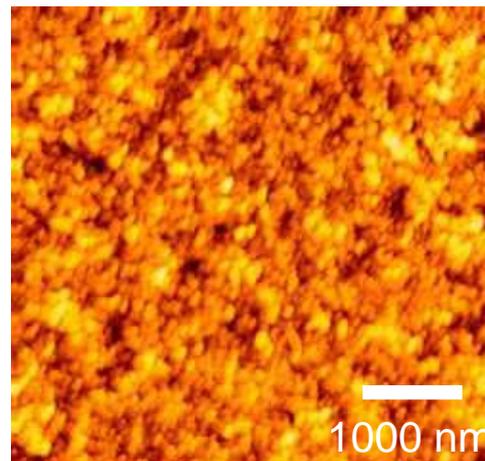
- ◆ 1個のイオンから1本のナノワイヤが形成されます。
- ◆ 照射量(電流値や照射時間)で自在に本数を制御できます。



1.0×10^9
ions/cm²

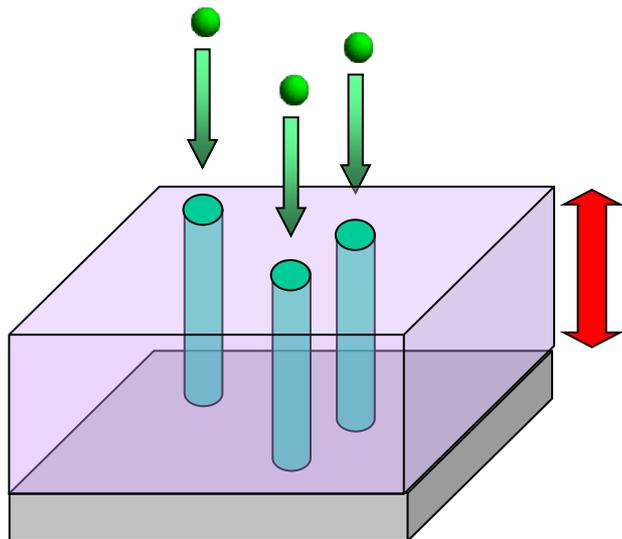


1.1×10^{10}
ions/cm²



9.7×10^{10}
ions/cm²

★長さの制御



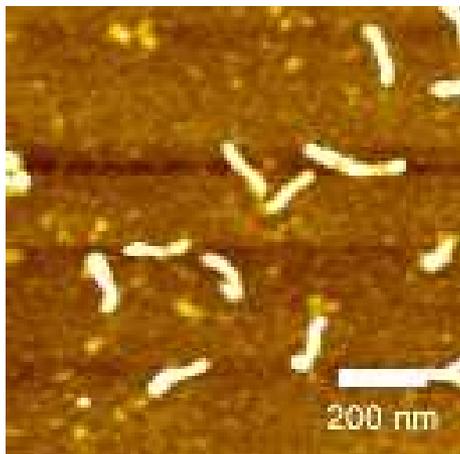
◆ 高分子膜の厚さと同じ長さでナノワイヤが均一に形成されます。膜厚で長さを自由に制御できます。

◆ 長さの上限は、イオンビームの貫通力で決まります。

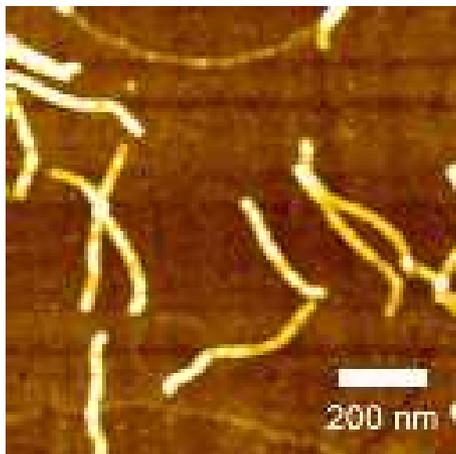
例: 560 MeV ^{129}Xe イオンをポリエチレンへ
→ 約 40 μm

ポリカルボシランの膜厚

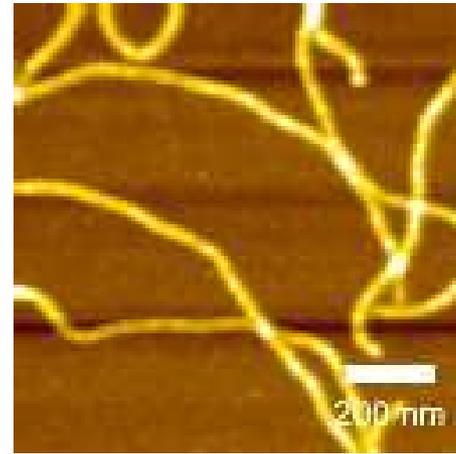
120 nm



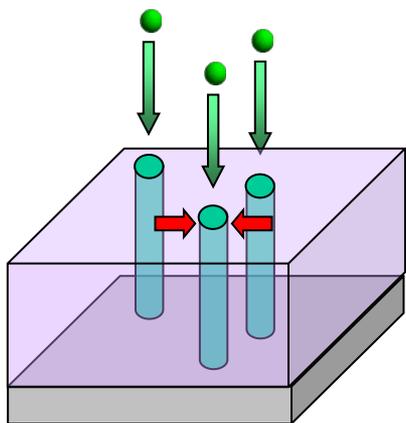
610 nm



1020 nm



★太さの制御



$$r^2 = \frac{\text{LET} \cdot G(x)mN}{400\pi\rho A} \left[\ln \left(\frac{e^{1/2}r_p}{r_c} \right) \right]^{-1}$$

LET: 線エネルギー付与

単位長さあたりの荷電粒子の飛跡に沿って物質に付与されるエネルギー量

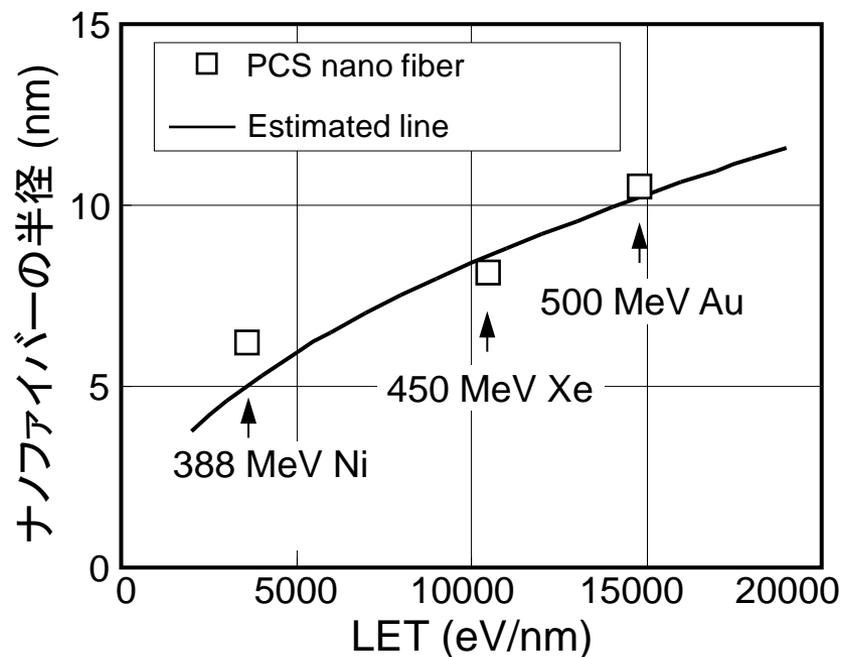
ρ : 高分子材料の密度

A : アボガドロ数

m : 分子量

N : 架橋度

$G(x)$: 架橋反応効率

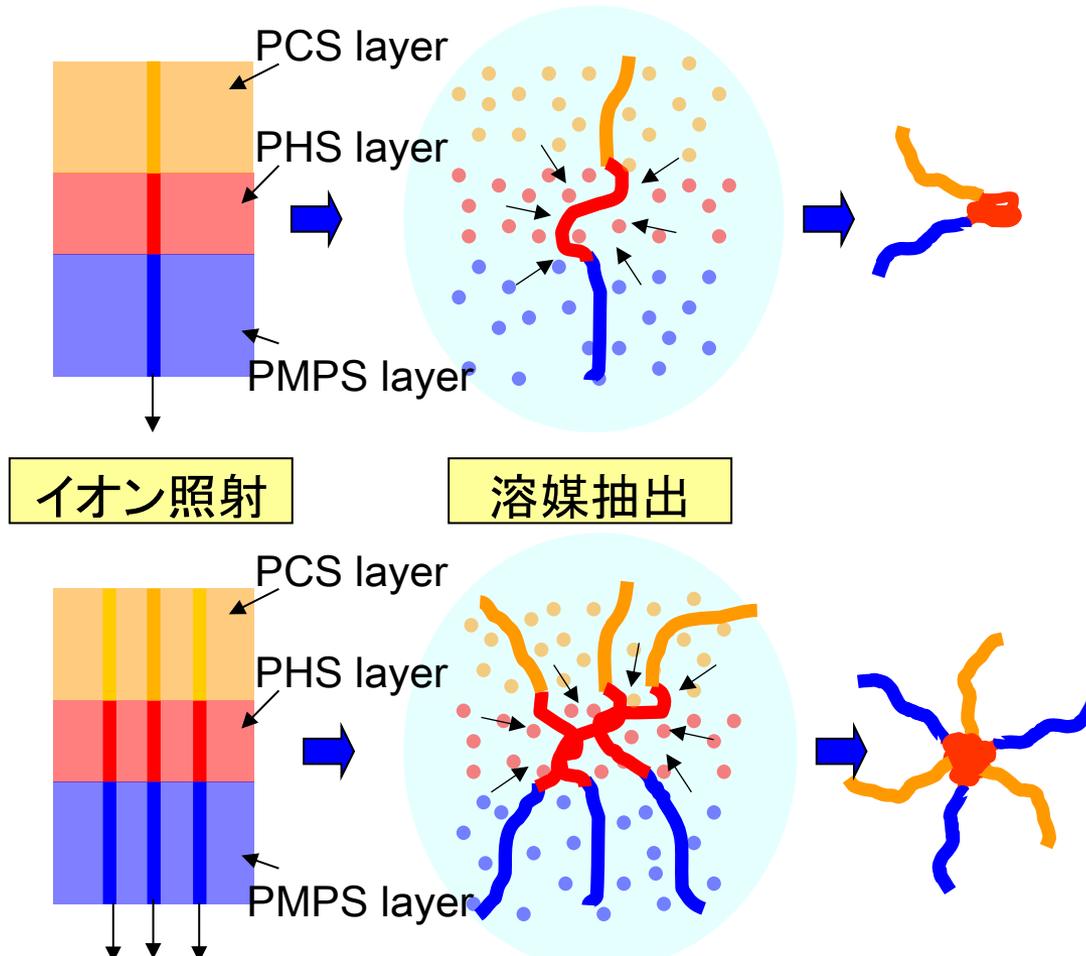
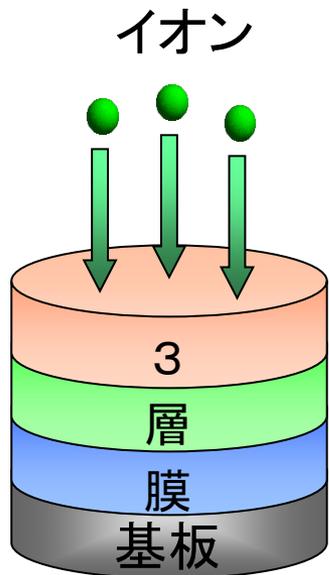


◆ ナノワイヤの太さは、イオンビームによって橋架けされる部分の直径に相当します。

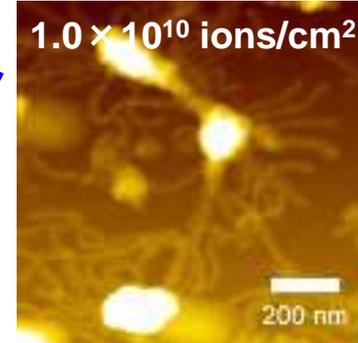
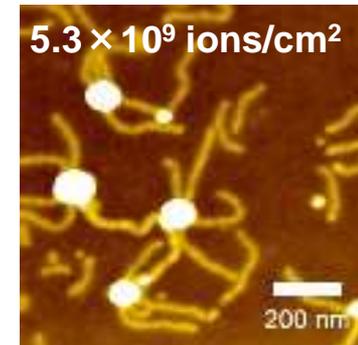
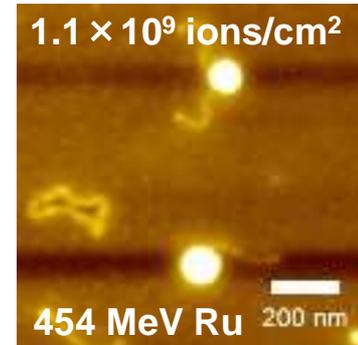
◆ イオンの種類やエネルギーで太さが決まるため、同じ太さのナノワイヤを均一に形成できます。

★ナノワイヤの連結

異なる種類の高分子材料を積層した多層膜を用いると、多段ナノワイヤを形成できます。他の作製方法では実現できないユニークな特徴です。

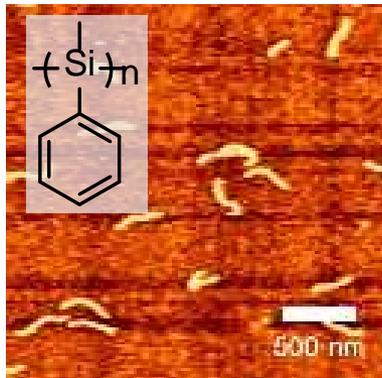


例： PMPS/PHS/PCS 3層薄膜への 450 MeV Xe 照射により形成された多段ナノワイヤ

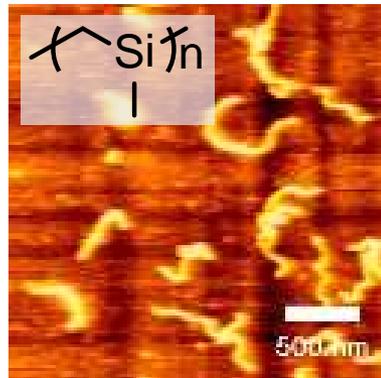


多様な高分子素材をナノワイヤーへ

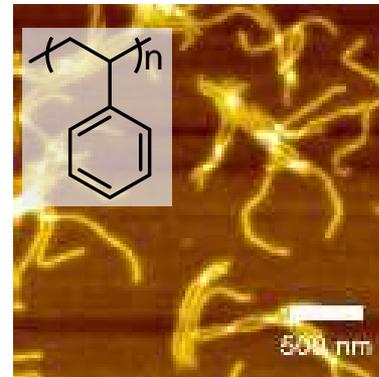
放射線で橋架けする高分子材料であれば、ほとんどの材料をナノワイヤへ加工することができます



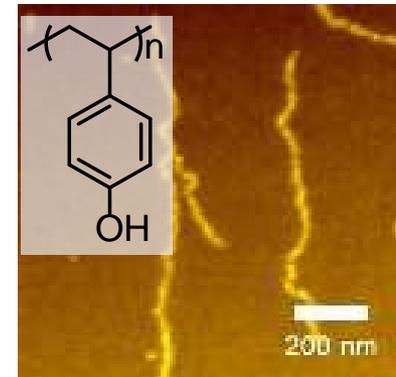
Polysilane



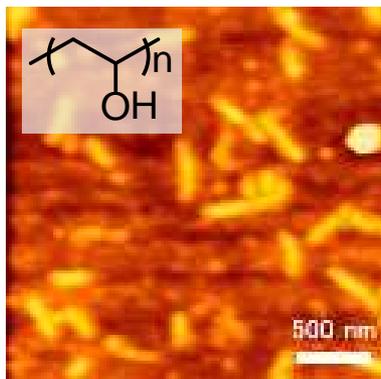
Polycarbosilane



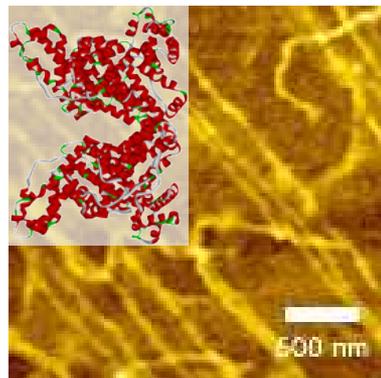
Polystyrene



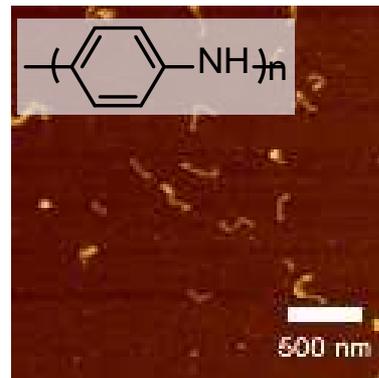
Poly(hydroxystyrene)



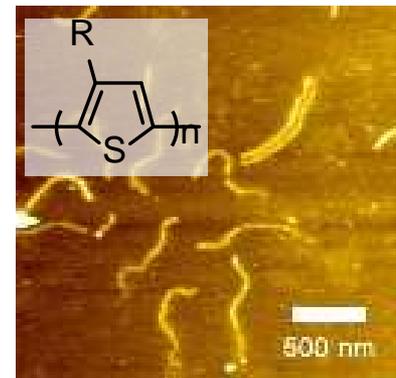
Polyvinylalcohol



Albumin (bovine)

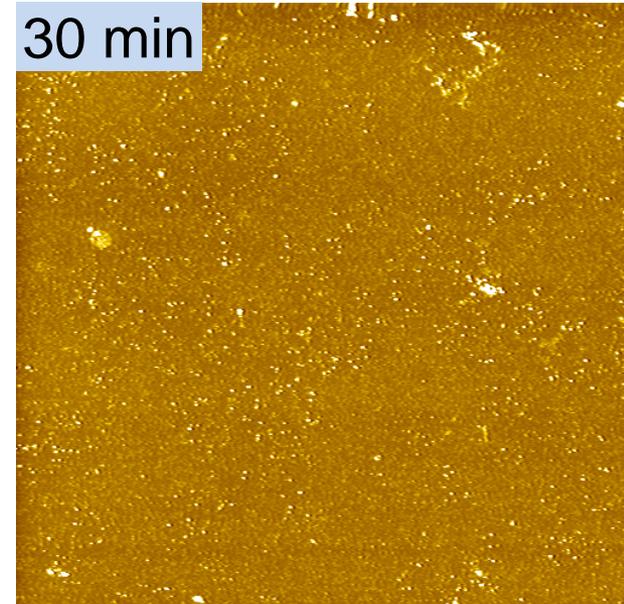
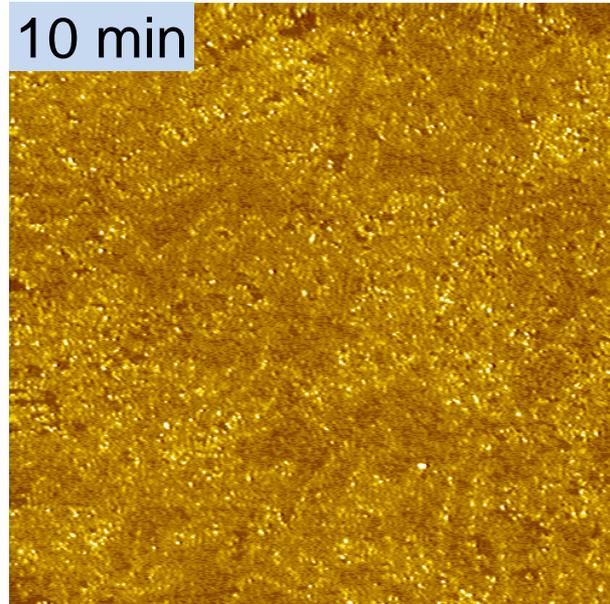
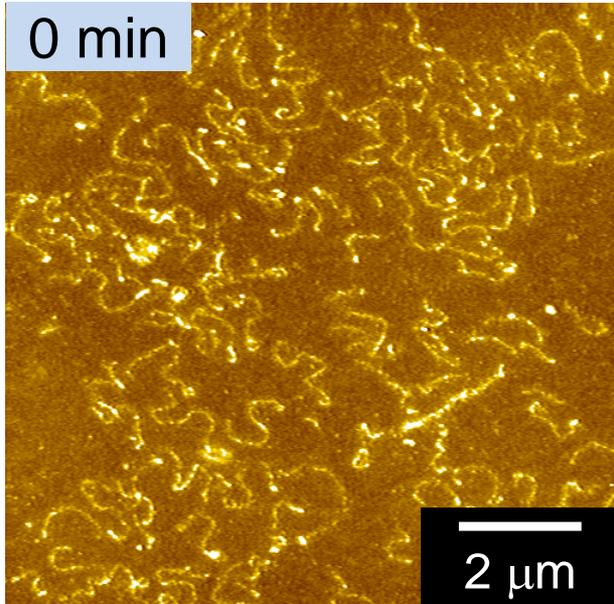
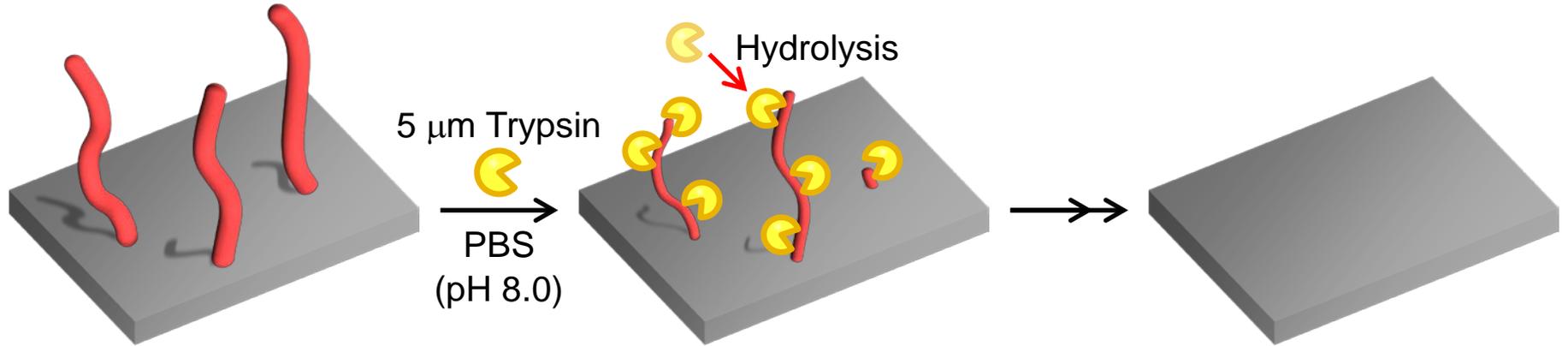


Polyaniline



Poly(3-hexylthiophene)

応用例：タンパク質ナノワイヤ

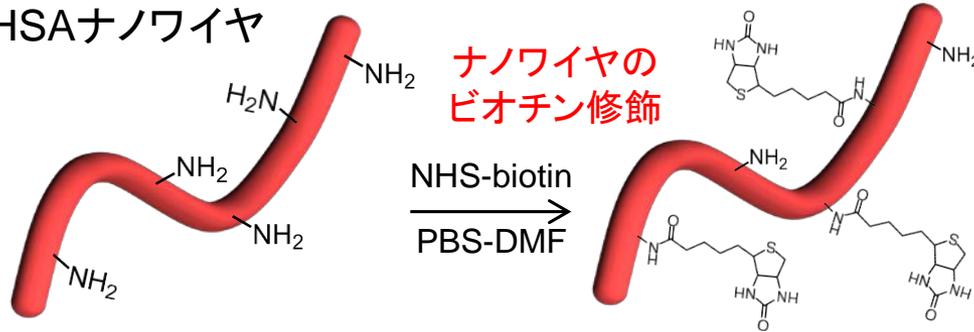


タンパク質ナノワイヤがトリプシンで分解される様子です。
 アミノ酸残基を保持しており、タンパク質としての性質を保持していました。

応用例: ヒト血清アルブミンナノワイヤ

アビジン-ビオチン相互作用を利用することでさまざまな酵素活性や蛍光等の機能を持つタンパク質ナノワイヤが形成できます。

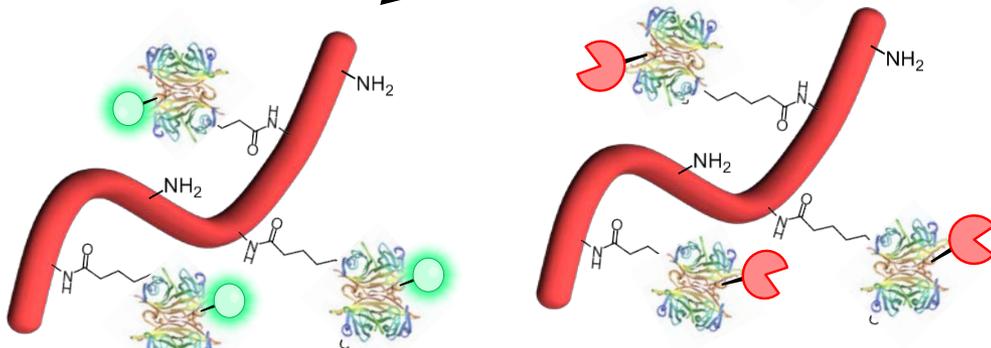
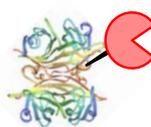
HSAナノワイヤ



streptavidin結合蛍光プローブ



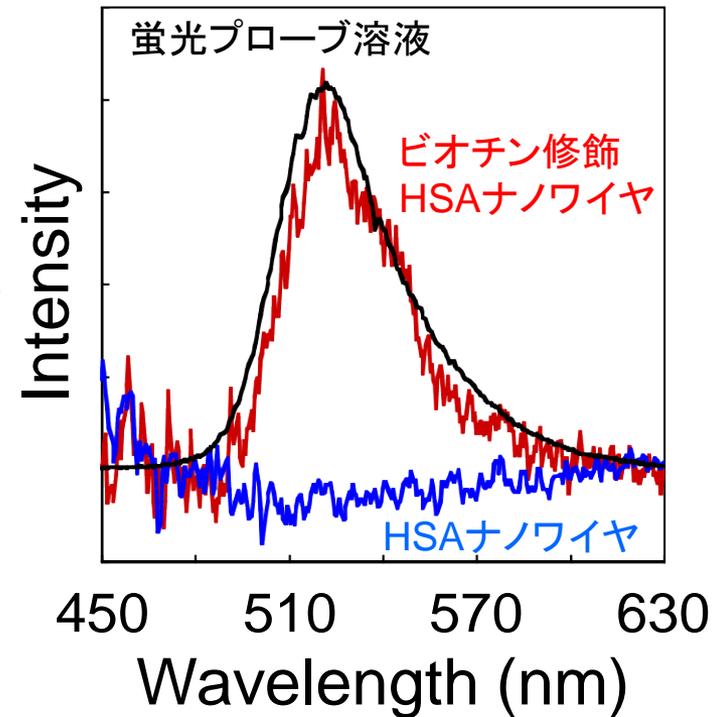
streptavidin結合
Horse radish peroxidase



蛍光発光ナノワイヤ

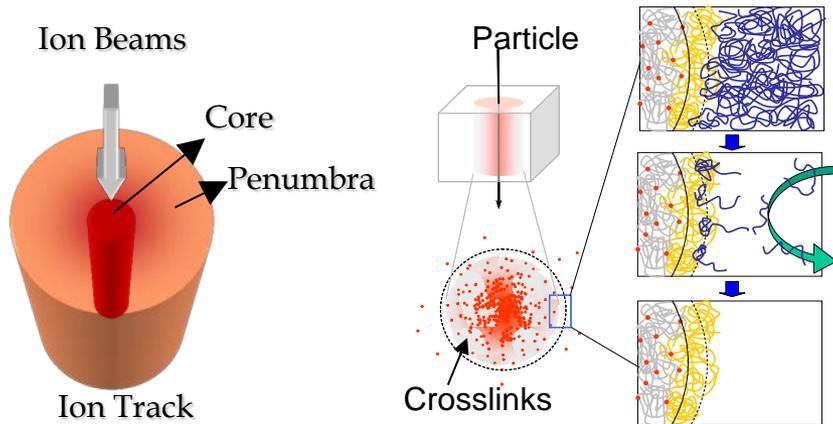
酵素活性を持つナノワイヤ

蛍光発光

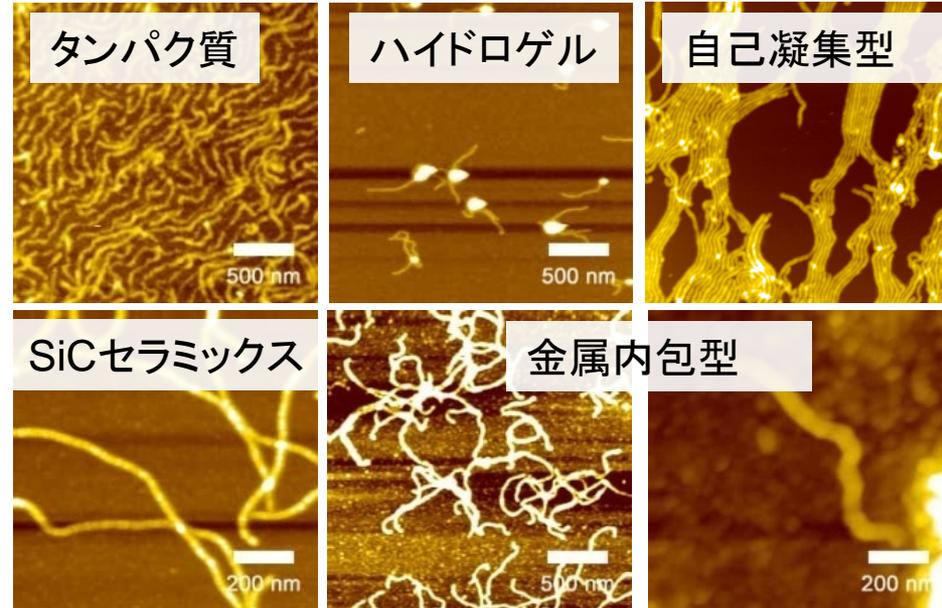


まとめ：誰にでも・何にでも応用できる技術に

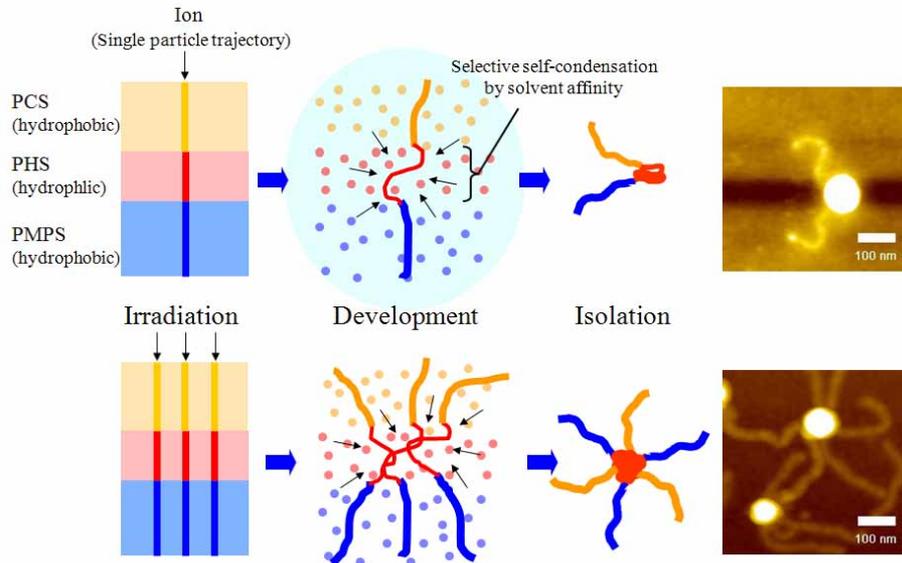
単一イオンだからこそできるナノ構造体形成



多様な機能性ナノ構造体



多層膜化による構造制御・物性の融合



簡単に

どんなものでも

自由に組み合わせて

SPNT法はさまざまな高分子材料を組み合わせることでナノワイヤを形成することができ、高機能で革新的なナノ材料の開発が期待できる。