

成果報告書

「多様なイオンによる高精度自在な照射技術の開発」
(高精度磁場・ビーム軌道解析技術の開発
及び新規な概念に基づく単一粒子ナノ加工法の高度化の研究)

平成23年5月

国立大学法人 大阪大学

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業による委託業務として、国立大学法人大阪大学が実施した平成22年度「多様なイオンによる高精度自在な照射技術の開発」（高精度磁場・ビーム軌道解析技術の開発及び新規な概念に基づく単一粒子ナノ加工法の高度化の研究）の成果を取りまとめたものです。

1. 委託業務の目的

独立行政法人日本原子力研究開発機構が保有するイオン照射研究施設 (TIARA) のAVFサイクロトロン的高度化により、ビーム条件の切換え時間の大幅短縮を実現する。具体的には、高精度磁場測定技術の開発、磁場高度安定化技術の開発、位相プローブの高度化、等時性磁場自動形成技術の開発、M/Q分解能向上技術の開発を順次進める。これにより、ビーム切換え時間を従来の1/3に当たる約40分で行えるようにする。さらに、これらのビームを用いるシングルイオンヒット等先進的イオンビーム技術の更なる高度化を行い、数百MeV以上の高エネルギーイオンの照射タイミング、水平方向照射位置及び深さを自在に変更可能な高精度イオンビーム制御技術を開発する。具体的には、2次元の高精度高速ビーム照準技術の開発、シングルイオンヒット実時間計測・制御技術の開発、カクテルイオンマイクロビーム照射技術の開発を順次進める。これにより、イオンビームマイクロ・ナノ加工を始めとする利用研究を加速し、斬新なもの作り技術革新に繋げる。

このため、独立行政法人日本原子力研究開発機構、国立大学法人大阪大学、独立行政法人宇宙航空研究開発機構、独立行政法人放射線医学総合研究所は共同で業務を行う。さらに、新イオンビーム育種技術に関する研究開発については、連携相手を検討する。

国立大学法人大阪大学では、ビーム条件の切換え時間の大幅短縮及びM/Q分解能の向上に関わる技術の研究開発を実施し、本技術の実現に必要な理論及び解析プログラムの構築、データ解析等を担当する。これにより本技術開発で製作・使用する機器の詳細設計、改良、動作アルゴリズムの確立に資する。また、利用研究の面では、機能性有機分子の試作、機能性高分子含有イオン性液体の調査などを実施し、従来の単一粒子ナノ加工法によるナノ構造化試験を担当する。

2. 平成22年度（報告年度）の実施内容

2. 1 実施計画

①高精度磁場・ビーム軌道解析技術の開発

サイクロトロンのビーム切換え条件に依存した磁場分布変動とビーム軌道への影響を明らかにするため、3次元静磁場解析コード、交流磁場・渦電流解析コード、熱構造解析コードなどを用いて、電磁石励磁時間の短縮化に伴う渦電流等の過渡的な磁場変動、各種熱源からの熱伝導による磁極・鉄心温度分布の非線形的な変化等を詳細に解析し、短時間で磁場を安定化させ、磁場分布の再現性を高めるための電磁石励磁法や磁極・鉄心温度制御法などを検討する。

②新規な概念に基づく単一粒子ナノ加工法的高度化の研究

平成21年度において、イオン液体及びその高分子溶液の直接ナノ構造化・蛋白質の直接ナノ構造化に成功した。この結果を踏まえ、この液体中への高分子・無機塩分散系のナノ構造化を行い、高分子ナノゲルの形成を実証する。ターゲットとする高分子には主に蛋白質及び環境応答性高分子材料を用い、温度応答性、蛋白発色、抗原抗体機能について明らかにする。

2. 2 実施内容(成果)

① 高精度磁場・ビーム軌道解析技術の開発

AVFサイクロトロンの主コイル励磁の短時間化と生成磁場の再現性の向上を実現するため、メインコイル電流の通電パターンに応じた磁化の遅れとヒステリシスの影響などについて理論的考察を行い、磁化の遅れはヒステリシス損失と渦電流損失に依存し、磁束が飽和する高磁場領域においてはコイル電流を単調に増加させる励磁法でも比較的短時間で再現性良く安定になること、低磁場領域ではヒステリシス

による磁場の絶対値のオフセットが避けられないことから、コイル電流を周期的に増減させながらその変化量を小さくすることによって磁化の遅れと再現性の悪化を最小化できることなどを明らかにした。

また、3次元磁場・熱解析コードOPERA-3D/TOSCA/ELEKTRAを用いて、単調増加励磁パターンや減衰振動型サイクリング励磁パターンなどでの渦電流損失による鉄心中のパワー損失を見積もり、短時間の励磁パターンでは磁場の安定性に与える影響は小さいことを示した。図1に、高磁場励磁用にメインコイル電流を設定値868Aまで70秒かけて単調に増加させたときの磁極表面の渦電流分布を示す。渦電流による磁極体積内の総パワーロスは数kW以下であり、それに伴う温度上昇により生じる磁場変動 $\Delta B/B$ は、 1×10^{-6} 以下であると見積もられる。

これらの解析結果を踏まえ、励磁電流値に応じて短時間で磁場を安定化させ、磁場分布の再現性を高めるための電磁石励磁法や磁極・鉄心温度制御法などの具体化に着手した。

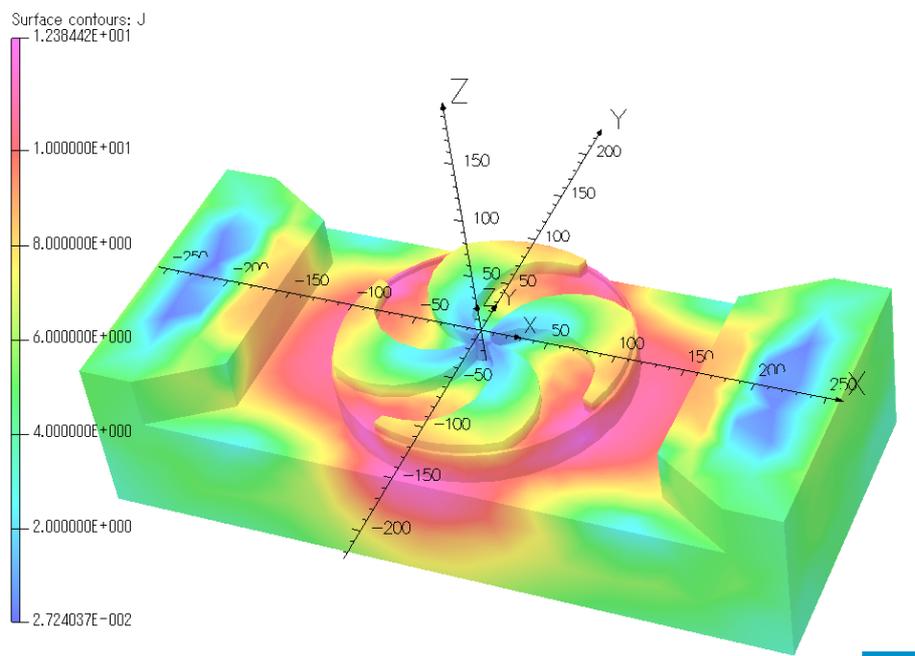


図1 メインコイルを868Aまで70秒かけて単調に増加させて励磁したときの70秒後の磁極表面の渦電流分布

②新規な概念に基づく単一粒子ナノ加工法の高度化の研究

常温常圧下液体状態である熔融塩中に高分子を分散させ、高分子架橋反応誘導剤を添加した。この溶液に対し、高エネルギー粒子を直接入射させて軌道上に架橋反応を誘導し、1次元高分子ナノゲルの形成を行った。特にポリイソプロピルアクリルアミドを用いた場合、この臨界相容温度を利用して、温度応答型1次元ナノゲルの形成に成功した。

②-1 単一粒子ナノ加工法 (Single Particle Nano-fabrication Technique)

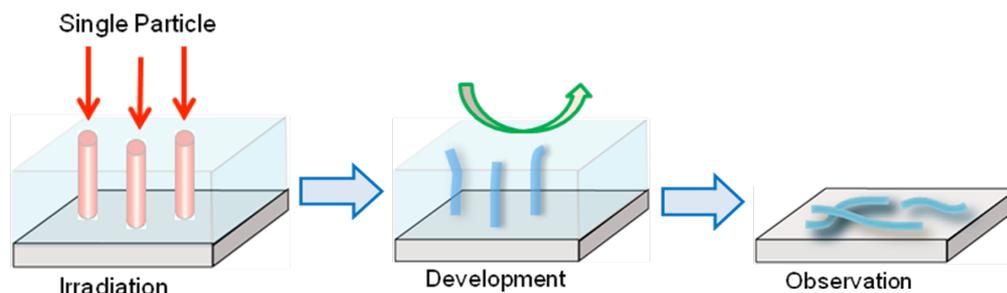


Figure ②-1. A schematic view showing the formation of nano-structures in the thin film. The development gives individual nano-wires.

高いエネルギーを持った粒子は、有機物に大きな相互作用を与えることで知られている。粒子は物質内を通過する際に、イオンの飛跡に沿った円柱状の局所的な空間に反応性の中間体やイオンラジカル、中性ラジカルを生成し、この反応性中間体により生じるナノ構造体を、限定空間における化学反応により生成することができる。このような手法は微細加工によく用いられるが、それらは多数の粒子を集束させたビームを用いるのが一般的である。本手法では集束したビームではなく、たった一つの粒子を用いるため、入射極限まで小さい構造体を形成することができる。

この、単一粒子ナノ加工法、SPNT法を用いることで、さまざまな高分子材料から非常によくサイズコントロールされたナノ構造体の形成が可能であることが報告されている。まず加速器により高いエネルギーを持った一つの重粒子を高分子膜に入射させる。すると、重粒子が通過した部分にエネルギーを与え、局所的な架橋反応を発生させる。粒子が通過した部分、つまり架橋反応を起こした部分は、ゲル化し一つの巨大分子となる。その後、ゲル化に至らない部分を適切な溶媒で洗い流すことにより、ナノ構造体を単離することができる。生成したナノ構造体は乾燥過程において基板上に倒れるため、原子間力顕微鏡（AFM）を用いて観察することが可能である。この手法では、形成されるナノ構造体の長さ、太さ、数密度の制御が極めて容易である。まず長さについて、入射イオン自身はエネルギーを材料に与えると同時に高分子膜中を直進し突き抜けていく。そのため形成されるナノ構造体の長さは粒子の通過距離である高分子膜の膜厚を完全に反映する。ナノ構造体の太さは、ターゲットとなる高分子の分子量と照射するイオン種の2種類のパラメーターによって決まる。一般的には、低分子量ほど細く、高分子量になるほど太くなり、また線エネルギー付与（LET）が小さいほど細く、大きいほど太くなる。最後の数密度制御については、入射粒子数とナノ構造体の数が1対1の関係であることから、照射量によって形成されるナノ構造体の数密度は決定される。

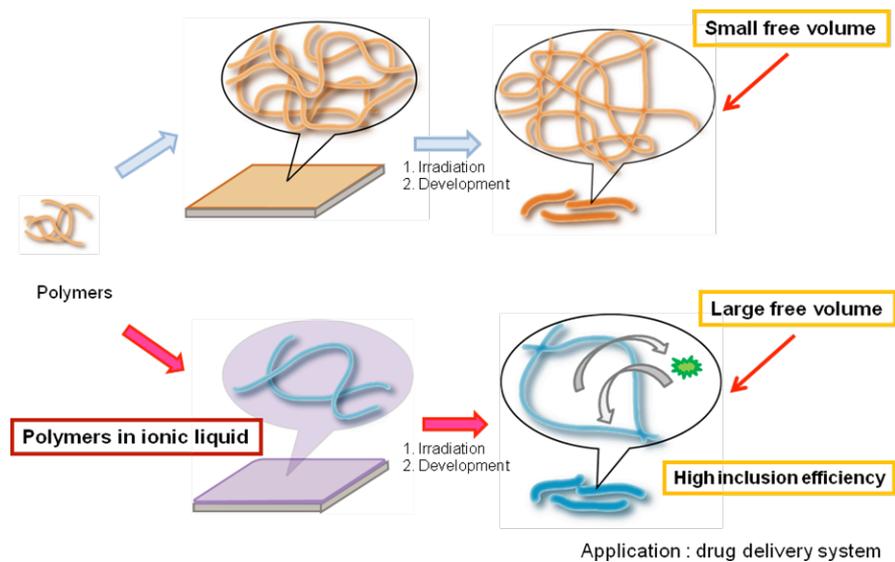
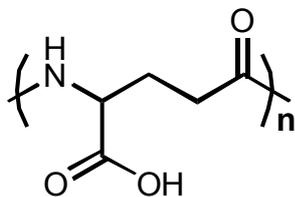


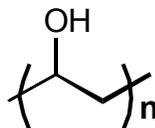
Figure ②-2. A schematic view showing the difference between nanostructures and nano-gels. Ionic liquid extend the free volume of solid polymer, so nano-gels have higher inclusion efficiency than that of nanostructures.

本研究では SPNT 法を用いて、ゲル状ナノ構造体（ナノゲル）形成に取り組んだ。ナノゲル形成にあたって、溶媒として用いたのはイオン液体である。イオン液体とはアニオンとカチオンから構成される常温融解塩で、高極性、不揮発性などさまざまな特徴をもつことが知られている。大阪大学工学研究科、桑畑らにより真空下で非常に高い不揮発性を保つことが報告されており⁶⁾、真空条件を必要とする SPNT 法の適用が可能である。イオン液体による希釈過程で固体高分子内の自由体積が拡張されるため、ナノゲルは従来までの薄膜から作るナノ構造体と比べて、高い内包性をもつと予想される。高い内包性をもつナノゲルに、さまざまな特性を組み込み、複合機能型ナノゲルを形成することが本研究の目標である。

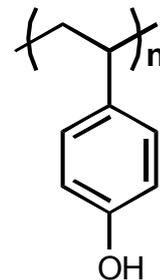
ナノゲル形成には第一に、ポリマーをイオン液体に溶解させる必要がある。以下に示すポリマーがイオン液体に溶解するかを確認した。



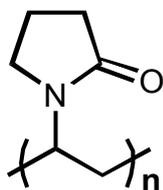
Poly(- γ -glutamic Acid)
(Mw 200,000~Mw 500,000)



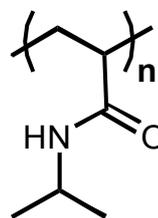
Poly(vinyl alcohol)
(Mw 500)



Poly(4-vinyl phenol)
(Mw 8,000)

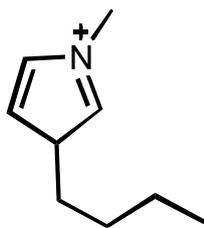


Poly(vinyl pyrrolidone)
(Mw 10,000 Mw 40,000 Mw 630,000)

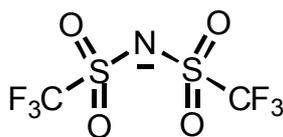


Poly(*N*-isopropyl-acrylamide)
(Mw 20,000~Mw 25,000)

イオン液体は1-butyl-3-methyl-imidazolium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide (bmim TFSI)、1-ethyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate (emim BF₄)を用いた。濃度は重量比5 w%、10 w%で行った。イオン液体の構造は以下のとおりである。



Bmim
TFSI



Emim
BF₄

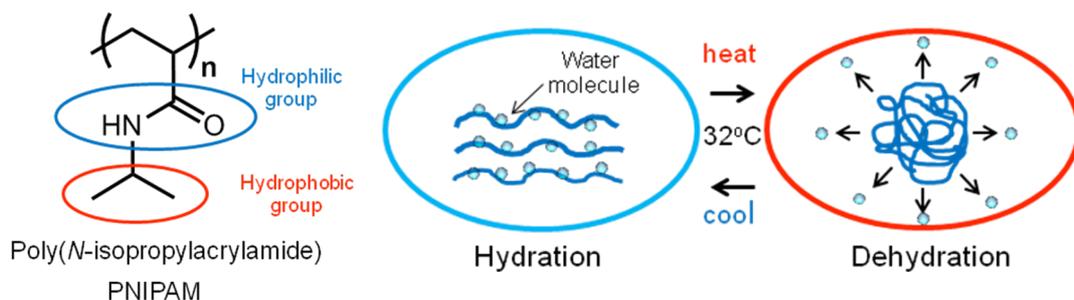


以下 Poly(- γ -glutamic Acid) を γ -glu、 Poly(vinyl alcohol) を PVA、 Poly(vinyl pyrrolidone) を (PVP)、 Poly(*N*-isopropyl-acrylamide) を (PNIPAM) と略す。

照射線源として、日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所内サイクロトロン (TIARA) からの高エネルギー荷電粒子を使用した。全て真空中 ($\ll 10^{-7}$ torr) で、照射量 5×10^{10} ions/cm²、 1×10^{10} ions/cm² とし、高エネルギー荷電粒子 450 MeV Xe を照射した。

②-2. 温度応答型ナノゲルの形成

対象高分子として PVP(Mw 10,000、Mw 40,000、Mw 630,000)と PNIPAM を選択し、後者は温度応答性高分子でコイルグロビュール転移により、32 °C以下では親水性を示して水和し、32 °C以上では疎水性を示して脱水和する。



PVP は高極性で、金属などの電子供与性物質と錯体を形成する高分子である。これら二つの高極性物質を組み合わせることで、複合機能性ナノゲルの形成が可能と考え、これら二つを選択した。ポリマー濃度は 5 w%、10 w%、20 w%とし、イオン液体は bmim TFSI を用いた。架橋剤には、高極性で水溶性である

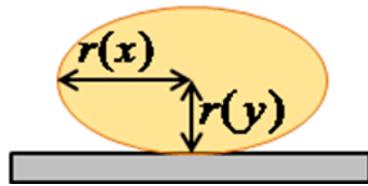
N,N'-methylenebisacrylamide を選択し、溶液を滴下する基板は、Si ウェハを UV/O₃ 表面処理装置 (ASM 1101N) に 20 分入れて親水処理したもの、および Si ウェハにメッシュパターンを形成したものの二種類を用い、溶液をそれぞれの基板上にスピコートしてサンプルを作成した。

化学活性種の拡散や分子サイズ・形成を考慮しないナノ構造体径 r は式(1)で与えられることが先の研究で報告されている。

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

ここで、 r_c 、 r_p は入射粒子によって直接エネルギーが与えられる領域(Core)、及びはじき出された 2 次電子によってエネルギーが付与される領域(Penumbra)のサイズを示し、入射粒子の速度によって決定される。E は Exponential Factor である。また LET は線エネルギー付与、 $G(x)$ は架橋反応の効率、 ρ はポリマー密度、 A はアボガドロ数をそれぞれ表し、 m 及び k はモノマーあたりの分子量、及び重合度である。

Os は Xe に比べて粒子半径と線エネルギー付与 (LET) が大きい。式(1)より形成されるナノ構造体のサイズ、特に断面半径が大きくなることが予想される。断面半径算出のモデルを以下に示す。



$$r' = \sqrt{r(x) \times r(y)}$$

分子量 Mw 10,000、Mw 40,000、Mw 630,000 の PVP を用いたところ、Mw 40,000 の PVP 薄膜をエタノールで 1 分現像した場合、Figure ②-3. に示すようなナノ構造体を確認した。

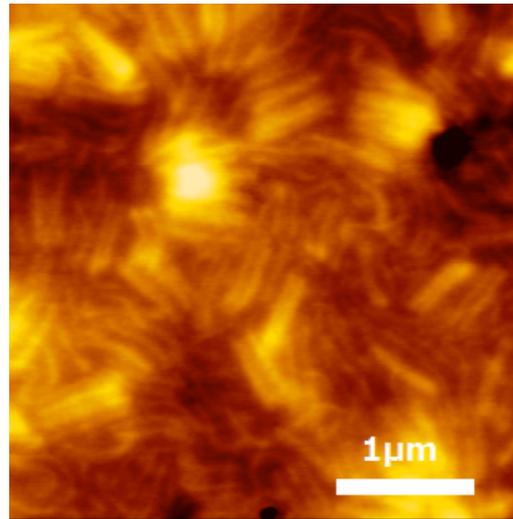


Figure ②-3. An AFM image of nanostructures produced by SPNT which is based on PVP (M_w : 40,000) and N,N' -methylenebisacrylamide as a crosslinker. The image was observed in thin film of PVP and a crosslinker. Crosslinker was used at 20 wt% conc. relative to PVP. The image was formed upon irradiation of 450 MeV Xe particles at the fluence of 1.0×10^9 ions cm^{-2} . The cross-section radius of image is 13 nm.

PNIPAM では薄膜、イオン液体溶液双方よりナノ構造体を確認した。PNIPAM 薄膜はイソプロピルアルコールで 4 分、イオン液体溶液はイソプロピルアルコールで 5 分現像した。PNIPAM を用いたナノ構造体を Figure ②-4. に示す。

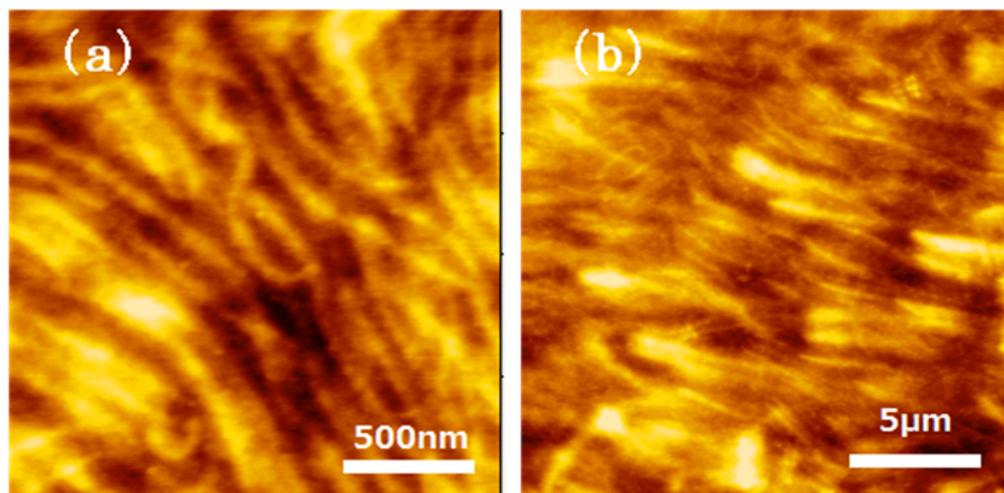
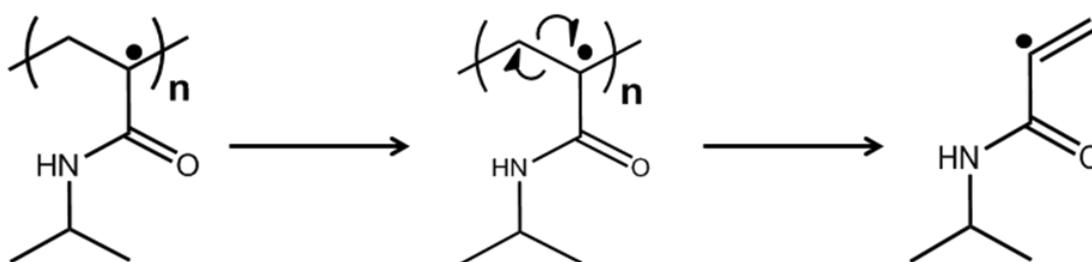


Figure ②-4. AFM images of nanostructures produced by SPNT which are based on PNIPAM and *N,N'*-methylenebisacrylamide as a crosslinker. Image (a) was observed in thin films of PNIPAM and the crosslinker. Image (b) was observed for the solution of PNIPAM and the crosslinker in bmim TFSI. Crosslinker was used at 20 wt% conc. relative to PNIPAM. PNIPAM was dissolved into bmim TFSI at 13 wt% conc. The nanostructures in images (a) and (b) were formed upon irradiation of 450 MeV Xe particles at the fluence of 1.0×10^{19} ions cm^{-2} .

PNIPAM は β 水素転移によって解重合反応を起こす分解型の高分子である。架橋剤なしでナノ構造体が形成されなかったのはこのためと考えられる。架橋剤を加えることで、PNIPAM の α 位ラジカルが架橋反応に使われ、それにより架橋反応が分解反応より優先して起こり、ナノ構造体が形成されたと考えられる。PNIPAM 主鎖分解メカニズムは以下のとおりである。



一方で PVP を対象高分子として用いた場合、PNIPAM ナノ構造体と比べて、断面半径が太いナノ構造体が観測された。PVP ナノ構造体の断面半径は 13 nm、PNIPAM ナノ構造体の断面半径は 11 nm、PNIPAM ナノゲルの断面半径は 15 nm であると見積もられた。AFM 画像を以下に示す。

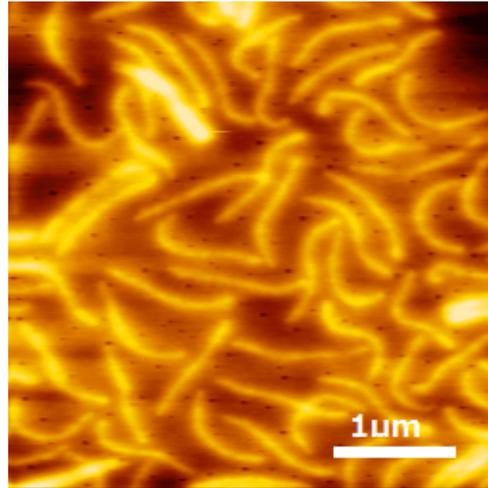


Figure ②-5. An AFM image of nanostructures produced by SPNT which is based on PVP (M_w : 40,000) and N,N' -methylenebisacrylamide as a crosslinker. The image was observed in thin film of PVP and a crosslinker. Crosslinker was used at 20 wt% conc. relative to PNIPAM. The image was formed upon irradiation of 450 MeV Os particles at the fluence of 5.0×10^8 ions cm^{-2} . The cross-section radius of image is 13 nm.

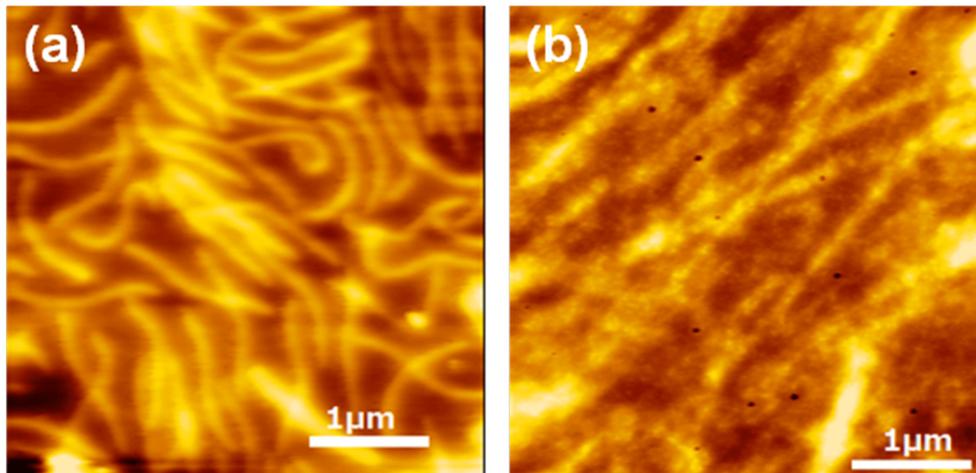


Figure ②-6. AFM images of nanostructures produced by SPNT which are based on PNIPAM and N,N' -methylenebisacrylamide as a crosslinker. Image (a) was observed in thin films of PNIPAM and the crosslinker. Image (b) was observed for the solution of PNIPAM and the crosslinker in bmim TFSI. Crosslinker was used at 20 wt% conc. relative to PNIPAM. PNIPAM was dissolved into bmim TFSI at 13 wt% conc. The nanostructures in images (a) and (b) were formed upon irradiation of 450 MeV Os particles at the fluence of 5.0×10^8 ions cm^{-2} . The cross-section radii of (a) and (b) are 11 nm and

②-3 総括

以上のことから、今回の研究では PNIPAM を用いて薄膜、イオン液体溶液双方よりナノ構造体形成に成功した。また PVP では薄膜よりナノ構造体形成に成功した。今後は PNIPAM の熱的挙動の観察と、金属ナノ粒子担持型ナノ構造体との複合機能化に取り組むこととする。

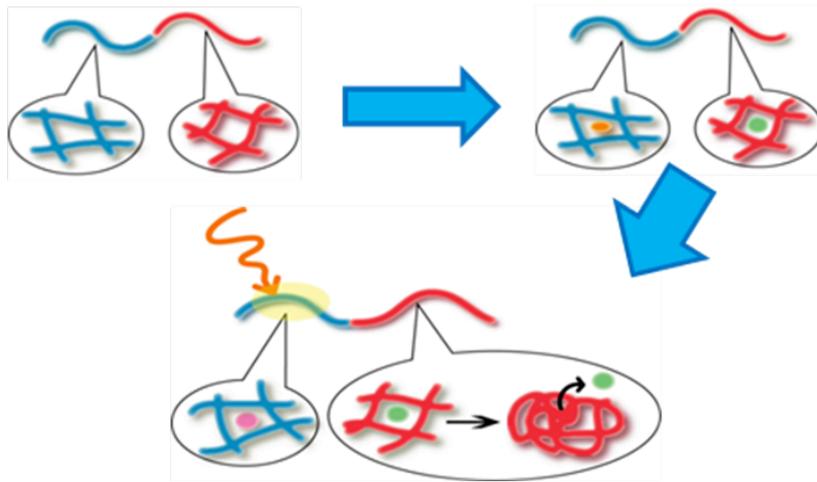


Figure ② -7. A schematic view showing applications of multi-functional nano-gel.

図は複合機能型ナノゲルの具体的案である。PVP と PNIPAM を用いて、複合型ナノゲルを形成し、PVP に金属ナノ粒子を、PNIPAM に低分子成分を内包させたとする。例えば、PVP に人体に無害なマイクロ波を照射したとすると、金属ナノ粒子が加熱され、PNIPAM が収縮し、内包成分を放出することが可能となる。このように人為的制御が可能な複合機能型ナノゲルの形成を目標とし、今後研究を進めていく予定である。

Reference

- (1) S. Seki, et al., *Macromolecules*.**39**,(2006) 7446
- (2) T. Ueki et al., *Chemistry Letters*. **35** (2006) 8
- (3) S.Tsukuda, et al. *J. Phys. Chem. B*,**110** (2006) 10319.
- (4) S. Seki, et al., *Macromolecules*. **38** (2005) 10164.
- (5) S. Seki, et al., *Adv.Mater.*, **13** (2001) 1663.
- (6) T. Torimoto, et al., *Adv. Mater*, **22**(2010) 1196

2. 3 成果の外部への発表

(1) 論文投稿 (国内/国外)

- 1) S. Kurashima, T. Yuyama, N. Miyawaki, H. Kashiwagi, S. Okumura, **M. Fukuda**, " Useful technique for analysis and control of the acceleration beam phase in the AVF cyclotron", *Rev. Sci. Instrum.* Vol. 81, pp. 033306-1~7 (2010)
- 2) K. Hatanaka, J. Nakagawa, **M. Fukuda**, T. Yorita, T. Saito, Y. Sakemi, T. Kawaguchi, N. Noda, "A HTS scanning magnet and AC operation", *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A*, Vol.616, pp.16-20 (2010)
- 3) S. Yagai, Y. Nakano, **S. Seki**, A. Asano, T. Okubo, T. Isoshima, T. Karatsu,

- A. Kitamura, Y. Kikkawa, "Supramolecularly Engineered Aggregation of a Dipolar Dye: Vesicular and Ribbonlike Architectures" *Angew. Chem. Int. Ed.*, 49(51), 9990-9994 (2010).
- 4) N. Tezuka, T. Umeyama, Y. Matano, T. Shishido, M. Kawasaki, M. Nishi, K. Hirao, L. Lehtivuori, N. V. Tkachenko, H. Lemmetyinen, Y. Honsho, **S. Seki**, H. Imahori, "Good Solvent Effects of C70 Cluster Formations and Their Electron-Transporting and Photoelectrochemical Properties" *J. Phys. Chem. B*, 114(45), 14287-14297 (2010).
 - 5) S. Yagai, T. Seki, H. Murayama, Y. Wakikawa, T. Ikoma, Y. Kikkawa, T. Karatsu, A. Kitamura, Y. Honsho, **S. Seki**, "Structural and Electronic Properties of Extremely Long Electron-Conductive Perylene Bisimide Nanofibers Formed through a Stoichiometrically-Mismatched Complexation between Complimentary Multiple Hydrogen-Bonding Modules" *Small*, 6(23), 2731-2740 (2010).
 - 6) K. Sugiyasu, Y. Honsho, R. M. Harrison, A. Sato, T. Yasuda, **S. Seki**, M. Takeuchi, "A Self-Threading Polythiophene: Defect-Free Insulated Molecular Wires Endowed with Long Effective Conjugation Length" *J. Am. Chem. Soc.*, 132(42), 14754-14756 (2010).
 - 7) H. Nobukuni, Y. Shimazaki, H. Uno, Y. Naruta, K. Ohkubo, T. Kojima, S. Fukuzumi, **S. Seki**, H. Sakai, T. Hasobe, F. Tani, "Supramolecular Structures and Photoelectronic Properties of the Inclusion Complex of a Cyclic Free-Base Porphyrin Dimer and C60" *Chem. Eur. J.*, 16(38), 11611-11623 (2010).
 - 8) S. Prasanthkumar, A. Saeki, **S. Seki** and A. Ajayaghosh, "Solution Phase Epitaxial Self-Assembly and High Charge-Carrier Mobility Nanofibers of Semiconducting Molecular Gelators" *J. Am. Chem. Soc.*, 132(26), 8866-8867 (2010).
 - 9) Deepak, N. Banerjee, **S. Seki**, "Evidence of electron conductivity in polysilanes and its implications in design of ultraviolet emitting devices" *J. Appl. Phys.*, 107(12), 124513 (2010).
 - 10) X. A. Zhang, T. Nakanishi, T. Ogawa, A. Saeki, **S. Seki**, Y. F. Shen, Y. Yamauchi, M. Takeuchi, "Flowerlike supramolecular architectures assembled from C-60 equipped with a pyridine substituent" *Chem. Commun.*, 46, 8752-8754 (2010).
 - 11) N. Fujita, T. Matsui, S. Kosugi, T. Satoh, Y. Saitoh, K. Takano, M. Koka, T. Kamiya, **S. Seki**, A. Iwase, "Micrometer-Sized Magnetic Patterning of FeRh Films Using an Energetic Ion Microbeam" *Jpn. J. Appl. Phys.*, 49(6-1), 060211 (2010).
 - 12) H. Nakano, **S. Seki**, H. Kageyama, "Photoinduced vitrification near the surfaces of single crystals of azobenzene-based molecular materials with glass-forming ability" *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 12(28), 7772-7774 (2010).
 - 13) L. Chen, Y. Honsho, **S. Seki**, D. Jiang, "Light-Harvesting Conjugated Microporous Polymers: Rapid and Highly Efficient Flow of Light Energy with a Porous Polyphenylene Framework as Antenna" *J. Am. Chem. Soc.*, 132(19), 6742-6748 (2010).
 - 14) Y. Hizume, K. Tashiro, R. Charvet, Y. Yamamoto, A. Saeki, **S. Seki**, T. Aida,

“Chiroselective Assembly of a Chiral Porphyrin-Fullerene Dyad: Photoconductive Nanofiber with a Top-Class Ambipolar Charge-Carrier Mobility” *J. Am. Chem. Soc.*, 132(19), 6628-6629 (2010).

- 15) T. Umeyama, N. Tezuka, **S. Seki**, Y. Matano, M. Nishi, K. Hirao, H. Lehtivuori, N. V. Tkachenko, H. Lemmetyinen, Y. Nakao, S. Sakaki, H. Imahori, “Selective Formation and Efficient Photocurrent Generation of [70]Fullerene/Single-Walled Carbon Nanotube Composites” *Adv. Mater.*, 22(15), 1767-1770 (2010).
- 16) A. Saeki, **S. Seki**, Y. Shimizu, T. Yamao, S. Hotta, “Photogeneration of charge carrier correlated with amplified spontaneous emission in single crystals of a thiophene/phenylene co-oligomer” *J. Chem. Phys.*, 132(13), 134509/1-134509/7 (2010).
- 17) H. Maeda, Y. Terashima, Y. Haketa, A. Asano, Y. Honsho, **S. Seki**, M. Shimizu, H. Mukai, K. Ohta, “Discotic columnar mesophases derived from ‘rod-like’ π -conjugated anion-responsive acyclic oligopyrroles” *Chem. Commun.*, 46, 4559-4561 (2010).
- 18) J. Ohshita, Y. Hatanaka, S. Matsui, T. Mizumo, Y. Kunugi, Y. Honsho, A. Saeki, **S. Seki**, J. Tibbelin, H. Ottosson, T. Takeuchi, “Effects of the silicon core structures on the hole mobility of star-shaped oligothiophenes” *Dalton Trans.*, 39, 9314-9320 (2010).

Cited: 0

- 19) N. Tezuka, T. Umeyama, **S. Seki**, Y. Matano, M. Nishi, K. Hirao, H. Imahori, “Comparison of Cluster Formation, Film Structure, Microwave Conductivity, and Photoelectrochemical Properties of Composites Consisting of Single-Walled Carbon Nanotubes with C₆₀, C₇₀, and C₈₄” *J. Phys. Chem. C*, 114(7), 3235-3247 (2010).
- 20) Y. He, Y. Yamamoto, W. Jin, T. Fukushima, A. Saeki, **S. Seki**, N. Ishii, T. Aida, “Hexabenzocoronene Graphitic Nanotube Appended with Dithienylethene Pendants: Photochromism for the Modulation of Photoconductivity” *Adv. Mater.*, 22(7), 829-832 (2010).
- 21) K. Nagashima, T. Yanagida, A. Klamchuen, M. Kanai, K. Oka, **S. Seki**, T. Kawai, “Interfacial effect on metal/oxide nanowire junctions” *Appl. Phys. Lett.*, 96(7), 073110 (2010).
- 22) Y. Dehari, Y. Takei, S. Koyama, H. Nanto, **S. Seki**, “QCM Gas Sensor with Organic Nanowire Film as Molecular Recognition Membrane” *Sensors and Materials*, 22(4), 175-181 (2010).

(2) 学会発表 (国内/国際)

- 23) **M. Fukuda**, K. Hatanaka, H. Kawamata, T. Yorita, T. Saito, H. Tamura, K. Kibayashi, “Developments for beam intensity increase and beam quality improvement in the RCNP cyclotrons”, Proceedings of IPAC’10, Kyoto, Japan, pp.546-548 (2010)
- 24) K. Hatanaka, **M. Fukuda**, J. Nakagawa, T. Saito, T. Yorita, T. Kawaguchi, K. Noda,

"A HTS scanning magnet and AC operation", Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, pp. 352-354 (2010)

- 25) **M. Fukuda**, K. Hatanaka, T. Yorita, T. Saito, H. Tamura, M. Kibayashi, S. Kurashima, "DEVELOPMENTS FOR INCREASE OF PROTON BEAM INTENSITY AT RCNP CYCLOTRON FACILITY", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Japan, pp. 364-366 (2010)
- 26) N. Miyawaki, S. Okumura, T. Yuyama, T. Ishizaka, S. Kurashima, H. Kashiwagi, K. Yoshida, I. Ishibori, Y. Yuri, T. Nara, W. Yokota, **M. Fukuda**, "REDUCTION OF START-UP TIME OF THE CYCLOTRON MAGNETIC FIELD FOR QUICK CHANGE OF ACCELERATION BEAM", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Japan, pp. 975-977 (2010)

2. 4 活動(運営委員会等の活動)

無し

2. 5 実施体制

別表1に記載

別表1 平成22年度に於ける実施体制

業 務 項 目	担当機関等	研究担当者
1. 高精度磁場・ビーム軌道解析技術の開発	大阪大学 核物理研究センター	◎福田 光宏
2. 新規な概念に基づく単一粒子ナノ加工法の高度化の研究	大阪大学 工学研究科応用化学専攻	◎関 修平

注1. ◎：課題代表者、○：サブテーマ代表者

注2. 本業務に携わっている方は、全て記入。

