

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390032

研究課題名(和文)球形からロッドへ：高速重イオン照射によるナノ粒子の形状変化の機構解明

研究課題名(英文) Shape elongation of embedded metal nanoparticles induced by swift heavy ion irradiation

研究代表者

雨倉 宏 (AMEKURA, Hiroshi)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・先端材料解析研究拠点・主席研究員

研究者番号：00354358

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：シリカなどに埋め込まれた球形の金属ナノ粒子を、高速重イオンと呼ばれる数十MeV以上の高エネルギーイオンビームで照射すると、球形だったナノ粒子がビームと平行方向に伸び、楕円形そしてロッド状へと変化する現象が報告されている。原因としてハンマリング効果が信じられてきたが、我々は線量依存性を測定し、矛盾点を指摘した。本研究では変形の深さ分布や照射温度依存性を調べ、ハンマリングモデルの更なる矛盾点を指摘した。さらに本現象の総合的な理解を深めるための研究も行った。計画には無かったが、6 MeVのC60クラスターイオン照射でも同様にナノ粒子の楕円化が起こることを世界で初めて明らかにした。

研究成果の概要(英文)：It has been reported that spherical metal nanoparticles (NPs) embedded in amorphous solid, such as silica, show shape deformation to prolate spheroids and finally to nano-rods under irradiation with swift heavy ions, i.e., heavy ions with higher energy than a few tens of MeV. While the majority of scientists still assume the deformation mechanism to the ion-hammering effect, we have pointed out an inconsistency between the fluence dependence predicted from the hammering and our experimental results. In this study, we have further pointed out subtle but certain inconsistency of the hammering mechanism in the depth dependence and in the irradiation temperature dependence of the NP deformation. In order to enrich the understanding, other studies concerning this phenomenon were carried out. To the best of our knowledge, we have firstly observed that the same phenomenon is induced under MeV C60 cluster ion irradiation.

研究分野：イオンビームナノ工学

キーワード：高速重イオン ナノロッド 金属ナノ粒子 楕円ナノ粒子 照射誘起楕円変形 Ion Beam Shaping プラズモニクス イオンビーム

1. 研究開始当初の背景

シリカ(SiO₂)のような非晶質固体中に埋め込まれた球形の金属ナノ粒子を、高速重イオンと呼ばれる ~10 MeV を超えるイオンビームで照射すると、ナノ粒子の形状が球形から楕円形、そしてロッド状へと変化する現象が報告されていた。ナノ粒子が全て同方向に伸び、伸長の程度は照射量、方向はビーム方向で制御できるため、方向性を持たない球状ナノ粒子集団を完全配向したナノロッドから成る非等方的複合体へ室温・乾式で自在に変形させる技術として注目された。

本現象の具体的な応用として、厚さ 100 nm 以下の偏光子・複屈折材の提案、球の Aspect 比を変え表面 Plasmon 共鳴波長を大きくシフトさせる応用も実現されつつあった。その他 Plasmonic 素子への応用、さらには本現象を利用して可視紫外域用の極小 Split Ring Resonator を形成し、可視紫外域での負の屈折率の実現を目指す可能性も提案された。

一方、基礎科学の観点から、物質への高速重イオン照射効果は、アト秒台の超高速電子励起、引き続き引き起こされる電子系と格子系の極端な非平衡状態、電子温度の拡散速度と物質によって異なる電子格子エネルギー交換速度の大小による物質応答の多様性が知られていた。そしてこれらの変化が半径十 nm、長さ数 μm のイオントラックと呼ばれる非等方なマイクロな円筒領域を中心に引き起こされことなどが信じられていたものの、直接的に実時間で観測する計測技術がほぼ無く、間接的実験結果をもとに議論が続けられていた。

2. 研究の目的

そのような限られた状況の中、本現象のメカニズムとして以下のようなモデルが提案された：シリカのような非晶質固体に高速重イオンが照射されると、ビームと垂直方向に伸びようとする現象（イオンハンマリング）が古くから知られていた。シリカ中に金属ナノ粒子が埋め込まれていると、ハンマリング効果のためにシリカが面内で伸びようとして面内応力を発生させる。ナノ粒子は面内方向で押される。しかし定量的な評価から、この応力だけでは観測されるような劇的なロッド化は起こらない。面内応力が印加されている中、ナノ粒子がイオンに直撃され、熱スパイク効果により融解し、面内応力に押されて面と垂直方向（ビーム方向）に伸びる複合機構が当該学会の権威から提案され、多くが支持していた。

しかしシリカは低線量域では密度化と呼ばれるハンマリングとは異なる照射誘起変形を起こすことが知られており、ハンマリングはイオン照射量に対して閾値を持って出現することが知られていた。もしナノ粒子のロッド化がハンマリングによるならば、ロッド化は閾値を示すはずである。しかしながら、低線量域でのわずかのロッド化を精度良く

測定することは容易ではない。我々はナノ粒子の長軸方向と短軸方向に直線偏光した光の吸収に差がでることを利用して、ナノ粒子のロッド化を高感度で測定する二色性分光を開発した。その結果、ロッド化はほぼ閾値線量を示さないことが判明し、ハンマリングによる従来説を否定した。しかし権威が提案し一度広く信じられてしまったためか、なかなか我々の結果を受け入れてもらえない。

本研究ではハンマリングの関与の有無を判断できる別の実験を新たに（複数）行い、その関与の有無を明確にする。また本現象の総合的な理解を深めるための研究を進める。

3. 研究の方法

上記目的のために以下の四項目の研究を行った。

(1) ナノ粒子ロッド化のシリカ中での深さ依存性：

これまで金属ナノ粒子はシリカへの 60 keV イオン注入法で作製していたため、表面から 100 nm より浅い深さにしか形成されなかった。一方、高速重イオンとして 200 MeV Xe イオンを使った場合、飛程は 20 μm 程度のため、ナノ粒子が存在する深さよりもハンマリングは極端に深くまで誘起されている。ナノ粒子の存在する 100 nm より浅い領域では、表面の存在により面内応力はより深い領域より小さくなっていると予想される。

そこでナノ粒子が存在する層の深さをより深くしていくと、面内応力は増加して最終的には飽和すると予想される。もしハンマリングによる面内応力がロッド化に関与しているのであれば、深さに応じてロッド化効率が変わるはずである。60 keV のイオン注入で Zn ナノ粒子を形成した試料に対して、CVD 法で SiO₂ 膜をそれぞれ厚さ 100, 300, 1000 nm 堆積させたものを用いた。製膜温度は 350°C で、製膜時には TEOS ガスと酸素ガスを流しながらプラズマを発生させた。比較のため、SiO₂ 膜を堆積させない試料も用いたが、同じ 350°C で熱処理は行った後に使用した。原子力機構東海において 200 MeV Xe イオンを $1 \times 10^{11} - 2 \times 10^{14}$ ions/cm² の範囲で照射した。ロッド化の評価は二色性分光法による。

(2) ナノ粒子ロッド化の照射温度依存性：

ハンマリング効果では照射温度が上昇すると変形効率が単調に減少する。照射温度 700K では変形効率が 100K での値の 10% 程度まで減少する。つまりロッド化がハンマリングによるのであれば、照射温度を上げれば急激にロッド化効率が下がるはずである。

本実験では、融点が高く、高温まで比較的安定な V ナノ粒子を 60 keV イオン注入法で用意した。100K から 700K 以上にわたる照射温度依存性の測定は、実績のあるインドの加速器施設 IUAC において、研究協力者の Avasthi 教授、Khan 博士（インド IUAC）の協力の下、実施した。イオン種は IUAC におい

て発生可能で比較的高 Se な 120 MeV Ag イオンを用いた。楕円化の評価は二色分光法による。

(3) 電子線リソグラフィーを用いて作製した配列したナノ粒子のロッド化：

電子線リソグラフィーを用いて作製した碁盤の目のように整列した Au ナノ粒子試料は、CSIRO (豪州) Gomez 博士より提供を受けた。シリカ基板をレジスト剤で一度覆い、ナノ粒子を形成する部分を電子線で感光させ、Au を堆積させる。レジストを化学的に除くと、Au ナノ粒子だけが基板表面上に残る。照射誘起ロッド化のためにはナノ粒子はシリカ中に埋まっている必要があるため、その上に 100 nm 厚のシリカをさらに堆積させた。ナノ粒子は一辺 800 nm の 2 次元正方格子点付近に対称及び非対称対として形成された。ナノ粒子は直径 10-90 nm の範囲で作製された。

高速重イオン照射は原研東海で行った。ロッド化を透過電子顕微鏡、He イオン顕微鏡での観察を試みた。

(4) MeV C_{60} クラスタイオン照射によるナノ粒子のロッド化の確認：

ナノ粒子のロッド化現象において、照射するイオンビームの電子的阻止能 Se という量が重要であることは共通認識となっている。高速重イオンは高い Se 値を持つためロッド化現象を引き起こすと考えられている。より高い Se をもつイオンとして C_{60} のようなクラスタイオンが知られている。数 MeV の C_{60} イオンは、我々がロッド化実験によく使ってきた 200 MeV の Xe イオンと同程度の高い Se をもつため、数 MeV の C_{60} イオンによるロッド化も期待される。

最近まで MeV 域の C_{60} ビームは非常に低流束で、比較的高い照射量が必要なロッド化実験には適用が難しいと思われていた。しかし最近、量研機構高崎がタンデム加速に耐える高流束の C_{60} クラスタイオン源を開発し、数 MeV の大流束の C_{60} の発生に成功した。本実験は当初の研究計画には含まれていなかったが、量研機構側のご好意もあり、照射実験を行わせてもらった。クラスタイオンによるナノ粒子の楕円化に世界で初めて成功した。

4. 研究成果

(1) ナノ粒子ロッド化のシリカ中での深さ依存性：

図 1 は直線偏光で測定したシリカ中の Zn ナノ粒子の吸収スペクトルで、 0° が長軸が偏光面に平行、 90° が垂直の場合である。CVD で SiO_2 膜を表面に堆積したため、膜厚に応じた干渉縞が観測される。図は高速重イオン照射量が 5×10^{13} ions/cm² の結果なので、ロッド化は十分に起こっており、偏光角度により吸収に大きな差が観測される。

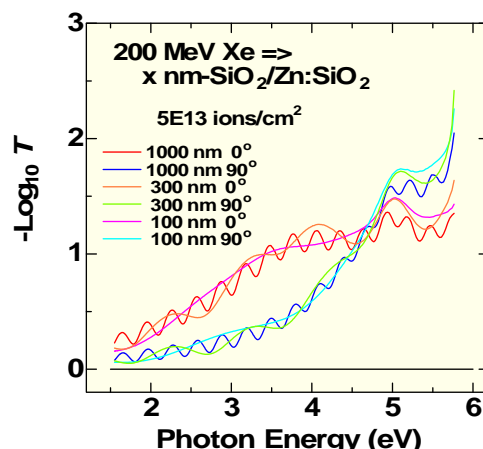


図 1. 直線偏光で測定したシリカ中の Zn ナノ粒子の吸収スペクトルで、 0° が長軸が偏光面に平行、 90° が垂直の場合。表面に SiO_2 膜がそれぞれ 100, 300, 1000 nm 堆積されている。

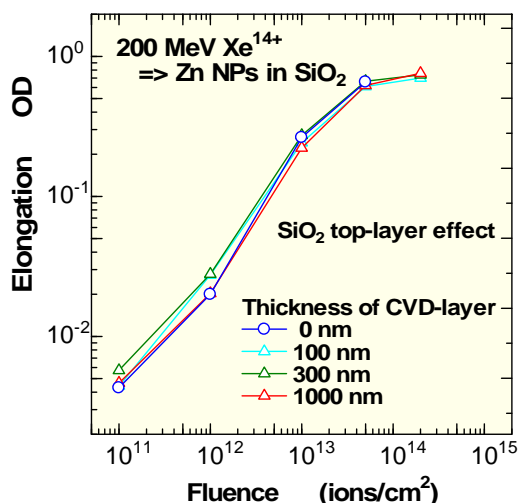


図 2. 直線偏光角度 0° 及び 90° における光吸収の差から求めたナノ粒子のロッド化の割合の照射量依存性。試料表面に SiO_2 膜を 0-1000 nm の厚さで堆積させ、Zn ナノ粒子の平均深さを変えている。

偏光角度が 0° と 90° の光吸収スペクトルの差から求めたナノ粒子のロッド化の割合を図 2 に示す。低線量 10^{11} や 10^{12} ions/cm² では膜厚 0 と 1000 nm のデータ、100 と 300 nm のデータがそれぞれ重なり 2 つの組に分離して見えるが、高線量では差が無くなる。低線量ではロッド化割合の絶対値が小さく、ノイズを拾いやすいことなどを考慮すると、異なる膜厚間で違いがあるとは積極的に言えない。つまりロッド化への明確なハンマリングの関与が観測されたとは言えない。

(2) ナノ粒子ロッド化の照射温度依存性：

シリカ中の V ナノ粒子のロッド化の照射温度依存性を図 3 に赤丸で示す。青丸はハンマリングの変形率の照射温度依存性の文献

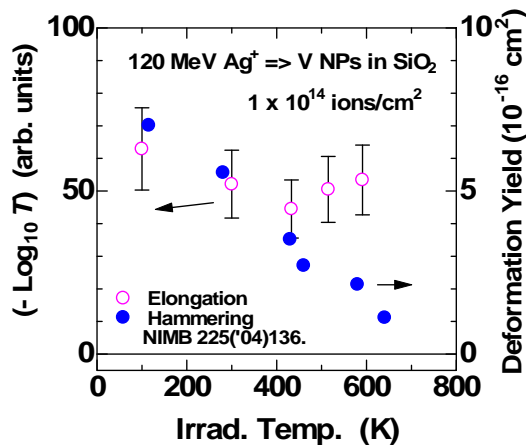


図 3. シリカ中の V ナノ粒子のロッド化の照射温度依存性 (赤丸)。照射量は 1×10^{14} ions/cm² に固定。青丸はハンマリングの変形率の文献値。

値である。ロッド化は 100K から 600K の範囲で 400K 付近に弱い極小を持ちながらも、大よそ一定である。対してハンマリングは照射温度とともに単調に減少した。両者は特に 400K を超えた領域での違いが顕著である。

400K を超えた温度域では、ハンマリングが弱まっているのにも関わらず、ロッド化は低温と同程度に起こっている。この結果からもハンマリング効果をロッド化の起源とすることに疑問が持たれる。

(3) 電子線リソグラフィーを用いて作製した配列したナノ粒子のロッド化：

電子線リソグラフィーによる Au ナノ粒子の作製は研究協力者 Gomez 博士 (豪州 CSIRO) によって行われた。用いた電子線リソグラフィーは従来方式の一筆書きのため露光作業に時間がかかり、各条件のナノ粒子はそれぞれ 40 μm 角の領域にしか形成できなかった。そのため、TEM 観察を行うためには、それぞれの領域を把握して切り出さなければならない。もちろんリソグラフィーで各領域に金でマークが付けられているし、ナノ粒子の存在する領域は (光学顕微鏡で観察すると) 明らかに異なるコントラストを呈していた。そこで Ga イオン 2 次電子顕微鏡を備えた FIB 装置を用いて、各領域から TEM 試料の切り出しを試みた。ところが光学顕微鏡では非常にはっきり見えたマークなどが、Ga-2 次電子顕微鏡ではほとんど見えなかった。帯電が邪魔をしているようで、この方法を断念せざるを得なかった。

そこで色々調べると、非常に最近の報告であるが、He イオン顕微鏡が通常の SEM では観測できない帯電した試料に対して有効であると知った。理由は未だ明らかにされていないが、厚さ 100 nm 程度のシリカの下にある金属構造が見えたという報告である。そこで知り合いに頼んで He イオン顕微鏡での観察を行ってもらった。観測結果の一つを図 4



図 4. 電子線リソグラフィー法で作製した基板上に整列した直径 20 nm、粒子間隔 10 nm の Au ナノ粒子対の He イオン顕微鏡像。厚さ 100 nm の絶縁体シリカ層を通しての観察。右下の大きな構造はゴミ。下部のスケールバーは 200 nm に対応。

に示す。絶縁体である厚さ 100 nm のシリカ層が表面を覆っているため、Ga イオン SEM では帯電してしまい、像が得られなかったが、He イオン顕微鏡では図のような高倍率でも埋め込まれたナノ粒子の像が得られた。これは He イオンにより発生する 2 次電子は非常に低エネルギーまで延びており、絶縁体のバンドギャップを介してあまり減衰せずに検出されるためと説明されている。

確かに He イオンを用いるとナノ粒子からの信号は得られるが、表面シリカ層の帯電は確実に起こっているようで、帯電により観測中に像が揺れ、高分解能観察を阻害するようであった。実際、試料は直径 20 nm のナノ粒子の対であるが、一つの点としか分解できなかった。この 20 nm のナノ粒子対を高速重イオン照射すると、ナノ粒子対が観測できなかった。理由は不明である。さらに大きな 40 nm のナノ粒子対では照射後もナノ粒子対は観測されたが、今度は照射による形状の変化がほとんど識別できなかった。この傾向は粒子径が 40 nm 程度を超えると変形の効率が低下するという他の報告と一致する。以上から He イオン顕微鏡もこの系のロッド化を明瞭に観察する手法としてはあまり向いてないと結論した。適した観察方法を見つけることが今後の課題である。

(4) MeV C₆₀ クラスタイオン照射によるナノ粒子のロッド化の確認：

シリカ中に 60 keV イオン注入で作製した Zn ナノ粒子に対して、6 MeV の C₆₀ イオンを照射した。5 × 10¹³ ions/cm² まで照射すると、強力なスパッタリングが確認され、Zn ナノ粒子が多量に失われていた。エネルギー依存性の測定からこのスパッタリングは電子的スパッタリングに帰属された。しかし C₆₀ イオンは非常に重いため、6MeV C₆₀ でも 1 個の C イオンは 100 keV 以下のエネルギーしか持っていない。そのため電子的スパッタリングが

起こっているとは不思議に感じられた。またシリカ（非晶質 SiO₂）の代わりに石英（結晶 SiO₂）を照射すると、通常高速重イオンでしか観測されないイオントラックが形成されており、強力な電子励起が示唆された。

トラックは長さが約 100 nm であり、高速重イオンによるトラックとは桁違いに短い。C₆₀ 照射はこれまでの単原子イオン照射の常識には収まりきれない様々な挙動が期待される。

5×10^{13} ions/cm² の照射でナノ粒子が失われてしまったため、それより低照射量でロッド化が起こっているかどうかを光学二色性分光法で評価した。低線量において、200 MeV Xe イオン照射を超える高効率のロッド化が確認された。

クラスターイオンによるナノ粒子の楕円化は世界で初めての結果であり、一連のデータが揃ったら、論文執筆・投稿を行いたい。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 11 件)

K. Chung, T.J. Karle 他計 10 名(H. Amekura 最後から 2 番目), Room-temperature single-photon emission from Zinc oxide nanoparticle defects and their in-vitro photostable intrinsic fluorescence, *Nanophotonics*, **6** (2017) 269-278, 査読有、DOI: 10.1515/nanoph-2015-0138.

H. Amekura, S. Akhmadaliev, S. Zhou, and F. Chen, A possible new origin of long absorption tail in Nd-doped yttrium aluminum garnet induced by 15 MeV gold-ion irradiation and heat treatment, *J. Appl. Phys.* **119** (2016) 173104 (8 pages), 査読有、DOI: 10.1063/1.4948348.

A.D. Pogrebnyak, A.A. Dem'yanenko, V.M. Beresnev, O.V. Sobol', O.M. Ivasishin, K. Oyoshi, Y. Takeda, H. Amekura, and A.I. Kupchishin, Recrystallization and formation of spheroidal gold particles in amorphous-like AlN-TiB₂-TiSi₂ coatings after annealing and subsequent implantation, *Phys. Solid State* **58** (2016) 1453-1457, 査読有、DOI: 10.1134/s1063783416070283.

H. Amekura, Shape elongation of embedded metal nanoparticles induced by irradiation with swift heavy ions/cluster ions, Proc. 2016 IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference, 2016, 7777110 (2 pages), 査読有、DOI: 10.1109/NMDC.2016.7777110.

A. Chettah and H. Amekura, Does swift heavy ion beam mixing in metal/a-Ge interface result from transient thermal process?, *Transactions of*

the Materials Research Society of Japan **41** (2016) 325-328, 査読有、DOI: 10.14723/tmrsj.41.325.

C. Ng, S. Dligatch, H. Amekura, T.J. Davis, and D.E. Gómez, Waveguide-Plasmon Polariton Enhanced Photochemistry, *Advanced Optical Materials* **3** (2015) 1582-1590, 査読有、DOI: 10.1002/adom.201500157

A. Chettah, H. Amekura, R. Baeker, H. Kucal, Y. Takeda, M. Matsuda, and A. Iwase, The inelastic thermal spike model applied to metal/insulator interfaces, *Physica Status Solidi (c)* **12** (2015) 102-106, 査読有、DOI: 10.1002/pssc.201400149.

H. Amekura, K. Kono, N. Okubo, and N. Ishikawa, Shape elongation of embedded Zn nanoparticles induced by swift heavy ion irradiation: A SAXS study, *Physica Status Solidi (b)* **252** (2015) 165-169, 査読有、DOI: 10.1002/pssb.201400138.

C. Pannu, U.B. Singh, D.C. Agarwal, S.A. Khan, S. Ojha, R. Chandra, H. Amekura, D. Kabiraj, and D.K. Avasthi, A study on the consequence of swift heavy ion irradiation of Zn-silica nanocomposite thin films: electronic sputtering, *Beilstein Journal of Nanotechnology* **5** (2014) 1691-1698, 査読有、DOI: 10.3762/bjnano.5.179.

H. Amekura, N. Okubo, and N. Ishikawa, Optical birefringence of Zn nanoparticles embedded in silica induced by swift heavy-ion irradiation, *Optics Express* **22** (2014) 29888-29898, 査読有、DOI: 10.1364/OE.22.029888.

H. Amekura, S. Mohapatra, U.B. Singh, S.A. Khan, P.K. Kulriya, N. Ishikawa, N. Okubo, and D.K. Avasthi, Shape elongation of Zn nanoparticles in silica irradiated with swift heavy ions of different species and energies: scaling law and some insights on the elongation mechanism, *Nanotechnology* **25** (2014) 435301 (10 pages), 査読有、DOI: 10.1088/0957-4484/25/43/435301.

〔学会発表〕(計 24 件)

招待講演：雨倉 宏、高速重イオンと材料照射効果、日本学術振興会第 132 委員会第 225 回研究会、2017 年 2 月 3 日、産総研臨海副都心センター（東京都江東区）。

招待講演：雨倉 宏、高速重イオンを利用した金属ナノ粒子の形態変化と光学特性制御、東海重イオン科学シンポジウム、2017 年 1 月 5 日～6 日、日本原子力研究開発機構東海研究所（茨城県東海村）。

招待講演：雨倉 宏、SiO₂ 中へ埋め込まれた金属ナノ粒子への C₆₀ クラスターイオン照射効果、クラスターイオン研究会、2016 年 12 月 5 日～6 日、量研機構高崎量子応用研究所（群馬県高崎市）。

H. Amekura, K. Narumi, A. Chiba, A. Usui, Y. Saitoh, D. Tsuya, N. Okubo, N. Ishikawa, Shape elongation of Embedded Metal Nanoparticles induced by C₆₀ Cluster Ion Irradiation, 20th International Conference on Ion Beam Modification of Materials (IBMM 2016), October 30th – November 4th, 2016, Wellington, (New Zealand).

招待講演：H. Amekura, Shape Elongation of Embedded Metal Nanoparticles induced by Irradiation with Swift Heavy Ions / Cluster Ions, IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC 2016), Octber 9-12, 2016, Toulouse (France).

H. Amekura, A. Chettah, P. Mota Santiago, P. Kluth, D.K. Avasthi, N. Okubo, N. Ishikawa, Shape Elongation of Embedded Metal Nanoparticles induced by Swift Heavy Ion Irradiation, 25th Annual Meetings MRS-J, International Symposia, December 8-10, 2015, Yokohama Port Opening Plaza (Kanagawa, Yokohama).

招待講演：H. Amekura, Shape Elongation of Metal Nanoparticles in Silica under Swift Heavy Ion Irradiation, 18th International Conference on Radiation Effects in Insulators (REI-18), October 26-31, 2015, Jaipur (India).

H. Amekura, P. Mota Santiago, P. Kluth, A. Chettah, D.K. Avasthi, N. Okubo, and N. Ishikawa, Is the shape elongation mechanism of embedded nanoparticles via underdense track cores acceptable?, International Symposium on Swift Heavy Ions in Matter (SHIM 2015), May 18th-21st, 2015, Darmstadt (Germany).

H. Amekura, A. Chettah, U.B. Singh, S. Mohapatra, D.K. Avasthi, N. Okubo, N. Ishikawa, Shape Elongation of Zn Nanoparticles under Swift Heavy Ions of Different Species and Energies, 19th International Conference on Ion Beam Modification of Materials (IBMM 2014), September 14-19, 2014, Leuven (Belgium).

H. Amekura, N. Ishikawa, N. Okubo, D.K. Avasthi, Shape elongation of Zn nanoparticles under swift heavy ion irradiation: Criticism on Elongation via underdense track cores, The IUMRS International Conference in Asia 2014, August 24-30, 2014, Fukuoka University (Fukuoka, Fukuoka).

H. Amekura, N. Ishikawa, Okubo, A. Chettah, S. Mohapatra, D.K. Avasthi, Stopping Power Dependence on Shape Elongation of Zn Nanoparticles under Swift Heavy Ion Irradiation: Elongation via Low-density Track Cores, Euro MRS 2014, Spring Meeting, Symposium E, May 26-30, 2014, Lille (France).

〔図書〕(計1件)

H. Amekura, Ultraviolet-visible Spectrophotometry, Compendium of Surface and Interface Analysis, Springer, 2017, web 出版予定, 分担執筆 8 ページ.

〔その他〕

ホームページ：

http://samurai.nims.go.jp/AMEKURA_Hiroshi-j.html

<http://www.nims.go.jp/group/ionbeam>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

雨倉 宏 (AMEKURA, Hiroshi)
物質・材料研究機構・先端材料解析研究拠点・主席研究員
研究者番号：00354358

(2)研究分担者

河野 健一郎 (KONO, Kenichiro)
物質・材料研究機構・若手国際研究センター・主任エンジニア
研究者番号：50354353
平成 27 年 3 月削除

(3)連携研究者

石川 法人 (ISHIKAWA, Norito)
日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学研究センター・研究主幹
研究者番号：90354828

大久保 成彰 (OKUBO, Nariaki)
日本原子力研究開発機構・原子力エネルギー基盤連携センター・副主任研究員
研究者番号：60391330

(4)研究協力者

Devesh Kumar Avasthi (AVASTHI, Devesh.)
元 Inter-University Accelerator Centre, India
現 Amity 大学, India・教授

Saif Ahamed Khan (KHAN, Saif)
Inter-University Accelerator Centre, India・研究員

Daniel E. Gomez (GOMEZ, Daniel)
CSIRO, Australia・研究員