

平成23年5月20日現在

機関番号： 82401
 研究種目： 基盤研究(C)
 研究期間： 2008～2010
 課題番号： 20510119
 研究課題名(和文) 絶縁体細管の内壁帯電を利用した集束荷電粒子ビーム生成装置の開発
 研究課題名(英文) Development of focused charged-particle beam optics based on charge-up of insulator capillaries
 研究代表者
 池田 時浩 (IKEDA TOKIHIRO)
 独立行政法人理化学研究所・山崎原子物理研究室・専任研究員
 研究者番号： 80301745

研究成果の概要(和文)：

マイクロメートルやナノメートルオーダー径の量子ビームを生成するために、長さ数 cm でビーム出射口がサブ μm から $100\mu\text{m}$ のガラス細管を用いて荷電粒子ビームを集束し照射する装置を開発した。keV エネルギー多価イオンビームでは μm サイズで数 1,000 cps の出射強度を達成し、MeV エネルギーでは、いくつかの生物実験 (HeLa 細胞、大腸菌、メダカ胚) に全く新しいミクロンオーダーのピンポイント改質ツールとして導入することができた。

研究成果の概要(英文)：

We have developed a method to provide micro- or nano-meter sized quantum beams. The method employs tapered glass capillaries whose length is several cm and outlet diameter is of the order from sub-micron to 100 micron to realize the focusing on the irradiated samples. For keV-energy highly charged ion beams, the intensity of the extracted microbeam of several 1,000 cps has been achieved. For MeV-energy beams, some biological living targets such as HeLa cells, Escherichia coli, and Medaka embryos have been irradiated with the glass capillaries as a unique tool for micron order modification.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・マイクロ・ナノデバイス

キーワード：

- (1) ガラスキャピラリー (2) 多価イオン (3) 絶縁体 (4) ガイド効果
 (5) 集束効果 (6) 生物照射 (7) ナノビーム (8) ナノファブリケーション

1. 研究開始当初の背景

量子線ビームは産業分野、研究分野を問わず益々重要性を増し、特に分析を含む産業分野では、加速エネルギーが比較的小さいキロボルト (kV) からメガボルト (MV) 程度で加速

されたビームが使われており、このエネルギー領域では、標的の内部ではなく表面の改質に優れ、分析やナノファブリケーションに用いられている。またビーム生成装置は初期投資として数 100 万円から数億円規模で巨大加速器と比べると国内外での照射装置の数は非常に多い。この状況の中、マ

マイクロメートル(μm)オーダーからナノメートル(nm)オーダーのビーム径への要求が急速に高まってきている。従来は、 nm 径の量子ビームを生成する場合、電磁レンズおよびアパーチャーの組み合わせが主流であった。量子ビームの中でも電子ビームは良いエミッタンスが得やすいので、 nm 径の電子ビーム生成は非常に進んでいる。ところが、ポテンシャルスパッタリングに用いられるような反応性の高い粒子(特に、 kV 程度で加速された多価イオン)でのビーム径微細化を考えると、未だ実用に耐え得るような状況ではない。ここで本研究グループが世界に先駆けて見出した、絶縁体細管(ガラス製キャピラリー)の内壁帯電現象を利用した集束ビーム生成技術を、現象の検証段階から一気に実用レベルまで引き上げる機運が国内外の研究者の間で高まりつつある。この手法を簡単に紹介すると、生物学実験で用いられるガラス製の注射針(ガラス製キャピラリー)の内径の大きい端から、 kV 程度で加速された(“低速”と呼ぶ)多価イオンビームを入射し、内径の小さい($1\mu\text{m}$ 前後)もう一端、すなわち出口からビームを出射させることを考える。出口径は非常に小さいため、ほとんど全てのイオンはキャピラリー内壁に衝突し運動エネルギーを失いキャピラリー出口からビームが出てくることはないと考えられていた。ところが、ガラスは絶縁体であるので衝突箇所に貯まった電荷はほとんど移動することなくそこにとどまり、衝突が繰り返されることでその電荷が作りだす電場は徐々に大きくなる。その電場がある程度大きくなるとイオンはその電場によって方向を曲げられ、もはやその地点に衝突することはなくなる。したがって、キャピラリー管内をさらに出口に向かって進むようになり、その結果、密度の向上(集束効果)も得られる。この内壁帯電により μm オーダーの出口からビームが得られるまでには、入射ビーム強度によるが、数秒から数10秒かかる。出口から得られたビームは出口径とほぼ同じ径を持ちマイクロビームが実現することになる[1]。学術的にはこれだけで非常に興味深い現象であるが、実用レベルにするには出射ビーム安定性やマイクロビームとしての強度さらに、 nm オーダーへの更なる微細化が必要になっている。

上記の低速多価イオンマイクロビームは真空容器の中でしか使用できず照射されるサンプルも真空容器内に限定される。よって水分を含んだようなサンプルには不向きであるので、この場合、水中でもわずかに飛程が期待できる MV 程度に加速された(本研究では“高速”と呼ぶことにする)イオンビームを使う。ここでもやはりビームの微細化は急務であるため、装置が簡便なガラス製キャピラリーを用いて高速イオンのマイクロビームを実現する。ガラスを帯電させることがで

きるのはせいぜい 10 kV 程度までであるのでビームを通過させるには帯電現象そのものはほとんど貢献せず、通過は内壁での小角散乱によると考えられる。ここでは通過特性を向上させるよりは、むしろ、ガラス製キャピラリーの出口からサンプル周辺の水がキャピラリーを通じて加速器の真空ダクトに逆流するという技術的問題の解決が先決であった。そこで出口に μm オーダー径の“フタ”を設置する技術を世界に先駆けて本研究グループが開発した。このフタがついたキャピラリーを使用すれば、(加速器から続く)内部が真空のキャピラリーを、液体中のサンプルに直に触れさせ、水中飛程数 μm のビームを直接サンプルに照射させることが可能である。特に生きた細胞内の小器官に照射するという全く新しい生物実験におけるツールを提供することができた。しかしながら、飛程が短くビームが細胞を貫通しないというメリットと同時に、細胞の下流側に設置される粒子数計数器に届かないというデメリットに直面することになった。

[1] “Production of a microbeam of slow highly charged ions with a tapered glass capillary”, T. Ikeda, et al.: Applied Physics Letters **89** 163502 (2006).

2. 研究の目的

前述の低速多価イオン通過性能、高速イオンの照射イオンの計数の問題、および関連技術の普及を踏まえ、本研究では以下の3点を目的とした。

- (1) 低速多価イオンマイクロビーム出射装置の開発
： μm や nm オーダーのビーム径を低速多価イオンビームで安定的に実現するためには、出口付近まで十分な量のビームが到達できるような形状を持つキャピラリーが必要ということであり、通過量の増大は最優先である。また、ナノファブリケーションを行うにはサンプルに対する照射量コントロールが必要で、多価イオンひとつがサンプルに衝突した時に生成される複数の二次電子を検出する方法が有効であるが、その際にバックグラウンドとなるイオンや電子の迷い込みを極力抑えることが重要で、このバックグラウンドの抑制も目的の一つである。
- (2) 先端にフタがついたキャピラリーによる細胞照射用マイクロビーム出射装置の開発：標的への照射線量を把握および制御することが課題となる。それと同時に水分を含んだサンプルを使えるというメリットを更に具現化するために種類の異なる幾つかの生きた生物標的への照射実験を行う。一方、フタ厚、ビームエネルギー、キャピラリーへの入射ビーム強度だけでなく、キャピラリーのテーパ角度を含む形状の最適化も行う。
- (3) 本研究は装置開発が主であるが、開発成果物の普及も開発の価値を高める要素である。従って、他研究機関への導入時のアドバイス及び学生の受

け入れも適宜行っていく。

3. 研究の方法

(1) 低速多価イオンマイクロビーム出射装置の開発

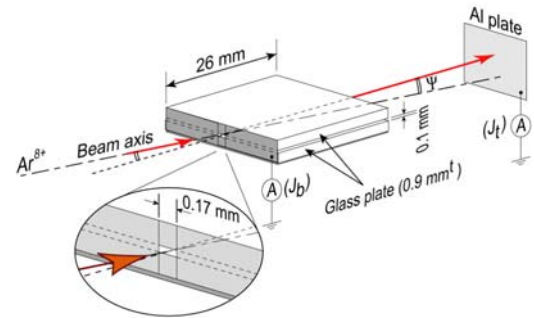
全て理化学研究所内低速多価イオン実験室で行い、入射イオン Ar^{8+} で 1 ~ 13 kV の範囲で加速したビームを用いた。出射装置を収める照射真空層およびキャピラリーを複数本マウントできるゴニオメーターを新たに製作した。ゴニオメーターは 4 軸（横移動、鉛直移動、水平回転、垂直回転）可動で、回転の伝達は大气側からのワイヤー等で行った。真空槽の真空度は 10^{-9} Torr であった。

① キャピラリー形状の最適化：キャピラリーの作製には puller と呼ばれる専用装置が使われる。これは生物実験で用いられるガラス製注射針あるいは神経電位測定用ガラス製電極を作製する装置と同じである。作製にはガラス製チューブの中ほどをヒーターで加熱 (HT) し、それと同時に両端に張力 (T1) をかけて伸ばしていく。ある程度の長さになると張力の大きさを切り替え (T2) 伸ばされたチューブを 2 つに引きちぎる。パラメーター、HT、T1、T2 の組み合わせを変えていくことで、太短いキャピラリーから細長いキャピラリーまで形状を変えることができる。ただし、形状を決定するパラメーターはこの 3 つだけではなく、ガラスの材質や、太さ、チューブ肉厚、作製時の湿度もあり、再現よく希望の形状が作製できるかどうかの確認も必要であった。

② 出射ビーム強度の測定：上記で作製されたキャピラリーで、実際にイオンビームを使って、出射ビーム強度やその安定性などを測定した。実験データの取得には位置敏感型検出器 (MCP および Wedge-and-strip 電極からなる)、専用の測定回路、コンピューターを用いるが、これらは汎用的なものであるため、実験中に速やかにキャピラリーの評価を行うために評価ソフトウェアの開発も行った。これにより、数分以内でキャピラリーの性能比較ができるようになった。実験終了後、各自のパソコン上で改めて解析ができなければ不便である。したがって、本ソフトウェアは Windows マシン上で使えるよう、Microsoft Visual Studio .NET の C++ を用いて開発された。

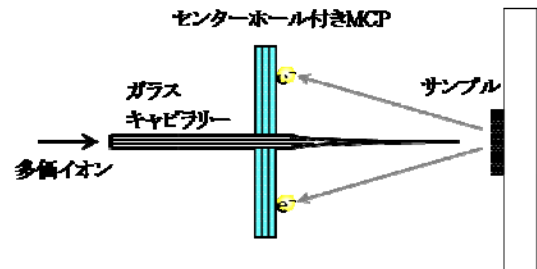
③ ガラスの帯電と放電のバランスに関する研究：低速多価イオンビームの通過安定性はキャピラリーの形状だけでなくガラスの帯電特性にも左右される。帯電の速度は入射ビーム強度とビームの向きに依存するが、ガラスは絶縁体と言ってもわずかに電気伝導度があり実際には放電によって帯電量は減っていく。ここで注目していたのは帯電が大

きくなった時に著しく大きな放電が可逆的に起こっている可能性である。そこで、下図のセットアップのとおり、2 枚のガラス板の間 (0.1 ミリ) にビームを通し、下流側を数 mrad 程度 (Ψ) ティルトさせ、ビームを上向きに偏向させた (ビームガイド効果)。このガイド効果によって、幾何学的にはビームは通過しないが、下方のガラス板上の帯電によってビーム通過が実現されている状態を作り出した。そして、入射ビーム強度を変化させて通過ビーム強度の時間経過を観測することで帯電と放電のバランスをモデル式と比較することが



できる。

④ 出射装置内サンプル近傍のバックグラウンド抑制：サンプルに照射されたイオンを計数するために、下図のセットアップを用いて、照射時に放出される複数の二次電子を検出する装置を作製した。計数時、センターホール付き MCP にビーム起源のバックグラウンド粒子が侵入してはならない。シールドや、場合によってはバイアス電圧を導入してバックグラウンドの抑制を行った。



(2) 先端にフタがついたキャピラリーによる細胞照射用マイクロビーム出射装置の開発

主に理化学研究所内ペレトロン加速器を用いて行い、入射イオンは陽子、およびヘリウムイオンで 2 ~ 3.2 MeV の範囲で加速したビームを用いた。ビームラインは細胞照射専用で、暗室、細胞観察用顕微鏡、高感度高速 CCD カメラなどを併せ持つ。暗室には各種培養ツールを備えている。

① フタ形状および作製方法確立：シミュレーションコードによりフタ厚の最適化を行った。ガラス製のフタは少し厚く作製し、専用の装置を使って計算どおりの厚さに仕上げた。

② 照射線量の評価：照射粒子は必ずフタを貫通するので、標的への線量の評価をするためにガラス製のフタをプラスチックシンチレーター製のフタに置きかえた。このフタからのシンチレーショ

ン光を検出することで照射線量を評価できるようにした。プラスチックシンチレータをフタに使うこと自体、ユニークなことであるので、その作製方法も十分に吟味した。

以下の③から⑤の標的実験は生物系研究者との共同研究で、ガラスキャピラリーという新しいツールによってのみ実現できる実験として推進した。

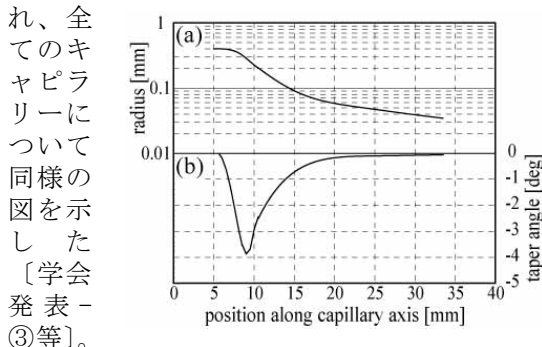
- ③ ヒト由来の生細胞
- ④ 生きた大腸菌
- ⑤ 発生途中の生きたメダカ胚

⑥ ミュオンビームを使った散乱過程の研究：さらに運動エネルギーの高いミュオンを使って表面での散乱について実験値とシミュレーションを比較した。

4. 研究成果

(1) 低速多価イオンマイクロビーム出射装置の開発

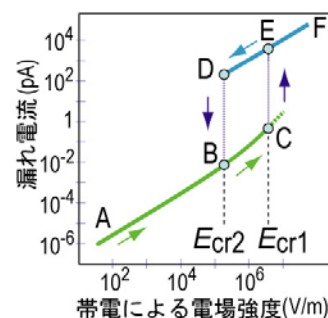
① キャピラリー形状の最適化：パラメータ、HT、T1、T2 以外は固定し、HT、T1、T2 を系統的に変化させ、その全ての組み合わせでキャピラリー形状の測定を行った。ガラスキャピラリーを用いたビーム集束法は国内外を問わず、多くの研究チームが参戦しており、企業での研究も始まりつつある。しかし、キャピラリー作製時にはそれぞれの研究チームが独自のパラメータを使っているものの系統的に決められたパラメータを用いている例は少ない。このような状況の下、上記の3パラメータにおける傾向を示すことは普及の上でも重要な位置づけとなる。下図は、測定されたキャピラリーの形状の一例〔雑誌論文-①等〕である。この図から主にビームと内壁の相対角度の最大値が得られ、全



② 出射ビーム強度の測定：上記①の最適化作業で得られたキャピラリー（相対角度の最大値が小さいもの⇔細長いもの）で実際のビームを使い通過強度および安定性を測定した。その結果、Ar⁸⁺、1 kV 加速のマイクロビーム（径 9 μm φ）を、2,000 cps 以上の大強度で少なくとも数 10 分以上安定に取り出すことに成功した〔学会発表-③等〕。また、10 kV

加速ではさらにその数倍の強度が得られ、今後、より高いレートで計数できる測定系に置き換えての実験を予定している。

③ ガラスの帯電と放電のバランスに関する研究：上記②の実験と同じ真空槽および、Ar⁸⁺、13 kV 加速 (=104 keV) のビームを用いた。最初の数分は安定な通過が観測されたが、やがて、周期的に通過の有無を繰り返すようになった。この繰り返しは、ガラス板表面の帯電傾向が周期的に大きな放電（大きな漏れ電流）に転じることによると考えざるをえない。さらに、この繰り返し周期は入射ビーム強度に反比例することが分かった。つまり、帯電量がある値を超えるとガラスの抵抗値が瞬時に著しく減少すると考えると自然である。そこで、物性理論の研究者と議論を繰り返し、下図のようなガラスの resistive switching 現象を仮定すれば実験結果とよく合う



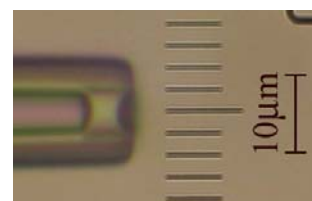
では例のないことである。このモデル計算および極めて正確な周期性を示した実験結果を学会等で発表した〔学会発表-②等〕。

④ 出射装置内サンプル近傍のバックグラウンド抑制：方法の項であげたセットアップに対して、シールドを施し、さらに、上流側で生成された二次電子には数 10 V 程度のバイアスをシールドに印加して、バックグラウンドレートを 1 cps 以下に落とすことができた。これはシールド無しの状態に比べ 3 桁ほどの改善であり、目的とするイオン計数（1,000 cps ほど）に比べ十分小さい値である〔学会発表〕。

(2) 先端にフタがついたキャピラリーによる細胞照射用マイクロビーム出射装置の開発

① フタ形状および作製方法確立：シミュレーションコードによりフタ厚（数 μm）の最適化を行い、10 μm φ 以下では、任意の大きさのガラス製フタを作製できることを示した〔雑誌論文-⑨等〕。

② 照射線量の評価：プラスチックシンチレータ製のフタの開発に成功（右写真）し、実際のビームを使った実験では通過粒子に起因するシンチレーション光を、細胞観察用の顕微鏡の



アイピースと置き換えた光電子増倍管にて検出することに成功した〔学会発表等〕。今まで生物照射実験ではMeVエネルギーのマイクロビームを使った線量評価が難しかったが、これにより、生物分野における正確な放射線応答のツールを供給できることになった。

③ ヒト由来の生細胞への照射:HeLa細胞の核および細胞質へのピンポイント照射を行っており、応答の違いが見出されている。今後は、細胞分裂中にしか現れない器官への照射と、まだ知られていない、その応答を調べる予定である〔学会発表、招待講演等〕。

④ 生きた大腸菌へ照射することによる分子モーターの放射線に対する反応の測定:大腸菌のべん毛は分子モーターの典型であり、1 μm の範囲でのエネルギー付与や周辺の電位変化に対する応答やダメージに対するしきい値等を調べている〔学会発表-①等〕。

⑤ 発生段階のメダカ胚内のひとつの細胞だけに照射したバスタンダー効果の検証:3次元的に閉じ込められたひとつの細胞への照射に対するバスタンダー効果検証は、今まで難しかったためあまり例がない。本研究では発生5~7期の胚を用い、細胞への照射を行っている。また、発生後期の臓器への照射も行っており段階的に進む臓器の発生に関する今まで決着がつかない問題への貢献を試みていく〔学会発表-④等〕。

⑥ ミュオンビームを使った散乱過程の研究:10 MeV 程度のミュオンをガラス板、金属板に衝突させ散乱方向やエネルギー損失をシミュレーションと比較した。また、合わせて陽電子ビームでもガイディング検証実験を行った〔雑誌論文-②③等、学会発表-⑱等〕。

(3) ガラスキャピラリーによるマイクロイオンビーム生成法の普及

普及のため、他の大学、研究所へのキャピラリーの供給を行った。また、上智大、東京理科大、奈良女子大、東邦大、Cambridge 大などから長期、短期で学生を受け入れ、実験や勉強会を通して指導を行った。

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)

- ① T. Ikeda (13 名中 1 番目), “Glass capillary optics for producing nanometer sized beams and its applications”, Journal of Surface and Coatings and Technology, in press, 査読有.

- ② Dai TOMONO, Tokihiro IKEDA (11 名中 4 番目), “Focusing Effect of MeV Muon Beam with a Tapered Capillary Method”, Journal of the Physical Society of Japan **80**, 044501 (2011), 査読有.
- ③ N. Oshima, T. Ikeda (8 名中 4 番目), “Guiding of a Slow Positron Beam with a Glass Capillary”, Materials Science Forum **607**, 263-265 (2009), 査読有.
- ④ A. Cassimi, T. Ikeda (17 名中 10 番目), “Imaging dynamics of charge-auto-organisation in glass capillaries”, Nucl. Instrum. Meth. B **267**, 674-677 (2009), 査読有.
- ⑤ Y. Kanai, T. Ikeda (7 名中 4 番目), “Dynamic features of ion guiding by nanocapillaries in an insulating polymer”, Physical Review A **79**, 012711 (2009), 査読有.
- ⑥ 池田時浩, “低価格ガラスキャピラリーによるマイクロビーム生成 ——低速多価イオン照射マイクロパターンニングと培養液中の生細胞オルガネラ照射に向けて——”, 日本MRSニュース **21**, 2, 5-7 (2009).
- ⑦ Y. Kanai, T. Ikeda (7 名中 4 番目), “Guiding of Slow Highly Charged Ions through Nanocapillaries - Dynamic Aspect”, Journal of Physics: Conference Series **194**, 012068 (2009), 査読有.
- ⑧ 池田時浩, 金井保之, 小島隆夫, 岩井良夫, 前島一博, 小林知洋, 今本尚子, “総説 ガラスキャピラリーによるイオンビームの集束とその応用”, RADIOISOTOPES **58**, 9, 617-628 (2009), 査読有.
- ⑨ Yoshio Iwai, Tokihiro Ikeda (10 名中 2 番目), “Ion irradiation in liquid of μm^3 region for cell surgery”, Applied Physics Letters **92** 023509 (2008), 査読有.
- ⑩ A. Cassimi, T. Ikeda (14 名中 7 番目), “Multiply-charged ion nanobeams”, Int. J. Nanotechnology **5**, 6/7/8 809 (2008), 査読有.

〔学会発表〕(計 57 件)

- ① Mikio Kato, “Real-time monitoring of Escherichia coli cells irradiated using a 2 MeV proton beam”, ABAIBS 2011 7th Asian Biophysics Association (ABA) Symposium & Annual Meeting of the Indian Biophysical Society (IBS), Jan.30 (2011), New Delhi, India.
- ② 池田時浩, 低速多価イオンビーム照射によるガラス伝導度の変化, 第 6 回励起ナノプロセス研究会, 2010 年 11 月 2 日, ビッグ・アイ 国際障害者交流センター, 堺市.
- ③ 池田時浩, ガラスキャピラリーによる低速多価イオンマイクロビームの応用:絶縁体表面への照射, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 24 日, 大阪府立大学中百舌鳥キャンパス.
- ④ K. Maruyama, “Irradiation of living medaka embryo by proton beams through a glass capillary: preliminary data”, Wiii2010 (The 3rd Workshop on Interaction of Ions with Insulators), Sep.5 (2010),

- Narita, Chiba.
- ⑤ 岩井良夫, 若手奨励賞講演: 細胞手術のための細胞内微小領域へのイオン照射, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 21 日, 岡山大学, 岡山市.
 - ⑥ 池田時造, マイクロビーム生成用ガラスキャピラリーの低速多価イオンビーム通過特性, 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 2010 年 3 月 19 日, 東海大学湘南キャンパス.
 - ⑦ T. Ikeda, 招待講演: “Glass capillary optics for producing nanometer sized beams and its applications”, 16th International Conference on Surface Modification of Materials by Ion Beams, Sep. 16 (2009), Odaiba, Tokyo, Japan.
 - ⑧ T. Ikeda, 招待講演: “Guiding of slow HCl beams through glass-made optics”, 2nd Symposium on Ion Insulator Interactions – S3I, May 20 (2009), Platja d’Aro, Girona, Spain.
 - ⑨ Yoshio Iwai, “Ion irradiation in liquid of μm^3 volume using a tapered glass capillary with end-window”, IUMRS-ICA 2008 (The IUMRS International Conference in Asia 2008), Dec.10 (2008), Nagoya, Japan.
 - ⑩ Yoshio Iwai, 招待講演: “Ion irradiation of cell surgery using a tapered glass capillary with end-window”, 8th International Workshop on Microbeam Probes of Cellular Radiation Response, Nov.15 (2008), Chiba, Japan.
 - ⑪ Yoshio Iwai, 招待講演: “Formation of a nano-sized ion beam with end-closed glass capillary and its application to living cell surgery”, AISAMP8 (The 8th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics), Nov 26 (2008), Perth, Australia.
 - ⑫ T. Ikeda, 招待講演: “Interaction of slow highly charged ions with insulating surfaces”, AISAMP8 (The 8th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics), Nov. 25 (2008), Perth, Australia.
 - ⑬ 池田時造, ガラスキャピラリーによるガイド効果のビーム応用, SPring-8 ビーム物理研究会 2008, 2008 年 11 月 6 日, SPring-8, 佐用郡佐用町.
 - ⑭ Takao M. Kojima, “Ion beams with glass capillaries”, AMPP2009 (The 3rd China-Japan Joint Seminar on Atomic and Molecular Processes in Plasma), Oct. 27 (2008), Xian, China.
 - ⑮ 池田時造, 招待講演: ガラスキャピラリーによる多価イオンビームの集束とガイドング, 第 51 回放射線化学討論会, 2008 年 10 月 15 日, 産業技術総合研究所, つくば市.
 - ⑯ Yoshio Iwai, “Ion irradiation in liquid of μm^3

region for cell surgery using a tapered glass capillary with end-window”, RADAM 2008 (Radiation Damage in Biomolecular Systems), Jun.13 (2008), Debrecen, Hungary.

- ⑰ 池田時造, 招待講演: ガラス細管によるナノサイズ集束イオンビーム生成法と生細胞中のオルガネラ標的への照射実験, 東邦大学物理学科コロキウム, 2008 年 5 月 21 日, 東邦大学.
- ⑱ Nagayasu Oshima, “Guiding of a slow positron beam with a glass capillary”, PPC-9 (9th International Workshop on Positron and Positronium Chemistry) May 5 (2008), Wuhan, China.

[その他]

ホームページ等

<http://www.riken.jp/ap/nanobeam/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

池田 時造 (IKEDA TOKIHIRO)

独立行政法人理化学研究所・山崎原子物理研究室・専任研究員
80301745

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

岩井 良夫 (YOSHIO IWAI)

独立行政法人理化学研究所・山崎原子物理研究室・協力研究員
00391871

小島 隆夫 (TAKAO M. KOJIMA)

独立行政法人理化学研究所・山崎原子物理研究室
前任研究員
90211896

金井 保之 (YASUYUKI KANAI)

独立行政法人理化学研究所・山崎原子物理研究室・前任研究員
00177487

山崎 泰規 (YASUNORI YAMAZAKI)

独立行政法人理化学研究所・山崎原子物理研究室・主任研究員
30114903

マイスル ウォルター (WALTER MEISSL)

独立行政法人理化学研究所・山崎原子物理研究室・訪問研究員
30548970

(4) 研究協力者

丸山 耕一 (KOUICHI MARUYAMA)

独立行政法人放射線医学総合研究所・放射線防護研究センター・主任研究員
70349033