

## DESIGN OF PENCIL BEAM FORMATION SYSTEM FOR HIGH-ACCURACY CARBON-ION MICROSURGERY

Kazuo Arakawa<sup>1A,B,C,D)</sup>, Masakazu Oikawa<sup>A,C)</sup>, Hirofumi Shimada<sup>A,C)</sup>, Tomihiro Kamiya<sup>A,B,C)</sup>,  
Takashi Nakano<sup>B,C,D)</sup>, Ken Yusa<sup>D)</sup>, Hiroyuki Katoh<sup>B)</sup>, Takahiro Satoh<sup>A)</sup>, Takashi Agematsu<sup>A)</sup>,  
Hirotsugu Kashiwagi<sup>A)</sup>, Mitsuhiro Fukuda<sup>E)</sup>, Takuro Sakai<sup>A)</sup>, Susumu Okumura<sup>A)</sup>,  
Satoshi Kurashima<sup>A)</sup>, Nobumasa Miyawaki<sup>A)</sup>, Yosuke Yuri<sup>A)</sup>, Yuichi Saito<sup>A)</sup>, Yasuyuki Ishii<sup>A)</sup>,  
Watalu Yokota<sup>A)</sup>, Shoji Kishi<sup>B)</sup>, Taku Satoh<sup>B)</sup>, Yasushi Horiuchi<sup>B)</sup>, Satoru Yamada<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> Takasaki Advanced Radiation Research Institute, Japan Atomic Energy Agency, Takasaki 370-1292, Japan

<sup>B)</sup> Graduate School of Medicine, Gunma University, Maebashi 371-8511, Japan

<sup>C)</sup> Gunma University 21st Century COE Program, Gunma University, Maebashi 371-8511, Japan

<sup>D)</sup> Gunma University Heavy Ion Medical Center, Maebashi 371-8511, Japan

<sup>E)</sup> Research Center for Nuclear Physics, Osaka University, Osaka 567-0047, Japan

### Abstract

Remarkable curative effects have been shown in the cancer treatment using high LET particles like carbon ions. Since heavy particles have unique characteristics of high energy transfer localized in the vicinity of almost straightforward tracks, they are suitable for the treatment of small tumors with the size of several millimeters or less. This research aims at developing an innovative microsurgery treatment system, using the carbon-ion pencil beam, for small lesions in the body, such as brain pituitary and spinal cord or vertebral tumors, vascular lesions such as AVM (arteriovenous malformation), and AMD (age-related macular degeneration).

A parallel beam, called a pencil beam, with a spot size of 0.1 to 5mm and very small divergence is required for the high-accuracy irradiation of the minute lesion part. The pencil beam transport system was studied and designed for carbon-ion microsurgery therapy. Homogeneous dose distribution in the lesion part will be obtained by precisely controlled spot scanning of the pencil beam. The AMD treatment system has studied using the carbon-ion pencil beam system.

## イオンマイクロサージェリー治療用ペンシルビーム形成システムの検討

### 1. はじめに

重粒子線（重イオンビーム）はX線やγ線など通常の放射線より生物作用が2~3倍強力であり、さらに、線量分布の集中性が良いことから、通常の放射線治療で治療困難ないわゆる放射線抵抗性の悪性腫瘍の治療に威力を発揮している。従来のブロードビーム照射法においては、加速器からのビームを散乱体により横方向に数cm~15cm四方の照射野を形成し、極めて優れた線量分布の平坦度±2.5%を実現している。また、深さの制御には飛程調整用のポラスやSOBP形成用のリッジフィルターを用いている。これらの装置は、全てビームを散乱させるため、照射野の切れを悪化させる原因となっている。一方、炭素線などの重粒子線は、体内での散乱がX線や陽子線に比べ少なく、シャープなエッジを作ることに適している。重粒子線のこの長を活かし、癌などの疾患部のみを精密に照射する、あるいは小

さな癌をピンポイントで狙い撃ちする新しい重粒子線治療照射法を検討した。本研究は、群馬大学21世紀COEプログラム「加速器テクノロジーによる医学・生物学研究」として実施した。

### 2. イオンマイクロサージェリー治療

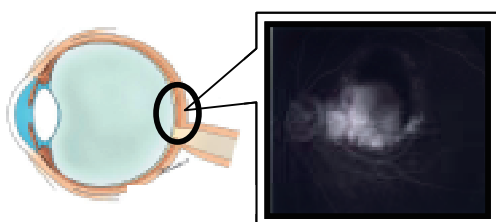
炭素イオン等が持つシャープなエッジを作ることに適しているという特性と、重粒子線を細く集束させるイオンマイクロビーム形成技術、及びマイクロビームによる描画機能を組み合わせることにより、新しい治療照射が可能となる。即ち、サブミリサイズの重粒子線を形成し、患部の形状に沿って緻密に走査照射することにより、シャープな照射領域を形成することができる。従って、サブミリサイズに集束したイオンビームを用いて、健全な組織や患部近傍の重要な臓器への不要な照射を避け、病巣を高精度でピンポイント照射することができれば、小さな早期癌の治療や脳疾患などに対して、より低侵襲性の治療が可能となる。このように重粒子線を用いて

<sup>1</sup> E-mail: arakawa.kazuo@jaea.go.jp

微小な病変部位を高精度で治療する技術は“イオンマイクロサージェリー治療”と呼ばれている<sup>[1]</sup>。

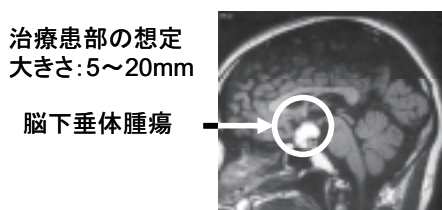
### 3. ペンシルビーム形成技術

本研究では、眼疾患である加齢黄斑変性症（以下黄斑変性症）と脳下垂体腫瘍（以下脳下垂体）の二つをイオンマイクロサージェリー治療の代表的な想定症例として検討した。黄斑は眼の網膜の中で視力に最も関わりが深く、色を識別する部分であり、この部分に新生血管が発生するのが黄斑変性症である。約40万人が罹患しており、高齢者の失明の原因の一つとなっている（図1の白い部分が新生血管からの出血の状態を示す眼底造影剤による蛍光画像）。脳下垂体は脳の下側の中心部に位置し、体のホルモン調節の中樞器官であり、腫瘍の発生によりホルモンのバランスが崩れ、様々な疾患を発症する（図2）。



加齢黄斑変性症

図1 加齢黄斑変性症の眼底カメラ画像



治療患部の想定  
大きさ: 5~20mm

脳下垂体腫瘍

図2 脳下垂体腫瘍

表1 医学的な要請に基づく基本仕様

	黄斑変性症	脳下垂体
飛程	24mm	115mm
照射領域	1mm X 1mm	30mm X 30mm
ビーム径	0.1~1.0mm	0.5~1.0mm
SOBP	-	30mm
飛程調整ステップ	0.05mm	0.25mm
全照射線量	20 GyE	21 GyE
想定照射回数	10回	3回

上記二つを対象症例とした場合のイオンマイクロサージェリー治療システムとして医学的要請に基づく基本仕様を表1に示す。

表1に示した仕様を満たす治療照射に必要な炭素イオンのエネルギー、粒子数（線量）、ビームエネルギーの広がり、エミッタンスの変化及び体内での散乱によるビームの広がり等についてGEANT4等のコードを用いて検討した。その結果、治療照射に適した炭素イオンエネルギーは黄斑変性症で96MeV/u、脳下垂体で235MeV/uである。散乱によるビームサイズのラテラル方向への広がりを考慮すると、黄斑変性症患部位置で0.15mmΦ以下、脳下垂体腫瘍位置で0.52mmΦ以下は実現できないが、患部の体積、必要照射点数（時間）等を考慮した患部位置でのビームサイズは1mmΦ前後が現実的と考えられる。また、規定線量に必要な1回の照射粒子数、1回の照射時間、ビーム遮断時間（加速器ビーム遮断時間+線量モニター測定時間+制御系反応応答時間）、及び検出が必要な最小粒子数を表2に示す。

表2 照射粒子数と照射時間

項目	黄斑変性症	脳下垂体
照射粒子数	3X10 <sup>4</sup> 個	8X10 <sup>5</sup> 個
照射時間	20 msec以上	1分~20分
ビーム遮断時間	0.2 msec	0.2 msec

以上の検討結果をふまえて、炭素イオンマイクロサージェリー治療システムの検討では、①ビームサイズの精密制御、②レンジシフターによるエネルギー幅の広がりの影響の低減、③レンジシフターで発生する2次放射線による患者への被曝低減、④深さ方向の照射位置のきめ細かな調整、をポイントとしてビーム光学計算を行なった。また、設計に当たっては、⑤垂直照射ラインであること、⑥普及小型重粒子線照射システムのビームラインにそのまま接続できる寸法であること、を考慮した。

加速器で加速した通常のイオンビームは発散角が大きいため、磁気レンズ等でビーム径を0.1mmのように細く集束させると、焦点面以外ではビームは広がる。一方、イオンマイクロサージェリー治療では、重粒子が到達する位置をある間隔で変えながら点状に照射して線量を積み重ねてゆくスポットスキニング照射が用いられる。従って、発散しないビーム（ペンシルビーム）を用いることができれば、患部への打ち込み深さが変わっても1次ビーム径はほぼ同じ、あるいは広がりを無視できれば散乱による影響のみを評価すれば良いため、立体的に均一な線量分布が得られ易い。そこで、本研究では、可能な限り平行ビームでサイズ0.1~1.0mmのペンシルビーム形成法を検討するとともに、同一システムで汎用スポットスキニング照射のためのビーム径~5.0mmまでの形成を検討した。

シンクロトロンから出射されたビームは、ビーム輸送系によりイオンマイクロサージェリー用のペンシルビーム形成・照射系に輸送される。ペンシル

ビーム形成・照射系は、シンクロトロンから供給されるビームのエネルギー変更とエミッタンス及び電流値の低減を行うビーム輸送系と、その下流に設置して、体内でのビーム幅の調整とSOBPの形成及びラテラル方向のビーム位置（飛程）の変更を行う照射系で構成する。

飛程調整のためのレンジシフターによるエミッタンスの大幅な変化は、ビームサイズを変えて輸送するときに問題となる。そこで、厚み0.1mmのタングステン散乱体とレンジシフターを組み合わせ、散乱したビームをコリメーター（スリット）システムによりエミッタンスを制限して用いる方法を採用した。

ペンシルビーム形成システムは、2組の可変コリメーターシステム、エネルギー分析が可能な2台の45° 偏向電磁石、及び3連四重極電磁石から構成されており、コリメーターシステムによりオブジェクトサイズと発散角が規定されたビームがアイソセクターにおいて1:1で結像するようなテレスコピックな系を構築した。TRANSPORTを用いてイオンビーム光学を計算した結果、ビーム径0.1mm～1.0mmのペンシルビーム形成とビーム径1.0～5.0mmの形成が可能な解が得られた。代表的なビームエンベロープを図3に示す。また、イオン光学計算結果から求めた各種四重極電磁石、レンジシフター、コリメーター、偏向電磁石、スキャニング電磁石等の必要数量とその配置を図4に示す。

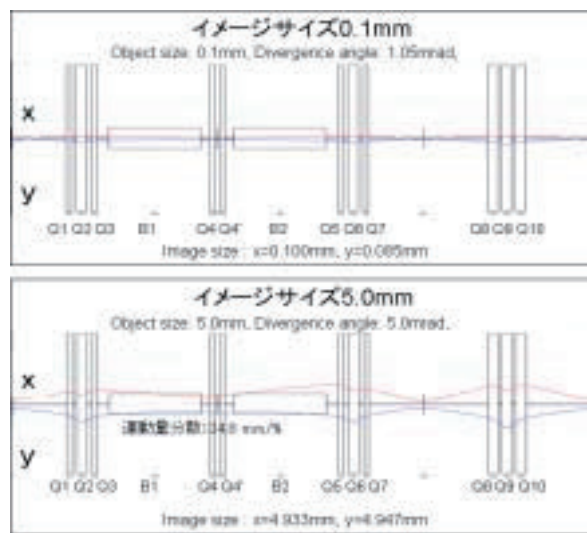


図3 ペンシルビーム形成時のビームエンベロープ (TRANSPORTコードを用いて計算)

### 3. 3次元照射・照準技術

立体的に複雑な形状をした数ミリメートルの患部に対し周囲にはみ出さずに精密に3次元照射するため、レンジシフター1とビームスキャニング電磁石 (SMX, SMY) の組み合わせによるディスクリット・

スポットスキャニング照射法を検討し、炭素イオン 235MeV/uを用いて水中10cmの深さで直径2cm球に照射した場合の線量分布のシミュレーションを行い、均一照射の可能性を明らかにした。

イオンマイクロサージェリー治療技術において、狭小・微細領域にある患部を正確に3次元精密照射するためには、従来よりも精密な照射位置決め法、即ち照準法の開発が必要不可欠である。加齢黄斑変性症に対する照射位置決め法として、眼底蛍光造影

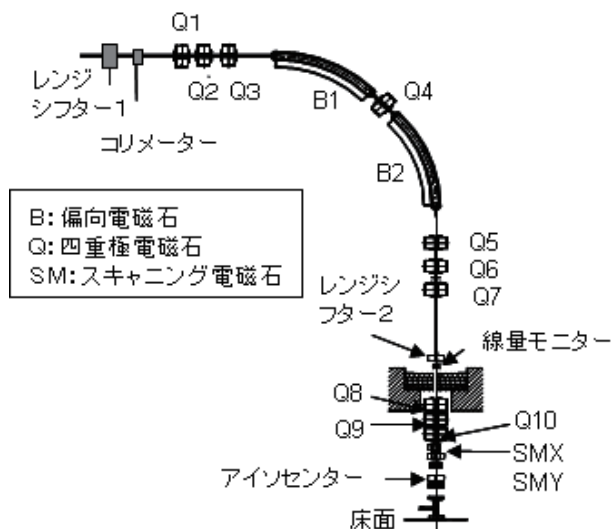


図4 システムの構成機器と配置

剤を用いて、眼底カメラにより患部位置を観察する方法を検討した。この方法は、飛程をレンジシフターで微調しながら重粒子線を照射することにより、患部に投与された眼底蛍光造影剤であるインドシアニンググリーン (ICG) 等からの発光画像を観測して照射位置を決めるというものである<sup>[2]</sup>。本研究では、眼底カメラを用いた照射位置決めシステムの検討と、220MeV及び320MeV炭素イオン用いたICGとフルオレセインの発光測定の基礎実験を行った。その結果、人体に投与した際のICGの血中濃度 ( $1.9 \times 10^{-2}$  mg/mL) における発光画像とフルオレセインからの発光スペクトルの取得に成功した<sup>[3]</sup>。

### 参考文献

- [1] T. Nakano, 1st Int. Symp. on Biomedical Research Using Accelerator Technology, 9 (2005).
- [2] 特許：PCT/JP2007/050347 島田、酒井、荒川、福田、及川、佐藤、上松、中野、遊佐、加藤、岸、佐藤、堀内。
- [3] 島田、及川、佐藤、奥村、神谷、荒川、加藤、佐藤、堀内、遊佐、岸、中野、第2回高崎量子応用研究シンポジウム要旨集111 (2007)。