

多目的実験用電磁石の試作と応用

川崎医療短期大学 放射線技術科 川崎医科大学 放射線医学教室*
川崎医科大学附属病院 中央放射線部**

松宮 昭 *今城 吉成 *平塚 純一 *山本美貴子 **沼口 健治
**長瀬 尚巳 **成廣 直正 西村 明久 西下 創一

(平成元年 8月28日受理)

Multipurpose Electromagnets: Experimental Constructions and Applications

Akira MATSUMIYA, Yoshinari IMAJO*, Junichi HIRATSUKA*,
Mikiko YAMAMOTO*, Kenji NUMAGUCHI**, Naomi NAGASE**,
Naomasa NARIHIRO**, Akihisa NISHIMURA and Souichi NISHISHITA

Department of Radiological Technology, Kawasaki College of Allied Health Professions

**Department of Radiation Oncology, Kawasaki Medical School*

***Department of Radiotherapy, Kawasaki Medical School Hospital*

Kurashiki, Okayama 701-01, Japan

(Received on Aug. 28, 1989)

Key words: 磁界, 電子偏向, 動物実験

概 要

放射線治療に用いられる高エネルギーX線および電子線の特性ならびに強磁界の生体におよぼす影響に関する研究などを目標に、3基の小形直流電磁石を試作した。このうち最も効率の良い磁石は、磁極断面積約20cm²、磁極間隙3cmを有し、磁束密度約0.4Tにて連続運転が可能であった。

これら電磁石の応用例として、電子線エネルギーの測定、電子線と制動放射X線との分離測定、光子線に混在する二次電子の除去に関する実験を試み、所期の目的を達成し得ることが確かめられた。更に実験動物に対する磁場印加に関する実験では、腫瘍細胞動態に新しい知見が得られ、本格的な研究を開始させることができた。試作電磁石の今後の活用が期待される。

1. はじめに

放射線治療に用いられる高エネルギー光子線および電子線に関する研究の一手段として、磁界を用いる方法がある。

光子ビーム中には常に二次電子が混在し、一方電子線には制動放射X線が含まれる。精密に吸収線量を評価するためにはこれらを分離測定する必要がある^{1,2,3,4,5,6)}。また磁界により偏向する電子の性質を利用して電子線のエネルギーを測定したり、線量分布を改善する研究も行われている^{7,8)}。

更に磁界を用いた新たな研究テーマとして、強

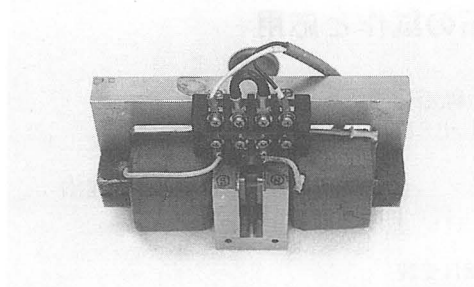
磁界の生体におよぼす影響に関する研究も興味深い^{9,10,11,12)}。医学の領域にMRIが普及しつつある現在、この分野の研究が十分に行われているとは言い難い。

上記のような研究を目標に著者らは多目的実験用電磁石の製作を試みた。試作電磁石の特性ならびに2, 3の応用例について述べる。

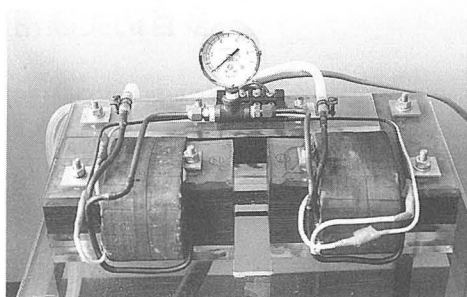
2. 電磁石の製作と特性

完成した3基の電磁石を写真1(a)(b)(c)に、励磁電流を供給する直流電源装置を(d)に示した。

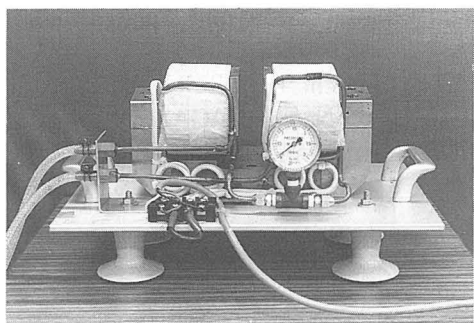
それぞれの電磁石の主要部と電源装置は共に



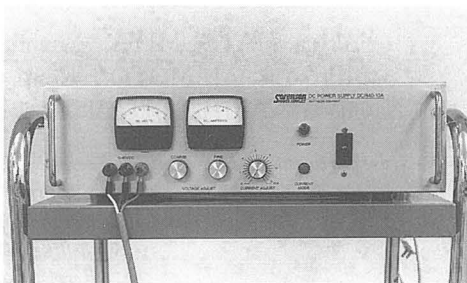
(a) ビーム偏向用小型マグネット (A型)



(c) 動物実験用マグネット (C型)



(b) 汎用可搬型マグネット (B型)



(d) 直流電源装置

写真1 試作マグネットの全景

直線加速器 (NEC NELAC1006D 型) に使用されていた部品を加工再利用した。

小型電磁石 (A 型と呼ぶ) は細い電子ビームを一定の磁界で偏向させ、その偏向角度からエネルギーを推定することを目的に設計した。完成した磁石は磁極断面が約 7.5cm^2 の類台形で磁極間隙 8mm を有し、直径 5mm のビームコリメーターを備えている。励磁コイルに冷却装置が装備されていないので長時間使用は望めないが、ビーム進路の写真分析に利用できると考えた。

汎用可搬型電磁石 (B 型と呼ぶ) は A 型よりも強力な励磁コイルを有し、更にコイルの発熱を防いで連続運転ができるように冷却装置を備えている。磁極断面は約 20cm^2 の類台形で磁極間隙は 3cm とした。光子ビーム中に含まれる二次電子の除去や、電子線と制動放射 X 線の分離測定など、吸収線量評価に関する実験に加え、磁極間に挿入可能な小動物実験にも応用できると考えた。なお B 型電磁石は、電源とセットにして台車に乗せ、目的の場所へ運べる構造とした。

動物実験用据置型電磁石 (C 型と呼ぶ) は将

来交流電磁石としての利用も考え積層形の鉄芯を用いた。磁極断面 $7.3 \times 7.3\text{cm}^2$ 、磁極間隙 3.5cm とし、励磁コイルには B 型と同一のタイプを用い連続運転ができるようにした。

直流電源装置は、電圧 $0 \sim 40\text{V}$ 、電流 $0 \sim 10\text{A}$ 可変式で、一対の励磁コイルへの接続は直列とした。放射線に関する実験を行う場合には、電源装置は照射室外へ置き遠隔操作で励磁電流を制御できるようにした。

電磁石 A 型、B 型、C 型それぞれの磁極中央における磁束密度はガウスメータ (横河製 3251) を用いて測定した。結果は図 1 に示すように、いずれも磁束密度は電源の容量により制限された。A 型、B 型の磁束密度は共に励磁電流にほぼ比例的に上昇し、上限は 0.4T を越えたが、C 型電磁石は磁極断面、磁極間隙が共に大きいので飽和の傾向を示し、上限は約 0.2T であった。

3. 電磁石の応用

1) 高エネルギー電子線のエネルギー測定

A 型電磁石を用い、電子線のエネルギー測定への可能性について検討した。

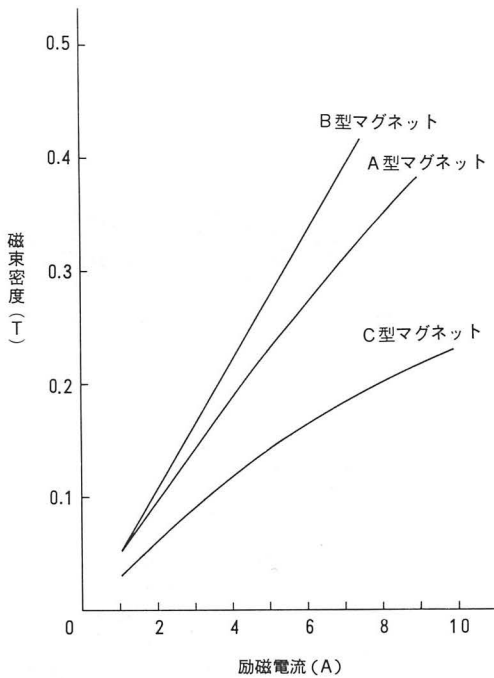


図1 試作電磁石の磁束密度

実験は図2および写真2(a)に示すように、直線加速器(三菱ML-15MDX型)からの電子線を水平方向から電磁石へ入射させ、偏向後の電子の進路を磁極間に垂直に挟んだフィルム(KODAK VX-II)に記録する方法をとった。

写真2(b)に結果の一例を示した。磁束密度0.23T、入射電子エネルギー(公称値)6 MeVおよび15MeVの場合である。水平方向に鮮明に伸びた制動放射X線を基準に、散乱によりやや不鮮明にはなるがエネルギーに応じて偏向角度の異なることが容易に観測される。既知エネルギーの電子線について偏向角度のcalibrationを行っておけば、電子線のエネルギー測定に用い得ることが確かめられた。

2) 高エネルギー電子線と制動放射X線の分離測定

直線加速器から得られる電子線には、かなりの制動放射X線が混入している。これは加速された電子が放射口から取出されるまでに主として真空窓、スキヤタリングフォイル、モニター電離箱、コリメーターを通過する際に発生すると考えられる。

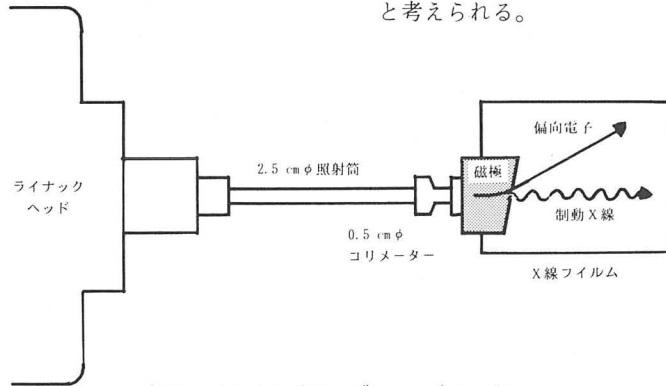
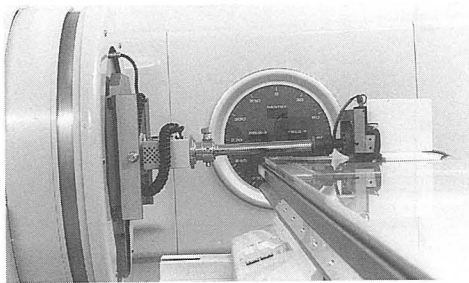
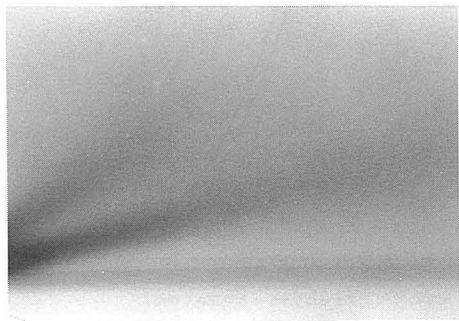


図2 電子偏向実験のブロックダイアグラム



(a) 実験の状況

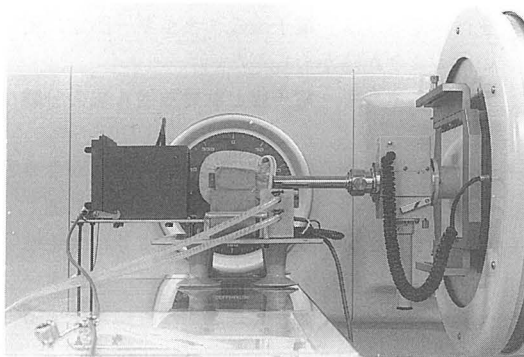


(b) フィルム黒化法によるエネルギー分析

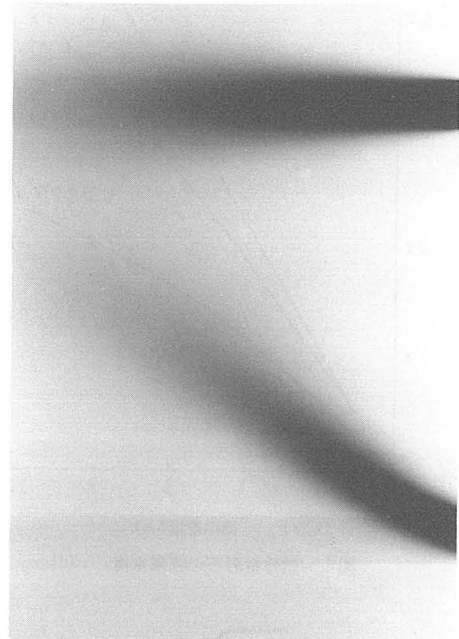
写真2 電子ビームの偏向実験

B型電磁石を用い写真3(a)に示すような配置で電子線と制動放射X線の分離測定を試みた。エネルギー 12MeVの電子線を2.5cmφの腔内照射筒を用いて照射，磁極間隙を介して照射筒先端より10cmの距離にファントムを置いた。深部電離量の測定にはシャローチェンバー(Duplex 0.1cc)を使用し，13×13×10cm³の亚克力板積層形ファントムを用いた。測定に先立ち，電子線と制動放射X線の分離状況をフィルムで確認した(図2参照)。写真3(b)上は磁界ゼロ

の場合を示し，電子と制動放射X線が重なり合っているが，下は0.28Tの磁界を印加した場合である。黒化度の濃い飛跡が電子線，薄く直

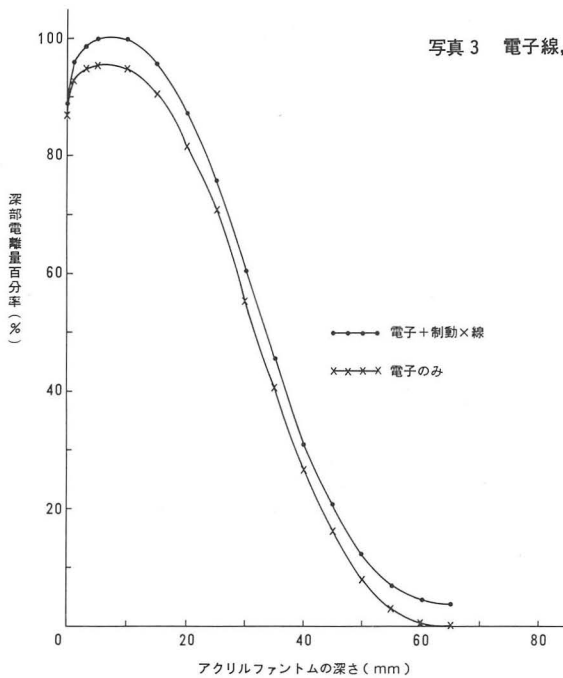


(a) 実験の配置

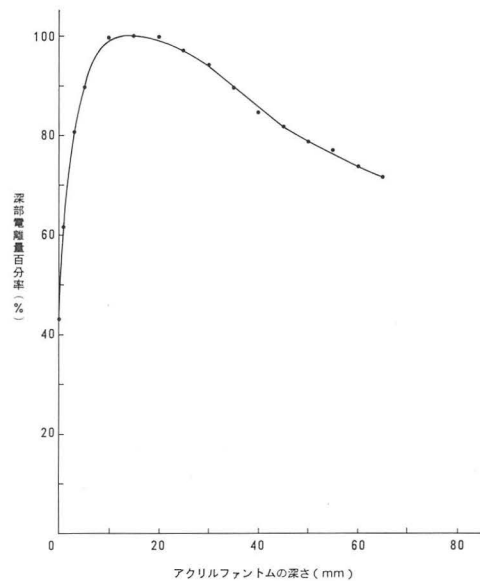


(b) フィルム黒化法による分離の状況

写真3 電子線，制動放射X線の分離測定



(a) 電子線の深部電離量曲線



(b) 制動放射X線の深部電離量曲線

図3 12MeV電子線の深部線量

進んでいる飛跡が制動放射X線である。完全に分離されている様子が確認できた。

ファントム測定は同条件下にて、磁界ゼロの場合および制動放射X線のみの場合について行った。極性効果は無視した。図3(a)は電子線に関する測定結果である。磁界を印加しなかった場合の深部電離量曲線に加え、制動放射X線を差し引いた電子のみのカーブを示した。表面近傍を除いて、ほぼ全域にわたり約5%低い値を示した。図3(b)は制動放射X線のみでの深部電離量曲線である。表面線量約40%、ピーク深約1cm、80%の深さ約5cmであった。これを深部量百分率の標準データ¹³⁾と比較すると、約4~5MVX線相当と思われた。

3) 光子線に混在する二次電子の除去

⁶⁰Co照射装置からのγ線や直線加速器からの高エネルギーX線には、絞り機構や照射線錐内に含まれる空気により発生した二次電子が混入している。

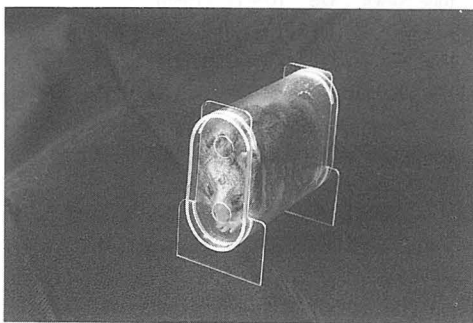
前記、電子線と制動放射X線の分離測定の場合と同様の配置で二次電子除去の実験を試みた。

測定は⁶⁰Coγ線および6MV X線について、SSD100cm、照射野4×4cm²、電磁石は絞り装置の直下に置いて、ビルドアップ前後の深部率を求めた。結果はまとめて表1に示した。表面における二次電子の割合は、⁶⁰Coγ線で約1%、6MV X線で約6%であった。また二次電子の影響がおよぶ深さは⁶⁰Coγ線では2mm程度、6MVX線では約13mmと思われた。二次電子の量は照射野に依存するが、磁極間隙に制約され広い照射野をとることができず、明確な結果を得ることは困難であった。

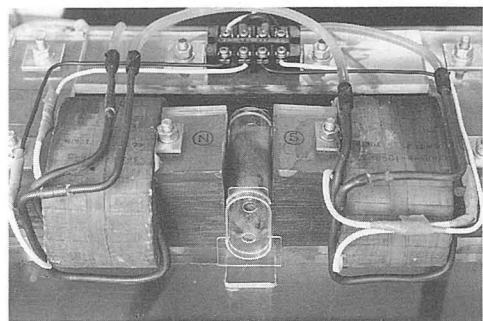
4) 動物実験
強磁界が生体におよぼす影響を調べる一実験として動物実験を試みた。
C型電磁石を用い、ハムスターを写真4(a)に示すような専用の容器を製作して保定し、磁極間に挿入した(写真4(b))。この状態で磁束密度0.2T、3時間連続で磁場を印加した。今回の実験に供したハムスターには、側腹に直径約

表1 表面近傍の線量におよぼす二次電子の影響 (SSD100cm, FS 4×4cm²)

⁶⁰ Co γ線			6MV X線		
深さ	0T	0.2T	深さ	0T	0.2T
(mm)	(%)	(%)	(mm)	(%)	(%)
0	17.5	17.3	0	8.5	8.0
1	71.3	71.1	1	43.1	42.5
2	89.3	89.1	3	69.7	69.1
3	99.3	99.3	5	82.3	81.8
4	100.0	99.9	7	89.6	88.9
5	99.0	99.8	9	95.5	95.0
6	99.8	99.8	11	98.0	97.9
7	99.5	99.4	13	100.0	99.8
8	99.3	99.2	15	99.1	99.1
9	97.7	97.6	17	97.9	97.8
10	97.0	96.9	19	97.6	97.6



(a) 動物の保定容器



(b) 磁界印加の状況

写真4 動物実験

1cm の腫瘍が移植されており、磁場印加後屠殺し腫瘍細胞の動態が分析された。その結果細胞周期内分布に影響のあることが見出された。本研究に関する詳細は、共同研究者の今城らの報告に委ねる。¹²⁾

4. 考察およびまとめ

荷電粒子線が磁界により偏向する性質は古くから知られており、 α 線、 β 線、 γ 線の基本的特性を説明する上で初学者向き教科書等で馴染み深い。しかしその割には放射線医学教育、研究の場で実際に磁石が用いられることは稀である。

現在、放射線治療装置の主力は加速器であり、高エネルギー化の傾向にある。高エネルギーX線にはエネルギーの高い二次電子が混入し、一方電子線ではエネルギーの上昇とともに混入する制動放射X線の割合が増す。磁界を用いてこれらを分離するためにはかなり強力な磁石が必要となる。

一方、画像診断の領域にMRI（磁気共鳴映像法）が出現し、急速に普及しつつある。その理由の一つに、磁気は放射線に懸念されるような人体に対する障害がないとされていることが挙げられる。しかし強力な磁場が生体におよぼす影響をより深く追究する必要があると考えられる。

筆者はかねてより上記のような目的の実験に供し得る電磁石の製作を試みてきた。折しも川崎医大付属病院で直線加速器の更新があり、これを機に古い装置に装備されていたビーム偏向系部品の再利用を計画した。加工にかなりの労力と時間を費したが三基の試作品を完成させることができた。最も効率の良いB型電磁石では、磁束密度0.42Tで連続運転が可能であった。

ビームの偏向に関する実験では、現在付属病院に設置されている直線加速器の最高エネルギー15MeV電子ビームを、制動放射X線と完全に分離して測定できることが確められた。

更に動物実験への応用ではすでに腫瘍細胞の動態に関し、本格的な実験をスタートさせることができた。

試作電磁石は磁極断面積、磁極間距離、磁束密度共に十分とは言えないまでも、磁界を応用した研究に有効であると考えられた。今後の活

用が期待される。

付 記

本研究の一部は放射線技術科3学年に対する放射線治療技術学特論（卒業研究）の一環として行われた。

参考文献

- 1) B Nordell, A Brahme: Anguler distribution and yield from bremsstrahlung targets. *Phys. Med. Biol.*, **29**(7), 797~810 (1984)
- 2) Bo Nilsson: Electron contamination from different materials in high energy photon beams. *Phys. Med. Biol.*, **30**(2), 139~151 (1985)
- 3) P. D. Higgins, C. H. Sibata, B. R. Paliwal: Determination of contamination-free build-up for ^{60}Co . *Phys. Med. Biol.*, **30**(2), 153~162 (1985)
- 4) S. N. Rustgi, J. E. Rodgers: Improvement in the build-up characteristics of a 10MV photon beam with electron filters. *Phys. Med. Biol.*, **30**(6), 597~601 (1985)
- 5) E. D. Yorke, C. C. Ling, S. Rustgi: Air-generated electron contamination of 4 and 10 MV photon beams: a comparison of theory and experiment. *Phys. Med. Biol.*, **30**(12), 1305~1314 (1985)
- 6) ICRU Report 35, Radiation Dosimetry: Electron Beams with Energies Between 1 and 50 MeV (1984)
- 7) 松宮昭, 木村修治, 石田哲哉, 近藤健爾, 山中勝義: 高エネルギー電子線拡散振子照射法, 兵庫県立病院がんセンター紀要, **8**, 35~39 (1975)
- 8) B. R. Paliwal, B. R. Thomadsen, A. L. Wiley Jr: Magnetic modification of electron beam dose distributions. *Acta Radiol. Oncol.*, **18**(1) 57~64 (1979)
- 9) 岩崎民子: 磁気は体に影響をおよぼすか, *Isootope News*, **376**, 10~11 (1985)
- 10) 石垣武男, 岩崎民子: 非電離放射線の障害, *Isootope News*, **410**, 2~7 (1988)
- 11) V. K. Sud, G. S. Sekhon: Blood flow through the human arterial system in the presence of a steady magnetic field. *Phys. Med. Biol.*, **34**(7), 795~805 (1989)
- 12) 今城吉成, 平塚純一, 松宮昭, 山本美貴子, 西下創一: 強磁場が移植腫瘍細胞動態に及ぼす影響, *日本癌治療学会誌*, **24**(6), 1261~1265 (1989)
- 13) 日医放射線部会編: 吸収線量の標準測定法, (1986)