〔第47回総会シンポジウム—全身照射法の技術的諸問題—〕

3. 寝台移動法について

津 田 政 行

東海大学病院

Key words: TBI, Moving Couch

TECHNICAL PROBLEMS OF TBI IN CASE OF THE MOVING COUCH METHOD

MASAYUKI TSUDA

Tokai University Hospital

Summary

In Tokai University Hospital ever since 1982, TBI for bone marrow transplantation has been performed by the moving couch method. In this method, the patient is irradiated from the opposite direction of A-P and P-A in a comfortable supaine position as is.

This technique has been well studied and greatly improved. For example, the moving speed of the couch is automatically varied depending on the dose rate deviation of the electron linear accelerator, function having variable speed with the dose rate (VSDR). Another function in variable speed with division (VSDV). In addition it has a self-recording function for the actual condition for the dose and couch movement.

In such small areas as the eyes and gonad, the shielding effect cannot be effectively used. For the lungs, but it is able to shield and compensate to a sufficient extent.

It applied to actual treatment resulting from data obtained from the measurements using a phantom. During the irradiation we must check the reproducibility of the systems which are dose rate, couch position, and so on. This is one reasonable concept of the dose monitor.

1. はじめに

限られた大きさの絞り装置からより広い照射野を得るため、照射中に寝台を平行移動しながら全身をカバーする寝台移動法 TBI の主な長所は、ボラスやフィルタなどによる線量補償および遮蔽ブロックが容易に使えること、さらには患者の体位に無理がないこと、があげられる。

1982年3月から東海大学病院においてははじめられた BMT のための TBI の前提条件は、後者の長所を十分に生かすために、A-P および P-A 方向の照射を可能にすることであった。このことは、移動寝台の設計に何らか

の工夫が必要なことを意味する。もう一つの大前提は、放射線治療装置として電子加速器への依存度が増す傾向にあった当時の状況から、出力線量率の変動に対する不安を押して加速器への応用を進める、ということであった。

爾来いくつかの技術的問題を解決しながら今日に至る。この報告はこうした経緯を述べ、これから TBI の方法を検討する場合の一助になろうとするものである。

2. 移動寝台

(1) 1982年型

最初に製作した移動寝台は種々の制約から、H型アル

ミニウム材フレームとし、それに塩化ビニール板を張った簡便なものとなった。幅45 cm、長さ330 cmで、速度は約180 cm/minである。

駆動方法は、標準治療台の天板を抜いて移動寝台と入れ替え、繰り出す方式である。ギヤを使わないために、アルミの摩耗や損傷・圧力歪み・たわみなどによって定速が損なわれる。そのためフレームを受ける支えを必要とした。

(2) 1983年型

1983年5月から使い始めた寝台は、天板をはずして治療台上に固定する方式をとった。幅50 cm、長さ300 cm、ストローク220 cm、速度は100~230 cm/min連続可変で、照射中は定速とした^{1,2)}。

ステンレス鋼のラックギヤ付フレームは、取付枠から送り出される機構にした。寝台取付枠には駆動モータがあり、ギヤボックスを介してピニオンギヤがラックギヤと噛み合うようにした。

(3) 1990年型

長い間の使用で、たわみを生じて定速性が保証できなくなった83年型は、加速器の更新を機に、寝台の拡張とストロークの延長などをも改善する目的で検討した。このためには、旧型の総重量約100 kgを越えてしまうことが予測され、もはや人力で持ち上げて乗せ替えできる限度を越えると思われたために、二本のポストで支持されたキャスト付の移動設置型とした。

1990年7月から使用しているこの移動寝台は、幅60 cm、長さ220 cm、ストローク240 cmである。最大外寸は幅83 cm、長さ360 cm、ポストの高さが155 cmである。また、移動速度は50~200 cm/cmの連続可変である。

3. 定速モニタ

全身に均等に照射するための装置側の条件は、移動寝台の速度と出力線量率とを一定に保つことである。

まず82年型では、寝台フレーム側縁にマグネット片を10 cm間隔で貼り付け、床置きスタンド型の磁気検出器付きの患者監視装置で信号を操作室に送り、XYレコーダに記録した。この磁気信号間隔の等しいことにより、定速での移動を確認した。

83年型では、駆動部のギヤボックスに付けられたポテンショメータの信号をXYレコーダに送るようにした。

90年型では、線量率対応変速機能を設けたことから定速移動の意義が薄れたので、CRT画面に寝台位置の数字を表示するようにした。

4. 出力線量率

加速器を用いての寝台移動法で、最大の弱点は出力線量率の変動に起因するものである。

われわれの施設における1982年から1991年4月までのBMTのためのTBIおよびTAIは110例である。加速器の更新時にコバルト60による左右対向のlong SAD法で行った例、標準寝台による前後対向固定照射法の例、これらの合計21例を除いた89例に移動寝台を使った。その移動回数はおよそ7000回にもなり、照射前にいかに綿密なビーム調整をしても線量率の変動に遭遇することは明らかである。

82, 83年型ともに、加速器のコントロール部にある線量モニタ回路からの信号をXYレコーダに入力して、前述の定速モニタと同時に記録していた。

90年型では、CRT画面にリアルタイムで表示されるばかりでなく、加速器側の制御を越えて線量率変動した場合、TBIコントロールボックスの演算回路から速度信号にフィードバックされ、線量率が下がった時には速度が遅くなり、上がった時には速くなって、常に一定線量が照射される。これが線量率対応変速機能である。

5. 遮蔽ブロック

照射野の中をブロックが移動することになる寝台移動法では、照射野の大きさやブロックの厚さによって、ブロック辺縁の遮蔽効率やブロック周辺の線量減少の程度が異なる。比較的大きい照射野での線量分布の面積比に関する報告はすでに行っている³⁾、ここでは照射野・ブロック厚・ファントム中の深さの違いについて相対的に見る。

Fig. 1に示したように、厚さ18 cmのファントム(Tough Water)のそれぞれ3, 8, 13 cm深さにフィルム(Kodak XV2)を挟み、ファントム上3.5 cmのアクリル製シャドウトレイに直径8 cmの低融点合金製ブロックを載せ、往復した。X線エネルギーは18 MV、

Fig. 1 Experimental arrangement for shielding effect profiles in phantom.

SSD121 cm, 移動方向に対する直角方向の絞りは52 cmである。

Fig. 2 はブロック厚 4 cm の場合のサクラ PDI-10 によって得られた等線量曲線で、図の上列から深さがそれぞれ 3, 8, 13 cm である。移動方向の絞りは、右側が 5 cm 左側が 30 cm の場合のものである。同じフィルムサンプルの濃度を移動方向とその直角方向とについて XY レコーダに描かせ、重ね合わせた（内側が移動方向、外側が直角方向の濃度）のが Fig. 3 である。

Fig. 4 にブロック厚 8 cm の場合の濃度曲線を示した。

これらの図からわかるように、照射野が狭いほど、そして浅い所ほどブロックの原型に近い遮蔽ができることを示しており、ブロックの厚さにはあまり依存しないことがわかる。

ブロックの厚さはX線の透過率を左右する。Fig. 5 は、直径 8 cm の低融点合金の18 MV X線による移動照射の場合の透過率を、AE132 線量計（応用技研）で測定した結果である。電離箱(C-110 0.6 ml)はファントム中 3 cm 深に設定し、照射野は $52 \times 13 \text{ cm}^2$ である。

遮蔽の対象となる部位は眼球・肺・生殖腺等であるが、

Fig. 2 Isodose curves of shielding for the $52 \times 30 \text{ cm}^2$ and $52 \times 5 \text{ cm}^2$ field in a plane perpendicular to the central axis at the depth of 3, 8 and 13 cm for SSD 121 cm.

Fig. 3 Film density variation with 4 cm thickness shielding as the same films in Fig. 2. Inner curves in the parallel direction to the couch translation and outers at right angles.

Fig. 4 Film density variation with 8 cm thickness shielding.

Fig. 5 Transmission curves for the low melting alloy of 8 cm in diameter for a $52 \times 13 \text{ cm}^2$ field size.

このうち事実上‘遮蔽’の可能な所は肺である。Fig. 2, 3, 4 で見たように、ブロック辺縁に遮蔽率の低い所があるため、特に遮蔽面積の小さな眼球や生殖腺では、周辺領域へのブロックの影響による線量低下域を覚悟した線量低減を目的とする不完全な遮蔽を考えるしかない。

肺でも線量低減を目的とした場合には、Fig. 5 のデータを利用し、ブロック厚を適当に選べば良い。

肺の形状は複雑であるが、シミュレータによる平面写真を基に発泡スチロールをくり抜き、低融点合金を流し込んで等厚ブロックを作っている。Fig. 6 は実際の肺ブロックにおける等線量曲線である。大きい照射野では、ブロック辺縁の低線量域が肺野の薄い部分と一致している。

Fig. 6 An example of the isodose curve for lung shielding.

このように、眼球や生殖腺の遮蔽には照射野を小さくし、肺の遮蔽には大きくするのが良いということになる。実際的には Fig. 7 に示したように、照射野と線量との関係も知らなければならない。移動回数、出力線量率、照射線量をも考慮して照射野を決定することになる。

6. 線量補償の方法

Fig. 7 Relative dose is as a function of field length. Field width is fixed at 52 cm.

Fig. 8 Relation to the MU/cm and couch motor signal, compared with the dose rate curve.

鉛板や低融点合金を補償フィルタとして使うほか、ポリエチレンビーズや KI ゲルをポーラス材として用いていたが、最近われわれは脂肪組織に近い高分子化合物といわれ、ソアレスマットとして市販されている液泡ゲルを常用している。

90年型寝台では、移動寝台速度を MU/cm の値で規定している。この値を任意の区間ごとに異なった値に設定すると、それぞれの区間ごとに照射線量が変わることになる。これが区間対応変速機能で、患者の部位に応じた線量の加減を可能にする。この方式は先に述べた線量率対応変速機能の実現によって初めて可能になるものであ

る。

区間対応変速機能の例を Fig. 8 に示す。100 cm 移動の間を三区間に分け、それぞれ 3.50, 3.04 MU/cm を設定し、その時の駆動モータの出力電圧を XY レコーダに記録したものである。MU/cm が多いと電圧が低く、速さが遅いことを示している。

Fig. 9 は、平坦なファントムの 3.5 cm 深さにフィルムを挟み、ファントム中心と移動方向絞り 10 cm の中心とが一致した所で、MU/cm を 2.75 から 3.50 cm に変わるように設定した場合の濃度曲線である。照射野 10 cm とほぼ同じ範囲で濃度の傾斜が認められる。このことは、適当な照射野を選ぶことによって、下肢の線量補償が可能であることを示している。

Fig. 10 は極端にファントムの厚さが変化する場合の例で、8 cm の厚さを補償し得る 3.5 MU/cm と 3.07 MU/cm で動かすと、厚いほうに低濃度、薄いほうに高濃度の部分が見られる。したがって、下顎から頸部にかかる領域に適用することはできそうにない。

Fig. 9 Film irradiated to 18 MV for a 52×10 cm² field. MU/cm exchanged from 2.75 to 3.50 at phantom center.

Fig. 10 Film irradiated to 18 MV for a 52×10 cm² field in phantom with step. MU/cm exchanged from 3.50 to 3.07 at phantom center.

7. 線 量 率

寝台移動法における線量率の問題は、瞬間線量率と平均線量率とに分けられる。日常行われている一般的な照射法における線量率は、照射された線量を照射時間で除して得られる。しかし寝台移動法では照射目的領域の一部分だけが照射野に含まれ、時々刻々と移動して行く。このような間欠照射の照射時間で線量を除した値が平均線量率で、この値が小さくともある一点を照射野が通過する際に受ける瞬間線量率は大きい。

線量率に関する報告はすでにあるが²⁾、寝台移動法と同じように間欠照射である sweeping beam method の論文は、22例の臨床データ⁵⁾とマウスによる実験結果⁶⁾でも、間欠照射と連続照射との間に有意の差がなかったことを報告している。寝台移動法での実験結果も同じであった⁷⁾。このことからわれわれは、初期の頃 A-P, P-A 各方向当りの移動回数が 8 回で約 20 cGy/min で行っていたが、徐々に上げて現在では 4 回移動で約 200 cGy/min である。

8. 線量モニタ

腔内照射における線量モニタは、過剰照射を警戒することにあるが、TBI でのモニタは均等照射の指標を得るためのものであると考える。どの程度の不均等照射でどのような影響があるかは不明であるから、一般的には $\pm 5\%$ の線量範囲が目標とされている。このような状況からして、線量モニタのために患者に対して新たな苦痛を強いるような測定方法は避けるべきである。TLD や電離箱による体外測定を、何らかの新しい照射条件や状況が生じた場合の確認として適用することで良い。その前提として必要なことは、シミュレーションの際のファントムによる測定と、その時の装置側の条件が常時再現できるようにすること、さらにそれらを記録することである。

このような観点から 90 年型の移動寝台システムでは、従来のシミュレーションの記録や出力線量率の記録のほか、寝台の始点と終点およびそれらの時刻、その間の MU 値、照射時間、MU/min 等々を一移動ごとに記録し、その平均値も自動的にプリントアウトされるようにした。

近年 portal imaging system の開発が盛んであるが、これらは照射野モニタが主流であるけれども、線量モニタとしての可能性もある。特に寝台移動法の場合には透過線量システムを考えると、このシステムに似たような形になるだろう。

9. おわりに

これまで報告されている寝台移動法は⁸⁻¹¹⁾すべてガントリを回転させないで、患者を背臥位から腹臥位にしている。患者の苦痛、遮蔽ブロック、線量補償の諸観点から見て、移動法の利点を十分に生かしきれていない。背臥位のままでA-PとP-Aの照射が可能な方法をとるべきである。

電子加速器を用いた寝台移動法は今後徐々に普及するものと思われるが、線量率対応変速機能は備える必要がある。

区間対応変速機能は他にも報告があるが¹⁰⁾、適用に限界があると思われる。またこの方式は線量率対応変速機能が実現して初めて可能である。

綿密な線量測定と装置側の再現性を確保し、それを記録することで確実な治療を目指しているが、線量モニタシステムの開発は今後の課題として残る。

10. 謝 辞

この報告の移動寝台システムは終始日本電気(株)医療機器事業部の方々を初め、東海大学医学部母里知之教授との議論の結晶として生まれ、変遷してきたものであり、この間当院放射線治療科に所属した診療放射線技師諸君の実験・臨床経験を反映して達成されたものであることを付記し、感謝の意を表する。

引用文献

- 1) 安藤富士夫, 母里知之, 津田政行, 他: 骨髓移植のための前処置としての新しい全身照射法. 臨床放射線, **29**, 327-330, (1984).
- 2) Mori T, Ohizumi Y, Maezawa H, et al: Total Body Irradiation as a Method of Preparation for

Bone Marrow Transplantation. Jpn. J. Clin. Oncol., **14**(Suppl. 1), 457-464, (1984).

- 3) 安藤富士夫, 菅義雄, 長谷一広, 他: 寝台移動法による全身照射における遮蔽技術. 日放技学総会予稿, **42**, 422, (1986).
- 4) 安藤富士夫, 坂口 薫, 長谷一広, 他: 寝台移動法による全身照射における遮蔽技術. 日放技学秋季大会抄録, **43**, 545, (1987).
- 5) Kim TH, Rybka WB, Lehnert S, et al: Interstitial Pneumonitis following Total Body Irradiation for Bone Marrow Transplantation using two Different Dose Rates. Int. J. Rad. Oncol. Biol. Phys., **11**, 1285-1291, (1985).
- 6) Lehnert S: Response of the Lung to Intermittent Irradiation. Int. J. Rad. Oncol. Biol. Phys., **11**, 2183-2184, (1985).
- 7) Maezawa H, Ohizumi Y, Tamai Y, et al: Survival of Mice and Hematopoietic Stem Cells in Bone Marrow after Intermittent Total Body Irradiation. Rad. Med., **5**, 215-219, (1987).
- 8) Cunningham JR, Wright DJ: A Simple Facility for Whole-Body Irradiation. Radiology, **78**, 941-949, (1962).
- 9) Quast U, Glaeser L, Bormann U: Physical Aspects of Total Body Irradiation in Essen. J. Eur. Radiother., **3**, 208-210, (1982).
- 10) 中明鉄朗, 藤田勝久: 移動寝台を用いた全身照射法の検討. 日放技学秋季大会抄録, **46**, 179, (1990).
- 11) 久保田博, 小山一郎: 移動ベットによる全身照射法. 日放技学秋季大会抄録, **46**, 180, (1990).