



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2008 023 350 A1 2008.11.20**

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2008 023 350.1**

(22) Anmeldetag: **13.05.2008**

(43) Offenlegungstag: **20.11.2008**

(51) Int Cl.⁸: **A61N 5/10 (2006.01)**

(30) Unionspriorität:

2007-127645 14.05.2007 JP

(71) Anmelder:

Hitachi, Ltd., Tokyo, JP

(74) Vertreter:

Strehl, Schübel-Hopf & Partner, 80538 München

(72) Erfinder:

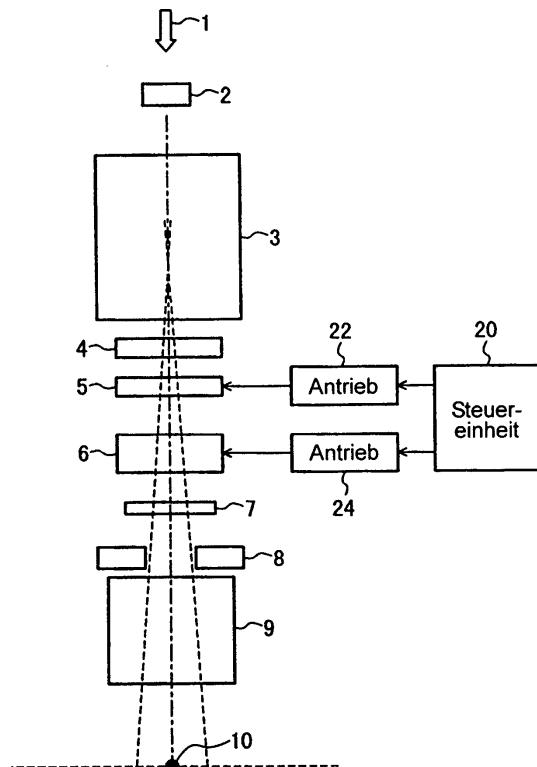
Okazaki, Takashi, Tokyo, JP; Fujimaki, Hisataka, Tokyo, JP; Fujitaka, Shinichiro, Tokyo, JP; Fujimoto, Rintaro, Tokyo, JP; Fujii, Yusuke, Tokyo, JP; Hiramoto, Kazuo, Tokyo, JP

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Teilchenbestrahlungsvorrichtung, Teilchenbestrahlungsverfahren und Teilchenstrahlbehandlungssystem**

(57) Zusammenfassung: Eine Teilchenbestrahlungsvorrichtung und ein Teilchenbestrahlungsverfahren ermöglichen das Bilden eines SOBP mit einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite, basierend auf einem Verfahren der Überlagerung von SOBPs, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, um einen gewünschten SOBP zu bilden. Ein Energieverteilungsabschnitt 5 umfasst eine erste Energieverteilungsvorrichtung, die einen ersten SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite bildet, und eine zweite Energieverteilungsvorrichtung, die einen zweiten SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite und einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung am von der Körperoberfläche aus tiefsten Abschnitt bildet, wobei der Energieverteilungsabschnitt 5 die folgenden Schritte durchführt: Bestrahlen des Zielbereichs mit einem Teilchenstrahl durch Verwendung der zweiten Energieverteilungsvorrichtung zum Bilden eines SOBPs mit einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung am von der Körperoberfläche aus tiefsten Abschnitt des Zielbereichs, Bestrahlen des Bereichs vom zweitiefsten Abschnitt bis zum flachsten Zielbereich auf der Körperoberflächenseite mit dem Teilchenstrahl durch mehrmalige Verwendung der ersten Energieverteilungsvorrichtung zum Bilden von SOBPs, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, und Überlagern der gebildeten SOBPs, um einen SOBP mit einer für den Zielbereich geeigneten Länge zu bilden.



Beschreibung

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

1. Gebiet der Erfindung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf eine Teilchenbestrahlungsvorrichtung, ein Teilchenbestrahlungsverfahren und ein Teilchenstrahlbehandlungssystem. Insbesondere bezieht sich die vorliegende Erfindung auf eine Teilchenbestrahlungsvorrichtung, ein Teilchenbestrahlungsverfahren und ein Teilchenstrahlbehandlungssystem, die geeignet sind, durch Verwendung eines Kantenfilters einen Hochdosisbereich in einer Dosisverteilung zu bilden.

2. Beschreibung des Stands der Technik

[0002] Ein Teilchenstrahlbehandlungssystem, zum Beispiel ein Protonenstrahlbehandlungssystem, ist eine der wirksamen Einrichtungen für die Tumorthherapie, und es wird erwartet, dass es künftig in stärkerem Maße eingesetzt wird. Bei der Protonenstrahlbehandlung muss die Dosisverteilung in einem betroffenen Körperteil des Patienten (Zielbereich) auf einen gleichmäßigen oder einen vorbestimmten Zustand gesteuert werden.

[0003] Zu den Verfahren zur Steuerung der Dosisverteilung auf einen gleichmäßigen Zustand usw. gehören unter anderem die Verwendung einer Streueinrichtung zum Aufweiten eines Protonenstrahls auf einer zur Laufrichtung des Protonenstrahls senkrechten Ebene (Bestrahlungsfeld) oder die Verwendung eines Strahls mit einem kleinen Protonenstrahlradius zum Abtasten des Bestrahlungsfelds.

[0004] Die Dosisverteilung in der Laufrichtung des Protonenstrahls (Tiefenrichtung) wird gebildet, indem die Eigenschaft des Protonenstrahls, dass er den größten Teil seiner Energie unmittelbar vor dem Stoppen abgibt, um eine als Bragg-Kurve bezeichnete Dosisverteilung zu bilden, sowie die Eigenschaft genutzt werden, dass die Tiefenposition eines Bragg-Peaks (ein Peak der Bragg-Kurve) durch die Größenordnung der in den Körper eingebrachten Energie des Protonenstrahls gesteuert werden kann. In diesem Fall wird die Energie des Protonenstrahls entsprechend gewählt, und der Protonenstrahl wird in der Nähe des betroffenen Körperteils gestoppt, wodurch der größte Teil der Energie auf die Krebszellen an dem betroffenen Körperteil einwirkt. Hierbei beträgt die Breite des Bragg-Peaks in Tiefenrichtung mehrere Millimeter. Typischerweise weist der betroffene Körperteil in Tiefenrichtung eine größere Dicke als der Bragg-Peak auf. Um den gesamten Abschnitt eines solchen betroffenen Körperteils in der Tiefenrichtung mit einem Teilchenstrahl effektiv zu bestrahlen, müssen die Energie und Bestrahlungsdosis des Protonenstrahls entsprechend gesteuert werden, um

einen Hochdosisbereich mit einer sehr gleichmäßigen Ausbreitung in Tiefenrichtung und der Größe des betroffenen Körperteils zu bilden („Spread Out Bragg Peak“, nachstehend als SOBP bezeichnet). Zum Bilden einer Dosisverteilung in der Laufrichtung (Tiefenrichtung) des Protonenstrahls wird ein Verfahren mit einem Kantenfilter oder einem Reichweitenmodulationsrad (RMW) oder ein Verfahren zur Änderung der Art der Strahlenenergie von einem Beschleuniger verwendet, um einen SOBP zu bilden (siehe zum Beispiel W. T. Chu, B. A. Ludewigt und T. R. Renner, Rev. Sci. Instrum. 64, 2055–2122, 1993).

[0005] Bei der Bildung eines SOBPs ermöglichen Kantenfilter und RMW das gleichzeitige Bilden von SOBPs in der Tiefenrichtung durch Bestrahlung mit einem Protonenstrahl; wenn sich jedoch die Form eines betroffenen Körperteils in der Tiefenrichtung ändert, wird ein anderer Abschnitt als der betroffene Körperteil mit dem Protonenstrahl bestrahlt. Bei diesem Verfahren ist es nötig, eine Reihe von Kantenfiltern und RMWs entsprechend den Breiten der zu bildenden SOBPs vorzubereiten. Obwohl das Verfahren zur Änderung der Strahlenenergie von dem Beschleuniger es ermöglicht, den betroffenen Körperteil entsprechend seiner Form zu bestrahlen, ist es außerdem nötig, eine Reihe von Energiearten vorzubereiten.

[0006] Darüber hinaus gibt es ein weiteres Verfahren, bei dem ein Kantenfilter verwendet wird (siehe zum Beispiel B. Schaffner, et al., Med. Phys. 27 (4), 716–724, April 2000). Bei diesem Verfahren wird ein betroffener Körperteil vor der Bestrahlung in Schichten eingeteilt, das heißt mehrere SOBPs mit jeweils einer geringen Breite entsprechend den eingeteilten Schichten des betroffenen Körperteils werden gebildet und dann überlagert, um einen SOBP zu bilden, der zu der Form des betroffenen Körperteils passt (nachstehend wird ein SOBP mit einer geringen Breite als ein SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite bezeichnet, um ihn von einem SOBP mit der Größe des betroffenen Körperteils zu unterscheiden).

[0007] Dieses Verfahren kombiniert SOBPs, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, um einen SOBP mit der Größe des betroffenen Körperteils zu erzeugen. Daher ist es nicht nötig, einen Kantenfilter für jede SOBP-Länge vorzubereiten, wodurch sich die Anzahl der Kantenfilter verringert. Zum Bilden von SOBPs, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite für die Durchführung dieser Bestrahlung aufweisen, werden mehrere Energieverteilungsvorrichtungen mit einer aufgeweiteten („spread-out“) Bragg-Peakbreite und einer gesteuerten Peakintensität angewendet (Kantenfilter und andere Vorrichtungen zum Verbreitern oder Verteilen der Energie in der Tiefenrichtung werden zusammenfassend als Energieverteilungsvorrichtungen bezeichnet).

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

[0008] Bei dem Verfahren, bei dem SOBPs, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, gebildet und miteinander kombiniert werden, um einen gewünschten SOBP zu bilden, ist jedoch, wenn die Bragg-Peakbreite ausgeweitet wird, um die Anzahl der Schichten zu verringern und damit die Bestrahlungszeit zu verkürzen, die Dosisverteilung an einer Grenze eines SOBPs auf der tiefen Seite des Bestrahlungsbereichs nicht scharf, und es tritt das Problem auf, dass die abfallende Flanke der Dosisverteilung auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite nicht steil wird. Wenn die abfallende Flanke der Dosisverteilung auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite nicht steil ist, wird außer dem betroffenen Körperteil auch gesundes Gewebe bestrahlt. Wenn SOBPs, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, erzeugt werden, um dies zu vermeiden, tritt außerdem das Problem auf, dass die Anzahl der Schichten zunimmt, was zu einer längeren Bestrahlungszeit führt.

[0009] Ein Ziel der vorliegenden Erfindung ist die Bereitstellung einer Teilchenbestrahlungsvorrichtung, eines Teilchenbestrahlungsverfahrens und eines Teilchenstrahlbehandlungssystems, die es ermöglichen, einen kombinierten SOBP mit einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite zu bilden und eine Bestrahlung in einer kurzen Zeit auf der Grundlage eines Verfahrens durchzuführen, bei dem SOBPs mit jeweils einer geringen Dosisverteilungsbreite überlagert werden, um einen gewünschten SOBP zu bilden.

[0010] Um das vorstehend genannte Ziel zu erreichen, stellt die vorliegende Erfindung eine Teilchenbestrahlungsvorrichtung bereit, die einen Zielbereich mit einem Teilchenstrahl bestrahlt, wobei mehrere Energieverteilungsvorrichtungen zum Bilden von SOBPs mit unterschiedlichen Dosisverteilungen verwendet werden, um Dosisverteilungen in Tiefenrichtung zu kombinieren.

[0011] Um das vorstehend genannte Ziel zu erreichen, stellt die vorliegende Erfindung eine Teilchenbestrahlungsvorrichtung bereit, die einen Zielbereich mit einem Teilchenstrahl bestrahlt, wobei mehrere Energieverteilungsvorrichtungen mit unterschiedlichen geometrischen Formen verwendet werden, um Dosisverteilungen in Tiefenrichtung zu kombinieren.

[0012] Vorzugsweise umfasst die Teilchenbestrahlungsvorrichtung einen Monitor, der die Bestrahlungsdosis misst, und eine Steuereinheit, die die Bestrahlungsdosis steuert, wobei die Teilchenbestrahlungsvorrichtung folgende Schritte durchführt: Einteilen eines Zielbereichs in Schichten, Bestimmen der

dosis, die für die jeweilige Schicht verwendet werden, Messen der Bestrahlungsdosis für jede Schicht mit Hilfe des Monitors und Bestrahlen der jeweiligen Bereiche mit der durch die Steuereinheit gesteuerten Bestrahlungsdosis und Kombinieren der erzeugten SOBPs, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen.

[0013] Vorzugsweise umfasst die Teilchenbestrahlungsvorrichtung weiter eine Energieverteilungsvorrichtung, die einen ersten SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite bildet, und eine Energieverteilungsvorrichtung, die einen zweiten SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite am von der Körperoberfläche aus tiefsten Abschnitt des Zielbereichs bildet, wobei die Teilchenbestrahlungsvorrichtung die folgenden Schritte durchführt: Bestrahlen des Zielbereichs mit dem Teilchenstrahl durch Verwendung der Energieverteilungsvorrichtung zum Bilden des zweiten SOBPs mit einer geringen Dosisverteilungsbreite am von der Körperoberfläche aus tiefsten Abschnitt des Zielbereichs und Bestrahlen des Bereichs vom zweitiefsten Abschnitt bis zum flachsten Zielbereich auf der Körperoberflächenseite mit dem Teilchenstrahl durch einmalige oder mehrmalige Verwendung der Energieverteilungsvorrichtung zum Bilden von ersten SOBPs, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, wodurch die gebildeten SOBPs überlagert werden, um einen SOBP mit einer für den Zielbereich geeigneten Länge zu bilden.

[0014] Hierbei entspricht eine Art von Energieverteilungsvorrichtung einer Energieverteilungsvorrichtung zum Erzeugen eines SOBPs mit einer Dosisverteilungsbreite, die kleiner als die mit einer gewöhnlichen Energieverteilungsvorrichtung erzeugte Dosisverteilungsbreite ist, und die andere Art von Energieverteilungsvorrichtung entspricht einer Energieverteilungsvorrichtung zum Bilden eines SOBPs mit einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite.

[0015] Vorzugsweise umfasst die Teilchenbestrahlungsvorrichtung weiter eine Reichweitenverschiebungsvorrichtung, die die Bestrahlungstiefe des Teilchenstrahls ändert, eine Reichweitenverschiebungsvorrichtung antreibt, und eine oder mehrere Energiearten als Teilchenstrahlenenergie eines Beschleunigers, wobei die Teilchenbestrahlungsvorrichtung die folgenden Schritte durchführt: Bilden von Hochdosisbereichen durch Ändern der Bestrahlungstiefe des Teilchenstrahls durch Verwendung entweder der von der Reichweitenverschiebungsvorrichtung angetriebenen Reichweitenverschiebungsvorrichtung oder der Energieart oder von beidem, durch Verwendung der vorstehend genannten einen oder anderen Art von Energieverteilungsvorrichtung, wodurch die gebildeten Hochdosisbereiche überlagert werden.

[0016] Um das vorstehende Ziel zu erreichen, stellt die vorliegende Erfindung außerdem ein Teilchenbestrahlungsverfahren zum Bestrahlen eines Zielbereichs mit einem Teilchenstrahl bereit, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst: Bestrahlen des Zielbereichs mit dem Teilchenstrahl durch Verwendung einer Energieverteilungsvorrichtung zum Bilden des zweiten SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite am von der Körperoberfläche aus tiefsten Abschnitt des Zielbereichs und Bestrahlen des Bereichs vom zweittiefsten Abschnitt bis zum flachsten Zielbereich auf der Körperoberflächenseite mit dem Teilchenstrahl durch einmalige oder mehrmalige Verwendung einer ersten Energieverteilungsvorrichtung zum Bilden von ersten SOBPs, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, wodurch die gebildeten SOBPs überlagert werden, um einen SOBP mit einer für den Zielbereich geeigneten Länge zu bilden.

[0017] Dieses Verfahren ermöglicht das Bilden eines SOBPs mit einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite basierend auf dem Verfahren der Überlagerung von SOBPs, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, um einen gewünschten SOBP zu bilden.

[0018] Um das vorstehende Ziel zu erreichen, stellt die vorliegende Erfindung außerdem ein Teilchenbestrahlungsverfahren zum Bestrahlen eines Zielbereichs mit einem Teilchenstrahl bereit, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst: direktes Bestrahlen des Zielbereichs mit dem Teilchenstrahl ohne Verwendung einer Energieverteilungsvorrichtung zum Bilden eines SOBPs mit einer geringen Dosisverteilungsbreite am von der Körperoberfläche aus tiefen Abschnitt des Zielbereichs und Bestrahlen des Bereichs vom zweittiefsten Abschnitt bis zum flachsten Zielbereich auf der Körperoberflächenseite mit dem Teilchenstrahl durch einmalige oder mehrmalige Verwendung der ersten Energieverteilungsvorrichtung zum Bilden von SOBPs, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, wodurch die gebildeten SOBPs überlagert werden, um einen SOBP mit einer für den Zielbereich geeigneten Länge zu bilden.

[0019] Dieses Verfahren ermöglicht das Bilden eines SOBPs mit einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite basierend auf dem Verfahren der Überlagerung von SOBPs, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, um einen gewünschten SOBP zu bilden.

[0020] Um das vorstehende Ziel zu erreichen, stellt die vorliegende Erfindung außerdem ein Teilchenstrahlbehandlungssystem bereit, aufweisend einen Beschleuniger, der einen Teilchenstrahl beschleunigt,

und eine Teilchenbestrahlungsvorrichtung, die den Teilchenstrahl von dem Beschleuniger empfängt und einen Zielbereich mit dem Teilchenstrahl bestrahlt, wobei die Teilchenbestrahlungsvorrichtung eine erste Energieverteilungsvorrichtung und eine zweite Energieverteilungsvorrichtung aufweist, die eine steilere Dosisverteilung in der Laufrichtung des Teilchenstrahls bildet als die erste Energieverteilungsvorrichtung, wobei mindestens die ersten und zweiten Energieverteilungsvorrichtungen benutzt werden, um Dosisverteilungen in der Laufrichtung des Teilchenstrahls zu kombinieren.

[0021] Vorzugsweise umfasst das Teilchenstrahlbehandlungssystem außerdem eine Steuereinheit, die eine Steuerung durchführt, um die zweite Energieverteilungsvorrichtung auf einem Weg des Teilchenstrahls anzuordnen, wenn eine Schicht am tiefsten Abschnitt von mehreren eingeteilten Schichten des Zielbereichs mit dem Teilchenstrahl bestrahlt wird.

[0022] Der Teilchenstrahl ist vorzugsweise ein Protonenstrahl. Der Teilchenstrahl kann auch ein Schwereteilchenstrahl sein.

[0023] Nach der vorliegenden Erfindung ist es möglich, einen SOBP mit einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite basierend auf dem Verfahren der Überlagerung von SOBPs zu bilden, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, um einen gewünschten SOBP zu bilden.

KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0024] [Fig. 1](#) zeigt ein Blockdiagramm mit dem Aufbau einer Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach einer ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

[0025] [Fig. 2A](#) zeigt ein Diagramm mit dem Aufbau einer gewöhnlichen Energieverteilungsvorrichtung für einen Energieverteilungsabschnitt der Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung, und

[0026] [Fig. 2B](#) zeigt ein Diagramm der Funktion der gewöhnlichen Energieverteilungsvorrichtung.

[0027] [Fig. 3A](#) zeigt ein Diagramm mit dem Aufbau einer Energieverteilungsvorrichtung zum Erzeugen eines SOBPs mit einer geringen Dosisverteilungsbreite für den Energieverteilungsabschnitt der Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung, und [Fig. 3B](#) und [Fig. 3C](#) zeigen Diagramme der Funktionen der Energieverteilungsvorrichtung.

[0028] [Fig. 4](#) zeigt eine perspektivische Ansicht mit dem Aufbau der Energieverteilungsvorrichtungen

zum Erzeugen eines SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite für den Energieverteilungsabschnitt der Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

[0029] [Fig. 5A](#) und [Fig. 5B](#) zeigen Diagramme der Funktionen der Energieverteilungsanordnungen zum Bilden eines SOBP mit einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite für den Energieverteilungsabschnitt der Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

[0030] [Fig. 6](#) zeigt eine Aufsicht eines ersten Aufbaus des Energieverteilungsabschnitts der Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

[0031] [Fig. 7](#) zeigt eine Aufsicht eines zweiten Aufbaus des Energieverteilungsabschnitts der Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

[0032] [Fig. 8](#) zeigt ein Diagramm zur Erläuterung der Abläufe beim Bilden von SOBPs mit der Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

[0033] [Fig. 9A](#) und [Fig. 9B](#) zeigen Diagramm zur Erläuterung der mit der Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung gebildeten SOBPs.

[0034] [Fig. 10A](#) und [Fig. 10B](#) zeigen Diagramme zur Erläuterung der SOBPs, die mit der Energieverteilungsanordnung zum Erzeugen eines SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite für eine Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach einer zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung gebildet werden.

[0035] [Fig. 11A](#) und [Fig. 11B](#) zeigen Diagramme zur Erläuterung der SOBPs, die mit der Energieverteilungsanordnung zum Erzeugen eines SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite für eine Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach einer dritten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung gebildet werden.

Bezugszeichenliste

1	Protonenstrahl
2	Monitor
3	Abtastmagnet
4	Streueinrichtung
5	Energieverteilungsabschnitt
6	Reichweitenverschiebungsanordnung
7	Dosismonitor
8	Blockkollimator
9	Patientenkollimator

10	Isozentrum
20	Steuereinheit
22	Energieverteilungsanordnungs-Antriebseinheit
24	Reichweitenverschiebungs-Antriebseinheit
40	Gestell
42	Halterung
RF	Normale Energieverteilungsanordnung
M-RF	Energieverteilungsanordnung zum Erzeugen eines SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite
SM-RF	Energieverteilungsanordnung zum Bilden eines SOBP mit einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite

AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG DER BEVORZUGTEN AUSFÜHRUNGSFORMEN

[0036] Der Aufbau und Betrieb einer Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach einer ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung werden nachstehend anhand von [Fig. 1](#) bis [Fig. 9](#) beschrieben.

[0037] Zunächst wird nachstehend der Aufbau der Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der ersten Ausführungsform anhand von [Fig. 1](#) beschrieben. Hier wird eine Teilchenbestrahlungsvorrichtung eines Protonenstrahlbehandlungssystems als Beispiel beschrieben. [Fig. 1](#) zeigt den allgemeinen Aufbau eines Bestrahlungskopfabschnitts der Protonenstrahlbestrahlungsvorrichtung in dem Protonenstrahlbehandlungssystem.

[0038] [Fig. 1](#) zeigt ein Blockdiagramm mit dem Aufbau der Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

[0039] Ein Protonenstrahl **1** gelangt von der Beschleunigerseite in die Protonenstrahlbestrahlungsvorrichtung (Bestrahlungskopf). Die Protonenstrahlbestrahlungsvorrichtung umfasst einen Monitor **2** wie etwa einen Strahlprofilmonitor, einen Abtastmagnet **3** für den Protonenstrahl, eine Streueinrichtung **4** zum Aufweiten des Durchmessers des Protonenstrahls, einen Energieverteilungsabschnitt **5**, eine Reichweitenverschiebungsanordnung **6**, einen Dosismonitor **7**, einen Blockkollimator **8**, einen Patientenkollimator **9**, eine Steuereinheit **20**, eine Energieverteilungsanordnungs-Antriebseinheit **22** und eine Reichweitenverschiebungs-Antriebseinheit **24**. Das Isozentrum **10** bezeichnet den Punkt im Raum, durch den der zentrale Strahl des Protonenstrahls hindurchtritt, um einen betroffenen Körperteil des Patienten zu bestrahlen.

[0040] Die Streueinrichtung **4** wird verwendet, um den Strahldurchmesser des Protonenstrahls **1** aufzuweiten. Je kleiner der Strahlradius, desto höher wird

der Strahlnutzungsfaktor und gleichzeitig auch die Positionsgenauigkeit des Strahls. Im Gegensatz dazu gilt, je größer der Strahlradius, desto geringer wird der Strahlnutzungsfaktor und gleichzeitig auch die Positionsgenauigkeit des Strahls. Hier ist der mit der Streueinrichtung **4** aufgeweitete Strahlradius größer als der Durchmesser einer Bleistiftkeule.

[0041] Zu den Verfahren zum Bestrahlen eines Bestrahlungsfelds senkrecht zur Laufrichtung des Protonenstrahls gehören die Verwendung eines Abtastmagneten **3** zur Durchführung der Punktabtastung, der Rasterabtastung oder der Multi-Wobbler-Abtastung mit dem Protonenstrahl oder die Verwendung eines Doppelstreuungsverfahrens.

[0042] Im Energieverteilungsabschnitt **5** sind verschiedene Energieverteilungsrichtungen austauschbar für den Protonenstrahl angeordnet. Obwohl später anhand von **Fig. 2** bis **Fig. 5** beschrieben, umfassen die verschiedenen Energieverteilungsrichtungen eine gewöhnliche Energieverteilungsrichtung, eine Energieverteilungsrichtung zum Erzeugen eines SOBP mit einer geringeren Dosisverteilungsbreite als die gewöhnliche Energieverteilungsrichtung, eine Energieverteilungsrichtung zum Bilden eines SOBP mit einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung auf einer von der Körperoberfläche aus tieferen Seite usw. Die Energieverteilungsrichtung-Antriebseinheit **22** ändert die Arten der Energieverteilungsrichtungen, die auf der Grundlage eines Steuerbefehls von der Steuereinheit **20** in den Protonenstrahl eingefügt werden.

[0043] Die Reichweitenverschiebungsvorrichtung **6** wird zum Verschieben der Position (von der Körperoberfläche aus) eines SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite verwendet, der mit der Energieverteilungsrichtung zum Erzeugen eines solchen SOBP und mit der Energieverteilungsrichtung zum Bilden eines SOBP mit einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung auf einer von der Körperoberfläche aus tieferen Seite erzeugt wird. Die Reichweitenverschiebungsvorrichtung **6** besteht zum Beispiel aus Reichweitenverschiebungsplatten mit unterschiedlichen Dicken. Die Dicke der Reichweitenverschiebungsplatten basiert auf einem Binärsystem, bei dem die Dicke multipliziert mit 2 zunimmt, zum Beispiel 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm, 32 mm usw. Die Verwendung von zwei Reichweitenverschiebungsplatten mit einer Dicke von 2 mm bzw. 8 mm resultiert zum Beispiel darin, dass die Reichweitenverschiebungsvorrichtung **6** eine Dicke von 10 mm aufweist, und die Verwendung von zwei Reichweitenverschiebungsplatten mit einer Dicke von 4 mm bzw. 16 mm resultiert darin, dass die Reichweitenverschiebungsvorrichtung **6** eine Dicke von 20 mm aufweist. Die Reichweitenverschiebungsvorrichtung **6** wählt die Reichweitenverschiebungsplatten aus, die auf der Grundlage eines Steuerbe-

fehls von der Steuereinheit **20** in den Protonenstrahl eingefügt werden sollen und fügt die ausgewählten Reichweitenverschiebungsplatten sodann in den Protonenstrahl ein.

[0044] Der Aufbau der verschiedenen Energieverteilungsrichtungen für den Energieverteilungsabschnitt **5** der Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der vorliegenden Ausführungsform wird nachstehend anhand von **Fig. 2** bis **Fig. 5** beschrieben.

[0045] **Fig. 2A** zeigt ein Diagramm mit dem Aufbau der gewöhnlichen Energieverteilungsrichtung für den Energieverteilungsabschnitt der Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung, und **Fig. 2B** zeigt ein Diagramm der Funktion der gewöhnlichen Energieverteilungsrichtung. **Fig. 3A** zeigt ein Diagramm mit dem Aufbau der Energieverteilungsrichtung zum Erzeugen eines SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite für den Energieverteilungsabschnitt der Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung, und **Fig. 3B** und **Fig. 3C** zeigen Diagramme der Funktionen der Energieverteilungsrichtung. **Fig. 4** zeigt eine perspektivische Ansicht mit dem Aufbau der Energieverteilungsrichtungen zum Erzeugen eines SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite für den Energieverteilungsabschnitt der Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. **Fig. 5A** und **Fig. 5B** zeigen Diagramme der Funktionen der Energieverteilungsrichtung zum Bilden eines SOBP mit einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung auf einer von der Körperoberfläche aus tieferen Seite für den Energieverteilungsabschnitt **5** der Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

[0046] Zunächst wird die gewöhnliche Energieverteilungsrichtung anhand von **Fig. 2A** und **Fig. 2B** beschrieben. Wie in **Fig. 2A** gezeigt, ist eine gewöhnliche Energieverteilungsrichtung RF zum Bilden eines SOBP so aufgebaut, dass eine obere Schicht eine geringere Breite als die Schicht direkt darunter aufweist. Auch wenn **Fig. 2A** sieben Schichten als Beispiel zeigt, weist die gewöhnliche Energieverteilungsrichtung in der Tat etwa dreißig Schichten auf. Das gezeigte Beispiel ist ein schematisches Diagramm, und die Anzahl und Breite der Schichten unterscheiden sich von denen einer tatsächlichen Energieverteilungsrichtung.

[0047] Wie in **Fig. 2A** gezeigt, wird die Energieverteilungsrichtung RF mit dem Protonenstrahl **1** bestrahlt, und die Auftreffpositionen des Protonenstrahls unterscheiden sich für jede Schicht der Energieverteilungsrichtung RF mit einer unterschiedlichen Höhe. Als Folge werden, wie in **Fig. 2B** gezeigt, Bragg-Peakpositionen Pbp1, Pbp2 usw. in von der

Körperoberfläche aus verschiedenen Tiefen gebildet. Je weniger Schichten der Protonenstrahl passiert, desto tiefer von der Körperoberfläche aus der Abschnitt, den eine Bragg-Peakposition P_{bp} erreicht. Die Bragg-Peakpositionen P_{bp1} , P_{bp2} usw. werden überlagert, um einen SOBP **30** zu bilden.

[0048] Als Nächstes wird nachstehend die Energieverteilungsvorrichtung zum Erzeugen eines SOBPs mit einer geringen Dosisverteilungsbreite anhand von **Fig. 3** beschrieben. Eine Energieverteilungsvorrichtung M-RF, die einen SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite erzeugt, wie in **Fig. 3A** gezeigt, weist eine geringere Anzahl von Schichten und eine geringere Höhe als die in **Fig. 2** gezeigte gewöhnliche Energieverteilungsvorrichtung RF auf. Auch wenn **Fig. 3A** drei Schichten als Beispiel zeigt, ist dieses Beispiel ein schematisches Diagramm, und die Anzahl und Breite der Schichten unterscheiden sich von denen einer tatsächlichen Energieverteilungsvorrichtung. Die Energieverteilungsvorrichtung M-RF ist so beschaffen, dass ihre Breite einschließlich Platz auf beiden Seiten die größte Breite WM1 ist, die Breite einer ersten Schicht die zweitgrößte Breite WM2 ist und die Breite einer zweiten Schicht die drittgrößte Breite WM3 ist. Die Höhe H_{m1} wird entsprechend der Form eines SOBPs mit einer geringen Dosisverteilungsbreite bestimmt.

[0049] Wie in **Fig. 3A** gezeigt, wird die Energieverteilungsvorrichtung M-RF mit dem Protonenstrahl **1** bestrahlt, und die Auftreffpositionen des Protonenstrahls unterscheiden sich für jede Schicht der Energieverteilungsvorrichtung M-RF mit einer unterschiedlichen Höhe. Als Folge werden, wie in **Fig. 3B** gezeigt, Bragg-Peakpositionen P_{bpm1} , P_{bpm2} usw. in von der Körperoberfläche aus verschiedenen Tiefen gebildet. Je weniger Schichten der Protonenstrahl passiert, desto tiefer von der Körperoberfläche aus der Abschnitt, den eine Bragg-Peakposition P_{bpm} erreicht. Die Bragg-Peakpositionen P_{bpm1} , P_{bpm2} usw. werden überlagert, um einen SOBP (P_{bpm}) mit einer geringen Dosisverteilungsbreite zu bilden.

[0050] Danach wird, wie in **Fig. 3C** gezeigt, die Energieverteilungsvorrichtung M-RF benutzt, um einen ersten SOBP (P_{bpm1}) mit einer geringen Dosisverteilungsbreite zu erzeugen. Als Nächstes wird die in **Fig. 1** erläuterte Reichweitenverschiebungsvorrichtung **6** verwendet oder die Energieart eines Beschleunigers wird geändert oder beide Möglichkeiten werden benutzt, um einen SOBP (P_{bpm2}) mit einer geringen Dosisverteilungsbreite zu erzeugen, indem die SOBP-Position von der Körperoberfläche aus verschoben wird. Auf diese Weise werden SOBPs, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, überlagert, um einen SOBP **30A** zu bilden. Die Energieverteilungsvorrichtung zum Erzeugen eines SOBPs mit einer geringen Dosisverteilungsbreite

erzeugt SOBPs, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, und überlagert diese, um eine gewünschte Form des SOBPs **30A** zu erhalten. Daher müssen die Anzahl, Breite und Höhe der Schichten der Energieverteilungsvorrichtung eingestellt werden, um die gewünschte Zielform des SOBPs zu erhalten. Die Formen der SOBPs mit geringen Dosisverteilungsbreiten werden so bestimmt, um eine gewünschte SOBP-Ebenheit durch Überlagern der SOBPs sicherzustellen, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen.

[0051] Wie in **Fig. 4** gezeigt, weisen die im Energieverteilungsabschnitt **5** verwendeten Energieverteilungsvorrichtungen zum Erzeugen von SOBPs, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, einen Aufbau auf, bei dem mehrere der in **Fig. 3** gezeigten Energieverteilungsvorrichtungen M-RF in gleichen Abständen auf einem Gestell **40** angeordnet und befestigt sind. Wenn die Breite jeder Energieverteilungsvorrichtung M-RF als WM1 definiert ist, entspricht die in **Fig. 4** gezeigte Platzbreite WG1 der Summe des auf beiden Seiten einer Energieverteilungsvorrichtung gebildeten Platzes. Es ist auch möglich, die Energieverteilungsvorrichtungen auf einem kreisförmigen Gestell anzuordnen, um die gesamte Form kreisförmig zu machen.

[0052] Diese SOBPs (P_{bpm}), die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, werden mit jedem aufgeweiteten Bragg-Peak überlagert; daher ist die in **Fig. 3C** gezeigte abfallende Flanke der Dosisverteilung auf einer von der Körperoberfläche aus tieferen Seite nicht steil. Um dies zu vermeiden, wird die Energieverteilungsvorrichtung zum Bilden eines SOBPs mit einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung auf einer von der Körperoberfläche aus tieferen Seite (weiter unten anhand von **Fig. 5** erläutert) benutzt.

[0053] Eine Energieverteilungsvorrichtung SM-RF zum Bilden eines SOBPs mit einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung auf einer von der Körperoberfläche aus tieferen Seite wird nachstehend anhand von **Fig. 5** beschrieben. Die Energieverteilungsvorrichtung SM-RF weist auf beiden Seiten mehr Platz auf als die Energieverteilungsvorrichtung M-RF in **Fig. 3A**. Bei jeder Schicht der Energieverteilungsvorrichtung SM-RF, wie in **Fig. 3A** gezeigt, wird die Breite allmählich von der ersten Schicht verringert, jedoch mit einem unterschiedlichen Breitenverhältnis für jede Schicht gegenüber der Energieverteilungsvorrichtung M-RF.

[0054] Bei der Energieverteilungsvorrichtung M-RF passiert der Protonenstrahl, der eine von der Körperoberfläche aus tiefere Seite eines Zielbereichs erreicht, den schmaleren Platz der Energieverteilungsvorrichtung M-RF in **Fig. 3A**; bei der Energieverteilungsvorrichtung SM-RF ist der Platz jedoch erwei-

tert, um die Intensität des hindurchtretenden Strahls zu erhöhen und damit die Intensität einer Bragg-Kurve zu erhöhen, die eine von der Körperoberfläche aus tiefere Seite des Zielbereichs erreicht. Die Intensitäten der Protonenstrahlen, die die jeweilige Schicht der Energieverteilungsvorrichtung SM-RF passieren, ändert sich entsprechend dem Breitenverhältnis jeder Schicht, und je mehr Schichten eine Bragg-Kurve passiert, desto flacher von der Körperoberfläche aus die Seite des Zielbereichs, den eine Bragg-Peakposition erreicht. Als Folge werden, wie in [Fig. 5A](#) gezeigt, die Bragg-Kurven Pbpsm1, Pbpsm2 usw. überlagert, um einen SOBP (PbpSM) mit einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite und einer moderat abfallenden Flanke der Dosisverteilung auf der flachen Seite derselben zu erzeugen.

[0055] Bei diesem SOBP (PbpSM) weist die Dosisverteilung auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite des Zielbereichs eine steil abfallende Flanke auf, und die Dosisverteilung auf der von der Körperoberfläche aus flachen Seite weist eine Form auf, die die Ebenheit eines zu bildenden SOBPs auf einem betroffenen Körperteil sicherstellt, wenn der SOBP (PbpSM) mit SOBPs (PbpM) kombiniert wird, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen und mit der Energieverteilungsvorrichtung M-RF erzeugt werden.

[0056] [Fig. 5B](#) zeigt auf einem betroffenen Körperteil gebildete SOBPs. Auf einer von der Körperoberfläche aus tieferen Seite des Zielbereichs wird mit der Energieverteilungsvorrichtung SM-RF ein SOBP (PbpSM) mit einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung gebildet. An flacheren Abschnitten davon wird mit der in [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#) erläuterten Energieverteilungsvorrichtung M-RF ein SOBP (PbpM2) mit einer geringen Dosisverteilungsbreite erzeugt. Weiter wird die Reichweitenverschiebungsvorrichtung **6** verwendet oder die Energieart des Beschleunigers wird geändert oder beide Möglichkeiten werden benutzt, um wiederholt SOBPs (PbpM2, PbpM3, ...) zu erzeugen, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, wodurch ein SOBP **30B** gebildet wird. In diesem Fall wird der SOBP **30B** mit einer gewünschten Länge erzeugt, indem die Häufigkeit der wiederholten Erzeugung von SOBPs (PbpM2, PbpM3, usw.), die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, gesteuert wird. Die Breite eines mit der Energieverteilungsvorrichtung zum Bilden eines SOBPs mit einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite erzeugten SOBPs wird in Relation zur Breite eines mit der Energieverteilungsvorrichtung M-RF erzeugten SOBPs bestimmt, der zur Kombination mit dem erstgenannten SOBP verwendet wird, um vorzugsweise einen SOBP mit einer beliebigen Länge zu erzeugen.

[0057] In gleicher Weise wie bei der in [Fig. 4](#) gezeigten Energieverteilungsvorrichtung M-RF weisen die im Energieverteilungsabschnitt **5** verwendeten Energieverteilungsvorrichtungen zum Erzeugen von SOBPs, die jeweils eine steil abfallende Flanke der Dosisverteilung auf einer von der Körperoberfläche aus tieferen Seite aufweisen, einen Aufbau auf, bei dem mehrere der Energieverteilungsvorrichtungen SM-RF mit jeweils der in [Fig. 5](#) gezeigten Funktion in gleichen Abständen auf dem Gestell **40** angeordnet und befestigt sind.

[0058] Der Aufbau des Energieverteilungsabschnitts **5** der Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der vorliegenden Ausführungsform wird nachstehend anhand von [Fig. 6](#) und [Fig. 7](#) beschrieben.

[0059] [Fig. 6](#) zeigt eine Aufsicht eines ersten Aufbaus des Energieverteilungsabschnitts der Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. [Fig. 7](#) zeigt eine Aufsicht eines zweiten Aufbaus des Energieverteilungsabschnitts der Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

[0060] In [Fig. 6](#) weist eine drehbare Energieverteilungsvorrichtungshalterung **42** vier darin ausgebildete kreisförmige Öffnungen OP1, OP2, OP3 und OP4 auf. Die Energieverteilungsvorrichtungshalterung **42** kann mit der Energieverteilungsvorrichtungs-Antriebseinheit **22** in [Fig. 1](#) in den durch den Pfeil R1 angegebenen Richtungen gedreht werden. Ein Gestell mit mehreren der in [Fig. 5](#) erläuterten Energieverteilungsvorrichtungen SM-RF darauf ist in die kreisförmige Öffnung OP2 eingesetzt. Die in [Fig. 4](#) erläuterten Energieverteilungsvorrichtungen M-RF sind in der kreisförmigen Öffnung OP3 angeordnet. Ein Gestell mit mehreren der in [Fig. 2](#) erläuterten Energieverteilungsvorrichtungen RF darauf ist in die kreisförmige Öffnung OP4 eingesetzt. In die kreisförmige Öffnung OP1 ist keine Energieverteilungsvorrichtung eingesetzt, sondern die Öffnung OP1 wird verwendet, um das Bestrahlungsfeld direkt mit dem Protonenstrahl zu bestrahlen. Auch wenn in dem Beispiel in [Fig. 6](#) vier Öffnungen vorgesehen sind, kann die Anzahl der Öffnungen erhöht werden, um verschiedene Arten von Energieverteilungsvorrichtungen SM-RF und Energieverteilungsvorrichtungen M-RF anzuordnen.

[0061] Um einen SOBP zu erzeugen, wird zum Beispiel die Halterung **42** so gedreht, dass die kreisförmige Öffnung OP2 an der Position des Protonenstrahls platziert wird, und der Protonenstrahl wird mit der Energieverteilungsvorrichtung SM-RF angelegt. Danach wird die Energieverteilungsvorrichtungshalterung **42** gedreht, und der Protonenstrahl wird mit der Energieverteilungsvorrichtung M-RF angelegt. Weiter wird in diesem Zustand die Reichweitenver-

schiebungsvorrichtung **6** verwendet oder die Energieart des Beschleunigers wird geändert oder beide Möglichkeiten werden benutzt, um die Bestrahlung unter Änderung der Bestrahlungsposition in Tiefenrichtung zu wiederholen und so SOBPs zu erzeugen.

[0062] Wenn die gewöhnliche Energieverteilungsvorrichtung RF benutzt wird, ist es außerdem möglich, die Energieverteilungsvorrichtungshalterung **42** so zu drehen, dass sie in die Position der Energieverteilungsvorrichtung RF gebracht wird, und die Energieverteilungsvorrichtung RF mit einem Protonenstrahl zu bestrahlen. Nach dem Bilden von SOBPs mit der gewöhnlichen Energieverteilungsvorrichtung RF ist es möglich, sie durch die Energieverteilungsvorrichtung M-RF zu ersetzen und dann SOBPs zu addieren, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, um einen SOBP mit einer großen Breite zu bilden.

[0063] Weiter ist es möglich, das Bestrahlungsfeld direkt mit dem Protonenstrahl zu bestrahlen, indem die Halterung **42** so gedreht wird, dass die kreisförmige Öffnung OP1 an der Position platziert wird, durch die der Protonenstrahl hindurchtritt. Ein gewünschter SOBP kann durch Kombinieren der mit den Energieverteilungsvorrichtungen M-RF, den Energieverteilungsvorrichtungen SM-RF usw. erzeugten SOBPs gebildet werden.

[0064] Der vorstehend beschriebene Aufbau macht es leichter, die verschiedenen Energieverteilungsvorrichtungen zu wechseln, und die Verwendung der kreisförmigen Halterung ermöglicht es, den nötigen Platz zum Wechseln der Energieverteilungsvorrichtungen zu verringern.

[0065] [Fig. 7](#) zeigt einen zweiten Aufbau der Halterung. Eine rechteckige Energieverteilungsvorrichtungshalterung **44** kann durch die in [Fig. 1](#) gezeigte Energieverteilungsvorrichtungs-Antriebseinheit **22** in den durch den Pfeil R2 gezeigten Richtungen geschoben werden. Die Energieverteilungsvorrichtungshalterung **44** weist vier darin ausgebildete kreisförmige Öffnungen OP1, OP2, OP3 und OP4 auf. Ein Gestell mit mehreren der in [Fig. 5](#) erläuterten Energieverteilungsvorrichtungen SM-RF darauf ist in die kreisförmige Öffnung OP2 eingesetzt. Die in [Fig. 4](#) erläuterten Energieverteilungsvorrichtungen M-RF sind in die kreisförmige Öffnung OP3 eingesetzt. Ein Gestell mit mehreren der in [Fig. 2](#) erläuterten Energieverteilungsvorrichtungen RF darauf ist in die kreisförmige Öffnung OP4 eingesetzt. In die kreisförmige Öffnung OP1 ist keine Energieverteilungsvorrichtung eingesetzt, sondern die Öffnung OP1 wird verwendet, um das Bestrahlungsfeld direkt mit dem Protonenstrahl zu bestrahlen.

[0066] Die Betriebsabläufe in jeder Komponente beim Bilden von SOBPs mit der Teilchenbestrah-

lungsvorrichtung nach der vorliegenden Ausführungsform werden nachstehend anhand von [Fig. 8](#) beschrieben.

[0067] [Fig. 8](#) zeigt ein Diagramm zur Erläuterung der Abläufe in jeder Komponente beim Bilden von SOBPs mit der Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

[0068] Zunächst werden in Schritt **50** ein SOBP mit der Größe eines Zielbereichs (Größe eines betroffenen Körperteils), die Tiefenpositionen von der Körperoberfläche aus, die Gesamtdosis usw. bestimmt. Diese Daten werden entsprechend einem Behandlungsplan usw. bestimmt. Basierend auf den bestimmten Werten werden in Schritt **51** die Arten der zu verwendenden Energieverteilungsvorrichtungen, die Reihenfolge der Verwendung der Energieverteilungsvorrichtungen, wenn ein SOBP mit der Größe des Zielbereichs in SOBPs unterteilt wird, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, und eine Bestrahlungsdosis bestimmt, die für jeden SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite anzuwenden ist.

[0069] Danach wird in Schritt **52** eine Energieverteilungsvorrichtung eingestellt. Wenn diese Energieverteilungsvorrichtung zum Beispiel die Energieverteilungsvorrichtung SM-RF ist, wird die Vorrichtung in Schritt **52** eingestellt. In Schritt **53** werden die Strahlenenergie entsprechend der Position von der Körperoberfläche aus, die der Strahl erreicht, und auch die Dicke der Streueinrichtung im Verhältnis zur Strahlgröße eingestellt. In Schritt **54** erfolgt die Bestrahlung mit einem Strahl auf der Grundlage dieser Bedingungen.

[0070] In Schritt **55** wird die Bestrahlungsdosis mit Hilfe eines Monitors wie etwa einem Dosismonitor gemessen und bestimmt, ob die gemessene Dosis eine vorbestimmte Bestrahlungsdosis erreicht hat oder nicht. Wenn nicht, wird der Strahl weiter angewendet, bis der Dosisgrenzwert erfasst wird, um einen SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite zu bilden. Die Steuereinheit bestimmt, ob die gemessene Dosis die vorbestimmte Bestrahlungsdosis erreicht hat oder nicht.

[0071] Wenn der Dosisgrenzwert erfasst wird, wird in Schritt **56** bestimmt, ob die Bestrahlungsposition geändert und ob ein SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite mit der vorstehenden Energieverteilungsvorrichtung gebildet werden soll oder nicht. Wenn diese Energieverteilungsvorrichtung zum Beispiel die Energieverteilungsvorrichtung SM-RF ist und wenn vorbestimmt worden ist, dass ein SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite vorzugsweise am von der Körperoberfläche aus tiefsten Abschnitt des betroffenen Körperteils mit dieser Ener-

gieverteilungsvorrichtung gebildet werden soll, wird in Schritt **56** bestimmt, dass es nicht nötig ist, die Bestrahlungsposition zu ändern und einen SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite mit derselben Energieverteilungsvorrichtung zu bilden.

[0072] Danach wird die Verarbeitung mit Schritt **57** fortgesetzt, in dem bestimmt wird, ob die Energieverteilungsvorrichtung geändert und die nächste Bestrahlung durchgeführt werden soll oder nicht. Wenn in Schritt **57** bestimmt wird, dass die Energieverteilungsvorrichtung entsprechend der vorbestimmten Reihenfolge der Verwendung der Energieverteilungsvorrichtungen geändert und die nächste Bestrahlung durchgeführt werden soll, wird in Schritt **52** eine Energieverteilungsvorrichtung eingestellt. Wenn diese Energieverteilungsvorrichtung zum Beispiel die Energieverteilungsvorrichtung M-RF zum Erzeugen einer bestimmten Dosisverteilungsbreite ist, wird die Vorrichtung in Schritt **52** eingestellt.

[0073] Anschließend werden dieselben Betriebsabläufe wie vorstehend durchgeführt (Schritte **53** und **54**). Wenn der Dosisgrenzwert erfasst wird, wird danach in Schritt **56** bestimmt, ob die Bestrahlungsposition geändert und dann ein SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite mit derselben Energieverteilungsvorrichtung gebildet werden soll oder nicht. Wenn diese Energieverteilungsvorrichtung zum Beispiel die Energieverteilungsvorrichtung M-RF ist und wenn mit der Energieverteilungsvorrichtung M-RF erzeugte SOBPs, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, überlagert werden sollen, um einen gewünschten SOBP zu bilden, wird in Schritt **56** bestimmt, dass es nötig ist, die Bestrahlungsposition zu ändern und einen SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite mit derselben Energieverteilungsvorrichtung zu bilden. Daher werden in Schritt **53** die Strahlenergie und die Dicke der Streueinrichtung eingestellt, um einen SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite an der nächsten Position zu erzeugen. Anschließend werden in Schritt **54** und **55** dieselben Betriebsabläufe wie vorstehend wiederholt, gefolgt von Schritt **56**.

[0074] Wenn in Schritt **56** bestimmt wird, dass es nicht nötig ist, die Bestrahlungsposition zu ändern und einen SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite mit derselben Energieverteilungsvorrichtung zu bilden, wird die Verarbeitung mit Schritt **57** fortgesetzt, in dem bestimmt wird, ob die Energieverteilungsvorrichtung entsprechend der vorbestimmten Reihenfolge der Verwendung der Energieverteilungsvorrichtungen geändert und die nächste Bestrahlung durchgeführt werden soll oder nicht. Wenn diese Energieverteilungsvorrichtung zum Beispiel die Energieverteilungsvorrichtung M-RF zum Erzeugen einer weiteren Dosisverteilungsbreite ist, wird die Vorrichtung in Schritt **52** eingestellt. Anschließend werden dieselben Betriebsabläufe wie vorstehend durchge-

führt. Wenn in Schritt **57** bestimmt wird, dass es nicht nötig ist, die nächste Bestrahlung entsprechend der vorbestimmten Reihenfolge der Verwendung der Energieverteilungsvorrichtungen durchzuführen, wird die Bestrahlung in Schritt **58** beendet. Damit ist das Bilden des SOBPs mit der Größe des Zielbereichs durch die Teilchenbestrahlungsvorrichtung abgeschlossen.

[0075] Ein Verfahren zum Einstellen der Strahlenergie wird nachstehend beschrieben. Die Tiefenposition eines SOBPs wird durch die Strahlenergie bestimmt. Verfahren zum Ändern der Strahlenergie umfassen unter anderem das Ändern der Energieart durch Verwendung des Beschleunigers oder der Reichweitenverschiebungsvorrichtung oder beider Einrichtungen. Die Strahlenergie wird durch Verwendung einer oder beider dieser Einrichtungen eingestellt. Wenn zum Beispiel die Position nur mit der Energieart des Beschleunigers geändert werden soll, wird die Anzahl der Energiearten enorm zunehmen und daher wird auch die Reichweitenverschiebungsvorrichtung verwendet. Beim Bilden eines SOBPs nimmt außerdem, wenn die Position eines SOBPs mit einer geringen Dosisverteilungsbreite nur mit der Reichweitenverschiebungsvorrichtung verschoben wird, ohne die Energieart von dem Beschleuniger zu ändern, die Reichweitereinstellungsbreite der Reichweitenverschiebungsvorrichtung zu, wodurch die Größe der Reichweitenverschiebungs-Antriebseinheit zunimmt.

[0076] Daher verwendet die vorliegende Ausführungsform eine Energieart von mehreren Beschleunigern und die Reichweitenverschiebungsvorrichtung zusammen, wenn ein SOBP gebildet werden soll. Wenn ein SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite am tiefsten Abschnitt des Zielbereichs durch Verwendung der Energieverteilungsvorrichtung SM-RF zum Bilden eines SOBPs mit einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite gebildet werden soll, wird eine Energieart, die den tiefsten Abschnitt des Zielbereichs erreicht, aus den vorbereiteten Energiearten von den Beschleunigern ausgewählt, und die Bestrahlung wird durchgeführt. Wenn keine geeignete Energieart vorliegt, wird die Strahlenergie, die den tiefsten Abschnitt des Zielbereichs erreicht, mit einer Energieart von den Beschleunigern und der Reichweitenverschiebungsvorrichtung gebildet, und die Bestrahlung wird durchgeführt.

[0077] Wenn ein SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite an einer flacheren Position vom tiefsten Abschnitt des Zielbereichs durch Verwendung der Energieverteilungsvorrichtung M-RF gebildet werden soll, ähnlich dem vorstehenden Fall, wird die Strahlenergie, die die flachere Position von dem tiefsten Abschnitt des Zielbereichs erreicht, mit der Kombination der Energieart von den Beschleunigern

und der Reichweitenverschiebungsvorrichtung gebildet, und die Bestrahlung wird durchgeführt. Mit einem ähnlichen Verfahren werden durch Verschieben der Position (im Zielbereich) eines SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite wiederholt SOBPs erzeugt, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen. Danach werden diese SOBPs, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, überlagert, um einen SOBP mit einer für den Zielbereich geeigneten Länge zu bilden.

[0078] Fig. 9 erläutert das Bilden eines SOBPs mit der Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der vorliegenden Ausführungsform. In diesem Fall werden ein SOBP mit einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite und ein SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite zur Erläuterung verwendet.

[0079] Fig. 9A und Fig. 9B zeigen Diagramm zur Erläuterung der mit der Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung gebildeten SOBPs. In diesem Fall werden ein SOBP mit einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite und ein SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite verwendet.

[0080] Die einzelnen Komponenten werden jeweils entsprechend dem in Fig. 8 gezeigten Verfahren verwendet, um durch Verwendung einer Energieverteilungsvorrichtung zum Bilden eines SOBPs mit einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite des Zielbereichs einen SOBP (PbpSM) mit einer geringen Dosisverteilungsbreite zu bilden, wie in Fig. 9A gezeigt. An flacheren Abschnitten davon werden mit einer Kombination der Energieart von den Beschleunigern und der Reichweitenverschiebungsvorrichtung und auch unter Verwendung einer Energieverteilungsvorrichtung zum Erzeugen eines SOBPs mit einer geringen Dosisverteilungsbreite wiederholt SOBPs (PbpM2, PbpM3 usw.) erzeugt, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, und danach wird die Anzahl der Wiederholungen gesteuert, um einen SOBP 30B zu bilden. Wenn wiederholt SOBPs erzeugt werden, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, können anstelle derselben Energieverteilungsvorrichtung mehrere verschiedene Arten von Energieverteilungsvorrichtungen zum Erzeugen eines SOBPs mit einer geringen Dosisverteilungsbreite verwendet werden.

[0081] Der Grad der Steilheit der abfallenden Flanke der Dosisverteilung des SOBPs 30B auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite des Zielbereichs kann zum Beispiel durch den Abstand zwischen einer 80%-Dosis und einer 20%-Dosis (distaler Abfall) auf der tiefen (körperfernen) Seite angege-

ben werden, wobei angenommen wird, dass ein flacher Abschnitt der Dosisverteilung eine 100%-Dosis erhält. Durch Verwendung einer Energieverteilungsvorrichtung zum Bilden eines SOBPs mit einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite ist es möglich, die mit der Energieverteilungsvorrichtung zum Erzeugen eines SOBPs mit einer geringen Dosisverteilungsbreite gebildete moderat abfallende Flanke, wie durch die gestrichelte Linie in Fig. 5B gezeigt, in eine steil abfallende Flanke zu ändern, wie mit der durchgehenden Linie gezeigt. Wie in Fig. 9A gezeigt, ist es durch Verwendung der mit der Energieverteilungsvorrichtung zum Bilden eines SOBPs mit einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite gebildeten SOBPs an der Position des distalen Abfalls möglich, nahezu dieselbe Wirkung wie bei Verwendung der herkömmlichen Energieverteilungsvorrichtungen RF zu erhalten.

[0082] Nach der vorliegenden Ausführungsform ist es möglich, einen gewünschten SOBP zu bilden, indem ein SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite nahezu genauso oft oder weniger häufig wie bei Verwendung der herkömmlichen Energieverteilungsvorrichtungen M-RF wiederholt wird, ohne die Steilheit der abfallenden Flanke der SOBP-Dosisverteilung auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite des Zielbereichs zu verschlechtern, wodurch die Wirkung erzielt wird, dass die Bestrahlungszeit verkürzt werden kann. Weil es möglich ist, die Anzahl der Schichten zu verringern und die Dicke der jeweiligen Schichten zu erhöhen, ist er außerdem robust hinsichtlich der Bewegung in Tiefenrichtung jedes Schichtabschnitts und daher für die atmungssynchrone Bestrahlung geeignet.

[0083] Wenn die herkömmlichen Energieverteilungsvorrichtungen RF verwendet werden, ist es nötig, die Vorrichtungen entsprechend den Längen der SOBPs vorzubereiten, was zu einer Erhöhung der Anzahl der Vorrichtungen führt. Im Gegensatz dazu kann nach der vorliegenden Erfindung die SOBP-Länge geändert werden, indem die Energieverteilungsvorrichtung zum Erzeugen eines SOBPs mit einer geringen Dosisverteilungsbreite wiederholt verwendet wird. Daher ist es möglich, einen gewünschten SOBP durch Verwendung von zwei verschiedenen Arten von Vorrichtungen zu erzeugen: eine Energieverteilungsvorrichtung zum Erzeugen eines SOBPs mit einer geringen Dosisverteilungsbreite und eine Energieverteilungsvorrichtung zum Bilden eines SOBPs mit einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite. Auch wenn mehrere verschiedene Arten von Energieverteilungsvorrichtungen zum Erzeugen eines SOBPs mit einer geringen Dosisverteilungsbreite und mehrere verschiedene Arten von Energieverteilungsvorrichtungen zum Bilden eines

SOBP mit einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite, wie nachstehend gezeigt, vorbereitet werden, wird außerdem die Gesamtzahl der vorzubereitenden Vorrichtungen im Vergleich zu dem Fall mit den herkömmlichen Energieverteilungsvorrichtungen RF deutlich verringert. In dieser Weise bewirkt die vorliegende Erfindung eine deutliche Verringerung der Anzahl der Energieverteilungsvorrichtungen im Vergleich zu einem herkömmlichen Fall.

[0084] Außerdem war es bei den herkömmlichen Energieverteilungsvorrichtungen RF nötig, mehrere Arten von Energieverteilungsvorrichtungen vorzubereiten und die Energieverteilungsvorrichtungen RF entsprechend der SOBP-Länge zu wechseln.

[0085] Die vorliegende Erfindung macht es möglich, die Anzahl der Wechsel der Energieverteilungsvorrichtungen im Vergleich zu einem herkömmlichen Fall zu verringern, und die Energieverteilungsvorrichtungshalterung **42** macht es leichter, verschiedene Energieverteilungsvorrichtungen mit dem vorstehend genannten Aufbau zu wechseln, was zur Folge hat, dass eine Vorrichtung zum Wechseln der Energieverteilungsvorrichtungen zum Bilden eines SOBP vereinfacht werden kann.

[0086] Wenn wie vorstehend beschrieben mehrere Energiearten von Beschleunigern vorbereitet werden, um die Energieart während des Erzeugens von SOBPs zu ändern, ist es möglich, die Reichweiteinstellungsbreite der Reichweitenverschiebungsvorrichtung zu verkleinern und dementsprechend die Anzahl der Reichweitenverschiebungsplatten zu verringern, was zur Folge hat, dass die Reichweitenverschiebungs-Antriebseinheit vereinfacht werden kann.

[0087] Weiter ist es in Reaktion auf eine Änderung der Form einer Energieverteilungsvorrichtung usw. nicht einmal nötig, eine große Anzahl von herkömmlichen Energieverteilungsvorrichtungen RF zu modifizieren. In diesem Fall müssen nur einige Energieverteilungsvorrichtungen zum Erzeugen eines SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite modifiziert werden, was zur Folge hat, dass flexible Maßnahmen ergriffen werden können.

[0088] Wie in **Fig. 9B** gezeigt, ist es außerdem möglich, einen SOBP **30C** zu bilden, dessen Länge durch Steuerung der Anzahl der Wiederholungen der mit der Energieverteilungsvorrichtung zum Erzeugen eines SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite gebildeten SCBPs (PbpM2, PbpM3, PbpM4 usw.) gesteuert wird, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen. Die SOBP-Länge ist abhängig von der Größe eines betroffenen Körperteils und wird bisher in vielen Fällen aus medizinischer Sicht in Schritten von 1 cm geändert. Wenn die Länge eines SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite auf

1 cm eingestellt ist, ist es daher möglich, durch Überlagern von SOBPs, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, einen SOBP mit einer gewünschten Länge zu bilden. Auf diese Weise bewirkt die vorliegende Erfindung, dass ein SOBP mit einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite und einer gewünschten Länge gebildet werden kann.

[0089] Der Aufbau und Betrieb einer Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung werden nachstehend anhand von **Fig. 10A** und **Fig. 10B** beschrieben. Der Aufbau der Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der vorliegenden Ausführungsform ist derselbe wie in **Fig. 1**. Die vorliegende Ausführungsform ist durch den Aufbau der Energieverteilungsvorrichtung zum Erzeugen eines SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite gekennzeichnet.

[0090] **Fig. 10A** und **Fig. 10B** zeigen Diagramme zur Erläuterung der SOBPs, die mit der Energieverteilungsvorrichtung zum Erzeugen eines SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite für die Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung gebildet werden.

[0091] Die Aufweitungsbreite eines zu erzeugenden SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite kann durch Steuerung der Anzahl, Breite und Höhe der Schichten der Energieverteilungsvorrichtungen zum Erzeugen eines SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite geändert werden. Bei der Energieverteilungsvorrichtung zum Erzeugen eines SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite in **Fig. 3A** werden zum Beispiel die Anzahl und Breite der Schichten erhöht, um deren Verhältnisse zu steuern, um die Breite der Bragg-Kurve zu erhöhen und dadurch einen SOBP mit einer großen Aufweitungsbreite zu erzeugen.

[0092] **Fig. 10A** zeigt ein Diagramm der mit der Energieverteilungsvorrichtung zum Erzeugen eines SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite in **Fig. 4**, und **Fig. 10B** zeigt ein Diagramm eines gewünschten SOBP, der mit SOBPs gebildet wird, die jeweils eine große Aufweitungsbreite aufweisen.

[0093] Wenn zum Beispiel die Aufweitungsbreite eines mit der Energieverteilungsvorrichtung M-RF zum Erzeugen eines solchen SOBP erzeugten SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite 1 cm beträgt, wird die Aufweitungsbreite eines SOBP mit einer geringen Dosisverteilungsbreite nach der vorliegenden Ausführungsform auf 2 cm, 3 cm oder dergleichen eingestellt. Wenn ein kombinierter SOBP mit einer Breite von 12 cm gebildet werden soll, wird zum Beispiel ein SOBP (PbPSM) mit einer Breite von 1 cm und einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung

lung auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite am von der Körperoberfläche aus tiefsten Abschnitt des Zielbereichs gebildet und elf SOBPs (PbpM2, PbpM3 usw.), die jeweils eine Breite von 1 cm und eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, werden über den Bereich vom zweitiefsten Abschnitt zum flachsten Zielbereich auf der Körperoberflächenseite gebildet. Daher wird das Bilden eines SOBPs mit einer geringen Dosisverteilungsbreite zwölfmal wiederholt, um den kombinierten SOBP mit einer Breite von 12 cm zu bilden.

[0094] Wenn im Gegensatz dazu SOBPs verwendet werden, die jeweils eine große Aufweitungsbreite aufweisen, wie im Falle der vorliegenden Ausführungsform, wird zuerst ein SOBP (PbpSM) mit einer Breite von 1 cm am von der Körperoberfläche aus tiefsten Abschnitt des Zielbereichs gebildet. Danach werden zum Beispiel fünf SOBPs (PbpM2', PbpM3' usw.), die jeweils eine Breite von 2 cm aufweisen, und ein SOBP mit einer Breite von 1 cm über den Bereich vom zweitiefsten Abschnitt zum Zielbereich auf der Körperoberflächenseite gebildet. Auf diese Weise wird die Anzahl der Wiederholungen von SOBPs, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, auf sieben verringert, wenn ein SOBP **30D** gebildet werden soll.

[0095] Weiter wird, wenn ein SOBP (PbpSM) mit einer Breite von 1 cm am von der Körperoberfläche aus tiefsten Abschnitt des Zielbereichs erzeugt wird, und drei SOBPs, die jeweils eine Breite von 3 cm aufweisen, und ein SOBP mit einer Breite von 2 cm über den Bereich vom zweitiefsten Abschnitt zum flachsten Zielbereich auf der Körperoberflächenseite gebildet werden, die Anzahl der Wiederholungen von SOBPs, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, auf fünf verringert, wenn ein kombinierter SOBP gebildet werden soll. Auf diese Weise ist es zum Verringern der Anzahl der Wiederholungen von SOBPs, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, zum Bilden eines kombinierten SOBPs möglich, eine oder mehrere Energieverteilungsvorrichtungen M-RF und eine oder mehrere Energieverteilungsvorrichtungen SM-RF vorzubereiten, wobei die durch beide erzeugten SOBP-Breiten voneinander abweichen, um die Anzahl der Wiederholungen zu verringern.

[0096] Auf diese Weise bietet nach der vorliegenden Ausführungsform die Verwendung von SOBPs, die jeweils eine große Aufweitungsbreite aufweisen, den Vorteil, dass die Anzahl der Wiederholungen von SOBPs, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, verringert werden kann, wenn ein kombinierter SOBP gebildet werden soll. Im Einzelnen bewirkt dies eine Verkürzung der Behandlungszeit. Außerdem ergibt sich durch die größeren Breiten der SOBPs die Wirkung, dass die Ebenheit eines kombinierten SOBPs nicht so stark beeinflusst wird,

auch wenn die Position eines SOBPs mit einer geringen Dosisverteilungsbreite verschoben wird.

[0097] Der Aufbau und Betrieb einer Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der dritten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung werden nachstehend anhand von [Fig. 11A](#) und [Fig. 11B](#) beschrieben. Der Aufbau der Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der vorliegenden Ausführungsform ist derselbe wie in [Fig. 1](#). Die vorliegende Ausführungsform ist durch den Aufbau der Energieverteilungsvorrichtung zum Erzeugen eines SOBPs mit einer geringen Dosisverteilungsbreite gekennzeichnet.

[0098] [Fig. 11A](#) und [Fig. 11B](#) zeigen Diagramme zur Erläuterung der SOBPs, die mit der Energieverteilungsvorrichtung zum Erzeugen eines SOBPs mit einer geringen Dosisverteilungsbreite für die Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der dritten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung gebildet werden.

[0099] In einem ersten Beispiel nach der vorliegenden Ausführungsform wird die Form der Dosisverteilung geändert. Hierbei wird die in [Fig. 4](#) gezeigte Energieverteilungsvorrichtung zum Erzeugen eines SOBPs mit einer geringen Dosisverteilungsbreite benutzt; die Intensität des Protonenstrahls oder die Bestrahlungsdosis wird jedoch gesteuert, um SOBPs (PbpM2A, PbpM3A usw.) zu erzeugen, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite und eine große Dosis aufweisen, wie in [Fig. 11A](#) gezeigt. Die Intensitäten der SOBPs, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, werden erhöht, um einen SOBP **30E** mit einer größeren Dosis auf einer von der Körperoberfläche aus flacheren Seite zu bilden.

[0100] Weiter wird in einem zweiten Beispiel nach der vorliegenden Ausführungsform die in [Fig. 4](#) gezeigte Energieverteilungsvorrichtung zum Erzeugen eines SOBPs mit einer geringen Dosisverteilungsbreite benutzt; die Intensität des Protonenstrahls wird jedoch verringert oder die Bestrahlungsdosis wird gesteuert, um SOBPs (PbpM2B, PbpM3B usw.) zu erzeugen, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite und eine geringe Dosis aufweisen, wie in [Fig. 11B](#) gezeigt. Die Intensitäten der SOBPs, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, werden verringert, um einen SOBP **30F** mit einer geringeren Dosis auf einer von der Körperoberfläche aus flacheren Seite zu bilden.

[0101] Bei der vorliegenden Ausführungsform ist es möglich, die SOBP-Dosisverteilung durch Steuerung der Intensität des Protonenstrahls oder der Bestrahlungsdosis zu steuern, um die Größenordnung der Bestrahlungsdosis eines SOBPs mit einer geringen Dosisverteilungsbreite zu steuern. Wenn das Verfahren zur Steuerung der Größenordnung der Bestrahlungsdosis eines SOBPs mit einer geringen Dosisver-

teilungsbreite durch Steuerung der Intensität des Protonenstrahls oder der Dosis auf einen SOBP mit einer großen Aufweitungsbreite angewendet wird, ist es möglich, die SOBP-Dosisverteilung zu steuern, während gleichzeitig die Anzahl der Wiederholungen von SOBPs, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, verringert wird.

[0102] In dieser Weise wird durch Steuern der Größenordnung der Bestrahlungsdosis eines SOBPs mit einer geringen Dosisverteilungsbreite eine Wirkung erreicht, dass die SOBP-Dosisverteilung auf eine gewünschte Form gesteuert werden kann. Dies ist insbesondere im Falle eines Kohlenstoffstrahls wirksam, um einen SOBP mit einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite zu bilden, während gleichzeitig die SOBP-Dosisverteilung eine Neigung erhält.

[0103] Als Nächstes werden nachstehend der Aufbau und Betrieb einer Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach einer vierten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung beschrieben. Der Aufbau der Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach der vorliegenden Ausführungsform ist derselbe wie in [Fig. 1](#).

[0104] Bei der vorliegenden Ausführungsform werden SOBPs, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, mit der in [Fig. 4](#) gezeigten Energieverteilungsvorrichtung zum Erzeugen eines SOBPs mit einer geringen Dosisverteilungsbreite erzeugt; auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite des Zielbereichs wird das Bestrahlungsfeld jedoch direkt bestrahlt, ohne den Strahl durch eine Energieverteilungsvorrichtung hindurchtreten zu lassen. Im Einzelnen wird das Bestrahlungsfeld direkt bestrahlt, indem man den Protonenstrahl durch die kreisförmige Öffnung OP1 der in [Fig. 6](#) und [Fig. 7](#) gezeigten Energieverteilungsabschnittshalterung 42 hindurchtreten lässt.

[0105] Weil das Bestrahlungsfeld direkt bestrahlt wird, weist der Bragg-Peak auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite des Zielbereichs eine schmalere Aufweitung auf, was zu einer steil abfallenden Flanke der Dosisverteilung auf der von der Körperoberfläche aus tiefen Seite führt. Vom zweitiefsten Abschnitt des Zielbereichs werden mit der Energieverteilungsvorrichtung zum Erzeugen eines solchen SOBPs SOBPs gebildet, die jeweils eine geringe Dosisverteilungsbreite aufweisen, um auf diese Weise einen kombinierten SOBP mit einer für den Zielbereich geeigneten Länge zu bilden.

[0106] Die vorliegende Ausführungsform hat eine Wirkung zur Folge, dass ein SOBP durch die Kombination einer Art von in [Fig. 4](#) gezeigten Energieverteilungsvorrichtung und direkter Protonenbestrahlung gebildet werden kann.

[0107] Außerdem kann diese direkte Bestrahlung auch verwendet werden, um einen Abschnitt mit einer unzureichenden Dosis zu bestrahlen, um die Ebenheit des SOBPs sicherzustellen.

[0108] Obwohl vorstehend die Bestrahlungsvorrichtung und das Verfahren eines Protonenstrahlbehandlungssystems mit einem Protonenstrahl beschrieben worden sind, ist dieses Bestrahlungsverfahren auch für eine Bestrahlungsvorrichtung in einem Teilchenstrahlbehandlungssystem mit einem Schwerionenstrahl wie zum Beispiel Kohlenstoff, Helium usw. anwendbar.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- W. T. Chu, B. A. Ludewigt und T. R. Renner, Rev. Sci. Instrum. 64, 2055–2122, 1993 [\[0004\]](#)
- B. Schaffner, et al., Med. Phys. 27 (4), 716–724, April 2000 [\[0006\]](#)

Patentansprüche

1. Teilchenbestrahlungsvorrichtung zum Bestrahlen eines Zielbereichs mit einem Teilchenstrahl (1), wobei die Teilchenbestrahlungsvorrichtung mehrere Energieverteilungsvorrichtungen (RF, M-RF, SM-RF) zum Bilden von Hochdosisbereichen mit unterschiedlichen Formen der Dosisverteilung aufweist und Dosisverteilungen in Tiefenrichtung durch die mehreren Energieverteilungsvorrichtungen kombiniert werden.

2. Teilchenbestrahlungsvorrichtung zum Bestrahlen eines Zielbereichs mit einem Teilchenstrahl (1), wobei die Teilchenbestrahlungsvorrichtung mehrere Energieverteilungsvorrichtungen (RF, M-RF, SM-RF) mit unterschiedlichen geometrischen Formen aufweist und Dosisverteilungen in Tiefenrichtung durch die mehreren Energieverteilungsvorrichtungen kombiniert werden.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, wobei die mehreren Energieverteilungsvorrichtungen (RF, M-RF, SM-RF) eine erste Energieverteilungsvorrichtung und eine zweite Energieverteilungsvorrichtung aufweisen, die eine steilere Dosisverteilung in der Laufrichtung des Teilchenstrahls (1) als die erste Energieverteilungsvorrichtung bildet.

4. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, weiter aufweisend einen Monitor (7) zum Messen der Bestrahlungsdosis und eine Steuereinheit (20) zum Steuern der Bestrahlungsdosis, wobei die Teilchenbestrahlungsvorrichtung dazu eingerichtet ist, die folgenden Schritte durchzuführen: Einteilen des Zielbereichs in Schichten, Bestimmen mindestens einer Energieverteilungsvorrichtung und einer Bestrahlungsdosis, die für die jeweilige Schicht verwendet werden, Messen der Bestrahlungsdosis für jede Schicht mit Hilfe des Monitors (7) und Erzeugen von Dosisverteilungen mit der durch die Steuereinheit (20) gesteuerten Bestrahlungsdosis und Kombinieren der erzeugten Dosisverteilungen.

5. Vorrichtung nach Anspruch 4, weiter aufweisend eine erste Energieverteilungsvorrichtung zum Bilden eines ersten Hochdosisbereichs und eine zweite Energieverteilungsvorrichtung zum Bilden eines zweiten Hochdosisbereichs am von der Körperoberfläche aus tiefsten Abschnitt des Zielbereichs, wobei die Teilchenbestrahlungsvorrichtung dazu ein-

gerichtet ist, die folgenden Schritte durchzuführen: Bilden des zweiten Hochdosisbereichs am von der Körperoberfläche aus tiefsten Abschnitt des Zielbereichs durch Verwendung der zweiten Energieverteilungsvorrichtung und Bilden der ersten Hochdosisbereiche durch einmalige oder mehrmalige Verwendung der ersten Energieverteilungsvorrichtung über den Bereich vom zweitiefsten Abschnitt zum flachsten Zielbereich auf der Körperoberflächenseite, wodurch die gebildeten ersten und zweiten Hochdosisbereiche überlagert werden, um einen Hochdosisbereich mit einer für den Zielbereich geeigneten Länge zu bilden.

6. Vorrichtung nach Anspruch 4, weiter aufweisend eine Reichweitenverschiebungsvorrichtung (6) zum Ändern der Bestrahlungstiefe des Teilchenstrahls (1), eine Reichweitenverschiebungs-Antriebseinheit (24) zum Antreiben der Reichweitenverschiebungsvorrichtung (6) und eine oder mehrere Energiearten als Teilchenstrahlenergie eines Beschleunigers, wobei die Teilchenbestrahlungsvorrichtung dazu eingerichtet ist, die folgenden Schritte durchzuführen: Bilden von Hochdosisbereichen durch Ändern der Bestrahlungstiefe des Teilchenstrahls (1) durch Verwendung entweder der von der Reichweitenverschiebungs-Antriebseinheit (24) angetriebenen Reichweitenverschiebungsvorrichtung (6) oder der Energieart oder von beidem und durch Verwendung der ersten und der zweiten Energieverteilungsvorrichtung (RF, M-RF, SM-RF), wodurch die gebildeten Hochdosisbereiche überlagert werden.

7. Teilchenbestrahlungsverfahren mit der Teilchenbestrahlungsvorrichtung nach Anspruch 5, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst: Bilden des zweiten Hochdosisbereichs am von der Körperoberfläche aus tiefsten Abschnitt des Zielbereichs durch Verwendung der zweiten Energieverteilungsvorrichtung und Bilden der ersten Hochdosisbereiche durch einmalige oder mehrmalige Verwendung der ersten Energieverteilungsvorrichtung über den Bereich vom zweitiefsten Abschnitt zum flachsten Zielbereich auf der Körperoberflächenseite, wodurch die gebildeten ersten und zweiten Hochdosisbereiche überlagert werden, um einen Hochdosisbereich mit einer für den Zielbereich geeigneten Länge zu bilden.

8. Teilchenbestrahlungsverfahren zum Bestrahlen eines Zielbereichs mit einem Teilchenstrahl (1), wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst: direktes Bestrahlen des Zielbereichs mit dem Teilchenstrahl (1), um einen Hochdosisbereich an einem von der Körperoberfläche aus tiefen Abschnitt des Zielbereichs zu bilden, Bestrahlen des Bereichs von einem tieferen Ab-

schnitt als dieser tiefe Abschnitt zum flachsten Zielbereich auf der Körperoberflächenseite mit dem Teilchenstrahl (1) durch einmalige oder mehrmalige Verwendung einer Energieverteilungsvorrichtung, um Hochdosisbereiche zu bilden, wodurch die gebildeten Hochdosisbereiche überlagert werden, um einen gewünschten Hochdosisbereich mit einer für den Zielbereich geeigneten Länge zu bilden.

9. Teilchenstrahlbehandlungssystem, aufweisend einen Beschleuniger zum Beschleunigen eines Teilchenstrahls (1) und eine Teilchenbestrahlungsvorrichtung zum Empfangen des Teilchenstrahls (1) von dem Beschleuniger und Bestrahlen eines Zielbereichs mit dem Teilchenstrahl, wobei die Teilchenbestrahlungsvorrichtung eine erste Energieverteilungsvorrichtung und eine zweite Energieverteilungsvorrichtung aufweist, die eine steilere Dosisverteilung in der Laufrichtung des Teilchenstrahls (1) als die erste Energieverteilungsvorrichtung bildet, und wobei mindestens die ersten und zweiten Energieverteilungsvorrichtungen (RF, M-RF, SM-RF) benutzt werden, um Dosisverteilungen in der Laufrichtung des Teilchenstrahls (1) zu kombinieren.

10. Vorrichtung nach Anspruch 3 oder System nach Anspruch 9, weiter aufweisend eine Steuereinheit (20), die eine Steuerung durchführt, um die zweite Energieverteilungsvorrichtung in einem Weg des Teilchenstrahls (1) anzuordnen, wenn eine Schicht am tiefsten Abschnitt von mehreren eingeteilten Schichten des Zielbereichs mit dem Teilchenstrahl (1) bestrahlt wird.

11. Vorrichtung oder System nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei der Teilchenstrahl (1) ein Protonenstrahl oder ein Schwerteilchenstrahl ist.

Es folgen 10 Blatt Zeichnungen

FIG.1

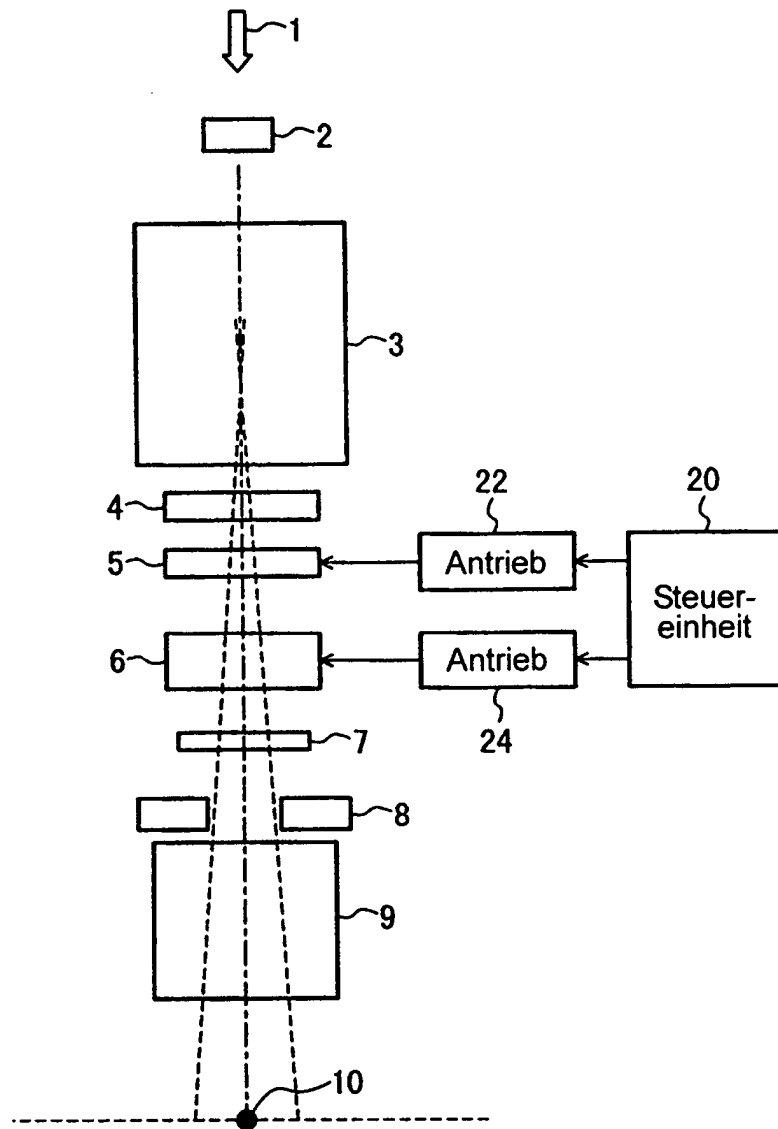


FIG.2B

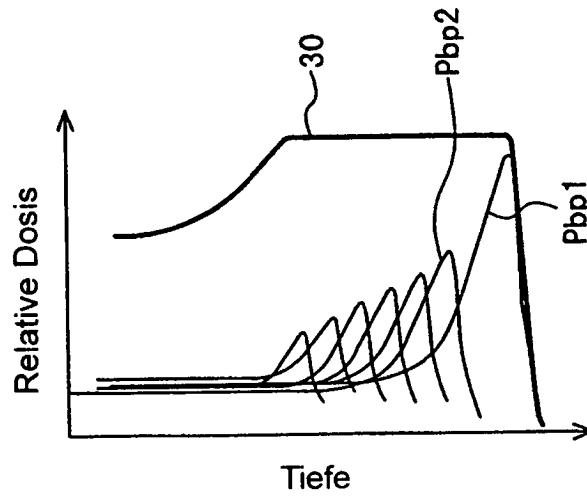


FIG.2A

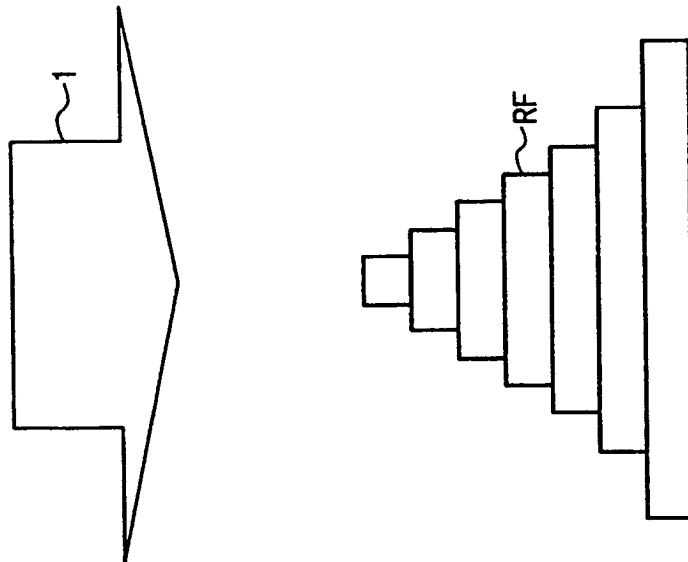


FIG.3C

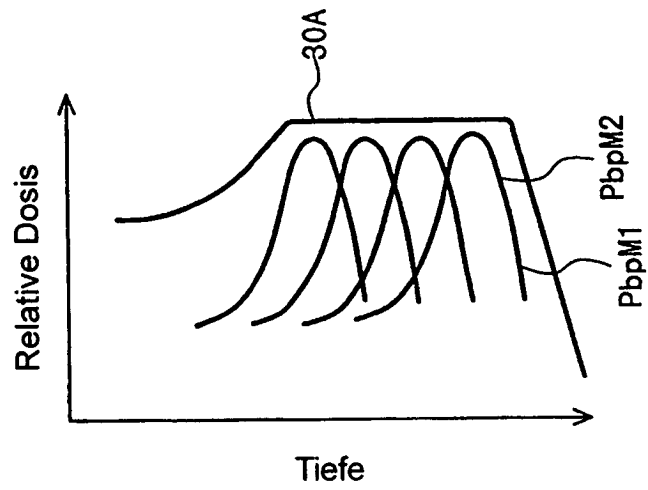


FIG.3B

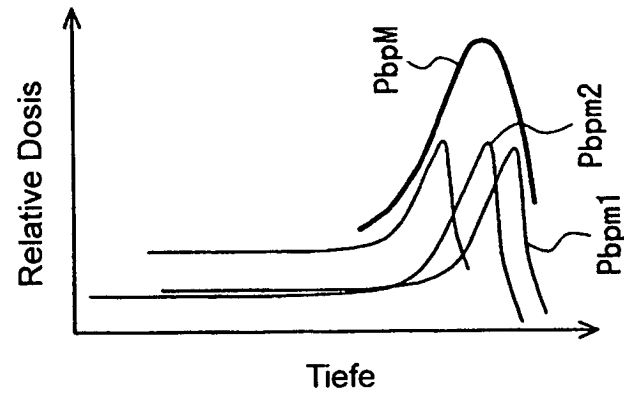


FIG.3A

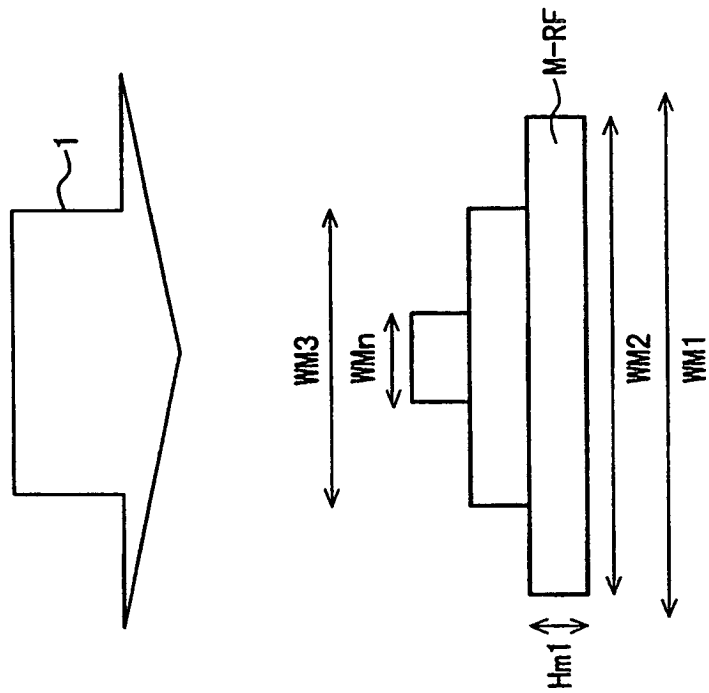


FIG.4

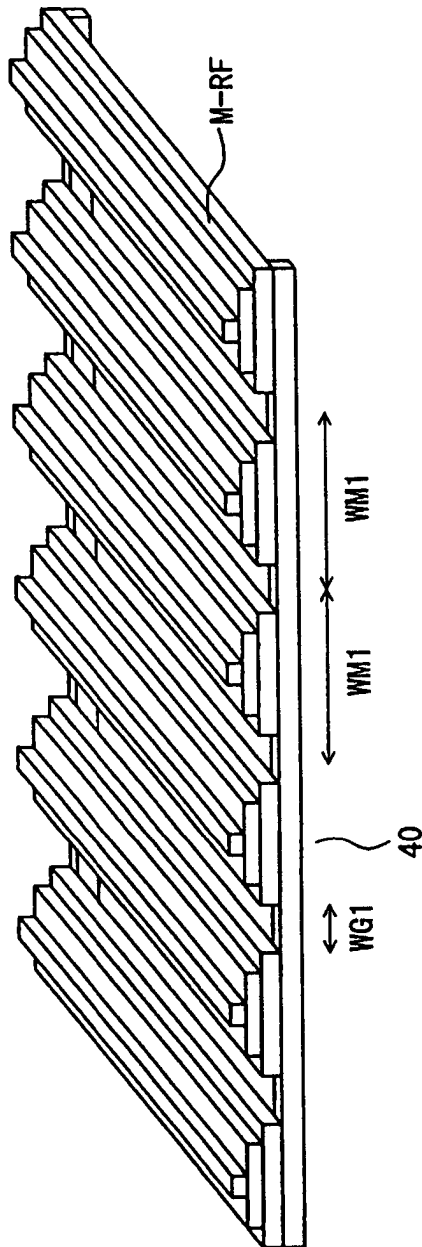


FIG.5B

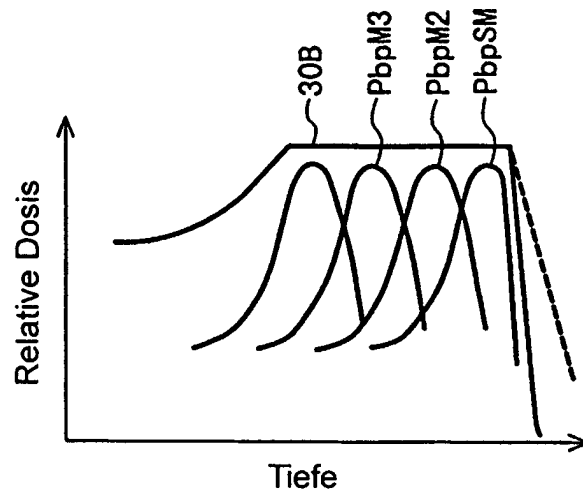


FIG.5A

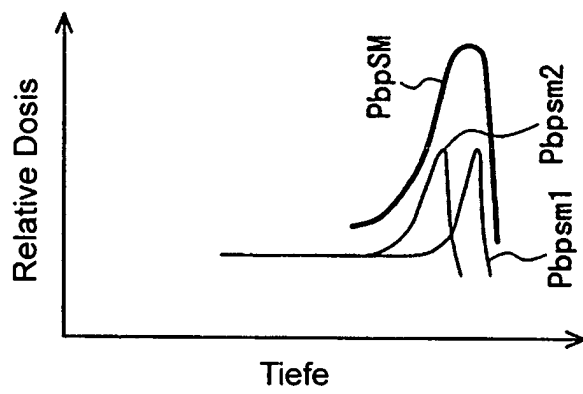


FIG.6

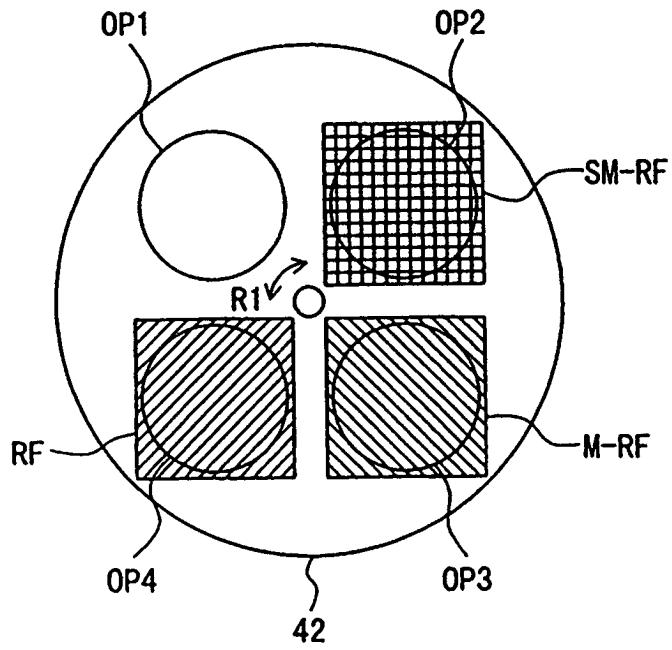


FIG.7

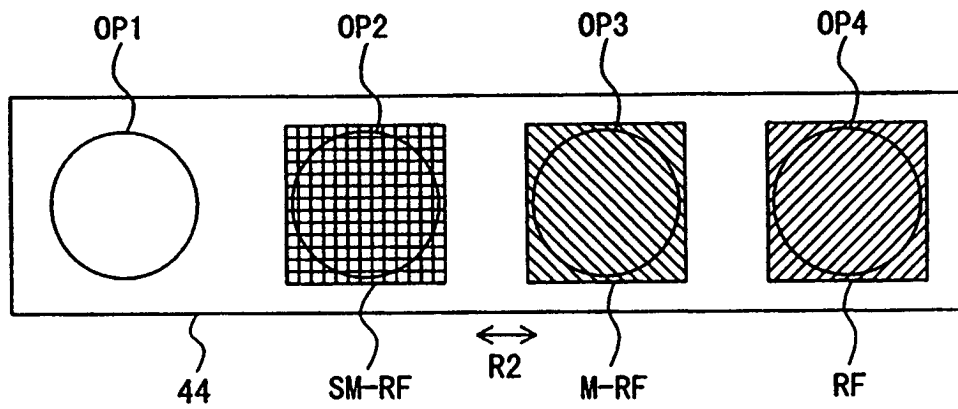


FIG.8

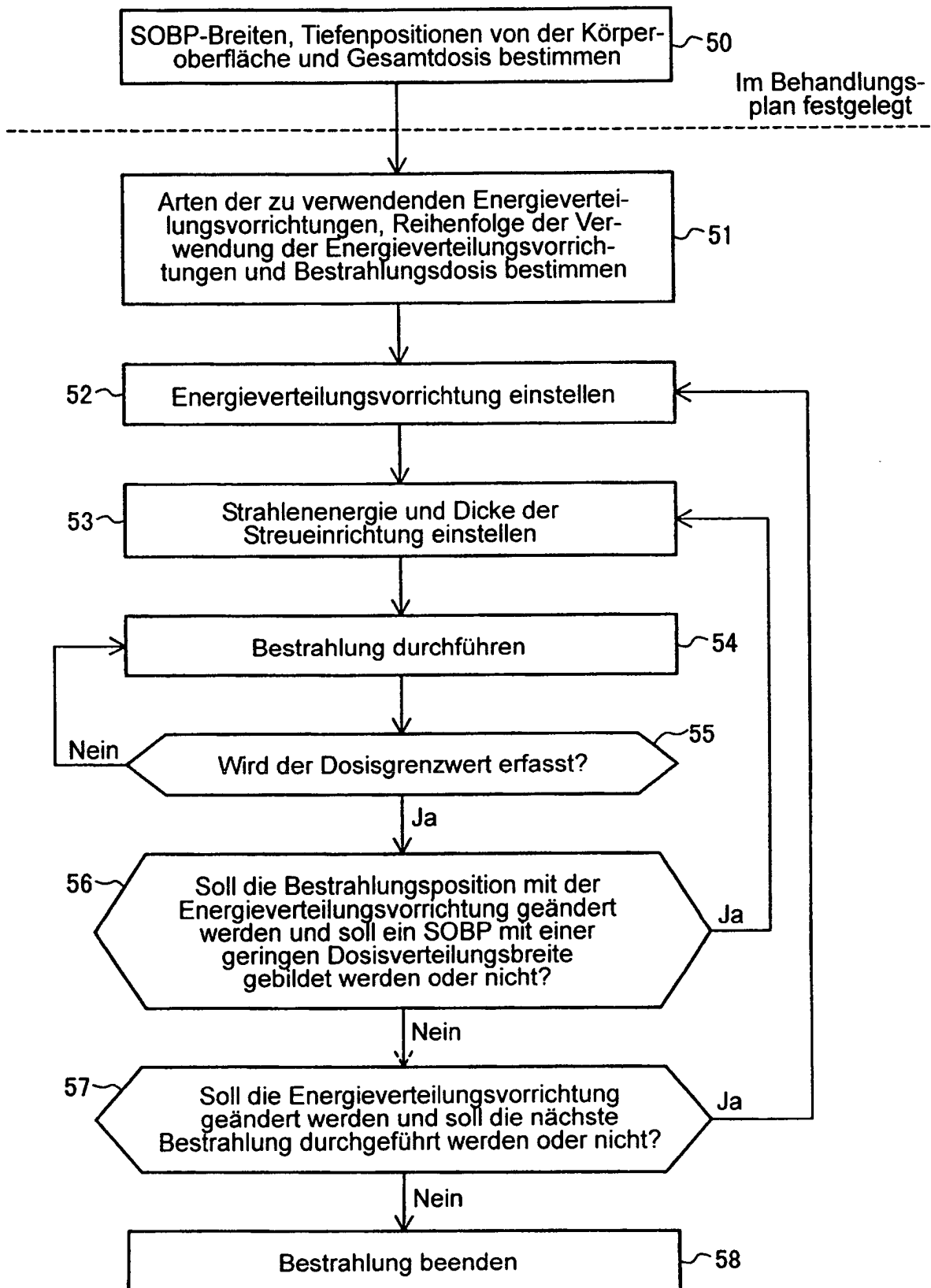


FIG.9B

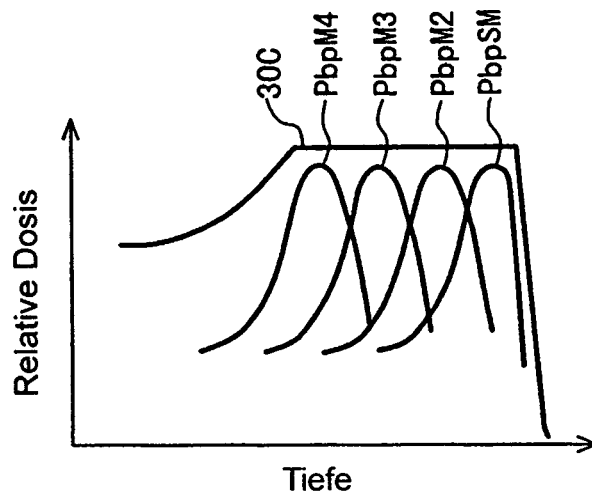


FIG.9A

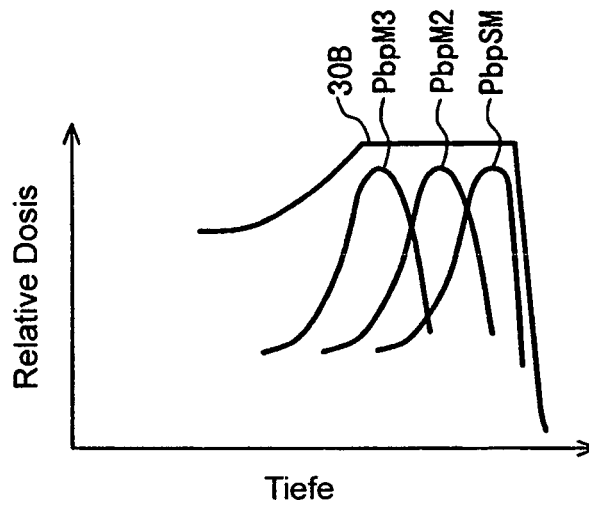


FIG.10B

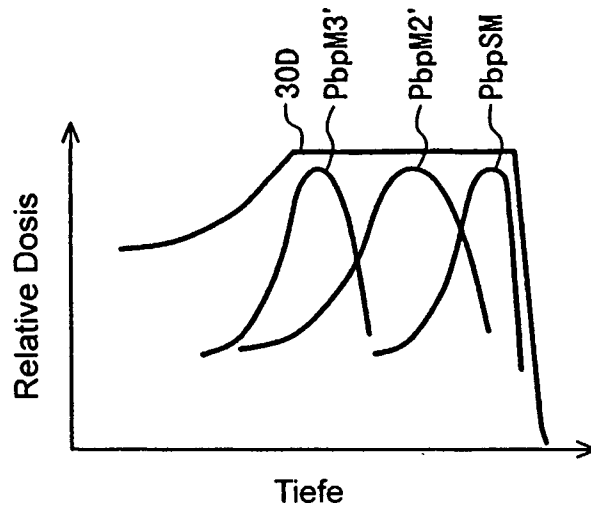


FIG.10A

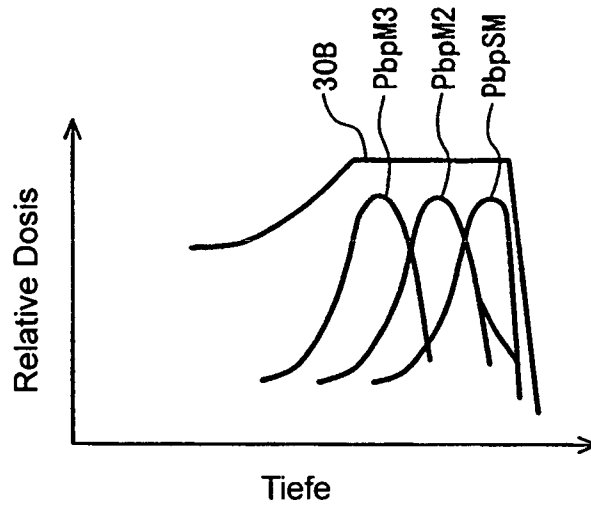


FIG.11B

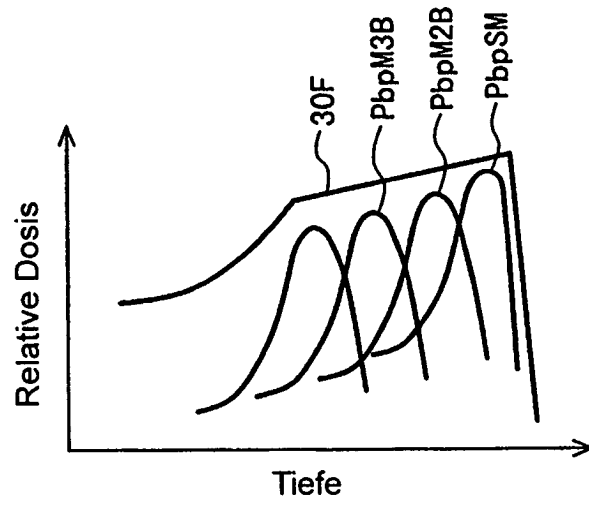


FIG.11A

