



(12)

Veröffentlichung

der internationalen Anmeldung mit der
 (87) Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2016/063548**
 in deutscher Übersetzung (Art. III § 8 Abs. 2 IntPatÜG)
 (21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2015 004 797.2**
 (86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/JP2015/005352**
 (86) PCT-Anmeldetag: **24.10.2015**
 (87) PCT-Veröffentlichungstag: **28.04.2016**
 (43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
 in deutscher Übersetzung: **13.07.2017**

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

(30) Unionspriorität:
2014-217869 **24.10.2014** **JP**

(74) Vertreter:
**Winter, Brandl, Fürniss, Hübner, Röss, Kaiser,
 Polte Partnerschaft mbB, Patentanwälte, 85354
 Freising, DE**

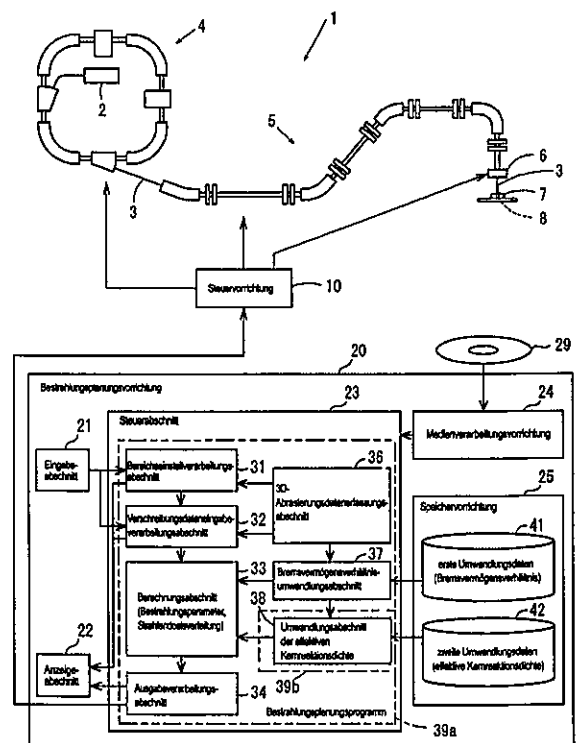
(71) Anmelder:
**National Institutes for Quantum and Radiological
 Science and Technology, Chiba-shi, Chiba, JP**

(72) Erfinder:
**Inaniwa, Taku, Chiba-shi, JP; Kanematsu,
 Nobuyuki, Chiba-shi, JP**

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Bestrahlungsplanungsvorrichtung und Bestrahlungsplankorrekturverfahren**

(57) Zusammenfassung: Bereitgestellt wird eine Bestrahlungsplanungsvorrichtung, umfassend einen Erfassungsabschnitt (36) für 3D-CT-Wertdaten, einen Verschreibungsdateneingabeabschnitt (32) zum Erfassen von Verschreibungsdaten, einen Bremsverhältnisumwandlungsabschnitt (37) und einen Umwandlungsabschnitt (38) der effektiven Kernreaktionsdichte, die auf Grundlage der 3D-CT-Wertdaten erste Umwandlungsdaten (41) und zweite Umwandlungsdaten (42) erstellen, und einen Berechnungsabschnitt (33), der auf Grundlage der Verschreibungsdaten und der ersten Umwandlungsdaten (41) und zweiten Umwandlungsdaten (42) eine Strahlendosisverteilung ermittelt, wobei der Bremsverhältnisumwandlungsabschnitt (37) und der Umwandlungsabschnitt (38) der effektiven Kernreaktionsdichte anhand einer physikalischen Größe, die die Fragmentierbarkeit von Teilchen eines Ladungsteilchenstrahls (3) anzeigt, eine Korrekturverarbeitung an aus den 3D-CT-Wertdaten erlangten Daten durchführen und daraufhin die Strahlendosisverteilung ermitteln. Bei einer Berechnung der Strahlendosisverteilung im Körper für einen Teilchenbestrahlungsplan kann dadurch ein Strahlendosisfehler, der darauf zurückgeht, dass sich die Kernreaktionswahrscheinlichkeit einfallender Teilchen im Körper von ihrer Kernreaktionswahrscheinlichkeit in Wasser unterscheidet, leicht und mit hoher Genauigkeit korrigiert werden.



Beschreibung

Technisches Gebiet

[0001] Diese Erfindung betrifft eine Bestrahlungsplanungsvorrichtung, ein Bestrahlungsplanungsprogramm, ein Bestrahlungsplankorrekturprogramm und ein Bestrahlungsplankorrekturverfahren, die dazu dienen, beispielsweise einen Teilchenbestrahlungsplan zu erstellen.

Allgemeiner Stand der Technik

[0002] Im Stand der Technik führt eine Bestrahlungsplanungsvorrichtung für Teilchentherapie, zu deren Vertretern die Protonenstrahlentherapie und die Kohlenstoffionentherapie gehören, eine Näherung des menschlichen Körpers anhand von Wasser durch, welches eine andere Dichte aufweist, und führt durch Anwenden der im Wasser gemessenen Strahlendosisverteilung auf den menschlichen Körper, der ein ungleichförmiges Medium ist, eine Berechnung der Strahlendosisverteilung im Körper aus (siehe japanische Patentoffenlegungsschrift Nr. 2013-252420). In der Praxis wird mithilfe einer CT-Vorrichtung und einer Umrechnungstabelle, die für jeweiligen Aufnahmebedingungen im Voraus bereitgestellt wird, ein Pixelwert (CT-Wert) für CT-Aufnahmen eines Patienten in ein Bremsvermögensverhältnis umgewandelt, welches die effektive Dichte des Materials gegenüber den Teilchenstrahlen anzeigt, um auf diese Weise den menschlichen Körper als Wasser auszudrücken, dessen Dichte verschieden ist. Der CT-Wert stellt dabei einen effektiven Strahlenabschwächungskoeffizienten des Materials für die Röntgenstrahlen dar.

[0003] Die Zusammensetzung des menschlichen Körpers unterscheidet sich jedoch von derjenigen von Wasser. Der Anteil an Kernreaktionen, die die einfallenden Teilchen im Körper auslösen, unterscheidet sich daher von dem Anteil an Kernreaktionen, die sie in Wasser auslösen. Ein unterschiedlicher Anteil ausgelöster Kernreaktionen bedeutet, dass die Anzahl einfallender Teilchen, die in die Nähe ihrer Reichweite gelangen, im Körper und in Wasser unterschiedlich ist.

[0004] Der Anteil einfallender Teilchen, die annähernd das Ende ihres Wegs erreichen, beeinflusst unmittelbar die Höhe des Bragg-Peak. Daher ergibt sich in der Strahlendosisverteilung eines Bestrahlungsplans, bei welchem die in Wasser gemessene Strahlendosisverteilung auf den Körper angewandt wird, ein Fehler, der auf die unterschiedlichen Kernreaktionen in Wasser und im menschlichen Körper zurückgeht. Das Ausmaß dieses Fehlers ist zudem je nach Patient und Strahlenrichtung verschieden.

[0005] Allerdings wurde bislang noch kein praxistauglicher Algorithmus zum Korrigieren dieses Fehlers veröffentlicht.

[0006] Andererseits wird bei der Messung der absoluten Strahlendosis zu Qualitätssicherungszwecken als Ersatz für das Referenzmaterial Wasser häufig ein Festkörperphantom verwendet. Es wurde berichtet, dass in diesem Fall aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung von Wasser und dem Festkörperphantom (bzw. die darauf zurückzuführende unterschiedliche Kernreaktionswahrscheinlichkeit) ein Strahlendosisfehler auftritt (siehe Nicht-Patentdokumente 1, 2).

[0007] Zur Korrektur dieses Strahlendosisfehlers wird bei der Messung der absoluten Strahlendosis anhand der Monte-Carlo-Methode und tatsächlicher Messdaten ein Koeffizient zur Umwandlung des im Festkörperphantom gemessenen Werts in den Wert im Wasser (Fluenzkorrekturfaktor) ermittelt. Anhand dieses Koeffizienten wird der im Festkörperphantom gemessene Wert in den Wert im Wasser umgewandelt (siehe Nicht-Patentdokumente 3, 4).

[0008] Idealerweise kann auch der beim Berechnen der Strahlendosisverteilung im Körper des Patienten auftretende Strahlendosisfehler mithilfe des Fluenzkorrekturfaktors korrigiert werden.

[0009] Allerdings ist die tatsächliche Messung des Korrekturfaktors im Körper des Patienten unmöglich. Auch ist es unrealistisch, den Korrekturfaktor für jeden Patienten und jeden Strahl nach der Monte-Carlo-Methode zu ermitteln.

Patentschriften des Stands der Technik

[0010]

Patentdokument 1: Japanische Patentoffenlegungsschrift Nr. 2013-252420

Nicht-Patentdokumente

[0011]

Nicht-Patentdokument 1: Palmans, H. und Verhaegen, F., 1997, Calculated depth dose distributions for proton beams in some low-Z materials, Phys. Med. Biol. 42, 1175–83

Nicht-Patentdokument 2: Schneider, U., Pernler, P., Besserer, J., Dellert, M., Moosburger, M., Boer J., Pedroni, E. und Boehringer, T., 2002, The water equivalence of solid materials used for dosimetry with small proton beams, Med. Phys. 29, 2946–51

Nicht-Patentdokument 3: Palmans, H. und Verhaegen, F., 2005, Assigning nonelastic nuclear interaction cross sections to Hounsfield units for Monte Carlo treatment planning of proton beams, Phys. Med. Biol. 50, 991–1000

Nicht-Patentdokument 4: Al-Sulaiti, L., Shipley, D., Thomas, R., Kackperek, A., Regan, P. und Palmans, H., 2010, Water equivalence of various materials for clinical proton dosimetry by experiment and Monte Carlo simulation, Nucl. Instrum. Meth. A619, 344–7

Kurzdarstellung der Erfindung

Aufgabe der vorliegenden Erfindung

[0012] Die vorliegende Erfindung wurde unter Berücksichtigung der vorstehenden Probleme getätigt, und ihr liegt die Aufgabe zugrunde, eine Bestrahlungsplanungsvorrichtung, ein Bestrahlungsplanungsprogramm, ein Bestrahlungsplankorrekturprogramm und ein Bestrahlungsplankorrekturverfahren bereitzustellen, wobei bei der Berechnung der Strahlendosisverteilung im Körper für einen Teilchenbestrahlungsplan ein Strahlendosisfehler, der darauf zurückgeht, dass sich die Kernreaktionswahrscheinlichkeit einfallender Teilchen im Körper von ihrer Kernreaktionswahrscheinlichkeit in Wasser unterscheidet, leicht und mit hoher Genauigkeit korrigiert werden kann.

Mittel zum Lösen der Aufgabe

[0013] Bei der vorliegenden Erfindung handelt es sich um eine Bestrahlungsplanungsvorrichtung zum Erstellen eines Bestrahlungsplans für Teilchenstrahlen, umfassend einen 3D-Abrasterungsdatenerfassungsabschnitt, der 3D-Abrasterungsdaten erfasst, indem ein Bestrahlungsobjekt der Teilchenstrahlen durch radioaktive Strahlen, die sich von den Teilchenstrahlen unterscheiden, einer 3D-Abrasterung unterzogen wird, einen Verschreibungsdatenerfassungsabschnitt zum Erfassen von Behandlungsdaten, die für das Bestrahlungsobjekt eine Position und eine Dosis eines Bereichs darstellen, der mit Teilchenstrahlen bestrahlt wird, einen Erzeugungsabschnitt für physikalische Reaktionsgrößenverteilungsdaten, der auf Grundlage der 3D-Abrasterungsdaten physikalische Reaktionsgrößenverteilungsdaten zur Verteilung einer physikalischen Größe erstellt, die das Vermögen des Materials des Bestrahlungsobjekts darstellt, welches mit den Teilchenstrahlen reagiert, und einen Strahlendosisverteilungsberechnungsabschnitt, der auf Grundlage der Verschreibungsdaten und der physikalischen Reaktionsgrößenverteilungsdaten die Strahlendosisverteilung ermittelt, wobei der Erzeugungsabschnitt für physikalische Reaktionsgrößenverteilungsdaten durch einen Bremsvermögensverhältnis-Korrekturverarbeitungsabschnitt zum Erstellen von dreidimensionale Bremsvermögensverhältnisdaten, der die 3D-Abrasterungsdaten in ein Bremsvermögensverhältnis umwandelt, das eine physikalische Größe ist, die darstellt, wie leistungsfähig ein betrachtetes Material in Bezug auf Wasser hinsichtlich der Abbremsung der einfallenden Teilchen ist, und einen Bestrahlungsobjektmaterial-Korrekturverarbeitungsabschnitt gebildet ist, der aus den 3D-Bremsvermögensverhältnisdaten einen Korrekturfaktor ermittelt, der die Differenz zwischen Wasser und dem Bestrahlungsobjektmaterial darstellt, und anhand des Korrekturfaktors eine Strahlendosisverteilung der Teilchenstrahlen für eine jeweilige Tiefe korrigiert, sowie ein Bestrahlungsplanungsprogramm, ein Bestrahlungsplankorrekturprogramm und Bestrahlungsplankorrekturverfahren, die diese verwenden.

Wirkung der Erfindung

[0014] Gemäß der vorliegenden Erfindung können eine Bestrahlungsplanungsvorrichtung, ein Bestrahlungsplanungsprogramm, ein Bestrahlungsplankorrekturprogramm und ein Bestrahlungsplankorrekturverfahren bereitgestellt werden, wobei bei der Berechnung der Strahlendosisverteilung im Körper für einen Teilchenbestrahlungsplan ein Strahlendosisfehler, der darauf zurückgeht, dass sich die Kernreaktionswahrscheinlichkeit einfallender Teilchen im Körper von ihrer Kernreaktionswahrscheinlichkeit in Wasser unterscheidet, leicht und mit hoher Genauigkeit korrigiert werden kann.

Kurzbeschreibung der Figuren

[0015] Es zeigen:

[0016] Fig. 1 eine erläuternde Ansicht anhand von Graphen, die die Strahlendosis darstellen;

[0017] Fig. 2 eine erläuternde Ansicht anhand von Graphen, die in vereinfachter Weise die vorliegende Strahlendosisverteilungskorrektur darstellen;

[0018] Fig. 3 eine erläuternde Ansicht, die ein Bild mit 3D-Abrasterungsdaten und ein Bild nach der Umwandlung zeigt;

[0019] Fig. 4 einen Graphen, der die Strahlendosisstiefenverteilung von Protonenstrahlen in Wasser und den Beitrag von Wechselwirkungen darstellt;

[0020] Fig. 5 eine erläuternde Ansicht, die die Beziehung zwischen dem Bremsvermögensverhältnis von menschlichem ICRU-Gewebe und jeweiligen Korrekturfaktoren darstellt;

[0021] Fig. 6 Bilder und ein Histogramm, die eine Reihe von Umwandlungen darstellen;

[0022] Fig. 7 eine erläuternde Ansicht, die den Gesamtaufbau eines Teilchenstrahlenbestrahlungssystems darstellt; und

[0023] Fig. 8 eine erläuternde Ansicht, die den Gesamtaufbau eines Teilchenstrahlenbestrahlungssystems 1A gemäß einer zweiten Ausführungsform darstellt.

Ausführungsformen der Erfindung

[0024] Die Erfinder haben intensive Studien betrieben, um bei einer Berechnung der Strahlendosisverteilung im Körper für einen Teilchenbestrahlungsplan einen Strahlendosisfehler zu beseitigen, der darauf zurückgeht, dass sich die Kernreaktionswahrscheinlichkeit einfallender Teilchen im Körper von ihrer Kernreaktionswahrscheinlichkeit in Wasser unterscheidet.

[0025] Sie haben ein Verfahren entwickelt, mit welchem der Strahlendosisfehler sich leicht und mit hoher Genauigkeit korrigieren lässt. Zunächst soll der Grundgedanke dieses Korrekturverfahrens beschrieben werden.

<Bei Kohlenstoffionentherapie>

[0026] Wenn bei der Kohlenstoffionentherapie Kohlenstoffstrahlen in den Körper einfallen, durchlaufen einige der Kohlenstoffionen eine Kernspaltungsreaktion mit den Atomkernen im Körper, so dass ihre Zahl abnimmt. Umgekehrt nimmt die Zahl von durch die Kernspaltungsreaktion erzeugten Fragmentteilchen immer weiter zu, die sich über die Position hinaus ausbreiten, an der die Kohlenstoffstrahlen anhalten.

[0027] Fig. 1(A) ist eine Ansicht, in welcher für die jeweilige Atomzahl die Teilchenzahlstiefenverteilung von Kohlenstoffstrahlen in Wasser mittels Monte-Carlo-Methode hergeleitet wird. Die horizontale Achse zeigt die Tiefe ausgehend von der Körperoberfläche und die vertikale Achse die Fluenz. Die Strahlendosisverteilung $d_j(x, y, z)$ der Kohlenstoffstrahlen beruht auf dem Strahlendosisbeitrag der einfallenden Teilchen (Kohlenstoffionen) und der Fragmentteilchen und kann anhand der Ausbreitungsdifferenz in horizontaler Richtung als Übereinanderlagerung von drei Termen mit der folgenden Gleichung 1 ausgedrückt werden.

[Gleichung 1]

$$d_j(x, y, z) = \sum_{n=1}^3 d_{n,j}(x, y, z) = \sum_{n=1}^3 \left[I_n(s_S(z), E_{0j}, L_j) \cdot G(x, y, \sigma_{n,j}(z)) \right]$$

[0028] Dabei steht $d_{n,j}(x, y, z)$ für die Strahlendosisverteilung des n-ten Terms.

[0029] I_n steht für die in einer Ebene senkrecht zur Strahlenachse integrierte Strahlendosisstiefenverteilung (integrated depth dose, IDD) der Strahlendosisverteilung des n-ten Terms.

[0030] $G(x, y, \sigma_{n_j}(z))$ steht für die zweidimensionale Normalverteilung mit einer Standardabweichung σ .

[0031] Zu Einzelheiten siehe: Inaniwa, T., Furukawa, T., Nagano, A., Sato, S., Saotome, N., Noda, K., und Kanai, T., 2009, Fieldsize effect of physical doses in carbon-ion scanning using range shifter plates, Med. Phys. 36, 2889–97.

[0032] Dabei erfolgt die Näherung derart, dass der erste Term (erster Bereich) der Beitrag der einfallenden Teilchen (im Falle von Kohlenstoffionentherapie Kohlenstoffionen), der zweite Term (zweiter Bereich) der Beitrag schwerer Fragmente mit anderer Atomzahl als 1, 2 und der dritte Term (dritter Bereich) der Beitrag leichter Fragmente mit Atomzahl 1, 2 ist.

[0033] Fig. 1(B) ist ein Graph, der als ein Beispiel eine Strahlendosisverteilung von Kohlenstoffstrahlen mit einer Energie von 290 MeV/u zeigt. Die horizontale Achse zeigt die Tiefe ausgehend von der Körperoberfläche und die vertikale Achse die Strahlendosis. Graph 101 zeigt die Strahlendosisverteilung IDD_{total} der Kohlenstoffstrahlen in Wasser, Graph 102 zeigt den Strahlendosisbeitrag des ersten Terms ($Z = 6$), Graph 103 zeigt den Strahlendosisbeitrag des zweiten Terms ($Z = 3 - 5$) und Graph 104 zeigt den Strahlendosisbeitrag des dritten Terms ($Z = 1 - 2$).

[0034] Im Teilchenbestrahlungsplan wird mithilfe einer Umrechnungstabelle, die im Voraus bereitgestellt wird, ein Pixelwert (CT-Wert) für CT-Aufnahmen eines Patienten in ein Bremsvermögensverhältnis ρ_S des Materials in Bezug auf Wasser umgewandelt, und das ungleichförmige Medium des menschlichen Körpers wird als Verteilung des Bremsvermögensverhältnisses ausgedrückt. Dabei ist das Bremsvermögensverhältnis ρ_S eine physikalische Größe, die darstellt, wie leistungsfähig ein betrachtetes Material in Bezug auf Wasser hinsichtlich der Abbremsung der einfallenden Teilchen ist. Im Allgemeinen wird im Teilchenbestrahlungsplan für die Verteilung des mittels der Umwandlung erlangten Bremsvermögensverhältnisses durch Anwenden der im Wasser gemessenen Strahlendosisverteilung, wie in Fig. 1(B) gezeigt, die Strahlendosisverteilung im Körper errechnet.

[0035] Die Erfinder haben aus einer Übersicht über die Zusammensetzung von menschlichen Gewebearten, die im ICRU-Bericht (ICRU-Bericht 1992) zusammengefasst ist, die allgemeine Korrelation zwischen dem Bremsvermögensverhältnis ρ_S und der effektiven Kernreaktionsdichte ρ_N der einzelnen Gewebearten hergeleitet. Dabei ist die effektive Kernreaktionsdichte ρ_N eine physikalische Größe, die darstellt, wie leicht ein betrachtetes Material in Bezug auf Wasser die einfallenden Teilchen fragmentiert.

[0036] In der vorliegenden Erfindung wird zunächst mit Röntgenstrahlen, bei denen es sich um radioaktive Strahlen handelt, die sich von Teilchenstrahlen unterscheiden, mittels einer CT-Vorrichtung eine 3D-Abrasterung durchgeführt und aus der dreidimensionalen Verteilung der dabei erlangten CT-Werte die dreidimensionale Verteilung des Bremsvermögensverhältnisses ρ_S erlangt, woraufhin anhand der Korrelation von ρ_S und ρ_N die dreidimensionale Verteilung der effektiven Kernreaktionsdichte ρ_N erstellt wird.

[0037] Eine effektive Weglänge $S_S(z)$ von der Körperoberfläche bis in die betrachtete Tiefe z , die sich auf die Abbremsung der Teilchen bezieht, ergibt sich durch Zeilenintegration des Bremsvermögensverhältnisses ρ_S bis in die betrachtete Tiefe z aus der folgenden Gleichung 2.

[Gleichung 2]

$$s_S(z) = \int_0^z \rho_S(z') dz'$$

[0038] Eine effektive Weglänge $S_N(z)$ bis in die Tiefe z , die sich auf die Fragmentierung (Auslösung einer Kernreaktion) bezieht, ergibt sich durch Zeilenintegration der effektiven Kernreaktionsdichte ρ_N bis z aus der folgenden Gleichung 3.

[Gleichung 3]

$$S_N(z) = \int_0^z \rho_N(z') dz'$$

[0039] Hierfür existiert ein Versuch von Haettner et al. zur Messung von Teilchenbündeln (Fluenz) von Kohlenstoffstrahlen in Wasser. (Zu Einzelheiten siehe: Haettner, E., Iwase, H., Kramer, M., Kraft, G. und Schardt, D., 2013, Experimental study of nuclear fragmentation of 200 and 400 MeV/u 12C ions in water for applications in particle therapy, Phys. Med. Biol., 58, 8265–79.)

[0040] Kanematsu et al. haben auf Grundlage eines Exponentialfunktion-Abschwächungsmodells der Kohlenstoffstrahlenfluenz den mittleren freien Weg (mean free path) λ von Kohlenstoffstrahlen als 255 mm betragend hergeleitet. (Zu Einzelheiten siehe: Kanematsu, N., Koba, Y., Ogata, R., 2013, Evaluation of plastic materials for range shifting, range compensation, and solid phantom dosimetry in carbon-ion radiotherapy, Med. Phys., 40, 041724-1-6.) Mithilfe dieser Beziehung kann die Veränderung der Kohlenstoffstrahlenfluenz aufgrund der Kernreaktion in Wasser und im Körper bis in die betrachtete Tiefe z anhand der folgenden Gleichung 4 ausgedrückt werden.

[Gleichung 4]

$$\phi_w^p(z) = \frac{\exp\left(-\frac{s_N(z)}{\lambda}\right)}{\exp\left(-\frac{s_S(z)}{\lambda}\right)} = \exp\left(\frac{s_S(z) - s_N(z)}{\lambda}\right)$$

$\phi_w^p(z)$ wird dabei als Abschwächungskorrekturfaktor (attenuation correction factor) bezeichnet.

[0041] Gemäß dieser Definition ist dabei der Abschwächungskorrekturfaktor aufgrund der Beziehung $S_S(z) < S_N(z)$ für den Fall, dass ein Material durchlaufen wird, bei dem die Kernreaktionswahrscheinlichkeit in Bezug auf das Bremsvermögen höher als bei Wasser ist, $\phi_w^p(z) < 1,0$.

[0042] Wird dagegen ein Material durchlaufen, bei dem die Kernreaktionswahrscheinlichkeit in Bezug auf das Bremsvermögen niedriger als bei Wasser ist, so ist aufgrund der Beziehung $S_S(z) > S_N(z)$ $\phi_w^p(z) > 1,0$.

[0043] Mithilfe dieses Korrekturfaktors kann anhand der folgenden Gleichung 5 eine Formel zum Korrigieren der in Gleichung 1 dargestellten Strahlendosisverteilung erlangt werden.

[Gleichung 5]

$$d'_j(x, y, z) = \sum_{n=1}^3 d_{n,j}'(x, y, z)$$

$$= \phi_w^p \cdot I_{1,j} \cdot G_{1,j} + I_{2,j} \cdot G_{2,j} + \frac{1}{\phi_w^p} \cdot I_{3,j} \cdot G_{3,j}$$

[0044] Da die Strahlendosis der einfallenden Teilchen proportional zur Fluenz der einfallenden Teilchen ist, wird $I_{1,j}$ mit $\phi_w^p(z)$ korrigiert. Da die Anzahl der Fragmentteilchen mit zunehmender Abschwächung der einfallenden Teilchen ansteigt, wird der Strahlendosisbeitrag $I_{3,j}$ des dritten Terms mit $1/\phi_w^p(z)$ korrigiert. Dass der zweite Term $I_{2,j}$ nicht korrigiert wird, beruht auf Erfahrung.

[0045] Fig. 2 zeigt eine erläuternde Ansicht anhand von Graphen, die in vereinfachter Weise die vorliegende Strahlendosisverteilungskorrektur darstellen. In Fig. 2(A), (C), (E) stellt die vertikale Achse die Kohlenstoffstrahlenfluenz und die horizontale Achse die Tiefe von der Körperoberfläche dar, und in Fig. 2(B), (D), (F) sind Bragg-Kurven gezeigt, wobei die vertikale Achse die Tiefenstrahlendosis und die horizontale Achse die Tiefe von der Körperoberfläche darstellt.

[0046] Fig. 2(A) und Fig. 2(B) zeigen jeweils die Kohlenstoffstrahlenfluenz bzw. die Tiefenstrahlendosis in Wasser. Wie dargestellt, nimmt in Graph 111 die Kohlenstoffstrahlenfluenz entsprechend der Tiefe ab und zeigt in Graph 116 bei einer Tiefe um 1,0 einen Spitzenwert.

[0047] Fig. 2(C) und Fig. 2(D) zeigen jeweils die Kohlenstoffstrahlenfluenz bzw. die Tiefenstrahlendosis in einem Material, bei dem die Kernreaktionswahrscheinlichkeit in Bezug auf das Bremsvermögen kleiner ist ($\varphi_w^p(z) > 1,0$). Wie dargestellt, ist Graph 112 insgesamt etwas höher als Graph 111, und auch Graph 117 ist insgesamt etwas höher als Graph 116.

[0048] Fig. 2(E) und Fig. 2(F) zeigen jeweils die Kohlenstoffstrahlenfluenz bzw. die Tiefenstrahlendosis in einem Material, bei dem die Kernreaktionswahrscheinlichkeit in Bezug auf das Bremsvermögen größer ist ($\varphi_w^p(z) < 1,0$). Wie dargestellt, ist Graph 113 insgesamt etwas niedriger als Graph 111, und auch Graph 118 ist insgesamt etwas niedriger als Graph 116. Bei einem solchen Material mit größerer Kernreaktionswahrscheinlichkeit nehmen Fluenz und Tiefenstrahlendosis ab, während Fluenz und Tiefenstrahlendosis bei einem Material mit kleinerer Kernreaktionswahrscheinlichkeit zunehmen.

[0049] Fig. 3 zeigt Bilder, die eine Reihe von Umwandlungen darstellen. Fig. 3(A) zeigt ein CT-Wert-Bild unter Anwendung eines Abschwächungskoeffizienten M , Fig. 3(B1) zeigt ein Bremsvermögensverhältnis-Bild, das mit dem Bremsvermögensverhältnis ρ_s korrigiert wurde, und Fig. 3(C1) zeigt ein Bild der effektiven Kernreaktionsdichte, das außerdem mit der effektiven Kernreaktionsdichte ρ_N korrigiert wurde. In Fig. 3(B2) stellt die vertikale Achse das Bremsvermögensverhältnis und die horizontale Achse den Abschwächungskoeffizienten dar, und gezeigt wird ein Umwandlungsdiagramm, das zum Ermitteln des Bremsvermögensverhältnis-Bilds aus dem CT-Wert-Bild verwendet wird. In Fig. 3(C2) stellt die vertikale Achse die effektive Kernreaktionsdichte und die horizontale Achse das Bremsvermögensverhältnis dar, und gezeigt wird ein Umwandlungsdiagramm, das zum Ermitteln des Bilds der effektiven Kernreaktionsdichte aus dem Bremsvermögensverhältnis-Bild verwendet wird. Auf diese Weise wird aus den CT-Werten das Bild der effektiven Kernreaktionsdichte ermittelt, und durch Anwenden der Korrektur kann ein genauer Teilchenbestrahlungsplan erstellt werden.

<Bei Protonenstrahlentherapie>

[0050] Wenn Protonenstrahlen Wasser durchdringen, finden zwischen den Elektronen oder Atomkernen der Wassermoleküle eine elektromagnetische Wechselwirkung (electromagnetic interaction, EM), wobei die Protonenstrahlen Energie verlieren, indem sie diese an die Elektronen der Wassermoleküle (oder im Körper die Elektronen im Körper) abgeben, und abgebremst werden, eine elastische Wechselwirkung (elastic interaction, EL), wobei unter Beibehaltung der Bewegungsenergie insgesamt lediglich Energie übertragen wird und sich die Art der Atomkerne nicht verändert, inelastische Wechselwirkung (inelastic interaction, IE), wobei durch das Übertragen von Energie zwar nicht die Atomkernart geändert wird, aber eine Anregung stattfindet, und eine nicht diesen Wechselwirkungen (EM, EL, IE) entsprechende Kernreaktion (nonelastic interaction, NE) statt. Ein Proton mit EL oder IE verliert durch diese Reaktion eine geringfügige Menge an Energie, erreicht jedoch in etwa die gleiche Tiefe wie ein Protonenbündel, bei dem nur EM stattfindet. Bei zusammengefasster Behandlung von Protonenbündeln mit EL und IE kann eine Strahlendosisverteilung $D(s)$, die die Protonenstrahlen im Wasser bewirken, durch Addieren der Beiträge der einzelnen Wechselwirkungen ($D_{EM}(s)$, $D_{EL/IE}(s)$, $D_{NE}(s)$) dargestellt werden, wie in der folgenden Gleichung 6 gezeigt.

[Gleichung 6]

$$D(s) = D_{EM}(s) + D_{EL/IE}(s) + D_{NE}(s)$$

[0051] Dabei ist $D_{EM}(s)$ die vom Wasser absorbierte Strahlendosis aufgrund von einfallenden Teilchen, bei denen nur EM-Wechselwirkung stattgefunden hat.

[0052] $D_{EL/IE}(s)$ ist die vom Wasser absorbierte Strahlendosis aufgrund von einfallenden Teilchen, bei denen EL-Wechselwirkung oder IE-Wechselwirkung aufgetreten ist.

[0053] $D_{NE}(s)$ ist die vom Wasser absorbierte Strahlendosis aufgrund von NE-Wechselwirkung.

[0054] Wenn das Protonenbündel durch ein anderes Material als Wasser tritt, wird die in der Tiefe z (Wasseräquivalenztiefe s) abgegebene Strahlendosis (dose to water in material) durch die folgende Gleichung 7 dargestellt.

[Gleichung 7]

$$D(z) = \frac{1 - A's(z)}{1 - As(z)} D_{EM}(s(z)) + \frac{Y'}{Y} D_{EL/IE}(s(z)) + \frac{\gamma' (A' - Y')}{\gamma (A - Y)} D_{NE}(s(z))$$

[0055] Es folgt eine Beschreibung der einzelnen Terme von Gleichung 7.

<Erster Term, EM-System>

[0056] $1 - A's$ steht für die Veränderung der Protonenzahl (Fluenz) in Wasser, wenn nur EM-Wechselwirkung stattgefunden hat. A steht für die Neigung, und $1 - As$ stellt das Ausmaß der Reduzierung der Protonenzahl (Fluenz) bei Wasser in der Tiefe s ausschließlich mit EM-Wechselwirkung dar.

[0057] $1 - A's$ stellt das Ausmaß der Reduzierung der Fluenz dar, allerdings nicht in Wasser, aber in derselben Tiefe wie bei Wasser.

[0058] Das heißt, $(1 - A's)/(1 - As)$ wendet eine Korrektur hinsichtlich dessen an, wie groß die Differenz der EM-Reaktionen in der Tiefe s gegenüber Wasser ist.

<Zweiter Term, EL/IE-System>

[0059] Y steht für die Neigung und stellt das Ausmaß der Zunahme der Protonenzahl (Fluenz) bei Wasser in der Tiefe s mit EL-Wechselwirkung oder IE-Wechselwirkung dar.

[0060] Y' stellt das Ausmaß der Zunahme der Protonenzahl (Fluenz) mit EL-Wechselwirkung oder IE-Wechselwirkung dar, allerdings nicht in Wasser, aber in derselben Tiefe wie bei Wasser.

[0061] Das heißt, Y'/Y wendet eine Korrektur hinsichtlich dessen an, wie groß die Differenz der EL- und IE-Reaktionen in der Tiefe s gegenüber Wasser ist. Obwohl der Ausdruck eigentlich $Y's/Ys$ lautet, wird die Tiefe s herausgekürzt, da sie sowohl im Zähler als auch im Nenner auftritt, woraus sich die Schreibweise Y'/Y ergibt.

<Dritter Term, NE-System>

[0062] $A - Y$ stellt dar, in welchem Ausmaß NE-Reaktionen in Wasser stattfinden.

[0063] $A' - Y'$ stellt dar, in welchem Ausmaß in Material NE-Reaktionen bis zur gleichen Tiefe wie bei Wasser (Wasseräquivalenztiefe) stattfinden.

[0064] Das heißt, $A' - Y'/A - Y$ wendet eine Korrektur hinsichtlich dessen an, wie groß die Differenz der NE-Reaktion im Material in der Wasseräquivalenztiefe s ist.

[0065] γ zeigt an, wie viel Energie im Fall von Wasser an Ladungsteilchen abgegeben wird, wenn die einfallenden Protonen eine Kernreaktion auslösen. Genauer ausgedrückt werden Ladungsteilchen, die bei der Kernreaktion entstehen, in die Berechnung der Strahlendosis einbezogen, da bei ihnen um den Zeitpunkt der Reaktion Energie abgegeben wird, während bei Neutronen oder Gammastrahlen, die während der Kernreaktion entstehen, zum Zeitpunkt der Reaktion eher weniger Energie abgegeben wird, weshalb sie nicht in die Berechnung der Strahlendosis einbezogen werden. Wenn γ groß ist, zeigt dies an, dass der Anteil der an die Ladungsteilchen übergegangenen Energie hoch ist, und wenn γ klein ist, zeigt dies an, dass der Anteil der an die Neutronen oder Gammastrahlen übergegangenen Energie hoch ist, während der Anteil der an die Ladungsteilchen übergegangenen Energie gering ist.

[0066] γ' zeigt an, wie viel Energie im Fall von einem anderen Material als Wasser an Ladungsteilchen abgegeben wird, wenn eine Kernreaktion ausgelöst wird.

[0067] Das heißt, γ'/γ zeigt die Differenz des Anteils der Energie an, der in der Tiefe s durch die NE-Reaktion auf die Ladungsteilchen übergeht.

[0068] Dabei stellt der D_{EM} -Korrekturfaktor $(1 - A's(z))/(1 - As(z))$ das Verhältnis der primären Protonenzahl in Material und in Wasser dar, bei denen nur eine EM-Wechselwirkung ausgelöst wird, und der $D_{EL/IE}$ -Korrektur-

faktor Y'/Y das Verhältnis der Protonenzahl in Material und in Wasser, bei denen eine EL/IE-Wechselwirkung ausgelöst wird.

[0069] Die D_{NE} -Korrekturfaktoren γ'/γ und $(A' - Y)/(A - Y)$ stellen jeweils das Verhältnis des „Anteils der an die Zielladungsteilchen abgegebenen Energie von Protonen mit Kernreaktion“ und der „Protonenzahl mit Kernreaktion“ in Material und in Wasser dar. Wenn sich das Material abhängig von der Tiefe z kontinuierlich verändert, kann verhindert werden, dass die Gleichung 7 ihre Allgemeingültigkeit verliert, indem Gleichung 8 angewandt wird.

[Gleichung 8]

$$D(z) = \frac{\left(1 - \int_0^z A'(\hat{z}) \rho_s(\hat{z}) d\hat{z}\right)}{1 - A_s(z)} D_{EM}(s(z)) + \frac{\int_0^z Y'(\hat{z}) \rho_s(\hat{z}) d\hat{z}}{Y_s(z)} D_{EL/IE}(s(z)) + \frac{\gamma(z) (A'(z) - Y'(z))}{\gamma (A - Y)} D_{NE}(s(z))$$

[0070] Wenn nämlich die Korrekturfaktoren $A, A', Y, Y', \gamma'/\gamma$ und das Bremsvermögensverhältnis ρ_s bekannt sind, kann durch Korrigieren und Aufsummieren der Strahlendosisbeiträge $D_{EM}, D_{EL/IE}, D_{NE}$ der Wechselwirkungen in Wasser gemäß Gleichung 8 die Strahlendosisverteilung im Material berechnet werden.

[0071] Fig. 4 ist ein Graph, der die Strahlendosisverteilung D und die Wechselwirkungsbeiträge $D_{EM}, D_{EL/IE}, D_{NE}$ von Protonenstrahlen mit einer Energie von 216 MeV in Wasser darstellt. Die vertikale Achse zeigt die Strahlendosis und die horizontale Achse die Tiefe.

[0072] Im Teilchenbestrahlungsplan wird mithilfe einer Umrechnungstabelle, die im Voraus bereitgestellt wird, ein Pixelwert (CT-Wert) für CT-Aufnahmen eines Patienten in ein Bremsvermögensverhältnis ρ_s des Materials in Bezug auf Wasser umgewandelt, und das ungleichförmige Medium des menschlichen Körpers wird als Verteilung des Bremsvermögensverhältnisses ausgedrückt. Dabei ist das Bremsvermögensverhältnis eine physikalische Größe, die darstellt, wie leistungsfähig ein betrachtetes Material in Bezug auf Wasser hinsichtlich der Abbremsung der einfallenden Teilchen ist. Im Allgemeinen wird im Teilchenbestrahlungsplan für die Verteilung des mittels der Umwandlung erlangten Bremsvermögensverhältnisses durch Anwenden der im Wasser gemessenen Strahlendosisverteilung die Strahlendosisverteilung im Körper errechnet.

[0073] Die Erfinder haben aus einer Übersicht über die Zusammensetzung von menschlichen Gewebearten, die im ICRU-Bericht (ICRU-Bericht 1992) zusammengefasst ist, auf der Monte-Carlo-Simulationsplattform Geant4 ein Phantom von menschlichem Gewebe erzeugt und durch virtuelle Bestrahlung des Phantoms mit Protonenstrahlen eine allgemeine Korrelation des jeweiligen Bremsvermögensverhältnisses ρ_s und der jeweiligen Korrekturfaktoren $A'/A, Y'/Y, \gamma'/\gamma$ für die einzelnen Gewebe abgeleitet. Auch für das Referenzmaterial Wasser wurde mit Geant4 eine Bestrahlung mit Protonenstrahlen virtualisiert, um den EM-Abschwächungskoeffizienten A und die EL/IE-Ausbeute Y zu ermitteln.

[0074] Fig. 5 ist eine erläuternde Ansicht, die die Beziehung zwischen dem Bremsvermögensverhältnis ρ_s von den menschlichen ICRU-Geweben und den Korrekturfaktoren $A'/A, Y'/Y, \gamma'/\gamma$ darstellt. Dabei zeigt jeweils die vertikale Achse den Korrekturfaktor, und die horizontale Achse das Bremsvermögensverhältnis (Anhaltefähigkeit der Teilchenstrahlen). Die +-Symbole in den Graphen zeigen die einzelnen ausgewählten Parameter der Gewebe (der einzelnen Materialien) aus den menschlichen ICRU-Geweben. In den Graphen zeigt ein Wert des Bremsvermögensverhältnisses über 1,0 an, dass es sich um Gewebe (Material) handelt, das Teilchenstrahlen besser anhält als Wasser, und ein Wert unter 1,0 zeigt an, dass es sich um Gewebe (Material) handelt, das Teilchenstrahlen schlechter anhält als Wasser.

[0075] Fig. 5(a) ist ein Graph des Korrekturfaktors A'/A für EM, Fig. 5(b) ist ein Graph des Korrekturfaktors Y'/Y für EL/IE und Fig. 5(c) ist ein Graph des Korrekturfaktors A'/A für NE. Wie dargestellt, zeigen die einzelnen Graphen der Korrekturfaktoren für EM und EL/IE in Fig. 5(a), Fig. 5(b) eine positive Korrelation und für NE in Fig. 5(c) eine negative Korrelation.

[0076] An der Teilchenbehandlungsplanungsvorrichtung wird der CT-Wert, der den effektiven Strahlenabschwächungskoeffizienten für Röntgenstrahlen darstellt, über eine (für die jeweilige CT-Vorrichtung und die jeweiligen Aufnahmebedingungen kalibrierte) Umwandlungstabelle in das Bremsvermögensverhältnis ρ_s umgewandelt. Das heißt, beim Durchführen der Strahlendosisberechnung an der Behandlungsplanungsvorrichtung wird die Bremsvermögensverhältnisverteilung ρ_s im Körper des Patienten im Voraus bestimmt. Daher ist es möglich, aufgrund der allgemeinen Korrelation des Bremsvermögensverhältnisses ρ_s und der einzelnen Kor-

rekturfaktoren A'/A , Y'/Y , γ'/γ aus Fig. 5 und des EM-Abschwächungskoeffizienten A und der EL/IE-Ausbeute Y die Korrektur aus Gleichung 8 auf die Strahlendosisberechnung anzuwenden.

[0077] Fig. 6 zeigt Bilder und ein Histogramm, die eine Reihe von Umwandlungen darstellen. Fig. 6(a) zeigt ein Bild der Strahlendosisverteilung vor der Korrektur, Fig. 6(b) zeigt ein Bild der Strahlendosisverteilung nach der Korrektur und Fig. 6(c) zeigt die Strahlendosisdifferenz vor der Korrektur (ohne Korrektur) und nach der Korrektur. Fig. 6(d) ist ein Strahlendosis-Körpervolumen-Histogramm mit dem Körpervolumen auf der vertikalen Achse und der Strahlendosis auf der horizontalen Achse. Auf diese Weise wird aus dem CT-Wert das Bild der effektiven Kernreaktionsdichte ermittelt, und durch Anwenden der Korrektur kann ein genauer Teilchenbestrahlungsplan erstellt werden.

[0078] Im Folgenden sollen anhand der Figuren Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung beschrieben werden.

Erstes Ausführungsbeispiel

[0079] Fig. 7 ist eine erläuternde Ansicht, die den Gesamtaufbau eines Teilchenstrahlenbestrahlungssystems 1 gemäß einer ersten Ausführungsform darstellt.

[0080] Das Teilchenstrahlenbestrahlungssystem 1 weist einen Beschleuniger 4, der einen von einer Ionenquelle 2 abgestrahlten Ladungsteilchenstrahl 3 beschleunigt, ein Strahlentransportsystem 5, das den vom Beschleuniger 4 ausgehenden Ladungsteilchenstrahl 3 transportiert, eine Bestrahlungsvorrichtung (Abrasterungsbestrahlungsvorrichtung) 6, die den Ladungsteilchenstrahl 3, der das Strahlentransportsystem 5 durchlaufen hat, auf einen das Bestrahlungsobjekt bildenden Zielabschnitt 8 eines Patienten 7 (beispielsweise einen Tumor) strahlt, eine Steuervorrichtung 10 zum Steuern des Teilchenstrahlenbestrahlungssystems 1 und eine Bestrahlungsplanungsvorrichtung 20 als einen Computer zum Bestimmen der Bestrahlungsparameter des Teilchenstrahlenbestrahlungssystems 1 auf. In diesem Ausführungsbeispiel wird als der von der Ionenquelle 2 abgestrahlte Ladungsteilchenstrahl 3 ein Strahl aus Kohlenstoffstrahlen benutzt, doch liegt in dieser Hinsicht keine Beschränkung vor, und die vorliegende Erfindung kann auch auf ein Teilchenstrahlenbestrahlungssystem 1 angewandt werden, das einen Ladungsteilchenstrahl (einschließlich eines Strahls schwerer Ladungsteilchen) abstrahlt.

[0081] Der Beschleuniger 4 dient dazu, die Stärke des Ladungsteilchenstrahls 3 anzupassen.

[0082] Die Bestrahlungsvorrichtung 6 weist einen Abrasterungsmagnet (nicht dargestellt), der den Ladungsteilchenstrahl 3 in eine X-Y-Richtung neigt, die eine Ebene vertikal zur Strahlfortpflanzungsrichtung (Z-Richtung) bildet, einen Strahlendosismonitor (nicht dargestellt) zum Überwachen der Position des Ladungsteilchenstrahls 3 und einen Abschwächer (nicht dargestellt), der die Anhalteposition des Ladungsteilchenstrahls 3 in Z-Richtung anpasst, wobei mit dem Ladungsteilchenstrahl 3 der Zielabschnitt 8 an einem Abrasterungsweg abgerastert wird.

[0083] Die Steuervorrichtung 10 steuert die Stärke des Ladungsteilchenstrahls 3 vom Beschleuniger 4, die Positionskorrektur des Ladungsteilchenstrahls 3 im Strahlentransportsystem 5, die Abrasterung durch den Abrasterungsmagnet (nicht dargestellt) der Bestrahlungsvorrichtung 6 und die Strahlanhalteposition des Abschwächers (nicht dargestellt).

[0084] Die Bestrahlungsplanungsvorrichtung 20 weist Eingabevorrichtungen 21, die durch eine Tastatur, eine Maus und dergleichen gebildet sind, eine Anzeigevorrichtung 22, die durch ein LCD-Display oder ein CRT-Display oder dergleichen gebildet ist, eine Steuervorrichtung 23, die durch eine CPU, ROM und RAM gebildet ist, eine Medienverarbeitungsvorrichtung 24, die durch ein Laufwerk gebildet ist, das Datenlese- und Schreibvorgängen an einem Speichermedium 29 wie etwa CD-ROM, DVD-ROM usw. durchführt, und eine Speichervorrichtung 25 auf, die durch eine Festplatte oder dergleichen gebildet ist.

[0085] Die Steuervorrichtung 23 liest ein Bestrahlungsplanungsprogramm 39a und ein Bestrahlungsplankorrekturprogramm 39b ein, die auf der Speichervorrichtung 25 gespeichert sind, und fungiert als Bereichseinstellungsverarbeitungsabschnitt 31, Verschreibungsdateneingabeverarbeitungsabschnitt 32, Berechnungsabschnitt 33, Ausgabeverarbeitungsabschnitt 34, Erfassungsabschnitt 36 für 3D-CT-Wert-Daten, Bremsvermögensverhältnismumwandlungsabschnitt 37 und Umwandlungsabschnitt 38 der effektiven Kernreaktionsdichte.

[0086] Der Speicherabschnitt **25** speichert erste Umwandlungsdaten **41** zur Umwandlung von 3D-CT-Wertdaten (3D-Abrasterungsdaten) in das Bremsvermögensverhältnis, und zweite Umwandlungsdaten **42** zur Umwandlung des Bremsvermögensverhältnisses in die effektive Kernreaktionsdichte. Die erste Umwandlungsdaten **41** sind Daten einer Umrechnungstabelle des Stands der Technik zum Umwandeln von CT-Werten in das Bremsvermögensverhältnis. Die zweiten Umwandlungsdaten **42** sind Daten einer Umrechnungstabelle der vorliegenden Erfindung zum Umwandeln des Bremsvermögensverhältnisses in die effektive Kernreaktionsdichte, und der Abschwächungskorrekturfaktor $\phi_w^p(z)$ wird anhand der oben genannten Gleichungen 2 bis 4 aus der dreidimensionalen Verteilung des Bremsvermögensverhältnisses und der effektiven Kernreaktionsdichte, die durch die jeweiligen Umwandlungen erlangt wurden, ermittelt.

[0087] Der Betrieb der einzelnen Funktionsabschnitte der derart aufgebauten Bestrahlungsplanungsvorrichtung **20** aufgrund des Bestrahlungsplanungsprogramms **39a** und des Bestrahlungsplankorrekturprogramms **39b** ist wie folgt.

[0088] Zunächst erfasst der Erfassungsabschnitt für 3D-CT-Wertdaten **36** von einer gesonderten CT-Vorrichtung 3D-CT-Wertdaten des Bestrahlungsobjekts (des Patienten). Das heißt, er erfasst den effektiven Strahlenabschwächungskoeffizienten der Röntgenstrahlen an den jeweiligen dreidimensionalen Positionen des Bestrahlungsobjekts als 3D-CT-Wertdaten.

[0089] Der Bereichseinstellverarbeitungsabschnitt **31** stellt die 3D-CT-Wertdaten auf der Anzeigevorrichtung **22** als Bild dar und empfängt über eine Eingabe in der Eingabevorrichtung **21** durch eine Planerstellungsperson eine Bereichsvorgabe (Vorgabe des Zielabschnitts **8**).

[0090] Der Verschreibungsdateneingabeverarbeitungsabschnitt **32** zeigt einen Behandlungseingabe Bildschirm auf der Anzeigevorrichtung **22** an und empfängt über eine Eingabe in der Eingabevorrichtung **21** durch eine Planerstellungsperson Verschreibungsdaten. Die Verschreibungsdaten sind Daten, die die Bestrahlungsposition und die Bestrahlungsmenge für die Teilchenstrahlen an den einzelnen Koordinatenpunkten der 3D-CT-Wertdaten angeben. Die Verschreibungsdaten können die Bestrahlungsposition und die Bestrahlungsmenge je nach Art, einschließlich der Art der Teilchenstrahlen (beispielsweise Kohlenstoffatomkerne oder Wasserstoffatomkerne usw.) angeben oder für mehrere Arten von Teilchenstrahlen angeben.

[0091] Der Bremsvermögensverhältnisumwandlungsabschnitt **37** wandelt wie bei einer üblichen Teilchenbestrahlungsplanungsvorrichtung mithilfe der im Voraus bereitgestellten ersten Umwandlungsdaten (Umwandlungstabelle) die 3D-CT-Wertdaten in das Bremsvermögensverhältnis ρ_s an jeweiligen dreidimensionalen Positionen um. Durch diese Umwandlung werden Bremsvermögensverhältnisdaten zur dreidimensionalen Verteilung des Bremsvermögensverhältnisses ρ_s erlangt. Diese Umwandlung in Bremsvermögensverhältnisdaten kann gemäß bekannten Techniken zur Umwandlung mithilfe einer im Voraus bereitgestellten Umrechnungstabelle erfolgen.

[0092] Mithilfe der zweiten Umwandlungsdaten, die die Korrelation zwischen dem Bremsvermögensverhältnis ρ_s und der effektiven Kernreaktionsdichte ρ_N des menschlichen Gewebes angeben, wandelt der Umwandlungsabschnitt **38** der effektiven Kernreaktionsdichte die Bremsvermögensverhältnisdaten in die effektive Kernreaktionsdichte ρ_N an den einzelnen dreidimensionalen Positionen um und leitet die dreidimensionale Verteilung der effektiven Kernreaktionsdichte ρ_N her. Durch diese Umwandlung werden Daten der effektiven Kernreaktionsdichte erlangt, die die dreidimensionale Verteilung der effektiven Kernreaktionsdichte angeben. Bei der Berechnung der Strahlendosis im Körper wird also nicht die in Wasser gemessene Strahlendosisverteilung unverändert angewandt, sondern mithilfe des in den obenstehenden Gleichungen 2 bis 4 erlangten Abschwächungskorrekturfaktors $\phi_w^p(z)$ wird die Strahlendosisverteilung gemäß Gleichung 5 für die jeweilige Tiefe korrigiert.

[0093] Der Berechnungsabschnitt **33** empfängt die Verschreibungsdaten, Bremsvermögensverhältnisdaten und Daten der effektiven Kernreaktionsdichte und erstellt auf deren Grundlage Bestrahlungsparameter und Strahlendosisverteilung. Für die Bestrahlungsmenge und die Bestrahlung der Verschreibungsdaten an der Bestrahlungsposition der Verschreibungsdaten wird somit die vom Teilchenstrahlenbestrahlungssystem **1** abzustrahlende Teilchenstrahlenmenge (Teilchenanzahl) mithilfe der Bremsvermögensverhältnisdaten und Daten der effektiven Kernreaktionsdichte zurückgerechnet, und die Bestrahlungsparameter der vom Teilchenstrahlenbestrahlungssystem **1** abgestrahlten Teilchenstrahlen werden berechnet. Anhand der berechneten Bestrahlungsparameter berechnet der Berechnungsabschnitt **33** außerdem die Strahlendosisverteilung beim Bestrahlen des Bestrahlungsobjekts mit Teilchenstrahlen.

[0094] Der Ausgabeverarbeitungsabschnitt **34** gibt die berechneten Bestrahlungsparameter und die Strahlendosisverteilung zur Anzeige an die Anzeigevorrichtung **22** aus. Außerdem sendet der Ausgabeverarbeitungsabschnitt **34** die Bestrahlungsparameter und die Strahlendosisverteilung an die Steuervorrichtung **10**, die das Teilchenstrahlenbestrahlungssystem **1** steuert.

[0095] Mit der oben beschriebenen Bestrahlungsplanungsvorrichtung **20** kann das Teilchenstrahlenbestrahlungssystem **1** im Vergleich zu Bestrahlungsparametern, die durch Näherung mittels Wasser erstellt wurden, mit Bestrahlungsparametern, die in Anpassung an das Bestrahlungsobjekt mit hoher Präzision korrigiert wurden, einen äußerst präzisen Strahl abstrahlen. Bei der Bestrahlung durch den Strahl kann es sich um eine beliebige geeignete Bestrahlung handeln, beispielsweise um die Bestrahlung mit Punktstrahlen unter Verwendung eines Abrasterbestrahlungsverfahrens, wobei eine gleichförmige Strahlendosisverteilung auf den Zielbereich stattfindet (die Strahlendosisverteilung ist die Summe der Punktstrahlen).

[0096] Da mit den zweiten Umwandlungsdaten **42** die effektive Kernreaktionsdichte in Bezug auf das Bremsvermögensverhältnis korrigiert wird, ist eine sofortige Ausstattung und Nutzung der Bestrahlungsplanungsvorrichtung **20** verschiedener existierender Teilchenstrahlenbestrahlungssysteme **1** möglich. Genauer ist der CT-Wert je nach CT-Vorrichtung und Aufnahmeumgebung unterschiedlich, so dass auch die Umrechnungstabelle zum Umrechnen aus dem CT-Wert in das Bremsvermögensverhältnis je nach CT-Vorrichtung und Aufnahmeumgebung unterschiedlich ist. Erfolgt also eine direkte Korrektur aus dem CT-Wert in die effektive Kernreaktionsdichte, muss für jede CT-Vorrichtung und Aufnahmeumgebung eine Umrechnungstabelle erstellt werden. Da bei dem existierenden Teilchenstrahlenbestrahlungssystem **1** eine Umrechnungstabelle für das Bremsvermögensverhältnis der bereits installierten CT-Vorrichtung und der Aufnahmeumgebung vorhanden ist, kann diese genutzt werden, so dass keine gesonderte Einstellung je nach Vorrichtung oder Umgebung notwendig ist. Das heißt, solange die zweiten Umwandlungsdaten **42** erstellt werden, ist es bei jeder CT-Vorrichtung und Aufnahmeumgebung möglich, aus dem Bremsvermögensverhältnis, das mittels der individuell angepassten Umrechnungstabelle berechnet wurde, anhand der zweiten Umwandlungsdaten **42** eine Korrektur durch die effektive Kernreaktionsdichte durchzuführen. Durch Standardisierung der zweiten Umwandlungsdaten **42** kann auch verhindert werden, dass beim Installieren fehlerhafte Daten verwendet werden, so dass auf sichere Weise eine äußerst präzise Bestrahlungsplanerstellung erreicht werden kann.

[0097] Bei der Berechnung der Strahlendosisverteilung im Körper wird also nicht die in Wasser gemessene Strahlendosisverteilung (Gleichung 1 oben) unverändert angewandt, sondern die Strahlendosisverteilung wird gemäß der Kernreaktionswahrscheinlichkeit des durchlaufenen Materials korrigiert angewandt, so dass Strahlendosisfehler aufgrund der Kernreaktion leicht korrigiert werden können.

[0098] Außerdem kann mit dieser Bestrahlungsplanungsvorrichtung **20** bei der Strahlendosisverteilungsbeziehung für den Teilchenbestrahlungsplan der Einfluss der Kernreaktionen durch die einfallenden Teilchen im Körper genau reflektiert werden.

[0099] Dies ermöglicht eine genauere Berechnung der Strahlendosisverteilung unter Berücksichtigung des Körpergewebes. Darüber hinaus ist das Verfahren einfach und verwendet allgemeine Charakteristiken des menschlichen Gewebes, so dass es an jeder Bestrahlungsplanungsvorrichtung anwendbar ist. Daher hat dieses Verfahren das Potenzial, künftig zum Standard in Algorithmen zur Strahlendosisberechnung von Teilchenbestrahlungsplänen mit Kohlenstoffstrahlen zu werden.

Zweites Ausführungsbeispiel

[0100] Fig. 8 ist eine erläuternde Ansicht, die den Gesamtaufbau eines Teilchenstrahlenbestrahlungssystems **1A** gemäß einer zweiten Ausführungsform darstellt. Anders als bei der ersten Ausführungsform sind anstelle des Umwandlungsabschnitts **38** der effektiven Kernreaktionsdichte (siehe Fig. 7) ein EM-Korrekturabschnitt **38a**, ein EL/IE-Korrekturabschnitt **38b** und ein NE-Korrekturabschnitt **38c** vorgesehen, anstelle des Bestrahlungsplankorrekturprogramms **39b** (siehe Fig. 7) ist ein Bestrahlungsplankorrekturprogramm **39c** vorgesehen, und anstelle der zweiten Umwandlungsdaten **42** sind zweite Umwandlungsdaten **42a** vorgesehen.

[0101] Der EM-Korrekturabschnitt **38a**, EL/IE-Korrekturabschnitt **38b** und NE-Korrekturabschnitt **38c** empfangen Bremsvermögensverhältnisdaten vom Bremsvermögensverhältnisumwandlungsabschnitt **37**, entnehmen die Korrekturfaktoren A'/A , Y'/Y , γ'/γ aus den zweiten Umwandlungsdaten **42a** und führen jeweils eine Korrektur durch.

[0102] Der EM-Korrekturabschnitt **38a** dient zum Durchführen der Korrektur für die elektromagnetische Wechselwirkung (EM), der EL/IE-Korrekturabschnitt **38b** dient zum Durchführen der Korrektur für die elastische Wechselwirkung (EL) und die inelastische Wechselwirkung (IE) und der NE-Korrekturabschnitt **38c** dient zum Durchführen der Korrektur für die Kernreaktion (NE).

[0103] Ebenso wie in der ersten Ausführungsform bewirkt das Bestrahlungsplankorrekturprogramm **39c** den Betrieb der verschiedenen Funktionsabschnitte der Bestrahlungsplanungsvorrichtung **20A**. Insbesondere wird in der zweiten Ausführungsform durch den EM-Korrekturabschnitt **38a**, EL/IE-Korrekturabschnitt **38b** und NE-Korrekturabschnitt **38c** eine Korrektur des Bestrahlungsplans unter Verwendung der obenstehenden Gleichung 8 und der zweiten Umwandlungsdaten **42a** durchgeführt.

[0104] In den zweiten Umwandlungsdaten **42a** sind die Korrekturfaktoren A'/A , Y'/Y , γ'/γ der einzelnen Gewebe gespeichert.

[0105] Ihr Aufbau und ihre Betriebsweise entsprechen der ersten Ausführungsform, weshalb gleiche Elemente mit gleichen Bezugszeichen versehen sind und ihre ausführliche Beschreibung entfällt.

[0106] Durch diesen Aufbau und diese Betriebsweise kann das Teilchenstrahlenbestrahlungssystem **1A** in der zweiten Ausführungsform im Vergleich zu Bestrahlungsparametern, die durch Näherung mittels Wasser erstellt wurden, mit Bestrahlungsparametern, die in Anpassung an das Bestrahlungsobjekt mit hoher Präzision korrigiert wurden, einen äußerst präzisen Strahl abstrahlen. Bei der Bestrahlung durch den Strahl kann es sich um eine beliebige geeignete Bestrahlung handeln, beispielsweise um die Bestrahlung mit Punktstrahlen unter Verwendung eines Abrasterungsbestrahlungsverfahrens, wobei eine gleichförmige Strahlendosisverteilung auf den Zielbereich stattfindet (die Strahlendosisverteilung ist die Summe der Punktstrahlen).

[0107] Um anhand der zweiten Umwandlungsdaten **42a** die Korrekturfaktoren aus dem Bremsvermögensverhältnis abzuleiten, ist eine sofortige Ausstattung und Nutzung der Bestrahlungsplanungsvorrichtung **20A** des existierenden verschiedenen Teilchenstrahlenbestrahlungssystems **1A** möglich. Genauer ist der CT-Wert je nach CT-Vorrichtung und Aufnahmeumgebung unterschiedlich, so dass auch die Umrechnungstabelle zum Umrechnen aus dem CT-Wert in das Bremsvermögensverhältnis je nach CT-Vorrichtung und Aufnahmeumgebung unterschiedlich ist. Erfolgt also eine direkte Korrektur aus dem CT-Wert, muss für jede CT-Vorrichtung und Aufnahmeumgebung eine Umrechnungstabelle erstellt werden. Da bei dem existierenden Teilchenstrahlenbestrahlungssystem **1A** eine Umrechnungstabelle (Umrechnungstabelle zum Umwandeln der Abschwächung der Röntgenstrahlen in das Anhaltevermögensverhältnis der Teilchenstrahlen) für das Bremsvermögensverhältnis der bereits installierten CT-Vorrichtung und der Aufnahmeumgebung vorhanden ist, kann diese genutzt werden, so dass keine gesonderte Einstellung je nach Vorrichtung oder Umgebung notwendig ist. Das heißt, solange die zweiten Umwandlungsdaten **42a** erstellt werden, ist es bei jeder CT-Vorrichtung und Aufnahmeumgebung möglich, das anhand der individuell angepassten Umrechnungstabelle berechnete Bremsvermögensverhältnis in den zweiten Umwandlungsdaten **42a** zu verwenden und eine Umwandlung in die Verteilung der Korrekturfaktoren für die elektromagnetische Wechselwirkung (EM), elastische Wechselwirkung (EL), inelastische Wechselwirkung (IE) und Kernreaktion (NE) durchzuführen und so eine Korrektur vorzunehmen, die die Differenz der einzelnen Wechselwirkungen zu Wasser berücksichtigt. Durch Standardisierung der zweiten Umwandlungsdaten **42a** kann auch verhindert werden, dass beim Installieren fehlerhafte Daten verwendet werden, so dass auf sichere Weise eine äußerst präzise Bestrahlungsplanerstellung erreicht werden kann.

[0108] Bei der Berechnung der Strahlendosisverteilung im Körper wird also nicht die in Wasser gemessene Strahlendosisverteilung (in der ersten Ausführungsform beschriebene Gleichung 1) unverändert angewandt, sondern die Strahlendosisverteilung wird gemäß der Kernreaktionswahrscheinlichkeit des durchlaufenen Materials korrigiert angewandt, so dass Strahlendosisfehler aufgrund der Kernreaktion leicht korrigiert werden können.

[0109] Außerdem kann mit dieser Bestrahlungsplanungsvorrichtung **20A** bei der Strahlendosisverteilungsbeziehung für den Teilchenbestrahlungsplan der Einfluss der Kernreaktionen durch die einfallenden Teilchen im Körper genau reflektiert werden. Dies ermöglicht eine genauere Berechnung der Strahlendosisverteilung unter Berücksichtigung des Körpergewebes. Darüber hinaus ist das Verfahren einfach und verwendet allgemeine Charakteristiken des menschlichen Gewebes, so dass es an jeder Bestrahlungsplanungsvorrichtung anwendbar ist. Daher hat dieses Verfahren das Potenzial, künftig zum Standard in Algorithmen zur Strahlendosisberechnung von Teilchenbestrahlungsplänen mit Protonenstrahlen zu werden.

[0110] Bezüglich der Entsprechung der Erfindung und der Ausführungsformen entsprechen die Teilchenstrahlen der Erfindung dem Ladungsteilchenstrahl **3** der Ausführungsform, und ebenso entspricht das Bestrahlungsobjekt den Patienten **7**, der Bereich dem Zielabschnitt **8**, die Bestrahlungsplanungsvorrichtung und der Computer der Bestrahlungsplanungsvorrichtung **20**, der Verschreibungsdatenerfassungsabschnitt dem Verschreibungsdateneingabeverarbeitungsabschnitt **32**, der Strahlendosisverteilungsberechnungsabschnitt dem Berechnungsabschnitt **33**, der 3D-Abrasterungsdatenerfassungsabschnitt dem Erfassungsabschnitt **36** für 3D-CT-Wertdaten, der Erzeugungsabschnitt für physikalische Reaktionsgrößenverteilungsdaten dem Bremsvermögensverhältnisumwandlungsabschnitt **37** und dem Umwandlungsabschnitt **38** der effektiven Kernreaktionsdichte, der Bremsvermögensverhältnis-Korrekturverarbeitungsabschnitt dem Bremsvermögensverhältnisumwandlungsabschnitt **37**, der Bestrahlungsobjektmaterial-Korrekturverarbeitungsabschnitt dem Umwandlungsabschnitt **38** der effektiven Kernreaktionsdichte, dem EM-Korrekturabschnitt **38a**, dem EL/IE-Korrekturabschnitt **38b** und dem NE-Korrekturabschnitt **38c**, der Korrekturverarbeitungsabschnitt für die effektive Kernreaktionsdichte dem Umwandlungsabschnitt **38** der effektiven Kernreaktionsdichte, der Teilchenstrahlenwirkung-Korrekturverarbeitungsabschnitt dem EM-Korrekturabschnitt **38a**, dem EL/IE-Korrekturabschnitt **38b** und dem NE-Korrekturabschnitt **38c**, die physikalischen Reaktionsgrößenverteilungsdaten den ersten Umwandlungsdaten **41** und zweiten Umwandlungsdaten **42**, **42a**, die dreidimensionalen Bremsvermögensverhältnisdaten den ersten Umwandlungsdaten **41** und zweiten Umwandlungsdaten **42** und der Term dem ersten Term, zweiten Term und dritten Term, doch liegt in dieser Hinsicht keine Beschränkung vor.

[0111] Die Atomzahl der einzelnen Terme in der Korrektur des Ausführungsbeispiels der oben beschriebenen ersten Ausführungsform wurde spezifisch anhand der Kohlenstoffionentherapie mit der Atomzahl **6** beschrieben, doch liegt in dieser Hinsicht keine Beschränkung vor, und wenn eine andere Kernart mit anderer Atomzahl verwendet wird, kann der Atomzahlbereich in den einzelnen Termen auf einen geeigneten Bereich festgelegt werden.

[0112] In der zweiten Ausführungsform wird anhand von Gleichung 8 bei der Korrekturverarbeitung jeweils eine Korrektur für die drei Terme EM, EL/IE und NE berechnet, doch liegt in dieser Hinsicht keine Beschränkung vor, und es können nach Bedarf auch zwei Terme EM + EL/IE und NE oder vier Terme EM, EL, IE und NE verwendet werden. Auch in diesem Fall kann im Vergleich zu Bestrahlungsparametern, die durch Näherung mittels Wasser geplant wurden, ein genauerer Bestrahlungsplan in Anpassung an das Bestrahlungsobjekt erstellt werden.

[0113] Der Bremsvermögensverhältnis-Korrekturverarbeitungsabschnitt (Bremsvermögensverhältnisumwandlungsabschnitt **37**) und der Bestrahlungsobjektmaterial-Korrekturverarbeitungsabschnitt (Umwandlungsabschnitt **38** der effektiven Kernreaktionsdichte, EM-Korrekturabschnitt **38a**, EL/IE-Korrekturabschnitt **38b** und NE-Korrekturabschnitt **38c**) können als Rechenbegriffe in zwei Rechensysteme aufgeteilt werden, und in der tatsächlichen Berechnung können die zwei Korrekturverarbeitungen zusammengefasst und eine Berechnung ausgeführt werden.

Gewerbliche Anwendung

[0114] Die vorliegende Erfindung kann auf dem technischen Gebiet der Therapie durch Bestrahlen mit Teilchenstrahlen angewandt werden.

Bezugszeichenliste

3	Ladungsteilchenstrahl
7	Patient
8	Zielabschnitt
20, 20A	Bestrahlungsplanungsvorrichtung
32	Verschreibungsdateneingabeverarbeitungsabschnitt
33	Berechnungsabschnitt
36	3D-Abrasterungsdatenerfassungsabschnitt
37	Bremsvermögensverhältnisumwandlungsabschnitt
38	Umwandlungsabschnitt der effektiven Kernreaktionsdichte
38a	EM-Korrekturabschnitt 38a

38b	EL/IE-Korrekturabschnitt 38b
38c	NE-Korrekturabschnitt 38c
41	erste Umwandlungsdaten
42, 42a	zweite Umwandlungsdaten

Patentansprüche

1. Bestrahlungsplanungsvorrichtung zum Erstellen eines Bestrahlungsplans für Teilchenstrahlen, umfassend:

einen 3D-Abrasterungsdatenerfassungsabschnitt, der 3D-Abrasterungsdaten erfasst, indem ein Bestrahlungsobjekt der Teilchenstrahlen durch radioaktive Strahlen, die sich von den Teilchenstrahlen unterscheiden, einer 3D-Abrasterung unterzogen wird,

einen Verschreibungsdatenerfassungsabschnitt zum Erfassen von Behandlungsdaten, die für das Bestrahlungsobjekt eine Position und eine Dosis eines Bereichs darstellen, der mit Teilchenstrahlen bestrahlt wird, einen Erzeugungsabschnitt für physikalische Reaktionsgrößenverteilungsdaten, der auf Grundlage der 3D-Abrasterungsdaten physikalische Reaktionsgrößenverteilungsdaten zur Verteilung einer physikalischen Größe erstellt, die die Leistung des Materials des Bestrahlungsobjekts darstellt, welches mit den Teilchenstrahlen reagiert, und

einen Strahlendosisverteilungsberechnungsabschnitt, der auf Grundlage der Verschreibungsdaten und der physikalischen Reaktionsgrößenverteilungsdaten die Strahlendosisverteilung ermittelt,

wobei der Erzeugungsabschnitt für physikalische Reaktionsgrößenverteilungsdaten durch einen Bremsvermögensverhältnis-Korrekturverarbeitungsabschnitt zum Erstellen von dreidimensionale Bremsvermögensverhältnisdaten, der die 3D-Abrasterungsdaten in ein Bremsvermögensverhältnis umwandelt, das eine physikalische Größe ist, die darstellt, wie leistungsfähig ein betrachtetes Material in Bezug auf Wasser hinsichtlich der Abbremsung der einfallenden Teilchen ist, und einen Bestrahlungsobjektmaterial-Korrekturverarbeitungsabschnitt gebildet ist, der aus den 3D-Bremsvermögensverhältnisdaten einen Korrekturfaktor ermittelt, der die Differenz zwischen Wasser und dem Bestrahlungsobjektmaterial darstellt, und anhand des Korrekturfaktors eine Strahlendosisverteilung der Teilchenstrahlen für eine jeweilige Tiefe korrigiert.

2. Bestrahlungsplanungsvorrichtung nach Anspruch 1, wobei der Bestrahlungsobjektmaterial-Korrekturverarbeitungsabschnitt die Strahlendosisverteilung der Teilchenstrahlen nach Atomzahl in Terme unterteilt oder nach Wechselwirkung der Teilchenstrahlen in Terme unterteilt und für die einzelnen Terme eine Korrektur der Strahlendosisverteilung durchführt.

3. Bestrahlungsplanungsvorrichtung nach Anspruch 2, wobei der Bestrahlungsobjektmaterial-Korrekturverarbeitungsabschnitt ein Korrekturverarbeitungsabschnitt der effektiven Kernreaktionsdichte ist, der die 3D-Bremsvermögensverhältnisdaten in effektive Kernreaktionsdichte umwandelt, die eine physikalische Größe ist, die darstellt, wie leicht ein betrachtetes Material in Bezug auf Wasser die einfallenden Teilchen fragmentiert, und 3D-Daten der effektiven Kernreaktionsdichte erstellt, die Strahlendosisverteilung der Teilchenstrahlen nach Atomzahl in Terme unterteilt und eine Unterteilung in Terme mit Anwendung eines Korrekturfaktors und Terme ohne Anwendung eines Korrekturfaktors durchführt und die Strahlendosisverteilung korrigiert.

4. Bestrahlungsplanungsvorrichtung nach Anspruch 3, wobei der Korrekturverarbeitungsabschnitt der effektiven Kernreaktionsdichte Terme mit einer Datenatomzahl von 3 bis 5 als Terme ohne Anwendung eines Korrekturfaktors festlegt, Terme mit der Atomzahl 6 als Terme zum Berechnen eines Abschwächungskorrekturfaktors festlegt, der anhand einer Veränderung der Teilchenstrahlenfluenz ermittelt wird, und Terme mit einer Atomzahl von 1 bis 2 als Terme festlegt, bei denen eine Multiplikation des Kehrwerts des Abschwächungskorrekturfaktors stattfindet.

5. Bestrahlungsplanungsvorrichtung nach Anspruch 2, wobei der Bestrahlungsobjektmaterial-Korrekturverarbeitungsabschnitt ein Teilchenstrahlenwirkung-Korrekturverarbeitungsabschnitt ist, der die Strahlendosisverteilung der Teilchenstrahlen in wenigstens einen Term bezüglich elektromagnetischer Wechselwirkung und einen Term bezüglich der Kernreaktion unterteilt und jeweils eine Korrektur durch einen Korrekturfaktor durchführt.

6. Bestrahlungsplanungsvorrichtung nach Anspruch 5, wobei der Bestrahlungsobjektmaterial-Korrekturverarbeitungsabschnitt die Strahlendosisverteilung der Teilchenstrahlen in drei Terme unterteilt, nämlich einen Term bezüglich elektromagnetischer Wechselwirkung, einen Term bezüglich der Kernreaktion und einen Term bezüglich elastischer Wechselwirkung und inelastischer Wechselwirkung, jeweils eine Korrektur durch einen Korrekturfaktor durchführt und die Werte nach der Korrektur addiert.

7. Bestrahlungsplankorrekturprogramm, das einen Computer veranlasst, als ein 3D-Abrasterungsdatenerfassungsabschnitt, der 3D-Abrasterungsdaten erfasst, indem ein Bestrahlungsobjekt der Teilchenstrahlen durch radioaktive Strahlen, die sich von den Teilchenstrahlen unterscheiden, einer 3D-Abrasterung unterzogen wird, ein Verschreibungsdatenerfassungsabschnitt zum Erfassen von Behandlungsdaten, die für das Bestrahlungsobjekt eine Position und eine Dosis eines Bereichs darstellen, der mit Teilchenstrahlen bestrahlt wird, ein Erzeugungsabschnitt für physikalische Reaktionsgrößenverteilungsdaten, der auf Grundlage der 3D-Abrasterungsdaten physikalische Reaktionsgrößenverteilungsdaten zur Verteilung einer physikalischen Größe erstellt, die die Leistung des Materials des Bestrahlungsobjekts darstellt, welches mit den Teilchenstrahlen reagiert, und ein Strahlendosisverteilungsberechnungsabschnitt zu arbeiten, der auf Grundlage der Verschreibungsdaten und der physikalischen Reaktionsgrößenverteilungsdaten die Strahlendosisverteilung ermittelt, und den Erzeugungsabschnitt für physikalische Reaktionsgrößenverteilungsdaten veranlasst, als ein Bremsvermögensverhältnis-Korrekturverarbeitungsabschnitt zum Erstellen von dreidimensionale Bremsvermögensverhältnisdaten, der die 3D-Abrasterungsdaten in ein Bremsvermögensverhältnis umwandelt, das eine physikalische Größe ist, die darstellt, wie leistungsfähig ein betrachtetes Material in Bezug auf Wasser hinsichtlich der Abbremsung der einfallenden Teilchen ist, und ein Bestrahlungsobjektmaterial-Korrekturverarbeitungsabschnitt zu arbeiten, der aus den 3D-Bremsvermögensverhältnisdaten einen Korrekturfaktor ermittelt, der die Differenz zwischen Wasser und dem Bestrahlungsobjektmaterial darstellt und anhand des Korrekturfaktors eine Strahlendosisverteilung der Teilchenstrahlen für eine jeweilige Tiefe korrigiert.

8. Bestrahlungsplankorrekturprogramm, das einen Computer veranlasst, als ein Bremsvermögensverhältnis-Korrekturverarbeitungsabschnitt zum Erstellen von dreidimensionale Bremsvermögensverhältnisdaten, der die 3D-Abrasterungsdaten in ein Bremsvermögensverhältnis umwandelt, das eine physikalische Größe ist, die darstellt, wie leistungsfähig ein betrachtetes Material in Bezug auf Wasser hinsichtlich der Abbremsung der einfallenden Teilchen ist, und ein Bestrahlungsobjektmaterial-Korrekturverarbeitungsabschnitt zu arbeiten, der aus den 3D-Bremsvermögensverhältnisdaten einen Korrekturfaktor ermittelt, der die Differenz zwischen Wasser und dem Bestrahlungsobjektmaterial darstellt, und anhand des Korrekturfaktors eine Strahlendosisverteilung der Teilchenstrahlen für eine jeweilige Tiefe korrigiert.

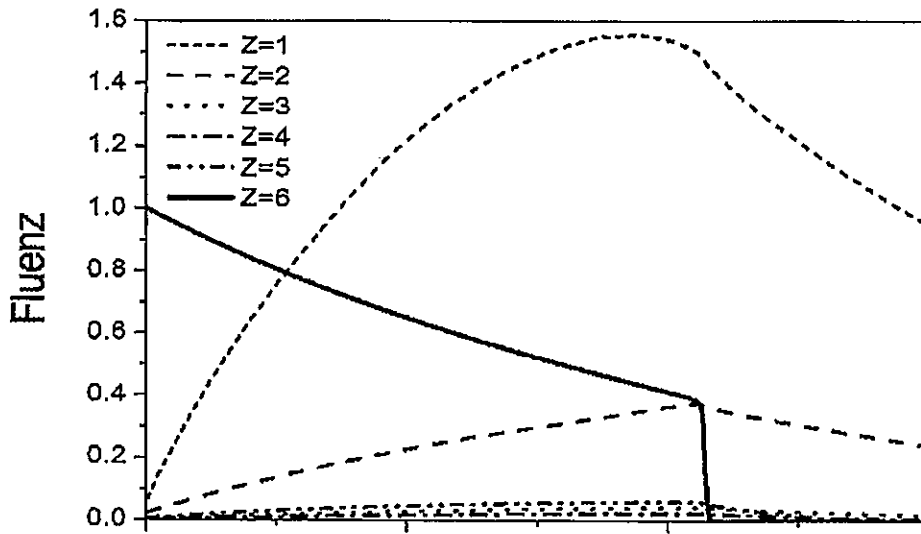
9. Bestrahlungsplankorrekturverfahren zum Korrigieren eines Bestrahlungsplans für Teilchenstrahlen, wobei dreidimensionale Bremsvermögensverhältnisdaten erstellt werden, indem 3D-Abrasterungsdaten in ein Bremsvermögensverhältnis umgewandelt werden, das eine physikalische Größe ist, die darstellt, wie leistungsfähig ein betrachtetes Material in Bezug auf Wasser hinsichtlich der Abbremsung der einfallenden Teilchen ist, und aus den 3D-Bremsvermögensverhältnisdaten ein Korrekturfaktor ermittelt wird, der die Differenz zwischen Wasser und dem Bestrahlungsobjektmaterial darstellt, und anhand des Korrekturfaktors eine Strahlendosisverteilung der Teilchenstrahlen für eine jeweilige Tiefe korrigiert wird.

Es folgen 8 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig.1

(A)



(B)

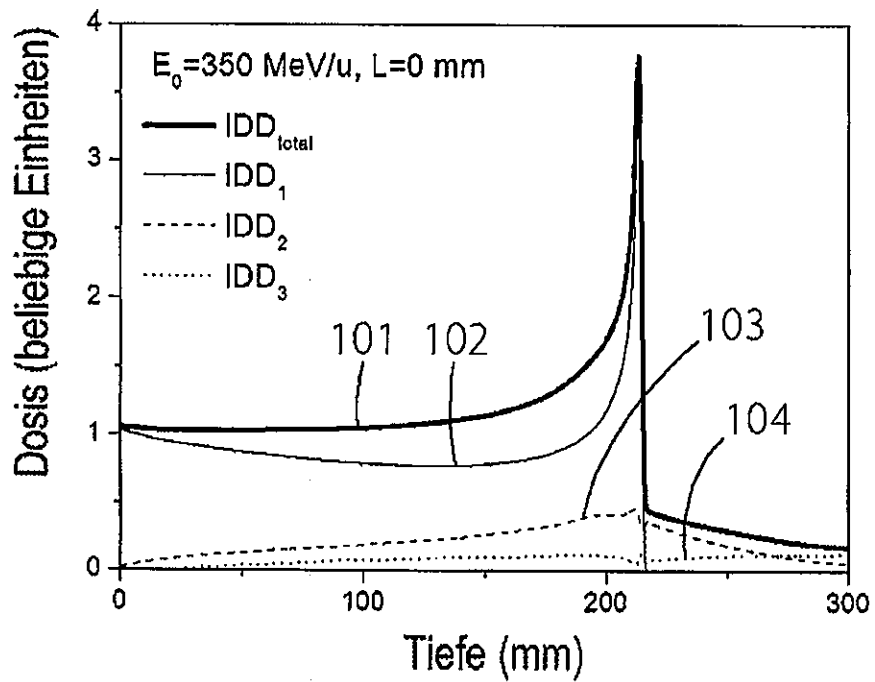


Fig.2

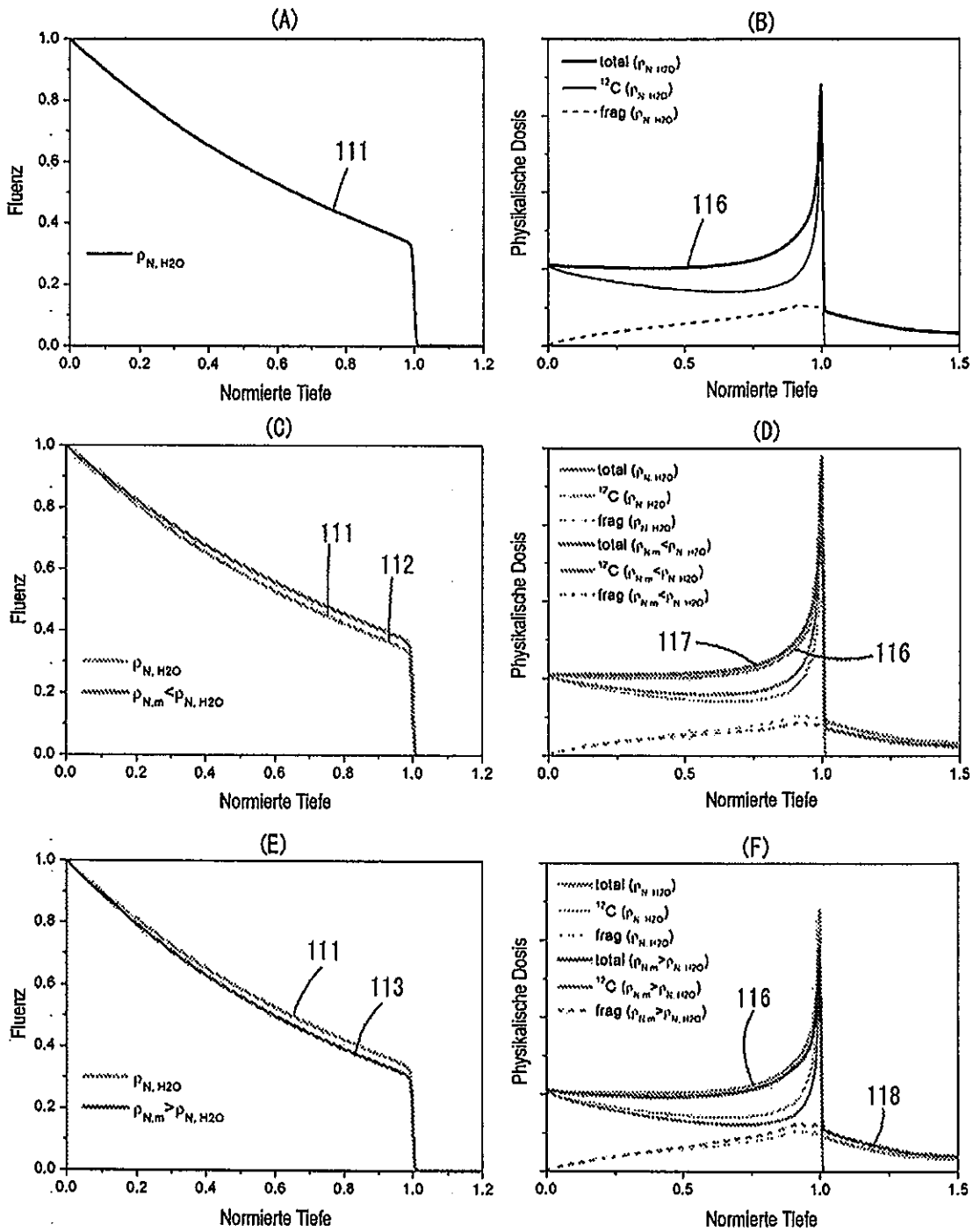
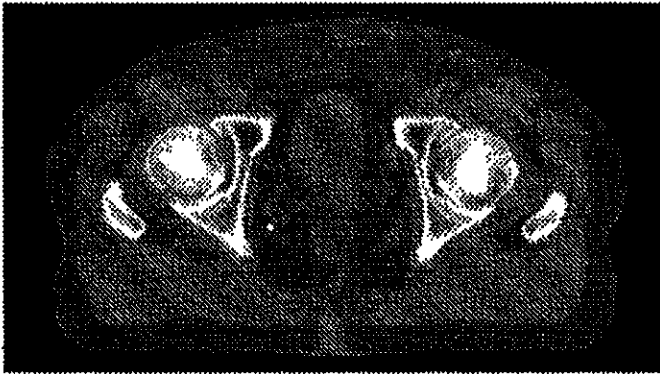
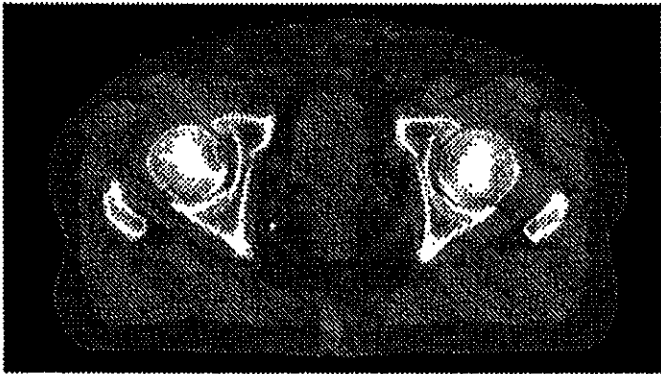


fig.3

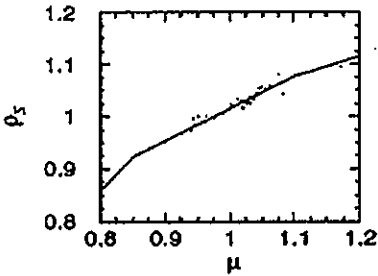
(A)



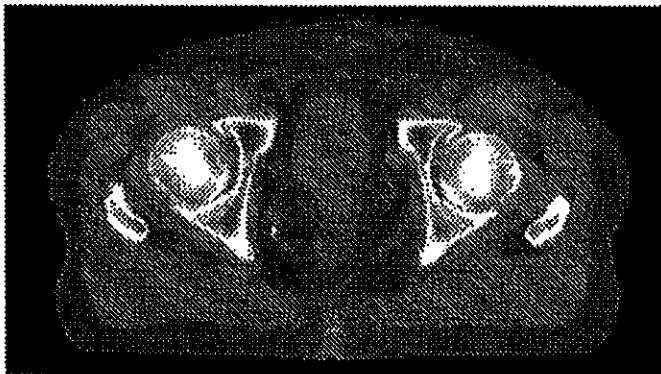
(B 1)



(B 2)



(C 1)



(C 2)

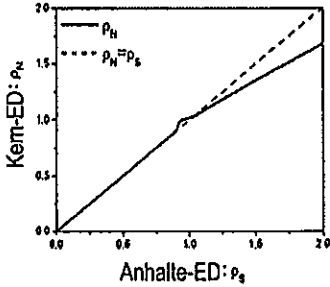


fig. 4

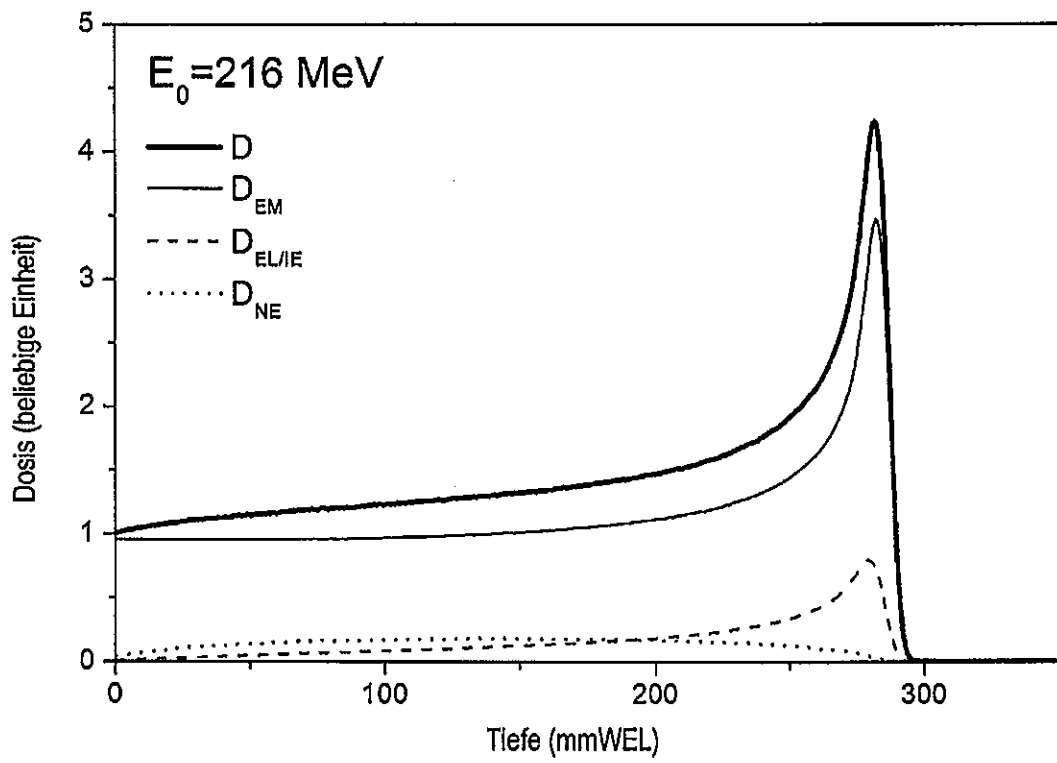


fig.5

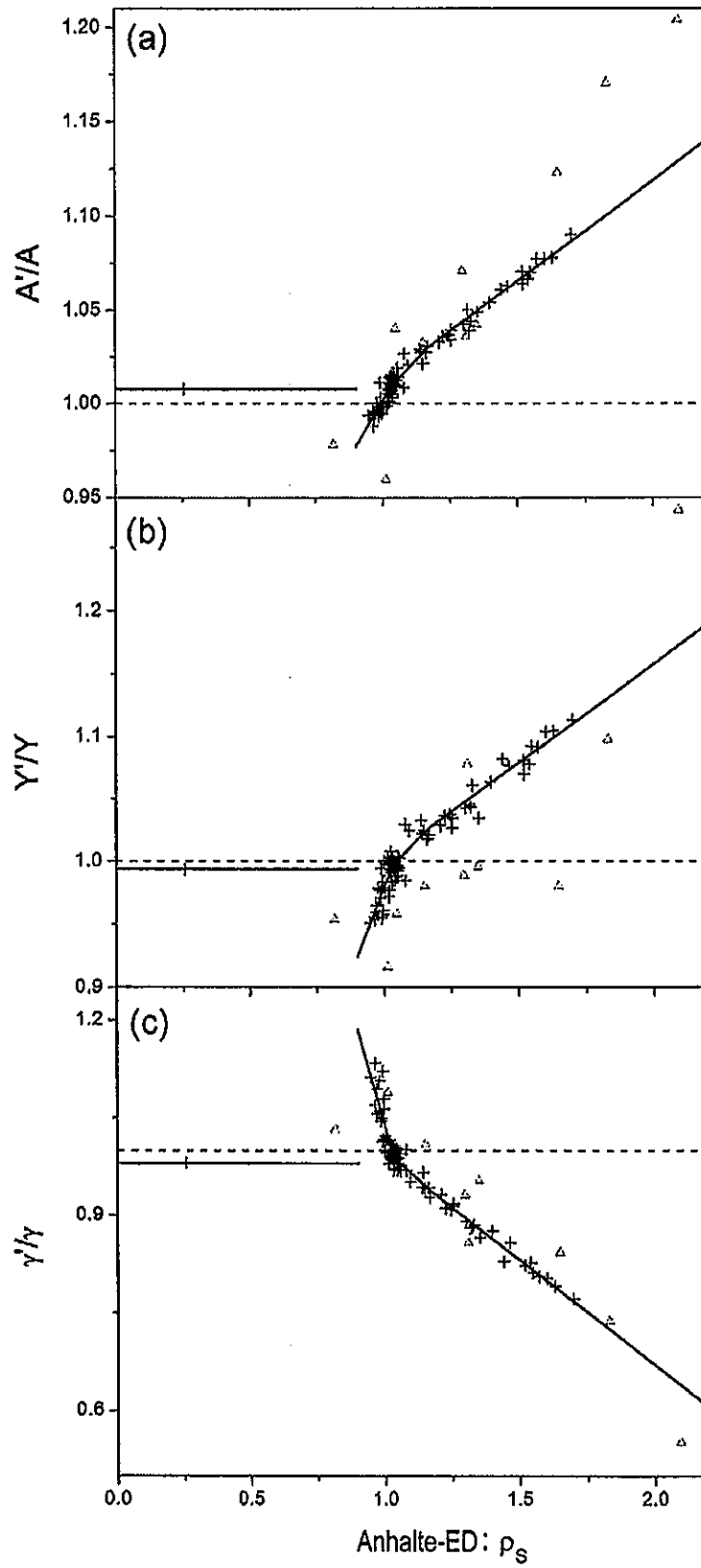


fig. 6

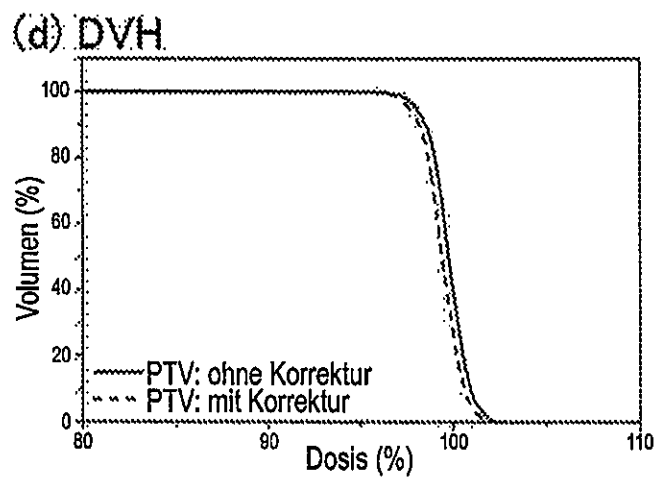
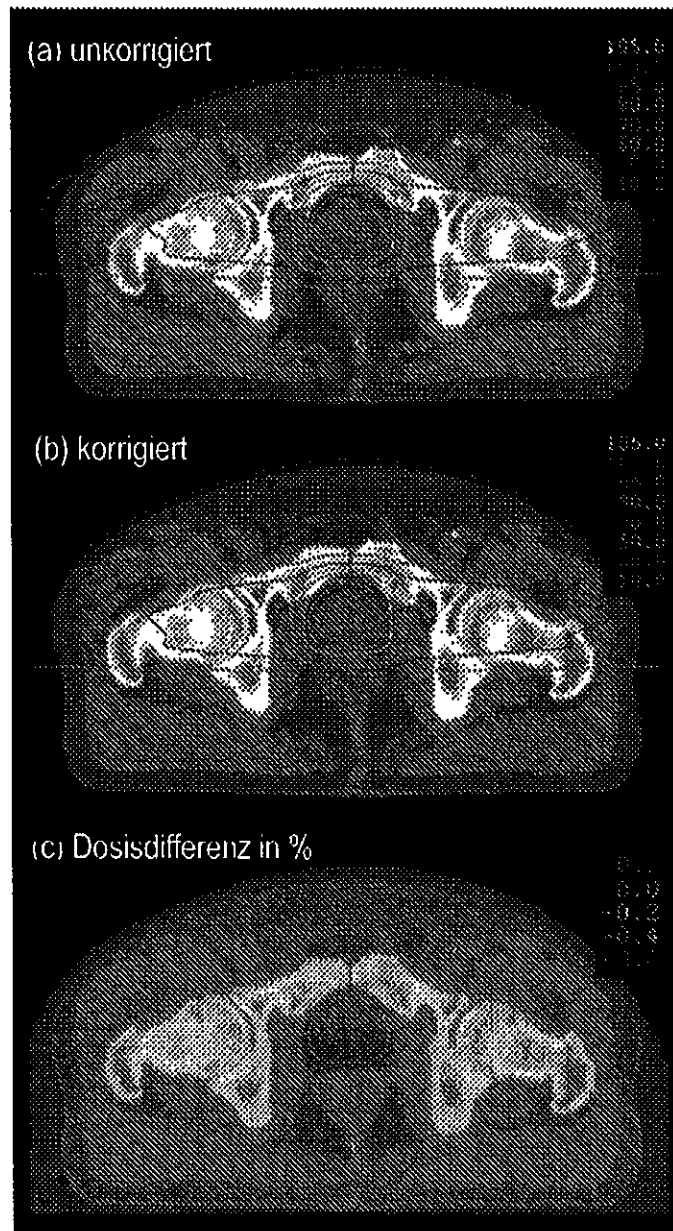


fig. 7

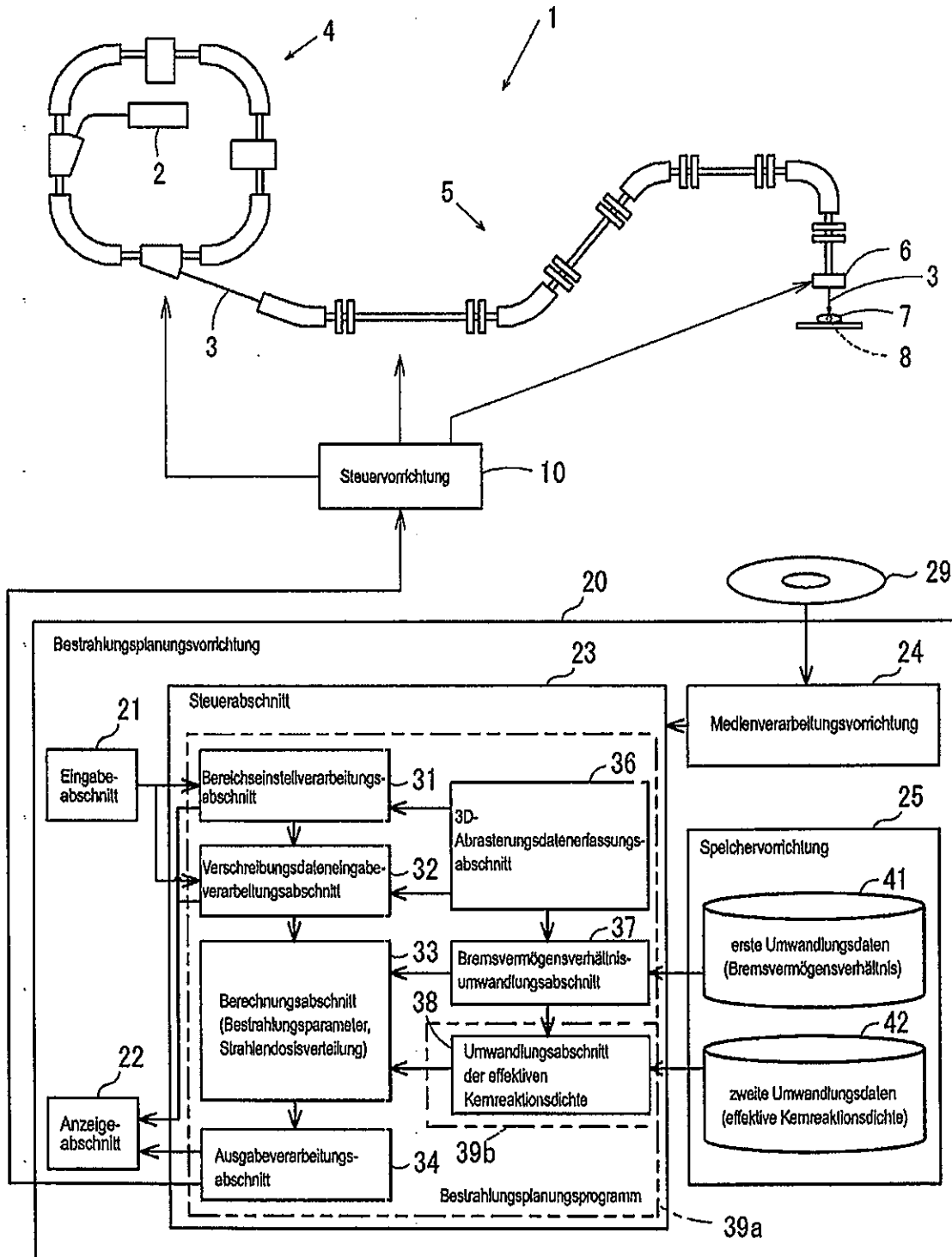


Fig. 8

