



(11) **EP 2 011 127 B1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des
Hinweises auf die Patenterteilung:
20.04.2011 Patentblatt 2011/16

(51) Int Cl.:
G21K 1/093 ^(2006.01) **G21K 5/04** ^(2006.01)
H05H 7/04 ^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **07712257.0**

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP2007/051642

(22) Anmeldetag: **21.02.2007**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2007/122025 (01.11.2007 Gazette 2007/44)

(54) **GEKRÜMMTER STRAHLFÜHRUNGSMAGNET MIT SATTEL- UND RENNBAHNFÖRMIGEN
SUPRALEITENDEN SPULEN UND BESTRAHLUNGSANLAGE MIT EINEM SOLCHEN MAGNETEN**

CURVED BEAM-GUIDING MAGNET WITH SADDLE- AND RACE-TRACK-SHAPED
SUPERCONDUCTING COILS AND IRRADIATION UNIT WITH SUCH A MAGNET

AIMANT COURBÉ À GUIDAGE DE FAISCEAU À BOBINES SUPRACONDUCTRICES EN FORME
DE SELLE ET DE TRAJECTOIRE DE COURSE ET INSTALLATION D'IRRADIATION ÉQUIPÉE D'UN
AIMANT DE CE TYPE

(84) Benannte Vertragsstaaten:
**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR
HU IE IS IT LI LT LU LV MC NL PL PT RO SE SI
SK TR**

(30) Priorität: **21.04.2006 DE 102006018635**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
07.01.2009 Patentblatt 2009/02

(73) Patentinhaber: **SIEMENS
AKTIENGESELLSCHAFT
80333 München (DE)**

(72) Erfinder: **RIES, Günter
91056 Erlangen (DE)**

(56) Entgegenhaltungen:
**DE-A1- 4 335 807 DE-A1- 19 904 675
JP-A- 63 304 606**

- **PRIANO C. ET AL: 'A superconducting magnet for a beam delivery system for carbon ion cancer therapy' IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY Bd. 12, Nr. 1, März 2002, Seiten 988 - 992, XP011069190**

EP 2 011 127 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf eine Bestrahlungsanlage mit einer feststehenden, einen Strahl elektrisch geladener Teilchen erzeugenden Bestrahlungsquelle und einem Gantry-System mit einem Strahlführungsmagneten. Der Strahlführungsmagnet dient zur Ablenkung eines Strahls elektrisch geladener Teilchen längs einer gekrümmten Teilchenbahn, wobei der Magnet versehen ist

- mit einer durch die gekrümmte Teilchenbahn festgelegten Strahlführungsebene,
- mit einem die gekrümmte Teilchenbahn umschließenden gekrümmten Strahlführungsrohr,
- und
- mit einem dem Strahlführungsrohr zugeordneten System von in Führungsrichtung des Teilchenstrahls ausgedehnten gekrümmten Einzelspulen, die spiegelbildlich zu der Strahlführungsebene ausgebildet und angeordnet sind.

[0002] Eine entsprechende Bestrahlungsanlage geht z. B. aus der WO 02/069350 A1 oder der DE 199 04 675 A1 hervor.

[0003] Gekrümmte Strahlführungsmagnete kommen verbreitet in Teilchenbeschleunigeranlagen zu einer Ablenkung und/oder Fokussierung eines Strahls geladener Teilchen wie Elektronen oder Ionen zum Einsatz. Solche Anlagen können insbesondere auch für eine Strahlentherapie auf dem Gebiet der medizinischen Technik konzipiert sein. Eine entsprechende Therapieanlage geht aus der genannten DE 199 04 675 A1 oder der US 4,870,287 hervor. Sie umfasst eine Teilchenquelle bzw. einen Beschleuniger zur Erzeugung eines hochenergetischen Teilchenstrahls, der aus der Quelle in Richtung einer Bestrahlungsachse austritt und auf einen zu bestrahlenden Bereich eines Probanden wie z. B. eine Geschwulst eines Patienten gerichtet wird. Um die Bestrahlungsdosis im umliegenden Bereich möglichst gering zu halten; wird der Strahl in einer so genannten "Gantry" mittels einer Anordnung aus verschiedenen Ablenk- und Fokussierungsmagneten mehrfach aus der Richtung der ursprünglichen Bestrahlungsachse so abgelenkt, dass er unter einem vorbestimmten Winkel bezüglich dieser Achse, insbesondere unter 45 bis 90°, auf den zu bestrahlenden Bereich auftritt. Damit eine Bestrahlung von mehreren Seiten erfolgen kann, ist die Magnetanordnung aus Ablenk- und Fokussierungsmagneten auf einem Gestell der Gantry so angeordnet und um die ursprüngliche Bestrahlungsrichtung als Drehachse bzw. Gantry-Rotationsachse drehbar ausgebildet, wobei der austretende Strahl immer durch einen festen Punkt im so genannten "Isozentrum" läuft und sich so die Bestrahlungsbelastung im umliegenden Bereich bzw. Gewebe durch Verteilung auf eine verhältnismäßig große Fläche begrenzen lässt.

[0004] Bei der aus der genannten DE-A1-Schrift entnehmbaren Gantry-Anlage sind alle Ablenk- und Fokussierungsmagnete mit Leitern aus normalleitendem Material wie Kupfer(Cu) ausgebildet. Der Grund hierfür ist, dass die Wicklungen dieser Magnete mit diesem Leitermaterial verhältnismäßig einfach auszubilden sind, weil zu einer Formung der den Strahl ablenkenden und/oder fokussierenden Magnetfelder Körper bzw. Joche aus ferromagnetischem Material wie Eisen verwendet werden. Gerade die Strahlführungsmagnete zur Ablenkung weisen deshalb z. B. mit Wasser zu kühlende Kupferwicklungen und entsprechende Eisenjoche auf. Dabei ist jedoch die magnetische Flussdichte durch die Sättigung des Eisens auf maximal etwa 1,8 Tesla beschränkt. Der Kurvenradius und die Magnetlänge der allgemein verwendeten Magnete mit Ablenk-/ bzw. Krümmungswinkeln von 45° bis 90° liegen hierbei für den Fall einer Bestrahlung mit C⁶⁺-Ionen bei einigen Metern. Bei diesen Abmessungen ist aber das Gewicht insbesondere der Eisenjoche der Magnete dementsprechend hoch. So haben z. B. die Magnete einer bekannten Gantry-Anlage ein Gesamtgewicht von etwa 95 t. Das erforderliche Drehgestell für die schwenkbaren Magnete einer solchen Gantry-Anlage muss dementsprechend stabil ausgeführt sein und dabei eine exakte Strahlführung gewährleisten. Außerdem ist bei einer großen Magnetapparatur, wie sie bei einer rasterförmigen Ablenkung eines Teilchenstrahls gemäß dem so genannten "Spot Scanning-Verfahren" für Gantry-Anlagen benötigt wird, der Bedarf an elektrischer Leistung und somit an Kühlwasser ganz erheblich und liegt bei einer bekannten Gantry-Anlage bei etwa 800 kW.

[0005] Das Dokument von C. Priano et al., "A Superconducting Magnet for a Beam Delivery System for Carbon Ion Cancer Therapy", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 12, No. 1, March 2002 offenbart allgemein einen supraleitenden Magneten für eine Bestrahlungsanlage für die Krebstherapie.

[0006] Die DE 43 35 807 A1 offenbart eine supraleitende Ablenkmagnet-Vorrichtung zur Ablenkung eines Elektronenstrahls. Diese Vorrichtung weist eine magnetische Abschirmung auf, welche einen Kryostaten umgibt. In dem Kryostaten sind zwei Gruppen von Spulen angeordnet. Insgesamt umfasst die Ablenkelektromagnet-Vorrichtung zwei Hauptspulen sowie vier- und sechspolige Korrekturspulen. Die supraleitenden Magnetspulen werden innerhalb des Kryostaten in einem Kältemittelbad, vorzugsweise einem Bad aus flüssigem Helium, gekühlt.

[0007] Die Druckschrift von G. Sabbi, "Design of Racetrack Coils for High-Field Dipole Magnets", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, March 2001 offenbart einen Beschleunigermagnet für einen Teilchenbeschleuniger. Dieser Beschleunigermagnet weist zum Schließen eines von den Magnetfeldspulen erzeugten magnetischen Feldes ein Eisenjoch auf.

[0008] Die EP 0 208 163 A1 offenbart eine Magnetfeldeinrichtung für eine Anlage zur Beschleunigung und/oder Speicherung elektrisch geladener Teilchen. Die elektrisch geladenen Teilchen, insbesondere Elektronen, werden mit

der angegebenen Magnetfeldeinrichtung entlang einer gekrümmten Teilchenbahn abgelenkt. Zu diesem Zweck verfügt die Magnetfeldeinrichtung über supraleitende Wicklungen, die einen Dipol erzeugen. Das magnetische Führungsfeld, welches auf den Teilchenstrahl wirksam ist, soll insbesondere gegenüber diesem fokussierend wirken.

[0009] Die US 6,403,967 B1 offenbart eine Vorrichtung mit einem Magnetsystem für die Ionenimplantation. Das Magnetsystem dient der Erzeugung eines Dipolfeldes zur Ablenkung des Ionenstrahls. Die entsprechende Vorrichtung weist insbesondere speziell ausgeformte ferromagnetische Joche zur Magnetfeldformung auf.

[0010] Die US 5,111,173 offenbart einen Ablenkmagneten für geladene Teilchen, dieser ist beispielsweise für ein Synchrotron geeignet. Insbesondere wird ein 180°-Ablenkmagnet mit supraleitenden Spulen angegeben, der zur Erzeugung eines Magnetfeldes geeignet ist, das hinsichtlich seiner Homogenität verbessert ist.

[0011] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, eine Bestrahlungsanlage mit zumindest einem Strahlführungsmagneten anzugeben, wobei der Strahlführungsmagnet hinsichtlich seiner Größe und seines Gewichtes gegenüber entsprechenden normalleitenden Magneten reduzierte Werte aufweisen soll.

[0012] Die Aufgabe wird mit den in Anspruch 1 angegebenen Maßnahmen gelöst. Dementsprechend soll eine Bestrahlungsanlage mit einer feststehenden, einen Strahl elektrisch geladener Teilchen, erzeugende Bestrahlungsquelle und einem Gantry-System mit einem Strahlführungsmagneten angegeben werden. Der Strahlführungsmagnet zur Ablenkung eines Strahls elektrisch geladener Teilchen soll frei von ferromagnetischem, die Strahlführung beeinflussendem Material sein und zusätzlich noch die folgenden Merkmale aufweisen, nämlich

- a) eine durch die gekrümmte Teilchenbahn festgelegte Strahlführungsebene,
- b) ein die gekrümmte Teilchenbahn umschließendes Strahlführungrohr,
- c) ein dem Strahlführungrohr zugeordnetes System von mindestens sechs in Führungsrichtung des Teilchenstrahls ausgedehnten, gekrümmten supraleitenden Einzelspulen, die paarweise spiegelbildlich zu der Strahlführungsebene ausgebildet und angeordnet sind, wobei das Spulensystem zumindest umfasst,

- zwei sattelförmige Hauptspulen mit in Strahlführungsrichtung lang gestreckten Seitenteilen und stirnseitig aufgebogenen Endteilen,
- zwei zumindest weitgehend flache, bananenförmig gekrümmte Nebenspulen vom Rennbahntyp, die jeweils einen Innenbereich umschließen,
- zwei zumindest weitgehend flache, jeweils in dem Innenbereich der jeweiligen Nebenspule angeordnete, bananenförmig gekrümmte Zusatzspulen vom Rennbahntyp, und

- d) Mittel zur thermischen Isolation und Mittel zur Kühlung der supraleitenden Einzelspulen.

[0013] Bei der Erfindung wird von der Erkenntnis ausgegangen, dass es bei einem Verzicht auf feldformende Teile aus ferromagnetischem Material wie Eisenjoche mindestens sechs gekrümmter Einzelspulen bedarf, um eine gewünschte, vorgebbare Feldgüte im Strahlbereich für die Strahlablenkung realisieren zu können.

[0014] Die mit den erfindungsgemäßen Maßnahmen verbundenen Vorteile sind dann insbesondere in der angestrebten Reduzierung von Gewicht und Baugröße des gekrümmten Strahlführungsmagneten gegenüber normalleitenden Ablenkmagneten zu sehen. Diese Vorteile kommen besonders dann zum Tragen, wenn schwere Ionen wie z. B. C^{6+} -Ionen zum Einsatz kommen sollen. So ist z. B. für eine Gantry-Anlage mit einem 90°-Ablenkmagneten und zwei 45°-Ablenkmagneten für C^{6+} -Ionen das Magnetgewicht etwa 6 Tonnen (t) bei einer Leistungsaufnahme der erforderlichen Kältemaschinen von einigen 10 kW. Dabei ist der Platzbedarf fast um die Hälfte zu reduzieren, wobei ein erforderliches Schwenkgestell für die Drehung der Magnete um eine Gantry-Rotationsachse vorteilhaft einfacher und leichter ausgeführt werden kann.

[0015] Vorteilhafte Ausgestaltungen der erfindungsgemäßen Bestrahlungsanlage aus den von Anspruch 1 abhängigen Ansprüchen hervor. Dabei kann die Ausführungsform nach Anspruch 1 mit den Merkmalen eines der Unteransprüche oder vorzugsweise auch denen aus mehreren Unteransprüchen kombiniert werden. Demgemäß kann die Bestrahlungsanlage nach der Erfindung zusätzlich noch folgende Merkmale aufweisen:

- So kann der Strahlführungsmagnet vorteilhaft so ausgeführt sein, dass sein zentraler Krümmungswinkel zwischen 30° und 90° beträgt. Gerade bei größeren Krümmungswinkeln kommt der Vorteil an Gewichtsreduzierung und kleinerer Baugröße gegenüber normalleitenden Magneten besonders zum Tragen.
- Die Nebenspulen können sich bevorzugt zwischen den aufgebogenen Endteilen ihrer jeweils zugeordneten Hauptspule erstrecken. Auf diese Weise ist ein kompakter Aufbau des Systems aus den Einzelspulen zu realisieren.
- Die Leiter der Einzelwicklungen können bekanntes metallisches LTC(Low T_c)-Supraleitermaterial aufweisen. Entsprechende Leiter z. B. auf Basis von NbTi sind bei sehr tiefen Temperaturen zu betreiben und erfordern im Allgemeinen eine Helium-Kühltechnik. Sie sind technisch ausgereift und verhältnismäßig einfach zu verarbeiten.

- Stattdessen können die Leiter der Einzelwicklungen selbstverständlich auch mit bekanntem metalloxidisches HTC (High T_c)-Supraleitermaterial erstellt sein. Solche Leiter mit vorzugsweiser Bandform ermöglichen höhere Betriebstemperaturen, die insbesondere zwischen 10 und 40 K, vorzugsweise zwischen 20 und 30 K liegen können. Gegenüber der Kühltechnik der LTC-Supraleiter ist dann der Aufwand entsprechend verringert. Zudem haben bekannte HTC-Supraleiter in dem genannten Temperaturbereich zur Erzeugung starker Magnetfelder hinreichend große kritische Stromtragfähigkeiten bzw. Stromdichten.
- Wird ein abzulenkender Teilchenstrahl von C^{6+} -Ionen vorgesehen, so sind im Falle dieser hochenergetischen Teilchen die Vorteile der Gewichts- und Baugrößenreduzierung besonders ausgeprägt.
- Außerdem lässt sich der Strahlführungsmagnet vorteilhaft so ausführen, dass eine magnetische Aperturfeldstärke von mindestens 2 Tesla, vorzugsweise zwischen 3 und 5 Tesla, gegeben ist. Mit Supraleitern zu erzeugende hohe Aperturfeldstärken bringen nämlich die genannten Vorteile der Gewichts- und Baugrößenreduzierung mit sich.

[0016] Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der erfindungsgemäßen Bestrahlungsanlage gehen aus den vorstehend nicht angesprochenen Unteransprüchen sowie insbesondere aus der Zeichnung hervor.

[0017] Die Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die Zeichnung weiter erläutert, aus der ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel eines Strahlführungsmagneten und dessen Einsatzmöglichkeit in einer Bestrahlungsanlage ohne Einschränkung auf die konkret veranschaulichte Ausführungsform veranschaulicht ist. Dabei zeigen deren

Figur 1 einen Strahlführungsmagneten in Schrägansicht,
 Figur 2 den Querschnitt durch einen entsprechenden Strahlführungsmagneten,
 Figur 3 einen Längsschnitt durch einen entsprechenden Strahlführungsmagneten
 sowie Figur 4 einen prinzipiellen Aufbau einer Gantry-Anlage unter Verwendung mehrerer gekrümmter Strahlführungsmagnete.

[0018] Beim Aufbau eines aus den Figuren 1 und 2 entnehmbaren, gekrümmten Strahlführungsmagneten 2 wird von an sich bekannten Ausführungsformen entsprechender Magnete mit normalleitenden Spulenwicklungen ausgegangen, wie sie in der Teilchenbeschleunigertechnik zum Einsatz kommen. In den Figuren nicht dargestellte Teile sind daher bekannt.

[0019] Der Strahlführungsmagnet 2 dient zur Ablenkung eines durch eine gepfeilte Linie angedeuteten Teilchenstrahls 3 um einen zentralen Krümmungs- oder Bogenwinkel α , der bevorzugt zwischen 30° und 90° liegt (d.h. mit $30^\circ \leq \alpha < 90^\circ$). Bei dem Teilchenstrahl 3 handelt es sich um einen Strahl elektrisch geladener Teilchen wie Ionen, insbesondere von C^{6+} -Ionen. Der Teilchenstrahl wird mit Hilfe magnetischer Kräfte innerhalb eines entsprechend gekrümmten Strahlführungsrohres 5 gehalten bzw. geführt. Die gekrümmte Bahn des Teilchenstrahls legt dabei eine Strahlführungsebene 6 fest, die in Figur 2 durch eine gestrichelte Linie angedeutet sein soll.

[0020] Erfindungsgemäß werden Supraleiter zum Aufbau der Magnetwicklungen bzw. -spulen des Strahlführungsmagneten 2 verwendet. Als bekannte Materialien für hier verwendbare Supraleiter sind bekannte metallische LTC (Low T_c)-Supraleitermaterialien wie z. B. NbTi oder auch bekannte oxidische HTC (High T_c)-Supraleitermaterialien geeignet. Während für LTC-Supraleiter im Allgemeinen eine He-Kühltechnik erforderlich ist bei beispielsweise Betriebstemperaturen von etwa 4,2 K können bei Verwendung von HTC-Supraleitern höherer Betriebstemperaturen von beispielsweise 10 bis 40 K, vorzugsweise 20 bis 30 K vorgesehen werden. Bei diesen Temperaturen weisen bekannte HTC-Supraleiter zur Erzeugung der erforderlichen Magnetfeldstärken hinreichend hohe kritische Stromdichten auf. Zu der erforderlichen Kühlung der Supraleiter kann auf bekannte Kälteeinrichtungen zurückgegriffen werden.

[0021] Erfindungsgemäß muss ein System von mindestens sechs supraleitenden Einzelspulen vorgesehen werden, von denen jeweils zwei paarweise spiegelbildlich zur Strahlführungsebene 6 ausgebildet und angeordnet sind. Demgemäß umfasst das System an Einzelspulen zwei in Strahlführungsrichtung langgestreckte, sattelförmig ausgebildete, nachfolgend als Hauptspulen bezeichnete Spulen 8 und 9. Diese Spulen weisen jeweils zwei gekrümmte, seitlich zu dem Strahlführungsrohr 5 verlaufende Seitenteile 8a, 8b bzw. 9a, 9b sowie stirnseitige Endteile 8c, 8d bzw. 9c, 9d auf. Bevorzugt sind die stirnseitigen Endteile dabei jeweils so aus der durch die Seitenteile der Hauptspule aufgespannten Ebene aufgebogen bzw. gekröpft, dass sie außen um das Strahlführungsrohr 5 jeweils halbkreisbogenartig herumführen. Die Gestaltungsform entsprechender Hauptspulen ist allgemein bekannt (vgl. z. B. EP 0 276 360 B1). Gegebenenfalls sind aber auch andere bekannte Sattelformen geeignet, die auf einer gekrümmten Zylindermantelfläche liegen. D.h., die Seitenteile 8a, 8b bzw. 9a, 9b brauchen jeweils nicht exakt in einer nicht-gekrümmten Ebene zu verlaufen und/oder die stirnseitigen Endteile 8c, 8db bzw. 9c, 9d müssen jeweils nicht unbedingt exakt halbkreisbogenförmig ausgebildet werden, sondern können auch parabelähnliche Gestalt haben (vgl. z. B. JP 02-246305 A).

[0022] Oberhalb und unterhalb des Strahlführungsrohres 5 sind in parallelen Ebenen liegend zwei zumindest weitgehend flache, bananenförmig gekrümmte, nachfolgend als Nebenspulen bezeichnete Spulen 10 bzw. 11 vorgesehen. Diese Spulen sind als gekrümmte Rennbahnsulen gestaltet und erstrecken sich dabei vorzugsweise zwischen den stirnseitigen, wickelkopfartigen Endteilen der Hauptspulen 8 und 9. Die Gestaltungsform entsprechender, hier beispiels-

weise etwa um 90° gekrümmter bananenförmiger Nebenspulen ist ebenfalls bekannt (vgl. z. B. EP 0 185 955 B1 oder DE 35 04 211 A1). Die Leiter der Nebenspulen 10 und 11 umschließen dabei jeweils einen bananenförmig gekrümmten Innenbereich 12 bzw. 13 und dort jeweils eine entsprechend gekrümmte, nachfolgend als Zusatzspule bezeichnete 14 bzw. 15 ebenfalls vom Rennbahntyp. Wie aus Figur 2 hervorgeht, ist der Wicklungsquerschnitt dieser Zusatzspulen 14 und 15 gegenüber dem der sie jeweils umschließenden Nebenspule 10 bzw. 11 deutlich geringer. In dieser Figur sind außerdem die Stromflussrichtungen in den Spulen 10, 11, 14 und 15 angedeutet.

[0023] Gegebenenfalls können den einzelnen Spulen noch weitere Spulen zugeordnet werden, um geforderte Feldverhältnisse z. B. hinsichtlich der Homogenität weiter zu verbessern. Mit der Mindestzahl von sechs Spulen sind jedoch im Allgemeinen hinreichend befriedigende Feldverhältnisse zu realisieren.

[0024] Da sich die supraleitenden Einzelspulen 8, 9, 10, 11, 14 und 15 auf einer kryogenen Betriebstemperatur mittels entsprechender, in den Figuren nicht ausgeführter Mittel und Vorrichtungen zur Kühlung befinden, müssen auch Mittel zu deren thermischer Isolation gegenüber dem auf Raumtemperatur befindlichen Außenbereich des Strahlführungsmagneten vorgesehen sein. Diese thermische Isolationsmittel umfassen gemäß der Darstellung der Figur 2 ein als Vakuum- oder Kryostatengehäuse ausgebildetes warmes Außengehäuse 17, das einen Vakuumraum 18 einschließt. Innerhalb dieses Vakuumraums befindet sich ein kaltes Innengefäß 20, in dem eine Haltestruktur 21 zur Aufnahme und Fixierung der einzelnen supraleitenden Spulen angeordnet ist. Außerdem muss in diesem Innengefäß den Leitern der einzelnen supraleitenden Spulen die erforderliche Kälteleistung zu deren Kühlung beispielsweise über ein Kältemittel in geeigneter Weise zur Verfügung gestellt werden. Selbstverständlich können, wie in Figur 2 ferner angedeutet ist, zwischen dem kalten Innengefäß 20 und dem warmen Außengehäuse 17 in den Vakuumraum 18 noch weitere, auch diskret gekühlte Isolationsmittel wie Bestrahlungsschilde oder Isolationsfolien 22 vorgesehen werden.

[0025] Selbstverständlich müssen die einzelnen Wicklungen des erfindungsgemäß gestalteten Strahlführungsmagneten so mechanisch fixiert sein, dass die auf sie wirkenden Kräfte aufgenommen werden, ohne dass es zu unerwünschten Leiterbewegungen kommt. Diesbezügliche Maßnahmen sind allgemein bekannt und deshalb in Figur 2 nicht ausgeführt.

[0026] Figur 3 zeigt eine seitliche Aufsicht auf den in der Strahlführungsebene vorgenommenen Längsschnitt durch einen entsprechenden Strahlführungsmagneten 2 mit einem Krümmungswinkel α von 90°. Dabei sind die aus dieser Ebene herausführenden Winkelköpfe bzw. Endteile einer der sattelförmigen Hauptspulen, beispielsweise die halbkreisbogenartigen Endteile 8c und 8d der Spule 8 besonders hervorgehoben. Wie ferner ersichtlich, ist die Haltestruktur 21 für die Hauptspule 8 mit besonderen Verstärkungsrippen 23 versehen. Diese Teile befinden sich innerhalb des kalten Innengefäßes 20, das z. B. zur Aufnahme eines flüssigen Kältemittels wie He oder Ne dient. Das Innengefäß ist mit stirnseitigen Endflanschen 25 und 26 ausgestattet. In entsprechender Weise sind auch stirnseitige Endflansche 27 und 28 für das warme Außengehäuse 17 vorgesehen.

[0027] Bei dem vorstehend geschilderten Ausführungsbeispiel wurde davon ausgegangen, dass die Nebenspulen 10 und 11 sowie die Zusatzspulen 14 und 15 als völlig flache, in einer Ebene liegende, bananenförmig gekrümmte Rennbahnschleifen ausgebildet sind. Gegebenenfalls ist es auch möglich, dass wenigstens teilweise diese Spulen auch nur annähernd flach gestaltet sind. Hierunter ist zu verstehen, dass die Spulen zumindest im Bereich ihrer bogenförmigen Endteile auch sattelförmig aufgebogen sein können. Die Spulen liegen dann nicht mehr in einer flachen Ebene sondern auf einer Mantelfläche eines Zylinders, der die gekrümmte Strahlführungsschleife 4 umschließt. Solche Spulen lassen sich beispielsweise aus zunächst ebenen, gekrümmten Rennbahnschleifen herstellen, indem sie dann der Mantelfläche des gekrümmten Zylinders formschlüssig angepasst werden.

[0028] Der an Hand der Figuren 1 bis 3 beschriebene gekrümmte Strahlführungsmagnet 2 ist an sich für beliebige Bestrahlungsanlagen zur Ablenkung von Strahlen beliebiger elektrisch geladener Teilchen geeignet (vgl. z. B. US 4,870,287 A oder JP 2000-075100 A). Bevorzugt wird er für eine Gantry-Anlage vorgesehen, die zur medizinischen Therapie dient. Die Gestaltungsmerkmale entsprechender Anlagen sind ebenfalls allgemein bekannt (vgl. z. B. DE 199 04 675 A1 oder WO 02/069350 A1). Eine solche Anlage zeichnet sich dadurch aus, dass ihre endseitigen Fokussierungs- und Ablenkmagnete um eine Gantry-Rotationsachse schwenkbar ausgeführt sind. Nur die schwenkbaren Ablenkmagnete einer solchen Anlage sind in Figur 4 in stark schematisierter Darstellung angedeutet. Die allgemein mit 30 bezeichnete Gantry-Anlage weist eine in der Figur nicht näher ausgeführte Bestrahlungsquelle 31 zur Erzeugung eines Strahls 3 von Ionen wie insbesondere C⁶⁺-Ionen auf. Diese Ionen treten aus der Quelle in einer Strahlführungsrichtung aus, die zugleich die Gantry-Rotationsachse A festlegt. Mit Hilfe von beispielsweise zwei 45°-Ablenkmagneten 33 und 34, die vorteilhaft entsprechend dem erfindungsgemäßen gekrümmten Strahlführungsmagneten 2 ausgebildet sein können, wird der Ionenstrahl 3 in einen bezüglich der Achse A entfernten Bereich gebracht und von dort durch einen erfindungsgemäß ausgebildeten, beispielsweise um 90° ablenkenden Ablenk- bzw. Strahlführungsmagneten 2 in eine senkrecht zur Rotationsachse A gerichtete Richtung gelenkt, wo er in einem Isozentrum 35 die Achse A kreuzt. Selbstverständlich sind auch andere Kombinationen von Ablenkmagneten wie z. B. von einem 45°-Magneten und einem 135°-Magneten oder von zwei 30°-Magneten und einem 120°-Magneten geeignet. Ferner ist in der Figur noch ein von dem Strahl 3 durchlaufener, mittels einer Eisenkastens magnetisch abgeschirmter Diagnostikkopf für die Strahlmenge und die Strahlungsdosis mit 36 bezeichnet.

[0029] Zu Vergleichszwecken ist außerdem in der Figur 4 durch gestrichelte Linien ein weiteres Magnetsystem 38

angedeutet, das sich ergeben würde, wenn man statt eines Systems aus supraleitenden Magneten entsprechende normalleitende Magnete mit feldformenden Eisenjochen verwenden würde. Das Isozentrum 35 läge dann um etwa 1 m weiter entfernt von der Ionenquelle 31, wenn man die aus der folgenden Tabelle entnehmbaren Werte zugrunde legt:

Ausführungsart	konventionell	supraleitend
Magnettechnologie	Cu-Leiter und Eisen	LTC- oder HTC-Leiter
Aperturfeld $B_{\max}$	1,8 Tesla	4-5 Tesla
Feldformung	Eisenjoch	Luftspulen ohne Eisen
Magnetmasse (1 90°-Magnet, 2 45°-Magnete)	ca. 95 t	ca. 6 t
Leistungsverbrauch bei $B_{\max}$	830 kW	15-30 kW
Gantry-Durchmesser x Gantry-Länge	ϕ 12 m x 18 m	ϕ 7 m x 12 m

[0030] Aus Figur 4 und der vorstehenden Tabelle geht unmittelbar der Vorteil einer Verwendung von supraleitenden Magneten in einer Gantry-Anlage als Bestrahlungsanlage hervor.

Patentansprüche

1. Bestrahlungsanlage (30) mit einer feststehenden, einen Strahl (3) elektrisch geladener Teilchen erzeugenden Bestrahlungsquelle (31) und einem Gantry-System mit mindestens einem Strahlführungsmagneten (2) zur Ablenkung des Strahls (3) elektrisch geladener Teilchen längs einer gekrümmten Teilchenbahn (4), wobei

- die gekrümmte Teilchenbahn (4) eine Strahlführungsebene (6) festlegt,
- das Gantry-System um eine in der Strahlführungsebene (6) liegende Achse (A) drehbar ist, und
- der Strahlführungsmagnet (2) frei von ferromagnetischem, die Strahlführung beeinflussendem Material ist und versehen ist

a) mit einem die gekrümmte Teilchenbahn (4) umschließenden gekrümmten Strahlführungsrohr (5),
 b) mit einem dem Strahlführungsrohr (5) zugeordneten System von mindestens sechs in Führungsrichtung des Teilchenstrahls ausgedehnten gekrümmten supraleitenden Einzelspulen, die paarweise spiegelbildlich zu der Strahlführungsebene (6) ausgebildet und angeordnet sind, wobei das Spulensystem zumindest umfasst:

- zwei sattelförmige Hauptspulen (8, 9) mit in Strahlführungsrichtung lang gestreckten seitenteilen (8a, 8b bzw. 9a, 9b) und stirnseitigen, aufgebogenen Endteilen (8c, 8d bzw. 9c, 9d),
- zwei flache, bananenförmig gekrümmte Nebenspulen (10, 11) vom Rennbahntyp, die jeweils einen Innenbereich (12 bzw. 13) umschließen,
- zwei flache, jeweils in dem Innenbereich (12, 13) der jeweiligen Nebenspule (10, 11) angeordnete, bananenförmig gekrümmte Zusatzspulen (14, 15) vom Rennbahntyp, und

c) mit Mitteln zu thermischen Isolation und Mitteln zur Kühlung der supraleitenden Einzelspulen.

2. Bestrahlungsanlage (30) nach Anspruch 1, **gekennzeichnet durch** einen Strahlführungsmagneten (2) mit einem zentralen Krümmungswinkel (α) zwischen 30° und 90°.

3. Bestrahlungsanlage (30) nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** sich die Nebenspulen (10, 11) des Strahlführungsmagneten (2) zwischen den aufgebogenen Endteilen (8c, 8d bzw. 9c, 9d) ihrer jeweils zugeordneten Hauptspule (8 bzw. 9) erstrecken.

4. Bestrahlungsanlage (30) nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Leiter

der Einzelspulen des Strahlführungsmagneten (2) metallisches LTC-Supraleitermaterial aufweisen.

- 5 5. Bestrahlungsanlage (30) nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Leiter der Einzelspulen des Strahlführungsmagneten (2) metalloxidisches HTC-Supraleitermaterial aufweisen.
- 10 6. Bestrahlungsanlage (30) nach Anspruch 5, **gekennzeichnet durch** eine Betriebstemperatur der Leiter der Einzelspulen zwischen 10 K und 40 K, vorzugsweise zwischen 20 K und 30 K.
7. Bestrahlungsanlage (30) nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Teilchenstrahl (3) C⁶⁺-Teilchen enthält.
- 15 8. Bestrahlungsanlage (30) nach einem der vorangehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** eine magnetische Aperturfeldstärke des Strahlführungsmagneten (2) in seinem Strahlführungsröhr (5) von mindestens 2 Tesla, vorzugsweise zwischen 3 und 5 Tesla.

Claims

- 20 1. Irradiation machine (30) with
a fixed irradiation source (31), producing a beam (3) of electrically charged particles, and a gantry system with at least one beam-guiding magnet (2) for deflecting the beam (3) of electrically charged particles along a curved particle path (4), wherein
 - 25 - the curved particle path (4) defines a beam-guiding plane (6),
 - the gantry system can be rotated about an axis (A) lying in the beam-guiding plane (6),
 - and
 - the beam guiding magnet (2) is devoid of ferromagnetic material that influences the beam guiding and is provided
 - 30 a) with a curved beam-guiding tube (5) surrounding the curved particle path (4),
 - b) with a system, associated with the beam-guiding tube (5), of at least six curved superconducting individual coils, which extend in the guiding direction of the particle beam and which are designed and arranged in pairs, mirrored in the beam-guiding plane (6), wherein the coil system comprises at least:
 - 35 - two saddle-shaped main coils (8, 9) with lateral parts (8a, 8b and 9a, 9b) elongated in the beam-guiding direction and with bent-up end parts (8c, 8d and 9c, 9d) at the end faces,
 - two flat secondary coils (10, 11) of the racetrack type, which have a banana-like shape and each enclose an inner region (12 and 13),
 - two flat additional coils (14, 15) of the racetrack type, which have a banana-like shape and are respectively arranged in the inner region (12, 13) of the respective secondary coil (10, 11),
 - 40 and
 - c) with means for thermal insulation and means for cooling the superconducting individual coils.
- 45 2. Irradiation machine (30) according to Claim 1, **characterized by** a beam-guiding magnet (2) with a central curvature angle (α) between 30° and 90°.
3. Irradiation machine (30) according to Claim 1 or 2, **characterized in that** the secondary coils (10, 11) of the beam-guiding magnet (2) extend between the bent-up end parts (8c, 8d and 9c, 9d) of their respectively associated main coil (8 and 9).
- 50 4. Irradiation machine (30) according to one of the preceding claims, **characterized in that** the conductors of the individual coils of the beam-guiding magnet (2) have metallic LTC superconductor material.
- 55 5. Irradiation machine (30) according to one of Claims 1 to 3, **characterized in that** the conductors of the individual coils of the beam-guiding magnet (2) have metal-oxide HTC superconductor material.
6. Irradiation machine (30) according to Claim 5, **characterized by** an operational temperature of the conductors of the individual coils of between 10 K and 40 K, preferably of between 20 K and 30 K.

7. Irradiation machine (30) according to one of the preceding claims, **characterized in that** the particle beam (3) contains C^{6+} particles.
8. Irradiation machine (30) according to one of the preceding claims, **characterized by** the beam-guiding magnet (2) having a magnetic aperture field strength of at least 2 Tesla, preferably of between 3 and 5 Tesla, in the beam-guiding tube (5) thereof.

Revendications

1. Installation (30) d'exposition à un rayonnement, comprenant une source 31 de rayonnement fixe et produisant un faisceau (3) de particules chargées électriquement et un système Gantry comprenant au moins un aimant (2) de guidage du faisceau pour dévier le faisceau (3) de particules chargées électriquement le long d'une trajectoire (4) de particules courbée, dans laquelle

- la trajectoire (4) de particules courbée fixe un plan (6) de guidage du faisceau,
- le système Gantry peut tourner autour d'un axe (A) passant dans le plan (6) de guidage du faisceau, et
- l'aimant (2) de guidage du faisceau est exempt de matériau ferromagnétique et influençant le guidage du faisceau et est pourvu

- a) d'un tube (5) de guidage du faisceau courbé et entourant la trajectoire (6) de particules courbée,
- b) d'un système associé au tube (5) de guidage du faisceau d'au moins six bobines individuelles supraconductrices courbées et s'étendant dans la direction de guidage du faisceau de particules, qui sont formées et disposées par paire d'une manière symétrique comme en un miroir, par rapport au plan (6) de guidage du faisceau, le système de bobine comprenant au moins :

- deux bobines (8, 9) principales en forme de selle ayant des parties (8a, 8b et 9a, 9b) latérales s'étendant en longueur dans la direction de guidage du faisceau, et des parties (8c, 8d et 9c, 9d) courbées d'extrémité, du côté frontal,
- deux bobines (10, 11) auxiliaires plates courbées en forme de banane, du type à piste de course, qui entourent respectivement une zone (12 et 13) intérieure,
- deux bobines (14, 15) supplémentaires, de type à piste de course, courbées en forme de banane et disposées respectivement dans la partie (12, 13) intérieure des bobines (10, 11) auxiliaires respectives,

- c) de moyens d'isolation thermique et de moyens de refroidissement des diverses bobines supraconductrices.

2. Installation (30) d'exposition à un rayonnement suivant la revendication 1, **caractérisée par** un aimant (2) de guidage du faisceau ayant un angle (α) de courbure au centre compris entre 30° et 90°.
3. Installation (30) d'exposition à un rayonnement suivant la revendication 1 ou 2, **caractérisée en ce que** les bobines (10, 11) auxiliaires de l'aimant (12) de guidage du faisceau s'étendent entre les parties (8c, 8d et 9c, 9d) courbées d'extrémité de leur bobine (8 et 9) principale associée respectivement.
4. Installation (30) d'exposition à un rayonnement suivant l'une des revendications précédentes, **caractérisée en ce que** les conducteurs des bobines individuelles de l'aimant (2) de guidage du faisceau ont des matériaux supraconducteurs LTC métalliques.
5. Installation (30) d'exposition à un rayonnement suivant l'une des revendications 1 à 3, **caractérisée en ce que** les conducteurs des diverses bobines de l'aimant (2) de guidage du faisceau ont des matériaux supraconducteurs HTC en oxyde métallique.
6. Installation (30) d'exposition à un rayonnement suivant la revendication 5, **caractérisée par** une température de fonctionnement des conducteurs des diverses bobines comprise entre 10 K et 40 K, de préférence entre 20 K et 30 K.

EP 2 011 127 B1

7. Installation (30) d'exposition à un rayonnement suivant l'une des revendications précédentes, **caractérisée en ce que** le faisceau (3) de particules contient des particules C^{6+} .
8. Installation (30) d'exposition à un rayonnement suivant l'une des revendications précédentes, **caractérisée par** une intensité du champ magnétique d'ouverture de l'aimant (2) de guidage du faisceau dans son tube (5) de guide du faisceau d'au moins 2 Tesla, de préférence compris entre 3 et 5 Tesla.

5

10

15

20

25

30

35

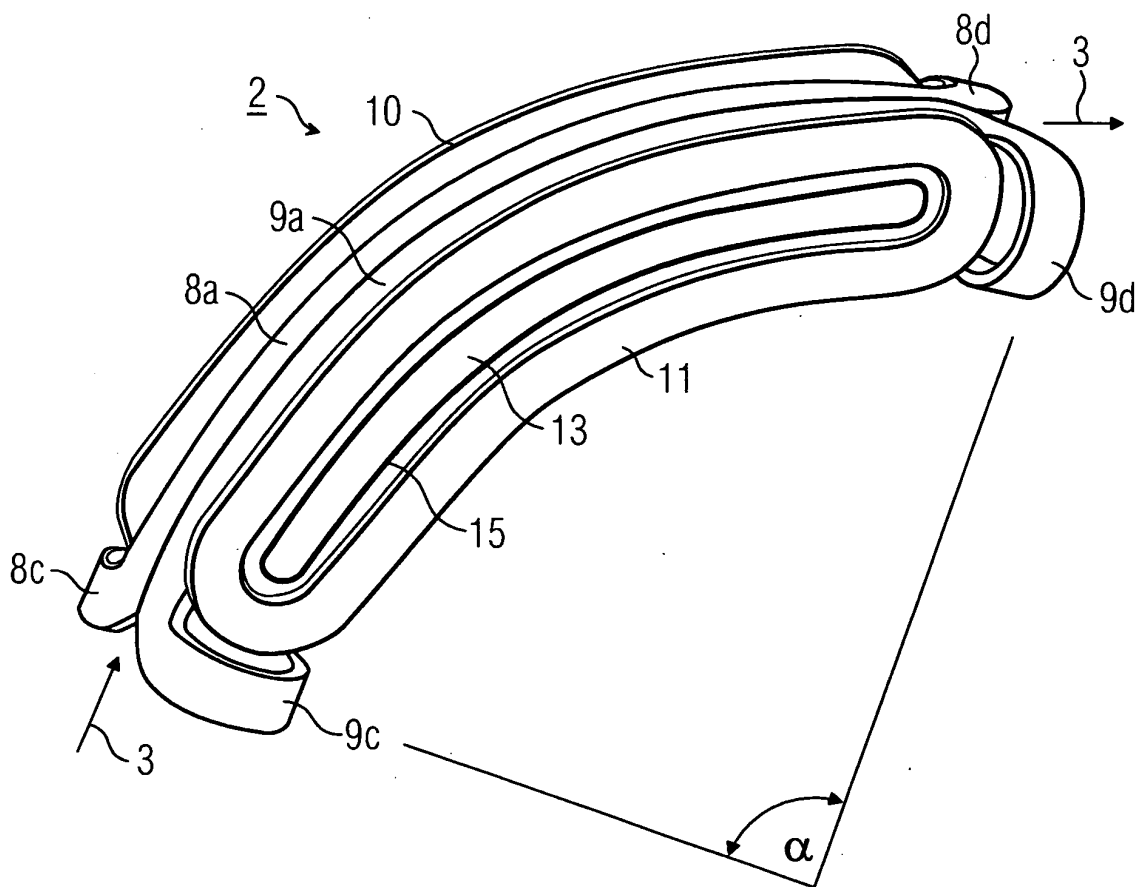
40

45

50

55

FIG 1



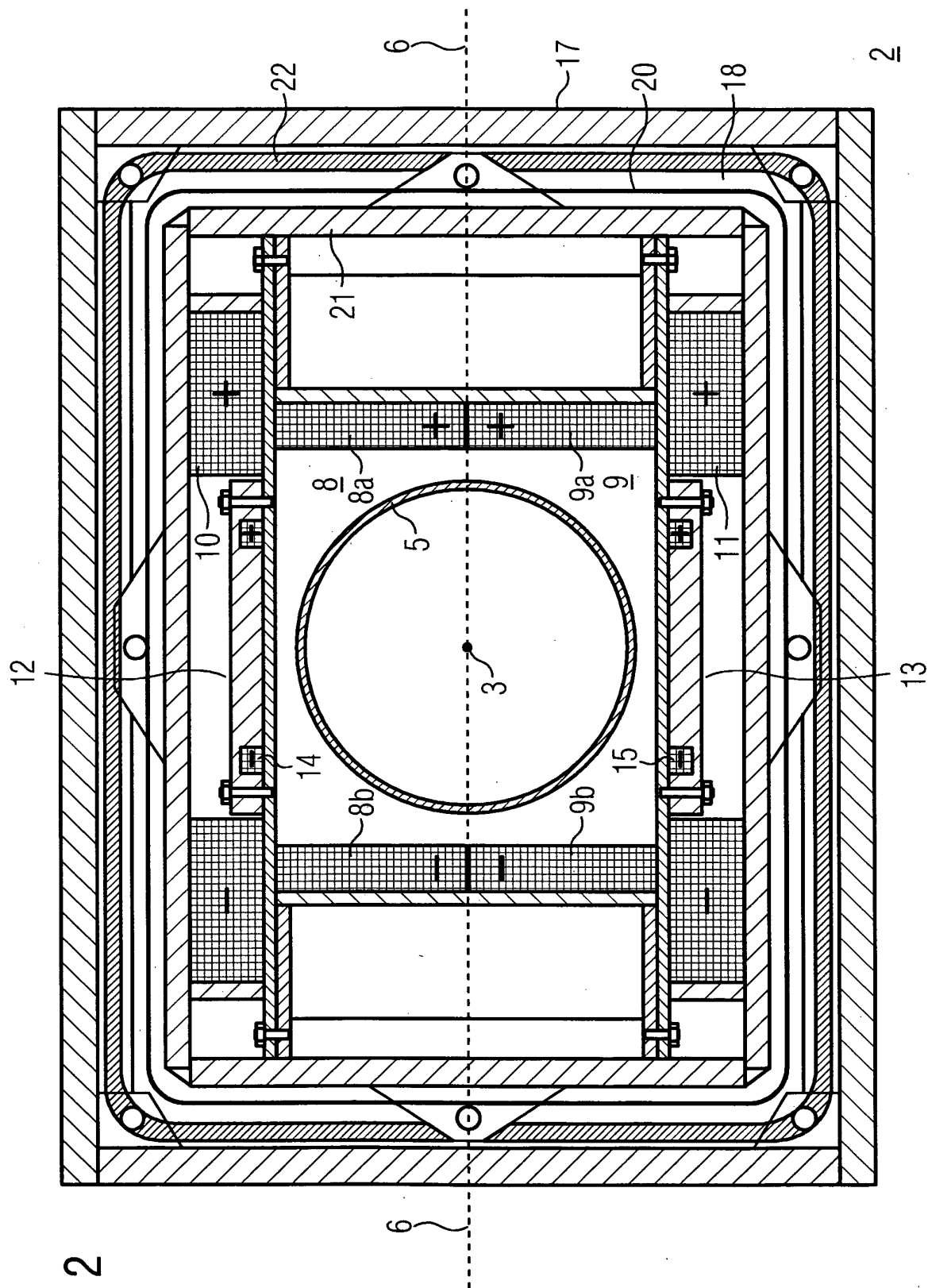


FIG 3

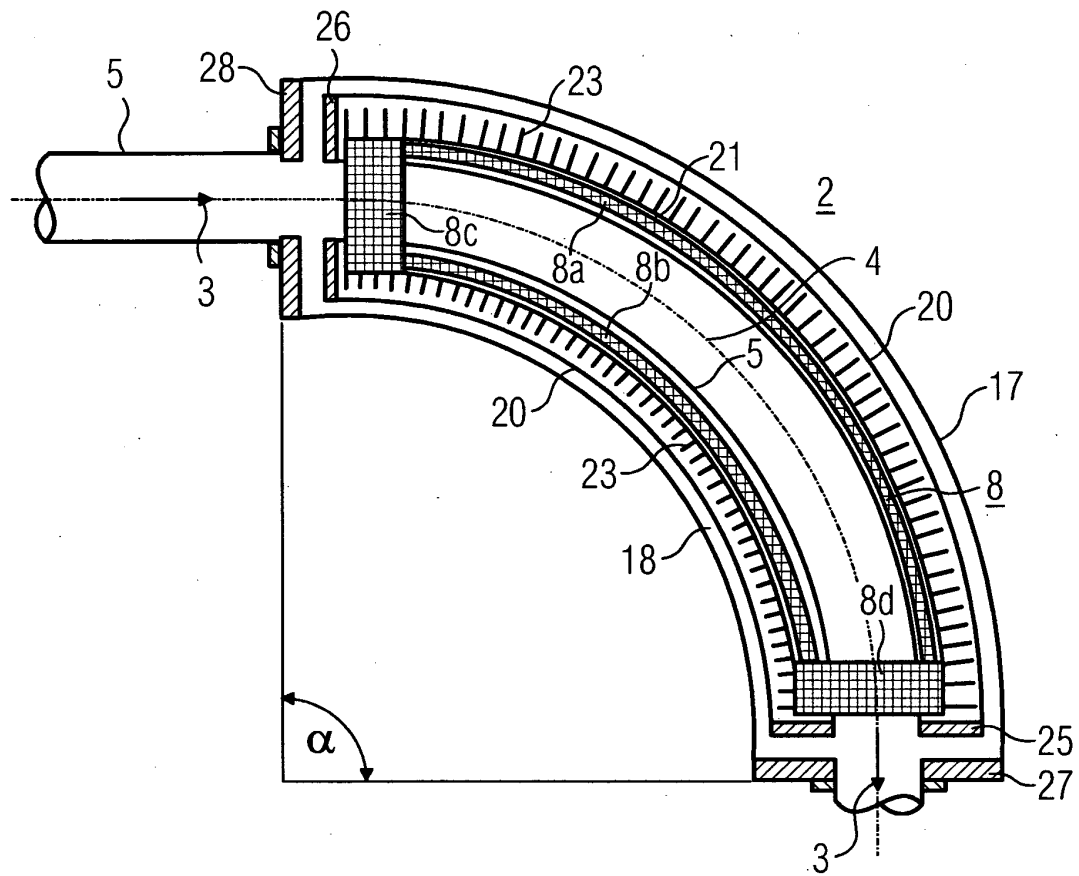
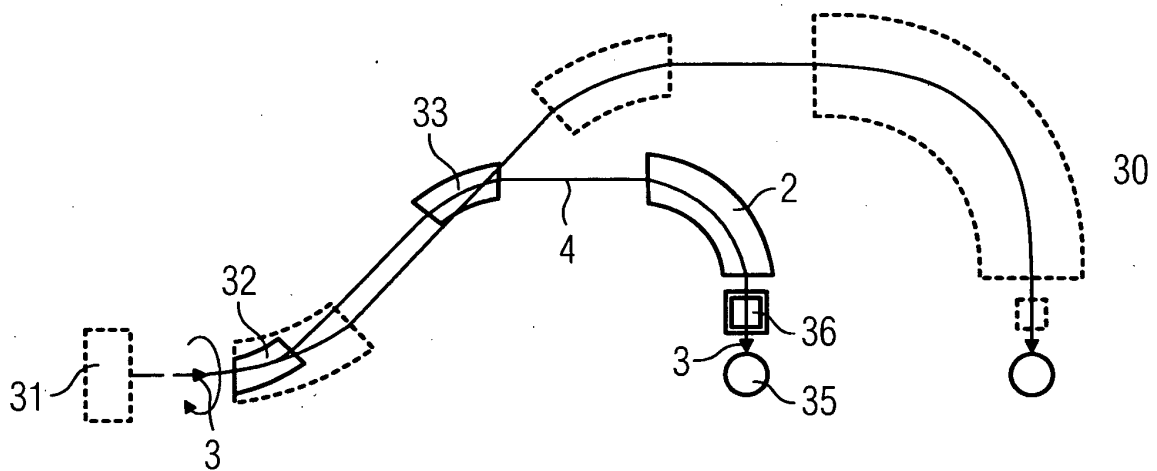


FIG 4



IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- WO 02069350 A1 [0002] [0028]
- DE 19904675 A1 [0002] [0003] [0028]
- US 4870287 A [0003] [0028]
- DE 4335807 A1 [0006]
- EP 0208163 A1 [0008]
- US 6403967 B1 [0009]
- US 5111173 A [0010]
- EP 0276360 B1 [0021]
- JP 2246305 A [0021]
- EP 0185955 B1 [0022]
- DE 3504211 A1 [0022]
- JP 2000075100 A [0028]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **C. Priano et al.** A Superconducting Magnet for a Beam Delivery System for Carbon Ion Cancer Therapy. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, März 2002, vol. 12 (1 [0005]
- **G. Sabbi.** Design of Racetrack Coils for High-Field Dipole Magnets. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, März 2001, vol. 11 (1 [0007]