

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6537067号
(P6537067)

(45) 発行日 令和1年7月3日(2019.7.3)

(24) 登録日 令和1年6月14日(2019.6.14)

(51) Int. Cl.	F I				
H05H 13/04 (2006.01)	H05H	13/04		E	
H05H 7/04 (2006.01)	H05H	7/04			
G21K 5/04 (2006.01)	H05H	13/04		N	
G21K 5/00 (2006.01)	G21K	5/04		A	
G21K 1/093 (2006.01)	G21K	5/00		R	
請求項の数 6 (全 18 頁) 最終頁に続く					

(21) 出願番号	特願2015-116488 (P2015-116488)	(73) 特許権者	301032942
(22) 出願日	平成27年6月9日(2015.6.9)		国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
(65) 公開番号	特開2017-4711 (P2017-4711A)		千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号
(43) 公開日	平成29年1月5日(2017.1.5)	(74) 代理人	110001807
審査請求日	平成30年3月9日(2018.3.9)		特許業務法人磯野国際特許商標事務所
		(72) 発明者	水島 康太
			千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号
			国立研究開発法人放射線医学総合研究所内
		(72) 発明者	古川 卓司
			千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号
			国立研究開発法人放射線医学総合研究所内
		審査官	藤原 伸二
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 粒子線照射装置およびその制御方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

荷電粒子ビームを標的に照射する粒子線照射装置であって、
前記荷電粒子ビームを加速する加速器と、
当該加速器において、前記荷電粒子ビームを周回させるための加速器用電磁石と、
前記荷電粒子ビームを照射するに際して、照射野を形成する照射野形成用電磁石と、
前記加速器用電磁石と前記照射野形成用電磁石とに電力を供給する電源装置とを備え、
前記電源装置は、
前記加速器用電磁石または前記照射野形成用電磁石にフォーシング電圧を出力する強制励磁電圧出力部と、

加速器用電磁石に、電流設定値との偏差を小さく保つため、前記フォーシング電圧よりも低い電圧を出力する第1電流安定化制御部と、

照射野形成電磁石に、電流設定値との偏差を小さく保つため、前記フォーシング電圧よりも低い電圧を出力する第2電流安定化制御部とを備え、

前記第1電流安定化制御部と前記第2電流安定化制御部は常時動作させる一方、前記強制励磁電圧出力部は、前記第1電流安定化制御部に接続を切り替えて、前記加速器用電磁石を動作させる電圧を出力し、または、前記第2電流安定化制御部に接続を切り替えて、前記照射野形成電磁石を動作させる電圧を出力する態様で、前記加速器用電磁石と前記照射野形成用電磁石との電源として共有化されていることを特徴とする粒子線照射装置。

【請求項2】

10

20

請求項 1 に記載の粒子線照射装置において、
前記強制励磁電圧出力部は、
前記加速器の運転の状態またはタイミングに合わせて、前記加速器用電磁石または前記照射野形成用電磁石に切り替えて接続される
ことを特徴とする粒子線照射装置。

【請求項 3】

請求項 1 または請求項 2 に記載の粒子線照射装置において、
前記強制励磁電圧出力部は、
前記加速器にて前記荷電粒子ビームを加速または減速する場合に、前記加速器用電磁石に接続される一方、
前記荷電粒子ビームを、照射野を形成して標的に照射する場合に、前記照射野形成用電磁石に接続される
ことを特徴とする粒子線照射装置。

【請求項 4】

請求項 3 に記載の粒子線照射装置において、
前記加速器にて前記荷電粒子ビームを加速または減速する場合、前記加速器用電磁石に前記強制励磁電圧出力部と前記第 1 電流安定化制御部とが接続されるとともに、前記照射野形成用電磁石に前記第 2 電流安定化制御部が接続され、
前記荷電粒子ビームを、照射野を形成して標的に照射する場合、前記照射野形成用電磁石に前記強制励磁電圧出力部と前記第 2 電流安定化制御部とが接続されるとともに、前記加速器用電磁石に前記第 1 電流安定化制御部が接続される
ことを特徴とする粒子線照射装置。

【請求項 5】

荷電粒子ビームを標的に照射する粒子線照射装置の制御方法であって、
前記荷電粒子ビームを加速する加速器と、
当該加速器において、前記荷電粒子ビームを周回させるための加速器用電磁石と、
前記荷電粒子ビームを照射するに際して、照射野を形成する照射野形成用電磁石と、
前記加速器用電磁石と前記照射野形成用電磁石とに電力を供給する電源装置と、
前記加速器と前記電源装置を制御する外部制御装置とを備え、
前記電源装置は、
前記加速器用電磁石または前記照射野形成用電磁石にフォーシング電圧を出力する強制励磁電圧出力部と、
加速器用電磁石に、電流設定値との偏差を小さく保つため、前記フォーシング電圧よりも低い電圧を出力する第 1 電流安定化制御部と、
照射野形成電磁石に、電流設定値との偏差を小さく保つため、前記フォーシング電圧よりも低い電圧を出力する第 2 電流安定化制御部と
前記強制励磁電圧出力部の出力電圧を測定する電圧検出部とを備え、
前記第 1 電流安定化制御部と前記第 2 電流安定化制御部は常時動作させる一方、前記強制励磁電圧出力部は、前記第 1 電流安定化制御部に接続を切り替えて、前記加速器用電磁石を動作させる電圧を出力し、または、前記第 2 電流安定化制御部に接続を切り替えて、
前記照射野形成電磁石を動作させる電圧を出力する態様で、前記加速器用電磁石と前記照射野形成用電磁石との電源として共有化されていて、
前記照射野形成用電磁石に通電中に、前記電圧検出部により測定された電圧がゼロであると判定されて、前記荷電粒子ビームを照射している状態から、前記加速器用電磁石が前記荷電粒子ビームのエネルギーの加速を行う状態に移行する際、
前記強制励磁電圧出力部が前記照射野形成用電磁石から前記加速器用電磁石に切り替えて接続され電圧が当該加速器用電磁石に出力され、
前記加速器において前記加速器用電磁石は前記荷電粒子ビームが所定のエネルギーに加速されるまで一定の周回軌道を保ち、
前記外部制御装置から荷電粒子ビームが所定のエネルギーに加速されたことを知らせる

信号を受信すると、前記強制励磁電圧出力部が前記加速器用電磁石から前記照射野形成用電磁石に切り替えて接続され電圧が当該照射野形成用電磁石に出力され、

前記照射野形成用電磁石が、前記荷電粒子ビームの照射野を形成することを特徴とする粒子線照射装置の制御方法。

【請求項 6】

請求項 5 記載の粒子線照射装置の制御方法において、

前記電源装置は、前記加速器用電磁石に前記フォーシング電圧よりも低い電圧を出力して電流が安定化するように制御する第 1 電流安定化制御部と、前記照射野形成用電磁石に前記フォーシング電圧よりも低い電圧を出力して電流が安定化するように制御する第 2 電流安定化制御部とを有し、

10

前記強制励磁電圧出力部が前記照射野形成用電磁石から前記加速器用電磁石に切り替えて接続され、前記加速器用電磁石に前記強制励磁電圧出力部と前記第 1 電流安定化制御部とが接続され、

前記加速器において前記加速器用電磁石は前記荷電粒子ビームが所定のエネルギーに加速されるまで一定の周回軌道を保ち、

前記強制励磁電圧出力部が前記加速器用電磁石から前記照射野形成用電磁石に切り替えて接続され、前記照射野形成用電磁石に前記強制励磁電圧出力部と前記第 2 電流安定化制御部とが接続され、

前記照射野形成用電磁石が、前記荷電粒子ビームの照射野を形成することを特徴とする粒子線照射装置の制御方法。

20

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、粒子線照射装置およびその制御方法に関する。

【背景技術】

【0002】

加速器で高エネルギーまで加速した荷電粒子ビームを用いる粒子線治療では、人体表面付近の正常組織への線量を極力抑えながら、粒子線のブラッグピークを用いて体内深くにある腫瘍に大きな線量を与えることが可能である。

【0003】

30

加速器は荷電粒子ビームを偏向、収束、発散させるなどの用途をもつ多くの電磁石で構成されている。電磁石にはコイルに電流を流すことで自在に磁場を発生させるために、電源装置が必要となる。電源装置の出力電流精度はビームの質（ビーム位置やビームサイズ、出射ビーム電流の安定性、またはビーム加速や出射の効率など）に直接関係する。そのため、加速器には、非常に高精度な電源装置が求められるのが一般的である。

【0004】

高エネルギービームを扱う場合、必要となる磁場も高くなるため、電磁石の電源装置も必然的に大容量で大型なものとなる。また、照射野を形成する装置にも腫瘍形状に合わせて荷電粒子ビームを照射するために照射野形成用電磁石とその電源装置は必要である。この電源装置についても同様に高いエネルギーのビームを偏向することが求められるため、高精度で大容量の電源装置が必要となる。

40

【0005】

本願に係る先行技術文献として、下記の特許文献 1、2 がある。

特許文献 1 には、最低限 2 つの電磁石電源装置を交互に用いて複数の治療室に係る電磁石の何れか一つを励磁する技術が記載されている。使用する複数の治療室に対して、治療室数より少ない数の電源を用意し、使用する治療室間で電源の共用化を図るものである。

【0006】

特許文献 2 には、少なくとも 2 つの電磁石電源装置と少なくとも 2 つの負荷切替装置を設けたので、それらの電源群を、別々の照射室、例えば 5 つの治療室の何れかの治療室に係わる第 2 ビーム輸送系の電磁石群に接続するよう切替制御する。そのため、少なくとも

50

2つの電磁石電源装置を交互に用いて複数の治療室に係る各第2ビーム輸送系の電磁石群を励磁可能なことが記載されている。つまり、使用する治療室毎に電源を切り替え接続する構成である。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0007】

【特許文献1】特許第4451411号公報（段落0043、0126等）

【特許文献2】特許第4648817号公報（段落0010、0083等）

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

特許文献1では、治療室数が2部屋より多い治療施設にしか適用しても効果がないという問題がある。

特許文献2も特許文献1と同様、治療室数が2部屋以下の治療施設の場合には効果がないという問題がある。

【0009】

ところで、上述の大容量の電源装置は、製造コストが高く、大型であるため広い設置スペースが必要となる。

大容量の加速器用の電源装置は非常に大きく、膨大な設置スペースを必要とする。例えば、最も大きな電源装置1台で、奥行き1～2m、高さ2m、幅20m以上となることも

【0010】

電源装置の費用も大型なものだと1台で1億円以上かかり、それが複数台必要になることもある。電源装置の全コストで10億円以上になる場合もある。

従って、電源装置の小型化、低コスト化は、粒子線照射施設の小型化・低コスト化に向けた一つの課題となっている。

【0011】

本発明は上記実状に鑑み創案されたものであり、電源装置の小型化、低コスト化を図れる粒子線照射装置およびその制御方法の提供を目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0012】

前記課題を解決するため、第1の本発明の粒子線照射装置は、荷電粒子ビームを標的に照射する粒子線照射装置であって、前記荷電粒子ビームを加速する加速器と、当該加速器において、前記荷電粒子ビームを周回させるための加速器用電磁石と、前記荷電粒子ビームを照射するに際して、照射野を形成する照射野形成用電磁石と、前記加速器用電磁石と前記照射野形成用電磁石とに電力を供給する電源装置とを備え、前記電源装置は、前記加速器用電磁石または前記照射野形成用電磁石にフォーシング電圧を出力する強制励磁電圧出力部が前記加速器用電磁石と前記照射野形成用電磁石とで共有化されている。

【0013】

第1の本発明によれば、強制励磁電圧出力部を加速器用電磁石と前記照射野形成用電磁石との共有とするので、電源装置の小型化、低コスト化を図れる。

【0014】

第2の本発明の粒子線照射装置は、第1の本発明の粒子線照射装置において、前記強制励磁電圧出力部は、前記加速器の運転の状態またはタイミングに合わせて、前記加速器用電磁石または前記照射野形成用電磁石に切り替えて接続されている。

【0015】

第2の本発明によれば、強制励磁電圧出力部が加速器の運転の状態またはタイミングに合わせて、加速器用電磁石または照射野形成用電磁石に切り替えて接続されるので、強制励磁電圧出力部を加速器用電磁石と照射野形成用電磁石との共有の電源にすることができる。

10

20

30

40

50

【 0 0 1 6 】

第3の本発明の粒子線照射装置は、第1または第2の本発明の粒子線照射装置において、前記強制励磁電圧出力部は、前記加速器にて前記荷電粒子ビームを加速または減速する場合に、前記加速器用電磁石に接続される一方、前記荷電粒子ビームを、照射野を形成して標的に照射する場合に、前記照射野形成用電磁石に接続されている。

【 0 0 1 7 】

第3の本発明によれば、強制励磁電圧出力部は、加速器にて荷電粒子ビームを加速または減速する場合に加速器用電磁石に接続される一方、荷電粒子ビームを、照射野を形成して標的に照射する場合に照射野形成用電磁石に接続されるので、荷電粒子ビームを加速または減速する場合に加速器用電磁石に高電圧を出力し、荷電粒子ビームを、照射野を形成して標的に照射する場合に照射野形成用電磁石に高電圧を出力できる。 10

【 0 0 1 8 】

第4の本発明の粒子線照射装置は、第1から第3の何れかの本発明の粒子線照射装置において、前記電源装置は、前記加速器用電磁石に接続され、当該加速器用電磁石に前記電圧よりも低い電圧を出力して電流が安定化するように制御する第1電流安定化制御部と、前記照射野形成用電磁石に接続され、当該照射野形成用電磁石に前記電圧よりも低い電圧を出力して電流が安定化するように制御する第2電流安定化制御部とを有し、前記強制励磁電圧出力部は、前記加速器用電磁石または前記照射野形成用電磁石に切り替えて接続され電圧を出力している。 20

【 0 0 1 9 】

第4の本発明によれば、加速器用電磁石には、第1電流安定化制御部が接続されるとともに、強制励磁電圧出力部が切り替え接続されるので、加速器用電磁石にモードに応じた適切な電圧を安定して出力できる。また、照射野形成用電磁石には、第2電流安定化制御部が接続されるとともに、強制励磁電圧出力部が切り替え接続されるので、照射野形成用電磁石にモードに応じた適切な電圧を安定して出力できる。 20

【 0 0 2 0 】

第5の本発明の粒子線照射装置は、第4の本発明の粒子線照射装置において、前記加速器にて前記荷電粒子ビームを加速または減速する場合、前記加速器用電磁石に前記強制励磁電圧出力部と前記第1電流安定化制御部とが接続されるとともに、前記照射野形成用電磁石に前記第2電流安定化制御部が接続され、前記荷電粒子ビームを、照射野を形成して標的に照射する場合、前記照射野形成用電磁石に前記強制励磁電圧出力部と前記第2電流安定化制御部とが接続されるとともに、前記加速器用電磁石に前記第1電流安定化制御部が接続されている。 30

【 0 0 2 1 】

第5の本発明によれば、加速器にて荷電粒子ビームを加速または減速する場合、加速器用電磁石に強制励磁電圧出力部と第1電流安定化制御部とが接続されるので、加速器用電磁石に高電圧を安定して出力できる。また、照射野形成用電磁石に第2電流安定化制御部が接続されるので、照射野形成用電磁石に低電圧を出力して電流を安定化できる。

一方、荷電粒子ビームを、照射野を形成して標的に照射する場合、照射野形成用電磁石に強制励磁電圧出力部と第2電流安定化制御部とが接続されるので、照射野形成用電磁石に高電圧を安定して出力できる。また、加速器用電磁石に第1電流安定化制御部が接続されるので、加速器用電磁石に低電圧を出力して電流を安定化できる。 40

【 0 0 2 2 】

第6の本発明の粒子線照射装置の制御方法は、加速器用電磁石と、照射野形成用電磁石と、強制励磁電圧出力部を有する電源装置とを備え、荷電粒子ビームを標的に照射する粒子線照射装置の制御方法であって、前記強制励磁電圧出力部が前記照射野形成用電磁石から前記加速器用電磁石に切り替えて接続され電圧が当該加速器用電磁石に出力され、前記加速器において前記加速器用電磁石は前記荷電粒子ビームが所定のエネルギーに加速されるまで一定の周回軌道を保ち、前記強制励磁電圧出力部が前記加速器用電磁石から前記照射野形成用電磁石に切り替えて接続され電圧が当該照射野形成用電磁石に出力され、前記 50

照射野形成用電磁石が、前記荷電粒子ビームの照射野を形成している。

【 0 0 2 3 】

第 6 の本発明によれば、強制励磁電圧出力部が照射野形成用電磁石から加速器用電磁石に切り替えて接続され電圧が当該加速器用電磁石に出力され、加速器において加速器用電磁石は荷電粒子ビームが所定のエネルギーに加速されるまで一定の周回軌道を保ち、強制励磁電圧出力部が加速器用電磁石から照射野形成用電磁石に切り替えて接続され電圧が当該照射野形成用電磁石に出力され、照射野形成用電磁石が、荷電粒子ビームの照射野を形成するので、強制励磁電圧出力部を加速器用電磁石と照射野形成用電磁石とで共有化できる。

【 0 0 2 4 】

第 7 の本発明の粒子線照射装置の制御方法は、第 6 の本発明の粒子線照射装置の制御方法において、前記電源装置は、前記加速器用電磁石に前記電圧よりも低い電圧を出力して電流が安定化するように制御する第 1 電流安定化制御部と、前記照射野形成用電磁石に前記電圧よりも低い電圧を出力して電流が安定化するように制御する第 2 電流安定化制御部とを有し、前記強制励磁電圧出力部が前記照射野形成用電磁石から前記加速器用電磁石に切り替えて接続され、前記加速器用電磁石に前記強制励磁電圧出力部と前記第 1 電流安定化制御部とが接続され、前記加速器において前記加速器用電磁石が前記荷電粒子ビームが所定のエネルギーに加速されるまで一定の周回軌道を保ち、前記強制励磁電圧出力部が前記加速器用電磁石から前記照射野形成用電磁石に切り替えて接続され、前記照射野形成用電磁石に前記強制励磁電圧出力部と前記第 2 電流安定化制御部とが接続され、前記照射野形成用電磁石が、前記荷電粒子ビームの照射野を形成している。

【 0 0 2 5 】

第 7 の本発明によれば、加速器用電磁石に前記強制励磁電圧出力部と前記第 1 電流安定化制御部とが接続され、加速器において加速器用電磁石は荷電粒子ビームが所定のエネルギーに加速されるまで一定の周回軌道を保ち、照射野形成用電磁石に強制励磁電圧出力部と第 2 電流安定化制御部とが接続され、照射野形成用電磁石が、荷電粒子ビームの照射野を形成する。

そのため、荷電粒子ビームを所定のエネルギーに加速する際、強制励磁電圧出力部と第 1 電流安定化制御部とで加速器用電磁石に高電圧を安定して出力できる。また、照射野形成用電磁石が、荷電粒子ビームの照射野を形成する際、強制励磁電圧出力部と第 2 電流安定化制御部とで照射野形成用電磁石に高電圧を安定して出力できる。

【発明の効果】

【 0 0 2 6 】

本発明によれば、電源装置の小型化、低コスト化を図れる粒子線照射装置およびその制御方法を実現できる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 2 7 】

【図 1】本発明の実施形態に係る粒子線照射装置の構成例を示す上面図。

【図 2】(a) は加速器用電磁石電源の出力電流の波形を示す図、(b) は加速器用電磁石電源の出力電圧の波形を示す図、(c) は照射野形成用電磁石電源の出力電流の波形を示す図、(d) は照射野形成用電磁石電源の出力電圧の波形を示す図、(e) は主整流回路部の接続状態を示す図。

【図 3】図 2 (c) に示す照射野形成用電磁石に図 2 (d) に示す出力電圧が印加され、出力電流が流れる際の照射野を示す模式図。

【図 4】粒子線照射装置の電源装置の回路構造を示す図。

【図 5】粒子線照射装置の制御の流れを示すフロー図。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 2 8 】

以下、本発明の実施形態について、適宜図面を参照しながら詳細に説明する。

図 1 は、本発明の実施形態に係る粒子線照射装置の構成例を示す上面図である。

実施形態の粒子線照射装置 S は、腫瘍などの標的（患者 p の腫瘍など）p 1 に粒子線ビームを照射する装置である。

粒子線照射装置 S は、電源装置 1 3（図 4 参照）の構造を、高速で大きな電流変化を行うために比較的高い電圧を出力・制御する主整流回路部 1 3 a（図 4 参照）と、電流設定値に対して偏差を小さく保つために比較的低い電圧を出力・制御する電流安定化制御部 1 3 b、1 3 c（図 4 参照）とに分けることに特徴がある。

【0029】

加速器用電磁石（5、6、7）電源と照射野形成用電磁石（10、11）電源では、電流設定値を大きく変更している時間帯は重ならない。すなわち、加速器用電磁石（5、6、7）電源におけるビーム加速・減速中と照射野形成用電磁石（10、11）電源におけるビーム照射中は重ならない。

そのため、電流安定化制御部 1 3 b、1 3 c はどちらの電源でも常時動作しているものの、主整流回路部 1 3 a は何時でもどちらか片方しか動作していないことになる。

【0030】

そこで、主整流回路部 1 3 a を加速器用電磁石（5、6、7）電源と照射野形成用電磁石（10、11）電源とで共有にし、必要な時間帯に合わせて加速器用電磁石（5、6、7）電源または照射野形成用電磁石（10、11）電源に切り替えて主整流回路部 1 3 a を動作させる。

【0031】

< 粒子線照射装置 S の全体構成 >

粒子線照射装置 S は、荷電粒子入射系 1 A とシンクロトロン 3 と照射野形成照射装置 1 0 A とを具備している。

荷電粒子入射系 1 A は、荷電粒子を生成して所定のエネルギーに加速した荷電粒子をシンクロトロン 3 に供給する。

【0032】

シンクロトロン 3 には、荷電粒子入射系 1 A から荷電粒子ビームが入射される。

シンクロトロン 3 は環状の粒子加速器であり、荷電粒子ビームを周回させて、荷電粒子ビームを照射するため、荷電粒子ビームを所定のエネルギーに加速する。

【0033】

照射野形成照射装置 1 0 A は、水平方向照射野形成電磁石 1 0、垂直方向照射野形成電磁石 1 1 を用いて、荷電粒子ビームを標的 p 1 に適合した照射野を形成して標的 p 1 に照射する。

荷電粒子入射系 1 A とシンクロトロン 3 と照射野形成照射装置 1 0 A とは、外部制御装置 1 4（図 4 参照）により制御される。

【0034】

< 荷電粒子入射系 1 A >

荷電粒子入射系 1 A は、イオン源 1 と線形加速器 2 とを備える。イオン源 1 と線形加速器 2 とシンクロトロン 3 とは、高真空に保たれる入射ビーム路 1 m で連結されている。

【0035】

イオン源 1 は、中性ガスに高速の電子を衝突させるなどしてイオンを生成し、線形加速器 2 にてシンクロトロン 3 で加速可能な状態に加速する。イオン化される原子、粒子としては、例えば、水素、ヘリウム、炭素、窒素、酸素、ネオン、シリコン、アルゴンなどがある。

【0036】

線形加速器 2 は、イオン源 1 から供給される荷電粒子を所定のエネルギーまで加速して、シンクロトロン 3 に供給する。線形加速器 2 によって、荷電粒子は、例えば、核子あたり数 MeV 程度のエネルギーに加速される。

【0037】

< シンクロトロン 3 >

シンクロトロン 3 は、荷電粒子入射系 1 A の線形加速器 2 から供給される荷電粒子を、

シンクロトロン 3 から出射される出射ビームのエネルギーまで加速する。出射ビームとは、照射対象の標的 p 1 に照射するために、シンクロトロン 3 から取り出される荷電粒子ビームをいう。

【 0 0 3 8 】

線形加速器 2 から供給される荷電粒子は、入射インフレクタ 4 によって、荷電粒子入射系 1 A からの軌道が偏向され、周回軌道をもつシンクロトロン 3 に入射される。

シンクロトロン 3 は、荷電粒子を出射ビームのエネルギーまで加速するための構成要素として、偏向電磁石 5 と発散四極電磁石 6 と収束四極電磁石 7 と高周波加速空洞 8 とを備えている。

【 0 0 3 9 】

シンクロトロン 3 は、偏向電磁石 5 と発散四極電磁石 6 と収束四極電磁石 7 とが、シンクロトロンリング 3 r を形成して周回状に構成されている。

シンクロトロン 3 は、出射ビームを取り出すための構成要素として、出射デフレクタ 9 を備えている。

シンクロトロン 3 において、荷電粒子入射系 1 A から入射した荷電粒子ビームは、発散四極電磁石 6 と収束四極電磁石 7 とによって発散と収束とを繰り返しつつ偏向電磁石 5 によって偏向することで、シンクロトロンリング 3 r の周回軌道上を周回する。

【 0 0 4 0 】

高周波加速空洞 8 は、内部に設けられる加速ギャップ（図示せず）の間に発生する電界によって、シンクロトロンリング 3 r の周回軌道を周回する荷電粒子を加速する。

高周波加速空洞 8 において、加速ギャップの間を通る荷電粒子は、加速ギャップ間に印加された高周波電界から正のエネルギーゲインを得ることで加速され、周回毎にエネルギーが増加していく。また、出射ビームの出射終了後、加速ギャップ間に印加する高周波電界の周波数を下げることによって、荷電粒子を減速し放射線の発生を抑制する。

【 0 0 4 1 】

シンクロトロン 3 において、荷電粒子は、所定のエネルギー、例えば核子あたり数百 MeV のエネルギーまで加速される。

この際、偏向電磁石 5、発散四極電磁石 6 および収束四極電磁石 7 は、高周波加速空洞 8 における加速または減速に同期して、加速または減速された荷電粒子のエネルギーに応じて、荷電粒子がシンクロトロンリング 3 r の周回軌道に沿った軌道を描くように磁場強度が外部制御装置 1 4（図 4 参照）により制御される。

【 0 0 4 2 】

周回軌道上で所定のエネルギーに加速された荷電粒子ビームは、出射デフレクタ 9 によって、その軌道が偏向されて、シンクロトロンリング 3 r から出射され、出射ビームとしてビーム輸送系 1 0 B に取り出される。

ビーム輸送系 1 0 B は、照射部の照射野形成照射装置 1 0 A に出射ビームである荷電粒子ビームを導く。

【 0 0 4 3 】

照射野形成照射装置 1 0 A は、照射野形成用電磁石 1 0、1 1 を有している。

照射野形成用電磁石 1 0、1 1 は、標的（p 1）表面方向（XY 方向）の 2 次元の線量分布を作るために用いられる。照射野形成用電磁石 1 0、1 1 は、2 次元分布を作るために、水平方向（X 方向）偏向用の照射野形成電磁石 1 0 と垂直方向（Y 方向）偏向用の照射野形成電磁石 1 1 の 2 台の照射野形成用電磁石で構成されている。

【 0 0 4 4 】

なお、1 つの電磁石の中に、水平方向用と垂直方向用の 2 種類のコイルを入れることで 1 台の照射野形成用電磁石で構成する場合もある。ちなみに、腫瘍などの標的 p 1 の形状は 3 次元であるため、荷電粒子ビームのエネルギー（飛程）をシンクロトロン 3 で変えることで、標的（p 1）表面方向（XY 方向）に標的奥行き方向（Z 方向）を加えて標的に照射する最終的な 3 次元（XYZ 方向）の線量分布が作られる。

照射野形成照射装置 1 0 A において、取り出された出射ビームは、照射対象の標的 p 1

10

20

30

40

50

に応じた照射野が形成されて標的 p 1 に照射される。

【 0 0 4 5 】

< 粒子線照射装置 S の制御 >

粒子線照射装置 S は、外部制御装置 1 4 (図 4 参照) により統括的に制御される。

外部制御装置 1 4 は、荷電粒子入射系 1 A と、シンクロトロン 3 と、照射野形成照射装置 1 0 A とを制御する。

外部制御装置 1 4 は、タイミング制御装置、電源制御装置、照射制御装置等を有している。

【 0 0 4 6 】

タイミング制御装置は、イオン源 1 でのイオンの生成、線形加速器 2 での加速、取り出し、荷電粒子のシンクロトロン 3 での加速、減速、シンクロトロン 3 からの出射などのタイミング制御をクロック信号などを用いて行う。

電源制御装置は、各種電磁石 (5 、 6 、 7 、 1 0 、 1 1) での電流値を指令し、制御する。

照射制御装置は、荷電粒子ビームの照射野を形成し、荷電粒子ビームを照射する制御を行う。

【 0 0 4 7 】

そのため、外部制御装置 1 4 により、荷電粒子入射系 1 A (イオン源 1 、線形加速器 2) と、シンクロトロン 3 を構成する入射インフレクタ 4 、偏向電磁石 5 、発散四極電磁石 6 、収束四極電磁石 7 、高周波加速空洞 8 、出射デフレクタ 9 などが制御される。具体的には、外部制御装置 1 4 により、イオン源 1 によるイオンの生成、線形加速器 2 による前段加速、シンクロトロン 3 への入射、加速および荷電粒子ビームのシンクロトロン 3 からの出射の制御が遂行される。

【 0 0 4 8 】

さらに、外部制御装置 1 4 により、ビーム輸送系 1 0 B を通過しての照射部の照射野形成照射装置 1 0 A (照射野形成電磁石 1 0 、 1 1) で、シンクロトロン 3 から取り出した荷電粒子ビーム (出射ビーム) の照射野形成の制御が遂行される。

荷電粒子入射系 1 A 、シンクロトロン 3 、およびビーム輸送系 1 0 B の随所には荷電粒子のモニタ (図示せず) が配置され、荷電粒子の軌道、電流量およびエネルギーが測定され、外部制御装置 1 4 にその測定信号がフィードバックされることによって、制御が行われる。

【 0 0 4 9 】

< 加速器用電磁石電源装置と照射野形成用電磁石電源装置 >

上述の構成で加速器のシンクロトロン 3 を運転し、荷電粒子ビームを標的 p 1 (患者 p の腫瘍など) へ照射するときの加速器用電磁石 (5 、 6 、 7) 電源と照射野形成用電磁石 (1 0 、 1 1) 電源の出力電流、電圧の波形は図 2 (a) ~ (d) のようになる。

図 2 (a) に加速器用電磁石 (5 、 6 、 7) 電源の出力電流の波形を示し、図 2 (b) に加速器用電磁石 (5 、 6 、 7) 電源の出力電圧の波形を示す。また、図 2 (c) に照射野形成用電磁石 (1 0 、 1 1) 電源の出力電流の波形を示し、図 2 (d) に照射野形成用電磁石 (1 0 、 1 1) 電源の出力電圧の波形を示す。図 2 (e) に主整流回路部の接続状態を示す。

以下、加速器用電磁石 (5 、 6 、 7) 電源を加速器用電磁石電源と記載し、照射野形成用電磁石 (1 0 、 1 1) 電源を照射野形成用電磁石電源と記載する。

【 0 0 5 0 】

図 2 に示す加速器用電磁石とは、図 1 中のシンクロトロン 3 を構成する電磁石の偏向電磁石 5 や発散四極電磁石 6 、収束四極電磁石 7 である。それらの電磁石 (5 、 6 、 7) には、例えば 図 1 の計 6 台の偏向電磁石 5 に対して電源 1 台、図 1 の計 3 台の発散四極電磁石 6 に対して電源 1 台、図 1 の計 3 台の収束四極電磁石 7 に対して電源 1 台のように、種別ごとに複数台が直列に電源に接続されている。電源が多いとコストが上昇し、電源をばらばらに構成すると各電源の高精度な同期制御が必要となり、制御が複雑化

するからである。

なお、 3 台の偏向電磁石 5 に対して電源 1 台 や 2 台の偏向電磁石 5 に対して電源 1 台 というような構成もあり得るし、 1 台の偏向電磁石 5 に対して電源 1 台 という構成としてもよい。

【 0 0 5 1 】

図 2 (a) の加速器用電磁石電源の出力電流 a 1 は線形加速器 2 から荷電粒子ビームがシンクロトロン 3 に入射している際の電流である。

図 2 (a) の加速器用電磁石電源の出力電流 a 2 はシンクロトロン 3 で荷電粒子ビームを加速する際の電流である。加速は、加速器用電磁石 (5、6、7) の電流制御、時間制御 (クロック制御) で行われる。出力電流の符号 a 2 1 はシンクロトロン 3 での荷電粒子ビームの加速が終了したタイミングを示す。

【 0 0 5 2 】

図 2 (a) の加速器用電磁石電源の出力電流 a 3 はシンクロトロン 3 から荷電粒子ビームをビーム輸送系 1 0 B に出射している際の電流である。

図 2 (a) の加速器用電磁石電源の出力電流の符号 a 3 1 はシンクロトロン 3 から荷電粒子ビームをビーム輸送系 1 0 B に出射が終了するタイミングを示す。

【 0 0 5 3 】

図 2 (a) の加速器用電磁石電源の出力電流 a 4 はシンクロトロン 3 で荷電粒子ビームを減速する際の電流である。減速は、加速器用電磁石 (5、6、7) の電流制御、時間制御 (クロック制御) で行われる。

出力電流の符号 a 4 1 はシンクロトロン 3 での荷電粒子ビームの減速が終了したタイミングを示す。

図 2 (a) の加速器用電磁石電源の出力電流 a 5 は線形加速器 2 から荷電粒子ビームがシンクロトロン 3 に入射している際の電流である。以下、同様の動作を繰り返す。

【 0 0 5 4 】

図 2 (b) の加速器用電磁石電源の出力電圧 b 1 は、線形加速器 2 から荷電粒子ビームがシンクロトロン 3 に入射する際の電圧である。

図 2 (b) の加速器用電磁石電源の出力電圧 b 2 は、シンクロトロン 3 で荷電粒子ビームを加速するために出力される正電圧である。これにより、加速器用電磁石電源の出力電流 a 2 (図 2 (a) 参照) が増加する。

【 0 0 5 5 】

図 2 (b) の加速器用電磁石電源の出力電圧を V とすると、加速器用電磁石のコイルやケーブル、電源の内部抵抗を合わせた抵抗 R、加速器用電磁石のコイルやケーブルの自己インダクタンス L、出力電流 I とすると次式で表される。

$$V = R I + L (d I / d t) \quad (1)$$

出力電流 I の増加分、減少分が L (d I / d t) の項で表される。

【 0 0 5 6 】

図 2 (b) の加速器用電磁石電源の出力電圧 b 3 は、シンクロトロン 3 から荷電粒子ビームをビーム輸送系 1 0 B に出射している時間帯であり、定電圧である。

図 2 (b) の加速器用電磁石電源の出力電圧 b 4 は、シンクロトロン 3 で荷電粒子ビームを減速するために出力される負電圧である。これにより、加速器用電磁石電源の出力電流 I (符号 a 4 (図 2 (a) 参照)) が減少する。

【 0 0 5 7 】

加速器用電磁石電源の出力電圧 b 4 の際の出力電流 I (符号 a 4 (図 2 (a) 参照)) も同様に式 (1) で表され、出力電流 I の減少分が L (d I / d t) の項である。

図 2 (b) の加速器用電磁石電源の出力電圧 b 5 は、線形加速器 2 から荷電粒子ビームがシンクロトロン 3 に入射する時間帯であり、図 2 (a) の加速器用電磁石電源の出力電流の a 5 の時間帯である。以下、同様の動作を繰り返す。

【 0 0 5 8 】

10

20

30

40

50

図 2 (a) の加速器用電磁石電源の出力電流 a 3、a 7、a 1 1、a 1 5 および図 2 (b) の加速器用電磁石電源の出力電圧 b 3、b 7、b 1 1、b 1 5 の状態時 (符号 a 3、b 3、符号 a 7、b 7、符号 a 1 1、b 1 1、符号 a 1 5、b 1 5 それぞれの場合)、荷電粒子ビームがビーム輸送系 1 0 B に出射される。この際、図 4 に示すように、照射野形成用電磁石 (1 0、1 1) に、主整流回路部 1 3 a が接続されている。

【 0 0 5 9 】

照射野形成用電磁石に、図 2 (d) に示す出力電圧 d 3、d 7、d 1 1、d 1 5 が加えられ、図 2 (c) に示す出力電流 c 3、c 7、c 1 1、c 1 5 が流れる。この際、図 3 に示すように、電荷粒子ビーム b が走査され、X Y 方向に広がる照射野 S y が形成される。なお、図 3 は、図 1 に示す照射野形成用電磁石 (1 0、1 1) に図 2 (d) に示す出力電圧 d 3、d 7、d 1 1、d 1 5 が印加され、図 2 (c) に示す出力電流 c 3、c 7、c 1 1、c 1 5 が流れる際に形成される照射野 S y を示す模式図である。

【 0 0 6 0 】

図 2 (a) ~ (d) を参照すると、

図 2 (a) の加速器用電磁石電源の出力電流 a 2 が大きく増加する間、図 2 (c) の照射野形成用電磁石電源の出力電流 c 2 は変化しない。

図 2 (c) の照射野形成用電磁石電源の出力電流 c 3 が大きく変化する間、図 2 (a) の加速器用電磁石電源の出力電流 a 3 は変化しない。

【 0 0 6 1 】

図 2 (a) の加速器用電磁石電源の出力電流 a 4 が大きく減少する間、図 2 (c) の照射野形成用電磁石電源の出力電流 c 4 は変化しない。

図 2 (c) の照射野形成用電磁石電源の出力電流 c 7 が大きく変化する間、図 2 (a) の加速器用電磁石電源の出力電流 a 7 は変化しない。

以下、同様である。

【 0 0 6 2 】

上述のように、図 2 (a) の加速器用電磁石電源の出力電流の波形と図 2 (c) の照射野形成用電磁石電源の出力電流の波形を見ると分るように、加速器用電磁石電源と照射野形成用電磁石電源では、電流を大きく変更している時間帯が重ならない。

【 0 0 6 3 】

これは、当然であるが、シンクロトロン 3 (図 1 参照) での荷電粒子ビームのシンクロトロン 3 への入射 (図 2 (a) の符号 a 1)、シンクロトロン 3 での大きな加速 (図 2 (a) の符号 a 2)、シンクロトロン 3 での大きな減速中 (図 2 (a) の符号 a 4) には、照射野形成照射装置 1 0 A からの荷電粒子ビームの照射を行えないからである。

【 0 0 6 4 】

逆に、荷電粒子ビームの照射中 (図 2 (c) の符号 c 3、c 7、c 1 1、c 1 5) に加速器のシンクロトロン 3 で大きな加減速が行われることもない。

荷電粒子ビームの照射中にわずかに、加速器用電磁石電源の電流値を変更するような場合もあるが、それは非常にわずかな量である。つまり、加速器用電磁石電源の大きな電圧の変更は伴わない。

つまり、加速器用電磁石電源と照射野形成用電磁石電源とで、電流を大きく変更している時間帯が重ならないということは、高い電圧を必要とする時間帯も重ならないということである。

【 0 0 6 5 】

< 電源装置 1 3 とその制御 >

図 4 に、粒子線照射装置の電源装置の回路構造を示す。

そこで、図 4 に示すように、加速器用電磁石 (5、6、7) および照射野形成用電磁石 (1 0、1 1) の電源装置 1 3 を、比較的高い電圧 (高電圧) を出力して電流を制御する主整流回路部 1 3 a と、電流設定値に対して偏差を小さく保つために比較的低い電圧 (低電圧) を出力して電流を制御する電流安定化制御部 1 3 b、1 3 c とに分ける。

例えば、主整流回路部 1 3 a と電流安定化制御部 1 3 b、1 3 c が出力できる電圧比は 1

0 : 1 ~ 20 : 1 などである。そして、主整流回路部 13 a を加速器用電磁石 (5、6、7) の電源と照射野形成用電磁石 (10、11) の電源とで共有化する構成とした。

【 0066 】

電流安定化制御部 13 b は、加速器用電磁石 (5、6、7) の制御に用いる。電流安定化制御部 13 c は、照射野形成用電磁石 (10、11) の制御に用いる。

そうした場合、電流安定化制御部 13 b、13 c はどちらの電源でも常時動作しているものの、主整流回路部 13 a は必要な時間帯に合わせて加速器用電磁石 (5、6、7) の電源と照射野形成用電磁石 (10、11) の電源とで切り替えて動作させられる。これにより、電源装置 13 の構成をコンパクトにでき、低コスト化と省スペース化を図ることができる。

10

【 0067 】

主整流回路部 13 a と電流安定化制御部 13 b とは、加速器用磁石 (5、6、7) に所定の電流が流れるように電圧を増減して制御する。

主整流回路部 13 a と電流安定化制御部 13 c とは、照射野形成用電磁石 (10、11) に所定の電流が流れるように電圧を増減して制御する。

【 0068 】

電源装置 13 には、加速器用電磁石 (5、6、7) に流れる電流を検出する電流検出部 d 1 と、照射野形成用電磁石 (10、11) に流れる電流を検出する電流検出部 d 2 が接続されている。電流検出部 d 1、d 2 には、例えば D C C T (DC Current Transformer) が使用される。

20

【 0069 】

また、主整流回路部 13 a には、回路の出力電圧を測る電圧検出部 13 a v が設けられている。

電流安定化制御部 13 b、13 c には、例えば F E T (Field Effect Transistor) 半導体素子が用いられる。

主整流回路部 13 a には、例えば I G B T (Insulated Gate Bipolar Transistor) 半導体素子が用いられる。

また、電源装置 13 は、加速器用電磁石 (5、6、7) と照射野形成用電磁石 (10、11) とに、外部制御装置 14 で設定する電流を流すためのフィードバック装置 15 を有している。

30

【 0070 】

< 受電装置 J >

電源装置 13 には、電源装置 13 に必要な電力を供給するための受電装置 J が接続されている。受電装置 J は、主整流回路部 13 a、電流安定化制御部 13 b、13 c のそれぞれに接続され、電力を供給する。

【 0071 】

< フィードバック装置 15 >

電源装置 13 内のフィードバック装置 15 は、外部制御装置 14、電流検出部 d 1、d 2、主整流回路部 13 a、電流安定化制御部 13 b、13 c に電氣的に接続されている。

フィードバック装置 15 には、加速器用電磁石 (5、6、7) と照射野形成用電磁石 (10、11) とに流す電流設定値が外部制御装置 14 から入力され設定される。

40

フィードバック装置 15 には、電流検出部 d 1 から加速器用電磁石 (5、6、7) に流れる電流の信号が入力される。そして、フィードバック装置 15 は、加速器用電磁石 (5、6、7) に流れる電流値を電流設定値と比較する。

【 0072 】

電流値と電流設定値とに差異がある場合には、主整流回路部 13 a または / および電流安定化制御部 13 b に制御信号を出力し、加速器用電磁石 (5、6、7) に流れる電流が電流設定値になるように電圧を増減して制御する。

【 0073 】

同様に、フィードバック装置 15 には、電流検出部 d 2 から照射野形成用電磁石 (10

50

、 11) に流れる電流の信号が入力される。そして、フィードバック装置 15 は照射野形成用電磁石 (10、11) に流れる電流値を電流設定値と比較する。

電流値と電流設定値とに差異がある場合には、主整流回路部 13 a または / および電流安定化制御部 13 c に制御信号を出力し、照射野形成用電磁石 (10、11) に流れる電流が電流設定値になるように電圧を増減して制御する。

【0074】

なお、フィードバック装置 15 は、原則的には、電流設定値と電流値との差異が大きい場合には主整流回路部 13 a に制御信号を出力し、電流設定値と電流値との差異が小さい場合には電流安定化制御部 13 b、13 c に制御信号を出力する。

【0075】

<切替部 s1、s2、s3>

電源装置 13 は、接続を切り替える切替部 s1、s2、s3 を有している。

切替部 s1 は、高い電圧を印加する主整流回路部 13 a 側の接点 s1 c を加速器用電磁石 (5、6、7) 側の接点 s1 a または照射野形成用電磁石 (10、11) 側の接点 s1 b に接続されるように切り替える。

【0076】

切替部 s2 は、加速器用電磁石 (5、6、7) のための切替部であり、電流安定化制御部 13 b 側の接点 s2 c を主整流回路部 13 a 側の接点 s2 a または加速器用電磁石 (5、6、7) 側の接点 s2 b に接続されるように切り替える。

切替部 s3 は、照射野形成用電磁石 (10、11) のための切替部であり、電流安定化制御部 13 c 側の接点 s3 c を主整流回路部 13 a 側の接点 s3 a または照射野形成用電磁石 (10、11) 側の接点 s3 b に接続されるように切り替える。

切替部 s1、s2、s3 は、粒子線照射装置 S の運転状態やタイミングに応じて以下のように切り替えられる。

【0077】

シンクロトロン 3 で荷電粒子ビームを加速または減速する場合には、切替部 s1 は、主整流回路部 13 a を加速器用電磁石 (5、6、7) 側の接点 s1 a に切り替える。また、切替部 s2 は、電流安定化制御部 13 b の接点 s2 c を主整流回路部 13 a 側の接点 s2 a に接続されるように切り替える。これにより、加速器用電磁石 (5、6、7) は、主整流回路部 13 a と電流安定化制御部 13 b とに接続されて、高い電圧が安定して出力される。

【0078】

シンクロトロン 3 で荷電粒子ビームを加速または減速する場合、切替部 s3 は、電流安定化制御部 13 c の接点 s3 c が照射野形成用電磁石 (10、11) 側の接点 s3 b に接続されるように切り替える。これにより、照射野形成用電磁石 (10、11) に電流安定化制御部 13 c から比較的低い電圧が安定して出力される。

【0079】

一方、図 1 に示す照射野形成照射装置 10 A で照射野を形成して荷電粒子ビームを標的 p1 に照射する場合は、切替部 s1 は、主整流回路部 13 a 側の接点 s1 c が照射野形成用電磁石 (10、11) 側の接点 s1 b に接続されるように切り替える。切替部 s3 は、電流安定化制御部 13 c の接点 s3 c が主整流回路部 13 a 側の接点 s3 a に接続されるように切り替える。これにより、照射野形成用電磁石 (10、11) は、主整流回路部 13 a と電流安定化制御部 13 b とに接続されて、高い電圧が安定して出力される。

【0080】

荷電粒子ビームの照射中には、切替部 s2 は電流安定化制御部 13 b の接点 s2 c が加速器用電磁石 (5、6、7) 側の接点 s2 b に接続されるように切り替える。これにより、加速器用電磁石 (5、6、7) に電流安定化制御部 13 b から比較的低い電圧が安定的に出力される。

【0081】

シンクロトロン 3 にて荷電粒子ビームを加速または減速する場合に、主整流回路部 13

10

20

30

40

50

aが加速器用電磁石(5、6、7)に接続される一方、荷電粒子ビームを、照射野を形成して標的p1に照射する場合に、照射野形成用電磁石(10、11)に接続されることで、高電力を必要とする電磁石に高電力を資源少なく、省スペースで提供できる。

切替部s1、s2、s3には、トランジスタなどの半導体スイッチング素子を用いることが望ましく、使用する半導体素子の許容電圧、電流、電力を超えないように複数の素子を直列化または/および並列化させることで一つの切替部を構成する。また、接続を切り替える際に生じる電圧変動を抑制するためにスナバ回路などを切替部s1、s2、s3に用いてもよい。なお、切替部s1、s2、s3は説明する所定の機能が果たせれば任意のものを適用できる。

【0082】

図4に示した例は「照射中」でのものであり、照射野形成用電磁石(10、11)側に主整流回路部13aが接続されているが、切替部s1、s2、s3をそれぞれ逆に切り替えることで、荷電粒子ビームの「加減速中」である加速器用電磁石(5、6、7)側に主整流回路部13aを接続することができる。切替部s1、s2、s3の切り替えは、加速器のシンクロトロン3の制御システムなどの外部制御装置14から運転の状態、タイミングに合わせて送られる信号に応じて行われる。

【0083】

運転の状態とは、シンクロトロン3での加速中、減速中、エネルギー維持中、照射野形成照射装置10Aでの照射中などである。運転のタイミングとは、シンクロトロン3での加速開始、加速終了、減速開始、減速終了、照射野形成照射装置10Aからの照射開始、終了などをいう。シンクロトロン3の運転の状態、タイミングに応じて、主整流回路部13aを加速器用電磁石(5、6、7)または照射野形成用電磁石(10、11)に切り替え接続することで、主整流回路部13aを加速器用電磁石(5、6、7)と照射野形成用電磁石(10、11)とで共有化できる。

【0084】

<粒子線照射装置Sの制御の流れ>

次に、粒子線照射装置Sの制御の流れの一例について説明する。

粒子線照射装置Sの制御は、前記したように、外部制御装置14により遂行される。

図5は、粒子線照射装置Sの制御の流れを示すフロー図である。

【0085】

まず、切替部s1の主整流回路部13a側の端子s1cを加速器用電磁石(5、6、7)側の端子s1aに接続する。また、切替部s2の電流安定化制御部13b側の端子s2cを主整流回路部13a側の端子s2aに接続する(図5のS101)。これにより、加速器用電磁石(5、6、7)に主整流回路部13aと電流安定化制御部13bとが接続される。こうして、加速器用電磁石(5、6、7)に通電が開始される(S102)。

【0086】

続いて、入射インフレクタ4を用いて荷電粒子入射系1Aから荷電粒子ビームをシンクロトロン3に入射する(S103)(図2(b)の時刻t0~時刻t1)。

そして、シンクロトロン3にて、加速器用電磁石(5、6、7)や高周波加速空洞8を用いて荷電粒子ビームを照射エネルギーまで加速する(S104)(図2(b)の時刻t1~時刻t2)。加速器用電磁石(5、6、7)の電流と荷電粒子ビームの運動量はおおよそ比例するので、当該電流を電流検出部d1で検出し、さらに高周波加速空洞8に印加された高周波電界の周波数も監視することで、荷電粒子ビームを照射エネルギーまで加速し終わったことを検出できる。

【0087】

続いて、主整流回路部13aの出力電圧を電圧検出部13avで測定してモニタする(S105)。そして、主整流回路部13aの出力電圧がゼロか否か判断される(S106)。加速し終わった場合、主整流回路部13aの電圧が0に制御される(図2(b)の時刻t2)。

【0088】

10

20

30

40

50

主整流回路部 13 a の出力電圧がゼロでないと判断される場合 (S 1 0 6 で N O)、 S 1 0 5 に移行して、主整流回路部 13 a の出力電圧をモニタする。

一方、主整流回路部 13 a の出力電圧がゼロであると判断される場合 (S 1 0 6 で Y E S)、 S 1 0 7 に移行し、切替部 s 1 の主整流回路部 13 a 側の端子 s 1 c を照射野形成用電磁石 (1 0、 1 1) 側の端子 s 1 b に切り替え接続する。また、切替部 s 3 で、電流安定化制御部 13 c 側の端子 s 3 c を主整流回路部 13 a 側の端子 s 3 a に切り替え接続する (S 1 0 7)。

【 0 0 8 9 】

そして、主整流回路部 13 a、電流安定化制御部 13 c で照射野形成用電磁石 (1 0、 1 1) が制御され、照射野形成照射装置 1 0 A で標的 p 1 に適合する荷電粒子ビームの照射野が形成され、標的 p 1 に向けて照射が開始される (S 1 0 8) (図 2 (c) の時刻 t 2 ~ 時刻 t 3)。

【 0 0 9 0 】

照射開始後、シンクロトロン 3 における荷電粒子ビーム残量の低下、もしくは照射エネルギーの変更、もしくは照射終了が発生する (S 1 0 9)。荷電粒子ビーム残量の低下もしくは照射エネルギーの変更、もしくは照射終了を知らせる信号は外部制御装置 1 4 によって入力される。

【 0 0 9 1 】

荷電粒子ビーム残量の低下、もしくは照射エネルギーの変更、もしくは照射終了の発生後、主整流回路部 13 a の出力電圧がモニタされる (S 1 1 0)。

続いて、主整流回路部 13 a の出力電圧がゼロか否か判定される (S 1 1 1)。

主整流回路部 13 a の出力電圧がゼロでないと判定された場合 (S 1 1 1 で N O)、 S 1 1 0 に移行し、主整流回路部 13 a の出力電圧をモニタする。

【 0 0 9 2 】

一方、主整流回路部 13 a の出力電圧がゼロであると判定された場合 (S 1 1 1 で Y E S) (図 2 (c) の時刻 t 3)、切替部 s 1 で主整流回路部 13 a 側の端子 s 1 c を加速器用電磁石 (5、 6、 7) 側の端子 s 1 a に接続する。また、切替部 s 2 で電流安定化制御部 13 b の端子 s 2 c を主整流回路部 13 a 側の端子 s 2 a に接続し (S 1 1 2)、加速器用電磁石 (5、 6、 7) に主整流回路部と電流安定化制御部 13 b とを接続する。

【 0 0 9 3 】

続いて、シンクロトロン 3 内に残った荷電粒子ビームを、荷電粒子入射系 1 A から荷電粒子ビームを入射する際のエネルギー近傍まで減速する (S 1 1 3) (図 2 (a) の時刻 t 3 ~ 時刻 t 4)。

続いて、照射終了か否か判定される (S 1 1 4)。

照射終了でないと判定された場合 (S 1 1 4 で N O)、 S 1 0 3 に移行する。

照射終了であると判定された場合 (S 1 1 4 で Y E S)、終了する。

【 0 0 9 4 】

上記構成によれば、加速器用電磁石 (5、 6、 7) と照射野形成用電磁石 (1 0、 1 1) の電源装置の構造を一部共有化することによって電源装置 1 3 の製造コストダウンや省スペース化が可能となる。

詳細には、加速器用電磁石 (5、 6、 7) と照射野形成用電磁石 (1 0、 1 1) との二つの電磁石電源の主整流回路を主整流回路部 13 a として共有化するので、トータルとしての電源の製造コストを低減することができる。

【 0 0 9 5 】

例えば、電源の製造コストを 6 0 ~ 7 0 % 程度にすることができる。

また、二つの電磁石電源の共有化により、電源の設置スペースを小さくすることが可能となる。

結果として、粒子線照射装置 S の電源装置 1 3 の製造コストと設置スペースを、従来の 2 / 3 程度に削減できる。

また、電源の設置スペースを 2 / 3 程度に削減できるので、粒子線照射装置 S の設置面

積が限られる都市部への粒子線照射装置Sの展開の足掛かりにすることができる。

【0096】

以上のことから、電源装置の小型化、低コスト化を図れる粒子線照射装置Sを実現することができる。

【産業上の利用可能性】

【0097】

本発明は、粒子線治療施設の電磁石電源に利用可能である。

【符号の説明】

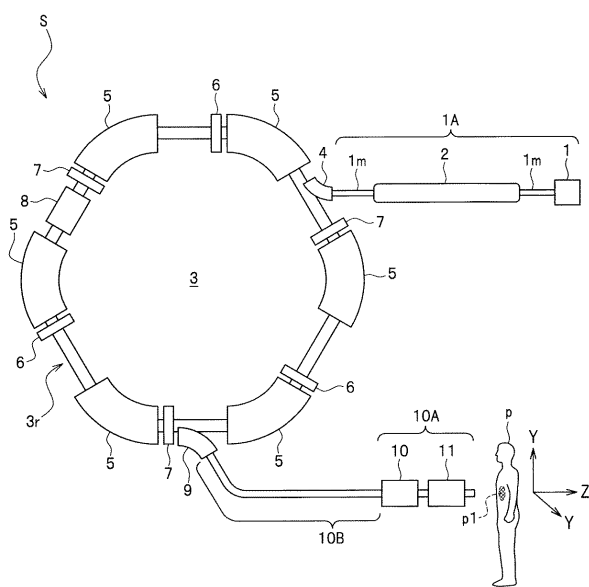
【0098】

- 1 イオン源
- 2 線形加速器
- 3 シンクロトロン
- 4 入射インフレクタ
- 5 偏向電磁石
- 6 発散四極電磁石
- 7 収束四極電磁石
- 8 高周波加速空洞
- 9 出射デフレクタ
- 10 水平方向照射野形成電磁石
- 11 垂直方向照射野形成電磁石
- 13 a 主整流回路部（強制励磁電圧出力部）
- 13 b 電流安定化制御部（第1電流安定化制御部）
- 13 c 電流安定化制御部（第2電流安定化制御部）
- p 1 標的
- S 粒子線照射装置

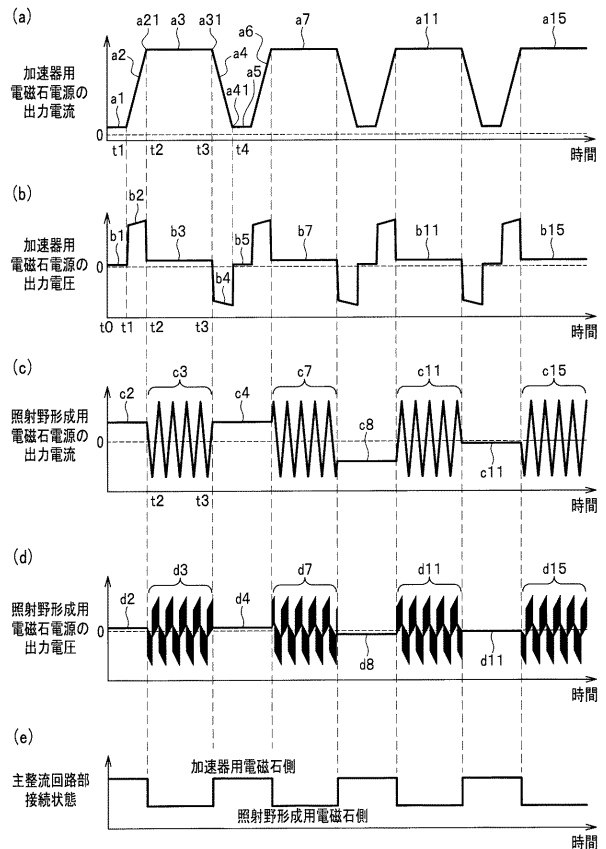
10

20

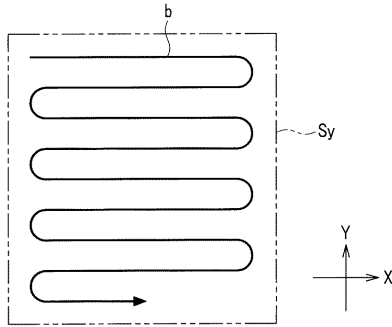
【図1】



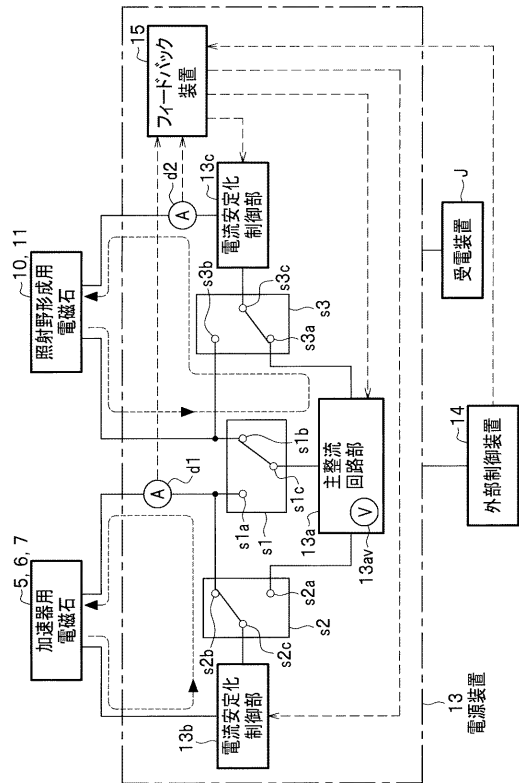
【図2】



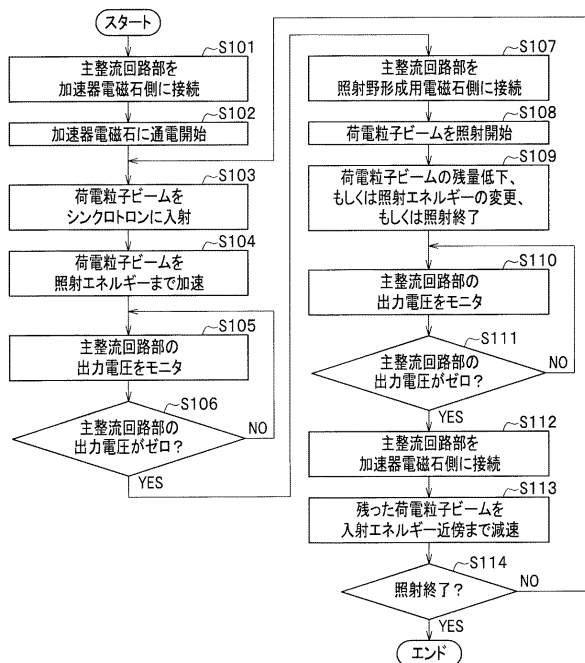
【 図 3 】



【 図 4 】



【 図 5 】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
A 6 1 N 5/10 (2006.01) G 2 1 K 1/093 D
A 6 1 N 5/10 H

(56)参考文献 特開平 0 6 - 0 6 8 9 9 8 (J P , A)
国際公開第 2 0 1 1 / 0 5 8 8 3 3 (W O , A 1)
特開 2 0 0 9 - 2 7 9 0 4 5 (J P , A)
米国特許出願公開第 2 0 1 4 / 0 1 8 7 8 4 4 (U S , A 1)

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

H 0 5 H 3 / 0 0 - 1 5 / 0 0
A 6 1 N 5 / 1 0
G 2 1 K 5 / 0 0
G 2 1 K 5 / 0 4
G 2 1 K 1 / 0 9 3
J S T P l u s (J D r e a m I I I)
J S T 7 5 8 0 (J D r e a m I I I)