

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6016058号
(P6016058)

(45) 発行日 平成28年10月26日 (2016. 10. 26)

(24) 登録日 平成28年10月7日 (2016. 10. 7)

(51) Int. Cl.		F I			
H05H	13/04	(2006.01)	H05H	13/04	E
H05H	7/04	(2006.01)	H05H	7/04	
H01F	7/20	(2006.01)	H01F	7/20	Z

請求項の数 8 (全 22 頁)

(21) 出願番号	特願2012-72623 (P2012-72623)	(73) 特許権者	301032942
(22) 出願日	平成24年3月27日 (2012. 3. 27)		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2013-206635 (P2013-206635A)		千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号
(43) 公開日	平成25年10月7日 (2013. 10. 7)	(74) 代理人	100135781
審査請求日	平成27年3月26日 (2015. 3. 26)		弁理士 西原 広徳
		(72) 発明者	岩田 佳之
			千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号
			独立行政法人放射線医学総合研究所内
		(72) 発明者	野田 耕司
			千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号
			独立行政法人放射線医学総合研究所内
		審査官	田辺 正樹

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 偏向電磁石コイル設計方法、偏向電磁石コイル設計装置、超電導電磁石の製造方法、加速器の製造方法、及びコイル配置最適化プログラム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

円弧状のビーム路で粒子を輸送する偏向電磁石のコイルを設計する偏向電磁石コイル設計方法であって、

前記コイルを構成するコンダクタについて、前記ビーム路と垂直なビーム路垂直面上における前記コンダクタの位置を前記ビーム路垂直面上のパラメータで表現し、所望領域全体の磁場均一度が高くなるように補正できる前記コンダクタの位置を、前記パラメータを用いた二次元磁場計算による最適化によって計算する偏向電磁石コイル設計方法。

【請求項2】

前記コイルの磁場を三次元磁場計算によって予め算出し、前記二次元磁場計算において前記ビーム路垂直面上のパラメータと前記ビーム路の長さを用いたモデル化コイルの磁場を計算して前記最適化を行い、最適化したコンダクタの位置での前記コイルの磁場を三次元磁場計算によって計算する請求項1記載の偏向電磁石コイル設計方法。

【請求項3】

前記二次元磁場計算は、次の(1)、(2)、または(3)である請求項1または2記載の偏向電磁石コイル設計方法。

(1)

補正前の前記コイルによるBL積分布と補正後の前記コイルによるBL積分布の和が最小

10

20

になるようなコンダクタの位置を多次元最小化アルゴリズムで求める

(2)

位置補正するコンダクタを定めて該コンダクタの位置を乱数で変化させながら該コンダクタの最適位置を求める部分最適化処理を行い、該部分最適化処理を予め定めた範囲で位置補正するコンダクタを変更して繰り返す

(3)

任意の方法で A_n を定め、該 A_n を用いて次の数式で表される電流分布を再現するようコンダクタの位置を定め、定めたコンダクタの位置で二次元磁場計算により磁場分布を求める処理を、求めた磁場分布が補正前のコイルの磁場分布における打ち消したい磁場と符号が逆で大きさが同一または近い値になるように繰り返す

【数1】

$$I = \sum_n A_n \cos(n\theta) \quad \text{※ } n=1,2,3,4,\dots$$

【請求項4】

前記コイルは、前記ビーム路に沿って偏向させた偏向円筒面上に巻線状のコンダクタが1層配置された単層コイルを、ビーム路垂直方向に多層に配置して構成され、前記二次元磁場計算による最適化は、少なくとも一層の前記単層コイルを補正用コイルとして、該補正用コイルのコンダクタの配置を最適化することで実行する
請求項1、2、または3記載の偏向電磁石コイル設計方法。

【請求項5】

円弧状のビーム路で粒子を輸送する偏向電磁石のコイルを設計する偏向電磁石コイル設計手段として機能させる偏向電磁石コイル設計装置であって、前記コイルを構成するコンダクタについて、前記ビーム路と垂直なビーム路垂直面上における前記コンダクタの位置を前記ビーム路垂直面上のパラメータで表現するコンダクタ位置パラメータ化部と、所望領域全体の磁場均一度が高くなるように補正できる前記コンダクタの位置を、前記パラメータを用いた二次元磁場計算による最適化によって計算する二次元磁場計算最小化部とを備えた
偏向電磁石コイル設計装置。

【請求項6】

偏向電磁石コイル設計装置により円弧状のビーム路で粒子を輸送する超電導電磁石のコイルを設計して超電導電磁石を製造する超電導電磁石の製造方法であって、前記偏向電磁石コイル設計装置が、前記コイルを構成するコンダクタについて、前記ビーム路と垂直なビーム路垂直面上における前記コンダクタの位置を前記ビーム路垂直面上のパラメータで表現し、所望領域全体の磁場均一度が高くなるように補正できる前記コンダクタの位置を、前記パラメータを用いた二次元磁場計算による最適化によって計算する超電導電磁石の製造方法。

【請求項7】

超電導電磁石を複数備える加速器の製造方法であって、前記超電導電磁石を請求項6記載の製造方法により製造する加速器の製造方法。

【請求項8】

コンピュータを、円弧状のビーム路で粒子を輸送する偏向電磁石のコイルを設計する偏向電磁石コイル設計手段として機能させるコイル配置最適化プログラムであって、前記コイルを構成するコンダクタについて、前記ビーム路と垂直なビーム路垂直面上における前記コンダクタの位置を前記ビーム路垂直面上のパラメータで表現するコンダクタ位置パラメータ化手段と、

10

20

30

40

50

所望領域全体の磁場均一度が高くなるように補正できる前記コンダクタの位置を、前記パラメータを用いた二次元磁場計算による最適化によって計算する二次元磁場計算最小化手段として機能させる
コイル配置最適化プログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は、例えば加速器等のビーム輸送系に用いるような超電導偏向電磁石の偏向電磁石コイル設計方法、偏向電磁石コイル設計装置、超電導電磁石の製造方法、加速器の製造方法、及びコイル配置最適化プログラムに関する。

10

【背景技術】

【0002】

従来、シンクロトロン等の加速器には、超電導電磁石が用いられている。この超電導電磁石は、円形の加速器内で荷電粒子を湾曲させて搬送するものであるから、湾曲した偏向電磁石であることが好ましい。しかし、偏向させると、磁場均一度を確保することが困難であるという問題が生じる。

【0003】

このような偏向電磁石の磁場均一度を向上させるものとして、偏向マグネット、及びその励磁装置が提案されている（特許文献1参照）。この装置は、素線の配置が可能な範囲をk個の小コイルに分割して均一磁場空間内に所定の磁場が発生するように小コイルの電流iを最適化し、これを模擬するように素線を配置したものである。これにより、偏向磁場の補正を簡単に行うことができるとされている。

20

【0004】

一方、電磁石の磁場均一度を求めるものとして、三次元磁場計算を行うソフトウェアが市販されている。このような三次元磁場計算を行うと、磁場均一度を精度良く知ることができる。

【0005】

しかし、均一度の高い磁場を得るためのコイル等の設計を三次元磁場計算により直接実行し、最適化を行おうとすると、計算に膨大な時間が必要になるという問題があった。

30

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【特許文献1】特開平1-27199号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

この発明は、上述の問題に鑑みて、磁場均一度の高い偏向電磁石およびそのコイルを、短時間に精度よく設計できるようにすることを目的とする。

【課題を解決するための手段】

40

【0008】

この発明は、円弧状のビーム路で粒子を輸送する偏向電磁石のコイルを設計する偏向電磁石コイル設計方法であって、前記コイルを構成するコンダクタについて、前記ビーム路と垂直なビーム路垂直面における前記コンダクタの位置を前記ビーム路垂直面上のパラメータで表現し、所望領域全体の磁場均一度が高くなるように補正できる前記コンダクタの位置を、前記パラメータを用いた二次元磁場計算による最適化によって計算する偏向電磁石コイル設計方法であることを特徴とする。

【発明の効果】

【0009】

この発明により、磁場均一度の高い偏向電磁石およびそのコイルを、短時間に精度よく

50

設計できる。

【図面の簡単な説明】

【0010】

【図1】加速器を有する粒子線照射治療装置の概略構成を示す構成図。

【図2】偏向電磁石の構成を説明する説明図。

【図3】補正前と多極展開補正後の偏向電磁石のコンダクタ位置と磁場均一度の説明図。

【図4】偏向電磁石コイル設計装置の構成を示すブロック図。

【図5】多次元最小化補正後の二極コイルのコンダクタ位置と磁場分布の説明図。

【図6】補正前と多極展開補正後の偏向電磁石のコンダクタ位置と磁場分布の説明図。

【図7】ランダムサーチ補正後のコンダクタ位置と磁場分布の説明図。

【図8】補正前の四極コイルのコンダクタ位置と磁場分布の説明図。

【図9】多極展開補正後の四極コイルのコンダクタ位置と磁場分布の説明図。

【図10】ランダムサーチ補正後の四極コイルのコンダクタ位置と磁場分布の説明図。

【発明を実施するための形態】

【0011】

この発明の一実施形態を以下図面と共に説明する。

図1は、加速器を用いる装置の一例としての粒子線照射治療装置1の概略構成を示す構成図である。粒子線照射治療装置1は、荷電粒子入射部2、加速器4、ビーム輸送部6および照射部8を備えている。

【0012】

荷電粒子入射部2は、荷電粒子を生成するイオン源、1次線形加速器、および2次線形加速器を備えており、加速された荷電粒子を加速器4に供給する。

【0013】

加速器4は、入射器11、射出器12、及び各種電磁石（偏向電磁石20等）を有するシンクロトロンと、これらをコントロールするコントローラ（図示省略）を備えている。加速器4は、荷電粒子入射部2から入射器11を介して入射する荷電粒子を、略円環状の軌道に沿って軌道偏向しながらさらに加速し、射出器11から射出する。

【0014】

荷電粒子入射部2、加速器4、ビーム輸送部6および照射部8は、ビーム路30により互いに接続されている。荷電粒子は、このビーム路30内で輸送される。

【0015】

加速器4内のビーム路30も含め、各ビーム路30には、荷電粒子の輸送方向を偏向させる偏向電磁石20が設けられている。この偏向電磁石は、湾曲するビーム路30に沿って湾曲している。

【0016】

図2は、偏向電磁石20の構成を説明する説明図である。図2(A)は、偏向電磁石20をビーム路と垂直に縦断した概略構成を示す縦断斜視図であり、図2(B)は、巻線コイルである単層の第k層コイル51(k)（単層コイル）をビーム路30と垂直に縦断した概略構成を示す縦断斜視図である。なお、図2(A)および図2(B)は、いずれも概略構成を説明するために簡略化したものである。したがって、コンダクタ63（超電導線）の巻き数も実際のものとは異なっている。

【0017】

偏向電磁石20は、超電導偏向電磁石であり、ビーム路30に沿って湾曲した偏向円筒形のコイル51と、このコイル51の外側周囲を囲む偏向円筒形のヨーク52と、このヨーク52のさらに外側周囲を囲む真空チャンバ53とを備えている。コイル51のビーム路方向の長さ、ヨーク52のビーム路方向の長さは、ほぼ同じ長さに構成されている。

【0018】

コイル51は、枠体61（図2(B)参照）上に配置された第k層コイル51(k)（図2(B)参照）をビーム路方向垂直断面の同心円上に多層に重ねた多層コイルである。コイル51の内側全体には、真空で偏向円筒形の磁場空間56が存在している。この磁場

10

20

30

40

50

空間 5 6 内がビーム路 3 0 となる。なお、枠体 6 1 の外側の表面は、偏向円筒面 6 2 を形成する。

【 0 0 1 9 】

ヨーク 5 2 は、内周面がコイル 5 1 の外周面と接触するか近接する大きさであり、鉄で構成されている。このヨーク 5 2 により、コイル 5 1 による磁場の強度を増大している。

【 0 0 2 0 】

真空チャンバ 5 3 は、内周面がヨーク 5 2 の外周面と離れるようにヨーク 5 2 よりも大きく構成されている。この真空チャンバ 5 3 の内周面とヨーク 5 2 の外周面との間には、空間 5 7 が設けられている。

【 0 0 2 1 】

図 2 (B) に示すように、枠体 6 1 は、偏向円筒形に構成されている。この枠体 6 1 は、図示する境界線 6 2 で分離され、図示上側の第一枠体 6 1 A と図示下側の第二枠体 6 1 B とで構成されている。なお、枠体 6 1 は、このように加速器 4 で略円形をなすビーム路 3 0 の円形面で横断して上側と下側に分離することに限らず、略円形をなすビーム路 3 0 の円周面で枠体 6 1 を縦断して内側と外側に分離する、あるいは分離せずに一体の枠体 6 1 とするなど、適宜の構成とすることができる。

【 0 0 2 2 】

枠体 6 1 の外周面には、一層のコンダクタ 6 3 がコイル状に配置されている。このコンダクタ 6 3 は、枠体 6 1 の偏向に沿ってビーム路方向に配置され、枠体 6 1 の端部付近で折り返されて、枠体 6 1 の偏向に沿ってビーム路方向に配置されることを繰り返して配置されている。従って、コンダクタ 6 3 の中央大部分（折り返される端部付近を除いた部分）は、ビーム路と垂直の断面をビーム路方向のどの位置で見ても、後述の図 3 (A 1) に示すような同じ配置となる。

【 0 0 2 3 】

以降の説明において、偏向電磁石 2 0 およびコイル 5 1 の座標系について、図 2 (B) に示す座標系に統一する。すなわち、円弧状に湾曲しているビーム路 3 0 の方向を L 軸とし、この L 軸に垂直な平面を X Z 平面とする。X Z 平面は、ビーム路 3 0 の円弧半径方向を水平軸である X 軸とし、この X 軸と垂直な垂直軸を Z 軸とする。

【 0 0 2 4 】

ここから、コイル 5 1 を二極コイル 5 1 a として設計する場合の実施形態について説明する。

【 0 0 2 5 】

< 補正前の二極コイル >

図 3 (A 1) は、第 k 層となる第 k 層二極コイル 5 1 a (k) の断面図を示す。

第 k 層二極コイル 5 1 a (k) は、コンダクタとなる第 k 層コンダクタ 6 3 a (k) を、 \cos の電流分布を作るように配置している。

【 0 0 2 6 】

これにより、コンダクタ位置（第 k 層コンダクタ 6 3 a (k) の位置）は、ビーム路垂直面におけるビーム路中心を中心点とする角度で表現することができる。このコンダクタ分布を用いることで、二次元磁場計算上では均一な磁場分布を得ることができる。これ以降、「二次元磁場計算」とは、X Z 平面（ビーム路の垂直面）の二次元上に変数を設定した磁場計算のことをいう。

【 0 0 2 7 】

なお、この実施形態では、二極磁場を発生させたいために \cos としているが、2 n 極の磁場を発生させるためには、円周上に $\cos (n)$ の電流分布をつくれればよく、二極に限られるものではない。このように第 k 層コンダクタ 6 3 a (k) を図 3 (A 1) のように配置することで、 \cos の電流分布を模擬している。

【 0 0 2 8 】

第 k 層コンダクタ 6 3 a (k) は、図 3 (A 1) に示す左右両端、すなわち湾曲している二極コイル 5 1 a の内側端と外側端が密で、図 3 (A 1) に示す上下両端、すなわち湾

10

20

30

40

50

曲している二極コイル 5 1 a の両側端が粗となるように配置されている。

【 0 0 2 9 】

図 3 (A 2) は、第 k 層コンダクタ 6 3 a (k) を 2 2 層重ねた補正前の二極コイル 5 1 a の断面図である。この二極コイル 5 1 a は、再内層の第 1 層二極コイル 5 1 a (0 1) から、最外層の第 2 2 層二極コイル 5 1 a (2 2) まで、コイル中心から外側へ向かって配置されている。このように第 k 層コンダクタ 6 3 a (k) を多層に重ねることで、より強い磁場を得るようにしている。

【 0 0 3 0 】

この補正前の二極コイル 5 1 a について、二次元磁場計算を行うことができる。なお、この段階では、偏向させていない円筒面上に配置した二極コイル 5 1 a について計算している。

10

【 0 0 3 1 】

図 3 (A 3) は、偏向していない二極コイル 5 1 a についての磁場計算で得られた垂直磁場 (B_z) 分布を示すグラフである。計算において、ヨークなどはない無限長の空芯コイルを仮定し、コイル電流は 1 0 0 A としている。

【 0 0 3 2 】

図 3 (A 4) は、図 3 (A 3) の垂直磁場 (B_z) 分布を垂直磁場の均一度分布 (B_z / B_z) に変換したグラフである。図示するように、 10^{-5} 位の非常に均一な二極磁場が発生していることがわかる。

【 0 0 3 3 】

このような二次元磁場計算は、電磁石が直線形状且つ無限長のコイルである場合に良い近似となる。このような無限長直線コイルでは、三次元磁場を行っても均一な磁場を得ることができる。

20

【 0 0 3 4 】

しかし、問題は、(a) 一般的に磁石が有限な長さを持つこと、(b) 一般的に磁石にコイルエンドが存在すること、(c) 本発明で必要な磁石形状が直線でなく湾曲形状であることである。これらにより、二次元磁場計算の近似が破られ、結果として得られる磁場は不均一となる。

【 0 0 3 5 】

ここまでの図 3 (A 1) から図 3 (A 4) では、偏向していない二極コイル 5 1 a について説明したが、二極コイル 5 1 a およびその電磁石の形状は、粒子の軌道に沿って偏向していることが好ましい。そこで、上述した二極コイル 5 1 a を、断面上のコンダクタ位置をそのままとして全体をビーム路 3 0 に沿って偏向させた偏向後の二極コイル 5 1 a (偏向コイル) について考える。この二極コイル 5 1 a を用いた電磁石は、偏向電磁石 2 0 (図 2 (A) 参照) のコイル 5 1 (図 2 (A) 参照) となる。

30

【 0 0 3 6 】

このようにコイルを湾曲させると、湾曲させない二極コイル 5 1 a の二次元磁場計算では見られなかった磁場の不均一性が生じる。また、実際のコイル端部には、コイル巻き返しのためのコイルエンドが存在する。このコイルエンドも磁場不均一性を生む要因となる。これらの三次元的な構造から生じる磁場への影響を調べるため、三次元磁場計算を行う

40

【 0 0 3 7 】

三次元磁場計算は、「Opera 3 D」や「Ansys」等の市販の計算コードを用いて行うことができる。この実施形態では、Cobham社の三次元電磁場解析プログラム「Opera 3 D」を用いて計算する。「Opera 3 D」を用いた磁場計算は、コイル 5 1 やヨーク 5 2 の三次元形状を正確にモデル化して実行する。この三次元磁場計算によって、垂直磁場を得ることができる。

【 0 0 3 8 】

偏向電磁石の場合、磁石により発生された二極磁場によりビーム粒子は偏向される。この際、粒子の偏向角は次の [数 1] により計算される。

50

【 0 0 3 9 】

【 数 1 】

$$\theta \approx \frac{B_z L}{B\rho}$$

ここで、 B はビームの磁気剛性であり、ビームの運動量に比例する。つまり、ビームの運動量（エネルギー）が一定であれば、電磁石による偏向角は $B_z L$ 積（磁場の Z 軸成分の $B L$ 積）に比例する。この $B_z L$ 積は垂直磁場をビーム軌道に沿って積分することで、次の [数 2] のように求めることができる。

10

【 0 0 4 0 】

【 数 2 】

$$B_z L = \int B_z dl$$

つまり、三次元磁場計算で得られた垂直磁場をビーム軌道に沿って積分することで計算できる量である。

【 0 0 4 1 】

ここで、粒子のビームは、必ずしも磁石の中心軌道状を通過する訳ではなく、様々な位置から入射される。よって、偏向電磁石には様々なビーム軌道に対して $B_z L$ 積が均一であることが求められる。

20

そこで、三次元磁場計算で得られた結果より、様々なビーム軌道に対する $B_z L$ 積を求めてみる。

【 0 0 4 2 】

図 3 (B) は、偏向させた二極コイル 5 1 a について、ビーム軌道を水平に X 、垂直に Z だけ平行移動した際の $B_z L$ 積の均一度を求めた図である。 $B_z L$ 積は、 Z 軸方向の磁場の強さ (B_z) と二極コイル 5 1 内で粒子が通過するビーム路距離 (L) の積である。

【 0 0 4 3 】

但し、水平方向に関して、ビーム軌道が X だけ平行移動した軌道については、軌道長 L が $L = X$ だけ長くなるため (θ は磁石の偏向角)、この軌道長増加分を補正してプロットしている。つまり、図 3 (B) は、理想としては全領域でゼロになって欲しいが、図から磁石端部では 10^{-3} 位の不均一性が生じていることがわかる。

30

【 0 0 4 4 】

< 多極展開手法により補正した二極コイル (参考) >

図 3 (C) は、上述した二極コイル 5 1 a について、参考用の手法として、ある軸上の磁場を求め、それを多極展開することで多極磁場を見積もり、それを打ち消すよう補正を加えた結果を示す。このような補正の場合、補正前よりは均一度が向上しているものの、端部で不均一性が見られる。特に磁石が大口径で、且つ、コイル全長に対するコイルエンド長の割合が大きい場合、このような多極展開手法では、一般的に端部の補正が困難となる。

40

【 0 0 4 5 】

< 二次元計算手法による補正 >

本発明者らは、鋭意研究の結果、主に二次元計算を用いて最適化計算を行うことで、端部も補正できて磁場均一度の高いコイル 5 1 を設計する二次元計算手法を発明した。

この最適化計算は、大まかに言うと、次 [A] から [D] の 4 つの工程で行うものである。

【 0 0 4 6 】

[A] 最初に三次元磁場計算によって $B_z L$ 積均一度の分布を求めておく。

[B] 二次元磁場計算による最小化計算によって均一度の計算結果が最小となる補正後

50

の第 k 層二極コイルの超電導線（コンダクタ）の位置を決定する。

【 C 】最後に三次元磁場計算によって B_z L 積均一度が向上したかを確認する。

【 D 】確認結果が求める均一度に達していなければ、前記【 B 】を繰り返すことで、さらに均一度の高いコンダクタ位置を求める。

【 0047 】

前記【 A 】と前記【 D 】の三次元磁場計算では、実際の偏向電磁石を想定して細かいパラメータを入力して計算を行う。

前記【 B 】の二次元磁場計算では、ビーム路 30 と垂直な断面でのコンダクタ位置のコンダクタが、ビーム路 30 の方向に無限長続くものとしたモデル化コイルを仮定し、簡略化して計算を行う。

10

【 0048 】

なお、前記【 A 】と【 D 】では、次のパラメータを入力する。二極コイルや四極コイルといった極数および層数で変化するコンダクタ（線）の配置に関するパラメータとしては、層番号毎（各層毎）に、ターン数、コンダクタ中心位置（mm）、層間での線中心間距離、コンダクタ中心位置（m）等を入力する。その他の極数や層数によって変動しないパラメータとしては、線材径、線材径（絶縁処理後）、コイル巻枠の外半径、絶縁厚（内側径）、絶縁厚（層間）、塗布線後の導体厚、参考半径、ビームパイプ径、最小導体中心間ピッチ、最小コンダクタ表面間距離、最小曲率半径、鉄ヨーク内半径、鉄ヨーク外半径、鉄ヨーク厚み、鉄ヨーク材質、真空容器内半径、真空容器外半径、真空容器厚み、真空容器材質、鉄予0区外側と真空容器内側の距離等を入力する。これらのパラメータの入力は、後述するパラメータ入力処理部 74b（図4参照）により受け付ける。

20

【 0049 】

図4（A）は、二次元計算手法を用いて最適化計算を行う偏向電磁石コイル設計装置7（偏向電磁石コイル設計手段）の構成を示すブロック図である。偏向電磁石コイル設計装置7は、適宜のコンピュータで構成されており、システムバス70に接続された入力装置71、表示装置72、記録媒体処理装置73、制御装置74、及び記憶装置75を備えている。

【 0050 】

この偏向電磁石コイル設計装置7は、記憶装置75に記憶されたプログラムに従って、制御装置74が、マウスやキーボード等の入力装置71からの入力を受け付け、計算処理や制御処理等の各種処理を実行し、記録媒体処理装置73によって記録媒体79に対する情報（プログラム及びデータ）の読み書きを行い、C D T や液晶ディスプレイ等で構成される表示装置72に画像や文字の表示を実行する。

30

【 0051 】

記憶装置75には、少なくともコイル配置最適化プログラム75aと、三次元磁場計算プログラム75bが記憶されている。

制御装置74は、CPUとROMとRAMで構成されており、RAM上にコイル配置最適化プログラム75aと三次元磁場計算プログラム75bを読み込んで、中央処理部74a、パラメータ入力処理部74b、コンダクタ位置パラメータ化部74c、三次元磁場計算部74d、および二次元磁場計算最小化部74eとして機能する。

40

【 0052 】

中央処理部74aは、パラメータ入力処理部74b、コンダクタ位置パラメータ化部74c、三次元磁場計算部74d、および二次元磁場計算最小化部74eに対するインプット/アウトプット、および実行/停止等の制御をつかさどり、補正の最適化計算を行う再全体をコントロールする。

【 0053 】

パラメータ入力処理部74bは、偏向電磁石20やコイル51のパラメータ、具体的には線材径やコイル巻枠の外半径などのコイルパラメータの入力を受け付ける。

【 0054 】

コンダクタ位置パラメータ化部74cは、コンダクタ63の位置をビーム路垂直面上で

50

の によるパラメータにパラメータ化する処理を実行する。

【 0 0 5 5 】

三次元磁場計算部 7 4 d は、市販の三次元磁場計算コードによる三次元磁場計算を実行する。

二次元磁場計算最小化部 7 4 e は、二次元磁場計算による最小化を実行する。

【 0 0 5 6 】

記録媒体 7 9 は、適宜のプログラムを記録しており、コイル配置最適化プログラム 7 5 a、三次元磁場計算プログラム 7 5 b、またはこの両方のプログラムを記憶しておく構成としてもよい。このように記録しているプログラムは、記録媒体 7 9 から偏向電磁石コイル設計装置 7 にインストールされる。

【 0 0 5 7 】

図 4 (B) は、二次元磁場計算最小化部 7 4 e の具体的な構成の一例であり、多次元最小化手法を行う場合の構成を示している。

この場合、二次元磁場計算最小化部 7 4 e は、コンダクタ初期位置設定部 8 1、二次元磁場計算部 8 2、 B_z L 積分布計算部 8 3、 B_z L 積均一度分布変換部 8 4、分布ズレ指標定義部 8 5、多次元最小化アルゴリズム部 8 6、及びコイル断面形状出力部 8 7 を、この順に備えている。各部の詳細な動作は後述の実施例 1 に示す。

【 0 0 5 8 】

図 4 (C) は、二次元磁場計算最小化部 7 4 e の具体的な構成の他の一例であり、ランダムサーチ手法を行う場合の構成を示している。

この場合、二次元磁場計算最小化部 7 4 e は、初期二次元磁場分布計算部 9 1、着目コンダクタ位置変化部 9 2、変化後二次元磁場分布計算部 9 3、変化率分布計算部 9 4、改善量計算部 9 5、着目コンダクタ再移動計算部 9 6、着目コンダクタ計算繰返し部 9 7、着目コンダクタ変更繰返し部 9 8、およびコイル断面形状出力部 9 9 を、この順に備えている。各部の詳細な動作は後述の実施例 2 に示す。

【 0 0 5 9 】

図 4 (D) は、二次元磁場計算最小化部 7 4 e の具体的な構成の他の一例であり、多極成分加算手法を行う場合の構成を示している。

この場合、二次元磁場計算最小化部 7 4 e は、組み合わせ決定部 1 0 1、コンダクタ配置決定部 1 0 2、二次元磁場計算部 1 0 3、繰返し部 1 0 4、およびコイル断面形状出力部 1 0 5 を、この順で備えている。各部の詳細な動作は後述の実施例 3 に示す。

【実施例 1】

【 0 0 6 0 】

< 多次元最小化手法により補正した二極コイル >

実施例 1 として、上述した二次元磁場計算最小化部 7 4 e が 図 4 (B) とともに説明した多次元最小化手法により多次元最小化補正を行う構成の場合の動作について説明する。

【 0 0 6 1 】

図 5 (A) は、多次元最小化補正による補正後の二極コイル 5 1 b の断面図を示す。この二極コイル 5 1 b は、上述した補正前の二極コイル 5 1 a (図 3 (B) で説明したもの) について、補正を行う一部の層として最外層 (2 2 層目) の二極コイル 5 1 b (2 2) を選択し、この最外層 (2 2 層目) の二極コイル 5 1 b (2 2) における最外層コンダクタ 6 3 b (2 2) の配置を多次元最小化計算によって補正したものである。

【 0 0 6 2 】

最内層である第 1 層コンダクタ 6 3 b (0 1) で構成される第 1 層コイル 5 1 b (0 1) から第 2 1 層コンダクタ 6 3 b (2 1) で構成される第 2 1 層コイル 5 1 b (2 1) は、補正前の位置から変更しない。

【 0 0 6 3 】

なお、この実施例では、最外層 (2 2 層目) のコンダクタ位置で補正を行っているが、これに限らず他の層で補正しても良く、また複数層で補正しても構わない。

10

20

30

40

50

【 0 0 6 4 】

$B_z L$ 積分布で見られる不均一性を打ち消すよう、次の手順に従って、第 2 層二極コイル 5 1 b (2 2) のコンダクタ位置 (第 2 層コンダクタ 6 3 b (2 2) の配置) を最適化する。すなわち、次の手順で最適化したコイルが、図 5 (A) に示す二極コイル 5 1 b である。

【 0 0 6 5 】

[A] 三次元磁場計算 (事前計算)

(1) 三次元磁場計算プログラム 7 5 b (図 4 (A) 参照) は、「 O p e r a 3 D 」や「 A n s y s 」等の三次元磁場計算を行うプログラムであり、 $B_z L$ 積均一度の分布 ($B_z L / B_z L$) を求める。この分布には図 3 (B) に示したような不均一性が見られる。この三次元磁場計算は、三次元磁場計算プログラム 7 5 b に従って、制御装置 7 4 が三次元磁場計算部 7 4 d として機能して実行する。この実施例では、三次元磁場計算プログラム 7 5 b として「 O p e r a 3 D 」を用いている。

10

【 0 0 6 6 】

(2) 最外層コイル (第 2 層二極コイル 5 1 b (2 2)) に n ターン / ポールのコンダクタ (第 2 層二極コイル 5 1 b (2 2)) があつたとすると、コンダクタ位置パラメータ化部 7 4 c は、この最外層コイルに含まれるコンダクタの総数を、次の [数 3] によって求める。

【 0 0 6 7 】

[数 3]

$$n \text{ (ターン/ポール)} \times 2 \text{ (ポール)} \times 2 \text{ (コンダクタ数/ターン)} = 4 n$$

20

【 0 0 6 8 】

最外層コイルに含まれる全コンダクタの位置は、半径 R が一定であるため、原点と各コンダクタを結ぶ線の角度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_{4n}$ でパラメタライズされる。従って、コンダクタ位置パラメータ化部 7 4 c は、コンダクタ位置を θ によるパラメータとする。

【 0 0 6 9 】

[B] 二次元磁場計算による最小化計算 (最適化の実行)

(3) コンダクタ初期位置設定部 8 1 は、前記 (2) のパラメータの $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_{4n}$ に初期位置を与える。これにより、全てのコンダクタ位置が定まる。

30

【 0 0 7 0 】

(4) 二次元磁場計算部 8 2 は、前記 (3) で決めたコンダクタ位置で二次元磁場計算を行う。これにより、磁石断面の B_z 分布が求まる。

【 0 0 7 1 】

(5) 前記 (4) で求めた B_z 分布に中心軌道長 L (ビーム路長) を乗じた分布が、予想される補正後の $B_z L$ 積分布となるため、 $B_z L$ 積分布計算部 8 3 は、この補正後の $B_z L$ 積分布を求める。この分布から、 $B_z L$ 積均一度分布変換部 8 4 は、更に予想される $B_z L$ 積均一度分布に変換する。

【 0 0 7 2 】

(6) ここで、前記 (5) で求めた予想される補正後の $B_z L$ 積均一度分布と、前記 (1) で得た補正前の $B_z L$ 積均一度分布の和がゼロになれば良い。従って、分布ズレ指標定義部 8 5 は、両分布がどれだけずれているかの指標として、次の [数 4] を定義する。

40

【 0 0 7 3 】

[数 4]

$$\chi^2 = \sum_{\Delta X, \Delta Z} \left[\left(\frac{\Delta B_z L}{B_z L} \right)_{org} + \left(\frac{\Delta B_z L}{B_z L} \right)_{expected} \right]^2$$

【 0 0 7 4 】

ここで、 $(B_z L / B_z L)_{org}$ は、前記 (1) で求めた $B_z L$ 積を示す。 $(B_z$

50

$L / B_z L$)_{expected}は、前記(5)で求めた $B_z L$ 積を示す。上記 2 を均一にしたい X 及び Z の範囲に対して和を取る。

【0075】

(7)多次元最小化アルゴリズム部86は、前記(6)の 2 を最小化するようなパラメータ $_1$ 、 $_2$ 、 $_3$ 、 \dots 、 $_n$ を、多次元最小化のアルゴリズムを用いて決定する。多次元最小化のアルゴリズムとして、この実施例では、例えば滑降シンプレックス(downhill simplex)法を用いる。なお、多次元最小化のアルゴリズムは、これに限らず、最小二乗法等、導関数なしに最適化できる適宜のアルゴリズムを使用できる。

【0076】

[C]確認計算(均一度が向上しているか三次元磁場計算により確認)

(8)前記(7)で決定したパラメータ $_1$ 、 $_2$ 、 $_3$ 、 \dots 、 $_n$ から、補正対象である最外層コイルのコイル断面形状(第2層コンダクタ63b(22)の配置)が決定される。従って、コイル断面形状出力部87は、このコイル断面形状を出力する。

【0077】

中央処理部74aは、出力されたコイル断面形状を三次元磁場計算部74dにインプットし、三次元磁場計算部74dによる三次元磁場計算を実行させる。三次元磁場計算部74dは、インプットされたコイル断面形状に基づき、三次元磁場計算コード上で磁石をモデル化し、三次元磁場計算を実施する。そして、三次元磁場計算部74dは、 $B_z L$ 積均一度が向上したかを確認する。

【0078】

[D]均一度向上のための繰り返し計算(繰り返し)

(9)中央処理部74aは、前記[8]の結果、更なる補正が必要な場合は、前記(1)で最初に得た補正前の $B_z L$ 積均一度分布と、前記(8)の計算で求めた補正後の $B_z L$ 積均一度分布の和を取り、その分布を均一にするよう、(3)~(7)の計算、すなわちコンダクタ初期位置設定部81から多次元最小化アルゴリズム部86までの処理を繰り返す。これにより、更に均一な分布を得ることが可能となる。

【0079】

以上の計算をイタレーティブに繰り返すことで、図5(A)に示したように最外層コイル(第2層二極コイル51b(22))が磁場を補正する均一な $B_z L$ 積分布のコイル51および偏向電磁石20を得ることができる。この偏向電磁石20の $B_z L$ 積均一度分布は、図5(B)の $B_z L$ 積均一度分布図に示すように、高い均一度を得ることができる。

【0080】

この図5(B)は、上記計算の実施例として、補正後のコイル51をモデル化し、三次元磁場計算を行った結果である。端部で若干の不均一性は見られるものの、 10^{-3} オーダーの不均一が存在しておらず、補正前に比べて格段に均一度が高まっている。そして、前記(9)に記載したように、再度、補正を行えば端部の不均一性も補正することができる。

【0081】

このようにして、三次元磁場計算を最初(前記[A])と最後(前記[C])に用いながら、計算回数が多くなる最小値を求める最小化計算(前記[B])で三次元磁場計算を用いずに二次元磁場計算を用いることで、計算速度の向上と計算結果の精度向上という相反する課題を両立して解決している。

【0082】

詳述すると、三次元磁場計算は、計算時間がかかるために、最小化計算に直接利用すると膨大な計算時間を必要とする。しかし、計算回数の多い最小化計算部分を二次元磁場計算とすることで、計算時間を大幅に削減でき、最適解を素早く求めることができる。

【0083】

そして、最初と最後は三次元磁場計算を用いることで、偏向していることによる磁場不

10

20

30

40

50

均一度やコイルエンドによる磁場不均一度を考慮した磁場計算を行うことができる。

【 0 0 8 4 】

特に、本実施例の方法によれば、コイルエンドによる $B_z L$ 積の不均一を均一にしようとして、磁石中心の比較的磁場が均一な部分をかえて不均一にしてしまうというのを防止できる。従って、本実施例の方法により、所望領域となる磁場空間 5 6 (図 2 (A) 参照) の全領域 (もしくは一部の領域) にわたって磁場均一度の高いコイル 5 1 および偏向電磁石 2 0 を作成することができる。

【 0 0 8 5 】

またこれにより、加速器 4 の性能向上や小型化等に資することができ、加速器 4 の要求仕様に合った大きさ、偏向度、仕様電力等の偏向電磁石 2 0 を容易かつ短時間に設計することができる。

10

【 0 0 8 6 】

また、このように計算して補正することで、偏向電磁石 2 0 が大口径超伝導電磁石である場合に生じる磁場上下非対称性を補正することもできる。

【 0 0 8 7 】

また、最外層コイル等の一部のコイルを用いて補正することができるため、仮に実際に作成した後に良い結果が得られなくても (例えば搬送する荷電粒子のビームが拡散または収束する、あるいはずれるなど)、補正に用いている一部のコイルを交換して再調整することができる。特に外層側のコイル、中でも最外層コイルを用いて補正している場合は、補正している外層側 (若しくは最外層) のコイルを交換すればよいため、その内側のコイルを操作する必要がなく、安価かつ勘弁に設計変更と改良を行うことができる。

20

【 0 0 8 8 】

なお、上述した最適化計算では $B_z L$ 積のみの均一化に着目したが、その他の条件を付加することもできる。例えば、 $B_z L$ 積を均一にすると同時に、 $B_x L$ 積 (磁場の X 軸成分の $B L$ 積) についても条件を加えることもできる。

この場合、前記 (6) で定義した $\int B^2$ の式 (数 4) に、最小化したい条件を付加すればよい。

【 0 0 8 9 】

また、上述した計算例では、 $B_z L$ 積分布の均一化を行ったが、磁石断面の B_z を均一にすることもできる。

30

【 0 0 9 0 】

また、その他の応用例として、四極磁場、六極磁場、またそれ以上の偶数極である多極磁場、あるいは二極磁場と四極磁場の組み合わせ等の偶数極の組み合わせ磁場も、同様な最適化計算を実施できる。

【 0 0 9 1 】

例えば四極磁場を最適化したい場合、次の [数 5] および [数 6] に示す理想的な四極磁場からのずれ量の二乗和を、前記 (6) で定義した $\int B^2$ とすれば良い。

【 0 0 9 2 】

【 数 5 】

$$B_x L = K_z L$$

40

(※ K は磁場勾配を示す。)

【 数 6 】

$$B_z L = K_x L$$

(※ K は磁場勾配を示す。)

【 0 0 9 3 】

また、偏向電磁石 2 0 は、シンクロトロンや F F A G 等の加速器や、加速器に接続され

50

る回転ガントリ等、適宜のビーム輸送系に利用することができる。

【実施例 2】

【0094】

実施例 2 として、ランダムサーチ手法によって B_z L 積均一度の高いコイル配置を求める方法を説明する。この方法は、図 4 (C) に示した構成を有する二次元磁場計算最小化部 74e によって実行する。

【0095】

この実施例 2 では、二極コイルはダブルパンケーキ構造としているが、22 層のうち最後の 2 層 (外側の 2 層) についてはシングルパンケーキ構造としている。また、ダブルパンケーキコイル構造とすることで生じる磁場の上下非対称性の補正のため、後半の一部の 10
コイル層 (第 19 層、第 20 層、第 22 層) のターン数を調整している。また、コイル 51 を四極コイルとした場合、四極コイルは 2 層のみとして、シングルパンケーキ構造としている。

【0096】

この実施例の三次元計算において、コイルエンド部の最小曲げ R は $R = 10 \text{ mm}$ (四極)、 $R = 16 \text{ mm}$ (二極) とし、標準部は何れも $R = 40 \text{ mm}$ としている。具体的には、次のとおりである。

二極: $R = 16, 18, 20, 22, 24, \dots, 38, 40, 40, 40, \dots$

四極: $R = 10, 12, 14, 16, 18, \dots, 38, 40, 40, 40, \dots$

【0097】

まず、二極コイルについて説明する。

図 6 (A) ~ 図 6 (C) は、補正前の二極コイル 51c を示している。図 6 (A) は、二極コイル 51c の断面図であり、二極コイル 51c のコンダクタ位置を示している。図 6 (B) は、二極コイル 51c の電流 $I = 210 \text{ A}$ での B_z L 均一度分布を示している。図 6 (C) は、二極コイル 51c の電流 $I = 210 \text{ A}$ での B_x L 均一度分布を示している。
20

【0098】

この補正前の二極コイル 51a には、次の特徴がある。

(1) 励磁電流 $I = 231 \text{ A}$ で定格中心磁場 $B_z = 2.3704 \text{ T}$ を得る。

(2) 磁場均一度は 2×10^{-3} 程度であり、求める仕様を満足していない。
30

(3) 磁場均一度はコイル電流 $I = 210 \text{ A}$ まで変化しないが、それ以上の励磁電流で飽和の影響から均一度が僅かに ($\sim 1.3 \times 10^{-4}$ 程度) 変化する。

(4) ヨーク内半径を 230 mm と大きくしたことから、磁場均一度の変化量は抑えられている。

【0099】

コイル電流 $I = 210 \text{ A}$ で磁場均一度が余り変化しないことから、 $I = 210 \text{ A}$ 時を基本に補正計算を行うこととする。

【0100】

図 6 (D) ~ 図 6 (F) は、参考用の多極展開手法による補正後の二極コイル 51d を示している。この多極展開手法は、実施例 1 で参考用に説明したものと同一手法である。
40
図 6 (D) は、二極コイル 51d の断面図であり、二極コイル 51d と補正された最外層の第 22 層二極コイル 51d (22) の配置を示している。図 6 (E) は、二極コイル 51d の電流 $I = 231 \text{ A}$ での B_z L 均一度分布を示している。図 6 (F) は、二極コイル 51d の電流 $I = 231 \text{ A}$ での B_x L 均一度分布を示している。

【0101】

多極展開補正した最外層 (22 層目) の二極コイル 51b (22) のコンダクタ位置分布は、主に六極成分を打ち消すため、左右非対称なコイル形状となっていることが分かる。
。

【0102】

この補正した二極コイル 51d を用いて、三次元磁場計算を行った。励磁電流 $I = 23$
50

1 A , 2 2 0 A , 2 1 0 A , 2 0 0 A , 1 9 0 A , 1 8 0 A , 1 6 0 A の 7 通りについて計算を行ったところ、有効磁場領域の端部で磁場均一度が低下しており、求める仕様を満たすことができていなかった。I = 2 3 1 A の計算結果を図 6 (E) および図 6 (F) に示し、他の励磁電流の計算結果については図示省略する。

なお、この有効磁場領域の端部で見られる磁場の不均一性は、多極展開による補正を繰り返しても改善しないと思われる。

【 0 1 0 3 】

< ランダムサーチ手法により補正した二極コイル >

そこで、 $B_z L$ 積の二次元分布に見られる不均一性を打ち消すよう、一部のコイル（この実施例では最外層コイル）のコンダクタ位置の最適化を行う。補正対象の磁場分布は、コイル電流 $I = 2 1 0 A$ 時のデータを用いている。この実施例 2 では、乱数を用いたランダムサーチ手法により補正する最適化手法について説明する。この手法では、最初の三次元磁場計算で見られる磁場不均一性の二次元分布 $B(x, y) L / B(x, y) L$ を補正する。なお、「y」は垂直成分を示し、「z」と同義である。これ以降の計算式でも「y」は「z」と同義である。

【 0 1 0 4 】

[A] 三次元磁場計算（事前計算）

実施例 1 と同様に、三次元磁場計算プログラム 7 5 b（図 4 (A) 参照）は、 $B_z L$ 積均一度の分布（ $B_z L / B_z L$ ）を求める。

【 0 1 0 5 】

[B] 二次元磁場計算による最小化計算（最適化の実行）

(I) 初期二次元磁場分布計算部 9 1（図 4 (C) 参照）は、全コンダクタの二次元磁場計算を行い、このコンダクタが発生する二次元平面上の磁場分布を求め、これを初期磁場分布 $B_0(x, y)$ とする。

【 0 1 0 6 】

(II) 着目コンダクタ位置変化部 9 2 は、1つのコンダクタ位置に着目する（コンダクタ $ID = k$ とする）。着目コンダクタ位置変化部 9 2 は、コンダクタの半径を変えずに、コンダクタの円周方向の位置（同径方向の位置）を変化させる。すなわち、着目コンダクタ位置変化部 9 2 は、初期角度を θ_0 とすると、 $\theta_0 + \Delta\theta$ の位置にコンダクタを動かす。この $\Delta\theta$ を決めるとき、着目コンダクタ位置変化部 9 2 は、隣接する左右のコンダクタを飛び越さない範囲で、乱数で適当に決める。

【 0 1 0 7 】

(III) 変化後二次元磁場分布計算部 9 3 は、前記 (II) のように 1 つのコンダクタ位置を変化させた状態で、再度、全コンダクタの二次元磁場計算を行い、二次元磁場分布 $B_k(x, y)$ を求める。

【 0 1 0 8 】

(IV) 変化率分布計算部 9 4 は、(I) で求めた初期磁場分布と (III) で求めた新しい磁場分布の変化率分布 [数 7] を二次元平面上で求める。

【 0 1 0 9 】

【 数 7 】

$$\left(\frac{\Delta B_k(x, y)}{B_k(x, y)} \right) = \frac{B_k(x, y) - B_0(x, y)}{B_0(x, y)}$$

【 0 1 1 0 】

(V) 改善量計算部 9 5 は、様々な x 及び y 位置において、(IV) で求めた [数 8] と、均一にしたい元々の不均一分布 $B L / B L$ の二乗和を取る。具体的には、次の [数 9] を計算する。

【 0 1 1 1 】

【 数 8 】

$$\left(\frac{\Delta B_k(x, y)}{B_k(x, y)} \right) \cong \left(\frac{\Delta B_k(x, y) L}{B_k(x, y) L} \right)$$

【 0 1 1 2 】

【 数 9 】

$$\chi^2 = \sum_{x,y} \left\{ \left(\frac{\Delta B(x,y)L}{B(x,y)L} \right) + \left(\frac{\Delta B_k(x,y)L}{B_k(x,y)L} \right) \right\}^2$$

【 0 1 1 3 】

(VI) 着目コンダクタ再移動計算部 9 6 は、コンダクタを動かす前後で χ^2 を求め、動かした後に χ^2 が小さくなっている場合には、このコンダクタを新しい位置に移動させる。

【 0 1 1 4 】

(VII) 着目コンダクタ計算繰返し部 9 7 は、 χ^2 が改善するまで (II) ~ (IV) を適当な回数 (例えば 10 回など) 繰り返す。結局、改善しない場合は、もとの位置のままとする。

【 0 1 1 5 】

(VIII) 着目コンダクタ変更繰返し部 9 8、次のコンダクタ (コンダクタ ID = k + 1) について、(II) ~ (VII) の計算を繰り返す。

【 0 1 1 6 】

上記計算を何度も繰り返し、 χ^2 が収束するまで計算を継続する。そして、収束後、コイル断面形状出力部 9 9 は、新しいコンダクタ配置となるコイル断面形状を出力する。

【 0 1 1 7 】

[C] 確認計算 (均一度が向上しているか三次元磁場計算により確認)

中央処理部 7 4 a は、出力されたコイル断面形状を三次元磁場計算部 7 4 d にインプットし、三次元磁場計算部 7 4 d による 2 度目の三次元磁場計算を行い、磁場均一度を確認する。

[D] 均一度向上のための繰返し計算 (繰返し)

2 度目の計算で未だ不均一性が残っている場合、中央処理部 7 4 a は、再度、(I) ~ (VIII) の計算を行う。これにより、更に均一な磁場分布を得ることができる。

【 0 1 1 8 】

このようにして求めた二極コイル 5 1 e について、図 7 とともに説明する。図 7 (A) は、ランダムサーチ補正による二極コイル 5 1 e のコイル断面形状を示す。図示するように、最外層コイルが他の層のコイルと異なる位置 (角度) に配置されていることがわかる。この二極コイル 5 1 e のコイル断面形状を用いて、 $I = 231.2 \text{ A}$, 220 A , 210 A , 200 A , 190 A , 180 A , 160 A の 7 通りに対して、それぞれ三次元磁場計算を行ったところ、いずれの計算でも磁場均一度が改善し、有効磁場範囲 ($\pm 100 \text{ mm}$) でほぼ仕様 ($\pm 1 \times 10^{-4}$) を満足する結果となった。

一例として、 $I = 231.2 \text{ A}$ の B_z L 均一度分布を図 7 (B) に示し、 $I = 231.2 \text{ A}$ の B_x L 分布を図 7 (C) に示す。

計算の結果、コイル電流 $I = 231.2 \text{ A}$ 時の中心磁場は、 $B_z = 2.3707 \text{ T}$ であった。

【 0 1 1 9 】

図 7 (D) は、ランダムサーチ補正による二極コイル 5 1 e を用いた偏向電磁石 2 0 について、「Opera 3 D」を用いて三次元磁場計算を行った結果を示す。この結果は、コイル電流 $I = 231.2 \text{ A}$ 時のヨーク磁場の分布を示しており、中心磁場は $B_z = 2.3707 \text{ T}$ である。

【 0 1 2 0 】

各コイル電流に対する磁場均一度分布から、磁場分布はコイル電流によって殆ど変化しないことがわかる。これはヨーク内半径を $R230$ にした効果と思われる。

【 0 1 2 1 】

図 7 (E) は、コイル電流とビーム中心軌道の B_z L 積の関係を表すグラフであり、図 7 (F) は、コイル電流とビーム中心軌道の有効磁場長の関係を表すグラフである。

10

20

30

40

50

有効磁場長は、デザイン値 $L_{\text{design}} = 1.09956 \text{ m}$ より $0.3 \sim 0.6 \text{ mm}$ 程短い結果となった。

【0122】

<補正前の四極コイル>

ヨーク内半径の変更に伴い、四極コイルについても再計算を行う必要が生じたため、四極コイルについてもランダムサーチ補正による最適化を行う。

【0123】

図8(A)は、補正前の四極コイル51fのコイル断面形状を示す断面図である。この四極コイル51fは、全2層により構成されている。

コイル長は、二極にあわせ、 22.5 度のヨーク端部から四極コイルエンド最端部のコネクタ中心までの距離を $L_{\text{END}} = 116 \text{ mm}$ としている。

【0124】

四極コイル51fのみモデル化し、三次元磁場計算を行った。

得られた磁場分布を図8(B1)から図8(F)に示す。

図8(B1)は $B_z L$ 積を示すグラフであり、図8(B2)は $B_x L$ 積を示すグラフであり、図8(B3)は $G_z L$ 積を示すグラフであり、図8(B4)は $G_x L$ 積を示すグラフであり、図8(B5)は $G_z L$ 積均一度を示すグラフであり、図8(B6)は $G_x L$ 積均一度を示すグラフである。

図8(C)は、 $G_x L$ 分布を示すグラフであり、図8(D)は、 $G_z L$ 分布を示すグラフであり、図8(E)は、 $G_x L / G_x L$ 分布を示すグラフであり、図8(F)は、 $G_z L / G_z L$ 分布を示すグラフである。

【0125】

コイル電流 $I = 200 \text{ A}$ とした際、ビーム中心軌道の GL 積は $GL = 1.5112 \text{ T}$ であった。有効磁場長は $L_{\text{eff}} = 1.15986 \text{ m}$ と計算され、デザイン値 ($L_{\text{design}} = 1.09956 \text{ m}$) より約 60.3 mm 長い。

計算結果から、磁場分布には主に六極成分が見られ、 GL 積均一度としては1%程度に至るため、補正の必要がある。

【0126】

<多極展開手法による四極コイル(参考)>

図9は、参考用の多極展開手法による補正後の四極コイル51gを示している。この多極展開手法による補正(多極展開補正)は、実施例1で参考用に説明したものと同様の補正である。補正を行わない場合に見られた主に六極成分からなる多極成分(六極以上の多極成分)を、2層目(最外層)のコイルで補正している。

【0127】

図9(A)は、参考用の多極展開補正後の四極コイル51gのコイル断面形状を示す断面図である。この四極コイル51gは、全2層により構成されている。

この四極コイル51gのみモデル化し、三次元磁場計算を行い、得られた磁場分布を図9(B1)から図9(F)に示す。

【0128】

図9(B1)は $B_z L$ 積を示すグラフであり、図9(B2)は $B_x L$ 積を示すグラフであり、図9(B3)は $G_z L$ 積を示すグラフであり、図9(B4)は $G_x L$ 積を示すグラフであり、図9(B5)は $G_z L$ 積均一度を示すグラフであり、図9(B6)は $G_x L$ 積均一度を示すグラフである。

図9(C)は、 $G_x L$ 分布を示すグラフであり、図9(D)は、 $G_z L$ 分布を示すグラフであり、図9(E)は、 $G_x L / G_x L$ 分布を示すグラフであり、図9(F)は、 $G_z L / G_z L$ 分布を示すグラフである。

【0129】

この参考用の補正により GL 積の均一度は1桁ほど改善したが、有効磁場領域端部では依然 10^{-3} 台前半の不均一性が見られ、要求する仕様を満たしていない。一方、磁場勾配は補正前と変わらず、 $GL = 1.5117 \text{ T}$ であった。有効磁場長も $L_{\text{eff}} = 1.15$

10

20

30

40

50

987mと大きな変化はない。

【0130】

<ランダムサーチ手法により補正した四極コイル>

図10は、ランダムサーチ手法による補正後の四極コイル51hを示している。このランダムサーチ補正は、二極コイルの例で上述したものと同様の補正であり、GL積の二次元分布上の全領域で均一になるように最外層コイルで補正を行う。

【0131】

図10(A)は、ランダムサーチ手法による多極展開補正後の四極コイル51hのコイル断面形状を示す断面図である。この四極コイル51hは、全2層により構成されている。

この四極コイル51hのみモデル化し、三次元磁場計算を行い、得られた磁場分布を図10(B1)から図10(F)に示す。

【0132】

図10(B1)は B_z L積を示すグラフであり、図10(B2)は B_x L積を示すグラフであり、図10(B3)は G_z L積を示すグラフであり、図10(B4)は G_x L積を示すグラフであり、図10(B5)は G_z L積均一度を示すグラフであり、図10(B6)は G_x L積均一度を示すグラフである。

図10(C)は、 G_x L分布を示すグラフであり、図10(D)は、 G_z L分布を示すグラフであり、図10(E)は、 G_x L/ G_x L分布を示すグラフであり、図10(C)は、 G_z L/ G_z L分布を示すグラフである。

【0133】

補正前と比較して有効磁場領域端部のGL積均一度が改善しており、参考用の多極展開補正と比較しても有効磁場領域端部のGL積均一度が若干改善していることがわかる。

【0134】

磁場勾配は変化せず、 $GL = 1.51107$ Tであった。有効磁場長については $L_{eff} = 1.15992$ mと僅かに変化した。

【0135】

また、コイル電流を $I = 100$ Aとした計算も実施したが、この場合の磁場均一度は、 $I = 200$ A時の磁場均一度と変化がなかった。よって、飽和の影響は考えなくて良い。

【0136】

以上に説明したように、ランダムサーチ手法による実施例2も、上述した実施例1と同様の効果を得ることができる。また、二極コイルだけでなく、四極コイル等も含め、多極コイルで同様の効果を得ることができる。

【0137】

なお、この実施例では、コンダクタ63を1つずつ移動させて計算したが、1つに限らず所定個数ずつ移動させて計算してもよい。

【実施例3】

【0138】

<多極成分加算手法によるコイル>

実施例3として、多極加算補正によって B_z L積均一度の高いコイル配置を求める多極成分加算手法を説明する。この方法は、図4(D)に示した構成を有する二次元磁場計算最小化部74eによって実行する。

【0139】

まず、あらゆる磁場分布は多極成分の和で表現できる。つまり、次の[数10]の電流分布を持つコンダクタ配置で、 A_n を最適化することにより、観測された不均一性を打ち消すことが出来る。

【0140】

【数10】

$$I = \sum_n A_n \cos(n\theta)$$

※ $n=1,2,3,4,\dots$

10

20

30

40

50

【 0 1 4 1 】

具体的な手法は、上述した実施例 2 で示した考えとほぼ等しく A_n を最適化することができる。この手法の主な手順を説明する。

【 0 1 4 2 】

[B] 二次元磁場計算による最小化計算 (最適化の実行)

(i) 組み合わせ決定部 1 0 1 は、 A_n の組み合わせを乱数で適当に決定する。この決定には、モンテカルロ法等を使用してもよい。

(ii) コンダクタ配置決定部 1 0 2 は、前記 (i) で決めた A_n を用いて、前記 [数 1 0] の電流分布を再現するよう、コンダクタ配置を決める。

(iii) 二次元磁場計算部 1 0 3 は、前記 (ii) で得たコンダクタ配置で二次元磁場計算を行い、磁場分布を求める。

(iv) 繰り返し部 1 0 4 は、前記 (iii) で求めた磁場分布が、丁度、打ち消したい磁場不均一性と符号が逆で大きさが一致するように、(i) ~ (iii) を繰り返す。

【 0 1 4 3 】

以上の計算方法を用いることで、実施例 1 , 2 と同様の効果を得ることができる。

なお、上述した多極成分加算手法では乱数を用いているが、 A_n の最適化は、これに限らず滑降シンプレックス法等の多次元最小化法を用いても良い。この場合も同様の効果を得ることができる。

【 0 1 4 4 】

また、この多極成分加算手法についても、[A] 最初に三次元磁場計算によって $B_z L$ 積均一度の分布を求めておき、[B] 多極成分加算手法によって補正後のコンダクタ位置を決定し、[C] 最後に三次元磁場計算によって $B_z L$ 積均一度が向上したか確認し、[D] 確認結果が求める均一度に達していなければ、前記 [B] を繰り返すことで、さらに均一度の高いコンダクタ位置を求めるようにしてもよい。

【 0 1 4 5 】

この発明は、上述の実施形態の構成のみに限定されるものではなく、多くの実施の形態を得ることができる。

【 産業上の利用可能性 】

【 0 1 4 6 】

この発明は、超電導偏向電磁石とそのコイルに利用することができ、また、この超電導偏向電磁石を用いたシンクロトロンおよび F F T A 等の加速器、回転ガントリ等、ビーム輸送系の適宜の装置に利用することができる。

【 符号の説明 】

【 0 1 4 7 】

- 4 ... 加速器
- 7 ... 偏向電磁石設計装置
- 2 0 ... 偏向電磁石
- 3 0 ... ビーム路
- 5 1 ... コイル
- 5 1 (k) ... 第 k 層コイル
- 5 1 b (2 2) ... 最外層の二極コイル
- 6 2 ... 偏向円筒面
- 6 3 ... コンダクタ
- 6 3 b (2 2) ... 補正用のコンダクタ
- 7 4 c ... コンダクタ位置パラメータ化部
- 7 4 e ... 二次元磁場計算最小化部
- 7 5 a ... コイル配置最適化プログラム

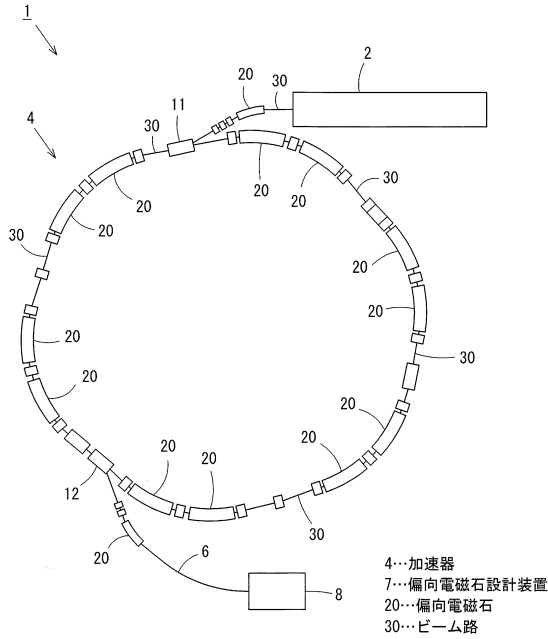
10

20

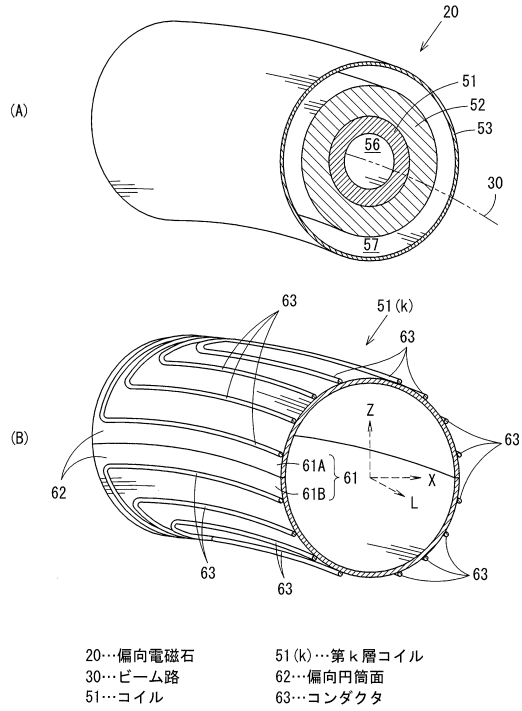
30

40

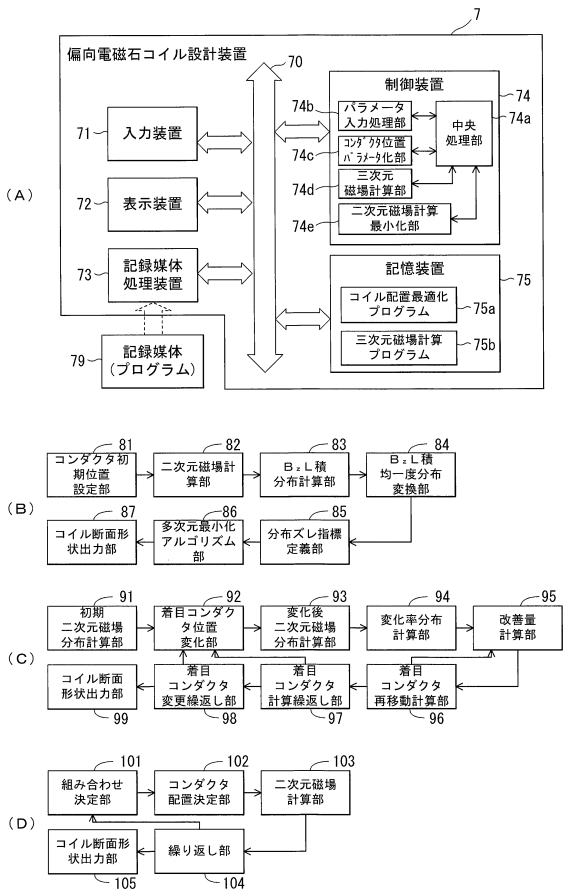
【図1】



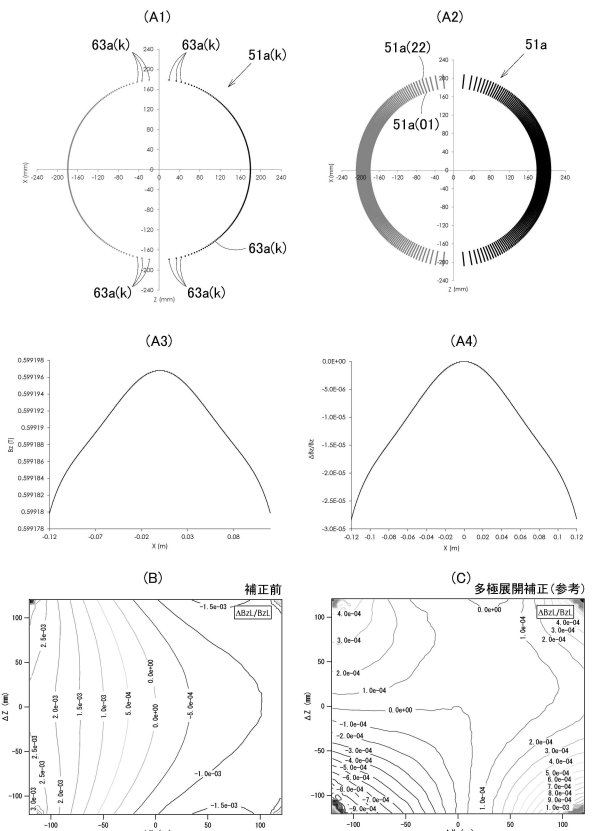
【図2】



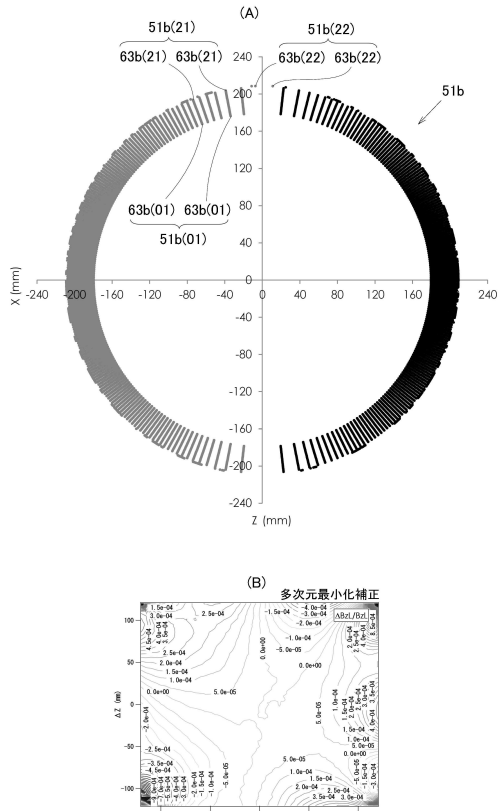
【図4】



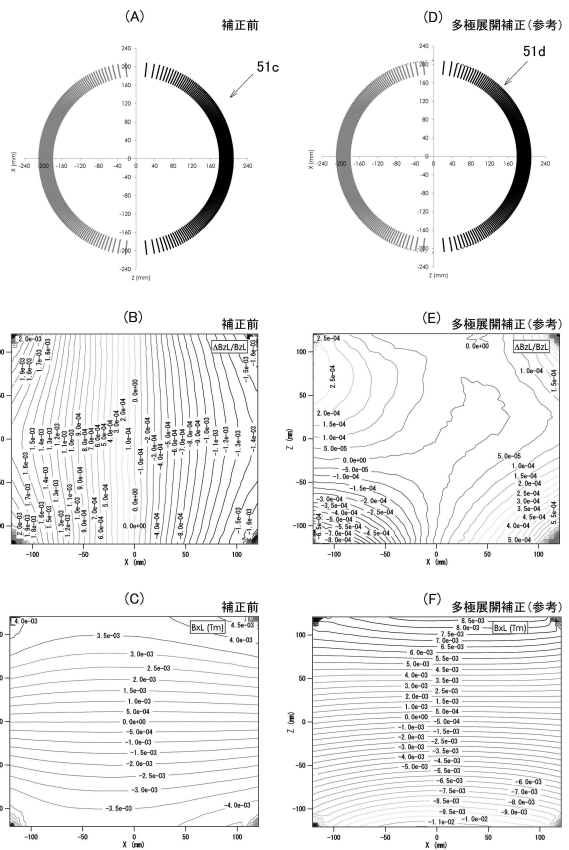
【図3】



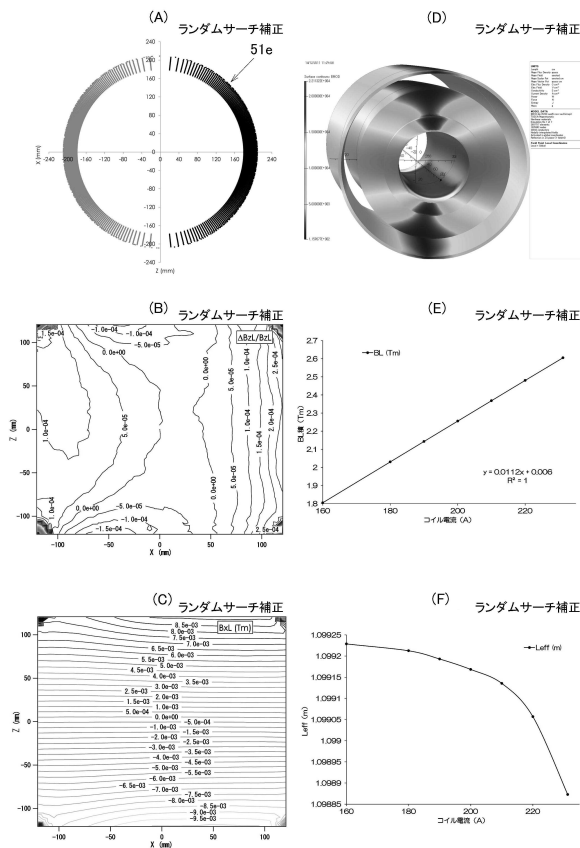
【図5】



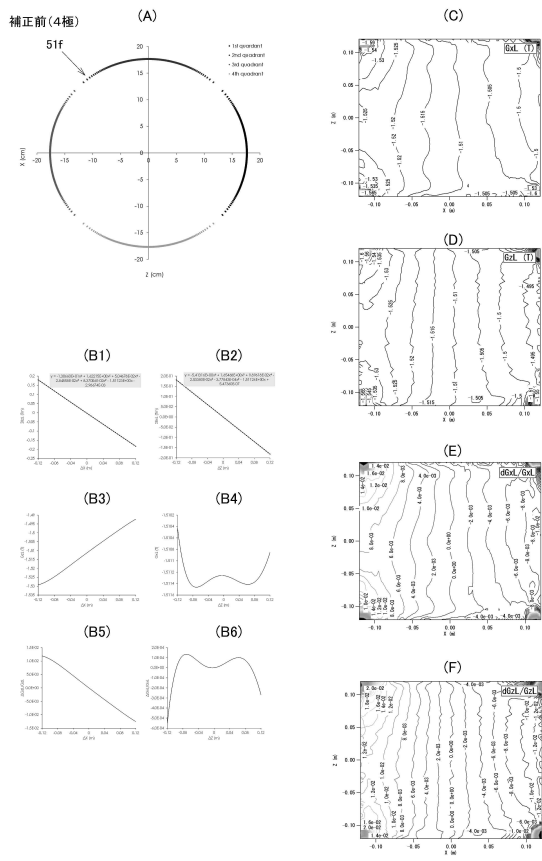
【図6】



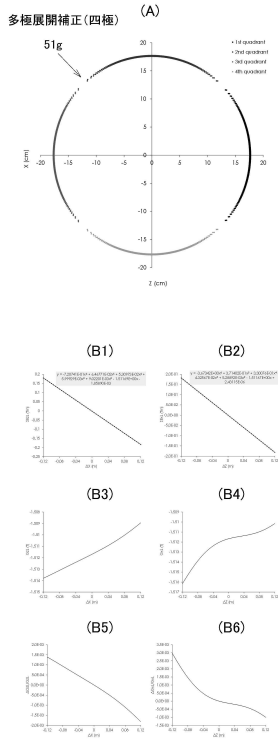
【図7】



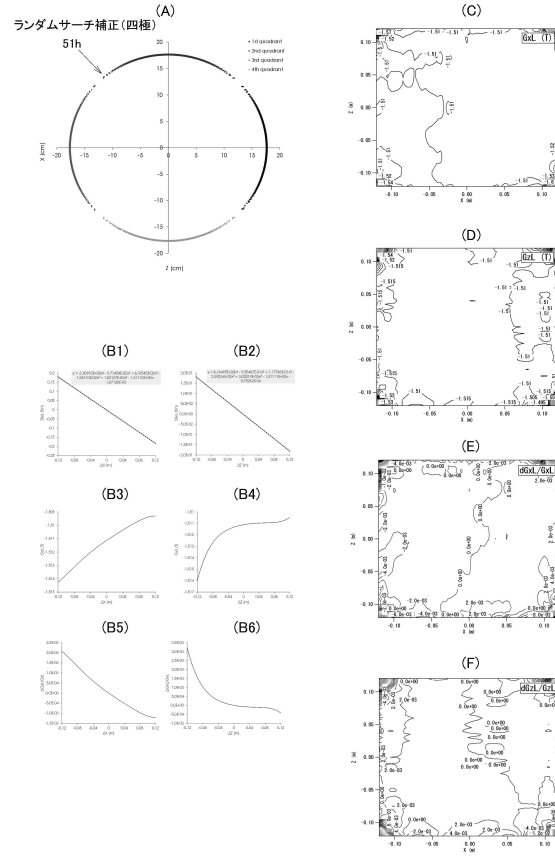
【図8】



【図9】



【図10】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開平04 - 273408 (JP, A)
特開平05 - 082292 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H01F6/00 - 6/06、7/20
H05H3/00 - 15/00