

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5322780号
(P5322780)

(45) 発行日 平成25年10月23日(2013.10.23)

(24) 登録日 平成25年7月26日(2013.7.26)

(51) Int. Cl.	F I		
A 6 1 B 5/055 (2006.01)	A 6 1 B	5/05	3 3 1
G O 1 R 33/3815 (2006.01)	G O 1 N	24/06	5 1 0 C
G O 1 R 33/421 (2006.01)	A 6 1 B	5/05	3 6 2
H O 1 F 5/00 (2006.01)	G O 1 N	24/02	5 4 O A
H O 1 F 6/00 (2006.01)	H O 1 F	5/00	Z A A C
請求項の数 6 (全 15 頁) 最終頁に続く			

(21) 出願番号 特願2009-132102 (P2009-132102)
 (22) 出願日 平成21年6月1日(2009.6.1)
 (65) 公開番号 特開2010-274039 (P2010-274039A)
 (43) 公開日 平成22年12月9日(2010.12.9)
 審査請求日 平成23年12月22日(2011.12.22)

(73) 特許権者 000006013
 三菱電機株式会社
 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号
 (74) 代理人 100073759
 弁理士 大岩 増雄
 (74) 代理人 100093562
 弁理士 児玉 俊英
 (74) 代理人 100088199
 弁理士 竹中 考生
 (74) 代理人 100094916
 弁理士 村上 啓吾
 (72) 発明者 田邊 肇
 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三
 菱電機株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 超電導マグネット装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

撮像空間内に静磁場を発生させるための主コイルと、外部から流入する変動磁場の影響を撮像空間において抑制する外乱磁場補償コイルとで構成され、前記主コイルは少なくとも2つのダイオード回路に分割されており、前記外乱磁場補償コイルは前記各ダイオード回路との相互インダクタンスを低減する少なくとも一つのマイナスターンのコイルを有することを特徴とする超電導マグネット装置。

【請求項2】

前記主コイル全体と外乱磁場補償コイルとの磁気的カップリングを低減すると共に、前記主コイル内のそれぞれのダイオード回路と外乱磁場補償コイルとの磁気的カップリングを低減するように前記主コイルと外乱磁場補償コイルとの相互インダクタンスを最適化することを特徴とする請求項1に記載の超電導マグネット装置。

【請求項3】

前記主コイルはプラスターンあるいはマイナスターンからなる複数個のコイルの閉ループ回路からなり、前記マイナスターンの外乱磁場補償コイルを、前記プラスターンの主コイル上に配置したことを特徴とする請求項1に記載の超電導マグネット装置。

【請求項4】

前記主コイルはプラスターンあるいはマイナスターンからなる複数個のコイルの閉ループ回路からなり、前記マイナスターンの外乱磁場補償コイルを前記マイナスターンの主コイル上に配置したことを特徴とする請求項1に記載の超電導マグネット装置。

【請求項 5】

前記外乱磁場補償コイルは、全ての正極性ターンのコイルを直列に巻線あるいは接続し、かつ全ての逆極性ターンのコイルを直接に巻線あるいは接続した上で、お互いを直列接続したことを特徴とする請求項 1 ~ 4 のいずれかに記載の超電導マグネット装置。

【請求項 6】

前記外乱磁場補償コイルは、逆極性ターンのコイル巻数を増やすかわりに、配置スペースの少ないコイルの巻数を減らしたことを特徴とする請求項 1 ~ 5 のいずれかに記載の超電導マグネット装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

10

【0001】

この発明は、超電導コイルによって静磁場を発生する静磁場源（以下、主コイルという）内で生じる磁気共鳴現象を利用した医療用断層撮像装置（以下、MRI装置という）において、MRIの撮像に悪影響を及ぼす外乱磁場を補償するためのコイル（以下、外乱磁場補償コイルという）を有する超電導マグネット装置に関するものである。

【背景技術】

【0002】

MRI装置に必要な静磁場を発生するものとして、一般的に永久磁石、常伝導マグネット、超電導マグネットなどがあげられるが、静磁場の大きさや時間的安定性などの観点から超電導マグネットが主流となっているのが現状である。超電導マグネットを利用した静磁場源においては、発生する磁場が強力であるため、外部に磁場を漏洩するのを防ぐ方法として主として2種類の手法が採用されており、これによってマグネットの種類が大きく2分される。一つは、マグネット本体を鉄体で覆う方法（パッシブシールド方式）で、もう一つは鉄体の代わりに逆極性の超電導コイルを配置する方法（アクティブシールド方式）である。このうち、アクティブシールド方式のマグネットの方が、本体の軽量性、コンパクト性などから主流となっている。

20

【0003】

一方、MRI装置の設置場所・環境は様々で、道路に隣接している場合もあれば、電車や送電用の電力ケーブルなどが近接している場合もある。その場合、大きな鉄体の接近や、交流磁場の影響などで、MRIの撮像中に外部から撮像空間内に無視できない大きさの変動磁場（以下、外乱磁場という）が流入してくることになる。前記パッシブシールド方式の超電導マグネットであれば、鉄体に自己シールド効果があるため問題にならない場合が多いが、アクティブシールド方式の超電導マグネットの場合、そのままでは外乱磁場のほとんどが撮像空間に流入してしまい、MRI撮像に大きな悪影響を及ぼす可能性がある。

30

【0004】

そこで、前記外乱磁場の影響を抑制する（補償する）ために、主コイルとは別に、外乱磁場補償専用の超電導コイル（外乱磁場補償コイル）を配置することが行われている。これは、外乱磁場が流入した場合に外乱磁場補償コイル内に電流が誘起されて補償磁場を発生するというものであり、上記外乱磁場補償コイルによる補償と主コイルによる補償（比較的微小ではあるが）でキャンセルすることで、撮像空間内の磁場変動量は、流入してきた外乱磁場量の数%以下に抑えることができる。

40

【0005】

前記主コイルは超電導コイルであり、通常は大きな電流が永久電流モードで流れているが、何らかの理由により超電導状態が破壊（以下、クエンチという）されると、一気に大きなエネルギーを放出することになる。そのエネルギーの大半は熱として放出されるが、主コイルと外乱磁場補償コイルが磁氣的にカップリングしている場合には、電磁誘導という形で、外乱磁場補償コイルに対してエネルギーを放出することになる。

【0006】

このとき、外乱磁場補償コイルには、磁氣的カップリングの程度にもよるが比較的大き

50

な電流が誘起されることになり、そのときにはまだ主コイルによる磁場が十分減衰していない場合が殆どであるため、外乱磁場補償コイル自体に非常に大きな電磁力がかかる。なぜならば、外乱磁場補償コイルはコストや設置スペース等の問題から主コイルに比べてターン数が少ないため、場合によっては主コイルの電流（例えば400～700A）以上の電流が外乱磁場補償コイルに誘起されることがあるからである。それにも拘わらず外乱磁場補償コイルはターン数が少なくボリュームが小さいために、十分な強度を与えることが難しい。

【0007】

そのため、外乱磁場補償コイルになるべく大きな電流を誘起させないように、例えば数10A以上は流れないようにするなどの対策が必要である。しかしながら外乱磁場補償コイルは通常、超電導コイルで構成されているため、かなり性能の低い超電導線材を使用したとしても、数10Aは簡単に流れてしまう。なぜ超電導コイルで構成されているかというところ、外乱磁場には、鉄体が接近してそのまま静止するなどの状況もあり得るため、銅線などで構成すると誘起された電流がすぐに減衰してしまい、長時間補償することができなくなることもあるからである。外乱磁場補償コイルはこのような減衰時定数にも配慮して構成されている。

【0008】

従って、なるべく設計段階において、主コイルと外乱磁場補償コイルの磁気的カップリングをできる限り小さくすることが肝要となる。なお、MRI用超電導マグネットは高い静磁場の均一性が要求されることから、主コイルは複数のコイルが直列接続されて構成されることが多い。また、それに伴って、外乱磁場補償コイルもほぼ同数のコイルからなり、これも直列接続されることが一般的である。なお、上記主コイルと外乱磁場補償コイルはお互いに独立した閉回路をなしている。

主コイルと外乱磁場補償コイルの磁気的カップリングを小さくするためには、お互いの距離を遠ざけることも一つの手段ではあるが、スペースや構造部材の問題から基本的には、電気的には互いに絶縁された状態で、それぞれの主コイル上に重なるように配置し、主コイルと外乱磁場補償コイルの巻ターン数（巻ターン数比）を適切に選ぶことで、磁気的カップリングを小さくすることが行われている（特許文献1を参照）。

【0009】

表1にその一例を示す。なお、本例では、主コイルおよび外乱磁場補償コイルはそれぞれ6対の数を有し、全ての外乱磁場補償コイルが主コイルの上に重なるように配置されている。（詳細な位置寸法は記述していない）

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	
主コイル	247	546	969	-420	2700	-1376	（マイナスは逆方向の巻ターン 合計840ターン×2
外乱磁場補償コイル	25	80	80	50	90	515	

表1 従来技術における主コイルと外乱磁場補償コイルのそれぞれの巻ターン数例

【0010】

このとき、撮像空間内の磁場変動量は、外乱磁場補償コイルNo.1～No.6の相対的なターン数比から論理計算すると、流入してきた外乱磁場量の約4.2%であり、一般的な目標値である5%以下を満足している。

またこのとき、主コイルと外乱磁場補償コイルの自己インダクタンスおよび相互インダクタンスはそれぞれ、以下の通りである。

主コイルの自己インダクタンス	37.790 H（ヘンリー）
外乱磁場補償コイルの自己インダクタンス	3.095 H（ヘンリー）
両コイルの相互インダクタンス	0.014 H（ヘンリー）

【0011】

主コイルがクエンチした後の各コイル内に流れる電流変化のイメージを図7に示している。上述したように、両コイルの相互インダクタンスが非常に小さいため、例えば定常時に500Aの電流が流れていた主コイルがクエンチして0Aになった場合、熱による消費

10

20

30

40

50

などを考慮しなくても外乱磁場補償コイルには約 2.3 A の電流しか誘起されず、前述のような誘起電流によって生じる電磁力に悩まされることは殆どない。

【 0 0 1 2 】

次に、従来の超電導マグネットの主要構成を図 8 に従って説明する。図中、該超電導マグネット 100 は MRI の撮像空間内に静磁場を発生する主コイル 200 と撮像空間内に流入する外乱磁場の影響を抑制（補償）する外乱磁場補償コイル 310 とからなり、それぞれ超電導コイルからなっている。主コイル 200、外乱磁場補償コイル 310 は、一つの閉ループ回路をなしており、互いに電氣的に独立している。外乱磁場補償コイル 310 は基本的に主コイル 200 のそれぞれのコイル上に配置されている。なお、図における主コイル 200 および外乱磁場補償コイル 310 の各コイル内に記入された、「+」、「-」の符号は、各コイルの巻方向を示している。

10

【 0 0 1 3 】

主コイル 200 はダイオード 221 を用いて比較的エネルギーの小さなコイルグループ 210（コイル 201a、201b、202a、202b、203a、203b、204a、204b）と、比較的エネルギーの大きなコイルグループ 211（コイル 205a、205b、206a、206b）からなる 2 つの回路に分割されており、それにより、小さな体積（熱容量）のコイルで大きなエネルギーを消費する危険性を低減させ、クエンチ時の発生電圧やエネルギー消費（コイルの発熱）に対する保護を行っている。

【 0 0 1 4 】

しかし、どのコイルがクエンチしたとしても、2 つのダイオード回路で少なからず電流差を生じることは否定できない。この電流差は、クエンチを生じたコイル、クエンチバック手法などにより様々であるが、主コイルがクエンチした後の両コイルの電流イメージの一例を図 9 に示している。本例では、表 1 における No. 1 ~ No. 4 をエネルギーの小さいコイルグループ、No. 5、No. 6 を大きいコイルグループとしているが、この場合、図から明らかのようにエネルギーの大きいグループと小さいグループの電流差は最大 300 A 程度にもなる。それにより、外乱磁場補償コイルにも大きな電流が過渡的に誘起され、最大で 200 A 程度に達することがある。

20

【 0 0 1 5 】

すなわち、いかに主コイルと外乱磁場補償コイルの磁氣的カップリング（相互インダクタンス）を小さくしたとしても、主コイルのそれぞれエネルギーの小さいコイルグループおよび大きいコイルグループと外乱磁場補償コイルの磁氣的カップリング（相互インダクタンス）が大きければ、クエンチの際には、一時的に外乱磁場補償コイル内に大きな電流が誘起されることが分かる。本例で、主コイルの各々のコイルグループと外乱磁場補償コイルの相互インダクタンスは以下のとおりである。

30

主コイルの小さいコイルグループと外乱磁場補償コイルとの相互インダクタンス
2.206 H（ヘンリー）

主コイルの大きいコイルグループと外乱磁場補償コイルとの相互インダクタンス
- 2.192 H（ヘンリー）

（合計）主コイルと外乱磁場補償コイルとの相互インダクタンス
0.014 H（ヘンリー）

40

【 0 0 1 6 】

上記の結果から、主コイル各々と外乱磁場補償コイルの相互インダクタンスは、主コイルと外乱磁場補償コイルの相互インダクタンスの約 160 倍もの大きさになっていることが分かる。これによって、外乱磁場補償コイルに最大 200 A 程度の電流が誘起されたことになる。

このとき、外乱磁場補償コイルには大きな電磁力が発生しており、この具体例を表 2 に示す。

(単位:トン)	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
Z方向電磁力	-0.22	0.49	1.83	3.51	0.30	5.10
R方向電磁力	-0.70	-2.17	-3.62	2.68	-20.70	80.18

表2 従来のクエンチ例における外乱磁場補償コイルにかかる最大電磁力

【0017】

表2から、特にNo. 6コイルのR方向電磁力が大きいことが分かる。No. 6コイルは、配置の関係上、外周部にスペースの余裕がないことが多く、R方向電磁力の対策を講じにくい
 ため、最優先課題として、この電磁力を低減することが求められる。また、No. 6の外
 乱磁場補償コイルの巻ターン数は表1より515ターンであるが、やはりスペース上の問
 題から、これを低減することも課題として挙げられる。しかしながら、通常の外乱磁場補
 償コイルの設計においては、主コイルとの磁気的カップリングを小さくしようとすれば、
 どうしてもNo. 6コイルの巻ターン数は比較的大きい値になってしまい、低減することは
 難しい。

10

【0018】

一方、上述の内容から、主コイルのそれぞれエネルギーの小さいコイルグループおよび
 エネルギーの大きいコイルグループと外乱磁場補償コイルの磁気的カップリング（相互イ
 ンダクタンス）を小さくすることが望まれるとはいえ、主コイル（全体）と外乱磁場補償
 コイルの相互インダクタンスも同時に小さくすることが望ましい。なぜなら、外乱磁場補
 償コイルにとっては、主コイルがクエンチした場合に誘起される電流だけでなく、主コ
 イルを励磁あるいは消磁する場合や、超電導マグネット内に設置されている永久電流スイ
 ッチ（PCS）220（図8参照）の超電導部がクエンチする場合に誘起される電流も考慮
 の対象にしておく必要があり、この場合は、主コイル（全体）と外乱磁場補償コイルの相
 互インダクタンスによって誘起電流が決まるためである。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0019】

【特許文献1】特許第3043478号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

30

【0020】

以上説明したように、MRI装置外部から流入する変動磁場を抑制するための外乱磁場
 補償コイルを備えた超伝導マグネット装置において、例えば主コイルがクエンチした場
 合に生じる誘導電流を最小にするために主コイル全体と外乱磁場補償コイルとの相互イ
 ンダクタンスを最小にしたとしても、主コイルが複数の保護ダイオード回路を有している場
 合にはクエンチ時に各ダイオード回路で電流差を生じるため、各ダイオード回路と外乱磁
 場補償コイルとの相互インダクタンスによって大きな誘導電流が生じてしまうという問題点
 があった。

この発明の目的は、上記のような課題を解決し、主コイルがクエンチした場合に、外乱
 磁場補償コイルをできるだけ安全に保護し、不具合を生じにくくすることにある。

40

【課題を解決するための手段】

【0021】

この発明に係る超伝導マグネット装置は、撮像空間内に静磁場を発生させるための主コ
 イルと、外部から流入する変動磁場の影響を撮像空間において抑制する（補償する）外
 乱磁場補償コイルとで構成され、前記主コイルは少なくとも2つのダイオード回路に分割さ
 れており、前記外乱磁場補償コイルは前記主コイルの各ダイオード回路との相互イ
 ンダクタンスが最小となるように少なくとも一つのマイナスターンのコイルを有することを特徴
 とするものである。

【発明の効果】

【0022】

50

この発明によれば、主コイル全体と外乱磁場補償コイルとの磁気的カップリングを低減できるだけでなく、主コイル内のそれぞれのダイオード回路と外乱磁場補償コイルとの磁気的カップリングも低減することができるため、主コイルがクエンチして各ダイオード間で電流差を生じた場合でも、外乱磁場補償コイルに誘起される電流が抑えられ、それに伴って発生する電磁力も抑えられるため、外乱磁場補償コイルへの特に機械的な不具合が生じにくくなる。

また、外乱磁場補償コイルに誘起される電流が下がることで、外乱磁場補償コイル自身がクエンチする可能性も低減できるため、それに伴う熱的、電氣的な処置も軽減できる。

【図面の簡単な説明】

【0023】

【図1】この発明の超電導マグネットを使用したMRI装置の構成を示す概念図である。

【図2】この発明の実施の形態1の超電導マグネットの構成を示す概念回路図である。

【図3】この発明の実施の形態2の超電導マグネットの構成を示す概念回路図である。

【図4】この発明の実施の形態3の超電導マグネットの構成を示す概念回路図である。

【図5】この発明の実施の形態4の超電導マグネットの構成を示す概念回路図である。

【図6】この発明の実施の形態1における主コイルがクエンチした後の各コイルグループの電流イメージ（2ダイオード回路の場合）である。

【図7】従来技術における主コイルがクエンチした後の主コイルの電流イメージ（1回路の場合）である。

【図8】従来超電導マグネットの構成を示す概念回路図である。

【図9】従来主コイルがクエンチした後の各コイルグループの電流イメージ（2ダイオード回路の場合）の一例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0024】

実施の形態1.

以下、図面を参照してこの発明の実施の形態を詳細に説明する。図1は、この発明の超電導マグネットを使用したMRI装置の構成を示す概念図である。超電導マグネット100は真空断熱容器400内の冷却容器500内に収納される。一般に、超電導マグネット100の発生する静磁場内の撮像空間に挿入されている患者（被検者）10の周囲には、傾斜磁場コイル600、RF送信コイル700およびRF受信コイル800が配置されており、これらは制御装置900により制御されている。制御装置900は、例えば、傾斜磁場電源901、RF送信系902、RF受信系903、シーケンサ904、CPU905およびモニタ、キーボードなどのコンソール906などから構成される。

【0025】

図2は、上記のようなMRI装置に使用される超電導マグネット100の構成を示す概念回路図である。該超電導マグネット100は、MRIの撮像空間内に静磁場を発生する主コイル200と撮像空間内に流入する外乱磁場の影響を抑制（補償）する外乱磁場補償コイル300とからなり、それぞれの回路は電氣的に独立している。主コイル200は超電導コイルであり、一つの閉ループをなしている。主コイル200は通常、冷却容器500内で液体ヘリウムなどの冷媒に浸漬されており超電導状態になっており、それによってMRIの撮像空間内に強力かつ安定な静磁場を発生している。主コイル200の超電導ループ内には、超電導スイッチ220（PCS：Persistent Current Switch）が配置されており、図示していないが外部の静磁場電源で主コイル200に磁場を発生させた後、静磁場電源を切り離し、主コイル200内に電流を閉じ込める役割を行う。

【0026】

主コイル200は時に、微小割れによる内部発熱などによって超電導状態から常電導状態へと転移する、いわゆるクエンチ状態となることがある。主コイル200はクエンチによって生じる抵抗によって急激に電圧を発生させ、かつコイル内でのエネルギー消費によって発熱する。これによる主コイル200内の不具合を防ぐためにダイオード221を用いて保護を行っている。ダイオード221はどちらの方向でも作動するように両方向を一

10

20

30

40

50

組として設置されている。なお、図2においては、各回路、各方向のダイオード221は便宜上それぞれ1つずつ配置されているが、必ずしも1つではなく、ダイオードで制御する電圧によって直列に複数個配置してもよい。

【0027】

さらに主コイル200は、ここでは、上記ダイオード221によって比較的エネルギーの小さなコイルグループ210と比較的エネルギーの大きなコイルグループ211との2回路に分割している。それにより、小さな体積(熱容量)のコイルで大きなエネルギーを消費する危険性を低減させている。比較的エネルギーの小さなコイルグループ210は合計8個のコイル201a、201b、202a、202b、203a、203b、204a、204bからなり、比較的エネルギーの大きなコイルグループ211は合計4個のコイル205a、205b、206a、206bからなる。それぞれのコイルのaおよびbは、主コイル200の軸方向に対称に配置され、静磁場出力として対をなしている。

10

【0028】

一方、外乱磁場補償コイル300も超電導コイルであり、一つの閉ループをなしている。外乱磁場補償コイル300も主コイル200と同様、合計12個の超電導コイル301a、301b、302a、302b、303a、303b、304a、304b、305a、305b、306a、306bからなり、基本的に主コイル200のそれぞれのコイル上に配置されている。ただし、構造上、主コイル200上に配置しているだけで、電気的には絶縁されている。ここで外乱磁場補償コイル300を主コイル200上に配置しているのは、超電導マグネット100の構造をできるだけ簡素化するためであり、必ずしも主コイル200上に配置する必要はない。また、図示していないが、外乱磁場補償コイル300にも、主コイル200と同様に超電導スイッチおよび保護用のダイオードを配置する場合がある。

20

【0029】

これまで述べたように、外乱磁場補償コイル300は、超電導マグネット外部からの外乱磁場に応じて自動的に電流が誘起され、撮像空間における影響を補償してくれるものである。一方、撮像空間の磁場均一性の観点から見ると、外乱磁場補償コイル300に電流が誘起されると、それによって発生する誤差磁場で撮像空間の磁場均一性が悪化してしまうおそれがある。通常考えうる外乱磁場の量では、その誘起電流は非常に小さいものであるが、超電導マグネットを長期間使用している間に、誘起電流が集積され、いずれ無視できない悪影響を及ぼすようになる恐れがある。

30

【0030】

外乱磁場補償コイル300は、通常、初期状態では電流は流れておらず、外部から変動磁場が流入した場合にのみ変動磁場を補償するのに見合った電流が誘起される。この電流は、一般的に変動磁場が流入した場合にでも1A以下の微少な電流であるように設計されている。また、外乱磁場補償コイルによる撮像空間への磁場均一性への影響は、設計上考慮されておらず、なおかつ、外乱磁場補償コイルに電流が流れると少なからず磁場均一性を乱す要因となり得るため、初期状態の電流をゼロとしておいた方がよい。そのため、図示していないが、外乱磁場補償コイルのループの何処かに、電流をゼロとするに十分な抵抗を有するヒータを熱的にのみ接触するように設置しておいて、初期状態での電流をゼロとしている。さらに、MRI装置を継続運転していくにつれ外乱磁場補償コイル内に誘起される電流が重畳して増加することがあるため、定期的にヒータに通電して電流をゼロにする方法がとられることがある。

40

【0031】

本来、撮像空間の磁場均一性に影響を与えないように外乱磁場補償コイルを最適化設計できれば特に問題はないものの、実際には高度の最適化設計は現状では極めて困難である。

ところで、従来の外乱磁場補償コイルはすべてプラスターンで構成されていたが、このうち一部のコイルをマイナスターンとすれば、プラスターンとマイナスターンによって、原理上、誤差磁場もキャンセル効果を生じるため、発生する誤差磁場をうまくキャンセル

50

できる可能性がある。

そこで、本実施の形態1の外乱磁場補償コイル300は、マイナスターンの外乱磁場補償コイルを配置することで、主コイルとの磁気的カップリングも低減し、かつ撮像空間に対して悪影響を与えない範囲の誤差磁場しか発生しないように、総合的に最適化しようとするものである。

【0032】

なお、図1における主コイル200および外乱磁場補償コイル300の各コイル内に記入された、「+」、「-」の符号は、各コイルの巻方向を示している。「+」は順方向に巻かれたコイル（プラスターンのコイル）で、電流が流れた場合、撮像空間内に正方向（静磁場と同じ方向）の磁場を発生させる。一方、「-」は逆方向に巻かれたコイル（マイナスターンのコイル）で、撮像空間内に負方向（静磁場と逆の方向）の磁場を発生させる。

10

【0033】

図8の従来の外乱磁場補償コイル310に比べ、本実施の形態1の外乱磁場補償コイル300は、303a、303bをマイナスターンのコイルとし、それぞれプラスターンの主コイル203a、203bの上に配置されている点が相違している。本実施の形態における主コイル200と外乱磁場補償コイル300の巻方向および巻ターン数の例を表3に示す。主コイル200および外乱磁場補償コイル300は前述の通り、それぞれ12個（軸方向に対称なものが6対）のコイルを有しているため、表3では、No.1~No.6の6対に対して表記してある。

20

【0034】

表3において、主コイルのそれぞれNo.1~No.6は、それぞれ201(aおよびb)、202(aおよびb)、203(aおよびb)、204(aおよびb)、205(aおよびb)、206(aおよびb)に対応しており、外乱磁場補償コイルのそれぞれNo.1~No.6は、それぞれ301(aおよびb)、302(aおよびb)、303(aおよびb)、304(aおよびb)、305(aおよびb)、306(aおよびb)に対応している。また、表内の「-」符号は、マイナスターンのコイルである。

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	
主コイル	247	546	969	-420	2700	-1376	(マイナスは逆方向の巻ターン)
外乱磁場補償コイル	26	143	-155	90	104	322	合計840ターン×2

30

表3 本発明の実施の形態1における主コイルと外乱磁場補償コイルのそれぞれの巻ターン数例

【0035】

一方、従来技術においては、表1および図8に示すように外乱磁場補償コイル310はマイナスターンのコイルを有していない。なお、本発明と従来技術の差異を明確に比較するために、表1と表3の主コイルは全く同じものであり、外乱磁場補償コイルは合計の巻ターン数を同じにしてある。

このとき、外部から流入してきた磁場変動に対する撮像空間内の磁場変動量は、外乱磁場補償コイルNo.1~No.6の相対的なターン数比から論理計算すると、約4.45%であり、表1の従来技術例と同様、一般的な目標値である5%以下を満足している。また、主コイル200と外乱磁場補償コイル300の自己インダクタンスおよび相互インダクタンスはそれぞれ以下の通りである。

40

【0036】

- 主コイルの自己インダクタンス 37.790 H (ヘンリー)
- 外乱磁場補償コイルの自己インダクタンス 1.371 H (ヘンリー)
- 両コイルの相互インダクタンス -0.015 H (ヘンリー)

上記の通り、従来技術例と同様、両コイルの相互インダクタンスは非常に小さく、主

50

コイル 200 がクエンチして、定常時の 500 A が 0 A になった場合、外乱磁場補償コイル 300 には約 5.5 A の電流しか誘起されない計算となる。ただし、これは主コイル 200 の電流が一樣に減少した場合、かつ熱などによるエネルギー消費を考慮しない場合である。

【0037】

次に上記実施の形態 1 の超伝導マグネット装置の動作について説明する。前述の通り、本発明における主コイル 200 は、クエンチ時のコイル保護のために、比較的エネルギーの小さなコイルグループ 210 と比較的エネルギーの大きなコイルグループ 211 の 2 つのダイオード回路を有している。何らかの原因により主コイル 200 のいずれかのコイルがクエンチした場合、クエンチしたコイルでは抵抗が発生し、発熱により主コイル 200 内部のエネルギーを消費しながら、主コイル 200 の電流は減衰していく。と同時に、他のコイルとの相互インダクタンスによってエネルギーを分散させ、各所で様々な電圧を発生させる。その電圧によって、ダイオード 221 が動作（ターンオン）した場合、それぞれのコイルグループ 210 および 211 内の電流に差異を生じながら、電流は更に減衰していく。

【0038】

一方、そのとき外乱磁場補償コイル 300 は閉ループをなしているため、たとえ主コイル 200 との磁気的カップリングが非常に小さかったとしても、コイルグループ 210 または 211 とある程度の磁気的カップリングを有している場合には、コイルグループ 210 および 211 内の電流差異に伴って外乱磁場補償コイル 300 へ電流が誘起される。この場合における主コイルがクエンチした後の各コイルの電流推移を図 6 に示す。図 6 は、従来技術の図 9 と同様、様々なクエンチケースのうち、最も外乱磁場補償コイルにとって大きな電磁力が発生するケース例を示している。

【0039】

このときの外乱磁場補償コイル 300 に生じる電磁力を表 4 に示す。表 4 は、表 2 に示した従来例と対応するものである。表 2 と表 4 との比較により、従来例（表 2）で特に大きかった No. 6 コイルの R 方向電磁力が、本発明（表 4）においては約 70% に低減し、電磁力として約 2.4.3 トンの低減となっていることが分かる。なお、図 9 と図 6 を比較した場合、本発明の図 6 の方が外乱磁場補償コイル 300 に生じる誘起電流は若干大きいものの、他方で No. 6 コイルのターン数が小さいため、結果的に電磁力が低減されるものである。

(単位:トン)	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
Z方向電磁力	-0.38	0.27	-2.82	6.94	0.45	3.34
R方向電磁力	-0.82	-4.50	8.22	4.79	-26.52	55.88

表 4 本発明の実施の形態 1 における図 5 のクエンチ例での外乱磁場補償コイルにかかる最大電磁力

【0040】

これによって、R 方向電磁力に対する構造的、機械的対策が楽になる一方、該電磁力に伴う不具合も生じにくくなる。なお、他のコイルにおいて本発明の方が大きな電磁力となっているところがあるが、No. 6 コイルの R 方向電磁力に比べてかなり小さいため対処しやすく、特に問題とはならない。

また、No. 6 コイルは配置の関係上、コイル上部にスペースの余裕があまりないことが多いため、本発明の例のようにターン数が約 63% と大幅に減らせることは、設置スペースの観点からも好ましい。

【0041】

以上のことから、本実施の形態 1 のように、図 1 における 303a、303b のようなマイナスターンの外乱磁場補償コイルを、203a、203b のようなプラスターンの主コイル上に配置することにより、各コイルグループ 210、211 と外乱磁場補償コイルとの

磁気的カップリングを最適（最小）にできるだけでなく、従来の技術におけるマイナスターンの主コイル 206a、206b上に配置する外乱磁場補償コイル 306a、306bのターン数を減らした設計が容易となるため、設置スペースを減らすことができる。

【0042】

実施の形態 2 .

次に、この発明の実施の形態 2 を図 3 に基づいて説明する。

この発明の実施の形態 2 によれば、実施の形態 1 のようにマイナスターンの外乱磁場補償コイル（303a、303b）を、プラスターンの主コイル（203a、203b）上に配置するだけでなく、マイナスターンの外乱磁場補償コイル（304a、304b）をマイナスターンの主コイル（204a、204b）上に配置するようにしたものである。

10

【0043】

これは、303a、303bの外乱磁場補償コイルのみで主コイルとの磁気的カップリングを最適化しようとする、コイルの幅に対して要求するターン数が多すぎたり、少なすぎたりして巻線性を著しく低下させる可能性がある。例えば、巻線性を優先して303a、303bによって磁気的カップリングを小さくしすぎた場合などは、304a、304bを更にマイナスターンとしてこれをマイナスターンの主コイル（204a、204b）上に配置することによって、主コイルとの磁気的カップリングを大きくするなどの調整により最適化することができる。

【0044】

実施の形態 3 .

次に、この発明の実施の形態 3 を図 4 に基づいて説明する。

前記の通り、本発明における外乱磁場補償コイル 300 は一つの閉ループを形成しているため、各コイル（301a、301b、・・・、306a、306b）を直列に接続する必要がある。ただし、接続作業はそれ自体、ある程度の時間を要するため、できる限り接続箇所を減らすことがコスト上からも重要となる。そのため、複数のコイルを、できるだけ線を切断することなく連続して巻くことが望ましい。しかしながら、本発明のようにマイナスターンの外乱磁場補償コイルが混在すると、やむなく切断して、コイル巻線後に接続する必要性が生じる。

20

【0045】

外乱磁場補償コイル 300 は各コイルの接続順は問わないため、図 4 のように、プラスターンのコイルとマイナスターンのコイルをそれぞれ纏めて連続に巻線して接続すれば、最小限の接続箇所数で済む。また、実施の形態 2 の場合でも同様の接続要領にすれば、同じく最小限の接続箇所数で済む。なお、この場合、外乱磁場補償コイルの機能・動作は実施の形態 1（図 1）に示したものと全く同じである。

30

【0046】

実施の形態 4 .

次に、この発明の実施の形態 4 を図 5 に基づいて説明する。

前述の通り、主コイル全体と外乱磁場補償コイルとの磁気的カップリングが最小になるように設計したとしても、主コイルがクエンチした場合には、各ダイオード回路の電流差によって外乱磁場補償コイルに大きな電流が誘起されるため、主コイルの各ダイオード回路と外乱磁場補償コイルとの磁気的カップリングも小さくする必要があり、そのためにマイナスターンの外乱磁場補償コイルが有用であることを述べた。

40

【0047】

ただ、主コイルを励磁あるいは消磁する場合には、各ダイオード回路の電流差は生じないため、外乱磁場補償コイルに誘起される電流は、主コイル全体と外乱磁場補償コイルとの磁気的カップリングによって決まる。その磁気的カップリングが大きい場合、主コイルの励磁あるいは消磁中に外乱磁場補償コイルへの誘起電流が集積され、いずれは外乱磁場補償コイルがクエンチすることになる。クエンチによって一旦電流は減衰するものの、減衰して超電導状態に復帰した後は再度誘起電流が集積されるため、場合によっては 1 回の励磁あるいは消磁中に何度も外乱磁場補償コイルがクエンチする可能性もある。一般的に

50

コイルが頻繁にクエンチするのは熱応力が頻繁に生じることでもあり、コイルにとってあまり好ましいとは言えない。

【 0 0 4 8 】

また、そのような状況は、主コイルの励磁エネルギーの一部が外乱磁場補償コイルに吸収され、それがクエンチによって熱エネルギーとして消費されることでもあり、エネルギー効率にとっても良くない。そのため、主コイルの励磁あるいは消磁中には、外乱磁場補償コイルの一部に設置したヒータによってあらかじめ常電導状態を生じさせておき、誘起電流が過大にならないようにすることもある。

しかしながら、ヒータを通電し続けることは、低温容器に対して熱量を加えることになり、冷媒を過剰に消費させることにつながるため、できる限り避けるべきである。

10

【 0 0 4 9 】

以上のことから、本発明のように主コイル全体と外乱磁場補償コイルとの磁氣的カップリングも最小にすることが望まれるわけであるが、この場合、従来の技術（図 8）のように、外乱磁場補償コイルは全てプラスターンであっても、主コイルにマイナスターンのコイルがあるため最小にすること自体は可能である。ただし、そのためには、図 8 の 2 0 6 a、2 0 6 b のような比較的大きなエネルギーのマイナスターンのコイル上に、比較的多いターンの外乱磁場補償コイル（3 1 6 a、3 1 6 b）を配置する必要がある。

【 0 0 5 0 】

一方で、2 0 6 a、2 0 6 b のようなマグネット外部への漏れ磁場を低減するために配置されたマイナスターンのコイル上にはあまりスペースの余裕がないことが多い。そのため、上記外乱磁場補償コイルの必要ターン数をなるべく下げる必要もある。

20

そこで、本実施の形態 4 においては、図 5 に示す 3 0 3 a、3 0 3 b のマイナスターンのコイルのターン数を他の実施例よりも増やすことにより、それによって主コイル全体との磁氣的カップリングが低減できるため、その分、3 0 6 a、3 0 6 b のターン数を減らすようにしたものである。

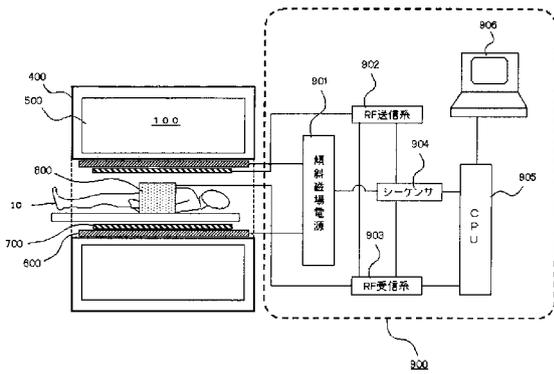
【 符号の説明 】

【 0 0 5 1 】

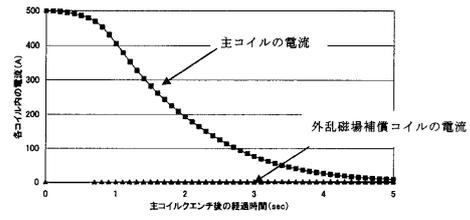
1 0 患者（被験者）、 1 0 0 超電導マグネット、 2 0 0 主コイル、
 2 1 0、2 1 1 コイルグループ、 2 2 1 ダイオード、
 3 0 0 外乱磁場補償コイル、 4 0 0 真空断熱容器、 5 0 0 冷却容器
 、
 6 0 0 傾斜磁場コイル、 7 0 0 R F 送信コイル、 8 0 0 R F 受信コ
 イル、
 9 0 0 制御装置。

30

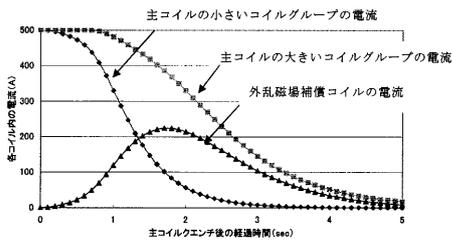
【図1】



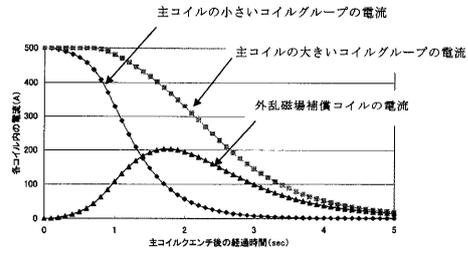
【図7】



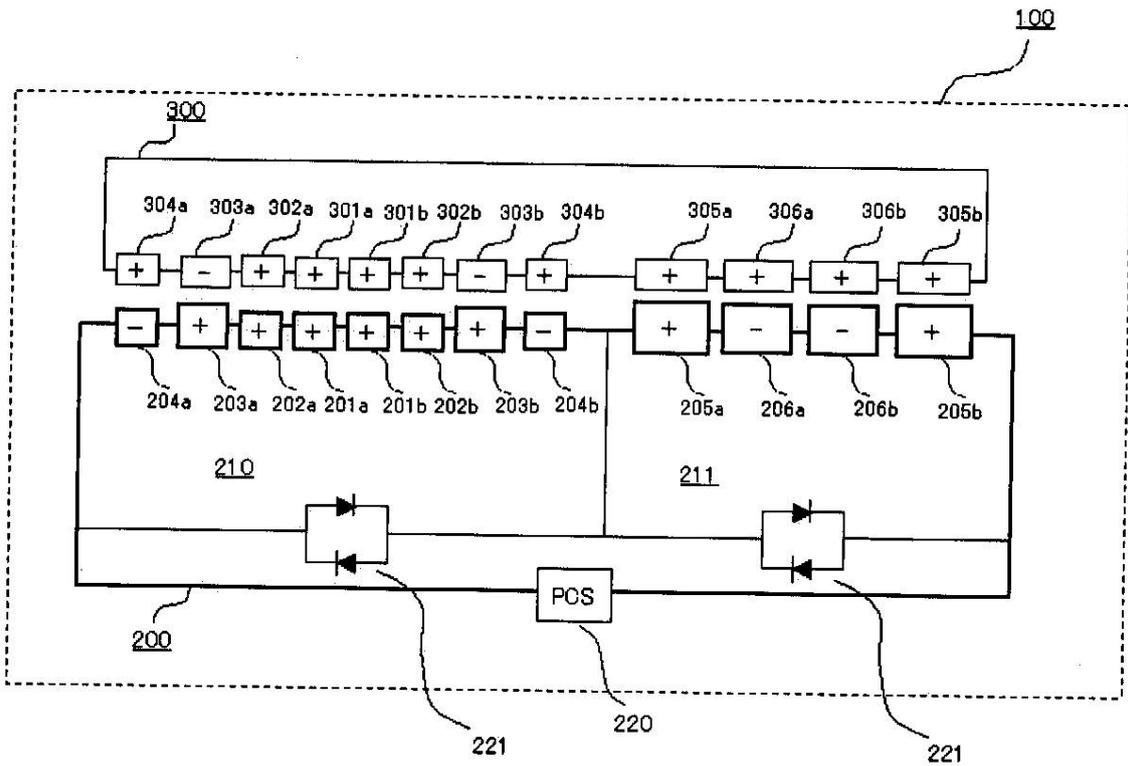
【図6】



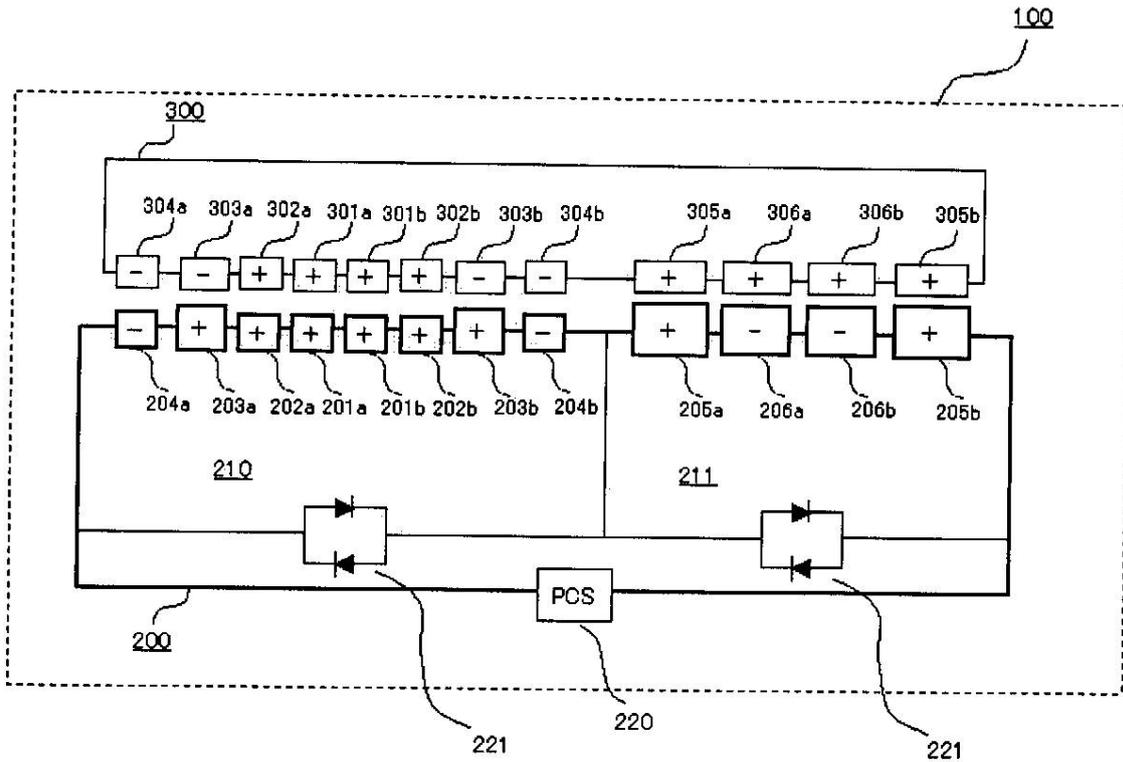
【図9】



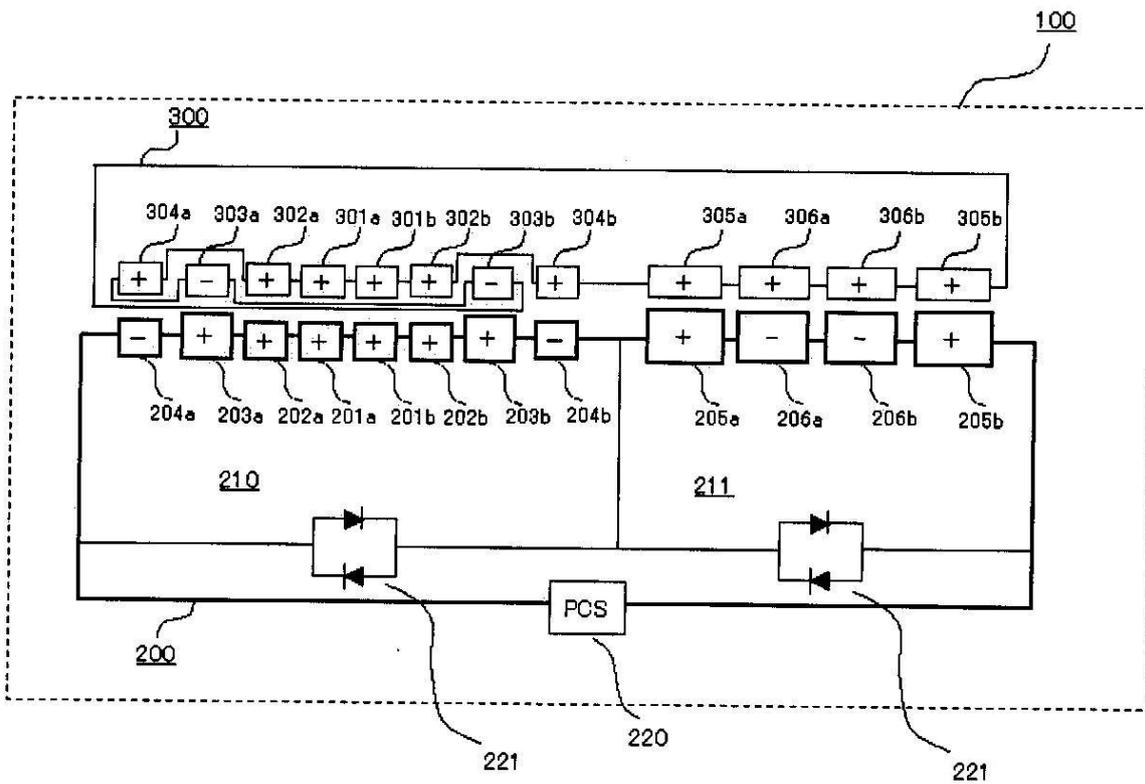
【図2】



【 図 3 】



【 図 4 】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
H 0 1 F 7/22 C

審査官 宮澤 浩

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

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

A 6 1 B 5 / 0 5 5
G 0 1 R 3 3 / 3 8 1 5
G 0 1 R 3 3 / 4 2 1
H 0 1 F 5 / 0 0
H 0 1 F 6 / 0 0