



(19)中華民國智慧財產局

(12)發明說明書公開本 (11)公開編號：TW 202425011 A

(43)公開日：中華民國 113 (2024) 年 06 月 16 日

(21)申請案號：112144486 (22)申請日：中華民國 112 (2023) 年 11 月 17 日
(51)Int. Cl. : H01F6/06 (2006.01) H01F6/04 (2006.01)
(30)優先權：2022/12/14 日本 2022-199653
(71)申請人：日商住友重機械工業股份有限公司 (日本) SUMITOMO HEAVY INDUSTRIES, LTD.
(JP)
日本
(72)發明人：江原悠太 EBARA, YUTA (JP)
(74)代理人：林志剛
申請實體審查：有 申請專利範圍項數：7 項 圖式數：4 共 20 頁

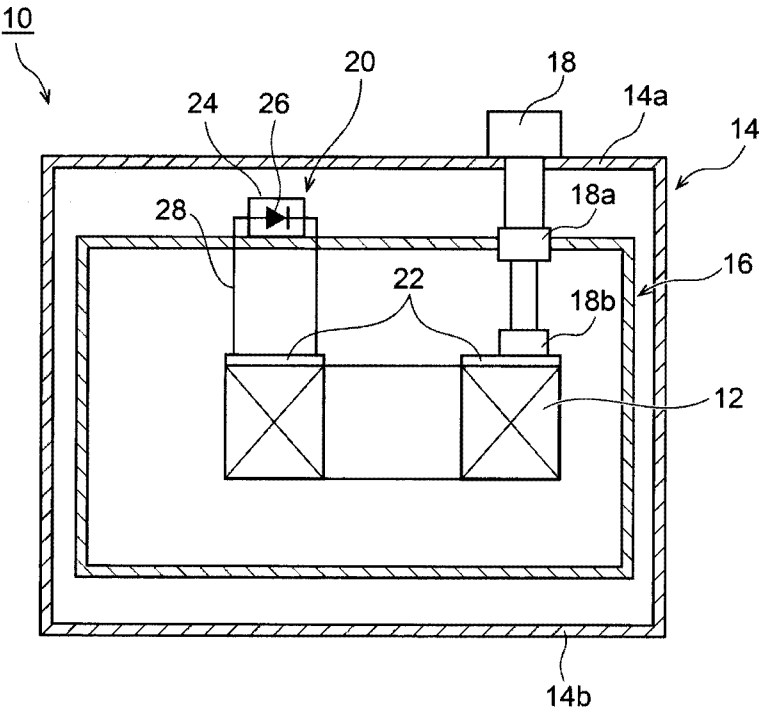
(54)名稱

超導磁體裝置

(57)摘要

超導磁體裝置(10)具備：超導線圈(12)；極低溫冷凍機(18)，係冷卻超導線圈(12)；及導熱構件(22)，係能夠作為使超導線圈(12)與極低溫冷凍機(18)熱耦合的同時與超導線圈(12)電磁耦合的次級線圈進行動作。超導磁體裝置(10)亦可以進一步具備連接於導熱構件(22)的兩端之間的焦耳熱產生元件(24)。

指定代表圖：



- 符號簡單說明：
- 10:超導磁體裝置
 - 12:超導線圈
 - 14:真空容器
 - 14a:頂板
 - 14b:底板
 - 16:熱屏蔽件
 - 18:極低溫冷凍機
 - 18a:第 1 冷卻台
 - 18b:第 2 冷卻台
 - 20:能量取出機構
 - 22:導熱構件
 - 24:焦耳熱產生元件
 - 26:二極體
 - 28:電氣配線

【圖 1】

【發明摘要】

【中文發明名稱】

超導磁體裝置

【中文】

超導磁體裝置(10)具備：超導線圈(12)；極低溫冷凍機(18)，係冷卻超導線圈(12)；及導熱構件(22)，係能夠作為使超導線圈(12)與極低溫冷凍機(18)熱耦合的同時與超導線圈(12)電磁耦合的次級線圈進行動作。超導磁體裝置(10)亦可以進一步具備連接於導熱構件(22)的兩端之間的焦耳熱產生元件(24)。

【指定代表圖】圖 1

【代表圖之符號簡單說明】

10:超導磁體裝置

12:超導線圈

14:真空容器

14a:頂板

14b:底板

16:熱屏蔽件

18:極低溫冷凍機

18a:第 1 冷卻台

18b:第 2 冷卻台

20:能量取出機構

22:導熱構件

24:焦耳熱產生元件

26:二極體

28:電氣配線

【特徵化學式】無

【發明說明書】

【中文發明名稱】

超導磁體裝置

【技術領域】

【0001】本發明係有關一種超導磁體裝置。

【先前技術】

【0002】在超導磁體裝置的運轉中有可能發生的不期望的現象有超導線圈的熱失控(淬火：quench)。若發生淬火，則超導線圈從超導轉變為常導，並在線圈內部產生電阻。有可能從此前以超導狀態流經線圈之大電流產生大量的焦耳熱。亦有可能發生線圈內的電壓上升及其引發的放電。另外，由於發生淬火時的暫態電流的不平衡，有可能使大電磁力作用於超導線圈。配置於線圈附近的導體上亦產生渦電流而有可能使電磁力作用於導體。如此產生的熱、放電、電磁力有可能對超導線圈及其周邊的結構、機器帶來損傷。因此，提出在超導線圈的附近設置感應線圈。在淬火發生時，能夠藉由電磁感應將能量從超導線圈回收至感應線圈並釋放出超導線圈所持有的能量。

[先前技術文獻]

[專利文獻]

【0003】

[專利文獻1]日本特開2015-142044號公報

【發明內容】**[發明所欲解決之問題]**

【0004】 在上述結構中，由於新設置感應線圈，因此在超導線圈周圍需要用於設置感應線圈的空間。或者，若包含感應線圈在內欲容納於超導線圈的現有空間中，則超導線圈的空間佔有率會受到追加感應線圈相應量的限制。

【0005】 本發明的一態樣的例示性目的之一為抑制對超導線圈的空間限制，並且能夠從超導線圈取出能量。

[解決問題之技術手段]

【0006】 根據本發明的一態樣，超導磁體裝置具備：超導線圈；極低溫冷凍機，係冷卻超導線圈；及導熱構件，係能夠作為使超導線圈與極低溫冷凍機熱耦合的同時與超導線圈電磁耦合的次級線圈進行動作。

[發明之效果]

【0007】 根據本發明，能夠抑制對超導線圈的空間限制，並且能夠從超導線圈取出能量。

【圖式簡單說明】**【0008】**

[圖1]係概略地表示實施方式之超導磁體裝置之圖。

[圖2]係概略地表示實施方式之能量取出機構之圖。

[圖 3]中圖 3(a)及圖 3(b)係概略地表示實施方式之被能量取出機構 20 消耗的能量之曲線圖。

[圖 4]係概略地表示實施方式之超導線圈及導熱構件之俯視圖。

【實施方式】

【0009】以下，參照圖式對用於實施本發明之形態進行詳細說明。在說明及圖式中，對相同或同等的構成要件、構件、處理標註相同的符號，適當省略重複說明。圖中所示之各部分的縮尺、形狀為了便於說明而適當地設定，只要沒有特別提及，則不應做限定性解釋。實施方式為例示，對本發明的範圍不作任何限定。實施方式中記載之所有特徵及其組合未必限定為發明的本質性部分。

【0010】圖 1 係概略地表示實施方式之超導磁體裝置之圖。圖 2 係概略地表示實施方式之能量取出機構之圖。如後前述，圖 2 所示之能量取出機構能夠應用於圖 1 所示之超導磁體裝置。

【0011】超導磁體裝置 10 例如作為單晶提拉裝置、NMR(Nuclear Magnetic Resonance：核磁共振)系統、MRI(Magnetic Resonance Imaging：磁共振成像)系統、迴旋加速器(cyclotron)等加速器、核融合系統等高能物理系統或其他高磁場利用機器(未圖示)的磁場源而搭載於高磁場利用機器中，能夠產生該機器所需要之高磁場。

【0012】超導磁體裝置 10 具備超導線圈 12、真空容器

14、熱屏蔽件16及能量取出機構20。

【0013】超導線圈12構成為配置於真空容器14內且藉由在冷卻至超導轉移溫度以下的極低溫之狀態下通電而產生強磁場。超導線圈12可以為公知的超導線圈(例如所謂低溫超導線圈)。超導線圈12亦可以從配置於真空容器14的外部之外部電源(未圖示)供電。

【0014】又，超導線圈12例如與設置於真空容器14中的二段式吉福特-麥克馬洪(Gifford-McMahon；GM)冷凍機或其他形式的極低溫冷凍機18熱耦合，並且以冷卻至超導轉移溫度以下的極低溫之狀態使用。在本實施方式中，超導磁體裝置10構成為藉由極低溫冷凍機18直接冷卻的所謂傳導冷卻式，而不是將超導線圈12浸漬於液態氦等極低溫液態冷媒中的浸漬冷卻式。再者，超導磁體裝置10亦可以為浸漬冷卻式。

【0015】再者，在圖1中，示出1台極低溫冷凍機18為例，但例如超導線圈12為大型的情況等，超導磁體裝置10可根據需要具備冷卻同一超導線圈12之複數台極低溫冷凍機18。

【0016】真空容器14為提供適合將超導線圈12設定為超導狀態之極低溫真空環境之隔熱真空容器，亦被稱為低溫保持器。通常，真空容器14具有圓柱狀的形狀或者在中心部具有中空部之圓筒狀的形狀。因此，真空容器14具有大致平坦的圓形狀或圓環狀的頂板14a及底板14b、以及將該等連接之圓筒狀的側壁(圓筒狀外周壁或同軸配置的圓

筒狀的外周壁及內周壁)。極低溫冷凍機18可以設置於真空容器14的頂板14a。真空容器14例如由不鏽鋼等金屬材料或其他合適的高強度材料形成，以承受環境壓力(例如大氣壓)。

【0017】熱屏蔽件16在真空容器14內以包圍超導線圈12之方式配置。熱屏蔽件16例如由銅等金屬材料或其他具有高熱傳導率之材料形成。熱屏蔽件16直接安裝於極低溫冷凍機18的第1冷卻台18a，並與第1冷卻台18a熱耦合。或者，熱屏蔽件16亦可以經由具有可撓性或剛性之導熱構件安裝於第1冷卻台18a。在超導磁體裝置10的運轉中，熱屏蔽件16藉由第1冷卻台18a被冷卻至第1冷卻溫度，例如30K~50K。熱屏蔽件16能夠對配置於其內側且冷卻至比熱屏蔽件16更低的溫度之極低溫冷凍機18的第2冷卻台18b、超導線圈12等低溫部進行熱保護以免受來自真空容器14的輻射熱的影響。

【0018】超導線圈12經由導熱構件22與第2冷卻台18b熱耦合。導熱構件22例如由銅等金屬材料或其他具有高熱傳導率之材料形成，並且將超導線圈12連接於第2冷卻台18b。導熱構件22可以為直接固定於第2冷卻台18b並將超導線圈12與第2冷卻台18b剛性連接的剛性構件。或者，亦可以設置將導熱構件22與第2冷卻台18b連接之額外的導熱構件。該額外導熱構件可以為剛性構件，或者亦可以將該等以具有可撓性且容許超導線圈12與第2冷卻台18b的相對移位的方式連接。在超導磁體裝置10的運轉中，超導線圈

12藉由第2冷卻台18b被冷卻至比第1冷卻溫度低的第2冷卻溫度，例如3K～20K(例如約4K)。

【0019】導熱構件22能夠作為與超導線圈12電磁耦合的次級線圈進行動作。作為一例，如圖1及圖2所示，導熱構件22具備安裝於超導線圈12的上端面之C形導熱板。為了與超導線圈12的良好的熱接觸，該導熱板在超導線圈12的全周內與超導線圈12物理接觸。然而，如圖2所示，導熱板的C形形狀的兩端隔著微小間隙相鄰。因此，導熱構件22能夠作為圈數為1的線圈發揮功能。超導線圈12所產生的磁場發生變動時，藉由電磁感應在導熱構件22上感應到從C形形狀的一端朝向另一端沿著超導線圈12的周向旋轉的電流。

【0020】在該例中，導熱構件22安裝於超導線圈12的上端面，但亦可以安裝於超導線圈12的下端面。安裝於超導線圈12的下端面之C形導熱板可以作為與超導線圈12電磁耦合的次級線圈進行動作。

【0021】導熱構件22與超導線圈12相鄰接觸，因此作為次級線圈的導熱構件22與超導線圈12的耦合係數能夠變高。例如，耦合係數可期待成為0.95左右。再者，導熱構件22與超導線圈12相同地被冷卻至極低溫。形成導熱構件22之金屬材料(例如銅)的電導度藉由極低溫冷卻而顯著增加。耦合係數和電導度的增加均為藉由次級線圈提高能量取出效率之因素。因此，藉由將作為次級線圈的導熱構件22設置於超導線圈12上，能夠提高能量取出機構20的能量

取出效率。

【0022】再者，有時現有的超導磁體裝置10亦在超導線圈12的端面安裝有導熱構件。然而，在此類現有設計中，為了防止或減少沿著超導線圈12的周向旋轉的渦電流，準備被分割的複數個導熱片，該等導熱片在超導線圈12的周向上彼此隔著間隙排列。例如，可以以2個半圓狀的導熱片彼此不接觸的方式安裝於超導線圈12的端面。

【0023】不同於此類現有分割型導熱構件，在本實施方式中，如後前述為了從超導線圈12取出能量，積極利用繞導熱構件22旋轉的感應電流。因此，導熱構件22具有能夠作為次級線圈進行動作的形狀，例如如上述之類的在超導線圈12的全周範圍內延伸的C形形狀。

【0024】能量取出機構20除了具備作為次級線圈進行動作的導熱構件22以外，還具備連接於導熱構件22的兩端之間的焦耳熱產生元件24。焦耳熱產生元件24具備電阻且能夠藉由通電發熱。在本實施方式中，焦耳熱產生元件24具備二極體26作為一例。

【0025】焦耳熱產生元件24可以具備一般的線性(亦即，遵循歐姆定律)電阻元件，或者亦可以具備非線性電阻。非線性電阻可以具有對該非線性電阻施加的電壓小時電阻值變高且對非線性電阻施加的電壓大時電阻值變低的非線性特性(非線性電阻可以在對非線性電阻施加的電壓為第1值時具有第1電阻值且在對非線性電阻施加的電壓為比第1值大的第2值時具有比第1電阻值小的第2電阻值)。

【0026】非線性電阻例如可以為二極體、閘流電晶體(thyristor)等整流元件。或者，非線性電阻可以為變阻器(varistor)。再者，焦耳熱產生元件24可以具備線性電阻和非線性電阻兩者，例如該等可以串列連接。

【0027】導熱構件22與焦耳熱產生元件24藉由電氣配線28連接。電氣配線28例如可以由銅等金屬材料或其他導電材料形成。或者，電氣配線28可以具備高溫超導電流引線。高溫超導電流引線例如可以由氧化銅超導體或其他高溫超導材料形成。此類高溫超導電流引線的材料具有隔熱性。因此，與電氣配線28為金屬製的情況相比，能夠減少有可能以電氣配線28為導熱路徑從焦耳熱產生元件24傳導至導熱構件22的熱。這能夠降低對極低溫冷凍機18的第2冷卻台18b的熱負荷，並實現導熱構件22及超導線圈12的良好冷卻。

【0028】焦耳熱產生元件24可以藉由極低溫冷凍機18被冷卻。由此，能夠有效地去除焦耳熱產生元件24所散發的熱。此時，焦耳熱產生元件24可以與極低溫冷凍機18的第1冷卻台18a熱耦合，因此可以設置於熱屏蔽件16。這是因為，通常極低溫冷凍機18的第1段的冷凍能力大於第2段(例如達數十倍)，相對來說有富餘。再者，情況允許時，焦耳熱產生元件24亦可以與極低溫冷凍機18的第2冷卻台18b熱耦合並藉由第2冷卻台18b被冷卻。

【0029】通常，在超導線圈12中檢測到淬火或其徵兆時，停止超導磁體裝置10的運轉，對超導線圈12進行消

磁。超導線圈12所產生的磁場從所期望的高磁場急劇減少為零。此時，在作為次級線圈的導熱構件22上，藉由電磁感應而感應到電流。該電流從導熱構件22經由電氣配線28流向焦耳熱產生元件24，焦耳熱產生元件24發熱。如此，超導線圈12所蓄積的電磁能量被導熱構件22以電磁方式取出，並由焦耳熱產生元件24轉換為熱。熱藉由基於極低溫冷凍機18之冷卻被去除。

【0030】如此，超導線圈12的能量的至少一部分被能量取出機構20消耗。由於超導線圈12的能量減少，能夠防止或減輕有可能由此引起而發生的超導線圈及其周圍的損傷。

【0031】又，若超導線圈12的溫度伴隨淬火上升得較高，則用於恢復的再冷卻所需的時間會延長，亦即會導致超導磁體裝置10的停機時間(downtime)的增加。在本實施方式中，能量取出機構20能夠從超導線圈12取出能量，因此能夠抑制超導線圈12的溫度上升並縮短從淬火恢復所需的時間而有利。

【0032】在超導線圈12附近新設置專用感應線圈之以以往提出的結構中，在超導線圈的周圍需要用於設置感應線圈的空間，或者超導線圈的空間佔有率會受到追加感應線圈相應量的限制。與此不同，在本實施方式中，使極低溫冷凍機18與超導線圈12熱耦合的導熱構件22兼作次級線圈。由於導熱構件22具有次級線圈的功能，因此有利的是不需要額外空間。能夠維持超導線圈12的設置空間及空間

佔有率。因此，根據實施方式，能夠抑制對超導線圈 12 的空間限制，並且能夠從超導線圈 12 取出能量。

【0033】圖 3(a)及圖 3(b)係概略地表示實施方式之被能量取出機構 20 消耗的能量之曲線圖。圖 3(a)中示出焦耳熱產生元件 24 具有線性電阻元件之情況，圖 3(b)中示出焦耳熱產生元件 24 具有非線性電阻元件(例如二極體 26)之情況。在圖 3(a)及圖 3(b)中描述了在超導線圈 12 的淬火發生時藉由電磁感應流入焦耳熱產生元件 24 之電流 I 、藉由電流 I 產生於焦耳熱產生元件 24 之電壓 V 、及在電流 I 和電壓 V 的條件下焦耳熱產生元件 24 所消耗的能量 P 的時間變化。曲線圖的橫軸為時間，將淬火發生時設定為時刻 0。

【0034】如圖 3(a)所示，電流 I 在淬火發生時變得最大，並且隨著時間的經過單調且急劇(例如指數函數級地)減少。焦耳熱產生元件 24 具有線性電阻元件，電壓 V 與電流 I 成比例。電壓 V 與電流 I 同樣地在淬火發生時變得最大，並且隨著時間的經過單調且急劇減少。因此，消耗能量 P 亦同樣地隨著時間的經過單調且急劇減少。

【0035】在此，施加於焦耳熱產生元件 24 的電壓 V 不可以超出設計上容許的上限電壓 $V_{\max}$ (換言之，焦耳熱產生元件 24 設計成電壓 V 不會超出上限電壓 $V_{\max}$)。

【0036】在圖 3(b)中，電流 I 亦在淬火發生時變得最大，並且隨著時間的經過單調且急劇(例如指數函數級地)減少。然而，焦耳熱產生元件 24 具有上述非線性特性時，如圖所示，電壓 V 在從淬火發生時間點到電流 I 減小至極小

值為止的期間(圖中的時間 T_a)維持為接近上限電壓 V_{max} 的大值(換言之，焦耳熱產生元件24能夠利用其非線性特性而設計成電壓 V 在上限電壓 V_{max} 附近維持較長時間)。因此，在時間 T_a 內，消耗能量 P 亦維持為較高水平。

【0037】如此，焦耳熱產生元件24具有非線性電阻元件的情況下，與具有線性電阻元件的情況相比，能夠增加能量取出機構20所消耗的能量 P 的總量(亦即，與如圖所示之曲線圖的面積相當的消耗能量 P 的時間積分)，因此有利。

【0038】又，焦耳熱產生元件24具備二極體26等整流元件時，整流元件可以以如下方式連接於導熱構件22的兩端之間：在超導線圈12的磁場增加時阻斷被導熱構件22感應到的第1方向的電流，在超導線圈12的磁場減少時容許被導熱構件22感應到的與第1方向反向的第2方向的電流。

【0039】例如，考慮超導線圈12產生從圖2的紙面裏側朝向跟前的磁場的情況。對超導線圈12進行勵磁時，該磁場增加。這樣一來，在圖2中導熱構件22以抵消該磁場的方式(亦即，以產生與超導線圈12的磁場反向的磁場(從跟前朝向紙面裏側的磁場)的方式)順時針感應電流。如圖2所例示，二極體26以阻斷該感應電流的朝向與導熱構件22連接。

【0040】因此，超導線圈12的勵磁中，能量取出機構20中可流動的感應電流被二極體26阻斷。為了勵磁而投入超導線圈12之能量無法從能量取出機構20取出。因此，能

夠有效地對超導線圈12進行勵磁。

【0041】另一方面，發生淬火而超導線圈12消磁時，以抵消超導線圈12的磁場減少的方式(亦即，以產生與超導線圈12的磁場相同方向的磁場的方式)，導熱構件22順時針感應到電流。該感應電流在圖2所示之二極體26中沿其正向流動。因此，二極體26容許感應電流。如此，能量取出機構20能夠在超導線圈12的消磁中取出能量。能夠應對由淬火的發生導致的上述問題。

【0042】以上，根據實施例對本發明進行了說明。本領域技術人員應理解，本發明並不限定於上述實施方式，能夠進行各種設計變更，能夠進行各種變形例，並且該種變形例亦在本發明的範圍內。結合一種實施方式進行了說明之各種特徵亦能夠應用於其他實施方式中。藉由組合而產生之新的實施方式兼具所組合之實施方式各自的效果。

【0043】在上述實施方式中，導熱構件22以具備安裝於超導線圈12的上端面及/或下端面之C形導熱板的情況為例進行了說明，但導熱構件22亦能夠採用相對於超導線圈12的其他配置。例如，如圖4所示，導熱構件22亦可以具備安裝於超導線圈12的外周面之C形導熱板。在超導線圈12的外周面可以固定有外框12a以在勵磁中抑制由電磁力引起的朝向超導線圈12的徑向外的膨脹，導熱構件22可以安裝於外框12a的外表面。或者，導熱構件22可以安裝於超導線圈12的內周面。此時，亦可以在超導線圈12的線圈框架上安裝導熱構件22。

【0044】根據實施方式，使用具體詞句對本發明進行了說明，但實施方式僅示出本發明的原理、應用的一側面，實施方式可以在不脫離請求的範圍所規定的本發明的思想的範圍內，具有複數種變形例、配置的變更。

[產業上之可利用性]

【0045】本發明能夠用於超導磁體裝置領域。

本申請案係主張基於2022年12月14日申請之日本專利申請第2022-199653號的優先權。該日本申請案的全部內容係藉由參閱而援用於本說明書中。

【符號說明】

【0046】

- 10:超導磁體裝置
- 12:超導線圈
- 18:極低溫冷凍機
- 18a:第1冷卻台
- 18b:第2冷卻台
- 20:能量取出機構
- 22:導熱構件
- 24:焦耳熱產生元件
- 26:二極體

【發明申請專利範圍】

【請求項1】一種超導磁體裝置，其特徵為，具備：
超導線圈；
極低溫冷凍機，係冷卻前述超導線圈；及
導熱構件，係能夠作為使前述超導線圈與前述極低溫
冷凍機熱耦合的同時與前述超導線圈電磁耦合的次級線圈
進行動作。

【請求項2】如請求項1的超導磁體裝置，其中，
前述導熱構件具備安裝於前述超導線圈的上端面、下
端面、外周面或內周面之C形導熱板。

【請求項3】如請求項2的超導磁體裝置，其中，
前述C形導熱板在前述超導線圈的全周上延伸，
前述C形導熱板的兩端隔著間隙相鄰。

【請求項4】如請求項1至3中任一項的超導磁體裝
置，其中，進一步具備：
焦耳熱產生元件，係連接於前述導熱構件的兩端之
間。

【請求項5】如請求項4的超導磁體裝置，其中，
前述焦耳熱產生元件具備非線性電阻。

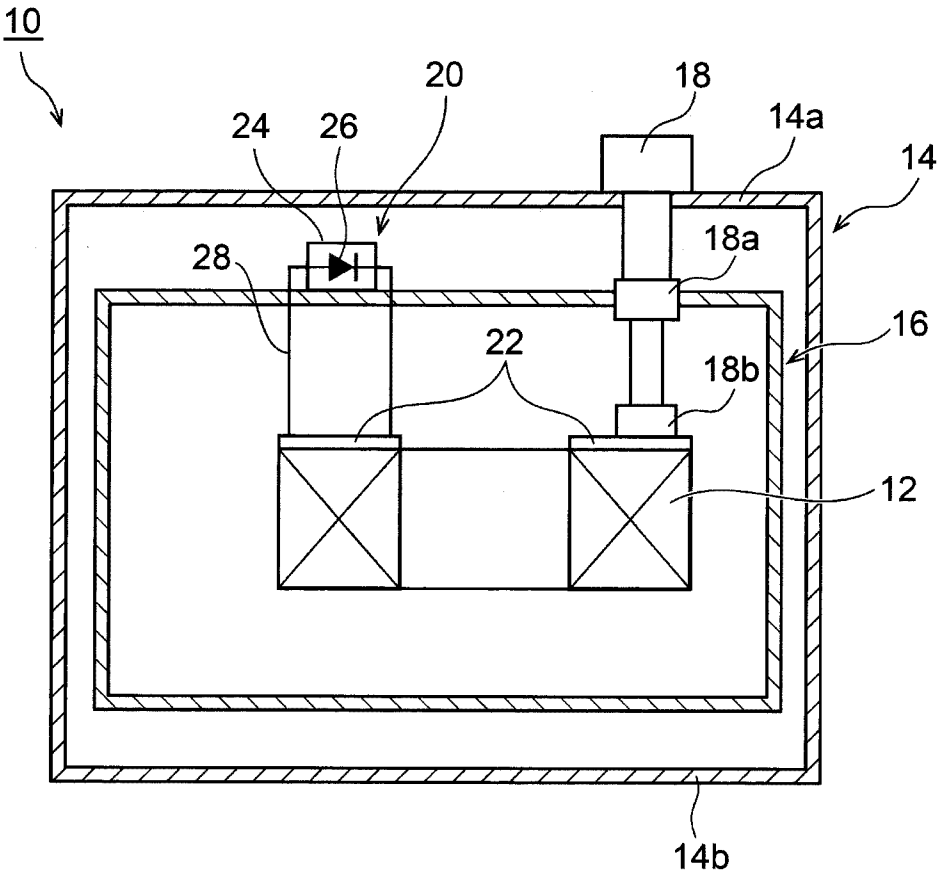
【請求項6】如請求項4的超導磁體裝置，其中，
前述焦耳熱產生元件具備整流元件，
前述整流元件以如下方式連接於前述導熱構件的兩端
之間：在前述超導線圈的磁場增加時阻斷前述導熱構件感
應到的第1方向的電流，在前述超導線圈的磁場減少時容

許前述導熱構件感應到的與前述第1方向反向的第2方向的電流。

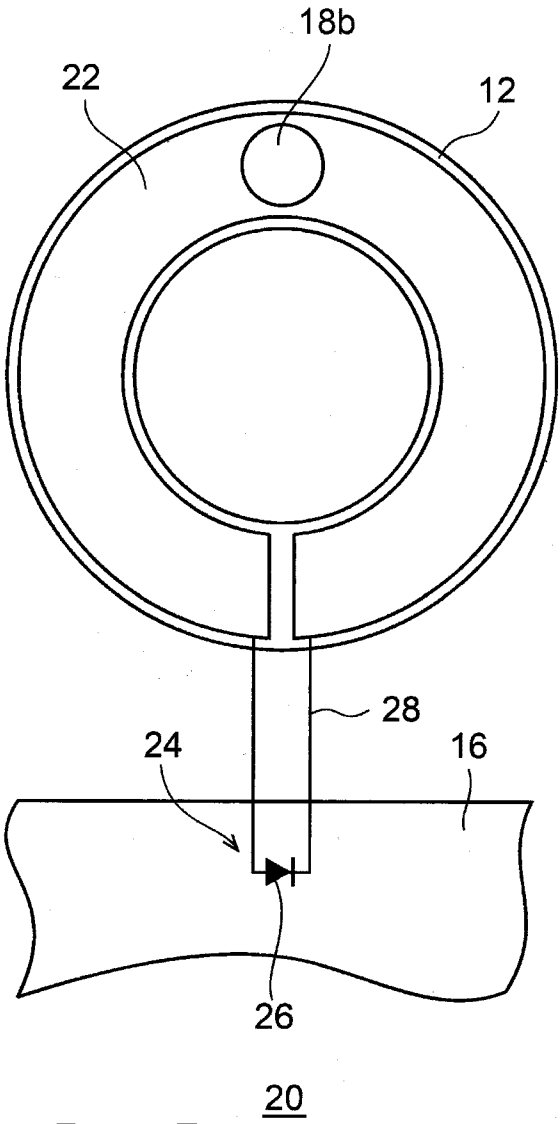
【請求項7】如請求項4的超導磁體裝置，其中，
前述極低溫冷凍機具備：

第1冷卻台，係冷卻前述焦耳熱產生元件；及第2冷卻台，係冷卻至比前述第1冷卻台更低的溫度並冷卻前述超導線圈。

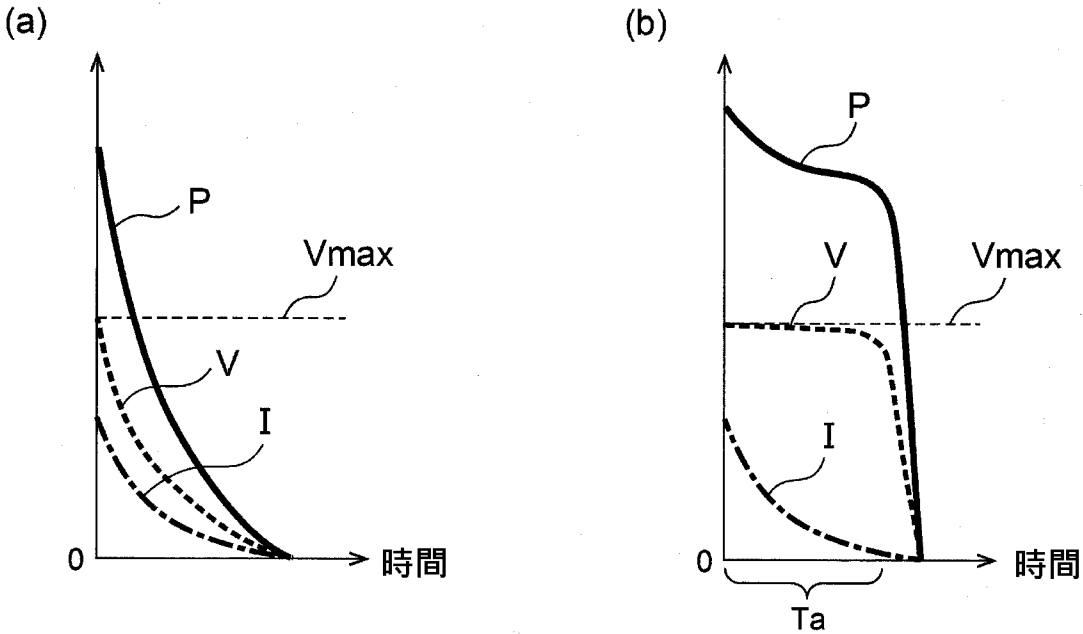
【發明圖式】



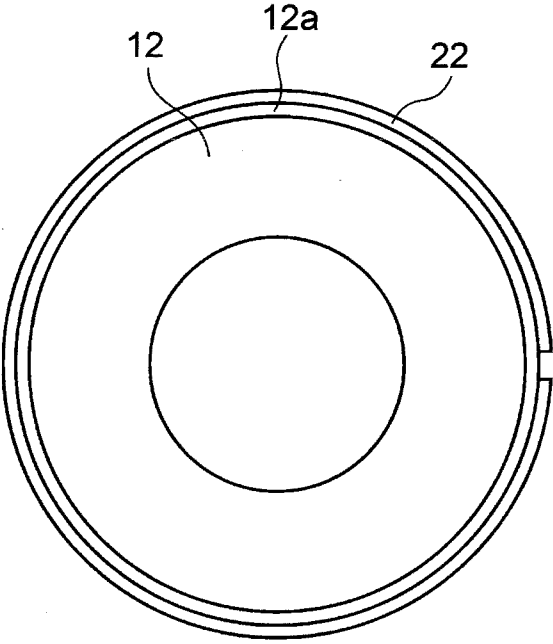
【圖 1】



【圖 2】
20



【圖 3】



【圖 4】