

(19)日本国特許庁(JP)

## (12)特許公報(B2)

(11)特許番号  
特許第7520310号  
(P7520310)

(45)発行日 令和6年7月23日(2024.7.23)

(24)登録日 令和6年7月12日(2024.7.12)

(51)国際特許分類 F I  
H 0 1 S 1/06 (2006.01) H 0 1 S 1/06  
G 0 4 F 5/14 (2006.01) G 0 4 F 5/14

請求項の数 6 (全46頁)

(21)出願番号	特願2022-512269(P2022-512269)	(73)特許権者	000004271 日本電子株式会社 東京都昭島市武蔵野3丁目1番2号
(86)(22)出願日	令和3年3月30日(2021.3.30)	(73)特許権者	503359821 国立研究開発法人理化学研究所 埼玉県和光市広沢2番1号
(86)国際出願番号	PCT/JP2021/013476	(74)代理人	110001210 弁理士法人Y K I国際特許事務所
(87)国際公開番号	WO2021/200909	(72)発明者	辻 成悟 東京都昭島市武蔵野3丁目1番2号 日 本電子株式会社内
(87)国際公開日	令和3年10月7日(2021.10.7)	(72)発明者	高本 将男 埼玉県和光市広沢2番1号 国立研究開 発法人理化学研究所内
審査請求日	令和5年11月6日(2023.11.6)	(72)発明者	香取 秀俊
(31)優先権主張番号	特願2020-65317(P2020-65317)		
(32)優先日	令和2年3月31日(2020.3.31)		
(33)優先権主張国・地域又は機関	日本国(JP) (出願人による申告)国立研究開発法人科学技術振興 機構 未来社会創造事業「クラウド光格子時計による時空 間情報基盤の構築」に関する委託研究、産業技術力強化 法第19条の適用を受ける特許出願		

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 光格子時計用物理パッケージ

## (57)【特許請求の範囲】

## 【請求項1】

原子ビームのビーム軸に沿って配置され、原子集団を捕捉するMOT装置と、  
入射される光格子光を用いて光格子を形成し、前記MOT装置に捕捉された原子集団を  
前記光格子に閉じ込めて、前記ビーム軸に垂直な移動軸に沿って時計遷移を促す時計遷移  
空間まで移動させる光格子形成部と、  
前記MOT装置と前記光格子形成部とを囲む略柱形状の本体部を備えた真空チャンバと、  
を備え、  
前記真空チャンバの中心軸は、前記時計遷移空間を通り、かつ、前記ビーム軸に略平行  
に設定されている、ことを特徴とする光格子時計用物理パッケージ。

10

## 【請求項2】

請求項1に記載の光格子時計用物理パッケージにおいて、  
前記真空チャンバは、前記ビーム軸に沿って前記本体部から突起した突起部を備え、  
当該物理パッケージには、さらに、前記ビーム軸における前記MOT装置の上流側に前  
記原子集団を減速する減速器を備え、  
前記減速器は、前記本体部と前記突起部にまたがって配置される、ことを特徴とする光  
格子時計用物理パッケージ。

## 【請求項3】

請求項2に記載の光格子時計用物理パッケージにおいて、  
MOT装置では、前記ビーム軸と、前記ビーム軸に垂直かつ前記移動軸とは異なる2軸

20

とからなる 3 軸に沿って、各軸の両方向から M O T 光が照射される、ことを特徴とする光格子時計用物理パッケージ。

【請求項 4】

請求項 3 に記載の光格子時計用物理パッケージにおいて、

前記減速器では、前記ビーム軸に沿って上流に向けて減速光が照射され、

前記本体部は、前記ビーム軸に沿った M O T 光と前記減速光とをともに透過させる 1 対の第 1 耐真空光学窓と、前記 2 軸に沿った M O T 光をともに透過させる 1 対の第 2 耐真空光学窓と、を備える、ことを特徴とする光格子時計用物理パッケージ。

【請求項 5】

請求項 2 に記載の光格子時計用物理パッケージにおいて、

さらに、前記真空チャンバを真空化する真空ポンプカートリッジを備え、

前記真空ポンプカートリッジは、前記本体部において、前記減速器と並び、かつ、前記減速器とは異なる方向に偏心して配置されている、ことを特徴とする光格子時計用物理パッケージ。

【請求項 6】

請求項 1 に記載の光格子時計用物理パッケージにおいて、

前記略柱形状の本体部は、略四角柱形状、略六角柱形状、略八角柱形状、あるいは略円柱形状に形成されている、ことを特徴とする光格子時計用物理パッケージ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光格子時計用物理パッケージに関する。

【背景技術】

【0002】

光格子時計は、2001年に、本出願の発明者の一人である香取秀俊によって提案された原子時計である。光格子時計では、レーザー光で形成した光格子内に原子集団を閉じ込めて、可視光領域の共振周波数を計測するため、現行のセシウム時計の精度をはるかに凌駕する18桁の精度の計測が可能である。光格子時計は、発明者らのグループによって鋭意研究開発がなされている他、国内外の様々なグループによっても研究開発が行われて、次世代原子時計として発展してきている。

【0003】

最近の光格子時計の技術については、例えば、下記特許文献1～3を挙げることができる。特許文献1には、中空の通路を有する光導波路の内部に、1次元の移動光格子を形成することが記載されている。特許文献2には、実効的魔法周波数を設定する態様について記載されている。また、特許文献3には、周囲の壁から放射される黒体輻射からの影響を低減する輻射シールドについて記載されている。

【0004】

光格子時計では、高精度で時間計測を行うため、重力による一般相対性論的な効果に基づく地球上の1cmの高度差を、時間の進み方のずれとして検出することができる。そこで、光格子時計を可搬化して研究室外のフィールドで利用できるようになれば、地下資源探索、地下空洞、マグマだまりの検出など、あらたな測地技術への応用可能性が広がる。光格子時計を量産して各地に配置し、重力ポテンシャルの時間変動を連続監視することにより、地殻変動の検出、重力場の空間マッピングなどの応用も可能となる。このように、光格子時計は、高精度な時間計測の枠を超えて、新たな基盤技術として社会に貢献することが期待されている。

【0005】

下記非特許文献1～5には、光格子時計を可搬化する試みについて記載されている。例えば、非特許文献4には、長さ99cm、幅60cm、高さ45cmのフレームに格納された光格子時計の物理パッケージが記載されている。この物理パッケージでは、長さ方向に順に、原子オープン、ゼーマン減速器及び真空チャンバが並んでいる。そして、真空チ

10

20

30

40

50

チャンバの外側には、長さ方向、幅方向及び高さ方向の3軸について、1辺が30～40cm程度の1対の正方形の磁場補正コイルが設置されている。磁場補正コイルは、原子をゼロ磁場下のもとで時計遷移分光を行うために、分光時の原子周辺の領域における磁場分布を一様にかつゼロ値に補償するために使われる。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【文献】特許第6206973号公報

【文献】特表2018-510494号公報

【文献】特開2019-129166号公報

【非特許文献】

【0007】

【文献】Stefan Vogtら著「A transportable optical lattice clock」Journal of Physics: Conference Series 723 012020, 2016年

【文献】S. B. Kollerら著「Transportable Optical Lattice Clock with  $7 \times 10^{-17}$  Uncertainty」Physical review letters 118 073601, 2017年

【文献】William Bowdenら著「A pyramid MOT with integrated optical cavities as a cold atom platform for an optical lattice clock」Scientific Reports 9 11704, 2019年

【文献】S. Origliaら著「Towards an optical clock for space: Compact, high-performance optical lattice clock based on bosonic atoms」Physical Review A 98, 053443, 2018年

【文献】N. Poliら著「Prospect for a compact strontium optical lattice clock」Proceedings of SPIE 6673, 2007年

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

上述の非特許文献1～5に記載された光格子時計よりもさらに小型化または可搬化を進めることで、光格子時計の搬送、設置等が容易となり、活用性も向上することになる。

【0009】

既存の光格子時計では、実験室で使用される大規模な光格子時計の構造をベースに装置または部品の小型化を図ることで、物理パッケージの小型化または可搬化を進めてきている。このため、物理パッケージでは、原子を捕捉する空間または原子に時計遷移を促す時計遷移空間に、原子ビーム、レーザー光、磁場などの多数の軸が複雑に配置されており、必要な装置または部品を集積することが困難であった。

【0010】

本発明の目的は、小型化または可搬化が可能となる構造を備えた光格子時計の物理パッケージを実現することにある。

【課題を解決するための手段】

【0011】

本発明にかかる光格子時計用物理パッケージは、原子ビームのビーム軸に沿って配置され、原子集団を捕捉するMOT装置と、入射される光格子光を用いて光格子を形成し、前記MOT装置に捕捉された原子集団を前記光格子に閉じ込めて、前記ビーム軸に垂直な移動軸に沿って時計遷移を促す時計遷移空間まで移動させる光格子形成部と、前記MOT装置と前記光格子形成部とを囲む略柱形状の本体部を備えた真空チャンバと、を備え、前記真空チャンバの中心軸は、前記時計遷移空間を通り、かつ、前記ビーム軸に略平行に設定されている。

【0012】

本発明の一態様においては、前記真空チャンバは、前記ビーム軸に沿って前記本体部から突起した突起部を備え、当該物理パッケージには、さらに、前記ビーム軸における前記

10

20

30

40

50

MOT装置の上流側に前記原子集団を減速する減速器を備え、前記減速器は、前記本体部と前記突起部にまたがって配置される。

【0013】

本発明の一態様においては、MOT装置では、前記ビーム軸と、前記ビーム軸に垂直かつ前記移動軸とは異なる2軸とからなる3軸に沿って、各軸の両方向からMOT光が照射される。

【0014】

本発明の一態様においては、前記減速器では、前記ビーム軸に沿って上流に向けて減速光が照射され、前記本体部は、前記ビーム軸に沿ったMOT光と前記減速光をとともに透過させる1対の第1耐真空光学窓と、前記2軸に沿ったMOT光をとともに透過させる1対の第2耐真空光学窓と、を備える。

10

【0015】

本発明の一態様においては、さらに、前記真空チャンバを真空化する真空ポンプカートリッジを備え、前記真空ポンプカートリッジは、前記本体部において、前記減速器と並び、かつ、前記減速器とは異なる方向に偏心して配置されている。

【0016】

本発明の一態様においては、前記略柱形状の本体部は、略四角柱形状、略六角柱形状、略八角柱形状、あるいは略円柱形状に形成されている。

【発明の効果】

【0017】

本発明によれば、物理パッケージが部品等を集積化できる構造に形成されており、物理の小型化または可搬化が可能となる。

20

【図面の簡単な説明】

【0018】

【図1】実施形態にかかる光格子時計の全体構成を示す概略図である。

【図2】光格子時計の物理パッケージの概略的な構成を示す図である。

【図3】物理パッケージの外観を概略的に示す図である。

【図4】図3において物理パッケージの内部を部分的に透視的に示す図である。

【図5】3軸磁場補正コイルの全体形状を示す図である。

【図6】X軸磁場補正コイルの第1コイル群の形状を示す図である。

30

【図7】X軸磁場補正コイルの第2コイル群の形状を示す図である。

【図8】Y軸磁場補正コイルの第1コイル群の形状を示す図である。

【図9】Y軸磁場補正コイルの第2コイル群の形状を示す図である。

【図10】Z軸磁場補正コイルの第1コイル群の形状を示す図である。

【図11】Z軸磁場補正コイルの第2コイル群の形状を示す図である。

【図12】3軸磁場補正コイルのホルダの形状を示す図である。

【図13】フレキシブルプリント基板を用いた補正コイルの例を示す図である。

【図14】フレキシブルプリント基板を用いた円筒形の補正コイルを示す図である。

【図15】補正コイルに流す電流の例を示す図である。

【図16】図15の補正コイルと等価な電流の流れを示す図である。

40

【図17】補正コイルに流す電流の別の例を示す図である。

【図18】図17の補正コイルと等価な電流の流れを示す図である。

【図19】フレキシブルプリント基板を用いた補正コイルの別の例を示す図である。

【図20】球形状の真空チャンバを備える物理パッケージを示す図である。

【図21】3軸磁場補正コイルの別の設置例を示す図である。

【図22】図21の3軸磁場補正コイルの支持態様について説明する図である。

【図23A】磁場の補正態様について示す模式図である。

【図23B】磁場の補正態様について示す模式図である。

【図24】3軸磁場補正コイルのキャリブレーションのフローチャートである。

【図25】3軸磁場補正コイルの補正手順を示すフローチャートである。

50

- 【図 2 6】磁場の補正態様の別例について示す模式図である。
- 【図 2 7】冷凍機における漏洩磁場の補償について示す図である。
- 【図 2 8】ゼーマン減速器と M O T 装置の構造を示す断面図である。
- 【図 2 9】コイルのボイドについて説明する断面図である。
- 【図 3 0】図 2 8 の構成に対応した磁場分布を示す図である。
- 【図 3 1 A】ゼーマン減速器と M O T 装置の構造を示す断面図である。
- 【図 3 1 B】ゼーマン減速器と M O T 装置の構造を示す断面図である。
- 【図 3 2】図 3 1 A、図 3 1 B の構成に対応した磁場分布を示す図である。
- 【図 3 3 A】図 3 1 A、図 3 1 B の変形態様にかかる構造を示す図である。
- 【図 3 3 B】図 3 1 A、図 3 1 B の変形態様にかかる構造を示す図である。
- 【図 3 4】コイル外径が一定となるゼーマンコイルの断面図である。
- 【図 3 5 A】ゼーマン減速器用コイルのカプセル化について示す断面図である。
- 【図 3 5 B】ゼーマン減速器用コイルのカプセル化について示す断面図である。
- 【発明を実施するための形態】

#### 【 0 0 1 9 】

##### ( 1 ) 物理パッケージの概略的な構成

図 1 は、光格子時計 1 0 の全体構成を示す概略図である。光格子時計は、物理パッケージ 1 2 と、光学系装置 1 4 と、制御装置 1 6 と、P C ( Personal Computer ) 1 8 を組み合わせて構成されている。

#### 【 0 0 2 0 】

物理パッケージ 1 2 は、次に詳述するように、原子集団を捕捉し、光格子に閉じ込め、時計遷移を起こさせる装置である。光学系装置 1 4 は、レーザ発光装置、レーザ受光装置、レーザ分光装置などの光学的機器を備えた装置である。光学系装置 1 4 は、レーザを発光して物理パッケージ 1 2 に送る他、物理パッケージ 1 2 において原子集団が時計遷移により発光した光を受光して電気信号に変換し、周波数帯で分波するなどの処理を行う。制御装置 1 6 は、物理パッケージ 1 2 及び光学系装置 1 4 を制御する装置である。制御装置 1 6 は、光格子時計 1 0 に特化したコンピュータであり、プロセッサ及びメモリを備えたコンピュータハードウェアをソフトウェアによって制御することで動作する。制御装置 1 6 は、例えば、物理パッケージ 1 2 の動作制御、光学系装置 1 4 の動作制御などの他、計測により得られた時計遷移の周波数解析などの解析処理も行っている。物理パッケージ 1 2、光学系装置 1 4、及び制御装置 1 6 は、相互に密接に連携をして、光格子時計 1 0 を形成している。

#### 【 0 0 2 1 】

P C 1 8 は、汎用的なコンピュータであり、プロセッサ及びメモリを備えたコンピュータハードウェアをソフトウェアによって制御することで動作する。P C 1 8 には、光格子時計 1 0 を制御するアプリケーションプログラムがインストールされている。P C 1 8 は、制御装置 1 6 に接続されており、制御装置 1 6 のみならず、物理パッケージ 1 2 と光学系装置 1 4 を含む光格子時計 1 0 の全体にかかる制御を行っている。また、P C 1 8 は、光格子時計 1 0 の U I ( User Interface ) となっており、ユーザは、P C 1 8 を通じて、光格子時計 1 0 の起動、時間計測、結果確認などを行うことができる。本実施形態では、物理パッケージ 1 2 を中心に説明を行う。なお、物理パッケージ 1 2 と、その制御に必要な構成を含むものを物理パッケージシステムと呼ぶことがある。制御に必要な構成は、制御装置 1 6 または P C 1 8 に含まれる場合があるが、物理パッケージ 1 2 自体に内蔵される場合もある。

#### 【 0 0 2 2 】

図 2 は、実施形態にかかる光格子時計の物理パッケージ 1 2 を模式的に示した図である。また、図 3 は、物理パッケージ 1 2 の外観の例を示す図であり、図 4 は図 3 に示した物理パッケージ 1 2 の内部構造を部分的に透視的に示す図である。図 2 ~ 4 ( 及び以後の図 ) には、後述する原子が時計遷移分光の際に存在し得る対象空間 ( 時計遷移空間 5 2 ) を原点とする X Y Z 直交直線座標系を図示して、方向を明示している。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 2 3 】

物理パッケージ 1 2 は、真空チャンバ 2 0、原子オープン 4 0、ゼーマン減速器用コイル 4 4、光学共振器 4 6、MOT (Magneto-Optical Trap (磁気光学トラップ)) 装置用コイル 4 8、低温槽 5 4、熱リンク部材 5 6、冷凍機 5 8、真空ポンプ本体 6 0、及び、真空ポンプカートリッジ 6 2 を備える。

## 【 0 0 2 4 】

真空チャンバ 2 0 は、物理パッケージ 1 2 の主要部分を真空に保つ容器であり、略円柱形に形成されている。詳細には、真空チャンバ 2 0 は、大きな略円柱形状に形成された本体部 2 2 と、本体部 2 2 から突起した小さな略円柱形状に形成された突起部 3 0 とを備える。本体部 2 2 は、内部に後述する光学共振器 4 6 等を格納した部位である。本体部 2 2 は、円柱の側面をなす円筒壁 2 4 と、円柱の円形の面をなす前部円形壁 2 6 及び後部円形壁 2 8 とを備える。前部円形壁 2 6 は、突起部 3 0 が設けられた壁である。後部円形壁 2 8 は、突起部 3 0 とは反対側の壁であり、円筒壁 2 4 に比べて拡張された形状に形成されている。

10

## 【 0 0 2 5 】

突起部 3 0 は、円柱の側面をなす円筒壁 3 2 と、前部円形壁 3 4 とを備える。前部円形壁 3 4 は、本体部 2 2 から遠い側の円形の面である。突起部 3 0 における本体部 2 2 の側は、大部分が開口された形状となって本体部 2 2 と接続されており、壁部を有しない。

## 【 0 0 2 6 】

真空チャンバ 2 0 は、本体部 2 2 の円柱の中心軸 (この軸を Z 軸と呼ぶ) がほぼ水平になるように配置される。また、突起部 3 0 の円柱の中心軸 (この軸はビーム軸となる) は、Z 軸の鉛直方向上方において、Z 軸に平行に延びている。

20

## 【 0 0 2 7 】

真空チャンバ 2 0 は、例えば、Z 軸方向に 3 5 c m 程度以下、X 軸方向及び Y 軸方向に 2 0 c m 程度以下に形成することを想定している。さらに小型化を進めて、Z 軸方向の長さを 3 0 c m 程度以下、2 5 c m 程度以下、あるいは、2 0 c m 程度以下とすることも想定される。また、X 軸方向及び Y 方向についても、1 5 c m 程度以下、あるいは 1 0 c m 程度以下とすることも十分に可能であると想定される。また、ビーム軸と Z 軸の距離は、例えば、1 0 ~ 2 0 m m 程度に設定される。

## 【 0 0 2 8 】

実施形態では、真空チャンバ 2 0 の本体部 2 2 下部における四隅付近には、4 本の脚 3 8 が設けられており、真空チャンバ 2 0 を支える。真空チャンバ 2 0 は、内部が真空になった場合の気圧差に耐えられるように、SUS (ステンレス) などの金属を用いて、十分頑強に作られている。真空チャンバ 2 0 は、後部円形壁 2 8 と前部円形壁 3 4 とが取り外し可能に形成されており、保守点検時などに取り外される。

30

## 【 0 0 2 9 】

原子オープン 4 0 は、突起部 3 0 の先端付近に設けられた装置である。原子オープン 4 0 は、設置した固体金属をヒータで加熱し、熱運動により金属から飛び出した原子を細孔から放出して、原子ビーム 4 2 を形成する。原子ビーム 4 2 が通るビーム軸は、Z 軸と平行に設定されており、X 軸とは原点から若干離れた位置において交差するように設定されている。交差する位置は、後述する原子が捕捉される微小な空間である捕捉空間 5 0 に相当する。原子オープン 4 0 は、基本的には、真空チャンバ 2 0 の内部に設けられているが、冷却のために、放熱部が真空チャンバ 2 0 の外にまで延びている。原子オープン 4 0 では、例えば、7 5 0 K 程度にまで金属が加熱される。金属としては、例えば、ストロンチウム、水銀、カドミウム、イッテルビウムなどが選ばれるが、これらに特に限定されるものではない。

40

## 【 0 0 3 0 】

ゼーマン減速器用コイル 4 4 は、原子オープン 4 0 のビーム軸の下流側において、真空チャンバ 2 0 の突起部 3 0 から本体部 2 2 に渡って配置されている。ゼーマン減速器用コイル 4 4 は、原子ビーム 4 2 の原子を減速するゼーマン減速器と、減速した原子を捕捉す

50

る MOT 装置を融合させた装置である。ゼーマン減速器と、MOT 装置は、いずれも原子レーザー冷却技術に基づく装置である。図 2 に示されたゼーマン減速器用コイル 44 には、ゼーマン減速器で用いられるゼーマンコイルと、MOT 装置で用いられる 1 対の MOT コイルの一方が、一連のコイルとして設けられている。明確な区分けはできないが、大まかには、上流側から下流側までの大部分が、ゼーマン減速法に寄与する磁場を発生するゼーマンコイルに相当し、最下流側が MOT 法に寄与する勾配磁場を生成する MOT コイルに相当する。

#### 【0031】

図示した例では、ゼーマンコイルは上流側ほど巻回数が多く下流側ほど巻回数が少ないディクリーシング型となっている。ゼーマン減速器用コイル 44 は、ゼーマンコイルと MOT コイルの内側に原子ビーム 42 が通るように、ビーム軸の周囲に軸対称に配置されている。ゼーマンコイルの内側には、空間的に勾配が付けられた磁場が形成され、ゼーマン減速光ビーム 82 が照射されることで、原子の減速が行われる。

10

#### 【0032】

光学共振器 46 は、Z 軸周りに配置される円筒形の部品であり、内側に光格子が形成される。光学共振器 46 には、複数の光学部品が設置されている。X 軸上の 1 対の光学ミラーと、それと平行してもう 1 対の光学ミラーを備え、計 4 枚のミラー間で光格子光を多重反射することで、ボウタイ型の光格子共振器を生成する。捕捉空間 50 で捕捉された原子集団は、この光格子の内部に閉じ込められる。また、光学共振器 46 では、共振器に入射させる 2 本（右回り、左回り）の光格子光の相対周波数をシフトさせた場合、光格子の定在波が移動する移動光格子を形成する。移動光格子によって、原子集団は、時計遷移空間 52 に移動される。実施形態では、移動光格子を含む光格子を X 軸上に形成されるように設定されている。なお、光格子としては、X 軸に加えて、Y 軸上と Z 軸の一方または両方にも格子が並ぶ 2 次元、または 3 次元のものを採用することも可能である。このように、光学共振器 46 は、光格子を形成する光格子形成部ということが出来る。光学共振器 46 も、原子レーザー冷却技術に基づく装置である。

20

#### 【0033】

MOT 装置用コイル 48 は、捕捉空間 50 に対して、勾配磁場を生成する。MOT 装置では、勾配磁場を形成した空間に X Y Z の 3 軸に沿って MOT 光が照射される。これにより、MOT 装置は、捕捉空間 50 に原子を捕捉する。捕捉空間 50 は、X 軸上に設定されている。図 2 に示されたゼーマン減速器用コイル 44 には、ゼーマン減速器で用いられるゼーマンコイルと、MOT 装置で用いられる 1 対の MOT コイルの一方が、一連のコイルとして設けられている。この図では、MOT 法に寄与する勾配磁場は、MOT 装置用コイル 48 と、ゼーマン減速器用コイル 44 の一部と合わせて生成される。

30

#### 【0034】

低温槽 54 は、時計遷移空間 52 を囲むように形成され、内側の空間を低温に保つ。これにより、内側の空間では黒体放射が低減される。低温槽 54 には、支持構造を兼ねた熱リンク部材 56 が取り付けられている。熱リンク部材 56 は、低温槽 54 から冷凍機 58 へ熱を伝導する。冷凍機 58 は、熱リンク部材 56 を介して、低温槽 54 を低温化する装置である。冷凍機 58 は、ペルチエ素子を備えており、低温槽 54 を例えば 190 K 程度に冷却する。

40

#### 【0035】

真空ポンプ本体 60 と真空ポンプカートリッジ 62 は、真空チャンバ 20 を真空化するための装置である。真空ポンプ本体 60 と真空ポンプカートリッジ 62 は、その後、真空チャンバ 20 の真空化を行う装置である。真空ポンプ本体 60 は、真空チャンバ 20 の外側に設けられており、真空ポンプカートリッジ 62 は、真空チャンバ 20 の内側に設けられている。真空ポンプカートリッジ 62 は、起動開始時に、真空ポンプ本体 60 に設けられたヒータによって加熱され活性化される。これにより、真空ポンプカートリッジ 62 が活性化されて、原子を吸着することで、真空化を行う。

#### 【0036】

50

真空ポンプカートリッジ 6 2 は、本体部 2 2 において、ゼーマン減速器用コイル 4 4 と並置するように設置されている。ゼーマン減速器用コイル 4 4 は、本体部 2 2 の円柱の中心軸に対して、X 軸方向に偏心したビーム軸に沿って配置されている。このため、ゼーマン減速器用コイル 4 4 が偏心した方向とは反対側には、比較的大きな空間がある。真空ポンプカートリッジ 6 2 は、この空間に設置されている。

【 0 0 3 7 】

物理パッケージ 1 2 は、光学系の部品として、光格子光用耐真空光学窓 6 4、6 6、MOT 光用耐真空光学窓 6 8、ゼーマン減速光および MOT 光用耐真空光学窓 7 0、7 2、及び、光学ミラー 7 4、7 6 を備える。

【 0 0 3 8 】

光格子光用耐真空光学窓 6 4、6 6 は、真空チャンバ 2 0 の本体部 2 2 における向かい合う円筒壁 2 4 に対面して設けられた耐真空の光学窓である。光格子光用耐真空光学窓 6 4、6 6 は、光格子光を入射及び出射するために設けられている。

【 0 0 3 9 】

MOT 光用耐真空光学窓 6 8 は、MOT 装置で用いる 3 軸の MOT 光のうち、2 軸の MOT 光を入射及び出射するために設けられている。

【 0 0 4 0 】

ゼーマン減速光および MOT 光用耐真空光学窓 7 0、7 2 は、ゼーマン減速光と 1 軸の MOT 光を入射及び出射するために設けられている。

【 0 0 4 1 】

光学ミラー 7 4、7 6 は、ゼーマン減速光と 1 軸の MOT 光の方向を変えるために設けられている。

【 0 0 4 2 】

また、物理パッケージは、冷却用の部品として、原子オープン用冷却器 9 0、ゼーマン減速器用冷却器 9 2、及び、MOT 装置用冷却器 9 4 を備える。

【 0 0 4 3 】

原子オープン用冷却器 9 0 は、原子オープン 4 0 を冷却する水冷装置である。原子オープン用冷却器 9 0 は、真空チャンバ 2 0 の外に設けられており、原子オープン 4 0 のうち真空チャンバ 2 0 の外に延びた放熱部を冷却する。原子オープン用冷却器 9 0 は、冷却用の管である金属製の水冷管を備えており、内部に液体冷媒である冷却水を流すことで、真空チャンバ 2 0 を冷却する。

【 0 0 4 4 】

ゼーマン減速器用冷却器 9 2 は、真空チャンバ 2 0 の壁部に設けられ、ゼーマン減速器用コイル 4 4 を冷却する装置である。ゼーマン減速器用冷却器 9 2 は、金属製のパイプを備えており、内部に冷却水を流すことで、ゼーマン減速器用コイル 4 4 のコイルで発生するジュール熱を奪う。

【 0 0 4 5 】

MOT 装置用冷却器 9 4 は、真空チャンバ 2 0 の円壁部に設けられた放熱部である。MOT 装置用コイル 4 8 では、ゼーマン減速器用冷却器 9 2 よりも小さい（例えば 1 / 1 0 程度）が、コイルにジュール熱が発生する。そこで、MOT 装置用コイル 4 8 からは、MOT 装置用冷却器 9 4 の金属が真空チャンバ 2 0 の外まで延びており、大気中に熱を放出する。

【 0 0 4 6 】

さらに、物理パッケージ 1 2 は、磁場を補正するための部品として、3 軸磁場補正コイル 9 6、耐真空電気コネクタ 9 8、冷凍機用個別磁場補償コイル 1 0 2、及び、原子オープン用個別磁場補償コイル 1 0 4 を備える。

【 0 0 4 7 】

3 軸磁場補正コイル 9 6 は、時計遷移空間 5 2 における磁場を均一にゼロ化するためのコイルである。3 軸磁場補正コイル 9 6 は、X Y Z の 3 軸方向の磁場を補正するように立体的な形状に形成されている。図 4 に示した例では、3 軸磁場補正コイル 9 6 は、全体と

10

20

30

40

50

して略円筒形状に形成されている。3軸磁場補正コイル96を構成する各コイルは、各軸方向において、時計遷移空間52を中心として点対称な形状に形成されている。

【0048】

耐真空電気コネクタ98は、真空チャンバ20内に電力を供給するためのコネクタであり、真空チャンバ20の円壁部に設けられている。耐真空電気コネクタ98からは、ゼーマン減速器用コイル44、MOT装置用コイル48、及び3軸磁場補正コイル96に電力が供給される。

【0049】

冷凍機用個別磁場補償コイル102は、低温槽54を冷却する冷凍機58からの漏洩磁場を補償するためのコイルである。冷凍機58が備えるペルチエ素子は、相対的に大きな電流が流される大電流デバイスであり、大きな磁場を発生させる。ペルチエ素子の周囲は、高透磁率材によって磁場を遮蔽しているが、完全には遮蔽できず一部の磁場が漏洩する。そこで、冷凍機用個別磁場補償コイル102は、時計遷移空間52におけるこの漏洩磁場を補償するように設定されている。

【0050】

原子オープン用個別磁場補償コイル104は、原子オープン40のヒータからの漏洩磁場を補償するためのコイルである。原子オープン40のヒータも大電流デバイスであり、高透磁率材による遮蔽にもかかわらず、漏洩磁場が無視できない場合がある。たとえば、ヒータ回路を無誘導巻配線で構成したとしても、配線端末や絶縁層を介した配線などにおいて、現実的に誘導成分が残ってしまうことがある。また、たとえば、原子オープンを高透磁率材で覆い磁気遮蔽を図った場合であっても、原子ビーム開口部など、現実的に覆えない部分が存在してしまうことがある。そこで、原子オープン用個別磁場補償コイル104は、時計遷移空間52におけるこの漏洩磁場を補償するように設定されている。

【0051】

(2) 物理パッケージの動作

物理パッケージ12の基本的な動作について説明する。物理パッケージ12では、真空チャンバ20の内部に備わった真空ポンプカートリッジ62が原子を吸着することで、真空チャンバ20の内部が真空化される。これにより、真空チャンバ20の内部は、例えば、 $10^{-8}$  Pa程度の真空状態となり、窒素、酸素などの空気成分の影響が排除される。使用する真空ポンプの種類に応じて、あらかじめ前処理を実施しておく。たとえば、非蒸発型ゲッターポンプ(NEGポンプ)やイオンポンプなどでは、それを稼働する前に、大気からある程度の真空度に粗引きしておく必要がある。この場合、真空チャンバに粗引きポートを備えておき、そのポートから例えばターボ分子ポンプなどを利用して十分に粗引きしておく。また、たとえば、真空ポンプ本体60としてNEGポンプを使用する場合には、あらかじめ、真空中で高温に熱する活性化という工程を実施しておく必要がある。

【0052】

原子オープン40では、金属がヒータによって加熱されて高温化し、原子蒸気を生成する。この過程で金属から飛び出した原子蒸気は、次々と細孔を通り抜け、集束され並進し、原子ビーム42を形成する。原子オープン40は、原子ビーム42がZ軸に平行なビーム軸上に形成されるように設置されている。なお、原子オープン40では、原子オープン本体は、ヒータによって加熱されるが、原子オープン本体と、それを支持する継手とは熱絶縁体を介して断熱され、さらに物理パッケージに接続される継手は、原子オープン用冷却器90に依って冷却されており、物理パッケージ12へ高温化の影響が及ぶことを防止しないしは低減している。

【0053】

ゼーマン減速器用コイル44は、ビーム軸に対して軸対称となるように設置されている。ゼーマン減速器用コイル44の内部には、ゼーマン減速光ビーム82及び1軸のMOT光ビーム84が照射されている。ゼーマン減速光ビーム82は、ゼーマン減速光およびMOT光用耐真空光学窓70から入射され、MOT装置用コイル48よりもビームの下流に設置された光学ミラー74によって反射される。これにより、ゼーマン減速光ビーム82

10

20

30

40

50

は、原子ビーム 4 2 と重なりながら、ビーム軸にほぼ平行にビーム軸の上流に向かう。この過程で、磁場の強さに比例したゼーマン分裂による効果とドップラーシフトによる効果によって、原子ビーム 4 2 中の原子は、ゼーマン減速光を吸収し、減速方向に運動量を与えられて減速する。ゼーマン減速光は、ゼーマン減速器用コイル 4 4 の上流において、ビーム軸の脇に置かれた光学ミラー 7 6 によって反射され、ゼーマン減速光および MOT 光用耐真空光学窓 7 2 から出射される。なお、ゼーマン減速器用コイル 4 4 では、ジュール熱が発生するが、ゼーマン減速器用冷却器 9 2 による冷却が行われるため、高温化が防止される。

#### 【 0 0 5 4 】

十分に減速された原子ビーム 4 2 は、ゼーマン減速器用コイル 4 4 の最下流側の MOT コイルと、MOT 装置用コイル 4 8 とによって形成される MOT 装置に至る。MOT 装置内では、捕捉空間 5 0 を中心に、線形的な空間勾配をもつ磁場が形成されている。また、MOT 装置には、3 軸方向において、正の側及び負の側から MOT 光が照射されている。

10

#### 【 0 0 5 5 】

Z 軸方向の MOT 光ビーム 8 4 は、Z 軸の負方向に向けて照射され、さらに、ゼーマン減速光および MOT 光用耐真空光学窓 7 2 の外で反射されることで Z 軸の正方向に向けても照射される。残る 2 軸の MOT 光ビーム 8 6 a、8 6 b は、MOT 光用耐真空光学窓 6 8 と、図示を省略した光学ミラーによって MOT 装置内に照射される。図 4 に示すように、この 2 軸は、Z 軸に垂直で、かつ、X 軸と Y 軸とそれぞれ 4 5 度をなす 2 つの方向に照射される。2 本の MOT 光ビーム 8 6 a、8 6 b を Z 軸に垂直とすることで、ゼーマン減速器用コイル 4 4 と、MOT 装置用コイル 4 8 との間隔を狭めることができ、真空チャンバ 2 0 の小型化に寄与している。MOT 光ビームを照射する方向を Z 軸及び Y 軸とそれぞれ 4 5 度をなす角度に設定する場合、MOT 光ビームがゼーマン減速器や低温槽と干渉しないように、ビーム軸方向の距離を大きくとる必要がある。この場合では、MOT 光の 2 軸が Z 軸に垂直であった場合に比べ、装置のサイズが大きくなってしまふ。

20

#### 【 0 0 5 6 】

MOT 装置内では、原子ビームは、磁場勾配のために、捕捉空間 5 0 を中心に復元力を受けるようにして減速される。これにより、原子集団は、捕捉空間 5 0 に捕捉される。なお、捕捉空間 5 0 の位置の微調整は、3 軸磁場補正コイル 9 6 の発生磁場のオフセット値調整によって行うことができる。また、MOT 装置用コイル 4 8 で発生するジュール熱は、MOT 装置用冷却器 9 4 によって真空チャンバ 2 0 外に排出される。

30

#### 【 0 0 5 7 】

光格子光ビーム 8 0 は、光格子光用耐真空光学窓 6 4 から光格子光用耐真空光学窓 6 6 へ向けて、X 軸上に入射される。X 軸上には、2 つの光学ミラーを備える光学共振器 4 6 が設置されて、反射を起こす。このため、X 軸上では、光学共振器 4 6 の内部に、X 軸方向に定在波が連なった光格子ポテンシャルを形成する。原子集団は、光格子ポテンシャルに捕獲される。

#### 【 0 0 5 8 】

光格子は、波長を若干変化させることで、X 軸に沿って移動させることができる。この移動光格子による移動手段によって、原子集団は、時計遷移空間 5 2 まで移動される。この結果、時計遷移空間 5 2 は、原子ビーム 4 2 のビーム軸から外れるため、高温の原子オープン 4 0 が発する黒体輻射の影響を除去することができる。また、時計遷移空間 5 2 は、低温槽 5 4 によって囲われており、周囲の常温の物質が発する黒体輻射から遮蔽されている。一般に、黒体輻射は、物質の絶対温度の 4 乗に比例するため、低温槽 5 4 による低温化は、黒体輻射の影響除去に大きな効果がある。

40

#### 【 0 0 5 9 】

時計遷移空間 5 2 では、光周波数を制御したレーザ光を原子に照射し、時計遷移（すなわち時計の基準となる原子の共鳴遷移）の高精度分光を行い、原子固有かつ不変な周波数を計測する。これにより、正確な原子時計が実現する。原子時計の精度を高めるためには、原子を取り巻く摂動を排除し、周波数を正確に読みだす必要がある。とくに重要なこと

50

は、原子の熱運動によるドップラー効果が引き起こす周波数シフトの除去である。光格子時計では、時計レーザーの波長に比べて十分に小さい空間に、レーザー光の干渉によって作る光格子で原子を閉じ込めることで、原子の運動を凍結させる。一方で、光格子内では、光格子を形成するレーザー光によって原子の周波数がずれてしまう。そこで、光格子光ビーム 80 としては、「魔法波長」あるいは「魔法周波数」と呼ばれる特定の波長・周波数を選ぶことで、光格子が共鳴周波数に与える影響を除去する。

#### 【 0 0 6 0 】

時計遷移は、さらに、磁場によっても影響を受ける。磁場中の原子は、磁場の強さに応じたゼーマン分裂を起こすため、時計遷移を正確に計測することができなくなる。そこで、時計遷移空間 52 では、磁場を均一化し、かつゼロにするように磁場の補正が行われる。まず、冷凍機 58 のペルチエ素子に起因する漏洩磁場は、漏洩磁場の大きさに応じた補償磁場を発生する冷凍機用個別磁場補償コイル 102 によって動的に補償される。同様に、原子オープン 40 のヒータに起因する漏洩磁場は、原子オープン用個別磁場補償コイル 104 によって、動的に補償できるように設定されている。なお、ゼーマン減速器用コイル 44 及び MOT 装置用コイル 48 については、時計遷移の周波数を計測するタイミングにおいて、電流信号を OFF として、通電せず、磁場の影響が及ばないようにしている。時計遷移空間 52 の磁場は、さらに、3 軸磁場補正コイル 96 によって補正される。3 軸磁場補正コイル 96 は、各軸の方向に複数設けられており、磁場の一樣成分のみならず、空間的に変化する成分についても除去することができる。

#### 【 0 0 6 1 】

このようにして、擾乱を除去した状態で、原子集団はレーザー光により時計遷移を促される。時計遷移の結果発光する光は、光学系装置によって受光され、制御装置によって分光処理等されて、周波数が求められる。以下では、物理パッケージ 12 についての実施形態を詳細に説明する。

#### 【 0 0 6 2 】

##### ( 3 ) 磁場補正コイルの形状と設置態様

図 5 ~ 図 11 を参照して、物理パッケージ 12 における 3 軸磁場補正コイル 96 について説明する。ここでは、3 軸磁場補正コイル 96 は、銅などの導線の周囲にポリイミド樹脂などで絶縁処理した被覆導線を巻回して所定の形状に形成することを想定している。

#### 【 0 0 6 3 】

図 5 は、3 軸磁場補正コイル 96 の全コイルを示す斜視図である。また、図 6 ~ 図 11 は、3 軸磁場補正コイルを構成する個々のコイルを示す斜視図である。3 軸磁場補正コイル 96 は、真空チャンバ 20 の本体部 22 の内壁付近に取り付けられる。このため、3 軸磁場補正コイル 96 は、時計遷移空間 52 を中心とする略円筒の形状に形成されている。3 軸磁場補正コイル 96 は、X 軸、Y 軸、Z 軸の各軸方向において、それぞれ、第 1 コイル群と第 2 コイル群により形成されている。

#### 【 0 0 6 4 】

図 6 は、X 軸方向 ( 1 軸の光格子が形成される方向であり、移動光格子が移動する方向である ) における第 1 コイル群 120 について示す図である。第 1 コイル群 120 は、時計遷移空間 52 を中心として、X 軸方向に距離  $c$  だけ離間して設置された二つのコイル 122, 124 からなる。コイル 122, 124 はともに Y 軸方向の辺の長さが  $a$ 、Z 軸方向の辺の長さが  $b$  に設定された長方形に形成されている。また、コイル 122, 124 は、時計遷移空間 52 に対して点対称な形状に形成されている。

#### 【 0 0 6 5 】

第 1 コイル群 120 は、中心部の X 軸方向の磁場を略均一に生成できるように、コイル 122, 124 を正方形のヘルムホルツ型のコイルに形成している。正方形のヘルムホルツ型のコイルとは、コイル 122, 124 が  $a = b$  の正方形に形成され、かつ、 $c / 2a = 0.5445$  程度であるものをいう。コイル 122, 124 は、同じ方向に同じ大きさの電流を流したときには、X 軸方向に均一度の高い磁場を形成するヘルムホルツコイルペアとなる。ただし、実施形態ではコイル 122, 124 には、大きさ及び方向が異なる電

流を流すことができる。なお、コイル 1 2 2 , 1 2 4 は、 $a > b$  とした場合にも十分に磁場の均一性を高めることが可能である。 $a > b$  の場合には、Z 軸方向の磁場分布に比べて、Y 軸方向の磁場分布の偏差が少なくなる傾向にあり、 $a < b$  の場合には、Y 軸方向の磁場分布に比べて、Z 軸方向の磁場分布の偏差が少なくなる傾向にある。 $a = b$  の場合において、 $c$  を最適化したものを長方形のヘルムホルツ型コイルと呼ぶことにする。第 1 コイル群 1 2 0 を長方形のヘルムホルツ型のコイルとすることも可能である。

#### 【 0 0 6 6 】

第 1 コイル群 1 2 0 は、X 軸方向の磁場成分について、その値と X 軸方向への空間 1 階微分項を調整するために用いられる。まず、1) コイル 1 2 2 , 1 2 4 に同じ方向に同じ大きさの電流を流した場合には、時計遷移空間 5 2 に対して X 軸方向にほぼ勾配のない均一な磁場を生成する。他方、2) コイル 1 2 2 , 1 2 4 に逆方向に同じ大きさの電流を流した場合には、時計遷移空間 5 2 に対して X 軸方向にほぼ一様な勾配をもつ磁場を形成する。そして、コイル 1 2 2 , 1 2 4 に流す電流の大きさと方向を適当に変更した場合には、1) と 2) の線形和からなる磁場が形成される。このため、第 1 コイル群 1 2 0 は、時計遷移空間 5 2 における X 軸方向の磁場成分  $B_x$  について、定数項成分の補正と、X 軸方向の空間 1 階微分項の補正を行うことができる。

#### 【 0 0 6 7 】

図 7 は、X 軸方向における第 2 コイル群 1 3 0 について示す図である。第 2 コイル群 1 3 0 は、時計遷移空間 5 2 を中心として、X 軸方向に離間して設置された二つのコイル 1 3 2 , 1 3 4 からなる。コイル 1 3 2 , 1 3 4 は、方形のコイルを半径  $e$  の同一の円筒面に乗るように曲率を持たせて変形した形状に形成されており、中心角は  $f$ 、Z 軸方向の高さは  $g$  に設定されている。この円筒面は、図 6 の第 1 コイル群 1 2 0 が固定される円筒面とほぼ同程度の半径に形成されているため、 $e^2 = (a/2)^2 + (c/2)^2$  の関係にある。また、コイル 1 3 2 , 1 3 4 は、時計遷移空間 5 2 に対して点対称な形状に形成されている。

#### 【 0 0 6 8 】

第 2 コイル群 1 3 0 は、ヘルムホルツコイルの形状とは異なる非ヘルムホルツ型のコイルである。また、第 2 コイル群のコイル 1 3 2 , 1 3 4 は電氣的に接続されており、同方向に同じ大きさの電流が流される。すなわち、コイル 1 3 2 , 1 3 4 には、ともに矢印 1 3 6 の方向に電流が流されるか、ともに矢印 1 3 8 の方向に電流が流される。第 2 コイル群 1 3 0 は、非ヘルムホルツ型のコイルであるため、中心である時計遷移空間 5 2 では、ヘルムホルツコイルに準じた一様な成分に加えて、非一様な成分も生成される。ただし、電流の大きさ及び方向が同じであるため、非一様な成分は、主として空間 2 階微分項の成分となる。すなわち、第 2 コイル群 1 3 0 は、時計遷移空間 5 2 における X 軸方向の磁場成分  $B_x$  について、定数項成分の補正と、X 軸方向の空間 2 階微分項の補正とを行うことができる。

#### 【 0 0 6 9 】

3 軸磁場補正コイル 9 6 のうち、X 軸方向の磁場成分  $B_x$  について制御を行うのは、基本的には、X 軸方向の第 1 コイル群 1 2 0 と第 2 コイル群 1 3 0 である。そこで、これらを合わせて、X 軸磁場補正コイルと呼ぶことにする。補正を行う際には、まず、第 2 コイル群 1 3 0 によって X 軸方向の空間 2 階微分項の値がゼロ化される。続いて、第 1 コイル群 1 2 0 によって、X 軸方向の空間 1 階微分項の値をゼロ化するとともに、X 軸方向の定数項の値をゼロにする調整を行う。

#### 【 0 0 7 0 】

図 8 は、Y 軸方向における第 1 コイル群 1 4 0 について示す図である。第 1 コイル群 1 4 0 は、方形のコイルが曲率を持つように変形し、時計遷移空間 5 2 を中心とする半径  $h$  の円筒面に乗るように形成されている。第 1 コイル群は、コイル 1 4 3 とコイル 1 4 4 からなる複合コイル 1 4 2 と、コイル 1 4 6 とコイル 1 4 7 からなる複合コイル 1 4 5 が、Y 軸方向に離間して設置されている。コイル 1 4 3、1 4 4、1 4 6、1 4 7 は、中心角を  $i$ 、Z 軸方向の高さを  $j$  に設定されている。コイル 1 4 3、1 4 4 は互いの端を重ね合

10

20

30

40

50

わせるかまたは隣接させて形成されている。同様にコイル 1 4 6、1 4 7 は、互いの端を重ね合わせるかまたは隣接させて形成されている。複合コイル 1 4 2 と複合コイル 1 4 5 は、時計遷移空間 5 2 を中心として点対称に形成されている。また、コイル 1 4 3 とコイル 1 4 6、及び、コイル 1 4 4 とコイル 1 4 7 も、それぞれ、時計遷移空間 5 2 を中心として点対称に形成されている。

#### 【 0 0 7 1 】

まず、3) コイル 1 4 3、1 4 4 に同方向に同じ大きさの電流を流した場合を考える。この場合、重ね合わせまたは隣接させた部分の電流が打ち消し合って、複合コイル 1 4 2 全体が大きな一つのコイルのようにふるまう。同様に、コイル 1 4 6、1 4 7 にも同方向に同じ大きさの電流を流した場合には、複合コイル 1 4 5 全体が大きな一つのコイルのようにふるまう。第 1 コイル群 1 4 0 は、複合コイル 1 4 2 と複合コイル 1 4 5 とが 1 対のヘルムホルツ型のコイルとなるように設定されている。図 8 に示した円筒面上のヘルムホルツ型のコイル(すなわち 2 つの方形のコイルを曲げて同一の円筒面上に配置したヘルムホルツ型のコイル)は、中心角が約 1 2 0 度に設定されているものをいう。Z 軸方向の長さは特に限定されないが、Z 軸方向の長さが円筒の半径に比べて長いほど、中心部の磁場均一性が高くなることが知られている。第 1 コイル群 1 4 0 は、流す電流の方向及び大きさを調整することで、中心付近において、磁場の Y 軸方向の成分を均一化することができる。

10

#### 【 0 0 7 2 】

次に、4) ヘルムホルツコイルを形成する場合の電流から若干変更する。具体的には、コイル 1 4 3 とコイル 1 4 7 の電流のみを同方向に若干大きくする。この場合、磁場の Y 軸方向の成分が X 軸方向の空間 1 階微分項の値をもつことになる。なお、厳密には、コイル 1 4 3 とコイル 1 4 7 が作る磁場は、X 軸方向の成分ももっており、第 1 コイル群 1 4 0 の調整を行う場合には、X 軸磁場補正コイルの調整も必要となる。

20

#### 【 0 0 7 3 】

図 9 は、Y 軸方向における第 2 コイル群 1 5 0 について示す図である。図 9 に示した第 2 コイル群 1 5 0 は、Y 軸方向に向かい合う 1 対のコイル 1 5 2、1 5 4 からなる。コイル 1 5 2、1 5 4 はそれぞれ、半径  $k$  の円形コイルに曲率を持たせて、時計遷移空間 5 2 を中心とする半径  $l$  の円筒面上に載せた形状に形成された非ヘルムホルツ型のコイルである。非ヘルムホルツ型のコイルでは、磁場の空間 2 階微分項の成分も形成される。そこで、第 2 コイル群 1 5 0 は、Y 軸方向の磁場成分  $B_y$  における X 軸方向の空間 2 階微分項の制御に用いられる。

30

#### 【 0 0 7 4 】

図 8 に示した Y 軸方向の第 1 コイル群 1 4 0 と図 9 に示した Y 軸方向の第 2 コイル群 1 5 0 は、基本的には、Y 軸方向の磁場成分  $B_y$  の補正する Y 軸磁場補正コイルを形成する。Y 軸磁場補正コイルは、Y 軸方向の磁場成分  $B_y$  の定数項、X 軸方向の空間 1 階微分項、及び、X 軸方向の空間 2 階微分項を補正することができる。

#### 【 0 0 7 5 】

図 1 0 は、Z 軸方向における第 1 コイル群 1 6 0 を示す図である。第 1 コイル群 1 6 0 は、半径  $m$  の円形の複合コイル 1 6 2、1 6 5 が距離  $n$  を隔てて対面して配置されている。複合コイル 1 6 2、1 6 5 は、中心に対して点対称の関係にある。また、複合コイル 1 6 2 は、半円形のコイル 1 6 3、1 6 4 の互いの弦を重ね合わせるかまたは隣接させることで形成されている。半円形のコイル 1 6 3 は X 軸の正の側に配置され、半円のコイル 1 6 4 は X 軸の負の側に配置されている。同様に、複合コイル 1 6 5 は、X 軸の正の側にある半円形のコイル 1 6 6 と、X 軸の負の側にある半円のコイル 1 6 7 を組み合わせて形成されている。

40

#### 【 0 0 7 6 】

複合コイル 1 6 2、1 6 5 は、ヘルムホルツ型のコイルとなるようにサイズ等が設定されている。円形のヘルムホルツコイルは  $m = n$  の関係にある。複合コイル 1 6 2、1 6 5 は、両者に同じ向きで同じ大きさの電流を流した場合に、中心付近における Z 方向の磁場

50

の均一度がヘルムホルツコイルと実質的に等価になる範囲に設定されている。ただし、複合コイル 162 を構成するコイル 163、164 では、電流の向き及び大きさを自由に変更することができる。このため、図 8 に示した Y 方向の第 1 コイル群 140 と同様にして、第 1 コイル群 160 は、Z 方向の磁場成分  $B_z$  の定数項と、X 軸方向の空間 1 階微分項について補正できる。

【0077】

図 11 は、Z 軸方向の第 2 コイル群 170 を示す図である。第 2 コイル群 170 は、半径  $p$  の円形のコイル 172、174 が、Z 軸方向に距離  $q$  だけ離間して対面配置されている。第 2 コイル群 170 は、非ヘルムホルツ型のコイルである。非ヘルムホルツ型のコイルでは、一様ではない成分を有する。このため、Z 軸方向の磁場成分  $B_z$  の X 軸方向の空間 2 階微分項について補正することができる。

10

【0078】

図 10 に示した Z 軸方向の第 1 コイル群 160 と図 11 に示した Z 軸方向の第 2 コイル群 170 は、基本的には Z 軸方向の磁場成分  $B_z$  を補正する Z 軸磁場補正コイルを形成する。Z 軸磁場補正コイルは、Z 軸方向の磁場成分  $B_z$  の定数項、X 軸方向の空間 1 階微分項、及び、X 軸方向の空間 2 階微分項を補正することができる。

【0079】

図 5 に示した 3 軸磁場補正コイル 96 は、X 軸磁場補正コイル、Y 軸磁場補正コイル、及び、Z 軸磁場補正コイルを組み合わせることで形成されている。3 軸磁場補正コイル 96 は、X 軸方向の磁場成分  $B_x$  については、定数項、X 軸方向の空間 1 階微分項、X 軸方向の空間 2 階微分項を補正可能である。Y 軸方向の磁場成分  $B_y$  については、定数項、X 軸方向の空間 1 階微分項、X 軸方向の空間 2 階微分項を補正可能である。そして、Z 軸方向の磁場成分  $B_z$  については、定数項、X 軸方向の空間 1 階微分項、X 軸方向の空間 2 階微分項を補正可能である。

20

【0080】

3 軸磁場補正コイル 96 では、時計遷移空間 52 の磁場の値を均一にゼロにする補正を行う。時計遷移空間 52 は、1 次元の光格子では、例えば、X 軸方向（格子の方向）に 10 mm、Y 軸及び Z 軸の方向に 1 ~ 2 mm 程度の大きさに設定される。この空間を、例えば、磁場の誤差が  $3 \mu\text{G}$  以内、 $1 \mu\text{G}$  以内あるいは  $0.3 \mu\text{G}$  以内となるように磁場を制御する。3 軸磁場補正コイル 96 で用いるヘルムホルツ型のコイル及び非ヘルムホルツ型のコイルは、この磁場を形成できるように精度が設定される。

30

【0081】

3 軸磁場補正コイル 96 は、図 4 に示すように、時計遷移空間 52 を中心として点対称性を有する形状に形成されており、時計遷移空間 52 の磁場補正を精度よく行うことが可能である。しかし、巨視的に見れば、捕捉空間 50 も 3 軸磁場補正コイルの中心付近に存在する。このため、MOT 装置による捕捉空間 50 の磁場を補正するために利用することも可能となる。すなわち、MOT 装置を起動して原子ビーム 42 から原子を捕捉する期間には、捕捉空間 50 の磁場補正を行うように電流を制御する。そして、捕捉が終わった後には、ゼーマン減速器用コイル 44 と MOT 装置用コイル 48 への送電を停止するとともに、時計遷移空間 52 の磁場補正を行うようにすればよい。こうすることで、捕捉空間 50 の位置を高精度で調整し、効率よく光格子に原子集団を閉じ込めることが可能となる。

40

【0082】

図 12 は、3 軸磁場補正コイル 96 を取り付ける円筒形のホルダ 180 を示す図である。ホルダ 180 は、円環状のフレーム 182、184 の間を 8 本の直線状のフレーム 186 で繋いで形成されている。3 軸磁場補正コイル 96 は、ホルダ 180 の内壁及び外壁に取り付けられる。そして、ホルダ 180 は、真空チャンバ 20 の本体部 22 の後部円形壁 28 に固定される。3 軸磁場補正コイル 96 をホルダ 180 に取り付けることで、物理パッケージ 12 の組み立て及び保守点検作業が効率化される。

【0083】

ホルダ 180 は、3 軸磁場補正コイル 96 が作る磁場に影響を与えないように、低透磁

50

率材である樹脂、アルミなどを用いて形成される。また、ホルダ 180 は、本体部 22 の円柱の中心軸と同軸にして、本体部 22 の内部に設置される。ホルダ 180 は、本体部 22 の内径に近いサイズに形成される。このため、3 軸磁場補正コイル 96 及びホルダ 180 は、本体部 22 の内部のスペースをほとんど占有しない。ただし、X 軸方向の第 1 コイル群 120 であるコイル 122, 124 については、本体部 22 の内側を直線的に横切って取り付けられる。

#### 【0084】

ホルダ 180 は、フレームを用いて疎構造に形成されている。疎構造とは、各面に多くの隙間がある構造をいう。ホルダ 180 を疎構造とすることで、軽量化される他、真空チャンバ 20 に入出射されるレーザー光などとの干渉防止が容易となる。

10

#### 【0085】

3 軸磁場補正コイル 96 は、ホルダ 180 の内壁及び外壁に分散して取り付ける代わりに、例えば、全てホルダ 180 の内壁に取り付けてもよいし、全てホルダ 180 の外壁に取り付けてもよい。この場合には、例えば、3 軸磁場補正コイル 96 を外壁に押し付ける円環形状の留め具、あるいは、内壁に押し付ける円環形状の留め具を使って、簡単に固定をすることが可能となる。また、3 軸磁場補正コイル 96 は、ホルダ 180 を使わずに、本体部 22 の内壁に固定することも可能である。

#### 【0086】

以上に示した 3 軸磁場補正コイル 96 は、被覆導線を 1 周または複数周巻回して形成することを想定した。しかし、3 軸磁場補正コイル 96 は、一部または全部を、フレキシブルプリント基板で形成することが可能である。

20

#### 【0087】

図 13 は、平面上に展開されたフレキシブルプリント基板を示す図である。フレキシブルプリント基板には、補正コイル 190 が形成されている。補正コイル 190 は、プリントされた銅などの電気伝導体からなり磁場形成に参加する電流路 192 と、シート状のフレキシブルな樹脂等で形成された絶縁部 194 から成り、フレキシブルに曲げることができる。各電流路 192 は一端に集中的に設けられた配線路 196 に接続されている。配線路 196 も、電気伝導体のプリントにより形成されている。配線路は、電流が往復するペアを隣接配置して、周囲に形成する磁場を相殺している。配線路 196 はターミナルコネクタ 198 に接続されている。

30

#### 【0088】

図 14 は、真空チャンバ 20 の本体部 22 にあわせて、円筒形状に折り曲げた補正コイル 190 を示す図である。補正コイル 190 は、2 つの端が接続または隣接配置された境界部 199 を備える。なお、図 14 では、配線路 196 とターミナルコネクタ 198 は省略している。

#### 【0089】

上述した被覆導線を巻回した 3 軸磁場補正コイル 96 と同様に、フレキシブルプリント基板で構成する 3 軸磁場補正コイルも、本体部 22 の円筒形状の内壁または円筒形状のホルダ 180 に取り付けられることを想定している。ただし、3 軸磁場補正コイル 96 では、円筒面上に配置された電流路の他に、円筒面から遊離した電流路が存在した。具体的には、図 6 に示した X 軸方向の第 1 コイル群 120 における長さ a の辺と、図 10 に示した Z 軸方向における第 1 コイル群 160 の直線部分は、円筒面から遊離している。そこで、以下では、3 軸磁場補正コイル 96 を構成する電流路のうち、円筒面に配置された電流路を、フレキシブルプリント基板で形成する例について説明する。

40

#### 【0090】

図 15 と図 16 は、図 10 に示した Z 軸方向における第 1 コイル群 160 の円形部分のコイルをフレキシブルプリント基板により形成する例を示す図である。図 15 に示すように、黒色線の電流路 202 に反時計回りの電流を流し、灰色線の電流路 200 には電流を流さない。このとき、隣接し互いに反対方向に流れる電流は、相殺し合うことを考慮すると、図 16 に示した仮想的な電流路 203 に電流を流す場合と等価であると考えられる。

50

## 【 0 0 9 1 】

図 1 7 と図 1 8 は、図 8 に示した Y 軸方向における第 1 コイル群 1 4 0 における最外周のコイルを、フレキシブルプリント基板により形成する例について示す図である。図 1 7 では、黒色線の電流路 2 0 6 に反時計回りの電流を流し、灰色線の電流路 2 0 4 には電流を流さない。このとき、隣接し互いに反対方向に流れる電流は、相殺し合うことを考慮すると、図 1 8 に示した仮想的な電流路 2 0 8 に電流を流す場合と等価であると考えられる。

## 【 0 0 9 2 】

このようにして、フレキシブルプリント基板では、円筒面の外周を円筒中心軸周りに一周して還流する電流路、円筒面内を円筒中心軸を周ることなく還流する電流路など、様々な電流路を形成することができる。

10

## 【 0 0 9 3 】

フレキシブルプリント基板では、図 1 3 のように、展開図において、長方形の電流路から成るパターンをプリントすることができる。また、図 1 9 に示した補正コイル 2 1 0 のように、長方形の電流路 2 1 2 と円形の電流路 2 1 4 を含む複合的なパターンもプリントすることができる。物理パッケージ 1 2 では、真空チャンバ 2 0 の壁面付近には、レーザー光の経路、耐真空光学窓などが設けられるため、円形の電流路 2 1 4 を設けて干渉を防止することが有効となる。また、フレキシブルプリント基板では、図 1 6、図 1 8 に示したようなコイルを形成してもよい。また、フレキシブルプリント基板は、複数枚を重ねて利用することが可能であり、複数枚を用いて 3 軸磁場補正コイルの一部または全部を形成することができる。

20

## 【 0 0 9 4 】

フレキシブルプリント基板では、絶縁部 1 9 4 の樹脂から微量なガスが放出される場合がある。そこで、絶縁部 1 9 4 は、ポリイミド系樹脂など、ガスの放出量が少ない材料を選択する。また、製造工程では、脱気処理、脱泡処理、洗浄処理等を行う他、適当な温度での焼出処理を行うことが考えられる。

## 【 0 0 9 5 】

フレキシブルプリント基板により形成された 3 軸磁場補正コイルは、様々な形で真空チャンバ 2 0 に設置可能である。例えば、3 軸磁場補正コイルを円筒形状に曲げた状態で、本体部 2 2 に内壁面付近に設置し、3 軸磁場補正コイルを本体部 2 2 に押し付けるような留め具で固定することが考えられる。あるいは、ホルダ 1 8 0 に取り付けて設置してもよい。疎構造なホルダ 1 8 0 に代えて、面的にフレキシブルプリント基板を支持できるように、面に孔があまり無い密構造なホルダを用いてもよい。

30

## 【 0 0 9 6 】

他方、円筒面から遊離した電流路については、被覆導線を用いて別途形成することができる。あるいは、ホルダの構造を変更することで、円筒面から遊離した電流路についても、フレキシブルプリント基板を用いて形成することが可能となる。

## 【 0 0 9 7 】

フレキシブルプリント基板を利用した 3 軸磁場補正コイルは、被覆導線を巻回した 3 軸磁場補正コイル 9 6 に比べて、真空チャンバ 2 0 への装着が容易となる他、製造再現性の高さ、製品歩留まり向上などの利点がある。

40

## 【 0 0 9 8 】

なお、3 軸磁場補正コイルのコイル形状は、他にも様々な設定可能である。例えば、3 軸のそれぞれにおいて、2 つの円形コイルの中間に、サイズの大きい円形コイルを並べることで、マックスウェル型の 3 軸磁場補正コイルを形成することができる。マックスウェル型の 3 軸磁場補正コイルでは、磁場の定数項、空間 1 階微分項、及び空間 2 階微分項の成分について補正をすることができる。

## 【 0 0 9 9 】

さらに、3 軸のそれぞれにおいて、所定の大きさと間隔で設けられた大きな 1 対の円形コイルの外側に、所定の大きさと間隔で設けられた小さな円形コイルを配置することで、テトラ型の軸磁場補正コイルを形成することができる。テトラ型の 3 軸磁場補正コイルで

50

は、定数項、空間 1 階微分項、空間 2 階微分項、及び空間 3 階微分項の成分の補正を行うことが可能となる。

【 0 1 0 0 】

以上に示した軸磁場補正コイルは、全体として球または球を若干ゆがめた形状を有する。このため、特に、略球形状の真空チャンバの内壁または内壁付近に取り付けることで、真空チャンバの内部空間を有効活用することが可能となる。

【 0 1 0 1 】

図 20 は、図 4 に対応する図であり、物理パッケージ 218 の外観と内部を概略的に示す図である。図 4 と同一または対応する構成には、同一の符号を付している。物理パッケージ 218 の真空チャンバ 220 は、略球形状の本体部 222 と、突起部 30 によって形成されている。

10

【 0 1 0 2 】

本体部 222 の内部には、時計遷移空間 52 を中心とし、円形コイルにより形成された 3 軸磁場補正コイル 224 が設けられている。図面の簡潔化のため、図 20 では、各軸方向に 1 対のヘルムホルツ型のコイルを図示しているにすぎないが、実際には、各軸にはさらに 1 対以上の非ヘルムホルツ型のコイルも設けることを想定している。3 軸磁場補正コイル 224 の外縁は、ほぼ球面となるように設定することができる。このため、略球形の本体部 222 の内壁付近に設置することで、本体部 222 の内部空間に設置される他の部品との干渉を防止することが可能となり、設計自由度も高まる。

【 0 1 0 3 】

同様にして、3 軸磁場補正コイルは、正方形コイルを用いて構築することも可能である。円形コイルと同様に、1 対の正方形コイルを用いたヘルムホルツ型の 3 軸磁場補正コイル、3 つの正方形コイルを用いたマックスウェル型の 3 軸磁場補正コイル、2 対の正方形コイルを用いたテトラ型の 3 軸磁場補正コイルなどを採用することができる。これらの 3 軸磁場補正コイルは、全体として立方体または立方体を若干ゆがめた形状を有する。そこで、略立方体形状または略直方体形状の真空チャンバの内壁または内壁面に取り付けることで、真空チャンバの内部空間を有効活用することが可能となる。

20

【 0 1 0 4 】

3 軸磁場補正コイルは、本体部 22 の内壁よりも時計遷移空間 52 に近い位置に取り付けることも可能である。図 21 は、図 1 に示した光学共振器 46 の内側付近を簡略的に示す図である。ただし、図 21 では、図 1 の 3 軸磁場補正コイル 96 に代えて、ゼーマン減速器用コイル 44 と MOT 装置用コイル 48 との間の空間に、立方体型の 3 軸磁場補正コイル 230 を設けている。3 軸磁場補正コイル 230 は、低温槽 54 の内部の時計遷移空間 52 を中心として配置されている。3 軸磁場補正コイル 230 は、3 軸方向ともに、正方形コイルからなる 2 対のコイル群により形成されている。2 対のコイル群のうち 1 対はヘルムホルツ型のコイルであり、もう 1 対は非ヘルムホルツ型のコイルである。3 軸磁場補正コイル 230 は、電流の大きさ及び方向を特に制限しない場合には、空間 3 階微分項までの磁場成分を補償することができる。あるいは、図 5 ~ 図 11 に示した 3 軸磁場補正コイル 96 の非ヘルムホルツ型のコイルのように、同じ向きに同じ大きさの電流を流すようにした場合には、空間 2 階微分項までの磁場成分を簡易に補償することができる。

30

【 0 1 0 5 】

3 軸磁場補正コイル 230 は、図 5 ~ 図 11 に示した 3 軸磁場補正コイル 96 に比べて、非常に小型であり、かつ、時計遷移空間 52 に接近している。このため、時計遷移空間 52 に形成する磁場は、比較的小さな空間スケールで変化することになる。しかし、3 軸磁場補正コイル 230 は、ヘルムホルツ型のコイルにより、比較的広い範囲にわたって、定数項成分及び空間 1 階微分項成分を補償することができる。また、非ヘルムホルツ型のコイルにより、少なくとも空間 2 階微分項の磁場成分も補償することができる。したがって、時計遷移空間 52 の磁場は、十分に高い精度で一様にゼロ化される。また、3 軸磁場補正コイル 230 は、時計遷移空間 52 に近い位置にあることから、磁場を形成するために流す電流を非常に小さくすることが可能であり、省電力性に優れている。

40

50

## 【 0 1 0 6 】

図 2 2 は、図 2 1 の A の方向から見た側面図である。図 2 2 に示すように、捕捉空間 5 0 には、Z 軸に垂直で、かつ、X 軸と Y 軸とそれぞれ 4 5 度の角度をなす 2 つの MOT 光ビーム 8 6 a、8 6 b が照射されている。また、紙面に垂直な方向にも MOT 光ビーム 8 4 が照射されている。この捕捉空間 5 0 及びその周囲に形成される勾配磁場を調整するため、バイアスコイル 2 3 4 が、捕捉空間 5 0 を中心として配置されている。バイアスコイル 2 3 4 は、ビーム軸に沿って向かい合う 1 対のヘルムホルツ型の円形コイル 2 3 4 a と、X 軸に沿って向かい合う 1 対のヘルムホルツ型の正方形コイル 2 3 4 b と、Y 軸に沿って向かい合う 1 対のヘルムホルツ型の正方形コイル 2 3 4 c からなる。バイアスコイル 2 3 4 は、各軸のコイルによって定数項成分または空間 1 階微分項の成分を調整することで、勾配磁場を所望の分布に補正する。

10

## 【 0 1 0 7 】

捕捉空間 5 0 を通る X 軸には、光格子光ビーム 8 0 が照射されている。時計遷移空間に 5 2 を含む低温槽 5 4 は、この光格子光ビーム 8 0 上に設けられている。そして、低温槽 5 4 の周囲には、時計遷移空間 5 2 を中心として、3 軸磁場補正コイル 2 3 0 が設けられている。3 軸磁場補正コイル 2 3 0 は、面の法線が Z 軸に平行となるコイル群 2 3 0 b と、面の法線が Z 軸に垂直かつ X 軸及び Y 軸と 4 5 度の角度をなす 2 つのコイル群 2 3 0 a、2 3 0 c によって構成されている。すなわち、3 軸磁場補正コイル 2 3 0 は、X 軸、Y 軸、Z 軸に沿った立方体形状を、Z 軸周りに 4 5 度回転させた状態に配置されている。

20

## 【 0 1 0 8 】

3 軸磁場補正コイル 2 3 0 は、MOT 装置を支持する支持部材であるフランジ 4 4 a、4 8 a に支持されている。このため、3 軸磁場補正コイル 2 3 0 は、MOT 装置の中心である捕捉空間 5 0 に接近して配置される必要がある。他方、3 軸磁場補正コイル 2 3 0 は、捕捉空間 5 0 を通る MOT 光ビーム 8 6 a、8 6 b との干渉を避けるように配置する必要がある。そこで、3 軸磁場補正コイル 2 3 0 は、Z 軸と、MOT 光ビーム 8 6 a、8 6 b に沿った形状で配置されている。

## 【 0 1 0 9 】

3 軸磁場補正コイル 2 3 0 は、各軸方向ともにヘルムホルツ型のコイルと非ヘルムホルツ型コイルを備えており、空間高階微分項の補正を含む広い空間の磁場均一化が可能である。このため、光格子光ビーム 8 0 の方向である X 軸方向についても、高精度に磁場を補正することが可能となっている。

30

## 【 0 1 1 0 】

ただし、3 軸磁場補正コイル 2 3 0 は、捕捉空間 5 0 を囲っていないため、捕捉空間 5 0 の磁場補正を行うことができない。このため、上述のように、捕捉空間 5 0 には、勾配磁場を補正するバイアスコイル 2 3 4 が設けられている。

## 【 0 1 1 1 】

図 2 0 及び図 2 1 では、正方形コイルからなる 3 軸磁場補正コイル 2 3 0 を例に挙げた。しかし、例えば、正方形コイルに代えて円形コイルを用いるなど、他の形状のコイルを用いることも可能である。また、例えば、図 5 ~ 図 1 1 に示した円筒形状の 3 軸磁場補正コイル 9 6 を採用してもよい。

40

## 【 0 1 1 2 】

3 軸磁場補正コイルは、時計遷移空間 5 2 に近い位置と、本体部 2 2 の内壁付近の両方に設けることも可能である。例えば、本体部 2 2 の内壁付近には、ヘルムホルツ型のコイルを設け、時計遷移空間 5 2 に近い位置には、非ヘルムホルツ型のコイルを設けることが考えられる。時計遷移空間 5 2 に近い位置に非ヘルムホルツ型のコイルを設けることで、大きな曲率をもつ磁場の補正を容易に行うことが可能となる。

## 【 0 1 1 3 】

## ( 4 ) 磁場補正コイルの調整

3 軸磁場補正コイルによる磁場の調整について説明する。磁場の補正は、時計遷移空間 5 2 の周辺に対し、定期的な磁場分布を観測し、不均一な磁場分布になっていればそれを

50

相殺するように、3軸磁場補正コイル96の電流を操作する。磁場分布の観察は、光格子に閉じ込められた原子集団を、移動光格子によって移動させることで行う。これらの操作によって、原子群に含まれる個々の原子が、常に同じゼロ磁場下に置かれる状況が具現化される。

#### 【0114】

図23Aと図23Bは、3軸磁場補正コイルの調整過程を模式的に示す図である。図23Aには、移動光格子に閉じ込められた原子集団240をX軸に沿って移動させている状態を示している。また、図23Bは、蛍光遷移と時計遷移の関係について示している。

#### 【0115】

図23Aに示すように、原子集団240は、X軸方向に連なる格子の中に、ある程度の空間的な広がりをもって閉じ込められている。図中では、原子集団240が移動する代表的なX座標上の位置を、位置X1, 位置X2, 位置X3, 位置X4, 位置X5という具合に表している。これらは、磁場の補正用に設定された補正用空間242内に設定された位置である。補正用空間242は、実際の計測を行う時計遷移空間52を含む広い範囲に設定されている。実施形態では、光格子がX軸方向に延びる1次元の格子を採用しており、原子集団240がX軸方向に広がって分布していることから、特に、X軸方向の磁場を高い精度で一様にゼロ化することを目指している。そこで、補正用空間242は、X軸方向に広がりをもって設定されている。なお、光格子を2次元的に形成する場合には、時計遷移空間52を2次元方向に広げた補正用空間を設定することが望ましく、光格子を3次元的に形成する場合には時計遷移空間52を3次元方向に広げた補正用空間を設定することが望ましい。

#### 【0116】

移動した補正用空間242内の各位置において、時計遷移を励起するレーザ光を原子集団240に照射し、時計遷移を励起する。レーザ光の周波数を掃引して、各位置での時計遷移の周波数を計測する。時計遷移の励起率の観測には電子棚上げ法を用いる。電子棚上げ法では、時計遷移を励起後、原子を蛍光観測空間243に移動させる。図23Bに示すように、蛍光遷移の光を照射することにより、原子は励起率に応じて蛍光244を発光し、受光器246によって蛍光が観測される。時計遷移は各位置における磁場の大きさによってゼーマン分裂している。このため、ゼーマン分裂の情報から各位置における磁場分布が求められる。図23Aの下部には、こうして求めたX軸上の周波数分布を示している。この手法により、蛍光が観測できない場所(クライオヘッド内等)でも磁場を測定することが可能となる。また、時計遷移の励起率の測定には、電子棚上げ法の他にも、原子の位相シフトの測定を利用した非破壊測定法なども適用可能である。

#### 【0117】

図24と図25は、3軸磁場補正コイルによる磁場の補正手順を説明するフローチャートである。まず、図24に示す手順に従って、キャリアレーションが行われる。キャリアレーションでは、3軸磁場補正コイルを構成する全てのコイルの電流が止められ(0Aにセットされ)、3軸方向の磁場の分布が計測される(S10)。この磁場の計測は、例えば、小型のコイル、ホール素子などの磁気センサを用いて3軸方向の磁場を計測する。計測される磁場は、3軸磁場補正コイルを使用しない状態におけるバックグラウンドの値を表す。次に、全コイル(n個とする)に対し、一つずつ同じ大きさの電流(図24では1Aとしている)を流し、3軸方向の磁場分布を磁場センサ等により計測する(S12~S18)。得られた磁場の分布から、バックグラウンドの磁場を引くことで、各コイルが1Aの電流で形成する基本磁場を求めることができる。

#### 【0118】

このキャリアレーションでは、補正用空間242の磁場を計測してもよい。しかし、補正用空間242は、低温槽54の中にあり、磁気センサの設置は必ずしも容易ではない。そこで、補正用空間242の近傍で磁場を計測し、電磁界シミュレーションの結果と合わせて、磁場を推定するようにしてもよい。磁場の計測は、真空ではなく、大気の下で行うことも可能である。これにより、3軸磁場補正コイルの各コイルが1Aの電流で形成する

10

20

30

40

50

基本的な磁場分布を把握することが可能となる。このキャリブレーションは、原則として、物理パッケージ 1 2 を作成した段階で 1 度行えば十分である。

#### 【 0 1 1 9 】

次に、図 2 5 に示す手順に従って、磁場の補正が行われる。まず、上述のように、原子集団 2 4 0 を移動光格子により移動させて、補正用空間 2 4 2 における各位置での時計遷移の周波数を計測する ( S 2 0 )。そして、ゼーマン分裂の効果を見積もることで、補正用空間 2 4 2 における磁場分布を求める ( S 2 2 )。この磁場分布は、磁場の絶対値として得られる。

#### 【 0 1 2 0 】

続いて、各コイルが補正する磁場に対応した電流を最小二乗法などの最適化手法を用いて決定する ( S 2 4 )。すなわち、各コイルが形成する基本的な磁場を重ね合わせた場合に、補正用空間 2 4 2 に形成される磁場が一様にゼロとなるような重ね合わせの係数が求められる。なお、上述のように、ヘルムホルツ型のコイルと非ヘルムホルツ型のコイルの両方を用いる場合には、まず、非ヘルムホルツ型のコイルが生成する空間高階微分項について最小二乗法などにより最適な重ね合わせの係数を求める。次に、ヘルムホルツ型のコイルが生成する定数項および空間 1 階微分項について、最小二乗法などにより最適な重ね合わせを求める。これにより、計算が簡単化され、また、計算精度も高くなる。求めた重ね合わせの係数は、個々のコイルに流す電流の方向及び大きさとなる。求めた電流を 3 軸磁場補正コイルに流すことで、3 軸の磁場を補正することができる ( S 2 6 )。

#### 【 0 1 2 1 】

図 2 5 に示した補正は、磁場があまり変動しない通常の条件下では、必ずしも頻繁に行わなくてよい。例えば、時計遷移空間 5 2 における時計遷移の計測を繰り返す場合において、所定回数ごとに、図 2 5 に示した補正を行えば十分である。また、時計遷移空間 5 2 における時計遷移を計測した場合において、ゼーマン分裂の大きさを常に確認し、所定以上の大きさになった場合に、図 2 5 に示した補正を実施することも考えられる。

#### 【 0 1 2 2 】

3 軸磁場補正コイルにおける磁場の補正を、補正用空間 2 4 2 の範囲に対して行った場合には、時計遷移空間 5 2 の範囲に対して行った場合に比べて、時計遷移空間 5 2 の磁場の一様なゼロ化を安定的に行うことが期待できる。これは、例えば、時計遷移空間 5 2 のように狭い空間のみを対象とした場合には、磁場の若干のゆらぎ、磁場計測の誤差、各コイルの基本磁場の誤差など様々な細かなスケールの乱れの影響を受けるためと考えられる。実際、実験的には、補正用空間 2 4 2 を対象として補正を行うことで、精度が向上する結果が得られている。

#### 【 0 1 2 3 】

図 2 3 A 及び図 2 5 に示した例では、移動光格子を用いて、原子集団 2 4 0 を、補正用空間 2 4 2 の各所に移動させた。これに対し、図 2 6 は、一度で、補正用空間 2 4 2 内の磁場分布を計測する例を模式的に示す図である。

#### 【 0 1 2 4 】

図 2 6 では、補正用空間 2 4 2 の全域にわたって、原子集団 2 5 0 が光格子に閉じ込められている。原子集団 2 5 0 の蛍光 2 5 2 a、2 5 2 b、2 5 2 c、2 5 2 d、2 5 2 e は、CCDカメラ 2 5 4 によって、空間位置情報を残したまま一度に受光され、周波数が求められる。これにより、ただちに、補正用空間 2 4 2 の磁場分布が求められる。

#### 【 0 1 2 5 】

##### ( 5 ) 個別磁場補償コイル

上記 ( 1 ) で説明したように、大電流デバイスであるペルチエ素子 ( 冷凍機 5 8 ) については冷凍機用個別磁場補償コイル 1 0 2 を設け、時計遷移空間 5 2 の磁場の補償を行っている。また、原子オープン 4 0 のヒータについては原子オープン用個別磁場補償コイル 1 0 4 を設けて、時計遷移空間 5 2 の磁場の補償を行っている。大電流デバイスからの大きな漏洩磁場を全て 3 軸磁場補正コイルで補償する場合には、3 軸磁場補正コイルの高次化、電流増大などが必要となってしまう。そこで、個別磁場補償コイルを設けて磁場を補

10

20

30

40

50

償することが有効となる。ここでは、冷凍機用個別磁場補償コイル102を例に挙げて、詳細に説明する。

【0126】

図27は、低温槽54、熱リンク部材56、冷凍機58、及び、冷凍機用個別磁場補償コイル102の構成例を模式的に示す図である。低温槽54は、時計遷移空間52を囲む中空の部品である。図示を省略したが低温槽54の壁部には、内部に光格子光を通すための開口部がX軸に沿って設けられている。低温槽54は、熱伝導性の高い無酸素銅などを用いて作られている。

【0127】

低温槽54には、熱リンク部材56が取り付けられている。熱リンク部材56は、低温槽54を支持する支持構造と、低温槽54から熱を奪う経路とを兼ねた部材である。熱リンク部材56も熱伝導性の高い無酸素銅などを用いて作られる。

10

【0128】

冷凍機58は、ペルチエ素子58a、放熱板58b、断熱部材58c、パーマロイ磁場シールド58d、58eを備える。ペルチエ素子58aは、熱リンク部材56に接続されており、電流を流されることで、熱リンク部材56から熱を奪う。放熱板58bは、熱伝導性の高い無酸素銅などによって作られた部材である。放熱板58bは、真空チャンバ20の外壁に設けられて、ペルチエ素子58aから伝えられる熱を、真空チャンバ20の外壁に放出する。

【0129】

20

断熱部材58cは、パーマロイ磁場シールド58dと熱リンク部材56との間の断熱性を確保する。断熱部材58cは、熱伝導性の低いシリカなどの部材によって作られており、さらに、パーマロイ磁場シールド58dと熱リンク部材56との接点を減らすために球形に形成されている。パーマロイ磁場シールド58eは、磁場遮蔽体であり、熱伝導性が高く、透磁率も高いパーマロイを用いて作られている。パーマロイ磁場シールド58eは、ペルチエ素子58aと放熱板58bの間に設けられており、ペルチエ素子58aから放熱板58bへと熱を伝導する。

【0130】

低温槽54には、熱電対、サーミスタなどを用いた温度センサ260が設けられており、計測した温度T1を制御装置262に入力する。また、放熱板58bまたはその周辺には、温度センサ264が設けられており、計測した温度T2を制御装置262に入力する。

30

【0131】

制御装置262は、低温槽54の温度T1を常に一定の低温（例えば190K）に保つように電流を制御している。制御は、例えば、放熱板58bの側の温度T2も考慮したPID（Proportional Integral Differential）制御によって行われる。決定された電流は、電流路266を通じて、ペルチエ素子58aに流される。

【0132】

ペルチエ素子58aは、流す電流に応じて、熱を移動させる熱電素子である。電流が流されることで、ペルチエ素子58aは、低温側の熱リンク部材56（そして熱リンク部材56に接続された低温槽54）から熱を奪い、高温側のパーマロイ磁場シールド58e（そしてパーマロイ磁場シールド58eに接続された放熱板58b）に熱を放出する。

40

【0133】

ペルチエ素子58aは、例えば数アンペア程度の大きな電流が流される。このため、大きな磁場を発生させる。ペルチエ素子58aは、高透磁率材であるパーマロイ磁場シールド58dとパーマロイ磁場シールド58eによって大部分が覆われている。このため、発生した磁場の多くは、これらの部材の内部を流れて、外部に漏れださない。しかし、熱リンク部材56とペルチエ素子58aとの間には、熱伝導の効率の観点から、磁場シールドを設けることができない。このため、漏洩磁場270が発生している。漏洩磁場270は、低温槽54の内部の時計遷移空間52における磁場を乱すことになる。

【0134】

50

そこで、実施形態では、磁場シールドができない開口部位となる熱リンク部材 5 6 の周囲に、冷凍機用個別磁場補償コイル 1 0 2 を設けている。冷凍機用個別磁場補償コイル 1 0 2 は、電流が流された場合に、補償磁場 2 7 2 を生成する。

#### 【 0 1 3 5 】

冷凍機用個別磁場補償コイル 1 0 2 には、電流路 2 6 6 から分岐した電流路 2 6 8 によって電流が流される。すなわち、ペルチエ素子 5 8 a と冷凍機用個別磁場補償コイル 1 0 2 とは同一の電流路に並列接続された関係にある。ペルチエ素子 5 8 a の電気抵抗と冷凍機用個別磁場補償コイル 1 0 2 の電気抵抗は、温度によって若干変化するが、計測を行う温度環境ではどちらもほぼ定数値であるとみなしてよい。したがって、制御装置 2 6 2 から電流路 2 6 6 に流される電流は、一定の割合で、ペルチエ素子 5 8 a と冷凍機用個別磁場補償コイル 1 0 2 に配分される。

10

#### 【 0 1 3 6 】

ペルチエ素子 5 8 a に流す電流が増加する場合には、その電流の増加分に比例して、冷凍機用個別磁場補償コイル 1 0 2 に流れる電流も増加する。このため、ペルチエ素子 5 8 a からの漏洩磁場 2 7 0 が増大した場合には、冷凍機用個別磁場補償コイル 1 0 2 が生成する補償磁場 2 7 2 も同じだけ増大する。冷凍機用個別磁場補償コイル 1 0 2 は、電流路 2 6 6 にある大きさの電流が流される場合に、低温槽 5 4 の内部の時計遷移空間 5 2 における漏洩磁場 2 7 0 を補償する（反対向きで同じ大きさの磁場を生成する）ように形成されている。このため、電流が変化した場合にも、磁場の補償することができる。なお、電流路 2 6 6、2 6 8 にも電流が流れるが、電流路 2 6 6、2 6 8 では往復する電流が近接して流されるため、生成される磁場は小さく問題とはならない。

20

#### 【 0 1 3 7 】

電流路 2 6 6、2 6 8 の配置は、冷凍機用個別磁場補償コイル 1 0 2 に流す電流を漏洩磁場 2 7 0 に応じて動的に変化させる補償電流制御手段とすることができる。補償電流制御手段は、他の形態で構築することも可能であり、例えば、制御装置 2 6 2 が、演算により求めた必要な電流を冷凍機用個別磁場補償コイル 1 0 2 に流す態様を挙げることができる。

#### 【 0 1 3 8 】

図 2 7 に示した例では、冷凍機用個別磁場補償コイル 1 0 2 は、熱リンク部材 5 6 の周囲に巻回された一つのコイルによって形成されるものとした。この構成では、冷凍機用個別磁場補償コイル 1 0 2 は、真空チャンバ 2 0 の壁近くに設けられるため、低温槽 5 4 付近の構成が煩雑化することを防止できる。しかし、冷凍機用個別磁場補償コイル 1 0 2 の設置場所は特に限定されることはなく、例えば、低温槽 5 4 の近傍に設置することも可能である。冷凍機用個別磁場補償コイル 1 0 2 を低温槽 5 4 の近傍に設置する場合には、冷凍機用個別磁場補償コイル 1 0 2 の小型化及び省電力化を図ることが可能となる。

30

#### 【 0 1 3 9 】

冷凍機用個別磁場補償コイル 1 0 2 は一つのコイルではなく、複数のコイルによって形成されてもよい。時計遷移空間 5 2 における漏洩磁場の分布が複雑な場合には、複数のコイルを用いることで、比較的簡単に補償できる可能性がある。

#### 【 0 1 4 0 】

電流デバイスと、個別磁場補償コイルと、補償電流制御手段は、磁場補償モジュールを構成する。磁場補償モジュールは、精密な磁場補償を可能とするため、光格子時計 1 0 をはじめとする各種のデバイスに適用することができる。

40

#### 【 0 1 4 1 】

##### ( 6 ) ゼーマン減速器

図 2 8 は、ゼーマン減速器用コイル 4 4 と M O T 装置用コイル 4 8 の断面図である。図示したゼーマン減速器用コイル 4 4 では、ビーム軸と同軸に配置された長い円筒形状のポピン 2 8 0 の周りに、コイル 2 8 2 が巻回されている。ポピンの中心付近の中空部分は、ビーム軸に沿って原子ビーム 4 2 が流される空間である。

#### 【 0 1 4 2 】

50

機能的な観点からいえば、コイル 282 の大部分は、ビーム軸の上流側から下流に向かって巻回数がほぼ漸減しているディクリーシング型のゼーマンコイル部 284 となっている。そして、コイル 282 のビーム軸方向の最下流付近は、巻回数の多い MOT コイル部 286 となっている。ゼーマンコイル部 284 と MOT コイル部 286 の被覆導線は連続しており、また、ゼーマンコイル部 284 が作る磁場は MOT コイル部 286 の付近にまで広がり、MOT コイル部 286 が作る磁場はゼーマンコイル部 284 の下流側にまで広がる。したがって、ゼーマンコイル部 284 と MOT コイル部 286 の境界は明確には定義できないことに注意されたい。

#### 【0143】

ポピン 280 のビーム軸上流側には、ゼーマンコイル部 284 の最大半径部位よりも半径の大きい円盤形状の上流フランジ 288 が設けられている。上流フランジ 288 は、真空チャンバ 20 の突起部 30 における円筒壁 32 に取り付けられている。また、上流フランジ 288 の前部には、図示を省略したミラー支持部が取り付けられている。ミラー支持部の先端には、光学ミラー 76 が取り付けられている。

10

#### 【0144】

ポピン 280 のビーム軸下流側には、MOT コイル部 286 と同程度の半径に形成された 2 枚の円環形状の下流フランジ 290、292 が設けられている。下流フランジ 290 は、ビーム軸方向に比較的厚い円環形状に形成されており、ゼーマンコイル部 284 と MOT コイル部 286 との境界付近に設けられている。下流フランジ 292 は、ビーム軸方向に比較的薄い円環形状に形成されており、MOT コイル部 286 の下流側に設けられている。下流フランジ 290、292 は、上部を上部支持部材 312 に取り付けられ、下部を下部支持部材 314 に取り付けられる。上部支持部材 312 と、下部支持部材 314 は、それぞれ、真空チャンバ 20 の本体部 22 における後部円形壁 28 に取り付けられている。

20

#### 【0145】

MOT 装置用コイル 48 は、ゼーマン減速器用コイル 44 の下流側に、所定の距離だけ離間して配置されている。MOT 装置用コイル 48 は、ビーム軸に同軸に設けられた短い円筒形状のポピン 300 の周りに、MOT コイル 302 が巻回されている。ポピン 300 のビーム軸上流側には、MOT コイル 302 と同程度の半径をもつ薄い円環形状のフランジ 304 が設けられている。また、ポピン 300 のビーム軸方向下流側には、MOT コイル 302 と同程度の半径をもつ比較的厚い円環形状のフランジ 306 が設けられている。フランジ 304、306 の上部は、上部支持部材 312 に取り付けられて、固定されている。

30

#### 【0146】

ゼーマン減速器用コイル 44 は、ポピン 280、上流フランジ 288 及び下流フランジ 290、292 が、熱伝導性が高く、低透磁率な銅などを用いて形成されている。また、ポピン 280、上流フランジ 288 及び下流フランジ 290、292 は、溶接によって高強度にかつ密着して結合されている。

#### 【0147】

ゼーマン減速器用コイル 44 では、ビーム軸の上流側に多くのコイルが巻回されており、下流側に比べて上流側の重量が重い。そこで、上流フランジ 288 を真空チャンバ 20 の突起部 30 における円筒壁 32 に結合することで、ゼーマン減速器用コイル 44 は、安定して真空チャンバ 20 内部に配置される。

40

#### 【0148】

また、ゼーマン減速器用コイル 44 では、コイル 282 に流される電流によって発熱する。真空チャンバ 20 内は真空であるため、大気中と異なり、気体を介した熱伝導は生じない。このため、ゼーマン減速器用コイル 44 では、黒体輻射による若干の冷却作用も生じるが、主として、コイル 282 の熱を、固体を介した熱伝導により取り除く必要がある。ポピン 280 は、コイル 282 と接触しており、コイル 282 から熱が効果的に伝導される。また、上流フランジ 288 と、下流フランジ 290、292 も、コイル 282 との

50

接触面積が大きく、コイル 2 8 2 からの熱を奪う。図 2 に示したように、上流フランジ 2 8 8 は、突起部 3 0 の円筒壁 3 2 において、ゼーマン減速器用冷却器 9 2 に接続されている。ゼーマン減速器用冷却器 9 2 は、銅などで作られた水冷管の中に冷却水を循環することで、上流フランジ 2 8 8 を冷却する。こうして、ゼーマン減速器用コイル 4 4 の過剰な高温化が防止される。

#### 【 0 1 4 9 】

MOT 装置用コイル 4 8 のボビン 3 0 0、フランジ 3 0 4、3 0 6 も、熱伝導性が高く、低透磁率な銅などを用いて形成されている。また、ボビン 3 0 0、フランジ 3 0 4、3 0 6 は、溶接によって高強度にかつ密着して結合されている。MOT 装置用コイル 4 8 の MOT コイル 3 0 2 は、ゼーマン減速器用コイル 4 4 のコイル 2 8 2 に比べて小型かつ軽量であり、MOT 装置用コイル 4 8 全体も軽量である。このため、MOT 装置用コイル 4 8 は、フランジ 3 0 4、3 0 6 が固定された上部支持部材 3 1 2 を介して、後部円形壁 2 8 に安定的に取り付けられる。

10

#### 【 0 1 5 0 】

また、MOT 装置用コイル 4 8 の MOT コイル 3 0 2 では、ゼーマン減速器用コイル 4 4 のコイル 2 8 2 に比べて流される電流が小さく、発熱量も小さい。また、MOT 装置用コイル 4 8 では、MOT コイル 3 0 2 の 3 方向の周囲を、ボビン 3 0 0、フランジ 3 0 4、3 0 6 によって囲まれている。このため、MOT コイル 3 0 2 で発生した熱は、上部支持部材 3 1 2 を介して、MOT 装置用冷却器 9 4 に伝えられる。MOT 装置用冷却器 9 4 は、水冷方式を採用することを想定している。しかし、除去する熱量が小さい場合には、空冷方式とすることも可能である。

20

#### 【 0 1 5 1 】

図 2 8 の例では、コイル 2 8 2 の巻回数は、大まかには単調に減少しているが、詳細には、ビーム軸方向に凹凸が形成されている。凹凸を持たせる理由のひとつは、ビーム軸上の特定の位置で、所望の磁場強度を得るためである。例えば、原子を捕捉する捕捉空間 5 0 では、磁場をゼロにする必要がある。また、別の理由として、省電力の観点から、磁場が不要な位置には磁場を発生させない構成としていることが挙げられる。ゼーマン減速器用コイル 4 4 では、原子を減速するため、あるいは、原子を拘束するために必要な磁場を発生すれば十分である。さらに、凹凸を持たせる理由として、機械的支持あるいは熱的放熱からの要請が挙げられる。巻回数が多くなるとコイルの重量が増加するため、支持が難しくなる。また、コイルからの放熱量が増大する。このため、支持に有利な部位、あるいは、放熱効率が高い部位でコイルの巻回数を増やすことが考えられる。図 2 8 に示した例では、ゼーマン減速器用コイル 4 4 のコイル 2 8 2 は、上流フランジ 2 8 8 と接触する部位において巻回数が多い相対的に凸な形状に形成され、その下流側は相対的に巻回数が少ない相対的に凹な形状に形成されている。このため、ゼーマン減速器用コイル 4 4 の重心は上流フランジ 2 8 8 の側に移動しており、上流フランジ 2 8 8 による固定を安定化させている。また、コイル 2 8 2 と上流フランジ 2 8 8 との接触面積も大きくなるため、コイル 2 8 2 から上流フランジ 2 8 8 に効率的に熱伝導を行うことができる。

30

#### 【 0 1 5 2 】

ここで、図 2 9 を参照して、コイル中のボイド (void) について説明する。図 2 9 は、2 つのゼーマンコイル 3 2 0、3 3 0 の上部についての断面図である。ゼーマンコイル 3 2 0 は、部位 3 2 2 を含めてコイル巻回数はビーム軸方向に単調減少している。他方、ゼーマンコイル 3 3 0 は、ボイドと呼ばれる部位 3 3 2 において局所的に巻回数が少ない。しかし、ゼーマンコイル 3 3 0 では、ビーム軸方向における部位 3 3 2 の前後において巻回数が局所的に多く形成されている。このため、ゼーマンコイル 3 3 0 の全体によって作り出される磁界の分布は、ゼーマンコイル 3 2 0 が作り出す磁界の分布と実質的に等しくなる。

40

#### 【 0 1 5 3 】

ボイドとその周囲のコイル形状をどう形成するかは、理論的に求めることができる。単位電流成分が発生する磁場分布は、ビオ・サバルの法則に従う。また、磁場分布から電

50

流分布への変換は、デコンボリューション法、あるいは広く逆問題として取り扱うことができる。逆問題によって最小電流路の解を求める手法は、例えば、Mansfield P, Granne II PK. 著「NMR diffraction in solids.」J Phys C: Solid State Phys 6:L422-L427 1973年に記載されている。しかしながら、最小電流にこだわらなければ、いくつかの重解が存在することは自明である。図29において、所望の磁場分布を満たす最小電流路の解がゼーマンコイル320であるとして、ボイドの周囲の電流密度を増やしたゼーマンコイル330もまた、所望の磁場分布を形成することが可能となる。

#### 【0154】

図28に示したコイル282では、コイル282の途中に下流フランジ290が設けられた。これは、下流フランジ290は、大きなボイドの位置に設けられたことに相当する。そして、下流フランジ290のビーム方向前後では、下流フランジ290を設けない場合に比べて巻回数を多く設定することで、下流フランジ290の影響を除去または低減している。

10

#### 【0155】

図30は、ゼーマン減速器用コイル44とMOT装置用コイル48における磁場分布を示す図である。横軸はビーム軸上の位置を表しており、原点は、捕捉空間50に相当する。縦軸はビーム軸上における磁場の大きさを表している。ゼーマン減速器用コイル44とMOT装置用コイル48はビーム軸に対して対称に形成されているため、ビーム軸上の磁場はビーム軸方向の成分のみを有する。ビーム軸上には、ゼーマン減速器用コイル44のコイル282が配置される位置と、MOT装置用コイル48のMOTコイル302が配置される位置も示している。グラフ中の点は、計算により求めた磁場の値を示し、グラフ中の細線はゼーマン減速により捕捉空間50に向けて原子を減速する上で理想的な磁場の値を示している。

20

#### 【0156】

磁場はコイル282の上流側の端部よりも若干下流側で最大となる。最大値をとる位置より少し上流側では急激に磁場の値が減少し、さらに上流側でなだらかゼロに近づく。理想的な磁場は、コイル282の外側では磁場がゼロとなり、磁場が外部に漏れださない分布である。しかし、電流による磁場の生成は空間的に広がりをもつため、例えば、外部磁場を補償する(打ち消す)逆向きのコイルを設けない場合には、コイル282の外側の磁場を全てゼロにすることはできない。

30

#### 【0157】

磁場が最大値をとる位置より下流側では、磁場は単調に減少する。コイルの巻回数は、上述のように若干の凹凸をもつが、周辺のコイルの影響によって、ゼーマン減速を行う上で理想的な単調減少の磁場が作られている。この勾配を有する磁場は、ゼーマン減速を行う上での理想的な磁場分布とほぼ一致しており、原子を捕捉空間50に向けて、着実に減速できることを示している。

#### 【0158】

磁場は、コイル282の下流側の端部よりも手前から、急激に減少する。この付近にあるMOTコイル部286は、巻回数が多いが、さらに下流側にコイルが存在しないことから、磁場の値が急速に減少する。

40

#### 【0159】

磁場は、ほぼ一定の傾きで減少し、捕捉空間50でゼロとなる。さらに、磁場は同じ傾きで減少し、MOT装置用コイル48のMOTコイル302の付近で最小値(負の値が最大)となる。これは、MOTコイル302が、コイル282とは逆向きに電流を流しているためである。コイル282のMOTコイル部286付近からMOTコイル302の付近は、近似的にはヘルムホルツ型のコイルが形成されている。このため、MOTコイル302に逆向きの電流を流すことで、傾きが一定となる磁場を形成することができる。また、図示を省略するが、ビーム軸に垂直な方向にも、傾きが一定となる磁場が形成されている。MOT装置で形成されるこの勾配磁場中には、3軸のそれぞれからMOT光ビームが照射される。これにより、原子を原点である捕捉空間50に捕捉することが可能となる。M

50

O T コイル 3 0 2 よりも下流側では、磁場は徐々にゼロに近づく。

【 0 1 6 0 】

このように、ゼーマン減速器用コイル 4 4 と M O T 装置用コイル 4 8 とを組み合わせることで、ゼーマン減速器と M O T 装置を別々に設ける場合に比べて、ビーム軸方向の長さを短縮することが可能となる。また、全体のコイル長さも短くできるため、省電力化と発熱量低減を図ることができる。

【 0 1 6 1 】

なお、バックグラウンドの磁場が存在する場合には、磁場がゼロとなる位置が捕捉空間 5 0 からずれてしまう。そこで、原子を捕捉する過程では、3 軸磁場補正コイル 9 6、あるいは、勾配磁場を補正するバイアスコイルを調整して、捕捉空間 5 0 付近のバックグラウンドの磁場を打ち消す補償磁場を生成することができる。

10

【 0 1 6 2 】

次に、図 3 1 A と図 3 2 B を参照して、インクリーシング型のゼーマン減速器用コイル 3 4 0 の例を示す。図 3 1 A は、ゼーマン減速器用コイル 3 4 0 を真空チャンバ 2 0 の内部に取り付ける前の状態を示す断面図であり、図 3 1 B は、取り付け後の状態を示す断面図である。図 3 1 A に示したゼーマン減速器用コイル 3 4 0 のコイル 3 4 2 は、ビーム軸の上流側の大部分がゼーマンコイルの機能をもつゼーマンコイル部 3 4 4 となっている。また、コイル 3 4 2 の最下流側はゼーマンコイルの機能と M O T コイルの機能が混在した M O T コイル部 3 4 6 となっている。ゼーマンコイル部 3 4 4 では、上流側の端部から下流側に向けて、コイルの巻回数が単調増加している。そして、下流側の端部近くでは、凹凸が繰り返された後、最下流側で巻回数が最大となる。巻回数最大の付近を便宜的に M O T コイル部 3 4 6 と呼んでいるが、上述の通り、機能的にはゼーマンコイルの役割も果たしている。

20

【 0 1 6 3 】

ゼーマン減速器用コイル 3 4 0 は、内側にボピンを備えている。また、上流側の端部にはフランジ 3 5 0 が設けられ、下流側の端部近くではコイル 3 4 2 の途中にフランジ 3 5 2 が設けられ、下流の端部にはフランジ 3 5 4 が設けられている。フランジ 3 5 0、3 5 2、3 5 4 はボピンに溶接されている。

【 0 1 6 4 】

最上流のフランジ 3 5 0 には、図示を省略したミラー支持部が取り付けられており、ミラー支持部には光学ミラー 7 6 が固定されている。

30

【 0 1 6 5 】

下流側のフランジ 3 5 2、3 5 4 は、ボピン以外の部位でも相互に連結されて強度を高められている。フランジ 3 5 2 は、薄くかつ半径の大きな円盤となっている。フランジ 3 5 2 は、リング状に作られた円環支持部 3 7 0 に取り付けられる。円環支持部 3 7 0 のリングは、内部に冷却水を流す水冷管 3 7 2 を備えており、フランジ 3 5 2 を通じてコイル 3 4 2 を冷却する。円環支持部 3 7 0 には上部に左右 2 本の梁 3 7 4 が取り付けられ、下部に水冷管を兼ねた左右 2 本の梁 3 7 6 が取り付けられている。梁 3 7 4、3 7 6 は、真空チャンバ 2 0 の本体部 2 2 における後部円形壁 2 8 に取り付けられており、ゼーマン減速器用コイル 3 4 0 を含む全体を支持している。また、梁 3 7 4、3 7 6 は、コイル 3 4 2 の熱を後部円形壁 2 8 に伝える排熱経路となっている。なお、梁 3 7 6 に流す冷却水は、冷凍機 5 8 における放熱板 5 8 b にも循環させることができる。

40

【 0 1 6 6 】

この構成では、M O T 装置用コイル 3 8 0 は、別途設けられた支持部材によって後部円形壁 2 8 に取り付けられることを想定している。また、ゼーマン減速器用コイル 3 4 0 は、位置決め機構によって、M O T 装置用コイル 3 8 0 と位置決めされることを想定している。

【 0 1 6 7 】

図 3 2 は、図 3 0 に対応する図であり、インクリーシング型のゼーマン減速器用コイル 3 4 0 と M O T 装置用コイル 3 8 0 を用いた場合の磁気分布を示している。磁気は、ゼー

50

マン減速器用コイル 340 のコイル 342 よりも下流側から徐々に増加して、MOT コイル部 346 の手前付近で最大の値となる。この磁気の増加は、ゼーマン減速を実現するために必要となるターゲットの曲線によく一致している。最大値をとる位置よりも下流側では、磁気は急速に減少する。そして、原点である捕捉空間 50 の前後ではほぼ一定の傾きでプラスからマイナスへと減少しており、捕捉空間 50 でゼロとなっている。磁場は、MOT 装置用コイル 380 の付近で最小となり、その後は徐々にゼロに近づく。

【0168】

捕捉空間 50 の前後の MOT 装置を構成する部位においては、図 30 のディクリーシング型の場合に比べて、磁場の傾きが急激になっている。これは、コイル 342 における MOT コイル部 346 の巻回数が大きいこと、向かい合う MOT 装置用コイル 380 のコイル巻回数も大きいことなどが理由である。磁場の傾きを急にすることで、ビーム軸方向に短い距離で原子を捕捉することができる。

10

【0169】

また、図 32 に示したインクリーシング型のゼーマン減速器用コイル 340 は、図 30 のディクリーシング型のゼーマン減速器用コイル 44 に比べて、ビーム軸方向の長さを短縮することができている。これは、インクリーシング型では、効率的に原子を減速できるためである。インクリーシング型では、ディクリーシング型に比べて、原子の減速に要する磁場を抑制できるため、省電力化できる利点がある。

【0170】

他方、インクリーシング型のゼーマン減速器用コイル 340 では、捕捉空間 50 の側の方が重いため、真空チャンバ 20 の内部で支持することが難しくなる。また、インクリーシング型では、捕捉空間 50 の側のコイル巻回数が多いため、真空チャンバ 20 の中央付近での発熱量が多くなり、冷却が難しくなる課題がある。しかし、上述のように、ゼーマン減速器用コイル 340 は、冷却機能が付いた円環支持部 370 によって、真空チャンバ 20 の中央付近で支持されているため、これらの問題は生じない。

20

【0171】

図 31 A と図 31 B に示したインクリーシング型のゼーマン減速器用コイル 340 の取り付け態様は一例にすぎず、他の態様もとることができる。図 33 A と図 33 B を参照して、変形例について説明する。

【0172】

図 33 A は、ゼーマン減速器用コイル 390 を真空チャンバ 20 の内部に取り付ける前の状態を示す斜視図であり、図 33 B は取り付け後の状態を示す斜視図である。ゼーマン減速器用コイル 390 のコイル 392 は、ゼーマン減速器用コイル 340 と同様に巻回されており、ポピン及び複数のフランジ 394、396、398 を備える構成もほぼ同様である。ただし、ゼーマン減速器用コイル 390 では、ビーム方向の下端近くに設けられたフランジ 396 の形状が下半分程度の半円形状となっている。そして、フランジ 396 を支持する部位も円環を半分にした略 U 字型の半円環支持部 400 となっている。半円環支持部 400 には水冷管 402 が設けられている。

30

【0173】

図 33 A と図 33 B に示した態様では、フランジ 396 が半円形状となったことで、冷却水の循環が同程度である場合の冷却性能が若干低下する。その一方で、ゼーマン減速器用コイル 390 では、フランジ 396 の上部に空間があるため、真空チャンバ 20 の内部において、光学共振器 46 の側から原子オープン 40 の側へアクセスしやすくなっている。また、半円環支持部 400 の上部に空間ができたことで、光学共振器 46 の取り外しなども容易となっている。さらに、水冷管の上下方向の距離が短くなったことで、水冷管内における対流に起因した流れの乱れを防止しやすくなっている。なお、図 33 A、33 B に示したフランジ 396 には、面内に適宜孔部を設けることができる。孔部を設ける場合には、熱伝導の効率は低下するが、軽量化が可能となる。同様にして、図 31 A、31 B に示したフランジ 352 にも、面内に孔部を設けることが可能である。

40

【0174】

50

図34は、別の形態にかかるインクリーシング型のゼーマン減速器用コイル410の断面図である。ゼーマン減速器用コイル410では、ビーム方向に厚みの異なるボビン412を用いている。円筒形状のボビン412は、内径は一定であるが、外径は、ビーム方向の上流から下流に向けて階段状に漸減している。そして、ボビン412の周囲に巻回されたコイル414は、ビーム軸方向の下流側ほど多く巻回されている。このため、コイル414の外径はビーム軸方向にほぼ一定である。

【0175】

図34に示した構成では、ボビン412の外径を大きくすることで、ボビン412とコイル414との接触面積が大きくなるため、コイル414からボビン412への熱伝導効率が向上する。また、ボビン412の段差を利用して被覆導線を巻回できるため、コイル414の設置が容易となる。

10

【0176】

なお、本実施形態に限らないが、コイル414を構成する被覆導線は、断面が丸い丸線ではなく、断面が方形の平角線を用いることで、ボビン412等との熱伝導効率が一層向上する。また、次に示すように、コイル414の周囲を熱伝導性のカバーで覆う場合には、コイル414の外径が一定であるため、カバーをコイル414に密着させて、カバーを通じた熱の除去を行うことが容易となる。

【0177】

これまで、ゼーマン減速器を真空チャンバ20の内部に設置する例について説明してきた。コイルで発生するジュール熱を除去する冷却機構を設けることで、ゼーマン減速器を真空チャンバ20内に熱的に安定して設置することができる。以下では、別の例として、コイルの一部または全部をカバーで密封する（すなわち、カプセル化する）例について説明する。

20

【0178】

図35Aと図35Bは、ゼーマン減速器用コイル420とカバー440を示す側断面図である。図35Aは、ゼーマン減速器用コイル420にカバー440を取り付ける前の状態を示す図であり、図35Bは取り付け後の状態を示す図である。ゼーマン減速器用コイル420は、ビーム軸の方向にコイルの巻回数が漸減するディクリーシング型である。

【0179】

ゼーマン減速器用コイル420のボビン422には、ビーム軸の上流側の端部にフランジ424が設けられ、下流側の途中位置にもフランジ426が設けられている。ボビン422とフランジ424、426は、上述の例と同様に、銅などで形成されて高い熱伝導性が確保されている。フランジ424、426の外周には、ともに、インジウムで作られたシール部材428、430が設けられている。シール部材428、430は、環状（リング状ともいう）の比較的薄いシート状に形成されるか、あるいは、環状の比較的肉厚の形状に形成される。インジウムは、大きな温度変化がある場合にも、安定的に真空シールを可能とする特徴がある。また、フランジ426には、耐真空コネクタであるハーメチックコネクタ432が設けられている。

30

【0180】

ボビン422には、フランジ424とフランジ426との間にコイル434が巻回されており、フランジ426の下流側にコイル436が巻回されている。コイル434、436は、ともに、銅を樹脂で絶縁した被覆導線によって形成されている。コイル434とコイル436は、ハーメチックコネクタ432を介して電氣的に接続されている。

40

【0181】

カバー440は、円筒形に形成されている。カバー440は、ボビン422、フランジ424、426及びコイル434、436と同じ銅を用いて形成されており、熱膨張による変形を抑制している。

【0182】

カバー440は、フランジ424からフランジ426までを覆うように設置される。すなわち、カバー440の上流側端部の内周部の一部は、フランジ424の外周部の一部を

50

囲んでおり、シール部材 4 2 8 でシールされている。また、カバー 4 4 0 の下流側端部の内周部の一部は、フランジ 4 2 6 の外周部の一部を囲んでおり、シール部材 4 3 0 でシールされている。カバー 4 4 0 は、フランジ 4 2 4 からフランジ 4 2 6 までの長さに対して、プラスの公差をもつように作られており、確実に、両者を囲むことができる。

**【 0 1 8 3 】**

カバー 4 4 0 の内側は、シール部材 4 2 8、4 3 0 が確実にシールをできるのであれば、気圧の設定は自由である。例えば、大気圧の空気を封入してもよいし、粗引きの真空とすることもできる。粗引きの真空とは、ターボポンプなどを用いて希薄化した状態であり、例えば 1 Pa ~ 0.1 Pa 程度に設定される。カバー 4 4 0 の内側を粗引きの真空とした場合には、真空チャンバ 2 0 を真空にした状態において、カバー 4 4 0 の内外における圧力差が小さくなるため、シール部材 4 2 8、4 3 0 によるシール面の引き離れを強く防止することができる。

10

**【 0 1 8 4 】**

カバー 4 4 0 の内側に、窒素、ヘリウムなどの不活性ガスを封入することも可能である。不活性ガスは、コイル 4 3 4 が高温化した場合に、コイルで使われる樹脂との反応性が低い気体を選ばれる。不活性ガスの圧力も特に限定されるものではなく、例えば、1 気圧であってもよいし、粗引きの真空状態としてもよい。また、カバー 4 4 0 の内側には、例えば、発泡ウレタンなどの軽量の樹脂を充填するようにしてもよい。この場合には、カバー 4 4 0 の強度を高めることが可能となる。

**【 0 1 8 5 】**

ゼーマン減速器用コイル 4 2 0 は、通電時には、ジュール熱によって高温化する。ジュール熱は、巻回数の少ないコイル 4 3 6 よりも、巻回数の多いコイル 4 3 4 において多く発生する。このため、コイル 4 3 4 は高温化する傾向にある。高温化が進んだ場合、コイル 4 3 4 を構成する被覆導線の樹脂に含まれる微量なガスが樹脂から放出される（このガスをアウトガスという）。しかし、ゼーマン減速器用コイル 4 2 0 では、コイル 4 3 4 は、ボビン 4 2 2、フランジ 4 2 4、4 2 6 及びカバー 4 4 0 で密閉されており、アウトガスが真空チャンバ 2 0 の内部に漏れ出すことはない。このため、アウトガスによる時計遷移の誤差の発生が防止される。したがって、カバー 4 4 0 で密閉したゼーマン減速器用コイル 4 2 0 は、真空中で設置する際の利便性が高い真空設置用コイルとして機能する。

20

**【 0 1 8 6 】**

カバー 4 4 0 は、フランジ 4 2 4 とフランジ 4 2 6 との間の熱伝導媒体ともなる。すなわち、フランジ 4 2 4 とフランジ 4 2 6 との間は、ボビン 4 2 2 のみならず、カバー 4 4 0 によっても熱伝導が行われるため、コイル 4 3 4、4 3 6 の冷却を促進する効果もある。

30

**【 0 1 8 7 】**

以上の説明では、カバー 4 4 0 は、フランジ 4 2 4、4 2 6 の外周を覆うものとし、コイル 4 3 4 には接触しないことを想定した。しかし、カバー 4 4 0 をコイル 4 3 4 の外表面の一部または全部に接触させるようにしてもよい。この場合には、コイル 4 3 4 からの熱は、カバー 4 4 0 に直接熱伝導されるため、放熱効率が高められる。特に、図 3 4 に示したコイル 4 1 4 のように、コイル 4 1 4 の外径が一定である場合には、カバー 4 4 0 の内周に密着させることが容易となる。また、カバー 4 4 0 をコイル 4 3 4 の外表面と接触させる形状を形成することが難しい場合には、カバー 4 4 0 とコイル 4 3 4 との間に、熱伝導性のある部材を挿入するようにしてもよい。

40

**【 0 1 8 8 】**

図 3 5 A と図 3 5 B に示した実施形態では、カバー 4 4 0 は、コイル 4 3 4 を覆っていない。これは、コイル 4 3 4 の巻回数が少なく、アウトガスの放出対策を行う必要性が低いためである。また、コイル 4 3 4 は MOT 装置を構成する MOT コイル部を含む部分であり、近傍には光学共振器 4 6 などが配置されることから、コイル 4 3 4 をカバーで覆って大口径化することを回避している。しかし、周囲の装置・部品との干渉を回避可能であるならば、コイル 4 3 4 を含む全体をカバーで覆いカプセル化するようにしてもよい。

**【 0 1 8 9 】**

50

また、図35Aと図35Bの例では、ディクリーシング型のゼーマン減速器用コイル420を例に挙げた。しかし、インクリーシング型の場合にも、巻回数の多い部分を含む一部または全部をカプセル化することが可能である。

【0190】

なお、以上の説明においては、カバー440は、インジウムのシール部材428、430を用いて、フランジ424、426と密着させて、内部を気密化するものとした。しかし、インジウムに代えて、他の材質で形成されたシール部材を用いてもよい。シール部材を使った場合には、例えば、固定ネジを用いて、カバー440をフランジ424、426に着脱することが可能となる。しかし、例えば、カバー440とフランジ424、426とを、溶接、真空ロウ付けなどの半永久的な密閉手法により密着させて、内部を気密化するようによい。

10

【0191】

以上の説明においては、光格子時計を例に挙げた。しかし、本実施形態の各技術は、当業者であれば、光格子時計以外にも適用可能である。具体的には、光格子時計以外の原子時計、あるいは、原子を使った干渉計である原子干渉計にも適用可能である。さらに、本実施形態は、原子（イオン化された原子を含む）に対する各種の量子情報処理デバイスにも適用可能である。ここで、量子情報処理デバイスとは、原子や光の量子状態を利用して計測、センシング、情報処理を行う装置をいい、原子時計、原子干渉計の他に、磁場計、電場計、量子コンピュータ、量子シミュレータ、量子中継器などを例示することができる。量子情報処理デバイスの物理パッケージでは、本実施形態の技術を利用することで、光格子時計の物理パッケージと同様に、小型化または可搬化を達成することができる。なお、こうしたデバイスでは、時計遷移空間は、時計計測を目的とする空間ではなく、単に、時計遷移分光を起こす空間として扱われる場合があることに注意されたい。

20

【0192】

これらのデバイスでは、例えば、本実施形態にかかる3軸磁場補正コイルを設けることで、装置の精度向上を達成できる可能性がある。また、本実施形態にかかる3軸を真空チャンバ内に設けることで、物理パッケージの小型化、可搬化、または、高精度化を実現できる可能性がある。さらに、磁場補償モジュールを導入することで、磁場分布を高い精度で制御することが可能となる。また、真空チャンバを用いた物理パッケージにおいて、真空設置用コイルを設置することは効果的である。

30

【0193】

以上の説明においては、理解を容易にするため、具体的な態様について示した。しかし、これらは実施形態を例示するものであり、他にも様々な実施形態をとることが可能である。

【0194】

以下に、本実施形態の付記を示す。

(付記1)

原子が配置された時計遷移空間を囲む真空チャンバの内部に設けられ、デバイス用の電流が流されて漏洩磁場を発生させる電流デバイスと、

前記電流デバイスの近傍に設けられ、コイル用の電流が流される補償コイルと、

前記補償コイルに流す前記コイル用の電流を動的に変化させて、前記時計遷移空間に対する前記漏洩磁場を補償する制御手段と、

を備える、ことを特徴とする磁場補償モジュール。

(付記2)

付記1に記載の磁場補償モジュールにおいて、

前記電流デバイスは、前記時計遷移空間を所定の低温に維持する低温恒温槽を冷却するペルチエ素子であり、

前記制御手段は、前記低温恒温槽の温度、または、前記ペルチエ素子に流されるデバイス用の電流に応じて、前記コイル用の電流を変化させる、ことを特徴とする磁場補償モジュール。

40

50

( 付記 3 )

付記 1 に記載の磁場補償モジュールにおいて、  
前記電流デバイスの周囲には、高透磁率材で形成された磁場遮蔽体が設けられ、  
前記補償コイルは、前記磁場遮蔽体から漏れ出る前記漏洩磁場について補償する、ことを特徴とする磁場補償モジュール。

( 付記 4 )

付記 1 に記載の磁場補償モジュールにおいて、  
前記制御手段は、前記デバイス用の電流から前記コイル用の電流を分配する分配電線を備え、前記デバイス用の電流に応じて前記コイル用の電流を分配する、ことを特徴とする磁場補償モジュール。

10

( 付記 5 )

付記 1 に記載の磁場補償モジュールを備えることを特徴とする光格子時計用物理パッケージシステム。

( 付記 6 )

付記 1 に記載の磁場補償モジュールを備えることを特徴とする原子時計用物理パッケージシステム。

( 付記 7 )

付記 1 に記載の磁場補償モジュールを備えることを特徴とする原子干渉計用物理パッケージシステム。

( 付記 8 )

付記 1 に記載の磁場補償モジュールを備えることを特徴とする原子またはイオン化された原子についての量子情報処理デバイス用物理パッケージシステム。

20

( 付記 9 )

付記 1 に記載の磁場補償モジュールと、  
前記原子を前記時計遷移空間に導くゼーマン減速、磁気光学トラップ、及び、光格子トラップの少なくとも一つの原子レーザ冷却技術装置を備える、ことを特徴とする物理パッケージシステム。

( 付記 10 )

真空チャンバと、  
筒形状に形成され筒内にビーム軸に沿って原子ビームが流されるボビンと、前記ボビンの周りに巻回された一連のコイルとを備え、前記筒内に空間的に勾配が付けられた磁場を形成するゼーマン減速器と、  
を備え、

30

前記ボビンには、ビーム軸方向の途中位置において筒の外面が拡径されたフランジが設けられ、

前記一連のコイルは、前記フランジをまたいで前記ボビンに巻回されており、  
前記ゼーマン減速器は、前記フランジを直接的または間接的に前記真空チャンバに取り付けられて、前記真空チャンバ内に設置されている、  
ことを特徴とする物理パッケージ。

( 付記 11 )

40

付記 10 に記載の物理パッケージにおいて、  
前記一連のコイルは、前記原子ビームの上流側に比べて下流側の巻回数が多いインクリーシング型であり、  
前記フランジは、前記ボビンの下流側に設けられている、ことを特徴とする物理パッケージ。

( 付記 12 )

付記 11 に記載の物理パッケージにおいて、  
前記真空チャンバは、前記ビーム軸に平行に中心軸が配置された略円筒形状に形成され、  
前記フランジは、前記真空チャンバにおける前記原子ビームの下流側の円筒壁に、支持部材を用いて間接的に取り付けられている、ことを特徴とする物理パッケージ。

50

( 付記 1 3 )

付記 1 2 に記載の物理パッケージにおいて、  
前記フランジは略円形に形成され、  
前記支持部材は、前記フランジの外縁を支持する略円環状の支持部を備え、  
前記略円環状の支持部には、管に液体冷媒を流して前記フランジを冷却する冷却機構が  
設けられている、ことを特徴とする物理パッケージ。

( 付記 1 4 )

付記 1 2 に記載の物理パッケージにおいて、  
前記フランジは、鉛直下向きを含む方向に拡径された略扇形に形成され、  
前記支持部材は、前記フランジの外縁を支持する略 U 字型の支持部を備え、  
前記略 U 字型の支持部には、管に液体冷媒を流して前記フランジを冷却する冷却機構が  
設けられている、ことを特徴とする物理パッケージ。

10

( 付記 1 5 )

付記 1 0 に記載の物理パッケージにおいて、  
前記ボビン及び前記フランジは、金属で形成されており、  
当該物理パッケージには、前記フランジを直接的または間接的に冷却する冷却機構が設  
けられている、ことを特徴とする物理パッケージ。

( 付記 1 6 )

付記 1 0 に記載の物理パッケージにおいて、  
さらに、前記ゼーマン減速器から前記原子ビームの下流側に離間した位置に、前記ビー  
ム軸の周りに巻回された相手方コイルを備え、  
前記一連のコイルと前記相手方コイルは、前記一連のコイルと前記相手方コイルとの間  
に MOT 磁場を形成する、ことを特徴とする物理パッケージ。

20

( 付記 1 7 )

付記 1 0 に記載の物理パッケージを備えることを特徴とする光格子時計用物理パッケー  
ジ。

( 付記 1 8 )

付記 1 0 に記載の物理パッケージを備えることを特徴とする原子時計用物理パッケージ。

( 付記 1 9 )

付記 1 0 に記載の物理パッケージを備えることを特徴とする原子干渉計用物理パッケー  
ジ。

30

( 付記 2 0 )

付記 1 0 に記載の物理パッケージを備えることを特徴とする原子またはイオン化された  
原子についての量子情報処理デバイス用物理パッケージ。

( 付記 2 1 )

真空チャンバ内に設置され、原子ビームが流されるビーム軸の周りに巻回されて空間的  
に勾配が付けられた磁場を形成するコイルと、  
前記コイルの一部または全部を気密に囲む密閉部材と、  
を備えることを特徴とする真空設置用コイル。

( 付記 2 2 )

付記 2 1 に記載の真空設置用コイルにおいて、  
前記密閉部材は金属により形成されている、ことを特徴とする真空設置用コイル。

40

( 付記 2 3 )

付記 2 1 に記載の真空設置用コイルにおいて、  
前記密閉部材は、  
前記コイルの内周側に設けられ、前記コイルが巻回される筒形状のボビンと、  
前記ボビンの筒の外周側が拡径されて、前記コイルにおける前記ビーム軸の方向の側面を  
囲む 2 つのフランジと、  
前記 2 つのフランジの間において前記コイルの外周側を囲むカバーと、  
を備える、ことを特徴とする真空設置用コイル。

50

( 付記 2 4 )

付記 2 3 に記載の真空設置用コイルにおいて、  
前記カバーは、前記 2 つのフランジの外周の少なくとも一部を囲む、ことを特徴とする真空設置用コイル。

( 付記 2 5 )

付記 2 3 に記載の真空設置用コイルにおいて、  
前記カバーは、前記コイルの外周側の一部または全部と、直接的に接している、または、前記密閉部材により囲まれた空間に挿入された熱伝導性部材を介して間接的に接している、ことを特徴とする真空設置用コイル。

( 付記 2 6 )

付記 2 1 に記載の真空設置用コイルにおいて、  
前記コイルは、ビーム軸の方向に巻回数が異なっており、  
前記密閉部材によって囲まれる範囲には、前記コイルにおける巻回数最大の部位が含まれる、ことを特徴とする真空設置用コイル。

( 付記 2 7 )

付記 2 1 に記載の真空設置用コイルにおいて、  
前記密閉部材により囲まれた空間は、大気中に比べて希薄に保たれている、ことを特徴とする真空設置用コイル。

( 付記 2 8 )

付記 2 1 に記載の真空設置用コイルにおいて、  
前記密閉部材により囲まれた空間には、不活性ガスが封入されている、ことを特徴とする真空設置用コイル。

( 付記 2 9 )

付記 2 1 に記載の真空設置用コイルにおいて、  
前記密閉部材により囲まれた空間には、発泡性の樹脂が充填されている、ことを特徴とする真空設置用コイル。

( 付記 3 0 )

付記 2 1 に記載の光格子時計の真空設置用コイルにおいて、  
前記密閉部材は、耐真空コネクタを備え、  
前記コイルにおける前記密閉部材により気密に囲まれる部位と囲まれない部位とは、前記耐真空コネクタを通じて電氣的に接続される、ことを特徴とする真空設置用コイル。

( 付記 3 1 )

付記 2 1 に記載の真空設置用コイルと、  
前記真空チャンバとを備えることを特徴とする物理パッケージ。

( 付記 3 2 )

付記 3 1 に記載の物理パッケージにおいて、  
前記コイルは、前記原子ビームの下流側の巻回数の相対的に少ないディクリーシング型コイルであり、

当該物理パッケージは、前記ディクリーシング型コイルから前記原子ビームの下流側に離間した位置に、前記ビーム軸の周りに巻回された相手方コイルを備え、

前記ディクリーシング型コイルと前記相手方コイルは、前記ディクリーシング型コイルと前記相手方コイルとの間に MOT 装置用の勾配磁場を形成し、

前記密閉部材は、前記コイルにおける前記ビーム軸の最上流側を含む部位を気密に囲み、最下流側を含む部位を囲まない、ことを特徴とする物理パッケージ。

( 付記 3 3 )

付記 3 1 に記載の物理パッケージにおいて、  
前記コイルは、前記原子ビームの下流側の巻回数の相対的に多いインクリーシング型コイルであり、

当該物理パッケージは、前記インクリーシング型コイルから前記原子ビームの下流側に離間した位置に、前記ビーム軸の周りに巻回された相手方コイルを備え、

10

20

30

40

50

前記インクリーシング型コイルと前記相手方コイルは、前記インクリーシング型コイルと前記相手方コイルとの間にMOT装置用の勾配磁場を形成し、

前記密閉部材は、前記コイルにおける前記ビーム軸の最下流側を含む部位を気密に囲むことを特徴とする物理パッケージ。

(付記34)

付記31に記載の物理パッケージを備えることを特徴とする光格子時計用物理パッケージ。

(付記35)

付記31に記載の物理パッケージを備えることを特徴とする原子時計用物理パッケージ。

(付記36)

付記31に記載の物理パッケージを備えることを特徴とする原子干渉計用物理パッケージ。

(付記37)

付記31に記載の物理パッケージを備えることを特徴とする原子またはイオン化された原子についての量子情報処理デバイス用物理パッケージ。

(付記38)

真空チャンバ内に設置され原子ビームが流されるビーム軸の周りに巻回されて空間的に勾配が付けられた磁場を形成するコイルに対し、密閉を行う密閉部材であって、

前記コイルの側との間を、環状のシート形状または肉厚形状に形成されたインジウムでシールして、前記コイルの一部または全部を気密に囲むことを特徴とする密閉部材。

【符号の説明】

【0195】

10 光格子時計、12 物理パッケージ、14 光学系装置、16 制御装置、18 PC、20 真空チャンバ、22 本体部、24 円筒壁、26 前部円形壁、28 後部円形壁、30 突起部、32 円筒壁、34 前部円形壁、38 脚、40 原子オープン、42 原子ビーム、44 ゼーマン減速器用コイル、44a フランジ、46 光学共振器、48 MOT装置用コイル、48a フランジ、50 捕捉空間、52 時計遷移空間、54 低温槽、56 熱リンク部材、58 冷凍機、58a ペルチエ素子、58b 放熱板、58c 断熱部材、58d、58e パーマロイ磁場シールド、60 真空ポンプ本体、62 真空ポンプカートリッジ、64、66 光格子光用耐真空光学窓、68 MOT光用耐真空光学窓、70、72 MOT光用耐真空光学窓、74、76 光学ミラー、80 光格子光ビーム、82 ゼーマン減速光ビーム、84、86a、86b MOT光ビーム、90 原子オープン用冷却器、92 ゼーマン減速器用冷却器、94 MOT装置用冷却器、96 3軸磁場補正コイル、98 耐真空電気コネクタ、102 冷凍機用個別磁場補償コイル、104 原子オープン用個別磁場補償コイル、120 第1コイル群、122、124 コイル、130 第2コイル群、132、134 コイル、136、138 矢印、140 第1コイル群、142 複合コイル、143、144 コイル、145 複合コイル、146、147 コイル、150 第2コイル群、152、154 コイル、160 第1コイル群、162 複合コイル、163、164 コイル、165 複合コイル、166、167 コイル、170 第2コイル群、172、174 コイル、180 ホルダ、182、184、186 フレーム、190 補正コイル、192 電流路、194 絶縁部、196 配線路、198 ターミナルコネクタ、199 境界部、200、202、203、204、206、208 電流路、210 補正コイル、212、214 電流路、218 物理パッケージ、220 真空チャンバ、222 本体部、224、230 3軸磁場補正コイル、240 原子集団、242 補正用空間、243 蛍光観測空間、244 蛍光、246 受光器、250 原子集団、252a、252b、252c、252d、252e 蛍光、254 CCDカメラ、260 温度センサ、262 制御装置、264 温度センサ、266 電流路、268 電流路、270 漏洩磁場、272 補償磁場、280 ボビン、282 コイル、284 ゼーマンコイル部、286 MOTコイル部、288 上流フランジ、290、292 下流フランジ、300 ボビン、302 MOTコ

10

20

30

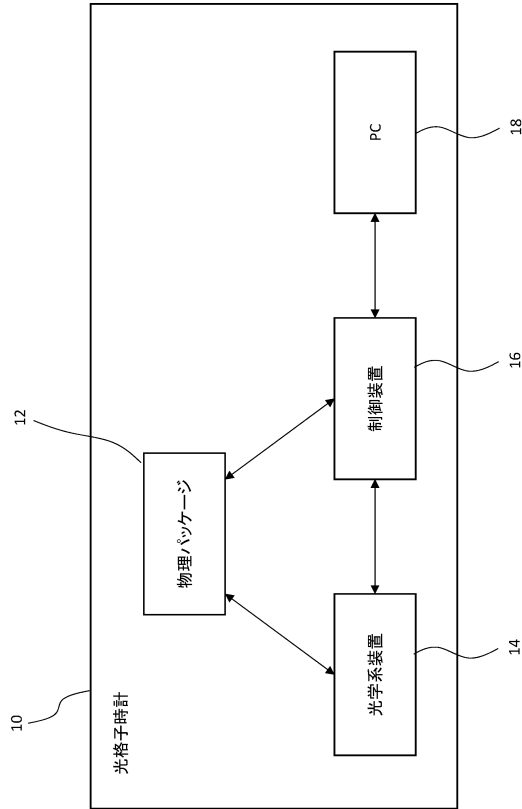
40

50

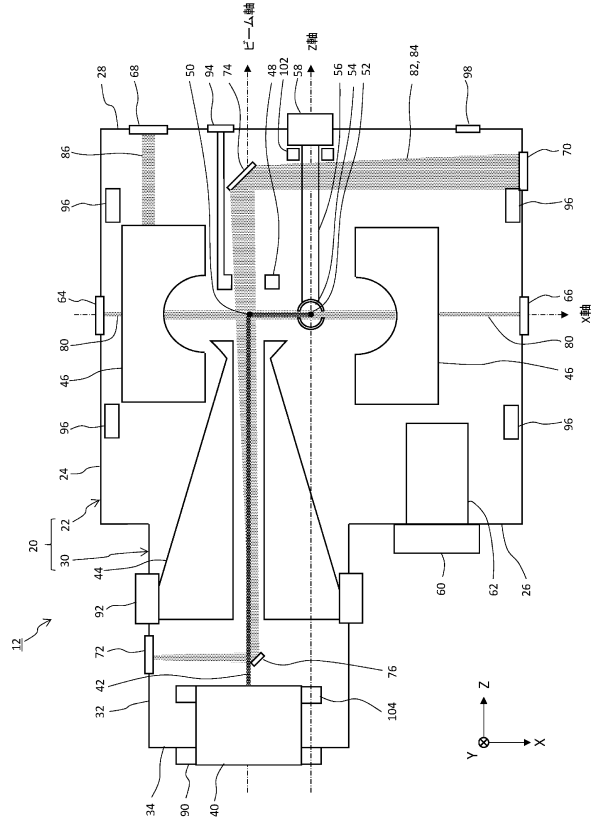
イル、304, 306 フランジ、312 上部支持部材、314 下部支持部材、320  
 ゼーマンコイル、322 部位、330 ゼーマンコイル、332 部位、340 ゼー  
 マン減速器用コイル、342 コイル、344 ゼーマンコイル部、346 MOTコイル部  
 、350, 352, 354 フランジ、370 円環支持部、372 水冷管、374, 3  
 76 梁、380 MOT装置用コイル、390 ゼーマン減速器用コイル、392 コイ  
 ル、394, 396, 398 フランジ、400 半円環支持部、402 水冷管、410  
 ゼーマン減速器用コイル、412 ポビン、414 コイル、420 ゼーマン減速器用コ  
 イル、422 ポビン、424, 426 フランジ、428, 430 シール部材、432  
 ハーメチックコネクタ、434, 436 コイル、440 カバー。

【図面】

【図 1】



【図 2】



10

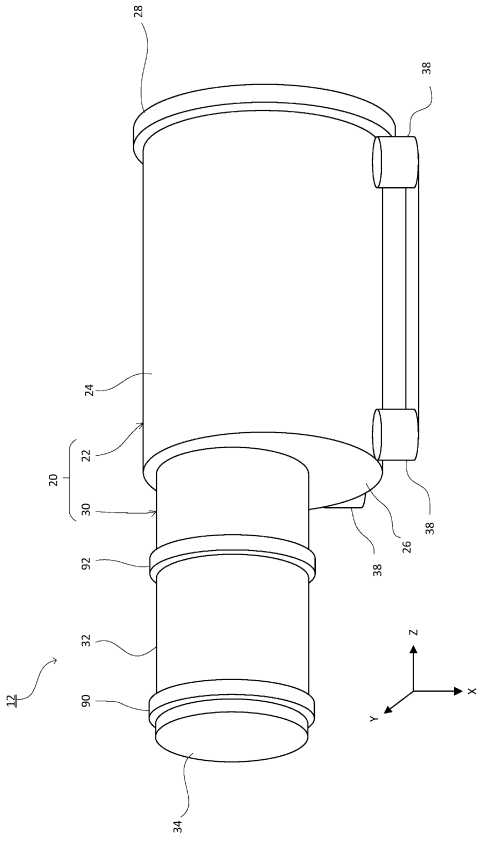
20

30

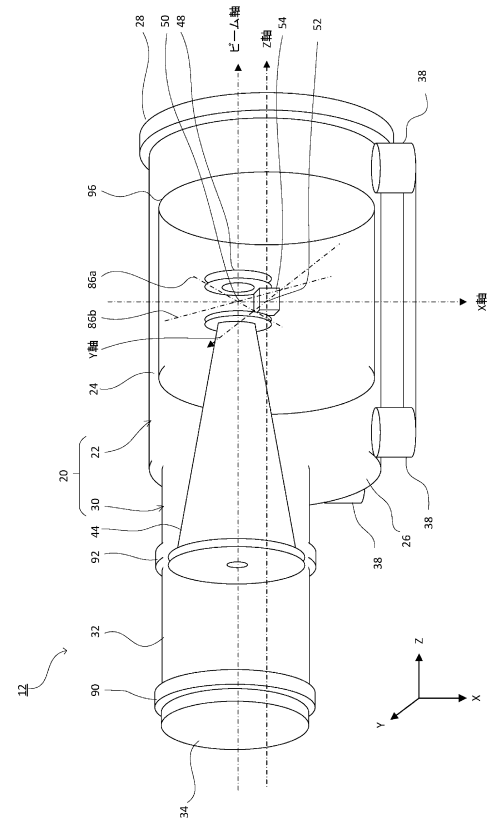
40

50

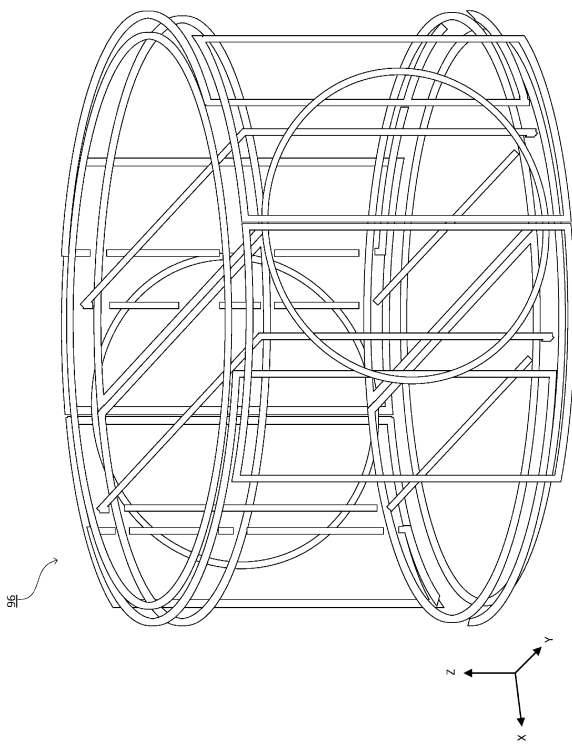
【図 3】



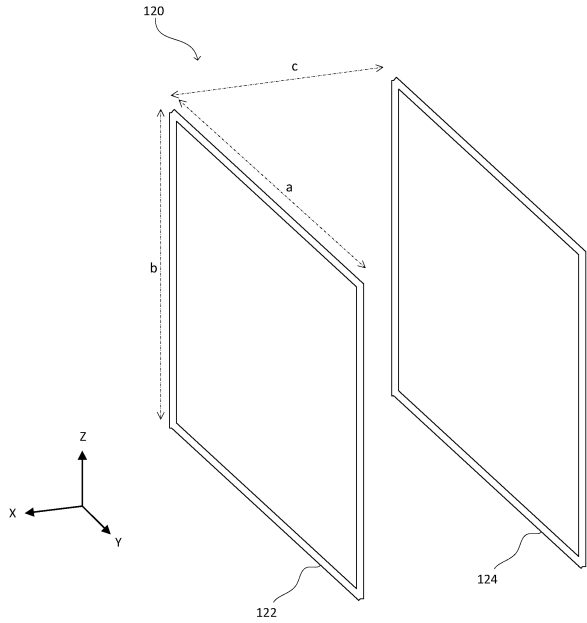
【図 4】



【図 5】



【図 6】



10

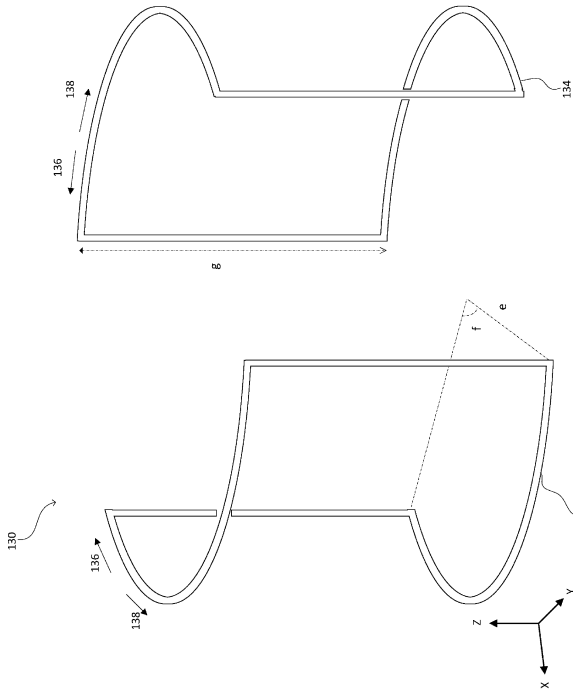
20

30

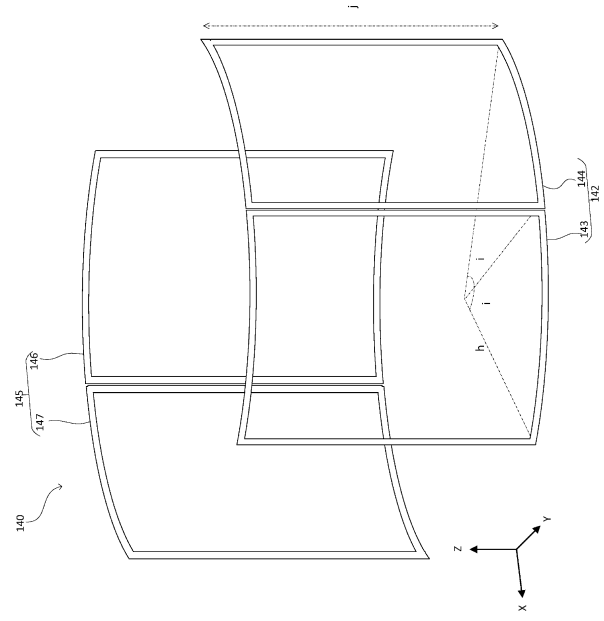
40

50

【 7 】



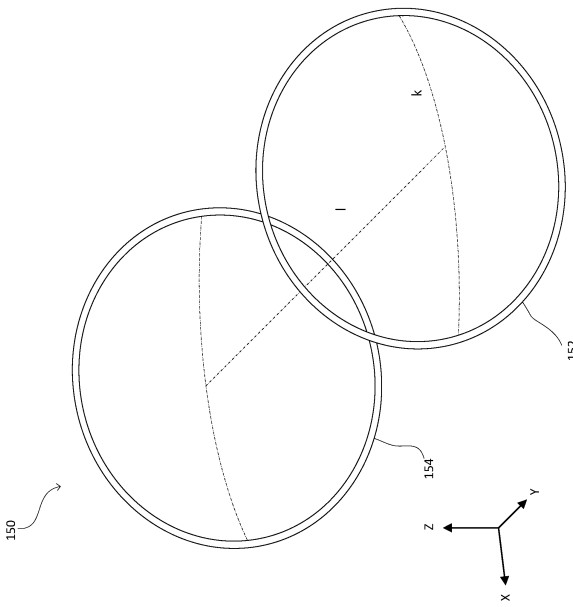
【 8 】



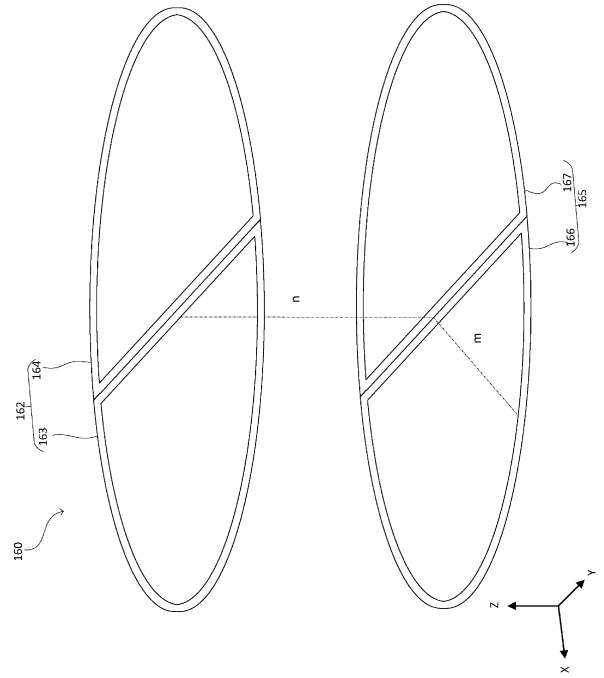
10

20

【 9 】



【 10 】

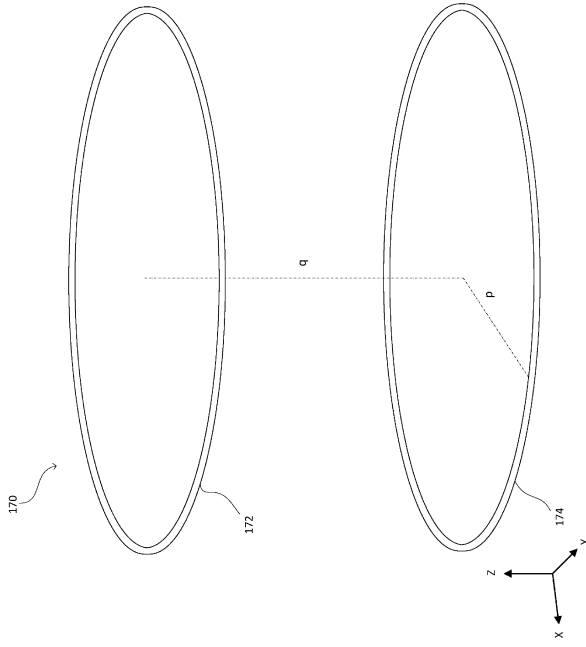


30

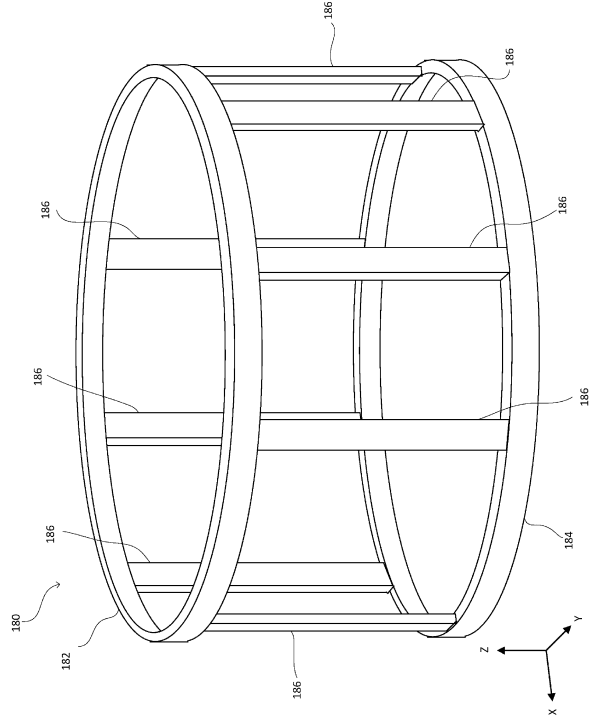
40

50

【 1 1 】



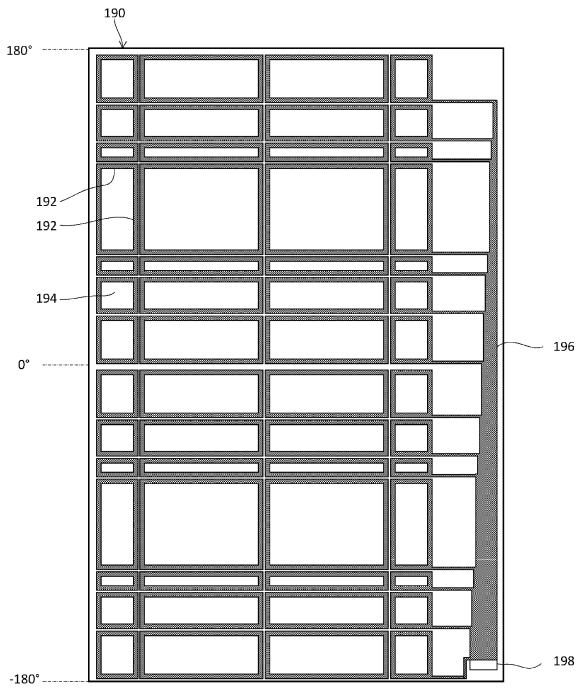
【 1 2 】



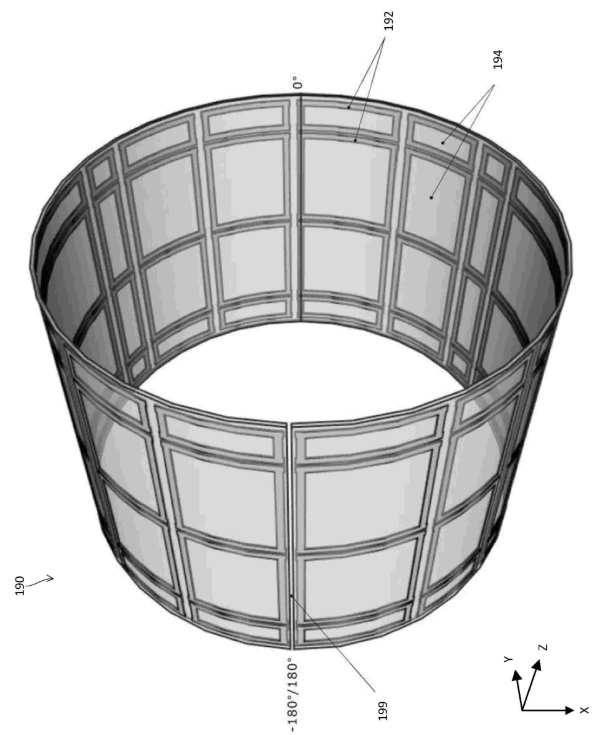
10

20

【 1 3 】



【 1 4 】

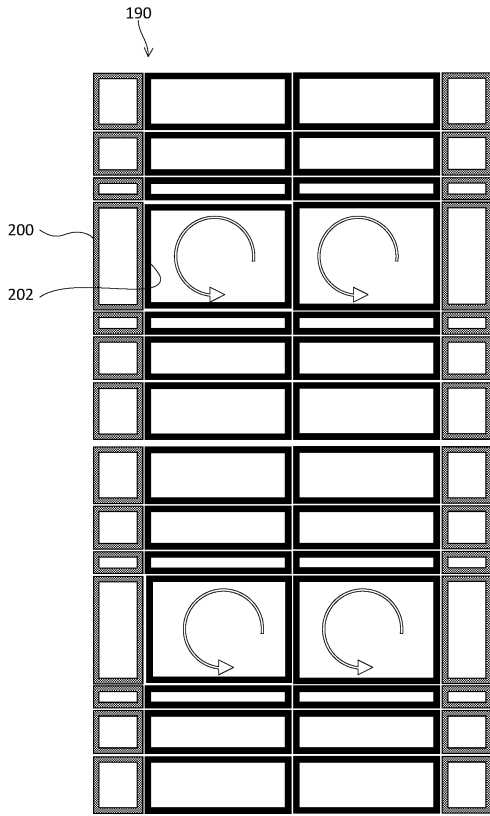


30

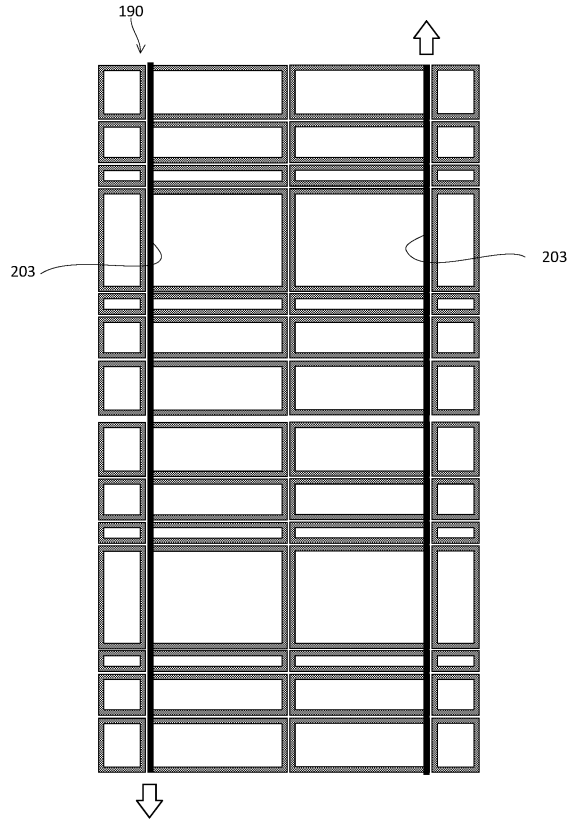
40

50

【図 15】



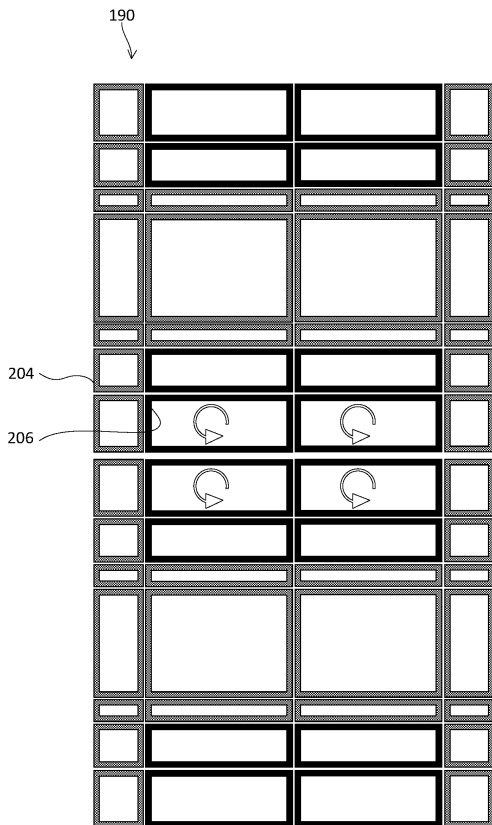
【図 16】



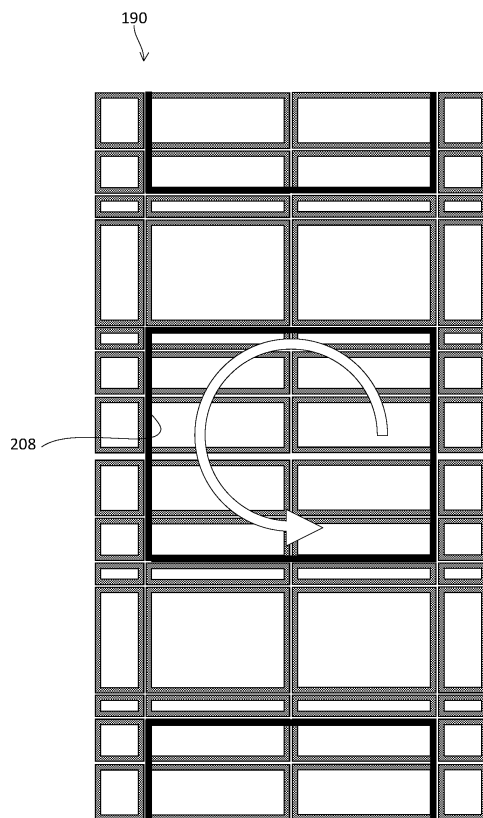
10

20

【図 17】



【図 18】

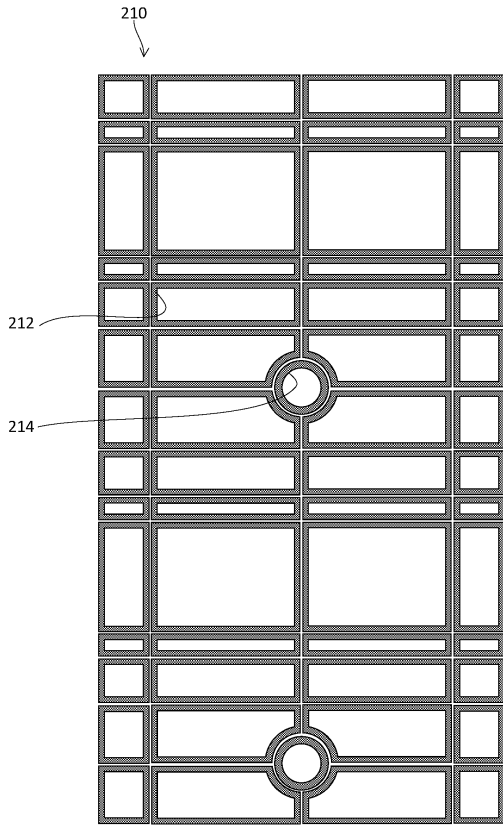


30

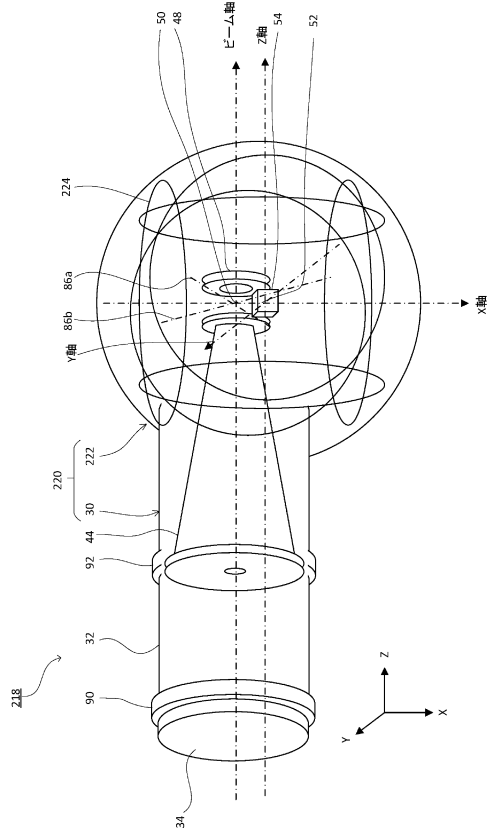
40

50

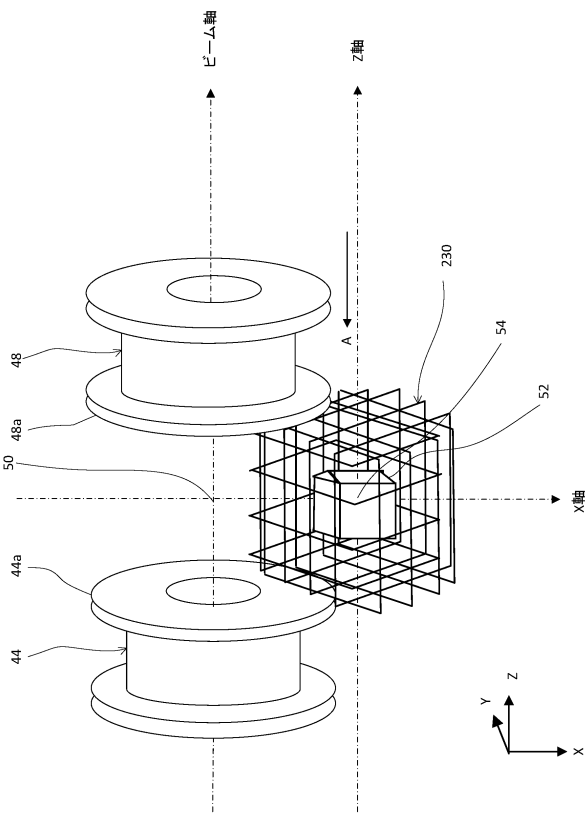
【図 19】



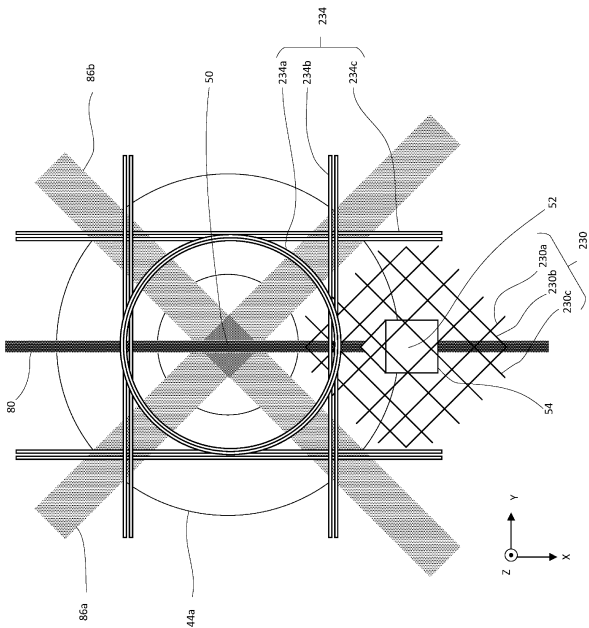
【図 20】



【図 21】



【図 22】



10

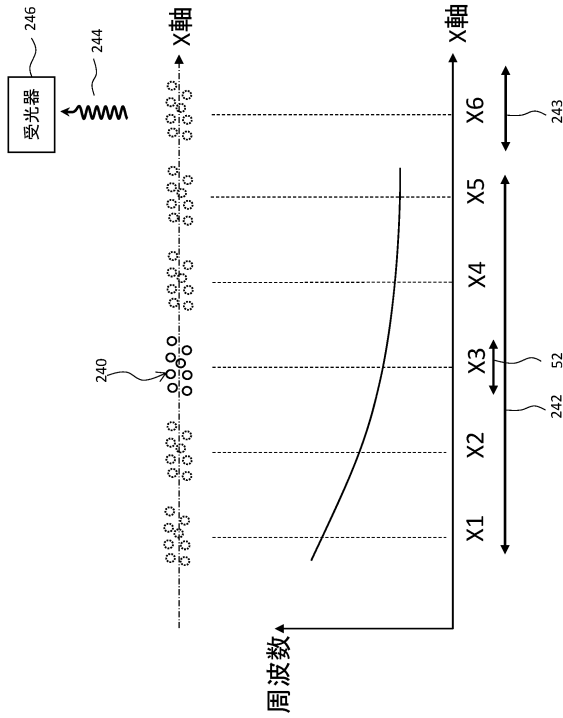
20

30

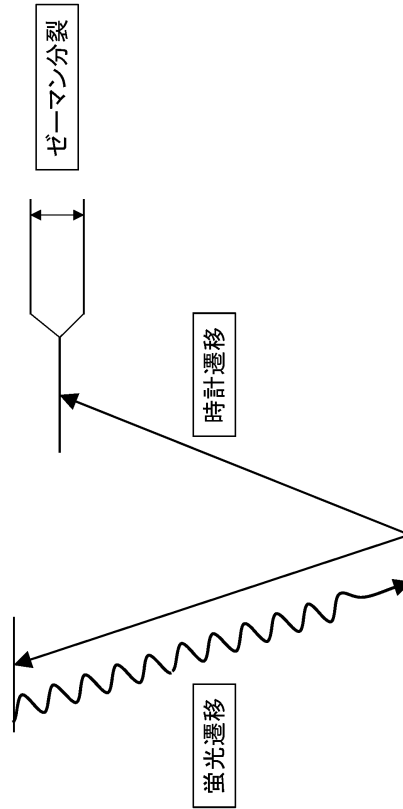
40

50

【図 2 3 A】



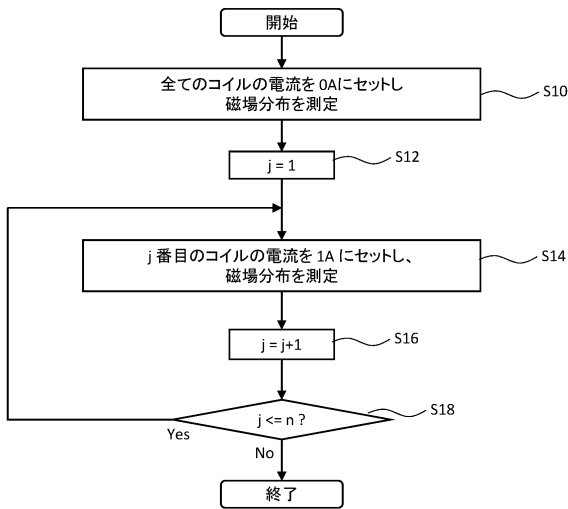
【図 2 3 B】



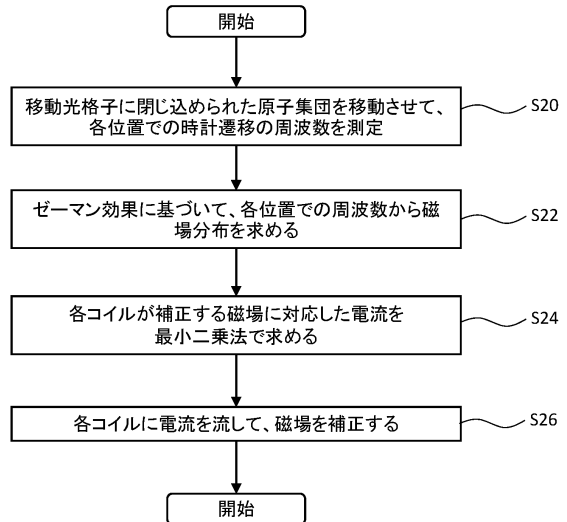
10

20

【図 2 4】



【図 2 5】

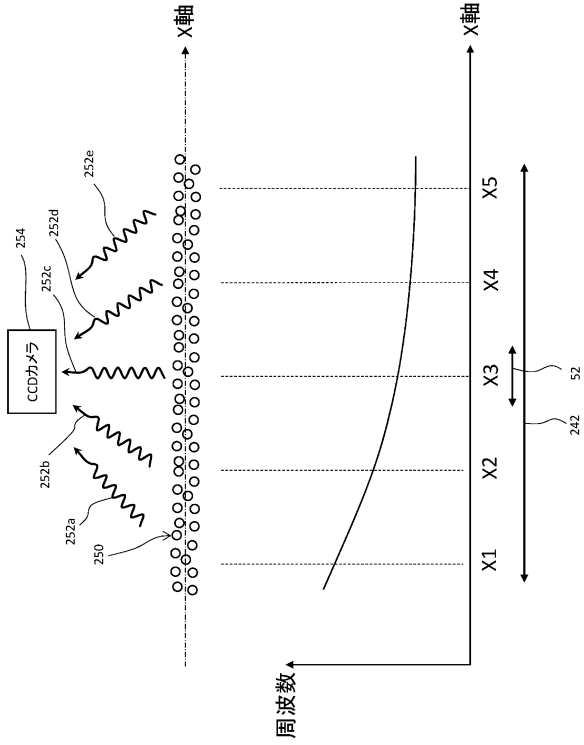


30

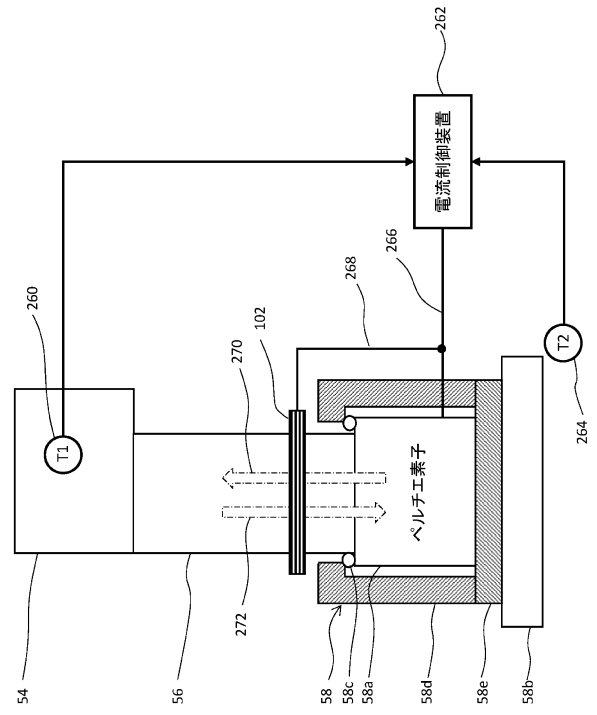
40

50

【図 26】



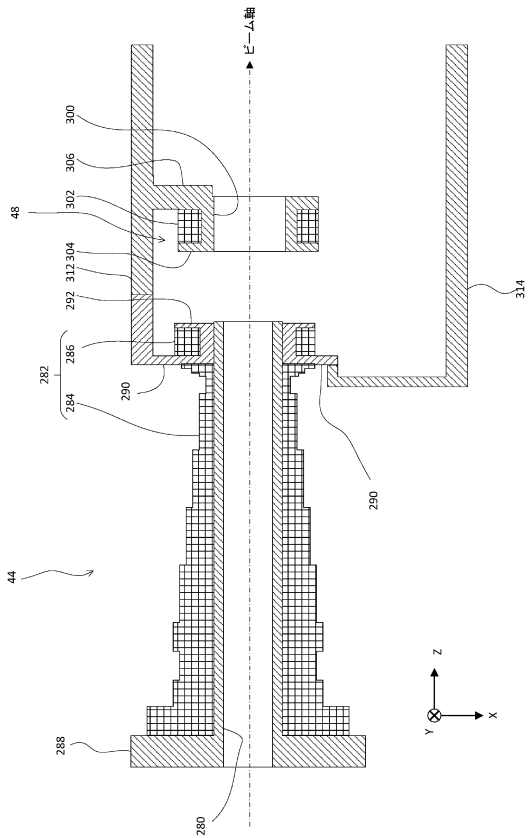
【図 27】



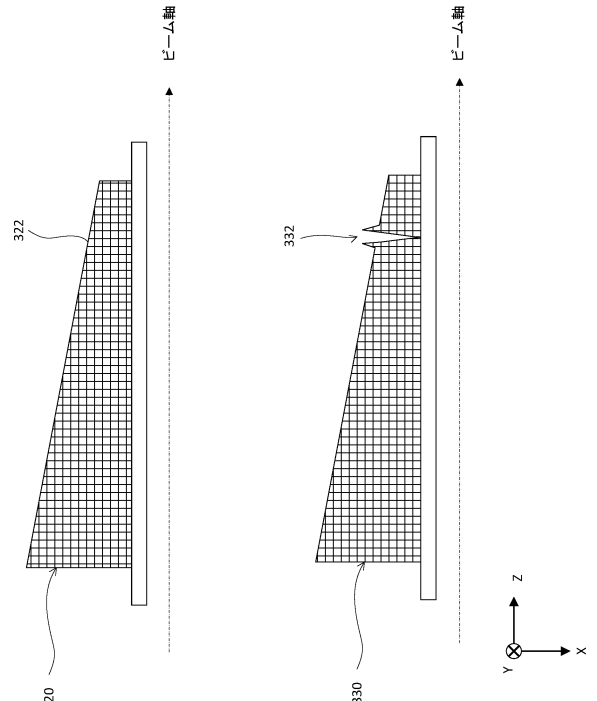
10

20

【図 28】



【図 29】

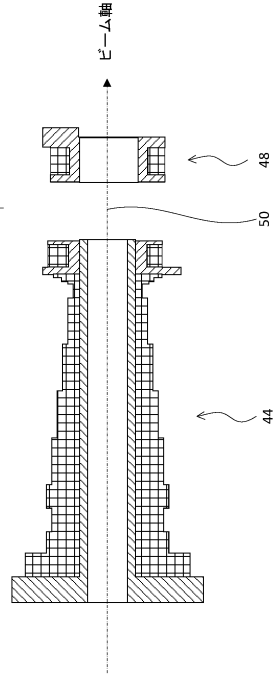
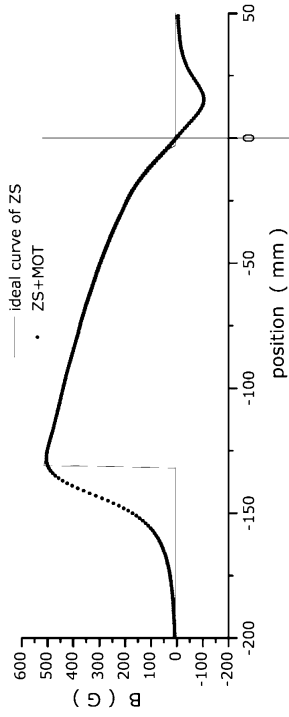


30

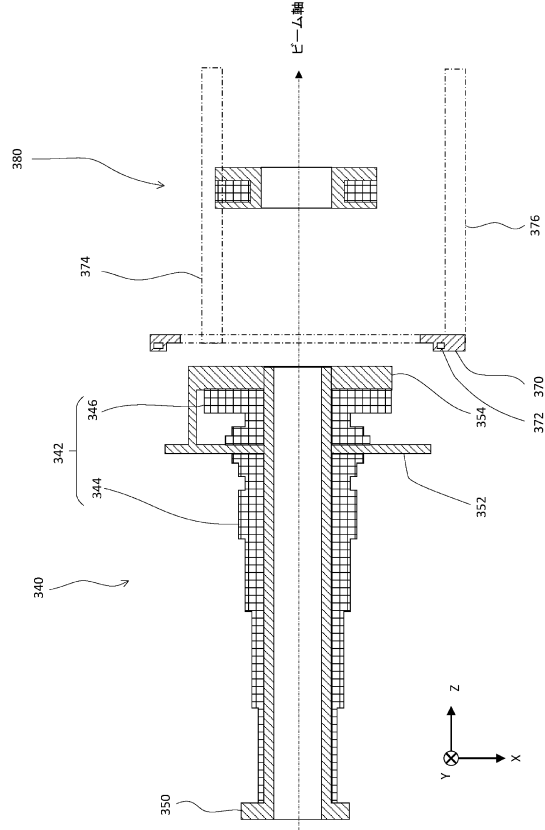
40

50

【図 3 0】



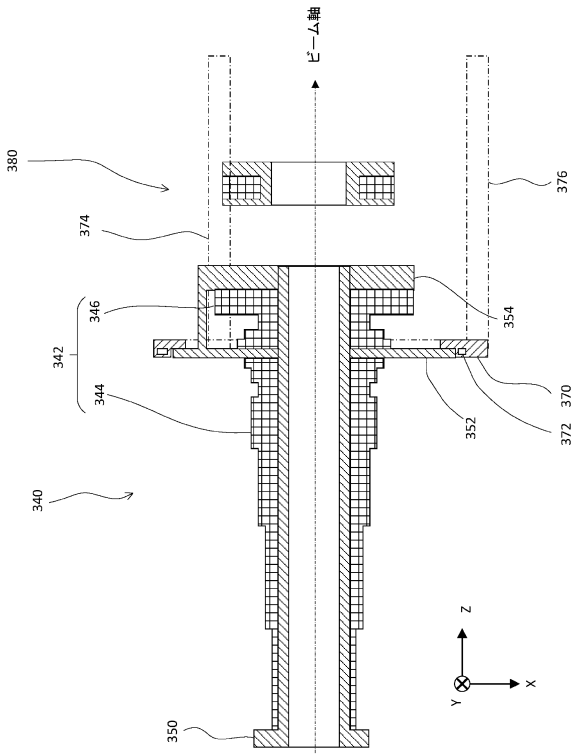
【図 3 1 A】



10

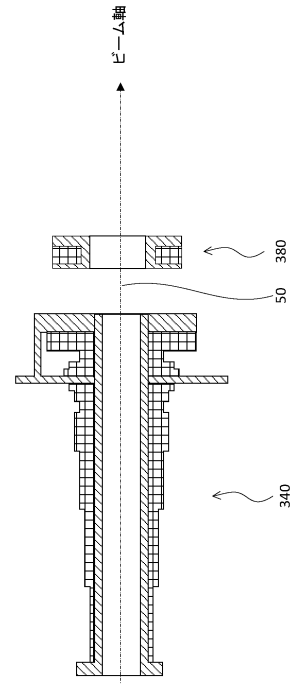
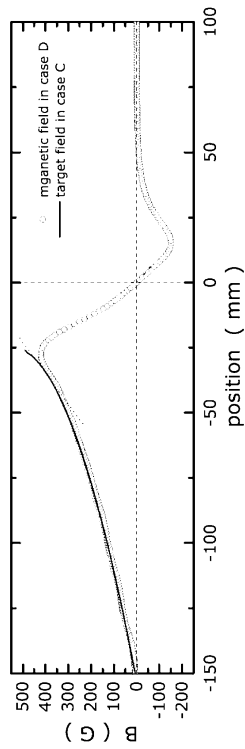
20

【図 3 1 B】




30

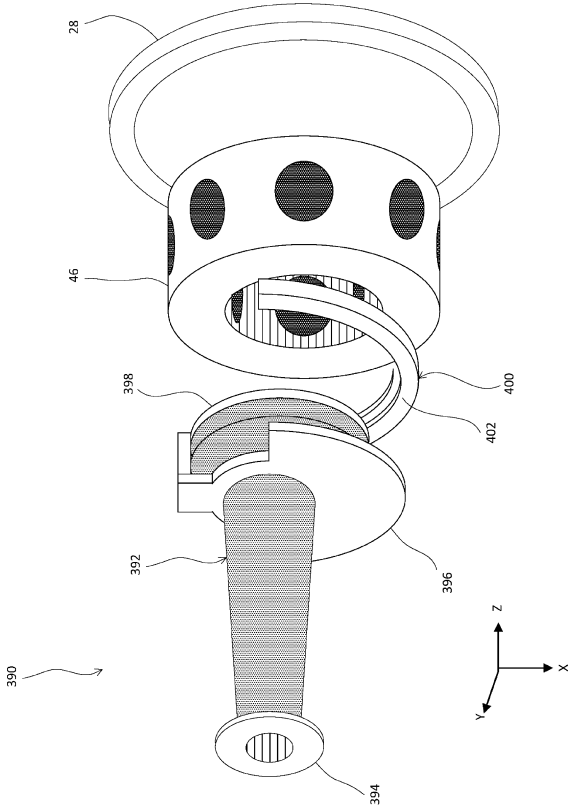
【図 3 2】




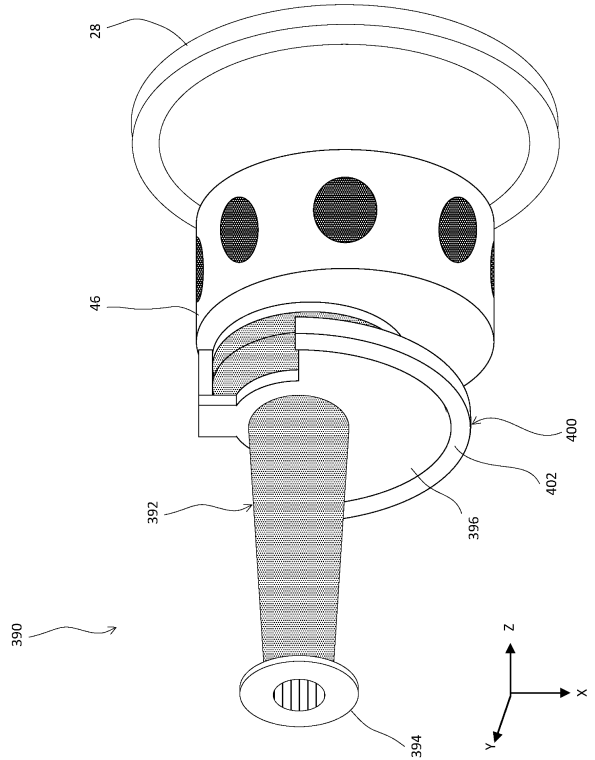
40

50

【 3 3 A】




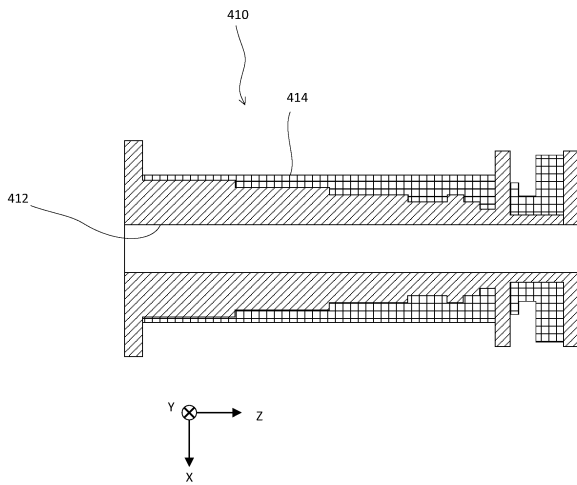
【 3 3 B】




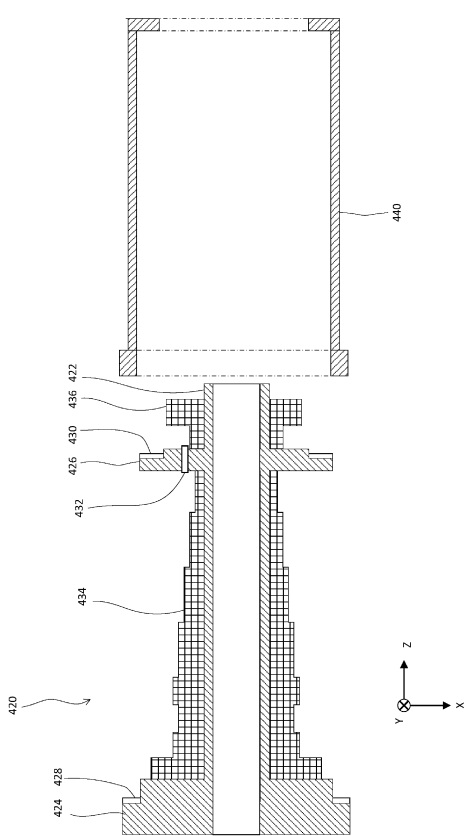
10

20

【 3 4】



【 3 5 A】

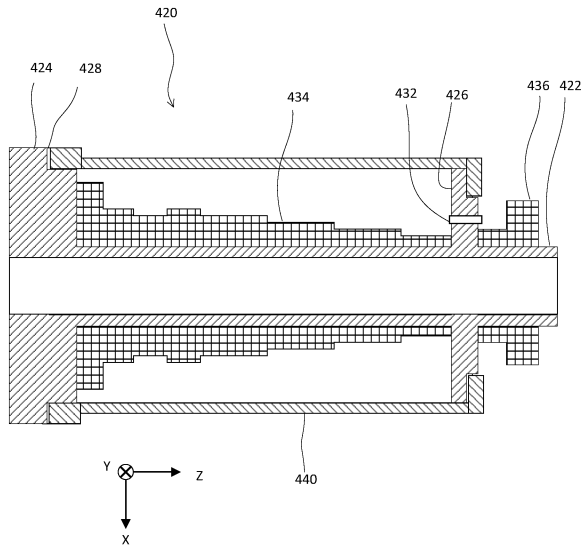


30

40

50

【 3 5 B 】



10

20

30

40

50

## フロントページの続き

埼玉県和光市広沢 2 番 1 号 国立研究開発法人理化学研究所内

審査官 村井 友和

- (56)参考文献 特許第 6 2 0 6 9 7 3 ( J P , B 2 )  
特表 2 0 1 8 - 5 1 0 4 9 4 ( J P , A )  
特開 2 0 1 9 - 1 2 9 1 6 6 ( J P , A )
- (58)調査した分野 (Int.Cl. , D B 名)  
H 0 1 S 1 / 0 6  
G 0 4 F 5 / 1 4