



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

クライオスタット(9)の第1の低温容器(2)内に配されたNMR磁石装置と、前記クライオスタット(9)の室温ポア内に配され調査サンプルからのNMR信号を受信するRF共鳴器(16)と前置増幅器(17)とを有したNMRプローブヘッド(1)とを備え、前記第1の低温容器(2)が、外側真空ジャケット内に設置され、また1つ以上の放射シールド(24)およびまたは更なる低温容器(3)により包囲され、そしてまた、前記NMRプローブヘッド(1)及び1つ以上の低温容器(2、3)を冷却する冷却装置を備え、この冷却装置がクライオクーラのコンプレッサにより駆動されるコールドヘッド(4、4a、4b、4c)を備え、このコールドヘッドは温度レベルを異にする幾つかの

10

コールドステージ(12a、12b、12c、18a、18b、18c、19a)を有し、前記コールドヘッド(4、4a、4b、4c)の1つ以上のコールドステージ(12a、12b、12c、18a、18b、18c、19a)が熱伝達装置と熱伝達可能に接続され、そしてまた、前記冷却装置と前記NMRプローブヘッド(1)との間には冷媒を有した1つ以上の冷却回路が設けられ、この冷却回路を、1つ以上の部分的に断熱されたトランスファライン(7)を介して前記クライオクーラのコンプレッサ(5)またはポンプにより駆動するNMR装置において、

前記冷却装置が、前記NMR磁石装置の前記クライオスタット(9)の直上に位置づけられた別個の真空断熱ハウジング(6)内に配され、

前記熱伝達装置の1つ以上が、前記クライオスタット(9)の前記第1の低温容器およびまたは前記更なる低温容器(2、3)のサスペンションチューブ(29a、29c)内に直接に近接して挿入され、それによって前記低温容器(2、3)が前記外側ジャケットに接続されおよびまたは前記放射シールド(24)に接触することを特徴とするNMR装置。

20

## 【請求項 2】

前記冷却装置が、振動伝達を除去または大幅に減少させる部品を介して、前記NMR磁石装置の前記クライオスタット(9)および前記プローブヘッド(1)に気密に接続されることを特徴とする請求項1記載のNMR装置。

## 【請求項 3】

前記熱伝達装置の1つ以上が高い熱伝導率を有する金属接続体(11)を有し、前記低温容器(2、3)の前記サスペンションチューブ(29a、29c)内に突出する前記金属接続体の端で、前記クライオスタット(9)の低温容器(2、3)からのクライオジェンが液化されることを特徴とする請求項1または2記載のNMR装置。

30

## 【請求項 4】

前記クライオクーラが、2つ以上のコールドステージ(12a、12b、12c、18a、18b、18c、19a)を備えたパルスチューブクーラまたはギボード・マクマーンクーラであることを特徴とする請求項1ないし3のいずれかに記載のNMR装置。

## 【請求項 5】

前記熱伝達装置の1つ以上が、両端が開口したライン(14)とくにパイプ導管を備え、該ラインは、前記クライオスタット(9)の低温容器(2、3)の1つから蒸発したクライオジェンを前記コールドステージ(12a、12b、12c、18a、18b、18c、19a)へ導くと共に前記コールドステージ(12a、12b、12c、18a、18b、18c、19a)で液化したクライオジェンを前記クライオスタット(9)の前記低温容器(2、3)へ戻すものであり、またキャピティ(15)を有し、前記ラインの一方の開口した端が前記キャピティ(15)内で終端をなすと共に前記ラインの他方の開口した端が低温容器(2、3)内で終端をなすことを特徴とする請求項1ないし4のいずれかに記載のNMR装置。

40

## 【請求項 6】

前記クライオスタット(9)の前記更なる低温容器(3)から蒸発し且つ前記サスペンションチューブ(29c)内で略周囲温度まで加熱されたクライオジェンを、最冷コールド

50

ドステージではないコールドステージ（18 a、19 a）に導くと共に前記コールドステージ（18 a、19 a）で液化温度まで冷却されて液化したクライオジェンを前記更なる低温容器（3）へ戻すため、前記熱伝達装置の1つ以上が、両端が開口した更なるライン（23 a）とくに前記コールドステージ（18 a、19 a）と良好に熱接触するパイプ導管を備え、一方の開口端が前記サスペンションチューブ（29 a）の温端に接続され、他方の開口端が前記更なる低温容器（3）内に延びていることを特徴とする請求項1ないし5のいずれかに記載のNMR装置。

【請求項7】

前記クライオスタット（9）の前記第1の低温容器（2）から蒸発すると共に前記サスペンションチューブ（29 a）内で略周囲温度まで加熱されたクライオジェンを最冷コールドステージ（12 c）よりも暖かいパルスチューブクーラのコールドヘッド（4 c）のコールドステージ（18 c）へ導くと共に前記クライオジェンを前記第1の低温容器（2）へ戻すため、前記熱伝達装置が、前記パルスチューブクーラの前記コールドヘッド（4 c）の前記コールドステージ（18 c、12 c）および前記パルスチューブクーラの前記コールドヘッド（4 c）の前記コールドステージ（12 c、18 c）の少なくとも最冷リジェネレータチューブ（28）と良好に熱接触し両端が開口した更なるライン（23 e）とくにパイプ導管を備え、

10

前記更なるライン（23 e）がその開口端の一方が前記サスペンションチューブ（29 a）の温端に接続され、前記更なるライン（23 e）の他方の開口端が、クライオジェンが液化温度まで冷却されて液化されるよう前記第1の低温容器（2）内に延びていることを特徴とする請求項4ないし6のいずれかに記載のNMR装置。

20

【請求項8】

前記熱伝達装置のうち、前記第1の低温容器（2）内に挿入された1つが、前記NMRプローブヘッド（1）の前記冷却回路の部分回路として設計され、

沸点温度の低いガスが冷媒として供され、

前記冷媒の一部分を中間膨張させて前記冷媒の別の部分を予備冷却する装置（27）が設けられ、

前記冷却回路が、前記クライオクーラの前記コンプレッサ（5）およびまたは更なるコンプレッサ（20）により駆動されることを特徴とする請求項1ないし7のいずれかに記載のNMR装置。

30

【請求項9】

前記熱伝達装置は少なくとも一部がフレキシブルであり、特に、ベロー（10）およびまたは編組ワイヤ（15）として設計されていることを特徴とする請求項1ないし8のいずれかに記載のNMR装置。

【請求項10】

温度が4.2 K以下の液体ヘリウムを前記コールドヘッド（4、4 a、4 b、4 c）の最冷コールドステージ（12 a、12 b、12 c）で発生可能であり、温度が77 K以下の液体窒素を前記クライオクーラの前記コールドヘッド（4、4 a、4 b、4 c）のコールドステージ（18 a、18 b、18 c、19 a）で発生可能であることを特徴とする請求項1ないし9のいずれかに記載のNMR装置。

40

【請求項11】

2つの最冷コールドステージ（12 c、18 c）の温度の間の温度まで前記冷媒が冷却されるよう、前記NMRプローブヘッド（1）を冷却する前記冷却装置内で、前記冷媒の少なくとも一部分が前記パルスチューブクーラの前記コールドステージ（12 c、18 c）の少なくとも最冷リジェネレータチューブ（28）と熱接触することを特徴とする請求項4ないし10のいずれかに記載のNMR装置。

【請求項12】

1つ以上の低温容器およびまたは前記冷却装置の前記クライオクーラの前記コールドヘッド（4、4 a、4 b、4 c）の前記コールドステージ（12 a、12 b、12 c、18 a、18 b、18 c、19 a）または前記冷却装置のその他の部品とくに前記熱伝達装置

50

または前記ライン(14、23a、23b、23c、23d、23e)に、電気的な加熱手段が設けられていることを特徴とする請求項1ないし11のいずれかに記載のNMR装置。

【請求項13】

請求項1ないし12のいずれかに記載のNMR装置の動作方法であって、前記NMR装置の前記NMRプローブヘッド(1)および前記1つ以上の低温容器(2、3)を共通のクライオクーラを用いて冷却するものにおいて、

前記NMRプローブ(1)および前記低温容器(2、3)を冷却するのに必要な温度および冷凍能力が前記クライオスタット(9)の外部で発生され、前記クライオクーラの前記コールドヘッド(4、4a、4b、4c)と接触する1つ以上の熱伝達装置が、前記クライオスタット(9)の前記第1の低温容器およびまたは更なる低温容器(2、3)のサスペンションチューブに直接に近接して挿入され及び又は前記放射シールド(24)に接触し、前記低温容器(2、3)内のガス状クライオジェンが前記熱伝達装置を用いて液化され、少なくとも部分的に断熱されると共に前記クライオスタットの外側に配された1つ以上のトランスファライン(7)を介して、冷媒が前記冷却装置から前記NMRプローブヘッド(1)に送られることを特徴とする動作方法。

10

【請求項14】

前記低温容器(2、3)内のガス状クライオジェンが、高い熱伝導率を有する金属接続体(11)の、前記低温容器(2、3)の1つ以上の中に突出している端で液化されることを特徴とする請求項13に記載の方法。

20

【請求項15】

前記クライオスタット(9)の前記低温容器(2、3)の1つから蒸発したクライオジェンが、ライン(14)とくにパイプ導管を介して、前記クライオクーラの前記コールドヘッド(4、4a、4b、4c)の前記コールドステージ(12a、12b、12c、18a、18b、18c、19a)のキャピティ(15)へ導かれて前記コールドステージで液化され、次いで、前記パイプ導管(14)を介して前記クライオスタット(9)の前記低温容器(2、3)へ戻されることを特徴とする請求項13に記載の方法。

【請求項16】

前記クライオスタット(9)の前記低温容器(2、3)の1つから蒸発したクライオジェンを前記低温容器(2、3)の前記サスペンションチューブ(29a、29b、29c)内で略周囲温度まで加熱し、更なるライン(23a、23b)およびまたは接続ライン(30)とくに前記コールドステージ(12a、12b、12c、18a、18b、18c、19a)と良好に熱接触するパイプ導管を介して前記コールドステージ(12a、12b、12c、18a、18b、18c、19a)に導き、該ラインおよび随意には前記バルブチューブクーラの前記コールドヘッド(4c)の前記コールドステージ(12c、18c)の少なくとも最冷リジェネレータチューブ(28)で冷却して最終的に液化させ、前記液化されたクライオジェンは前記更なるライン(23a、23e)を介して前記低温容器(2、3)へ戻されることを特徴とする請求項13記載の方法。

30

【請求項17】

前記コールドヘッド(4、4a、4b、4c)の少なくとも1つのコールドステージ(12a、12b、12c、18a、18b、18c、19a)と前記低温容器(2、3)の少なくとも1つおよびまたは放射シールド(24)との間での熱伝達が、前記NMRプローブヘッド(1)の前記冷却回路の部分回路内で行われ、前記回路は、前記クライオクーラのコンプレッサ(5)または随意には循環ポンプにより駆動されることを特徴とする請求項13記載の方法。

40

【請求項18】

冷媒の一部が予め冷却され、この冷却は、冷媒の予め冷却された部分が第1の低温容器内のガス圧力と同一またはこれよりも低いガス圧力までの膨張により液化されるよう、前記第1の低温容器(2)を冷却する冷媒の別の部分の中間膨張により行われることを特徴とする請求項17記載の方法。

50

## 【請求項 19】

前記クライオクーラとしてパルスチューブクーラを使用し、そして、前記 NMR プロブヘッド (1) を冷却する冷媒が、前記パルスチューブクーラの前記コールドヘッド (4c) の前記コールドステージ (12c、18c) の少なくとも最冷リジェネレータチューブ (28) と熱接触し、これにより 2 つの最冷コールドステージ (12c、18c) の温度の間の温度まで冷却されることを特徴とする請求項 13 記載の方法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本願は、2005年9月1日出願されたドイツ出願第10 2005 041 38 3.8号に基づくパリ条約による優先権を主張し、その記載を引用して合体するものとする。

## 【0002】

本発明は、クライオスタットの第1の低温容器に配された NMR 磁石装置と、クライオスタットの室温ポア内に配され調査サンプルからの NMR 信号を受信する RF 共鳴器と前置増幅器とを有した NMR プロブヘッドとを備えた NMR 装置に関し、第1の低温容器は、外側真空ジャケット内に設置され、また1つ以上の放射シールドおよびまたは更なる低温容器により包囲され、そしてまた、NMR プロブヘッド及び1つ以上の低温容器を冷却する冷却装置を備え、この冷却装置はクライオクーラのコンプレッサにより駆動されるコールドヘッドを備え、このコールドヘッドは温度レベルを異にする幾つかの 20  
コールドステージを有し、コールドヘッドの1つ以上のコールドステージは熱伝達装置と熱伝達可能に接続され、そしてまた、冷却装置と NMR プロブヘッドとの間には冷媒を有した1以上の冷却回路が設けられ、該冷却回路は、1つ以上の部分的に断熱されたトランスファラインを介してクライオクーラのコンプレッサまたはポンプにより駆動される。

## 【背景技術】

## 【0003】

この種の装置は特許文献1及び2に開示がある。

## 【0004】

NMR 装置はイメージングやスペクトロスコピに使用される。NMR 装置は、通常、超伝導磁石を含み、超伝導磁石は極低温にまで冷却しなければならない。 30

## 【0005】

大部分の NMR 磁石装置では、同装置の冷却に液体クライオジェン ( $LN_2$ 、 $LHe$ ) を未だ使用している。しかしながら、クライオジェンの取り扱いが困難である。クライオジェンは定期的に再充填する必要があり、測定をしばしば不所望に中断しなければならない。液体クライオジェンに依存することは、例えば開発途上国 (インド、中国など) のように社会基盤が不十分である場合に問題となる。将来、クライオジェン価格が上昇して液体クライオジェンを用いた冷却が極めて高価になるおそれがある。

## 【0006】

そのため、機械的な冷却装置いわゆるクライオクーラを用いて、磁石装置を直接または間接的に冷却する試みがなされている。特に成功したと認められた基本的な考え方は、クライオスタット内に1以上の液体クライオジェンを供するというものであり、クライオジェンは、(外部熱入力による) 蒸発後にクライオクーラを用いて再び液化される。そのような磁石装置は、外部クライオジェン損失を生じさせない。そして、幾つかの変形態様がある。例えば、クライオスタットの外側ジャケットの真空断熱領域内またはヘリウム容器を外側ジャケットに直接に接続するネックチューブのヘリウム雰囲気内に、クライオクーラのコールドヘッドをクライオスタット内に直接に設置するという態様がある。 40

## 【0007】

NMR プロブヘッドの RF 共鳴器および前置増幅器の冷却が実用化されている。これは、信号対ノイズ比すなわち NMR 信号の解像度を改善し、測定をはやめる。NMR プロブヘッドは、クライオクーラに接続されたガス冷凍回路により冷却される。クライオク 50

ーラのコールドヘッドならびに熱交換器および弁などのガス冷凍回路の各種部品は、磁石クライオスタットに隣接して配される別個の断熱されたハウジング内にある。クライオクーラは、通常、入力電力が約7kWのコンプレッサにより駆動される。NMRプローブヘッドのRF共振器及び前置増幅器の冷却が特許文献3に記載されている。

【0008】

クライオジェン損失のないNMRプローブヘッド付き磁石装置は、広いスペースを占める2つの冷却装置を必要とするので、取得費用および運転費用が高くなり、更なる不利益もある。

【0009】

そこで、特許文献3（オックスフォード・インストルメンツ・スーパーコンダクティビティ）は、1つのクーラを用いた磁石装置およびプローブヘッドの統合的な冷却を開示している。単一のクライオクーラ（ギホード・マクホーンクーラやパルスチューブクーラ）が、（磁石）クライオスタットの冷却および堅固に装着されたプローブヘッドの冷却に用いられる。そして、クーラのコールドヘッドはクライオスタットに一体化されている。コールドヘッドの第1のコールドステージがクライオスタットの放射シールドに接触される一方、第2のコールドステージは蒸発したヘリウムを直接に液化する。ポンプにより駆動される別個のヘリウムガス回路がコールドステージ上に導かれ、コールドステージではガスが冷却されて液化され、次いで、好ましくはクライオスタット内または排気可能な別個のハウジング内の管を介して、（排気可能な別個のハウジング内に勾配コイルおよびRF共振器を具備した）プローブヘッドおよび（クライオスタット内または排気可能なRFユニットのハウジング内の）シムコイルに導かれる。

【0010】

しかしながら、この構成は、部品（ガスライン、プローブヘッド）が部分的に固定されているので、比較的複雑であると共に柔軟性のある運転を妨げる。そして、トランスファラインが長く、循環ポンプを介する熱入力があり、そして冷却回路と放射シールド間の接点非常に低温であるので、従来の構造はその熱力学的効率が極めて低い。また、現在のクライオクーラで達成される冷凍能力がクライオスタットおよびプローブヘッドの冷却を提案の如く行うのに充分であるかは疑問がある。更なる問題点は、振動に関してクーラと磁石との減結合が不十分であり、磁石装置の磁界がクライオクーラの影響を受けるということである。さらに、この装置の冷却システムを保守する間は、NMR測定を行うことができない。

【0011】

特許文献2（オックスフォード・インストルメンツ・スーパーコンダクティビティ）では、特許文献1の欠点の幾つかは解消されている。特許文献2で提案された冷却装置の熱力学的効率は特許文献1よりも良好である。しかしながら、重大な欠点が依然として存在する。クライオクーラのコールドヘッドがクライオスタット内に堅固に設置されており、コールドヘッドの振動および電磁氣的な外乱が多かれ少なかれ磁石クライオスタットに直接に伝達される。これとは逆に、磁石クライオスタット内の超伝導磁石がクライオクーラに影響を及ぼすことがある。コールドヘッドの保守や交換には依然として相当な労力および費用がかかる。磁石装置全体を運転停止しなければならないからである。更に、既存の従来の磁石装置の改造は困難であり、全く新たな構造が必要になる。

【特許文献1】国際公開第03/023433号パンフレット

【特許文献2】欧州特許第1560035号明細書

【特許文献3】米国特許第5889456号明細書

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0012】

従って、本発明の基礎的な目的は、上述の欠点を解消し且つ構造が簡易なNMR装置を提案することにある。

【課題を解決するための手段】

10

20

30

40

50

## 【0013】

上記目的は本発明により達成される。本発明では、冷却装置は、別個の真空断熱ハウジング内に配され、このハウジングはNMR磁石装置のクライオスタットの直上に位置づけられる。そして、熱伝達装置の1つ以上が、クライオスタットの第1の低温容器およびまたは更なる低温容器のサスペンションチューブ内に直接に近接して挿入され、それによって低温容器が外側ジャケットに接続されおよびまたは放射シールドに接触する。

## 【0014】

冷却装置付きのハウジングがクライオスタットの外側に配され、これによりクライオスタットから空間的に隔離されるので、冷却装置により動作範囲 (working volume) 内に生じる機械的または磁気的な外乱が特許文献1、2の従来装置に比べて低減する。

10

## 【0015】

更に、ハウジングの外部配置により、従来の既存システムの改造が可能になる。コールドヘッドがクライオスタット内に配されていないので、クライオスタットの運転を中断することなくクーラを使用することができる。

## 【0016】

トランスファラインや外部ガス回路なしにヘリウム容器を直接に冷却することにより、例えばラインを阻止することのある不純物に起因する問題が低減する。また、これにより、トランスファラインによる冷凍損失が低減すると共に、磁石装置が高効率で冷却される。

## 【0017】

本発明のNMR装置の磁石装置およびNMRプローブヘッドの冷却は、2つの物理的に別個独立の、冷却源に結合された機構内で行われ、冷却すべきサブシステム (磁石装置またはNMRプローブヘッド) の冷却を、その他のサブシステムの冷却に影響を及ぼさずに中断することができる。

20

## 【0018】

更に、本発明のNMR装置は、冷却装置がクライオスタットに隣るスペースを要しないのでコンパクトである。

## 【0019】

本発明のNMR装置の冷却装置は、例えば、イオンサイクロトロン共鳴スペクトロスコピ (ICR) や電子スピン共鳴 (ESR、EPR) 等のその他の構造分解 (structure-resolving) 方法に有利に使用することができる。

30

## 【0020】

本発明のNMR装置の特別な実施の形態では、冷却装置のハウジングはNMR磁石装置のクライオスタットに装着される。

## 【0021】

これに代わる実施の形態では、冷却装置のハウジングは外部とくに部屋の天井やスタンドに装着される。

## 【0022】

上記両実施の形態では、冷却装置は、振動を伝達せず或いは実質的に振動を減衰する部品とくにベローを介して、NMR磁石装置のクライオスタットおよびプローブヘッドに有利に気密に接続される。「柔軟」な部品を介してクライオスタットおよびNMRプローブヘッドに結合することにより、冷却装置からクライオスタットおよびNMRプローブヘッドへの振動伝達が防止される。

40

## 【0023】

本発明のNMR装置の有利な実施の形態では、熱伝達装置の1つ以上が、高い熱伝導率を有する金属接続体を有し、金属接続体の、低温容器のサスペンションチューブ内に突出する端で、クライオスタットの低温容器の1つからのクライオジェンが液化される。この場合、クライオジェンは低温容器内で直接に液化される。

## 【0024】

特に有利には、クライオスタットは、2以上のコールドステージを備えたパルスチュー

50

ブクーラまたはギボード・マクマーンクーラである。振動から効率的に減結合するので、その他のクライオスタット冷却分野でしばしば好適である低振動のパルスチューブクーラに比べ、ギボード・マクマーンクーラなどの振動のより大きいクライオクーラを使用することができる。しかしながら、スターリングクーラやジュール・トムソンクーラ等のその他のクーラを使用してもよい。

**【0025】**

蒸発したクライオジェンをクライオスタットの低温容器の1つからコールドステージへ導くと共にコールドステージで液化されたクライオジェンをクライオスタットの低温容器へ戻すため、熱伝達装置の1つ以上が、両端が開口したラインとくにパイプ導管を備えると共にキャピティを有することが有利であり、そして、ラインの一方の開口端はキャピティ内で終端をなし、ラインの他方の開口端は低温容器内で終端をなす。低温容器から蒸発したクライオジェンは、ラインを流れて、クライオクーラのコールドヘッドのコールドステージに接続されたキャピティに流入して液化される。このラインは、1つ以上の同心のパイプを含むものでよく、その場合、クライオジェン蒸気が外側環状ギャップ内を通過してキャピティに至り、キャピティ内で液化したクライオジェンが内側チューブを流れて低温容器へ戻る。周囲からの最適な断熱を確実にを行うため、ラインの一部に沿ってまたは全長にわたって真空断熱を追加して設けてもよい。

10

**【0026】**

本発明の特に好適な実施の形態では、クライオスタットの更なる低温容器から蒸発し且つサスペンションチューブで略周囲温度まで加熱されたクライオジェンを、最冷コールドステージではないコールドステージに導くと共にコールドステージで液化温度まで冷却されて液化したクライオジェンを更なる低温容器へ戻すため、熱伝達装置の1つ以上が、両端が開口した更なるラインとくにコールドステージと良好に熱接触するパイプ導管を備え、一方の開口端はサスペンションチューブの温端に接続され、他方の開口端は更なる低温容器内に延びる。蒸発したクライオジェンはサスペンションチューブ内で加熱され、これによりクライオジェン供給容器内への熱入力が高減する。蒸発したクライオジェンは、過熱された蒸気(ガス)の形式で漏れ、更なるラインを介して放出される。このクライオジェンは再び冷却され、そして、更なるラインとコールドヘッドとの接触により液化され、次いでクライオスタットへ戻される。

20

**【0027】**

クライオスタットの第1の低温容器から蒸発すると共にサスペンションチューブにおいて略周囲温度まで加熱されたクライオジェンを最冷コールドステージよりも暖かいパルスチューブクーラのコールドヘッドのコールドステージへ導くと共にクライオジェンを第1の低温容器へ戻すため、有利には、熱伝達装置は、パルスチューブクーラのコールドヘッドのコールドステージおよびパルスチューブクーラのコールドヘッドのコールドステージの少なくとも最冷リジェネレータチューブと良好に熱接触し両端が開口した更なるラインとくにパイプ導管を備え、更なるラインはその開口端の一方がサスペンションチューブの温端に接続され、更なるラインの他方の開口端は、クライオジェンが液化温度まで冷却されて液化されるよう第1の低温容器内に延びる。この構成もまた、例えばヘリウム等の、沸点の低いガスの冷却および液化を熱力学的に効率的に行える。冷却および液化すべきガスの量が過剰でない限り、最冷コールドステージのリジェネレータへの追加の熱入力が、クライオクーラの冷凍能力に実質的な影響を及ぼすことはない。更に、装置全体の効率は増大しない。サスペンションチューブを介する熱入力が理想的には除去されるよう、サスペンションチューブの温端で放出されるクライオジェンの流れにより、第1の低温容器のサスペンションチューブが冷却されるからである。

30

40

**【0028】**

本発明のNMR装置の特に好適な実施の形態では、熱伝達装置の1つ以上が、コールドヘッドの1以上のコールドステージと低温容器の1つ以上及びまたは放射シールドとの間に追加の冷媒を有した追加の閉じた冷却回路として設計され、追加の冷媒は沸点温度の低いガスであり、追加の冷却装置は自由対流、循環ポンプまたはクライオクーラのコンプレ

50

ッサにより駆動される。追加の冷却回路が自由対流により駆動される場合、追加のポンプや冷凍コンプレッサによるプロセスガスの循環を除去することができる。

【0029】

或いは、熱伝達装置のうち、第1の低温容器内に挿入された1つはNMRプローブヘッドの冷却回路の部分回路として設計され、沸点温度の低いガスが冷媒として供され、冷媒の一部を中間膨張させて冷媒の別の部分を予備冷却する装置が設けられ、冷却回路は、クライオクーラのコンプレッサおよびまたは更なるコンプレッサにより駆動される。実在気体を用いる絞り装置において冷媒流れの一部を膨張させることにより、初期状態および最終状態に依存しない冷却を行える（ジュール・トムソン効果）。コールドヘッドの最冷コールドステージの温度を下回る温度においても、好適なプロセス制御により、第1の低温容器を冷却する冷凍能力を提供することができる。しかしながら、冷凍コンプレッサにより提供される低圧よりも低い圧力まで冷媒を膨張させる場合には、追加のコンプレッサが必要になることがある。

10

【0030】

熱伝達装置のうち、更なる低温容器内に挿入され或いは放射シールドに接触する1つ以上をNMRプローブヘッドの冷却回路の部分回路として設計可能であり、この回路は、クライオクーラのコンプレッサまたは循環ポンプにより駆動される。このため、NMRプローブヘッドの冷却に用いられる好適温度の冷媒の一部は主たる流れから分岐され、別個のトランスファライン内へ導かれて更なる低温容器または放射シールドへ至る。ガスは、熱伝達装置を介する更なる低温容器または放射シールドへの熱入力を受容する。更なる低温容器を使用する場合、クライオジェン損失が低減または除去され、クライオジェンの再充填が不要になり、または時々必要になるに過ぎない。

20

【0031】

本発明のNMR装置の熱伝達装置の1つ以上は、特に真空断熱を用いて外部熱入力から有利に断熱され、これによりNMR装置の効率が增大する。

【0032】

熱伝達装置は少なくとも一部分がフレキシブルであり、特に、ベローおよびまたは編組ワイヤの形式で設計され、冷却装置から磁石クライオスタットまたはNMRプローブヘッドへの振動伝達を遮断または減衰させる。

【0033】

クライオクーラのコールドヘッドの最冷コールドステージは、有利には4.2 K以下の温度の液体ヘリウムを発生させる。これは、特に、低温超伝導を備えた磁石装置を使用する場合に必要である。

30

【0034】

クライオクーラコールドヘッドの1つのコールドステージは、好ましくは、77 K以下の温度の液体窒素を発生させ、NMR磁石装置のクライオスタットで液体窒素を備えた更なる低温容器を使用可能にし、または放射シールドを熱力学的に好適な温度にまで冷却可能にする。

【0035】

特に有利には、冷媒が2つの最冷コールドステージの温度の間の温度まで冷却されるよう、NMRプローブヘッドを冷却する冷却装置内で、冷媒の少なくとも一部分がパルスチューブクーラの前記コールドステージの少なくとも最冷リジェネレータチューブ（28）と熱接触する。これにより、NMRプローブヘッドは約4.2 Kと50 Kの間の温度で冷却される。コールドステージのリジェネレータチューブへの追加の熱入力パルスチューブクーラの冷凍能力に影響を及ぼすが、装置全体の熱力学的な効率は増大する。

40

【0036】

本発明の特に好適な実施の形態では、第1の低温容器の、熱伝達装置が挿入されていないサスペンションチューブの1つ以上と第1の低温容器との間に接続ラインが設けられ、この接続ラインは、冷却装置のクライオクーラのコールドヘッドの1以上のコールドステージに接触し、接続ラインにはバルブおよびまたはポンプを挿入可能である。パルスチュ

50

ープクーラを使用する場合、接続ラインを最冷コールドステージのリジェネレータチューブにも接続可能である。これにより、サスペンションチューブを通る冷却流れが存在することに起因して、熱伝達装置を挿入することなしにサスペンションチューブを介する熱入力が少なくとも低減される。そして、装置の全体効率が増大する。

【0037】

本発明のNMR装置の特定の実施の形態は、液体窒素およびまたは窒素蒸気を備えた別個の閉じた冷却回路を提供し、同冷却回路内では冷却回路の液体窒素が蒸発し、冷却回路の、NMRプローブヘッドの前増幅器を冷却するコールドヘッドにより再び液化され、冷却回路は自由対流または循環ポンプにより駆動され、そして外部熱入力からの断熱とくに真空断熱が設けられる。この変形態様は熱力学的に有利であり、装置の全体効率を増大させる。

10

【0038】

例えばクライオクーラの過剰冷却能力によるクライオジェンの過度の液化および低温容器内の圧力低下を防止するため、電気的な加熱手段が低温容器の1つ以上に有利に設けられる。

【0039】

或いは、電気的な加熱手段を、冷却装置のクライオクーラのコールドヘッドのコールドステージまたは冷却装置のその他の部品とくに熱伝達装置またはラインに設けても良い。

【0040】

特定の選択では、クライオクーラのコールドヘッドとNMRプローブヘッドとの間の冷却回路の冷媒として、およびまたはクライオクーラのコールドヘッドと低温容器の1以上との間の更なる冷却回路の更なる冷媒として、ヘリウムが用いられる。通常圧力において、ヘリウムは4.2 Kで液化され、従って、極低温分野の冷媒としても好適である。臨界圧力(2.29 パール)よりも高い圧力では相変化が発生せず、4.2 Kより低温でもヘリウムは(準単相の)冷媒として使用することができる。

20

【0041】

また、本発明は、いずれかの請求項に記載のNMR装置の動作方法に関し、この方法では、NMR装置のNMRプローブヘッドおよび1つ以上の低温容器は共通のクライオクーラを用いて冷却される。本発明の特徴は、NMRプローブおよび低温容器を冷却するのに必要な温度および冷凍能力がクライオスタットの外部で発生され、クライオクーラのコールドヘッドと接触する1つ以上の熱伝達装置が、クライオスタットの第1の低温容器およびまたは更なる低温容器のサスペンションチューブに直接に近接して挿入され及び又は放射シールドに接触し、低温容器内のガス状クライオジェンが熱伝達装置を用いて液化され、少なくとも部分的に断熱されると共にクライオスタットの外側に配された1つ以上のトランスファライン(7)を介して、冷媒が冷却装置からNMRプローブヘッドに送られる点にある。

30

【0042】

本発明の方法の変形例では、低温容器内のガス状のクライオジェンが、高い熱伝導率を有する金属接続体の、低温容器の1つ以上の中に突出している端で液化される。

【0043】

クライオスタットの低温容器の1つから蒸発したクライオジェンは、ラインとくにパイプ導管を介して、クライオクーラのコールドヘッドのコールドステージのキャピティへ導かれてコールドステージで液化され、次いで、パイプ導管を介してクライオスタットの低温容器へ戻される。

40

【0044】

別の有利な変形例では、クライオスタットの低温容器の1つから蒸発したクライオジェンを低温容器のサスペンションチューブにおいて略周囲温度まで加熱し、更なるラインおよびまたは接続ラインとくにコールドステージと良好に熱接触するパイプ導管を介してコールドステージに導く。このコールドステージおよび随意にはパルスチューブクーラのコールドヘッドのコールドステージの少なくとも最冷リジェネレータチューブで冷却して最

50

最終的に液化させ、液化されたクライオジェンは更なるラインを介して低温容器へ戻す。

【0045】

コールドヘッドの少なくとも1つのコールドステージと低温容器の少なくとも1つおよびまたは放射シールドとの間での熱伝達が、更なる冷媒を備えた閉じた冷却回路内で有利に行われ、沸点温度の低いガスが更なる冷媒として使用され、冷却回路は、自由対流または循環ポンプまたはクライオクーラのコンプレッサにより駆動される。

【0046】

本発明の方法の別の有利な変形例では、コールドヘッドの少なくとも1つのコールドステージと低温容器の少なくとも1つおよびまたは放射シールドとの間での熱伝達が、NMRプローブヘッドの冷却回路の部分回路内で行われ、回路は、クライオクーラのコンプレッサまたは随意には循環ポンプにより駆動される。

10

【0047】

冷媒の一部が予め冷却され、この冷却は、冷媒の予め冷却された部分が第1の低温容器内のガス圧力と同一またはこれよりも低いガス圧力までの膨張により液化されるよう、第1の低温容器を冷却する冷媒の別の部分の中間膨張により行われる。これは、例えば、1以上のジュールトムソンバルブおよび1つ以上のカウンタフロー熱交換器を用いて達成可能である。

【0048】

NMRプローブヘッドの前置増幅器もまた別個の閉じた回路内において液体窒素およびまたは窒素蒸気で冷却可能であり、液体窒素は、回路を通過する間にNMRプローブヘッドの前置増幅器との接触によって蒸発し、冷却装置のコールドヘッドにより再び液化され、前記回路は自由対流または循環ポンプにより駆動される。

20

【0049】

特定の選択により、クライオクーラとしてパルスチューブクーラを使用し、又、NMRプローブヘッドの冷却に供される冷媒が、パルスチューブクーラのコールドヘッドのコールドステージの少なくとも最冷リジェネレータチューブと熱接触し、これにより2つの最冷コールドステージの温度の間の温度まで冷却される。

【0050】

本発明の更なる利点は明細書および図面から抽出可能である。上述のおよび下記の特徴は、個々にあるいは任意に組み合わせて用いることができる。図示および記載される実施の形態は網羅的であると解すべきではなく、本発明を説明するための例示的な性格のものであると解すべきである。

30

【発明を実施するための最良の形態】

【0051】

図1に示した本発明のNMR装置は、2つの別個の冷却装置よりもコンパクトで且つ廉価な単一の冷却装置を用いて、NMRプローブヘッド1およびクライオスタット9を連続的に冷却可能とするものである。クライオクーラのコールドヘッド4は、コンプレッサ5により動作されるものであって、外部の断熱真空ハウジング6内に収容されている。クライオクーラの外部配置は、クライオクーラからNMR磁石装置の動作範囲内への機械的または磁気的な外乱の伝達を除去する。これにより、低振動パルスチューブクーラを使用することができ、また、より大きい外乱を発生するギホード・マクホーンクーラの使用も可能である。クライオクーラのコールドヘッド4が外部に配置されているので、幾何学的に何らの制約も受けない。ハウジング6は、1つ以上のトランスファライン7を介してNMRプローブヘッド1に接続されている。図1の実施の形態では、ハウジング6はスタンド8に装着され、そして、NMR装置のクライオスタット9の直上に配される。コールドヘッド4からクライオスタット9への振動伝達を防止するため、ハウジング6とクライオスタット9の間にはベロー10が設けられている。単一のコールドヘッド4を用いてクライオスタット9およびNMRプローブヘッド1を連続的に冷却することにより、クライオスタットの冷凍能力を最大限利用し、また、コンパクトな冷却ユニットを実現する。

40

【0052】

50

図2は、本発明のNMR装置の概略断面を示す。高い熱伝導率を有する金属接続体11（例えば銅製）の形式の熱伝達装置が第1の低温容器2を冷却するために設けられ、接続体11の一端は3段のコールドヘッド4aの最冷コールドステージ12aに接続され、他端は第1の低温容器2内に突出している。接続体11は、サスペンションチューブ29aを介して第1の低温容器2内に導かれる。クライオジェンが接続体11へそしてこれによりコールドヘッド4aへ熱を放出するので、第1の低温容器2内の低温蒸気は、高い熱伝導率を有する金属接続体11の、第1の低温容器2内に突出する端で液化される。接続体11を介するコールドヘッド4aから第1の低温容器2への振動伝達を除去するため、高い熱伝導率を有する接続体11は、部分的にはフレキシブルスタンド13の形式で設計され、これによりソフトな接続を行う。好ましくは第1の低温容器2内でのクライオジェンとして温度が約4.2Kのヘリウムが使用される。 10

#### 【0053】

図2の実施の形態では、ライン14とくにキャビティ15に接続されたパイプ導管を用いて更なる低温容器3が冷却される。ここで、キャビティ15はコールドヘッド4aの第1のコールドステージ18aに接触している。ライン14は、更なる低温容器3のサスペンションチューブ29cを通して導かれ、更なる低温容器3内で終端をなしている。蒸発するクライオジェンたとえば窒素は、ライン14を介して更なる低温容器3からキャビティ15内に導かれ、ここでクライオジェンはコールドヘッド4aとの熱交換により液化され、次いで、ライン14を介して更なる低温容器3へ戻される。ライン14はまた、2つのチューブからなる同心のラインとして設計することもできる。すなわち、クライオジェン蒸気は外側のパイプギャップ内でキャビティ15へ上昇し、また、液化したクライオジェンは内側チューブを通して更なる低温容器3へ戻る。このラインは、少なくとも一部または全長にわたって真空断熱を有利に備えることもできる。 20

#### 【0054】

更に、コールドヘッド4aは、NMRプローブヘッド1のRF共振器16および前置増幅器17も冷却する。NMRプローブヘッド1はコールドヘッド4aに直接に接続されてはいないが、閉じた回路内を流れる冷媒を介してコールドヘッドと接触している。トランスファライン7（4つの個別のラインストランドからなる）は、NMRプローブヘッド1をコールドヘッド4aの第1のコールドステージ18aおよび第2のコールドステージ19aに接続する。ここで、コールドヘッド4aの第1のコールドステージ18aは約65Kであり、第2のコールドステージ19aは約12Kである。双方のコールドステージ18a、19aは、冷気を放出する熱接触面を有し、この熱接触面は例えば熱交換器と接続可能であって冷却回路の冷媒からコールドヘッド4aへ熱を伝達する。 30

#### 【0055】

冷媒（例えばヘリウム）は、クライオクーラコンプレッサ5を用いてNMRプローブヘッド1の冷却回路内で循環される。冷媒は、第1のカウンタフロー熱交換器21を用いて最初は予備冷却され、その後、第2のカウンタフロー熱交換器22に到達する前にコールドヘッド4aの第1のコールドステージ18aで65Kまで冷却され、最後に第2のコールドステージ19aで冷媒が12Kまで冷却される。冷却された冷媒は、トランスファライン7を介してRF共振器16に供給され、この冷媒はRF共振器を約15Kまで冷却する。第2のカウンタフロー熱交換器22を通過した後、冷媒の一部はトランスファライン7を介して前置増幅器17に供給され、この前置増幅器を約77Kまで冷却する。77Kまで加熱された冷媒はその後トランスファライン7を介してハウジング6に流入し、ここで、冷媒は第2のカウンタフロー熱交換器22からの余剰流れと混合され、第1のカウンタフロー熱交換器21を介してコンプレッサ5へ導かれる。 40

#### 【0056】

これにより、2つの別個の冷却伝達機構を介して単一のコールドヘッド4aを用いて、第1の低温容器2、追加の低温容器3及びNMRプローブヘッド1が冷却される。コールドヘッド4aを備えたハウジング6は、ベロー10を介してクライオスタット9及びNMRプローブヘッド1に気密に接続され、コールドヘッド4aからクライオスタット9及び 50

NMRプローブヘッド1への振動伝達を除去し或いは少なくとも実質的に減衰させる。

【0057】

図3は、本発明の実施の形態を示し、この実施の形態では第1の低温容器2がライン14を介して冷却される。ライン14はキャピティ15に接続されている。更なるライン23aが更なる低温容器3内に挿入されており、更なるライン23aはコールドヘッド4aの第1のコールドステージ18aに導かれてこれに接触する。蒸発したクライオジェンは略周囲温度まで加熱されており、更なるライン23aを介してコールドヘッド4aの第1のコールドステージ18aへ導かれる。第1のコールドステージ18aにおいて、熱がクライオジェンから第1のコールドステージ18aに伝達され、クライオジェンが冷却されて液化され、そして更なる低温容器3へクライオジェンが戻される。

10

【0058】

図4に示した本発明の実施の形態では、更なる低温容器3に代えて放射シールド24が冷却される。更なるライン23bは閉じた回路を形成し、この回路では、コールドヘッド4aの第1のコールドステージで冷媒が冷却され、熱交換器25へ導かれる。熱交換器25は放射シールド24と接触しており、これにより放射シールド24から熱を取り出す。更なるライン23bの冷却回路は自由対流によって駆動される。循環ポンプの使用も望ましい。

【0059】

図5のNMR装置では、第1の低温容器2の冷却がNMRプローブヘッド1の冷却と直接に組み合わされ、そして単一の冷却回路で実現される。図2ないし図4の例と対照的に、コールドステージ18b、12bを備えた2段コールドヘッド4bが冷却に供される。ここで、最冷コールドステージ12bの温度は約12Kである。閉じた回路の冷媒(ヘリウム)はコールドヘッド4bのコールドステージ18b、12bで冷却され、冷却すべき部品(第1の低温容器2、RF共振器16、前置増幅器17)に供給される。図2に記載のNMRプローブヘッド1の冷却回路に加えて、図5のNMR装置では、冷却回路の冷媒は、冷却後、2つのカウンタフロー熱交換器26のコールドヘッド4bの最冷コールドステージ12bから第1の低温容器2へ導かれる。この第1の低温容器では、更なるライン23cは第1の低温容器2内のクライオジェンと接触する。コールドステージ12で冷媒が約12Kに冷却された後、冷媒の流れが分割され、冷媒の一部が更なるカウンタフロー熱交換器26を通過する一方、別の部分が中間膨張用の装置27たとえばジュールトムソンバルブ内で冷却される。冷媒が所定の初期状態および最終状態で正の整数のジュールトムソン係数を有する場合、等エンタルピ圧力低下を伴う冷却が行われる。冷却された部分流れは、カウンタフロー熱交換器26における第1の低温容器2へ供給される部分流れを予備冷却する。第1の低温容器内の圧力よりも僅かに低い圧力までの最終的な膨張により、予備冷却された部分流れが部分的に液化される。冷媒は、第1の低温容器2から熱を取り去った後、飽和蒸気または僅かに過熱された蒸気の形式で更なるカウンタフロー熱交換器26を通過して戻され、これにより加熱され且つNMRプローブヘッド1内へ導かれてRF共振器16及び前置増幅器17を冷却する。ジュールトムソンバルブ内の冷媒を低圧まで一般には雰囲気圧力またはそれよりも僅かに低い圧力まで膨張させなければならないので、冷凍コンプレッサ5の低圧力レベルまで冷媒を再び圧縮するため更なる(より小型の)コンプレッサ20が必要である。冷却回路は冷凍コンプレッサ5から完全に分離可能でもある。この場合、冷媒を雰囲気圧力からプロセス制御に必要な高圧にまで圧縮する追加の別個のコンプレッサを用いる。

20

30

40

【0060】

第1の低温容器2の冷却とNMRプローブヘッド1の冷却との組み合わせは、両部分システムを個々に冷却することが困難である点で不利である。プローブヘッド冷却および低温容器2の連続冷却を中断するには、冷却回路に更なる継手およびラインが必要になり、装置費用が増大する。

【0061】

図6の装置では、NMRプローブヘッド1の冷却回路と放射シールド24の冷却回路が

50

連結されて閉じた冷却回路を形成している。前置増幅器 17 及び放射シールド 24 を約 77 K にまで冷却しなければならないため、プローブヘッド冷却に用いる冷媒部分は、RF 共振器 16 および第 2 のカウンタフロ-熱交換器 22 を通過した後に主たる流れから分岐され、また、更なるライン 23 d 内を放射シールド 24 へ導かれる。一方、冷媒の別の部分は前置増幅器 17 を通る。放射シールド 24 に供給された冷媒は、熱交換器 25 により放射シールド 24 への熱入力を取り去り、ハウジング 6 内の前置増幅器 17 からの戻りラインと結合される。図 6 の実施の形態では、放射シールド 24 および NMR プローブヘッド 1 の冷却を独立に行うことはできない。

#### 【0062】

2 つのコールドステージ 18 c、12 c を備えたパルスチューブクーラのコールドヘッド 4 c を使用することが特に有利である。プローブヘッド 1 を冷却する冷媒および第 1 の低温容器 2 で蒸発し加熱されたクライオジェンを、パルスチューブクーラ (図 7) の最冷コールドステージ 12 c のリジェネレータチューブ 28 と熱接触させることができる。サスペンションチューブ 29 a、29 b 内で熱入力により蒸発し加熱されたクライオジェンは、ライン 23 e、30 を介してハウジング 6 へ導かれる。このハウジング内では、クライオジェンは混合され、コールドヘッド 4 c の第 1 のコールドステージ 18 c へ導かれて約 65 K まで冷却される。クライオジェンは次いでリジェネレータチューブ 28 に沿って冷却され、最後にコールドヘッド 4 c の最冷コールドステージ 28 に接触して液化され、第 1 の低温容器 2 へ戻され、これによりサスペンションチューブ 29 a、29 b を冷却し、第 1 の低温容器 2 への熱入力を低減する。

#### 【0063】

RF 共振器 16 は約 15 K まで冷却すればよいので、RF 共振器 16 を冷却する冷媒を最冷コールドステージ 12 c の温度 (4.2 K) まで冷却する必要はない。このため、図 7 の実施の形態の NMR プローブヘッド 1 の冷却回路の冷媒は、NMR プローブヘッド 1 から放出された冷媒を用いてカウンタフロ-熱交換器 21 で予備冷却され、次いでコールドヘッド 4 c の第 1 のコールドステージ 18 c で予備冷却され、最後に最冷コールドステージ 12 c のリジェネレータチューブ 28 の区間に沿って所要温度まで冷却される。NMR プローブヘッド 1 の冷却回路の冷媒はコールドヘッド 4 c の最冷コールドヘッド 12 c の冷端には導かれず、単に、リジェネレータチューブ 28 の、冷媒が NMR プローブヘッド 1 の RF 共振器 16 および前置増幅器 17 を冷却するのに好適な温度を有する一部位に導かれる。冷媒とリジェネレータチューブ 28 との接触面の長さは自由に選択することができる。この長さは、最冷コールドステージ 12 c の温度 (4.2 K) と第 1 のコールドステージ 18 c の温度 (例えば 65 K) との間の温度範囲内の冷媒冷却温度を必要に応じて最適化することができる。最冷コールドステージ 12 c のリジェネレータチューブ 28 への追加の熱入力は、パルスチューブクーラの最冷コールドステージ 12 c の冷凍能力を損なう。しかしながら、好適なプロセス制御および設計により、装置全体の熱力学的な効率を増大可能でもある。また、カウンタフロ-熱交換器の数は低減可能である。

#### 【0064】

ヘリウムは、臨界点以上で、閉じた冷却回路に対する冷媒として使用することが好ましい。しかしながら、NMR プローブヘッド 1 の前置増幅器 17 を冷却するため、別個の閉じた冷却回路 31 を設けてもよい (図 8)。この冷却回路 31 は、より高温度で沸騰する冷媒 (例えば窒素) で運転可能である。前置増幅器 17 は約 77 K まで冷却すれば足りるからである。図 8 の実施の形態では、本発明の NMR 装置は、低温容器 2、3、前置増幅器 17 および RF 共振器 16 を単一のコールドヘッド 4 a および 4 つの別個のコールドカップリング機構を用いて冷却する。これにより、クライオクーラ (これによる磁石の冷却) をスイッチオフせずに例えば NMR プローブヘッド 1 を加熱することが可能になる。

#### 【0065】

全体として、冷却の効率化および振動減結合の改良ならびにクライオジェン損失の最小化を図った NMR 装置が得られる。本発明の装置は、コールドヘッドの磁気リジェネレータ材料による磁石材料の磁場への影響 (およびその逆) を低減する。これに加えて、低温

10

20

30

40

50

液体は磁石の冷却を少なくとも一時的に確実なものにするので、クライオスタットの冷却が中断された場合にも NMR 計測を継続することができる。

【図面の簡単な説明】

【0066】

【図1】クライオスタットおよび NMR プロブヘッドの共通冷却用のクライオクーラを備えた本発明の NMR 装置の概略図を示す。

【図2】3段クライオクーラと第1の低温容器を冷却する金属製熱伝達装置と更なる低温容器を冷却するキャビティに接続されたパイプ導管とを備えた本発明の NMR 装置の概略断面を示す。

【図3】3段クライオクーラと第1の低温容器を冷却するキャビティに接続されたパイプ導管と更なる低温容器を冷却する更なるラインとを備えた本発明の NMR 装置の概略断面を示す。 10

【図4】3段クライオクーラとキャビティに接続され第1の低温容器を冷却するパイプ導管と放射シールドを冷却する更なるラインとを備えた本発明の NMR 装置の概略断面を示す。

【図5】2段クライオクーラと、第1の低温容器および NMR プロブヘッドを冷却する共通冷却回路と、キャビティに接続され更なる低温容器を冷却するパイプ導管とを備えた本発明の NMR 装置の概略断面を示す。

【図6】3段クライオクーラと、キャビティに接続され第1の低温容器を冷却するパイプ導管と、放射シールドおよび NMR プロブヘッドを冷却する共通冷却回路とを備える本発明の NMR 装置の概略断面を示す。 20

【図7】NMR プロブヘッドの冷却回路用の可変温度タップと、第1の低温容器を冷却する2つのラインからの統合ラインと、更なる低温容器を冷却する更なるラインとを備えた本発明の NMR 装置の概略断面を示す。

【図8】3段クライオクーラと NMR プロブヘッドの前置増幅器用の別個の冷却回路とを備える本発明の NMR 装置の概略断面を示す。

【符号の説明】

【0067】

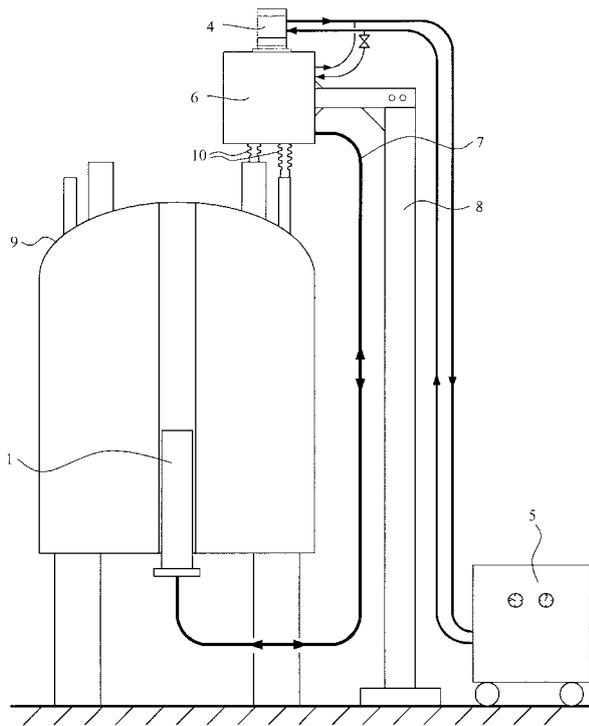
- 1 NMR プロブヘッド
- 2 第1の低温容器 30
- 3 追加の低温容器
- 4 コールドヘッド
- 4 a 3段コールドヘッド
- 4 b 2段コールドヘッド
- 4 c パルスチューブクーラの2段コールドヘッド
- 5 冷凍コンプレッサ
- 6 真空ハウジング
- 7 トランスファライン
- 8 スタンド
- 9 クライオスタット 40
- 10 ベロー
- 11 高熱伝導率との接続
- 12 a 3段コールドヘッドの最冷コールドステージ
- 12 b 2段コールドヘッドの最冷コールドステージ
- 12 c パルスチューブクーラの2段コールドヘッドの最冷コールドステージ
- 13 スタンド
- 14 ライン
- 15 キャビティ
- 16 RF共振器
- 17 前置増幅器 50

- 18 a 3段コールドヘッドの第1のコールドステージ
- 18 b 2段コールドヘッドの第1のコールドステージ
- 18 c パルスチューブクーラの2段コールドヘッドの第1のコールドステージ
- 19 a 3段コールドヘッドの第2のコールドステージ
- 20 更なるコンプレッサ
- 21 第1のカウンタフロー熱交換器
- 23 a 追加の低温容器の冷却回路の更なるライン
- 23 b 放射シールドの冷却回路の更なるライン
- 23 c パルスチューブクーラの冷却回路の更なるライン
- 23 d 放射シールドの冷却回路の更なるライン
- 23 e 第1の低温容器の冷却回路の更なるライン
- 24 放射シールド
- 25 熱交換器
- 26 更なるカウンタフロー熱交換器
- 27 中間膨張装置
- 28 最冷コールドステージのリジェネレータチューブ
- 29 a 第1の低温容器のサスペンションチューブ
- 29 b 第1の低温容器の更なるサスペンションチューブ
- 29 c 更なる低温容器のサスペンションチューブ
- 30 接続ライン
- 31 前置増幅器冷却回路

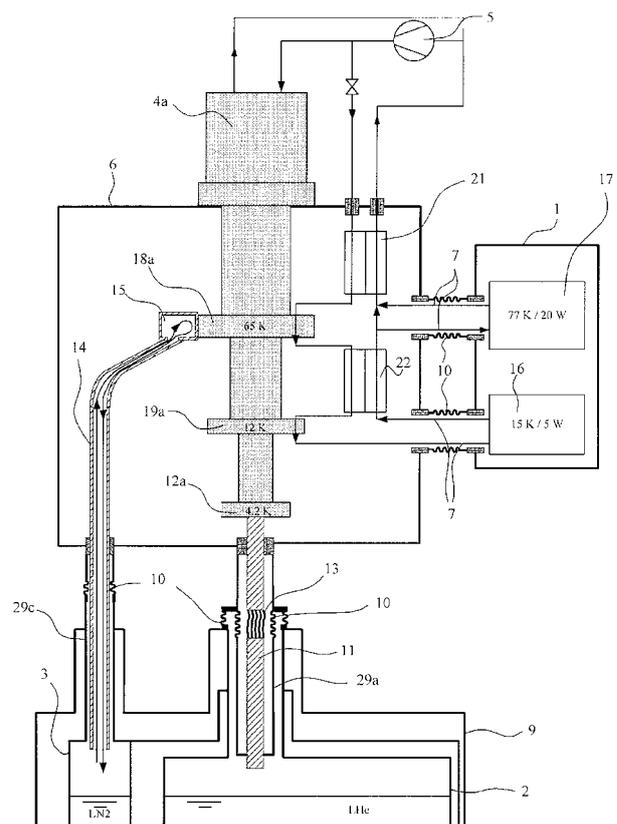
10

20

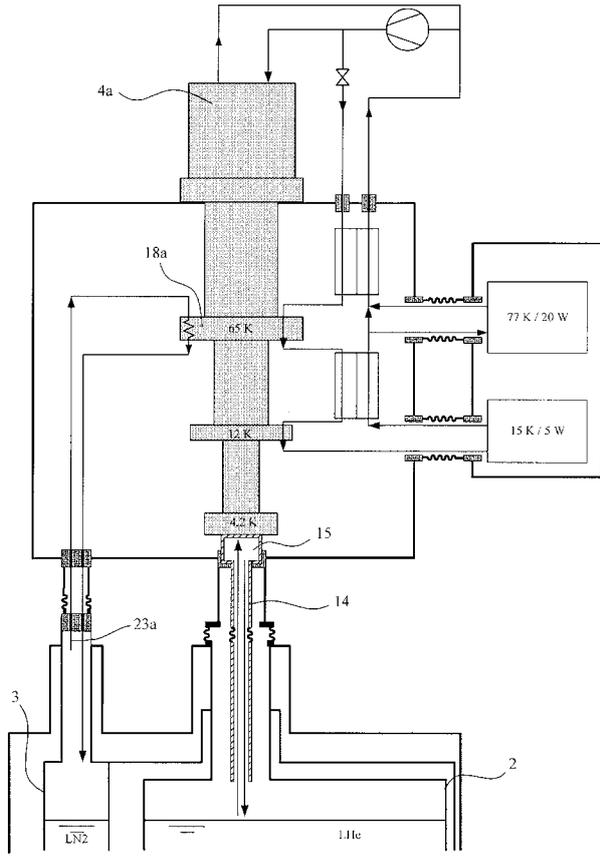
【図1】



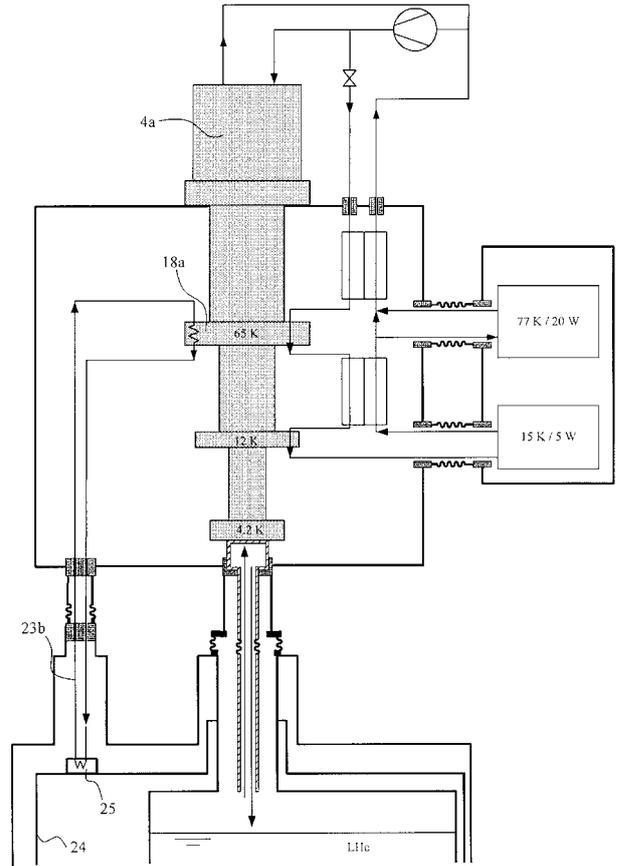
【図2】



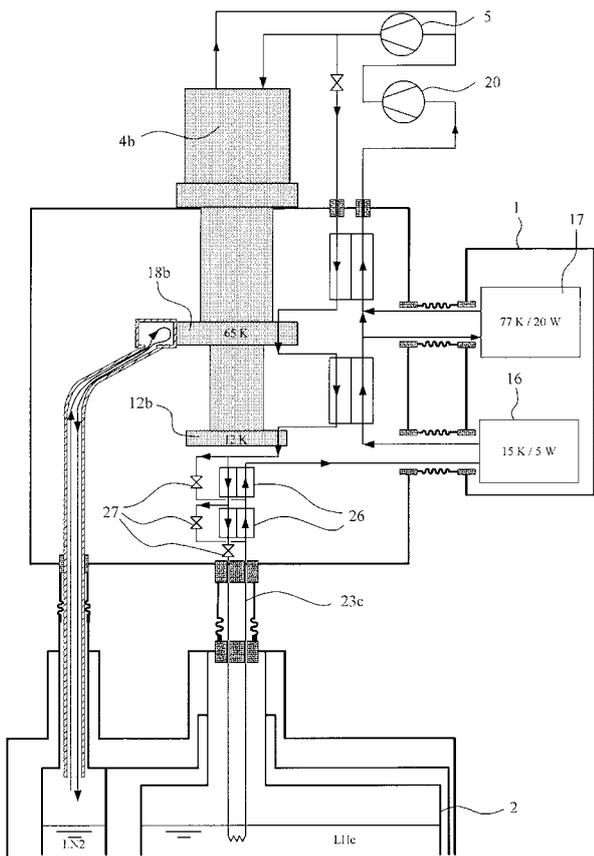
【 図 3 】



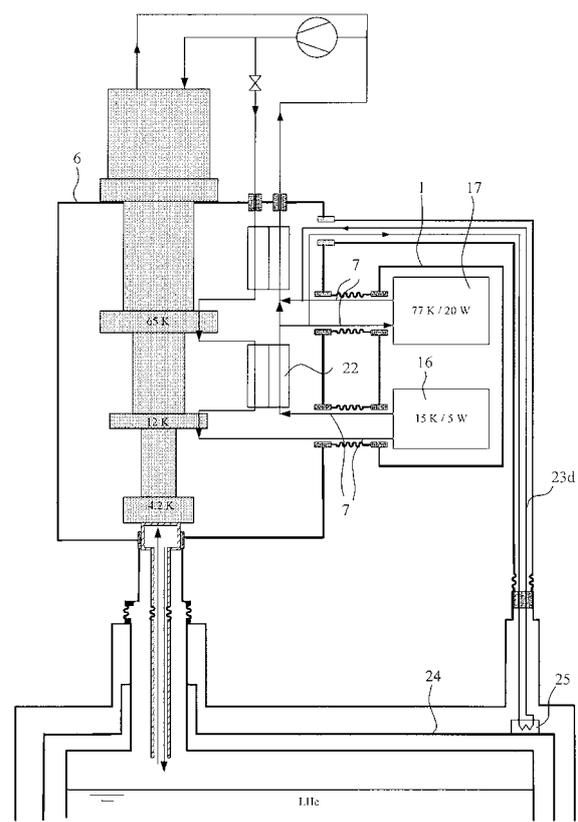
【 図 4 】



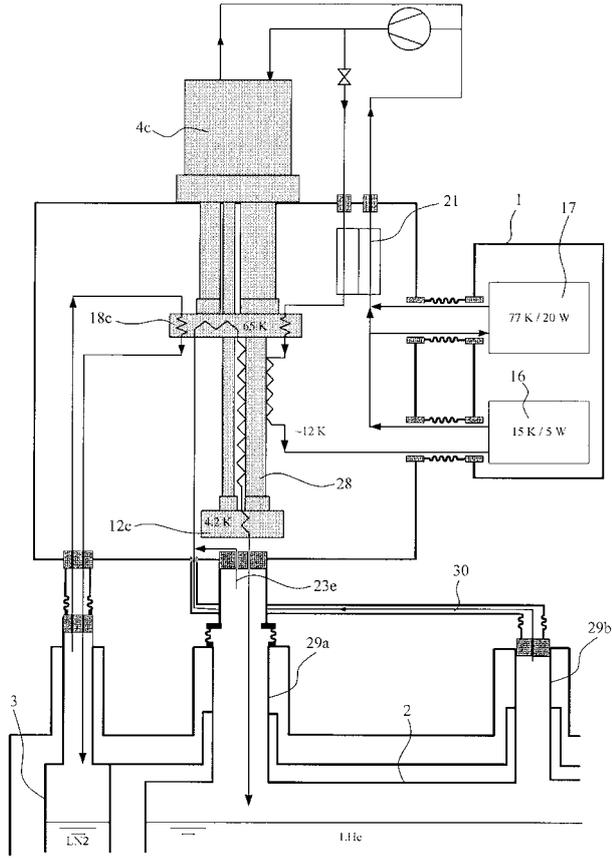
【 図 5 】



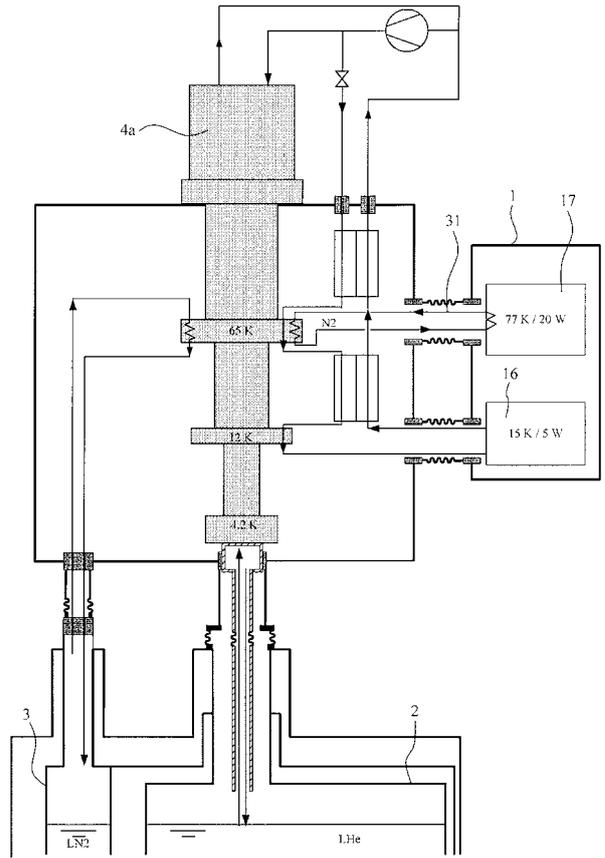
【 図 6 】



【 図 7 】



【 図 8 】



---

フロントページの続き

- (72)発明者 アニエス グレモット  
スイス国 チューリッヒ ツェーハー - 8 0 0 6 ストルゼシュトラーセ 5
- (72)発明者 ダニエル エカート  
スイス国 バッヘンブルハ ツェーハー - 8 1 8 4 ツィシェンウェゲン 8
- (72)発明者 ダニエル ギー バウマン  
スイス国 ルシンコン ツェーハー - 8 3 3 2 ルムリンコン ウンテルドルフ 1 a

【外国語明細書】

[2007064984000001.pdf](#)

[2007064984000002.pdf](#)

[2007064984000003.pdf](#)

[2007064984000004.pdf](#)