

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 393 141**

51 Int. Cl.:

H01F 6/04 (2006.01)

F25D 19/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **08776071 .6**

96 Fecha de presentación: **25.07.2008**

97 Número de publicación de la solicitud: **2183753**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **12.05.2010**

54 Título: **Métodos de refrigeración**

30 Prioridad:

10.08.2007 GB 0715670

15.08.2007 GB 0715948

09.11.2007 GB 0722098

09.11.2007 US 937573

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:

18.12.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:

18.12.2012

73 Titular/es:

TESLA ENGINEERING LIMITED (100.0%)

WATER LANE

STORRINGTON WEST SUSSEX RH20 3EA, GB

72 Inventor/es:

BEGG, MICHAEL COLIN y

GOLDIE, FREDERICK THOMAS DAVID

74 Agente/Representante:

PÉREZ BARQUÍN, Eliana

ES 2 393 141 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN**Métodos de refrigeración**

5 La presente invención se refiere a sistemas superconductores, y más en particular a sistemas de refrigeración y métodos para un sistema superconductor que incluye una o más bobinas superconductoras.

10 Los sistemas superconductores se usan en muchas aplicaciones, que incluyen, por ejemplo, rotores, dispositivos de almacenamiento de energía magnética, generadores, motores y sistemas magnéticos, por ejemplo, de obtención de imágenes por resonancia magnética (IRM), o sistemas para su uso en aplicaciones de física de partículas, como, por ejemplo, aceleradores de partículas. La presente invención está dirigida en particular, aunque no exclusivamente, a un sistema de imán superconductor.

15 Se han propuesto varios métodos para la refrigeración de bobinas de sistemas superconductores. Algunos métodos convencionales de refrigeración para bobinas superconductoras implican sumergir la bobina en un refrigerante criogénico líquido o "criógeno". El criógeno usado más comúnmente es helio líquido. El criógeno absorbe calor del superconductor, y se vaporiza, refrigerando así el superconductor. Sin embargo, la necesidad de sumergir el superconductor en el criógeno tiene algunos inconvenientes. Por ejemplo, esto puede dar como resultado un aparato voluminoso como consecuencia de la necesidad de proporcionar un criógeno que contenga un baño alrededor del superconductor. Debido a las cantidades relativamente grandes de criógeno requeridas, generalmente es necesario que el baño que contiene criógeno sea un recipiente a presión, capaz de resistir las presiones potencialmente elevadas que pueden derivarse de la vaporización del criógeno en el enfriamiento rápido del imán superconductor. El enfriamiento rápido es un fenómeno que puede producirse si el imán superconductor sale de su estado superconductor y entra en un estado resistivo. Esto puede derivar en la liberación de energía desde la bobina en forma de calor, haciendo que el criógeno que rodea a la bobina se vaporice. Además, es probable que los criógenos, por ejemplo, helio líquido, se hagan cada vez más escasos en el futuro, lo que hace menos deseables los sistemas de inmersión que usan grandes cantidades de criógeno.

30 Otros métodos de refrigeración conocidos usan conductores térmicos, como enlaces térmicos de cobre, para transferir calor desde la bobina superconductoras al fluido de trabajo de un criorefrigerador, sin usar un criógeno como un medio de transferencia de calor. Sin embargo, estos sistemas tienen también algunos inconvenientes. Por ejemplo, pueden producirse gradientes de temperatura importantes a lo largo de los conductores, lo que degrada el rendimiento, de la bobina superconductoras. Este problema puede hacer dichos sistemas inadecuados para su uso en conjunción con bobinas grandes, por ejemplo imanes, cuando puede ser necesario situar el criorefrigerador a una distancia importante de la bobina para reducir cualquier interferencia por parte de la bobina con las partes de trabajo del criorefrigerador.

35 El documento US 2006/0235709 A1 desvela un dispositivo superconductor que ahorra espacio. El documento US 6107905 desvela un aparato de imán superconductor. El documento EP 1522867, que se contempla como la técnica anterior más cercana, desvela un imán superconductor con aumento de la estabilidad térmica.

El solicitante ha comprendido que existe la necesidad de un método y un sistema de refrigeración mejorado para un sistema superconductor.

45 De acuerdo con la presente invención se proporciona: un sistema superconductor de acuerdo con la reivindicación 1.

50 Por tanto, de acuerdo con la invención, se proporciona una cámara criogénica en proximidad de la bobina superconductoras. Un criógeno líquido situado en la cámara en uso puede absorber y ser vaporizado por calor transmitido al mismo desde la bobina superconductoras para enfriar con ello la bobina. Se proporciona específicamente un medio de alta conducción térmica para facilitar la transferencia de calor desde la bobina superconductoras a la cámara criogénica con el fin de vaporizar el criógeno situado en la misma en uso. La presente invención usa así una vía de conducción térmica para transferir calor desde la bobina superconductoras al criógeno situado en una cámara criogénica en proximidad de la bobina en uso. La cámara criogénica está en comunicación fluida con, por ejemplo conectada a, una unidad de recondensación de criógeno, con lo que, en uso, el criógeno situado en la cámara y vaporizado por calor desde la bobina superconductoras puede fluir a la unidad de recondensación de criógeno con el fin de recondensarlo antes de retornar a la cámara. A continuación, el criógeno recondensado puede ser vaporizado de nuevo para iniciar un nuevo ciclo.

60 De esta forma, la presente invención proporciona un sistema de refrigeración para la bobina superconductoras o enfría el sistema, en el que calor es extraído de la bobina o bobinas en un proceso en dos etapas. En primer lugar, el calor es transmitido por conducción térmica en distancias relativamente cortas a un criógeno de una cámara criogénica local para vaporizar el criógeno presente en la cámara en uso. En la segunda fase, el criógeno vaporizado actúa como un medio de transferencia de calor para evacuar el calor de la proximidad de la bobina superconductoras, con un recorrido desde la cámara criogénica a una unidad de recondensación.

65 Se ha encontrado que la combinación de los dos mecanismos diferentes de transferencia de calor, es decir, el uso

del criógeno en su estado vaporizado como un medio de transporte de calor solo en las últimas fases del proceso de refrigeración para transportar calor a la unidad de recondensación, por ejemplo a lo largo de un alcance mayor, con el uso de conducción térmica por medio de un medio específico de alta conducción térmica para transmitir inicialmente calor desde la bobina al criógeno, es decir, a lo largo de un alcance menor, es especialmente ventajoso, lo que permite que la presente invención aborde los problemas asociados con las configuraciones de la técnica anterior que dependen de la inmersión de la bobina en un baño criogénico para evacuar el calor de la bobina, y también con las que dependen del uso de conductores térmicos para transmitir calor a una distancia importante directamente al fluido de trabajo de una bomba de calor, como un criorrefrigerador, sin usar un criógeno.

A diferencia de las configuraciones de tipo inmersión, la presente invención permite el uso de una cantidad significativamente menor de criógeno, y reducciones correspondientes en el tamaño de la cámara criogénica que se obtendrán en comparación con los baños criogénicos de la técnica anterior. Esta es una consecuencia de la presencia de un medio térmicamente conductor dedicado a facilitar la transmisión de calor desde la bobina al interior de la cámara criogénica para vaporizar criógeno, y una unidad de recondensación para recondensar el criógeno vaporizado. La presencia del medio de alta conducción térmica permite que la temperatura de la bobina se mantenga cerca de la temperatura del criógeno líquido sin necesidad de proporcionar una cantidad sustancial de criógeno adyacente a la bobina en un baño criogénico para que actúe como un reservorio de frío. De acuerdo con la invención, la inmersión de la bobina en criógeno es sustituida por el contacto térmico de la bobina con un medio de alta conducción térmica dispuesto para transmitir calor a la cámara criogénica. Como de acuerdo con la invención puede estar presente una cantidad menor de criógeno, las presiones potenciales que pueden surgir durante el enfriamiento rápido de la bobina se reducen, para proporcionar mayor flexibilidad en la construcción de la cámara criogénica, que no es necesario diseñar de manera que resista presiones tan elevadas como un baño criogénico convencional. Además, al reducir el tamaño de la cámara criogénica con respecto a un baño criogénico convencional, y al proporcionar un medio de alta conducción térmica para transportar calor a la cámara, se proporciona mayor flexibilidad en la construcción del sistema global, por ejemplo, en su tamaño y configuración, ya que no es necesario que el criógeno esté en contacto directo con las bobinas.

Como la cámara criogénica está en la proximidad de la bobina superconductora, las distancias sobre las cuales debe transmitirse el calor por conducción térmica son relativamente pequeñas en uso, lo que reduce la cantidad de material térmicamente conductor requerida, y evita los problemas asociados con las pérdidas térmicas y los gradientes de temperatura que pueden producirse cuando el calor se transmite a largo alcance, por ejemplo, directamente a un criorrefrigerador de una unidad de recondensación usando enlaces térmicos. De acuerdo con la invención, solo es necesario transmitir el calor hasta la cámara criogénica local por conducción para permitirle que vaporice el criógeno en uso, con el criógeno vaporizado siendo utilizado a continuación para que evacue el calor de la proximidad de la bobina, por ejemplo, a un criorrefrigerador si se desea. El uso de criógeno vaporizado como el medio de transporte del calor de largo alcance a una unidad de recondensación puede permitir que el calor sea transferido convenientemente a distancias relativamente grandes, ya que la masa y el tamaño del aparato requerido para transportar calor a una distancia dada usando criógeno vaporizado es mucho menor de lo que sería necesario para transportar una cantidad de calor correspondiente usando un enlace térmico sólido, por ejemplo, de cobre. Esto permite que la unidad de recondensación se sitúe a mayores distancias de la cámara criogénica que lo que permiten las configuraciones de la técnica anterior, sin comprometer la eficiencia del sistema de refrigeración en un grado perjudicial. Al eliminar las restricciones en la distancia a la que puede situarse la bobina con respecto a la unidad de recondensación, la presente invención puede permitir el uso de bobinas superconductoras más grandes, ya que la unidad de recondensación puede colocarse a una distancia suficientemente grande de la bobina para evitar la interferencia inaceptable con su funcionamiento mediante la bobina. Además, se ha encontrado que el uso del criógeno para transportar calor a la unidad de recondensación permite obtener un mejor aislamiento de las vibraciones entre la bobina y la unidad de recondensación, lo que puede incluir un motor y otras piezas móviles.

Debe observarse que todas las referencias a conductividad térmica en la presente memoria descriptiva, salvo que se indique lo contrario, aluden a conductividad térmica a temperaturas criogénicas. Las temperaturas criogénicas pueden tomarse como aquellas temperaturas de menos de 100 K, y así, el medio de alta conducción térmica es de alta conducción térmica a temperaturas criogénicas de menos de 100 K. En formas de realización típicas, las temperaturas criogénicas a las que se hace funcionar el sistema pueden ser de menos de 40 K.

De acuerdo con un segundo aspecto de la invención, se proporciona un método de refrigeración de una bobina superconductora de acuerdo con la reivindicación 12.

La presente invención en el aspecto adicional puede incluir cualquiera o la totalidad de las características descritas en relación con el primer aspecto de la invención.

Aunque la presente invención de acuerdo con cualquiera de sus aspectos y formas de realización es aplicable a cualquier sistema superconductor que comprenda una bobina superconductora que debe refrigerarse, el sistema superconductor es preferentemente un sistema de imán superconductor, y la bobina superconductora está dispuesta preferentemente para proporcionar un campo magnético cuando fluye corriente a través de sus arrollamientos.

La presente invención puede aplicarse a sistemas de alta temperatura o de baja temperatura. Sin embargo, la

invención puede aplicarse en particular a los denominados sistemas superconductores “de baja temperatura”. En estos sistemas la bobina superconductora del sistema debe accionarse a una temperatura en o por debajo de una temperatura crítica con el fin de ser capaz de conseguir y/o mantener la superconductividad. Las temperaturas críticas para estos superconductores de baja temperatura están en el orden criogénico, normalmente, por ejemplo, de menos de 20 K. Por ejemplo, niobio-titanio (NbTi) y niobio-estaño (Nb₃Sn), que son materiales superconductores usados comúnmente en sistemas superconductores de baja temperatura, que tienen temperaturas de transición de superconducción de 10,1 K y 18,5 K respectivamente. Para proporcionar un rendimiento de superconducción adecuado, los superconductores que comprenden estos materiales deben enfriarse bastante por debajo de estas temperaturas de transición críticas para permitir, por ejemplo, que la bobina superconductora de un superimán sea capaz de transportar grandes densidades de corriente en presencia de campos magnéticos elevados.

Aunque la invención se ha descrito en detalle en relación con una bobina superconductora, se observará que el sistema puede comprender cualquier número de bobinas, y, si no se indica explícitamente, debe entenderse que las referencias a “la bobina” se refieren a “al menos una bobina”, y esto puede entenderse como la, cada o una bobina, cuando está presente una pluralidad de bobinas. La segunda bobina, o cualquiera otra adicional, puede ser de la misma construcción que la primera, y puede incluir cualquiera o la totalidad de las características descritas con respecto a la primera bobina.

La al menos una bobina superconductora puede ser de cualquier tamaño y configuración, dependiendo de la aplicación pretendida del sistema. La bobina puede ser de forma regular o irregular. En algunas formas de realización, la bobina superconductora es anular. Entonces, la bobina puede tener la forma de una parte o de todo el anillo.

La bobina o bobinas pueden estar hechas de cualquier material adecuado que sea superconductor, por ejemplo, a temperaturas criogénicas bajas. Preferentemente, la al menos una bobina comprende niobio-titanio y/o niobio-estaño. La bobina puede comprender una envoltura exterior, por ejemplo en forma de un manguito o funda para proteger el o los filamentos que definen los arrollamientos, o bien pueden dejarse los filamentos expuestos.

De acuerdo con la invención, el calor se transfiere por conducción entre el criógeno situado en la cámara criogénica en uso y la bobina superconductora, por medio de un medio de alta conducción térmica. Puede usarse cualquier material que tenga un nivel adecuadamente elevado de conductividad térmica a temperaturas criogénicas para proporcionar el medio de alta conducción térmica, y en la técnica se conocen ejemplos de materiales adecuados. El medio de alta conducción térmica puede comprender uno o más materiales diferentes, que pueden ser de la misma o diferente conductividad térmica, siempre y cuando todos los compuestos muestren altos niveles de conductividad térmica. Preferentemente el medio de alta conducción térmica comprende o consiste en un metal. Por ejemplo, el medio de alta conducción térmica puede comprender aluminio. Sin embargo, en formas de realización preferidas en particular el medio de alta conducción térmica comprende o consiste en cobre.

El medio de alta conducción térmica tiene normalmente una conductividad térmica más elevada que los materiales usados convencionalmente para proporcionar componentes estructurales en sistemas convencionales de superimanes. Dichos materiales tienen normalmente una conductividad térmica baja a temperaturas criogénicas de menos de 10 W/m/K, e incluyen materiales como acero inoxidable, aleación de aluminio o poliéster reforzado con vidrio. El medio de alta conducción térmica tiene, por tanto, una conductividad térmica elevada con respecto al acero inoxidable.

Preferentemente, el elemento de alta conducción térmica tiene una conductividad térmica en el intervalo de más de 100 W/m/K a temperaturas criogénicas, y más preferentemente de más de 200 W/m/K. Según se describe anteriormente, las referencias a temperaturas criogénicas en la presente memoria descriptiva aluden a temperaturas de menos de 100 K. Así, el medio térmicamente conductor debería ser capaz de mostrar conductividad térmica dentro de los intervalos descritos en todo este intervalo de temperaturas, es decir, a cualquier temperatura por debajo de 100 K. En térmicos prácticos, las temperaturas más bajas que se encontrarán probablemente estarían en el orden de 4 K. En formas de realización típicas, el sistema puede hacerse funcionar a temperaturas entre 4 K y 50 K, y el medio de alta conducción térmica muestra la conductividad térmica descrita en todo este intervalo. Cualquier otro intervalo para conductividad térmica descrito en la presente memoria descriptiva, por ejemplo con referencia a otros componentes del sistema, debería tomarse análogamente con referencia a temperaturas de menos de 100 K.

Preferentemente el medio de alta conducción térmica tiene una conductividad térmica en el intervalo de más de 100 W/m/K a temperatura ambiente.

El medio térmicamente conductor puede ser de cualquier forma y estar dispuesto de cualquier manera que facilite la transferencia de calor por conducción térmica entre la bobina y el criógeno situado en la cámara criogénica en uso. Por ejemplo, el medio térmicamente conductor puede comprender uno o más conectores conductores térmicamente, y/o capa(s) conductora(s) térmicamente.

El medio térmicamente conductor se extiende a toda la distancia entre la al menos una bobina y el interior de la cámara criogénica. De esta forma, el medio térmicamente conductor proporciona una vía directa de conducción

térmica entre una superficie de la bobina y el interior de la cámara criogénica con el fin de ser capaz de entrar en contacto directamente con el criógeno situado en la cámara en uso. Preferentemente el medio térmicamente conductor está dispuesto para entrar en contacto directamente con una superficie de la bobina en un extremo de la misma, y para entrar en contacto directamente con el criógeno situado en la cámara criogénica en uso en el otro extremo de la misma. El medio térmicamente conductor puede extenderse a lo largo de cualquier trayectoria o trayectorias adecuadas entre la bobina y la cámara criogénica, y puede extenderse a través o alrededor de cualquier capa interpuesta.

El medio térmicamente conductor puede estar dispuesto para transmitir calor entre la bobina y la cámara criogénica solo en un punto o puntos seleccionados de un área superficial de la bobina, o en una pluralidad de puntos, que pueden estar en forma de un área continua o discontinua. En algunas formas de realización, el medio térmicamente conductor puede estar dispuesto para recoger calor de diferentes partes de la bobina y para suministrar el calor a la cámara criogénica. De esta manera, el medio térmicamente conductor puede transportar calor desde partes de la bobina que no son directa o indirectamente adyacentes a la cámara criogénica, o al menos a una parte que contiene criógeno de la misma, al criógeno en la cámara en uso.

Se observará que, en efecto, la presente invención sustituye el criógeno proporcionado en un baño criogénico dispuesto adyacente a la bobina con el fin de sumergir la bobina con el medio térmicamente conductor que entra en contacto con la bobina para evacuar el calor de la misma y transferirlo a una cámara criogénica, para proporcionar mayor flexibilidad en la colocación y el tamaño de la cámara criogénica con respecto a la bobina. Cuanto mayor sea el área de contacto entre la bobina y el medio térmicamente conductor, mayor será la eficacia con la que puede extraerse el calor de la bobina.

En formas de realización preferidas, el medio térmicamente conductor está en contacto con una parte sustancial del área superficial de la bobina. En las formas de realización, el medio térmicamente conductor se extiende alrededor de al menos parte de una circunferencia de la bobina. De esta forma, el calor puede extraerse directamente de una parte mayor de la bobina para aumentar la velocidad de refrigeración. Preferentemente el medio térmicamente conductor está dispuesto para entrar en contacto con al menos el 25 %, más preferentemente al menos el 50 %, y con la máxima preferencia al menos el 75 % de una superficie de la bobina. El medio térmicamente conductor puede rodear al menos parcialmente a la bobina. En estas formas de realización, el medio térmicamente conductor puede entrar en contacto con una superficie radialmente exterior de la bobina. Preferentemente el medio térmicamente conductor está dispuesto para entrar en contacto con un área de la bobina que se extiende alrededor de al menos el 25 %, más preferentemente al menos el 50 %, y con la máxima preferencia al menos el 75 % de una circunferencia de la bobina.

La extensión hasta la que el medio térmicamente conductor se extiende con respecto a la superficie interior de la cámara criogénica no es crítica, dado que el medio térmicamente conductor está dispuesto para facilitar la transferencia de calor al interior de la cámara en cierta manera. El medio térmicamente conductor puede, por ejemplo, entrar en contacto con el interior de la cámara solo en un punto. Dado que la presente invención permite que el tamaño de la cámara criogénica y el volumen de criógeno presente se reduzcan significativamente con respecto a configuraciones de la técnica anterior que se basan en la inmersión de la bobina o bobinas en criógeno, el calor puede transferirse más fácilmente a cualquier criógeno presente dentro del área limitada de la cámara criogénica. La forma en que el medio térmicamente conductor está dispuesto con respecto a la cámara criogénica puede seleccionarse según resulte apropiado dependiendo de factores como el tamaño de la cámara criogénica, la distancia entre la cámara criogénica y la bobina, y la cantidad de criógeno situado en la cámara en uso para conseguir un nivel deseado de transferencia de calor. El medio térmicamente conductor puede atravesar una pared de la cámara criogénica, o, en algunas formas de realización, se contempla que el medio térmicamente conductor pueda definir al menos parcialmente una pared de la cámara criogénica.

En algunas formas de realización, el medio térmicamente conductor puede disponerse de manera que distribuya calor desde una parte de la cámara criogénica a otra. Por tanto, el medio térmicamente conductor puede estar dispuesto de manera que pueda conducir calor desde una parte de la cámara criogénica que no contiene criógeno en uso a una parte de la cámara que contiene criógeno. En algunas formas de realización, las regiones son diferentes regiones alrededor de una periferia, por ejemplo, la circunferencia de la cámara. En estas formas de realización, el medio térmicamente conductor puede entrar en contacto con una superficie interior de la cámara criogénica en uno o más puntos, que pueden extenderse sobre un área continua o discontinua de la cámara criogénica, de una manera similar al modo en que el medio térmicamente conductor puede disponerse con respecto a la bobina, según se expuso anteriormente. En algunas formas de realización, el medio térmicamente conductor puede extenderse alrededor de una periferia, o circunferencia, de la cámara criogénica.

En estas formas de realización, el calor puede aún ser transmitido al criógeno dispuesto en la cámara criogénica en uso sin la cámara criogénica, o al menos una parte del mismo que está llena de criógeno, que debe ser coextensivo con la bobina, permitiendo mayores reducciones en el tamaño de la cámara criogénica, y en la cantidad de criógeno requerida, que se obtendrá a diferencia de los sistemas de tipo inmersión de la técnica anterior. Sin embargo, debido al tamaño relativamente pequeño de la cámara criogénica que puede usarse de acuerdo con la invención, y a su proximidad a la bobina, no es necesario proporcionar ninguna configuración de distribución de calor a lo largo de

estas líneas.

En uso, el criógeno vaporizado se desplaza por difusión a la unidad de recondensación. Por tanto, la cámara criogénica puede comprender una mezcla de criógeno líquido y criógeno vaporizado en diferentes fases en su ciclo de vaporización y condensación conforme se desplaza desde una región próxima a la bobina a la unidad de recondensación y retorna de nuevo.

La cámara criogénica puede proporcionarse según cualquier manera que asegure que cuando un criógeno está situado dentro de la cámara en uso, el calor pueda transmitirse al criógeno desde la bobina por el medio de alta conducción térmica. La cámara criogénica es local con respecto a la bobina superconductora. En otras palabras, está situada en proximidad a la misma, y puede ser adyacente a la bobina. Por ejemplo, la cámara puede estar separada de la bobina por una o más capas interpuestas. La cámara criogénica está dispuesta de manera que el criógeno situado en la cámara en uso no entra en contacto directamente con la bobina superconductora. En otras palabras, la bobina no está sumergida total o parcialmente en criógeno líquido.

Cuando el medio de alta conducción térmica transporta calor al interior de la cámara criogénica, las paredes de la cámara criogénica pueden ser de baja conductividad térmica a temperaturas criogénicas, por ejemplo, de menos de 10 W/m/K. Sin embargo, en algunas formas de realización se contempla que el medio térmicamente conductor pueda formar una pared de la cámara criogénica.

Se observará que como las formas de realización de la presente invención necesitan contener solo una cantidad relativamente pequeña de criógeno, la cámara criogénica puede ser relativamente pequeña en cuanto a dimensión, lo que permite obtener una configuración mucho más compacta que en sistemas convencionales que sumergen la bobina total o parcialmente en un baño criogénico. El criógeno puede confinarse a un área limitada alrededor de la bobina definida por la posición de la cámara criogénica. Así se proporciona la capacidad de hacer las bobinas superconductoras, y otros componentes del sistema, significativamente más pequeñas y económicas de lo que permiten los sistemas convencionales. Además, como las cantidades de criógeno usadas son relativamente pequeñas, hacer funcionar el sistema puede ser más económico, y la reducción en el consumo de criógeno puede ser ventajosa al reducir la demanda de los suministros ya agotados de criógeno, por ejemplo, helio líquido, que puede hacerse más escaso en el futuro.

Aunque la presente invención permite reducir significativamente la cantidad de criógeno presente en comparación con las configuraciones convencionales, puede ser deseable usar volúmenes de criógeno que sean mayores de lo requerido para proporcionar capacidad al sistema para que siga funcionando si falla el refrigerante. La presente invención puede aplicarse a sistemas que tienen cámaras criogénicas con un intervalo de volúmenes amplio, por ejemplo, de 1 litro a 500 litros, o, en algunas formas de realización de 2 litros a 100 litros.

En algunas formas de realización, la cámara criogénica rodea al menos parcialmente a la bobina superconductora. La cámara criogénica puede rodear completamente o no a la bobina. En las formas de realización, la cámara criogénica rodea a la bobina de forma circunferencial. En las formas de realización, la cámara criogénica se extiende alrededor de al menos el 50 %, y más preferentemente al menos el 75 % de la circunferencia de la bobina. En las formas de realización, la cámara criogénica es anular. La cámara criogénica preferentemente es no coextensiva con la bobina. En formas de realización preferidas existen áreas de la bobina que son adyacentes a la cámara criogénica y existen áreas que no son adyacentes a la cámara criogénica. Por ejemplo, no es necesario que la cámara criogénica se extienda a toda el área superficial exterior de la bobina.

Se observará que en formas de realización en las que más que está presente una bobina, puede proporcionarse una o más cámaras criogénicas asociadas con cada bobina superconductora del sistema, o puede asociarse una cámara criogénica con más de una bobina.

De acuerdo con la invención, una vez que se ha transmitido calor desde la bobina al criógeno en la cámara, el calor se transmite a toda la distancia restante hasta la unidad de recondensación por medio del criógeno. Esto contrasta con algunos sistemas de la técnica anterior en los que conductores térmicos sólidos transmiten el calor directamente al fluido de trabajo de la unidad de recondensación, y no a un criógeno líquido que se vaporiza para actuar como un medio de transporte de calor.

La cámara criogénica está conectada con la unidad de recondensación de una manera que permite que el criógeno líquido o vaporizado se desplace entre la cámara criogénica y la unidad de recondensación en uso. Preferentemente la cámara criogénica está conectada a la unidad de recondensación usando un tubo, es decir, un tubo hueco a través del cual puede fluir el criógeno vaporizado. El tubo debería estar hecho de un material que tenga baja conductividad térmica a temperaturas criogénicas, y tenga preferentemente una conductividad térmica de menos de 10 W/m/K. Preferentemente la cámara criogénica comprende un orificio de salida al tubo. Preferentemente, el tubo de conexión es un tubo rígido.

Preferentemente el tubo se extiende a toda la distancia entre el orificio de salida de la cámara criogénica y el medio de recondensación, es decir, una parte de puesta en contacto del criógeno de la misma. Se observará que cuando

está presente una pluralidad de bobinas, la unidad de recondensación puede estar asociada con una o más bobinas, y puede haber una o más unidades de recondensación asociadas con cada bobina.

5 El tubo de conexión puede tener cualquier longitud adecuada. En formas de realización preferidas en las que la bobina superconductora es una bobina superconductora de un imán superconductor, la unidad de recondensación debería estar situada a una distancia suficiente de la bobina superconductora para reducir el riesgo de interferencia con el funcionamiento de la unidad de recondensación por medio del campo magnético asociado con la bobina. Normalmente, cuanto mayor es la bobina superconductora, más intenso es el campo magnético de dispersión asociado con la bobina, y más puede ser necesario colocar la unidad de recondensación desde la bobina
10 superconductora. De acuerdo con la invención, la unidad de recondensación puede estar situada a distancias del orden de hasta 1 m o más desde la bobina si fuera necesario, lo que permite situar el criorrefrigerador de la unidad de recondensación fuera de una región sujeta a interferencias por causa de la bobina. En configuraciones convencionales que usan un conductor térmico para transportar calor en toda la distancia desde la bobina a la unidad de recondensación, el tamaño y la masa del conductor térmico sólido requerido para transportar calor en una
15 distancia correspondiente serían prohibitivos.

Preferentemente el sistema está dispuesto de manera que permita que el criógeno recondensado retorne a la cámara criogénica bajo la acción de la gravedad. En formas de realización preferidas, la unidad de recondensación está dispuesta, por tanto, para estar por encima del nivel de la cámara criogénica en uso con el fin de permitir que el criógeno recondensado retorne a la cámara criogénica bajo la acción de la gravedad, por ejemplo mediante goteo de nuevo en la cámara criogénica.
20

La unidad de recondensación puede tener cualquier construcción adecuada. Preferentemente la unidad de recondensación comprende un criorrefrigerador. Un criorrefrigerador es un dispositivo bien conocido en la técnica de superconductividad a bajas temperaturas, y es un motor térmico alternativo que usa gas como fluido de trabajo para transferir calor de una o más fases frías a temperatura ambiente. Preferentemente la unidad de recondensación comprende así un fluido de trabajo. El criorrefrigerador puede ser de cualquier construcción adecuada que proporcione el nivel requerido de refrigeración del criógeno para una aplicación dada. Por ejemplo, bobinas más grandes, por ejemplo de un imán más grande, requerirán niveles mayores de potencia de refrigeración.
25 Preferentemente la unidad de recondensación comprende al menos un módulo de refrigeración en el cual puede recondensarse el criógeno en uso.
30

La presente invención se extiende a un sistema de acuerdo con la invención en cualquiera de sus aspectos o formas de realización que incluyen un criógeno. Preferentemente el criógeno es helio líquido.
35

En formas de realización en las que la cámara criogénica contiene criógeno, preferentemente al menos una parte de la cámara criogénica no incluye criógeno líquido, y el método comprende solo inicialmente el llenado parcial de la cámara criogénica con criógeno. En formas de realización preferidas, la cámara criogénica se llena inicialmente con criógeno líquido a un nivel de menos del 50 % de la altura de la cámara. Este es el nivel antes del uso del aparato, y de cualquier vaporización del criógeno. En estas formas de realización, si se desea, el calor aún puede ser transferido desde regiones de la bobina o la cámara criogénica distintas a las adyacentes al criógeno mediante una configuración apropiada del medio térmicamente conductor para permitir que la totalidad, o una mayor parte, de la cámara criogénica participe en la refrigeración.
40

La presente invención proporciona un sistema giratorio en el que la refrigeración de la bobina sigue produciéndose aun cuando la bobina se haga girar. Preferentemente la bobina, (y su cámara criogénica), puede hacerse girar hasta 90 grados en cualquier dirección, sin interferir con la refrigeración de la bobina. Esto puede conseguirse proporcionando una cámara criogénica que rodee al menos parcialmente a la bobina, y llenando la cámara solo parcialmente con criógeno en uso, de manera que el criógeno puede seguir rodeando a al menos una parte de una circunferencia de la bobina si la bobina se hace girar. A continuación, la inclinación de la bobina y la cámara criogénica puede dar simplemente como resultado que el flujo del criógeno alrededor de la bobina encuentre de nuevo su propio nivel. Estas formas de realización son aplicables en particular a bobinas anulares en las que la cámara criogénica rodea al menos parcialmente a la bobina. Preferentemente, en estas formas de realización la cámara criogénica tiene forma circunferencial curvada. El nivel de rotación posible puede restringirse en último término solo por la capacidad del criógeno recondensado de retornar bajo la acción de la gravedad a la cámara en aquellas formas de realización preferidas en las que el criógeno recondensado retorna de esta manera a la cámara.
45
50
55

Se observará que el sistema de la presente invención incluye un circuito de criógeno, siendo las partes del sistema a través de las cuales el criógeno puede fluir durante sus ciclos de vaporización y, preferentemente, recondensación. Este circuito comprende la cámara criogénica, la unidad de recondensación y el posible tubo o tubos de conexión.
60

En algunas formas de realización de la invención, el circuito criogénico está sellado, de manera que estará presente una cantidad fija de criógeno en todo el funcionamiento del sistema, por ejemplo, a través de refrigeración, calentamiento o enfriamiento rápido. En algunas formas de realización, el circuito sellado puede incorporar un recipiente de expansión para dar cabida al volumen aumentado de la sustancia criogénica de trabajo a mayores temperaturas, por ejemplo, temperatura ambiente. En otras formas de realización alternativas, el circuito sellado
65

puede ser de volumen constante, y estar diseñado para resistir la presión adicional de la sustancia criogénica a mayores temperaturas, por ejemplo, a temperatura ambiente.

5 Según se expuso anteriormente, la presente invención evita la necesidad de colocar un baño criogénico alrededor de la bobina. La presente invención permite que la bobina superconductora se monte en un recipiente de vacío a temperatura ambiente, preferentemente separado del ambiente por solo uno o dos escudos contra radiación, y cierto aislamiento. Se observará que no es necesario que el recipiente de vacío sea capaz de resistir la gran sobrepresión que podría producirse si la bobina se enfriara rápidamente. Esto se debe a que la cantidad de criógeno presente en el sistema que podría empezar a hervir en esta situación es relativamente baja, e insuficiente para requerir el uso de un recipiente a presión, a diferencia de las configuraciones convencionales que usan un criógeno, por ejemplo, un baño de helio líquido. Si se reduce todo criógeno en forma de vapor durante un enfriamiento rápido, puede liberarse de forma segura al ambiente, o bien se recoge y se recondensa para su nuevo uso. En formas de realización preferidas, la o cada bobina está montada en un recipiente de vacío, preferentemente un recipiente de vacío a temperatura ambiente. Preferentemente el recipiente de vacío proporciona la capa más externa del sistema. 10 Preferentemente se sitúan uno o más escudos contra radiación de forma externa a la o a cada bobina, preferentemente entre un recipiente de vacío y la bobina. Preferentemente se sitúan una o más capas de aislamiento entre el escudo contra radiación (más externo) y la pared del recipiente de vacío.

20 Como se proporciona un medio de alta conducción térmica para facilitar la transferencia de calor entre el criógeno situado en la cámara criogénica en uso y la bobina superconductora, y debido al uso de una pequeña cámara criogénica que incluye una cantidad de criógeno relativamente baja que se recondensa en uso, la presente invención proporciona una configuración más compacta que lo que pueden proporcionar las configuraciones de la técnica anterior que incluyen un baño criogénico convencional, y al eliminar la necesidad de sumergir la bobina en un baño de criógeno, se proporciona mayor libertad en el diseño del sistema. Por ejemplo, la cámara criogénica puede estar situada a una corta distancia de la bobina para facilitar la fabricación, o mejorar el soporte de la bobina y el tratamiento de las tensiones para una configuración de bobina dada, y pueden seleccionarse materiales para la bobina, y otras partes circundantes, que no necesariamente deban ser adecuados para la inmersión en helio líquido.

30 El sistema comprende además un medio de soporte para sustentar la bobina. Debido a la presencia del medio térmicamente conductor, es posible colocar una capa poco conductora térmicamente, o no conductora térmicamente, entre la cámara criogénica y la bobina superconductora sin comprometer la capacidad del criógeno de enfriar la bobina en uso, ya que el calor puede seguir transmitiéndose al criógeno por medio del medio térmicamente conductor. Según la invención, se coloca un soporte entre la bobina y la cámara criogénica. Según la invención, se proporciona un medio de soporte en el exterior de la bobina, y rodea al menos parcialmente de forma 35 circunferencial a la bobina o bobinas. En estas formas de realización de la invención, se ha encontrado que la bobina superconductora puede funcionar en condiciones más extremas a las que lo haría una bobina convencionalmente en un conformador interno y refrigerada por un criógeno situado directamente adyacente y en el exterior de la bobina, por ejemplo, un baño de helio.

40 En algunas aplicaciones puede ser posible eliminar la necesidad de todo soporte interno de la bobina. El uso de un soporte externo puede ampliar al máximo el espacio disponible dentro de la bobina, y reducir la atenuación de los efectos de la bobina en la región en el interior del mismo, lo que permite reducciones en el tamaño de la bobina. Por ejemplo, puede obtenerse un campo magnético similar usando una bobina de diámetro menor que en configuraciones que se basan en el uso de un soporte interno que permite que el aparato se haga más compacto.

45 El medio de soporte puede ser o comprender cualquier material o materiales adecuados para proporcionar un nivel de soporte requerido para la bobina, teniendo en cuenta, por ejemplo, el tamaño y la configuración de la bobina, y la posible presencia de cualquier soporte adicional. Preferentemente el medio de soporte comprende o está formado por un material diferente al medio de alta conducción térmica. Preferentemente el medio de soporte tiene una conductividad térmica baja a temperaturas criogénicas, preferentemente en el intervalo de menos de 10 W/m/K. Preferentemente el soporte tiene una conductividad térmica menor que el medio de alta conducción térmica a 50 temperaturas criogénicas. En algunas formas de realización el soporte es un soporte de acero inoxidable. En formas de realización en que la cámara criogénica rodea al medio de soporte, la cámara criogénica se extiende solo sobre una parte seleccionada de una superficie exterior del medio de soporte, es decir, existen áreas del medio de soporte que no son adyacentes a la cámara criogénica en uso. Preferentemente la cámara criogénica cubre un área superficial que es menor que del área de la superficie más externa del medio de soporte. La cámara criogénica puede extenderse sobre una parte correspondiente del medio de soporte a esa parte de la bobina sobre la cual se extiende.

60 En algunas formas de realización, el medio de soporte define al menos una parte de la cámara criogénica. Por ejemplo, puede proporcionarse al menos una pared interior de la cámara criogénica mediante el medio de soporte. En las formas de realización, el medio de soporte comprende una cavidad que define al menos una parte de la cámara criogénica. En algunas formas de realización, la cavidad es una cavidad abierta, y con la máxima preferencia está en la forma de un canal definido en una superficie exterior del soporte. En estas formas de realización, el medio de soporte puede definir al menos un canal receptor de criógeno en la superficie exterior del mismo. El canal puede ser un canal que se extiende de forma circunferencial. El canal puede extenderse entonces alrededor de toda la 65

circunferencia del soporte o de solo una parte del mismo.

Según la invención se disponen uno o más conductores térmicos para facilitar la transferencia de calor entre al menos una bobina superconductora y la cámara criogénica para vaporizar criógeno contenido en la misma en uso y evacuar, con ello, calor desde la al menos una bobina, siendo los uno o más conductores térmicos de alta conducción térmica a temperaturas criogénicas.

De acuerdo con la invención, cada uno de dichos uno o más conductores térmicos tiene preferentemente una conductividad térmica de al menos 200 W/m/K a temperaturas criogénicas. Los uno o más conductores térmicos están hechos preferentemente de cobre. Los uno o más conductores térmicos están dispuestos para proporcionar una vía directa de conducción térmica entre la superficie de la bobina superconductora y el interior de la cámara criogénica. Los uno o más conductores térmicos pueden estar dispuestos de manera que pueden conducir calor desde una parte de la cámara criogénica que no contiene criógeno en uso a una parte de la cámara criogénica que contiene criógeno en uso. La cámara criogénica puede rodear al menos parcialmente de forma circunferencial a la bobina. Los uno o más conductores térmicos pueden estar dispuestos para conducir calor desde una parte de la bobina que no está rodeada por la cámara criogénica a la cámara criogénica en uso.

El sistema puede disponerse de manera que el criógeno recondensado pueda retornar a la cámara criogénica bajo la acción de la gravedad. El sistema superconductor puede ser un sistema de imán superconductor, estando la bobina superconductora dispuesta para generar un campo magnético cuando se hace pasar una corriente eléctrica a su través.

El sistema comprende además un soporte para sustentar la bobina, en el que el soporte está situado entre la bobina superconductora y la cámara criogénica. El soporte rodea al menos parcialmente a la bobina. El soporte tiene una conductividad térmica a temperaturas criogénicas de menos de 10 W/m/K. En formas de realización, los uno o más conductores térmicos pueden tener una conductividad térmica más elevada que el soporte.

El sistema puede comprender criógeno en la cámara criogénica. La cámara puede contener criógeno líquido que llena la cámara criogénica a un nivel de menos del 60 % de la altura de la cámara.

A continuación se describirán algunas formas de realización preferidas de la presente invención a modo de ejemplo exclusivamente, y con referencia a los dibujos que se acompañan, de los cuales:

la figura 1 es una vista en corte transversal longitudinal tomada en la dirección vertical a lo largo del eje longitudinal de un sistema de imán superconductor que incorpora el sistema de refrigeración de la presente invención, y esta vista corresponde al corte a lo largo de la línea 1-1 de la figura 3;

la figura 2 es una vista en corte transversal perpendicular tomada en la dirección vertical a lo largo de la línea 2-2 de la figura 1 desde un extremo del sistema;

la figura 3 ilustra esquemáticamente una vista en perspectiva del sistema mostrado en las figuras 1 y 2 que indica la relación entre sí de las bobinas en cada extremo, y sus respectivas unidades de recondensación, con algunos detalles omitidos para mayor claridad;

la figura 4 ilustra una configuración en la que la bobina y el soporte están alojados dentro de un recipiente de vacío que incluye un baño de helio; y

la figura 5 es una vista que corresponde a la de la figura 4 pero eliminando el baño de helio.

Se describirá una forma de realización preferida de la presente invención con referencia a las figuras 1 a 3. El sistema es un sistema de imán superconductor. El sistema tiene generalmente forma anular, y define una longitud L a lo largo de un eje longitudinal, y una dimensión R en una dirección radial perpendicular al mismo. El sistema comprende bobinas superconductoras primera y segunda 3, 3' que tienen forma anular, y están montadas en extremos axiales opuestos en la superficie interior de un soporte común 12. Las bobinas están dispuestas para proporcionar un campo magnético cuando se hace pasar una corriente a través de sus arrollamientos en uso. El soporte 12 tiene la forma de un manguito cilíndrico.

Se observará que la construcción del sistema en la región de la segunda bobina superconductora 3' es idéntica a la de la región de la bobina en el otro extremo, la primera bobina superconductora 3, y así, la presente invención se describirá en detalle con respecto a la primera bobina 3 y su sistema de refrigeración asociado. Las partes correspondientes del sistema en relación con la segunda bobina superconductora 3' se denotan con los mismos números de referencia, pero anotados con un signo prima (" "). Para mayor sencillez, solo se rotulan las características principales del sistema con respecto a la segunda bobina superconductora 3'.

La bobina 3 es una bobina superconductora de baja temperatura de niobio-titanio o niobio-estaño, unos materiales que se comportan como superconductores solo por debajo de una temperatura crítica. En el caso de niobio-titanio y

niobio-estaño, las temperaturas de transición de superconducción son 10,1 K y 18,5 K, respectivamente. Con el fin de proporcionar buen rendimiento, y de ser capaz de transportar grandes densidades de corriente en presencia de campo magnéticos elevados, las bobinas superconductoras hechas de estos materiales deben enfriarse muy por debajo de las temperaturas de transición de superconducción. Las bobinas superconductoras pueden incluir una funda protectora que rodee los filamentos de la bobina según se conoce en la técnica. La bobina superconductora no está arrollada en ninguna alma central, y está sustentada solo por el soporte 12 situado radialmente hacia el exterior de la bobina. Se define una cavidad 4 en el centro de la bobina anular 3. Se observará que la invención es aplicable a cualquier otro tipo de bobina usado en aplicaciones superconductoras, de forma regular o irregular, como, por ejemplo, dipolo, cuadrupolo, sextupolo, bobinas en forma de D u otras bobinas, usadas en aplicaciones como reactores estelares, aceleradores de partículas, tokamaks etc.

El soporte 12 incluye una superficie interna radialmente 13, y una superficie externa radialmente 15. La primera bobina superconductora 3 está montada en una cavidad que se extiende de forma circunferencial alrededor de la superficie interior 13 del medio de soporte 12. La primera bobina superconductora 3 incluye una superficie interna radialmente 5 y una superficie exterior radialmente 7 que entra en contacto con una superficie interna 13 del soporte. La bobina superconductora define también superficies primera y segunda 9 y 11 que conectan las superficies internas y externas 5 y 7. El soporte 12 está formado por un material de alta resistencia que es de baja conductividad térmica a temperaturas criogénicas, como el acero inoxidable. El acero inoxidable tiene una conductividad térmica de aproximadamente 0,2 W/m/K a temperaturas criogénicas. El soporte 12 tiene también forma anular.

La figura 2 muestra más claramente el modo en que el soporte 12 rodea de forma circunferencial a todo el perímetro de la bobina 3.

Una cámara criogénica 17 se define en parte por el soporte 12. La cámara criogénica 17 está dispuesta radialmente hacia el exterior del soporte 12. Se proporciona un canal en rebaje 30 en la superficie externa 15 del soporte 12. El canal en rebaje 30 está separado radialmente de la superficie exterior de la bobina superconductora por el soporte 12. El canal 30 define una pared interna 19 y paredes laterales separadas axialmente 21.

Una placa de cubierta 23 que se extiende de forma circunferencial alrededor del soporte 12 está soldada a la superficie exterior del soporte 12 a ambos lados del canal 30 para cerrar el canal y definir la cámara receptora de criógeno 17.

La figura 2 muestra más claramente que el canal 30 se extiende de forma circunferencial alrededor del soporte 12 en la región correspondiente a la posición de la bobina superconductora 3. En uso, según se muestra mediante la parte sombreada de la cámara 17 en las figuras 1 y 2, la cámara se llena de una cantidad de criógeno, por ejemplo, helio líquido. La cámara se extiende totalmente alrededor de la circunferencia de la bobina y el soporte a excepción de una región en la base de un orificio de salida a un tubo 31 que conduce a una unidad de recondensación 33. De esta forma, se proporciona una cámara cerrada 17 que se extiende de forma circunferencial alrededor del soporte 12 y la bobina superconductora 3, que no está en contacto térmico directo con la bobina superconductora sino que, al contrario, está separada de la misma por una parte del soporte de baja conductividad térmica 12.

Como el soporte 12 es de baja conductividad térmica, o puede no mostrar ninguna propiedad de conductividad térmica en absoluto, con el fin de proporcionar una vía de conducción térmica entre la bobina superconductora y la forma interior de la cámara criogénica 17, se proporciona un medio de alta conducción térmica 25. El medio de alta conducción térmica 25 está en la forma de un conector de cobre soldado en un extremo a una superficie interior 5 de la bobina superconductora 3 (véase la figura 1). El medio de cobre térmicamente conductor tiene una conductividad térmica a temperaturas criogénicas en el orden de al menos 20 W/m/K a temperaturas criogénicas. Esto es significativamente mayor que la conductividad térmica de materiales usados convencionalmente en la construcción de partes estructurales de sistemas superconductores, como, por ejemplo, acero inoxidable, aleación de aluminio o poliéster con refuerzo de vidrio, que tienen respectivamente conductividades térmicas a temperaturas criogénicas de aproximadamente 0,2 W/m/K, 2 W/m/K y 0,01 W/m/K.

El medio térmicamente conductor 25 se extiende alrededor del borde de la bobina superconductora 3 y el soporte 12, con su otro extremo terminado en una toma 27. La toma 27 penetra en la placa de cubierta 23 y tiene una placa de contacto 29 soldada a su superficie de revestimiento más interior. La placa de contacto 29 está unida a la superficie interior de la placa de cubierta 23 dentro de la cámara criogénica 17. De esta manera, la placa de contacto 29 define una parte de la superficie interior de la cámara 17. El componente de alta conducción térmica 25, la toma 27 y la placa de contacto 29 están hechos todos de materiales de alta conducción térmica, como, por ejemplo, cobre. La toma 27 puede estar soldada por haz electrónico a la placa de cubierta 29. El componente térmicamente conductor es de conductividad térmica más elevada que el soporte 12.

Como puede verse más claramente en la figura 2, el medio térmicamente conductor 25 se extiende de forma circunferencial alrededor de la circunferencia exterior completa de la cámara criogénica 17, estando dispuesto radialmente hacia el exterior de la misma, con tomas 27 que penetran en la placa de cubierta que define la pared exterior de la cámara en puntos separados de forma circunferencial. La placa de contacto interna 29 que se

proporciona dentro de la cámara criogénica se extiende alrededor de la circunferencia interna completa del interior de la cámara criogénica. De esta manera, el calor puede transmitirse desde cualquier parte de la bobina a cualquier parte del interior de la cámara criogénica, y el medio térmicamente conductor puede distribuir calor desde una parte de la cámara criogénica adyacente a una parte de la bobina a una parte adyacente a otra parte de la bobina. En la práctica, aunque el criógeno está situado solo en la parte inferior de la cámara criogénica según se muestra en la figura 2, el calor puede transmitirse desde partes de la bobina en las regiones superiores que no son adyacentes a una parte de la cámara criogénica que se llena con criógeno a la parte inferior de la cámara con el fin de que sea absorbida por el criógeno para vaporizar el criógeno por el medio térmicamente conductor. La cámara puede llenarse, por ejemplo, con criógeno líquido hasta un nivel que es de aproximadamente el 50 % de la altura de la cámara.

En una región superior del sistema, un tubo 31 se abre en la cámara criogénica en la base de la misma, y conduce a una unidad de recondensación 33. El tubo tiene un orificio de salida en su extremo inferior que se abre en la cámara criogénica para permitir que el criógeno sea transferido al tubo cuando se vaporiza en la cámara criogénica para alcanzar la unidad de recondensación 33. Esto se consigue interrumpiendo la placa de cubierta a lo largo de una parte de la circunferencia del soporte y la bobina en la región de la base del orificio de salida al tubo. La unidad de recondensación está en la forma de un criorrefrigerador que incluye un fluido de trabajo y un módulo de refrigeración 35 según el cual el criógeno vaporizado puede recondensarse antes de gotear de nuevo hacia el soporte y retroceder a la cámara criogénica bajo la acción de la gravedad.

A continuación se describirá el funcionamiento del sistema para refrigerar la bobina 3. Un criógeno líquido, por ejemplo, helio líquido, se coloca en la cámara criogénica según se ilustra esquemáticamente en las figuras 1 y 2, que muestran el criógeno como un área sombreada. El criógeno líquido se llena inicialmente a aproximadamente el 50 % de la altura de la cámara criogénica. En uso, la bobina superconductora 3 entra en funcionamiento, lo que provoca la generación de calor. El calor es transferido por conducción térmica desde alrededor de toda la circunferencia de la bobina por medio del medio de alta conducción térmica 25 al interior de la cámara criogénica 17 por medio de la parte del medio térmicamente conductor 25 que se extiende de forma circunferencial alrededor de la circunferencia exterior completa del soporte y la bobina, y las tomas 27 que penetran en la cámara en puntos separados de forma circunferencial. El calor suministrado a una parte de la cámara criogénica puede ser distribuido a otras partes de la cámara mediante la placa de contacto 29 soldada al interior de la placa de cubierta que define la pared exterior de la cámara criogénica 17. De esta forma, incluso el calor generado en regiones superiores de la bobina, que no son radialmente adyacentes a una parte de la cámara criogénica 17 que contiene criógeno líquido, pueden ser distribuidas a otras partes de la cámara criogénica que contienen criógeno líquido por un medio térmicamente conductor en las regiones tanto externa como internamente a la cámara criogénica. Como consecuencia del medio de alta conducción térmica 25, el calor puede seguir transmitiéndose al criógeno en una cámara criogénica a pesar de la presencia del soporte estructural de baja conductividad térmica 12 que está interpuesto entre la bobina y la cámara criogénica.

Se observará que el criógeno líquido puede mantenerse en cualquier nivel deseado, y, que la cámara puede, por ejemplo, llenarse por completo. Sin embargo, se ha encontrado que si el nivel se mantiene a menos de aproximadamente el 50 % de la altura del aparato, la bobina puede hacerse girar hasta 90° en cualquier dirección alrededor de su eje sin interferir con el funcionamiento del aparato de refrigeración, ya que el criógeno líquido simplemente se moverá dentro de la cámara criogénica para encontrar el mismo nivel, dejando una parte de la cámara criogénica libre del helio líquido en las regiones superiores de la misma a través de la cual el helio vaporizado puede transmitirse a la base del tubo 31.

El calor que llega al criógeno líquido en la cámara hace que el criógeno se vaporice. El criógeno vaporizado se mueve hacia arriba en la dirección de las flechas en las figuras 2 y 3 por difusión hacia la base del orificio de salida del tubo 31 que lo conduce a la unidad de recondensación 33. El criógeno fluye en contacto con el módulo de recondensación 35 y se enfría, con lo cual se recondensa. El criógeno recondensado gotea en la superficie exterior del soporte en la base del tubo y se mueve bajo la acción de la gravedad de nuevo a la cámara criogénica.

De esta manera, el calor es evacuado de la bobina superconductora por la vaporización y recondensación del criógeno. Se observará que calor es transferido hacia fuera desde la bobina por dos mecanismos. El calor se desplaza desde la bobina al criógeno en la cámara criogénica cubriendo la relativamente corta distancia intermedia mediante un proceso de conducción con ayuda del medio térmicamente conductor. El mecanismo usado para transferir calor desde la cámara criogénica a la unidad de recondensación es de difusión con el criógeno en sí actuando como el medio de transferencia térmica. La unidad de recondensación puede colocarse a cualquier distancia deseada desde la bobina usando canalizaciones apropiadas. De esta manera, la unidad de recondensación puede colocarse de manera que esté fuera de la región que puede estar sujeta a interferencia debida a cualquier campo magnético producido por la bobina superconductora en uso. El uso del criógeno como un medio de transferencia de calor para transferir calor desde la cámara criogénica a la unidad de recondensación en esta parte relativamente más larga de la ruta de transporte de calor entre la bobina y la unidad de recondensación puede evitar el problema de que surjan gradientes de temperatura importantes, tal como puede experimentarse si se usan conductores sólidos. Además, el uso de helio vaporizado como el medio de transferencia de calor puede dar como resultado un sistema significativamente menos voluminoso, y hacer que el transporte de calor a mayores

distancias fuera realista en la práctica usando un conductor térmico posible. A modo de ejemplo, para conducir 2 W de calor a una distancia de 1 m, en la que existe una diferencia de temperatura de 0,5 K en la longitud de la trayectoria, según un cálculo ilustrativo aproximado, se requiere un enlace térmico de cobre con una conductividad de 600 W/m/K, que tuviera un diámetro de aproximadamente 100 mm y una masa en el orden de 60 kg. La masa del conductor requerida es proporcional al cuadrado de la distancia implicada. Se observará que la cámara criogénica es local a la bobina superconductora en formas de realización de la invención, y que solo se requiere que la conducción térmica tenga lugar a corto alcance. Se ha encontrado que el uso de criógeno líquido como un medio de transferencia de calor puede proporcionar también mejor aislamiento frente a vibraciones entre la unidad de recondensación y la bobina superconductora.

Como no es necesario sumergir la bobina superconductora en un baño de criógeno como en las configuraciones convencionales, el soporte puede colocarse en el exterior de la bobina según se muestra en la forma de realización ilustrada. Por ejemplo, la bobina puede reforzarse con un collar rígido en su superficie exterior, si se desea. Esto puede permitir que la bobina funcione en condiciones más extremas que un arrollamiento de bobina convencionalmente en un alma u otro soporte interno, y refrigerada por un baño de helio situado alrededor de su superficie exterior.

Como las bobinas no están sustentadas por un conformador interno o rodeadas por un baño de helio, pueden hacerse más compactas, lo que aumenta su eficacia, y reduce la cantidad de superconductor requerido para generar un campo magnético deseado.

Además, a diferencia de las configuraciones tipo de inmersión convencional, se requiere colocar una cantidad relativamente pequeña de criógeno en la cámara criogénica, y la cámara criogénica en sí puede reducirse de tamaño para proporcionar una configuración más eficiente en términos de espacio. Esto se debe a que el calor puede ser transportado desde todas las regiones de la bobina usando elementos térmicamente conductores a la cámara criogénica rápidamente, y sin pérdidas significativas, y el calor puede distribuirse dentro de la cámara criogénica para asegurar que la cantidad suministrada a ese criógeno que se proporciona se aumenta al máximo.

El circuito del criógeno, es decir, la cámara criogénica, el tubo y el unidad de recondensación, puede estar sellado, de manera que a lo largo de todo el ciclo de funcionamiento, que incluye refrigeración, calentamiento y cualquier enfriamiento rápido que pueda suceder, el circuito contiene una cantidad fija de sustancia criogénica. El circuito sellado puede incorporar un recipiente de expansión para dar cabida a un volumen aumentado de criógeno a temperatura ambiente. En otras formas de realización, el circuito sellado puede ser de volumen constante, y puede estar diseñado de forma que resista la presión adicional de criógeno cuando se calienta a temperatura ambiente.

Como la cantidad de criógeno situado en el sistema es relativamente pequeña, en el caso de que se produzca cualquier enfriamiento rápido, es decir, que la bobina cambie de un estado superconductor a resistivo, convirtiendo su energía magnética en calor, y provocando la vaporización de la mayoría o la totalidad del criógeno, la cantidad de vapor liberado puede reducirse, en la medida en que pueda liberarse de forma segura al ambiente, o recogerse para su nuevo uso. Dado que es probable que los criógenos, como el helio líquido, se conviertan en recursos relativamente escasos, la capacidad de hacer funcionar un sistema usando una cantidad menor de helio y que permita que el helio se recicle es ventajosa.

Las figuras 4 y 5 ilustran las ventajas que puede proporcionar la presente invención permitiendo que pueda eliminarse la presencia de un baño de helio. La figura 4 ilustra las capas que estarían implicadas si el imán estuviera rodeado por un baño de helio convencional. La bobina magnética 50 dispuesta en un soporte 52 está rodeada por un recipiente de helio que atrapa una capa de helio 54 entre la superficie exterior de la bobina y el soporte y la superficie interior del recipiente. En esta configuración, se dispone de uno o más escudos contra radiación 56 en el exterior del recipiente de helio. Se dispone una capa de aislamiento, como un aislamiento multicapa 58, entre el escudo o escudos contra radiación 56 y el componente más exterior, que es un recipiente de vacío 60.

La figura 5 ilustra el modo en que, de acuerdo con la invención, puede eliminarse la capa de helio 54, para proporcionar un aparato más compacto, en el que la bobina pueda disponerse en su elemento de formación y montarse en un recipiente de vacío a temperatura ambiente separado por uno o dos finos escudos contra radiación y algún aislamiento multicapa. Los escudos contra radiación están dispuestos para interceptar cualquier calor irradiado desde el ambiente que rodea al aparato, que puede estar, por ejemplo, a temperatura ambiente, reduciendo la carga de calor en el imán. Las partes correspondientes del sistema se denotan con un signo prima (" ").

REIVINDICACIONES

1. Un sistema superconductor que comprende:
- 5 al menos una bobina superconductora anular (3), y
- una cámara criogénica (17) que está situada en proximidad de la bobina superconductora para contener un criógeno en uso;
- 10 en el que el sistema comprende además un medio térmicamente conductor (25) dispuesto para facilitar la transferencia de calor desde la al menos una bobina superconductora (3) a la cámara criogénica (17) para vaporizar el criógeno contenido en la misma en uso y para evacuar por ello el calor de la al menos una bobina, siendo el medio térmicamente conductor (25) de alta conducción térmica a temperaturas criogénicas;
- 15 en el que el medio de alta conducción térmica está dispuesto para proporcionar una vía directa de conducción térmica entre una superficie de la bobina superconductora y el interior de la cámara criogénica;
- en el que el sistema comprende además una unidad de recondensación de criógeno (33), estando la cámara criogénica (17) en comunicación fluida con la unidad de recondensación de criógeno (33), con lo que el criógeno vaporizado puede fluir desde la cámara criogénica (17) a la unidad de recondensación de criógeno con el fin de que sea recondensado en uso antes de retornar a la cámara criogénica; y
- 20 caracterizado porque el sistema es un sistema giratorio, en el que la bobina puede hacerse girar alrededor de su eje en uso, en el que la refrigeración de la bobina puede producirse todavía aun cuando la bobina se hace girar alrededor de su eje en uso; y
- 25 en el que el sistema comprende además un medio de soporte (12) para sustentar la bobina, en el que el medio de soporte (12) está situado entre la bobina superconductora (3) y la cámara criogénica, en el que el medio de soporte (12) rodea a la bobina al menos parcialmente.
- 30
2. El sistema superconductor según la reivindicación 1, en el que el medio de alta conducción térmica (25) tiene una conductividad térmica de al menos 200 W/m/K a temperaturas criogénicas.
3. El sistema superconductor según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el medio de alta
- 35 conducción térmica (25) es cobre.
4. El sistema superconductor según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el medio de alta conducción térmica (25) está dispuesto de manera que puede conducir calor desde una parte de la cámara criogénica (17) que no contiene criógeno en uso a una parte de la cámara criogénica que contiene criógeno en uso.
- 40
5. El sistema superconductor según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la cámara criogénica (17) rodea al menos parcialmente de forma circunferencial a la bobina, preferentemente en el que el medio de alta conducción térmica (25) está dispuesto para conducir calor desde una parte de la bobina que no está rodeada por la cámara criogénica a la cámara criogénica en uso.
- 45
6. El sistema según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el sistema está dispuesto de manera que el criógeno recondensado puede retornar a la cámara criogénica (17) bajo la acción de la gravedad.
7. El sistema superconductor según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el sistema
- 50 superconductor es un sistema de imán superconductor, estando la bobina superconductora dispuesta para generar un campo magnético cuando se hace pasar una corriente eléctrica a su través.
8. El sistema superconductor según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el medio de soporte
- (12) tiene una conductividad térmica a temperaturas criogénicas de menos de 10 W/m/K.
- 55
9. El sistema superconductor según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el medio de alta conducción térmica (25) tiene una conductividad térmica más elevada que el medio de soporte (12).
10. El sistema según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende además un criógeno en la
- 60 cámara criogénica (17), preferentemente en el que la cámara contiene criógeno líquido que llena la cámara criogénica hasta un nivel de menos del 50 % de la altura de la cámara.
11. El sistema según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el sistema está dispuesto de manera que el medio de soporte, la cámara criogénica, el medio térmicamente conductor y la unidad de recondensación de
- 65 criógeno giran con la bobina cuando la bobina gira alrededor de su eje.

12. El sistema según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la bobina puede hacerse girar hasta 90° en cualquier dirección alrededor de su eje sin interferir con la refrigeración de la bobina.

5 13. Un método de refrigeración de una bobina superconductora que usa un sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12, comprendiendo el método el suministro de un criógeno en la cámara criogénica (17), y el accionamiento de la bobina superconductora (3), con lo que se conduce calor desde la bobina superconductora por el medio de alta conducción térmica (25) a la cámara criogénica para vaporizar el criógeno de la misma y evacuar con ello calor de la bobina, con el criógeno vaporizado fluyendo a la unidad de recondensación con el fin de que sea recondensado antes de retornar a la cámara criogénica.

10 14. El método según la reivindicación 13, que comprende además el suministro del criógeno en la cámara criogénica de manera que el criógeno llena la cámara criogénica hasta un nivel de menos del 50 % de la altura de la cámara, y el giro de la bobina alrededor de su eje, en el que la refrigeración de la bobina sigue produciéndose aun cuando la bobina se haga girar alrededor de su eje.

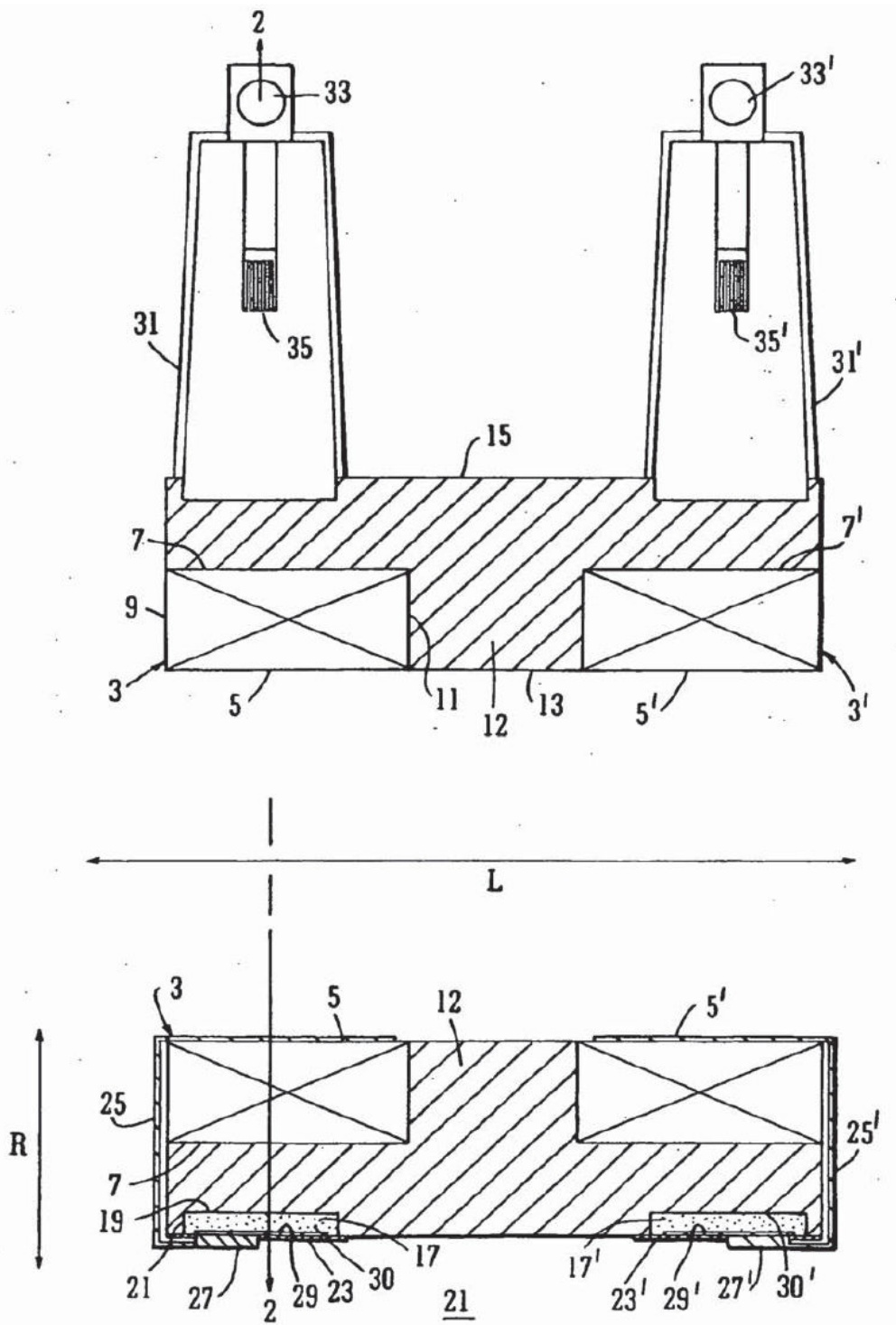


FIG. 1

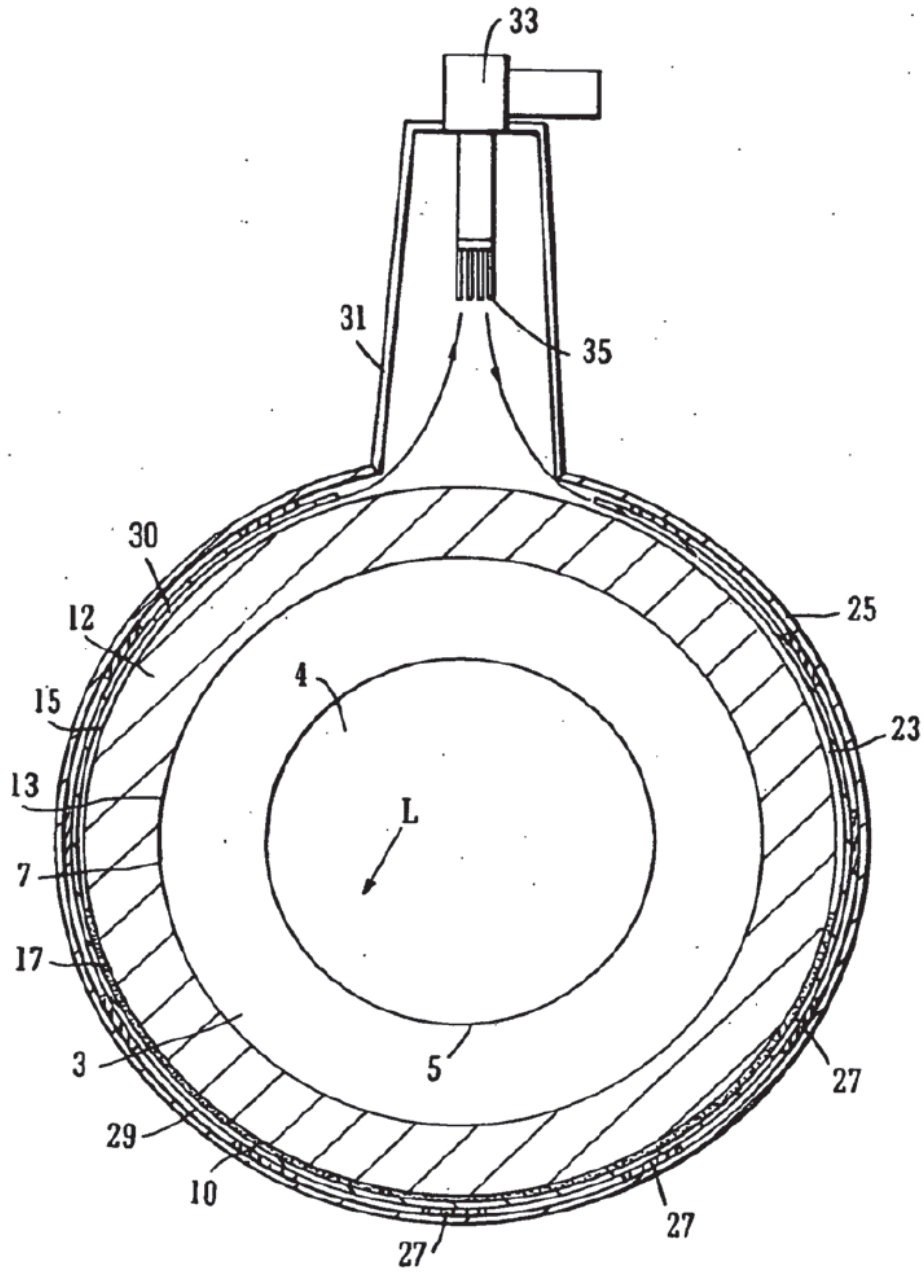
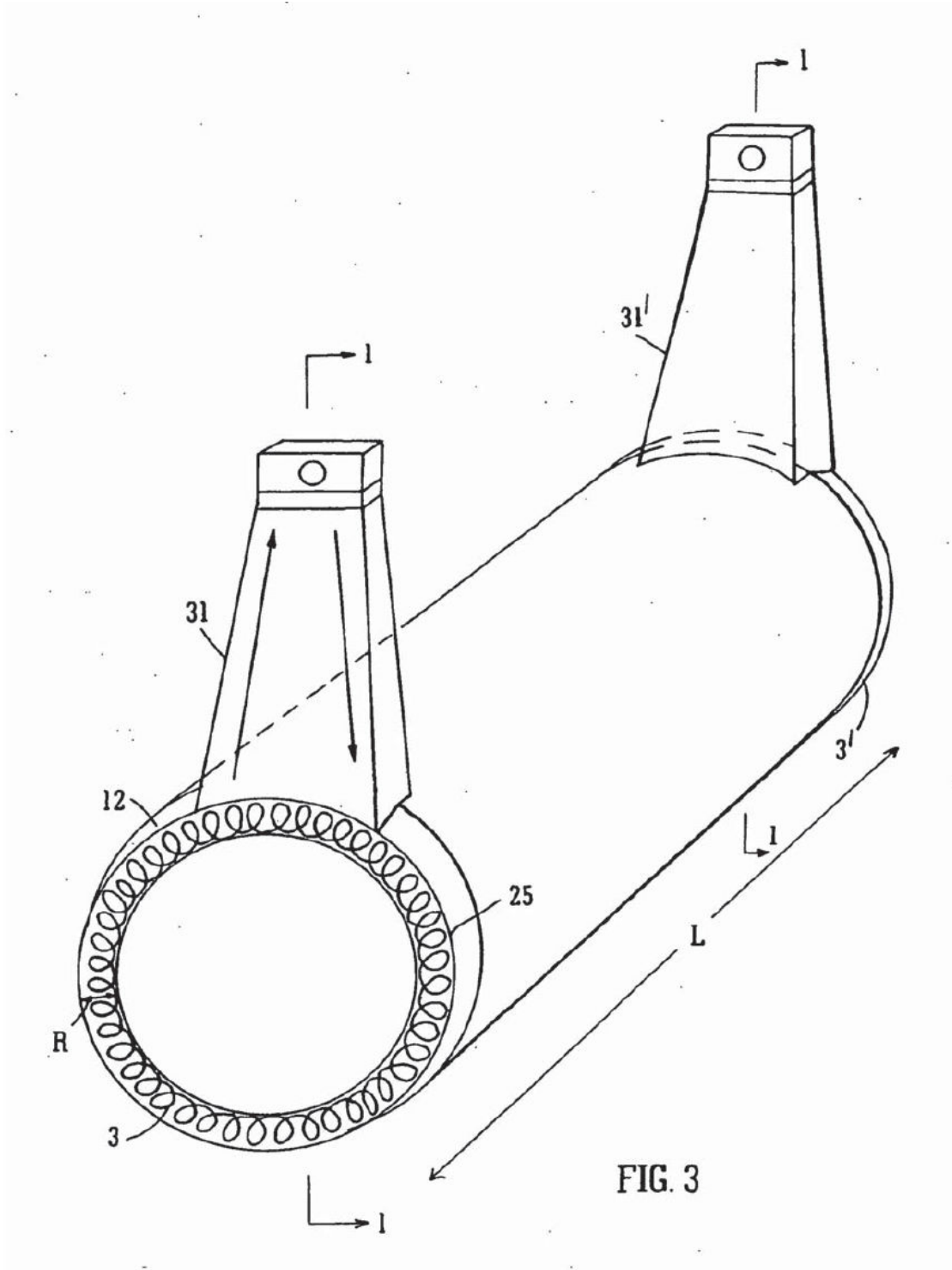


FIG. 2



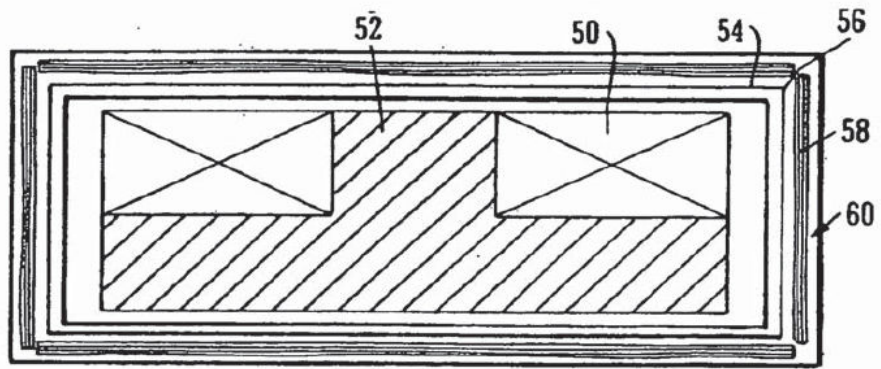
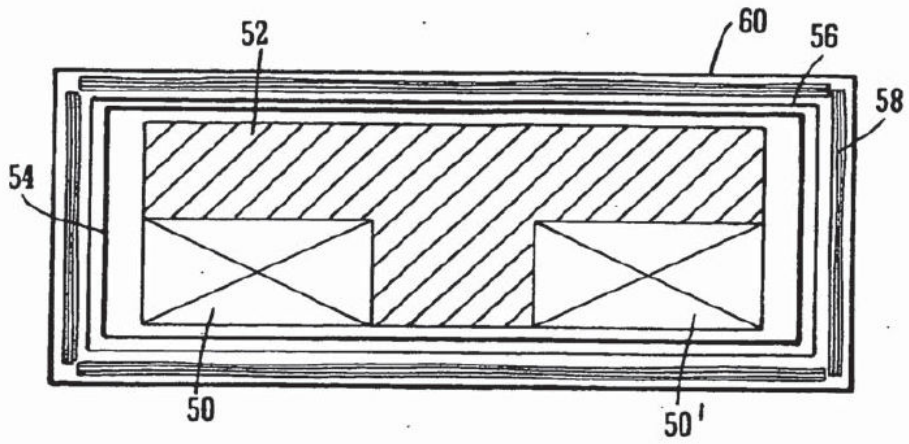


FIG. 4

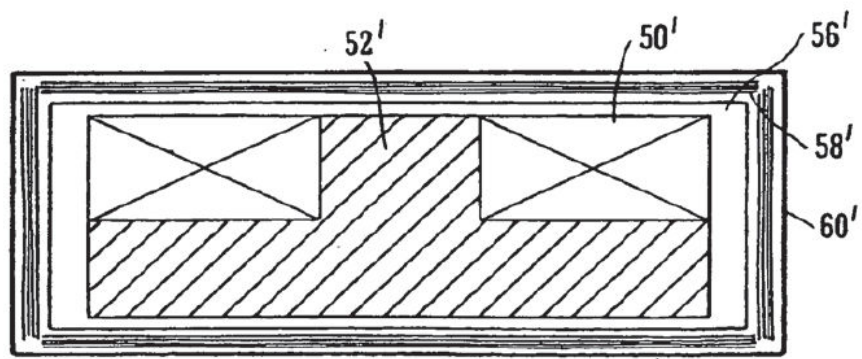
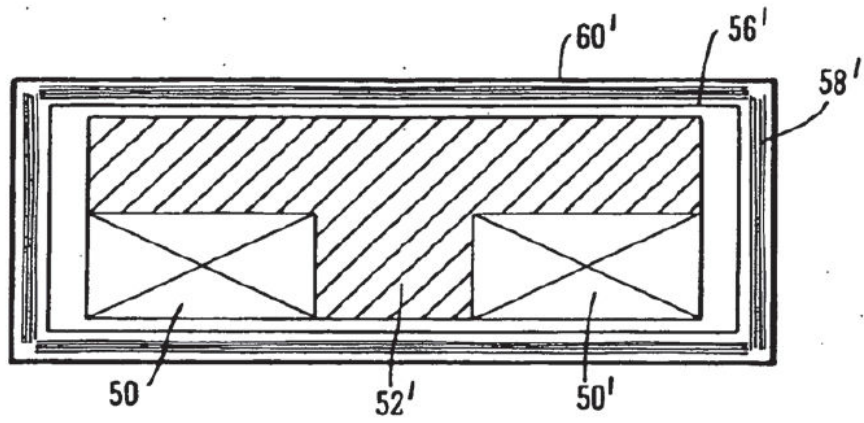


FIG. 5