

(19)



(11)

EP 2 225 501 B1

(12)

FASCICULE DE BREVET EUROPEEN

(45) Date de publication et mention de la délivrance du brevet:
05.09.2018 Bulletin 2018/36

(51) Int Cl.:
F25J 1/02 (2006.01) **F25B 1/10** (2006.01)
F25B 9/14 (2006.01) **F25B 9/10** (2006.01)
F25B 9/06 (2006.01) **F25J 1/00** (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **08852903.7**

(86) Numéro de dépôt international:
PCT/FR2008/051919

(22) Date de dépôt: **23.10.2008**

(87) Numéro de publication internationale:
WO 2009/066044 (28.05.2009 Gazette 2009/22)

(54) **DISPOSITIF ET PROCÉDÉ DE RÉFRIGÉRATION CRYOGÉNIQUE**

KRYOGENES KÜHLVERFAHREN UND ENTSPRECHENDE VORRICHTUNG
CRYOGENIC REFRIGERATION METHOD AND DEVICE

(84) Etats contractants désignés:
AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MT NL NO PL PT RO SE SI SK TR

• **RAVEX, Alain**
F-38240 Meylan (FR)

(30) Priorité: **23.11.2007 FR 0759243**

(74) Mandataire: **De Cuenca, Emmanuel Jaime**
L'Air Liquide S.A.
Direction Propriété Intellectuelle
75 Quai d'Orsay
75321 Paris Cedex 07 (FR)

(43) Date de publication de la demande:
08.09.2010 Bulletin 2010/36

(60) Demande divisionnaire:
18178529.6

(56) Documents cités:
EP-A- 1 801 518 **EP-A2- 1 120 615**
WO-A-92/15774 **WO-A1-2007/066474**
DE-A1- 2 440 215 **FR-A- 2 696 708**
JP-A- 60 079 125 **JP-A- 2001 041 598**
US-A- 3 494 145 **US-A- 4 984 432**
US-A- 5 473 899 **US-A- 5 590 528**

(73) Titulaire: **L'Air Liquide Société Anonyme pour l'Étude et l'Exploitation des Procédés Georges Claude**
75007 Paris (FR)

(72) Inventeurs:
• **DURAND, Fabien**
F-38340 Voreppe (FR)

EP 2 225 501 B1

Il est rappelé que: Dans un délai de neuf mois à compter de la publication de la mention de la délivrance du brevet européen au Bulletin européen des brevets, toute personne peut faire opposition à ce brevet auprès de l'Office européen des brevets, conformément au règlement d'exécution. L'opposition n'est réputée formée qu'après le paiement de la taxe d'opposition. (Art. 99(1) Convention sur le brevet européen).

Description

[0001] La présente invention concerne un dispositif et un procédé de réfrigération cryogénique.

[0002] L'invention concerne plus particulièrement un dispositif de réfrigération cryogénique destiné à transférer de la chaleur d'une source froide vers une source chaude via un fluide de travail circulant dans un circuit de travail fermé, le circuit de travail comprenant en série : une portion de compression, une portion de refroidissement, une portion de détente et une portion de réchauffement.

[0003] La source froide peut être par exemple de l'azote liquide à refroidir et la source chaude de l'eau ou de l'air.

[0004] Des réfrigérateurs connus pour refroidir des éléments supraconducteurs utilisent en général un cycle de Brayton inverse. Ces réfrigérateurs connus utilisent un compresseur lubrifié à vis, un échangeur à contre courant à plaques et une turbine de détente.

[0005] Ces réfrigérateurs connus présentent de nombreux inconvénients parmi :

- un faible rendement énergétique du cycle et par conséquent du réfrigérateur,
- l'utilisation d'huile pour refroidir et lubrifier le compresseur, ceci impose une opération de déshuilage du gaz de travail après compression,
- l'utilisation de joints tournants entre le moteur électrique et le compresseur,
- le faible rendement isotherme de compression du compresseur,
- la périodicité des opérations de maintenance.

[0006] Le document US-3,494,145 décrit un système de réfrigération utilisant des accouplements via engrenages nécessitant des paliers à huile. Ce type de dispositif utilise des joints tournants tels que les garnitures mécaniques entre le gaz de travail et le carter des engrenages et des paliers à huile. Cette architecture augmente les risques de fuite du gaz de travail et la pollution possible du gaz de travail par l'huile. Ce système concerne par ailleurs un moteur de type basse vitesse.

[0007] Le document US-4,984,432 décrit un système de réfrigération utilisant des compresseurs ou des turbines de type à anneau liquide fonctionnant avec un moteur à basse vitesse utilisant des paliers classiques tels que les roulements à billes. Cette technologie relève des compresseurs et turbines volumétriques.

[0008] Un but de la présente invention est de pallier tout ou partie des inconvénients de l'art antérieur relevés ci-dessus.

[0009] A cette fin, l'invention propose un dispositif de réfrigération cryogénique destiné à transférer de la chaleur d'une source froide vers une source chaude via un fluide de travail circulant dans un circuit de travail fermé, le circuit de travail comprenant en série : une portion de compression sensiblement isotherme du fluide, une por-

tion de refroidissement sensiblement isobare du fluide, une portion de détente sensiblement isotherme du fluide et une portion de réchauffement sensiblement isobare du fluide, la portion de compression du circuit de travail comprenant au moins deux compresseurs disposés en série et au moins un échangeur de refroidissement du fluide comprimé disposé à la sortie de chaque compresseur, la portion de détente du circuit de travail comprenant au moins une turbine de détente et au moins un échangeur de réchauffement du fluide détendu, les compresseurs et la ou les turbines de détente étant entraînés par au moins un moteur dit à haute vitesse comprenant un arbre de sortie dont l'une des extrémité porte et entraîne en rotation par accouplement direct un premier compresseur et dont l'autre extrémité porte et entraîne en rotation par accouplement direct une turbine de détente.

[0010] Les modes de réalisation permettent d'obtenir un système sans pollution d'huile et sans contact. En effet, la combinaison de compresseurs centrifuges, des turbines centripètes et des paliers selon l'invention réduit ou supprime tout contact avec les parties fixes et les parties tournantes. Ceci permet d'éviter tout risque de fuite. L'ensemble du système est en effet hermétique et ne comporte aucun joint tournant vis-à-vis de l'atmosphère (tel que des garnitures mécaniques ou des « dry face seal »).

[0011] Par ailleurs, l'invention comporte en outre les caractéristiques suivantes :

- les compresseurs sont du type à compression centrifuge,
- la ou les turbines de détente sont du type à détente centripète,
- les arbres de sortie des moteurs sont montés sur des paliers de type magnétique ou de type dynamique à gaz, lesdits paliers étant utilisés pour sustenter les compresseurs et les turbines,
- la portion de refroidissement et la portion de réchauffement comprennent un échangeur de chaleur commun dans lequel le fluide de travail transite à contre-courant selon qu'il est refroidit ou réchauffé,

En outre, des modes de réalisation particuliers peuvent également comporter les caractéristiques suivantes :

- le circuit de travail comprend un volume formant une capacité tampon de stockage du fluide de travail,
- le fluide de travail est en phase gazeuse et constitué d'un gaz pur ou d'un mélange de gaz purs parmi : l'hélium, le néon, l'azote, l'oxygène, l'argon, le monoxyde de carbone, le méthane, ou tout autre fluide présentant une phase gazeuse à la température de la source froide.

[0012] L'invention propose en outre un procédé de réfrigération cryogénique destiné à transférer de la chaleur d'une source froide vers une source chaude via un fluide

de travail circulant dans un circuit de travail fermé, le circuit de travail comprenant en série : une portion de compression comprenant au moins deux compresseurs disposés en série, une portion de refroidissement du fluide, une portion de détente comprenant au moins une turbine de détente, et une portion de réchauffement, le procédé comprenant un cycle de travail comportant une première étape de compression sensiblement isotherme du fluide dans la portion de compression par refroidissement du fluide comprimé en sortie des compresseurs, une seconde étape de refroidissement sensiblement isobare du fluide dans la portion de refroidissement, une troisième étape de détente sensiblement isotherme du fluide dans la portion de détente par réchauffement du fluide détendu en sortie de turbine, et une quatrième étape de réchauffement sensiblement isobare du fluide ayant échangé thermiquement avec la source froide, le cycle de travail du fluide (température T, entropie S) étant du type Ericsson inverser selon la revendication 6. Par ailleurs :

- lors de la première étape de compression sensiblement isotherme, le fluide comprimé est refroidit en sortie de chaque compresseur pour maintenir les températures du fluide en entrée et en sortie de chaque compresseur sensiblement égales et de préférence dans une fourchette d'environ 10 K,
- lors de la troisième étape de détente sensiblement isotherme le fluide détendu est refroidit en sortie de chaque turbine pour maintenir les températures du fluide en entrée et en sortie de chaque turbine sensiblement égales et de préférence dans une fourchette d'environ 5 K,
- les compresseurs et la ou les turbines de détente sont entraînée par au moins un moteur dit à haute vitesse comprenant un arbre de sortie dont l'une des extrémité porte et entraîne en rotation par accouplement direct un premier compresseur et dont l'autre extrémité porte et entraîne en rotation par accouplement direct une turbine de détente et en ce que le procédé comprend une étape de transfert d'une partie du travail mécanique de la ou des turbines vers le ou les compresseurs via le ou les arbres de sortie. En outre, des modes de réalisation de l'invention peuvent comporter l'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :
 - à l'issue de la seconde étape de refroidissement le fluide de travail est amené à une température basse de l'ordre de 60 K et en ce que le circuit de travail comprend un nombre de compresseurs trois fois plus important environ que le nombre de turbines de détente,
 - le fluide de travail est utilisé pour refroidir ou maintenir en froid des éléments supraconducteurs à une température de l'ordre de 65 K,
 - la chute de température du fluide constituant la source froide est sensiblement identique à l'aug-

mentation de température du gaz dans les échangeurs.

[0013] L'invention peut présenter l'un ou plusieurs des avantages suivants :

- le cycle du fluide de travail (type Ericsson inverse) permet d'obtenir un rendement plus important que les systèmes connus sans pour autant créer ou augmenter d'autres inconvénients,
- le travail de détente dans les turbines peut être avantageusement valorisé,
- il est possible de s'affranchir de l'utilisation d'huile pour la lubrification ou le refroidissement, ceci permet de supprimer l'installation de déshuilage en aval du compresseur, ainsi que les opérations de traitement et de recyclage des huiles usagées,
- le système ne nécessite qu'un faible nombre de pièces mobiles ce qui accroît sa simplicité et sa fiabilité. Il est possible grâce à l'invention de s'affranchir pour le compresseur d'une transmission de puissance mécanique du type multiplicateur de vitesse, joints de cardan, ...
- les opérations de maintenance sont réduites voir pratiquement inexistantes,
- le système permet d'éviter des joints tournant et d'utiliser un système totalement hermétique vis à vis de l'extérieur. Ceci empêche toute perte ou pollution du gaz de cycle de travail,
- l'encombrement du réfrigérateur peut être réduit par rapport aux systèmes connus.

[0014] D'autres particularités et avantages apparaîtront à la lecture de la description ci-après, faite en référence aux figures dans lesquelles :

- la figure 1 représente une vue schématique illustrant la structure et le fonctionnement d'un premier exemple de réalisation de dispositif de réfrigération selon l'invention,
- la figure 2 représente de façon schématique un détail de la figure 1 illustrant un agencement d'un moteur d'entraînement d'un ensemble compresseur-compresseur ou compresseur-turbine,
- la figure 3 représente de façon schématique un exemple de cycle de travail du fluide de travail du réfrigérateur de la figure 1,
- la figure 4 représente une vue schématique illustrant la structure et le fonctionnement d'un second exemple de réalisation d'un réfrigérateur selon l'invention,
- la figure 5 représente de façon schématique un second exemple de cycle de travail du fluide de travail du réfrigérateur selon la figure 3.

[0015] En se référant à l'exemple de réalisation de la figure 1, le réfrigérateur selon l'invention est prévu pour transférer de la chaleur d'une source froide 15 à une température cryogénique vers une source chaude à tem-

pérature ambiante 1 par exemple.

[0016] La source froide 15 peut être, par exemple, de l'azote liquide à refroidir et la source chaude 1 de l'eau ou de l'air. Pour réaliser ce transfert de chaleur, le réfrigérateur illustré à la figure 1 utilise un circuit de travail 200 d'un gaz de travail comprenant les composants listés ci-dessous.

[0017] Le circuit 200 comprend plusieurs compresseurs 3, 5, 7 centrifuges disposés en série et fonctionnant à température ambiante.

[0018] Le circuit 200 comprend plusieurs échangeurs de chaleur 2, 4, 6 fonctionnant à température ambiante disposés respectivement à la sortie des compresseurs 3, 5, 7. Les températures du gaz de travail en entrée et en sortie, de chaque étage de compression (c'est-à-dire à l'entrée et à la sortie de chaque compresseur 3, 5, 7), sont maintenues par les échanges thermiques à un niveau sensiblement identique (cf. zone A sur la figure 3 qui représente un cycle de travail du gaz : température en K en fonction de l'entropie S en J/kg). A la figure 3, les parties montantes de la zone A en dents de scie correspondant chacune à un étage de compression tandis que les parties descendantes de cette zone A correspondent chacune à un refroidissement par échangeur.

[0019] Cette disposition permet de se rapprocher d'une compression isotherme. Les températures d'entrée et de sortie, de chaque étage de compression, sont sensiblement les mêmes.

[0020] Les échangeurs 2, 4, 6 peuvent être distincts ou être constitués de portions distinctes d'un même échangeur en échange thermique avec la source chaude 1.

[0021] Le réfrigérateur comprend plusieurs moteurs (70 cf. figure 2) dits à haute vitesse. Par moteur à haute vitesse on désigne habituellement des moteurs dont la vitesse de rotation permet un accouplement direct avec un étage de compression centrifuge ou un étage de détente centripète. Les moteurs 70 à haute vitesse utilisent de préférence des paliers magnétiques ou dynamiques à gaz 171 (figure 2). Un moteur à haute vitesse tourne typiquement à une vitesse de rotation de 10 000 tours par minute ou plusieurs dizaines de milliers de tours par minute. Un moteur basse vitesse tourne plutôt avec une vitesse de quelques milliers de tours par minute.

[0022] En aval de la portion de compression comprenant les compresseurs en série, le réfrigérateur comprend un échangeur 8 de chaleur de préférence de type à plaques à contre courant séparant les éléments à température ambiante (en partie haute du circuit 200 représenté à la figure 1) des éléments à température cryogéniques (en partie inférieure du circuit 200). Le fluide est refroidit (correspondant à la zone D de la figure 3). Le refroidissement du gaz de la température ambiante à la température cryogénique s'effectue par échange à contre courant avec le même gaz de travail gaz à température cryogénique qui revient de la portion de détente après échange thermique avec la source froide 15.

[0023] En aval de cette portion de refroidissement

constituée par l'échangeur 8 à plaques, le circuit comporte une ou plusieurs turbines 9, 11, 13 de détente, de préférence de type centripètes, disposées en série. Les turbines 9, 11, 13 fonctionnent à température cryogéniques, les températures d'entrée et de sortie de chaque étage de détente (entrée et sortie de turbine) sont maintenues sensiblement identiques par un ou plusieurs échangeurs de chaleur 10, 12, 14 cryogéniques disposés à la sortie de la ou des turbines. Ceci correspond à la zone C de la figure 3, les portions descendantes de la zone C correspondant chacune à un étage de détente tandis que les portions montantes de cette zone correspondent au réchauffement dans les échangeurs 10, 12, 14. Cette disposition permet de se rapprocher d'une détente isotherme. Les températures d'entrée et de sortie de chaque étage de détente sont sensiblement les mêmes. De plus et afin d'augmenter le rendement du réfrigérateur, l'augmentation de la température du gaz de travail dans le ou les échangeur (10, 12, 14) peut être sensiblement identique (en valeur absolue) à la baisse de la température du fluide à refroidir (15) (source froide).

[0024] Ces échangeurs 10, 12, 14 de réchauffement peuvent être distincts ou être constitués de portions distinctes d'un même échangeur en échange thermique avec la source froide 15.

[0025] En aval de la portion de détente et de l'échange thermique avec la source froide 15, le fluide de travail échange thermiquement à nouveau avec l'échangeur 8 de chaleur à plaques (zone B de la figure 3). Le fluide échange thermiquement dans l'échangeur 8 à contre courant par rapport à son passage après la portion de compression. Après réchauffage le fluide revient dans la portion de compression et peut recommencer un cycle.

[0026] Le circuit peut comprendre en outre une capacité de gaz de travail à température ambiante (non représentée par souci de simplification) pour limiter la pression dans les circuits, lors de l'arrêt du réfrigérateur par exemple.

[0027] Le réfrigérateur utilise de préférence comme fluide de travail un fluide en phase gazeuse circulant en circuit fermé. Celui-ci est constitué par exemple d'un gaz pur ou d'un mélange de gaz pur. Les gaz les mieux adaptés à cette technologie sont notamment : l'hélium, le néon, l'azote, l'oxygène et l'argon. Le monoxyde de carbone et le méthane peuvent également être utilisés.

[0028] Le réfrigérateur est conçu et piloté ainsi de façon à obtenir un cycle de travail du fluide se rapprochant du cycle d'Ericsson inverse. C'est à dire: une compression isotherme, un refroidissement isobare, une détente isotherme et un réchauffement isobare.

[0029] Selon une particularité avantageuse le réfrigérateur utilise pour l'entraînement au moins des compresseurs 3, 5, 7 (c'est-à-dire pour l'entraînement des roues des compresseurs) plusieurs moteurs 70 dits à hautes vitesses.

[0030] Comme schématisé à la figure 2, chaque moteur 70 à haute vitesse reçoit sur une des extrémités de son arbre de sortie une roue de compresseur 31 et, sur

l'autre extrémité de son arbre une autre roue de compresseur ou une roue de turbine 9. Cette disposition procure de nombreux avantages. Cette configuration permet dans le réfrigérateur un accouplement direct entre le moteur 70 et les roues de compresseur 3, 5, 7 ou entre le moteur 70 et les roues des turbines 9, 11, 13. Ceci permet de s'affranchir d'un multiplicateur ou réducteur de vitesse (ce qui limite le nombre de pièces mobiles nécessaires). Cette configuration permet également une valorisation du travail mécanique de la ou des turbines 9, 11, 13 et par conséquent une augmentation du rendement énergétique global du réfrigérateur. Selon cette configuration, le réfrigérateur a un fonctionnement sans huile, ce qui permet de garantir la pureté du gaz de travail et supprime la nécessité d'une opération de déshuilage.

[0031] Le nombre de moteur à haute vitesse est principalement fonction du rendement énergétique souhaité pour le réfrigérateur. Plus ce rendement est important, plus le nombre de moteur haute vitesse doit être élevé.

[0032] Le rapport entre le nombre d'étage de compression (compresseurs) et le nombre d'étages de détente (turbines) est fonction de la température froide cible. Par exemple, pour un réfrigérateur dont la source froide est à 273 K, le nombre d'étage de compression sera sensiblement égal au nombre d'étage de détente. Pour un réfrigérateur dont la source froide est à 65 K, le nombre d'étage de compression est environ 3 fois plus important que le nombre d'étage de détente.

[0033] La figure 4 illustre un autre mode de réalisation qui peut par exemple être utilisé pour refroidir ou maintenir en température des câbles supraconducteurs à une température cryogénique d'environ 65 K. Pour ce niveau de température, le nombre d'étage de compression (compresseurs) doit être environ trois fois plus important que le nombre d'étages de détente (turbines). Ceci peut être réalisé selon plusieurs configurations possibles. Par exemple trois compresseurs et une turbine ou six compresseurs et deux turbines,...

[0034] Le choix du nombre d'organe sera fonction du rendement énergétique souhaité. Ainsi, une solution utilisant trois compresseurs et une turbine aura un rendement énergétique moins important qu'une solution utilisant six compresseurs et deux turbines.

[0035] Dans l'exemple de la figure 4 le réfrigérateur comprend six compresseurs 101, 102, 103, 104, 105, 106 et deux turbines 116, 111 et quatre moteurs à haute vitesse 107, 112, 114, 109. Les deux premiers compresseurs 101, 102 (c'est-à-dire les roues des compresseurs) sont montés respectivement aux deux extrémités d'un premier moteur haute vitesse 107. Les deux compresseurs 103, 104 suivants sont montés respectivement aux deux extrémités d'un second moteur haute vitesse 112. Le compresseur suivant 105 et la turbine 116 (c'est-à-dire la roue de la turbine) sont montés respectivement aux deux extrémités d'un troisième moteur haute vitesse 114. Enfin, la dernière turbine 111 et le sixième compresseur 106 sont montés respectivement aux deux extrémités d'un quatrième moteur 109.

[0036] Le cheminement du gaz de travail lors d'un cycle dans le circuit en boucle fermée peut être décrit comme suit.

[0037] Lors d'une première étape le gaz est comprimé progressivement en passant successivement dans les quatre compresseurs en série 101, 102, 103, 104, 105, 106.

[0038] A l'issue de chaque étage de compression (à la sortie de chaque compresseur) le gaz de travail est refroidi dans un échangeur de chaleur respectif 108 (par échange thermique avec de l'air ou de l'eau par exemple) pour se rapprocher d'une compression isotherme. Après cette portion de compression le gaz est refroidi de façon isobare au travers d'un échangeur à plaques à contre-courant 103. Après cette portion de refroidissement, le gaz de refroidissement est détendu progressivement dans les deux turbines centripètes en série 116, 111. Après chaque étage de détente le gaz de travail est réchauffé par échange thermique dans un échangeur 110 (par exemple par échange thermique avec la source froide), de façon à réaliser une détente sensiblement isotherme. A l'issue de cette détente isotherme le gaz de travail est réchauffé dans l'échangeur 113 et peut ensuite recommencer un nouveau cycle par une compression.

[0039] La figure 5 représente le cycle (température T et entropie S) du fluide de travail du réfrigérateur de la figure 5. Comme précédemment pour la figure 3, on distingue dans la zone A de compression six dents de scie correspondant aux six compressions et refroidissements successifs. Dans la zone C de détente on reconnaît deux dents de scie correspondant aux deux détentes et réchauffement successifs.

[0040] L'invention améliore les réfrigérateurs cryogéniques en terme de rendement énergétique, de fiabilité et d'encombrement. L'invention permet de diminuer les opérations de maintenance et de supprimer l'utilisation d'huiles.

[0041] Bien entendu l'une ou les deux extrémités des arbres de sortie du ou des moteurs peuvent entraîner directement plus d'une route (c'est-à-dire plusieurs compresseurs ou plusieurs turbines).

Revendications

1. Dispositif de réfrigération cryogénique destiné à transférer de la chaleur d'une source froide (15) vers une source (1) chaude via un fluide de travail circulant dans un circuit (200) de travail fermé, le circuit (200) de travail comprenant en série : une portion de compression sensiblement isotherme du fluide, une portion de refroidissement sensiblement isobare du fluide, une portion de détente sensiblement isotherme du fluide et une portion de réchauffement sensiblement isobare du fluide, la portion de compression du circuit (200) de travail comprenant au moins deux compresseurs (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) disposés en série et au moins un

- échangeur (6, 4, 2, 108) de refroidissement du fluide comprimé disposé à la sortie de chaque compresseur (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106), la portion de détente du circuit (200) de travail comprenant au moins une turbine (9, 11, 13, 116, 111) de détente et au moins un échangeur (10, 12, 14, 110) de réchauffement du fluide détendu, **caractérisé en ce que** les compresseurs (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) et la ou les turbines (9, 11, 13) de détente sont entraînés par plusieurs moteurs (70, 107, 112, 114, 109) dit à haute vitesse c'est-à-dire tournant à une vitesse de rotation de 10 000 tours par minute ou plusieurs dizaines de milliers de tours par minute, et dont l'un au moins des moteurs comprend un arbre de sortie dont l'une des extrémité porte et entraîne en rotation par accouplement direct un premier compresseur (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) et dont l'autre extrémité porte et entraîne en rotation par accouplement direct une turbine (9, 11, 13, 116, 111) de détente, le nombre d'étages de compression, c'est-à-dire de compresseurs, étant sensiblement égal ou supérieur au nombre d'étages de détente, c'est-à-dire de turbines, et **en ce que** les compresseurs (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) sont du type à compression centrifuge, et **en ce que** la ou les turbines (9, 11, 13, 116, 111) de détente sont du type à détente centripète, et **en ce que** les arbres (71) de sortie des moteurs (70, 107, 112, 114, 109) sont montés sur des paliers (171) de type magnétique ou de type dynamique à gaz, lesdits paliers (171) étant utilisés pour sustenter les compresseurs (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) et les turbines (9, 11, 13, 116, 111), et **en ce que** la portion de refroidissement et la portion de réchauffement comprennent un échangeur de chaleur (8, 113) commun dans lequel le fluide de travail transite à contre-courant selon qu'il est refroidit ou réchauffé.
2. Dispositif selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** le circuit de travail comprend un volume formant une capacité tampon de stockage du fluide de travail.
3. Dispositif selon la revendication 1 ou 2, **caractérisé en ce que** le fluide de travail est en phase gazeuse et constitué d'un gaz pur ou d'un mélange de gaz purs parmi : l'hélium, le néon, l'azote, l'oxygène, l'argon, le monoxyde de carbone, le méthane, ou tout autre fluide présentant une phase gazeuse à la température de la source froide.
4. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, **caractérisé en ce qu'il** comporte au moins un moteur (70, 107, 112, 114, 109) dont au moins l'une des extrémités de l'arbre de sortie entraîne en rotation par accouplement direct au moins deux roues (roues de compresseur et/ou roues de turbine).
5. Dispositif selon la revendication 4, **caractérisé en ce qu'il** comporte au moins un moteur dont une extrémité de son arbre de sortie entraîne en rotation par accouplement direct deux roues compresseur, l'autre extrémité de l'arbre de sortie entraînant en rotation par accouplement direct une roue de turbine.
6. Procédé de réfrigération cryogénique destiné à transférer de la chaleur d'une source froide (15) vers une source (1) chaude via un fluide de travail circulant dans un circuit (200) de travail fermé, le circuit (200) de travail comprenant en série : une portion de compression comprenant au moins deux compresseurs (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) disposés en série, une portion de refroidissement du fluide, une portion de détente comprenant au moins une turbine (9, 11, 13, 116, 111) de détente, et une portion de réchauffement, le procédé comprenant un cycle de travail comportant une première étape de compression sensiblement isotherme du fluide dans la portion de compression par refroidissement du fluide comprimé en sortie des compresseurs (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106), une seconde étape de refroidissement sensiblement isobare du fluide dans la portion de refroidissement, une troisième étape de détente sensiblement isotherme du fluide dans la portion de détente par réchauffement du fluide détendu en sortie de turbine, et une quatrième étape de réchauffement sensiblement isobare du fluide ayant échangé thermiquement avec la source froide (15), le cycle de travail du fluide (température T, entropie S) étant du type Ericsson inverse, lors de la première étape de compression sensiblement isotherme, le fluide comprimé est refroidit en sortie de chaque compresseur (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) pour maintenir les températures du fluide en entrée et en sortie de chaque compresseur sensiblement égales et de préférence dans une fourchette d'environ 10 K, lors de la troisième étape de détente sensiblement isotherme le fluide détendu étant réchauffé en sortie de chaque turbine (9, 11, 13, 116, 111) pour maintenir les températures du fluide en entrée et en sortie de chaque turbine (9, 11, 13, 116, 111) sensiblement égales et de préférence dans une fourchette d'environ 5 K, **caractérisé en ce que** les compresseurs (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) et la ou les turbines (9, 11, 13, 116, 111) de détente sont entraînés par plusieurs moteurs (70, 107, 112, 114, 109) dit à haute vitesse c'est-à-dire tournant à une vitesse de rotation de 10 000 tours par minute ou plusieurs dizaines de milliers de tours par minute, et dont l'un au moins des moteurs comprend un arbre de sortie dont l'une des extrémité porte et entraîne en rotation par accouplement direct un premier compresseur (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) et dont l'autre extrémité porte et entraîne en rotation par accouplement direct une turbine (9, 11, 13, 116, 111) de détente le nom-

bre d'étages de compression, c'est-à-dire de compresseurs, étant sensiblement égal ou supérieur au nombre d'étages de détente, c'est-à-dire de turbines, et **en ce que** le procédé comprend une étape de transfert d'une partie du travail mécanique de la ou des turbines (9, 11, 13, 116, 111) vers le ou les compresseurs (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) via le ou les arbres de sortie (71), et **en ce que** les arbres (71) de sortie des moteurs (70, 107, 112, 114, 109) sont montés sur des paliers (171) de type magnétique ou de type dynamique à gaz, lesdits paliers (171) étant utilisés pour sustenter les compresseurs et turbines, et **en ce que** la portion de refroidissement et la portion de réchauffement comprennent un échangeur de chaleur (8, 113) commun dans lequel le fluide de travail transite à contre-courant selon qu'il est refroidi ou réchauffé.

7. Procédé selon la revendication 6, **caractérisé en ce qu'à** l'issue de la seconde étape de refroidissement, le fluide de travail est amené à une température basse de l'ordre de 60 K et **en ce que** le circuit (200) de travail comprend un nombre de compresseurs (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) trois fois plus important que le nombre de turbines (9, 11, 13, 116, 111) de détente.
8. Procédé selon l'une quelconque des revendications 6 ou 7, **caractérisé en ce que** le fluide de travail est utilisé pour refroidir ou maintenir en froid des éléments supraconducteurs à une température de l'ordre de 65 K.
9. Procédé selon l'une quelconque des revendications 6 à 8, **caractérisé en ce que** la chute de température du fluide constituant la source froide (15) est sensiblement identique à l'augmentation de température du gaz de travail dans des échangeurs (110, 10, 12, 14) de chaleur du circuit (200) de travail.

Patentansprüche

1. Kryogene Kühlvorrichtung, die dazu bestimmt ist, Wärme von einer kalten Quelle (15) zu einer heißen Quelle (1) über ein Arbeitsfluid, das in einem geschlossenen Arbeitskreislauf (200) zirkuliert, zu übertragen, wobei der Arbeitskreislauf (200) seriell Folgendes umfasst: einen im Wesentlichen isothermen Kompressionsabschnitt des Fluids, einen im Wesentlichen isobaren Kühlabschnitt des Fluids, einen im Wesentlichen isothermen Expansionsabschnitt des Fluids und einen im Wesentlichen isobaren Erwärmungsabschnitt des Fluids, wobei der Kompressionsabschnitt des Arbeitskreislaufs (200) mindestens zwei seriell angeordnete Kompressoren (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) und mindestens einen Tauscher (6, 4, 2, 108) zum Kühlen des

am Ausgang jedes Kompressors (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) angeordneten komprimierten Fluids umfasst, wobei der Expansionsabschnitt des Arbeitskreislaufs (200) mindestens eine Expansions-turbine (9, 11, 13, 116, 111) und mindestens einen Tauscher (10, 12, 14, 110) zum Erwärmen des expandierten Fluids umfasst, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Kompressoren (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) und die Expansionsturbine(n) (9, 11, 13) von mehreren Motoren (70, 107, 112, 114, 109) angetrieben werden, die mit hoher Geschwindigkeit, das heißt mit einer Drehzahl von 10 000 Umdrehungen pro Minute oder mehreren Zehntausend Umdrehungen pro Minute, rotieren, und worin mindestens einer der Motoren eine Abtriebswelle umfasst, von der eines der Enden durch direkte Kopplung einen ersten Kompressor (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) trägt und in Rotation versetzt und deren anderes Ende durch direkte Kopplung eine Expansionsturbine (9, 11, 13, 116, 111) trägt und in Rotation versetzt, wobei die Anzahl der Kompressionsstufen, das heißt der Kompressoren, im Wesentlichen gleich oder größer als die Anzahl der Expansionsstufen, das heißt der Turbinen, ist, und dadurch, dass die Kompressoren (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) vom Typ der Zentrifugalkompression sind, und dadurch, dass die Expansions-turbine(n) (9, 11, 13, 116, 111) vom Typ der Zentripetalex-pansion ist bzw. sind, und dadurch, dass die Abtriebswellen (71) der Motoren (70, 107, 112, 114, 109) auf Lagern (171) vom magnetischen oder gasdynamischen Typ montiert sind, wobei die Lager (171) zur Abstützung der Kompressoren (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) und der Turbinen (9, 11, 13, 116, 111) verwendet werden, und dadurch, dass der Kühlabschnitt und der Erwärmungsabschnitt einen gemeinsamen Wärmetauscher (8, 113) umfassen, in dem das Arbeitsfluid in Abhängigkeit davon, ob es gekühlt oder erwärmt wird, im Gegenstrom fließt.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Arbeitskreislauf ein Volumen umfasst, das eine Pufferkapazität zur Speicherung des Arbeitsfluids bildet.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** sich das Arbeitsfluid in der Gasphase befindet und aus einem reinen Gas oder einem Gemisch von reinen Gasen besteht aus: Helium, Neon, Stickstoff, Sauerstoff, Argon, Kohlenmonoxid, Methan oder einem anderen Fluid, das eine Gasphase mit der Temperatur der kalten Quelle aufweist.
4. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie mindestens einen Motor (70, 107, 112, 114, 109) umfasst, von dem

mindestens eines der Enden der Abtriebswelle durch direkte Kopplung mindestens zwei Räder (Kompressorräder und/oder Turbinenräder) in Rotation versetzt.

5. Vorrichtung nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie mindestens einen Motor umfasst, dessen ein Ende seiner Abtriebswelle durch direkte Kopplung zwei Kompressorräder in Rotation versetzt, wobei das andere Ende der Abtriebswelle durch direkte Kopplung ein Turbinenrad in Rotation versetzt.
6. Kryogenes Kühlverfahren, das dazu bestimmt ist, Wärme von einer kalten Quelle (15) zu einer heißen Quelle (1) über ein Arbeitsfluid, das in einem geschlossenen Arbeitskreislauf (200) zirkuliert, zu übertragen, wobei der Arbeitskreislauf (200) seriell Folgendes umfasst: einen Kompressionsabschnitt, der mindestens zwei seriell angeordnete Kompressoren (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) umfasst, einen Kühlabschnitt des Fluids, einen Expansionsabschnitt, der mindestens eine Expansionsturbine (9, 11, 13, 116, 111) umfasst, und einen Erwärmungsabschnitt, wobei das Verfahren einen Arbeitszyklus umfasst, der einen ersten Schritt der im Wesentlichen isothermen Kompression des Fluids in dem Kompressionsabschnitt durch Kühlen des komprimierten Fluids am Ausgang der Kompressoren (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106), einen zweiten Schritt der im Wesentlichen isobaren Kühlung des Fluids in dem Kühlabschnitt, einen dritten Schritt der im Wesentlichen isothermen Expansion des Fluids in dem Expansionsabschnitt durch Erwärmung des expandierten Fluids am Turbinenausgang und einen vierten Schritt der im Wesentlichen isobaren Erwärmung des Fluids, welches das Fluid mit der kalten Quelle (15) thermisch ausgetauscht hat, umfasst, wobei der Arbeitszyklus des Fluids (Temperatur T, Entropie S) vom inversen Ericsson-Typ ist, wobei im ersten Schritt der im Wesentlichen isothermen Kompression, das komprimierte Fluid am Ausgang jedes Kompressors (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) abgekühlt wird, um die Fluidtemperaturen am Eingang und am Ausgang jedes Kompressors im Wesentlichen gleich und vorzugsweise in einem Bereich von etwa 10 K zu halten, wobei im dritten Schritt der im Wesentlichen isothermen Expansion das expandierte Fluid am Ausgang jeder Turbine (9, 11, 13, 116, 111) erwärmt wird, um die Fluidtemperaturen am Eingang und am Ausgang jeder Turbine (9, 11, 13, 116, 111) im Wesentlichen gleich und vorzugsweise in einem Bereich von etwa 5 K zu halten, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Kompressoren (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) und die Expansionsturbine(n) (9, 11, 13, 116, 111) von mehreren Motoren (70, 107, 112, 114, 109) angetrieben werden, die mit hoher Geschwindigkeit, das heißt

mit einer Drehzahl von 10 000 Umdrehungen pro Minute oder mehreren Zehntausend Umdrehungen pro Minute, rotieren, und worin mindestens einer der Motoren eine Abtriebswelle umfasst, von der eines der Enden durch direkte Kopplung einen ersten Kompressor (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) trägt und in Rotation versetzt, und deren anderes Ende durch direkte Kopplung eine Expansionsturbine (9, 11, 13, 116, 111) trägt und in Rotation versetzt, wobei die Anzahl der Kompressionsstufen, das heißt der Kompressoren, im Wesentlichen gleich oder größer als die Anzahl der Expansionsstufen, das heißt der Turbinen, ist, und dadurch, dass das Verfahren einen Schritt umfasst, bei dem ein Teil der mechanischen Arbeit der Turbine(n) (9, 11, 13, 116, 111) über die Abtriebswelle(n) (71) auf den Kompressor bzw. die Kompressoren (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) übertragen wird, und dadurch dass die Abtriebswellen (71) der Motoren (70, 107, 112, 114, 114, 109) auf Lagern (171) vom magnetischen oder gasdynamischen Typ montiert sind, wobei die Lager (171) zur Abstützung der Kompressoren und Turbinen verwendet werden, und dadurch, dass der Kühlabschnitt und der Erwärmungsabschnitt einen gemeinsamen Wärmetauscher (8, 113) umfassen, in dem das Arbeitsfluid in Abhängigkeit davon, ob es gekühlt oder erwärmt wird, im Gegenstrom fließt.

7. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** am Ende des zweiten Kühlsteps das Arbeitsfluid auf eine niedrige Temperatur im Bereich von etwa 60 K gebracht wird, und dadurch, dass der Arbeitskreislauf (200) eine Anzahl von Kompressoren (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) umfasst, die dreimal größer ist als die Anzahl der Expansionsturbinen (9, 11, 13, 116, 111).
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Arbeitsfluid zum Kühlen oder Kühlhalten von supraleitenden Elementen bei einer Temperatur im Bereich von 65 K verwendet wird.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Temperaturabfall des Fluids, welches die kalte Quelle (15) bildet, im Wesentlichen identisch ist mit dem Temperaturanstieg des Arbeitsgases in den Wärmetauschern (110, 10, 12, 14) des Arbeitskreislaufs (200).

Claims

1. Cryogenic refrigeration device intended to transfer the heat from a cold source (15) to a hot source (1) via a working fluid circulating in a closed working circuit (200), the working circuit (200) comprising in series: a substantially isothermal fluid compression

section, a substantially isobar fluid cooling section, a substantially isothermal fluid expansion section and a substantially isobar fluid heating section, the compression section of the working circuit (200) comprising at least two compressors (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) arranged in series and at least one compressed fluid cooling exchanger (6, 4, 2, 108) arranged at the outlet of each compressor (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106), the expansion section of the working circuit (200) comprising at least one expansion turbine (9, 11, 13, 116, 111) and at least one expanded fluid heating exchanger (10, 12, 14, 110), **characterised in that** the compressors (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) and the expansion turbine(s) (9, 11, 13) is/are driven by several motors (70, 107, 112, 114, 109) called high-speed motors, in other words, rotating at a speed of 10000 rotations per minute, or several tens of thousands of rotations per minute, and of which at least one of the motors comprises an output shaft, of which one of the ends supports and rotates by direct coupling, a first compressor (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) and of which the other end supports and rotates by direct coupling, a expansion turbine (9, 11, 13, 116, 111), the number of compression levels, in other words compressors, being substantially equal to or more than the number of expansion levels, in other words turbines, and **in that** the compressors (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) are of the centrifugal compression type, and **in that** the expansion turbine(s) (9, 11, 13, 116, 111) is/are of the centripetal expansion type, and **in that** the output shafts (71) of the motors (70, 107, 112, 114, 109) are assembled on the magnetic-type or gas-activated-type bearings (171), said bearings (171) being used for sustaining the compressors (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) and the turbines (9, 11, 13, 116, 111), and **in that** the cooling section and the heating section comprise a shared heat exchanger (8, 113) wherein the working fluid passes through at counter-current depending on if it is cooled or heated.

2. Device according to claim 1, **characterised in that** the working circuit comprises a volume forming a buffer capacity for storing the working fluid.
3. Device according to claim 1 or 2, **characterised in that** the working fluid is in gaseous phase and constituted by a pure gas or a mixture of pure gases among: helium, neon, nitrogen, oxygen, argon, carbon monoxide, methane, or any other fluid that has a gaseous phase at the temperature of the cold source.
4. Device according to any one of claims 1 to 3, **characterised in that** it comprises at least one motor (70, 107, 112, 114, 109) of which at least one of the ends of the output shaft rotates by direct coupling,

at least two wheels (compressor wheels and/or turbine wheels).

5. Device according to claim 4, **characterised in that** it comprises at least one motor of which one end of the output shaft thereof rotates by direct coupling, two compressor wheels, the other end of the output shaft rotates by direct coupling, one turbine wheel.
6. Method of cryogenic refrigeration intended to transfer the heat from a cold source (15) to a hot source (1) via a working fluid circulating in a closed working circuit (200), the working circuit (200) comprising in series: a compression section comprising at least two compressors (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) arranged in series, a fluid cooling section, a expansion section comprising at least one expansion turbine (9, 11, 13, 116, 111), and a heating section, the method comprising a working cycle comprising a first substantially isothermal fluid compression step in the compression section by cooling the compressed fluid exiting the compressors (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106), a second substantially isobar fluid compression step in the cooling section, a third substantially isothermal fluid expansion step in the expansion portion by heating the expanded fluid exiting the turbine, and a fourth substantially isobar fluid heating step having thermally exchanged with the cold source (15), the fluid working cycle (temperature T, entropy S) being of the opposite Ericsson type, during the first substantially isothermal compression step, the compressed fluid is cooled exiting each compressor (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) to keep the fluid temperatures entering and exiting each compressor substantially equal, and preferably in a range of around 10K, during the third substantially isothermal expansion step, the expanded fluid being heated exiting each turbine (9, 11, 13, 116, 111) to keep the fluid temperatures entering and exiting each turbine (9, 11, 13, 116, 111) substantially equal, and preferably in a range of around 5K, **characterised in that** the compressors (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) and the expansion turbine(s) (9, 11, 13, 116, 111) is/are driven by several motors (70, 107, 112, 114, 109) called high-speed motors, in other words, rotating at a speed of 10000 rotations per minutes or several tens of thousands of rotations per minutes, and of which at least one of the motors comprises an output shaft of which one of the ends supports and rotates by direct coupling, a first compressor (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) and of which the other end supports and rotates by direct coupling, a expansion turbine (9, 11, 13, 116, 111), the number of compression steps, in other words compressors, being substantially equal to or more than the number of expansion steps, in other words turbines, and **in that** the method comprises a step of transferring from one

part of the mechanical working of the turbine(s) (9, 11, 13, 116, 111) to the compressor(s) (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) via the output shaft(s) (71), and **in that** the output shafts (71) of the motors (70, 107, 112, 114, 109) are assembled on the magnetic-type or gas-activation-type bearings (171), said bearings (171) being used for sustaining the compressors and turbines, and **in that** the cooling section and the heating section comprise a shared heat exchanger (8, 113) wherein the working fluid passes through at counter-current depending on if it is cooled or heated.

7. Method according to claim 6, **characterised in that** from the second cooling step, the working fluid is brought to a low temperature of around 60K and **in that** the working circuit (200) comprises a number of compressors (7, 5, 3, 101, 102, 103, 104, 105, 106) that is three times the amount the number of expansion turbines (9, 11, 13, 116, 111).
8. Method according to any one of claims 6 or 7, **characterised in that** the working fluid is used for cooling or keeping cold the superconductor elements at a temperature of around 65K.
9. Method according to any one of claims 6 to 8, **characterised in that** the fall in temperature of the fluid constituting the cold source (15) is substantially identical to the increase in temperature of the working gas in the heat exchangers (110, 10, 12, 14) of the working circuit (200).

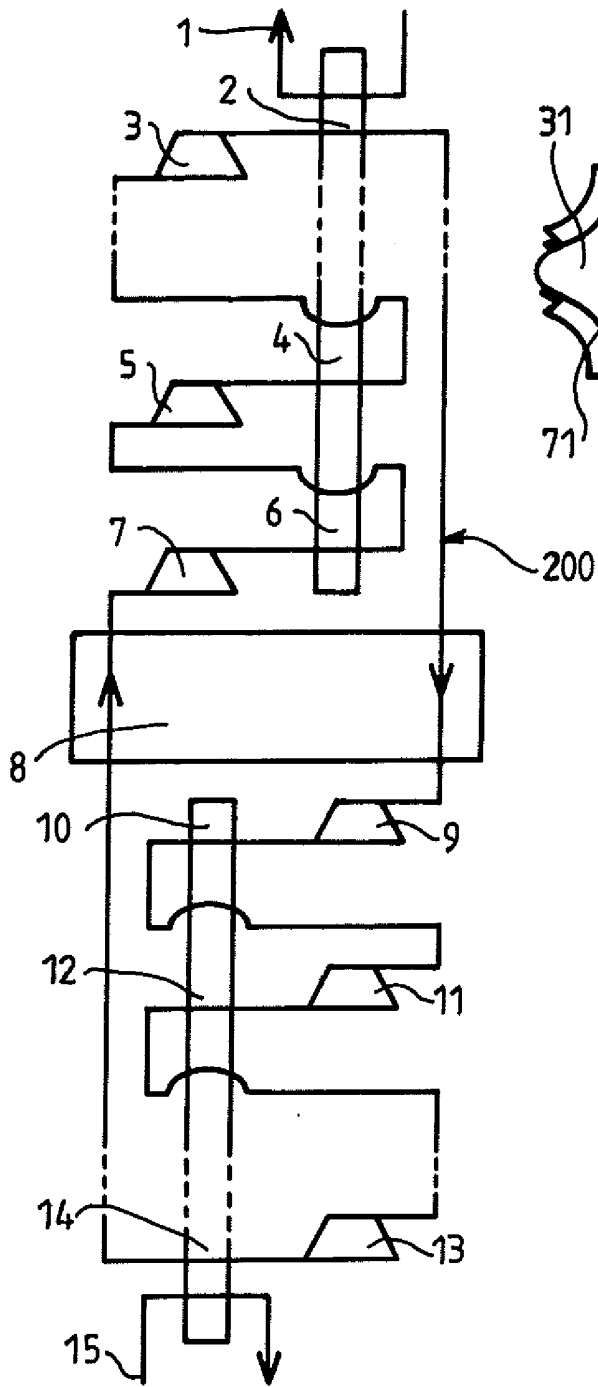


FIG. 1

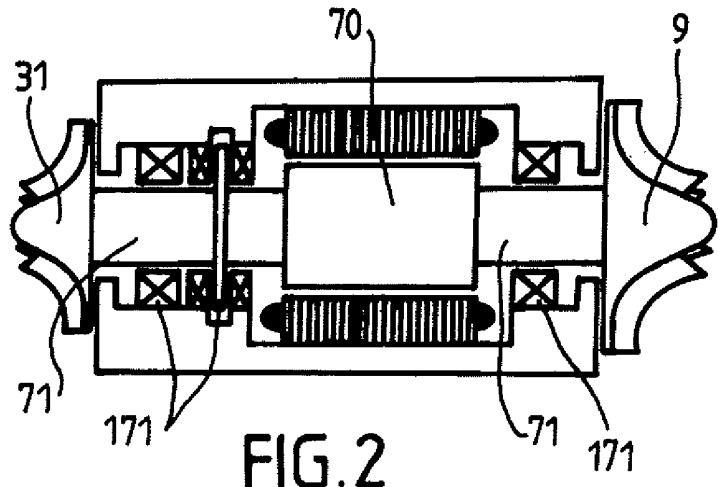


FIG. 2

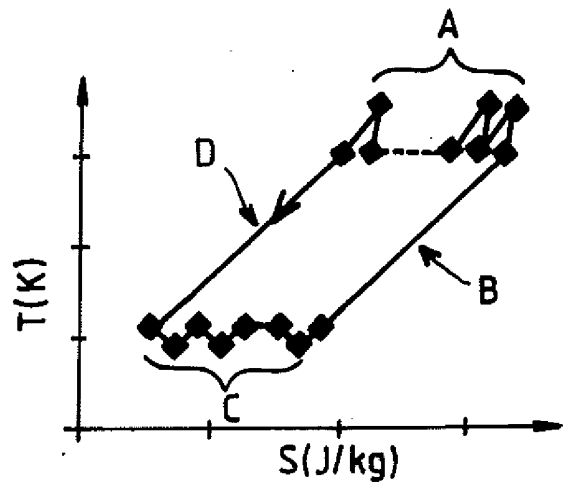


FIG. 3

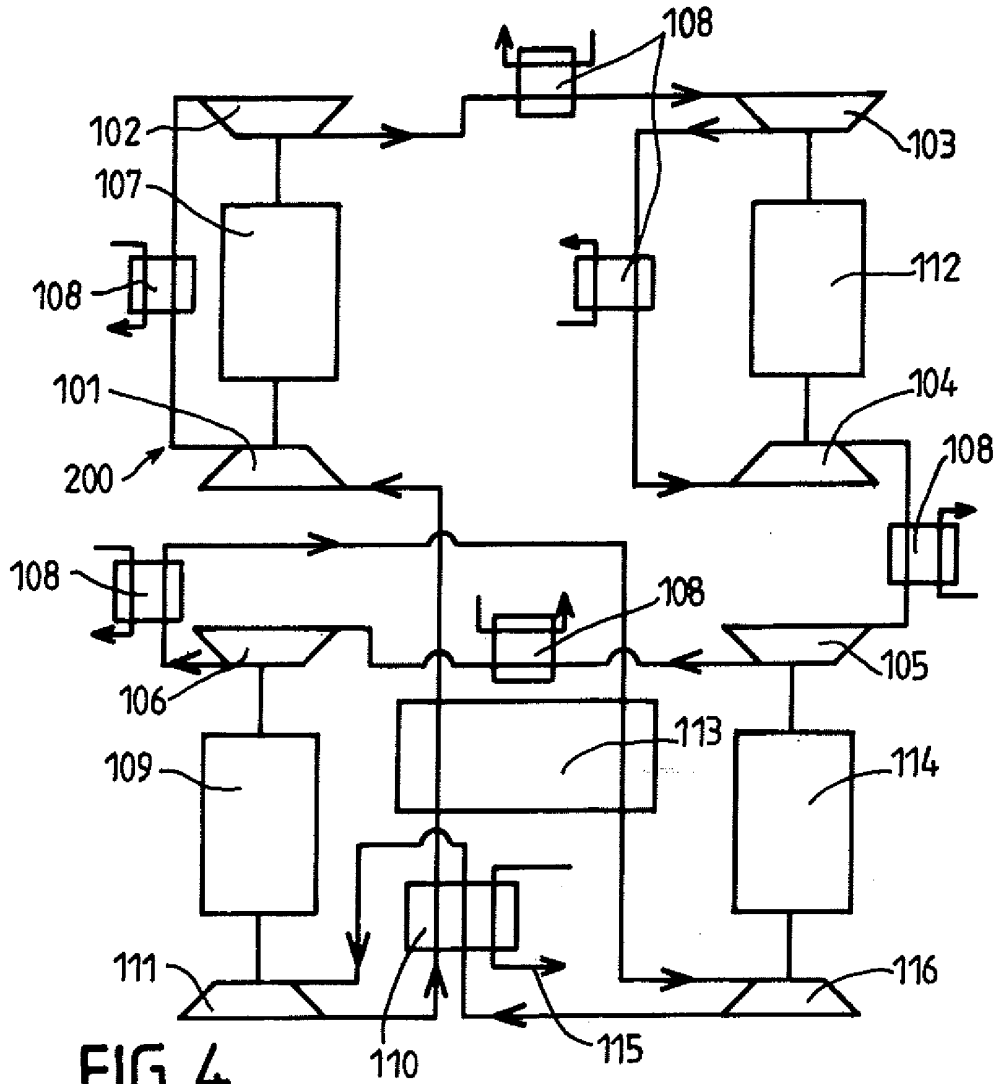


FIG. 4

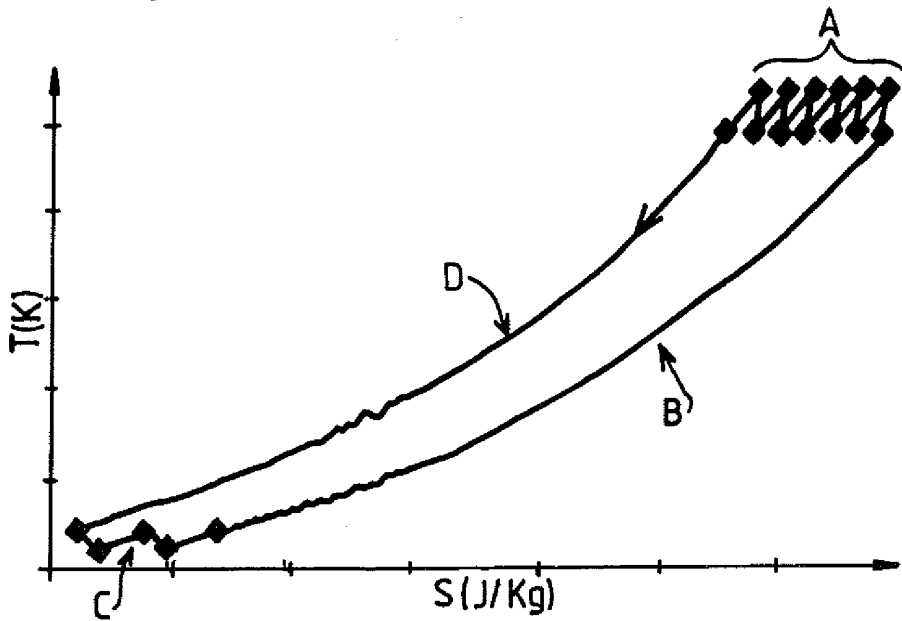


FIG. 5

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Documents brevets cités dans la description

- US 3494145 A [0006]
- US 4984432 A [0007]