

(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

(11) N° de publication :
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

2 586 793

(21) N° d'enregistrement national :

86 12258

(51) Int Cl^a : F 25 B 21/00.

(12)

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

(22) Date de dépôt : 29 août 1986.

(30) Priorité : JP, 30 août 1985, n° 189 916/85.

(71) Demandeur(s) : Société dite : KABUSHIKI KAISHA TOSHIBA. — JP.

(72) Inventeur(s) : Toru Kuriyama et Hideki Nakagome.

(43) Date de la mise à disposition du public de la demande : BOPI « Brevets » n° 10 du 6 mars 1987.

(60) Références à d'autres documents nationaux appartenants :

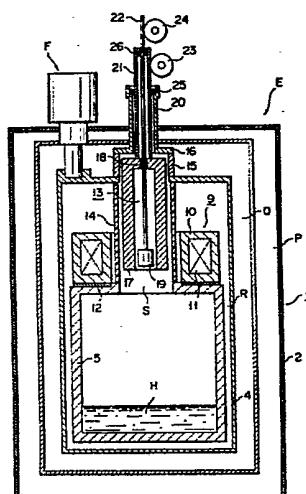
(73) Titulaire(s) :

(74) Mandataire(s) : Cabinet Beau de Loménie.

(54) Procédé et appareil de réfrigération magnétique.

(57) L'appareil réfrigérant magnétique comprend une substance de travail 19 destinée à produire de la chaleur lorsqu'elle se magnétise et à se refroidir lorsqu'elle se démagnétise, une bobine supraconductrice 11 appliquant un champ magnétique à la substance de travail, un tuyau de régénération 17 à gradient de température qui est mobile entre une première position, où une partie à température élevée est écartée de la bobine et une deuxième position où la partie à haute température est proche de la bobine et la partie à basse température est à l'intérieur d'un réservoir 5. La substance de travail et le tuyau de régénération sont respectivement déplacés de façon que la substance de travail se démagnétise pour la deuxième position et se remagnétise pour la première position.

A1
FR 2 586 793



La présente invention concerne un procédé et un appareil de réfrigération magnétique utilisant l'effet magnétocalorique.

Les appareils réfrigérateurs magnétiques de ce type sont utilisés pour condenser l'hélium, ou d'autres gaz condensables,

5 à l'aide de l'absorption de chaleur faite par une substance magnétique qui est refroidie par démagnétisation adiabatique. Ces appareils présentent, par rapport à des réfrigérateurs du type à compression classique, l'avantage d'offrir une capacité de réfrigération plus grande par unité de volume.

10 On se reporte maintenant au diagramme d'entropie de la figure 1, à l'aide duquel on va décrire le cycle de réfrigération d'un semblable appareil réfrigérateur magnétique de la technique antérieure.

15 Sur la figure 1, les axes des ordonnées et des abscisses représentent respectivement l'entropie et la température absolue. Si l'on introduit rapidement dans un champ magnétique une substance de travail, ou une substance magnétique, comme un grenat gadolinium-gallium, sa température s'élève du niveau T_c au niveau T_m (du point C au point D du graphe ; processus de magnétisation adiabatique).

20 Si l'on rejette à l'extérieur la chaleur produite ensuite dans la substance de travail, l'entropie s'abaisse (du point D au point A, processus de magnétisation isotherme). Ensuite, si l'on extrait rapidement du champ magnétique la substance de travail, sa température chute du niveau T_m au niveau T_c (du point A au point B ;

25 processus de démagnétisation adiabatique). Si la température T_c est égale à la température de condensation du gaz condensable, la substance de travail condense le gaz en absorbant de la chaleur de celui-ci, si bien que l'entropie augmente du point B au point C (processus de démagnétisation isotherme).

30 En général, on détermine la capacité de réfrigération, ou capacité des réfrigérateurs, par la différence entre les températures exothermique et endothermique et le niveau d'absorption de chaleur. Toutefois, dans le cycle de réfrigération décrit ci-dessus, si la différence de température ($T_m - T_c$) entre le côté de décharge de 35 chaleur (haute température) et le côté d'absorption de chaleur (basse température) devient importante, la différence d'entropie, c'est-à-dire la quantité de chaleur absorbée, s'abaisse du point AA, via BB

et CC, jusqu'à DD de la figure 1. Puisque cette situation peut être attribuée aux propriétés physiques de la substance de travail, on a jusqu'ici considéré comme difficile de satisfaire ces deux exigences contraires en même temps.

5 Le but de l'invention est de proposer un procédé de réfrigération magnétique et un appareil associé, permettant d'augmenter la différence de température entre le côté haute température et le côté basse température, sans diminution de la quantité de chaleur absorbée.

10 Selon l'invention, un procédé de réfrigération magnétique comprend des processus de décharge et d'absorption de chaleur à champ magnétique constant, ainsi que des processus de magnétisation et de démagnétisation adiabatiques. Par conséquent, la différence de température entre le côté haute température (Th) et le côté basse 15 température (Tc) peut être augmentée sans réduction de la quantité de chaleur absorbée du côté basse température, ce qui améliore sensiblement la capacité de réfrigération.

La description suivante, conçue à titre d'illustration de l'invention, vise à donner une meilleure compréhension de ses caractéristiques et avantages ; elle s'appuie sur les dessins annexés, 20 parmi lesquels :

- la figure 1 est un diagramme montrant le cycle de réfrigération d'un appareil réfrigérateur magnétique selon la technique antérieure ;

25 - la figure 2 est une vue en coupe verticale montrant la structure d'un dispositif liquéfacteur d'hélium selon un mode de réalisation de l'invention ;

30 - les figures 3A à 3J sont des diagrammes montrant les positions relatives d'un tuyau de refroidissement à régénération et d'une substance de travail, afin d'illustrer le fonctionnement de l'appareil de la figure 2 ; et

- la figure 4 est un diagramme montrant le cycle de réfrigération de l'appareil de la figure 2.

On présente ci-dessous un mode de réalisation de l'invention 35 en relation avec les dessins, et, pour commencer, la figure 2, qui montre un montage particulier dans lequel un appareil de réfrigération

magnétique selon un mode de réalisation de l'invention est incorporé à un dispositif liquéfacteur d'hélium. L'appareil comprend un corps de liquéfacteur E et un prérefroidisseur F.

Le corps de liquéfacteur E comporte une cuve d'hélium 1.

- 5 La cuve 1 est constituée d'une structure à trois cylindres, comprenant une cuve extérieure cylindrique 2 et deux cuves cylindriques intérieures 3 et 4 fermées à leurs deux extrémités, et un réservoir d'hélium 5 placé à l'intérieur de la structure. De manière classique, le vide est fait dans l'espace P existant entre les cuves 2 et 3,
- 10 dans l'espace Q existant entre les cuves 3 et 4, et dans l'espace R existant entre la cuve 4 et le réservoir 5, à l'aide d'une pompe à vide (non représentée), de sorte que l'on forme une couche adiabatique de vide. Par exemple, la cuve extérieure 2 est faite en un matériau non magnétique présentant une faible conductivité thermique, tandis que les cuves intérieures 3 et 4 et le réservoir
- 15 d'hélium 5 sont faits en un matériau non magnétique possédant une conductivité thermique élevée.

Une bobine supraconductrice 9 de forme annulaire, faisant fonction de générateur de champ magnétique, est disposée co-axialement dans la partie supérieure du réservoir d'hélium 5, à l'intérieur de la cuve interne 4. La bobine 9 comporte un boîtier 10 de forme annulaire, fait d'un conducteur thermique non magnétique, et un corps de bobine supraconducteur 11 contenu à l'intérieur du boîtier. La bobine est montée sur le réservoir 5, une feuille 12 faite d'un conducteur thermique non magnétique étant disposée entre eux. Ainsi, le corps de bobine 11 est thermiquement connecté à l'hélium liquide H se trouvant au fond du réservoir 5, successivement via le boîtier 10, la feuille 12 et la cuve 5, afin d'être refroidi jusqu'à une température prédéterminée.

30 Une section principale 13 de l'appareil réfrigérateur magnétique est placée dans un espace central circulaire de la bobine supraconductrice 9, ainsi qu'au-dessus et, ou bien, au-dessous de celle-ci. La section principale est construite de la manière suivante.

35 Des ouvertures circulaires concentriques, ayant des diamètres sensiblement égaux, sont formées distinctement dans les parties centrales des faces extérieures respectives du réservoir d'hélium 5

et de la cuve intérieure 4. Un cylindre de guidage 14, dont le diamètre interne est sensiblement égal aux diamètres des ouvertures circulaires, est connecté de manière étanche, par ses deux extrémités, aux bords périphériques de l'ouverture. La partie inférieure du

5 cylindre 14 est placée dans l'espace circulaire de la bobine supra-conductrice 9. Un cylindre de rayonnement 15 est formé sur la face supérieure de la cuve intérieure 4, de façon à être coaxial avec le cylindre 14. L'extrémité inférieure du cylindre 15 est connectée de manière étanche à la face supérieure de la cuve 4, ce qui ferme

10 hermétiquement l'ouverture de cette dernière. L'ouverture supérieure du cylindre 15 est fermée par une plaque 16 formant un couvercle supérieur. Les cylindres 14 et 15 et la plaque 16 définissent un espace S en forme de colonne qui s'étend au travers de la bobine 9, se raccordant ainsi à l'espace intérieur du réservoir d'hélium 5.

15 Le cylindre de guidage 14 et la plaque-couvercle 16 sont formés en un matériau non magnétique ayant une faible conductivité thermique, si bien qu'ils peuvent empêcher la pénétration de chaleur extérieure. Le cylindre de rayonnement 15, qui est formé d'un conducteur thermique non magnétique, possède un diamètre interne légèrement supérieur

20 (par exemple d'environ 100 µm) au diamètre extérieur du tuyau de refroidissement à régénération 17, lequel est disposé coaxialement au cylindre de guidage 14, dans l'espace S. Le tuyau 17 est un élément cylindrique, formé par un matériau de refroidissement à régénération, tel que du plomb, qui possède une chaleur spécifique par unité de volume élevée. Le tuyau de refroidissement 17 est ouvert

25 à son extrémité inférieure et comporte un petit trou 18 au centre de sa face terminale supérieure. La substance de travail 19, par exemple grenat gadolinium-gallium ou d'autres substances magnétiques, est disposée coaxialement dans l'espace interne du tuyau 17.

30 Le diamètre de la substance 19 est légèrement plus petit (par exemple d'environ 100 µm) que le diamètre interne du tuyau 17. Une ouverture est formée dans la partie centrale de la plaque 16. Un cylindre de guidage 20 est raccordé de manière étanche à l'air sur la plaque 16, afin de fermer hermétiquement l'ouverture. Il fait saillie vers le haut depuis la face supérieure de la plaque 16, pénétrant de manière étanche à l'air dans les cuves interne 3 et externe 2 et se

35

prolongeant jusqu'à l'extérieur de la cuve externe. Un cylindre de commande 21 est disposé coaxialement dans le cylindre 20, et un arbre de commande 22 est disposé coaxialement dans le cylindre 21. La partie terminale inférieure du cylindre 21 est raccordée à la partie terminale supérieure du tuyau de refroidissement 17. La partie terminale supérieure du cylindre 21 se prolonge, dans le cylindre de guidage 20, jusqu'à l'extérieur de la cuve externe 2, faisant saillie vers le haut depuis l'extrémité supérieure du cylindre 20 et venant en prise avec une unité de commande 23. Lorsque le cylindre de commande 21 se déplace vers le haut et vers le bas sous l'action de la force d'entraînement de l'unité 23, le tuyau 17 se déplace également vers le haut et vers le bas, à l'intérieur de l'espace S en forme de colonne. L'extrémité inférieure de l'arbre 22 est reliée à l'extrémité supérieure de la substance de travail 19. La partie terminale supérieure de l'arbre 22 est en prise avec une unité de commande 24, située à l'extérieur de la cuve externe 2. La force d'entraînement de l'unité 24 sert à déplacer l'arbre 22 et, de ce fait, la substance 19, vers le haut et vers le bas. Les unités de commande 23 et 24 présentent une configuration classique et comportent chacune un pignon entraîné par un moteur (non représenté) et une crémaillère disposée sur la partie supérieure de la face latérale du cylindre 21 ou de l'arbre 22, et en prise avec le pignon. Le cylindre de guidage 20, le cylindre de commande 21 et l'arbre de commande 22 sont faits d'un matériau présentant une faible conductivité thermique. Des joints d'étanchéité 25 et 26 sont utilisés pour fermer hermétiquement les intervalles formés entre les cylindres 20 et 21 et entre le cylindre 21 et l'arbre 22, respectivement, de manière à maintenir l'étanchéité des cuves.

Le prérefroidisseur F, qui est un réfrigérateur classique, est thermiquement raccordé aux cuves extérieure 2 et intérieures 3 et 4 et il est utilisé pour assurer le prérefroidissement des cuves intérieures.

On va maintenant décrire le fonctionnement de l'appareil de réfrigération magnétique ainsi conçu.

Une quantité prédéterminée d'hélium liquide H est emmagasinée dans le réservoir d'hélium 5. Le corps de bobine est refroidi jusqu'à une très basse température par l'hélium H, dont

la température se transmet via le réservoir 5, la feuille 12 et le boîtier 10. Lorsque le corps de bobine a été excité, un courant permanent le traverse, ce qui conduit à la formation d'un champ magnétique. Le champ magnétique est au maximum de largeur dans la 5 partie centrale du corps 11 et se rétrécit graduellement vers l'extrémité inférieure.

Sous l'action des unités de commande 23 et 24, le tuyau de refroidissement à régénération 17 et la substance de travail 19 effectuent respectivement un mouvement de va-et-vient vertical, 10 dans le champ magnétique produit par le corps de bobine 11. Le tuyau 17 présente une longueur telle que son extrémité inférieure est disposée au centre du corps de bobine 11 lorsque le tuyau atteint sa limite d'action supérieure, soit la position présentée sur la figure 2. La course du tuyau 17 est réglée de façon que l'extrémité 15 supérieure du tuyau soit placée au-dessous du plan central du corps 11 lorsque le tuyau se trouve à la limite d'action inférieure. La course parcourue par la substance 19 a lieu entre une limite d'action supérieure, sur le plan central du corps 11, et une limite d'action inférieure, qui correspond à une position pour laquelle l'intensité 20 du champ magnétique, produit par le corps de bobine, est extrêmement basse. Le tuyau 17 et la substance 19 effectuent un mouvement de va-et-vient vertical indépendamment.

On se reporte maintenant aux figures 3 et 4, qui décrivent les actions du tuyau de refroidissement à régénération 17 et de la 25 substance de travail 19.

Le tuyau de refroidissement 17 présente un gradient de température dans sa direction axiale. Sur la figure 4, les symboles Th et Tm désignent respectivement les températures des extrémités supérieure et inférieure du tuyau 17. Ce gradient de température peut 30 être produit par la substance de travail 19 lorsque le tuyau 17 et la substance 19 ont été déplacés plusieurs fois, à l'occasion d'actions préparatoires. Au début, l'extrémité supérieure du tuyau 17 se trouve sur le plan central du corps de bobine 11, comme représenté sur la figure 3A. De plus, la substance 19 est placée sur le plan central du 35 corps 11, ce qui correspond à la densité de flux magnétique B2, c'est-à-dire le champ magnétique maximal produit par le corps 11.

La température de la substance 19 est égale à la température T_h de l'extrémité supérieure du tuyau 17 (point I de la figure 4). Ensuite, seul le tuyau 17 se déplace vers le haut, comme indiqué sur la figure 3B. A ce moment, la substance de travail 19, dans un champ magnétique constant B_2 , échange de la chaleur avec le tuyau de refroidissement 17, possédant un gradient de température, par l'intermédiaire de l'hélium gazeux se trouvant dans une partie étroite entre le tuyau 17 et la substance 19 (soit du point I au point J sur la figure 4). Lorsque le tuyau 17 atteint sa limite d'action supérieure, comme indiqué sur la figure 3C, la substance 19 présente la température T_m dans le champ magnétique B_2 , comme indiqué par le point J sur la figure 4. Ensuite, le tuyau 17, tout en restant lui-même immobile, fait en sorte que la substance 19 se déplace vers le bas, comme représenté sur la figure 3D. En résultat, la substance 19 se démagnétise de manière adiabatique et se refroidit jusqu'à une température inférieure (du point J au point K sur la figure 4). Si la température de la substance 19 s'abaisse jusqu'à T_c (ordonnai-
rement, la température de saturation de l'hélium liquide à 4,2 K) ou moins, l'hélium gazeux se condense à la surface de la substance 19, et il y a démagnétisation en même temps qu'absorption isotherme de chaleur (du point K au point L sur la figure 4). L'hélium liquide résultant de la condensation de l'hélium gazeux à la surface de la substance 19 tombe en gouttes pour être recueilli au fond du réservoir d'hélium 5. De cette manière, l'hélium gazeux évaporé par la chaleur externe transmise au réservoir 5 se liquéfie. A sa limite d'action inférieure (figure 3E ; point L de la figure 4), la substance de travail 19 se déplace de nouveau vers le haut pour être magnétisée de manière adiabatique et produire de la chaleur (du point L au point M sur la figure 4). En même temps, le tuyau de refroidissement 17 se déplace vers le bas, comme représenté sur la figure 3F. Lorsque la substance 19 atteint la température T_m , dans le champ magnétique B_1 , comme indiqué par le point M sur la figure 4, elle est située dans la partie inférieure du tuyau 17, comme représenté sur la figure 3G. Ensuite, seul le tuyau 17 se déplace de nouveau vers le bas, la substance 19 étant maintenue immobile, comme représenté sur la figure 3H. Dans le même temps,

la substance 19 se trouvant dans le champ magnétique constant B1, échange de la chaleur avec le tuyau 17, par l'intermédiaire de l'hélium gazeux se trouvant dans l'intervalle étroit formé entre le tuyau 17 et la substance 19 (du point M au point N sur la figure 4), 5 de la manière précédemment indiquée. Lorsque le tuyau 17 atteint sa limite d'action inférieure, la substance 19 se trouve placée dans la partie supérieure du tuyau 17, comme représenté sur la figure 3I, et prend la température Th, correspondant au point N de la figure 4. Ensuite, le tuyau 17 et la substance 19 se déplacent vers le haut à une même vitesse, comme représenté sur la figure 3J. Alors, la 10 substance de travail 19 se magnétise, ce qui produit de la chaleur. Toutefois, par suite de l'échange de chaleur avec le tuyau de refroidissement à régénération 17, la substance 19 se magnétise de manière isotherme (à Th), ce qui modifie sa densité de flux magnétique de B1 15 à B2. Ceci correspond au processus décrit du point N au point I de la figure 4. Ainsi, un cycle complet a été achevé. La chaleur supplémentaire transmise de la substance de travail 19 au tuyau de refroidissement 17 est déchargée de la manière suivante, par l'intermédiaire des cylindres de rayonnement 15 liés à la cuve 20 intérieure 4, lorsque le tuyau 17 se trouve à sa limite d'action supérieure, comme représenté sur les figures 3C, 3D et 3E.

Comme précédemment mentionné, le cylindre de rayonnement 15 est formé d'un conducteur thermique non magnétique, et il présente un diamètre interne légèrement supérieur au diamètre 25 externe du tuyau de refroidissement à régénération 17. Lorsque le tuyau 17 est placé à sa limite d'action supérieure de sorte que sa partie supérieure se trouve dans le cylindre de rayonnement 15, la chaleur se trouvant à l'intérieur du tuyau 17 se transmet au cylindre 15 par l'intermédiaire de l'hélium gazeux se trouvant dans 30 l'intervalle étroit. La chaleur reçue par le cylindre 15 est extraite jusqu'à l'extérieur, via la cuve interne 4 et le pré-refroidisseur F.

De cette manière, l'hélium gazeux qui a été évaporé par la chaleur externe introduite dans le réservoir 5 se liquéfie, 35 le corps de bobine 11 peut se refroidir de manière satisfaisante par le maintien de l'hélium liquide H dans le réservoir 5 à un

niveau fixe. Ainsi, le fonctionnement du corps de bobine, en tant qu'unité de bobine supraconductrice, peut être maintenu pendant une longue durée.

On comprendra que l'invention n'est pas limitée au mode 5 de réalisation ci-dessus décrit.

Dans le mode de réalisation ci-dessus présenté, le tuyau de refroidissement à régénération 17 et la substance de travail 19 sont par exemple déplacés par rapport à la bobine supraconductrice 9, faisant fonction de générateur de champ magnétique. Toutefois, selon 10 une autre possibilité, il est possible de déplacer la bobine 9 et la résistance 19 par rapport au tuyau 17, ou la bobine 9 et le tuyau 17 par rapport à la substance 19. De plus, en ce qui concerne 15 le mode de réalisation précédent, on a décrit le générateur de champ comme étant déplacé par rapport à la substance de travail et au tuyau de refroidissement pour permettre de faire varier le champ magnétique créé par celui-ci. Selon une autre possibilité, on peut faire varier le champ en commandant électriquement le générateur de champ. Le déplacement de la substance de travail et, ou bien, 20 du tuyau de refroidissement, ne se limite pas à un déplacement axial et peut aussi bien être une rotation. En outre, dans le mode de réalisation ci-dessus, le moyen régénératrice est formé par le tuyau de refroidissement à régénération, dans lequel la substance de travail peut être insérée. Toutefois, il n'est pas nécessaire qu'il s'agisse toujours d'une structure tubulaire et celui-ci peut 25 par exemple prendre la forme d'une plaque qui ne peut pas recevoir en elle la substance de travail. En tout cas, le moyen régénératrice doit être disposé de préférence à proximité de la substance de travail et, pour assurer un rendement thermique, en contact avec celle-ci.

30 La substance de travail ne se limite pas au grenat gadolinium-gallium et peut être un grenat dysprosium-aluminium ou toute autre substance magnétique appropriée.

Bien entendu, l'homme de l'art sera en mesure d'imaginer, 35 à partir du procédé et de l'appareil dont la description vient d'être donnée à titre simplement illustratif et nullement limitatif, diverses variantes et modifications ne sortant pas du cadre de l'invention.

REVENDICATIONS

1. Appareil réfrigérant magnétique, comprenant :
une substance de travail (19) destinée à produire de la chaleur lorsqu'elle se démagnétise et à se refroidir lorsqu'elle se démagnétise ;
 - 5 un moyen (9) générateur de champ magnétique servant à appliquer un champ magnétique prédéterminé à la substance de travail ;
un premier moyen de commande (22, 24) servant à changer les positions relatives du moyen (9) générateur de champ magnétique et de la substance de travail (19), de manière à faire varier le champ magnétique appliqué à la substance de travail ;
10 un moyen de retenue (5) qui retient un élément (H) à faire refroidir par la substance de travail lorsque la substance de travail se démagnétise ;
15 un système (F) de décharge de chaleur qui décharge la chaleur du moyen régénérateur vers l'extérieur de l'espace dans lequel la substance de travail se trouve ;
caractérisé en ce qu'il comprend en outre :
un moyen régénérateur (17) présentant un gradient de
20 température suivant sa direction de déplacement et conçu pour être déplacé par rapport à la substance de travail de façon qu'un échange de chaleur ait lieu entre le moyen régénérateur (17) et la substance de travail (19) ; et
un deuxième moyen de commande (21, 23) servant à
25 modifier la position du moyen régénérateur en vue de l'échange de chaleur avec la substance de travail.
 2. Appareil réfrigérant magnétique selon la revendication 1, caractérisé en ce que ledit moyen (9) générateur de champ magnétique est fixé au moyen de retenue (5), et lesdits premier et deuxième moyens de commande déplacent respectivement la substance de travail et le moyen régénérateur.
 3. Appareil réfrigérant magnétique selon la revendication 2, caractérisé en ce que ledit moyen de retenue possède une ouverture, à l'une de ses extrémités, et comporte un réservoir (5)
35 contenant l'élément à refroidir, ledit moyen générateur de champ magnétique comporte une bobine supraconductrice (11) disposée à

l'extérieur du réservoir, et ladite substance de travail peut se déplacer entre une position de magnétisation, à l'intérieur de la bobine, et une position de démagnétisation, à l'intérieur du réservoir.

5 4. Appareil réfrigérant magnétique selon la revendication 3, caractérisé en ce que ledit moyen régénérateur comporte un élément de régénération (17) possédant une partie à température élevée et une partie à température basse, ledit élément de régénération étant mobile entre une première position, pour laquelle la partie à haute température est placée loin de la bobine et la partie à basse température est placée près de la bobine, et une deuxième position pour laquelle la partie à haute température est placée près de la bobine et la partie à basse température est placée à l'intérieur du réservoir.

10 15. Appareil réfrigérant magnétique selon la revendication 4, caractérisé en ce que ledit élément de régénération comporte un tuyau de régénération, permettant l'insertion en lui-même de la substance de travail, destiné à effectuer un déplacement axial et comportant une fente, qui ouvre en direction de l'élément à refroidir, dans le réservoir.

15 20. Procédé de réfrigération, caractérisé en ce qu'il comprend :

25 une opération de décharge de chaleur à champ magnétique constant visant à positionner une substance de travail (19) dans un champ magnétique fixe et à extraire de la chaleur de la substance de travail, ladite substance de travail (19) étant destinée à produire de la chaleur lorsqu'elle se magnétise et à se refroidir lorsqu'elle se démagnétise ;

30 une opération de démagnétisation adiabatique de la substance de travail ;

 une opération de démagnétisation isotherme de la substance de travail ;

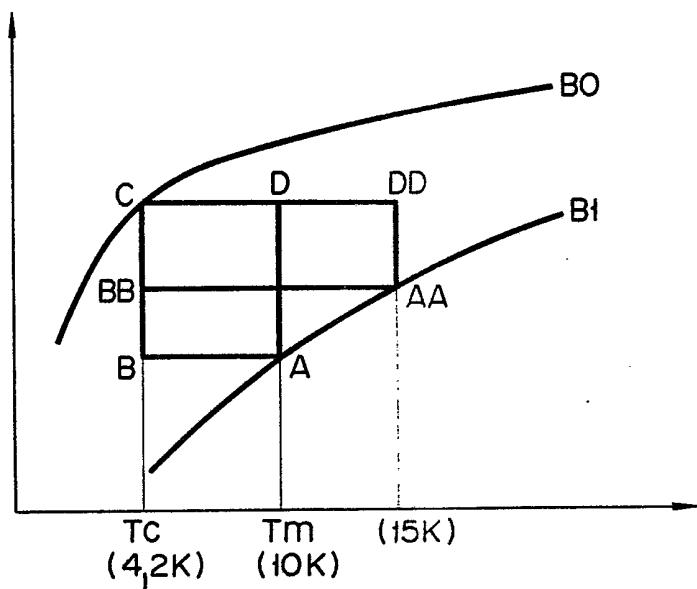
 une opération de magnétisation adiabatique de la substance de travail ;

35 une opération d'absorption de chaleur à champ constant

visant à positionner la substance de travail dans le champ magnétique et à faire revenir la chaleur à la substance de travail ; et une nouvelle opération de magnétisation isotherme de la substance de travail,

5 lesdites opérations se répétant dans l'ordre indiqué.

F I G. 1



F I G. 4

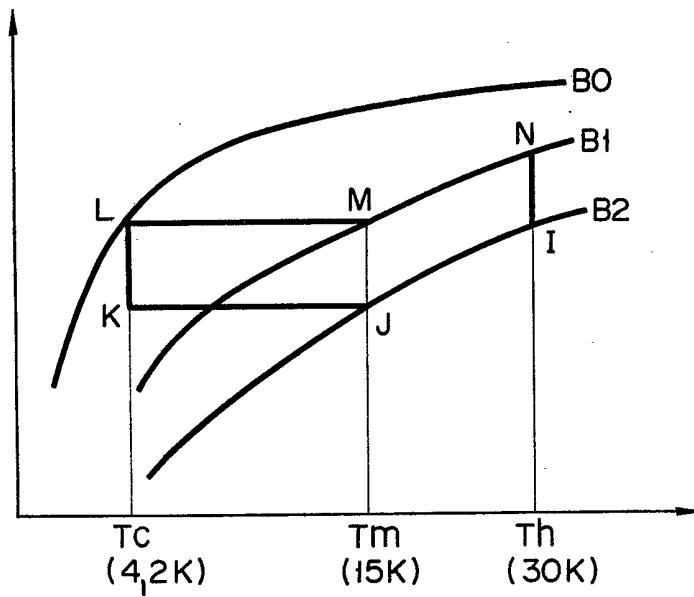


FIG. 2

