

平成 23 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「超伝導ピン止め効果を応用した低発塵回転体
の位置決め技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成 25 年 1 月

委託者 関東経済産業局
委託先 学校法人芝浦工業大学

目次

1. 研究の目的	1
2. 研究の概要	2
3. 研究体制	
(1) 研究組織及び管理体制	
1) 研究組織（全体）	3
2) 管理体制	4
①事業管理機関	4
②再委託先	5
(2) 研究員	6
(3) 他からの指導・協力者	7
4. 当該研究開発の連絡窓口	8
5. 研究成果	
(1) 超伝導体ピン止め効果を利用した位置止め技術の確立	9
(2) 回転トルク伝達機構の高度化	16
(3) 回転機器の高速回転安定化技術	20
(4) 攪拌機及びポンプに最適な冷却システムの設計及び試験器の製作	23
6. まとめ	26

1. 研究の目的

本研究開発の目的は、超伝導のピン止め効果を利用することで、完全非接触状態で物体を空中位置決めする技術を高度化することにより、高効率の極低温冷却システムを備えた無発塵の回転機器である攪拌器及びケミカルポンプを開発することである。

医薬品製造や化学プロセス分野では、異物の混入が製品の品質劣化に繋がるため、高い清浄環境での溶液攪拌や液体搬送を可能とする低発塵技術の開発が急務である。

これら川下製造業者が抱える課題を解決するために、本研究開発では、超伝導のピン止め効果を利用し、完全非接触状態で物体を空中位置決めする技術を高度化することにより、高効率の極低温冷却システムを備えた無発塵の回転機器である攪拌器及びケミカルポンプを開発する。

2. 研究の概要

低発塵化あるいは、まったく発塵の無い完全非接触回転機器を実現するために以下の研究を行う。

①超伝導体のピン止め効果を利用した位置決め技術の確立として、ピン止め効果を利用した位置決め機構に及ぼす超伝導回路の影響を調査し、超伝導の位置決め機構に及ぼす諸条件の影響を特定する。

②回転トルク伝達機構の高度化として、浮上高さと回転トルクの究明を行い、設定条件が回転トルクに及ぼす影響を特定する。

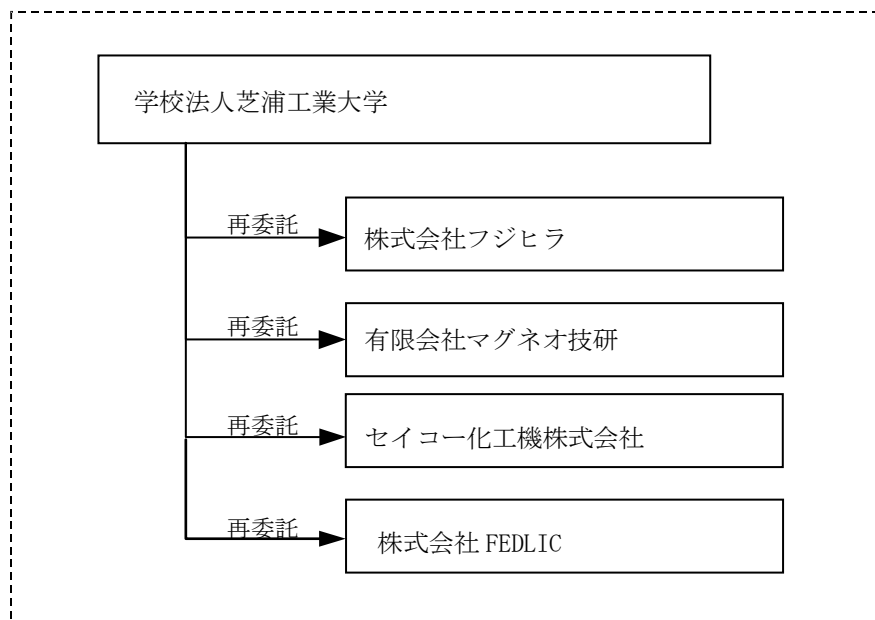
③回転機器の高速回転安定化技術として、剛性力向上のための磁石回路の開発を行い、設定条件及び剛性が回転速度に及ぼす影響を特定する。

④超伝導体の冷却システムの開発として、攪拌機及びポンプに最適な冷却システムの設計及び試験機の製作を行い、攪拌機及びポンプに最適な冷却システムの設計及び試験機の製作を行う。

3. 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織（全体）



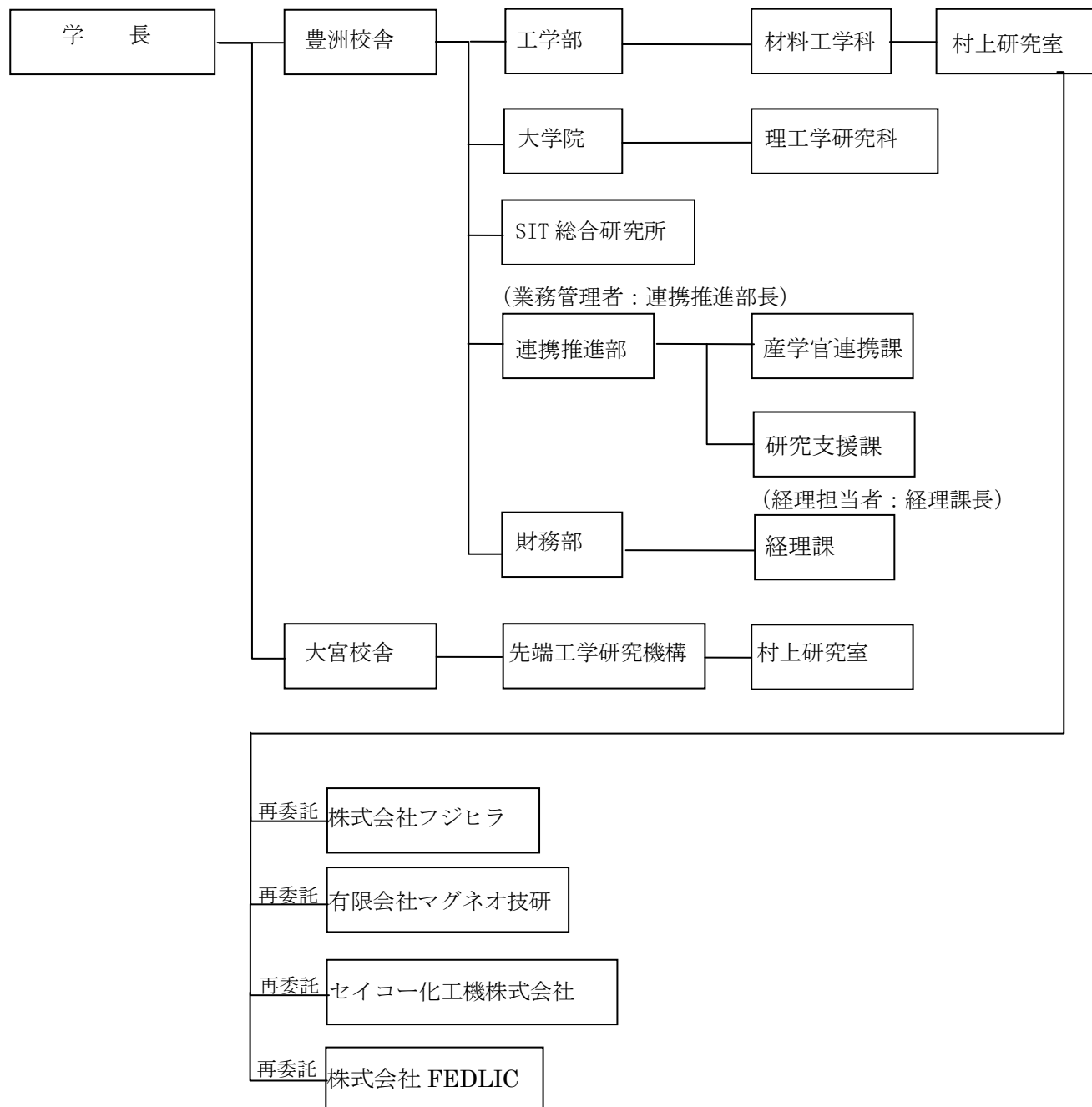
総括研究代表者（P L）
学校法人芝浦工業大学
工学部材料工学科 教授
村上 雅人

副総括研究代表者（S L）
株式会社フジヒラ
代表取締役
藤平 誠一

2) 管理体制

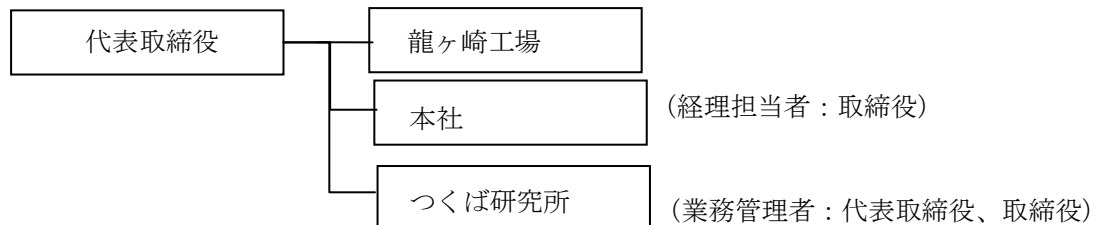
①事業管理機関

[学校法人芝浦工業大学]



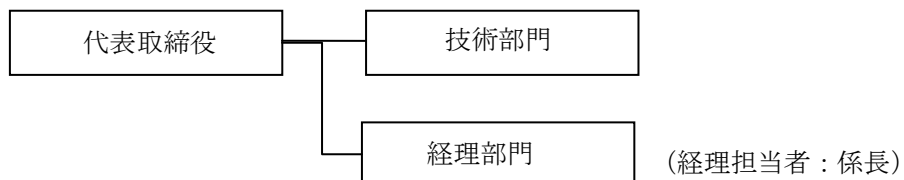
② 再委託先

[株式会社フジヒラ]



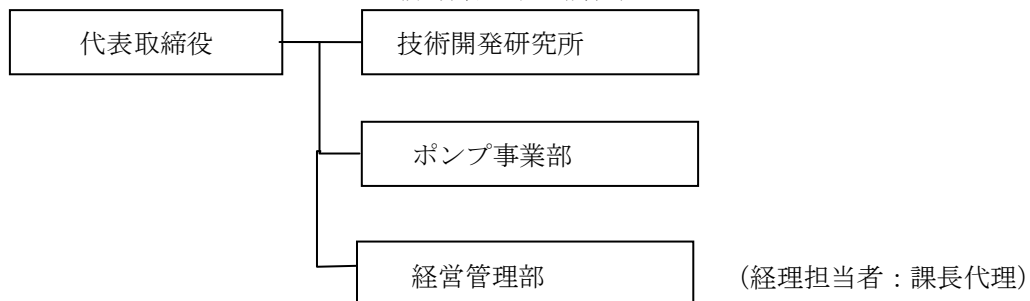
[有限会社マグネオ技研]

(業務管理者：代表取締役)



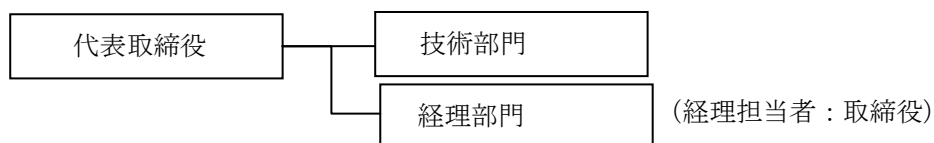
[セイコー化工機株式会社]

(業務管理者：所長)



[株式会社 FEDLIC]

(業務管理者：代表取締役、技術リーダー)



(2) 研究員

【事業管理機関】 学校法人芝浦工業大学

(研究員)

氏名	所属・役職
村上 雅人	工学部 材料工学科 教授
腰塚 直己	工学部 材料工学科 教授
中山 千秋	大学院 理工学研究科 教授
井上 和朗	SIT 総合研究所 客員研究員

【再委託先】

(研究員)

株式会社フジヒラ

氏名	所属・役職
藤平 誠一	代表取締役
佐保 典英	主任研究員
藤平 秀幸	取締役

有限会社マグネオ技研

氏名	所属・役職
秋山 慎一	代表取締役
太田 直希	技術部長

セイコー化工機株式会社

氏名	所属・役職
平櫛 真男	主任研究員
岡田 守央	設計課長
上岡 正弘	設計主任

株式会社 FEDLIC

氏名	所属・役職
藤平 潤一	代表取締役
渡邊 和訓	技術リーダー

(3) 他からの指導・協力者

氏名	所属・役職
腰塚 直己	学校法人芝浦工業大学 工学部 材料工学科 教授
中山 千秋	学校法人芝浦工業大学 大学院 理工学研究科 教授
井上 和朗	学校法人芝浦工業大学 SIT 総合研究所 客員研究員
石井 均	学校法人芝浦工業大学 連携推進部 産学官連携課
長嶋 賢	公益財団法人鉄道総合技術研究所 浮上式鉄道技術研究部 低温システム 研究室長
丸山 忠克	淡路マテリア株式会社 東京支店 開発グループ部長

4. 当該研究開発の連絡窓口

住所：〒135-8548 東京都江東区豊洲3丁目7番5号

名称： 学校法人芝浦工業大学

連絡担当者所属役職・氏名： 豊洲学事部部长 丁龍鎮

Tel: 03-5859-7180 Fax: 03-5859-7181

E-mail: sangaku@ow.shibaura-it.ac.jp

5. 研究成果

(1) 超伝導体のピン止め効果を利用した位置決め技術の確立

超伝導体に磁場を印加した状態で冷却することをフィールドクール（磁場中冷却）と呼んでいる。冷却する前は、超伝導体は常磁性体であるため、すべての磁力線が超伝導体を貫通する。この状態で、超伝導臨界温度以下に冷却すると、磁力線がピン止めセンターに捕捉される。

フィールドクールによる位置決め機構においては、高さ方向の位置決めと、横方向の位置決めがある。横方向の位置決め技術は、高速回転の安定化にとって重要であり、位置決めだけでなく、回転時の外乱に対して、中心軸方向に回転体を復元させる剛性力の向上も重要となる。

高さ方向の位置決めは、以下の手順による。まず、超伝導体と永久磁石間の距離を、支持材を使って、ある一定値に保ったまま冷却すると、フィールドクール状態となる。この後、永久磁石の支持を開放すると、永久磁石はわずかに変位し、その位置に固定される。これが超伝導浮上である。浮上物体は、この位置に固定される。さらに、この状態で永久磁石に追荷重を加えると、浮上高さが下がる一方で、永久磁石は、より強固に固定される。

位置決めの際に重要となるのは、フィールドクール時の初期ギャップと、その後の変位量である。この変位量は、超伝導体のピン止め効果（臨界電流によって測定できる）と、永久磁石（あるいは磁石回路）の磁場強度と、その重量に依存する。さらに、この状態で永久磁石に追荷重を加えると、浮上高さが低くなる一方で、永久磁石は、より強固に固定される。追荷重により、ギャップを変えると、それ以降は、この位置に固定される。

ただし、高さ方向の位置決めについては、高速回転による影響をほとんど受けないため、必要とされるギャップを確保したうえで、浮上が可能であれば、問題のないことが明らかとなった。

位置決めにおいて、より重要になるのは、横方向の剛性である。磁気力 F は磁性体の磁化を M 、磁場の強さを H 、剛性を必要とされる方向を x とすると

$$F = M \frac{dH}{dx}$$

という式によって与えられる。したがって、横方向の磁場が均一の場合、つまり、 $dH/dx = 0$ の場合には、剛性はまったく働かないことになる。よって、できるだけ、磁気勾配を大きくすることが重要となる。

そこで、本研究では、磁気回路が剛性に与える影響について検討した。

まず、図 1 に示すような単極のリング磁石と、NS2 極からなるリング磁石回路を用意した。磁石の素材は、Fe-Nd-B 磁石であり、試作機での運用を考え、磁石形状は、単極磁石が外径 120 mm、内径 70 mm、NS2 極磁石が外径 120 mm 内径 60 mm である。磁石の厚さは、すべて 20mm としている。



図 1 剛性力測定用の Fe-Nd-B リング磁石。左図が単極リングであり、右図が NS2 極リングからなる。

まず、これら磁石回路の磁場分布をホール素子 2 次元走査型磁場分布測定装置により評価した。図 2 および図 3 に測定結果を示す。

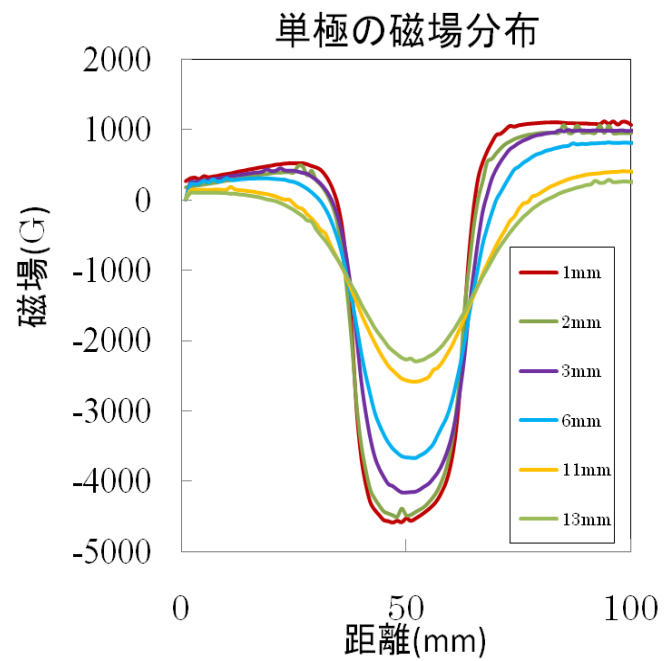


図 2 単極磁石の磁場分布

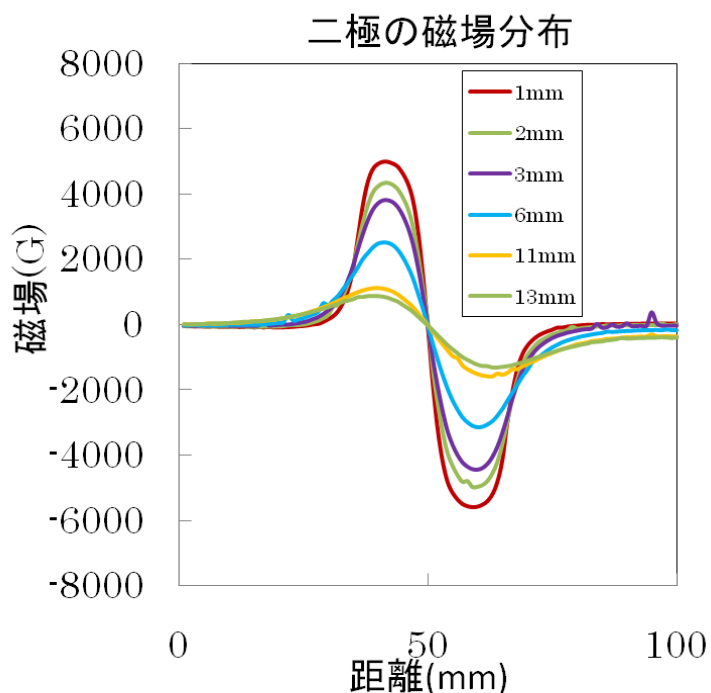


図3 NS2 極磁石の磁場分布

磁石分布では、単極リング磁石では 1 個のピークであるのに対し、NS2 極リング磁石では、正負の 2 個のピークを呈している。さらに、ピーク磁場強度を比較すると、ギャップ 1mm では、双方とも 5000G 程度であるが、ギャップが 13mm の位置でも、単極磁石と 2 極磁石どちらも 2000G 程度であり、磁場のギャップ依存性に大きな違いはない。

一方、磁気勾配 (dH/dx) という観点では、単極磁石の場合は、磁石の端部でのみ磁場変化が生じているが、2 極磁石では、2 個のリング磁石間においても、磁場変化が生じている。このため、磁気勾配による剛性向上という観点では有利となる。

本研究では、さらなる磁気勾配 (磁気変化) の向上という観点からハルバツパ磁石回路についても検討を行った。

この磁石回路は、磁路をうまく設計することにより、磁場がある場所に集中するように工夫したものである。本来は、方形磁石において、磁気回路の検討がなされているが、本研究開発では、回転機器への応用を考え、図 4 に示したように、小磁石を並べることで、回転方向には磁場の均一がハルバツパ回路を構成した。

図 4 に示した回路では、超伝導体を対向する面にのみ磁場が集中するような設計となっている。

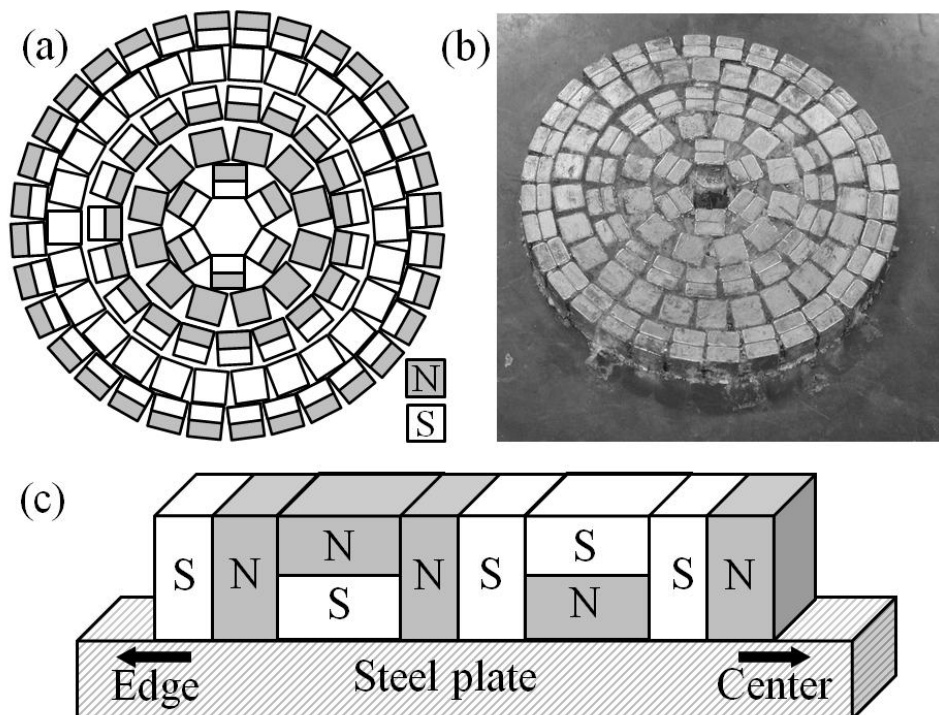


図4 回転体用のハルバツハ磁石回路

図4(a)が Fe-Nd-B 磁石の配列、(b)が外観写真、(c)に回転方向の磁石列の模式図を示している。鉄板をバックヨークとして、図4(a)のように、10mmx10mm の Fe-Nd-B 磁石(厚さ 5mm) を貼り付けて作製した。

図4(c)のように磁気回路を設計すると、磁場が上面にのみ現れるので、磁場集中が生じる。また、図4(a)から、分かるように、この回路は5重リング構造に相当する。

このハルバツハ回路の磁場分布を測定例を図5に示す。

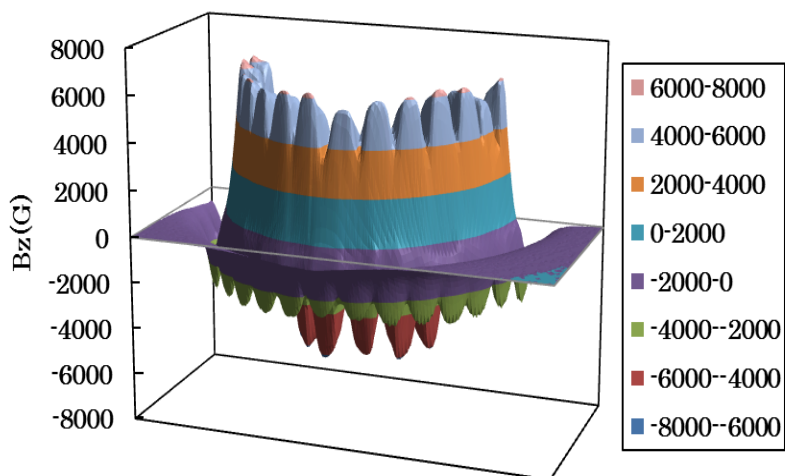


図5 ハルバツハ磁石回路の磁場分布：ギャップ 1mm.

図5に示すように、ギャップ1mmでの磁場強度は7000Gに達しており、単極および2極のものよりも高くなっている。これは、ハルバッハ構造により磁場が、この面側に集中した結果である。

ただし、磁場勾配が磁石表面のNS間で強く結合しているため、磁場が表面に局所化する傾向にある。このため、6mmギャップでは2000G、さらに9mmギャップでは1500G程度と、単極および2極磁石と比較すると、ギャップの大きな地点で磁場強度は少し弱くなっている。

つぎに、これら磁石回路を浮上させるための、バルク超伝導体の製造を行った。組成としてはY-Ba-Cu-O系超伝導体であり、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 相と、 Y_2BaCuO_5 相が10:4の割合の原料粉を混合し、1wt%の CeO_2 を添加し、よく混合したうえで、ペレット状に成型したうえで、種結晶溶融成長法(TSMG: top-seeded melt-growth)法により製造した。溶融成長後は、超伝導化のために、 400°C で300h純酸素中での酸素アニーリング処理を施した。バルク超伝導体の最終形状は、直径40mm、高さ16mmであった。浮上実験には6個のバルク超伝導体を使用した。図6に作製したバルク超伝導体の外観写真を示す。

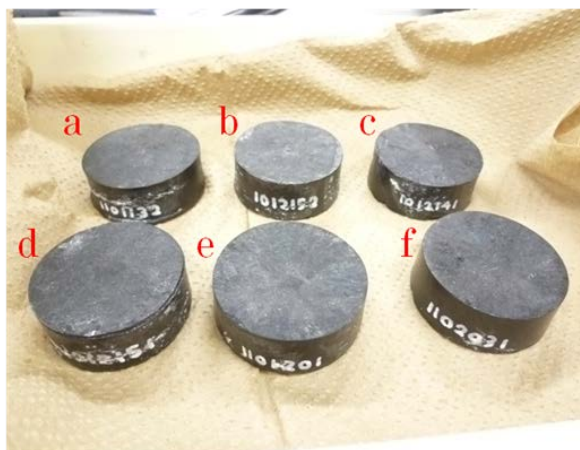


図6 浮上実験に使用したバルク Y-Ba-Cu-O 超伝導体



図7 液体窒素容器（クライオスタット）内に装着したバルク超伝導体

作製したバルク超伝導体は、エポキシ樹脂製のクライオスタットに図 7 に示したように装備し、液体窒素で冷却する。その上に、図 1 に示した単極および 2 極リング磁石と、図 4 に示したハルバッハ型磁石を浮上させる。

これら磁石回路の剛性を求めるために、ギャップ 5mm の高さに、これら磁石回路を位置決めし、横方向に磁石をずらし、その際の復元力をフォースゲージにより測定することで剛性を測定した。図 8 に剛性力測定用実験の模式図を示す。

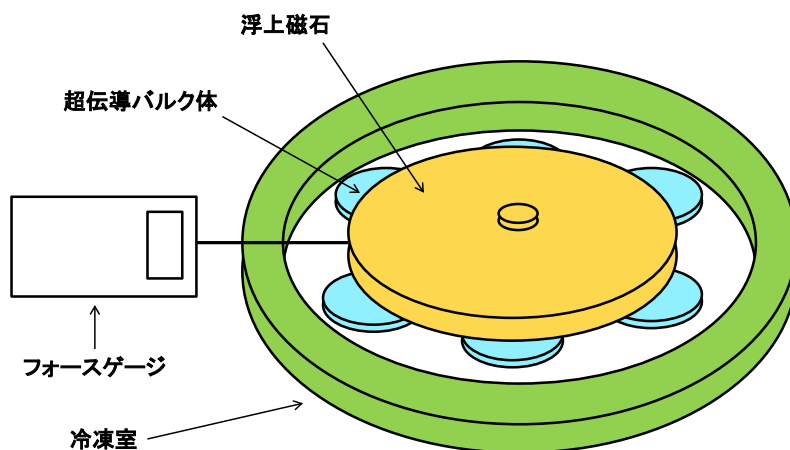


図 8 剛性力測定実験の模式図

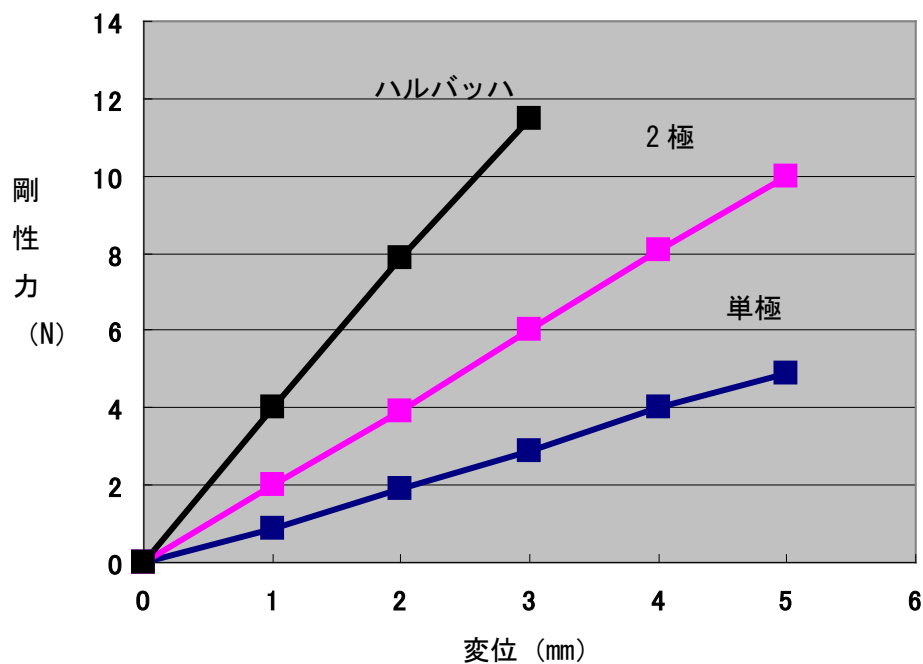


図 9 単極、2 極、ハルバッハ磁石の剛性力 (ギャップ 5mm)

図 9 に剛性力測定結果を示す。図からわかるように、単極磁石よりも 2 極磁石のほうが、剛性が高い。これは、図 2 と図 3 に示した磁場分布から分かるように、2 極のほうが dH/dx が大きいためと考えられる。

さらに、ハルバッハ回路がもっとも高い剛性力を示すこともわかる。これは、この回路が実質的な多極リングに相当し、それだけ x 方向の磁気勾配が強くなるためと考えられる。

(2) 回転トルク伝達機構の高度化

永久磁石間の結合により攪拌翼を駆動する技術はすでに存在する。この場合、回転軸を保持するためには、玉軸受等の機械式ベアリングが必ず必要となる。

機械式ベアリングは、接触動となるため、発塵をゼロにすることはできない。このため、医療品やバイオ製品など、高洗浄度を必要とされる製造現場においては、発塵の問題を回避することができない。

一方、超伝導のピン止め効果を利用すると、完全非接触の回転トルク伝達機構の構成が可能となる。図 1 に模式図を示す。バルク超伝導体は、下部のモータに結合した駆動永久磁石回路と磁気的にカップリングしており、モータによって駆動永久磁石が回転すると、それに同期して、バルク超伝導体も回転する。この際、バルク超伝導体は、液体窒素を充填したクライオスタット内で浮上回転することになる。

このバルク超伝導体の上部には、被駆動永久磁石回路があり、この回路もバルク超伝導体と磁気的にカップリングしている。そして、バルク超伝導体が回転すると、被駆動永久磁石回路も同期して回転する。

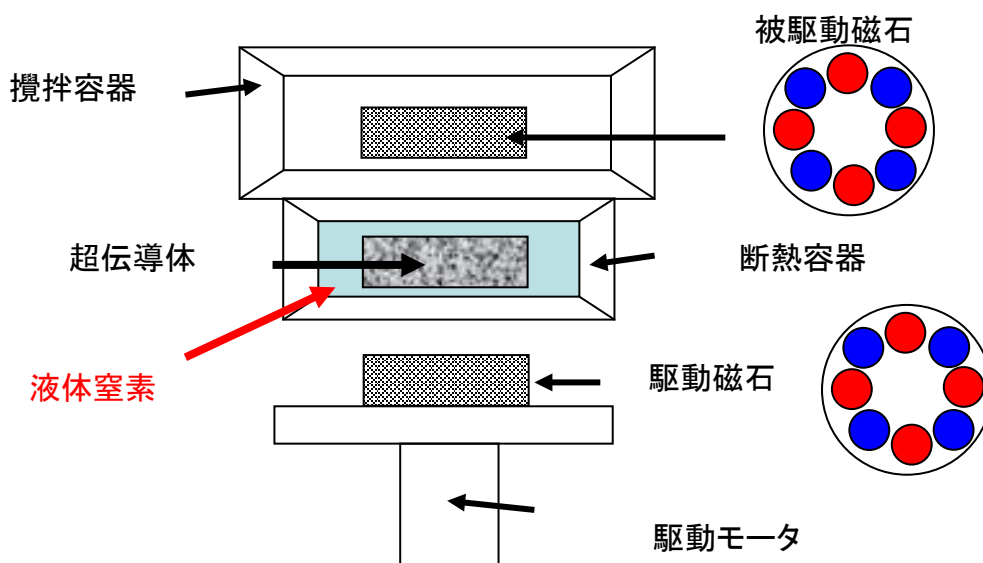


図 1 非接触型超伝導攪拌機の模式図

この際、上部に浮上している永久磁石回路に攪拌翼を付けると、攪拌翼が液体内に浮上して、液体を攪拌できる。このように、超伝導体と永久磁石の非接触の磁気カップリングを利用すると、回転トルクを完全非接触で伝達できることになる。

この場合の課題は、バルク超伝導体と、永久磁石回路をどのように設計するかである。

まず、バルク超伝導体については、Y-Ba-Cu-O 超伝導体を用いた。作製方法は、すでに報告した内容と同様である。ここで、超伝導体の対向面積を増やすために、扇形の形状に加工し、バルク超伝導体 8 個を図 2 のように配置した。この配置では、円柱状のバルク体よりも密にパッキングすることが可能となるので、永久磁石の対向面積を増やすことが可能となる。



図 2 回転トルク伝達機構用のバルク超伝導体の配列

ただし、このままでは 8 個のバルク超伝導体は、協働して回転しないので、接着剤により結合させるとともに、アルミ製の枠をはめている。

つぎに、このバルク超伝導体に対向して、トルクを伝達する磁石回路が必要である。

最も、単純な磁石回路は N 極と S 極の磁石を交互に回転軸のまわりに対象に配列した構造である。

この磁石とバルク超伝導体が磁気的にカップリングしていれば、この永久磁石回路を回転させると、バルク超伝導体も、それに同期して回転するはずである。これにより回転トルクを非接触で伝達することが可能である。

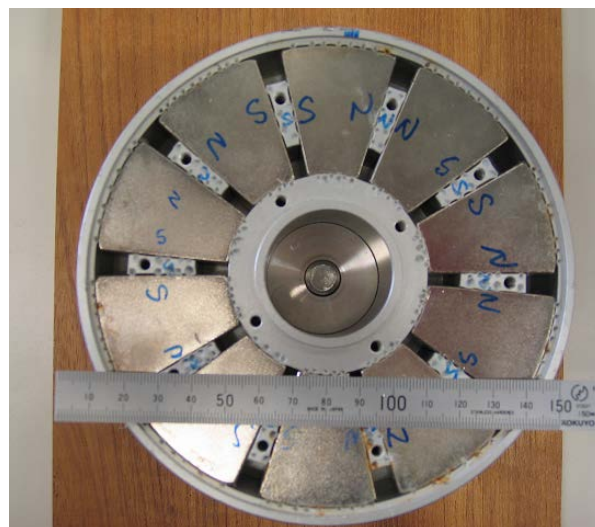


図 3 回転トルク伝達用磁石回路

攪拌機においては、粘性のある流体を攪拌翼により攪拌するため、回転体に粘性力が働く。この抵抗に対抗して、液体を攪拌するためには、十分、大きな回転トルクを非接触で伝達する必要がある。

このため、バルク超伝導体と対向する永久磁石の実効面積を増大させるとともに、磁場強度の増大および、回転方向において磁場が変化する部分での磁気勾配の増大が必要となる。図 3 は、その目的で設計した回転トルク伝達用の永久磁石回路である。基本的にはバックヨークとして鉄を使用し、厚さ 30mm の Fe-Nd-B 磁石を厚み 42mm のパッケージの中に埋め込む構造をとっている。

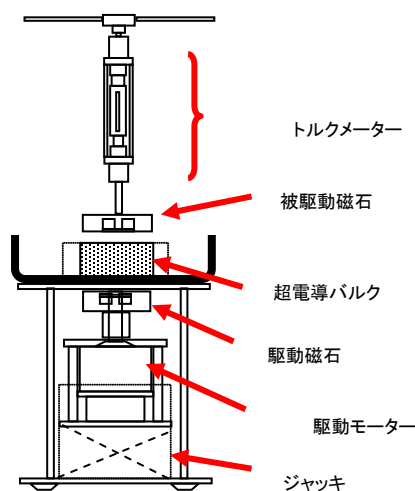


図 4 回転トルク測定のための実験設備

検証実験の結果、三者は完全非接触で、モータからの回転トルクを最上部の攪拌翼を取り付けた永久磁石回路に伝達されることが確認できた。

ただし、実際の操業にあたっては、粘性のある流体の攪拌となるために、抵抗力に伍して、十分攪拌する必要がある。例えば、ワクチン製造においては、100ℓの溶液を攪拌するには、安全係数も含めて、200Ncm程度のトルクが必要とされている。さらに、300rpmで回転する必要がある。

そこで、永久磁石回路とバルク超伝導体間の回転トルクを測定し、目標が達成できるかどうかの検証を行った。図 4 にトルク測定のための実験設備の模式図を示す。実際の操業を想定し、下部の駆動磁石を上昇させ、上部のバルク超伝導体と、さらに、その上部の永久磁石回路を浮上させた状態で、最上部の永久磁石の回転トルクを測定する。

回転トルクは、永久磁石回路によって値が変化する。表 1 に測定結果を示す。バルク超伝導体と上部の浮上磁石とのギャップによって回転トルクが変化していることが分かる。

表 1 回転トルク測定結果のまとめ

条件	超伝導体を固定し上部磁石のみを 浮上させてトルクを測定		
上部被駆動磁石 [kg]	4.0 (10 連・扇型磁石)		
バルクの重量 [kg]	2.48		
ギャップ (mm)	25	15	10
初期トルク [Ng・cm]	5	20	58
最大トルク [N・cm]	90	300	580

測定の結果、ギャップが 25mm では、回転トルクは 90Ncm しか得られなかったが、ギャップが 15mm で 300Ncm、ギャップが 10mm では、580Ncm が得られ、ギャップが 15mm 以下であれば、実用レベルの回転トルクを達成できることが明らかとなった。

(3) 回転機器の高速回転安定化技術

超伝導ミキサ（超伝導攪拌器）においては、溶液の攪拌する際の擾乱に耐えるために、大きな回転トルクが必要となるが、回転速度は 300rpm 程度と、それほど大きくはない。

一方、液体搬送用の超伝導ポンプにおいては、3000rpm を越える回転速度が要求される。

そこで、システム設計としては、図 1 に示すように、回転を伝達する機構と、浮上回転する機構を別々に制御する構造とした。

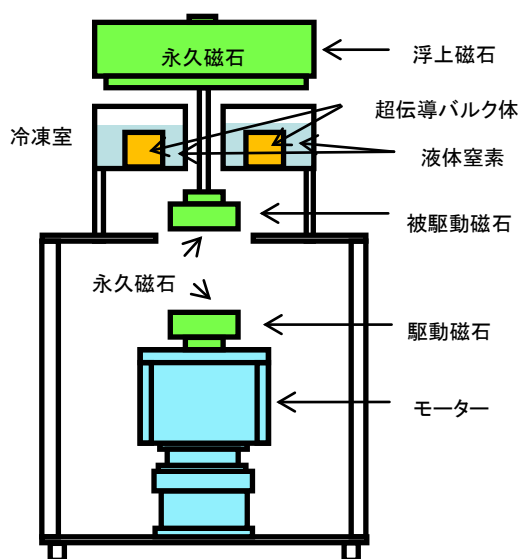


図 1 超伝導ポンプを意図した高速回転システムの模式図

インペラーを取り付ける上部の浮上磁石は、超伝導バルクによって浮上している。この部分では、回転が摩擦がないように、回転方向に均一なリング状磁石を搭載している。

この浮上回転する永久磁石回路には、中心軸を通して、機械的に別の回転磁石（被駆動磁石）が取り付けられている。こちらは、モータに設置された駆動磁石の回転トルクを伝達するために、駆動磁石と被駆動磁石ともに、回転方向に対して、NS 極が交互に配列するような構造をとっている。これにより、下部モータの回転が、これら磁石どうしのカップリングにより上部の浮上回転部に伝達されることになる。

下部にジャッキを使用して上下移動が可能なモータがある。モータには回転トルク伝達用の磁石が取り付けられている。その上方に、被駆動磁石があり、機械軸を通して、上部の浮上回転磁石に連結されている。

上部の浮上磁石は、エポキシ樹脂製のクライオスタットに設置されたバルク

超伝導体によって浮上している。

図2に回転トルクを伝達するための磁石構造を示す。予備実験の結果NS2極からなる構造が、遠距離においても磁気カップリングし、さらに、大きな回転トルクの伝達可能なことが分かったので、図のような構造を採用した。

NS4極以上の多極構造の場合には、ギャップが小さい領域においても、強い磁気カップリングを示したが、ギャップが大きくなると磁気結合力が低下し、回転が同期しないようになった。これは、多極構造では、表面にあるNS極が磁気結合してしまうためと考えられる。

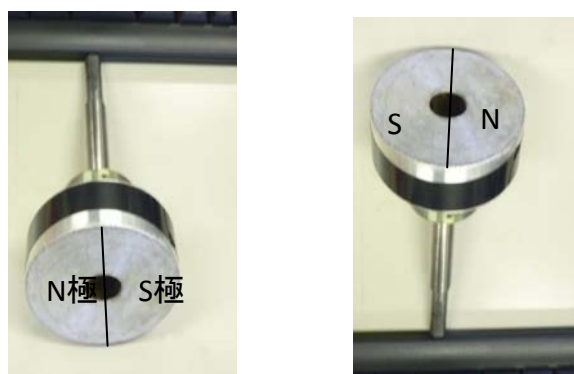


図2 駆動磁石と被駆動磁石。NS2極からなる。

つぎに、浮上用のバルク超伝導体を設置するガラス繊維強化エポキシ樹脂製のクライオスタットに、バルク超伝導体を6個設置した様子を図3に示す。

本実験に使用したバルク超伝導体はY-Ba-Cu-O系であり、TSMG法により作製した単ドメイン構造のものであり、直径が30mm、高さが15mmのものを使用した。



図3 クライオスタット設置したバルク超伝導体。

浮上用磁石としては、位置決め技術の項で図 1 に示した単極リングと NS2 極リングを用いた。

回転試験は、駆動磁石と被駆動磁石のギャップを変えながら、モータにより回転速度を徐々に上げながら、浮上回転磁石の回転数をモニターする方式で実験を行った。図 4 に、回転試験の結果を示す。

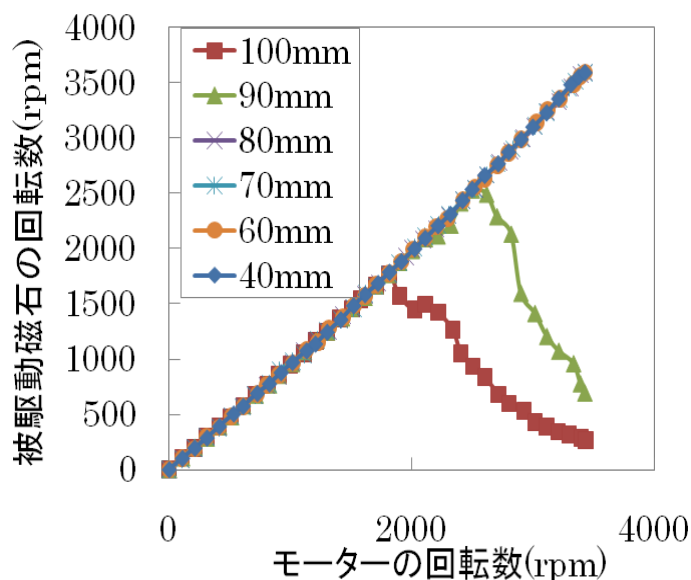


図 4 回転特性

図 4 に示したように、駆動-被駆動磁石間の距離が 100mm の場合には回転速度が 1800rpm で同期がはずれ、90mm の場合には、回転速度が 2500rpm で同期がはずれた。これは、磁石間の距離が大きくなると、磁気カップリング力が低下するためと考えられる。

ただし、磁石間距離が 40 - 80mm の場合には、回転速度 3500 rpm まで駆動磁石と被駆動磁石の回転は完全に同期しており、高速回転が可能であることが分かった。

また、回転速度を上昇させる際に、600 rpm、1000rpm 程度に共鳴周波数があり、回転が不安定になったが、回転同期はずれることがなく、危険速度を越えたと、ふたたび安定回転の状態に移行した。したがって、本システムは高速回転時にも安定であることが確認できた。

(4) 攪拌機及びポンプに最適な冷却システムの設計及び試験機の製作

超伝導体の冷却システムに要求される超伝導の位置決め機構などの性能を維持し、かつ作業能率に優れた冷却システムを構築できる設計を行い、試験機を製作しその冷却性能を試験実施した。

作業性や、超伝導回転機器の回転性能すなわち内蔵する円板状の高温超伝導バルク体群のピン止効果を最大限に発揮するために、低温容器内のバルク体と、室温部の永久磁石を内蔵した非接触の被回転体との距離をできるだけ短くするために、冷却機構の占める体積をできるだけ小さくすることが必要である。よって、バルク体の冷却部分が室温空間と熱的に絶縁できる真空断熱空間を、いかに狭く設計するかが重要となる。

なぜなら、高温超伝導バルク体の冷却温度は液体窒素温度 77.4 K (−195.6 °C) 以下の極低温であり、冷却システムのクライオスタット (断熱冷却容器) の断熱性能が不十分の場合、前記両者間にある容器表面に霜付きや結露が発生して、不具合が生じるため、断熱空間はむやみに狭くすることはできない。

一方、クライオスタット内部は真空断熱のために真空排気するが、真空断熱容器の円板状の常温の隔壁は、大気圧により凹状に変形する可能性がある。この変形により、常温の隔壁が内部の液体窒素容器や極低温のバルク体等の極低温部位に接触すると、大きな熱侵入が生じ、液体窒素が異常に蒸発したり、バルク体の温度が上昇し超伝導が消滅するリスクや容器表面に霜付きや結露が発生する。したがって、クライオスタットの強度設計も熱設計同様に重要である。

以上の事項を考慮して、設計した超伝導攪拌機用の冷却システムの構造を図 1 に示す。本システム内のクライオスタットにおける特徴的な構造は、高温超伝導バルク体群が液体窒素温度で回転する機能を有することである。

これは、超伝導バルク体のピン止め機能により、常温の攪拌機内で回転する回転翼に一体化された永久磁石の浮上機能と、回転駆動機能を同時に担保するためである。このため、超伝導バルク体群自身も超伝導温度を確保したまま回転する必要があるため、図に示すようにクライオスタットの真空断熱空間内に液体窒素容器を設け、前記液体窒素容器に液体窒素を供給する供給管と、侵入熱で蒸発した蒸発窒素ガスを排気する排気管を備え、離設の液体窒素槽とを、真空空間内で連通している。液体窒素容器は、エポキシ樹脂製の円筒体を多重同円心に組合せた荷重支持体により、クライオスタットの常温の底板から支持固定されている。

排気管端開口部は、液体窒素槽の上部気相部に設けており、本構造で排気管内に液体窒素が逆流することを防止でき、供給管との液深差でスムーズに液体窒素容器に液体窒素を供給することができる。一方、超伝導バルク体群の上部

室温空間に配置される攪拌機の容器の設置スペースを確保するため、超伝導バルク体群の回転中心線と液体窒素槽を納めた真空断熱容器の外壁とは、300 mm 以上離す必要がある。

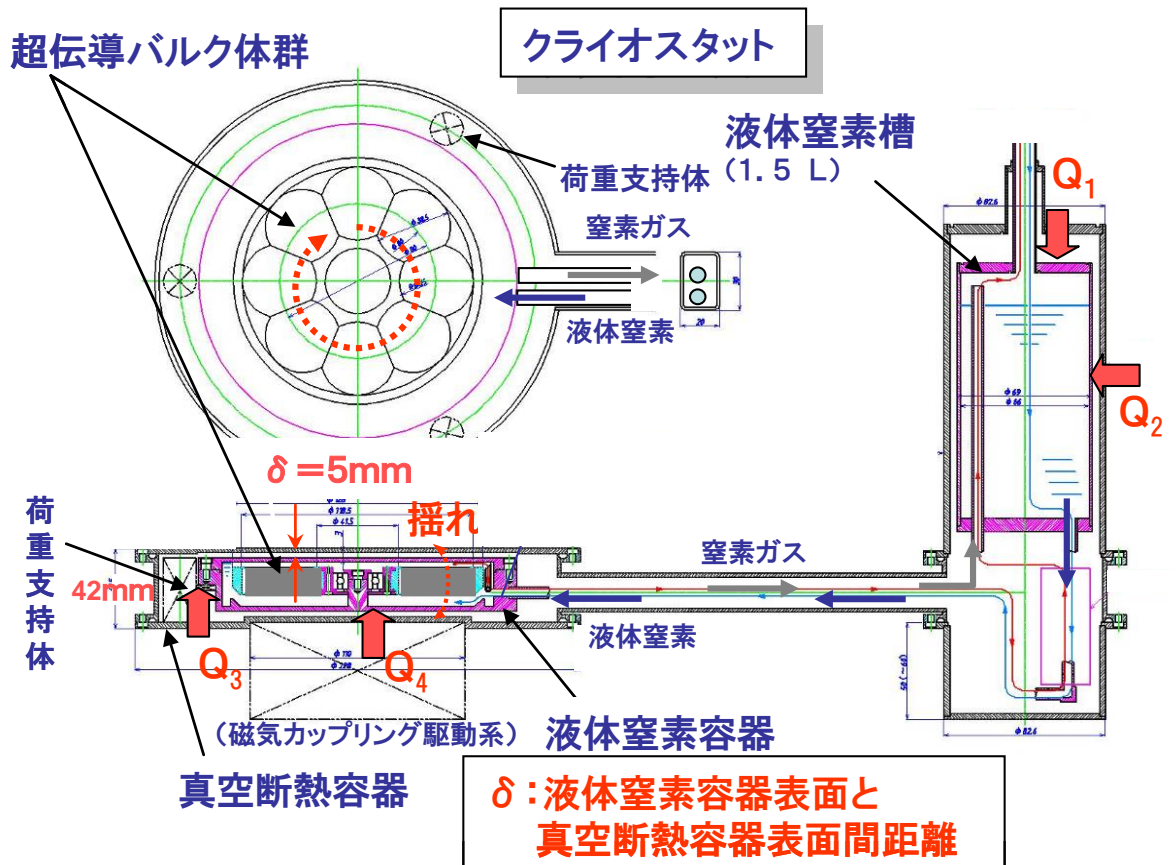


図1 超伝導ミキサ用冷却システムの構造

また、超伝導バルク体群が液体窒素容器内で浮上し回転する際、バネ定数を有したピン止めにより支持されているため、攪拌機内の被回転体である回転翼のトルクの変動に伴い、回転中に動揺する可能性が大であり、超伝導バルク体群が液体窒素容器の天井に接触し、回転数の変動や停止のリスクが考えられる。このリスク回避のために液体窒素中で軸受に固定支持する軸受回転構造を併用できる構造を検討する。

同様に、超伝導ポンプ用の冷却システムの場合、超伝導体は、クライオスタット内に静置されているので、ミキサの場合と比較して、設計は楽である。そこで、将来の運用において、さらなる安定操業が可能となる冷凍機搭載型の冷却システムを設計した。図2に超伝導ポンプ用の冷凍機搭載型冷却システム

の模式図を示す。

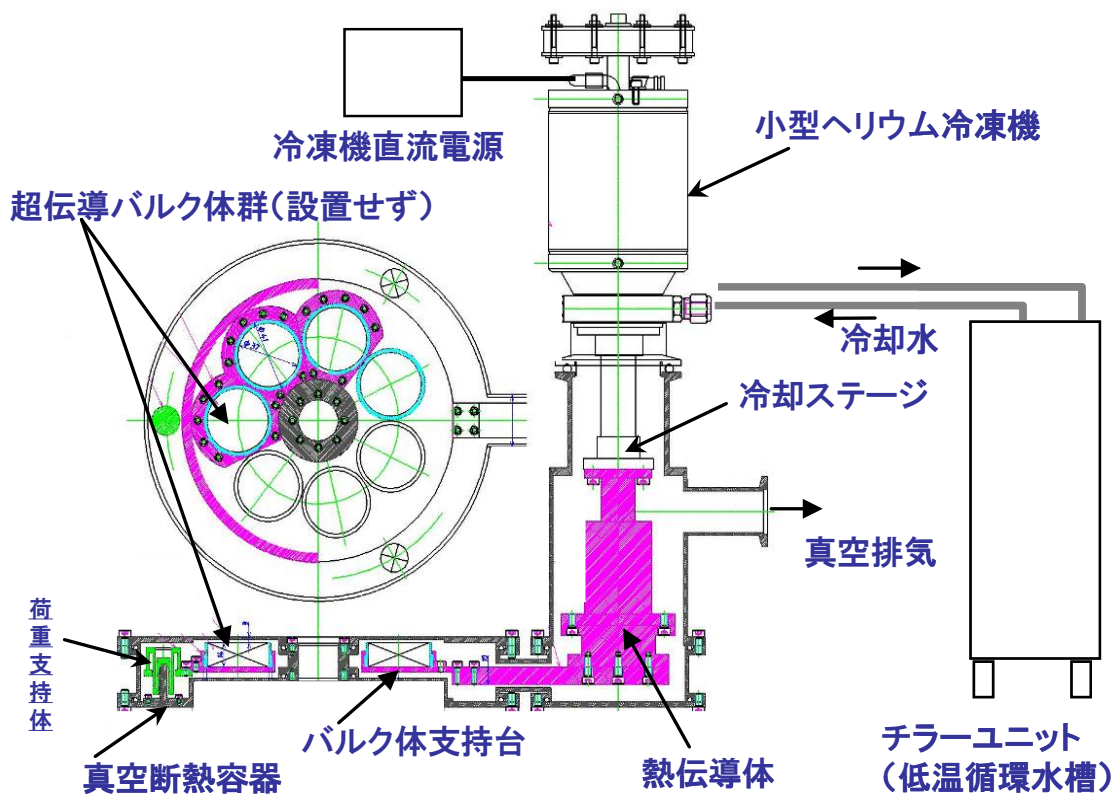


図2 超伝導ポンプ用の冷却システムの構造

図1 および図2 に模式図を示した冷却システムを構築し、バルク超伝導体を設置したうえで、冷却試験を行ったところ、超伝導冷却を問題なく行えることを確認した。

つぎに、永久磁石回路を実際にクライオスタット上に設置して浮上実験を実施したところ、いずれのシステムにおいても、浮上できることが確認できた。

6. まとめ

本研究開発では、超伝導のピン止め効果を応用した位置決め機構を有する非接触磁気浮上型回転機器の開発に共通な基盤技術となる“超伝導のピン止め効果を利用した位置決め技術の確立”を進めながら、この技術を適用するために“回転トルク伝達機構の高度化”、“回転機器の高速回転安定化技術の確立”、“超伝導体の冷却システムの開発”などの周辺技術開発を進め、回転機器開発に必要な要素技術の確立を行った。

各要素技術のまとめを行うと以下のようなになる。

① 超伝導体のピン止め効果を利用した位置決め技術の確立

超伝導のピン止め効果を利用した位置決め技術を確立するため、超伝導体回路のバルクサイズや配置などの諸条件が位置決め機構に及ぼす影響を特定した。具体的には、実現機で要求される外径を有するバルク超伝導体回路及び永久磁石回路を用いて、位置決め機構に及ぼす初期ギャップなどの因子の影響を明らかにした。

特に、高速回転にとって重要な、剛性力に及ぼす永久磁石回路の影響を調べ、単極リング磁石、NS2 極リング磁石、およびハルバッハ回路 (5 重リングに相当) が剛性力に及ぼす影響を調べ、回転の径方向の磁場変化が大きいほど、すなわち、ハルバッハ、NS2 極、単極の順に剛性力が大きいという結果が得られた。

② 回転トルク伝達機構の高度化

超伝導のピン止め効果を攪拌機などの回転機器に応用するために必要な回転トルク伝達機構を高度化するため、永久磁石回路が浮上高さおよび回転トルクに及ぼす影響を調べた。

まず、基本構成として、永久磁石—バルク超伝導体—永久磁石からなる系において、回転トルクを非接触で伝達できるかどうかを確認した。

そのうえで、回転トルクの測定と回転安定性について調べた。その結果、永久磁石回路を工夫すると、ワクチンなどの薬液 100ℓを攪拌するのに必要とされるトルク 200Ncm を越える 300Ncm と、また、実用化に必要なとされる回転速度 300rpm を達成した。

③ 回転機器の高速回転安定化技術

回転機器の高速回転安定化を図るために、回転トルクを伝達する機構と、バルク超伝導体を利用して永久磁石回路を浮上回転させる機構を分離し、これら機構からなるシステムを構成した。

回転トルク伝達機構は、NS2 極からなる一対の永久磁石を用いて、磁気的にカップリングさせ、モータに取り付けられた駆動磁石の回転を、インペラーを取り付ける浮上型永久磁石回路に機械軸で結合した被駆動磁石に非接触で伝達する機構を考案し、うまく作動することを確認した。

一方、浮上回転磁石は、バルク超伝導体の上に単極あるいは NS2 極のリング磁石を浮上させる機構とした。

本システムを使用して、回転試験を行ったところ、被駆動磁石と駆動磁石間のギャップが 40-80mm の範囲で、実用化に必要な 3500rpm の安定した高速回転を実現できた。

なお、回転速度を上昇する過程で、600rpm および 1000rpm 近傍の共鳴周波数近傍で大きなブレが生じたが、磁気カップリングははずれることなく、回転数を上昇することで、危険速度の回避が可能であることも明らかとなった。

④攪拌機及びポンプに最適な冷却システムの設計及び試験機の製作

バルク超伝導体のピン止め位置決め機能の効果向上のため、収納・冷却機構の省スペース化を図り、液体窒素温度以下の冷却温度を確保し、霜付きが無く、作業能率を含めた使い勝手の良い冷却システムを構築設計したのち、高性能なクライオスタットおよび冷却システムを試作し、性能試験を実施した。

バルク超伝導体のピン止め位置決め機能の効果向上のため、超伝導バルク体収納・冷却部高さは 42 mm で省スペース化を図った。攪拌機用クライオスタットの熱侵入量は 3.1 W であり、液体窒素補給 1 バッチ連続冷却運転が 21 時間（バルク体無し）を検証した。

ポンプ用クライオスタットの熱侵入量は 3.4 W、液体窒素負圧過冷却方式で冷却温度 75.6 K を検証した。また、ネオジウム永久磁石のピン止め浮上現象を確認した。液体窒素補給後の真空排気運転での 1 バッチ連続過冷却運転時間は 5 時間であることを検証した。

ポンプ用冷凍機一体型クライオスタットの冷却試験を実施し、バルク体支持台温度 46.8 K を確認し、装着される超伝導バルク体の温度は 52.8 K となる見通しを得た。

攪拌機用として、超伝導バルク体群を使用した液体窒素中での軸受回転機能を確認した。

以上の要素技術の開発により、超伝導ピン止め効果を利用した完全非接触型の超伝導ミキサおよび超伝導ケミカルポンプ基本要素が明らかとなった。つぎのステップとして、これら製品の実用化に進むべきと考える。