

(技術資料)

# 無冷媒型超電導マグネット

## Cryogen-free Superconducting Magnet



広瀬 量一\*  
Ryoichi Hirose



林 征治\*(理博)  
Dr. Seiji Hayashi



渋谷和幸\*(工博)  
Dr. Kazuyuki Shibutani

Cryogen-free superconducting magnets are becoming popular due to their simple operation, compared with the conventional liquid helium cooled magnets. Japan Superconductor Technology Inc. has manufactured more than a hundred cryogen-free superconducting magnets based on technologies developed by the R&D division of Kobe Steel. The company has the highest worldwide market share. This report describes the basic features of cryogen-free magnets, as well as related recent and future developments.

まえがき = 無冷媒型超電導マグネット<sup>注</sup>は、従来の液体ヘリウム冷却が必須であった超電導マグネットを誰でも簡単に扱える物に変えたことにより、急速に普及してきた。ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー<sup>株</sup>では、<sup>株</sup>神戸製鋼所技術開発本部で開発された技術をベースに、これまでに100台以上の無冷媒型超電導マグネットを製造販売し、世界でもトップのシェアを誇っている。

本稿では、無冷媒型超電導マグネットの構造を概説するとともに、近年の開発成果および今後の展望を述べる。

### 1. 無冷媒型超電導マグネットの特長と構造

超電導マグネットは高い電流密度を利用できることから、電磁石では発生できない高磁場や大空間に磁場が必要な場合に非常に有効である。しかし、その利用には液体ヘリウムによる冷却が必須であったため、専門知識を持った研究者による物理実験や化学分析などでのみ利用されてきた。

液体ヘリウムを用いずに小型冷凍機のみで超電導マグネットを冷却し運転する構想は1982年に検討されていた<sup>1)</sup>が、当時の小型冷凍機の能力やマグネットの励磁に必要な大電流を導入するための金属製リードからの熱浸入のため、実現できなかった。1990年代に磁性蓄冷材を利用して液体ヘリウム温度に近い4K近傍まで十分な冷却能力を有するGifford-MacMahon(GM)冷凍機<sup>2)</sup>、およ

脚注)「無冷媒型超電導マグネット」は、「伝導冷却超電導マグネット」「直立式超電導マグネット」「冷凍機冷却超電導マグネット」などとも呼ばれている。(社)低温工学協会編集委員会では、最近「小型冷凍機冷却超電導マグネット(cryocooled superconducting magnet)」を用いることを推奨することを決めたが、本稿ではジャパンスーパーコンダクタテクノロジー<sup>株</sup>の従来の公表資料や製品に合わせて「無冷媒型超電導マグネット(cryogen-free superconducting magnet)」を用いることとした。

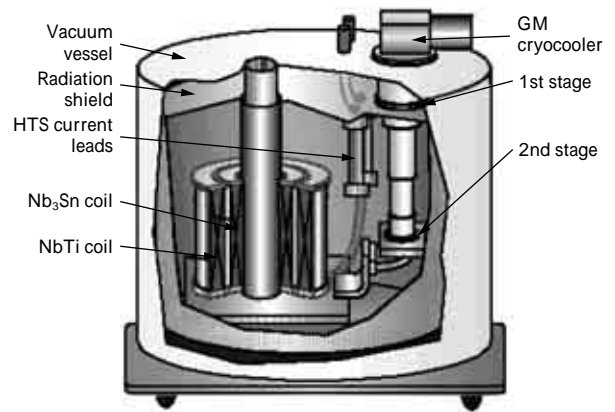


図1 無冷媒型超電導マグネットの構成  
Fig. 1 Schematic view of cryogen-free superconducting magnet

び70K近傍まで超電導性を示す酸化物超電導体(高温超電導体)を用いた電流リード<sup>3)</sup>が開発され、無冷媒型超電導マグネットが実用化されるに至った。

一般的な無冷媒型超電導マグネットの構成を図1に示す。冷凍機のコールドヘッドは2段あり、1stステージは外部からの熱輻射を遮蔽する熱シールドを冷却し、2ndステージは超電導マグネットに連結されてこれを冷却する構造である。冷媒を全く使用しないため、(1)ハンドリングが容易である、(2)自由に磁場軸を回転できる、(3)クリーンルーム内での運転も容易である、(4)磁場中心へのアクセスが容易であるなどの特長を生かし、光物性測定、電気化学反応、半導体デバイス開発、配向制御、物性測定、磁気共鳴、ジャイロトロン、磁気分離、構造解析など様々の分野で採用されている。

### 2. 高磁場への展開

#### 2.1 概要

前述のように、無冷媒型マグネットは寒剤を使用しな

\*ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー<sup>株</sup> マグネット部

いため、極低温機器の取扱いに慣れていない研究者や技術者に10T程度までの磁場を手軽に得られる機器として急速に普及してきた<sup>4)</sup>。しかし、従来の液体ヘリウム冷却のマグネットに比べて運転温度が高くなるため、13Tを超えるような高磁場では臨界電流密度の低下が著しく、マグネットの設計が困難であった。これを解決するため、複数の冷凍機を用いる<sup>5)-7)</sup>、冷凍能力の高いGM-JT冷凍機を用いる<sup>6)</sup>、複数の電源を用いて内層コイルと外層コイルの運転電流を変える<sup>5)-7)</sup>、などの工夫がなされてきた。しかし、そのことにより、無冷媒型超電導マグネット本来の特徴である取扱いの簡便さが損なわれ、十分普及するに至っていない。

我々はこれらの問題点を省み、本来の無冷媒型マグネットの簡便さを維持したままで高磁場化を目指すことをコンセプトに、室温ボア径52mmのサンプル空間に15Tの磁場を発生できる無冷媒型マグネット(以下、15T52mmボアマグネット)を開発した。マグネットは、通常の居



図2 15T52mm ボアマグネットの外観と寸法

Fig. 2 Outside view and overall size of 15T52mm cryogen-free superconducting magnet

表1 15T52mm ボアマグネットの仕様

Table 1 Specifications of 15T52mm cryogen-free superconducting magnet

Central field (guaranteed) (maximum)	15.0 T 16.1 T
Ramp time	30 min/15 T
Operating current	121 A/15 T
Field uniformity	< 0.1%/10 mmDSV
Initial cool down time	80 h
0.5 mT stray field	Axial: 4.2 m Radial: 3.3 m
Room temperature bore size	52 mm
Overall size (excluding cooler etc.)	820 mm dia. × 680 mm height
GM cryocooler	1.0 W @ 4.2 K/50 W @ 43 K 1 unit

Inductance : 107 H  
Stored energy : 780 kJ  
Charging voltage : 7.2 V

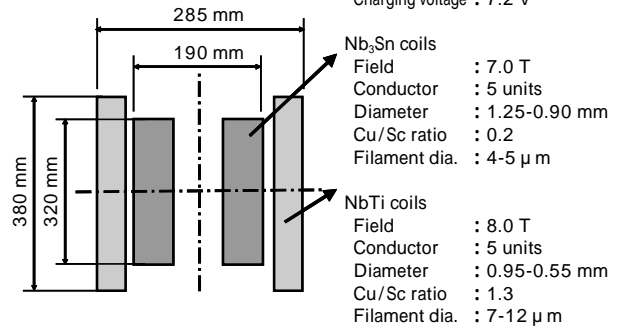


図3 15T52mm ボアマグネットのコイル構成と超電導線材の仕様  
Fig. 3 Coil layout and wire specifications of 15T52mm cryogen-free superconducting magnet

室に十分設置できるサイズであり、無冷媒型マグネットの簡便さを損なうことがないように、1台の冷凍機と1台の電源で冷却・励磁できる。本章では、その設計の概要と性能試験結果について概説する。

## 2.2 マグネット設計

今回開発したマグネットの外観と寸法を図2に、マグネットの仕様を表1に示す。また、コイル構成と超電導線材の仕様を図3に示す。マグネットは、1体のNb<sub>3</sub>Sn内層コイル、1体のNbTi外層コイルからなり、Nb<sub>3</sub>Sn・NbTiともに5種類の断面寸法の線材を経験磁場に応じて最適に配置して小型化を図っている。使用した線材の重量はNb<sub>3</sub>Snが43 kg、NbTiが63 kgであり、Nb<sub>3</sub>SnコイルはWind & React法(Nbフィラメントとブロンズマトリックスからなる線を巻線後に熱処理してNb<sub>3</sub>Snを析出させる方法)で作製した。それぞれのコイルは、樹脂真空含浸し、外周を銅円筒で覆って伝導冷却する。

マグネットの小型化と冷凍機の冷却能力を最適化して、15Tにおける臨界温度を5.2Kに設定した。小型冷凍機冷却超電導マグネットの簡便さを損なうことがないように、全コイルを直列に接続して1回路で通電し、出力125A×9Vの電源1台により30分で励磁できる。15T発生時の定格電流は121Aで、Nb<sub>3</sub>Snが7T、NbTiが8Tを発生する。

クエンチ保護は、コイルを8セクションに分け、各セクションにダイオードを並列に接続した回路を用いる<sup>8)</sup>。あるセクションでクエンチが発生した場合、そのセクションの電流が速やかにダイオードに分流し、巻線部内の局所的な発熱による破損を避けることができる。また、クエンチしたセクションの蓄積エネルギーの一部は隣接するセクションに転送され、電流が増加し電磁力も大きくなるが、各セクションのインダクタンスの分配を最適にすることによって、クエンチ中の過度な電磁力による破損を防いでいる。このようにしてマグネットが健全に保護される。ダイオードはマグネットと同じ低温部に置き、クライオスタット内部で閉回路を構成する。このことにより、マグネットと電源間の結線が切断するトラブルにおいてもマグネットは保護される。

マグネットは4.2Kで1Wの冷凍能力を有する2段式GM冷凍機1台で冷却される。熱バランスを図4に示す。

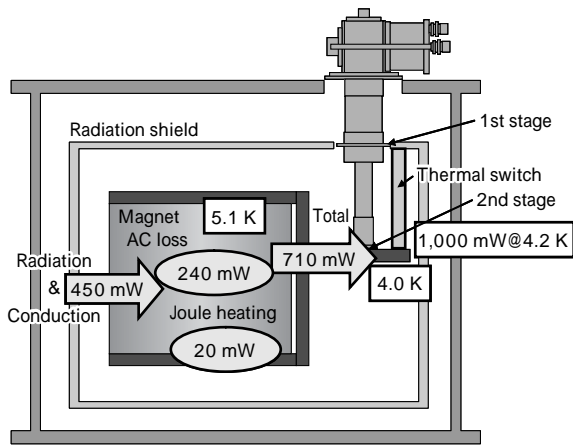


図4 15T52mm ポアマグネットの熱バランス

Fig. 4 Heat balance of 15T52mm cryogen-free superconducting magnet

熱負荷は、伝導・輻射による浸入熱 450mW，15T/30min (0.067A/s) 励磁時のコイルの交流損失は細フィラメント NbTi 線を使用することで 240mW に抑え、ジュール熱その他 20mW を加えて計 710mW である。冷凍機冷却端は 4.0K，マグネット温度は冷却経路が長い Nb<sub>3</sub>Sn コイルで最大値をとり 5.1K に達すると計算できる。また、無負荷時の熱負荷 450mW に対するマグネット温度は Nb<sub>3</sub>Sn コイルで 4.5K と計算できる。室温からの冷却時は窒素ガスを圧力調整して封入した熱スイッチを用いることで、初期段階の冷却には冷却能力の大きい 1 段目の冷凍機を活用する。これにより初期冷却時間は約 80 時間に短縮できた<sup>9)</sup>。

### 2.3 試験結果

マグネットは約 80 時間で最終到達温度 3.7K に冷却できた。まず 60min/15T の速度で励磁したところ、14.5-14.8T で 3 回のトレーニングクエンチの後 15T に到達した。クエンチ直前のマグネット温度は約 4.8K であり、線材の臨界温度より十分低いことからワイヤムーブメントによるトレーニングクエンチと推定される。その後、30min/15T の速度でクエンチすることなく 15T に到達した。このときのマグネット温度は 5.1K であり、熱バランス計算による推算値とよく一致した。

さらにマグネット温度が下がるのを待って励磁を続けた結果、15.5T(125A)，さらに 16.1T(130A)までクエンチすることなく励磁できることを確認した。

## 3. 産業分野への展開

### 3.1 概要

極低温機器の取扱いに慣れていない人でも手軽に高磁場を得られるメリットを生かし、産業用に無冷媒型超電導マグネットを利用する動きも近年急速に増えつつある。

図 5 に、無冷媒型マグネットの磁場/磁場空間サイズと用途の関係を示す<sup>10)</sup>。この用途分類から産業応用を明確に抽出することはできないが、磁気分離、磁気配向、金属相変態、バルク着磁などの一部が産業応用と推定される。これらのマグネットの特徴は、比較的低磁場、大きな磁場空間サイズを備えていることである。本

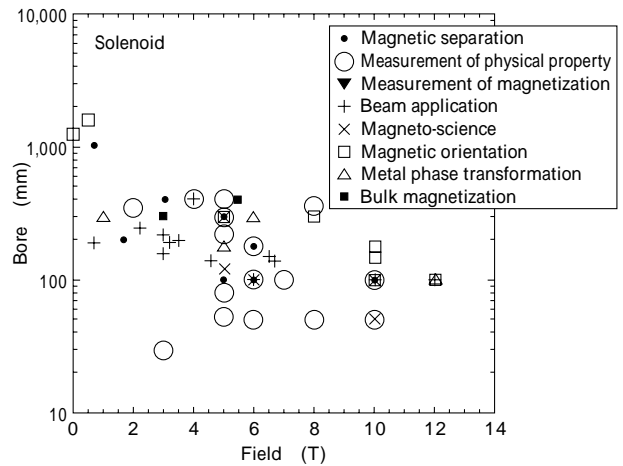


図5 無冷媒型マグネットの磁場/磁場空間サイズと用途の関係  
Fig. 5 Magnetic field/bore size and purpose of cryogen-free superconducting magnet

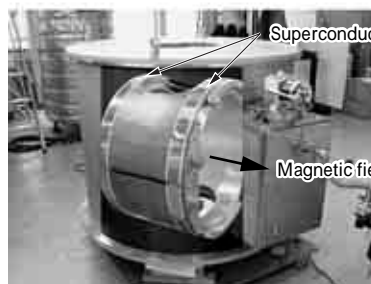
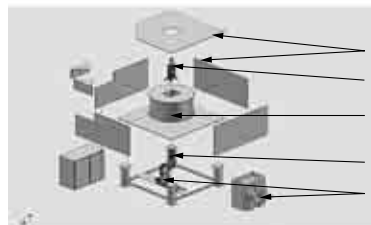


図6 MRAM 材料製造用磁場中熱処理装置の外観、内部構造および超電導マグネット(内部透視図)

Fig. 6 Outside and inside view of annealing equipment for MRAM and superconducting magnet cut model

章では、産業応用の現場で稼動するジャパンスーパーコンダクタテクノロジー(株)製品例を紹介し、概説する。

### 3.2 半導体材料磁場中熱処理用マグネット

図 6 は、次世代不揮発メモリとして期待される MRAM (Magnetoresistive Random Access Memory) 材料製造用磁場中熱処理装置の外観および内部構造を示す。装置の

中核となる超電導マグネットは軟鉄製の磁気シールドボックス内に設置され、310mmの常温スプリットギャップに1Tの均一磁場を発生させる。この磁場空間中でウェーハを熱処理し一方向に磁化させることで、メモリの材料を製造する。マグネットは1台の4K-GM冷凍機で冷却され、励磁20分、磁場保持90分、消磁20分のサイクルで運転される。図7に、この運転パターンを模擬した励磁試験の結果を示す。消磁に続く励磁直後に温度は最大約5.5Kに達し、続く励磁時には漸減して最大電流（最大磁場）到達時の温度は約5.3Kになる。

類似の応用分野として、ハードディスク磁気ヘッド材料の磁場中熱処理にも利用されている。

### 3.3 磁気分離用マグネット

図8は、カオリン鉱石から鉄分を除去し純粋な原料（高級紙・顔料・化粧品などに混合し白色度を高めるために使用される）を製造するための装置の外観を示す。装置の中核となる超電導マグネットは空芯の状態です。1,015mm×500mmの常温空間に最大0.6Tの磁場を発生させる。この磁場空間に多数のパイプを通した鉄芯を挿入し、磁場を約1.3Tに強化して用いる。パイプ中には金属メッシュが挿入されており、鉱石粉を含んだ懸濁水を流入させ鉄分をメッシュに吸着させて除去する。吸着さ

れた鉄分は消磁した後洗浄水を流入させて除去する。

装置を高効率で使用するためには短時間で励消磁を繰り返すことが必要である。マグネットは1台の4K-GM冷凍機で冷却され、励磁1分、磁場保持6分、消磁1分のサイクルで運転される。図9に、この運転パターンを模擬した試験の結果を示す。冷凍機低温端の温度は最大約5.5Kに達し、マグネット温度は最大約6.8Kになる。

類似の応用分野として、湖沼などの污水浄化や製紙工場の廃水処理にも利用されている<sup>11)</sup>。

### 3.4 産業分野への展開における今後の課題

産業分野で稼動する無冷媒型超電導マグネットの例を紹介したが、これらの産業用超電導マグネットに共通に見られる特徴として、前述のように低磁場/大磁場空間が挙げられる。これは産業用マグネットが元々銅線を水などで冷却して運転する常電導マグネットからの置換えであることに起因すると思われる。これは多くの研究用の冷凍機冷却型マグネットが液体ヘリウム浸漬冷却マグネットからの置換えであることと対照的である。

超電導マグネットへの置換えにおいて求められることは、常電導マグネットと同等の使用性である。現状では産業応用といっても特別なマグネットや冷凍機が使用されているわけではなく、研究用の物がほとんどそのまま

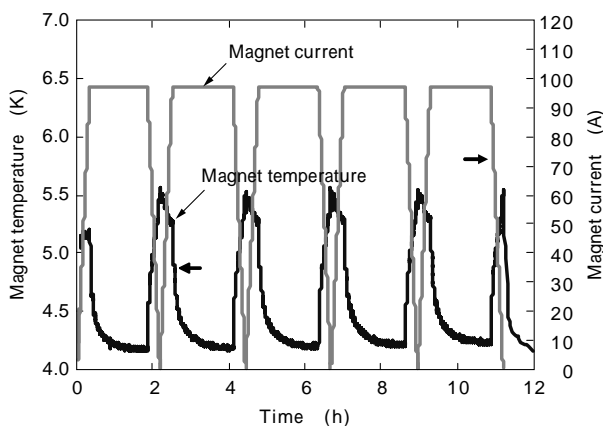


図7 MRAM 材料製造用磁場中熱処理装置の励磁試験結果  
Fig. 7 Test result of annealing equipment for MRAM

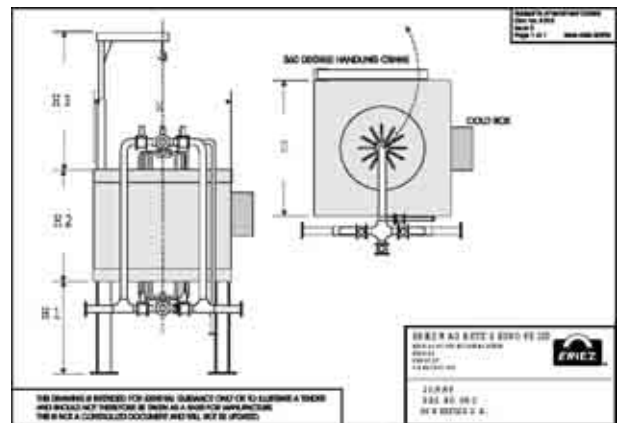


図8 カオリン原料製造用磁気分離装置の外観  
Fig. 8 Outside view of magnetic separation equipment for kaolin

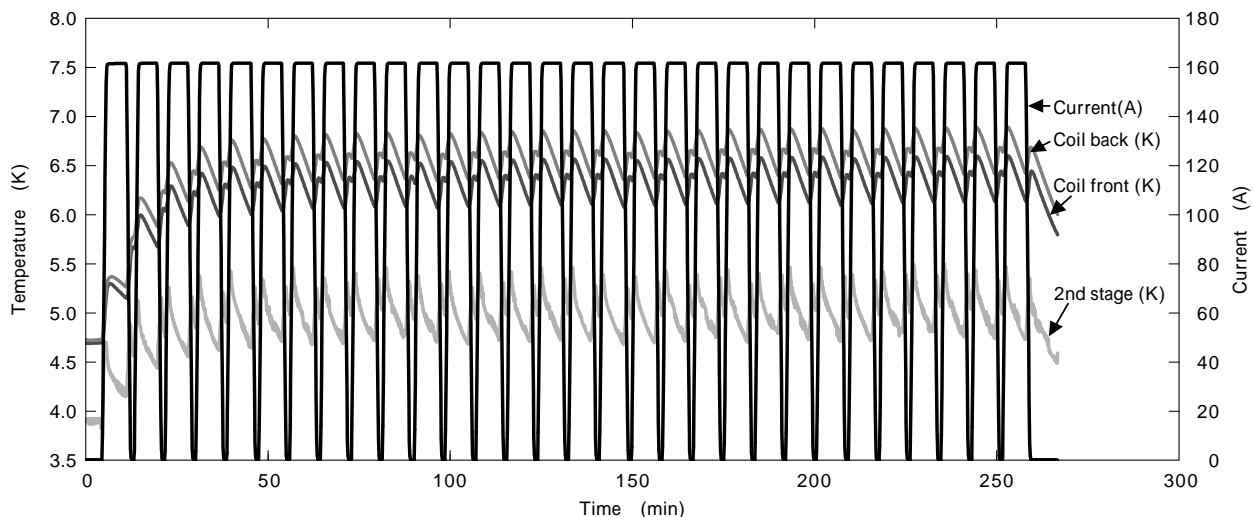


図9 カオリン原料製造用磁気分離装置の励磁試験結果  
Fig. 9 Test result of magnetic separation equipment for kaolin

流用されるにとどまっている。液体ヘリウム浸漬冷却マグネットから移行した研究者は、寒剤補充の手間が省けたことで使用性の向上を大いに感じることができ、常電導マグネットから移行した産業関係者にとっては、電力のみで運転できることは当然のことである。むしろ、ヘリウムガスや高真空の管理、メンテナンスの煩雑さなどがマイナス要因として受取られがちである。さらに産業用マグネットは、24時間休むことなく運転するケースがほとんどである。すなわち、日常の管理を意識しないで済むような高信頼性、堅牢性が重要である。また、定期メンテナンスの頻度の減少、簡素化も重要な要素になる。これは、メンテナンスそのもののコスト低減とともにメンテナンスのための機器の停止期間をできる限り少なくすることが、生産性の向上に直接つながるからである。

さらに、ここに挙げた例でも分かるように、産業用マグネットは磁気分離用のように劣悪な環境下や、半導体材料製造装置のように逆にクリーンルーム中に設置されるケースがほとんどである。

これら種々の条件に配慮したマグネットシステムを開発することにより、産業分野への無冷媒型超電導マグネットの需要が飛躍的に伸びるものと期待される。

むすび = 無冷媒型超電導マグネットの実用化にともない、従来よりも広い分野において強磁場下での新現象の発見・理解が「新磁気科学」として急速に進展しつつあ

る。さらに、産業分野に冷凍機冷却型超電導マグネットを利用する動きも近年急速に増えつつある。今後ともユーザーニーズを的確に捉えた開発を進め、超電導技術の実用化に貢献していく所存である。

産業用超電導マグネットの例として、半導体材料磁場中熱処理用マグネットの資料をご提供いただいた Despatch Industries 社の Mr. Dan Roach と、磁気分離用マグネットの資料をご提供いただいた日本エリーズ㈱の本間忠様に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) M. O. Hoening : IEEE Transaction on Magnetics, Vol.19 (1983) p.880.
- 2) 橋本 穂洲ほか : 低温工学, Vol.31, No.4 (1996) p.131.
- 3) 植田和雄ほか : 低温工学, Vol.30, No.12 (1995) p.552.
- 4) K. Shibutani et al. : Proc. of electromagnetic processing of materials in the 3rd millennium, Chamonix (2001) p.89.
- 5) T. Kurusu et al. : IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol.14, No.2 (June 2004) p.393.
- 6) T. Hasebe et al. : IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol.14, No.2 (June 2004) p.368.
- 7) K. Watanabe et al. : Jpn. J. Appl. Phys., Vol.37, No.10A (1998) p.L1148.
- 8) O. Ozaki et al. : IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol.5, No.1 (March 1995) p.483.
- 9) 神門 剛ほか : 低温工学, Vol.34, No.5 (1999) p.230.
- 10) 佐藤明男 : 2002 年度第 6 回冷凍部会資料 .
- 11) S. Nishijima et al. : IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol.16, No.2 (June 2006) p.1142.