理研超電導リングサイクロトロン用セクター電磁石の開発 —基本設計—

川口 武男, 奥野 広樹, 後 藤 彰, 密本 俊典,
富中 利治, 大西 純一, 矢野 安重

理化学研究所 RI ビームファクトリー計画推進室 和光市広沢 2-1

(1999 年 3 月 29 日受理)

Development of Sector Magnets for the RIKEN Superconducting Ring Cyclotron —Basic Design—

Takeo KAWAGUCHI, Hiroki OKUNO, Akira GOTO, Toshinori MITSUMOTO,
Toshiharu TOMINAKA, Jun-ichi OHNISHI and Yasushige YANO

RIBF Project Office, The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN),
2-1 Hirosawa, Wako 351-0198

(Received March 29, 1999)

Synopsis:

Superconducting sector magnets are to be the main components of the superconducting ring cyclotron for the RIKEN RI beam factory. A full-scale prototype sector magnet is being developed and constructed. One of the critical points of the design is how to support the huge magnetic force exerted on the superconducting main coil. A cold-pole arrangement is adopted as the solution to this problem. Unbalanced magnetic forces were measured using 1/6-scaled-Cu/Fe magnets. A cryogenic stabilizing method is applied to make the main and trim coils quench-free. The whole structure, magnetic force and its support structure, quench protection, eddy current loss in the cold-pole, and helium cooling system are described.

Keywords: superconducting magnets, structures, magnetic force, design, cooling

1. はじめに

理化学研究所では次世代の重イオン科学研究のための世界最強の RI ビームファクトリー¹⁾を建設中で、その主要加速器の 1 つである超電導リングサイクロトロンは、6 台の超電導セクター電磁石、4 台の高周波共振器、および入射/取出しの電磁チャンネル等から構成される。超電導セクター電磁石は 2 種類の超電導コイルを配置した C 形鉄ヨーク付きの電磁石で、ビーム軌道上に最大 4.5 T の磁界を発生する。セクター電磁石 6 台を配置したリングサイクロトロンの直径は 20 m、総重量は鉄ヨーク込みで 5,000 トンに及ぶ。メインコイルに働く巨大な電磁力を支持するためにコールドポール方式²⁾を採用し、クエンチフリーとするため

に冷却安定化コイルとした。現在、等倍のプロトタイプ電磁石を開発製作中であり、引き続き実機電磁石の製造を開始する予定である。本論文では、セクター電磁石の基本設計として、全体構造、電磁力とその支持構造、クエンチ保護、コールドポールの渦電流損失、ヘリウム冷却系について述べる。超電導コイルとその冷却安定化については、別論文に記載した。

2. セクター電磁石の諸元および構造

Table 1 および Fig. 1 にセクター電磁石の主要諸元と断面図を示す。前段サイクロトンからの重イオンビームは、入射用の電磁チャンネルにより平均半径 3.56 m の第 1 平衡軌道に誘導され、ビームチェンバー内を数百回周回しながら高周波共振器により加速を

Fig. 2 Distribution of the magnetic field (B_z) calculated on the mid-plane.

受け、平均半径 5.36 m の最終平衡軌道から取出し用電磁チャンネルによりサイクロトロン外に誘導される。ビームチェンバーとクライオスタットの真空は分離した。その理由は、ビームチェンバーに要求される超高真空 (10^{-6} Pa) とクライオスタットの高真空 (10^{-4} Pa) を仕切ると共に、ビーム実験側に真空破壊が生じた場合にクライオスタットの真空を保護するためである。

コイルは、最大 4 T の主磁界を発生させる超電導メインコイル、必要な等時性磁界*に対して 10^{-3} の誤差まで磁界補正を行うため最大 1 T の傾斜磁界を作る超電導トリムコイル、さらに 5×10^{-5} までの補正のために最大 0.02 T を発生させる常電導トリムコイル、の 3 種類から成る。Fig. 2, 3 に、メインコイルによる磁界分布と磁界強度の起磁力依存性を示す。

磁気回路の鉄心部分はコールドポールとヨークから構成される。このセクター電磁石の大きな特徴は、コイルに加わる巨大な電磁力を支持するためにコールドポール配置を採用したことである。超電導メインコイルはメインコイル容器を介してコールドポールの外周に、超電導トリムコイルも同様にトリムコイル容器を

* サイクロトロン内の加速粒子は磁界で曲げられながら高周波共振器で加速され渦巻き状に数百ターン回転する。すべてのターンの回転周期を同じくするための磁界分布をいう。

Fig. 3 Calculated B_z versus the electromotive force of the two main coils.

介してコールドポールの表面に設置され、共に液体ヘリウム温度まで冷却される。上下のコールドマス（超電導コイルおよびコールドポール）間に加わる最大 1,000 トンの電磁吸引力は、コールドポール両端 2 箇所のポールリンクで支持される。この電磁力により、板厚 465 mm のコールドポールに 1.5 mm のたわみが発生すると予測される。ヨークは、上ヨーク、下ヨーク、側ヨークおよびヨークリンクから構成される。1 台の全重量は 730 トンで、運搬制限上から多数の板を積層した構造とする。上下ヨーク間の電磁吸引力 3,000 トンを、側ヨークとヨークリンクで支持する。この電磁力による上下ヨークのたわみは、各々 1 mm と予測している。

上下コールドポール間のギャップ長さは 40 cm で、この間に室温のビームチェンバー、SI (Superinsulator), 80 K 熱シールド、超電導トリムコイル/容器、が設置される。常電導トリムコイルはビームチェンバーの 2 重壁間（大気雰囲気）に設置される。コールドポールとヨーク間には 12 cm のギャップを置き、この間に 80 K 熱シールドおよび 5 cm 厚さの真空容器壁が配置される。重量 60 トンのコールドマスは、4 本の F_r サポート、2 本の F_θ サポート、および 8 本の F_z サポートにより断熱支持される。これらサポートは地震時の荷重および不平衡電磁力に耐えるよう設計している。また、低温時でも大気側からコールドマスの位置調整が可能な構造とする。 F_θ , F_z サポート

の断熱部分はチタン合金パイプ、 F_r サポートはステンレス合金製の3重カラム構造とした。80 K熱シールドは、コイル電流遮断時の渦電流による電磁力を小さくするためにステンレス製とし、冷却管を配置する。

1 セクター電磁石のクライオスタット真空容器は、幅5 m、奥行き3.3 m、高さ1.6 mの大きさの箱で、上、中、下の3部分に分かれており、現地でのコールドマスとクライオスタットの組立時に、相互を溶接で結合する。中真空容器にはビームチェンバーが一体化されている。

3. 電磁力と支持構造

3.1 コイルに働く電磁力とその支持構造

最大起磁力6 MA/2 コイルの超電導メインコイルには巨大な電磁力が働く。コイル1台の水平面に働く力（いわゆる拡張力）の合計（スカラー和）は4,000 トンに及ぶ。上下コールドマス（コイルおよびコールドポール）が引き合う力は1,000 トンで、これらコイルに働く電磁力は、コイル容器を介してコールドポールにより支持される。

コイル容器（オーステナイトステンレス鋼）とコールドポール（純鉄）は、室温から極低温までの熱収縮率が0.1 %異なるため、両者を溶接やピンで結合すると大きな熱応力（せん断力）が発生するので、これを防止するためにミクロ的に見たスベリ構造が必要となる。プロトタイプにおいては2種類の結合構造を開発中である。その1つは長い高強度ボルトを用いて両者を結合する方法、他の1つはフックで両者を結合する方法である。Fig. 4 は、最大電磁力が加わった場合の両方のコイル容器の変形図と発生応力を示す。2つの方式では製作手順も異なる。ボルト方式では、C形のコイル容器を作っておき、これをコールドポールに組みボルトで結合し、コイル巻線を行い、外周から厚さ60 mmの側板をC形容器にボルトで取り付け、最後に厚さ10 mmの板を真空気密溶接する。フック方式では、L形容器にコイル巻線を行い、厚さ65 mmの側板をL形容器に電子ビーム溶接（EBW）で取り付け、次に75 mmの外ふた板をEBWで取り付けてコイル容器を閉じ、その後コイル容器の内周を機械加工しコールドポールと組み立て、最後にフックをコイル容器に溶接する。両方式とも、電磁力に耐え得るかどうかの強度試験を行った。ボルト方式については、高強度ステンレス鋼 A286 で製作されたボルトと純鉄ナ

Fig. 4 Deformation and stress on the two main coil vessels by the electromagnetic forces.

ットの組合せで、極低温での1万回の繰り返し疲労試験を行って破壊しないことを確認した。フック方式については、最大応力発生部であるコイル容器コーナー部を模擬した等倍の試験片を用い、1万回の繰り返し疲労試験を行って問題がないことを確認した。さらに、フック部の詳細応力解析を行い、安全率を確認するために純鉄材の疲労強度試験を実施中である。

3.2 不平衡電磁力とその支持構造

コイルおよびコールドポールには半径方向の不平衡電磁力 F_r が働く。これは、a)コイル／ポールとヨークの形状が半径方向に非対称であることによる力、b)隣のセクター電磁石による力、の合算したものとなる。b)の隣のセクター電磁石による力は本質的に発生する力で、隣のコイル同志が反発する力の分力として外径方向に押し出す成分である。従って、 F_r を減らすためには、a)の力を内径側に向かわせること

Fig. 5 A photograph of the 1/6-scaled model magnet for magnetic-force measurement.

が必要となる。このために、コイル外径近辺のヨークに比較的深い切り込みを設け、かつ、ヨークリンクを磁性材とした。最大起磁力6 MA/2 コイルでの電磁石1台あたりの F_r の計算値は100 トンである。この F_r は4本の F_z サポートで支持するので、その大きさはコイル系への熱侵入に大きく影響する。さらに、 F_r によりコールドマスが半径方向に移動するとビーム軌道が変化してしまうので、この移動量を1 mm 以下にすべく F_r サポートの剛性を設計した。垂直方向の不均衡電磁力 F_z は上下8本の F_z サポートで支持する。この力は偏心と共に増大する離心力であるので、構造支持系のバネ定数を偏心電磁力係数（単位偏心量あたりの力）より大きくしておかないと偏心は不安定になり、コイル/ポールがヨークにぶつかるまで偏心してしまう。3次元の構造計算を行った結果、真空容器の上下フランジで F_z サポートを支持した場合、支持系のばね定数は十分な大きさを持ってないことが判った。そこで、 F_z サポートの室温側支持端をヨークで支持することにした。周方向の偏心電磁力 F_θ は2本の F_θ サポートで支持する。この偏心電磁力は比較的小さいので、 F_θ サポートの強度設定は地震時の荷重により決定した。

3.3 縮小モデルによる不平衡電磁力の測定

r 方向不平衡電磁力 F_r は、6セクター配置と1セクター配置では方向も値も異なること、また、寸法に敏感なことが3次元電磁力計算で予測された。さらに、計算精度の不確かさが問題となった。6セクター配置での F_r の計算値100 トンは、水平方向拡張力8,000 トンに対してわずか1%程度の差分力であり、計算精度により方向も大きさも変化する。計算精度の

Fig. 6 Measured results of the current and magnetic field (B_z) on the one 1/6-scaled model arrangement.

例として、1セクター配置でヨーク部分を空気に置き換えてコールドマスに加わる F_r を計算すると数十トンの値が出るが、これは本来0なので、計算誤差である。計算誤差がいくらあるかの判断ができないことと、これら電磁力の重要性を考慮し、電磁力測定を行うこととした。これまでに経験した銅コイルを用いた電磁力に関する実験^{3,4)}を参考にし、銅コイル/ポール/ヨークからなる縮小モデル電磁石を液体窒素温度に冷却し、パルス通電で高磁界を実現して電磁力を測定することとした。励磁電源としては5,000 A、750 V定格の大型直流発電機を使用する。電源容量、遮断器容量、および銅コイルの温度上昇制限から、縮小モデルの最適サイズを検討し、実機の1/6とした。大きさを1/6にすると、実機と同等な磁界を発生させるためには実機の6倍のコイル電流密度としなければならない。電源電圧の制限から、縮小モデルの発生磁界の目標を実機の90%とした。この時、縮小モデルのメインコイルの電流密度は180 A/mm²に達する。縮小モデル電磁石は測定用電磁石1台と隣接電磁石2台を製作し、測定用電磁石1台のみでの測定（1セクター配置）と、測定用電磁石1台と隣接電磁石2台の組み合わせ（3セクター配置）の2ケースについて電磁力を測定した。また、 F_r については超電導トリムコイルの影響も大きいので、測定用電磁石にはトリムコイルも設置している。

Fig. 5は、測定用電磁石1台配置での室温予備試験

Fig. 7 Comparison of the unbalanced magnetic force (F_r) between the calculated and measured values converted to the real magnet on one sector arrangement.

時の写真を示す。測定用電磁石のコイル/ポールは、 z 方向 8 本、 θ 方向 2 本、 r 方向 4 本の計 14 本のロッドでヨークから支持され、それぞれのロッドに貼りつけた歪ゲージにより、コイル/ポールとヨーク間に働く電磁力を測定する。パルス通電によりポール/ヨークに生じる渦電流と製作性の両者を考慮し、ポールおよびヨークは 25 mm 厚さの板を積層して製作した。これら一連の試験は 1999 年 1 月に工場にて完了したところで、現在、すべてのデータ解析は終わっていないが、代表例として 1 セクター配置での電流/磁界波形と、 r 方向不平衡電磁力の計算値/測定値の比較を、それぞれ Fig. 6 および 7 に示す。Fig. 7 のトリムコイルなしでの計算値と実測値を比較すると、最大値部分で約 2 倍の差異が認められる。これらの測定データから、コイル断熱支持の最終仕様を決定する予定である。

4. クエンチ時のコイル保護

このセクター電磁石は冷却安定化を施しているので基本的にはクエンチフリーであるが、運転ミスや突発的な真空劣化等によって起こるヘリウム液面低下や温度上昇によるクエンチは想定するべきであり、クエンチ時のコイル保護は重要な問題である。Fig. 8 に、6

Fig. 8 A protection circuit of the main coils for the six sector magnets.

セクターの超電導メインコイルのクエンチ保護回路を示す。6 セクターを 2 分割保護にすることにより、電流遮断時の 1 回路あたりの消費エネルギーを総蓄積エネルギーの半分に低減できる。遮断時には 2 回路間に電流アンバランスが生ずるので、 θ 方向に不平衡な電磁力を発生させないように、セクター 1 台とびに直列接続となる保護回路としている。3 セクター/3 セクター間の電磁結合係数 k ($k = \text{相互インダクタンス } M / \text{自己インダクタンス } L$) の計算値は 4 % と小さく、2 回路間のエネルギー移動は無視できる。

ここでは、メインコイルについてのクエンチ保護解析について述べる。Fig. 9 は計算回路の模式図を示すもので、電流遮断後の状態を示す。6 コイル (3 セクター) 中の 1 コイルのみがクエンチした場合を考える。この計算ではノーマル領域を固定し、1 コイル容積に対するノーマル領域の容積比率 Fixed Normal Zone Ratio (NR) を 0~1 まで変化させ、かつ、保護抵抗の値を変えて導体温度上昇の計算を行った。結果を Fig. 10 に示す。図に示す計算結果は、導体自身と導体間ヘリウムガス (1 kg/cm²G と仮定) の両者のエンタルピーを考慮したものである。NR=0 の計算結果は、いわゆるホットスポットモデルに相当する。液面低下時のクエンチを想定すると、ノーマルが

Fig. 9 A calculation model for quench protection analysis.

Fig. 10 Maximum temperatures calculated for the main superconducting wire at coil quench.

ガス層部分に留まりノーマル部容積が小さいことが考えられるので、温度上昇については $NR=0$ の計算結果を保護設計に採用することにした。Fig. 10 の計算結果によれば、保護抵抗 R_p が 0.1Ω の場合は導体が焼損する危険性を示す。現在採用しようとしている $R_p=0.3 \Omega$ では、導体最高温度の計算値は 210 K である。次にコイルに加わる最高電圧を検討する。この場合は電圧の高く出る $NR=1$ の場合、すなわち 1 コイル全体がノーマルになった場合を考えておくことが安全設計である。Fig. 11 は、 $R_p=0.3 \Omega$, $NR=1$ での

Fig. 11 Changes of the voltage and temperature calculated for the main coil in the case of $NR=1$.

コイル電圧と導体温度の計算結果を示す。ここで、 V_c は実際にコイルに加わる電圧である。 V_{293K} は室温ヘリウム中における必要な絶縁耐力を求めるためのものである⁵⁾。すなわち、ヘリウムガス中の放電電圧のガス温度の依存性⁶⁾を考慮して、計算された V_c (導体/ガス温度 T) を、室温ヘリウムガス中での放電電圧に換算したものである。メインコイルの室温ヘリウムガス中での耐電圧仕様は、計算値 $V_{293K}=550 \text{ V}$ の 2 倍の $1,100 \text{ V}$ とした。室温ヘリウムガス雰囲気を設置されるパワーリードや電圧タップについては、最大端子電圧 $V_t=1,500 \text{ V}$ ($=5,000 \text{ A} \times 0.3 \Omega$) の 1.5 倍の $2,250 \text{ V}$ を耐電圧仕様とした。

トリムコイルの保護回路については、メインコイルの磁気蓄積エネルギーがトリムコイル側に移動しないように、回路の時定数をメインコイルのものより充分小さくしておくことが必要である。ここでは回路等の記述を割愛する。

さらに、コールドポールの渦電流の影響、クエンチ検出の電圧感度と遮断遅れ、保護動作の信頼性等を考慮して最終的な保護回路の仕様を決定していく。

5. コールドポールの渦電流損失

不純物の少ない金属の電気抵抗率は極低温で急激に小さくなるがよく知られている。各セクター電磁石間の磁化特性のばらつきを小さくするためにコールドポールには純鉄の使用を予定しており、すでにプロトタイプのコールドポールは完成している。励磁電流

アップ、ダウン時のコールドポール内の渦電流損失が懸念されるため、次のような見積もり計算を行った。コールドポール内の磁界分布を同様とし、渦電流による減磁効果を考えない場合の渦電流損失 W は、次式で計算できる。

$$W = \alpha [\pi R^4 H (dB/dt)^2 / 8 \rho]$$

ここで、 R ：ポールと同断面積となる円柱の半径、 H ：ポールの高さ、 ρ ：電気抵抗率、 dB/dt ：ポールの断面に垂直な磁界の時間変化率、である。[]中の式は円柱の渦電流の解析計算式を示す。 α は実際のポール形状での損失を求めるための換算係数で、変動磁界が作る渦電流の式 $\text{rot}(\rho J) = -dB/dt$ と、電流が作る磁界の式 $\text{rot}(\mu B) = -J$ の相似性を利用して、一般的な2次元定常磁界計算で計算できる。すなわちポールを導体とみなし、断面に垂直に均一電流を流した場合に導体内に発生する磁界が渦電流に相当するので、[磁界強度の2乗]と[導体の透磁率]をかけたものを面積分すれば、これが渦電流損失に相当する。Fig. 12 は、ポール断面の半分に均一電流を流した場合の磁界ベクトル図を示す。この等価計算を行った結果、円柱半径 $R=1.25$ m に対し、換算係数 α は 0.65 となった。

各諸元を入れて渦電流損失を以下に試算してみる。ポール高さ $H=0.465$ m、2時間の励磁アップとして平均磁界変化率 $dB/dt=4.5$ T/(3,600 s $\times$ 2 h) = 0.625×10^{-3} T/s、室温での純鉄の電気抵抗率 $\rho_0=1 \times 10^{-7}$ Ω m、磁気抵抗効果を見捨てた極低温電気抵抗率 ρ は ρ_0/RRR となる。RRR は残留抵抗比である。たとえば、RRR=100 として計算すると、コールドポール1台あたりの渦電流損失 W は 113 W となり、6セクター分では 1,350 W と、定常熱負荷を上回る渦電流損失となる。実験室で作られた純度の高い材料の電気

抵抗率測定例^{7,8)}では、RRR=100以上の高い値が報告されているが、測定された材料の不純物成分が明確でなく、実際のポール材のRRRを推定できない。そこで、プロトタイプのパール材について極低温電気抵抗を測定した。結果をFig. 13に示す。RRRは約10であり、上記文献値より1オーダー以上低い値であった。今回測定したパール材の純度は99.8%で、不純物の重量%は、C:0.01以下、Si:0.01、Mn:0.09、P:0.007、S:0.004、Cu:0.02、Cr:0.03、Mo:0.01、Al:0.015、N:0.003、である。測定結果のRRR=10で計算すれば、6セクター分の渦電流損失は135 Wとなり許容できる値となる。さらに不純物量

Fig. 13 Measured results of the magnetoresistance of the material for the prototype cold-pole at 4.2 K. A: Without heat treatment after making the specimen. B: With a heat treatment of 850°C $\times$ 1 h in a vacuum after making the specimen.

Fig. 12 Distribution of the eddy current in the cold-pole with 2D magnetic-field calculation.

を変えたサンプルについても測定を行い、また、プロトタイプの試験で渦電流損失を測定したいと考えている。

6. ヘリウム冷却系

ヘリウム冷却システムはまだ検討継続中で最終仕様を決定していないが、セクター電磁石とアクティブシールドコイルを一括して一式のヘリウム冷却システムで冷却することを考えている。Fig. 14 に冷却系統図を示す。アクティブシールドコイルは、セクター電磁石からの外部への漏れ磁界を最小にするためのもので、直径 25 m 程度の大きなヘルムホルツコイルとなる。重量、消費電力、および冷却水量の削減のために超電導コイルが適していると考えているが、まだ方式は決定していない。この冷却システムでは、設備や運転保守を簡便にするために液体窒素は使用しない。従って、膨張タービンが発生する寒冷のみで冷却を行い、電磁石内の熱シールドは 70 K のヘリウムガスで冷却する。ヘリウム冷凍システムの 4.5 K 換算の必要能力は 1,500 W 程度と見積もっている。約 400 トンのコールドマスを冷却するのに 1.5 カ月を必要とするので、コールドマスを 1 年中低温保持するシステムとしたい。

セクター電磁石コールドマスの冷却は、12 台のメインコイル/容器を並列に冷却し、コールドポールはコイル容器からの熱伝導で冷却する。1 セクターの上コールドマスのみを表した冷却系統を Fig. 15 に示す。室温からの初期冷却では、メインコイル/容器の

Fig. 15 Schematic cooling diagrams for the one upper cold mass. Upper: at initial cooling from room temperature. Lower: at steady state cooling.

Fig. 14 A conceptual diagram of the He cooling system.

みをヘリウムで冷却し、トリムコイル/容器はボールからの熱伝導で冷却する。定常冷却ではヘリウムの流れを初期冷却と逆とし、電磁石上部に設けた液体ヘリウムタンク（セクター6台に対して1台のタンクを設ける）から、メインコイルおよびトリムコイルに液体ヘリウムを重力落下で供給する。コイルの口出しリードは液体ヘリウムの供給管内に収納され、液体ヘリウムタンク内でコイル間接続や電流リードとの接続を行う。定常時にコイル容器内に発生する蒸発ガスを取り除くために泡抜き管をコイル容器の外周に複数配置し、液体ヘリウムタンクのガス部分に導く。泡抜き管の配置とサイズについては、水平なコイル容器内で蒸発ガスを吐出するために必要な液面傾斜高さと、泡抜き管内でのガスと液の入れ換わりの Flooding 限界を考慮して決定した。プロトタイプの低温試験では、泡抜き管内にヘリウム液面計を設置し、液面の振動現象が発生しないか計測する予定である。

7. ま と め

世界最大の超電導リングサイクロトロンキーコンポーネントである超電導セクター電磁石の基本設計について述べた。巨大な電磁力に耐え、クエンチフリーで、そして所定の磁界精度を出せる事が開発の主要ポイントである。これらの総結集として現在、等倍のプロトタイプ電磁石を製作中であり、1999年秋に冷却励磁試験および磁界測定を行い、性能の検証を行う予定である。

定である。実機完成までには、装置の長期信頼性や運転操作性を考えた見直しや開発が必要であり、超電導・低温工学の識者の方々のご比判とご指導をお願い致します。

プロトタイプの開発に関して、コイルおよびクライオスタットの製作を担当頂いている(株)日立製作所および三菱電機(株)の関係者の方々に謝意を表します。また、理研RI ビームファクトリー計画を推進している関係者の方々にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 矢野安重, 谷畑勇夫: Radioisotopes 44, No.12 (1995) 870
- 2) T. Kawaguchi, et al.: Proc. of MT-15 (1997) 303
- 3) T. Satow, et al.: Electromagnetomechanical interactions in deformable solids and structures, North-Holland (1987) 137
- 4) 今里 純ら: 第39回低温工学研究発表会講演概要集 (1988) A1-7
- 5) 川口武男ら: 第39回低温工学研究発表会講演概要集 (1988) A1-23
- 6) 野島敏幸ら: 第40回低温工学研究発表会講演概要集 (1988) C3-5
- 7) Cryogenic Material Data Handbook, National Bureau Standards (1964)
- 8) 井垣憲三: 鉄と鋼 68, No. 3 (1982) 25