特集・核 融 合

U.D.C. 621.039.637: [621.318.3:538.945]

超電導マグネットの核融合への技術開発

Development of Superconducting Magnet Technology for Fusion Reactor

トカマクをはじめとする磁気閉込め方式の核融合装置は,大形化するに従い磁界 発生に要する電力が膨大となる。このため、従来の銅コイルマグネットに代わって、 超電導マグネットの採用が不可避になり、国内外でその研究、開発が進められてい る。日立製作所及び日立電線株式会社は早くからこの分野の仕事に着手し、次に述 べるような成果を得た。(1)静水圧押出し法による超電導導体の製造法を確立し、均 一かつ良好な特性の極細多心線材の開発に成功した。(2)マグネット安定性解明と向 上のために,超電導導体伝熱面の液体ヘリウムへの熱伝達特性の改良を試みた。 (3) 電磁力支持用などの構造材の極低温特性の評価を行ない、基礎データを得た。 (4) 独自の超電導マグネット保護方式を開発した。

木村 浩*	Hiroshi Kimura
森 誉延*	Takanobu Mori
尾形久直**	Hisanao Ogata
石上祐治***	Yûji Ishigami

今後更に実用上のデータを集積するため、大電流、高磁界用超電導に関する各種 試験装置を建設中である。

言 1 緒

トカマクをはじめとする磁気核融合装置は, 強磁界によっ てプラズマを閉じ込め,高温に加熱して核融合反応を起こさ せようとする装置である。この磁界を普通の銅コイルで発生



させようとすると、装置が大形化するに従い、ジュール損失 やうず電流損失のために膨大な電力を必要とすることになる。 超電導マグネットは、これを極低温に保つために必要な電力 以外は,ほとんど電力損失を伴わないため,核融合装置を構 成する一つの重要な主技術として各国でその開発が進められ ている。核融合装置の他のコンポーネントと同じく、核融合 のための超電導マグネットの開発は,政府関係研究機関を中 心に進められているが、日立製作所及び日立電線株式会社は これら中心機関に技術的側面から貢献している。

超電導マグネット一般の技術について, 日立製作所は早く から(昭和37年ごろ)超電導材料の研究を開始し、その後各研 究所,工場で分担して超電導マグネットの技術開発を進めて いる。

開発上の問題点 2

超電導マグネットの開発は昭和40年前後から始まり、この 十数年で急速な進歩を遂げた。しかし, 核融合動力炉用マグ ネットに要求される技術水準は、現状よりもはるかに高いも のである。超電導マグネットの規模を示す指標として、その 発生磁界と蓄積エネルギーをとり,現在までに建設された世 界の大形超電導マグネットと、核融合炉用として要求される 水準を図1に示す。同図から分かるように、現状技術との差 は主に規模の大きさにある。すなわち,現存する世界最大の CERN(ヨーロッパ共同原子核研究所)のバブル チェンバ用 超電導マグネット(蓄積エネルギー8×10⁸J)に比べ、核融合 炉用のものはその約10倍以上大きいエネルギーをもつものに なる。この目標を達成するために解決しなければならない主 要な問題には、下記のようなものがある。

大形, 高磁界超電導コイルの現状 义 | 現在までに完成された世 界の大形超電導コイル(一点鎖線の下部)と核融合炉用として要求される超電導 コイル(斜線部より上)の比較を示す。LCT:IEAの国際協力, クラスター:原 研設置のトロイダルコイル試験装置, 金材研:Nb₃Sn及び V₃Ga テープ巻き で中心磁界17.5T(世界最高),電総研-日立: IMW MHD装置用及び R & D, CERN:世界最大の蓄積エネルギー, AVCO:世界最初のMHD用くら形コイル

67

(1) 超電導導体

使用する超電導導体は, 高磁界, 大電流のものが必要にな

る。一方, 超電導マグネットとして安定に動作するためには,

*** 日立電線株式会社金属研究所 * 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所機械研究所

382 日立評論 VOL. 62 No. 5(1980-5)

完全安定化(局部的に常電導の芽が発生しても,その原因が 消滅すれば,芽は縮小して超電導状態に戻るような条件に設 計する。)の技術が重要であり,高磁界,大電流になるほどこ の設計条件が難しくなる。これを解決するには,安定化材の 比抵抗を下げること,導体表面からの沸騰熱伝達特性の向上 を図ることなどの手段を講ずる必要がある。

また、10T以上の高磁界を発生させるためには、Nb₃Sn な どの化合物系線材を使う必要があるが、NbTi などの合金系 線材に比べてこれらの化合物線材はもろく、ひずみを受ける と特性が劣化しやすい欠点がある。この現象は応力-ひずみ 効果と呼ばれている。導体製造時や極低温冷却時に受ける熱 ひずみや、コイル励磁中の電磁力によって導体が受けるひず みに対する対策が必要である。

トロイダル磁場コイルは直流コイルであるが, ポロイダル パルス磁界を受けて交流損失が発生するので, これを極力減 少することが安定性の上でも重要な課題になる。更に, ポロ イダル磁場コイル自身を超電導化するには, パルス用導体の 開発が必要になる。

更に,核融合炉が実現すれば,中性子など放射線による照 射を受けることになるので,照射が諸特性に及ぼす影響とそ の対策を検討することも重要な課題である。

(2) 超電導コイル

超電導コイルは極低温に冷却して初めて超電導特性を示す



図2 静水圧押出しによる超電導線断面写真 直径40mmの線材の 内部に,直径0.86mmの超電導フィラメント1,090本が整然と配列されている。 銅と超電導体の断面積比は1である。

の輸送,組立,解体修理などについても同様のことが言える。 日立製作所及び日立電線株式会社で開発されつつあるこれら

ものであり、コイルの冷却方式、冷却構造が重要であること は当然である。一般に、冷却を良くするためには、導体表面 が液体へリウムと接する面積をできるだけ広く取りたいが、 耐電磁力、耐電圧の要求と矛盾する場合が多い。

コイルに巻線された超電導導体は、一様な磁界を受けるわ けではなく、場所によって高低の差がある。これを考慮して、 磁界に応じた線材を使い分けることが経済的なコイルの設計 につながる。これをグレーディングと呼び有効なグレーディ ング法を検討すること、接続抵抗をできるだけ小さくするた めの導体の接続法の開発も重要な課題である。

図1から分かるように、コイルには~10¹⁰ J以上のエネル ギーが蓄えられている。マグネットシステムとしての安全対 策,信頼性の向上は、今後力を入れなければならない問題で ある。

(3) 構造材料

超電導マグネットを構成する材料には,導体のほかに電磁 力支持及び容器用などの金属,非金属構造材料,電気的及び 熱的絶縁材料などがあり,極低温での電気的,機械的,熱的 各特性,放射線の影響など研究すべき課題は多い。

(4) 電源装置

超電導導体が大電流化するにつれて、トロイダル磁場コイ ル用直流電源も、数十~数百キロアンペアのものが要求され る。更にポロイダル磁場コイル用には、電流容量だけでなく 1~数秒の立上り時間をもつ高速励磁用電源が必要になる。 単極発電機をこの目的に使う案などもある。

(5) 計測・制御

68

超電導マグネットを運転するために必要な計測量には、電 流、電圧、抵抗、磁界、圧力、流量、液面、温度、ひずみ、 変位、真空度などがある。より高い精度で十分な信頼性をも つ計測センサと測定器の開発、これらをコンピュータと組み 合わせた制御系、データ処理などが重要である。 (6) 諸設備など 導体、コイル、容器などを対象とする製造法、製造設備、試 験法及び試験設備にも開発すべき新しい要素が多い。製造後 多くの課題のうち、数項目を選んで以下にやや詳細に述べる。

3 日立製作所及び日立電線株式会社における研究開発の現状

3.1 超電導導体

(1) 合金系線材(約9T以下の低磁界用)の製造法と電気的特性 日立製作所及び日立電線株式会社では,世界で初めて超電 導線の工業的生産に静水圧押出し法を採用した。従来の熱間 押出し法と比較すると、コンテナ摩擦がないこと、ダイス潤 滑が良好なことから押出し中のメタルフローが均一になり, ビレットの断面と全く相似の断面構造をもつ押出材が,ほぼ 全長にわたって得られる。図2に超電導線横断面を示す。中 心部,周辺部共にサイズのそろった超電導フィラメントが整 然と配列していることが分かる。また,比較的低い温度で押 し出すことができるので、構成材同志の反応がなく、熱影響 も極めて少ない。NbTi系線材について確立した製造工程を 図3に示す。単心線、多心線共に静水圧押出しをすることに よって、NbTi合金の特性を高めるために必要な冷間加工を 十分に行なうことができる。

本製造工程に従って、核融合装置用に重要な高磁界での臨 界電流値を向上させるために、時効熱処理と加工条件の組み 合わせの最適化を図った結果、図4に示すように極めて良好な 特性が得られた。ここに示すバンドは、処理条件による差で、 同一処理でのばらつきを示すものではない。適切な条件では、 8Tで1.1×10⁵A/cm²以上の高い臨界電流密度が得られている。 (2) 化合物系線材(約10T以上の高磁界用)の製造法と電気的 特性

ブロンズ法によるNb₃Sn 極細多心線の製造法を確立した。 線材の構成は、数百本のNb+Nb₃SnフィラメントとCuSnマ トリックスをNbの拡散障壁で囲み、更に安定化用銅を被覆し たものを一つの単位としている。これを数百本再度マルチ化 することによって、数万から数十万本のNb₃Snフィラメント を含む線材が得られる。この製造にも静水圧押出し法をフル に適用する。すなわち、単心線、多心線共に静水圧押出しと



冷間引抜の組み合わせで加工することにより、NbとSnが反応することや拡散障壁が破損することなく、必要なサイズまで加工できる。

最終工程で熱処理し、Nb₃Sn層を生成させる。本方式で製造したNb₃Sn極細多心線の代表的な特性を、合金系線材とともに図4に示す。安定化材の機能も十分に生かされた、良好な特性の線材が得られた。

3.2 大電流超電導導体の試験設備

核融合装置用超電導マグネットは,前述したように大電流, 高磁界導体を使用するため,その研究,開発に当たって特性 評価を行なうための試験設備もまた大規模なものになる。次 に,日立製作所の研究所に設置した「超電導実験室」の試験 設備について略述する。これらの設備は,もちろん導体だけ でなく超電導マグネットの研究,開発にも使用される。

(1) 導体評価用超電導マグネット

大電流超電導導体の磁界-電流特性を測定する場合,一般 に導体をU形に曲げて磁界空間に挿入する必要がある。特に, Nb₃Snのような化合物系線材は曲げひずみによる特性劣化が 著しいため,できるだけ大きな有効空間をもったマグネット が必要になる。この目的のために,NbTiZr合金系線材を用 い,有効空間径70cm,中心磁界5.3Tのパンケーキ形超電導 マグネットを試作した。その仕様を表1に示す。この中に合 金系あるいは化合物系線材で巻いたスプリットコイルを入れ

注:略語説明

OFCパイプ(Oxygen Free Copper パイプ)

図3 NbTi系超電導線の製造工程及び静水圧押出し法の原理と特徴 静水圧押出し法により,導体構成材同志が反応しない比較的低温で加工でき,均一かつ良好な特性の超電導線が得られる。

て、8T以上の磁界中で導体の臨界電流値を測定する予定で ある。図5(中央奥)にマグネットを容器から取り出している ところを示す。

(2) ヘリウム液化冷凍装置

超電導実験を行なうために不可欠なヘリウム液化装置として、現在35*l*/hの液化機、1,000*l*の液体ヘリウム容器(図5 左側手前)が設置され稼動している。今後、実験の大形化が予想されるために、自社製の100*l*/hヘリウム液化冷凍装置を設置する予定である¹⁾。

(3) 励磁用直流電源装置

導体評価用及びマグネット励磁用として、出力20V、20kA 及び20V、2kAの安定化直流電源が設置されている。



図 4 NbTi超電導線及びNb₃Sn 超電導線の磁場-臨界電流密度 特性 NbTiは9T以上では臨界磁 界に近いため,臨界電流密度は急激に低 下する。またNb₃Snそのものの臨界電 流密度は高いが(J Nb3 Sn の曲線),実 用的な値は一桁近く低くなる(J Nb3 Sn

+Nb+CuSnの曲線)。 J NbTi (NbTiの臨界電流密度) J Nb3 Sn (Nb3 Snの臨界電流密度) J Nb3 Sn (Nb3 Snの臨界電流値を, 安 定化用銅を除く構成材の断面積で除し た値) 8 T以上は日本原子力研究所の測定値 である。

69

384 日立評論 VOL. 62 No. 5(1980-5)



表 | 導体評価用超電導マグネットの仕様 コイル巻線内の磁界分 布を考慮して,3種類のNbTiZr合金系線材を使用している。

項	目	仕様			
	内 径	73 cm			
コイルナキ	外 径	123 cm			
コイル引法	高さ	58.7cm			
有効空間径		71 cm			
コ イ ル 巻	線方式	フラットワイズ巻き, ダブルパンケーキ コイル			
全 タ ー	シ数	6,277ターン			
インダク	タンス	30.7H			
コイル	重量	2.6 t			
コイル中	心磁界	5.3T			
コ イ ル 最	大磁界	6.6T			
コイル平均	1 電 流 密 度	3,242 A/cm ²			
起磁	玄 力	4.76×10 ⁶ AT			
蓄 積 エ ネ	ルギー	8.8×10 ⁶ J			
液体ヘリウ	ム 蒸 発 量	6.5(非通電時)l/h			

エクセル」³⁾は,液体ヘリウムに対しても優れた性能をもつことが日本原子力研究所⁴⁾及び日立製作所内でのそれぞれ独自の測定によって判明した。図7に,ヘリウムに対して良い性能を与える「サーモエクセルC」の断面及び表面の顕微鏡写

図5 超電導試験設備 導体評価用超電導マグネットを極低温容器から 取り出しているところ(中央奥)を示す。左側手前にヘリウム液化装置のコール ドボックスと液体ヘリウム容器が見える。

3.3 液体ヘリウム中の熱伝達

 $\mathbf{70}$

マグネット巻線を超電導状態に維持するためには、線材をある固有の臨界温度 T_c よりも低く冷却しなければならない。一般に使用される線材の T_c は、NbTi合金で約9K(-264°C)、Nb₃Sn 化合物で約18K(-255°C)である。このような極低温雰囲気を実現するには、冷却剤として、大気圧での沸点が4.2K(-269°C)の液体ヘリウムを用いる。

最も一般的な超電導マグネットの冷却方式は、巻線を液体 ヘリウムのプールに浸漬する方式であり、これまで国内で製 作された大形の超電導マグネットは、すべてこの方式を採用 している。この浸漬冷却法では、導体は直接液体へリウムに 接して冷却され、導体から液体への熱の伝達形態は「沸騰熱 伝達」である。沸騰には伝熱面上の核から気泡が発生する核 沸騰、伝熱面上を蒸気の薄い膜が覆ってしまう膜沸騰及びそ の中間の遷移沸騰の3種の領域がある。導体の熱負荷を上げ てゆくと、核沸騰から膜沸騰への遷移が起こるため、導体の 温度が急上昇して、Tcを超えてしまうところが生ずる。この 点の熱流束を限界熱流束 qcと呼び、安定化導体を設計する上 で不可欠な量である。

一般の浸漬冷却超電導マグネットでは、巻線内部に液体へ
リウムをくまなくゆきわたらせるために、間隙1~5mmの多数の狭い冷却流路が形成されている。このような流路をモデル化して、qcを測定した結果を図6に示す²⁾。xは流路入口からの距離、deは流路の等価直径である。
大電流導体の安定化を図るために、導体表面からの沸騰熱
伝達特性全般を向上させる努力も払われている。日立製作所と日立電線株式会社とで共同開発した高性能伝熱面「サーモ

真を示す。機械加工により、高さ1mm程度ののこぎり歯状フ ィンを多数配列したものである。特に、膜沸騰及び遷移沸騰 の領域で熱伝達特性向上の効果が著しい。更に優れた伝熱面 を開発するため、伝熱面の状態と沸騰特性の関係を解明する 研究が進められている。

超電導マグネットの冷却方式には上述した浸漬冷却のほかに、導体の内部又は外部に冷却剤(液体ヘリウムや超臨界ヘリウム)を強制的に流して冷却する方式⁵⁾、冷却剤として超流動ヘリウムを使う方式などが考えられている。これらに関しても、日立製作所では早くから強制対流熱伝達の測定など⁶⁾に積極的に取り組んでいる。

3.4 極低温構造材料

核融合用超電導マグネットの電磁力支持用,容器用などの 材料は極低温で非磁性であり,耐力及び靱性の高いことが要 求されるため,オーステナイト系ステンレス鋼の適用が考え



超電導マグネットの核融合への技術開発 385



表2 供試材の化学組成(wt%) 0.2%耐力及び衝撃値の測定に用 いたオーステナイト系ステンレス鋼の化学組成を示す。Ni 当量はその鋼種のオ ーステナイト相の安定度を示し, Ni 当量の大きいものはオーステナイト相が安 定で, マルテンサイト相に変態しにくい傾向をもつ。

鋼種	С	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ni当量
SUS 304	0.08	0.84	١.47	18.57	8.60	-	23.5
SUS 316	0.08	0.67	1.40	17.50	11.90	2.30	28.2
SUS316L	0.02	0.55	1.17	16.81	13.29	2.36	28.2
SUS 310S	0.08	0.87	1.52	25.17	20.64		39.9

注:Ni当量=Ni+0.65Cr+0.98Mo+1.05Mn+0.35Si+12.6C





C量が少ないと低温での0.2%耐力が低くなる傾向にある。

図9に低温での衝撃値の結果を示す。同図から,低温での 衝撃値は鋭敏化によって低下する傾向のあること, 鋭敏化を 受けると低温での衝撃値はNi当量の減少とともに低下する傾 向のあることが知られる。SUS316Lが鋭敏化を受けても低温 で衝撃値低下を示さないことの原因は, C量が少ないために, 結晶粒界でのCr炭化物形成量が少なく,この結果,粒界近 傍のオーステナイト相が低温でも安定であることによると考 えられる。

図7 高性能伝熱面「サーモエクセルC」の構造 「サーモエクセル C」の表面は高さ Imm程度の多数ののこぎり歯状フィンで構成されている。元 来,一般の熱交換器の凝縮面用として開発されたもので,液体へリウムに対し ても高性能伝熱面となる。

られている。しかし、オーステナイト系ステンレス鋼は、化 学組成によってはオーステナイト相が低温で不安定となる結 果、 ϵ 相及び α '相のマルテンサイト相を形成し、強磁性体と なる場合のあることが知られている^{7),8)}。このほか、化学組成 上のオーステナイト安定度を示すNi 当量⁹⁾の変化や鋭敏化^{*1)} による組織変化などによって、オーステナイト系ステンレス 鋼は低温での耐力及び衝撃値に影響を受けることが予想され る。そこで、**表2**に示すような数種類のオーステナイト系ス テンレス鋼について検討した。

図8に低温での0.2%耐力*2)の結果を示す。同図から、低 温での0.2%耐力はNi当量の減少とともに低下する傾向のあ ること、Ni当量の最も小さいSUS304は鋭敏化を受けると、 極低温での0.2%耐力が低下することが知られる。SUS316L が低温でSUS316よりも低い0.2%耐力を示すことの原因は、 C量が少ないために、Cによる転位固着作用が弱いことによ ると考えられる。オーステナイト系ステンレス鋼は、一般に 以上に述べた結果から、オーステナイト系ステンレス鋼が鋭 敏化されるような熱履歴を受けた後に、極低温で使用される 場合には、極低温での耐力及び靱性を共に確保するために、 Ni量が多く、C量の少ない鋼種を選定することが重要である と考えられる。

なお、オーステナイト系ステンレス鋼の極低温での耐力を 増大させる手段として、Nの添加が有効なことから、今後は N添加ステンレス鋼の極低温での機械的性質を明らかにする ことが課題と考えられる。

3.5 超電導マグネット保護法

前述したように、核融合炉用超電導マグネットは運転中大 きな蓄積エネルギーをもっているため、外乱などによって急 激に常電導転移すること(クェンチと呼ぶ。)を防止する必要



※1)	鋭敏化:オーステナイト系ステンレス鋼が、溶接、残留応力除
	去焼鈍,熱間加工などの製作過程で,500~800℃の温度域に加
	熱された場合,結晶粒界にCr炭化物を析出して耐食性が低下
	することがある。このような状態を一般に鋭敏化された状態と
	言う。
※ 2)	0.2%耐力:引張試験で0.2%の永久伸びを起こすときの荷重
	を、試験片平行部の原断面積で除した値(公称応力)を言う。

図8 供試材の低温での0.2%耐力 表2に示した供試材の0.2%耐力と温度の関係を示す。Ni 当量及びC量の少ない鋼種は,極低温での0.2%耐力が低くなる傾向を示している。

71

386 日立評論 VOL. 62 No. 5(1980-5)



図9 供試材の低温での衝撃値 表2に示した供試材のシャルピー衝 撃値と温度の関係を示す。Ni 当量が少なく、C量の多い鋼種は鋭敏化処理を受けた場合、低温での衝撃値が低くなる傾向を示している。

がある。これは大きなエネルギーが液体ヘリウム中で消費さ

図|| 蓄積エネルギー除去実験結果の一例 「転移検出回路」の設定 電圧と設定時間幅によって,エネルギー除去率がどのように変わるかを示す。

4 結 言

核融合炉を対象とした超電導マグネットの開発は, 国内で

れると、気化により容器の内圧が急激に上昇して危険である ためである。このためには、超電導導体自体が安定化され、 コイル巻線の一部に常電導の芽が発生しても、その原因が除 かれれば常電導部も消失するような設計になっている。しか し、万一常電導部が拡大するようなことがあった場合には、 早期にこれを検出し、コイルの蓄積エネルギーが液体へリウ ム中で消費されないような手段を講ずる必要がある。

従来,常電導転移の検出は,常電導部が発生したことによって生ずる電圧を検知し,これが設定電圧を超すとクェンチとみなし,蓄積エネルギーを室温空間に設置された保護抵抗に放出する方法をとっていた。しかし,この検出法はノイズによる誤動作が多く問題である。日立製作所では,コイル端子電圧が設定電圧以上になる時間が設定時間幅以上にわたった場合,初めてクェンチとみなす新しい転移検出法を開発した¹⁰⁾。この方法を使った保護回路を図10に,この回路を用いて行なったクェンチ実験結果の一例を図11に示す。設定電圧,設定時間幅を適当に選べば,90%以上のエネルギー除去率(保護抵抗Rで消費されるエネルギー/蓄積エネルギー)が得られることが分かる。



は日本原子力研究所,電子技術総合研究所,金属材料技術研 究所及び各大学が中心となりここ数年来急速に進められつつ ある。また国内各社でもこれに協力するため,メーカーとし ての技術的研究,開発が行なわれている。日立製作所,日立 電線株式会社では,これまでに蓄積された技術を基盤として, 今後上記国内外の研究機関と協力して,核融合炉の実現を目 指して研究,開発を進めてゆく予定である。

本論文中の超電導導体の高磁界特性は,日本原子力研究所 核融合研究部超電導磁石研究室で測定されたものであり,同 研究室の許可を得てここに発表させていただいた。

参考文献

- 2) 尾形,外:長い間隙中におけるヘリウム沸騰熱伝達,日立評論,53,635~638(昭46-7)
- 3) 中山,外:高性能伝熱面「サーモエクセル」,日立評論,57, 637~640(昭50-8)
- 4) 西,外:大電流超電導導体のヒートフラックス(II),第22回 低温工学研究発表会予稿(昭54-6)及び西,外:大電流導体 のヒートフラックス(III),第23回低温工学研究発表会予稿 (昭54-11)
- 5) 留奥,外:小型化合物超電導コイルの強制循環冷却,低温工学,12,97~105(昭52-7)
- 6) 尾形,外:超臨界ヘリウムの強制対流熱伝達,低温工学,7,
 20~28(昭47-5)
- 18wt%Cr-8wt%Niステンレス鋼の4.2Kにおける変形 挙動,低温工学,7,68~75(昭47-7)
- 8) 北田: 17wt%Cr-11wt%Ni-2wt%Moおよび18wt%Cr-15wt\%Ni-2wt%Moステントス網の4.2Kにおける亦形送動 伯

図10 超電導マグネット保護回路 「超電導コイル」端子電圧が設定電 圧以上になり、これが設定時間幅以上継続した場合、「検出回路」が働きしゃ断 器を開く。コイル蓄積エネルギーの大部分は「保護抵抗」で消費される。 wt%Ni-2wt%Moステンレス鋼の4.2Kにおける変形挙動,低 温工学, 7,133~143 (昭47-9)

- 9) 平山,外:Fe-Cr-Ni系ステンレス鋼のマルテンサイト変態 に対する化学組成の影響,日本金属学会誌,34,507~510 (昭45-5)
- 10) H. Kimura, N. Hara: Detection of Normal Transition and Energy Removal on Superconducting Magnet, Proceedings of 6th Int. Conf. on Magnet Technology, 944~948 (1977)

72