I. AE による超電導マグネットの監視診断の現状

塚 本 修 巳

横浜国立大学工学部電機工学科 横浜市保土ヶ谷区常盤台156

(1986年11月25日受理)

I. Present State of Monitoring and Diagnosis by AE for Superconducting Magnets Osami TSUKAMOTO

Faculty of Engineering, Yokohama National University, 156 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama, Kanagawa 240

(Received November 25, 1986)

Synopsis :

AE technique is expected to be an useful monitoring and diagnosing technique for superconducting magnet. Already, it has been proven that AE technique is a powerful tool to identify and understand causes of magnet quenches.

In the paper, the development of AE technology as it is applied to superconducting magnet is reviewed. Future directions of research are also discussed.

1. 序

一般に物体に応力がかかると物体中に極微小の破壊が生じ超音波が発生する。これをアコースティックエミッション(AE)と呼んでいる。このAEを計測することにより物体の状態を監視したり、検査する方法を総称しAE技術とよんでいる。AE技術は受動的で非破壊的な検査方法であり、対象物を乱さず監視、検査できることが他にない特長である。AE技術は、圧延機スタンドや圧力容器の機械的健全性の監視、パイプのもれの監視、溶接工程の管理、山はね、地すべり、雪なだれの予兆の監視、ベアリングの潤滑油切れ、切削機械の刃こぼれの監視、大型ダムのコンクリートの養生状態の監視など非常に広い分野で応用の研究開発が行なわれている^{1,2)}。すでに大形圧力容器に関しては標準的な監視検査方法となっている。米国のデュポン化学会社では化学プラント用圧力容器の試験、監視にAE技術を組織的に導入することにより、それまでに2~3件あった人的損傷を伴う圧力容器の重大事故が実質上皆無になった例が報告されている³⁾。

超電導マグネットと圧力容器とは内部応力の観点からすれば良く似ているところがあり、AE技術は超電導マグネットに関しても標準的な監視診断法となると予想されている。

本文では超電導マグネットへのAE技術の応用の現状について概観し、将来の課題についても言及する。

2. マグネットの擾乱の監視診断

2.1 マグネット中のAEの発生源

超電導マグネットの励磁、減磁さらにクエンチの過程で多くAEが発生する²⁾。AEの発生源としては、電磁応力の変化や、クエンチにより発生した熱歪によって生じる、

- a) 導体のずれ^{8,9,26)}
- b) 構造材のひび割れ、歪およびすでに割れている部分のずれ^{3,5,7,10)}

が主である。発生源については後で詳しく検討されるが、上記の他に、極細多心線を用いていない古いマグネットなどではフラックスジャンプもAEの発生源となる^{6,9)}。また、液体ヘリウムが急激に蒸発する場合もAEが生じ得ると思われるが、このような場合は他の要因のAEの方が優勢であると考えられる。したがって、上記の機械的要因がマグネットのAEの主な発生源であると考えて良い。

2.2 クエンチ原因の診断

超電導マグネットがクエンチを起す原因としては、

- a) 導体の動き
- b) 含浸材のひび割れ
- c) 通電電流が導体の臨界値に達する

が考えられる。従来行なわれていたマグネットの端子電圧を監視する方法ではクエンチが起きてもその原因が何であるかの診断は困難であったが、AE計測を電

圧計測に併用すると、上記クエンチ原因を分類することが可能となる^{4,19)}。

クエンチ原因を AE および電圧計測により診断した例を示す¹⁹⁾。実験装置の概略を Fig. 1 に示す。長さ 1 m、幅 17mm、厚さ 0.9mm の編組線（素線径 0.3 mm ϕ 、97本、半田含浸）が U 字形にサンプルホルダに取りつけられており、サンプルホルダに電磁力が加わらないよう編組線は往復するよう配置されている。サンプルホルダ全体は外部磁界中に入れられる。編組線は通電されるとサンプルホルダ面から突出するような電磁力を受け、U 字形の底の部分に最も大きな電磁力が働く。U 字形底部の導体の一部はエポキシ含浸されている。導体全体および各所に電圧タップが取り付けられ導体各部で生じた電圧が計測できるようになっている。この装置を液体ヘリウム中に漬けて通電試験を行ったところ Fig. 2 のようにトレーニング現象が生じた。クエンチ時に生ずる電圧および AE 信号を記録した結果、クエンチは Fig. 3 に示すように三つのクラスに別けられた。すなわち、

- クラス 1. クエンチの直前に AE 信号のバーストを伴った電圧スパイクが生ずる場合 (Fig. 3 a)。
- クラス 2. AE の発生と同時にクエンチが生じるが電圧スパイクは発生しない場合 (Fig. 3 b)。
- クラス 3. AE も電圧スパイクも発生せずクエンチする場合 (Fig. 3 c)。

Fig. 1 Schematic of experimental arrangement. (V_1 - V_6 are voltage taps.)

Fig. 2 Training characteristics of the sample conductor and classification of quenches. (In this sequence, class 2 quench did not occur.)

Fig. 3 には各クエンチの class 分けが示してある。

クラス 1 クエンチはトレーニングの過程で生じており、クエンチ直前の AE 信号を伴う電圧スパイクは導体のずれによるものであると考えられる。したがってこのクエンチは導体のずれによって誘起されたものである。クラス 2 クエンチはクラス 1 にくらべるとその発生頻度は少なく、主にトレーニングが終りになる頃に生ずる。このクエンチは電圧スパイクの発生がないので導体の動き以外の擾乱、たとえばエポキシのひび割れによって誘起されたものと考えられる。事実、クラス 2 クエンチは常に導体のエポキシ含浸した部分から発生していた。クラス 3 クエンチはトレーニング終了した時に生じ、通電電流が臨界値に達しジュール発熱によって誘起されたものと考えられる。ヒータを用いクエンチを誘起した場合でも同様なクラス 3 クエンチが生じた。

今まで多くのマグネットに関し電圧および AE の計測が行われており、多くのデータが集まりつつある。後で詳述するが、マグネットの擾乱に関し有用な情報が得られており、マグネットのクエンチ事象の診断に関して上記三つのクラス別による方法はかなり成功をおさめている。

2.3 擾乱の発生位置の標定

上述したようにマグネットに生ずる機械的擾乱は AE を発生するので、複数の AE センサを用い、各センサに AE 波の達する時間差を計測すれば擾乱の発生位

置を標定できる。実際に Fig. 1 に示した実験装置で擾乱の位置標定が原理的に可能であることが確かめられている^{13,14)}。しかし、実際のマグネットでの擾乱の位置標定を行なおうとすると、(i)マグネットは導体、絶縁物、構造材等の複合構造になっており AE 波の伝播特性が複雑である、(ii)AE センサの感度が極低温ではかなりばらつく、などの理由により精度の良い標定はかなり困難である。

(a)

(b)

(c)

Fig. 3 Three classes of quench events.

- (a) Class 1 quench.
- (b) Class 2 quench.
- (c) Class 3 quench.

超電導マグネットと状況が比較的似ている例としてグラスファイバ樹脂製の圧力容器がある。グラスファイバの向きにより AE の伝播特性が複雑に異なり、その発生源の位置標定はかなり困難である。この場合発生源をピンポイントで標定するのではなく発生区間を標定する スチュワートの 区域標定法が用いられる¹⁾。例えば三つの隣接するセンサが AE 信号を検出したとすると、最初に検出したセンサのまわりの検出可能区域 (第 1 ゾーンという) 内で AE が発生したことになる。第 1 ゾーン内のうち 2 番目に検出したセンサに近い区域が限定され (第 2 ゾーン)、さらに第 2 ゾーンのうち 3 番目に AE を検出したセンサの近い区域に発生源が限定される。このような方法により、検出したセンサの数に応じて発生位置をさらに細かく限定することができる。この方法は超電導マグネットにも応用可能である。

2.4 AE 計測の応用例

従来すでに多くのマグネットの AE 計測が行なわれてきている。以下計測例について述べる。

2.4.1 高エネルギー物理マグネット 粒子加速器用の 2 重極、4 重極マグネットは応力を抑えるためにマグネット径を小さくする必要があり、高電流密度の巻線にする必要がある。このためマグネットは擾乱の影響を受けやすく定格電流に達する前に早期にクエンチすることが多い。そのため AE 計測によりクエンチ原因を診断することが重要となる。

Fig. 4 にはブルックヘブン国立研究所 (BNL) で作られた 2 重極モデルマグネットの概略と AE センサの配置が示してある。このマグネットは定格電流に達する前に多くのクエンチを繰り返しかえた。クエンチ事象の典型的例を Fig. 5 に示す。この図から明らかなように上述したクラス 1 形のクエンチを示しており導体の動きによりクエンチが生じたことがわかる。AE 信号を見ると導体の動きはマグネットの端部、AE 2 の付近で生じたことがわかる。

高エネルギー研でプロトタイプの 4 重極マグネットが製作された²⁷⁾。このマグネットは 3,900 A で 6 T を発生したが、何回かクエンチを繰り返しかえているうちに、クエンチ事象がクラス 1 形からクラス 3 形になり、クエンチ電流がかなり低下した。クラス 3 形クエンチは発熱によって引き起こされるものであり、コイルのターン間短絡が発生したものと考えられた。すなわち、ターン間短絡が生ずると、等価的には 2 次側巻数が 1 ターンの単巻変圧器において、2 次側が短絡され

Fig. 4 BNL dipole magnet and positions of AE sensor.

Fig. 5 Typical class 1 quench of BNL magnet.

た形となり、通電電流の何倍もの電流が短絡したターンの部分に流れる。このためその部分の電流が臨界値を上まわりクエンチを起す。事実、通電試験後巻線をほどいたところ絶縁テープに絶縁破壊による微少穴があいており、そこで短絡が発生していたことが確かめられた²⁶⁾。

この他にも高電流密度マグネットの監視診断にAE計測が非常に有効であることが示されている²⁵⁾。

2.4.2 完全安定大形マグネット

完全安定化されたマグネットでは導体のずれがあってもそれがすぐにはクエンチにはつながらない。しかし、コイル剛性の良さ、操りかえし励磁に対しての経年変化を監視する手段としてAE計測が期待されている。

LCT (Large Coil Task) コイルのうち日本原子力研究所(後述)およびジェネラルアトミックスのコイルについてAE計測がすでに行なわれ、AEバーストを伴う電圧スパイクの発生が観測されており導体の微

小なずれが励減磁中に多数発生していることが確認されている^{17,29,31)}。また、ローレンスリバモアのミラー形核融合炉実験装置 (MFTF) 用のインヤンマグネット (蓄積エネルギー 380MJ)¹⁶⁾、アルゴンヌ研究所のCFFF (Coal-Fired Flow Facility) MHD 実験装置用2重極マグネット (内径2.3m、長さ4.9m蓄積エネルギー170MJ) など大形マグネットのAE計測も行なわれており導体の動きの監視が行なわれている。一例としてCFFFMHD用マグネットの例を示す^{32,33)}。

Fig. 6にはAEセンサの配置が示してあり、Fig. 7には励磁中に生じた導体のずれ例が示してある。導体のずれが、Fig. 7a)ではコイル端部で、b)ではコイル中央部で発生したことがAE信号によってわかる。

この他に原研のクラスタ試験装置、必ずしも完全安定化されていないが東北大学のハイブリッドマグネット用超電導マグネットのAE計測が行なわれており、詳細は後述される。

2.4.3 パルスマグネット トカマク形核融合炉

の抵抗加熱用パルスマグネットは繰り返し応力を受ける。Fig. 8はパルスマグネットの励磁中のAEの例を示したものである³⁰⁾。電流の変化が速いとはいえ、そのAE特性は電流値がある値以上になるとAEが発生し始め、電流の変化がなくなるとAEの発生が無くなるなど、直流的なマグネットの導体の動きによるAE特性に良く似ている。

パルスマグネットには繰り返し応力がかかるので、

Fig. 6 CFFF dipole magnet for MHD and positions of AE sensors.

巻線部のゆるみなどの特性劣化の監視に AE 計測が有力であると考えられている。これについては後で述べられている。

3. クエンチの監視

3.1 クエンチ検出

すでに種々の実験で調べられているが、超電導体の常電導転移そのものは AE を発生させない⁸⁾。しかし常電導転移によって生ずるジュール発熱による巻線の熱歪によって AE が発生する²⁰⁾。一般にマグネット構造材や導体の線膨張係数は20~30K以下ではほとんど零であるが、巻線温度がこの値以上になると熱歪の影響が出て AE が発生する。これを利用すれば急速な励磁減磁の過程におけるクエンチの発生を検出できる。

Fig. 7 Typical signal traces for conductor motion events of CFFF magnet.

Fig. 9には前述した高エネルギー研の4重極マグネットについてクエンチが生じた場合 a) と、急速減磁したがクエンチしなかった場合 b) の AE 信号と電流値の変化が示してある。a) の場合は電流が零になってもクエンチによる熱歪で AE が発生しつづけている。マグネットが超電導状態を回復するとともに AE の発生がなくなる。一方 b) の場合では電流が零になると同時に AE の発生がなくなっている。このようにマグネット電流が零になったときの AE の発生の有無を調べることによりクエンチ検出が可能となる。またクエンチ後マグネットが超電導を回復したかどうかを調べることができる。特に急速な励磁減磁を行うパルスマグネットでは大きな電圧がかかり、電圧測定によるクエンチ検出は困難であり、AE 計測によるクエンチ検出法が期待されている。

3.2 AE 計測によるクエンチ予測の可能性

AE 計測によりマグネットのクエンチが予測できると期待された事があったが^{11,18)}、特殊な場合を除きクエンチの予測はできないと考えられる。予期せぬクエンチの主要原因はわずかな導体のずれや構造材のひび割れであり、これらの擾乱は予兆なしに生ずることはすでにいくつかの実験で示されている^{8,9,10)}。

AE 計測によってクエンチの予測ができる可能性のある場合としては、

- i) すでに何回も励磁をくりかえしその都度 AE データが取られており、AE の発生パターンが従来のものと異なった場合、
- ii) AE 波のエネルギーや発生頻度が急に桁ちがいに大きくなった場合、

などが考えられる。しかし上記の場合が生じたとしても必ずクエンチが起るとは限らず単にクエンチの警戒信号と考えるべきである。実際にこれらが本当に予兆

Fig. 8 Charging current and AE signal of pulse magnet. (AE spike at the beginning of charging was caused by electromagnetically-induced noise.)

Fig. 9 Traces current and AE count rate of KEK quadrupole magnet.

(a) Case that quench did not occur during dump sequence.

(b) Case that quench occurred.

であるかどうかは実際にクエンチが起きるかどうかを確かめてみてわかるわけで、その意味では予兆があったとしても実用的な意味がどれだけあるか疑問であろう。

ただし、繰り返し何度も使うマグネットにおいて AE データの蓄積が充分ある場合、AE パターンの変化によってクエンチを予測することは可能であると考えられる。このような例としてハイブリッドマグネットの場合が後述されている。

4. アーク検出

絶縁破壊によってアークが生ずると、音響信号および電磁誘導雑音を生ずる。AE センサには単動形と差動形とがあり、圧電素子の一方の電極がセンサのケースと電気的に接続されている単動式のセンサは電磁誘導に応答する。また、圧電素子がケースと電気的に絶縁されている差動式のセンサは基本的にアーク音のみに応答する。

パルスマグネットを複数の単動形センサで監視している時に、通常の励磁とは全く異なる Fig. 10 のような AE 信号が観測された。マグネットの電圧を印加したのと同時に（電流の立上り時に）すべての AE センサが同時に AE 信号を検出している。この励磁の後クライオスタットを開けたところアークが発生していたことが確かめられていた。このように AE センサの特性をうまく使えばアーク事故の発生を監視できる。

また差動式の AE センサは基本的にはアーク音のみに応答するのでアーク発生場所の標定が可能となる。アーク音を AE センサで検出し、マグネットの計測線に生じた絶縁破壊の場所をピンポイントで検出した例がある³¹⁾。

5. AE 計測の問題点と今後の課題

5.1 AE センサの感度のばらつきとオンサイト較正法

常温で同じ感度をもつセンサを、マグネットに同じように取り付けても、極低温状態にすると感度が著しくばらつくことはしばしば経験することである。AE 事象の発生位置を正確に標定したり、そのエネルギーを正確に測定するためには、各 AE センサの感度が正確に較正されなければならない。AE センサの感度が極低温になるとばらつく要因は、主としてセンサとマグネットの音響的結合特性のばらつき、センサそのものの特性のばらつきであると考えられる。これらの要因がセンサの感度に及ぼす影響は非常に複雑であるため、あらかじめ予測することはほとんど不可能である。したがって、センサをマグネットに付けたままで、すなわちオンサイトの状態で、さらに極低温になった状態で感度を較正する必要がある。しかし、超電導マグネットはクライオスタットに封入されてしまうので、一般的に行われているような測定対象に直接的に一定エネルギーの機械的インパクトを与える方法は使え

Fig. 10 AE signals of pulse magnet when the magnet was subject to electric arc.

ない。

超電導マグネットに使われる AE センサは一般に圧電素子でできている。したがって、センサに電圧パルスを加えると圧電素子が歪み音響信号を発生する。この性質を利用してオンサイトで較正する‘2 センサ法’が考えられている。二つのセンサを隣接配置し、マグネットにつけたままで交互に一定の電圧パルスで励振し、電圧パルスを加えない方のセンサで交互に音響信号を検出し、二つのセンサの感度をそれぞれもとめる。その算術平均値を取って互いに隣接するセンサ対の感度とする。隣接するセンサ対一組で一点の AE 信号を検出する。したがって、センサの数は測定点数の 2 倍必要となる。測定にあたっては対になっているセンサからの信号を平均し、先に求めたセンサ対の感度によって較正する。この方法を超電導マグネットに応用した例は無いとされるが、液体窒素での実験では良好な結果が得られている³⁴⁾。

5.2 AE 波の伝播特性

超電導マグネットは導体、絶縁物、巻枠を含む構造材などの複合構造になっており、しかも極低温状態で用いるため AE 波の伝播特性は非常に複雑である。そのため AE 波のエネルギー値や周波数スペクトラムなど

を用いて AE 発生源の大きさ、性質について検討を行なえるには到っていない。AE 計測は、(i) 巻線中にセンサを組み込まなくて良い、(ii) マグネット導体とセンサ間を電氣的に絶縁できるなど他の計測法にない大きな特徴を持っており、AE センサの感度の較正、AE 波の伝播特性把握が十分なされているなら、従来計測が困難であった擾乱のエネルギーの大きさを計測できる可能性を持っている。したがって、マグネット中の AE 波の伝播特性の把握は今後の重要な課題である。

マグネット中の音響伝播特性はマグネットの状態に依存すると考えられ、積極的に音響信号を加えクエンチを検出する試みも行なわれている（後述）。

5.3 マグネットの健全性の常温での監視

超電導マグネットの信頼性、安定性は巻線の剛性、一体性の良さに大きく依存する。巻線のゆるみ、欠陥などは、常温でマグネットに適当な方法で応力に加えその際の AE 特性を調べたり、機械的インパクトを加えそのときの音響伝播特性を調べることでより監視できる可能性がある。

Nb₃Sn 導体は曲げ歪によって特性が劣化することが知られている。Nb₃Sn 導体も曲げ歪を加えると AE

が発生することが見い出されており^{28,35)}, これを利用し, 巻線作業中に導体に過度の歪が加わったかどうかの監視ができる可能性がある。

以上のように超電導マグネットの特性を常温でのAE計測や, 音響伝播特性の計測により行える可能性があり, 今後この方面の研究にも重点を置くべきと考えられる。

6. 結 言

AE技術の応用が現在実用的なレベルに達している他の分野について, 過去の経緯を見ると一般に次のような五つの段階を経てきている。まず最初, (i) AEにより何か非常にエキゾチックなことができるのではないかと期待され, そしていささか誇張された成功例が報告されるが, その後, (ii) 必ずしも言われているような結果が出ないことがだんだんわかってくる。(iii) それに続いて地道な研究が行なわれるようになり, 対象から出てくるAEの理解が深まり, 何ができて(またはできそうか), 何ができないかが明らかになり, (iv) 多くのデータやノウハウの蓄積が行なわれ, (v) 計測技術(ハード, ソフト両方を含め)の発達とともに実用的に十分信頼できる方法が開発される。AEの応用が定着するかどうかは(iii)および(iv)の段階をうまく越せるかどうかにかかっている。

AE技術の超電導への応用に関する研究は1976年のC. F. Old等によるNb₃Sn線に引張り歪を加えてAEの発生の状況を調べたもの²⁸⁾が最初であると思われるが, 超電導マグネットへの応用としては1977年の野村ら²⁹⁾やPasztorら³⁰⁾の論文が最初である。また, 1977年米国のロスアラモスで開かれた超電導マグネットの安定性に関するワークショップで, 超電導マグネットの監視診断技術としてAEがすでに話題になっていた。AEの超電導マグネットへの応用の研究が実質的にスタートしたのが1977年と考えるとすでに現在まで10年が過ぎており, 電圧計測とAE計測とを組み合わせクエンチの原因を診断する技術はすでに上述の(iv)から(v)に入っていると考えられる。一方他の技術に関してはまだ(ii)または(iii)の段階にとどまっているものが多い。

AE技術によるマグネットの監視診断を上述の最終段階にもっていくためには, 1) AEセンサの極低温領域における感度のばらつきの抑制とオンサイト校正法, 2) マグネット中のAE波の伝播特性の解明, 3) AE波の振幅の大きさや周波数スペクトラムと,

擾乱の大きさエネルギーおよび発生源の性質との関係の解明について今後より精力的に研究を進めていく必要がある。

参 考 文 献

- 1) T. J. Fowler: *Proc. 7th Intl. AE Symp.* The Japanese Society for Non-Destructive Inspection, (1984) 421.
- 2) H. Nomura, K. Takahisa, K. Koyama and T. Sakai: *Cryogenics* 17 (1977) 471.
- 3) C. Schmidt and G. Pasztor: *IEEE Tran. Magn.* **MAG-13** (1977) 116.
- 4) P. Turowski: *Proc. 6th Intl. Conf. Magnet Tech. (MT-6)* (Alfa, Bratislava), (1978) 648.
- 5) G. Pasztor and C. Schmidt: *J. Appl. Phys.* **49** (1978) 886.
- 6) G. Pasztor and C. Schmidt: *Cryogenics* 19 (1979) 608.
- 7) See, for example, G. Pasztor and C. Schmidt: *J. Mater. Sci.* **16** (1981) 2154.
- 8) See, for example, O. Tsukamoto and Y. Iwasa: *J. Appl. Phys.* **54** (1983) 997.
- 9) See, for example, H. Maeda, O. Tsukamoto and Y. Iwasa: *Cryogenics* 22 (1982) 287.
- 10) Y. Iwasa, E. S. Bobrov, J. E. C. Williams, O. Tsukamoto, H. Fujita and T. Takaghi: *Cryogenics* 25 (1985) 304.
- 11) H. Nomura, M. W. Sinclair and Y. Iwasa: *Cryogenics* 20 (1980) 283.
- 12) See, for example, *Proc. of the 6th Int'l AE Symp.*
- 13) O. Tsukamoto, M. F. Steinhoff and Y. Iwasa: *Proc. 9th Symp. Engr. Problems of Fusion Research* (IEEE Pub. No. 81 CH 1715-2 NPS) (1981) 309.
- 14) O. Tsukamoto and Y. Iwasa: *Appl. Phys. Lett.* **40** (1982) 538.
- 15) O. O. Ige, A. D. McInturff and Y. Iwasa: *Cryogenics* 26 (1986).
- 16) J. Lore, N. Tamada, O. Tsukamoto and Y. Iwasa: *Cryogenics* 24 (1984) 201.
- 17) F. J. Cogswell, Y. Iwasa, J. W. Lue and

- J. N. Luton: *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 31, Plenum Press, New York (1986).
- 18) Y. Iwasa and M. W. Sinclair: *Mechanics of Superconducting Structures*, (ASME AMD-41), (1980) 109.
 - 19) O. Tsukamoto, J. F. Maguire, E. S. Bobrov and Y. Iwasa: *Appl. Phys. Lett.* **39** (1981) 172.
 - 20) O. Tsukamoto and Y. Iwasa: *Appl. Phys. Lett.* **24** (1984) 922.
 - 21) H. Fujita, E. S. Bobrov and Y. Iwasa: *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 31, Plenum Press, New York (1986),
 - 22) H. Yamajo, H. Fujita, E. S. Bobrov and Y. Iwasa: *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 31, Plenum Press, New York (1986),
 - 23) H. Fujita and Y. Iwasa: *Experimental Mechanics* (1986).
 - 24) S. Nishijima, K. Shibata, T. Okada, K. Matsumoto, M. Hamada and T. Horiuchi: *IEEE Tran. Magn.* **MAG-19** (1983) 216.
 - 25) S. Caspi and W. V. Hassenzahl: *IEEE Trans. Magn.* **MAG-19** (1983) 692.
 - 26) H. Maeda: *Cryogenics* **24** (1984) 208.
 - 27) K. Tsuchiya, *et al.*: *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 31, Plenum Press, New York (1986).
 - 28) C. F. Old and J. P. Charlesworth: *Cryogenics* **16** (1976) 469.
 - 29) K. Jacob, Y. Iwasa, J. W. Lue and J. R. Miller: *Proc. 10th Symp. Fusion Engr.* IEEE Cat. No. 83 CH1916-6 NPS (1983) 754.
 - 30) T. Satow, *et al.*: *IEEE Trans. Magn.* **MAG-21**, (1985) 803.
 - 31) K. Yoshida, M. Nishi, H. Tsuji, Y. Hattori and S. Shimamoto: *Adv. Cryo. Eng.* **31** (1986) 277.
 - 32) S. T. Wang, *et al.*: *IEEE Trans. Magn.* **MAG-17**, (1981) 2190.
 - 33) O. Tsukamoto and Y. Iwasa: *Proc. of 6th Int'l AE Symp.* (1982) 332.
 - 34) O. Tsukamoto and Y. Iwasa: *Proc. of 8th Int'l AE Symp.*, (1986).
 - 35) O. Tsukamoto and Y. Iwasa: *Adv. Cryo. Eng.*, **32** (1986) 259.
 - 36) 土屋 (私信)