III. 超電導マグネットのAE

1. 超電導マグネット開発とAE

前田 秀明

(株)東芝 総合研究所 神奈川県川崎市川崎区浮島町4-1

(1986年11月12日受理)

III. Examples of AE from Superconducting Magnets

1. AE in Connection with the Development of Superconducting Magnets

Hideaki MAEDA

Research & Development Center, Toshiba Corp., Ukishima, Kawasaki, Kanagawa 210

(Received November 12, 1986)

Synopsis :

Application of acoustic emission (AE) measurement to the superconducting magnet is reviewed. Four kinds of applications are available at the moment: (a) Simultaneous measurement of AE and coil voltage, which is used to identify the quench origin. (b) Measurement of AE count rate during coil charging, appropriate to recognize the general trend of mechanical disturbance occurrence in the magnet. (c) Spectrum analysis of an AE signal generated by a vibrator which is suitable for long range diagnosis of the magnet system. (d) Location of electrical breakdown of instrumentation wires. Each of the techniques is briefly reviewed and compared in this paper.

1. まえがき

超電導コイルを励磁していると、チリチリという音がクライオスタットの中から聞こえてくることがある。音は時に非常に大きくなる事もあり、まれにはあるが、音が発生した直後にコイルがクエンチすることもある。一般にノイズとして見過されてきたこの種の音に注目し、組織的な研究が行われるようになったのは1970年代の後半で、野村ら（電子技術総合研究所）¹⁾が、コイルにアコースティック・エミッション(AE)測定検出用の圧電素子を取付け、励磁中のAE計数を測定したのが最初である。この方法は、その後のAE測定の一つの標準的な手法になっており、LCT・コイル²⁾、東北大学ハイブリッド・コイル³⁾、電総研パルス・コイル⁴⁾などにも応用されている。

野村らの測定は音響発生のマクロな変化を観測するものであったが、Turowski (Karlsruhe 原子核研究所)⁵⁾は個々の音響信号に注目し、これをコイル電圧信号と共にシンクロ・スコープで測定する新しい手法を開発した。塚本、Iwasa ら（横浜国立大学、MIT）は、この手法によりクエンチ原因の判定、位置決めが

できる事を実証した^{6)~9)}。現在では、LCT のような大型コイル²⁾から、小型の密巻きコイル¹⁰⁾に至るまで適用され成果を納めている。

励磁中にコイルから発生する音を観察するという受身の方法ではなく、AEセンサーを発振器として使い、その結果生じる弾性波を他のAEセンサーで受信してスペクトル分析することにより、コイル内部状態を把握する方法が、玉田ら（電子技術総合研究所、MIT）により提案されている¹¹⁾。これをクエンチ・ディテクターへ応用する試みもある¹²⁾。LCT コイルの絶縁チェックにAE計測が使用され、成功をおさめたことが最近報告されている²⁾。

以上のように、超電導マグネットへAE計測を応用する方法には、次の4種類がある。

- (a) 個々のAE信号を(電圧信号と共に)測定する、
- (b) AEの計数を測定する、
- (c) AEセンサーを送受信用に使用する、
- (d) 絶縁不良場所の標定に利用する。

本解説に続く後の章で、日本原子力研究所、電子技術総合研究所、東北大学、成蹊大学、近畿大学における最近の研究成果の具体的な紹介がある。本解説では

Fig. 1 Block diagram of instrumentation system.

4 方法について概要を比較紹介する。

2. AE, 電圧信号の同時測定

計測系の例を Fig. 1 に示した。この方法では、クエンチ原因になる機械的擾乱 (conductor motion やエポキシの割れ) が作る AE 信号を正確に捕える必要がある。クエンチは一過性の現象であるから、これを逃すことがないように、計測系にはデーター・レコーダーを入れることが多い。励磁中にコイル電圧と AE 信号を記録し、トランジェント・レコーダーで再生してクエンチ原因を検討する方法を取る。

この種の信号例を Fig. 2 に示す¹³⁾。図は東芝で試作された超流動ヘリウム冷却15テスラ・コイルで得られた、二つのクエンチ信号である。コイルはボア-33mm, 外径140mm, 高さ140mmのエポキシ含浸 Nb₃Sn コイルと、ボア-150mm, 外径276mm, 高さ295mmの非含浸 NbTi コイルから成る。Fig. 2 (a), (b) とともに AE 信号, 下が Nb₃Sn コイル電圧信号である。Fig. 2 (a) の場合, クエンチは14.6テスラで発生したが, ノーマル電圧開始直前に大きな電圧パルスが現れている。Nb₃Sn コイルは, エポキシ含浸してあるので, エポキシの割れや剝離により premature quench が発生するが, この擾乱により線材が磁界を横切り電圧パルスが発生する。擾乱は AE を伴うので, AE パーストが現れる。電圧信号だけではノイズとの判別が付きにくい, このように AE パーストと同期していると, 機械的擾乱がクエンチ原因であることが明確になる。

Fig. 2 (b) は, 15.1 T におけるクエンチ信号であるが, 電圧パルスも AE も現れず, Fig. 2 (a) とは異ったパターンを示す。このような場合, クエンチは熱的な原因によるものであり, この例では短尺の臨界電流に達している。AC ロスやパワー・リード発熱によるクエンチの場合にも同様な信号パターンが見られる。

非含浸コイルの場合, 擾乱は導体の動き (conductor

Fig. 2 AE and voltage signal for a high field magnet¹³⁾. (a) Quenching at 14.6 T in He II. (b) Quenching at 15.1 T in He II.

motion) であるが, Fig. 2 のように擾乱の持続時間は1ミリ秒以下で AE を伴う。大型の LCT コイル²⁾や MFTF コイル¹⁴⁾でも conductor motion の信号が報告されているが, この場合にも持続時間は同程度である。

コイルに取り付けた AE センサーの数を増し, 信号の時間後れを比較すれば, 擾乱の位置決めを行う事ができる⁹⁾。実際には, コイルが異種材料の複合体であるために, この方法で正確な位置決めを行うことは容易ではない。位置標定のしやすい特殊な形状のコイル,

例えばダイポール・マグネット¹⁵⁾, 薄肉ソレノイド¹⁶⁾, 短いソレノイド¹⁷⁾などで成功例が報告されている。Fig. 3にこのような例を示した¹⁷⁾。これは、内径 250 mm, 外径 314mm, 高さ 52mm の Nb₃Sn ソレノイド (非含浸) のクエンチ信号である。直径に比べて長さが短いので、コイルは平面状に近くなり位置標定が行い易い。Fig. 4のように取り付けた四つのセンサーの AE 信号の内、AE 3が一番速く応答している。(a)この部分は、最外ターンに付けた NbTi 線が最も動きやすい場所であること、(b)電磁オシロによる電圧信号測定ではクエンチは外層の 4 層から発生していることなどから、NbTi 線の動きがクエンチを引き起こしていると判定された。この例のように、現時点では位置標定といっても「大体このあたりである」という程度のものであり、狭い範囲に場所を決定できるわけではない。

Fig. 2のような電圧信号を更に詳細に検討すると、擾乱の大きさを定量的に把握する事ができる。コイルの一部が Fig. 5のように電磁力により動き、磁束を横切ると、動いた部分に

$$V = BLv \quad (1)$$

の電圧が発生する。ここで B は磁界、 L は動いた部分の長手方向の長さ、 v は動きの速さである。電圧 V の値を実測し

$$V \times \text{電流} \quad (2)$$

を電圧パルスについて積分すれば、擾乱のエネルギー

Fig. 3 Four AE signals and coil voltage¹⁷⁾. Voltage signal is 500mV/div. Time scale is 0.5ms/div.

Fig. 4 Four AE sensor positions on the winding form¹⁷⁾.

Fig. 5 Deflected conductor segment by the electro-magnetic force.

が求まる。

浦田ら(東芝)¹⁰⁾は、密巻き NbTi コイル (非含浸) の各層に電圧タップを取り付け、上述の電圧 V の値から発熱エネルギーを 26mJ と求めている。これと、電圧パルス終了時点のノーマル電圧からノーマル部の長さ 120mm, 導体が動いた距離 0.13mm を得ている。

コイル・クエンチの原因としては、以上のような機械的擾乱や熱的原因の他に、フラックス・ジャンプやターン間ショートなどがある。Fig. 2の15テスラ・コイルでは、消磁中に低磁界で Fig. 6のような電圧パルスが発生する¹³⁾。このコイルは Nb チューブ法という Nb₃Sn 導体を用いている。この導体は直径 90 ミクロンの Nb チューブ内壁に数十ミクロンの厚さに Nb₃Sn を生成するので低磁界でフラックス・ジャンプが発生

していると推測される。電圧パルスは、AE を伴わず、パルス持続時間も機械的擾乱に比べて長いという特徴がある(低磁界なのでコイルはクエンチしない)。ターン間ショートが発生した場合にも、100 ミリ秒程度の持続時間を持つ電圧パルスが発生する。この場合にも AE バーストは現れない。これらの特徴を知れば、機械的擾乱と区別することができる。

この種の AE 測定をコイル励磁試験に導入した経験に基いて、その利点をまとめると次のようになる。(イ) コイル励磁中、電圧信号にスパイクが現れることがある。この種のスパイクは励磁担当者にとっては不気味な物である。従来のマルチ・ペンによる計測では、スパイクの原因を判別する事は不可能であった。AE 計測の導入により、スパイク発生時点で原因を明確に判断しながら励磁試験を進めることができるようになった。(ロ) コイル・クエンチの原因を明らかにできる。コイル特性が上らない場合には、どのような対策を講じるべきかについて正確な指針を得ることができる。

3. AE計数測定

コイルを励磁していると、無数の AE のバーストが現れる。前節の計測は、この内特定の数個の AE だけに注目するものであった。コイル励磁中に発生する AE 群を森にたとえるなら、上述の方法は森の中の数本の木だけに注目している事に対応する。これに対し、森全体を眺めその広がり、木の分布の様子などを広い立場から観察してみようというのが AE 計数測定の基本的な考え方である。

この種の測定系では、AE 信号はアンプで増幅された後、ディスクリミネーターに入れられる。これは、

Fig. 6 Voltage and AE signal for the flux jump¹³⁾. The vertical scale for the voltage signal is 15mV/div. Time scale is 40ms/div.

Fig. 7 AE count rate patterns³⁾. (a) Count rate increases with current. (b) Count rate shows a peak in the middle.

振動波形を特定のしきい値(例えば 1 V)で弁別してパルスに変換するもので(リング・ダウン法)このパルス列をカウンターで計数し、コイル電流に対する AE の(a)計数率、(b)累積数、(c)エネルギー量の変化などを表示する。

石川ら(東北大学)³⁾によれば、コイル電流に対するエネルギー計数率は次の2種類のパターンに分けられる。

- (i) コイル励磁中電流と共に単調に計数率が増加する場合、
- (ii) コイル励磁中計数率が途中でピークを持ち、その後減衰する場合、

いずれの場合にも、消磁中には途中でピークを示す。例を Fig. 7(a)(b)に示す³⁾。Fig. 7(a)は、内径 80mm、外径 166mm、高さ 115mm、Fig. 7(b)は内径 202mm、外径 334mm、高さ 299mm の NbTi 密巻きコイル(非

含浸)である。Fig. 7(a)は、塚本と Iwasa による電磁力、弾性力、摩擦力が働いている場合についての AE 計数の理論式¹⁸⁾に良く一致している(破線が理論曲線)。

Fig. 7(b)のように計数がコイル励磁中にピークを示すことがあるのは不思議である。浦田ら¹⁰⁾は同様な測定を上述の密巻きコイルについて行い、Fig. 8 のような結果を得ている。図は上から巻き枠内壁に付けた歪みゲージ信号、AE の計数率、コイル電流である。コイル電流が 600 A 以上になると、ゲージ信号が飽和するが、これは電磁力により巻き線が巻き枠から浮き上がるためである。浮き上がり開始と同時に、AE の計数率が急激に減少している。この減少は、消磁過程でコイル電流が 600 A 以下になるまで続き、そこから再び AE 計数率が大きくなる。このような振舞いは、巻き線部の浮き上がりにより、音波の伝搬が著しく低下することに起因している。これはまた、計測されている AE 信号の大部分がコイル内部で発生していることを示唆している(即ち支持系などからきたノイズは少ない)。このような情報は、AE バーストの一つ一つを眺めていたのでは得られないものであり、計数率測定によりはじめて得られるものである。

この種の測定でも、音源の位置標定が可能である。野村ら⁴⁾は内径 400mm、外径 860mm、高さ 625mm の 3 MJ パルス・マグネットの各ダブル・パンケーキ間に 4 個ずつ AE のセンサーを取り付け、センサーへの到達時間差から音源の位置を求め CRT 上に表示する方法を開発している。

近葉ら¹⁹⁾(近畿大学)は、コイル励磁中に発生する AE を FFT 分析する事により、線材の動きとエポキシ・クラックを区別し、これを AE の計数変化と結び付ける事を試みている。これらの詳細については、後の解説に譲る事にする。

4. その他の応用

以上述べてきたのは、励磁中にコイルから発生する音を受動的に聞く方法であった。コイルを振動子などで強制的に叩き、その際に生じる音響波を AE センサーで受信してコイル内部の状態を把握しようとする試みが玉田ら¹¹⁾により成されている。受信波をスペクトル分析すると、マグネットの機械的な共振周波数にピークが現れるが、この周波数はコイル内部の応力分布に依存する。Fig. 9 に MIT のハイブリッド・マグネット で取られたこの種の信号例を示す¹¹⁾。コイル電流

Fig. 8 Strain gauge, AE count rate and coil current for a small solenoid¹⁰⁾.

Fig. 9 Traces of the hybrid magnet frequency spectrum at different magnet current settings¹¹⁾.

と共に内部応力が増加するので、 ν_1 が高周波側にシフトしている。この種の共振周波数の経時変化を長期にわたって観測することにより、マグネットの内部状態(例えばクランプ状態、疲労など)の長期的な監視を行うことができる。

コイル上下に付けた AE センサーの一方に数百 kHz の電圧信号を送り、発生した音波を対向する AE センサーで捕えると、コイル内部の温度変化につれて(熱応力により)共振周波数がシフトするので受信波強度が変化する。石郷岡ら(成蹊大学、MIT)¹²⁾は、この現象を利用した高感度のクエンチ・ディテクターを提案している。

日本の LCT コイルは、当初計測線がクライオスタットに対して絶縁不良を起こした。不良場所標定のために AE センサーが使用された²⁾。これは計測線に高電圧を加えてスパークを発生させて、数個のセンサーへの到達時間差を測定し、絶縁不良場所を標定したものである。この技術は米国 General Dynamics 社の

LCT コイルにも適用され、標定に成功した事を Shen ら (Oak Ridge 国立研究所) が報告している²⁰⁾。

5. まとめ

コイル励磁中に聞こえる音を測定してみようと言う単純な好奇心に発した AE 計測技術が、わずかな間に多岐にわたって広がり、現在ではコイル診断の道具として欠かせぬ存在になった事がおわかりいただけたと思う。昔から聴覚が人間の五感に数えられているように、「聞く」事は、物事の認識に欠くことができないものである。AE 計測によって我々が得た「聴覚」を、単なる診断の具に止めず、さらに有効に活用するならば、超電導コイル技術全体を向上させる上でも寄与するところが多いものと推測される。

参 考 文 献

- 1) H. Nomura, K. Takahisa, K. Koyama and T. Sakai: *Cryogenics* **17** (1977) 471.
- 2) K. Yoshida, M. Nishi, H. Tsuji., Y. Hattori, S. Shimamoto and O. Tsukamoto: *Adv. Cryo. Eng.* **31** (1986) 277.
- 3) 石川 尚, 三浦成人, 中川康昭: *低温工学* **21** (1986) 140.
- 4) 野村晴彦, 立石 裕, 大西利只: 第32回低温工学研究発表会予稿集 (1984) 78.
- 5) P. Turowski: *Proc. 6th. International Conf. on Magnet Technology(MT-6)*, Alpa Press. Bratislava (1978) 648.
- 6) O. Tsukamoto, M.W. Sinclair, M.F. Steinhoff and Y. Iwasa: *Appl. Phys. Lett.* **38** (1981) 718.
- 7) O. Tsukamoto, J.F. Maguire, E.S. Bobrov and Y. Iwasa: *Appl. Phys. Lett.* **39** (1981) 172.
- 8) H. Maeda, O. Tsukamoto and Y. Iwasa: *Cryogenics* **22** (1982) 287.
- 9) O. Tsukamoto and Y. Iwasa: *Appl. Phys. Lett.* **40** (1982) 538.
- 10) M. Urata and H. Maeda: Presented at the Applied Superconductivity Conference in Baltimore (1986).
- 11) N. Tamada, F. Schauer and Y. Iwasa: *Appl. Phys. Lett.* **41** (1982) 36.
- 12) T. Ishigohka, O. Tsukamoto and Y. Iwasa: *Appl. Phys. Lett.* **43** (1983) 317.
- 13) H. Maeda, A. Sato, M. Koizumi, M. Urata, N. Aoki, M. Ichihara and E. Suzuki: *Adv. Cryo. Eng.* **31** (1986) 293.
- 14) J. Lore, N. Tamada, O. Tsukamoto and Y. Iwasa: *Cryogenics* **24** (1984) 201.
- 15) O. Tsukamoto and Y. Iwasa: Stability of superconductors in helium I and helium II, *International Institute of Refrigeration* (1982) 259.
- 16) Y. Iwasa, E.S. Bobrov, J.E.C. Williams, O. Tsukamoto, H. Fujita, T. Takagi: *Cryogenics* **25** (1985) 304.
- 17) H. Maeda, M. Koizumi and S. Murase: *Cryogenics* **23** (1983).
- 18) O. Tsukamoto and Y. Iwasa: *J. Appl. Phys.* **54** (1983) 997.
- 19) 近葉實雄, 竹尾正勝, 山藤 馨, 入江富士男: 第32回低温工学研究発表会 (1984) 74.
- 20) S.S. Shen, C.T. Wilson and J.N. Luton, Jr.: *Adv. Cryo. Eng.* **31** (1986) 285.