研究論文

超電導ソレノイドコイルの巻棒ひずみと安定性の関係

森山 英重, 関谷 洋紀, 三井 久安
岩本 晃史*, 西嶋 茂宏*, 岡田 東一*

〒東芝 横浜市鶴見区末広町 2-4

* 大阪大学産業科学研究所 茨木市美徳ヶ丘 8-1

(1994年7月18日受理)

Relationship between Former Strain and Stability of Superconducting Solenoid

Hideshige MORIYAMA, Hiroki SEKIYA, Hisayasu MITSUI, Akifumi IWAMOTO,*
Shigehiro NISHIJIMA* and Toichi OKADA*

Toshiba Corporation, 2-4 Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama 230

* ISIR, Osaka University, 8-1 Mihogaoka, Ibaraki 567

(Received July 18, 1994)

Synopsis :

To investigate the relationship between former strain and stability of a superconducting solenoid, a test coil was constructed and was applied to a training test. In this test, time dependences of the former circumferential strain ε_θ and quench currents I_q were measured. I_q decreased at the next quenches, when the residual compressive strain ε_θ^R of the former occurred at the previous quench. Especially when the coil emerged from boiling helium at a quench, the absolute value of ε_θ^R increased, and I_q remarkably decreased at the next quench. These occurrences of ε_θ^R could be ascribed to fast change of the Lorentz force and thermal condition at the quenches.

Keywords : superconducting, stability, quench, former strain

1. はじめに

超電導コイルは巻線内または巻線と巻棒の間の絶縁物のクラック、剝離、摩擦に伴う発熱によってクエンチすることが報告されており、そのクエンチ発生メカニズムについて数多くの研究が行われている^{1~5)}。非磁性金属の巻棒と巻線の間（以下、対地絶縁部という）に対地絶縁物を配置した超電導ソレノイドコイルにおいて、対地絶縁部に離型フィルムを装着したり、巻線が巻棒から浮いた状態にすると、クエンチ電流は高くなることが観測されている⁶⁾。換言すると対地絶縁部の接触状態がコイル安定性に大きな影響を与えていると言える。しかし、対地絶縁部の接触状態とコイル安定性の関係に注目した研究は十分であるとは言えない。

この対地絶縁部の接触状態を反映する巻棒のひずみとコイル安定性の関係を詳しく調べるため、本論文で

は、ステンレス巻棒と巻線の間に対地絶縁物を配置した供試コイルを製作し、トレーニング試験において、巻棒の円周方向ひずみ、およびクエンチ電流の関連について測定した。この測定結果を基に超電導ソレノイドコイルの巻棒ひずみと対地絶縁部の接触状態との関連ならびに安定性との関係について考察した。

2. 方 法

2.1 供試コイル

供試コイルの断面構成を Fig. 1a に示す。ただし、図中の r, θ, z は円柱座標軸の方向を示す。コイルの巻棒材質にはステンレス (SUS 304) を用い、巻棒つば部の外径寸法は 180 mm とした。エポキシ樹脂をマトリックスに使用したガラス繊維強化プラスチック (GFRP) の対地絶縁物を巻棒に装着した後、ホルマー被覆の NbTi 超電導線を張力 88 N で 132 列 40 層巻回して巻線を形成した。Table 1 に NbTi 超電導

Fig. 1 Coil construction.

Table 1 Superconducting wire specifications.

Superconductor	Nb-69 %Ti
Copper ratio	3
Diameter of bare wire	0.8 mm
Insulator	formal
Insulator thickness	50 μ m

Fig. 2 Sensors and sensor leads.

線の主な寸法諸元を, Fig. 1 b に巻棒胴部の対地絶縁構成を示す。胴部対地の絶縁耐力を十分に確保するため⁷⁾, 8枚の GFRP を用い, 各 GFRP の厚さを0.5 mm にした。

2.2 トレーニング試験

供試コイルを液体ヘリウムに浸漬し, トレーニング試験を行った。液体ヘリウムがクエンチ時に蒸発し, コイルが液面よりも大きく露出することがある。この

Fig. 3 Time dependence of ε_{θ}^A and ε_{θ}^D before and after 2nd quench.

露出を伴った時のトレーニング試験も実施した。合計7回のトレーニング試験を行い, クエンチ電流 I_q を測定した。試験中の励磁速度は10 A/min で一定とした。

2.3 巻棒ひずみ

Fig. 2 に巻棒ひずみの測定方法を示す。アクティブのひずみゲージをステンレス巻棒の内周面に貼り, 巻棒の円周方向のひずみ ε_{θ}^A の経時変化を測定した。また, ダミーのひずみゲージをステンレス製の被着体に貼り, この被着体を巻棒の内周面に固定し, 被着体の円周方向のひずみ ε_{θ}^D の経時変化を測定した。励磁開始時の ε_{θ}^A および ε_{θ}^D の値はクエンチ回数ごとにゼロと初期化した。アクティブゲージとダミーゲージは受

Fig. 4 Time dependence of ε_{θ}^A and ε_{θ}^D .

ける磁場が同一になるように配置し、巻棒と被着体の温度が同じであれば⁸⁾、 ε_{θ}^A から ε_{θ}^D を減じた値 ε_{θ} は巻棒円周方向の真のひずみになる。また、対地絶縁部が接した状態で巻線が電磁力によって変位すると ε_{θ} が変化する。しかし、対地絶縁部が浮いた状態では ε_{θ} が変化しない。励磁速度は一定であるので、クエンチが発生するまでの ε_{θ}^A 、 ε_{θ}^D の経時変化は ε_{θ}^A 、 ε_{θ}^D と励磁電流との関係を表す。静ひずみ計は動ひずみ計に比べ急激に変化するひずみの測定に適していないが、極低温での微小ひずみの出力安定性が高いので、静ひずみ計を ε_{θ}^A 、 ε_{θ}^D の測定に用いた。ゲージ用リード線の温度変化および磁場変化による測定誤差を小さくするため、リード線は3線方式にして撚り合せた。

Fig. 5 Coil after the training test, arrows indicate the expanded parts of winding.

3. 結 果

3.1 巻棒ひずみ

Fig. 3 にクエンチ2回目のひずみ ε_{θ}^A と ε_{θ}^D の経時変化の測定結果を示す。クエンチ時まで、 ε_{θ}^A および ε_{θ}^D は励磁電流の増大につれて徐々にプラス側（引張側）に大きくなっている。しかも、 ε_{θ}^A は ε_{θ}^D に比べて大きくなっている。クエンチ後、 ε_{θ}^A はマイナス側（圧縮側）へ急激に変化し、それから4分後にゼロへ戻っている。一方、 ε_{θ}^D は瞬時にゼロへ戻っている。

3回目から5回目までも同様な傾向であった。これらの2回目から5回目までのクエンチではコイルが液体ヘリウムから露出しなかった。

次に、Fig. 4 にクエンチ1回目および6回目のひずみ ε_{θ}^A 、 ε_{θ}^D の経時変化の測定結果を示す。1回目と6回目のいずれの ε_{θ}^D も2回目と同様な傾向を示している。一方、クエンチ時までは、いずれの ε_{θ}^A も2回目と同様な傾向を示しているが、クエンチ後はゼロへ完全に戻っていない。

クエンチ1回目は2回目から5回目までと同様にコイルが液体ヘリウムから露出しなかったが、6回目のクエンチ後にコイルの上部 30 mm が露出した。この状態で7回目のトレーニング試験を行ったが、7回目のクエンチ後にコイル上半分が液体ヘリウムから露出した。

トレーニング試験の後、供試コイルを室温に戻して外観を調べた。Fig. 5 にその外観の一部を示す。巻線の外周面の一部が膨らんでいる。また、巻棒の下側つ

Fig. 6 Relationship between ϵ_θ^R and I_q .

* : upper part of coil emerged from LHe,

** : a half of coil emerged from LHe.

ば部の対地絶縁物が飛び出している。

3.2 残留ひずみとクエンチ電流

クエンチ時から10分以上経過すると、クエンチ1回目から5回目までの ϵ_θ^A は安定した値になり、6回目と7回目の ϵ_θ^A もほぼ安定した値になった。この10分以上経過した時の ϵ_θ^A から ϵ_θ^D を減じて巻棒の残留ひずみ ϵ_θ^R を求めた。Fig. 6 aに ϵ_θ^R 、およびクエンチ電流 I_q の測定結果を示す。クエンチ1回目の I_q は臨界電流 I_c に到達している。1回目の ϵ_θ^R は -0.2×10^{-4} になっていて、次の2回目の I_q は I_c の83%に低下している。同様に、6回目の ϵ_θ^R は -3.0×10^{-4} になっていて、次の7回目の I_q は19%に低下している。 ϵ_θ^R がほぼゼロになっている場合、次回の I_q はほぼ I_c に到達している。このような傾向は同様な供試コイルでも見られた (Fig. 6 b)⁹⁾。

ϵ_θ^R が発生した1回目と6回目を比較した場合、いずれの I_q も I_c に到達しているが、コイル上部が液体ヘリウムから露出した6回目の方が ϵ_θ^R の絶対値は大きくなっている。しかも、次の2回目と7回目を比較した場合、2回目より7回目の方が I_q は I_c から大きく低下している。

4. 考 察

4.1 巻棒ひずみ

クエンチ時まで、コイルは発熱しないため、 ϵ_θ^A から ϵ_θ^D を減じて求めた ϵ_θ は真のひずみになる。また、 ϵ_θ^A は ϵ_θ^D に比べて大きくなったことから、 ϵ_θ は励磁電流の増加につれて徐々に引張側に大きくなったことがわかる。したがって、巻線が電磁力によって外径方向に膨らんだ際、超電導線の巻回張力で内径方向に縮んでいた巻棒胴部は、対地絶縁物を介して巻線と接し

ながら外径方向に戻ったと言える。

クエンチ後、コイルは巻線のジュール発熱あるいは巻棒の渦電流損によって昇温するので、 ϵ_θ^A は見かけひずみを含み、マイナス側へ急激に変化したと考えられる。また、使用したひずみゲージの見かけひずみと温度の関係から、アクティブゲージの温度は20 K以上になったことが推定される。

クエンチ時から10分以上経過した時、クエンチ1回目から5回目までの ϵ_θ^A は安定した値になったことから、この時の ϵ_θ^R は真の残留ひずみであることが考えられる。

クエンチ6回目と7回目の ϵ_θ^R がクエンチ1回目の値に比べて1桁以上と大きかったこと、およびトレーニング試験後の巻線の外周面に膨らみが見られたことは互に対応することから、クエンチ6回目と7回目の真の残留ひずみは大きかったこと、このために巻線の外周面の一部は膨らんだことが考えられる。また、この真の残留ひずみは過大であって徐々に緩和したこと、このためにクエンチ時から10分経過しても ϵ_θ^R は完全に安定しなかったことが考えられる。

4.2 残留ひずみとクエンチ電流

クエンチ時、電磁力は急激に減少し、巻線は発熱による温度上昇および熱膨張が急激に起きる。クエンチ1回目および6回目に ϵ_θ^R が発生し、次の2回目および7回目に I_q が低下したことから、この I_q 低下の一つの原因は前回のクエンチ時の電磁力の急激な減少による ϵ_θ^R の発生であることが考えられる。また、コイル上部が液体ヘリウムから露出した6回目はコイル全体が浸漬していた1回目と比べ、 ϵ_θ^R の絶対値が大きかったこと、および7回目の I_q 低下が著しかったことから、 ϵ_θ^R による I_q 低下には温度条件の急激な変化

Fig. 7 Stress-strain curve of the former.

が関係したと考えられる。

4.3 残留ひずみとひずみエネルギー

クエンチ 1 回目および 2 回目の ε_θ の経時変化および ε_θ^R の測定結果に基づき、巻棒胴部の円周方向の σ - ε 線図について考えた。Fig. 7 にその σ - ε 線図を示す。1 回目、励磁開始時の位置は A 点にしてあり、A 点の ε_θ はゼロに初期化してある。電磁力が増大して巻線が外径方向に膨らむにつれて B 点に移行する。B 点で 1 回目のクエンチが発生し、電磁力が急激に減少して巻線が内径方向に戻るため、C 点に移行する。2 回目、励磁開始時の ε_θ はゼロに初期化せず、その位置は 1 回目の C 点に一致させてある。電磁力が増大すると D 点に移行する。D 点で 2 回目のクエンチが発生し、C 点に戻る。A 点と C 点の間には残留ひずみ -0.2×10^{-4} が発生したため、1 回目は巻棒胴部の単位体積当りのひずみエネルギーが図中の斜線部に相当する分だけ増大している。また、巻棒のアクティブゲージに近い微小部分として面積 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 、厚さ 1 mm を考え、巻棒材質のヤング率 $210 \text{ GPa}^{(9)}$ を用いた場合、この微小部分のひずみエネルギーは $-3 \times 10^3 \text{ mJ}$ 以上となり、一般的に知られている最小クエンチエネルギー数 $\text{mJ}^{(1)}$ に比べて極めて大きな値となる。一方、クエンチ 2 回目はひずみエネルギーが増減していない。

巻棒に作用する力は巻棒と巻線の抗力のみであること、およびクエンチ後の電磁力の減少は急激であることから、巻棒ひずみエネルギーのクエンチ後の増大は抗力の増大によるものであり、巻線のひずみエネルギーが急激に増大したことを意味する。また、 ε_θ^R と I_q 低下の関係から、巻線ひずみエネルギーの急激な増大は次回クエンチの I_q 低下に繋がったことが考えられる。

クエンチ 1 回目および 6 回目に ε_θ^R が発生したことに基づき、クエンチ後の電磁力の急激な減少に伴うコイルの zr 面内の変位について考えた。Fig. 8 にその変位の概要を示す。クエンチ前、巻線は電磁力 F_r に

Fig. 8 Schematic displacement after the quench.

よって外径方向へ膨らみ、 F_z によって z 方向へ縮んでいる。クエンチ後、巻線は内径方向および z 方向へ急激に戻ろうとする。内径方向への戻りを抑えようとする力は作用しない。 z 方向への戻り（縮みの減少）は対地絶縁部の摩擦力が抑えようとする。超電導線の巻回張力 F_T と巻棒胴部の抗力 F_N が大きい場合、対地絶縁部は容易にすべらないため、 z 方向の縮みは残留することがあると考えられる。この残留はポアソン比 ν_{zr} による内径方向への変位 δ を伴う。この δ が ε_θ^R の発生原因と考えられる。したがって、 ε_θ^R の発生による I_q 低下を抑制する方法として、対地絶縁部をすべり易くすること、あるいは電磁力による巻線の z 方向の変位が十分に小さくなるように巻線を電磁力相当の力で z 方向に締め付けておくことが考えられる。

5. ま と め

超電導ソレノイドコイルを製作し、トレーニング試験における巻棒の円周方向ひずみ ε_θ の経時変化およびクエンチ電流 I_q を測定した。また、 ε_θ の経時変化から残留ひずみ ε_θ^R を求めた。これらの結果から巻棒ひずみとコイル安定性の関係についてわかったことを以下に述べる。

1) クエンチによってマイナス（圧縮側）の ε_θ^R が発生した場合、次回クエンチの I_q が低下した。 ε_θ^R が発生しなかった場合、次回クエンチの I_q がほぼ I_c に到達した。

2) クエンチ時にコイルが液体ヘリウムから露出した場合、 ε_θ^R の絶対値が大きくなり、 I_q の低下が著しくなった。

3) 圧縮側の ε_θ^R 発生原因は、電磁力によって z 方向へ縮んでいた巻線がクエンチ後に元の形状に戻ろうとしたが、対地絶縁部の摩擦力によって完全に戻れなかったためと考えられる。

4) 圧縮側の ε_θ^R が発生した場合、巻線のひずみエネルギーは急激に増大したこと、この増大は次回クエ

ンチの I_q 低下に繋がったことが考えられる。

5) 1) 項のクエンチ電流の低下を抑制する方法として、対地絶縁部をすべり易くすること、あるいは巻線を電磁力相当の力で z 方向に締め付けておくことが考えられる。

参 考 文 献

- 1) 低温工学協会・編：超伝導・低温工学ハンドブック，オーム社，第1版（1993）559
- 2) S.Nishijima, K.Takahata and T.Okada : Adv. Cryog. Eng. **33** (1988) 135
- 3) E.S.Bobrov, J. E. C. Williams and Y. Iwasa : Cryogenics **25** (1985) 307
- 4) 森山英重，三井久安，井上良之，真田芳直，小

- 林良雄：電気学会論文誌 B **111** (1991) 986
- 5) A.Iwamoto, S.Nishijima and T.Okada : IEEE Appl. Supercond. **3** (1993) 269
- 6) M.Urata and H.Maeda : IEEE Trans. Magn. **MAG 23** (1987) 1596
- 7) 森山英重，三井久安，牛脇義次，渡辺 裕：電気学会研究会資料 EIM-86-116 (1986) 49
- 8) 緒方俊夫，長井 寿，石川圭介：第46回低温工学・超電導学会 E 2-5 (1991) 243
- 9) 森山英重，関谷洋紀，三井久安，西嶋茂宏，岡田東一：第52回低温工学・超電導学会 B 1-20 (1991) 41
- 10) Edited by R.P.Reed and A.F.Clark : *Materials at low temperatures*, American Society for Metals (1983) 377