核融合用超電導導体試験装置, 8.5 T-24 cm 超電導磁石†

島 本 進・安 藤 俊 就
西 正 孝・吉 田 清

日本原子力研究所核融合研究部 茨城県那珂郡東海村

(1979年 7 月30日受理)

A 8.5T-24cm Bore Nb-Ti Magnet for Short Sample Test on Tokamak Superconductor

S. SHIMAMOTO, T. ANDO M. NISHI and K. YOSHIDA

Superconducting Magnet Laboratory, Division of Thermonuclear Fusion
Research Japan Atomic Energy Research Institute
Takai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-11

(Received July 7, 1979)

Synopsis :

This paper describes the design, construction and testing of the high field and large bore Nb-Ti solenoid wound by a technique without cooling channel for the purpose of having both high current density and mechanical rigidity. The first quenching current after the winding was the short sample value, 900 A at 9.3 T on the conductor, and no degradation was found after a lot of quenches. The solenoid can be stably operated up to 8.5 T of the central field, as designed, during short sample tests in the bore. The performance of this magnet is well above the statistical curve of superconducting magnet technology by M.S. Lubell¹⁾.

核融合装置であるトカマクのトロイダル・コイルを
超電導コイルで実現するためには、その特徴に従って
数多くの技術開発項目がある²⁾³⁾。この項目の中で8 T
以上の磁界中で10,000 A以上の超電導導体の開発が重
要なものの一つである。この導体評価のために、8.5
T-内径24 cm (蓄積エネルギー, 1.2 MJ) の超電導磁
石のシステムが、12,000 A-10 V の直流電源と連結し
て建設された (Fig. 1)。この超電導磁石は巻線後第1
回目の試験において、短尺試験の結果と同じ値である
9.3 T にて 900 A で常電導転移を生じた。この超電導
磁石の性能は Lubell¹⁾による既存の超電導技術レベル
を示す平均電流密対磁石の蓄積エネルギーの曲線より

十分上にある高い平均電流密度を示した。

このソレノイドの設計の基本的技術は飛躍的に得ら
れたものでなく、本論文の著者らがこれまでいくつか
の超電導ソレノイド⁴⁾⁵⁾を作ることによって得られた
ノウハウをもとにして、外挿した手法によるものでは
ある。設計の基本思想を以下に列記する。

(i) 適切な電流値の選択：電源および電流供給線の
点からは少い電流値が好ましいが、ソレノイドおよび
クライオスタットの寸法を巻線部の剛性を考えて、モ
ノリス導体とし設計電流値を850~900 Aに選んだ。

(ii) 平角導体の使用：適切な電流値を選ぶことによ
り、平角導体の使用が可能となる。平角導体を使用す
ると導体の占積率が上がるばかりでなく、線の配置が良

† Cryogenics 同時掲載

Fig. 1 8.5 T-24 cm Bore Superconducting Solenoid and Cryostat(center), Magnet Power Supply (right) and 12,000A-10V Short Sample Power Supply (left back).

くなる。さらに、設計巻数と実際の巻数との対応が非常に良くなる。

iii) 冷凍チャンネルをもうけない：巻線中に冷凍チャンネルをもうけると、機械的強度が低下する。クエンチ中の常電導領域の伝播は冷凍チャンネルの無い方がより速やかでかつ広い領域にわたるので、温度の最も高い部分のその値が低下する。ただし、巻棒と巻線

の間には中央の円筒部および両端の円板部にそっていずれにも十分な冷凍チャンネルをもうけた。また、巻線部に冷凍チャンネルをもうけないことによって、高い電流密度でコンパクトな磁石が作れる。

iv) 応力補強材をもうけない：応力計算の結果によると、この規模のソレノイドでは応力補強材は不要であることが解った。このことは前項とともにコンパクトな磁石として好ましい。実際の巻線には最外層にステンレスの巻線を二層ほどこしてある。これは超電導線の最外層部の固定と損傷に対しての保護のためである。

v) 含浸をほどこさない：平角導体を用いることにより線のおさまりが良くなるので、平均熱伝導率を悪くするエポキシ樹脂の含浸を行わない。また、万一巻きもどしの必要性があっても含浸していないと、線の回収が容易である。

vi) 層間にマイラー絶縁材をいれる：層が厚くなると巻線圧力により層間短絡が生じやすい。これをさけるために層間にマイラー絶縁材を挿入する。マイラーは巻線部の幾何学的調整としても意味がある。

vii) 保護系統の速やかな動作：常電導検出後しゃ断開始までの時間を短くしかつしゃ断時間を短縮するために（約1 msec）サイリスターしゃ断器を用いた。電流の減衰時間を短縮するために、保護抵抗の代りに非線形半導体素子であるバリスターを用いた（Fig. 2）、保護系統が速やかに動作することによりエネルギー回収率が上り、万一 training 効果があっても液体ヘリウムの損失が少なくてすむ。

Table 1 に本ソレノイドに用いた超電導導体のパラメータを示す。巻線作業は導体の巻き張力、数個の接続部、導体の位置等に関して充分な注意を払いつつ行われた。完成したソレノイドの諸パラメータを Table 2 に示す。

ソレノイド本体の重量は約 300 kg あり、その他付属物を入れると、冷凍重量は約 350 kg である。この

Fig. 2 Protection System

Table 1 Superconductor parameter

Dimension	1.9mm×3.8mm
Nb-Ti filament, diameter	36 μ
number	2,300
Cu/SC ratio	2.08
Twist pitch	27mm
Thickness of insulation	25±5mm
Critical current	1,085~1,240 A at 8.5 T and 4.2 K
300K/4.2K Resistance ratio	121

Table 2 Solenoid Paramater

Winding	inner diameter	260mm
	outer diameter	412mm
	length	450mm
Total turn	4,346	
Inductance	2.91 H	
Tesla/Amp. at the center	0.0098 T/A	
Current density at 900 A	11,400 A/cm ²	

ソレノイドの予冷はまず液体窒素で行い、次に液体ヘリウムで行う。この作業時間を合計すると約8時間となる。予冷の間の抵抗値の測定結果を、液体窒素によるものについて Fig. 3 に、液体ヘリウムによるものについて Fig. 4 に示す。

本ソレノイドでは training 効果はみられなかった。900 A で常電導転移が生じた時の電流の減衰時間は約7秒であった。このデータの一例を Fig. 5 に示す。電流値の関数としてエネルギー回収率をまとめた結果

を Fig. 6 に示す。この図中 900 A の結果は自然常電導転移によるものであるが、他は保護装置を手動してエネルギー移送を試みたものである。また、図中には液体ヘリウムの蒸発量を示した。900 A における液体ヘリウムの損失量は、クライオスタットが空になるまで蒸発してしまったので数量としてははあくできていない。回収できなかったエネルギーが全て液体ヘリウムの気体潜熱に使われるとして計算した液体ヘリウ

ムの量と実際に損失した液体ヘリウム量を比較すると、後者の方の量が一般に少い。Fig. 6 の結果は900 A で1.2 MJ の蓄積エネルギーをもつ半安定化高電流密度の電磁石としてはエネルギー回収率が高いことを示している。このソレノイドは 8.5 T まで数分間で磁界を上昇または下降でき、制御系統も含めて全システムは使いやすくかつ安定である。また 900 A での常電導転移を今まで20回行っているがソレノイドの劣化はみられない。

このソレノイドが training 効果もなく安定な動作

Fig. 3 Liquid Nitrogen Cooldown Characteristic

Fig. 4 Liquid Helium Cooldown Characteristic

Fig. 6 Energy Recovery in function of Coil Current

が行えていることは、先前列記した設計技術が適切であったことを示しているといえよう。特にNb-Tiを用いて 9Tを越えるこの規模のソレノイドが、含浸をしないで第1回目の試験から一杯の性能を発揮できたことは内外をみても画期的進歩といえよう。

筆者等の技術を忠実に尊重しつつ、导体製作、巻線作業、全系統の組上げを担当した古河電工(株)中央研究所の方々に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) M.S.Lubell : CRYOGENICS 12 (1972) 340
- 2) 原子力委員会核融合会議超電導磁石分科会：超電導磁石分科会報告書，1977年 7 月
- 3) 島本：日本原子力学会誌 21 (1979) 215
- 4) 島本：低温工学 9 (1974) 186
- 5) S.Shimamoto and H.Desportes : Proc. of MT 5 (1975) 579

Fig. 5 Current and Voltage Decay with Ballister after a Quenching