PVF絶縁を施したリアクト&ワインド (R&W) 法による Nb₃Snコイルの開発

久保 芳生[†], 横山 彰一^{*1}, 小松 秀一^{*2}, 平本 清^{*3}

三菱電機 (株) 先端技術総合研究所 神奈川県相模原市宮下1-1-57 ([†]E-mail:Kubo.Yoshio@wrc.melco.co.jp)

^{*1}三菱電機 (株) 先端技術総合研究所 兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1

^{*2}三菱電機 (株) 相模事業所 神奈川県相模原市宮下1-1-57

^{*3}三菱電機 (株) 電力産業システム事業所 神奈川県相模原市宮下1-1-57

(2001年12月3日受理)

Development of Nb₃Sn Coils with PVF Insulated Wire through the React and Wind Technique

Yoshio KUBO, Shoichi YOKOYAMA,^{*1} Shuichi KOMATSU^{*2} and Kiyoshi HIRAMOTO^{*3}

Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Co., 1-1-57 Miyashimo, Sagamihara 229-1195

^{*1}Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Co., 8-1-1 Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki 661-8661

^{*2}Sagami Administration Center, Mitsubishi Electric Co., 1-1-57 Miyashimo, Sagamihara 229-1195

^{*3}Energy & Industrial Systems Center, Mitsubishi Electric Co., 1-1-57 Miyashimo, Sagamihara 229-1195

(Received December 3, 2001)

Synopsis: To develop low cost Nb₃Sn coils, we examined coil fabrication through the react and wind (R&W) technique by narrowing down the target to relatively big bore magnets for industrial applications. We first carried out various strain evaluations for the annealed Nb₃Sn wire. Grasping the characteristics, we set up the allowable strain condition for handling the annealed wire. Using our internal-tin route wire, which has high cost performance, the wire was primarily reacted, then we coated it with cheap formal insulation while controlling the strain applied to the wire and then wound it to Nb₃Sn coils. As a result of evaluating them, we succeeded in passing a current of 284 A for the 23 layers of small-scale coil, which is equivalent to the case of short-length wires, and achieved a maximum field of 6.7 T. We also succeeded in generating a maximum field of 9.5 T for a commercial scale coil. As a result, we were able to demonstrate that the wire doesn't degrade and we were able to fabricate the coil through the R&W technique if the tensile and bending strain were securely controlled.

Keywords: Nb₃Sn coil, react & wind technique, PVF insulation, strain control, internal-tin diffusion process

1. はじめに

最近, G-M (ギフォード・マクマホン) 冷凍機の急速な発展とBi系酸化物超電導リード材の開発により, これらを組み合わせることで液体ヘリウムを使用しない, いわゆる伝導冷却型のマグネットが開発され¹⁾, 種々の工業用途に用いられるようになってきた。一方, 当社では内部拡散法Nb₃Sn線材の低履歴損失化, 高電流密度化, 低コスト化の開発が進行中であり²⁻⁵⁾, この線材によるマグネット応用への展開を進めている。

Nb₃Sn線材をコイル化するには, これまでは線材にガラス絶縁を施して巻線した後, 熱処理するワインド&リアクト(W&R)法が主流であった。しかしながら, この方法ではガラス絶縁に費用と時間がかさむこと, コイル占積率が低くなってしまうこと, 更にはガラス絶縁に含まれるサイジング材の炭化により絶縁耐圧が低下すること等の欠点が存在する。例えば, 後述する実規模コイルのような線長12 km程度のNb₃Snコイルを製作する場合, ホルマール(PVF)絶縁とガラス絶縁では, 大雑把に言って100万円程度の差が生じ

ることになる。本研究開発の目的は低コストなNb₃Snコイルを開発することであり、そのためには加工時の焼鈍が不要等の理由によりコスト的に有利な内部拡散法線材を用いて安価な方法で絶縁、コイル化することが望まれる。それ故、ターゲットを工業用の比較的口径が大きいマグネットに絞り込み、予め線材を熱処理したのち、線材に加わる歪を制御しながらPVF絶縁、及び巻線するリアクト&ワインド(R&W)法でコイル化の検討を行うことにした。本研究では、先ず熱処理済みNb₃Sn線材について様々な歪評価を行ってこれらの諸特性を把握した後、熱処理済みの線材を取り扱う時の許容歪条件を定め、その条件下でコイルを製作、評価してR&W法の可能性を検証した。これらの課題の中で、熱処理済みの線材を取り扱う時の許容歪条件、更には熱処理時、コイル巻線時、冷却時、更にはコイル通電時に線材に加わる様々な歪を推定し、これらに対して線材の臨界電流(I_c)がどの程度劣化するかにについては別に述べる予定である⁹⁾。本論文ではNb₃Sn線材の耐歪特性と、R&W法により小コイルと実規模コイルを製作、評価した結果について報告する。

2. 内部拡散法Nb₃Sn線材の耐歪特性評価

R&W法によるコイル化では、絶縁工程やコイル化工程で曲げ歪、引張り歪を許容範囲内に制御しながらコイル化する必要がある。そこで、先ず内部拡散法Nb₃Sn線材の耐歪特性を把握することにした。評価項目としては、室温での引張り歪に対する I_c 劣化の依存性、室温での曲げ歪に対する I_c 劣化の依存性、室温での曲げと引張り歪の同時印加に対する I_c 劣化の依存

Fig. 1 Cross-sectional view of Nb₃Sn wire by our internal-tin diffusion process before heat treatment. (Wire diameter ϕ 0.65 mm)

Table 1 Specifications of Nb₃Sn wire by our internal-tin diffusion process.

Wire diameter	0.65 mm
Cu to non-Cu ratio	1.60
Number of filaments	8,037
Filament diameters	2.1 μ m
Filament material	pure Nb
Barrier material	Ta
Sn material	Sn-2wt%Ti

性、及び極低温での I_c -歪特性の評価を行った。評価に用いたTi添加Nb₃Sn線材(線径0.65 mm)の断面写真をFig. 1に、諸元をTable 1に示す。この線材を直線の形状で650℃-160時間の熱処理を行い、評価用試料とした。線材の製造方法については文献5を参照された。

2.1 室温での引張り歪に対する I_c 劣化

熱処理したNb₃Sn線材を100 mm程度に切断し、室温で引張り試験機により0.1~0.5%の引張り歪を印加した後歪を除荷した試料を直線用の評価ホルダーに取り付け、液体ヘリウム中で $B=8$ Tの条件下において I_c 評価を行った。結果をFig. 2に示す。Fig. 2において縦軸は、引張り歪ゼロの時の I_c で規格化している。また、図において□と○は、室温においてそれぞれ5回と10回の繰返し引張り歪を与えた時の I_c の劣化率を示している。図の0.1%歪と0.4%歪で見られる凹みは、試料の差、及びホルダーへの取り付けの差に起因したばらつきと考えられる。この結果から、線材は室温での引張り歪に対して、0.3%歪まではあまり

Fig. 2 Dependence of I_c degradation on tensile strain at room temperature for our Nb₃Sn wire. Square and circle symbols represent values at repeated strains of 5 and 10 cycles, respectively.

Fig. 3 Dependence of I_c degradation on bending strain at room temperature for our Nb_3Sn wire. Square and circle symbols represent values at repeated strains of 5 and 10 cycles, respectively.

劣化しないこと、更には繰返し歪に対しても殆ど劣化しないことが判明した。

2.2 室温での曲げ歪に対する I_c 劣化

熱処理した直状の Nb_3Sn 線材を、直径がそれぞれ75 mm, 62.5 mm, 55 mm, 50 mm, 41.7 mm, 35 mmの曲率の溝を切ったGFRP製ホルダーに取り付けることで、室温で曲げ歪を印加した。75 mm, 55 mm, 35 mmの曲率のホルダーでは4ターンのコイル状で、62.5 mm, 50 mm, 41.7 mmの曲率のホルダーでは1ターン弱のリング状で I_c 評価を行った。4.2 K, $B=8$ Tの下での評価結果をFig. 3に示す。図において縦軸は曲げ歪ゼロでの I_c で規格化した値で、横軸は曲げ歪として線径を巻き付けたホルダー直径で除した値で示している。また、□と○は室温においてそれぞれ5回と10回の繰返し曲げ歪を与えた時の I_c の劣化率を示す。図によれば、1ターン弱のリング状試料と4ターンのコイル状試料とではやや曲げ歪に対する依存性が異なっているが、何れも1%歪の辺りから歪の増加に伴って直線的に劣化が進行する様子が認められる。また、歪の繰返しについては、線材を曲げてから一度直線状態に戻し、更に曲げを加えるプロセスで複数回繰返した。5回程度の繰返しだと劣化は認められないが、10回の繰返し曲げ歪では劣化が現れることが分かる。評価用マグネットの口径の関係上、0.5%程度の曲げ歪での劣化率が上手く評価することができなかったため厳密なことは言えないが、

Fig. 4 Dependence of I_c degradation on both tensile and bending strains at room temperature for our wire. Nb_3Sn . The open triangle symbol represents a value at a repeated strain of 6 cycles.

上の結果によれば室温での曲げ歪に対して、0.8%歪程度までは劣化はそれ程大きくならないように思われる。

2.3 室温での引張りと曲げ歪の同時印加に対する I_c 劣化

熱処理した直状の Nb_3Sn 線材を、室温で直径がそれぞれ75 mm, 55 mm, 35 mmのV溝を切ったGFRP製マンドレルに重りをぶら下げて張力をかけた状態で巻線することで引張りと曲げ歪を同時に加えたのち、液体ヘリウム下で I_c 評価を実施した。また、曲げと引張り歪の同時印加の繰返しに対する I_c 劣化率の測定法としては、線材に張力がかかった状態において、測定用マンドレルに巻き付けと巻き戻しを繰返す方法で I_c 評価を行った。4.2 K, $B=8$ Tの条件下での測定結果をFig. 4に示す。図において縦軸は引張り及び曲げ歪がゼロの時の I_c で規格化した値で、横軸は曲げ歪(線径を巻き付けたホルダー直径で除した値)で示している。また、△は室温において6回の繰返し曲げ歪を与えた時の I_c の劣化率である。図に注目すると、曲げ歪が0.87%となるマンドレルに巻き付けた場合は、0.3%程度の引張り歪まで線材に大きな劣化は見られないのに対して、曲げ歪1.18%のマンドレルに巻く場合は引張り歪が約半分の0.15%を越えた程度で線材に大きな劣化が現れることが分かる。また、0.17%の引張り歪がかかった状態で線材に6回の繰返し曲げ歪を印加した場合には、劣化は認められな

Fig. 5 I_c versus tensile-strain properties of our Nb_3Sn wires. The triangle and circle symbols represent data of wire diameters of 0.65 mm and 1.05 mm, respectively.

い、以上の結果から、引張りと曲げ歪の同時印加に対しては、マンドレル径と張力の組み合わせを考慮しなければ、大きな劣化をきたすことが判明した。それ故、安全を考えると巻線等の作業時には曲げ歪0.87%以下、引張り歪0.2%以下の組合わせで行うのが望ましいように思われる。

2.4 I_c -引張り歪特性

文献6において線材の I_c 劣化率を見積もるのに線材の I_c -引張り歪特性のデータが必要なため、 I_c -引張り歪特性の評価も併せて実施した。熱処理した直状の線材を380 mmの長さに切り取り、標点間距離250 mmで取り付けのち、液体ヘリウム中で引張り試験機(島津製:DCS-R-5000型)により引張り歪を印加し、 $B=9$ Tの下で I_c を測定した。測定条件は、0.2 mm/分の速度で線材を引張り、伸びは引張り試験機のクロスヘッドの移動量を差動トランスで検出して算出した。線材の I_c -引張り歪特性をFig. 5に示す。図において縦軸は I_c の最大値で規格化した値で示しており、▲はこれまで評価してきた線径0.65 mmの線材(Table 1に記載)の特性である。図に見られるように、この線材では線径の細さに伴う評価設備の限界により、特性に不連続な段差が発生してしまったため、線径が1.05 mmとやや太い同構造の線材についても歪特性の評価を行った。Fig. 5にはその結果も○で共に示している。両線材の I_c -歪特性に注目すると何れもピーク効果が認められ、 I_c が最大となる歪は両線材共に0.26%であ

Table 2 Specifications of a small-scale Nb_3Sn coil fabricated by the R&W technique.

Inner diameter	180.4 mm
Outer diameter	219.1 mm
Height	79 mm
Layer	23
Total winding turns	2,343
Inductance	1.07 H

ることが、また、破断歪は線径0.65 mmの線材では1.06%、線径1.05 mmの線材では1.11%であることがわかる。以上から、0.4%程度の引張り歪を印加しても、 I_c の劣化率は10%以下にとどまり、この程度までの歪では I_c の急激な劣化は起こらないことが判明した。

3. 小コイルの製作

R&W方式の可能性を実証するため、実機に近いサイズの小コイルを製作した。Fig. 1及びTable 1に示したのと同構造の低履歴損失型 Nb_3Sn 線材(線径0.70 mm、銅比1.65、線長3200 m)を675°C-160時間の条件で熱処理した後、耐歪特性に関する予備実験結果、更には文献6に基づく I_c 劣化率の推定結果から、引張り歪を0.03%以下、曲げ歪を0.5%以下に制御した状態で線材に膜厚0.03 mmのPVF絶縁を施した。この線材を引張り歪を0.03%以下、曲げ歪を0.4%以下に制御した条件でコイルに巻線した。コイルは23層、総巻数2,343ターンのソレノイド巻きで、電磁力に対する補強のため線径1 mmのステンレス線(SUS316L)を外側に4層巻いたのちエポキシ含浸を施した。コイル製作にあたっては、評価時にどの部分からクエンチが発生したかを確認するため、最内層、2層目、3～4層目、5～10層目、11～14層目、15～20層目、21～23層目から電圧タップを取り出した。製作したコイルの諸元をTable 2に、外観写真をFig. 6に示す。

4. 小コイル評価結果

コイルの通電試験は浸漬冷却で行った。Fig. 7にコイルの通電結果をロードラインと共に示す。Fig. 7には、線材の熱処理時に同時熱処理した短尺試料の I_c も共に示している。コイルは1回目の通電試験で250 Aに達した。この値は同時熱処理した短尺線の I_c の91%に相当し、この時コイルが発生した最大磁界 B_{max} は5.9 Tであった。その後、トレーニング回数の進展と共にクエンチが発生する電流は増加していき、3回目の通電では270 A、6回目の通電では284 Aを記録した。

Fig. 6 Overview of a small-scale Nb_3Sn coil fabricated by the R&W technique.

この時のコイルの B_{max} は、それぞれ6.4 T、及び6.7 Tであった。6回目の通電に於いて得られた284 Aという値は、同時熱処理した短尺試料の $I_c(6.7 \text{ T})$ の103%に対応しており、R&W法によるコイル化において劣化することなく、短尺線材と同等の通電ができることを確認した。クエンチの発生箇所を特定するため、各電圧タップから取り出した電圧をアナライジング・レ

Fig. 7 Load line and experimental results of a small-scale Nb_3Sn coil fabricated by the R&W technique. Symbols $\blacktriangle$ represent I_c - B property for the same short-length wire annealed at the same time.

Fig. 8 Transient voltage properties of a small-scale Nb_3Sn coil at third measurement. Symbols, $\bullet$, $\blacksquare$, $\blacklozenge$, $\blacktriangle$, $\blacktriangledown$, $\times$, $+$ and $\circ$ respectively represent coil voltages from the innermost layer; layer 2; layers 3-4, 5-10, 11-14, 15-20 and 21-23; and the current.

コーダーを用いて過渡特性を調べた結果、3回目の通電時にはFig. 8に見られるようにコイルの5～10層目からクエンチが発生していたのに対し、6回目の通電時ではFig. 9に見られるようにコイルの最内層からクエンチが発生していることがわかった。クエンチがコイルの最内層から発生しているということと、短尺線材と同等の I_c を達成したということとを併せて考えると、本コイルでは線材にダメージ等が入って劣化することなく、コイル最大経験磁界にさ

Fig. 9 Transient voltage properties of a small-scale Nb_3Sn coil at the 6th measurement. The 8 symbols mean the same as in Fig. 8.

らされた最内層の中央部で線材が μ_0 の限界を超えてクエンチに達したものと推察される。

5. 実規模コイルでの検証

小コイルでの実証に続いて、著者らは実際に工業用の比較的口径が大きなマグネットに対してもR&W法により製品化が可能かどうかについて検証を行うことにした。CuNb補強Nb₃Sn線材を用いてR&W法で製作された小コイルの例はあるが⁷⁾、線材を補強せずにPVF絶縁する本手法に基づいた実規模コイルの製作は、我々が初めてではないかと思われる。それ故、本手法でコイルを製作するに当たっては、

- ・コイルサイズの増大によりコイルの規模、蓄積エネルギーも大きくなるが、それに対して小コイルと同様の結果が得られるか？
- ・コイル保護等に問題は生じないか？
- ・歪対策に新たな問題は発生しないか？
- ・Nb₃Snコイルに特有な課題は起こらないか？

等の多くの未知な課題が考えられる。これらに対して、どの項目がコイル開発に対して重要か、或いは杞憂の問題であるかは全く未知なため、実際に製品化するのと同規模の実規模コイルを試作し、これを評価することで問題点を明確化する開発手法を採った。コイルサイズと蓄積エネルギーの増大に対しては、クエンチ時におけるコイルのクエンチ電圧と温度上昇を抑えるため、コイルを内層と外層の2分割に分け、それぞれをダイオードにより保護する方式を採用することにした。コイルの発生磁界としては、NbTiコイルとの差別化を明瞭にするため、 B_{max} が10 T以上を目指すことにした。

実規模コイルで用いたNb₃Sn線材の諸元をTable 3に示す。この線材は小コイルで用いた線材と同様の低履歴損失型の内部拡散法Nb₃Sn線材であり、表に見られるように線径を0.78 mmとやや太くしたものを

Table 3 Specifications of Nb₃Sn wire by the internal-tin diffusion process used for a commercial scale Nb₃Sn coil.

Wire diameter	0.78 mm
Cu to non-Cu ratio	1.6
Number of filaments	8,113
Filament diameters	2.7 μ m
Filament material	pure Nb
Barrier material	Ta
Sn material	Sn-2wt%Ti

Table 4 Specifications of a commercial scale Nb₃Sn coil fabricated by the R&W technique.

Inner diameter	179.6 mm
Outer diameter	282.8 mm
Height	244.5 mm
Layer	58
Total winding turns	16,708
Inductance	31.9 H

用いた。この線材を675℃-160時間の条件で熱処理した後、小コイルの時と同様に引張り歪を0.03%以下、曲げ歪を0.56%以下に制御した条件で膜厚30 μ mのPVF絶縁を施した。この線材を引張り歪を0.03%以下、曲げ歪を0.45%以下に制御した条件で58層、総巻数16,708ターンをソレノイド巻きした。なお、コイルは巻棒1個とし、これに内層28層、外層30層を巻く構造を採用している。更に、電磁力に対する補強のため、線径1 mmのステンレス線を外側に4層巻いたのち、伝導冷却タイプのコイルとして用いるため、コイルの外周部に肉厚5 mmの銅の伝導冷却板を被せてからエポキシ含浸を施した。含浸後、コイル保護用のダイオードを内層コイル、外層コイルのそれぞれに並列に結線し、仕上げ作業を完了した。なお、コイルの電圧タップは、内層コイル、外層コイルそれぞれの両端電極部以外に最内層の2層分についても取り出した。製作した実規模コイルの諸元をTable 4に、外観写真をFig. 10に示す。

コイル評価は液体ヘリウムでの浸漬冷却下で実施した。通電試験においては、励磁速度は5~12 A/minで励磁した。結果は、1回目の通電では電流値114.5 Aでクエンチが発生した。この時の B_{max} は7.8

Fig. 10 Overview of a commercial scale Nb₃Sn coil fabricated by the R&W technique.

Tであった。2回目の通電では125 Aで、3回目の通電では124 Aでクエンチが発生した。3回のトレーニングののち、4回目の励磁において B_{max} は8.6 Tまで到達した。この時の電流値は126 Aで、この値は同時熱処理した短尺線の特性和と比較するとロードライン上で76%に相当していた。小コイルの時と同様にアナライジング・レコーダーでクエンチ発生箇所を調べた結果、クエンチは外層コイルから発生していることが判明した。そこで、一度昇温してコイルを観察した所、外層コイルの電極部の固定が不充分であったことが判明し、その部分を改善したのち、再度励磁試験を実施した。その結果、以前の試験結果を上回る139 Aまで通電することができた。この時の B_{max} は9.5 Tであった。この値は、短尺線と比較してロードライン上で84%に相当している。クエンチ時におけるコイル発生電圧の様子を調べたところ、クエンチは内層コイルから発生していることが判明した。最大磁界9.5 Tを発生した時、コイルの蓄積エネルギーは0.3 MJに達しており、Nb₃Snコイルのみで構成されている本コイルにおいては、Nb₃Sn線材のクエンチ伝播速度の遅さのため焼損に至る可能性があり危険と判断してこれ以上の励磁は行わなかった。

6. ま と め

熱処理済みの内部拡散法Nb₃Sn線材について、先ず様々な歪評価を行って歪に関する諸特性を把握した。続いて、それらのデータに基づいて曲げ歪と引張り歪を制御しながら、熱処理済みの線材をPVF絶縁し、コイル化するR&W法により、小コイルと実規模コイルを製作し、これらの実証試験を実施した。その結果、小コイルにおいては通電電流284 Aという短尺線材と同等の通電に成功し、コイル最大経験磁界6.7 Tを達成することができた。また、実規模コイルにおいては、最大経験磁界9.5 Tの発生に成功した。以上の結果から、R&W法において張力、曲げ等をしっかりと管理することにより線材は劣化せず、低コスト

なNb₃Snコイルを製造することが可能であることを示すことができた。

最後に、コイル製作時における引張り歪、曲げ歪の限界値に関して、文献6に記した I_c 劣化率の推定式に基づいて検討を行った。その結果、コイル化による引張り歪及び曲げ歪がもたらす I_c 劣化率を短尺線材の I_c の20%まで許容するならば、小コイルと同じ線材を用いて引張り歪0.03%で巻線を行った場合、発生磁界が同一と仮定すると曲げ歪は0.88%まで許されることになり、内径80 mm程度のコイルまでR&W法で製作できる可能性があることが判明した。

線材のPVF絶縁にあたって、張力管理、曲げ歪管理等にご協力頂きました三枝信氏をはじめとする第一電工株式会社の皆様に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) K. Watanabe, Y. Yamada, J. Sakuraba, F. Hata, C. K. Chong, T. Hasebe and M. Ishihara : Jpn. J. Appl. Phys. **32** (1993) L488
- 2) 久保芳生, 江川邦彦, 永井貴之, 内川英興, 田口 修, 守田正夫 : 低温工学 **31** (1996) 306
- 3) 久保芳生, 江川邦彦, 永井貴之, 内川英興, 田口 修, 守田正夫 : 低温工学 **31** (1996) 314
- 4) Y. Kubo, K. Egawa, T. Nagai, M. Wakata, F. Uchikawa, O. Taguchi, K. Wakamoto, M. Morita, T. Isono, Y. Nunoya, K. Yoshida, M. Nishi and H. Tsuji : Proc. 16th ICEC/ICMC (1997) 1771
- 5) K. Egawa, Y. Kubo, T. Nagai, M. Wakata, F. Uchikawa, O. Taguchi, K. Wakamoto, M. Morita, T. Isono, Y. Nunoya, K. Yoshida, M. Nishi and H. Tsuji : Proc. 16th ICEC/ICMC (1997) 1731
- 6) 久保芳生, 横山彰一, 小松秀一, 平本 清 : 低温工学 **37**(2002)
- 7) 淡路 智, 渡辺和雄, 片桐一宗, 岩崎庄治, 後藤謙次, 定方伸行, 斉藤 隆, 河野 幸 : 低温工学 **33** (1998) 390