ブロンズ法による ITER 用低交流損失・高臨界 電流密度 Nb₃Sn 素線の開発と量産

遠藤 壮, 井上 至, 池田 長, 清水 仁司*, 目黒信一郎*
坂本 久樹**, 田中 靖三**, 西 正孝***, 磯野 高明***
布谷 嘉彦***, 吉田 清***, 辻 博史***

古河電気工業株式会社新機能製品事業部超電導製品部 日光市清滝町 500

* 古河電気工業株式会社新機能製品事業部超電導製品部 東京都千代田区丸の内 2-6-1

** 古河電気工業株式会社研究開発本部 日光市清滝町 500

*** 日本原子力研究所超電導磁石研究室 茨城県那珂郡那珂町向山 801-1

(1996 年 12 月 4 日受理)

Development and Mass Production of Bronze-Processed Nb₃Sn Strand
with Low AC Loss and High Critical-Current Density for the ITER

Sakaru ENDOH, Itaru INOUE, Masaru IKEDA, Hitoshi SHIMIZU,* Shin-ichiro MEGURO,*
Hisaki SAKAMOTO,** Yasuzo TANAKA,** Masataka NISHI,*** Takaaki ISONO,***
Yoshihiko NUNOYA,*** Kiyoshi YOSHIDA*** and Hiroshi TSUJI***

Superconducting Products Department, New Business Development Division, The Furukawa Electric Co., Ltd.,
500 Kiyotaki, Nikko 321-14

* Superconducting Products Department, New Business Development Division, The Furukawa Electric Co., Ltd.,
2-6-1 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo 100

** Research and Development Division, The Furukawa Electric Co., Ltd., 500 Kiyotaki, Nikko 321-14

*** Superconducting Magnet Laboratory, Japan Atomic Energy Research Institute,
801-1 Mukohyama, Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki 311-01

(Received December 4, 1996)

Synopsis :

The developmental work and mass production of high-performance bronze-processed Nb₃Sn superconducting strands for the ITER pulse coils were performed. Using fine hexagonal single-core rods, the undesirable deformation of filament shape was drastically improved and uniform filament-spacing was obtained. As the result, Nb₃Sn strand having a bronze/Nb ratio of 2.3 and filament diameter of 3.0 μm showed a very high non-Cu J_c of 667 A/mm² at 12 T and 4.2 K without external strain. Sufficient low hysteresis loss of 88.2 mJ/cm³ at ±3 T was also observed. These results fully satisfy ITER specifications. The maximum piece length reached 18.9 km, while average piece length was 8.5 km, thus proving excellent workability. By applying the developed technology, mass production of 1,280 km in total was successfully completed. This means that the mass-production technology for the high-performance Nb₃Sn superconducting strand of the ITER was established; thus clearing the way for construction of the reactor.

Keywords : Nb₃Sn wire, ITER, bronze process, bronze/Nb ratio, filament shape

1. はじめに

ITER 計画は、1992 年に実機建設を前提とした工

学的設計活動に入り、1998 年完了を目標に取り組まれている。ここでは ITER 実機に向けたコイル設計の妥当性や製作の実現性を検証することが大きな目的

の一つであり、超電導コイルに用いられる Nb_3Sn 超電導素線にとっては、文字通り ITER 実機に供給しうる性能・製造性の実現が要求される。この工学的設計活動の中で、ITER 実機の中心に位置する中心ソレノイド (CS) コイルの開発を目指して、モデル・コイルの製作が進められている。この CS モデル・コイルは ITER 実機仕様の Nb_3Sn 素線で製作される計画であり、その Nb_3Sn 素線は $\geq 550 \text{ A/mm}^2$ (12 T) の高臨界電流密度 (J_c) と $\leq 200 \text{ mJ/cm}^3$ ($\pm 3 \text{ T}$) の低交流損失の両立が必要不可欠とされている。古河電工は原研と協力しブロンズ法により Nb_3Sn 素線の開発を行い、前述した性能を有する素線を良好な歩留で製造できる技術を確認してきた¹⁻³⁾。一般に、ブロンズ法ではフィラメントを極細化しやすく、低交流損失化に適している。また製法上の特徴として、Sn 単体を用いないことから高温押出が可能であり、押出ビレットを大型化できるため量産にも適している。しかしながら高温での強加工は、フィラメントの長手方向の不均一変形 (ソーセージング) や径方向の複雑変形を誘発し、フィラメント同士の近接やブリッジングにより性能劣化の原因となる。またフィラメント同士のブリッジングの回避と J_c 向上のために、フィラメント間の間隔を大きくすることでフィラメント周囲のブロンズ量を増やし、フィラメント近傍の Sn 供給量を増加させようとしても、ビレット構造上の制約等によりあまり間隔をとることができず、十分な供給源を有し得なかった。

一方、CS コイル最内層の最高磁界経験部に使用される Nb_3Sn 素線では、 $\geq 600 \text{ A/mm}^2$ と更に高い J_c を安定して得られることが望ましく、 Nb_3Sn 素線の改良が急務となっていた。

本論文では、前述した素線製造上の問題に鑑み、交流損失を増大させることなく J_c を向上させた素線の開発を行い、これにより総計 1,280 km (約 5.9 トン) の量産を完了したので、得られた成果について述べ

る。まず素線の開発経緯について、従来の素線との比較により述べ、次に量産結果について述べる。また今回の量産では、要求性能の異なる素線の製作に対してブロンズ/Nb 断面積比 (ブロンズ比) の異なる、すなわちフィラメント本数の異なる 2 種類の素線を用いており、得られた結果の相違についても議論する。

2. 高性能 Nb_3Sn 素線の開発

2.1 開発経緯

ITER 超電導コイル用 Nb_3Sn 素線の開発は、Table 1 に示した 4 段階で進められてきた。Stage 2 では数種類のビレットにより 0.5 トンの試作を通じて ITER 仕様を満足する高性能素線の絞り込みを行い、Stage 3 では Stage 2 で選定された 1 種類のビレットについて 0.5 トン (約 105 km) の製造を通じて安定製造の実証を行ってきた。Stage 2~3 で開発した素線の断面構成を Fig.1 (1) に、得られた諸性能を Table 2 におおの示す。素線構成は製造上の簡便性を考慮し、1 次ビレットはブロンズ中に純 Nb ロッドを 19 芯埋設した構成とし、これを縮径して対辺約 6 mm の複合線としたのち Ta パリア材を介して無酸素銅 (OFC) 管内に 313 本充填して 2 次ビレットとした。これを熱間押出、伸線加工を経て最終径 0.82 mm とした。このときフィラメント径は、ヒステリシス損失が最小になるよう研究開発の結果として選択した $3.5 \mu\text{m}$ となるよう設計している。最終素線を所定の熱処理ポビンに巻き、Ar 雰囲気中で 650°C 、240 時間の反応熱処理を施して諸性能の評価を行った。素線性能はいずれも ITER 仕様を満足するものであり、これを 90.3% と良好な歩留りで製作することに成功した。

Stage 4 ではさらに、コイルの最高磁界部においても十分な臨界電流マージンを確保しうるように J_c 性能の改善を目指した。Stage 4 での製作素線の性能仕様を Table 2 に示す。

Table 1 Development of Nb_3Sn strands for the ITER superconducting coils.

Step	Contents	Manufacturing volume
Stage 1	Planning of QA program	—
Stage 2	Verification of QA program through manufacturing trial of 0.5 tons of strand	0.5 tons
Stage 3	Demonstration of reliability of the production technology by producing 0.5 tons of strand in accordance with ITER specifications	0.5 tons (~105 km)
Stage 4	Required strand production for the CS model coil	2.75+3.1 tons (600+680 km)

Table 2 Specifications of performance of the Nb₃Sn strand for the ITER-CS model coil.

	Results of Stage 3 (former strand)	Specifications of Stage 4 (600 km mass production)	(680 km mass production)
non-Cu J_c (@12 T, 4.2 K, 0.1 μ V/cm)	580 A/mm ²	≥ 600 A/mm ²	≥ 550 A/mm ²
n -value (@12 T, 4.2 K, 0.1~1.0 μ V/cm)	36	≥ 20	≥ 20
non-Cu hysteresis loss (± 3 T)	116 mJ/cm ³	≤ 200 mJ/cm ³	≤ 200 mJ/cm ³
Resistivity of Cu stabilizer (@0 T, ~ 18 K)	$1.14 \times 10^{-10} \Omega \cdot m$	$\leq 2.0 \times 10^{-10} \Omega \cdot m$	$\leq 2.0 \times 10^{-10} \Omega \cdot m$
Residual resistivity ratio	150	≥ 100	≥ 100
Piece length	4,780 m average	$1,540 + 385 \times n$ m (n : integer)	$1,800 + 450 \times n$ m (n : integer)

2.2 開発要素

高性能化のポイントは、ヒステリシス損失を低いレベルで維持しながら、 J_c を向上させることにある。そのためにはフィラメントの異常変形を最小限に抑え

あるいは低減し、フィラメント径やフィラメント周囲のブロンズ量の適正化を図ることが必要である。

従来素線の場合、1次ビレットに19芯のNbを有するサブマルチ・タイプとしていたため局所的なブロンズ比が不均一となり、塑性加工時、特に高温での押出で応力の不均一化を招いていた。そのため最終素線でのフィラメントの変形は、主にサブマルチ・セグメントの最外周部に位置する12本のフィラメントで発生した。これは全フィラメントの6割強を占める数になり、有効フィラメント径の増大やフィラメント同士の近接、熱処理時の不均一反応の割合の増加から、十分な性能を発揮し得なかったものと考えられる。これらのことから素線改良の指針として、ブロンズ比の均一化を念頭にフィラメント径やブロンズ比の適正化を

(1) Strand of Stage 3

(2) Strand of Stage 4

Fig.1 Schematic cross section of developed Nb₃Sn strand.

Fig.2 Magnified SEM image of typical cross section of developed Nb₃Sn strand.

Table 3 Major design parameters of the developed and manufactured Nb₃Sn strand.

Manufacturing process	Bronze process
Material	
Superconductor	Titanium-added Nb ₃ Sn
Stabilizer	Oxygen-free copper
Tin diffusion barrier	Tantalum
Surface coating	Chromium
Dimensions	
Strand diameter	0.81±0.01 mm
Cu/non-Cu ratio	1.5±0.1
Thickness of Cr plating	2.5±0.5 μm
Filament diameter	3.0 μm nominal
Number of filaments	{ ① 8,058 nominal (mainly in 600 km) ② 7,650 nominal (mainly in 680 km)
Bronze/Nb ratio	{ ① 2.3 (mainly in 600 km) ② 2.5 (mainly in 680 km)

行った。

改良された素線の断面構成を Fig. 1(2)と Fig.2に、主要諸元を Table 3 に示す。1次ビレットはブロンズ中に単芯の純 Nb ロッドを埋設した構成とし、これを縮径して対辺約1mmの複合線としたのち Ta バリア材を介して OFC 管内に ①ブロンズ比 2.3 の場合 8,058 本、②ブロンズ比 2.5 の場合 7,650 本を充填して2次ビレットとした。2次ビレットに充填した単芯ロッドは、従来素線の 19 芯ロッドと比較して表面積が5～6倍に増加しており、2次ビレット組立までの製作工程で外来異物の付着混入する危険性が高い。そこで2次ビレット組立段階での異物混入防止策を中心に量産工程の見直しを図った。また断面構成の特徴として Fig. 1(2)に示したように、Nb フィラメントの充填されていない領域、すなわちブロンズのみの領域を素線中心部および Ta バリアとの境界部に設けた。これは、①縮径加工時に素線中心部のフィラメントに働く過大な引張応力を回避する、②ブロンズ比 2.3～2.5 でフィラメントを均等配置した場合に特に熱間押出時に生じるフィラメント・ソーセージングを防止する、③Ta バリア近傍でのフィラメントの異常変形を防止する、④フィラメント群の外周部に高抵抗層を意図的に配置することにより素線の結合損失を低減せしめる等の効果を狙ったものである。

このようにして製作した2次ビレットを、熱間押出や伸線加工を経て最終径 0.81 mm に仕上げた。仕上径が Stage 3 の場合と異なるのは、製作仕様が変更になったことによる。また仕上時のフィラメント径は

3.0 μm となるように設計した。フィラメント径は、Fig. 3 に示すように J_c の最大値の得られる最適値に設定したものである。

2.3 開発素線の評価結果

得られた最終素線を、所定の熱処理ポビンに巻いて Ar 雰囲気中で 650℃、240 時間の反応熱処理を施し、 J_c 、ヒステリシス損失 (P_h) の評価を行った。 J_c は 25 mm 径の SUS パイプに巻回して熱処理したサンプルを、同径の GFRP ポビンに移してクライオスタットに装填し、4 端子法により素線に加わるローレンツ力による歪みが圧縮側に働く場合と拡張側に働く場合とで通電して測定した。このときサンプルの通電試験部はホルダーに固定せず、完全にフリーな状態になるようにした。拡張方向通電で得られた結果を基に、L. T. Summers らによる経験式⁴⁾を用いて温度、磁

Fig.3 Relationship between non-Cu J_c and filament diameter with a bronze/Nb ratio of 2.3.

界, 歪みの補正を加えることで付加歪み無し状態に換算した J_c を算出して評価した。付加歪み無し状態とは, Nb_3Sn 素線に外部から力を付加していない状態を意味し, Nb_3Sn 層自体に素線を構成する他の成分(銅やブロンズ等)に起因する 0.2~0.3% 程度の圧縮歪みが加わった状態であり, ITER における J_c 定義の標準状態である。また P_h はピックアップコイル法により測定・評価した。まず 0~3 T の直流バイアス磁界に三角波の交流磁界を重畳したときの磁化曲線を数点測定し, これらをつなぎ合わせることで 0~3 T の磁界における磁化曲線を得る。このとき磁界振幅 B_m は, バイアス磁界 $B_{dc}=0, 0.5, 1.0$ T のとき 0.25 T とし, $B_{dc}=2.4, 2.8$ T のとき 0.20 T とした。また磁界変化率は, 0.2 T/秒 および 0.4 T/秒の 2 点とした。得られた磁化曲線の面積から 0~3 T における損失を求め, 磁界変化率に対して外挿することで磁界変化率 0 T/秒の値 $=P_{h1}$ を求める。これに 2 を乗じ, 磁界振幅 ± 3 T に対応した損失 $=P_{h2}$ を求め, 更に次式からクロムメッキ部を除く非銅部体積当たりの P_h を求めた。

$$P_h = P_{h2} \times (1 + \text{Cu/non-Cu 比})$$

以上の方法により評価した結果, 97 mJ/cm^3 と損失を低減しつつ, 650 A/mm^2 と ITER 仕様を十分に満足する J_c が得られた⁵⁾。フィラメント形状に着目し

てみると, Fig. 4 に示すように Stage 3 で行った従来素線のフィラメントは, 19 芯のサブマルチ・セグメントの最外周 12 芯で特に偏平が大きく, Ta バリアの近傍では更にそれが助長されている。一方, 今回開発した素線のフィラメントは, 変形の度合いも小さく均一であると同時に, フィラメント間隔も均一である。また Ta バリアとの境界にブロンズ層を設けたことで, この領域でもフィラメントは健全である。これらの効果により, 前述した性能向上が達成されたものと解釈される。以上より Stage 4 での量産を本開発素線で行うこととした。

3. Nb_3Sn 素線の量産結果

Stage 4 での量産は 1994 年より開始した。Table 1 および Table 3 で示したように, 要求性能の異なる素線を 2 期に分けて製造し, 第 1 期の 600 km は主にブロンズ比 2.3 の素線により⁶⁾, 第 2 期の 680 km は主にブロンズ比 2.5 の素線により行った。第 2 期の素線は, 要求性能が軽減されたことにより加工性重視の観点から, 横断面中心部に位置するブロンズのみの領域の占積率を大きくすることで製作した。以下に本量産を通じて得られた結果を順次述べる。

3.1 性能評価結果

J_c のヒストグラムを Fig. 5 に, 平均値等の各種統

Fig. 4 Comparison in the filament shape between (a) strand at Stage 3 and (b) developed strand near the Ta barrier.

Table 4 Statistics on manufactured Nb₃Sn strands for the ITER-CS model coil.

(1) Bronze/Nb ratio 2.3

Properties (units)	J_c (A/mm ²)	n -value	P_h (mJ/cm ³)	ρ_{Cu} ($\times 10^{-10} \Omega \cdot m$)	J_c , filament (A/mm ²)
Number of data	54	54	27	34	54
Minimum	623	33	78.1	0.94	2,227
Maximum	731	43	100.0	1.53	2,612
Average: $\bar{x}$	666.6	37.7	88.16	1.223	2,381.4
Standard deviation: σ	24.7	2.5	5.57	0.150	88.4

(2) Bronze/Nb ratio 2.5

Properties (units)	J_c (A/mm ²)	n -value	P_h (mJ/cm ³)	ρ_{Cu} ($\times 10^{-10} \Omega \cdot m$)	J_c , filament (A/mm ²)
Number of data	40	40	20	20	40
Minimum	582	34	70.1	0.96	2,205
Maximum	665	40	88.7	1.33	2,525
Average: $\bar{x}$	625.2	36.4	82.46	1.137	2,369.0
Standard deviation: σ	17.1	1.6	5.69	0.123	65.3

計量を Table 4 に示す。ブロンズ比のいかんに関わらず J_c は $\bar{x}-3\sigma$ ($\bar{x}$ は平均値, σ は標準偏差を表す) >550 A/mm² でありすなわち 99.9% の確率で仕様を満たしていると言え、安定して高い値が得られている。特にブロンズ比 2.3 では平均値約 667 A/mm² と高い J_c が得られており、ブロンズ比 2.5 に比べて明確な差が見られる。ここで相互比較のため、フィラメント当たりの J_c として構成比から概算評価してみると、Fig. 6 に示すように両者の間で殆ど差は見られない。このことから、前記ブロンズ比の範囲内で生成した Nb₃Sn 相は量的にも質的にもあまり差異がないものと推察することができる。

次に n 値のヒストグラムを Fig. 7 に、非銅部当たり

の J_c との相関をとった散布図を Fig. 8 に、また各種統計量を Table 4 に示す。いずれも仕様値 20 を大幅に越える値が得られている。また Fig. 8 からわかるように、ブロンズ比 2.5 では 2.3 に比べ明確な n 値と J_c との正の相関が見られ、フィラメントの健全性が J_c に影響を及ぼしている様子がうかがえる。ブロンズ比 2.3 と 2.5 の両者でフィラメント周りの局所的ブロンズ比は同一としていることから、素線中心部に配したブロンズのみの領域を大きくしフィラメント数を減らしたことにより、ダメージを受けるフィラメントの割合が増加したことによる影響であると考えられる。

P_h のヒストグラムを Fig. 9 に、また各種統計量を

Fig. 5 Histogram of non-Cu J_c . Fig. 6 Histogram of calculated J_c at the filament.

Fig. 7 Histogram of the n -value.

Table 4 に示す。ブロンズ比 2.3 の場合で、平均値約 88.2 mJ/cm^3 と仕様値の 200 mJ/cm^3 に対して大幅に下回る値が得られており、 P_h は極めて低レベルに抑えられている。更にブロンズ比の大きいほうが平均値約 82.5 mJ/cm^3 と P_h は低くなっているが、非銅部当たりの J_c も低いことから自明の結果である。Fig. 10 は J_c との相関を見た散布図を表すが、 J_c との強い正の相関が見られる。また Stage 3 の結果と比較すると、 P_h を低減せしめつつ J_c が大幅に改善されている様子がわかる。これは前述したように、1 次ビレットを単芯化して 2 次ビレットのスタッキングを行ったことにより、フィラメントの異常変形が抑制され局所的なブロンズ比が均一化されたことによる効果であると判断される。2.3 節で述べた素線開発結果が、本量産においても十分に再現されていると言える。

最後に反応熱処理後の安定化銅部の ρ_{Cu} のヒスト

Fig. 8 Relationship between non-Cu J_c and n -value of the manufactured strand for the ITER-CS model coil.

Fig. 9 Histogram of hysteresis losses at $\pm 3T$.

グラムを Fig. 11 に、また各種統計量を Table 4 に示す。 ρ_{Cu} には素線構成の差は影響していない。また反応熱処理は 650°C 、240 時間で行っているがこの温度領域では安定化銅中への Cr の拡散による汚染は少ないと判断される。Sn 拡散バリアには Ta 単体を用いているが、バリアの損傷に伴う安定化銅中への Sn の拡散による汚染の影響も見られず、その健全性が証明されている。

3.2 伸線加工性評価結果

第 1 期 600 km と第 2 期 680 km の量産における条長を Fig. 12 に、また各種統計量を Table 5 に示す。ここで言う条長とは Table 2 に示した規定条長を満たすものを表しており、その合計がおおの 600 km と 680 km となる。第 1 期では 10 km を越えるものが全体の約 3 割、4 km を越えるものが約 6 割であったのに対し、第 2 期ではおおの約 7 割と約 9 割にま

Fig. 10 Non-Cu J_c and hysteresis losses of the manufactured strand for the ITER-CS model coil.

Fig.11 Histogram of resistivity of the Cu stabilizer.

で向上し、かつ平均条長も 4.5 km から 8.5 km にほぼ倍増している。これは、主に素線断面中心部に位置するブロンズ部の占積率を増加させたことと、量産実績を重ねることにより量産工程の安定化が図られたことによる効果であると推察される。現在工程上の制約により 2 次ビレットの加工途中で 2 分割せざるを得ないが、この点を改善することでさらに単長を向上させることが可能となる。

4. ま と め

ブロンズ法により、ITER で求められる高性能と良好な製造性を有する Nb_3Sn 超電導素線の開発に成功するとともに、ITER-CS モデル・コイル用にその高性能 Nb_3Sn 素線の量産を行った。1 次ビレットを単芯化し細径六角ロッドにより 2 次ビレットのスタッキングを行うことで、扁平を伴うフィラメントの異常変形は大幅に抑止され、局所的ブロンズ比、フィラメン

Table 5 Statistics on piece length of manufactured Nb_3Sn strands.

	600 km (2.75 tons)	680 km (3.1 tons)
Number of strands	132	80
Minimum (m)	1,540	1,800
Maximum (m)	17,710	18,900
Average (m)	4,547	8,505

ト間隔の均一化された素線を製造することができた。ブロンズ比 2.3 の素線ではフィラメント径 $3.0 \mu m$ で最高の J_e が得られ、 $J_e \cong 667 A/mm^2$ (12 T, 4.2 K, 付加歪み無し状態)、 $P_h \cong 88.2 mJ/cm^3$ (非銅部、 $\pm 3 T$) とヒステリシス損失を低減しつつ高 J_e 化を達成できた。この素線により 600 km の量産を行った結果、平均条長 4.5 km、最大条長 17.7 km と良好な加工性を実現できた。さらに素線断面中心部に位置するブロンズのみの領域の占積率を増加させブロンズ比を 2.5 とした素線により 680 km の量産を行ったところ、フィラメントの占積率の減少により若干の J_e の低下はあるもののより良好な加工性を得ることができ、最終的には 10 km を越えるものが全体の 7 割を占めるに至った。いずれの素線においても ITER 仕様を十分に満足するものであり、ITER 実機に供給しうる性能および製造性を兼ね備えた素線の量産技術が確立できた。

著者らは更に、数年後に控えた ITER 実機建設に向けて、コスト・パフォーマンスに優れた素線製造技術の開発に取り組んでいく予定である。

本開発・量産において素線製造技術の確立に御尽力いただいた超電導製品部生産技術課の和田克則氏、長洲義則氏、高木亮氏、測定評価技術の確立と測定に御尽力いただいた同部品質保証課の角田好喜氏、八木沢進氏の各氏に、また本開発・量産全般を通じて有益な御指導・御助力をいただいた日本原子力研究所超電導磁石研究室の安藤俊就氏、高橋良和氏に心より感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) H. Sakamoto, H. Ii, S. Endo, Y. Tanaka, I. Inoue, S. Meguro, M. Ikeda, M. Nishi, T. Ando, T. Isono, Y. Nunoya, Y. Takahashi and H. Tsuji: Proc. of the 9th US-Japan Workshop on HFSC Materials, Wires and Con-

Fig.12 Piece length distribution of finished strands at Stage 4.

ductors and Standard Procedures for HFSC Wire Testing, Kyoto, Japan, March (1995) 21-24

- 2) 西 正孝, 吉田 清, 安藤俊就, 細野史一, 布谷嘉彦, 磯野高明, 高橋良和, 辻 博史: 第51回1994年春季低温工学超電導学会予稿集(1994) 83
- 3) M. Nishi, K. Yoshida, T. Ando, Y. Takahashi, T. Isono, Y. Nunoya, M. Sugimoto, F. Hosono, Y. Wadayama, H. Ogata, Y. Yasukawa, T. Sasaki and H. Tsuji: Proc. of the 15th

International Cryogenic Engineering Conference, Genova, Italy (1994)

- 4) L. T. Summers: IEEE Trans. Magn. **27** (1991) 2041
- 5) 西 正孝, 磯野高明, 布谷嘉彦, 吉田 清, 高橋良和, 安藤俊就, 辻 博史: 第52回1994年秋季低温工学超電導学会予稿集(1994) 198
- 6) 遠藤 壮, 井上 至, 清水仁司, 目黒信一郎, 池田 县, 西 正孝, 磯野高明, 布谷嘉彦, 辻 博史: 第54回1995年秋季低温工学超電導学会予稿集(1995) 204