

(技術資料)

ITER用Nb₃Sn素線Nb₃Sn Strands for ITER

村上幸伸*
Yukinobu MURAKAMI



池谷 大**
Dai IKEGAYA



木藤明男***
Akio KIFUJI



宮崎隆好*****(工博)
Dr. Takayoshi MIYAZAKI

There is an ongoing project,; the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), to initiate artificial fusion reaction. The ITER project will require a large number of Nb₃Sn strands having high critical current density and small hysteresis loss. Japan Superconductor Technology, Inc. (JASTEC) has successfully developed a Nb₃Sn strand which meets all the requirements by improving its structural design and heat treatment processes. JASTEC has already received orders, and Nb₃Sn strands are being produced on a large scale.

まえがき = 地上で人工的に核融合反応を実現することを目的とした国際プロジェクトである国際熱核融合実験炉 (International Thermonuclear Experimental Reactor, 以下 ITER という) 計画が進められている。ITER 計画には現在、日本、欧州、ロシア、米国、韓国、中国、インドの7カ国・地域が参画し、実験炉は今後約10年をかけてフランスに建設され、その後20年間にわたって運転を行う計画となっている。そして、ITER 計画では、50万キロワットの核融合出力を長時間にわたって実現し、核融合エネルギー利用が科学・技術的に実現可能であることを実証することを目標としており、大出力長時間の核融合反応を実現するために超電導コイルが必要となる。

ITER で建設される超電導コイルには、図1に示すとおり、高温のプラズマを閉込めるための磁場を発生するト

ロイダル磁場 (TF) コイル 18 個、プラズマの立上げ、燃焼、立下げを制御するための磁場を発生する中心ソレノイド (CS) コイル 6 個、プラズマの形や位置を制御するための磁場を発生するポロイダル磁場 (PF) コイル 6 個、計 30 個の超電導コイルが配置される。このうち TF コイルと CS コイルには約 540 トンの Nb₃Sn 素線が使用され、そのうちの約 220 トンが日本で調達される。

ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー㈱ (以下、当社という) は、2003 年度に ITER 用 Nb₃Sn 素線の開発に着手し、その後独立行政法人日本原子力研究開発機構からの2度にわたる素線試作の受注を通じて、ITER 用 Nb₃Sn 素線の開発をさらに進めることによって ITER 用 Nb₃Sn 素線が供給可能なメーカーとして認められた。そして、参加7カ国・地域の先陣を切って2008年3月に実施された入札において23.2トンのNb₃Sn素線製作を落札し、2010年2月の完納に向け現在量産を実施している。

本稿では、ITER 用 Nb₃Sn 素線の主な要求仕様について紹介し、当社が開発した素線がその要求仕様を満足することを報告する。また、現在実施している量産についても簡単に紹介する。

1. ITER 用 Nb₃Sn 素線の要求仕様

ITER 用 Nb₃Sn 素線は、NMR 用 Nb₃Sn 線材などのように直接コイルに巻線されるのではなく、例えば TF コイルでは、900本の超電導素線と522本の銅線を段階的により合せたより線を製作し、このより線をジャケット材に挿入して導体化してからコイルに巻線される。運転時には冷却による熱収縮や電磁力などが作用するため、導体内部の各素線には大きな圧縮ひずみがかかることになる。Nb₃Sn 素線はこのひずみによって臨界電流密度 (J_c) などの特性が低下することが知られているが、素線の製造方法によってもひずみ依存性は異なる。Nb₃Sn

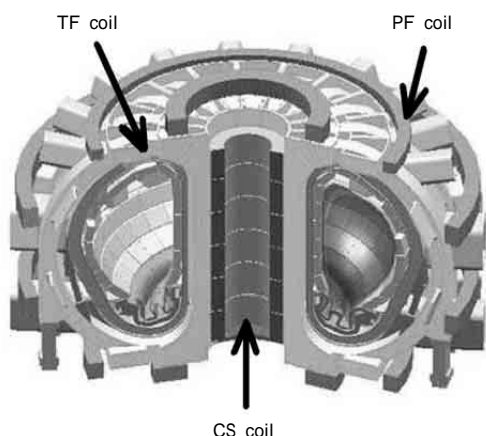


図1 ITER 超電導マグネットの配置図 (出典：独立行政法人日本原子力研究開発機構, <http://www.naka.jaea.go.jp/ITER/iter/index7.html>, (参照2009年1月))

Fig. 1 Schematic view of superconducting magnet arrangement for ITER (Reference: Japan Atomic Energy Agency, <http://www.naka.jaea.go.jp/ITER/iter/index7.html>, (accessed 2009-01))

*ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー㈱ 線材部 **ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー㈱ マグネット部 ***ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー㈱ 営業部 ****㈱神戸製鋼所 技術開発本部 電子技術研究所

表 1 ITER 用 Nb₃Sn 素線の要求仕様
Table 1 Required specifications of Nb₃Sn strand for ITER

Item	Strand for TF coils	Strand for CS coils	Remarks
Strand diameter	0.820 ± 0.006mm	0.830 ± 0.005mm	After Cr plating
Cu to nonCu ratio	1.0 ± 0.1		
RRR	> 100		
nonCu J _c	> 700 A/mm ²	> 750 A/mm ²	at 4.2K, 12T
n-value	> 20		at 4.2K, 12T
nonCu hysteresis loss	< 1,000 mJ/cm ³		at 4.2K, ±3T cycle

素線の製法は、一般的にブロンズ法と内部拡散法に大別され、当社が実施しているブロンズ法はひずみに対して比較的強く、内部拡散法は相対的にひずみに弱いとされている。このことから、ITER 用 Nb₃Sn 素線の要求仕様は、ブロンズ法用と内部拡散法用で J_c が異なる。ここでは、当社が実施しているブロンズ法 Nb₃Sn 素線の要求仕様について紹介する。

ブロンズ法による ITER 用 Nb₃Sn 素線の要求仕様を表 1 に示す。なお、表 1 に示す仕様は開発段階におけるものであり、量産時のものとは異なる。

当社がこれまで扱ってきた NMR 用 Nb₃Sn 線材に要求される仕様と大きく異なる点は、高い J_c と低いヒステリシス損失が挙げられる。通常 NMR 用 Nb₃Sn 線材では、非銅部臨界電流密度 (nonCu J_c) は 12T において 450 ~ 550A/mm² 程度であるが、ITER では 700A/mm² 以上の高い nonCu J_c が要求される。また、NMR マグネットは永久電流モードで運転されるため、NMR 用 Nb₃Sn 線材ではヒステリシス損失そのものが問われることはないが、ITER では低ヒステリシス損失であることが要求される。

2. ITER 用 Nb₃Sn 素線の製作と評価結果

2.1 ITER 用 Nb₃Sn 素線の諸元

表 1 に示した要求仕様をもとに、当社が開発した ITER 用 Nb₃Sn 素線の設計諸元を表 2 に示す。

ブロンズ法 Nb₃Sn 線材の J_c を向上するには、ブロンズ中の Sn 濃度を高めること¹⁾と、フィラメント径を細くすることが有効である。ブロンズ中の Sn 濃度については、Sn の固溶限界である 15.8wt% を超える 16wt% のタイプも NMR 用に開発されている²⁾が、ブロンズ中の Sn 濃度を高くすると冷間加工性が低下するため、量産時の製造安定性を損なうことが懸念された。このことから ITER 用には 15wt% の Sn 濃度を選択した。そして、15wt% Sn ブロンズを用いて、臨界電流密度などの要求仕様を満足するのに最適なフィラメント径を調べるため、フィラメント径をパラメータにした試作を行い、最終的にフィラメント径は 2.8μm とした。通常、NMR 用 Nb₃Sn 線材ではフィラメント径は 4 ~ 6μm であり、J_c を向上させるためにフィラメント径が細くなっていることが分かる。また、拡散バリアを通常の半分以下の厚みにし、より多くの Nb フィラメントを配置する断面構成とすることで nonCu J_c のより一層の向上を図った。

拡散バリアの材質については、Ta を用いるとヒステリシス損失が低減できるが、NMR 用で一般的な Nb を用い

表 2 ITER 用 Nb₃Sn 素線の設計諸元
Table 2 Designed value of Nb₃Sn strand for ITER

Item	Strand for TF coils	Strand for CS coils	Remarks
Bronze matrix	Cu-15wt%Sn-0.3wt%Ti		
Cu to nonCu ratio	1.0		
Number of filament	12,787		
Filament diameter	2.8 μm		
Material of diffusion barrier	Nb		
Thickness of diffusion barrier	7μm		
Wire diameter	0.82mm	0.83mm	after Cr plating
Twist pitch	15mm (right-hand thread)		

てもヒステリシス損失の要求仕様を満足できることが判明したため、コストや加工性を考慮して Nb を適用することとした。

なお、CS コイル用 Nb₃Sn 素線では、12T において 750A/mm² 以上の nonCu J_c が求められる。これは TF コイル用よりさらに高い値であるが、後述のとおり 2 段階熱処理を行うことにより、J_c 特性を 10% 以上向上することが可能であることが判明したことから、CS コイル用 Nb₃Sn 素線についても TF コイル用と同じ断面構成で対応することとした。

2.2 ITER TF コイル用 Nb₃Sn 素線の評価結果

表 2 に示す線材諸元にもとづいて実際に製作した ITER 用 Nb₃Sn 素線の断面写真を図 2 に示す。

製作した素線の両端および中央部からサンプルを採取し、温度 650、保持時間 100h の条件で拡散熱処理を行って特性を評価した。表 3 にその評価結果を示す。また、nonCu J_c および n 値の磁場依存性をそれぞれ図 3、図 4 に示す。表 3 より、製作した Nb₃Sn 素線が全ての要求仕様を満足していることが分かる。そして図 3、図 4 より製作した素線の nonCu J_c および n 値は、要求仕様に対して十分高い値が得られていると同時に、素線の両端および中央部分の特性がよく一致しており、素線長手方向に均一に加工されていることが分かる。

この結果により、当社は独立行政法人日本原子力研究開発機構から、TF コイル用 Nb₃Sn 素線が供給可能なメーカーとして認められた。

2.3 2 段階熱処理による nonCu J_c の向上

Nb₃Sn 線材の熱処理温度は通常、650 ~ 700 が適用されるが、650 ~ 700 の熱処理の前に、より低温での熱処理を追加する 2 段階熱処理を行うことで nonCu J_c が向上することが報告されている。そこで、TF コイル用 Nb₃Sn

表 3 TF コイル用 Nb₃Sn 素線の評価結果
Table 3 Test results of Nb₃Sn strand for TF coils

Item	Specifications	Results		
		Head	Middle	Tail
Strand diameter	0.820 ± 0.006 mm	0.821	0.820	0.821
Cu to nonCu ratio	1 ± 0.1	1.03	0.96	0.96
nonCu J_c at 4.2K, 12T	> 700 A/mm ²	784	787	787
n-value at 4.2K, 12T	> 20	34	36	36
nonCu hysteresis loss at 4.2K, ± 3T cycle	< 1,000 mJ/cm ³	743	771	746
RRR	> 100	113	168	155

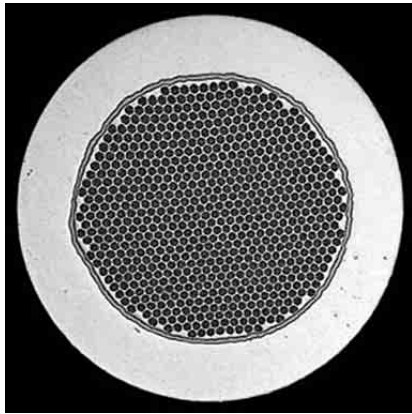


図 2 ITER 用 Nb₃Sn 素線の断面写真
Fig. 2 Cross-sectional view of Nb₃Sn strand for ITER

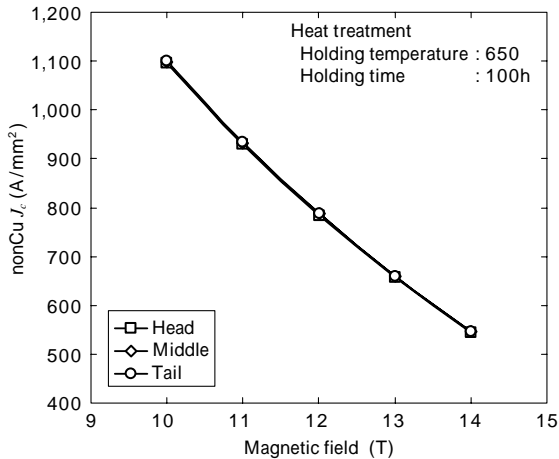


図 3 TF コイル用 Nb₃Sn 素線の 4.2K における nonCu J_c の外部磁場依存性
Fig. 3 Magnetic field dependence of nonCu J_c of Nb₃Sn strand for TF coils at 4.2K

素線の開発段階で試作した線材に、低温側の熱処理温度を 570℃、その保持時間を 100h と 150h の 2 種類とし、さらに 650℃ で 100h の熱処理を追加した 2 段階熱処理を行って nonCu J_c およびヒステリシス損失を評価した。その結果を図 5 に示す。図 5 より、温度 650℃、保持時間 100h の 1 段階熱処理に対して、2 段階熱処理により 10% 以上 nonCu J_c が向上することが確認された。一方、nonCu J_c の増加は、同時にヒステリシス損失の増加を招くが、その増加の割合は 5% 以下にとどまっており、2 段階熱処理を行ってもヒステリシス損失が仕様の範囲内に収まることも確認された。

これらの結果から、最終的に表 2 に示す諸元で製作し

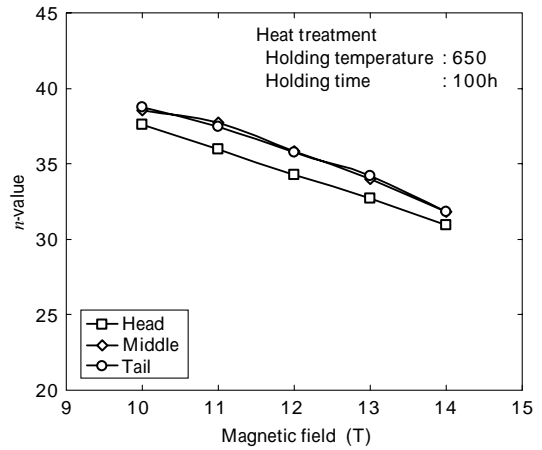


図 4 TF コイル用 Nb₃Sn 素線の 4.2K における n 値の外部磁場依存性
Fig. 4 Magnetic field dependence of n-value of Nb₃Sn strand for TF coils at 4.2K

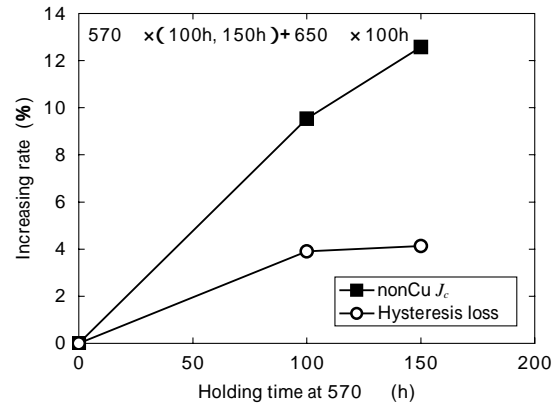


図 5 2 段階熱処理による nonCu J_c およびヒステリシス損失の増加率
Fig. 5 Increasing rate of nonCu J_c and hysteresis loss by 2-step heat treatment

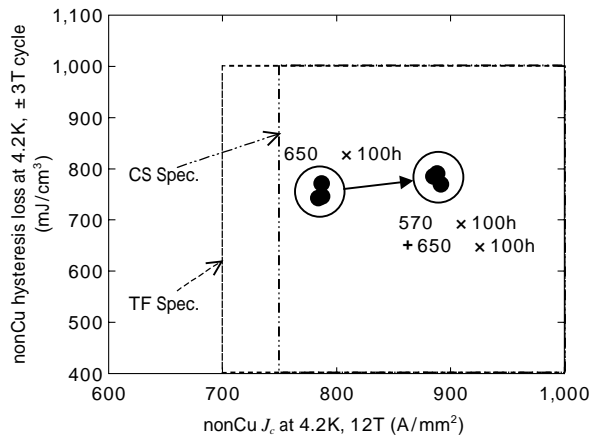


図 6 TF コイル用 Nb₃Sn 素線の nonCu J_c およびヒステリシス損失の 2 段階熱処理による変化
Fig. 6 Change of nonCu J_c and hysteresis loss of Nb₃Sn strand for TF coils by 2-step heat treatment

た TF コイル用 Nb₃Sn 素線に温度 570℃、保持時間 100h の拡散熱処理の後、温度 650℃、保持時間 100h の拡散熱処理を行う 2 段階熱処理を行って nonCu J_c およびヒステリシス損失を評価した。その結果は、図 6 に示すとおりであり、臨界電流密度は要求仕様に対してより多くのマージンが得られ、ヒステリシス損失も要求仕様を満足した。さらに、この結果は CS コイル用 Nb₃Sn 素線の要求仕様に対しても余裕があることが分かる。

表 4 CS コイル用 Nb₃Sn 素線の評価結果
Table 4 Test results of Nb₃Sn strands for CS coils

Item	Specifications	Results			
		No.1 Head	No.1 Tail	No.2 Head	No.2 Tail
Strand diameter	0.830 ± 0.005mm	0.829	0.829	0.829	0.829
Cu to nonCu ratio	1 ± 0.1	0.97	0.91	1.00	0.93
nonCu J _c at 4.2K, 12T	> 750 A/mm ²	888	895	897	878
n-value at 4.2K, 12T	> 20	36	37	42	38
nonCu hysteresis loss at 4.2K, ±3T cycle	< 1,000 mJ/cm ³	874	858	815	843
RRR	> 100	151	144	133	157

2.4 ITER CS コイル用 Nb₃Sn 素線の評価結果

TF コイル用として開発した Nb₃Sn 素線に 2 段階熱処理を行うことで、CS コイル用 Nb₃Sn 素線の仕様を満足できることが確認できた。このため、CS コイル用 Nb₃Sn 素線として新たな断面構成の線材を開発するのではなく、同じ断面構成で熱処理条件を選択することにより、要求仕様の異なる TF コイル用および CS コイル用 Nb₃Sn 素線に対応することとした。

2006 年度に当社は、独立行政法人日本原子力研究開発機構から CS コイル用 Nb₃Sn 素線の試作を受注し、100kg の素線製作を行った。この時製作した Nb₃Sn 素線の評価結果を表 4 に示す。断面構成は TF コイル用 Nb₃Sn 素線と同じであり、nonCu J_c を高めるため前述の温度 570 ，保持時間 100h の熱処理に引続き、温度 650 ，保持時間 100h の熱処理を行う 2 段階熱処理を適用した。表 4 に示すとおり、製作した素線は全ての仕様を満足することが確認された。また、nonCu J_c は、図 6 に示す TF コイル用 Nb₃Sn 素線に 2 段階熱処理を行ったときの値とよく一致しており、複数の素線間で安定した性能が得られていることが分かる。

3. ITER 用 Nb₃Sn 素線の量産

当社は、2008 年 3 月に TF コイル用 Nb₃Sn 素線 23.2 トンを独立行政法人日本原子力研究開発機構より受注し、

現在その量産を進めている。そして 2010 年 2 月の完納に向け、順次出荷していく計画である。これは、1 カ月あたり約 1.8 トンの出荷量に相当し、Nb₃Sn 線材としては 2007 年度実績の約 5 倍の生産量である。このため、新規設備の導入や要員の増員を行って対応しており、生産体制としてはほぼ計画通りの立上げを達成している。今後製品検査を実施していく中で性能安定性が順次明らかとなってくるが、安定した性能の Nb₃Sn 線材を納期どおり納めることで国際貢献していく。

むすび = ITER 用 Nb₃Sn 素線では、高臨界電流密度と低ヒステリシス損失というこれまで NMR 用 Nb₃Sn 線材では経験しなかったレベルの性能が要求されるが、ITER 用に開発した素線がこれらの要求仕様を満足することを確認した。これにより、当社は ITER 用 Nb₃Sn 素線が供給可能メーカーとして認められ、2008 年 3 月に独立行政法人日本原子力研究開発機構が初めて実施した TF コイル用 Nb₃Sn 素線の調達活動において、全量の半分程度を受注した。今後さらに 220 トン規模の調達が順次進められる予定であり、今回の受注量を安定供給することで実績を積み、継続受注につなげるとともに、国際貢献して行く所存である。

参考文献

- 1) T. Miyazaki et al. : IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol.9 (1999) p.2505.
- 2) Y. Murakami et al. : TML Annual report 2003, pp.48-49.