核融合炉用超伝導マグネット構造の構造材料規格の開発*

西村 新^{*1}, 中嶋秀夫^{*2}

Development of Structural Materials Standard for Superconducting Magnet Structures in Fusion Reactor Plant

Arata NISHIMURA^{*1} and Hideo NAKAJIMA^{*1} National Institute for Fusion Science
322-6 Oroshi, Toki, Aichi 509-5292

To confirm design and construction process of large superconducting magnets for fusion application, a rules on superconducting magnet structure has been established as part of a code for fusion facilities in JSME standard. The code consists of Quality assurance, Materials, Design, Fabrication and installation, Non-destructive examination, Pressure and leak testing and Glossary. This code is the world first document covering all manufacturing processes of the large scale superconducting magnet for fusion. This report deals with "Structural materials" in the code. Although the code specifies all materials applicable to the magnet construction, the cryogenic structural materials will be focused and the outline of the contents will be expounded here. A special point described in the code is skipping of mechanical tests at cryogenic temperature. When the chemical composition and mechanical property at ambient temperature meet with the code requirements, according to the code and when any special and additional heat treatments are not performed, the cryogenic mechanical tests are not required.

Key Words : Superconducting Magnet, Fusion Reactor, Cryogenic Structural Materials, Design Strength

1. 緒 言

国際熱核融合炉 (ITER) の設計, 建設が進められている⁽¹⁾. ITER のトロイダル磁場 (TF) コイルは, 高さ約 14 m, 幅約 9 m の巨大なコイルであり, トロイダル方向に 18 個配置される. この TF コイルの製作にあたり, 超伝導素線や電気絶縁材料を除いた, 主としてコイル容器部分を対象とした規格が日本機械学会で制定された⁽²⁾. ここでは, 新たに制定された超伝導マグネット構造規格の中で, 「材料」のセクションに記載された極低温構造材料の規定について, 化学的組成, 機械的性質など, その内容の概要を示す.

2. TF コイルの電磁力とコイル容器

ITER の超伝導磁石システムを図 1 に示す. 磁場閉じ込め核融合装置では, プラズマはドーナツ形状をしており, TF コイルがドーナツ方向の磁場を形成し, ポロイダル磁場 (PF) コイルが垂直方向の磁場を形成する. 図 2 は TF コイルの構造を示したもので, AU, BU がコイル容器で, AP, BP はコイル容器の蓋である. コイル容器内部には Winding pack が装着されている. Winding pack の構造を図 3 に示す. 超伝導導体はラジアルプレートに収められ, そのラジアルプレートが 7 枚重ねられ, 一つの Winding pack を構成する. 図 4 は TF コイルに作用する電磁力のイメージ図である. TF コイル内部を流れる電流と PF コイルや CS コイルが作り出す垂直磁場とが作用し, 電磁力が発生する. 電磁力は電流と磁場との積であり, 12 T (テスラ) の磁場中で 100 kA の電流が流れると 120 トン/m の電磁力が磁場と電流に垂直な方向に発生する. 100 kA の電流が流れる電流経路 (超伝導導体) がコイル断面に 100 本存在すると, マグネットの総電流は 10 MA, 総電磁力は 12,000 トン/m となる. 電磁力が赤道面から上部で時計方向に作用する場合, 赤道面から下部では反時計方向に作用し, 丸い球の上半分と下半分をねじるような形の電磁力が存在する. このような巨大な電磁力はコイ

* 原稿受付 2011 年 9 月 29 日

^{*1} 核融合科学研究所 (〒509-5292 岐阜県土岐市下石町 32206)^{*2} 正員, (独) 日本原子力研究開発機構

E-mail: nishi-a@nifs.ac.jp

Fig. 1 Superconducting coil system in ITER.

Fig. 2 TF coil case and winding pack.

Fig. 3 Structure of winding pack.

Fig. 4 Illustration of electro-magnetic force on TF coils.

ル容器で支えられ、隣り合う TF コイル同士で支え合う構造が採用されている。すなわち、コイル容器は超伝導導体を格納するとともに、核融合装置の形状を維持する電磁力支持構造の役割を果たしている。

超伝導マグネットは 4.5 K (約-269℃) 付近まで冷却され運転される。従ってコイル容器に用いられる構造材料は極低温下においても脆化することなく、高い降伏応力、引張強さを有していることが必要である。また、切断、加工、溶接など、製造工程で必要とされる諸特性に優れていることが期待される。

3. 極低温構造材料

本規格で規定された極低温構造材料の化学組成を材料コードとともに表 1 に示す^(3,4)。基本となる材料は 1980 年代以降に開発されてきた高 Mn 系非磁性鋼である JJ1 とオーステナイト系ステンレス鋼である 316LN である。本規格では、材料コードとして従来の名称の前に FM (Fusion Magnet の頭文字) を付けている。

JJ1 は極低温下で高い降伏強度と優れた靱性を示す。高 Mn 系の低炭素、高窒素含有鋼であり、共金溶接が可能である。316LN は基本化学組成は JIS 規格と同じであるが、(C+N) 量に応じて 3 種類に分けられ、最大添加量は 0.25wt% である。図 5 に示すように、316LN は (C+N) 量の増加に応じて耐力、引張強さが増加することが知られており、一方、溶接性の観点から大量の窒素の固溶は好ましくない。このような経験から添加量とクラス分けが行われた。FM316LNMTTP は超伝導導体のジャケット材料で炭化物の析出をさらに押さえるために炭素量を 0.02

Fig. 5 Relation between yield strength and C+N content.

Fig. 6 Comparison of design strength with test results.

以下とし、その減少分を窒素量で補い、極低温強度を維持している。燐の含有量も低く抑えている。FMJJ1 は完全オーステナイト溶接金属を得るための TIG 溶接用ワイヤ材料である。FMJJ1 と比べると、燐量を抑え、ニッケル量を増やしている。また、酸化物の生成を抑えるために、溶存酸素量の上限を 0.010wt% と規定している。

これらの材料に要求される室温での機械的特性を表 2 に示す。ITER TF コイルでは、400mm を越えるような鍛造品の使用が想定されている。そこで、板厚の効果を考慮し、200mm 以下の鋼板の強度は少し高くされている。ジャケットの板厚は通常 1mm から 2mm であるため、FM316LNMTp には板厚の制限はない。また、断面収縮率の規定もない。本規格では、極低温構造材料の規定であるにもかかわらず、極低温下での規定は何もなされておらず、室温での機械的性質に関する規定しかなされていない。これは後述するように、室温から 4K までの温度範囲の強度特性が室温での強度特性によって記述されるためである。

本規格では、設計降伏応力、設計引張強さは温度の 2 次関数で与えることとされている。規格には表 1 に示されている材料について、溶体化熱処理を行った状態での設計降伏応力、設計引張強さの 2 次関数の各係数を表の形で与えられており、設計者、製造者はそれらの値を用いることができる。このような規定を導入することにより、時間と経費が必要とされる極低温下での引張試験を行わなくても良いこととしている。ただし室温での引張試験は要求されており、表 2 の機械的特性を満足することが求められている。溶体化熱処理後に、超伝導相生成のための熱処理といった追加的な熱処理を行う場合には、極低温下での引張試験を実施し、極低温強度が所定の設計強度を満足することを確認することが求められている。

4K での設計降伏応力が最も高い FMJJ1 の場合の実験値と設計降伏応力との関係を図 6 に示す。図から明らかなように、実験値が設計値を下回ることはない。溶接継ぎ手の設計強度は母材と同じとされており、いわゆる継手効率率は 1.0 である。規格には、新たな極低温構造材料や溶接材料の登録規定も設けられている。

4K での疲労寿命線図も求められており、標準試験片で得られた寿命線図の、寿命の 1/20、応力範囲の 1/2 のいずれか小さい方の値を設計疲労線図とすることが規定されている。

Table 1 Chemical compositions of materials for cryogenic use (mass %).

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	O	C+N
FMJJ1	0.030 max.	0.75 max.	9.00- 11.00	0.035 max.	0.015 max.	11.00- 13.00	11.00- 13.00	4.00- 6.00	0.21- 0.27	-	-
FM316LNL	0.030 max.	0.75 max.	2.00 max.	0.035 max.	0.020 max.	10.00- 14.00	16.00- 18.50	2.00- 3.00	0.05- 0.12	-	≥ 0.080
FM316LNM	0.030 max.	0.75 max.	2.00 max.	0.035 max.	0.020 max.	10.00- 14.00	16.00- 18.50	2.00- 3.00	0.10- 0.17	-	≥ 0.130
FM316LNH	0.030 max.	0.75 max.	2.00 max.	0.035 max.	0.020 max.	10.00- 14.00	16.00- 18.50	2.00- 3.00	0.15- 0.22	-	≥ 0.180
FM 316LNMTp	0.020 max.	0.75 max.	2.00 max.	0.030 max.	0.020 max.	10.50- 14.50	16.00- 18.00	2.00- 3.00	0.11- 0.18	-	≥ 0.130
FMYJJ1	0.030 max.	0.40- 0.60	9.5- 10.5	0.020 max.	0.015 max.	13.5- 14.5	11.5- 12.5	4.5- 5.5	0.11- 0.15	0.010 max.	-

Table 2 Mechanical properties at room temperature of materials for cryogenic use.

Material	Thickness (mm)	YS (MPa)	UTS (MPa)	EL (%)	RA (%)
FMJJ1	$t < 200$	300	620	30	40
	$200 \leq t < 400$	280	600		
FM316LNL	$t < 200$	210	520	30	40
	$200 \leq t < 400$	205	480		
FM316LNM	$t < 200$	245	550	30	40
	$200 \leq t < 400$	230	520		
FM316LNH	$t < 200$	280	580	30	40
	$200 \leq t < 400$	260	560		
FM316LNMTP	-	245	550	35	-

4. 結 言

2008年に制定された超伝導マグネット構造規格の中で、極低温構造材料に注目してその概要を示した。ITER TFコイルの製作準備が進められる中、この規格が、安定した品質を保つとともに、合理的な設計、製作に貢献するものと期待される。また、同時に、規格の不十分さが指摘され、現実の工程に則した更なる追加、変更といった見直しが行われるものと思われる。極低温構造材料に関しては以下のような特徴が取り入れられている。

1. 使用できる極低温構造材料の化学的組成範囲を明確にした。特にFMJJ1については、規格中に明確に化学的組成を記述した。また、室温での機械的性質を表記し、溶体化熱処理材をそのまま使用する場合には、極低温下での機械試験を免除する内容とした。このことによって、経費の節減、施工期間の短縮が期待される。

2. 室温での機械試験を要求し、その結果は表2に示す特性を満足することを求めた。溶体化熱処理後に、超伝導相生成などの追加的な熱処理を行う場合には、別途極低温下での機械試験を実施し、要求値を満足することを確認する必要がある。

参考文献

- (1) Okuno, K., Nakajima, H., Takahashi, Y., and Koizumi, N., “Progress in ITER Project and its Superconducting Magnet System in Japan”, *ASME PVP2009-77478*. (2009).
- (2) 日本機械学会 核融合設備規格 超伝導マグネット構造規格 2008年版, JSME S KA1-2008.
- (3) Nishimura, A., and Nakajima, H., JSME Construction Standard for Superconducting Magnet of Fusion Facility “Material”, *ASME PVP2009-77825*. (2009).
- (4) Nakajima, H., Takano, K., Tsutsumi, F., Kawano, K., Hamada, K., and Okuno, K., “Qualification of Cryogenic Structural Materials for the ITER Toroidal Coils”, *ASME PVP2009-77553*. (2009).