

小特集 磁場閉じ込め核融合炉に向けた超伝導マグネット材料工学

2. 極低温構造材料

濱田一弥

日本原子力研究開発機構

(原稿受付：2006年8月26日)

ITERのトロイダル磁場(TF)コイルおよび中心ソレノイド(CS)は、高電流(40 kA以上)、高磁場(11 T以上)で運転されるため、強大な電磁力を支持する必要がある。そのため、構造材料には、従来の規格材を超える極低温での高い強度と靱性が要求され、日本が開発したオーステナイト系ステンレス鋼であるJJ1, JK2, 高強度型SUS316LNが使用される。本稿では、磁場閉じ込め核融合炉用超伝導マグネットで使用される低温用構造材料について、ITERを例にとり、マグネットに作用する電磁力および設計に対する要求を交えてこれらの構造材料の特性を紹介し、原型炉における構造材料についての課題を提起する。

Keywords:

ITER, cryogenic structural material, toroidal field coil, JJ1, JK2, stainless steel

2.1 はじめに

トカマク方式の超伝導マグネットシステムは、トロイダル磁場(TF)コイル、ポロイダル磁場(PF)コイルおよび中心ソレノイド(CS)等から構成され、それぞれのコイルが様々な通電パターンで運転される。コイルの高磁場化と大電流化により、発生する電磁力は大きくまたコイルに作用する電磁力は複雑であるので、核融合炉用超伝導コイルシステムにおける電磁力を支持するための構造物の占める割合は極めて大きい。ITER超伝導コイル[1]は、過去に例のない極めて高い電磁力が発生するので、従来の規格にない、あるいは規格にあってもほとんど製作経験がないような最先端の高強度・極低温用ステンレス鋼を使用する必要がある。

日本は早くから核融合炉を指向した高強度極低温用ステンレス鋼の開発に着手し[2]、ITERにおいて、日本が開発したJJ1鋼[3]やJK2鋼[4]が採用されるに至っている。本章では、ITERを例にとり、構造材料への機械強度要求と、これを満足する特性を持つ、JJ1, JK2鋼および高強度型SUS316LN[5]を紹介し、ITER後の原型炉用構造材料について課題を提起する。

2.2 大型マグネットの電磁力と構造

図1は、ITER TFコイルが68 kA, 11.8 Tで運転された時に作用する電磁力の方向と大きさを図示したものである。TFコイルには、面内力(フープ力)と面外力が働く。TFコイルの励磁によって生ずる面内力は、図のように作用し、D型形状であることやトロイダル配置により、磁場の強いTFインボード側(D型の直線側)の面内力が大きい。そのため、コイルには、トカマク中心方向への向心力が作用する。

面外力は、TFコイル電流とCSおよびPF磁場の相互作用により、トロイダル方向に発生する。図に示すように、面外力は、TFコイルを捻るような力であり、転倒力となる。

これらの電磁力を支持するため、ITER TFコイルは、肉厚が100 mmを超える極厚ステンレス鋼を材料とするコイル容器およびコイル支持構造物から構成されている。図2にTFコイル構造物の概略を示す。TFコイルは、D型に巻かれた超伝導導体が、ラジアルプレート(厚さ約110 mm)のステンレス圧延板に高精度で機械溝加工されたD型プレートにはめ込まれて、コイル容器に収められる構造である。向心力の支持方式として、ITERでは、TFコイル容器のインボード側をクサビ形状とし、18個のTFコイルが互いに支持し合うウェッジ方式を採用している。また、面外力を支持するために、インボード側の上下に機械加工されたキイ溝にせん断キイを打ち込むとともに、アウト

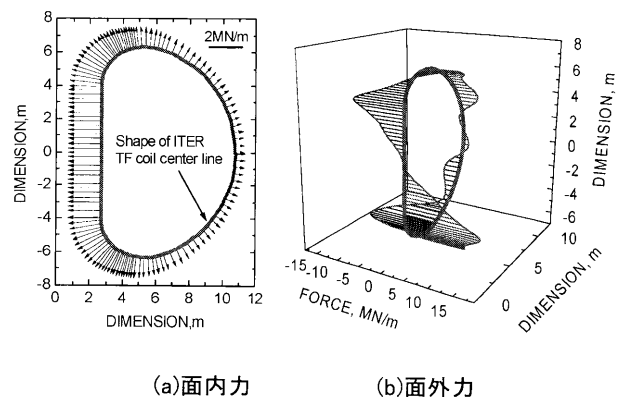


図1 ITER TFコイルに作用する電磁力。TFコイル励磁時の面内力(a)に加えPFコイルの運転により、面外力(右)が発生する。両図ともTFコイル(D形状)から伸びた線の向きと長さが、電磁力の方向と大きさ(MN/m)を表す。

2. Cryogenic Structural Materials

HAMADA Kazuya

corresponding author's e-mail: kazuya@jaea.go.jp

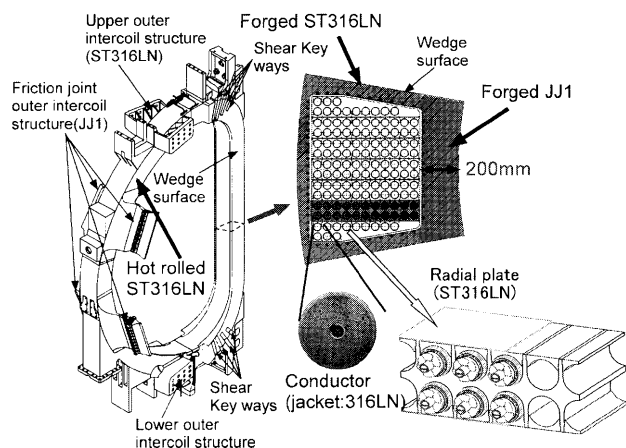


図2 ITER TF コイル電磁力支持構造物。

ボード側には、コイル間支持構造物（インターコイルストラクチャー）が配置され、TF コイル同士を、渦電流ループを切るための絶縁体を介して連結している。

TF コイルおよびCSの導体には、直径0.8 mmのNb₃Sn超伝導素線を約1,000本束ねた燃線が、金属製保護管（コンジット）に挿入された、ケーブルインコンジット導体を使用する。Nb₃Snは脆く、ひずみによって超伝導特性が劣化するため、導体はコイル形状に巻き線加工された後、650℃、240時間の超伝導生成熱処理を行う必要がある。

以上のように、構造材料の用途は、(1)コイル構造物と(2)導体コンジット、に大きく分けることができ、要求される性能は用途に応じて異なる。

2.3 構造材料に対する機械的特性の要求

応力解析[6]により、コイル構造物、コンジットの応力レベルが評価され、材料への耐力、引張強さ、伸びの要求値が決定される。また、構造物が、不安定破壊を起こさないよう十分な破壊靭性値が要求される。靭性の評価については、簡便な方法として、シャルピ衝撃試験があるが、4.2 Kでの試験では、破断時の温度上昇により正確な評価が困難であること、シャルピ衝撃試験値自体は設計には直接利用できないことから、弾塑性破壊靭性 J_{IC} 試験 (JIS Z2284) により測定される、平面ひずみ破壊靭性値 (K_{IC}) を構造物使用温度での靭性の指標に用いている。

TF コイルは一定電流で運転されるが、プラズマショット回数 (ITER では3万回) だけ電磁力が繰り返し荷重として作用する。また、CSはプラズマ電流駆動のため、パルス的な通電運転が行われ、1回のプラズマ運転において2回の応力ピークが発生し、繰り返し荷重の回数は合計6万回となる[7]。

ITER では、上述の繰り返し荷重に対して、材料の繰返し応力 - 破断回数 (S-N) 特性に基づく疲労寿命評価に加えて、ITER 完成後コイルへのアクセスが困難であるという理由から、構造材料にき裂が発生し、不安定破壊を引き起こさないように、補足的に、線形弾性破壊力学に基づく、疲労き裂進展に対する初期許容評価を取り入れることが提案されている[6]。すなわち、Paris 則に基づく疲労き裂進

展速度の4 Kでの測定値から、設計回数の繰り返し荷重が作用した後に、以下の条件を満足する初期き裂を求める、

- 1) 部材を貫通しないこと。
- 2) 部材の許容応力を超えないこと。
- 3) 成長したき裂の応力拡大係数が、材料の設計破壊靭性値 ($= K_{IC}(J)/安全率$) を超えないこと。

き裂進展解析の結果、初期き裂が検出可能な大きさではない時、構造物の設計変更が行われる。

このように、ITER 超伝導コイルに使用される構造材料には、耐力、靭性などの静的な強度とともに、疲労といった動的な強度の把握が重要となる。

2.4 JAERI-BOX

構造材料の性能は、核融合炉の設計条件に大きく依存し、炉設計の進展とともに材料開発の目標が明確になってきた。1980年代、ITER 概念設計活動と並行して、日本独自の核融合実験炉 (Fusion Experimental Reactor: FER) の設計活動[8] がなされ、この中で、図3に示すように、4.2 KにおけるTF コイル構造材料の目標値として、1,200 MPa以上の0.2%耐力と200 MPa√m以上の破壊靭性値 $K_{IC}(J)$ が設定された。同図に示すように、316系ステンレス鋼では耐力が上がると、靭性は低下する性質があり、新しく設定した目標領域は、従来 (当時) の低温構造材料の強度レベルをはるかに超えるものであった。通称「JAERI (日本原子力研究所の略称) - BOX」と呼ばれたこの領域を目標として、オーステナイト系ステンレス鋼の材料開発が積極的に行われた[9]。FERの設計結果は、炉の大きさ、コイルの電流、発生磁場が現在のITERのそれらに近いものであった[10]。ITER TF コイルでは、最も強度を要求される構造材の0.2%耐力の規格値は1,000 MPa以上、万一支持構造物に大きなき裂が発生した場合でも、コイルが不安定破壊しないよう、 $K_{IC}(J)$ は200 MPa√m以上が設定されている。こ

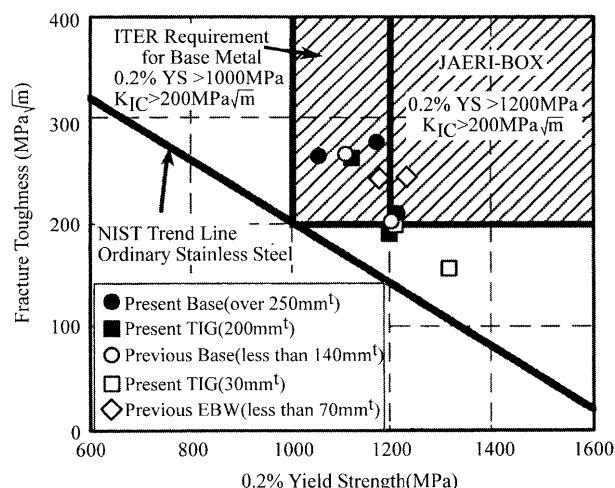


図3 4.2 Kにおける構造材料の0.2%耐力と破壊靭性値に対する目標特性 (JAERI-BOX: 耐力1,200 MPa以上、 K_{IC} 200 MPa√m以上の領域)、プロットした点は、JJ1およびJK2の母材と溶接部の機械試験の実績値。ITERでは最も高い応力部に使用される材料に対して、耐力1,000 MPa、 K_{IC} 200 MPa√m以上が設定されている。

うして、JAERI-BOX 達成の努力の中で開発された材料が、ITER で採用されるに至っている。

2.5 極低温構造材料の開発

1982年以來、鉄鋼メーカーおよび大学関係者の協力を得て、約100鋼種の候補材について4Kでの機械強度評価を行い、大型鋼塊材として高強度、高靱性の達成が可能な5鋼種(JJ1, JN1, JN2, JK2, JKA1)が選定された[2]。また、規格材である316LNについて、強度要求仕様に応じ、化学成分の仕様が決定できるよう、基本データが収集された。

詳細は参考文献[2, 4, 9, 11-16]に譲るが、これまでの開発のポイントは、以下のとおりである。

- (1) Fe-Mn-Cr および Fe-Ni-Cr 鋼をベースとしたオーステナイト系ステンレス鋼として、Nの固溶強化作用を利用して、4Kでの強度を高めた。
- (2) ステンレス鋼において、 δ フェライト、非金属介在物および析出物が増えると、靱性が大きく劣化する。また、加工等によりマルテンサイト変態し磁性体化することを防止する必要がある。そこで、安定な完全オーステナイトが得られるよう化学成分設計(図4)を行い、機械特性面からも最適化を図った。また、製造プロセスでは、素材を厳選しP, SおよびSi等の不純物を低減し、真空脱炭やエレクトロスラグ再溶解等の精製および素材の均質化を図った。
- (3) コンジット材料に通常のステンレス鋼を使用した場合、650°C、240時間の超伝導生成熱処理により、炭化クロム等の化合物($M_{23}C_6$)が結晶粒界に析出し、靱性は大幅に劣化する。そこで、SUS316LNよりもさらに低炭素化(0.02%以下)を図る[17]。また、Nb, Tiなどを添加し、NbCやTiCとして安定化させて分散させる。さらに、拡散速度の速いBを微量(数十ppm程度)添加し、析出物の核となるPの粒界へ偏析を低減し、靱性の劣化を軽減する[18]。また、高温延性を改善し、鍛造や熱間圧延などの高温加工性を改善し、歩留まりを高めた。

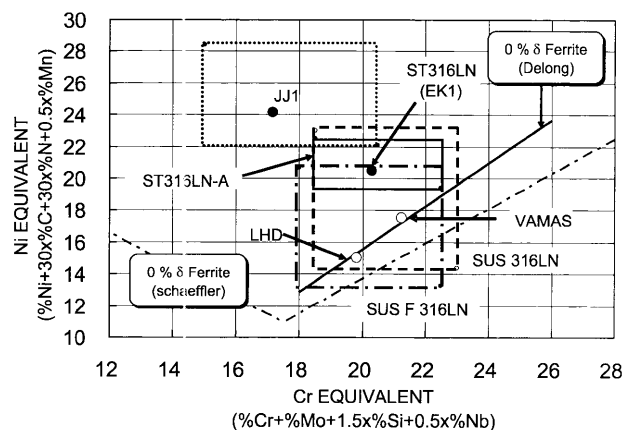


図4 化学成分によるオーステナイト化の検討。Delong 図により、Cr 当量と Ni 当量により0% δ Ferrite 線よりもマイナス側となる化学成分とし、完全オーステナイト化する。

2.6 ITER 構造材料

ITER では、TF コイル構造材料として JJ1 と強化型316LN 鋼(ST316LN)が、TF 導体コンジットには低炭素型 SUS 316LN 鋼が、CS 導体コンジットには改良型 JK2 が使用される(本文中、316LN は規格材 SUS316LN, ST316LN および低炭素型 SUS316LN を含めた総称とする)。

表1にITER TF コイル構造材料とコンジット材料の要求仕様を示す。JJ1 および316LN が高強度、および高靱性を達成できるように、製作仕様には、化学成分とともに、結晶構造、結晶粒径、析出物、介在物に関して管理値が規定されている。また、放射化の低減のため、Co は500 ppm 以下に制限されている。ITER 超伝導構造材料の化学成分案を表2に示す。

2.6.1 TF コイル構造材料

JJ1: インボード直線部とコイル間支持構造物に使用される。SUS316LN をベースとして、強度と靱性の向上のため高 Mo 添加された、高 Mn 系ステンレス鋼であり、0.2% 耐力が1,000 MPa 以上、 K_{IC} (J) が200 $MPa\sqrt{m}$ を達成できる材料である。これまで多くの強度特性データ(引張特性、靱性、疲労き裂進展速度)が収集されている。コイル間支持構造物は静的応力条件としては最も厳しく、例えば、ディスラプション時には Tresca 応力で723 MPa の応力が発生する。

コイル間支持構造物には上述した面外力に起因する繰り返し応力が発生する。具体的には、TF コイル初期励磁とプラズマ燃焼終了時(End of Burn)の間に、コイル間支持構造物には、398 MPa の等価応力振幅(3万回)が、さらにディスラプションにより539 MPa (3千回)の繰り返し荷重が予想される。疲労強度については、S-N 特性[7]および疲労き裂進展速度[19]が測定されており、JJ1 は十分な疲労強度特性を有している。

ST316LN: コイル容器およびラジアルプレートに使用される。高 N 型316LN で、高温での加工特性が悪いため、熱間圧延や鍛造工程時に割れなどの問題が発生しやすい。また、高窒素材は316L 材に比べて機械切削性が劣る傾

表1 ITER 構造材料に要求される特性。

	TF coil structure	TF conduit	CS conduit
	JJ1	316LN	JK2
0.2% yield strength (MPa)	≥ 1000	650~950	≥ 900
K_{IC} (J) ($MPa\sqrt{m}$)	≥ 200	≥ 200	Elongation : $\geq 30\%$ ≥ 130
Phase composition	Fully austenitic, Free of δ -ferrite and σ -phase		
Grain size	t<100mm: not exceed ASTM #2, t>100mm: Large grain size may be acceptable		
Inclusions	Not exceed Field number 3 for inclusion type A, B, C and D (ASTM E45, Method A using Plate I)		
Precipitated carbides	Free of precipitated carbides that form a continuous network		
Ingot process	Electro-slag remelting (ESR) or equivalent of the ingots are required		
Radiation	Co fraction is less than 500ppm		

表2 TFコイル構造材料とコンジット材料の化学成分.

	TFcoil structure		TF conductor	CS conductor	JIS G3214 SUS F316LN
	JJ1	316LN	conduit	conduit	
C	≤0.03	≤0.03	≤0.02	≤0.025	≤0.03
Si	≤1.00	≤1.0	≤0.75	≤0.5	≤1.0
Mn	9.0-11.0	≤2.00	1.0-2.0	20.5-22.5	≤2.00
P	≤0.040	≤0.040	≤0.045	≤0.015	≤0.040
S	≤0.010	≤0.030	≤0.030	≤0.015	≤0.030
Cr	11.0-13.0	16.50-18.50	16.0-18.0	12.0-14.0	16.0-18.0
Ni	11.0-13.0	10.50-14.50	11.0-14.0	8.0-10.0	10.0-14.0
Mo	4.5-5.5	2.00-3.00	2.0-3.0	0.5-1.5	2.00-3.00
N	0.21-0.27	0.12-0.22	0.14-0.18	0.09-0.15	0.10-0.16
B	~10ppm			10-40ppm	

向にあり、素材調達時の歩留まりや加工特性の観点から低窒素量であることが望ましい。そのため、強度要求仕様に応じた適切な化学成分の仕様を設定することが重要となる。316LNの耐力はCとNの含有率(C+N)と比例関係にあることが知られている。また、大型鋼塊では、結晶粒径や化学成分の不均一により、場所によって材料特性にばらつきが生じやすいため、ばらつきの幅と材料特性を代表する場所(試験片採取場所)を把握することが重要である。このため、原子力機構では、図5に示すように、化学成分と強度との関係についてそのばらつきを調査し、強度レベルに応じた316LNの化学成分仕様を決定している[5]。疲労に関して、ST316LNについても既に4KでのS-N特性[20]、疲労き裂進展速度[21]は測定されており、十分な疲労強度特性を有している。

2.6.2 コンジット材料

コンジットは、溶体処理化状態で導体メーカに供給され、(1)長尺化のための溶接、(2)撚線の引き込み、(3)圧縮成型加工、(4)輸送用仮巻線、(5)コイルメーカでの巻線加工、(6)超伝導生成熱処理、(7)絶縁含浸という製造プロセスを経て使用される。これらのプロセスにより強度特性は変化し、特に延性の劣化に考慮する必要がある。

316LN : 316LNをTF導体コンジット材料として使用する[22]。表2に示すように化学成分はST316LNとほぼ同じであるが、超伝導生成熱処理時の靱性の劣化を低減するために、低C仕様となっている。また、加工による強度上昇

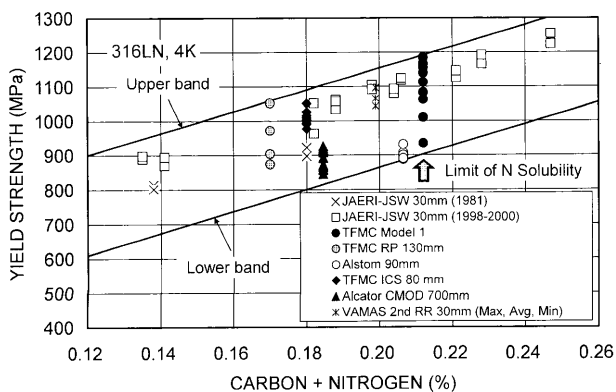


図5 過去の316LN鋼のC+Nに対する0.2%耐力(4K)の実績値。

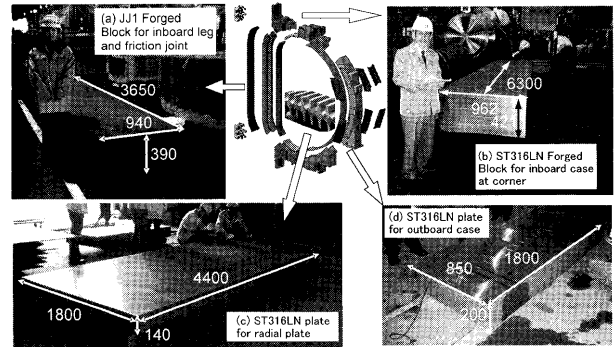


図6 ITER用に試作したJJ1鍛造材とST316LN鍛造材と熱間圧延板。

を考慮し、N量は低い値とすることによって、製造性を高める工夫をしている。TFコンジットは薄肉円管であり、規格に沿った靱性の測定が困難である。そこで、延性を確保する観点から、30%以上の伸びを規定している。

JK2 : JK2は、高価なNiを減らし、Mnに置き換えてNの固溶度を高めた高Mnステンレス鋼である。JK2は以下のような経緯で、CS導体コンジットへの適用のための改良が進められている。ITER CSモデルコイル計画[23]では、導体コンジット材料として強度および熱収縮特性に優れたFe-Niベースの析出硬化型超合金であるIncoloy 908[24]が選択されていた。しかし、応力誘起粒界酸化(SAGBO: Stress Accelerated Grain Boundary Oxidation)[25]が超伝導生成熱処理中に発生するリスクや熱処理後の溶接が極めて困難であることなどから、代替案として、別の構造材料が探求されてきた。JK2鋼は強度、熱収縮率および疲労特性の観点で、Incoloy 908を代替できるが、超伝導生成熱処理を施した場合、靱性が劣化すること、熱間圧延や鍛造工程において割れが生じる等の課題があった。これらの問題を解決するため、JK2にBを添加することおよびC含有量を低下させることによる特性の改善を行い、鍛造性を改善するとともに、超伝導生成熱処理後の延性や靱性の劣化を低減した。この改良されたJK2はCS導体コンジットとして使用される予定である[26]。

構造材料については、すでに、ITER TFコイル支持構造物用にJJ1鍛造材(390 mm厚)、ST316LN鍛造材(390 mm厚)および熱間圧延材(140 mmおよび200 mm厚)の実規模の大型鋼塊の試作(図6)が行われており、製作性、加工特性および強度特性の確認が行われている[5, 20]。また、コンジットについてもSUS316LNおよびJK2とも試作を行い、機械特性が確認された。また、材料特性データベースの構築が並行して進められている[27]。

2.7 溶接技術

TFコイル構造物は、図2に示したように複雑な形状であり、極厚のステンレス鋼を溶接接合して製作する必要がある。溶接部については、母材と同様に、 δ フェライトや介在物の発生により靱性が劣化するため、溶接部についても完全オーステナイト化をすることが望ましい。ITERにおいてはTIG溶接が主要な溶接方法である。TIG溶接用の添

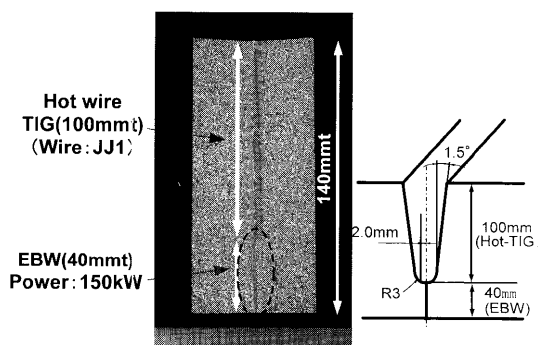


図7 ITER TF コイル構造物を模擬した電子ビーム溶接とTIG溶接の組み合わせ試験。

加棒 (Filler wire) は, JJ1, JK2 については共金であるが, ST316LN については, DIN 1.4455 相当品が使用される。両者とも完全オーステナイトの溶接金属が得られ, 溶接時のブローホールの発生を低減するため低N化している。JJ1, JK2 の極厚材の TIG 溶接部は, 図3に示したように母材並の高強度, 高靱性を有しており, ITER への適用が可能である[28]。SUS316LN 溶接部においても十分な強度と靱性が確保されている。現在の課題は, TF コイル製作のための, 高効率で, 変形が少ない溶接技術を確認することである。そこで, TIG 溶接に加えて, 電子ビーム溶接とレーザー溶接を構造物の製作に応用するための試作が現在進められている。

電子ビーム溶接(EBW): 大型真空容器内で高速に加速した電子ビームにより溶接する方法である。JJ1, JK2 では過去に EBW による溶接試作が行われている[29-32]。また, 低温構造物での実績としては, 大型ヘリカル装置(LHD)の支持構造物(SUS316)について, 65~100 mm 厚さの溶接に使用された実績がある。図7に, ITER を模擬して, ビーム出力 150 kW で溶接した JJ1 の接続部の断面マクロ写真を示す。140 mm の板厚のうち, 初層の 40 mm は EBW で, 残り 100 mm は TIG 溶接である。このように EBW 部は細い溶け込みであり溶接変形が少なく, TIG を組み合わせることで, 極厚材でも変形が少ない効率的な溶接が可能となる。

レーザー溶接: 近年, ファイバレーザー等の小型で高出力のレーザー溶接機が容易に入手可能である。レーザー溶接では, EBW と同様, 幅数 mm の細い溶け込みでの接合が可能であり, 高い能率と変形の少ないことが特徴である。最大溶け込み深さは, 10 kW 出力のもので, ST316LN では, 15~20 mm 程度であり, 両側からの溶接であれば 30 mm 程度の完全溶け込み溶接が可能である[33, 34]。レーザー溶接は, 高い寸法精度が要求されるラジアルプレートの組み立てに使用することを計画しており, 試作試験が進行中である。機械強度については TIG 溶接と遜色のない引張特性が得られている。

2.8 まとめにかえて一原型炉用構造材料の見直し

ITER を実現するための極低温構造材料の製作技術および溶接に関する基盤は十分整っているといてもよいであ

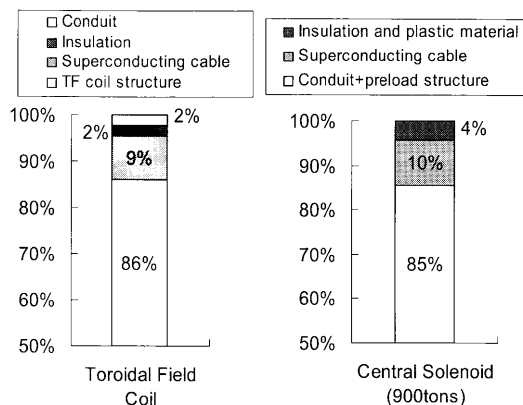


図8 ITER TF コイルおよびCSにおける構造材料の占める割合。

ろう。

一方, 図8に示すように, ITER の TF コイルおよびCSでは, コンジットを含めた支持構造物が全体の90%近くを占めている。このことは, ITER と同様な構造で, 高磁場化が必要なトカマク型核融合炉では, 超伝導線材の性能を向上させて超伝導線材の専有部分を減らしたとしても, 支持構造体を増やして剛性を高める余地が, 限界に近いことを示している。

構造材料の高強度化として, 4 K での耐力 1,400 MPa 程度のステンレス鋼[35]や Inconel 718 等は既に存在するが, 大型鋼塊の量産も含めた製造性, 溶接性, 母材/溶接部の機械特性の評価, 放射化, 放射損傷が許容可能かどうかの確認が必要である。特に大型化については, 品質の点で鍛鋼品が必須であるが, 高強度ステンレス鋼に関しては ITER 以上のサイズを量産することは現実的に極めて困難と言わざるを得ない。また, 高強度鋼は, 概して高コストで難切削性であり, 多用は避ける必要がある。

強度とともに問題となる可能性があるのがヤング率である。ステンレス鋼, Inconel 718 等のヤング率は, 200 GPa 程度であるが, 高い応力まで使用する場合には, 大きな変形を許容することになるので, 磁場精度への影響や, 変形により他の機器と干渉する可能性がある。高強度, 高ヤング率の材料としては, データブックをざっと見ると, 既存の材料では, 例えば, SiC (耐力: ~7,000 MPa, E : ~400 GPa) 等[36]はあるが, 低温物性や大型化技術の面からも新しい材料の探求が必要である。

以上のように, 今後の磁場閉じ込め型核融合炉では, 高強度の大型鋼塊の使用量をなるべく低減するための努力が重要となる。まず, 超伝導コイルはすべての部分が高強度である必要はないので, 応力解析とその評価を細かく行い, 高強度材の利用は最小限度に留め, 部分的な補強材として活用する合理的な設計が望まれる。また, ITER は実験装置である都合上, プラズマ真空容器は数多くポートを有し, 面外力を支持するための構造物は, ポートをかかわして取り付ける必要がある。このため, 部材の形状・寸法が大きく制限され, これがコイル容器に極厚の高強度材料を必要とするとともに, 支持構造物を複雑にする原因の一つにもなっている。この観点から, 原型炉では単純な真空容

器構造を採用できないであろうか？また、高強度材料の靱性は低いので、低靱性材料の使用を可能とした構造設計を行う手法が必要である。

一方、原型炉設計については、VECTOR[37, 38], FFHR [39]などが提案され、既存材料の強度レベルを踏まえた設計が行われている。例えば、VECTORは低アスペクト比設計であり、小型化により剛性を高め、高磁場にも対応している。また、電磁力平衡型コイル[40]によるFFHRでは、構造物の低減を設計手法で解決する設計案が提案されている。疲労の問題については、原型炉が長時間燃焼を目的とするので、ITERのようなパルス炉より、軽減できることが予想される。

以上の炉構造設計と並行して、低磁場で高性能の核融合プラズマが実現できるようなシナリオを構築する研究の継続が必要不可欠である。

謝辞

極低温構造材料の開発およびコイル構造物の試作については、国内鉄鋼および重工メーカー各社殿のご協力を得ております。ここに厚く御礼を申し上げます。また、本稿を執筆するにあたり、核融合科学研究所 西村 新教授、原子力開発機構 ITER 超伝導磁石開発グループ 奥野 清グループリーダー、中嶋秀夫研究主幹よりご助言を得ました。感謝いたします。

参考文献

- [1] プラズマ・核融合学会誌 第78巻増刊「ITER工学設計」2002年1月。
- [2] H. Nakajima *et al.*, ISIJ International **30**, 567 (1990).
- [3] 石坂淳二他：鉄と鋼 **76**, 791(1990).
- [4] S. Tone *et al.*, Adv. Cryogenic Eng. Mater. **30**, 145 (1984).
- [5] K. Okuno *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **16**, 850 (2006).
- [6] M. Ferrari *et al.*, Fusion Eng. Des. **75-79**, 207 (2005).
- [7] K. Hamada *et al.*, Fusion Eng. Des. **75-79**, 87 (2005).
- [8] E. Tada *et al.*, Proc. 13th Symp. on Fusion Eng. (1989) p.239.
- [9] 中嶋秀夫他：プラズマ・核融合学会誌 **70**, 733 (1994).
- [10] K. Yoshida *et al.*, 11th International Conference on Magnet Technology (MT-11) **2**, 908 (1989).
- [11] K. Suemure *et al.*, Adv. Cryogenic Eng. Mater. **32**, 51 (1986).
- [12] S. Yamamoto *et al.*, Adv. Cryogenic Eng. Mater. **32**, 57 (1986).
- [13] T. Sakamoto *et al.*, Adv. Cryogenic Eng. Mater. **32**, 57 (1986).
- [14] T. Sakamoto *et al.*, Adv. Cryogenic Eng. Mater. **30**, 137 (1984).
- [15] R. Miura *et al.*, Adv. Cryogenic Eng. Mater. **30**, 245 (1984).
- [16] H. Nakajima *et al.*, Adv. Cryogenic Eng. Mater. **30**, 219 (1984).
- [17] 石尾光太郎他：鉄と鋼 **92**, 2, 30 (2006).
- [18] M. Shimada, Fusion Eng. Des. **20**, 437 (1993).
- [19] S. Konosu *et al.*, J. Eng. Mater. Technol. **118**, 109 (1996).
- [20] K. Hamada *et al.*, presented in SOFT2006, Poland, Warsaw (2006).
- [21] A. Nylas *et al.*, Adv. Cryogenic Eng. **48**, 123 (2002).
- [22] A. Ulbricht *et al.*, Fusion Eng. Des. **73**, 189 (2005).
- [23] H. Tsuji *et al.*, Fusion Eng. Des. **55**, 153 (2001).
- [24] I.S. Hwang *et al.*, Adv. Cryogenic Eng. Mater. **38**, 1 (1992).
- [25] T. Kato *et al.*, Adv. Cryogenic Eng. Mater. **44**, 9 (1998).
- [26] 濱田一弥他：低温工学 **41**, 131 (2006).
- [27] H. Nakajima *et al.*, Proc. 10th International Conference on Nuclear Engineering (2002) 22674, 1.
- [28] K. Ishio *et al.*, Adv. Cryogenic Eng. Mater. **44**, 73 (1998).
- [29] T. Horiuchi *et al.*, Adv. Cryogenic Eng. Mater. **32**, 219 (1986).
- [30] S. Tone *et al.*, Adv. Cryogenic Eng. Mater. **32**, 89 (1986).
- [31] 中嶋秀夫：溶接学会誌 **64**, 3, 28 (1995).
- [32] M. Onozuka *et al.*, presented in SOFT2006, Poland, Warsaw.
- [33] K. Abe *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **16**, 807 (2006).
- [34] H. Nakajima *et al.*, presented in SOFT2006, Poland, Warsaw (2006).
- [35] S. Sgobba *et al.*, International Congress Stainless Steel '99 Science and Market **2**, 391 (1999).
- [36] M.F. Ashby, Engineering Materials I, (Elsevier, 2005).
- [37] T. Isono *et al.*, Fusion Eng. Des. **81**, 1257 (2006).
- [38] K. Tobita *et al.*, Fusion Eng. Des. **81**, 1151 (2006).
- [39] T. Mito *et al.*, to be published in Fusion Eng. Des. (2006).
- [40] T. Murakami *et al.*, Fusion Eng. Des. **52**, 1059 (2000).