

## ITER TFコイル開発から学んだこと、そして原型炉への展望

## 2) ITER TFコイル構造物の開発

## Lessons learned from ITER TF coil development and load to DEMO

## 2) Development on ITER TF coil structure

中平 昌隆

Masataka NAKAHIRA

量子科学技術研究開発機構

National Institutes for Quantum Science and Technology (QST)

## 1. はじめに

量子科学技術研究開発機構(QST)では、前身である日本原子力研究所の時代から長年にわたり、核融合炉用 TF コイル構造物の材料開発を行っており、ITER では 19 機の TF コイルの全機分の構造物の調達を担当している。この構造物とはコイル容器及びコイル間支持構造物の総称だが、ここでは主にコイル容器としてその構造材料開発、溶接継手の合理化と超音波探傷の工夫について述べる。

本稿ではこれらの開発の概要と、成果が引用できるように実施した規格及び論文や反省点の紹介を行い、原型炉での応用の一助としたい。

## 2. 材料開発と材料へのITER要求

核融合装置の超伝導コイルは、大型で磁場が強いため、構造材料として高強度、かつ高靱性の極低温用の構造材料が必要となる。また、構造材料の磁化により、プラズマの制御性能を損なう恐れがあるため、オーステナイトステンレス鋼を採用している。QST では、1980 年から極低温構造材料の研究開発を開始し、実用化研究及び規格化を経て、ITER TF コイルへの適用を行ってきた。開発のキーポイントは、高強度と高靱性であるが、当時は高強度のために材料を改善すると、他方で破壊靱性値が低下し、両者の高い値を満足するのは一般に困難であると考えられていた。また、4 K での強度試験、破壊靱性試験は技術的、経済的に敷居が高く、量産体制にある使用材料の品質確認としては、より現実的な方法を考案する必要があった。これらの困難を乗り越え、高強度と高靱性を極低温で両立する鋼種の開発及び品質確認試験方法の確立を達成した。

日本原子力研究所(JAERI)時代には、この材料開発目標として、JAERI-BOX という 4 K での耐力 1,200 MPa 以上、破壊靱性値 200 MPa√

m 以上を掲げ、精力的に構造材料を開発してきた<sup>1)</sup>。基本的には、窒素の固溶強化による強度上昇を図り、窒素の固溶度を増すためにクロムを多く含有する鋼種(JN1, JKA1)及びマンガンも多く含有する鋼種(JJ1, JK2, JN2)を開発し、5 種が将来の構造材料候補となった。この中から、製作性、加工性、溶接性、コストの条件を鑑みて ITER TF コイルに適用されたのは、JJ1 であり、316LN と合わせて、その構造材料として採用されている<sup>2)</sup>。材料選定のひとつのポイントが、溶接である。新材料は高窒素で強度を確保しているが、溶接の際に窒素が抜けてしまい、溶接部の強度は若干母材より落ちることになる。このため、高応力発生個所には溶接線を持ってこれず、JJ1 は 8 m の巨大な部材として材料製作をせざるを得なかった。同様な注意を原型炉でも考慮する必要があると考える。

ITER TF コイルの構造物は、仕様として 4 K において 1,000 MPa 以上の耐力、180 MPa√m 以上の破壊靱性値を要求され、JJ1 はこれを十分満足する材料であった。また、ITER TF コイルは発生する応力に分布があり、発生する応力に応じて部材の材料の要求強度区分を設け、図 1 に示すように、C1~C4 の分類をしている。これに対応する材料として、窒素含有量の程度で 316LN を 3 クラスに分け、JJ1 と共に製造者が全ての区分の構造材料を利用できるように日本機械学会(JSME)の核融合設備規格「超伝導マグネット構造規格」に標準化した<sup>4)</sup>。

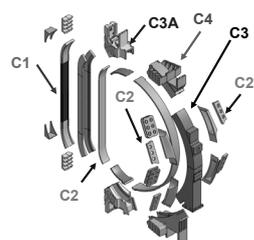


Figure 1 shows a 3D exploded view of the ITER TF coil structure. The components are labeled with material classes: C1 (innermost), C2 (middle), C3 (outer), C3A (outermost), and C4 (support structure).

[ITER requirement for TF coil materials]			
Class	YS at 4K	YS at RT	K <sub>IC</sub> at 4K
C1	>1000MPa	>280MPa	>180MPa√m
C2	>900MPa	>280MPa	>180MPa√m
C3	>700MPa	>245MPa	>180MPa√m
C3A	>700MPa	>260MPa	>180MPa√m
C4	>500MPa	>210MPa	>180MPa√m

図 1 ITER TF コイル構造物の材料区分

この材料区分は、材料だけを見ると合理化と考えられたが、製作の実際を考えると反省点もある。管理の手間が増え、製品が対称形状で同形状の材料があっても、相互交換が出来ない。このため、材料納入の遅れが発生しても取り換えが効かず工程遅れのリスクが高まることなどのデメリットとなる。また、同様な窒素制御が必要な材料であるので、材料のコストは JJ1 を除いてそれほど大きな差が出なかった。トータルで見ると、316LN 材の中で、最も強度の高い材料で統一した方が強度の裕度も生まれ、どうしても高強度が必要な個所にのみ更に高強度の材料を配置するのが効率的と考える。

JSME 規格は、極低温構造材料の強度が炭素(C)と窒素(N)の含有量(C+N)と相関があり、室温から 4 K までの強度の推定が可能であることを利用し、高価な He を用いた 4 K 強度試験を必ずしも必要としない室温での試験から合理的に 4 K での強度を規定する、世界にも類を見ない規格とした。

また、30%の引張真ひずみを与えた時に 50%のマルテンサイト変態が生じる温度を定義した Md30 という物性に着目して破壊靱性値と相関があることを発見し、4 K での破壊靱性値を化学組成から類推することで物性を合理的にコントロールできる可能性を示す研究も行われ<sup>5)</sup>、原型炉でも適用が期待できる。

### 3. 継手の合理化と超音波探傷の工夫

ITER TF コイルにおける既存の製作設計の常識を越えて採用した特徴的なものに部分溶け込み溶接(Partial Penetration Weld: PPW)の適用がある。通常、PPW は非溶け込み部先端の形状がシャープであり、応力集中が発生しやすく評価が複雑になるため、その採用を避けることがほとんどである。しかし TF コイルでは他機器の取り付け構造が多数あり、これらについては発生応力が小さく、溶接変形の低減や製作作業の合理化を考えて PPW を適用した。

PPW に関しては、4 K でのき裂進展試験を溶接継手から切り出したコンパクト(Compact Tension: CT)試験片にて行い、き裂が溶着金属内を伝播すること、Paris 則に基づく理論式によく合致することを確認し、溶着金属のき裂進展特性曲線を作成した。この物性を元に、PPW を適用する全ての接手の応力拡大係数を評価し、ITER 運転寿命中に破断に至らない初期き裂の大きさを設定した。この初期き裂の大きさから、設計上の部分溶け込み部の大きさの制限値を求

め、かつ溶接後の UT により、実際の部分溶け込み部の先端が、設計通りの位置にあることを確認することで、PPW の適用を可能とした<sup>6)</sup>。

本 PPW の設計手法は原型炉にも応用できると考えるが、き裂進展初期には進展速度の速い領域があり、非溶け込み部先端での応力集中の影響があると推測し、先端形状の改善により、より合理的な設計が可能となると考える。

継手の超音波探傷試験(Ultrasonic Test: UT)においては、溶接部での音波の減衰対策が課題であった。これは、オーステナイトステンレス鋼の溶接部では、材料組織が柱状になり、音波の進路を曲げたり、散乱を生じたりすることで減衰が生じることによる。この対策として、実機と同材料で製作した継手試験片を実機に用いる探傷装置を使って減衰特性を求め、これにより実際の検査で適切に感度を上げて探傷することにより、減衰の問題を解決した<sup>6)</sup>。本手法は、前もって R&D で上げる感度を一般的に決められるものではなく、実機と同じ装置を用いて求める必要があるが、UT の規格に従った校正作業と同時期に実施することを予め製作仕様に入れておくことで効率的に応用できると考える。

### 4. おわりに

ITER TF コイル構造物は、材料、設計、製作、検査の製造に必要な各分野で特徴的な新技術、合理化技術をふんだんに盛り込んでおり、多くの困難を乗り越えて形にしてきた。成果については学会発表や規格化を通じて、世に発信してきているが、今回のシンポジウムでは実務的な反省点にも言及するよう試みた。少しでも原型炉の効率化に役立つことを切に願う。

### 参考文献

- 1) 「核融合炉用超伝導コイル構造材料開発の歩み」、低温工学 48, (2), (2013).
- 2) 「核融合炉'ITER'の超伝導コイル用極低温構造物」、低温工学 48, (10), (2013).
- 3) 「ITER トロイダル磁場コイル構造物の製作技術開発」、低温工学 47, (3), (2011).
- 4) 「超伝導マグネット構造規格」、日本機械学会 JSME S KA1, (2017).
- 5) 「極低温における極低温におけるオーステナイト系ステンレス鋼の破壊靱性値とオーステナイト相の安定度との相関」、低温工学 52, (4), (2017)
- 6) “Completion of the first ITER toroidal field coil structure”, Nuclear Fusion 59, (2019)