

## 原型炉超伝導マグネット開発のための導体試験およびコイル試験の提案 Proposal on Conductor Tests and Model Coil Tests for Superconducting Magnets for DEMO

今川信作  
Shinsaku Imagawa

自然科学研究機構核融合科学研究所，総研大  
NIFS NINS, The Graduate University for Advanced Studies

原型炉設計合同特別チームを中心にして核融合原型炉の概念設計が進展している。超伝導マグネットの最新の設計仕様をITERの仕様と比較することによりNb<sub>3</sub>Snケーブル・イン・コンジット導体の開発課題を整理し，必要な導体試験やコイル試験を提案する。

核融合原型炉の2019年設計では，表1に示すように，トロイダル磁場（TF）コイルの最高磁場は13.9 Tで，導体電流値は83 kAとなっている。ITERのTFコイルの11.8 T，68 kAよりも各々が1.2倍程度に高くなっており，電磁力は1.5倍である。ITERでは，モデルコイル試験において電磁力による臨界電流I<sub>c</sub>低下と繰り返し励磁によるI<sub>c</sub>劣化（不可逆的な低下）が明らかになり，様々な研究開発の結果，ケーブル撚りピッチを短くする（STP: Short Twist Pitch）対策と素線I<sub>c</sub>の向上により要求仕様を満足することに成功した。最初は熱膨張係数がNb<sub>3</sub>Snに近いニッケル合金Incoloy908をジャケット材に使用する計画であったが，溶接欠陥等の問題があり，TFコイル導体にはステンレス鋼SS316，中心ソレノイド（CS）コイル導体には，高マンガン鋼JK2LBが採用された。使用状態では-0.6%程度の熱ひずみが生じるため，導体のI<sub>c</sub>が素線I<sub>c</sub>の半分程度に低下することを考慮して製作されている。

提案する原型炉マグネットのR&Dを図1に示す。ITERで開発された線材が原型炉TFコイルの要求を満足できるかをITERのI<sub>c</sub>回帰式を用いて評価すると，使用状態のひずみが0.6%以下に収まれば要求値を満足できる。しかし，ケーブル本数も電磁力もITERの1.5倍程度に増大する原型炉において，ITERのSTP対策が導体の製作性を含めて十分に有効かどうかは極めて重要である。電磁力影響が大きい場合は，原型炉の基本パラメータの見直しも必要となるため，工学設計に移行する前に実規模の導体試作と性能確認試験を実施すべきである。また，原型炉

の基本寸法を決定づけるTFコイル構造物の許容応力は，ITERの1.2倍を想定しており，絶縁材料を含めて早期の研究開発が必須である。

コスト低減とケーブル横剛性向上にI<sub>c</sub>改善が有効であることから，Nb<sub>3</sub>Sn素線の性能向上や低熱収縮ジャケット材の適用などの研究開発を平行して進めるべきである。加速器用に高性能Nb<sub>3</sub>Sn線材の開発が先行しているが，核融合用には，機械強度に優れ，低コストの線材開発プログラムが必要である。さらに，実機製作前には，技術実証のためモデルコイル試験が必要かつ有用である。特に，巻線コスト低減のためにTFコイルのラジアルプレート無くす場合は，絶縁物の健全性実証試験も必須である。

Table 1 Specifications of TF coils of DEMO & ITER.

	DEMO	ITER-TF
Highest field (T)	13.9	11.8
Conductor current (kA)	83	68
Number of SC strands	1512	900
Number of Cu strands	906	522
Diameter of strand (mm)	0.8	0.82
Cu ratio of strand	1	1
Non-Cu current density (A/mm <sup>2</sup> )	> 218.4	> 286.1
Void fraction	0.33	0.33
Central tube diameter (mm)	10.2	9
Conduit inner diameter (mm)	50.4	39.7
Discharge time constant (s)	22	11
Delay of shut-off (s)	3	3
Cu current density (A/mm <sup>2</sup> )	99.4	132.5
Hot spot temperature of cable (K)	< 250	< 250
Current sharing temperature (K)	> 6.0	> 6.0

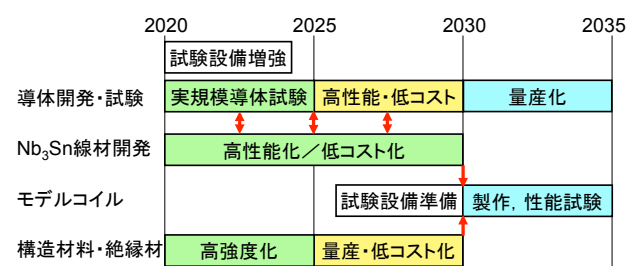


Fig. 1. Proposal on R&Ds for DEMO magnets.