

# 核融合原型炉に向けた Action Plan の策定と超伝導マグネットの設計活動

## Development of the Action Plan towards nuclear fusion DEMO and design activity of superconducting magnets

西村 新(核融合科学研究所);

宇藤裕康, 飛田健次, 日渡良爾, 青木 晃, 岡野邦彦, 原型炉設計合同特別チーム(量子科学技術研究開発機構)

NISHIMURA Arata (NIFS); UTOH Hiroyasu, TOBITA Kenji, HIWATARI Ryoji, AOKI Akira, OKANO Kunihiko,  
Joint Special Design Team for Fusion DEMO (QST)

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

### 1. はじめに

核融合科学技術委員会の下に設置された原型炉設計総合戦略タスクフォースは、核融合原型炉設計に向けた Action Plan を作成し、平成 28 年 3 月に核融合科学技術委員会に報告した。報告された Action Plan は、平成 27 年 1 月に核融合原型炉開発のための技術基盤構築の中核的役割を担うチーム(合同コアチーム)が報告した原型炉技術基盤構築チャート[1,2]に基づき作成されたものである。その概要は前報[2]で報告した通りである。この Action Plan は、ITER の First Plasma 達成が 2020 年との想定の下に作成されている。すでに 2015 年 11 月の ITER 理事会で、First Plasma が大幅に遅延することが示唆されており、次回理事会(2016 年 6 月)で新しい Schedule、Cost、Scope が発表されれば、この Action Plan の関連する部分は見直されることとなる。

### 2. 原型炉に向けた Action Plan

Fig. 1 に超伝導コイルの Action Plan を示す。Action Plan は時系列として、概念設計の基本設計、概念設計、工学設計と展開されており、2020 年に概念設計に移行するための「中間 Check & Review」、2027 年に「原型炉建設への移行判断」が行われるものと想定されている。

原型炉設計にあたっては、設計パラメータの設定と研究開発目標との関係が重要である。例えば、超伝導コイル容器や電磁力維持構造に用いられる極低温用構造材料は、ITER TF コイル用としては設計耐力 1000MPa の JJ1 鋼がすでに用いられるが、原型炉 TF コイル設計では 1200MPa の設計耐力を有する構造材料が期待されている。このような設計値と研究開発目標との関係は超伝導体設計などでも認められており、両者の緊密な情報交換、情報共有が維持されていく必要がある。

原型炉超伝導コイルの概念設計状況は既に報告されている[4]。本報告では、超伝導コイルの Action Plan の Milestone となる「SC 開発方針」と「材料決定」に注目し、それ

らの Milestone までに検討されるべき幾つかの重要な項目について述べる。

### 参考文献

1. 山田弘司他、核融合原型炉開発のための技術基盤構築の中核的役割を担うチーム報告 NIFS-MEMO-69(核融合科学研究所、2014 年 9 月) [http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/gijyutu/gijyutu/056/shiryo/1350763.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu/056/shiryo/1350763.htm).
2. 山田弘司他、核融合原型炉開発のための技術基盤構築の中核的役割を担うチーム報告—原型炉技術基盤構築チャート—NIFS-MEMO-72(核融合科学研究所、2015 年 2 月) [http://www.naka.jaea.go.jp/kankoubutu/PDF/gou\\_doukoa\\_201501.pdf](http://www.naka.jaea.go.jp/kankoubutu/PDF/gou_doukoa_201501.pdf)
3. 西村新他、低温工学・超電導学会、2015 年度秋季全国大会講演概要、3B-a05。
4. 宇藤裕康他、低温工学・超電導学会、2015 年度秋季全国大会講演概要、3B-a06。

合同特別チームの活動フェーズ	概念設計の基本設計		概念設計	工学設計
	2015	2017	2020	2027
1.超伝導コイル	SC概念基本設計(設計仕様、構造設計、保守等)	SC開発方針	SC概念設計(仕様、構造、保守等)	SC工学設計、SC製造設計
	超伝導線材・導体・巻線、構造材料、絶縁材料等 開発			材料決定
	冷却系概念設計(設計仕様、保守等)			冷却系工学設計、冷却系製造設計
SC設計・製造	(15)特/J: SC概念設計・基本設計 (19) (15)特/J: SC保守の概念検討 →(17)	(15)特/J: SC概念設計・基本設計 (19) (17)特/J: SC開発方針策定 →(19)	(20)特/J: SC概念設計 → (28) (25)特/J: 使用材料の最終決定 → (26)	(27)特/産: SC工学設計(31) →(31) (32)特/産: SC製造設計(34) →(35)
超伝導線材・導体設計・製造	(15)特/J/N/物/大: 超伝導線材 (Nb <sub>3</sub> Sn, Nb <sub>3</sub> Al, NbTi, ReBCO) 予備検討(19)	(15)特/J/N/物/大: 超伝導線材 (Nb <sub>3</sub> Sn, Nb <sub>3</sub> Al, NbTi, ReBCO) 予備検討(19) (17)特/J/N: 超伝導体設計の予備検討→(19)	(20)特/J/N/物/大: 超伝導線材 (Nb <sub>3</sub> Sn, Nb <sub>3</sub> Al, NbTi, ReBCO)本検討 →(28) (20)特/J/N: 超伝導体 概念設計 →(28)	(27)特/産: 超伝導材料 大量生産技術 → (31) (27)特/産: 超伝導体 大量生産技術→(31) (27)特/産: 巻線製造技術 → (35) (27)特/産: コイル容器・支持構造 製造技術 → (35)
超伝導導体、コイル試験設備		(17)特/J/N: 超伝導体試験設備 予備検討→(19)	(20)特/J/N: 超伝導体 試験設備 →(26) (20)特/J/N: 超伝導体 試験 →(26)	(27)特/J/N/産: コイル試験設備 → (35)
高強度構造材料	(15)特/J/物: 高強度構造材料 予備検討(19)	(15)特/J/物: 高強度構造材料 予備検討(19)	(20)特/J/物: 高強度構造材料 試作検討→(26)	
耐放射線絶縁材料	(15)特/J: 耐放射線性絶縁材 予備検討(19)	(15)特/J: 耐放射線性絶縁材 予備検討(19)	(20)特/J: 耐放射線性絶縁材 試作検討→(26)	
コイル間構造設計・製造	(15)特/J: コイル間構造概念設計・基本設計(19)	(15)特/J: コイル間構造概念設計・基本設計(19)	(20)特/J: コイル間構造概念設計 → (26)	(27)特/産: コイル間構造工学設計 → (30) (27)特/産: コイル間構造製作 技術開発→(35) (32)特/産: コイル間構造製造設計 → (35)
冷却系設計・製造	(15)特/J: 冷却系概念設計・基本設計(19)	(15)特/J: 冷却系概念設計・基本設計(19)	(20)特/J: 冷却系概念設計 → (26)	(27)特/産: 冷却系工学設計→(31) (32)特/産: 冷却系製造設計→(35)

Fig. 1 Action Plan for DEMO superconducting coils.

## 原型炉超伝導コイルワーキンググループ活動の中間報告

### Progress in Superconducting Magnet Working Group on Joint Special Design Team for Fusion DEMO

宇藤裕康, 日渡良爾, 小泉徳潔, 辺見努, 井手俊介, 坂本宜照, 青木晃, 飛田健次 (量研機構);  
今川信作, 柳長門, 西村新 (NIFS); 小野嘉則, 伴野信哉 (NIMS); 淡路智 (東北大); 雨宮尚之 (京大);  
長谷川満 (三菱電機); 坂成人 (三菱重工); 伊藤保之 (東芝)

UTOH Hiroyasu, HIWATARI Ryoji, KOIZUMI Norikiyo, HEMMI Tsutomu, IDE Shunsuke, SAKAMOTO Yoshiteru, AOKI Akira,  
TOBITA Kenji (QST); IMAGAWA Shinsaku, YANAGI Nagato, NISHIMURA Arata (NIFS); ONO Yoshinori,  
BANNO Nobuya (NIMS); AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.); AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.);  
HASEGAWA Mitsuru (MELCO); SAKA Masahito (MHI); ITO Yasuyuki (Toshiba)

E-mail: uto.hiroyasu@qst.go.jp

#### 1. はじめに

「核融合原型炉開発のための技術基盤構築の中核的役割を担うチーム」の報告書に基づき、原型炉設計合同特別チームが平成 27 年 6 月に設置され、原型炉概念の基本設計を開始している。原型炉の基本概念設計において、超伝導コイルシステムの基本構築は緊急の課題であり、同特別チームではチーム内外の専門家による「原型炉超伝導コイルワーキンググループ」を設置し、平成 27 年 11 月より原型炉用超伝導コイルの基本構築の構築ならびに今後の開発方針の策定に向け検討課題を議論している。本発表では原型炉超伝導コイルワーキンググループ活動の中間報告としてワーキンググループの活動内容および主な議論、原型炉超伝導コイル概念設計の方向性について報告する。

#### 2. 原型炉超伝導コイルワーキンググループ設立の経緯

「核融合原型炉開発のための技術基盤構築の中核的役割を担うチーム報告書」において、超伝導コイル開発における緊急の課題として、原型炉設計合同特別チーム(以下、特別チーム)の体制を強化し、超伝導コイルシステム概念設計の基本設計にも着手することが示されている。特別チームで実施された BA 設計レビューにおいて、原型炉超伝導コイル概念構築のために設計強度、大型コイルの製作性、超伝導線材の選択などを最優先課題として取り組むべきとの指摘を受け、これら重要かつ幅広い検討課題に対応すべく特別チーム内外の専門家による「原型炉超伝導コイルワーキンググループ(以下、超伝導 WG)」(主査:日渡良爾(特別チーム・システム設計グループ・グループリーダー))を平成 27 年 11 月に設置し、活動を開始した。

#### 3. 超伝導 WG の活動内容と計画

超伝導 WG では、原型炉用超伝導コイルの基本構築の構築ならびに今後の開発方針の策定(コアチーム報告書チャートによると平成 29 年を想定)を目的に、下記の原型炉用超伝導コイルの主要課題項目を中心に各専門家から情報提供を受け、WG メンバー内で議論している。

##### 超伝導 WG での検討項目:

- ・ 原型炉超伝導コイル概念設計
- ・ 炉心プラズマからの要求磁場精度
- ・ 超伝導コイルの保守・故障時の対応策
- ・ ITER における超伝導コイル製作の技術進展と原型炉用超伝導コイル(大型コイル製作)への課題・提案
- ・ Nb<sub>3</sub>Sn 線材の開発進展と将来性
- ・ Nb<sub>3</sub>Al 線材の開発進展と大型コイル製作への技術課題
- ・ 高温超伝導線材(ReBCO)の開発進展と将来性
- ・ 低温高強度構造材開発の現状と原型炉への見直し
- ・ 超伝導線材・超伝導コイル用絶縁材の耐放射化性能の現状と原型炉への見直し
- ・ 原型炉用導体・コイル大型試験設備の計画検討

#### 超伝導 WG 構成メンバー:

日渡良爾(主査), 宇藤裕康(幹事), 小泉徳潔, 辺見努, 井手俊介, 坂本宜照(以上、量研機構), 今川信作, 柳長門(以上、NIFS), 小野嘉則, 伴野信哉(以上、NIMS), 淡路智(東北大), 雨宮尚之(京大), 長谷川満(三菱電機), 坂成人(三菱重工), 伊藤保之(東芝)(順不同)

これまでに超伝導 WG 会合を 5 回開催し、主要な検討課題について情報の取り纏めおよび議論を完了し、平成 28 年 6 月に報告書を作成予定である。本報告書は特別チームでの原型炉超伝導コイルの設計仕様・基本設計(コアチームチャートでは平成 29 年策定期限)の根拠とすると共に、開発方針策定(コアチームチャートでは平成 29 年検討開始)の出発点とし、開発を加速する必要がある項目については、文科省に設置されている原型炉開発総合戦略タスクフォースへ提案される予定である。

#### 4. 主な議論の内容

原型炉用超伝導コイル設計に関して、現在特別チームでは ITER からの技術的飛躍が最小限となるよう ITER 超伝導コイル仕様を設計の出発点としているが、中心ソレノイド(CS)供給磁束を十分確保する場合に炉全体が大型化( $R_p \sim 8$  m)し、それに伴いトロイダル磁場(TF)コイルも大型化している。大型 TF コイルにおいては、ITER-TF コイル製作の経験からラジアルプレート方式では製作期間やコスト面から、合理化の必要があり、オプションとして新たな巻線方法の検討も大型コイル巻線製作の R&D と合わせて必要であるとした。また、大型コイル製作の観点から、原型炉での炉心プラズマからの要求磁場精度を明確化し、評価解析コードを用いて原型炉での巻線・製作・組立精度の影響を評価した上で、コイル製作の方針にフィードバックすることとした。原型炉用超伝導コイルの開発計画としては、超伝導コイル開発には時間を要することから、原型炉設計と並行し、高めの暫定的な目標値として最大経験磁場 15-16 T、導体電流値 100 kA と設定し、導体の高磁場化・高 J<sub>c</sub> 化、構造材料の高強度化などの開発研究に着手し、原型炉設計の進展と開発状況を総合的に判断して、具体的な数値目標を設定することが肝要とした。また、開発された技術を継続して発展させるため、人材育成や技術の伝承・発展を考慮し、開発項目と合わせて具体的な実施時期も明確にした開発計画を立案することとした。

#### 5. まとめ

特別チームにおいて、平成 27 年 11 月より超伝導 WG 活動を開始し、平成 28 年 6 月の報告書提出に向け、原型炉用超伝導コイルの基本構築のため、設計強度や大型コイルの製作性、線材選択などの幅広い課題を議論している。WG 内での議論を踏まえ、原型炉用超伝導コイル開発に向けた暫定的な目標値並びに開発計画を立案する予定である。

# LHD ポロイダルコイルの長期信頼性～18年間の交流損失の変化

## Change in AC losses of LHD poloidal coils over an eighteen-year period

高畑 一也, 森内貞智, 大場恒揮, 鷹見重幸, 三戸 利行, 今川信作 (NIFS)

TAKAHATA Kazuya, MORIUCHI Sadatomo, Ooba Kouki, TAKAMI Shigeyuki, MITO Toshiyuki, IMAGAWA Shinsaku (NIFS)  
E-mail: takahata@LHD.nifs.ac.jp

### 1. はじめに

大型ヘリカル装置(LHD)の超伝導コイルシステムは、2個のヘリカルコイルと3対6個のポロイダルコイルから構成される。その内ポロイダルコイルは、サブチャンネルを持たない矩形のケーブル・イン・コンジット(CIC)導体を使用した強制冷却型コイルである。また超伝導体は Nb-Ti である。3対のコイルは、径の小さなものから IV, IS, OV コイルと呼んでいる。また上下コイルは-U, -L を付記して区別する。完成から現在までの18年間を通じて、18回の冷却と昇温を経験した。それぞれの冷却から昇温までの実験期間をサイクル(またはキャンペーン)と呼ぶ。我々は、第4サイクルまでに、各コイルの交流損失特性を把握し、長時定数結合損失の存在などを報告してきた[1]。今回は、その後の第18サイクルまでの交流損失の経年変化について報告する。

### 2. 交流損失の評価

LHD は、3～5ヶ月間の実験サイクル中、実験日の朝に全てのコイルを同時に励磁し、通常夕方に減磁する。これまでの通電回数は、総計で1,625回になる。通電条件(各コイルの電流値の組み合わせ)は日によって変更されるが、ある標準的な通電条件はサイクル中に数回実施された。その特定の通電条件に注目し、プラズマ実験後の夕方の減磁時の交流損失量を収集した。具体的には、ヘリカルコイル 11.0 kA, OV コイル 18.0 kA(最大磁場 2.86 T), IS コイル 3.0 kA, IV コイル 11.2 kA(最大磁場 3.47 T)である。そのうち、電流値の大きな OV コイルと IV コイルの交流損失を収集した。減磁に要する時間  $\Delta T$  は、第4サイクルの前半までは1,650秒、第4サイクルの後半からは半分の825秒に変更された。

交流損失の測定法は、コイル入口、出口の超臨界圧ヘリウム(Helium)の圧力、温度からエンタルピー差を積算する熱的方法である。図1に、第18キャンペーンの代表的な減磁における OV-U コイルの冷媒入口・出口温度の変化を示した。減磁後に出口温度のみが交流損失によって変化していることが分かる。この変化分を熱量に換算し、交流損失とした。なお、定常状態での入口・出口の温度差は、定常熱侵入によるものである。

### 3. 交流損失の長期観測結果

図2に、この18年間の実験サイクル中の交流損失を示す。初期(第5サイクルまで)には IV-L 以外のコイルで減少傾向が見られたが、その後は全てのコイルで有意な変化は見られなかった。これまでの研究で、交流損失の中の結合損失については、素線間結合損失が支配的であることが分かっている。実際、図2のデータから見かけの結合損失時定数を計算すると、秒オーダーになり、短尺サンプルの測定値40msと比べて2桁大きい。これは、素線間結合によって長い距離の遮蔽電流ループが発生しているためである。初期の実験サイクルでは、電磁力または熱収縮によって、低抵抗の素線間接触が外れることにより、この電流ループの一部が消滅したものと考えられる。さらに、素線が安定な位置に移動した後は、素線間接触状況が変化しないことから、交流損失も変化しなくなったと考えられる。素線はもともと被膜のない裸線であるため、過去の研究[2]で見られたような被膜の剥がれによる交流損失の増加もなかった。

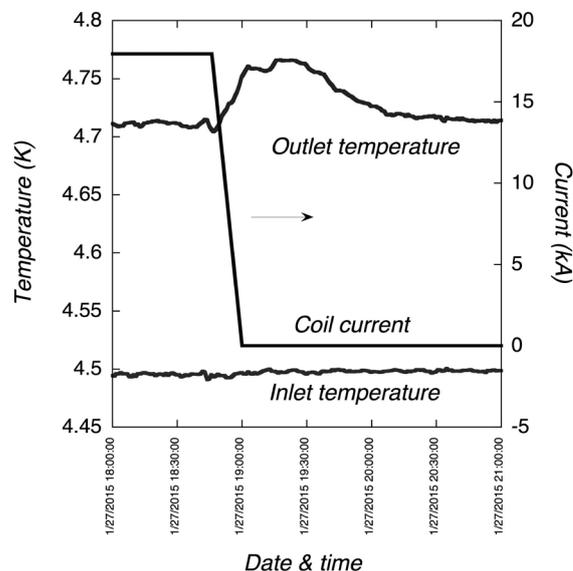


Fig. 1 Time evolution of helium temperatures and coil current during discharge for the OV-U coil.

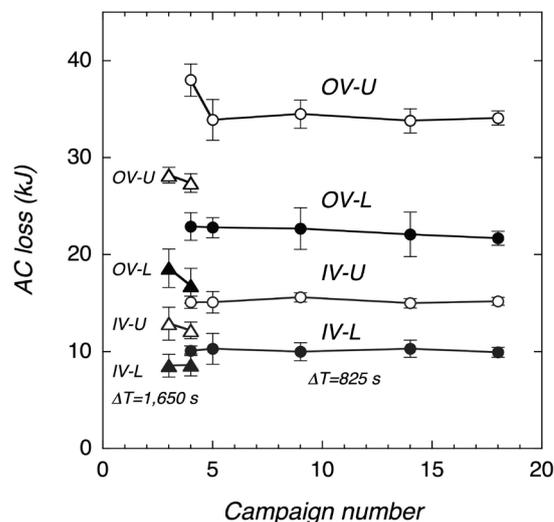


Fig. 2 Long-term changes in AC losses for six coils

### 参考文献

- [1] K. Takahata, et al.: Fusion Engin. Des., Vol. 65 (2003) p. 39
- [2] R. Zanino, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 22 (2009) p. 085006.

## JT-60SA 用ポロイダル磁場コイルの製作進捗

### Progress of Manufacturing of Poloidal Field Coils for JT-60SA

村上 陽之, 木津 要, 土屋 勝彦, 小出 芳彦(量研機構); 堀井 弘幸, 野元 一宏(三菱電機)  
 MURAKAMI Haruyuki, KIZU Kaname, TSUCHIYA Katsuhiko, KOIDE Yoshihiko (JAEA);  
 HORII Hiroyuki, NOMOTO Kazuhiro (Mitsubishi Electric)

#### 1. はじめに

欧州と日本が共同で製作を進めているJT-60SAの超伝導コイルのうち、トロイダル磁場コイルは欧州が製作を担当し、ポロイダル磁場コイル(中心ソレノイドおよび平衡磁場コイル)は日本が製作を担当する。

これまでに6個の平衡磁場コイルのうち3個のコイルはJT-60SA装置内に仮置きされている。残る3個についても2016年夏の完成に向けて製造が進められている。中心ソレノイドは一つ目のモジュールのパンケーキ巻線・熱処理およびパンケーキ間接続が完了した。

本発表では、ポロイダル磁場コイルの製作の進捗状況およびJT-60SA装置全体の組立状況について報告する。

#### 2. 中心ソレノイド

中心ソレノイド(CS)は4つのモジュールで構成され、各モジュールは6個の8層パンケーキと1個の4層パンケーキから成る。CSモジュールは、パンケーキ巻線、パンケーキ熱処理、ターン絶縁およびパンケーキ接続、ターン絶縁真空含浸、対地絶縁、対地絶縁真空含浸の手順で製作される。

パンケーキ間の接続は突合せ接続を用いている。接続部の健全性を確認するため、接続後に2kN(破断力の1/6程度)の力で引っ張り[1]、十分な接続状態であることを確認している。これまでに、1ヶ所の接続部で接合面に微小なクラックが入っていることが確認された(図1)。クラックの確認された接続部は、接続位置を切断し再度接続作業を行い、問題なく接続できたことを確認している。

一つ目のモジュールは、パンケーキ巻線および熱処理、パンケーキ間の接続作業が完了した(図2)。2つ目のモジュールは、パンケーキ巻線および熱処理が完了し、現在パンケーキ間の接続作業を進めている。また、3つ目のモジュールのパンケーキ巻線および熱処理を並行して進めている。

CSが健全に製作されていることを確認するため、最初のモジュールは、冷却・通電試験を実施する計画である。

#### 3. 平衡磁場コイル

平衡磁場コイルは6個のコイルで構成される。このうちEF4,5,6の3個のコイルは装置下部に据え付けられるため、真空容器等の組立開始前に、JT-60SA装置内に仮置きされている。現在は装置上部に設置されるEF1,2,3の3個のコイルの製造が進められている。

EF1,2,3コイルの巻線および絶縁テーピングはすべて完了した。EF2コイルは絶縁キュア作業も完了しており、完成したEF2コイルの電流中心位置の測定を実施した。電流中心測定は、20度ピッチで円周18ヶ所の全導体の位置を測定し、平均値を電流中心とした。測定の結果、図3に示すようにEF2コイルの電流中心は目標の真円度6mmに対して0.4mmと、EF4,5,6コイル[2]の場合と同等に非常に高精度で製作ができていることを確認した。

EF1,3コイルの絶縁キュア作業および冷却配管・支持構造物の取り付け等の作業を行い、2016年夏の完成に向けて製作を進めている。上部3個のコイルは、真空容器およびトロイダル磁場コイルの組立が完了した後、その上部に設置する計画である。

#### 4. JT-60SA装置の組立状況

これまでに真空容器の組立は340度分が完了し、真空容器の周囲に設置するサーマルシールドの組立を行っている。欧州が製作を担当するトロイダル磁場コイルは、最初のコイルの冷却・通電試験が問題なく完了し、日本に向けて輸送中である。日本に到着後、受け入れ検査を実施し、装置へ組み込む予定である。2019年のファーストプラズマに向けて、遅滞なく作業を進める予定である。

#### 参考文献

1. K. Kizu, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 23, No.3 (2013) 4200104
2. Y. Koide, et al.: Nuclear Fusion, Vol. 55, (2015) 086001

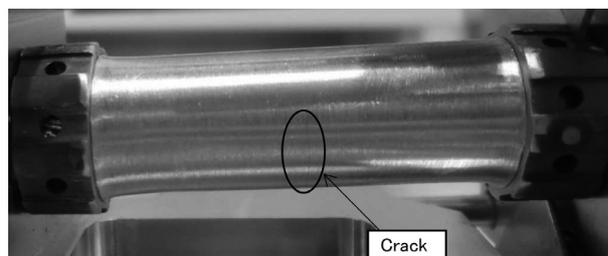


Fig.1 Crack on Surface of Butt Joint



Fig.2 Stacked CS1 Module

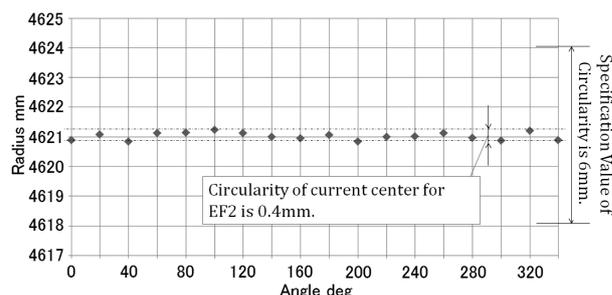


Fig.3 Current Center of EF2 Coil