

## Development of cutting technique of Magnetic alloys core

Masahiro Nomura<sup>1,A)</sup>, Fumihiko Tamura<sup>A)</sup>, Alexander Schnase<sup>A)</sup>, Masanobu Yamamoto<sup>A)</sup>,  
Shozo Anami<sup>B)</sup>, Eizi Ezura<sup>B)</sup>, Keigo Hara<sup>B)</sup>, Chihiro Ohmori<sup>B)</sup>, Akira Takagi<sup>B)</sup>, Masahito Yoshii<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Centre for Proton Accelerator Facility, Japan Atomic Energy Research Institute

2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195, Japan

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801, Japan

### Abstract

A new type of rf cavity using a high permeability magnetic alloy (MA) will be used for the J-PARC high intense proton synchrotrons. The cut core configuration has been adopted to get the optimum Q-value of MA core. We observed the cut surface of MA cores obtained by water jet and grind stone cut. The results show that the roughness of the cut surfaces by grind stone cut is much smaller than by water jet cut so that the cut core by grind stone cut has a possibility to reduce the temperature rise around the cut surface. We developed a grind stone cutting machine for large core and cut large cores by using this machine. High power test of those cores have been performed and we did not observe the temperature rise around the cut surface.

## 金属磁性体コア切断技術の開発

### 1. はじめに

J-PARC大強度陽子シンクロトロンは、RCS (Rapid Cycling Synchrotron) と呼ばれる早い繰り返し (25Hz) の3GeVシンクロトロンと50GeVメインシンクロトロン (Main Ring; MR) で構成されている<sup>[1]</sup>。これらの陽子リングのRF空洞には金属磁性体を利用したコアが用いられている。RF空洞の主な仕様を以下の表1に示す<sup>[2,3]</sup>。

	RCS	MR
台数	12 (内予備1)	7 (内予備1)
周波数 (MHz)	0.938~1.67 (h=2) 1.877~3.34 (h=4)	1.67~1.72 (h=9)
Q値	2	~15
ハーモニック数	2	9 or 18
加速電圧	450kV	180kV
コア枚数	18枚/空洞	18枚/空洞
コア寸法	外径:85cm 内径:37.5cm 幅:3.5cm	外径:80cm 内径:24.5cm 幅:3.5cm

表1 RF空洞の主な仕様

金属磁性体のコアを採用した一番の理由は、飽和磁束密度が高い為、大強度陽子ビームを加速するシンクロトロンでは不可欠な高加速勾配が得られるからである。また、Q値の制御ができ求められるバンド幅に応じた広帯域化が可能、キュリー温度が高い (~570°C) 等の利点もある<sup>[4]</sup>。

Q値に関しては表1に示したように、RCSでは2つのバンド幅をカバーできるようにQ=2、MRでは周波

数可変範囲が3%程度であることからQ~15としている。

Q値の調整にはカットコアの技術を用いる<sup>[5]</sup>。この技術ではトロイダル状のコアを2つに切断し、切断面のギャップ間隔を変化させることにより磁気抵抗を変化させ、実効的なインダクタンスを変化させている。RCSのQ=2の場合は、コア切断面の実質のギャップ間隔は約1mm、MRのQ=15の場合は約10mmである。

コアの切断に関しては、大型コアを切断できる砥石切断機が無い等の理由によりウォータージェット (WJ) による切断を行ってきた。しかし、次に述べるような切断面の局所的な発熱の問題から大型の砥石切断機の開発を開始し、砥石 (GS) による切断方法に移行中である。

### 2. 切断面での局所的発熱

WJ切断したカットコアに気中でパワーを投入しサーモビューワで観測した試験では、切断面のギャップ間隔が0から数ミリ程度の場合切断面の局所的な発熱が観測された。スペーサー1.5mmの場合の測定結果を図1に示す。切断面が発熱している様子が理解できる。

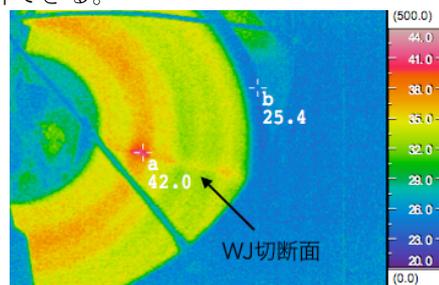


図1 WJ切断でのコア切断面。

<sup>1</sup> E-mail: manomura@popsvr.tokai.jaeri.go.jp

一方、テスト用小型コアをGS切断したものは0.1mm以上のギャップ間隔では局所的な発熱は観測されず、スペーサーを入れないギャップ間隔 $\sim$ 0mmの場合はWJ切断と同様の切断面の局所的な発熱が観測された。

一般的にGS切断での切断面はWJ切断に比べて表面粗さが小さいこと、ギャップ間隔が狭い場合に局所的な発熱が起こっていることから、ギャップ間隔と比較して表面の粗さが無視できない場合に発熱がおきていると考えられる。そこで、もう少し定量的にWJ切断とGS切断したコアの切断面の粗さをレーザー顕微鏡を用いて測定した。

### 3. WJ切断とGS切断での切断面の観察

測定には、キーエンス社製の超深度カラー3D形状測定顕微鏡VK-9500を用いた。波長は408nm、深さ方向の分解能は $0.01\mu\text{m}$ 、スポットサイズは $0.14\mu\text{m}$ 、測定方式は共焦点工学方式を採用している。

#### 3.1 WJ切断での切断面の粗さ

レーザー顕微鏡を用いた測定結果では、WJ切断での平均的な切断面の粗さは数百 $\mu\text{m}$ 程度で、所々五百 $\mu\text{m}$ 程度の粗さの部分があった。レーザー顕微鏡での測定結果の中から水流の上流と下流での測定結果を以下に示す。WJ切断の切断面の状態は切断と言うより水流により削り取られたような状態であった。

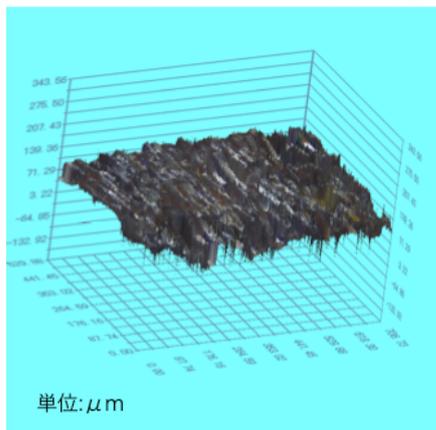


図2 WJ切断上流部分での表面粗さ。

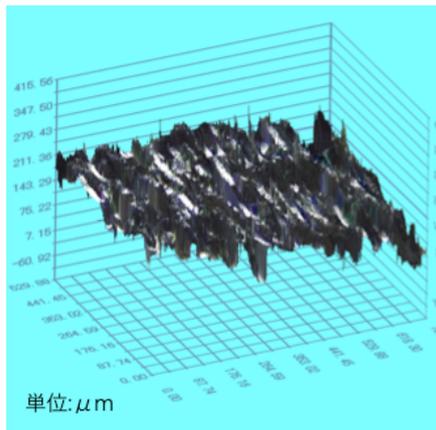


図3 WJ切断下流部分での表面粗さ。

WJ切断では水流の関係でどうしても上流から下流にいくに従って切断面が粗くなってしまう。この傾向は図2と3を比較すれば明らかである。

#### 3.2 GS切断での切断面の粗さ

小型コアをGS切断した切断面の測定結果を図4に示す。測定結果からも明らかな様に表面粗さは非常に小さく数 $\mu\text{m}$ 程度の粗さであった(図4の縦軸のスケールは図2、3と比べ桁小さい)。

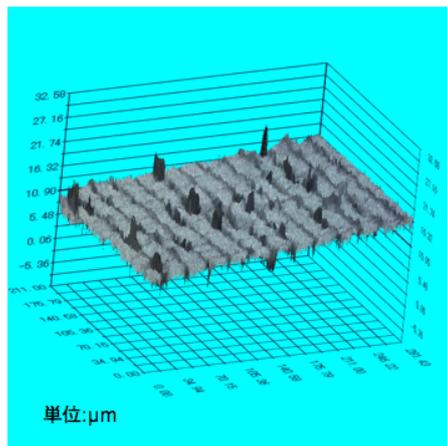


図4 GS切断上流部分での表面測定結果。

#### 3.3 表面粗さ測定結果まとめ

WJ切断での切断面の粗さはギャップ間隔数ミリ程度と比較して小さいとは言えず、以前観測された切断面の局所的な発熱の原因になっていると考えられる。また、WJ切断したコアで実際にRCSのQ値を2に合わせることを考えるとスペーサー等を挟んでギャップ間隔を1mm以下で調整し、そのギャップに冷却水を効率良く流し局所的な発熱を押さえるのは非常に困難である。一方、GS切断の場合は、切断面の粗さはRCSのギャップ間隔と比較しても十分に小さい。

そこで、切断方法としては、切断面の粗さが十分小さく、局所的な発熱を起こさない、言い換えると切断面が冷却を必要としない砥石による切断を採用することとした。

## 4. GSでの大型コア切断技術の開発

#### 4.1 大型コア切断

まず初めに、大型のコアを切断できる砥石切断機の開発を行い、外径 $80\phi$ のMR用コアの切断を行った。大型切断機では、切断面一面を段差を無く切断できる様に大型の砥石の歯が用いられている。コアの切断面(エッチング処理後)の写真を図5に示す。一部、荒れた部分はあるが切断による大きな段差等は生じていない。

コアの平面度の測定は、切断した2枚のコアを切断面で付き合わせてその隙間を計ることにより行った。コアを付き合わせた状態の写真を図6に示す。



図5 GS切断したコアを切断面。



図6 GS切断したコアを切断面で合わせた状態。

隙間は中央部分が一番広く、約0.8mmあった。また、この切断において切り代は、通常の小型コア(10~20cm)程度の約5mmにおさめることができた。

#### 4.2 大型コアHigh Power Test

このGS切断したMR用コアに大気中でパワーを投入し、切断面が局所的に発熱するかをサーモビューワで観測した。この時の試験では切断部には0.5mmのスペーサーを挟んだ。結果を図7に示す。

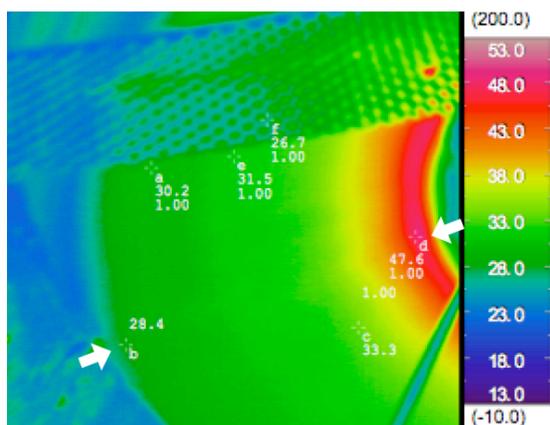


図7サーモビューワ画像。矢印が切断面を示す。

図7から明らかな様に、切断部分の局所的な発熱は起きていない。

引き続き、切断部の隙間に1.5mmのスペーサーを入れ冷却水がは入り込まないようにし、実際のMR用空洞に組み込み、コア一枚あたり約8kW(RCSの運転条件)を入力し連続8時間運転を行い切断部の温度上昇をサーモペイントで調べた。試験後コアを取り出し切断部を調べたところ、サーモペイントは変色しておらず切断部分の温度は130度以下であった。同様の試験はWJ切断したコアでも行っており、その時の結果は、切断面で冷却水に触れていない部分は完全にサーモペイントは変色していた。これらの試験から、GS切断したMR用実機大コアの切断面は局所的な発熱が無く、実機に使用できることが確認された。

### 5. まとめと今後

WJ切断で観測された切断部分の局所的な発熱を解決する為に、大型の砥石切断機の開発を行い、MR用コアの試作を行った。気中及び実際の空洞に装填しHigh Power Testを行った結果、切断部分の局所的な発熱は無く実機に使用できることが確かめられた。

今後は、大量生産に向けて切断面の粗さ及び平面度の改善を行っていく予定である。また、J-PARCでは直接冷却方式を採用しているため防水コーティングが必要である。そこで、今回試作したMR用実機大コアに防水コーティングを行い再度High Power Testを行い実機に採用できるかの最終確認を行う予定である。

### 謝辞

WJ及びGS切断の切断面の3次元測定の際に機材及び測定に協力をして下さったJ-PARC RCS真空グループ及び株式会社キーエンス社の方々に感謝いたします。

### 参考文献

- [1] "Accelerator Technical design Report For High-Intensity Proton accelerator Facility Project, J-PARC", KEK Report 2002-12 or JAERI-Tech 2003-044
- [2] 吉井正人. "J-PARC RING RF SYSTEM", Proceedings of the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan
- [3] Alexander Schnase. "Hybrid cavity for J-PARC Rapid Cycling Synchrotron", Proceedings of the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tosu, July 20-22, 2005
- [4] Y. Mori, et al., "A new type of RF cavity for high intensity proton synchrotron using high permeability magnetic alloy", Proceedings of EPAC98, p.229-301
- [5] C.Ohmori, et. al., "High field gradient cavity for JAERI-KEK joint project", Proceedings of EPAC2002, p.257-261