

# 3D ELECTROMAGNETIC FIELD ANALYSIS OF RF ACCELERATING STRUCTURE LOADED WITH OIL-COOLED MAGNETIC METAL CORES

Takeshi Takahashi<sup>1,A)</sup>, Yuichi Morita<sup>A)</sup>, Jun Kameda<sup>B)</sup>, Tatsuya Kageyama<sup>C)</sup>, Satoru Yamashita<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> Department of Physics, Graduate School of Science, The University of Tokyo  
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033

<sup>B)</sup> Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo  
5-1-5 Kashiwa-no-Ha, Kashiwa City, Chiba, 277-8582

<sup>C)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

<sup>D)</sup> International Center for Elementary Particle Physics, The University of Tokyo  
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033

## Abstract

We report the design and simulation of an oil-cooled RF accelerating structure using the FINEMET magnetic alloy (MA). Normal paraffin is chosen as a coolant since it is chemically inert and is an excellent electrical insulator comparable to high-grade transformer oils. This makes it unnecessary to protect the MA cores with anticorrosion coating. The absence of coating is expected to reduce the mechanical stress due to thermal expansion inside the MA cores. In the current design, a single disk-shaped toroidal core is replaced with a set of three ring cores of different radial sizes. Each ring core is made of wound FINEMET ribbon (typically 18  $\mu\text{m}$  thick) with silica insulating layers (typically 2  $\mu\text{m}$  thick) interleaved. This kind of microscopic multi-layers structure brings anisotropic dielectric and magnetic properties with cylindrical symmetry. Special care is taken in modeling these anisotropies for the electromagnetic simulation.

## 油冷式金属磁性体コア装荷高周波加速構造の三次元電磁場解析

### 1. はじめに

陽子・イオン用リング加速器の高周波構造は同軸管共鳴器内に磁性体を装荷することによりMHz帯の共振周波数を持ちながらサイズをコンパクトにすることができる。従来、磁性体にはフェライトが使用されてきた。

近年、日立金属株式会社によりファインメットと呼ばれる新素材が開発された。これはナノ結晶構造を有する軟磁性鉄系合金であって、フェライトを上回る透磁率、飽和磁束密度、キュリー温度をもつ表(1)<sup>1)</sup>。透磁率だけで考えれば1MHzの周波数では約5倍弱の加速勾配が見込める。飽和磁束密度とキュリー温度が大きいという特徴は大きなパワーを加速構造内に供給して高い加速勾配を得ることを可能とする。しかし、供給するパワーが大きいことと渦電流損失があることによりFINEMETの単位体積あたりの発熱量は大きくなる。よって、効率の良い冷却システムが必要である。また、FINEMETは水腐食性があるため錆対策も必要になる。本加速構造では冷媒に低粘度ノルマルパラフィン油を使用し、これを乱流域で使用することで十分な冷却効率を目指す。

本論文ではFINEMETコアを装荷した加速構造の三次元電磁場シミュレーションの現状報告を行う。

	FINEMET <sup>1)</sup>	フェライト
比透磁率	2400	500
飽和磁束密度[T]	1.2	0.4
キュリー温度[°C]	570	200

表1:FINEMETとフェライトの磁気特性の比較(1MHz)

### 2. 加速構造の概要

我々が開発を進めている加速構造は1/4 $\lambda$ 同軸型加速構造を基本とし、加速ギャップあたり15kVの加速を想定している。この加速構造の概略図を図1に示す。

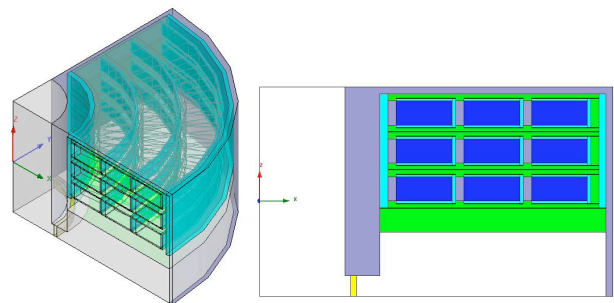


図1:加速構造の1/8モデル(左)、加速構造の断面図(右)(色分けについては本文参照)

<sup>1)</sup> E-mail: takahashi@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

金属磁性体コアはFINEMET(図1の青色部分)を使用。磁性体コアのカラー(巻き芯)、及び加速構造の外殻(タンク)はステンレス鋼(灰色部分)。油タンクと空気の仕切り窓、及びコア間の流路構造物はガラスエポキシ材FRP(黄緑部分)、加速ギャップにはアルミナ材の円筒を装荷(黄色部分)。冷媒はノルマルパラフィン油(水色部分)。

FINEMETコアは冷却性能、熱応力緩和の観点から径方向に三分割されたものを使用する。大、中、小の三つのコア一枚ずつを2枚のFRP板に挟み、一つの構造物とし、これを三段積みにする(図1)。以降、コア1式というときは大・中・小各1枚ずつ計三枚のコアから構成されるセットを指す。

冷媒にノルマルパラフィン油を選定した理由は冷却性能、絶縁破壊強度、化学的安定性、安価であることなどが挙げられる。

構造のより詳細なデータは本学会論文<sup>[5]</sup>を参照。

### 3. 電磁場シミュレーション

電磁場シミュレーションにはHFSS<sup>[7]</sup>を使用した。

#### 3.1 シミュレーション手法の概要

FINEMETコアの径方向の構造はFINEMET箔と表面に塗布したシリカの絶縁層が交互に並んでいる。このマイクロ構造を正確に入れてシミュレーションを行うことは困難なのでマクロ媒質的に近似して扱う。マクロ的なコアの誘電率と透磁率は径方向には積層構造、周方向はFINEMETの占積率が75%として扱うことで求める<sup>[2]</sup>。

FINEMETコアの比誘電率、透磁率は周方向と径方向に円筒対称の異方性を持っているが、HFSSで設定できる異方性は直行座標系のみである。そこで「疑似円筒座標系」という手法を用いる<sup>[6]</sup>。まず、周方向にコアを扇型に分割する。そして、各扇型に局所直交座標系を配して、その上で媒質の異方性を定義することにより、擬似的に円筒座標系の異方性を表している。FINEMETの直交座標系での異方性を表2に示す。

	X軸方向	Y軸方向	Z軸方向
比誘電率	15	1	1
比透磁率	4	1800	1800

表2:マクロ媒質的に近似したFINEMETの異方性<sup>[2]</sup>

シミュレーションを行うモデルは図1で示した構造を入れて行っている。ステンレスの部分のみ材質は完全導体に変更した。物性値は表2、3の値を使った。表3のアルミナの比誘電率は共振周波数が1.7MHzになるように調節している。この比誘電率と加速ギャップの寸法ではキャパシタンスCは $C=2.28 \times 10^{-10}$ [F]になる。

	ノルマル パラフィン油	FRP	アルミナ
比誘電率	2	7.8	100
比透磁率	1	1	1

表3:構成要素の比誘電率と比透磁率

上記条件でシミュレーションを行い、得られた磁束密度分布を図2に示す。表示するデータは値が最大となる位相(ピーク時)を使う。

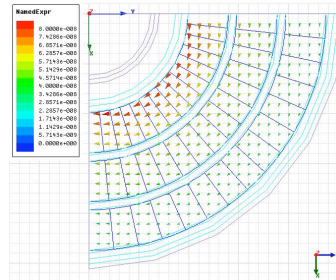


図2:磁束密度分布のベクトル図(加速電圧で規格化されていない任意スケール)

#### 3.2 加速電場

我々の加速構造はギャップあたり15kVの加速を要求している。ハーフセルではその半分の7.5kVで規格化する。規格化した電場を図3に示す。

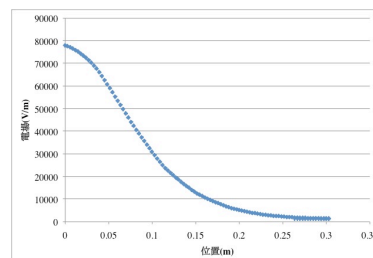


図3:規格化した加速電場(ピーク値)

このときに用いた定数を使い、磁束密度、電場を規格化する。

#### 3.3 コア内部の磁束密度

コアは図1に示すように三式入っている。ギャップに近いものをギャップ側、一番遠いものをショート板側と呼ぶ。三式のコアの磁束密度は図4に示す。

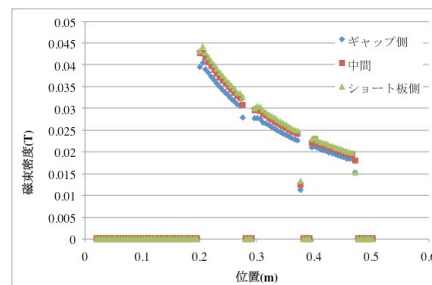


図4:コアの磁束密度分布(ピーク値)

各コアの磁束密度分布は $1/r$ に比例している。  
 コアの発熱は磁束密度の二乗に比例するため、この分布から発熱分布を作ることができる。図4から三式のコアはほぼ同じ発熱分布になる。

### 3.4 コア表面の電場

それぞれのコアの図5に示す青(図5の1)(ギャップ側)、赤(図5の2)、緑(図5の3) (ショート板側)の線の経路に沿った電場を図6に示す。

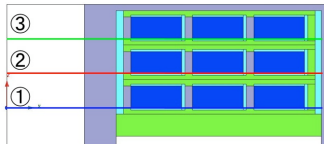


図5:示す電場の経路

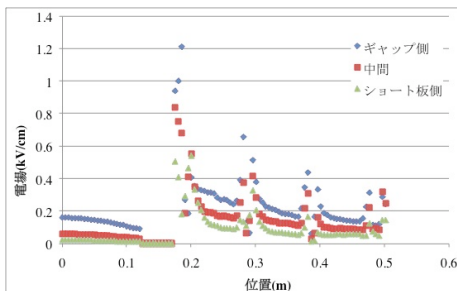


図6:コア表面に現れる電場(ピーク値)

ギャップ側の電場が最も強いのでこれについて述べる。

電場の分布は鋭いスパイクとスパイクの間の谷と直線の3つの部分がある。スパイクはノルマルパラフィン油、谷はFRP、直線はコアの部分の電場である。媒質ごとの最も強い電場と絶縁破壊強度は表5にまとめる。実際のコアはFINEMETとシリカが層状に入っているため電荷がFINEMETに溜まり、電圧がシリカの部分にかかるため、コアの部分の電場に(FINEMET一層の厚み(18 $\mu$ m)+(シリカー層の厚み+空間)(6 $\mu$ m))÷((シリカー層の厚み+空間)(6 $\mu$ m))の値をかけて補正(4倍)する。この部分の絶縁破壊強度はシリカの値になると考えられる。なお、表4の絶縁破壊強度の値は直流電圧に対する値である。

	シリカ	ノルマル パラフィン油	FRP
電場(kV/cm)	1.6	1.2	0.066
絶縁破壊強度 (kV/cm)	10000	40 <sup>[3]</sup>	220

表4:コア表面の電場の最大値(ピーク値)と絶縁破壊強度

今回の計算で求めた各媒質の最大電界強度(ピーク値)は絶縁破壊強度に比べて十分余裕をもって低い。

## 4. 等価回路模型による共振周波数の検証

我々が開発を進めている加速構造の等価回路模型は図7に示す。はじめに同軸管のインピーダンス $Z$ (図7の $Z$ )を求める。

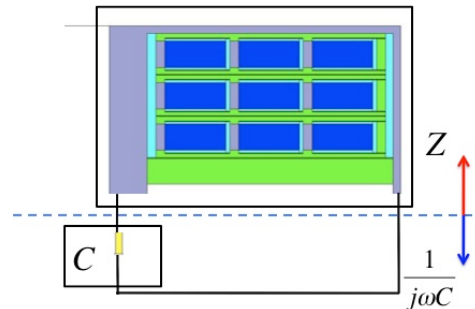


図7:加速構造の等価回路

インピーダンス $Z$ は文献<sup>[4]</sup>の等価回路模型を参考にして単位長さあたりのインダクタンス $L_i$ とキャパシタンス $C_i$ から求める。注意すべき点是我々の加速構造では図8に示す白(図8の1)、赤(図8の2)、紫(図8の3)、青(図8の4)の線の経路上で $L_i$ と $C_i$ を計算する。求めた各経路の $L_i$ と $C_i$ にビームライン方向の厚みを考慮してこの加速構造の単位長さあたりのインダクタンス $L_1$ とキャパシタンス $C_1$ を求めます。

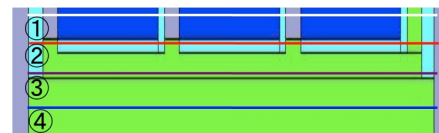


図8:FINEMETコアとFRP窓周辺の拡大図

$L_1$ と $C_1$ を使い、特性インピーダンス $Z_0$ と信号の速度 $v$ は次のようになる。また、ここでビームラインの長さ $l$ も示す。

$$Z_0=606[\Omega]$$

$$v=4.15 \times 10^6[\text{m/s}]$$

$$l=0.2[\text{m}]$$

次に加速ギャップのインピーダンスを考える。これは単純にコンデンサが入っていると考える(図7のC)。キャパシタンス $C$ は $C=2.28 \times 10^{-10}[\text{F}]$ 。

この加速構造の共振は図7の青色の破線から見て同軸部分のインピーダンスと加速ギャップのインピーダンスが等しいときに起こるので共振周波数 $f$ は次の式を満たす。

$$Z_0 \tan\left(\frac{2\pi f l}{v}\right) = \frac{1}{2\pi f C} \quad (1)$$

式1:共振周波数が満たす式

式1を1MHzから3MHzまでグラフにプロットすると図9になる。

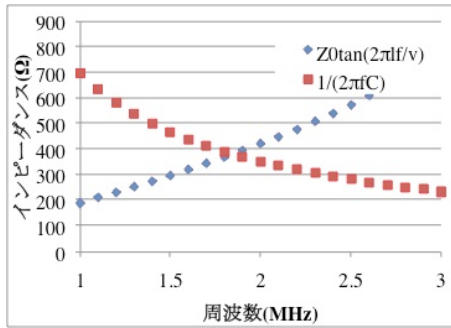


図9:インピーダンスと周波数

式1を満たす周波数は1.84MHzとなる。シミュレーションの共振周波数は1.7MHzなので誤差は10%程度である。

## 5. まとめ

油冷式磁性体コアを装荷した加速構造について以下解析を行った。

- 等価回路模型を使用して共振周波数を算出した。
- 磁性金属箔帯のマイクロ構造を異方性マクロ媒質で近似する技法を電磁場計算コードHFSS上で使用することにより加速モードの電磁場分布を求めた。
- 磁束密度分布については、三式のコアがほぼ同じような発熱分布になることが分かった。
- 電場分布から得られた材料毎の最大電界強度は各絶縁破壊電圧に比べて十分余裕を持って低いことが分かった。

今後の計画として、まずはコア1段積みの試験器を製作して大電力試験及び絶縁試験を行う。さらに、FINEMET箔の幅を28mmにして四段積みの構造を考えている。これは35mm幅のFINEMET箔は単ロール法で作られたそのままの状態であるため両端が粗い。これを28mm幅に切りそろえる事で層間絶縁が良くなる事が期待される。さらにコアの厚さが薄くなるので冷却性能も向上する。

## 参考文献

- [1] 日立金属FINEMETカタログ, URL: [http://www.hitachi-metals.co.jp/prod/prod02/pdf/hl-fm9-d\\_a.pdf](http://www.hitachi-metals.co.jp/prod/prod02/pdf/hl-fm9-d_a.pdf).
- [2] T.Suehiro, “J-PARC主リングの加速能力増強のための新しい加速空洞冷却システムの基礎研究”, URL:<http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~suehiro/ronbun.pdf>
- [3] J.Kameda, et al., “RF cavity loaded with oil-cooled FINEMET cores for RCS”, ATAC’07, JAEA Tokai, Mar. 1-3, 2007
- [4] I.S.K.Gardner, “FERRITE DOMINATED CAVITIES”, Proceedings of CAS,CERN92-03v2, URL:[http://cas.web.cern.ch/cas/CAS\\_Proceedings.html](http://cas.web.cern.ch/cas/CAS_Proceedings.html)
- [5] Y.Morita, et al., “RF ACCELERATING STRUCTURE LOADED WITH OIL-COOLED MAGNETIC METAL CORES”, Proceedings of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, JAEA Tokai, Aug. 5-7, 2009
- [6] K.Hasegawa, et al., “HOM analysis of Magnetic Alloy Cavity”, Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Hiroshima University Higashihiroshima city, Aug. 6-8, 2008
- [7] アンソフト社製三次元電磁場シミュレーションソフト HFSS