

RF ACCELERATING STRUCTURE LOADED WITH OIL-COOLED MAGNETIC METAL CORES

Yuichi Morita^{1,A)}, Jun Kameda^{B)}, Takeshi Takahashi^{A)}, Tatsuya Kageyama^{C)}, Satoru Yamashita^{D)}

^{A)} Department of Physics, Graduate School of Science, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033

^{B)} Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo
5-1-5 Kashiwa-no-Ha, Kashiwa City, Chiba, 277-8582

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

^{D)} International Center for Elementary Particle Physics, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033

Abstract

A nanocrystalline soft magnetic alloy “FINEMET” has great potential for use as a magnetic core material for proton and ion RF accelerators. We have been developing an RF accelerating structure loaded with oil-cooled magnetic alloy cores (MA), where a low-viscous hydrocarbon fluid (normal paraffin “ENEOS Grade L”) is used. In addition, normal paraffin is an excellent electrical insulator, whose withstanding voltage is comparable to those of high grade transformer oils. As for the MA core design, a set of three ring cores of different radial sizes is adopted instead of a single disk-shaped toroidal core. This paper reports the outline of the RF structure, followed by some results of the thermal structural analysis and coolant flow simulation by means of ANSYS.

油冷式金属磁性体コア装荷高周波加速構造

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振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)^[1]。この優れた素材を用いることによりフェライト使用時と比較して約10倍の加速勾配を得ることができる。我々はファインメットコアを装荷した高周波加速構造を開発し、将来の陽子・イオン加速器の可能性を切り拓くため研究を進めている。

	ファインメット	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：ファインメットとフェライトの磁気特性の比較(1MHz)^[1]。

飽和磁束密度とキュリー温度が高いという特徴はより大電力の高周波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。その結果ファイン

メットコアの単位体積当たりの発熱量が大きくなる。よって、冷却効率の良い冷却系が必要となる。本加速構造では低粘度油（ノルマルパラフィン”ENEOS Grade L”）を冷媒として乱流域で使用することで十分な冷却効率を得ることを目指す。

2. 加速構造の概要

我々の開発している加速構造は1.7MHzの1/4λ同軸共振モードを使用し、ギャップ当たり15kVの加速電圧を想定している。

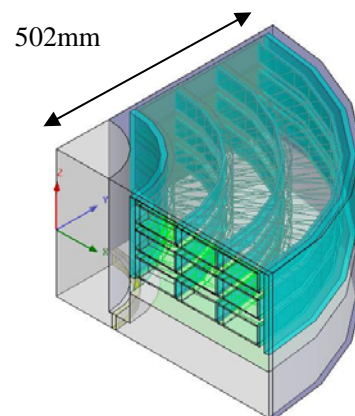


図1：加速構造の1/8モデル図

¹ JSPS Research Fellow
E-mail: morita@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

2.1 金属磁性体（ファインメット）

加速構造にはファインメット（FT-3M）の薄帯（厚み18μm、幅35mm、片面に2μmの厚みとなるようにシリカを塗布）をトロイダル状に巻いたコアを装荷する。その構造上、コア本体は流路形成の構造材として使用するには適さない。そのため大・中・小3種類のコアを用意し、それぞれの巻き芯となるステンレスカラーを流路構造の一部として利用する。また発熱分布が一様発熱ではなく半径の2乗に逆比例するので3種類のコアを用いると1枚のトロイダル状コアを用いる場合よりも内部の熱応力を緩和できると期待される。薄帯状のファインメットの使用は渦電流損を小さく抑えるという利点がある。大中小コアを1式として1ギャップに6式のコアを装荷する。コアの寸法は表2に示すとおりである。

	内径 [mm]	外径 [mm]
小コア	396	558
中コア	592	754
大コア	788	950

表2：各コアの寸法

2.2 ノルマルパラフィン油によるコア冷却

ファインメットコア装荷加速構造はフェライトコア装荷加速構造に比べてコアの発熱量が大きくなるため加速器運転中には効率よく冷却することが必要である。安全性、冷却効率の面から理想的な冷媒は水であるが鉄を主成分としたファインメットは水腐食性を持つので水ではなくノルマルパラフィン（ENEOS Grade L）を選定することとした。ノルマルパラフィンと水の物性値を表3に示す^[2]。ノルマルパラフィンは耐放射線性能、絶縁破壊電圧、冷却効率、価格に優れている^[3]。

	ノルマルパラフィン油	水
密度 [kg m ⁻³]	751	1000
比熱 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]	2200	4186
動粘性係数 [m ² s ⁻¹]	1.36×10 ⁻⁶	0.66×10 ⁻⁶
熱伝導率 [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	0.126	0.618
引火点 [°C]	71	-
比誘電率	~2	~81

表3：ノルマルパラフィンと水の物性値の比較^[2]

流路の形成は以下のように行う。図2に示すようにコア1式を2枚のFRP板で挟み一体構造を形成する。コア表面とFRP板の間に3mmの隙間を残しこれを流路とする。この一体構造を3段積みにしたものを加速構造のハーフセルに装荷する（図1）。十分な冷却効率を得るために流速を上げて乱流域としなければならない。流路（幅81mm、高さ3mm）の代表長は5.8×10⁻³mとなるので代表速度をUとするとレイノルズ数Reは

$$Re = \frac{5.8 \times 10^{-3} \times U}{1.36 \times 10^{-6}}$$

となり、これが典型的な臨界レイノルズ数2320に達するには少なくとも0.54m/sの流速が必要であることがわかる。

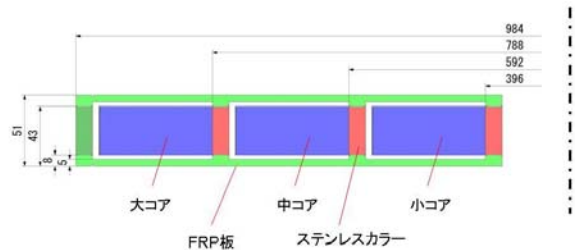


図2：流路の形成。コア1式をFRP板で挟む。この構造をタンク内に3つ積み上げると図1のようになる。

3. 熱構造解析

流路にノルマルパラフィンを流した場合の流速分布及び大電力試験（コア1枚当たり6kWの発熱）を行った場合のコア1式の温度分布、熱応力の様子をANSYS^[4]を用いて計算した。

3.1 流速－伝熱シミュレーション

ANSYSの流体計算用モジュールCFXを使用して冷媒の流速計算及びこの流速を用いたコア温度分布の計算を行った。計算に必要なファインメットの熱伝導率は産業総合研究所の協力で測定した。測定法はレーザーフラッシュ法による^[5]。計算に使用したノルマルパラフィンの物性値およびファインメットの物性値は表3及び表4の通りである。流路入口での流速は1.5m/sとしている。

	ファインメット	ステンレス	ノルマルパラフィン
熱伝導率 [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	7.1	16.2	0.126
線熱膨張係数 [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	10.6	17.3	1.0e-3
ヤング率 [GPa]	200	193	1.0e-9
ポアソン比	0.32	0.3	0.4999

表4：ファインメット薄帯の物性値

各コアは多層同心円に近似して計算を行うため径方向に10分割した（実際には約7000層である）。分割した一層一層に交互にファインメット、ノルマルパラフィンを定義している。ノルマルパラフィンを定義したのはファインメット間にノルマルパラフィンが浸み込むと考えられるからである。コアの発熱量は電磁場シミュレーションより得られる磁場分布の2乗をコア一枚当たりの発熱量6kWで規格化したものを使用している^[6]。図4よりわかるように現在の流路設計では小コア用流路の入口及び出口の流れが淀む部分においてコアの冷却が不十分であり、改善の余地がある。コアの裏表で入口・出口の周方向

位置を異なる箇所配置する、あるいは入口を複数つくって淀みをなくす等の対策を考えている。

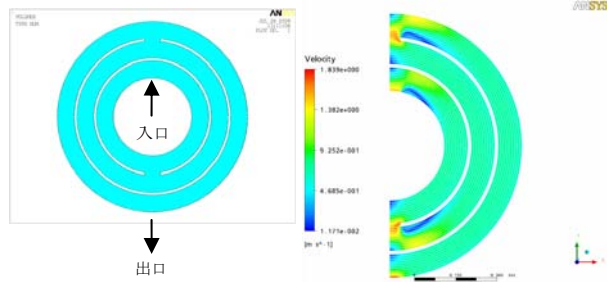


図3：流路の形状（左図）及び流路の中心（高さ1.5mmの面）でのノルマルパラフィンの流速（右図）。対称条件より流路の右半分のみ取り出して計算している。

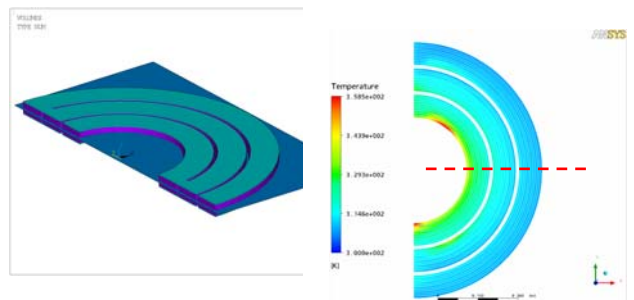
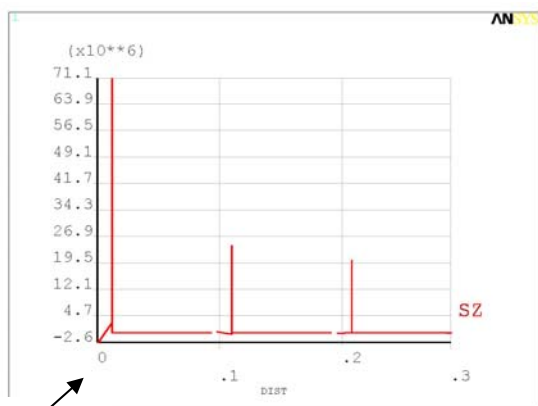


図4：コア中心温度（右図）。左図の断面での温度分布を表している。各コアを径方向に10分割し、各層に交互にファインメット、ノルマルパラフィンを定義している。

3.2 熱応力シミュレーション



小コアのカラーの内径

図5：熱応力の周方向成分

流体-伝熱シミュレーションの結果を用いてコア内部に発生する熱応力の計算を行った（図5）。図4左図の断面付近のみ取り出して2次元計算している。温度分布は図4右図の赤い点線上の値を用いた。ANSYSに入力した物性値は表4の通りである。ノルマルパラフィンはコア内部に自由に入出力できると考え、線熱膨張係数、ヤング率にはゼロに近い値を用いている。ゼロを入力しないのはANSYSが物

性値ゼロを許容しないからである。図5よりコア内圧縮応力の周方向成分は約20kPa以下である。コアを鉄製バルク構造として同様のシミュレーションを行った結果、同成分の最大値は約30MPaであった。よって薄帯を巻いただけの柔らかい構造は熱応力を緩和する効果をもつことがわかる。

4. まとめ

油冷式金属磁性体コアを装荷した高周波加速構造において、流路にノルマルパラフィンを流した場合の流速計算及び大電力運転時のコアの温度分布計算、熱応力計算を行った。今後は1/2流路を製作して流れの可視化実験を行い、その後実寸大の1段積み構造を製作して大電力試験、コアの絶縁試験を行っていき（実機は3段積みにする予定である）。将来計画として28mm厚のコアを用いた4段積み構造を考えている。35mm幅のファインメット薄帯は製作した薄帯そのままの状態である。35mm薄帯の両端を切りそろえて製作する28mmの薄帯の使用により層間絶縁が良くなると期待される。また冷却の観点からも28mm厚の薄いコアは有利である。

5. 謝辞

東京大学生産技術研究所吉川暢宏教授にはシミュレーションに関して大変有益なアドバイスを頂いた。この場を借りて御礼申し上げます。なお、本研究は科研費（21・9662）の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 日立金属ファインメットカタログ, URL: http://www.hitachi-metals.co.jp/prod/prod02/pdf/hl-fm9-d_a.pdf.
- [2] T.Kageyama, "Alternative Solutions for the Ring RF Cavity Structures", ATAC'09, JAEA Tokai, Mar. 5-7, 2009
- [3] J.Kameda, et al., "RF cavity loaded with oil-cooled FINEMET cores for RCS", ATAC'07, JAEA Tokai, Mar. 1-3, 2007
- [4] アンシス社製汎用FEM連成解析ツール
- [5] 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>
- [6] T.Takahashi, et al., "3D ELECTROMAGNETIC FIELD ANALYSIS OF 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