

DEVELOPMENT OF AN RF ACCELERATING STRUCTURE LOADED WITH FINEMET MAGNETIC CORES COOLED BY A CHEMICALLY INERT LIQUID

Yuichi Morita^{1,A)}, Tatsuya Kageyama^{B)}, Jun Kameda^{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)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

^{C)} Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo
5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba, 277-8582

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

Abstract

We report the development of a new type of high gradient accelerating cavity by using “FINEMET” for proton/ion accelerators with a new structure and cooling system. FINEMET is a metallic alloy having higher permeability and higher Curie temperature comparing to ferrite, which enables ten times higher accelerating gradient than those of ferrite loaded cavity. To develop next generation high power proton/ion accelerating cavity, we have focused on the structure of the core and cooling system. We are developing cavity cooled by “Fluorinert” which is a fluoro-based chemically inert liquid. It enables the direct cooling of FINEMET-cores without long-term degradation. Three cores subdivided in radial direction, each of which are made by winding FINEMET ribbon of 18micron thick, are packed into a core module. The cores are packed with wind collars to install in cavities so to have no additional mechanical stress. With this structure and cooling system, we expect higher performance such as long-term stability, accurate and homogeneous winding of the core and higher permeability, which would lead the higher power acceleration with stable operation. This report shows the design of the prototype of RF and cooling system constructed at KEK and the preliminary results of its high-power test.

不活性冷媒液冷式ファインメット磁性体装荷高周波加速構造の開発

1. はじめに

近年、日立金属株式会社においてファインメットと呼ばれる金属磁性体が開発された。これは高い透磁率とキュリー温度を持ち、陽子・イオン用リング加速器の磁性体コア装荷型高周波加速構造に適した特性を備えた金属磁性体である。加速構造に従来用いられてきたフェライトの典型的な物性値とファインメット (FT-3M) の物性値を表 1 に示す。優れた磁気的特性をもつファインメットコアを装荷した加速構造はフェライトコア装荷型と比べて約 10 倍の加速勾配が期待できる。

しかし高い加速勾配を得るにはファインメットコア 1 枚あたり数 kW の発熱を冷却しなければならない。冷却効率の観点からは水冷が優れるがコア表面に防錆皮膜が必要となり、皮膜の長期的信頼性、皮膜による冷却効率の低下が懸念される。我々は水の代わりにフロリナートと呼ばれるフッ素系不活性冷媒を用い、コアを直接冷却する。フロリナートを高

速で流し、乱流で冷却するファインメット装荷加速構造の開発は世界初の試みである。このような加速構造は将来の陽子・イオン加速器の原型となり得る。一例として J-PARC 3GeV リング加速器への応用が挙げられる。

	ファインメット (FT-3M)	Ni-Zn 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
熱伝導率 [W/m/K]	7.1 ^[1]	6 ^[2]

表 1：ファインメットとフェライトの物性値の比較 (1MHz)^[3]

2. 加速構造試験空洞の概要

試験空洞は図 1 に示すようにコアモジュールを 1 ユニット装荷したハーフセル構造である。加速

¹ JSPS Research Fellow

E-mail: morita@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

ギャップの代わりに可変キャパシタ (15~1000pF) を使用した。可変キャパシタ両端にブスバーを接続して $\lambda/4$ 同軸共振モードを励振する (1.1MHzから3MHzまで可変)。この試験空洞によりコアあたり平均電力10kWまでの冷却試験を行う。

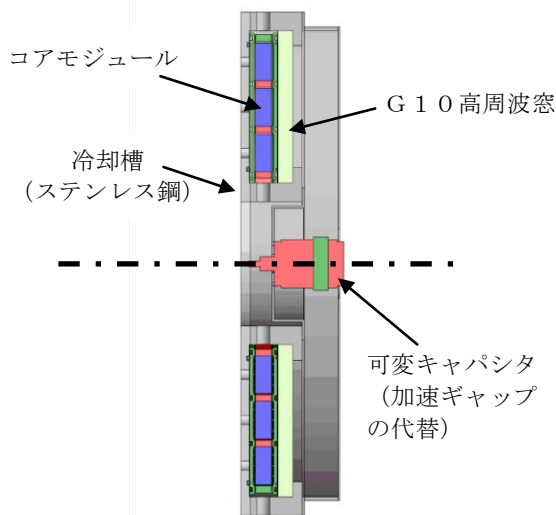


図1：試験空洞の断面図 (ハーフセル構造)

2.1 コアモジュール

ファインメット磁性体コアをエポキシガラス積層板 (G10) で一体化したコアモジュールを図2に示す。コアは径方向に3分割されており、径が小さいものから順に小コア、中コア、大コアと呼ぶ。径方向にコアを分割することでファインメット薄帯の巻締まりを一定の範囲に制御可能となり、磁気特性の向上が見込まれる。モジュール内ではコアの巻芯 (ステンレスカラー) を構造材として使用し、磁性薄帯部分は機能材として不要なストレスをかけることなく組み立てることができる。我々が用いるコアは磁性薄帯の表面に絶縁用シリカを塗布して巻いただけの所謂生コア構造である。生コアはその柔軟性により運転時の発熱による内部応力が緩和される。さらに、生コア表面は直接冷媒にさらされるので放電生成物に対する自己清浄作用が期待できる。

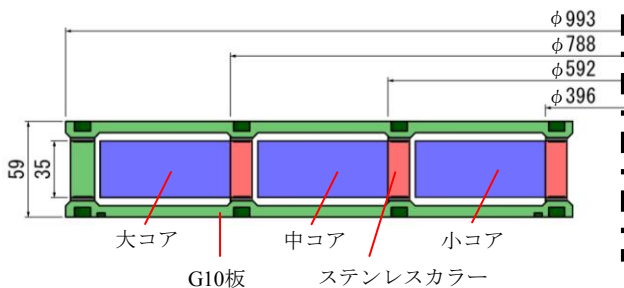


図2. コアモジュールの構造。巻芯 (ステンレス) が構造材となり、磁性体にはストレスがかからない。

2.2 冷媒の選定

前回の報告^[4]では冷媒としてノルマルパラフィンを採用することになっていた。しかし、可燃性のノルマルパラフィンをトンネル内で使用する場合、消防法の観点から安全上の困難が伴う。そこで不活性な冷媒について調査し、比誘電率・絶縁破壊電圧・冷却性能においてノルマルパラフィンとほぼ同等かそれ以上の性能を有するフッ素系不活性液体フロリナート (住友スリーエム株式会社、FC-3283) を採用することとした。フロリナートおよびノルマルパラフィンの物性値を表2に示す。

	FC-3283	ENEOS Grade L
化学式	$(C_3F_7)_3N$	$C_{11}H_{24}$, $C_{12}H_{26}$
沸点 [°C]	128	190~210
密度 [kg/m ³]	1830	751
動粘度 [m ² /s]	0.82×10^{-6}	1.36×10^{-6}
比熱 [J/kg/K]	1050	2180
熱伝導率 [W/m/K]	0.067	0.126
絶縁破壊電圧 [kV/2.54mm Gap]	43	30
比誘電率(1kHz)	1.91	2.0
誘電正接(1kHz)	$<4 \times 10^{-4}$	$\sim 1 \times 10^{-4}$
熱伝達係数 [W/m ² /K] (乱流域)	530	~ 500
価格 [千円/リットル]	~ 19	~ 0.5

表2：フロリナート (FC-3283) とノルマルパラフィン (ENEOS Grade L) の物性値^[5]。熱伝達係数はコア表面から冷媒への値である。

2.3 冷却構造

コア表面に流路を形成してフロリナートの流速を速め、乱流とすることで冷却効率を向上させる。図2のG10板とコア表面との隙間が流路 (高さ5mm×幅81mm) となる。流路の形状を図3左に示す。フロリナートは内径側から入り、外径側から出て行く。前回の報告において回込み部に淀みが生じる問題を報告した^[4]。淀みを解消するために、回込み部に小さな噴出口を開けること (図3右)、および流路内に複数の小さい方向舵を設置することなどの対策を行った^[5]。方向舵についてはシミュレーションにより設置場所ごとに向きを最適化した。

流路構造材のG10材については、フロリナートに浸漬して膨潤試験を行った。3枚のG10片を5カ月間浸漬したが、外観・質感とも変化はなく、表3に示すように有意な質量増加も見られなかった。

生コア表面が高速液流にさらされた場合に懸念される浸食・摩耗が実際に発生するかどうか確認すべく、図4の装置を用いて長期間 (2カ月) にわたり外径200mmのコア表面をフロリナート液流 (噴出部 ~ 4 m/s、流路内0.7m/s以上) にさらした。その結果、コア表面を肉眼および顕微鏡で確認したが、外観上

の異常は見られなかった。

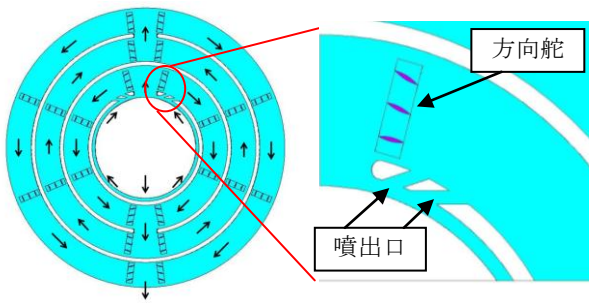


図3. 流路の形状(左図)。バッファから小コアへの回り込み部に追加した噴出口(右図)。

	浸漬前[g] 09年12月18日	浸漬後[g] 10年5月27日	質量差[g]
G10試料#1	41.98	41.98	0.00
G10試料#2	43.31	43.32	0.01
G10試料#3	43.27	43.28	0.01

表3. フロリナートによるG10材膨潤試験の結果

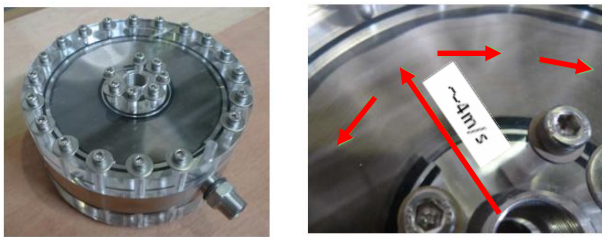


図4. 高速フロリナート流によるコア表面摩耗試験装置。流速0.7m/s以上、噴出部では~4m/s。

3. 試験空洞の組み立て

3.1 コアモジュール組み立て

日立金属株式会社鳥取工場において小、中、大コアを2枚のG10板で挟み込んでコアモジュールを組み立てた。組立時の写真を図5に示す。

小コア、中コア、大コア各々、およびコアモジュ



図5. G10板の上に小、中、大コアを置いている。

ール一体のシャント抵抗測定結果を図6および表4に示す。コアモジュール一体のシャント抵抗値が各コア測定値の和に比べて約6%低いのは、測定方法の違いによる系統誤差と推測される。

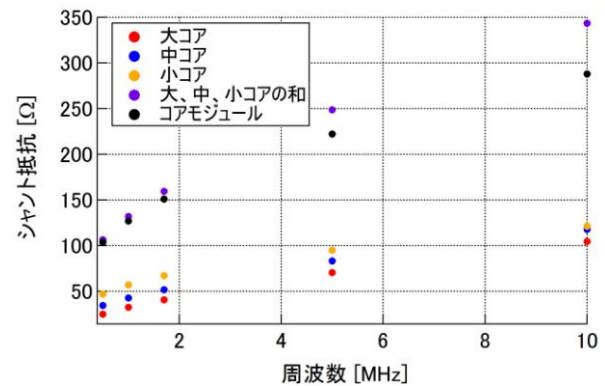


図6. 小、中、大コア単体のシャント抵抗とそれらの和、およびコアモジュールのシャント抵抗。

大コア	中コア	小コア	3つの和	コアモジュール
41Ω	52Ω	67Ω	160Ω	151Ω

表4. 1.7MHzでのシャント抵抗値

コアモジュール組み立てに使用するシール材としてはEPDMゴムを採用した。EPDMゴムはフロリナートと相性が良く、耐放射線性能にも優れている^[6]。コアモジュールの組み立てに使用するネジはG10材とした。

3.2 試験空洞組み立て

2010年7月上旬に試験空洞を組み立てた。冷却槽内へコアモジュールを入れて密封した。高価なフロリナートを使って直ちに気密試験を行うのはリスクがあるので事前に窒素ガスを使って気密試験を行った(2気圧)。ステンレス製冷却槽のタップ穴にねじ込む継手は異材で且つ噛み込みにくい真鍮製を使用した。冷媒がフロリナートであるので真鍮製継手は腐食の心配がなく、かつ安価である。

4. RF電力試験設備

4.1 高周波源

半導体増幅高周波源を用いる。出力パワー(連続波): 0~10kW、出力周波数: 800kHz~3MHz、出力インピーダンス: 50Ωである。

4.2 冷却系

当初、可燃性のノルマルパラフィンの使用を想定

していたので、航空機燃料系防火安全基準を指針として設計・製作した。図7に冷却系の模式図を示す。ポンプはマグネット式のものを使用する。熱交換器の2次冷却系には純水を流す。将来的には、放射線によりフロリナートが分解してできる酸、水分、及び有機物などを除去するフィルターを備えた独立な循環系を設ける必要がある。

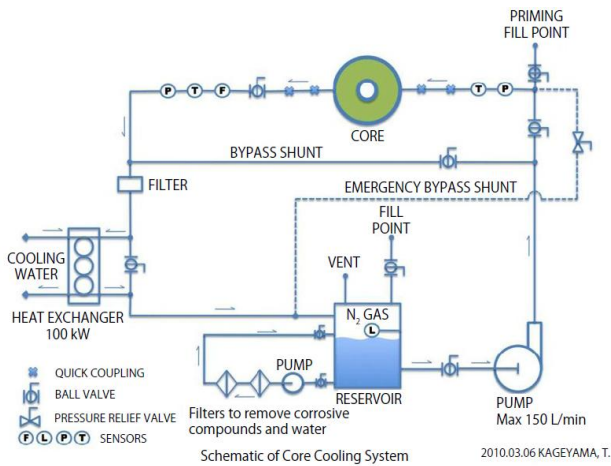


図7. 冷却系の模式図

4.3 整合器

図8に示すように整合器を負荷（試験空洞）と高周波源の間に組み込む。高周波源の出力インピーダンス（ 50Ω ）と試験空洞のシャント抵抗（ 130Ω と仮定）をインダクタ（ $5.7\mu\text{H}$ ）とキャパシタ（ 920pF ）で整合した。整合器を付けることにより、VSWR=2.7を1.2まで改善した。後に 920pF はスミスチャートの読み取りミスによる間違った値であることが分かった。正しい値（ 720pF ）に調整し直すとVSWRはさらに向上すると思われる。

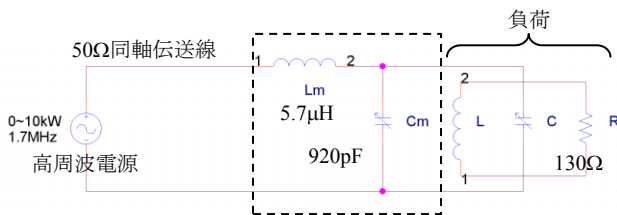


図8. 整合器の回路図。点線で囲まれた部分が整合器である。

5. RF 試験

5.1 Low Level 測定（試験空洞単体）

LCRメータにより試験空洞のインピーダンス（ $R+jX$ ）を測定した結果を図9に示す。現行J-PARC RCS加速空洞の運転周波数の高いところを参考にして、共振周波数が 1.7MHz となるように加速ギャップ（可変キャパシタ）を調整している（ 406pF ）。

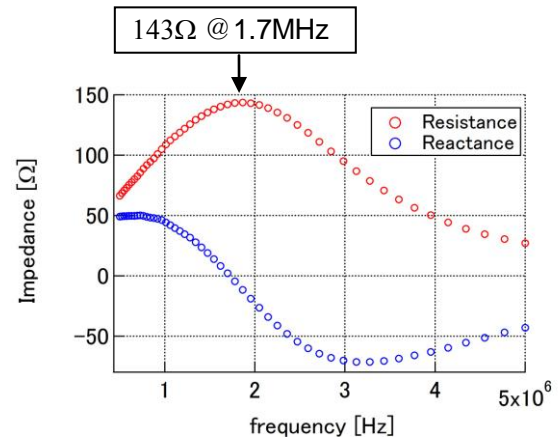


図9. LCRメータで測定したインピーダンス（ $R+jX$ ）。

5.2 RF 電力試験（整合器有り）

電波漏れ防止のため、電力試験中は試験空洞及び整合器はアルミ製遮蔽構造体で覆った。試験空洞に 1.7MHz 、 8kW までの高周波電力を供給して、フロリナート（流量： $50\text{L}/\text{min}$ ）の温度上昇を測定した。コアで消費される電力を P 、流量を L 、フロリナート密度を ρ 、比熱を C とするとフロリナートの温度上昇は

$$\Delta T = \frac{P[\text{W}]}{L[\text{m}^3/\text{s}] \times \rho[\text{kg}/\text{m}^3] \times C[\text{J}/\text{kg}/\text{K}]}$$

と表される。温度上昇の測定値と計算値を比較したグラフを図10に示す。フロリナートの1次側温度は約 40°C 一定であったので、計算値にはこの温度でのフロリナートの密度 $1780[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、定圧比熱 $1076[\text{J}/\text{kg}/\text{K}]$ を用いている。測定値がやや低いのは、試験空洞及び配管系から大気への放熱に因ると推定される。

次に、加速ギャップ（可変キャパシタ）にかかる電圧およびコアでの消費電力から算出したシャント抵抗の値を図11に示す。コアでの消費電力に依らずほぼ一定値（平均 $146[\Omega]$ ）であることから、コアの異常発熱、放電などは起こっていないと考えられる。

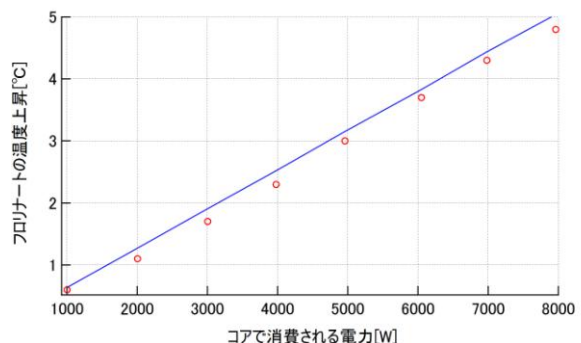


図 10. コアでの消費電力と試験空洞におけるフロリナート温度上昇の関係。赤丸が測定値、実線が計算値である。

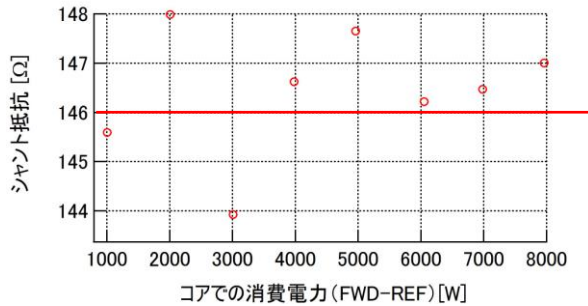


図 11. 加速ギャップ (可変キャパシタ) にかかる電圧値から算出したシャント抵抗。

8kW連続運転時にRFを突然オフにしたときのフロリナート温度の時間変化を図12に示す。フィッティングにより時定数は187[s]となり、熱伝達係数は364[W/m²/K]と推定される。一方、熱伝達係数の計算値は530[W/m²/K]であり、約7割の一致となっている。ただし、当該実験データの解析においてはコア表面温度を一樣と仮定し、かつ、冷媒の流路に沿った温度上昇は考慮していない。よって、推定値は実際の値より過小に評価されている。

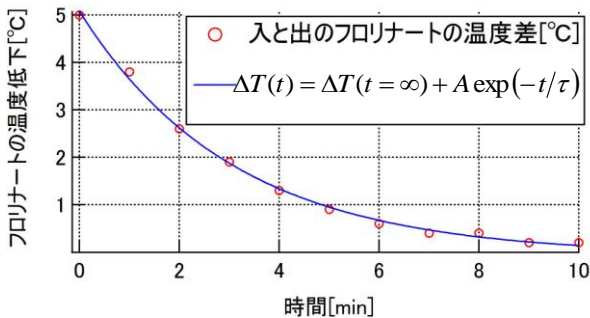


図 12. フロリナートの温度差の時間変化

6. まとめ、及び今後の予定

フロリナート液冷式 (乱流域強制冷却) 径方向分割磁性体コア3つ (小・中・大の生コア) から構成されるコアモジュール構造を考案し、試作した。さらに、コアモジュールを1ユニット装荷した試験空洞を製作した。並行してフロリナート液冷系 (流量: 最大150L/min、冷却能力: 最大100kW) を製作した。これらを用いて、コアモジュール熱負荷試験を目的として、半導体高周波源を使用し、試験空洞のRF電力試験 (周波数: 1.7MHz、整合器有り) を行った。その結果、コアモジュール当たり最大8kW (目標6kW) の平均消費電力にて一定時間 (約20分

間) 安定に運転できた。運転中の加速空洞のシャント抵抗を直接測定したところ、コア消費電力が増えても値は一定であったことから、コアモジュール内の異常発熱、放電等は発生していないと考えられる。

次回RF試験ではコア表面の温度を測定し、熱流体シミュレーションから得られたコア温度と比較してフロリナートによる冷却が正常に行われていることを確認する。測定方法として光ファイバー温度計あるいは赤外線温度計を考えている。光ファイバー温度計は冷却槽内へのプローブの導入方法は確立したが、コア表面へのプローブの接着方法を模索中である。一方、フロリナートの赤外線透過率について調査したところ赤外線温度計の測定波長 (3~5.4μm) において透過率はほぼ100%であり、有望な温度測定方法であるといえる。

また、高周波源の最大定格10kWまでの電力試験も行う。加えて、長時間連続運転試験を行う。次回RF試験でコアの冷却が十分行われていることを示すことができれば、コアモジュールを複数装荷したハーフセル加速構造試験空洞の製作に移る。さらにファインメット薄帯の巻き方を改善してコアのシャント抵抗を高めたい。また、フロリナート冷媒中でのコア耐圧試験を高圧パルス電源で行う予定である。

なお、本研究は日本学術振興機構の科研費 (21・9662) の助成を受けている。

参考文献

- [1] T.Suehiro, et al., “修士論文 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”, <http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~suehiro/ronbun.pdf>
- [2] 高エネルギー加速器セミナーOHO (1996年) <http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt/OHO-1996/txt-1996-%E2%85%A8.pdf>
- [3] 日立金属株式会社ファインメット製品カタログ http://www.hitachi-metals.co.jp/prod/prod02/pdf/hl-fm9-d_a.pdf
- [4] 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
- [5] T.Takahashi, et al., “修士論文 J-PARCにおける磁性体コアを用いた加速空洞の大強度安定化のための研究”, <http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~takahashi/master-takahashi.pdf>
- [6] H.Ino, et al., “Research on radiation resistant rubber O-ring for accelerators”, Proceedings of the 10th Ultra High Vacuum Technology for Accelerator Science and Storage Ring, KEK, Mar.11-12, 2004