大型フェライト実負荷試験装置の開発と特性試験

正員 田辺 義雄 (東芝*)
 非会員 中山 仁史 (東京大学原子核研究所)
 非会員 森 義治 (東京大学原子核研究所)

非会員 大森 千広 (東京大学原子核研究所)
 非会員 上杉 智教 (東京大学原子核研究所)
 非会員 吉井 正人 (高エネルギー物理学研究所)

Development of high power ferrite test bench and its performance

Yoshio Tanabe, Member (Toshiba) Chihiro Ohmori, Non-member (INS, Univ. of Tokyo)
 Hitoshi Nakayama Non-member (INS, Univ. of Tokyo) Tomonori Uesugi, Non-member (INS, Univ. of Tokyo)
 Yoshiharu Mori, Non-member (INS, Univ. of Tokyo) Masahito Yoshii, Non-member (KEK)

Ferrite loaded radio-frequency (rf) cavity with resonant frequency of several MHz is commonly used for proton synchrotrons. The high-intensity proton synchrotron like the JHP (Japan Hadron Project) requires high accelerating voltage at the maximum repetition rate of 50Hz. In order to select or develop ferrites which meet these requirements, a high power ferrite test bench was fabricated.

This paper presents the theoretical relations between ferrite properties and characteristics of rf cavity. Next, description is made for the fabricated test bench which consists of a test cavity, a measuring system, a bias power supply and an rf power supply. Three ferrites with large diameter over 500mm were successfully tested by 1kW rf input power and data equivalent in actual operation of rf cavity were acquired. As a result, usefulness of the test bench was verified.

キーワード: フェライト、高周波特性、加速空洞、陽子加速器

1. まえがき

陽子などを加速するシンクロトロン加速器には、通常フェライトを装荷した周波数帯域が数MHzの高周波加速空洞が採用されている。特に、大型ハドロン計画⁽¹⁾のような大強度陽子加速器に採用される加速空洞では高い加速電圧が要求されている⁽²⁾。加速電圧を高くするとフェライト内の発熱が大きくなり、単位体積当たりの発熱を許容値内におさめるためにフェライトを大型化せねばならない。大型フェライトの特性は小型サンプルとは一般に異なり、その原因としては、焼結前の加圧の不均一性や圧力不足等が考えられている。したがって小型サンプルの特性データは目安とはなるが、実際の設計に用いることはできず、大型フェライトを試験できる装置が不可欠となる。

大型フェライトを実負荷試験する装置としては、BNL⁽³⁾、ISIS⁽⁴⁾、高エネ研⁽⁵⁾などの例がある。BNLやISISの例はフェライトを2枚用いて2枚の中央から高周波電流を流して上下に分けて電流パスを8の字型にしているため、高周波電界が打ち消されて外部に漏れない利点があるが、1枚毎の特性が測定できないこと、高周波電源容量が2倍必要になる欠点がある。また、高エネ研の例はフェライトは1枚であるが、円板の空隙長を変化させ

*: 東京大学原子核研究所共同研究員

てキャパシタンスを変える構造で再現性に乏しい欠点がある。このため今回、小さい高周波電源で1枚毎に実負荷での特性が精度よく測定でき、かつ再現性のよい試験装置を製作した。

本論文では、まず加速空洞の諸特性とフェライト特性との関係を述べ、次に今回製作した本試験装置の特徴とフェライト特性測定法についてまとめる。さらに、複数のフェライトを試験した結果をまとめ、その有用性と妥当性について考察する。

2. 高周波加速空洞の基本特性

<2.1>フェライトの複素比透磁率 フェライトの等価回路は図1に示すように直列表記(添字s)と並列表記(添字p)がある。通常は直列表記がよく用いられるが、加速空洞では並列表記が便利である。なお、比透磁率は従来 μ_r で表されるが、簡便のため以下添字rを省略する。

直列および並列の複素比透磁率は、それぞれ

$$\text{直列} \quad \mu = \mu_s' - j\mu_s'' \quad (1)$$

$$\text{並列} \quad 1/\mu = 1/\mu_p' - 1/j\mu_p'' \quad (2)$$

で表される。(1)、(2)両式より

$$\mu_s' = \mu_p' \mu_p''^2 / (\mu_p'^2 + \mu_p''^2) \quad (3)$$

$$\mu_s'' = \mu_p'^2 \mu_p'' / (\mu_p'^2 + \mu_p''^2) \quad (4)$$

の関係がある。

また、 a をフェライト内半径、 b を外半径、厚みを t とするとフェライトのインピーダンス Z は空心のインダクタンス L_0 を用いて、

$$Z = j\omega\mu L_0, L_0 = \mu_0/2\pi \times t \ln(b/a)$$

と表される⁽⁶⁾。並列インダクタンスを L_p 、並列抵抗を R_p とすると、

$$1/Z = 1/j\omega L_p + 1/R_p$$

であり、したがって L_p 、 R_p は以下の式となる。

$$L_p = \mu_0/2\pi \times t \times \mu_p' \times \ln(b/a) \quad (5)$$

$$R_p = \mu_0/2\pi \times \omega \times t \times \mu_p'' \times \ln(b/a) \quad (6)$$

ここで、 μ_0 は真空透磁率、 $\omega = 2\pi f$ である。

また、フェライトの Q 値は

$$Q = R_p/\omega L_p = \mu_p''/\mu_p' \quad (7)$$

で与えられる。(6)、(7)式より R_p は

$$R_p = \mu_0 \times t \ln(b/a) \times (\mu_p' Q f) \quad (8)$$

となり、フェライト内の損失は R_p に逆比例するので $\mu_p' Q f$ は重要な値である。

直列変換して、(3)、(4)式を用いると L_s 、 R_s は

$$L_s = \mu_0/2\pi \times t \times \mu_s' \times \ln(b/a) \quad (9)$$

$$R_s = \mu_0/2\pi \times \omega \times t \times \mu_s'' \times \ln(b/a) \quad (10)$$

$$Q = \omega L_s/R_s = \mu_s'/\mu_s'' \quad (11)$$

となり、直列、並列両ケースの値が得られる。 Q 値は両者で同じ値である。

また、(3)、(4)、(7)、(11)の各式より μ_s' と μ_p' 、 μ_s'' と μ_p'' の関係を Q 値を用いて表すことができ、

$$\mu_p' = \mu_s' (1 + 1/Q^2) \quad (12)$$

$$\mu_s'' = \mu_p'' / (1 + Q^2) \quad (13)$$

となる。 Q が大きい場合は μ_s' と μ_p' はほぼ等しく、並列回路であっても従来通り μ_s' および $\mu_s' Q f$ を用いて磁性体の評価ができる。しかし、 Q が小さい時には μ_p' は μ_s' と大きく異なってくるため、 R_p に直接結び付く $\mu_p' Q f$ 、または、 $\mu_s' Q f$ を $(1 + 1/Q^2)$ で補正した値で評価する必要がある⁽⁷⁾。

図1 フェライトの等価回路
Fig. 1. Equivalent circuit of ferrite

<2.2> 高周波加速空洞の基本特性 加速空洞の概念を示す断面図を図2に示す。円筒の真空ダクトの中央に加速ギャップとなるセラミックリングが取り付けられており、真空ダクトの外側に多数枚のフェライトリングが装荷されている。真空ダクトと外側カバーで両端が短絡された同軸伝送線路を構成しており、また、セラミックリングの外周には周方向に複数のギャップコンデンサー（図2には図示していない）が取り付けられている。したがって、

フェライトをインダクタンスとし、ギャップコンデンサーをキャパシタンスとする $\lambda/4$ 共振回路を対向させた $\lambda/2$ 型共振器となっている。これをプッシュプル型の高周波電源で励振すると、この共振回路はギャップを挟んで逆位相となり、共振時には $+V/2$ と $-V/2$ 、合計 $V(V_{peak})$ の電圧が発生し、真空ダクト中を走る陽子はこの電圧で加速される。さらに、陽子シンクロトロンでは、陽子の加速エネルギーの増加に伴って周回速度が上がるため徐々に共振周波数を上げる必要がある。これは、通常フェライトの周りに巻かれたバイアス巻線に電流を流し、フェライトの比透磁率を変化させインダクタンスを変えることで対応する。キャパシタンスはフェライト自身やセラミックリングにもあるが、上述のギャップコンデンサー（容量 C ）が支配的である。

加速空洞としての重要な特性は共振周波数 f 、ギャップの加速電圧 $V(V_{peak})$ 、フェライト内総損失 $P(W)$ である。空洞内フェライトの総枚数を N 枚とすると、 f は、

$$f = 1/2\pi\sqrt{NL_pC} \quad (14)$$

であり、 V はフェライト内の磁束変化量に相当し、以下の式で算出される。

$$V = \omega N B_{rf} S \quad (15)$$

ここで、 $\omega = 2\pi f$ 、 B_{rf} はフェライト断面内の平均高周波磁束密度、 S はフェライト断面積である。(15)式より $B_{rf} \cdot f$ も試験より求めるべき重要な量である。また、総損失 P は

$$P = V^2/(2NR_p) \quad (16)$$

である。

図2 加速空洞の概念図
Fig. 2. Schematic drawing of rf cavity

3. 試験装置

試験装置は、フェライトを挿入する試験共振器、高周波電源とバイアス電源部、および、計測装置から構成される。

<3.1> 試験共振器 図3に共振器の断面図を示す。共振器は同軸構造であり、内導体の直径は 120mm、外導体の内径は 732mm、内高さは 255mm である。共振器の中心部に高圧板があり、上側が真空コンデンサー、下側がフェライトとなっている。真空コンデンサーは電流分布が一樣になるように周上に等しく配置されており、8 台の 2000pF 真空可変コンデンサーと 8 台の 2000pF 真空固定コンデンサーからなり、最大 32000pF である。8 台の真空可変コン

図3 試験共振器の断面形状
Fig. 3 Cross section of test cavity

デンサーはギアとタイミングベルトからなる駆動機構により同時に回転し、任意のキャパシタンス(16000pF から 370pF まで)に設定できる。固定コンデンサーのキャパシタンスは固定であるが、着脱が可能である。このような構造にすることでキャパシタンスの再現性が確保される。

下側に置かれるフェライトの寸法は、内径(2a)×外径(2b)×厚み(t)が、200mm×700mm×25mm 程度まで可能である。フェライトは2枚の厚さ6mmの水冷銅板に挟まれており、押さえ板により銅板と密着するようになっている。

高周波電力は rf-feeder より供給され、コンデンサーおよび共振器内側を通してアース側へ流れる。バイアス電流は中心の bias current feeder より共振器内側を流れ、もう一本の feeder へ流れる。

< 3. 2 > 等価回路 共振器と高周波系、バイアス電源を含む等価回路を図4に示す。同図の中央部が共振器で LCR の並列回路で表示されている。また、左側が高周波電源回路、右側がバイアス電源回路である。共振器が共振している時には当然共振器の並列抵抗(R_p)のみが電源側からみえる。一方、高周波電源の出力インピーダンスは 50Ω であり、 R_p は通常 50Ω でないから、両者のインピーダンス整合をとらないと高周波電力の反射が大きく、有効に電力が入力できない。このため L 型のリアクタンス整合回路が高周波電源と共振器の間に入れられる。真空可変コンデンサー(C_m)と可変インダクタンス(L_m)を調整して整合をとる。なお、 L_m の下のコンデンサー(2500pF)は直流バイアス電流を阻止するためのブロックコンデンサーである。

高周波電源は現在 1kW 固体電源 (ENI MODEL A1000) が用いられているが、3kW 入力まで可能な設計となっている。パワーメーターは、Bird rf analyzer 4391 であり、整合回路を調整して入射電力を最大、反射電力を最少とする。

右側のバイアス電源はトランジスタドロップによる定電流制御方式であり、直流から 100Hz まで、最大 20V-

1000A の通電が可能である。高周波電源から高周波がまわりこまないようにチョークコイル(L_{ch})、バイパスコンデンサー(C_b)が入れている。チョークコイルは、水冷で直流ではインダクタンスは $26.8\mu H$ あるが、高周波では外側を覆っているアルミ板の渦電流の影響で約 $13.5\mu H$ まで小さくなる。今回はフェライトのインダクタンスに対して $13.5\mu H$ でも十分大きいのでこのまま用いた。

図4 試験装置の等価回路
Fig. 4 Equivqlent circuit of test bench

< 3. 3 > 整合回路 整合回路は並列抵抗(R_p)が 50Ω 以上の場合と 50Ω 以下では結線が異なり、図4は 50Ω 以上の場合である。すなわち、図5に示すリアクタンス X_1 、 X_m から成る L 型回路は下記条件の時に整合がとれる。

(1) $R_p > R_0 (=50\Omega)$

$$X_1 = R_p \sqrt{R_0 / (R_p - R_0)} \quad (17)$$

$$X_m = \sqrt{R_0 (R_p - R_0)} \quad (18)$$

(2) $R_p < R_0 (=50\Omega)$

$$X_1 = R_0 \sqrt{R_p / (R_0 - R_p)} \quad (19)$$

$$X_m = \sqrt{R_p (R_0 - R_p)} \quad (20)$$

であり、

$$X_m = 1/\omega C_m, X_1 = \omega L_m - 1/\omega C' \quad (21)$$

となる。 C_m は最大 4000pF、 L_m は最大 $28\mu H$ 、 C' は 2500pF のブロックコンデンサーである。具体的には図5の回路で J_1 、 J_2 両端子を設けておき、 50Ω 以上では J_1 端子を高周波電源側に、 50Ω 以下では J_2 端子を高周波電源側に接続する構成となっている。

図5 整合回路
Fig.5 Matching circuit

< 3. 4 > 測定およびデータ処理 測定は図4中の CT により高周波電流(I)、高電圧プローブにより共振器発生電圧(V)を測定する。I および V のオシロスコープの波形が同相となるように真空コンデンサーまたはバイアス電流を調整する。同相のときの周波数が共振周波数 f である。

同相の時の電圧の最大値、電流の最大値、位相差 (同相

に合わせても数回データを取る間に若干位相がばらつく)を、それぞれ $V_{\max}$ 、 $I_{\max}$ 、 Φ とすると、インピーダンス Z 、並列抵抗 R_p 、入力電力 P_{in} は、

$$Z = V_{\max} / I_{\max} = Z e^{j\Phi} \quad (22)$$

$$R_p = Z / \cos \Phi \quad (23)$$

$$P_{in} = V_{\max} \times I_{\max} \times \cos \Phi / 2 \quad (24)$$

となる。なお、 P_{in} はパワーメーターでも測定できるがパワーメーターの精度は 5 % 程度で良くない。

測定系のブロック図を図 6 に示す。バイアス電源の信号源は HP3326A two channel synthesizer であり、バイアス電流の大きさ (100A/1V) と周波数 (最大 100Hz) を設定する。一方、バイアス電源の入力に使用したものと同一波形を Waveform Generator (WFG) に入力する。WFG では、高周波電力を印加するバイアス電流値を設定できる (たとえば 200A なら 2V の信号がきた瞬間に Rf power amp. をオンする)。Rf amp. の出力も WFG で設定する。また、同時に WFG からの同期信号を用い、オシロスコープでの計測を同期させている。このような計測系により任意バイアス電流、任意高周波入力電力での測定が可能である。オシロスコープのデータは GPIB を介してパーソナルコンピューター上のソフトウェア HP VEE を用いて処理される。

図 6 測定系ブロック図

Fig. 6 Block diagram of measurement

< 3. 5 > 測定結果の較正 図 4 の等価回路で明らかのように試験空胴に並列に L_{ch} や C_b が入っているため較正が必要となる。このため、ブスバーのインダクタンスと浮遊容量 (C_s) を測定し、これらを含む入力アドミタンス Y を求める。

$$Y = 1/R_p + 1/j\omega L_p + j\omega(C + C_s) + 1/(j\omega L_{ch} + 1/j\omega C_b)$$

共振条件はこの虚数部が零であるから、 $\text{Im}(Y) = 0$ として、

$$L_p = (L_{ch} C_b \omega^2 - 1) / \omega^2 ((C + C_s) C_b L_{ch} \omega^2 - C_b - (C + C_s)) \quad (25)$$

を得る。本式が較正した L_p 値を与える式である。なお、ブスバーのインダクタンスは L_{ch} に含まれている。

4. 試験結果と考察

< 4. 1 > フェライト試料 陽子シンクロトロンに使うフェライトとしては、(1) $\mu'_p Qf$ が高い、(2) μ'_p が 100 程度、(3) バイアス電流に対する応答が速い、(4) キュリー温度が高い、等が望まれる。 μ'_p が大きすぎると必要な共振周波数を得るためのギャップコンデンサー容量 (< 2. 2 > 参照) が小さくなりすぎ、 μ'_p が小さすぎると逆になるため μ'_p は 100 程度を選定している。また、直径は 500mm 程度が必要であるが、現在大型フェライトは TDK、日立金属、Philips の 3 社のみが供給できる。これらを勘案して以下の 3 種類のフェライト、すなわち、SY2 (TDK、内径×外径×厚みは 300×500×25.1mm、体積は 3158cc)、N5C (日立金属、260×635×12.7mm、3350cc)、4M2 (Philips、200×500×25.1mm、4290cc) を試験した。キュリー温度は 4M2 が最も低く 150℃、SY2 が 300℃、N5C が 250℃である。

< 4. 2 > フェライトの静特性 直流バイアス電流 (I_b) を加えた時の特性を静特性と称する。試験空胴の共振周波数を設定するには、真空コンデンサーの静電容量を合わせるか、またはバイアス電流を流してフェライトのインダクタンスを合わせればよい。実際の加速空胴では、ギャップコンデンサーを一定としてフェライトインダクタンスを変化させるので、本試験においても真空コンデンサーの値を固定して特性を測定した。高周波電力が非常に低レベル (数 10mW) の測定結果を表 1 にまとめる。表 1 では、SY2、N5C は真空コンデンサーを最大、すなわち 16300pF で固定しているが、4M2 は他の 2 つに比較して内径が小さいため L_p が大きく、14200pF にしないと 3.3MHz まで測定できなかった。表 1 より以下の点が明らかとなった。

- (1) L_p は 0.1μH のオーダー、 R_p は数 100Ω である。また、発生電圧はたとえば、1kW 入力、800Ω の時は 1.26kV_{peak} である ((16) 式)。
- (2) μ'_p を約 2.8 倍 (周波数では 2MHz から 3.3MHz) 変化させるためのバイアス電流増分値は SY2 が 594A、N5C が 518A、4M2 が 765A であり、4M2 が最も大きい。
- (3) SY2、N5C の μ'_p は周波数が上がると下がるが、 Q 値が上がり結果的には $\mu'_p Qf$ はほとんど変わらない。
- (4) 4M2 の $\mu'_p Qf$ は低周波では他の 2 つより大きい、周波

表 1 フェライトの静特性

Table 1. Static characteristics of ferrites

フェライト	周波数	I_b	μ'_p	Q	$\mu'_p Qf$	L_p	R_p
SY2	2.0MHz	0A	152.3	80.4	2.46E10	0.396μH	398Ω
	2.7	263	83.5	97.9	2.21E10	0.215	356
	3.3	594	55.6	120.7	2.21E10	0.143	357
N5C	2.0MHz	70A	174.5	68.7	2.40E10	0.396μH	342Ω
	2.7	304	94.6	91.3	2.33E10	0.215	332
	3.3	588	63.0	112.3	2.34E10	0.143	333
4M2	2.0MHz	193	96.1	165.2	3.18E10	0.448μH	929Ω
	2.7	540	52.0	190.3	2.72E10	0.242	795
	3.3	958	34.6	205.2	2.35E10	0.161	686

数と共に小さくなり、3.3MHzでは同等の値まで下がる。
高周波電力を入力した時の評価は発生電圧、すなわち(15)式で定義される B_{rf} を用いる。一般に入力パワーと μ'_p 、 Q 値との関係は B_{rf} を用いて、

$$\mu'_p = \mu'_{pi}(1 + \lambda B_{rf}) \quad (26)$$

$$Q = Qi / (1 + \eta B_{rf}) \quad (27)$$

で表される⁽⁸⁾。ここで、添字 i はパワーが零の時の値を示し、また λ, η は正の比例定数であるが、材料によって異なりまた周波数依存性もある。(26)、(27)式より B_{rf} が大きくなる、すなわちハイパワーになるにしたがって、 μ'_p は大きくなり Q は小さくなる。しかし、 Q の低下の方が大きく $\mu'_p Qf$ は B_{rf} が大きくなるに従って小さくなる。一例を図7に示す。SY2、N5C は予想通り $\mu'_p Qf$ は低下しているが、4M2 は B_{rf} が約60Gaussまでほぼ一定でその後急激な低下が見られる。これは Q 値の高いフェライトに起きる高損失効果(HLE: High Loss Effect)が原因である⁽⁹⁾。

HLE は一定の周波数でハイパワーを入力し続けると、数10msec で突然 Q 値が低下する現象である。典型的例を図8に示す。この写真は4M2に3.3MHz、942Wの高周波を約60msec 入力した時の電圧波形で高周波を入力してから約13msec後に急激に電圧が低下している。SY2、N5C 共4M2程 Q 値は高くなく HLE は観測されていない。

HLE は周波数が高いほど小さい B_{rf} で起きやすく、たとえば1.7MHzではHLEが起る B_{rf} は約170Gaussであるのに対し、図7の例では約60Gaussまで落ちている。また、バイアス電流によっても変化し、電流が大きいほど早く起る。

<4. 3>フェライトの温度特性 空胴にハイパワーを入力すると(16)式に従う損失がフェライト内に発生し、すべて熱となる。フェライト特性は熱に対して敏感であり、温度特性の把握が重要である。このため、フェライトの冷却水を止めた状態でハイパワーを入力し、十分温度が上がった後入力をやめフェライトが自然に冷えていく期間にフ

図7 $\mu'_p Qf$ の B_{rf} 依存性 (2.7MHz)
Fig. 7 B_{rf} dependence of $\mu'_p Qf$ (2.7MHz)

図8 高損失効果
Fig. 8 High loss effect

ェライトの温度特性を測定した。フェライトはキュリー温度の高いSY2と低い4M2を測定した。

両者共温度が高い程 $\mu'_p Qf$ が小さくなる傾向が見られた。 μ'_p はフェライトによって異なり、SY2はほとんど変化がなかったが、4M2は温度とともに上昇した。図9に4M2の μ'_p および $\mu'_p Qf$ の温度特性を示す。4M2はキュリー温度が低いいため、温度変化の影響を受けやすいと考えられる。

$\mu'_p Qf$ が小さくなると R_p が小さくなりフェライト内損失が増え、それがまた温度上昇を引き起こすといういわゆる正帰還現象を引き起こし空胴が非常に不安定となる危険性がある。したがって、フェライト空胴を安定に動かすには温度を一定に保つことが重要である。

図9 フェライト(4M2)の温度特性
Fig. 9 Temperature dependence of ferrite (4M2)

5. むすび

本論文の内容を要約すると、次のようになる。

- (1)フェライトの複素比透磁率についてまとめ、加速空胴に重要な並列表記と従来の直列表記との関係を明らかにした。その結果、 Q 値が大きいフェライトは従来通り直列表記の複素比透磁率で表しても問題ないが、 Q 値が小さいと並列表記と直列表記は大きな差が出ることがわかった。
- (2)大型フェライトを実負荷試験するための試験装置を開発し、1kWまでの入力試験を行い所定の性能がだせることを

検証した。整合回路も設計通り動作し、反射電力を小さく抑えることができた。カバーできる周波数は被試験体のインダクタンスによって変わるが今回は約 2 MHz から 5MHz であった。なお、高周波電源の制約で現状は 1kW までであるが、設計上は 3kW まで入力可能である。

(3)外径が 500mm 以上の 3 種類のフェライトについて直流バイアスを加えた試験（静特性）を行った。Philips 社の 4M2 が他の 2 つ(SY2、N5C)より $\mu_p Q_f$ が高く、すなわち、 R_p が大きくフェライト内損失が小さい。このため、同一の高周波電力で高い加速電圧がだせる。しかし、このフェライトは高損失効果があり、また温度変化にも敏感であり、取り扱いが難しいという欠点がある。

実際の高周波空洞ではバイアス電流は加速ビームエネルギーにしたがって変化する。この状態での特性を把握するため、現在、バイアス電流を 0~1000A の範囲で正弦波で変動させた試験（動特性）を開始しており、有益なデータが得られつつある。4M2 の高損失効果は交流バイアス磁場では発生しない可能性もある。これらについては、続報で報告の予定である。

最後に、本研究に関して有益な助言・協力をいただきました東大原子核研究所田辺徹美教授、高エネルギー物理学研究所絵面栄二教授、高木昭氏、戸田信氏、装置製作を担当した東芝に深く感謝いたします。

(平成 8 年 12 月 13 日受付、平成 9 年 3 月 17 日再受付)

文 献

- (1)Y.Mori, et. al. :“Outline of JHP Synchrotron Design”, Proc. of the 10th Symposium on Accelerator Science and Technology,(1995) 454
- (2)C.Ohmori, et. al. :“RF systems of Synchrotrons for JHP”, Proc. of 10th Symposium on Accelerator Science and Technology,(1995) 55
- (3)M.A.Goldman, et. al. :“Studies of Ferrite Materials for the AGS Booster Synchrotron”, Proc. of the 1989 Particle Accelerator Conf.,(1989) 165
- (4)R.G.Bendall and R.A.Church :“Ferrite Measurements for SNS Accelerating Cavities”, RL-79-024 (1979)
- (5)T.Kamei, et. al. :“Measurements on the Magnetic Properties of Ferrite Cores for Proton Synchrotron RF Accelerating Cavities”,SJC-A-68-4 (1968)
- (6)I.S.K.Gardner :“Ferrite Dominated Cavities”, CERN Accelerator School, CERN-92-03 (1992) 352
- (7)吉井 :“高周波加速空洞”、高エネルギー加速器セミナー ‘OHO96 (1996),IX-5
- (8)二宮 :“陽子シンクロトロンの高周波加速装置”、高エネルギー加速器セミナー ‘OHO89 (1989),V-21
- (9)J.E.Griffin, et. al. :“A Review of Some Dynamic Loss Properties of Ni-Zn Accelerator RF System Ferrite”, IEEE NS-26, No.3 (1979) 3965

田辺 義雄

(正員) 1945 年 8 月 18 日生まれ。71 年 3 月東北大学大学院電気及び通信工学専攻修士課程修了。同年 4 月(株)東芝入社。主として超電導電磁石、核融合試験装置機器開発をへて、加速器用高周波機器の開発に従事。現在、同社重電技術研究所所属。電気学会、原子力学会、低温工学協会会員。

大森 千広

(非会員) 1960 年 2 月 18 日生まれ。89 年 3 月名古屋大学大学院理学研究科物理学専攻博士課程修了。同年 4 月東京大学原子核研究所助手。主として大型ハドロン計画をはじめとする大強度加速器の高周波加速システムを研究。理学博士。物理学会会員。

中山 仁史

(非会員) 1967 年 6 月 11 日生まれ。95 年 3 月佐賀大学工学系研究科エネルギー物質科学専攻博士後期課程単位取得退学。同年 7 月東京大学原子核研究所勤務。主として大型ハドロン計画の高周波機器の開発に従事。電子情報通信学会、物理学会会員。

上杉 智教

(非会員) 1972 年 11 月 27 日生まれ。現在、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻修士課程 2 年在学中。主として大型ハドロン計画の高周波キャビティおよびビーム解析に従事。

森 義治

(非会員) 1950 年 10 月 12 日生まれ。77 年 3 月九州大学大学院工学研究科応用原子核工学専攻博士課程修了。同年 7 月高エネルギー物理学研究所助手。主として陽子加速器の研究開発をへて現在、大型ハドロン計画を推進。東京大学原子核研究所教授。工学博士。応用物理学会、物理学会会員。

吉井 正人

(非会員) 1957 年 7 月 14 日生まれ。86 年 3 月東北大学大学院理学系博士課程修了。86 年 4 月より 87 年 2 月までフィンランド国ユバスキュラ大学研究員。87 年 3 月より高エネルギー物理学研究所助手。主として陽子シンクロトロンの研究に従事。理学博士。物理学会会員。