

閑話：35 年前の加速管製作

高田耕治
(高エネルギー加速器研究機構)

An Interlude : Fabrication of S-band Accelerating Structures Dating Back 35 Years

Koji Takata
(KEK)

The author was engaged in developing S-band linacs for medical application in the last half of 1960's. This article describes a summary of his experience in that period with a stress on the aspect of fine machining technology for the linac structures.

Key Words. linac, accelerating structure, fine machining, S-band

1. はじめに

筆者が加速器研究にかかわるようになったのは1964年で、それ以降の数年は主として医療用Sバンド(波長 $\lambda = 10.50\text{cm}$ 、周波数 $f_{RF} = 2856\text{MHz}$)リニアックの加速管開発に携わった。ここではそのための黄銅テストセルや無酸素銅セルの加工、測定、接合において、当時の精密加工レベルが掴めるような諸データを整理する。

国内では当時、数社が医療用Sバンドリニアックを開発、製品化していた。加速管の仕様はほぼ同じで、1~2mの加速管で10MeV前後まで電子ビームを加速し、多くの場合それを重金属ターゲットに当ててX線を発生させた。

ここでその一例として紹介しようとするのは4MWの商用マグネトロンで駆動する1.65m加速管である。ここでは、その初期モデルでのビームエネルギー13MeVを約1割上げるための作業をまとめる。

電子リニアックの加速管は円板を周期長 d で装荷した円筒導波管である。ここで述べる加速管は円板の数が1管内波長 λ_g につき3枚である。これは $2\pi/3$ モード構造と呼ばれて通常採用されるも

のであり、加速効率がほぼ極大になっている。この1周期の構造をセルという。円板の中心には円孔があり、ビームならびに電磁波の通過に供する。円孔の径は特に電磁波の伝わり方と加速電場集中度を左右する。円孔径を小さくすると、電場集中がより集中して加速電場が高くなるが、電磁波の減衰率も上昇するので、それらの折合いをつける必要がある。初期のモデルでは直径 $2a = 20\text{mm}$ であったが、ビームエネルギーを上げるために加速管後半部の $2a$ を18mmに縮めることを試みた。しかし周波数2856MHzで動作させるには、セルのほかの寸法も変更する必要がある。まず黄銅テストセルを作ったのは $2a$ などのパラメーターを変えたときの、2856MHzのためのセル寸法を決定するためである。

2. 加速管構成

加速管は図1に示すように47セルからなる。電子は最初の10cmほどで光速の50%からほぼ100%に加速される。それにあわせる用に加速モードの位相速度 $v_p (= \lambda_g f_{RF} = 3df_{RF})$ を変えなければならない。そのためにcell 1からcell 5までのパンチャー部と呼ばれる部分が用意される。こうして電子銃から入射される約80kVのビームを効率良く捕捉、集群し、cell 6からcell 48までの位相速度が光

速に等しい部分（レギュラー部という）に送込む。
その主要パラメーターを表 1 に示す。

Table 1: Main parameters of a 1.6m S-band linac structure with a constant iris diameter $2a$ of 20mm with $2b$ being the cell diameter, d the cell period, and t the disk thickness

	2a/mm	2b/mm	d/mm	t/mm
disk1	27.20			5.00
cell 1		85.87	19.09	
disk2	25.50			5.00
cell 2		84.24	22.56	
disk3	23.70			5.00
cell 3		83.05	26.66	
disk4	21.90			5.00
cell 4		82.28	31.51	
disk5	20.55			5.00
cell 5		81.91	34.57	
disk6	20.00			5.00
regular cells		81.80	35.00	
regular disks	20.00			5.00

エネルギー向上をはかるための改良型加速管では、 $2a = 20\text{mm}$ のレギュラー部は cell 6 から cell 24 までとし、cell 25 と cell 26 の遷移部分を経て cell 27 から cell 48 までを $2a = 18\text{mm}$ とした。遷移部分以降の主要パラメーターを表 2 に示す。

加速管を導波管とみなしたとき、 $2a$ の変化に伴って特性インピーダンスも変わり、進行波が反射される。それを出来るだけ小さくするために 2 セル分の遷移部分を設けたわけである。等価回路によりおおまかに評価したところこの構成での反射率は 1% 程度と推定され、実用上問題ないとした。

3. テスト空洞によるセル寸法の決定

テストセルによる測定の目的は $2\pi/3$ モードの共振周波数が正確に 2856MHz となるセル直径 $2b$ を、 d および $2a$ をパラメーターにして知ることである。図 3 ような構成で共振周波数を測定する。両端のセ

Table 2: Main parameters of the last half of the structure with an reduced iris diameter of 18mm

	2a/mm	2b/mm	d/mm	t/mm
disk25	20.00			5.00
cell 25		81.70	35.00	
disk26	19.00			5.00
cell 26		81.51	35.00	
disk27	18.00			5.00
regular cells		81.43	35.00	
regular disks	18.00			5.00

ルは中央面をショート板とする $d/2$ 長のものである。この 2 つの半セルを合わせて 1 個として全セル数を N としたとき、加速モードと同じ分散曲線に属すモードとして

$$\frac{0}{N}\pi, \frac{1}{N}\pi, \dots, \frac{N}{N}\pi$$

という $N + 1$ 個のモードが観測される。この報告に関する測定では当初 $N = 3$ であったが、その後 $N = 6$ にして測定精度を上げた。

ディスクおよび円筒の形状は図 2 に示す。材質は黄銅 (BsBM₂) を用いた。加工機械は、ディスクにはボーレー旋盤、円筒には昌運旋盤を使用した。加工後の寸法測定は ZEISS (JENA) の VMM、TESA の TESAMASTER によった。測定室温は 20° ないし 23° であったが、 $\pm 1^\circ\text{C}$ に保たれており、測定結果は全て 20°C に換算した。測定の分解能は $1\mu\text{m}$ である。

セル長 d として選んだ数値は

$$d = 17.50, 22.50, 27.75, 33.00, 35.00, 40.00\text{mm}$$

である。 $2\pi/3$ モードでの位相速度 v_p の光速 c に対する比 β_p はそれぞれ

$$\beta_p = 0.500, 0.643, 0.793, 0.943, 1.000, 1.143$$

である。

ディスクの厚さを t とすれば、円筒の高さ h は各 d について、通常セルで $d - t$ 、端部のセルで

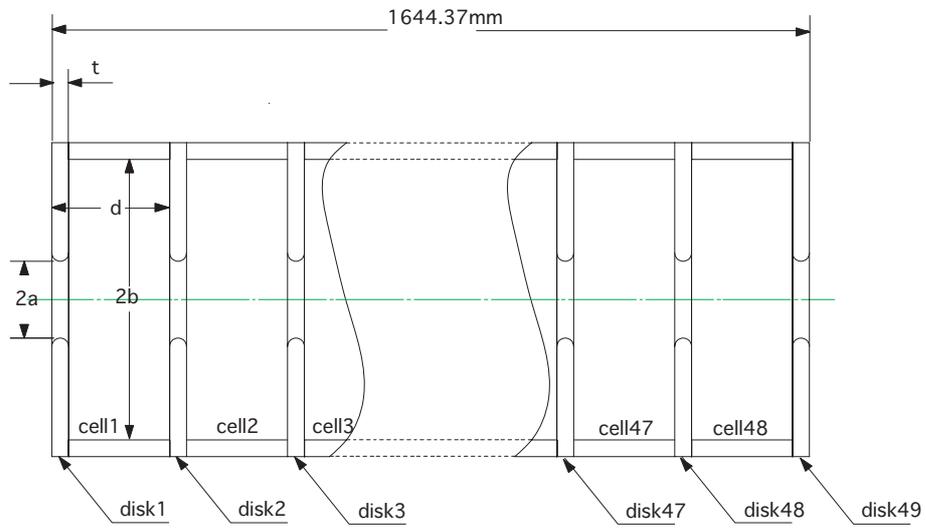


Figure 1: Configuration of a 1.6m S-band linac structure

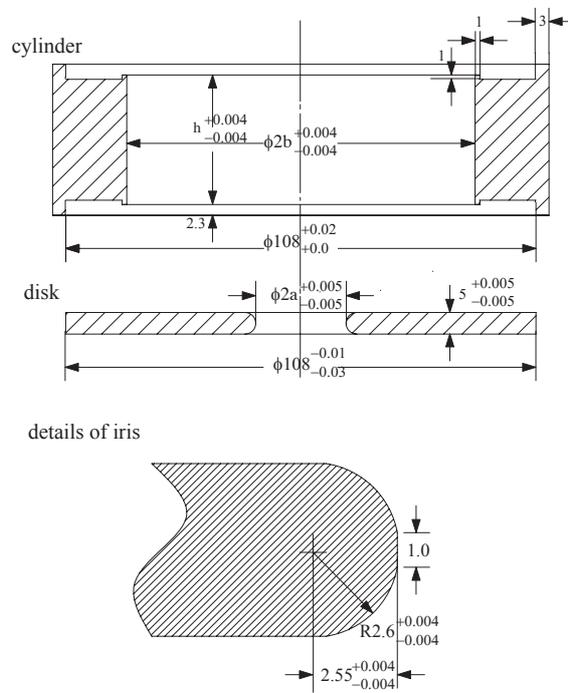


Figure 2: cylinder and disk of a test cell

$(d - t)/2$ に等しい。上の各 d について、内径 $2b$ をほぼ 0.5mm おきに 5 点指定し、それぞれについて通常セル用 5 個、端部セル用 2 個ずつ準備した。例として $h = 30\text{mm}$ の円筒 50 個の呼び寸法からの差の測定結果を表 3 にまとめる。指定精度は $2b$ および h ともに $\pm 4\mu\text{m}$ である。

Table 3: Distribution of machining errors for a total of 50 brass cylinders of a test cell : specified allowance is $\pm 4\mu\text{m}$ for both diameter $2b$ and height h

	$2b$	h
error/ μm	no. of pcs	no. of pcs
-4	3	2
-3	11	3
-2	8	5
-1	10	0
0	7	10
1	6	10
2	3	10
3	1	5
4	1	2
5	0	3
total	50	50

ディスクは $2a = 16, 17, 18, 20, 22, 24, 26\text{mm}$ について、同一寸法のをそれぞれ 14 枚製作した。厚さはすべて $t = 5\text{mm}$ である。 $2a = 16\text{mm}$ の場合の例をとると、加工後の寸法の呼び寸法からの差は、アイリス口径 $2a$ については表 4、直径 D については表 5、厚さ t については表 6 のような結果であった。指定精度は $2a$ で $\pm 5\mu\text{m}$ 、 t で $\pm 5\mu\text{m}$ 、 D で $-10\mu\text{m}$ 、 $-30\mu\text{m}$ である。

マイクロ波測定^{*1}は恒温室でおこなわれたが、温度設定は 19.3°C から 22.4°C の間にあった。測定した共振周波数は空洞材質である黄銅の熱膨張率を $2 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ として 20°C に換算した。1 気圧の空気の誘電率による共振周波数のずれは補正してい

*1 添田 (旧姓 菊地) 拓雄による。

Table 4: Distribution of machining errors with respect to the iris diameter $2a$ for a total of 14 brass disks of a test cell $2a = 16\text{mm}$: specified allowance is $\pm 5\mu\text{m}$

error/ μm	no. of pcs
0	2
1	5
2	2
3	4
4	1
total	14

Table 5: Distribution of machining errors with respect to the disk diameter D for a total of 14 brass disks of a test cell with $2a = 16\text{mm}$: specified allowance is $108\text{mm} \begin{smallmatrix} -10\mu\text{m} \\ -30\mu\text{m} \end{smallmatrix}$

error/ μm	no. of pcs
-20	1
-19	1
-18	4
-17	7
-16	1
total	14

ない。周波数の値は較正された空洞型波長計によるが、読取り精度は $\pm 50\text{kHz}$ であった。

表 7 には $d = 35\text{mm}$ の場合について、 $f_{2\pi/3} = 2856.0\text{MHz}$ における空洞寸法およびバンド幅 ($f_\pi - f_0$) と群速度 v_g をまとめた。なお群速度は

$$v_g = 6d (f_{5\pi/6} - f_{3\pi/6})$$

として計算した。

表 7 からバンド幅および群速度は

$$(2a)^{3.6}$$

に比例していることが分かる。なお $2b$ の変化に対する $f_{2\pi/3}$ の変化はすべての $2a$ で同じで

$$\frac{\Delta f_{2\pi/3}}{\Delta(2b)} \approx -35.5 \frac{\text{MHz}}{\text{mm}}$$

Table 6: Distribution of machining errors with respect to thickness t for a total of 14 brass disks of a test cell $2a = 16\text{mm}$: specified allowance is $\pm 5\mu\text{m}$

error/ μm	no. of pcs
-1	2
0	7
1	4
2	1
total	14

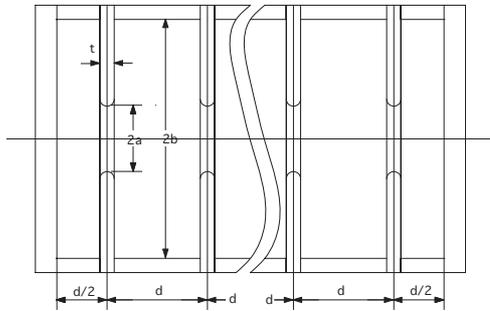


Figure 3: Configuration of test cell set-up for mode measurement

であり、また h の変化については

$$\frac{\Delta f_{2\pi/3}}{\Delta(h)} \approx -2 \frac{\text{MHz}}{\text{mm}}$$

であった。

空洞共振周波数を計算する Superfish というコードが使えるようになったのは 1970 年代後半である。当時では E. L. Chu と E. L. Ginzton が与えた公式 [1] が最新のものであった。参考のためにその公式を使って IBM7090 で計算した $2b$ の値*2と測定結果との差を図 4 に示す。

*2 大島厚太郎、海野陽一による。

Table 7: Results of mode frequency measurement for a test cell with $d = 35\text{mm}$

2a (mm)	2b (mm)	$f_\pi - f_0$ (MHz)	v_g/c (%)
16	81.035	11.6	
17	81.275	14.8	
18	81.415	18.5	0.51
20	81.780	26.7	0.82
22	82.170	37.3	1.13
24	82.640	50.7	1.55
26	83.195	65.5	2.05

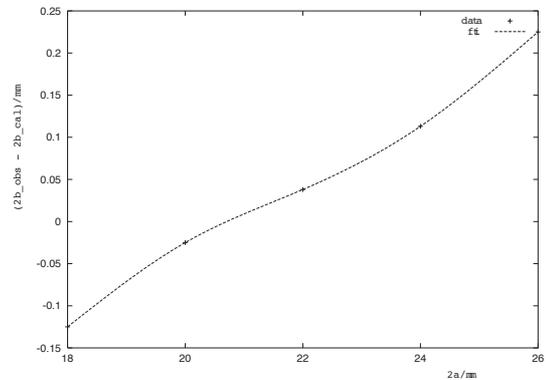


Figure 4: Difference between the values $2b$ obtained from test cell measurement and those calculated with the formula by [1]

4. 無酸素銅セルの精密加工

以上のテストセル測定結果を取入れて正確な $2b$ の値を決定し、無酸素銅の加速管製作に入った。材料は VoFCuP と呼称された無酸素銅である。加工にはボーレー旋盤を使い、寸法測定はテストセルの場合と同じ装置と環境であった。マイクロ波共振特性を決める内面形状、寸法はテストセルと同一である。ただし円筒両端面には銀鍍線をはめるために外径 $\phi 92\text{mm}$ 、内径 $\phi 90\text{mm}$ 、深さ 1mm の溝を掘っている。溝の縁は $0.3C$ の面取をする。

ディスクの面粗さは外径部で $0.8S$ 以下、その他の面は全て $0.4S$ 以下と指定されている。円筒については外径部で $0.6S$ 以下、その他の面は全て $0.4S$

以下の指定である。円筒外径面には 90° おきに外径 $\phi 9\text{mm}$ 、内径 $\phi 4\text{mm}$ 、深さ 1.5mm の溝加工を行い、径 $\phi 4\text{mm}$ のへそを作る。鑑付け後、このへそを押しして周波数を調整する。

同一の指定寸法で加工した複数個のディスクおよび円筒について、仕上がり寸法の誤差分布の例を表 8 および表 9 にまとめておく。

Table 8: Machining error distribution for a total of 19 oxygen free copper (OFC) disks of identical dimensions

	D	2a	t
design	$\phi 96.0$	$\phi 20.0$	5.0
allowance	± 0.004 (mm)	± 0.004 (mm)	± 0.004 (mm)
error/ μm	no. of pcs	no. of pcs	no. of pcs
-3		1	
-2		1	6
-1		2	7
0	2	5	6
1	5	6	
2	4	4	
3	6		
4	1		
5			
6	1		
total	19	19	19

5. 高周波加熱真空炉による鑑付け

ディスクと円筒を交互に積み重ね、加速管前半部、接続部、後半部の鑑付けをおこなう。鏤材は通常の銀鑑で水素炉を用いた。各部品の偏芯は 0.01mm 以内と指定された。加速管各部分の両端はステンレスのフランジが付けられ、ディスク（例えば 25 番目や 27 番目）をはさんで接続するようになっている。フランジと円筒は真空炉中で金鑑付けされる。フランジ端面は厚さ 0.5mm、高さ 3mm のツバになっており、対向するフランジどうしはヘリアーク接合される。

Table 9: Machining error distribution for a total of 20 OFC cylinders of identical dimensions

	D	2b	h
design	$\phi 96$	$\phi 81.8$	30
allowance	± 0.004 (mm)	± 0.004 (mm)	± 0.004 (mm)
error/ μm	no. of pcs	no. of pcs	no. of pcs
-4		1	
-3	2		1
-2	4		1
-1	5	1	1
0	4	2	1
1	5	6	
2	2	8	5
3	2	3	6
4			1
5			1
total	20	20	20

図 5 は円筒に銀鑑線をはめているところである。図 6 はディスクと円筒を交互に積んでいるところである。図 7 は炉に入れる架台の部分の接写したものである。加速管全体を中心を通すボルトと熱膨張を吸収するスプリングで締めつけている。通常は水素炉で鑑付けされるが、図 8 はテストとして、ガラスベルジャーをもちいて高周波コイルで加熱しているところである。図 9 は鑑付け後の各部分をステンレスフランジで接続し、ヘリアーク仕上げをする準備にはいつているところである。図 10 は最後の段階としてリークテストを行っている様子を示す。このような過程をへて周波数の測定および調整に入る。

6. 周波数調整

鑑付け後、各部分をヘリアーク接続して一本になった 1.6m 加速管の $2\pi/3$ モードの周波数、および各セルを押しつぶして調整した後の周波数を図



Figure 5: Fitting a silver alloy brazing wire into a groove on an OFC cylinder



Figure 6: Stacking OFC disks and cylinders

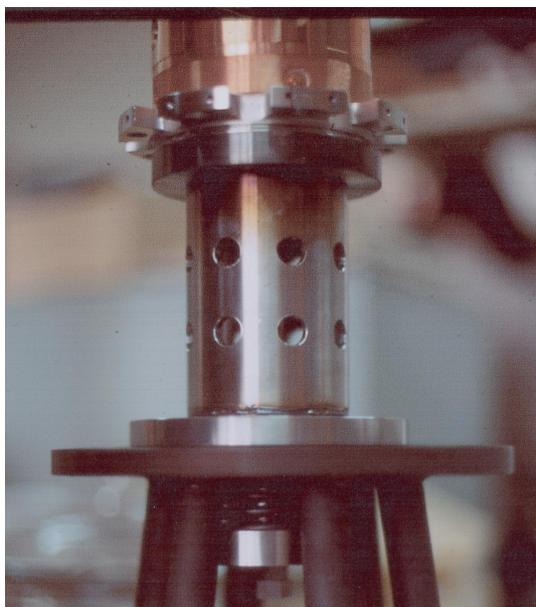


Figure 7: Stacked structure on a stand just before being installed into a vacuum furnace



Figure 8: RF heating

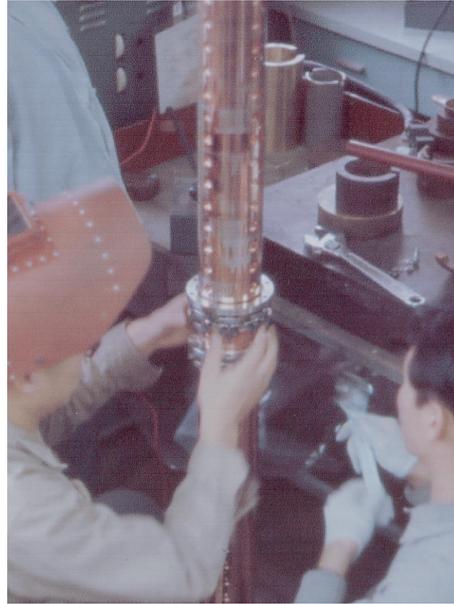


Figure 9: Joining two structures by helium arcing



Figure 10: Leak test

11 に示す*³。周波数測定は上流側および下流側から計りたいセルを挟むようにアンテナ付き金属円筒プローブを挿入しておこなう [2] [3]。上流側からは N 番目セルの中ほどへ、下流側からは $N + 3$ 番目セルの中ほどへ挿入すると N 番目セルおよび $N + 3$ 番目セルの中央面がオープン境界面（全ての電気力線が完全に動径方向になる）にすることが出来る。そうすると $N + 1$ 番目セルと $N + 2$ 番目セルを含む 3 セル長の領域について $2\pi/3$ モードが共振する。これを一方のプローブから信号を入力し、他方で受信することにより周波数を測定するわけで

ある。

前半 $2a = 20\text{mm}$ の部分のセル径は $2b = 81.80\text{mm}$ として加工され、それは 2854.78MHz に相当する。同様に後半 $2a = 18\text{mm}$ の部分のセル径は $2b = 81.43\text{mm}$ であって 2855.45MHz に相当する。図 11 から鑑付け直後の周波数のおおよその平均値をとれば、前半では 0.45MHz 、後半では 0.25MHz それぞれ指定値より高くなっている。ばらつきの全幅はほぼ 0.5MHz である。

調整後の周波数は上流バンチャー部および $2a$ 遷移部の数セルを除いて測定システムの分解能である $\pm 50\text{kHz}$ に入っている。

*³ 添田 (旧姓 菊地) 拓雄による。

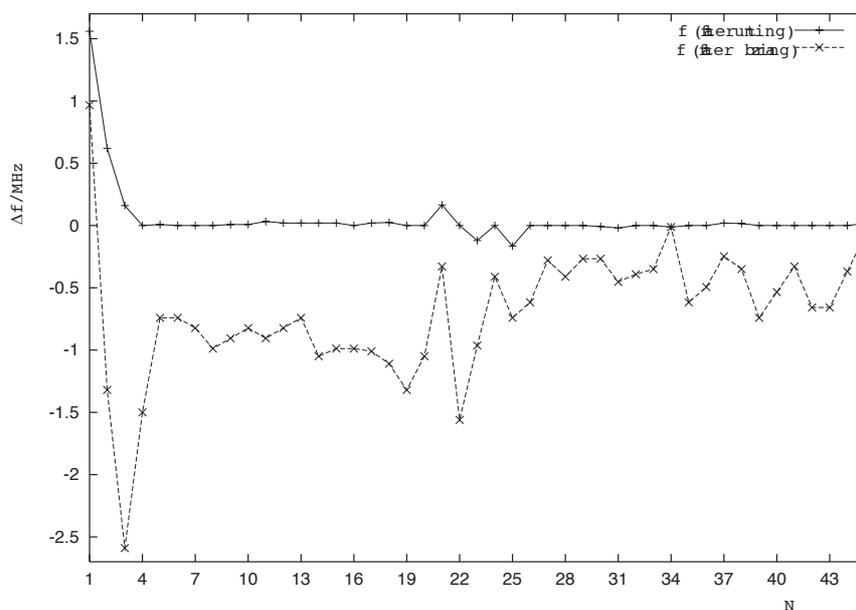


Figure 11: $2\pi/3$ mode frequencies immediately after brazing and those after cell tuning : ordinate value for N of abscissa means the $2\pi/3$ mode frequency of a 3-cell long portion comprising $(N + 1)$ th and $(N + 2)$ th cells with half (N) th and $(N + 3)$ th cells

7. おわりに

ここで紹介してきた 1960 年代後半の加速管製作の様子を現在のレベルと比較してみよう。精密工作の水準はほぼ一桁の差があろう。ダイヤモンドバイトは使われたが、旋盤の温度制御は行われていない。数値制御加工も単純な 1 次元のレベルであった。加工物の寸法測定は $1\mu\text{m}$ の単位であった。接合については水素炉および真空炉での金鍍付けや銀鍍付けの技術が日本で確立したところである。電磁場の数値計算精度は実用にほど遠くテスト空洞による測定に頼らざるをえなかった。周波数測定は標準空洞とマイクロメーターによるアナログ方式であった。

精密加工のレベルがこの調子で進んでゆくと次の 35 年後にはどうなっているであろうか。

参考文献

[1] CHU, E. L. and GINZTON, E. L.: Microwave Laboratory Report, Stanford Univ., **274** (1955).

[2] NISHIKAWA, T.: Fabrication and Measuring Methods for Disk-Loaded Waveguides, Proc. 1964 Linac Conference (1964)75.

[3] SHIGEMURA, N., *et al.*: A Measuring Method of Frequencies of Accelerator Guides, Report on the Meeting of the Physical Society of Japan (April 1964).