

T. Fukushima, K. Kobayashi, T. Nakanishi, S. Noguchi,
K. Sato, E. Tojyo, S. Yamada and K. Yoshida

Institute for Nuclear Study, Univ. of Tokyo

Abstract

The electromagnetic properties of eccentric transmission line resonators are measured as in the development research of a heavy ion linac. Two 1/8 scale models (constant velocity and π/π mode) are constructed and some transmission line properties and field distributions along the beam axis are measured. Obtained results coincide well with the UNILAC data and the error widths of the parameters are smaller than UNILAC data. By these model experiments, basic data for the modifications of resonator dimensions are obtained.

§1 はじめに.

重イオン加速用 Linac の開発研究の一環として、核研では偏心同軸型 Resonator の 1/8 モデルを製作し、Drift tube の配列の仕方と共振周波数、電界分布、線路定数等の関係について測定した。このモデル実験によって偏心同軸型 Resonator の基本的データを得ると共に、Dimensional error、測定誤差の諸パラメータへの効き方について評価し、かつ UNILAC データと比較検討して Resonator の Dimension を決定する際に必要な情報を得ることができた。以下はその概略を報告する。

§2. Model の Dimension の決定.

偏心同軸型 Wideröe Linac を Loss のない均一な伝送線路として近似し、専ら伝送線路特性を容易に測れる Model を作るため、Stub 等は省略し、Scale を 1/8 に決定した。Drift tube の配列は、粒子速度 $v/c = 3\%$ 、 4% に合わせて等間隔に並べたものを 2 種組み立てた。Mode は最も簡単な π/π 型とし、Q-magnet は Outer drift tube に組むものとして、その分だけ外径及び stem の外径を Inner drift tube 側より大きくしてある。すべての Component は $\pm 0.1\text{mm}$ 以内の精度で製作し、Alignment error は横方向、軸方

向共は $\leq 0.2 \text{ mm}$ 以内に抑えられた。Table 1 に 2 つのモデルの Dimension をまとめて示す。Fig. 1 は Model-II ($\nu_c = 3\%$) を示す。2 つのモデルは Total length, Drift tube length, Cell length, Cell の個数だけ異なり。他の Parameters については同じ形状・配列になっている。

	Model I ($\nu_c = 4\%$)		Model II ($\nu_c = 3\%$)	
Total length [mm]	1200		1215	
Numbers of unit cells	40		54	
Cell length [mm]	30		22.5	
Outer conductor:				
Inside diameter [mm]	150		150	
Thickness [mm]	1		1	
Diameter of inner conductor [mm]	20		20	
Distance between centers of inner and outer conductors [mm]	31		31	
Drift tubes :				
Length [mm]	(Outer)	(Inner)	(Outer)	(Inner)
Outer radius [mm]	20	20	15	15
Radius of curvature [mm]	12.5	7	12.5	7
Bore radius [mm]	5	1.2	5	1.2
Bore radius [mm]	1.85	1.85	1.85	1.85
Stems :				
Length [mm]	(Outer)	(Inner)	(Outer)	(Inner)
Diameters [mm]	36	39	36	39
	5	4	5	4

Table 1. Geometrical dimensions of $1/8$ models

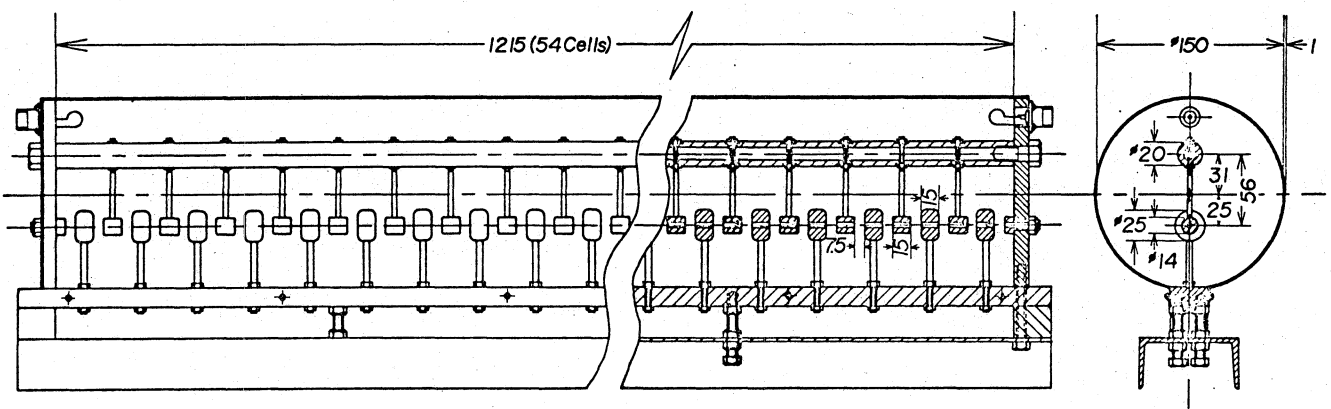


Fig. 1. A sketch of the $1/8$ model resonator (Model II)

§3 電氣的諸量の測定.

i) 共振周波数 f_n : 85~470 MHz の範囲で, ベクトル電圧計による peak search を行ない, $n=0\sim6$ まで測定した。入出力端の Coupling loop の影響による共振周波数のずれを補正するため, loop の内径を 12 mmφ から 4 mmφ まで 5 点変えてグラフにとり, ~ 0 mmφ に外挿して求めた値が Table 2 である。測定中の Oscillator の短時間周波数変動は 1×10^5 以下で, 測定誤差よりも小さい。

Harmonics No. ($n+1$)	Res. frequency [MHz]	
	Model I	Model II
1	93.103	84.767
2	182.352	165.094
3	263.621	237.010
4	333.144	297.686
5	389.399	346.817
6	435.114	386.727
7	472.193	420.691

Table 2. The resonant freq. of resonators at loose coupling limit.

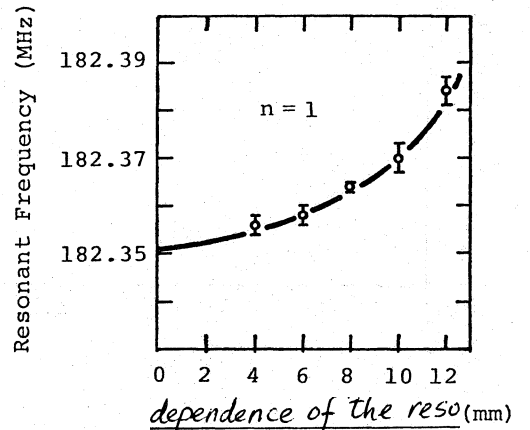


Fig. 2 dependence of the resonant freq.s on the loop diameter.
(Example about $n=1$)

ii) 全線間容量 C_0 : 内導体と外導体の間の Static capacitance を測るために, 真鍮の End plate をアクリル板 (同じ Dimensions) に替えて絶縁し, 両端の Drift tube (長さ $\pm 1/2$ づつ) は 1 mm の銅線の内導体に結合した。Q-meter を用いて測定し, 設定周波数を $f \sim 20$ MHz から逐次低い方に変えた結果, ~ 1 MHz で C_0 はほぼ一定値 70.0 pF (Model I), 80.5 pF (Model II) となり, ~ 80 kHz まで確認できた。得られた C_0 の値には End の浮遊容量が含まれているので, End plate の形状・厚みを考慮して補正を加えた。

iii) 電界分布: 通常の "Perturbing ball method" により Gap 間及び全長について電圧分布を測定した。Beam hole 3.7 mmφ に対し 3.0 又は 3.5 mmφ の鉄の Ball を用い, 2 mm step で動かして, Gap 内の Drift tube diameter の違いによる, 非対称な電界分布も測定した。Fig. 3 及び Fig. 4 は Model I の測定結果である。

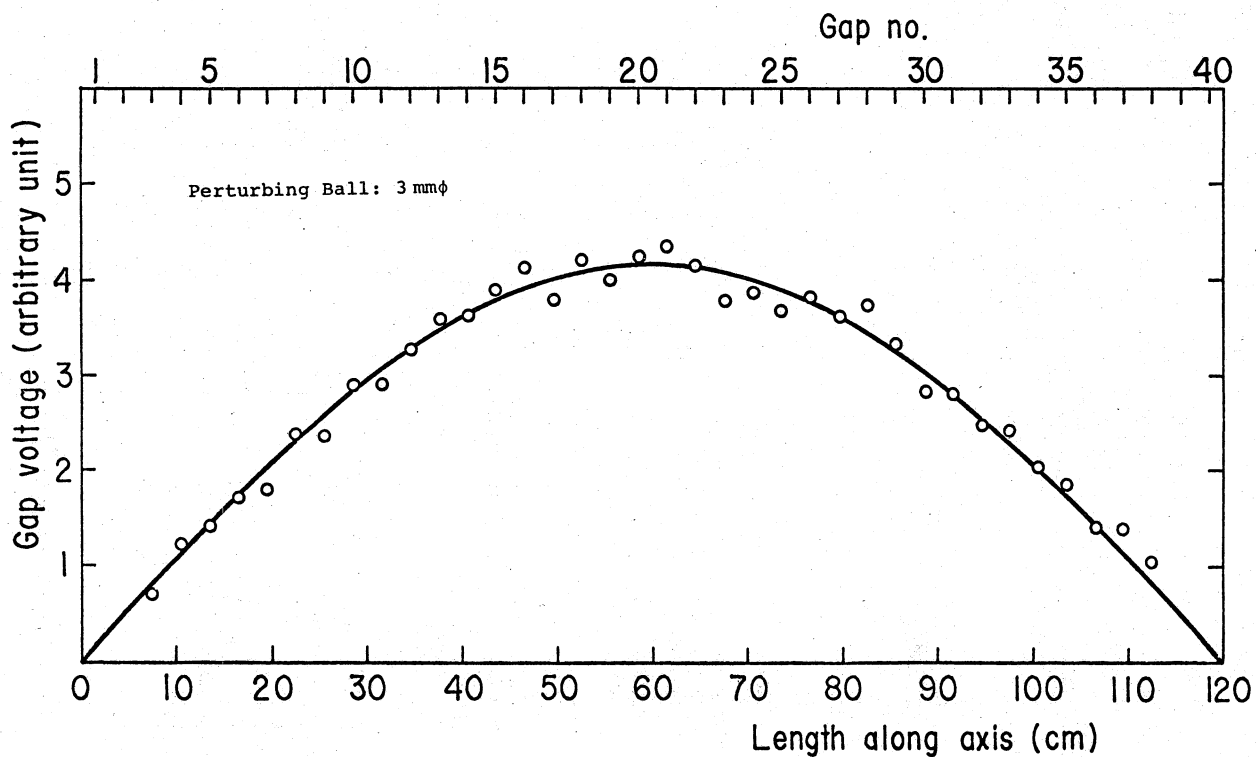


Fig. 3 Measured gap voltage distribution along the beam axis. (Model I)

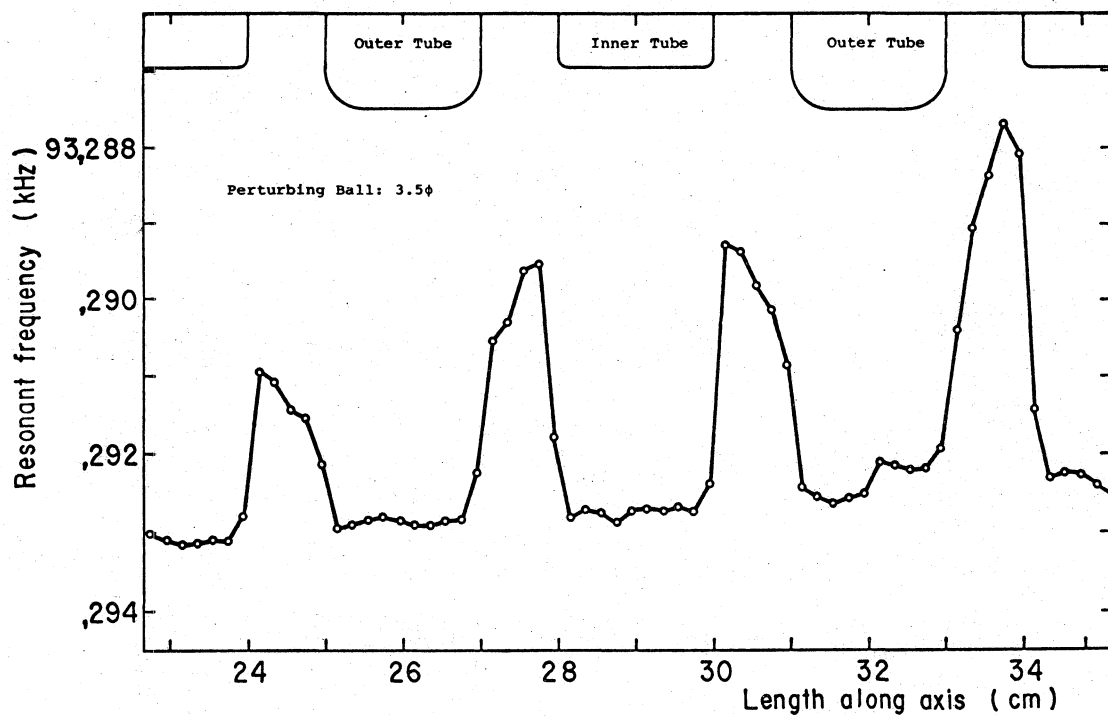


Fig. 4 An example of asymmetric field distribution in the gap region. (Model I)

§4. 等価回路解析

Kasper¹⁾にならって, Unit cell を右図の
よきな等価回路及び記号で表示すると,
共振角周波数 ω は次の式で与えられる

$$4\omega^4 L_s L_c C_g C_e - \omega^2 [4\omega^2 L_s C_g + L_c (C_g + C_e)] + \theta^2 = 0$$

ここに $\theta = \frac{n+1}{N}\pi$, N は Cell の総数である。
上の方程式は ω^4 , ω^2 , ω^2 に関し独立変数
を3つ(か含んでいないが, §3 で述べた
全線間容量 C_0 の測定から,

$$C_0(\omega \rightarrow 0) = C_g + C_e$$

が得られるので, 両式を連立させること
により L_c, L_s, C_g, C_e の最確値を求めること
ができる。こりして得られた結果を Table 3
に示した。

	Model I	UNILAC	Model II	LINILAC
L_c [mH]	$10.53^{+0.56}_{-0.51}$	11.1 ± 0.45	$7.62^{+0.41}_{-0.37}$	8.4
L_s [mH]	$26.01^{+2.28}_{-2.21}$	27.5 ± 12.6	$24.09^{+2.06}_{-1.99}$	28.4
C_e [pF]	0.894 ± 0.057	0.88 ± 0.24	0.550 ± 0.049	0.54
C_g [pF]	0.794 ± 0.053	0.80 ± 0.24	0.987 ± 0.064	0.99

Table 3. The most probable values and errors of each circuit parameter.

§5. 誤差の成因と評価.

伝送線路定数の決定の際に現われる誤差は, 大別して以下の3つに起因すると考えられ
る。1) 周波数測定からの誤差: これは更に入出力結合ループの影響 ($\leq 1 \times 10^{-4}$), Oscillator
と Counter の安定度 ($\leq 2 \times 10^{-5}$), Resonance の Peak search の読取誤差 ($\leq 1 \times 10^{-4}$),
Resonator の長さの誤差 ($\leq 2 \times 10^{-4}$) 等に合けられるか, 総合して測定周波数に入る誤差
は $\leq 3 \times 10^{-4}$ とみなされる。 $n=0 \sim 6$ の各 Harmonics のうち, 高調波ほど波長が Cell
length に近づいて伝送線路の均一性が失われるので, 誤差は大きくなる。

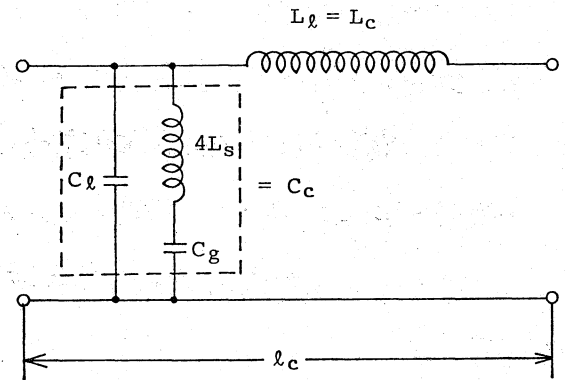


Fig. 5. A simplified equivalent circuit for the unit cell. Symbols L_l and C_l are the series inductance and the parallel capacitance of the eccentric line per unit cell, respectively. Symbols L_s and C_g denote the inductance of the drift-tube stem and gap capacitance, respectively. Three elements surrounded by the dashed line can be represented by a simple capacitance C_c .

ii) 全線間容量測定からの誤差: この誤差分は Q-meter の精度, End capacitance の補正に含まれる誤差を含めて, $\sim 5\%$ と見込まれる。

iii) Mechanical alignment error: Model resonator を外導体, 内導体の径がそれぞれ a, b , その中心間距離 C の偏心同軸線路とみなし, $\Delta a = 0.5 \text{ mm}$, $\Delta b = 0.1 \text{ mm}$, $\Delta C = 0.3 \text{ mm}$ の変形があるとすると, 線路の Inductance, Capacitance はそれぞれ $\sim 0.8\%$ 変化する。これは C_0 の測定誤差による影響より遙かに小さい。

§6. 結論

以上のよりに, 我々が得た L_c, L_s, C_e, C_g の各値はいずれも最確値において UNILAC のデータと良く一致しており, (しかも誤差幅は我々の値の方が遙かに小さかった。これは主として我々の周波数測定精度が1桁程度良いことに起因している。今回の実験では $\% = 3\%, 4\%$ の2点についてだけ測定したのであるが, これらの結果は, 今後この型の加速管について Dimension を決定するうえで有意なデータとなりうるであろう。

ref.

1) K. Kaspar: GSI-BERICHT 73-10