

変形同軸空洞による重イオン線型加速

向坂正勝, 法沢豊道, 塚博司, 中山基市, 山下弘二, 富田道男
吉田紘二, 福沢文雄, (京大工), 奥村彰二 (福井大)

§1 ねらい

重イオン加速で一番問題になるのはイオンの e/m が小さいことである。イオン源自身で十分に多量のイオンを作り出す方法は加速器に通用するまでにはまだ多くの解決すべき問題を含んでいる。従って当分の間は従来通り比較的小さい e/m の重イオンを何とか加速して或程度の速度にしてから電荷変換するという方法をとらざるを得ないであろう。イオン源部の電源容量を大きくし且保守を容易にするためには入射器の電圧はなるべく小さいことが望ましく、日本の気候を考えると 250 kV 程度が扱い易い。本研究では $Z = 11 \sim 50$ の重イオン ($e/m \geq 0.05$) を 250 kV 入射器で加速して ~ 12 kV/A ($\beta = 0.005$) にした後 0.5 MeV/A までエネルギーアップするものとして変形同軸空洞による線型加速を検討した。この加速器は原子分子、物性、材料研究用として実用化することを念頭においている。

§2 変形同軸空洞による加速の原理

Sloan-Lawrence 型は平行2線路路を用いているが、本法は同軸線路から出発する。図1(a)の同軸空洞では空洞長 $L = \lambda/2$ のとき TEM 基本モードに共振し、内軸上に sine 型の電圧分布ができる。この電場は r 方向であるが (b) のように内軸と接地側とから電極をせり出して対向させると z 方向の電場ができ、電極 (ドリフト・チューブ) の寸法や間隔を適当にえらべば線型加速器として使うことができる。(b) の空洞では両端近くの電場が弱くて加速に有効でないから、内軸を (c) のように折り曲げて電場の強い部分だけを加速に使うことが望ましい。(c) の形にしたとき共振周波数がどのように変るか、電圧分布は sine 型からどのように変るか、周波数調整はどうするか等が重要な問題となる。

§3 模型空洞の高周波特性

模型空洞の諸元は次の通りである。

空洞寸法: $500\phi \times 750^l$, 0.5t 銅板製

ドリフト・チューブ:

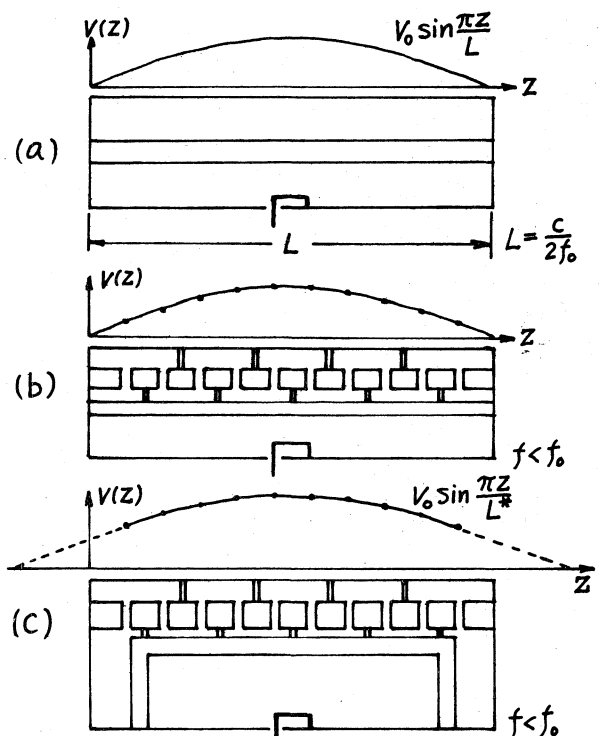


図1

- (a) 同軸空洞の原型
- (b) ドリフト・チューブの装荷
- (c) 変形同軸空洞

- 内軸側 40φ × 15ℓ 10個
- 接地側 40φ × 15ℓ 5個
- 60φ × 65ℓ 4個 (Q電極用)
- 60φ × 32.5ℓ 2個 (両端)

ギャップ: 20個, 間隔 10 (等間隔)

ドリフトチューブをつけたい菱形同軸空洞で共振周波数を測ると 145 MHz であった。即ち $\lambda/2 = 103 \text{ cm}$ であるが、この長さは内軸の延長とほぼ等しいから、菱形同軸空洞でも TEM モードができてきていることがわかる。従って共振周波数を高くするには内軸の実効長を短くすればよいことになり図2のように内軸の直立部と空洞端板との間に短絡板を入れ、外部から上下できるようにした。

次にドリフトチューブをつけて共振周波数を測ると短絡板両方とも最下部: 84 MHz
短絡板両方とも最上部: 93 MHz
となり約 10% 周波数可変となっている。

電場分布はドリフトチューブ軸に沿って小さい誘電体ビーズ玉を動かして共振周波数のズレ Δf を測り $E \propto (\Delta f)^{1/2}$ の関係から相対分布を求めた。

図2(a) は短絡板が両方とも最下部にあるときの分布で空洞の中央から見て左右対称でかつ sine 型になっている。これに片一方の短絡板を最上部にした(b)のときは左右非対称になるが sine 型である。このことは空洞が TEM 基本モードに共振していることを示す。電圧分布が短絡板によって左右非対称にでき、かつ共振周波数も可変にできることは、実際の加速器を作る場合に極めて都合が良い。即ちドリフトチューブは次第に長くなって行くから構造的に左右非対称であり、内軸上電圧はこのため対称 sine 型よりズレてしまっただけで設計計算に大きな支障となるが、このズレを2つの短絡板によって修正することが可能になるのである。

以上を要約すると次の通りである。

1. ドリフトチューブの装荷により共振周波数は無装荷の場合にくらべて約 30% 低くなるが、TEM 基本モードができてきている。それ以外のモードは極めて弱い。
2. 共振周波数は短絡板によって 10% 程度可変である。
3. 内軸上の電圧分布 $V(Z)$ も短絡板によって調節できる。左右対称の分布のとき

$$V(Z) = V_0 \sin \{ \pi(Z+L)/(L_0+2L) \}$$

ただし V_0 : 高周波のピーク電圧, L_0 : 空洞の長さ, L : 内軸直立部の実効長さ
左右空洞の Q 値は現在測定中であるが、少なくとも 5,000 はある。

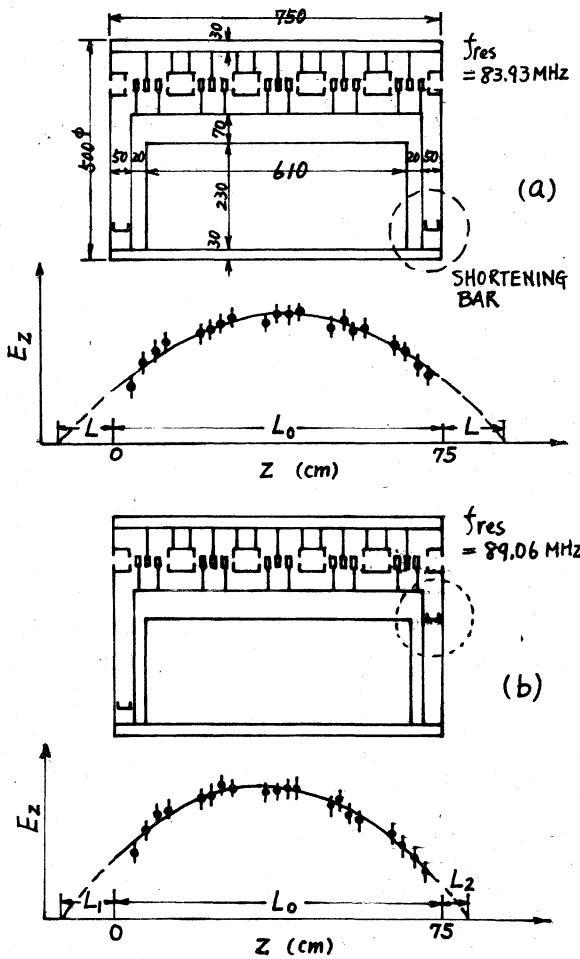


図2 (a) 短絡板が2つとも最下部

(b) 短絡板の1つ最下部、他が最上部

§4 ドリフトチューブ寸法の計算

電荷 q のイオンがギャップ g を通過して得るエネルギー増加 ΔK は

$$\Delta K = (qV_0/g) \sin \{ \pi(Z+L)/(L_0+2L) \} T \cos \phi_s$$

ただし $T = \sin(\pi g/2l) / (\pi g/2l)$, l : 加速1段の長さ

ϕ_s : 同期位相角

である。線型加速器では $g/l = 1/3 \sim 1/4$, $\phi_s = -10^\circ \sim 30^\circ$ にとる。このエネルギー増加によって1段の加速単位の長さ l' は次式のようになる。

$$l' = l \{ 1 + (\Delta K/4K) \} (\lambda/2c)$$

ただし v : 始めのイオン速度, K : 始めのイオンエネルギー。

このようにして順次 l, g がきまることが、イオンビーム集束用の Q 電場を入れることを考え、ドリフトチューブの長さを $(3, 1, 3, 1, \dots, 1, 3)$ あるいは $(3, 1, 1, 1, 3, 1, 1, 1, 3, \dots, 1, 1, 1, 3)$ と配列し全長が空洞長とうまく合うように収める。

§5 イオンビームの位相・エネルギー揺動及び集束

イオンビームは同期位相角 ϕ_s のまわりを $-\phi_s > \phi > 2\phi_s$ の間にわたって揺動しつつ次第に ϕ_s に集束してくる。同時にエネルギーも同期エネルギー K_s のまわりを揺動する。この様子を逐次計算した結果を図3に示す。横軸は位相のズレ $\delta\phi (= \phi - \phi_s)$ を、縦軸はエネルギー変化率 $\delta K/K_s$ を%で示してある。入射条件が異なりこの2例の何れも左廻りで次第に収束して来る。

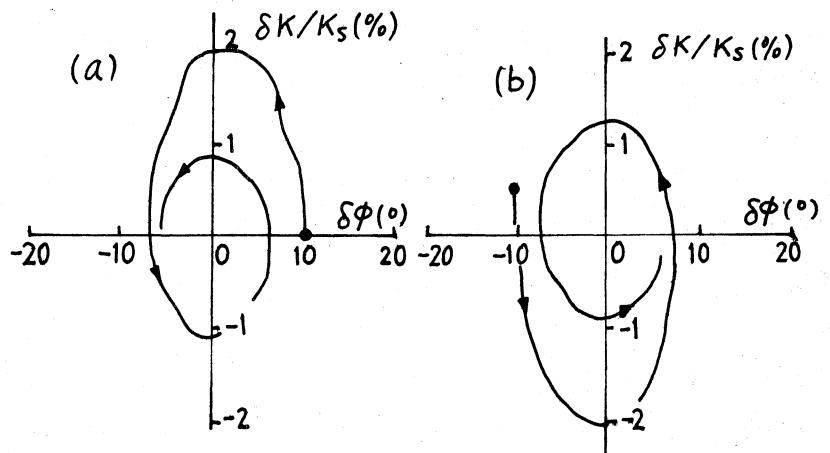


図3 (a) $\delta K/K_s = 0$, $\delta\phi = 10^\circ$ で入射のとき。

(b) $\delta K/K_s = 0.5\%$, $\delta\phi = -10^\circ$ で入射のとき。

イオンビームの収束には Q 電場による方法を考えている。必要な収束力 F は内軸上のピーク電圧 $V_0 = 65 \text{ kV}$ の場合 $F \sim q \times 15 \text{ kV/cm}$ となるが、この大きさは

内接円半径 8 mm の Q 電極配列, 電極電圧 $\sim \pm 3 \text{ kV}$

であって十分実現可能な値である。

§6 今後の計画

ここに述べた模型空洞 ($500\phi \times 750^L$, $f \sim 100 \text{ MHz}$) では 0.1 MeV/A 附近の重イオン加速領域を調べていることとなるが、同寸法の排気可能な試験空洞に 5 kW の RF 電力を供給して京大工の重イオンバンデからの $\sim 0.1 \text{ MeV/A}$ の C, N, O イオンの加速を実際に行なう準備を現在進めている。その結果を基に

(250 kV 入射器) + (25 MHz, 10 kW 空洞) + (50 MHz, 5 kW 空洞) + (100 MHz, 5 kW 空洞) の重イオン線型加速器を設計製作する予定である。