

1 GeV リニアック検討資料

1 GeV LINAC DESIGN NOTE

題目 (TITLE) 432MHz DTL cold modelの工作精度および
RF特性測定結果のまとめ

著者 (AUTHOR) 内藤富士雄、加藤隆夫、高崎栄一、山崎良成

概要 (ABSTRACT)

JHP用DTLのcold modelを製作した。従来の2倍の周波数 (432MHz) を使用するため、寸法が半分になっている。この寸法縮小に伴い変更した工作、組立方法の評価とRF特性の実測結果をまとめた。

KEY WORDS:

Ion source, RFQ, DTL, CCL, Magnet, Monitor, Beam Dynamics,
Transport, Vacuum, Cooling
Klystron, Low level rf, High power rf, Modulator
Control, Operation, Radiation, Others

D T L コールドモデルの製作と測定

高エネルギー物理学研究所

内藤富士雄、加藤隆夫、高崎栄一、山崎良成。

1 製作の目的

大型ハドロン計画の陽子リニアックに於てアルバレ型ドリフトチューブリニアック（以下、D T Lと略す）の仕様は、現時点では次の様になっている。即ち、

加速エネルギー範囲 3 MeV ~ 150 MeV

加速電場の周波数 432 MHz。 (詳細はref.1を参照)

過去KEKで製作、実用化されたD T Lは 200 MHzの高周波を使用している。今回のD T Lはその2倍の周波数の高周波を使用するため全体寸法は1/2になる。この寸法縮小の影響は特にD T L入射部で大きい。なぜならば、入射部では $\beta\lambda$ が小さいためドリフトチューブ（以下D/Tと略す）が高エネルギー側と比べて密に配置されるからである。更に $\beta\lambda$ の増加率も大きいいため各セルの長さの変化も急である。3MeV入射部最初の35セル分の陽子のエネルギー、 β 等の変化を図1に示す。35セルでどれも約2倍程度に増加している。

今回製作したD T Lコールドモデルはこの図に示した入射部である。表1にコールドモデルの仕様を示す。そしてこのモデルにより、以下の点に関し調べることが今回の製作目的である。即ち、

1. 空洞の工作、組立精度

特にD/Tの据え付け精度。

2. ポストカップラー（以下P/Cと略す）の効果

3. 空洞設計法（ステムの径変化による周波数の調整）

である。1は機械的な精度に関する事であり、特に D/T中心とビーム軸のずれを $50\mu\text{m}$ 以下にする事が今回の目標（最終的には $20\mu\text{m}$ 以下が目標．ref.1を参照）である。2と3はRF特性の測定を意味する。次節でモデルの特徴を述べる。そして3、4節で測定結果を説明し、5節でまとめを行う。

2 D T L コールドモデル概要

D T Lの全長は2.6mであるが、ビーム軸方向に対して4分割されている。分割された各タンクにD/Tを組み込んで、最後に架台上で結合させる。分割にした理由はD/TやP/Cを取り付ける作業を行う際に、作業者の手が届く様に配慮したからである。図2-aに結合後のD T Lの断面図を示す。同図bは第1タンクの内部を示す。P/Cは第一段階として各セル毎に左右交互に取り付けた。P/C先端には図の

様なタブが装着可能である。

図3にD/Tと取り付け部の断面を示す。以下の2つの特徴がこの図に示されている。即ち、

1. ステム (D/Tの支柱) のタンクへの取り付け部がテーパになっている事、
 2. ステムの太さが途中で15mmφから20mmφに変化している事、
- である。

1の事項は今回のコールドモデルの最重要点の1つである。テーパ部でSTEMのRF的な接触とD/Tの位置だしを兼ねることを狙っている。さらに将来的には真空封じも兼ねさせる事を考慮している。

一般に一つの部分に多機能を持たせる事は避けるべき事である。従って従来はD/Tの固定部はRF的接触、位置だし及び真空封じは総て別の部分が担当していた。今回敢えてテーパ部による接合を試みた理由は長期的に安定な接合が得られるからである。加速器が完成後10年以上稼働し続ける事を考慮した場合、これは非常に大きな長所である。もちろん位置出しとRF的接触が目標精度に到達する事が前提であるが、試してみる価値は十分であると判断し実行した。

2は、ref.1に詳細にかかっているが、DTLの各セルの共振周波数を合わせるための処置である。前節で述べた目的の3がこの効果の確認に対応する。

モデルの特徴的な事項は以上の通りである。

3 加工組立精度と高周波特性

(加工組立精度)

図4にD/Tのボア中心とビーム軸とのずれを示す。上図が垂直方向、下図が水平方向である。ずれの平均値は各々、

垂直方向 $13 \pm 110 \mu\text{m}$

水平方向 $20 \pm 58 \mu\text{m}$

である。平均値の標準偏差は今回の目標精度 $50 \mu\text{m}$ 以下には到達していない。原因はタンク側テーパ部の面精度が不十分なためである。テーパの傾斜が緩やか(1:20)なのでテーパ面上が $\pm 5 \mu\text{m}$ の精度であっても、D/T中心の垂直方向は $\pm 100 \mu\text{m}$ 程度変動する。従って垂直方向の精度を出すにはテーパ面精度としては $1 \mu\text{m}$ 未満の精度が要求される。また水平方向はテーパ部のずれがSTEMの長さ分拡大されるので垂直方向の場合と同程度の精度をテーパ面に対し要求する。これが実現不可能ならばテーパによるD/Tの固定方法は採用できない。

図4の各D/T中心位置のばらつきは全体に一様ではなく、第1と第4タンクで大きい。第2、3タンクだけならば中心のずれは、

垂直方向 $55 \pm 67 \mu\text{m}$

水平方向 $37 \pm 52 \mu\text{m}$

となり、特に垂直方向に関してはばらつきが大きく改善される。つまり第1、4

タンクと実際の作業行程で何が変化したのか判明すれば目標精度を出せる可能性がある。

図5は各セルに於けるD/T間の加速ギャップの設計値からのずれを示している。ずれの平均値は、 $11 \pm 188 \mu\text{m}$ であり、大きな偏差をもつ。D/Tのタンクへの装着行程に偏差の原因がある。D/Tのビーム軸方向の位置は各タンク間の接触面を基準に測る。今回はタンクを定盤上に垂直に立て、定盤が基準面となるようにした。D/Tは水平にされて装着される形になる。全D/Tの据え付けが終了した後でタンクを水平に（D/Tは垂直方向に）90度回転させて戻す。もちろん据え付け時にはD/Tの自重を考慮して作業を行なっている。しかし明かにこの行程がうまくいかなかった事を結果は示している。従って今回適用した方法は中止し、D/Tを垂直にしたままでタンクに装着する治具を今後開発することに方針を変更した。

以上が工作及び組立精度の実測から判明した主要点である。

(RF特性)

最初のRF特性測定はD/TやP/Cを付けず、タンクのみで行った。まず各タンク間及びタンク-端盤間の面圧とQ値の関係を調べた。（面圧はボルトを締める際に使用するトルクレンチの値とボルトの形状を基にした計算値である）図6が基本のTM010モードに対する測定結果である。横軸が面圧、縦軸がQ値である。面圧 $1.5\text{Kg}/\text{mm}^2$ 以上でQ値は一定になる。この結果より以後の測定では余裕をみて面圧を $1.75\text{Kg}/\text{mm}^2$ にする事に決定した。

Q値は34000であり、Super Fishの計算値45000の75%である。高周波空洞を銅で製作した場合、Q値は計算値の90~95%になる。しかし今回のモデルの様にアルミ製の場合、金属表面に生じる酸化膜の影響が銅に比較して大きい。そして表面の電気伝導度が酸化膜により低下するため、Q値が計算値の80%程度までしか普通は到達しない。（ref.2）我々の測定結果も同じ傾向を示している。TM010モードの共振周波数は、温度 20°C 、湿度50%に換算した値で、

測定値 519.967 MHz

計算値 519.913 MHz

となり、両者は良い一致を示す。

次にD/Tを付けて周波数測定を行った。TM010モードの結果は以下の通り。

測定値 431.271 MHz (Q=23800)

計算値 431.307 MHz

やはり一致は良い。

図7はD/Tをつけた状態での各モードと周波数の関係を示している。TM, TEモードと共にD/Tのステムによるモードもある。各々10番目のモードまで描いてある。

次いでチューナーの効果を調べた。チューナーは各タンク1本ずつ計4本付いている。場所はタンク上方 45° の位置である。この4本のチューナーを同時に同

一距離だけタンク内側へ出し、TM010 モードの周波数変化を測定した。図8に結果を示す。チューナーの挿入位置が約7cm以下ならば周波数の変化量はチューナーの挿入距離に比例する。比例係数は約100KHz/cmである。チューナー位置が9cm近傍で周波数変化は最大になり、その先では減少していく。

以上が空洞のRF基本特性の実験値である。これからP/Cの効果測定の段階に入る。

(P/Cによる加速電場の安定化)

* P/Cモードの周波数測定

D T Lで使用する TM010 モードは群速度 $v_g=0$ である。そして $v_g=0$ の場合、空洞内でのエネルギーの移動は容易には起こらない。従ってビームローディングや工作誤差等の影響により電場分布が乱される可能性がある。 $v_g \neq 0$ にして外部からの影響を小さくするためにP/Cを使用する方法がある。(ref.3) 即ちP/Cを挿入することにより生じるモード(ポストモード)と TM01n モードを TM010 モードの位置で合流させることによりTM010で $v_g \neq 0$ にできる。かつ TM01n 間のモード間隔を広げられる。但し欠点として、P/Cの存在によりQ値は減少する。

P/Cによる加速電場の安定化はKEKでも40MeV陽子リニアック(200MHz)で確認されている。(ref.4) しかし今回のモデルの様に各セル毎に寸法が大きく変化する場合の経験はない。故にこの領域でP/Cを電場安定化のために働かせる事が可能か調べる事は必要である。

各セル毎に寸法が大きく変化している場合、P/CをD/Tから同一距離の位置に設置すると、P/Cモードの周波数は各セルで異なってしまう。各セルのP/Cモードの周波数を一致させ全セルをRF的に結合させるには、各セルでのP/Cモード周波数とP/Cの位置の関係を求めなければならない。まだ未解決の問題がここにある。即ちP/Cモード周波数の測定方法である。今回は以下述べる様にして測定した値を用いたが、この方法が最良か否かは検討を要する。

手順は次の通り；

- 1 全P/CをD/Tから 5mmの位置に設置する。(これ以上は構造上接近不可能)
- 2 注目する1本のP/Cのみ徐々に引き抜く。
- 3 ネットワークアナライザーでP/Cモード群の共振周波数を観測し続ける。そして引き抜いているP/Cに同期して共振周波数を変化させているP/Cモードを捜し、その周波数を測定する。これが注目しているセルのP/Cモードである。
- 4 P/Cの位置と共振周波数の関係を TM010 モードの近傍まで調べる。

上記の行程1は

TE モードをたたく事、

P/Cモードのビーム軸方向の広がりを1セルの範囲内に限定する事、が目的である。第2の目的は、言い替えればD T Lに比較的厳密なセルの境界面を導入する事である。

測定結果を図9に示す。この結果より特定の周波数に全P/Cを合わせる際、設置すべき各P/Cの位置が分かる。測定されていないセルに関しては内捜して求める。同図bは同一位置にP/Cを設置したときの各セルでのP/Cモードの周波数を示したものである。図より両端盤近傍で急激に周波数に変化している事、そして中間ではセル番号の増加（即ちD/T長の増加）に伴い共振周波数が減少する事が分かる。後者は、定性的にはD/TとP/C間の静電容量が増加した結果であると解釈ができる。

* ビーズ摂動法

P/Cの効果を調べるにはビーム軸上での電場分布を測定する必要がある。我々は測定方法としてビーズ摂動法を用いた。以下原理を簡単に説明しておく。

TM₀₁₀モードの場合、ビーム軸上には軸に平行な電場のみ存在する。この軸上体積vの金属球が存在すると、金属球のある位置zでの電場E(z)と共振周波数 ω との間には次の関係が成立する。(ref.5)

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} = \frac{3 \epsilon_0 v E^2}{4 U}$$

ω_0 ; 基本周波数

ϵ_0 ; 真空の誘電率

U ; 空洞内の全エネルギー

従って金属球を軸上で移動させながら共振周波数と球の位置を測定すれば電場分布がわかる。実際には金属球に糸を通し、その糸を軸上に張る。そしてモーター等で糸を等速度で移動させ、金属球を動かす。今回用いたシステムのブロック図を図10に示す。金属球は直径4mmのAl球であり、25cm/secで軸上を移動する。共振周波数は約500 μ sec毎（距離にして約125 μ m毎）に測定される。周波数の読み込みは一度変調を加えて約8KHzに下げてから行われる。

次に以上の事項を基に行ったD T Lの加速電場安定化の結果をまとめる。

(安定化の実測)

図11の●はP/Cが無い状態でビーズ摂動法により測定した各セルの平均電場分布である。横軸はセル番号、縦軸は電場強度（最大値を1に規格化している）である。強度分布のばらつきは標準偏差で2%である。

この比較的一様な分布をチューナーを挿入して崩した結果が図12の□である。下流側で20%電場が減少している。チューナーの挿入量は第1タンク側（低エネルギー側）より、3mm, 18mm, 30mm, 42mmである。それから全P/Cを先に調べた周波数を揃える条件に従って挿入していき、電場分布の変化を測定した。分布の広がりはD T Lでは慣習的に Distortion parameter D

$$D = \sum_i |E_i - \langle E \rangle|$$

E_i ; セルの電場

$\langle E \rangle$; 全セルの平均値

を用いる。Dの最小の点がD T Lが安定化するところである。(ref.6) この位置での電場分布を図12の中に■印で重ねて示す。分布の傾きが減っているのが分かる。但し、安定化が非常にうまく行われた場合はこの分布は平らになる。(ref.3.4) 完全に平らにならないのはP/Cモード周波数の測定に問題がまだある事を示唆している。最後にこの安定化させたままでチューナーを引き抜き0位置に戻して、再度電場分布を測定した。結果を図11に重ねて示す。(○印) 分布の変動が減った事がはっきり分かる。標準偏差は1%とP/C無しの場合の半分になっている。この時点でP/Cによる電場分布の安定化は一応確認はできた。しかし今回のP/Cモード周波数の測定法は上述の様に不明確な点があるため、再測定を現在進行させている。

4 D T Lの振動対策

本節では電場分布測定中に判明したD T L構造体の低周期振動に関しまとめておく。図13 aは34番目のセルの電場分布の詳細である。横軸は位置座標、縦軸は電場強度である。中央の電場の強いところが加速ギャップである。それ以外は本来D/Tの中なので電場は存在しない。(ギャップ付近で電場は少し侵入する。)

ところが図では0であるべきベースラインが振動している。周期は約10Hzである。この振動の悪影響は平均電場を計算する際に現れる。即ち、各セルの平均電場を求めるには電場分布の積分値を使用する。しかしベースラインがゆっくり振動すると積分値が変動してしまい、結果に再現性がなくなる。このベースラインの振動はビーズ用の糸を張っていない場合でも観測された。振動の原因を調べたところ実験室全体の振動スペクトル中の10.6Hzのところにピークがある事が分かった。さらに源を遡ると、実験室付近を流れる冷却水のパイプから発生していた。

図-14-bにD T L上で測定した機械的振動のスペクトルを示す。10.6Hzにピークがある。この外部振動によりD/Tが強制的に振動して共振周波数が変化したのがベースライン振動の原因であった。この強制振動を除去するため、D T L架台に10.6Hzに共鳴点を持つメカニカルダンパー(SUS棒とAl製フランジで構成された振動系)を取り付けた。その結果、10.6Hzの振動を30dB低減でき、電場測定に支障は無くなった。図14-cにダンパーを働かせた後の電場分布を示す。ベースラインの大きな振動は消えている。

次の段階としてHigh-Power modelを製作、テストする際D/Tの冷却用の水流で同様の振動が生じる可能性がある。D/Tが振動すると内蔵している4極磁石によりビーム軸上にダイポール磁場が生じ、ビーム軌道を曲げてしまう。従ってより深刻

である。今回の振動問題はその除去対策の重要性を改めて認識させた。

5 まとめと今後の課題

今回製作したDTLコールドモデルにより、現時点までに判明したことをまとめると次のようになる。

- a D/Tのタンクへの接合をテーパーで行う方法は精度の点で目標には到達しなかった。但し、改良の余地はまだあるので、さらに推進を試みる。次には真空封じも考慮しなければならない。もちろん他の従来の方法も併せて検討していく必要がある。
- b D/Tのステムの直径を変化させてセルの周波数を合わせる方法は計算通りに作用した。
- c P/Cによる加速電場の安定化を確認できた。ただし、P/Cの必要性も含めて電場の安定化の条件として何が最適かをつめていく必要がある。
(P/Cの振舞いに関してはまだ定量的に明確でない点が多い。数値計算による結果と実測値の比較検討を現在進めている。)

(Reference).

1. 大型ハドロン計画推進作業部会編、
「大型ハドロン計画陽子リニアック ワーキンググループ 報告1」第4章、
JHP-10, KEK-INTERNAL 88-8, 1988
2. 肥後尋泰、私信
3. D.A.Swenson, E.A.Knapp, J.M.Potter and J.Schneider
"6th Conf. on High Energy Accelerator", Cambridge, 167, (1967)
4. T.Kato
"DESIGN AND RF TUNING OF THE KEK 40MeV PROTON LINEAR ACCELERATOR"
KEK REPORT 86-5, KEK, (1986)
5. L.C.Maier, Jr, & J.C.Slater
Journal of Applied Physics, vol.23 68 (1952)
6. J.Ungrin, S.O.Schriber & R.A.Vokes
IEEE Transactions on Nuclear Science, vol.NS-30 3013 (1983)

表-1. DTLコントロールモデル仕様

共振周波数 432 MHz
 空洞内径 441 mm, 全長 2585 mm,
 (加速エネルギーは 3.0~8.5 MeVを想定)

AI-5052型 ($\sigma=4.19 \times 10^{-4}$)

4タンク分割式、総セル数 36個

ドリフトチューブ数 34個 + ハーフセル 2個

チューナー (直径 70 mm) 4個

ボストカップララー (直径13mm) 34個 (先端にタブ取り付け可能)

大電力ポート (直径150mm) 1個

モニターポート (直径30mm) 2個

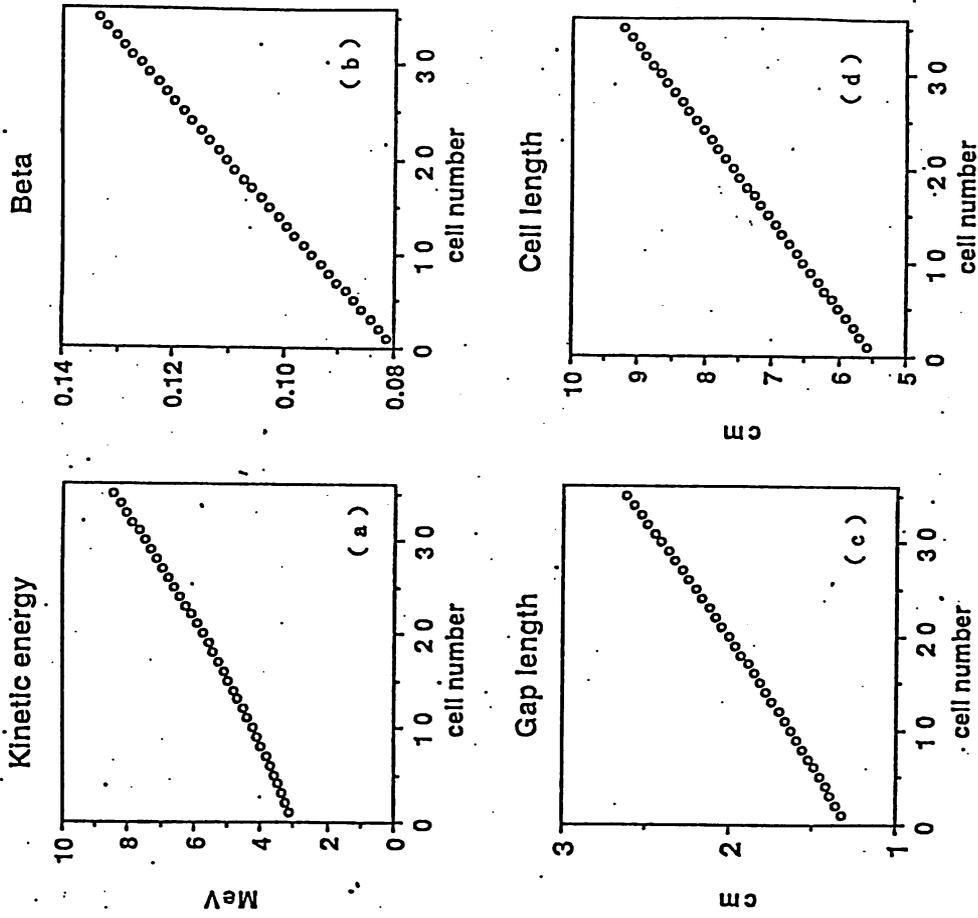


図-1 DTLコントロールモデル仕様

縦軸は総セル番号。

横軸は、a)陽子の運動エネルギー、b)陽子の速度、c)加速ギャップ長、d)セル長。

DRIFT TUBE AND STEM

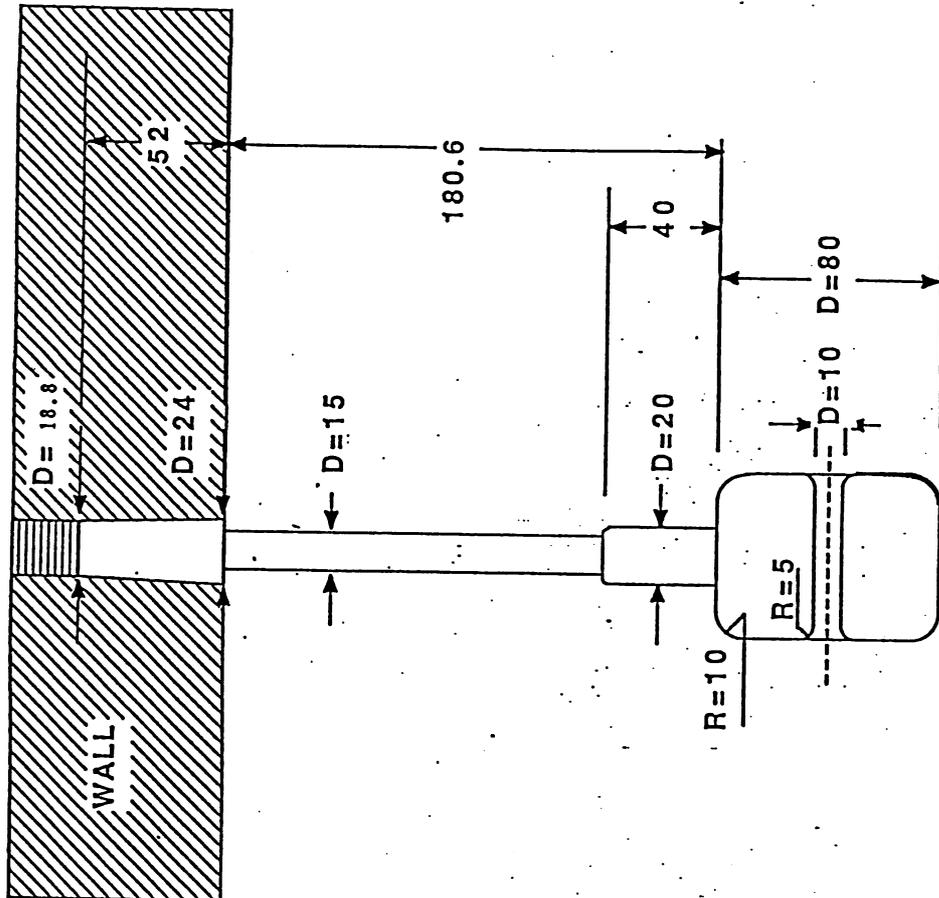
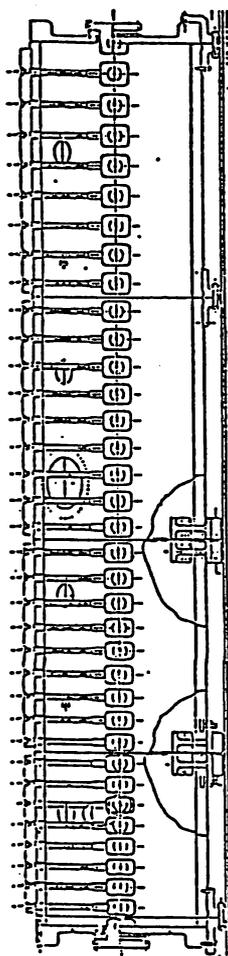
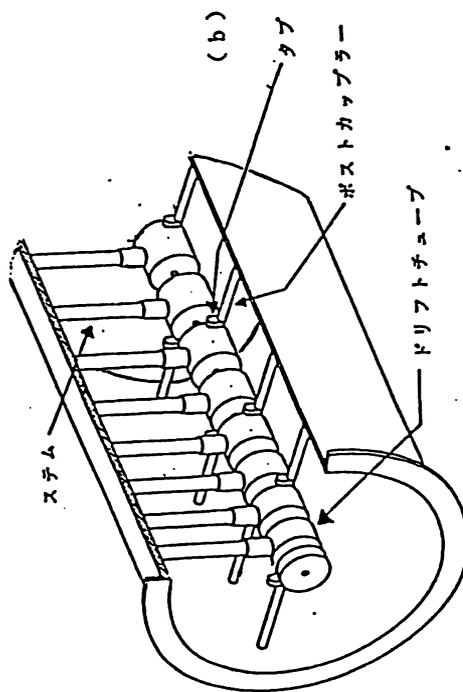


図-3 ドリフトチューブとステムの形状

ドリフトチューブとステム取り付け部の断面。ステムの加速タンクへの取り付け部がテーパー状になっている事、およびステムの直径が途中で変化している点の特徴。



(a)



(b)

図-2 DTLコールドモデル断面図

a) 4タンクを結合した時の断面図。陽子は左側から入射。
 b) 第1タンク内のドリフトチューブとポストカッパラーの様子。
 左から陽子は入射。b図は1部の寸法を誇張。

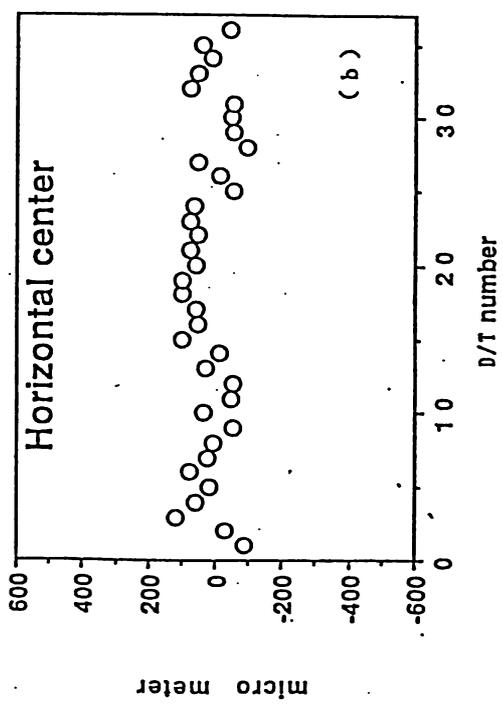
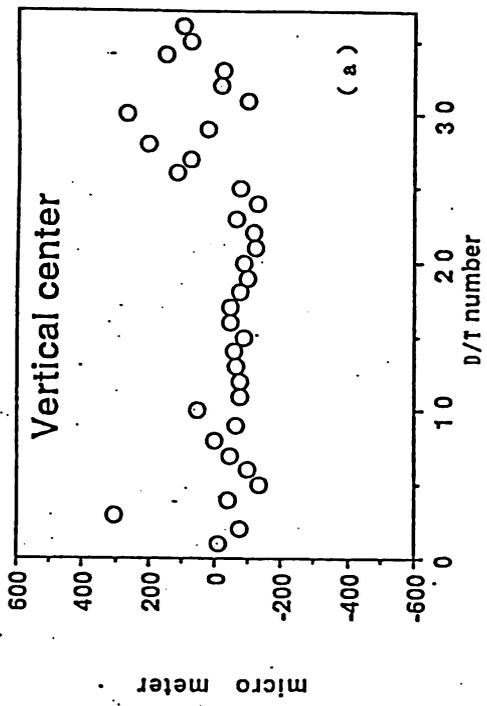


図-4 ドリフトチューブの取り付け精度 (1)

タンクに取り付けられたドリフトチューブの中心とビーム軸とのずれ。
 a) は垂直方向, b) は水平方向のずれ。

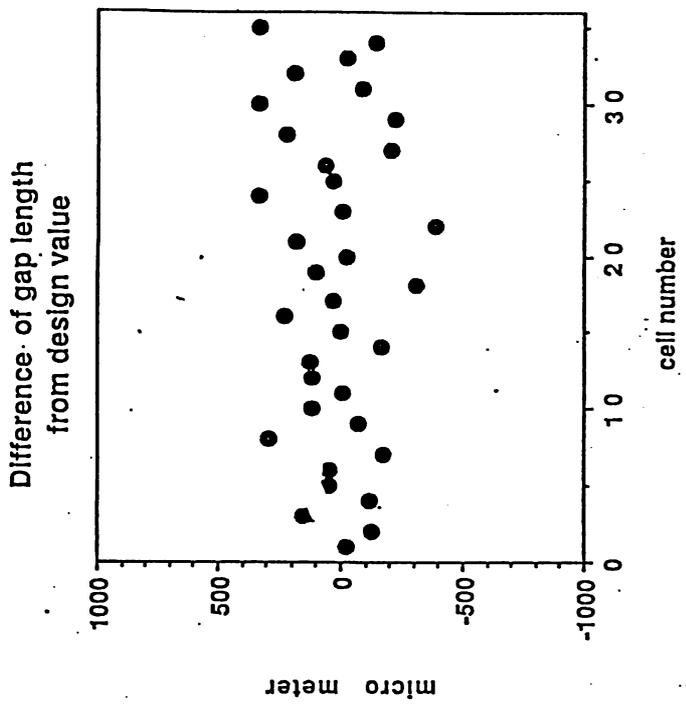


図-5 ドリフトチューブの取り付け精度 (2)

ドリフトチューブの間隔の実測値と設計値の差を描いたもの。

Pressure vs. Q-value

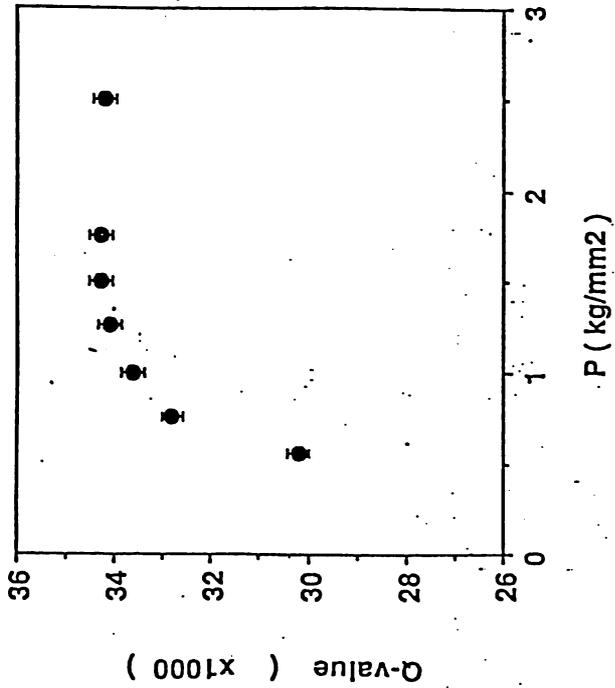


図-6 接触面圧とQ値の関係

縦軸は各タンク間及びタンクと端盤間の接触面の圧力。横軸は TM010 モードの Q 値。圧力 1.5 kg/cm^2 以上で Q 値は一定。

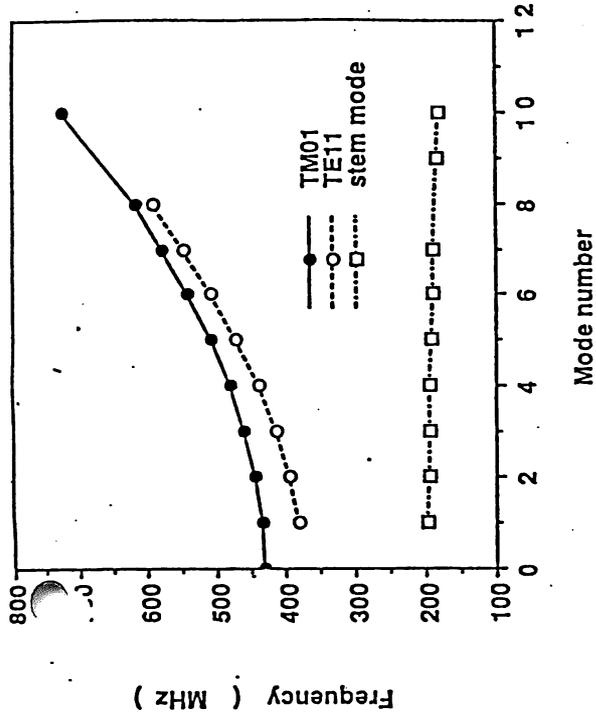


図-7 DTL共振周波数の分散関係

TM01_n ($n=0\sim 10$), TE11_m ($m=1\sim 8$) およびステムモード ($l=1\sim 10$) の周波数。

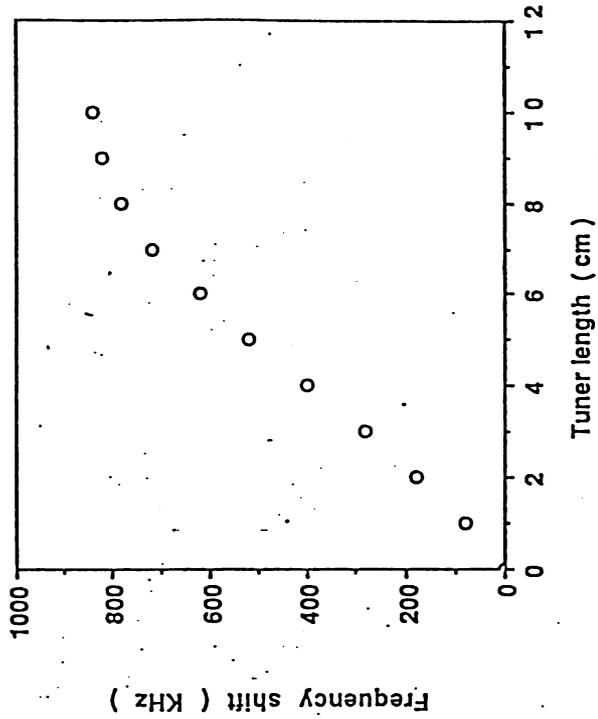
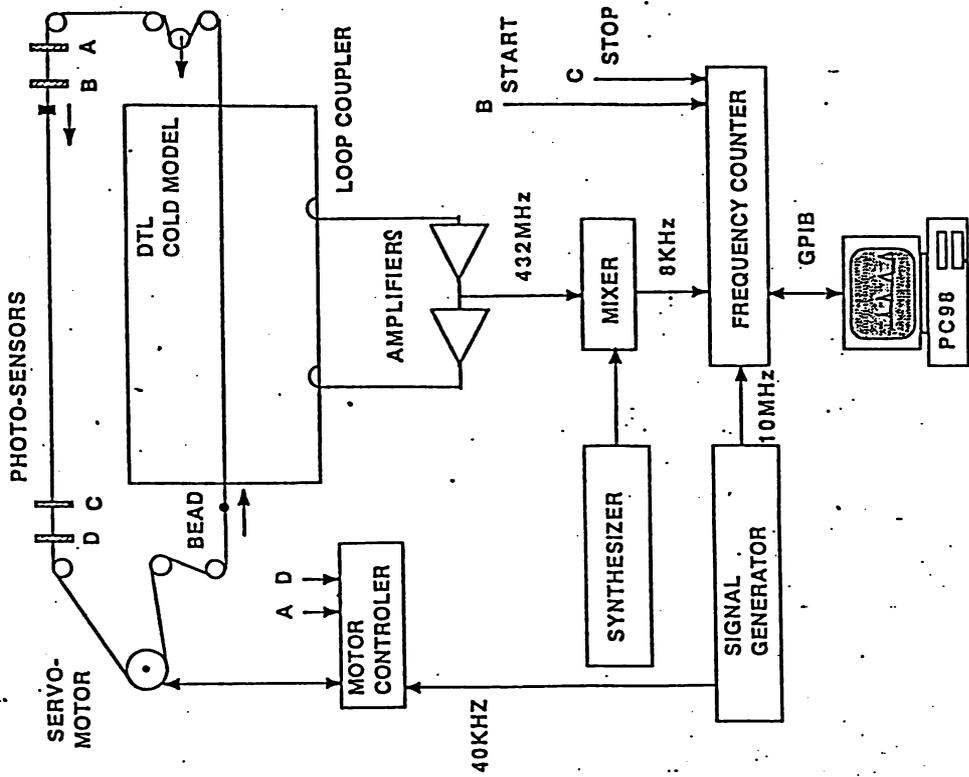


図-8 チューナーによる共振周波数の変化

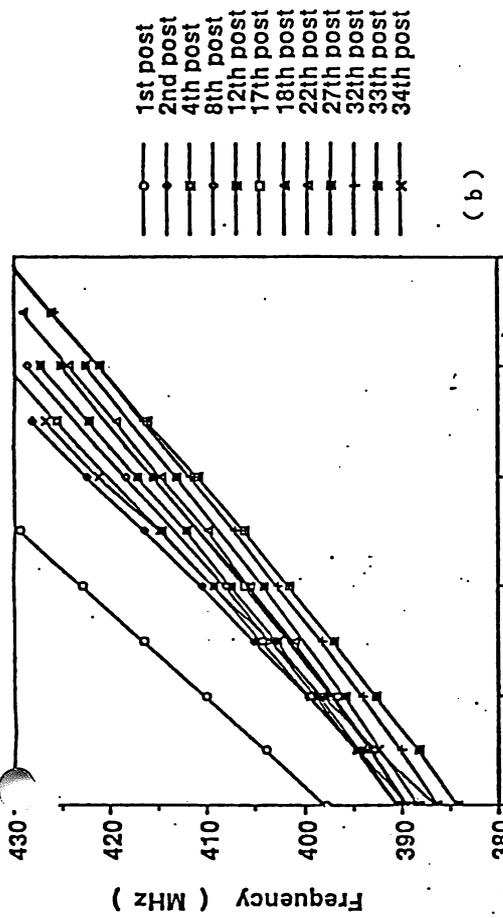
4本のチューナーを同時にタンク内に挿入した場合の TM010 モードの周波数変化。横軸は空腔内に突出したチューナーの長さ。

BLOCK DIAGRAM OF BEAD PERTURBATION MEASUREMENT

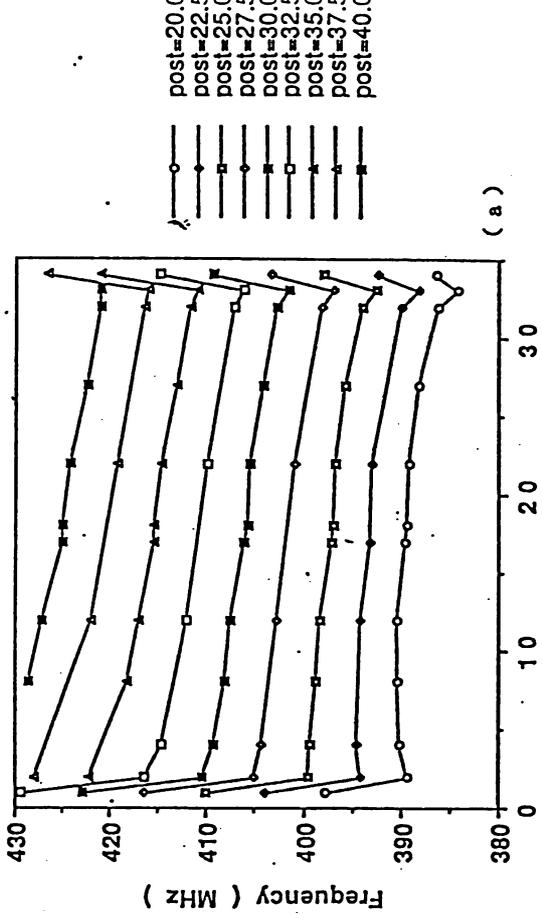


図一10 電場測定システムのブロックダイアグラム

ビーズ摂動法を利用した加速電場測定システムのブロック図。ビーズ駆動系と共振周波数の読み取り系を制御。



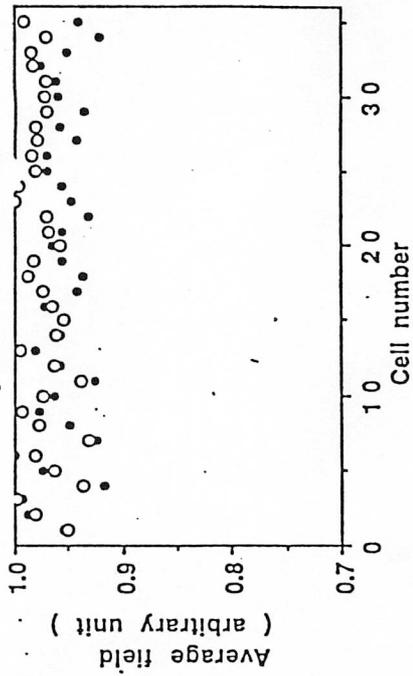
(b)



(a)

図一8 ポストカプラー(P/C)モードの周波数

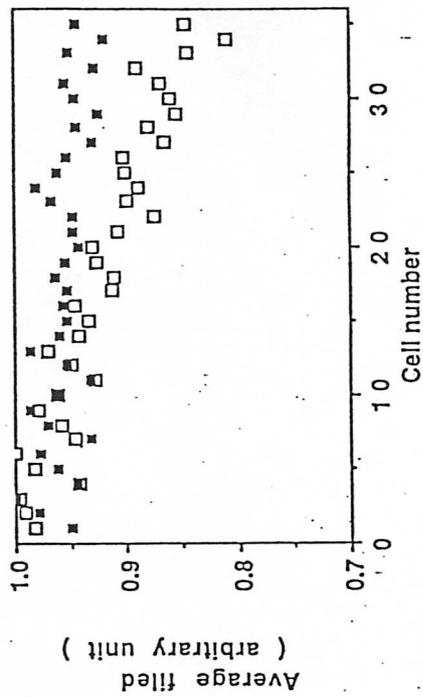
- a) P/Cモード周波数とP/CとD/C間の距離の関係。P/C番号がパラメータ。
- b) P/Cモード周波数とP/C番号の関係。P/C位置がパラメータ。



図一1.1 平均電場分布 (1)

○印：最初の平均電場分布。横軸はセル番号。縦軸は電場強度。最大電場を1に規格化

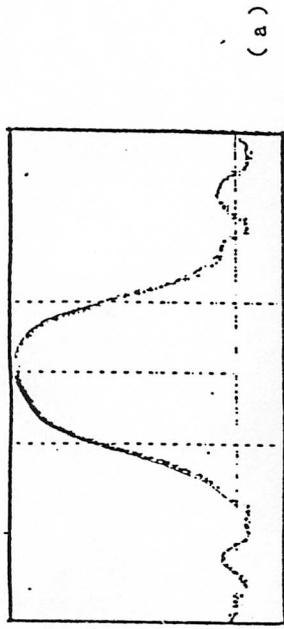
●印：P/Cにより安定化した時の電場分布。図1.2の■印の場合からチャージャーによる振動のみを無くした状態。



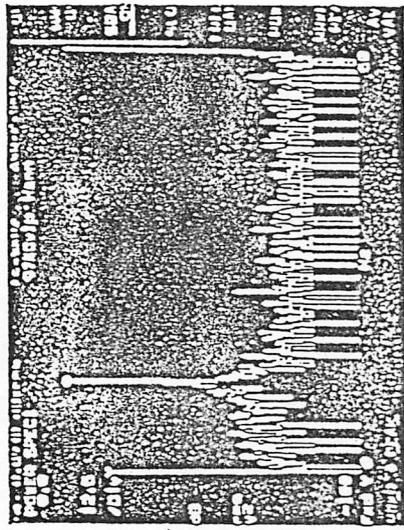
図一1.2 平均電場分布 (2)

□印：チャージャーによる振動を加えられた平均電場分布。

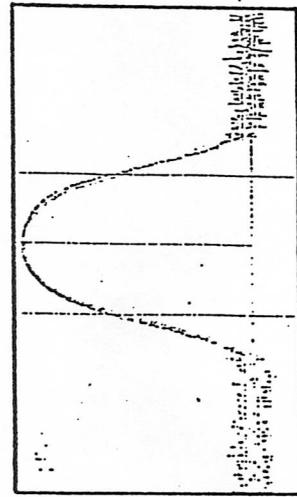
■印：□印の状態にP/Cを挿入し安定化した時の電場分布。



(a)



(b)



(c)

図一1.3 D.T.L.の振動

a) 34番目のセルの電場分布詳細。図の中央が加速ギャップに対応。

両端のベースラインの変動に注目。

b) D.T.L.の機械的な振動のスペクトル。10.6 Hz と 50 Hz にピークが存在。

c) 10.6 Hzの振動を除去した後の電場分布。