

# DTL 電場のチューニング (F15)

2002.12.8 T. Kato

JPL リニアックの DTL の電場と位相のチューニングについてまとめた。DTL を構成するそれぞれのタンクの特徴を利用して最適加速電場のチューニングを行う。

前提とする重要な事：

加速電場振幅と位相の最適点は、

1. ピーク電流（空間電荷効果）に依存しない、
2. 入射ビームの縦の twiss parameters 依存性は小さい、
3. 入射ビームの横の twiss parameters 依存性は小さい、
4. DTL の横収束力依存性は小さい。

こうした事が成り立つとすれば、チューニングは、できるかぎり弱いピーク電流を用いて行う事が望ましい。ビーム負荷効果を小さくし、後続のドリフトスペースでのバンチの広がり方を小さくする為である。

## 1. エネルギー測定

距離  $L$ (m) 離れた 2 点で、運動エネルギー  $K$  (MeV) の粒子の通過時間を測定する。周波数  $f=324\text{MHz}$ 、波長  $\lambda$  (m)として、2 点間の位相差  $\phi$  (rad) により測定を行う場合、粒子速度  $c\beta$  は

$$\beta = \frac{2\pi L}{\lambda\phi}$$

これより、測定のエラー評価をすれば、

$$\frac{\Delta K}{K} = \gamma(\gamma + 1) \left( \left| \frac{\Delta L}{L} \right| + \left| \frac{\Delta\phi}{\phi} \right| \right)$$

ここで次の関係を使った。

$$\frac{\Delta K}{K} = \gamma(\gamma + 1) \frac{\Delta\beta}{\beta}。$$

次節の DTL-1 の場合には、およその数値は以下の如くである。

$\gamma \sim 1$ ,  $L \sim 9.4\text{m}$ ,  $\phi \sim 360 \times 51$  (360 度かける 51 周期),  $\Delta\phi \sim 1\text{deg}$ ,  $\Delta L \sim 0.5\text{mm}$  とすれば、

$$\frac{\Delta L}{L} \approx 5E-5, \quad \frac{\Delta\phi}{\phi} \approx 5E-5, \quad \frac{\Delta K}{K} \approx 2E-4, \quad \Delta K \approx 4\text{keV}。注意すべきは、位相測定の設定エ$$

ラーは絶対値としての誤差である点である。ノイズで決まる位相測定の安定度（エラーバー）は、更に良い値と推定する。

同じ表現であるが、位相エラーの部分だけを距離を使って書き直すと、

$$\frac{\Delta K}{K} = \gamma(\gamma + 1) \frac{\beta\lambda}{L} \frac{\Delta\phi}{2\pi}$$

## 2. DTL-1 のチューニング

主要パラメータ

tank length	9.92017 m
accelerating field	2.5 MV/m
stable phase	-30 deg
input	3 MeV, beta=0.0797
output	19.716 MeV, beta=0.2017
number of cells	76
following drift space	0.18666 m
second DTL length	9.43965 m

チューニングでは、加速電場の振幅と位相を変えて、出力ビームのエネルギーを測定する。図 1-3 にシミュレーションの結果を示す。

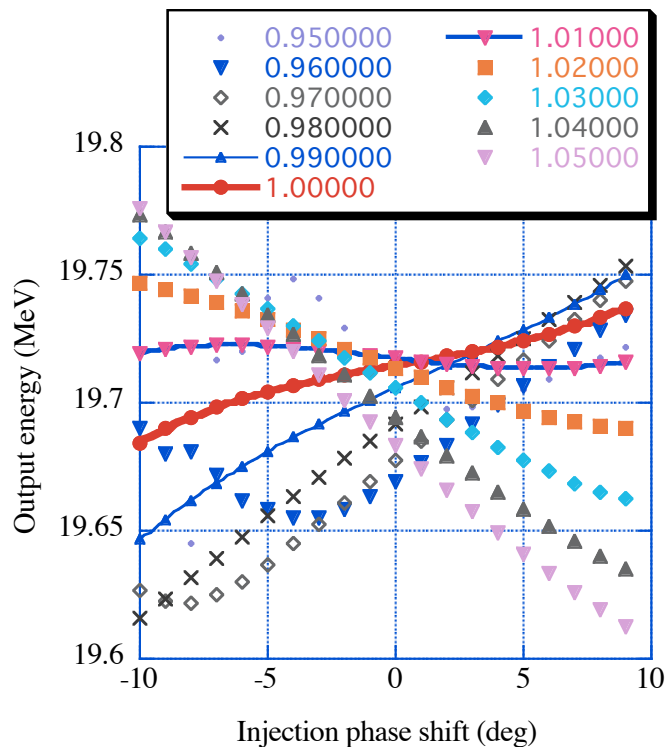


図 1 DTL-1 入射ビームの位相を変えた時の平均出力エネルギー。相対加速電場を 0.95-1.05 の範囲で変えて計算した。

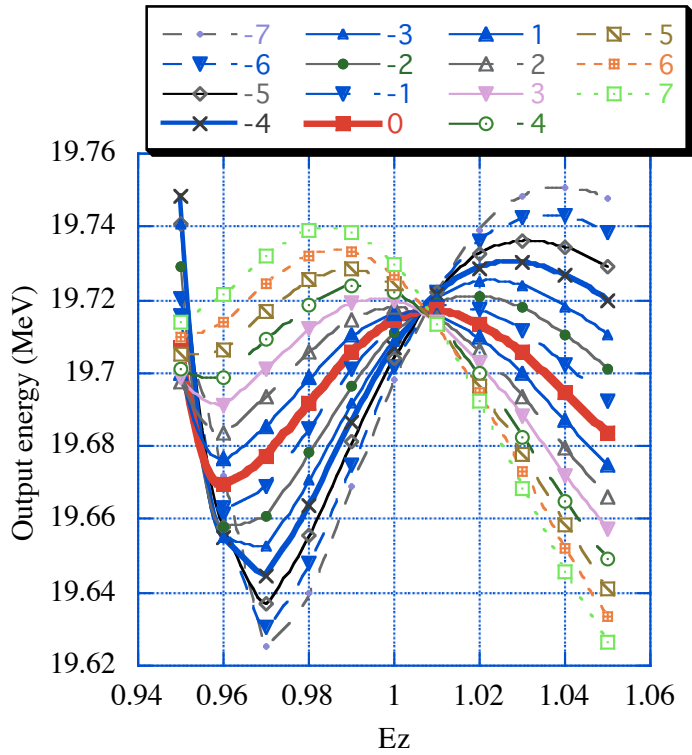


図2 DTL-1 加速電場を変えた時の平均出力エネルギー。入射ビーム位相を-7 度から+7 度の範囲で変えて計算した。

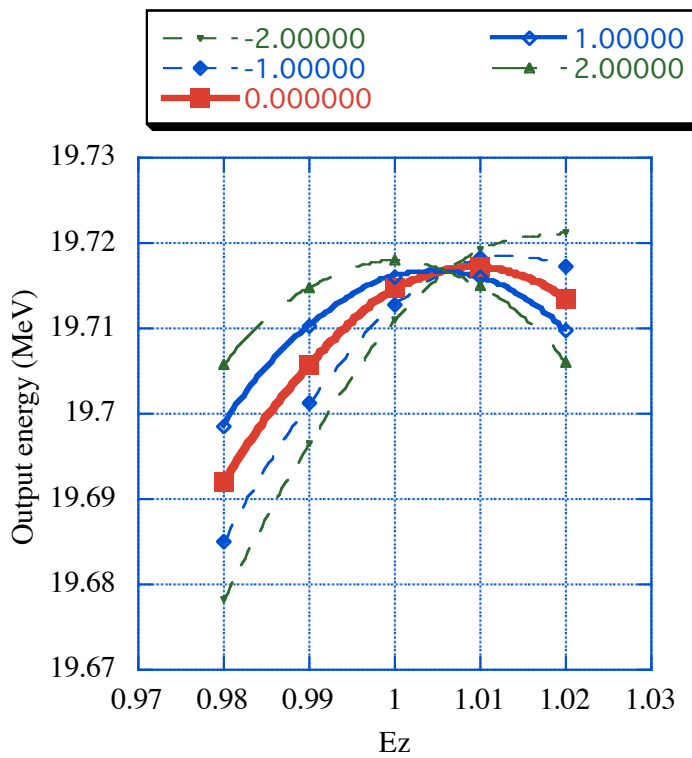


図3 DTL-1. 図2の主要部分を拡大したもの。

これらの結果から以下の事がわかる。

1. 図2, 3において、電場 1.006 付近の交点はひとつの目安となる。
2. 図1において、電場 0.99 と 1.01 では、勾配が逆転する。
3. 測定のエラーバーが数 keV ならば、電場と位相を  $\pm 1\%$ ,  $\pm 1\text{deg}$  の範囲で決める事は比較的容易にできそう。エラーバーが大きい場合は、データを広い範囲でとり、fit 等の手続きにより、最適値を推定する事になる。

### 3. DTL-2 のチューニング

主要パラメータ

tank length	9.43965 m
accelerating field	2.7 MV/m
stable phase	-26 deg
input	19.716 MeV, beta=0.2017
output	36.717 MeV, beta=0.2717
number of cells	43
following drift space	0.25141 m
third DTL length	7.32284 m

図 4-6 にシミュレーション結果を示す。出力エネルギーの変化の振る舞いは DTL-1 とほぼ同様と思われる。

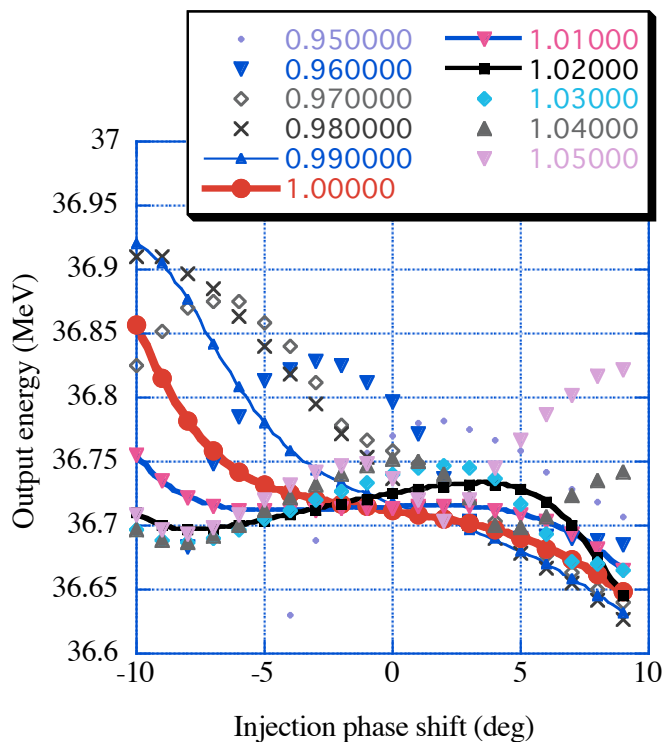


図 4 DTL-2 入射ビームの位相を変えた時の平均出力エネルギー。相対加速電場を 0.95-1.05 の範囲で

変えて計算した。

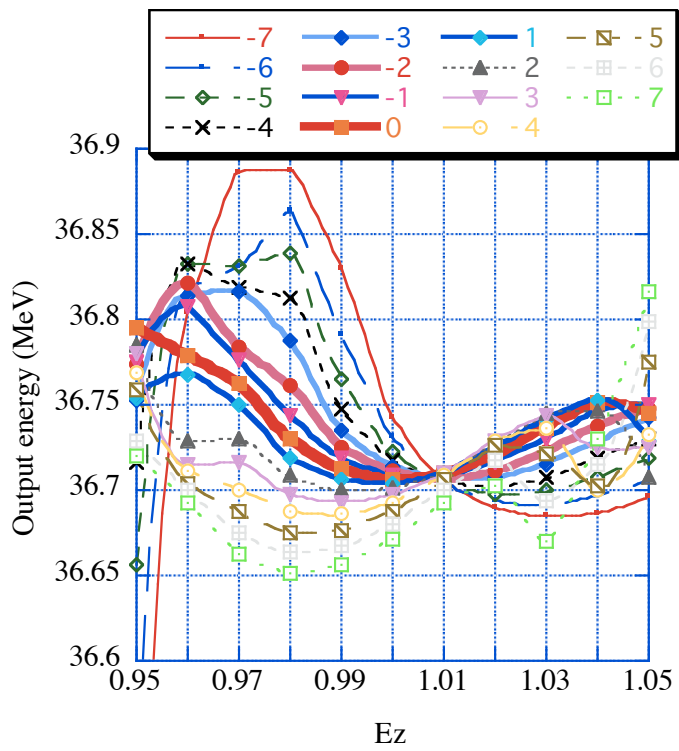


図5 DTL-2 加速電場を変えた時の平均出力エネルギー。入射ビーム位相を-7度から+7度の範囲で変えて計算した。

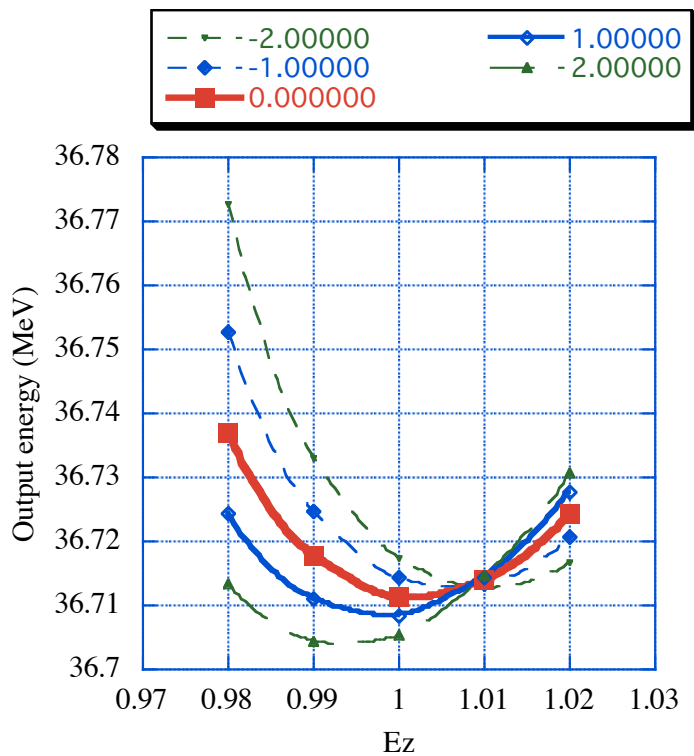


図6 DTL-2. 図5の主要部分を拡大したもの。

#### 4. DTL-3 のチューニング

主要パラメータ

tank length	7.32284 m
accelerating field	2.9 MV/m
stable phase	-26 deg
input	36.717 MeV, beta=0.2717
output	50.078 MeV, beta=0.3141
number of cells	27
following drift space	0.29065 m

図7-9にシミュレーション結果を示す。

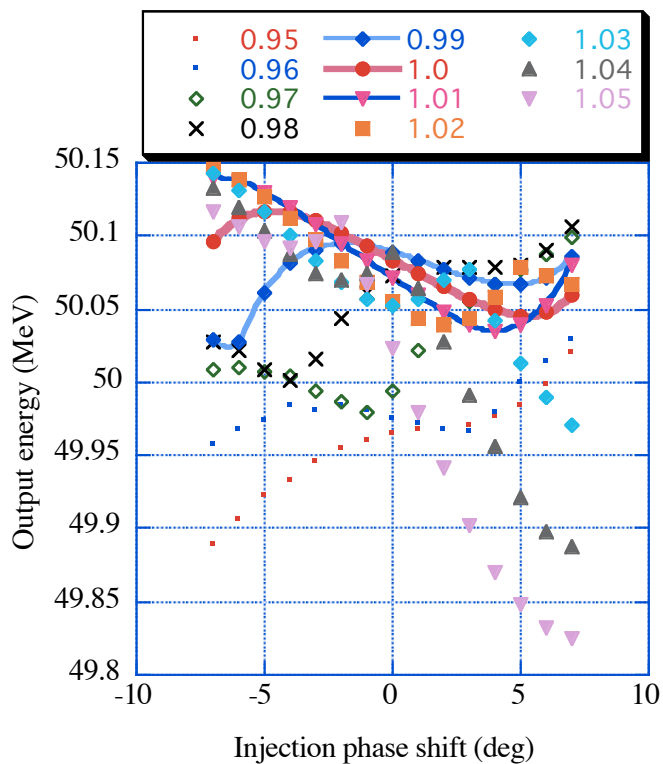


図7 DTL-3 入射ビームの位相を変えた時の平均出力エネルギー。相対加速電場を 0.95-1.05 の範囲で変えて計算した。

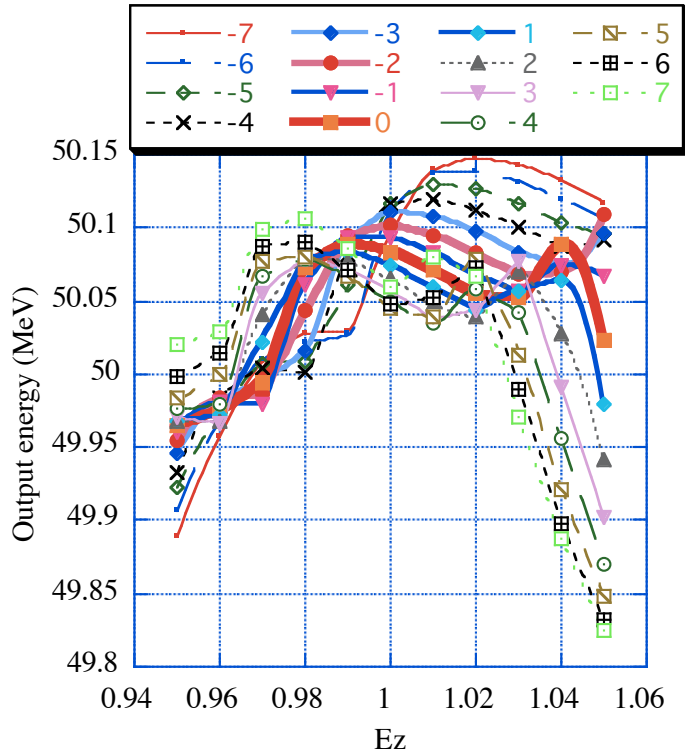


図8 DTL-3 加速電場を変えた時の平均出力エネルギー。入射ビーム位相を-7 度から+7 度の範囲で変えて計算した。

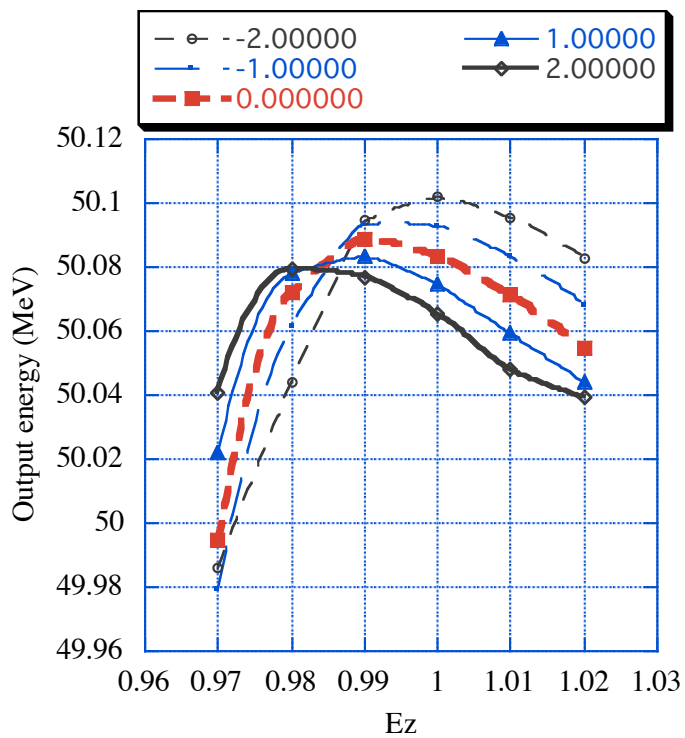


図9 DTL-3. 図8の主要部分を拡大したもの。

## 5. ビームロス

それぞれのチューニングの場合のビーム透過数を図 10-12 に示す。計算では、ビームロスを判定する時にエネルギーについては、条件を入れていない。ポア径で決まる横の条件だけでビームロスは判定している。従って、rf バケットからこぼれた粒子のエネルギーが定常値から大きくはずれるにつれて、横の振動が大きくなり、壁に当たったものと推定される。計算は、関心のあるタンクまで行っているため、ロスはそのタンク内で生じている。

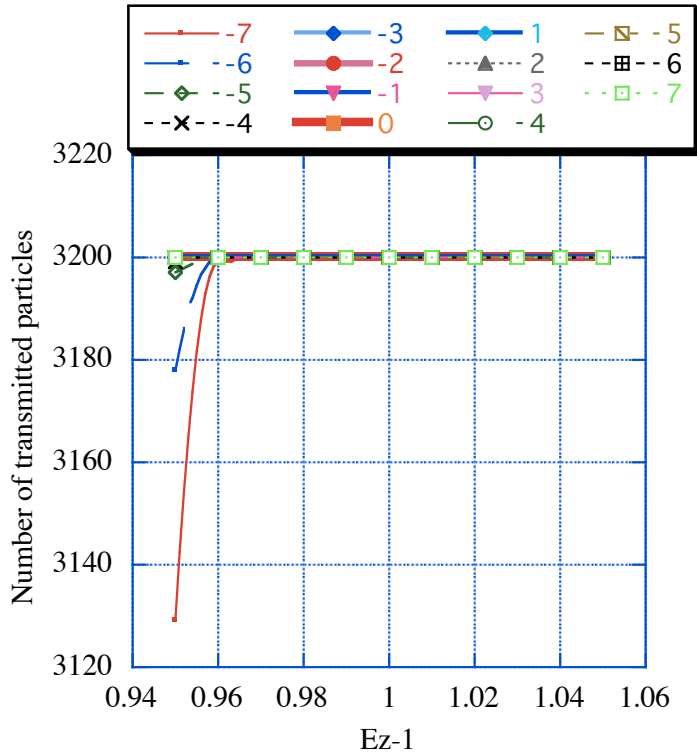


図 10 DTL-1 チューニング時のビーム透過数。



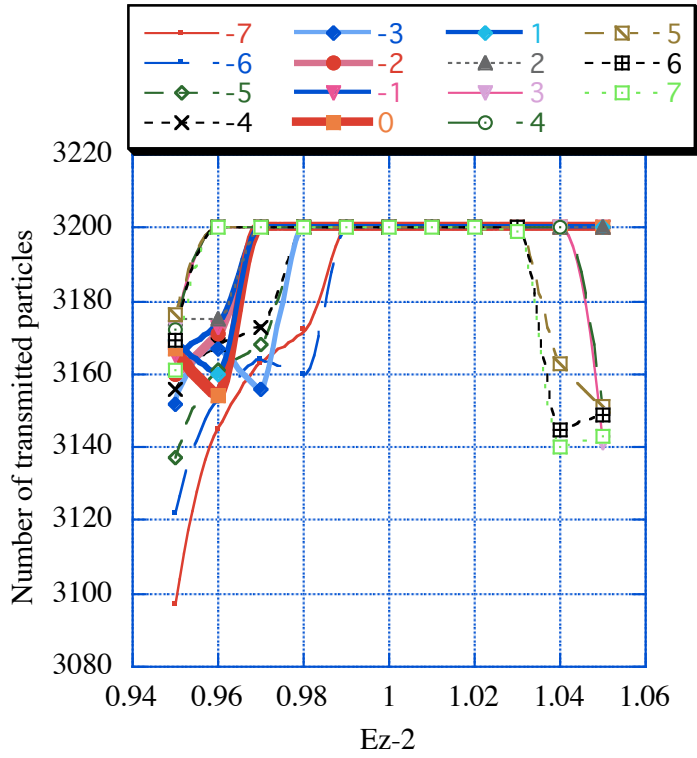


図1 1 DTL-2 チューニング時のビーム透過数。

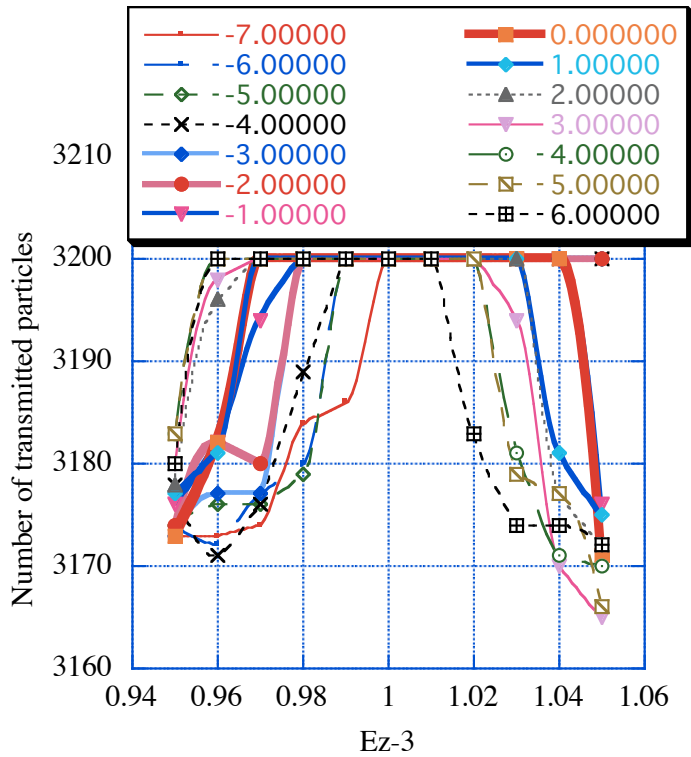


図1 2 DTL-3 チューニング時のビーム透過数。

## 6. 平均エネルギーの振動

図13に加速電場を変化させた時の、DTL-1内の平均エネルギーの変化の様子を示す。この場合には、振動の周波数が変化するので、タンク出口の振動の位相が変化する結果となり、結果として、測定する平均エネルギーが変化する。

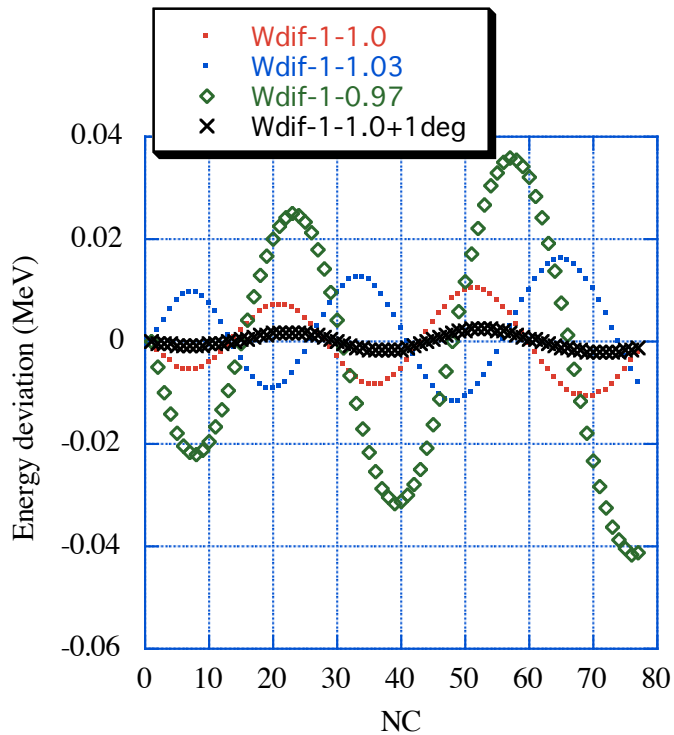


図13 DTL-1 加速電場を変えたときの、平均エネルギーの振動の様子。

図14に入射位相を変えたときの、平均エネルギーの振る舞いを示す。この場合には、振動の周波数は同じなので、タンク出口における振動の位相は同じである。従って、たまたまその位相がゼロとなるような加速電場の場合には、出力エネルギーは一定となる。入射ビームのエネルギーが変われば、出力エネルギーも変化する。

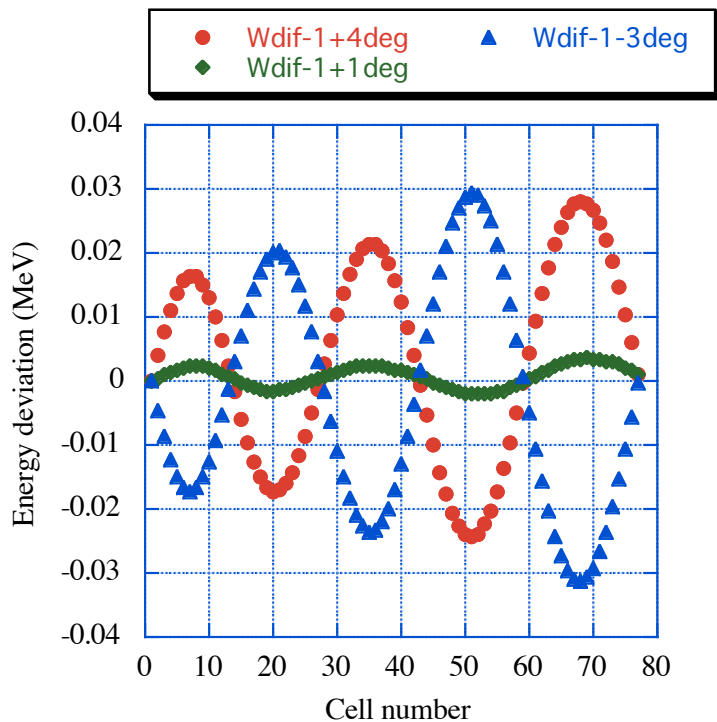


図1 4 DTL-1 入射位相を変えたときの、平均エネルギーの振動の様子。加速電場は 1.006。

### 7. 2種類の縦のチューニング

ここまでは、ビームの平均エネルギーのチューニングを考えた。エネルギー振動という言葉で、エネルギーの幅の振動について述べている場合も多く、DTL の場合にも、さらにエネルギーの幅のチューニングが必要である。入射ビームの縦の twiss parameters がかなり大きく変化して場合と正常の場合のエネルギー幅振動の計算結果を図1 5に示す。図1 6に位相幅振動の様子を示す。図1 7に平均エネルギーの振動を示す。これらより、平均エネルギーのチューニングの時には、縦のマッチングはあまり考慮しなくてもよい事がわかる。エネルギー幅を測る手段が直線リニアックの範囲にはないので、位相幅（バンチ長さ）を目安とする事を別ノートにて提案している。エネルギー幅は RCS 入射ビームの重要な特性のひとつである。

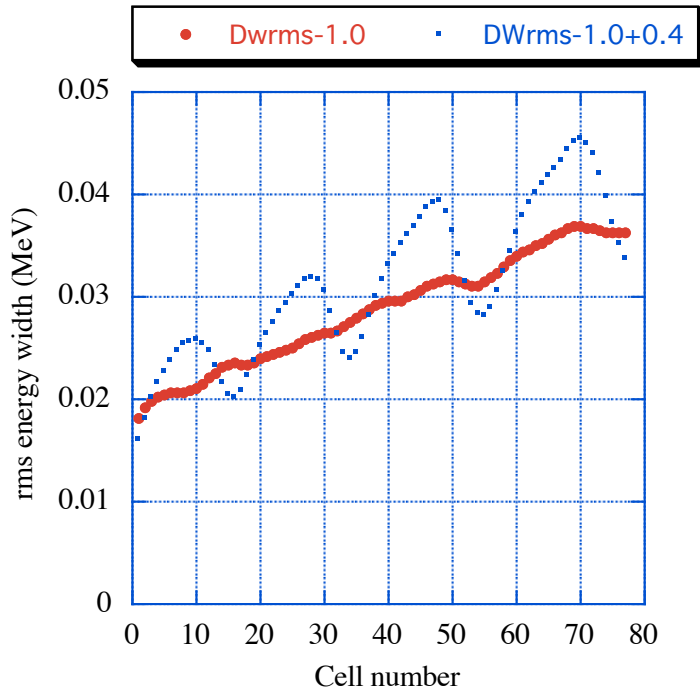


図15 エネルギー幅の振動。入射ビームがマッチしている場合( $\alpha z = -0.1, \beta z = 443$  deg/MeV)と大きなミスマッチがある場合( $\alpha z = -0.5, \beta z = 619$ )。

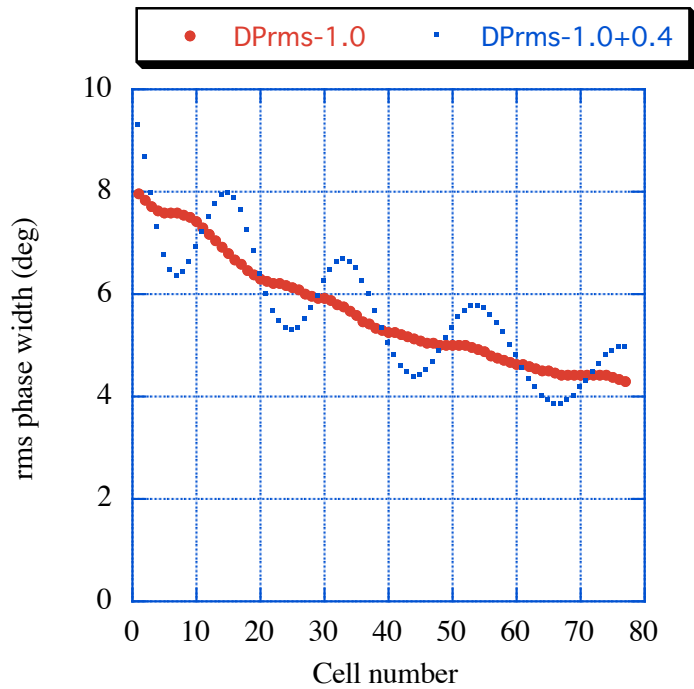


図16 位相幅の振動。入射ビームがマッチしている場合( $\alpha z = -0.1, \beta z = 443$  deg/MeV)と大きなミスマッチがある場合( $\alpha z = -0.5, \beta z = 619$ )。

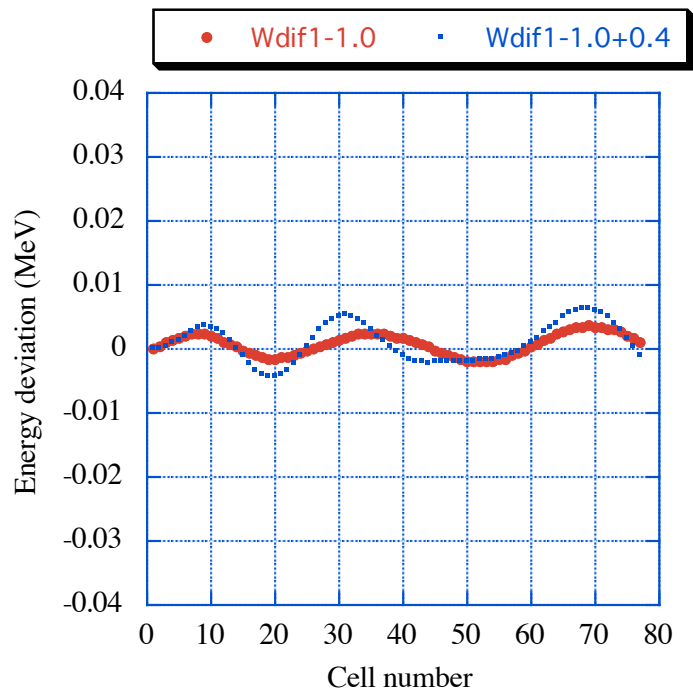


図17 平均エネルギーの振動。入射ビームがマッチしている場合( $\alpha z = -0.1, \beta z = 443$  deg/MeV)と大きなミスマッチがある場合( $\alpha z = -0.5, \beta z = 619$ )。