

PLA - 89 - 10

7 / 24 / 89

1 GeV リニアック検討資料

1 GeV LINAC DESIGN NOTE

題目 (TITLE) 432 MHz DTL の 4極磁石のアラインメント精度

著者 (AUTHOR) 加藤隆夫

概要 (ABSTRACT)

4 極磁石の中心がビーム軸からずれている場合のビームの振る舞いをビームシミュレーションにより計算した。その結果、安全係数を 2.67 倍に設定すれば、セル毎のズレのピーク許容値は $60\mu\text{m}$ となり、タンク毎のピーク許容値は $65\mu\text{m}$ となった。

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

432 MHz DTL の 4 極磁石のアラインメント精度

890724 加藤隆夫

4 極磁石の中心がビーム軸からずれている場合のビームの振る舞いをビームシミュレーションにより計算した。その結果、安全係数を 2.67 倍に設定すれば、セル毎のズレのピーク許容値は $60\mu\text{m}$ となり、タンク毎のピーク許容値は $65\mu\text{m}$ となった。

1. 計算の概要

DTL のパラメーター

セル数	342	
タンク数	13	
Q-mag gradient	175 T/m	cell 1 - 9
	167.5	cell 10 - 19
	160	cell 20 - 55
	150	cell 56 - 342

勾配を変化させた理由は、SmCo 磁石を高エネルギー部で使用したい事、しかし、入射部の勾配 (175 T/m) は実現出来ない事、磁石の長さは変えにくい事等による。磁石にはランダムに 2 種類の変位を与える。磁石毎に与える変位 (セルエラー) と、タンクアラインメントを考えて、タンクの中で一定の変位をタンク毎に与える変位 (タンクエラー) の 2 種類である。変位のピーク値は、RMS 変位の 2-3 倍の大きさとなる。タンク数は 13 なので、タンク毎の変位は充分ランダムとなっていない。従って、得られた数字がセルとタンクで異なっている。ここではピーク変位と RMS 変位の関係は以下のようになっている。

セルエラー	ピーク	$0.1\text{ mm} = 39\mu\text{m RMS}$
タンクエラー	ピーク	$0.1\text{ mm} = 60\mu\text{m RMS}$

シミュレーションは 2 種類行なった。第 1 は、安定粒子 ($x=x'=y=y'=0, \Delta W=\Delta\phi=0$) の軌道変位を求める事、第 2 は、あるアクセプタンスを持つビームの透過率を調べる事である。この場合、RFQ ビームを想定してエネルギーと位相の幅を与えている。

2. ビームのプロファイル

入り口と出口のパラメーターを Table 1 にまとめた。

Table 1 Beam parameters at the entrance and the exit.

energy	$\beta\gamma$	βm	r for $\epsilon_n=2.5\pi\text{mm mrad}$
3 MeV	0.0801	0.206 m	2.54 mm
148	0.584	1.703	2.70

Table 1 からわかるように、ビーム半径はタンクの中でほぼ一定になっている。規格化エミッタンスを $\epsilon_n = \beta\gamma E$ とすれば、ビーム半径は

$$r = \sqrt{E \beta m} = \sqrt{\epsilon_n \beta m / \beta\gamma}$$

と書けるので、 $\beta m \propto \beta$ と変化させれば $r = \text{一定}$ となる事がわかる。磁石の勾配の変化の選び方により、 βm の変化の仕方を選択出来る。Fig.1 に β function を示す。

BETA FUNCTION

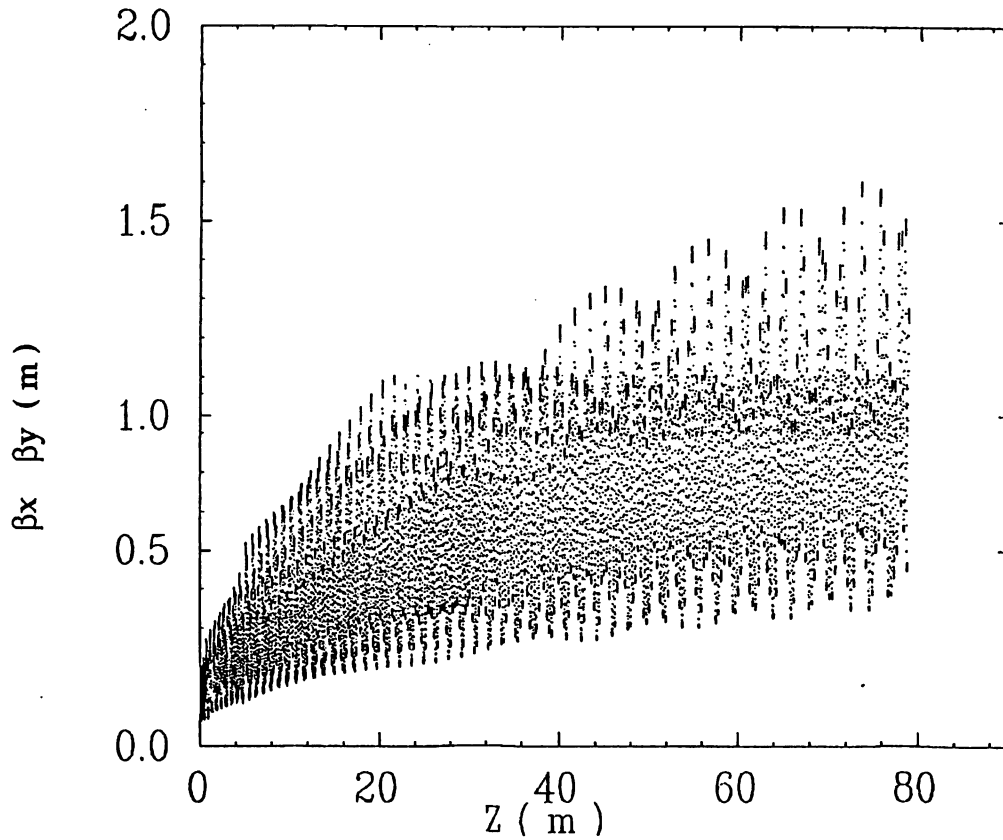


Fig. 1 β function of DTL.

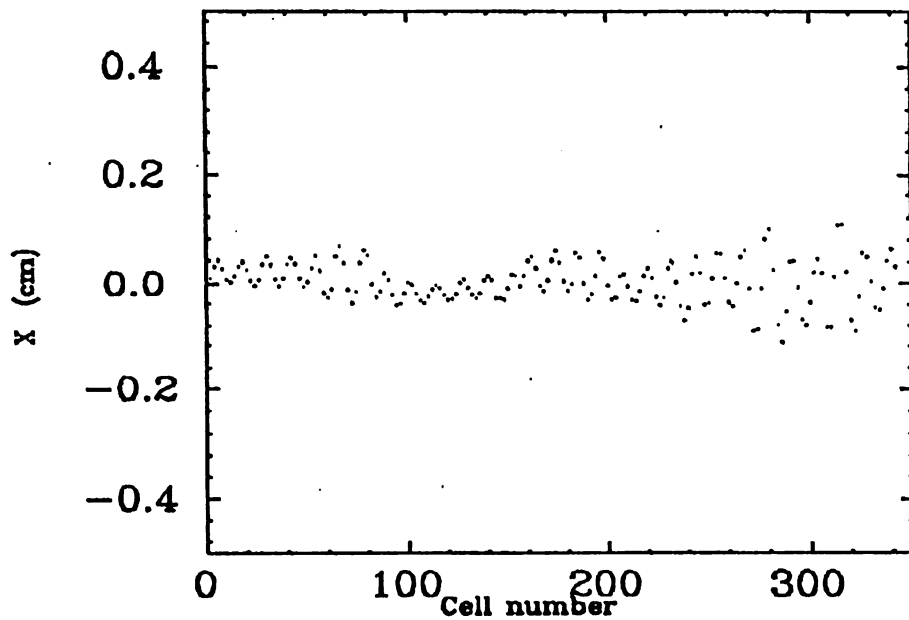


Fig. 2 RMSセルエラー 39 μm , タンクエラー 120 μm の場合の軌道の変位。

Fig.2 に入射時に $x=x'=y=y'=0$ の粒子の軌道を示す。RMSセルエラー $39\ \mu\text{m}$,タンクエラー $120\ \mu\text{m}$ を想定している。エラーを導入した場合にエミッタンスの増加がみられない事から、ここで考えているエラーの効果は、

1. ビーム軌道を変位させる、
2. その結果、壁に衝突して粒子が失われる、

の2点に分けて考える事が出来る。各種のエラーの場合の中心軌道の最大変位を Table 2 に示す。

Table 2 4極磁石のずれ (RMS) による軌道の変位

タンクエラー	0	60	120	180	240 μm	
セルエラー μm						
0	0	0.6	1.2	1.6	2.1	mm
39	0.6	0.8	1.2	1.6	2.2	
78	1.1	1.3	1.5	1.8	2.3	
117	1.7	1.8	2.0	2.3	2.6	
156	2.2					

アラインメント精度のクライテリオンの設定

1. 最大ビーム半径 = $0.75 \times \text{bore radius}$
半径が大きくなると、磁石の非線形性、高周波電場の特性劣化などがあるため、通常よく使われる値を指針とする。
2. 安全係数 = 2
放射線に弱い永久磁石を使用している事と、タンクの放射化を避ける意味で安全係数をおおきくとする。

bore radius = 5 mm だから許容半径は 3.75 mm となる。従って中心軌道に許される変位は 3.75 - 2.7 ~ 1 mm となる。Table 2 から変位 1 mm を与えるエラーを読み取って Fig.3 に示す。これからセルエラーのRMS最大値は $70\ \mu\text{m}$,タンクエラーのRMS最大値は $100\ \mu\text{m}$ となる。これらの数字は最大変位で表示すると両方とも 0.18 mm 程度に

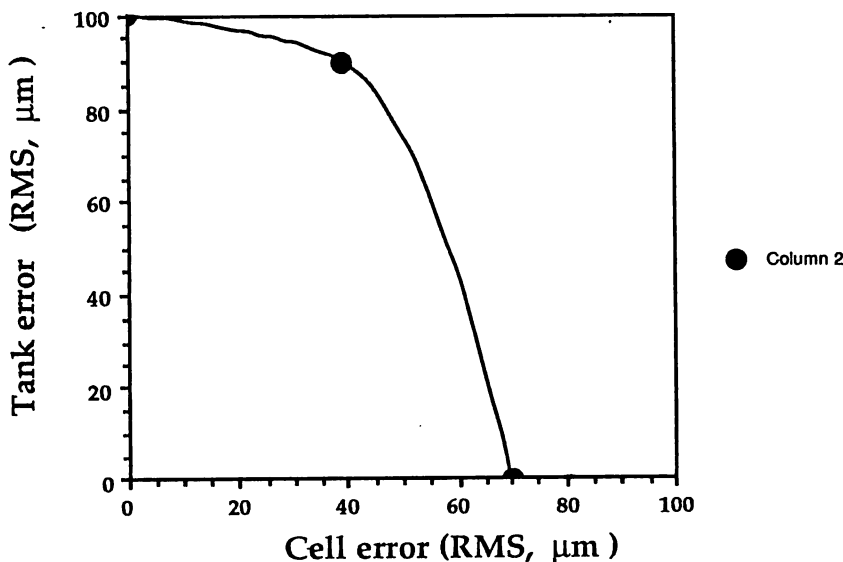


Fig.3 軌道変位 1 mm を与えるエラーの組み合わせ。

なる。

実際にはセルエラーとタンクエラーは共存するので、ここで RMS タンクエラーを 80 μm (最大値で 0.13 mm) と仮定すると、RMS セルエラーは 47 μm (最大値で 0.12 mm) となる。次にクライテリオンに従って、安全係数 2 で割ると

	RMS	MAX	
セルエラー	23	60	μm
タンクエラー	40	65	

となる。ここでの総合安全係数は $2 \times 1/0.75 = 2.67$ である。

クライテリオン以外の問題が 2 点ある。ビームのエミッタンスは実際には幾らか、タンクとセルのエラー配分をどう決めるのが最善か。これらにより得られる結論が変わってくる事に注意する。

3. エミッタンスを持つビームの透過率

DTL の 100% アクセプタンスは $13.3\pi\text{mm mrad}$ である。考えているエラーによりエミッタンスの増加は起こらない事がシミュレーションで示されたので、ビームエミッタンスがアクセプタンスの 20% と 40% の場合について透過率を求める計算を行った。前項で考えた $2.5\pi\text{mm mrad}$ のビームはほぼ 20% のビームに相当する。

Fig. 4,5 に計算結果を示す。横軸は RMS タンクエラーである。図の中で、0.2A Cell 39 は、エミッタンスが 20% のビームでセルエラーの RMS 値が 39 μm の場合を示している。

Data from "QmagErrorffcetDTL"

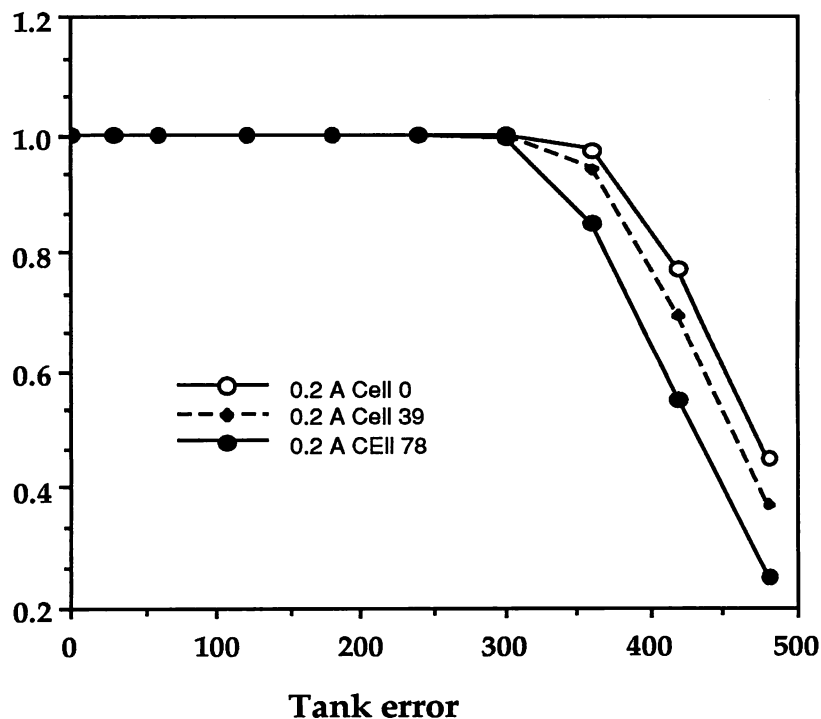


Fig. 4 ビームエミッタンスがアクセプタンスの 20% 場合 ($\epsilon_n = 2.65\pi\text{mm mrad}$) の透過率のエラー依存性。

Data from "QmagErrorffcetDTL"

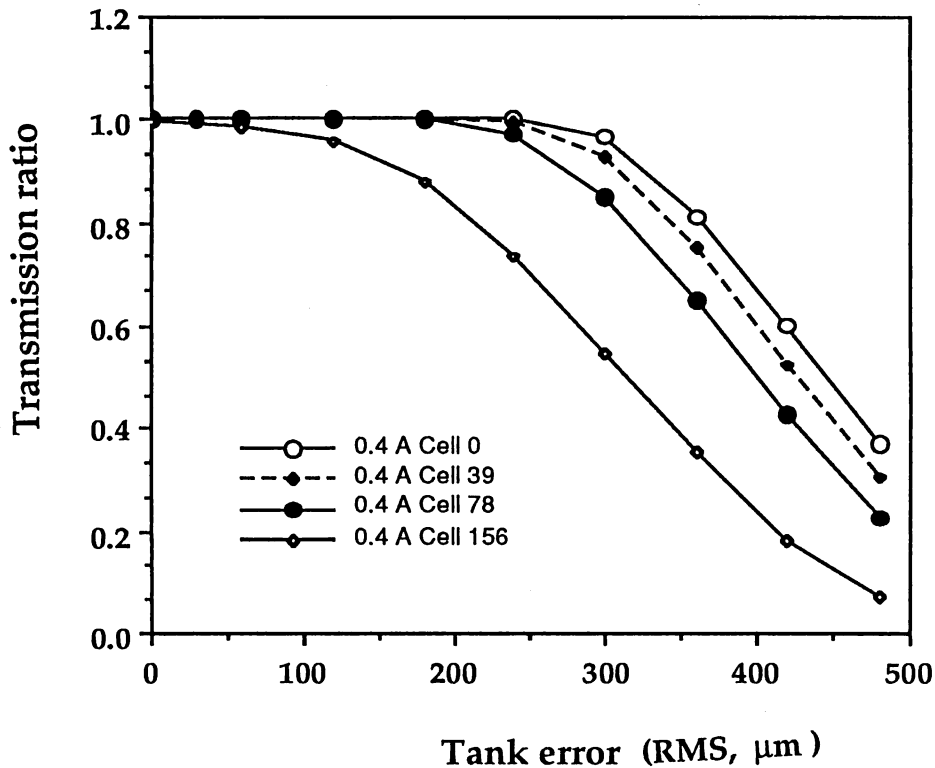


Fig.5 ビームエミッタンスがアクセプタンスの40% 場合($\epsilon_n = 4.3 \pi \text{mm mrad}$)の透過率のエラー 依存性。

Fig. 4 より、 $\epsilon_n = 2.1 \pi \text{mm mrad}$ (20% アクセプタンス) の時は、タンクエラー=(RMS 240 μm , ピーク 400 μm)、セルエラー=(RMS 78 μm , ピーク 200 μm) 以下ではビームロスは見られない。

Fig. 5より、 $\epsilon_n = 4.3 \pi \text{mm mrad}$ (40% アクセプタンス) の時は、タンクエラー=(RMS 180 μm , ピーク 300 μm)、セルエラー=(RMS 78 μm , ピーク 200 μm) 以下ではビームロスは見られない。タンクエラーが無くても、セルエラー=(RMS 156 μm , ピーク 400 μm)以上ではビームロスが見られる事がわかる。

以上、シミュレーションにより、ビームロスがあるかないかの視点からは次の結論がえられる。(安全係数=1)

2種類のエラーが単独で存在する場合

40% ビームの場合

タンクエラーの最大値は RMS 234 μm , ピーク 390 μm

セルエラーの最大値は RMS 152 μm , ピーク 390 μm

20% ビームの場合

タンクエラーの最大値は RMS 312 μm , ピーク 520 μm

セルエラーの最大値は RMS 203 μm , ピーク 520 μm

2種類のエラーが共存する場合

ここでは、セルエラーが (RMS 78 μm , ピーク 200 μm) の場合を考えると

40% ビームの場合

タンクエラーの最大値は RMS 180 μm , ピーク 300 μm

セルエラーの最大値は RMS 78 μm , ピーク 200 μm

20% ビームの場合

タンクエラーの最大値は RMS 240 μm , ピーク 400 μm

セルエラーの最大値は RMS 78 μm , ピーク 200 μm

以上より、要求精度のおよその目安は算出出来たと思われる。安全係数のとりかたをどうするかにより、結論が大きく変わる。これは、bore radius に余裕がない為である。エネルギーが高くなって、高周波電場から受ける制限がなくなる部分の bore radius を大きくする方法を採用すれば、磁石に要求される精度を軽減できる。高エネルギー部では、ドリフトチューブの長さが長くなるので、磁石を長くする事が可能である。この場合、必要な磁場勾配も下げる事が出来て都合が良い。

まとめ

1. $\epsilon_n = 2.5 \pi \text{mm mrad}$, 安全係数=2.67, ビーム半径増加= 1mm

タンクピークエラー 65 μm

セルピークエラー 60 μm

2. $\epsilon_n = 4.3 \pi \text{mm mrad}$, 安全係数=1, ビームロスが無い

a) タンク又はセルエラーが単独に 390 μm

b) タンクピークエラー 300 μm , 且つセルピークエラー 200 μm

3. $\epsilon_n = 2.1 \pi \text{mm mrad}$, 安全係数=1, ビームロスが無い

a) タンク又はセルエラーが単独に 520 μm

b) タンクピークエラー 400 μm , 且つセルピークエラー 200 μm