

PLA / 95 / 11
95 / 12 / 25

1 GeV リニアック検討資料

1 GeV LINAC DESIGN NOTE

題目 (TITLE) 200 MeV 線型加速器の基礎設計

著者 (AUTHOR) 加藤隆夫

概要 (ABSTRACT)

200 MeV 線型加速器の基礎設計を行う時の基本的考察を行った。

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

200 MeV 陽子線形加速器の基礎設計

高エネルギー物理学研究所 加藤隆夫

第一章 200 MeV - DTL の概要

要求仕様

1. peak current 30 mA
2. pulse length 400 μ sec
3. repetition 25 Hz
4. rf max. duty factor 3%

Frequency 324 MHz

DTL injection energy 3 MeV

DTL output energy 200 MeV

1) 加速電場

距離の制約：将来の拡張を考えて、150 m 程度に納める。距離の制約から、加速電場が殆ど決まってしまう。高周波電源、冷却、空洞、総合コスト等の殆どの観点からみて、望ましい電場に比べてやや高めの加速電場を設定する事になるだろう。加速電場と加速管の長さとの関係を図1に示す。なお kilpatrick field (KL) は、17.8 MV/m (324 MHz)、20.1 (432 MHz)、23.8 (648 MHz) であり、KL=1 程度を設定する。

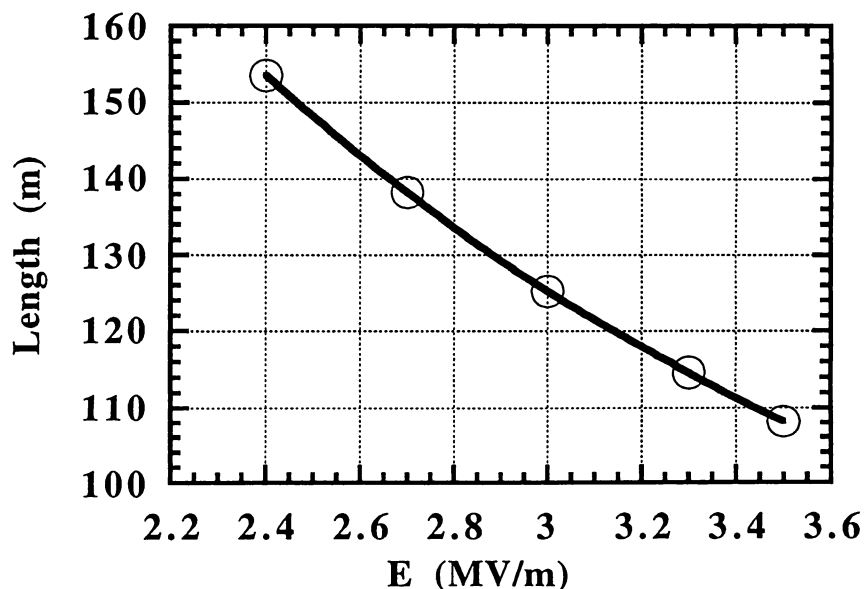


図1 200 MeV DTL の加速電場と長さの関係

2) SDTLの採用

DTLの製作及び運転時の問題点は、ドリフトチューブの中の電磁石に起因する事が多い。従って、収束用磁石をドリフトチューブの外へ出す構造を期待する事は自然のなりゆきと言える。その構造をSDTL (separated-type DTL) と呼ぶ(参考文献1)。SDTLには、製作上の簡略化など多くの優れた点があるが、新たにビームダイナミックスの問題も付随する。簡単にSDTLの特徴をまとめる。

長所

- 1) 収束用磁石がタンクの外へ出て、個数も減る事により、製作(ドリフトチューブの製作、冷却、製作精度、設置精度)が技術的に容易となり、経費も激減する。
- 2) ドリフトチューブの形状を自由に設定出るのでシャントインピーダンスが大幅に増加する(セル計算で40%以上)。
- 3) メンテナンスが容易となる。

短所

- 1) ドリフトスペースが導入されるので、これが縦方向の運動に悪影響をもたらす。
- 2) 横方収束周期が長くなる。
- 3) 全体の長さが増える。
- 4) 高周波系の部品が増え、複雑となる。
- 5) DTLとSDTLの接続部分が必要となる。

短所はあるが、それを上回る長所がSDTLには認められる。従って、出きるだけ低エネルギーからSDTLを採用する事が望ましいが、エネルギーが低い程、短所の効果が目立ってくるので、遷移エネルギーの決定には十分な検討が必要となる。その検討項目は以下のものがかんがえられる。

- 1) ビームダイナミックス
- 2) 高周波システム
- 3) 運転時の問題点(チューニング法)

(2)と(3)は密接に関連している。ユニットタンクの長さは、高周波電力の励振電力を決める。加速電場の選定とも関連するが、ビームローディングとの比も決まる。一つのクライストロンから分岐して給電される場合には、各ユニットタンクの励振電力を同じに選んでおく事が望ましい。ブリッジカップラーを使って結合する場合には、別の考え方が必要となろう。

以上より、低いエネルギーからSDTLを使う事が望ましいが、高周波システムの複雑化とコスト及びドリフトスペースの増大を考えると、短いユニットタンクは望ましくない。反面、長いユニットタンクは横方向収束系の周期の増大をもたらす。従って、第一には、ビームダイナミックスが許容出来るかを調べ、次にそれがどのような高周波システムとチューニング方法を意味しているかという手順で考える事になろう。

第二章 SDTL

SDTL は次のような長所と短所を併せ持つ。

長所

- 1) 四極磁石が外へ出る事
製作法の簡単化、アラインメント精度を緩く出来る、故障時交換
- 2) シャントインピーダンスの増大
RF 電力が少なくすむ
- 3) コスト低下

短所

- 1) 収束周期の増大による横アクセプタンスの低下
- 2) 縦エミッタンスの増大
- 3) 高周波機器の個数増加

具体的に検討してみよう。

1) シャントインピーダンス

SDTL はドリフトチューブ内に磁石を含まないので、ドリフトチューブ外径を小さくしてシャントインピーダンスをあげる事ができる。同じ理由により、ビーム孔半径を大きくして横方向のアクセプタンスを大きくでき、これは収束周期の増加によるアクセプタンスの減少を相殺する。ビームの広がりがおおきくなるので、空間電荷効果の観点からも望ましい。但し、この場合には、ビーム孔に浸入する電場の量が増え、transit time factor が大きく変わるので、ZTT で考えると、最適な形状が決まり、むやみにビーム孔半径を大きく出来るわけではない。SUPERFISH で計算するシャントインピーダンスには、普通は端板による損失の効果を含ませない。しかし、SDTL でセル数が小さい場合には、この効果が効いて来る。

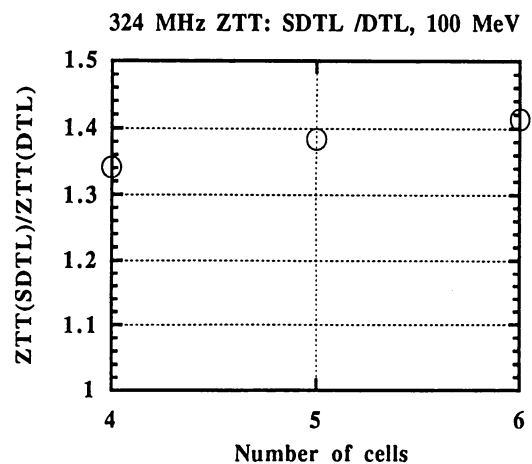
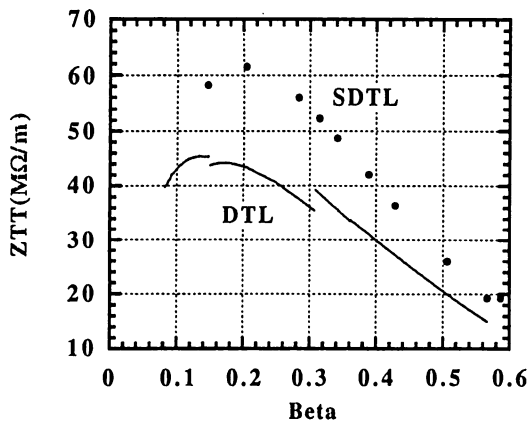


図2 S D T L と D T L の Z T T の比較 図3 端板の効果を取り入れた Z T T の比較

図2には、計算で使用した ZTT を示す。これらの値は最終的なものではない。特に、SDTL の値は空洞直径を変える等の最適化を行っていない。図3は、端板の効果を考えた時の SDTL シャントインピーダンスと DTL シャントインピーダンスの比である。これより40%近いシャントインピーダンスの増加が期待できる。但し、ここで比較している対象の DTL は、中に四極電磁石を含むかなり直径の大きいドリフトチューブを想定した DTL である。

2) ビームダイナミクスー1

第一にシステム全体を SDTL にする場合を考えてみよう。この場合、さすがに入射エネルギー 3 MeV は低すぎるので、計算は 5.2 MeV と 6 MeV 入射で行った。Table 1 に 5 MeV 入射 SDTL (ビーム孔半径 15 mm、第一ユニットタンクセル数 4 で 40 cm、第一ドリフトスペース長さ 52 cm) のアクセプタンスを示す。Table 2 にはすべて DTL タンクの場合を示す (ビーム孔半径 7.4 mm)。SDTL のアクセプタンスは DTL より小さいが、小さすぎる値ではない。

図4にコード PRODTL で計算した 200 MeV-SDTL の出力エミッタンス、図5には PARMILA で計算した DTL の出力エミッタンスを示す。Table 3 に出力エミッタンスを示す。入射エミッタンスの大きさは同じである。PARMILA-like の空間電荷効果の計算では、使用可能なメッシュ数とメッシュの大きさによって結果が大きく変化する。ビームの大きさが変化する場合には、きめ細かな対応が求められるであろう。

次にコード LINSAC で殆ど同様の計算をした結果を図6と7に示す。'殆ど同様'の意味は、LINSAC で SDTL をシミュレートする場合には、タンクの中のドリフトスペースの効果だけを計算する結果を意味している。現在 (95年8月時点) のコードでは、4極磁石はすべてのドリフトチューブに挿入されていると設定して計算を行うからである。

Table 1 Acceptances of 5.2 MeV-injection SDTL

ex(rms)	ex(90)	ey(rms)	ey(90)	ez(rms)	ez(90)
mm-mrad				MeV-deg	
5.42	19.6	3.74	13.3	2.32	9.32

Table 2 Acceptances of 5.2 MeV-injection DTL

ex(rms)	ex(90)	ey(rms)	ey(90)	ez(rms)	ez(90)
mm-mrad				MeV-deg	
8.01	28.9	8.04	29.3	3.37	12.4

Table 3 Output emittances of 5.2 MeV-injection SDTL by PRODTL and DTL by PARMILA.

	ex(rms)	ex(90)	ey(rms)	ey(90)	ez(rms)	ez(90)
	mm-mrad				MeV-deg	
SDTL out	0.346	1.76	0.479	2.70	0.296	1.52
DTL out	0.218	0.940	0.197	0.855	0.182	0.778
input	0.186	0.798	0.188	0.793	0.133	0.563

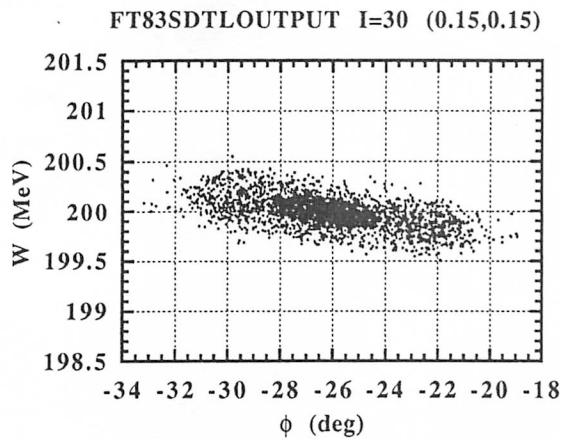


図4 PRODTL で計算した 200 MeV-SDTL の出力エミッタンス

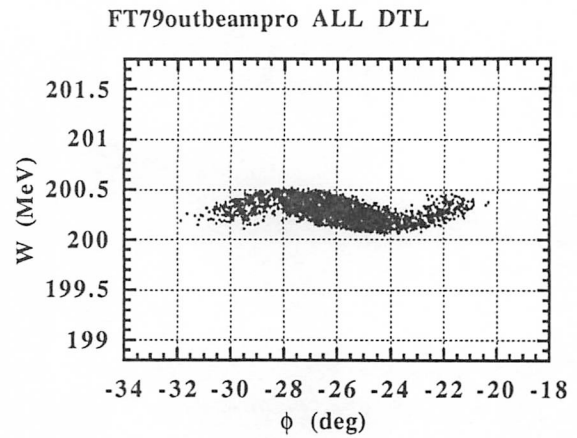


図5 PARMILA で計算した 200 MeV-DTL の出力エミッタンス

縦と横のカップリングを含む厳密な比較を、純正なSDTLとの間で行う事は難しいが、ドリフトスペースの効果の検討は充分可能と思われる。ここでの計算はエネルギー 150 MeV である点に注意する。図8には電流をゼロに設定した時の結果を示す。この結果より、ドリフトスペースと空間電荷効果が作用して、図6の結果が得られている事がわかる。PARMILAの計算では、空間電荷効果の入れ方と使い方にまだ問題点が残し、充分安定な結果に達していないと思われる。Table 4にLINSAC計算によるエミッタンスをまとめた。LINSACの結果によれば、ドリフトスペースの存在により、縦と横のエミッタンス増大が、DTLの場合に比べてかなり大きい事がわかる。そして、例えば、3倍周波数のCCLの高エネルギー加速管に150 MeVで接続しようとしても、かなり厳しくなる事が予想される。従って、すべてをSDTL構造にする事はビームダイナミクスの観点から見て、望ましくない。高周波システム及びチューニング法からみても、望ましい方向でない事は自明である。

そこで、次の節では、DTLからSDTLへの転換エネルギーを上げていくとどのような結果となるかを考える。

Table 4 Output emittances of 5.2 MeV-injection SDTL and DTL by LINSAC code.

	ex(rms)	ex(90)	ey(rms)	ey(90)	ez(rms)	ez(90)
	mm-mrad				MeV-deg	
SDTL out	0.453	2.30	0.463	2.31	0.537	3.21
DTL out	0.400	1.94	0.391	1.84	0.340	1.45
input	0.186	0.795	0.188	0.791	0.133	0.566

3) ビームダイナミクスー2

入射部から、ある程度の長さを持つ DTL タンクを設置し、その後、SDTL に転換する事を考える。Table 5 にその構造を示す。計算は LINSAC を使って行い、出力エミッタンスを図 9-11 に示し、結果を Table 6 にまとめた。SDTL に見られたドリフトスペースの効果は DTL タンクの導入により、減少する事がわかる。DTL タンクを三本にした時に、縦のエミッタンスの増加が見られる。これは、更に検討する必要がある。シミュレーションの各ケースの SDTL タンクのパラメーターを Table 7 にまとめた。

Table 5 Details of DTL-tanks + SDTL structure.

name	Number of DTL tank	transition energy	Number of cells in DTL tanks	Number of cells in drift space
MOD-1	1	11.44	28	4
MOD-2	2	11.44, 26.74	28, 46	4, 3
MOD-3	3	11.44, 26.74, 45.38	28, 46, 42	4, 3, 2

Table 6 Output emittances of 5.2 MeV-injection SDTL, DTL and modified SDTL by LINSAC code.

	ex(rms) mm-mrad	ex(90)	ey(rms)	ey(90)	ez(rms) MeV-deg	ez(90)	
SDTL out	0.453	2.30	0.463	2.31	0.537	3.21	all SDTL structure
MOD-1	0.417	2.05	0.362	1.77	0.362	1.64	
MOD-2	0.454	2.29	0.395	2.00	0.347	1.58	
MOD-2	0.411	2.25	0.42	2.13	0.353	1.55	(9600 particles)
MOD-3	0.398	1.98	0.377	1.78	0.407	2.17	
DTL out	0.398	1.91	0.389	1.83	0.276	1.22	all DTL structure
input	0.186	0.795	0.188	0.791	0.133	0.566	injection beam

Table 7 Parameters of injection part of SDTL tank for simulation 2.

Name	Length cm	Cell	Prf kW	Pbeam kW	Ptot kW	drift-sapce cm
All SDTL	40.1	4	47	23	70	51.9
	42.9	4	50	25	75	55.1
	45.8	4	53	28	81	58.4
	48.6	4	56	30	86	49.4
11.435 MeV in						
MOD-1	58.7	4	68	38	106	60.3
	61.8	4	71	40	111	63.3
	64.8	4	75	42	117	49.7
	67.8	4	79	44	123	52.0
26.739 MeV in						
MOD-2	133	6	158	87	245	68.2
	140	6	167	91	257	71.4
	146	6	175	94	269	49.7
	152	6	184	98	282	51.8
45.375 MeV in						
MOD-3	170	6	209	107	316	57.5
	176	6	218	110	327	59.4
	181	6	227	112	339	61.4
	187	6	235	115	350	63.3

FT64DPDW.TRANS.OUT 5MeVin ALLSDTL

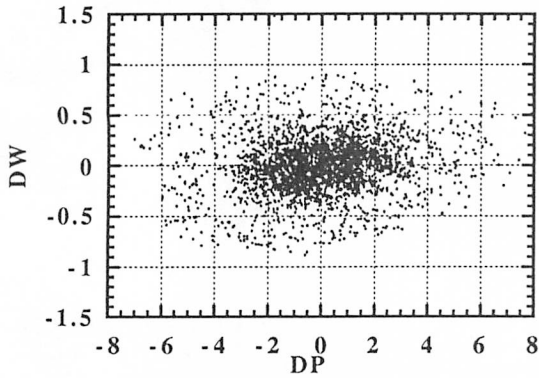


図6 LINSAC で計算した SDTL の出力エミッタンス

FT64DPDW.TRANS.OUT 5MeV in no dr

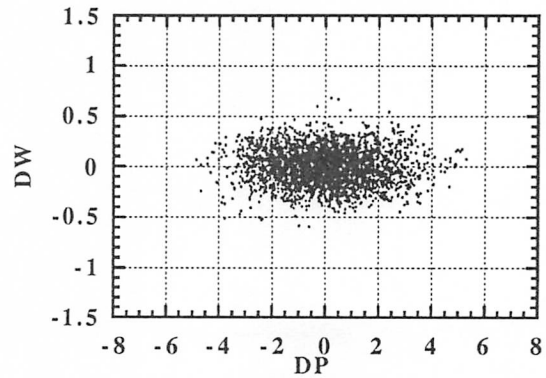


図7 LINSAC で計算した DTL の出力エミッタンス

FT64DPDW.TRANS.OUT5MeVindr5&I=0

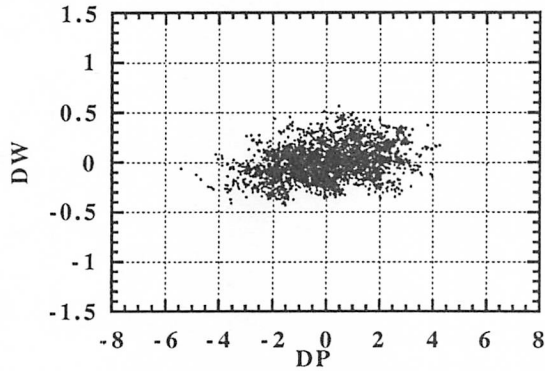


図8 LINSAC で計算した SDTL の出力エミッタンス、I=0。

FT64DPDW.TRANS.OUT DTLTANK-1

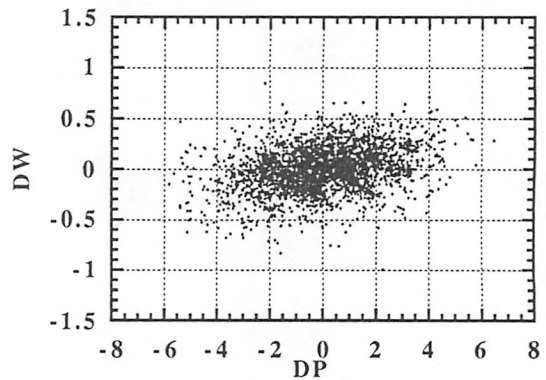


図9 LINSAC で計算した DTL tank が1本の場合 (MOD-1) の出力エミッタンス。

FT64DPDW.TRANS.OUT

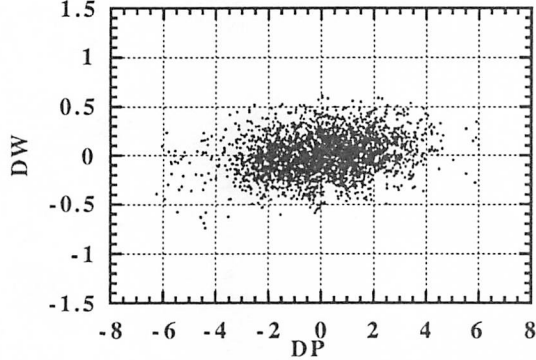


図10 LINSAC で計算した DTL tank が2本の場合 (MOD-2) の出力エミッタンス。

FT64DPDW.TRANS.OUT DTL tank-3

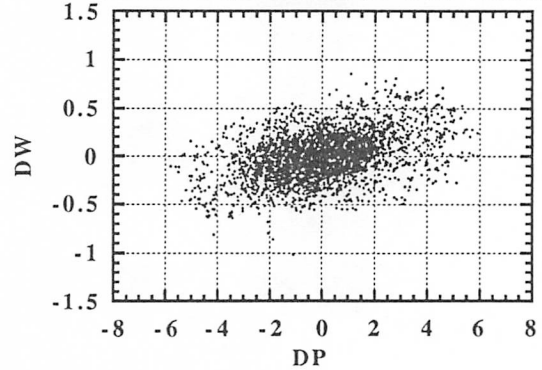


図11 LINSAC で計算した DTL tank が3本の場合 (MOD-3) の出力エミッタンス。

4) ビームダイナミクスー3

前節の LINSAC コードは、ドリフトチューブの中に収束磁石が入っている構造の計算を行っている。これでは、横の収束が現実とは異なるので、これから結論を出すには少し無理がある。そこで、コードを修正して、SDTL の構造を、より正しく反映させて計算できるようにした。併せて、SUPERFISH による形状計算を行い、使用するセルパラメータも SDTL 用に修正した。Table 7 に低エネルギー領域に使用する 4 本の DTL タンクのパラメータを示す。DTL から SDTL への転換エネルギーを決める為に、DTL タンク + SDTL の構造について計算を行う。転換エネルギーは次のように設定した。

- 1) TYPE-1 32.154 MeV
- 2) TYPE-2 47.274
- 3) TYPE-3 62.118

Table 8 Parameters of DTL part of 200 MeV linac.

No	ENERGY	CELL	LENGTH	Pc	Pb	Ptot	DRIFT
	3 MeV		cm	MW	MW	MW	cm
1	16.353	69	843.787	0.827	0.401	1.228	68.2
2	32.154	45	917.051	1.039	0.474	1.513	70.9
3	47.274	33	857.888	1.025	0.454	1.479	84.9
4	62.118	27	816.131	1.165	0.445	1.610	

Table 9 Parameters of combined 200 MeV linac.

	TYPE-1	TYPE-2	TYPE-3	All DTL	
DTL energy	3-32	3-47	3-62	3-200	MeV
DTL tank number	2	3	4	18	
DTL length	18.29	27.58	36.59	143.58	m
DTL cell	114	147	174	395	
DTL Pc	1.87	2.89	4.06	18.66	MW
DTL Pbeam	0.88	1.33	1.77	5.92	MW
DTL total power	2.74	4.22	5.83	24.58	MW
SDTL tank No.	46	42	38		
SDTL length	135.43	128.58	116.89		m
SDTL cell	243	224	192		
SDTL Pc	14.58	13.93	12.67		MW
SDTL Pbeam	5.04	4.58	4.14		MW
SDTL total power	19.62	18.51	16.81		MW
Total length	153.72	156.16	153.48	143.58	m
Total rf power	22.36	22.73	22.64	24.58	MW

加速電場は 2.5-2.8 MV/m を設定した。Table 8 に DTL 部分のパラメーターを示し、Table 9 にリニアック全体のパラメーターを示す。

まず基本となる標準のシミュレーションとして、タンクとタンク間のドリフトスペースがない理想的な all DTL のシミュレーション結果を図 12-14 に示す。

次に、all DTL のタンク間に長さ 50-100 cm 程度のドリフトスペースを入れた場合の結果を図 15-17 に示す。

次に DTL + SDTL の構造にした時の計算結果を図 18-26 に示す。DTL から SDTL の変換は、横のマッチングだけを行っている。

以上の計算結果を Table 10 にまとめた。

DTL から SDTL への変換部には、ドリフトスペースが必要となり、それは、縦エミッタンスの増加をもたらす。図 27 に結果を示す。

ここまでの結果は、SDTL のユニットタンク間のドリフトスペースを 0.5-1 m に設定した結果であり、ここには改善の余地がある。第一には、モニターとの兼ね合いであるが、全ての場所にこれだけのスペースは必要ではない事、第二には、全般に更に間隔を狭められる可能性が高い事による。

総合的に判断すれば、324 MHz-47 MeV-DTL + 200 MeV SDTL が選定される。

Table 10 Output emittances of 3 MeV-injection DTL-SDTL by LINSAC code.

	ex(rms)	ex(90)	ey(rms)	ey(90)	ez(rms)	ez(90)	
	mm-mrad				Normalized		
Type-1	0.596	2.61	0.667	3.17	0.96	4.24	
Type-2	0.561	2.50	0.677	3.06	1.21	6.33	
Type3	0.564	2.47	0.586	2.74	1.03	5.14	
DTL out	0.439	2.02	0.429	2.04	0.824	3.49	all DTL no drift
DTL out	0.417	1.89	0.409	1.81	1.05	4.75	all DTL drift
input	0.186	0.795	0.188	0.791	0.133	0.566	injection beam
all SDTL	0.563	2.50	0.632	2.55	0.99	5.38	648 MHz, 2βλ

図1 2 all DTL ドリフトス
ペースなし、x-xd output

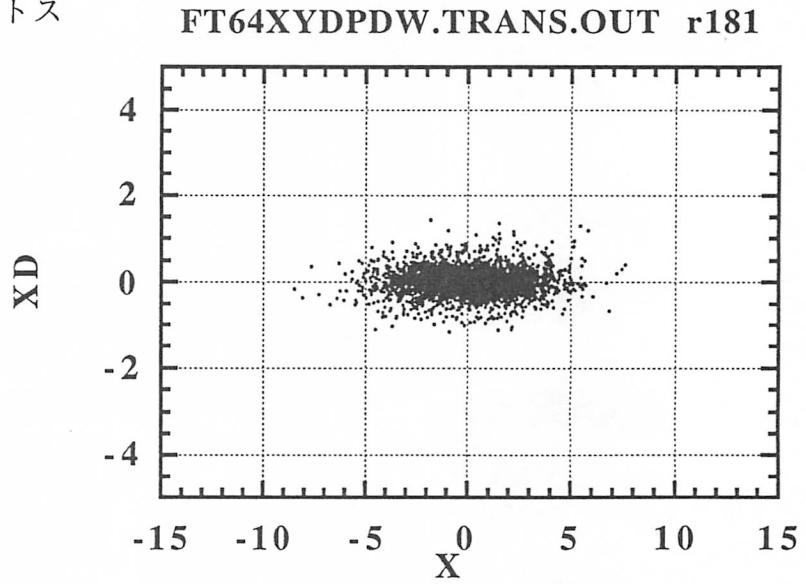


図1 3 all DTL ドリフトス
ペースなし、y-yd output

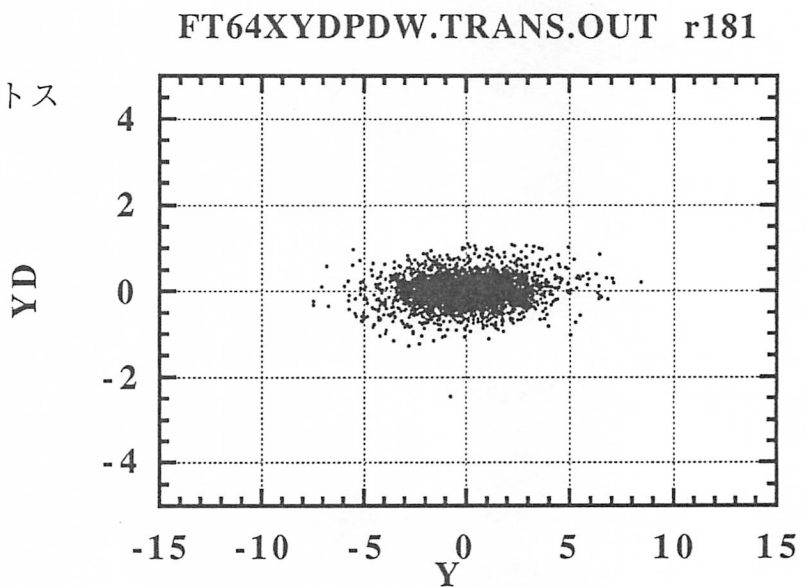


図1 4 all DTL ドリフトス
ペースなし、phi-w output

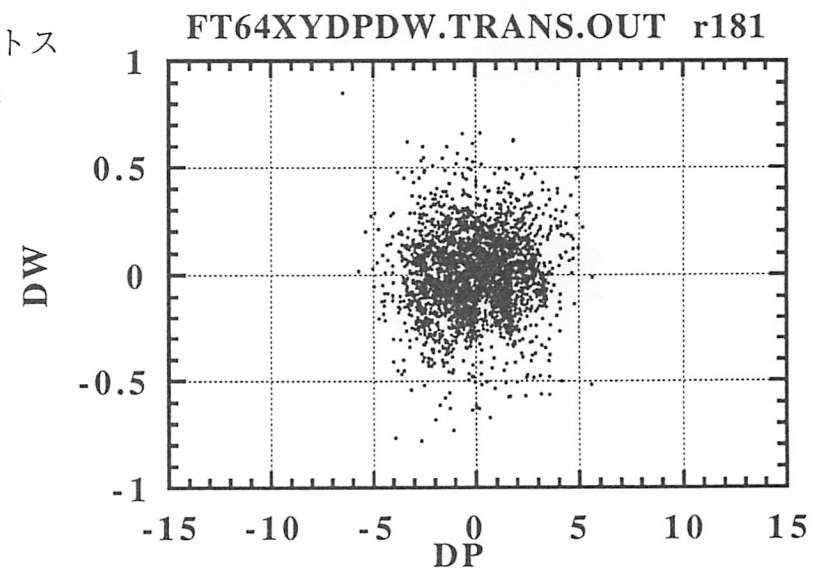


図15 all DTL ドリフトス
ペースあり、x-xd output

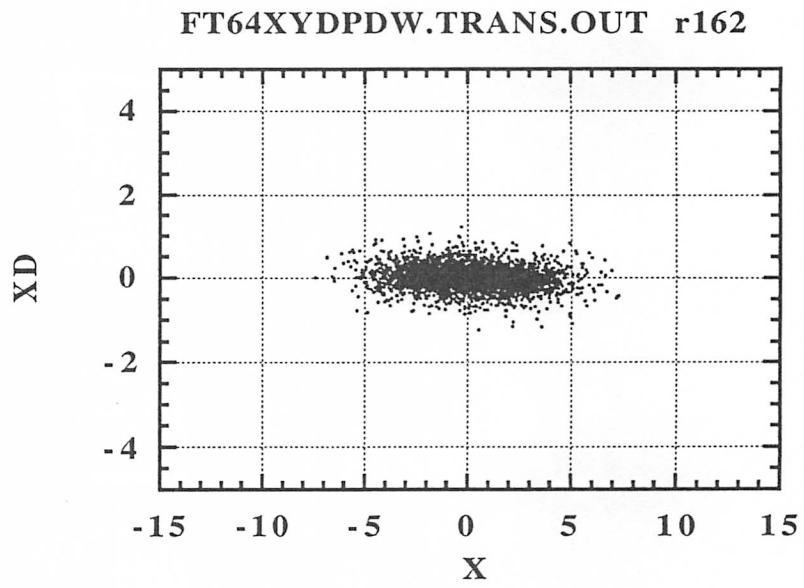


図16 all DTL ドリフトス
ペースあり、y-yd output

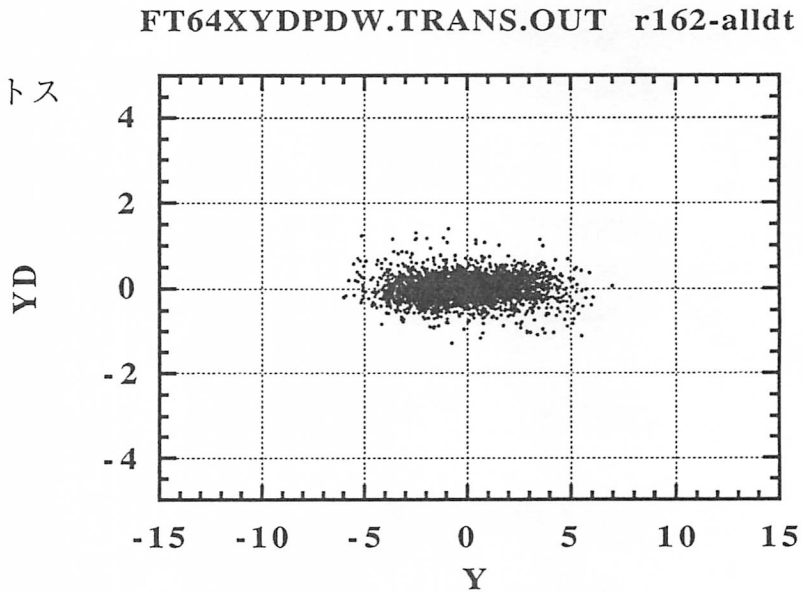


図17 all DTL ドリフトス
ペースあり、phi-w output

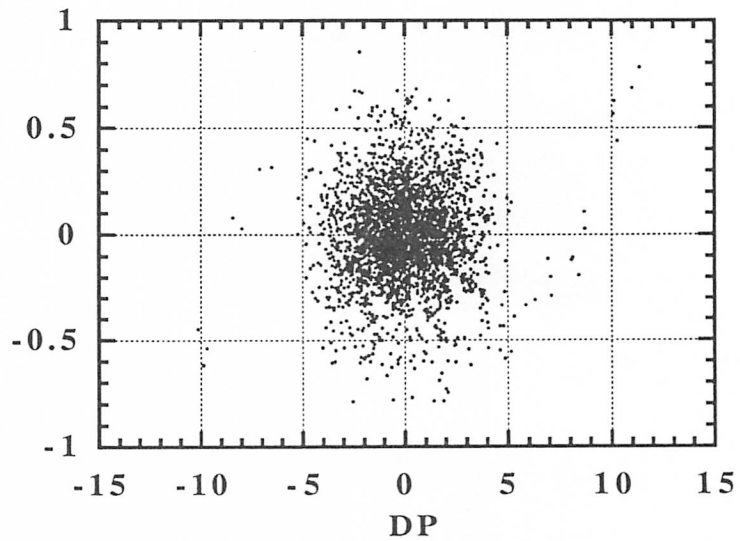


图 1 8 Type-1、x-xd output

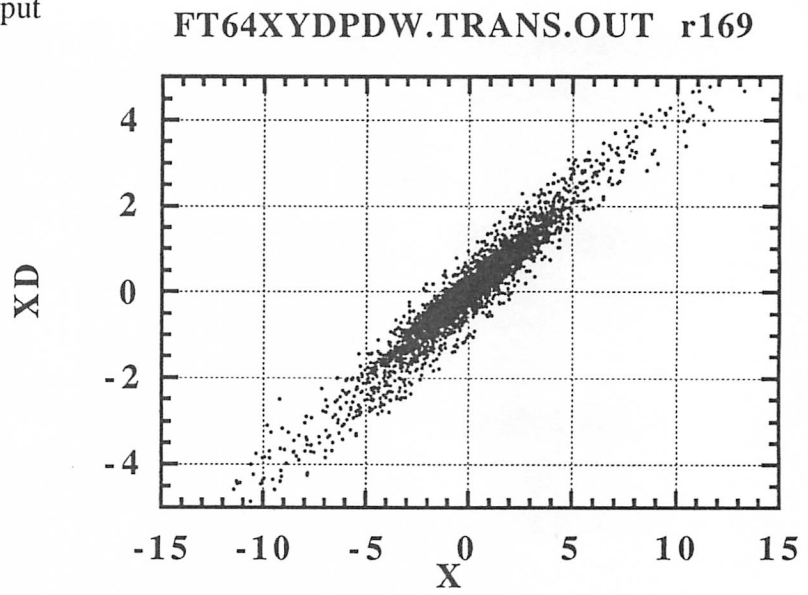


图 1 9 Type-1、y-yd output

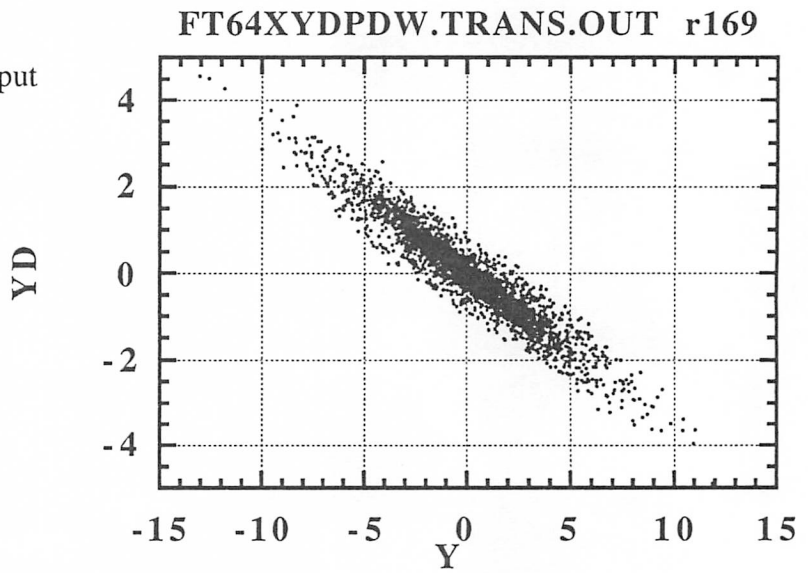


图 2 0 Type-1、phi-w output

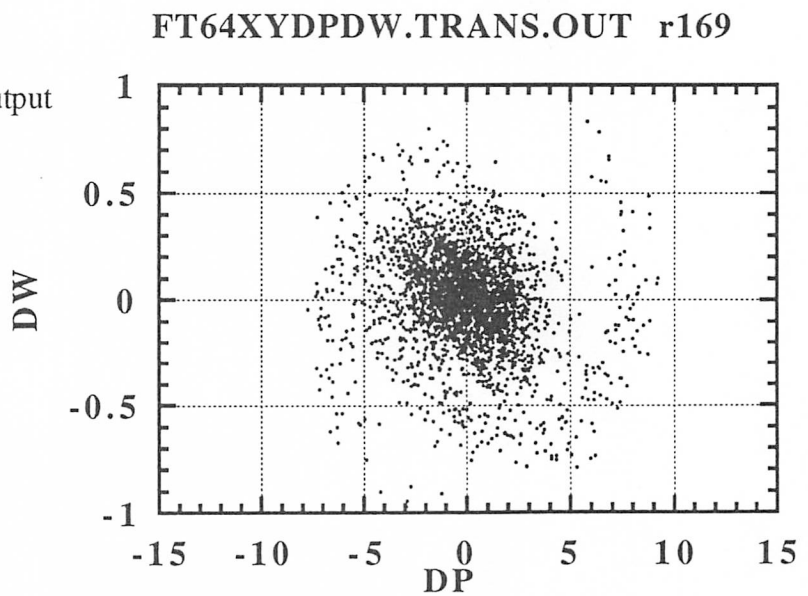


图 2 1 Type-2、x-xd output

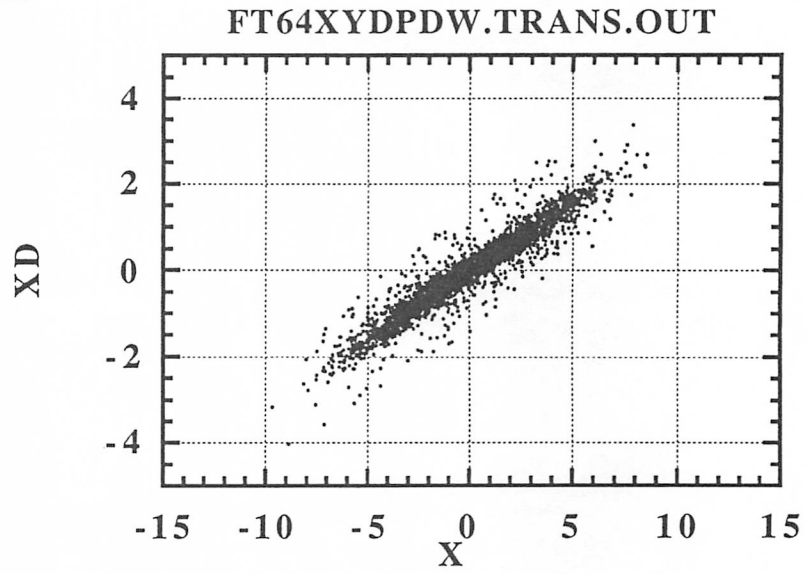


图 2 2 Type-2、y-yd output

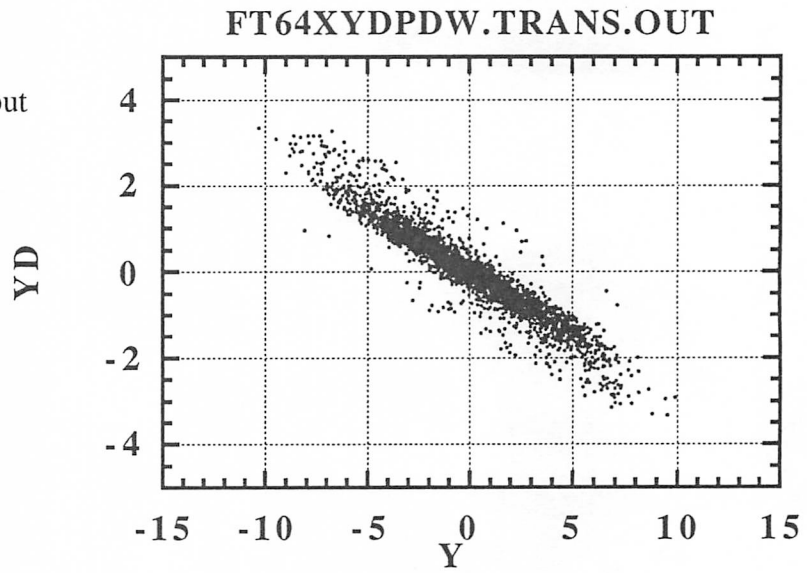


图 2 3 Type-2、phi-w output

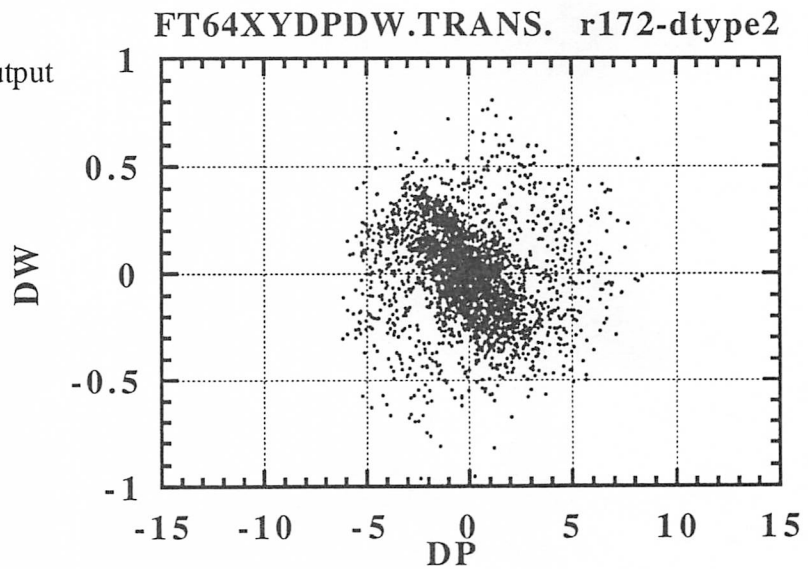


图 2 4 Type-3、x-xd output

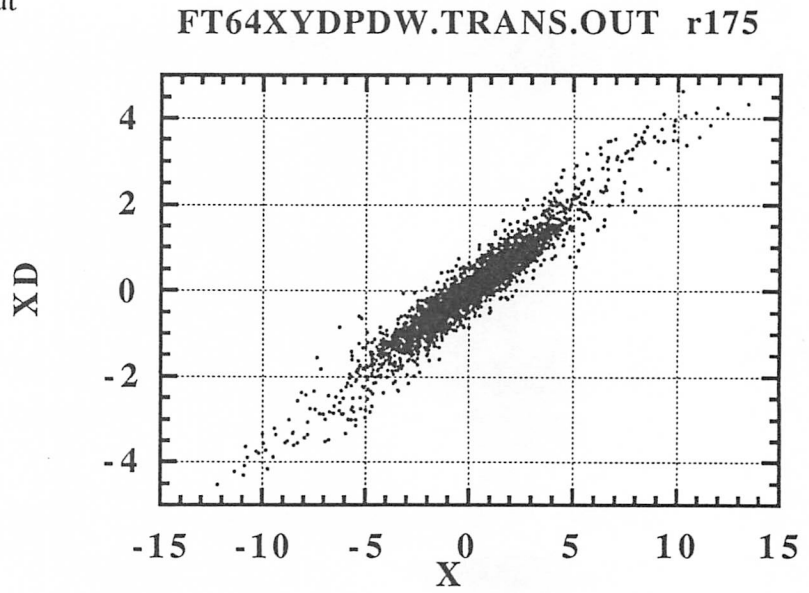


图 2 5 Type-3、y-yd output

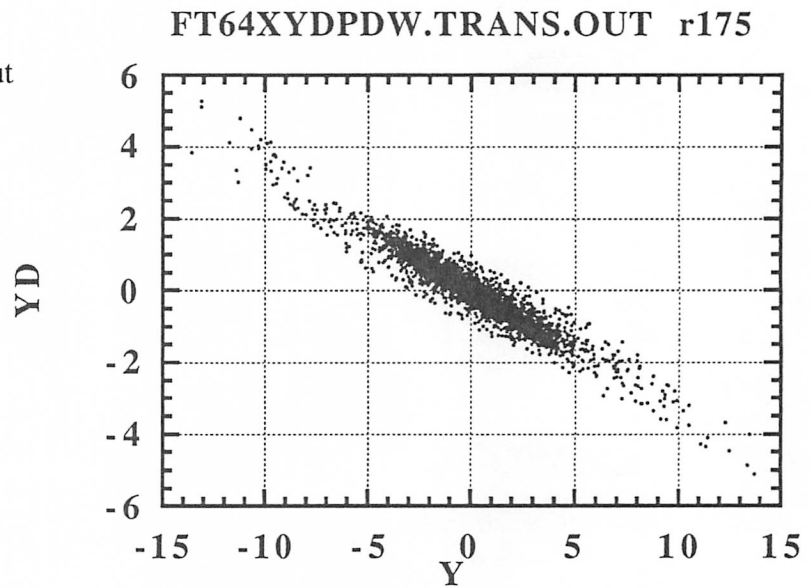
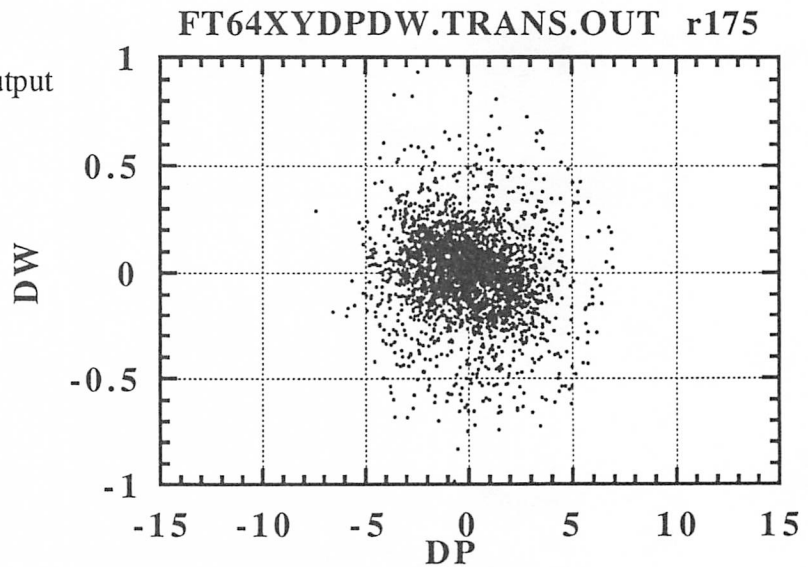


图 2 6 Type-3、phi-w output



Long.egrowbytransi-drift324

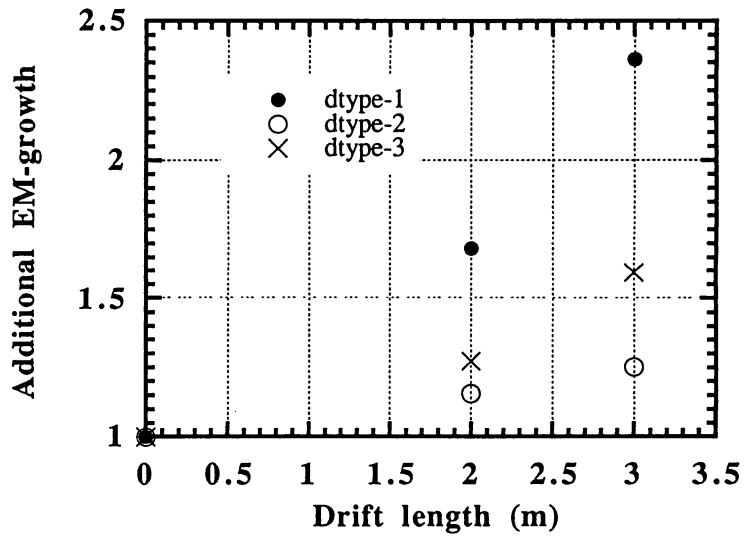


図2 7 DTL からSDTL への変換部のドリフトスペースによる縦エミッタンスの増加の割合。

648 MHz all SDTL について

以下の問題点を指摘できる。

1) Focusing は doublet が必要だろう。従って、タンク間のドリフトスペースは長くなるを得ない。

2) アクセプタンスを大きくする為に、ビーム孔を極端に大きくすれば、周波数が高いので TTF の激減をもたらす。

3) 周波数を倍にすると、本来その周波数で得られるはずのバンチ内粒子数が2倍になる事になり、これは、空間電荷効果の電流が倍になった事と等価である。

4) リニアックの運転の為に、モニターが必要である。その為のスペースが、ビームに与える効果が、周波数が高いと、大きくなってしまふ。

5) ユニットタンクの数の多さと高周波システムの複雑さは、製作と運転の障害となるだろう。

6) 理想的な構成にしても、加速ビームの性質は、たっぷりドリフトスペースを入れた 324 MHz-DTL-SDTL と同等である。

7) ビームハローの生成の割合が大きい。

Table 11 Output emittances of 5 MeV-injection SDTL by LINSAC code.

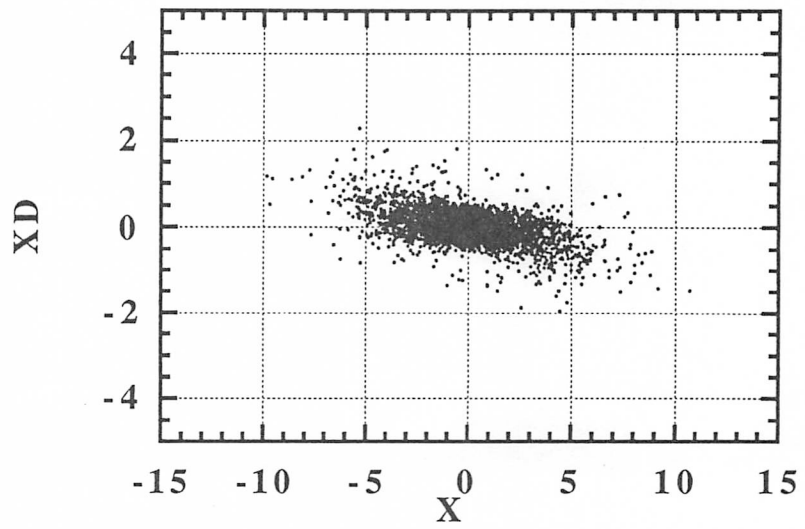
	ex(rms)	ex(90)	ey(rms)	ey(90)	ez(rms)	ez(90)
	mm-mrad				Normalized	
SDTL	0.563	2.50	0.632	2.55	0.985	5.34

Table 9 Parameters of combined 200 MeV linac.

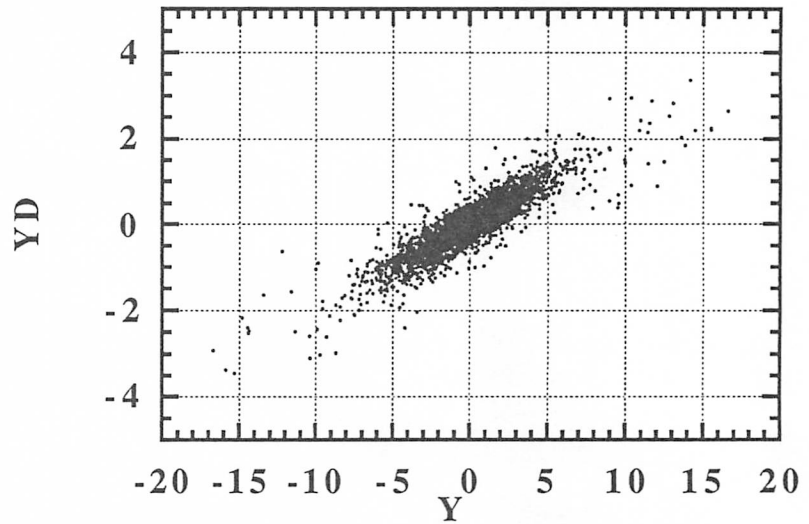
	TYPE-1	TYPE-2	TYPE-3	All DTL	648 MHz SDTL	
DTL energy	3-32	3-47	3-62	3-200	5-200	MeV
DTL tank number	2	3	4	18		
DTL length	18.29	27.58	36.59	143.58		m
DTL cell	114	147	174	395		
DTL Pc	1.87	2.89	4.06	18.66		MW
DTL Pbeam	0.88	1.33	1.77	5.92		MW
DTL total power	2.74	4.22	5.83	24.58		MW
SDTL tank No.	46	42	38		147	
SDTL length	135.43	128.58	116.89		174.69	m
SDTL cell	243	224	192		735	
SDTL Pc	14.58	13.93	12.67		14.03	MW
SDTL Pbeam	5.04	4.58	4.14		5.85	MW
SDTL total power	19.62	18.51	16.81		19.88	MW
Total length	153.72	156.16	153.48	143.58	174.69	m
Total rf power	22.36	22.73	22.64	24.58	19.88	MW

648MHz
SDTL
output

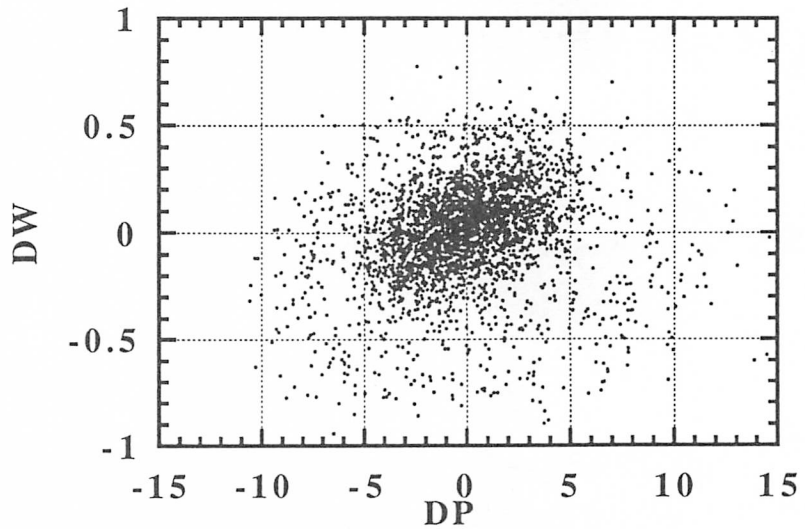
FT64XYDPDW.TRANS. r190-648



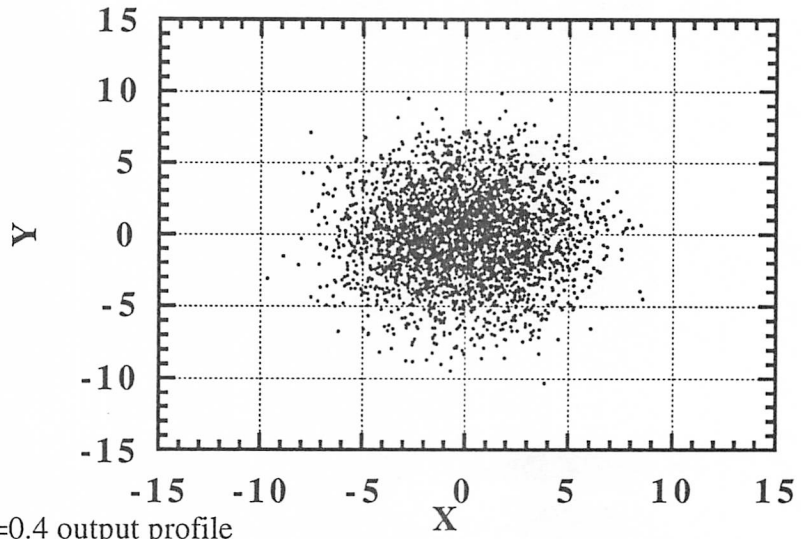
FT64XYDPDW.TRANS. r190-648



FT64XYDPDW.TRANS. r-190-648

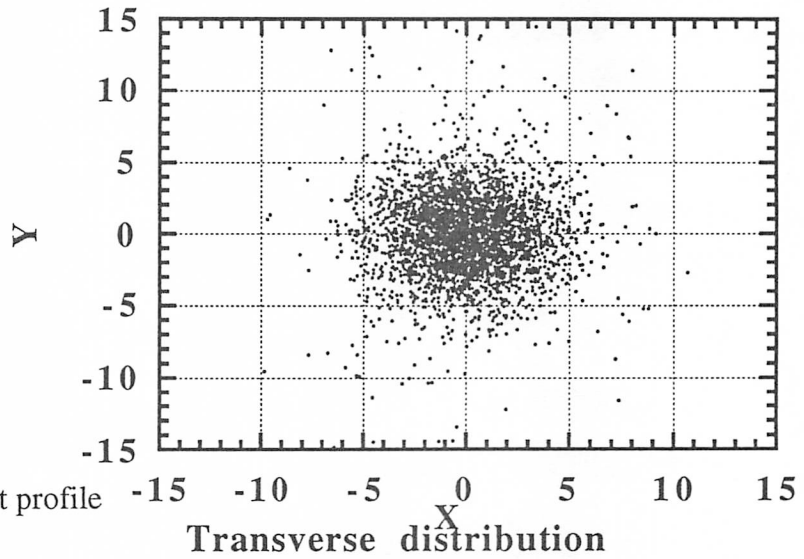


FT64XYDPDW.TRANS.OUT-r172

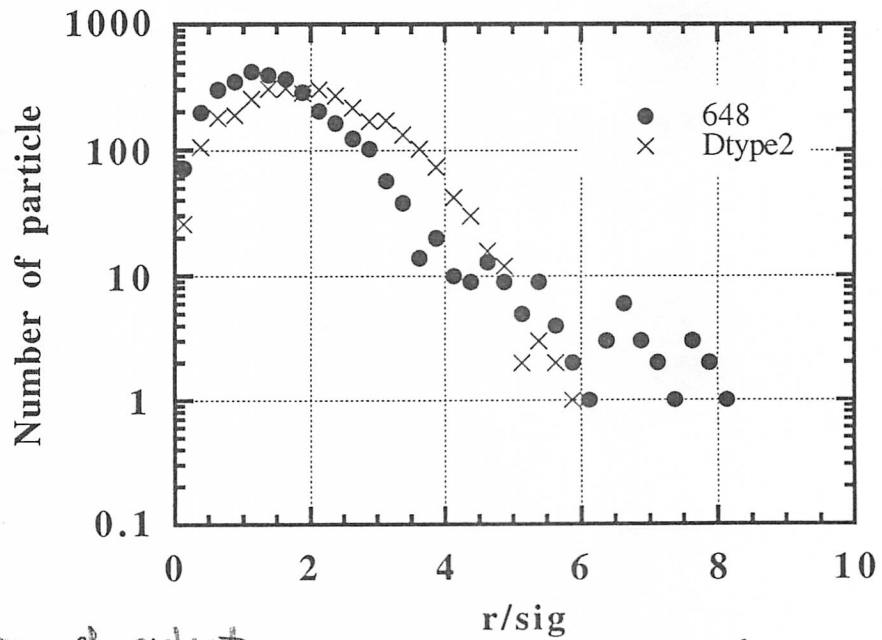


324 MHz r172 dtype2 s=0.4 output profile

FT64XYDPDW.TRANS.OUT r190-648



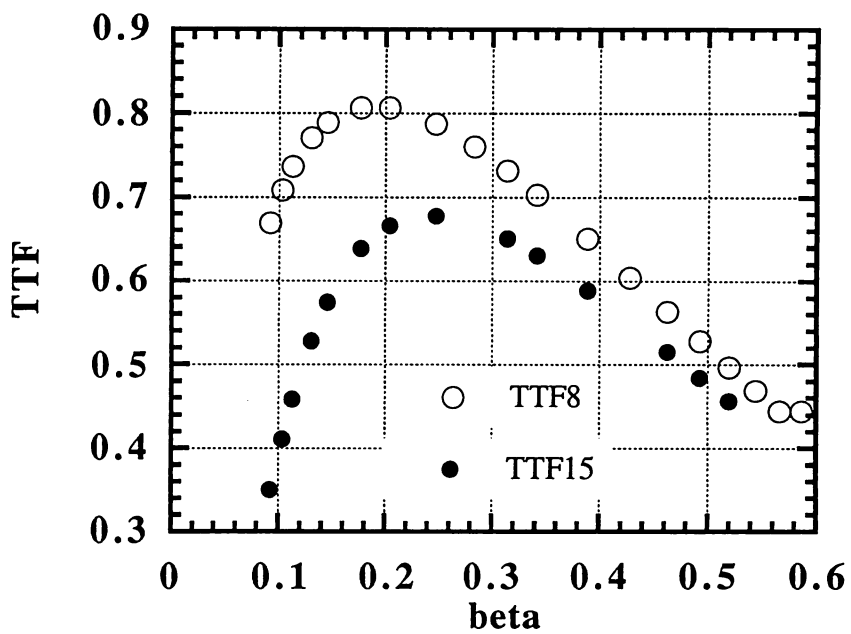
648 MHz r190 s=0.5 output profile



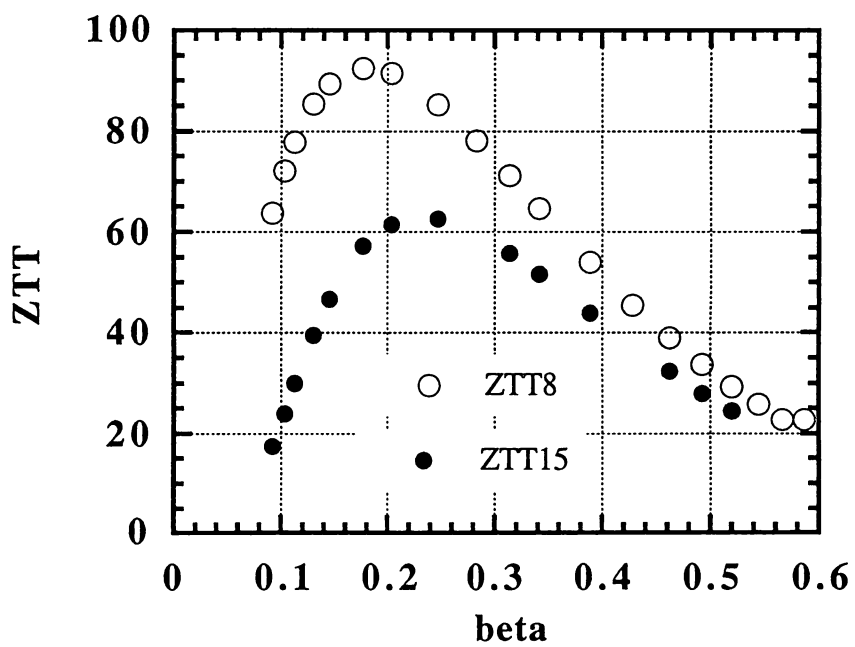
Distribution of output
beam size

r/σ_r

TTFsum648-15r.data



TTFsum648-15r.data



648MHz Z & T

Table 9 Parameters of combined 200 MeV linac.

	TYPE-1	TYPE-2	TYPE-3	All DTL	648 MHz SDTL	
DTL energy	3-32	3-47	3-62	3-200	5-200	MeV
DTL tank number	2	3	4	18		
DTL length	18.29	27.58	36.59	143.58		m
DTL cell	114	147	174	395		
DTL Pc	1.87	2.89	4.06	18.66		MW
DTL Pbeam	0.88	1.33	1.77	5.92		MW
DTL total power	2.74	4.22	5.83	24.58		MW
SDTL tank No.	46	42	38		147	
SDTL length	135.43	128.58	116.89		174.69	m
SDTL cell	243	224	192		735	
SDTL Pc	14.58	13.93	12.67		14.03	MW
SDTL Pbeam	5.04	4.58	4.14		5.85	MW
SDTL total power	19.62	18.51	16.81		19.88	MW
Total length	153.72	156.16	153.48	143.58	174.69	m
Total rf power	22.36	22.73	22.64	24.58	19.88	MW

RFQ について

1) RFQ を縦接続させて出力エネルギーをあげる事は、計算上では容易だが、チョッパーを入れるなどして、タンクを2個に分割した時は、そのビームラインをはさんだ部分のマッチングを達成する事は非常に難しい。

2) 現段階では、RFQ の加速電場はブラックボックスに等しい。それを、重ねる事は、運転を科学的に行う為に必要となる労力が無視できなくなり、安定な運転が期待できない。結局は、経験的な運転法に頼ってしまうだろう。

3) 従って、RFQ は rf 的に1タンクで製作すべきであり、チョッパーのエネルギー領域を勘案すれば、3 MeV が適当である。