

1 チューニングの目標

リニアックのチューニングは次の三点の実現を目指す。

- 1) 縦と横のマッチングを調整してビームを入射する事 (MEBT tuning)。
- 2) 横の収束力 (横方向の運動) を調整する事 (Q-mag tuning)。
- 3) 縦のエネルギーゲインと収束力 (縦方向の運動) を調整する事 (加速電場 tuning)。

入射器としてのリニアックチューニングは次を目標とする。

- 4) リング入射後のビーム強度が高い事。

* これらのチューニング後の状態が安定に継続出来る事が必要となる。

* ビーム電流の増減に対応して原理的にはチューニングを変えるべきであるが、現実的にどの程度必要かはビームスタディの結果から判断する。

以上の達成の為に、適当なモニターを配置し、加速パラメータとビームパラメータを測定して、望ましい加速パラメータを決定する。

補足：

- 1) リニアック出力ビームの電流、エネルギー、運動量幅 (エネルギー幅)、横方向エミッタンスが、リング入射の重要なパラメータとなるので、リング側からの要請に答える事がリニアックの目標となる。。その他にビームハローが生ずれば、その量も (ビーム損失と直結すれば) 重要な指針となるが、将来の事と予測する。縦方向に関して、ビームの平均的なエネルギー幅だけが、リング入射チューニングにとって重要なパラメータとなる場合には、リニアック出口に設置するデバンチャーを、ビームエネルギー幅が常に一定となるように運転すれば、縦方向のリニアックチューニングは簡単になる可能性もある。それはリングからの要請エネルギー幅の仕様にも依存する。ビームの裾の広がり方とか縦エミッタンスの形等がリング入射にとって重要 (ビーム損失の観点から) となる場合には、デバンチャーの機能では補正しきれない場合もあると予測する。数字で表したビームの諸量は、ビームのある一面しか表していないという点に注意して、更にどこまで詳しい情報が必要なのかを検討する必要がある。
- 2) 「調整する」という曖昧な言葉を使った理由は、唯一の最良のチューニングパラメータセットを決めにくい (決められない) という予想の為である。DTL だけの加速では、少しばかりの mismatch があっても、測定にかかるビームの性質はそれほど変わらない (KEK Report 97-16)。横のチューニングが縦のビームパラメータにも影響を与える可能性もあるので、縦と横の収束力の組のどれが最適かはリニアックだけのチューニングではおそらく決まらない。そこで、リニアックのビームスタディを通じて、加速パラメータと加速ビームの性質の関係に関する知識を蓄積する事が重要な作業となる。その場合に、記述するパラメータの種類、量、質が必要で且つ十分であるかを常に検討する事が求められる。以上は、リニアックビームにどこまでの性能を求めるかにも依存する。
- 3) 定常運転の時に、常時モニターする最低限のパラメータと、チューニングを行う時に必要なパラメータとを区別する必要がある。更にチューニング、スタディ及び運転の程度 (grade) により、必要なモニター、測定項目及び精度が違ってくる。

2 モニターの種類、略号、機能

CT:	current transformer、ピーク電流測定、ピークとはビーム幅500マイクロ秒の時間内の平均を意味する。
FCT:	fast current transformer、パンチ（位相、形）を見る。パンチの縦方向位相情報。
WS:	wire scanner、ビームの横方向プロファイル。ビームの位置及び幅情報。
BPM:	beam position monitor、 パンチを見る。ビームの縦方向位相情報。 ビーム横方向平均位置。
EM:	emittance monitor、ビームの横方向エミッタンス。
FC:	Faraday cup、ビーム平均電流、又はパンチ観測。ビームダンプに使用。
SL:	strip line、パンチを見る。パンチの縦方向位相情報、ビームの縦方向位相情報。
EANL:	momentum analyzer、ビームの運動量（エネルギー）幅。
BLM:	beam loss monitor、加速途中のビーム損失検出。
BSM:	bunch shape monitor、パンチ波形。
BLVD:	bunch length and velocity detector、パンチ波形、パンチ速度（エネルギー）。

注) モニターがdestructiveであるかnon-destructiveであるかは重要な選択項目となる。ほぼ同じ機能を有する複数のモニターがあるので、どれを選択すべきかは今後検討する。

3 設定パラメータの種類

3.1 RFQビームパラメータ

ビーム電流： I_b
エネルギー： W_{rfq}
エネルギー幅： ΔW_{rfq}
位相幅（パンチ幅）： $\Delta\phi_{rfq}$
横エミッタンス： ϵ_x, ϵ_y , twiss parameter (α_x, β_x) (α_y, β_y)
ビーム横方向位置： $\Delta x, \Delta y$

注) これらの値は、パルス内（500マイクロ秒）で恐らく変化するので、一般的に言えば、その変化量を最小にするというチューニングが必要である。DTL入射ビームは、パルス内の性質の変化が無いようにチューニングしたい。加速のそれぞれの段階においてこの事は必要となる。

注) 縦エミッタンス（ $\epsilon_z = \Delta W_{rfw} \times \Delta\phi_{rfq}$ ）でも良いが、別々に考えたほうが、実際の。

3.2 MEBTの縦方向の加速パラメータ

バンチャー1 加速電場： E_{b1}
バンチャー1 加速位相： ϕ_{b1}
バンチャー2 加速電場： E_{b2}
バンチャー2 加速位相： ϕ_{b2}

3.3 MEBTの横方向のチューニングパラメータ

四極磁石電流： $Q_{b1}, Q_{b2}, Q_{b3}, Q_{b4}$
 $Q_{b5}, Q_{b6}, Q_{b7}, Q_{b8}$

Q1-Q4は主として、RFQビームのMEBTへの入射調整とチョッパーの動作の最適化、Q5-Q6はDTL横方向入射マッチングに使用する。

横方向ステアリング電流： $ST1 - ST6$ (2組、x and y)

注) ステアリングはDTLへの入射ビームを仮想的なDTの中心軸に揃えて入射させる為使用する。入射エラーにより横方向のビーム中心位置の振動が起り、それがエミッタンス増加をもたらすという予測がある。但し、この横振動はドリフトチューブ内の収束磁石の設置エラーによっても生じるので、ある程度の振動は許容せざるを得ない。DTL加速後に補正可能でもある。あまりに大きな入射エラーがあれば、整列をやり直すことが必要だろう。トウイスパラメータのミスマッチとは区別する。

チョッパー1加速電圧： E_{c1}
チョッパー1加速位相： ϕ_{c1}
チョッパー2加速電圧： E_{c2}
チョッパー2加速位相： ϕ_{c2}

3.4 DTLの縦方向の加速パラメータ (タンク番号 1-3)

タンク加速電場： E_1, E_2, E_3
タンク加速位相： ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3
タンク周波数デチューニング量： $\Delta F_1, \Delta F_2, \Delta F_3$

デチューニング量は、各タンクの可変チューナーによる自動周波数追尾システム中において、タンク位相検出回路出力のオフセットとして与える事が出来る。チューナー動作回路の位相に対する不感帯の設定量とも関連するので、実際に動作させてみないと、効果ははっきりしない。

注) 加速位相は、ビームを高周波位相のどこに入射させるかの設定値である。ある基準高周波(タンク高周波)との相対値で設定する。出力ビームの高周波に対する位相は、ある基準高周波との相対位相で測定する。全リニアックを通じての統一された位相情報は、変動等が少ないように設置された基準信号との差から求める。

3.5 DTLの横方向のチューニングパラメータ (磁石番号 1-149)

四極磁石電流(磁場) Q1-Q149

これらは、横方向の位相進み設定値に従って、全体として(セットとして)変化させる。個々の磁石のチューニングはなるべく回避したい。

3.6 HEBT (DTL3 → SDDL) の横方向マッチング

四極磁石電流 Q148, Q149, Qs1, Qs2

Q148, Q149はDTLの最後の二つの四極磁石。Qs1, Qs2はDTL3とSDDL1の間のビームライン上の四極磁石。

3.7 SDDLの縦方向の加速パラメータ

タンク加速電場： E_{s1}
タンク加速位相： ϕ_{s1}

1本のクライストロンは2台のSDDLタンクを励振するので、可変な加速パラメータはタンク2台につき一組となる。最初のコミッショニング時に、一組の中のそれぞれのタンクの電場(強度のこと)と位相の分配状況のビームに対する効果をテストしたいと思うが、SDDLタンクが当初の2個だけの場合には、その効果を適切に判断する事は難しいと予想するので、先延ばし(相当数のSDDLタンクを揃えた後)する可能性もある。将来これらのパラメータは16セットになる予定。

3.8 SDDLの横方向の収束パラメータ (将来の増設時)

四極磁石電流 15セットの電流設定。

3.9 デパンチャーの加速パラメータ（将来の増設時）

タンク加速電場： E_d

タンク加速位相： ϕ_d

補足:

リニアックのチューニングの良否の判断基準が何種類もある事が指摘できる。基本的には、デザイン通りの（に近い）ビームパラメータが実現出来ればよいとする。ハロー等の問題が無視できる大きさならば、この段階では横方向の収束法には自由度が残る。リニアックは円形加速器の入射器なので、リングで良好な加速が達成出来るチューニングが最善という見方もある。ここでは、最善の横方向の収束が決まる可能性がある。次に、高エネルギー大強度ビームのビーム損失に由来する問題がある。リニアック中のビーム損失とリング入射後のビーム損失が共に小さくなるような設定が望ましいという観点もある。そんなわけで、リニアック単体では、自由にビームハンドリングが出来る事を目標とし、入射器としては、リングビーム強度を最適化するという事になるだろう。

4 測定項目、使用モニター、及び得られる情報等

基本的なビームパラメータ測定項目を列挙する。

測定項目	モニター	情報
1. ビーム電流(Ib)	CT	ビーム強度、ビーム透過率、non-destructive
2. パンチ位相	FCT or BPM or SL	パンチ位相、パンチ波形、non-destructive
3. ビームエネルギー(W)	FCT or BPM or SL	平均エネルギー、non-destructive
4. ビームエネルギー幅 (DW)	BANL	エネルギー幅、destructive
5. ビーム横エミッタンス(ϵ_x)	EM	横エミッタンス、destructive
6. ビーム中心位置	BPM	ビーム中心位置、整列誤差、non-destructive
7. ビームプロファイル	WS	ビーム横幅、ビーム中心位置、横収束情報、横エミッタンス、destructive
8. ビーム損失	BLM	場所と時間関数で測定出来るビーム損失
9. ビーム縦エミッタンス(ϵ_z)		縦エミッタンス
10. パンチ詳細情報	BSM BLVD	パンチの縦方向の形 パンチの縦方向の形、パンチエネルギー

注) 異なる2点でのパンチ位相測定から time-of-flight により平均速度を求める。間にある加速タンク電圧はゼロにする。

注) BPMで位相幅測定がむずかしい場合は、ある程度の情報が得られるFCTを使う。

注) モニターの精度は重要な指針だが、ここでは次の指摘をする。モニターはビームを測定するが、同時にその状態を形成する加速パラメータが存在する。一般に加速パラメータは精度よく知る（設定する）事が出来る。例えば、高周波位相を変えた時に、直近の位相モニターのビーム測定には変化がなくても、加速後のビームの性質が観測可能程度変えることはありうる。

5 MEBTのチューニング

モニター設置場所を図1に示す。

5.1 MEBT電流透過率

CTがMEBTの入り口と出口に設置される。

5.2 RFQ出力ビームの横方向位置

Q1のBPM及びDR-2のWSで測定する。

5.3 MEBTへの横入射マッチング

WSをDR-2、DR-5、DR-8に設置する。twiss parametersをBENDの後で測定する。

5.4 横エミタンス測定

DR-8にてBENDの後ろで測定する。ライン上の4個のWSを使ったプロファイル測定からも可能。

5.5 RFQビーム位相情報

DR-2のFCTにて位相と位相幅を測定。

5.6 RFQビーム平均エネルギー

DR-2とDR-7のFCTから求める (buncher off)。

5.7 バンチャー 1 & 2 のチューニング

DR-2とDR-7のFCTのエネルギー測定により、バンチャー 1 の位相を設定。

DR-7とDR-12のFCTのエネルギー測定により、バンチャー 2 の位相を設定。

DR-8のBEND利用によるエネルギー幅測定よりバンチャー 1 の電場を設定。又はDR-8のFCTによるバンチ波形を使用。又はBLVDを使用。

DR-12のFCTによるバンチ波形により、バンチャー 2 の電場を設定する。

5.8 DTLへの横方向マッチング

Q5 - Q8をチューニングする。モニターはDR-12のWSを使用。

5.9 ステアリング (ST) の調整

BPM、必要があれば、DR-8とDR-13のWSをモニターしながら、調整する。DTL各タンク出口のWSも利用する。

5.10 チョッパーのチューニング

DR-7のFCT、DR-8のWS、Scraperの出力電流、DR-12のWS、FCTを使ってチューニングする。BPMも使える。

5.11 ビームストッパー

DR-12 or DR-13 にFCを入れる。

5.12 BPMをそれぞれのQに入れる。

補足

当然ながら、加速電場等の設定は第一には高周波モニターによる測定値をデザイン値にあわせる。

6 DTLのチューニング

モニター設置場所を図 2 に示す。理想的には、短パルス小電流の場合のチューニングが、長パルス大電流

のビームにおいて、そのまま実現されるように、高周波のコントロールがなされる。その達成度は、加速電圧、加速位相、そして加速ビームの位相とエネルギーの、パルス内の変化を測定すれば判断出来る。

注) リニアックの場合、最初にビームと通す為には、細かな設定はいらない。加速をしなくとも(加速電圧をオフ)、適当な横収束力があれば、RFQ-MEBTビームはDTLタンクを通過するはずである。加速電場と位相のラフな設定は透過率とエネルギー測定により可能である。適当な強さの横収束力にすれば、ビームを保持する為には十分である。この類の測定では、DTL出口直後にFCをおくのが確実に感度も高い。

6.1 DTL電流

CTがDTL各タンクの入り口と出口に設置され、電流透過率、大きなビーム損失を監視。DTLの最下流にはFCにおいて電流測定とビームダンプに使用。

6.2 加速電場の設定

各タンクの出口に設置するFCTによる位相測定を使ってビームエネルギーを算出する。加速ビームの位相幅も測定する。各タンクの加速電場の強度と位相をスキャンして、最適な設定をさがす。信号を揃える為に第3タンクの後ろにもFCTを入れる。EANLによりエネルギー幅を測定する。

6.3 横方向収束の最適化

横の収束力を変える場合には、入射マッチングを変える必要がある。横の収束力と加速ビームとの関係の知識を蓄積する事が必要。その場合、DTL出力ビームの横エミッタンスと縦エミッタンスが測定可能であり、更に、ハロー部分まで測定出来る感度を有する事が望ましい。最終的には、(200 or 400 MeV全システム完成後、リングの電流とビーム損失がどうなるかにより最適設定値が決まる。

6.4 ビーム損失

タンクに沿って分布させて設置するロスモニター (BLM) を使う。場所とパルス内のどこで落ちるかという情報が有用である。ビーム損失がリニアックの中で起こる場合には、なんらかのエラー、例えば、

- 1) 電場エラー
- 2) 入射エラー
- 3) 収束磁石エラー

が考えられる。(2)と(3)は整列エラーも含んでいる。逐次テストを進める事になる。なお、このBLMが速ければ、緊急ビームストップに使える。

6.5 ビーム位置の補正

DTLとSDTLの間のビームラインで、ビーム横方向の位置補正が、必要となれば行う。

6.6 HBETの横方向マッチング

4台の収束磁石(3.6参照)によりマッチングを行う。SDTL加速後のWSで幅を測定し、エミッタンスを測定する。

6.7 SDTLのチューニング

今回製作のSDTLは2タンクなので、基本的な測定はDTLと同じ。後続のSDTLが追加された時に、必要となる測定技術の開発を行う。

7 チューニング全般について

7.1 ビーム電流

ビーム損失のおそれがあるので、最初は小電流（ピーク、平均）で行う。その為には、パルス幅を小さくする、繰り返し周波数を下げる、イオン源の出力電流を下げる、メッシュをいれて粒子をまびくなど考えられる。従って、RFQ加速前にビームパルス幅を調整出来る事は必須である。

7.2 基本設定

モニター可能な小ピーク電流により、基本的な加速パラメータの設定ができる。ビームローディング補償をしないで設定する。（この部分は習熟すれば省略も可能か）。次に、ビームローディング補償が出来るようにパルス幅を増やして、同時にピーク電流も増やして、ビームローディング補償システムのチューニングを行う。基本動作がチューニング出来れば、パルス長さを増やし、ピーク電流を増やして、動作を確認する。加速電場と位相、ビームエネルギー、ビーム位相等のパルス内変化が目安となる。繰り返しは少なくてもよい。最後に、フルスペックのビーム強度に近づける。ピーク電流を大きく変える場合には、全系の他の（横及び縦）収束力を再チューニングする必要がある。このあたりがわけがわからなくなる原因の一つとなりやすいので注意する。

7.3 チューニング順序

* 定常運転にはいれば、ある低電流で上流よりチューニングを始め、下流を順次行う。電流を増やせば、そこでまた全系のチューニングを行う。運転に関する知識の集積が十分になれば、電流を変えた時の再チューニングはデータに従って出来る可能性が生まれる。

* 建設後の最初のチューニングをどのようにすべきかは、熟考の余地がある。それは、運転時に定常的に設置出来るモニターの数と種類にも依存する。モニターは場所を占有するので、ある場合にはビームの質を落とす事にもなりかねない。特に、MEBT及びDTLのタンクの間は注意が必要である。従って、建設途中のある時期にしか測定出来ない設定が存在する。これをどこまで利用するかが問題となる。日程とコストと労力が全然違って来るからだ。建設後の最初のビーム測定において、RFQのビーム測定とMEBTのチューニングはきちんと行いたい。即ち、将来のDTLの設置場所にモニターをおいて、縦横のビーム測定を行っておきたい。同時に、定常運転時との対応をつける為にMEBTビームライン途中に偏向磁石をおいて、偏向ラインにてビームの詳しい性質（非定常ビームを含めて）をモニターする。定常運転時には偏向ラインのモニターはチューニングの基準となる。全系の安定な運転において、DTLへの入射ビームを詳しくモニター出来るようにしておく事は（様々な比較的自由的なモニター改良の余地を残して）重要と考える。いずれにせよ、当初から仕様に近いRFQビームが出る事を前提とする。

* DTLのタンク 1本毎の初期コミッションングが必要かどうか。縦方向のチューニングの為ならば必要はない。DTLタンクの全部を整列させたあとで各タンク電場の設定は出来る。横方向についてはどうか。ある磁石の極性が反対の事はありうる事だが（ないようにチェックするが）、おそらく磁石の特定は出来るし、電流の向きを変える事も容易。磁石とタンク毎の整列精度は、経験上から仕様精度内の実現は可能。入射ビームの偏りによりビーム中心位置がずれる事はありうるが、それはMEBTのステアリングで補正する。補正しきれない場合には、今後の事を考えると、DTLを基準にしてMEBTとRFQの整列をやりなおす事になる。

7.4 チョッパーのチューニング

* このチューニングは、他のチューニングとは独立に行う事が出来る。ただし、タンクのビームローディング量が変わる事に注意すべきである。ビームローディング補償がパルス内の平均電流（電荷の総量）に対して行われるようになっており、電流の変化に自動的に対応出来れば、新たな問題はない。パルス内の平均電流という時に、RF電力供給の立場では、チョッパー動作により平均電流は変化する事になるが、収束力を含めてビームの運動の側面から眺めると平均電流は変化しない。そこでいわゆるピーク電流値（例えば30 mA）と、ピーク電流にチョッピング率を掛けた実効値表示的なピーク電流値が必要となる。

* チョッパー電圧と位相の調整はMEBTのQ4のBPM、DR-8のWS、Scraperの電流波形を見ながら行う。同時にnormal beamをQ-8のBPM、DR-13のWS、DTL加速後のFCT、WS、BPMでモニターする。特にMEBTのQ-4はチョッパー動作（ビームの振れ角）に大きな影響を与える事に注意する。

7.5 マッチングについて

一般に入射のミスマッチングによって、加速途中のビームの振動が起こる。従って、この振動の振幅が小さくなるようにチューニングをすれば、マッチングが達成されたと考えてよい。測定項目は、ビーム横幅 (WS)、ビーム中心位置 (BPM) とビーム位相幅 (FCT or BPM)。エネルギー幅 (EANL) も使えるが、これは測定場所に限られる。注意すべきは、振動を起こす原因は他にもある事である。即ち相対的なものだから、ビーム自身が違っていても、受ける側の加速パラメータが違っていても同じ効果となる事である。従って、チューニングの時には、出来る限りマッチングのとれたビームを使うべきであり、加速パラメータのチューニングと入射マッチングの調整は交互に順次調整されていくべきものである。

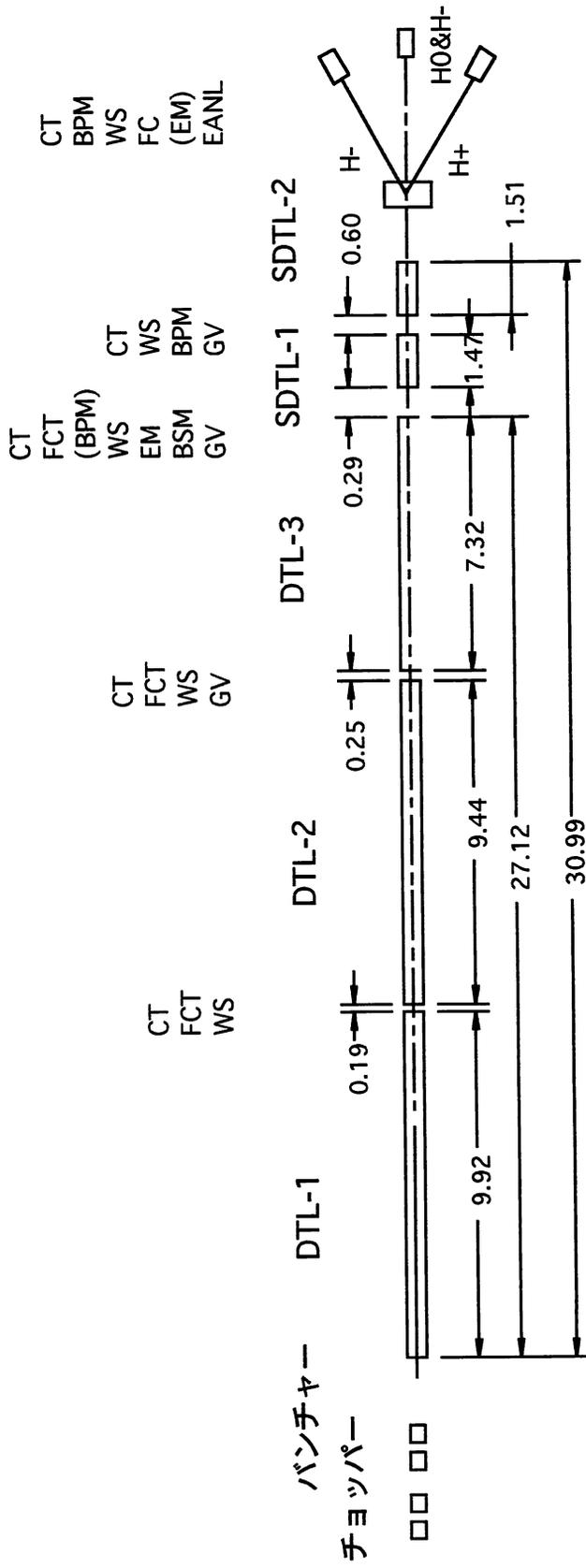
7.6 定常運転時に使用するビームモニター

- 1) ビーム電流: CT
 - 2) ビーム損失: BLM
 - 3) ビーム位相: FCT
 - 4) ビーム中心位置: BPM
 - 5) チョッパー動作の確認: MEBT-Q8のBPMとDTL加速後のBPM。DTL加速後は、チョッパーON時のゲート内の粒子量を測定。
- (1)-(3)は代表値をモニターし、同時にパルス内変化をCRTで監視。パルス内変化量をコンピュータで自動監視。

7.7 チューニング時のモニター

- 1) ビーム電流: CT
- 2) ビーム損失: BLM
- 3) ビーム位相: FCT
- 4) ビーム中心位置: BPM
- 5) ビーム巾
- 6) 横エミッタンス
- 7) エネルギー
- 8) エネルギー巾
- 9) パンチ巾 (縦エミッタンス)

DTL & SDTL 配置図 T. Kato 980923
 Monitor 配置図 Igarashi, Takasaki, Kishiro, Kato 981009
 mod. 981010, 2000.4.21



BLMをタンク外に設置する

CT: current transformer, FCT: fast current transformer, WS: wire scanner, BPM: beam position monitor,
 EM: emittance monitor, FC: Faraday cup, BSM: bunch shape monitor, BLM: beam loss monitor,
 EANL: momentum analyzer, GV: gate valve

図 2 60-MeV linac layout

MEBT design 2000.4.21 T. Kato and S. Fu

negative charge
 Total length 2989.9 mm
 Normal beam size < 10 mm
 Deflected < 26 mm
 Scraper at Q-5, r=9.5 mm

Buncher-1 0.147 MV
 6.8 kW

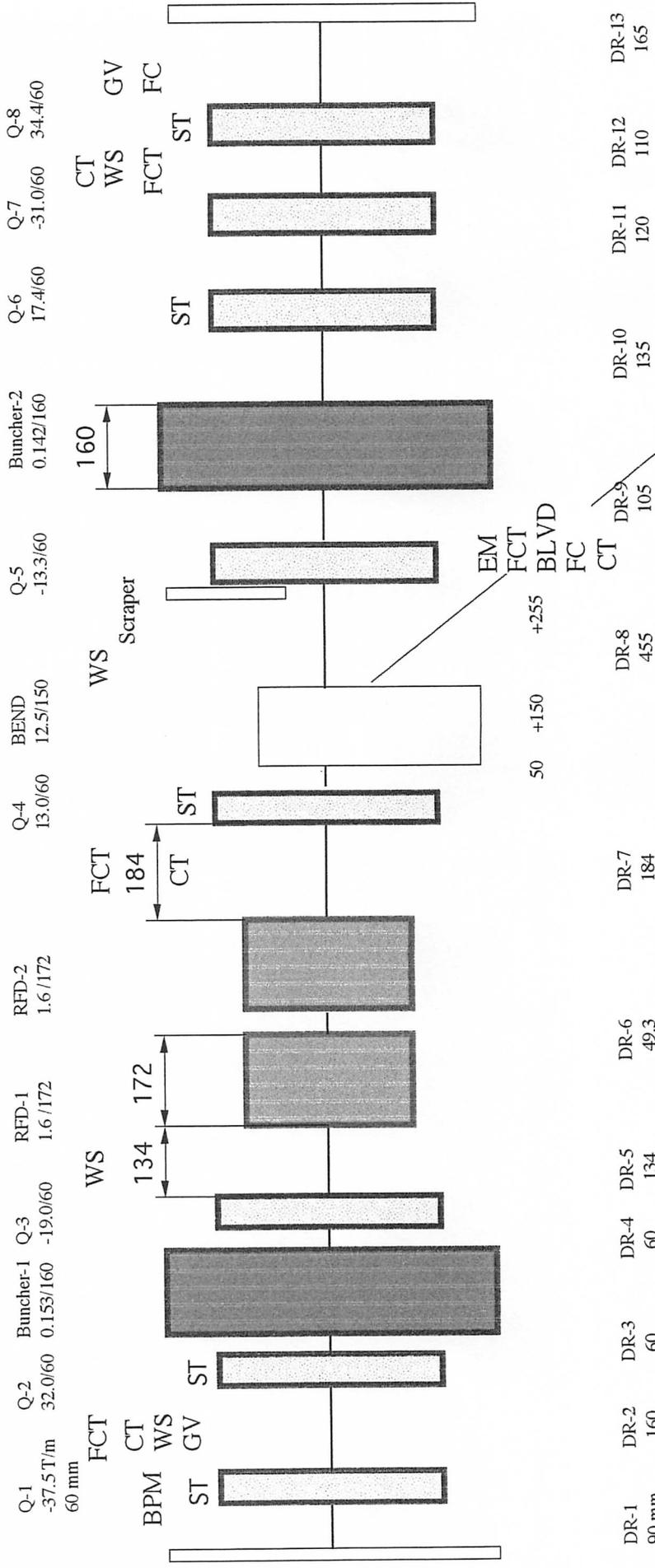
RFD-1 1.6 MV/m
 18.6 kW

RFD-2 1.6 MV/m
 18.6 kW

Buncher-2 0.141 MV
 6.7 kW

RFQ vane end

DTL end plate



CT=current monitor, FCT=fast CT, WS = wire scanner, ST = steering mag., BPM = beam position monitor, GV = gate valve, EM = emittance monitor