

リニアック出射エネルギーを下げた場合の L3BT 検討

リニアック全体設計グループ 2002.6.11

T. Kato, K. Hasegawa, M. Ikegami, M. Matsuoka

リニアックの出射エネルギーを下げた場合の L3BT(L3BTMOD)の検討結果について述べる。約 300 メートルの RCS に到るビーム輸送系内の、縦方向の収束の周波数選定が設計のポイントと思われる。そこで、324MHz と 972MHz を採用した場合についての検討結果を報告する。

まとめ

1. 縦の収束系に 324MHz を選択すれば、2 台のデバンチャーにより RCS の運動量仕様を満足できる。要求されるボア径の大小により空洞タイプを変える必要があり、それぞれの特徴を表 1 にまとめた。この選択では、出力エネルギーが変化する (181, 186, or 191MeV)。基本的には、SDTL 空洞をデバンチャーとして使用可能であるが、ボア直径が 36mm であり、ビーム損失が懸念される場合には、新たにボア径の大きいデバンチャー空洞を製作する必要がある。初期投資は 972MHz より小さいが、段階的なエネルギーアップグレードには不向きである。
2. 縦の収束系に 972MHz を選択すれば、5 台のデバンチャーが必要である。39 セル長の ACS 空洞 (1 モジュール) をデバンチャーとして使う場合には、空洞内の位相スリップが問題となるので、使用可能な ACS 空洞は 1 台と考えられる。MEBT2 用のバンチャーがデバンチャーとして使用可能なので、新たに 2 台のデバンチャー空洞の製作が必要となる。位相スリップ低減の為に ACS 空洞の片側の 15 セルを使う場合には、ブリッジ部分を含めた R&D および改造が必要であるが、これが解決されれば段階的なエネルギーアップグレードも可能性が出てくる。972MHz 検討ケースの特徴を表 2 に、324MHz を含めた全体の得失を表 3 にまとめた。

表1 324MHz デバンチャー検討結果の比較

デザイン名	S1	S2	S3	デバンチャー特性
出力エネルギー MeV	181.0	185.9	190.8	
追加デバンチャー製作台数	0	1	2	
デバンチャーNo.1	SDTL No.31	SDTL No.32	2セル SDTL	1.3MV, 51m
ボア直径 mm	36	36	70	
デバンチャーNo.2	SDTL No.32	2セル SDTL	2セル SDTL	0.5MV, 225m
ボア直径 mm	36	70	70	
高周波電力 No.1 / No.2 kW	50 / 6	50 / 27	180 / 27	
追加クライストロン	0	0	0	
追加固体増幅器	1 (注1)	1 (注2)	1 (注2)	

注1) 10 kW。第2デバンチャー用。将来のMEBT改造時に、第3バンチャー用として使う。

注2) 30 kW 以内の場合。第2デバンチャー用。将来のMEBT改造時に、anti-chopper用として使う。30kW増幅器では、出力が足りなくなる懸念がある場合は、324MHzクライストロンを選択する。

表2 972MHz デバンチャー検討結果の比較

デザイン名	A1	A2	A3	デバンチャー特性
出力エネルギー MeV	190.8	190.8	190.8	
デバンチャーNo.1	buncher-1	buncher-1	buncher-1	1.1MV, 23.2m
高周波電力 kW	65 kW	65 kW	65 kW	(Bore : ϕ 40)
デバンチャーNo.2	buncher-2	buncher-2	buncher-2	0.8MV, 80.8m
高周波電力 kW	34.5kW	34.5kW	34.5kW	(Bore : ϕ 40)
デバンチャーNo.3	ACS-No.1-full	New-1	New-1	0.45MV, 138.2m
高周波電力 kW	2.1kW	11kW	11kW	(Bore : ϕ 40)
デバンチャーNo.4	ACS-No.2-15cell	ACS-No.1-ful	New-2	0.4MV, 155.0m
高周波電力 kW	5.7kW	1	8.6kW	(Bore : ϕ 40)
デバンチャーNo.5	ACS-No.2-15cell	New-2	New-3	0.5MV, 213.9m
高周波電力 kW	28.4kW	42.6kW	42.6kW	(Bore : ϕ 70)
追加デバンチャー製作台数	0	2	3	
追加RF源	5	5	5	

注1) デバンチャーNo.5は第1アークの下流に設置されるので、ボア径が大きい事が望ましい。A2案とA3案は、ボア径を大きくできる。

注2) ACS-15 セル案では、ブリッジ部分の開発検討が必要と思われる。

注3) Buncher-1,2 はMEBT2 用のバンチャーを意味する。

検討内容詳細

1. 検討条件

- ・RCS からの運動量仕様として $\Delta p/p \sim 0.1\%$ (365 keV) を仮定
- ・加速電流は 50mA
- ・横方向の収束系は、SDTL の横収束系と同じダブルレット系として、L3BT と接続する。収束周期は、磁石個数を減らすために SDTL の長さ ($7\beta\lambda$) より長い $8\beta\lambda$ とする。

2. 縦方向の検討

2.1) 324 MHz 案の概要

本案は、324MHz の 2 台のタンクを、L3BTMOD の 2 ヶ所に配置してデバンチャーとして用い、所要の運動量幅を実現する。周波数が 324MHz のままなので、バンチ長さを短くする必要がなく、弱い空間電荷効果の状態でも L3BTMOD を構築できる。図 1 に TRACE3D の計算結果を示す。

324MHz デバンチャーの概要

	設置位置	電圧	所要電力 (SDTL 空洞の時)
No.1	48 m	1.3 MV	50 kW
No.2	210 m	0.5 MV	6 kW

デザイン S1 案は、No.31 と 32 の SDTL 空洞をデバンチャーとして使用する。ここで懸念される事は、第 1 アーク直後のデバンチャーのボア直径が 36mm となり、十分な余裕がない事である。ボア径と rms ビームサイズの比は 8 倍程度なので、横方向のハローの存在、各種のミスマッチを考慮すれば、ボア径の大きな空洞を使う事が望ましい。デザイン S2 案は第 2 デバンチャーのボア径を大きくした案、デザイン S3 案は、2 台のデバンチャーのボア径を大きくした案である。この案では出力エネルギーが 191MeV となる。この時、第 1 デバンチャーの加速電圧は高いので、シングルセル空洞では、加速電場が高くなりすぎて (4.4MV/m) 好ましくない。従って、2セルの SDTL 型空洞を選択して加速電場を下げる。

2.2) 972 MHz 案の概要

本案は L3BTMOD のデバンチャーとして、MEBT2 の 2 台のバンチャーと、低エネルギー領域の ACS 空洞をデバンチャーとして用いる案である。ACS タンクの長さは全体で 39 セルとなるので、位相スリップがビームの運動に大きな影響を与える (資料 1-3)。検討結果によれば、安心して使用できる 39 セル ACS 空洞は 1 台のみである。また使える位相幅として 972 MHz の ± 70 度程度とすれば、全数で 5 台のデバンチャーが必要となる。位相スリップの効果を低減するために、15 セル ACS タンクを使う方法が考えられる。

その場合には、ブリッジのテストが新たに必要と思われる。更に、第1アークの下流のデバンチャーは、大きなボア径が望ましいので、新たにデバンチャー空洞を製作する事が望ましい。図2に TRACE3D 計算結果を示す。

3. 横方向の検討

ACS 空洞設置範囲は、SDTL の横方向収束系（ダブレット）を延長する事にして、L3BT 部へつなげる方針とする。この収束系の場合には、既定の SDTL 及び L3BT 収束系との接続は、スムーズにできる。MEBT2 は当初使用しない。収束磁石は、ACS 用磁石を流用する。収束周期長さとしては、磁石数の少ない $8\beta\lambda$ （約 4 m）を選択する。

横方向収束系の概要

場所	磁石数（注）	アップグレード時に必要な磁石数
MEBT2+ACS 部分	62 台(Q)	32 台(Q)
L3BT 部分	8 台(B)、85 台 (Q)	0
合計	8 台(B)、147 台(Q)	32 台(Q)

注) ダブレット 1 組を 2 台の磁石とする。

4. ビームダイナミクスの観点からの比較

972 MHz 案の場合、使用可能な縦方向位相領域が 324MHz 案に比べて 1/3 に減少するので、短いバンチ長さのままビームを輸送する事になる。この結果、空間電荷効果が強まり、得策ではない。また、今回の提案では、横コリメータの下流には空洞設置が難しいという制約により、デバンチャーとして使用する位相範囲を広げて、台数を 5 台としている(6~7 台がより望ましい台数である)。この結果、デバンチャー電圧の非線形領域を使うことになり、縦方向のビームの劣化をもたらす可能性がある。以上より、マイクロバンチの幅に対する要求がない場合には、324MHz が有利であると思われる。

5. エネルギーアップグレードの観点からの比較

190 MeV から 400 MeV へ、1 段階あるいは多段階で増強する場合について、対応可能性を表3にまとめた。空洞のボア径を大きくすることは専用のデバンチャーを製作することになるため、エネルギーアップグレード時に捨てる空洞となる。すなわちボア径に余裕を取ることと表裏の関係となる。

3 2 4 MHz のケースでは、SDTL を正規の位置に設置して 972MHz のアップグレードパスを取ることによって一応可能であるが、当初から 972MHz のデバンチャーを使うケースよりも余計にコストがかかる。

表3 各検討ケースの得失

ケース	初期投資	空間電荷効果 RF 非線形性	空洞ボア径 の余裕度	1段階で 400MeV への アップグレード	多段階でエネルギーアップ グレード
S1	◎ 最小	○	△	◎：捨てる空洞がなく効率的	×：SDTL 空洞の再設置、A1～A3 と同じアップグレードで何とか可能である。
S2	○	○	○	○：デバンチャーNo2 は捨てることになる	×：SDTL 空洞の再設置、A1～A3 と同じアップグレードで何とか可能である。
S3	○	○	◎	○：デバンチャーNo1、2 は捨てることになる	△：A1～A3 のアップグレードで何とか可能である。SDTL 再設置は不要。
A1：ブリッジテスト成功が前提	△	△	△	◎：捨てる空洞がなく効率的、ただしブリッジ片側は捨てることになる	○（◎）：ブリッジの R&D、空洞のボア径の問題がクリアできれば最適選択肢となる
A2	△	△	○	○：デバンチャー2台を捨てることになる	△：エネルギーを変える都度デバンチャーを作る必要がある
A3	△	△	◎	○：デバンチャー3台を捨てることになる	△：エネルギーを変える都度デバンチャーを作る必要がある

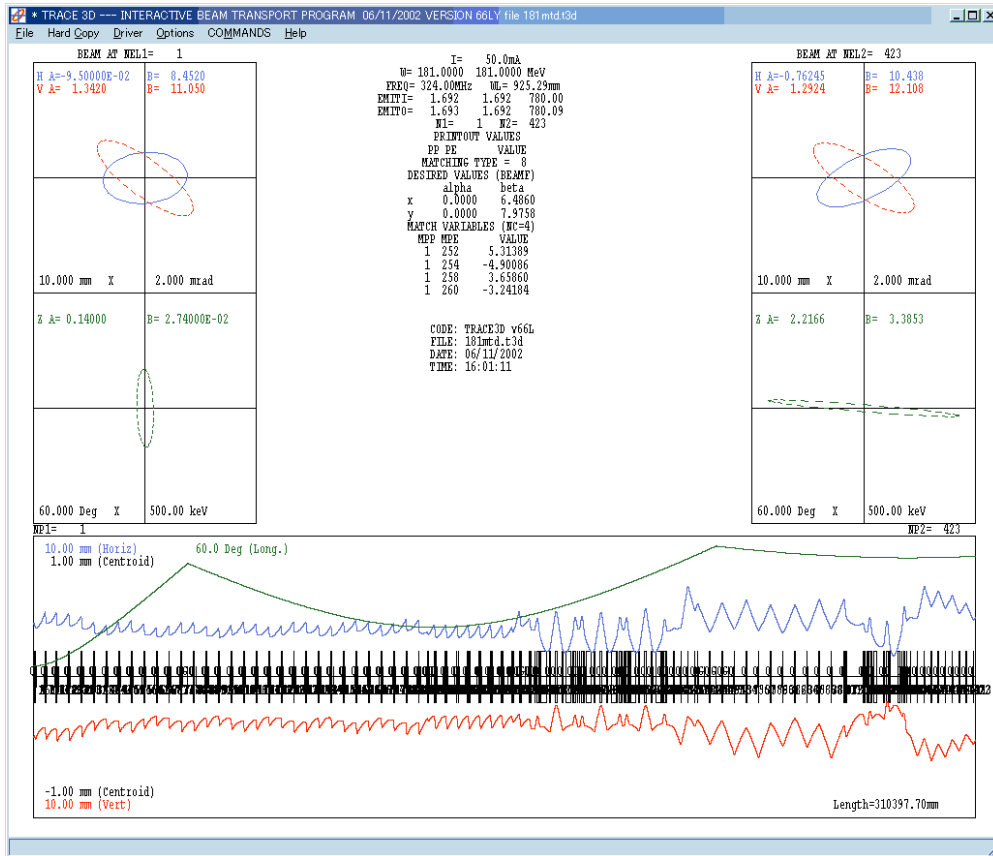


図1 L3BTMOD ビームエンベロップ解析結果 (324MHz ケース)

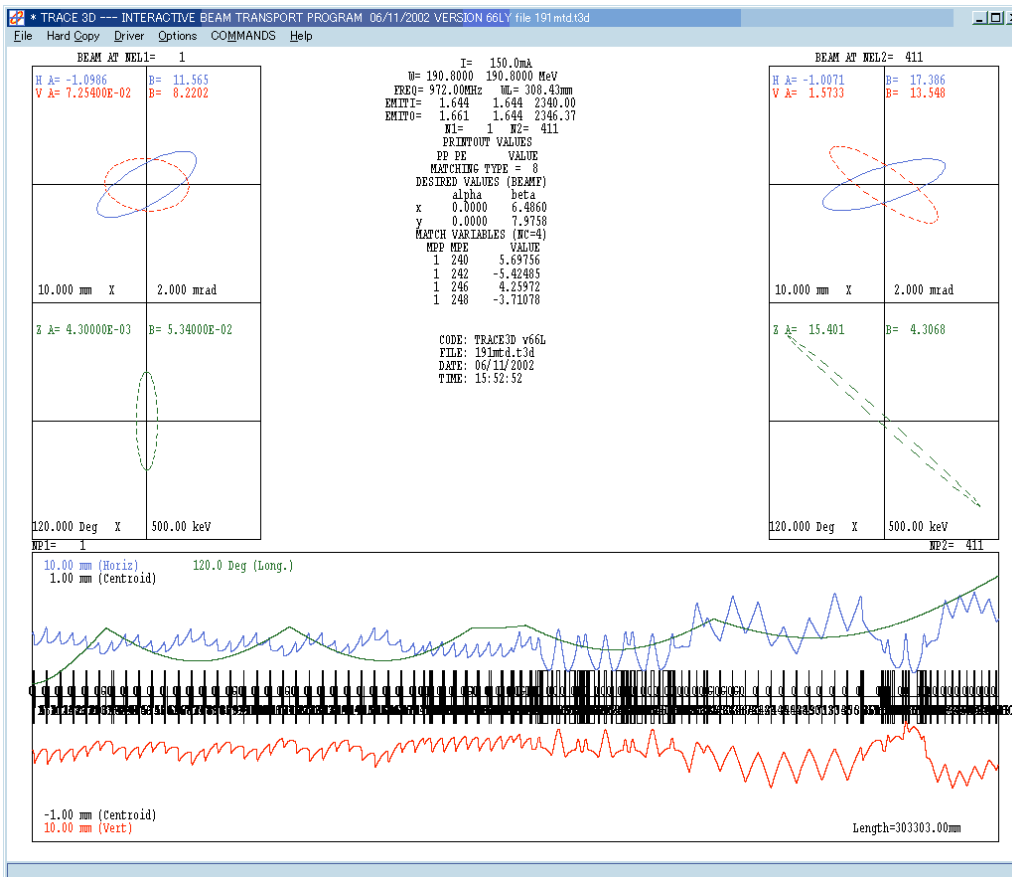


図2 L3BTMOD ビームエンベロップ解析結果(972MHz ケース)