

統合計画用リニアック-3GeV シンクロトロン間ビーム輸送系の設計

松岡雅則^{1,A)}、山本風海^{A)}、長谷川和男^{A)}、下崎義人^{B)}、池上雅紀^{B)}、加藤隆夫^{B)}

^{A)} 日本原子力研究所東海研究所

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

^{B)} 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

日本原子力研究所（原研）と高エネルギー加速器研究機構(KEK)は共同して、大強度陽子加速器計画を推進している。この加速器は、400MeV リニアックと、3GeV シンクロトロンリングおよび 50GeV シンクロトロンリングから構成される。本発表は、400MeV リニアックと 3GeV シンクロトロンリングをつなぐビーム輸送系(L3BT)に関するものである。ここでは、L3BT の各機器仕様を決めるために実施した基本設計検討結果について述べる。

1. はじめに

統合計画加速器^[1]は、400MeV リニアック(将来拡張で 600MeV)、3GeV シンクロトロンリング、50GeV シンクロトロンリングから構成される。表 1 に、統合計画加速器リニアックの基本仕様を示す^[2]。

本加速器の大きな特徴は、非常に大強度のビームを加速するという点である。このため、L3BT ラインには、空間電荷による影響を受けにくい設計が求められる。さらに、L3BT では、リニアックで加速されたビームをその質を劣化させることなく、輸送するだけでなく、3GeV リング入射の際にロスが発生しないよう、ビーム仕様を整える必要がある(表 1)。この 3GeV リングからの要求仕様を得るため、L3BT ラインには、横方向エミッタンス抑制用としてスクレーパが、運動量拡がり抑制用としてデバンチャーが、それぞれ配されている^[3]。

表 1 統合計画加速器リニアックビーム仕様

ビームエネルギー	400MeV
ビーム電流	50mA
加速周波数	324MHz(RFQ,DTL,SDTL) 972MHz(ACS)
パルス幅	500 μ s
繰り返し周波数	50Hz
<3GeV リングからの要求仕様>	
エミッタンス(横方向)	4 π *mm*mrad (un-normalized,100%)
運動量拡がり	$\pm 0.1\%$ 以内

2. L3BT の基本仕様

図 1 に、L3BT ラインのレイアウトを示す。L3BT ライン全長は 176m で、輸送用の各種電磁石、スクレーパ等から構成される(表 2)。各磁石の磁場強度は、ローレンツストリッピングによるビームロスが 1 W/m を越えることのないよう設定されている。

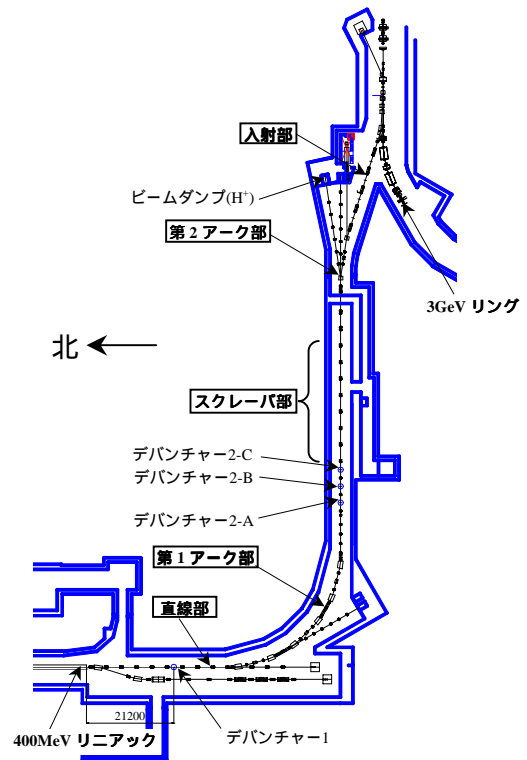


図 1 L3BT のレイアウト

表 2 L3BT 系の概略仕様
ビームライン全長(セプトム電磁石前まで)

	176m
偏向電磁石	8 台
四極電磁石	88 台
デバンチャー	2 台
スクレーパ	8 台
ビームダンプ	5 箇所

1) E-mail: matsuoka@linac.tokai.jaeri.go.jp、三菱重工業(株)より出向

3. ビームラインの設計

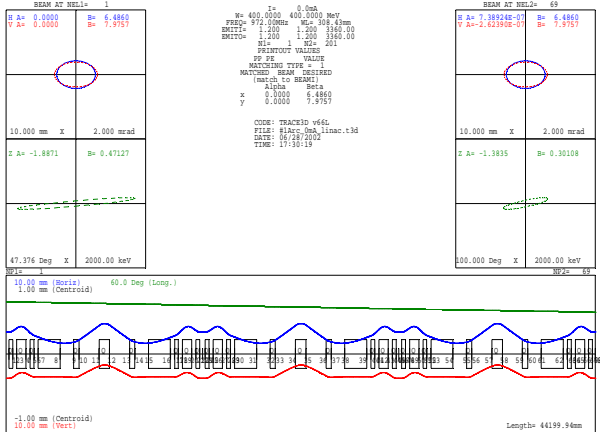
3.1 ビームラインの構成

(1) 直線部

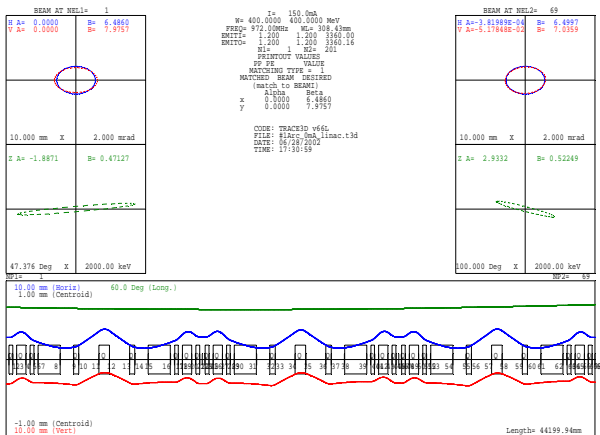
直線部は、400MeV リニアック出口から第1アーク部に至るまでのラインである。ACS から出力されたビームは、位相空間上にパンチされており、空間電荷の影響を強く受ける。そこで、直線部のラティスは、ACS と同じくダブレット構造とし、極力横方向の連続性を保った。

(2) 第1アーク部^[4]

第1アーク部は、南北に走る 400MeV リニアックから延長されたビームラインを東西のラインに偏向するためのラインである。ラティス構成は、DBA(Double Bend Achromatic)を3つ組み合わせたもので、空間電荷の影響を受けにくいアークとした。図2に、TRACE3D によるビームエンベロープ解析結果を示す。磁石の調整をしなくても電流の有無でアーク出口の Twiss parameters が大きく変化しない。



(a)電流 0mA



(b)電流 150mA (実際のビームのパンチの周波数は 324MHz であるので、空間電荷の評価のために、972MHz での等価な値 150mA を用いた)

図2 第1アーク部のビームエンベロープ (TRACE3D による解析結果)

(3) スクレーパー部^[3]

スクレーパー部は、横方向のビームハローを除去するために、第1アークと第2アークの間の東西に走る直線部に設けられる。1周期あたりの位相進みが 45° の FODO ラインで構成され、8ヶ所あるスクレーパーで、不要なビームは荷電変換フォイルを通過して陽子ビームに変換される。変換されたビームは、第2アーク部の最初の偏向電磁石で主軌道と逆の方向に曲げられ、コンクリートに埋め込まれた鉄製ビームダンプに捨てられる。

(4) 第2アーク部

第2アーク部は、3GeV へ入射するための入射角を得るためのアークである。偏向角は 17.6° で、一組の DBA ラティスで構成される。

(5) 入射部

入射部には、セプタム電磁石等、入射のための機器が並べられる。実際には、3GeV リングにある荷電変換フォイル部で入射に最適な条件が与えられ、これに応じた磁石の最適化が必要となるが、ここでは、セプタム電磁石の手前までの解析に留める。

以上の各部の間には、マッチングセクションが設けられ、スムーズな関数変換が行われる。ここでは、このセクションの磁石配置および強度の条件を、MAD および TRACE3D を用いて求めた。図3には、MAD で計算された、L3BT 系全体の関数を示す(空間電荷なし)。各セクション間で急激な関数の変動がないことが分かる。

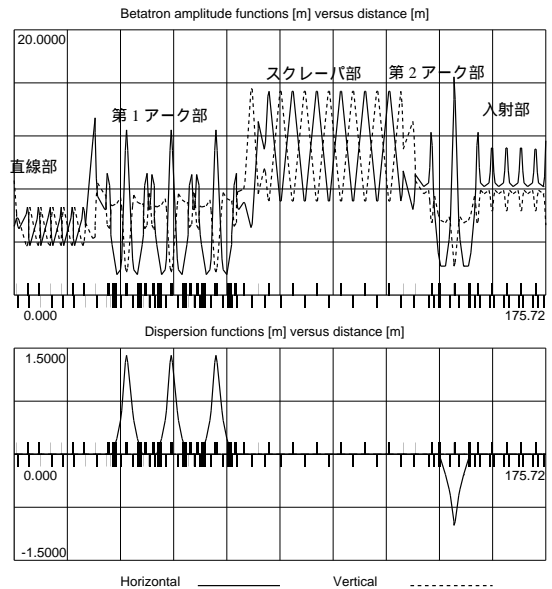


図3 L3BT 全体のツイスパラメータ (MAD による解析結果)

3.2 デバンチャー電圧の最適化

表1に示した 3GeV リングからの要求仕様のうち、運動量拡がり $\pm 0.1\%$ を満足させるために、デバンチャーが用いられる。デバンチャーには、パンチされたビームを縦方向の位相空間上で広げることにより、空間電荷の影響で生じる縦方向エミッタンス増大を軽減すると共に、3GeV 入射部で、運動量拡がり最

小になるよう調整する働きがある。L3BT ラインには、第 1 アーク部の直前と直後に、合わせて 2 台のデバンチャーが設置される。

図 4 にデバンチャー 1 (ACS 出口から 21.2m の位置) の電圧を 3.0MV 一定とし、アーク部直後のデバンチャー (デバンチャー 2) の電圧および設置場所を変化させたときの 3GeV リング入口における運動量拡がりの変化を示した。デバンチャー 2 の位置は、極力下流に設置するのが有利であることが分かる。

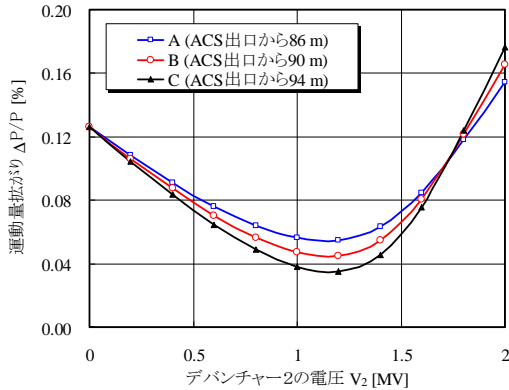


図 4 デバンチャーの電圧と 3GeV 入口での運動量拡がりの関係 (TRACE3D による解析結果)

3.3 ビームシミュレーションおよび横方向スクレーパの挙動

3.1、3.2 項で得られた条件で、ビームシミュレーションを実施した。解析には、PARMILA コードを用いた。解析結果を表 3、図 6 に示す。400MeV 出口から 3 GeV リング入口まで、大きなエミッタンス増加もなく輸送でき、要求仕様を満足している。

横方向のエミッタンス拡がりを抑制するために設置されるスクレーパ部のビーム挙動を、PARMILA コードを用いてシミュレーションした。スクレーパ設置部での 関数は、約 14.5m であるので、仕様の $4\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ のビーム径は、 $\sqrt{\epsilon\beta} = \sqrt{4 \cdot 14.5} = 7.6 \text{ mm}$ である。実際のスクレーパでは、この位置に荷電変換フォイルを配し、仕様を満足しないビームを陽子に変換し、第 2 アークの偏向電磁石で逆方向に曲げてビームダンプに導く構成となっている。ここでは、スクレーパ部に配置される荷電変換フォイルをスリットで模擬し、これに衝突するとビームが消滅するという条件で解析を行った。スクレーパの効果を見るために、表 1 に示した横方向エミッタンスの 3 倍のエミッタンスを持つビームをインプット条件とした。結果を図 7 に示す。スクレーパセクションで、ビームが適切に削られている様子が確認できる。

表 3 L3BT 出口のビーム仕様解析結果
横方向エミッタンス(99.9%)

水平方向	1.82 $\pi\cdot\text{mm}\cdot\text{mrad}$
垂直方向	1.82 $\pi\cdot\text{mm}\cdot\text{mrad}$
運動量拡がり	0.048%(半幅)
(99.9% エミッタンスより算出)	

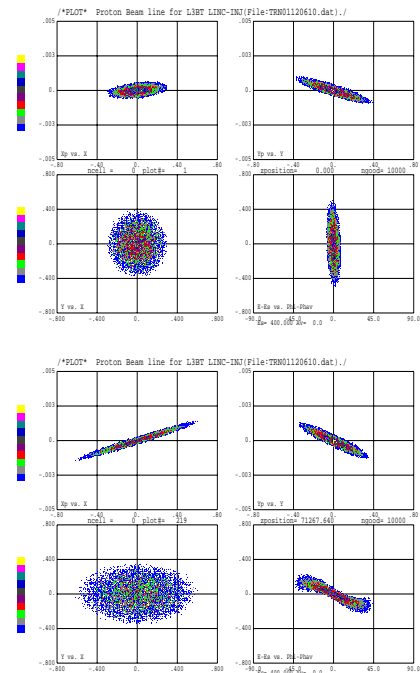


図 6 L3BT ラインのビームシミュレーション結果 (上段: L3BT 入口、下段: L3BT 出口)

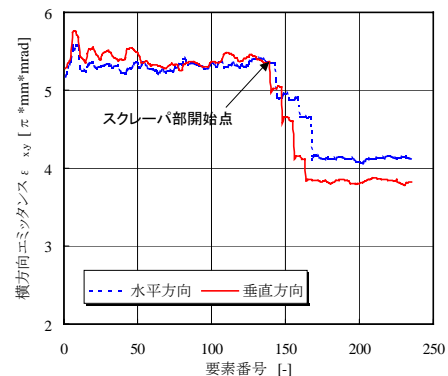


図 7 横方向エミッタンス(99.9%)の変化 (スクレーパの動作確認のため、大きなエミッタンスで計算した)

4. まとめ

L3BT ラインの主要な電磁石、デバンチャー、コリメータの仕様をビームエンベロープ解析、ビームシミュレーションにより検討した。今後は、3GeV での入射スキームとのマッチングを中心に検討を行う予定である。

参考文献

- [1] JAERI/KEK Joint Project Team, “Accelerator technical design report for high-intensity proton accelerator facility project”, 2002
- [2] 伊藤 崇 “大強度陽子加速器計画用リニアックの開発状況”, 本研究会
- [3] 山本風海, “ビームトランスポートシステム()-ビームロス局所化の設計-”, OHO2001
- [4] 加藤隆夫, “L3BT デザイン(1)アーク部について”, 内部資料