

# 1. はじめに

現在、日本原子力研究所（JAERI）と高エネルギー加速器研究機構（KEK）が共同で建設を進めている大強度陽子加速器計画では、3GeV シンクロトロンはリニアックから入射される 400MeV、333 $\mu$ A もの大強度のビームを 25Hz の早い繰り返しで蓄積・加速して後続の中性子散乱施設、および 50GeV シンクロトロンに打ち出す[1]。3GeV シンクロトロン加速終了時のビームパワーは 1MW にも達し、これは KEK PS メインリングのビーム出力（6.1 kW）のおよそ 164 倍にも達する[2]。表 1 に、PS メインリングと今回の 3GeV シンクロトロンのパラメータを示す。

表 1 PS-3GeV シンクロトロンパラメータ

	KEK 12GeV PS	3GeV シンクロトロン
加速 energy [GeV]	0.5~12	0.4~3
繰り返し周期 [秒]	2.2	40m
ビーム電流 [ $\mu$ A]	0.15	333
粒子数 [ppp]	$7 \times 10^{12}$	$8 \times 10^{13}$

この様に、今回の計画では現存する加速器と比較して、何桁も大きいビーム出力での設計を行っている。この様な大強度の陽子加速器において最も重要となってくるのは、空間電荷効果や様々な不安定性等によって発生するビームロスをしてできる限り低く抑える事

である。

現在、PS のトンネル内はビームロスによる放射化で停止後数日を経過しても平均数百 $\mu$ Sv/h、局所的には 30mSv/h 以上もの残留放射能が検出される。このため、放射線防護のため PS トンネル内での作業は一人あたり一回 1 時間～数分にまで制限されている。上述の通り、3GeV シンクロトロンは PS に比べて桁違いのビーム出力で設計を行っているが、いわゆる「hands-on-maintenance」を行うためには、加速器内の放射化を PS と同じ程度のレベルに抑える事が必要である。また、表 2 に示した世界の主なリング加速器のビームパワーとビームロスを見ると、各リングのビームパラメータはまちまちであるにも関わらず、リング全体としてのビームロス量には大きな違いは見られない[3]。この結果を見ても、ビームロス量が加速器のビームパワーのリミットを決定しているという事が判る。具体的に許容されるビームロス量の指標としては、1W/m、すなわちリング 1m につき 1W という量が一つの目安とされている[4][5]。

もちろん、今回の計画でもビームロスをできる限り減らすため様々な対策をしているが、それにも関わらず発生してしまうロスに関しては、シンクロトロン内の他の部分よりもアパーチャーを狭くセットしたコリメータをビームラインに設置する事で、ビームロスをそのコリメータに集中させ、他の機器の放射化を減らすよう設計を進めている。

本講義では、そのようにビームロスを局所化するためのリニアック-3GeV シンクロトロ

ンビームトランスポートライン (L3BT) の設計と L3BT 用・3GeV シンクロトロン用コリメータシステムについての説明を行う。

表 2 既存加速器のビームロスと放射化

	KEK 12GeV PS	LANL-PSR	ISIS
加速エネルギー	500MeV~12GeV	800MeV	70MeV~800MeV
ビーム電流	0.15 $\mu$ A	70 $\mu$ A	200 $\mu$ A
出力	6.1kW	56kW	160kW
ビームロス	入射ロス (10~20%) 取出しロス ( $0.2 \times 10^{12}$ pps) 総計約 400W	1st Turn Loss (0.2~0.3%) 蓄積ビームロス (0.3~0.5%) 速いロス (<0.1%) 総計約 400W	RF キャプチャーロス (70~100MeV、約 7%) 総計約 1kW
残留放射能	取出し部周辺数ヶ所 30~40mSv/h リング内のディスパージョン ファンクションの大きい場所 ~10mSv/h (ビーム停止 3 日後)	入出射周辺数ヶ所 ~200mSv/h 約 2/3 周の Q 電磁石 ~20mSv/h (ビーム停止 4.5 時間後)	SP1 (コリメータロス) ~50mSv/h SP2 6~7mSv/h SP0 ~3mSv/h (ビーム停止 1~2 日後)

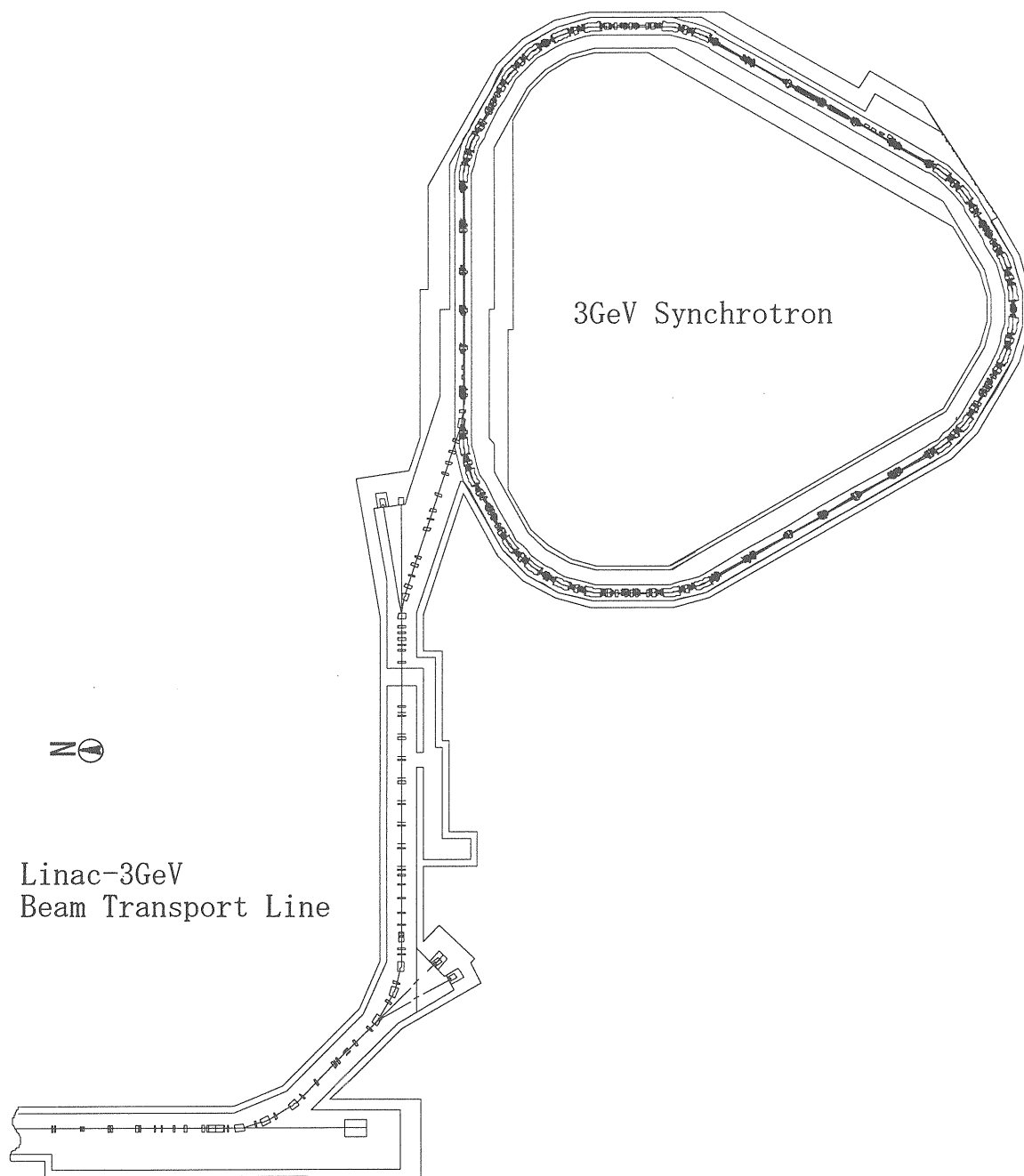


図1 統合計画リニアック-3GeV シンクロトロンビームトランスポートラインと  
3GeV シンクロトロン

## 2. リニアック-3GeV シンクロトロンビームトランスポートライン (L3BT ライン)

### 2-1 L3BT ラインへの要求事項

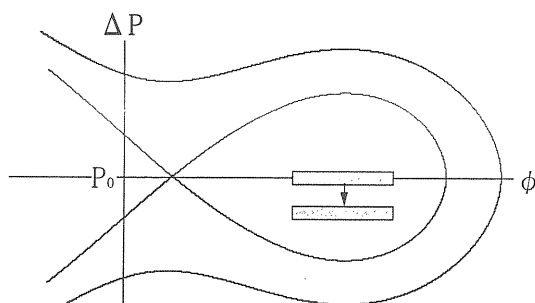
前述の通り、今回の計画では3GeVシンクロトロンでは $333\mu\text{A}$ という大電流のビームを蓄積・加速する。そのために、リニアック-3GeVシンクロトロンビームトランスポートライン (L3BT) は、ただビームを輸送すれば良いという物ではなく、リング内でのビームロスをもっと抑えられるよう、入射ビームに様々な制限を課さなければならない。そのために、L3BTラインに要求される機能としては

- 1) 入射ビームのエネルギー幅の制限機能 (運動量で $\pm 0.1\%$ 以内)
- 2) シンクロトロン入射点でのTwiss parameterのマッチング機能
- 3) 横方向のエミッタンスの制限機能 ( $4\pi\text{ mm}\cdot\text{mrad}$ 以下)
- 4) その他、必要な機器を入れるだけの十分なスペース

がある。

1)のシンクロトロン入射時のビームのエネルギー幅は、入射時間に依存して決定している。今回の3GeVシンクロトロンでは、各電磁石は25Hzの正弦波で励磁されるため、入射ペインティングの間中シンクロナス運動量は変動している。そのため、縦方向の位相空間内でのビーム入射点が、入射時間

の推移と共にスイープされていく (図2参照)。またその効果以外にも、入射の間に蓄積されている粒子はシンクロトロン振動・空間電荷効果等により、やはり位相空間内を広がっていく。



シンクロナス運動量が入射ペインティング中に変動するため、縦方向の入射点が移っていく。

図2 縦方向ビーム入射位置の推移

このような事を考慮して、入射ビームの運動量分散は3GeVシンクロトロン運動量のアクセプタンス1%に対して十分小さな値である0.1%に制限している。

2)、3)の機能は、シンクロトロン内の横方向の位相空間内の分布をより平滑にし、空間電荷効果の影響を小さくするために必要である。図3に入射ビームエミッタンスサイズおよび入射点でのTwiss Parameterの違いによる位相空間内での粒子密度の変化を示す。

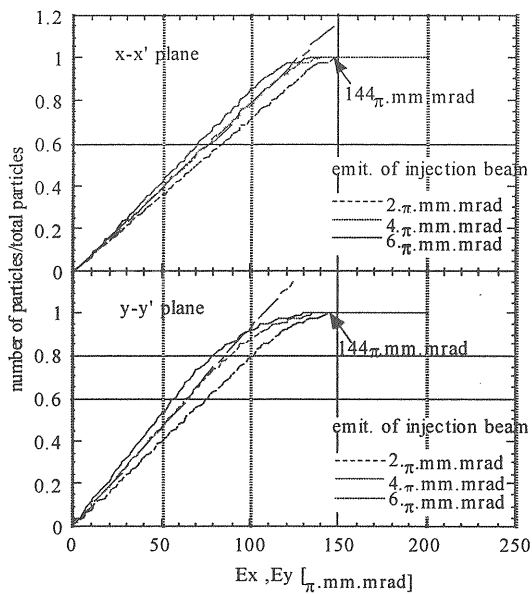
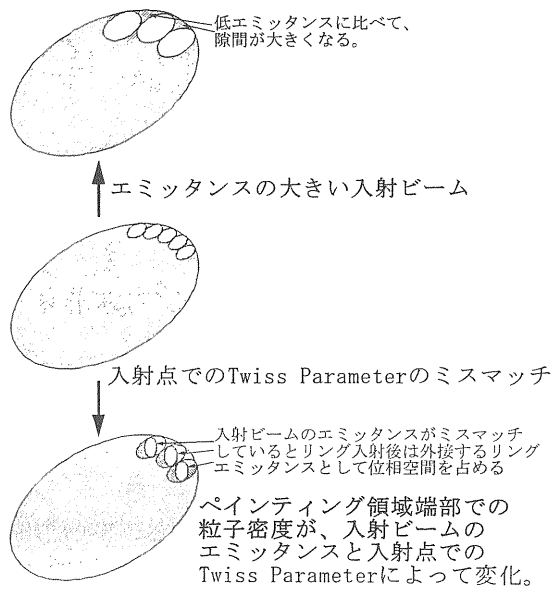


図3 入射条件と位相空間密度

ペインティング領域の端の部分（今回の計画では $144\pi$  mm. mrad）でのビーム密度は、入射ビームのエミッタンスが小さく、また入射ビームがペインティング領域（すなわち、シンクロトロン周回ビームのエミッタンス形状）と相似形をなしている程、一樣になる。位相空間内でのビーム密度をペインティング領域でできる限り一定とするため、上記の条件を可能な限り満たすように設計を行っている。また、L3BTでビーム整形を行う事で、3GeVシンクロトロン入射時のロスのコントロールも期待できる。4)のスペースとは、入射ペインティングを行うためのバンプ電磁石、リニアックの試験中でもシンクロトロン内で作業するために必要な遮蔽壁、デバンチャ、等を置くために必要なスペースを指している。

この様な多様な機能を実現するために、L3BTラインはいくつかのセクションに分けて設計を行い、それらセクションに様々な機能を振り分けて持たせている。以下、各セクションの設計について、簡単に述べる。

## 2-2 L3BT ライン設計

### 2-2-1 L3BTライン全体

L3BTライン全体のTwiss Parameterを図4に示す。L3BTラインの設計の際には、ローレンツストリッピング[6][7]を考慮して、磁場強度が強くなり過ぎないようにしなければならない。ローレンツストリッピングによるロス $1\text{W/m}$ 以下に抑える為に、磁場強度の上限を $0.5\text{T}$ として設計を行っている。また、空間電荷効果によるビームブローアップを抑える為に、 $\beta$ 関数の最小値が出来る限り大きくなるように設計を行っている。

### 2-2-2 $90^\circ$ アークセクション

$90^\circ$  アーク部では、入射エネルギー幅を制限するための運動量コリメータが置かれる。運動量方向のコリメーションは、ディスパージョンによる軌道の増減を利用して規定の運動量以上の粒子（今回は絶対値 $0.1\%$ 以上）を除去する。この様に縦方向の分散を横方向の分散に変換してコリメーションを行うため、本来のビームの横方向の広がり $\beta$ とディスパージョンによる軌道の増加とが混じり、規定の運動量以上の粒子であってもコリメータで切る事が出来ない可能性がある（図5参照）。この効果は、横方向のビームの広がり $(\propto \beta)$ を出来るだけ小さくし、逆にディスパージョンを大きくする事で改善される。そのため、 $90^\circ$  アーク部は $\beta$ 関数が $18\text{m}$ 、 $\eta$ 関数が $23\text{m}$ で設計されている。L3BTの運動量コリメータの詳しい説明は、3-3で行う。

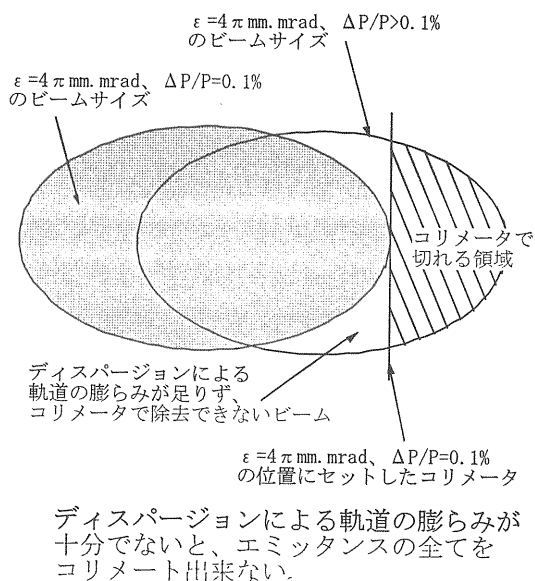


図5 運動量コリメータ概念図

### 2-2-3 $90^\circ$ アーク-コリメータ マッチングセクション

このセクションでは、 $90^\circ$  アークとコリメータ部とのオプティクスのマッチングを行う。また、この領域には運動量分散を小さくするデバンチャーが置かれる。

### 2-2-4 コリメータセクション

コリメータセクションには、横方向のハロービームを除去するコリメータが置かれる。位相空間上の $4\pi\text{mm.mrad}$ 以上の粒子を、エミッタンスの楕円に沿って除去するために、単純なFODOで組み1セル当りの位相進度が $45^\circ$ のphase advanceとなるように設計している。L3BTの横方向コリメータの詳しい説明は、3-3で行う。

## 2-2-5 コリメータ-入射マッチング セクション

このセクションでは、コリメータ部と入射部とのオプティクスのマッチングを行う。また、リニアックと3GeVを仕切る隔壁を置くため、長いドリフトスペース (7.5m) を設けている。

## 2-2-6 入射セクション

入射セクションでは、リングへの入射ビームのTwiss parameterの調整を行う。また、入射ペインティング用Y方向バンプを、入射点から $\pi$ 位相の戻った点に置いている。なお、入射ペインティング、荷電変換その他入射方式に関する詳細な説明は、本テキストおよび過去のOH0テキスト[8][9]により詳しい説明があるので、そちらを参照されたい。

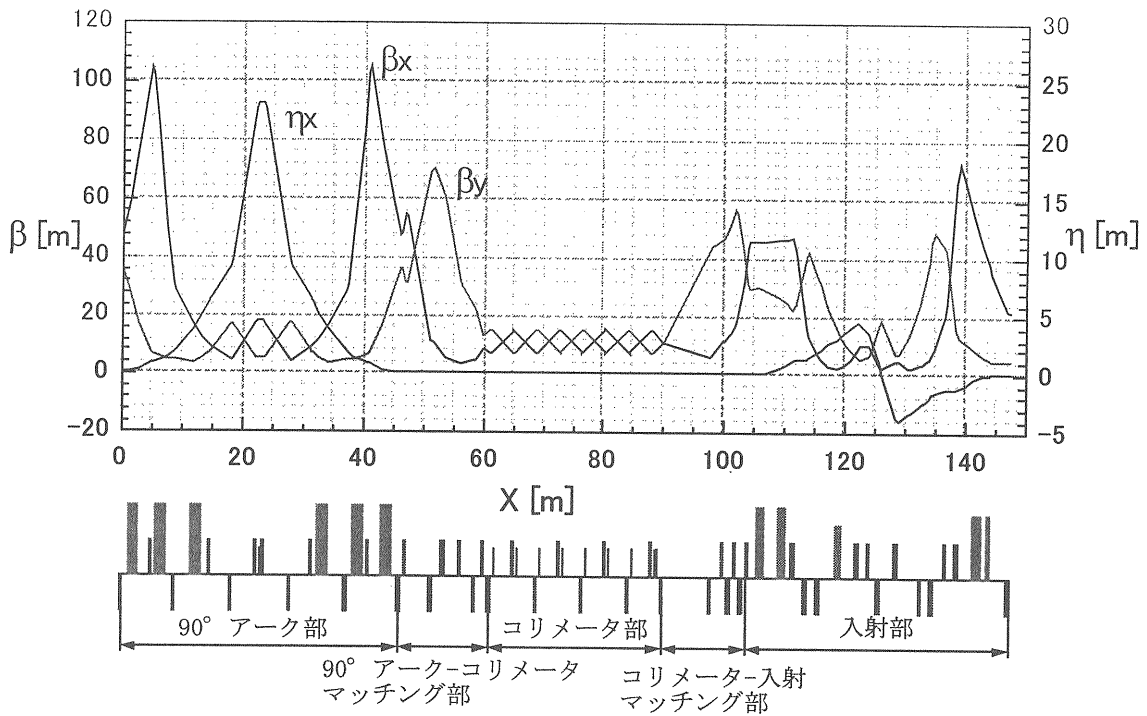


図4 Twiss Parameter of L3BT Line

### 3. コリメータシステム

#### 3-1 コリメータ概要

L3BT用および3GeVシンクロトロン用コリメータは、共に規定された以上のエミッタンスあるいは運動量のビーム（ハロービーム）を除去するために設置される。コリメータシステムの基本的な考え方は、ビーム中心からある一定の間隔だけ離れた位置にプライマリーコリメータを配置し、そのプライマリーコリメータに当たった粒子を除去する、という物である。

この基本的な考え方を除くと、L3BT用コリメータと3GeVシンクロトロン用コリメータのデザインはビームの違い（H<sup>-</sup>とH<sup>+</sup>）、コリメータの通過回数（1回か複数回か）の違いによって異なった物となっている。この章では、そうした違いを踏まえてそれぞれのコリメータシステム的设计について説明する。

#### 3-2 3GeV シンクロトロン用 コリメータシステム

3GeVシンクロトロン用コリメータシステムとしては、2ステージコリメーションと呼ばれる方式が採用されている[10]。これは、ビームハローを散乱させるプライマリーコリメータと、その下流に置かれるセカンダリーコリメータから構成される（図6参照）。

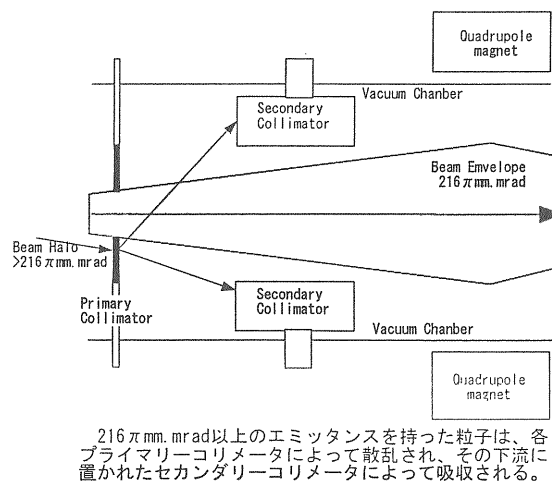


図6 コリメータシステム概念図

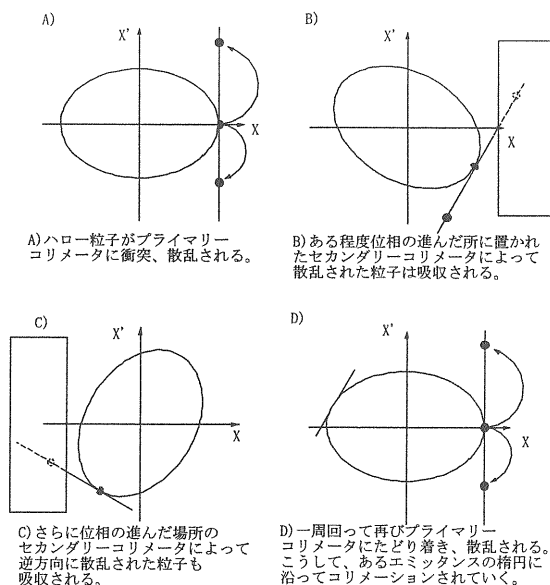


図7 位相空間内での散乱粒子の動き



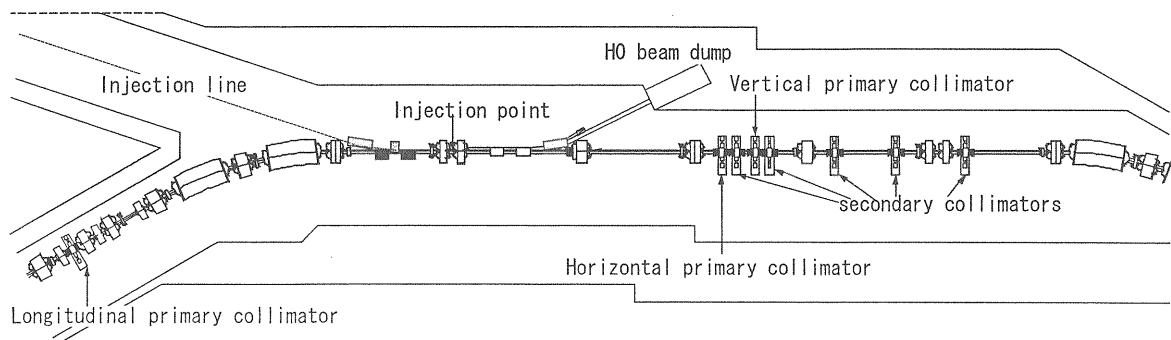


図8 コリメータ配置図

プライマリーコリメータによって散乱された粒子は、位相空間内で角度方向にシフトされ、その後位相が進むにつれて変位が増大し、下流に置かれたセカンダリーコリメータによって吸収される（図7参照）。このため、プライマリーコリメータから位相 $\pi$ 進む間にビームロスを集らせる事ができる。現3GeVシンクロトロンでは、このロスを集らせる領域として、入射部後方の1.5セル分をあてている。

水平および垂直方向のプライマリーコリメータは、この1.5セルの先頭に配置されている。一方、運動量方向のプライマリーコリメータは入射・コリメータ用直線部の直前のアーク部中でディスパージョンが最大となる位置に置いてある（図8参照）。運動量プライマリーコリメータに関しては、アーク部には吸収用のセカンダリーコリメータを配置するスペースが無いため、散乱によるエミッタンスの増加をフィジカルアパーチャーとコリメータアパーチャーの間になるように抑え、アーク部の残りの部分と入射部でロスする事無く通過させ、その後ろに配置され

ている水平および垂直方向用のコリメータシステムで除去する設計となっている。

また、このように、水平方向プライマリーコリメータと運動量用のプライマリーコリメータを別にする事で、水平方向と運動量それぞれのビームハローを独立に除去する事が可能となり、特に水平方向のビームサイズを運動量に依存せず一定の値とする事ができる。図9に運動量の違いによるコリメータアパーチャーの変化を示す。

吸収用のセカンダリーコリメータは全部で5台配置する設計となっており、その位置は位相空間上での粒子の位相の進み具合と、四極電磁石でのビームロスの低減化から決定している。

表3 アパーチャーサイズ

Painting emittance	144 $\pi$ mm. mrad
Physical aperture	>324 $\pi$ mm. mrad
Primary collimator aperture	216 $\pi$ mm. mrad
Secondary collimator aperture	>216 $\pi$ mm. mrad <324 $\pi$ mm. mrad

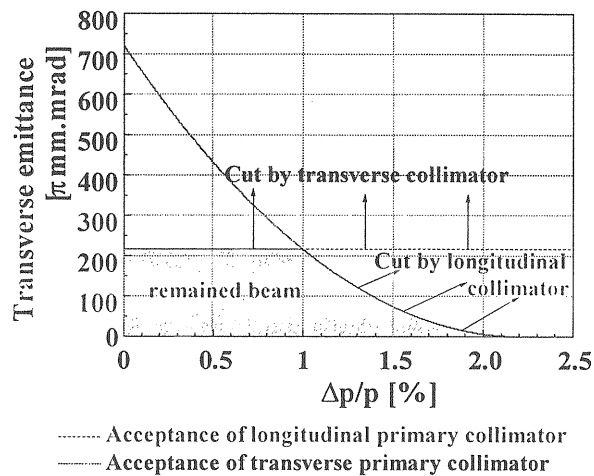


図9 プライマリーコリメータアパーチャーの運動量依存性

### 3-3 L3BT コリメータシステム

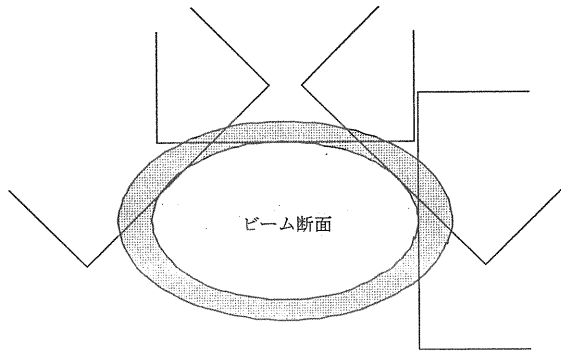
BTラインは、シンクロトロンと違いビームが一度しか通過しないため、ある程度の位相の間隔を置いてプライマリーコリメータを置く必要がある。また、粒子もHであるため、プライマリーコリメータに衝突させると粒子の電荷が変わり、衝突後のオプティクスが変わってしまう。そういった条件の違いから、L3BT用のコリメータシステムは、プライマリーコリメータを荷電変換フォイルとする事によって、粒子の散乱角度を抑え、荷電変換した粒子をベンディングマグネットでビームラインと逆側に設置したビームダンプへ導く、という方式としている。米国で進められているSNS計画でも、似たようなBTライン用のコリメータが考えられている[11]。この方式の利点は、高放射化が見込まれ取り扱いの難しいセカンダリーコリメータを省く事

ができる、という事である。(一部設置している部分も存在する。)

L3BT用コリメータは、シンクロトロンと同様、0.1%以上の運動量を持った粒子を削る運動量方向コリメータと、横方向のエミッタンスで $4\pi$  mm. mrad以上のビームを削る水平・垂直方向コリメータを別個に設置する。運動量方向コリメータは $90^\circ$  アーク部の中心に一組、水平・垂直方向コリメータは $90^\circ$  アーク部の後方に置かれたコリメータセクションに合計8組(水平4、垂直4)配置される。冒頭で述べた通り、BTラインはビームが一度しか通過しないので、エミッタンスの楕円に沿ってコリメートするために、横方向コリメータ部のオプティクスはベータatron振動が1セル辺り $45^\circ$  となるように設計している。

また、運動量方向コリメータの直後のドリフト空間には、荷電変換によって大きく膨らみ、ダンプまで到達する前にロスしてしまうビームを局所的に集中させるためのセカン

ダリーコリメータを置いている。各コリメータの配置を、図11に示す。



位相が45°進むごとにコリメータを置く事でエミッタンスの楕円に沿ってコリメートする。

図10 L3BT横方向コリメータ

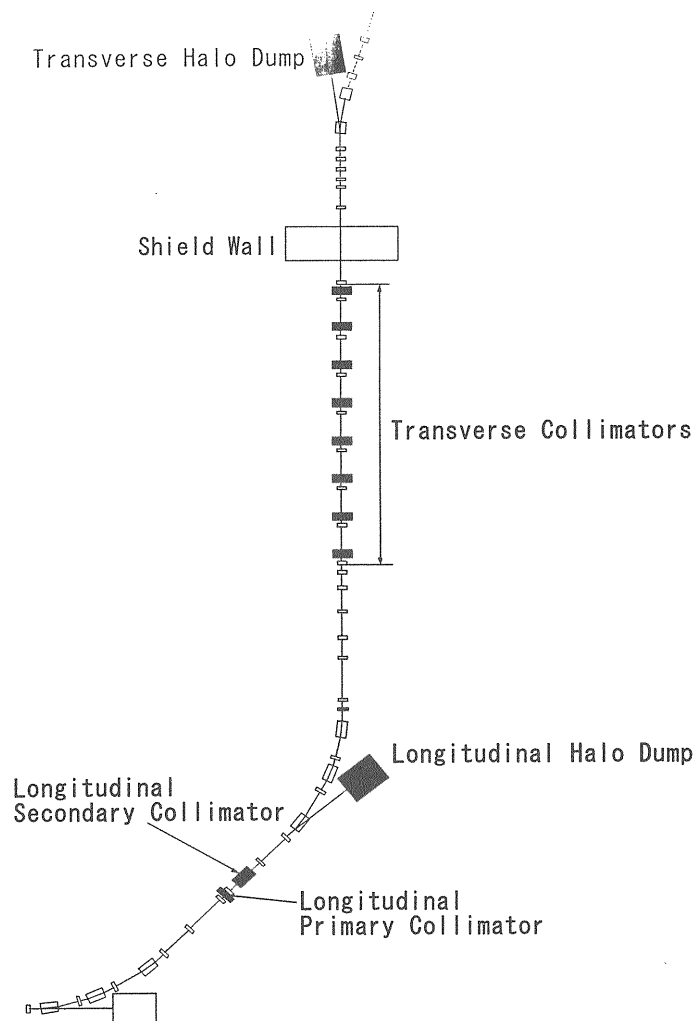


図11 L3BTコリメータ配置図

### 3-4 コリメータによるビーム

#### ロス局所化の評価

前述の様に設計したコリメータシステムによって、どの程度ビームロスを局所化できるかの検討は、STRUCTコード[12]を用いて行っている。STRUCTコードはトランスフォーマー・マトリックスによる粒子トラッキングを行い、粒子のX、Z座標がターゲットおよびコリメータの設定値より大きくなった際には衝突したものとし、散乱角およびその際のエネルギーロスを計算、粒子のエネルギーが所定の値以下になった時点でロストしたと判断している。また、計算の際には予めビームハローの分布とその総量を与えてやる必要がある。計算に使用したハロー分布の例を図12に示す。現在の所、この様なハローは4kW存在すると仮定している。

この様な条件で、計算を行った一例を図13、14に示す。この計算結果では、L3BT、シンクロトロンともにビームロスの99%程度はコリメータもしくはビームダンプによって吸収されている。

ビームロスの局所化の効率性は、ハロービームの分布の仕方、どのオペレーションポイントで加速器の運転をするか、コリメータのアーチャーをどの程度とするか、等々の条件により変わってくる。幾つかの条件下での計算結果については文献[13]を参考にして欲しい。

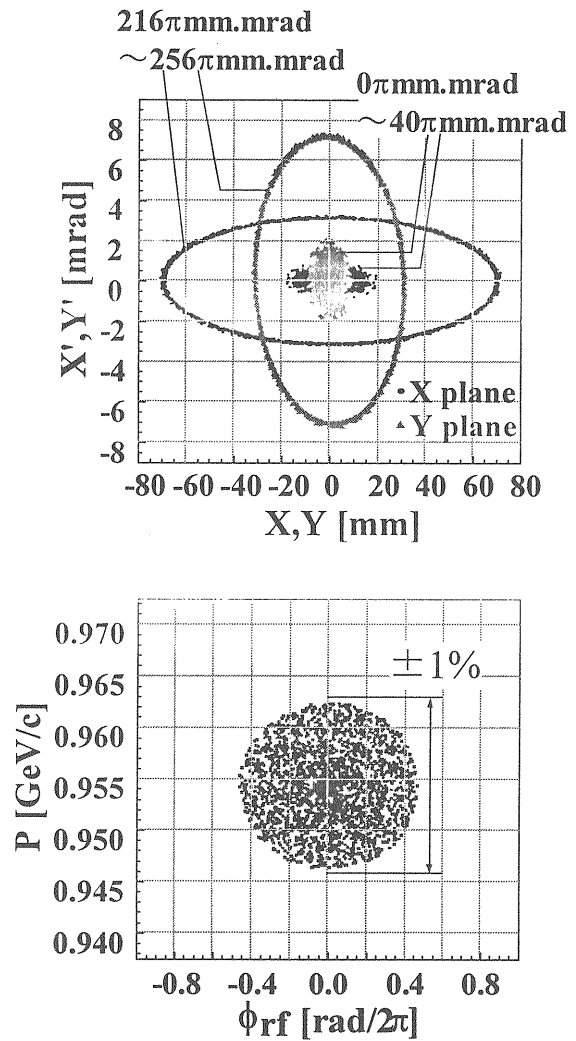


図12 計算で仮定したハロー分布

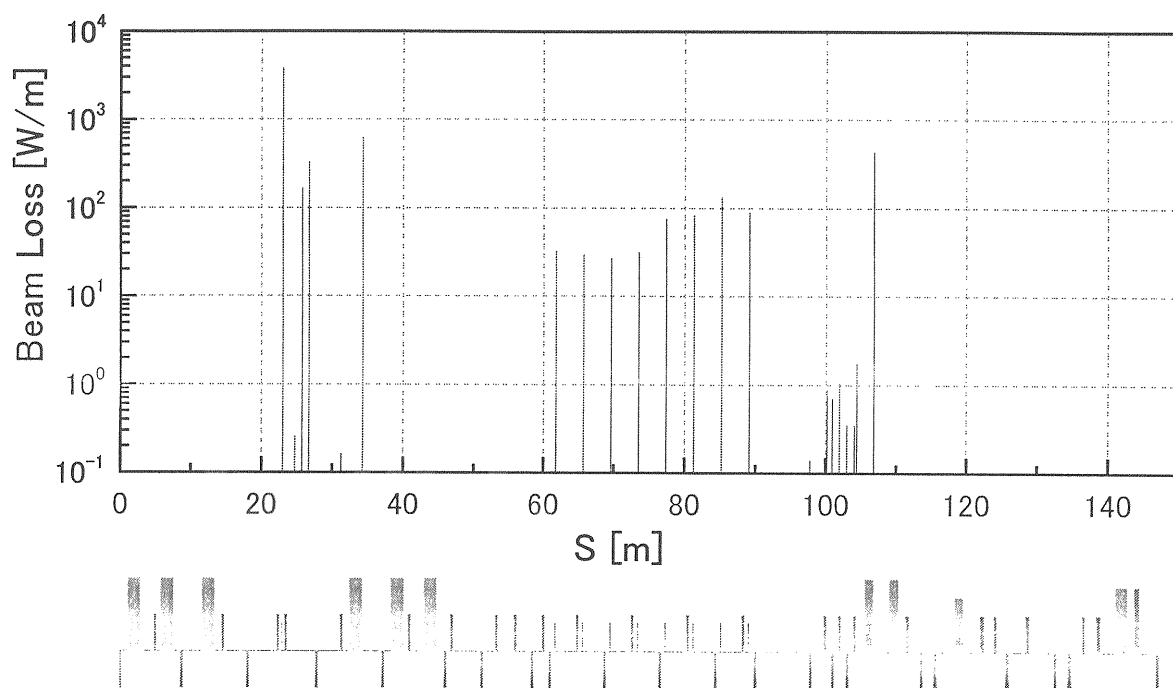


図13 L3BTビームロス分布

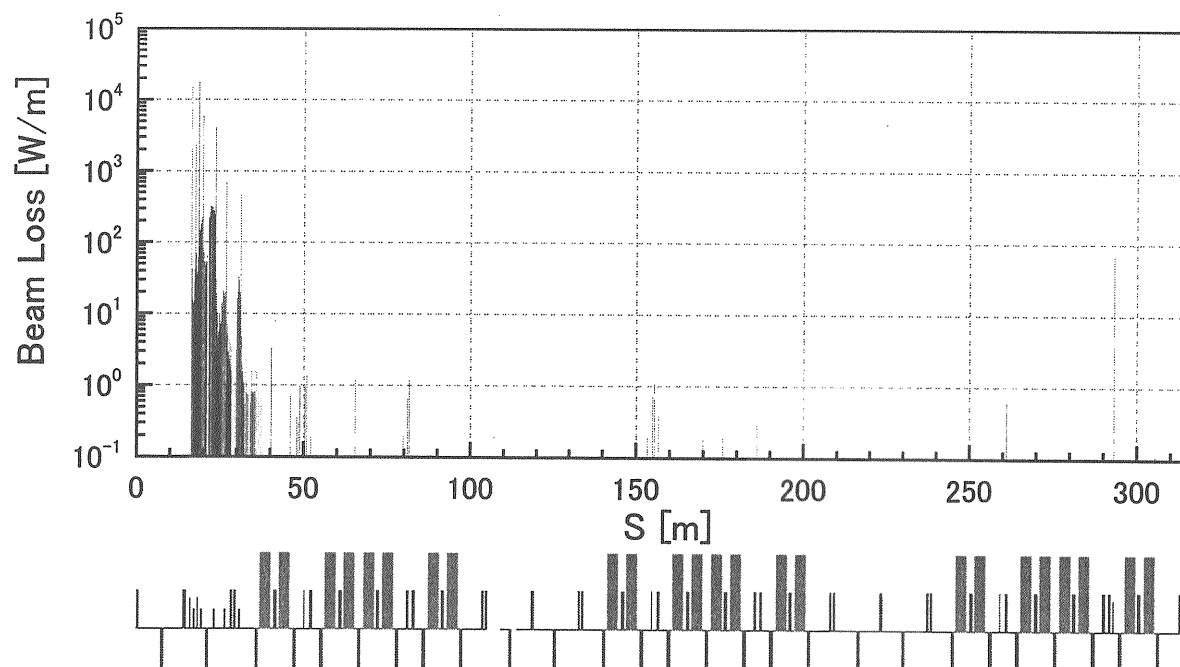


図14 3GeVシンクロトロンビームロス分布

### 3-5 ビームロスによる放射化の評価

STRUCTを用いて得たビームロス分布を元に、加速器トンネル内での放射化の評価はMARSコード[14]を用いて行われている。MARSコードに関しては、過去のOH0[15]に詳しい

説明があるので、興味のある方はそちらを参照して欲しい。ここでは、MARSコードによる計算例を示すに留める。

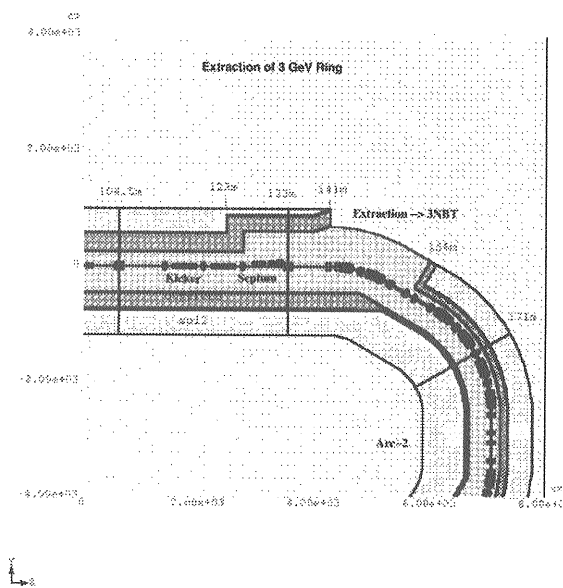


図15 MARSコードによる出射部  
トンネルジオメトリ

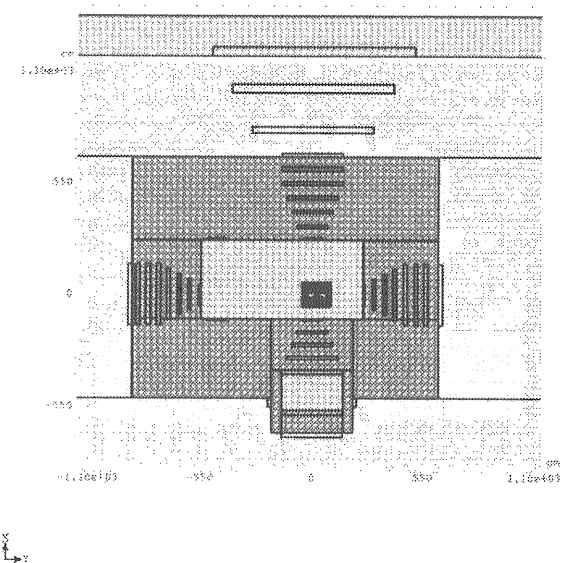


図16 トンネル断面図

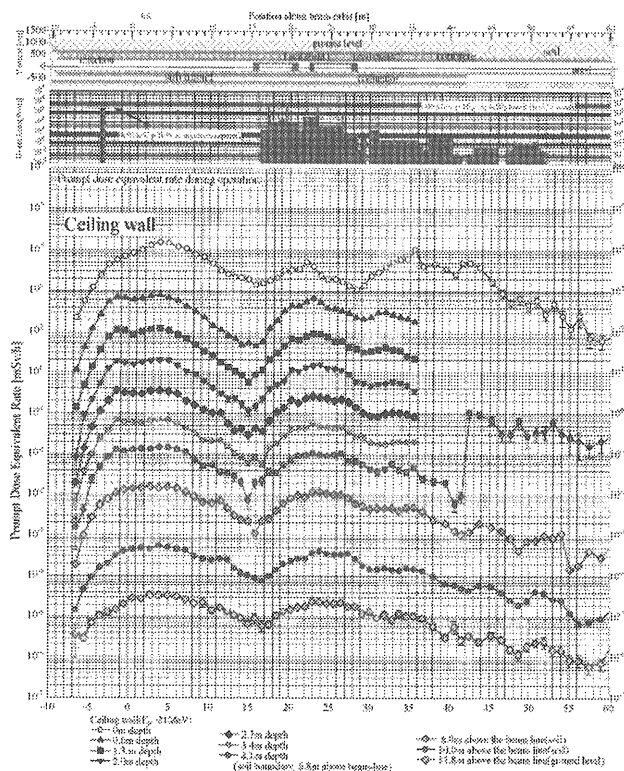


図17 MARSによるトンネル周辺の  
放射化の評価結果

### 3-6 コリメータの機器設計

最後に、コリメータに関して現在進めている機器設計に関して簡単に触れる。実際のコリメータを機器として設計する際には、様々な問題点を解決しなければならない。

まず第一に考えなければならないのは、コリメータ自身の放射化とその対応である。STRUCT の計算では、一台のコリメータに集中する最大のビームロスが 1.2kW にも達する、という結果が出ている。これは、既存の加速器の全出力にも相当するほどのビームパワーであり、コリメータに予想される放射化量もコリメータ表面で数 Sv/h という莫大な物となる。そのため、まずコリメータ自身がそれだけの線量にも耐えうるように設計を行わなければならない。ビームロスの状況によってはコリメータのアパーチャーを動かす必要性もあるため、コリメータは電動での可動を行えるよう設計を行っているが、絶縁材等、耐放射線性を考慮した材料選定を行わなければならない。また、故障による交換の際にはその残留放射線による被曝をできる限り低減するようコリメータ自体を遮蔽体で囲み、可能な限り遠隔、あるいは短時間の作業での交換できるような構造としなければならない。

それ以外にも、1.2kW のビームによる発熱の除去の方式、コリメータ本体により誘起されるインピーダンス等も問題である。現状では、これらの問題に対処する明確な方針はまだ決まっていない。そのため、以上の問題点の解決を図るために、種々の試験を行うコリメータ試作機の設計を行っている所である。

## 参考文献

- [1] 富澤正人 「KEK/JAERI統合陽子加速器計画の概要」本テキスト
- [2] 入江吉郎 私信
- [3] 山根功 私信
- [4] N.Mokhov and W.Chou *et al*, “Beam Halo and Scraping”, the report of the 7<sup>th</sup> ICFA Mini-workshop, Lake Como, Wisconsin, 1999.
- [5] JHP Project Office, “JHF ACCELERATOR DESIGN STUDY REPORT”, KEK Report 97-16, JHF-97-10, March 1998
- [6] Andrew J. Jason, Daniel W Hudgings, Olin B van Dyck, IEEE TRANS. on Nucl. Sci., NS-28, 2704 (1981).
- [7] M. S. Gulley *et al*, Phys. Rev. A, 53(5), 3201(1996)
- [8] 野田文章 「3GeV及び50GeVリング概要」本テキスト
- [9] 入江吉郎 「ビーム入射とハロー収集」 OII096' テキスト(1996)
- [10] T.Trenkler and J.B.Jeanneret, “The principles of two stage betatron and momentum collimation in circular accelerators”, CERN-SL/95-03(AP), February (1999).
- [11] N.Catalan-Lasheras and D.Raparia, “The Collimation system of the SNS transfer lines”, Proceedings of PAC' 01 (2001)
- [12] A.Drozhdin, N.Mokhov, “The STRUCT Program User's Reference Manual”, FNAL, January 2001.
- [13] K.Yamamoto and M.Kinsho *et al*, “Beam Collimator Design for The 3GeV Synchrotron of The JAERI-KEK Joint Project”, Proceedings of PAC' 01 (2001).
- [14] N.V.Mokhov, “The MARS Code System User's Guide Version 13(95)”, FERMILAB-FN-628 (1995).
- [15] 中尾徳晶 「MARSによるハドロンカスケード計算」 OHO' 99 テキスト(1999)