「加速器」Vol. 6, No. 1, 2009（79–82）

特集2　KEKB Bファクトリーのコミッショニング

入射路及び入射システムの立ち上げ

菊池　光男*

Commissioning of the Beam-Transport and the Injection System

Mitsuo KIKUCHI

1. 入　射　路[1)]

入射路は，電子陽電子線型加速器（以下Linac）の下流端からKEKBリング入射点に至る延長距離およそ450 mのビームラインである．Linacで加速された8 GeV電子及び3.5 GeV陽電子に対応して，それぞれ独立した2本のビームラインからなる．トンネルはできる限りトリスタン時代の入射路トンネルを再利用している．例外は，蓄積リング（AR，現在のPF-AR）を迂回するための「直接入射路」で，その名の通りLinacからARに至るAR入射路トンネルと，ARからMRへ至るMR入射路トンネルとを直接結ぶ延長125 mのトンネルである．直接入射路のあとは電子陽電子別々のトンネルを通り各入射部へ向かう．

入射路の概略を**図1**に示す．AR入射路トンネルはもともとビームエネルギー3 GeVに対して設計されたトンネルであり，ここに2本のビームラインを収納するため，ビームラインは2段重ねの構造をとった．直接入射路においても，トンネルの幅を節約するため2段重ね構造を踏襲した．Arc-1の上流からみたビームラインの写真を**図2**に示す．上の段が陽電子（床から1.2 m），下の段が電子ライン（同0.6 m）である．Arc-1の直後でビームラインは水平方向に分離される．ここで床が1.2 m下げられるとともに，陽電子ラインはArc-1とArc-2の間で1.5 m垂直方向に下げられ，電子ラインの下側に来る．これは，陽電子ラインがMR入射路（KEKBトンネルに向かって斜路になっている）の途中に合流するためである．この結果，Arc-2では電子ラインが床から1.8 m，陽電子ラインは同0.9 mの高さとなる．ここでもトンネル幅節約のため2段重ね構造をとるが，それまでと異なり上下関係は不規則にならざるを得ず，建設上苦労し

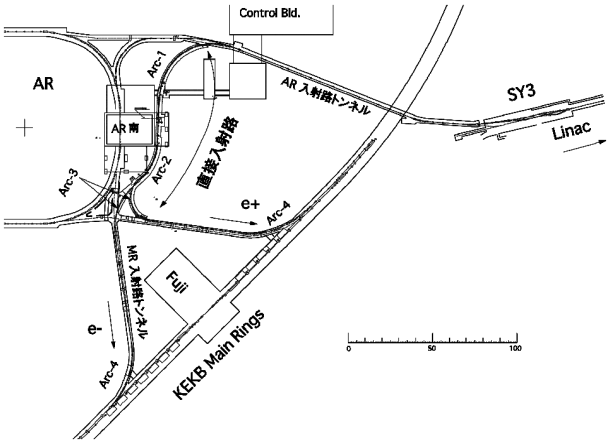

図1　入射路の概略図

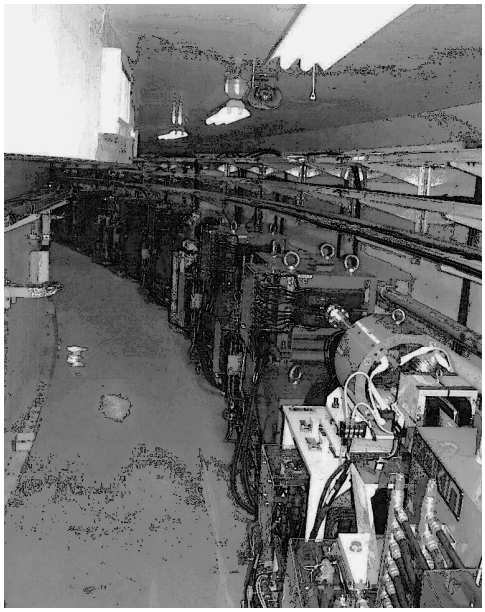

図2　2段重ね構造のビームライン

* 高エネルギー加速器研究機構（KEK）
（E-mail: kikuchim@post.kek.jp）

た部分の一つである．Arc–2 の最後で再び両ビームラインは水平方向に分離され，Arc–3 を通って MR 入射路トンネルに入る．

表 1 にビームパラメータを示す．KEKB の設計ルミノシティーにおいては，ビームはほとんど連続的に入射される．入射路の設計において，最初に懸念されたのは，途中のビーム損失による放射線が許容量をこえ，運転が不能になるという可能性であった．特に陽電子の場合，そのエネルギー幅及び裾が広いため，より可能性が大きい．場所としては，Linac 下流端の第 3 スイッチヤード（SY3）から直線部，第 1 アーク部（Arc–1），第 2 アーク部（Arc–2）近辺が，地上とトンネル天井部との距離が近いため（最小コンクリート 40 cm＋土 1.1 m），可能性が大きい．このことから，エネルギー幅圧縮システム（ECS）が，SY3 に設置された（**図 3** 参照，e^+ ライン最上流に位置するシケイン及びその下流の加速管が ECS を構成する）．ビーム損失を局所化して放射線遮蔽を容易にするため，コリメータを設置し（SY3 出口，Arc–1 入り口），また遮蔽用の築山を，Arc–1 入り口および Arc–3 入り口に置いた．Arc–1入り口ではトンネル天井に鉄シールドが置かれその上に土盛りされている．さらに，放射線最大許容量自体を上げるため Arc–1 の地上部を放射線監視区域とした．

第 2 の懸念は Linac ビームのハローが予想より広がっていて，Belle 検出器に対して大きなビームノイズを与えるかもしれない，ということであった．これに対処するため再びコリメータを設置することにした．放射線の問題が生じないようにトンネル深さが深い MR 入射路トンネル部に設置し，2 次散乱まで考慮した設計とした．

ふたを開けてみれば，上に述べた 2 つの問題は幸いにも杞憂であって，ごく初期を除いてコリメータを閉める必要は，実際には生じなかった．いずれにせよ，Linac から来るビームの質に関して十分な対策をしておくことによって，残るビームラインの建設に安心して取り組めばよい，ということになるのだが，これはこれで困難の連続であった．

1.1　オプティクス

曲率半径の小さな曲線部が連なるビームラインであるため，単純なノーマルセルでは，R_{56} 成分（転送行列の（5, 6）成分：経路長の運動量依存性）によるバンチ長の伸びが無視できなくなり，KEKB リングの運動学的口径を越えてしまう．このため，ほとんど全ての Q 磁石を独立励磁とし，いわば力ずくで，R_{56} 成分を小さくするオプティクスを採用した．

1.2　トンネル建設

合計 3 ヵ所に既存のトンネルとの接合部があり，AR 南実験室トラックヤードはアンダーピニング（実際には床を一時撤去して再構築）し，さらに AR 南実験室南西部の地中杭柱を切断して，トンネル天井に載せ替える，など複雑な構造であったが，ほぼ 1 年間の工期で 1997 年中に完成した．また同時に，AR を KEKB とは独立した放射光施設として再利用するための輸送ラインの建設，分離壁の設置，電源室の移動，ケーブルの引き直しなども行わなければならなかった．

1.3　電磁石製作

表 2 に電磁石台数を示す．この中では，新規製作（new 欄）の偏向電磁石の製作が，当初うまくいかず，最後まで建設の律速要因となった．コイルは，ホローコンダクターにエポキシセミキュアテープを巻き，熱処理する方法で製作した．30 台ほど製作した

表 1　入射路のビームパラメータ

	Positrons	Electrons
Energy	3.5 GeV	8 GeV
Emittance (Linac)	2.2×10^{-7} m	1.6×10^{-8} m
Acceptance (BT)	3.6×10^{-7} m	4.6×10^{-7} m
Energy spread (Linac)	1.25×10^{-3}	1.25×10^{-3}
Energy acceptance (BT)	2.5×10^{-3}	2.5×10^{-3}
Bunch length (Linac)	3.4 mm	1.7 mm
Bunch length (BT: end)	7.0 mm	7.1 mm

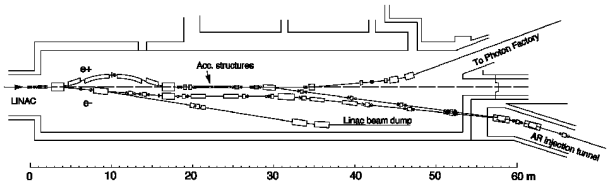

図 3　ビームライン先頭部

表 2　電磁石台数のまとめ

	Electron		Positron	
	total	new	total	new
Bend	67	46	56	56
Quad	60	15	61	34
STH	27	10	21	21
STV	37	9	33	33

段階で，ランダムに選んだ完成品コイルを切断し，エポキシの入り具合を検査したところ，a)素線テープが導体に密着していない（樹脂が入り込んでいない），b)層間に隙間がある，さらにc)パンケーキのRのあるところでホロコンがよじれている（20°～30°）事が発見された．この時点（97年3月）で製作期間2年間の半分を過ぎていた．原因は，a)はテープ巻き線時の張力不足，b)はコイルの層数が多い（4パンケーキ8層）ことから，熱処理時にコイルに加える圧力が素線に伝わらない，c)は巻き線時のジグ不良，ということであった．層間に隙間がある問題は，手作業で樹脂を塗り込みながら巻き線作業をおこなう，という方法で解決したが，製造は最初からやり直しであった．

5ヵ月後，今度は納入された磁石の磁場測定中に，コイルから水漏れしているのを発見した．ホロコンをコイルの内部で接いでおり，ロー付け不良が原因であった（コイル内部でホロコンを接ぐことは仕様外である）．内部で接ぐ予定の電磁石は，57台に上ることが判明した．この時点で，最初の2台が製作納入され，そのうち1台でロー付け不良のため水漏れが起きたのであった．インストール後発見されたらと思うと，誠に幸運であったというほかない．製作期間残り6ヵ月あまりのときに，ホロコン手配から再スタートすることになった．

このほかにも磁極面に段差がある，ストレーナーやコネクターが真鍮製であったなどいろいろあったが，コイル問題に比べれば傷は浅いというべきである．失敗学でいうところの技術の空洞化が起きていたことに初め気づかなかった．結局我々を救ったものは，すべて確認すべしという原点に立ち返ってコイルの試し切りをした勇気と，幸運であった．

1.4 架台，インストール，アラインメントなど

架台の製作では，複雑な2段重ねのレイアウトを架台の構造に落とし込む，地道な作業が必要であった．トンネル内にはMR入射路を除いてクレーンがなく，真空チェンバーをあらかじめ組み込んだ2階建ての電磁石セットを地上部で組み，エアパレットとチルローラーを用いて現場まで運んだ．最大7トンもあるため，空気が漏れないよう，床面の養生が肝心であった．電磁石が故障した場合，原則的には他の電磁石セットを移動することなく，交換可能となる設計であったが，Arc-1の上流部，AR入射路の上流部，電子ラインArc-3の上流部など，例外が結構できてしまった．この領域の電磁石に故障が起こらないことを祈っている．アラインメントは，全て測距機能付きセオドライトを用いた三角測量により行われた．設計位置からの最大誤差0.3 mmを仕様値としたが，実績はこれより良いと思われる．

2. 入射システム

入射システムは，セプタム電磁石，キッカー電磁石等のパルス電磁石，それらの電源，セラミックチェンバー等からなる．電子ビーム入射部付近の概略図を**図4**に示す．入射路の真空はリング側と共通で，ビームはリングチェンバーに開けられた長いスリットを通過して，入射される．

2.1 セプタム

仕様を**表3**に示す．セプタムのジッターから来るビームの振れ幅が入射ビーム幅に比べて十分小さい，という要請からパルスごとの安定度は0.02％となっている．電磁石は渦電流方式で，真空封止形である．渦電流の遅い成分を抑えるため，波形は正弦全波としている．立ち上げ当初は，珪素鋼板の表面絶縁が有機物であるためアウトガスが大きく，リング電流を積んでいくと，ある電流でバースト的に圧力悪化が起こ

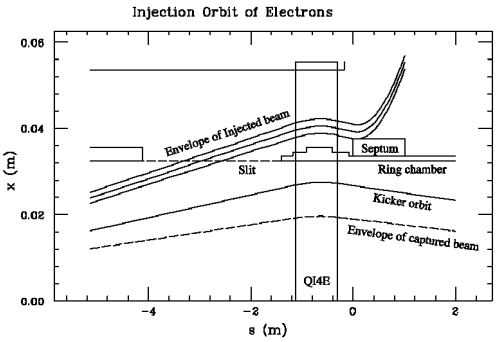

図4 入射部付近の概略図

表3 セプタム磁石仕様値

	電子	陽電子
曲げ角(mrad)	37.5	50
台数	4	2
磁場(T)	1.04	0.79
セプタム厚さ(mm)	1.5	1.5
磁気シールド板厚さ(mm)	0.5×2	0.5×2
コア長(m)	1.0	0.8
アパーチャ(mm)	11(H)×44(W)	11(H)×44(W)
珪素鋼板厚さ(mm)	0.1	0.1
電流(kA)	9.1	6.9
電圧(kV)	1.9	1.4
充電電圧安定度(％)	0.02	0.02
パルス幅(μs)	280	260

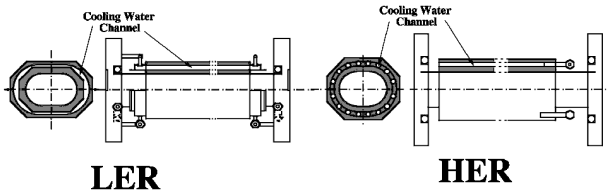

図5　水冷セラミックチェンバー

る，という現象がみられた．この現象はなかなか枯れず，アウトガスの少ない無機物絶縁のコアに替えるまで続いた．また，コアを固めている通しボルトのナットが振動のため運転中に外れる，という事故にも見舞われた．真空チェンバーには水冷パイプが何本も入っており，これが破断したら大事故になる可能性があった．以降はナットを溶接することにした．

2.2　キッカー，セラミックチェンバーなど

入射キッカーは幅2 μsの正弦半波で，陽電子用計6台，電子用計4台からなる．インピーダンス整合用抵抗及び浮遊インダクタンスを加減することにより，パルス幅及びアンダーシュートの深さをコントロールし，波形の相似性を確保できるようになっている．大電流ビームに耐え得るよう，セラミックチェンバーは水冷とした．セラミックチェンバーは2重管あるいは冷却水チャネルを彫り込んだ1重管である（図5）．HERで採用した後者の方式では，わずか1年の運転の後，水漏れ事故が続発した．原因は，ロー付けの際のメタライズ（W-Mn）とセラミックの間にある，Ni層が水に溶け出すことであった．HERのセラミックチェンバーは，これで全滅の憂き目にあった．前者は幸いTi活性金属法（Niを用いない）だったので10年の運転で問題は発生していない．

2.3　ビームアボートシステム

入射システムとは全く関係ないが，パルス磁石ということでBTグループの担当である．ビームアボートは，ビームをリングにばらまくことなく，安全に，ビームダンプに捨てるシステムである．アボートキッカーの立ち上がりのために，リング1周のうち500 nsだけギャップを設けている．ビームを水平方向に蹴って窓に導く水平キッカーと，垂直方向にスイープする垂直キッカーとからなる．これらは単一のスイッチング素子によって制御される．ビームによる発熱により，ビーム取り出し窓（厚さ1.4 mmのTi）は，2.6 Aのビームに対して，540℃に達する．これまでのところKEKBの最大電流1.8 Aに対してTiの劣化は認められていない．

3.　最　後　に

上に述べた事以外にも，磁場測定，電源，制御，ビーム位置モニター，ワイヤーモニター等，述べるべき事柄は山ほどあるが，割愛する．入射路および入射システムの建設は，KEKB-BTグループのマンパワーを遙かに上回る仕事量を必要とする事業であった．このためグループ外の多くの方々の助力をいただくことになった．彼らの献身的な奮闘なしにはBT建設はできなかったであろう．

謝辞

KEKB-入射路・入射システムの建設に携わった次の方々に感謝します（順不同，敬称略）：飯田直子，坂本裕，鷹崎誠治，中山久義，三増俊広，金澤健一，久保忠志，黒川眞一，佐藤康太郎，ジョンフラナガン，諏訪田剛，竹内康紀，福間均，本田融，吉岡正和，吉田正人

参 考 文 献

1）M. Kikuchi et al., *Nucl. Instr. Meth.*, **A 499**, pp. 8–23 (2003).