

## 入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川和朗

### 概要

2017 年は 1 月 30 日より入射器の運転を開始して、2 月 6 日の PF の立ち上げ調整のあと、PF-AR の新しい直接入射路のコミッショニング向けの入射を行い、新規の機器やビーム調整を進め、3 月 6 日の施設検査の合格を支援することができた。3 月 10 日から 4 月 3 日までは、SuperKEKB フェーズ 2 コミッショニング向けの建設を進めた。さらに、4 月 3 日から新年度の立ち上げを行い、放射光入射運転をも進めている。5 月 15 日から 10 月 10 日までの連続 5 ヶ月弱には、集中的に古い装置の撤去と新規装置の設置を進める。装置の詳細設計や図面作成を内部で行い、部品分割調達を追求するなどスケジュールの最適化を行うことによって資源節減をさらに進めているところである。KEKB の建設時期の 1997 年にも、光源の改造時期と合わせることで、9 ヶ月連続の停止期間をいただいでおり、複数のプロジェクトに関わる入射器の更新の難しさを感じるとともに、引き続き関係者のご協力をお願いしたい。

### PF-AR 直接入射路

これまで、入射器から PF-AR への入射を行うためのビーム輸送路は、KEKB / SuperKEKB と共有されていたので、異なる入射エネルギーに対応するために偏向電磁石等の磁場の変更の必要があり、そのために数分を要していた。KEKB の運転中の 2008 年からは、KEKB の LER、HER そして PF リングの 3 リング同時入射（20 ミリ秒毎の切り替え入射）が実現されたが、PF-AR の入射のためには 15 分ほどの時間を確保して、KEKB と PF の入射を停止する必要があった。同時入射中は KEBK・PF リングの蓄積電流はそれぞれ 0.05%・0.01% 以内に安定化することができたが、PF-AR の入射中にはこの電流値が減少することにな



図 2 入射器端末の第 3 ビーム・スイッチ・ヤード。右から、PF リング、PF-AR、直線ダンプ、SuperKEKB LER（陽電子）、HER（電子）、東ダンプ、の各ビームライン。

り、実験にも影響を与えていた。

SuperKEKB 計画においては、高いルミノシティを達成するために、SuperKEKB の蓄積ビームの寿命が極端に（例えば 1/10 以下）短くなることが予想され、15 分の入射中断は実験停止を意味すると思われた。そのため、PF-AR には 3 GeV の電子の代わりに、SuperKEKB の陽電子と共通にして、4 GeV の陽電子を PF-AR に入射する案が持ち上がっていたが、技術的な困難もいくつか指摘されていた。そこで、入射器と PF-AR を直接結ぶ、直接入射路を建設することになった。将来は 6.5 GeV のエネルギーで PF-AR にトップアップ運転の可能性も生まれ、4 リングの同時入射も可能となれば、双方に大きな利点が生まれることになる（図 1）。

今年度、同時入射に向けた多数の新規装置が集中的に設置されるので、遠くない将来、PF-AR も含めた 4 リング同時入射のコミッショニングを開始できることを期待している（図 2）。

### 電荷制限装置

入射器の運転を行うにあたっては、入射器内やビーム輸送路の各地点において、想定されるビームの最大出力の制限値が存在する。その制限値に基づいて、安全のための必要十分な遮蔽や入域制限などの対策が取られている。制限値については超過することが無いよう、運転操作の仕組みにおいてさまざまな装置に対策がされているが、それらが正しく機能しなかった場合も想定し、多重の監視装置を設け、それらの整備には注意を払っている。

2008 年からは複数のビームモードを 20 ms 毎に切り替えながらビーム運転を行う同時入射が始まり、制限値との

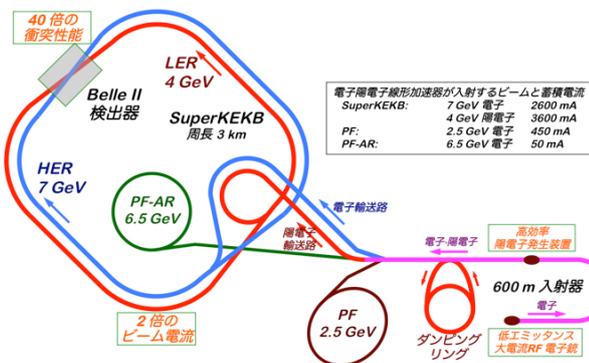


図 1 6.5 GeV の PF-AR 直接入射路を含めた電子陽電子複合加速器の模式図。SuperKEKB、PF、PF-AR の 4 つの蓄積リングへ入射器から同時入射が可能となる。

比較も複雑になった。その監視について誤りを避けるために、運転操作の仕組みとは独立に全てのビームバンチを監視できる装置を追加した(図3)。

ビームモニタとしては壁電流モニタ(図4)を用いて、約10 ps幅のビームバンチの電荷積分器としても動作させている。この種類のビームモニタは、KEKB計画の前にファラデーカップを用いて較正されているので、絶対値としても10%以下の精度を持っている(なお、運転操作のビーム電流モニタとしてはビーム位置モニタからの情報が使用されており、同程度の精度である)。壁電流モニタの信号は新しく開発された電荷制限装置に接続され、ナノ秒からミリ秒の範囲のアナログ信号の積分処理と、1秒間に50回のデジタル積分処理を行う。

もしも、対象の場所に1秒毎の平均電流制限値が設けられている場合は、測定された電荷積分値と比較し、電荷積分値が制限値を超えていれば、直接電子銃を停止させるためのインターロック信号を発生させる。さらに、電荷積分値を産業用小型計算機(PLC)に送り、1時間毎の電荷積分・平均電流処理を行わせる。その平均電流測定値と1時間平均電流制限値を比較し超えていれば、やはり電子銃を停止させるインターロック信号を発生させる。

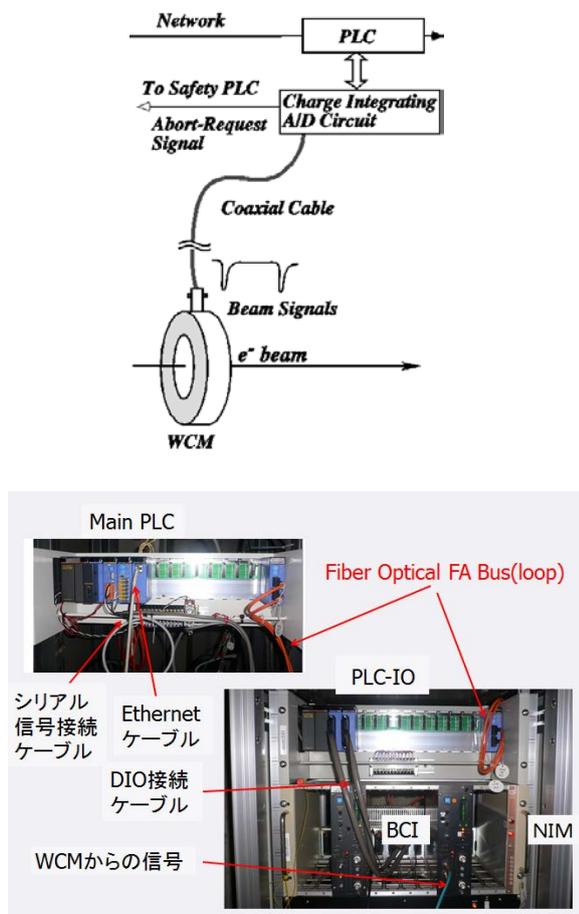


図3 電荷制限システムのブロック図。ビームモニタの情報を毎秒積分器で収集し、もしも制限値を越えることがあればビーム発生にインターロックを掛ける。さらに、産業用小型計算機(PLC)で毎時の積分を行い、やはり制限値と比較する。現在、入射器に全部で7系統設けられている。

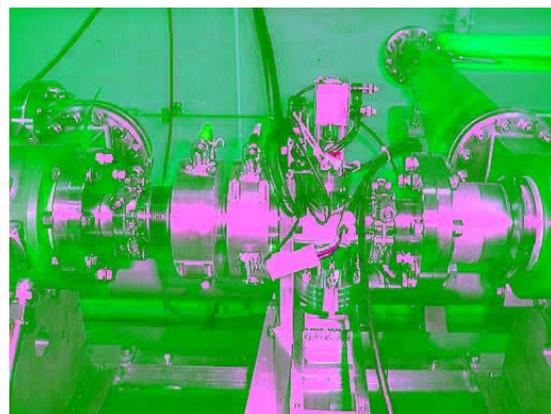


図4 ビームラインに設置されたスクリーンモニタ(中央右)と、電荷制限システムに用いられる壁電流モニタ(中央左)。

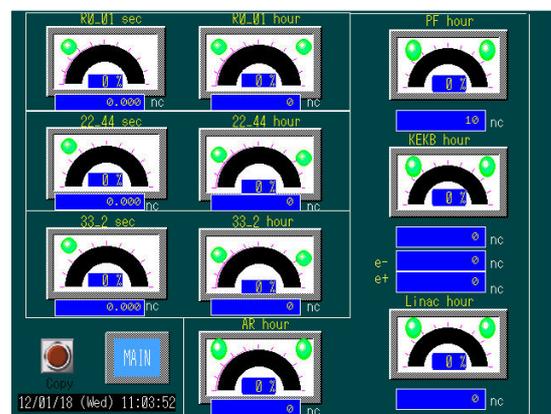


図5 電荷制限システムの専用表示画面。同様の表示が運転操作の画面にも表示される。

このような電荷制限装置が、入射器内のビームラインの主要な場所と、各蓄積リングへのビーム輸送路の、合計7ヶ所に設置されている。測定値はEPICSを通して運転操作の画面にも表示されるが、それぞれのPLCを直接結ぶネットワークを通して、制御室内の専用の画面にも表示される(図5)。装置の健全性を維持するために、毎シフトの引き継ぎ時には積分値が適切に測定されていることを確認し、さらに中長期の停止期間の後の運転前にそれぞれの機器の動作が正常であることを検証している。

### 運転体制

4月から、恵郷博文氏がJASRI/SPring8から異動して来られ、准教授として加速管グループへ配属になった。今後の長期運転に必要な新規加速管の開発や、加速電圧が低下した加速管の解決のほか、さまざまな入射器の課題に対して経験を活かしていただけると期待している。また、杉村仁志氏がJAEAの原子核実験グループから博士研究員として制御グループへ配属になった。今年度コミッションを開始するダンピングリングの入出射等において、高速データ処理や高速回路の経験を活かしていただけると期待している。

## 入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川和朗

### 概要

2017年5月15日までの放射光入射運転は順調に行われた。その後、5月15日から10月10日までの連続5ヶ月弱を利用して、集中的に古い装置の撤去とSuperKEKB入射に向けた新規装置の設置を進めている。特に、予算配分が延期されてきた陽電子ダンピング・リングに関連する装置について、入射器内でも100台近い電磁石や複数の大電力マイクロ波発生装置の置換・増設など、大きな変更が行われており、ビーム運転の再開にも慎重を期すつもりである。KEKBの建設時期の1997年にも、光源の改造時期と合わせることによって、9ヶ月連続の停止期間をいただいております。複数の計画に対して入射を行う入射器の更新の難しさを感じている。装置の詳細設計や図面作成を内部で行い、部品の取りまとめ調達を追求するなど、作業・スケジュールの最適化を行うことよって、資源節減をさらに進めているところであり、引き続き関係の方々の協力をお願いしたい。

### ダンピング・リングの入射タイミング設計

SuperKEKB計画において、低エミッタンス陽電子の生成を行うダンピング・リングの果たす役割が重要であり、また同時に、放射光施設への影響を最小限に留める設計も重要となる。年末からダンピング・リングのビーム・コミッションを計画しており、その入射タイミング設計を振り返ってみることにする。

建設を控えた2009年初めごろから詳細設計検討が本格化した。その中でまず、リングの大きさなど主要なパラメータを決定するハーモニック・ナンバが検討された。入射器は2856 MHzの主マイクロ波周波数を使用してきた。また、KEKB計画のメイン・リング空洞マイクロ波周波数としてはTRISTAN計画から0.4 MHz変更して508.9 MHzを採用している。その間には275対49の整数関係があり、共通基本周波数は10.39 MHzである。メイン・リングのハーモニック・ナンバの5120と共通周波数の倍数49が互いに素であることから、 $493 \mu\text{s} (= 5120 \times 49 / 508.9 \text{ MHz})$ の共通繰り返し周期で同じ位相関係を繰り返すため、最大493  $\mu\text{s}$ を待てば、メイン・リング内の任意のバケットに入射できるタイミングが訪れるので、入射タイミングの設計は比較的容易であった。入射器は平均50 Hzでビームをパルス加速することができるが、最大493  $\mu\text{s}$ のパルス間隔の振らつきは許容範囲であり、緩く商用周波数に同期させていた。

さまざまな要因から、SuperKEKBのメイン・リングとダンピング・リングの双方において、KEKBとほぼ同じ

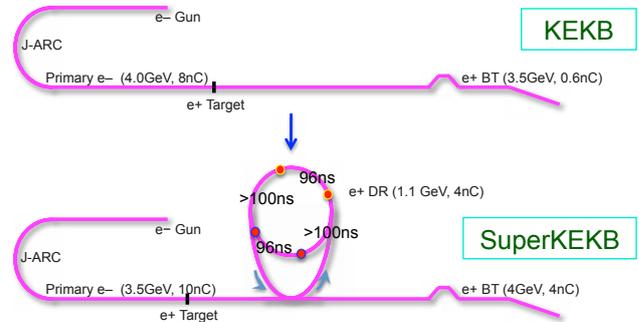


図1 陽電子加速のKEKBからSuperKEKBへの変更。ダンピング・リングには陽電子ビームバンチを最大4個、40 ms以上蓄積する。

空洞周波数を選択することになった。ダンピング・リングにおいては約12 msのダンピング時間を期待して、入射器の2パルスをそれぞれ2バンチ同時に、最小40 ms蓄積することとした。ダンピング・リングを現実的な周長に抑え、できるだけ容易に入射を行えるハーモニック・ナンバとして230が提案され、2バンチ間隔96.3 ns (= 1 / 10.39 MHz)と入射キッカーの立ち上がり・立ち下がり時間を100 nsとすると、全体の設計も成り立つことが期待された(図1)。

入射器の陽電子ビーム向けマイクロ波位相を自由に変更できないとした場合には、KEKB計画において493  $\mu\text{s}$ であった共通繰り返し周期が、SuperKEKB計画ではダンピング・リングを含めると11.3 ms (=  $5120 \times 230 \times 49 / 10 / 508.9 \text{ MHz}$ )になる。ダンピング・リングにおいては、入射キッカーの立ち上がり・立ち下がり100 nsを仮定して、既に前のパルスで2バンチが埋められている場合においても、さらに少し自由度があるので、あらかじめ適切な電子銃のタイミングを選んでおけば、2 ms以内にはメイン・リングの5120バケットの内の約半分のパケットに入射することができる。KEKBと同じパルス間隔の振らつきしか許さないとすると、制限が厳しすぎてリスクが高いため、入射器の60台の大電力マイクロ波発生装置のパルス電源も改造し、平均50 Hzのビーム間隔に2 msの振らつきを許すこととした。

通常の運転では、メイン・リングの中の電荷が少なくなったバケットに入射を行うが、その候補を複数(当面5個)挙げて選択させることによって、加速パルスを無駄にしない予定である。また、入射器のマイクロ波位相の操作については、光陰極RF電子銃のレーザーとの同期や、低レベ

ルマイクロ波制御の制約条件のために、ダンピング・リングより上流側についてはあまり自由度がないが、下流側については将来陽電子ビームパルス毎の調整操作ができる可能性を残している。

なお、SuperKEKB リングと入射器との同期については、30 ps 以下の精度で完全同期が必要となるため、先に述べたように整数関係を持つマイクロ波周波数を採用している。蓄積リングの周長は、気圧や潮汐力などにより刻々と変化するが、それぞれの蓄積リングの深度が異なるために、周長の変わり方は数十倍異なり、それに合わせてマイクロ波周波数も独立に変化させる。そのため、PF リングと PF-AR については、SuperKEKB と同時に入射器との完全同期はできないので、偶然の同期を期待した入射を行う。一部のパルス電源は精度の高いパルス波高を得るために、比較的時間精度の高い事前トリガを必要とするが、この周波数の違いを考慮した事前トリガの生成が必要となる。

入射器からメイン・リングへの入射に関しては、大電流でありながらビーム・エミッタンスに対する要求が 100・15 mm-mrad (水平・垂直) と厳しい。エミッタンスの増大がバンチ電流の 2 乗とビーム位置の空洞中央からの隔たりの 2 乗にも比例することを考慮すると、ダンピング・リングから入射器へビームを取り出す際のビーム位置の安定度が重要となる。従って、影響の大きい取り出しキッカーの充電タイミングの精度が大変重要となる。

ダンピング・リングのキッカーの充電時間は 15 ms 程度を想定しているが、ビーム・タイミングから離れたキッカーのタイミング発生にはいくつかの技術開発が必要となる。現在のタイミング信号発生仕組みでは、一つ前のビームパルスの同期信号から 15 ミリ秒前のキッカー信号を生成する必要があるが、一つ前のビームパルスが同期の仕

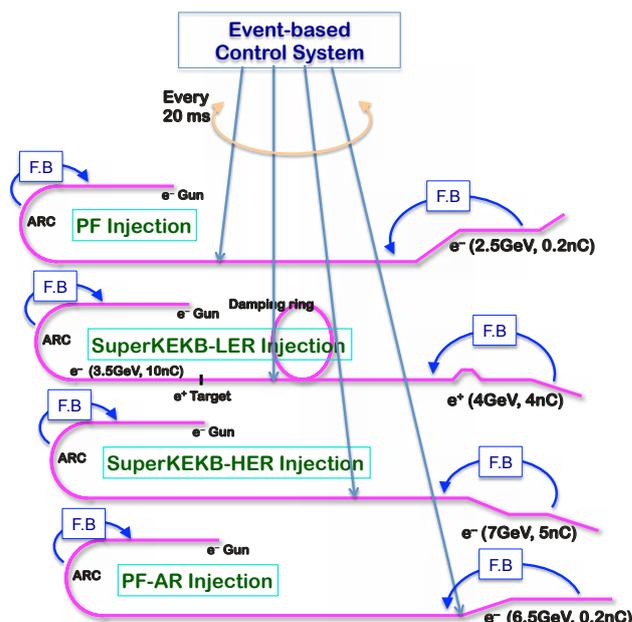


図2 同時入射の仕組みによって、4つの蓄積リングの入射を可能とするための試験を行う予定。

組みの異なる PF リングや PF-AR の場合は、タイミング信号が発生できない。従って、ビームパルスの並びに制限を設ける必要がある。

KEKB とは変更になる陽電子のタイミングが適切に生成できれば、最近運用可能になった PF-AR 直接入射路も組み合わせ、将来は、パルス毎に 4 つの種類 of ビームの切り替える同時入射も可能になる予定で、秋からのダンピング・リングのビーム・コミッションングを通して、さまざまな機器の動作を確認していく予定である (図2)。

表1 近年の入射器の運転統計

	運転時間		延故障時間		延故障回数		平均故障間隔時間 (MTBF)		平均故障時間 (MTL)		故障率
	x (時間)	y (時間)	x-y (時間)		z		x/z (分)		(x-y)/z (分)		
			故障	Trip	故障	Trip	故障	Trip	故障	Trip	故障/x (%)
1999年度	7,297	6,499	537	261	1,888	69,994	232	6	17	0.22	7.36
2000年度	7,203	6,577	466	160	2,401	39,380	180	11	12	0.24	6.47
2001年度	7,239	6,839	310	90	1,304	21,420	333	20	14	0.25	4.28
2002年度	7,086	6,813	205	68	1,424	17,372	299	24	9	0.23	2.89
2003年度	6,815	6,500	253	62	2,259	17,462	181	23	7	0.21	3.71
2004年度	7,117	6,936	129	52	2,323	12,956	184	33	3	0.24	1.81
2005年度	6,988	6,846	86	56	1,752	12,467	239	34	3	0.27	1.23
2006年度	6,927	6,777	95	55	1,665	13,064	250	32	3	0.25	1.37
2007年度	6,322	6,148	120	54	1,914	12,684	198	30	4	0.26	1.90
2008年度	6,556	6,390	117	49	1,536	11,228	256	35	5	0.26	1.78
2009年度	6,362	6,193	108	61	1,316	13,443	290	28	5	0.27	1.70
2010年度	5,847	5,721	89	37	1,027	8,079	342	43	5	0.27	1.52
2011年度	5,492	5,301	58	133	766	38,258	430	9	5	0.21	1.06
2012年度	5,331	5,191	69	71	859	14,893	372	21	5	0.29	1.29
2013年度	5,315	5,172	23	120	1,127	22,135	283	14	1	0.33	0.43
2014年度	3,448	3,235	31	182	1,243	30,583	166	7	1	0.36	0.90
2015年度	5,296	5,087	93	116	1,437	21,042	221	15	4	0.33	1.76
2016年度	4,733	4,562	101	70	1,986	12,481	143	23	3	0.34	2.13

### 昨年度の入射器運転統計

入射器の 2016 年度の運転統計によると、総運転時間は 4733 時間であった (表1)。故障に関しては、放電などにより数秒で回復できる Trip と他の故障を区別して集計している。Trip を除いた故障率は 2.13% で、この上昇は、SuperKEKB 向けの試験運転が本格化してきた際の新しい機器やソフトウェアの調整不足が原因と考えられる。今年度も多数の新規装置が稼働を始めるため故障率の上昇が予想され、KEKB の運転開始時と比較しながら注視しているところである。

## 入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川和朗  
(2017年11月13日付け)

### 概要

5月15日から10月10日までの連続5ヶ月弱、SuperKEKB 向けの建設のために長期の運転停止を行った。この期間を利用して、集中的に古い装置の撤去と SuperKEKB 入射に向けた新規装置の設置を進めることができた。特に、ダンピング・リング (DR) 接続部と3-5セクタにおける収束電磁石及び軌道補正電磁石の更新に関しては、放射光入射にも使用してきた古い装置を撤去しないと新しい装置を設置できないため、長期の建設期間が必要となった。10月10日からは、入射器の立ち上げ調整を進めており、まずは10月30日からの PF 及び PF-AR 放射光施設への入射に向けた調整を終えたところである。

### パルス電磁石群の設置

SuperKEKB 向けの建設が始まった2010年以降、震災復旧の期間を含めて、長期の停止期間を確保することができなかったため、放射光施設関係者と相談し、今回初めて連続5ヶ月弱の停止期間を確保することができた。KEKB の建設時期の1997年にも、光源の改造時期と合わせることで、9ヶ月連続の停止期間をいただいております。複数のプロジェクトに対する入射器の更新の難しさを感じるところである。部品・装置の事前・分割調達を追求するなどスケジュールの最適化を行うことよって、多数の機器の設置を進めることができた。また、装置の詳細設計や図面作成を内部で行い、資源節減をさらに進めてきた。これらの作業の内、まずはパルス電磁石を紹介する。

SuperKEKB の運転が本格化すると、KEKB 計画の後半で行われた3蓄積リング同時入射を、PF-AR を含めた4蓄積リングに拡大する必要がある。KEKB では入射ビームに対するエミッタンスの要求が緩かったために、エネルギーの低いビーム向けのビーム光学設定をエネルギーの高いビームにも使用し、入射器では共通のビーム輸送電磁石設定でビームを加速することができた。より正確なビーム光学調整はそれぞれの蓄積リングへのビーム輸送路で行われた。しかし、SuperKEKB の入射ビームに対する横方向エミッタンスや縦方向エネルギー分散は厳しく制限されるため、それぞれの入射ビームに対して独立に、600 m にわたって約100  $\mu\text{m}$  の精度の高い軌道制御を行わないと、ビーム航跡場によるエミッタンス悪化が顕著になってしまう。

そのために、少なくともそれぞれのビームエネルギーの差分が特に大きい入射器の後半部分においては、パルス毎にビーム軌道と光学関数を正確に制御できるよう、電磁石をパルス運転可能にする必要があった。パルス収束電磁石30台とパルス補正電磁石36台を今年度当初までに製造

し、長期停止期間中に DC 電磁石と電磁石電源を撤去し、さらに新しいパルス電磁石と電源を設置、そして試験を行った。昨年度、試作パルス電磁石の試験を行うことができたが、量産機のビーム運転は初めてとなるので、慎重に設置計画を立案し、9月上旬から約1ヶ月間の試験期間の確保に努めた。

パルス電源は、収束電磁石向けには1 mH, 330 A, 340 V, 0.5 ms フラットトップ、約2 ms 幅、補正電磁石は3 mH, 10 A という仕様で、それぞれ系内で設計が行われた。収束電磁石についてはコイルに送られた電力の約75%を電源で回収できると考えており、これにより、入射器の供給電力を大きく追加する必要がなくなった。電源は13の筐体に分散して配置され、50 Hz のパルス毎の精度の高い動作を保証するために、50 Hz のモニタ機構も構築された。また、パルス動作のためにビームの3ミリ秒前にタイミング信号が必要となり、パルスごとの電磁石励磁の情報も必要のために、全ての筐体にイベント制御・タイミング信号発生機構が組み込まれている。

現在のところ長期の安定度として、暫定の仕様である0.1%を充分下回る安定度が得られている。

図1に典型的な筐体の写真を示すが、左の2列の上段から、パルス電源用 DC 電源、収束電磁石用パルス電源、パルス電源用 DC 電源、補正電磁石用パルス電源、インタロック制御装置 (cRIO)、信号変換・接続盤、右の1列には制御装置 (PXI)、CPU、商用電源接続盤、などが並んでいる。パルス収束電磁石4台、及びパルス補正電磁石4台がこの筐体に接続される。

図2には地下に設置されたパルス電磁石本体を示す。



図1 パルス電磁石電源が設置された筐体



図2 加速器トンネルに設置されたパルス電磁石と架台

架台も今回新しく設計され、1  $\mu\text{m}$  のアライメント調整が可能となっており、Phase 3 運转向けのアライメント時に性能を発揮すると期待されている。

0.1% 以下の精度の高い磁場の発生のために、精度の高いタイミング信号がビーム加速の3ミリ秒前に必要となる。それぞれの蓄積リングは気圧・潮汐・温度による周長の変化をクロック周波数の連続補正によって吸収している。その内 SuperKEKB リングは30ピコ秒の高い同期精度を求められるため、設計上入射器と完全同期したクロックで動作しており、1ナノ秒以下の精度の3ミリ秒遅延信号の生成は困難ではない。ところが、蓄積リングの地下深度が異なるために、PF・PF-ARの周長補正の年較差・日較差の大きさは SuperKEKB の数十倍になり、3ミリ秒前にパルス電磁石向けの信号を発生した上で、数百ピコ秒精度で同期したビーム入射信号を発生することは容易ではない。そこで試験を繰り返し、クロックの差分を観測することで信号発生予測精度を高めている。

9月の電源試験と10月のビーム試験においては、今のところ仕様を充分上回る安定度を示しており、エネルギーが2.5 GeV と6.5 GeV と大きく異なるが、同じ電子銃設定を使う、PFとPF-ARのビームを問題なく高速に切り替え、独立なビーム調整を実現することができている。残念ながら、電子銃の切り替えの高速化は少し先になるが、将来の放射光運転と SuperKEKB 運転の間の干渉を最小限とする目処が付いたと考えている。

### ダンピング・リング接続部のエネルギー圧縮装置とバンチ圧縮装置

ダンピング・リング接続部への入射用ビームエネルギー圧縮装置と出射用バンチ圧縮装置の設置も今期の建設の中で大きな作業の一つであった。入射器内では、ビーム・バンチ長を数ピコ秒から十ピコ秒の適度な長さに維持して加速を行う必要がある。一方、ダンピング・リングに入射するためにはバンチ長の制限は厳しくないが、エネルギー分散を縮小させる要求が厳しい。そこで、ダンピング・リン

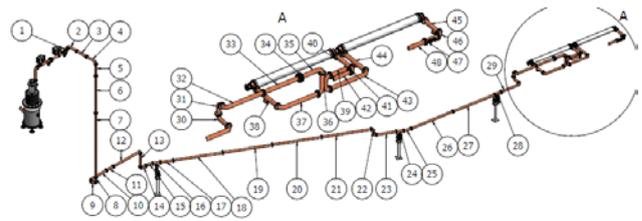


図3 ダンピング・リング入射路の ECS のために、マイクロ波が導波管を通じてクライストロン（左端）から地下に導かれた後、入射路の途中に置かれたエネルギー圧縮用の加速管（右端 A 部）に送られる。

グへの入射路に粒子到達時間と粒子エネルギーの間の光学収差を発生させた上で、加速装置を置くことによって、エネルギー分散を圧縮する（Energy Compression System - ECS）。さらに、出射路には全く逆の役割をもたせた加速装置を置き、バンチ長を圧縮する（Bunch Compression System - BCS）。

これらの新設装置の大電力パルス電源は入射器のクライストロン・ギャラリに置かれ、入射路の加速装置へはマイクロ波用方形導波管で接続する。経路が複雑であるため、ECS と BCS のそれぞれについて、数十 cm から 2 m の導波管を約 50 本組み合わせて、約 45 m の経路を接続することになる。

図3には入射路の ECS 用の導波管の設置の様子を示す。出射路の BCS 用の導波管も同様に設置されている。これらの方角導波管内は真空となっており、導波管同士を接続するためのフランジは、真空シールとしての役割と同時に、マイクロ波を伝えるための電気的な接続も実現する必要がある。入射器では建設当初より、オス・メスの無い対称なフランジを独自に設計し使用してきた。

図4のようなフランジの方形開口部の外側のヘリコフレックス・ガスケットで真空を封止した上で、方形開口部の特に電流の流れる長辺で電気的接触をさせる。今回複数のフランジにおいて図面通りの工作がされず、約 100  $\mu\text{m}$  の誤りがあり、大電力マイクロ波を通すことができなかったため、再工作を行っている。ダンピング・リングの試験運転には大きな影響を与えない予定である。

陽電子標的の後方の陽電子捕獲部においては、できるだけ多くの陽電子を捕獲したいわけだが、設計が適切でなければ品質の悪い陽電子の割合が増えてしまう。一方、ダン

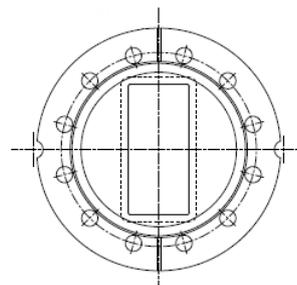


図4 内面 34 mm × 72 mm の方形導波管を接続する特殊フランジ

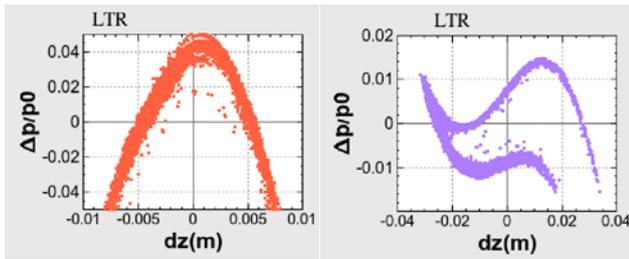


図5 ECS 前後の時間・エネルギー空間でのビームの広がり

ピング・リングにおいてはビーム損失を放射線管理上許される範囲に抑えなくてはならない。加速管と電磁石による陽電子の捕獲，コリメータによるビームの制限，ECS によるエネルギー圧縮などの調整パラメータをシミュレーションによって最適化しており，試験運転においては小電流から確認を進めていくことになる。BCS においても同様の手順を踏むことになる。

例えば，図5には ECS 前後の時間・エネルギー空間でのビームの広がりを示している。エネルギー広がりが大きなビームを左図のようにコリメータにより±5%のエネルギー広がりに制限する。ECS を通すことによって，右図のように時間方向にはビームが広がるが，エネルギー広がりはダンピング・リングの口径の±1.5%に抑えることができていることがわかる。

## 入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川和朗  
(2018年2月19日付け)

### 概要

3月8日よりダンピング・リングの試験運転が無事始まっており、入射器とダンピング・リング接続部に位置するエネルギー圧縮装置とバンチ圧縮装置についても、所定の性能の確認が進行している。これらのビーム特性の変換装置については、そのマイクロ波導波管の工作与完成図書の齟齬が10月に見つかり、運転への影響が心配されたが、再製作の上、12月中旬に設置を終え、ダンピング・リング建設作業の合間を縫って大出力コンディショニングを行うことができた。1月18日からのPF入射や2月5日からのPF-ARへの入射と、SuperKEKBに向けたビーム開発も順調に進めることができた。正月前後の短期の運転停止期間には、陽電子捕獲装置内のブリッジ・コイルの運用に向けた電源への交換も終えた。今後、ダンピング・リングを通した低エミッタンス陽電子ビームの調整を終えた上で、フェーズ2・コミショニングを進めて最初の電子・陽電子衝突を目指すことになる。

### 複数蓄積リングの入射に向けたビーム開発

ダンピング・リングやSuperKEKBのフェーズ2入射に向けて、事前に要求仕様を満たしたビームの準備が必要となる。一方、並行して放射光施設への入射を行うため、工夫が必要となる。近い将来行われる4リング同時入射に関しては、電子銃ビームラインの切り替えなど、全ての機構が揃っているわけではない。それでも、50 Hzでビーム・

パラメータを切り替えるための、マイクロ波・電磁石・制御・診断などの仕組みの構築に取り組んでおり、装置や制御ソフトウェアの試験も進展させてきた。今期から運用を始めた64台のパルス電磁石も貢献を始めている。そこで、この同時入射の機構を積極的にビーム開発にも利用している。

図1には、試験用7 GeV電子ビーム、試験用陽電子ビーム、PF向け2.5 GeV入射ビーム、PF-AR向け6.5 GeV入射ビームを同時に加速している際のビームの水平・垂直位置と電荷を示している。例えば、放射光リング入射を行いながら、陽電子生成フラックス・コンセントレータの耐久試験と電子ビームの低エミッタンス化試験などを並行して行うことができる。

現在は、連続入射を優先的に行っているわけではないが、ビーム開発の内容によっては干渉が小さく、数日間連続的にPFへの入射ができる場合もある。その間にはPF-ARへの入射も同時並行に行われるので、放射光実験へ貢献できている。

### マイクロ波システムの更新

電子や陽電子を加速するための電場は、入射器においては高電力のマイクロ波によってもたらされている。Sバンド(2856 MHz)のマイクロ波が、精度の高い加速管の中で方向を整えられ、バンチ化された電子や陽電子のビームの塊を加速することになる。1つの大電力マイクロ波源から約2 mの加速管4本にマイクロ波が供給される。大電力マイクロ波源は、40 kVの高電圧パルスを50 Hzで発生する大電力パルスモジュレータ、中電力のマイクロ波を10万倍ほど増幅する40 MWクライストロン、4 μsの40 MWマイクロ波パルスを1 μsに圧縮し、出力を増倍するSLED(マイクロ波パルス圧縮器)などから構成される。これらのマイクロ波発生装置はビーム運転中であっても軽度の保守作業の可能性を確保するために、地上部のクライストロン・ギャラリに設置されている。角型導波管を通じて地下にマイクロ波が導かれると、加速管を通過するビームを約20 MV/mの実効加速電場で加速する。

入射器には60台の大電力マイクロ波源が設置されており、それらが協調して動作し、電子を2.5–7 GeV、陽電子を4 GeVに加速し、4つの蓄積リング型加速器に入射する。それらの入射ビームの加減速を50 Hzのパルス毎に切り替えるために、マイクロ波の位相を変更する必要があるが、大電力での位相の変更は困難なため、小電力で位相を変更し、中電力、大電力と増幅する。そのため、60台の大電力マイクロ波源の内、3分の1は独立に小電力で位相を制

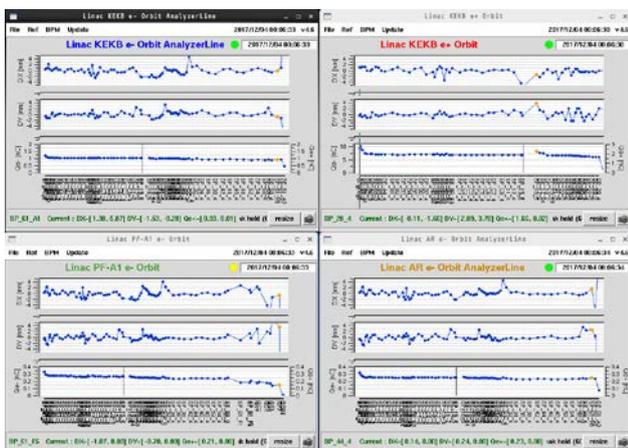


図1 左上から右へ、試験用7 GeV電子ビーム、SuperKEKB向け陽電子ビーム、PF向け2.5 GeV入射ビーム、PF-AR向け6.5 GeV入射ビームを、同時入射機構を用いて加速している様子。それぞれ、上からビームの水平・垂直位置とバンチ当たり電荷を表す。



図2 入射器クライストロン・ギャラリに設置されている大電力パルスモジュレータ電源とクライストロン。

御し、自由にマイクロ波を調整できるように構成されている。残りの3分の2については数台から8台までの大電力マイクロ波源が中電力のマイクロ波を共有し、まとめて制御されることになる。

以前のKEKB計画においては、入射ビーム特性に対する要求精度が高くなかったため、マイクロ波制御について

の高い精度は要求されなかった。しかし、SuperKEKB計画においては、大電流にもかかわらず数十分の1の低エミッタンスが要求されるため、精度が高く安定なマイクロ波制御が必要とされている。また、ダンピング・リングが増設されるため、既存の複数のエネルギー調節機構に加えて、ダンピング・リング入射エネルギーの調節機構や、エネルギー圧縮装置とバンチ圧縮装置が設置されるため、それぞれ独立なマイクロ波制御の増設が必要となる(図3)。一方、陽電子捕獲装置の増強やパルス電磁石装置、ダンピング・リングの一部の装置などギャラリに設置される装置が増えたため、大きな面積を必要とする旧型の大電力パルスモジュレータを約3分の1の面積となる新型のインバータ方式のモジュレータに更新した。

このように、SuperKEKB計画に向けたマイクロ波発生装置は大幅な改造を求められることになった。ところで、SuperKEKBのビーム運転は4リング同時入射など高度化しており、パルス毎に切り換えられるビームの入射先に応じて、それぞれのマイクロ波発生装置の動作点は異なり、それぞれ安定な動作が必要とされるため、常時監視することが必須となっている。そのような環境下においても、高度になったマイクロ波システムの信頼性を維持するために、パルス毎のマイクロ波の監視機構も整備されている。

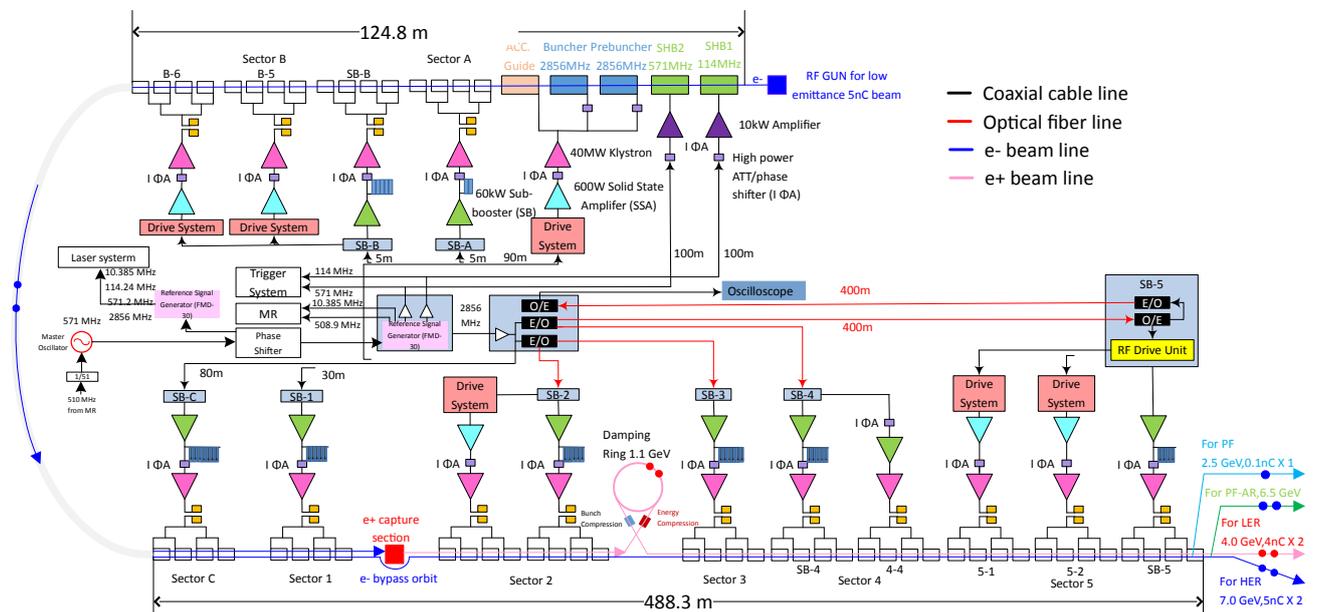


図3 入射器の小電力マイクロ波配信の概念図。薄赤色の箱で示した独立のマイクロ波制御部分(Drive System)が必要に応じて増設され、運転管理は高度化している。