

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川和朗
(2018年4月15日付け)

概要

放射光施設への電子入射ユーザー運転と、ダンピング・リングの試験運転が順調に推移する中、SuperKEKBのフェーズ2・コミッショニングも進行し、3月21日には電子リング(HER)へのビーム蓄積に成功し、さらに3月31日に陽電子リング(LER)へのビーム蓄積に成功した。各種新規装置の調整や、衝突点近傍の新しい電磁石を含めたビーム光学補正を繰り返して、4月中旬時点で、HERとLERそれぞれにおいて200 mAを超えるビーム蓄積が可能となっている。この間に入射器においても、新しい装置をはじめとしてさまざまな小さな障害を経験しているが、幸いにして入射を継続できており、障害を適切に管理することにより、一つ一つ正常化させている。引き続きSuperKEKB衝突点の調整を進めて最初の衝突を達成し、また進行状況によってフェーズ2・コミッショニング中に1.5 A程度の蓄積電流と2010年時点のKEKBと同程度の衝突性能(ルミノシティ)を目指すことになる。

受電設備の障害

放射光入射運転とダンピング・リングの試験運転を継続していた3月9日の早朝1:34に、つくばキャンパス内放射光地区を受け持つPFエネルギー・センターの受電設備における障害により、停電が発生した。入射器の再立ち上げにおいては、新規装置の調整中であったことも考慮し、2次災害を避けるために積極的な並行立ち上げは控えて、慎重な確認を心掛け、18時ごろの再入射となった。

当日は、湿度が高く南風であったところ、6.6 kVの送電ダクトから高湿度の空気が受電設備に侵入し、結露を発生した。その水が、外気を遮断するための水平の絶縁板の上に溜まり、銅板の母線(ブスバー)間の放電を招いたと考えられている。全体で約18 MWの容量の受電設備は2つ

の系統から構成されているが、ブスバーが損傷したために、1系統を停止させることとなった。入射器、放射光光源リング、ダンピング・リングの全てを運用するためには電力が不足することから、予定された3月20日までの放射光ユーザー運転を優先し、ダンピング・リングは休止させて20日に運転再開させることとなった。その後、電力制限が続いたが、5月の放射光施設の運転を再開する時期までには、停電無く復旧すると期待されている。

この受電設備の主要部分は、トリスタン建設以前に入射器と放射光施設のために準備されたもので、1980年から継続して運用されている。施設部関係者による適切な計画的保守がうかがわれる。なお、今回のような障害は38年間で初めてのもので、当日の天候が非常に特殊であったと推察される。また、先に述べた約18 MWという電源容量は当時必要であった電力の4倍から5倍であり、将来の放射光施設拡大に備えたものと思われ、当時の研究者の夢の大きさにも感心させられる。

SuperKEKB レビュー委員会

3月14日から16日にかけて、SuperKEKB加速器レビュー委員会が開催された。同委員会はKEKBの建設時期に開始されてから22回目を数え、毎回KEKB/SuperKEKB加速器について、科学的・技術的な課題や運営に関わるさまざまな助言を受けて、役立ててきた。今回も、Frank Zimmermann委員長を始めとする15人の専門家から、厳しい評価をいただいた。図らずもフェーズ2・コミッショニング中のメイン・リングのビーム蓄積間近の時期となったが、委員の方々には最も活動的な時期のプロジェクトを見ていただくことになったと思われる。24のレビュー項目の内、入射器に関する8項目についても、それぞれ適切な助言をいただくことができた。これらは、今後のプロ



図1 PFエネルギー・センター内の設備、左から、共同溝からの66 kV受電部、6.6 kVへの変圧器、6.6 kVのブスバーを覆うダクト。ダクトの下にあるメッシュから多湿の温風が侵入したと考えられる。

ジェットの指針となるべきもので、丁寧な対策を心がけていきたいと考えている。

入射器の体制

4月から、飯田直子氏が4系から5系のマグネット・真空グループへ異動・配属になり、入射器とダンピング・リング、入射器とメイン・リングの効果的な協調運転に力を発揮していただくと期待している。また、東保男氏が沖縄科学技術大学院大学（OIST）から加速管・陽電子グループへ異動・配属になり、今後の長期運転に必要な加速管の開発などの課題に対して経験を活かしていただくと期待している。

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川和朗
(2018年8月16日付け)

概要

SuperKEKB のコミッションング運転においては、ルミノシティ向上と Belle II バックグラウンドの理解への道筋を探すという、フェーズ2・コミッションングの所期の目標が、7月17日までの運転期間中に達成され、フェーズ2は今期で終えることとなった。SuperKEKB の次期の運転は、フェーズ3・コミッションングとして、Belle II 検出器に崩壊点位置検出器 (VXD) のピクセル検出器 (PXD) とストリップ型シリコン検出器 (SVD) を追加設置するなど、改造を行った後の年明けの2月末頃となる。フェーズ2について、入射器からもほぼ予定されたビーム品質の入射を達成することができ、ダンピング・リングとのビームの受け渡しや、各種新規増設機器の性能確認も進めることができた。今後は、最終仕様の入射電子陽電子ビームの実現を目指し、徐々にビーム品質を向上させることになる。

放射光施設への電子入射についても、PF-AR は6月29日、PF は7月6日まで順調に入射運転が行われた。今期は、PF-AR 向けの5 GeV の電子入射の試験が初めて行われ、来年には5 GeV のユーザー実験向け運転を行うことにより、電力消費量の削減が可能になると期待されている。

秋の運転期間にはフェーズ3向けの改造工事のために SuperKEKB 向けの入射は行われず、放射光施設向けの入射が予定されている。PF-AR 向け5 GeV 電子ビームの開発とともに、入射器においては、同時入射機構を利用した入射器のビーム開発が行われる。フェーズ3・コミッションング以前に解決すべき課題も多いため、特にビームの低エミッタンス化と安定化を図るために、さまざまな試験・検討が進められる予定である。

パルス電磁石の運用

放射光科学実験とBファクトリ電子陽電子衝突実験とを同時に行うために、入射器は、PF と PF-AR の2つの放射光蓄積リングと HER (電子リング) と LER (陽電子リング) の2つの SuperKEKB 蓄積衝突リングとの4蓄積リングへ同時入射を求められている。SuperKEKB 計画における衝突性能を向上させるために、入射する電子陽電子ビームについて大きな電流が求められるとともに、横方向のビーム拡がりや進行方向のエネルギー分散が厳しく制限される。そのために、それぞれの蓄積リングの入射ビーム軌道についても、600 m にわたって約 100 μm という高い精度の制御が必要となる。つまり、入射器にさまざまなパルス毎の動作が可能な装置を導入し、1秒間に50回動作を切り換えることによって、品質の高い大電流の電子陽電子ビームを4蓄積リングに同時入射することが重要となる。

特に、入射器の後半部においては入射先によって2.5 GeV から7 GeV とエネルギーの差が大きくなるために、パルス電磁石を増設して、ビーム光学条件とビーム軌道を入射対象リング毎に正確に制御管理する必要がある。そこで、2017年の夏に50 Hz (20 ミリ秒) で動作を切り換えることが可能なパルス収束電磁石電源を30台、パルス軌道補正電磁石を34台増設した。

パルス電源自体は高強度レーザー向けに内製開発していたものの実績があるが、電磁石コイルのインダクタンス負荷に対応し、さらに入射器の商用電源の大幅な増強を避けるために、負荷からの電力回収を行う必要があり、挑戦的な計画となった。また、装置の詳細設計や図面作成をできるだけ部内で行った。電源回路の設計においては、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 素子2個によりエネルギー回収用コンデンサと負荷電磁石との間の電流制御を行っている。

また、高い精度のパルス動作のために、正確にビームの3ミリ秒前にタイミング信号が必要となり、パルス毎に異なる電磁石励磁の情報も必要なために、全ての筐体に広域同期イベント制御・タイミング信号発生機構が組み込まれている。それぞれの蓄積リングは地下深度が異なるために、気圧・潮汐・温度による周長の変化を独立のクロック周波数の連続補正によって吸収している。入射器と SuperKEKB リングとは元々30ピコ秒の高い同期精度を実現するため、設計上入射器と完全同期したクロックで動作しており、高精度の3ミリ秒遅延信号の生成は容易である。ところが、同期しないクロックで動作する PF・PF-AR の周長補正の年較差・日較差の大きさは SuperKEKB の数十倍にもなり、3ミリ秒前にパルス電磁石向けの信号を発生した上で、約300ピコ秒精度で同期したビーム入射信号を発生するためには、予測制御の慎重な調整管理が重要になる。このような同期制御系は期待した通りに動作し、図1のように1ヶ月間では0.05%、1日では0.01%の安定度が得られており、仕様を充分満足している。

運用が始まったパルス電磁石機構について、電力回収の実測が行われた。1台の収束電磁石 (1 mH) に50 Hz 300 A の通電を行うとすると、収束電磁石のコイルに供給される電力が2250 W、コイルでのジュール発熱が76 W、配電ケーブルでのジュール発熱が303 W、となり、合計2629 W が供給されることになる。ところで、このような運用を行っている時に、この電源機構に供給された商用電力を電力計で測定すると827 W しか供給されていない。つまり、電磁石コイルに一度供給された電力が電源装置のコンデンサに回収され、次のパルスに再利用されている。

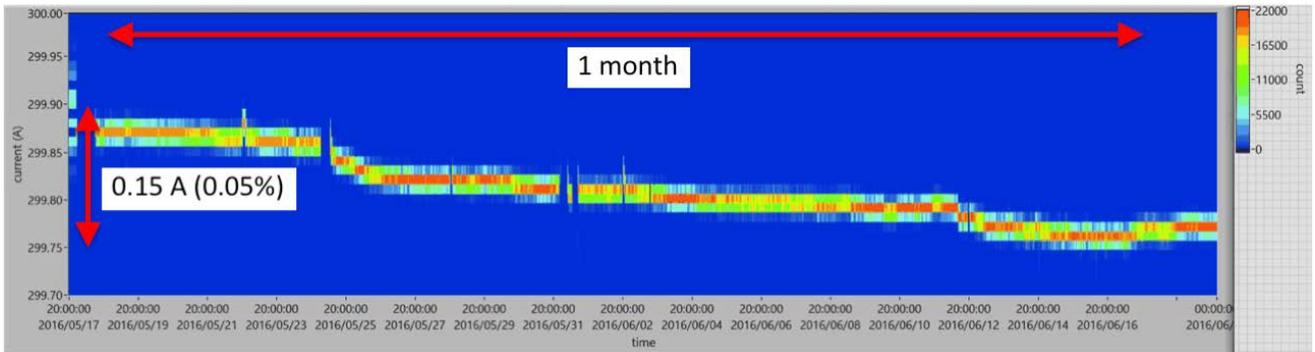


図1 パルス収束電磁石電源の1ヶ月間 50 Hz 連続試験結果の例。24時間の安定度は0.01%以下。

結果として、電力供給効率は317%、逆に電力回収効率は68.5%となる。IGBTのアナログ・フィードバック制御により、高安定（24時間安定性0.01%）で高電力回収効率（68.5%）の機構が構築できたことになる。なお、この効率の数値は、電源のうち、交流電力から直流電力に変換する直流電源の損失も含めた数値で、電力回収機構だけの効率では80%を超えと考えられる。

このようなパルス電磁石システムの開発によって、電力を回収しながら、放射光実験とSuperKEKB素粒子実験との間の干渉を最小限とする目処が付いたと考えており、この秋までに、上流部におけるパルス電磁石の増設を予定している。

ほとんどの新規のパルス電磁石については、新しく設計した架台に図2のように2台ずつのパルス収束電磁石とパルス軌道補正電磁石を乗せて設置された。この新しい架台は、SuperKEKBの本格稼働となるフェーズ3コミッションing運転に向けた、精度の高いアライメントに対応できるように工夫されており、ビームによるアライメント測定と架台の遠隔調整の組み合わせにより性能を発揮すると期待されている。

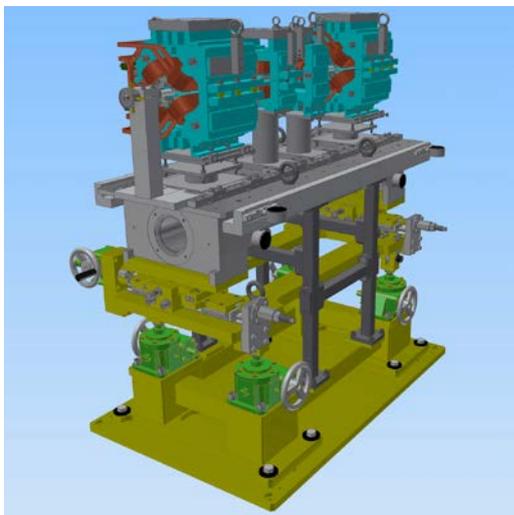


図2 パルス電磁石とその架台。高精度のアライメントを実現するための工夫が施されている。

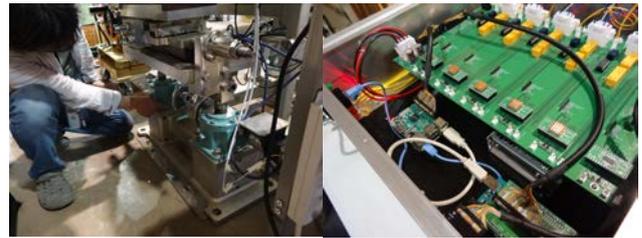


図3 収束電磁石の架台の駆動機構の開発。昨年設置した架台にモータを追加し、制御機構を接続する。

例えばこの図3の写真は、昨年度設置した電磁石の架台の駆動機構を遠隔制御にするための開発で、ステッピング・モータと制御機構を追加して、500 kg程度の重量について、1 μm 程度の位置調整を可能とする。低エミッタンスのビームを完成するためには、600 mにわたる、収束電磁石と加速管のアライメントは大変重要となるため、さまざまな検討、測定、開発を進めてきた。この追加遠隔駆動機構は、秋までに運用機器に組み込み、ビームを用いた試験を開始したいと考えている。

昨年度の入射器運転統計

入射器の2017年度の運転統計によると、総運転時間は4636時間であった（表1）。このうち、故障時間は173時間と大きな時間になっているが、実際に入射を要求されていたにも関わらず入射ができなかった故障時間（ビームロス）は29時間である。割合にすると、故障率は3.73%、ビームロス率は0.62%となる。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、特に2月に初めて運転を開始したダンピング・リングとのタイミング同期機構関連の障害が多い。ビームロスが故障に比べて6分の1程度であるので、入射が要求されていない時間帯に、適切に故障修理が行われたと考えることもできる。しかし、今年度は同時入射を基本とする入射運転に移行するため、運転時間内の障害対応は困難になる。また、引き続き多数の新規装置が稼働を始めるため、KEKBの運転開始時の故障率上昇と比較しながら注視しているところである。

表1 近年の入射器の運転統計

	運転時間	運転達成 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	ビーム ロス	ビーム ロス率
			故障	Trip	故障	Trip	故障	Trip	故障	Trip			
	x (時間)	y (時間)	x-y (時間)	z		x/z (分)		(x-y)/z (分)		故障/x (%)	(時間)	(%)	
1999年度	7,297	6,499	537	261	1,888	69,994	232	6	17	0.22	7.36	74	1.01
2000年度	7,203	6,577	466	160	2,401	39,380	180	11	12	0.24	6.47	54	0.76
2001年度	7,239	6,839	310	90	1,304	21,420	333	20	14	0.25	4.28	22	0.31
2002年度	7,086	6,813	205	68	1,424	17,372	299	24	9	0.23	2.89	23	0.32
2003年度	6,815	6,500	253	62	2,259	17,462	181	23	7	0.21	3.71	27	0.40
2004年度	7,117	6,936	129	52	2,323	12,956	184	33	3	0.24	1.81	39	0.55
2005年度	6,988	6,846	86	56	1,752	12,467	239	34	3	0.27	1.23	17	0.25
2006年度	6,927	6,777	95	55	1,665	13,064	250	32	3	0.25	1.37	22	0.32
2007年度	6,322	6,148	120	54	1,914	12,684	198	30	4	0.26	1.90	24	0.38
2008年度	6,556	6,390	117	49	1,536	11,228	256	35	5	0.26	1.78	35	0.53
2009年度	6,362	6,193	108	61	1,316	13,443	290	28	5	0.27	1.70	34	0.53
2010年度	5,847	5,721	89	37	1,027	8,079	342	43	5	0.27	1.52	15	0.26
2011年度	5,492	5,301	58	133	766	38,258	430	9	5	0.21	1.06	4	0.07
2012年度	5,331	5,191	69	71	859	14,893	372	21	5	0.29	1.29	8	0.15
2013年度	5,315	5,172	23	120	1,127	22,135	283	14	1	0.33	0.43	2	0.04
2014年度	3,448	3,235	31	182	1,243	30,583	166	7	1	0.36	0.90	7	0.20
2015年度	5,296	5,087	93	116	1,437	21,042	221	15	4	0.33	1.76	17	0.32
2016年度	4,733	4,562	101	70	1,986	12,481	143	23	3	0.34	2.13	15	0.32
2017年度	4,636	4,387	173	76	1,606	15,954	173	17	6	0.29	3.74	29	0.62

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川和朗
(2018年11月5日付け)

概要

夏の停止期間中の保守・建設・試験作業を終え、10月22日から入射器の立ち上げ作業を進めており、新規・改造装置の動作試験も進んでいる。上流部は装置の調整が先に進んでおり、熱電子銃、RF電子銃双方のビームの調整を開始したところである。秋に予定している放射光施設、PFとPF-AR、に向けた入射ビームを用意できる目処を付けることができた。夏前のSuperKEKBフェーズ2・コミッションングについては、入射器からもほぼ予定されたビーム品質の入射を達成することができたが、来年開始するフェーズ3・コミッションングに向けては、必要とされる入射ビームはまだ完全には実現できておらず、秋の放射光施設入射と並行して調整する予定である。同時入射機構を利用することにより、放射光入射用のビームと試験開発用のビームを並行して加速し、特にビームの低エミッタンス化と安定化を図るために、さまざまな試験・検討が進められる予定である。また、PF-AR向けの5 GeVの電子入射の試験も進め、電力消費量の削減を狙うことになる。

複数電子銃の利用

今回の改造においては、熱電子銃とRF電子銃を高速で切り替え、同時入射を実現するためのパルス電磁石が追加設置された。これらの電子銃の整備については、2010年からの入射器改造における課題の一つであったが、SuperKEKBのフェーズ3・コミッションングを控えて一区切りを迎えたことになる。

2010年から2011年にかけては、まずSuperKEKB向けの改造と、さらには予定していなかった震災復旧を、放射光入射と独立に進めるために、仮の熱電子銃をダンピング・リング接続部の下流側に建設した。当時はPF-ARの入射エネルギーが3 GeVであったので、PFの2.5 GeV入射と併せて、この仮電子銃と入射器の下流部8分の3を暫定復旧することにより、震災から3ヶ月後には入射を再開することができた。この仮電子銃を用いることによって、入射

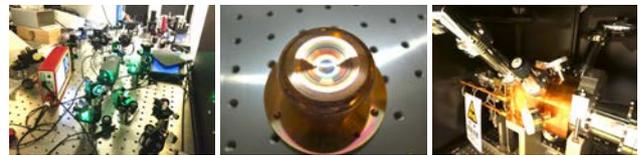


図1 RF電子銃向けに開発された、高強度レーザーシステムの試験時の最終段、高安定光陰極、及び高電界擬似進行波型空洞

器の上流8分の5の震災復旧・改造やビーム開発については、放射光施設入射とは独立に行えることとなった。仮電子銃は、PF-ARの直接入射路が完成し、6.5 GeVの入射が始まる2017年まで使用された。

SuperKEKBでの衝突性能、ルミノシティをKEKBの40倍に高めるためのナノビーム衝突方式を実現するためには、電子・陽電子入射ビームについても4倍強の電流増強と同時に、横方向と縦方向のビーム拡がり（エミッタンスとエネルギー拡がり）の大幅な縮小が重要な目標となっている。電子の入射には、新しいタイプのRF電子銃の開発の必要があり、2通りの方式の光陰極RF電子銃の開発を開始したが、後にひとつにまとめることになった。高強度レーザー、光陰極、空洞のそれぞれに新しい技術を導入し（図1）、最上流部にRF電子銃の建設を開始した。

RF電子銃のレーザーとしては、Yb:YAGファイバー発振器とファイバー増幅器、Yb:YAGまたはNd:YAGの固体増幅器を組み合わせ、エネルギー幅の小さいビームを作るための矩形パルスの生成を目指している。光陰極としてはイリジウム・セリウム合金が非常に安定した中程度の量子効率を持つことを見出し、空洞としては大きな電荷を空間電荷効果の影響を避けつつ高電界で加速するために擬似進行波型空洞が有効であることがわかっている。

陽電子を生成するための一次電子としては、低エミッタンスは必要ないが、電子の3倍近い電荷のビームを必要とするため、現在のところKEKBで使用された熱電子銃とバンチング系を可能な限り再利用することとしている。入

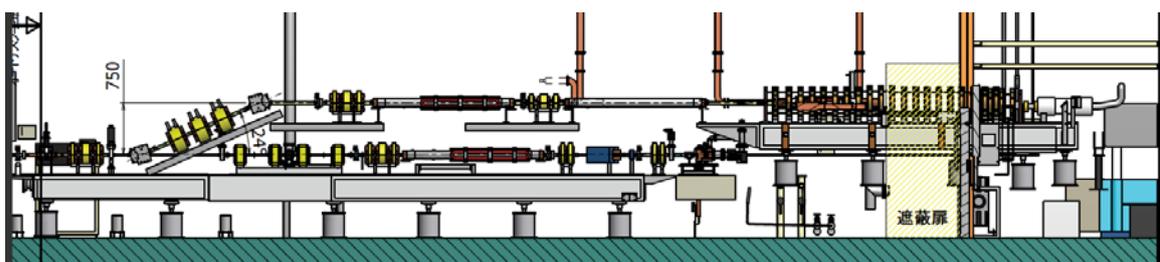


図2 下段の低エミッタンスRF電子銃と、上段の大電流熱電子銃の再配置・構成

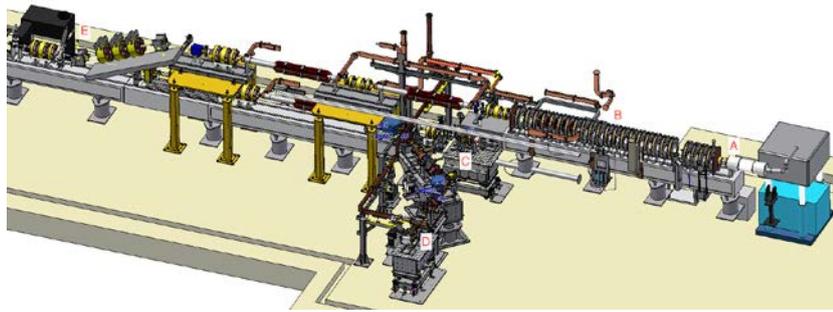


図3 入射部の構成。A: 上段熱電子銃, B: バンチング・セクション, C: 下段 RF 電子銃, D: 第二 RF 電子銃, E: 24 度合流部。

射器のトンネルとクライストロン・ギャラリーの大きさの制限があるため、RF 電子銃のビームラインの 750 mm 上部に熱電子銃のバンチング系を配置することにして、24 度の合流ビームラインと共に 2015 年に建設を行った (図 2)。

SuperKEKB の電子入射には下段の RF 電子銃を使用し、PF と PF-AR の電子入射、及び SuperKEKB 向けの陽電子生成には上段の熱電子銃を使用する。SuperKEKB のフェーズ 1 及びフェーズ 2・コミッションングにおいては、電子入射の条件が厳しくなかったため、切り替え速度等を考え、実際には熱電子銃を使用することも多かった。

2017 年に 5 ヶ月の連続停止期間を割り当てられたため、入射器の下流部向けに既に製造していた 64 台のパルス電磁石を設置することが可能となり、それらは期待したとおりに動作した。さらに、その結果を用いて 2018 年の夏の建設期間には、上流部にパルス電磁石を増設し、2 つの電子銃の合流部の偏向電磁石やビーム光学マッチング用の収束電磁石がパルス化されたため、他の装置や安全システムの改造とも併せて、50 Hz のパルス毎に電子銃を切り替えることが可能となった。これらによって、入射器全体の同時入射の準備がほぼ整った。また、2017 年には第二 RF 電子銃も設置し、信頼性の向上を図っている (図 3, 4)。

2008 年から 2010 年までは、PF、KEKB HER、LER の 3 リングへの同時入射を、当時のビーム品質仕様に従って行うことができた。来年から開始する SuperKEKB フェーズ 3 コミッションングにおいては、格段に厳しいビーム要求仕様に合わせて、パルス毎に精度の高いビーム制御を行いながら、SuperKEKB と放射光の 4 つの蓄積リング、さらにはダンピング・リングへのビームの供給を行うことになる。



図4 入射部の現在の様子。合流部近辺の水色の電磁石が最近設置されたパルス電磁石。

入射器のエミッタンス管理

入射器の SuperKEKB に向けた改造においては、電子・陽電子の 4 倍強の電流増強と横方向と縦方向のビーム拡がりの縮小 (エミッタンス約 20 mm・mrad とエネルギー拡がり 0.07%) が重要な目標となっている。それぞれの間には強い関係があり、単純にバンチあたりの電流を増やすとビーム拡がりは急速に悪化してしまう。

エミッタンス悪化の一つの原因は加速管中に発生する横方向の電場が主要要因となる。例えば、図 5a のように、集束電磁石の中心からずれたビームが通ると、四重極磁場によりビーム軌道が横方向に曲がり、さらにビームが加速管の中心からずれると、ビームバンチの先頭が横方向の航跡電場を誘起し、バンチの後方を曲げてしまう。その結果投影したビームバンチの大きさが大きくなってしまふ。図 5b のシミュレーション結果が示すようにバンチがバナナのような形状を持つことになる。これからわかるように加速器装置が精度良く並べてあること (アライメント) が重要になる。

図 6a は加速器装置のアライメントによって、エミッタンスがどの程度悪化するか見たプロットで、横軸は装置がランダムにずれていた時のずれの標準偏差で、縦軸が 100 通りの計算をした時の悪化したエミッタンスの平均と標準

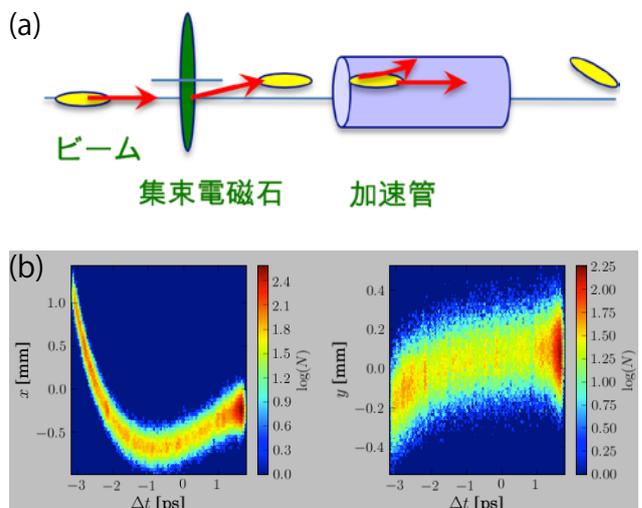


図5 (a) エミッタンスの悪化。装置の設置位置がずれた場合のビーム (黄色) の変形。(b) シミュレーション例。ビームバンチの縦方向 (横軸) と水平・垂直方向 (縦軸) の拡がり。

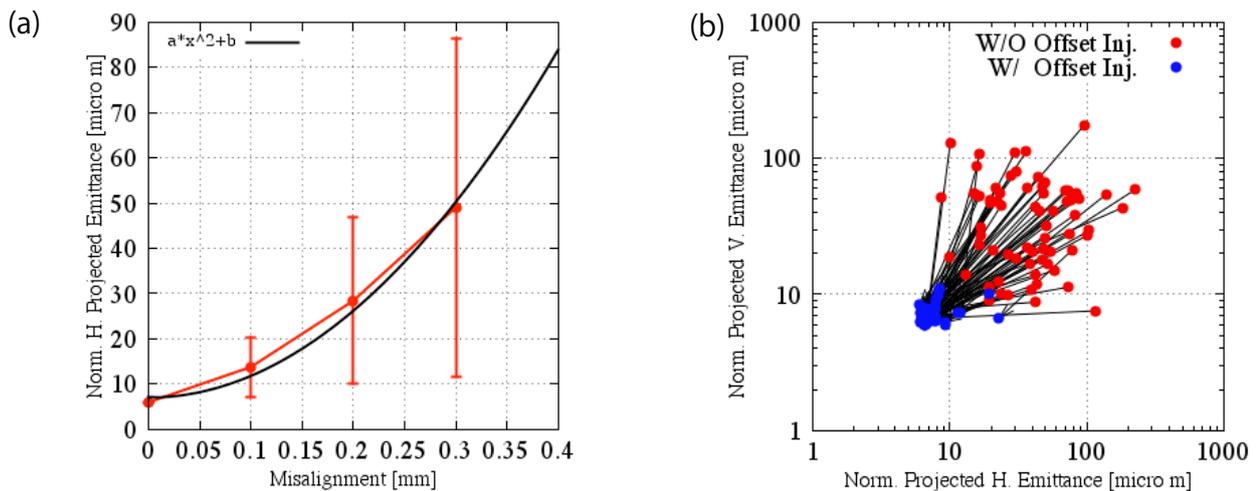


図6 (a) アライメントを悪化させた場合のエミッタンスの悪化。100 とおりの場合の標準偏差。(b) 悪化したエミッタンス (赤点) を初期のビーム位置と角度を調整して回復した例 (青点)。

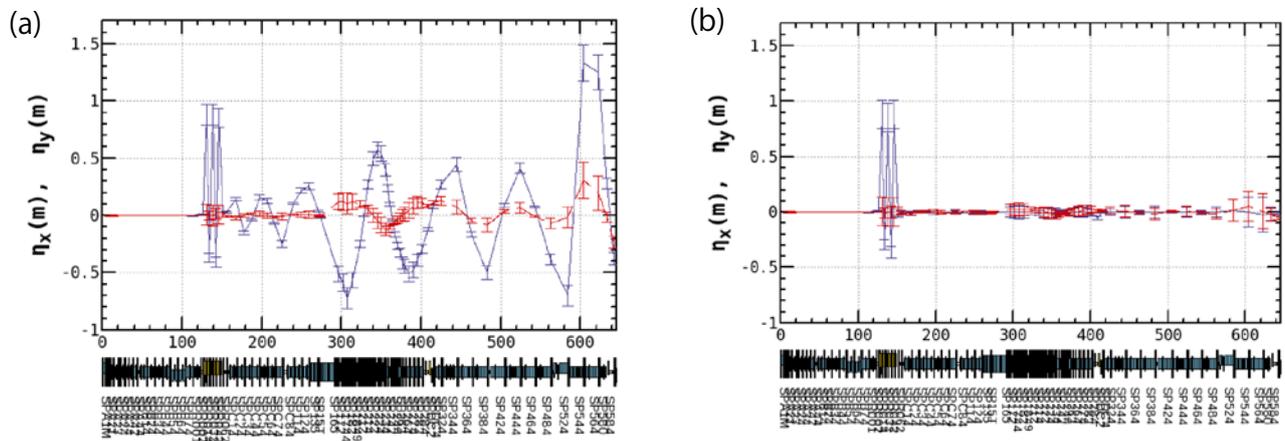


図7 (a) J-ARC 部以降の水平 (青) と垂直 (赤) 方向の分散関数の漏れ。(b) J-ARC 部の収束電磁石の調整により、分散関数を最小化することに成功した。

偏差である。アライメントの悪化によりエミッタンスが急激に悪化することがわかる。35 年前に最初に装置が設置される前に 0.1 mm の精度で設置する仕組みが構築されたが、2011 年の大震災によって、場所によっては装置が 10 mm 以上動いてしまい、回復は容易ではなかった。

もしも、アライメント精度 0.1 mm を達成することができれば、目標とするエミッタンスが実現できそうであるが、現実にはその精度の達成は困難と思われた。しかし、ずれが大きくなると、二次の効果が小さければ、適当なビーム軌道を作ると誘起航跡電場の効果を上下・左右方向に打ち消させることができる。そのような軌道を見つける方法の一つとして、最初のビーム位置と角度を調整することが考えられる。図 6b はそのような考えを適用して、アライメント精度 0.3 mm の場合 100 とおりに対して、悪化したエミッタンスを回復してみた例である。図 6a, 6b は単純化したシミュレーション結果であるが、もう少し現実的なシミュレーションにより、入射器全体のアライメント精度が 0.3 mm で、10 m 程度の短い区間で 0.1 mm が達成されていると、軌道制御により目標のエミッタンスを得ること

が可能であることがわかってきた。

夏のビーム試験においては、この前段階として、入射器に沿ったビームの光学特性の調査が行われた。その結果、ビームの分散関数が設計上ゼロである場所において、有限の値になっている場所が複数見つかった。エネルギー広がりエミッタンスの増大に見えてしまうので、修正することが望ましい。

例えば、エネルギー 1.5 GeV の J-ARC 部の後で、図 7a のように分散関数の漏れが見つかった。収束電磁石と偏向電磁石の磁場が想定した値からずれているための問題と考えられたため、分散関数の測定値から収束電磁石の磁場がずれていると考えた場合のずれの大きさを求め、補正を行ったところ、図 7b のように分散関数を最小化することができた。同様の調整を、ダンピング・リングから入射器への接続部や、入射器からメイン・リングへのビーム輸送路においても行った。

今後は、このようなビーム光学関数の管理を精度高く行うことによって、適切なビームを入射する必要があると考えている。

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川和朗
(2019年2月8日付け)

概要

2018年秋には、放射光施設 PF と PF-AR への電子入射運転と、ビーム開発も並行して行われて、無事に12月21日に終了した。SuperKEKB に向けた建設のために、2011年以降本格的な同時入射は行われなかったが、秋の期間に放射光施設にトップアップ入射を行って準備を整えることができ、2019年からは放射光と SuperKEKB の4蓄積リングに向けた同時トップアップ入射を行う予定である。ビーム開発については、3月に開始する SuperKEKB フェーズ3・コミッショニングに向けて重要であったが、ビーム測定などに制限はあったものの同時入射機構を利用することにより、放射光入射には大きな影響を与えずに実行することができた。大震災以来電力量節約のために入射器は25 Hzで運転してきたが、秋の運転期間の最後には、50 Hzの Puls 運転に向けた調整運転が行われ、大きな問題なく移行することができた。2月からの運転においては50 Hz 運転を基本とすることになった。

SuperKEKB フェーズ3 向けビーム開発

秋の運転期間中のビーム開発においては、夏期に改造された機器の性能確認や、ビームの特性の改善に向けたさまざまな試みが行われた。同時入射機構を用いて、パルス毎にビーム特性を切り換えることによって、多くのビーム実験が放射光施設の入射と共存しながら実行された。また、入射に影響を与える可能性のある実験は、予め専用割り当てられた時間帯を有効利用することによって実施することができた。

SuperKEKB の入射においては、大電流・低エミッタンス・低エネルギー拡がりというような特性を持ったビームを必要とする。衝突リングにおけるビーム条件と衝突性能の進展に合わせて、徐々に入射器のビームの質を高めて入

射する予定となっている。昨年のフェーズ2コミッショニングにおいては、期待された衝突性能も確認することができ順調であったが、Belle II 検出器へのバックグラウンド・ノイズが問題として認識されることになった。蓄積ビームによるノイズも少なくなかったが、入射ビームの寄与も確認されており、今後バックグラウンドを作らない入射が期待される。そのためには、ビームエミッタンス、エネルギー拡がり、エネルギージッター、軌道ジッターなどを低く抑える必要がある。

エネルギーや軌道のジッターについては、新しく導入されたパルス電磁石や低電力マイクロ波制御装置などに関連して、安定化機構の誤動作や、不十分な信号接続などが見つかっている。特殊な条件でのみ発生する誤動作も含まれており、また、装置のみの試験では発見が困難であった事象もあり、可能な部分から対策を施している。

低エミッタンスのビームの生成に肝要な RF 電子銃について、高出力 Nd:YAG レーザーが3ヶ月にわたって安定に動作し、今後の運転に自信をもたせた。ビデオカメラにより、2系統のレーザーの最終段の形状監視機構も整備された。最大5 nC 以上、定常的に2 nC のビームを生成し、低エミッタンス化の実験を継続している。12月末には、RF 電子銃のレーザー導入窓に真空漏れが発生したため対策を施した。帯電による放電と考えられており、窓の2重化を進めている。

ビームの低エミッタンス化については、入射器の複数の領域について、分散関数(ディスパージョン)の低減が行われ、その結果、エミッタンスの測定結果においても効果が確認されている(図1)。他にも様々なビーム調整を繰り返し、放射光施設の入射と共存が可能なフェーズ3・コミッショニング向けのビームの準備を進めている。

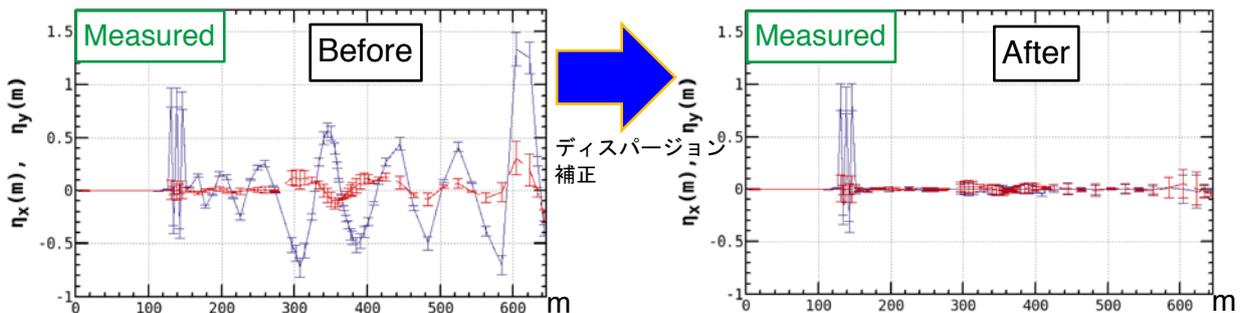


図1 ビームエネルギーを変えた時の軌道の変化からディスパージョン関数を測定し、測定されたディスパージョンが閉じるように4極磁石を調整し、低エミッタンス化を図る。