

## 概要

放射光施設への電子入射について、3月中旬に停止した後、5月初旬に再開して、順調に調整を進めているところである。SuperKEKB に関しては、フェーズ1コミッションと呼ばれる最初のリング試験運転の入射を2月初めから開始し、これまでのところ順調に電子・陽電子の入射を進めている。

6月末までのフェーズ1コミッションの期間中に、電子(HER)/陽電子(LER)両リングの真空焼き出しとビーム光学開発をできるだけ進める必要があるが、さらに入射器内のビームについても試験開発が必要となっており、毎週水曜日をその目的に割り当てている。また、来年度予定しているフェーズ2コミッションにおいては、高品質のビームを50Hzパルス毎に切り替え、SuperKEKB HER/LERとPF、PF-ARに入射することが求められている。ビーム品質が高いために、2010年まで行われたKEKBの時期に比べて多数のパルス動作装置の導入が行われている。それらのパルス運転機器の開発を継続しているため、昨年まで行われていたPF放射光施設へのトップ・アップ入射運転は控えさせていただいており、一日2回から6回の定時入射を行っている。

さらに前年度から引き続き放射線遮蔽の増強も行い、4月末には平均電流値を4倍とする放射線施設検査を受け、合格することができた。

## 運転コンソールの移動

KEKB 運転時には入射器の運転操作は主に KEKB 制御室から行っていたが、2010年からの建設時期には、日々建設変更される機器との距離の近い入射器棟内制御室から、放射光施設への入射を含めた運転操作を行ってきた。フェーズ1コミッション運転が始まってから、再度主

な運転操作を SuperKEKB 制御室から行っている。障害時の対策もあり、入射器棟内制御室と SuperKEKB 制御室ではできるだけ同じ操作が可能となるよう工夫しているが、一部の機能は双方で行うと矛盾が起こるので、排他処理を付加している。新しい端末としては、運転ログ記録の入力に慣れた Windows 端末を基礎として、Linux 仮想マシンの上で運転操作を行っている。こうすることによって、最新の小型の PC 端末を使用しても、よくありがちな画面表示ドライバ・ソフトウェアの問題などを回避できている(図1)。

フェーズ2では、KEKB の最後で行われた同時入射をさ



図2 KEKB 運転の初期から中期まで使用されたビームモード切り替えソフトウェアを、SuperKEKB フェーズ1では再利用している。



図1 SuperKEKB 制御室内の入射器用コンソール群(右)と全体運転コンソール(左正面)。さらには左にはリングの電磁石、マイクロ波、真空、ビームモニタ、Belle-2/Beast など各グループの端末が並んでいる。また、右奥には PF-AR 向けコンソールや全体安全コンソールがある。

らに進化させて高品質ビームを供給するため、フェーズ1とは大きく異なる運転形態となる。そこで、フェーズ1での運転操作ソフトウェアは、できるだけ新しい開発を避け、過去のソフトウェアを再利用して、省力化を図っている。例えば、図2のビームモード切り替えソフトウェアは、複数の機構と通信しながら約十秒でビームモードを切り替えるものだが、KEKB中期のものを大きな変更なく再利用している。この機構は、フェーズ2の同時入射ではイベント制御機構の中に組み込まれ、ナノ秒からミリ秒の制御機構に置き換わる。

### 放射線管理

昨年度から引き続き、SuperKEKB 入射時の電流増強に向けた放射線対策を進めており、最近も機械室においてコンクリート遮蔽増強を行った。また、既存の遮蔽部材の耐震対策も行っている。

これまで、段階的に電流増強の変更申請を重ねてきたが、今年度も、昨年度から行っていた放射線施設変更申請の施設検査を受け、首尾よく合格することができた。検査当日は入射器と同時に、ビーム輸送路と SuperKEKB の主リングの施設検査も行なわれ、ご協力いただいた放射線科学センターや安全衛生推進室の方々や各加速器の担当者には深く感謝したい(図3)。今後、フェーズ2やフェーズ3を開始するまでには、PF-AR 直接入射路接続部、陽電子ダンプリング接続部、さらに入射器電流増強などの変更申請を行う予定である。



図3 施設変更の申請箇所において、複数の観点から検査が行われた。

### 運転体制

既に述べたように、SuperKEKB のコミッションング運転の主なビーム運転操作は SuperKEKB 制御室から行っている。しかし、SuperKEKB 向けに開発された加速器機器とともに、入射器建設当初から35年以上にわたって使われている機器も多いことから、これらの古い機器が異常になった場合には、入射器棟の現場で確認する必要がある。また、入射器棟内には低速陽電子実験施設が存在するため、実験者入域の対応を行う場合もある。そこで、3交替の業務委託運転員のうち一人は入射器棟制御室において機器の維持業務を行い、もう一人が SuperKEKB 制御室において、リングの運転員と密に協調しながらビーム維持や問題解決にあたっている。

各機器グループに所属する入射器職員から10人が入射器とリングのビーム・コミッションングのシフトにも参加している。他の職員は安全確保のシフトに参加しているが、そのうちの10人ほどが随時ビームの調整等にも参加することがある。業務委託運転員は加速器の停止時には、入射器の建設や維持作業にも参加しているために、入射器のさまざまな部分を熟知している。それがビーム運転時には有効に働いており、職員と分業協調しながら品質の高いビーム入射に貢献することができている。

職員のうち、矢野喜治さん、荒木田是夫さん、中尾克巳さんがこの3月で定年を迎えられた。これまでの加速器施設での貢献と我々への温かい指導に感謝したい。また4月からは、技術職の佐武いつかさんと、博士研究員の佐藤大輔さんに新しく加速器五系で仕事をしていただくことになり、今後の活躍に期待したい。

## 概要

今期の放射光施設への電子入射については、5月初旬から6月末まで順調に推移した。SuperKEKBのフェーズ1コミッショニングと呼ばれる最初のリング試験運転に関しては、1月末から入射器の調整の後、短期の停止を除いて6月末まで電子・陽電子の入射を継続し、電子(HER)/陽電子(LER)両リングの真空焼き出し、ビーム光学開発や各装置の較正などを進めることができた。その際KEKB計画での経験を活かし、思った以上の成果を上げることができた。また、真空焼き出しが適切に進行しリングでのビーム寿命が長いため、入射器は25 Hz以下の運転を行い、電力費用を節約することができた。フェーズ1期間中には低エミッタンスの入射ビームは必要なかったが、RF電子銃の諮問委員会の助言に沿って、RF電子銃によるメインリング入射にも成功し、10日間の入射を行った。今後は、PF-AR直接入射路の建設やSuperKEKB向けの入射器改造の重要部分の設置作業が控えており、残念ながら放射光施設入射への影響も小さくないと予想される。

## RF電子銃によるHER入射

SuperKEKB計画においては、衝突性能を向上させるために、入射する電子陽電子についても電流を増やすと同時に、低エミッタンスのビームが必要とされる(図1)。来年度の後半に予定されているフェーズ2コミッショニングに備えて、フェーズ1コミッショニングの期間中にも、開発中のRF電子銃の試験入射を行い、機能の確認を行うことにした。

低エミッタンスではない大電流ビームを生成するためには、これまで熱電子銃を使ってきたが、品質の高い、大電

流低エミッタンスのビームを生成するためには、光陰極のRF電子銃が必要となり、高強度レーザー・高耐性光陰極・高電界マイクロ波空洞のそれぞれに工夫を凝らして開発を行なっている。

高強度レーザーは、大きく分けてファイバー・レーザー発振器、ファイバー・レーザー増幅器、光パルス整形装置、固体結晶レーザー増幅器、波長変換装置などから構成されている。レーザー媒体としてはイッテルビウム(Yb)やネオジウム(Nd)を含んだYAG結晶を使用しており、低エミッタンスのビームに適切な約20 psの長さの高強度レーザー光を生成する。

生成された紫外光は高耐性光陰極に照射されて、電子を大量に生成する。使用している陰極はイリジウム・セリウムの合金で、電子の生成効率が非常に高いわけではないが、真空度などの外的要因に大きく左右されずに電子を生成することができる(図2)。東日本大震災において、旧熱電子銃の真空が破れ、大きな影響を受けたことが、高耐性合金陰極を選択したひとつの要因になっている。

マイクロ波空洞の加速電界が低いと、空間電荷効果により低エミッタンスを実現することができないので、電界の高いサイドカップル型擬似進行波空洞と呼ぶ空洞を使用している(図3)。

RF電子銃によって、SuperKEKBリングに入射するためには、適切なタイミングで電子を発生させてリングのマイクロ波と30 ps以下の精度で同期させる必要がある。ところが、高強度レーザーを発生させるための初段のファイバー・レーザー発振器はファイバーの輪を周回して光を増幅

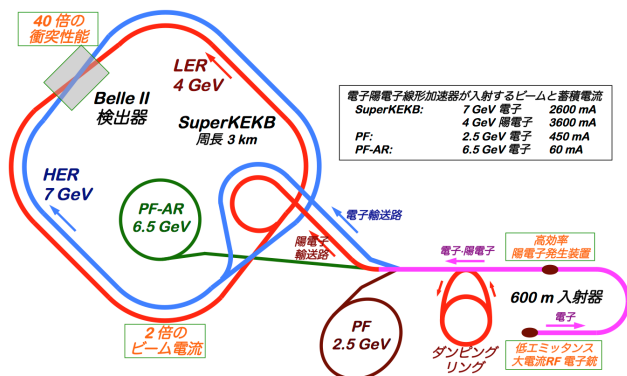


図1 電子陽電子加速器群の模式図。電子陽電子入射器は約600 mの長さを持ち、SuperKEKBリング加速器は約3 kmの周長を持つ。

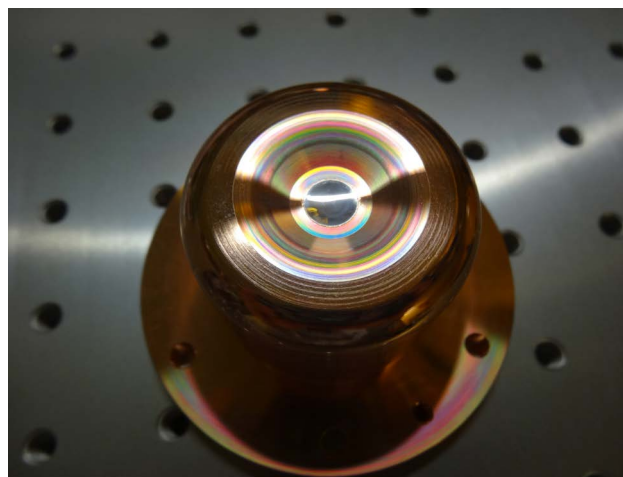


図2 マイクロ波空洞に取り付けるために、銅製のブロックに嵌めこまれた銀色のイリジウム・セリウム合金の光陰極。

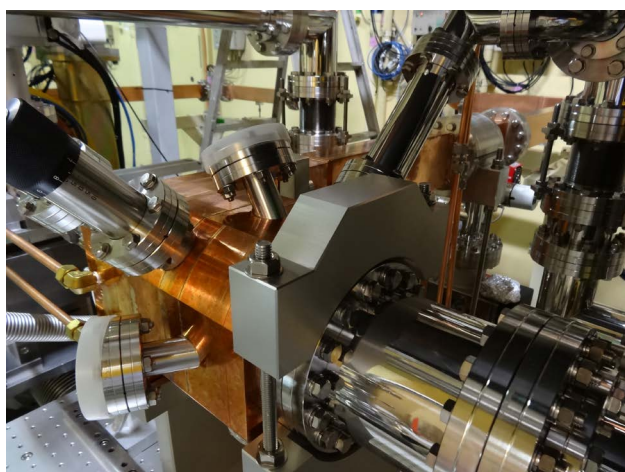


図3 生成された電子を直ちに加速するサイドカップル擬進行波型マイクロ波空洞（銅色の部分）と真空装置。

するため、独自の周期を持っている。そのため、高度な電子回路が必要となる。このようなさまざまな機器の調整を経て、5月31日にはSuperKEKBの電子メイン・リングへの入射に初めて成功した（図4）。

さらに、ビームバンチ圧縮によってビーム品質を改善し、電子入射と陽電子入射の切り替えの調整を行った後、6月8日からは、RF電子銃からの入射を10日間継続した。

現在のところ、エミッタンスとしてはフェーズ2コミッションの要求値を満足しているわけではなく、600 mの入射器で加速する間にエミッタンスが増大してしまっている。しかし、加速器のアライメントやビーム制御の整備

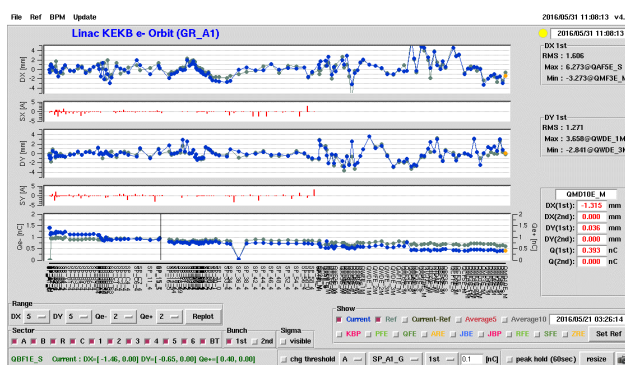


図4 RF電子銃で生成された電子（青）と比較対象の熱電子銃から生成された電子（緑）について、水平方向位置（上）、垂直方向位置（中）、電荷（下）の電子銃からビーム輸送路終端までの、情報プロット。この時点では、バンチ圧縮を行っていないので、途中でビーム損失がある。

も並行して進めており、必要とするビーム品質を満足できるようにする予定である。

### 昨年度の入射器運転統計

2015年度の運転統計によると、総運転時間は5296時間で前年度比+54%であったが、この増加は前年の予算配分が少なかったためである（表1）。故障率は1.76%で前年度比+0.86ポイントとなり、この上昇は、SuperKEKB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。KEKBの運転開始時には故障率が大幅に悪化したため、注視している。

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 (MTTR)		故障率 故障/x (%)
	x (時間)	y (時間)	x-y (時間)		z		x/z(分)		(x-y)/z(分)		
			故障	RF Trip	故障	RF Trip	故障	RF Trip	故障	RF Trip	
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

### 概要

放射光施設への電子入射と SuperKEKB のフェーズ 1 コミッショニングについて、6 月末まで順調に運転した後、夏の保守期間においては、フェーズ 2 コミッショニングに向けた建設を継続した。資源が充分ではないため、今年度はフェーズ 2 コミッショニングのための設備を全て設置することはできないが、来年度には集中的に建設を行う必要がある。建設の効率をできるだけ向上させるため、来年度の調達や設置作業のスケジュールの最適化を進めている。現在の計画では、夏の建設期間を 5 ヶ月確保する必要があるが、種々の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ことによって資源節減をさらに進める計画である。

今年の秋の運転は 10 月 3 日から始めており、PF リングへの入射と SuperKEKB 向けのビームコミッショニング、さらには、来年初めに予定されている PF-AR 直接入射路コミッショニングの入射器側準備も進めていく予定である。

### パルス電磁石の開発

SuperKEKB 計画においては衝突性能を向上させるために、入射する電子陽電子についても電流を増やすとともに、低エミッタンスのビームが必要とされる。放射光科学実験と B ファクトリ電子陽電子衝突実験を同時に行うために、入射器はダンピングリングと協調運転するとともに、PF と PF-AR の 2 つの放射光蓄積リングと、HER と LER の 2 つの SuperKEKB 衝突蓄積リングに同時にビームを入射する必要がある。

SuperKEKB については、蓄積リングと言っても実験が本格化すると、ビーム寿命は 5 分程度になると予想されているので、2 時間近くのビーム寿命のあった KEKB 計画に比べると、格段に同時入射の重要性が高い。このため、入射器にさまざまなパルス動作装置を導入し、50 Hz (20 ms) で動作を切り換えることによって、低エミッタンス大電流の電子陽電子ビームを 4 + 1 蓄積リングに同時入射することが重要となる。

KEKB の運転時には、入射器の電流が低く、さらに低エミッタンスのビームが要求されなかったため、多少の軌道の乱れやビーム光学的マッチングの悪化は許されていた。そのため、入射器内では HER, LER, PF 向けのビームについて、ビーム光学的な妥協点を探して加速を行い、ビーム光学の調整は、それぞれのリングへのビーム輸送路で行われた。結果として、HER, LER, PF への 3 蓄積リング同時トップアップ入射を実現し、安定で高品質な実験に貢献した。

しかし、SuperKEKB 向けの低エミッタンスビーム入射の要求は、曖昧なビーム光学条件を許さないで、入射器の特に下流部を中心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確実に管理する必要がある。50 Hz (20 ms) 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 (ステアリング) 電磁石を 36 台増設する予定である。また、電子銃の選択やビーム診断のためにさらに数台の偏向電磁石を必要とする。この内、収束電磁石 (と偏向電磁石) では、約 1 mH のインダクタンスに対して、330 A, 340 V, 1 ミリ秒という比較的大電力のパルスを安定に供給する電源装置を用意する必要がある。

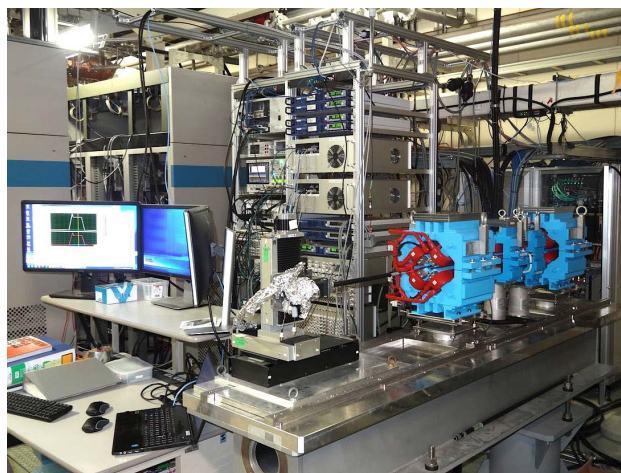


図 1 テストスタンドに置かれた青色のパルス収束電磁石 2 台とパルス軌道補正電磁石 2 台。連続運転時の長期安定度、磁場強度をパルス毎に変更した際の安定度など、実際の運転に近い条件での連続測定を行っている。

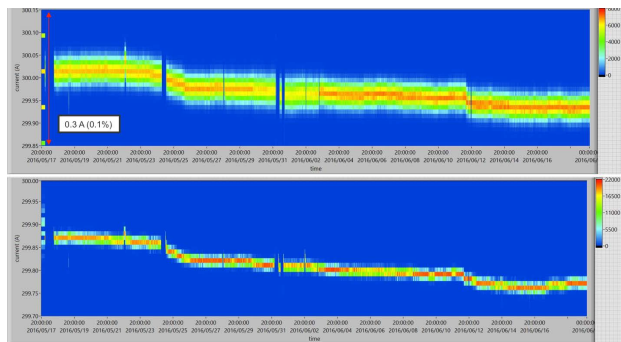


図 2 パルス収束電磁石電源の 1 ヶ月間の 50 Hz 連続試験例。上段・下段がそれぞれ外部と内部の DCCT (Direct Current Current Transformer) 測定器による電流安定度測定。縦軸に電流の 0.1% 分を表示しており、安定度は仕様を満足している。

パルス電源自体は高強度レーザー向けに内製していたものが応用でき、実績があるが、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、負荷からのエネルギー回収を行う必要があるため、たいへん挑戦的な計画である。このエネルギー回収により、7～8割の電力が節約できると考えている。IGBT(Insulated Gate Bipolar Transister) 素子2個によりDC電源、エネルギー回収用コンデンサ、負荷電磁石との間の電流制御を行っている。数ヶ月の連続試験に耐えられるようになってきており、安定度も仕様を満足している(図1,2)。

6月末にはビームラインに設置した2台のパルス収束電磁石を用いて、磁場強度をパルス毎に変更した際に、中心を通らないビームが正しく偏向されるかどうかの試験を行った。この時点では、電力節約のため入射器は50Hz運転ではなく25Hz運転を行っていたため、パルス間隔は20ミリ秒ではなく40ミリ秒ではあったが、運転に使われているイベント同期制御系を接続して、期待した通りの動作を確認することができた(図3)。

66台のパルス電磁石を設置する予定のほとんどの場所では、新しく入射器内で図面設計した架台に、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する予定である(図4,5)。この架台は資源不足のためほとんどが来年度製造設置することになっており、他のフェーズ2コミッショニングに必要な機器の設置と併せて、来年度の夏の停止期間を5ヶ月確保させていただくことになっている。

この新しい架台は、フェーズ3コミッショニングに向けた、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、例えばモータを追加することで遠隔調整が可能で、運転時にビームによるアライメントを実現することも可能となる。

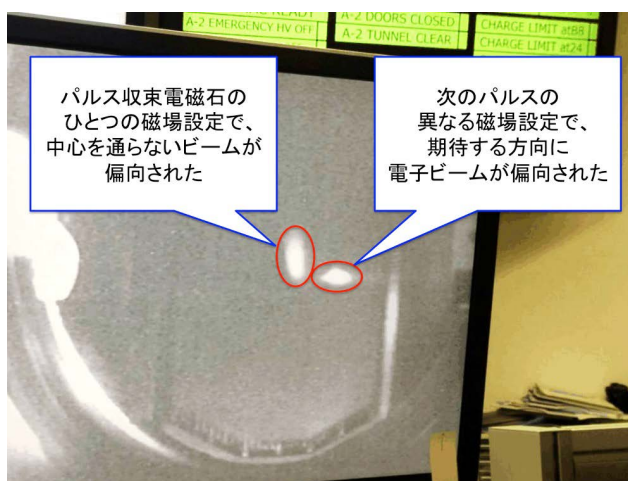


図3 パルス収束電磁石の磁場強度をパルス毎に変更し、電子ビームの軌道が期待どおりに変化することを確認した際の、スクリーンビームモニタの画像。

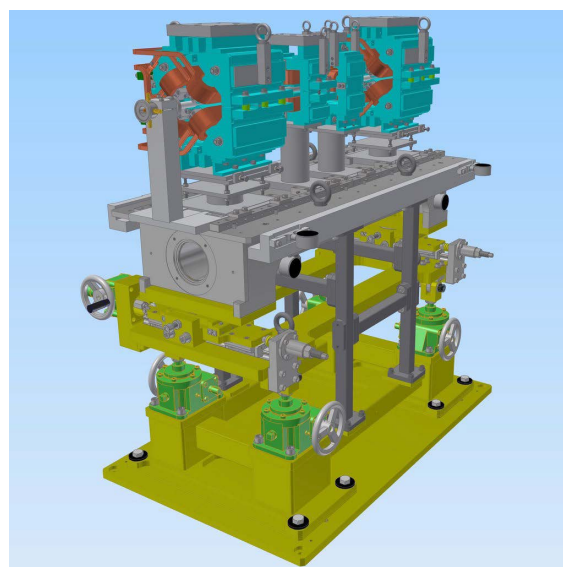


図4 3次元CADで新しく設計されたパルス電磁石架台。低エミッタンスビームを実現するためにはアライメントが重要なので、さまざまな工夫が施されている。

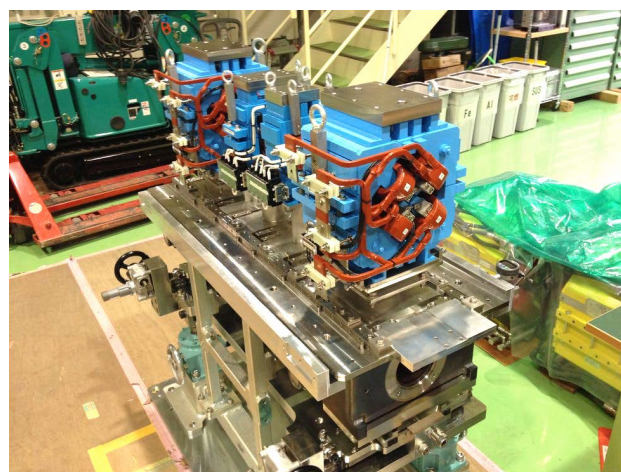


図5 新しく設計した架台に乗せられた4台のパルス電磁石

### 運転体制

来年度後半までは SuperKEKB 関連の入射運転の予定が無いので、人員の分散を避けるために入射器棟内の制御室からビーム運転を行っている。PF-AR 直接入射路のコミッショニングにも都合よいかもかもしれない。

10月から、技術職の西田麻耶さんが加速器五系に異動された。西田さんには、技術職が空席になっていた入射部グループに参加していただく予定である。現在は入射器内の各グループでの研修に参加していただいております、今後の活躍が期待されています。

概要

2016 年秋には 10 月 3 日から 12 月 19 日まで、PF リングへの入射運転を順調に行うことができた。並行して、SuperKEKB フェーズ 2 コミッショニングや、PF-AR 直接入射路コミッショニングの準備も進めているところである。年度内にはフェーズ 2 コミッショニング向けの設備の準備を進め、来年度には集中的に設置を行うため、5 月から 10 月にかけて連続 5 ヶ月弱の建設期間を確保する必要がある。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ともに、関係者の協力をお願いしたい。

高精度ビーム位置モニタ読み出し

SuperKEKB 計画においては衝突性能を向上させるために、電子及び陽電子ビームについて双方ともに 20 mm-mrad 以下のエミッタンスを確保する必要がある。これを実現するためには、ビーム光学設計上、0.1 mm 以下の加速管のアライメント精度が必要となる。また、同程度のビーム安定性、さらにはビームによるアライメントも安定して達成する必要があり、ビーム位置モニタ (Beam Position Monitor, BPM) には 10  $\mu\text{m}$  以下の単バンチ位置分解能が必要と考えられる。

KEKB 計画においては、位置分解能が 50~100  $\mu\text{m}$  で充分であったために、複数の BPM からの信号を一台の市販のオシロスコープに接続することによってコストを最適化

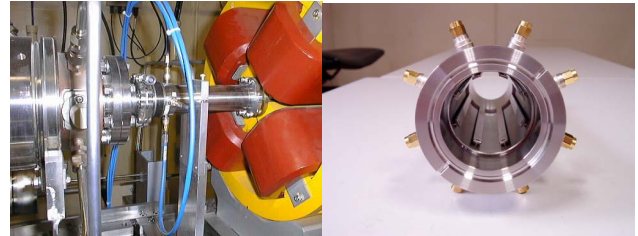


図 1 収束電磁石の磁極に固定されたビーム位置モニタ (左) と 8 電極タイプのビームモニタ (右、通常は 4 電極であるが 8 電極タイプを用いるとビーム形状情報も取得できる)。

し、1 秒間に 50 回の読み出しを行っていたが、更新を迫られることになった。SuperKEKB 向けの精度の高い読み出し回路として、2 通りの回路を試験検討し、また、外部研究者にも評価してもらった結果、バンドパス・フィルタと高速 ADC を組み合わせた回路を開発することになった。

入射器のビーム位置モニタはストリップライン型の 4 つの電極を持ち、インピーダンスを 50  $\Omega$  整合させることにより、シングルバンチのビームから約 1 ns 間隔の一組の双極信号を生成する (図 1, 図 3 (上))。ビームは 1 秒間に 50 パルス加速されるが、一つのパルスには 1 つまたは 2 つのバンチが含まれ、また入射先の蓄積リングによって約 0.2 nC から 10 nC の電荷のビームがパルス毎に切り替わる可能性がある。

このような信号を読み出す回路を VME 規格の 2 幅のモジュールとして構成し、複数段のフィルタ、増幅器、可変減衰器を組み合わせ、250 MSa/s の 16 ビット ADC によって読み出しを行う (図 2 (左))。ビーム信号をフィルタで整形することによって、精度が高く、フィルタと整合性

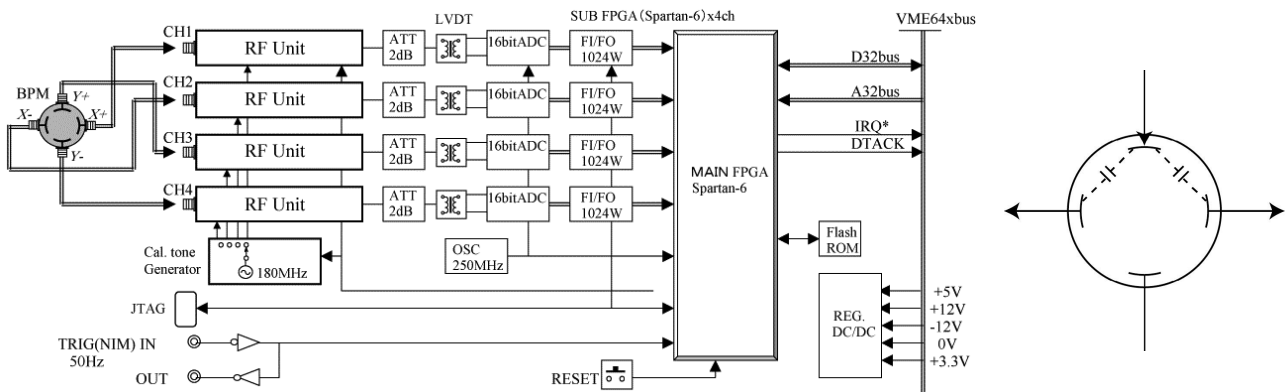


図 2 BPM 読み出し回路のブロックダイアグラム (左) と、較正信号誘起の仕組み (右)。

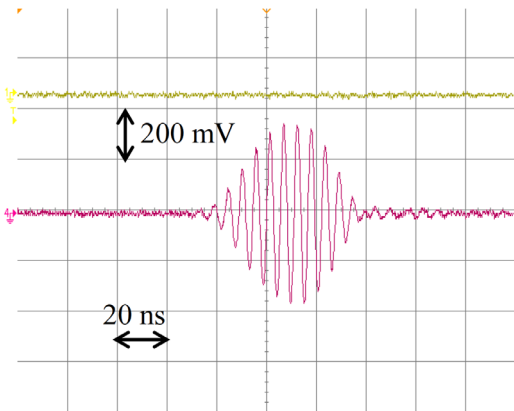
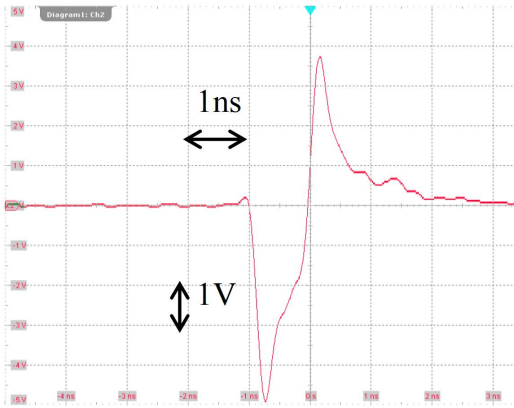


図3 ビーム位置モニタの電極から得られる信号(上)と、回路を通してADCに取り込まれる信号(下)。処理回路を通すことによって、情報を取り込みやすくなっている。

の良い高サンプルレートのADCを通して位置精度の高い読み出しを行う(図3)。1つのパルス内の2つのバンチが96 nsしか離れていないため、その2つの信号が重ならないよう、慎重にフィルタの係数が選ばれた。

一方、位置精度を高めるためには、さまざまな素子の特性のドリフトによる影響を補償する必要がある。このため、較正信号発生装置をモジュール内に実装することにし、ビーム測定間隔の20 msの間にBPMの一電極に対して較正パルスを与え、隣接する一対の対向電極に誘起されたパルス信号を測定することによって、チャンネル間の特性の変動を監視し、ビーム位置演算に補正を加えることとした(図2(右))。

読み出し回路は多数の試験によって、温度特性や位置精度を改善するための改造を加えられた後、入射器内のBPM向けに100台余りが量産され、昨年度末から設置が行われている。モニタと読み出し回路との配線接続が以前の仕組みとは変更されたことによって、これまでの較正係数が使えないため、ダイナミックレンジの広い多数の較正係数について一台ずつ慎重に検討を加えながら設置を進めている。

読み出し回路内のFPGAのファームウェアの動作や、VMEシステム内のソフトウェアの動作も順調で、現在のところ大きな障害なく運用出来ている(図4)。入射器全

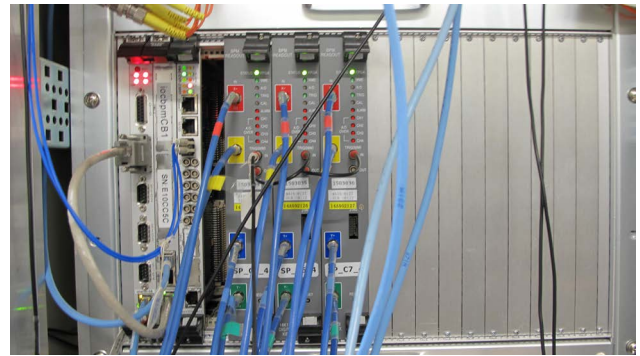


図4 VME装置内に実装されたBPM読み出し回路(灰色のパネル)とCPUやイベント受信器。

体のイベント制御システムから、パルス毎(20 ms 毎)に次のパルスの入射ビーム種類を受け取り、減衰器の設定を変更するとともに適切な較正係数を選択し、入力された信号処理を行い、ビーム位置と電荷量を算出し、さらに入射器を全体を通したビーム軌道を得る。

さまざまな入射ビームを用いた動作試験を重ね、PFリング及びPF-ARへの入射にも利用を始めている。また、位置精度の確認も進めており、ビームを用いた収束電磁石に対する相対位置の再測定には大きな時間を割いている。これまでのところ、約8割の回路を置き換え、数 $\mu\text{m}$ の位置精度が得られることの確認を進めている。

ところでBPMは、水平方向、垂直方向の位置、そして電荷量という3つの情報を取得するために、4つの電極から得られる信号を使用するわけであるが、情報量としては1つ冗長である。BPM信号の読み出しの精度が向上したことにより、この情報を利用した将来の拡張性も期待されている。例えば、信頼性の向上やビーム形状の取得なども試みられており、また、ビーム・エミッタンス測定への応用も試みる予定である。

また、入射器からダンピングリングへの接続部や蓄積リングへのビーム輸送路など、ビームラインの場所によっては、電極の数を増やし8つの電極からの信号を使用することにより、位置のダイナミックレンジを広げている。電極の形状も複数あり応用も広がる可能性もある。