

PRESENT STATUS OF THE KEK ELECTRON / POSITRON INJECTOR LINAC

Yujiro Ogawa¹ for the KEK electron/positron injector linac group
KEK, High Energy Accelerator Research Organization, Accelerator Laboratory
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801

Abstract

The KEK electron/positron injector linac presently delivers four different kinds of beams to four different rings, switching beam modes quite frequently (more than 750 times per day). The operation time per year has been surpassing 7,000 hours since KEKB started, while the maintenance time has been optimized so as to keep high availability throughout the year. Even in these severe operation conditions, machine failures have been decreasing steadily. The operation status and on-going R&D for future accelerators such as SuperKEKB and ILC are presented.

KEK電子・陽電子入射器の現状

1. はじめに

KEKB電子・陽電子入射器では、昨年度までに1982年のPF入射器としての運転開始以来の積算運転時間が12万時間を超え、年間運転時間もここ数年7,000時間に及んでいる。図1には20数年にわたる運転履歴（年間運転時間、積算運転時間、故障率）を示すが、その間入射器は2度の大きな改造（TRISTANとKEKB^[1]）を経験している。故障率は改造毎に上昇するが、その後着実に減少している。2004年にはKEKB連続入射が開始され常時ビームONの状態となり、それまで入射の合間を利用して行っていた維持・改善が不可能となり故障率の増加が懸念されたが、各種の工夫と努力の結果毎年減少を続け加速器の可用性（availability）は改善している。

2005年度にはPF（2.5 GeV）とKEKB電子ビーム（8 GeV）の間の切替時間短縮のためにPF用新ビーム輸送路を建設^[2]し運用を始めた結果、ビーム切替時間は数分から数十秒^[3]となった。さらに今後PFのトップアップ運転の実用化のためにPF用ビーム振分電磁石のパルス化を実施し、パルス毎のKEKB-PF擬似同時入射を実現する^[3]予定である。

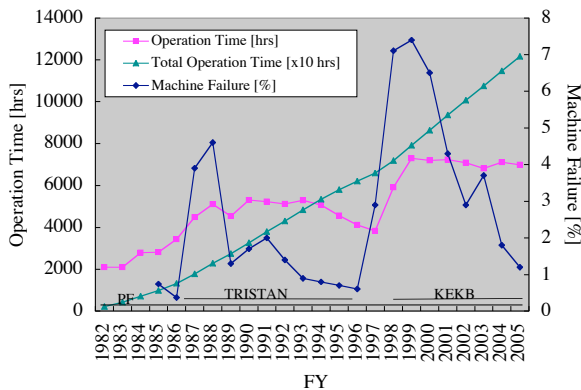


図1：入射器の運転時間と故障率の推移。

2. 運転と統計

2004年から実用化されたKEKBの連続入射は3.5GeVの電子と8GeVの陽電子ビームを5分毎に切替えながら入射を繰り返すもので、一日の切替回数は250回にも及ぶ。したがって故障率の減少だけでなくビームの再現性が運転上必須であった。幸い故障率は2004、2005年度と着実に減少を続け2005年度には1.2%となり、そのうち実際に入射遅延（図2）に至ったのは僅か0.25%であった。加速器の再現性は良好であり可用性は98%に迫っている。

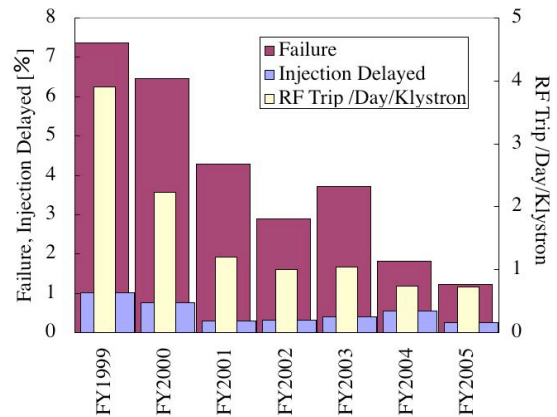


図2：故障率、入射遅延率、RFトリップ率の推移。

年間の運転時間の内訳の履歴（図3）を見ると2004年度のKEKBの連続入射開始により入射時間の増加と調整時間の減少がはっきり現れている。右端の切替時間他については連続入射以前はアイドル時間が中心であったが、現在はほとんどがビームモード切替時間となっており全運転時間のほぼ30%を占めている。切替時間短縮化は入射器の最重要課題^[4]の一つであり、KEKB・PF擬似同時入射プロジェクト（4節参照）として進行中である。

¹ E-mail: yujiro.ogawa@kek.jp

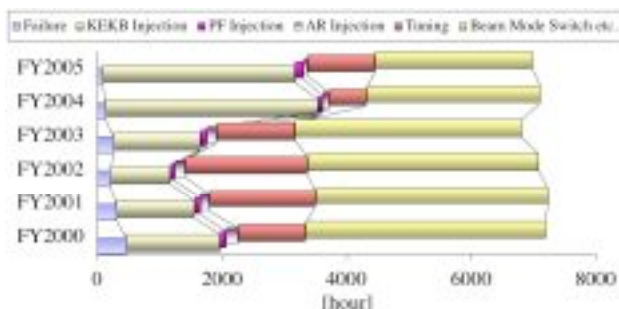


図3：年間運転時間の内訳の推移。

故障の内訳を正確に分類するのは容易ではないが、試みとして2005年度について故障の時間と回数を図4と図5に示す。RF関係の占める割合が多い（この割合は現実の加速器としてはかなり低いほうである。）のはRF加速器の性質上理解できるが、制御については分類自体の問題（例えばRFにも当然制御系があるなど）がありこの数値は評価しにくい。

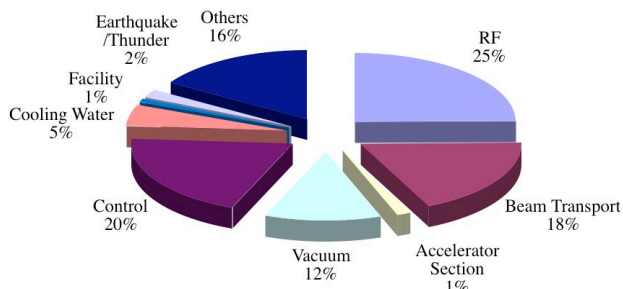


図4：故障時間（約86時間）の内訳（FY2005）。

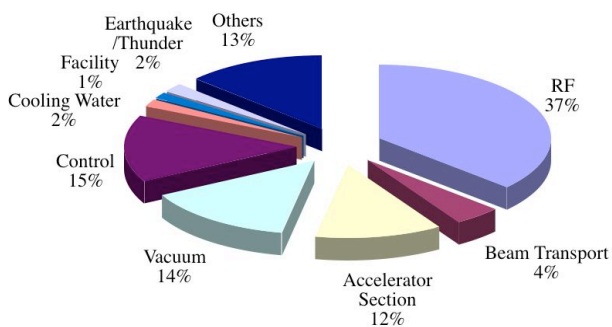


図5：故障回数（約1750回）の内訳（FY2005）。

一方、同様な分類を過去に遡って行い各内訳についてMTTR（Mean Time To Repair = 故障時間/回数）の変遷（図6）を見ると、RF、真空、制御は年々改善しているが、Beam Transport（主として電磁石電源の故障）は改善率がやや低い。また、近年冷却水のトラブルの割合が増えているが、これは冷却水システムの老朽化等の問題として捉えるべきものであろう。次節では、加速器本体に直接関連するものに限って各内訳の主なものについてこの一年間の維持・改善の内容を紹介し、運転統計との関連を考える。

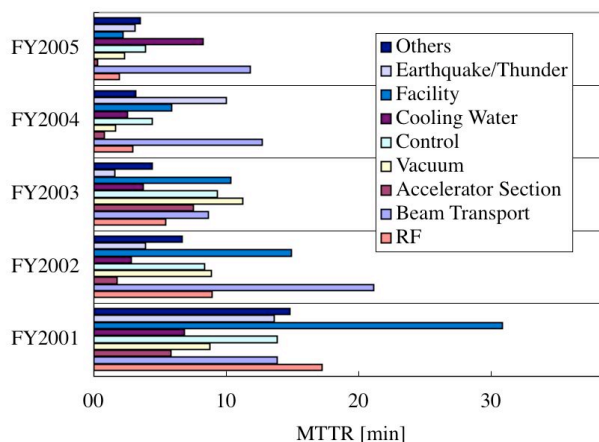


図6：故障内訳のMTTRの推移。

3. 維持と改善

3.1 RFシステム

RFシステムの信頼性は加速器の性能や可用性に直接的に結びつくので、KEKB運転開始以来集中的にRFシステム（クライストロン、電源、低電力系、タイミング系、制御系など）の維持・改善に努めて来た。加速器運転の信頼性や可用性の改善の観点から見ると、基本方針としてシステム全体の堅牢性の改善、故障時の迅速な判断と対処、故障の予測と計画的な修理・交換などが重要である。故障予測の成功例は昨年も紹介したクライストロンのディップ試験であるが、FPGAボード^[5]を用いたRF波形欠け計数の定期的な測定、レゾナントリングを用いた導波管高周波窓の初期不良試験などを合わせて実施^[6]してきたことが図6におけるRFのMTTR改善に大きく寄与していると思われる。

機器の信頼性と特性を向上するための各要素技術開発の一例として、サイラトロンドライバの高機能化試験^[7]を紹介する。これはサイラトロンの点弧回路においてスイッチ素子として直列2段のサイリスタのかわりにFET1個を使用するもので、出力特性等に優れるだけでなく機器の小型化（現在の約1/3）を可能とするものである。また、加速器の調整の高度化に伴って要求される技術の一例として、KEKB-PF擬似同時入射におけるマルチエネルギー加速方式を実現するための小型励振系の開発^[8]を挙げる。現在8本のクライストロンを1台のサブブースタークライストロンによって駆動しているが、ビームのエネルギーを高速かつ精密に変更するためには個々のクライストロンの高速直接駆動が必要となる。直接に駆動すべきクライストロンの本数が少なくないので従来方式の改良を行うとともに性能向上を目指してI/QモジュレータとFPGAを使用したシステムの開発を進めている。

3.2 加速管

図2に示したRFトリップ率の大部分は加速管、SLED、導波管、窓などの放電に起因する反射(VSWRの悪化)によるものである。これまでにトリップ時に一旦パワーを下げ、少しく回復させる方法や、短期メンテナンス後の立上げ時に「弱い」クライストロンは運転値より低めのパワーから投入する方法等、各種の対処法が行われてきた。しかし大きな放電などで回復に手間取る場合もあり、その場合の効果的な手法が模索されている。その一例がC-band加速管のエージングにおいて威力を発揮したアルゴリズム^[9]のS-band加速管への適用である。各部の真空やRF測定を参考にしたきめの細かくかつ人間の感に頼らないエージング方式であり、SLEDを導入後間もない加速ユニットに対して非常に有効であった。こうした工夫の結果、RFトリップ率は横ばい傾向ながらも昨年度も若干減少している。

3.3 制御

加速器の制御は軌道やエネルギーフィードバックのように直接ビーム運転に関わるものから、システムの冗長性の改善のように間接的に加速器の信頼性に影響を与えるものなど広範にわたる。入射器では数多くのフィードバックがビームモード毎に別々に働いてビームの再現性を確保している。冗長性は一般的には限られたマンパワーと予算の中で導入されるものであるが、入射器ではとくにマンパワーに強く依存しないようにネットワークやファイルサーバーを構成している。また必ずしも制御の範疇に入らないが運転監視^{[10], [11], [12]}ソフトウェアの充実化に努めている。こうしたことが制御のMTTRの改善に結びついていると考えられる。

4. アップグレード

- KEKB・PF 擬似同時入射試験^[13]

異なるエネルギーのビームを共通光学系で加速する試験を実施した。エネルギーは高速のRF移相器^[8]によってパルス毎に変える予定である。

- C-band 加速試験^[14]

SuperKEKBにおける陽電子エネルギー増強のために1加速ユニット分をC-band加速システムに置換えてビーム試験を行い良好な結果を得た。

詳細は本学会の各部報告を参照されたい。

5. R&D

- 電子・陽電子3バンチ加速試験^[15]

SuperKEKBでは陽電子ビームの強度の増強を必要としている。今回はバンチ数を増やす方法を試みた。大電流マルチバンチビームの加速ではバンチエネルギーを揃える必要があるが、通常のSLED波形では不可能である。FPAGを使用してエネルギー補償可能な入力波形を作り実際のビーム加速試験を行い、原理検証に初めて成功した。

- 超伝導試験加速器施設のための各種R&D^[16]

将来のILCのための試験加速器施設(STF)の電子銃、RF源等の開発を行っている。詳細は各報告を参照のこと。

- その他の各種R&D

この他に数多くのR&D等を行っている。詳細は各報告^{[17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24]}を参照のこと。

参考文献

- [1] 小磯晴代. “KEKB加速器の現状”, These proceedings.
- [2] 飯田直子. “KEKにおけるLINACからPFへの新ビーム輸送路の設計および建設”, *ibid.*
- [3] 佐藤政則. “KEK入射器におけるビームモード切り替えの高速化”, *ibid.*
- [4] 古川和朗. “KEK電子陽電子入射器における高速ビーム切り替えシステムの構築”, *ibid.*
- [5] 片桐広明. “加速器制御へのFPGAの応用”, *ibid.*
- [6] 熊野宏樹. “KEK電子陽電子入射器における高周波源の維持管理(II)”, *ibid.*
- [7] 本間博幸. “サイラトロンドライバの高機能化”, *ibid.*
- [8] 矢野喜治. “小型励振系の開発”, *ibid.*
- [9] 杉村高志. Private communication.
- [10] 草野史郎. “KEK LinacにおけるEPICS toolを用いた加速器情報蓄積システム”, These proceedings.
- [11] 工藤拓弥. “KEK入射器における運転監視ソフトウェア”, *ibid.*
- [12] 矢野喜治. “KEK Linacの温度計測システム”, *ibid.*
- [13] 大西幸喜. “KEKリングとPFリングのための異なるエネルギーに対応したビーム光学系の設計”, *ibid.*
- [14] 紙谷琢哉. “SuperKEKBのためのCバンド加速管開発の現状”, *ibid.*
- [15] M. Yoshida et al., “Study on high-current multi-bunch beam acceleration for KEKB injector linac”, to be published in Proc. of LINAC'06, Knoxville, USA, August 2006.
- [16] 福田茂樹. “超伝導RF試験装置(STF)のRF源”, および関連論文, These proceedings.
- [17] 横山和枝. “S-BANDとX-BANDを用いたビームエネルギーの均一化”, *ibid.*
- [18] 大沢哲. “X線発生用電子銃の特性”, *ibid.*
- [19] 杉村高志. “アパーチャグリッドを用いたDC/Pulse電子銃の開発”, *ibid.*
- [20] 穂積康文. “カーボンナノチューブ冷陰極を持つ電界放出電子銃の開発(3)”, *ibid.*
- [21] 諏訪田剛. “KEKB入射器における単結晶標的を利用した陽電子生成実験”, *ibid.*
- [22] 肥後寿康. “常伝導リニアコライダー型加速管の高電界試験結果と今後の基礎試験展望”, *ibid.*
- [23] 松本修二. “XバンドPPMクライストロンの開発”, *ibid.*
- [24] 諏訪田剛. “KEKB入射器における放射線安全のためのビーム電荷制限システム”, *ibid.*