

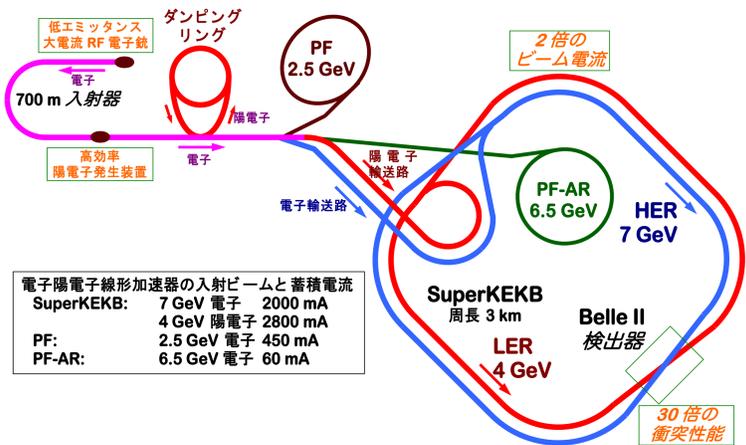
古川 和朗, 佐藤 政則, 松本 修二, 高エネルギー加速器研究機構 (KEK / SOKENDAI)
鈴木 和彦, 三菱電機システムサービス (MSC)

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の 7-GeV 電子陽電子入射器においては、年間約 5000 時間のビーム運転が行なわれており、2つの放射光実験施設 (PF、PF-AR) と衝突型素粒子実験施設 (SuperKEKB) への電子と陽電子の入射を継続している。入射器がビーム入射運転を開始した 1982 年から現在までさまざまな改造を行いながら運転を継続しているが、これまでの実験プロジェクトの形態によって入射器の運転様式も大きく変化を重ね、運転統計情報にもさまざまな特徴が現れている。素粒子実験としては TRISTAN、KEKB、SuperKEKB の各実験プロジェクトに

電子と陽電子を入射してきたが、実験ごとに要求される入射ビームの特性も大きく変わり、その対応のために各プロジェクトの初期には入射が停止するような障害が発生する場合もあったが、徐々に適切な対応が行われるようになり、円滑な運転が行われるようになる。高い性能を求める素粒子実験向けの入射ビームの開発が、徐々に放射光実験の入射にも活かされる場合も多い。これらの運転統計の情報を参考にしながら、実験ユーザーからの要求が大きく異なる素粒子物理実験と放射光科学実験の双方にバランスを考慮した入射運転最適化が期待されることである。

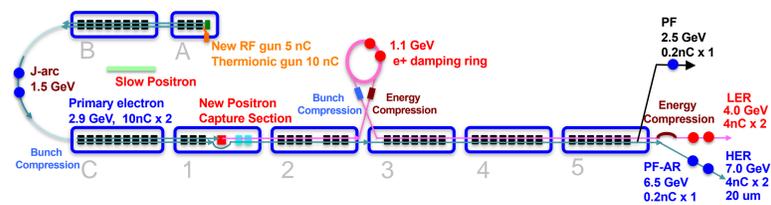
多目的同時トップアップ入射運転の安定化と高度化のための運転統計

電子陽電子複合加速器



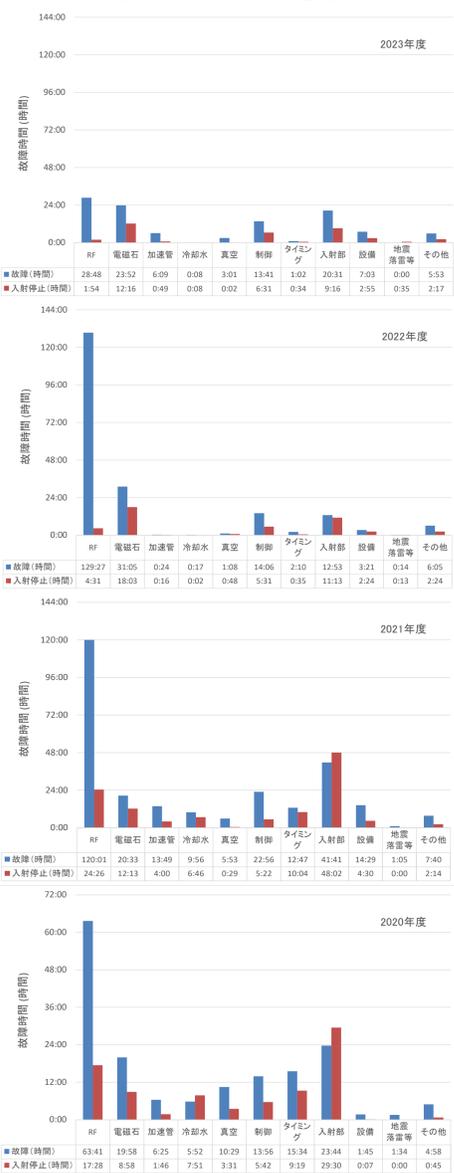
40年間の入射器運転

施設	入射エネルギー	実験エネルギー	年度
Photon Factory	2.5 GeV	2.5 GeV	1970-1981
TRISTAN	2.5 GeV	32 GeV	1982-1991
低速陽電子	2.5 GeV - 55 MeV	0.1 - 35 keV	1992-2000
KEKB	8 / 3.5 GeV	8 / 3.5 GeV	2001-2010
PF-AR	2.5 GeV - 6.5 GeV	5 - 6.5 GeV	2011-2020
SuperKEKB	7 / 4 GeV	7 / 4 GeV	2021-2024

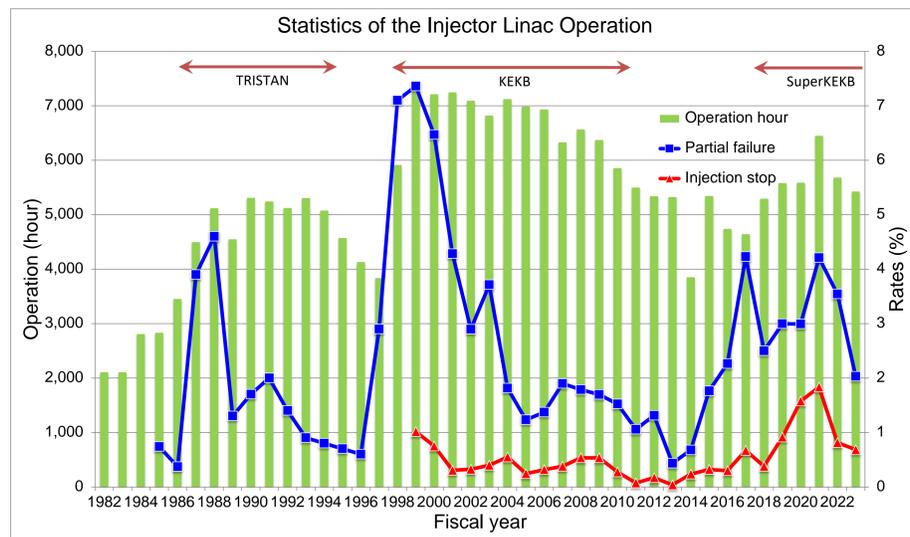


原因別故障時間とビーム停止時間

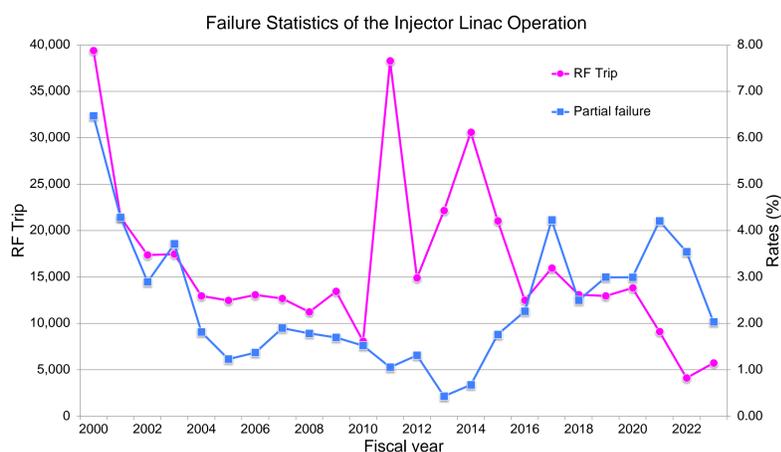
- ◆ 年度毎に故障時間の低減に成功している
- ◆ 運転中にクライストロンの交換を行うと故障時間の計上は増加するが、冗長性により、全て入射停止につながるわけではない
- ◆ 新しい装置の故障修理スキルの向上
- ◆ 装置故障時間の全てを運転停止に繋げない運転スキル向上
- ◆ 監視装置の増設による障害処理の事前準備
- ◆ 故障修理が終了してもビーム調整のためにすぐに入射が再開できない場合もある



入射器の運転統計

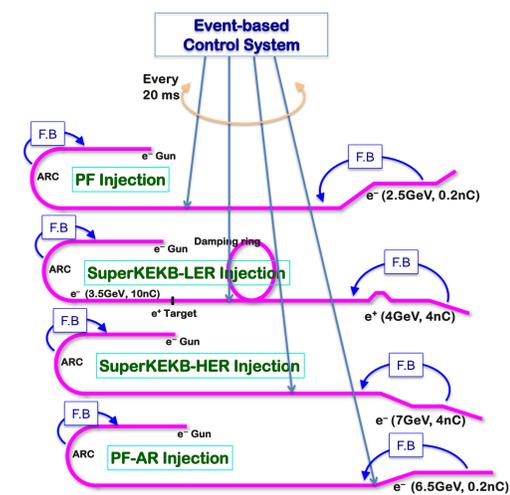


- ◆ 入射停止 (Injection stop - Beam loss) は蓄積リング加速器に入射ができない状態
- ◆ 故障時間 (Partial failure) は一部の装置が故障している状態
- ◆ 故障時間は、入射器内の冗長性により、全て入射停止につながるわけではない
- ◆ 各衝突実験プロジェクトの開始時点では故障率が高く、機器の理解や入射運転の特性の見極めが進むことによって故障率が下がる
- ◆ 2019年途中の5蓄積リング同時トップアップ入射の本格的開始に伴い、故障率の下降が一度止まった
- ◆ 以前は入射の合間に実施できた一部の故障修理が不可能となり入射停止への影響も大きくなった
- ◆ 最近2年の故障率や入射停止率は改善している、SuperKEKB向けの難しい入射運転への対応に進展があった
- ◆ しかし、2022年秋から2023年秋まではSuperKEKBは停止していたので注意が必要
- ◆ 今後運転が改善すると、RF Trip (VSWR によるインターロックなど) の影響割合が大きくなる可能性がある
- ◆ 加速電圧の全体分配により、KEKB計画の後半やここ数年も大きな改善がある
- ◆ 2011年から2015年は震災や建設時の大気暴露が影響されている



入射器の運転高度化

Stage	KEKB (final)	Phase-I (achieved)	Phase-II (achieved)	Phase-III (interim)	Phase-III (final)
Beam Energy	3.5 GeV	4.0 GeV	4.0 GeV	4.0 GeV	4.0 GeV
Stored current	1.8 A	1.1 A	1.0 A	1.8 A	2.8 A
Life time (hrs)	150	200	100	-	6
Bunch charge (nC)	-	1	0.5	1	4
Norm. Emittance (pmrad)	1400	310	1000	150	4020
Energy spread (%)	0.15%	0.15%	0.50%	0.10%	0.10%
Bunch / Pulse Repetition rate	2	2	2	2	2
Simultaneous top-up injection (PPM)	3 rings (LER, HER, PF)	No top-up	Partially	4+1 rings (LER, HER, DR, 4+1 rings (LER, HER, DR, PF, PF-AR))	4+1 rings (LER, HER, DR, 4+1 rings (LER, HER, DR, PF, PF-AR))



まとめ

- ◆ 入射が不可能となる入射停止時間は1%程度を推移しており、他の研究所に比べても良好な状態となっている
- ◆ 複合加速器群の中で入射器の障害が突出しないよう監視し、資源の分配を調整することが肝要
- ◆ 長期の積分データを重視する素粒子物理実験と数日内の短期性能を重視する放射光科学実験のバランスを考慮した運転計画や保守計画の最適化も重要
- ◆ 運転統計情報の解析により、大電流低エミッタンスの5蓄積リングの同時トップアップ入射など高度化する入射運転に適切な資源分配を行うことが期待されている