

SuperKEKB 入射 Kicker 電磁石におけるサイラトロン自爆対策

SELF FIRING COUNTERMEASURES TO INJECTION KICKER'S THYRATRON IN SuperKEKB

小玉恒太[#], 内藤孝, 三増俊広
 Kota Kodama[#], Takashi Naito, Toshihiro Mimashi
 High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

In the SuperKEKB accelerator, two pairs of kicker magnets are used for injection from the beam transport line into the main ring. Thyratrons have been used as the injection kicker magnet switches. During the operation, there is a problem about the thyatron self-firing. To prevent self-firing, the thyratrons are aged before operation and the reservoir heater voltage is adjusted, but the problem has not yet been solved. In this report, we report on the status of the thyatron used in the injection kicker magnet and countermeasures against self-firing.

1. はじめに

SuperKEKB 加速器は改良のために 2022 年 6 月から長期シャットダウンに入っていたが、2024 年 1 月に運転を再開しさらなるルミノシティ向上を目指した評価が続けられている。

SuperKEKB 加速器、Main Ring(MR)へのビーム入射では蓄積ビームに対して閉じた、つまり水平位相が 180° の入射バンブ軌道を 2 組の Kicker 電磁石によって形成する。Kicker 電磁石は高電圧で使用されるため、そのスイッチング素子としてサイラトロンが使用される。本文では SuperKEKB 加速器運転における問題の 1 つである Kicker 電磁石で使用されているサイラトロンの自爆に関する状況とともに、その対策と原因調査について報告する。

2. 背景

SuperKEKB 加速器では Low Energy Ring(LER)、High Energy Ring(HER)の 2 リングがあり、それぞれの入射を担う Kicker 電磁石は LER K1、LER K2、HER K1、HER K2 と分類される。K1、K2 それぞれの Kicker 電磁石は 3 台で構成しており、両リング合計で 12 台の Kicker 電磁石が使用される[1]。LER、HER の両リングにおいて入射 Kicker 電磁石では高電圧スイッチング素子として Teledyne e2v 社製のサイラトロンが使用されている。LER は 5 台に対して CX1154C、1 台のみ CX1174、HER は全台に対して CX1826A が SuperKEKB 運転開始から使用されてきた。この使用しているサイラトロンの種類の違いは経済的な理由や評価用途による。

LER K1 において 2020 年の始め頃からサイラトロンの自爆と考えられる正規のタイミングではない Kicker 電磁石の誤出力が頻発するようになった。ここでサイラトロンの自爆とはサイラトロンに高電圧がかかった状態でトリガなしに放電スイッチが On になることである。ノイズ等による誤ったトリガが Kicker 電磁石に入った可能性も疑い、トリガにゲートをかけることで調査を行ったがその可能性は低く、サイラトロンの自爆によるものであると結論されて

Table 1: Status for MR Kickers in 2024 Run

名称	LER		HER	
	K1	K2	K1	K2
台数	3	3	3	3
周波数 [Hz]	<25			
運転電圧 [kV]	16	11	21	16
サイラトロン	CX1154C:	CX1154C:	CX1826A	
	1 台	1 台		
	CX1174:	CX1174:		
	2 台	2 台		
サイラトロン耐圧 [kV]	CX1154C:35		CX1826A:35	
	CX1174:40			

いる。LER K1 の自爆対策として CX1154C より耐圧の高い CX1174 への置き換えが進められ、現在は Table 1 で示したサイラトロンがそれぞれの Kicker で使用されている[2-4]。

本来は 3 台 2 組で閉じた入射バンブ軌道を形成しているシステムに対してサイラトロンの自爆が発生すると、1 台のみでビームを蹴ることによってビーム振動が生じる。その結果として加速器に設置されているコリメータ等にビームが衝突し、ダメージを与える可能性があり、今後更に運転電流の増強が実現すればダメージは大きくなることが予測される。実際にサイラトロンの自爆が生じた場合にコリメータへのダメージを軽減するためにコリメータヘッド材料の変更が実施されている[5]。サイラトロンの自爆は一種の自然現象ではあるが、可能な限り避けるべき問題である。

2022 年 6 月から LS1 と呼ばれる運転停止期間を経て、2024 年 1 月から加速器運転が再開され、7 月 1 日まで運転を行った。この運転期間中、K1 で使用されている 2 つの CX1174 で自爆が何度か発生している。Table 1 に示したようにサイラトロンの自爆を防ぐために運転時の電

[#] kodamako@post.kek.jp

圧は最大電圧の耐圧値と比較してかなり低い電圧で運用されている。この期間では LER K1, K2 で 1 台ずつ使用している CX1154C の自爆はなかった。また LER K2 で使用している CX1174 では運転電圧がさらに低いためか自爆は発生していない。HER K1, K2 で使用している CX1826A では SuperKEKB 加速器運転開始以来、自爆の発生はない。

3. 自爆対策

3.1 対策案

サイクロトロン自爆により、加速器構成機器にダメージを与えないよう 2 つの案が検討された。1 つはサイクロトロンに代わり半導体素子を用いる案である。これは改造費用や評価期間の問題があり採用されていない。もう 1 つは K1 と K2 の 1 対の Kicker におけるサイクロトロンを共通にし、サイクロトロン自爆が生じた場合に軌道を閉じようとするものである。回路計算上、ハードの面からは実現可能であると提案されたが、SuperKEKB 加速器 LER のビーム光学上の理由から採用されていない。

3.2 運転中における対策

運転中にサイクロトロン自爆が発生した場合、我々はサイクロトロン内部の Reservoir Heater(RH)電圧を下げて様子を見るという運用を行ってきた。RH はサイクロトロン内部のガス圧を調整する部品であり、その温度を印加電圧によって制御することができる。RH 電圧を変えることはサイクロトロン内部のガス圧を調整することにより、放電のしやすさを制御する方法であり、これは一般的な対処方法であろう。CX1174 の RH 電圧の推奨値は個体ごとに指定されているが、メーカー仕様における変更可能範囲は 4.5 ~ 6.5 V である。

2024 年 1 月から運転中におけるサイクロトロン自爆時の対応の一例を示す。LER K1 のサイクロトロン CX1174 では 2024 年 3 月 10 日に自爆が発生した。自爆発生時の RH 電圧は推奨値 4.8 V に設定してあり、運転電圧は通常と同じ 16 kV である。これを 4.6 V に設定した。その後 4 月 28 日に自爆が再発し、RH 電圧は 4.3V に設定した。5 月 4 日、5 月 7 日に自爆がありさらに 3.9 V まで下げた。5 月 22 日に再度自爆があったがこの時は様子見とし、その後運転終了 7 月 1 日まで自爆することはなかった。RH 電圧を下げることはサイクロトロン自爆に対して一定の効果があることは間違いない。ここで仕様範囲を超えて RH 電圧を下げた理由は後述する Ranging[6]と呼ばれるサイクロトロン評価結果からである。なお加速器運転で使用するサイクロトロンは運転開始前、1 日数時間、運転電圧以上の電圧を印加して出力を行い、エージングを行っている。

3.3 Ranging 評価

サイクロトロン自爆対策の 1 つとして我々は KEK LINAC グループで行われている Ranging と呼ばれる評価を行った。これは RH 電圧を変化させ、サイクロトロンタイミングジッタを測定し運転で使用可能な RH 電圧の範囲を決定する手法である。運転で使用している Kicker 電磁石電源は加速器運転中で評価できないため、テストスタンドにて Ranging 評価を行った。この評価ではいくつかの新品サイクロトロン CX1174 を使用している。測定条件

は 20 kV、25 Hz、2000 点以上の電流出力を測定し、トリガからある出力波形とのタイミングを測定することでジッタを決定した。Figure 1 に測定結果を示す。この結果、ジッタはサイクロトロンメーカーが定める仕様下限である 4.5 V を超えて 3.25 V まで大きな増加がない結果を示した。3.0 V まで RH 電圧を下げると大きくジッタが増加する個体が見られる。この結果、仕様 RH 電圧よりも 1V 程度低いところ、つまりよりサイクロトロン自爆が発生しにくい RH 電圧でジッタの増加なく使用できそうであることがわかった。Teledyne e2v 社のサイクロトロン説明書[7]では RH 電圧の仕様範囲外での使用は寿命を縮めると記載されているが、RH 電圧が推奨値より低いところでの使用がサイクロトロン寿命にどう影響するかはわかっておらず、今後加速器運転で使用する継続することで明らかになることを期待する。

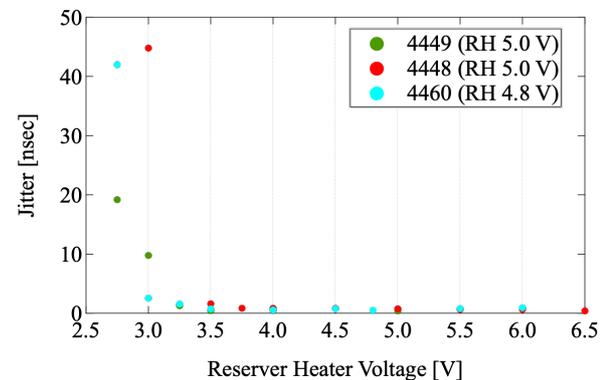


Figure 1: Ranging evaluation for CX1174 thyratrons. The left number in legends shows the thyatron's serial number. The right value shows speculation for reservoir heater voltage.

4. 原因調査

次に CX1174 の自爆が抑制できない原因の検証を行った。サイクロトロン自爆の原因として挙げられるのが耐圧の不良である。加速器運転で自爆を繰り返すサイクロトロンを取り外しテストスタンドに移設、DC 電圧を印加することで耐圧の劣化が生じていないかを確認した。RH、Cathode Heater(CH)電圧の設定値は 6.3 V、5.5 V とした。トリガなしで 25 kV 印加の状態を 30 分程度維持したが、この状態でのサイクロトロン自爆は生じなかったことからサイクロトロン自体の耐圧が劣化しているわけではないと判断した。

RH 電圧を下げなければ自爆が続いている状況からサイクロトロン内部の温度が変動しており、そのためサイクロトロン内部のガス圧が安定していないためではないかと推察した。これを検証するため、サイクロトロンセラミックス部分に温度計を取り付け、温度変化を測定した。測定は高電圧の印加をせず、トリガもかけない状態で CH と RH に通電を行い、冷却 FAN を稼働して行った。RH、CH 電圧は 6.3 V、5.5 V である。

24 時間程度サイクロトロン温度を測定した結果を Fig. 2(a) に示す。サイクロトロン温度は常に変動しており、この期間の測定における変動幅は 3 °C 程度である。

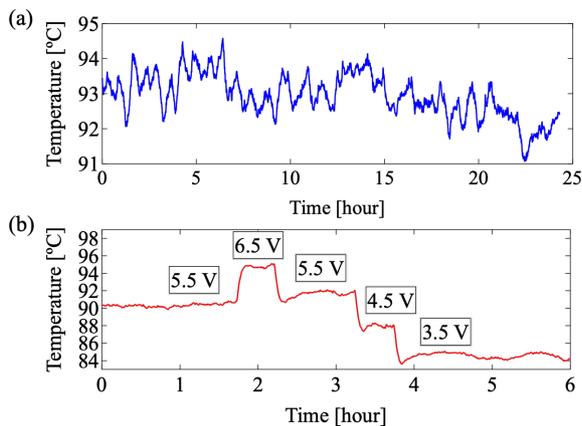


Figure 2: (a)Temperature change of thyatron's surface for about 25 hours. (b)Reservoir heater voltage dependence on temperature. Reservoir heater voltage was changed to 5.5 V, 6.5 V, 4.5 V and 3.5 V.

RH 電圧を 3.5 から 6.5 V まで変え、サイラトロン温度の変化を測定した結果を Fig. 2(b)に示す。測定結果からおおよそ RH 電圧を 1.0 V 変えることで 3°C~4°C の温度が変化していることがわかる。つまり温度の時間変化から約 3°C の温度ゆらぎがあるとすれば約 1.0 V 程度の RH 電圧を変えたと同じ効果が RH 電圧の設定を変更しなくても存在していると考えられる。この Fig. 2 に示した 2 つの温度測定結果から、我々が使用しているサイラトロン内部では常に温度が変動しており、その結果として内部ガス圧が変わっていることを示唆している。

サイラトロン内部の熱源はほとんどが RH、CH である。つまりサイラトロン温度を変える要因は RH、CH 電圧の変動であると考え、その電圧変動を測定した。測定は Fig. 2(a)と同様に行った。Figure 3 に RH 電圧と CH 電圧に対する温度の関係を示す。電圧ロガーの都合上、DC 電圧しか測定できないため、CH、RH 電圧を測定するために AC/DC 変換回路を使用している。その影響により測定電圧は RH、CH 電圧の設定値 6.3 V、5.5 V よりも低い値となっている。Figure 3 の測定結果は RH 電圧と CH 電圧とサイラトロン温度に相関があることを示す。RH 電圧の変動によるサイラトロン温度変化が支配的であるとすれば前述した 3°C 程度の温度変動にたいして、RH 電圧は約 1.0 V 程度変動することが期待される。しかし今回の測定では 0.2 V 程度の変動しかない。これは温度変化に対する CH 電圧の変動の寄与が RH 電圧よりも大きいためであると考えられる。メーカー仕様値は RH 電圧が 5.0 V の時、電流 10 A である。一方 CH 電圧は 6.3 V の時、電流 40 A であり、消費電力の差は約 5 倍であるから、CH 電圧の変動がサイラトロン温度により大きく影響すると推察される。このことからスイッチング電源を用いて RH、CH 電圧を制御すれば安定的にサイラトロンの使用できる可能性があるが、ノイズによる電源破壊の防止の工夫が必要であると考えられる。

5. まとめ

SuperKEKB 加速器における入射 Kicker 電磁石で使用されるサイラトロンの自爆について、運転状況とともに

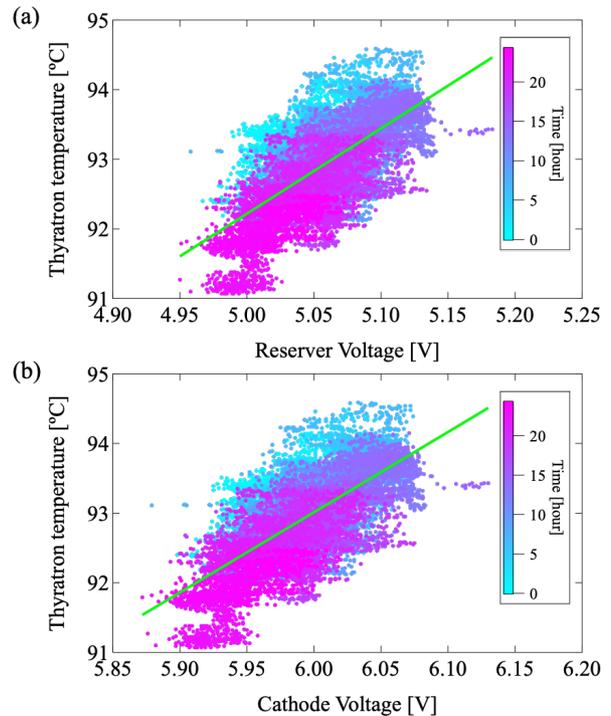


Figure 3: (a)Reservoir and (b)Cathode heater voltage dependence on thyatron's surface temperature. Line shows the linear fit for checking the correlation between these. The correlation factors R^2 are (a) 0.45 and (b) 0.48 respectively.

その対策、原因調査について報告した。Ranging と呼ばれる手法によって決定されたメーカー仕様値よりも低い RH 電圧を設定することによってある程度の自爆を抑えられるようであるが、今後長期間での評価が必要である。また RH 電圧を仕様値よりも下げなければサイラトロンの自爆が抑制されない原因の調査としてサイラトロン表面の温度測定とともに RH、CH 電圧測定を行った。その結果は RH 電圧や CH 電圧の時間変動によってサイラトロン内部の温度が変化しており、その効果によってサイラトロン内部のガス圧が変化していることを示唆している。

現在は G1 を DC プライムで運用している CX1174 を自爆を抑えるためにダブルトリガ化することを予定している。長期の運転によってその効果を評価できることを期待している。

今回 HER で使用している自爆の発生していない 1826A との比較評価を行うことはできなかったが、今後の課題である。

参考文献

- [1] K. Kodama *et al.*, "Residue orbit for LER injection bump caused by magnetic field difference between kickers", Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2023, pp. 222-224.
- [2] Teledyne e2V CX1154C データシート.
- [3] Teledyne e2V CX1174 データシート.
- [4] Teledyne e2V CX1826A データシート.

- [5] S. Terui *et al.*, “Development of a collimator to counteract accidental fire of the injection kicker for SuperKEKB”, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2023, pp. 748-752.
- [6] S. Fukuda, “加速器における電子管技術(1)”, the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2013.
- [7] E2V Technologies, “Hydrogen Thyratrons Preamble”.