

# PF-Ring クライストロンで発生した出力不安定事象の原因調査と対策

## INVESTIGATION INTO THE CAUSE OF AN OUTPUT FAILURE OF A PF-RING'S KLYSTRON

本村新<sup>#</sup>, 坂中章悟, 高橋毅, 内藤大地, 山本尚人  
Arata Motomura <sup>#</sup>, Shogo Sakanaka, Takeshi Takahashi, Naito Daichi, Naoto Yamamoto  
High Energy Accelerator Research Organization

### Abstract

At the KEK PF-Ring, an issue was observed with one of the four klystrons used as high-frequency (RF) amplifiers. When attempting to output RF power beyond a certain threshold, a sudden and significant increase in reflected power from the cavity triggered the equipment protection interlock, resulting in RF shutdown. Large fluctuations in amplitude and phase were detected immediately before the shutdown, suggesting a high likelihood of malfunction within the klystron itself. A high-power test conducted with the klystron connected to a dummy load revealed discontinuous variations in RF amplification gain. Suspecting multipactor discharge in the intermediate cavity of the klystron as the cause, we attempted to suppress the anomaly by adjusting the current of the solenoid coil used for focusing the klystron beam current. As a result, we successfully identified operating conditions under which the klystron could stably output the power required for PF-Ring operation. No further anomalies related to this klystron were observed during the subsequent three-month operational period. This presentation reports the details of the observed malfunction and the countermeasures implemented.

### 1. はじめに

KEK の放射光源加速器の1つである Photon Factory 2.5 GeV 電子蓄積リング (PF-Ring) の高周波 (RF) システムは 4 系統のハイパワー系とそれらを制御するローレベル RF (LLRF) 系で構成されている (Fig. 1)。ハイパワー各系には加速空洞と、高周波 (RF) 増幅器として周波数 500.1 MHz の 200 kW CW クライストロン (E3774, キヤノン電子管デバイス (現)) がそれぞれ 1 台ずつ設置されている。PF-Ring の LLRF 系は 2023 年に従来のアナログ方式からデジタル方式に更新された [1]。

2024 年 12 月頃、クライストロンのうち 1 台において、一定以上の RF 電力を出力しようとする加速空洞からの反射が突如大幅に増加して機器保護インターロックが作動し、RF が停止する事象が発生した [2]。デジタル LLRF (DLLRF) の高速モニタを用いて空洞入力 RF シグナルを観測したところ、RF 出力停止直前に振幅と位相に大きな変動が生じていることが確認された。

本発表では今回生じた不具合および対策の詳細について報告する。

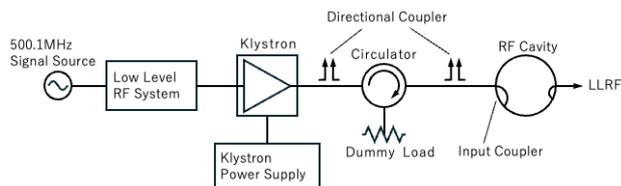


Figure 1: Schematic diagram of one of the four RF systems at PF-Ring.

### 2. クライストロン出力の不調

PF 運転期間中だった 2024 年 12 月、PF-Ring でマシンスタディを実施している際、蓄積ビーム電流が数 mA の状態で空洞反射インターロックによりクライストロン 1 台 (ヒーターの総通電時間 6.2 万時間) の RF 出力が異常停止した (Fig. 2)。再度クライストロンを立ち上げたところ、RF 出力電力 (P<sub>out</sub>) が約 22 kW になった時点で再度空洞反射インターロックが作動し RF が停止した。

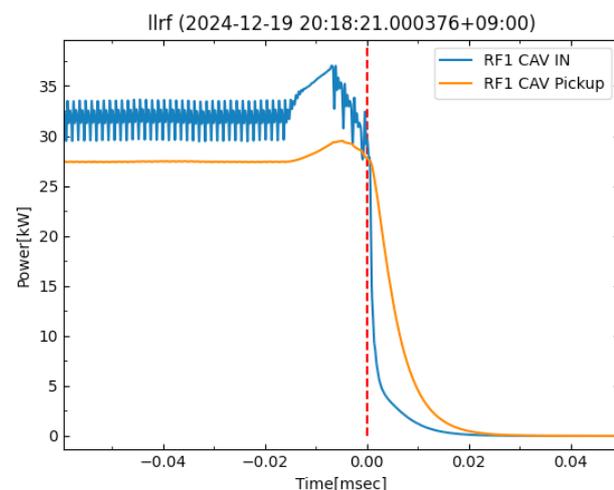


Figure 2: Waveform of cavity input captured at the moment of RF shutdown.

直後の調査によりクライストロン本体の不具合が疑われたが、ユーザー運転中であったため更なる調査は断念した。PF 運転期間終了まで当該 RF 系統を停止し、蓄積電流値と空洞電圧を下げ残りの 3 系統で運転を継続した。

<sup>#</sup> arata.motomura@kek.jp

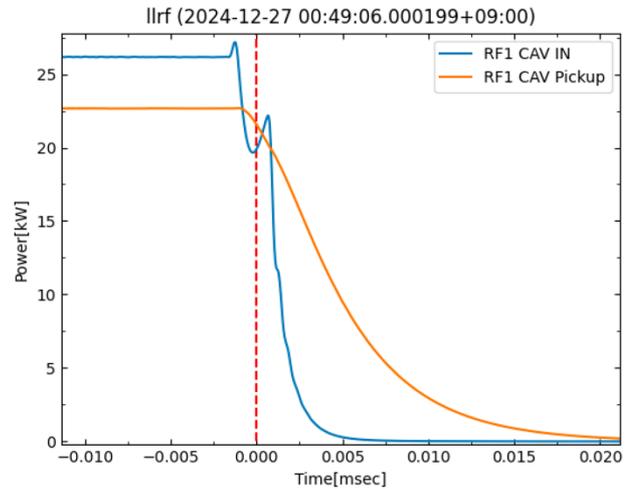
### 3. 原因調査

#### 3.1 ハイパワー系大電力試験

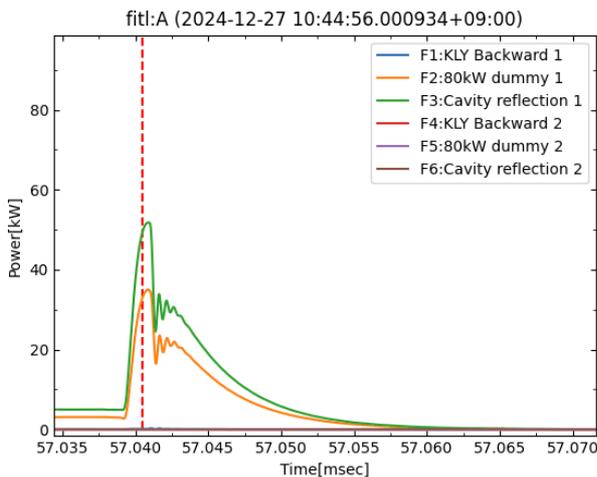
PF-Ring のユーザー運転終了後、不具合の原因を特定するため、当該 RF 系統において大電力試験を実施した。

DLLRF の空洞及びクライストロン出力の振幅・位相フィードバックを停止して RF 立ち上げを試みたところ、 $P_{out} = 26.2 \text{ kW}$  になったときに空洞反射インターロック作動により RF が停止した。この時、真空は  $1.6 \times 10^{-5} \text{ Pa}$  まで増大した。

RF 停止時に高速インターロックで検出された振幅波形 (Fig. 3) を確認したところ、RF 停止の直前に空洞 (F3:Cavity reflection 1) およびダミーロード (F2:80 kW dummy 1) からの反射が突然同じタイミングで上昇していた。



(a) Amplitude



(b) Phase

Figure 3: Waveform of reflection signal from RF cavity and dummy load when RF is stopped.

また、空洞入力信号 (CAV IN) および空洞ピックアップ信号 (CAV Pickup) の波形 (Fig. 4) において、RF 停止の約 1 マイクロ秒前に空洞入力信号の振幅低下と、さらに約 1 radian の位相変動が確認された。Figure 4 の様子から空洞ピックアップよりも空洞入力信号の変動がわずかに早く起こっており、これらの振幅および位相変動は空洞内部の放電によって引き起こされたものではないと考えられる。

これらの結果から、クライストロン本体の異常に起因した振幅および位相の変動が空洞からの RF 反射を誘発した疑いが生じた。

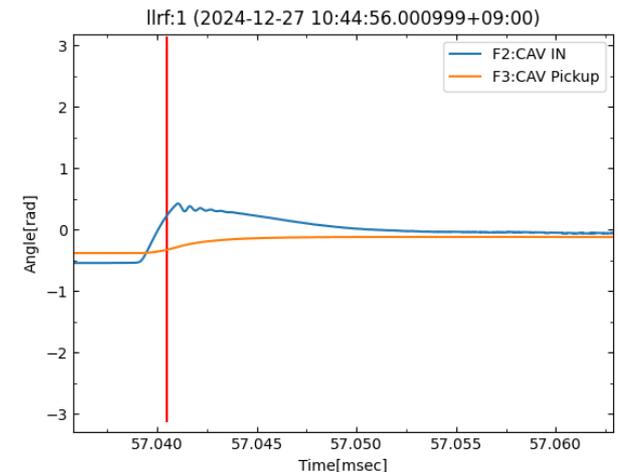


Figure 4: Waveform of cavity input signal measured by DLLRF when RF is stopped.

### 3.2 集束コイル電流設定値変更

クライストロン内部における放電の有無を確認するため、クライストロンの集束コイルの電流値の設定を変更して検証することにした。

PF のクライストロンは 4 つの集束コイルを備えており、それぞれコレクタ側から L1, L2, L3, L4 となっている (Fig. 5)。このうち、各コイルの電流設定値を 0.5-1 A (各設定値の 10%程度) 変更して立ち上げを行った。

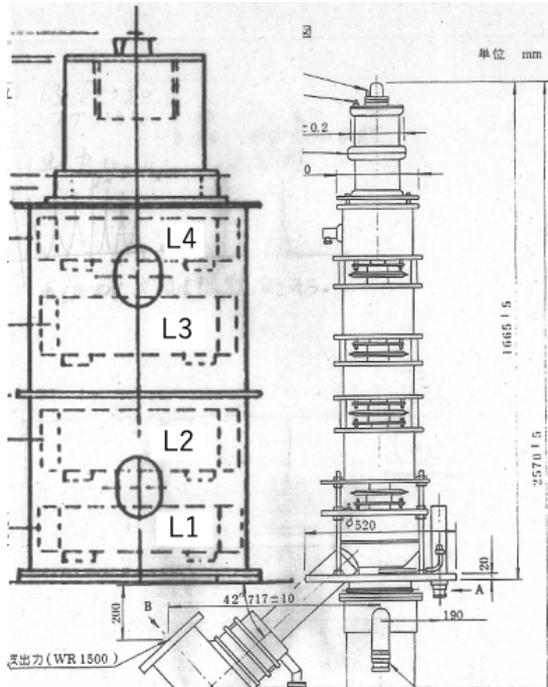
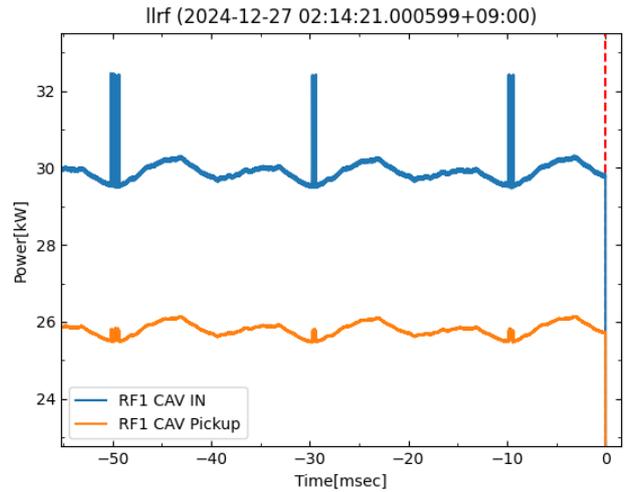


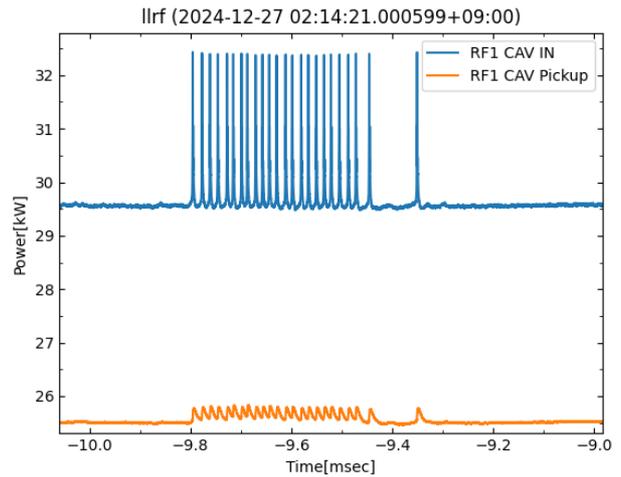
Figure 5: Solenoid coils for electron beam focusing installed in klystron E3774.

その結果、変更前と比べると少し大きい  $P_{OUT} = 28.5 \text{ kW}$  となったところで空洞反射インターロックが作動し RF が停止した。さらに、この時の DLLRF 系で測定した空洞入力信号の波形を確認すると、RF が停止する前から振幅と位相の両方にスパイク状の変動が複数回生じていた (Fig. 6)。

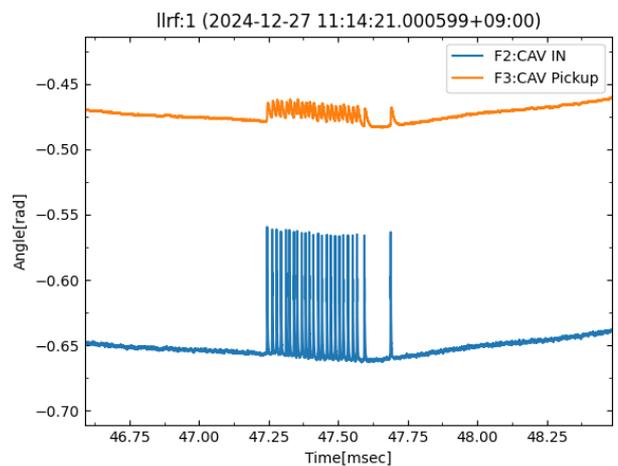
これらの結果から、 $P_{OUT}$  が一定の領域に入るとクライストロン内部で放電が発生し、それに伴い RF 出力の振幅や位相が変動すると考えられる。この  $P_{OUT}$  の閾値は集束コイルの設定で変化することがわかった。



(a) Amplitude (zoomed-out view)



(b) Amplitude (zoomed-in view)



(c) Phase

Figure 6: Waveforms of cavity input signals observed when RF shut down, with the klystron focusing coil current value arranged.

### 3.3 クライストロン単体試験

大電力試験の結果から、クライストロン内部に異常が発生し放電を引き起こしていると推測された。そのため、クライストロン出力の導波管の接続先を加速空洞から200 kW ダミーロードに変更して大電力試験を行った。このときのRFステーションの構成をFig. 7に示す。サーキュレータ後方の方向性結合器の信号をDLLRFの高速モニタに入力し、クライストロン出力RF信号の高速な変化を観測した。

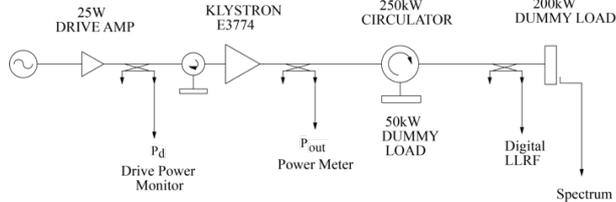


Figure 7: Configuration of the RF system during the test conducted with the klystron connected to a dummy load.

#### 3.3.1 通常設定

クライストロンのパラメータを通常の運転時と同様に設定し、入力電力(KLY IN)に対する出力電力(KLY OUT)の応答曲線(ゲインカーブ)を測定した。ゲインカーブは出力電力を増加させた場合(Ramp up)と減少させた場合(Ramp down)の2回測定した。

得られた応答曲線(ゲインカーブ)をFig. 8に示す。Ramp upの測定ではKLY IN = 約0.7 Wの時に、KLY OUTが約26 kWから約34 kWまで急上昇した。さらに、KLY IN = 約2 W (KLY OUT = 約45 kW)まで勾配が極端に小さくなり、それ以上ではKLY IN < 0.7 Wまでと近い振る舞いを示した。

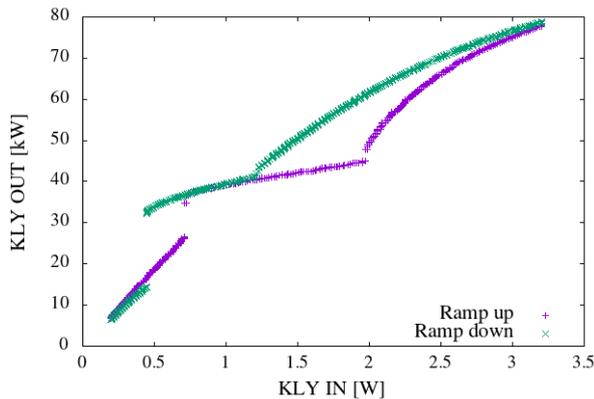


Figure 8: Gain curve of the klystron observed in the high-power test conducted under normal operating conditions.

一方、Ramp downでは、KLY IN > 1.2 Wの領域では滑らかな応答を示したが、0.5 Wから1.2 Wの領域で変化の傾向が変わり勾配が小さくなった。さらにKLY IN = 0.5 Wにおいて出力電力が急降下し、KLY IN > 1.2 Wの領域で描いたゲインカーブに近い振る舞いを示した。

#### 3.3.2 カソード電圧変更

クライストロンのカソード電圧を通常設定値の33.8 kVから37.5 kVに上げ、同様の測定を行った(Fig. 9)。Ramp upでは、KLY IN = 0.7 WのときにKLY OUTが急激に増加し、0.7 Wから1.6 Wにおいて不連続な出力特性が観測された。Ramp downでは0.43 W < KLY IN < 1.2 Wにおいて同様の不連続な応答を示した。

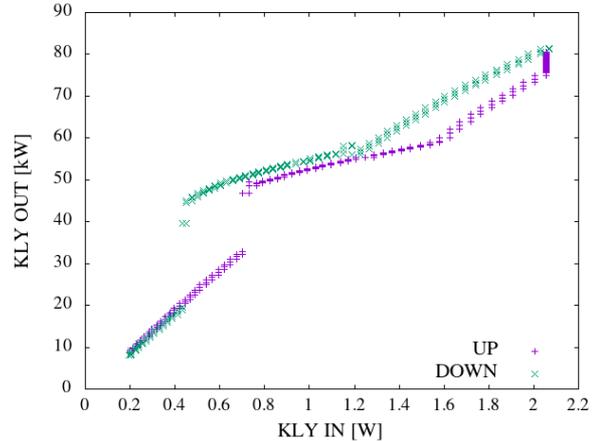


Figure 9: Gain curve obtained from the test with higher cathode voltage.

#### 3.3.3 クライストロン集束コイル電流値変更

上記の2つの結果より、今回の不具合の原因として、クライストロンの中間空洞におけるマルチパクタ放電の発生が疑われた。そこで、クライストロンの集束コイル4台の電流設定値を変更し、出力異常が発生しない条件があるか調査を行った。

その結果、クライストロンの中間空洞付近にある集束コイルL3の電流値を通常設定値の6.0 Aから4.0 Aまで下げたとき、ゲインカーブ上の不連続点発生を回避できることがわかった。さらに、カソード電圧を35.5 kVに上げてもほぼ同じ応答を示すことが明らかになった。また、この電流値でPF-Ring運転に必要な約80 kWの電力を出力できることも確認した(Fig. 10)。

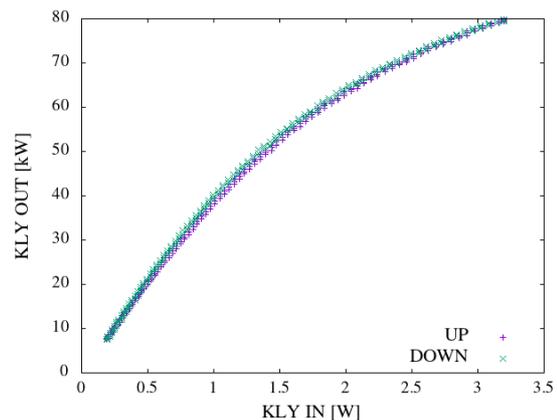


Figure 10: Gain curve obtained from the test with reduced current setting of focusing coil L3.

L1からL4全ての集束コイルの電流値を変えて応答を測定したところ、ゲインカーブはL3の電流値に最も敏感

に反応して変化し、L4 および L2 の電流値にも影響を受けることがわかった。一方、L1 の電流値の影響はあまり受けなかった。

### 3.3.4 クライストロン出力信号のスペクトル観測

ゲインカーブが不連続に変化した条件下で、200 kW ダミーロードのピックアップ信号をスペクトラム・アナライザー (R&S FPC-1500) に入力し、クライストロン出力信号を測定した (Fig. 11 上)。また、クライストロン入力空洞内部における放電の有無を調べるため、入力空洞からの反射信号を測定した (Fig. 11 下)。クライストロン出力信号のスペクトルには多数のサイドバンドが出現した。このとき、入力空洞からの反射信号にはサイドバンドは全く見られなかった。

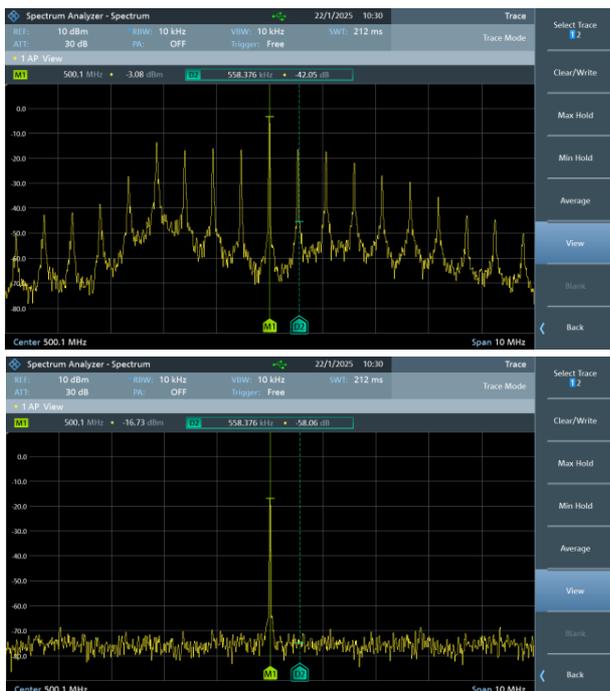


Figure 11: Spectrum obtained under unstable gain conditions. Top: Klystron output; Bottom: Reflection from klystron cavity.

ゲインカーブが集束コイル L3 の電流値変更により敏感に反応したことを合わせて考えると、出力不安定の原因はクライストロンの入力空洞内の放電ではなく、中間空洞内でのマルチパクタ放電であると推測される。

## 4. まとめ

PF-Ring の RF ステーションのうち 1 系統において突如出力電力が不安定になり、運転継続が不可能となった。原因調査の結果、クライストロン内部において放電等の異常が発生していると判断された。

さらに、大電力ダミーロードを用いたクライストロン試験の結果、ビーム集束用ソレノイドコイルの電流値を調整することで PF-Ring の運転に必要な電力を安定して出力できる条件を見つけることに成功した。

その後、計 3 か月間の運転期間中に当該クライストロンに起因する RF システムのトラブルおよびゲインカーブの顕著な変化はなく、安定な運転を継続している。

## 謝辞

キヤノン電子管デバイスの菊地里紗氏にはクライストロンの使用条件について有益な助言をいただきました。

## 参考文献

- [1] D. Naito *et al.*, “Performance Evaluation and Development of the New Digital LLRF System at the KEK 2.5 GeV Ring”, Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, pp. 290-294.
- [2] 帯名崇, “光源の現状”, PHOTON FACTORY NEWS Vol. 42 No. 4, 2025, pp.5-7.