

Sバンド長パルスクライストロン出力窓放電の パルス内遮断の効果

Effect of shut-off of RF window breakdown during the long-pulse operation of S-band klystron

田中俊成, 境武志, 早川建, 早川恭史, 住友洋介, 高橋由美子, 野上杏子

日本大学 量子科学研究所 電子線利用研究施設

Toshinari Tanaka, Takeshi Sakai, Ken Hayakawa, Yasushi Hayakawa,
Yoske Sumitomo, Yumiko Takahashi, Kyoko Nogami

Laboratory for Electron Beam Research and Application, Nihon University

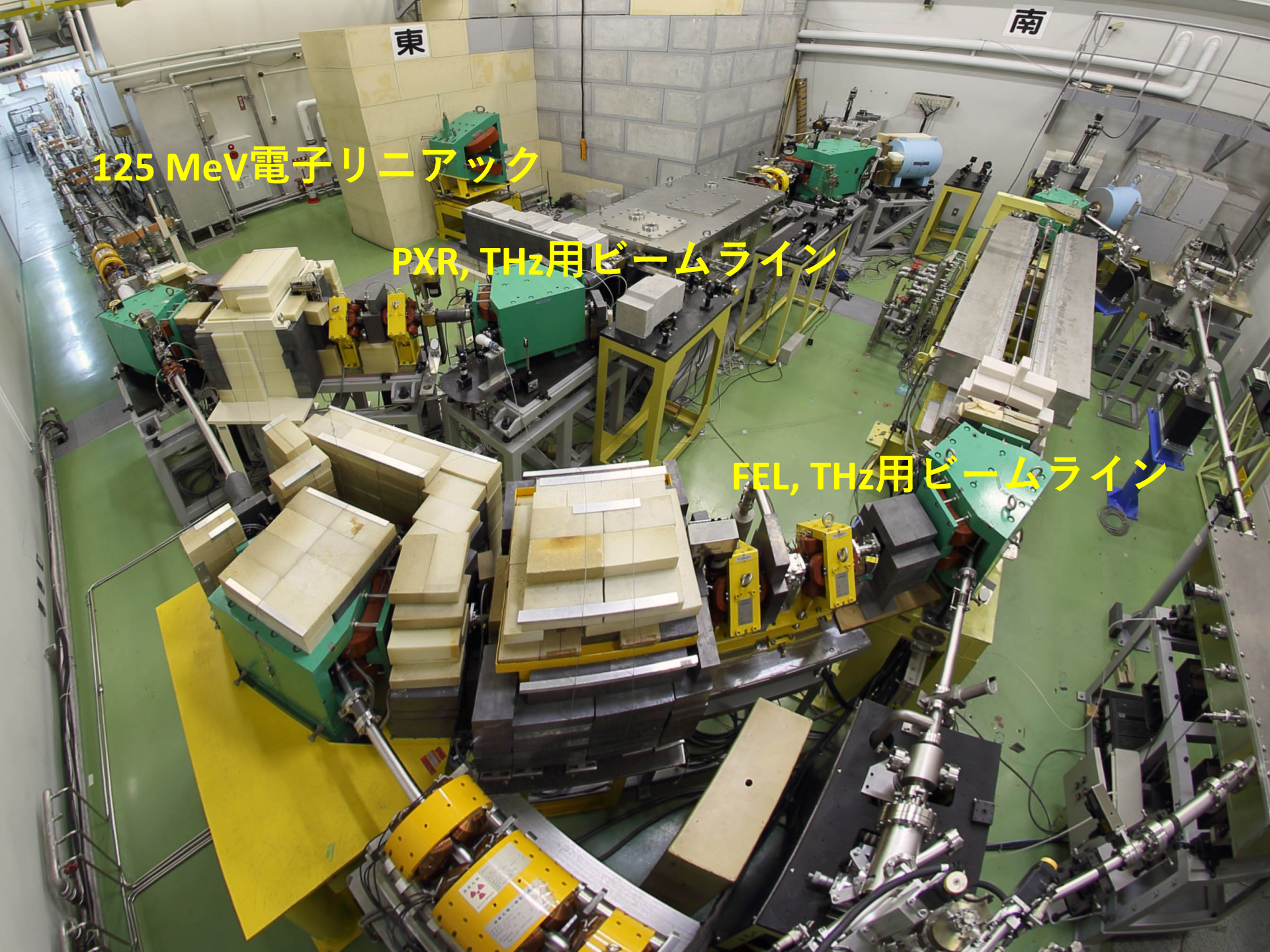
南

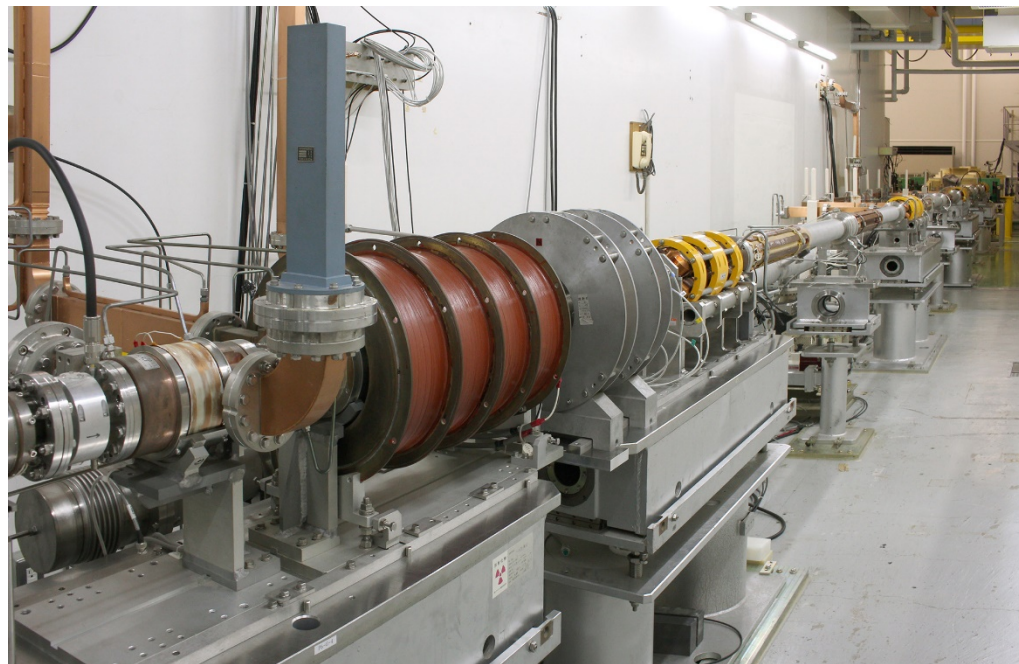
東

125 MeV電子リニアック

PXR, THz用ビームライン

FEL, THz用ビームライン





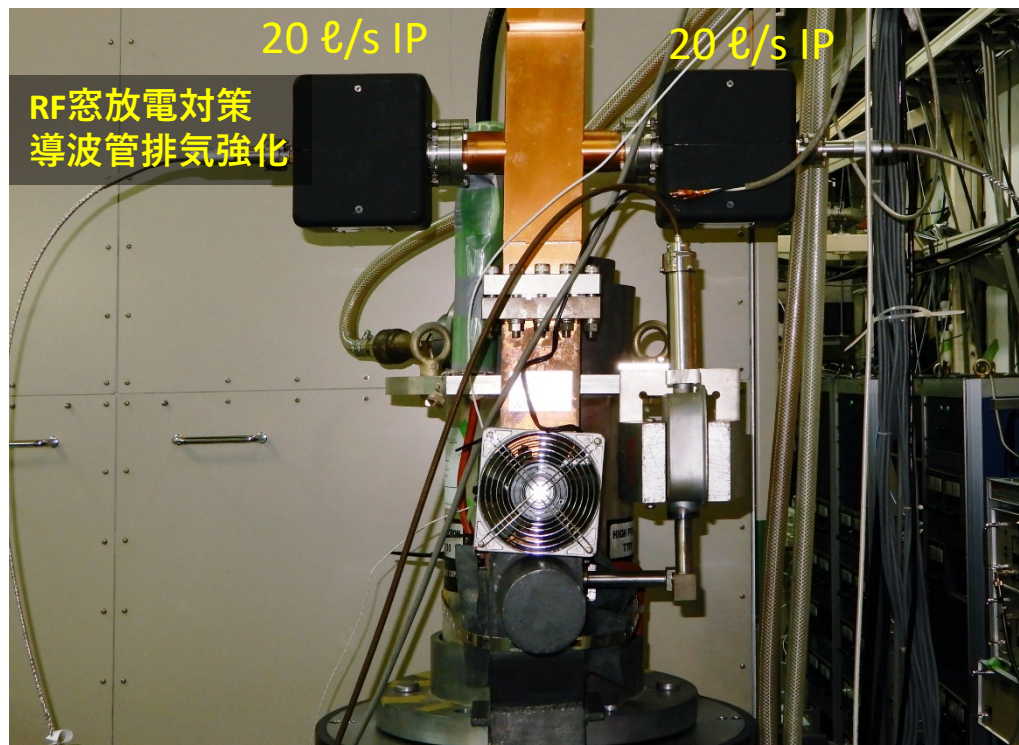
125 MeVリニアックRF系の仕様

加速周波数	2856 MHz
クライストロン	2本
RFパルス幅	20 μs
ピーク電力	20 MW
繰り返し	12.5 pps

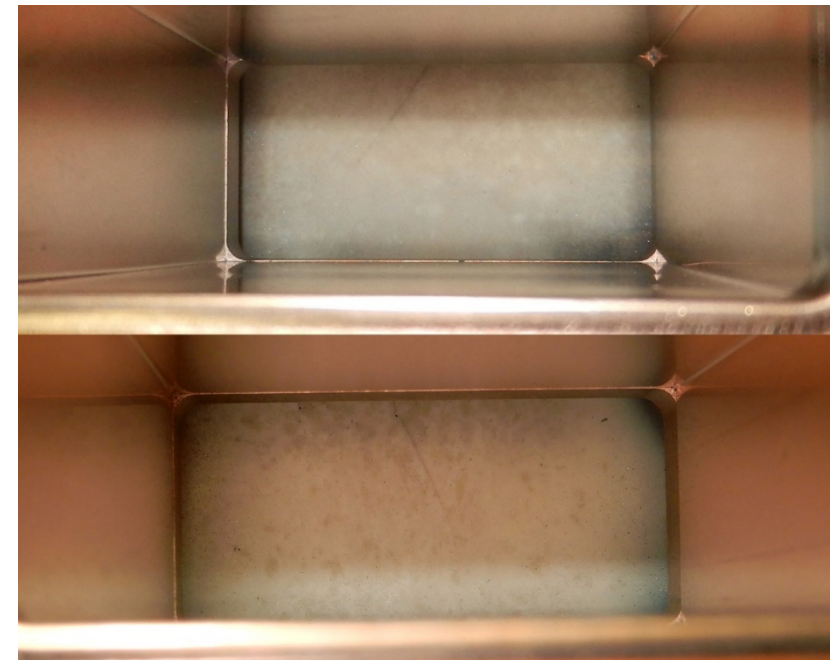
クライストロン：PV3030 (A3)

クライストロン運転上の課題

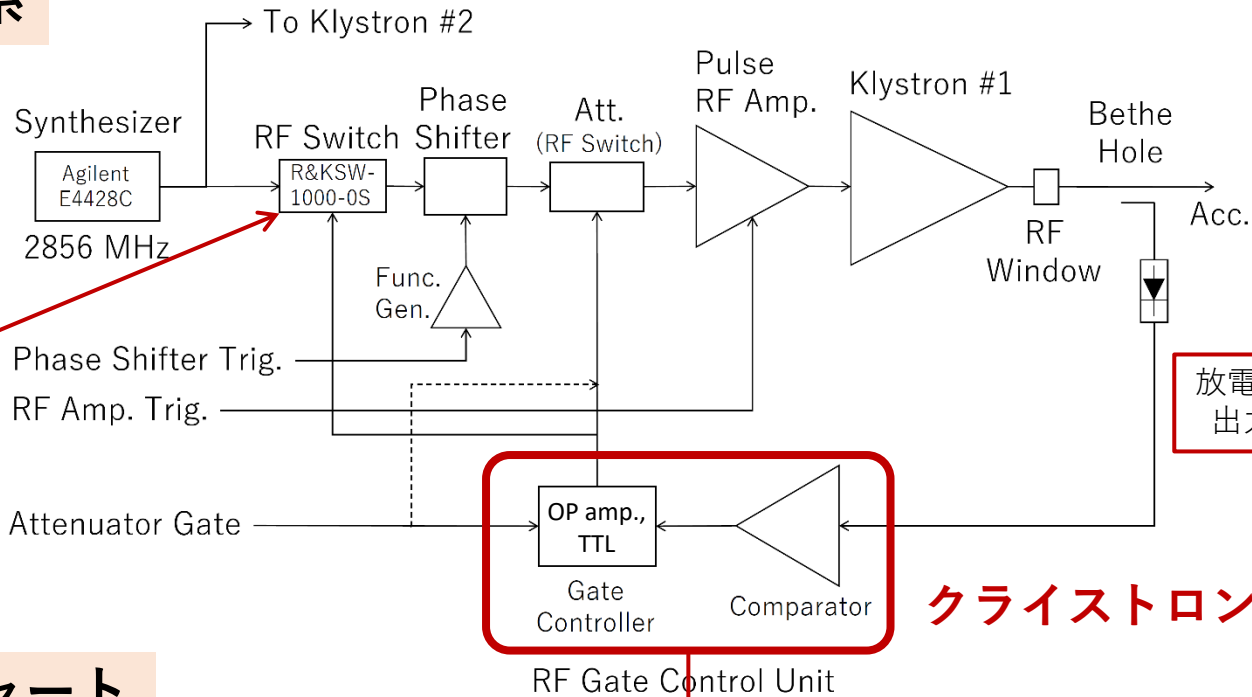
- ・ 長パルス運転はRF出力窓で放電が発生し易い
- ・ RF窓の放電による導波管真空悪化
- ・ RF窓が破損すると放電が頻発 → agingで回復も
- ・ 加速不安定 (パルス欠損、HV trigger Interlock)
- ・ しかしRF窓破損でも使い続ける → 要対策



RF窓の破損例

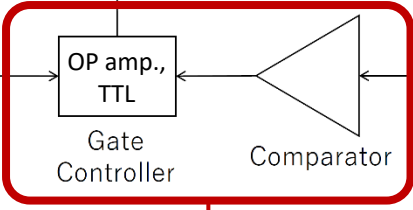


リニアックRF系



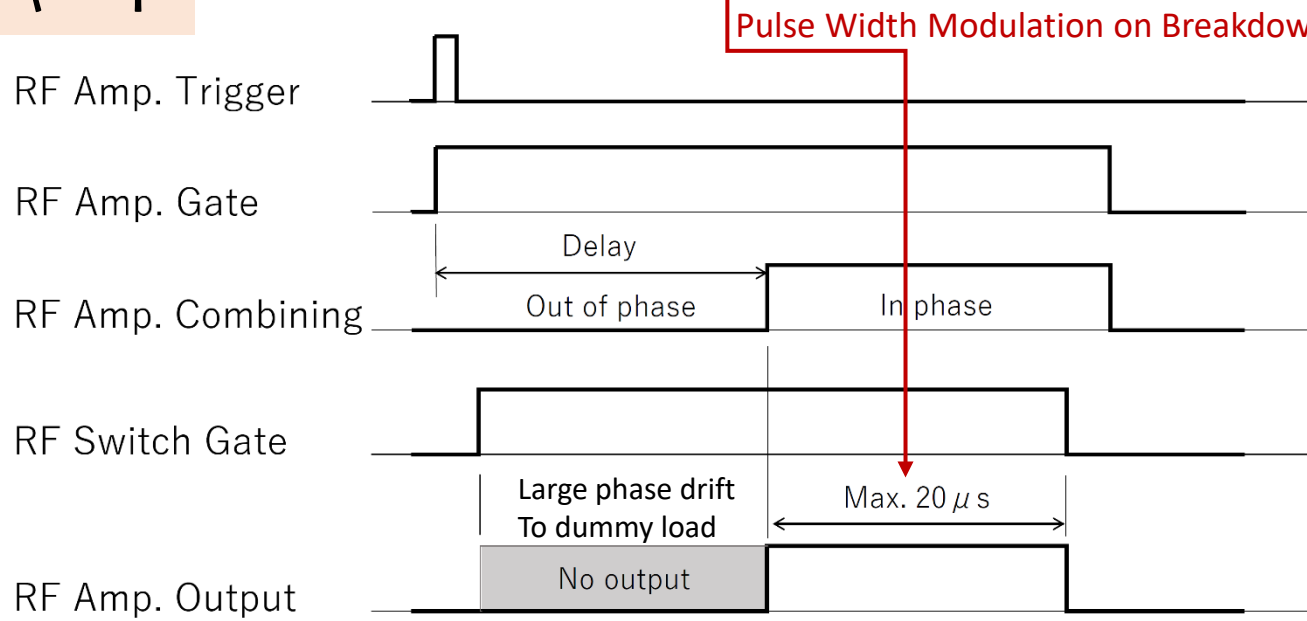
高速減衰器の減衰量不足のため直列挿入動作が速い

放電検出用素子なし 出力検波信号利用

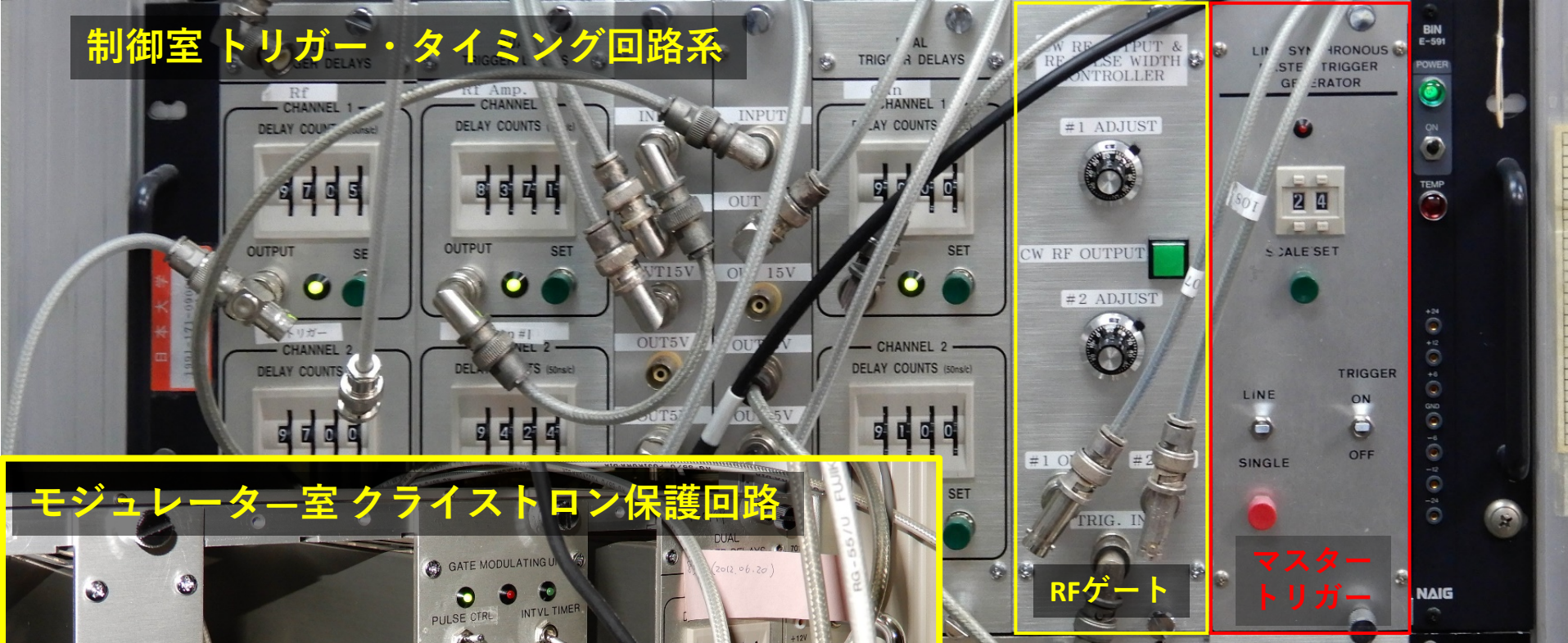


クライストロン保護回路

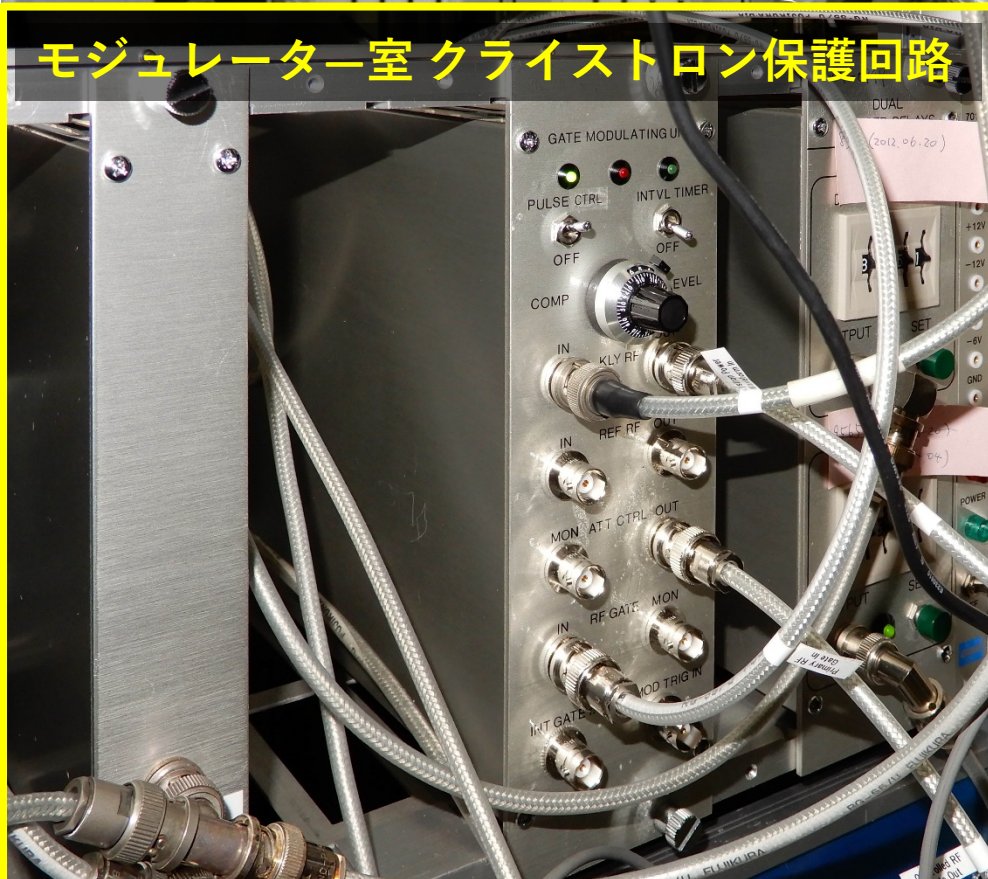
タイミングチャート



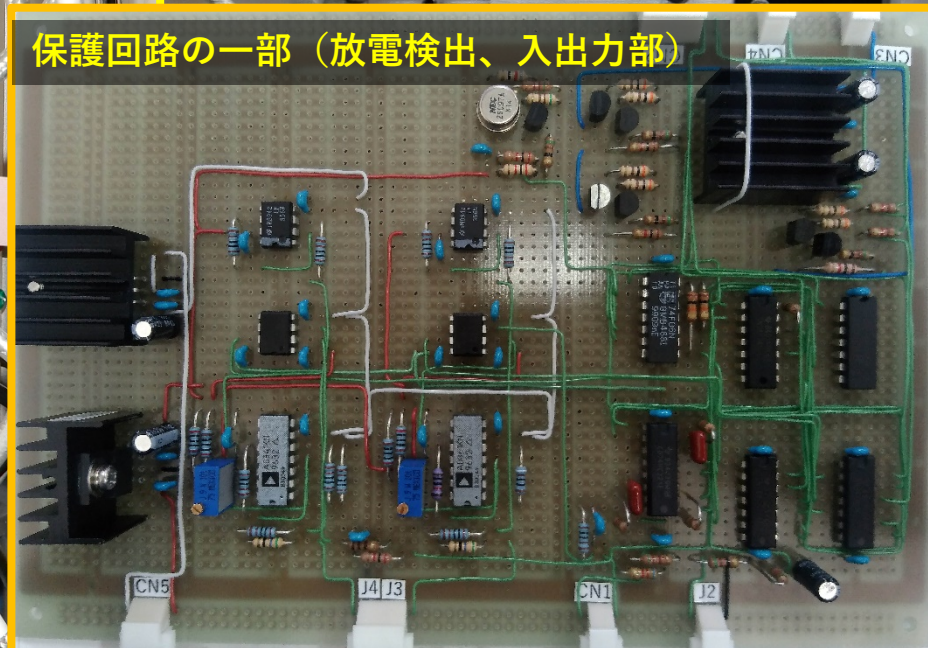
制御室トリガー・タイミング回路系



モジュレーター室クライストロン保護回路

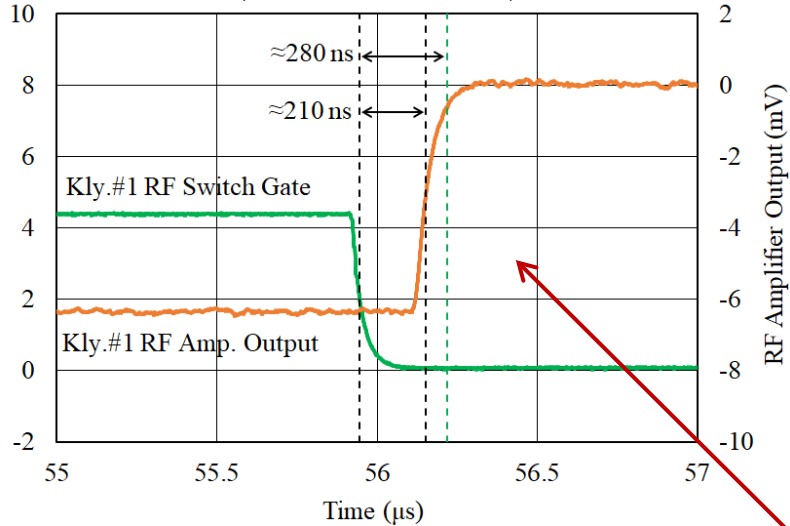


保護回路の一部 (放電検出、入出力部)

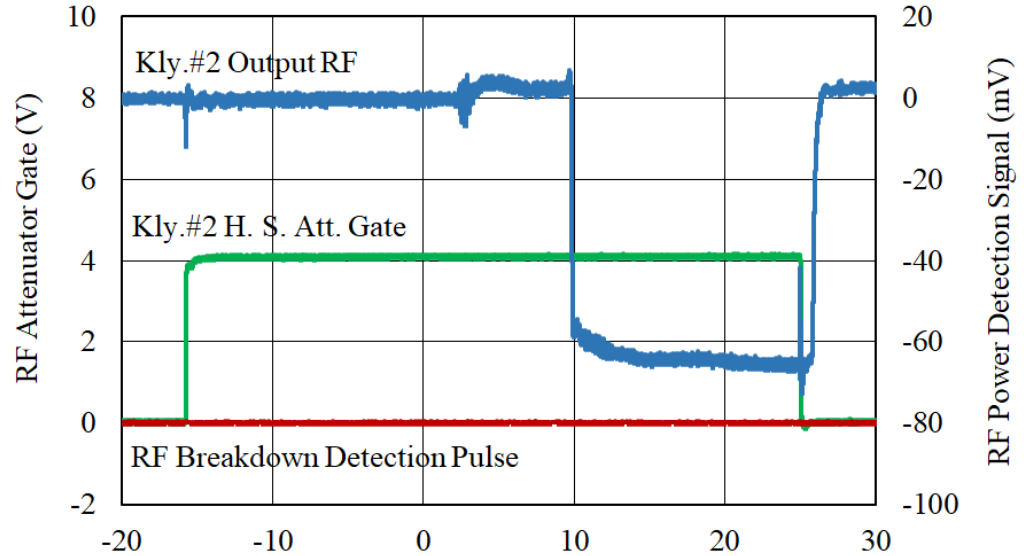


RFゲートによるRF出力停止の遅延時間

1号機 RF Gate – RFアンプ出力
(RFスイッチあり)

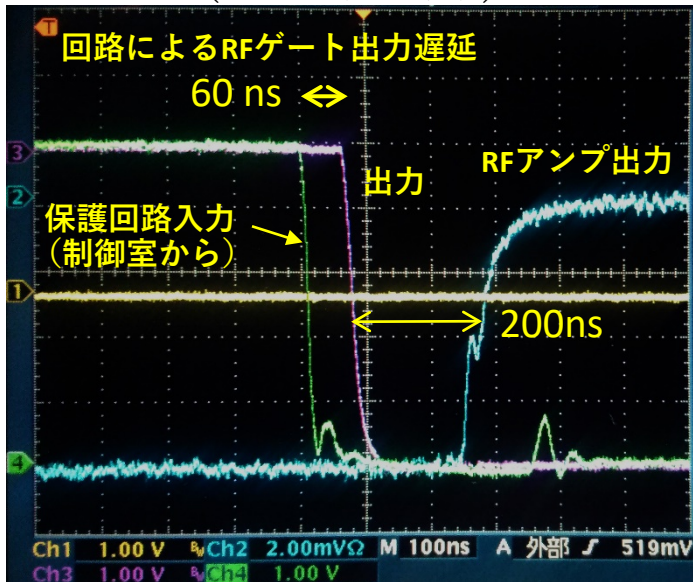


2号機クライストロン出力 (RFスイッチなし平常時)

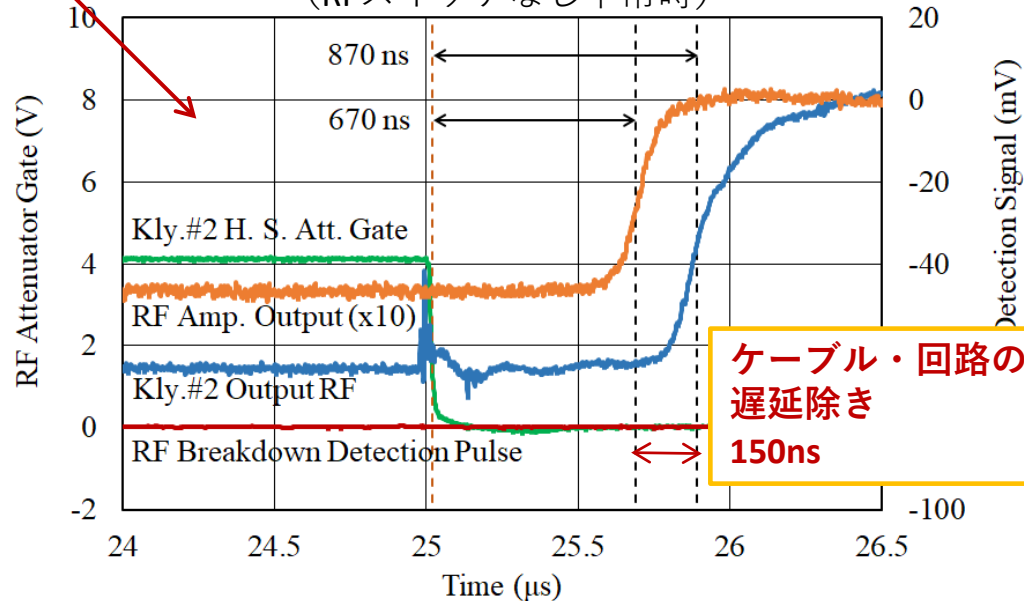


RFスイッチなしではさらに460 ns遅延

2号機 RF Gate – RFアンプ出力
(RFスイッチあり)



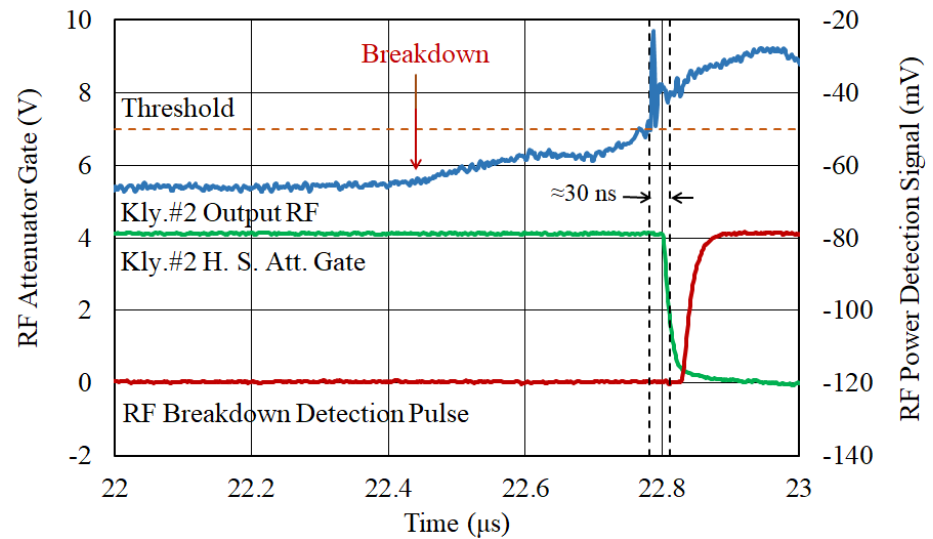
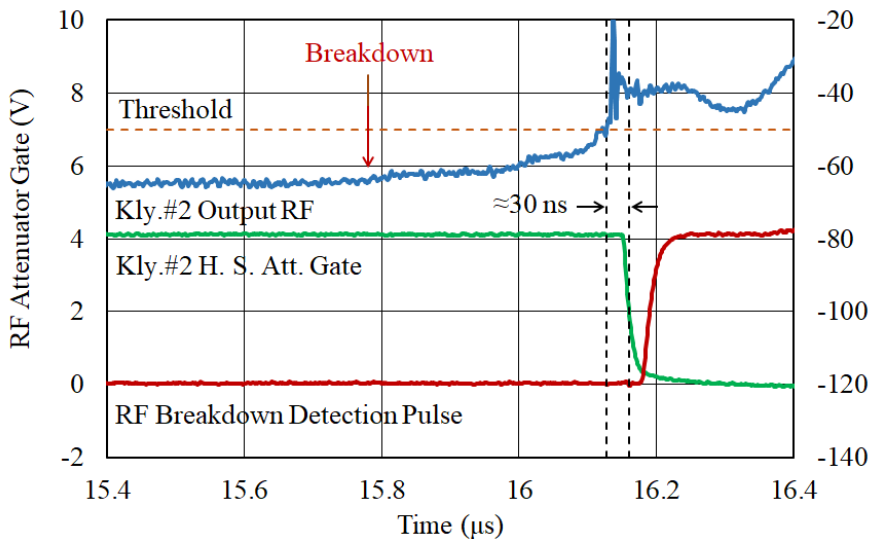
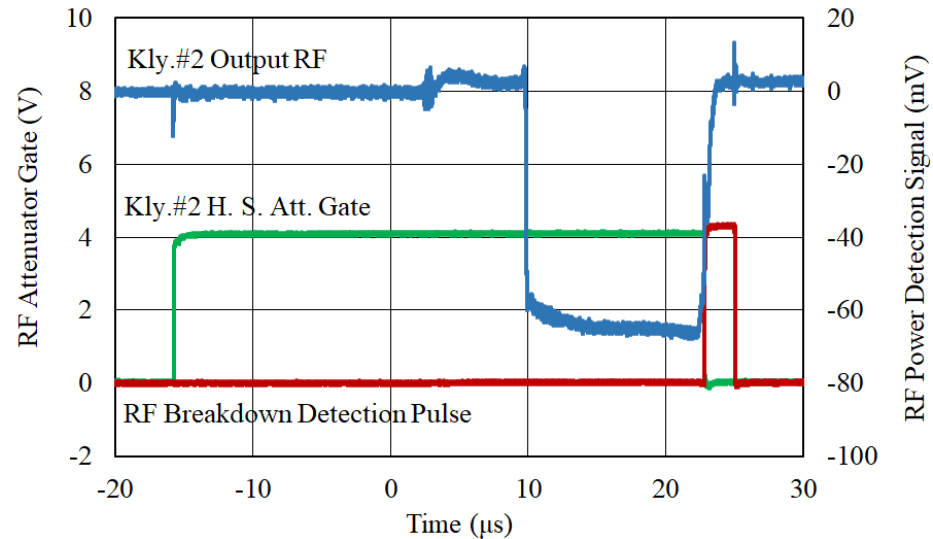
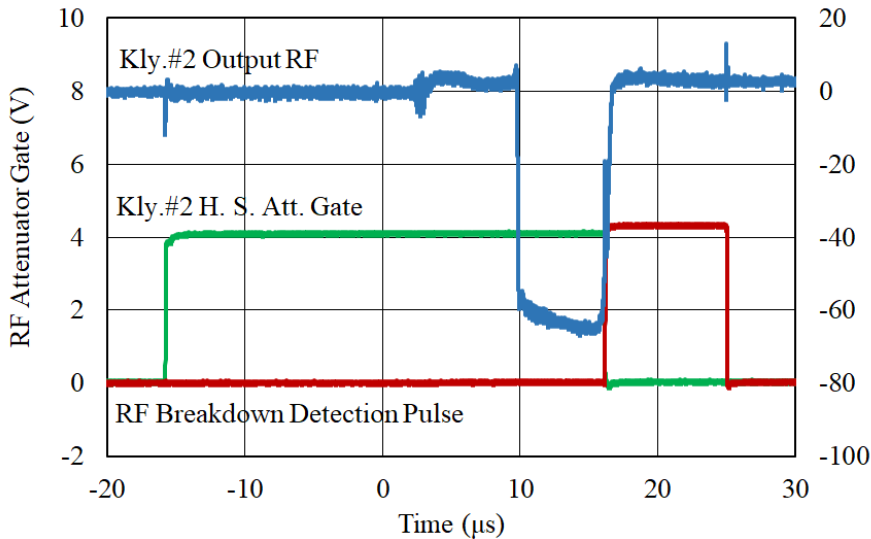
2号機 RF Gate – RFアンプ、クライストロン出力
(RFスイッチなし平常時)



ケーブル・回路の遅延除き
150ns

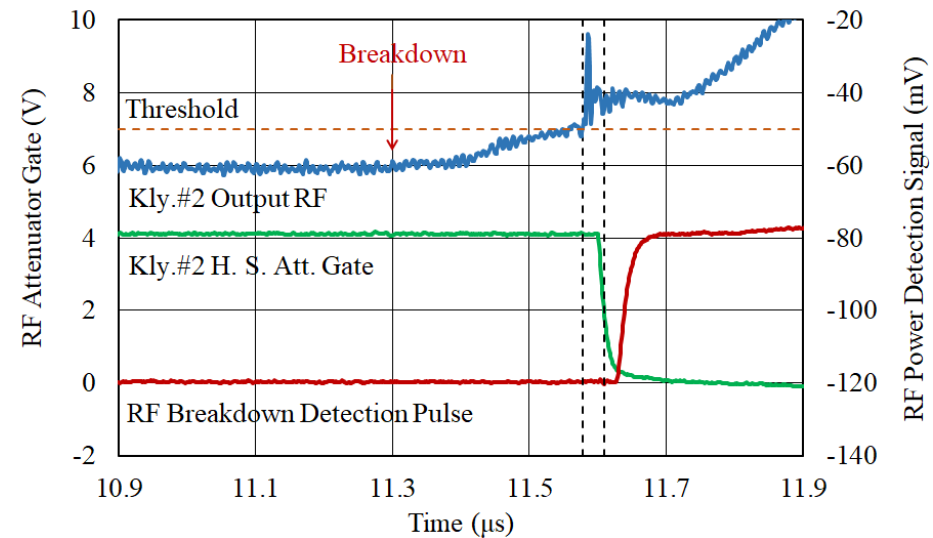
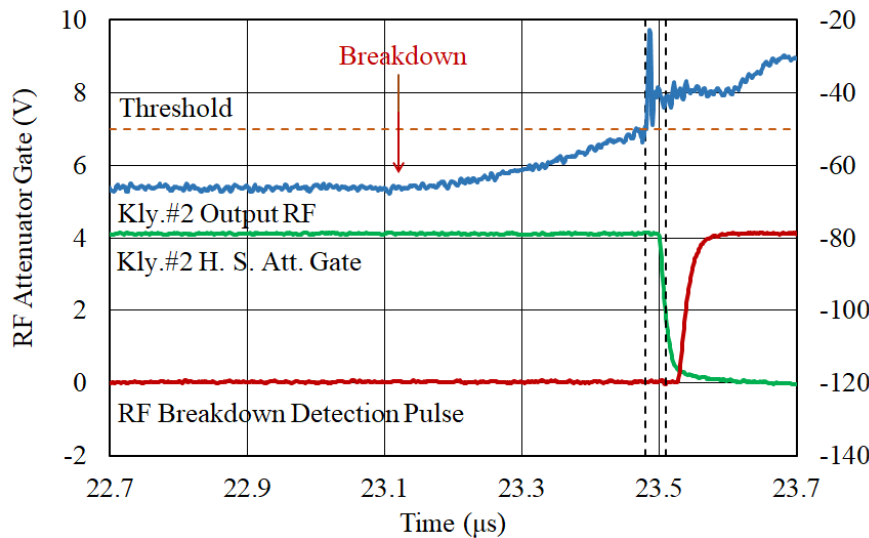
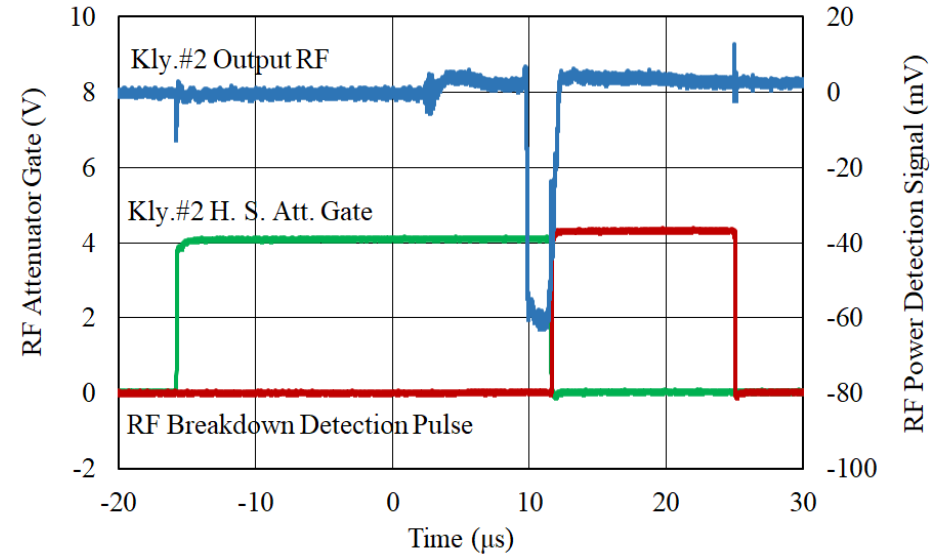
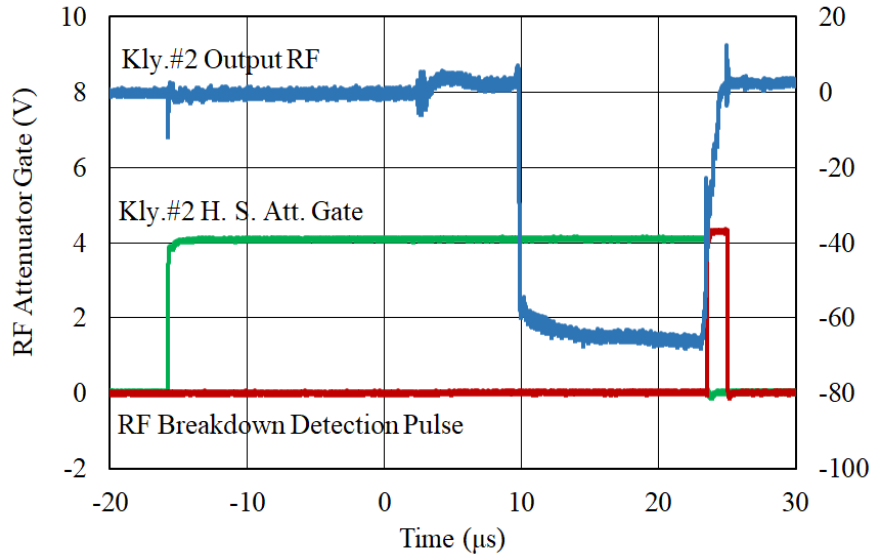
2号機 RF窓放電時のクライストロン保護回路の動作

- コンパレータ閾値設定は現状では緩やか（ポテンショメータで設定可変）
- 放電開始後300～400 nsで検出
- コンパレータで放電検出後30 nsでゲートOFF



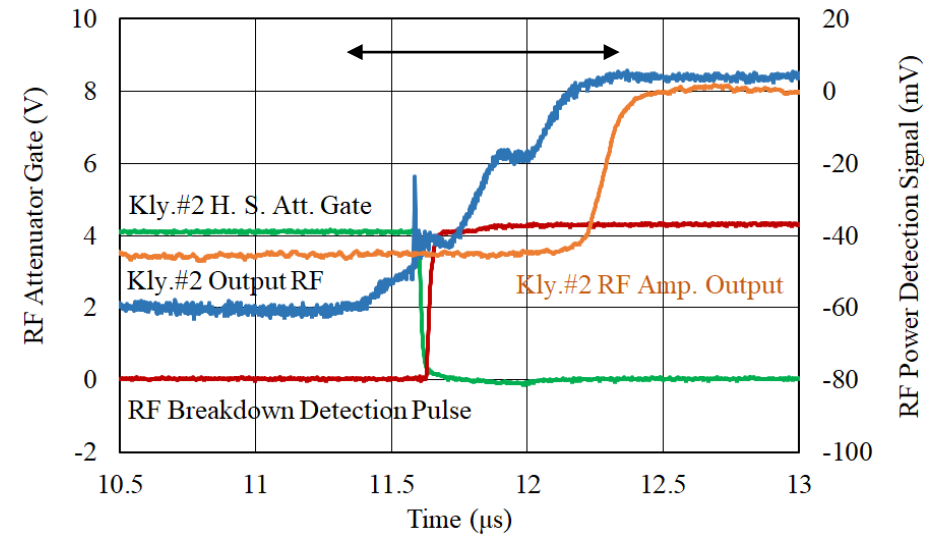
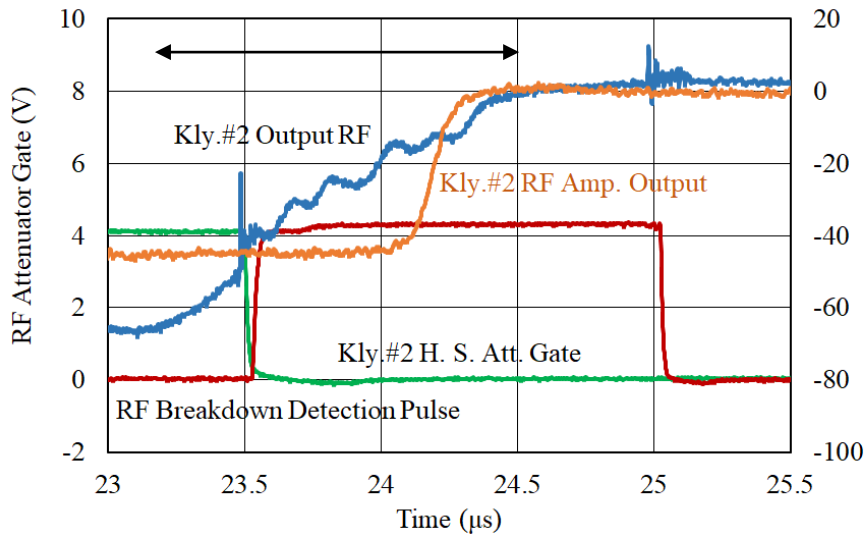
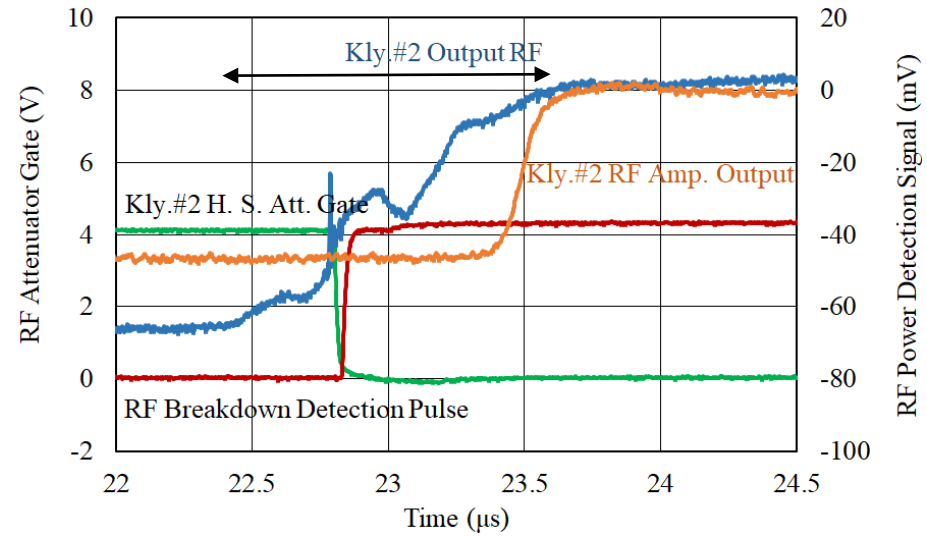
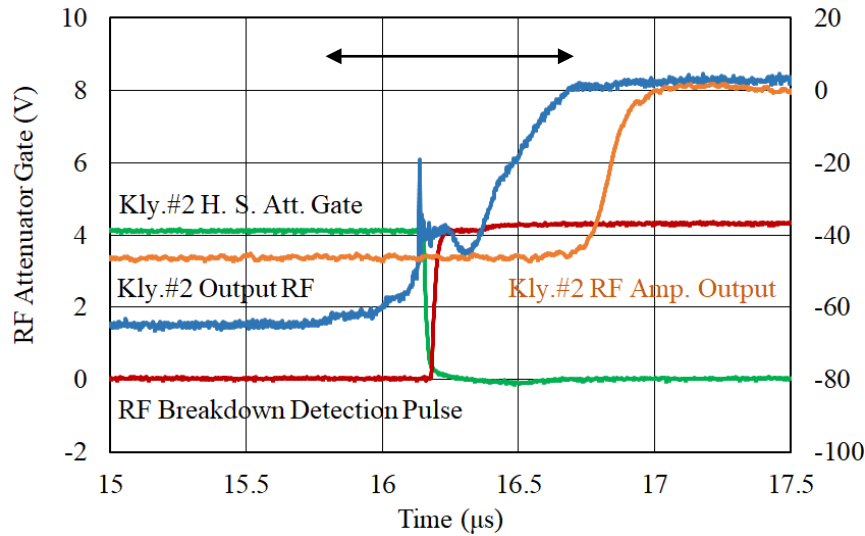
2号機 RF窓放電時のクライストロン保護回路の動作 (他の例)

- ・ 放電が発生した次のRFパルスは、放電したタイミング（放電検出波形の先頭）までのパルス幅に制限
 - ・ 100ns/パルス で元のパルス幅に戻る
- (ON/OFF可)



2号機 RF窓放電時クライストロン出力検波波形

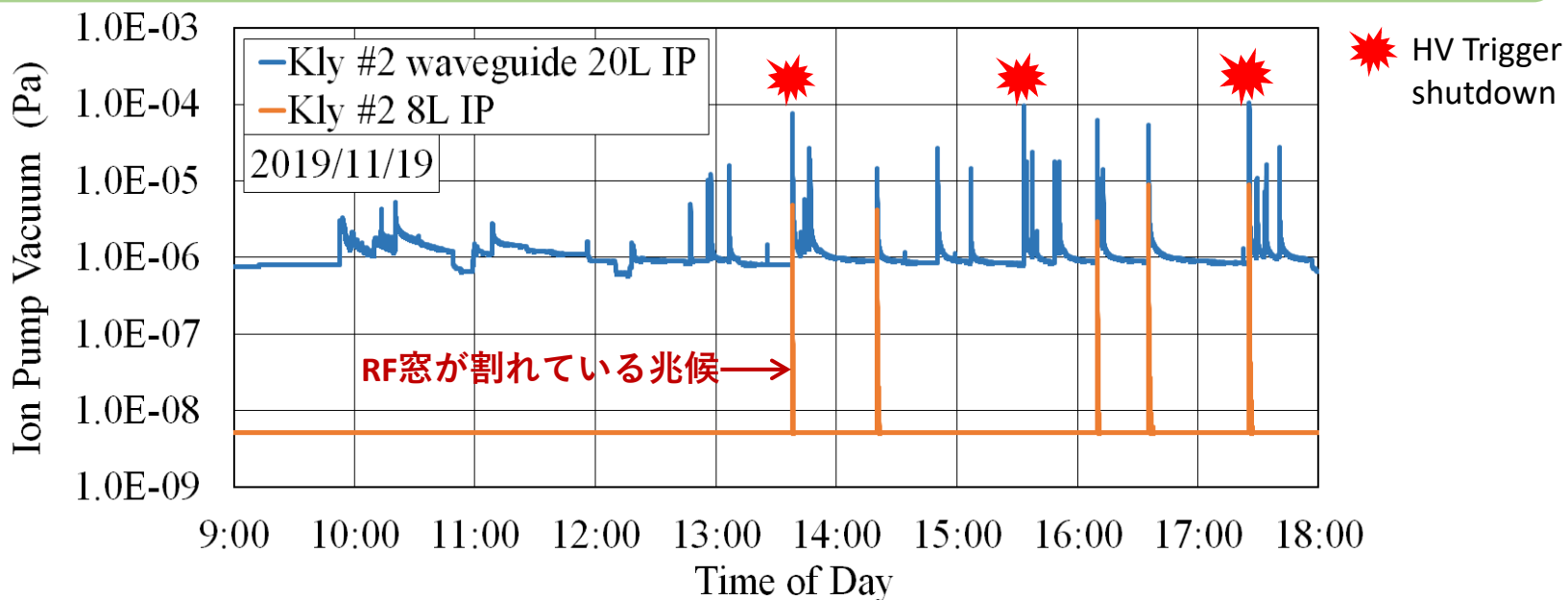
- ・ 放電開始後 $\sim 1.3 \mu\text{s}$ 以内にRF窓で全反射になる
- ・ 現状の2号機RFアンプの出力停止時には既に全反射状態
- ・ RFスイッチ直列挿入による高速化で窓の負担改善が可能
→ コンパレータで放電検出からクライストロン出力停止まで $\sim 400 \text{ ns}$ 以内に遅延短縮



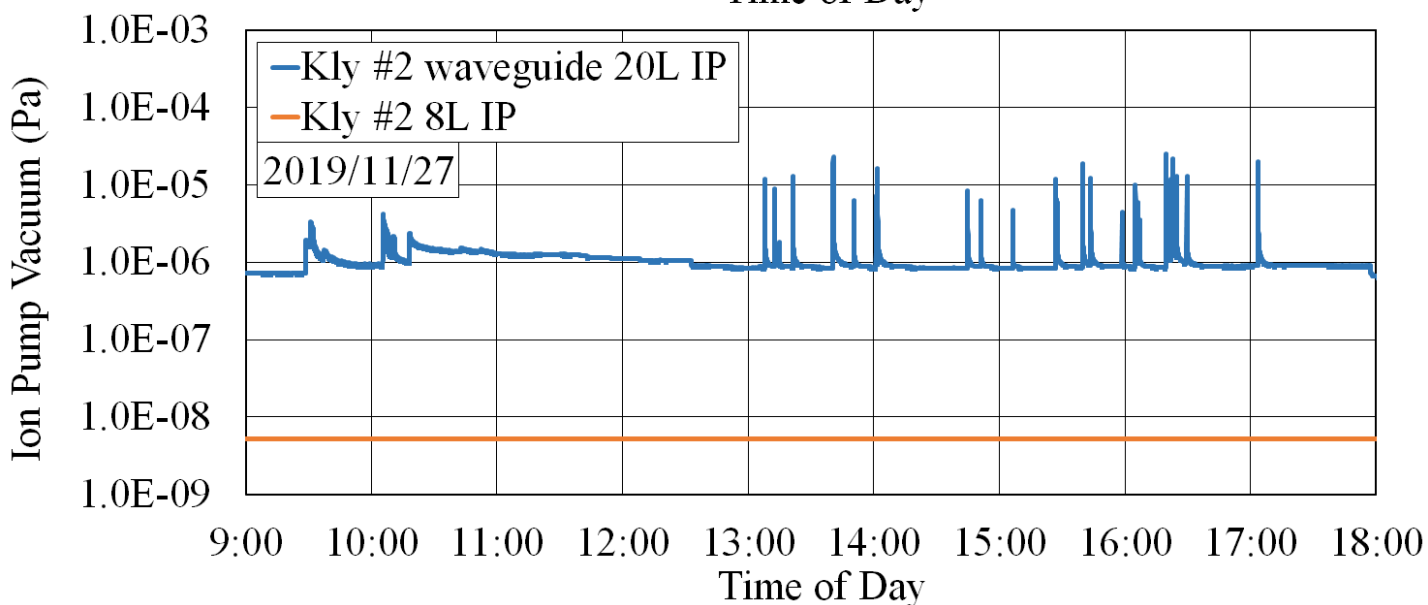
2号機 保護回路導入による放電時の真空度改善

- 導波管IP真空度悪化が 1/5程度に軽減
- HV トリガーの真空インターロックはOKで運転継続可能に
- クライストロン IP真空度悪化が大きく軽減

導入前



導入後



まとめ

- Sバンド長パルスクライストロンにおけるRF窓の放電対策としてクライストロン保護回路を導入。放電検出にはクライストロン出力検波波形を使用。
- 使用している2台のクライストロンのうち、2号機について放電時のRF出力停止特性、それによる放電遮断効果を調査。
- 現状では2号機の高速RFスイッチ故障のため制御が遅く、放電検出後、約860 nsでクライストロン出力検波波形が50%に低下。
- 1号機で稼働している高速RFスイッチを2号機RF系でも動作させることで約400 nsまで遅延を短縮可能（RFケーブル長にも依存）。
- 放電時の導波管真空度の悪化が改善し、RF窓が割れていても使用継続可。
インターロックによる HV Trigger 停止 → HV再起動 → コンディショニングの繰返しによる時間消耗が軽減、所期の目的であった、電子ビーム利用が増加。
- 放電開始から検出まで300～400 nsの遅延あり、放電検出方法改善（発光、X線）による保護動作の高速化が課題。
- 放電時の保護動作に伴う利用実験機器制御、ビーム制御の機能を検討予定。