

[12P-34]

## IMPROVEMENT OF THE LONG PULSE OPERATION OF THE S-BAND KLYSTRON

T.Sakai<sup>\*</sup>),<sup>†</sup>I.Sato,<sup>†</sup>K.Hayakawa,<sup>†</sup>T.Tanaka,<sup>†</sup>Y.Hayakawa,<sup>†</sup>K.Sato,  
H.Nakazawa, K.Yokoyama, K.Kanno, K.Ishiwata, H.Inokawa and Y.Nakamura

Graduate School of Science and Technology, Nihon University,  
7-24-1, Narashinodai, Funabashi, 274-8501 Japan  
<sup>†</sup>Atomic Energy Research Institute, Nihon University,  
7-24-1, Narashinodai, Funabashi, 274-8501 Japan

### Abstract

The long pulse operation of the PV3030 klystron for FEL linac at LEBRA in Nihon University has been improved considerably by the additional vacuum system placed immediately downstream the klystron output rf window. With the new vacuum system, the large conductance has enabled a high vacuum in normal operation and a quick recovery when the dielectric breakdown occurred. A high vacuum near the rf window may be essentially important for a stable operation of the high power klystron with long pulse duration. Now the PV3030 klystron can be operated at the condition of 20MW×20μs×12.5Hz.

### S バンドクライストロンの長パルス動作の改善

#### 1. はじめに

日本大学原子力研究所電子線利用研究施設(以下 LEBRA)では、高エネルギー加速器研究機構(以下 KEK)と共同研究を結び、FEL 用加速器の高性能化を進めてきた。共同研究の一環として KEK で使われていた三菱電機製の PV3030 クライストロンを 2 台使用している。クライストロンの型には B1、A1、A2 の 3 種ある。LEBRA では、赤外から紫外領域の波長の FEL 発振を目標にしているために、最大エネルギー 125MeV、ビーム電流 200mA 程度が必要である。そのため 2 台のクライストロンにはそれぞれ 30MW×20μs×12.5Hz(出力電力×パルス幅×繰り返し)の出力が要求されるが、このクライストロンは短パルス用であり、仕様上無理があるため暫定的に 20MW×20μs×12.5Hz で動作させ使用することにした。にもかかわらず、テスト運転中にクライストロン出力高周波窓が破損する故障が断続的に発生し、目標値に達することが難しかった<sup>[1]</sup>。しかし今年に入り、高周波窓の下流側に 8ℓイオンポンプを 2 台取り付け、RF 窓周辺の排気能力を強化することで、放電時に生ずるガス放出による真空の悪化を素早く回復することができるようになり、20MW×20μs×12.5Hz での運転が可能となった。

ここでは、改良前に起きていた RF 窓の破損状況と、クライストロン出力窓付近の真空排気系強化後に得られた効果について報告する。

#### 2. クライストロン使用状況

LEBRA で今まで使用してきた各クライストロンの使用状況とそのクライストロンで得られた最高出力値を表 1 に示す。

表 1: クライストロン使用状況

品名	製番	取付日	交換日	交換理由	最高性能
PV3030B1	88501			保存中	
PV3030A1	89510			保存中	
PV3030A1	?	98.02.06	98.02.07	真空不良	
PV3030A1	87514	97.02.25		窓破損	24MW×20μs×2Hz
PV3030A1	90503			窓破損	
PV3030A1	90507	98.02.07 99.05.24	99.02.15 00.04.19	窓破損	20MW×20μs×12.5Hz
PV3030A2	91506	99.02.15	99.05.24	窓破損	19MW×13μs×2Hz
PV3030A1	89511	00.04.19	使用中		20MW×20μs×10Hz
PV3030A1	88516	98.02.09	98.05.26	窓破損	21MW×8μs×2Hz
PV3030A2	91501	98.05.26	98.05.27	真空不良	
PV3030A2	91502	98.05.27	98.06.18	窓破損	26MW×20μs×2Hz
PV3030A2	92505	98.06.19	98.07.08	窓破損	21MW×12.5μs×2Hz
PV3030A2	92502	98.07.08	98.12.10	窓破損	26MW×20μs×2Hz
PV3030A2	91503	98.12.10	98.12.10	真空不良	
PV3030A2	92503	98.12.10	99.06.11	窓破損	26MW×20μs×2Hz
PV3030A2	92501	99.06.11	99.06.12	真空不良	
PV3030A1	89506	99.06.12	使用中		20MW×20μs×12.5Hz

\* 3 つに区切ったうちの上段が保存中、中段がクライストロン 1 号機、下段がクライストロン 2 号機。

交換理由で「真空不良」とあるのは、イオンポンプに通電しなかったために真空が悪化してしまったものや、据付時の無理な負担、輸送時の損傷など使用前にすでにクライストロン内部の真空が悪化し使用不能になったものである。

<sup>\*</sup>)T.Sakai,047-469-5489,sakai@acc.phys.cst.nihon-u.ac.jp

LEBRA では KEK で使い込まれたクライストロンを使用しているため、内部は十分にエージングされたものである。しかし表 2 に示すように KEK に比べ LEBRA では使用条件が厳しいために窓の破損を起こしやすかった。LEBRA では KEK に比べ、出力電力、繰り返しは低い、パルス幅を 10 倍広くして使用する。

表 2：KEK と LEBRA での使用条件の比較

	出力電力	パルス幅	繰り返し
KEK	33MW	2 $\mu$ sec	50Hz
LEBRA	20MW 以上	20 $\mu$ sec	12.5Hz
定格仕様	33MW	6 $\mu$ sec	67Hz

### 3．高周波窓の破損

LEBRA で高周波窓破損を引き起こした大きな理由は、出力電力×パルス幅×繰り返しを 20MW×20 $\mu$ s×12.5Hz とパルス幅を広げて運転しようとしていることが上げられる。また、特に 2 号機で起きていたクライストロン RF 窓の破損では次の事情も関与していた。LEBRA では 4m 加速管を 3 本使用している。しかし 2 本目と 3 本目の加速管が所定の間隔より 18mm (位相で約 62°) ずれて設置されていた。そのために予定の 90% までしか加速エネルギーが上がり、当初はこれをクライストロンの出力パワー不足と理解し、2 号機のエネルギー利得を上げるために過剰に出力パワーを上げた。その結果、クライストロンを 5 本破損させた。現在加速管の位置は設計通りに直したため、過剰に出力パワーを上げる必要がなくなり、2 号機でこれによる RF 窓の破損は無くなった。

クライストロンの交換理由のほとんどが、表 1 に示されるように RF 窓の破損であった。図 2 に破損した RF 窓の例を示す。

図 2 から明らかなように、放電が RF 窓とフラン

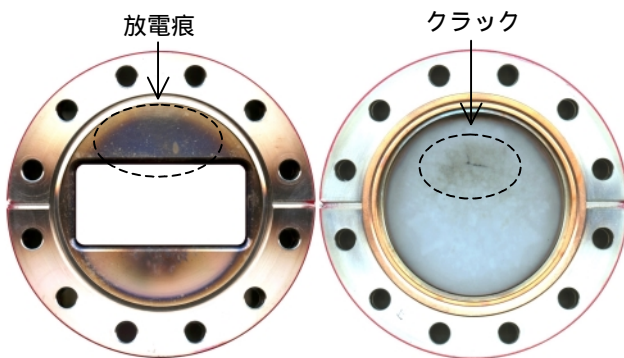


図 2：クライストロン下流側接続部放電痕と RF 窓破損の様子。加速管のずれによる問題で破損を起こした時の高周波窓の図。左：RF 窓と矩形導波管接続部。放電による損傷痕が見られる。右：RF 窓にクラックが成長し、表から裏へ貫通している。

ジの間で発生している。その放電痕から、推測されることは、まずあるとき何らかのきっかけで RF 窓や導波管の表面にマルチパクターリングが発生、それにより RF 窓やその周辺の真空が悪化し、放電に至った。この放電によりセラミックが破損したのであろうと考えられる。

### 4．クライストロン下流側真空強化

LEBRA におけるクライストロン出力部立体回路と真空排気装置の位置を図 3 に示す。

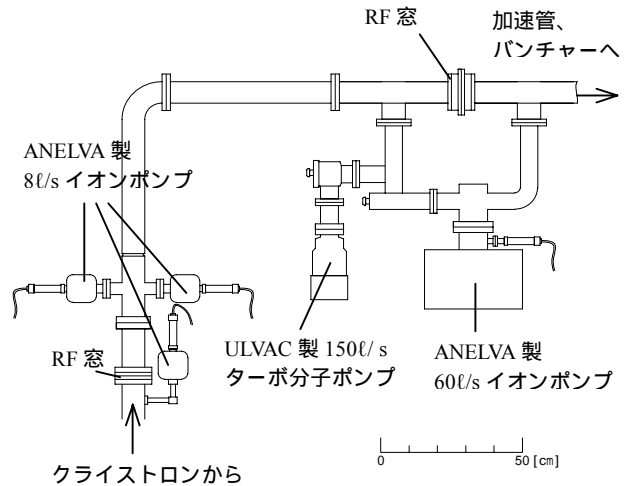


図 3：クライストロン出力部立体回路と真空排気装置位置関係。RF 窓の上流 40cm に ANELVA 製 8 $\ell$ /s イオンポンプ、RF 窓から 2.4m 下流に ULVAC 製 150 $\ell$ /s ターボ分子ポンプ (粗排気用)、2.6m 下流に ANELVA 製 60 $\ell$ /s イオンポンプがそれぞれ 1 台を設置してある。RF 窓下流約 30cm のところに新たに ANELVA 製 8 $\ell$ /s イオンポンプを 2 台取り付け付けた。

LEBRA におけるクライストロン出力部立体回路に付随する主な真空排気装置は、クライストロンに付属されている ANELVA 製 8 $\ell$ /s イオンポンプ 1 台 (RF 窓から約 40cm)、ULVAC 製 150 $\ell$ /s ターボ分子ポンプ 1 台 (RF 窓から約 2.4m、粗排気用)、ANELVA 製 60 $\ell$ /s イオンポンプ 1 台 (RF 窓から約 2.6m) で構成されていた。しかし先に示したように、RF 窓のフランジとセラミックの間で放電が生じたときには、RF 窓付近の真空状態は極めて悪化していたと考えられる。それは、RF 窓から 60 $\ell$ /s イオンポンプまで 2.6m も離れており、放電した時、その元の状態に回復するまでに長時間かかっていたことから推測される。実際この真空系でのクライストロン RF 窓周辺でのコンダクタンスは導波管などの形状を考慮に入れた計算<sup>[2]</sup>から、約 8.2 $\ell$ /s である。しかし今回 ANELVA 製 8 $\ell$ /s イオンポンプを RF 窓から約 30cm の距離にパイプの径を大きく、できるだけ導波管の近くに 2 台取り付け付けたことで全体のコンダクタンスは約 43 $\ell$ /s まで上がった。仮に RF 窓で一瞬通常の真空度

( $10^{-5} \sim 10^{-6}$ Pa ぐらい)から  $10^{-3}$ Pa ぐらいまで悪くなったとしても、元の真空状態に戻るまでの時間は、今までの真空排気系に比べ半分以上で可能である。また、持続的にガスが出る場合でも新しい真空排気系では今までに比べ、RF 窓の位置での圧力を半分程度まで低くすることが予想される。実際運転中に RF 窓で真空が悪化しても、真空系を強化する前に比べ飛躍的に回復時間が短縮された。

また、図 3 の 60ℓ/s イオンポンプの 2 つの引き口に挟まれた RF 窓は、クライストロンに取り付けられているものとまったく同じ 30MW 用 RF 窓であるが、1997 年に取り付けてから今まで一度も破損を起こしていなかった。その理由として RF 窓から 60ℓ/s イオンポンプが近い位置(約 1m)にあり、そこでのコンダクタンスが約 32ℓ/s と大きく、放電によるガス放出が起きてても元の真空状態に回復する時間が極めて短かったためと考えられ、今回新たに取り付けられた真空ポンプの有効性を裏づけるものであるといえる。

### 5. クライストロン長パルス安定動作

8ℓ/s イオンポンプを 2 台新たに取り付けることにより、予定の  $20\text{MW} \times 20 \mu\text{s} \times 12.5\text{Hz}$  で運転可能な状態になった。 $20\text{MW} \times 20 \mu\text{s} \times 12.5\text{Hz}$  動作時のクライストロン RF 出力波形を図 4 に示す。ただし、この図 4 に示した 1 号機の波形は、PV3030A1(90507)による波形でこのクライストロンはすでに破損してしまっていた。現在、次のクライストロン(PV3030A1(89511))では約 500 時間運転しており、今のところ  $20\text{MW} \times 20 \mu\text{s} \times 10\text{Hz}$  が最高値ではあるが、今後エージングを重ねて行き  $20\text{MW} \times 20 \mu\text{s} \times 12.5\text{Hz}$  まで上げていく予定である。2 号機 (PV3030A1(89506)) は現在まで約 1450 時間運転し、丹念に長時間エージングした結果、 $20\text{MW} \times 20 \mu\text{s} \times 12.5\text{Hz}$  で運転できる状態になっている。

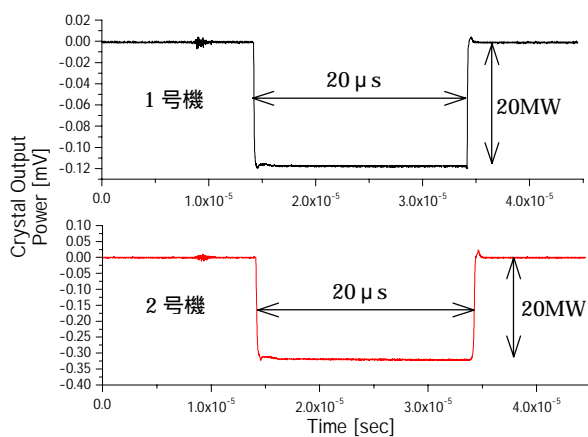


図 4 :  $20\text{MW} \times 20 \mu\text{s} \times 12.5\text{Hz}$  動作時のクライストロン出力波形。上が 1 号機、下が 2 号機の波形。印加電圧 1 号機 237kV、2 号機 219kV で得られた。

### 6. 今後の方針

クライストロン本体の RF 窓付近についている 8ℓ/s イオンポンプは導波管から約 40cm 離れた位置にあり、15mm 程度の細いパイプを通して排気している。そのためコンダクタンスが約 1.6ℓ/s と悪い。そこで新しく付けたイオンポンプのように引き口のパイプの径をできるだけ大きくし、イオンポンプ引き口を導波管にできるだけ近づければ排気能力も増え、その周辺で放出されるガスを速やかに排気することができ、放電時におけるガス放出からの早い回復が期待できる。これは今後クライストロンの製造過程において考慮すべき重要課題である。

また我々はクライストロンの改良として、電子銃部分を PV3030A3 用に取り替え、さらに RF 窓を今まで使用していた 30MW 用ではなく 50MW 用の耐性の高いものに交換し、さらに出力パワーを上げていくことも検討している。また 60ℓ/s イオンポンプ引き口付近にある RF 窓はすでに 30MW 用から 50MW 用のものに交換済みである。

### 7. まとめ

これまで LEBRA では、クライストロン RF 窓の破損を経て、その性能限界を探ってきたが、クライストロン出力  $20\text{MW} \times 20 \mu\text{s} \times 12.5\text{Hz}$  で動作させることに成功した。これは、RF 窓の近く(下流約 30cm)に 8ℓ/s イオンポンプを 2 台取り付けることによって、クライストロン出力立体回路の真空排気系の強化をはかったことによる。実際 60ℓ/s イオンポンプの位置におけるコンダクタンスは約 8.2ℓ/s であり、8ℓ/s イオンポンプの位置では約 43ℓ/s と 5 倍ほど大きい。そのためポンプ自身の排気容量は小さくても RF 窓の排気能力は大きくなり、RF 窓付近でのガス放出から素早く回復することで、PV3030A1 クライストロンで  $20\text{MW} \times 20 \mu\text{s} \times 12.5\text{Hz}$  の運転が安定して可能になった。

### 参考文献

- [1] : I.Sato, et al., "The Present Status of LEBRA in Nihon University". Proceedings of the 24th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sapporo, July 7-9, (1999) p10-12.
- [2] : 真空ハンドブック 改訂版 第 3 版、(株)アルバック・コーポレートセンター、1989 年 3 月 31 日、P34-39.