

# FEL用クライストロンのグレードアップ

境 武志<sup>1,A)</sup>、佐藤 勇<sup>B)</sup>、逸見和久<sup>C)</sup>、早川 建<sup>B)</sup>、田中俊成<sup>B)</sup>、早川恭史<sup>B)</sup>、佐藤和男<sup>B)</sup>、横山和枝<sup>A)</sup>、菅野浩一<sup>A)</sup>、石渡謙一郎<sup>A)</sup>、猪川弘康<sup>A)</sup>、中村吉弘<sup>A)</sup>、中尾圭佐<sup>A)</sup>、橋本英子<sup>A)</sup>、藤岡一雅<sup>A)</sup>、村上琢哉<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> 日本大学大学院 理工学研究科 量子理工学専攻 電子線利用研究施設

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎物理実験 B 棟

<sup>B)</sup> 日本大学 原子力研究所 電子線利用研究施設

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎物理実験 B 棟

<sup>C)</sup> 三菱電機株式会社 通信機製作所

〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町 8-1-1

## 概要

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と共同研究を結び、FEL用加速器の性能改善、並びに高度化を進めてきた。

LEBRAでは、ビームエネルギー125MeV、ビーム電流200mA程度のビームを加速するために、三菱電機製の短パルス用クライストロンPV-3030A1を2台使用している。

今年度、三菱電機製クライストロンPV-3030A3をベースに、電子銃、RF窓、クライストロン真空引き口等を強化し、クライストロンの性能強化を行い、クライストロンPV-3040Nを製作した。

これまで使用してきている短パルス用クライストロンPV-3030A1の長パルス化の成功を基盤にしているため、PV-3040Nは、LEBRAでの要求出力値である30MW×20μs×12.5Hz（出力電力×パルス幅×繰り返し）の長パルス、高出力動作が見込め、赤外線から紫外線の波長領域（0.3~5.0μm）までのFEL発振、パラメトリックX線の発生等に活用されると期待している。

## 1. はじめに

LEBRAでは、赤外線から紫外線の波長領域（0.3~5.0μm）までのFEL発振、エネルギー3~30keVのパラメトリックX線の発生を目標としている。これらの線源を発生させるのに必要な電子ビームは、エネルギーが125MeV、ビーム電流が200mA以上必要である。これらの要求を満たすには、加速器本体（プリバンチャー、バンチャー、4m加速管3本）への供給する高周波電力は60MW×20μs×12.5Hz（出力電力×パルス幅×繰り返し）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）の非常に厳しい値が要求される。この場合、クライストロンRF窓の耐性が問題となるが<sup>[1]</sup>、昨年度、クライストロンのRF窓下流側すぐ近くに、ANELVA製8ℓ/sイオンポンプを2台取り付け、耐性を向上させ

た。これは高周波窓付近の真空排気の強化を図ることによって、クライストロンPV-3030A1が、20MW×20μs×12.5Hz（出力電力×パルス幅×繰り返し）の長パルス、高出力運転を可能にした<sup>[1]</sup>。しかしまだ要求する出力電力値を達成できなかった。

そこで、三菱電機製クライストロンPV-3030A3をベースとした、電子銃部、RF窓部、クライストロン真空引き口部の改良を行い、新クライストロンPV-3040Nを製作した。現在使用中のクライストロンPV-3030A1と新クライストロンPV-3040Nの特性の比較、検討を表1、表2、表5に示す。

## 2. 現在使用中のクライストロン

現在使用中のクライストロンPV-3030A1（図1）は、現在までに1号機が約1300時間、2号機が約2237時間運転している。昨年度に行ったRF窓での真空排気強化と長時間にわたるエージングを丹念に行った結果、20MW×20μs×12.5Hzの長パルス動作が可能となった。表1にPV-3030A1の基本特性を示す。

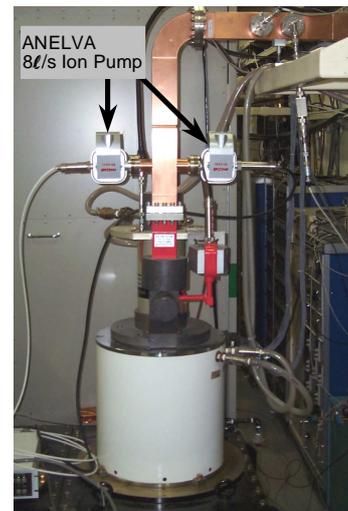


図1：現在使用中のクライストロンPV-3030A1。ANELVA製8ℓ/sイオンポンプを2台取り付けRF窓付近の真空排気強化を行っている。

<sup>1</sup> E-mail: akira28@lebra.nihon-u.ac.jp

表 1 : クライストロン PV-3030A1 の基本特性

動作周波数	2856	MHz
出力電力	33	MW
出力電力利得	51.0	dB
ビーム電圧	250	kV
ビーム電流	278	A
パルス幅	2.5	μs
パルス繰り返し	67	Hz
電力効率	43	%
パービアンス	2.27	μA/V <sup>1.5</sup>
全長	1317	mm

### 3. 新しいクライストロンの製作

#### 3.1 製作の基本方針

既設のヒーターパルストランスを改良せず、そのままクライストロンを交換するのみで使用できるようにするために、クライストロン PV-3030A1 と基本的に同じ寸法であることが望ましい。そこで、同じ寸法で高出力のクライストロン PV-3030A3 をベースに、各部の高性能化、改良を行うこととした。電子銃のカソードには Scandate タイプの含浸カソードを採用し、RF 窓には 50MW 用の大電力 RF 窓を採用した。クライストロン RF 窓周辺の真空排気強化が、クライストロンの長パルス化、高出力を達成した経験から、クライストロン RF 窓上流側の真空引き口を太く、短くして実行排気量の強化をすることにした。

#### 3.2 真空排気口の改良

今まで使用してきたクライストロン PV-3030A1 の引き口は、図 2 に示したように内径 15mm の細い円筒パイプを直角に 2 回曲げて、矩形導波管からおおよそ 250mm 位置に ANELVA 製 8ℓ/s イオンポンプを取付け、クライストロン内部 RF 窓上流側の真空を引いている。矩形導波管とイオンポンプの間のダクトが 15mm と細いため排気コンダクタンスが悪く、RF 窓上流側は実行排気量がおおよそ 1.2ℓ/s と小さい。(ただし曲がっている部分 2 箇所は直線で近似して計算したので実際はもう少し小さい。)



図 2 : クライストロン PV-3030A1 のイオンポンプ引き口の様子。内径 15mm の円筒ダクトを直角に 2 回曲げて ANELVA 製 8ℓ/s イオンポンプへ繋げている。RF 窓上流部の実行排気量はおおよそ 1.2ℓ/s。

そこで一時的に真空が悪くなった場合の回復時間の計算を行った。結果を図 3 に示す。これより PV-3030A1 では定常圧力 ( $10^{-7}$ Pa 程度) から  $10^{-4}$ Pa 程度に真空が悪化した場合、元の真空度付近に回復するのに、おおよそ 3sec かかる。それに対し PV-3040N では、引き口径を PV-3030A1 の約 2 倍、長さを 1/4 にしたことにより、RF 窓周辺での実行排気速度は約 3ℓ/s に増強された。先ほどと同じ条件で計算すると、図 3 の破線のようになり PV-3030A1 に比べ真空度の回復は格段に早くなっている。

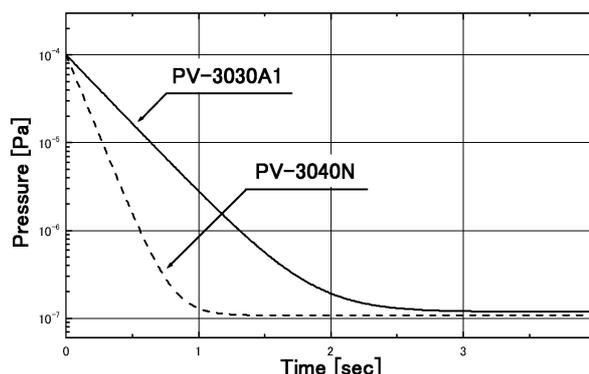


図 3 : クライストロン真空排気強化における真空回復時間の比較。新しいクライストロンの方が 3 倍近く真空悪化時からの回復時間が早い。

#### 3.3 PV-3040N 概観

新クライストロン PV-3040N の概観写真を図 4 に示す。写真を見て明らかのように、真空引き口は太

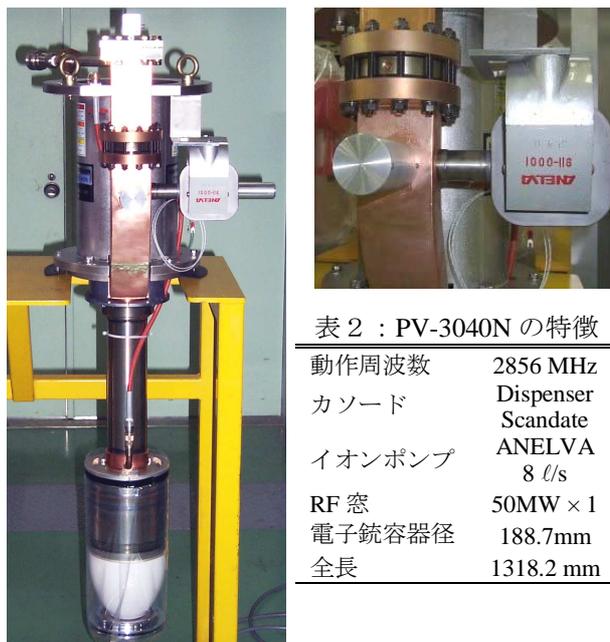


表 2 : PV-3040N の特徴

動作周波数	2856 MHz
カソード	Dispenser Scandate
イオンポンプ	ANELVA 8 ℓ/s
RF 窓	50MW × 1
電子銃容器径	188.7mm
全長	1318.2 mm

図 4 : クライストロン PV-3040N の概観写真(左)。引き口を改良した様子 (右)。真空引き口を PV-3030A1 のときに比べ約 2 倍大きくし、長さを 1/4 に縮めた。

くて短い。一方、電子銃容器外形（188.7mm）、全長（1318.2mm）はほぼ同じ寸法であり、現在のヒータートランスに問題なく取り付けることができる。

## 4. クライストロン PV-3040N の性能試験

### 4.1 入出力特性

新クライストロン PV-3040N の入出力特性の試験結果と現在使用中のクライストロン PV-3030A1 での短パルス時における入出力特性結果を図5に示す。性能試験は表3に示した各パラメーターで行った。

PV-3040N 入出力試験の結果、RF 入力電力 250W に対して 42.3MW の RF 出力電力が得られ、十分な出力値が得られた。

表3：入出力特性試験時の各パラメーター

	PV-3040N	PV-3030A1	
ヒーター電圧	16.8	18.2	V
ヒーター電流	18.0	19.0	A
RFパルス幅	4.0	4.0	μs
繰り返し	50	100	pps
ビーム電圧	286	252	kV
ビーム電流	309	289	A

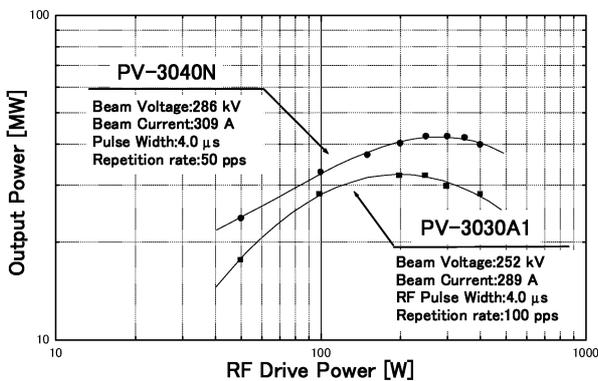


図5：クライストロン PV-3040N の入出力特性(上)、PV-3030A1 の入出力特性(下)。RF 入力電力 250W に対して 42.3MW の RF 出力電力が得られた。

### 4.2 電圧特性

次に PV-3040N のビーム電圧と RF 出力電力の特性、ビーム電圧と電力効率の特性を図6に示す。試験では、表4に示すパラメーターで行った。

表4：電圧特性試験時の各パラメーター

RF 入力電力	250	W
RF パルス幅	4.0	μs
繰り返し	50	pps
ヒーター電圧	16.8	V
ヒーター電流	18.0	A

ビーム電圧が 286kV のとき、RF 出力電力が 42.3MW 得られ、電力効率は 47.9%であった。

新クライストロン PV-3040N 性能試験の結果をまとめたものを表5に示す。短パルスでの性能試験の結果、現在使用中のクライストロン PV-3030A1 に比べ十分な出力特性をもっている。

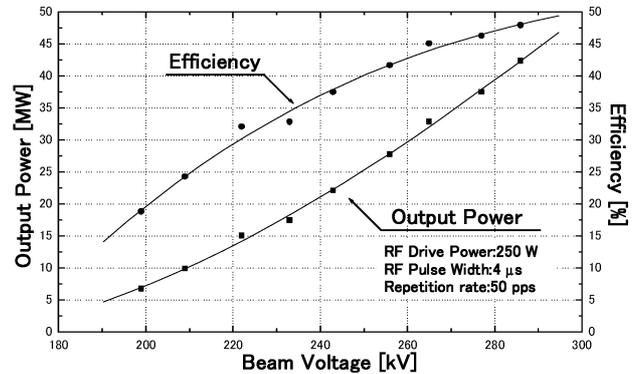


図6：クライストロン PV-3040N のビーム電圧と RF 出力電力の特性(下)と電力効率の特性(上)。

表5：クライストロン PV-3040N の性能試験結果

動作周波数	2856	MHz
出力電力	42.3	MW
出力電力利得	52.3	dB
ビーム電圧	286	kV
ビーム電流	309	A
パルス幅	4.0	μs
パルス繰り返し	50	Hz
電力効率	47.9	%
パービアンス	1.99	μA/V <sup>1.5</sup>
全長	1318.2	mm

## 5. まとめ

新クライストロン PV-3040N は、本格的に長時間にわたるエージングと長パルス、高出力運転を行っていない。しかし現在使用中のクライストロン PV-3030A1 の長パルス、高出力運転化の場合と比較して、短パルス試験の結果から 30MW×20μs×12.5Hz (出力電力×パルス幅×繰り返し) の出力値を達成できる目途がついた。今年度クライストロン交換後、長時間エージングを行い、本格的な長パルス、高出力運転を達成する予定である。

## 参考文献

- [1] T.Sakai, et al., "Improvement of the Long Pulse Operation of the S-Band Klystron", Proceedings of the 25<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, Himeji, July.12-14, 2000, p228-230. URL: [http://www-linac.kek.jp/mirror/www.sprng8.or.jp/JAPANESE/conference/li-me00/proc\\_index.html](http://www-linac.kek.jp/mirror/www.sprng8.or.jp/JAPANESE/conference/li-me00/proc_index.html)
- [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.