

FEL用Sバンド大電カクライストロンの長パルステスト運転

境 武志^{1,A)}、佐藤 勇^{B)}、樋野 雅司^{C)}、吉田 清彦^{C)}、福田 茂樹^{D)}、田中 俊成^{B)}、
早川 建^{B)}、早川恭史^{B)}、横山和枝^{B)}、菅野浩一^{A)}、石渡謙一郎^{A)}、中尾圭佐^{A)}、長谷川 崇^{A)}、宮崎慎也^{A)}

A) 日本大学大学院 理工学研究科

〒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

B) 日本大学 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

C) 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

D) 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1

概要

日本大学FELリニアックのクライストロンRF窓下流側の真空排気強化を2000年度に行い、RF窓表面で放電等が生じたときに起きる真空悪化からの早い回復が可能となり、RF窓の破損を避けることができるようになった。この成果を基に、2001年度に真空排気強化、電子銃、RF窓の改良を行った三菱電機製クライストロンPV-3040Nの製作を行った。三菱電機で行ったテスト運転では、これまで使用していたPV-3030A1と比較して、良好な結果が得られた。2003年に入り、これまで使用していたクライストロン(PV-3030A1)1台をPV-3040Nへ交換し、RFパルス幅20 μ sの長パルステスト運転を行った。RFパルス幅20 μ s、出力電力21.1MW、繰返し5Hzを達成するまでにPV-3030A1に比べ、長パルスでのRFコンディショニングは短い時間で達成した。この結果は改良を行った効果が十分に現れており、丹念にコンディショニングを続けていけば目標値達成が十分期待できると考える。

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設では、KEKとの共同研究の一環として、加速管に供給するRF電力増幅用に、これまでKEKのフォトンファクトリーの入射部で使用していた三菱電機製PV-3030A1クライストロンを移設し、2台使用してきた^[1]。このクライストロンはもともと短パルス用であるため、RFパルス幅を広げて使用することは難しく、クライストロンRF窓の破損を引き起こしやすかった。そこでクライストロンRF窓下流側の真空排気系の強化を行い、窓での放電等で生じたガス放出による真空悪化からの回復速度を向上させることにより、RF出力窓が1つのクライストロンにおいて、RFパルス幅20 μ sという厳しい条件のもとで、RF出力電力20MW、繰返し5~12.5Hzでの運転が実現している^[2,3,4]。これにより、2001年5月に1.5 μ mのFEL発振に成功したが^[5]、もともとのリニアックの仕様では、赤外線から

紫外線領域のFEL発振や、パラメトリックX線放射利用のためにRFパルス幅20 μ sでの運転が要求され、RF出力電力30MW、繰返し12.5Hzで、ピーク電子ビーム電流200mA、最大電子エネルギー125MeVまで加速できるように設計されている。この広いパルス幅がRF窓に大きな負担をかけ、耐久性が十分ではないために、この仕様を満たすRF出力電力値は達成していない。

そこで、クライストロンRF窓下流側の真空排気強化により出力電力を20 μ sのパルス幅で、電力20MW、繰返し12.5Hzを達成できたことから、クライストロン側の真空排気強化も行うことで、さらにRF窓の耐久性を向上させることが可能と判断し、30MW出力達成を目標にクライストロンPV-3040Nを製作した。ここではこれまでの主な真空対策、PV-3040Nクライストロン、およびそのテスト運転結果に関して述べる。

2. PV-3040Nクライストロン

PV-3040Nクライストロンは、これまで使用しているクライストロンアッセンブリータンクを変更せずにクライストロンの交換だけですむよう、これまで使用してきたPV-3030A1と同寸法で、出力電力の高いPV-3030A3クライストロン^[6]の本体をベースに製作を行ったものである^[7]。主な改良点としては、(1)電子銃のカソードはScandateタイプの含浸カソードを使用、(2)RF窓にKEKBで用いられ実績のある50MWクライストロンPV-3050のセラミック材を採用、(3)RF窓上流のクライストロン内部用引き口パイプの内径を大きく、長さを短くして実効排気速度を改善、等が挙げられる。

図1に製作したPV-3040Nクライストロンの概観写真を示す。図1からわかるように、引き口をできるだけ導波管に近い位置に持ってきている。またこの改良により引き口部分の真空排気コンダクタンスはPV-3030A1に比べおよそ17倍大きくなり、実効排気量は約1.2l/sから約3.3l/sになった(気温20℃の場合に換算)。これにより、真空度が一時的に悪化した

¹ E-mail: sakai@lebra.nihon-u.ac.jp

場合でも格段に早く回復することが可能となっている。なお、PV-3040Nクライストロンの最後の文字”N”は、日本大学の英語頭文字にちなんでつけられており、日本大学電子線利用研究施設での使用のために改良・開発されたことを意味している。



図1：PV-3040Nクライストロン外観写真。PV-3030A3をベースに改良している。真空引き口の径を大きく、長さを短くして真空排気能力を向上させ、PV-3030A1（約1.2l/s）に比べ実効排気量はおよそ3.3l/sに増加している（気温20 の場合に換算）。

3. RF 窓下流側の真空排気システム

図2にクライストロンRF窓下流側の真空排気強化後の導波管と各真空排気システムの配置を示す。クライストロンRF窓下流側約40cmの位置にANELVA製8l/sイオンポンプを2台設置し真空排気速度を向上させている。クライストロンRF窓周辺の実効排気量は追加前に比べ、約2.4倍の約17 l/sに増加している^[2]。（気温20 の場合に換算）

クライストロンRF窓の下流側の真空排気系を強化することにより、クライストロンRF窓付近での真空悪化からの回復速度を向上させ、短パルス用クライストロン（PV-3030A1）において、RFパルス幅20 μ sという厳しい条件のもとで、繰返し5~12.5Hz、出力RF電力20MWが実現している。

4. テスト運転結果

4.1 短パルステスト運転

PV-3040Nクライストロンの短パルスでのテスト運転は三菱電機で行った。動作試験は、RF入力電力250W、RFパルス幅4 μ s、繰返し50Hzで行い、カソードビーム電圧286kVのとき、RF出力電力42.3MWが得られ、出力電力効率は47.9%であった。

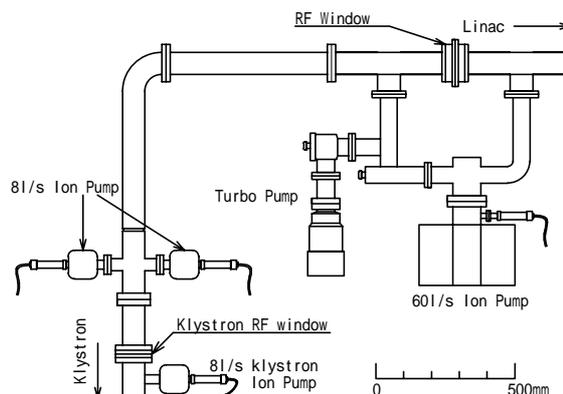


図2：クライストロン下流側の導波管と真空排気システムの配置。クライストロンRF窓下流側約40cmに8l/sイオンポンプを2台設置し、周辺の実効排気量が約2.4倍（約17l/s）に増加している（気温20 の場合に換算）。

表1に得られた各値を、図3に電圧特性のグラフを示す。PV-3030A1クライストロンの出力電力定格は同じRFパルス幅、繰返し等の条件で、30MWである。このことを考慮すると、PV-3040NはPV-3030A1に比べ、出力電力に対するRF窓の耐性に余裕があり、長パルスの厳しい条件でも出力電力を維持できると考えられる。

表1: PV-3040N クラストロンパラメータ

Frequency	2856 MHz
RF pulse duration	4.0 μ s
Repetition rate	50 Hz
Output power	42.3 MW
PV-3040N引き口	Beam 286 kV
voltage	
Beam current	309 A
RF power efficiency	47.9 %
Gain	52.3 dB
RF input power	250 W
Heater voltage	16.8 V
Heater current	18.0 A
Perveance (10^{-6})	1.99 A/V ^{1.5}
Total length	1318.2 mm

4.2 長パルステスト運転

三菱電機には長パルス用のテストベンチが無いため、長パルス（RFパルス幅20 μ s）でのテスト運転は、本研究施設にて行うことになった。

PV-3030A1クライストロンからの交換後、真空リーク等の問題も特に無く、20時間ほどで順調に立ち上がった。三菱電機からの移設後しばらくテスト運転をすることができず、長期にわたり保管していたので、ダイオード動作でクライストロン内壁や、電子銃部分のコンディショニングを約70時間行い、パルス幅30 μ sで、ビーム電圧238.5kV、ビーム電流231A、繰返し5Hzまで達した。その後、RFを入れた

コンディショニングを370時間ほど連続で行った（ベークは行わずRFコンディショニングを行った）。今回の長パルスでのテスト運転では当面の間、RFパルス幅20 μ s、RF出力電力20MWで使用することを目標とし、20MW付近で出力電力効率が最大になるように集束コイルのパラメータ調整を行った。その結果、RF入力電力240W、RFパルス幅20 μ s、繰返し2~5Hz、ビーム電圧214.5kV、ビーム電流203Aで出力電力21.1MWを達成した。それから計算すると、出力電力効率は48.5%となる。図3にPV-3040Nの長パルスでのテスト運転結果を示す（三菱電機で行ったテスト運転の結果も同図に示してある）。またRFパルス幅20 μ sのテスト時の波形を図4に示した（RF電力18.6MW、繰返し2Hz時）。テスト運転からRFパルス幅20 μ sで出力電力20MW、繰返し5Hz動作は特に問題は無かった。

これまで使用してきたPV-3030A1クライストロンでの長パルス運転では、RFパルス幅を20 μ sまで上げ、

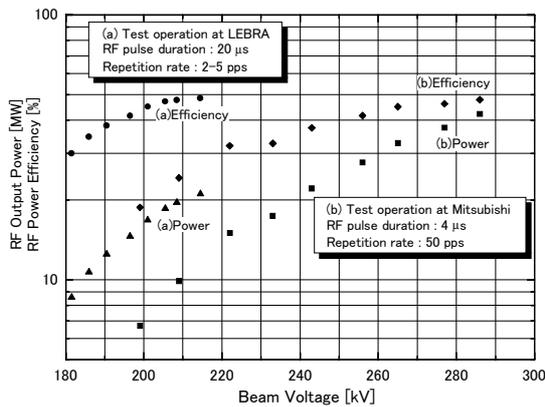


図3：PV-3040Nクライストロン電圧特性。(a)LEBRAで行った長パルス（パルス幅20 μ s）でのテスト運転結果。(b)三菱電機のテストベンチで行った（パルス幅4 μ s）テスト運転結果。

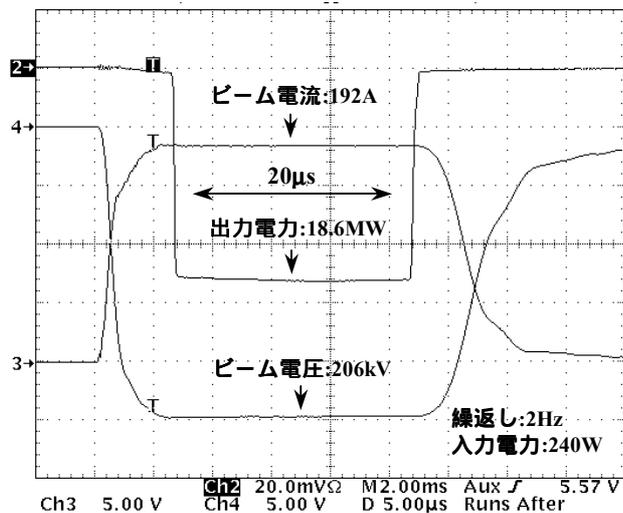


図4：長パルステスト運転時の出力RF電力、ビーム電圧、ビーム電流波形。（RFパルス幅：20 μ s、RF出力電力：18.6MW、繰返し：2Hz 運転時）

出力電力が20MW、繰返しが5~12.5Hzに到達するには千数百時間のRFコンディショニングが必要であった^[2]。しかし、それと比較すると短時間でRFパルス幅20 μ s、出力電力20MW、繰返し2~5Hzを達成したことから、真空排気強化等の改良の効果が十分あったといえ、今後もRFコンディショニングを続けていけば、最終目標値である30MWの達成が十分期待できると考える。

出力電力の安定度等に関しては、2003年3月に、パルスモジュレーター電源の改良を行うことにより、これまでの商用電源変動によっておきていた出力変動の問題が解決し^[8]、またPFNの微調整もPCによって遠隔操作で制御できるようになり^[9]、大きな問題はほぼ無くなってきている。

5. まとめと今後の課題

PV-3040Nクライストロンのテスト運転の結果、RFパルス幅20 μ sで、出力電力21.1MW、繰返し5Hzのテスト運転が可能になった。また、RFパルス幅20 μ sで出力電力20MW、繰返し5Hzでの運転は問題ないことが確認できた。これまで使用していたPV-3030A1にくらべ、RFコンディショニング時間が短かったことから改良の効果が顕著であり、PV-3040NクライストロンはRFパルス幅20 μ s、RF出力電力30MW、繰返し12.5Hz達成への目処が付いたと考えられる。

今後は、目標値である、RFパルス幅20 μ s、RF出力電力30MW、繰返し12.5Hzの達成を目指す。また同時に長パルス動作で安定した出力が得られるようRF窓の改良も行っていく予定である。

参考文献

- [1] T.Tanaka et al., "PERFORMANCE OF THE FEL LINAC AT NIHON UNIVERSITY" Proc. 1st Asian Particle Accelerator Conf. (APAC'98), Tsukuba, Japan (1998) p722-724.
- [2] T.Sakai et al., "Improvement of the long pulse operation of the S-band klystron" Proc. 25th Linear Accel. Meeting in Japan, Jul. 2000, Himeji, Japan, p228-230.
- [3] T.Tanaka et al., "IMPROVEMENT OF THE LONG PULSE OPERATION OF THE FEL LINAC AT NIHON UNIVERSITY" Proc. 2nd Asian Particle Accelerator Conf. (APAC'01), Beijing, China (2001) p743-745.
- [4] T.Sakai et al., " S-Band Klystron for Long Pulse Operation" Proc. The XXI International Linac Conference (LINAC2002), Gyeongju, KOREA (2002) p712-714 URL: <http://linac2002.postech.ac.kr>
- [5] Y.Hayakawa, et al., Nucl. Instr. and Meth. **A 483** (2002) 29.
- [6] S.Fukuda, et al., Nucl. Instr. and Meth. **A 368** (1996) 561.
- [7] T.Sakai et al., "FEL用クライストロンのグレードアップ" Proc. 26th Linear Accel. Meeting in Japan, Aug. 2001, Tsukuba, Japan, p222-224.
- [8] K.Hayakawa, et al., "商用電源変動とビーム不安定性II", 本予稿集.
- [9] K.Yokoyama, et al., "PFNインダクタンスの自動調整システム", 本予稿集