

476MHz AMPLIFIER FOR INJECTOR OF XFEL/SPRING-8

Takeshi Yamamoto^{1,A)}, Izumi Kanai^{A)}, Takao Asaka^{B)}, Yuji Otake^{C)}, Hirofumi Hanaki^{B)}

^{A)} IDX Corp²., 586-113 Ishizuka, Sano, Tochigi, 327-103

^{B)} Spring-8 Joint-Project for XFEL/JASRI, 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5198

^{C)} Spring-8 Joint-Project for XFEL/RIKEN, 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5148

Abstract

XFEL/SPRING-8 (X-ray Free Electron Laser) is under construction at SPRING-8. A 476MHz amplifier supplies rf power to a booster cavity at 476MHz, which is installed in the injector of the XFEL/SPRING-8. The 476MHz amplifier mainly comprises a 2kW pre-amplifier and an Inductive Output Tube (IOT) which generates an output rf power of 120kW (peak) with a 50μs pulse width at a 60pps pulse repetition rate. The intensity of SASE radiation along the undulator section of the XFEL is strongly affected by fluctuation of a peak beam current, which is formed by the velocity bunching process along the injector. Therefore, the high amplitude and phase stability (0.02 deg. (std.) /min and 0.02 % (std.) /min, respectively) of an rf signal outputted from the IOT is needed to guarantee the stable SASE radiation intensity. For this reason, various devices to reduce noise, such as strong noise shielding and employing a low-noise power supply for the error amplifier of high voltage feedback control, was carried out in the 476MHz amplifier. Furthermore, our company (IDX Inc.) executed various measurements to evaluate the noise and stability of the amplifier, and the evaluation test was completed in March 2009, with results which satisfied our requirements, such as an rf amplitude stability of 0.026% (std.) /min and an rf phase stability of 0.014° (std.) /min.

XFEL入射器のための476MHz高周波増幅器

1. はじめに

現在、SPRING-8において次世代放射光源であるX線自由電子レーザー施設(XFEL)^[1]が、平成22年度の完成を目指して建設中である。XFELでは、飛躍的に高い輝度で、かつ極短パルスの空間コヒーレントなX線発生を目的としており、それを実現するための加速器では、エミッタンスが1 mm mradで、3kAの大電流ビームを高安定に供給することが求められている。本加速器の入射部においては、500kV熱電子銃、ビームディフレクタ、238MHzサブハーモニックバンチャ、476MHzブースタ空洞、1428MHz加速管により、ビームパルス幅が1nsから40ps程度まで速度変調により集群・加速がおこなわれる^[2]。その後、3台の磁気パルス圧縮システムにより3kA/30fsまでバンチ圧縮され、Cバンド加速部により8GeVまでのビーム加速がおこなわれる^[3]。

238MHzサブハーモニックバンチャ、476MHzブースタ空洞では2MeV以下の非相対論領域の電子ビームの集群をおこなうことから、ここでの加速電磁場の変動がアンジュレータ内のXFEL発振に敏感に影響を及ぼす。このため、238MHz、ならびに476MHzの空洞電圧強度では0.01%(std.)、時間変動の許容値は120fsの高水準な安定性が要求されている^[4]。時間的に緩やかな変動は、高周波電力・位相帰還制御により安

定化されるが、1分以下、あるいはショット毎の変動は上記の安定度に抑えられなければならない。これを請けて、476MHz高周波増幅器は、徹底した主要回路の温度管理、ノイズ低減のためのシールド強化、防振対策等が施された。

476MHzブースタ空洞のための高周波増幅部は、すでに試験加速器施設にて、表1に示した要求仕様を達成している。今回XFELのための本装置製作においては、更なる安定化のための改良を加え、また保守性を配慮した改善を施した。

表 1: 476MHz高周波増幅器の主な要求仕様

使用周波数	476	MHz
帯域	±2.5	MHz
ピーク出力電力	120	kW
パルス幅	50	μ sec
繰返し周波数	60	pps
増幅率	83	dB
パルス毎の振幅安定度	0.02	%(std.) /min
パルス毎の位相安定度	0.02	° (std.) /min

¹ E-mail: t-yamamo@idx-net.co.jp

² <http://www.idx-net.co.jp/>

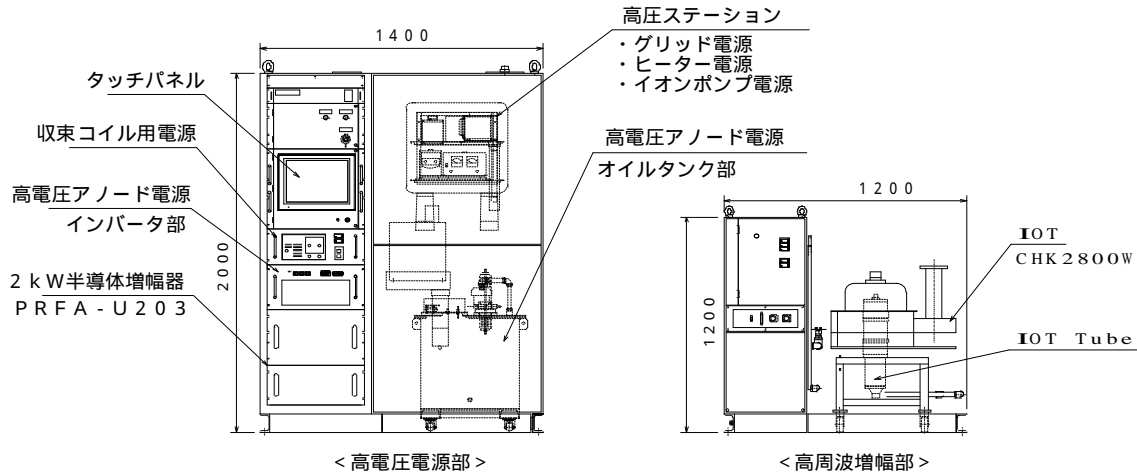


図 1: 476MHz高周波増幅器のレイアウト図

2. 構成

476MHz高周波増幅器は、高電圧電源部、高周波増幅部から構成される。図1に476MHz高周波増幅器のレイアウト図を示す。476MHzのRF基準信号はIQ変調器から1mWピークのパルス電力で入力され、2kW半導体増幅器を介してIOT (Inductive Output Tube) の励振を行う。IOTは、高電圧のIOT用アノード電源から電力が供給され、最大パルス出力120kWを出力する。当然のことながら、極めて高い高周波出力安定性を得るために、これらの構成機器に対しても高い安定性が求められる。2kW半導体増幅器は日本高周波(株)で製作された^[5]。

2.1 IOT

IOTはグリッドを持ち、三極管とクライストロンの特性を併せ持つ電子管で、TV用のUHF帯送信機などに使用されている。クライストロンと比べ効率が良く、入出力のリニアリティが良いことが特長である^[6]。IOTはC級動作も可能であるため、アノード電源にモジュレータを使用せずに、高効率なパルス高周波アンプが構成可能である。

本件では、IOTはCPI/Eimac³製のCHK2800Wを使用した。CHK2800Wは、IOT 本体とキャビティアセンブリのセットとして提供されている。キャビティアセンブリには、2つの調整可能な出力空洞が設けられており、470MHzから860MHzの使用周波数と8MHzまでの帯域幅でチューニングが可能である。

2.2 IOT用高電圧アノード電源

IOTが120kWの高周波パルスを出力するためには、-38kV、6Aの大電力をカソード、アノード間にパルスの必要がある。このため、IOT用高電圧アノード電源は、その出力端にコンデンサバンクを設け、パルス出力している50μ秒間はこのコンデンサバンクからIOTへ電力を供給する。残りの期間で、アノード電源のインバーター方式定電圧充電回路がこのコンデンサバンクに充電する方式とした。

IOT用高電圧アノード電源の電圧安定度は、高周波出力性能に影響することから0.003 % (std.)/minという高い安定度が要求される。この要求性能を満たすために特に次のような対策を施した。スイッチング周波数は33kHzとし、加速器の運転周波数60Hz (商用ライン周波数) に同期する方式とした。電圧検出用プローブの温度特性に配慮して水冷・断熱処理を施した。電圧検出回路は、周波数帯域制御で低ノイズ化が図られた。電圧制御回路をシールドボックスに入れノイズを低減し、この回路の電源には高精度低ノイズの電源を追加し、低ノイズ化を図った。

3. 評価試験結果

3.1 IOTチューニングの結果

IOTの帯域と入出力特性の測定結果を図2、図3に示す。IOTが安定に動作するように帯域幅を±2.5MHzで-0.3dBに調整し、C級に近いAB級とした。120kW (peak) 出力時のIOTの効率は68%であった。

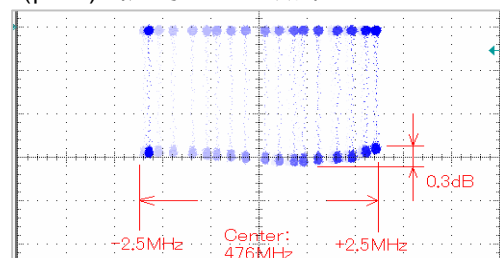


図 2: IOTの帯域 調整結果

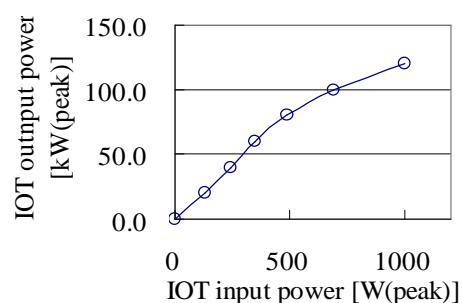


図 3: IOTの入出力特性

³ <http://www.cpii.com/product.cfm>

3.2 IOT用高電圧アノード電源の評価結果

IOT用高電圧アノード電源の電圧安定度は、パルス出力する直前の電圧値を測定して求めた。測定電圧を差動アンプ(LeCroy社製DA1855A)で拡大してオシロスコープ(Tektronix社製TDS5104B)により観測した。差動アンプから得られた出力をサンプリングしてその標準偏差を取得した。測定結果を表2に示す。また、測定時の電圧・電流の出力波形を図4に示す。

表 2: IOT用高電圧アノード電源の電圧安定度

電圧安定度	0.0013	% (std.)/10sec
	0.0014	% (std.)/min
	0.0858	% p-p/24hr/ 9

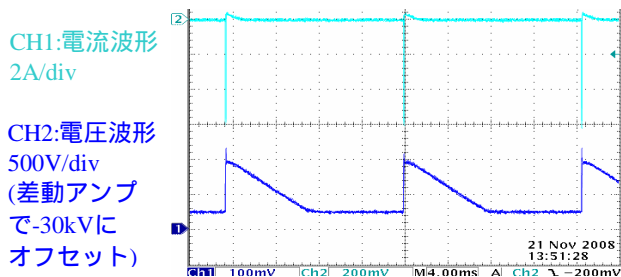


図 4: IOT用高電圧アノード電源出力波形

3.3 高周波出力安定度の評価結果

IOTの高周波出力安定度の測定回路を図5に示す。

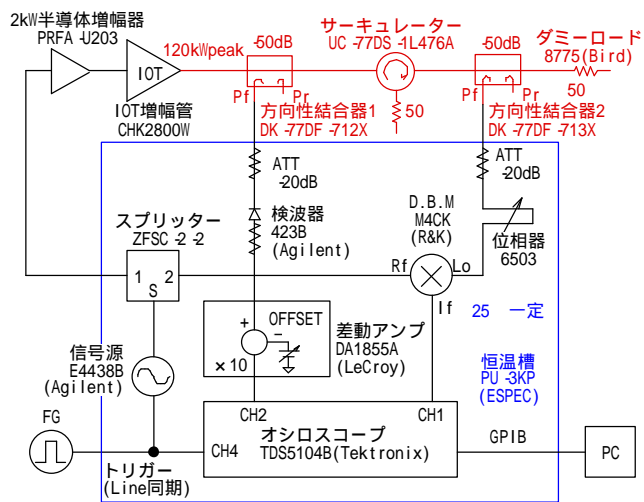


図 5: 出力安定度評価試験の測定回路

環境温度が測定器に影響しないように、測定器を恒温槽に収納した。振幅安定度は、IOTのパルス出力電力を方向性結合器で分波し、得られた検波出力の電圧変動値を記録した。位相安定度は、ダブル・バランスド・ミキサを使用し、出力された位相差に対応した電圧を記録した。10秒間と1分間の短時間の安定度は、これらの測定値の標準偏差値から無出力時のバックグラウンドノイズの標準偏差を差し引いて算出した。

振幅安定度と位相安定度の測定結果を表3に示す。図6には、24時間の安定度の測定結果を示す。測定結果から、長時間の変動は周囲温度の変動にほ

ぼ依存していることがわかる。

表 3: 出力電力の振幅安定度及び位相安定度

振幅安定度	0.0196	% (std.)/10sec
	0.0262	% (std.)/min
	0.95	% p-p/24hr/ 9
位相安定度	0.0077	° (std.)/10sec
	0.0140	° (std.)/min
	0.5	° p-p/24hr/ 9

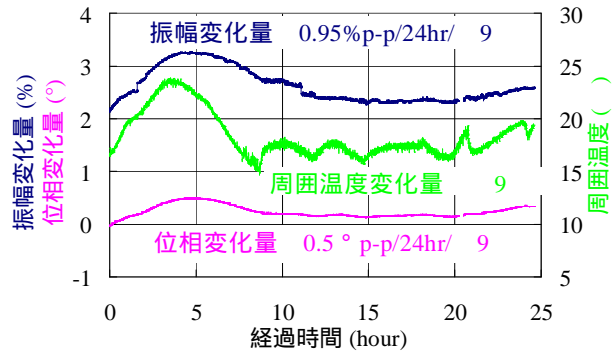


図 6: 24時間安定度の測定結果

4. まとめ

このように我々は、上述した多くの安定化のための工夫によりほぼ要求性能を達成することが出来た。振幅安定度が若干要求性能をオーバーしているのは、本装置の性能というよりも、測定環境や測定のために用意した信号源の性能の限界によるものと考えられる。位相安定度や高電圧アノード電源の電圧安定度は、この測定条件においても要求性能を満足することが出来た。実際に本装置がXFEL/SPring-8にて運転される際には、信号源の安定性が高いことや、周囲温度がより安定していること、などからより正確な測定が出来るものと考えられ、更に高い安定度が期待できる。

5. 参考文献

- [1] T. Shintake, "X線自由電子レーザー計画の概要", in these proceedings.
- [2] H. Hanaki et al., "SPring-8 XFELの入射部システム設計", in Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Higashihiroshima, Japan, 2008 pp. 539-541.
- [3] T. Hara et al., "XFEL/SPring-8ビームパラメータの基本設計", in Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Wako, Japan, 2007 pp. 610-612.
- [4] H. Tanaka et al., "XFEL/SPring-8のバンチ圧縮性能に及ぼすRF機器変動の影響評価", in Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [5] T. Shintake, et al. "高安定ソリッドステート高周波アンプの開発", in Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2005
- [6] H. Bohlen, et al. "IOT RF POWER SOURCES FOR PULSED AND CW LINACS", in Proceedings of LINAC 2004