

## DEVELOPMENT STATUS OF RF SYSTEM OF INJECTOR SECTION FOR XFEL/SPRING-8

Takao Asaka<sup>1,A)</sup>, Takahiro Inagaki<sup>B)</sup>, Hiroyasu Ego<sup>A)</sup>, Toshiaki Kobayashi<sup>A)</sup>,  
Kazuaki Togawa<sup>B)</sup>, Shinsuke Suzuki<sup>A)</sup>, Yuji Otake<sup>B)</sup>, Hirofumi Hanaki<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> JASRI, XFEL Joint Project / SPring-8

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198, Japan

<sup>B)</sup> RIKEN, XFEL Joint Project / SPring-8

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5148, Japan

### Abstract

XFEL/SPring-8 is under construction, which is aiming at generating coherent, high brilliance, ultra-short femto-second X-ray pulse at wavelength of 1 Å or shorter. The injector consists of a 500kV thermionic gun (CeB<sub>6</sub>) without a control grid, a beam deflecting system, multi-stage RF structures and ten magnetic lenses. The multi-stage RF structures (238MHz, 476MHz, 1428MHz) are used for bunching and accelerating the beam gradually to maintain the initial beam emittance. In addition, in order to realize linearizing the energy chirp of the beam bunch at three magnetic bunch compression systems after the injector system, we prepared extra RF structures of 1428MHz and 5712MHz. It is important to stabilize the gap voltage of those RF structures because the intensity of X-ray pulse is more sensitive for a slight variation of the RF system in the injector. We developed some stable amplifiers for those RF structures, and confirmed the amplitude and phase stability of an RF signal outputted from the amplifiers. The measurement results achieved nearly the requirement of design parameters. In this paper, we describe the development status and the achieved performances of RF equipment of the injector section.

## XFEL/SPring-8入射部における高周波システムの開発状況

### 1. はじめに

現在、X線自由電子レーザー施設 (XFEL/SPring-8) は2010年9月の完成を目指して、各機器の製作、据付け調整作業が進められている<sup>[1]</sup>。X線レーザー発振を実現するためには、アンジュレータ入口でピーク電流が3kA、かつ1πmm mrad以下の規格化スライスエミッタンスといった高品質ビームの生成をおこなうと同時に、高水準に安定化されたビーム供給が必要不可欠である。アンジュレータ内のピーク電流、すなわちバンチ内の電子分布がX線レーザー強度を決めることから、ビーム集群・加速に用いる高周波機器の電力・位相に対して、精密制御を可能とし、かつ高度な安定動作を実現することが重要である。

本加速器は図1に示すように、入射部、磁気バンチ圧縮部、主加速部を基本構成とする。入射部において、500kV電子銃で生成される1A/2μsビームは、ディフレクタにより1nsだけ切り出され、238MHzサブハーモニックバンチャ、476MHzブースタ空胴で速度変調によるビーム集群をおこない、2本の1428MHz加速管により30MeVまで加速される。このビーム集群、加速過程でエミッタンス増大は極力抑えられ、入射部出口では、20A/50psビームとなる<sup>[2]</sup>。これ以降のバンチ圧縮は、3台のシケインを使った磁気バンチ圧縮器が使用されるが、これらはSバンド・Cバンド加速部によるビームエネルギーの増加

に応じて配置される。この段階的なバンチ圧縮により、最終的に3kA/300fsの大電流・極短パルスビームを実現する。

効果的なバンチ圧縮を実現するために、入射部のビーム集群過程で生じるエネルギーチャープ非線形性は、1428MHz補正空胴を用いて抑制し、また3台の磁気バンチ圧縮器におけるバンチ圧縮過程の線形化は5712MHz補正加速管によりおこなわれる<sup>[3]</sup>。

高周波安定性においては、ビーム集群空胴と同様、従来の加速器技術レベルの1桁から2桁上回る性能が要求されている。とくに238MHzサブハーモニックバンチャ、476MHzブースタ空胴、1428MHz補正空胴では2MeV以下の非相対論領域のビームに速度変調を与えることから、僅かな高周波変動がアンジュレータ内のX線レーザー発振に対して敏感に影響を及ぼす。上記した空胴群における高周波電力・位相変動の影響はビーム軌道シミュレーションにより評価され、その要求される空胴ギャップ電圧安定度は0.01%(σ)、許容時間ジッターは120fs(σ)と与えられた<sup>[4]</sup>。

時間的にゆるやかな高周波変動は、電力・位相帰還制御により安定化されるが<sup>[5]</sup>、数十秒以下、あるいはショット毎の変動についても上記した安定度を満たさなければならない。これを請けて、高周波増幅部では、速い変動に対する安定化を念頭に置いた設計方針が立てられた。

<sup>1</sup> E-mail: asaka@spring8.or.jp

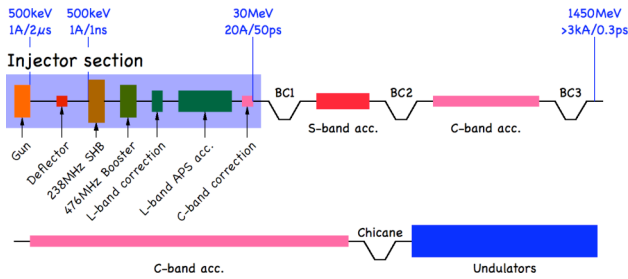


図1 XFEL/SPring-8加速器の概念図

すでに試験加速器施設において、238MHzサブハーモニックバンチャ、476MHzブースタ空胴、ならびにそれぞれの高周波増幅部は、電力・位相安定度とも目標を満足する水準に達していることが確認されているが、実機に向けた同装置の製作においては、さらなる変動要因の除去と長期間運用における耐久性、ならびに保守性を配慮した設計、製作がおこなわれている。また現在製作中である1428MHz補正空胴、1428MHz加速管、5712MHz補正加速管、ならびにこれらの高周波増幅部についても、上記した設計方針を踏襲している。

## 2. 入射部の高周波システム

入射部の高周波系ブロック図を図2に示す。238MHz、476MHz、1428MHz、2856MHz、5712MHzの各高周波基準信号は、低雑音マスターオシレータ、波長多重用光信号送受信機、分配器、IQ変調器を介して各高周波増幅部に入力される<sup>[6]</sup>。各空胴の入力電力・位相調整はVME高速D/A変換器により14ビットの分解能で制御される。また大電力伝送線路に設置さ

れる方向性結合器、ならびに空胴ピックアップモニターポートからの高周波電力・位相検出は、IQ復調器と分解能が14ビットのVME高速 A/D変換器によりおこなわれる。これら低電力高周波制御システムは、低雑音電源により電力供給され、すべてのユニットが $26 \pm 0.2^\circ\text{C}$ で温度管理された内部循環空気水冷型の19インチラックに収納される。

各周波数で使用するすべての半導体高周波増幅器では、温調系の導入、低雑音電源の採用、シールド強化、制御部と電源部の配線経路の分離、筐体の振動抑制等、徹底した安定化対策が施されている<sup>[7]</sup>。

238MHzサブハーモニックバンチャと1428MHz補正空胴には、上述した半導体高周波増幅器から直接、低損失・位相安定化同軸ケーブルを介して高周波電力が供給される。476MHzブースタ空胴には、CPI/EIMAC社製 IOT(Inductive Output Tube, CHK2800W)から同軸導波管を介して高周波電力が供給される。476MHz半導体増幅器はIOTの励振に使用される。1428MHz加速管と5712MHz補正加速管については、半導体増幅器により励振されるクライストロンから真空型矩形導波管を介して高周波電力供給をおこなう。これらの空胴・加速管への大電力高周波電力伝送、および高周波モニター用低電力伝送に使用する低損失・位相安定化同軸ケーブル、または導波管は、冷却水、あるいは断熱材による温度安定化がおこなわれ、常時、 $26 \pm 0.2^\circ\text{C}$ 以内に維持される。

238MHzサブハーモニックバンチャ、476MHzブースタ空胴、1428MHz補正空胴、1428MHz加速管、5712MHz補正加速管に対する高周波電力源の主要パラメータ、ならびに許容安定度を表1にまとめる。

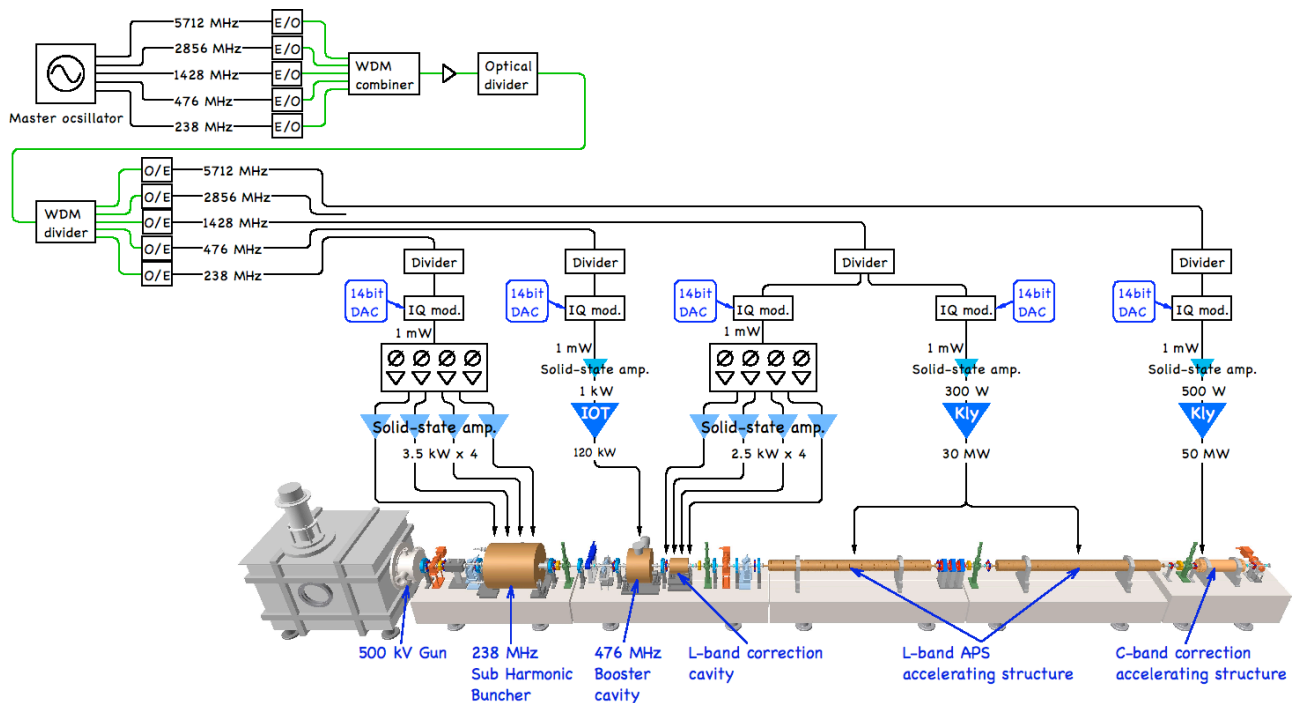


図2 入射部高周波系ブロック図

表1 各高周波増幅器の主要パラメータと許容安定度

Cavity or Structure	SHB cav.	Booster cav.	L-correction cav.	L-APS acc.	C-correction cav.
Frequency	238 MHz	476 MHz	1428 MHz	1428 MHz	5712 MHz
Type of Amplifier	Solid-state	Solid-state + IOT	Solid-state	Solid-state + Klystron	Solid-state + Klystron
Output power $P_{out}$	14 kW	120 kW	10 kW	30 MW	50 MW
Pulse width	100 $\mu$ s	50 $\mu$ s	10 $\mu$ s	6 $\mu$ s	0.5 $\mu$ s
Tolerance of $P_{out}$ stability	$\pm 0.02\%$ ( $\sigma$ )	$\pm 0.02\%$ ( $\sigma$ )	$\pm 0.06\%$ ( $\sigma$ )	$\pm 0.02\%$ ( $\sigma$ )	$\pm 0.2\%$ ( $\sigma$ )
Tolerance of phase stability	$\pm 0.01^\circ$ ( $\sigma$ )	$\pm 0.02^\circ$ ( $\sigma$ )	$\pm 0.06^\circ$ ( $\sigma$ )	$\pm 0.06^\circ$ ( $\sigma$ )	$\pm 0.06^\circ$ ( $\sigma$ )

### 3. 空洞・加速管、大電力高周波システムの製作状況

238MHzサブハーモニックバンチャ空洞と4台の3.5kW半導体高周波増幅器、そして476MHzブースタ空洞、同軸導波管、IOT高周波増幅器と2kW半導体高周波増幅器はすでに製作が完了した。これら完成した機器に対する評価試験では、すべて良好な結果を得ている。

1428MHz補正空洞については、ハーフモデルの製作をおこない、周波数チューナー可変範囲の確認、結合度による周波数、ならびにQ値への影響、電界分布の評価が完了し、実機モデルの製作に着手した。本年12月に完成予定である。本空洞を励振する10kW半導体高周波増幅器の製作はすでに完了し、その評価試験において良好な結果を得ている。

1428MHz加速管は詳細設計が完了し、その性能確認のため、コールドモデルを製作した。ロウ付後の高周波測定では計算と良い一致を示した。加速管、および立体回路で使用する矩形導波管用真空フランジを新たに開発し、真空試験、高周波損失評価ともに良好な結果を得ている。加速管、立体回路は本年12月に完成予定である。30MWクライストロンは株式会社東芝電子管デバイス社にて現在製作中であり、本年9月に大電力高周波試験を予定している。

5712MHz補正加速管は、ロウ付加工前の高周波測定が本年8月に完了し、その後、ロウ付加工、性能評価試験を予定している。50MWクライストロン、立

体回路は、Cバンド加速部で使用する機器と基本仕様は同等である。これらの製作、性能試験は完了している。

### 4. 高周波出力電力・位相安定度の評価

#### 4.1 1428MHz補正空洞用大電力高周波システム

すでに製作が完了した高周波増幅器(238MHzサブハーモニックバンチャ用、476MHzブースタ空洞用、1428MHz補正空洞用)の性能評価試験結果について表2にまとめて示す。3種類の半導体高周波増幅器は日本高周波株式会社にて製作し、またIOTを用いた476MHz大電力高周波システムは株式会社IDXにより製作した<sup>[8]</sup>。上記した高周波システムにおいて動作周波数、出力仕様は異なるが、基本設計思想は同じであり、ここでは紙面の関係上、一例として1428MHz補正空洞用大電力高周波システムの詳細を述べる。

1428MHz補正空洞用大電力高周波システムは、独立に高周波電力・位相調整可能な二連単空洞と4台の2.5kW半導体高周波増幅器で構成される。空洞内で均一な電界分布を得るため、各空洞には2カ所の結合部が空洞外周に対向して配置する。2.5kW半導体高周波増幅器から空洞までの電力伝送は、温度管理された低損失・位相安定化ケーブル(日立電線製HF-20D型)が使用される。

表2 各高周波空洞(238MHzサブハーモニックバンチャ、476MHzブースタ空洞、1428MHz補正空洞)のための高周波増幅器の性能評価試験結果、および出力高周波電力・位相に関する安定度測定結果

Frequency	238 MHz		476 MHz		1428 MHz
Type of amplifier	Solid-state		Solid-state	Solid-state +IOT	Solid-state
Number of amplifier	4		1	1	4
Pulse width	100 $\mu$ s		50 $\mu$ s	50 $\mu$ s	20 $\mu$ s
Repetition rate	60 Hz		60 Hz	60 Hz	60 Hz
Input power	1 mW		1 mW	1 kW	1 mW
Output power	3.5 kW (5.0 kW max.)		2 kW (2.9 kW max.)	120 kW	2.5 kW (3.5 kW max.)
Gain	65.4 dB		63 dB	20.8 dB	64 dB
Stability of output power			0.011%/min. (std.)	0.026%/min. (std.)	0.052%/min. (std.)
Stability of phase	0.02°/10 min. (std.)		0.014%/min. (std.)	0.014%/min. (std.)	0.062%/min. (std.)

#### 4.2 1428MHz 2.5kW半導体高周波増幅器

本高周波増幅器は、電力・位相調整可能な高周波信号4分配器、低雑音電源部、4台の2.5kW半導体高周波増幅部、タッチパネル付き制御部から構成され、高周波増幅部は温度管理された19インチラックに収納される。高周波増幅部内にあるすべての増幅素子はストリップラインで設計された基板上に配置し、この基板は冷却配管がロウ付されたアルミニウム板に固定される。銅板は $26 \pm 0.2^\circ\text{C}$ 以内に温度管理された冷却水により安定化される。この水冷方式は、空冷方式に比べて冷却能力が高いことと、機械振動が低減されるメリットがある。

電源部ではリップルによる変動を避けるため、シリーズレギュレーター方式を採用している。また電源部筐体内にある整流回路は、DCラインとACラインの配線経路を分離するように配置した。整流回路本体はシールド遮蔽をおこない、またレギュレーター制御回路も断熱材付きシールドボックスに収納することで、外乱による影響の低減を図る。この電源部の冷却は電源ユニット後方からファンによる空冷方式となるが、ファンの回転で生じる振動は、その取付け部分にゲルブッシュを挟み込むことで吸収している。長期運用において、空冷ファンの交換がしばしばおこなわれることを想定し、電源ユニットを19インチラックから取り外すこと無く、交換作業が簡易におこなえる構造としている。

#### 4.3 1428MHz 2.5kW半導体高周波増幅器の性能評価

図3には、高周波増幅器からの出力高周波電力・位相の安定度評価で使用した測定系を示す。高周波増幅器の電力測定では、方向性結合器で検波したパルス信号を差動アンプ(LeCroy社製DA1855A)により10倍に拡大することで、測定精度の向上を図る。位相測定は校正されたDBM(Double Balanced Mixer)を使用した。それぞれの信号は、オシロスコープ(Agilent社製DS06054)に入力し、10秒間、1分間の出力変動を測定する。本測定では、電力レベルで1ppm水準の精密測定を実現するため、低雑音電源の使用や接地の強化は当然であるが、環境温度、機器振動に至るまで徹底した状態監視をおこなった。

10秒間の測定では、約500ショットの信号を蓄積し、その変動量の標準偏差を算出する。測定環境における雑音レベルも測定し、これらの二乗差から対象機器に関する正味の変動量とした。図4には2.5kW定格出力時の検波出力電力波形、図5には差動アンプで得られた出力変動、図6にはDBMから得られる位相変動の様子を示す。出力電力変動は0.021%(std.)、位相変動は0.057%(std.)であり、表1に示した要求仕様を満足する水準にある。

長時間運転時の変動測定では、オシロスコープから得られる測定電圧を数秒間隔で読み込み、これと

同時に環境温度、冷却水温度の取得し、その相関を得た。図7に8時間連続運転における出力電力、位相の時間変化を示す。温調ラック内温度、冷却水温度の変化に依存した出力電力、位相変動はあるものの、実機ではこれら周辺設備の変動は抑制され、かつ帰還制御可能な時間成分であるため問題とならない。

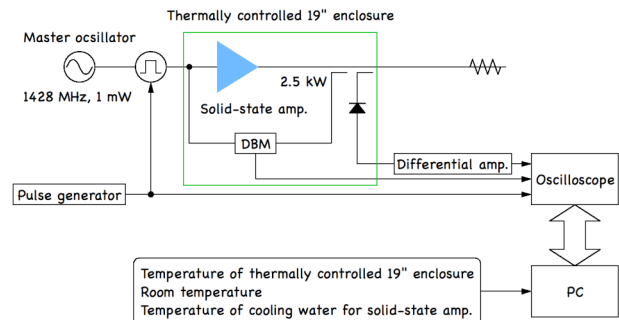


図3 高周波出力安定度測定系ブロック図

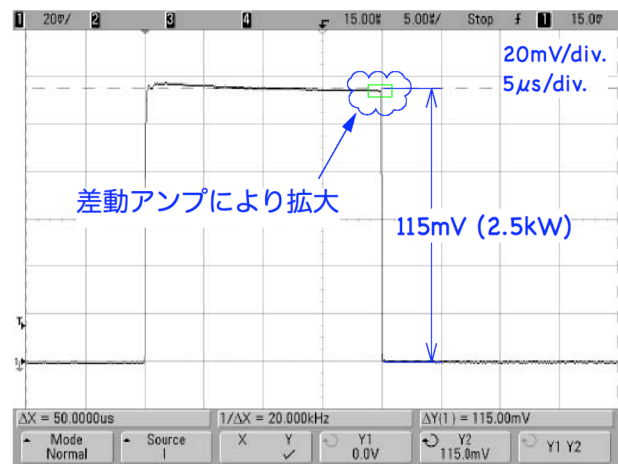


図4 2.5kW半導体高周波増幅器の出力電力波形

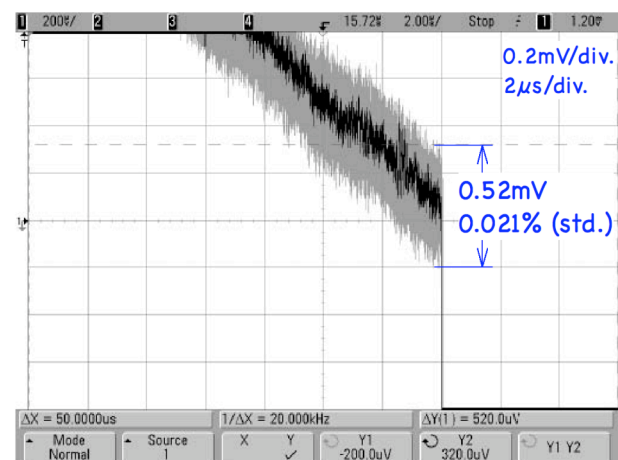


図5 2.5kW半導体高周波増幅器の出力電力変動

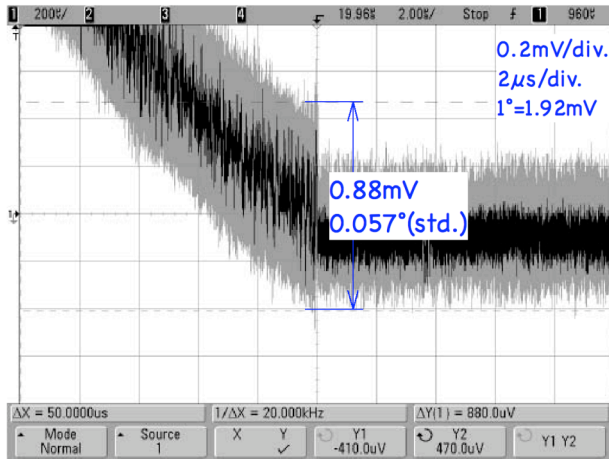


図6 2.5kW半導体高周波増幅器の位相変動

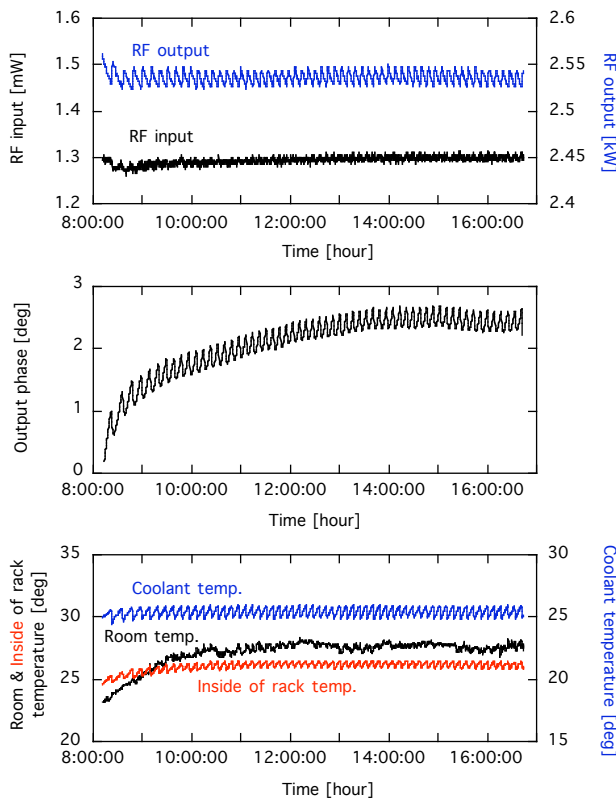


図7 8時間連続運転における出力電力・位相変動

## 5. まとめ

XFEL/SPring-8入射部における高周波システムの構成機器の開発、製作は順調に進んでいる。とくに238MHz、476MHz、1428MHzの半導体高周波増幅器や476MHz IOT用高電圧電源の製作では、試験加速器施設で要求される安定度に到達していることは確認済みだが、XFEL/SPring-8の高い要求安定度を満足するように徹底した雑音低減対策や回路配置の再検討

がおこなわれた。また、長期間の運用を見据えた耐久性、ならびに保守性も配慮した改良が施された。製作した装置に対する高周波電力・位相の精密変動測定では、従来製作したモデルに比べて高周波電力・位相の安定性が向上した結果が得られたものの、XFEL/SPring-8で要求するレベルに対して若干大きい変動量が観測された。この変動原因は、測定に使用した高周波発信器のSSB雑音によるものと考えており、実機で用いる高純度発信器では、本測定の結果より数分の一の変動量に低減可能と考えている。

今後、実機システムにこれら機器を実装し、クライストロン変調器電源など大電力装置の定格動作環境における安定動作確認をおこなう。

## 6. 謝辞

238MHz、476MHz、1428MHzの半導体高周波増幅器の製作においては、日本高周波株式会社第二事業部の永塚賢治氏、鈴木康夫氏をはじめ日本高周波の多くの方々にご尽力いただきました。また476MHz IOT高周波増幅器の製作においては、株式会社IDX技術加速器電源課の金井泉氏、山本岳氏をはじめIDX佐野工場の方々に精力的に取り組んでいただきました。1428MHz用矩形導波管真空フランジの開発においては、理化学研究所XFEL推進本部真空チームの備前輝彦氏、長谷川照晃氏にアドバイス、ご協力をいただきました。上記の皆様方に感謝いたします。

## 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, Wako, Japan, 2007 pp. 613-615.
- [5] H. Maesaka et al., “SCSS試験加速器のRFシステムの高精度化“, in Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Higashihiroshima, Japan, 2008 pp. -.
- [6] T. Oshima et al., “XFELに向けたタイミング・RF制御“, in Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Higashihiroshima, Japan, 2008 pp. 99-101.
- [7] 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, Tosu, Japan, 2005 pp. 314-316.
- [8] T. Yamamoto et al., “XFEL入射器のための476MHz高周波増幅器“, in these proceedings.