

## CONSTRUCTION OF INJECTOR SYSTEM FOR XFEL/SPRING-8

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

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

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

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

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 1Å or shorter. The design goals of the slice beam emittance and peak current at the end of the 8GeV linear accelerator are  $1\pi$  mm mrad and 3kA, respectively. The injector section of the 8GeV linear accelerator generate an electron beam of 1nC, accelerates it up to 30MeV, and compress its bunch length down to 40ps. 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. In this paper, we describe the construction status of the injector section and the RF measurement results of the waveguide circuit for two APS accelerating structures.

## XFEL/SPring-8 入射部の建設状況

### 1. はじめに

SPring-8 キャンパス内において、X線自由電子レーザーのための8GeV加速器が2010年9月末の完成を目指して、建設が進められている<sup>[1]</sup>。本加速器の入射部では、熱電子銃から低エミッタンスビームが生成され、エミッタンス増大を抑制しながら、多段式RF空洞(238MHz、476MHz、1428MHz)によるビーム集群・加速がおこなわれる。

入射部を構成するRF機器(1428MHz APS 加速管1本を除く)、電磁石、ビーム診断装置の製作、および単体試験がすでに終了し、現時点でこれら各機器の精密アライメント設置、真空ビームダクト接続、冷却系への配管接続、圧搾空気配管接続が終了している。また8月には、電磁石・電源間ケーブル敷設、ビーム診断装置の制御ケーブル敷設・調整、RFモニター用ケーブル敷設を完了し、10月からのRFエージング開始を目指して予定通り機器設置作業が進められている。

本加速器は入射部、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熱電子銃で生成される1A/2μsビームは、静電型ディフレクタにより1ns幅で切出され、238MHzサブハーモニックバンチャ、476MHzブースタ空洞、2本の1428MHz APS加速管により50psまでのビーム集群、ならびに30MeVまでのビーム加速がおこなわれる。ここでの速度変調によるビーム集群は、空間電荷効果によるビーム発散力を配慮し、エネルギー増加と共に段階的におこなう。これによりビーム集群・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1πmm mrad以下のエミッタンスで20Aの

ピーク電流に到達する<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バンド加速部に配置される。この段階的なビーム集群をおこなうことで、最終的に1πmm mrad以下、3000Aで、かつ300fsの低エミッタンス・大電流・極短パルス電子ビームを実現する<sup>[3]</sup>。

これまでの加速器でおこなわれている速度変調、および磁気バンチ圧縮器によるビーム集群では、高周波で有限のエネルギー幅を与えることから非線形性を有するバンチ圧縮過程となる。本加速器ではバンチ長に対するエネルギー幅の線形化をおこなうため、速度変調部には、1428MHzの2連空洞をブースタ空洞とAPS加速管の間に設置し、また、3台の磁気バンチ圧縮器における線形化のためにAPS加速管後段に5712MHzの19セル加速管を設置した。これら補正空洞を用いることで、高効率なバンチ圧縮を実現する<sup>[4]</sup>。

### 2. 入射部の建設状況

#### 2.1 加速器収納部の機器設置

加速器収納部内の機器搬入は、加速器最上流部にある搬入扉からおこなわれる都合上、最下流部より設置される主加速部、および磁気バンチ圧縮器の構成機器の搬入が先行しておこなわれた。これらの精密アライメント設置が終了した後、最後に入射部の組立作業がおこなわれた。図1に機器設置が完了した入射部の様子を示す。

本年5月中旬より2ヶ月半の間おこなわれた入射部設置作業について、主な作業項目を以下に述べる。

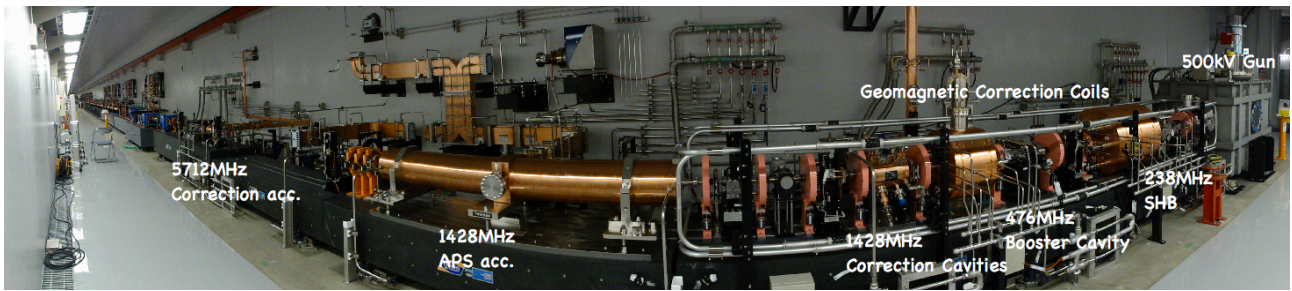


図1 XFEL/SPring-8加速器における入射部の機器設置状況（右側から電子銃パルストランスタンク、238MHzサブハーモニックバンチャ、476MHzブースタ空胴、1428MHz補正空胴、1428MHz APS加速管（1本を除く）、5712MHz補正加速管、電子銃からAPS加速管入口まで地磁気補正コイルを設置）

- 1) ビーム軸上における地磁気測定を実施し、床コンクリート内部の鉄筋による局所的な 0.5G の磁化を確認した。これは消磁器により、0.05G の平滑化された磁場分布となった<sup>[5]</sup>。
- 2) 架台、導波管、真空機器などを固定するためのアンカー打設後、エアパレット浮上機能を有する 6 台の石定盤架台（2m 長\*1 台、2.5m 長\*4 台、1.1m 長\*1 台）は、レーザートラッカー（API 社製 T3）により、水平、垂直、ビーム進行方向に対して 50 $\mu$ m 以内で精密アライメントがおこなわれた。
- 3) すべての RF 空胴は、石定盤架台のアライメントターゲットを用いて、50 $\mu$ m 以内で設置された。また 10 台の磁気レンズ、四極電磁石、プロファイルモニターなどは、石定盤架台のアライメント用加工溝に合わせられた。
- 4) 電子銃のカソード・アノードアセンブリ真空チャンバーとパルストランスタンクは一体型構造である。パルストランスタンク内に絶縁油を充填後、加速器収納部へ搬入、設置された。このアライメント設置精度は 100 $\mu$ m 以内である。
- 5) 電子銃から 1428MHz APS 加速管入口までは 1MeV 以下のエネルギー領域である。この範囲の地磁気によるビームへの影響を補正するため、図 1 に示した地磁気補正コイルを設置した。

## 2.2 クライストロンギャラリー部の機器設置

電子銃システムや RF 空胴励振システムごとに、4 連の 19 インチ制御ラックが合計 20 台備えられた。とくに温度依存性を考慮したタイミング制御システム、ならびに低電力 RF 制御システムは、 $\pm 0.1^\circ\text{C}$  で温度管理された 19 インチラックに収納されている。これら制御システムから各機器への配線もすでに完了している。また真空制御装置、冷却水精密温調系制御システムもラック内への機器設置、配線、動作試験が終了した。

電子銃用変調器電源、476MHz 120kW IOT（Inductive Output Tube, CPI 社製 CHK2800W）電源、1428MHz APS 加速管用 30MW クライストロン変調器電源、5712MHz 補正加速管用 50MW クライストロン変調器電源など、大型電源装置の設置が完了している。

## 3. 1428MHz APS 加速管用大電力システム

### 3.1 大電力立体回路

2 本の 1428MHz APS 加速管へは、30MW クライストロンから 3dB 電力分配器、大電力移相器、RF 波形観測のための方向性結合器を介して、パルス幅が 6 $\mu$ s の RF 電力が 60Hz の繰返し周波数で供給される。加速器収納部内に組上げられた立体回路を図 2 に示す。

2 本の加速管は、ビームトラッキングシミュレーションで得られる最適な RF 位相関係を反映して配置される。また、加速管が定在波型であることから、常時発生する各加速管からの反射 RF 電力は、3dB 電力分配器で合成され、終端負荷で消費されなければならない。これらを両立するために、加速管位置を決定後、各々の加速管までの電気長を等距離とする位置に 3dB 電力分配器を配置した。これにより、各加速管からの反射 RF 電力は、クライストロンに戻ることなく、3dB 電力分配器の入力 RF 電力側と対向面にある終端負荷側に導くことができる<sup>[6]</sup>。



図 2 加速器収納部内に設置された 1428MHz APS 加速システム用立体回路。E ベンド（左上）を介して 30MW の RF 電力が、3dB 電力分配器で各 APS 加速管に供給される。加速管からの反射 RF 電力は 3dB 電力分配器で合成され、終端負荷で消費される。

今回、新規開発した導波管の真空フランジ、ガスケットは、既に S バンド、および C バンドで使用している A-DESY 型を基本構造としている。真空試験モデルを製作し、2mm から 2.2mm の厚さの異なる銅ガスケットを用いて締結後の接続状態を確認した<sup>[7]</sup>。その結果、すべての銅ガスケットで真空性能は満足するものであったが、実機で用いる導波管がマイナス公差で製作されることと、銅ガスケットの厚みを利用して設置位置調整をおこなうことを配慮し、厚さ 2.5mm の銅ガスケットを使用した。

先行して製作した 30MW クライストロンの RF 電力出力部、方向性結合器付き導波管、直接冷却型終端負荷にロウ付けされたフランジは、クライストロン大電力試験の良好な結果とともに安定した動作を実現している<sup>[8]</sup>。

### 3.2 立体回路の反射 RF 電力の許容値

図 3 には、立体回路構成ダイアグラムを示す。3dB 電力分配器の電力分配率  $r$  が完全に等分であり、また 3dB 電力分配器から各 APS 加速管の電気長が等距離で、かつ各構成機器において理想的な VSWR が実現している場合には、加速管で発生する定常的な反射 RF 電力は、終端負荷で消費される。しかしながら実際の機器では、寸法公差、各コンポーネント単体、および接続部で生じるわずかな反射 RF 電力などから、終端負荷での反射 RF 電力消費だけでなく、クライストロンへ戻る RF 電力が生じる。クライストロンの安定動作を実現するために、その反射 RF 電力について、VSWR を 1.2 以下に制限する。このとき、3dB 電力分配器、および大電力移相器、各加速管の各パラメータの許容値を算出した。

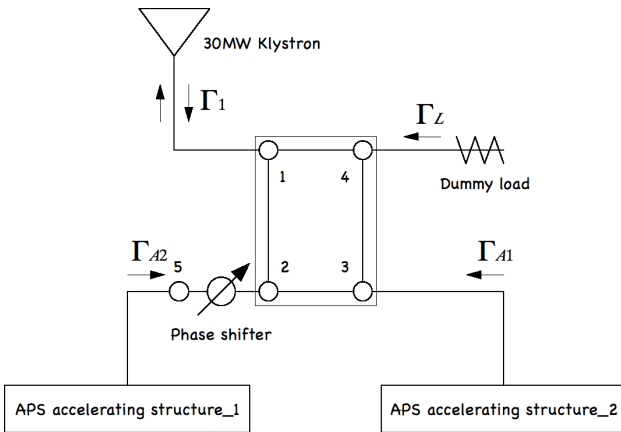


図 3 1428MHz 立体回路ダイアグラム

パルス変調がかけられた RF 電力が定在波型加速管に供給するとき生じる反射電圧  $V_b(t)$  は、

$$V_b(t) \approx \left[ \frac{2\beta}{1+\beta} \left( 1 + 2jQ_L \frac{f-f_r}{f} \right) \left( 1 - e^{j\pi f/Q_L} \right) - 1 \right] e^{j\omega t} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $\beta$  は加速管の結合度、 $Q_L$  は加速管の負荷  $Q$  値、 $f$  は加速周波数、そして  $f_r$  は加速管の共振周波数である。

$n$  番目の加速管への RF 電力入力部における電圧反射係数  $\Gamma_{An}$  は、

$$\Gamma_{An} \approx \frac{2\beta_n}{1+\beta_n} \left( 1 + 2jQ_{Ln} \frac{f-f_m}{f} \right) - 1 \quad (2)$$

で与えられ、さらに 3dB 電力分配器の電力入力部における電圧反射係数  $\Gamma_1$  は、

$$\Gamma_1 \approx \Gamma_h + (1 + \Gamma_p \Gamma_{A2}) \Gamma_{A2} r e^{-2j\theta} - (1-r) \Gamma_{A1} + r \Gamma_p - e^{-2j\theta} \Gamma_L r (1-r) \left[ (1 + \Gamma_p \Gamma_{A2}) \Gamma_{A2} r e^{-2j\theta} + \Gamma_{A1} + \Gamma_p \right]^2 \quad (3)$$

と近似できる。ここで、 $\Gamma_h$  は 3dB 電力分配器の電圧反射係数、 $\Gamma_p$  は大電力移相器の電圧反射係数、 $\theta$  は終端負荷と 1 番目の加速管との電気長である。

本立体回路の場合、終端負荷からの  $\Gamma_L$  は無視できる。したがって、式(3)は  $r$ 、 $\beta$ 、 $f_r$ 、 $Q_L$ 、 $\Gamma_p$ 、大電力移相器の設定位相  $\phi$  を用いると、

$$\begin{aligned} \Gamma_1 \approx & \Gamma_h + (\Gamma_{A2} + \Gamma_{A1}) \delta r + \frac{\partial \Gamma_A}{\partial \beta} [r \delta \beta_2 - (1-r) \delta \beta_1] \\ & + \frac{\partial \Gamma_A}{\partial f_r} [r \delta f_{r2} - (1-r) \delta f_{r1}] \\ & - \frac{\partial \Gamma_A}{\partial Q_L} [r \delta Q_{L2} - (1-r) \delta Q_{L1}] \\ & + (\Gamma_A^2 + 1) r \Gamma_p - 2j r \Gamma_{A2} \phi \end{aligned} \quad (4)$$

に近似できる。取得されたパラメータを式(4)に適用し、それで得られた計算結果を表 1 に示す。クライストロンへの VSWR を 1.2 以下、すなわち、電圧反射係数が 0.1 以下となるための 2 本の加速管の共振周波数差は 2.7kHz である。

表 1  $\Gamma_1 < 0.1$  の場合、算出される許容値

	Tolerance	Measurement
$\Gamma_h$	< 0.025	< 0.013
$\Gamma_p$	< 0.05	< 0.02
$r$	$3 \pm 0.1$ dB	$3 \pm 0.08$ dB
$\Delta f_{12}$	2.7 kHz	Not yet
$\Delta \beta_{12}$	0.2	Not yet
$\phi$	$\pm 7.5^\circ$	$\pm 7.5^\circ$

$$\Delta f_{12} = \delta f_{r1} - \delta f_{r2}, \quad \Delta \beta_{12} = \delta \beta_1 - \delta \beta_2$$

### 3.3 低電力 RF 測定

東芝電力システム社にて製作した直線導波管、E バンド導波管、H バンド導波管、方向性結合器、3dB 電力分配器、大電力移相器について、各機器の単体 RF 測定では、VSWR は 1.05 以下である。

立体回路を構築後、前説で述べた RF 位相関係、ならびにクライストロンへの RF 電力反射レベルを測定するため、図 4 に示す測定系による低電力 RF 測定を実施した。ネットワークアナライザの S11 ポートをクライストロン出力部に設置し、各加速管への入力部には RF 電力反射板 ( $\lambda/8$  校正用 RF 反射治具) を設けた。3dB 電力分配器と第 2 加速管の間には大電力移相器 (可変範囲  $\pm 7^\circ$ ) を設けており、この位相量に伴う S11 ポートへの VSWR 測定をおこなった。取得された結果を図 5 に示す。また、S11 ポートで得られた VSWR の周波数特性を図 6 に示す。

3dB 分配器から各加速管の電気長が等距離になる設計位相の VSWR は 1.1 であった。VSWR が最小となる位相量は設計値より  $-3^\circ$  分だけずれた値に相当している。これは、立体回路を構成する機器の設置誤差、複数あるフランジ接続部で発生するわずかな反射 RF 電力の合成によるものと考えられる。

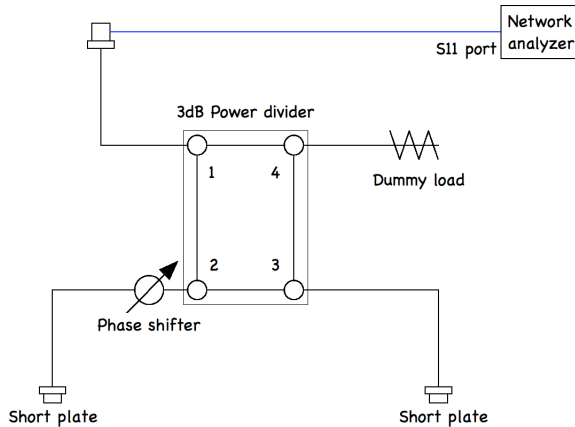


図 4 立体回路の RF 測定系

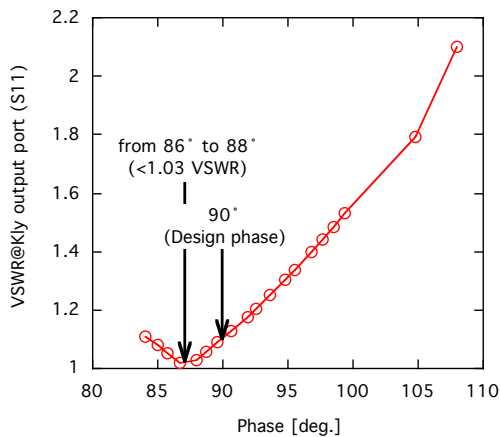


図 5 立体回路における設定位相と VSWR

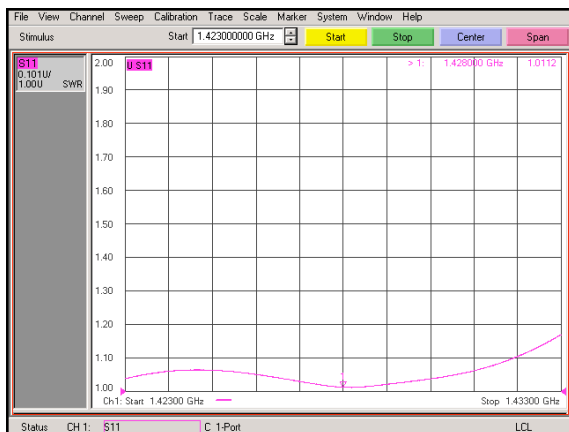


図 6 立体回路における VSWR 周波数特性

#### 4. 今後の予定

本年 5 月中旬より開始された入射部設置は、2 ヶ月半にわたって概ね順調におこなわれた。機器の精密アライメント設置、真空機器の締結、リーク試験、冷却水配管施工、および通水試験、一部機器配線作業が終了している。

現在、残り 1 本の 1428MHz APS 加速管が真空ロウ付けのトラブルで製作の遅延があるが、本年 12 月には納入予定である。また 1428MHz 大電力移相器のプランジャー導入フランジ部分のロウ付け箇所から、真空リークが発生したため、修正加工を施している。

今回、新たに製作した 1428MHz 方向性結合器、ならびに間接冷却型終端負荷の大電力試験、ならびに RF エージングを本年 8 月中旬より開始予定である。さらに大電力移相器においても真空リーク修正加工終了後、本大電力試験装置に導入し、RF エージングを実施予定である。

#### 参考文献

- [1] T. Shintake, et al., “X 線自由電子レーザー計画の進展”, 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 ビームパラメータ基本設計”, in Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Wako, Japan, 2007 pp. 610-612.
- [4] K. Togawa, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 12, 080706 (2009)
- [5] S. Matsui, et al., “XFEL 加速器トンネル内の地球磁場と鉄筋の消磁”, in these proceedings.
- [6] H. Hanaki, et al., “Construction of Injector System for SPRING-8 X-FEL”, in Proceedings of the 1st International Particle Accelerator Conference, Kyoto, Japan, 2010 pp. 1722-1724.
- [7] T. Hasegawa, et al., “XFEL 真空コンポーネントの組立て”, in these proceedings.
- [8] S. Fujii, et al., “XFEL 加速器向け L バンド 30MW クライストロンの開発”, in these proceedings.