

PRESENT STATUS OF THE C-BAND MAIN LINAC IN XFEL/SPRING-8 PROJECT

Takahiro Inagaki^{1,A)}, Katsutoshi Shirasawa^{A)}, Hirokazu Maesaka^{A)}, Chikara Kondo^{A)}, Tatsuyuki Sakurai^{A)},
Takashi Ohshima^{A)}, Hideki Takebe^{A)}, Shinsuke Suzuki^{B)}, Takao Asaka^{B)}, Yoshitaka Kawashima^{B)},
Hiroyasu Ego^{B)}, Yuji Otake^{A)}, Tsumoru Shintake^{A)}

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

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

Abstract

The C-band (5712-MHz) linac is used as the main accelerator of the X-ray free electron laser (XFEL) facility in SPring-8. The C-band linac generates high acceleration gradient. It enables us to construct an 8-GeV linac with 230-m active length. This is suitable size for our XFEL facility. One unit of the C-band rf system consists of following components; two choke-mode-type 1.8-m accelerating structures, an rf pulse compressor, a 50-MW klystron, and a 110-MW compact modulator power supply. We will use 64 units of them for the XFEL accelerator. Since November 2005, we have operated two C-band units in the SCSS (SPring-8 Compact SASE Source) 250-MeV accelerator. After rf conditioning, the accelerating gradient was achieved to 35-MV/m. We successfully accelerated the electron beam by this gradient of the electric field in the SCSS accelerator.

XFEL/SPring-8 Cバンド主加速器部の計画と現況

1. はじめに

XFEL/SPring-8は、波長1 Å以下のX線自由電子レーザー (XFEL) を、2010年までに建設するプロジェクトである^[1]。“Cバンド(5712 MHz)加速器”は、XFEL/SPring-8の“鍵を握る技術”のひとつである。Cバンド加速器は、加速電場勾配が定格で35 MV/mと高い。8 GeVの最終エネルギーを得るのに230 mの有効長で済み、施設全長が700 m。SPring-8内の限られた敷地にちょうど収まるサイズである。

2. XFELのCバンド加速器

2.1 XFEL加速器の構成

図1に、XFELの加速器レイアウト^[2]を示す。上流から、電子銃、入射器、Sバンド加速器と続いた後に、最初のCバンド加速器部が来る。12台のクライストロン、24本の加速管から成り、電子ビームを450 MeVから1.5 GeVまで加速する。この部分ではRFの位相-42度にビームを乗せ、エネルギー勾配をつけて下流側シケイン部 (BC2) にてバンチ圧縮をする。BC2の後は、104本の加速管にてクレスト位相で加速を続け、最終エネルギー8 GeVまで到達する。表1に、Cバンド加速器部の装置数と性能をまとめる。パルス運転の最大繰り返しは60 Hzで、受電ACラインに同期して運転を行う。

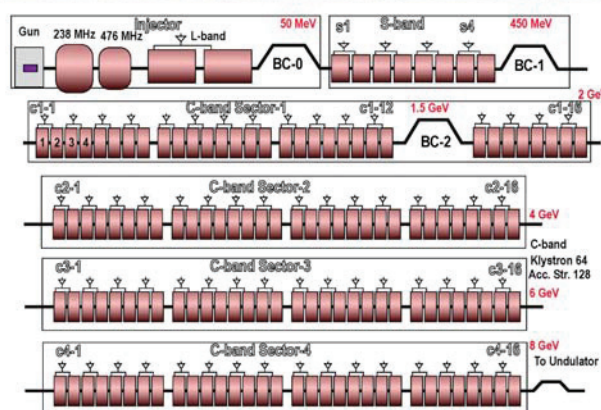
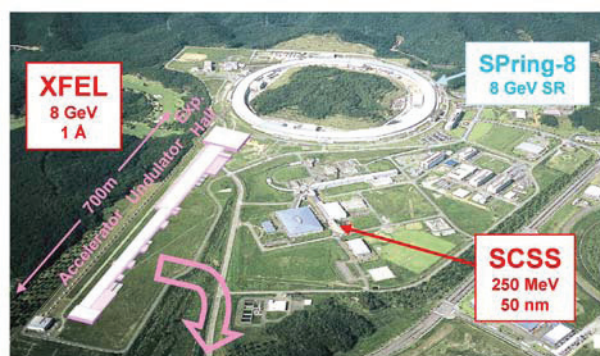


図1 : XFEL/SPring-8建屋の完成予想図と、加速器・加速空洞の構成図。

¹ E-mail: inagaki@spring8.or.jp

表 1 : Cバンド加速器の数量と性能。

	XFEL	SCSS試験機
Cバンド加速管	128本	4本
クライストロン	64台	2台
モジュレータ	64台	2台
加速電場勾配	35 MV/m	28 MV/m 試験時35 MV/m
加速管空洞長	230 m	7.2 m
終端エネルギー	8 GeV	250 MeV
最大運転繰返し	60 Hz	60 Hz
ビーム調整開始	2010年度 (予定)	2005年



図 3 : SCSS試験加速器トンネル内、Cバンド加速管の全景。

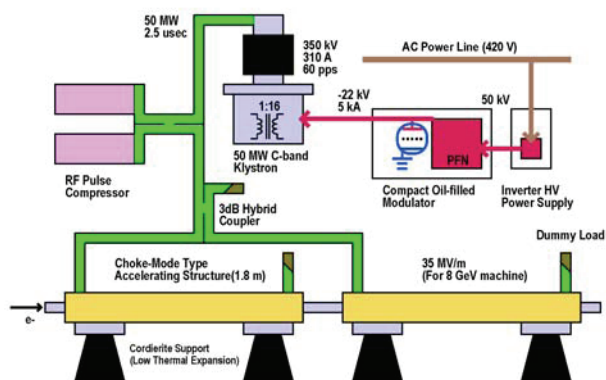


図 2 : Cバンド加速器、基本ユニットの構成。

2.2 CバンドRFユニットの構成

図 2 に、Cバンド加速器の基本ユニットの構成を示す。1ユニットは、以下の装置で構成される。

- (1) チョークモード型1.8 m加速管 2本
- (2) RFパルス圧縮器 1組
- (3) 立体回路 1式
- (4) 50 MWパルス・クライストロン 1台
- (5) 110 MWモジュレータ 1台
- (6) PFN充電用電源 1台
- (7) 半導体RFアンプ 1台
- (8) 低電力RFデジタル変調システム 1式
- (9) 制御、インターロックシステム 1式
- (10) 真空機器 1式
- (11) 冷却水、加速管の精密温調機構 1式

XFELでは、これらを64ユニット用いる。本発表では(1)~(6)の現況を報告する。(8)については発表^[3]を、(9)については発表^[4]を参照のこと。

Cバンド加速器は元々KEKにて、リニアコライダー計画のために開発されてきた^[5]。チョークモード型加速管、クライストロン、導波管コンポーネント、RFパルス圧縮器などが開発された。これら装置開発のお蔭で、XFELにて、大型加速器として初

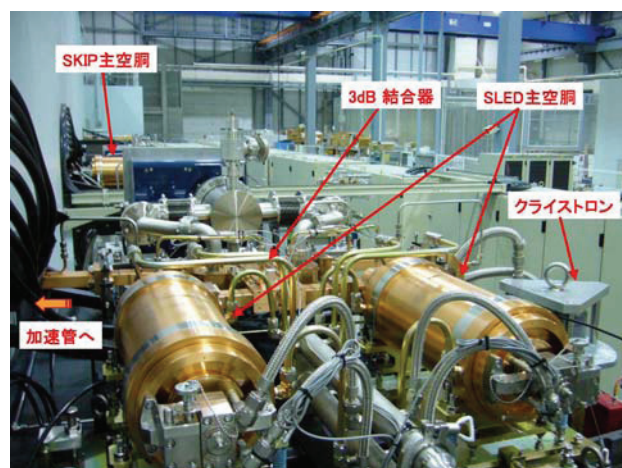


図 4 : RFパルス圧縮器、手前がCB2にて使用のSLED、左奥がCB1にて使用のSKIP。

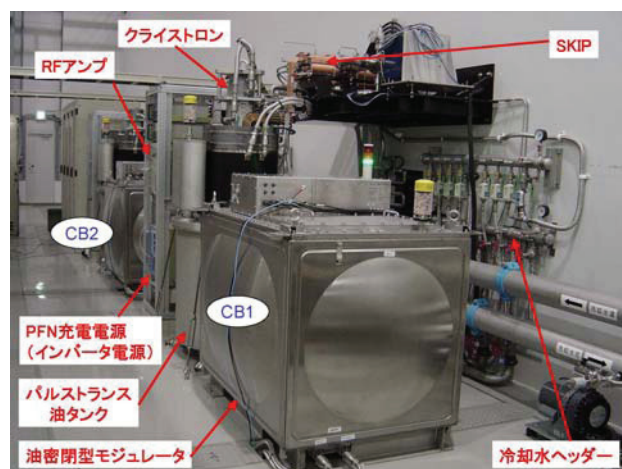


図 5 : クライストロンと油密閉型モジュレータ

めてCバンド加速器を採用することができた。

3. SCSS試験加速器

SCSS (Spring-8 Compact SASE Source) 試験加速器は、SASE増幅によるレーザー発振を実証するために、2005年に建設された。既存の建屋を改造し、全長60 mのトンネルに、エネルギー250 MeVの加速器とアンジュレータ2台を備える。SCSS試験加速器では、2006年に50 nmでのレーザー増幅を達成し、現在まで運転試験を続けている^[1]。また、SCSSはCバンド加速器などXFELで使用予定の各装置の長期運転試験を兼ねている。

SCSS試験加速器の写真を図3～5に示す。SCSSでは、Cバンド加速器を2ユニット使用し、上流からCB1、CB2と呼んでいる。以下の節で、各々の性能と状況について説明する。

3.1 チョークモード型加速管

図3に、加速管の写真を示す。加速管は、全長1.8 m、91セルの $3/4\pi$ モード、準CG進行波管で、平均シャントインピーダンスは54 M Ω /m、減衰係数0.53、充填時間は300 nsecである。特徴は、加速空洞の外側にチョーク構造を持つことで、将来のマルチバンチ運転時にWakefieldを減衰させ、ビーム不安定性を抑制する。この加速管の製作技術は三菱重工業にて確立されており、文献^[6]に詳しく述べられている。

通常の250 MeV運転ではエネルギーに余裕があるので、加速電場勾配は控え目の28 MV/mで運転している。通常運転の合間に、高電界を得るためのRFエージングを行ってきた。2006年末まで延べ500時間のエージングの末、設計値の加速電場勾配35 MV/mまで到達した。ビーム加速試験を行い、実際に35 MV/m (加速管1本あたり63 MeVのゲイン) の電場が得られていることを確認した^[7]。この測定の際は、時々、加速管やRFパルス圧縮器付近で放電を起こし停止をしていた。2007年1月～3月に、更なるRFエージングを行うと、放電頻度は下がってきた。4月には、加速管のビームフランジから内視鏡にて内部を観察し、カプラー空洞等には損傷の無いことを確認した。これら高電界試験の詳細は、文献^[7]にまとめる。

3.2 RFパルス圧縮器

RFパルス圧縮器 (いわゆるSLED) は、高いQ値を持つ2台の主空洞と3-dB結合器から成る。クライストロン出力のパルス幅は2.5 μ secで、2 μ secにて位相反転をする。主空洞に蓄積されたパワーを位相反転後に放出し、加速管に供給する。SCSSでは2種類のRFパルス圧縮器を使用している。写真を図4に示す。

下流ユニットCB2では、KEKにてリニアコライダー向けに開発された^[8]、TE_{0,1,15}空洞を用いたもの

を使用している。Q₀は実測で170,000、 β は8.2。主空洞との結合部に、モードコンバータを有するのが特徴である。モードコンバータは、導波管モード (TE₁₀) から円筒モード (TE_{01x}) モードに変換し、90度対称な4結合孔から主空洞に結合するものである。XFELではこちらのRFパルス圧縮器を採用する。

上流ユニットCB1には、SKIPと呼ばれるTE_{0,3,8}空洞を用いたものを使用している。これはKEK入射器グループが開発したものである^[9]。実測のQ₀は130,000、 β は6.3。

どちらのRFパルス圧縮器も、実際のパワー増倍率 (加速管の充填時間300 nsecの平均を比較) はほぼ同様で約3.8倍である。RFパワーが大きくなると、パルス出力のうち位相反転直後の尖鋭な部分が放電を起こしやすくなる。そこで、低電力RFシステムにて、位相反転部に振幅変調を加え、尖頭を抑えた^[7]。この場合、パワー増倍率は3倍程度となる。

3.3 50 MWパルス・クライストロン

現在、2台のクライストロン (東芝E3746A) を使用している。これまで1500時間運転し、問題なし。

3.4 モジュレータとPFN充電電源

クライストロン用パルス電源として、高電圧部品を油タンクに入れ電磁遮蔽した「油密閉型モジュレータ」を開発してきた^[10]。SCSSでは図5に示すCバンド用2台の他にも、電子銃用、Sバンド用の合計4台のモジュレータを使用している。2003年の試運転以来これまで、サイクロトンの交換1回、EOLダイオードの破損1回、高電圧コネクタの破損2回があったが、初期不良や製作不良に類するもので、深刻な問題とはなっていない。XFELに向けて更に一歩進んで、モジュレータとパルストランスをひとつの油タンクに入れた「一体型モジュレータ」を開発中である。これについては発表^[11]を参照のこと。

PFN充電電源として、インバータ方式の高電圧電源を使用している。最高充電電圧は50 kV、平均充電電流は1.5 Aである。充電電圧のジッタ (パルス毎のふらつき) は、加速器のエネルギー安定度を決める重要な要因のひとつである。XFELのCバンド各ユニットで許される加速電場のジッタは 10^{-4} 、RFの位相ジッタは最も厳しい所で0.1度 (いずれも1 σ) である^[2]。しかし、従来のインバータ方式の電源は 10^{-3} 台のジッタがあった。昨年、新竹とニチコンが開発した、高精度の充電電源を並列に追加し、モジュレータに取り付けた高電圧プローブから電圧フィードバックを取ることににより、ジッタを 10^{-5} (100 ppm) 程度に抑えることに成功した^[11]。この安定度は、XFELでの要求を満たす。今回の開発は既存品の改造であったので、より完成度を上げた量産向け電源を試作試験している。

4. まとめと今後の予定

XFELに向けた実証試験機であるSCSS試験加速器にて、昨年までに35 MV/mの加速電場を得て、電子ビームを加速して確認を行った。この実績より、(1)加速管、(2)RFパルス圧縮器、(3)立体回路、(4)クライストロン については、量産を開始している。

XFELでは、安定なレーザー光を供給するために、電子ビームが極めて安定であることが要求される。この主たる源である(5)モジュレータ、(6)PFN充電電源については、電圧ジッタ 10^{-5} を目指して開発が続けられている。

謝辞

Cバンド加速器は、日本の各メーカーの方々の高度な技術と不断の開発のおかげである。また、SCSS試験加速器の建設から運転に至るまで、多くのSCSSグループメンバー、SPring-8の諸方面の方々に大変お世話になった。KEK入射器グループの方々には、加速管や電源を永らくお借りし、SKIPなど色々な技術アドバイスをいただいた。こうした多くの方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] 新竹積「X線自由電子レーザー建設の現状」本学会WO05.
- [2] 原徹「XFEL/SPring-8のビームオプティックス」田中均「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」本学会TP65,TP66.
- [3] 大島隆「XFELに向けた低電力高周波システムの改良」本学会TP46.
- [4] 白澤克年「XFEL/SPring-8におけるクライストロン制御システム」本学会TP43.
- [5] H. Matsumoto, et. al., "The KEK C-band RF System for a Linear Collider", LINAC'04.
- [6] 三浦禎雄「Cバンドチョークモード型加速管の製作」リニアック技術研究会 2003年WP-31.
- [7] K. Shirasawa, et. al., "High Gradient Tests of C-band Accelerating System for Japanese XFEL Project", PAC'07 (WEPMN-023)
<http://appora.fnal.gov/pls/pac07/toc.htm>
- [8] M. Yoshida, "The Research and Development of High Power C-band RF Pulse Compression System using Thermally Stable High-Q Cavity", 東京大学博士論文 (2003), 吉田光宏「低熱膨張材を用いたC-band RFパルスコンプレッサーの大電力試験」リニアック技術研究会 2003年TP-5.
- [9] T. Sugimura, et. al., "SKIP - A Pulse Compressor for SuperKEKB", LINAC'04, 754-756 (2004).
- [10] T. Inagaki, et. al., "A Compact Oil-filled Modulator for C-band Klystrons", IEEE Pulsed Power Conf.'05.
- [11] 新竹積「XFEL向け高安定高周波電源について」本学会TP41.