

MASS PRODUCTION REPORT OF C-BAND RF PULSE COMPRESSOR

Kazunori Okihira^{1, A)}, Fumiaki Inoue^{A)}, Sadao Miura^{B)},
Hirokazu Maesaka^{C)}, Takahiro Inagaki^{C)}, Tsumoru Shintake^{C)}

^{A)} MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD.

1-1, Wadamisaki-cho 1-chome, Hyogo-ku, Kobe, 652-8585, Japan

^{B)} MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD.

1-1, Itozaki Minami 1-chome, Mihara, Hiroshima, 729-0393, Japan

^{C)} RIKEN / Spring-8

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

Abstract

A C-band rf pulse compressor stores the rf power from a klystron and generates a compressed rf pulse that has higher peak power in order to obtain a higher acceleration gradient. The XFEL project at Spring-8 uses 64 pulse compressor units. In December 2009, we completed the fabrication and RF measurement of these units. A high-power rf test was conducted in the test stand at RIKEN. The peak output power from pulse compressor is 260 MW, and the acceleration gradient of the accelerating structure is achieved to be 40 MV/m.

C-Band RFパルスコンプレッサーの量産結果報告

1. はじめに

X線自由電子レーザー(XFEL)^[1,2]は、光の速度近くまで加速された電子を軌道変化させることにより生じる放射光をコヒーレント化したX線レーザーである。XFELでは電子の加速に主としてCバンド線形加速器^[3]を使用する。クライストロンの出力はC-Band RFパルスコンプレッサーで圧縮され、加速管に送られる。圧縮しない場合に比べて約2倍の加速勾配が得られる。今回はこのC-Band RFパルスコンプレッサー64台の量産結果について報告する。

2. C-Band RFパルスコンプレッサー基本構造

C-Band RFパルスコンプレッサー(パルス圧縮器)は共振空洞、モードコンバータ^[4]、3dB分配器で構成される(図1参照)。クライストロンから出力され

た高周波が3dB分配器で2つの共振空洞に向け半分に分岐され、位相差90度で分配される。モードコンバータでは伝送モードが□TE10から○TE01に変換され、共振空洞で高周波が蓄積、圧縮される。本パルス圧縮器の共振空洞のモードはTE_{0,1,15}で、共振周波数は5712MHz、無負荷Q値の理論値は、銅の場合約190,000である。共振空洞には周波数調整のためのチューニング機構を設けている。表1にパルス圧縮器の基本スペックを示す。スペックを満たすようパルス圧縮器を設計した。

表1: パルス圧縮器基本スペック

構成	共振空洞×2、モードコンバータ×2 集積型立体回路、支持架台
主要材質	無酸素銅 (OFC-CLASS1&2) SUS304, SS400
RFフランジ	A-DESYタイプ
共振周波数	5,712MHz (@30°C、真空)
共振モード	TE _{0,1,15}
Q値	≥180,000
カップリング係数	β=8
VSWR	≤1.10
RF運転条件	入力:50MW、パルス幅:2.5μs パルス繰返し:60Hz
チューニング機構	精密差動ネジ駆動ダイヤフラム方式
集積型立体回路	3dB分配器: 結合度 3dB, 方向性 ≥25dB RFモニタ: 結合度60dB, 方向性 ≥25dB

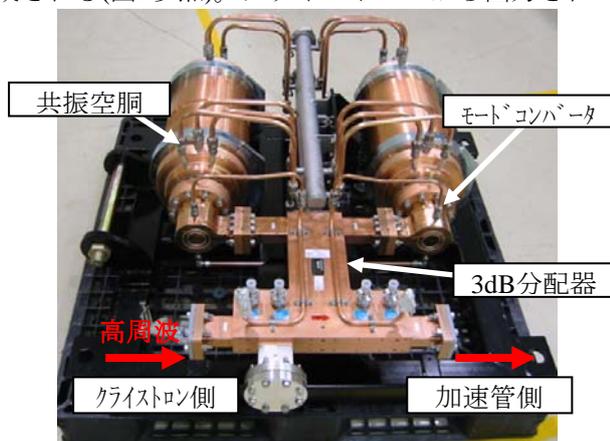


図1: パルス圧縮器

¹ E-mail: kazunori_okihira@mhi.co.jp

クライストロンから出力された高周波を高いピークパワーに圧縮するためには、パルス圧縮器の無負荷Q値が十分高い必要がある。共振空洞には共振周波数の誤差を10kHz以下に収めることが要求される。空洞全長に対する共振周波数の感度は約10kHz/ μm であるため、機械加工のみで目標とする周波数に調整することは非常に困難である。そのため、空洞には周波数を調整するためのチューナを取付ける。チューナには1 μm の分解能が要求される。

3. 量産

パルス圧縮器の製造工程について説明する。共振空洞は各部品の機械加工及び一部部品の単体ろう付け後、全体ろう付け前に仮組み状態で低電力高周波試験を実施し、空洞共振周波数及び無負荷Q値を計測する。計測結果を受けて、空洞胴体の全長のチューニング加工を行う(5712MHz \pm 0.5MHz程度まで機械加工で調整し、精密調整はチューナで行う)。チューニング加工完了後、全体ろう付けを実施し、共振空洞が完成する。

共振空洞同様、モードコンバータ及び3dB分配器を加工/調整・ろう付けを実施し、パルス圧縮器全体組立を行う(図1)。チューナによるRF特性精密調整及び各種検査を実施し、パルス圧縮器が完成する。パルス圧縮器の量産状況を図2に示す。現在パルス圧縮器は64台全数の組立・RF調整が完了している。



図2 パルス圧縮器量産状況

4. RF特性チューニング

図3に製作完了したパルス圧縮器のRF計測・調整結果を示す。パルス圧縮器に取り付けられたチューニング機構により共振周波数とVSWRを調整する。パルス圧縮器の温度を30 $^{\circ}\text{C}$ に保持した状態で、共振周波数を5,712MHz \pm 0.01MHzに調整した。無負荷Q値

(Q_0)は約180,000である。図4に製作完了したパルス圧縮器64台の無負荷Q値計測結果を示す。クライストロンから出力された高周波を高いピークパワーに圧縮する条件として、パルス圧縮器の無負荷Q値が十分高いことが挙げられる。計測したパルス圧縮器無負荷Q値は、全数180,000以上の十分高い値で良く安定している。

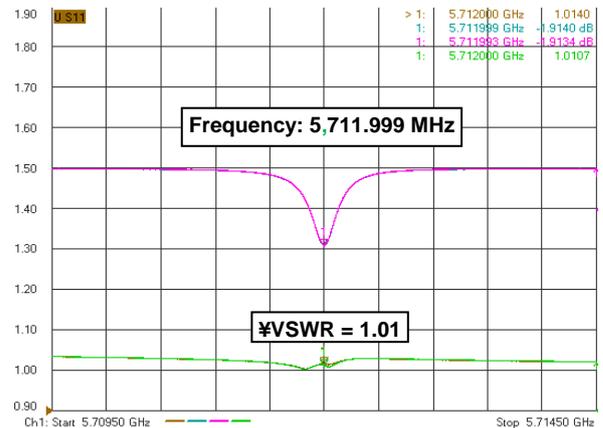


図3：パルス圧縮器RF計測結果

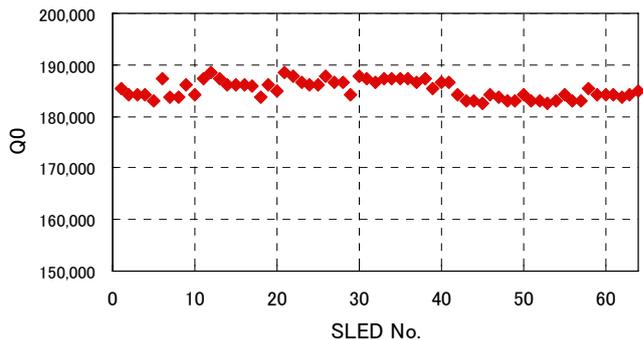


図4：パルス圧縮器 Q_0 計測結果

5. 低電力試験結果

パルス圧縮器に低電力パルス波形を入力し、応答特性を確認した。本試験では、パルス圧縮器は実機据付時と同様に縦吊り状態(壁掛け)とし、3dB分配器上流側フランジから信号を入力し、下流側フランジからの出力をリアルタイムスペクトルアナライザーで計測した(図5参照)。



図5 パルス圧縮器壁掛け

入力波形は2.5 μs 幅の矩形パルス信号で(図6参照)、2.0 μs で位相が180度回転するものである。計測結果、図7に示すパルス圧縮器の出力波形が得られた。電圧増幅率は2.0 μs 後のピーク値で約2.5倍、平均で約2倍となり、シミュレーションと概ね一致する出力結果が得られた。

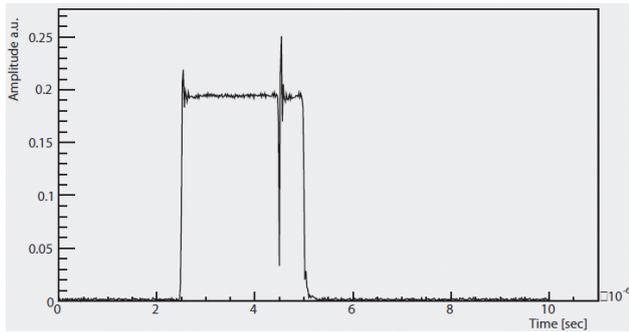


図6：パルス圧縮器入力信号

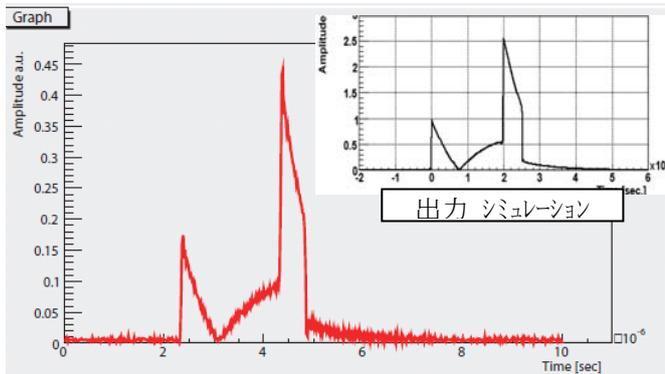


図7：パルス圧縮器応答特性

6. ハイパワー試験結果

理研XFELテストスタンドにて、パルス圧縮器を含めたCバンド加速ユニットの高電界試験が実施された。クライストロンRF出力パワー48MWに対し、パルス圧縮器のRF出力パワーはピーク値で280MWに達している(図8)。また、パルス圧縮器ピーク出力から加速管の最大加速電界を算出すると42MV/m以上に達し、設計パラメータ35MV/mを充分満足する結果となった。

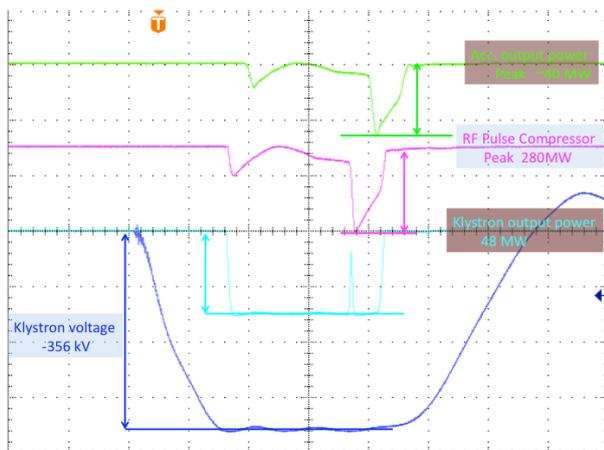


図8：ハイパワー試験結果

7. 据付結果

2009年から理研殿によるパルス圧縮機64台据付が開始、2010年7月全数の据付が完了した。トンネル内にはパルス圧縮機64台がトンネル内壁面に据付けられている(図9)。また、2010年5月よりMHI担当のXFEL最上流に位置する入射部(電子銃~Cバンド補正空洞)据付着手し、7月末に据付工事が完了している(図10、Lバンド等一部機器を除く)。



図9：パルス圧縮器据付状況



図10：入射部据付状況

8. まとめ

Cバンドパルス圧縮機64台全数の製造・計測が完了した。パルス圧縮器のQ値は180,000以上で安定しており、ハイパワー試験では、パルス圧縮器の出力はピーク値で280MW、加速管の加速勾配は42MV/mに達し、設計値を満足する結果となった。

Cバンドパルス圧縮器は、2009年8月より理研殿による据付が始まり、7月末に据付が完了した。また、2010年5月よりMHI所掌入射部据付に着手し、一部機器を除き7月末に据付が完了した。

参考文献

- [1] <http://www.riken.jp/XFEL/>
- [2] T. Shintake et al., "Status of SCSS X-FEL project at RIKEN/SPring-8", Proceedings of 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2005.
- [3] S. Miura et al., "Mass Production of C-Band Accelerator System", Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2008.
- [4] T. Shintake et al., "Development of C-band RF Pulse Compression System for e+e- Linear Collider", Proceedings of PAC97.