

DEVELOPMENT 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

C-band RF compressor is a device that generates high peak RF-power by saving, and compressing the RF-power output from the klystron. In SCSS: The Spring-8 Compact SASE Source, Q-factor of C-band RF compressor is lower than theoretical figure. To improve Q-factor of C-band RF compressor, we changed the production method of C-band RF compressor from Electron Beam Welding (EBW) to the brazing in XFEL: X-ray Free Electron Lasers. As a result, Q-factor of C-band RF compressor has been improved, and it succeeded in the work improvement.

C-Band RFパルスコンプレッサーの開発

1. はじめに

X線自由電子加速レーザー(XFEL)^[1]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レーザーである^[1]。XFELでは電子の加速に主としてCバンド線形加速器^[2]を使用する。クライストロンから出力された高周波を1度C-Band RFパルスコンプレッサーに蓄え、圧縮することにより高いピークパワーの高周波を発生させ、加速管に送る。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、我々はSCSS試験加速器^[3]用に製造されたC-Band RFパルスコンプレッサーの接合方法に改良を加え、高周波出力の効率改善を試みた。

2. 設計

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(3dB)に分配される。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。

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以下に収めることを要求される。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。その機構には2種類のねじを組合せた差動ねじを用いた。

共振空洞の接合にはろう付けを用いる。従来の試験加速器用パルス圧縮器の場合、電子ビーム溶接(EBW)を用いていた。EBW前の共振空洞無負荷Q値は約182000であったが、EBW後無負荷Q値は約175000~179000に低下した。EBWでは局所的な熱歪が生じる、密着性が不十分である、等の問題がある。そのため、無負荷Q値が理論値と比較して小さい値となる。接合方法を改善すればQ値が上がる余地があり、効率を改善できる可能性がある。そこで、我々は空洞の接合にろう付けを採用し、無負荷Q値の改善を試みた。ろう付けの場合、空洞の部品接合部の密着性向上が期待できる。

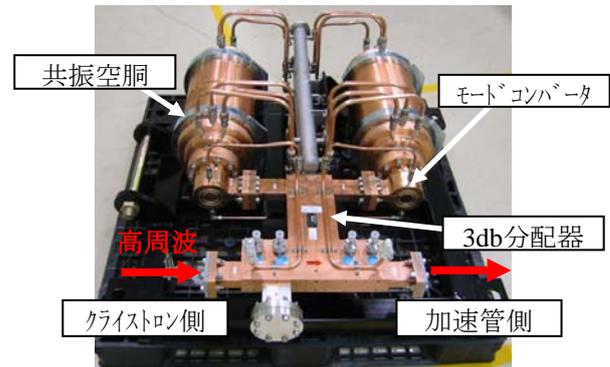


図1: パルス圧縮器

3. 製作

3.1 共振空洞製作

ろう付けによる共振空洞製作フローを図2に示す。

¹ E-mail: kazunori_okihira@mhi.co.jp

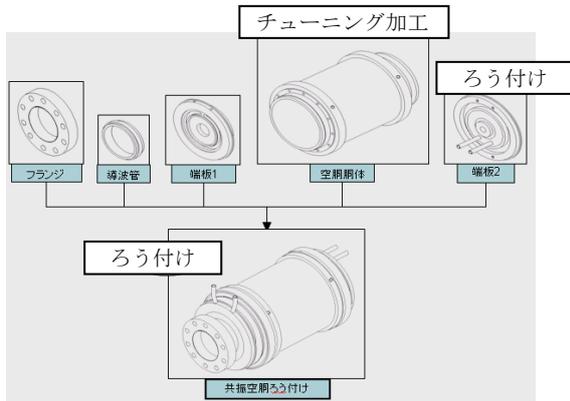


図2：共振空洞製作フロー図

空洞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。前述したとおり、機械加工で空洞共振周波数を目標値まで追い込むことは困難である。そのため、共振周波数がチューナで調整可能な範囲に収まるよう空洞をチューニング加工する(チューナ調整可能範囲は±3MHz程度であるが、ここでは±0.5MHz程度まで機械加工で調整する)。

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(図3参照)。従来のEBW品は、端板1のろう付け、端板2のろう付け、空洞胴体のEBW、共振空洞全体EBWの計4工程が必要であったが、端板2のろう付けと全体ろう付けの2工程に低減できた。



図3：共振空洞ろう付け品

3.2 モードコンバータ製作

空洞胴体と同様、モードコンバータの接合にはろう付けを採用する。ろう付け前には部品を仮組みして低電力高周波試験を実施し、電圧定在波比(VSWR)を計測する。チューニング加工でVSWR調整後、全体ろう付けを実施する(図4)。



図4：モードコンバータろう付け品

3.3 共振空洞ユニット組立・調整

ろう付け完了後、共振空洞、モードコンバータを組合せ、共振周波数の微調整と無負荷Q値



図5：共振空洞ユニット組立



図6：チューナ

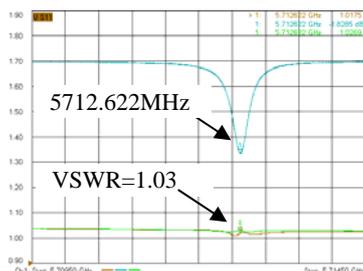


図7：パルス圧縮器RF特性

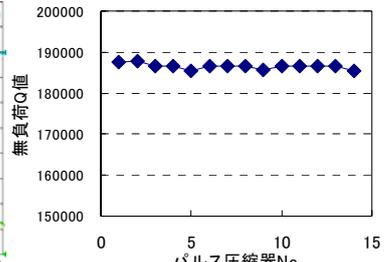


図8：14号機までの無負荷Q値

の計測を実施する(図5)。共振周波数の微調整は空洞端板に取付けたチューナで端板を押し引きする(空洞全長を変化させる)ことにより行う。チューナのねじ1回転で全長50 μ m(周波数500kHz)程度の調整が可能で、目標周波数±10kHzに調整する。本計測は空洞内部を真空引きした状態で実施する。

3.4 パルス圧縮器全体組立・調整

共振空洞ユニット品2体と3dB分配器を架台上で組み合わせ(図1)、最終計測・調整を行う。計測する項目は、共振周波数、無負荷Q値、外部Q値、カップリング係数(β)、VSWRである。ここでは、両空洞に取付けたチューナで共振周波数を一致させ、VSWRを1.1以下に調整する。

4. 低電力高周波試験結果

4.1 共振空洞(ユニット組立品)

共振空洞(ユニット組立品)の試験結果を従来のパルス圧縮器(EBW)の結果と併せて表1に示す。ろう付け前の無負荷Q値は約175,000であるのに対し、ろう付け後の無負荷Q値は約185,000であった。従来のEBWでの値より高く、ほぼ理論値と一致する結果が得られた。また、ろう付けによる接合の場合、密着性の向上と還元作用により、無負荷Q値は接合前と比較して改善される傾向が見られた。

表1. 共振空洞(ユニット組立品)RF試験結果

	EBW前	EBW後	ろう付け前	ろう付け後
無負荷Q値	182000	179000	175000	185000
外部Q値	20400	20700	19100	20000
β	8.92	8.65	9.16	9.25

4.2 パルス圧縮器全体組立品

パルス圧縮器全体組立品の試験結果を図7に示す。共振周波数は5712.622MHzであるが、この周波数は室温下で計測した数値であり、30 $^{\circ}$ C換算値は5712.000MHzである。試験時は共振空洞の物温を同時に測定する。事前にパルス圧縮器に冷却水を流し温度を変えて周波数の温度依存性を測定した結果から、換算値を求めている。無負荷Q値は約186000、VSWRは1.1以下となった。

現在パルス圧縮器は14台完成しており、計測した無負荷Q値は185000以上(図8参照)、VSWRは1.1以下で良く安定している。

5. パルス圧縮器応答特性

5.1 低電力試験

理化学研究所播磨研究所内のテストベンチにて、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



図9 パルス圧縮器壁掛け

ルタイムスペクトルアナライザで計測した(図9参照)。入力波形は $2.5\mu\text{s}$ 幅の矩形パルス信号で(図10参照)、 $2.0\mu\text{s}$ で位相が 180° 回転するものである。計測結果、図11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 $2.0\mu\text{s}$ 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。

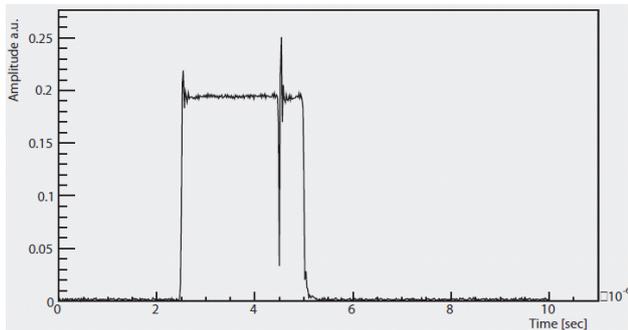


図10：パルス圧縮器入力信号

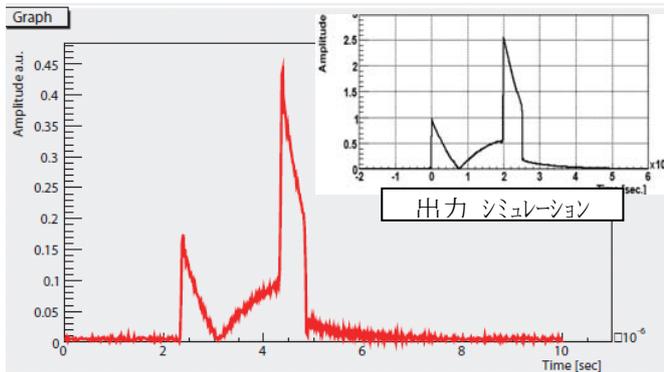


図11：パルス圧縮器応答特性

5.2 高電力試験

現在テストベンチにて、パルス圧縮器を含めたCバンド加速ユニットの高電圧試験を実施している。2008年8月4日現在の状況は、繰り返し 60pps 、パルス幅 $1.5\mu\text{s}$ 、 50MW までパワーが入るようになって

いる。(パルス圧縮器出力のRF波形は図12参照)。現状パルス圧縮器でのガス放出・放電は少なく、それ以外の部分での真空悪化の頻度が高くなっている。今後、パルス幅を $2.5\mu\text{s}$ まで徐々に広げ、パワーを 50MW まで上げる予定である。

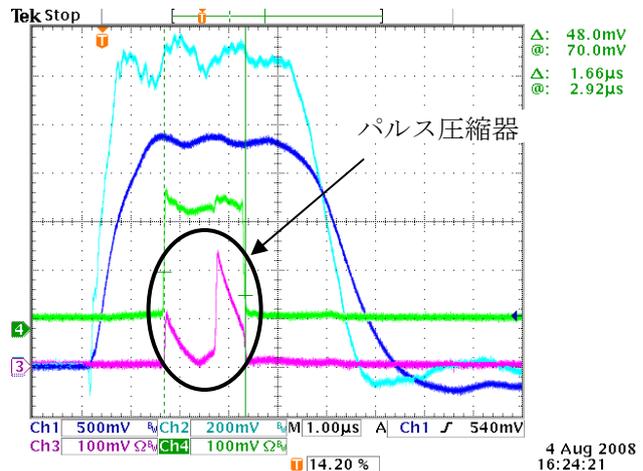


図12：パルス圧縮器高電圧試験結果

6. まとめ

無負荷Q値の改善と接合の工数の低減を目的とし、共振空洞の接合方法をEBWからろう付けに変更した。その結果、無負荷Q値は改善され、また、接合の工数を従来のろう付け2回、EBW2回の計4回から、ろう付け2回のみで低減できた。

XFEL計画では計64台のパルス圧縮器を据付ける予定である。現在、パルス圧縮器14号機までの製作、RF計測が完了し、無負荷Q値は185000以上で安定している。今後、2008年度中に27台、2009年度に23台パルス圧縮器を製作し、2010年に据付が開始される予定である。

参考文献

- [1] <http://www.riken.jp/XFEL/>
- [2] S. Miura et al., "Cバンド加速器システム量産", these proceedings.
- [3] T. Shintake et al., "Status of SCSS X-FEL project at RIKEN/SPring-8", Proceedings of Particle Accelerator Society of Japan
- [4] T. Shintake et al., "Development of C-band RF Pulse Compression System for e+e- Linear Collider", Proceedings of PAC97