

ナノテラス向け C バンド高周波パルス圧縮器の高周波性能

HIGH-FREQUENCY PERFORMANCE OF C-BAND HIGH-FREQUENCY PULSE COMPRESSOR FOR NanoTerasu

奥山恒幸^{#, A)}, 相澤修一^{A)}, 安積隆夫^{B)}, 西森信行^{B)}, 稲垣隆宏^{C)}
Tsuneyuki Okuyama^{#, A)}, Shuichi Aizawa^{A)}, Takao Asaka^{B)}, Nobuyuki Nishimori^{B)}, Takahiro Inagaki^{C)}

^{A)} Nihon Koshuha Co., Ltd.

^{B)} National Institutes for Quantum Science and Technology (QST)

^{C)} RIKEN SPring-8 Center

Abstract

The next-generation synchrotron radiation facility, NanoTerasu, uses 40 C-band disk-loaded accelerators to accelerate electron beams up to 3 GeV. The high power RF supplied to the accelerating tubes is generated by a pulse klystron with an output of 50 MW, and is supplied to the two accelerating tubes after compressing the time width and increasing the peak intensity using a RF pulse compressor. The RF pulse compressor consists of two low-loss cavities and a 3 dB hybrid coupler. Considering the required pulse width (300 ns) and multiplication factor (4x), as well as the installation space and manufacturing cost, the cavities are cylindrical cavities with TE_{0, 1, 20} mode, which are coupled with the H surface of a rectangular waveguide and two coupling holes. A frequency tuner is provided on the end face of the cavity to precisely match the resonance frequencies of the two cavities to suppress RF reflections. This type of RF pulse compressor was first developed at SACLA in RIKEN Harima and is used at SACLA and the NewSUBARU New Injector. In March 2022, the fabrication of 20 similar high-frequency pulse compressors was completed at NanoTerasu, and the measurement results of high-frequency characteristics will be reported.

1. はじめに

次世代放射光施設ナノテラスの入射線形加速器では、C バンドのディスクロード型加速器を 40 本使用し、電子ビームを 3 GeV まで加速する [1, 2]。パルスクライストロンにて生成される 50 MW の高周波出力は、高周波パルス圧縮器を使用して時間幅を圧縮しピーク強度を高めた後、2 本の加速管に供給している。このタイプの高周波パルス圧縮器は、最初に理研播磨の SACLA にて開発され、SACLA および NewSUBARU 新入射器にて使用されている [3, 4]。ナノテラスでも、同様の高周波パルス圧縮器を 20 台製作したので、高周波特性の測定結果を報告する。

2. 高周波パルス圧縮器の構成

C バンド高周波パルス圧縮器は 2 台の低損失空洞と 3 dB ハイブリッドで構成される。(Fig. 1 参照)クライストロンからの高周波出力は、3 dB ハイブリッドを通して 2 個の低損失空洞に蓄積させた後、高周波の位相を 0 から π に反転させることにより空洞に蓄積した高周波が取り出され、3 dB ハイブリッドの下流側では、もとのクライストロン出力の約 4 倍のピーク電力が得られる。パルス圧縮器の設置スペースや空洞製作の容易性より、低損失空洞の共振モードは TE_{0,1,20} を選択した。共振周波数は、5.712 GHz で無負荷 Q 値の理論値は 220,000 程になる。低損失空洞との結合は、矩形導波管の H 面と 2 つの結合穴で結合する方式とした。低損失空洞の端面には周波数チューナーを設けている。パルス圧縮器の圧縮効率を高めクライストロンへの戻り電力を減らすには、2 台

の空洞の共振周波数を精度よく合わせる必要がある。そこで低損失空洞の端面には、10 kHz の精度で周波数を調整できる周波数チューナーを設けた。端板をダイヤモンド構造にし、中央に差動ネジを用いた押し引き構造を設けて端板を変形させることで周波数を調整する。作動ネジ 1 回転あたりの移動量は 50 μm とし、この時の周波数変化は、約 0.4 MHz とした。作動ネジはがたつきを極力抑えるため個々に組み合わせ加工を行った。Table 1 に C バンド高周波パルス圧縮器の仕様を示す。

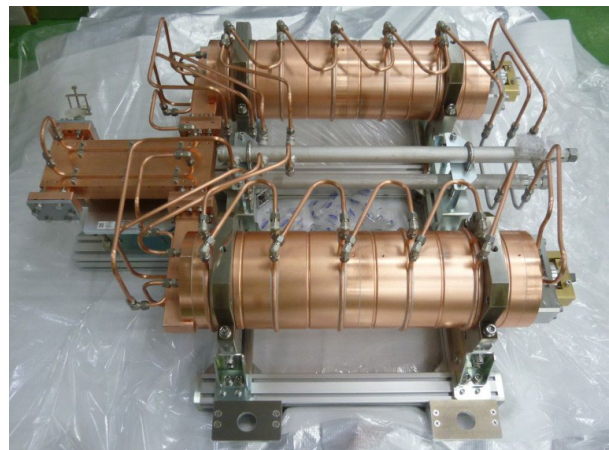


Figure 1: External view of the pulse compressor.

okuyama@nikoha.co.jp

Table 1: Specifications of the Pulse Compressors at NanoTerasu

| | |
|-------------------------|---|
| Frequency | 5.712 GHz |
| Resonance mode | TE 0, 1, 20 |
| Q factor | $\geq 180,000$ |
| β | 11 ± 1 |
| VSWR | ≤ 1.10 |
| RF operating conditions | Input: 50 MW, 2.5 μ s Output: 350 MW[peak] Repetition: 25 pps |

3. 高周波特性とチューニング

3.1 Q 値の測定結果

低損失空洞は、個々においてロー付け前に仮組みにて共振周波数を確認し、端板を追加することで空洞長を変えて共振周波数の調整を行っている。真空ロー付け後には、チューナーを取り付けて共振周波数の微調整を行い、また Q 値や結合度 β の確認を行っている。NanoTerasu で使用する 40 台の空洞の無負荷 Q 値と結合度 β の測定結果を、Fig. 2、Fig. 3 に示す。各空洞の個体差は少なく、いずれも仕様どおりに製作できていることがわかる。また、周波数チューナーの差動ネジを回転させたときの共振周波数の変化の例を、Fig. 4 に示す。ここではプラス側に回転させたときとマイナス側に回転させたときの両方をプロットしているが、ほぼ重なって見える。このことより差動ネジ部のバックラッシュは十分に小さく、周波数の調整に問題無いことが確認できた。

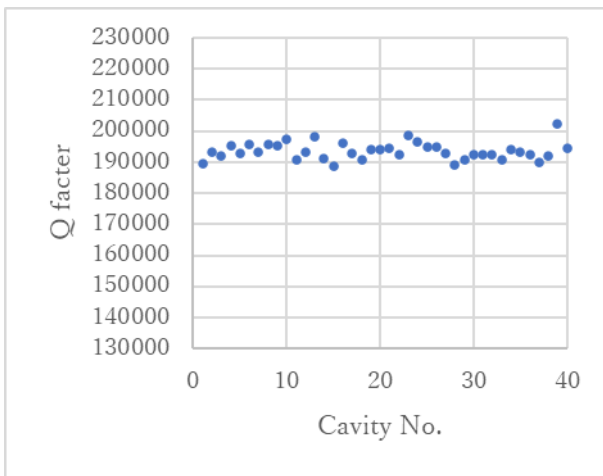


Figure 2: Q factor for each cavity.

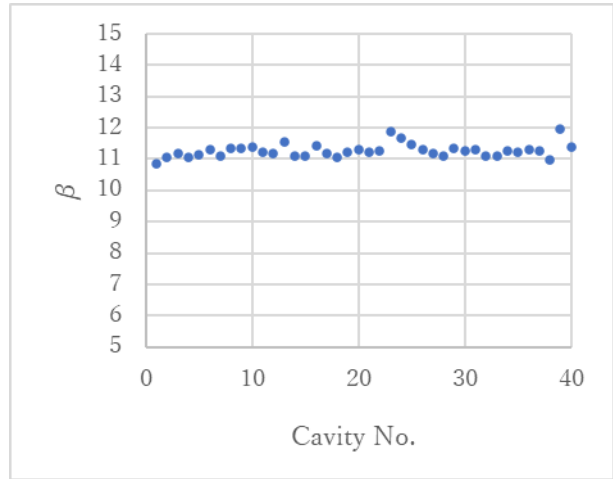


Figure 3: Coupling coefficient β for each cavity.

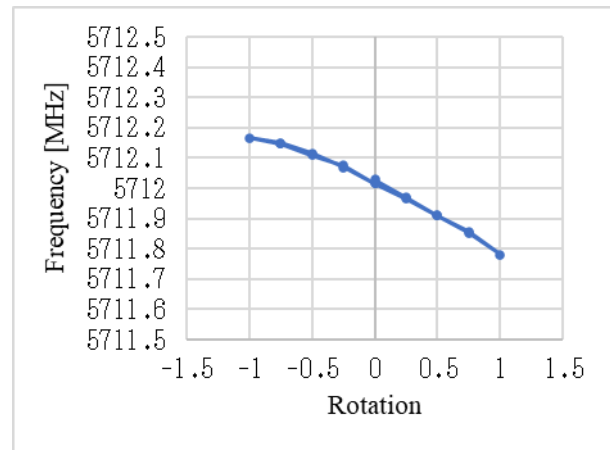


Figure 4: Frequency change per rotation of the frequency tuner.

3.2 パルス圧縮器としての高周波特性

3 dB ハイブリッドと低損失空洞 2 台を組み立てた後、空洞内部を真空引きし 28 °C の冷却水を通水した状態で空洞の最終調整を行った。2 台の空洞の周波数チューナーを調整した。調整後の VSWR の測定例を Fig. 5 に示す。20 台のパルス圧縮器は、すべて 1.05 以下(平均 1.033)となった。組立調整後のパルス圧縮器 20 台の無負荷 Q 値を Fig. 6 に結合度 β を Fig. 7 に示す。Q 値、結合度 β ともに標準偏差で $\pm 1.2\%$ と安定した結果が得られた。パルス圧縮器としても個体差は少なく、設計通りの特性が得られていることがわかる。チューナーの固定後には、真空-大気開放の繰り返しや衝撃により特性が変化しないことを確認している。真空-大気開放を繰り返した時の共振周波数と VSWR の再現性を Fig. 8 に示す。空洞の塑性変形やチューナー部のずれは見られず、高周波特性をよく再現していることがわかる。

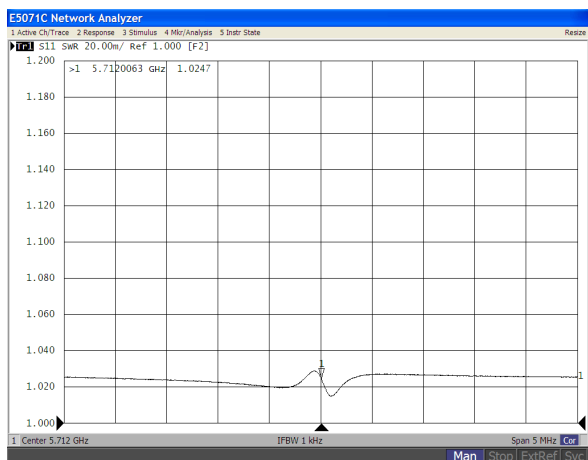


Figure 5: Example of the VSWR characteristics.

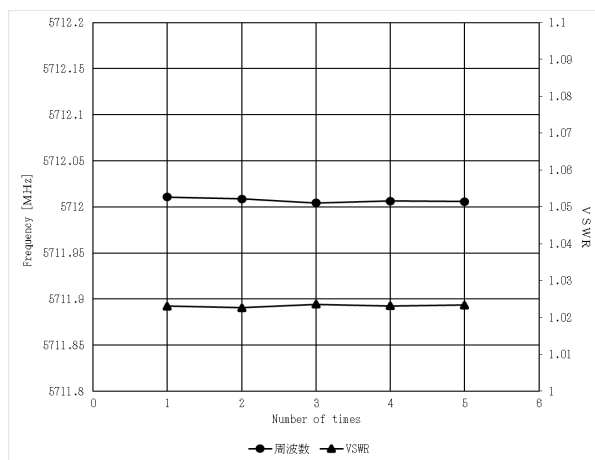


Figure 8: Example of change in resonant frequency and VSWR when vacuum was repeatedly pulled and opened to the atmosphere.

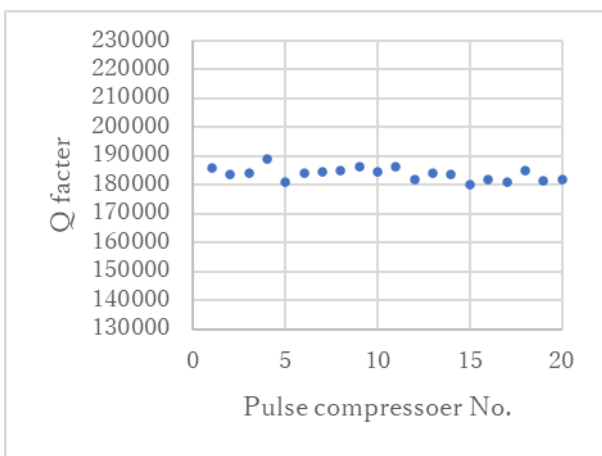


Figure 6: Q factor for each pulse compressor after assembly.

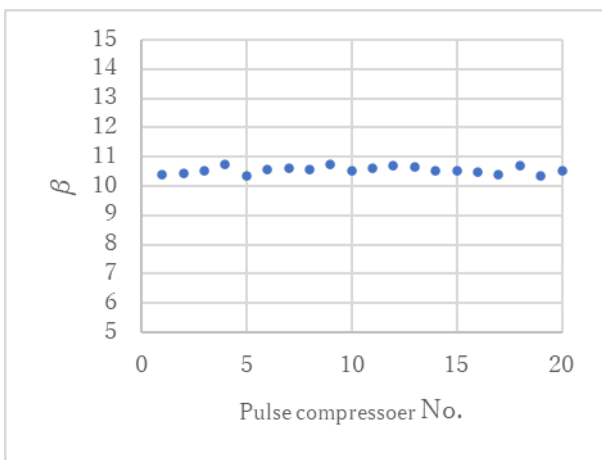


Figure 7: Coupling coefficient β for each pulse compressor after assembly.

3.3 パルス圧縮応答特性

パルス圧縮器にローレベルのパルス高周波を入力しパルス応答特性を確認した。シグナルジェネレータにて 3 dB ハイブリッドの入力ポートへ 5712 MHz のパルス高周波を入力し、出力ポートにピークパワーメータおよびオシロスコープを接続して測定した (Fig. 9 参照)。実機での使用を想定しパルス高周波のパルス幅は 2.5 μ s とし、2 μ s にて位相反転をすることとした。出力ポートの波形を Fig. 10 に、出力ピーク電力と先頭から 300 ns の平均電力の増倍率を、Fig. 11 に示す。増倍率は 5712 MHz で最大となりピーク電力の増倍率は 5.19 倍、300 ns の平均電力は 3.63 倍となった。これらは、設計値と良く一致している。

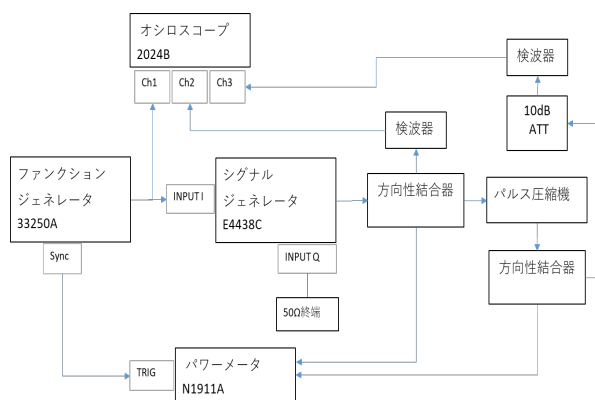


Figure 9: Block diagram of the pulse compression measurements.

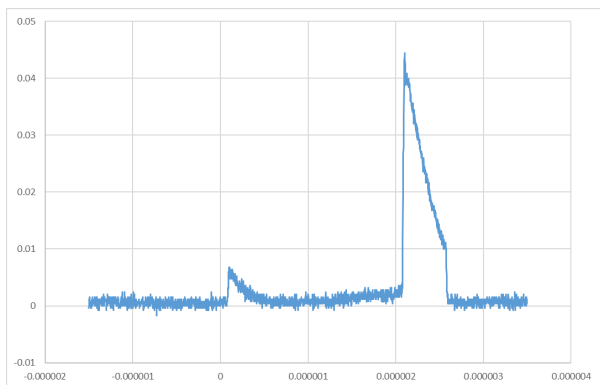


Figure 10: Waveform after the pulse compression, measured by an oscilloscope.

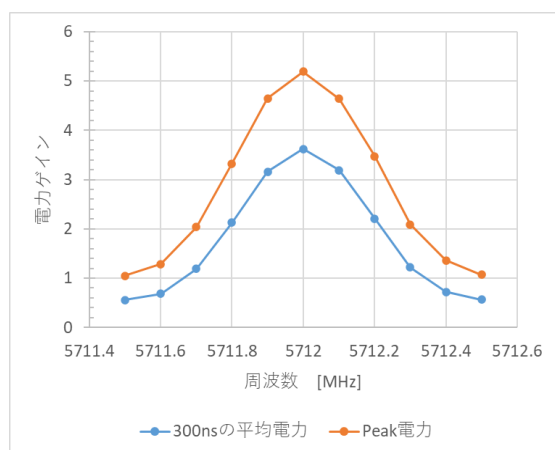


Figure 11: Power gain of the pulse compression, as a function of the drive frequency.

4. まとめ

ナノテラスの入射線形加速器で使用するため、TE_{0,1,20} モードの低損失空洞を用いた C バンドのパルス圧縮器を 20 台制作した。パルス圧縮器としての測定結果では、Q 値、結合度 β ともに標準偏差で $\pm 1.2\%$ と安定した結果が得られた。パルス圧縮器 20 台は、2022 年 3 月にナノテラスへ納入され、加速器に設置された後、2023 年 2 月からの運転にて使用されている。いずれのパルス圧縮器も所定の電力で運転され、問題は生じていない。

謝辞

本パルス圧縮器の測定に際し、御協力戴いた関係者各位に感謝いたします。

参考文献

- [1] <https://www.nanoterasu.jp/>
- [2] N. Nishimori *et al.*, “3GeV 次世代放射光施設の加速器システム”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan July 31 - August 3, 2019, Kyoto, Japan

- [3] T. Inagaki *et al.*, “次世代放射光リングの入射器として使用する C バンド加速器の機器設計と開発状況”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan July 31 - August 3, 2019, Kyoto, Japan.
- [4] T. Inagaki *et al.*, “ニュースバル新入射器における C バンド主加速器のコンディショニングと運転状況”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 9 - 12, 2021, QST-Takasaki Online, Japan.