

## 加速空洞立ち上げ時の周波数変調システム

### FREQUENCY MODULATION SYSTEM USED FOR STARTING UP DURATION OF THE ACCELERATING CAVITIES

大島隆<sup>#, A,B)</sup>, 細田直康<sup>A,B)</sup>, 岩井瑛人<sup>A,B)</sup>, 上島考太<sup>C)</sup>, 高橋隼也<sup>C,D)</sup>, 青木駿堯<sup>C,D)</sup>, 吉岡正倫<sup>E)</sup>  
Takashi Ohshima<sup>#, A,B)</sup>, Naoyasu Hosoda<sup>A,B)</sup>, Eito Iwai<sup>A,B)</sup>, Kota Ueshima<sup>C)</sup>, Shunya Takahashi<sup>C, D)</sup>,  
Toshitaka Aoki<sup>C, D)</sup>, Masamichi Yoshioka<sup>E)</sup>

<sup>A)</sup> Japan Synchrotron Radiation Research Institute

<sup>B)</sup> RIKEN SPring-8 Center

<sup>C)</sup> National Institutes for Quantum Science and Technology

<sup>D)</sup> NAT

<sup>E)</sup> SPring-8 Service

#### Abstract

A Storage Ring (SR) at a new synchrotron radiation facility, NanoTerasu, under construction at Sendai, Japan, equips four accelerating cavities which have low quality factors for the Higher Order Modes (HOM). One of four cavities has a higher resonant frequency of about 116 kHz than the designed RF accelerating frequency. This frequency deviation is too large to compensate by using a frequency tuner. So we developed a frequency shifting function during the starting up procedure in the Low Level RF system. We inserted an In-phase Quadrature (IQ) modulator to shift the frequency at the input port of the reference RF signal for the SR. At first, the amount of the frequency-shift is set to 80 kHz for minimizing the reflected power from the cavity. Then the heat load of the high power RF increase the body temperature of the cavity. Then the resonant frequency of the cavity is getting low. A resonant frequency tuning system works to move the tuner plunger position to minimize the reflected RF power from the cavity. The frequency shift system watch the tuner position, and lower the shift-frequency fed the IQ modulator until the frequency becomes zero. This frequency shift system was implemented at the RF test stand of the SPring-8 and we found that the system worked as we expected. The implementation of this system at the NanoTerasu was done and it worked as expected.

#### 1. はじめに

次世代放射光施設 NanoTerasu [1]の蓄積リングでは電子ビームの加速に4台の高次共振モード減衰型加速空洞[2]が使用される。今回使用する4台の空洞のうち1台はRF基準信号の周波数から約116kHz高い共振周波数を持つことがわかった。この周波数ズレは共振周波数制御用チューナの引き抜きでは対処できない範囲であった。そのため、空洞立ち上げ時にRF周波数にオフセットを与えるシステムを新規に開発した。加速器のマスターオシレータの下流にIQ変調器を挿入し、その制御信号として与えるsine波、cosine波の周波数を調整することで周波数変調を加えた信号を準備し、その信号を低電力高周波(LLRF)システムの基準信号として使用した。周波数にオフセットを与えることにより立ち上げにおける空洞からの反射の大きさを低減した。一度高周波電力が空洞に投入されると空洞温度が上昇し共振周波数が低下する。この低下量を参照しながらIQ変調器に与える変調の周波数を減らすという手順をシステムに組み込んだ。このシステムをSPring-8のテストスタンドに導入し、加速空洞のコンディショニングにおいて想定通りの動きをすることが確認された。本発表ではシステムの詳細、動作試験の結果について報告する。

#### 2. 加速空洞と共振周波数の調整

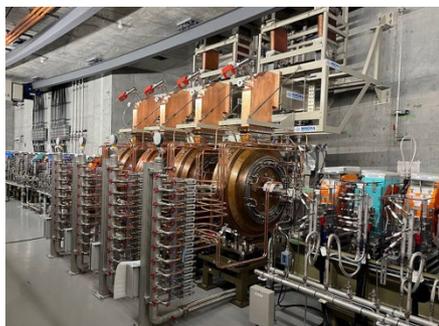
NanoTerasuの蓄積リングでは4台の加速空洞が電子ビームの放射光損失エネルギーを補うために使用される(Fig. 1 a)参照)。この加速空洞は複数の部品で構成されており、ロウ付または溶接で接合されている。Figure 1b)にNanoTerasuで使用する空洞の断面の例を示す。加速空洞の加工精度の補正、空洞温度の変化に伴う共振周波数のずれなどを補うため、周波数調整用チューナが取り付けられている。このチューナには筒状の可動プランジャがあり、その抜き差しで共振周波数を調整する。駆動範囲は-10mmから+60mmである。Figure 2にこの空洞のチューナ位置と共振周波数の関係の例を示す。この例ではチューナの位置が+1mm以上の領域でおよそ6.6kHz/mmの係数となっていることがわかる。チューナ位置が+1mm以下の領域ではその係数は次第に小さな値となる。

NanoTerasuには加速空洞のコンディショニング設備が整っていなかったため、空洞のコンディショニングはSPring-8のRFテストスタンドにおいて実施した。テストスタンドでは、到達真空度向上のためのベーキング、および大電力高周波信号の導入を行った。その結果、ベーキング、大電力における反射やアーク放電に起因するインターロック動作などを繰り返した後で空洞の共振周波数が次第に低下する現象が観測された[3]。4台の空洞のうち2台は加工途中で寸法の変更で周波数低下を見

<sup>#</sup> ohshima@spring8.or.jp

込んだ初期共振周波数の設定を実施、製作済みであった2台については端板を取り外しての加工を実施した。その結果、ある1台の加速空洞の共振周波数がチューナ位置 0 mm の条件で基準高周波周波数に対して約 116 kHz ほど高くなった。共振周波数はチューナを -20 mm まで引き抜いてもまだ 80 kHz ほど高く、そのままでは大電力の高周波を導入することができない状況であった。

a)



b)

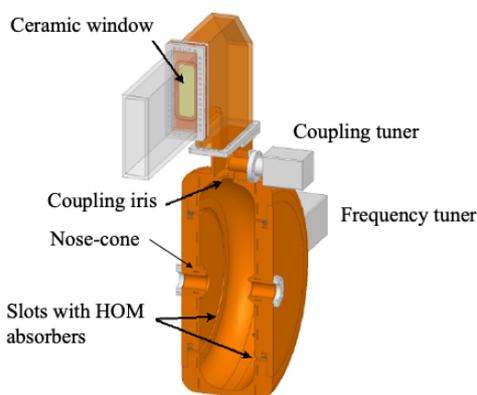


Figure 1: a) Photo of the acceleration cavity section and b) a cross sectional view of the HOM dumped cavity.

### 3. SR LLRF 基準信号の周波数シフト

共振周波数が設計周波数と大きく異なっていると空洞に RF 電力を投入することができない。一方で、テストスタンドでの経験から空洞に大電力を投入すると空洞本体温度が上昇し共振周波数が低下することがわかっていた。投入高周波電力に対するチューナの移動量は 100 kW に対して 14 mm 程度であり、周波数変化としては 116 kHz 程度に相当する。そこで、立ち上げ当初だけ、空洞に導入する RF の周波数にオフセットを与えることで反射電力を抑え、空洞温度上昇による共振周波数低下に合わせてそのオフセット量を減らすシステムを導入することにした。

このシステムに対する要求項目は以下の通りである。

- 1) 最大 80 kHz の周波数オフセットを生成できること。
- 2) 周波数変更時の反射電力を抑えるために 100 Hz 程度のステップで周波数を変化できること。
- 3) 周波数切り替え時に位相連続であること。
- 4) 周波数オフセットを終了した時の信号の位相が

再現されること

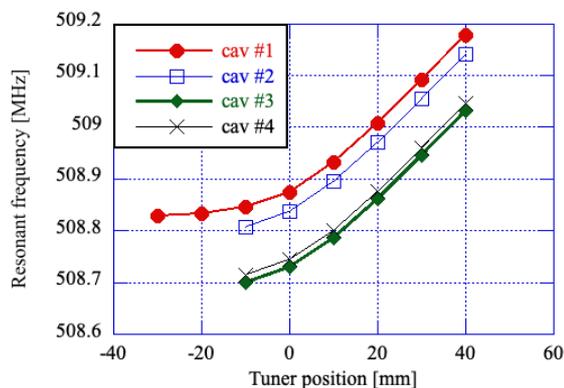


Figure 2: Resonant frequency of the cavity as a function of the tuner position.

基準 RF 信号に対して周波数オフセットを生成するためには、IQ 変調器と DAC の組み合わせを用いることとした。Figure 3 にシステムのブロック図を示す。基準 RF 信号を発生するマスターオシレータとしては Keysight 社製 E8257D シンセサイザを用いた。IQ 変調器としては candox 社製 CDX005-C を、DAC としては三菱電機特機システム社製 MTCA.4 規格の mmeadc01b を使用した。

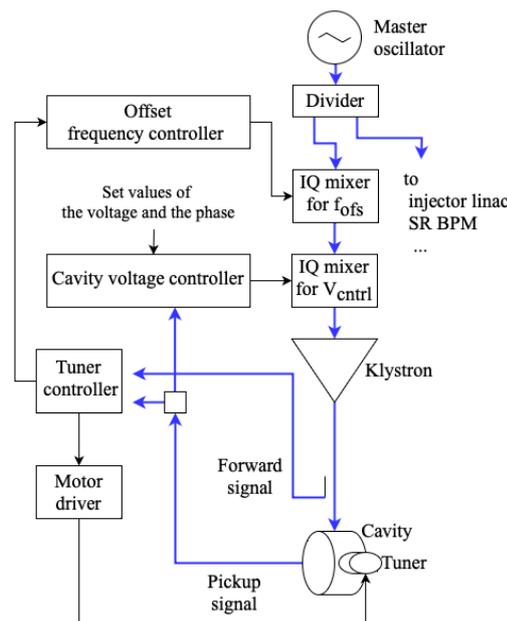


Figure 3: Block diagram of a LLRF and a frequency-shift system.

この DAC は SPring-8 のテストスタンドの LLRF システムでも使用しており、LLRF 用の firmware には以下の機能が実装されている。

- A) 振幅・位相を記載した波形データテーブルに応じた DAC 出力が可能
- B) DAC クロックの分周比(clkdiv)の設定が可能
- C) 位相連続で波形データの繰り返し出力が可能
- D) 波形データ繰り返し開始/停止、分周比設定、

波形データ切り替えなどのコマンド発行に対して、1波形分の出力を出し終えてからコマンド内容を反映

E) 停止時の DAC 出力値を保持

これらの機能を用いることで先に述べた 1)から 4)の要求を満たすことが可能である。DAC クロック周波数は

$$508.759 \text{ MHz} \times 5/8 \times 1/4 = 79.5 \text{ MHz} \quad (1)$$

であり、波形データとして 993 points (wfmpnts=993) のものを使用すると 80 kHz の周波数の正弦波と余弦波を出力することができる。994 points のデータではその周波数は 80 kHz - 80 Hz となり 2)の要求を満足する。Firmware の D)の機能により 3), 4)の機能を満足できる。

空洞立ち上げ時の周波数シフトのプロセスは SPring-8 で開発された MQTT を含む制御フレームワーク[4]に則って制作された。このプロセスは MTCA.4 規格の CPU 上で動作し、他の加速電圧安定化プロセスや空洞共振プロセス[5]と通信を行って動作する。周波数シフトのプロセスの動作は以下の通りである。まず、空洞が冷えている状態の時には初期値として +80 kHz のオフセットを与えておく。空洞に電力が投入され本体温度が上昇すると、共振周波数調整プロセスがチューナを突き出す方向に動かす。チューナの位置が閾値を超えた場合、周波数シフトプロセスはオフセット周波数を 100 Hz 以下程度のステップで下げ、チューナの位置が閾値以下になるまでその操作を継続する。オフセット周波数の変更は波形データの切り替えおよび DAC クロックの分周比変更で実現する。このプロセスはオフセット周波数が 0 Hz になると、動作を停止する。

## 4. 試験の結果

### 4.1 周波数シフト用 IQ 変調器の動作

SPring-8 の SR テストスタンドに構築した周波数オフセットシステムの性能評価を行った。周波数シフト用 IQ 変調器に使用する DAC 出力が要求事項3)を満たしているかどうかについて確認を行った。波形切り替え時の DAC 出力をオシロスコープで観測した時の例を Fig. 4 に示す。黄色が I チャンネルの制御電圧、緑が Q チャンネルの制御電圧の時間変化である。波形切り替え時に位

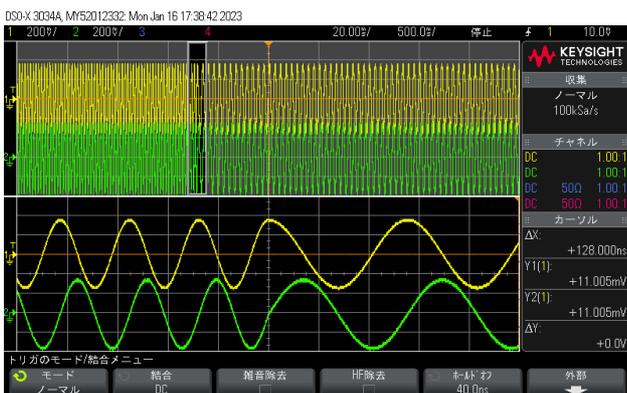


Figure 4: DAC output signals: I (yellow line) and Q (green line) of the offset frequency controller at a waveform file exchange. The cosine (I) and the sine (Q) signals are continuous when the period was changed.

相連続であることがこの図から見て取れる。

同様に DAC クロック切り替え時の出力の確認を実施した。このときも位相連続であった。次に周波数オフセット発生のための IQ 変調器を挿入することによる位相雑音の増加の様子を Fig. 5 に示す。マスターオシレータの信号に対してオフセット周波数 10 Hz から 10 MHz の範囲で積分した位相雑音は 53 fs rms であった。一方、IQ 変調器を通過した信号の位相雑音は Fig. 5 に示す様に 2.1 ps rms と大きめの値であった。この雑音の大きさはオフセット周波数によらずほぼ一定であった。空洞内部に作られる電場については、空洞の Q 値が高いのでおよそ 30 kHz 以上の雑音は減衰され、位相雑音は 230 fs rms となった。この値は実用上問題のないレベルである。

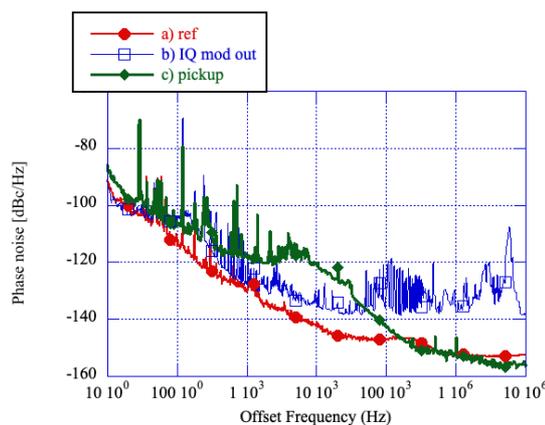


Figure 5: Phase noise spectrum of a) a reference signal, b) a signal with a frequency offset and c) a pickup signal of the cavity.

### 4.2 周波数シフトシステムを用いたコンディショニング

周波数シフトプロセスの動作確認を空洞#2 のコンディショニング時に SPring-8 サイトにて実施した。Figure 6 に空洞が冷えている状態からの立ち上げの様子を示す。このときの制御パラメータはチューナの位置が +2 mm に達するまでは周波数オフセットを 80 kHz で保持し、それよりもチューナが突き出し方向になると周波数を下げる動きとなるようにした。そのため、Fig. 6 の 11:12 から 11:43 までの間はチューナ位置が +2 mm でほぼ一定となっている。空洞温度が上昇して共振周波数が下がり、オフセット周波数が 100 Hz 以下になると、この制御を停止する設定としたので 11:43 以降はオフセット周波数が 0 Hz となっている。チューナの位置が 11:43 以降にマイナス方向に揺れているのは空洞冷却水温度の変動の影響を受けているためである。

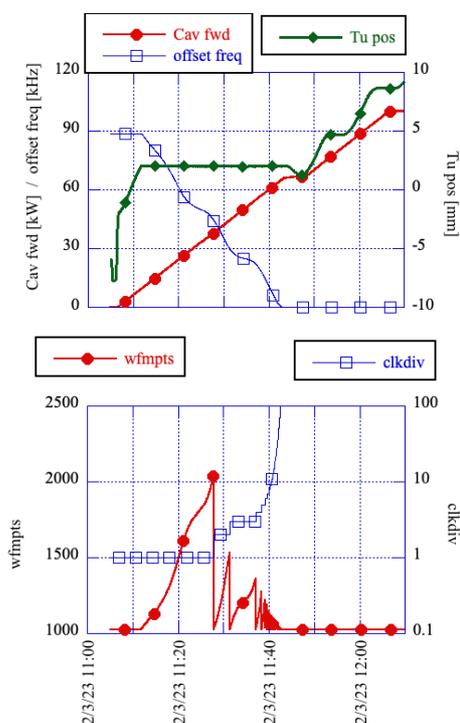


Figure 6: Trend graph of the klystron power fed to the cavity #2 (Cav fwd), the offset frequency (offset freq), the tuner position (Tu pos), the waveform point number (wfmpnts), and the DAC clock division number (clkdiv).

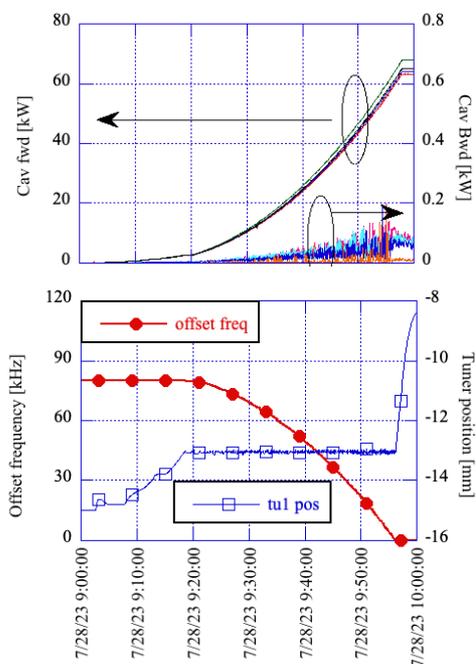


Figure 7: Trend graph of the rf power fed to the four cavities (Cav fwd), the reflected power (Cav bwd), the cavity 1 tuner position (tu1 pos) and the offset frequency (offset freq).

### 4.3 NanoTerasu での動作

この周波数変調システムは NanoTerasu に移植された。NanoTerasu では LLRF の信号が 1 台のクライストロンで増幅され 4 台の加速空洞に供給される[6]。Figure 7 に空洞 1 に導入される (Fwd) 電力、反射 (Bwd) 電力、チューナー位置、および周波数オフセット量のトレンドを示す。周波数変調が行われた瞬間は共振周波数チューナーの動きが間に合っておらず若干大きな反射電力が見られるが、安定した状態では反射電力が小さく抑えられている。周波数変調システムは空洞 1 チューナーの位置が -13 mm を超えるとそのオフセット周波数を下げる働きをする。オフセット周波数が 0 Hz になると、チューナーの位置は空洞内部へと突き出し方向に動く。このように周波数変調が想定した動作が行われることが確認された。

## 5. まとめ

次世代放射光施設 NanoTerasu で使用する HOM 減衰空洞について空洞に RF 電力が投入されていない冷間時の共振周波数が蓄積リングの周長で決定される基準 RF 信号の周波数より高かった。そこで、RF 空洞立ち上げ時のみ空洞励振信号の周波数にオフセットを与えるシステムを SPring-8 テストスタンドに構築した。このシステムを使って、反射電力の小さい状態を保持したまま空洞 RF 電力を投入することができた。このシステムは NanoTerasu に移植され、想定した動作が行われることが確認された。このシステムを用いて蓄積リングのビームコミッションが現在進行中である[7]。現在運用中の周波数変調システムはプロトタイプ的な位置付けであり、位相雑音を低減した実機の製作を検討しており、今後システムの高度化を進める予定である。

## 謝辞

システム構築に関しては多くの方々に協力をいただいた。すべてを網羅することはできないが、LLRF システムのファームウェア制作に協力いただいた三菱電機特機システムの岩城氏、漁師氏、播磨でのコンディショニング運転を実施したスプリングエイトサービスの早賀氏他の方々、導波管 RF 導入部のセラミクス窓のコンディショニングを主導された SPring-8 の山口氏、NanoTerasu の加速器建設を指揮されている QST の安積氏、西森氏、そして適切な助言・指導をいただいた SPring-8 RF チームリーダーの稲垣氏に深い感謝の意を表する。

## 参考文献

- [1] N. Nishimori, "A New Compact 3 GeV Light Source in Japan", Proc. of the 13th Int. Particle Acc. Conf, 2022, p.2402.
- [2] H. Ego *et al.*, "SPring-8-II 高次モード減衰型高周波加速空洞プロトタイプの大電力試験", Proc. of 16th Ann. Meeting of Particle Acc. Soc. Japan, 2019, p.17.
- [3] T. Inagaki *et al.*, "High-power tests of the compactly HOM-damped TM020-cavities for a next generation light source", Proc. of 14th Int. Particle Acc. Conf, 2023.
- [4] T. Fukui *et al.*, "Status of the Control System for the SACLA/SPring-8 Accelerator Complex", Proc. of the 16th

**PASJ2023 TUP32**

Int. Conf. on Accelerator and Large Experimental Control Systems, 2017, p.1995.

- [5] T. Ohshima *et al.*, “Development of a New LLRF System Based on MicroTCA.4 for the SPring-8 Storage Ring”, Proc. of the 8th Int. Particle Acc. Conf, 2017, p.3996.
- [6] S. Takahashi *et al.*, “NanoTerasu 蓄積リング用大電力高周波加速システムの現状”, The 20th Ann. Meeting of Particle Acc. Soc. Japan, 2023, THOB9, this meeting.
- [7] N. Nishimori *et al.*, “NanoTerasu 加速器コミッショニング”, The 20th Ann. Meeting of Particle Acc. Soc. Japan, 2023, TUOP02, this meeting.