

UVSORにおける高調波空洞を用いたビーム不安定性の抑制

SUPPRESSION OF BEAM INSTABILITY WITH HARMONIC CAVITY IN UVSOR

長谷川純^{#, A)}, 持箸晃^{B, A)}, 保坂将人^{B)}, 藤本将輝^{C)}, 林憲志^{C)},
今尾健太^{A)}, 高橋和義^{A)}, 高嶋圭史^{B, A)}, 加藤政博^{C, B)}

Jun Hasegawa^{#, A)}, Akira Mochihashi^{B)}, Masahito Hosaka^{B)}, Masaki Fujimoto^{C)}, Kenji Hayashi^{C)},
Kenta Imao^{A)}, Kazuyoshi Takahashi^{A)}, Yoshifumi Takashima^{B)}, Masahiro Katoh^{C)}

^{A)} Graduate School of Engineering, Nagoya University

^{B)} Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University

^{C)} UVSOR Facility, Institute for Molecular Science

Abstract

In order to suppress the longitudinal coupled bunch beam instability in the electron storage ring of UVSOR, a harmonic cavity (HCV) is routinely being operated. The current HCV has some vacuum troubles due to aging. We are going to replace it with a new HCV. In order to design a new HCV capable of suppressing the instability, it is necessary to know the origin of the beam instability. We have concluded that the main source of the instability is higher order mode of HCV from the analysis of the experimental data comparing with the simulation. In addition, from the consideration of Landau damping, we discussed the voltage in HCV necessary for suppressing the instability.

1. はじめに

1.1 背景

UVSOR[1]の加速器は 15 MeV 直線加速器、750 MeV ブースターシンクロトロン、750 MeV 電子蓄積リングから構成されている。蓄積リングのパラメータを Table 1 に示す。

Table 1: Parameters of Storage Ring

Beam Energy	750 MeV
Circumference	53.2 m
Beam Current	>300 mA
Natural Emittance	17.5 nm·rad
Betatron Tune	(3.75, 3.20)
RF-Frequency	90.1 MHz
Harmonic Number	16
RF Voltage	120 kV
Revolution Time	177.6 ns
Momentum Compaction	0.030
Natural Bunch Length	128 ps

現在 UVSOR では縦方向結合バンチ不安定性が発生していることが確認されている。Figure 1 にストリークカメラ (浜松ホトニクス, C5680) を用いて観測したビーム不安定性の様子を示す。画像内の塊1つが電子バンチ1個に該当する。Figure 1 から、電子バンチが進行方向に連結して振動している様子が分かる。このビーム不安定性は電子バンチが蓄積リング内のある構造を通過した際にそこに残していく電磁場 (wake field) が、次にその場所を通過する電子バンチに影響を及ぼすことを原因とし、この繰り返しのよって電子バンチ同士が連結して振動する現象である。

[#] hasegawa.jun@f.mbox.nagoya-u.ac.jp

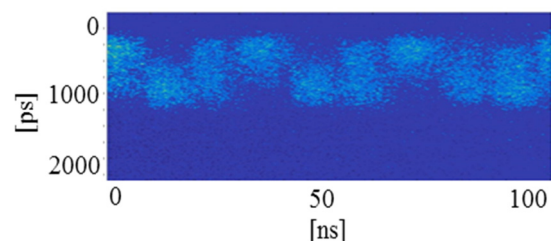


Figure 1: Longitudinal coupled bunch instability at a beam current value of 190 mA.

ビーム不安定性は UVSOR ユーザーが利用する放射光の質を悪化させてしまうため、安定した放射光を供給するためにはこれを抑制する必要がある。ビーム不安定性を抑制するため、UVSOR では 90.1 MHz の加速空洞 (Main Cavity) に加えて高調波空洞 (Harmonic Cavity, 以下 HCV) が設置、運用されている (Figure 2)。

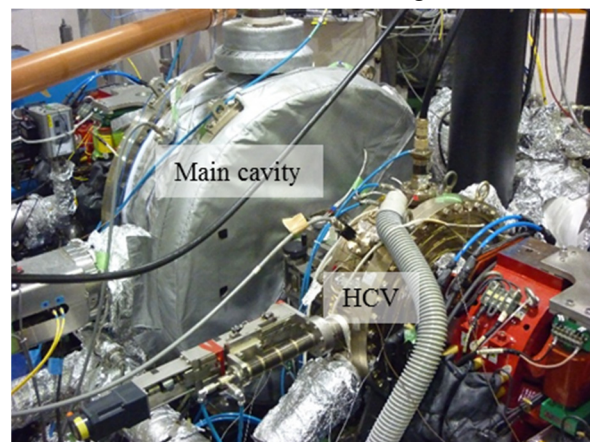


Figure 2: (Left) main RF Cavity (90.1MHz) and (right) HCV (270.3MHz) in UVSOR storage ring.

1.2 HCV

HCVは加速電場の整数倍の高調波を加速電場に重ね掛けすることで加速電場勾配を線形から非線形にする (Figure 3) [2].

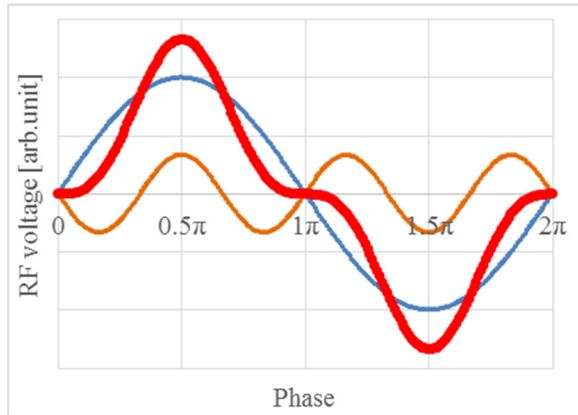


Figure 3: Waveforms of the acceleration voltage due to 3rd HCV. Blue, orange and red curves show the main RF, the 3rd harmonic, and the total voltages, respectively.

これによりシンクロトロン振動周波数はシンクロトロン振動振幅に依存し、シンクロトロン振動周波数は広がりを持つようになる。この広がりによって、wake fieldなどの外力が連続的に電子バンチに加わった場合でもうなりという形でエネルギーを吸収しては返すプロセスを繰り返し、電子バンチの振動は時間経過と共に成長しなくなる。この効果を Landau damping という[3]。大まかには、シンクロトロン振動周波数広がりがある時にビーム不安定性の成長率 (τ_{rad}^{-1}) より大きくなった時にビーム不安定性は抑制され、Landau damping の効果はHCV内に発生する電磁場が大きいほど顕著となる傾向がある。UVSOR では現在ビーム電流値 300 mA、HCV 電圧 30 kV 近傍において、外部からHCVにRF電力を入力しない passive mode でHCVを利用し、ビーム不安定性を抑制している。さらに、HCVは電子バンチ長を伸ばすという効果がある。これによりバンチ内の電子密度を下げる事ができ、電子バンチ内の電子同士の衝突による電子バンチ寿命低下 (Touscheck 効果) を抑制する効果があり、UVSOR の安定運転を支えるためには欠かせない設備となっている。

1.3 問題点・研究課題

現在UVSORで運用されているHCVは老朽化による真空性能に関するトラブルが散見されるようになってきていることが問題とされている。そこで我々は、UVSORの運転の長期的な安定性、そして更なる高品位ビームの実現に向け、HCVの更新を目標として研究を行っている。HCV更新の課題として、今回我々はビーム不安定性を引き起こす主要な原因の解明に向けた実験を行った。

2. 実験

2.1 ビーム不安定性の成長率の測定

本解析の目的はビーム不安定性を引き起こす原因の解明である。その方法として、まずビーム不安定性観測実験を行い、不安定性が放射減衰により抑制されるビーム電流閾値を求めた。また、ビーム不安定性の原因となるインピーダンス構造を仮定し、2次元電磁場シミュレーションによりシャントインピーダンスとQ値を求め、シミュレーションで求めたインピーダンスと実験で求めたビーム電流閾値から得られる不安定性の成長時間と放射減衰時間を比較することでその不安定性の原因の特定を試みた。

まずビーム電流値 300 mA の状態からビームスクレーパーを使ってビーム電流を減衰させていく。なお一連の測定では、HCV チューナー位置を固定している。Figure 4 に本操作におけるストリークカメラの測定データを示す。この操作によりHCV電圧が下がる事でHCVの不安定性抑制効果が弱まり、ビーム不安定性が発生した (Figure 4(b))。さらにビーム電流を減衰させていくと、ビーム電流値が 7.4 mA になった時点でビーム不安定性が収まり電子バンチが再び安定した (Figure 4(c))。これはビーム不安定性の成長率 (τ_g^{-1}) を放射減衰率 (τ_{rad}^{-1}) が凌駕したことによると考えられる。

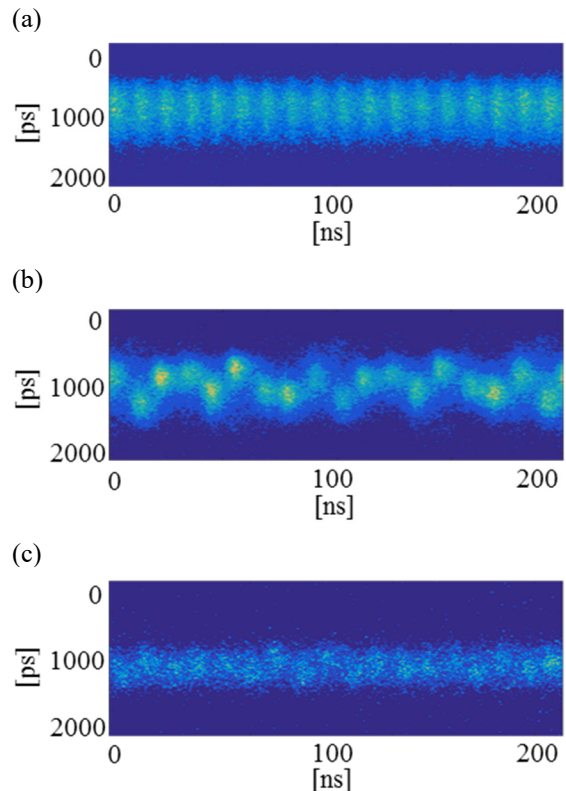


Figure 4: The electron bunches at each current condition. (a): 300 mA. (b): 100 mA. (c): 7.4 mA.

次に、ビーム不安定性の原因となるインピーダンスを求めた。周波数 ω におけるインピーダンスの実部 $\text{Re}Z(\omega)$ とすると、これを用いてビーム不安定

性の成長率 (τ_g^{-1}) は以下の式で表せる[3].

$$\tau_g^{-1} = \frac{I\alpha r_0}{2e\omega_s\gamma T_{rev}} \sum_{p=1}^{\infty} \left(\omega_p^{\mu+} \text{Re}Z(\omega_p^{\mu+}) - \omega_p^{\mu-} \text{Re}Z(\omega_p^{\mu-}) \right) \quad (7)$$

ここで $\omega_p^{\mu+}, \omega_p^{\mu-}$ はそれぞれ

$$\omega_p^{\mu+} = \{(p-1)M + \mu + \nu_s\}\omega_0 \quad (8)$$

$$\omega_p^{\mu-} = (pM - \mu - \nu_s)\omega_0 \quad (9)$$

で表される周波数であり、 ω_0 は周回角周波数、 M はバンチ数、 μ はモード ($0 \sim M-1$)、 ν_s はシンクロトロン振動数である。また、(7)式において、 I はビーム電流値、 α は momentum compaction factor、 r_0 は古典電子半径、 e は電気素量、 ω_s はシンクロトロン角周波数、 γ はローレンツ因子、そして T_{rev} は電子バンチの周回時間を表す。また、 $\text{Re}Z(\omega_p^{\mu\pm})$ は空洞共振器型のインピーダンスを仮定すると、シャントインピーダンス (R_{sh}) を用いて次のように表される。

$$\text{Re}Z(\omega_p^{\mu\pm}) = \frac{R_{sh}/2(1 + \beta_1 + \beta_2)}{1 + Q_l^2 \left(\frac{\omega_r}{\omega_p^{\mu\pm}} - \frac{\omega_p^{\mu\pm}}{\omega_r} \right)^2} \quad (10)$$

ここで β_1, β_2 はそれぞれ入力カップラー、ピックアップアンテナの結合定数であり、 ω_r はインピーダンスの原因となる構造の共振周波数である。(10)式よりインピーダンスの loaded Q が十分大きい場合には、インピーダンスは $\omega_p^{\mu\pm}$ が共振周波数付近の値を取るときのみビーム不安定性の成長率 (τ_g^{-1}) に影響を及ぼすことがわかる。

ビーム不安定性の原因特定のためには、ある構造をビーム不安定性の原因と仮定し、その構造のシャントインピーダンス、共振周波数によって計算されたビーム不安定性の成長率 (τ_g^{-1}) と、UVSOR の基本パラメータより計算された放射減衰率 (τ_{rad}^{-1}) が、7.4 mA において釣り合うことが条件となる。

我々は、ビーム不安定性の原因となる構造を仮定するにあたり、共振周波数 270 MHz、電磁波の共振モードが TM010 モードである現 HCV の高次モードに着目した。2 次元電磁場シミュレーションプログラム Superfish [4]を用いてシミュレーション解析を行ったところ、HCV 内に電磁波の共振モードが TM020 モードである共振周波数 780 MHz の高次モードが発生しているという解析結果を得た。そこで我々は、ビーム不安定性を引き起こしている原因は HCV の TM020 モードであると仮定して解析を進めた。Figure 5 にシミュレーション解析の結果を示す。

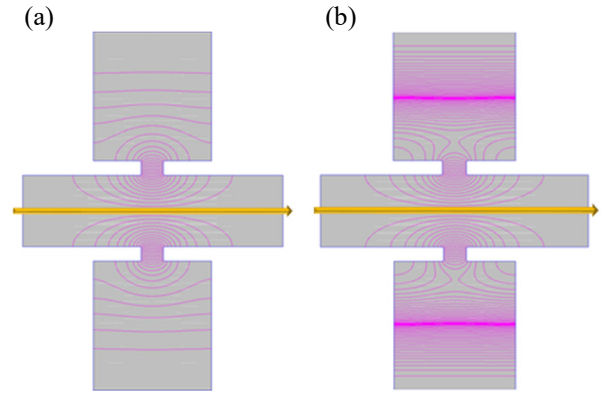


Figure 5: (a): TM010 ($f_{res}=270$ MHz). (b): TM020 ($f_{res}=780$ MHz). The yellow arrow shows the beam orbit.

この仮定から、 $\omega_p^{\mu\pm}$ が 780MHz に近い値をとるとき、つまり $p=9, \mu=11$ のときのみインピーダンスがビーム不安定性の成長率 (τ_g^{-1}) に影響を及ぼすため、(7)式より p についての総和は、

$$\sum_{p=1}^{\infty} \left(\omega_p^{\mu+} \text{Re}Z(\omega_p^{\mu+}) - \omega_p^{\mu-} \text{Re}Z(\omega_p^{\mu-}) \right) \cong (\omega_0^{\mu+}) \text{Re}Z(\omega_0^{\mu+}) \quad (11)$$

と近似できる。ここで $\text{Re}Z(\omega_p^{\mu-})$ の項は $\text{Re}Z(\omega_p^{\mu+})$ の項と比べて極めて小さいことから無視できるものとする。Superfish により算出した HCV の TM020 モードの基本パラメータを Table 2 に示す。

Table 2: Parameters of HCV at TM020 mode

Resonant frequency	777.80783 MHz
Unloaded Q	26309.8
R/Q	12.854 Ω

以上から、ビーム不安定性を引き起こす構造が HCV の高次モードの一つである TM020 モードであると仮定した場合、ビーム電流 7.4 mA の時のビーム不安定性の成長率 (τ_g^{-1}) は 39.84 s^{-1} と求めることができた。一方、UVSOR における放射減衰率 (τ_{rad}^{-1}) は 60.40 s^{-1} であり、7.4 mA におけるビーム不安定性の成長率と比較すると大きな違いは見られない。したがって、UVSOR におけるビーム不安定性の主な原因は HCV の TM020 モードであることが強く示唆される結論に至った。

2.2 シンクロトロン振動スペクトル測定

前述の解析から、HCV の TM020 モードを主な原因としたビーム不安定性を HCV 自身が Landau damping によって抑制しているという結果を得た。また、300 mA 近傍では Landau damping による効果がビーム不安定性の成長を凌駕するためビーム不安定性を抑制できているが、ビーム電流を減衰させていく、つまり HCV 電圧がある程度まで低下すると

ビーム不安定性が発生することも確認されている (Figure 4)。加速器運転時に、どの程度 HCV 電圧を保持しておけばビーム不安定性を抑制できるのかが判明していれば、運転の安定化に大きく貢献することができる。そこで本解析では、ビーム不安定性を抑制することができる、つまり Landau damping がビーム不安定性を抑制する閾値となる HCV 電圧を求めた。

Landau damping による安定の指標は以下の式で評価することとした[3]。

$$|\xi| < \frac{1}{\sqrt{3}} \Delta\omega \quad (12)$$

ここで $\Delta\omega$ はシンクロトロン振動スペクトルの HWHM である。また ξ は以下の式で表される。

$$\xi = \frac{Iar_0}{2e\omega_s\gamma T_{rev}} \omega_p^{\mu+} \frac{R_{sh}/2(1+\beta_1+\beta_2)}{1+iQ_l\left(\frac{\omega_r}{\omega_p^{\mu+}} - \frac{\omega_p^{\mu+}}{\omega_r}\right)} \quad (13)$$

したがって、(12) 式が満たされているとき Landau damping が有効である。

Landau damping の効果を評価するため、シンクロトロン振動スペクトルピークの HWHM を求めた。300 mA から任意の減衰ステップでスクレーパーを用いて電流値を減衰させ、その都度スペクトラムアナライザ (ROHDE&SCHWARZ, FSEB30) でスペクトルピークを測定した。2.2節より、ビーム不安定性のモードは 11 であると考えられるので、今回我々はモード 11 (242 MHz 近傍) のシンクロトロン振動スペクトルのアップサイドバンドの解析を行った。

まずモード 11 のシンクロトロン振動スペクトルのアップサイドバンドの、(dBm, Hz) の周波数スペクトルデータを、MATLAB を用いてガウス分布へのフィッティングを行った。ビーム電流値 100 mA のデータにおけるフィッティングを Figure 6 に示す。

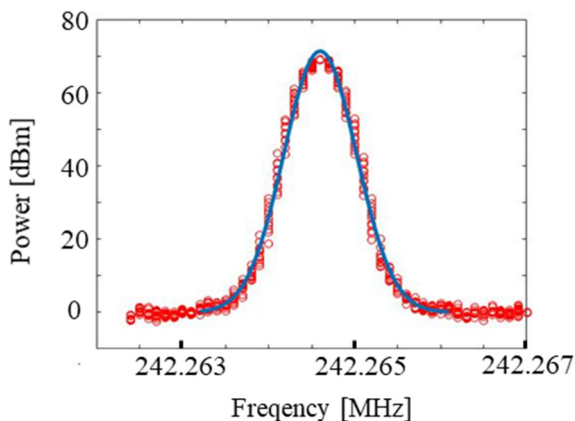


Figure 6: A frequency spectrum peak of synchrotron sideband. Red points show observation data and the blue line shows Gaussian fitting curve.

次に、縦軸データを dBm から mW へ変換し、HWHM を求めた。Figure 7 に、実験データ解析で求めた HWHM と HCV の TM020 モードのインピーダンスを仮定したときの理論値 $|\xi|$ との関係を示した。

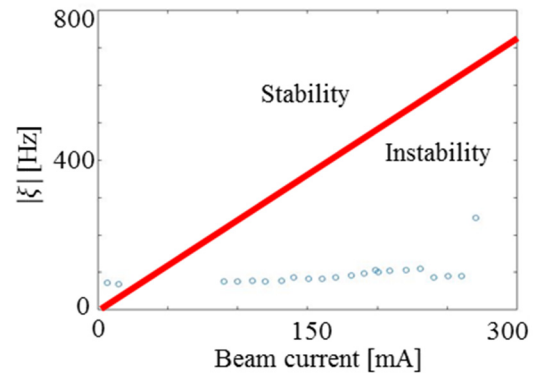


Figure 7: Stability condition by Landau damping in UVSOR. Blue points show HWHM of synchrotron frequency and the red line shows $|\xi|$ in (13).

Figure 7 において、赤色の線の左上の領域程度に、シンクロトロン振動のスペクトルが十分な周波数幅を持っていればビーム不安定性を Landau damping によって抑制できていると言える。今回の実験結果では多くの測定データが赤色の線の右下の領域に存在している、つまり Landau damping がビーム不安定性を抑制していない領域に存在している。今回の測定では、ビームの自励振動 (ビーム不安定性) によるスペクトラムを観測しているため、この結果は妥当なものと言える。しかし、本来の目的である閾電流値、そしてそれに線形比例する閾 HCV 電圧値の特定に至ることができないという結果となった。そこで、ストリークカメラデータにおける電子バンチの振動振幅についての解析を行った。振動振幅が急増している点が、Landau damping が有効でなくなる閾値に相当すると考えた。Figure 8 に解析結果を示す。

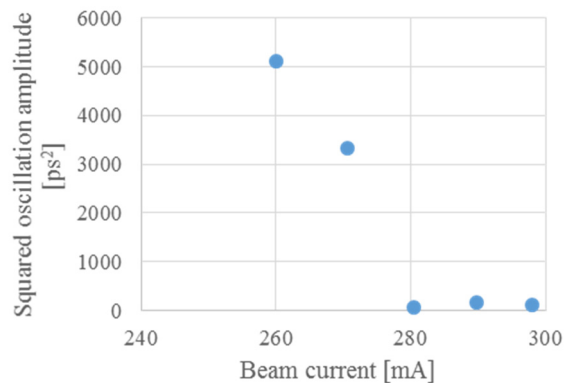


Figure 8: Dependence of squared longitudinal oscillation amplitude on total beam current measured by streak camera. Blue points show squared longitudinal oscillation amplitude of electron bunches.

したがって、ビーム電流値が 280 mA を閾値として振動振幅が急増している、つまり Landau damping が有効でなくなったと考えられる。そのときの HCV 電圧は 33.9 kV であったので、これが閾 HCV 電圧値であると言える。これはスペクトラムアナライザにおいてシンクロトロン振動スペクトルが発現した電流値と一致している (Figure 9)。

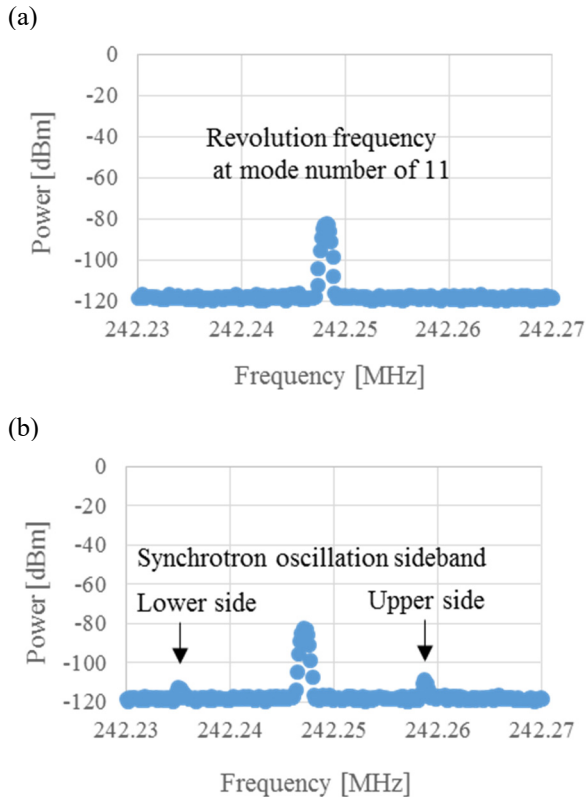


Figure 9: The frequency spectrum peak at each current value with spectrum analyzer around mode number of 11. (a): 280 mA. (b): 270 mA.

3. まとめと今後の展望

低電流域においてビーム不安定性の成長率 (τ_g^{-1}) と放射減衰率 (τ_{rad}^{-1}) が釣り合う閾電流値を求め、現在 UVSOR で起こっているビーム不安定性の原因となるインピーダンスを求めることができた。さらに、シミュレーション解析との比較により UVSOR におけるビーム不安定性の主な原因は HCV の高次モードの一つである TM020 モードであると判明した。また、高電流域において Landau damping の効果とビーム不安定性の成長が釣り合う HCV の閾電圧値をストリークカメラ画像解析によって求めることができた。今後の展望としては、インピーダンスの評価の際の HCV の共振周波数値を、実験を実施したチューナー位置に定めてネットワークアナライザを用いて再測定を行うことを考えている。また、Landau damping 効果の指標を用いた解析で、その効果の閾 HCV 電圧値について議論できなかったことか

ら、高電流域のビームが安定な状態で RF 位相変調などの外力を加えてビームを強制振動させ、シンクロトロン振動周波数幅を測定するといった追加実験による再解析を考えている。本研究の最終目的へのプロセスとしては、高次モードによるビームに対する影響を抑制した HCV 空洞構造の設計、よりビーム不安定性抑制効果の高い高調波空洞の条件の追究を経て、モデル空洞の作成・基本パラメータ測定を行い、最終目的は現行の HCV を新しい HCV に置き換えることとしている。

謝辞

本研究を進める上で、UVSOR の技術職員の方々をはじめ、多くの加速器関係者に実験協力をはじめとした数多くのご支援、ご指示を頂きました。深く感謝申し上げます。

本研究の一部は、高エネルギー加速器研究機構大学等連携支援事業による支援を受けて実施しました。

参考文献

- [1] <https://www.uvsor.ims.ac.jp/>
- [2] K. Tamura *et al.*, "Double RF System for Suppression of Longitudinal Coupled Bunch Instability on UVSOR Storage Ring", Appl. Phys., 33, January. 1, 1994, pp. 59-62.
- [3] A.W.Chao, Physics of collective beam instabilities in high energy accelerators, Wiley-Interscience Publication, 1993.
- [4] http://laacg.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml