

# 高次モード測定による cERL 入射器超伝導空洞の設置位置誤差の評価 ESTIMATION OF ALIGNMENT ERROR BY MEASURING HIGHER-ORDER-MODE OF INJECTOR SUPERCONDUCTING CAVITY AT CERL

本田洋介<sup>\*A)</sup>、許斐太郎<sup>A)</sup>、帯名崇<sup>A)</sup>、梅森健成<sup>A)</sup>、阪井寛志<sup>A)</sup>、加古永治<sup>A)</sup>、宮島司<sup>A)</sup>  
Yosuke Honda<sup>\*A)</sup>, Taro Konomi<sup>A)</sup>, Takashi Obina<sup>A)</sup>, Kensei Umemori<sup>A)</sup>, Hiroshi Sakai<sup>A)</sup>, Eiji Kako<sup>A)</sup>, Tsukasa Miyajima<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup>High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

## Abstract

cERL is a test accelerator of an energy recovery linac scheme which can realize a high quality beam in a high averaged current. In order to realize a low emittance beam, controlling the beam path in the superconducting accelerating cavity is important. By measuring higher-order-modes (HOM) excited in the cavities, the electrical center of the cavity can be detected. Comparing the HOM signals of the three independent cavities in the injector module, we estimated the relative positioning errors of the three cavities. It was found that the relative positioning errors were 2.5 mm and 0.3 mm in the horizontal and vertical planes, respectively

## 1. はじめに

エネルギー回収型線形加速器 (ERL) は、線形加速器の特長である低エミッタンスかつ短バンチの電子ビームを、エネルギー回収の原理のもとに大電流で運転することを可能にする加速器である。KEK に建設された cERL は、将来の大型 ERL 加速器に向けた試験加速器で、加速器要素の開発と、大電流かつ高性能のビームの実証を目的としてビーム運転を行っている [1]。

低エミッタンスビームを実現するには、入射器でのエミッタンスの悪化をできるだけ抑える必要がある。特に加速空洞でのビーム軌道が加速電場の中心からずれると、エミッタンスを悪化させる原因になるので、空洞中心を通過するように軌道を調整する必要がある。cERL の入射器クライオモジュールには、3 台の独立な 2 セル超伝導空洞が収められている。3 台の位置関係に直線からのずれがある場合は、ビーム軌道が全ての空洞の中心を通過するような理想軌道は存在しなくなってしまう。3 空洞の位置の相対的な直線性が重要で、エミッタンス増加を 10 % に抑えるには、0.4 mm の精度で設置することが目標である。

空洞の設置位置誤差を評価したいが、クライオモジュール内部にある空洞の位置を機械的な方法で測定することは困難である。また、ビーム軌道の応答による手法も、個々の空洞の位置を評価することは難しい。そこで、ビーム通過によって励起される空洞高次モード (Higher-Order-Mode: HOM) の測定による手法が考えられる [2]。各空洞の信号からそれぞれの空洞の電場中心にたいするビーム軌道のずれを測定することが可能である。HOM 測定によって得られた各空洞の電場中心位置の相対的な関係から、クライオモジュール内での 3 台の加速空洞の設置誤差を見積もった。

## 2. 測定の原理

注目するモードの角周波数を  $\omega$ 、HOM ポートの外部 Q 値を  $Q_{ext}$ 、としたとき、バンチ電荷  $q$  のビームの通過によってポートから取り出される信号のパワー  $P_{out}$

は、

$$P_{out} = \frac{\omega q^2}{4Q_{ext}} (R/Q) \quad (1)$$

で与えられる。ここで  $R/Q$  は

$$R/Q = \frac{|\int \vec{E} \cdot d\vec{s}|^2}{\omega U} \quad (2)$$

で、モードの電場をビーム軌道に沿って積分したものを全体のエネルギー  $U$  で規格化したもので、ビームとモードの相互作用の大きさを反映する量である。高次モードのうち、とくにダイポールモード (TM110) は、空洞中心に節を持つので、中心からの距離に比例した振幅で励起されることが分かる。即ち、ダイポールモード信号がゼロになる時、ビームは空洞中心を通過する。

## 3. セットアップ

### 3.1 入射器空洞とレイアウト

入射器加速空洞には、2 セルの 1300 MHz 超伝導空洞で、Fig. 1 に示すように、5 つの HOM カプラーが設置されている [3]。以前の実験で、上流側下ポート (HOM4) からの信号が、水平、垂直方向共に感度が良いことが分かっている [2]。今回はこの HOM4 ポートを使用して測定を行った。

Figure 2 に入射器全体のセットアップを示す。電子銃で生成された 390 keV のビームが入射器加速空洞に入射され、3 台の 2 セル空洞で最大 6 MeV まで加速される。クライオモジュールの直ぐ上流に、水平垂直のステアリング電磁石 (ZH4, ZV4) があり、本実験ではこれを利用してビーム軌道を調整する。下流にはスクリーンモニター (MS3) があり、ステアリング電磁石のキック量の校正に使用できる。

### 3.2 検出回路

HOM ポートからの信号には、測定したいダイポールモードだけでなく、他の周波数の HOM 信号や、加速モードである 1300 MHz の信号と、ビーム繰り返しの整数倍で直接励起され得る  $N \times 162.5$  MHz の信号が混

\*yosuke@post.kek.jp

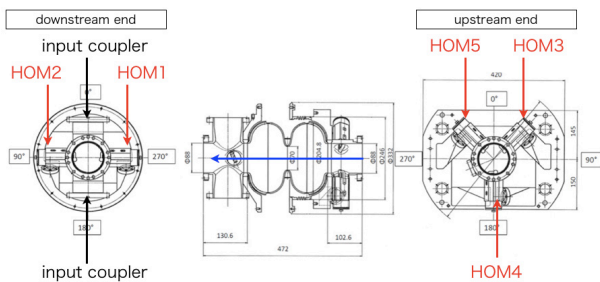


Figure 1: Layout of the HOM couplers.

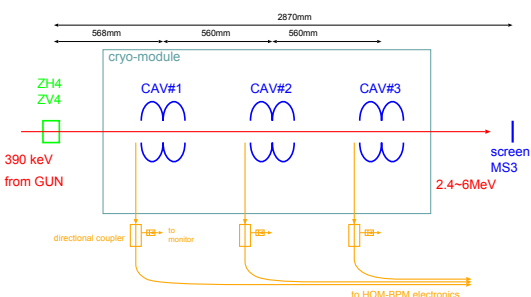


Figure 2: Layout of the injector.

入している。そこで、測定に不必要な信号を出来る限り除去する為に Fig. 3 に示すような 2 段階のヘテロダイン検出回路を用いた。最上流に設置した周波数フィルタに加えて、1 段階目の LO を 1300 MHz とすることで、加速モードを取り除き、また、2 段階目の LO を 487.5 MHz とすることで、測定モードに再近接のビーム繰り返し周波数である 1787.5 MHz (=11×162.5 MHz) を取り除く設計である。

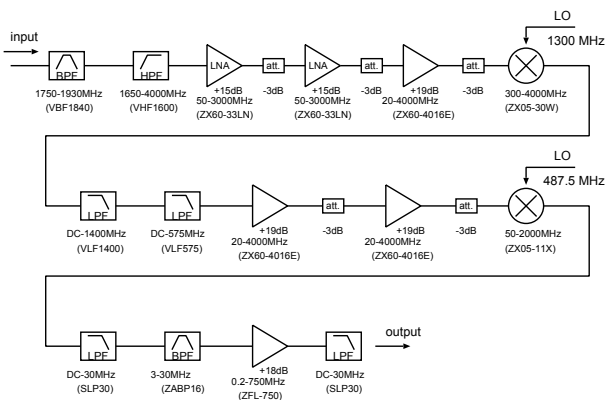
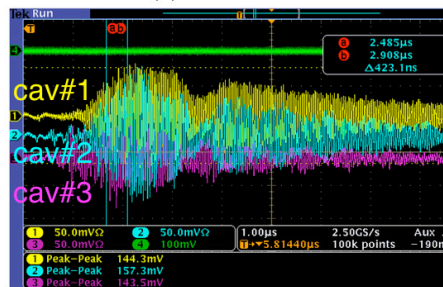


Figure 3: Scheme of the detection electronics.

TM110 のダイポールモードは、1801 MHz(個体差は 3 MHz 程度)であるので、ダウンコンバートされて 14 MHz 程度の信号として検出される。Figure 4 に検出される信号波形の例を示す。この測定を行う際は、ビームは 1μs のマクロパルス時間幅のバーストモードで運転した。マクロパルス内ではビーム繰り返し周波数で信号が励振され、Fig. 3 の回路では信号が取り除か

(a)Horizontal offset



(b)Vertical offset

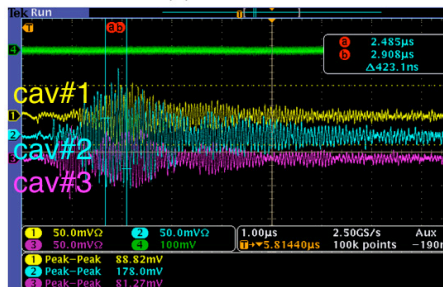


Figure 4: Examples of the signal waveform.

れて見えない。ビームパルスが終了した後から、HOM の周波数の信号が立ち上がり、その後減衰する波形が得られる。

上流のステアリング電磁石で軌道を水平 (a) あるいは垂直 (b) に動かすと、信号が強くなる。波形からその振幅 (peak-to-peak) を読み取り、HOM 信号の大きさとした。

#### 4. 空洞アライメントの解析

空洞の加速電場には、ビームの収束作用がある。ビームが空洞の電場中心を通過しない場合、収束作用によってビーム軌道が曲がる可能性があり、アライメントの直線性を議論する際に解析が複雑になる。そこで、この実験では空洞にパワーを入れずにビームを通過させた。このとき、ビーム軌道は直線と仮定できる。ビームの運動エネルギーは、電子銃のエネルギーの 390 keV である。この測定を行った時のビーム条件を Table 1 にまとめる。

Table 1: Beam Parameter in the Measurement

Parameter	Value	Comment
Bunch charge	6 pC/bunch	
Bunch repetition	162.5 MHz	
Macro-pulse width	1 μs	
Kinetic energy	390 keV	Inj. cavity turned off
Buncher status	off	reducing beam divergence

上流のステアリング電磁石を用いてビーム軌道を変化させながら、HOM 信号の振幅を測定した。Figure 5 は水平方向、Figure 6 は垂直方向にスキャンした結果で

ある。空洞の電場中心を通過するとき信号が最小となる、V字の依存性が測定されている。

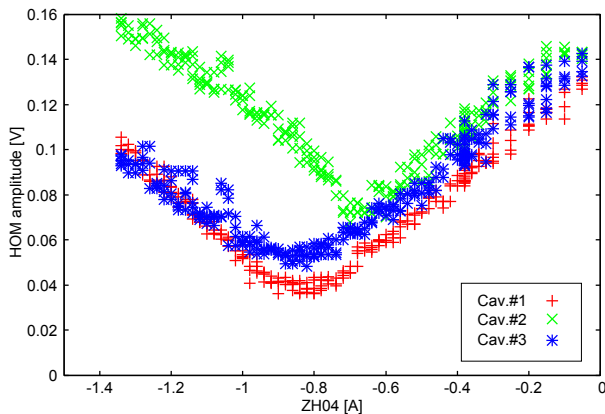


Figure 5: HOM signal v.s. horizontal offset.

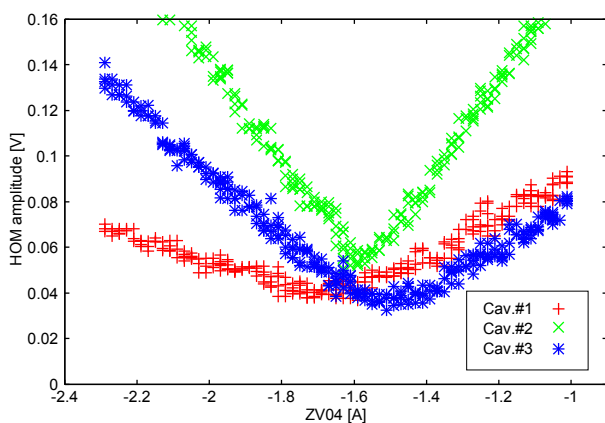


Figure 6: HOM signal v.s. vertical offset.

このデータを双曲線でフィットし、最小点を与えるステアリング電磁石の電流値を評価した。Figure 7に結果をプロットする。垂直方向については、3空洞のデータが順に直線上に並んでいる。これは、ビームの入射軌道にたいして全体が傾いているものの、3空洞が相対的には直線上にあることを示している。一方、水平方向については、データが直線上に並んでおらず、相対的な設置誤差があることを示している。

Figure 7 から設置誤差を定量的に評価するには、ステアリング電磁石のキック量の校正が必要である。下流のスクリーンモニタ (MS3) でのビーム位置の応答を測定して評価した結果、MS3 において 36 mm/A であった。位置関係から換算して、空洞#2 における応答は 13 mm/A と評価される。

アライメントの非直線性の指標として、次の  $R$  なる量を定義する。

$$R = c_2 - \frac{c_1 + c_3}{2} \quad (3)$$

ここで、 $c_n$  ( $n=1,2,3$ ) は、空洞# $n$  の中心を通過するときのステアリング電磁石の設定値である。 $R = 0$  ならば3空洞が相対的に直線上にあるが、値が 0 から離れるに

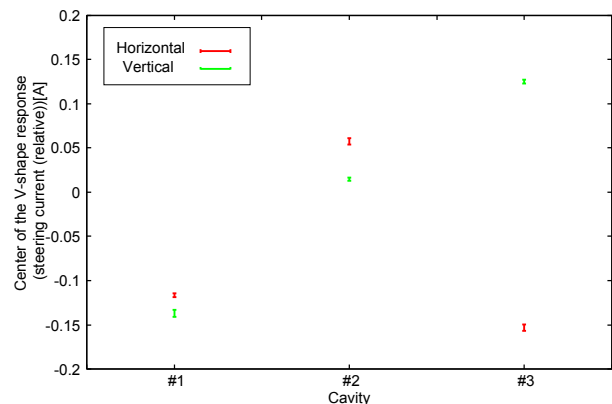


Figure 7: Condition (relative current of the steering magnets) to minimize HOM excitation for each cavity.

従って直線からのずれが大きいことを意味する。上に述べた、電流と位置関係の校正を用いて、これを長さで示すことが出来る。即ち、空洞#1 と空洞#3 を結んだ直線と空洞#2 の距離に相当する。この結果を表 2 にまとめる。垂直方向には 0.3 mm 以下の精度で直線性があると言えるが、水平方向については 2.5 mm の有意な非直線性があることが分かる。

Table 2: Summary of the Relative Misalignment

Plane	Deviation from linear alignment ( $R$ )
Horizontal	$2.51 \pm 0.05$ mm
Vertical	$0.27 \pm 0.04$ mm

## 5. まとめ

cERL の入射器超伝導加速空洞において、ビーム通過によって励起されるダイポールモード HOM を検出することによって、空洞の電場中心の位置を測定した。3 台の空洞の設置の相対的な位置誤差を評価し、水平方向に 2.5mm の有意な非直線性があるとの結果を得た。

## 参考文献

- [1] S. Sakanaka *et al.*, “Operations with 1-mA beam current at the compact ERL”, Proceedings of 13-th Particle Accelerator Society Meeting in Japan, Aug. 2016.
- [2] Y. Honda *et al.*, “Beam Position Measurement using Higher-Order-Mode of Injector Superconducting Cavity at cERL”, Proceedings of 12-th Particle Accelerator Society Meeting in Japan, Aug. 2015.
- [3] K. Watanabe *et al.*, “Development of the superconducting rf 2-cell cavity for cERL injector at KEK”, Nucl. Instrum. Meth. A, 714, 67-82 (2013).