

FIELD FLATNESS STUDY ON 9-CELL SRF CAVITIES

Fumio Furuta¹, Kenji Saito
KEK, High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba 305-0801, Japan

Abstract

9セル超伝導空洞のような多連空洞では、プリチューニングにより加速モードの電界が各セルに等しくなるように調整する。このセル間の電界強度の平坦度をフィールドフラットネスと呼ぶ。ILCでは96%以上のフラットネスが要求される。フラットネスは空洞表面処理やそれに伴う取り扱いで崩されてしまう恐れがある。我々は複数台の9セル空洞を用いて、様々な空洞ハンドリング工程でのフラットネスを追跡した。測定方法、各ステップで明らかになった問題点とその改善、及び評価結果について報告する。

9セル超伝導空洞のフィールドフラットネスの変動評価

1. はじめに

我々はKEK-LL(ICHIRO)形状のニオブ超伝導空洞による高電界達成を目指した研究を続けてきた[1,2]。9セル空洞で電子を効率よく加速するには加速モードで9つの各セルに同じ強度の電界を立てる必要がある。このセル間の電界強度の平坦度をフィールドフラットネスと呼ぶ。フラットネスの調整は機械的に各セルを塑性変形させて行い、この調整をプリチューニングと呼ぶ。ILCでは96%以上のフィールドフラットネスを要求する。

フィールドフラットネスは、空洞アニールで大きく攪乱されることが分かっているため、通常プリチューニングはその後に行われる。しかし、その後も電解研磨やそれに伴う移送、ベーキング、空洞縦吊り下げ等、さらにフラットネスを攪乱する可能性のある工程が続く。これら一連の工程でフラットネスの破壊の起きないようにしなければならない。

我々は、初期設計のICHIRO-9セル#0号機(I9#0)、RF設計を改良したNew-ICHIRO-9セル#5、#7、#8号機(I9#5、#7、#8)を用いて空洞ハンドリングや表面処理におけるフラットネスの変化を追跡した。図1に今回測定した空洞を示す。測定によって得られた結果、問題点の改善について述べる。



図1: ICHIRO-9セル#0,#5,#7,#8(写真上から)

2. フィールドフラットネス

$$field\ flatness[\%] = \left(1 - \frac{E_{c\max} - E_{c\min}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{ci}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

フィールドフラットネスは式(1)で求められる。E_{ci}はi番目のセルにおける中心軸上の電界強度である。(1)式で全セルの電界強度が等しいときのフィールドフラットネスは100%になる。フラットネス測定はネットワークアナライザとビードプル方法を用いる。これは糸に通した金属小片(ビード)を空洞の中心軸上を一定速度で走らせ、それに伴う各セルにおける加速周波数の変化を位相角変化としてネットワークアナライザで測定するものである。位相角変化は周波数変化に比例し、周波数は電界強度の2乗に比例する。従ってフラットネスはE_{ci}をdPi(i番目のセルにおける位相角変化)で書き直すと式(2)で表される。ネットワークアナライザによる測定の再現性は0.5%以下であった。図2に測定装置を示す。

$$field\ flatness[\%] = \left(1 - \frac{\sqrt{dP_{\max}} - \sqrt{dP_{\min}}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{dP_i}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

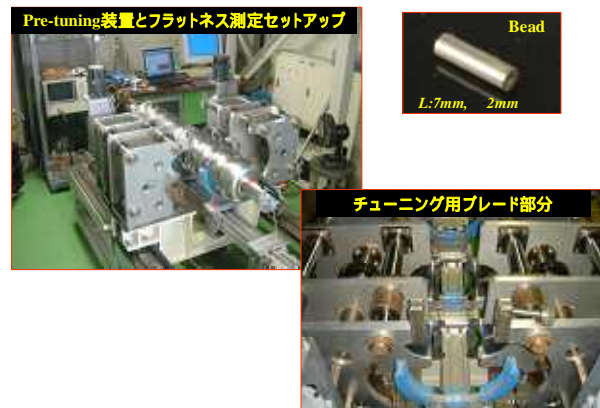


図2: プリチューニングマシンと測定装置

¹ E-mail: fumio.furuta@kek.jp

3. I9#0によるフラットネス評価

ICHIRO-9cell空洞#0(I9#0)を用いて、KEKでプリチューニングした後の、電解研磨(EP)処理、及び関連する各ステップでのフィールドフラットネスの変化を調べた。まず電解研磨をするために野村メッキ(KEKより車で2時間、約70km)にトラック輸送した前後でフラットネスの測定を行った。輸送時空洞はジグに取り付け、それを専用台車で縦向きにしてトラックに載せて移送した。野村メッキへ輸送後、空洞ジグの脱着時、EPジグの脱着時、及びEP処理前後でフラットネスを測定した。EPは20 μ m、40 μ mと二回処理し、そのつど測定を行った。EP処理後、KEKへの空洞輸送の前後で測定、さらに通常の空洞縦性能測定用の組み立て+ベーキング+真空排気を行った後、縦測定をせずに空洞を大気開放・分解してフラットネスを測定した。測定した各項目とフラットネスの値を表1に、プリチューニング直後とベーキング後分解した後のフラットネス測定結果を図3に示す。

測定場所	測定条件	Field flatness [%]
KEK	KEKにてPre-tuning, 空洞ジグなし,	96%
野村へ空洞ジグをつけて回転台車にのせトラック輸送, 空洞姿勢:縦,		
野村メッキ	輸送直後, 空洞ジグ付,	92%
	空洞ジグ外す, 拘束なし,	94%
	EPジグ付き, EP架台上,	94%
	EP20 μ m処理, EPジグ付, EP架台上で測定,	94%
	EPジグ外す, 拘束なし,	94%
	EPジグ付き, EP架台上,	94%
	EP40 μ m処理, EPジグ付, EP架台上で測定,	94%
EPジグ外す, 拘束なし,	94%	
空洞を木箱+緩衝材に入れてKEKに乗用車で輸送, 空洞姿勢:横,		
KEK	空洞ジグなし, 拘束なし,	94%
空洞ジグ取り付け, 縦測定用フランジ, カプラー組み立て, ベーキング+真空排気,		
KEK	大気開放, カプラー等分解, 空洞ジグ外す, 拘束なし,	94%

表1: I9#0によるフラットネス評価試験

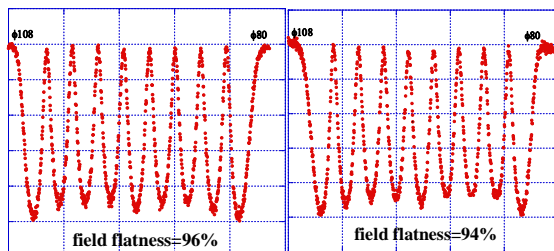


図3: (左)プリチューニング後、(右)EP+Baking後

この一連の測定で、フラットネスの変化が見られたのはKEKから野村メッキへの輸送時のみであった。その他、EPジグの脱着、EP処理、野村からKEKへの輸送、組み立て+ベーキング+真空排気はフラットネスへ影響を与えなかった。今回、計60 μ mの電解研磨処理前後でフラットネスに変化が無いと確認されたのは大きな進歩である。今後もデータを蓄積したい。復路輸送で変動が無かったのは往路での結果を受けて輸送方法を改善したためである。

フラットネスはプリチューニング直後(96%)に比べて、野村メッキへの運搬+ジグの影響で92%(-4%)に、ジグを外し拘束フリーの状態では94%(+2%)、つまり輸送前後でトータル-2%変化した。ジグ拘束の

有無で2%増減したことからジグ拘束が2%の弾性変形を与えている。ジグ改善については別の9セルで行ったので後述で述べる。上記のトータル-2%の塑性変形に対し、輸送とジグのどちらが原因かは判別できないが、拘束や振動等による輸送時のストレスが問題であると考えられる。そこでKEKへの復路輸送時、ジグによる拘束をやめ、木箱+緩衝材で空洞を保護し横姿勢で乗用車を用いて輸送した。結果、復路でのフラットネス変化を抑えることが出来た。

4. I9#5によるフラットネス評価

ICHIRO-9cell空洞#5(I9#5)によるフラットネス測定について述べる。

4.1 空洞姿勢によるフラットネスの変化

空洞性能測定(縦測定)では、空洞はジグに取り付けられ、測定スタンドに縦向きにセットされる。この時の空洞姿勢の影響を評価するために、プリチューニング後にジグをつけた状態で空洞を水平、垂直にしてフラットネスを測定した。結果、垂直にした場合、水平時に比べ-2%変化した(96→94%)。図4に示す。これはジグの影響と考えている。I9#5は空洞両端のエンドプレートを持たないため、アイリス部に入れたサポートのみで空洞が支持される。姿勢を変えた際に自重とサポート位置の影響で空洞に変形が起こり、-2%の変化を起こしたと考えている。その後、ジグセッティングの改良を行い、姿勢によるフラットネス変化は0.5%以下になるように改善した。

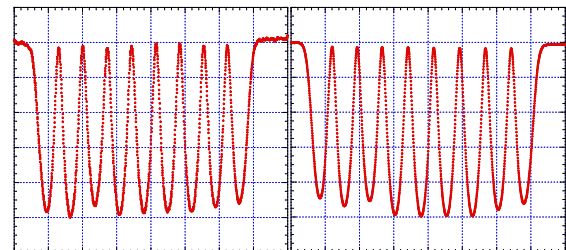


図4: (左)縦姿勢96%、(右)横姿勢94%

4.2 荷重によるフラットネス変動の評価

先に述べたように、I9#5はエンドプレートを持たない。そのため、両端のエンドセルは縦測定用のトップフランジ、インプットカプラーをつけた際にその重量の影響を受ける。空洞のトップフランジ、ボトムフランジに荷重をかけた場合のフラットネスを評価した。結果を表2と図5に示す。無負荷でフラットネスは94%、最大11kgの負荷に対し-1%(94→93%)の変化があった。~4kg(カプラー+トップフランジの重量程度)までの負荷では変化は見られず、カプラー等の負荷の影響はないと考えられる。またシミュレーションから加速電界40MV/mにおいてローレンツ力により軸上にかかる力の合計は約5kgである。今回の測定からローレンツ力によるフラットネスの変動も無視できると思われる。今後シミュレー

シオンによるローレンツ力とフラットネスの変化の関係を調べたい。

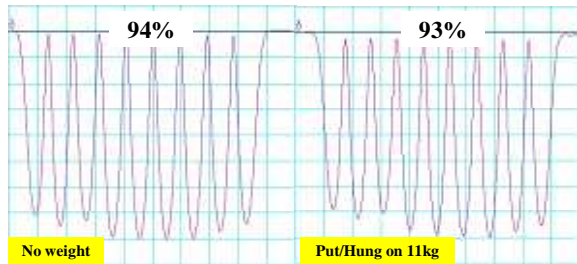


図5: 荷重試験によるフラットネス変化

weight		NO	4kg	7kg	11kg
Field flatness [%]	Put on top	94%	94%	93%	93%
	Hung on bottom	94%	94%	93%	93%

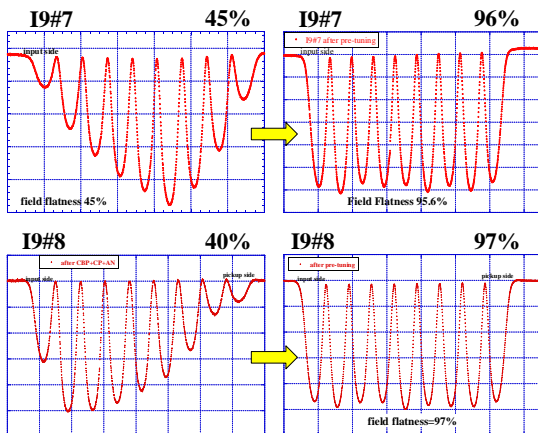
表2: I9#0によるフラットネス評価試験

5. New-I9#7、#8によるフラットネス評価

New-IICHIRO 9cell空洞#7、#8(I9#7、#8)によって行ったフラットネス測定試験について述べる。

5.1 製作時のフラットネス

空洞製作直後のフラットネスは非常に悪く40~45%レベルであった。2台の空洞を機械研磨、化学研磨、真空アニール処理を施した後にプリチューニングし、フラットネスを96~97%まで調整した。図6にチューニング前後のフラットネス測定結果を示す。



空洞製作時 プリチューニング後
図6: I9#7、#8製作直後とプリチューニング後

5.2 空洞ジグの脱着によるフラットネス評価

I9#7、#8はエンドプレート付きでそこを利用してジグを取り付ける。当初フラットネス調整後のジグ脱着テストで5~6%の落ちが見られた。その後のチェックでジグによる空洞へのストレスがあることがわかりジグに改良を加えてストレスがかからないようにした。その結果、ジグの有無、脱着によるフ

ラットネスの変化は $95 \pm 0.2\%$ 程度に抑えることが出来た。また空洞ジグの脱着とフラットネスの測定を3回繰り返し、再現性を調べた。再現性も同様に $95 \pm 0.2\%$ 程度であった。(図7)

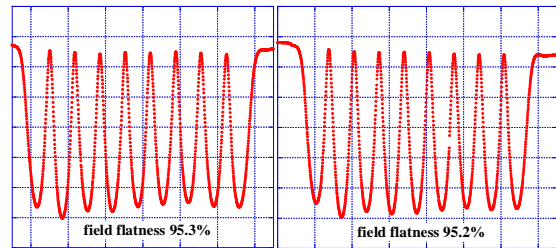


図7: ジグ脱着 + 繰り返しによるフラットネス測定

5.3 空洞姿勢によるフラットネスの変動評価

I9#5同様に空洞の姿勢によるフラットネスの変動評価を行った。水平方向、垂直方向で2%の差が見られた。ジグの調整により現在改善を図っている。

6. 最後に

I9#0、#5、#7、#8を用いたフラットネスの変動評価と問題点の洗い出しを行った。当初ジグの脱着によるフラットネスの劣化が問題になったが、空洞ジグの改良によって $\pm 0.2\%$ の変動にまで改善された。現在プリチューニング後のフラットネスは、空洞ハンドリング、輸送、電解研磨処理、組み立て、ベーキング、真空排気の段階までの各工程で95%レベルを維持できるようになった。I9#5、#7、#8を用いたフラットネス変動の評価は継続中である。さらに高いフラットネス調整を目指すと共にデータの蓄積を進める。特にEP処理と縦測定、2K冷却におけるフラットネスの確実な保障が課題である。図8に姿勢効果測定、EP処理後の測定の様子を示す。

7. 参考文献

- [1] F. Furuta, et al., in this proceeding
- [2] K. Saito, et al., in this proceeding

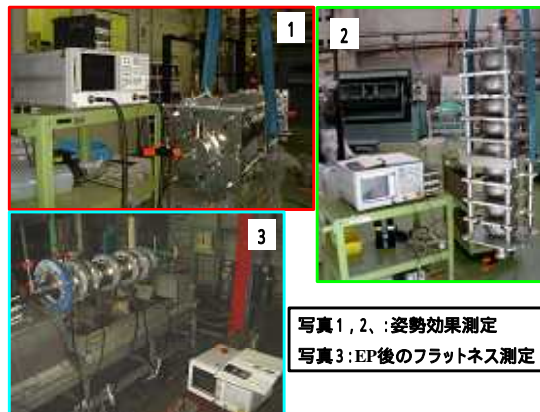


図8: 測定の様子