

Development of 50MV/m high gradient superconducting RF cavity

Fumio Furuta¹, Kenji Saito, Takayuki Saeki, Hitoshi Inoue, Yuichi Morozumi, Toshiyasu Higo, Yasuo Higashi,
Hiroshi Matsumoto, Kenji Ueno, Hiroshi Yamaoka, R. S. Orr, S. Kazakov
KEK, High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba 305-0801, Japan

Abstract

We have performed a series of vertical tests of three different designs of single cell Niobium superconducting cavities at 2 degrees Kelvin. These tests aimed at establishing that an accelerating gradient of 45 MV/m could be reached in any of the designs, while using the standard KEK surface preparation. The designs tested were the Cornell re-entrant shape (RE), the DESY/KEK Low Loss shape (LL), and the KEK ICHIRO series. These cavities achieved a gradient of between 47MV/m and 52MV/m. All three kinds cavities were used in a series of vertical tests to investigate details of the surface treatment. Of the six ICHIRO cavities tested, three exceeded 45 MV/m on the first test. In this paper we describe these tests and our future program for optimizing the surface preparation.

50MV/m高電界超伝導空洞の開発

1. はじめに

この10年、空洞の電界性能は40MV/mの壁に行き当たっていた。KEKの齊藤健治氏は、この制限はニオブ超伝導特性(高周波臨界磁場)に由来する理論限界で、その値は $1750 \pm 150 \text{Oe}$ と主張した。さらにその限界の中でも空洞形状の新設計で、特に、空洞内表面の最大表面磁場(H_p)と空洞中心軸上の加速電界(E_{acc})の比(H_p/E_{acc})を小さくすることで、50MV/mの高電界が期待できると提案した。これに基づきCornell大学でReentrant型単空洞(RE)が、JLAB/DESYではLow Loss型単空洞(LL)が、さらにLL形状をベースにKEKではICHIRO単空洞(IS)が、それぞれ設計、製作された。新形状ではそれまでスタンダードとしてきた空洞形状(TESLA形状)よりも H_p/E_{acc} が15%ほど小さく、その分だけ高い電界を達成できると予想された。図1にTESLA形状とRE形状、LL形状を、表1に計算されたそれぞれの空洞パラメータを比較する[1]。

2. 高電界の達成

KEKでRE、LL、IS空洞それぞれに対する2Kでの性能試験を行った。2005年7月にREで47MV/m、続く9月にはLLで46.3MV/m、さらに11月にIS#4で45MV/mを達成した。RE、LL空洞ではEPなどの表面処理を複数回繰り返しての達成であったが、IS#4では空洞製作～表面処理後の初回測定で高電界を達成した。これによって全ての新設計単セル空洞で、高電界の原理実証をすることが出来た。さらに追試験によって高電界の再現性も確認した。その後REでは52.3MV/m、LLでは47.3MV/mを達成し、IS#6においては53.5MV/mの世界記録を達成した(図2)。これによりKEKは、新形状の採用によって10年来の壁であった40MV/mの限界を破り、50MV/mの加速電界を達成するという、ブレイクスルーを起こした。

KEKでは、1994年に清浄表面の製作技術として高圧超純水洗浄(HPR)を実用化し、フィールドエミッション問題の長い歴史に王手をかけることで、電界強度30MV/mから40MV/mへのブレイクスルーをもたらしており、今回の50MV/mの達成はそれに続く2度目のブレイクスルーであった(図3)。また新形状に対し実験から見積もった臨界磁場 H_{cr} は $1750 \pm 150 \text{Oe}$ であり齊藤氏の説によくあっている。(図4)

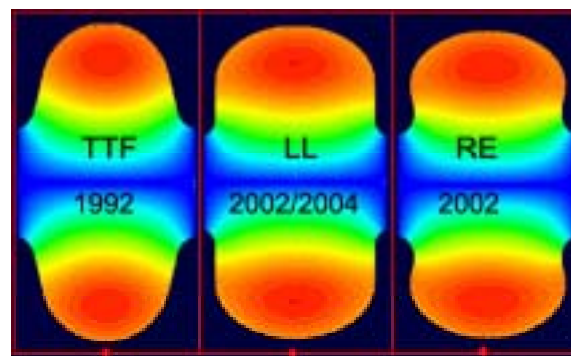


図1: 空洞形状の比較

	TESLA	LL	RE
Diameter [mm]	70	60	66
E_p/E_{acc}	2.0	2.36	2.21
H_p/E_{acc} [Oe/MV/m]	42.6	36.1	37.6
R/Q [W]	113.8	133.7	126.8
Γ [W]	271	284	277
E_{acc} max [MV/m]	41.1	48.5	46.5

表1: 空洞のRFパラメータ

¹ E-mail: furuta@post-cbandlc.kek.jp

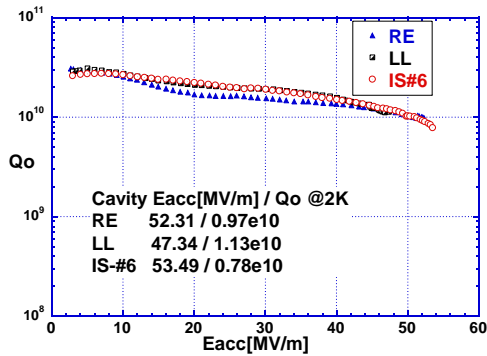


図2: RE, LL, IS 空洞測定結果

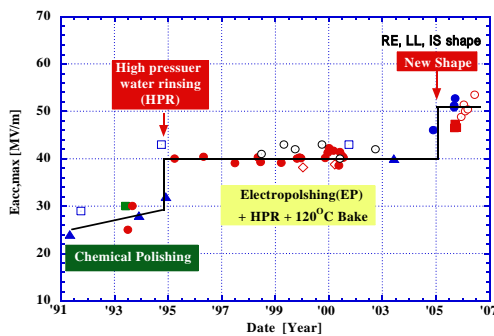


図3: 50mv/M達成によるブレイクスルー

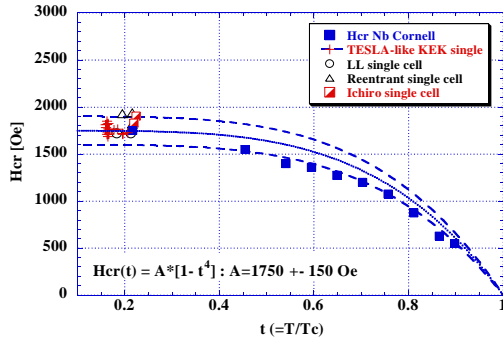


図4: 実験より見積もった臨界磁場

3. 空洞の製作と表面処理

空洞はNb板をプレス、トリム加工したハーフカップを二つ向かい合わせて電子ビーム溶接(EBW)し、そこにビームパイプとフランジをEBWして製作される。その後空洞内表面処理として、まず遠心パレル研磨(CBP)と呼ぶ機械研磨を行い、空洞表面の大きな表面欠陥を除去し、かつ溶接シームを滑らかにする(図5)。砥石と水を入れた空洞を機械で回し遠心力を利用して研磨するこのCBPプロセスは、1回につき4時間で、4種類の石を用いてトータル130~230μm研磨する。次に化学研磨(CP)でCBP時の砥粒による汚染表面を軽く除去(~10μm)する。CP液はフッ酸(46%)、硝酸(60%)、リン酸(85%)を体積比1:1:1で混合したもので、この時、研磨速度は室温25で10 μm/min.である。CBPやCP工程でニオブ中に吸蔵した水素を脱ガスするために真空熱処理(750、3時間)を行う。さらに電解研磨(EP)で80μm除去して滑らかな表面を作る(図6)。EP液はフッ酸

(46%)と硫酸(>93%)を体積比1:10で混合したものである。最後に 高圧超純水洗浄(HPR)、7MPaで1時間、を施して清浄表面を得る。その後ベーキング(120、48時間)、真空排気をして空洞性能試験に移る。このCBPからベーキングまでの空洞表面処理をKEK-WG5レシピと呼ぶ。

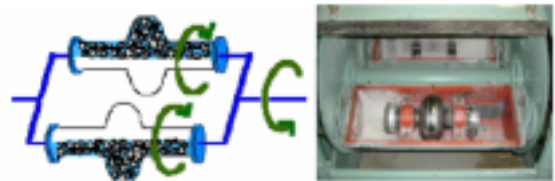


図5: CBP装置

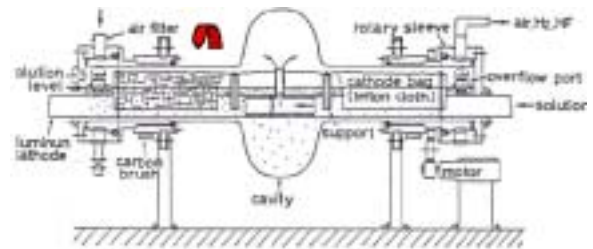


図6: EP装置

4. 表面処理レシピの確立

製作したIS空洞の6台(IS#2~#7)を用いてKEKの表面処理による高電界達成の歩留まり試験を行った。内3台(#2~#4)は外注製作した空洞、残り3台(#5~#7)はKEK機械工作センターで製作したものである。これは空洞の赤道部溶接に対する工業レベルの溶接法と、KEKの溶接法の性能信頼性試験の意味が含まれている。6台中3台(IS#4、5、6)で初回の表面処理によって45MV/m級の高電界を達成し、歩留まり50%を得た。残りの3台(IS#2、3、7)はクエンチやフィールドエミッション(FE)によって30~37MV/m付近で制限された。この初回試験の結果を図7に示す。

高電界を達成できなかった空洞に対する原因を分類した。まず、HPRまたは組み立て時の単純なミスによるゴミの混入で、これはFEを引き起こす可能性がある。これはHPRで改善できる。次にEP中に発生する硫黄や酸化膜の汚染によるもので、FEやQ-slope、ローフィールド

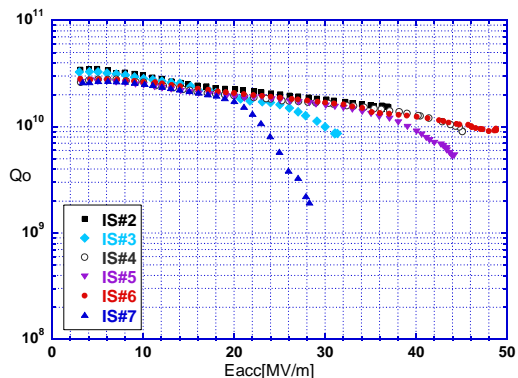


図7: IS空洞 初回性能測定結果

		IS#2	IS#3	IS#4	IS#5	IS#6	IS#7
KEK Recipe	Eacc	36.9	31.4	45.1	44.2	48.8	28.3
	Qo	1.53e10	8.66e9	9.07e9	5.38e9	9.56e9	1.94e9
+re-HPR		37.6	32.7	42.7		51.4	29.9
		1.42e10	7.27e9	5.66e9		7.78e9	1.1e10
+HF rinse		37.1 *	36.7	50.4 *		50.2	30.0 *
+HPR		1.64e10	1.43e10	9.97e9		3.9e9	3.33e9
+CP (10 μm)						41.0	40.5
+HPR+Baking						6.65e9	5.57e9
+EP (fresh acid, 3 μm)		41.6 *	40.3 *	41.1 *			
+HPR+Baking		1.00e10	1.28e10	1.17e10			
+EP (20-30μm)+EP (3 μm)		47.1		47.8			
+HPR+Baking		1.06e10		7.81e9			
+EP (20-30 μm)+EP (3 μm)			44.7 *	53.5			43.9 *
+HF rinse+HPR+Baking			0.98e10	7.83e9			1.17e10

表2: IS空洞6台による各表面処理に対する試験結果

ドでのクエンチを引き起こす可能性がある。これは軽くCP(~10μm)、もしくは新液による軽いEP(3μm)により改善できると思われる。さらに 内表面の傷やEBW跡のラフさが原因となるもので、FEやクエンチを起こすと考えられる。これを改善するにはCBP等による多量研磨が必要と予想される。

歩留まり50%の改善と残り3台の高電界達成を目標に空洞に対する表面処理を表2のような順序で追加していった。これは高電界未達成の原因が表面からどの程度のレベルにあるかを見極めることを目的にしており、再HPRから始め、徐々に表面層を研磨していく手法をとっている。表2には追加した表面処理と、それに対する性能測定結果(到達最大電界強度とそのときのQ値)が示してある。

まず、再HPRを行い、さらにフッ酸洗浄(20分)により0.2μm程度の研磨を行った。FEの改善や、Q値の回復などが見られたが、電界強度の改善はほとんどなかった。次に、軽いCP(10μm)や新液を使った軽いEP(3μm)を追加した。この処理によって電界強度が40MV/m付近に改善された。最後に通常のEP(20~30μm)と新液によるEP(3μm)さらにいくつかの空洞にはフッ酸洗浄を追加して試験を行った。この結果、残り3台の空洞全てが45MV/m級の電界を達成し、6台のIS空洞全てで高電界を達成した。この一連の試験から、高電界を達成出来なかった原因が、表面深さ30μm程度に存在することが示せた。

空洞を2K測定の後、約100Kで12時間以上維持し、再度2Kでの測定を行うという水素病に対する試験を複数回行った(表2中で*印のついたもの)。その結果、全ての試験でQ値の落ちはなく、水素吸蔵からくるQ病が我々の表面処理においては問題無いことを確認した。

IS空洞の試験結果に対するヒストグラムを作った。全ての測定結果に対し平均電界強度 37 ± 10 MV/mという結果を得、FEやQ-slopeを除いた結果に対しては平均 43 ± 5 MV/mを得た。軽いEPやフッ酸洗浄の追加で、我々のレシピの信頼性を上げ、より高い歩留まりを得られると言える(図8)。

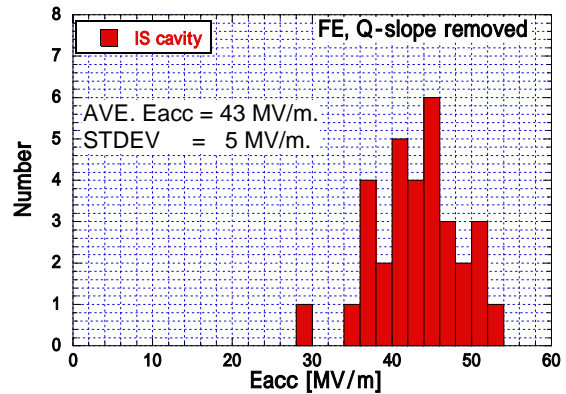


図8: IS空洞試験結果のヒストグラム

4. 最後に

RE, LL, ISの3つの新形状の空洞によって50MV/m級の高電界を達成した。IS空洞による試験では電界強度45MV/mに対し50%の歩留まりを得た。レシピに対する一連の試験から、通常EP20μm + 新液EP3μm、場合によってはフッ酸洗浄を追加、することで残りの50%も高電界を達成でき、表面30μm程度にその原因があることを明らかに出来た。一連の表面処理における水素病の問題が無いことも確認した。IS空洞の試験結果のうちクエンチした結果のヒストグラムより平均電界強度 43 ± 5 MV/mの結論を得、我々のレシピに改善を加えることで高い歩留まりが得られることが示せた。

参考文献

- [1] F. Furuta et al., "Experimental comparison at KEK of high gradient performance of different single cell superconducting cavity designs" Proc. of EPAC06, Edinburgh, June 2006.
- [2] <http://lcdev.kek.jp/ILC-AsiaWG/WG.php?wg=WG5>