RECENT RESULT OF THE CAVITY INSPECTION FOR THE SUPERCONDUCTING CAVITIES AT KEK-STF

Ken Watanabe[1,A)] , Hitoshi Hayano[A)] , Shuichi Noguchi[A)], Eiji Kako[A)] , Toshio Shishido[A)] , Yasuchika Yamamoto[A)] , Yoshihisa Iwashita[B)] , Yoichiro Kikuchi[C)]
[A)] KEK
1-1 Oho, Tsukuba, Japan, 305-0801
[B)] Institute for Chemical Research, Kyoto University
Uji, Kyoto, Japan 611-0011
[C)] Tohoku Gakuin University
Tagajyo, Miyagi, Japan,

Abstract

The inspection of inner surface of the superconducting rf cavities is essential in achieving high accelerating gradient. The camera system developed by the Kyoto-KEK collaboration is a good tool to survey defect locations and to analyse a defect shapes in the inner surface of the cavities for boost accelerating gradient yield of 1.3 GHz superconducting 9-cell cavities. The inspection of the five STF baseline cavities in each process was carried out to study relations between a defect shape and a heating location of the cavities in the vertical test. The careful inspection of the EBW seams and neighboring region at equator and iris parts was carried out before the vertical test.

The vertical tests of these cavities using T-map with fixed thermometer allocation were carried out at STF in KEK from December 2008 to July 2009. Non-uniform EBW seams in the equator area and the strain inside of cavity were found at the heating locations detected by T-map at high field. The inspection result of these cavities will be presented in this paper.

KEK-STFにおける超伝導加速空洞の空洞内面検査

１．はじめに

KEK-STFでは、超伝導加速空洞における空洞性能の歩留まり向上のために、高分解能カメラ（京都カメラシステム[1]）を用いた空洞内面検査を行っている。縦測定で観測される発熱位置およびそのときの加速電界と空洞内面に見られる欠陥（幾何学的形状変化やコンタミなど）との相関を調査するために、STF Baseline空洞（運転周波数1300MHz：空洞名称：MHI-05からMHI-09）を用いて各処理工程における空洞内面の状態を調べ、縦測定前に欠陥と思われる箇所を事前に調査して縦測定を行った。空洞内面の主な検査箇所は、セル赤道部およびアイリス部の電子ビーム溶接の溶接シームとその近傍の領域である。現在、空洞製作直後からの各表面処理工程における表面状態の変化を追跡しており、工業化における加速空洞の品質基準の明確化を試みている。また、これらの欠陥と空洞性能との相関を詳細に調べることで、空洞内面検査工程の自動化[2]に必要な情報が得られる。

２．縦測定前の内面検査工程について

空洞内面検査の工程を以下に示す。

A) 空洞受取後
B) Pre-EP（5μm）、EP-1（100μm）、アニール後
C) EP-2（20~50μm）、縦測定後

A)の検査は空洞性能の歩留まり向上における電子ビーム溶接の品質管理および溶接のオペレーターへのフィードバックのため重要なものである。
また、B)およびC)は表面処理時における作業の工程管理や電解研磨処理および洗浄・組み立てなどにおける工程管理に対する知見を得ることに繋がる。

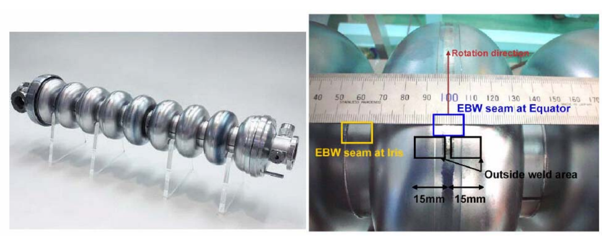


図１：STF Baseline空洞（MHI-Cavity）と観察箇所

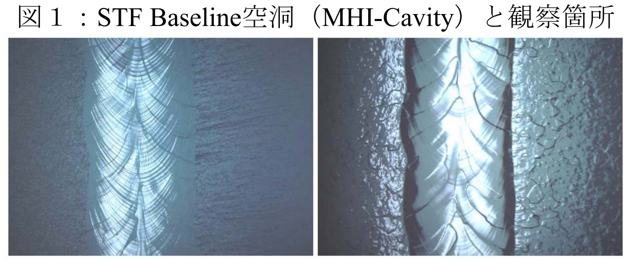


図２：空洞受取後（左）、EP-1後（右）における赤道部の表面状態（MHI-05）

図１にSTF Baseline空洞と内面検査における主な

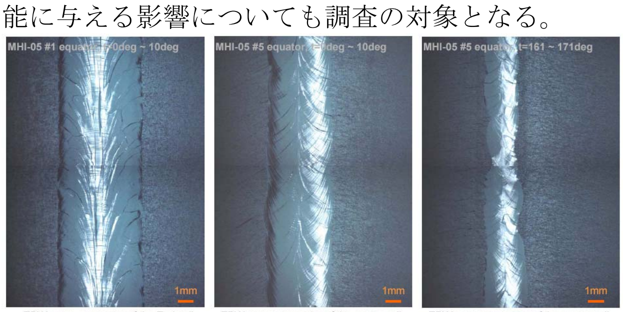
[1] E-mail: kenw@post.kek.jp

検査箇所を示す。図２にMHI-05の空洞受取後とEP-1後の赤道部における溶接シームの様子を示す。通常行っている観察位置は、赤道部およびアイリス部の電子ビーム溶接部すべてと赤道部の開先から±15mmの領域である。

３．各空洞における赤道部の電子ビーム溶接の状態

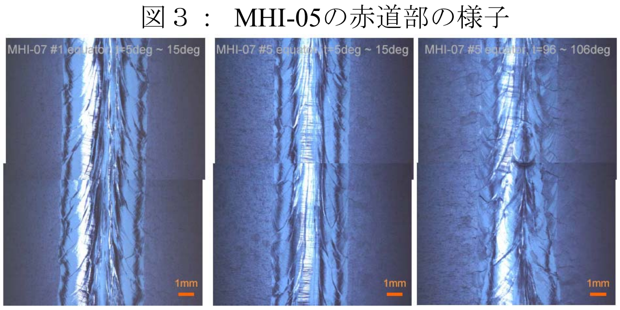
図３にMHI-05およびMHI-06、図4にMHI-07からMHI-09のエンドセルおよびセンターセルの赤道部における電子ビーム溶接シームの代表例を示す（空洞受取直後の状態）。ここで、MHI-05およびMHI-06は2007年度に製作され、一方、MHI-07、MHI-08およびMHI-09は2008年度に製作されたものであり、各ロッドの品質に差は見られなかった。

MHI-05およびMHI-06では、エンドセル（1-cellと9-cell）の溶接シームは赤道部全周を通して安定であった（幅、高さなど）。一方、センターセル（2-cell~8-cell）では、赤道部一周の間に安定と不安定な領域が混在していた（溶接シームの幅が2~5mmとばらつきが大きい）。この不安定な溶接シームができる原因として、トリム加工における開先部の厚みに対する工作精度（0.1mm程度）が考えられ、MHI-07からMHI-09では、電子ビーム溶接の条件を最適化し、赤道部全周を通して安定な溶接シームを得ることができた[3]。これら溶接シームの違いが空洞性能に与える影響についても調査の対象となる。



EBW seam at equator of the End cell (Uniform area) / EBW seam at equator of the center cell (uniform area) / EBW seam at equator of the center cell (non-uniform area)

図３： MHI-05の赤道部の様子



EBW seam at equator of the End cell / EBW seam at equator of the center cell / EBW seam at equator of the center cell (end of EBW seam)

図４：MHI-07の赤道部の様子

４．縦測定時に観測された発熱箇所と空洞内面の関係

2008年11月から2009年7月にかけて、MHI-05~MHI-08の4空洞についてSTFに建設された電解研磨施設で処理を行った後、縦測定を行った。縦測定時には空洞外面に固定式の温度マッピングを取り付け、常時クエンチ位置をモニターしている[4]。表1にMHI-05、MHI-06、MHI-07およびMHI-08の各縦測定で観測された発熱位置とそのときの電界強度および縦測定後に行った空洞内面検査の結果をまとめる。

MHI-05（1st、2nd）およびMHI-06（1st、4th）では、パスバンドモードの測定において、High fieldで発熱が観測された位置近傍に電子ビーム溶接シームが不安定な箇所が観測された（他にも不安定な箇所が存在するが、発熱が観測されない箇所もあった）。図5はMHI-05で観測された溶接シームが不安定な箇所の代表例である。図中のオレンジの円は温度センサーの位置を示している。図6に図5で示した箇所の空洞受取後の様子を示す。MHI-05（2nd）、およびMHI-06（4th）のπモードでは、約20MV/mでクエンチが起こっているが、この発熱箇所周辺に対して異常は観測されなかった。

一方、STF電解研磨処理施設ではEP液中のニオブの溶け込み量が増加したため、2009年5月にEP液を新液に交換した。EP液交換後、初めに処理を行った2空洞（1回目：EP-2 MHI-06 5th、2回目：EP-2 MHI-07 1st）はField emissionで空洞性能が制限された。

表１：縦測定後に行った空洞内面検査の結果

Cavity	# of V.T.	Eacc [MV/m] @ Mode Cause of limitation	Heating location	Result of inspection (after V.T. with T-map)
MHI-05	1st	27.3 @ Pi-mode Field emission	#5 cell equator, t=60~150deg.	Unstable : Width of the EBW seam is narrow. No defect in outside weld area.
	2nd	19.7 @ Pi, 8/9, 4/9, 3/9 Defect ? Quench	#8 cell equator, t=90~150deg.	No defect in outside weld area.
		25.6 (max 32.9) @ 5/9 Quench	#3 cell equator, t=180~240deg.	Unstable : Width of the EBW seam is narrow. No defect in outside weld area.
		29.2 @ 7/9 Quench	#5 cell equator, t=120~180deg.	Unstable : Width of the EBW seam is narrow. No defect in outside weld area.
		32.9 @ 6/9 Quench	#6 cell equator, t=270~360deg.	Unstable : Width of the EBW seam is narrow. No defect in outside weld area.
MHI-06	1st	25.7 @ Pi-mode Field emission ?	#7 cell equator, t=150~180deg.	Unstable : Width of the EBW seam is narrow. No defect in outside weld area.
		35.4 @ 3/9 Quench	#5 cell equator, t=200~300deg.	Unstable : Width of the EBW seam is narrow. No defect in outside weld area.
	4th	19.6 @ Pi, 8/9, 7/9, 6/9, 5/9, 4/9. Defect ? Quench	#9 cell equator, t=300~350deg.	No defect in outside weld area.
		39.9 @ 3/9 Quench	#5 cell equator, t=200~300deg.	Unstable : Width of the EBW seam is narrow. No defect in outside weld area.
	5th	22.1@ Pi-mode Field emission	No detection due to RF cable trouble	------------------------------
		A lot of stains found after V.T. by cavity inspection. The stains were observed all over of inside of cavity.		
		Note: EP acid changed before EP-2 process. EP-2 process was First time after changing EP acid (New one) at KEK-STF.		

Cavity	# of V.T.	Eacc [MV/m] @ Mode Cause of limitation	Heating location	Result of inspection (after V.T. with T-map)
MHI-07	1st	16.5 @ Pi-mode Field emission	#1 cell equator, t=60~150deg.	Stain
		16.7~19.1 @ 8/9, 7/9, 6/9	#1 cell equator, t=60~100deg.	Stain
		24.8@ 5/9 Quench	#1 cell equator, t=230~340deg.	Stain
		30.6@ 3/9 Quench	#2 cell equator, t=120~210deg.	Stain
		26.7@ 4/9 Quench	#4 cell equator, t=30~120deg.	Stain
		A lot of stains found after V.T. by cavity inspection. The stains were observed all over of inside of cavity.		
		Note: EP-2 process was Second time after changing EP acid (New one) at KEK-STF.		
MHI-08	1st	16.0 @ Pi-mode Quench	#2 cell equator, t=140~200deg.	Heavy Stain: Contamination ? #2 cell equator area, t=172 deg. Size = 450*800μm
		16.0 ~ 17.0 @ Pi, 8/9, 4/9, 3/9, Quench	#2 cell equator, t=140~200deg.	Heavy Stain: Contamination ? #2 cell equator area, t=172 deg. Size = 450*800μm
		28.4 @ 7/9 Quench	#1 cell equator, t=180~240deg.	Stain
		25.3 ~ 26.5@ 6/9, 5/9 Quench	#3 cell equator, t=200~270deg.	Little bit stain in outside weld area.
		A lot of stains found after V.T. by cavity inspection. The stains were observed at both side beam pipe, #1~ #3-cell and #7 ~ #9-cell area of inside of cavity.		
		EP-2 process was Third time after changing EP acid at KEK-STF.		

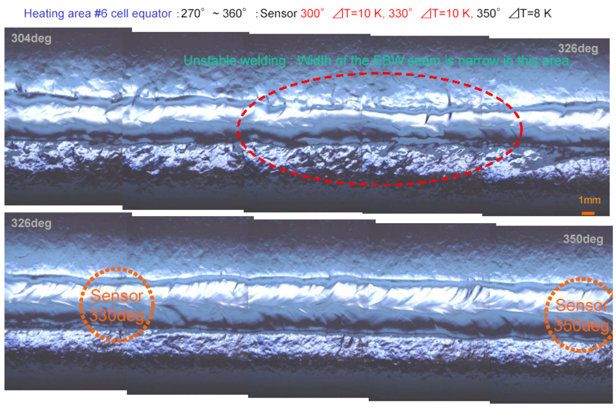


図５： MHI-05（2nd）で観測された発熱箇所の内面状態（縦測定後：#6-cell 赤道部、角度304~350°）

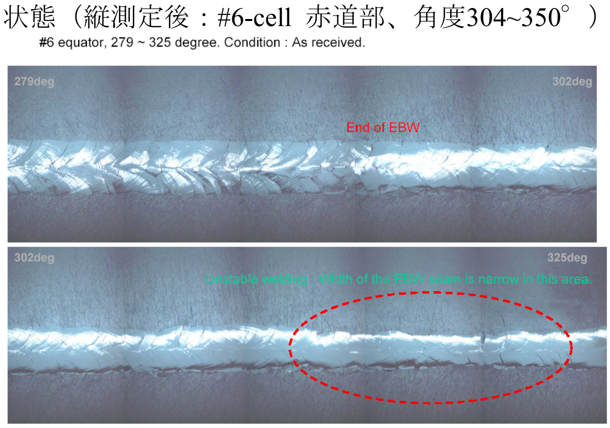


図６：MHI-05で観測された発熱箇所の内面状態（受け取り直後：#6-cell 赤道部、角度279~325°）

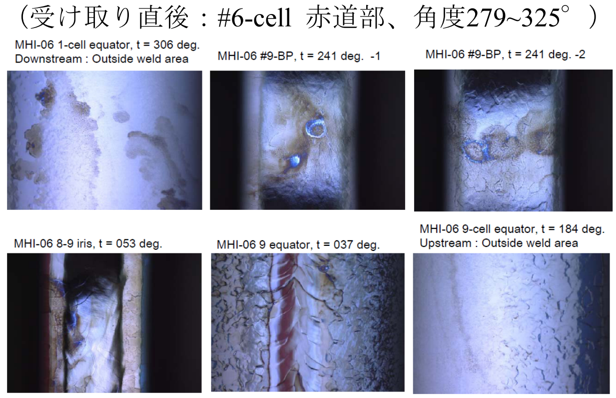


図７：新液でEP-2を行った際、空洞内部に発生したシミの様子（例：MHI-06 5thの縦測定後の様子）

図７はEP液交換後、初めて処理をしたMHI-06（5th）の内面状態であり、空洞内面全域に亘ってシミ状の異常が多数観測された。また、2回目に処理をしたMHI-07（1st）に関しても同様に空洞内面全域に亘って同様の異常が多数観測された。また、縦測定時に観測された発熱位置に対しては、近傍にシミ状の異常が観測されるケースが多かった。3回目に処理を行ったMHI-08（1st）では、シミ状の異常の総量は格段に減少し、程度の軽いものが両ビームパイプ、1-cell~3-cellおよび7-cell~9-cellに観測された。空洞性能は2-cell赤道部におけるクエンチで制限され、電界強度は16MV/mであった。図8にMHI-08（1st）の2-cellで観測された発熱箇所中心のEP-2処理前後における内面状態を示す。縦測定後観測した結果、2-cell赤道部のt=172°の位置に粒界に沿った形で黒く変質している異常が見つかった（サイズ：450μm×800μm）。EP-2前の様子では、このような異常は観測されていないため、EP-2以降の工程で発生したものであると考えられる。また、今回観測されたシミ状の異常などの詳細な成分分析は、現在、KEKの加藤、西脇らの表面研究チームが調査中である。

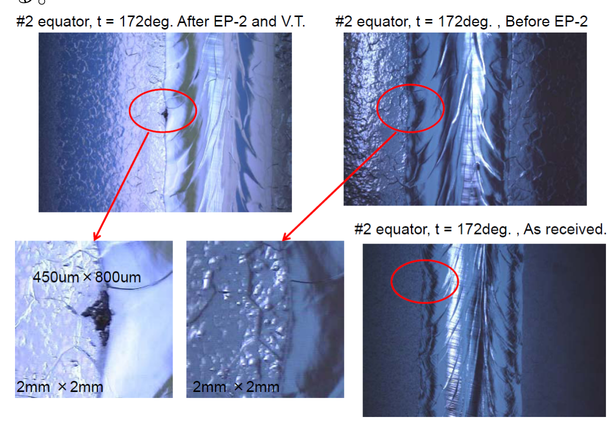


図８：MHI-08（1st）で観測された発熱箇所の内面状態（EP-2前後での比較：2-cell、角度172°）

５．まとめ

今回、超伝導加速空洞における空洞性能の歩留まり向上のために、京都カメラシステムを用いて、STF baseline空洞（MHI-05~MHI-09）の各処理工程における空洞内面検査を行った。MHI-05およびMHI-06では、電子ビーム溶接シームの不安定な箇所の一部でHigh fieldに達した際クエンチが観測された。MHI-07およびMHI-08では、表面状態に対してシミ状の異常などが観測された。依然として空洞性能はField emissionで制限される場合が多いため、電子ビーム溶接シームなどの空洞の品質を評価するにあたっては、各処理工程に対するより深い理解が必要である。

参考文献

[1] Y. Iwashita et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 11, 093501 (2008).

[2] Y. Kikuchi et al., “空洞内面検査カメラの自動画像取得と欠陥検出”, in this meeting.

[3] 人見 晴樹, “三菱重工業におけるILCに向けた超伝導加速空洞の開発状況”, in this meeting.

[4] Y. Yamamoto et, al., “A New Diagnostic System for the Vertical test of 1.3 GHz Superconducting 9-cell cavities at KEK-STF”, PAC’09, Vancouver, Canada, (2009).