

Development of Cavity Diagnostics System for ERL Superconducting Cavity

Hiroshi Sakai^{1,A)}, Kensei Umemori^{A)}, Takeshi Takahashi^{A)}, Takaaki Furuya^{A)},
Kenji Shinoe^{B)}, Atsushi Ishii^{B)}, Masaru Sawamura^{C)}, Toshiya Muto^{D)}

^{A)} KEK, High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801

^{B)} Institute for Solid State Physics, University of Tokyo
5-1-5 Kashiwanoha Kashiwa-shi, Chiba, Japan, 277-8581

^{C)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA)
2-4 Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195

^{D)} Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University
1-2-1 Mikamine, Taihaku-ku, Sendai, Miyagi, 982-0826

Abstract

We are developing the superconducting (SC) cavity for Energy Recovery Linac (ERL) in Japan[1]. In order to survey the electron emission and the heating spot of the cavity inner surface in detail, cavity diagnostics with the rotating mapping system was applied. Two types of sensors, one of which was the carbon resistor and the other was the Si PIN photo diode, were set to detect the temperature rise and electron emission. By rotating the sensor arrays around the cavity axis, a lot of information was obtained all over the cavity surface in detail. This paper reports the results of vertical tests by using this rotating mapping system with the single-cell & 9-cell Nb ERL cavity. We also report the research of the measurement system by using fiber scope on vertical test.

ERL超伝導加速空洞での空洞診断装置の開発

1. ERL空洞診断装置の開発に向けて

次世代光源を目指すエネルギー回収型リニアック(ERL)の超伝導主加速空洞は1.3GHzの周波数で $Q_0=1 \times 10^{10}$ 、15-20MV/mの加速勾配を目指しているが、100mAもの大電流運転のエネルギー回収を可能とするため、図1に示すように徹底したHOM対策を行った空洞形状になっている[2, 3]。この空洞形状の可否を見極めるべく空洞測定と空洞診断装置の開発を行ってきた。

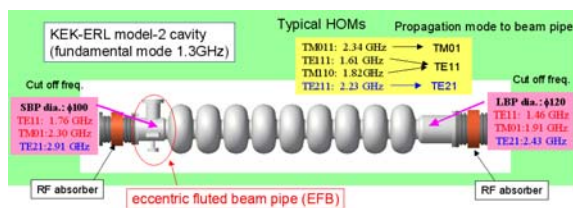


図1：ERL主加速器用空洞の概要

空洞劣化を引き起こす原因は局所的な空洞内面欠損などによるクエンチと空洞内面の小さな埃などによるfield emissionによる劣化が主なものである。特にこれらによる発熱や放射線分布(mapping)を測定することで空洞の劣化場所の特定を行うことが重要である。そこで空洞の診断を行うため、固定型mapping[4, 5]とは異なり、回転型のmappingシステムを構築した。炭素温度計と

PIN diodeをある角度上に空洞外面に設置し、回転させることで、温度測定、放射線測定を行う。固定型に比べ、センサー数の軽減と同時に回転角度の分解能で空洞分布の詳細測定が可能となる。このような回転型のmapping装置はTESLA空洞にて、温度mappingが行われたが[6]、我々の空洞はTESLA空洞に対し、同じ加速勾配で、iris部の電場が1.5倍と大きくなり、field emissionを誘起しやすい空洞となっている。それ故、我々の空洞では、詳細な放射線(X線)測定を行えることが重要である。そこで、我々はまず、KEKにて行われてきたL-bandのシングル空洞の測定装置[7]をもとに、詳細な放射線測定が行える新たな回転マッピング装置をERL用のシングル空洞測定用に製作した。[8]

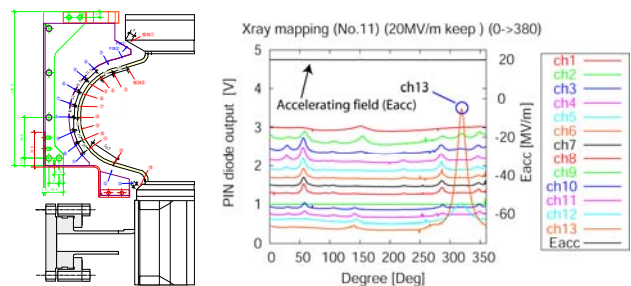


図2：ERL シングル空洞+空洞測定装置(左)。X線mappingの測定結果(右)

図2(左)はERLシングル空洞とその回転マッピ

¹ E-mail: sakai.hiroshi@kek.jp

ング測定装置である。13個の炭素温度計（図青色部）に加え、新たにPIN diode（図赤部）が一軸上に設置され、それが空洞の回りを歯車を介し、回るというものである。図2（右）はそのX線mappingの測定結果である。20MV/mにfieldをkeepした際にfield emissionが多く発生している状況でのデータであるが、PIN diodeの出力を空洞の周囲の角度にplotしたところ、下のiris部分に急峻なpeakや空洞内でのtraceが見られ。Q値劣化に対して、この放射線測定値が上昇していくことが判明した。このPIN diodeにて詳細な放射線測定が可能であることがわかり、9セル用の回転マッピングシステムへの設計製作へと移行した。

2. ERL 9セル空洞回転マッピング装置

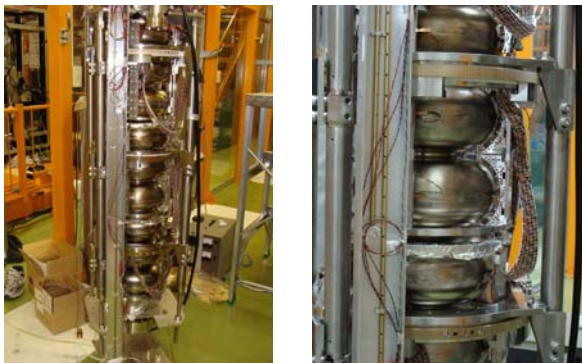


図3：ERL 9セル空洞（左）、マッピング部（右）

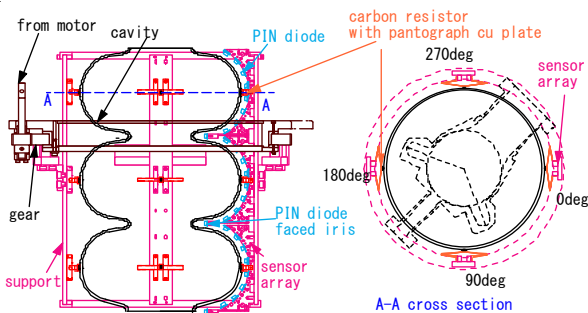


図4：回転マッピング装置の詳細図。水色がPIN diodeの配列。橙色がバネ付きの炭素温度計。

図3はERL 9セル用の縦測定のsetupを示す。その詳細は図4に示す。3セル毎に1つのmapping装置が歯車付きで配置されている。それが3つあり、9セルのmappingを行うというものである。セル毎に8つのPIN diode(HAMAMATSU, S5821-02)と各iris部にPIN diodeが1つの角度に合計82個並んでおり、これらが、それぞれの歯車を介し、各モーターを通じ、空洞の回りを1回転することで9セル全てのX線のmappingを行う。炭素温度計(Allen-Bradley, 50Ω)は各セルの赤道部に90度

毎に4つ、合計36個設置されている。炭素温度計は回転装置に固定されており、PIN diode同様、空洞の回りを回転する。空洞との接触を保つため、図4に示すように、パンタグラフタイプのリン青銅のバネにより、炭素温度計と空洞が緊密にくっついたまま、回転する。このように3セル毎に分けた理由は9セル空洞のkinkや全長の伸びに回転マッピング装置の設置を柔軟に対応すること、また各モーター毎の炭素温度計の回転摩擦の軽減を目的としており、2K低温下での回転動作を確実にすることを意図している。それぞれのデータはAC noise削減のため、0.5sでデータ収集を行う。炭素温度計は2K冷却中にSi温度計にて校正される。

3. ERL 9セル空洞縦測定結果

図5が回転マッピング装置を設置してからの縦測定の結果である[9]。回転マッピング装置は4回目の測定以降に導入した。そのうち、6、8回は真空リークで測定ができなかったため、第4、5、7、9回の縦測定結果をパスバンド測定前後の測定結果を含め、図5に掲載している。

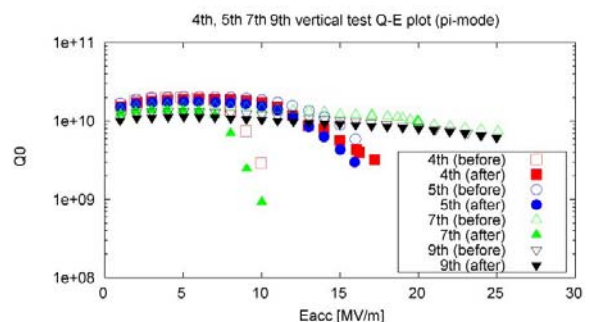


図5：縦測定結果(第4、5、7、9回)

第1-3回目の縦測定ではfield emissionが激しく第4回目の測定の前に50μmの電解研磨の表面処理を行い、4回目の測定を行った。またその再現性を見るために、昇温した後に表面処理は何も行わず再度縦測定を実施したのが5回目の測定である。図5に見られるように4回目、5回目とも10MV/mからQ値の劣化が始まり、16-17MV/mが最大加速勾配となっている。そのQ値の劣化に伴い、radiationモニターの値が増えていることからfield emissionが同2回の測定では起こったものとされる。そこで回転マッピング装置を用いてX線のmappingを行った。図6の左図が4回目縦測定時のπ-mode(加速モード)で加速勾配13.9MV/mの時のX線mappingの測定結果である。8-9irisに330°(FWHM10°)の位置で急峻なX線のpeakが見られると同時に1-6の各iris部で150°と中心とした広範なX線分布が見られている。これ以外のパス

バンド測定では $8/9\pi, 7/9\pi, 6/9\pi$ -modeでも8-9 irisの 330° に急峻なpeakが見られた。但し、このパスバンドではその他の広範なX線分布は見られなかった。5回目の縦測定においても π -modeにて全く同じ分布を再現したことから、この8-9iris部がX線発生場所だと疑い、空洞を開け、内面検査システムにて空洞内面の観察を行った[10]。

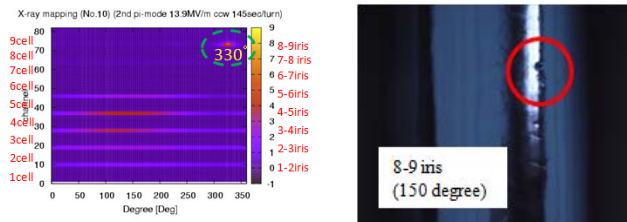


図6：4回目加速モードのX線マッピング測定結果(左)。内面測定時の8-9iris部の突起(右)。

図6の右図が内面検査時の8-9irisの 150° 部での測定結果である。高さ数 $10\mu\text{m}$ の幅数 $100\mu\text{m}$ の突起が見られた。特にこの場所はX線マッピングでの 330° のピークの対面でありなおかつ加速モードの広範な分布のピークの角度でもあり、この突起がX線発生源の疑いが高く、次の縦測定前に局所研磨にてこの突起を取り除いた。その結果第7回目の結果では図5に見られるように 25MV/m の加速勾配まで空洞性能が改善した。特に 20MV/m までは放射線が見られず、field emissionの改善が顕著に見られた。図7に見られるように2cellの $180\text{-}240^\circ$ の赤道部に炭素温度計による温度上昇が 25MV/m でのクエンチの際に見られ、内面欠損による発熱が 25MV/m の加速勾配を制限していることがわかる。その他のセルの加速勾配の制限を見るために、特に2セルにfieldが立たない $6/9\pi$ -modeの測定を行い、 36MV/m の勾配まで達することがわかったが、その加速勾配にて突然、バーストが起これ、その後は π -modeでは 10MV/m の加速勾配までしか行かないようになった。

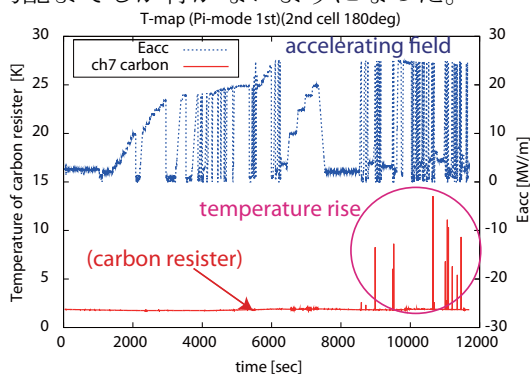


図7：7回目の2セル $180\text{-}240^\circ$ での温度上昇。

図8がパスバンド測定後の 9MV/m の加速勾配での π -modeでのX線マッピングの結果である。バースト前には見られなかった多数のX線トレー

スが見られており、バースト後に多数の小さなX線発生に参与する微細粒子がまき散らされ、性能劣化になったものと予測される。

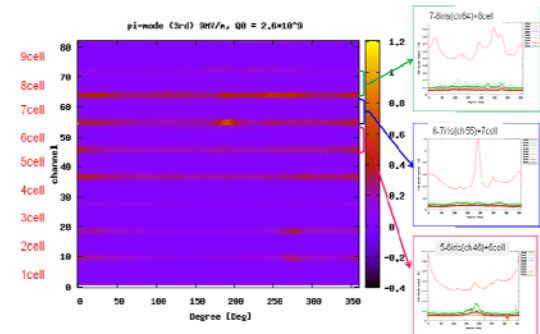


図8：7回目加速モードのX線マッピング測定結果。右図は各セルでの1次元トレース。

7回目測定後に再度内面検査を行った所、 25MV/m のクエンチ時に発熱が見られた2セル 200 度付近にて、深さ $10\mu\text{m}$ 、幅 $200\mu\text{m}$ 程度のピットが見つかっており、これがバースト前の加速勾配の空洞性能をリミットしていると予想される。残念ながら、多数見られたX線マッピングでのトレースの候補となる角度には内面検査でははっきりとしたX線発生源は今回は確認されず、微小な埃などを除去するため、そのまま再度表面処理を行う事となった。処理後、図5に示されるように9回目の測定にて、 25MV/m まで達成することが確認された。Field emissionは 15MV/m から発生したが、7回目とは異なり、X線の発生場所3~4か所のみであることが判明した。特に図9に示すように5セル 110° から軸方向に9セル方向にX線が広がる様子が見られ、5セル付近がX線発生源ではないかと予想される。

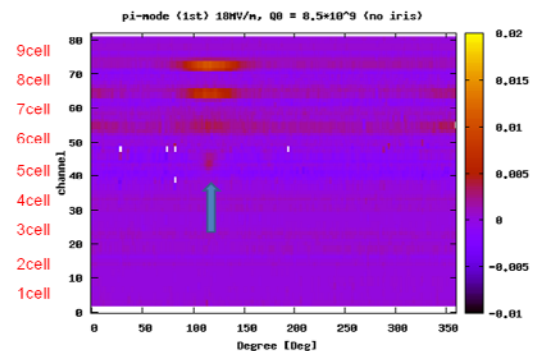


図9：9回目加速モードのX線マッピング測定結果。この図はiris部を除いた図であり、セル内部のX線の様子を示している。

4. ファイバーによる空洞診断開発

ERLシングル空洞測定時には空洞発熱時に表面の振る舞いやクライオスタット内の可視化を目的として、ファイバーによる、クライオスタット内の可視化システムを作成した。図10左図が測定装置概念図であり、図10右図は空洞の真上をファイバーを通じ、観察しているところである。ファイバーは石英でできており、画素数は12000画素のファイバー(黒田オプトニクス)である。このファイバーからライトガイドを通じて光を照射することで、空洞天板の様子やクライオスタット内のHe液面の変化などの詳細が観測され、2Kでもファイバーが問題なく動作することを確認した。また4K測定時では空洞などの発熱によるHeの沸騰の様子も観測された。今回はファイバー低温テストを兼ねた測定であり、上からのみの観測であったが、今後回転マッピングシステムなどにこのファイバーを備え付けておけば、空洞外面の発熱などの詳細を沸騰の泡などの観測により同定できることなど、様々な活用が期待されうると思われる。



図10：クライオスタット内可視化システム概念図(左)。ファイバーによる2K条件下での空洞上部の観測。空洞のインポートポートが見える(右)。

5. まとめ

ERL 空洞の開発を通じ、空洞診断システムの開発を行ってきた。特に空洞からの詳細な放射線測定を目的として製作された回転マッピング装置は、我々の空洞性能評価を決める非常に強力な診断ツールとなった。このような詳細なX線マッピングの測定は今まで前例がなく、今後 ERL 空洞の実機空洞の開発とともに詳細なデータを蓄積し、計算と実測の比較を行い、空洞の詳細な性能評価、及び空洞劣化メカニズムの解明を行う予定である。また、9セル用のファイバーによる可視化や、音波センサーなどの様々な空洞診断装置の開発も時間の許す限り、並列して行っていく予定である。

参考文献

- [1] S.Sakanaka et al., Proc. of IPAC2010, p2338
- [2] M. Sawamura et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 13, 022003 (2010)
- [3] K.Umemori et al., Proc. of APAC2007, p. 570.
- [4] J.Knobloch et al. Rev. Sci. Instrum., 65:3521 (1995)
- [5] R.Roth et. al., Proc. of 5th SRF workshop, p599 (1991)
- [6] Q.S.Shu et al, Proc. of PAC95, p1639.
- [7] M.Ohara, "Development of L-band superconducting RF cavities and diagnostics" 修士論文 (1993)
- [8] H.Sakai et al., Proc. of EPAC2008, p907.
- [9] K.Umemori et al. Proc. of IPAC2010, p2956.
- [10] Y. Iwashita et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 11, 093501 (2008).