

話 題

KEK の長期海外派遣制度を利用した 1 年間の TRIUMF 滞在報告

宍戸 寿郎*

A One-Year Stay Report at TRIUMF using the Support Program for Long-Term Research Abroad of KEK

Toshio SHISHIDO*

Abstract

I was working at TRIUMF in Vancouver for a year from April 2015, using the support program for long-term research abroad of KEK. I joined in the performance tests of 9 cell superconducting cavities for ARIEL#3 and #4, and the modularization of ARIEL#3. The ICM2 module composed of ARIEL#3 was completed in March 2016. Below is a one-year stay report at TRIUMF.

1. はじめに

2015年4月より1年間、KEKの長期海外派遣制度を利用して、カナダ、バンクーバーのTRIUMFに滞在しました。TRIUMFではRobert Laxdal教授が率いるSCRF (Superconducting Radio Frequency) グループに加わり、主に、現在TRIUMFで建設中のARIEL (Advanced Rare Isotope Laboratory)[†]用1.3 GHz 9セル超伝導空洞の測定、モジュール化作業に参加しました。

2. 海外派遣制度

KEKの技術職員の場合、CERNへの海外派遣制度を利用するのが一般的です。この制度はKEKだけでなく、CERNに関係のある大学等所属職員も応募する事が可能です。基本的に若手職員用の派遣制度であり、KEKでは技師、准技師、技術員の方が対象となっています。一方で長期海外派遣制度では職階、派遣先が限定されないので、専門技師以上の方（勿論若手も可）、教員の方が海外派遣を希望する場合はこの制度を利用する事になります。これはKEK内部で閉じた制度であり、各自が所属する系の主幹、所属長の推薦を得た後、所長会議での承認を得て、機構長が派遣を決定します。派遣期間は最長2年ですが、原則的

に1年です。

3. SCRF グループ

TRIUMFのSCRFグループはRobert Laxdal教授を筆頭に、Researcher/Technologistとして空洞表面処理担当が1名、空洞全般担当が2名、Technicianが3名からなります。超伝導空洞の測定や、ビーム運転には冷凍機、低電力、高電力の各グループが加わります。毎週火曜日の11時からSCRF Meetingが、木曜11時からISAC-II/VECC Meeting (Isotope Separator and Accelerator-II/Variable Energy Cyclotron Centre in Kolkata, India)が開催され、出席者全員から進捗状況その他の報告がなされて活発な議論が行われています。

このグループではARIEL用1.3 GHz 9セル超伝導空洞、韓国IBS (Institute for Basic Science)が進めているRISP (Rare Isotope Science Project)用QWR, HWR (Quarter/Half Wave Resonator)、カナダの空洞製造メーカーであるPAVAC製QWR, HWRの処理、測定、SLACで製造された入力カプラーの試験、Michigan大学やFNALとの共同研究を行っています。その他、R&D項目として、1セル超伝導空洞のVEP (Vertical ElectroPolishing) 処理装置の開発、空洞をアニー

* 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization
(E-mail: shishido@post.kek.jp)

[†] <http://www.triumf.ca/ariel>

ルするための RF Induction Oven の製造を自前で行っています。少人数グループでありながら、抱えている仕事は多く、非常に活動的です。

私の滞在中は、ARIEL#3, #4 の性能測定, #3 のモジュール化, ISAC-II ビームラインに設置済みであった SCB#1, SCB#4 内の Medium β 空洞 (各タンクに 4 台) の性能劣化を回復させるべく, 両タンクのラインからの分離, 分解, 空洞の化学研磨を含む表面処理, 再組み立て, 新設計された入力カプラーへの交換作業, ビームラインへの復帰も行われました。

4. ARIEL 用 1.3 GHz 9 セル超伝導空洞

4.1 概要

私は, KEK では ILC 用 1.3 GHz 9 セル超伝導空洞の仕事に従事しています。そのため, TRIUMF での主な関心は ARIEL 用 1.3 GHz 9 セル超伝導空洞でした。派遣当時, ARIEL#3, #4 の空洞処理, 測定を行っていました (図 1)。この空洞には, KEK での cERL 用入射部空洞と同様に入力カプラーポートが 2 つあります。ARIEL は同位体物理, 医療用同位体, 加速器技術の研究開発用施設ですが, 将来的には ERL としての利用も考えられています。

加速器の構成として, 9 セル空洞を入射器に 1 台, EACA, EACB モジュールに各 2 台, 合計 5 台が用いられ, 各空洞のエネルギーゲインは 10 MeV で, 最終的にはビームエネルギー 50 MeV を仕様としています¹⁾ (図 2)。

2014 年 10 月に, 入射器内の ARIEL#1 と, 本来 9 セル空洞 2 台が収容されるはずの EACA モジュール内に ARIEL#2 と Dummy 空洞が設置され (図 2, 1 番上の構成), 9 セル空洞 2 台による 23 MeV のビーム加速に成功しています (図 3)²⁾。



図 1 ARIEL#3 空洞

4.2 空洞表面処理

TRIUMF での超伝導空洞表面処理は CP (Chemical Polishing; 化学研磨, 図 4) です。

CP で得られる最大加速電場は約 20 MV/m, 要求される加速電場が 10 MV/m であるため十分ではありますが, 空洞単体の性能測定時, 数 MV/m での FE (Field Emission; 電界放出電子) に苦戦しており, 将来的には超伝導空洞で高加速電場を得るための標準的処理 EP (ElectroPolishing; 電解研磨) を導入すべきだと思います。

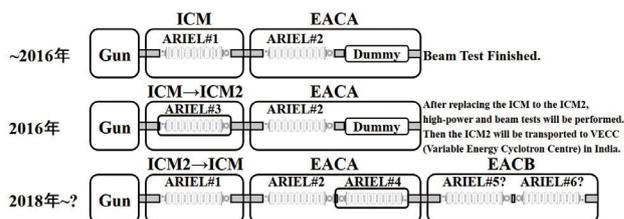


図 2 ARIEL の入射器, 加速空洞の構成

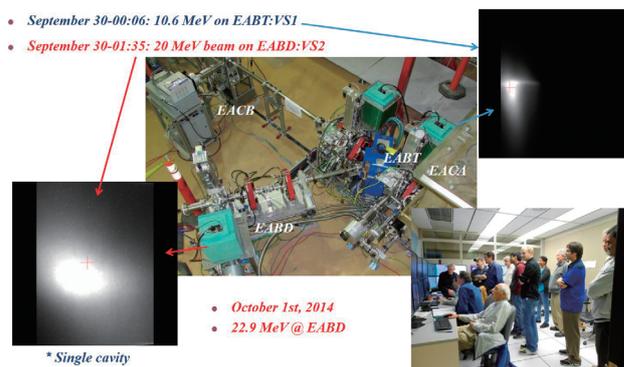


図 3 23 MeV のビーム加速

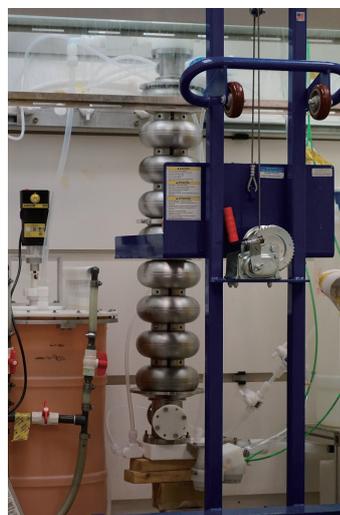


図 4 空洞の化学研磨処理

なお、1セル空洞用 VEP とその空洞をアニールするための RF Induction Oven の R&D と設置が進行中です。私の滞在中、8回の VEP 試験が行われました^{3,4)}。

通常、測定前の標準的な空洞処理としては

CP → 洗浄剤 Liquinox を混ぜた水槽内で超音波洗浄 → 洗浄剤なしの水槽内で超音波洗浄 → クラス 100 クリーンルーム内での超純水、700 psi (約 5 MPa) の高圧洗浄 → 空洞各ポート開放状態で内面乾燥 → クラス 10 クリーンルーム内での測定のための組み立て

となります。空洞のベーキングは行いません。一連の処理は水曜に CP 開始、空洞を上下反転させて高圧洗浄、その後、クラス 10 へ空洞を移動して土日を跨いで乾燥、週明けに組み立てとなります。

KEK の場合、高圧洗浄の圧力は 8 MPa、EP 開始から組み立てまで 2 日、その後 140°C 48 時間ベーキングとなります。クラス 10 環境下とはいえ、処理後の空洞を極力開放しないのが KEK の方針ですが、TRIUMF では清浄度を絶対的に信用している印象を受けました。

4.3 空洞単体測定

図 5 に空洞単体での性能測定の結果を示します⁵⁾。空洞の入力カップラーポートフランジ面にエッジが切ってありました。真空シール材として銅ガスケットを使用しますが、締め付けトルクの管理をせず、力任せに締めるため、測定回数が増えるにつれてエッジがなまり、それが原因で超流

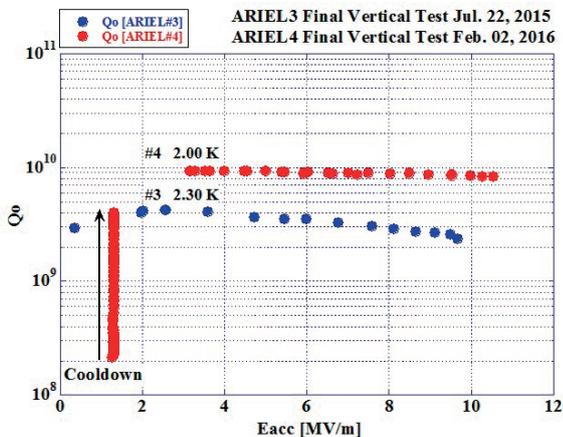


図 5 空洞単体性能試験最終結果

動液体ヘリウム環境下でのリーク (Superleak) が起こりました。ARIEL#3 ではこのリークを止められず、2.30 K で測定が行われました。ARIEL#4 では、Superleak は起こりませんでした。超流動転移 30 分後に空洞内真空バーストが起こりました。原因は不明ですが測定は続行されて最大加速電場約 10.5 MV/m の性能が得られました。

4.4 ARIEL#3 のモジュール化

7月に最終測定の終わった ARIEL#3 は、液体ヘリウムジャケットの溶接を行うために、製造メーカーの PAVAC へ搬送されました。戻って来た空洞の電場平坦度が劣化していたためチューニングを行い、電場平坦度の調整と、空洞を立て、上側ビームパイプに錘を乗せてばね定数の測定を行いました。その後、脱脂剤による空洞内面の超音波洗浄、超純水高圧洗浄の工程を経て、2015年11月下旬よりモジュール化が始まりました。ここでも最終測定終了後はモジュール化まで決して空洞内面を開放しない、我々との違いに大変驚きを感じました。

空洞へのゲートバルブ、入力カップラーの接続の際には、作業に加わって欲しいとの要請があり、私も参加して、仕事納め前日の 12 月 23 日に完成しました (図 6, 7)。



図 6 ゲートバルブ、入力カップラーが設置された ARIEL#3



図 7 完成した ARIEL#3 と共に記念撮影。左：著者、右：Bhalwinder S. Waraich 氏

完成後のリーク試験でも、入力カプラーでのリークは止まりませんでした。増し締めでリークレートが減った事 ($\sim 3 \times 10^{-8}$ atm-cc/sec), この部分は断熱真空槽内に位置するので合格としました。我々の場合、フランジ面は平面で、真空シール材として錫メッキを施した Helicoflex を使用しており、ほとんどリークは起こりません。ARIEL#3 のリークに悩まされた彼等は、今後製造される予定の空洞では Helicoflex を含めたシール材や、フランジ面の改良を検討したいとの事でした。

ARIEL#3 は 2016 年 1 月に組み立てエリアに運ばれ、Dummy 空洞が吊られていた ICM2 の Top Assembly への設置作業が開始され、この作業には 2 名の Technician が従事しました。測定のための CP とチューニング回数が増えたために空洞長が設計値と異なり、チューナーロード長が合わない等、不具合が発生したものの、その都度“Shop” (TRIUMF 内の工作センター) で改造、部品の製造を行いながらモジュール化が進んで行きました (図 8)。

2 月上旬に空洞吊り下げ部分の完成と真空容器への挿入、下旬に入力カプラーの設置、3 月上旬には WPM (Wire Position Monitor) が設置され ICM2 は完成しました。私の TRIUMF 滞在最終日である 3 月 24 日、冷却試験を行うためにクラス 1000 クリーンルームに搬送されました (図 9)。ICM2 はライン上の ICM と交換され、2016 年度中に High Power 試験、ビーム加速試験が行われる予定です。その後共同開発先であるインド、カルカッタの VECC に搬送され、ICM がビームラインに再度戻されます。

ARIEL#4 は、3 月下旬にヘリウムジャケット溶接のため PAVAC へ搬送されました。ジャケット溶接後は EACA 内の Dummy 空洞と交換、ARIEL#2 と接続されます。続く ARIEL#5, #6 を含む EACB が設置され、9 セル空洞 5 台による 50 MeV のビーム加速が 2018 年以降に行われる予定です。

5. QWR と HWR

5.1 概要

私が TRIUMF で最初に立ち会った空洞性能測定は、韓国 IBS との共同研究を行っている RISP

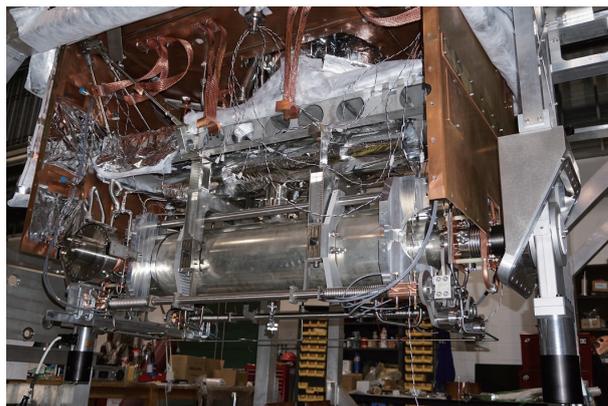


図 8 Top Assembly に組み込まれた ARIEL#3



図 9 クリーンルーム内に設置中の ICM2

用 HWR⁶⁾ でした。KEK に入所以来、TRISTAN の 508 MHz, 5 セル, 核破砕用 972 MHz, $\beta = 0.72$, 9 セル, そして ILC 用 1.3 GHz 9 セル超伝導空洞の仕事に携わってきた私は、空洞らしくないという感じを抱きました。この空洞の共振周波数は 163 MHz ですが、この半分の 81.5 MHz を共振周波数に持つ QWR の測定も行われていました。

図 10 に QWR と HWR を示します。入力カプラーポートが片側に寄っているのが QWR, 本体の真ん中にあるのが HWR です。

5.2 化学研磨

9 セル空洞の場合と異なり、専用の筒状治具内に空洞を固定して CP を行います (図 11)。

処理が済むと、リフターに固定した状態で空洞内外の水洗を行います (図 12)。

その後の洗浄工程は ARIEL 用 9 セル空洞と同様で、脱脂剤を溶かした水槽と超純水の水槽で超音波洗浄を行います (図 13)。

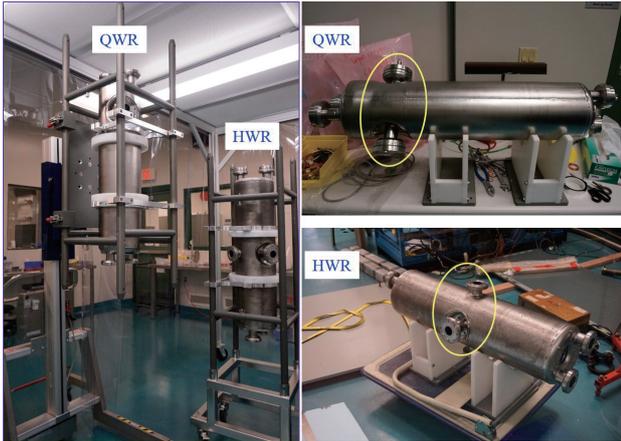


図 10 QWR と HWR



図 12 空洞内外の水洗工程



図 11 CP用治具 (左) とセッティング (右)

5.3 超純水高圧洗浄

CPされた部品は脱脂洗浄剤と超純水の水槽で超音波洗浄された後、超純水高圧洗浄器のあるクラス 100 クリーンルームへ運ばれます。

既に完成した空洞だけでなく、これから製造される QWR, HWR の部品に対する超純水高圧洗浄も頻繁に行われていました (図 14)。

部品洗浄の場合、高圧洗浄器の先端をジェットノズルに交換して行い、終了するとクラス 100 クリーンルーム内でビニル包装されます。空洞洗浄の場合、クラス 10 クリーンルーム内へ移動して測定のための組み立てが行われます。組み上がった空洞は、リーク試験を行い、合格すれば測定用縦型クライオスタットに吊り下げられます (図 15)。

図 16 にそれぞれの空洞の性能測定結果を示します。HWR は、前日の測定では FE が原因で 7 MV/m に制限されましたが、Pulse aging を行っ

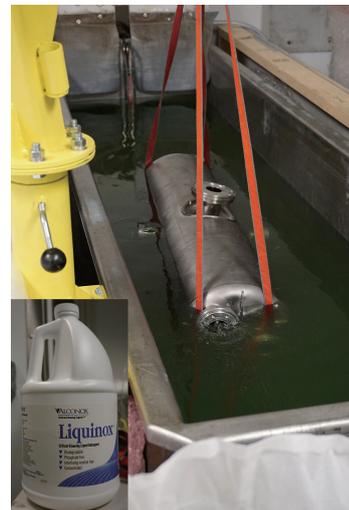


図 13 脱脂剤を含む水槽での超音波洗浄。左下は使用される脱脂剤 Liquinox



図 14 部品洗浄 (左, 中) と空洞洗浄 (右)

た結果 FE が収まり、最大加速電場が伸びました。QWR は通常の測定より Q 値が高く、また最大加速電場も 15 MV/m に達しました。



図 15 測定準備中の HWR

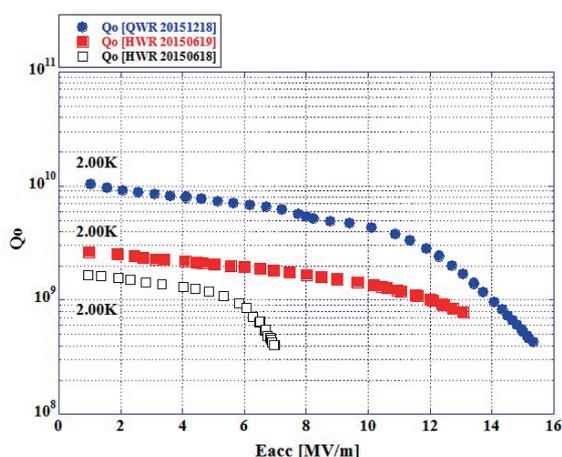


図 16 QWR, HWR の性能試験結果

6. Medium β Cavity

ISAC-II ビームラインに設置されている Medium β 空洞 4 台からなるモジュール SCB#1, SCB#4 に空洞性能の劣化や、チューニングが取りにくい現象が認められたために、2016 年の年明け早々ビームラインからの分離、解体、新型入力カプラーと入力ケーブルへの交換作業が開始されました (図 17)。

新型入力カプラーは、冷却ラインをストレートにし、冷却効率を改善したもので、私も組み立てを任せられました (図 18, 19)。

SCB#1 では新型入力カプラーと入力ケーブルの交換のみを行いました。SCB#4 では EZ15 空洞に放電痕や、空洞内壁面に樹脂様の付着物が見つかったため (図 20)、急遽 4 空洞を Top



図 17 SCB#1 (左) と Top Assembly (右)

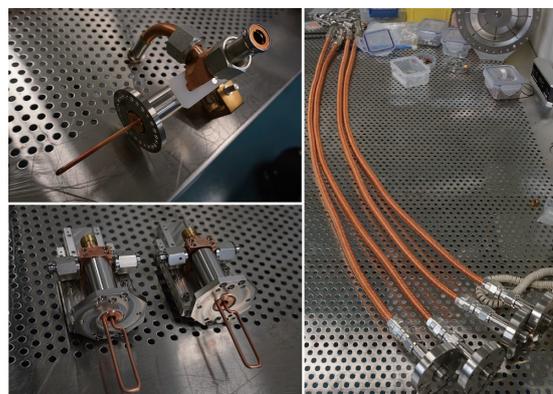


図 18 入力カプラー (左上:旧型, 左下:新型) と入力ケーブル (右)



図 19 新型入力カプラー組み立て中

Assembly から分離 (図 21)、再 CP を実施しました (図 22)。

全ての空洞の CP が済むと Top Assembly に吊り下げ、新型カプラー、入力ケーブル、周波数チューナー (図 23) 等を取り付け、真空容器に挿入後、リーク試験が行われました。

容器内の液体窒素ラインに微小リークがありましたが場所を特定出来ませんでした。実際に液体



図 20 放電痕 (左) と樹脂様付着物 (右)



図 21 Top Assembly (左) と分離された空洞 (右)

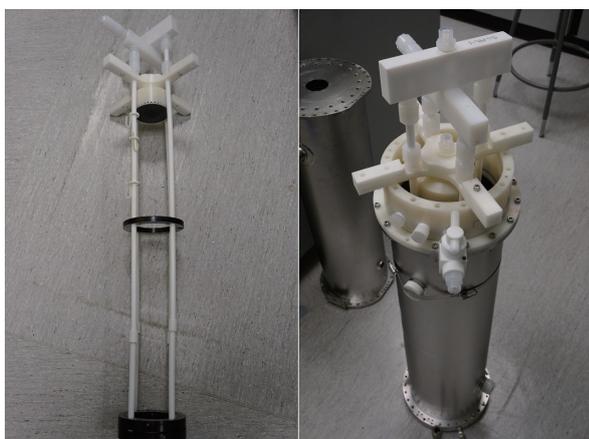


図 22 空洞内 CP 装置 (左) とセット状態 (右)

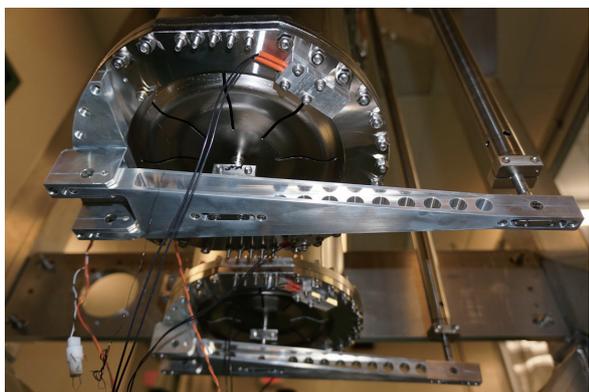


図 23 Medium β 空洞用周波数チューナー

窒素を流した所，容器内圧力の変化が見られないため，SCB#4 は 3 月 22 日にラインへ戻されました。

7. ま と め

KEK の海外派遣制度を利用してカナダ，バンクーバーの TRIUMF に 2015 年 4 月より 1 年間滞在しました。使用目的は異なりますが同じ 1.3 GHz 9 セル超伝導空洞を扱っているにもかかわらず，空洞の表面処理からモジュール化に至るまでの工程や考え方の違いを体験し，お互いの空洞性能向上に向けた議論をする事が出来ました。また QWR, HWR, そして Medium β 空洞からなるモジュールを初めて目にする事で，加速器への知見が広がった事を嬉しく思います。

8. 謝 辞

私の海外派遣を実現させるためにご尽力くださった KEK 加古永治教授，派遣要員としてご推薦くださった KEK 山口誠也教授（当時所属研究系主幹，現加速器研究施設長），KEK 生出勝宣教授（当時加速器研究施設長），荒井菜々枝氏をはじめとする KEK 国際企画第一係の皆様のご尽力に心から感謝致します。

参考文献

- 1) V. Zvyagintsev, et al., “Commissioning of the SRF Linac for ARIEL”, SRF2015, Whistler, Canada, TUAA02 (2015), URL: <http://srf2015proc.triumf.ca/prepress/papers/tuaa02.pdf>
- 2) Y. Bylinski, “Accelerator Science: TRIUMF’s Perspectives”, KEK-TRIUMF Symposium, KEK, Dec. 3-4 (2015) p23.
- 3) J. Keir, et al., “Vertical Electro-Polishing at TRIUMF”, SRF2015, Whistler, Canada, MOPB096 (2015), URL: <http://srf2015proc.triumf.ca/prepress/papers/mopb096.pdf>
- 4) T. Shishido, et al., “R&D on Vertical Electro-Polishing at TRIUMF”, 第 13 回日本加速器学会年会，幕張，MOP019 (2016).
- 5) P. Kolb, et al., “1.3 GHz Cavity Test Program for ARIEL”, SRF2015, Whistler, Canada, MOPB089 (2015), URL: <http://srf2015proc.triumf.ca/prepress/papers/mopb089.pdf>
- 6) G. T. Park, et al., “Report of Vertical Test of the $\beta = 0.12$ Half-Wave Resonator at RISP”, SRF2015, Whistler, Canada, TUPB072 (2015), URL: <http://srf2015proc.triumf.ca/prepress/papers/tupb072.pdf>