

Compact ERL 主加速部超伝導空洞クライオモジュールハイパワー試験 High power test of main linac cryomodule for Compact ERL

阪井寛志^{1,A)}、梅森健成^{A)}、江並和宏^{A)}、佐藤昌史^{A)}、篠江憲治^{A)}、古屋貴章^{A)}、沢村勝^{B)}、Enrico Cenni^{C)}
Hiroshi Sakai^{1,A)}, Kensei Umemori^{A)}, Kazuhiro Enami^{A)}, Masato Sato^{A)}, Kenji Shinoe^{A)}, Takaaki Furuya^{A)}
, Masaru Sawamura^{B)}, Enrico Cenni^{C)}

^{A)} KEK, High Energy Accelerator Research Organization(KEK)

^{B)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

^{C)} The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

Abstract

A main linac cryomodule have been constructed for Compact ERL project. It contains two 9-cell cavities, mounted with HOM absorbers and input couplers. After cavity string assembly, they were installed into the vacuum vessel of the cryomodule. It was placed inside radiation shield of cERL and connected to a refrigerator system. The cryomodule was successfully cooled down to 2K and low power and high power measurements were carried out.

1. Compact ERL Project

3GeV クラスの ERL の実現に向け、その実証機である Compact ERL (cERL)[1, 2]の建設が KEK で進められている。特に周回部のエネルギー回収を担う主加速部の超伝導空洞の開発が ERL 実現の成否を担っている。

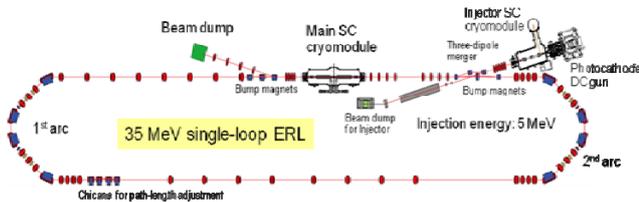


図 1: cERL project 概念図。

表 1: Main parameters for cERL project

Beam energy	35 – 245 MeV
Beam current	10 – 100 mA
Normalized emittance	0.1 – 1 mm mrad
Bunch length	1 – 3 ps (usual) 100 fs (bunch compression)

図 1 が cERL の概念図であり、その parameter を表 1 に示す。主加速部超伝導空洞クライオモジュールは初期の運転では 9cell の超伝導空洞 2 台を内包した 1 台を設置し、35MeV、10mA のビームのエネルギー回収を目的としている。2012 年から建設を開始し、2013 年前半にまずは入射部のビームコミッションが行われた。本文ではそのクライオモジュールの cERL への設置までの経緯と 2012 年 11 月～12 月に行われた 2K 冷却時のクライオモジュールの性能評価とハイパワーテストについて述べる。

¹hiroshi.sakai.phys@kek.jp

2. 主加速部超伝導空洞クライオモジュール

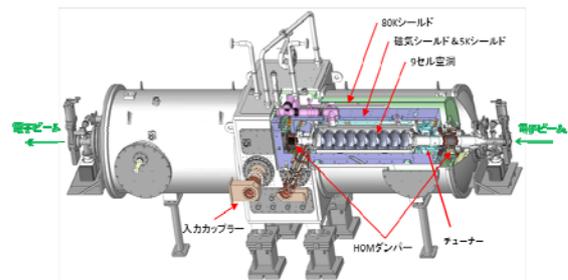


図 2: cERL 主加速部 cryomodule 概念図。

図 2 に主加速部超伝導空洞のクライオモジュールの概念図を示す [3]。HOM-BBU による不安定性を解消すべく独自に設計を行い、100mA 級の大電流のエネルギー回収を設計上可能とした 1.3GHz 9 セルの ERL-model-2 と呼ばれる空洞が 2 台設置されている [4]。目標の加速勾配と無負荷 Q 値(Q_0)は 15MV/m で 1×10^{10} である。2011 年に cERL 用の 2 台の空洞の性能評価試験 (縦測定) を行った結果、図 3 (左) に示すように最大 25MV/m の加速勾配を達成したと同時に上記 ERL の要求を満たす結果が得られた [8]。有害な HOM の除去に関しては、空洞の前後にビームパイプ型のフェライトの HOM 吸収体が置かれ、空洞からの HOM をその HOM 吸収体で吸収する [5]。HOM による温度上昇や入熱を避けるべく、HOM 吸収体は液体窒素による冷却可能な 80K の場所に置かれている。空洞 1 つに対し、入力カプラーが 1 つ用意されているが、特に 200 台以上の空洞が置かれる 3GeV クラスの ERL を想定し、どのセラミック窓が破断しても空洞本体に問題がないように低温部 (cold 窓) と常温部 (warm 窓) の 2 つの同軸型の窓を設けている [6]。特に cold 窓は HOM 吸収体同様 80K の温度に設定され、窓からの空洞に対する入熱を防いでいる。入力カプラーからの投入パ

ワーはエネルギー回収のため基本的には無負荷 Q 値 ($Q_0=1 \times 10^{10}$) に対応するロス の 20-30W 程度分だけ投入すればいいのだが、負荷 Q 値 Q_L を 2×10^7 に敢えて下げて、共振周波数のバンド幅を広げ、空洞のメカニカルな外乱による周波数変動による離調分をカバーする設計となっている。そのため、入力パワーは 20kW を想定しており、このハイパワー試験を 2011 年に行った所、図 3 (右) に示すように液体窒素冷却下で 20kW を 16 時間保持可能であることがわかった [6]。周波数を調整するチューナーは空洞を引っ張るためのメカニカルな粗調整部以外に、高い QL で安定に周波数をコントロールするためにピエゾを用い、空洞の周波数を数 Hz のレベルで 1.3GHz にコントロールする [7]。

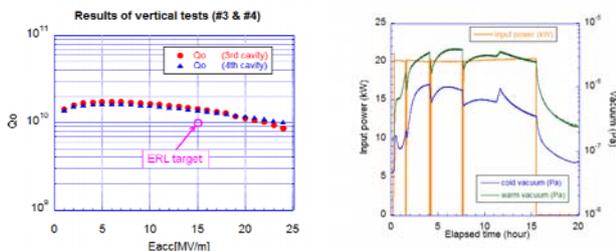


図 3: (左) cERL 用空洞縦測定結果。(右) cERL 入力カプラーハイパワーテスト結果。

空洞は縦測定後に 2K の液体 He を溜めるためのジャケット部の溶接を空洞外側に行う。ジャケット部に 2K の液体 He ラインを接続し、液体 He がジャケットに満たされる。XFEL や ILC などの pulse 運転と違い、常時空洞に 15MV/m の加速勾配を立てる CW 運転では、空洞 1 台あたり 25W もの熱負荷 (XFEL の場合の 100 倍) をいかに排気するかが問題であった。我々はジャケットを 300φ にし、He 液面をジャケット内に保持し液面面積を増やすことで、He ガス排気の効率を上げ、25W の熱負荷に対しても、2K に保つ設計とした。また、空洞のすぐ外側には He ガスを流した 5K フレームと呼ばれるチタンのフレームを設け、2K への入熱を防ぐと同時に、ジャケット付きの超伝導空洞をフレームに精度良く置くことで、アライメント基準の確保ができるような設計を行った。最後に 80K の熱シールドを断熱槽のすぐ内側に設け、室温からの輻射による入熱を抑える設計を行った。この 80K の熱シールドには HOM 吸収体や Cold 窓と同様に液体窒素を流し、80K の温度を保持することを可能としている。5K フレームは機械的に堅牢なバックボーンと呼ばれる室温部の架台上に配置されている。磁気シールドは 5K フレームのすぐ外側を覆い、空洞に地磁気などの影響がない設計としている。

3. クライオモジュール組立

空洞の接続は KEK ERL 開発棟にある class 10 の clean room 内で行われた。縦測定 of 空洞性能を保持するために、空洞接続前にイオンガンによるゴミ埃除去を行い、まず、図 4 (左) に見られるように空洞前後の HOM ダンパーを接続し、その後、入力カプラーの cold 窓の接続を行った。これらの工程はすべて空洞内に直接関与する工程であり、全てこの clean room 内にて行い、空洞内面にゴミ埃の侵入が起こらないよう慎重に組立を行った。またこの段階で空洞のアライメントが既に揃うよう、断熱槽内の基準となるバックボーンと呼ばれる堅牢な架台を clean room 内に最初から並べ、5K フレームを伴った空洞一式をバックボーン上に設置する。機械的に一意に決まる基準とルールをバックボーン上に設け、空洞間の接続を迅速に行うと同時にアライメントが簡便に精度良く接続が行えるような工夫を施した。最後に真空引き後リークチェックを行い、図 5 に示されるように clean room 内の空洞接続は完成した。全てのコンポーネントがバックボーン上に並べられている。

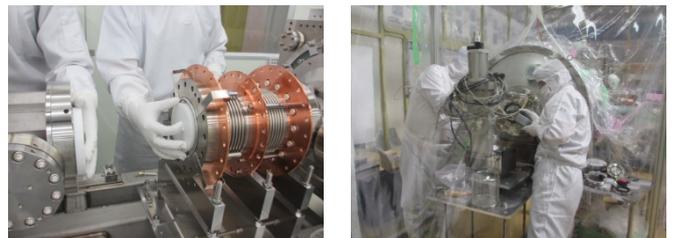


図 4: HOM ダンパー接続(左)、ゲートバルブ接続 (右)

次にバックボーン一式をクリーンルームから出し、断熱槽のセンター部への接続を行った。その後、周波数チューナーの接続、He 配管、磁気シールド、アライメントターゲットの接続、設置を行い、最後に断熱槽円筒部をセットする。但し、warm 窓とゲートバルブの接続は図 4 (右) に見られるようにクリーンブースを用いて行い、クリーンルーム作業同様、埃、ゴミが入らないように慎重に接続作業を行った。



図 5: クリーンルーム内での空洞接続完了。

組立が終わった主空洞クライオモジュールは cERL のビームラインに設置後に、冷凍機と接続を行った (図 6)。ビームライン上流に空洞 4 号機、下流に空洞 3 号機が置かれている。



図 6: cERL に設置された主加速部 cryomodule

4. 2K 冷却と冷却時のモジュール性能評価

図 7 がクライオモジュール 2K 冷却の履歴である。2012 年 11 月後半から 2 週間かけて冷却を行い、2K に到達した。その後、1 週はチューナー、ケーブルなどの low level テストを行い、次の 2 週に各空洞のハイパワーテストを行った。図 7 の赤線と青線がそれぞれ、空洞 3 号機、4 号機の He ジャケットに設置された Si センサーの温度を、図 7 の緑、黒、紫がそれぞれ空洞前後にある HOM ダンパーの温度を plot したものである。

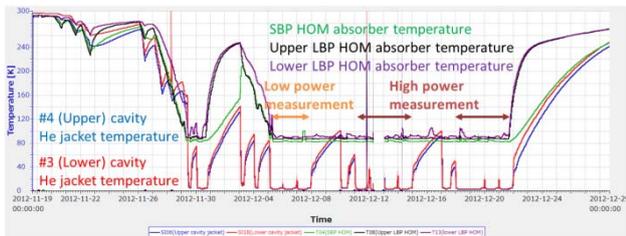


図 7: クライオモジュール冷却の履歴

冷却は下記の条件下で行われた。すなわち、(1)HOM ダンパーのフェライトの割れを防ぐために温度勾配が 3K/h より急にならないこと。(2)大きな熱収縮が起きないように 2K,5K,80K 配管ごとにモジュール全体で 50K 以上の温度差がつかないこと。これらの条件を守り、2 週間後にクライオモジュールは図 7 も示すように無事に 2K まで冷却が完了した。但し、80K ラインの冷却がない状態では入熱が激しいため、その後の low level テスト及び、ハイパワーテストの 3 週間は無停止で 80K ラインの冷却を行った。2k,5K ラインは日中のみ冷却を行い、深夜と週末は冷却を行わない運転を行った。

冷却中及びパワーテスト中はモジュールの変位を断熱槽内の 5K フレームに設置した光学ターゲットにて常時測定した[9]。図 9 が冷却期間中の光学ターゲットの変位を水平、垂直それぞれプロットしたも

のである。ターゲット 1-4 が 5K フレーム上部に、ターゲット 5-8 が 5K フレームのサイドに設置された光学ターゲットであり、それぞれ # 3、# 4 空洞の前後に設置されている。上部 1-4 とサイド 5-8 は冷却に合わせて同じ動きをしているのがわかり、フレーム全体が均等に冷却に合わせて動いている様子が測定された。これらの結果を統合し、空洞中心の動きに評価したところ、常温から 2K 冷却までで水平、及び垂直方向ともに 0.4mm 程度の変位で納まっているのが分かった。我々の要求は 1mm 以内のアライメント精度であり、これを十分満たすクライオモジュールの設計であることが分かった。

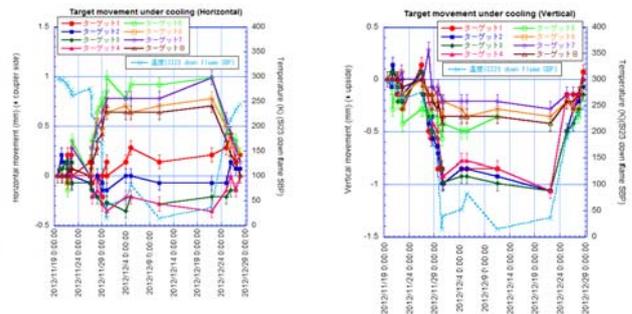


図 8: 冷却中のモジュール内空洞 5K フレームの変位の測定結果。(左) 水平方向の変位量測定結果。(右) 垂直方向の変位量測定結果。

次に 2K 冷却後に各コンポーネント特に図 9 に示すような cryomodule に設置されたチューナー、HOM 吸収体、入力カップラーの性能評価を行った。

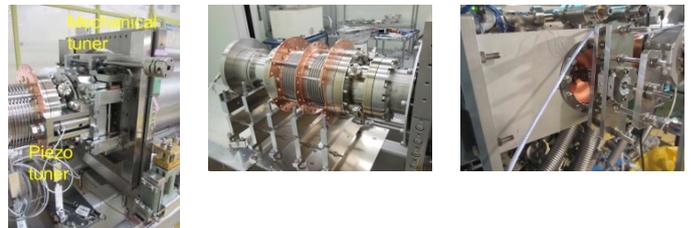


図 9: (左) 周波数チューナー (中) HOM ダンパー (右) 入力カップラー

図 10 はチューナーの性能評価試験結果である。図 10 (左) は各空洞の粗調整チューナーの動きである。モーターを通じ 2K 温度下におかれた粗調整チューナーを動かすことで空洞周波数を調整するが、特に冷却環境下でもモーターのトルクの負荷が大きくなることもなく、各空洞でそれぞれ 2-2.5mm の動きで 270kHz/mm でスムーズに 1.3GHz の周波数に調整が可能であることが分かった。さらに微調整を行うために 2K 環境下に置かれたピエゾに高電圧をかけて周波数変化を測定した所、図 10 (右) に示すように 500V の電圧で 1kHz 強の調整が可能であることがわかった。特に、高い $Q_L (=2 \times 10^7)$ で必要とされる数 Hz 程度の調整が極低温下でも調整可能であることが分かった[10]。

入力カプラーは $Q_L = (1 - 4) \times 10^7$ として、 Q_L が可変になるように設計されているが、この値が設計通りであるか 2K 環境下で low level 測定を行った。4号機のカプラーで $Q_L = 8.7 \times 10^6 - 3.3 \times 10^7$ 3号機のカプラーで $Q_L = (1.5 - 5.3) \times 10^7$ とほぼ設計通りの値であることが分かった。

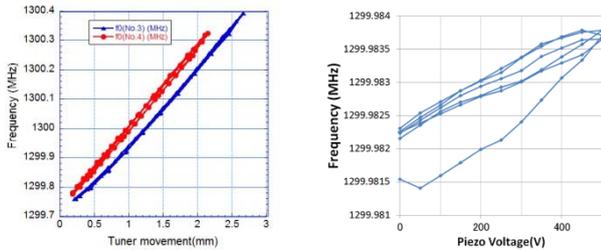


図 10: チューナーの性能評価試験結果。(左)粗調整チューナー (右) ピエゾチューナー

2K 冷却下で HOM ダンパーによる HOM の吸収が設計通り行われているかは、本実験の重要な試験項目の一つである。これらの HOM 測定を入力カプラーサイドにある pickup probe ともう一方のチューナーサイドに置かれた HOM ダンパー近くに用意した3つの pickup probe の合計4つを用いて HOM の測定を行った(図9中参照)。HOM 周波数とそれらに対する Q_L の測定結果(空洞#3)を図11に示す。測定時間の関係で 3GHz までの HOM の測定までを集中的に行ったが、測定結果は各 HOM の Q_{ext} の計算結果とおよそ合致していた。従って、80K に置かれたフェライトの吸収体は HOM の吸収に関しては設計通りに働いていることが判明した。

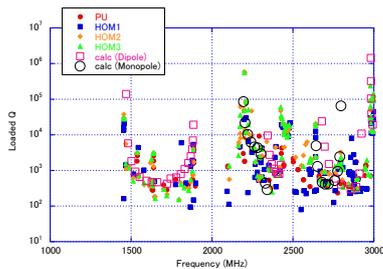


図 11: クライオモジュール冷却下における#3 空洞の HOM 特性測定結果。PU は入流カプラー側の pickup probe による測定結果。HOM1, HOM2 及び HOM3 は チューナーサイドの HOM 測定用 pickup probe による測定結果である。なお、calc はそれぞれ ERL-model-2 空洞の(dipole)と(monopole)の計算結果を表す。

5. クライオモジュールハイパワーテスト

最後の2週間で各空洞に 1.3GHz 30kW IOT を用いたハイパワーテストを行った。図 12(左)がハイパワーテスト時のセットアップである。チューナーで 1.3GHz に周波数を調整後に、パワーを入力カプ

ラーから投入し、パワーテストを行った。パワー投入に対する Field emission の測定を行うためにモジュールのビーム軸の前後に radiation monitor(エリアモニター)を設置した。

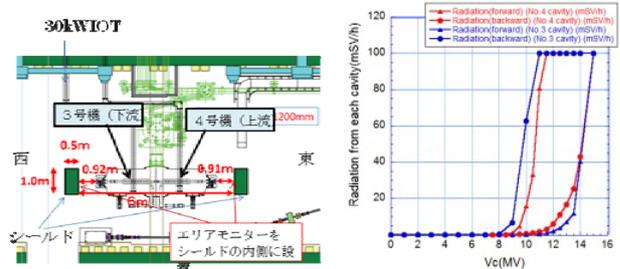


図 12: (左)ハイパワーテスト時のセットアップ。(右)加速電圧(Vc)と測定された放射線量。加速勾配(Eacc)と加速電圧(Vc)の関係は $Vc [MV] = 1.038 \times Eacc [MV/m]$ 。

図 12(右)がハイパワーテストの結果である。最大加速勾配としては両空洞とも 16MV まで印加可能であったが、強い field emission に見舞われることになった。特に両空洞とも 8-9MV から radiation が軸上のエリアモニターにより測定された。性能劣化がどのように起きているかを調べるためにQ値測定を行った。図 13 が各空洞の加速電圧(Vc)と Q 値の plot である。パワー投入時の空洞を冷やしている 2K の He の蒸発量からパワーを投入しない時の static loss (11W)を引き、空洞の熱負荷から Q_0 の測定を行った。図 3(左)で見られるように縦測定時には劣化が見られなかった2空洞が両空洞とも 10MV 以上で Q 値の劣化が起こっているのが分かった。その劣化に合わせて図 12 のように放射線の上昇が見られている。

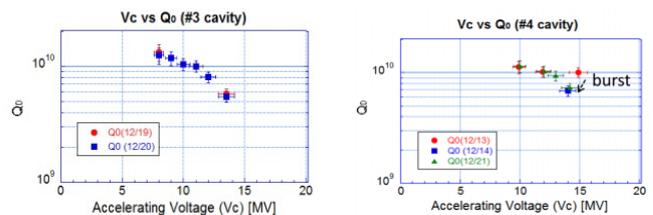


図 13: ハイパワーテスト時の Q_0 vs Vc 測定結果。(左) #3 空洞 (右) #4 空洞。

特に発生した radiation が縦測定時とどう違うかを確認すべく我々は radiation の profile 測定を行い、発生源の比較を行った。図 14 (左)はその radiation の profile を測定するために設置した PIN diodes である。16個の PIN diode を cryomodule 両端のビーム軸周りに設置し、特に field emission に誘起されて出て、軸上で加速される電子やそれによる放射線の分布を測定しようというものである[11]。#4 空洞のハイパワーテスト時の PIN diode の放射線測定結果を図 14 (右)に示す。測定結果として、まず縦測定時の radiation の分布と(両空洞とも)違っているのが分かった。cryomodule 組込までに空洞内に field

emission を起こす埃やゴミの混入があったと予想され、それによる空洞劣化が起こったものと考えられる。また、#4 空洞は最初のハイパワーテストでは、radiation は少なく、図 13(右)に見られるように 15MV で $Q_0=1 \times 10^{10}$ を達成していたが、その後、14.5MV に保持していた所、突然、burst 現象が起こり、Q 値の劣化が起こると同時に図 14(右)に見られるように radiation 分布が変化した。Burst により、radiation 源が変化したものと考えられる。このようにモジュールテストでは field emission による Q 値の劣化が見られたが、最終的には、#3 空洞は 13.5MV で 14.2MV で 1 時間以上電圧の保持が可能であった。

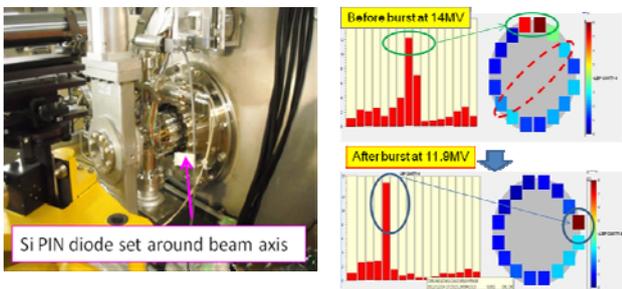


図 14: (左)radiation 分布測定用 PIN diode 配置。(右) #4 空洞測定時の PIN diode の分布上は burst 前 (14MV)の下は burst 後(11.9MV)の radiation 分布を示す。上の赤点線は縦測定時に見られた radiation の分布を示す。

最後に、空洞測定時には LLRF にてシグナルジェネレータに feedback loop をかけていたが、高い $Q_L(=2 \times 10^7)$ にてチューナーによる周波数コントロールが可能かを調べるべく、open loop にて空洞の入出力の位相差を測定することで空洞が外乱 (microphonics)によりどれくらいの離調を受けているかを測定した。図 15 がその位相差の測定結果である。およそ 49.5Hz で振動しているがその離調は pk-pk で 7Hz 程度に納まっていることがわかり、チューナーによる feedback が十分可能であることがわかった。空洞の共振周波数測定などとの詳細解析を現在進めているところである[12]。

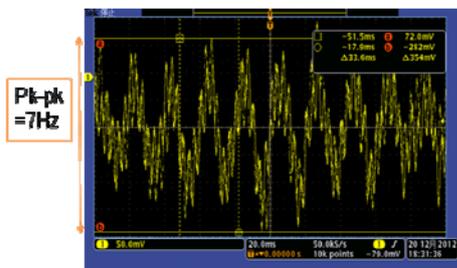


図 15: microphonics 測定結果。

6. まとめと今後

cERL 主加速部の cryomodule を建設し、2K までの冷却及びハイパワーテストを行った。各コンポー

ネントは現状問題なく稼働し、パワーテストでは瞬間で 16MV 以上を達成したが、強い field emission の影響を受ける結果となり、最終的に #3 空洞では 13.5MV、#4 空洞は 14.2MV で 1 時間保持可能であった。今後は 2013 年度に cERL の周回部の建設が行われ、主加速部でのエネルギー回収によるビーム運転が行われる。また、field emission の軽減に向けた対策を今後行っていく予定である。

7. 謝辞

cERL でのモジュール組立、パワーテストに関係した多くの関係者に感謝致します。この試験は量子ビームプロジェクトのサポートを受けて行いました。

参考文献

- [1] R. Hajima *et al.* (ed.), KEK Report 2007-7/ JAEA-Research 2008-032 (2008) [in Japanese]
- [2] S. Sakanaka *et al.*, “Progress in Construction of the 35-MeV Compact Energy Recovery Linac at KEK”, in these proceedings, WEPWA015
- [3] K. Umemori *et al.*, “Status of Main Linac Cryomodule Development for Compact ERL Project”, IPAC’12, New Orleans, USA, May 2012, p.67(2012)
- [4] K. Umemori *et al.*, “Design of L-band superconducting cavity for the energy recovery linacs”, APAC’07, Indore, India, Feb 2007, p.570 (2007)
- [5] M. Sawamura *et al.*, “Cooling properties of HOM absorber model for cERL in Japan”, SRF’2011, Chicago, July, 2011, p.350(2011)
- [6] H. Sakai *et al.*, “High power tests of KEK-ERL input coupler for main linac under liquid nitrogen condition”, SRF’2011, Chicago, July, 2011, p.356(2011)
- [7] S. Noguchi *et al.*, “New tuners for ILC cavity application”, SRF’07 Beijing, Oct, 2007, WE303
- [8] K. Umemori *et al.*, “Vertical test results for ERL 9-cell cavities for compact ERL project”, IPAC’12, New Orleans, USA, May 2012, p.2227(2012)
- [9] 篠江憲治 他, “cERL 主空洞冷却モジュールにおける冷却時の空洞位置変位測定”, 第 10 回加速器学会 proceedings (名古屋) (2013)
- [10] 江並和宏 他, “ERL Main Linac 実機用チューナーの低温特性試験”, 第 10 回加速器学会 proceedings (名古屋) (2013)
- [11] E.Cenni *et al.*, “Field emission simulation for KEK-ERL 9cell superconducting cavity”, IPAC’12, New Orleans, USA, May 2012, p.295(2012)
- [12] 佐藤昌史 他, “cERL 主空洞の機械的振動測定”, 第 10 回加速器学会 proceedings (名古屋) (2013)