

コンパクト ERL のコミッショニング BEAM COMMISSIONING OF COMPACT ERL

島田 美帆^{#A)}, 足立 伸一^{A)}, 阿達 正浩^{A)}, 赤木 智哉^{A)}, 明本 光生^{A)}, 荒川 大^{A)}, 浅岡 聖二^{A)},
江並 和宏^{A)}, 遠藤 有聲^{A)}, 福田 茂樹^{A)}, 古屋 貴章^{A)}, 芳賀 開一^{A)}, 原 和文^{A)}, 原田 健太郎^{A)},
本田 融^{A)}, 本田 洋介^{A)}, 本間 博幸^{A)}, 本間 輝也^{A)}, 細山 謙二^{A)}, 穂積 憲一^{A)}, 石井 篤^{A)}, 金 秀光^{A)},
加古 永治^{A)}, 神谷 幸秀^{A)}, 片桐 広明^{A)}, 河田 洋^{A)}, 小林 幸則^{A)}, 小島 裕二^{A)}, 近藤 良也^{A)},
Konstantinova Olga^{A)}, 小菅 淳^{A)}, 久米 達哉^{A)}, 松本 利広^{A)}, 松村 宏^{A)}, 松下 英樹^{A)}, 道園 真一郎^{A)},
三浦 孝子^{A)}, 宮島 司^{A)}, 宮内 洋司^{A)}, 長橋 進也^{A)}, 仲井 浩孝^{A)}, 中島 啓光^{A)}, 中村 典雄^{A)},
中西 功太^{A)}, 中尾 克己^{A)}, 濁川 和幸^{A)}, 野上 隆史^{A)}, 野口 修一^{A)}, 野澤 俊介^{A)}, 帯名 崇^{A)},
尾崎 俊幸^{A)}, Qiu Feng^{A)}, 下ヶ橋 秀典^{A)}, 阪井 寛志^{A)}, 坂中 章悟^{A)}, 佐々木 慎一^{A)}, 佐藤 康太郎^{A)},
佐藤 昌史^{A)}, 設楽 哲夫^{A)}, 篠江 憲治^{A)}, 塩屋 達郎^{A)}, 宍戸 寿郎^{A)}, 多田野 幹人^{A)}, 田原 俊央^{A)},
高橋 毅^{A)}, 高井 良太^{A)}, 高木 宏之^{A)}, 竹中 たてる^{A)}, 谷本 育律^{A)}, 飛山 真理^{A)}, 土屋 公央^{A)},
内山 隆司^{A)}, 上田 明^{A)}, 梅森 健成^{A)}, 浦川 順治^{A)}, 渡邊 謙^{A)}, 山本 将博^{A)}, 山本 康史^{A)},
矢野 喜治^{A)}, 吉田 光宏^{A)}, Enrico Cenni^{B)}, 羽島 良一^{C)}, 松葉 俊哉^{C)}, 森 道昭^{C)}, 永井 良治^{C)},
西森 信行^{C)}, 沢村 勝^{C)}, 静間 俊行^{C)}, 栗木 雅夫^{D)}, 清宮 裕史^{D)}, Hwang Ji-Gwang^{E)}
Miho Shimada^{#A)}, Shinichi Adachi^{A)}, Masahiro Adachi^{A)}, Tomoya Akagi^{A)}, Mitsuo Akemoto^{A)}, Dai Arakawa^{A)},
Seiji Asaoka^{A)}, Kazuhiro Enami^{A)}, Kuninori Endo^{A)}, Shigeki Fukuda^{A)}, Takaaki Furuya^{A)}, Kaiichi Haga^{A)},
Kazufumi Hara^{A)}, Kentaro Harada^{A)}, Tohru Honda^{A)}, Yosuke Honda^{A)}, Hiroyuki Honma^{A)}, Teruya Honma^{A)},
Kenji Hosoyama^{A)}, Kenichi Hozumi^{A)}, Atsushi Ishii^{A)}, Xiuguang Jin^{A)}, Eiji Kako^{A)}, Yukihide Kamiya^{A)},
Hiroaki Katagiri^{A)}, Hiroshi Kawata^{A)}, Yukinori Kobayashi^{A)}, Yuuji Kojima^{A)}, Yoshinari Kondou^{A)},
Olga Konstantinova^{A)}, Atsushi Kosuge^{A)}, Tatsuya Kume^{A)}, Toshihiro Matsumoto^{A)}, Hiroshi Matsumura^{A)},
Hideki Matsushita^{A)}, Shinichiro Michizono^{A)}, Takako Miura^{A)}, Tsukasa Miyajima^{A)}, Hiroshi Miyauchi^{A)},
Shinya Nagahashi^{A)}, Hirotaka Nakai^{A)}, Hiromitsu Nakajima^{A)}, Norio Nakamura^{A)}, Kota Nakanishi^{A)},
Katsumi Nakao^{A)}, Kazuyuki Nigorikawa^{A)}, Takashi Nogami^{A)}, Shuichi Noguchi^{A)}, Shunsuke Nozawa^{A)},
Takashi Obina^{A)}, Toshiyuki Ozaki^{A)}, Feng Qiu^{A)}, Hidenori Sagehashi^{A)}, Hiroshi Sakai^{A)}, Shogo Sakanaka^{A)},
Shinichi Sasaki^{A)}, Kotaro Satoh^{A)}, Masato Satoh^{A)}, Tetsuo Shidara^{A)}, Kenji Shinoe^{A)}, Tatsuro Shioya^{A)},
Toshio Shishido^{A)}, Mikito Tadano^{A)}, Toshihiro Tahara^{A)}, Takeshi Takahashi^{A)}, Ryota Takai^{A)}, Hiroyuki Takaki^{A)},
Tateru Takenaka^{A)}, Yasunori Tanimoto^{A)}, Makoto Tobiyama^{A)}, Kimichika Tsuchiya^{A)}, Takashi Uchiyama^{A)},
Akira Ueda^{A)}, Kensei Umemori^{A)}, Junji Urakawa^{A)}, Ken Watanabe^{A)}, Masahiro Yamamoto^{A)},
Yasuchika Yamamoto^{A)}, Yoshiharu Yano^{A)}, Mitsuhiro Yoshida^{A)}, Cenni Enrico^{B)}, Ryoichi Hajima^{C)},
Shunya Matsuba^{C)}, Michiaki Mori^{C)}, Ryoji Nagai^{C)}, Nobuyuki Nishimori^{C)}, Masaru Sawamura^{C)},
Toshiyuki Shizuma^{C)}, Masao Kuriki^{D)}, Yuji Seimiya^{D)}, Ji-Gwang Hwang^{E)}

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

^{B)} The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI

^{C)} Japan Atomic Energy Agency, JAEA

^{D)} Hiroshima University, ^{E)} Kyungpook National University

Abstract

Beam commissioning of the recirculation loop of Compact ERL has been underway at KEK site since December 2013. The injection beam has been successfully accelerated up to full energy of 20 MeV and transported to the movable Faraday cup, located in the area just before where it merges with the injection beam. There was no significant beam loss thanks to the orbit tuning and optics matching. The orbit tuning of the deceleration beam (second pass in the main linac) is performed with reference to the BPM signal at the burst operation rather than on the normal screen monitor. The electron beam was successfully decelerated near the injection energy and was led to the main dump in a period of a few weeks. To minimize the dump electron energy, the orbit length of the recirculation loop is controlled with making a bump at the top of the second arc section. Comparing the input power with the reflection power of the main linac, we confirmed that the energy recovery was succeeded. In this paper, we also report the results of the recent beam commissioning, including the measurement results of linear optics and transverse emittance.

[#] miho.shimada@kek.jp

1. はじめに

電子エネルギーが数 GeV クラスのエネルギー回収型線形加速器 (Energy Recovery Linac, ERL) の実現に向けた R&D 機として、コンパクト ERL^[1]が高能率加速器研究施設敷地内に建設された。光陰極 DC 電子銃および入射超伝導(SC)加速空洞の入射部のビームコミッショニング^[2]が 2013 年 4 月の 2 か月間に渡って行われた後、合流部シケインおよび周回部の建設が始まった。およそ 5 カ月の建設期間の後、2013 年 12 月から周回部を含めたビームコミッショニングを開始した^[3]ので、その詳細を報告する。

2. レイアウトおよび主要パラメータ

図 1 にコンパクト ERL のレイアウトを載せる。入射部は、光陰極 DC 電子銃、バンチャー、2 セル入射加速空洞 3 台、四極電磁石 5 台からなる。そのまま直進するラインは、入射部コミッショニングで使用した診断ラインである。入射ビームはドッグレッグの入射シケインを通して周回部と合流する。周回部は 9 セルの主超伝導加速空洞が並ぶ北側の直線部、第 1 アーク、南側直線部、第 2 アークおよびダンプラインで構成される。将来のエネルギー拡張を見込んで、北側の直線部には 8 つの空洞を設置するスペースが確保されており、減速ビームを安全に

ダンプに誘導するため、ダンプシケインは主加速空洞の直後に配置した。ダンプライン終端には 40 kW のグリッドコップ製の主ダンプを据えた。アーク部はトリプルベンドアクロマートに似た構成としており、偏向電磁石の間のトリプレットでアクロマートおよびアイソクロナスの調整を行う。周回時間を微調整するために、南側直線部に周長補正シケインが設置されているほか、アーク部の頂点でバンパを立てるための周長補正ステアリングを設置している。エネルギー回収なしでビームコミッショニングを行うことを想定して、図 2 に示すように合流シケインの直前に可動ファラデーカップ (FC) を設置している。

超伝導加速空洞のデザインはリニアコライダーの空洞をもとにしており、運転周波数は 1.3 GHz である。主加速空洞については、2012 年にハイパワーテストを行い、空洞あたり 8 MV 付近からフィールドエミッションが増大することが判明したため、周回エネルギーを 20 MeV に抑えることとした。それに伴って想定される周回時間が変わったため、周回部の電磁石設置位置の微調整を行った。また、入射・合流シケインおよびダンプシケインの軌道は、周回ビームの運動量が入射 (ダンプ) ビームに対して 7 倍であるとして設計したため、およそ 3 MeV の入射エネルギーでコミッショニングを開始した。

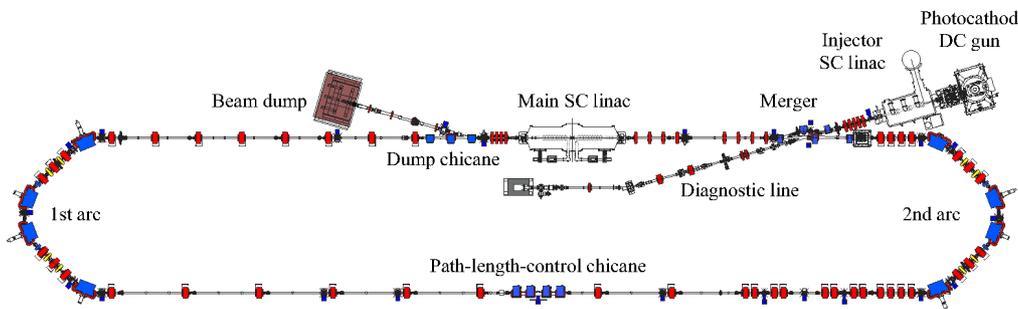


Figure 1: Layout of Compact ERL at its first commissioning in Dec. 2013.

2. ビーム周回と軌道・オプティクス調整

入射部コミッショニングと同様に、電子銃を 390 kV で立ち上げた。バンチあたりの電荷量が数 10 fC、パルス長 1 μ s のバースト構造、平均電流が数 100 pA で軌道調整を行った。入射加速空洞はオンクレスト加速でエネルギーが 3 MeV になるように、加速勾配を調整した。主加速空洞は、空洞あたりおよそ 8.5 MV に印加し、設定通りに 20 MeV に加速したことを第 1 アークの 45 度の偏向電磁石で確認した。また、ローレベル RF 系の安定度が、振幅で 0.02%、位相で 0.02 度を達成していることが、ビームの揺らぎの測定よりわかった。

入射ビームは特にエネルギーが低いいため、環境磁場の影響を受けやすい。ひとつは隣接する電磁石の漏れ磁場である。図 2 に入射・合流部シケインのレ

イアウトを示すが、周回ビームのバンパを調整する偏向電磁石 BMAG05 の漏れ磁場が近くを通過する入射ビームを蹴ってしまうことがわかった。そこで、鉄の磁気シールドを設置して対策を行った。同様のことがダンプシケインでも起こっていたと思われる。他に、コールド・カソード・ゲージ (CCG) の磁石も加速前のビーム軌道やプロファイルに影響を与えていたため、真空度のモニタリングに影響の少ない範囲で CCG の磁石を取り外して対処した。図 3 に CCG の写真と CCG 取り外し前後のビームプロファイルを示している。オプティクスの再調整も行っているが、xy coupling が解消されていることがわかる。また、ステアリングで強く蹴っていた軌道も改善された。

軌道調整は主に 30 台の Ce:Yag スクリーンを用いて行われ、四極電磁石の収束力を変えてもビームの

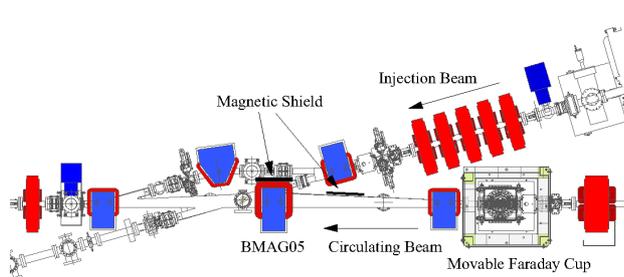


Figure 2: Enhanced illustration of the injection/merger chicane.

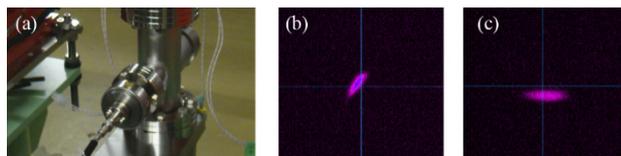


Figure 3: (a) Photo of the CCG magnet located 20 cm from the vacuum chamber. Beam profiles before removing the CCG magnet (b) and after (c).

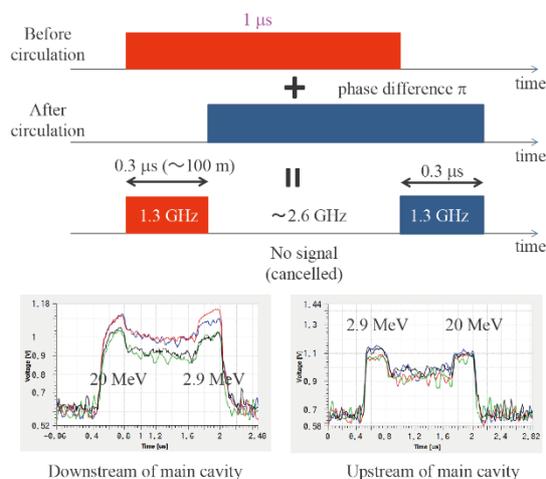


Figure 4: Responses of BPM in burst operation at the north straight line, in which the main cavity is installed.

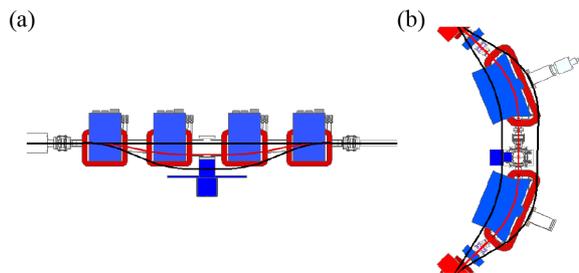


Figure 5: (a) Path-length-control chicane at the south straight line; (b) Bump at the top of 2nd arc. Nominal orbit is the red one.

位置が変わらない点を通すように行われた。アークのトリプレットの K 値はアクロマート・アイソクロナスを満たすことを優先し、ビームプロファイルの微調整は、直線部の四極電磁石のみで行った。以上の調整を積み重ねて、大きなビームロスなく可動 FC まで輸送することができた。また、エネルギー回収を行う前にダンプレインのビームテストを行うため、主加速空洞をデチューンした状態で主ダンプまで導いた。

3. ビーム減速およびエネルギー回収

可動 FC 以降は加速ビームと減速ビームが並行するため、スクリーンのような破壊型のモニターを使用することができない。そこで、バースト運転ではひとつのビームのみが通過するタイミングがあることを利用し、BPM による 2 つビームの同時測定を試みた。この模式図を図 4 に示す。ストリップライン型 BPM の信号は可変減衰器、1.3 GHz のバンドパスフィルタを通した後に、ログ検波する。周回後のビームは RF の減速位相に合わせているために、2 つのビームが通過するときは 2.6 GHz の信号となり、信号が検出されない。しかし、矩形のバーストモードで運転する場合、マクロパルスの先頭は加速ビームのみが、後尾は減速ビームのみが通過するタイミングがある。周回部の長さが 92 m であるため、その長さはおおよそ 300 ns 程度である。図 4 に示すように、検出した信号は階段状になっており、2 つのビームの位置を区別することができる。減速ビームの軌道調整はこの BPM の信号で行い、ダンプレインにビームを誘導することができた。

エネルギー回収効率を上げるには、周長（周回時間）を RF 周波数 1.3 GHz の半整数倍にする必要がある。そのため、周長補正シケインと第 2 アークの頂点の 2 か所でバンプを立てて周長補正を行った。調整可能な範囲は周長補正シケインで $\pm 5\text{mm}$ 、片側のアークの頂点で $\pm 10\text{ mm}$ 程度である。そのラティスを図 5 に載せる。ビーム調整時の平均電流は数 100 pA と少なく、主加速空洞のビームローディングを測定することができないため、図 6 に示すように偏向電磁石 BMAD01 直後の水平方向のビーム位置からエネルギーを最小となる点を探した。第 2 アークを使用したケースについて、測定と計算結果を比較したグラフを併記する。周長補正量はアーク頂点のビーム位置の変化から推定し、スクリーンの分散関数から推定したビーム位置が測定結果と合っていることがわかる。この手法が周長を調整するひとつの指針となることがわかった。

エネルギー回収をより直接的に証明するため、軌道調整の後に 6.5 μA の CW 運転を行い、ビームローディングの測定を行った。その模式図と測定結果を図 7 に載せる。“エネルギー回収試験”は通常の運転と同様であり、“ビーム負荷試験”は上流空洞で加速し、下流空洞で減速をすることによって、周回させることなくビームを主ダンプへ導いている。つまり、エネルギー回収なしの状態である。図 7 のグラフは、各試験の入力パワーと反射パワーの差、

$\Delta(\text{Pin-Pref})$ を示す。ここで、試験前の状態でゼロとなるようにオフセットをしている。ビーム負荷運転において、上流空洞ではビームにエネルギーを与えるために正の値となり、下流空洞ではエネルギーもらうため負の値となる。一方で、“エネルギー回収試験”では、ビームの有無に関わらず、ゼロのままであることから、測定誤差の範囲内でエネルギー回収がうまくいっていることがわかる。

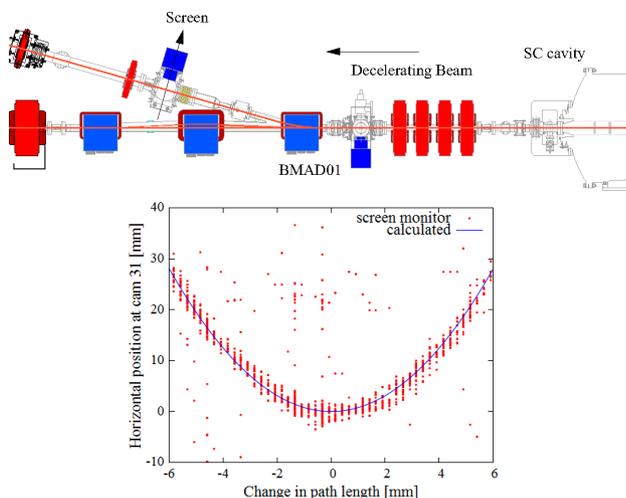


Figure 6: (upper) Layout of the dump chicane; (lower) Horizontal beam position at the screen vs. path length, which is tuned at the 2nd arc.

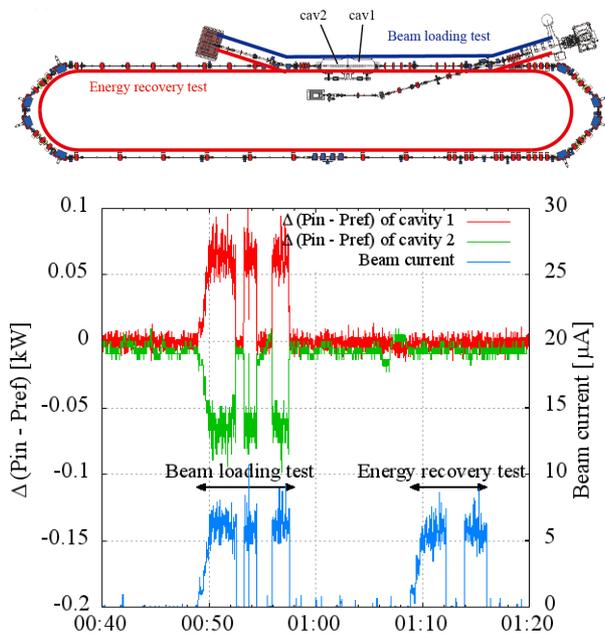


Figure 7: (upper) Schematic of the beam loading test; (lower) Different between input power and reflection power in the two beam at beam loading, and energy recovery test. Cavities 1 and 2 are the upstream and downstream cavities in the main linac, respectively. The blue line is the average electron beam current.

4. 線形オプティクスとエミッタンスの測定

20 MeV まで加速したビームであっても、エネルギーが十分でないため環境磁場の影響を受けている可能性がある。そこで、四極電磁石を消磁した上で、ステアリングの応答を測定した。図 8 に第 2 アーク手前の測定例を示す。四極電磁石が励磁されていないにも関わらず、水平方向には発散、垂直方向に収束する力が働いていることがわかる。消磁後でも残る残留磁場などの関係を調査中である。また、収束発散力について、ステアリングによるビームの応答測定を行った。ヒステリシスが 10% 近くあったものの、その範囲内では磁場測定の結果と一致することを確認した。

ダンプシケインから入射シケインまでの周回ビームの応答を測定して、デザイン値と比較を行った。デザイン値のステアリングによるキック量および偏向電磁石のエッジや四極電磁石の収束力は、励磁電流と磁場測定の結果をもとに算出した。図 9 にその一例を示す。第 1 アーク手前から南側直線部上流までの応答はよく一致していることから、おおむねデザイン通りの振る舞いをしていることがわかる。しかし、電磁石磁場の誤差の積み重ねあるいは環境磁場などによって、途中から結果が一致しなくなることがわかる。また、結果は載せないが、xy coupling や非線形なキックが発生しているため、原因を調査中である。

分散関数は周回エネルギーを 1% だけ変更した時の位置のずれを測定して求めた。非線形な応答は無視できるほど小さいことを確認済みである。トリプレットを微調整して分散関数の測定値をデザイン値に合わせた結果を図 10 に載せる。アイソクロナスに設定するために、アーク中央で $\eta_k = 0.24$ m、南側直線部入口でアクロマートになるように調整した。四極電磁石の励磁電流から計算した分散関数は測定結果と一致しないため、原因を調査中である。

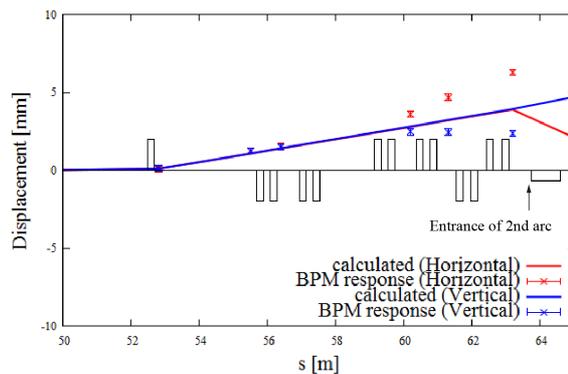


Figure 8: Beam response kicked by steering magnet with degaussing of all quadrupole magnets of BPM measurement results (cross) and calculated results (solid line). Error bar is 0.2 mm.

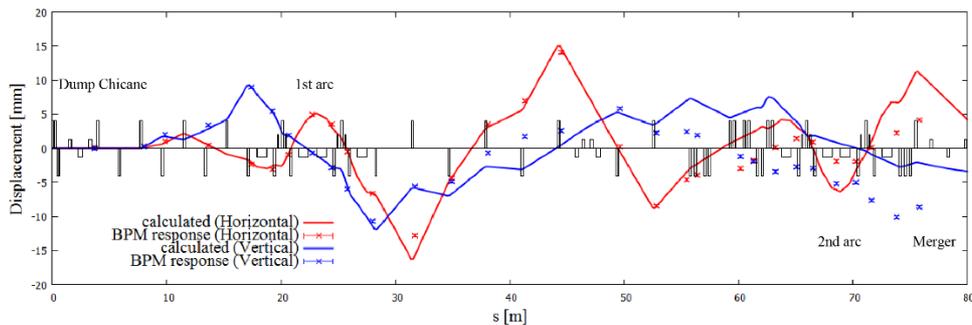


Figure 9: Beam response kicked by steering magnet from the dump chicane to merger chicane of BPM measurement results (cross) and results calculated with K-value estimated by magnet measurement (solid line).

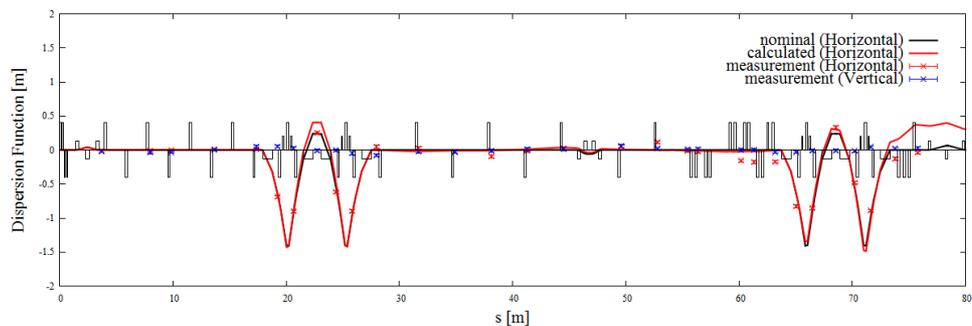


Figure 10: Matching results of dispersion function with triplet of quadrupole magnets at the arc section. (black line) Nominal horizontal dispersion function. (red line) Horizontal dispersion function calculated with K-value estimated by magnet measurement. (red/blue cross) Horizontal/vertical dispersion function estimated with BPM measurement.

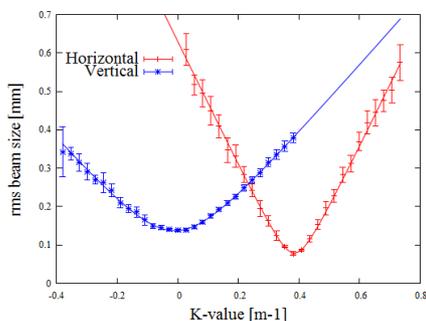


Figure 11: Measurement results of rms beam size after the 1st arc vs. K-value of quadrupole magnet.

スクリーンより手前の四極電磁石を振って、その時のビームサイズの変化から規格化エミッタンスを推定した (Q スキャン)。測定箇所は、主加速空洞の前後、第 1 アーク後、第 2 アーク前の計 4 か所である。スクリーン上でビームサイズが分解能以下にならないような四極電磁石とスクリーンの組み合わせを選んだ。第 1 アーク後の測定例を図 11 に載せる。測定結果は、水平・垂直ともに 0.14 ± 0.01 mm-mrad であった。この時のパンチあたりの電荷量は数 10 fC であり空間電荷効果は無視できる。フィッティングによるエミッタンス測定誤差は測定個所の違いによるばらつきよりも小さかった。

5. まとめ

周回部の建設が完了した後、2013 年 12 月から

2014 年 6 月下旬にかけて、断続的におよそ 3 カ月のビームコミショニングを行った。およそ 2 週間弱で減速ビームを主ダンプまで導き、6.5 μ A の CW 運転で主加速空洞にてエネルギー回収が行われていることを確認した。

入射エネルギーが 3 MeV、周回エネルギーが 20 MeV と比較的小さいため、環境磁場などの想定外の磁場の影響を受けることがあり、ビームダイナミクスには未解決の問題が残る。しかし、低い電荷量ではあるが、線形オプティクスや分散関数が大きく乱れることなく、エミッタンスを増加することなく輸送することができた。

今後は、ビームダイナミクスの解明を行い、空間電荷効果が顕著になる電荷量の運転や、レーザー逆コンプトン散乱などによる光源利用に向けた調整を進めていく予定である。

参考文献

- [1] “Energy Recovery Linac Conceptual Design Report”, KEK Report 2012-4, KEK, October, 2013, URL:<http://ccdb5fs.kek.jp/tiff/2012/1224/1224004.pdf>
- [2] S. Sakanaka, et al., Proceedings of ERL2013, Novosibirsk, Russia, p.16 (2013)
- [3] N. Nakamura, et al., Proceedings of IPAC14, Dresden, p.353 (2014)