CERL 主加速器クライオモジュール運転の現状

-大電流ビーム運転時における空洞内の現象理解に向けて-

THE OPERATION STATUS OF THE SUPERCONDUCTING CAVITY FOR CERL MAIN LINAC

-Toward the deep understanding inside the superconducting cavity with high current beam-

沼田直人[#, A)], 浅川智幸 [A)]
阪井寛志 [B)], 梅森健成 [B)], 古屋貴章 [B)], 篠江憲治 [B)], 江並和宏 [B)], 江木昌史 [B)]
坂中章悟 [B)], 道園真一郎 [B)], 三浦孝子 [B)], Qiu Feng [B)], 竹中たてる [B)], 荒川大 [B)]
小島裕二 [B)], 本間輝也 [B)], 中西功太 [B)]
沢村勝 [C)]
Naoto Numata [#, A)], Tomoyuki Asakawa [A)]
Hiroshi Sakai [B)], Kensei Umemori [B)], Takaaki Furuya [B)], Kenji Shinoe [B)], Kazuhiro Enami[B)], Masato Egi [B)]
Shogo Sakanaka [B)], Shinichiro Michizono[B)], Takako Miura [B)], Feng Qiu [B)], Tateru Takenaka [B)], Dai Arakawa[B)]
Yuuji Kojima [B)], Teruya Homma[B)], Kota Nakanishi [B)]
Masaru Sawamura [C)]
[A)] Nippon Advanced Technology
[B)] High Energy Accelerator Research Organization(KEK)
[C)] Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

Abstract

We started beam operation with Compact ERL(cERL) main linac cryomodule from 2013.Dec. Until now, we succeeded energy recovery with 80uA CW beam current of 20 MeV. For stable beam operation with more high current CW beam, it is nessesary to know the phenomina inside the superconducting cavity during beam operation, for example, increasing field emission. In order to know these phenomina,several fast monitors were set and monitored when the unexpected trip and/or radiation increase were occured with beam. In this paper, we describe the details of long-term operation experience of these cavities by using these monitors.

1. はじめに

KEKでは将来の大規模ERL型加速器のために、試験加速器であるコンパクトERL（以下cERL）が建設された。 2013年度よりビームコミッショニングを行っており、2014年2月にはビームが周回するようになった。現在は目標のビーム性能を実証するための調整運転を行っている。cERLビーム運転時のイメージ図を Figure 1 に、また設計（目標）パラメータを Table 1 に示す。cERLでは大電流かつ低エミッタンスのビームを高加速勾配の超伝導空洞で安定にエネルギー回収運転できるかの実証を目的としている。[1]

本文では、主加速器クライオモジュールの説明から性能評価試験結果及び cERL 運転時においてのモジュール内の現象を報告する。

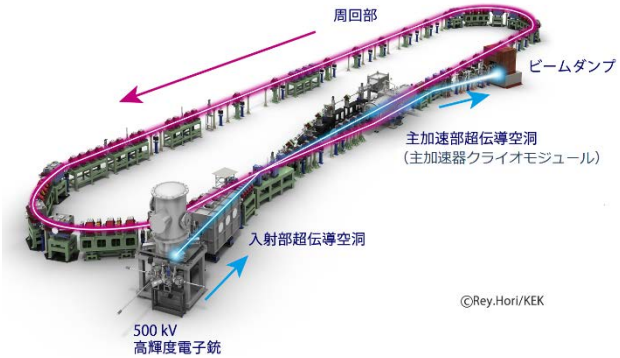

Figure 1: Image of cERL beam operation.

Table 1: Main Parameters for cERL Project

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

nat-numa@post.kek.jp

2. 主加速器クライオモジュール

主加速器クライオモジュール（以下主空洞）はエネルギー回収を行う本加速器の心臓部である。2台の 1.3 GHz の9セルのNb製超伝導空洞で構成され，高Q値(>1×10^{10})で15 MV/mの加速勾配で35 MeVまで加速することを想定している。特に最終目標である100 mAもの大電流ビームを周回できるように ERL 用に特化した改良設計を行った空洞である。cERL ビーム運転時のイメージ図を Figure 2 に示す。[1] 本文では上流空洞をML1、下流空洞をML2とする。

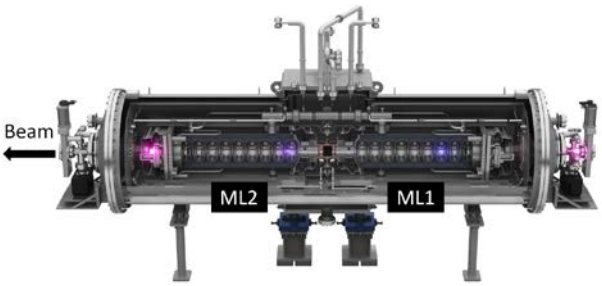

Figure 2: Image of main linac beam operation.

3. 主空洞の運転状況

主空洞がビーム運転を開始したのは 2014 年 10 月からであり、約 1 年半経過した。これまでのビーム運転の経緯を Figure 3 に示す。cERL としての 1 日の運転時間は 12 時間程度である。運転期間中の 2 週間における主空洞の運転状況を Figure 4 に示す。Figure 4 から分かるように非常に安定した運転を行っている。

Figure 3: History of main linac beam operation.

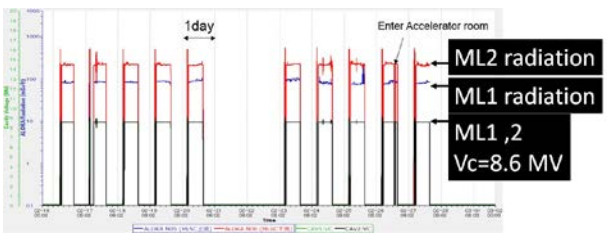

Figure 4: Two weeks data of cavity voltages and radiation.

cERL 運転スケジュールとしては、加速空洞のエージングを行ってから問題ないことを確認し、ビーム調整を開始する。各実験装置を順次立ち上げていき、主空洞は定格加速電圧まで立ち上げて運転を行う。通常の加速電圧としては、8.6 MV×2 である。2015 年 1-3 月期には、加速電圧を 8.6 MV×2 で 1 ヶ月半 down しないことを実証している。また、2015 年 5-6 月期には、加速電圧を上げて 10 MV 運転も行えることを確認している。

4. 長期ビーム運転中での空洞性能

長期運転により空洞性能は変化する可能性がある。性能劣化の指標としてあげられるのがQ_0値の劣化である。加速空洞ではフィールドエミッションによる放射線が発生する。フィールドエミッションの原因は、 空洞内への(0.1 μm 程度の) 埃やごみの混入によるものが主である。空洞内面の電界の強い場所に付着した埃から電子が発生し、 空洞に蓄えられたパワーを奪う。その結果Q_0値の劣化が起こる。

$$P_c = \frac{V_c^2}{R/Q \cdot Q_0} \qquad (1)$$

式(1)よりPc(Power loss)はQ_0値に反比例する。Vcは加速電圧である。R/Qは空洞の形状で決定される因子であり、Pcは空洞壁のlossである。その空洞壁で消費されたパワーがHe負荷となる。故に冷凍設備のHe消費量を解析することでQ_0値の測定を行っている。これまでのビーム運転によるQ_0値の変動をFigure 5,6に示す。

これまでの長期ビーム運転の結果としては、Q_0値の劣化が確認された。劣化を抑えるために、2014年は適切にパルスエージングを行い、2015年1-3月期までの 8.6 MV×2 の運転でQ_0値の劣化を抑えてきた。2015年5-6月期の運転でパルスエージングを行わずさらに劣化が進んだ。今後はパルスエージングを行ってQ_0値の回復を行う予定である。

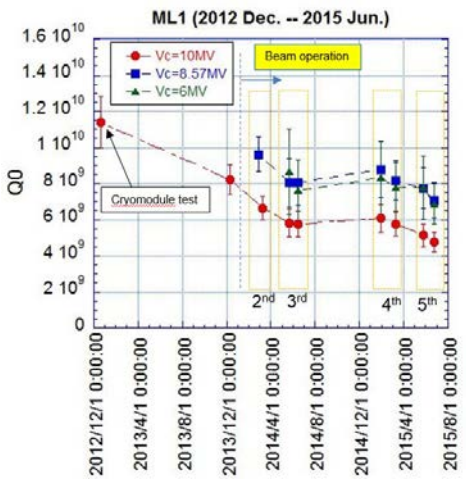

Figure 5: Q_0 measuring result (ML1).

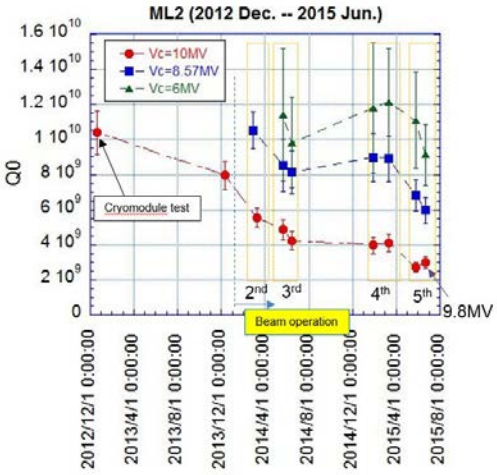

Figure 6: Q_0 measuring result (ML2).

5. 空洞モジュールのモニターとインターロックシステム

主空洞には Figure 7 に示す計測用センサーが構築されている。センサー出力レコードをモニター解析用と装置保護を目的としたインターロックシステムに利用して空洞内の現象を捉えている。現象を捉えるためには、センサーの変化を総合的に捉えて解析を行う。また、インターロックシステムには高周波源の入力遮断制御（以下 RF down）と空洞内の真空悪化を防ぐためのゲートバルブのクローズ制御(以下 GV close 制御)がある。加速電圧 Vc は Pt より換算している。

Sensor	ITL level	ITL response	ITL use
RF input(Pin)/refrection(Pref)	5 kW	1-10 μs	RF OFF ITL
加速電圧(Pt)	9.2 MV(8.6 MV運転時)	1-10 μs	RF OFF ITL
ARC sensor	Sensitive	1-10 μs	RF OFF ITL
Vacuum	1.0E-5 Pa(Cavity & Coupler)	100 -500 ms	RF OFF ITL/GV CLOSE
He	3.05 kPa	100 -500 ms	RF OFF ITL
Potentio meter	-		Only for measuring
Load cell	-		Only for measuring
Temperature	-		Only for measuring

Figure 7: Sensor of module.

RF down においては 1 μs 以内の高速遮断を行っており空洞負荷を最小限に抑えている。RF down の要因となる項目を Figure 7 に示す。RF down 時は要因となる項目から機器安全を確認し再立上げを行っている。参考までに高周波源のシステム系統図を Figure 8 に示す。

GV close 制御においては設置位置としては、空洞前後にあり異常時には自動で close 制御を行う。システム全体の中で真空悪化を確認した際には、真空悪化した場所に限らず瞬時に close 制御を行う。これは空洞を真空システム的に独立させることで他の装置からの真空悪化の影響を受けないことと、また主空洞自体での真空悪化を他の装置へ影響を与えないことを目的としている。インターロック動作時は、システム全体での真空値の変動を確認し、真空悪化した状況から主空洞としての真空制御動作が問題なかったかどうかまでを毎回確認している。参考までに真空システム系統図を Figure 9 に示す。

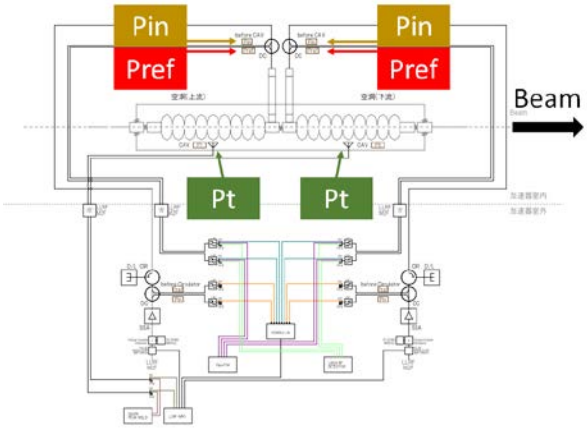

Figure 8: RF system diagram.

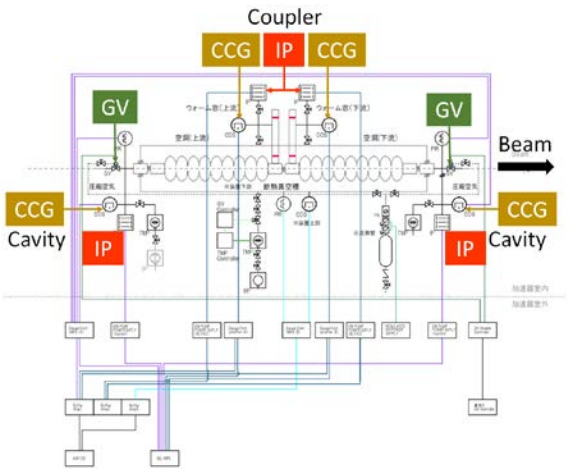

Figure 9: Vacuum system diagram.

Figure 9 に示す通り、真空領域は空洞と入力カプラーの 2 枚窓の間の領域の 2 箇所であり、お互いが独立している領域である。

6 RF down 時の現象理解

ビーム運転を開始してからは 2014 年 5-6 月期で 20 回の RF down が起きている。2015 年 1-3、5-6 月期では個々に 8 回の RF down に抑えられ、RF down の回数が劇的に減った。更に 2015 年 1-3 月期で 1 ヶ月半 RF down が起きなかった。これは 2015 年 1 月(cERL 運転前)に LLRF での GAIN 調整を行い、RF を非常に安定させた結果である。

安定した運転の継続はできているが、RF down する事象は起きている。その中でも、空洞内での放電及びカプラー内での放電、機械振動によるものが上げられている。前章で示したようにモニター解析及びインターロックシステムから空洞内で起きている

現象理解を行ってきた。モニター解析は 16ch モニターを使用して 1 μs 以下の分解能で測定を行っている。インターロック信号にトリガーをかけて±1 s のデータを取得し、RF down 時の波形解析を行うことで現象を捉えている。アラーム発報項目は最初に上がってきた項目には識別できるように設定しており、また項目内容に傾向が見られるかを確認している。例として 2015 年 5-6 月期のアラーム発報項目をまとめたものを Figure 10 に示す。

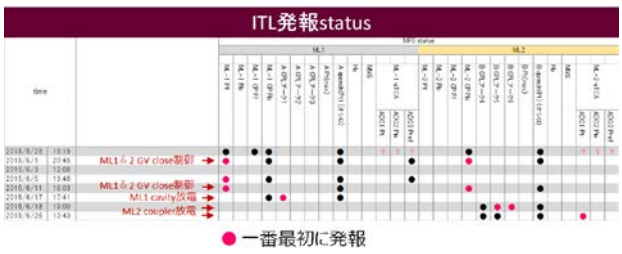

Figure 10: RF down result.

空洞内放電現象の波形データを Figure 11 に示す。またアークセンサーの取付け位置を Figure 12 に示す。

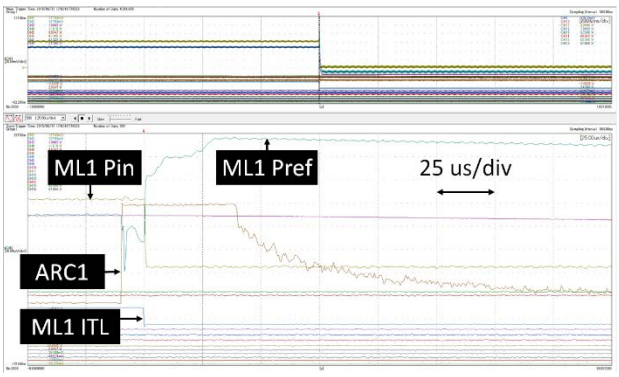

Figure 11: Discharge phenomenon of cavity.

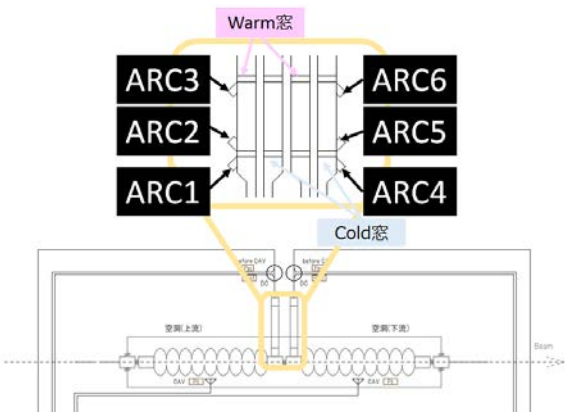

Figure 12: Position of arc sensor.

空洞内での放電をカプラー内に設置されたアークセンサーで反射光を捉えたものが波形としてあらわれていると考えられる。加速電圧の変化は見られていない。また空洞及びカプラー内の真空悪化がみられなかった。本来このような放電が起きると、真空悪化も見られると予想されるが、モジュール中心での放電が、モジュール両端の CCG に到達しなかった可能性が高い。このような放電が真空でも見られないとすると、この放電をアークセンサーでとらえることで RF down させることが機器安全に必須であると考えられる。

カプラー内放電現象の波形データを Figure 13 に示す。カプラー内での放電はアークセンサーがすべて反応しておりカプラー内でのアーク放電が大きいことがわかる。またカプラー内での真空悪化が見られている。高周波源の考察をすると入力波がなくなり反射波が大きくなるまでの時間に遅延時間が生じていることがわかる。これはカプラー内から放出されている電子の影響により反射波が遅れて検波されたと考えられる。これらの現象はまだ断定できておらず今後も継続して実験データを蓄積していく必要がある。更に加速電圧の上昇も起きており、その影響なのか同時刻にもう 1 台の空洞の高周波入力レベルが変動していることも確認できた。この結果から 2 台の空洞の相関関係も思慮に入れた現象理解が必要であると考えられる。

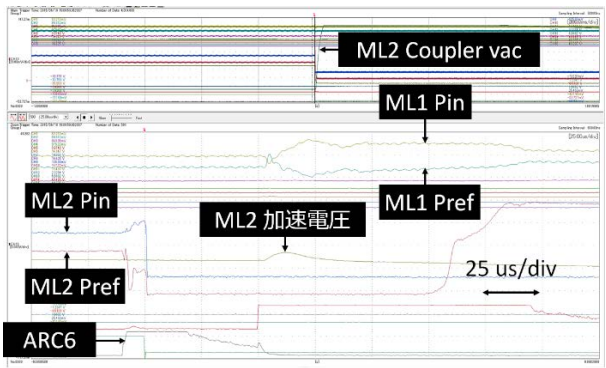

Figure 13: Discharge phenomenon of coupler.

機械振動による RF down は現在のところ GV close 制御により起きている。microphonics に関しては LLRF の調整により問題はない。機械振動による影響としては、空洞が高周波源のチューニングが外れることで、高周波源の入力波が反射波とともに振動しながら上昇する。高周波レベルのインターロック閾値を超えることにより RF down がおきる。しかしこれに関しては真空制御という面での機器安全が最優先であり、正しく動作している。Figure 14 に機械振動による高周波源の変動を捉えた波形を示す。Figure 15 に示す様に他の装置の真空悪化に対し GV close 制御が動作している。動作前に真空悪化が見られていないことから、cERL の他の実験装置からの真空悪化を未然に防いでいることがわかる。

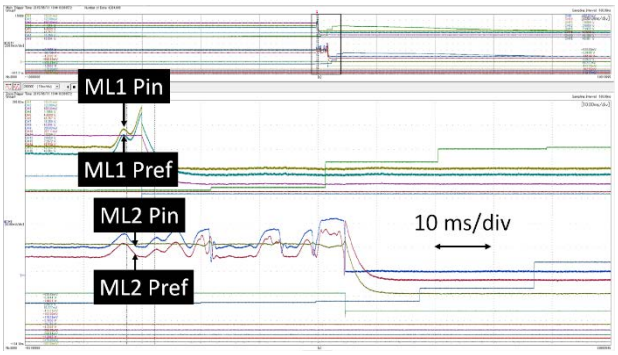

Figure 14: Mechanical vibration phenomenon.

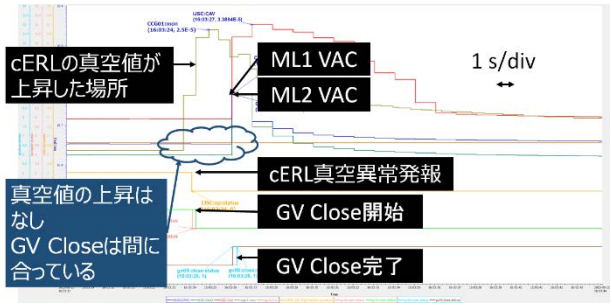

Figure 15: Vacuum system control.

これら RF down 後の対応としては、解析のためのデータ保存を行い、機器安全を確認してから再立上げを行っている。人為的な操作ミスによる RF down であれば再立ち上げは 5 分程で立ち上げることが可能である。

7. まとめ

主空洞のビーム運転は、2014 年 10 月から 1 年半行っているがフィールドエミッションによる RF down は起きておらず、安定した運転を行うことができている。また加速電圧を 8.6 MV×2 で 1 ヶ月半 RF down しないことも実証できた。2015 年 5-6 月期には、加速電圧を上げて 10 MV 運転も行えることを確認できた。

計測システムが充実することで、運転時の空洞内の現象を捉えることができている。RF down の一因である空洞内及びカプラー内での放電現象はアークセンサーにより、10 μs 以下で放電の成長を抑えることができている。今後も継続していきデータを蓄積することで、空洞内の現象理解を深めていく。

参考文献

[1] H. Sakai, and Y. Honda, et al., “ERL 試験加速器のビームコミッショニング”, HIGH ENERGY NEWS, Oct 2014, P.205 (2014).