

cERL Main linac 報告

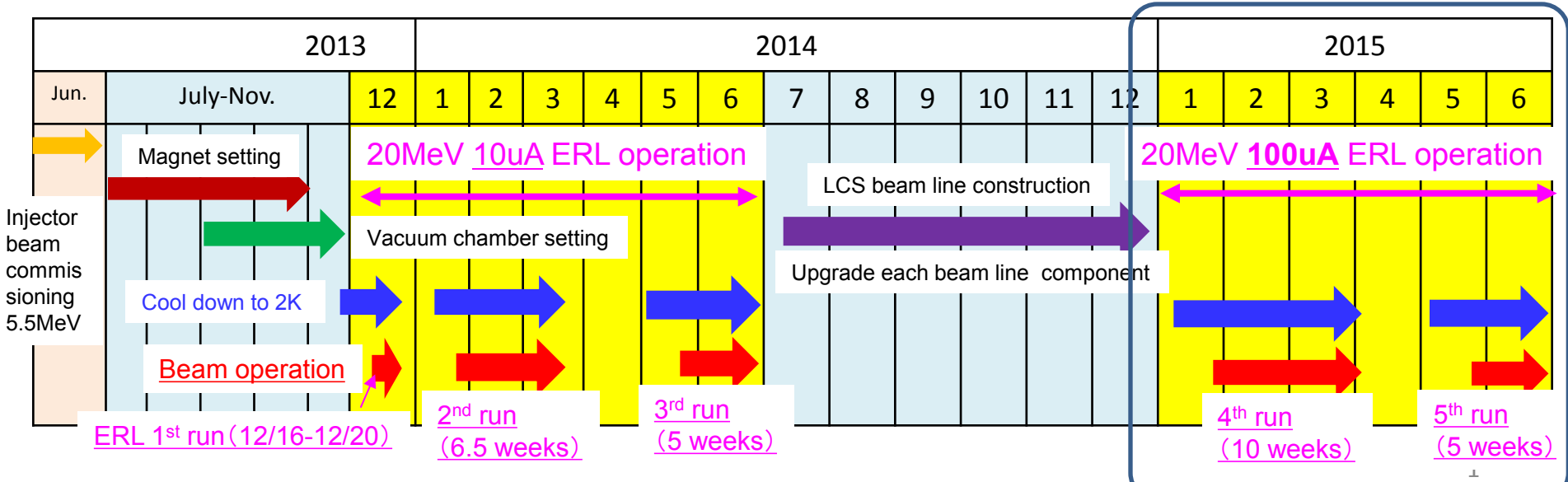
(2015年1月～6月までのビーム運転状況+α)

阪井寛志、梅森健成、江並和宏、江木昌人、
 沢村勝、篠江憲治、古屋貴章

12pages

Contents

- 2014年の運転時の結果(おさらい)と2015年目指すべきもの
 (2014年運転結果を踏まえた2015年の運転までの改良点)
- 2015年ビーム運転の状況とそこから得たもの。
- Summary

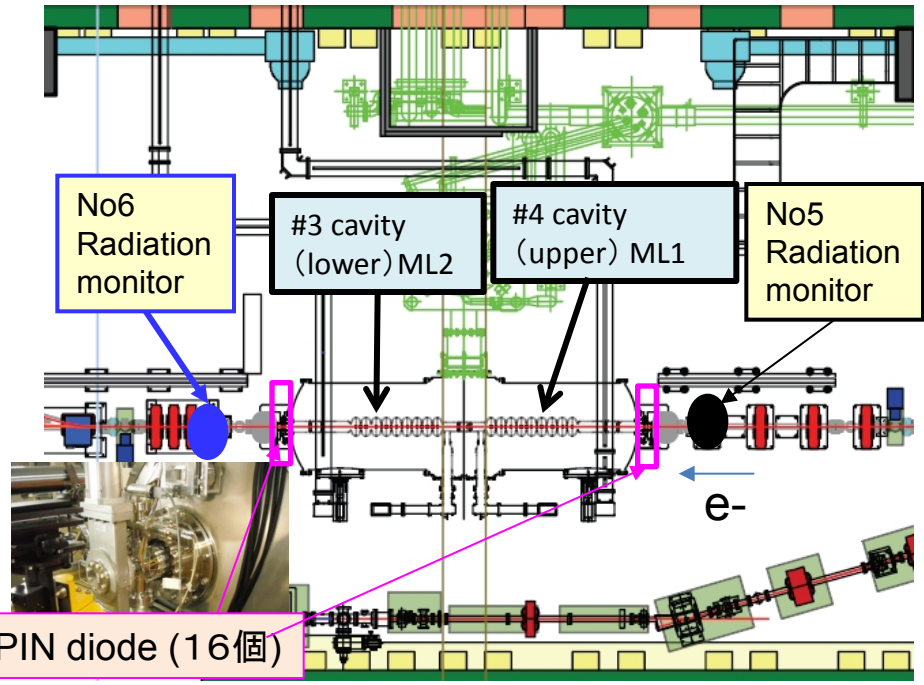


2014年のERL main linacとして初めてのビーム運転で知り得たこと(前回の復習)

- Fieldの安定性
 - QL 1.3×10^7 でmicrophonicsの影響もなく、振幅 $<0.1\%$ 、位相 $<0.1\text{deg}$ を運転中は確保。
(今後①): QLをさらに高く($>2 \times 10^7$)して運転可能かが課題。
- 空洞性能劣化に関して
 - ビーム運転中にも劣化が進んだ。対処策としてはpulse agingにて劣化対策を行っている。
(今後②): 根本的なHe processingなどが効くかが課題。
 - 但し、今のところ8.6MVではQの劣化はまだない。今のところこのfieldが運転可能電圧として我々が提唱できるもの。
(今後③): fieldを上げて長期運転はしてみたいところ。
- 運転中のITLとtripの原因。
 - 2014年5月～6月にかけての5週間では20回のITL
 - ビーム負荷、及び、HGによる振動起因のPinの増加によるもの、またダンプの真空劣化によるGVclose時の振動によるRF offが主な原因。
 - 但し、空洞起因のfield emissionやquenchによる空洞tripは一度もなし。カプラー原因のtripもなし。この結果はCEBAFとは違う。→今後③fieldを上げて長期運転してみたい。
 - ITLは安全サイドにRFを落とすにいく→空洞保護はほぼ完璧。
(今後④): gainのoptimiseでtripを減らし、かつ落ちた時にいかに早く立ち上げるかが課題。
- HOMの大電流、大電荷試験はこれから。CW 10uAまで行った。
 - 但し、ビーム対し、今のところHOM damperによるcharge upなどの大きな影響はまだない。
(今後⑤): 大電流によるHOMの熱負荷試験や100uAでHOMが問題ないか確認を行う。

2015年での100uAの運転に対して空洞側ではさらに長期の運転、特に劣化やtripの経験を増やしていくために
(今後④) gainのoptimizeでtripを減らし、8.6MV×2でのNo tripでの長期運転が確保可能か？その後
(今後③)のfieldを上げて、8.6MV以上(10MV)でも長期運転が可能か2015年夏までに調べた。それとは別に
(今後②) He processingなどが効くかを2014年後半から別途調べることにした。

2014年のcERL主空洞のビーム運転状況と劣化の現状(1月以降の長期運転での空洞性能劣化)



2013年12月16日にcERL周回部commissioning開始
 Beam energy 20MeV, beam current (max) 10uA

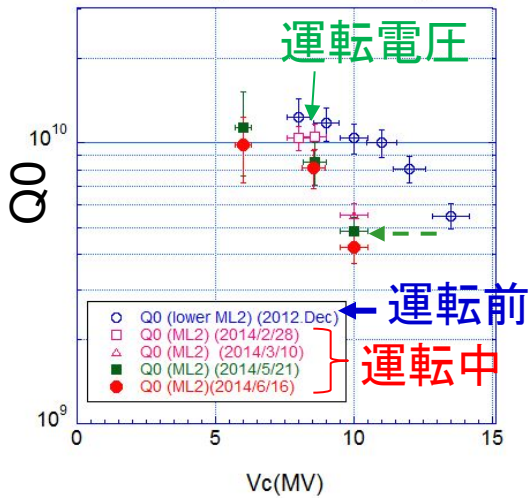
2014年					
1月	2月	3月	4月	5月	6月
	7週間			5週間	

周回部ビーム運転(1/30-3/14)
 放射線試験CWビーム10uA。
 エネルギー回収達成。

周回部ビーム運転
 (5/22-6/20) optics調整
 &大電荷運転(7.7pC)

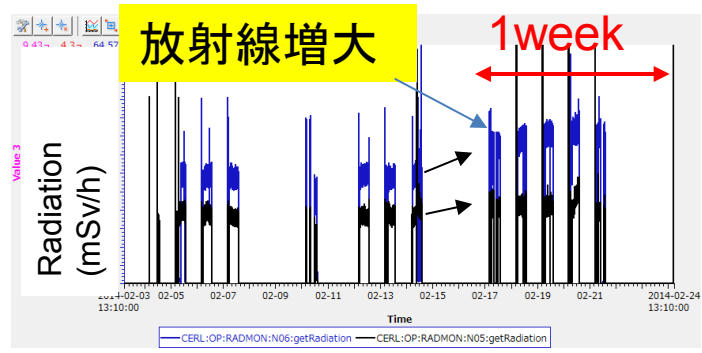
長期運転中のradaiton増大による空洞劣化を見るため2つのモニター(radiation monitor (Si) (ALOKA)、PIN profile monitor)を radiationの出る空洞の軸方向に常時設置。

運転前後のQ値測定

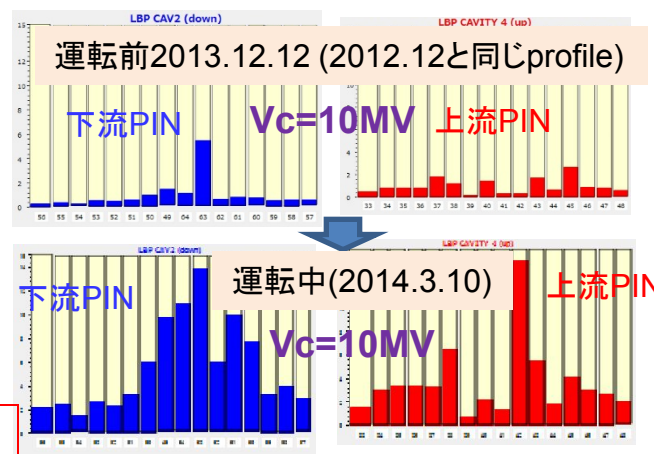


運転に伴う放射線の状況

2月初めの20MeV運転を始めてから3週間の radiationの様子。3週間後に突然下流に radiationが増える現象が見られる。



運転電圧ではQ値の劣化は少ないが、高い電圧ではQ値の劣化が見られた。それに合わせて、PINの放射線も全体的に増大していることも判明した。



運転中に空洞以外の真空悪化に伴う空洞性能劣化も見られた。

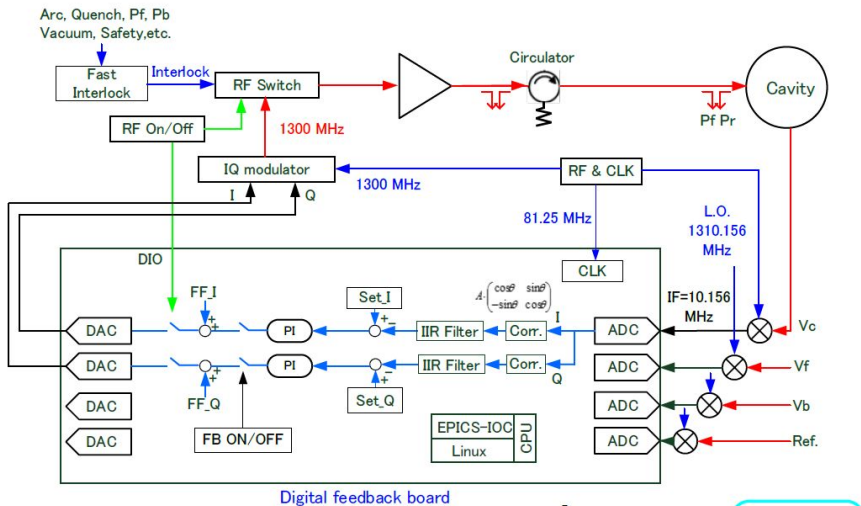
長期的な運転での空洞性能劣化は radiationの変化から追従可能。

今までMLのLLRFのfeedback loopはHG ; KP: 1000 , KI 4000というparameterで制御を行っていたが、Kpが高いと少しの変動でPinが入力され、非常に変動に弱かった。(ΔA/A, Δθは<0.02で安定なのだが。)そこでKPが小さいが安定な領域(Kp/KI比一定)で探した。右がgain scanの結果。現在はMiddle gain(New HG)を設定。振動には強くなり、かつ安定性も良くなった。

ML LLRF gain scan(三浦、道園、Qiu)

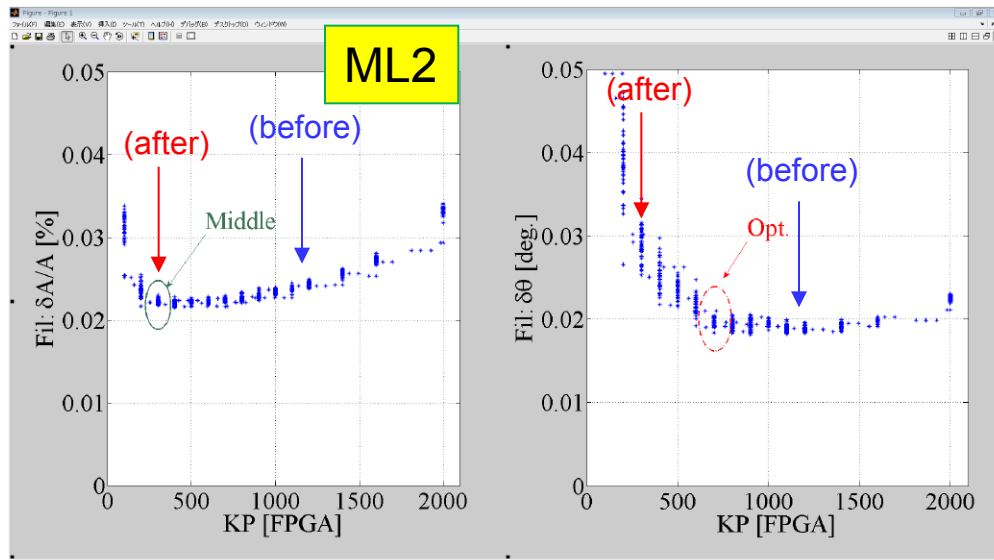
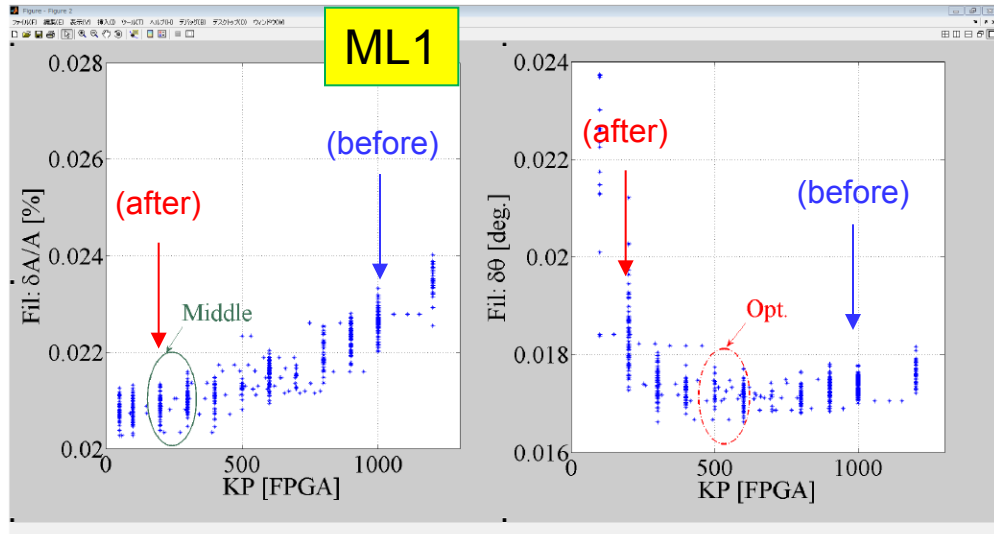
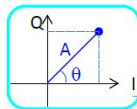
New HG

ML1 : Kp 200 , KI 800
ML2 : Kp 300 , KI 1200



$$I = \frac{1}{4} \sum_{n=0}^7 \cos\left(2\pi \frac{n}{8}\right) \cdot V(n),$$

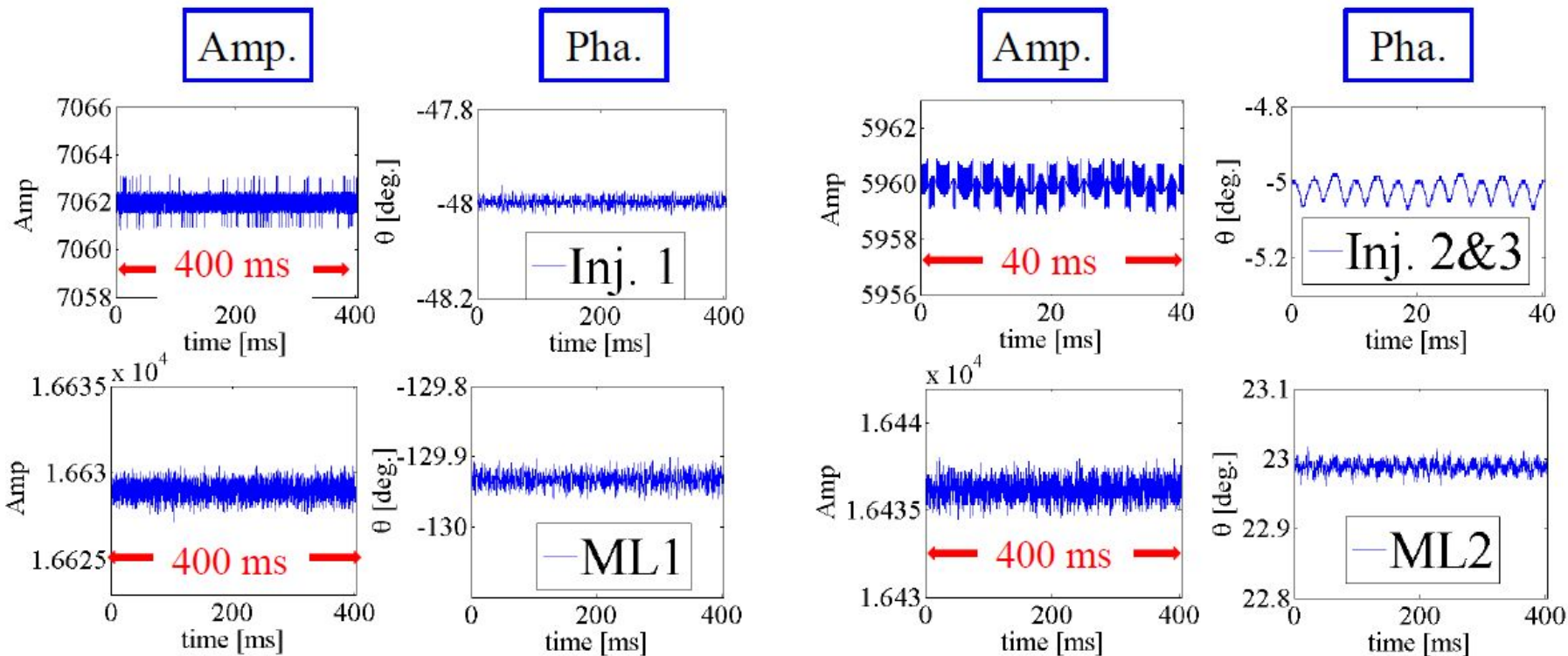
$$Q = \frac{1}{4} \sum_{n=0}^7 \sin\left(2\pi \frac{n}{8}\right) \cdot V(n)$$



ML1 : QL=1.3*10⁷ , ML2 : QL=1.0*10⁷

Performance of LLRF after changing HG parameters

RF requirement
0.1 % rms, 0.1 deg. rms for cERL
0.01% rms, 0.01deg.rms for 3GeV-ERL



RF stability	Bun.	Inj. 1	Inj. 2&3 (VS)	ML1	ML2
$\Delta A/A$ [% . rms]	0.07%	0.006%	0.007%	0.003%	0.003%
$\Delta \theta$ [° .rms]	0.04°	0.009°	0.025°	0.010°	0.007°

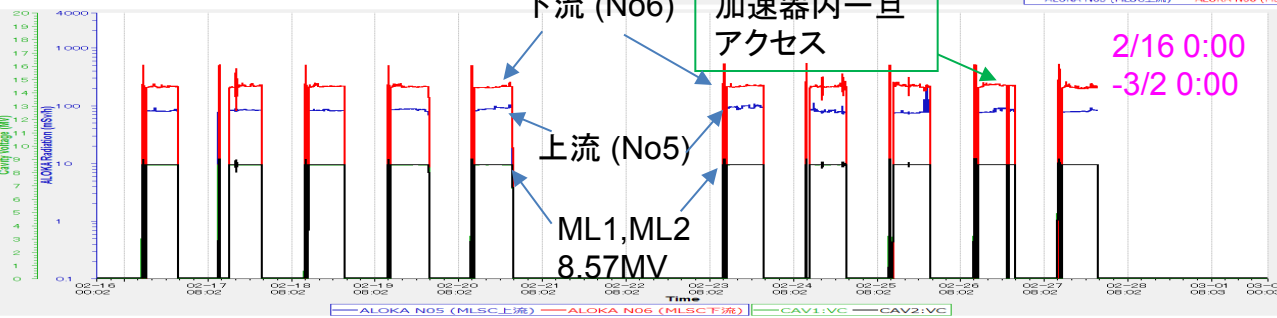
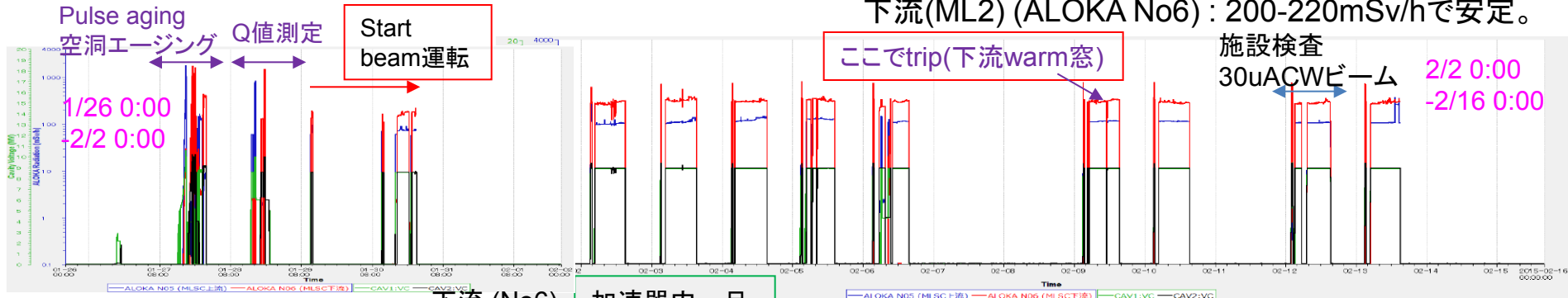
ML1:8.57MV
 ML2:8.57MV

Beam Momentum jitter is 0.006% (in agreement)

道園、Qiu、三浦

(2015/1/26-4/4 (4th run))10週間の空洞の変化(+radiation)

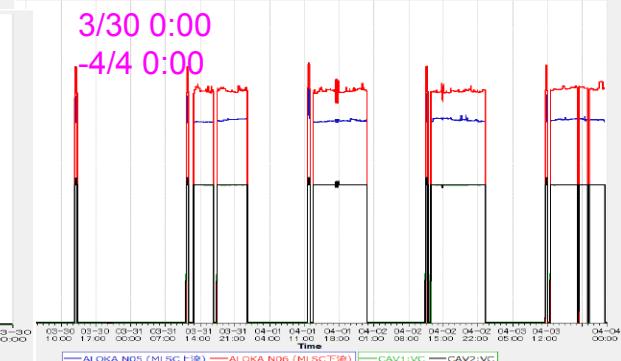
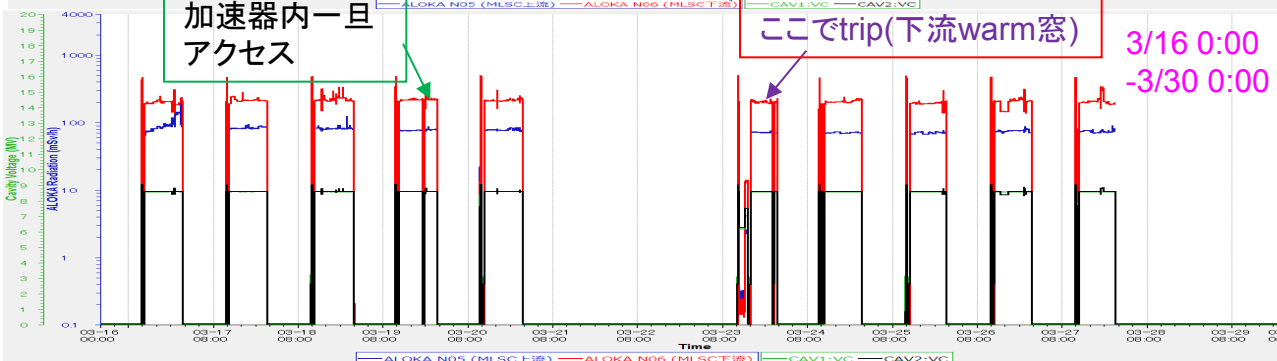
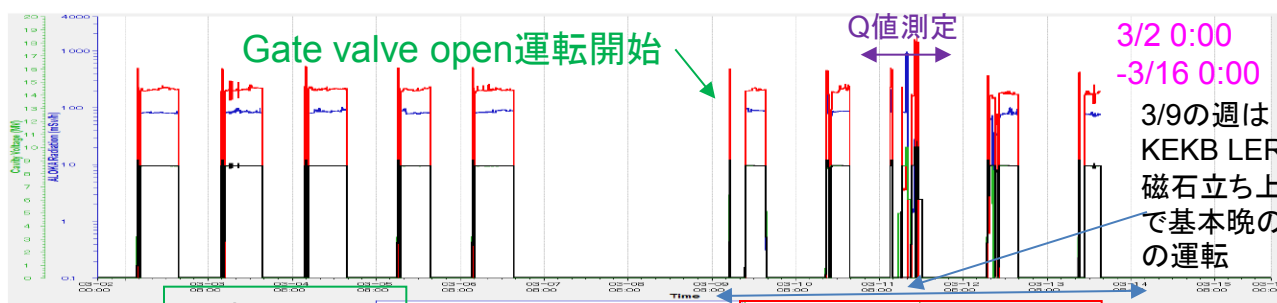
上流(ML1) (ALOKA No5) : 80mSv/hで安定
 下流(ML2) (ALOKA No6) : 200-220mSv/hで安定。



Vc (ML1:8.57MV)
 Vc (MI2 :8.57MV) Keep
 HGの調整後に2/9~3/23まで約
 1.5か月 No trip → trip減った。
 3/16以降は本格的にGVを開けっ
 放しでの運転となっているが、その
 際でもradiationが大きく増えること
 がない。
 最終週のLCS実験時もradiation
 が最後まで増えることはなかった。

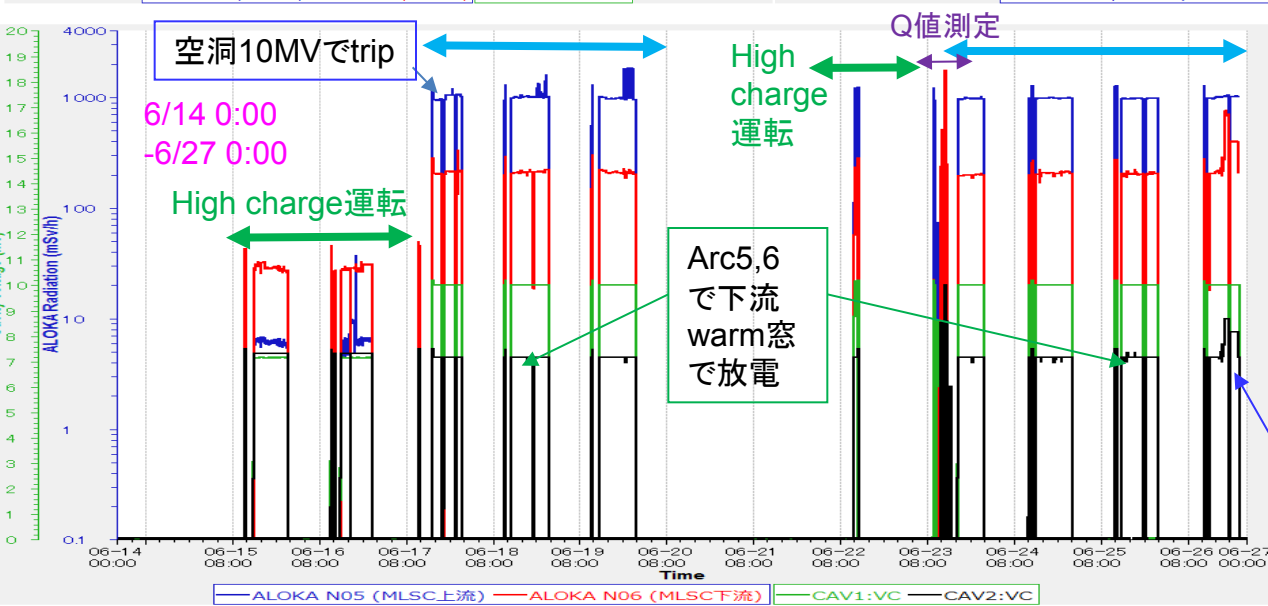
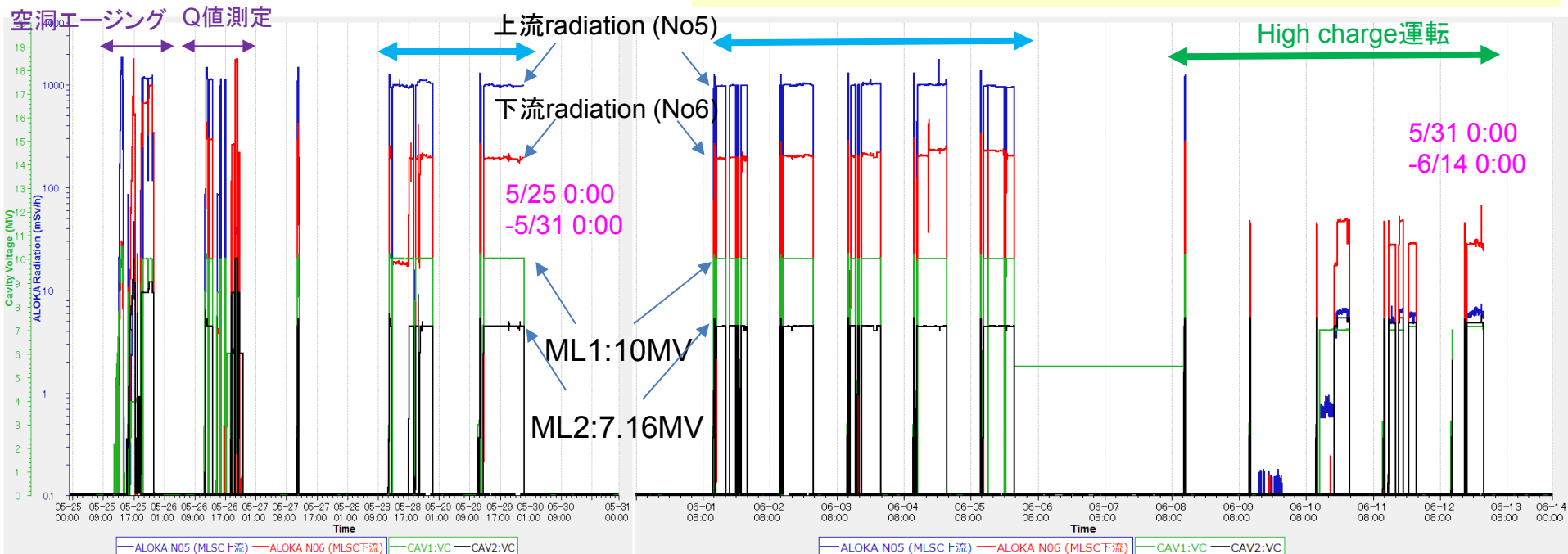
↓

10MV運転へtry



(2015/5/25-6/27 (5th run))5週間の空洞の変化(+radiation)

ML1: 10MV , ML2 : 7.16MV (total2週間try (水色矢印区間))
 上流(ML1) (ALOKA No5) : 980-1000mSv/hで安定
 下流(ML2) (ALOKA No6) : 200-220mSv/hで安定。



5th runでML1で10MV運転にtry。
 5週間のうち2週間しか10MV運転の時間が取れなかったが、それによるradiationの増加は見られなかった。また、tripもHigh charge運転後のあとの10MV運転でML1空洞では1度起きただけでそのあとは空洞起因のtripは10MVではなかった。10MV程度のエージングが長期にないと空洞のtripが多くなる可能性があると思われる。後半はwarm窓による放電(arc detectorで検出)が2回起こった。

最後21MeV運転。

Statistics of trip ratio (ITL)

- 2014.May.22 ~ Jun.20 (3rd run) : 4.5 weeks (cavity operation time : 10:00 ~ 22:00 or 23:00)
 - Main linac ITL: total 20 times
 - Main reason is LLRF gain is too high (severe from the fluctuation and beam loading on pulse operation)



Change LLRF gain to optimize to ML 1,2

- 2015.Jan.29 ~ Apr.3(4th run) : 9.5 weeks (cavity operation time : 10:00 ~ 22:00 or 23:00)
 - Main linac ITL: total 11 times
 - ML #1 : 7 times (CAV放電x1(10MV)、warm放電x1, 振動x3(地震1, GV2)、MMSx1、LLRFx1)
 - ML #2 : 9 times (warm放電x5, 振動x3(地震1, GV2) MMSx1)
- 2015.May.29 ~ Jun.26(5th run) : 5 weeks (cavity operation time : 10:00 ~ 22:00 or 23:00)
 - Main linac ITL: 8 times (miss operationを除く)
 - ML #1 : 5 times (CAV放電x1(10MV)、振動x3(unknown1, GV2)、LLRF?x1)
 - ML #2 : 5 times (warm放電x2, 振動x2(GV2) LLRF?x1)

震度1 → 震度3くらいは持つようになったか？

• LLRFのgainを変えることでITLの回数は減少した。ピンクが空洞起因のITL。(空洞10MVのみ)

• Warm窓の放電が多く、4th runで5回、5th runで2回あった。

平均 2週間に1回程度下流のwarm窓が放電したことになる。

カプラー内部では位相がずれるとカプラー内の定在波の位置がずれ、定在波の位置がmicrophonicsがあると、多少変わり、長期でおいていると放電することがあか？。

--> 今後は1週間に1回程度でwarm窓を多少detune (±10度程度)してagingをも考える予定。

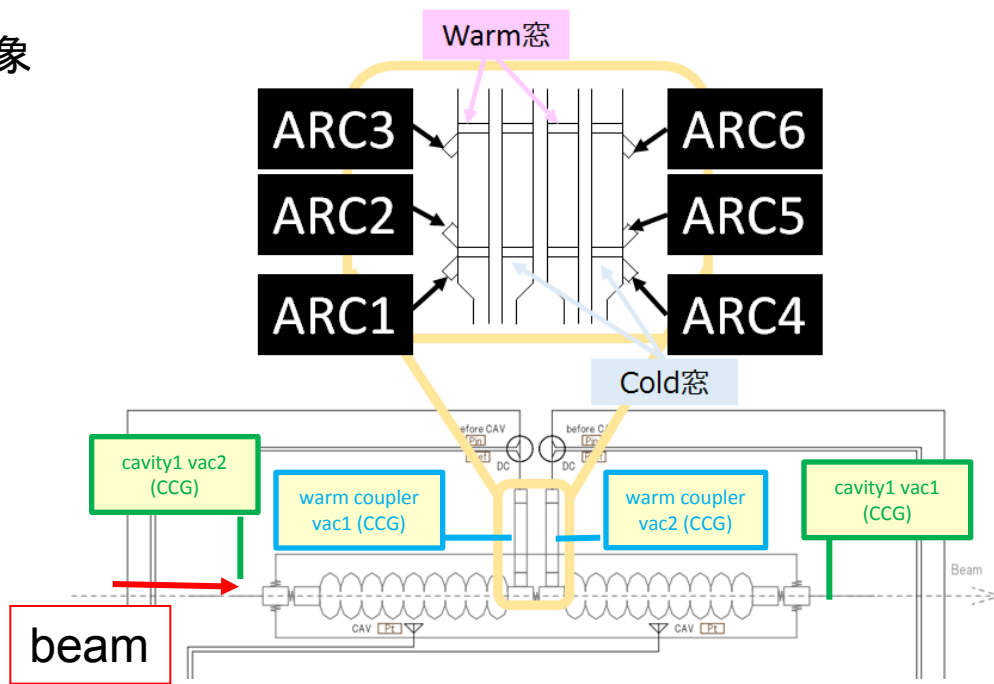
2015年5月6月での空洞起因のtrip時の現象

warm窓2のarc6が反応時:

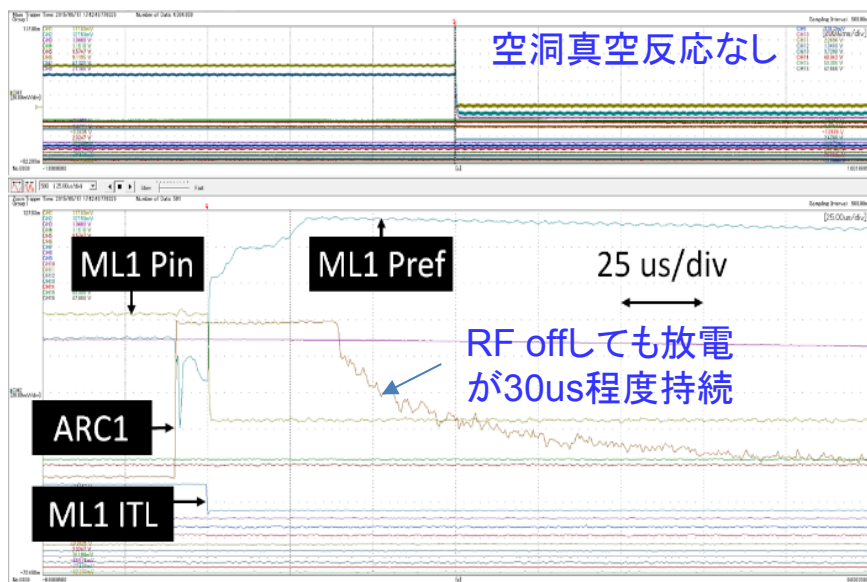
放電が9us持続したため、RF off ITL
 放電(arc6の信号)が25us持続してその後、減少後、arc4
 も反応しML2の加速電圧が少し増加。
 →warm窓で放電時は空洞とカプラー間のパワーバ
 ランスがしばらくおかしくなっている可能性大。これに合わせ
 て100ms後にwarm窓のcoupler真空が増加する。

空洞の放電arc1反応: RF off時も放電が30us持続してい
 た。この場合は空洞真空は全く反応なし。
 →CCGの場所がカプラーから遠いのか?

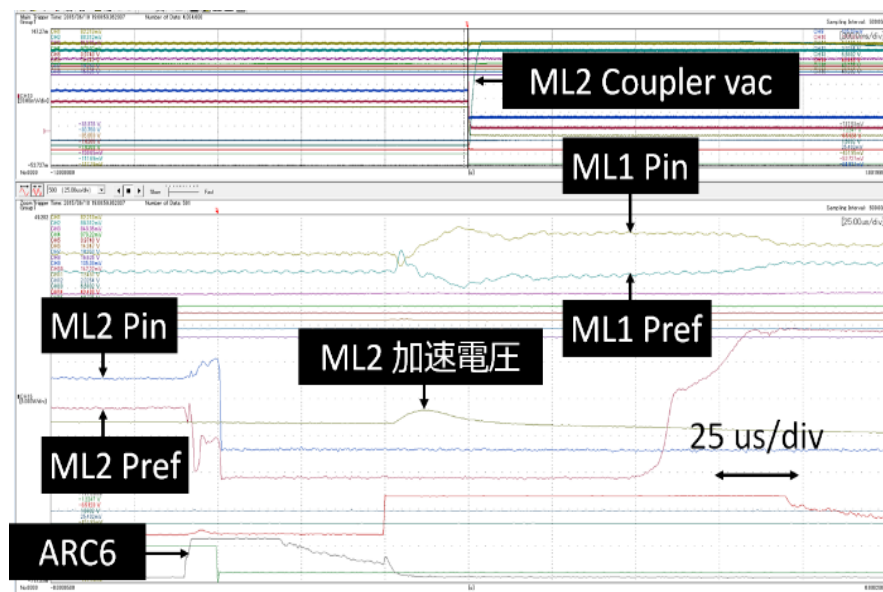
いずれにせよ。放電が持続して異常現象になる可能性が
 わかった。
 →Arc sensorが正しく働き、放電の成長を押さえている
 のがわかった。



沼田

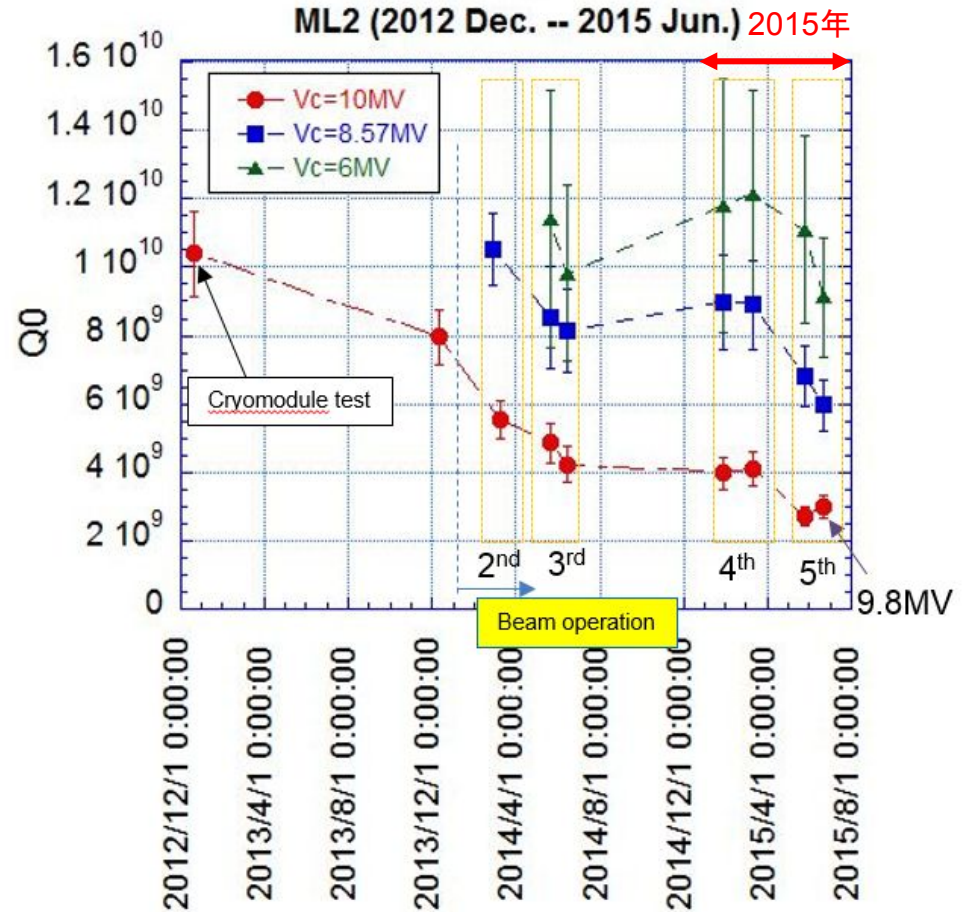
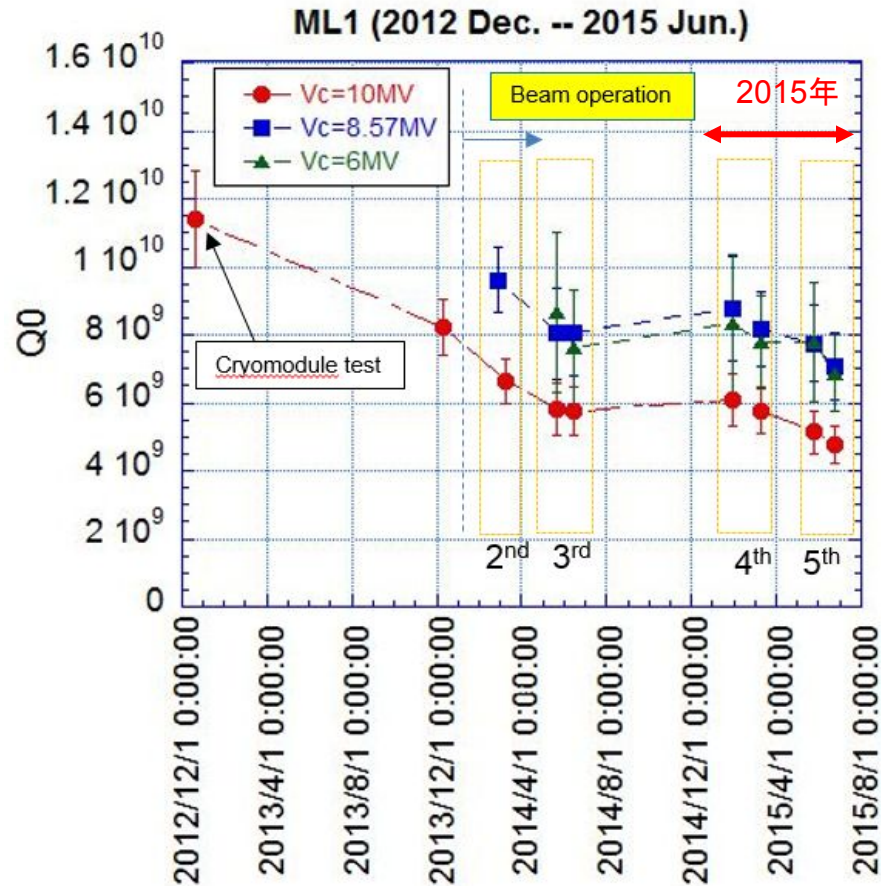


2015年6月17日 17:41 10MV運転時Arc1放電ITL



2015年6月18日 19:00 下流warm窓Arc6放電ITL

長期cERL ML空洞性能測定結果



これまでの長期ビーム運転の結果として、ビーム運転後に 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Pulse agingを行い、2015年1-3月(4th run)までの8.6 MV*2の運転で Q_0 値の劣化が抑えられた。2015年5-6月(5th run)の運転では10MVの運転に移行する前に Q_0 値の劣化が見られた。Pulse agingを行わずさらに劣化が進んだ可能性が高い。今後はPulse agingを行って Q_0 値の回復を行う予定である。

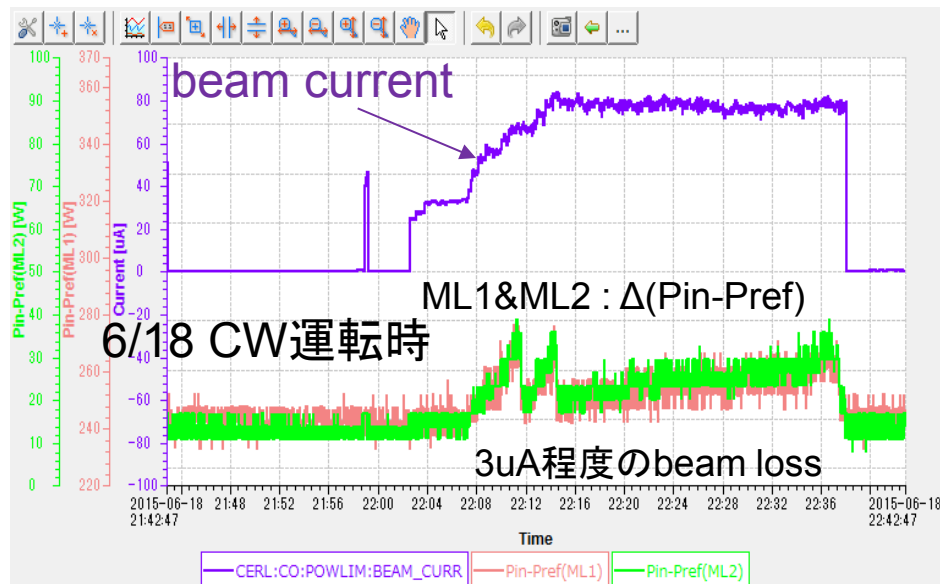
Energy recovery 運転結果

じわりじわり回収率が悪くなっている。最後にCOL3 bottomを5.3mm--> 5.8mmで抜く。抜けば回収率はもとに戻ったが、その後N4ダンプ北壁が20mSv/hを超えてビームストップした。

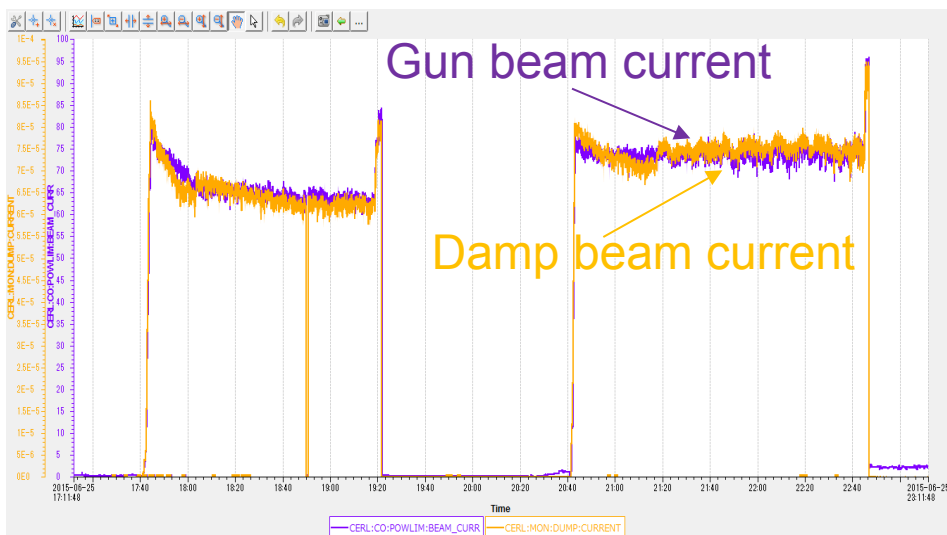
CW 100uA近くになったので、エネルギー回収していない時のlossが $\Delta(\text{Pin-Pref})$ でしっかり反映されるようになった。ここから回収の効率を見ながら運転が可能になった。



1mA運転時にも常時モニター可能。



6/25 70uA~90uA運転時 Off center & Col1,2の調整で回収率が非常によく運転できた。



Summary(運転から得たもの)

- 2014年末にLLRFのゲインを変えて2014年で問題だったtripを減らすことを行った。
- 2015年1月～3月は8.6MV×2で9.5 weeksの間で放射線量の変化はなく、Q値も変化がなかった。また、その安定化の結果1.5か月間 No tripであった。つまり、運転上tripを大きく減らすことができた。
- その結果を踏まえて、5月6月には一方の空洞を10MVに上げて、高い電圧での現空洞が運転上問題があるかどうか検証した。その結果、14日間しか10MVで運転していないが、field emissionによる空洞のtripなどは10MVに上げても見られず安定な運転を確保できた。またその間の放射線量の変化もなかった。
- 残念ながら、2015年3月から5月にかけてQ値の劣化が多少見られている。pulse processは2015年の運転前以降は行っていないので、それを次回tryして、回復するかを見る。
- 100uAに上げたが、その際でも問題なく安定に運転できてそれによるエネルギー回収を実証した。またエネルギー回収率のモニター化もできた。
- 上記Q値の劣化は見られているものの、モジュール全体としては冷却手順、真空なども含めて、大きなtroubleはなかった。またITLは適切に働いた。さらにはtrip時のmonitor化を進め、ITLの統計およびITLがかかった時の現象の理解を進めている。特にwarm窓のtripが問題だとわかったため、それを抑えるためにdetune agingなどを導入していく予定である。
- 今後電流増幅時にビームモニターと相関を取って大電流での安定運転への理解を深めていく予定である。
- またさらに大きな回復を目指したHe processの準備を行っている。縦測定ではHe processの効果が見られているので、次はカプラーテストスタンドにて窓にHeを入れた際に問題ないかを2015年秋に検証する。それが検証されれば、モジュールでHe processをtryすることになるであろう。

ここらへんのfield emissionを減らすための戦略などの今後の主空洞の長期戦略は前回の発表の復習も踏まえて、8月の梅森さんの発表に合わせて、述べる予定である。

Backup

2014年5月20日～6月20日までの1か月間(空洞運転時間:10時～22時)ITL 履歴

2014年5月20日～6月20日までの1か月間(空洞運転時間:10時～22時)

- 主超伝導空洞の停止回数: 20回

ITLの内容(RFに対して):

Power Pin(up),Pref(up),Pt(up,down) (Pin, Pref<5kW) , Pt (5MV/m< , <9MV/m)

冷凍機: He level±5mm,He pressure (<3.05kPa)

空洞&カプラー真空: < 1*10⁻⁵Pa

カプラー窒素ガス流量: in & out (>30l/min) (default 60ml/min)

温度: 上限(80度以下)(常温部)

アークセンサー3つずつ

MPS: ビーム&放射線など

原因	回数	
チューナ	1回	
RF FB制御(High gain 運転)	3回	Pin急激に上がった。(振動などによるもの) Middle gain で運転することで対処可能
アークセンサに太陽光入射	3回	対策済み
位相の設定ミス	1回	
ビーム調整中のカプラー・空洞の放電	4回	ビーム調整法の修正で対応(ビームが空洞にあたったことによるもの)
空洞下流の真空圧力上昇	4回	ビームダンプからの圧力上昇
ビーム負荷	3回	RF FBのゲインを変えて対処
冷凍機のオーバーロード	1回	対策済み

空洞起因の field emission や quench による trip や ITL は ない。



すべて、人的 operation miss か 外部によるもの。

安全サイドで働いている。その分ITLで落ちるratioもまだ調整しきれていない。(少し多くITLがかかる。)特にHigh Gainでは空洞のmicrophynicsの増幅やビーム負荷によるPinの増幅が大きいため、今後はgain 調整といかに早くITLが落ちた時から立ち上がりを早くすることが大切。

ここまで(cryomodule組込みまで)の課題: 空洞はなんで性能劣化したの？

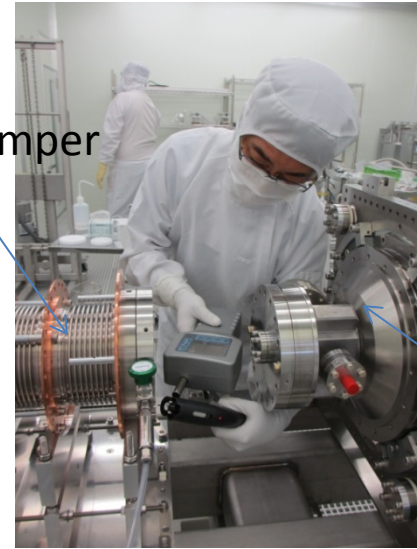
[縦測定後モジュールアセンブリ前]

1. 縦測定スタンドにて真空状態で保管
2. ジャケット化に備えArパージ → O.K (2014.4月)
3. ジャケット化に備えフランジ交換 (最後はAr flowしながらバルブ封止)
4. メーカーとの間の輸送 (空洞内はAr封止)
5. メーカーにてジャケット化 (空洞内はAr封止)

- ## [モジュールアセンブリ]
6. HOM damper、beampipeの組立・ベーキング
 7. 空洞とHOM damperの連結 (空洞内Ar flow)
 8. 組立時のAr flow
 9. 空洞とinput couplerの連結 (空洞内Ar flow)

- ## [モジュールアセンブリ後]
10. リークテスト → Arパージ
 11. ゲートバルブ接続
 12. リークテスト → Arパージ
 13. シールド内への移動 (空洞内はAr封止)
 14. 空洞内の真空引き
 15. Coupler aging
 16. 冷却
 17. ビームラインでのパワーテスト

HOMdamper



Ar導入口(0.01umのフィルター通して)
(カウンターフローを作る)

超伝導空洞

HOMダンパーつなぎ作業(class 10 clean room)



Gate valveつなぎ作業
(クリーンブース
class 100???)

超伝導空洞

ゲートバルブ

赤は空洞へのアクセス作業(クリーンルーム(class 4))

緑は空洞へのアクセス作業(クリーンブース)

青は空洞に絡む真空作業

縦測定に比べ、空洞性能評価後はより空洞内へのゴミ混入となりうる可能性の作業が圧倒的に多い。

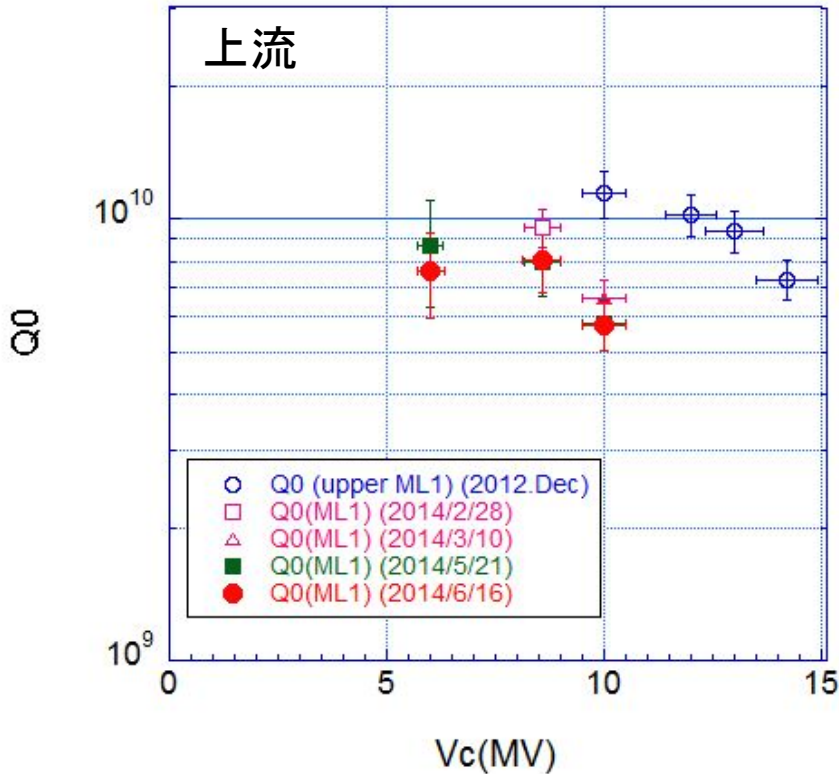
- ・新しい治具や組立方法を検討し、縦測定(X-mapping)などにて、各工程での性能劣化の有無を調べる。
- ・さらに劣化時には空洞を高圧超純水洗浄にて、再度回復可能かを調べる。→縦測定後の洗浄効果

運転中と今後行いたいstudy

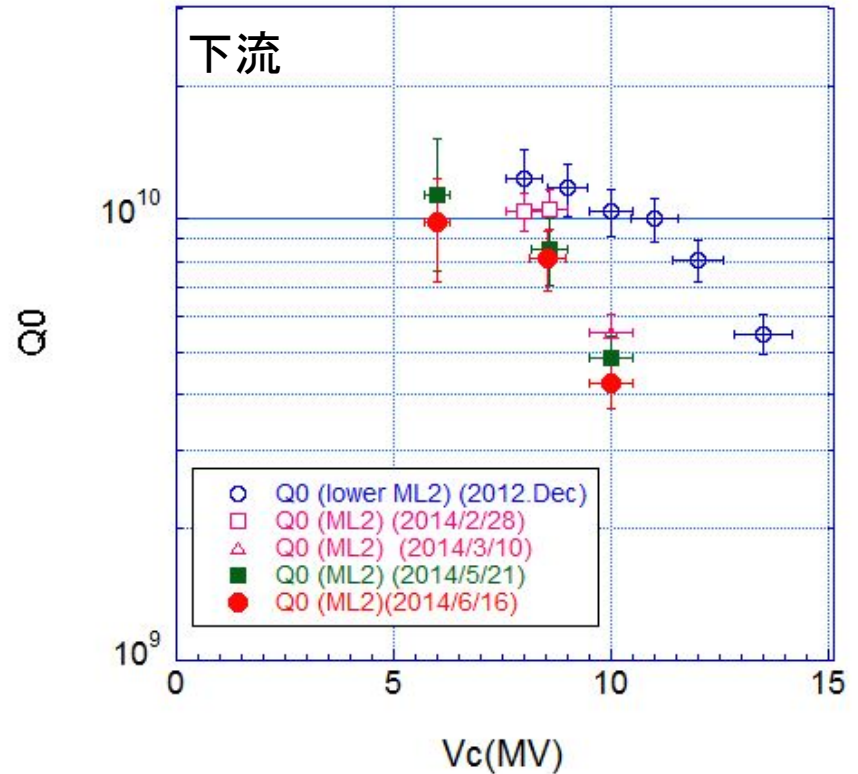
- 運転中
 - ML&LLRF含めて
 - QLを $2 \sim 4 * 10^7$ に上げてfeedback
 - **Middle gain** → 振動などのでHGだと何回かPin, Pref ITLで落ちたため。
 - Qiuさんstudy。(model feedback)
 - ML側
 - Microphonics 続き
 - He lossの早い測定、Q値を測定連続
 - pulse processingのさらにoptimization
 - Pulse aging を朝に定期的に行うか？
 - BPMとの相関
 - HOM study (100uAだと厳しいか？, 10mAのburstの時)
 - High fieldでのField emissionの効果(空洞の劣化 & trip ratioが増えるのか？)
例えば10MV(ML1)+7MV(ML2)でasymmetryで片方をhigh fieldにして長期運転。
 - 運転ソフトの成熟化 (ITLで落ちた時をいかに早く立ち上げるか？)
 - Energy recovery test (30uA~100uA)
- モジュールばらしで何が起きたかを最後みたい。

Q値測定結果(cryomodule history)

Vc vs Q0 history (ML1)
after cryomodule assembly



Vc vs Q0 history (ML2)
after cryomodule assembly



モジュールテスト(2012.12月)(青丸)とビーム運転中(2014年1月～6月まで)の上流(ML1)、下流(ML2)空洞のQ値の履歴

He processの縦測定での結果について

2014/5/29にHe process初めて縦測定で実施

- ・まず2KにてHe導入前の状況を測定
- ・2KにてHeを最大 10^{-2} Paまで導入し、同時にRFを入れていき、radiationの様子を測定 & processを進める。

・一度 300Kまでwarm up

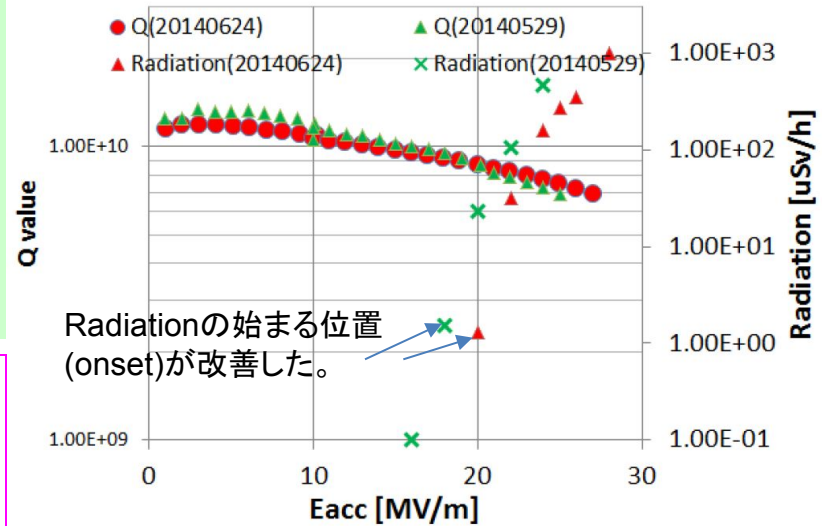
2014/6/24に再度測定。

・2Kまで再度冷却し空洞測定。

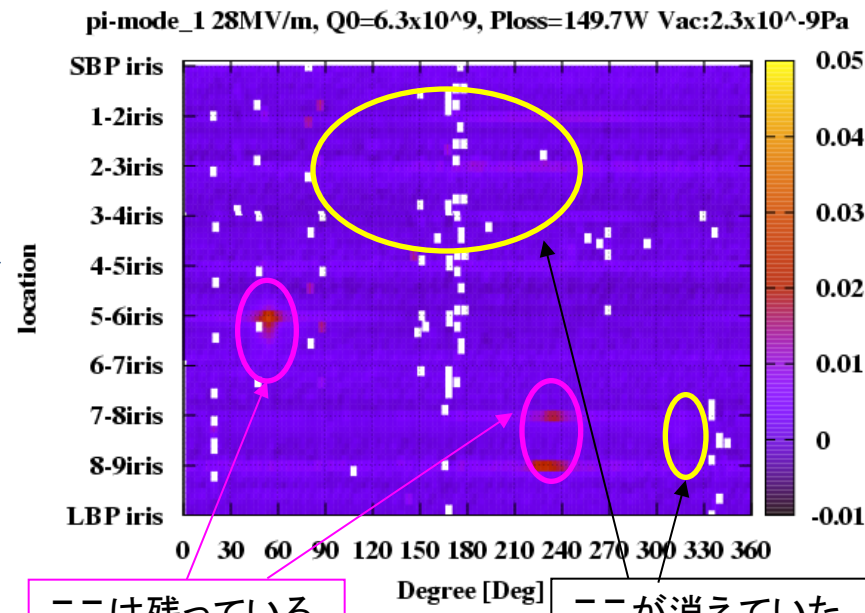
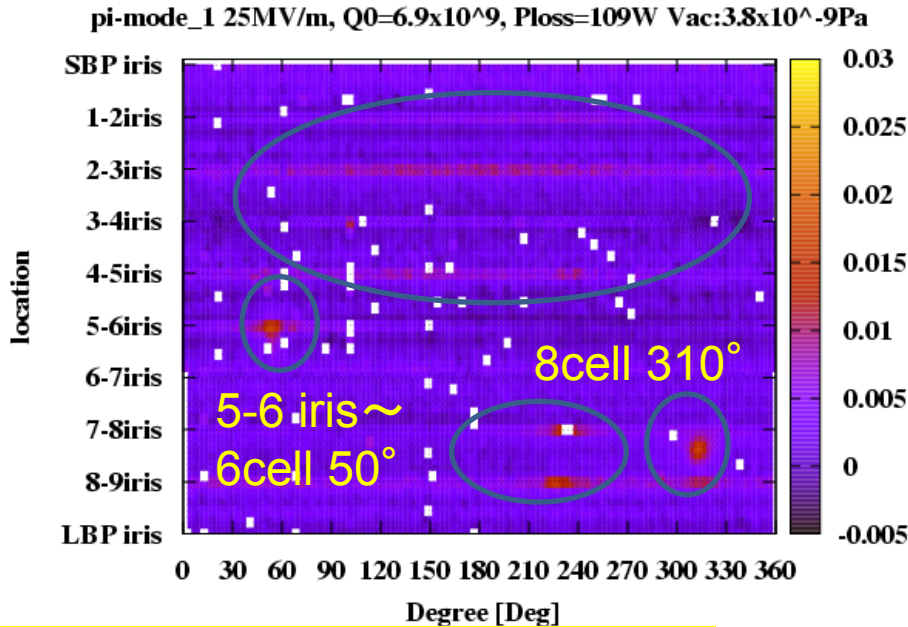
結論: He process実施後はx-mappingのradiationのtraceが一つ消滅していた。これに合わせて、radiationのonsetが上昇していた。高いfieldでもprocess効果あり。

→ He processは我々の空洞でも効果あり。

pi-mode (June 24 - May 29)



He process後: He圧力 10^{-8} Pa

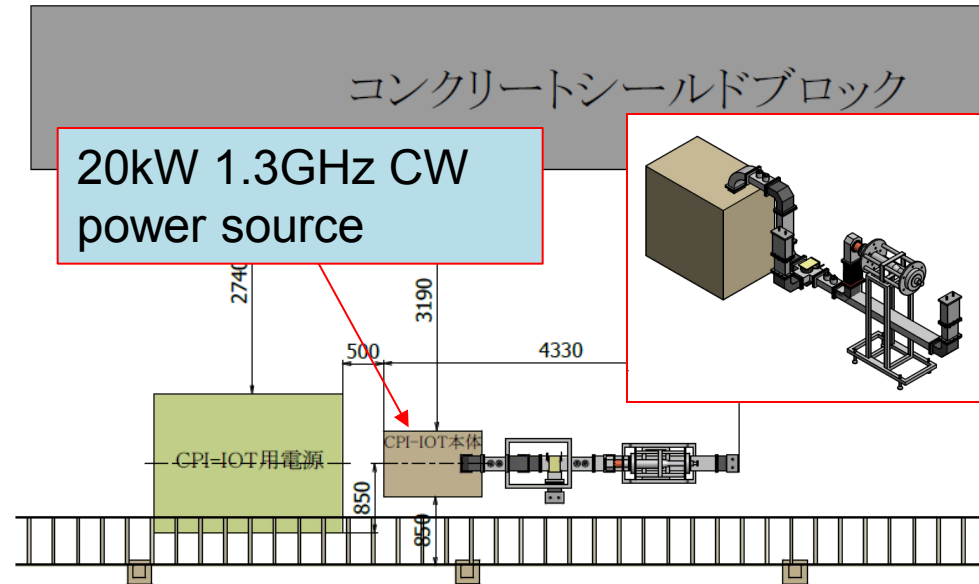


He process前: He圧力 10^{-8} Pa

He process用カプラースタンドの進捗状況

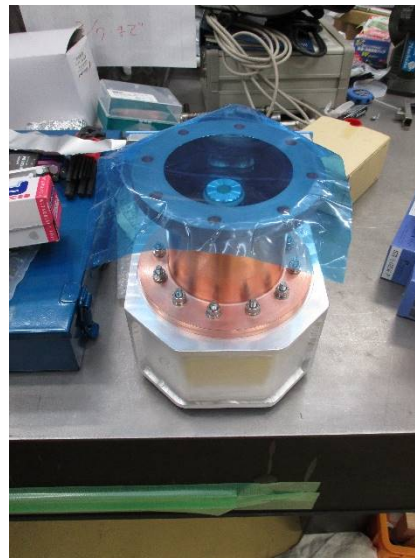
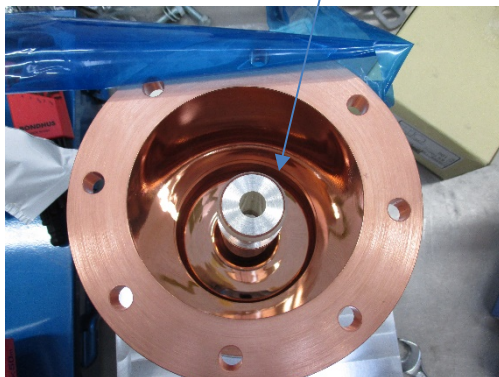
cERLでのテストスタンド 加速器室内

- He processは今のところ空洞劣化を引き起こさないと思われるので、He process用のカプラースタンドの準備を進める。
- 昨年度後半でドアノブのRF設計を見直し、発注。テフロンをなくした放射線耐性のもの設計と製作。**S11<-20dBの反射を確保していることを確認。→ OK。**
- 今年度夏からcERLのRF standエリアを改良し、手持の資産でカプラー用のテストスタンドを設ける準備を行っている。2015年9月末から開始可能。



ドアノブ設計 & 製作

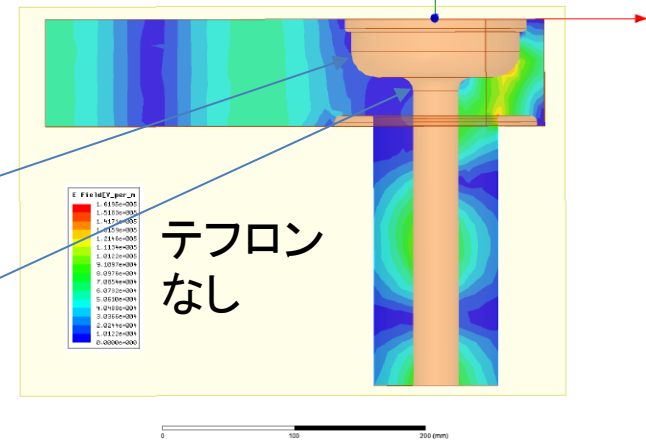
この部分にあったテフロンを無くした。



RF設計

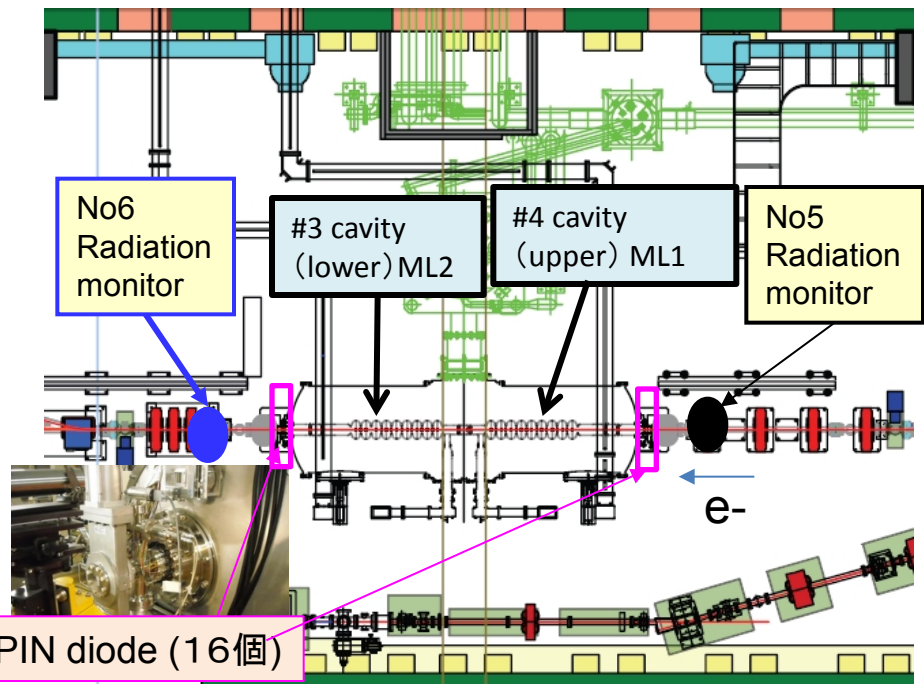
Rdoor1
15mm→20mm

Rdoor2
15mm→10mm



	設計(HFSS)	実測
S11 (dB)	-30.98dB	-27.7dB

cERL主空洞のビーム運転状況と劣化の現状(1月以降の長期運転での空洞性能劣化)



2013年12月16日にcERL周回部commissioning開始
 Beam energy 20MeV, beam current (max) 10uA

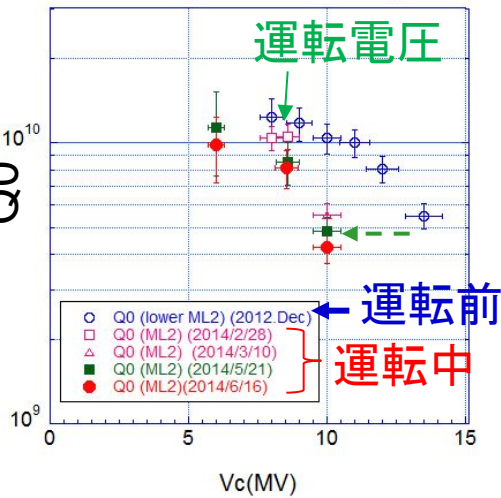
2014年					
1月	2月	3月	4月	5月	6月
	7週間			5週間	

周回部ビーム運転(1/30-3/14)
 放射線試験CWビーム10uA。
 エネルギー回収達成。

周回部ビーム運転
 (5/22-6/20) optics調整
 &大電荷運転(7.7pC)

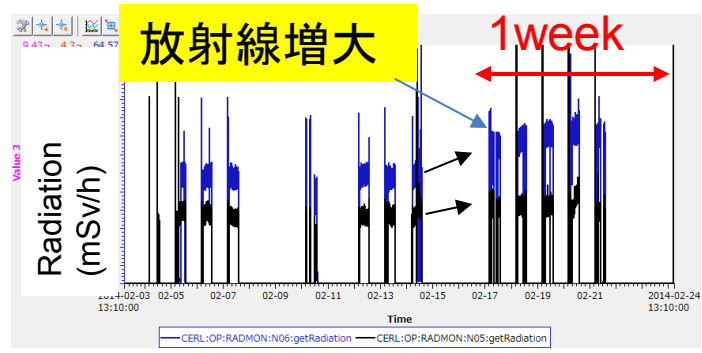
長期運転中のradaiton増大による空洞劣化を見るため2つのモニター(radiation monitor (Si) (ALOKA)、PIN profile monitor)を radiationの出る空洞の軸方向に常時設置。

運転前後のQ値測定

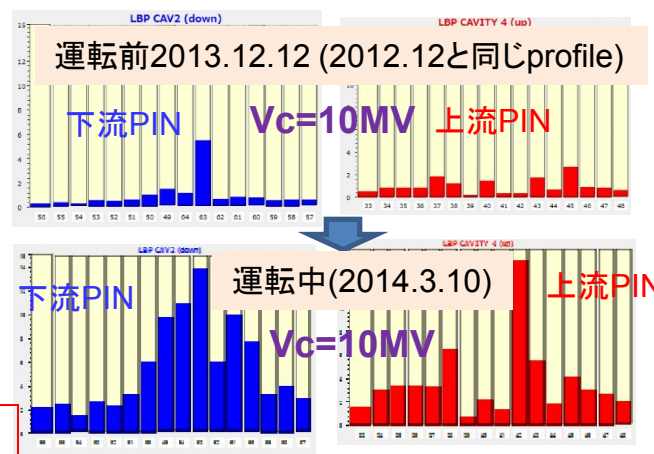


運転に伴う放射線の状況

2月初めの20MeV運転を始めてから3週間の radiationの様子。3週間後に突然下流に radiationが増える現象が見られる。



運転電圧ではQ値の劣化は少ないが、高い電圧ではQ値の劣化が見られた。それに合わせて、PINの放射線も全体的に増大していることも判明した。



運転中に空洞以外の真空悪化に伴う空洞性能劣化も見られた。

長期的な運転での空洞性能劣化は radiationの変化から追従可能。