

入射空洞と主空洞の性能低下と回復

2016/05/31

許斐太郎

発表内容

1. 入射空洞のパルスエージングによる性能回復

1. 2015.6までの入射空洞の性能低下
2. パルスエージング方法
3. パルスエージング結果
4. 2016年2,3月の放射線量変化
5. まとめ

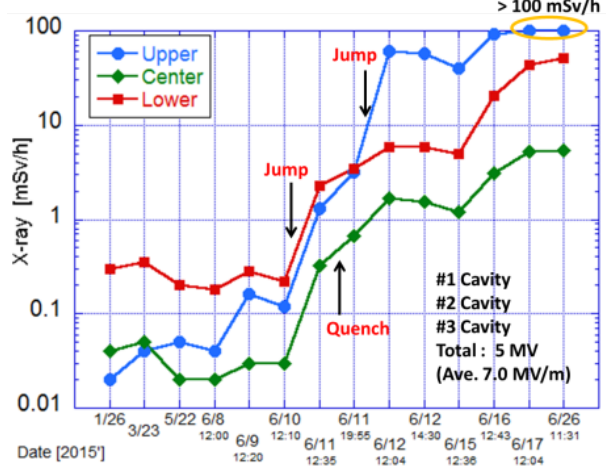
2. 主空洞の報告

1. 主空洞で行った4回のパルスエージング
2. Q値の長期推移
3. 1mA運転のエネルギーリカバリー
4. HOMの発熱について

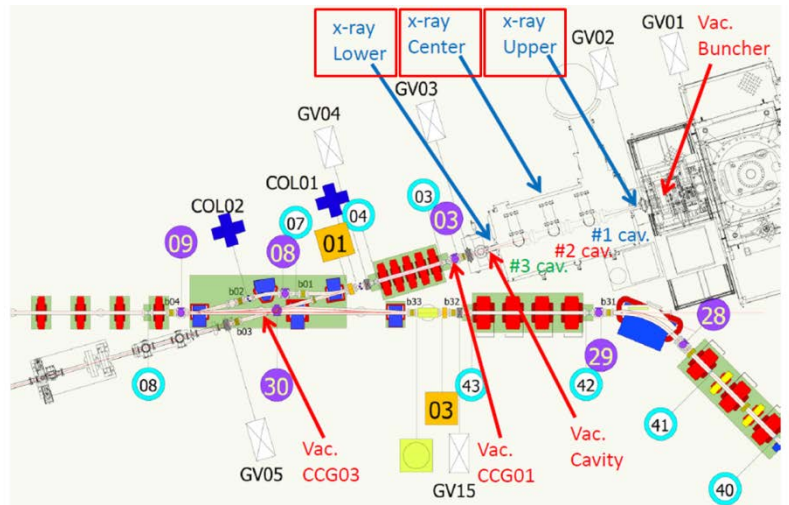
1-1 2015.6までの入射空洞の性能低下

2015年6月の5MV/m運転中に放射線量が突如上昇し、熱負荷のため、5MV/m運転を継続できなくなった。⇒ **パルスエージング**

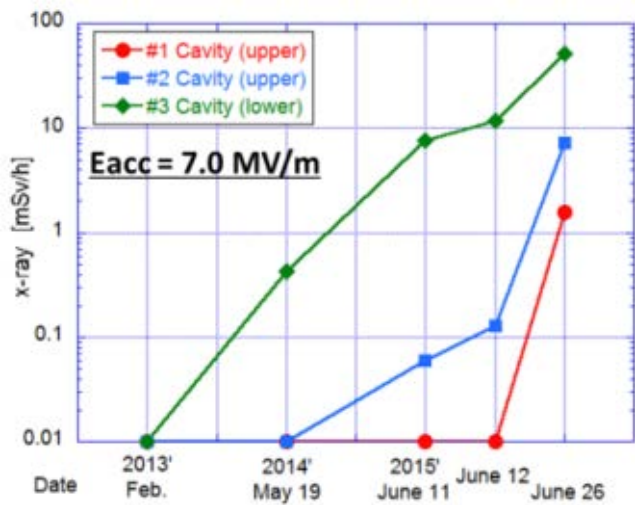
6月の3台同時運転時の放射線量変化



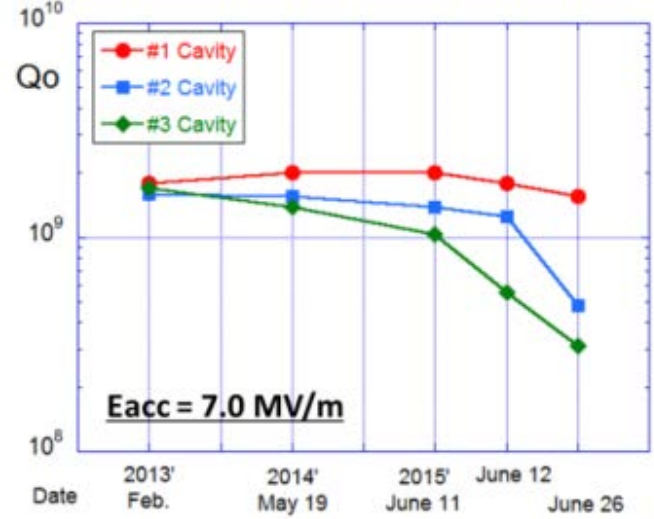
放射線モニターの配置



個別運転時の放射線量変化



個別運転時のQ値変化



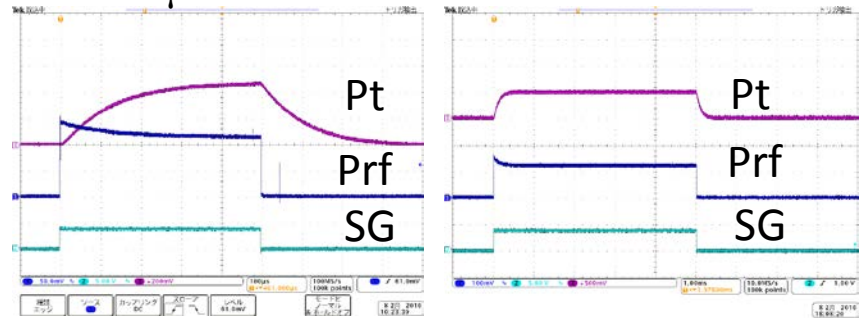
1-2 2016.1の入射空洞パルスエージング方法

低熱負荷、FEの雪崩を制御するため、空洞に電界が十分に立つだけのパルス幅から開始 Dutyを <0.25%、~2.5%、CWの順に3段階で行った。

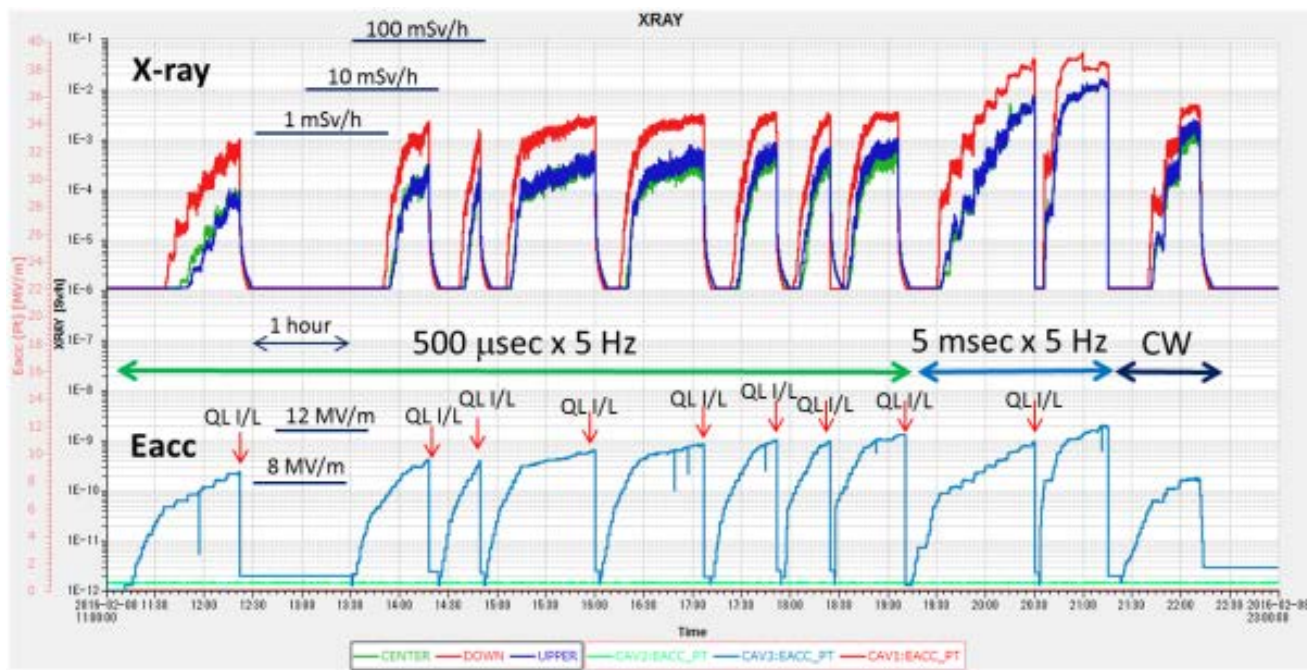
パルスエージングのRF条件

	No.1 Cavity	No.2 Cavity	No.3 Cavity
Q_L	1.2×10^6	5.3×10^5	5.4×10^5
filling time τ	0.15 msec	0.07 msec	0.07 msec
Required RF power at 15 MV/m	12 kW	27 kW	27 kW
Required RF power at 20 MV/m	21 kW	47 kW	47 kW

パルス波形(例: No.3 Cavity) 500 μ s x 5Hz 5ms x 5Hz



No.3 Cavityのパルスエージング(11時間)



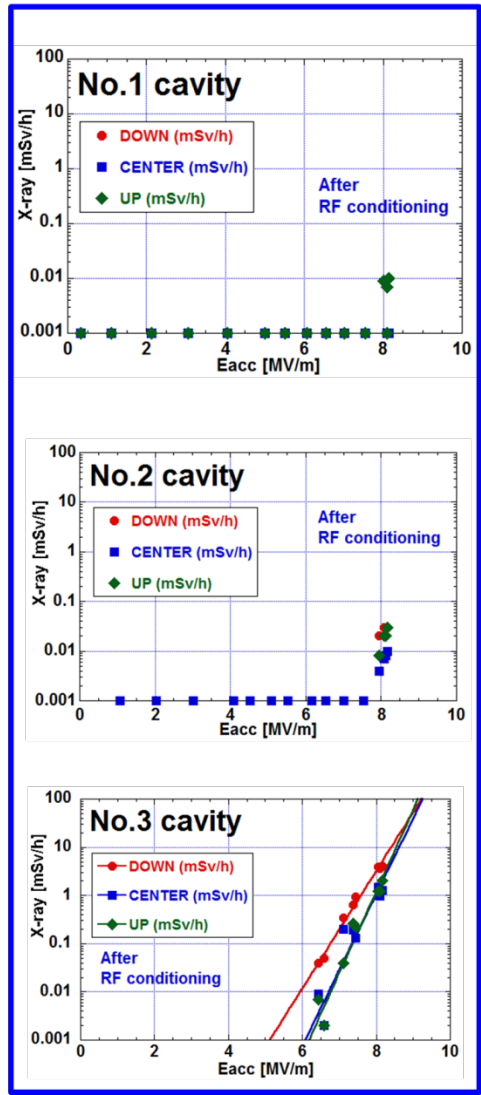
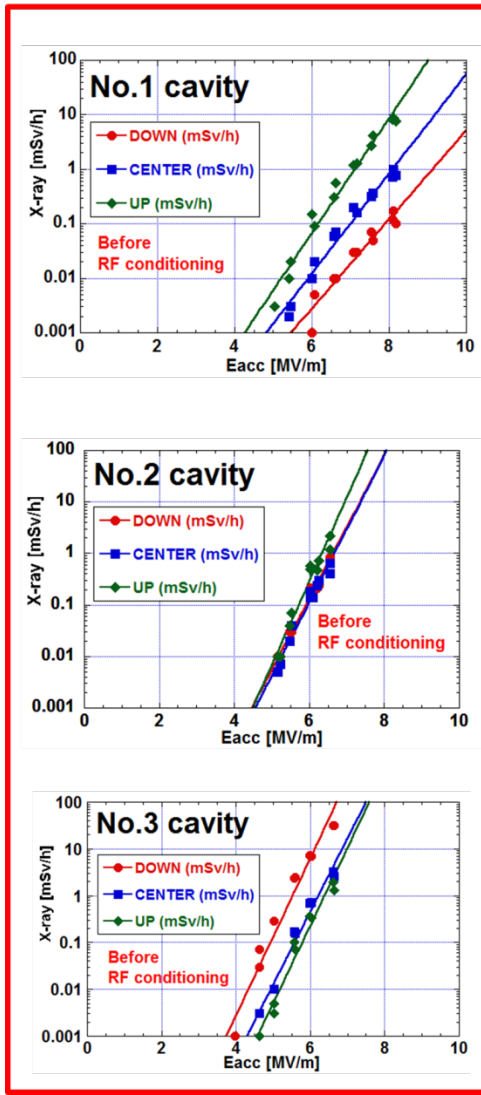
1-2 パルスエージング前後の放射線量

パルスエージング後はほぼ初期状態にまで回復した。

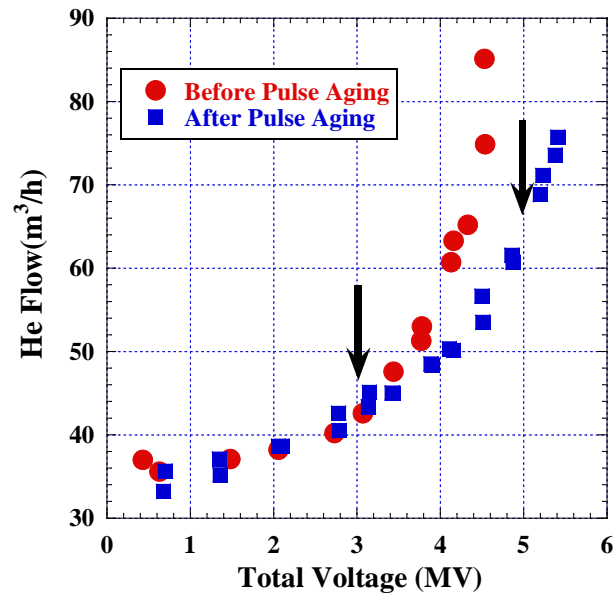
CW・個別運転のX線量変化

Before conditioning

After conditioning

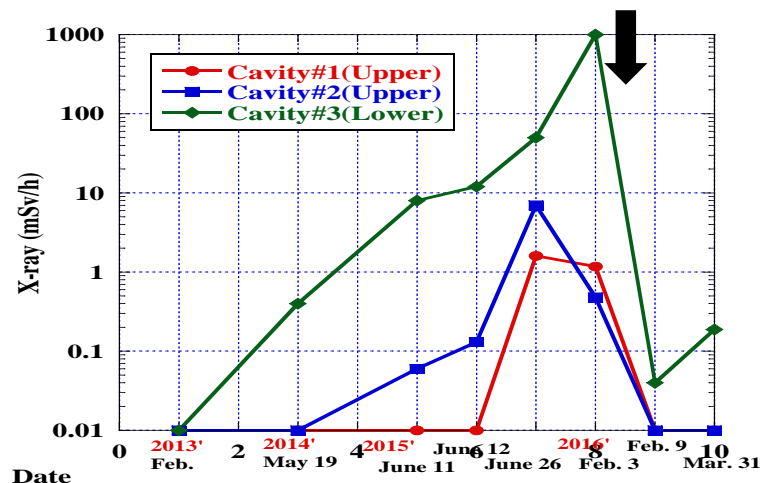


CW・同時運転時のHe Flow変化



CW・個別運転時のX線長期変化

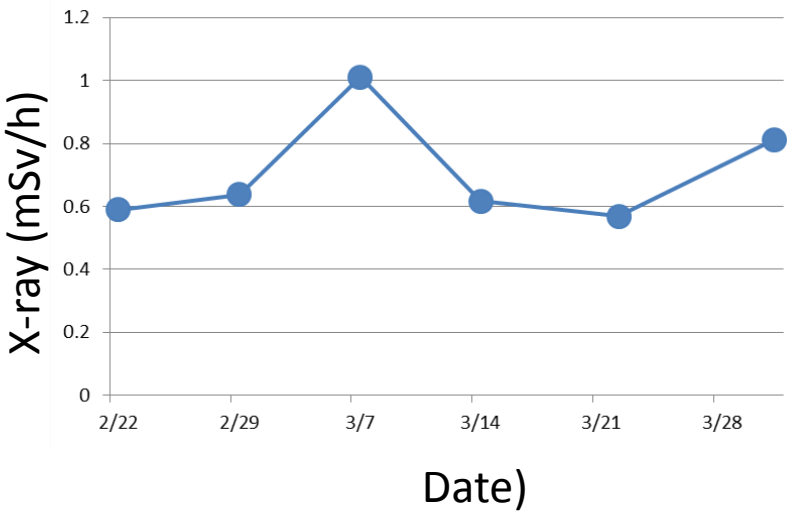
パルスエージング



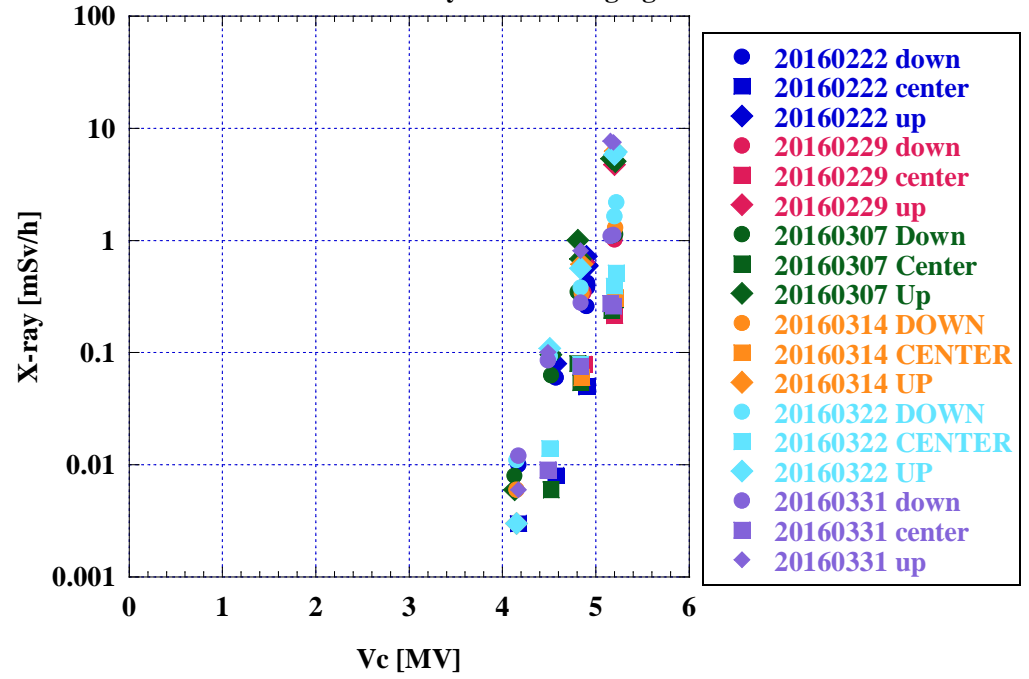
1-4 2016年3月までの変化

- 2016年2,3月は毎週月曜日に個別CW運転を行い、状況の変化を見た。
- 問題は生じず、X線量に変化はなかった。

X-ray(UP) @5 MV



20160222 -0331 all cavity 5MV CW aging



入射空洞のまとめ、

1. 長期運転によるX線量増加問題を解決するために、パルスエージングを行った。
2. パルスエージングはDutyを0.25%⇒2.5%⇒CWの3段階で行った。
3. パルスエージング後はほぼ初期状態に回復した。
4. 2016.1月~3月の運転では性能劣化は観測されなかった。

今後行いたいこと

1. 5MV運転での長期運転試験
2. Cavity #3の長期間のパルスエージング
⇒ フィールドエミッションonsetを伸ばせるか確認する。

主空洞の性能劣化と回復方法

cERL長期安定に向けた今季ビーム運転で主空洞で行ったこと。

1. ML1:10MVのfieldでの長期運転を実施。その際にradiationの変化やRF、真空の変化を常時モニターし、安定状況を見極める。
2. 長期にわたるQ値の劣化に対し、再度pulse agingでの回復を行い、性能が回復するか？また、Q値の測定を運転前後で行う。
3. 1mA電流や短バンチでのによるHOMが運転に問題ないか確認を行う。特に、1mA運転中でのロスの無いエネルギー回収が達成されるか確認する。

QLをさらに高く($>2 \times 10^7$)しての運転やHe processingは1mA施設検査を通すことを最優先にして、実施せず。

今季の運転の主空洞の大きな履歴

- 2/10 Main linac cavity aging
- 2/11 Main linac Q値測定。
- 2/12 ①ML2 pulse aging実施(radiation 半減)(後述)
- 2/15 ビーム運転開始(ML1:10MV, ML2:7.14MV)
- 2/19 ②ML1 pulse aging実施(radiation 1割減)(Discussion)
- 3/3 22:41 ML1空洞大放電(radiation 5.6倍に)(真空悪化) → 10MV keepできず
- 3/4 ③ML1 pulse aging実施(radiation 25%減)(ただし、真空悪化は改善せず。) → ML1 10MV keepをやめ、両空洞8.57MV運転。
(電子銃のSF6 tankもcharge upするのも問題で電圧を下げた。)
- 3/8 施設検査合格 → 900uAでのCW運転を実施。ERL works.
- 3/9 13:56 ML2で空洞放電(radiation 4倍程度、真空悪化) → その後に④ML2 pulse agingを実施で元に戻る。3/8 22:00のダンプ真空悪化も原因の一つか？
- 3/28 Main linac Q値測定。

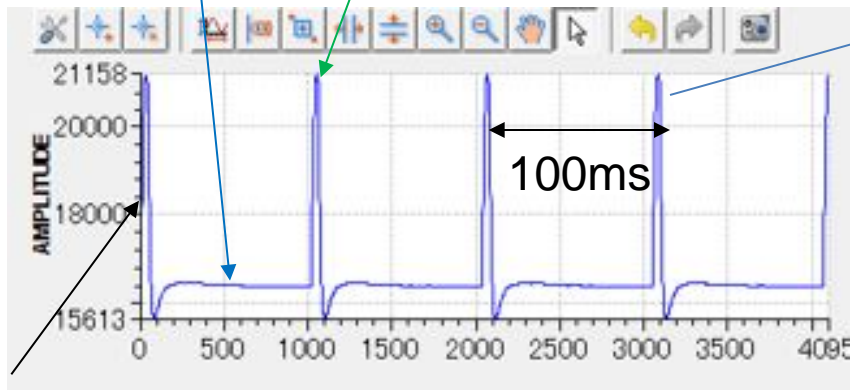
Pulse agingは今季4回も行う。

パルスエージング方法の例 - ML2事前エージングの場合 -

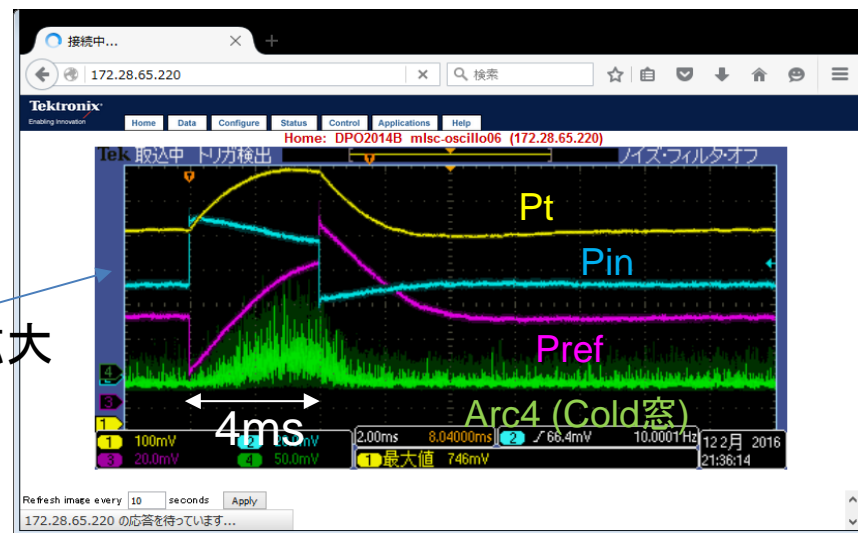
ML2 Pulse Aging

$$V_c = 8.57\text{MV}(\text{CW}) + 2.3\text{MV}(10\text{Hz} \times 4\text{ms}) = 10.9\text{ MV}$$

で40min pulse agingを行った。



拡大

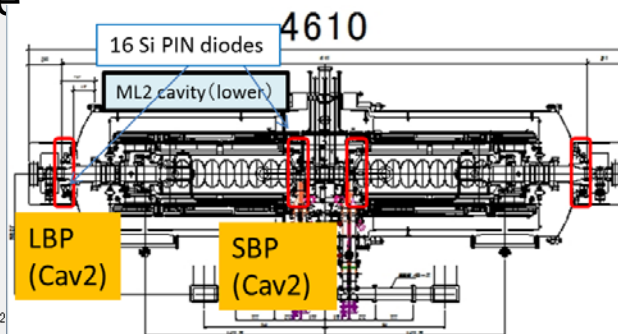
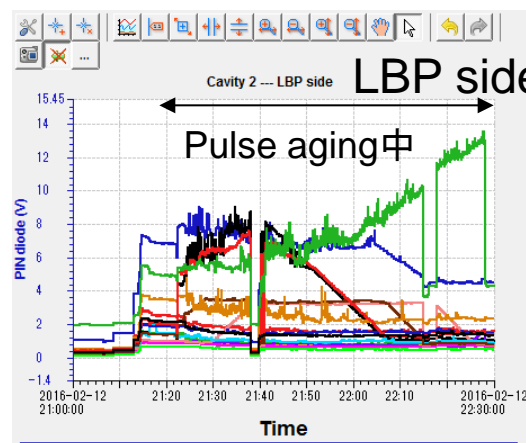
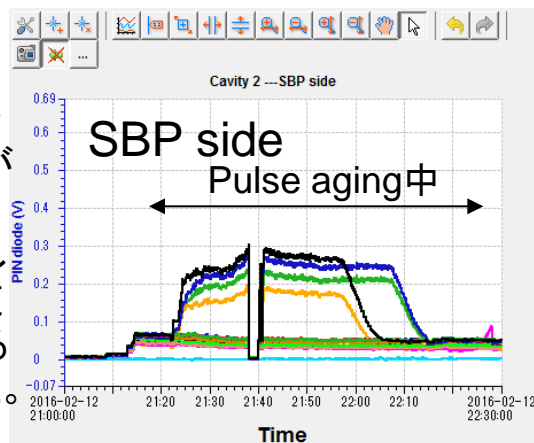


パルス波形で放電(Arc4)をコントロール

Vcのデジタル波形

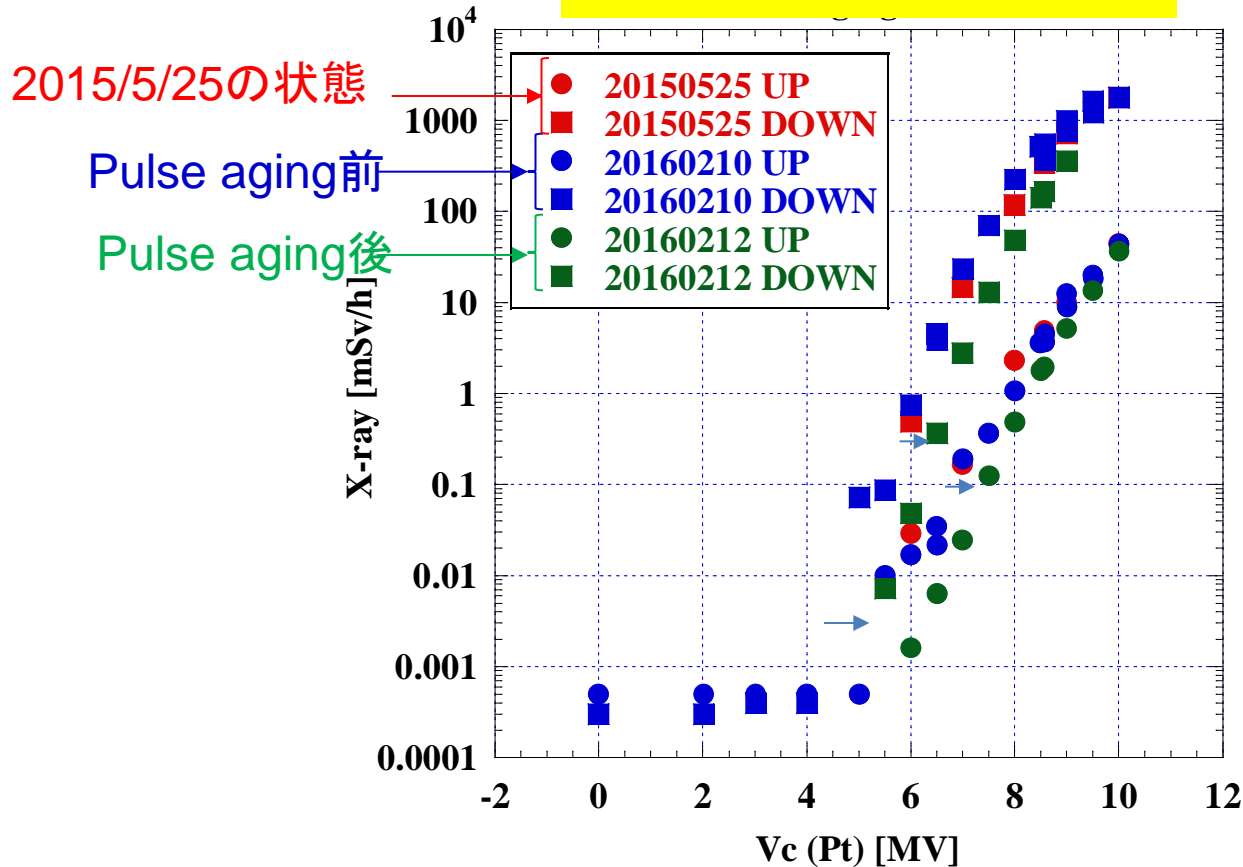
Pulse agingの履歴: agingは空洞前後の32個のPINの推移を見ながら行った。

20min程度でPIINの信号が減っていくが一部が上昇していたので複数が増える前に終わった。



① ML2 Pulse aging results(2016/2/12)

ML2 Vc vc ALOKA monitor



Aging前は前回と radiation状態は同じ。

Onsetがpulse aging前後で 0.5MV程度上昇している。
→ Pulse agingが効いた。

また、10MVでHe流量が 前回は80m³/h程度であったが、pulse aging後は70m³/h程度となった。

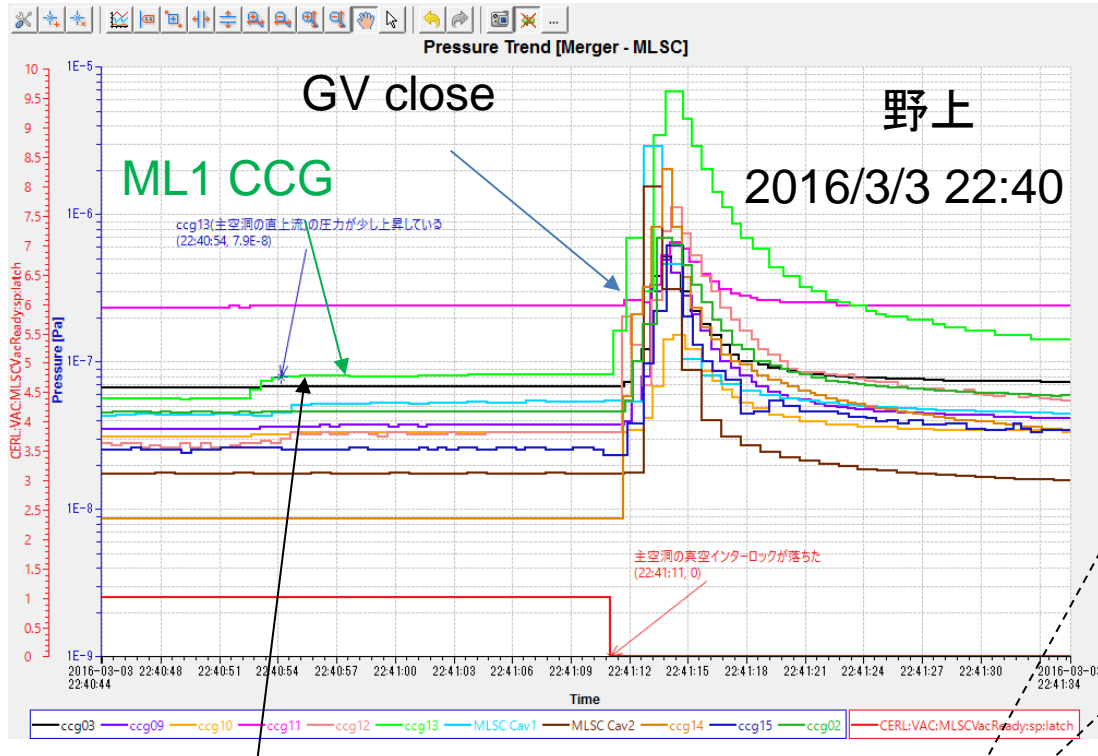
パルスエージングの効果あり。Radiationは約半減。(ML1: 0MV , ML2: 8.57MV)

ALOKA No.5 2.49mSv/h (2/12 21:07) → 1.99mSv/h (2/12 22:27)

ALOKA No.6 264.4mSv/h (2/12 21:07) → 158.0mSv/h (2/12 22:27)

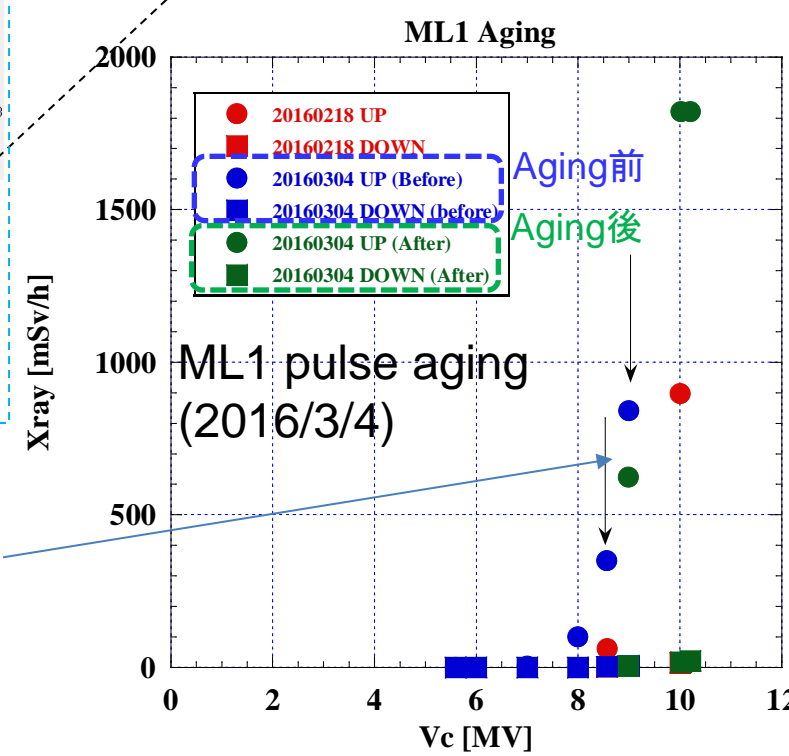
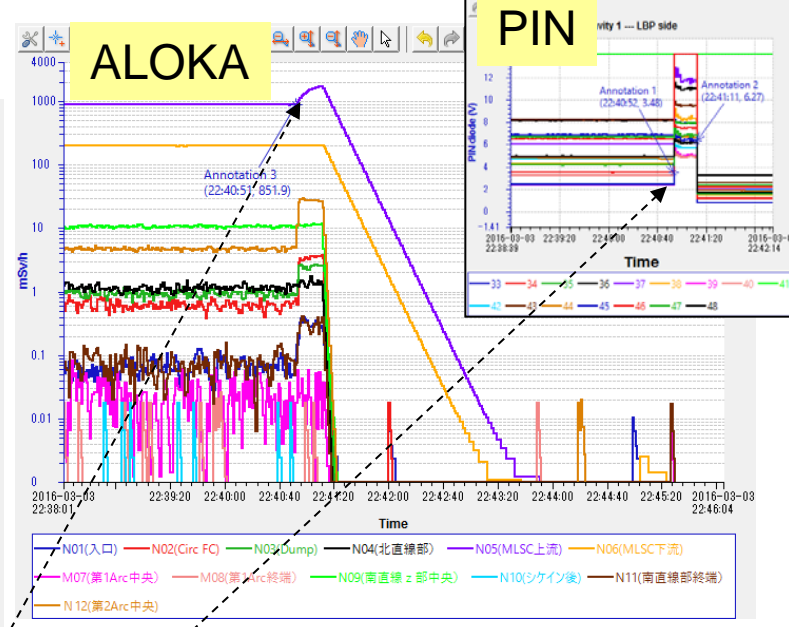
2016/3/3 22:40付近真空悪化時の状況と

③ML1 pulse aging(3/4)の結果



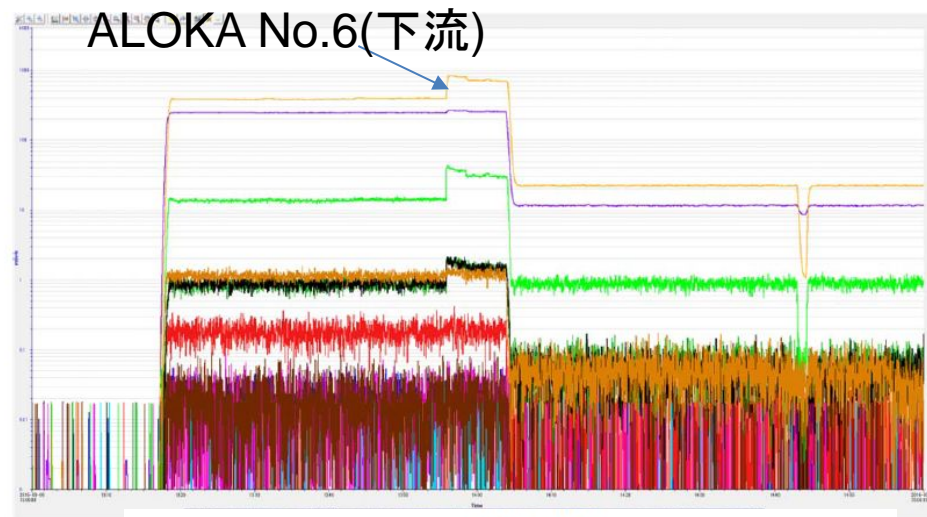
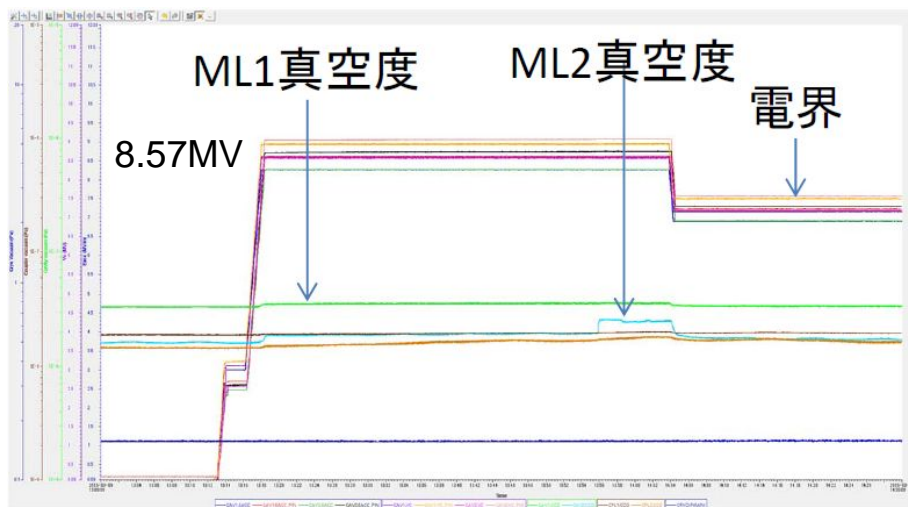
ITLで落ちる17秒前からML1 CCGの真空増加。その同時刻で急にPINの増大とALOKA No5の増大が見られる。→放電が大きくなり、真空悪化を及ぼし、結果として放電増大されITLがかかった。この後、fieldを10MVにkeepできず。

•次の日、3/4 12:00-16:00にML1のpulse agingを行う。Base CW 9MV、Pulse の設定は5Hz x 20ms, Peak = 10.5 MV で計1時間Keep。結果として、右図に見られるように25%のradaitonの減少とともに10MV keep可能に。但し、10MV時に真空の値が微増したため、3/8の施設検査を前に安全を見て、8.57MV運転に下げた。



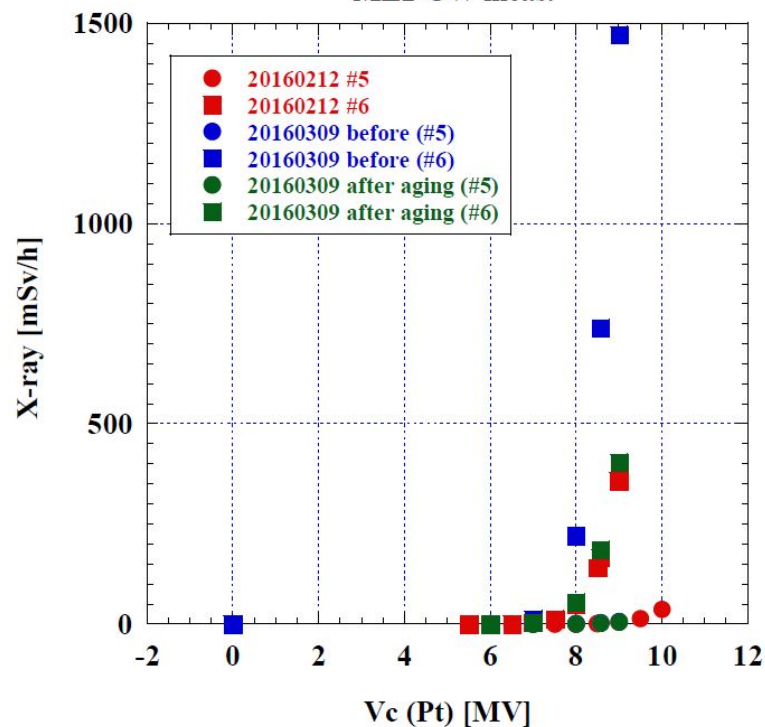
真空悪化の原因は不明。但し、pulse agingにて運転可能に

④ 2016/3/9 14:00付近真空悪化時の状況とML2 pulse agingの結果



- 13:56 ML2の真空度が急に悪化。Radiationは3~4倍に増加。
- その後にML2のpulse agingを行う。8.5MV Baseに4ms*10Hz (peak 0.9MV)でpulse agingを行う。quenchの後にradiationが減少。その後30分keepしたところ、右図に見られるようにもとに戻る。

ML2 CW meas.



3/8 22:00にダンプ真空悪化があり、但し、最終的な真空悪化の原因は不明。pulse agingにて運転可能に

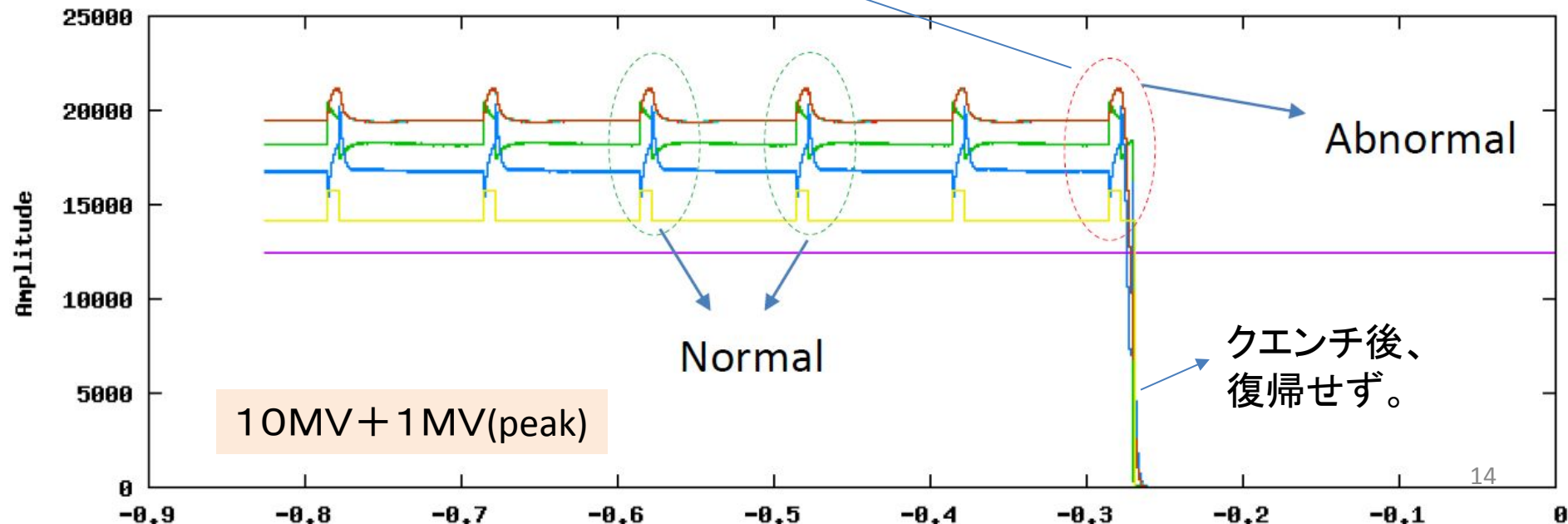
②2016/2/18 ML1 pulse aging (Discussion item)



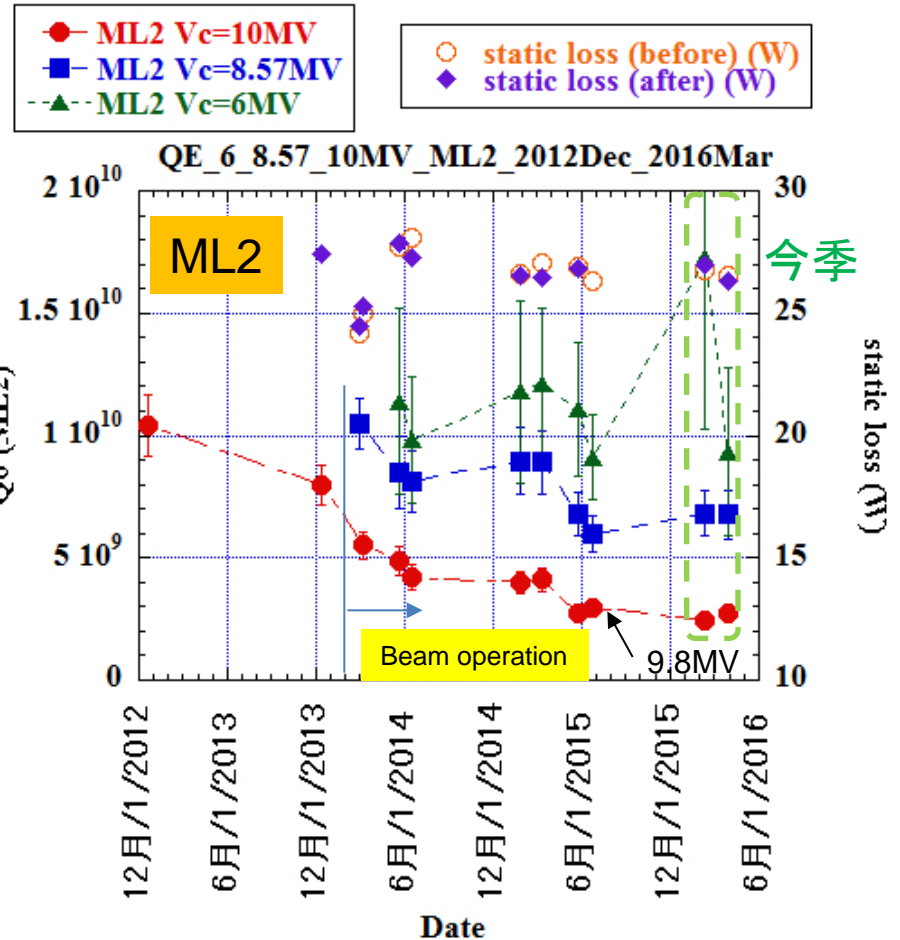
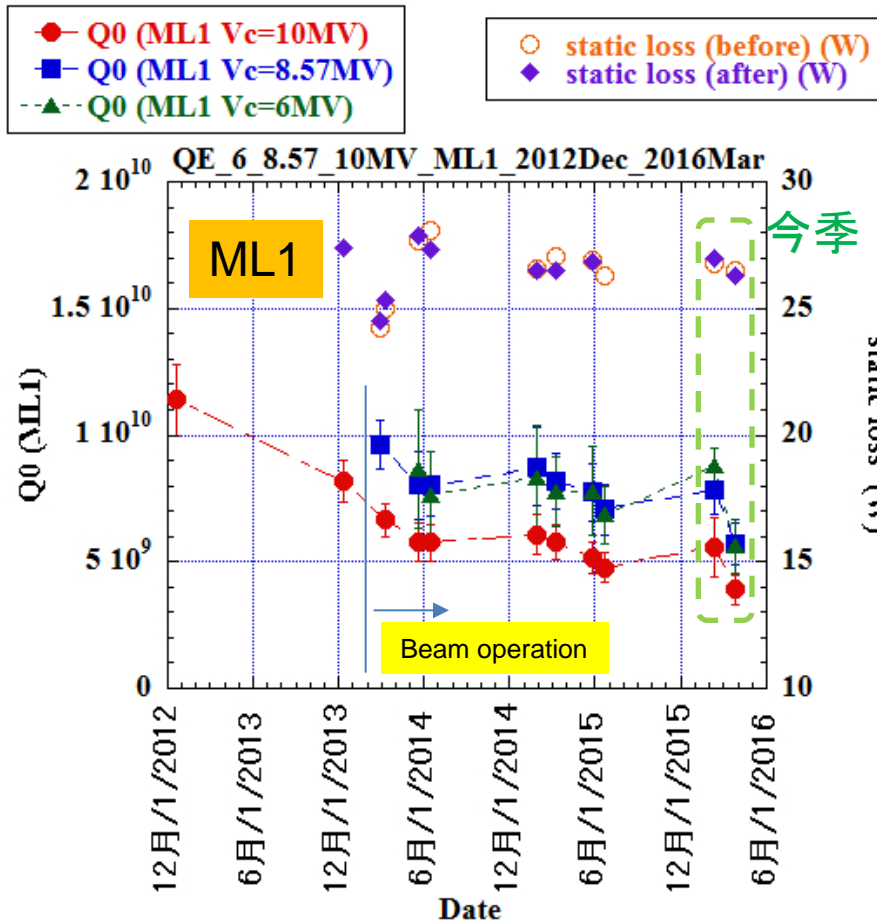
ML1がpulse agingによりさらにfieldが10MV以上行くか試した。Peak 11MVまでいくとPulse後Ptが落ちる。Decayを見るとquench。色々試したが、現在ではML1は11MV以上行かず、クエンチ。時間がなかったので、ここまでで終了。何故、11MV以上いかないかは不明。位相もモニターしているが、おかしな様子なし。

Pulse aging 30分程度で1割程度のradiationの減少。最初のagingで11MVを少し経験していたので、それほど効果がなかったのかもしれない。

FB4_HW_20160223123728_014212_AP.png



cERL運転後3年強のQ値測定history (10,8,57,6MV) & static loss



(2016/2/11)
(今季最初)

ML1 Vc=8.57 MV ML2 Vc=0 MV
ALOKA N0.5 60.0 mSv/h ALOKA No.6 2.95 mSv/h

(2016/3/28)
(今季最後)

ML1 Vc=8.57 MV ML2 Vc=0 MV
ALOKA N0.5 299.6 mSv/h ALOKA No.6 3.16 mSv/h

ML1 Vc=0.0 MV ML2 Vc=8.59 MV
ALOKA N0.5 2.76mSv/h , ALOKA No.6 288mSv/h

ML1 Vc=0.0 MV ML2 Vc=8.59 MV
ALOKA N0.5 2.53mSv/h , ALOKA No.6 232.4mSv/h

ML1は2016/3/4の真空イベント以降悪くなった。Radiationも5倍。ML2はほとんど現状維持だが、10MVに関しては2月のpulse agingで少し回復している。Radiationも減少。総じて、Pulse agingの効果はある。但し、放電イベントでQ値の劣化が見られる。Static lossは安定している。(26.9W)。

900uA Energy recovery 運転結果 (2016/3/8 施設検査)

加速電界 : $8.57\text{MV} + 8.57\text{MV} = 17.14\text{MV}$

回収がない場合に必要なエネルギー
 $= V_c \cdot I = 17.14\text{MV} \cdot 900\text{uA} = 15,426\text{W}$

エネルギーロス

$$\Delta P_{\text{total_loss}} = \Delta P_{\text{total}}(0\text{uA}) - \Delta P_{\text{total}}(900\text{uA})$$

$$\Delta P_{\text{total}}(900\text{uA}) = (-6.03 \pm 4.18 \text{ (W/mA)}) \cdot 0.9\text{mA}$$

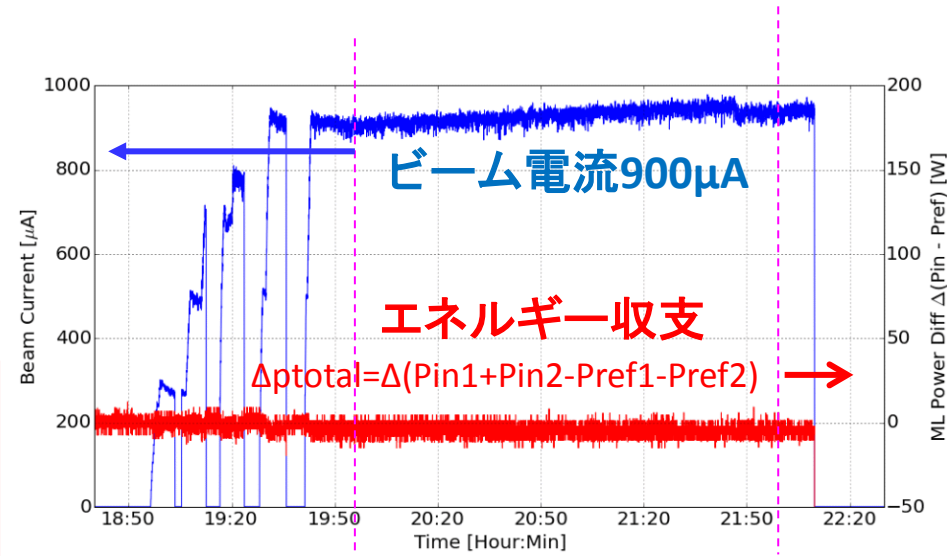
$$= -5.43 \pm 3.76 \text{ W}$$

$$\Delta P_{\text{total}}(0\text{uA}) = -0.81 \pm 3.69 \text{ W}$$

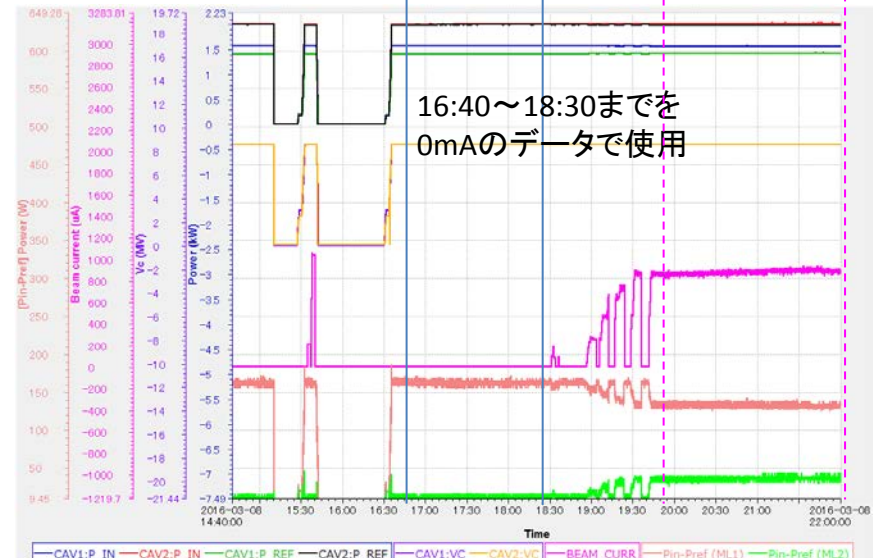
(今回はerro-barはRMSを使用)

$$\Delta P_{\text{total_loss}} = \mathbf{4.62 \pm 5.27\text{W}}$$

Totalのエネルギー回収率 ~
 $1 - (4.68 \pm 5.27\text{W} / 15,426\text{W})$
 $= \mathbf{99.97\% \pm 0.03\%}$



0uAのデータ



主空洞のまとめ

- 2015年5月に続き、ML1:10MV運転の長期試験を行った。
⇒空洞の真空悪化＋放電が発生し、維持できなかった。
- パルスエージングを4回(ML1:2回、ML2:2回)行い、Q値・放射線量の改善が見られた。
 - ただし、ML1は11MV以上でクエンチが起こり到達していない
- エネルギー回収率はCW・0.9mA運転で99.97±0.03%を達成。

今後の課題

- 今後fieldを上げるには他のprocessing(ex. He processing)などを試す必要がある。

おしまい

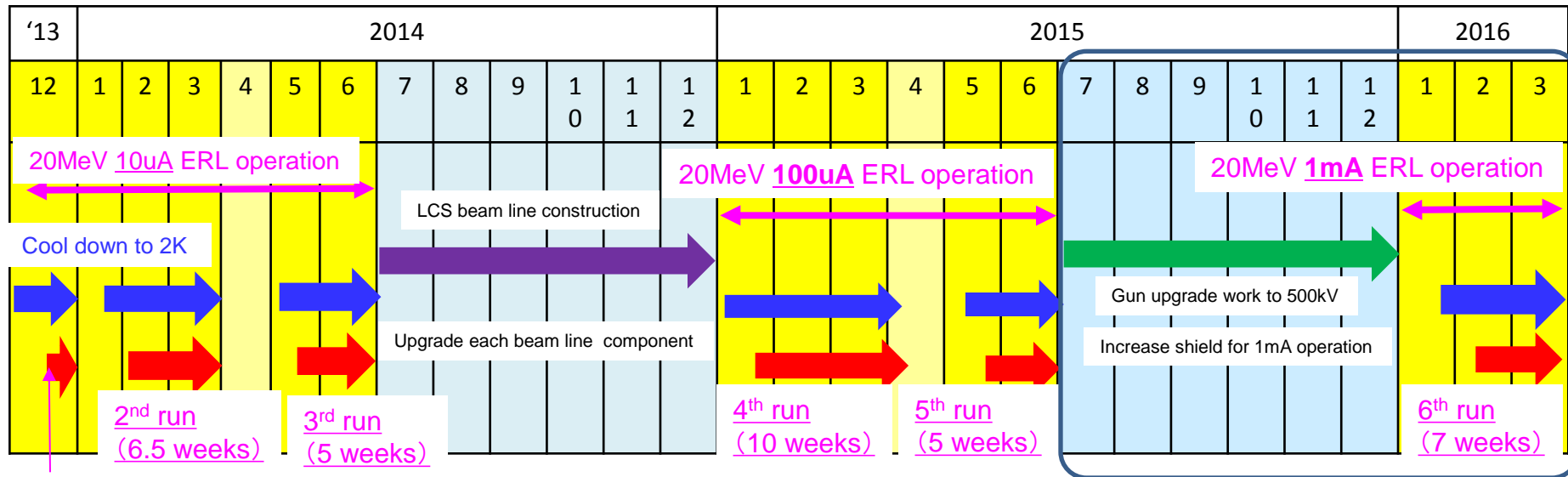
主空洞・予備スライド

cERL Main linac 報告

(2016年1月～3月までのビーム運転)

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、許斐太郎、沼田、浅川

- (1) 前回までの復習
- (2) 1月～3月のビーム運転のMLの状況と知見
- (3) 2015年度でのERL開発のR&D状況(書けてません。)



周回部 Beam operation start
 ERL 1st run (12/16-12/20)

報告する区間

(1)前回の復習と今季の運転の目標

方針:2015年度cERL関係予算結果:超伝導空洞(入射器空洞、主空洞)で合計年間200万円

保守費用で終わる。R&Dの金もないので、将来に向けた開発はSTFでの縦測定、横スタンドでの冷却試験やHOM damper開発、カプラースタンドでのHe process試験準備などを前年度からの予算とT社との共同開発経費(微々たる予算)で引き続きを粛々行った。

→cERLでやるべきは現状維持とcERLでのビーム運転での運転時のデータ取得。下記に詳細を示す。

● 空洞性能やFieldの安定性に関して(2015年6月までの2年間の運転まで)

- QL 1.3×10^7 で microphonics の影響もなく、振幅 $< 0.01\%$ 、位相 $< 0.01 \text{ deg}$ を運転中は確保。
- また 2015年1月～6月にかけての15週間でITLの数は19回。2014年5月～6月での5週間での20回に比べればITLは $\frac{1}{3}$ 。GainをHGからmiddle gainにしたために空洞のfieldが外乱やビーム変動に対して安定化。特に2015年5月から高速オシロで落ちた原因を常時モニター化が可能になった。

(課題①): QLをさらに高く($> 2 \times 10^7$)して運転可能かが課題。また振動の原因などを探る。

(課題②): 引き続き、ITLで落ちた時の原因の詳細を調べ、系統化し、次のモジュール設計に反映。

- 2015年5月以降 ML1: 10.0MV, ML2: 7.16 MVでのasymmetry運転で片方の空洞は10MVの長期運転が可能となった。

(課題③): この10MVのfieldでのさらに長期運転可能かが課題。

- 2015年1月～3月は劣化が見られなかったが、2015年5月～6月ではQ値測定結果ではビーム運転中に劣化が進んだ。2015年はpulse agingを実行していない。

(課題④): pulse agingでの回復を行い、性能が回復するか?それとは別に、新たなprocess方法で根本的なHe processingなどが効くかが課題。(カプラースタンドで試験)

- 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。

● HOMの大電流、大電荷試験はこれから。2015年まででCW 100uAまで行った。

- 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。

(課題⑤): 1mA電流や短バンチでによるHOMIに問題ないか確認を行う。(恐らく問題なし。)

それとは別にHOM damperの新たな開発を継続して行う。

(2)今季2016年1月～3月までの cERLビーム運転で状況と知見

cERL長期安定に向けた今季ビーム運転で主空洞で行ったこと。

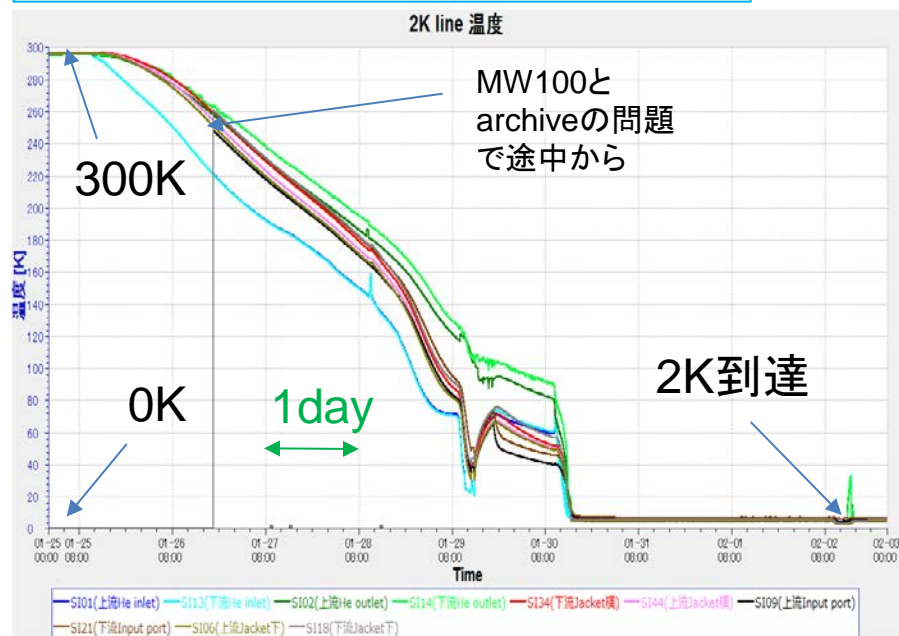
1. ML1:10MVのfieldでの長期運転を実施。その際にradiationの変化やRF、真空の変化を常時モニターし、安定状況を見極める。
2. ITLで落ちた時の原因の詳細を調べるために、ビーム信号を高速オシロに入れ、ビームとの関連を調べ、系統化を図る。
3. 長期にわたるQ値の劣化に対し、再度pulse agingでの回復を行い、性能が回復するか？また、Q値の測定を運転前後で行う。
4. 1mA電流や短バンチでのによるHOMが運転に問題ないか確認を行う。特に、1mA運転中でのロスの無いエネルギー回収が達成されるか確認する。

QLをさらに高く(>2*10⁷)しての運転やHe processingは1mA施設検査を通すことを最優先にして、実施せず。

前回2015年7月からの経過と立ち上げまで

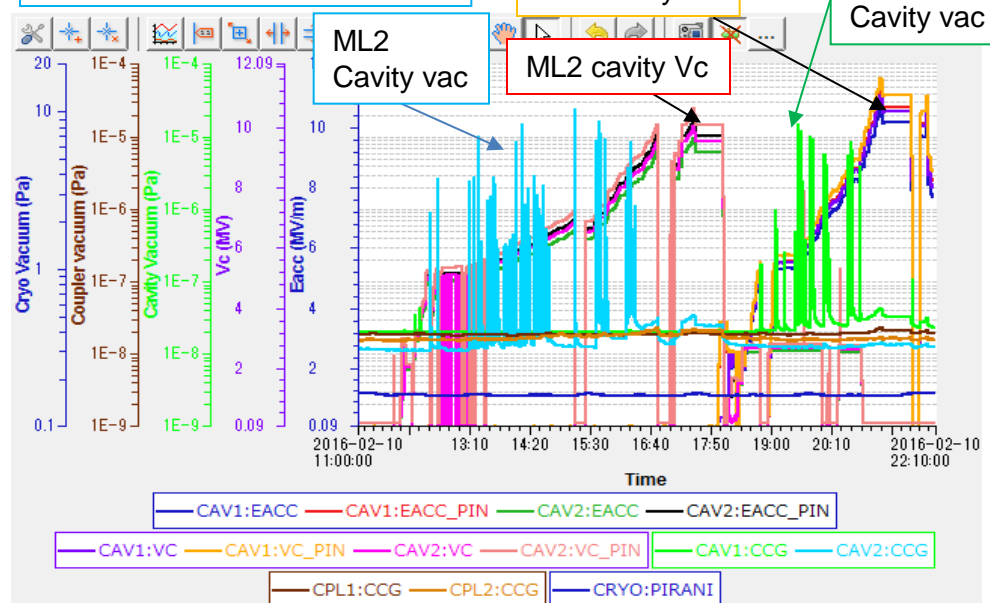
- 前回の空洞冷却の際にLakeshareのモニターの通信がおかしかったので、RS232Cのプログラムを変更(お盆前に路川さんに依頼)。以降問題なし。
- 10月に断熱槽の真空槽の大きなロータリーポンプを交換。これで再度断熱槽の一からの排気が可能に。
- 運転までに地絡(冷却直前:原田氏?)でラックが落ちることもあったが、順調に立ち上がった。MW100 loggerとepics側のアーカイブを新たにしたためにデータが残らない問題が冷却最初にあったが、冷却後運転直前にソフトを改良し対処。
- 1月~3月までの運転の最初の立ち上げやエージングや運転はすべて沼田、浅川氏で行えるように。そして篠江氏亡き後、許斐氏中心に立ち上げを遂行。エージング問題なし。
- LLRFでチューナーfeedbackを今までは0.01Hz程度で行っていたが、今回から1~10Hzの早いfeedbackで行っている。→ LLRF側から報告予定。

空洞冷却の様子(2Kまで) (2016.1.25 - 2016.2.3)



2/2(火)に2K到達。80Kは1.5K/h程度を保ってゆっくり冷却(3K/h以下はHOM damperクラックの問題から要請。)

冷却後のエージング(2016.2.10)

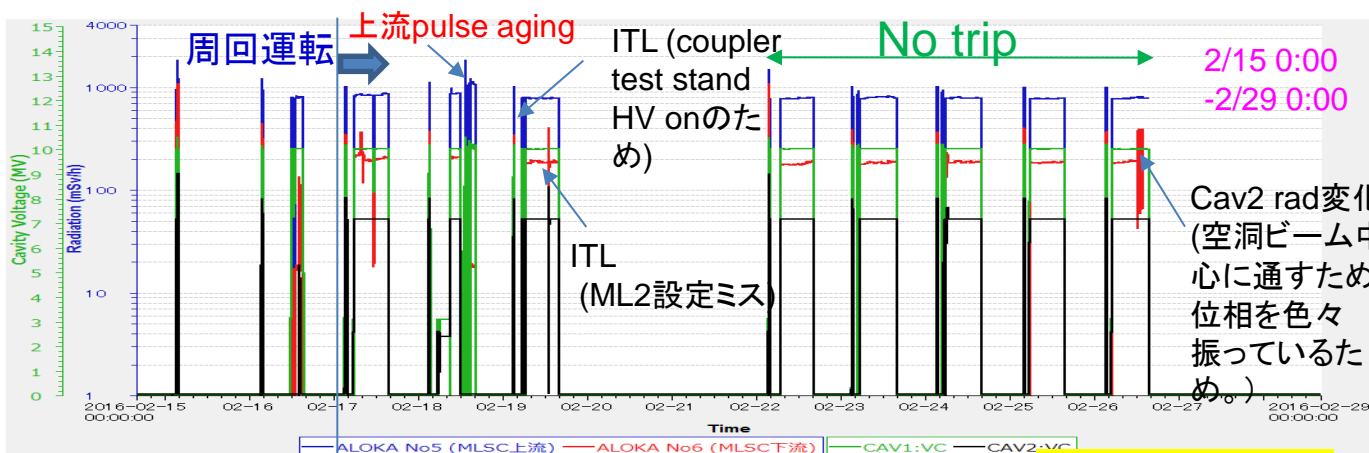


ML1 max 11.0MVまでcavity aging。10.5MVで30分keep。
ML2 max 10.0MVまでcavity aging。9.5MVで30分keep。
5-9MVまで毎回立ち上げで頻りに真空の跳ねがあり。

今季の運転の主空洞の大きな履歴

- 2/10 Main linac cavity aging
- 2/11 Main linac Q値測定。
- 2/12 ①ML2 pulse aging実施(radiation 半減)(後述)
- 2/15 ビーム運転開始(ML1:10MV, ML2:7.14MV)
- 2/19 ②ML1 pulse aging実施(radiation 1割減)(Discussion)
- 3/3 22:41 ML1空洞大放電(radiation 5.6倍に)(真空悪化) → 10MV keepできず
- 3/4 ③ML1 pulse aging実施(radiation 25%減)(ただし、真空悪化は改善せず。) → ML1 10MV keepをやめ、両空洞8.57MV運転。(電子銃のSF6 tankもcharge upするのも問題で電圧を下げた。)
- 3/8 施設検査合格 → 900uAでのCW運転を実施。ERL works.
- 3/9 13:56 ML2で空洞放電(radiation 4倍程度に)(真空悪化) → その後に④ML2 pulse agingを実施で元に戻る。3/8 22:00のダンプ真空悪化も原因の一つか？
- 3/28 Main linac Q値測定。

Pulse agingは今季4回も行う。後に詳細記述。



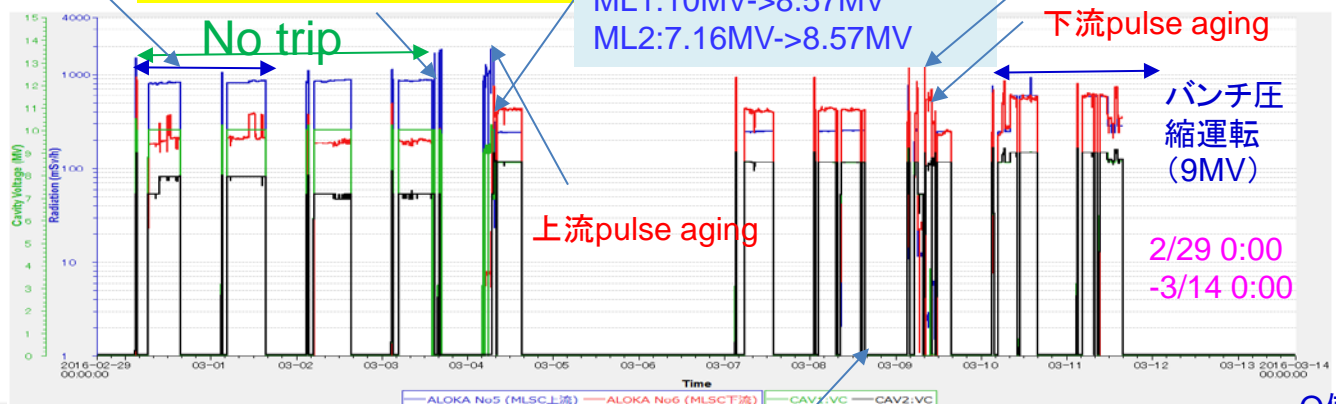
(2016/2/15-3/31
6th run))約7週間の
空洞の変化
(+radiation)

3/3 22:00までML1 10MV, ML2 7.16MV運転 Radiation: 上流 800mSv/h, 下流 200mSv/h 後、真空悪化で8.57MV*2運転へ 3/9 13:56 も真空悪化でradiation 上昇。Pulse aging後真空 radiationもとに戻る。 それ以降は多少ふらつきはあるが、上流下流とも200mSv/hで安定。上流は2015年より増えたが、下流は2015年と同じ程度

バンチ圧縮運転 ML2 8MV
3/3 22:40 ITL (上流空洞真空 増加、radiationも上昇)

Change: 3月4日の午後から
ML1:10MV->8.57MV
ML2:7.16MV->8.57MV

3/9 13:56
ML2空洞真空悪化



ITL ML2 coupler arc
CCG13(空洞手前) vac interlock
Ptだけ上昇

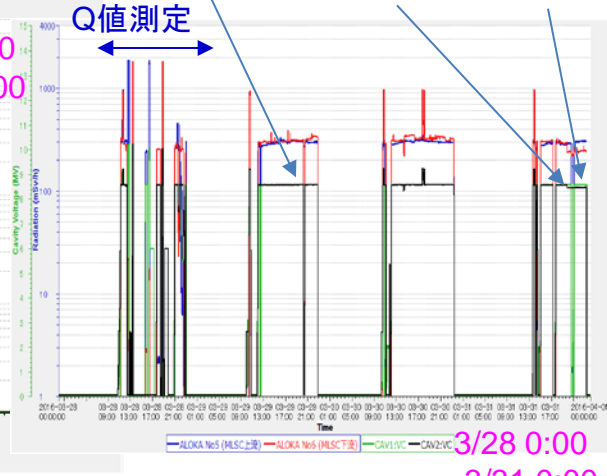
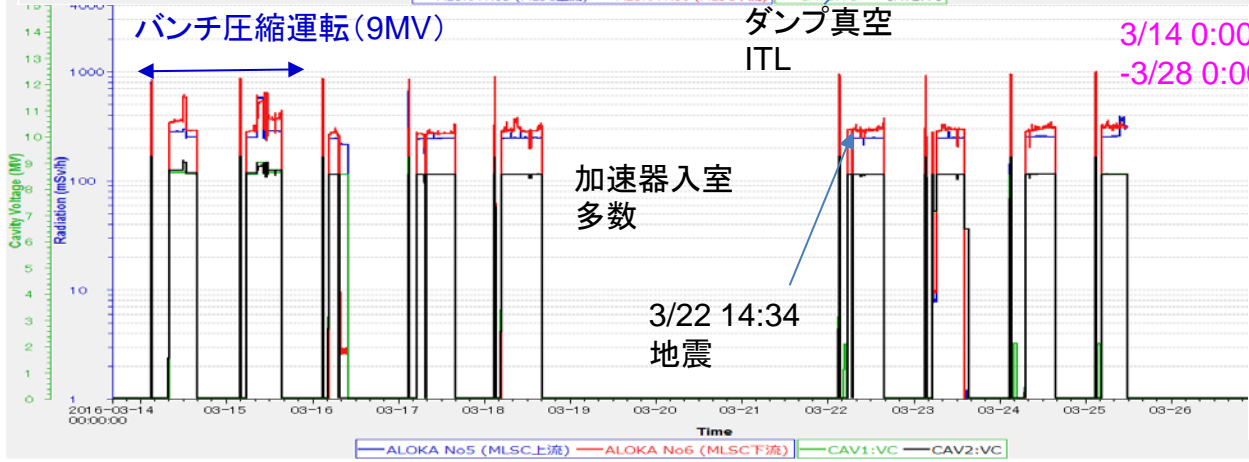
バンチ圧縮運転 (9MV)

ダンプ真空 ITL

3/14 0:00
-3/28 0:00

加速器入室 多数

3/22 14:34 地震



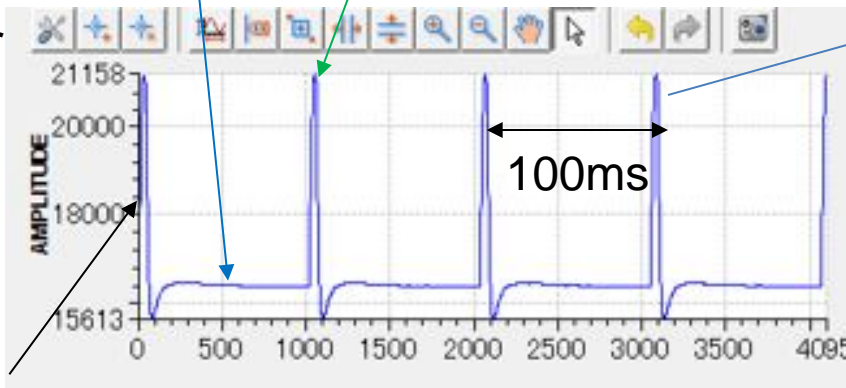
3/28 0:00
-3/31 0:00

①ビーム運転前のPulse aging (ML2)結果 (2016/2/12)

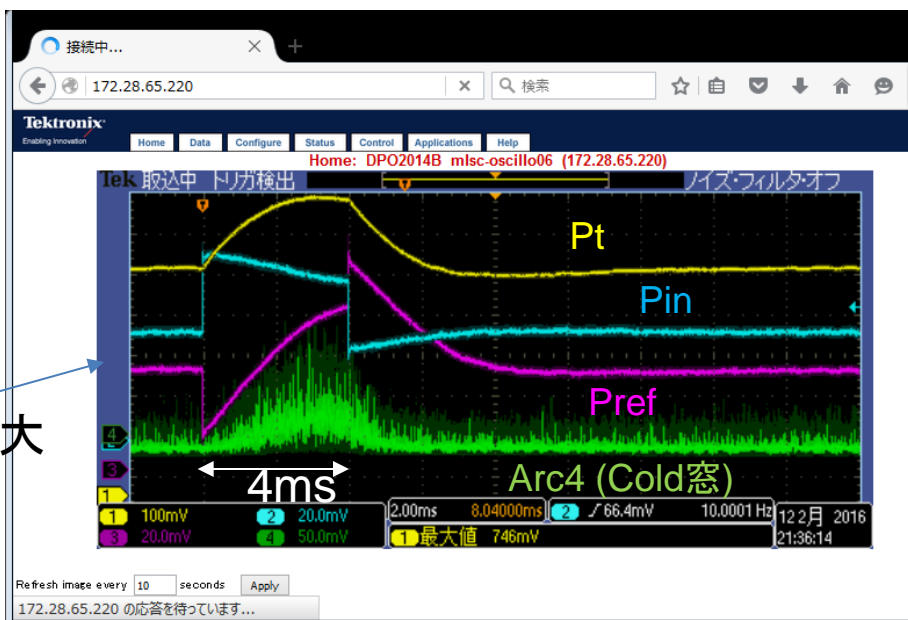
ML2 Pulse Aging

$$V_c = 8.57\text{MV (CW)} + 2.3\text{MV (10Hz x 4ms)} = 10.9\text{ MV}$$

で40min pulse agingを行った。(反射ITLの限界)



Vcのデジタル波形

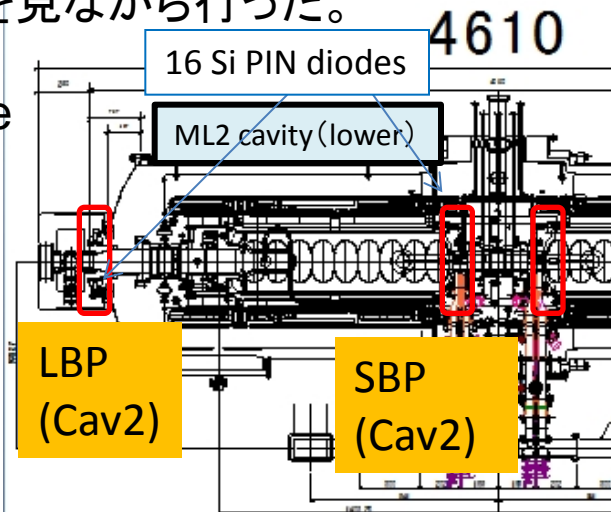
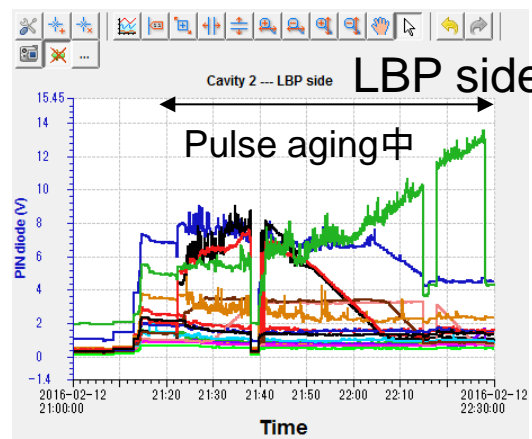
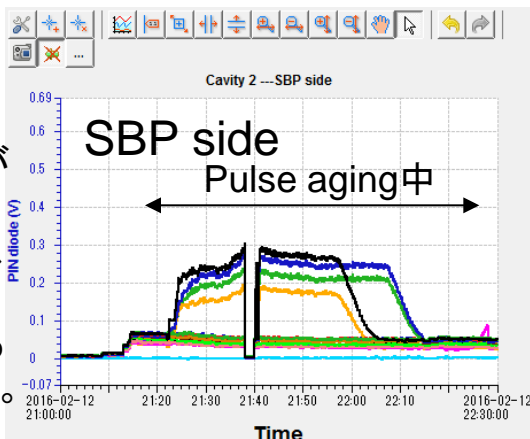


拡大

Arc4にあるように空洞内(もしくはCold窓)の放電が成長している様子が見られるが、pulse波形で成長が大きくならないようにコントロールしながらエージングを行うことができる。

Pulse agingの履歴: agingは空洞前後の32個のPINの推移を見ながら行った。

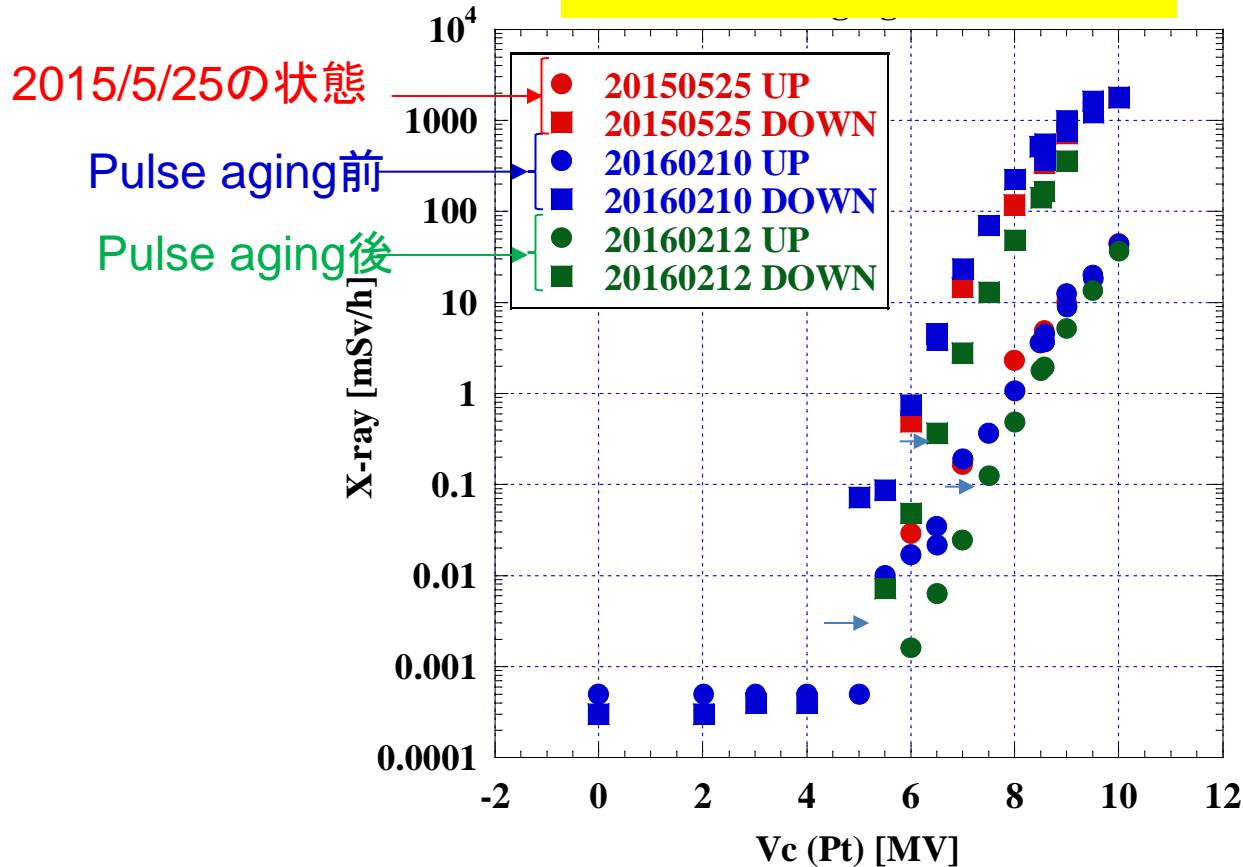
20min程度でPIINの信号が減っていくが一部が上昇していたので複数が増える前に終わった。



4610

① ML2 Pulse aging results(2016/2/12)

ML2 Vc vc ALOKA monitor



Aging前は前回と
radiation状態は同じ。

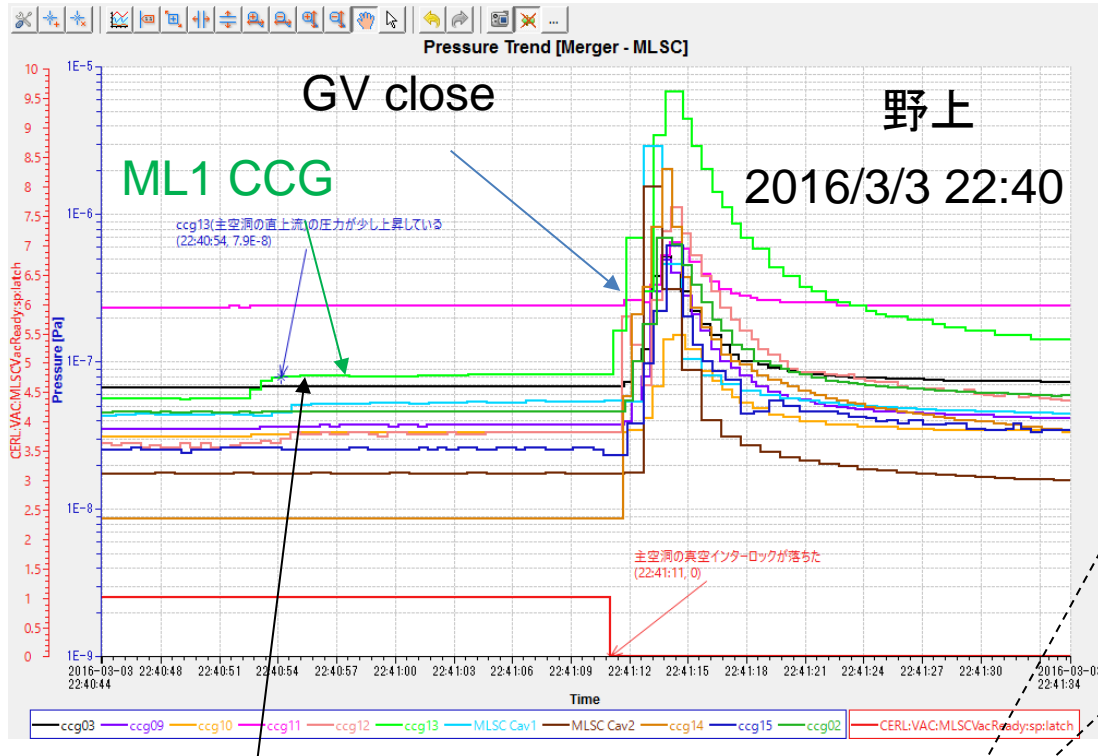
Onsetがpulse aging前後で
0.5MV程度上昇している。
→ Pulse agingが効いた。

また、10MVでHe流量が
前回は80m³/h程度
あったが、pulse aging後
は70m³/h程度となった。

パルスエージングの効果あり。Radiationは約半減。(ML1: 0MV , ML2: 8.57MV)
ALOKA No.5 2.49mSv/h (2/12 21:07) → 1.99mSv/h (2/12 22:27)
ALOKA No.6 264.4mSv/h (2/12 21:07) → 158.0mSv/h (2/12 22:27)

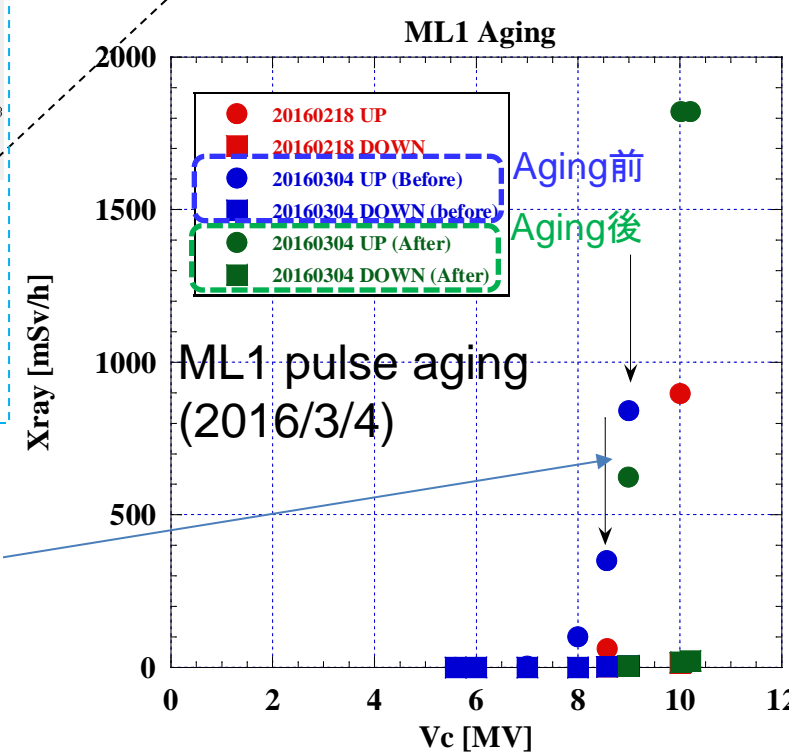
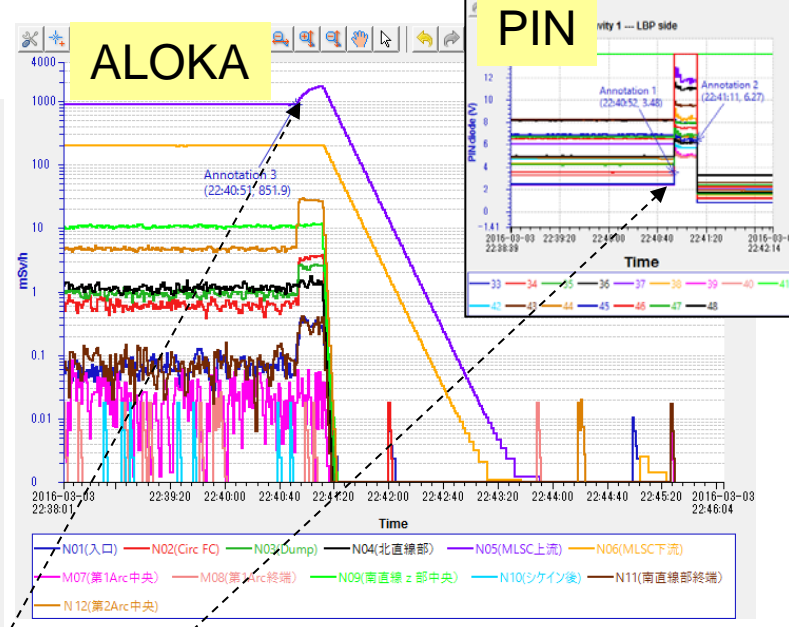
2016/3/3 22:40付近真空悪化時の状況と

③ML1 pulse aging(3/4)の結果



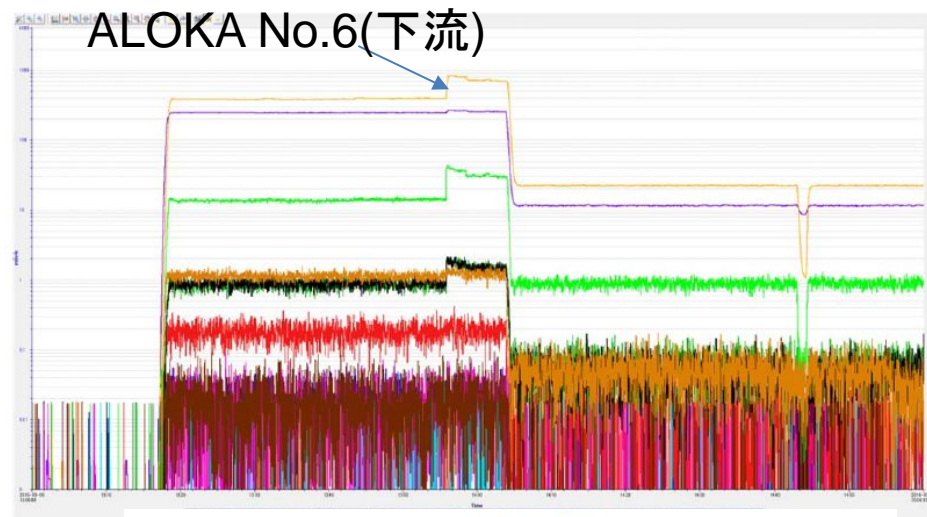
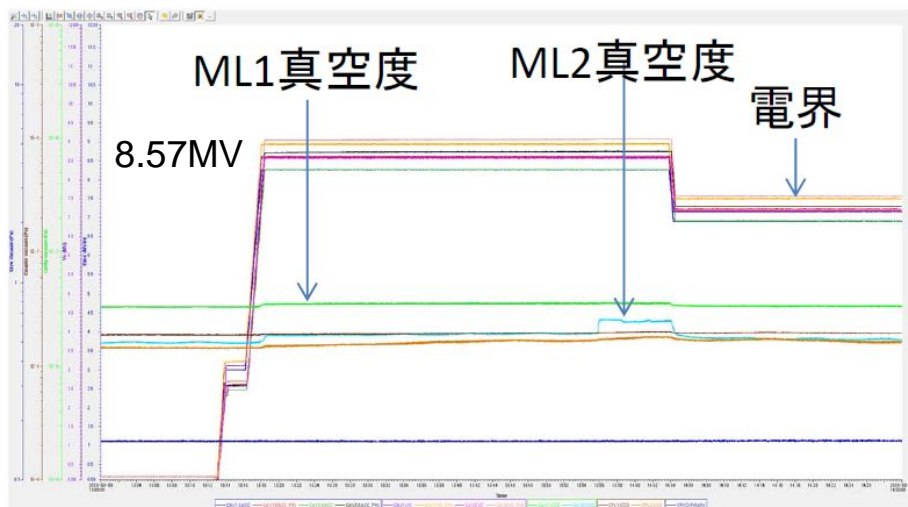
ITLで落ちる17秒前からML1 CCGの真空増加。その同時刻で急にPINの増大とALOKA No5の増大が見られる。→放電が大きくなり、真空悪化を及ぼし、結果として放電増大されITLがかかった。この後、fieldを10MVにkeepできず。

•次の日、3/4 12:00-16:00にML1のpulse agingを行う。Base CW 9MV、Pulse の設定は5Hz x 20ms, Peak = 10.5 MV で計1時間Keep。結果として、右図に見られるように25%のradaitonの減少とともに10MV keep可能に。但し、10MV時に真空の値が微増したため、3/8の施設検査を前に安全を見て、8.57MV運転に下げた。



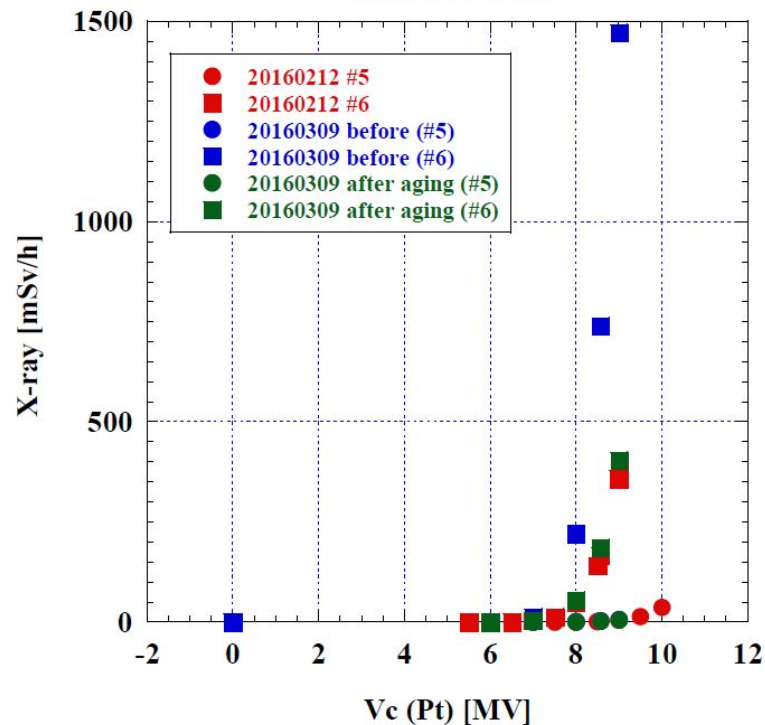
真空悪化の原因は不明。但し、pulse agingにて運転可能に

④ 2016/3/9 14:00付近真空悪化時の状況とML2 pulse agingの結果



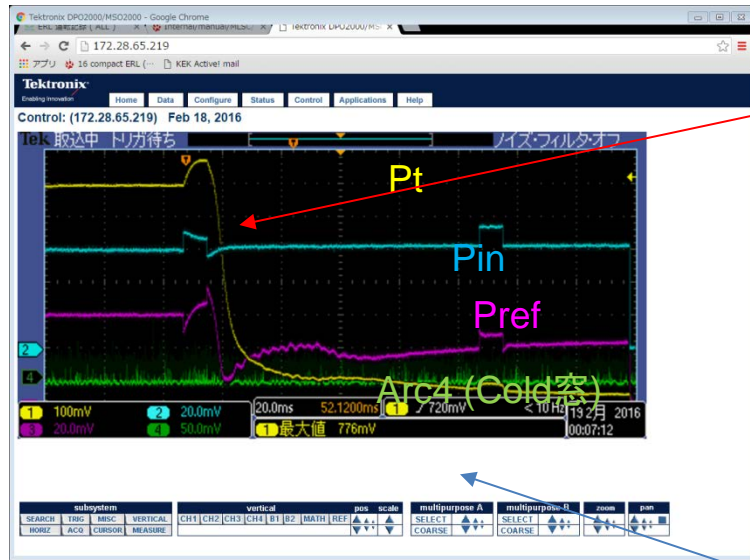
- 13:56 ML2の真空度が急に悪化。Radiationは3～4倍に増加。
- その後にML2のpulse agingを行う。8.5MV Baseに4ms*10Hz (peak 0.9MV)でpulse agingを行う。quenchの後にradiationが減少。その後30分keepしたところ、右図に見られるようにもとに戻る。

ML2 CW meas.



3/8 22:00にダンプ真空悪化があり、但し、最終的な真空悪化の原因は不明。pulse agingにて運転可能に

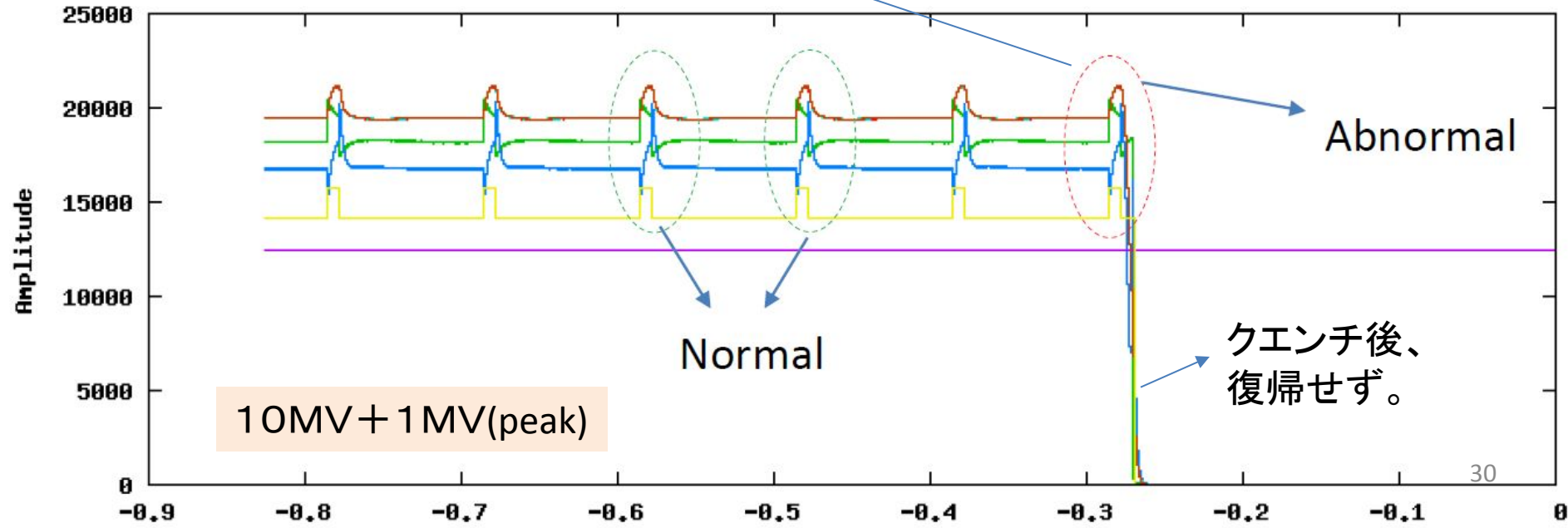
②2016/2/18 ML1 pulse aging (Discussion item)



ML1がpulse agingによりさらにfieldが10MV以上行くか試した。Peak 11MVまでいくとPulse後Ptが落ちる。Decayを見るとquench。色々試したが、現在ではML1は11MV以上行かず、クエンチ。時間がなかったので、ここまでで終了。何故、11MV以上いかないかは不明。位相もモニターしているが、おかしい様子なし。

Pulse aging 30分程度で1割程度のradiationの減少。最初のagingで11MVを少し経験していたので、それほど効果がなかったのかもしれない。

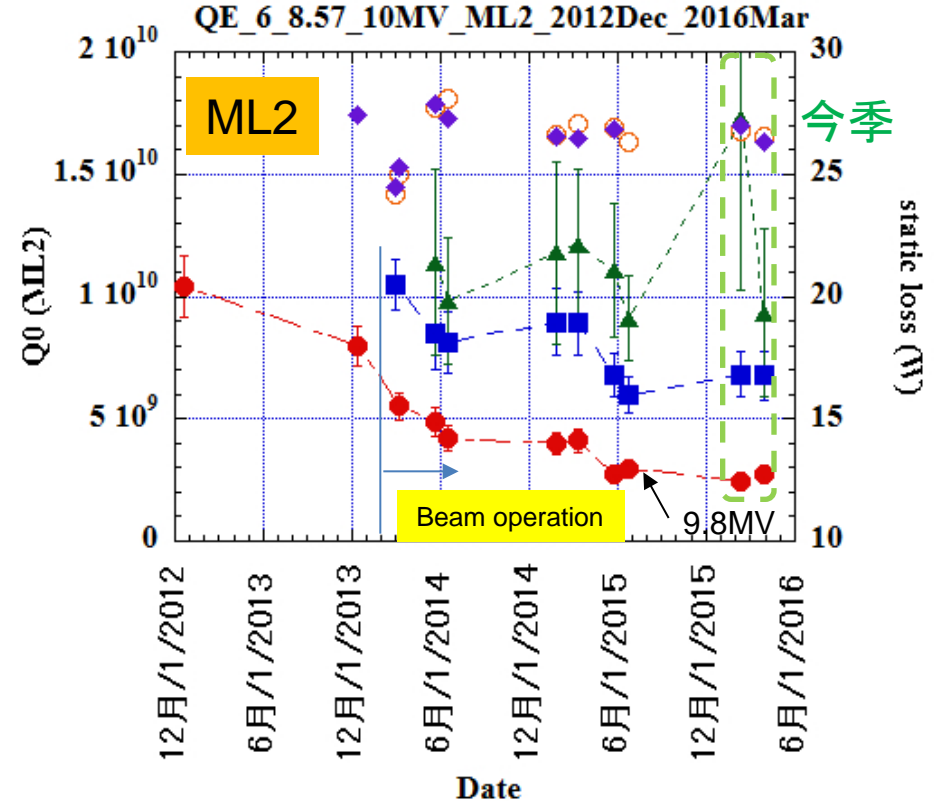
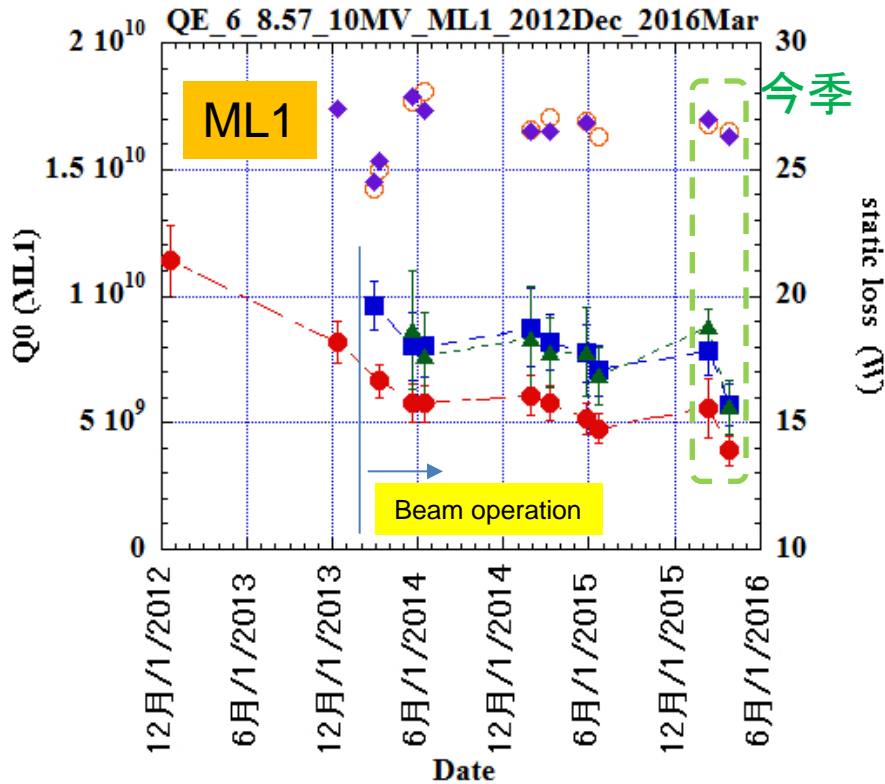
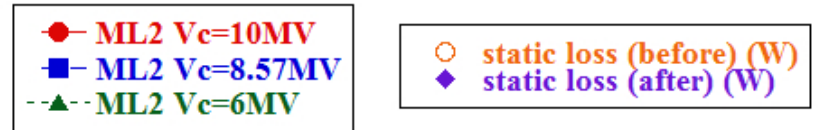
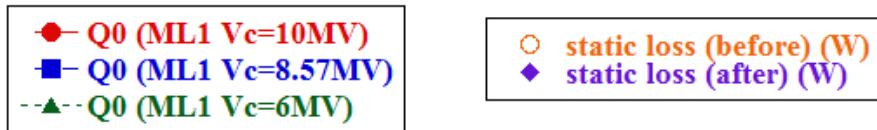
FB4_HW_20160223123728_014212_AP.png



Pulse agingに関する今季のまとめ

- 今季4回行った。ML1:2回、ML2:2回
- 劣化した空洞に対しては10MV以下のfieldに関しては真空での突然の悪化にも関わらず、radiationを下げることで可能であるとともにも運転可能な電圧に戻すことが可能であった。但し、radiationの減少の割合はeventにより違っていた。
- 11MV以上に上げる時にML1は現在クエンチが起きて、ダウンが起こった。これは今までに見られなかった現象であった。長年の運転でmaximum field levelが下がってきている可能性がある。今回の時間の中ではpulse agingでもfieldをさらに改善できず。赤道部に何か異物(ダンパーかけらなど)が入ったか??
- →今後fieldを上げる(本来の元のfield >15MV/m)には根本的に他のprocessing(ex. He processing)などを試す必要がやはりあるのではないか。今後の課題である。

cERL運転後3年強のQ値測定history (10,8,57,6MV) &static loss



(2016/2/11)
(今季最初)

ML1 Vc=8.57 MV ML2 Vc=0 MV
ALOKA N0.5 60.0 mSv/h ALOKA No.6 2.95 mSv/h

(2016/3/28)
(今季最後)

ML1 Vc=8.57 MV ML2 Vc=0 MV
ALOKA N0.5 299.6 mSv/h ALOKA No.6 3.16 mSv/h

ML1 Vc=0.0 MV ML2 Vc=8.59 MV
ALOKA N0.5 2.76mSv/h , ALOKA No.6 288mSv/h

ML1 Vc=0.0 MV ML2 Vc=8.59 MV
ALOKA N0.5 2.53mSv/h , ALOKA No.6 232.4mSv/h

ML1は2016/3/4の真空イベント以降悪くなった。Radiationも5倍。ML2はほとんど現状維持だが、10MVに関しては2月のpulse agingで少し回復している。Radiationも減少。総じて、Pulse agingの効果はある。但し、放電イベントでQ値の劣化が見られる。Static lossは安定している。(26.9W)。

2016/2/15-3/31 (6th run))約7週間での運転時のITLの原因
(毎日 月曜～金曜 12:00-23:00)

赤:空洞起因、青:他真空
ピンク:原因不明、黒:その他

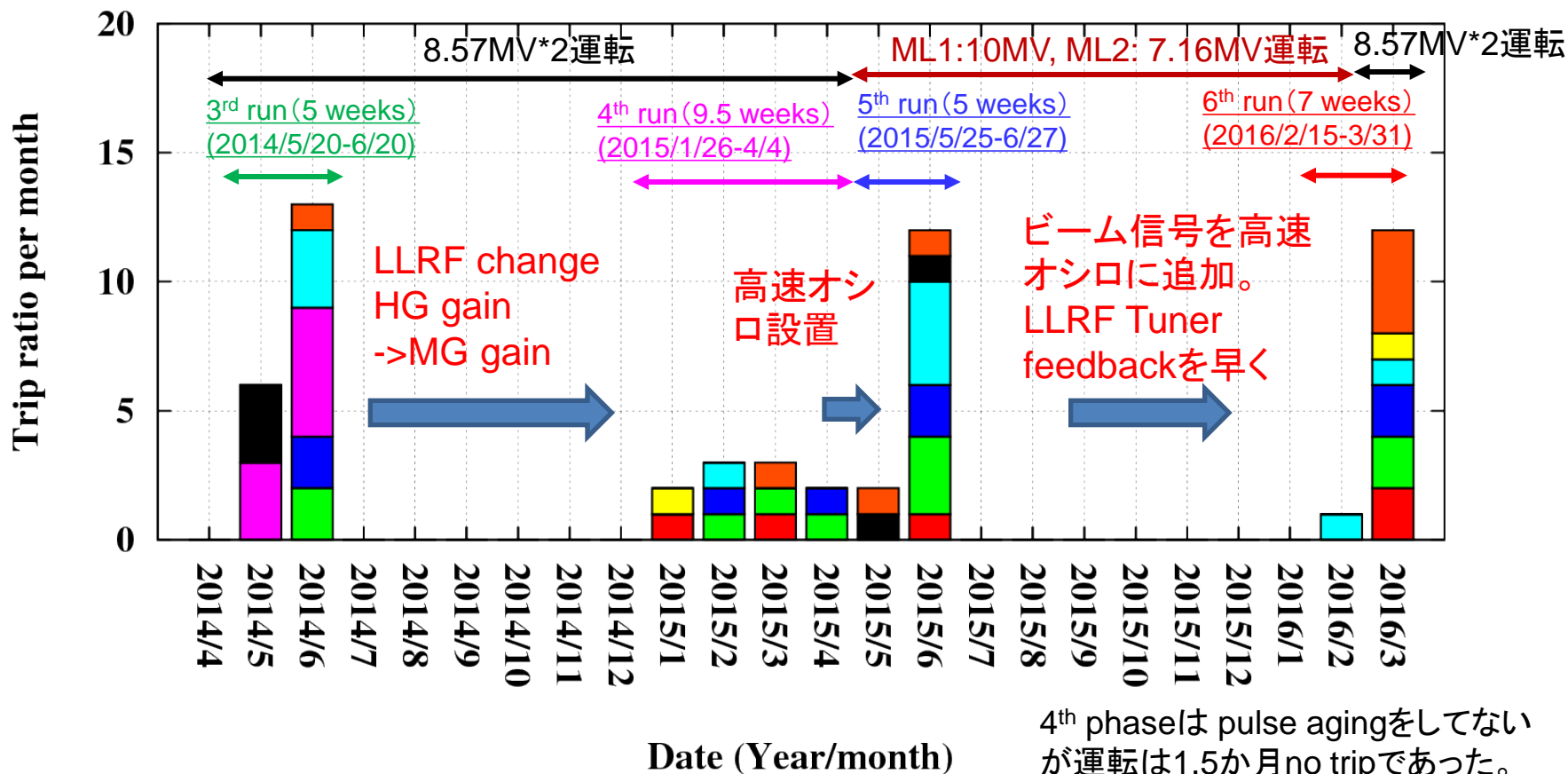
日にち	時間	ML1	ML2	原因
2016/2/19	14:09	○	○	CPL test stand HV ON電源ノイズ回り込み
2016/2/19	20:54	--	○	Beam operation miss (dispersion measurement panelを昔の設定にしていた。)
2016/3/3	22:01	○	--	CPL1 Cold窓 arc① (discharge)空洞か？
2016/3/3	22:40	○	○	上流CCG1 ITL (ここから10MVにkeep不可) (翌日 pulse aging) (10MV, 7.16MV → 8.57MV*2に変更)
2016/3/8	22:09	○	○	Dump真空悪化 → GV close → RF振動ITL
2016/3/11	15:30	--	○	ML2 RF振動 原因不明 ??(回りに人もいなかった)
2016/3/16	15:08	--	○	ML2 RF振動 原因不明(RF Grp study中ケーブル接触?)
2016/3/16	15:37	--	○	ML2 RF振動 原因不明(RF Grp study中ケーブル接触?)
2016/3/22	14:34	--	○	地震 震度2 → ML2 RF down
2016/3/29	20:12	--	○	CPL2 arc④, ⑤ (discharge) warm真空反応。
2016/3/29	22:47	○	○	LCS laser shutter close → PPS error
2016/3/31	14:03	--	○	CPL2 arc④, ⑤ (discharge) warm真空反応。
2016/3/31	17:14	○	○	ML手前 CCG11,12,13真空悪化。 → GV close → RF振動ITL (aging は必要なし。) (ビームがチェンバーに当たったか?)
2016/3/31	20:33	○	--	ML1 Vc上昇原因不明(オシロのみ反応、uTCA反応なし)

高速オシロで見たところ、すべてビームとは無関係で起きたイベント。

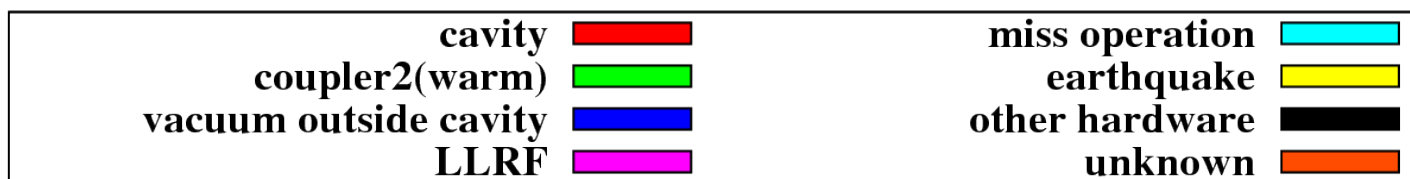
Trip Statistics of cERL Main Linac cavities for 2 years

2014年5月以降に運転が落ち着いてきて、そこから運転中のtripをカウントし始めた。

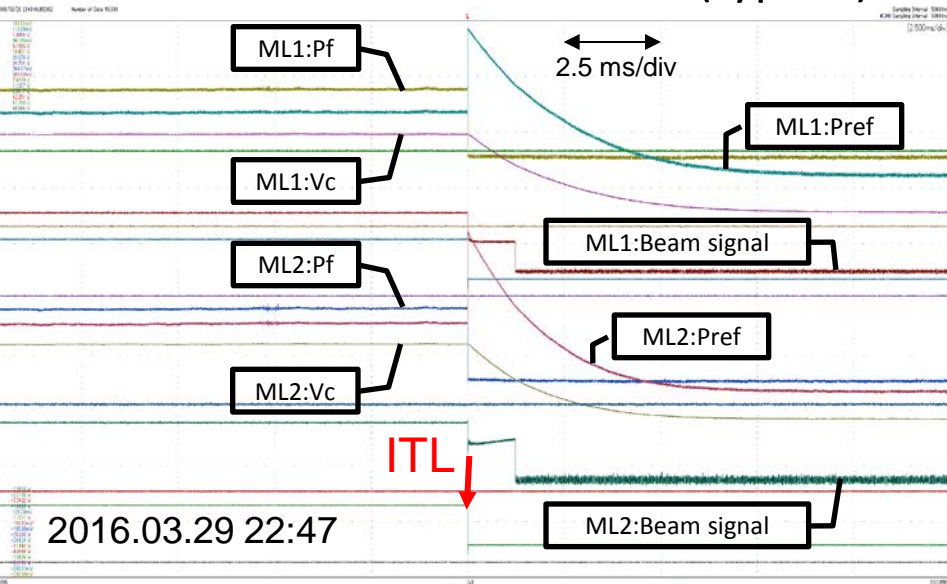
Trip statics of cERL Main Linac Cavity



4th phaseは pulse agingをしてないが運転は1.5か月no tripであった。



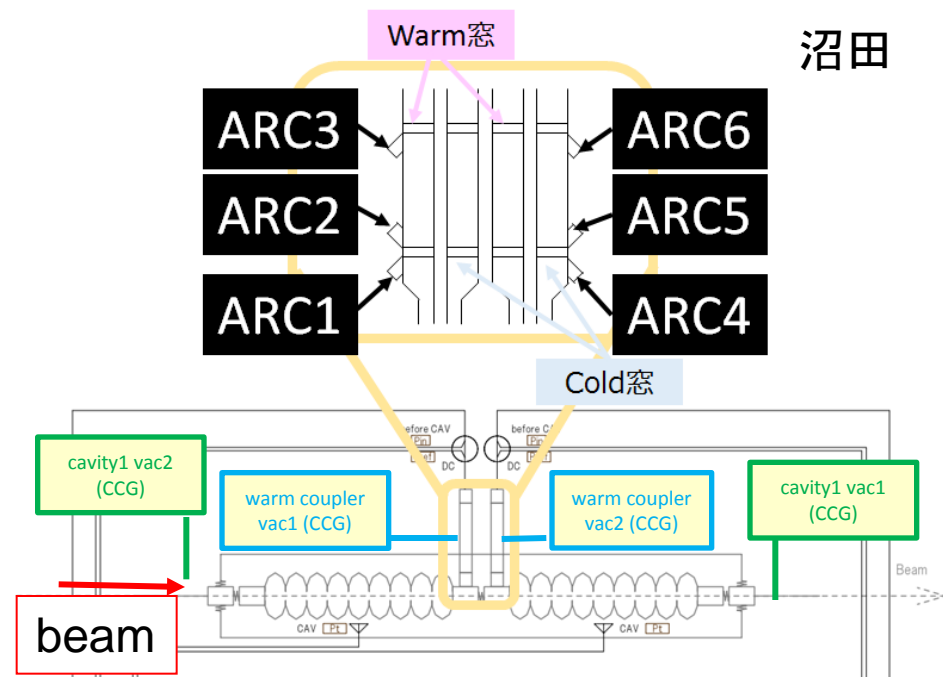
ITL時の高速オシロのevent(typical)



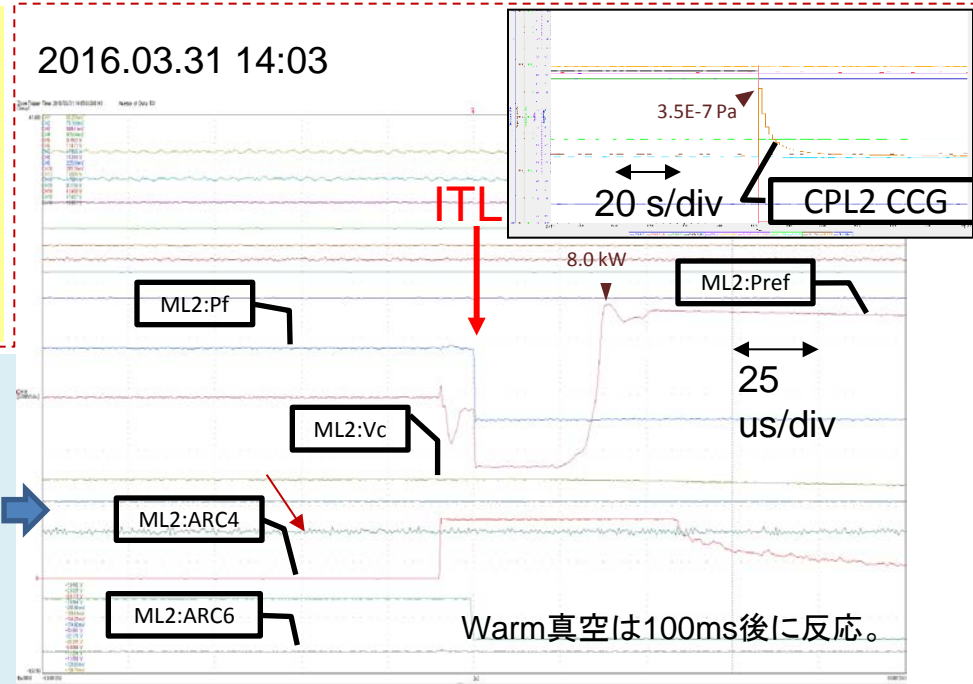
2016.03.29 22:47 (NormalなRFの落ち方)
 (LCS laser shutter close=>PPS error)
 CW運転時でITLで落ちた信号をとらえたのはこの一例のみ。
 PPSで落ちているので、RFが落ちると同時にbeamも落ちている。但し、pockel cellのあとのメカニカルシャッターまでに時間がかかるのか1ms程度ビームが少し出ているのがわかる。この場合は**ビームとRFは無関係**。

2016.3.31 14:03 (warm coupler ITL)
 CPL2(Warm-side)での**放電(arc4,6が反応)**。発生した電子の集団(plasma)がCPL2内でshortになる。反射波を**遮蔽**し、plasmaが納まるまで反射が見えてないと考える。これに合わせて、**CPL2の真空も反応**。ビームはこのときは5Hzで1usしか来ていず、この範囲にはオシロの画面の範囲にはビーム信号はいず、ITLは**ビームとは無関係**なのがわかる。

沼田



2016.03.31 14:03



このような典型的な波形がオシロで得られており、ITLが何で起きたか詳細がわかる。今季はビームとITLとRFは無関係。

ITL(trip)の今までの原因と対策(2年間)

- 2014年に起こっていたLLRFでtripが頻発していたのはgainを上げすぎており、外乱やビームの変動に弱かったため。Gainを下げ、なおかつfieldが安定する条件を探し、運転が落ち着いた。
- その他、主な原因は下流カプラーのwarm部の放電(真空悪化を伴う)。毎回エージングを行っているが、1か月に一回程度の放電が起こる。放電の成長が起きる前にITLで止めているのが高速オシロからわかる。ちなみに上流のカプラー放電は運転中は起きていない。
- Fatalな放電は空洞の放電による真空悪化、今期の2016年3月の空洞放電では放電後により、ML1は10MVをkeepできなくなった。Pulse agingを行うことで、現在運転をkeepできているが、Q値の大きな回復までには至っていない。
- 上記に合わせて、空洞以外の真空悪化による場合のITLも空洞での放電と同程度起きている。真空悪化でITLがかかり、致命的な結果にはなっていない、安定運転はできているが、これにより、Q値が劣化している可能性も否めない。
- その他、arcセンサーモジュールの光漏れ(other hardware)が2015年まで起こっていた。これは対処済み。最近2016年3月末Pt用の波形弁別モジュールがおかしいと思われる現象(unknown)もあり、対処が必要かもしれない。
- 運転ミスもITLの一つであり、これはsoftなどでさらに対処が必要であろう。

900uA Energy recovery 運転結果 (2016/3/8 施設検査)

CW 900uA 近くになったので、エネルギー回収していない時のlossが $\Delta(\text{Pin}-\text{Pref})$ でしっかり反映されるようになった。ここから回収率を計算する。

$\Delta p_{\text{total}} = \Delta(\text{Pin}_1 + \text{Pin}_2 - \text{Pref}_1 - \text{Pref}_2)$ としてを右の赤でplot。青はビーム電流。

Main linacによる加速: $V_c = 8.57\text{MV} + 8.57\text{MV} = 17.14\text{MV}$
この区間で加速電圧は安定

回収がない場合の本来の加速に必要なエネルギー
= $V_c \cdot I = 17.14\text{MV} \cdot 900\mu\text{A} = 15,426\text{W}$

$\Delta p_{\text{total_loss}} = \Delta p_{\text{total}}(0\mu\text{A}) - \Delta p_{\text{total}}(900\mu\text{A})$
のずれがエネルギー回収していない分のロスと考える。

CW 900uA 電流で運転中のデータは電流でnormalizeしたデータの平均を使用し、900uAを掛ける。

$\Delta P_{\text{total}}(900\mu\text{A}) = (-6.03 \pm 4.18 \text{ (W/mA)}) \cdot 0.9\text{mA}$
= $-5.43 \pm 3.76 \text{ W}$

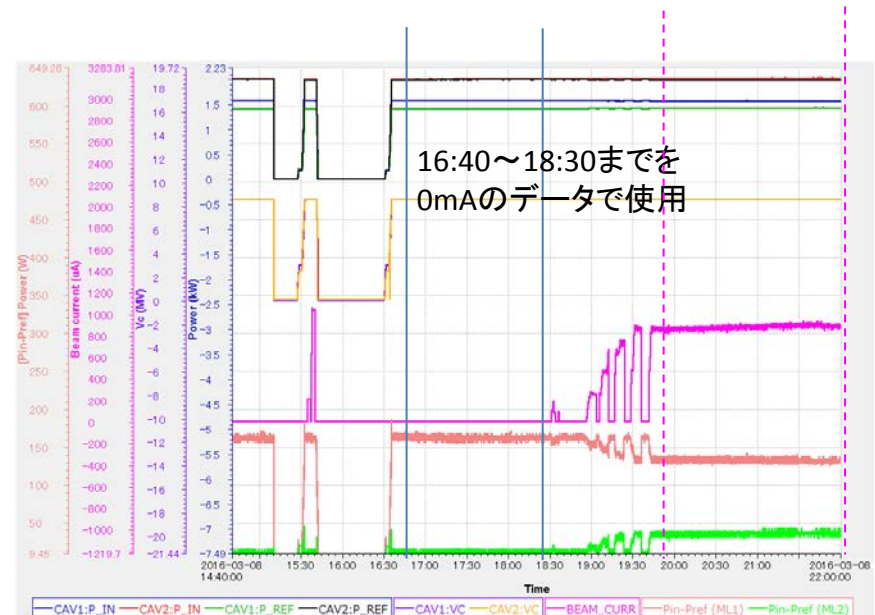
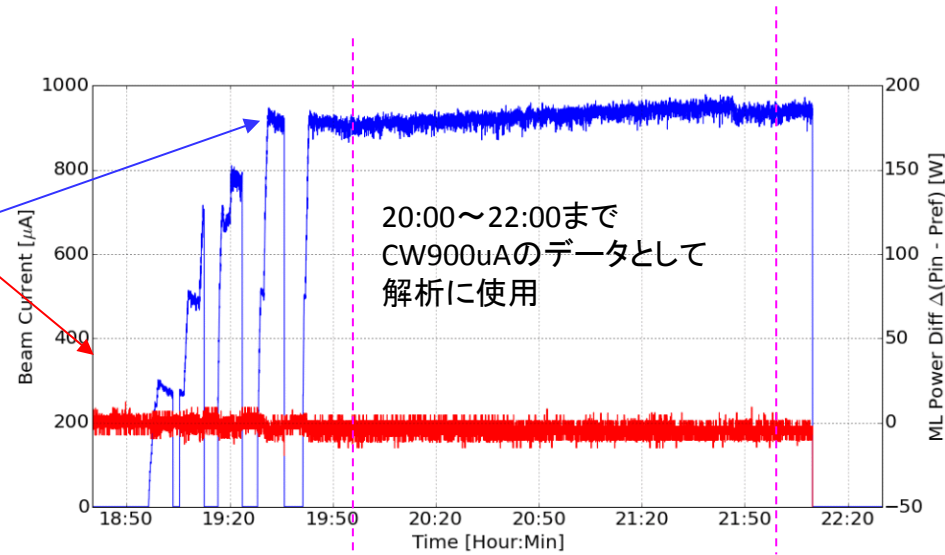
$\Delta P_{\text{total}}(0\mu\text{A}) = -0.81 \pm 3.69 \text{ W}$
(今回はerro-barはRMSを使用)

$\Delta p_{\text{total_loss}} = 4.62 \pm 5.27\text{W}$

Backup解析①を使用

エラーにRMS/VNを使用するかは議論
(解析②の場合)

Totalのエネルギー回収率 ~
 $1 - (4.68 \pm 5.27\text{W} / 15426\text{W}) =$
99.97% ± 0.03%

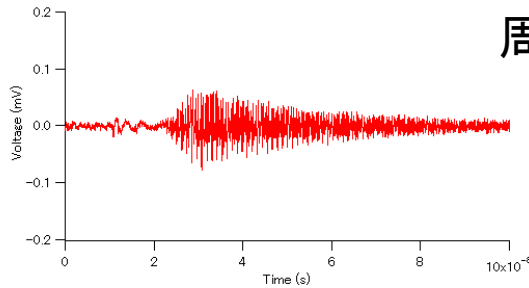
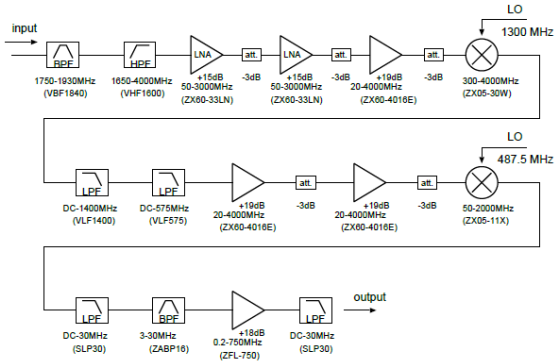


HOM-couplerについて

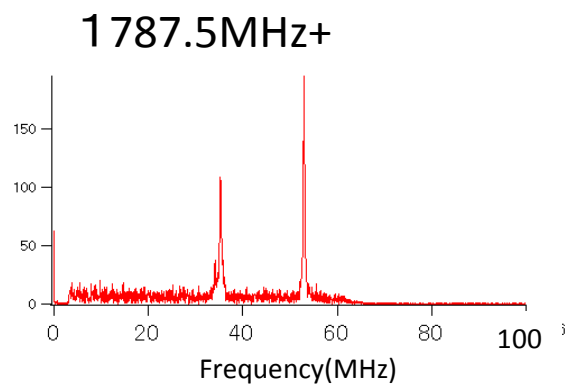
本田さんのHOM-BPMを使い主空洞のシグナルを見れるか試したが、見えず。
 やはり、Main LinacのHOM Couplerの結合は弱い。

入射空洞の場合はHOM-couplerからの信号を検出回路を通すことで、分離したHOM信号が見える。

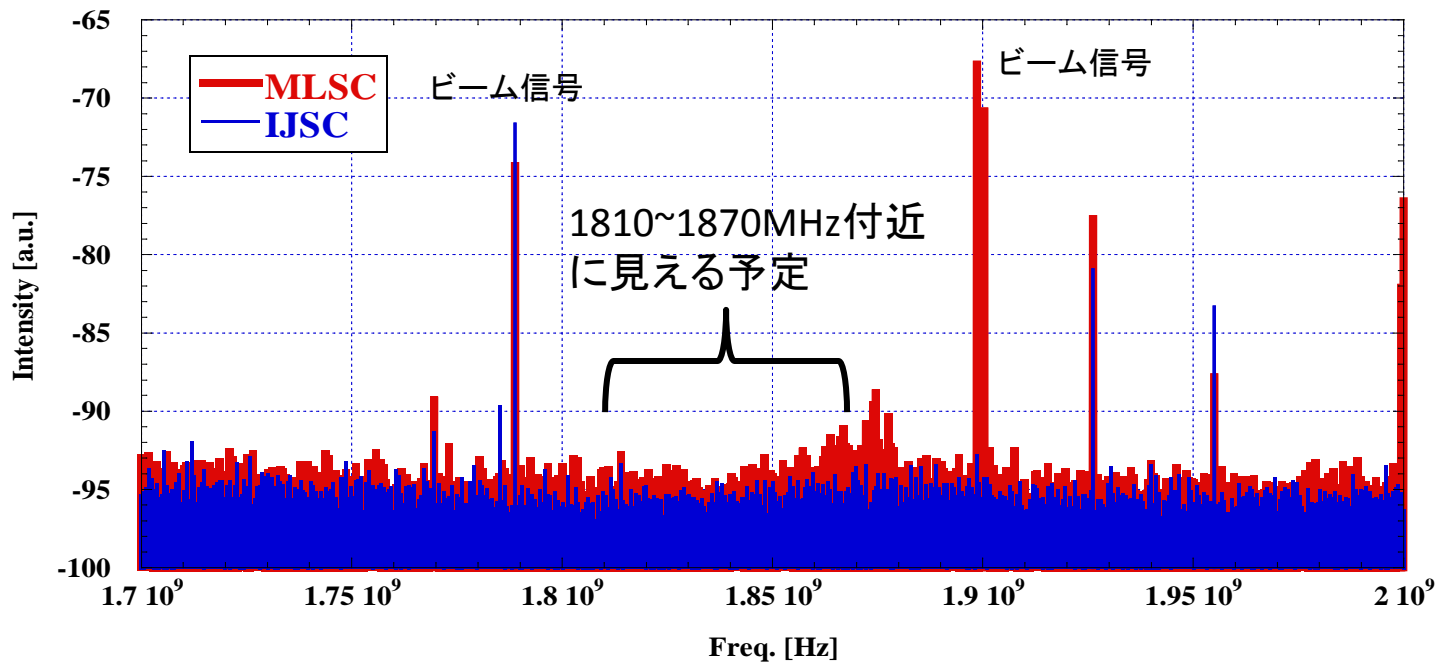
検出回路



周波数変換



念のため、スペアナで見るとビーム周波数とは干渉していないことを確認できた。



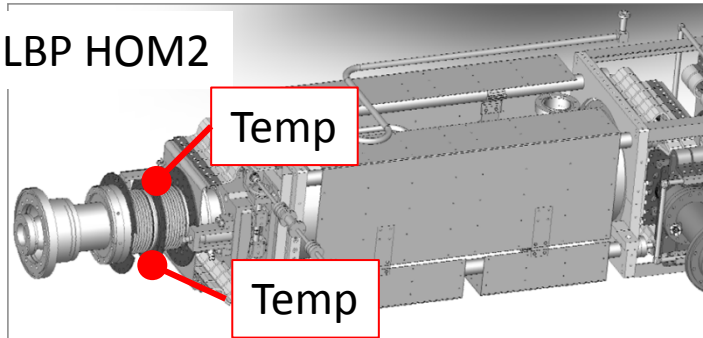
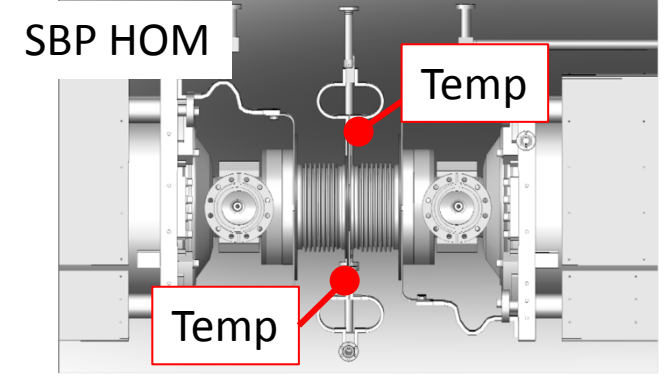
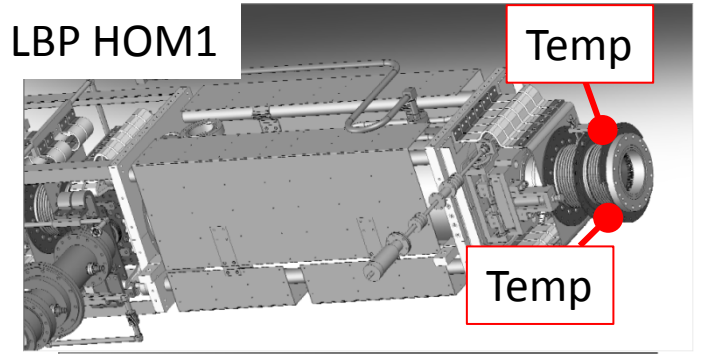
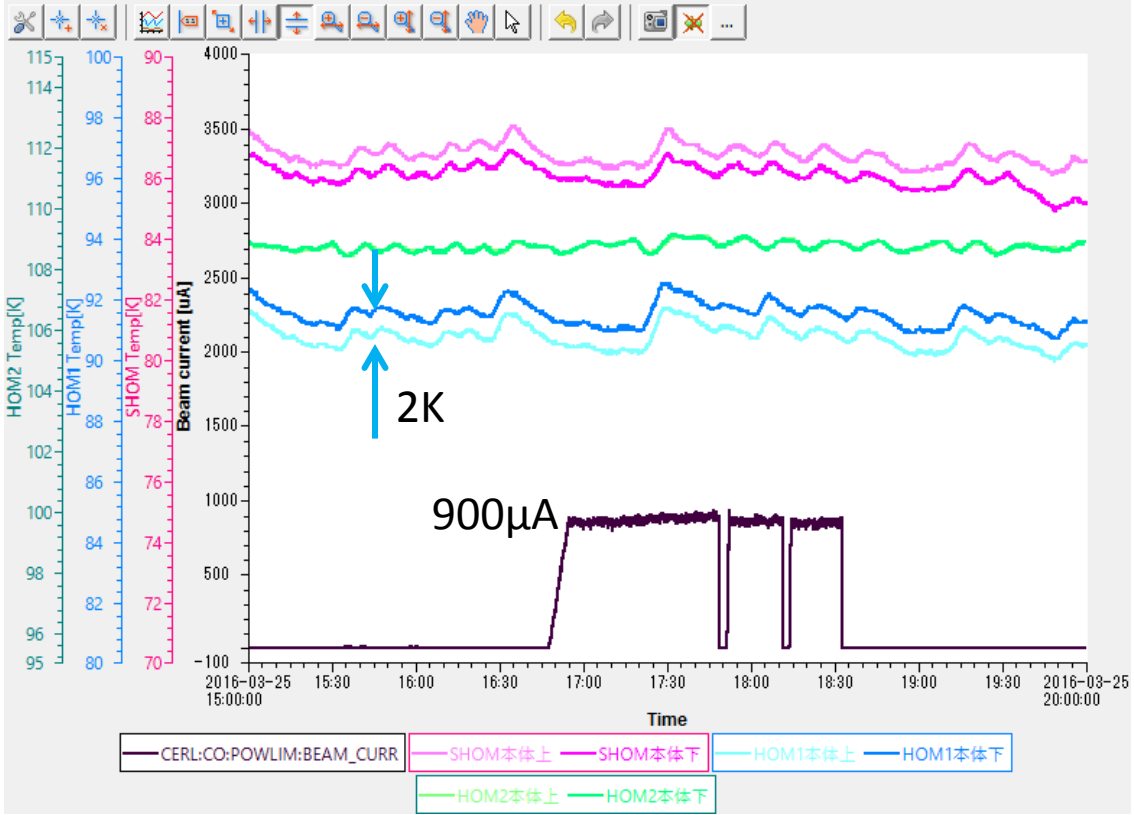
HOMダンパーの発熱について

2016.3.25に行った162.5MHz x 0.9mA運転時のHOM温度測定

Loss Factro 10[V/pC]@3ps
 Cavity Loss Power=7.7pC x 900μA x 10V/pC x 2= 140 mW

7.7pCビームの発熱量は小さい。
 HOM温度計も反応を示さず。
 ヒータを用いたテストでは30Wで0.4K上昇

Parameter	Value
Current	900 μA
Repetition	162.5 MHz
Bunch length	3ps



HOM測定&HOM damper発熱は？(*)

- 許斐君が測定したHOMのspectrumを載せる。結論はビームのspectrumしか見えていないということ。
- いつ測定したか忘れました？(3月半ば後半？162.5MHzの時の運転だったはず)。許斐君ERLのMLのlognoteにいつ測定したか乗っているので、それ教えてもらえませんか？それで、Bunch 圧縮の時でCWの時のデータのHOM damperの発熱の温度上昇がないのを一つ載せたい。HOMがcriticalに当たらないなら、計算では発熱は0.1W以下だったはず。ビーム条件わかれば教えて。1mAは当たり前だが、問題ないということをここで言う。
- 次に10mAでこの発熱がどれくらい上昇するか(計算の予想値もいれて)がわかるので、それでも問題ないことを書き、それとは別に10mAで162.5MHzの時も発熱は問題ないだろうとして、その場合にHOM-BBAが一応、問題ないか今後の課題と結論する。
→ Jlab-FELでは2~3mAでHOM-BBUが問題だったので、この空洞は問題ないつまり、この空洞の設計がいいことを言いたい。

• Q: Field ML1:10MVで長期運転が可能であったか？

- Ans. No. 2015年5月に引き続き、Field ML1:10MV, ML2 7.16MVで運転を行ったが、3/3の空洞の真空悪化+放電eventにより、10MVにkeepできず。3/4にML1にPulse agingを行い、10MVは再度keepできたが、放射線量の増加、さらに10MVでは真空の値も少し悪化していた。
- 3/8の施設検査を控えていたため、ML1:ML2ともに8.57MVに変えて、ここからはpulse agingも行いながら、安定運転が可能であった。

• Q.pulse agingによって、空洞性能は改善したか？

- Ans. 少しYes. pulse agingを今季4回(ML1:2回、ML2:2回)行った。ML2はpulse agingにより、2015年5月に見られていたQ値より、pulse agingにより、少し性能を回復している。またradiationも半減。ML1に関しては1割程度のradiationの改善が見られたが、11MV以上のfieldに到達しなかった。
- この改善が今後の課題であり、He processingなどを最終的には試して11MV以上の改善があるか見る。(カプラースタンドで窓が割れた(backup資料)ため、これに関してはそのテストが終わり次第やりたい。)

• Q: Trip rateはどれくらいか、主に何が原因か？

- 今季は平均して、一週間に2回程度。原因は空洞真空放電2回、外部空洞真空悪化2回、warmカプラー放電2回、miss operation2回、など。Warmカプラー放電などはagingの仕方で改善可能か調べる。それ以外、特に空洞真空の悪化eventは原因不明。(これは対処の方法が未だ見つからない。)

• Q: Fatalな空洞性能劣化は回避し、安定運転できていたか？

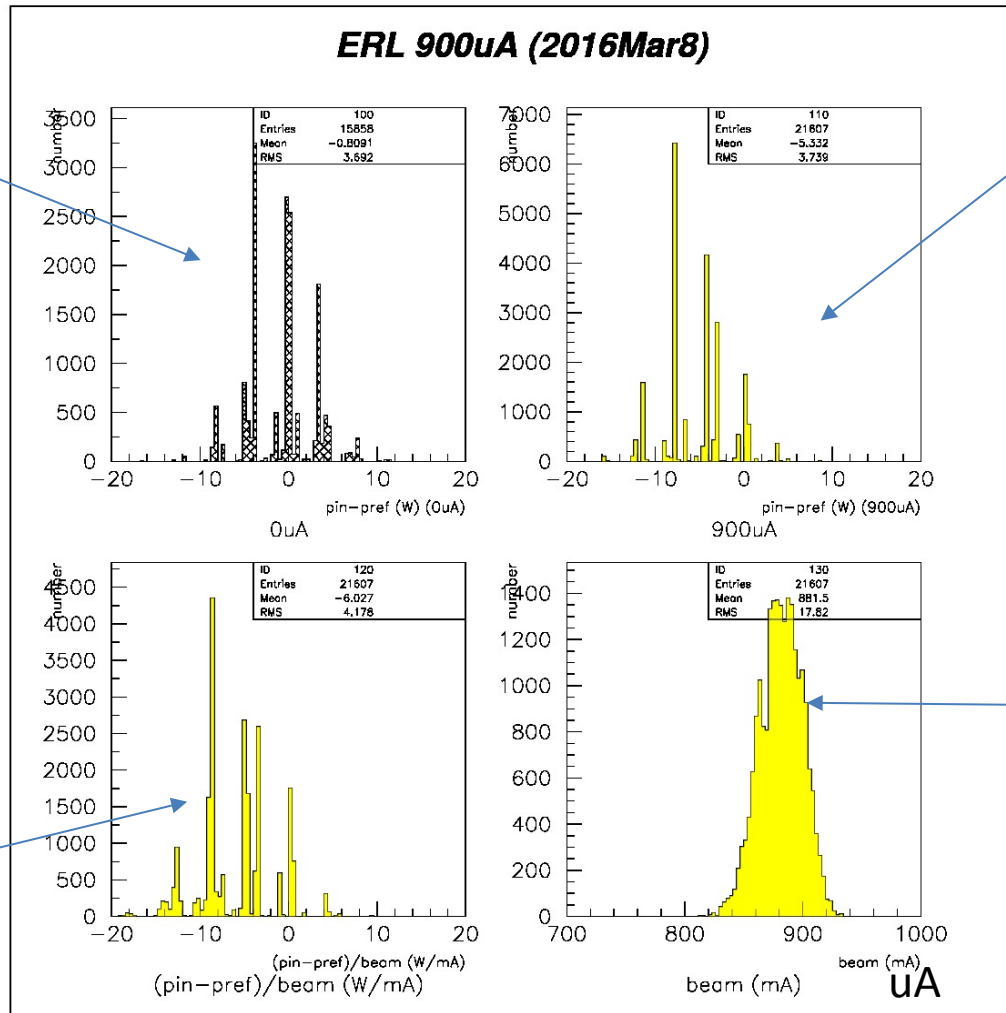
- Ans. 大体Yes
- 1.適切なITLで、カプラーや空洞の放電eventは高速オシロで10us以内に検出し、RF-ITLで落としている。これにより、致命的な窓の割れなどは起こっていない。
- 2. 真空悪化によるradiation増加が2回見られた。これは適切なpulse agingにより、現状の運転を維持するlevelで安定に運転できている。但し、ML1に関してはこの悪化以降、pulse agingを施しても、Q値の劣化+radiationの増加が見られており、長期運転にかけて、この劣化を回復することが今後の課題。
- 3. Tuner feedback改善でLLRFはうまく働き、 $\Delta\phi < 0.01^\circ$, $\Delta A/A < 0.01$ を達成。
- 4. CW 1mAは安定に行われた。特に良いビームチューニングにより、エネルギー回収率は0.9mA運転で $99.97 \pm 0.03\%$ を達成。HOMも162.5MHzのhigh charge運転でも発熱は特に見受けられなかった。今後の10mAに向けて、非常に大きな期待ができる結果であった。

Backup

900uA運転中の $\Delta(\text{Pin-Pref})$ の分布(解析①) (2016/3/8)のデータより

16:40~18:30までの
0mA中の
 $\Delta\text{ptotal}(0\text{mA})$ の分布
=-0.809 ± 3.69W

20:00~22:00までの
900uA中の
 $\Delta\text{ptotal}(0\text{mA})$ を電
流でnormalizeした
値の分布
=-6.03 ± 4.18
(W/mA)



20:00~22:00まで
の900uA中の
 $\Delta\text{ptotal}(0\text{mA})$ の分
布
=-5.33 ± 3.74W

20:00~22:00まで
の900uA中のビー
ム電流の分布

900uA運転中の $\Delta(\text{Pin-Pref})$ の分布(解析②) (2016/3/8)のデータより

16:40~18:30までの0mA中の
 $\Delta_{\text{ptotal}}(0\text{mA})$ の分布で1点が4W程度の
エラーバーがあると思い、それらをすべて
点数分だけconst fitをした。そのfit結果は

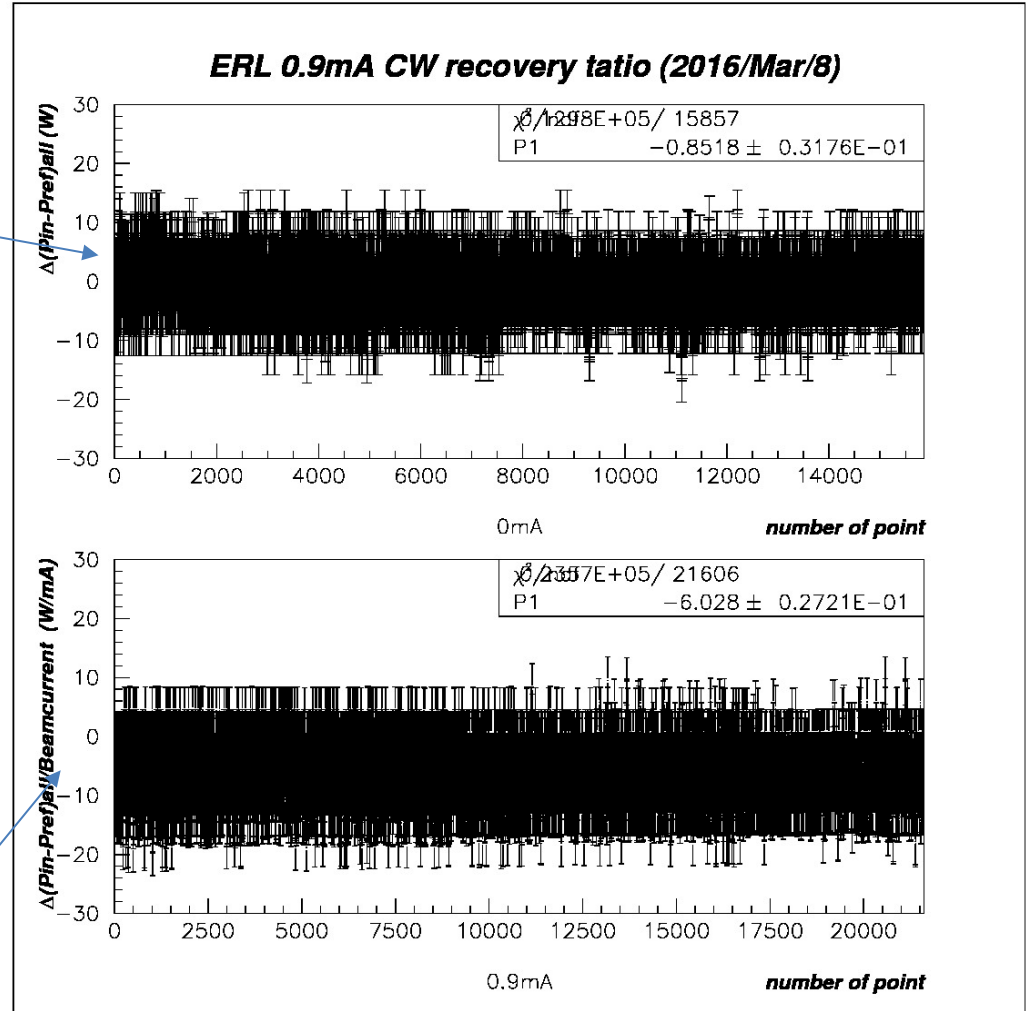
$$=-0.852 \pm 0.0318\text{W}$$

$\chi^2/\nu = 0.818$ と非常に良いfit
エラーは4W分の \sqrt{N} 分と非常に小さい。
本来はこれがエラーか？

20:00~22:00までの900uA中の
 $\Delta_{\text{ptotal}}(0\text{mA})$ を電流でnormalizeした値
の分布で1点が4W程度のエラーバー
があると思い、それらをすべて点数分
だけconst fitをした。そのfit結果は

$$=-6.02 \pm 0.0272\text{W/mA}$$

$\chi^2/\nu = 1.091$ と非常に良いfit
エラーは4W分の \sqrt{N} 分と非常に小さい。
本来はこれがエラーか？



cERLスケジュール(2月) & エージングの日程

2016年 2月

SUN	MON	TUE	WED	THU	FRI	SAT
1/31	1	2	3	4	5	6
空洞冷却	4K	2K check	Injector aging + pulse aging			
7	8	9	10	11	12	13
Injector aging + pulse aging		Mail-linac coupler aging	Main-linac空洞エージング ML2 LLRF check	建国記念日 Main-linac Q値測定	ML1 LLRF check Injector/ML 総合熱負荷check ML2 pulse aging	
14	15	16	17	18	19	20
			ビーム運転	ML1 pulse aging		
21	22	23	24	25	26	27
CW 300uA		ビーム運転			CW 300uA (事前検査)	
28	29					
次ページに記載	次ページに記載					

cERLスケジュール(3月)

2016年 3月

22:20 真空悪化でML1が
10MV keepできず

16:00~ pulse aging後
ML1 8.57MV, ML2 8.57MV運轉變更

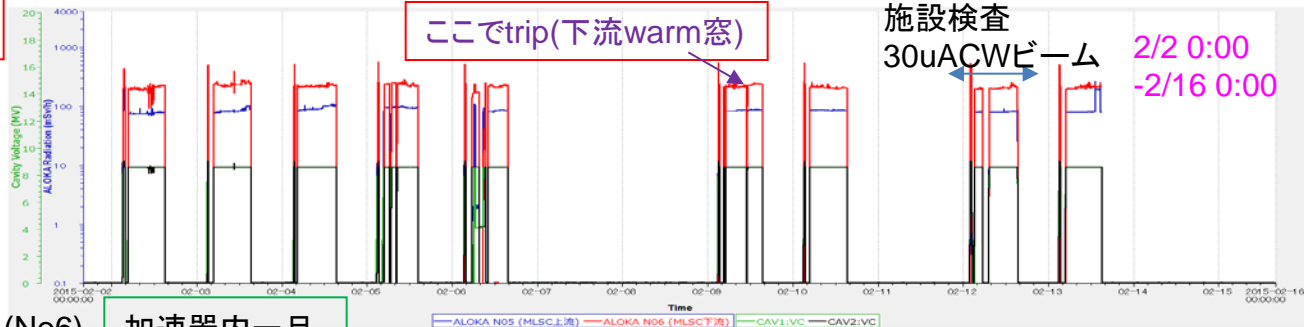
SUN	MON	TUE	WED	THU	FRI	SAT
2/28 空洞4K	2/29	1 バンチ圧縮	2 ビーム運転	3 Optics study	4 ML1 pulse aging	5 空洞4K
6 空洞4K	7 CW 300uA	8 施設検査 CW 300uA -> 0.9mA	9 ML2 pulse aging ビーム運転	10 バンチ圧縮	11	12 電子銃レーザー切替 空洞4K
13 電子銃レーザー切替 空洞4K	14 1.3GHz→ 162.5MHz運転	15 9~10時 加速器室内の 防災設備点検 午前: カソード交換と 光路調整	16 ビーム運転 大バンチ電荷	17	18	19 空洞4K
20 春分の日 空洞4K	21 振替休日	22	23 ビーム運転	24 LCS 大バンチ電荷	25 LCS CW 0.9mA @162.5MHz	26 昇温
27 空洞4K	28 Injector 電源故障 Main-linac Q値 測定	29 復帰 LCS CW 0.9mA @162.5MHz 大バンチ電荷	30 クレーン点検 電子銃450kV大バンチ電荷	31 終日2K	4/1 昇温	4/2

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

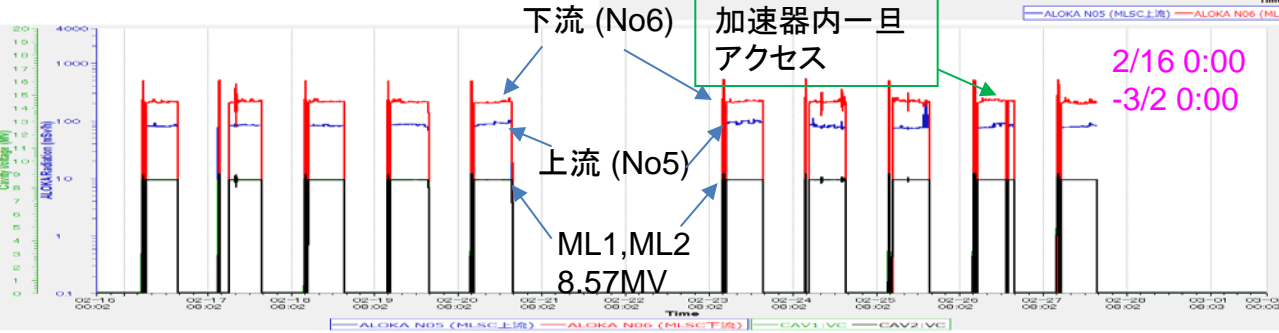
上流(ML1) (ALOKA No5) : 80mSv/hで安定
 下流(ML2) (ALOKA No6) : 200-220mSv/hで安定。

Pulse aging
 空洞エージング Q値測定 Start
 beam運転

1/26 0:00
 -2/2 0:00



施設検査
 30uACWビーム 2/2 0:00
 -2/16 0:00

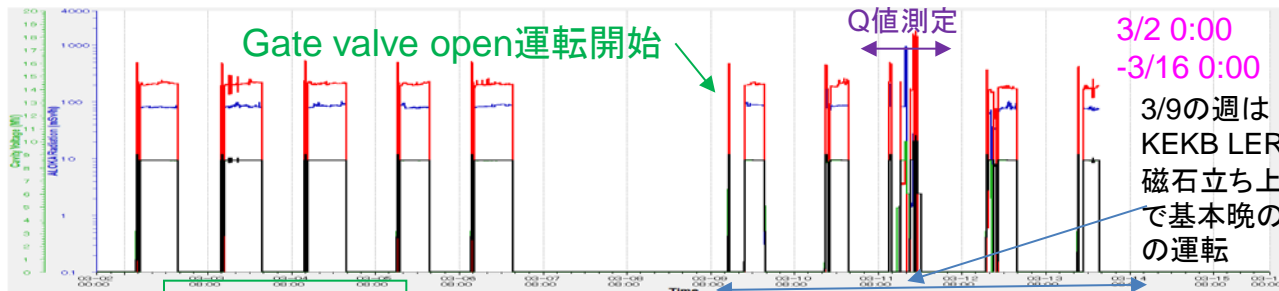


2/16 0:00
 -3/2 0:00

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。

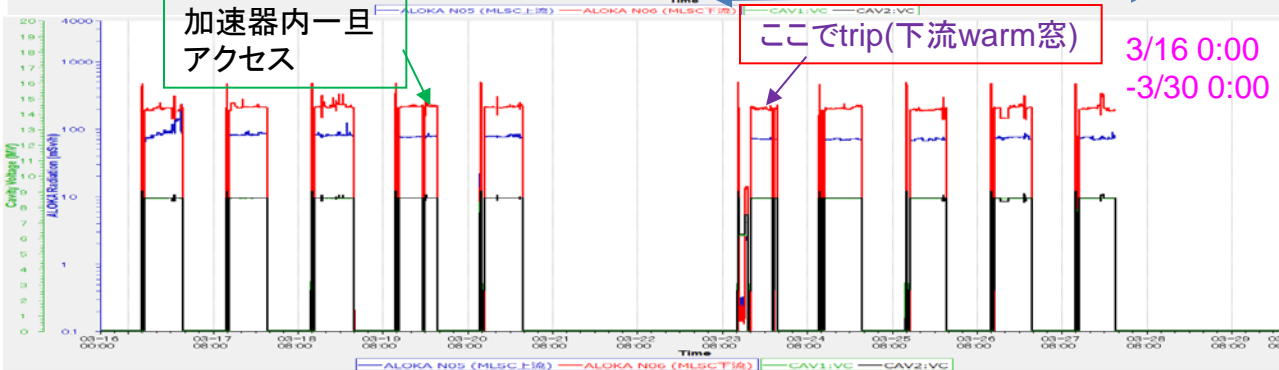
3/16以降は本格的にGVを開けっ放しでの運転となっているが、その際でもradiationが大きく増えることがない。
 最終週のLCS実験時もradiationが最後まで増えることはなかった。

↓
10MV運転へtry

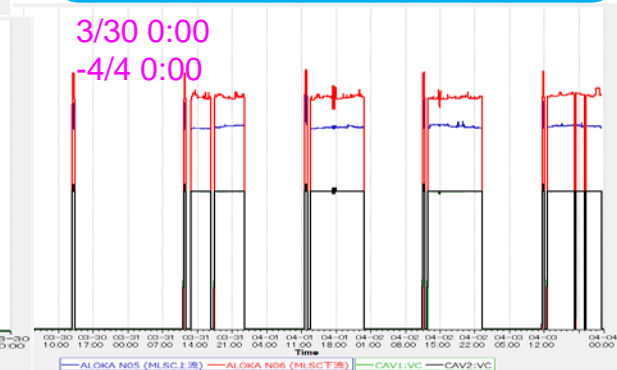


3/2 0:00
 -3/16 0:00

3/9の週はKEKB LER電磁石立ち上げで基本晩のみの運転



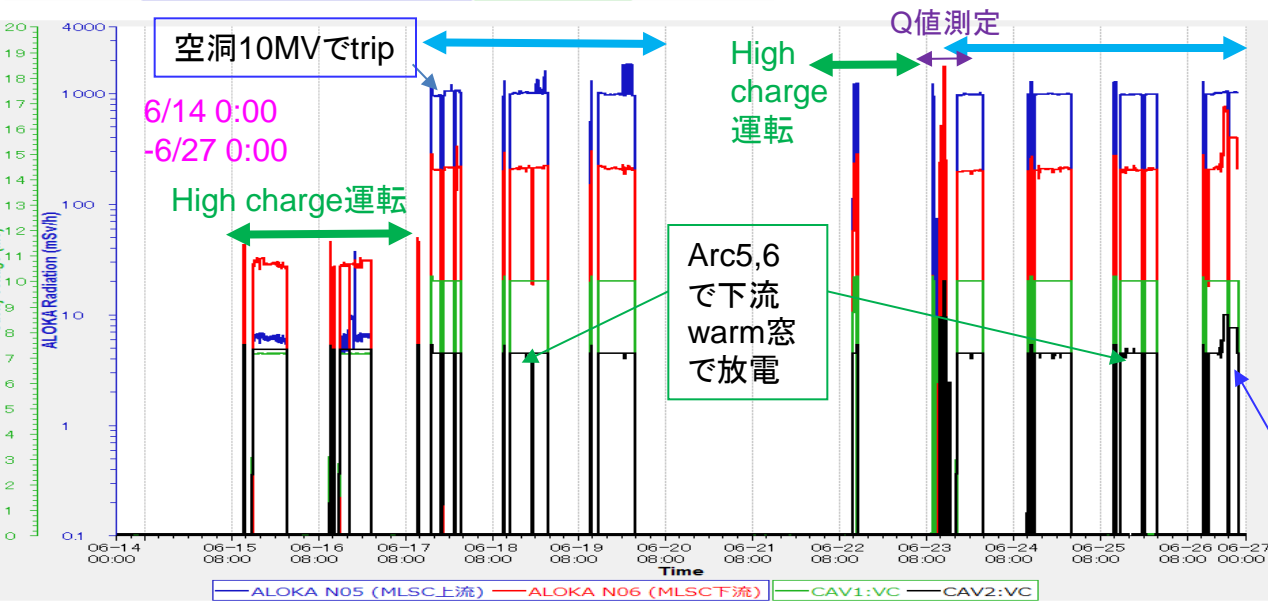
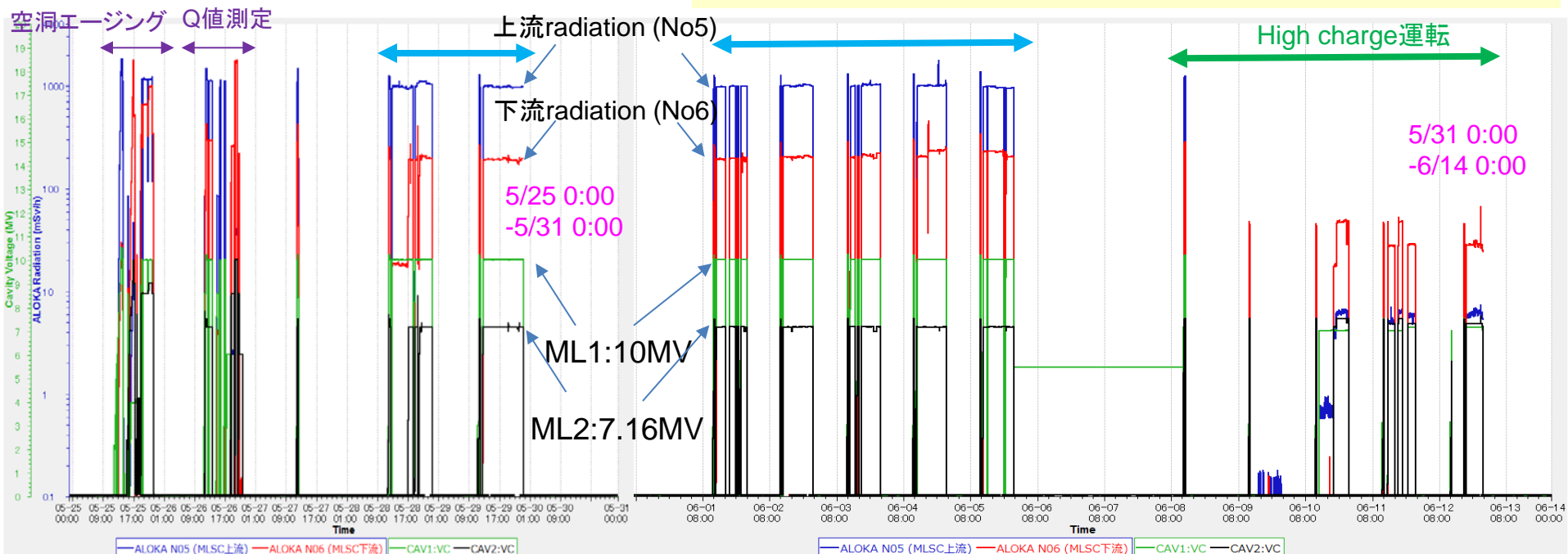
3/16 0:00
 -3/30 0:00



3/30 0:00
 -4/4 0:00

(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
 がないと空洞の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。

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。

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 ML1,2

- 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。

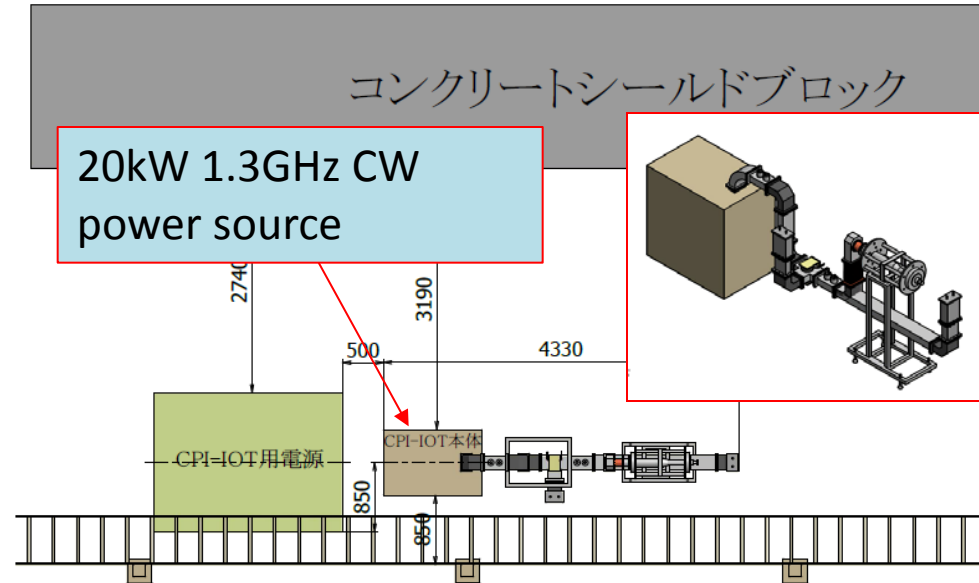
カプラー内部では位相がずれるとカプラー内の定在波の位置がずれ、定在波の位置がmicrophonicsがあると、多少変わり、長期でっていると放電することがあか？。

--> 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。

(A) He process用カプラースタンドの全体

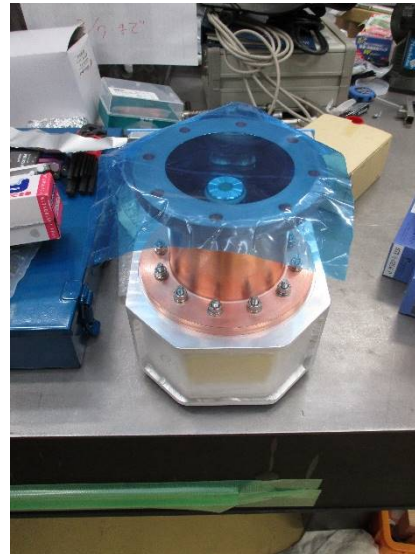
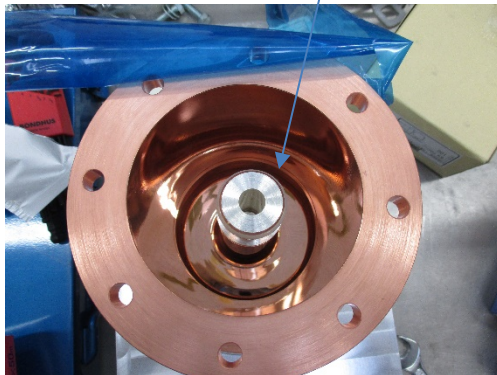
cERLでのテストスタンド 加速器室内

- 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た。(RF Grpのサポートの元)。2016月1月からカプラーテストを開始した。



ドアノブ設計 & 製作

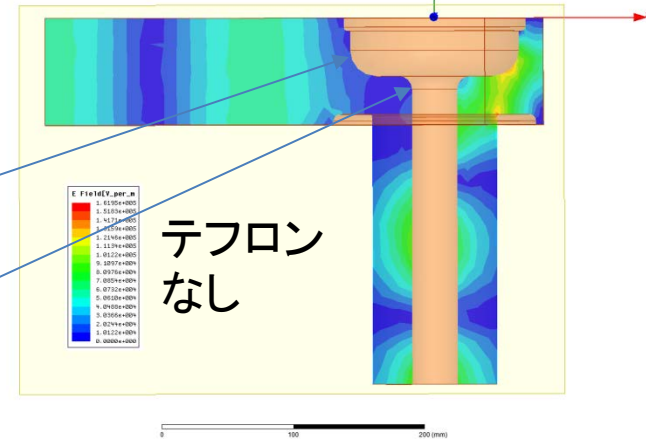
この部分にあったテフロンを無くした。



RF設計

Rdoor1
15mm→20mm

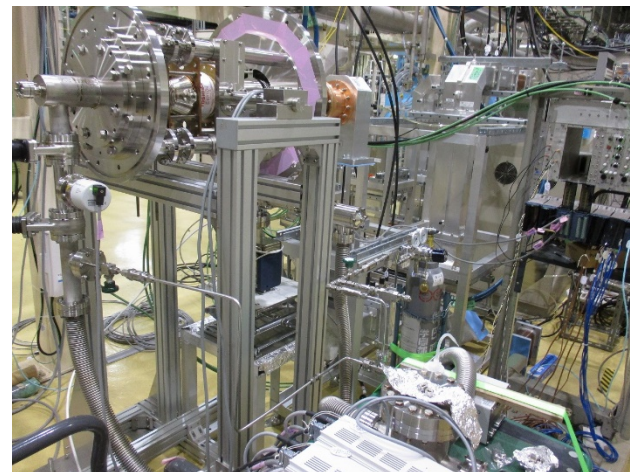
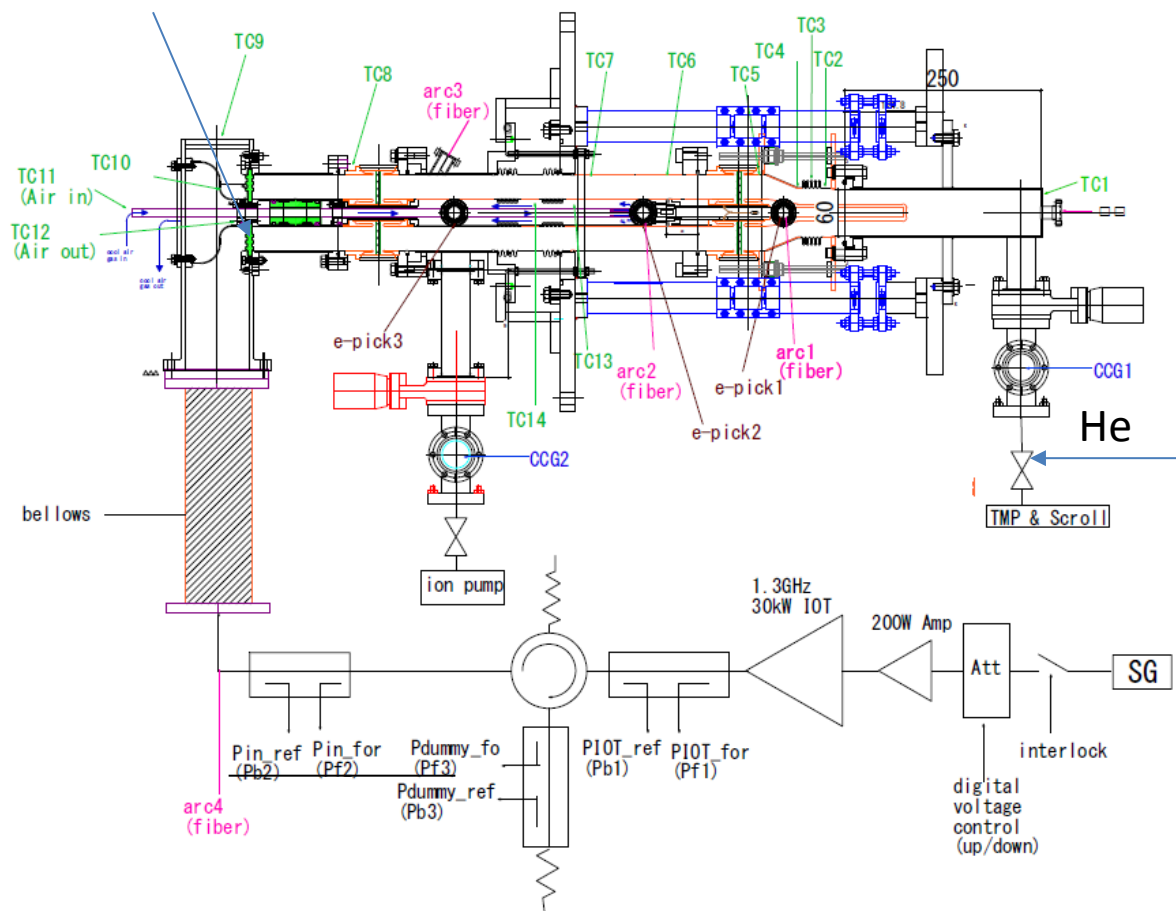
Rdoor2
15mm→10mm



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

テフロンは
ありません。

(A) 今回の測定(setup)



Cold側にHe bombと
variable leak valveを
用意してHeを入れる
準備は整えた。上写
真参照。この前にま
ずはカプラーのエー
ジングを1月末～2月
後半まで行った。

couper test stand monitor setup
2016.1.19 Hiroshi Sakai (ver1.0)

エージングの様子。

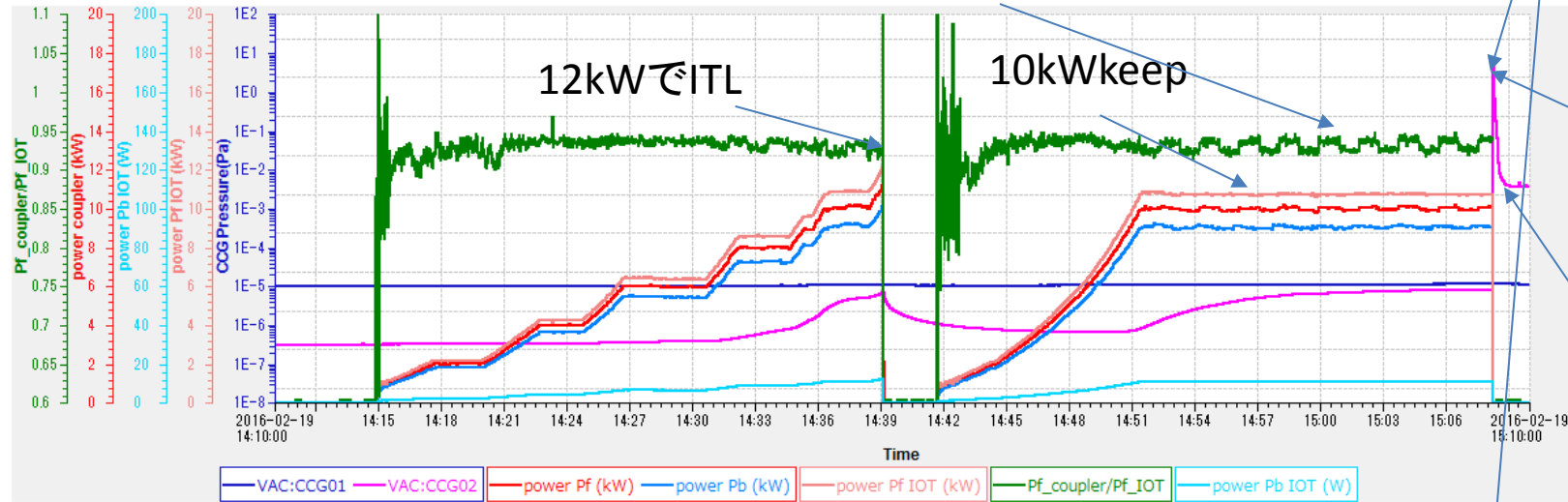
30usからpulse aging start (30us → 100us → 500us → 2ms
→ 10ms)と11kWまで特に問題なし。Agingも問題なしでそ
の後にCW運転に変更。

(A) カプラースタンドCW 運転 (2016/2/19)

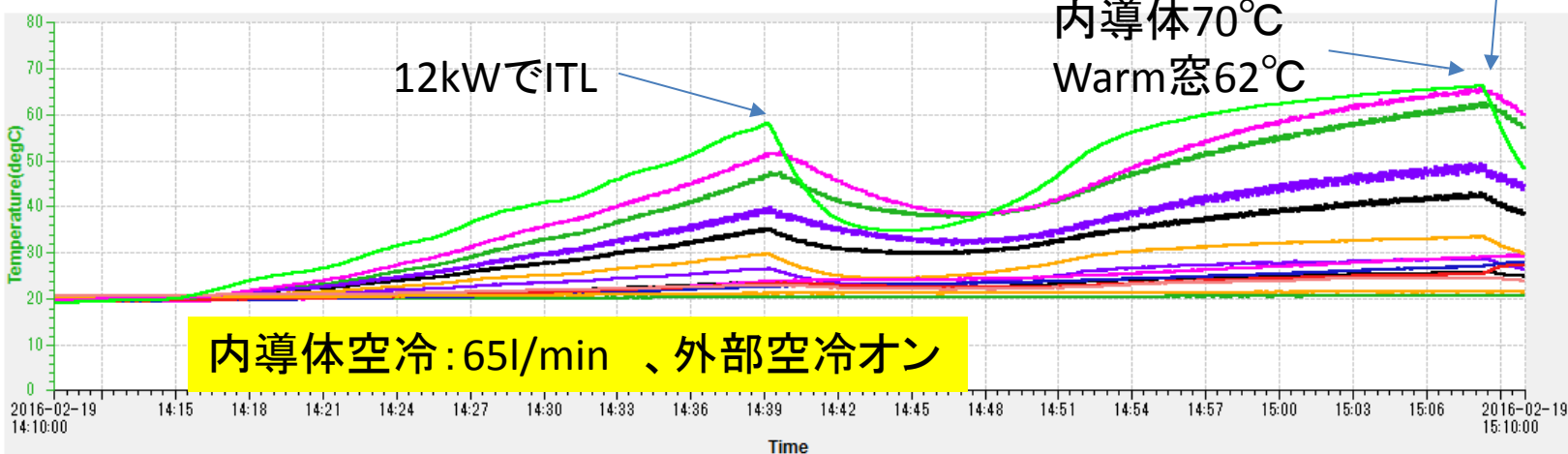
- 11.5kWまでのpulseエージングが進んだので、CWに運転モードを変えて最後に熱負荷checkを行う。
- 10kWで20分keep後warm真空、& arc③ITL、warm窓側の真空の大リークが起きる。

Pf_coupler/Pf_IOT ratio変わらず

Warm真空 & arc③ITL



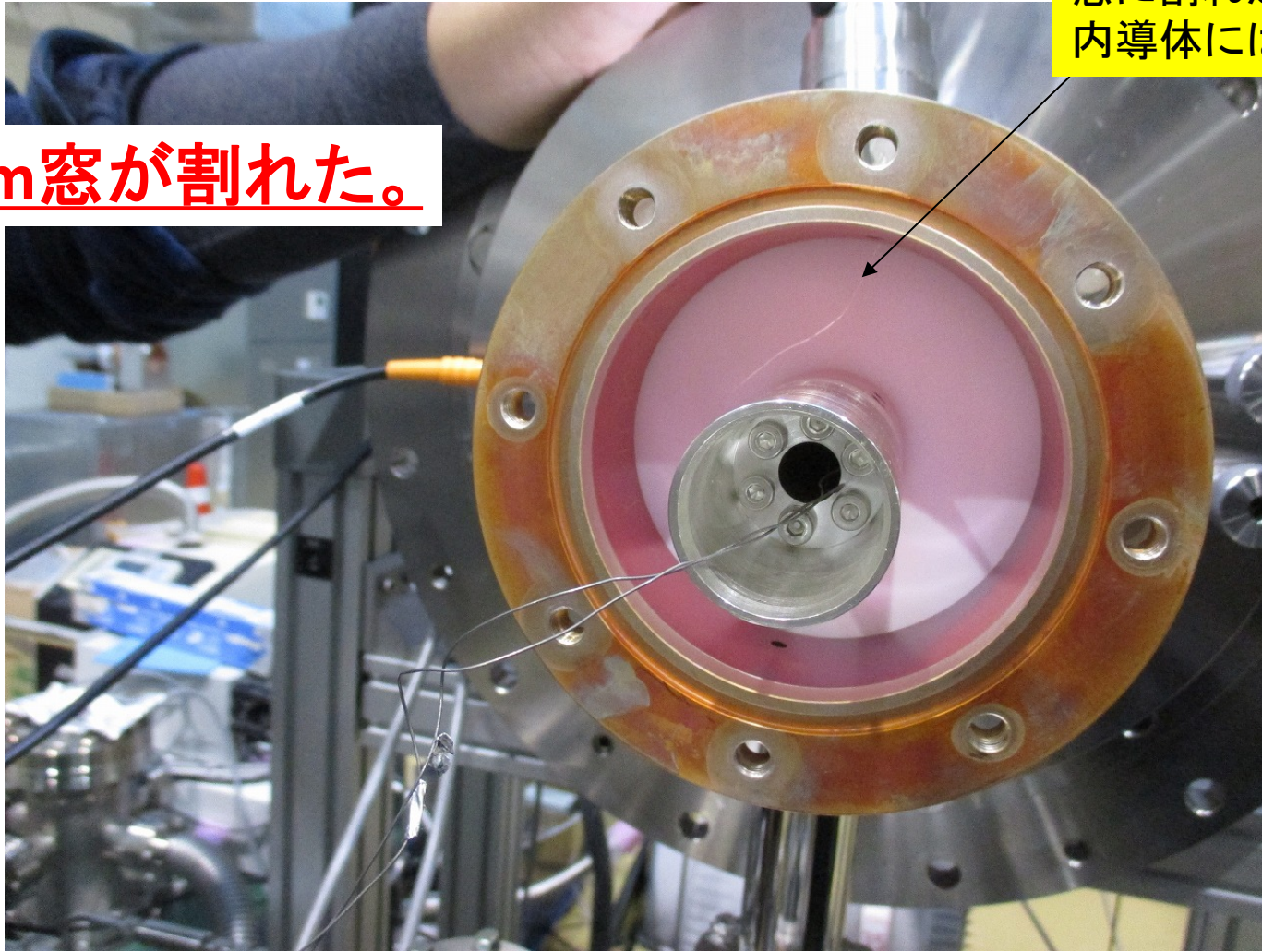
内導体70°C
Warm窓62°C



(A) warm窓check

窓に割れが見られた。
内導体には直接亀裂無

Warm窓が割れた。



カプラースタンドをばらし、warm窓の真空側も調べたが、大きな放電痕もなかった。今回ドアノブのテフロンを失くしたため、ドアノブの熱変形が内導体に直接、伝わり、メカニカルに窓を割った可能性が高い。

結果:He gasを入れるまではできず。
Warm窓を作り直す必要あり。ドアノブも改善必要か？

予備スライド・入射空洞

パルス・エージングの目的: 入射空洞の履歴

Pulse Agingの目的

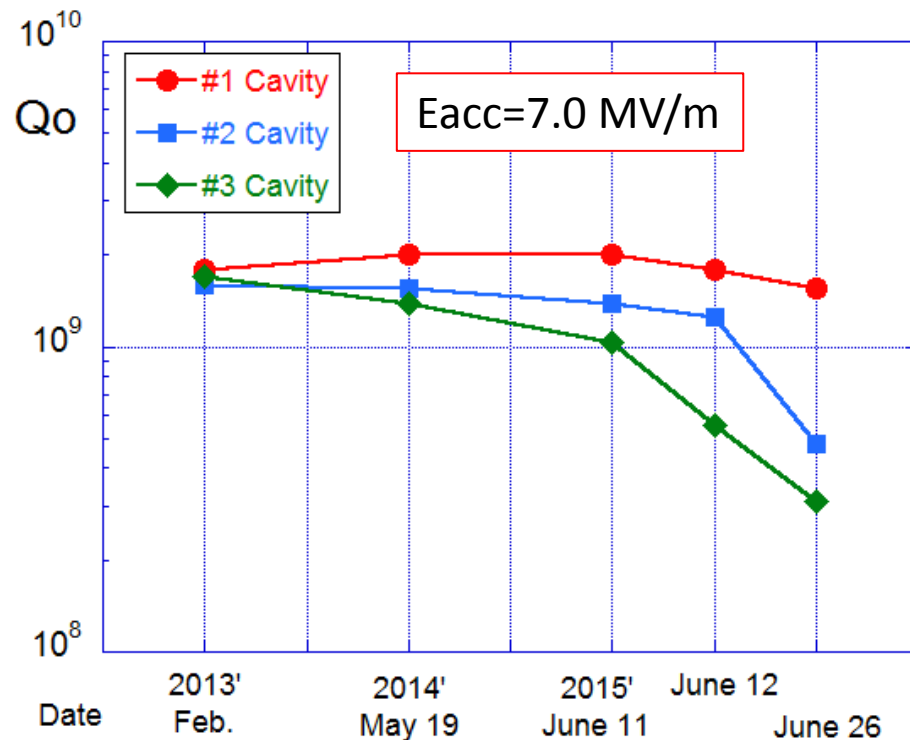
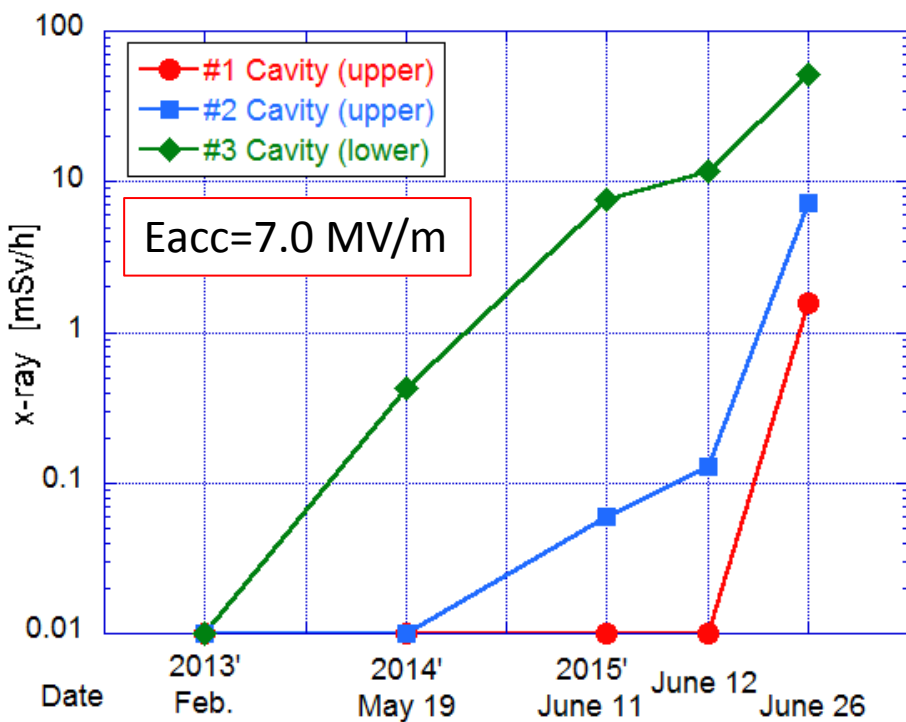
入射空洞は立上げ直後から2015.6月の運転までで、Field Emissionにより徐々に空洞性能が低下している。Pulse AgingによりFEを取り除き回復させる。

Pulse Agingを選ぶ理由

STFでは低電界でのFEはPulse Agingで取り除かれる現象が頻繁に見られる、ERL入射空洞でもPulse Agingにより低電界でのFEを取り除くことができると期待できる。

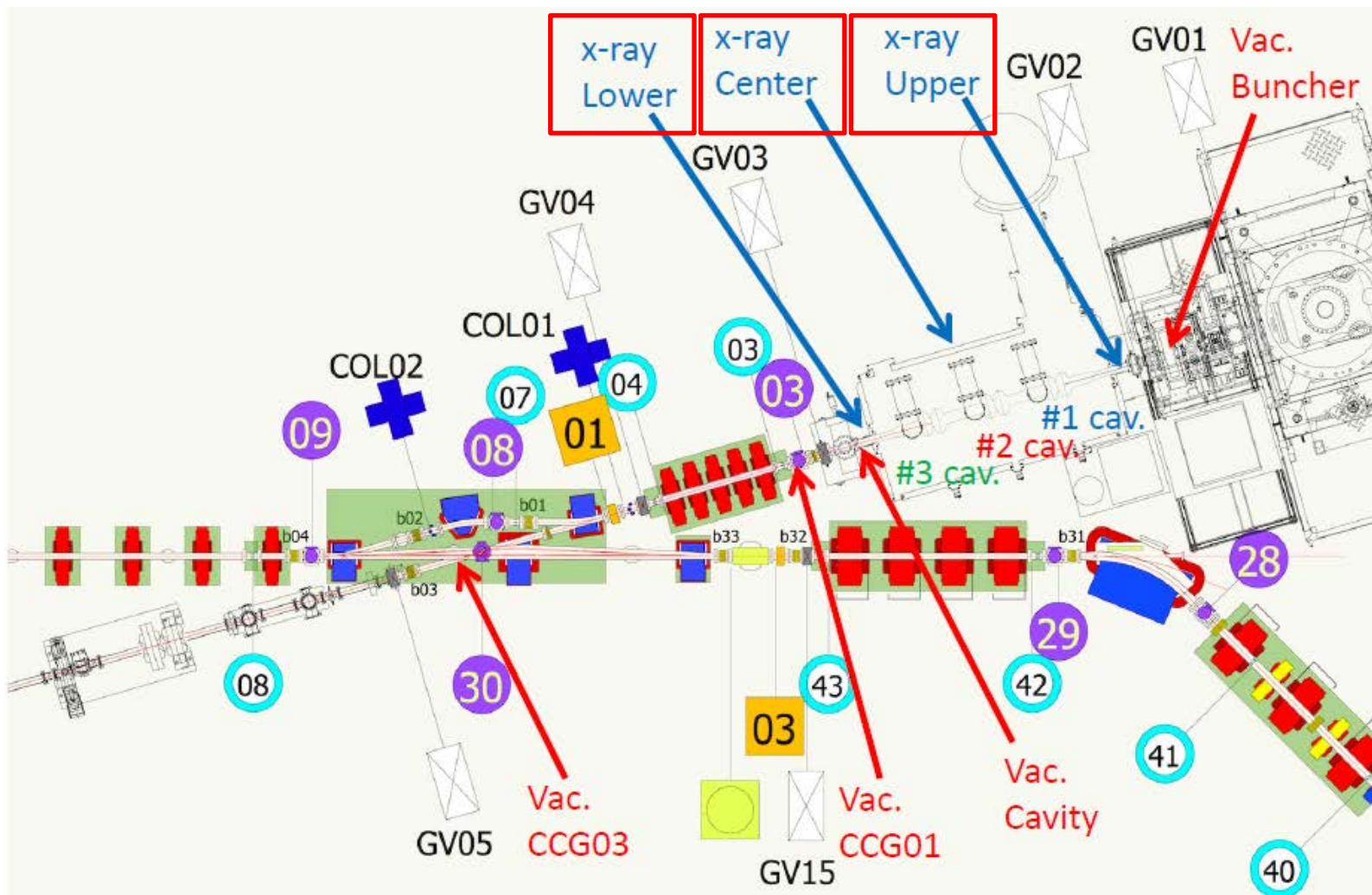
Pulse Agingの方法

可能な限りのShort Pulse から徐々にPulse 長さを伸ばし、低熱負荷、FEの雪崩を制御して高電界まで印加して、FEの発生源を散らす。



パルス・エージングの目的： X線モニターの配置

- X線モニターが空洞のField Emission状況を最も良く反映する。
- X線モニターは空洞モジュールの上流、側面、下流に1つずつ取り付けている。
- エージングは空洞ゲートバルブを閉めきって行っている。

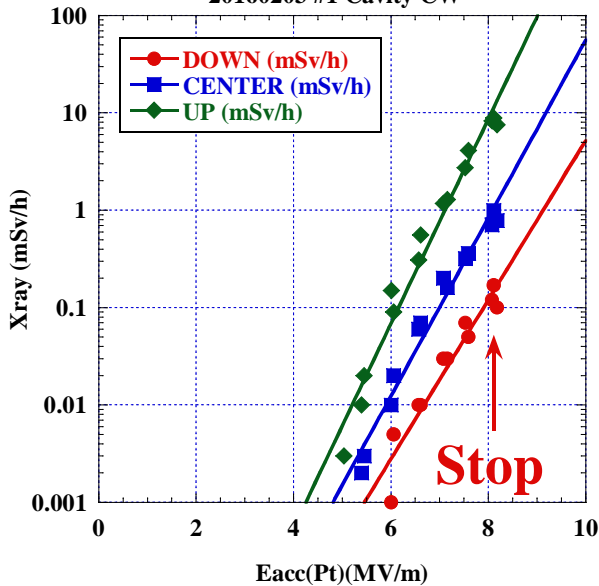


パルス・エージングの目的: パルスエージング前の状況

- 2016年2月のパルスエージング直前にCWで測定した、各空洞単体の放射線量を示す。
- 昇温、冷却によるフィールドエミッションの改善は見られない。
- 中央空洞はフィールドエミッション電子の衝撃によるクエンチが起こる状況となっていた。

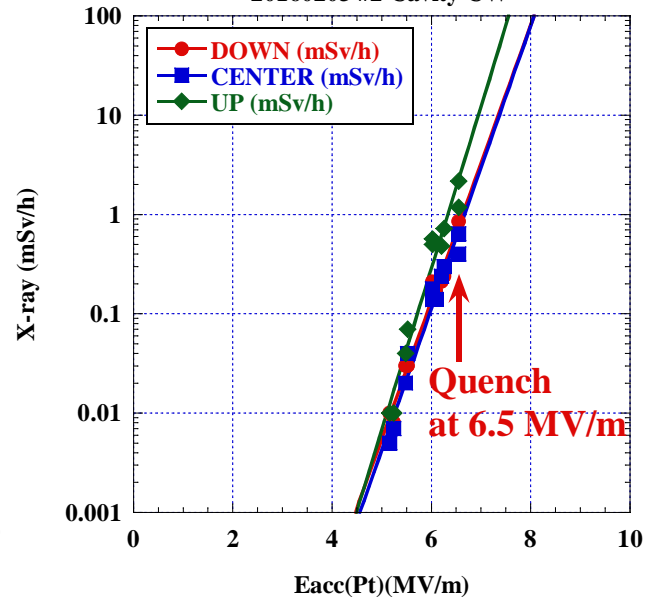
#1/上流空洞

20160203 #1 Cavity CW



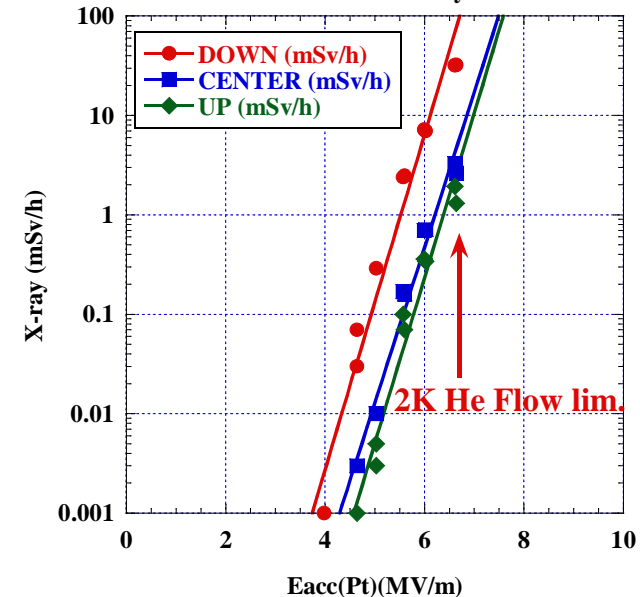
#2/中央空洞

20160203 #2 Cavity CW



#3/下流空洞

20160203 #3 Cavity CW



パルス・エージングのセットアップ: パルス波形

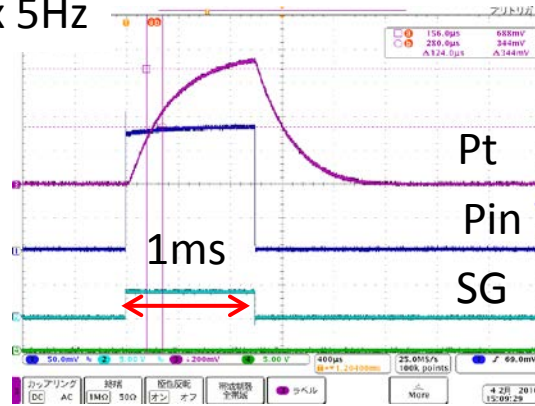
空洞に電界が十分に立つだけのパルス幅からエージングを行っている。

#1/上流空洞

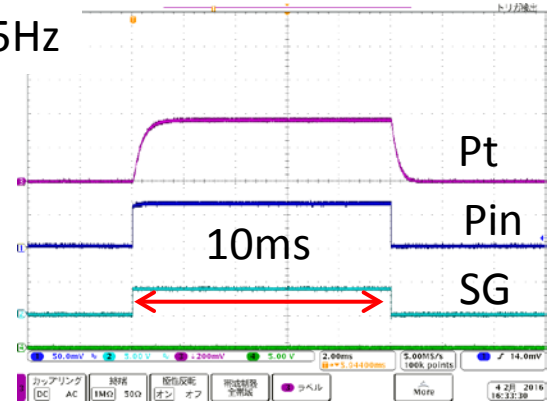
$$QL=1.26 \times 10^6$$

$$T(1/2)=106 \mu\text{s}$$

1msx 5Hz



10msx 5Hz

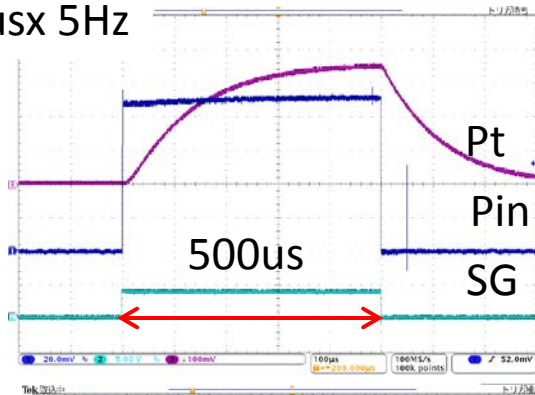


#2/中央空洞

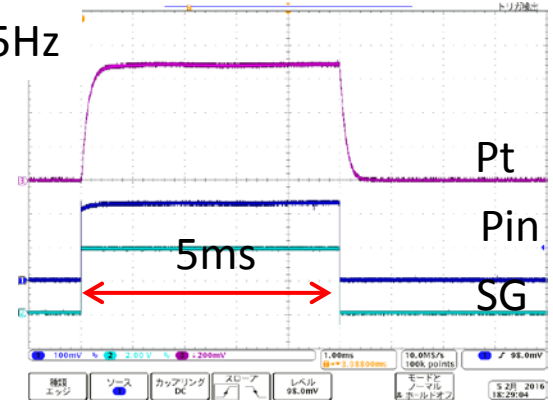
$$QL=5.3 \times 10^5$$

$$T(1/2)=45 \mu\text{s}$$

500usx 5Hz



5msx 5Hz

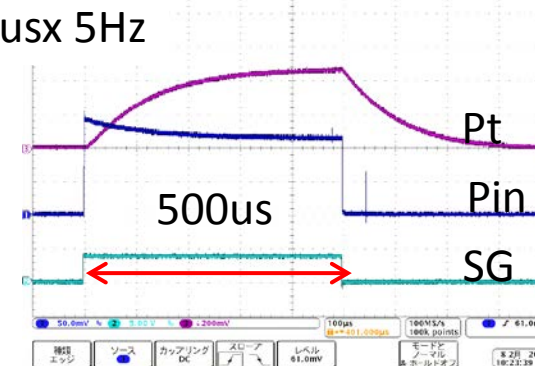


#3/下流空洞

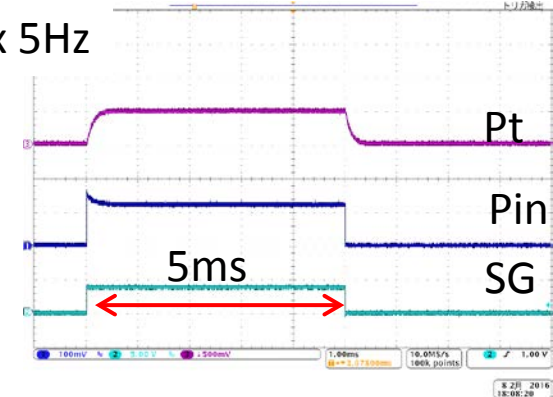
$$QL=5.0 \times 10^5$$

$$T(1/2)=42 \mu\text{s}$$

500usx 5Hz



5msx 5Hz



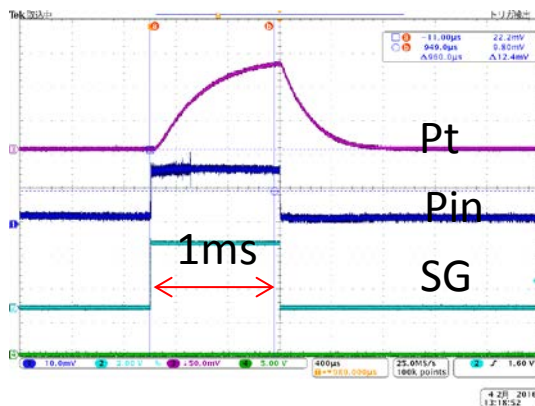
パルス・エージングのセットアップ: インターロック

パルスエージングのために、RFグループにQLインターロックを作成してもらった。

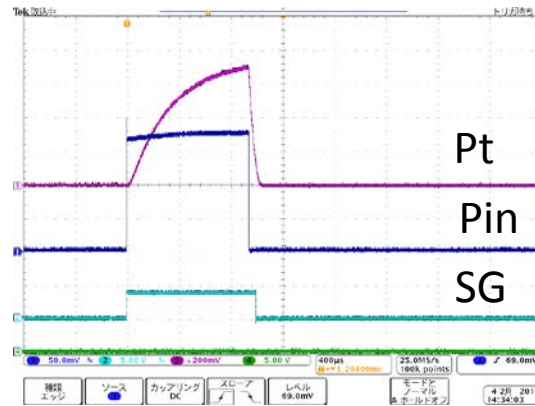
インターロック	#1空洞	#2空洞	#3空洞
真空 (Base 0.97×10^{-7} Pa)	5×10^{-7}	5×10^{-7}	5×10^{-7}
ARCモジュールの目盛	4と2	6と4	4と4
QL	8×10^5 (Base 1.26×10^6)	4×10^5 (Base 5.3×10^5)	4×10^5 (Base 5.0×10^5)

傾きからQLを計算して設定値を下回ればインターロックが働く。

通常



QL インターロック



パルスエージングのトレンド: #1上流空洞の状況

1msx5Hz

10msx5Hz

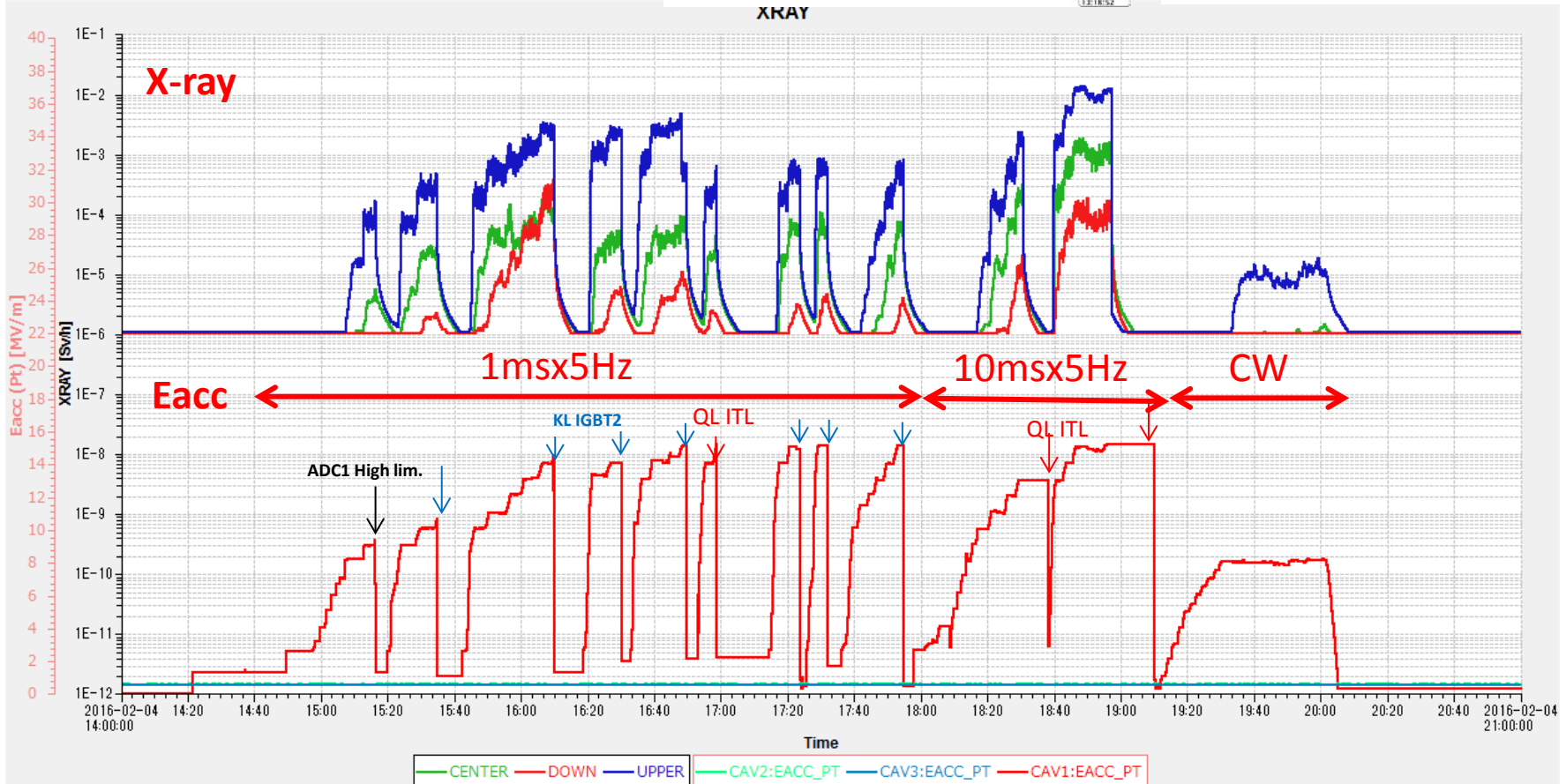
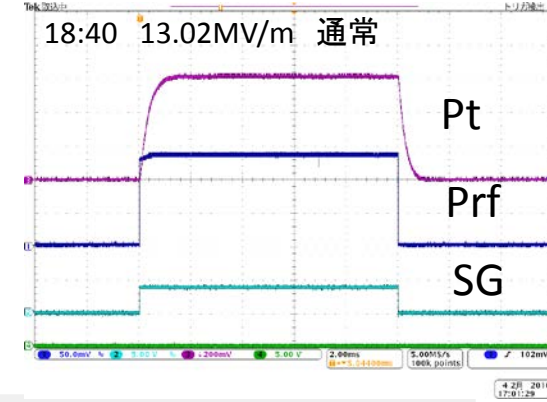
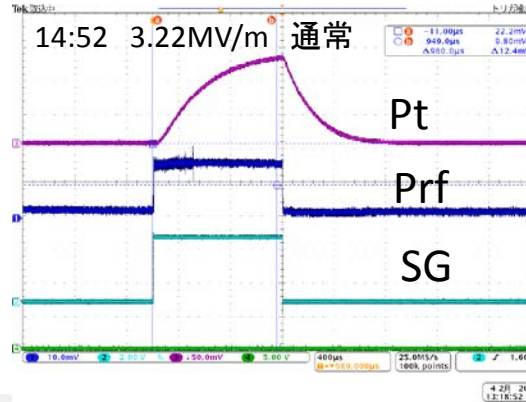
1msx5Hzと10msx5Hzを使用。

実Aging時間:3時間

最大Pin 16kW

$QL=1.26 \times 10^6$

$\tau(1/2)=100\mu s$



パルスエージングのトレンド: #1上流空洞の状況

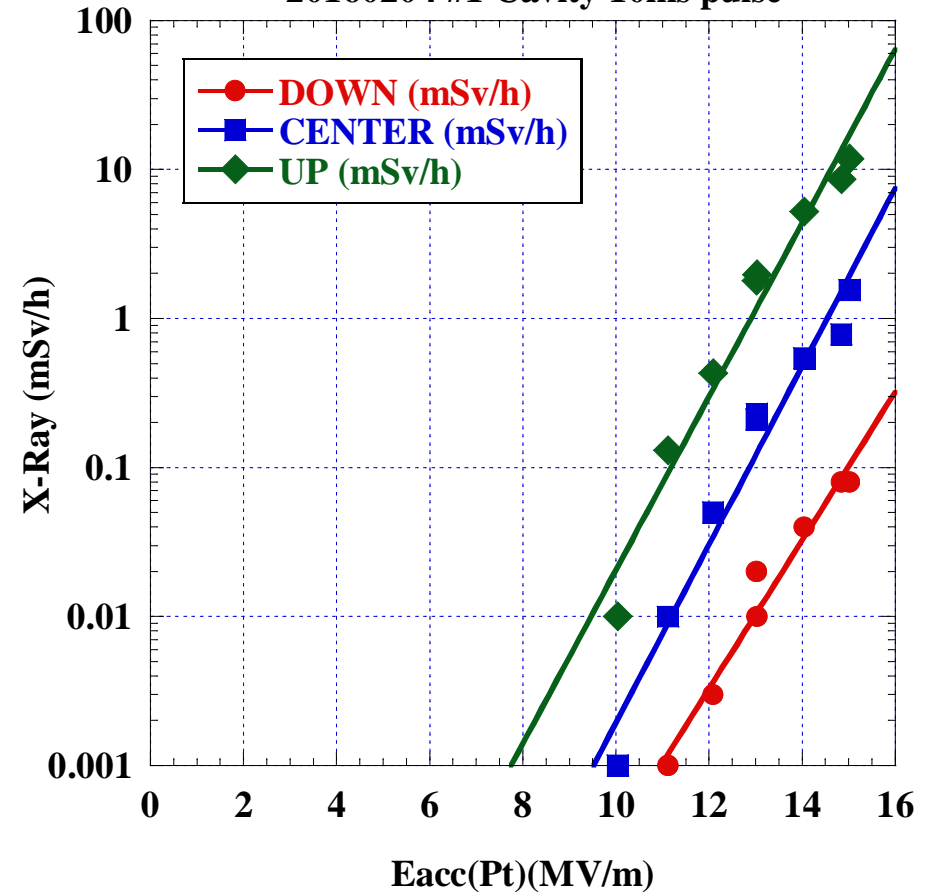
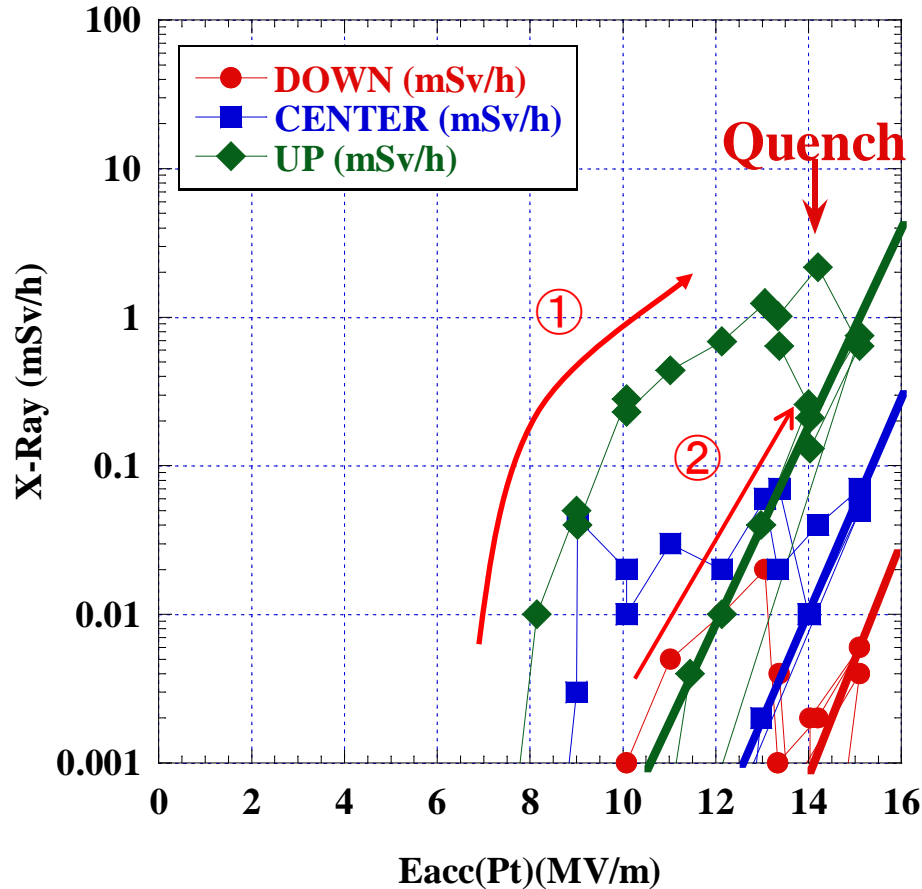
1msパルスのエージング中クエンチを経ることで、大幅なX線減少効果が見られた。
投入電力の上限により制限された。

1ms x 5Hz Pulse

10ms x 5Hz Pulse

20160204 #1 Cavity 1ms pulse

20160204 #1 Cavity 10ms pulse

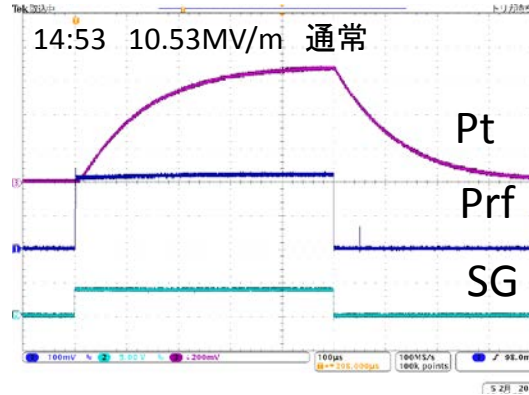


パルスエージングのトレンド: #2中央空洞の状況

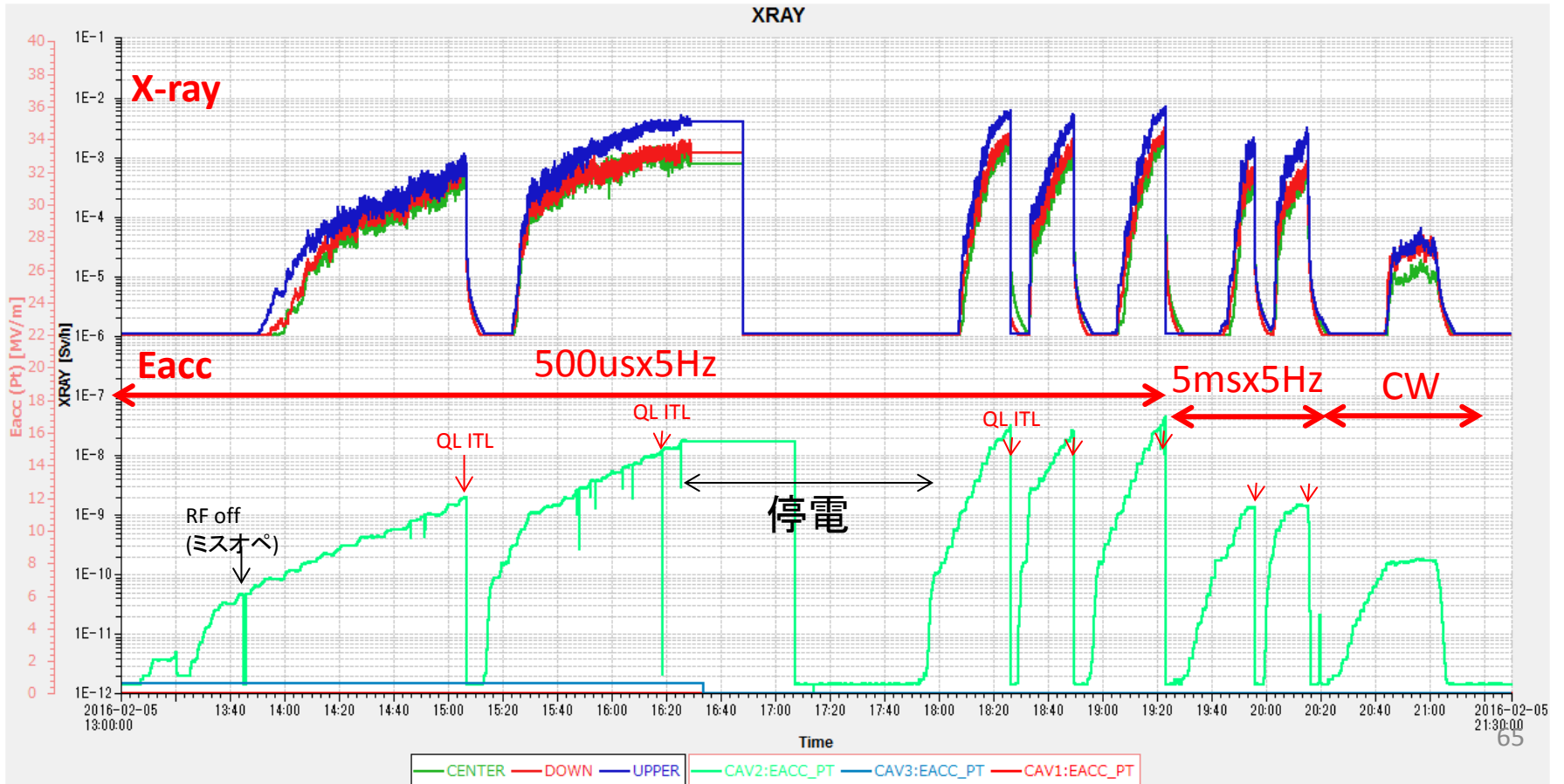
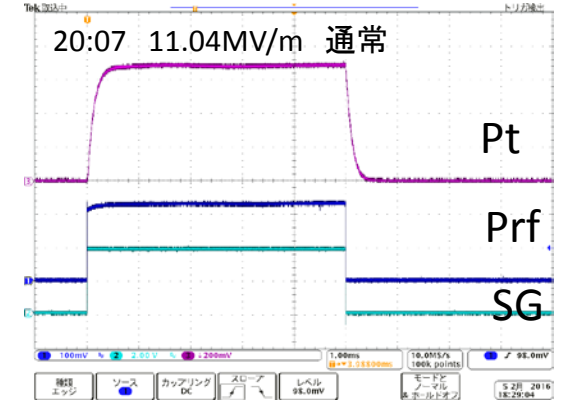
500usx5Hzと5msx5Hzを使用。
 実Aging時間:3時間
 最大Pin 40kW

QL=5.5x10⁵
 Tau(1/2)=50us

500usx5Hz



5msx5Hz

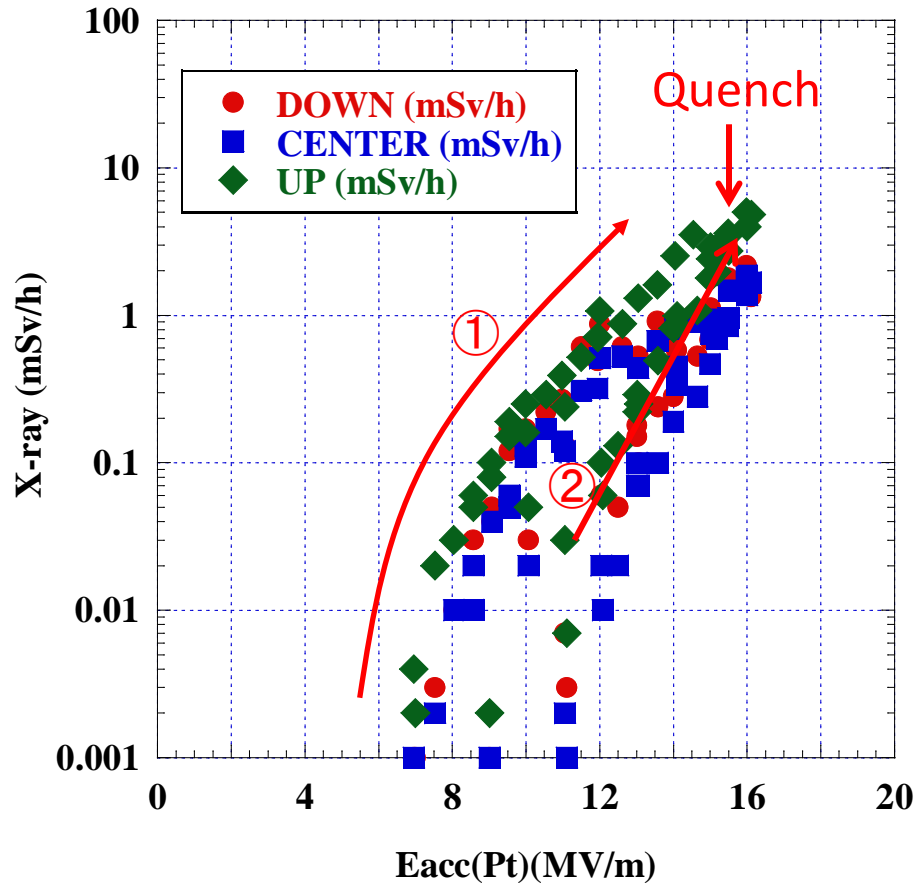


パルスエージングのトレンド:#2中央空洞の状況

500usパルスのエージング中クエンチを経ることで、大幅なX線減少効果が見られた。
16MV/m以上の電界はクエンチにより制限された。

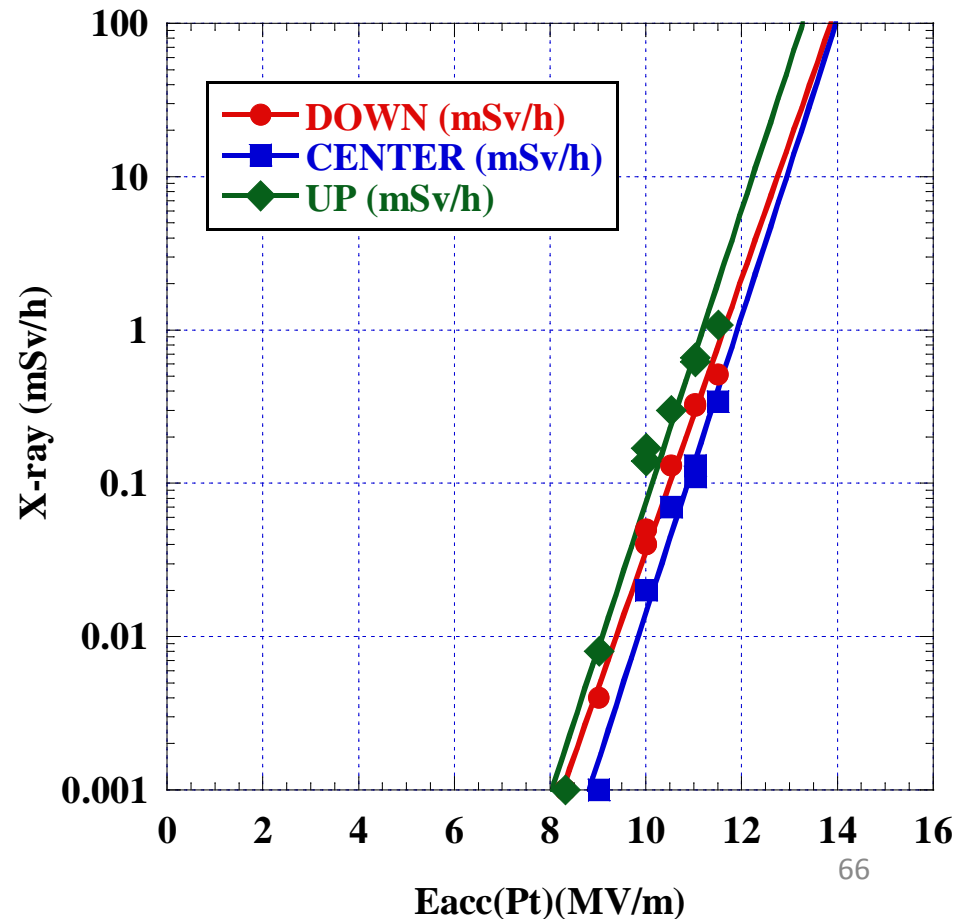
500us x 5Hz Pulse

20160205 #2 Cavity 500us pulse



5ms x 5Hz Pulse

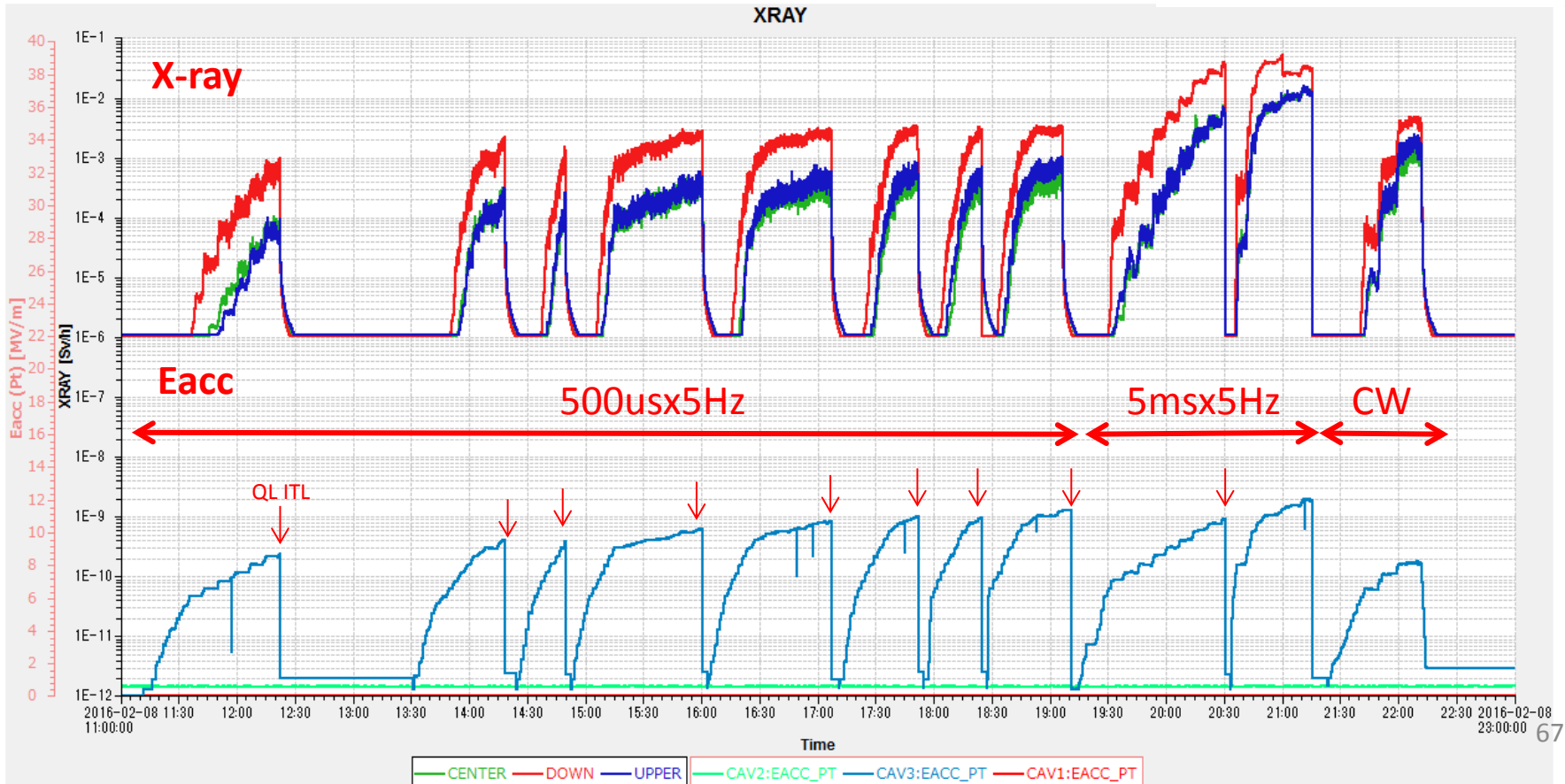
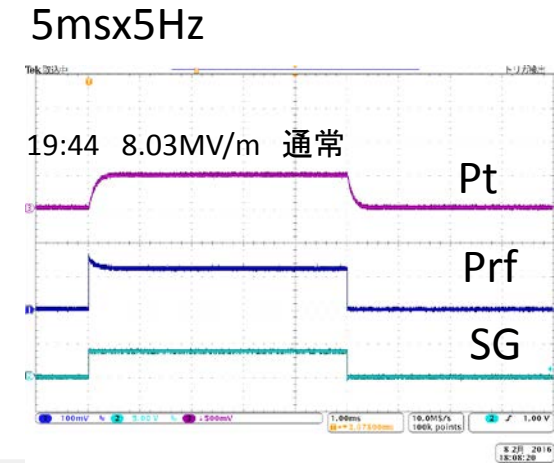
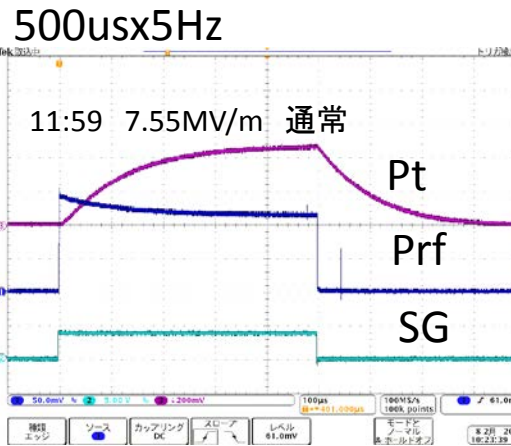
20160205 #2 Cavity 5ms pulse



パルスエージングのトレンド: #3下流空洞の状況

500usx5Hzと5msx5Hzを使用。
強力なFE-Quenchで~12MV/mまでのAging
時間の都合でAging Stop

最大Pin=18kW
QL=5.5x10⁵
Tau(1/2)=50us

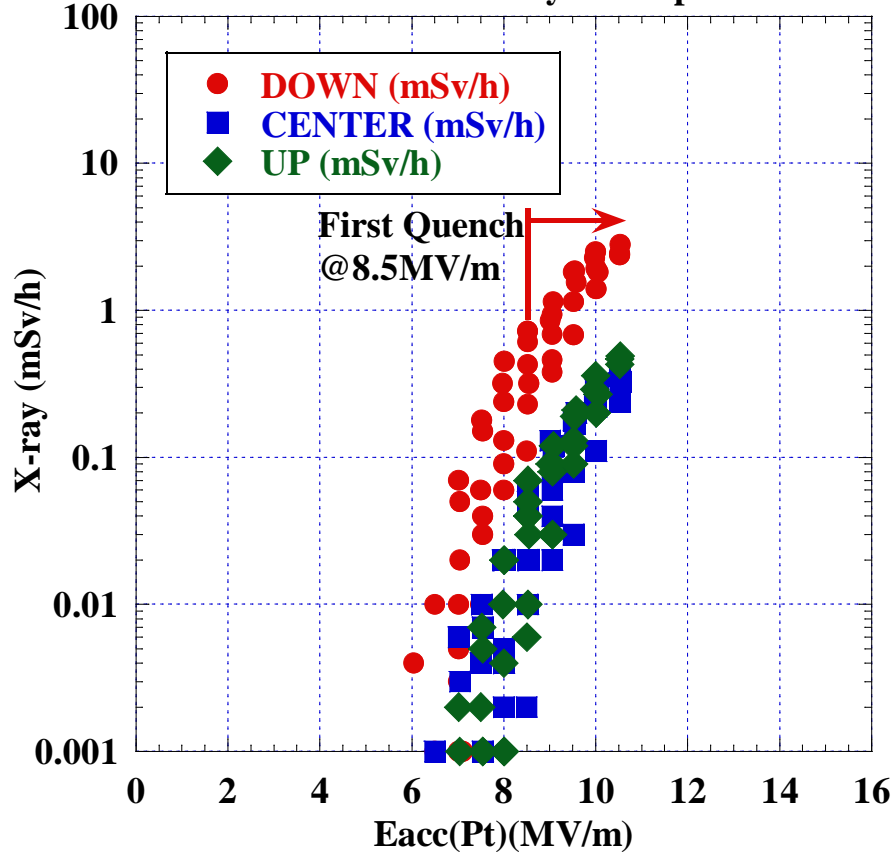


パルスエージングのトレンド: #3下流空洞の状況

クエンチを経るごとに到達電界は徐々に伸びるが、時間の都合でこれ以上のエージングは行えなかった。

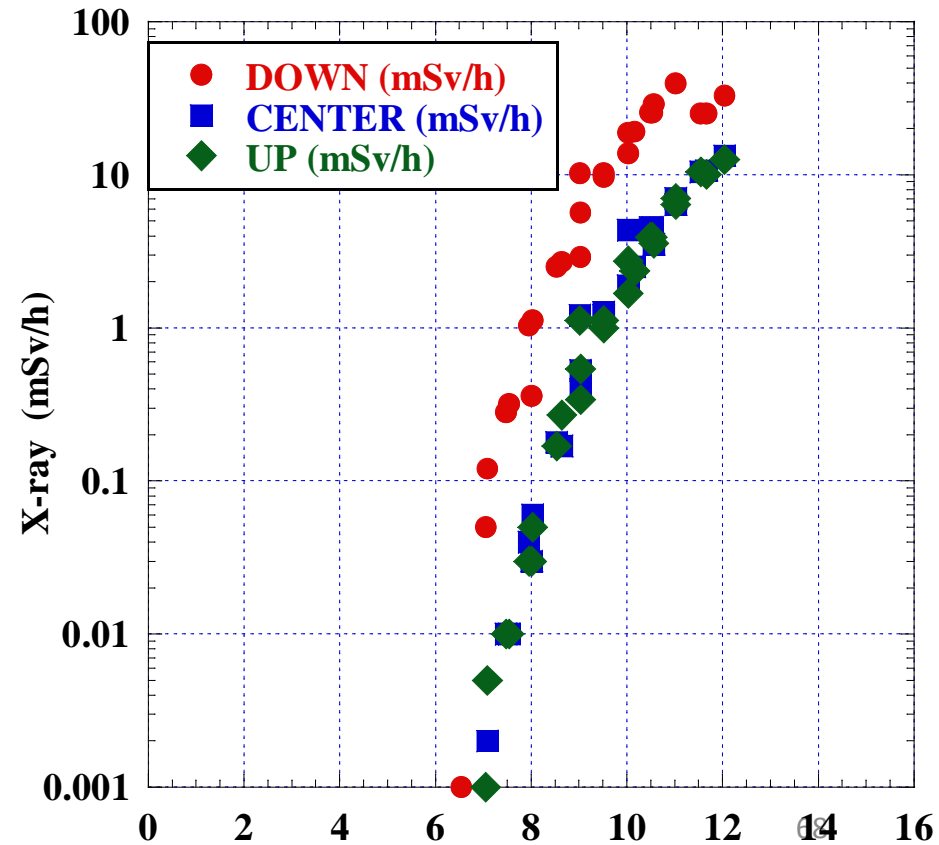
500us x 5Hz Pulse

20160208 #3 Cavity 500us pulse



5ms x 5Hz Pulse

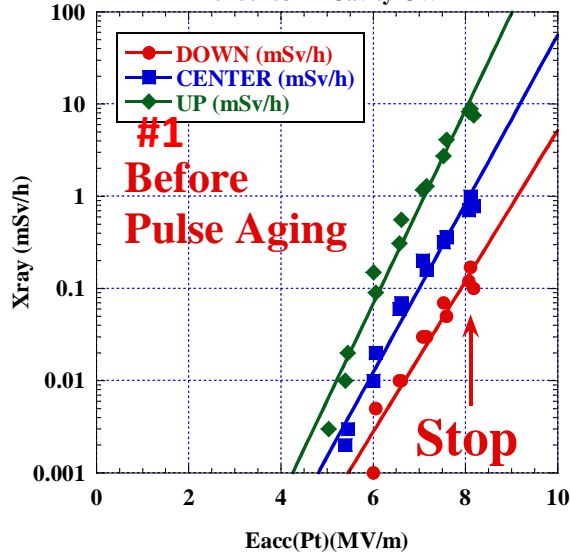
20160208 #3 Cavity 5ms pulse



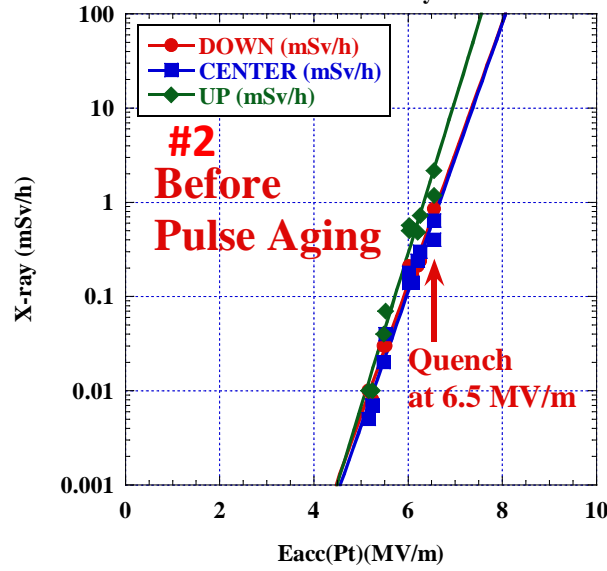
パルスエージングの効果: Pulse Aging前後の各空洞状況

大幅なField Emissionの改善が見られた。

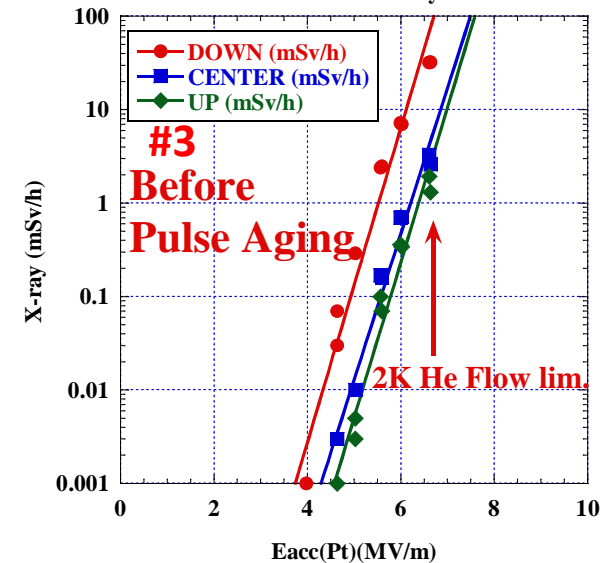
20160203 #1 Cavity CW



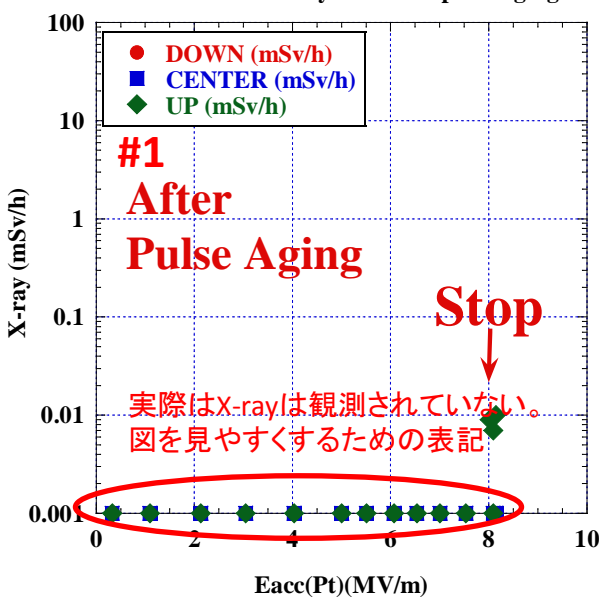
20160203 #2 Cavity CW



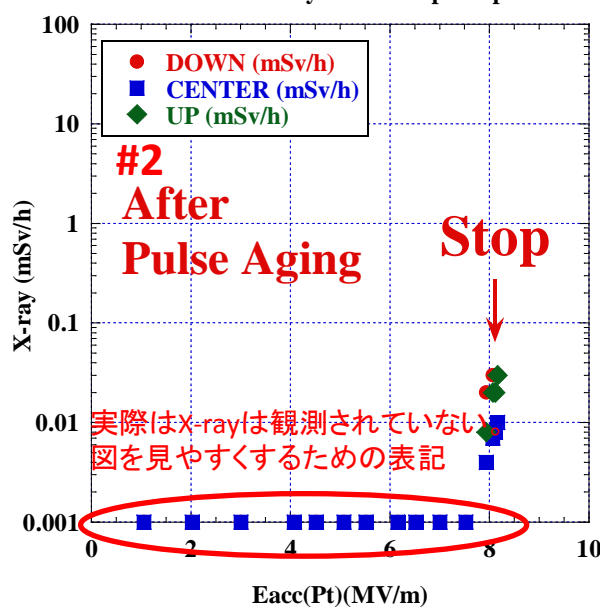
20160203 #3 Cavity CW



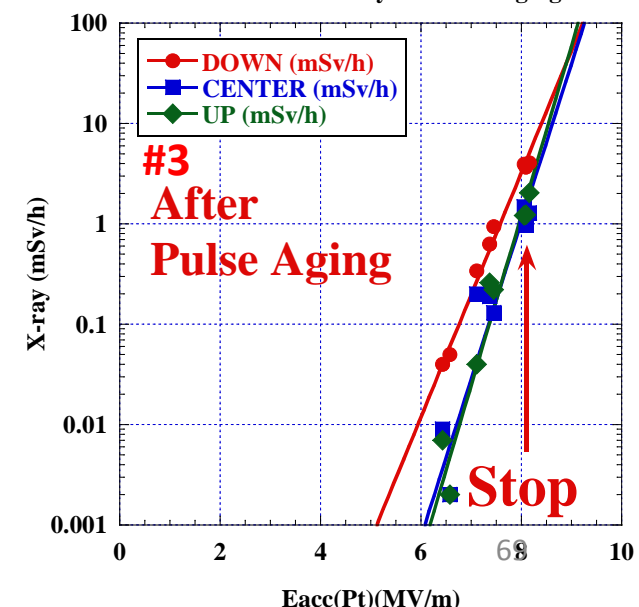
20160204 #1 Cavity CW after pulse aging



20160205 #2 Cavity CW after pulse process



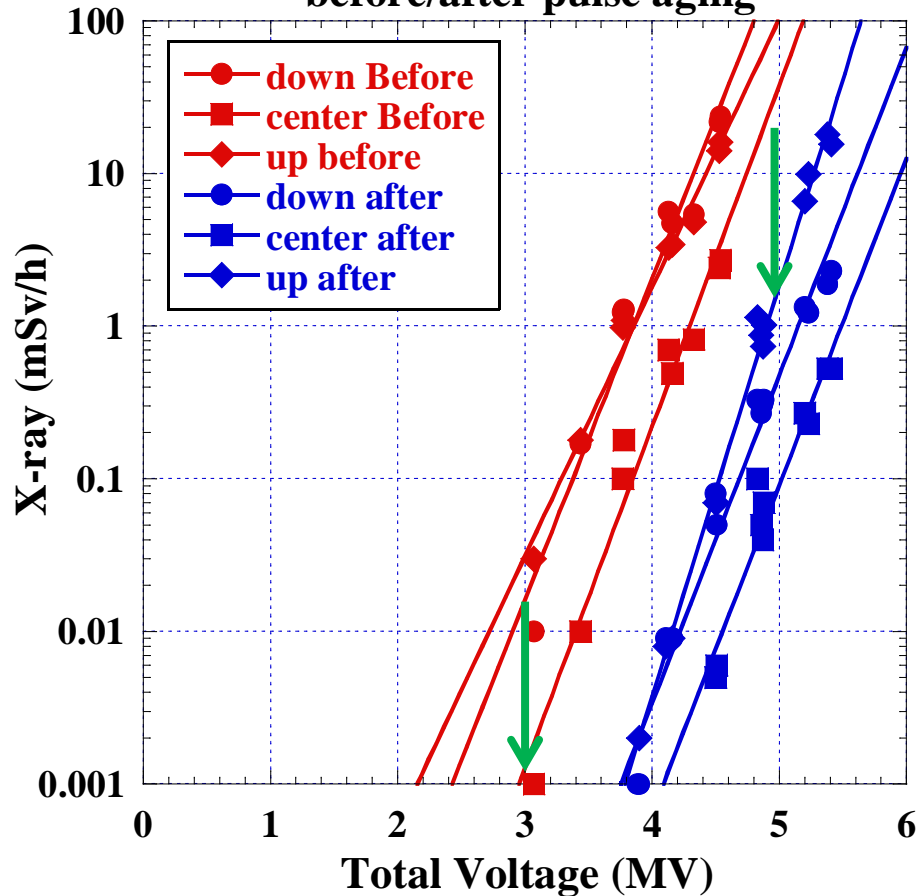
20160208 #3 Cavity CW after aging



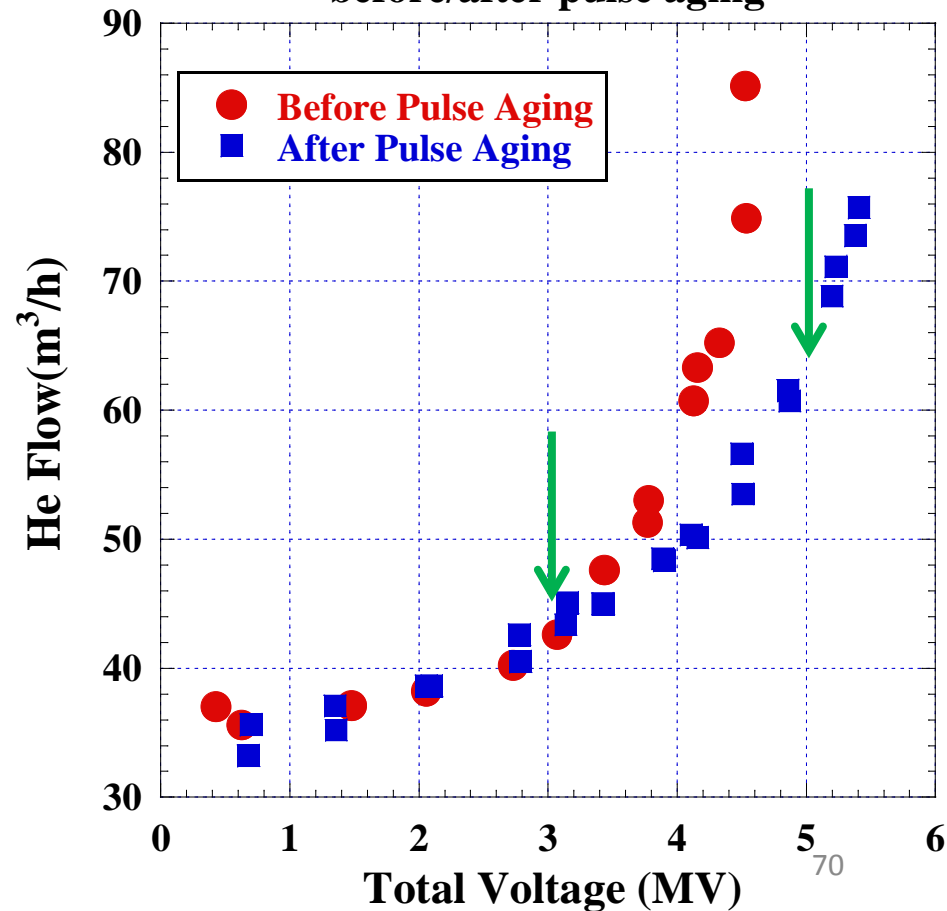
パルスエージングの効果 : Pulse Aging前後の空洞同時運転状況

- #1+#2+#3 空洞3台同時運転の比較
- 3MV運転
 - Field Emissionは無くなった。冷凍機負荷は10m³/h。
- 5MV運転
 - Field Emission強度は2ケタ減少。冷凍機負荷は25m³/h。
 - 主空洞との同時運転が可能になるまで回復した。

#1+#2+#3 Cavity performance
before/after pulse aging



#1+#2+#3 Cavity performance
before/after pulse aging



まとめ

- 昨年までの運転で、FEによりQ値が減少していたcERL入射空洞のPulse Agingを行った。
 - #1のPulse Agingは1ms x5Hzと10msx5Hzで行った。
 - #2のPulse Agingは500usx5Hzと5msx5Hzで行った。
 - #3のPulse Agingは500usx5Hzと5msx5Hzで行った。
 - #1,#2は最短パルスでのAgingで15~16MV/mまで到達。
1~2ケタのX-ray減少を確認できた。
 - #3は最短パルスで11MV/mまで、5msで12MV/mまで到達
- Aging前後のCW測定で各空洞のFE Onsetは
 - #1: 5MV/m ⇒ 8MV/m
 - #2: 5 MV/m ⇒ 8MV/m
 - #3: 4 MV/m ⇒ 6.5 MV/m
 - #1+#2+#3同時: 3MV ⇒ 4MVまで向上した。
- 入射空洞において8MV/m以下のFEは、
Eacc=15~16MV/mまでのPulse Agingにより取り除けることが分かった。

