

Jefferson Laboratory訪問記

(CEBAF He processing実験参加 +Jlab SRFの現状のactivityについて)

2015/12/11

阪井寛志

・訪問の目的:

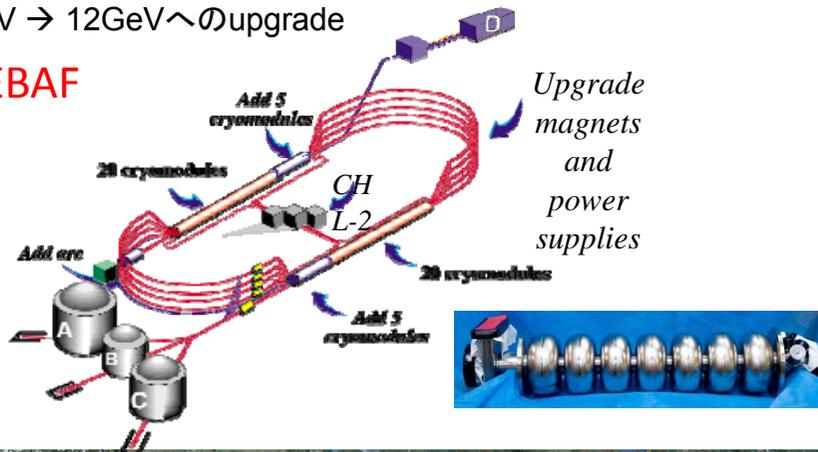
CEBAFでC100モジュール組込み後に12GeV運転を開始したが、そのモジュールの性能劣化の向上を行うため、今年の6月～9月にHe processingを行うことになった。そのHe processingの様子と効果を見るために実験に参加した。またJlabの現状視察も兼ねて訪問を行った。

Thomas Jefferson National Accelerator Facility (Jefferson Laboratory)

CEBAF: 主に原子核実験に使用し、17年間運転。5セル空洞を8個のCryomoduleを今まで使用していたが12GeVupgradeに7cell空洞を追加

6GeV → 12GeVへのupgrade

CEBAF



Newport News, Virginia 39°51'28.00" N 96°07'33.60" W

CEBAF Accelerator



SRF Research and accelerator production facilities

Slide from Ari D. Palczewski

Jlab滞在中の日程

• Sep 9 (Wed), 2015

- 午前 9:00~12:00 色々一般的な事務手続き & 放射線教育
- 午後13:30~ **放射線テスト (Rad worker I test)** そのあと、放射線テスト合格後に、CEBAF加速器など入れるように事務手続き(カード作成)。
 - 50問中75%で合格(これに落ちると24時間待ってもう一度テスト。) 合格。
- **午後16:00~18:00 CEBAF加速器にてHe processingの様子をまずは見学。**

• Sep 10 (Thu), 2015

- 午前8:30~9:30 SRF meeting
- 午前9:30~12:00 SRF lab見学
(LCLS-II用のモジュールテストと組立治具など)
- **午後14:00~19:00 CEBAFでHe processing実験参加。**



• Sep 11 (Fri), 2015

- 午前8:30~9:30 SRF meeting
- **午前10:00~12:00 CEBAF加速器内でのHe processing用の装置などの現場見学。**
- **午後14:30~16:00 KEKでのHe processingの実験とCEBAFでの実験の違いについて議論。**
- **午後16:00~17:00 LCLS-II用cryomodule実験に少し参加。**

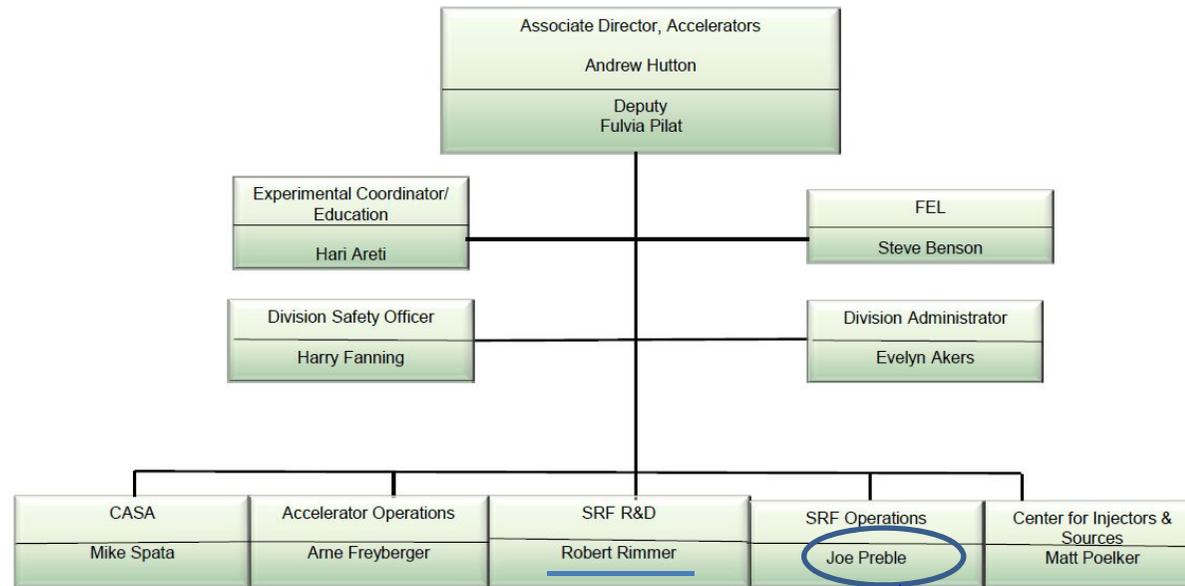
放射線テストを受ける前に下記の資料を目を通すように1週間前に言われた。SRF2015の準備と相まって、中々大変であった。

Below is a list of required training to access to the Accelerator Site and tunnel. Web based training
link: https://www.jlab.org/div_dept/train/webbasedtraining.html

- o EH&S Orientation (SAF100)
- o Users Annual Security Awareness (GEN034U)
- o GERT (SAF 800)
- o ODH (SAF 103)
- o Radiation Safety video (SAF801C)
- o RWP (SAF 801kd)--read and sign
- o **Rad Worker I test (SAF801T) Take this test on Wednesday, Sep 9.**

Jlab Accelerator Division (主にお世話になった方々)

JLAB ACCELERATOR DIVISION



今回はBob Rimmer氏とMike Drury氏にHe processing実験参加について依頼。SRF2015前までしかHe processing実験を行わないということで9/7の週に実験参加を急遽アレンジ。但し、9/7の週はRimmer氏が出張ということでSRF OperationのleaderのJoe Preble氏にお世話になった。ちなみに私の訪問中にSRF OperationのleaderはTony Reilly氏に代わり、Joe Preble氏はLCLS-IIの責任者に専任することになった。



Mike Drury: 今回He processingの全監督。彼とはHe Processing実験について色々教えていただくと共に色々議論も行った。(後述)



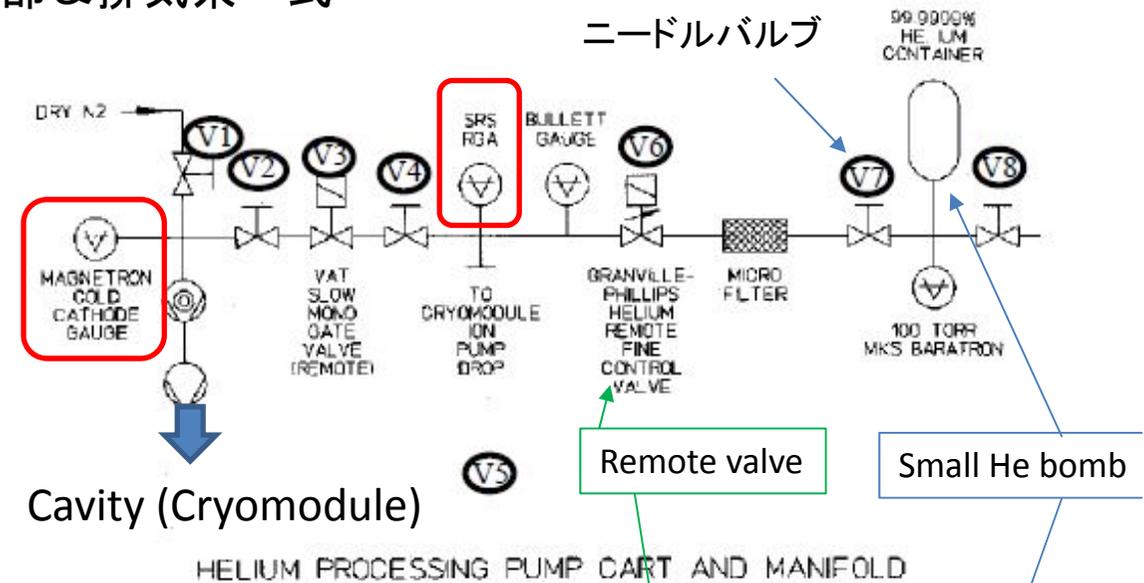
Joe Preble(左)
&
Edward Daly(右)

Joe Preble氏が今回の受け入れを全面サポートして頂いた。Edward Daly氏にはSRF施設特にLCLS-II関係の見学に協力頂いた。

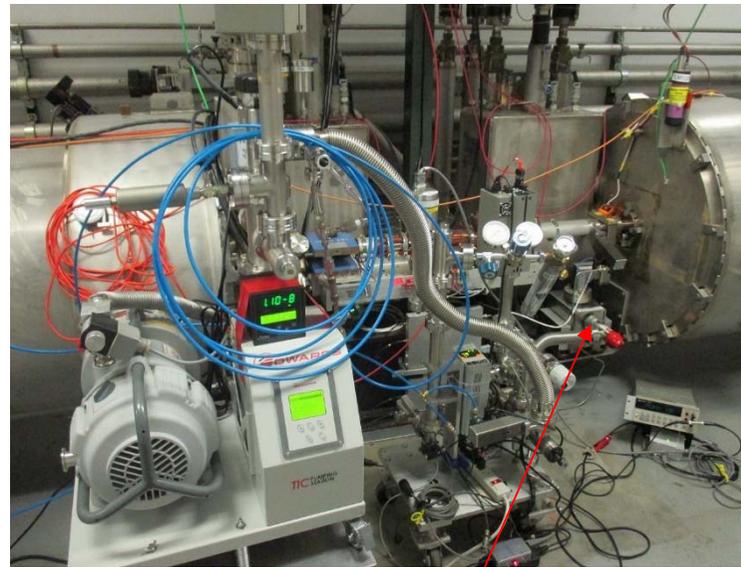
① CEBAF He processing 実験参加

(Setup)He processingのHe導入部 & 排気系一式

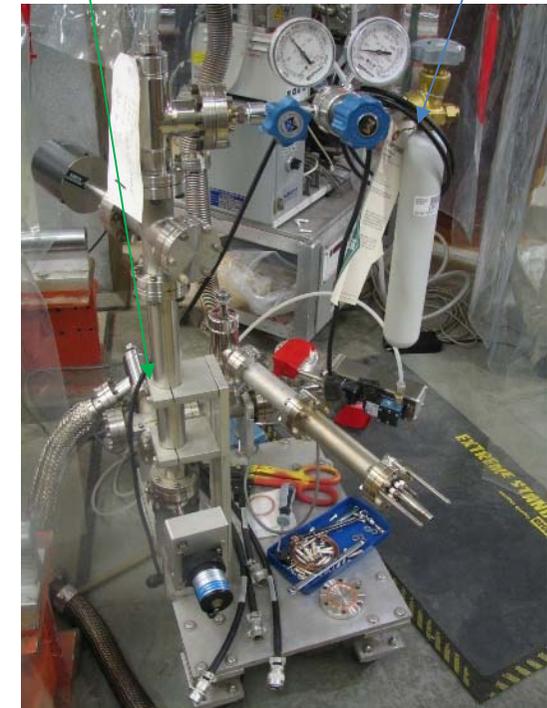
- Cryomodule at 2K
- Inject high purity He into the beamline vacuum raising partial pressure $\sim 1e-4$ torr. Operate cavities at maximum sustainable gradient 60 – 90 minutes.
- After processing complete: Perform a ~ 25 K cryocycle of the cryomodule while pumping on the beamline.
- Reestablish cryomodule at 2K
- Retest



- RGAとCCGでHeの分圧として常時モニター。RGAの前にcalibのHeボンベがある。
- 配管はベークしない。但し、3回窒素パージして置換。15-20分かかえてslow purgeする。
- Heはremoteでon/off制御。0.01umのfilterを使用。
- ある程度Heをバッファーとしてため込む領域を設けている。ニードルバルブで最初に投入量を調整。(後述)
- フランジ(ICF70)付け替え作業はクリーンブースを使って行う。(次ページ)



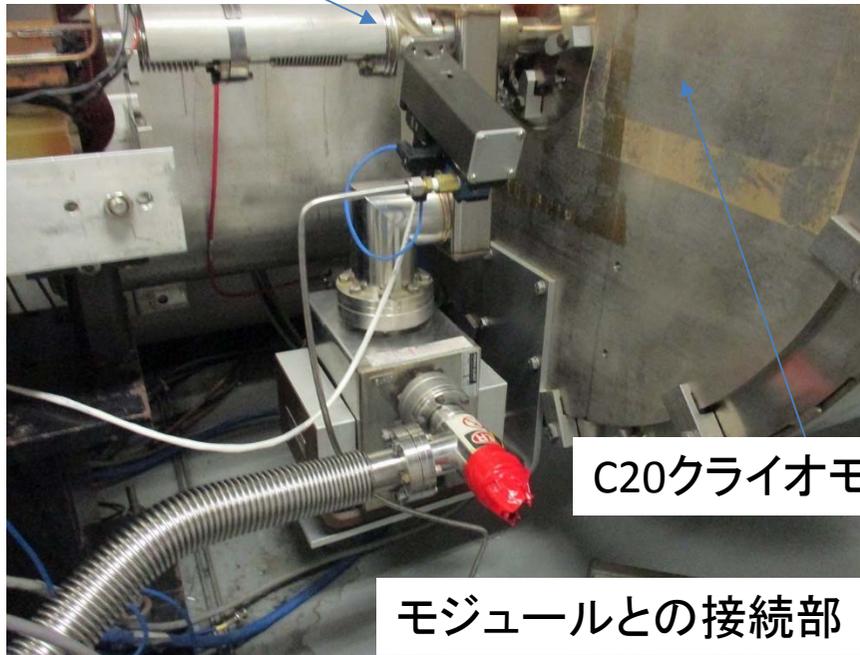
モジュールとHe processing装置一式のつなぎ口



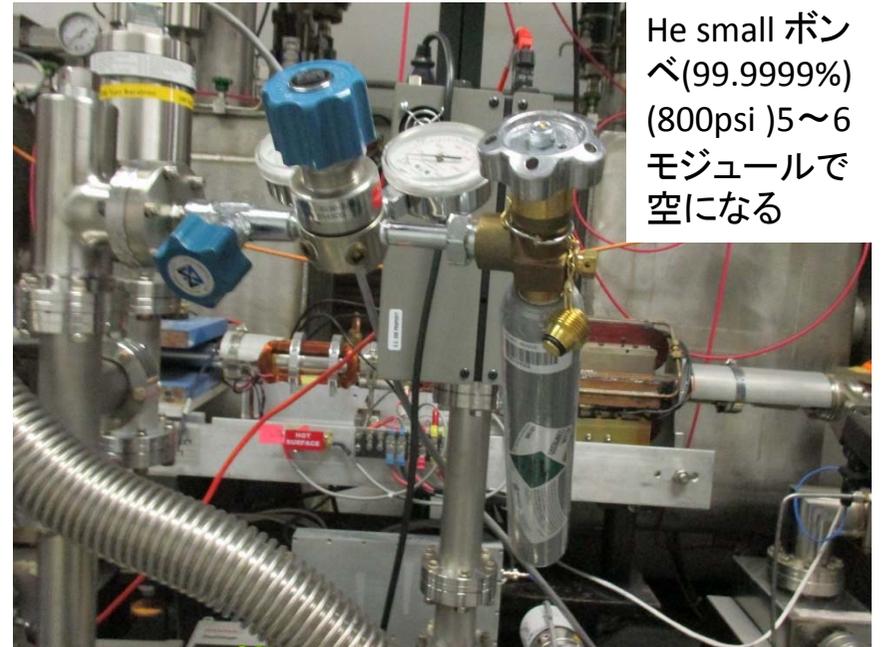
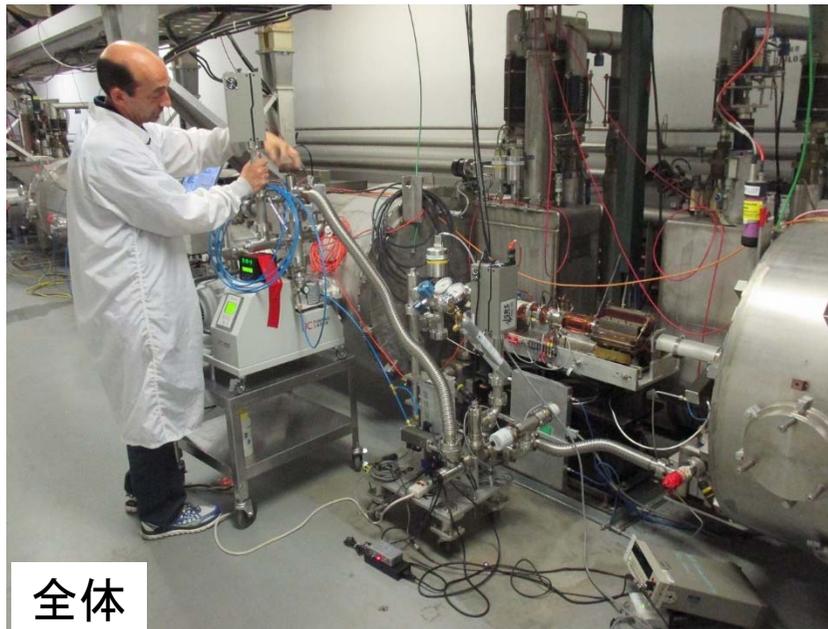
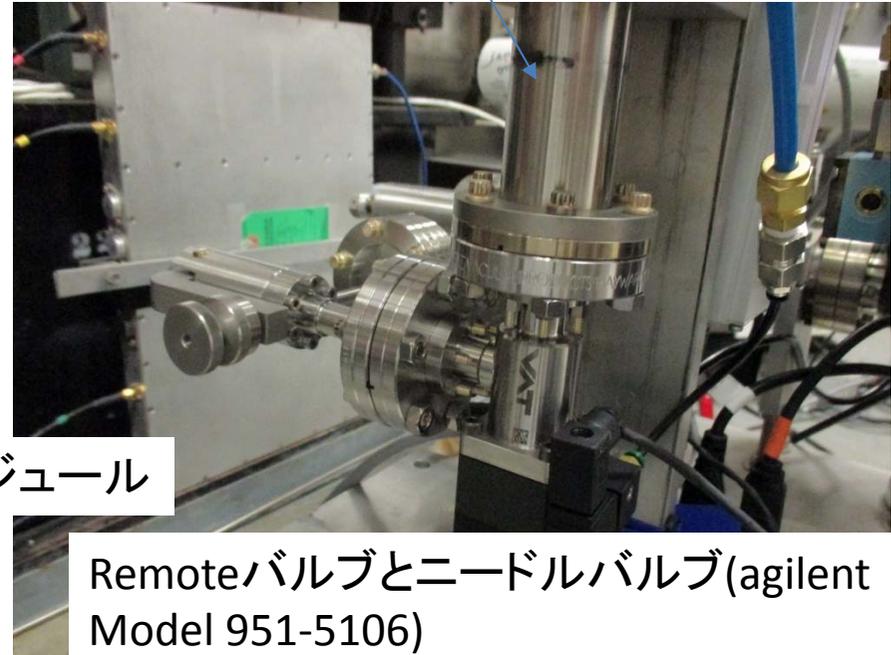
He processing装置

装置詳細

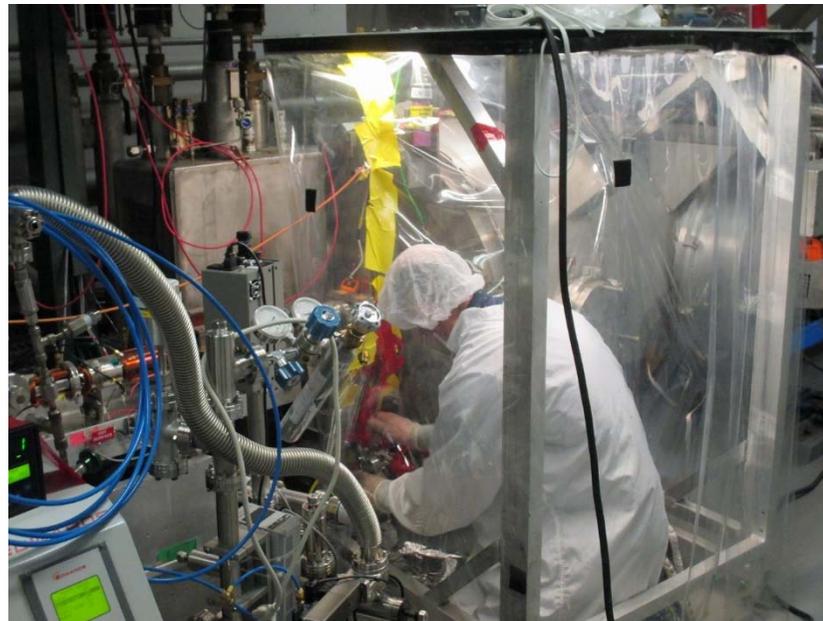
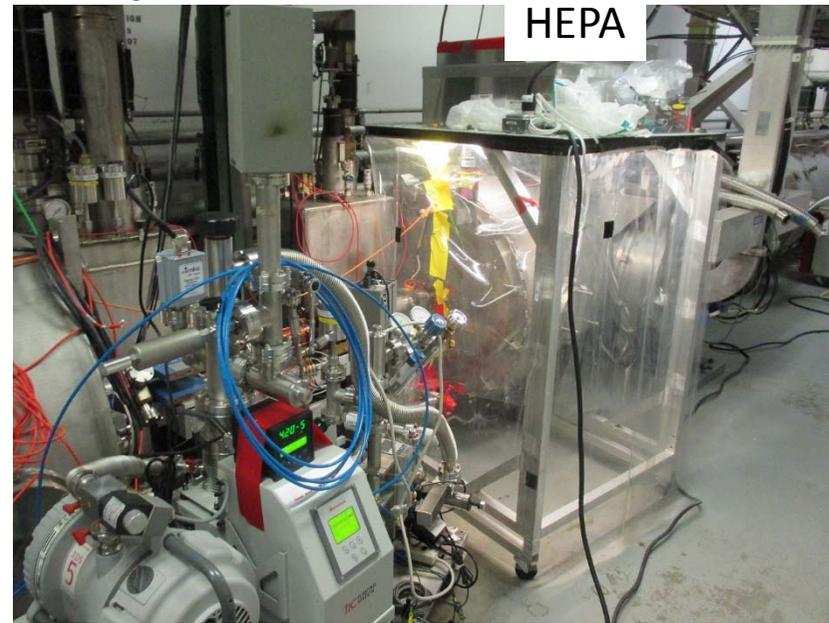
ビームライン



Heバッファ領域



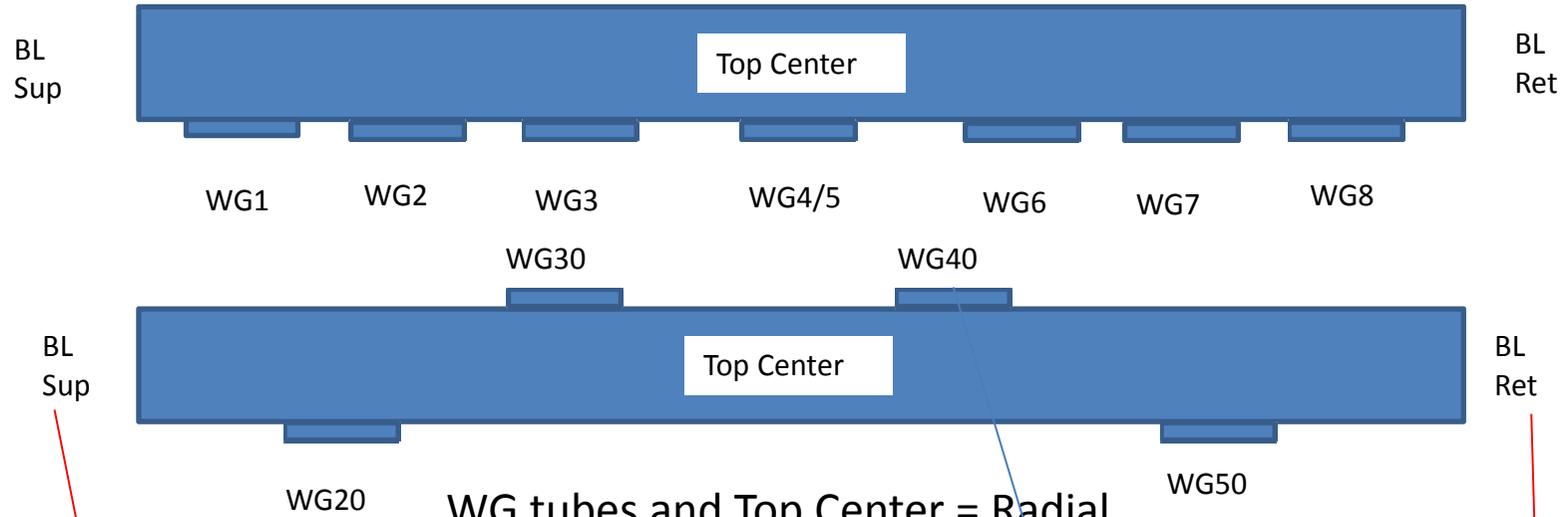
取り付け作業風景



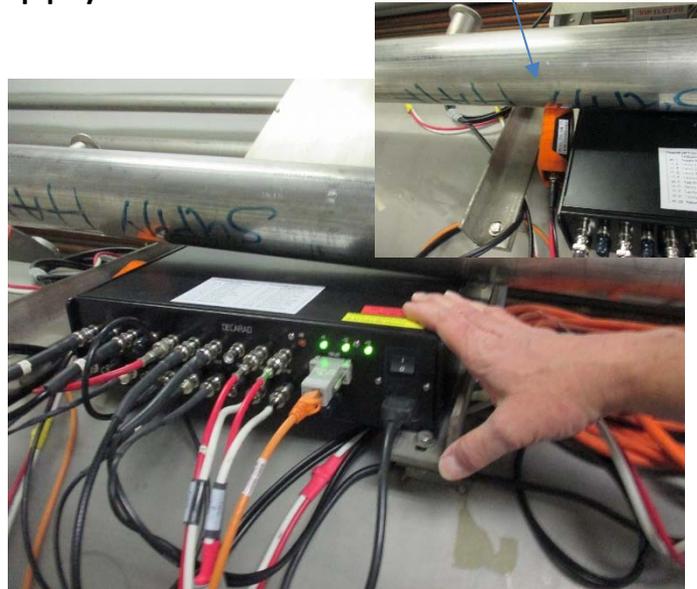
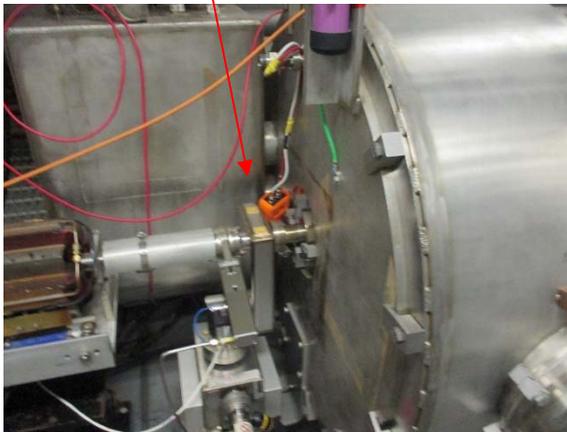
普通に外で服を着て手袋をはめて真空作業を行っていた。。。。

GM Tube Locations

同じRadiation monitorをHe processingのモジュールに毎回移動させて同じ位置で評価していた。各モジュールで10か所測定していた。



WG tubes and Top Center = Radial
BL Supply and Return = BL



GM tube用box

He processing実験

- 9/10 (木) CEBAF North line No19(IL19)のC20クライオモジュールのHe processingに参加。
- 午前はHe processingの真空作業(前述)。午後からlimitでCEBAFでのHe processing開始。
- 14:00~19:00 IL19 cavity#3,#2,#1の3つの空洞をHe processing

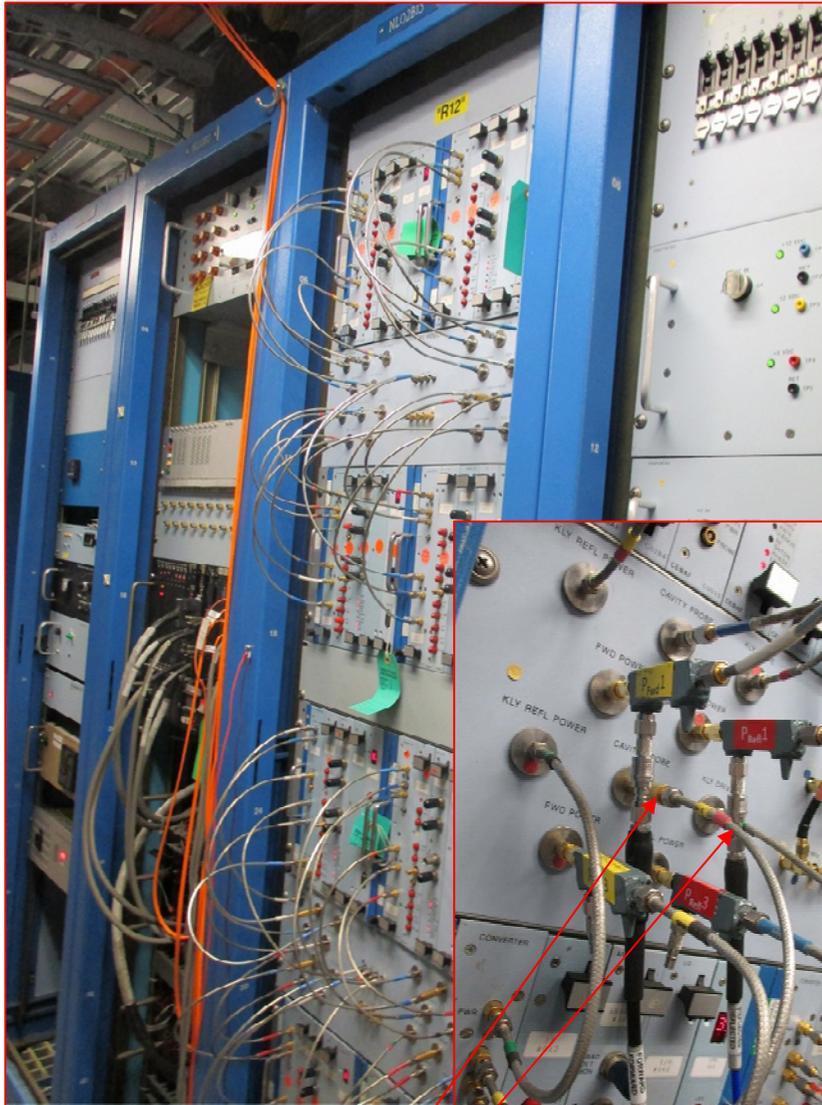


CEBAF北部のRFの長い建屋



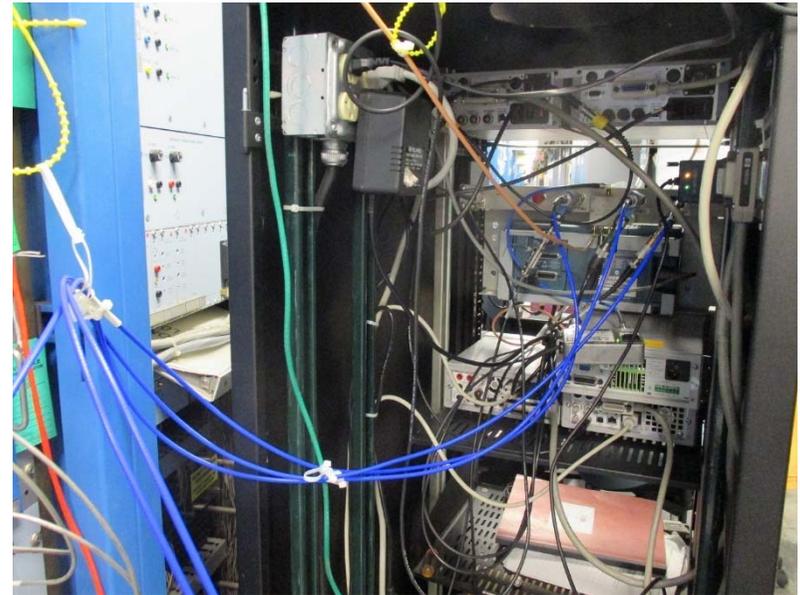
その中の様子とHe processingのoperationを行っているAnna Shabalinaさん。一緒にHe processingを行った。

Low level & 測定系



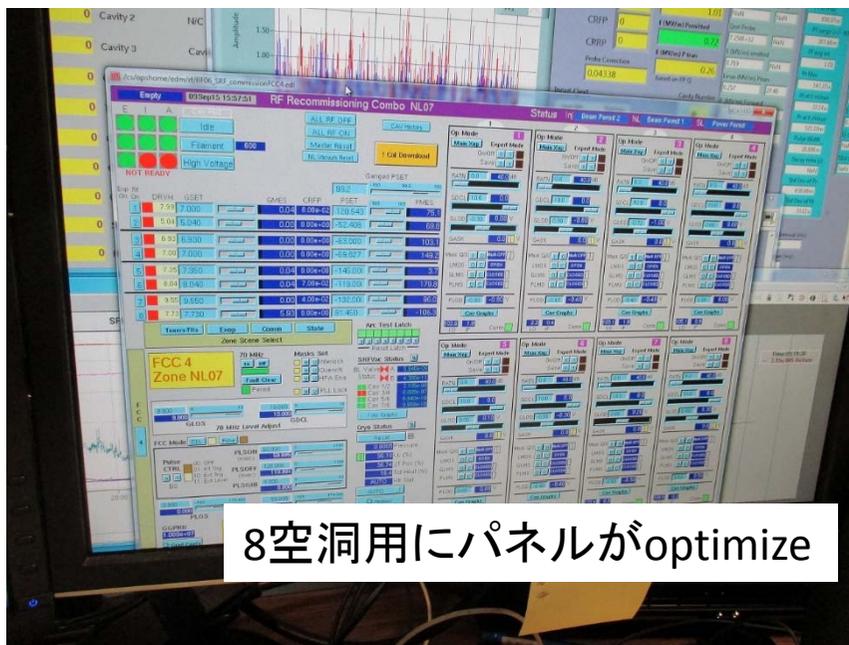
Pf Pref

各空洞毎ケーブルを付け替え

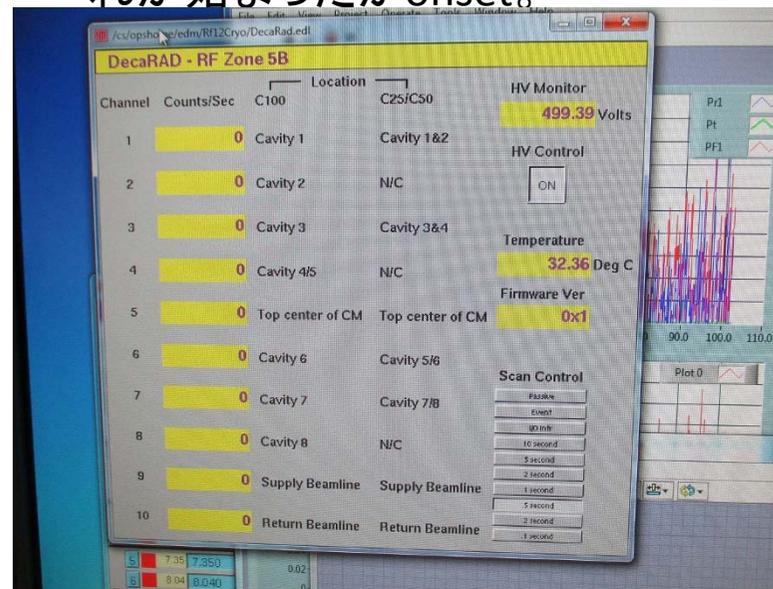


Pf, Pref, Pt
をモニター
F0=1497MHzに
対して、LO
1427MHzで
down convertし
てlow levelを組
んでいた。

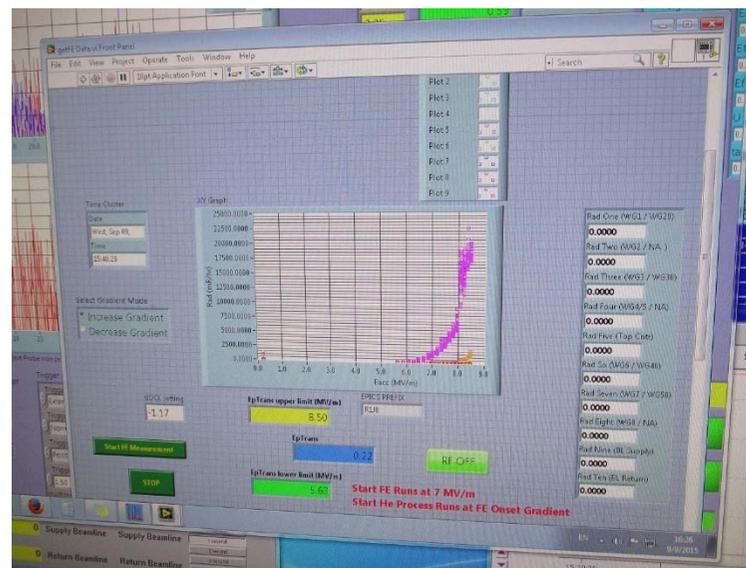
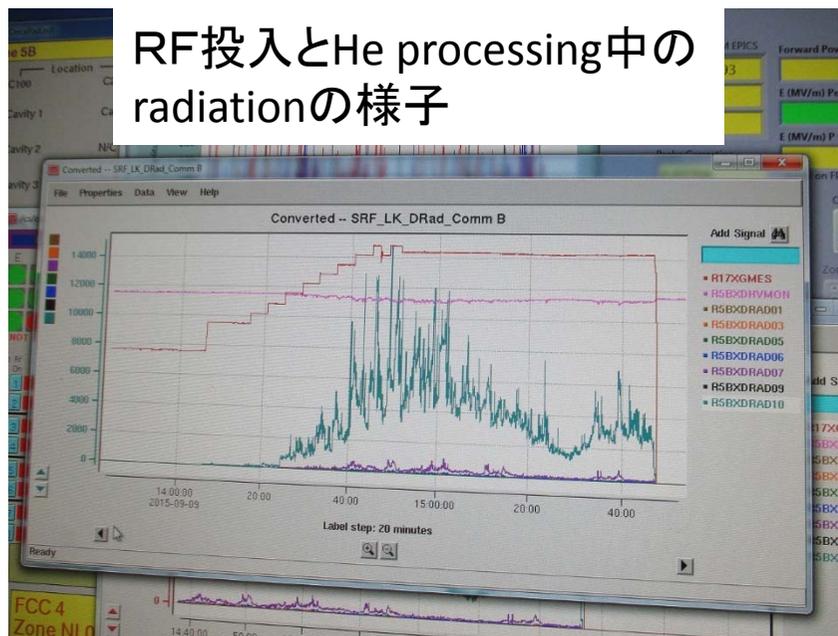
He processingの様子(全体)



Radiation onsetの定義は10個の radiationモニターのカウントがどれか始まったがonset。

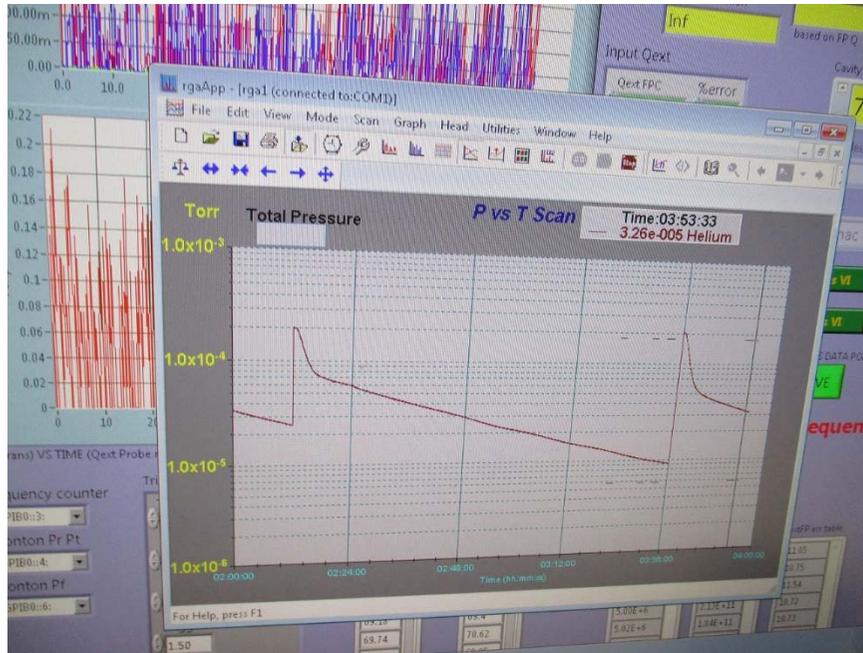


RF投入とHe processing中の radiationの様子



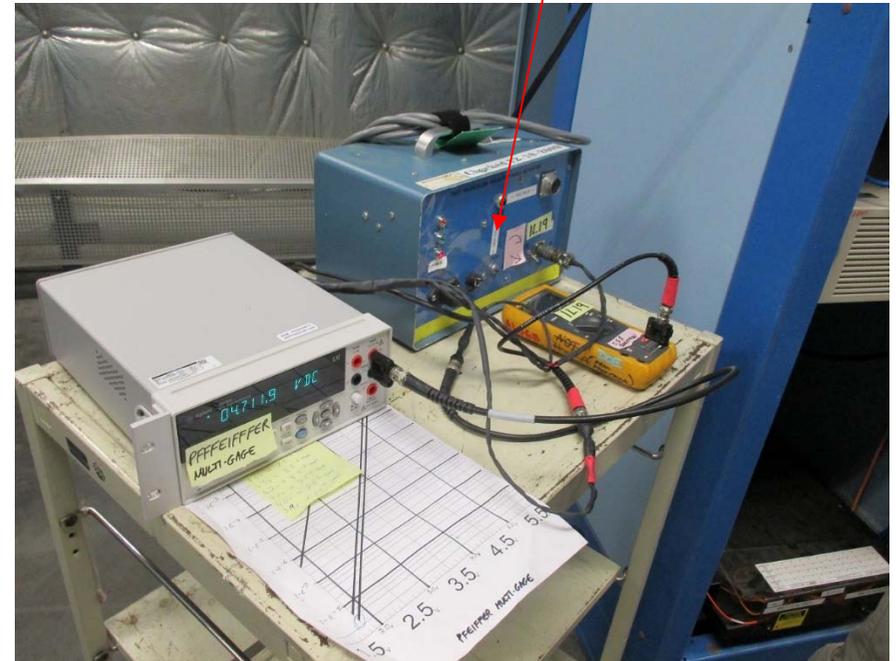
Eacc vs radiation。前回のonsetからはslowでfieldを上げるようなprogramを用意。

He ガスremote制御&ITL



Heを入れた瞬間は 2×10^{-4} Torrを超えるがHeを流しっぱなしにせず、すぐにbombを閉じてそのままHeが少なくなる。その後 1×10^{-5} Torrを切るくらいになるとまたon/off制御で開閉。He processing中はこれを繰り返してEaccを上げて行っている。

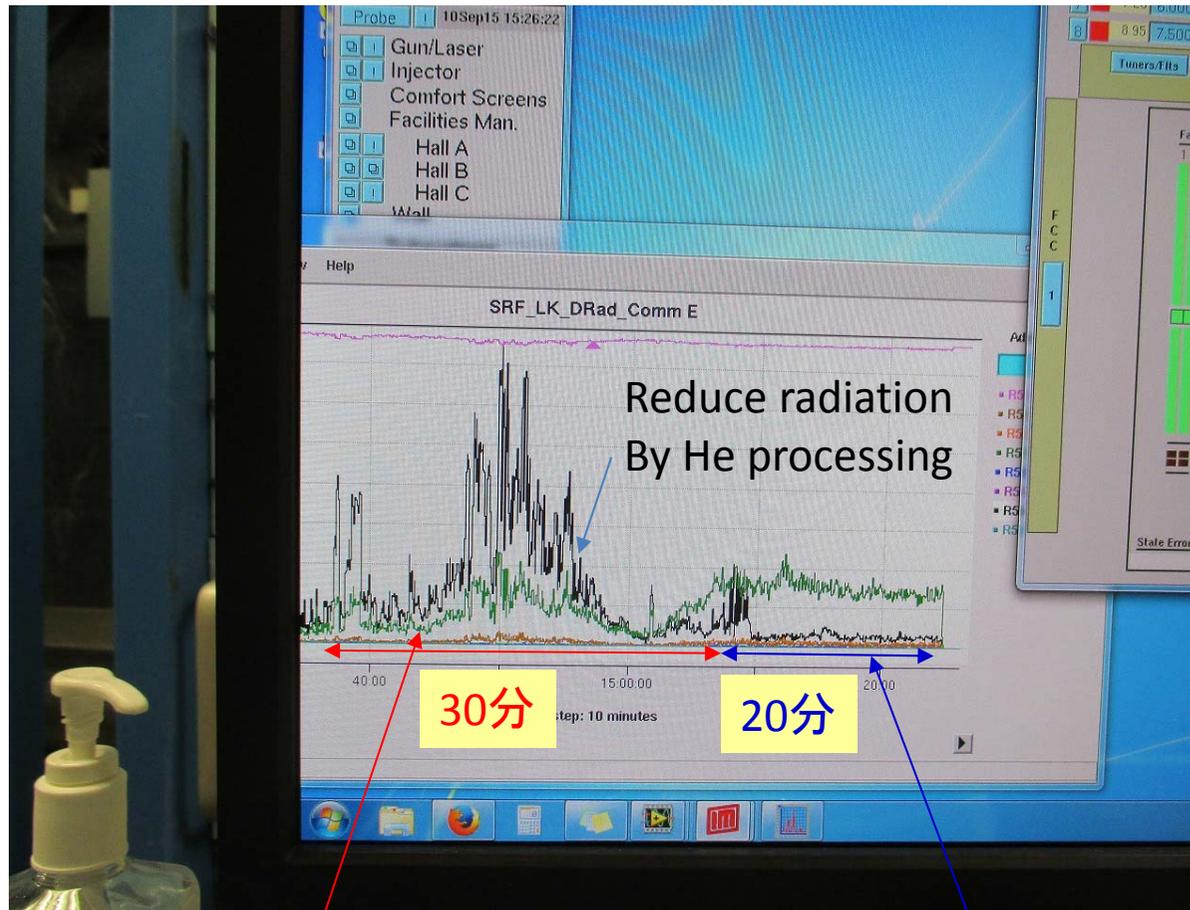
スイッチon/offでHeバルブを開閉



ITL list

- Arc : Arcsensor
- BLVF : Beam line vacuum
(disable : He processing中)
- CWVF : cavity window vacuum ($< 10^{-5}$ Pa)
- QCHL : Quench (RF drop (speed?))
- CWWT : Cavity Wave guide window temperature ($< ??$ 度)
- KPRP : klystron RF Reflector Power

IL19 cavity#3 He processing(1 個目)

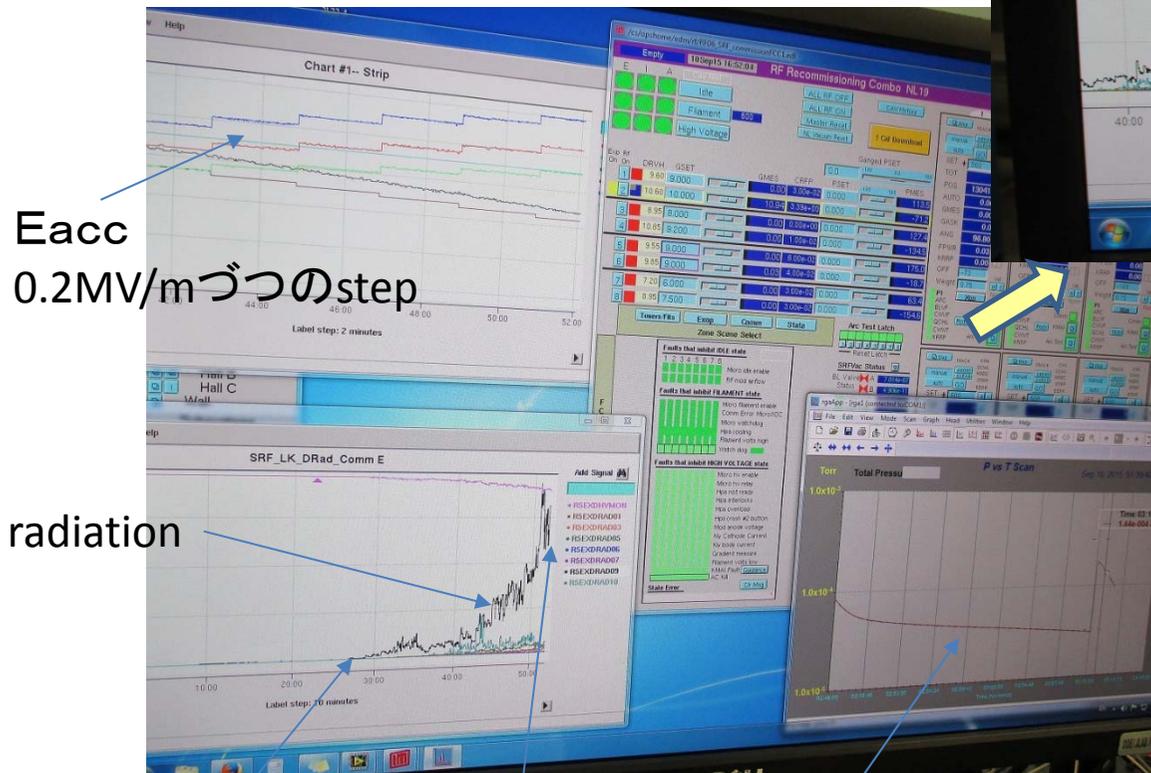
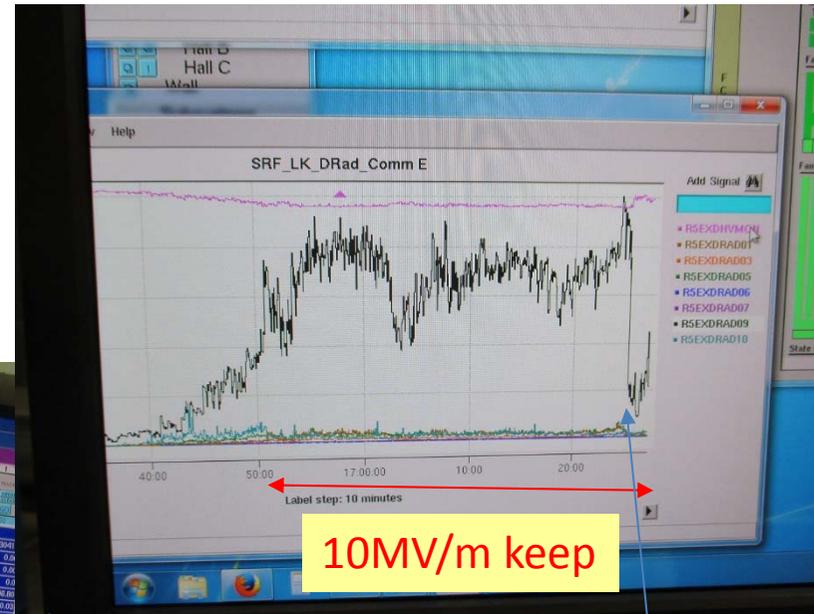


前回のonsetであった6.5MV/mからslowでfieldを上げて行っている。7.5MV/mまで上げて行ってその途中でradiationが下がっているのがわかる。

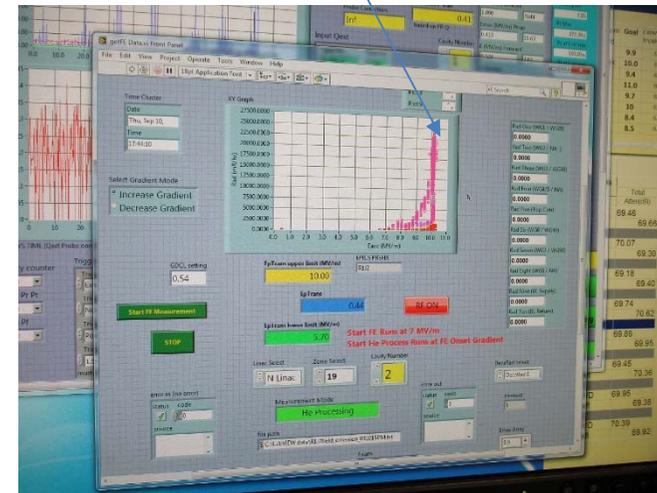
その後7.5MV/mでradiationが上がってきた(緑)ので、7.5MV/mで一旦keepしてradiationが下がるまで待つ。このままこれ以上かわらないが、onsetが上がったのがわかったので、これでこの空洞は終了。

IL19 cavity#2 He processing(2個目)

- 16:27 : 6.6MV/mからslowでfield up
2分毎に0.2MV/mずつ上げる。
- 16:51 : 10MV/m Eacc max(自分で勝手に
決めている。)に到達。keep。
- 17:26 : radiationが急激に減る。
- 17:43 : #2空洞 He process終了。



17:26 突然radiationが減る。



6.6MV/m

10MV/m到達

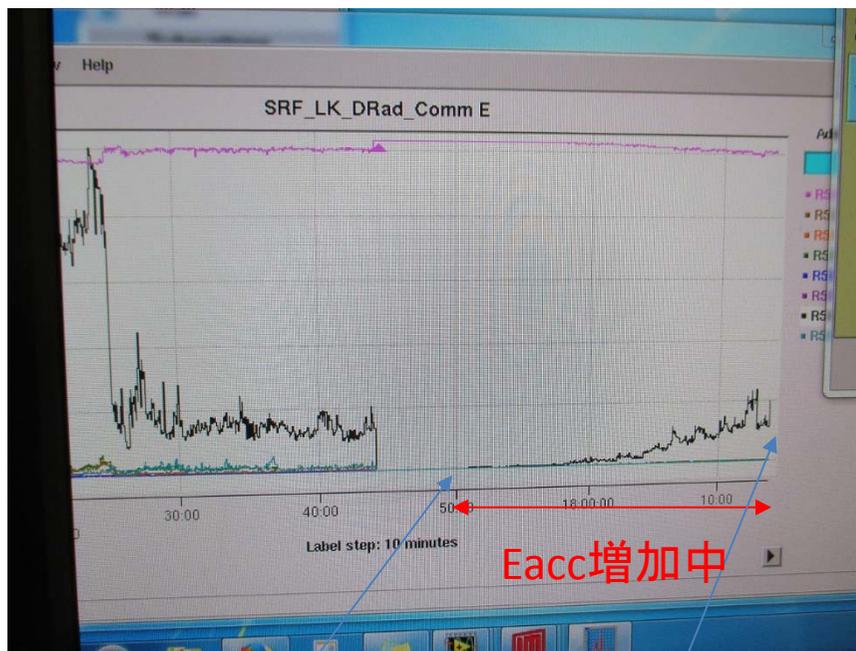
真空
trend

IL19 cavity#1 He processing(3個目)

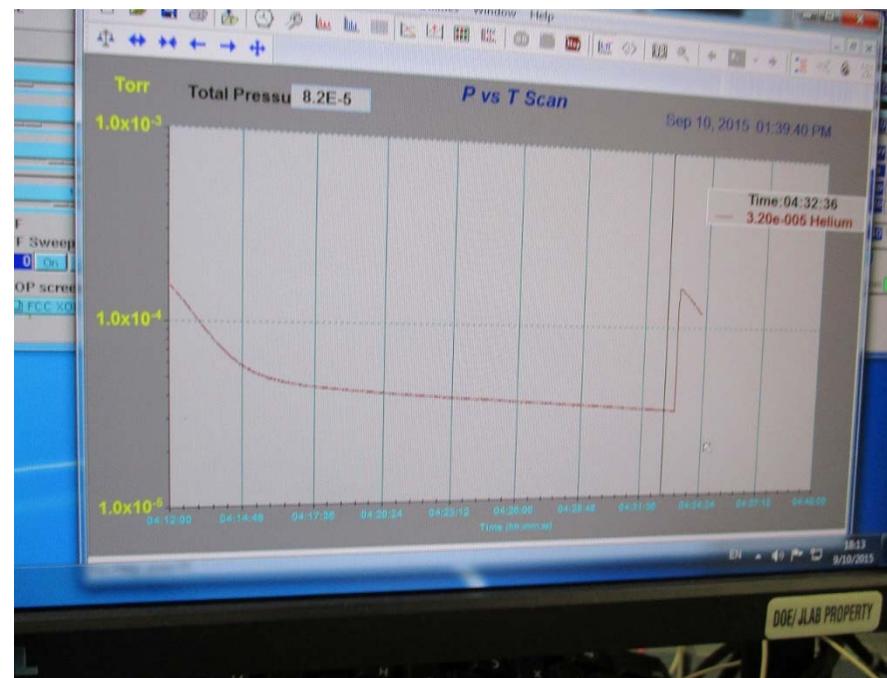
17:48 : #1 cavity RF on
17:52 : 6.5MV/m(前回onset)からslowで field up process進む。
18:16 : 9.0MV/m radiationも減っている。
18:20 : 9.2MV/m quench !! → restart
18:44: 8.9MV/m quench!!
19:00 : これ以上あがらないと判断し、終了。



IL19モジュールはこれで全部 He process終了。これより、30Kのthermal cycleに入る。2K → 30K → 2K
で次の日にこの空洞のonsetを再測定する。



6.5MV/m start 8.9MV/m



空洞真空のtrend

3空洞ともHe processingによって、processが進んでいるがその最後はradiationが微増したり、激減したり、quenchしたりと空洞毎にばらばらというのが印象。あと、C20はそもそも低いfieldでonsetが始まる。これに対しては効果があるが、高いonsetの場合はどうなのかというのはこれだけでは判断できなかった。→なので、..

Helium Processing Progress as of 8/26/15

M. Drury
SRF

→なので、、、
Drury氏に今までのHe processingのまとめの資料をもらった。
これで今回の2015年6月～8月末でのCEBAFのモジュールの
He processingの統計的なデータを紹介する。

Schedule vs. Actual

C100はやはり、C20,C50に比べonsetが高い。C100はOnsetの減少が見られたため、やめたとのこと。

Zone	Baseline Meas	He Proc	Cryocycle	Post Proc Meas	Baseline Meas	He Proc	Cryocycle	Post Proc Meas	Zone	Baseline Meas	He Proc	Cryocycle	Post Proc Meas	Baseline Meas	He Proc	Cryocycle	Post Proc Meas
1L02	100	100	100	100	100	100	100	100	2L02	100				100	100	100	100
1L03					100	100	100	100	2L03	100	100	100	100	100	100	100	100
1L04					100	100	100	50	2L04	100	100	100	100	100	100	100	100
1L05									2L05	100	100	100	100	75			
1L06									2L06	100	100	100	100				
1L07									2L07					100	100	100	100
1L08									2L08								
1L09					100	100	100	100	2L09	100	100	100	100	100	100	100	100
1L10					100	100	100	100	2L10	100	100	100	100	100	100	100	100
1L11									2L11	100	100	100	100	100	100	100	100
1L12									2L12	100	100	100	100	100	100	100	100
1L13	100	100	100						2L13								
1L14					100	100	100		2L14					100	100	100	100
1L15									2L15	100	100	100	100	100	100	100	100
1L16									2L16	100	100	100	100	100	100	100	100
1L17									2L17	100	100	100	100	100	100	100	100
1L18									2L18	100	100	100	100	100	100	100	100
1L19	100	100	100						2L19					100	100	100	100
1L20									2L20								
1L21									2L21	100	100	100	100	100	100	100	100
1L22	100	100	100	100	100	100	100	100	2L22	100	100	100	100	100	100	100	100
1L23									2L23	100	100	100	100	100	100	100	100
1L24									2L24								
1L25									2L25					100			
1L26									2L26								

26.8 Scheduled
27.6 Actual

Work on C100's halted



Gain in Field Emission Free Voltage (MV)

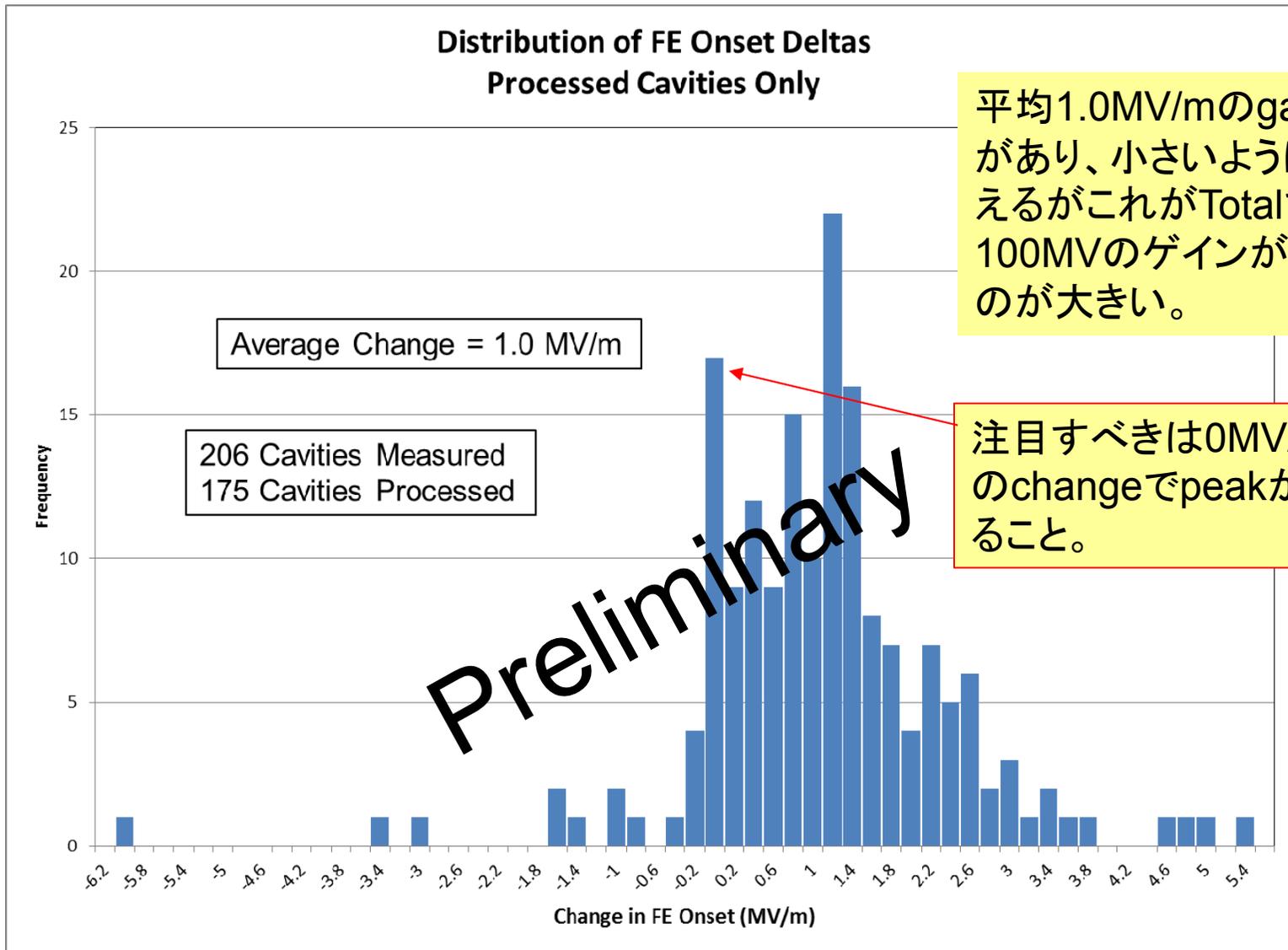
Zone	Integrated Change non FE Gradient (MV)		
1L02	5.7		
1L03	3.2		
1L04			
1L05			
1L06			
1L07			
1L08			
1L09	4.8		
1L10			
1L11			
1L12			
1L13			
1L14			
1L15			
1L16			
1L17			
1L18			
1L19			
1L20			
1L21			
1L22	7.1		
1L23			
1L24			
1L25			
1L26			
<hr/>			
2L02	1.9		
2L03	2.2		
2L04	7.4		
2L05			
2L06			
2L07	5.3		
2L08	5.0		
2L09	4.0		
2L10	1.8		
2L11	4.1		
2L12	3.9		
2L13	3.4		
2L14	5.9		
2L15	3.4		
2L16	2.1		
2L17	2.5		
2L18	2.7		
2L19	3.25		
2L20	1.6		
2L21			
2L22	6.4		
2L23	4		
2L24	-1.9		
2L25	11.3		
2L26	6.2		
<hr/>			
		C20 /C50 Average Gain	3.7
		C20 /C50 Total Gain	74.1
<hr/>			
		C100 Average Gain	5.5
		C100 Total Gain	26.0
<hr/>			
		Overall Average Gain	4.1
		Overall Total Gain	107.2

Gainの定義は
Onsetの場所の変化
(後述)

C20とC50はたくさん
やった。

C100は4つやっただけ
だと思う。

Distribution of FE Onset Deltas Processed Cavities Only



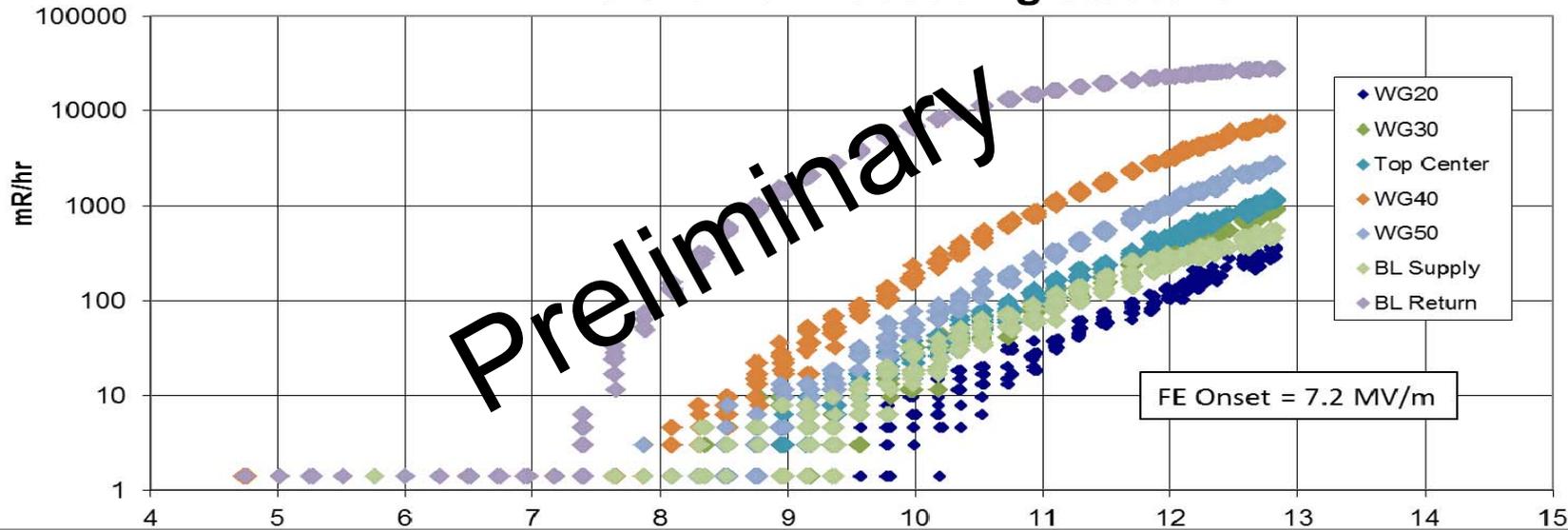
平均1.0MV/mのgain
があり、小さいように見
えるがこれがTotalで
100MVのゲインがある
のが大きい。

注目すべきは0MV/m
のchangeでpeakがあ
ること。

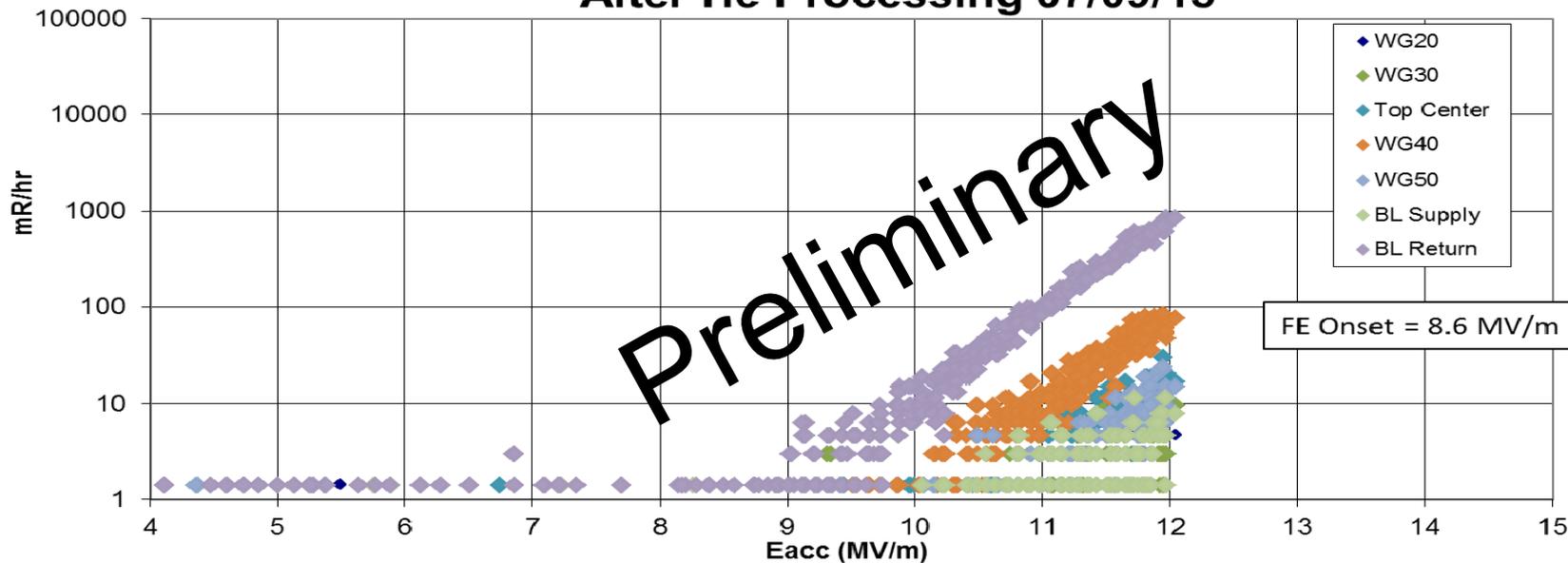
Preliminary

Field Emission vs. Eacc
2L07-5 (????)
Before He Processing 06/30/15

いい場合

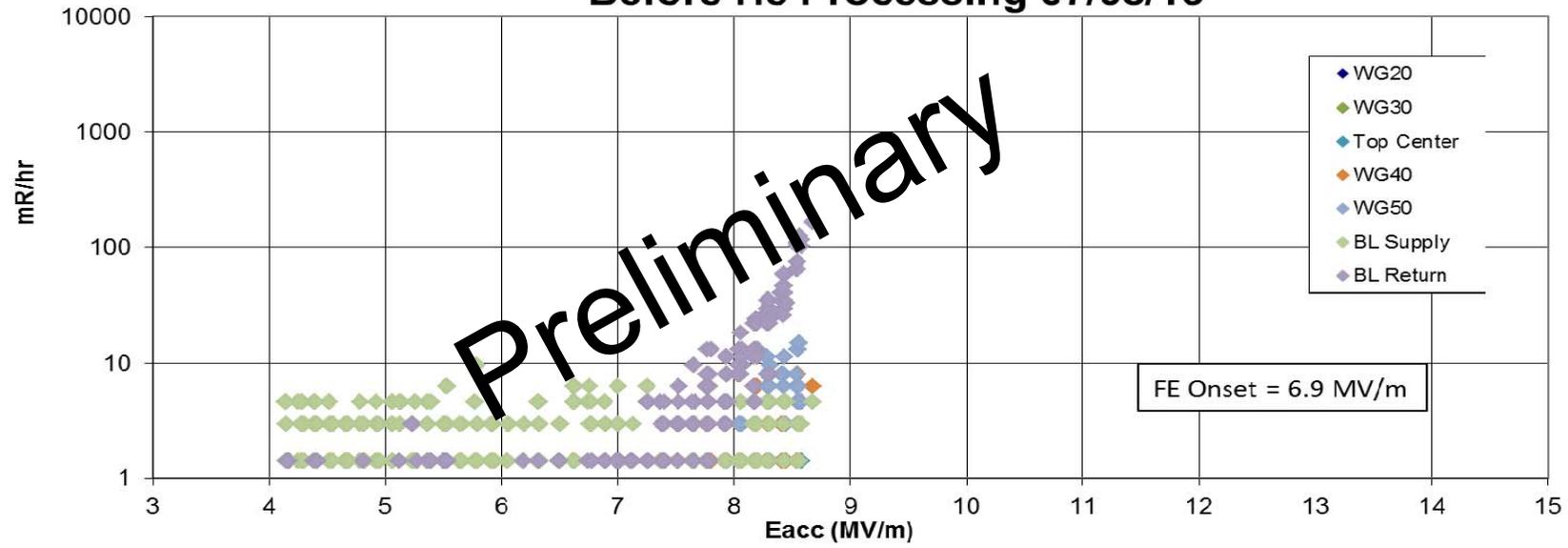


Field Emission vs. Eacc
2L07-5 (????)
After He Processing 07/09/15

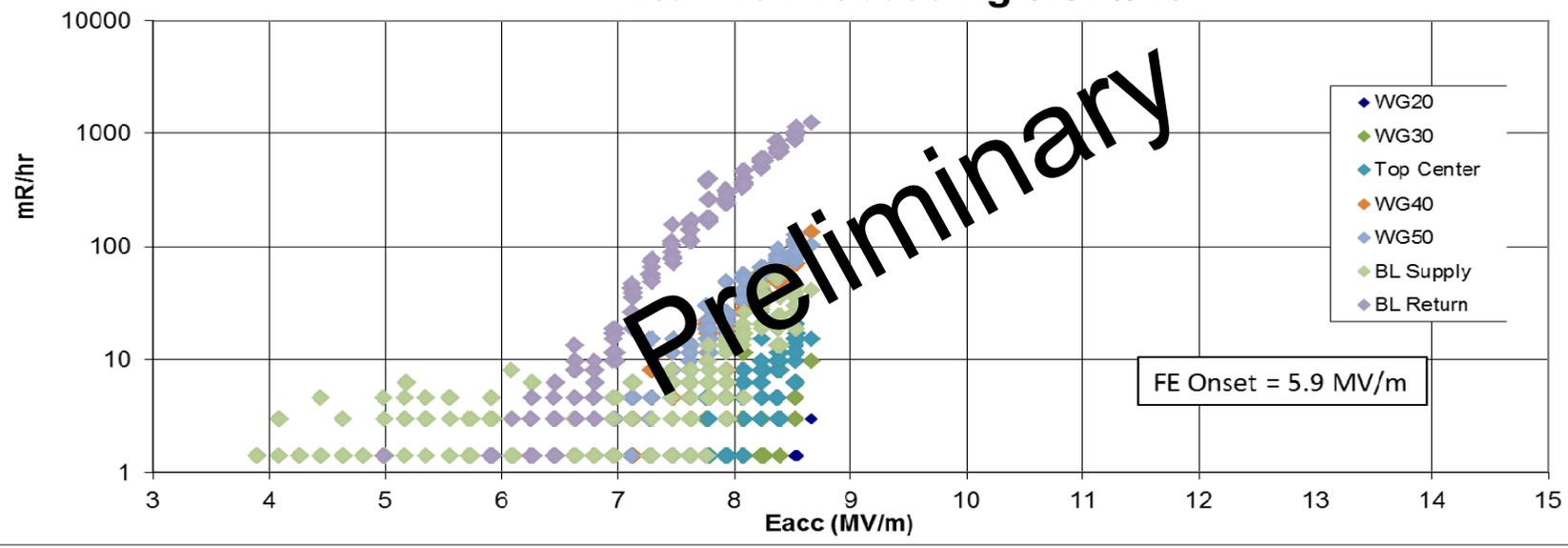


悪い場合

Field Emission vs. Eacc
2L16-7 (C50-02-7)
Before He Processing 07/08/15



Field Emission vs. Eacc
2L16-7 (C50-02-7)
After He Processing 07/15/15

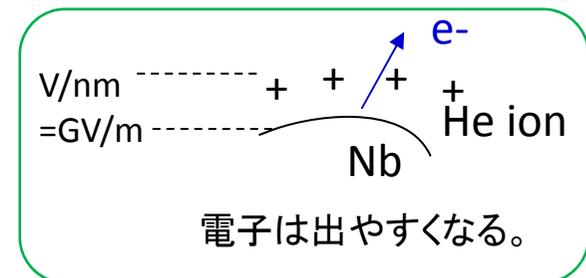


Conclusions

- 27+ Cryomodules processed since 6/15
 - Data for 26 cryomodules (plus two in January) included here
 - 31 Cavities not processed for various reasons
 - Average increase in Field Emission Onset = 0.9 MV/m
 - Average Change in Maximum BL Directed radiation = -3.8 R/hr
 - Average Change in Maximum Radial Directed Radiation = -2.1 R/hr
- 16 cryomodules left and about 4 weeks to go

He Processing実験参加の個人的な感想(結論は難しいが)

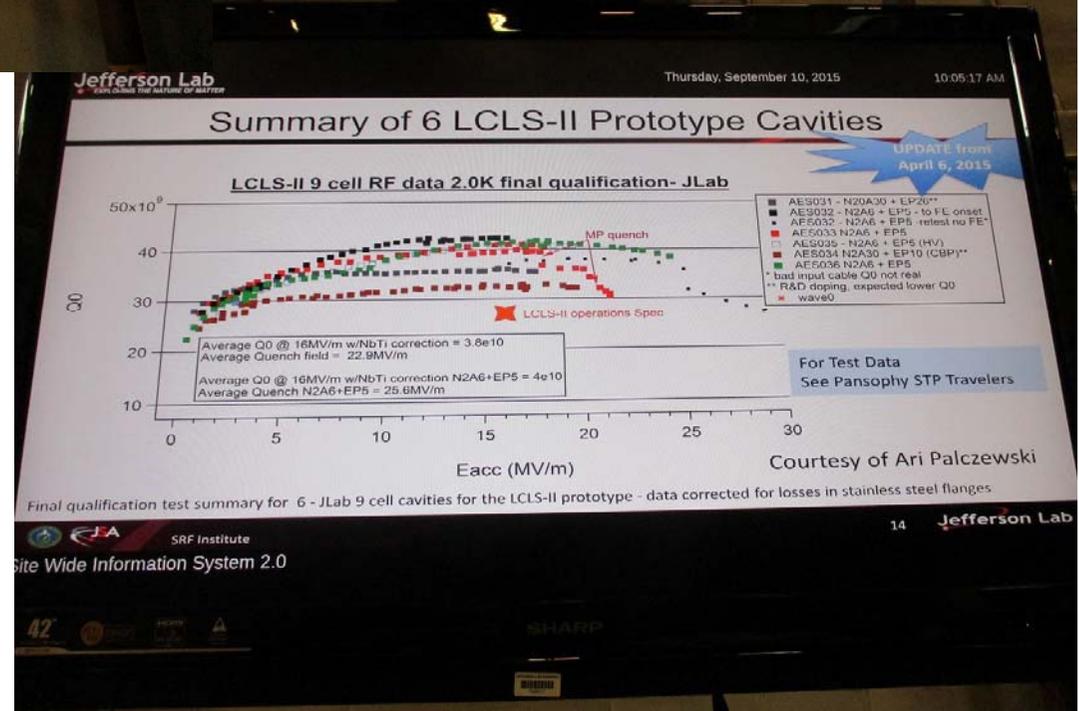
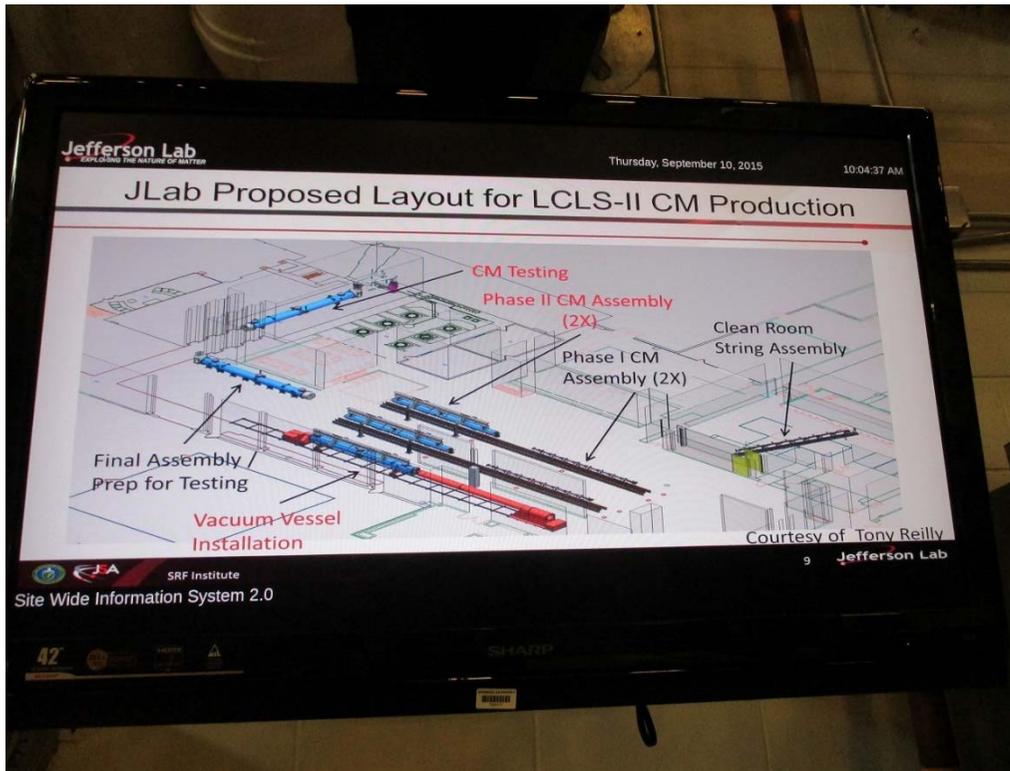
- CEBAFでのHe processingについて
 - He 導入の真空装置については我々の装置とそこまで違いはない。むしろ、He導入部をベーキングをしている我々の方がgasに関しての扱いはよりデリケートに扱っていると思われた。クリーンブースを使っているのはいいがあんな地べた近くで真空作業してはクリーンの今はあまりないような、、、という印象。
 - RGAでのHeの分圧に換算して計算していないところは我々の方ではケアが必要。
 - あと、radiationモニターをHe processing専用を用意しており、これで同じ位置でHe processing前後の比較をしているのが重要だと感じた。(我々のPIN diodeが重要なのも同じ感覚)
 - 3空洞の実験+統計データを見て、He processの効果はあるという印象はあったが、やはりprocessの効果はランダムであると実感した。そういう意味では実験に参加してよかったがpulse process (HPP)などとどれくらい大きな違いがあるかは少し疑問に思った。(CEBAFがHPPをしないのはpower sourceがないから。)。我々のモジュールで試したいとは思う。
- 議論+その他
 - 我々のVTでのHe processingのデータを発表してDruryやAri,Joeと議論したが、結論として、processの仕方はKEKとCEBAFでは同じであろうという見解であった。→CEBAFのHe processも彼ら曰く、localに β FNを大きくして、field emission源をprocessしているだろうと。
 - もう少し深い理解が必要だと感じた。(右はイメージ)
ionのコントロールができれば、processをコントロールできるかもしれないとおもった。なので、今後He processも我々の方でtool(X-map)があるので効果的に進めれるかどうかさらに理解を進める必要があるとは感じた。
 - あと、SRF2015ではSNSでのplasma processの話があったが、常温でじっくり長期的にprocessすることでprocessが進むなら、He processとは別にそちらも試してみるのも今後の方向かもしれないと思った。(KEKBがいいかも)



②Jlabの最近のactivity (LCLS-IIをメインに)

LCLS-II空洞のjlabでの現状 (9/11現在)

7個までN2 dopeで縦測定が終わっている。下はそのうち6つの測定結果。1つは次の横スタンドで測定。残り一つは縦測定を行っている。9月末から8空洞string assemblyを行うとのこと



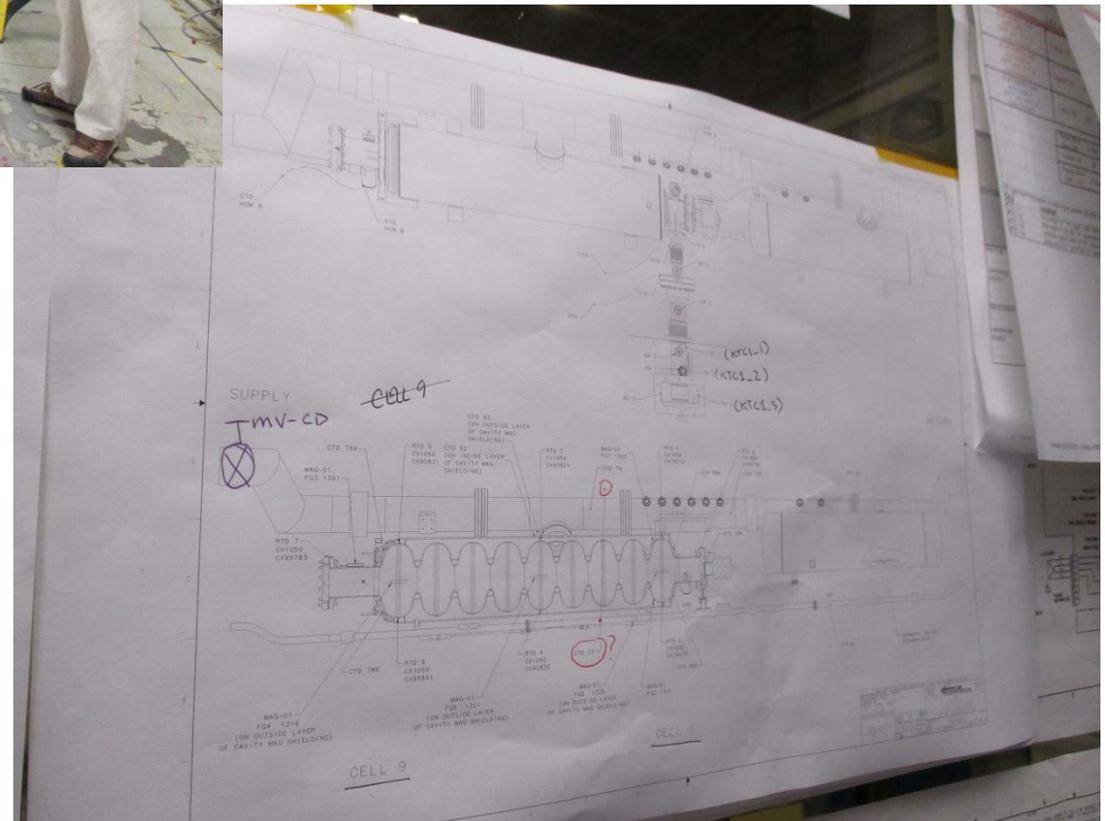
JlabでのLCLS-II空洞の 横測定

LCLS-II用のN2-dopeの空洞を入力カップ
ラー付きで初めて横測定。この週は
 $QL=2 \cdot 10^6 \sim 1.0 \cdot 10^7$ までゆっくりかえ
て最後1kW程度までパワーを投入して
いた。Fieldがどこまで入ったかは残念な
がらこの週では見ていない。(He process
で問題ないかを見る予定でもあった。)



横スタンド
はMircea
Stirbet
さんに案内

Clean room
workshopで
会っていた。

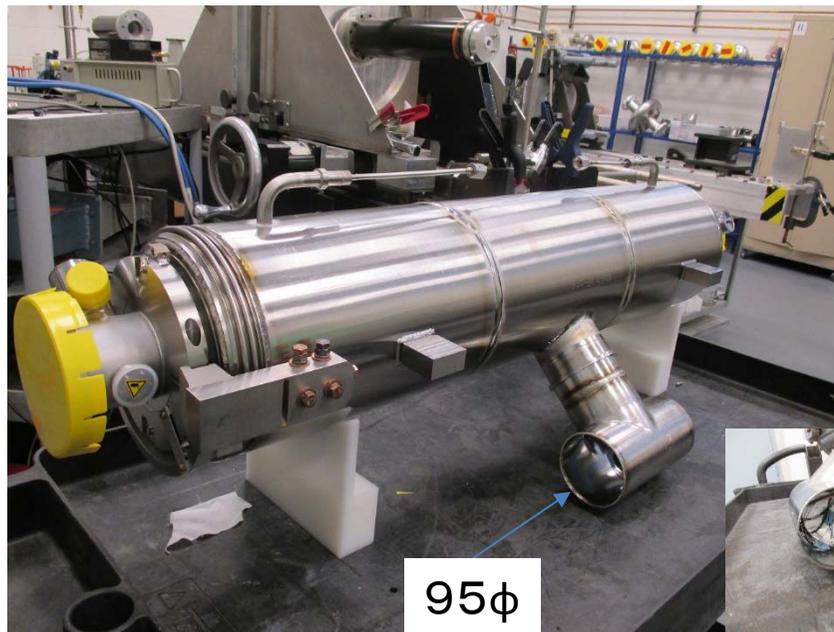


LCLS-IIIに向けた準備



String assembly用サポート

String assembly用台車



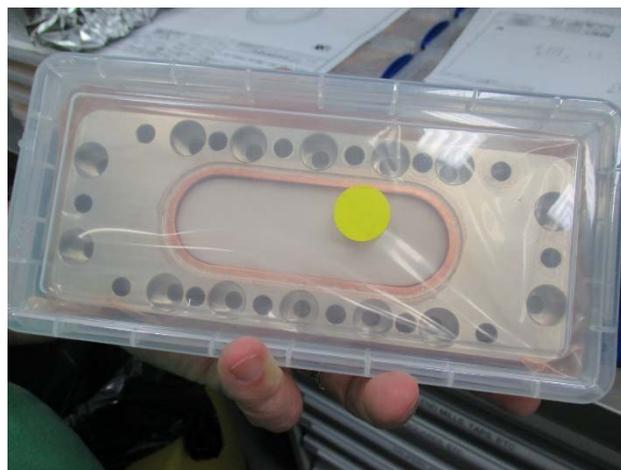
95φ



クリーンルーム

Jlabその他

ロウ付け用真空炉



CEBAFをC100モジュールに変えるために窓を大量にろうづけ



CEBAF用HOM absorber (窒化アルミ CA137)



横スタンドの新たな1.3GHz Solid state amp CPCという(謎の)会社。3.9kW仕様だが、まだ、2.5kWしか出ていない。

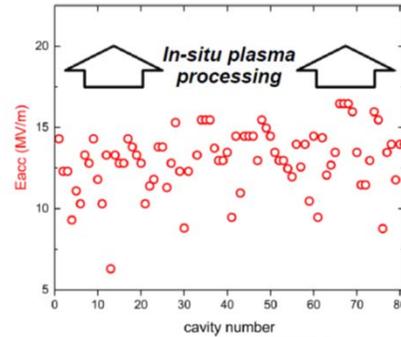
まとめ(Jlab & SRF2015)

- Jlabにて、He processing実験に参加。He processの詳細を体験すると共に、我々のやり方がそんなに間違った方法でないことがわかった。FEの回復を見るには同箇所でたくさんのradiationモニターが重要。
- 彼らの統計データではHe processingでは1MV/mでの上昇が見られているのがわかった。
- 今度はCEBAFでSRFの運転やtripなどをどうコントロールするかやQの改善後にどのように劣化していくかなどはまた見てみたいと思った。
- JlabのLCLS-II用の空洞は8空洞の窒素ドープ試験が終わり、9月末からstring assemblyのphaseになった。
- SLAC, FNAL, JLABの間で逐次テレビ会議をしており、とくにFNALとJlabで同時にこれから8空洞入りにone moduleの結果が年度内には出てくるであろう。
- このHe processの傍らSRF2015でのSNSでのPlasma processingを紹介。今後有望なprocess方法かもしれない。
- SRF2015では窒素ドープでのhigh Qの進展や他の材料(Nb₃Snなど)や多層膜のさらなる開発が見られたと同時に、様々なprojectによる空洞量産に対する性能をいかに確保するかなど現実の問題が浮き彫りになってきた会議でもあった。EURO-XFELは思ったより、cryomoduleでの性能が出ているなという印象。LCLS-IIIは上記で述べたHigh-Qが今後モジュールで保たれるのかという意味では大いに心配。早くモジュールの結果が知りたいところである。あとproton/ion加速器は多かった。

SRF2015のPlasma processingの試み (Marc Doleans, SNS) (1)

In-situ plasma processing to increase linac energy

- Higher linac energy provides more margin for reliable operation at 1.4 MW
- Most cavities at SNS are limited by field emission (FE) leading to thermal instability in end-groups
 - Average accelerating gradients are 12 and 13 MV/m for the two cavity geometries
- Developing in-situ plasma processing to reduce FE and increase accelerating gradients



In-situ plasma processing to reduce FE

- Plasma processing aims at
 - Reducing FE by increasing work function of cavity RF surface
 - Enabling operation at higher accelerating gradients
- Scaling from Fowler-Nordheim equation

$$J = a \frac{(\beta E)^2}{\phi} e^{-b \frac{\phi^{3/2}}{\beta E} - \frac{c}{\phi^{1/2}}}$$

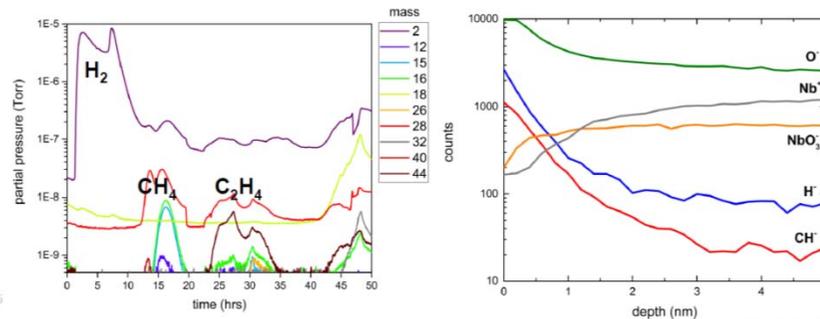
$$dJ = 0 \Rightarrow \frac{dE_{acc}}{E_{acc}} \approx \frac{3}{2} \frac{d\phi}{\phi}$$

J : current density
E : surface electric field
 β : field enhancement factor
 ϕ : work function

- 10-20% increase in ϕ leads to 20-30% increase in Eacc

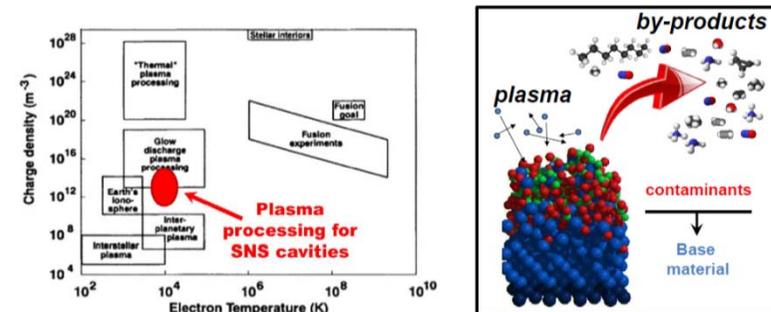
Hydrocarbon contaminants on Nb surfaces

- Hydrocarbon contaminants observed on all Nb surfaces
 - Volatile hydrocarbons released from cryomodule surfaces during thermal cycle
 - Hydrocarbons on offline spare cavity surfaces
 - Hydrocarbons fragments seen in secondary ion mass spectrometry (SIMS)
 - Mechanically polished niobium samples
 - Chemically polished niobium samples (BCP)
- Hydrocarbons tends to lower work function of Nb surface
 - Develop in-situ plasma processing to remove hydrocarbons from cavity RF surface



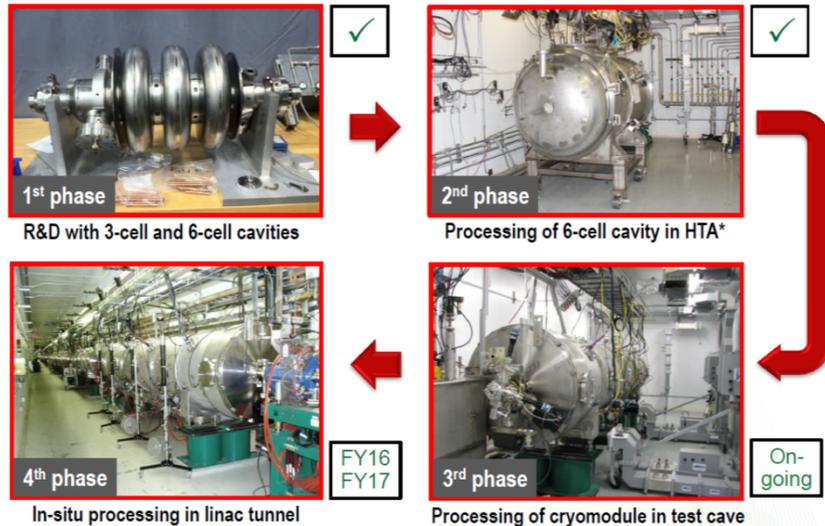
Low-temperature and low-density reactive plasma for removing hydrocarbons in SNS cavities

- Plasma is a rich and reactive environment
 - Ions, e-, neutrals, excited neutrals, molecules, radicals, UV...
- Plasma processing is a versatile technique used for various purposes
 - Cleaning, activation, deposition, crosslinking, etching...
- Chosen to develop room-temperature reactive oxygen plasma
 - Volatile by-products are formed through oxidation of hydrocarbons and pumped out



SRF2015のPlasma processingの試み (Marc Doleans, SNS)(2)

Plasma processing in four phases



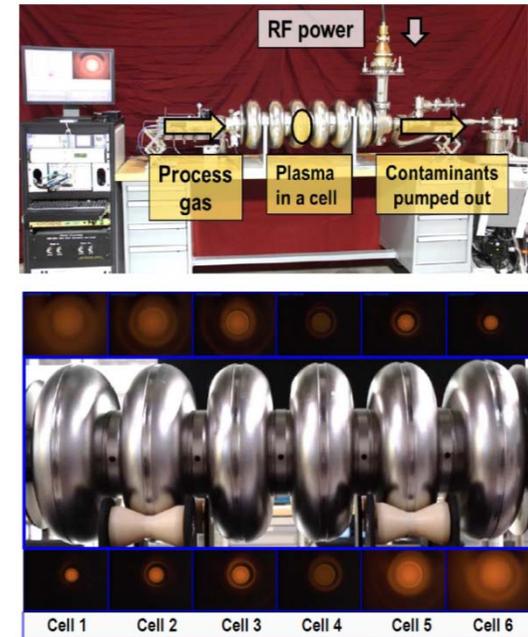
* Horizontal Test Apparatus

7 Plasma processing at SNS – M. Doleans – SRF2015



Reliable plasma generation in SNS HB cavities

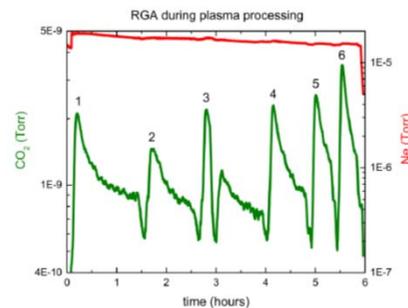
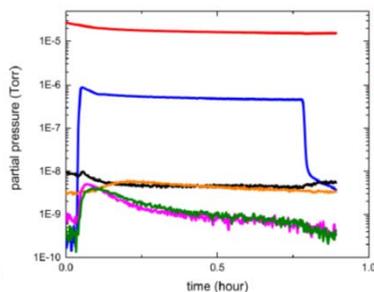
- Plasma generated inside cavity volume
 - Gas manifold and RF station
 - Neon (~100 mTorr) for plasma ignition and tuning
 - RF power < 1 kW
- Plasma ignites in discrete cells, tuning necessary to process all cells
 - Dual tone excitation (2 rf generators)
 - on and off-resonance excitation
 - Plasma loaded cavity theory



8 Plasma processing at SNS – M. Doleans – SRF2015

Removal of residual hydrocarbons by adding oxygen to the neon plasma

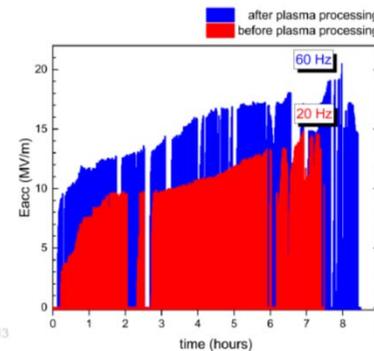
- Hydrocarbons removed from top surface through oxidation and formation of volatile by-products
 - H₂, H₂O, CO and CO₂
- Residual gas analysis to monitor plasma cleaning
 - Depletion of surface hydrocarbons within 30-45 minutes per cell
 - Removes 0.5-1.0 monolayer of hydrocarbon
 - Six cells of a cavity processed sequentially



9

Plasma processing improves HB59 performance

- Before plasma processing
 - Frequent trips associated with vacuum activity and temperature increase during RF conditioning
 - Reached 15.2 MV/m at 20 Hz repetition rate
- After plasma processing
 - Easier RF conditioning
 - Reached 20.5 MV/m at 60 Hz repetition rate



13

