

ERL main linac
課題と今後の展開

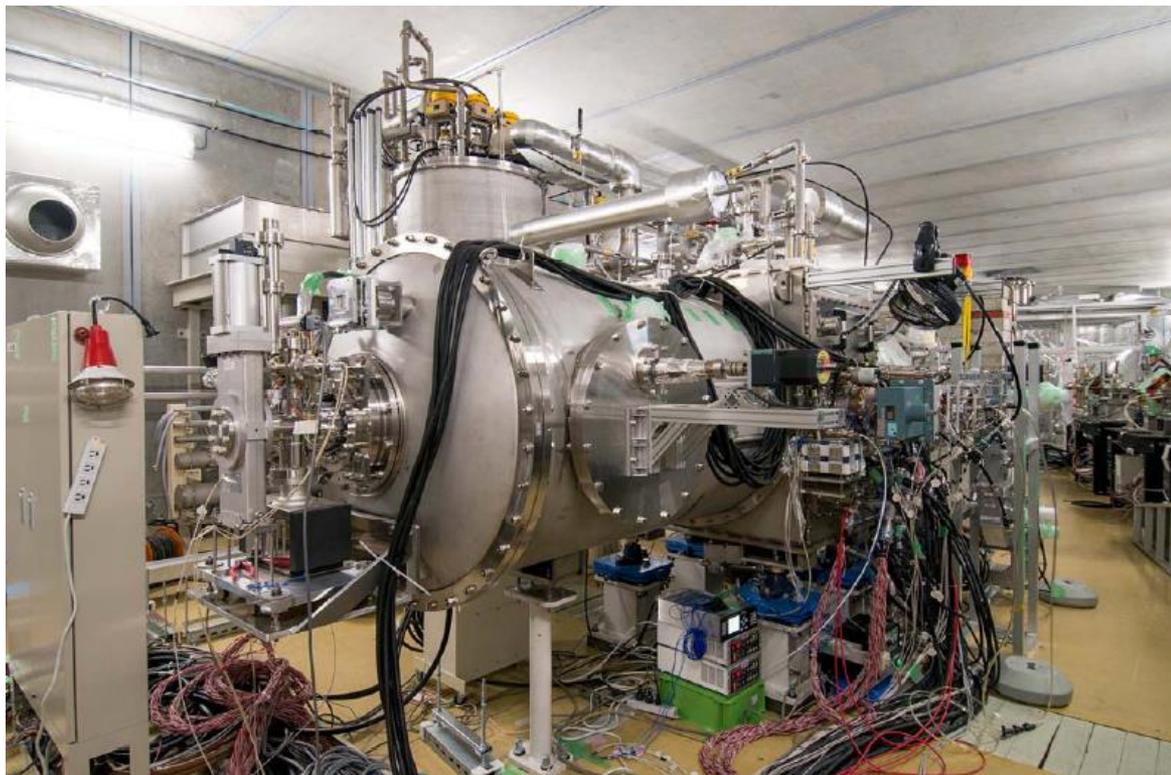
2014年12月19日

cERL mini-Workshop

ERL主空洞グループ 梅森 健成

これまでの成果

とにかく、ほぼゼロから検討を始めて、空洞、カップラー、クライオモジュール等の設計・製作等、全ての事を経験し、**なんとかビーム運転ができる所までこぎつけたこと**



ただし、課題もいろいろと...

- 空洞： 設計→製作
- カップラー： 設計→製作
- HOMダンパー： 設計→製作
- モジュール： 設計→製作
- 高圧ガス対応

ERL主空洞の現状と課題

	cERL	3GeV ERL	コメント
空洞	△	×	Field emission対策。加速勾配。セル形状の再設計
入力カップラー	○	○	Minor upgradeでOK
HOMダンパー	○	×	クラック問題。より信頼性の高い物の開発必須。重要課題。
周波数チューナー	○	○	Minor upgradeでOK
クライオモジュール(本体)	○	×	モジュールとしては動作OK 3GeV用には、コスト等も含め、再設計。STFベースのCW対応モジュールを検討
モジュール組立	△	×	Field emission対策 原因の究明と対策が必須
コスト	---	×??	現状の把握と今後の方針を検討
量産	---	△~×?	現状の把握と今後の方針を検討

今後の課題と展開

[cERLでの短期計画]

- **Field emission対策**
 - Pulse processing, He processing
 - **再組立て** (HPR、モジュールアセンブリの信頼性の確立)
- **長期運転での安定性の確立**

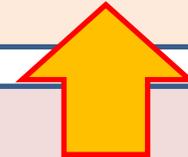
[cERLでの中期計画]

- **ビーム電流アップグレード**
 - 10mA以上でのCW運転。**Monopole HOM**が課題。
 - 実機で使わないであろうModel-2空洞でやる意味あるか？
 - 10mAで試験する意味あるか (熱負荷1% = 1W) ? ⇒ 数10mA欲しい
- **エネルギーアップグレード**
 - 4空洞入りモジュールの追加。**実機のプロトタイプ**に近いものを (要: 実機用の設計検討)。できれば、こちらに大電流を。

実機計画にリンクさせてcERLでの中長期計画の策定を

[3GeV実機に向けて]

- **空洞、HOM damper/coupler, クライオモジュール**の再設計 ⇒ 製作
- アセンブリ技術確立
- コスト、量産、人員、教育、etc.



課題(まとめると)

① Field emission対策

1. モジュールアセンブリ技術の確立
2. Field emissionからの復帰手法の確立

② 3GeV実機(EUV?)に向けての設計・製作

- 空洞
- HOM damper/coupler
- クライオモジュール
- 量産体制

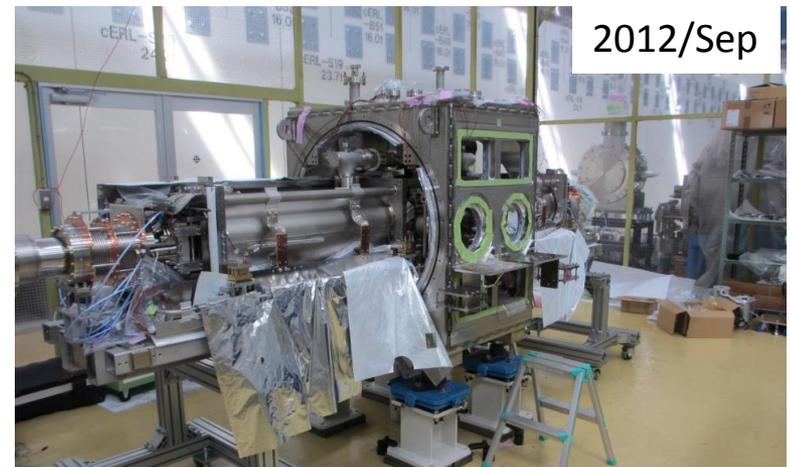
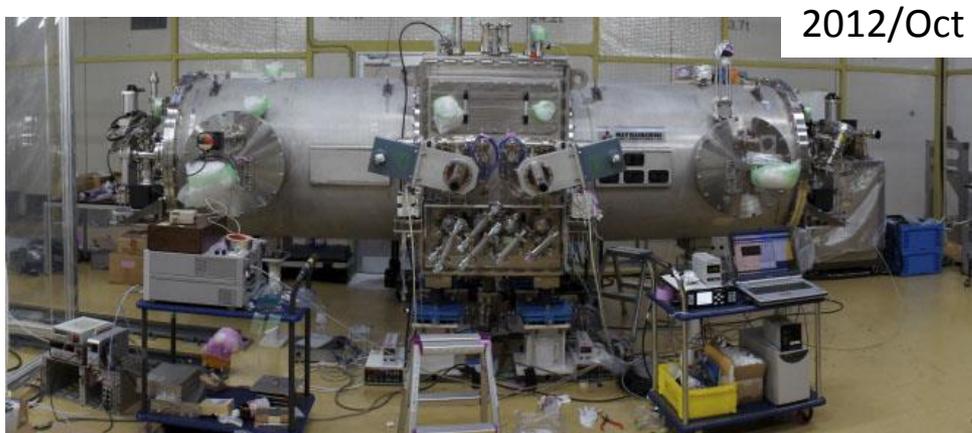
① - 1 アセンブリ技術の確立

Module assembly

Cavities, HOM dampers and input couplers were assembled.



He jackets were welded on cavities



Installed into cryomodule. Gate valves were mounted on both sides.

Assemble He line, magnetic shield, sensors and so on

縦測定～モジュール試験までの作業工程

[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
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. MHIとの間の輸送(空洞内はAr封止)
5. MHI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)
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

[モジュールアセンブリ後]

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

このあたりの工程
が怪しい？

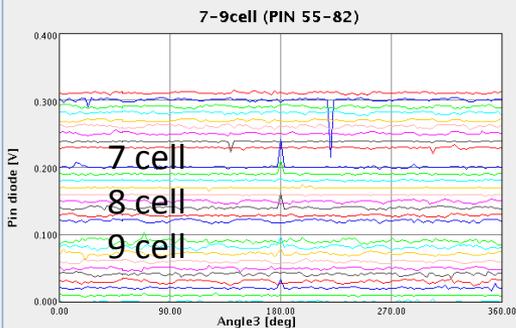
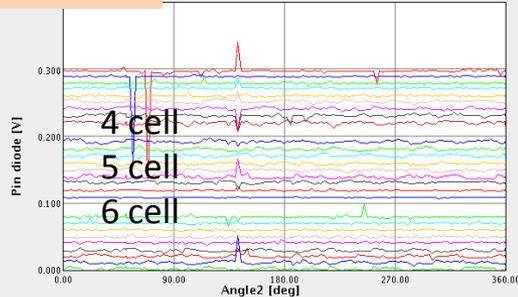
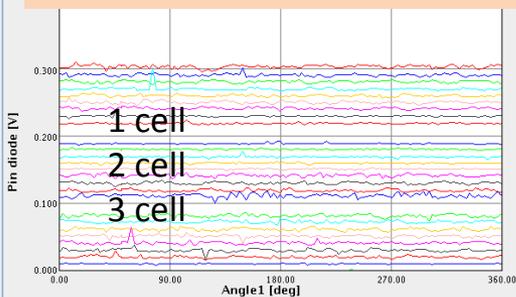
アセンブリ工程を一つ一つ確認

- ・清浄度
- ・治具
- ・手順
- ・周辺部品

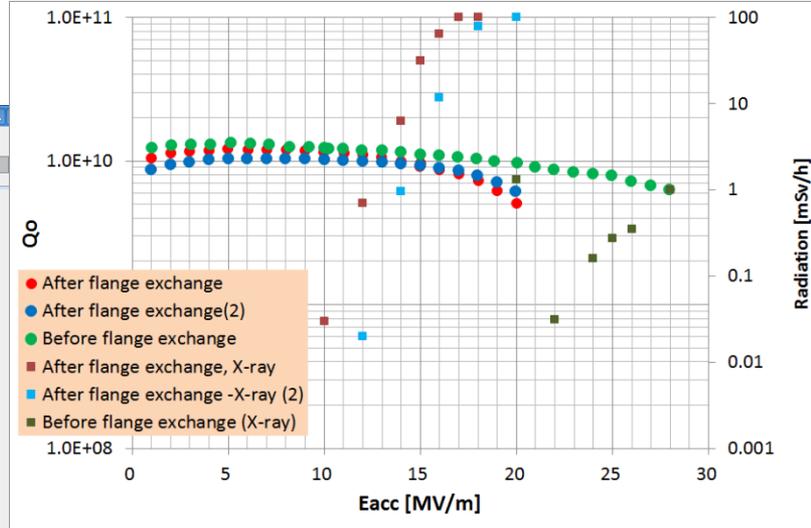
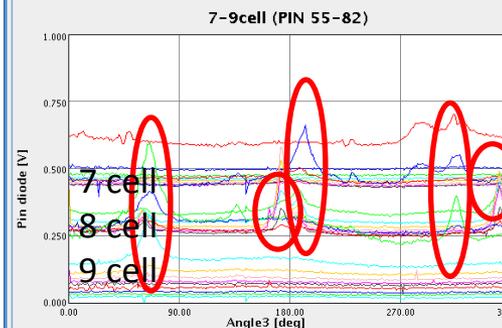
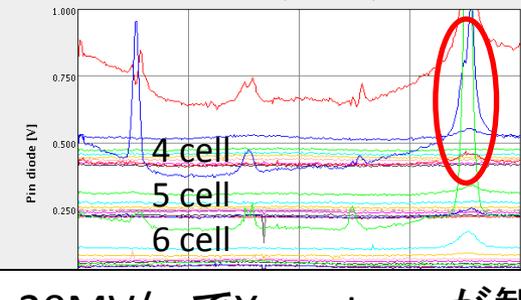
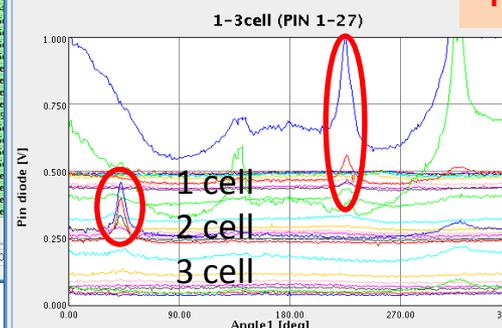
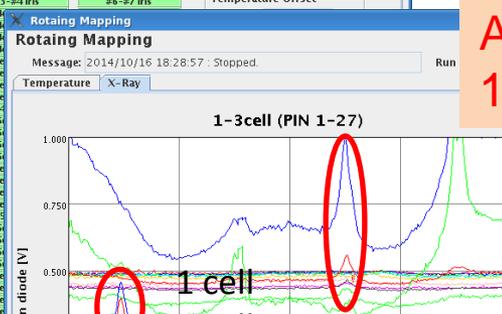
など、徹底的に調べる

フランジ交換での性能劣化の例

Before flange exchange study
20MV/m



SBP Iris	#3-#4 Iris	#6-#7 Iris	Temperature Offset
#1cell (up1)	#4	#5	
#1cell (up2)	#4	#5	
#1cell (up3)	#4	#5	
#1cell (up4)	#4	#5	
#1cell (down1)	#4c	#5c	
#1cell (down2)	#4c	#5c	
#1cell (down3)	#4c	#5c	
#1cell (down4)	#4c	#5c	
#1-#2 Iris	#4	#5	
#2cell (up1)	#5	#6	
#2cell (up2)	#5	#6	
#2cell (up3)	#5	#6	
#2cell (up4)	#5	#6	
#2cell (down1)	#5c	#6c	
#2cell (down2)	#5c	#6c	
#2cell (down3)	#5c	#6c	
#2cell (down4)	#5c	#6c	
#2-#3 Iris	#6	#7	
#3cell (up1)	#6	#7	
#3cell (up2)	#6	#7	
#3cell (up3)	#6	#7	
#3cell (up4)	#6	#7	
#3cell (down1)	#6c	#7c	
#3cell (down2)	#6c	#7c	
#3cell (down3)	#6c	#7c	
#3cell (down4)	#6c	#7c	

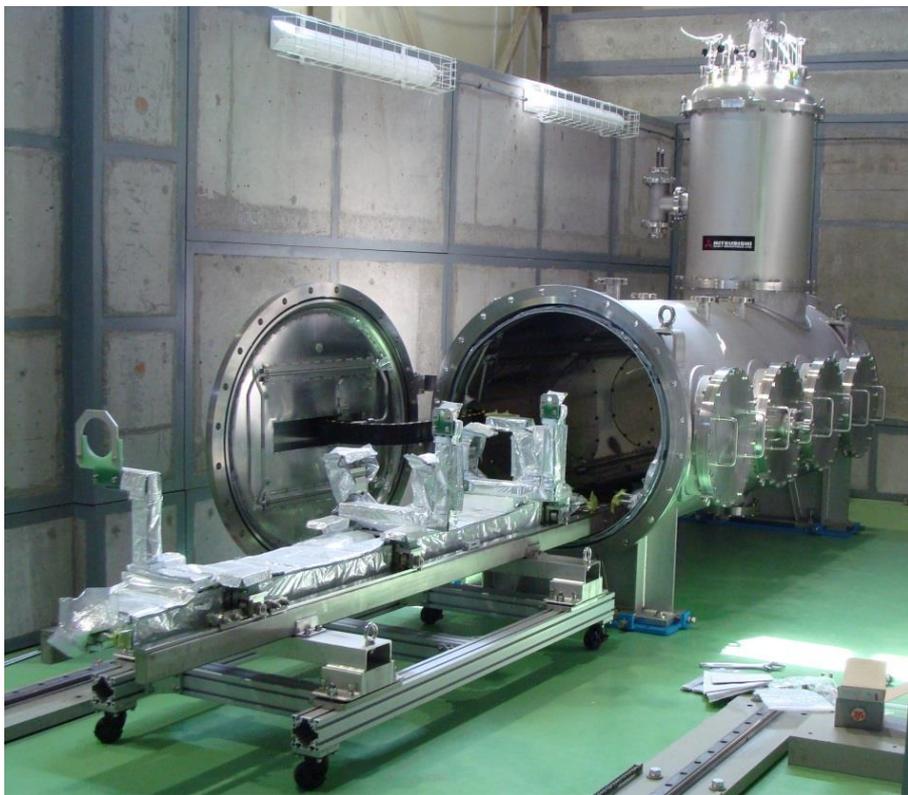


After flange exchange study
18MV/m ($1.3 \cdot 10^{-8} \text{Pa}$)



・20MV/mでX-ray traceが観測されていなかったが、フランジ交換作業後、10個近くのemitterが観測されるようになった。
 ・外したボルト・Uタイトシール・フランジ等からのゴミ混入が課題

アセンブリの対策 どのように進めていくか？



1. オフラインの試験

- ✓ Particle counter, fog generator等を使用して、ゴミの発生、エアの流れを確認しながら、清浄度・物品・手順などを徹底検証

2. 縦測定での試験(STF)

- ✓ ガス導入、フランジ交換等の作業については、縦測定で検証

3. 横型クライオスタットでの試験(AR東2)

- ✓ HOM damper、カップラー、Gate valve等の組立試験は横測定で検証
- ✓ ただし、一式が必要

① - 2 Field emissionからの復帰手法の確立

In situでの手法

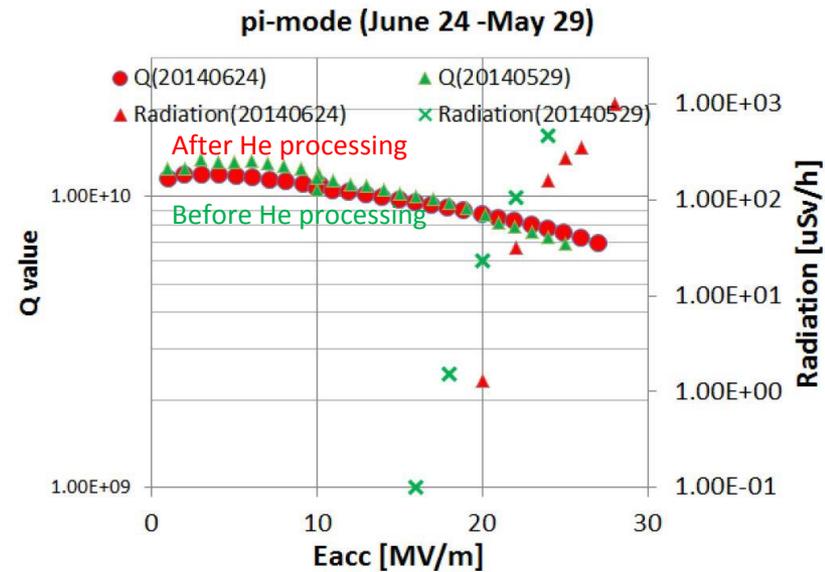
- RF pulse processing
 - 通常のcERL運転を通して確立
- He processing
 - 縦測定にて確立
 - Couplerについては、別途テストスタンドで試験

モジュールをばらした場合の手法

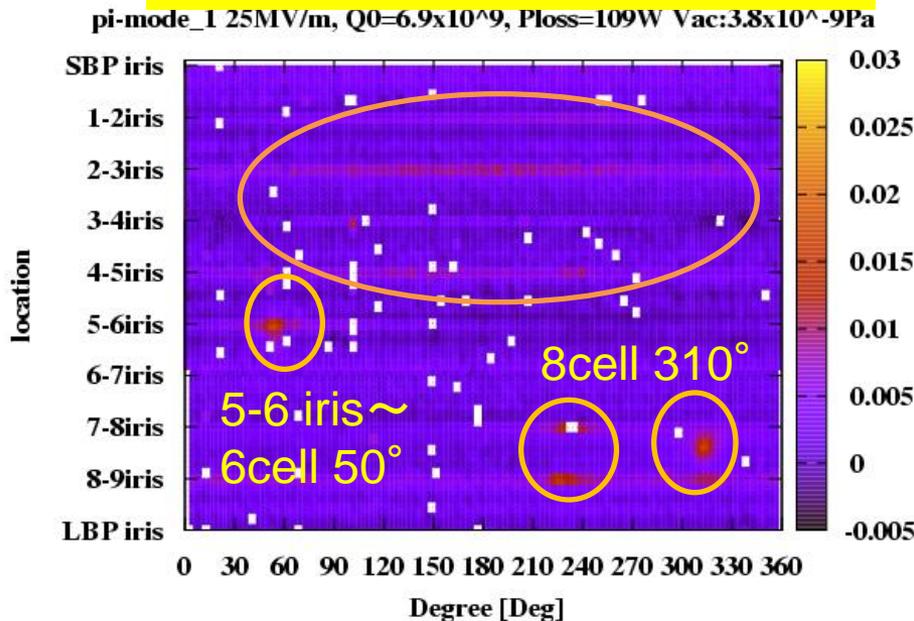
- HPR
 - Emitterが除去できることを、縦測定にて調査

He processing trial (0&1)

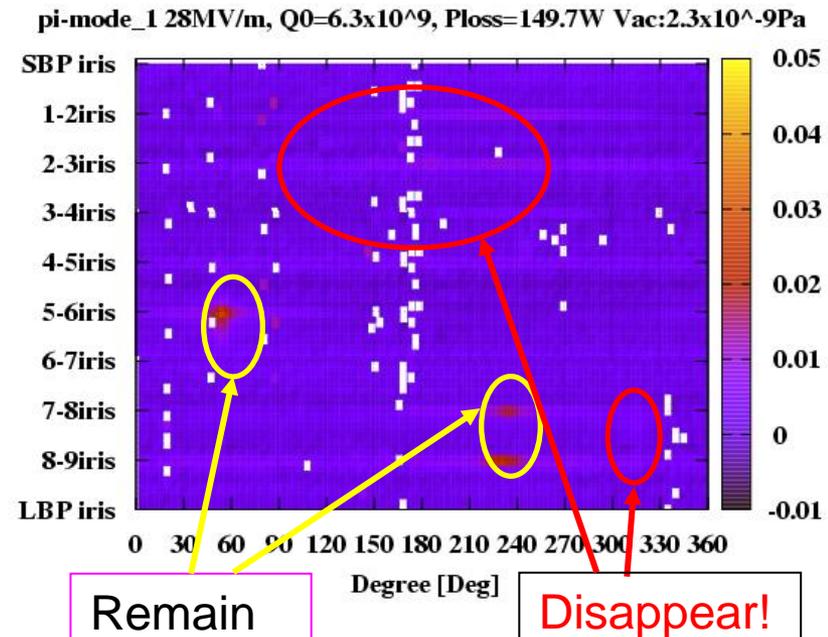
- He processing前に3個のエミッターを観測
- プロセス後に2つのエミッターが残り、1つが消えた。
- 数十分の“enhance mode”でのプロセスの後にエミッターが消失。
- Q値が多少改善(?)。Radiation on-setも少し上がった。



Before He processing : 10^{-8}Pa



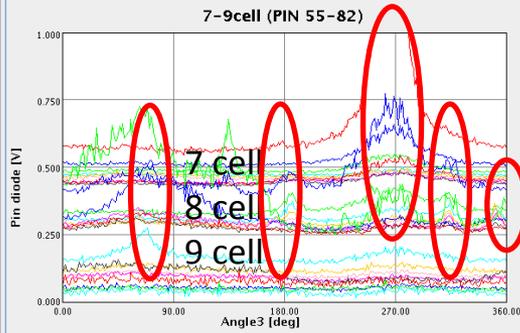
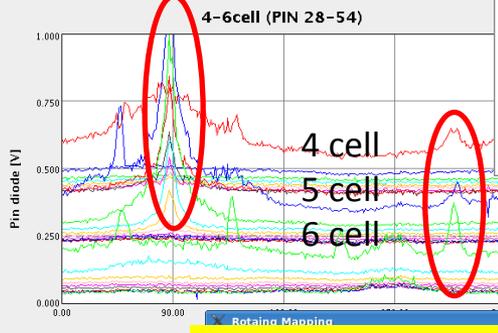
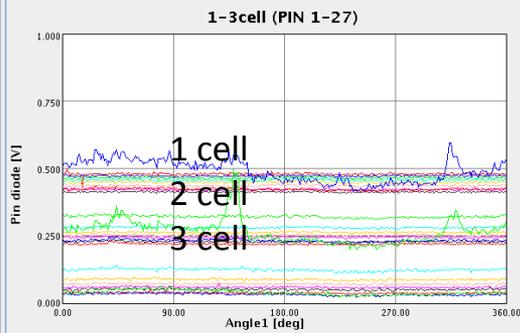
After He processing: 10^{-8}Pa



Study on HPR (2) ~continue~

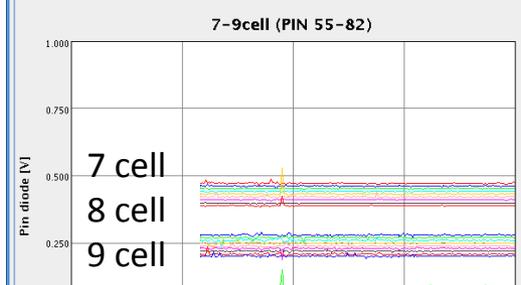
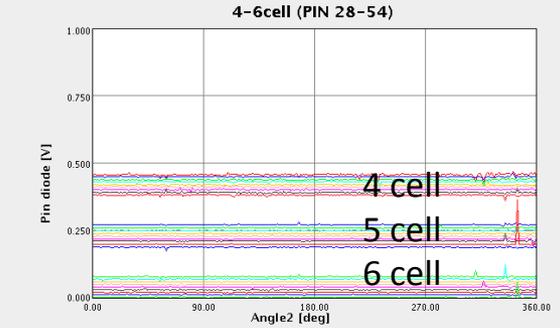
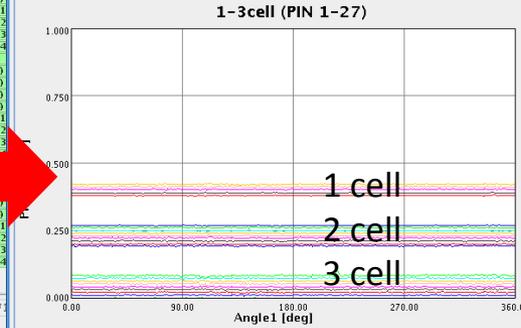
Comparison between 10th & 11th VT

10th Vertical test (18MV/m) ~before HPR



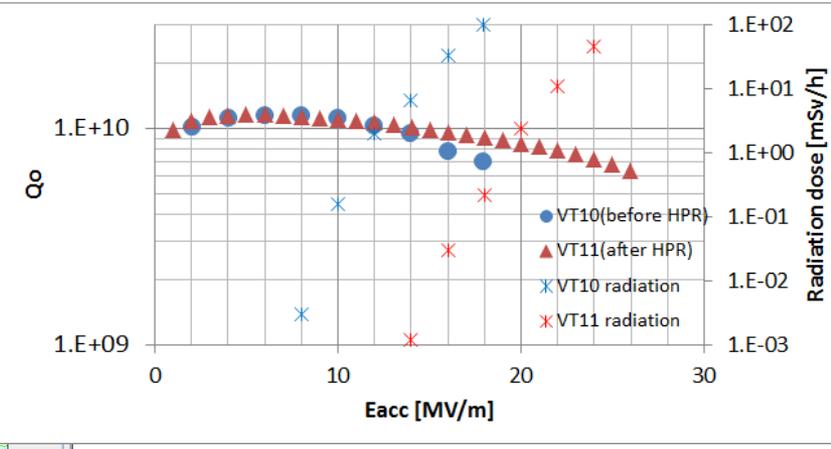
SBP iris	#3-#4 iris
#1cell (up1)	#4cell (up)
#1cell (up2)	#4cell (up)
#1cell (up3)	#4cell (up)
#1cell (up4)	#4cell (up4)
#1cell (down1)	#4cell (down1)
#1cell (down2)	#4cell (down2)
#1cell (down3)	#4cell (down3)
#1cell (down4)	#4cell (down4)
#1-#2 iris	#4-#5 iris
#2cell (up1)	#5cell (up1)
#2cell (up2)	#5cell (up2)
#2cell (up3)	#5cell (up3)
#2cell (up4)	#5cell (up4)
#2cell (down1)	#5cell (down1)
#2cell (down2)	#5cell (down2)
#2cell (down3)	#5cell (down3)
#2cell (down4)	#5cell (down4)
#2-#3 iris	#5-#6 iris
#3cell (up1)	#6cell (up1)
#3cell (up2)	#6cell (up2)
#3cell (up3)	#6cell (up3)
#3cell (up4)	#6cell (up4)
#3cell (down1)	#6cell (down1)
#3cell (down2)	#6cell (down2)
#3cell (down3)	#6cell (down3)
#3cell (down4)	#6cell (down4)

11th vertical test pi-mode (18MV/m) ~after HPR



SBP iris	#3-#4 iris	#6-#7 iris
#1cell (up1)	#4cell (up1)	#7cell (up1)
#1cell (up2)	#4cell (up2)	#7cell (up2)
#1cell (up3)	#4cell (up3)	#7cell (up3)
#1cell (up4)	#4cell (up4)	#7cell (up4)
#1cell (down1)	#4cell (down1)	#7cell (down1)
#1cell (down2)	#4cell (down2)	#7cell (down2)
#1cell (down3)	#4cell (down3)	#7cell (down3)
#1cell (down4)	#4cell (down4)	#7cell (down4)
#1-#2 iris	#4-#5 iris	#7-#8 iris
#2cell (up1)	#5cell (up1)	#8cell (up1)
#2cell (up2)	#5cell (up2)	#8cell (up2)
#2cell (up3)	#5cell (up3)	#8cell (up3)
#2cell (up4)	#5cell (up4)	#8cell (up4)
#2cell (down1)	#5cell (down1)	#8cell (down1)
#2cell (down2)	#5cell (down2)	#8cell (down2)
#2cell (down3)	#5cell (down3)	#8cell (down3)
#2cell (down4)	#5cell (down4)	#8cell (down4)
#2-#3 iris	#5-#6 iris	#8-#9 iris
#3cell (up1)	#6cell (up1)	#9cell (up1)
#3cell (up2)	#6cell (up2)	#9cell (up2)
#3cell (up3)	#6cell (up3)	#9cell (up3)
#3cell (up4)	#6cell (up4)	#9cell (up4)
#3cell (down1)	#6cell (down1)	#9cell (down1)
#3cell (down2)	#6cell (down2)	#9cell (down2)
#3cell (down3)	#6cell (down3)	#9cell (down3)
#3cell (down4)	#6cell (down4)	#9cell (down4)
SBP iris	#10-#11 iris	
#1cell (up1)	#11cell (up1)	
#1cell (up2)	#11cell (up2)	
#1cell (up3)	#11cell (up3)	
#1cell (up4)	#11cell (up4)	
#1cell (down1)	#11cell (down1)	
#1cell (down2)	#11cell (down2)	
#1cell (down3)	#11cell (down3)	
#1cell (down4)	#11cell (down4)	
#1-#2 iris	#11-#12 iris	
#2cell (up1)	#12cell (up1)	
#2cell (up2)	#12cell (up2)	
#2cell (up3)	#12cell (up3)	
#2cell (up4)	#12cell (up4)	
#2cell (down1)	#12cell (down1)	
#2cell (down2)	#12cell (down2)	
#2cell (down3)	#12cell (down3)	
#2cell (down4)	#12cell (down4)	
#2-#3 iris	#12-#13 iris	
#3cell (up1)	#13cell (up1)	
#3cell (up2)	#13cell (up2)	
#3cell (up3)	#13cell (up3)	
#3cell (up4)	#13cell (up4)	
#3cell (down1)	#13cell (down1)	
#3cell (down2)	#13cell (down2)	
#3cell (down3)	#13cell (down3)	
#3cell (down4)	#13cell (down4)	

Temperature Offset	
Offset1	0.01
Offset2	0.01
Offset3	0.01
Offset	
#1Cell:	0.2 <input checked="" type="checkbox"/>
#2Cell:	0.1 <input checked="" type="checkbox"/>
#3Cell:	0.0 <input checked="" type="checkbox"/>
#4Cell:	0.2 <input checked="" type="checkbox"/>
#5Cell:	0.1 <input checked="" type="checkbox"/>
#6Cell:	0.0 <input checked="" type="checkbox"/>
#7Cell:	0.2 <input checked="" type="checkbox"/>
#8Cell:	0.1 <input checked="" type="checkbox"/>
#9Cell:	0.0 <input checked="" type="checkbox"/>
Angle Offset	
Offset1	0.0
Offset2	0.0
Offset3	0.0



- 10th VTの後、HPRを行った。
- 10th VTで観測したエミッターは消失した。
- Q値回復。Radiation on-setも上がった。

新しいエミッターもRF conditioningのうちに消滅

② 3GeV実機(EUV?)に向けての 設計・製作

3GeV ERL全体設計と主空洞

- 3GeV ERLの全体設計を進めるとともに、要求されるパラメーターにマッチした、**空洞・HOM・モジュール**の設計を行う。
 - 大電流、高加速勾配のCW運転は、現状では困難
- **ビーム電流・加速勾配・packing factor**が設計の上で重要なパラメーター
 - 特に**ビーム電流値**は設計に大きな影響を与える
- 運転・メンテ時の対応のしやすさも考慮。
- 建設コスト・ランニングコストも踏まえた上での、加速勾配の最適化等進める

このプロトタイプモジュールをcERLに入れられるのが理想的

空洞・HOM

- 3GeV ERLでの全体設計に依存
- 電流値、packing factorの目標値に依存する。Packing factorで制限される場合には、自由度無くなるかも。
- 空洞設計において、ビーム電流(HOM)と加速勾配(field emission)は相反するパラメーター。どちらに重きをおいた設計とするのか？
- 設計が決まれば、空洞製造は、おそらく問題無い。
- HOMは新たな開発要素
- どの方式を採用しても、かなりのR&D項目がある。
 - Beampipe型: 材質、周波数帯、製造法、清浄化、ヒートサイクル
 - Coupler型: CW化、冷却、stop-bandへの対応、HOM減衰
 - Waveguide型、その他新アイデア: 新規設計、開発

沢村さんからの報告を参照

クライオモジュール

- 3GeV ERLの全体設計とからんで、コンセプトを決定
 - 4空洞/8空洞の選択
 - モジュール長
- TESLA(STF) baseのモジュールのCW化で対応か？
 - STFモジュールを参考
 - STF-2でCW試験(ヒーター使用)。横型クライオスタットでも試験可能。
- R&D項目は？
 - アセンブリ、CWへの対処、磁気シールド、入熱、冷却、アンカー、ケーブルなどなど。
- 横測定スタンドを作って、効率よくR&Dを進めたい

量産に関して

- 量産に必要なもの
 - 施設
 - 人員確保、教育
 - 経験
- EUVのような数10台規模の加速器の経験を積むことは、超伝導空洞製造の立場からは非常に有益
- KEK/日本/海外にかかわらず、超伝導加速器の計画には積極的に関与して経験を積み、底力を蓄えておく。

まとめ

- いちからクライオモジュール設計をして、何とかcERLのビーム運転までこぎ着けた。
- 主空洞の課題は
 - Field emission対策(アセンブリ、リカバリー)
 - 実機に向けての設計・製作(空洞・HOM・モジュール)
- 3GeV実機またはEUVを展望した時に、どのように短期・中期・長期の戦略を持つのかを議論して欲しい(状況は随時変わるので、今回に限らず継続的に議論を続けて欲しい)