

第2回 cERL ミニワークショップ 超伝導電子銃の開発

○許斐太郎、梅森健成、加古永治、小林幸則、山口誠哉
(高エネルギー加速器研究機構)
松田竜一、柳澤剛 (三菱重工)

報告内容

1. 概要

i. 超伝導電子銃の特徴

ii. 目標パラメータ

iii. 試作機の開発計画

a. 1~3号機の目標

b. 1号機における縦測定計画

2. 試作1号機 空洞設計

3. 試作1号機 空洞製作

4. 高電界試験準備

i. RF パラメータ

ii. 処理内容

iii. Field調整

iv. 電界研磨

5. 高電界測定

i. 測定結果

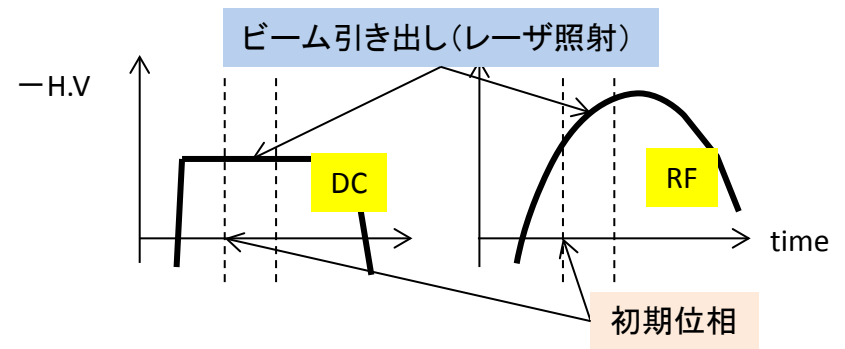
ii. 内面観察

6. まとめ

1. 概要 超伝導RF電子銃の特徴

超伝導電子銃の長所

- 超伝導RF空洞は空洞壁面での**低RF損失** (~10W)
⇒加速電界 10MV/m以上でCW運転可能。
- RF電子銃は**高電界加速**を得やすく短距離で光速付近まで加速可能。
⇒空間電荷効果を緩和し、大電荷低エミッタンスビームを引き出しやすい。



超伝導RF電子銃の短所

- 空洞電磁界のRF周期による変化
- 静磁場は超伝導空洞内に侵入できない(マイスナー効果)
⇒RF効果、ビーム拡散による投影エミッタンス、エネルギー広がりの増大
- カソード交換機構でRF損失が生じてはならない。
⇒RFフィンガーでは不十分
⇒Choke構造を用いてカソードプラグを仮想短絡させる。

- 超伝導RF電子銃の長所を発揮させるには解決しなければならない課題が多い。
- 先行研究 (HZDR, HZB, 北京大学, BNL) を踏まえた上で基礎から進める。
 1. 3GHz空洞を用いて実証を進め、到達可能な性能を検証する。

1. 概要 目標パラメータ

超伝導RF電子銃の性能を生かしやすい、
高繰返し・高電荷運転の特徴を持つERLをターゲットに開発を進める。

100mA-ERL (KEK) を目標とした超伝導電子銃のビームパラメータ

空洞出口での仕様:

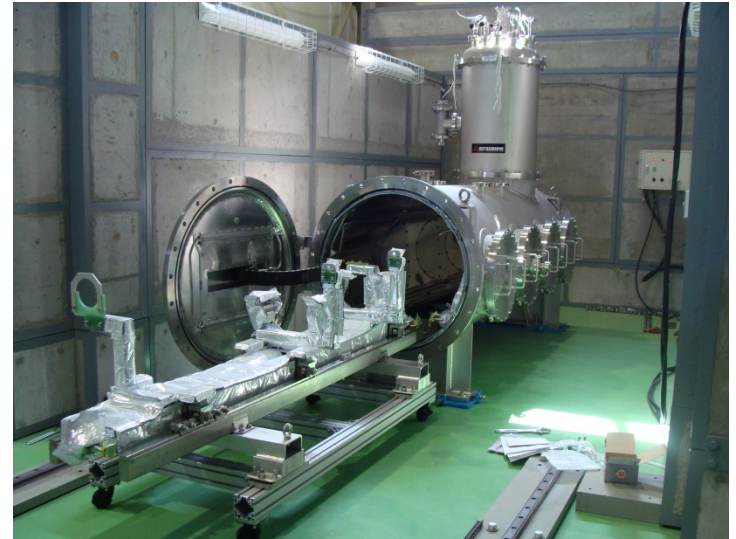
駆動周波数 f_0	1.3 GHz
出口エネルギー KE	2 MeV
平均ビーム電流 I	100 mA (1.3 GHz, CW、入力RF100 kW x2)
初期ビーム径、バンチ長	$\phi 2$, 10 ps (矩形形状)
出口バンチ長、	3ps (rms)
最大表面電界強度 E_{sp}	< 50 MV/m
エミッタンス ε	< 1 mm mrad
エネルギー拡がり ΔKE	< 0.1 %
空洞数	1.5 空洞 (1つの金型で空洞を成形)

最大表面電界強度はCW運転の安定性を考慮してマージンを十分に持たせた設計。
超伝導RF空洞の最大表面電界は100 MV/mに達している。

1. 概要 試作機の開発計画

先行研究 (HZDR, HZB, 北京大学, BNL) を踏まえた上で基礎から進める。

試作2号機はAR-E第2で行う



試作1号機 (試験中)

- **空洞単体**で縦測定のみを行う。
- ※縦測定とは空洞全体を液体ヘリウムに漬けて行う高電界測定のこと。

試作2号機 (設計中)

- テストクライオモジュールでの冷却・高電界試験

試作3号機

- ハイパワー試験、ビーム試験を行う。
- 場所は未定

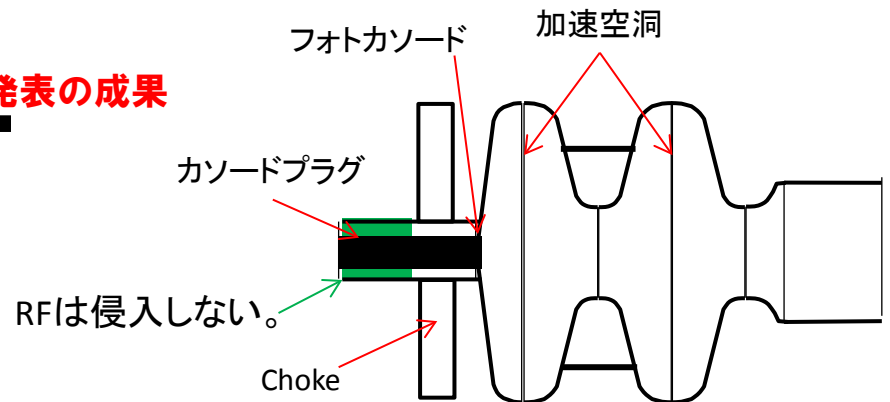
試作1号機の詳細

空洞セル単体から徐々に電子銃構造へ近づけて高電界試験を進める。

測定順序と付加構造

順序	Choke	カソードプラグ	フォトカソード
1	×	×	×
2	×	○	×
3	○	×	×
4	○	○	×
5	○	○	○

本発表の成果



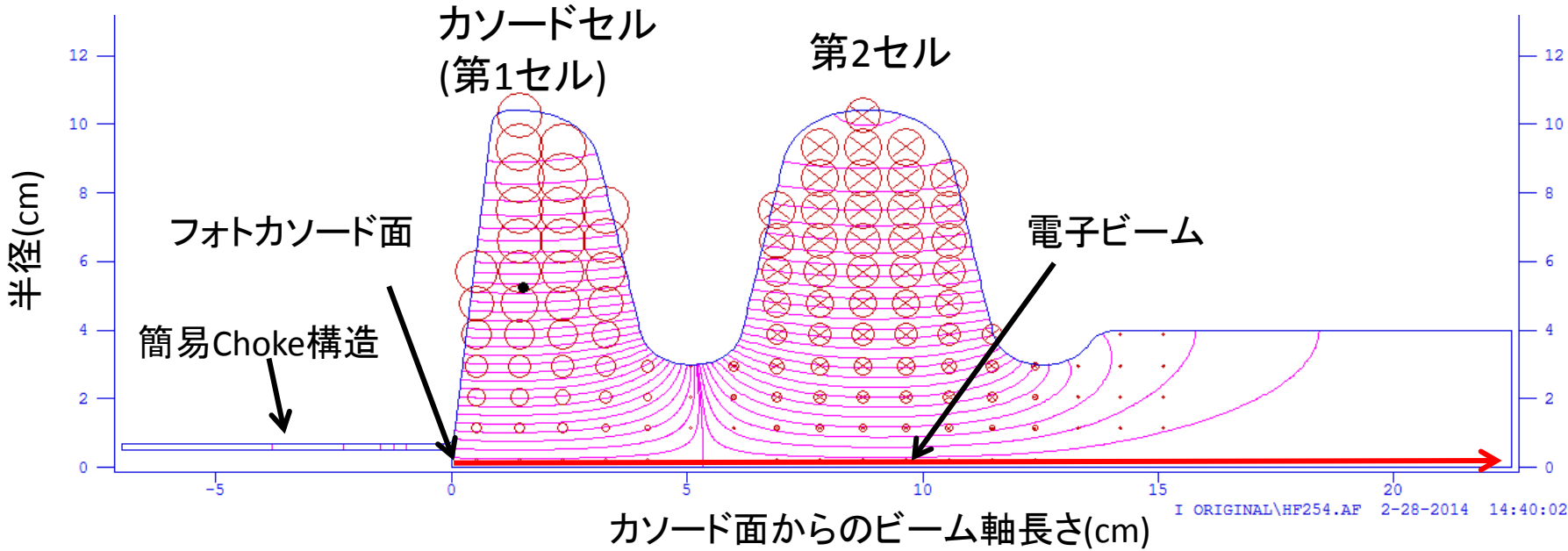
2. 試作機1号機の設計

設計の詳細は
第11回日本加速器学会年会 MOOL13 松田竜一 他
「KEKIにおける超伝導RF電子銃の開発」を参照。

超伝導電子銃の課題

- 空洞電磁界のRF周期による変化
 - 静磁場は超伝導空洞内に侵入できない(マイスナー効果)
⇒**空洞形状のみでビーム性能が決まる。**
 - 空洞に比べ高温になるカソードを空洞に接触させられない。
 - 全空洞壁面のRF損失をわずか数十Wで抑えなければならない。
⇒**Choke構造を用いてフォトカソードプラグを仮想短絡させる。**
- ↓
- SUPERFISHとGPTを用いて空洞形状の最適化を行った。
⇒**空間電荷効果は”Spacecharge3D”, マクロ粒子数1kで計算。**

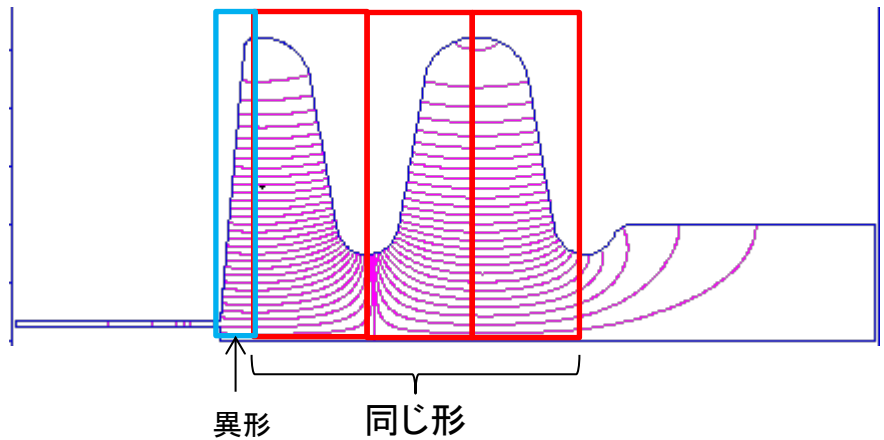
設計に用いた空洞形状：SUPEFISHの電磁界分布



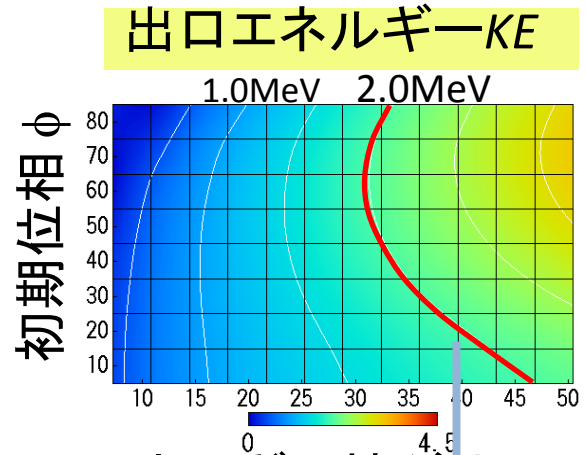
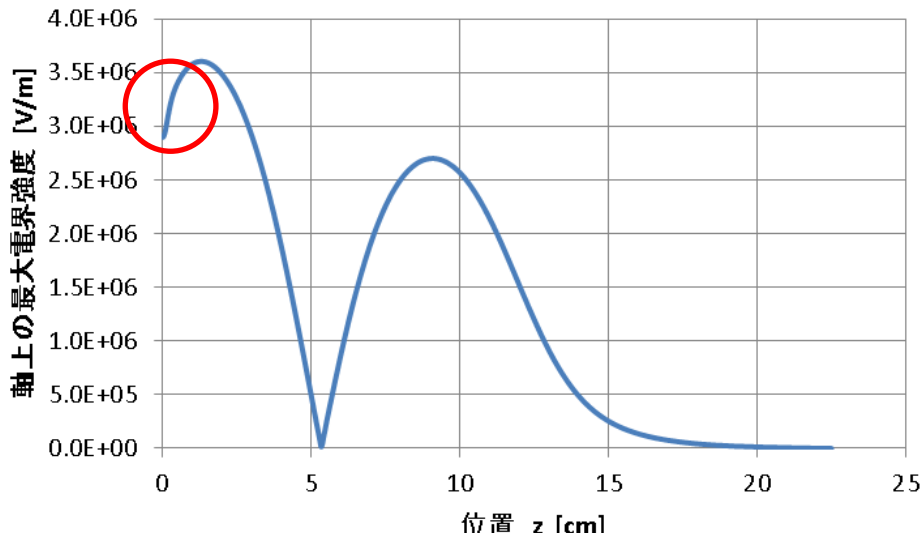
2. 試作機1号機的设计:

設計の詳細は
 第11回日本加速器学会年会 MOOL13 松田竜一 他
 「KEKIにおける超伝導RF電子銃の開発」を参照。

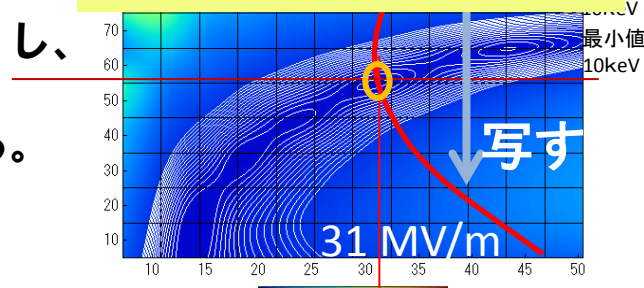
金型コストを抑えるために、
 カソード側のハーフセル以外は同一形状



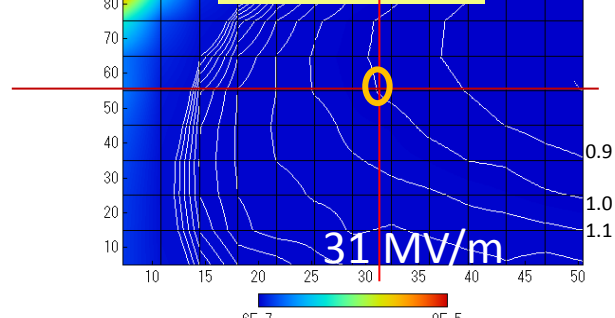
- カソード上で大電界になるよう、カソードセル側の電界を強くし、2セル目で2MeVに合わせる。
- カソード表面の電場勾配を空間電荷効果の発散と釣り合わせる。



エネルギー拡がりΔKE



エミッタンスε



横軸: 軸上電界強度 E_0

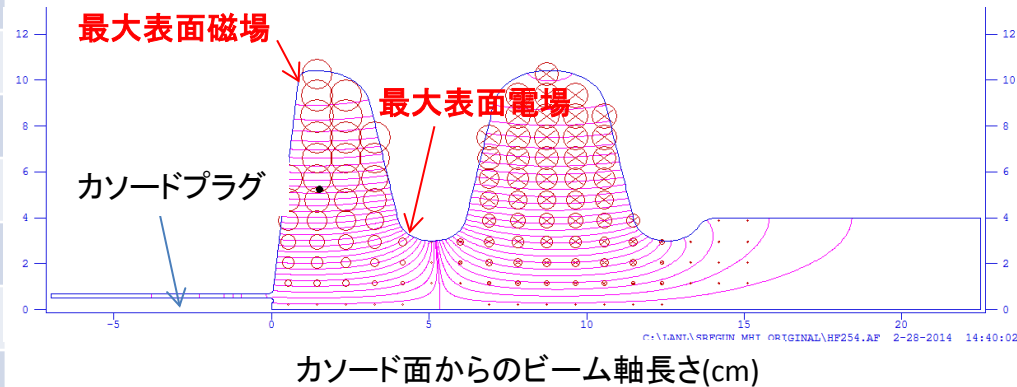
2. 試作機1号機的设计

- **空洞形状を最適化した結果、目標性能を満足する設計を得られた。**
 詳細は去年の第11回加速器学会年会MOOL13 松田竜一 他を参照
- **カソード上で大電界になるよう、カソードセル側の電界を強くしている。**
 2セル目で2MeVに合わせる。
 ⇒最大電界は**カソードセル**アイリス、最大表面磁場は**カソードセル**赤道

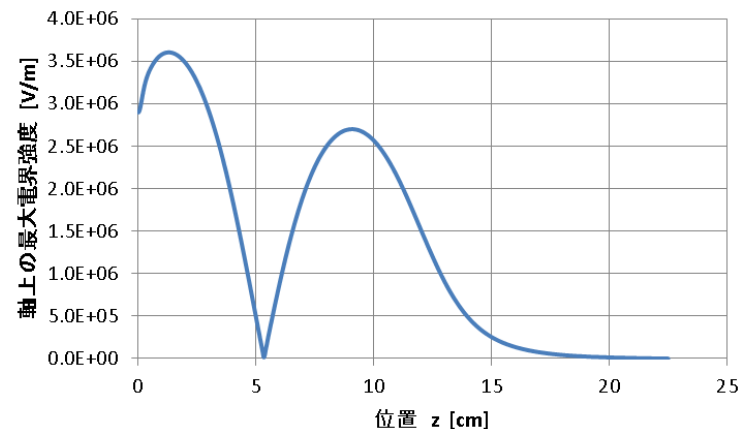
パラメータ	値
ビームエネルギー	2 MeV
投影エミッタンス	0.98 mm.mrad
投影エネルギー広がり	0.09%(1.84 keV)
最大表面電場	41.9 MV/m
最大表面磁場	95.2 mT
初期RF位相	55°
Geometrical Factor	135.6 Ω (β=1空洞は約260 Ω)
目標表面抵抗	30 nΩ (ILC ターゲット)
目標Q値	4.5 × 10 ⁹
目標空洞ロス	8 W

設計の詳細は
 第11回日本加速器学会年会 MOOL13 松田竜一 他
 「KEKにおける超伝導RF電子銃の開発」を参照。

SUPEFISHによる電磁界分布



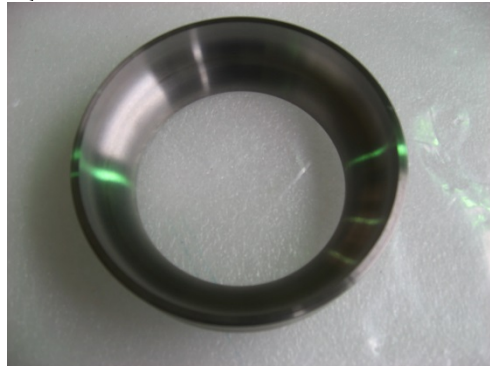
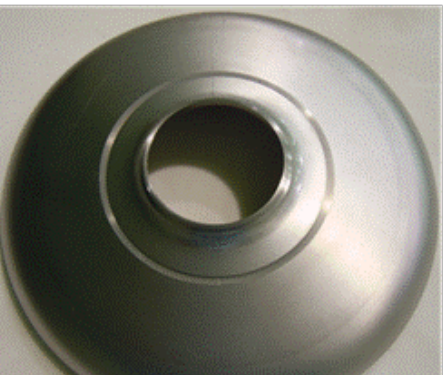
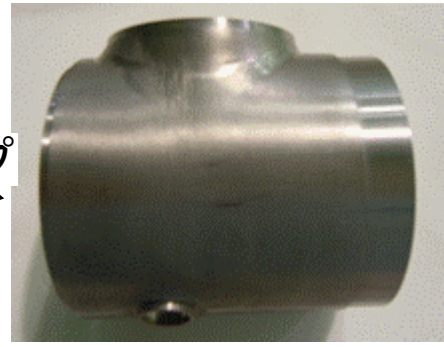
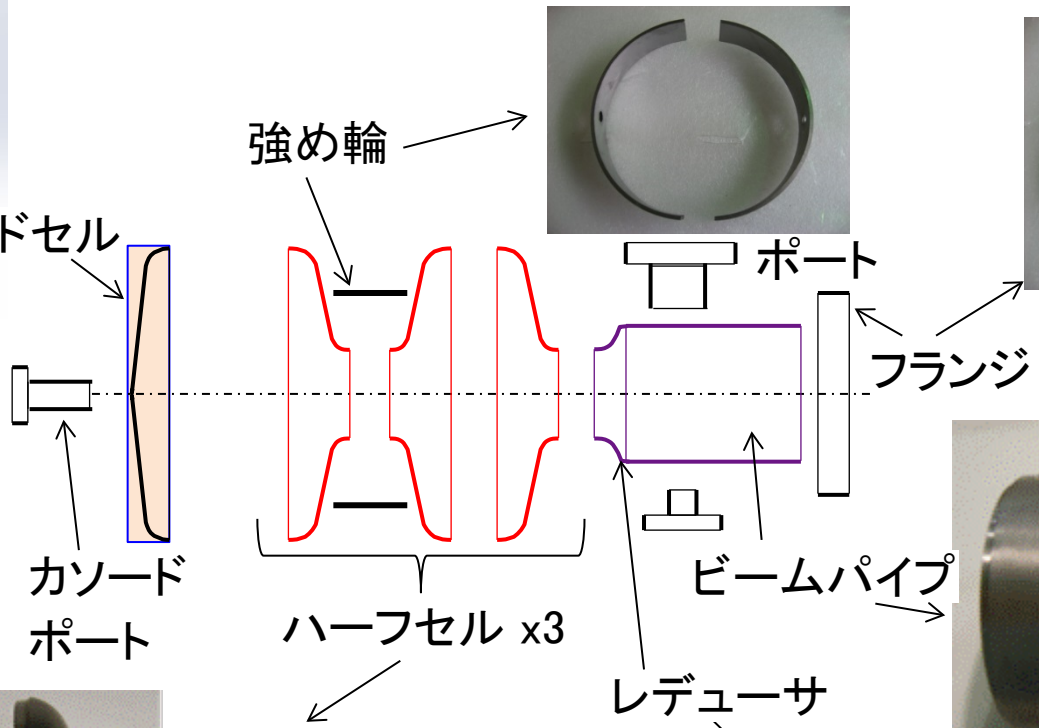
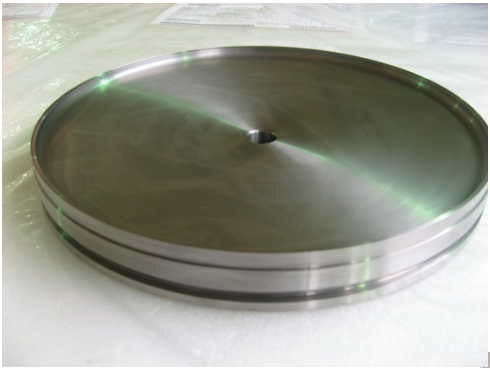
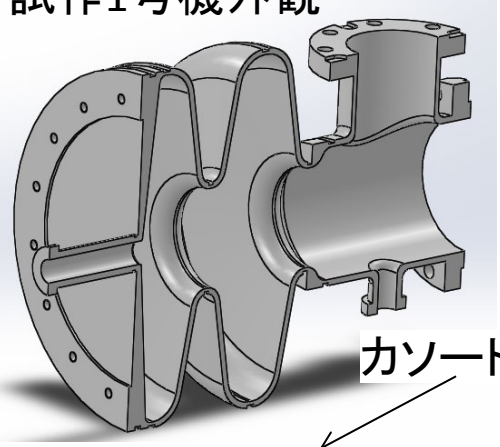
軸上電界強度分布



3. 試作機1号機の製作 部品製作

試作1号機外観

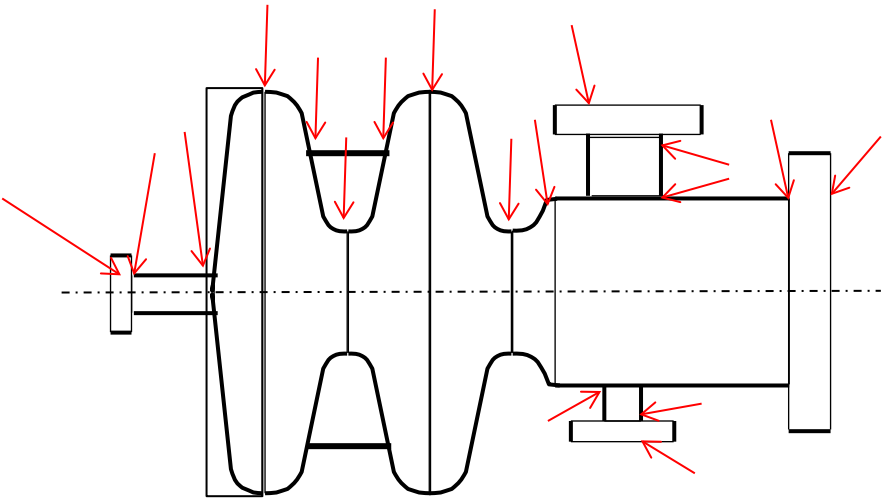
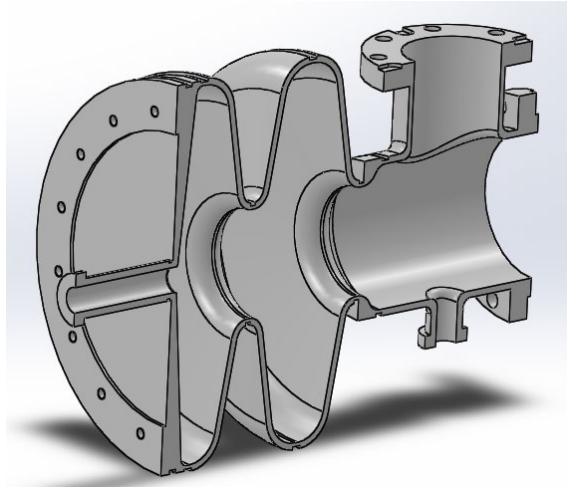
剛性が必要なカソードセルを削り出しによって製作。
他のハーフセルはコスト削減のために共通金型で製作。



ハーフセルのトリム加工

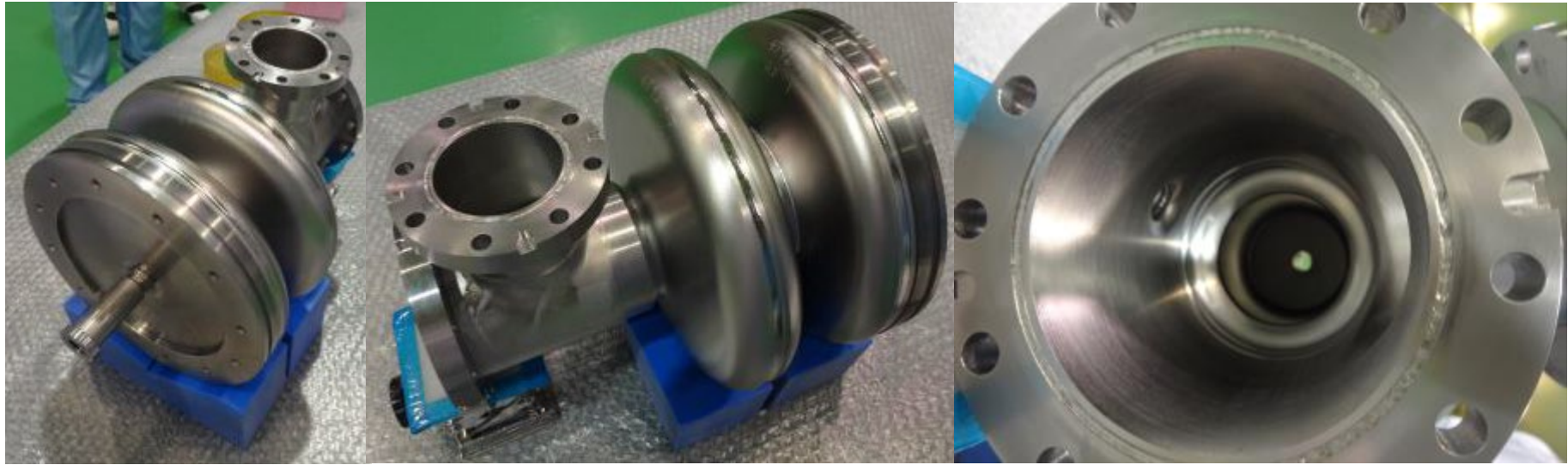
3. 試作機1号機の製作

各部分は全て電子ビーム溶接で接合する。



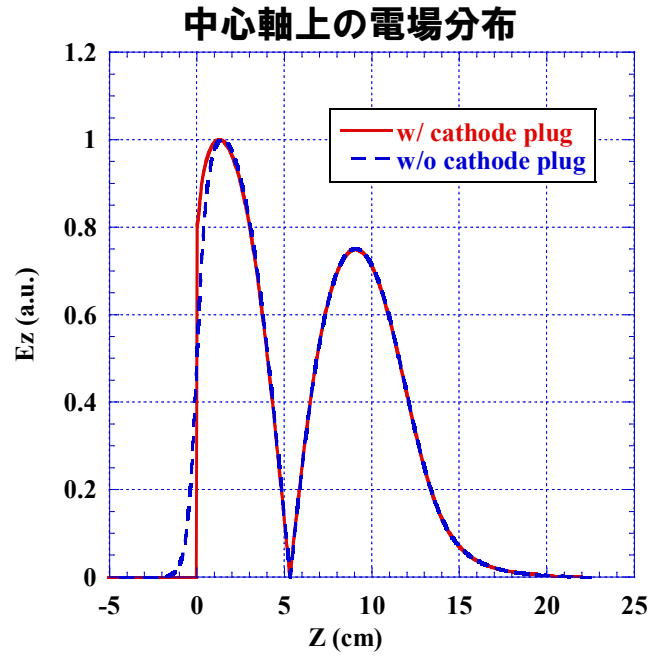
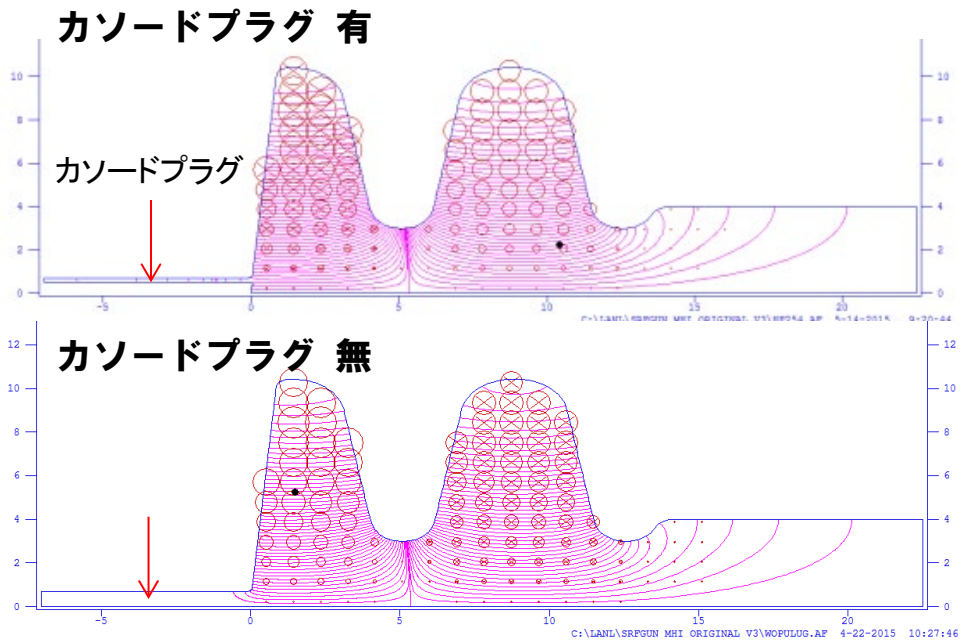
電子ビーム溶接箇所: 赤矢印

完成した超伝導電子銃空洞



4. 高電界試験の準備 RFパラメータ

- カソードプラグを装着しない空洞セル単体でのRF特性を評価する。
- カソードプラグの有り無しが空洞のRFパラメータへ与える影響はない。



Design Parameter	カソードプラグ有	カソードプラグ無
Frequency	1300.007 MHz	1300.088 MHz
Geometrical Factor	135.6 Ohm	135.5 Ohm
Hp/Ep	2.27 mT/(MV/m)	2.28 mT/(MV/m)

注意: 本発表で述べる高電界試験とその準備は全て、カソードプラグなしで行っている。

4. 高電界試験の準備 処理内容

電子銃空洞は $\beta=1$ 空洞と空洞形状が異なるため、各処理では電子銃空洞に適した処理方法を用いている。特に異なる処理について説明する。

処理内容	内容
化学研磨	106 μm
アニール	750°C x 3時間
チューニング	セル間比率の設計からのズレ 1%以内
電解研磨	20 μm
超音波脱脂洗浄	15min, 51°C, 36kHz x 4800W
HPR (高圧水洗)	ブランク無し2h+外面15min+ブランク有2h
組立	クリーンルームClass 10
ベーキング	130°C x 44時間



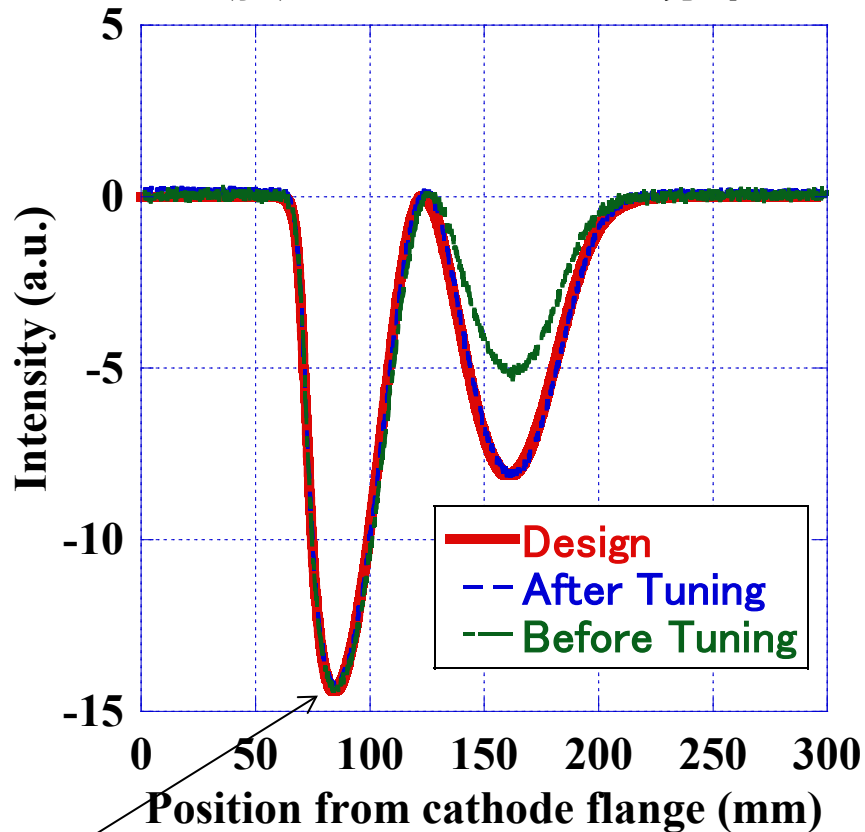
空洞単体での高電界試験 (カソードプラグは装着しない。)

4. 高電界試験の準備 Field調整

特にField強度比に注意してチューニングした。
チューニングにはビーズ測定を用いている。

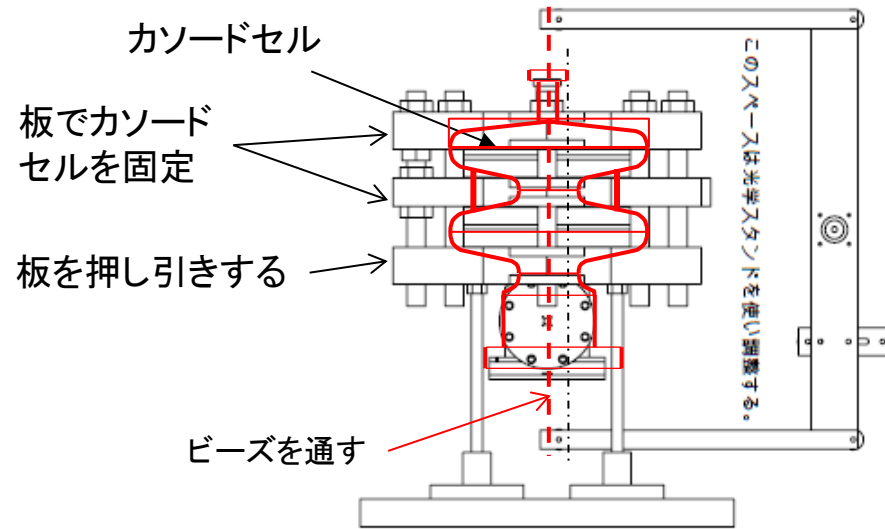
Filed強さの比率のずれを設計値の1%以内に
追い込んだ。

加速モードのパワー分布

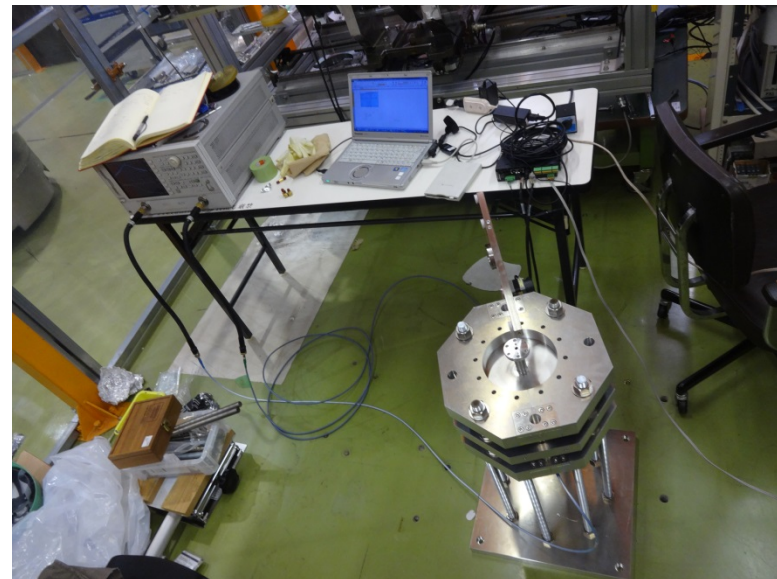


カソードセルの強さで規格化している。

チューニングJIG



作業風景



4. 高電界試験の準備 表面処理

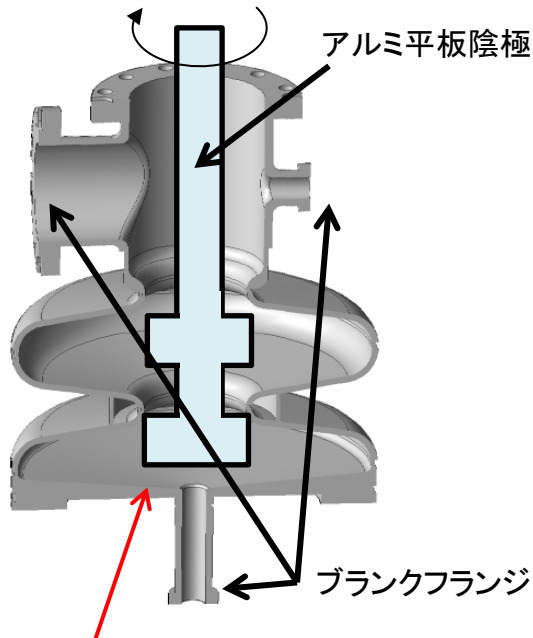
表面処理の最終研磨である電解研磨について。

- 電解研磨液は貯め込み式。
- 研磨液を拡散させるために回転羽状に切り出した純アルミ陰極を使用。
- アルミ陰極は常時回転させて研磨液の拡散を行う。

処理時のトラブル：

- 発生した水素ガスの泡が空洞からこぼれそうになった。
⇒このため、1分ごとに電極電源のON/OFFを行い、20 μ m研磨した。
- 電解研磨終了時にアルミ電極を空洞へぶつけ凹み傷を作ってしまった
⇒次回から機械式リミッターを取り付け安全を図っている。

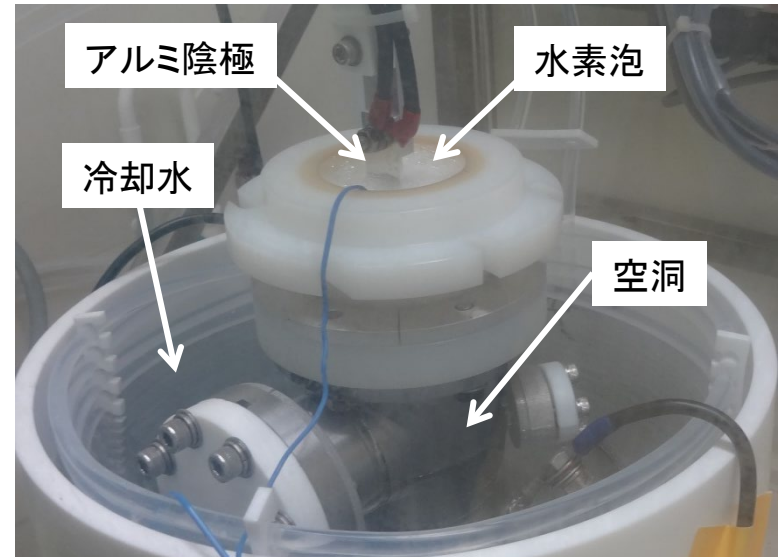
電界研磨の模式図



アルミ平板陰極



電界研磨の様子



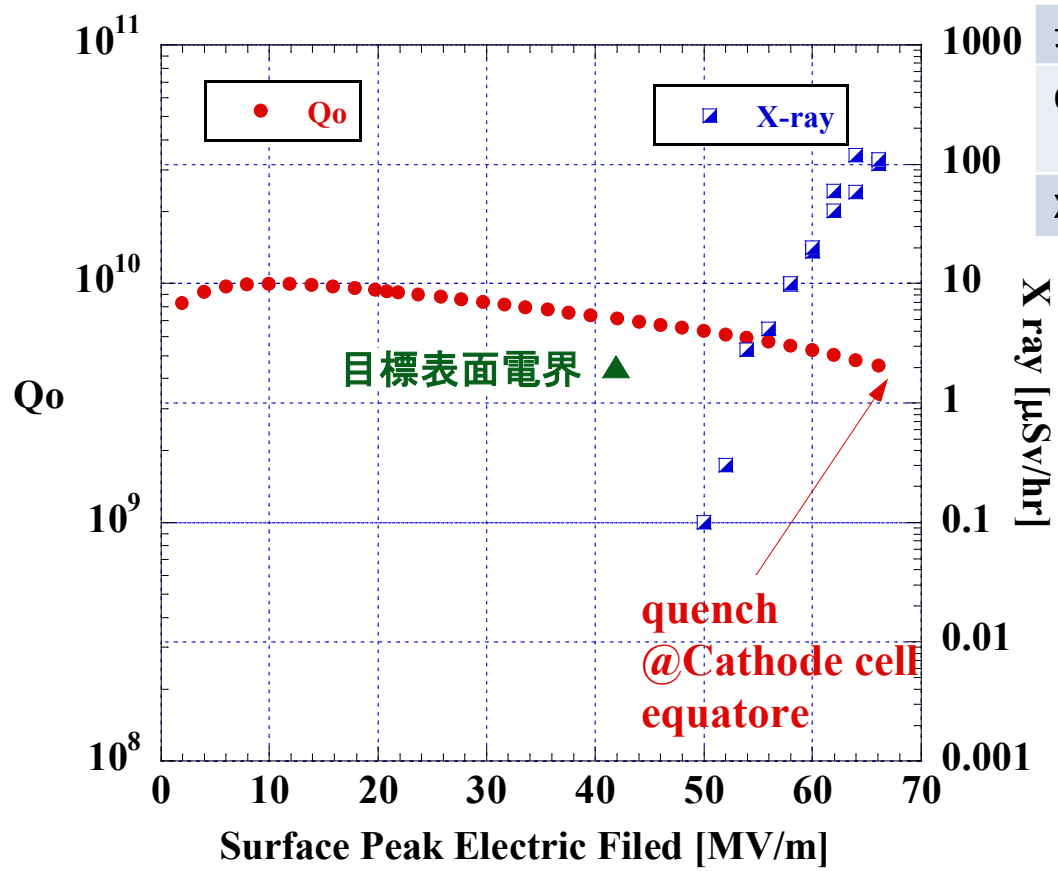
この部分へアルミ電極をぶつけた。

← 次回からの対策：機械式リミッターを取り付ける。

5. 高電界試験 結果

- 幸い、電解研磨時の傷は大きな問題とならなかった。
- クエンチした個所はカソードセル赤道部。
- 目標表面電界まではField Emissionはなく、十分満足できる性能である。

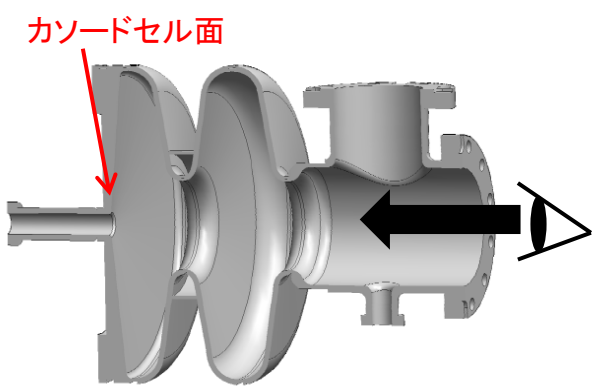
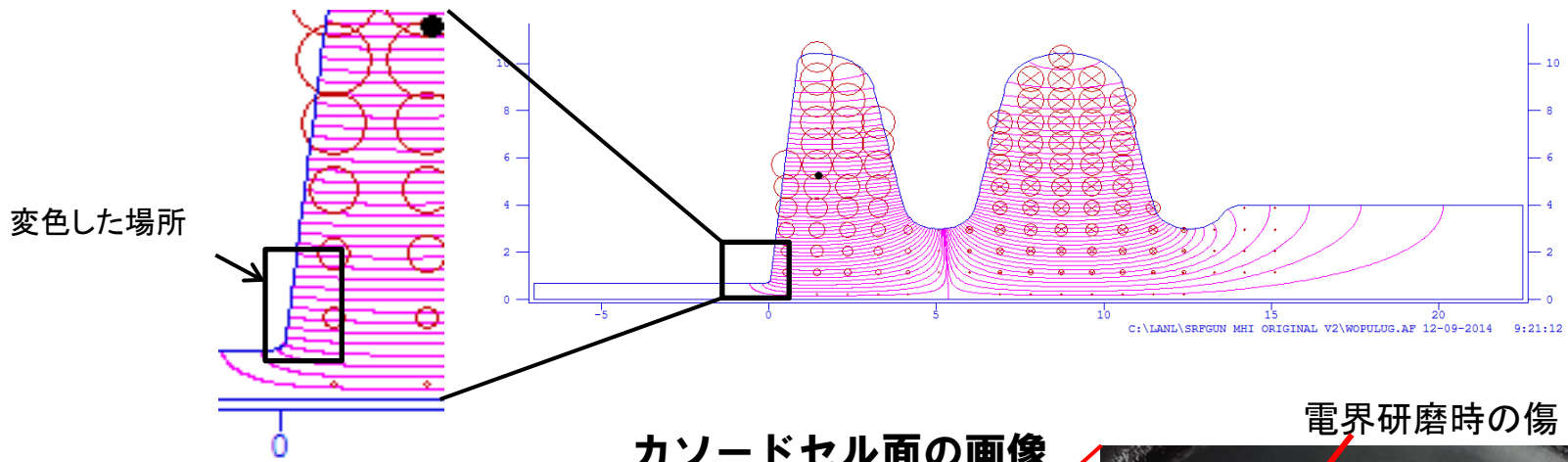
	目標	測定結果
最大表面電場	41.9 MV/m	66 MV/m
Qo値	4.5×10^9	4.31×10^9 @66 MV/m 7.15×10^9 @42MV/m
X-Ray		Onset 50 MV/m



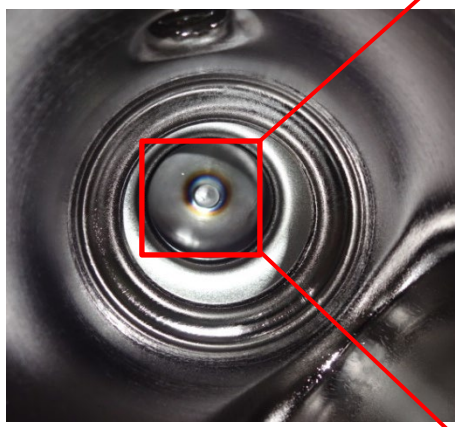
注意: 横軸は加速電界ではない。
カソードセルアイリスにある最大表面電場を示している。

5. 高電界試験 内面観察

高電界試験測定後に空洞内面を観察すると、カソードセルに変色が生じていた。変色原因は見当もつかず不明⇒今後の測定で解明していく。



カソードセル面の画像



電界研磨時の傷



ビームパイプ側からカソードセル面を覗いている。

まとめ

- 超伝導電子銃の到達可能性能を検証するための研究を始めた。
- ERLをターゲットとした目標パラメータを設定した。
- 目標パラメータを満たす空洞形状設計が完了した。

- 空洞単体の試作1号機を製作し、高電界試験を行った。
- 高電界試験では最大表面電場 $E_{sp}=50\text{MV/m}$ からField Emissionが生じたが、設計目標である最大表面電場 $E_{sp}=41.9\text{MV/m}$ では目標 $Q_0=4.5\times 10^9$ を上回る 7.15×10^9 をField Emissionなしで達成した。
- 空洞単体では設計目標を満足できる

- 今後は他の電子銃に必要な構造を付けた試作1号機の測定を行いつつ、
- 冷却構造等までを検討した試作2号機的设计を進める。