

KEKにおける超伝導RF電子銃の開発

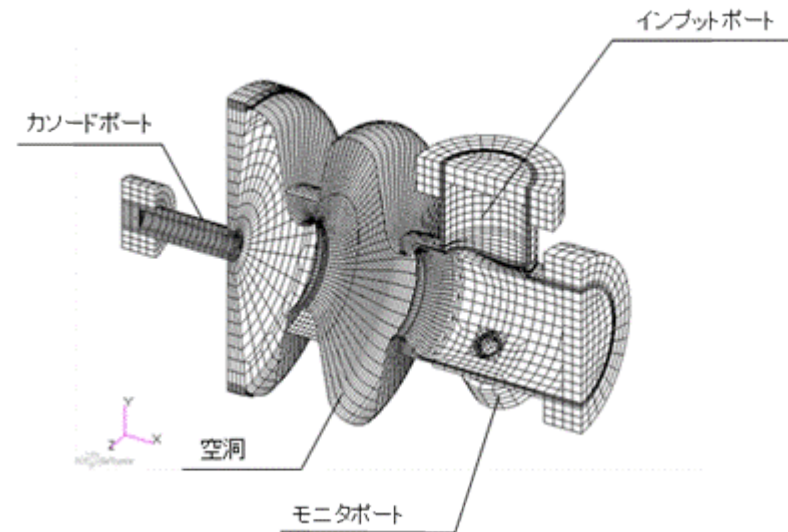
○松田 竜一, 井上 典亮(三菱重工), 許斐 太郎(分子研),
小林 幸則, 山口 誠哉, 加古 永治(高エネ研)

第11回日本加速器学会年会
MOOL13

2014/08/11

三菱重工業株式会社

技術統括本部



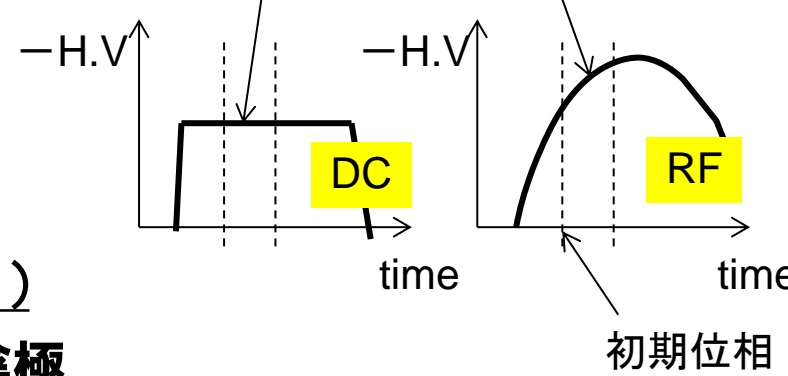
1. 超伝導RF電子銃 長所と開発動向
2. 空洞形状の設計方針、仕様
3. 開発フロー
4. 試作1号機の設計製作
 - 4.1 空洞形状と各寸法、パラメタの設定
 - 4.2 空洞形状最適化のためのビームダイナミクス
 - 4.3 製作状況
 - 4.4 熱構造解析
 - 4.5 縦測定計画 概要
5. まとめ

1. 超伝導RF電子銃 長所と開発動向

1.1 超伝導RF電子銃の長所

- ・空洞材料を超伝導化すると空洞表面での**損失が小さい**
- ・RF電子銃は高電界を得やすく短距離で光速付近まで加速できる
⇒ **低エミッタンスビームを得やすい**
- しかし加速電界が変化するため、**低エネルギー拡がりのビームは得難い**

ビーム引き出し(レーザー照射)



1.2 開発動向 (HZB(独ベルリン)の例)

Stage 1 (2011/4 first beam)

1.5空洞、超伝導Pb陰極
1.8MeV, 6pC, 50nA

Stage 2~3(開発中)

1.5空洞、CsK₂Sb陰極
>1.8MeV, 77pC, 4~100mA

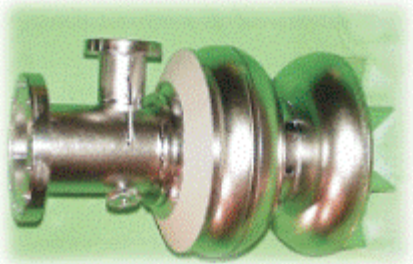
計画: 機械設計~製作中

2014 中ごろ 低平均電流

2016 初め >1 mA

**KEK計画仕様と近く、
ベンチマークの対象**

出典: 2012TTC Meeting, Knobloch



2. 空洞形状の設計方針、仕様

方針:

次世代ERL、高出力FELの電子源として、所定のビームエネルギーを満たし、**最小のエミッタンスとエネルギー拡がり**を得る、**低コストの空洞形状**を求める

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 (77pC)
表面最大電界強度 E_{sp}	< 50 MV/m
エミッタンス ε	< 1 mm mrad
エネルギー拡がり ΔKE	< 2 keV (< 0.1 %)
空洞数	1.5 空洞 (1つの金型で空洞を成形)

目標仕様、ロードマップ設定



空洞形状の設計

- ・高周波電磁界解析(SUPERFISH)
- ・荷電粒子軌道解析(GPT)

カソード材料開発(分子研)

- ・カソード材料、基板製作
- ・量子効率評価
- ・エミッタンス評価



本年会 SAP031 参照
8月9日 ポスター

試作1号機

- ・Nb材で空洞を試作
- ・縦測定による高周波特性計測
- ・製作性確認、カソード設置の影響確認
- ・冷却時の共振周波数変化を確認
(電子ビーム引き出しは行わない)

今回の報告範囲

次のページ

試作2号機

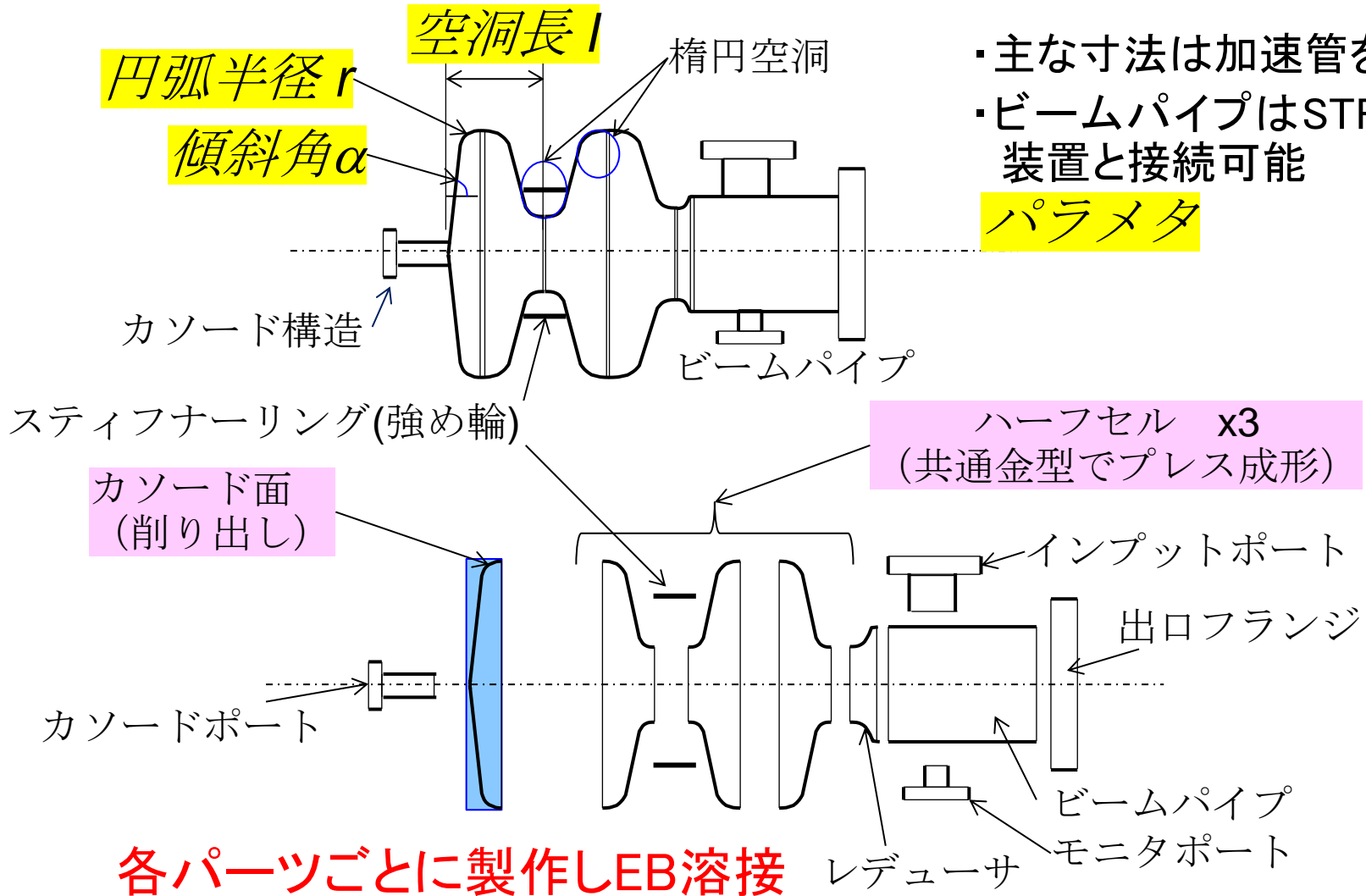
- 設計課題:
 - 100kW x 2 高周波入力カプラ、HOMカプラ
 - カソード交換を考慮したカソード付近のチョーク構造
 - He冷却ジャケット構造
 - 共振周波数及び電界強度比調整機構、
 - 極低温真空環境で共振周波数1.3GHzとなる空洞形状
- Nb材で空洞試作し、縦測定による高周波特性計測
- 横型クライオ容器に設置して性能を評価 (ビーム引き出しは行わない)

試作3号機(実証機)

- 設計課題:
 - クライオモジュール
 - 2号機までの改良案の反映
- 設置場所確保、放射線発生装置手続き、高圧ガス機器手続き
- 専用光電子放出用レーザー整備、システムアップ
- RF特性、制御性、ビーム電流等の確認、性能向上の検討課題抽出

4. 試作1号機 設計製作

4.1 空洞形状と各寸法、パラメタの設定



4. 試作1号機 設計製作

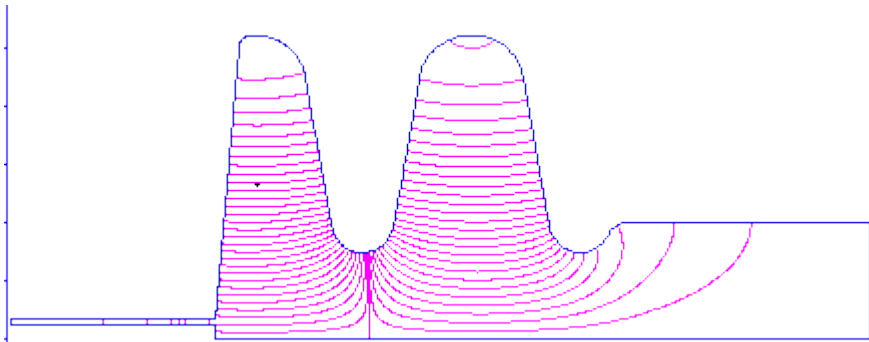
4.2 空洞形状最適化のためのビームダイナミクス

(i) 効率的なRFパラメタ設定手順

① 空洞電磁場解析

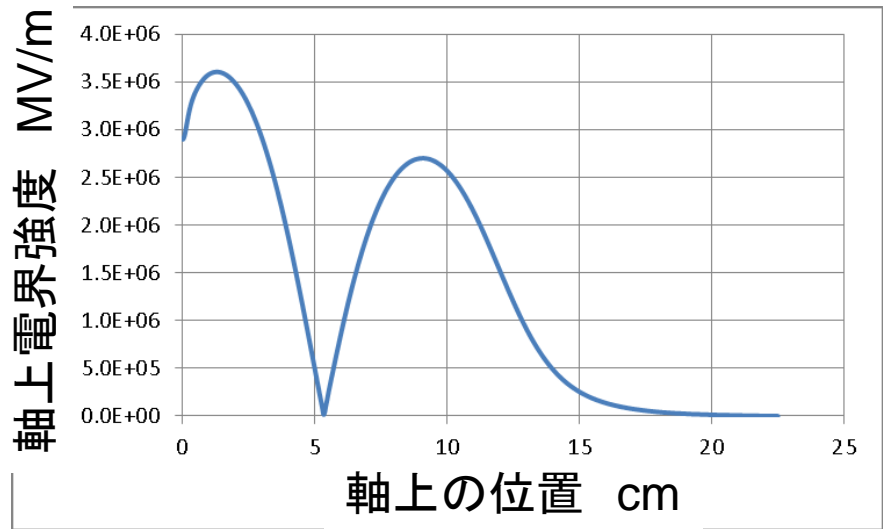
(1) 共振周波数が1.3GHzとなる空洞形状を求める

(2) 軸上高周波電界分布(右図)を荷電粒子解析コードへエクスポート



電磁場解析による電界分布

SUPERFISH



軸上電界強度分布(初期位相90°)

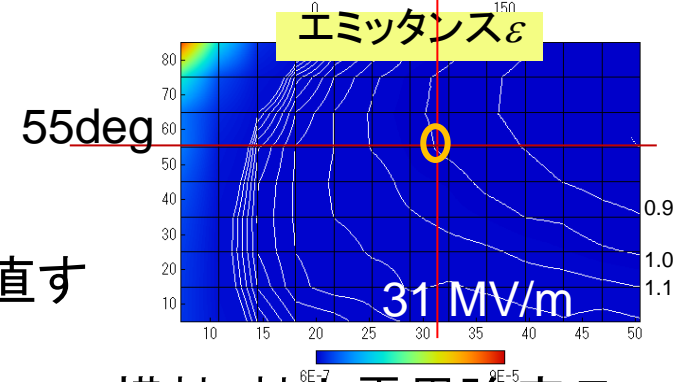
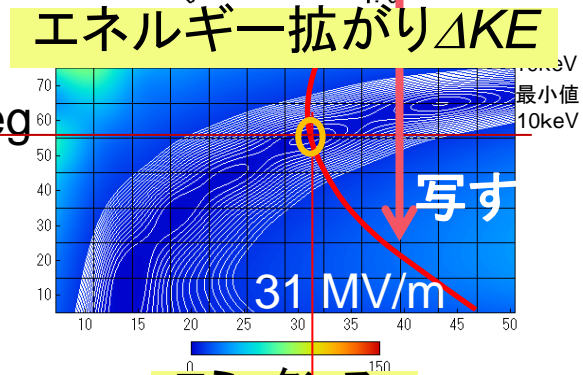
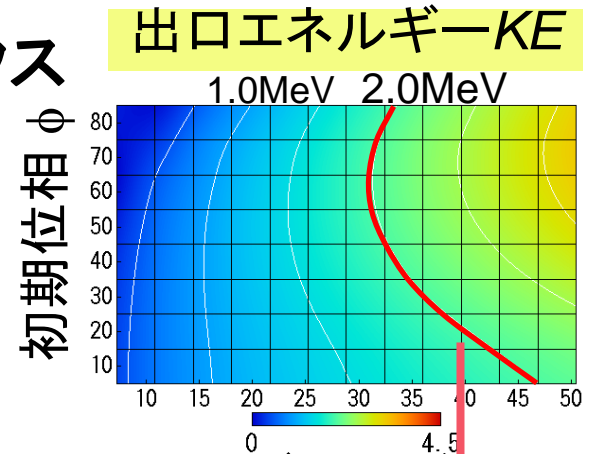
4. 試作1号機 設計製作

4.2 空洞形状最適化のためのビームダイナミクス

(i) 効率的なRFパラメタ設定手順

② 荷電粒子解析

- (1) 空洞出口でのビーム特性を解析し、出力
- (2) 初期位相(横軸)と軸上電界強度(縦軸)の座標上に右図に示す各値をプロットした3つの等高線図を作成
- (3) KE が2 MeVの曲線(右上図の赤い実線)を ΔKE の図(右中)に写す
- (4) ΔKE が最小となる初期位相と軸上電界強度の組合せ(座標)を求める
- (5) この組合せでのエミッタンス ϵ 、最大表面電界 E_{sp} を求める



横軸: 軸上電界強度 E_0

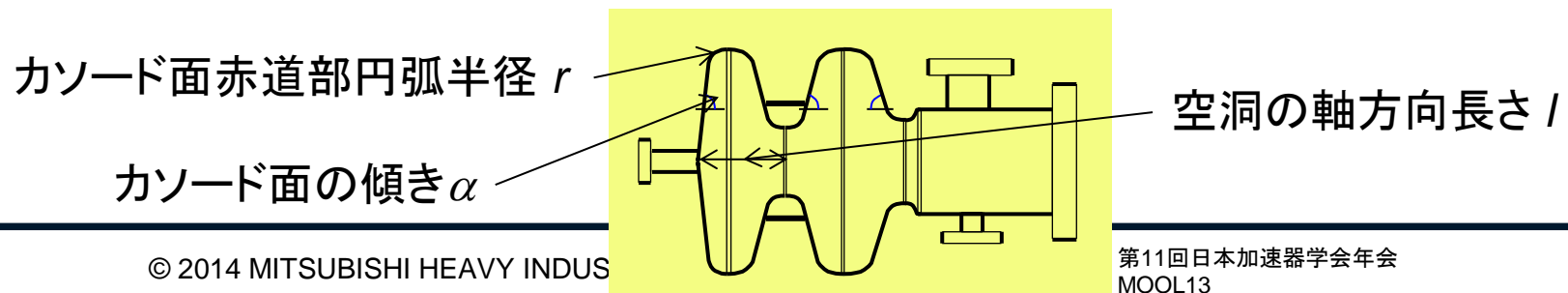
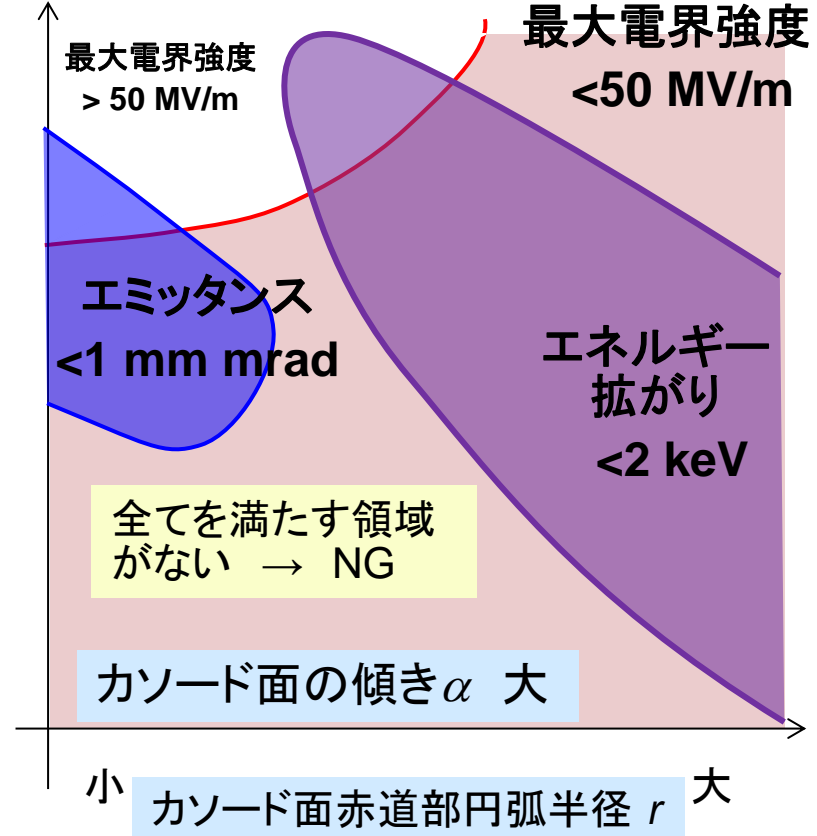
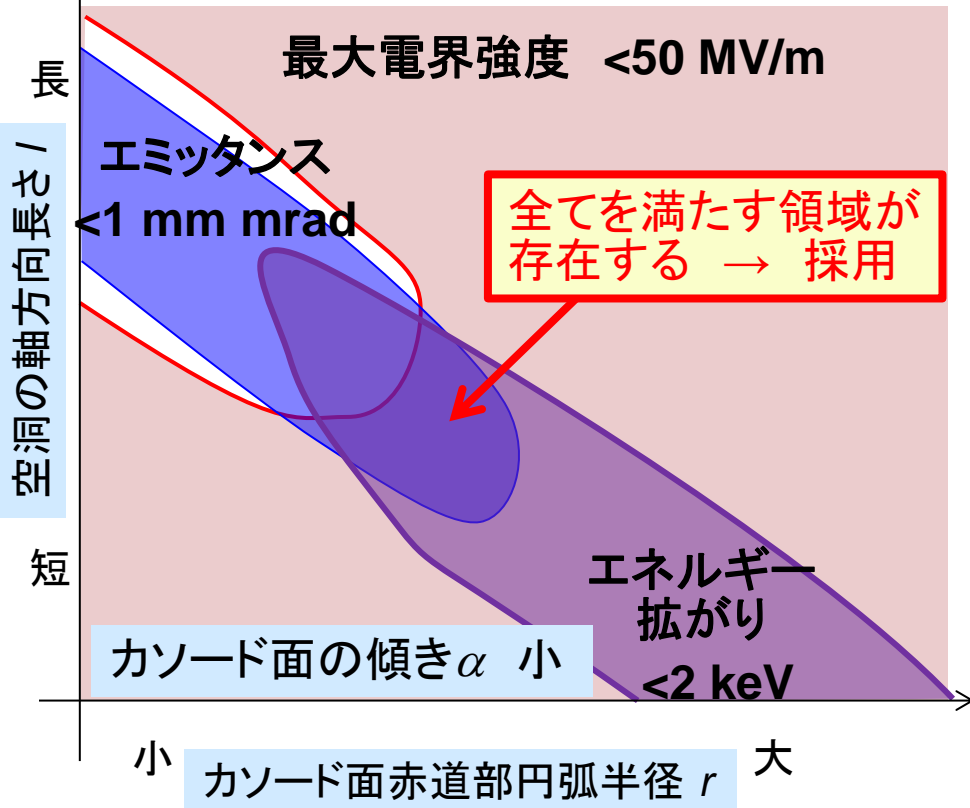
③ 繰り返し計算

- (1) ①に戻り、空洞寸法を変化させて②を行う
- (2) ビームへの要求仕様を満たすまで空洞寸法を見直す

4. 試作1号機 設計製作

4.2 空洞形状最適化のためのビームダイナミクス

(ii) 空洞パラメタの設定例



4. 試作1号機 設計製作

4.2 空洞形状最適化のためのビームダイナミクス

(iii) 最適化の結果

(1) エミッタンス ϵ

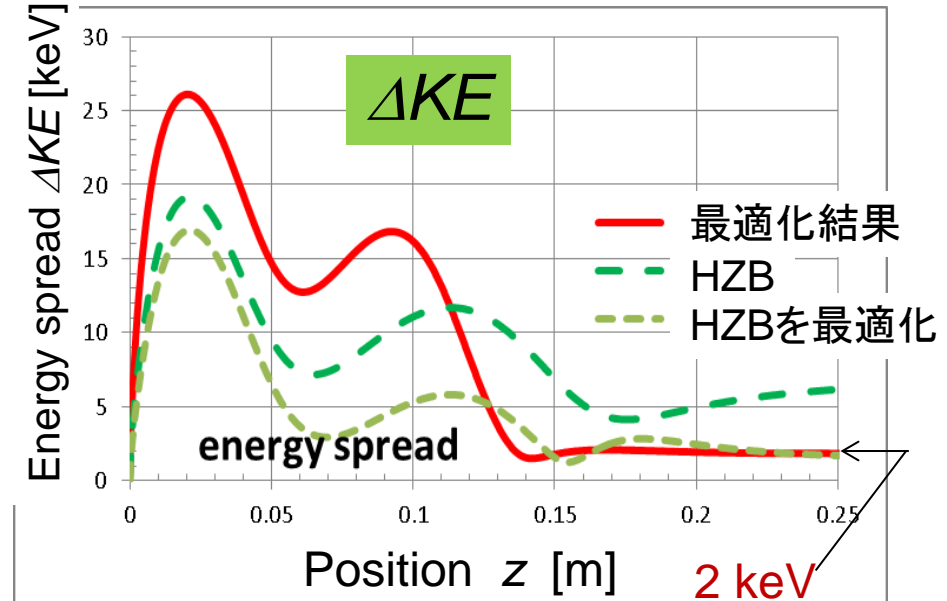
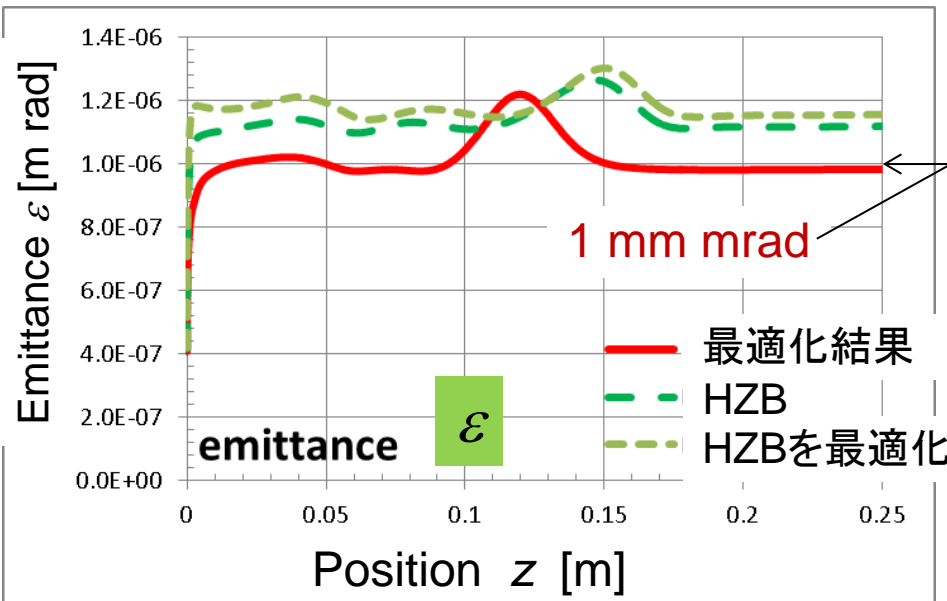
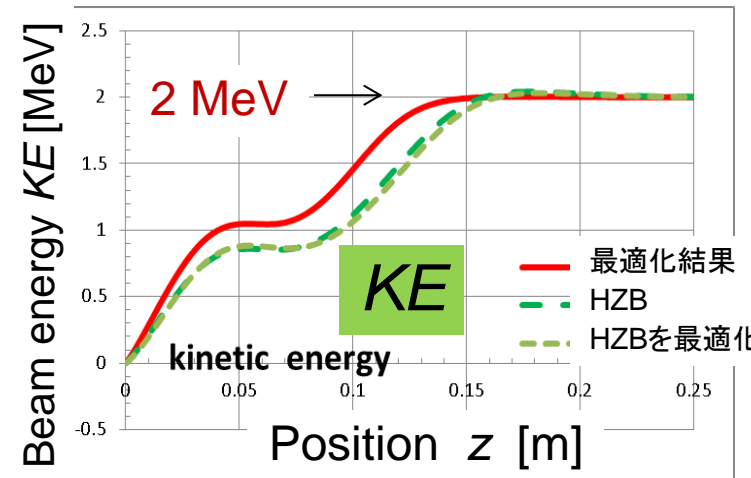
0.98 mm mrad 目標 < 1 mm mrad

(2) エネルギー拡がり ΔKE

1.84 keV (0.09 %) 目標 < 2 keV (< 0.1 %)

(3) 表面最大電界 E_{sp}

41.9 MV/m 目標 < 50 MV/m

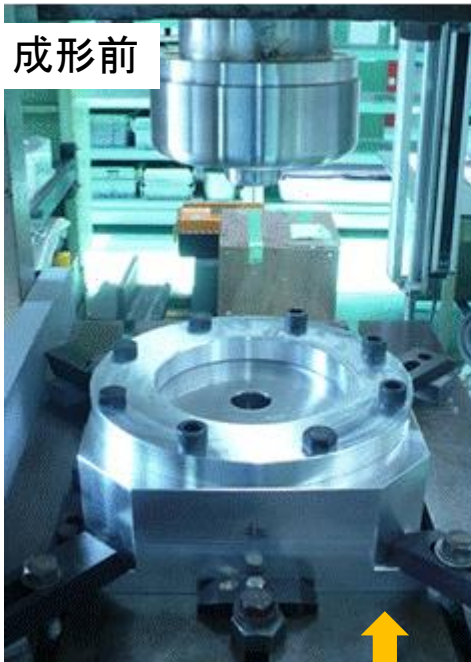


4. 試作1号機 設計製作

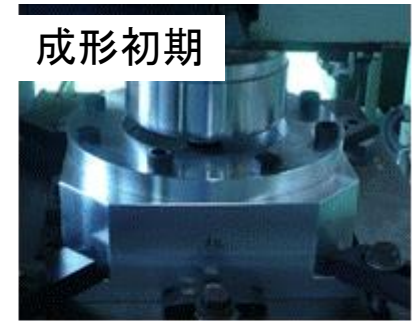
4.3 製作状況 (i) ハーフセルのプレス加工



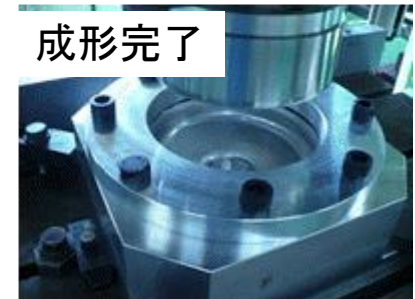
油圧100tプレス



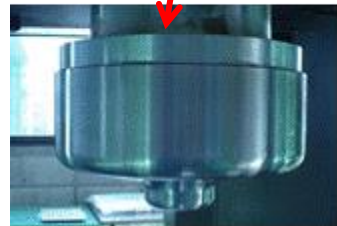
成形前



成形初期



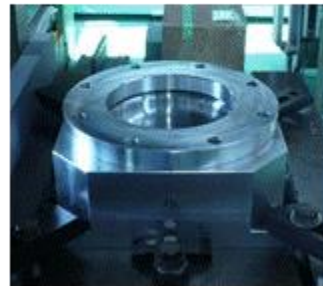
成形完了



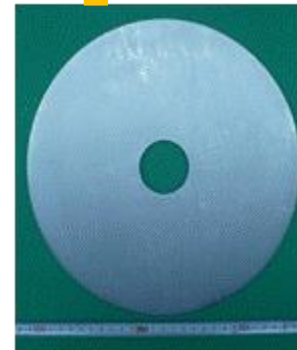
ポンチ



ダイス



しわ押さえ取付



初期素材(Nb)

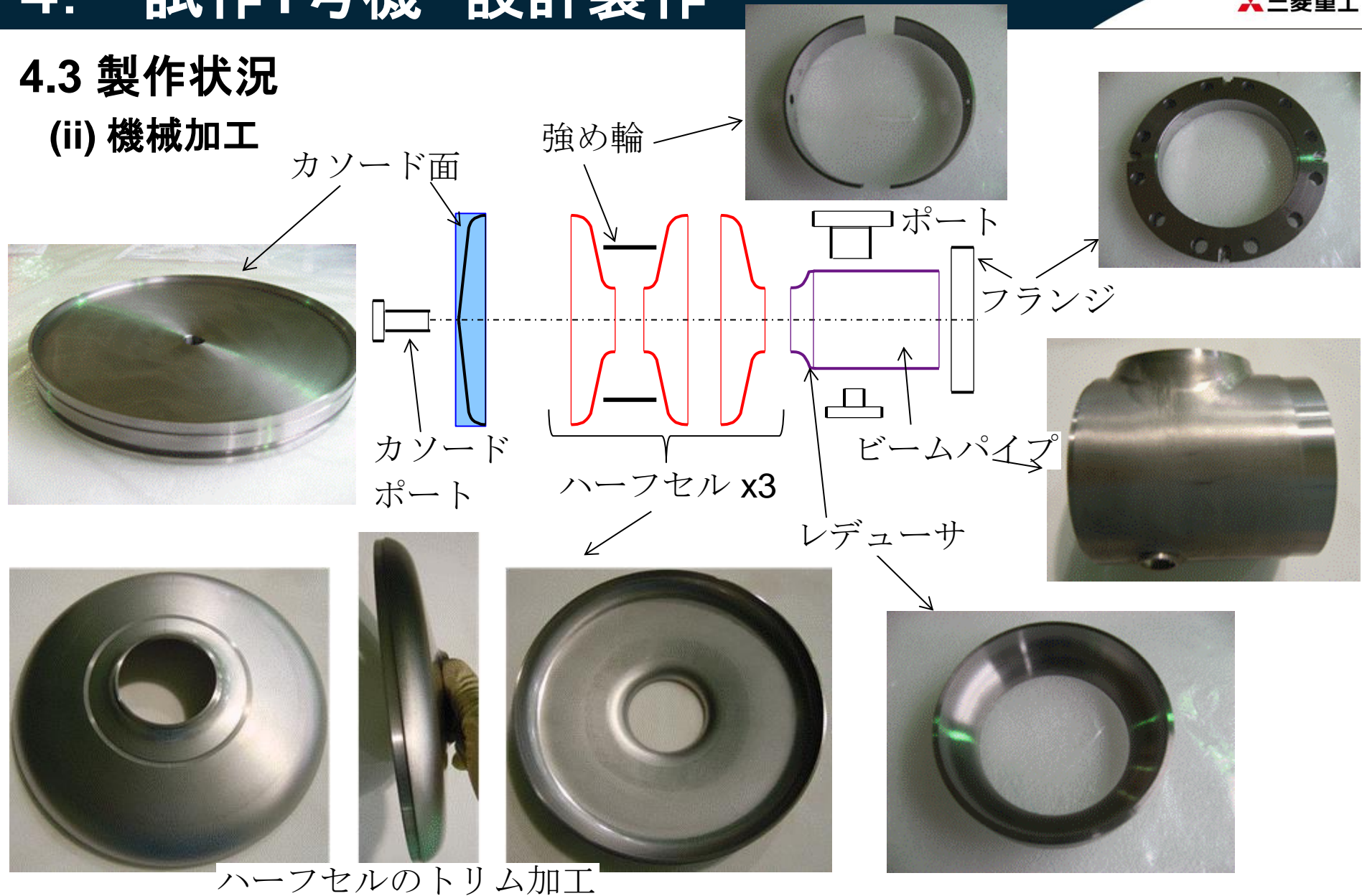


成形後 (Nb)
しわ、割れなし

4. 試作1号機 設計製作

4.3 製作状況

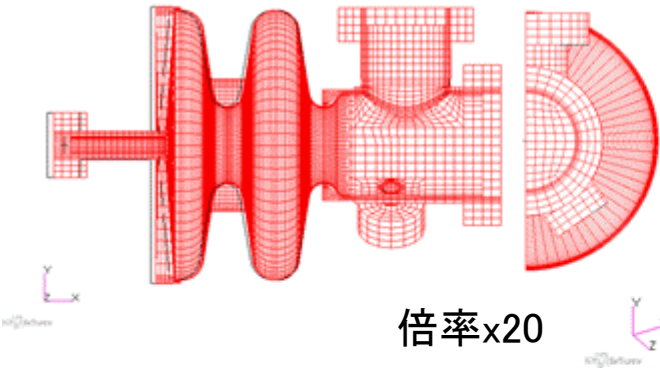
(ii) 機械加工



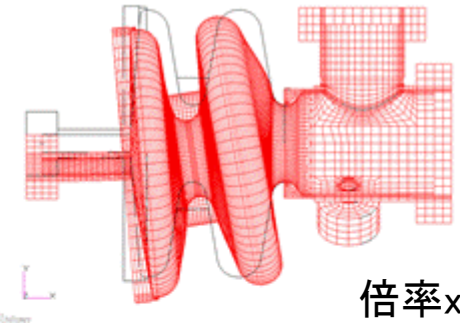
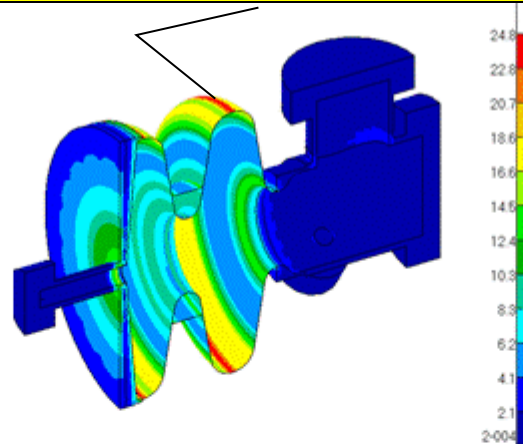
4. 試作1号機 設計製作

4.4 熱構造解析

(i) 常温、真空排気

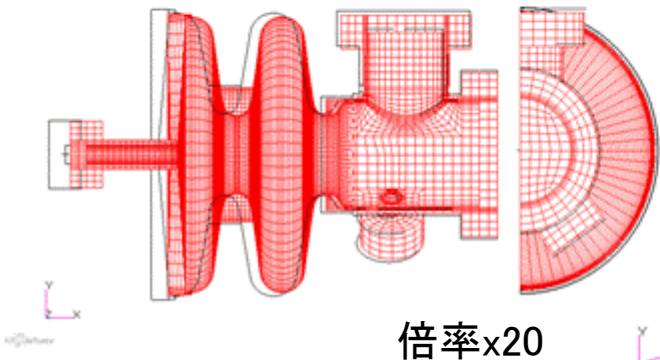


24.8MPa (許容応力39 MPa以下)

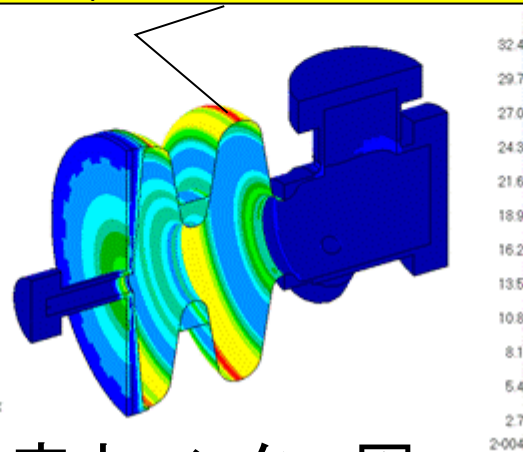


座屈1次モード

(ii) 低温、真空排気



32.4MPa (許容応力78 MPa以下)



外部大気圧(0.1 MPa)に対し
座屈1次モードは19.5 MPaであり
十分余裕がある(Lanczos法)

変形モード図

応力コンター図

(応力評価: JIS B 8266:2003 附属書8(規定)圧力容器の応力解析及び疲労解析 に準じる)

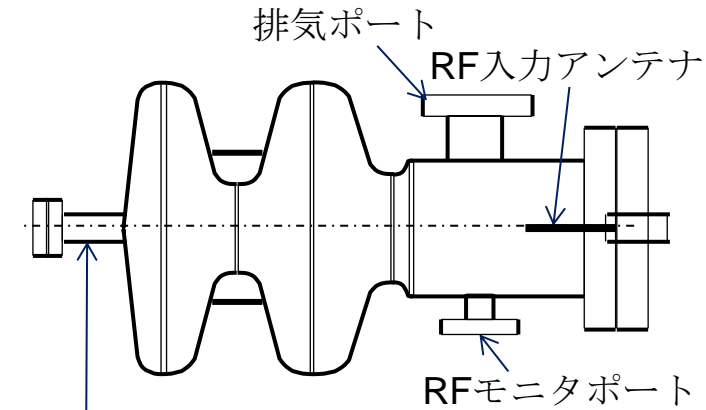
4. 試作1号機 設計製作

4.5 縦測定計画 概要

- ・試作1号機を2 Kまで冷却して超伝導化
- ・真空及び冷却による座屈が無いことを確認
- ・変形による共振周波数シフトを計測し解析と比較
- ・カソードロッドを挿入し、チョーク部(空洞との隙間)で放電しないかを確認
- ・カソード基板(超伝導体)をカソードロッドに取り付け、RF特性を評価

縦測定 実施項目

- (1) カソードロッドなし
- (2) カソードロッド挿入
- (3) カソード基板付き(透明超伝導LTO)



カソードロッド挿入ポート

(1)

ブランクフランジ(Nb材)

(2)

カソードロッド(Nb材)

(3)

チョーク部

カソード基板
(透明超伝導)

5. まとめ

- KEKでは超伝導RF電子銃の開発を開始した。

用途: 次世代ERL、高出力FELシステム

仕様: 共振周波数... 1.3 GHz、出口エネルギー... 2 MeV、電流... 100 mA、
エミッタンス... $< 1 \text{ mm mrad}$ 、エネルギー拡がり... $< 0.1 \%$ (2 keV)、
最大表面電界... $< 50 \text{ MV/m}$

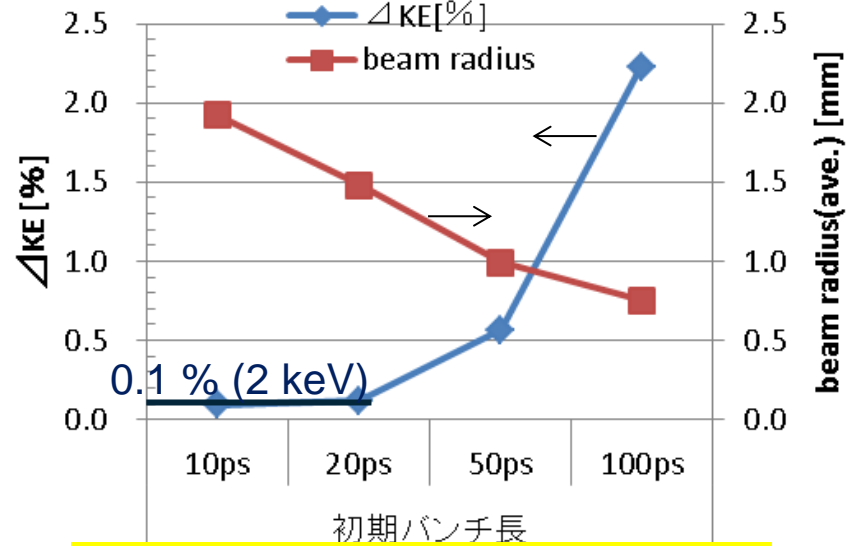
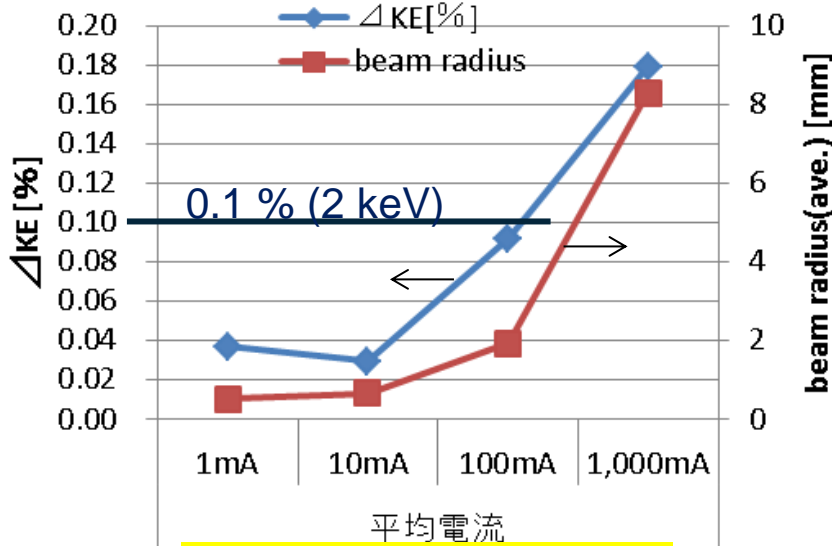
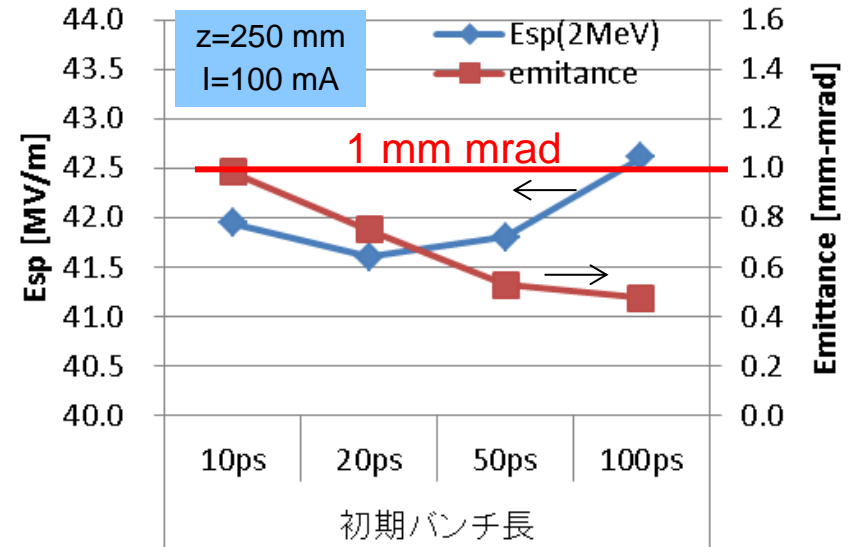
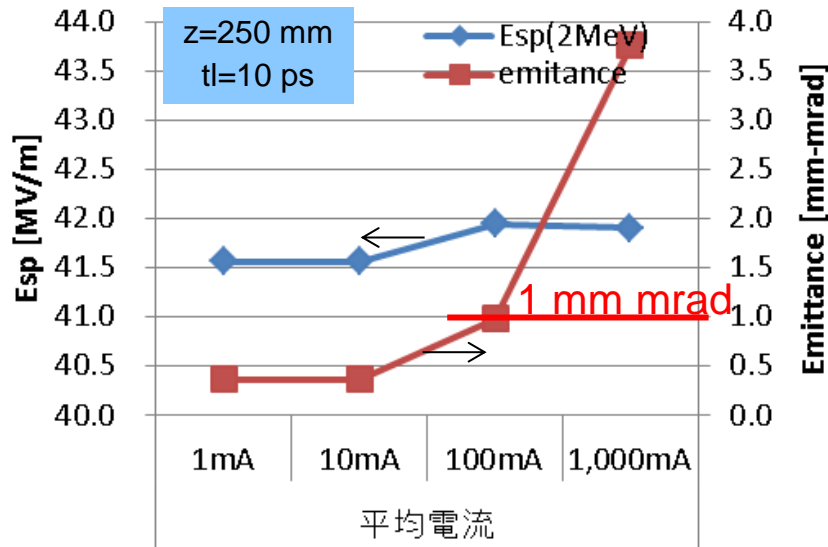
- 加速電界が変化するRF電子銃において、最小のエネルギー拡がりを優先する手法を用いて、効率的に空洞形状の最適設計を行った。
- 3つのハーフセルを1つの金型から製作する仕様とした(コスト低減)。
- 試作1号機として、熱構造解析を実施し、Nb材による空洞を製作中。
- 今後 縦測定を実施し、2号機以降の設計に反映する予定。



この星に、たしかな未来を

A red arrow graphic pointing to the right, positioned below the Japanese text.

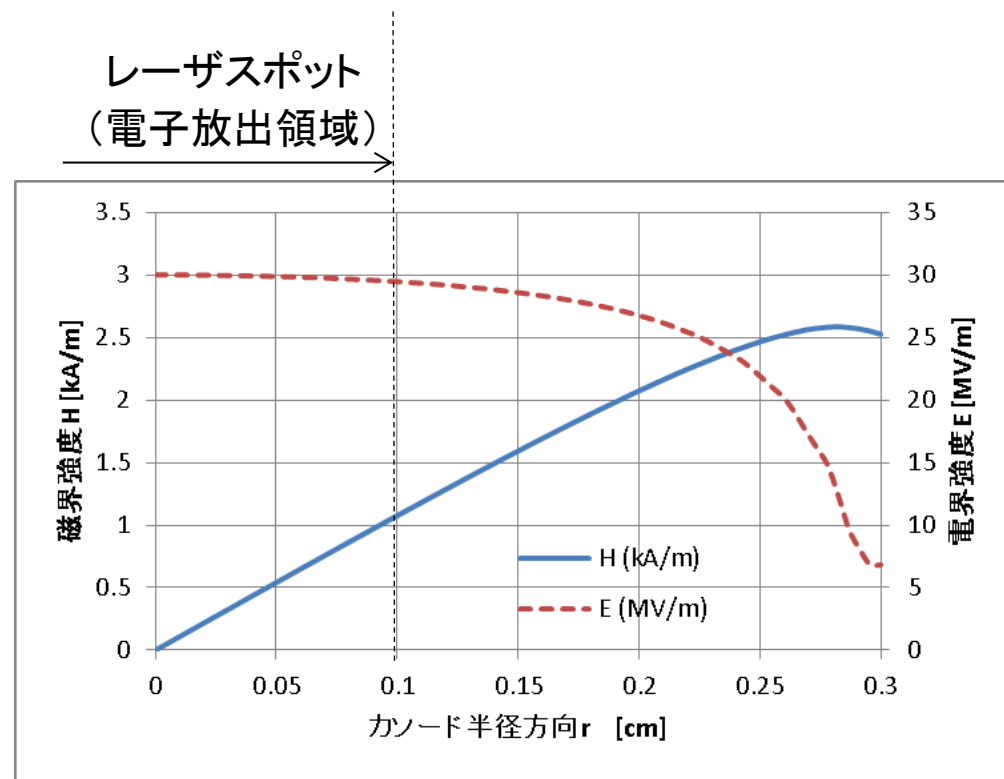
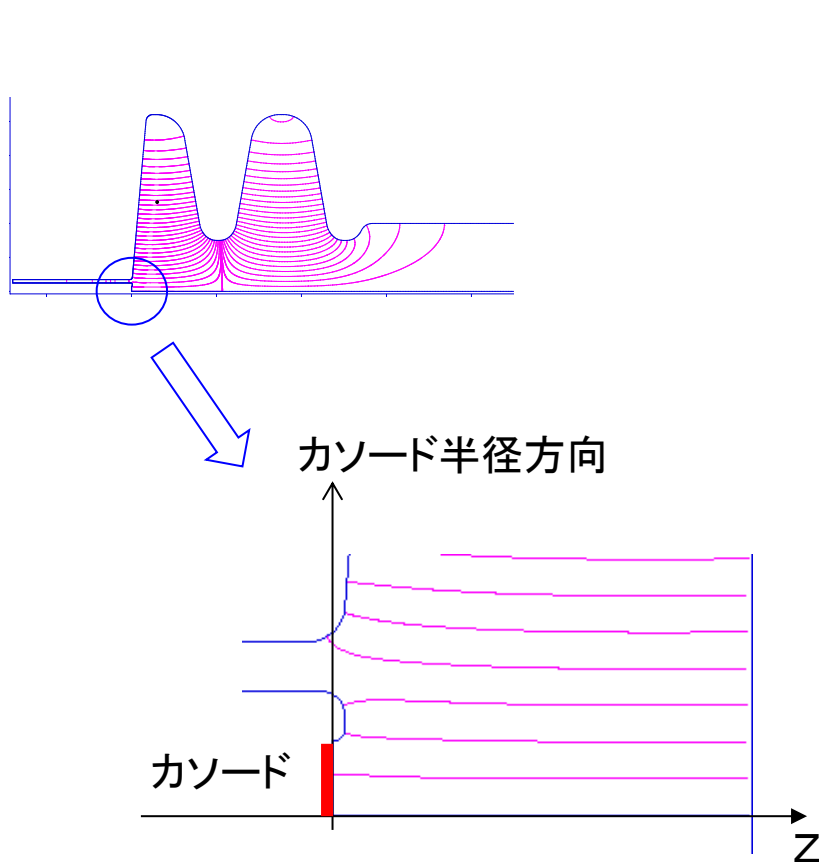
(補足説明) 電流量、初期バンチ長 依存性



電流量依存性

初期バンチ長依存性

- ・カソード面 $\phi 6$ に対し、レーザスポット径 $\phi 2$ の周辺の電界は中心の98 %でほぼ一定
- ・カソード面 $\phi 6$ での磁界強度は周囲ほど高く、最大2.6 kA/m。
(@出口2 MeV、加速位相 60° 、SUPERFISH、GPT)



カソード上の電磁界強度分布