

低温Cバンド銅製空洞における温度上昇 と超高加速勾配動作のシミュレーション

日本大学量子科学研究所 電子線利用研究施設

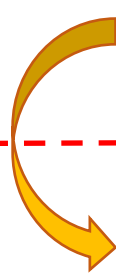
田中俊成, 境武志, 早川建, 早川恭史, 野上杏子,
佐藤勇, 住友洋介, 山田靖征, 吉田昂斗

光・量子融合連携開発研究プログラム

「小型加速器による小型高輝度X線源とイメージング基盤技術開発」 (KEK 浦川、照沼氏 実施期間:2013-2016)

■ クライオ光陰極高周波電子銃開発(日大、KEK)

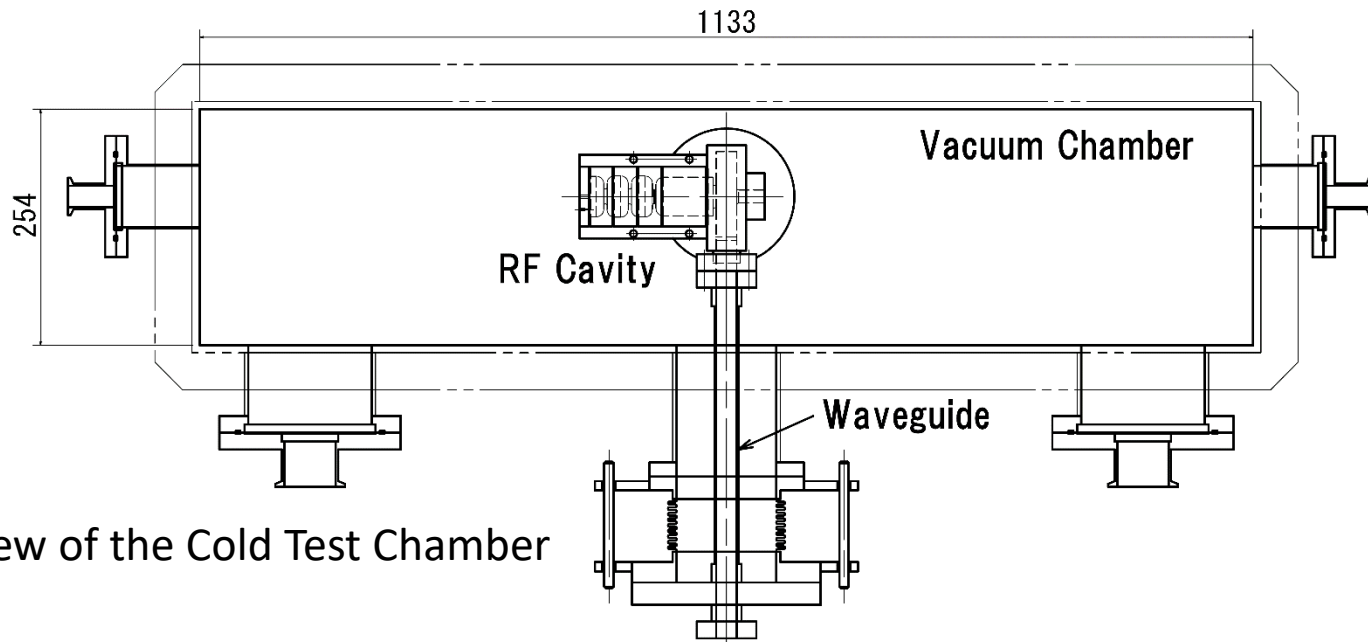
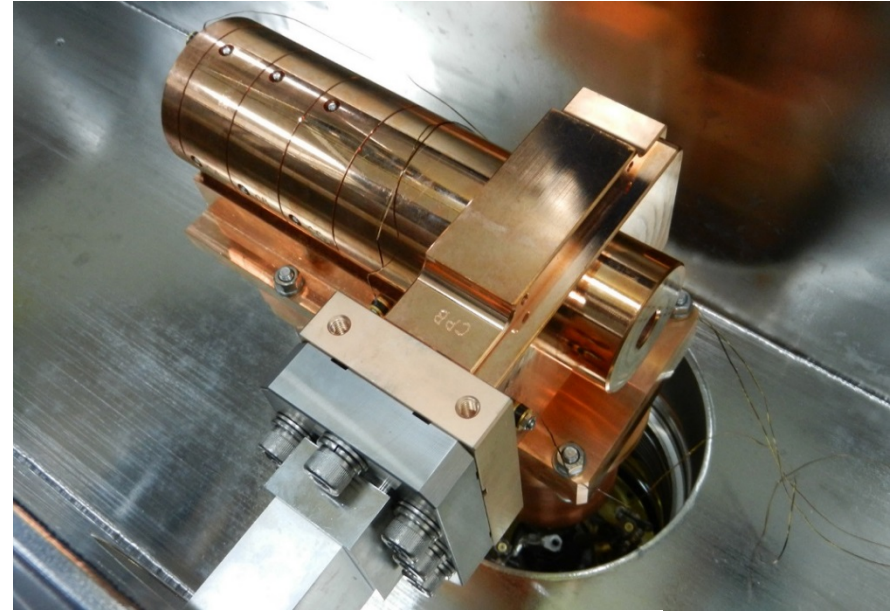
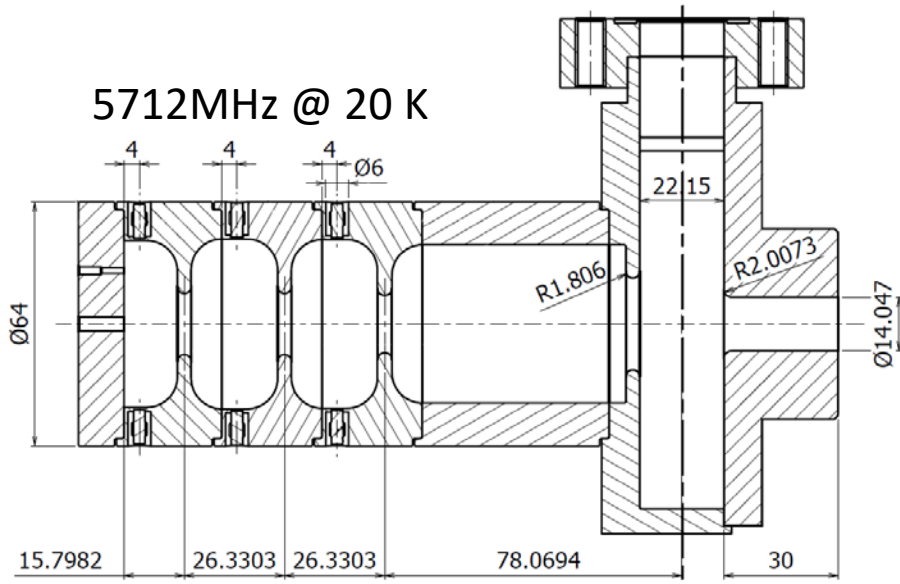
- 高純度銅材の良好な低温特性
電気伝導度、線膨張率、熱伝導率
- 常伝導だが室温に比べ低損失な高周波空洞
20 K 冷却で室温の1/6程度@Sバンド
- 20 K程度までの冷却ならば素人でも扱える



■ 低損失低温常伝導空洞による超高勾配加速管 中・大規模電子線形加速器の小型化

■ 超高電界RF電子銃 低エミッタンス電子ビーム生成

2.6セルCバンド光陰極RF電子銃用低電力試験空洞と試験装置



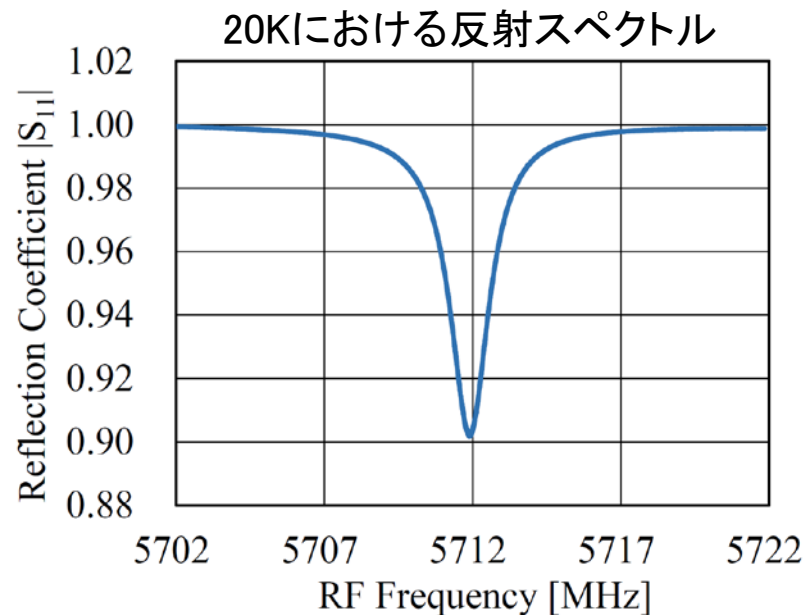
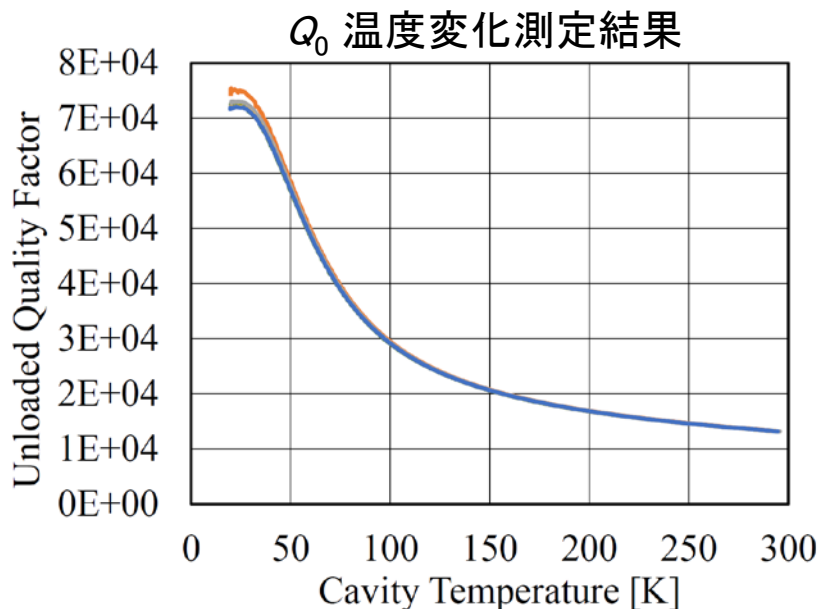
Top View of the Cold Test Chamber

2.6セルCバンド空洞のRF特性

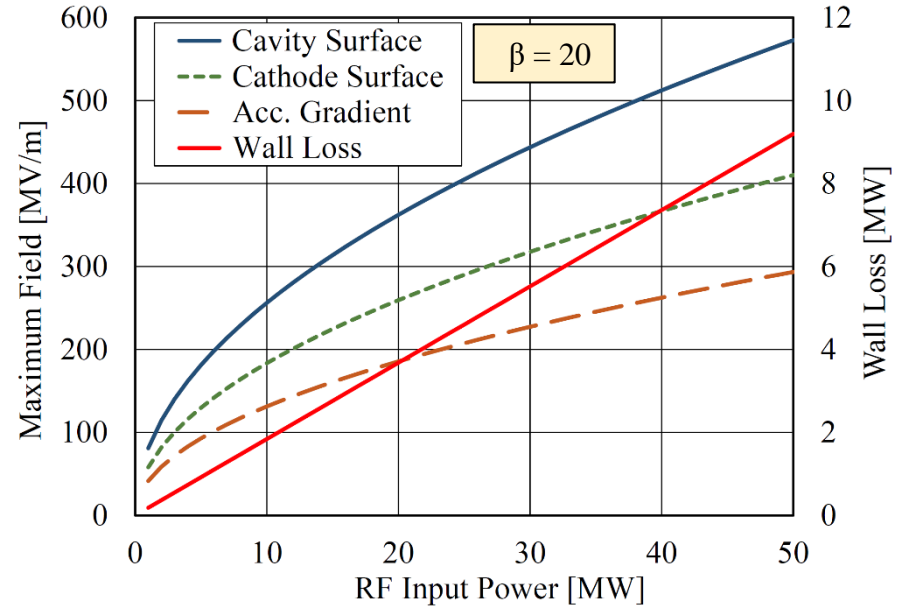
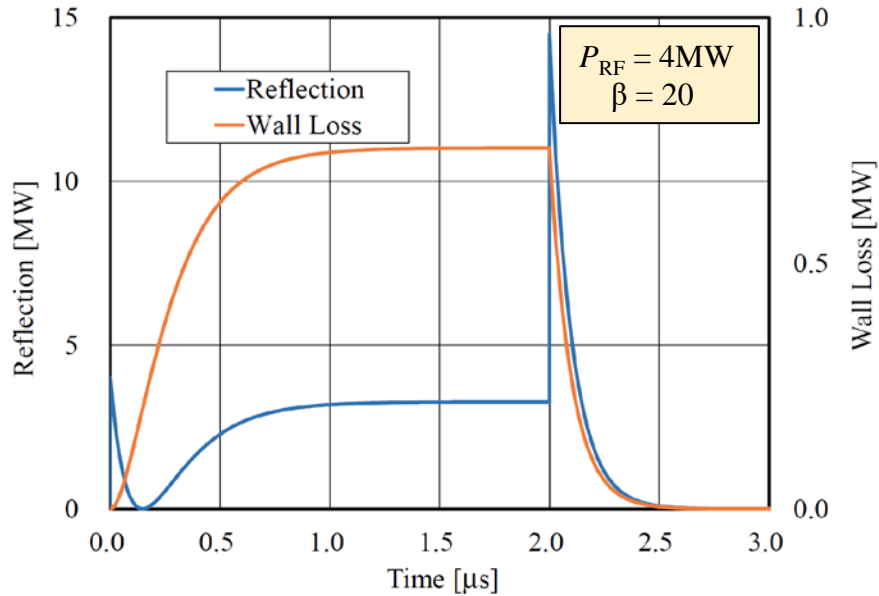
シミュレーションとの比較

	空洞温度 296.65K	空洞温度 20K	値の比
無負荷Q値	13176 ± 20 (13310)	72775 ± 1168 (73029)	5.52 ± 9 (5.48)
空洞結合係数	3.566 ± 8 (3.52)	19.79 ± 26 (19.30)	5.55 ± 7 (5.48)
共振周波数 [MHz]	5692.8632 ± 57 (5692.791)	5711.8826 ± 90 (5712.015)	1.0033409 ± 14 (*1.0033529)

()内はCST Studioによるシミュレーション結果、* は設計時寸法変化



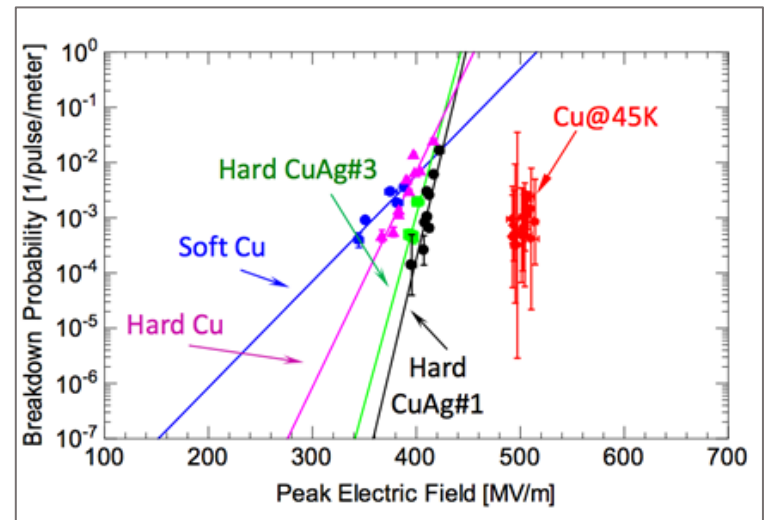
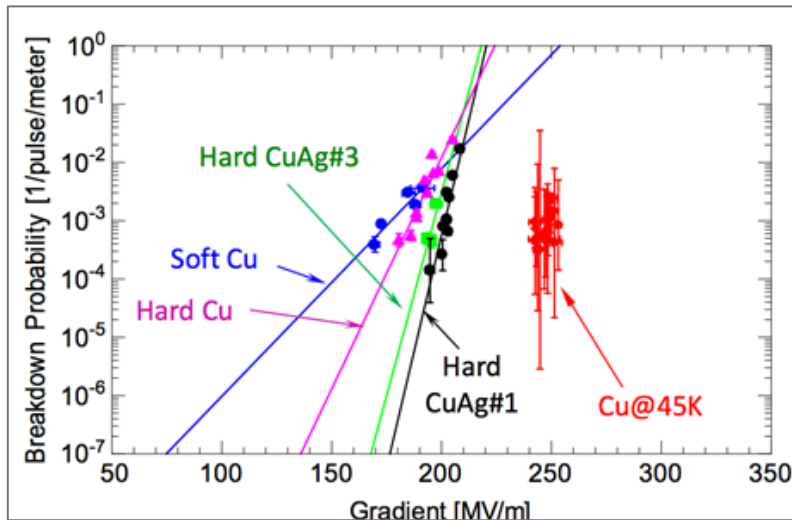
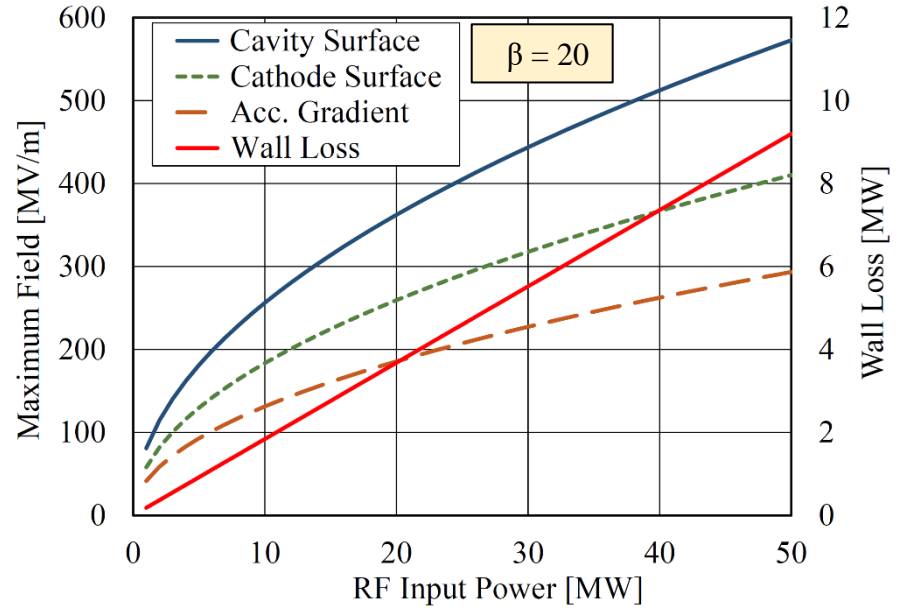
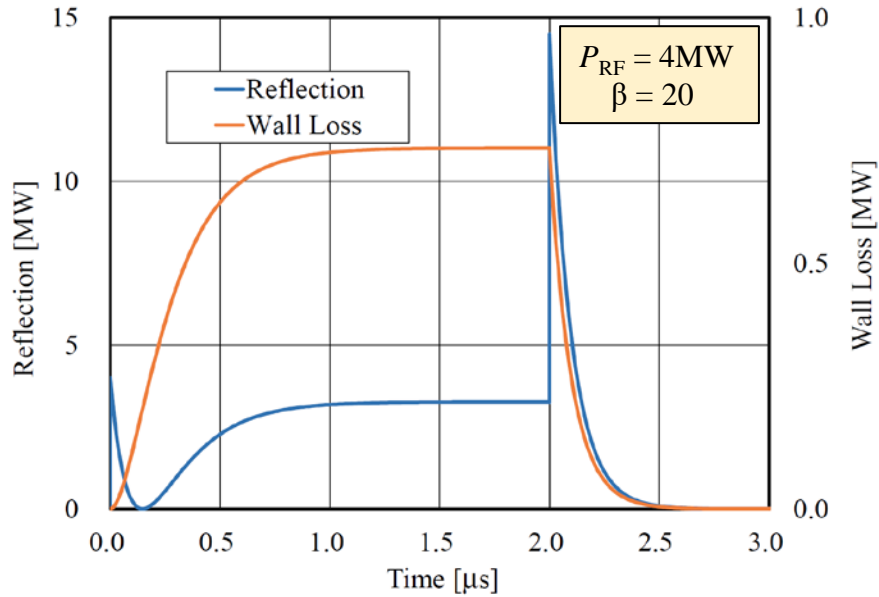
大電力RF入力による超高電界発生



ピークRF 4MW入力 @20K

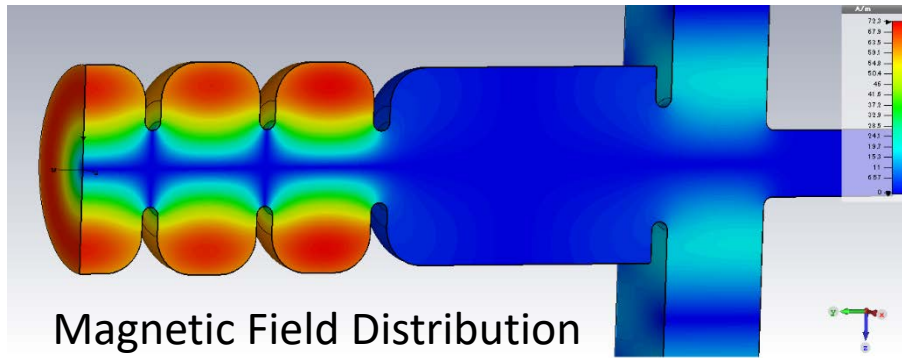
ピーク損失電力	0.7356	MW
最大表面磁場	1.99	kA/m
端板最大損失	7.20	kW/cm ²
加速空洞平均損失	5.15	kW/cm ²
最大表面電界	162	MV/m
最大カソード面電界	116	MV/m
最大加速勾配	83	MV/m

大電力RF入力による超高電界発生



大電力RF入力による空洞温度上昇の検討

CST Studio Simulation



Magnetic Field Distribution

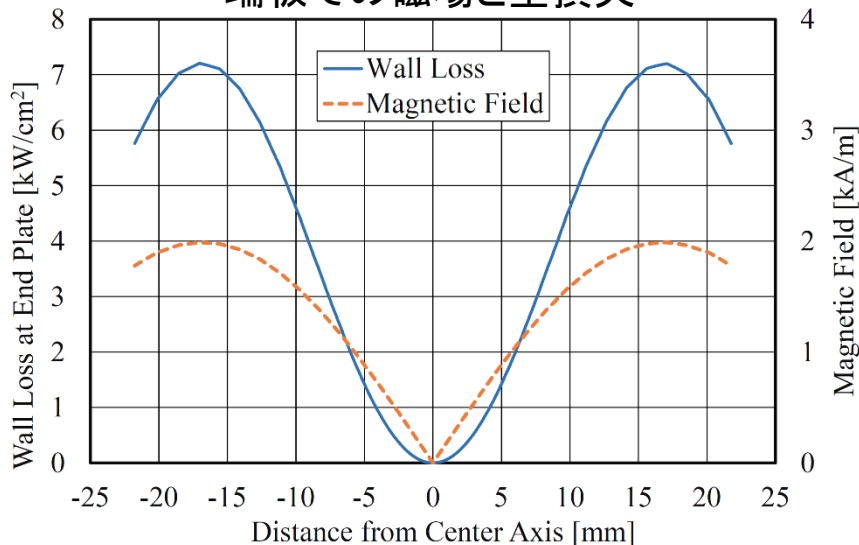
- ・ 左端板中心軸から17mmで磁場最大
- ・ 外周部損失電力(/cm²) 81%
- ・ 加速空洞平均損失電力(/cm²) 70%

$$(\text{発熱}) \quad \frac{dP}{dS} = \frac{1}{2} R_s J^2 = \frac{1}{2} R_s |H_{\parallel}|^2 \quad [\text{W/m}^2]$$

ピークRF 4MW入力 @20K

ピーク損失電力	0.7356	MW
最大表面磁場	1.99	kA/m
端板最大損失	7.20	kW/cm ²
セル外周平均損失	5.83	kW/cm ²
加速空洞平均損失	5.15	kW/cm ²

端板での磁場と壁損失



RFパルスによる空洞壁温度上昇
(D. P. Pritzkau, Stanford University)

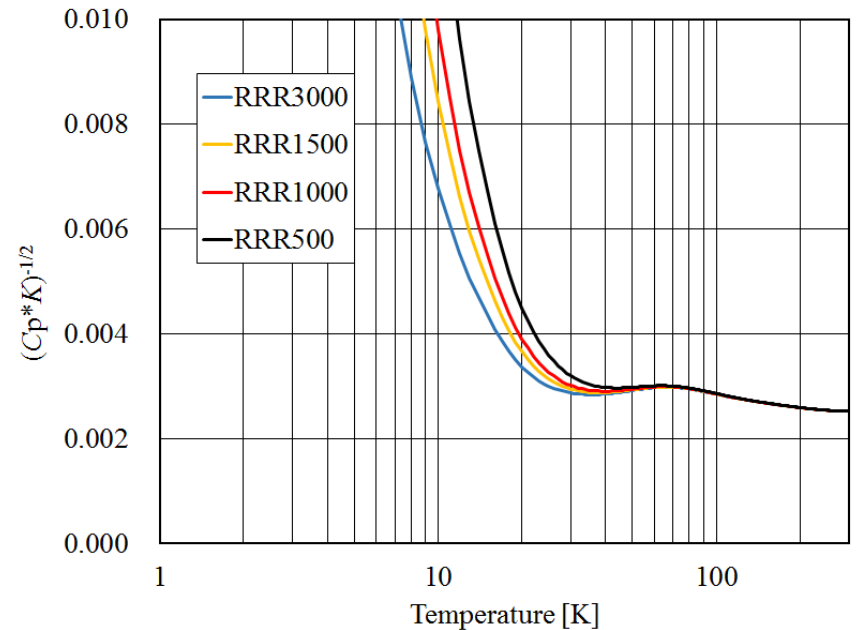
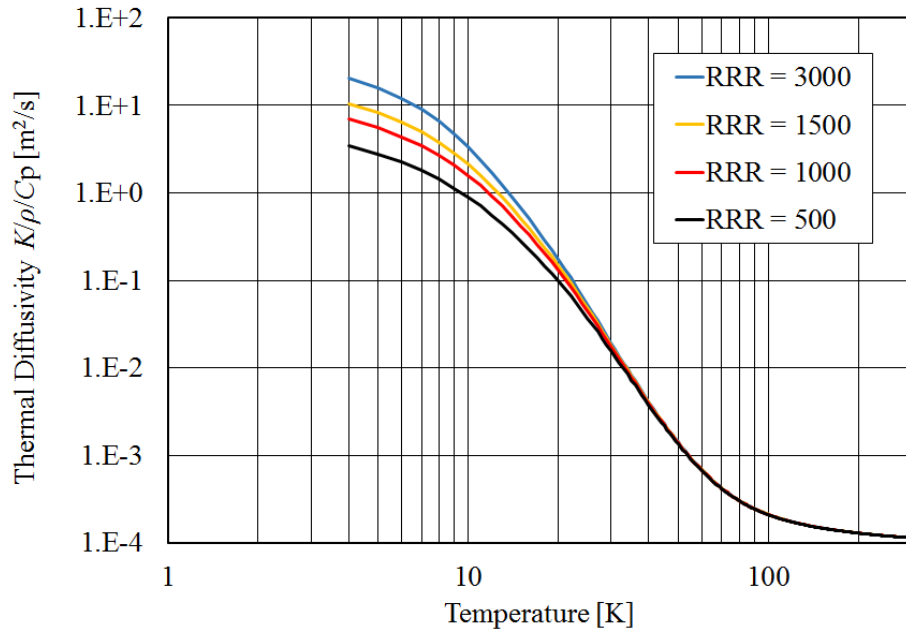
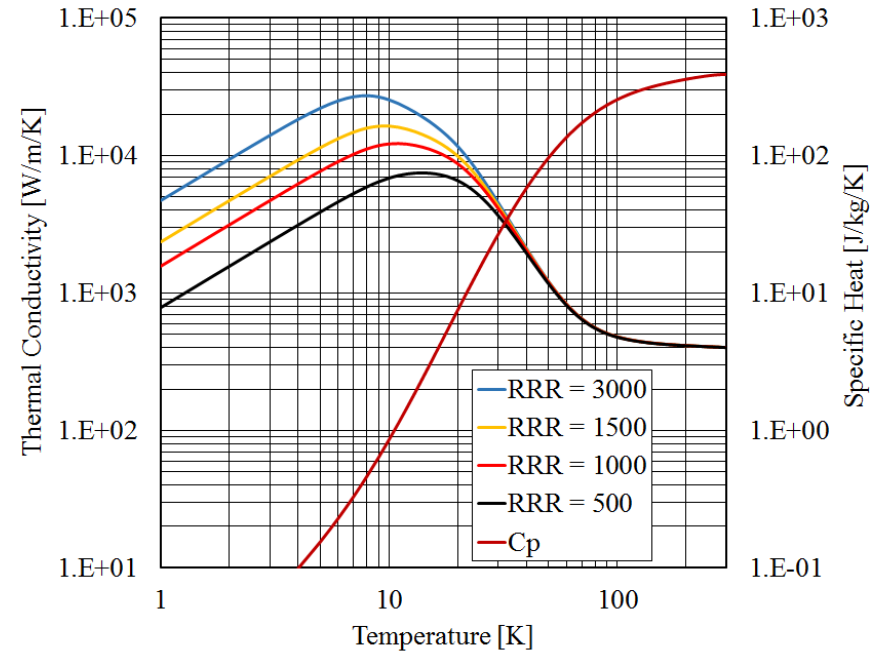
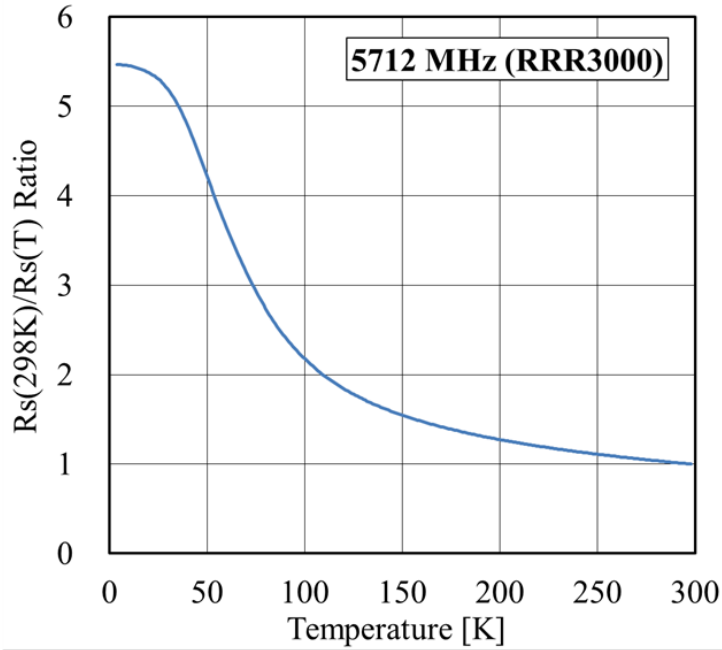
一次元熱拡散モデル

ρ : 密度、 C_p : 比熱、 K : 熱伝導率

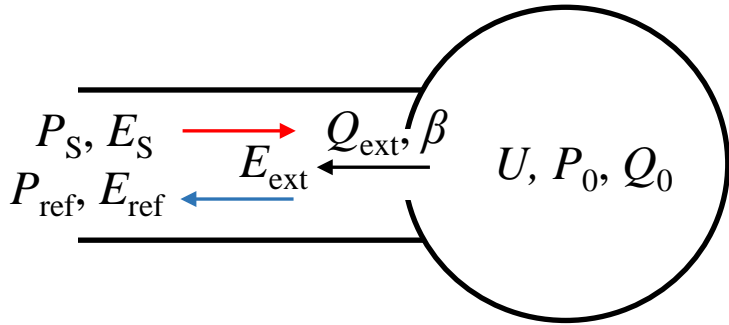
$$\Delta T(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi\rho K C_p}} \int_0^t \frac{dP(t', T)}{dS} \frac{dt'}{\sqrt{t-t'}}$$

(ρ , C_p , K 一定とした場合)

高純度銅材の電氣的・熱的特性の温度依存性



パルスRFにおける空洞内電界、反射電力、平均表面温度上昇



2.6セル RF電子銃空洞 $P_S = 4 \text{ MW}$, $\beta = 20 @ 20 \text{ K}$

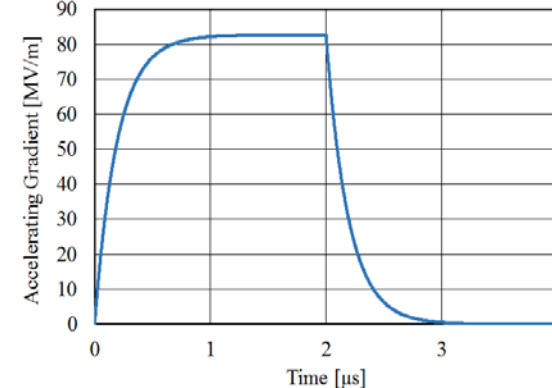
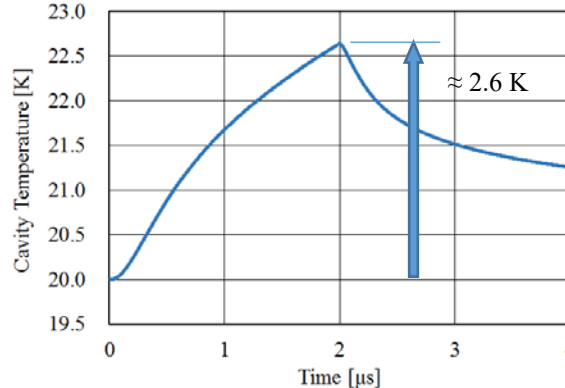
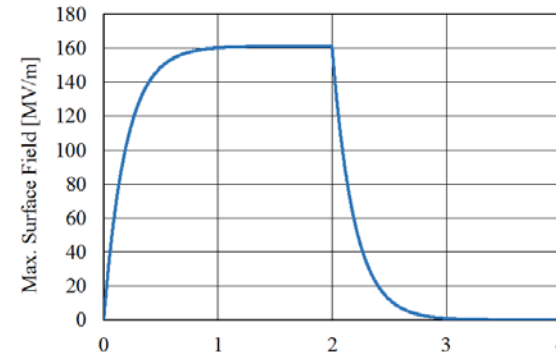
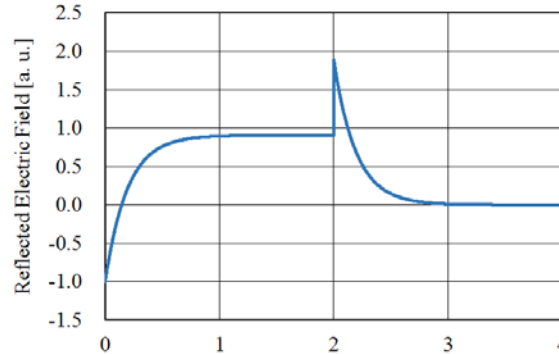
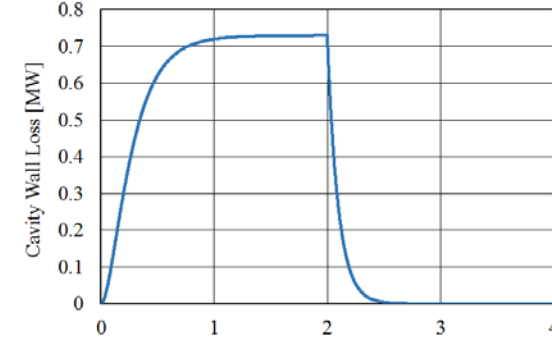
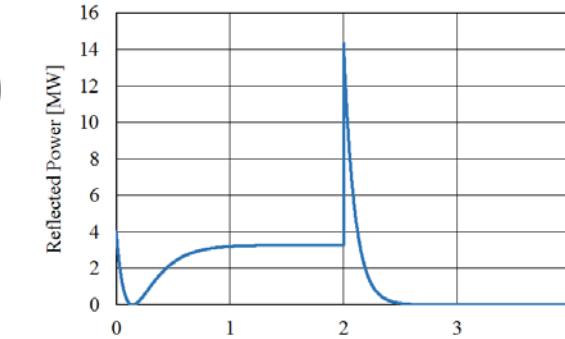
空洞特性一定の場合

$$E_{\text{ref}} = -E_S + E_{\text{ext}}$$

$$U = \frac{Q_0 P_0}{\omega} \propto \frac{Q_0 E_{\text{ext}}^2}{\omega \beta}$$

$$P_S = P_{\text{ref}} + P_0 + \frac{dU}{dt}$$

$$E_{\text{ext}} + \frac{2Q_0}{\omega(1+\beta)} \frac{dE_{\text{ext}}}{dt} = \frac{2\beta}{1+\beta} E_S$$



パルス内空洞表面温度上昇による空洞特性変化を考慮

$$T(z=0,t) \approx T_0 + \int_0^t \frac{1}{\rho C_p (T(z=0,t')) \sqrt{\pi \alpha_d (T(z=0,t'))}} \frac{dP(t', T(z=0,t'))}{dS} \frac{dt'}{\sqrt{t-t'}} \quad \left(\alpha_d = \frac{K}{\rho C_p} \right)$$

$$Q_0(T(t)) = Q_0(20K) \frac{R_s(20K)}{R_s(T(t))}, \quad \beta(T(t)) = \frac{Q_0(T(t))}{Q_{\text{ext}}}$$

共振周波数と反射係数の変化を補正

$$\omega(t) = \omega_{\text{RF}} \sqrt{\frac{1+1/Q_0}{1+1/Q(t)}} \quad \left(\omega_{\text{RF}} = \frac{\omega_0}{\sqrt{1+1/Q_0}} \right)$$

$$\beta'(t) = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|}, \quad |S_{11}|^2 = 1 - \frac{4\beta(t)}{(1+\beta(t))^2 + \left(2Q_0(t) \frac{\omega_{\text{RF}} - \omega(t)}{\omega_{\text{RF}}} \right)^2}$$

$$E_{\text{ext}} + \frac{2Q_0(t)}{\omega_{\text{RF}} (1+\beta'(t))} \frac{dE_{\text{ext}}}{dt} = \frac{2\beta'(t)}{1+\beta'(t)} E_s(t)$$

$$P_s(t) = P_{\text{ref}} + P_0(t) + \frac{dU}{dt}$$

$$E_{\text{ref}} = -E_s(t) + E_{\text{ext}}$$

$$U = \frac{Q_0(t)P_0(t)}{\omega} \propto \frac{Q_0(t)E_{\text{ext}}^2}{\omega\beta(t)}$$

$$\frac{dP_0}{dS} = \frac{1}{2} R_s J^2 = \frac{1}{2} R_s |H_{\parallel}|^2 \quad [\text{W/m}^2]$$

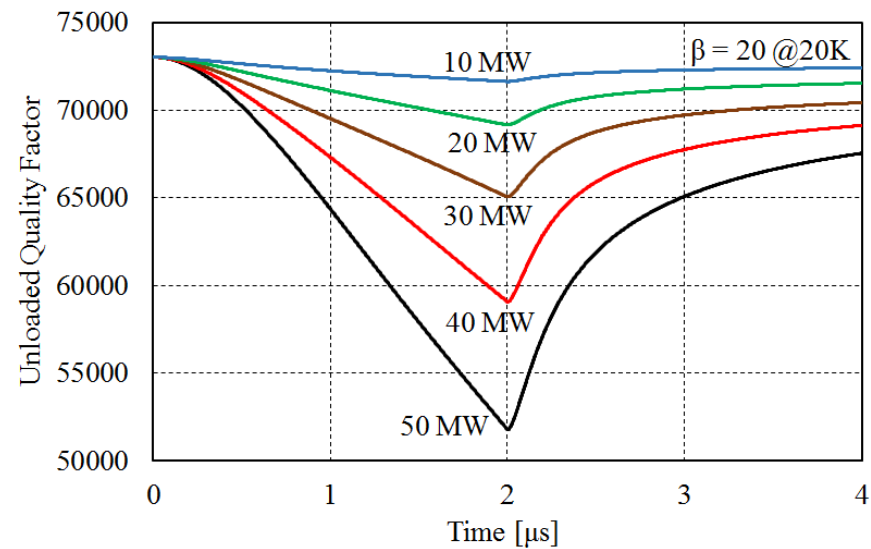
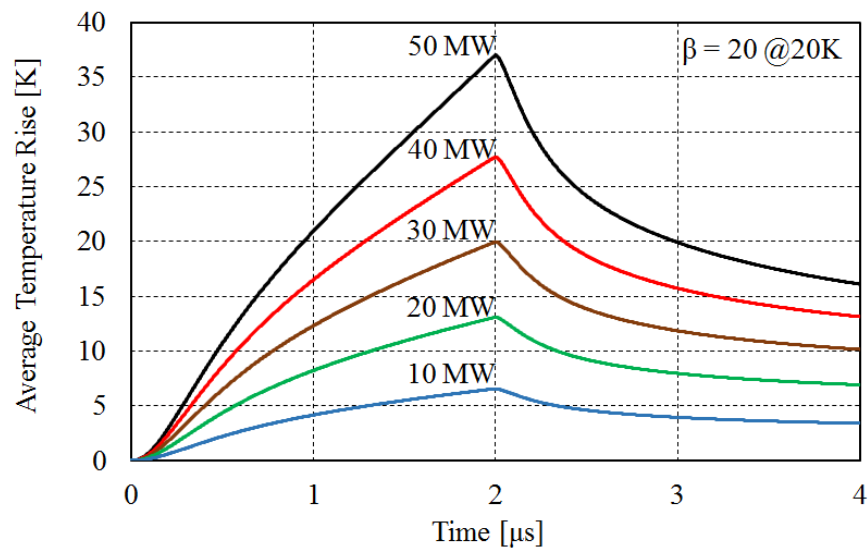
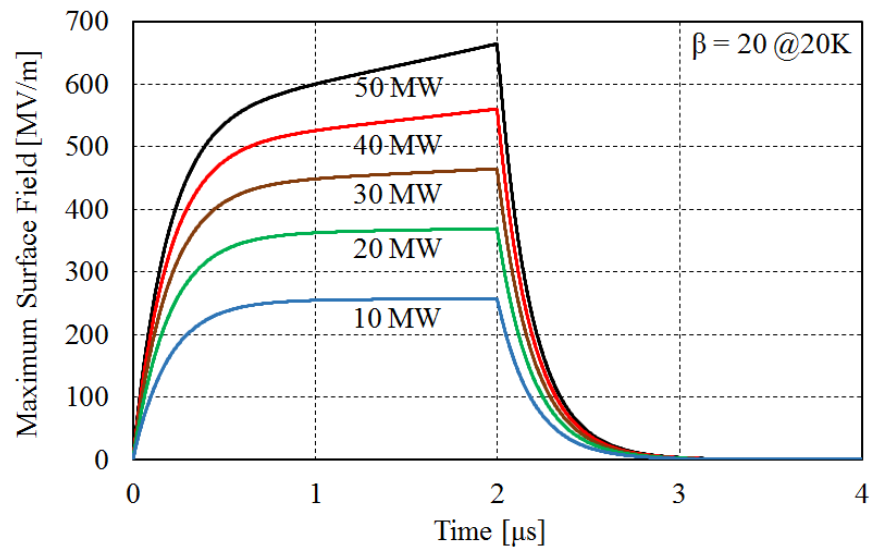
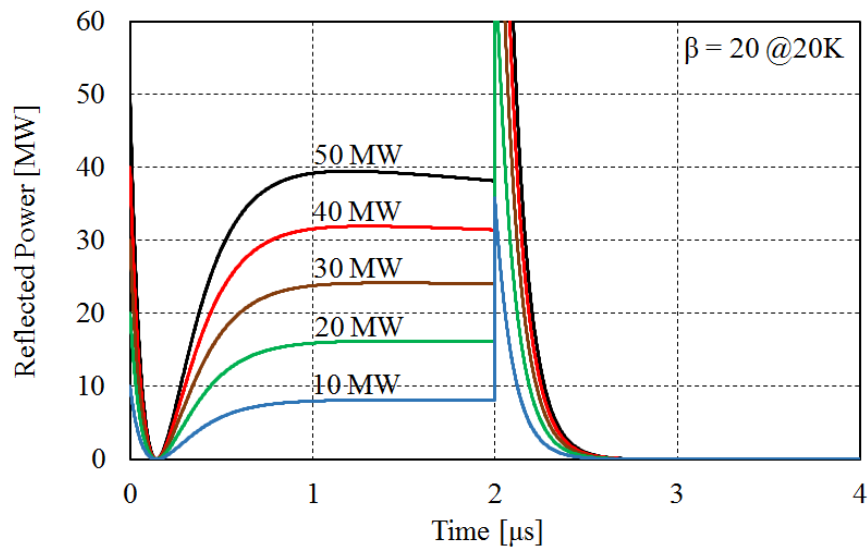
2.6セル RF電子銃空洞 ピークRF 4MW入力 @20K

ピーク損失電力	0.7356	MW
端板最大損失	7.20	kW/cm ²
加速空洞平均損失	5.15	kW/cm ²
最大表面磁場	1.990	kA/m
平均表面磁場	1.665	kA/m
最大表面電界	162	MV/m
最大カソード面電界	116	MV/m
最大加速勾配	83	MV/m

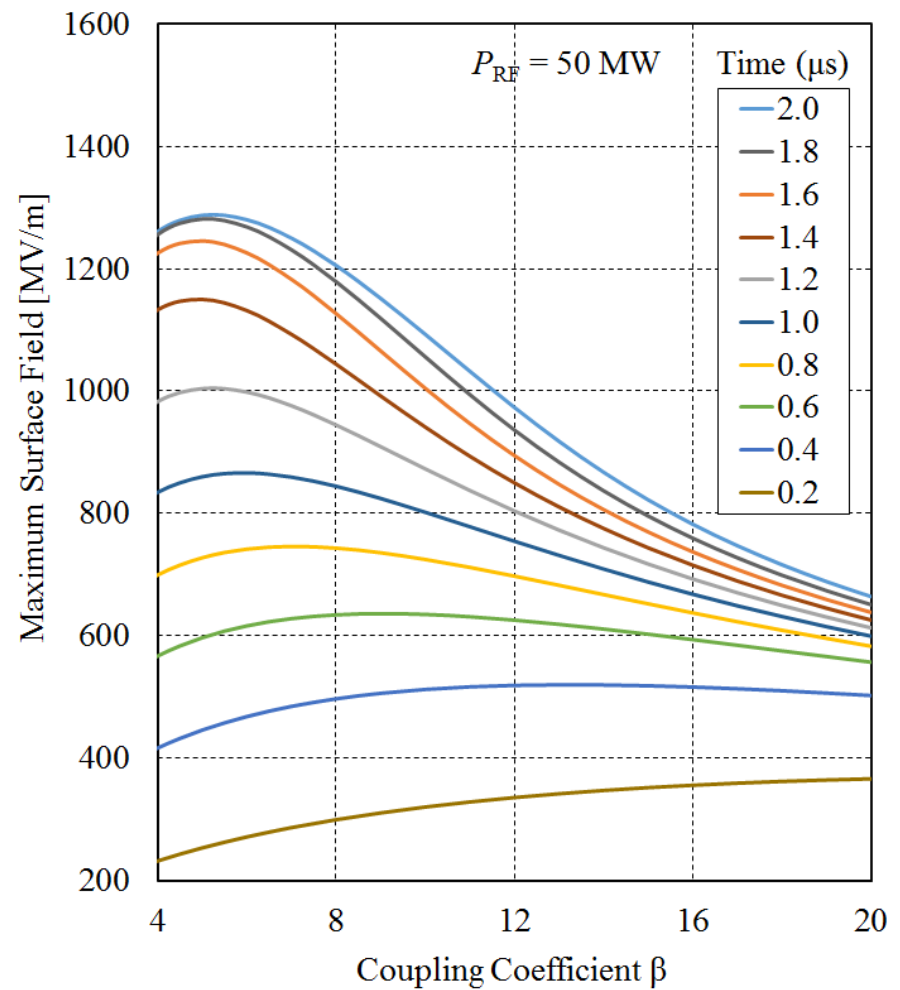
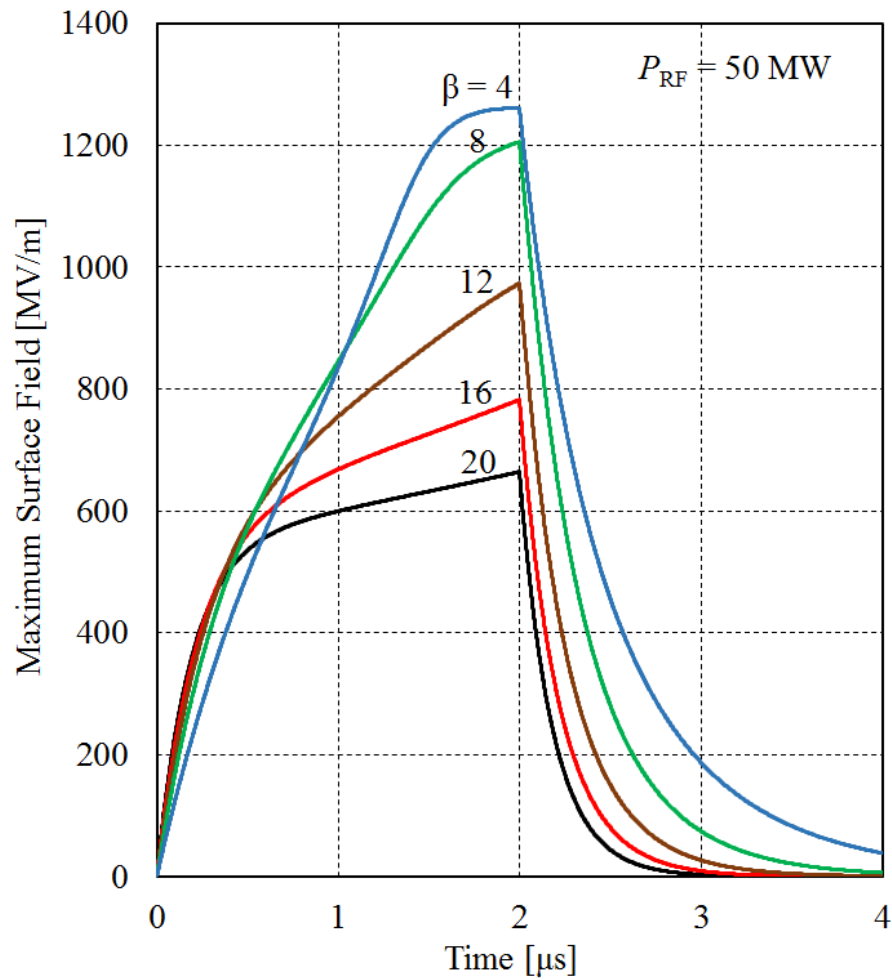
シミュレーション条件

- 空洞表面温度は平均表面磁場(電流密度)により一様に上昇
- TM01モード電磁場の分布は損失によらず不変
- ビーム負荷、電界放出の負荷は無視
- 初期条件には2.6セル試験空洞の20Kにおける無負荷Q値 $Q_0=73000$ を使用

2.6セル $\beta=20$ 試験空洞におけるシミュレーション結果



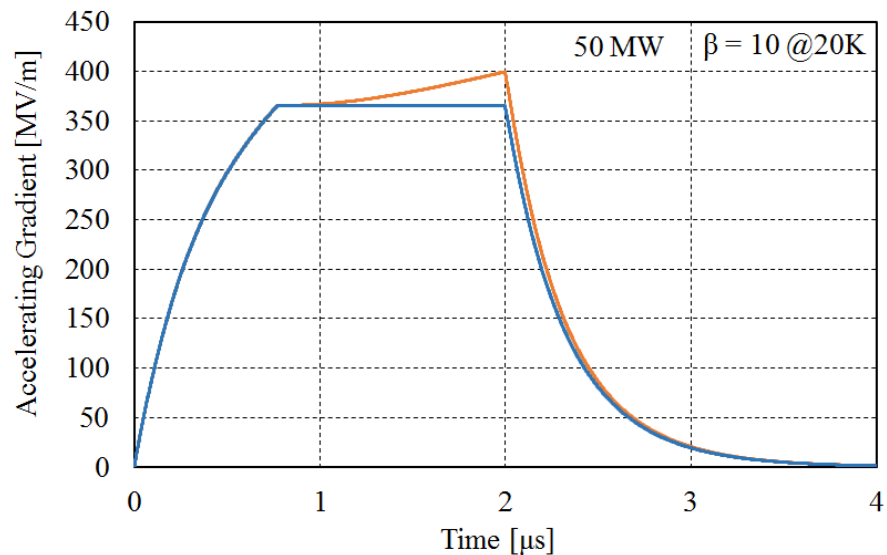
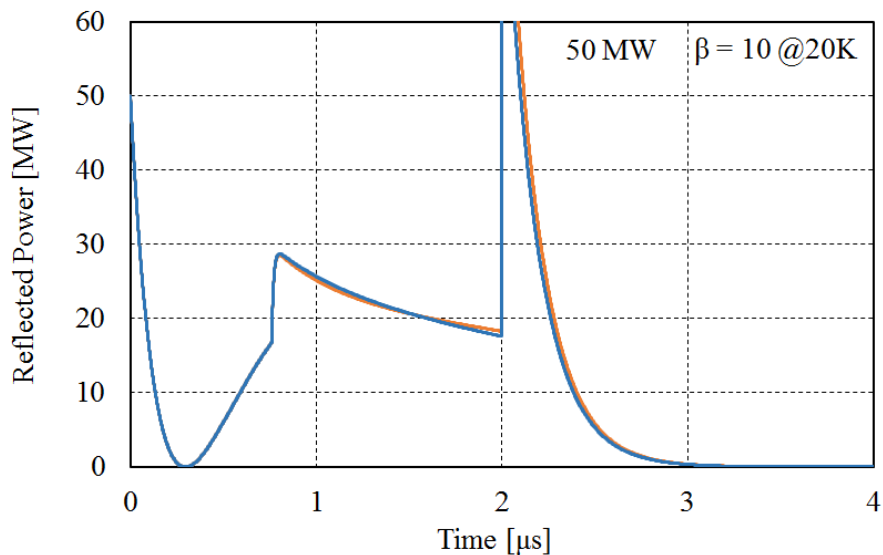
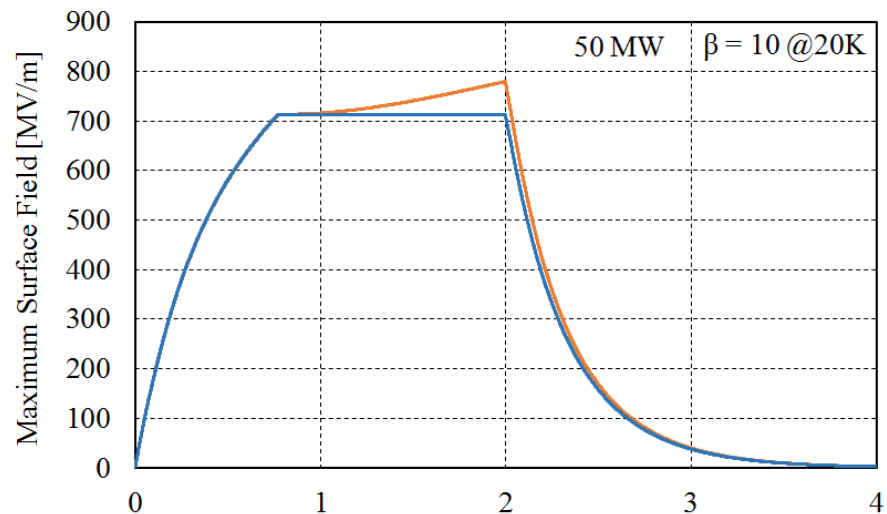
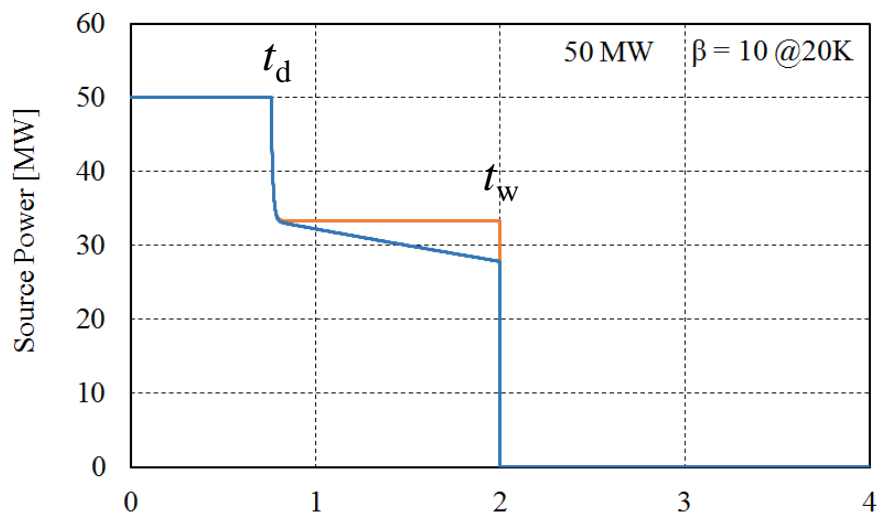
2.6セル空洞最大表面電界の結合係数依存性 @50MW



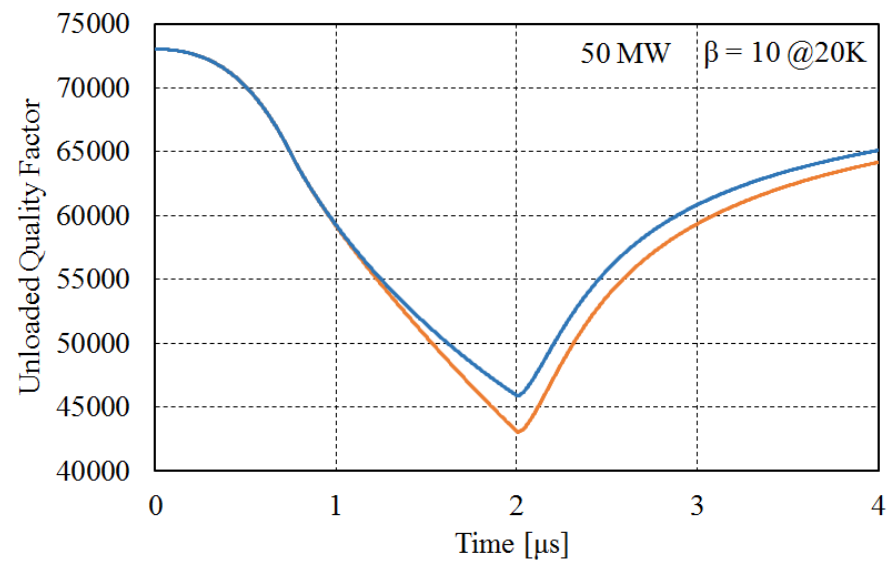
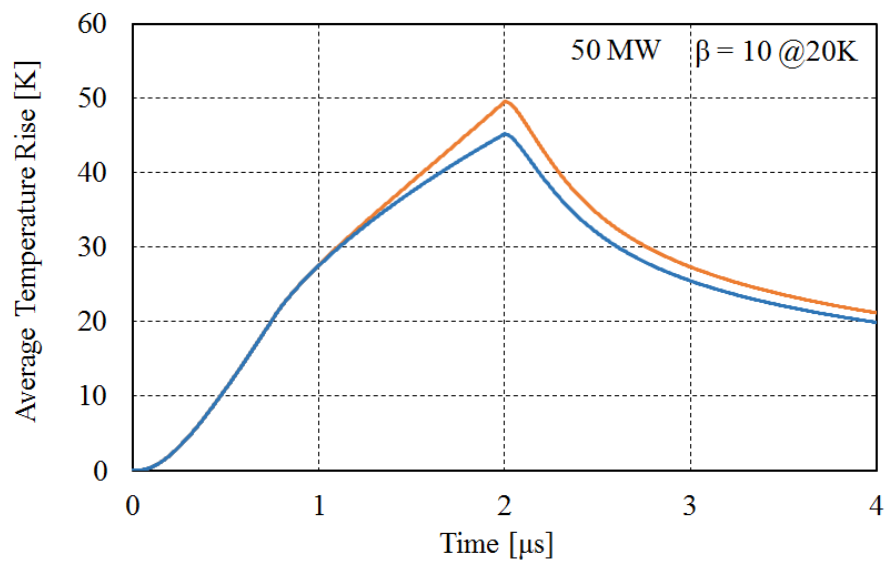
結合係数 $\beta = 10$ における電界の平坦化シミュレーション

$$E_s(t) = 1 \quad (0 \leq t \leq t_d)$$

$$E_s(t) = 1 - a \left[1 - \exp\left\{-\frac{(t-t_d)}{t_r}\right\}\right] \left\{ 1 + b(t-t_d) \right\} \quad (t_d < t \leq t_w)$$



結合係数 $\beta=10$ で電界の平坦化シミュレーション (空洞平均温度上昇・無負荷Q値変化)



まとめ

- 2.6セルCバンドRF電子銃用20K冷却試験空洞を基に、超高電界発生シミュレーションから、空洞の温度上昇、表面電界、加速勾配を導出。
- ピーク50MW入力時にRF電力を変調、パルス終端での空洞平均温度上昇45K、パルス幅2 μ sのうち1 μ s以上の平坦部で、表面電界710MV/m、加速勾配360MV/m。現実には低温動作でのRF放電、電界放出の抑制が課題。

今後の展望

- 大電力試験を行う50MW RFシステムの構築、実験用空洞、冷凍システムの開発
- 大電力試験用50MWサーキュレーターの問題
当面は電力を抑制した実験、または方向性結合器で入力電力を減衰させ、反射電力を減衰させる方法の検討(例:3dB+3dB方結 50MW \rightarrow 12.5MW)

