

Cバンド 20K 冷却高電界 RF 電子銃による 高品質電子ビーム引き出しの可能性

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,
住友洋介, 山田靖征, 吉田昂斗, 佐藤勇

研究の背景と動機

光・量子融合連携開発研究プログラム

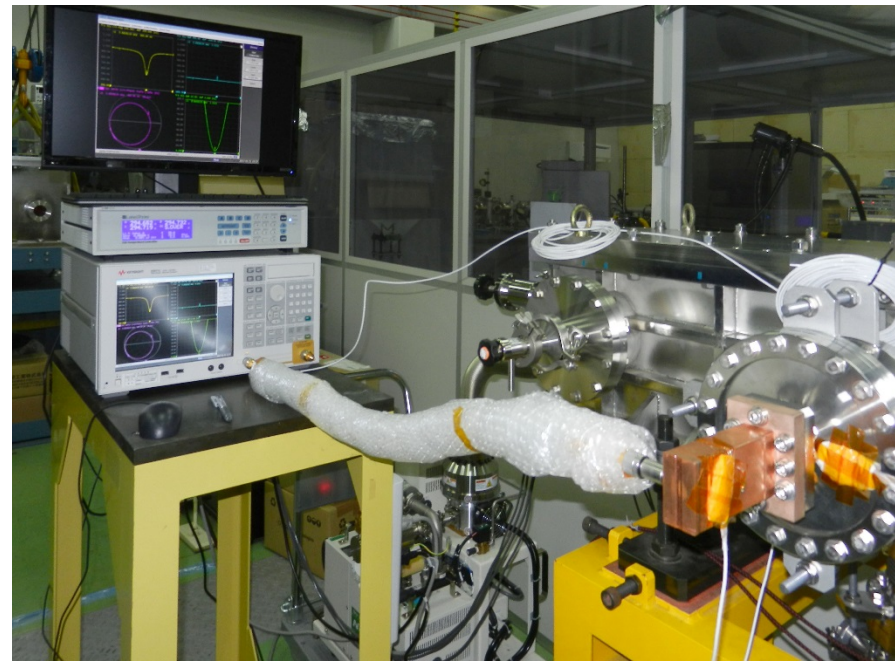
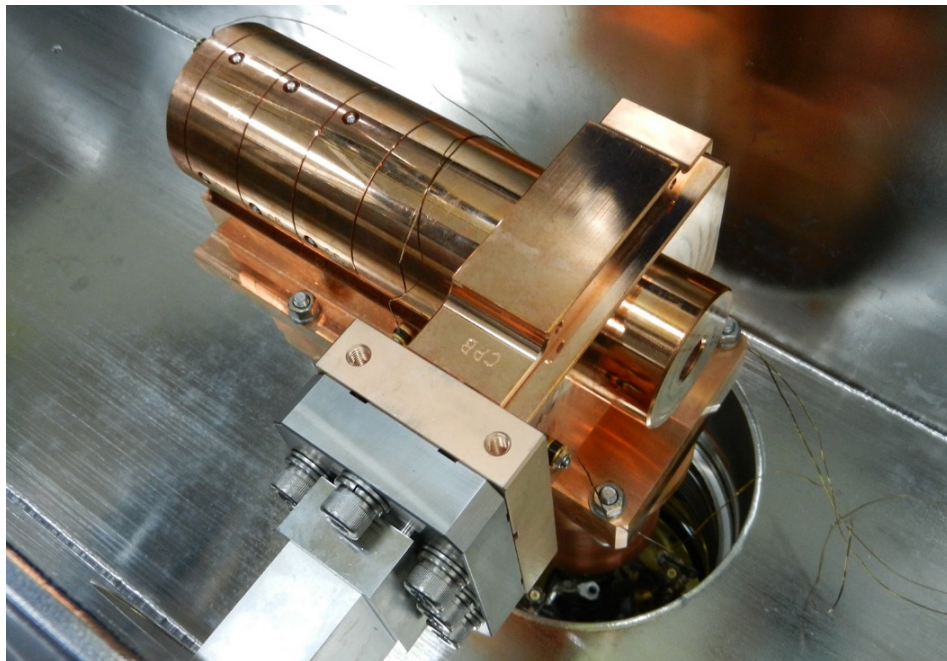
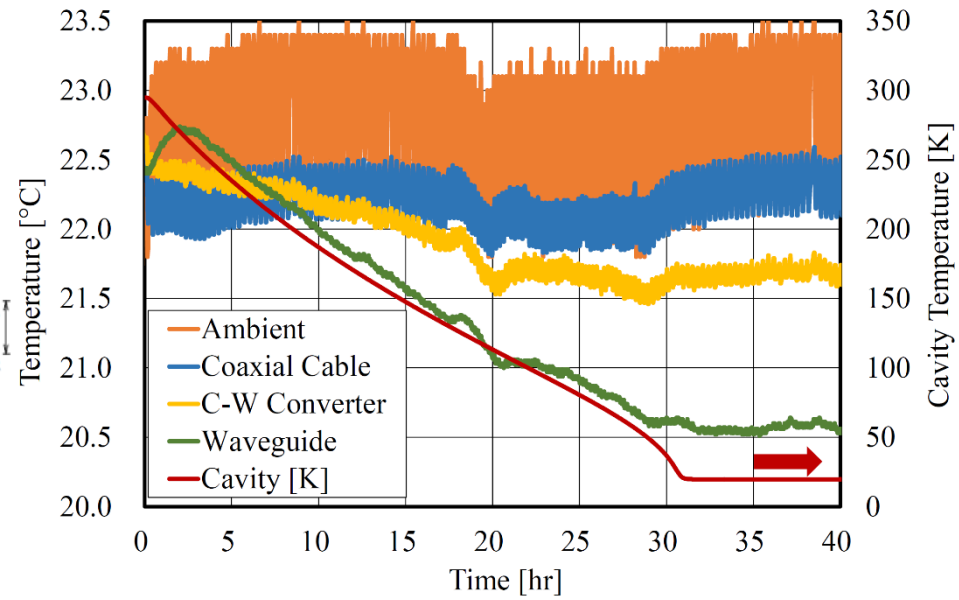
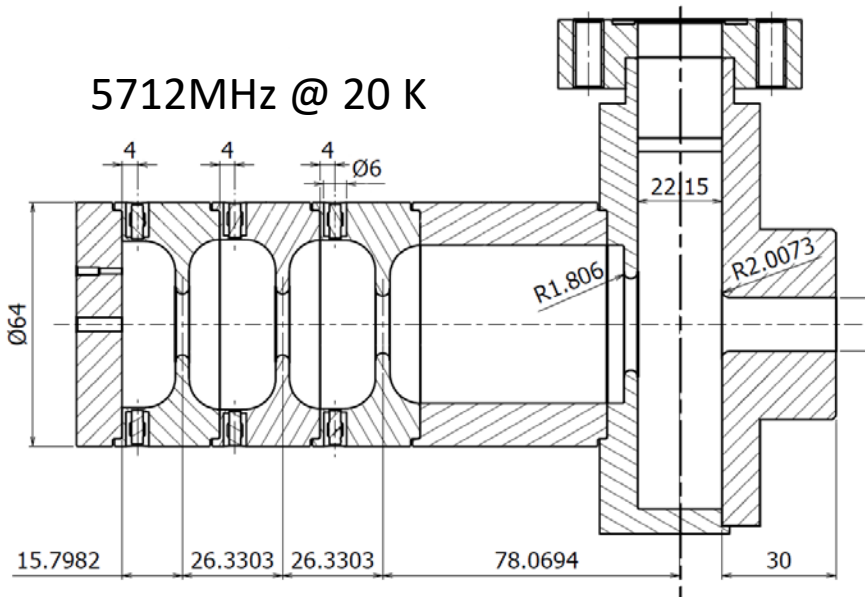
「小型加速器による小型高輝度X線源とイメージング基盤技術開発」

(KEK 浦川、照沼氏)

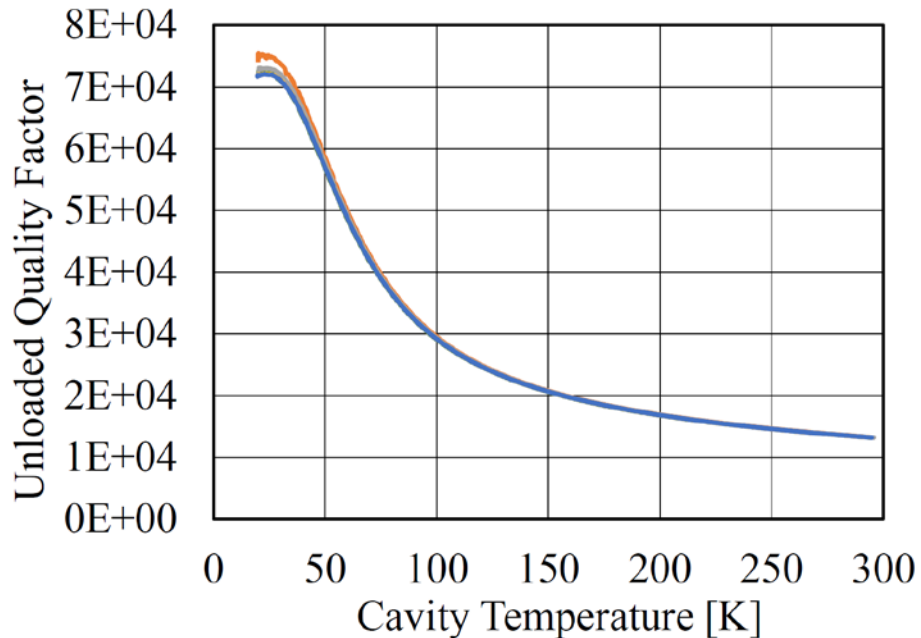
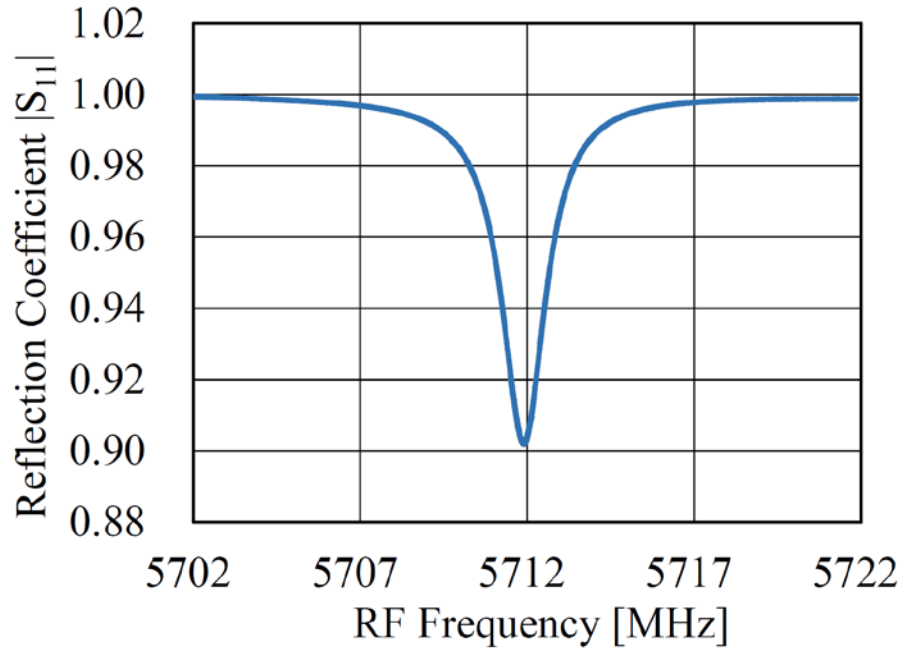
- クライオ光陰極高周波電子銃開発(日大、KEK)
 - 20K程度までの冷却は素人でも容易
 - 常伝導だが表面抵抗の低下を利用した低損失空洞
 - 大電力RF試験による動作の検証はプログラムでは未達成
- SLACにおける Xバンド空洞の高電界試験結果
 - 銅合金による高硬度材料空洞による高電界での低放電頻度
 - 45K冷却純銅空洞において、さらに高電界でも低放電頻度を達成
 - 放電頻度の電界強度依存性に対する欠陥モデルとの整合性
- トヤマ・KEKによるクライオ進行波加速管の開発と大電力試験
 - 低温下において電界放出電子が少ない

2.6セルCバンド光陰極RF電子銃用 低電力試験空洞

5712MHz @ 20 K



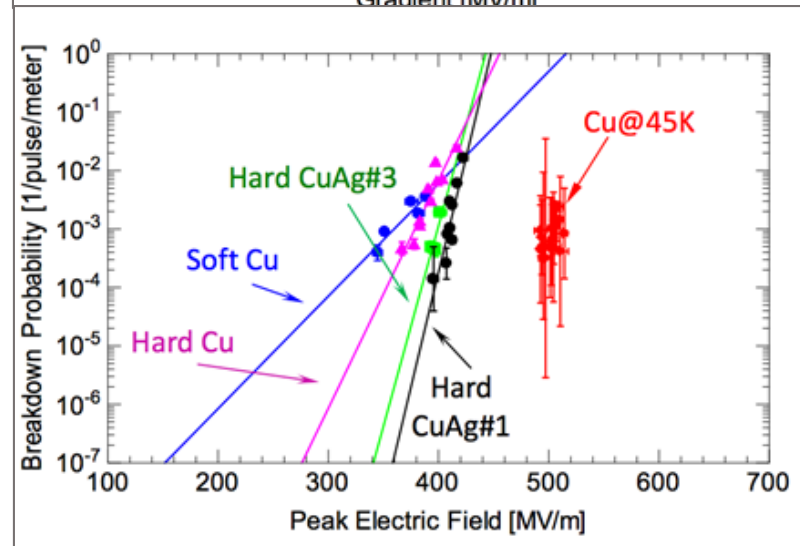
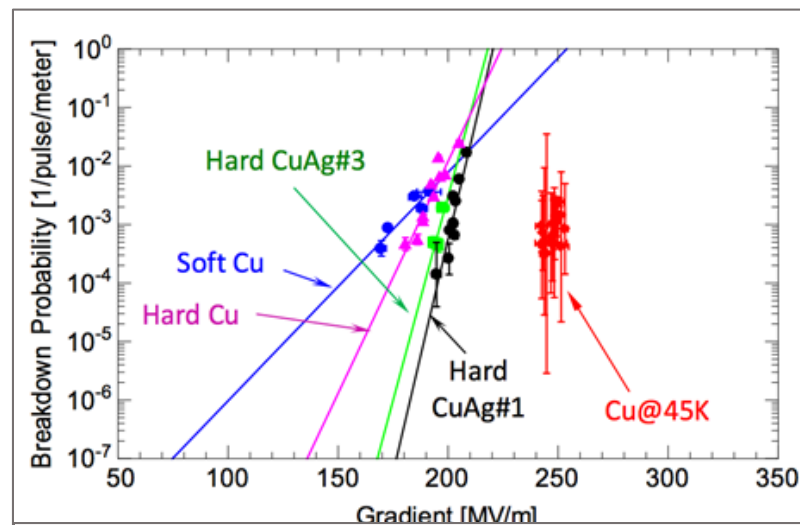
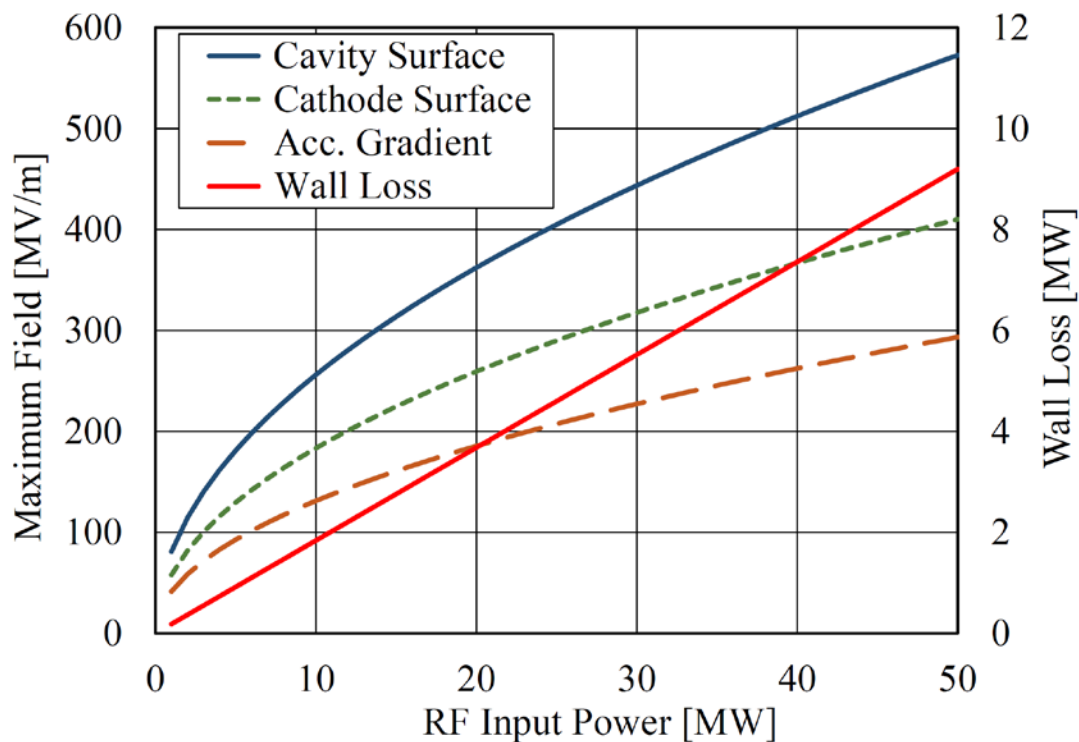
2.6セルCバンド光陰極RF電子銃用 低電力試験空洞



低電力試験に基づくRF電子銃空洞の仕様

共振周波数	5712	MHz
加速空洞長	68.2	mm
無負荷Q値	73000	
結合係数	19.7	
負荷Q値	3526	
電場立上り時間	196	ns
シャントインピーダンス	624	MΩ/m
ピーク入力RF電力	4	MW
パルス幅	2	μs
繰返し	50	pps
平均空洞損失	73.6	W
バンチ当たり電荷量	0.5	nC
最大表面電界	162	MV/m
最大カソード面電界	116	MV/m
加速勾配	83	MV/m

大電力RF (> 4 MW) 入力時の2.6セル空洞内における高電界発生



V. Dolgashev, 2nd European Advanced Accelerator Concepts Workshop (EAAC 2015) La Biodola, Isola d'Elba, Italy, 13-19 September 2015

銅表面をカソードとした場合の量子効率とエミッタンス

銅表面付近のポテンシャルエネルギー

$$\phi(x) = -eE_{\text{RF}}x - \frac{e^2}{16\pi\epsilon_0 x}$$

ポテンシャルエネルギー最大値

$$\phi_{\text{max}} = -\sqrt{e^3 E_{\text{RF}} / 4\pi\epsilon_0}$$

仕事関数実効値

$$\phi_{\text{eff}} = \phi_{\text{W}} - \sqrt{e^3 E_{\text{RF}} / 4\pi\epsilon_0}$$

D. H. Dowell *et al.*, Phys. Rev. STAB 9(2006) 063502

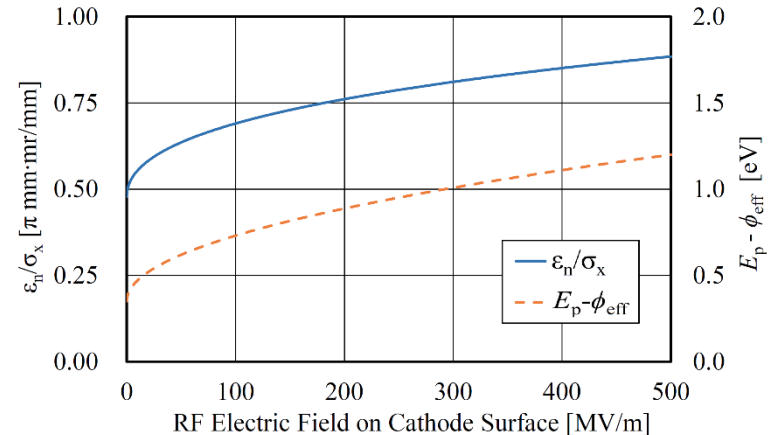
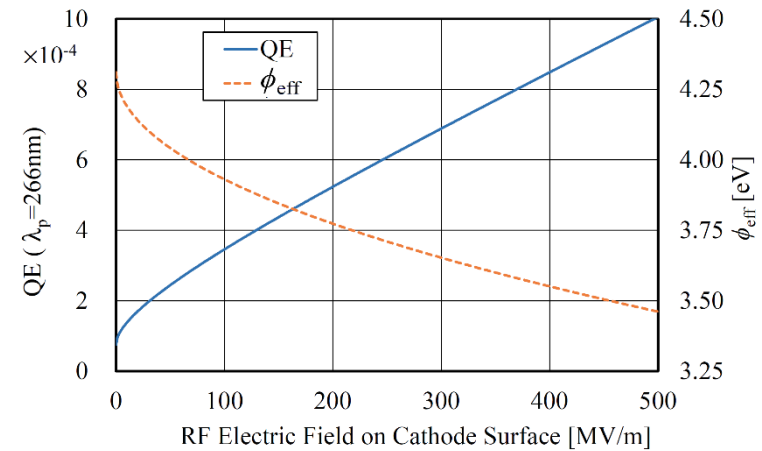
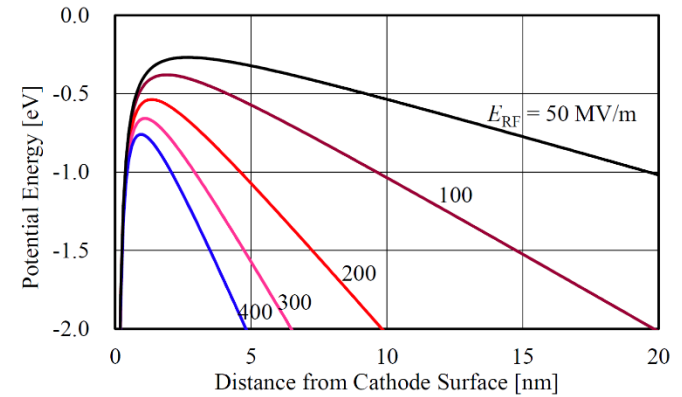
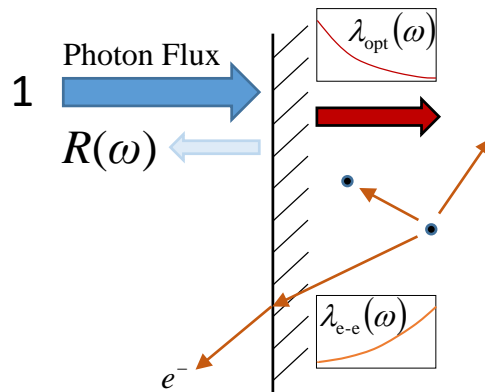
量子効率

$$\text{QE}(\omega) = \frac{1 - R(\omega)}{1 + \lambda_{\text{opt}}(\omega) / \lambda_{e-e}(\omega)} \frac{E_F + \hbar\omega}{2\hbar\omega} \left[1 - \sqrt{\frac{E_F + \phi_{\text{eff}}}{E_F + \hbar\omega}} \right]^2$$

規格化エミッタンス

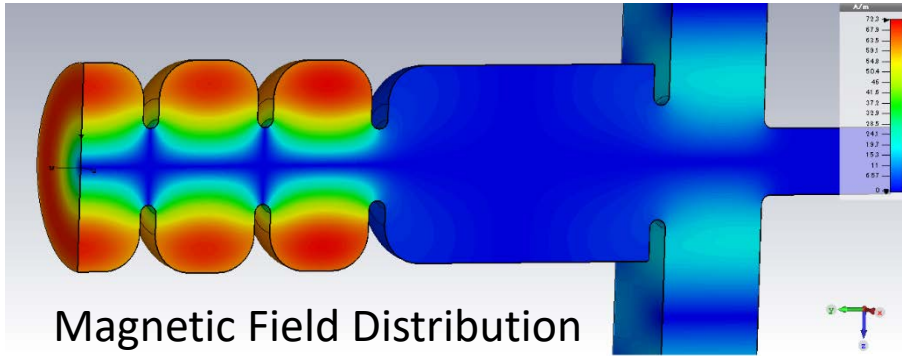
$$\epsilon_n = \sigma_x \sqrt{\frac{\hbar\omega - \phi_{\text{eff}}}{3mc^2}}$$

$\lambda_p = 266 \text{ nm}$ で試算



大電力入力による空洞特性への影響 — 温度上昇 —

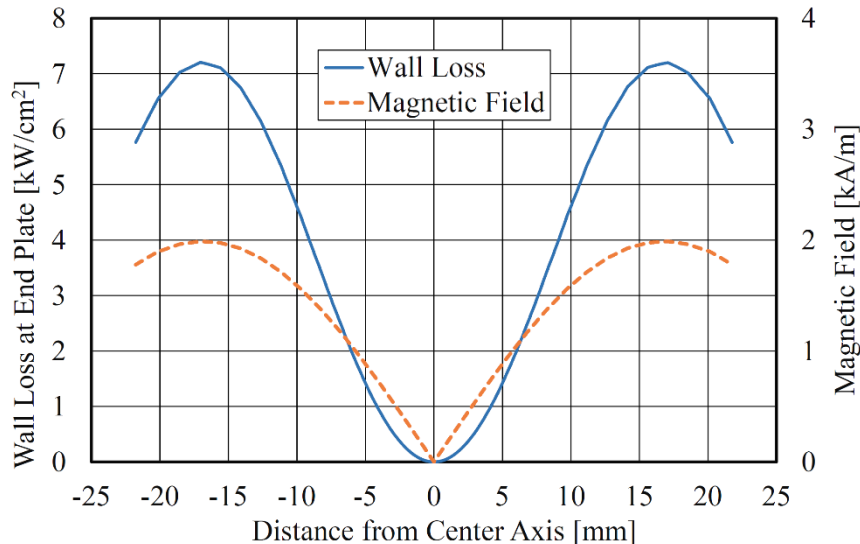
CST Studio Simulation



Magnetic Field Distribution

- ・ 左端板中心軸から17mmで磁場が最大
- ・ 外周部ではその90% → 損失電力は81%

最大磁場振幅 1.99 kA/m @ 4 MW
 端板壁損失 7.20 kW/cm² @ 20 K



RFパルスによる温度変化

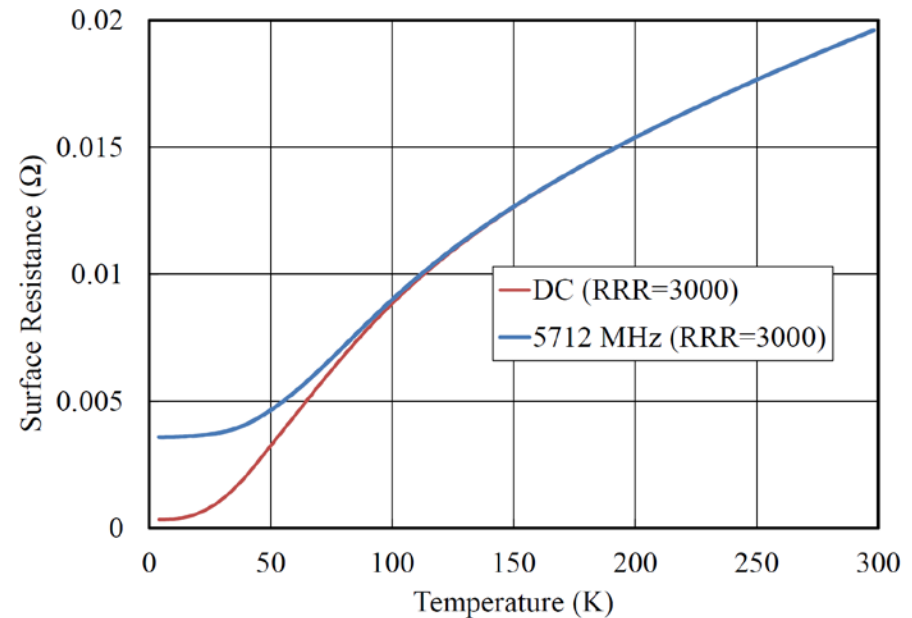
(D. P. Pritskau, Dissertation, Stanford university)

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

$$\frac{dP}{dA} = \frac{1}{2} R_s J^2 = \frac{1}{2} R_s |H_{\parallel}|^2 \quad (\text{単位面積当たり発熱})$$

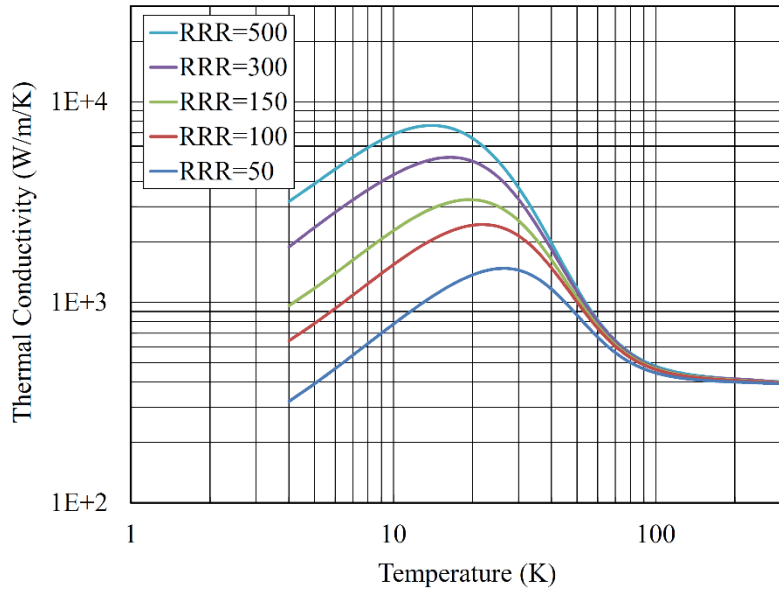
ρ : 密度、 C_p : 比熱、 K : 熱伝導率

RRR=3000 高純度銅の空洞表面抵抗 R_s



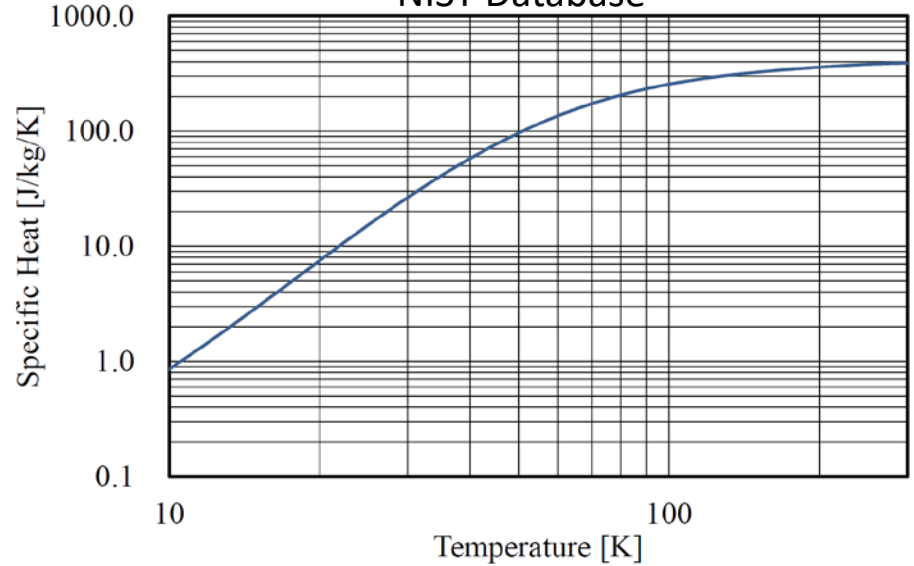
大電力入力による空洞特性への影響 — 温度上昇 —

NIST Database

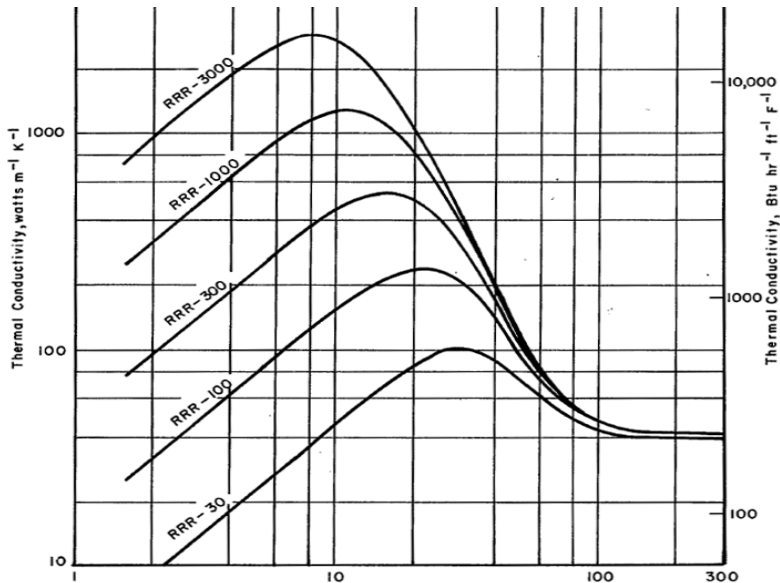


$$\Delta T(t) = \int_0^t \frac{dP(t', T)}{dA} \frac{1}{\sqrt{\pi \rho K(T) C_p(T)}} \frac{dt'}{\sqrt{t - t'}}$$

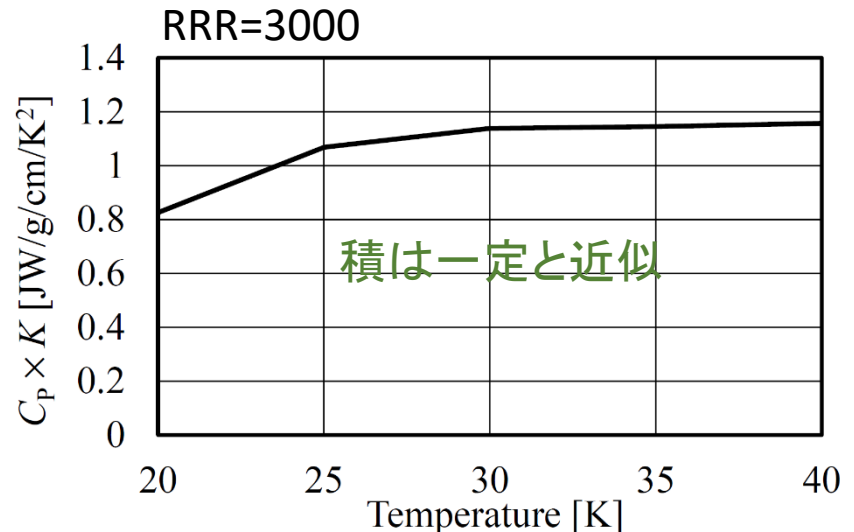
NIST Database



(桁間違)

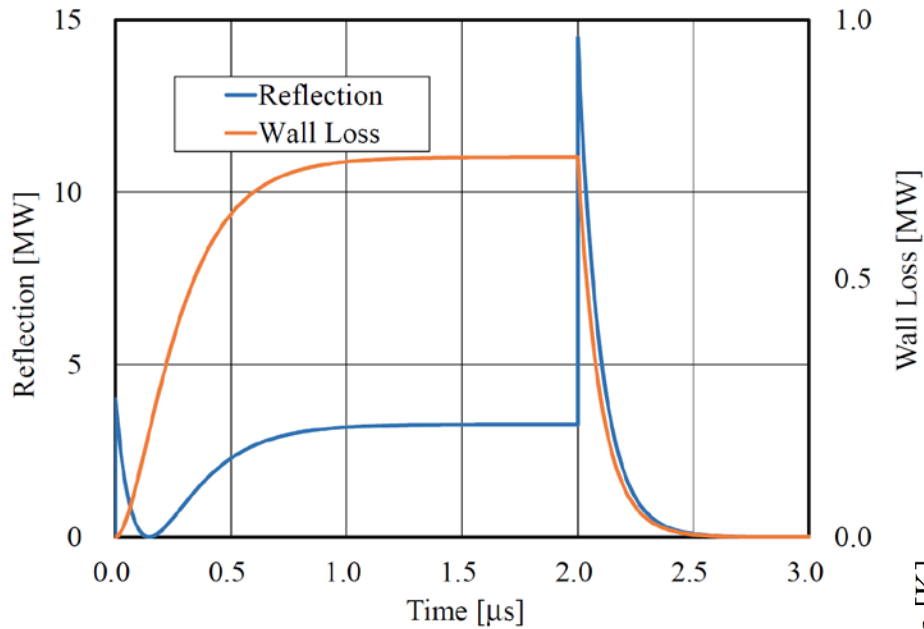


Brookhaven National Laboratory Database



大電力入力による空洞特性への影響 — 温度上昇 —

4 MW、パルス幅2 μ s入力における反射電力と空洞内損失電力の波形



一定値と近似した20 Kでの物性数値

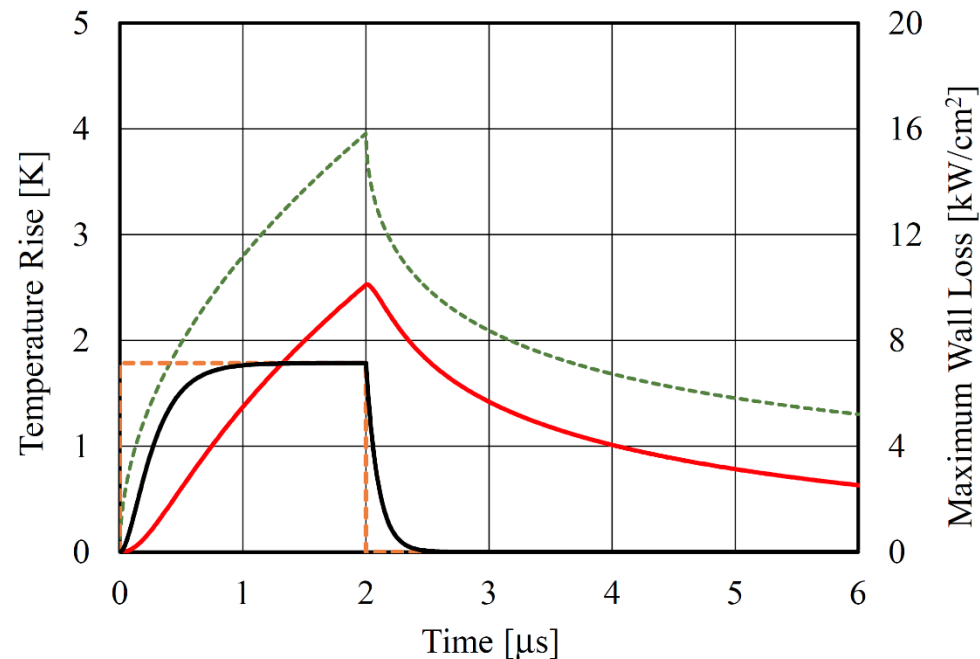
$$R_s = 0.003645 \Omega$$

$$C_p = 0.01 \text{ J/g/K}$$

$$K = 90 \text{ W/cm/K}$$

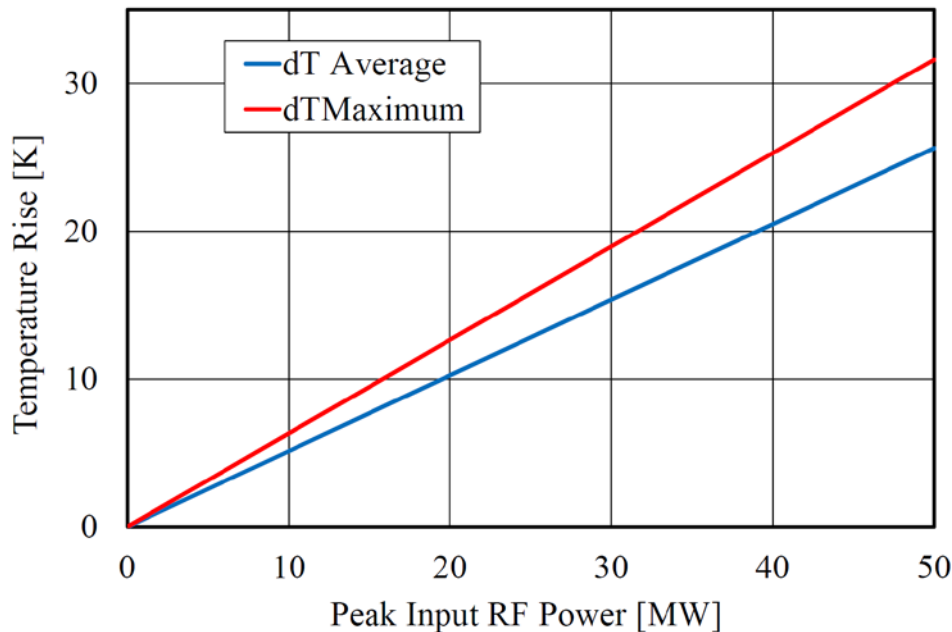
$$\rho = 9.0 \text{ g/cm}^3$$

最大磁場部分の温度上昇計算結果
空洞全体ではパルス終端で約2 K上昇



大電力入力による空洞特性への影響

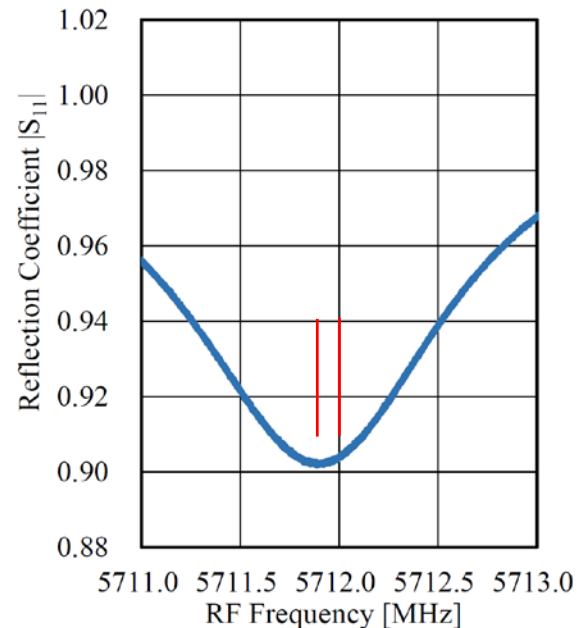
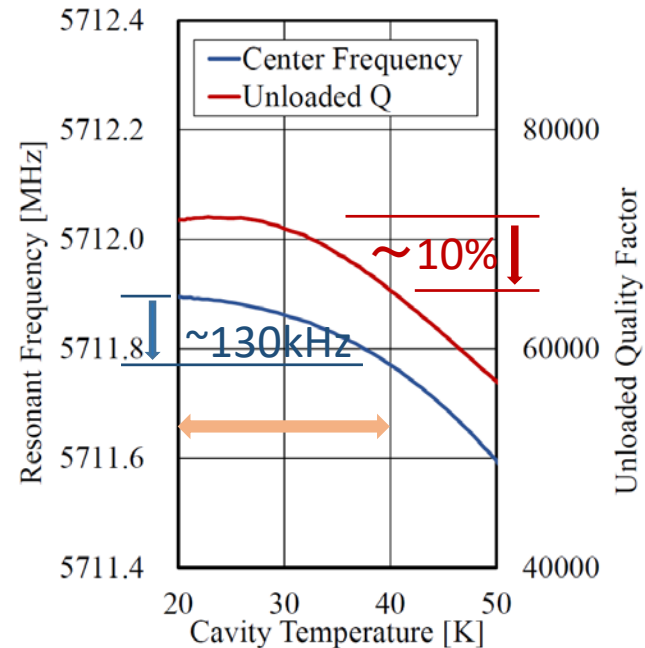
20 K を基準とした計算結果
空洞温度上昇の入力RF電力依存性



Q値および共振周波数への影響
(20 Kを基準に定常状態からの推定)

- 10 K程度の温度上昇はほぼ影響なし
→ 20 MW入力程度まで問題なし(?)
- 20 Kの温度上昇 Q_0 が10%低下、共振周波数が130kHz低下しても、動作の破綻はない
→ ピーク共振周波数から130kHz低下しても空洞電界の低下は1.5%以内

— 温度上昇 —



Q_0 の低下による結合係数変化の影響

$$Q_0 = \beta Q_{\text{ext}}$$

$$Q_{\text{ext}} = \text{const.}$$

$$Z \propto Q_0 \propto \beta$$

$$\beta = \beta_0 + \Delta\beta$$

$$V_{\text{acc}} = \frac{2\sqrt{\beta}}{1+\beta} \sqrt{PZT^2L} \approx \left\{ 1 + \frac{\Delta\beta}{\beta_0(1+\beta_0)} \right\} \frac{2\sqrt{\beta}}{1+\beta} \sqrt{PZ_0T^2L}$$

≈ -0.005

Q_0 の10%低下は1次近似では電界の変化がほぼ無視できる。



空洞放電時の電界がほぼ正確に推定できる。

ま と め

- 20 K 冷却Cバンド光陰極RF電子銃用試験空洞の低電力試験結果に基づき当初予定のピーク4MWを遥かに超える大電力RF入力における空洞動作を検討。
- RF入力による空洞温度上昇を評価し、空洞特性に及ぼす影響を考察。
- 空洞温度の上昇10K程度までは、空洞特性の変化は小さい。
- 温度上昇が20K程度までになると、無負荷Q値の低下に伴い、加速電界の変化は無視できるが、空洞消費電力は10%増加するため、さらに若干空洞温度が上昇すると予想。
- パルス幅 $2\mu\text{s}$ 、ピーク40 MWの入力で空洞平均温度が20 K程度上昇。
- 空洞温度上昇は、20 K冷却2.6セルRF電子銃空洞における高電界放電頻度の測定実験には支障ない。
- 低温冷却高電界RF電子銃で、短パルスレーザー照射による短バンチビーム生成の可能性。