

11. High Gradient R&D @ KEK

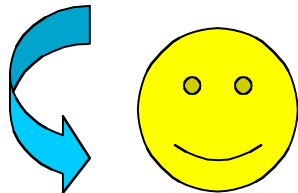
- TESLA/ILCに向けた 高電界超伝導空洞の開発 -

KEKの基礎研究

Basic R&D for High Gradient SC Niobium Cavity in KEK L-band Group

**High Gradient
SC Cavity**
Eacc ~ 40MV/m

- 1) High pure niobium material RRR~200
- 2) Electropolishing (EP)
- 3) High Pressure Water Rinsing (HPR)
- 4) Baking (70~140°C)



**Degradation-free
Final Cavity Assembly**

- 1) Opening vacuum with Argon Gas
- 2) Simple Aluminum Vacuum Sealing



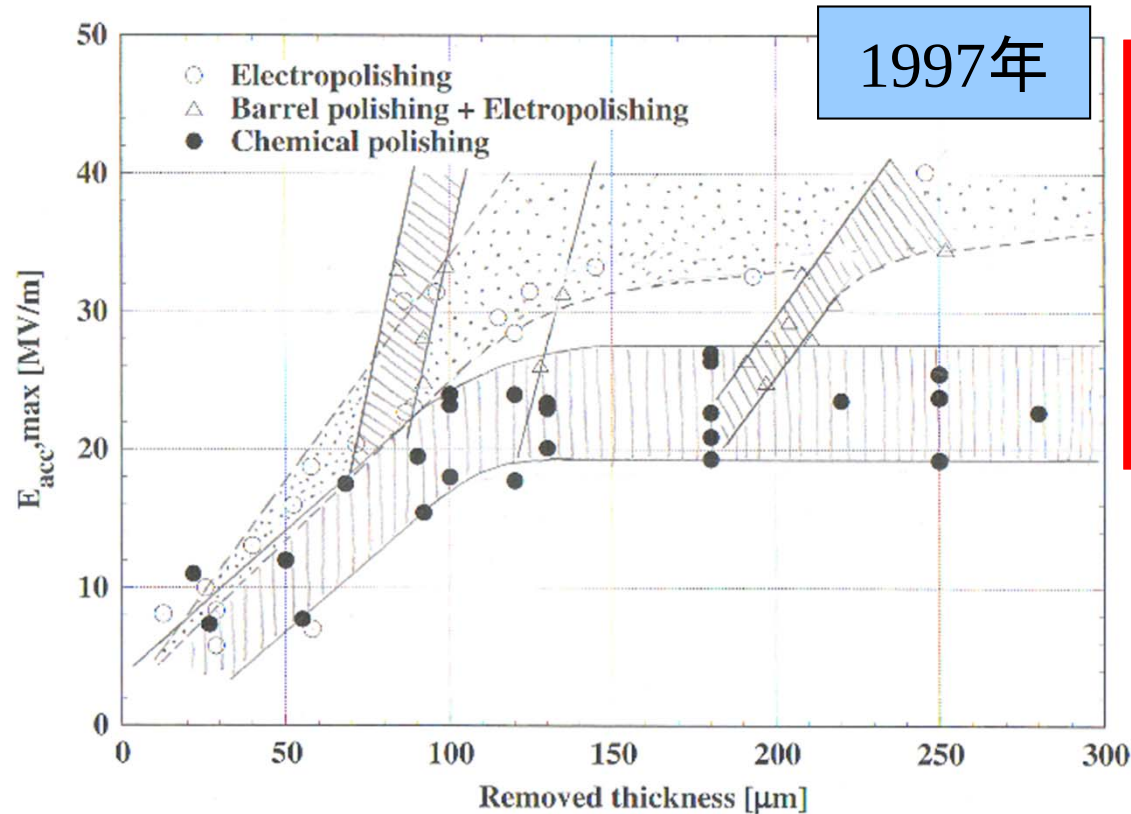
**Cost-Effective
Cavity Production
Method**

- 1) Nb/Cu Clad Seamless Cavity
- 2) Simplified Surface Treatment



High Gradient & Highly Reliable & Cost-effective SC Cavity

Discovery of Superiority of EP with High Gradient



電解研磨が必要か？

TRISTANで電解研磨が高性能性に不可欠か？

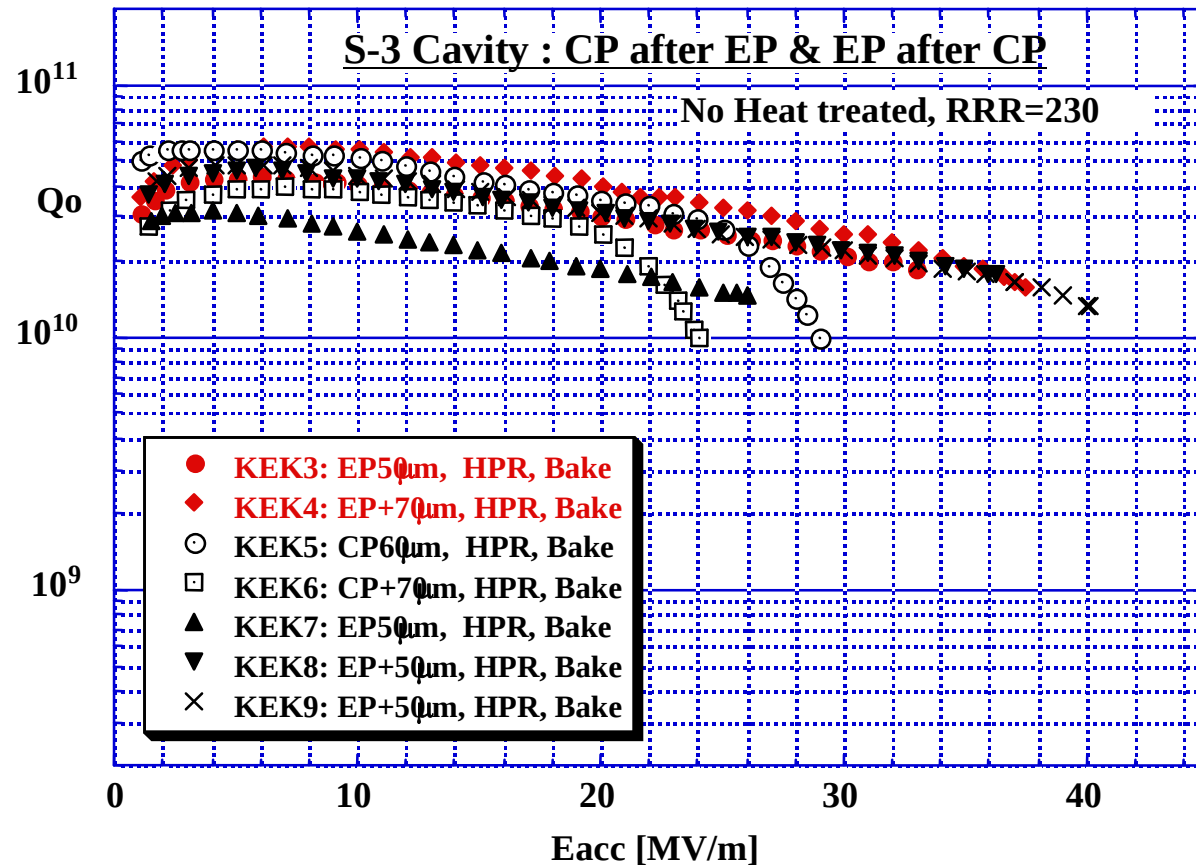
CPは簡単で、研磨速度が大きい。

CPでの空洞性能の見極めが第一 !!

CPでの研磨厚みに対する空洞性能

- 1) 250 μm 研磨しても $E_{acc}=20\sim28MV/m$ 程度しか期待出来ない。
- 2) それらの空洞に電解研磨を施すと30MV/m以上に高電界が向上する。
- 3) 電解研磨では、研磨量の増加とともに電界が向上し、30MV/m以下でサチル傾向は見えない。
- 4) 高電界性に関し、EPのCPに対する優位性が存在する。

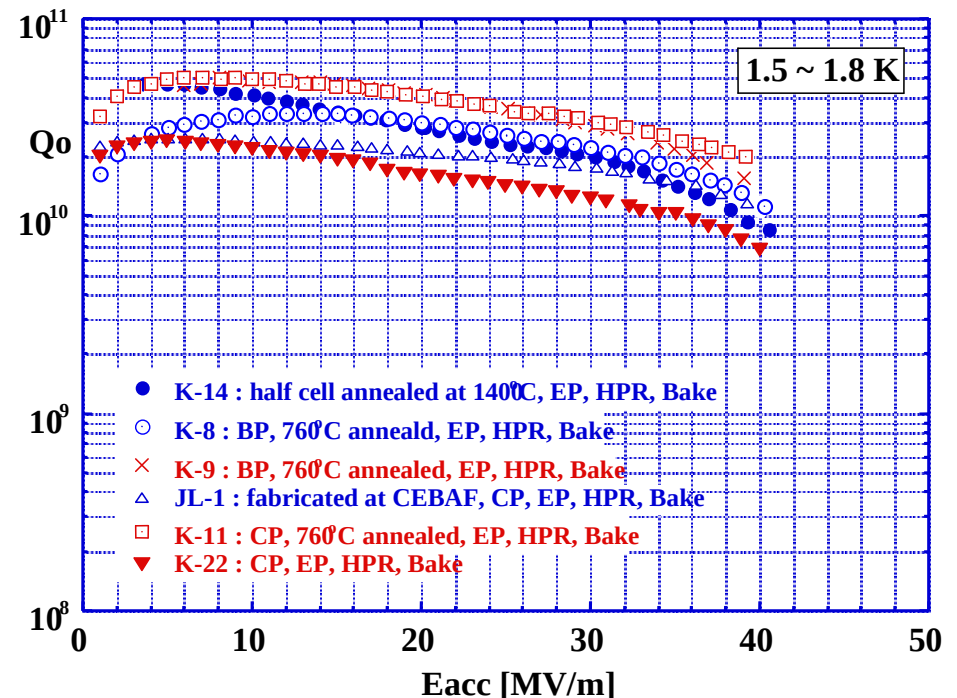
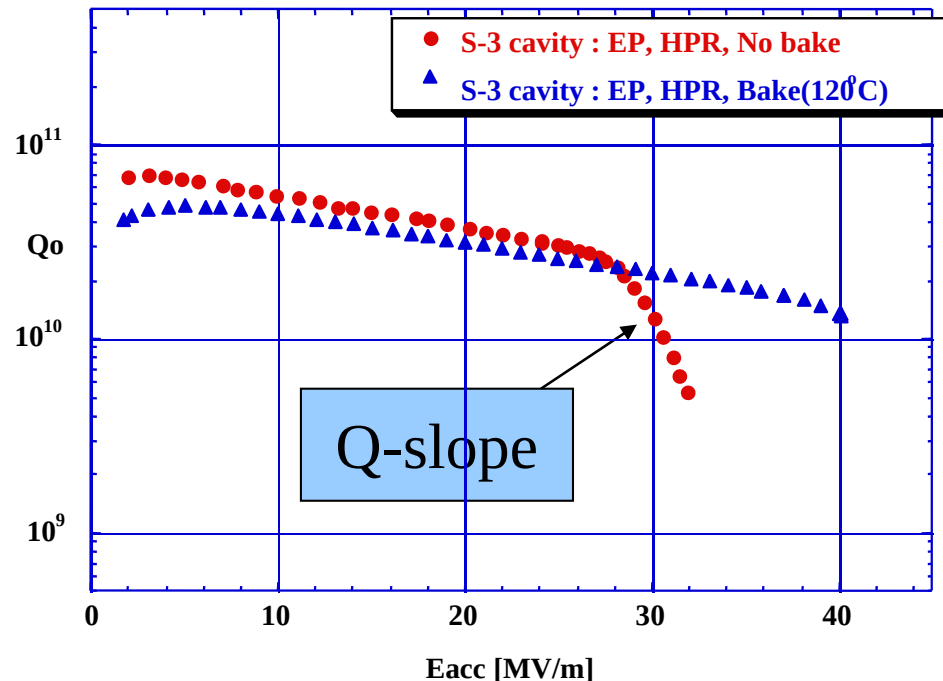
高電界性に対するEPの優位性



2000年

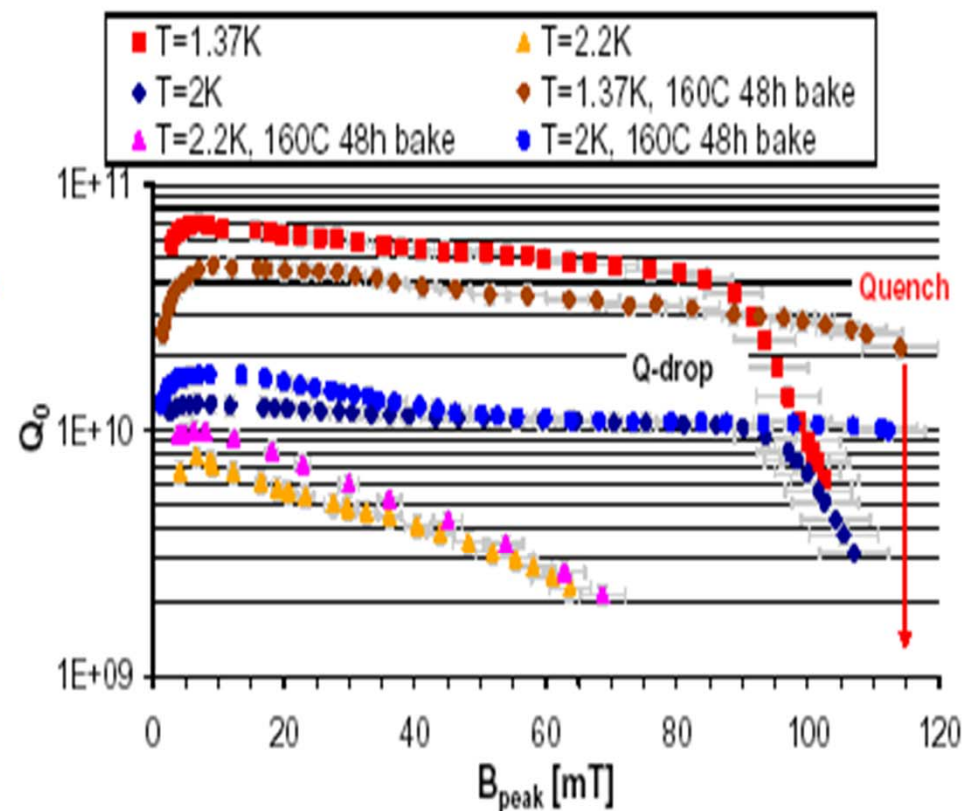
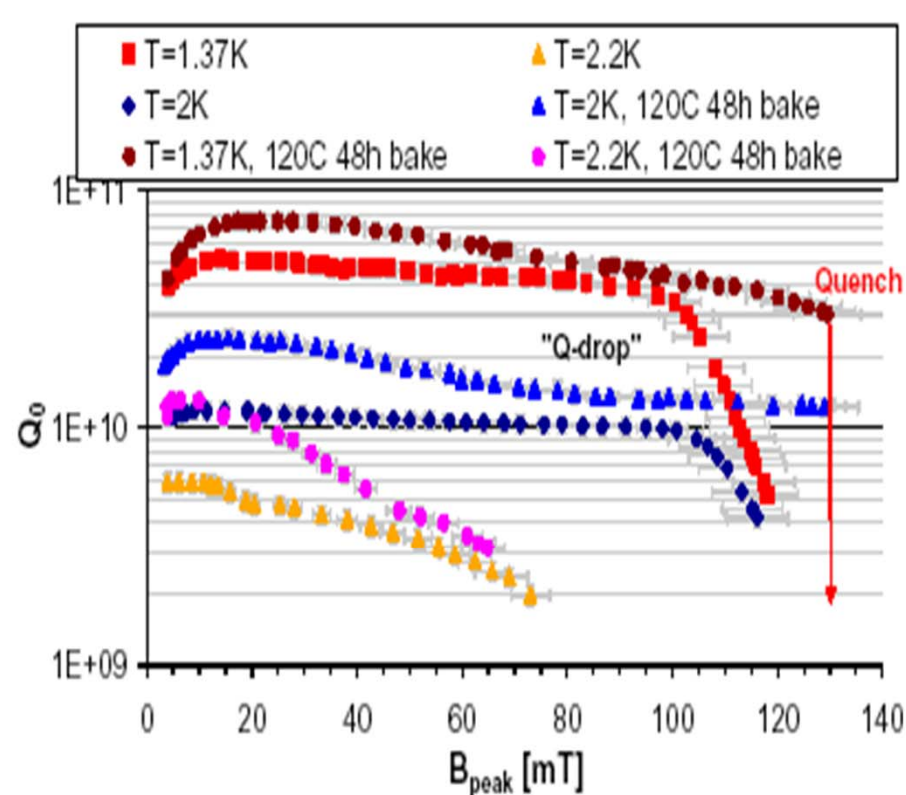
- 1) Saclay研究所で製作した空洞をKEKでEPを繰り返す。
電界順次向上し、38MV/mまで達成。
- 2) CPを追加すると電界が劣化。
- 3) EPを行うと電界が向上し、40MV/mを達成。

Baking Effectとの絡み



- 1) EPだけではQ-slopeが発生する。
- 2) 120°C BakingでQ-slopeが消失し、電界が向上する。
- 3) EP+Bake(TRISTANのrecipe)が高電界への道。
TRISTANの表面処理のレシピはベストである事を確認。
- 4) 何ぜどの空洞も40MV/m辺りでクエンチするのか？

CPに対するBaking Effect (最近の結果)



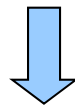
CPした空洞では、

- 1) BakingによりQ-slopeは消えるが、
- 2) 高電界性の大きな向上は見えない。
- 3) 何を意味するか？

Oxygen Diffusionだけでは説明の付かない、 他の高電界制限の存在

Coupled Problem

- EPした空洞は何故40MV/mでクエンチするか？
- CPLした空洞ではBaking後も何故電界がそれ程向上しないのか？



統一的に説明するためには

Magnetic Critical Fieldが

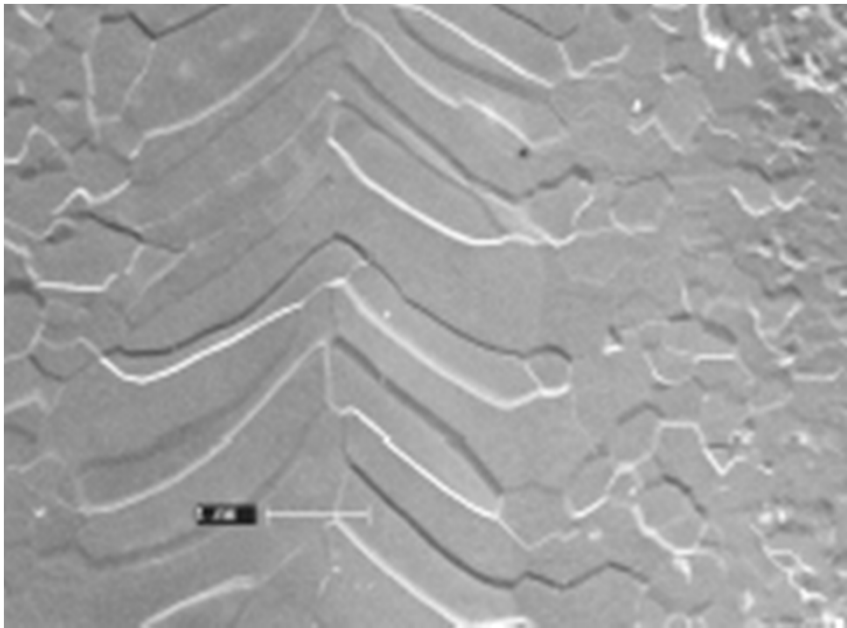
$$E_{acc} \sim 40 \text{ MV/m} = 43.8 \times 40 = 1750 \text{ Oe} = H_c^{\text{RF}}$$

辺りであるとする説明できる。By K.Saito

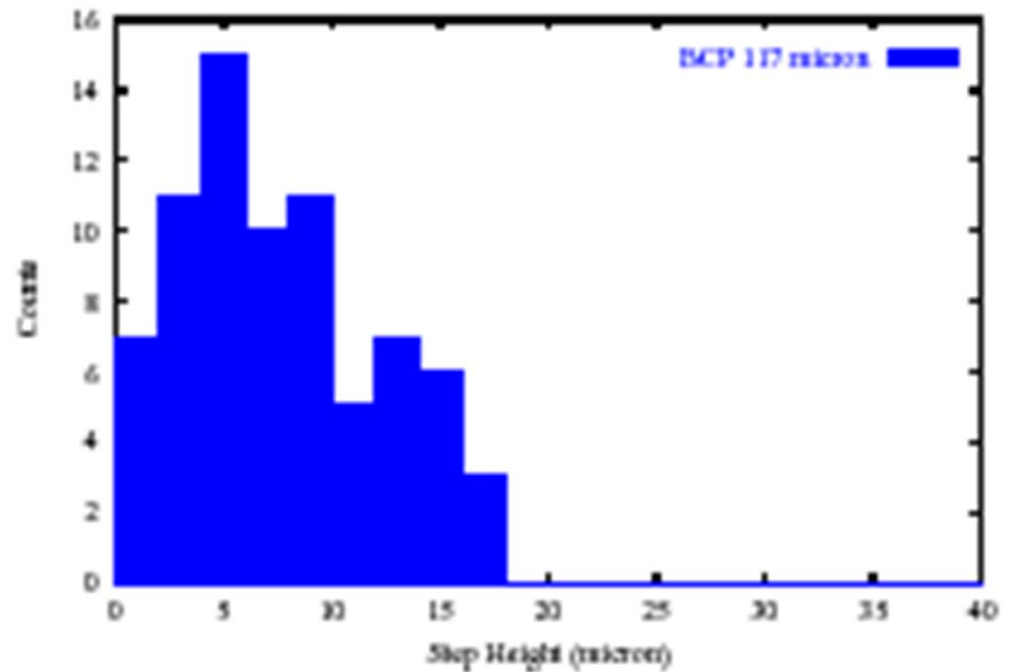
EPの滑らかな面 $\Rightarrow$ 磁場のenhancement 起こらず $\Rightarrow H_{\text{rf}} = H_c^{\text{RF}}$ でクエンチ

CPの粗い面粗度 $\Rightarrow$ 磁場のenhancement: β_m
 $\beta_m = 40/28 \sim 40/20 = 1.4 \sim 2$ $\Rightarrow \beta_m \cdot H_{\text{rf}} = H_c^{\text{RF}}$ でクエンチ

Grain Boundary Steps on EBW Seams



Equator EBW seam of Nb cavity

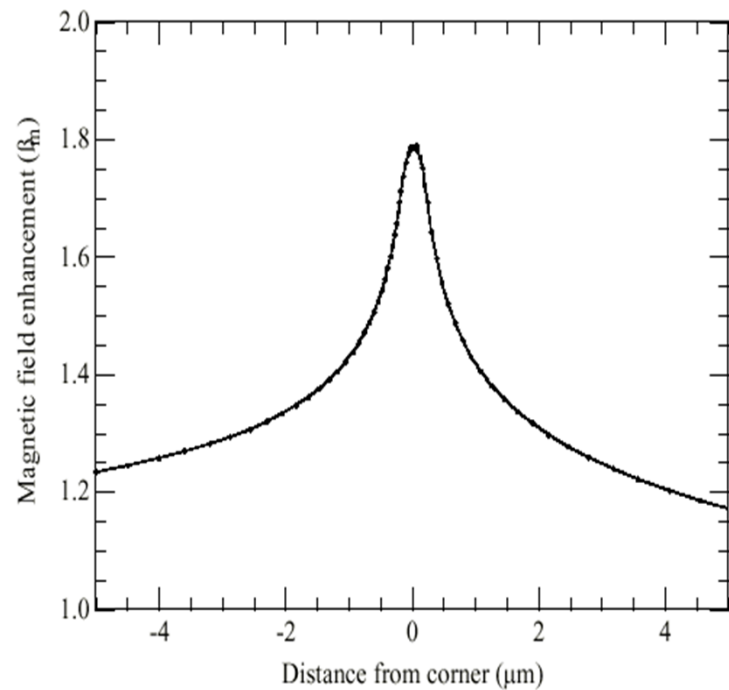
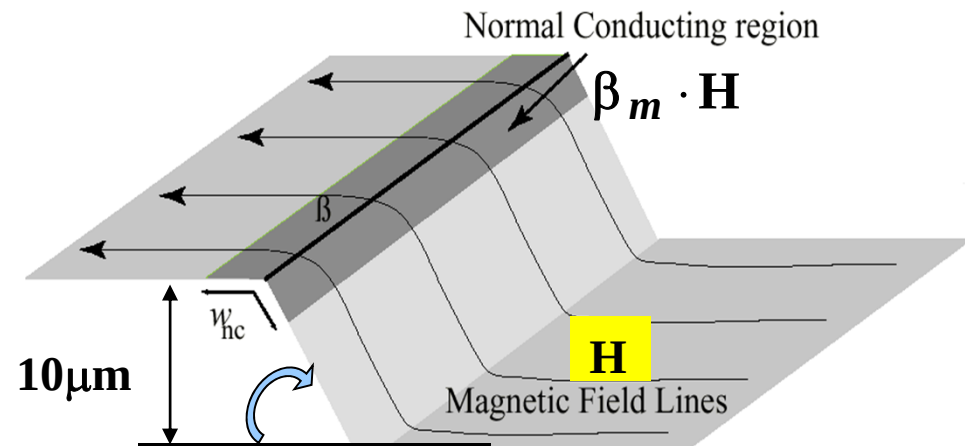


Distribution of the step height

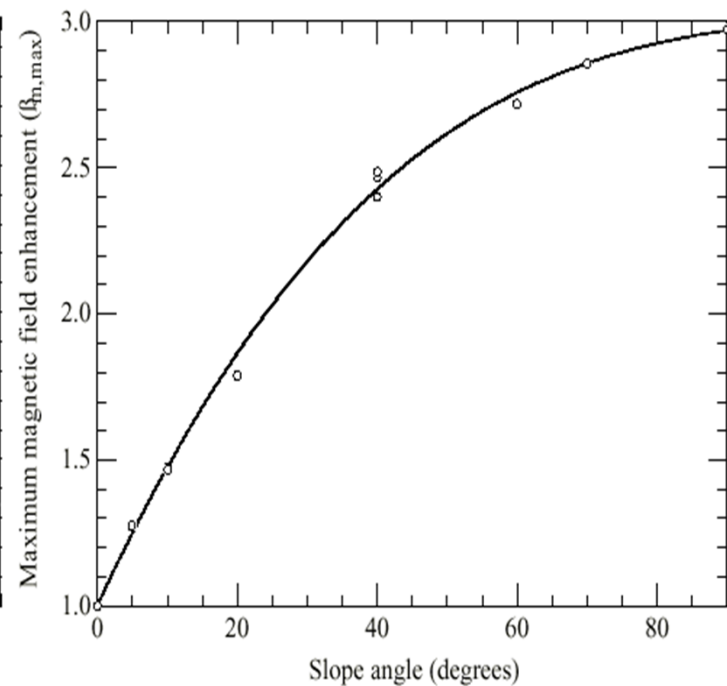
Magnetic Field Enhancement Model on The Step

実験結果から予想される
 β_m の値はシミュレーションと
矛盾しない。

Cornell



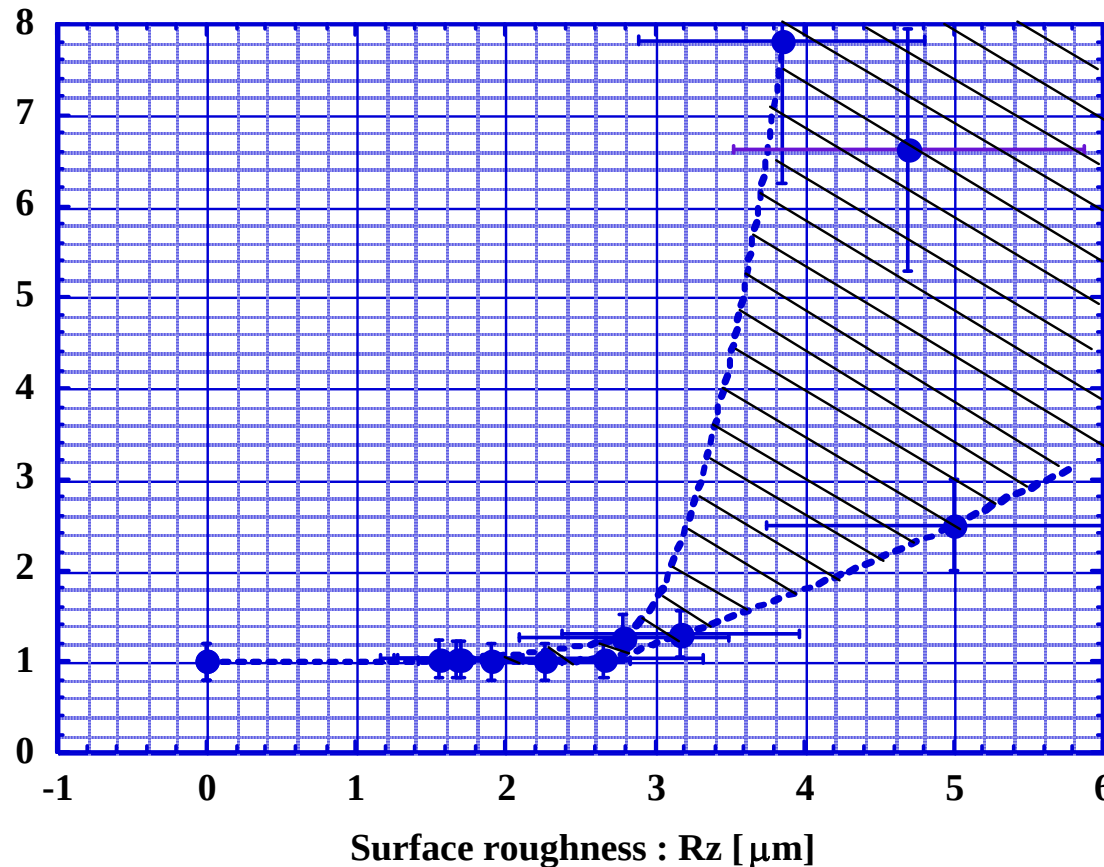
(a)



(b)

高電界性のための必要研磨粗さ

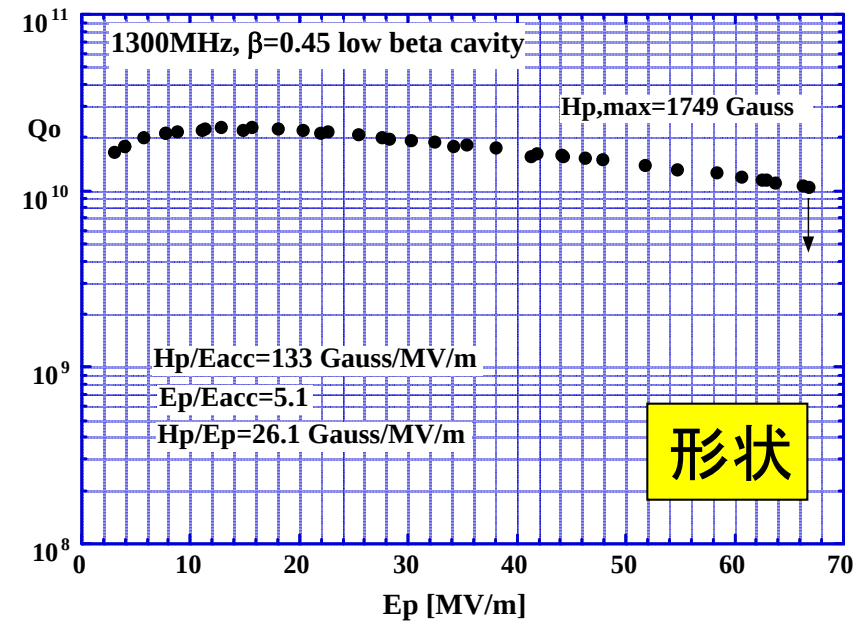
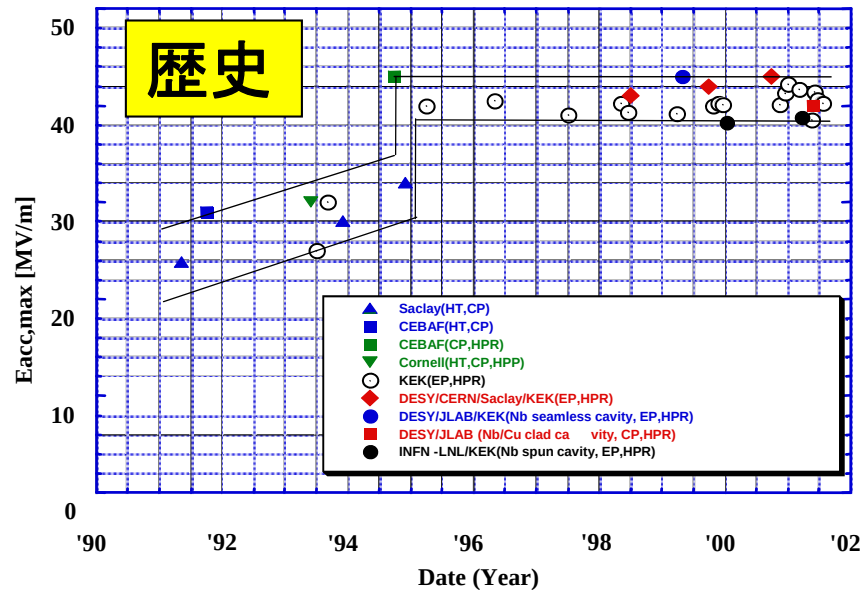
$$R_{BCS}(E_{acc}) = \frac{A}{T_B + C \cdot E_{acc}} \cdot \exp\left[-\frac{B \sqrt{1 - \left(\frac{\beta_m H_p}{\sqrt{2} \cdot H_c}\right)^2}}{T_B + C \cdot E_{acc}}\right], \quad H_c(Rz) = 2150 \text{ Gauss} = \beta_m(Rz) \cdot H_p$$



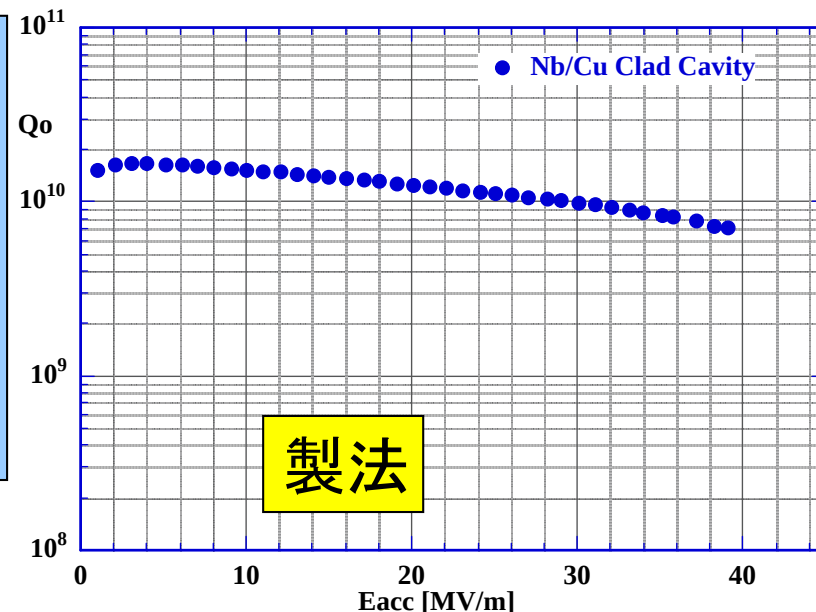
1300MHzでは
Rz < 2 μm でなければ
ならない。

CPでも材料によっては
Rz < 2 μm は達成出来る。
CPでもまれに40MV/m
が達成されている。

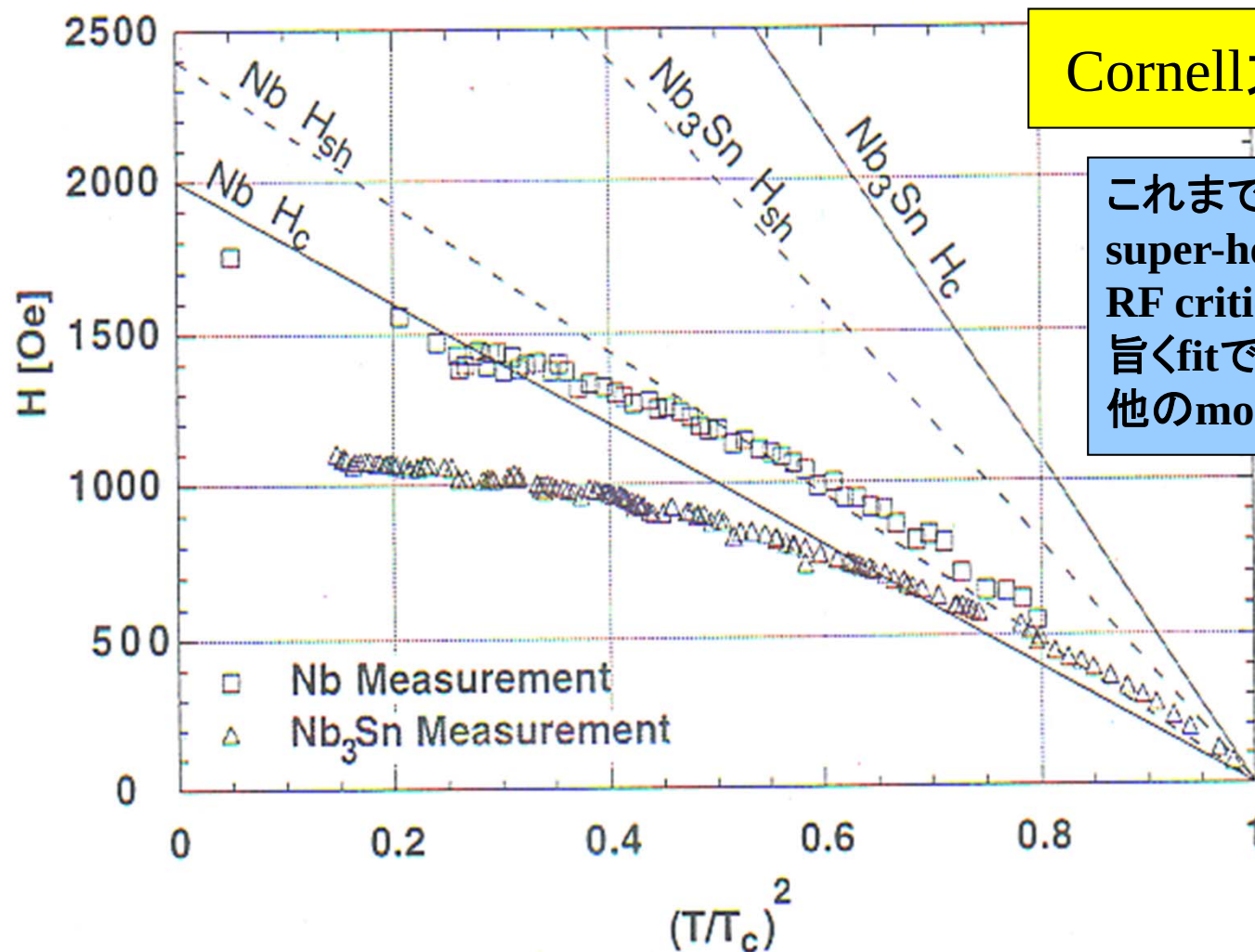
Limitation of 1750 Oe



- 1) 1750Oeのlimitationはこの10年更新されず。
- 2) $\beta=0.45$ のlow beta cavityでも変わらない。形状に依存しない。
- 3) Nb/Cu clad seamless空洞でも変わらない。製法に依存しない。
- 4) シームレス空洞でも変わらない。



Pulse 法による RF 臨界磁場の測定



Cornell大学

これまで言われていた
super-heating(H_{sh})仮説による
RF critical field でfit。
旨くfitできない。
他のmodelが必要。

What is the correct model for H_c^{RF}

Planenucleation: $\sigma_s = \frac{1}{2} \mu \xi H_c^2 - \frac{1}{2} \mu \lambda H^2 = 0$

AC Application: $H \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} H$

$$\sigma_s = \frac{1}{2} \mu \xi H_c^2 - \frac{1}{4} \mu \lambda H^2 = 0 \quad \therefore H_c^{RF} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{\xi}{\lambda}} H_c = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\kappa}} H_c$$

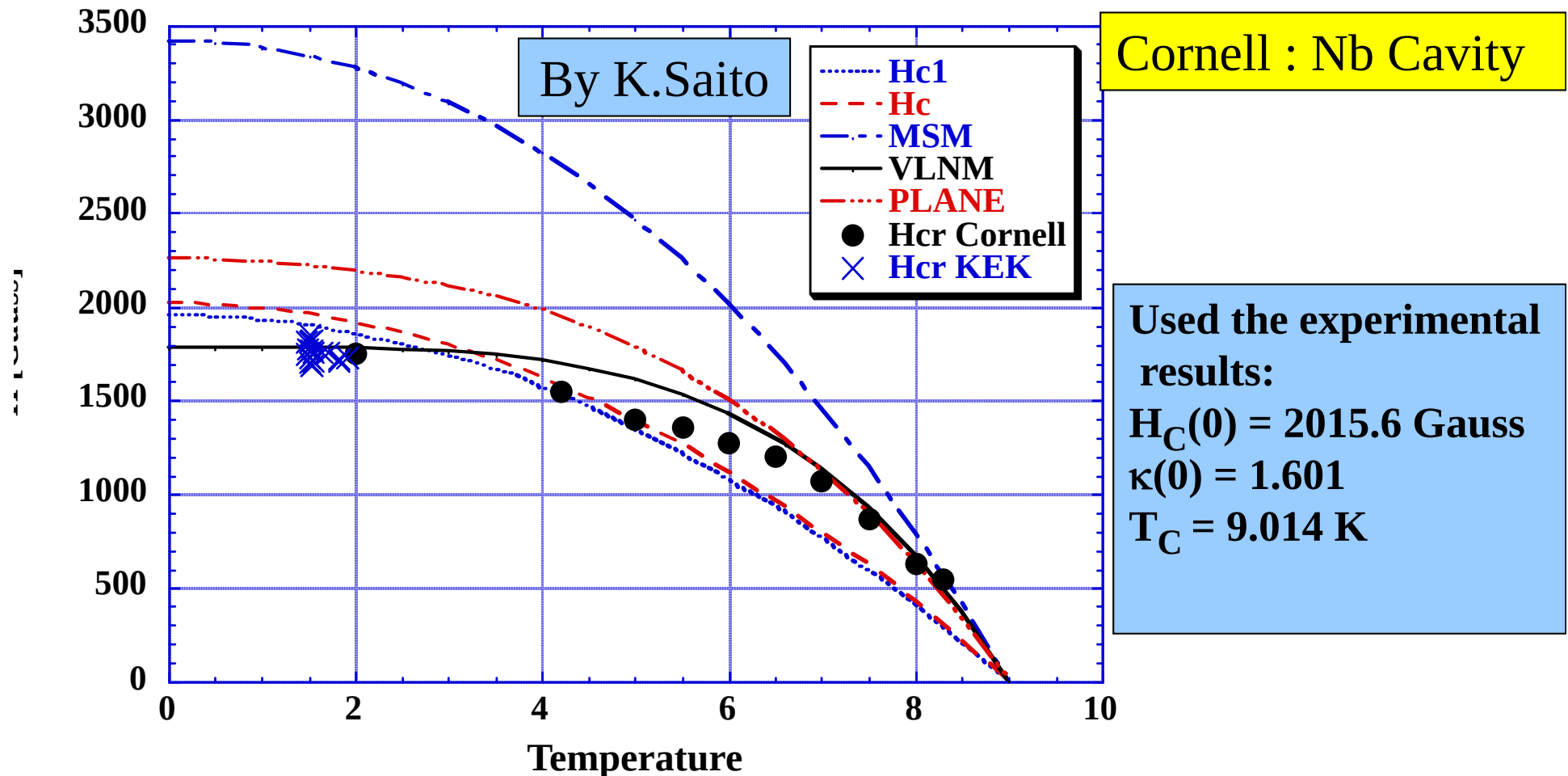
By K.Saito

$$H_c^{RF}(T) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\kappa(T)}} H_c(T) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\frac{\kappa(0)}{1 + \left(\frac{T}{T_c}\right)^2}}} \cdot H_c(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^2 \right] = \frac{\sqrt{2} H_c(0)}{\sqrt{\kappa(0)}} \sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_c}\right)^2} \cdot \left[1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^2 \right]$$

Vortex Nucleation : $\frac{1}{2} \mu 4\pi (\xi H_c)^2 - \frac{1}{2} \mu 4\pi \left(\lambda \frac{H}{\sqrt{2}} \right)^2 = 0$

$$\therefore H_c^{RF} = \frac{\sqrt{2}}{\kappa} H_c, \quad H_c^{RF}(T) = \frac{\sqrt{2}}{\kappa(T)} H_c(T) = \frac{\sqrt{2} H_c(0)}{\kappa(0)} \left[1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^4 \right]$$

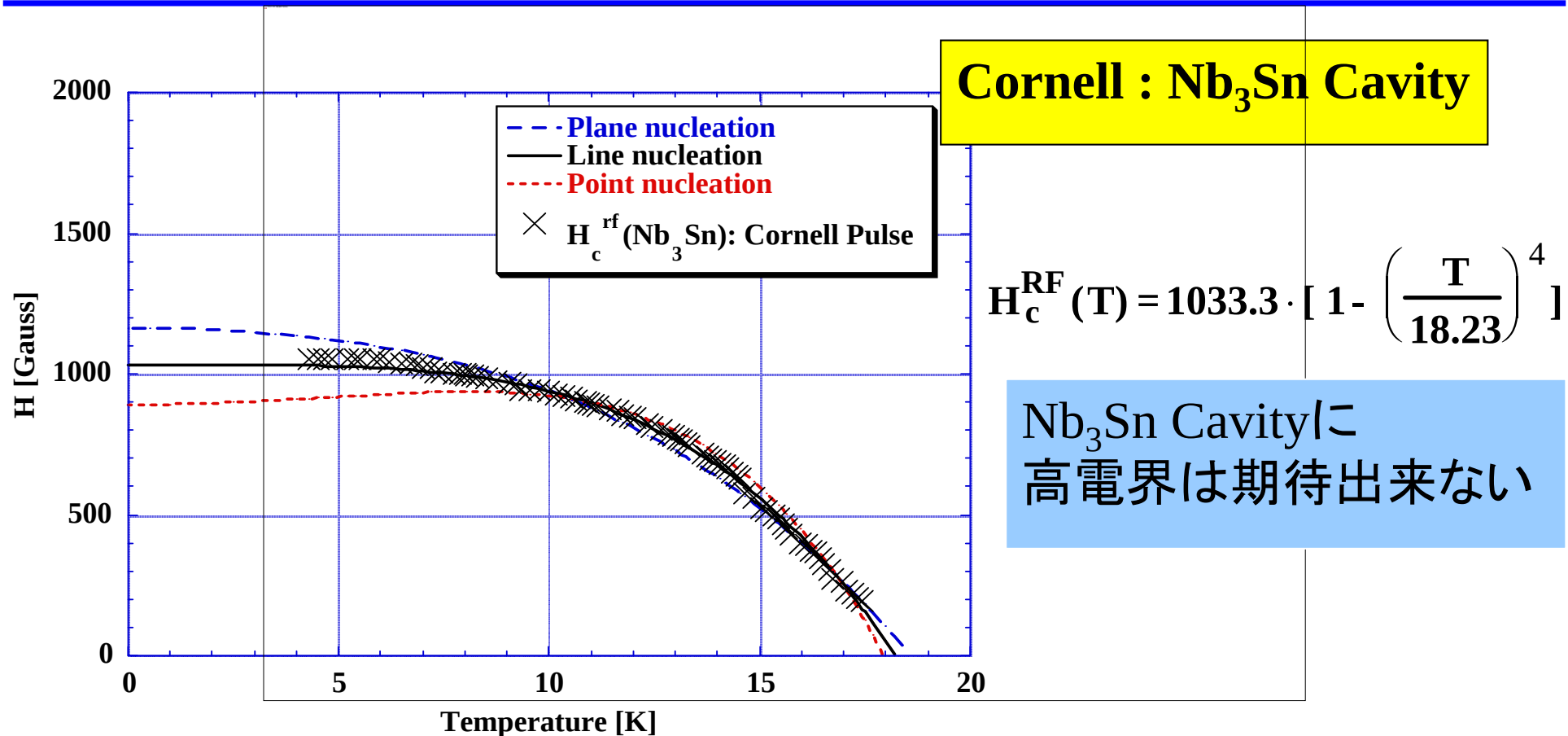
Model Comparison with Experiment



Only the vortex line nucleation can fit the experimental result.

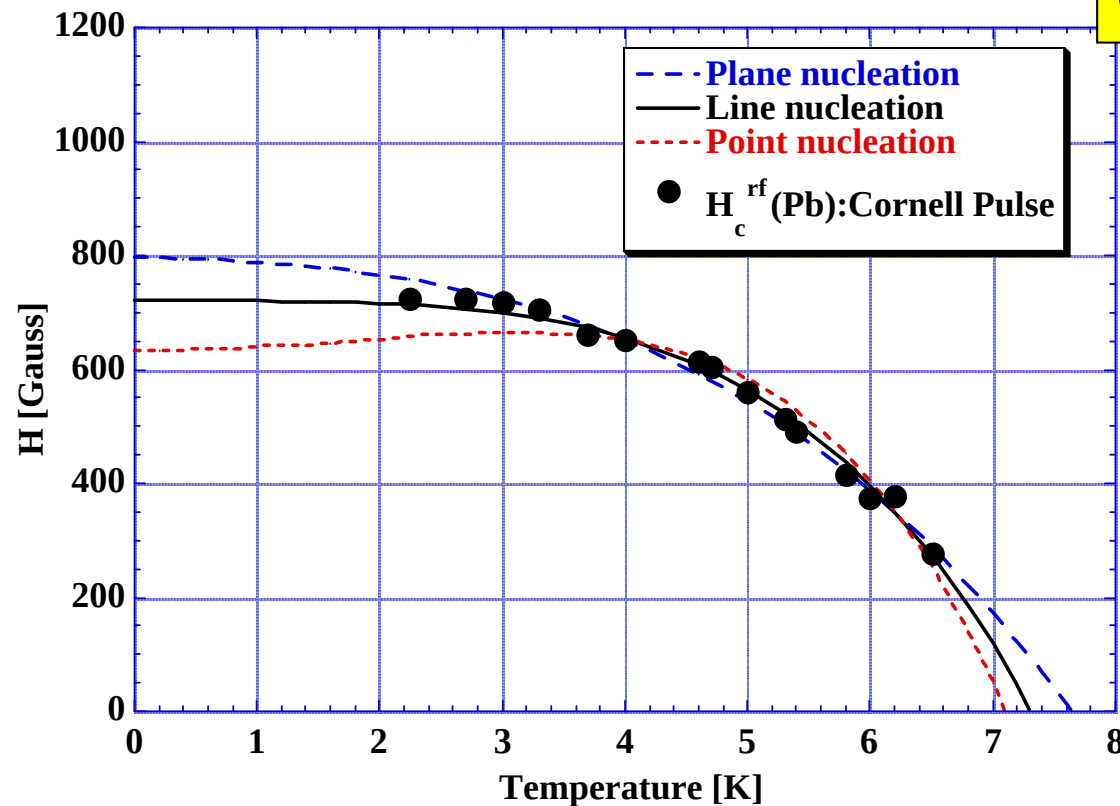
$$H_c^{\text{RF}}(T) = 1780.4 \cdot \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^4 \right] \quad \text{for Nb cavity}$$

Vortex Line Nucleation Modelは Nb₃Sn Cavityに有効か



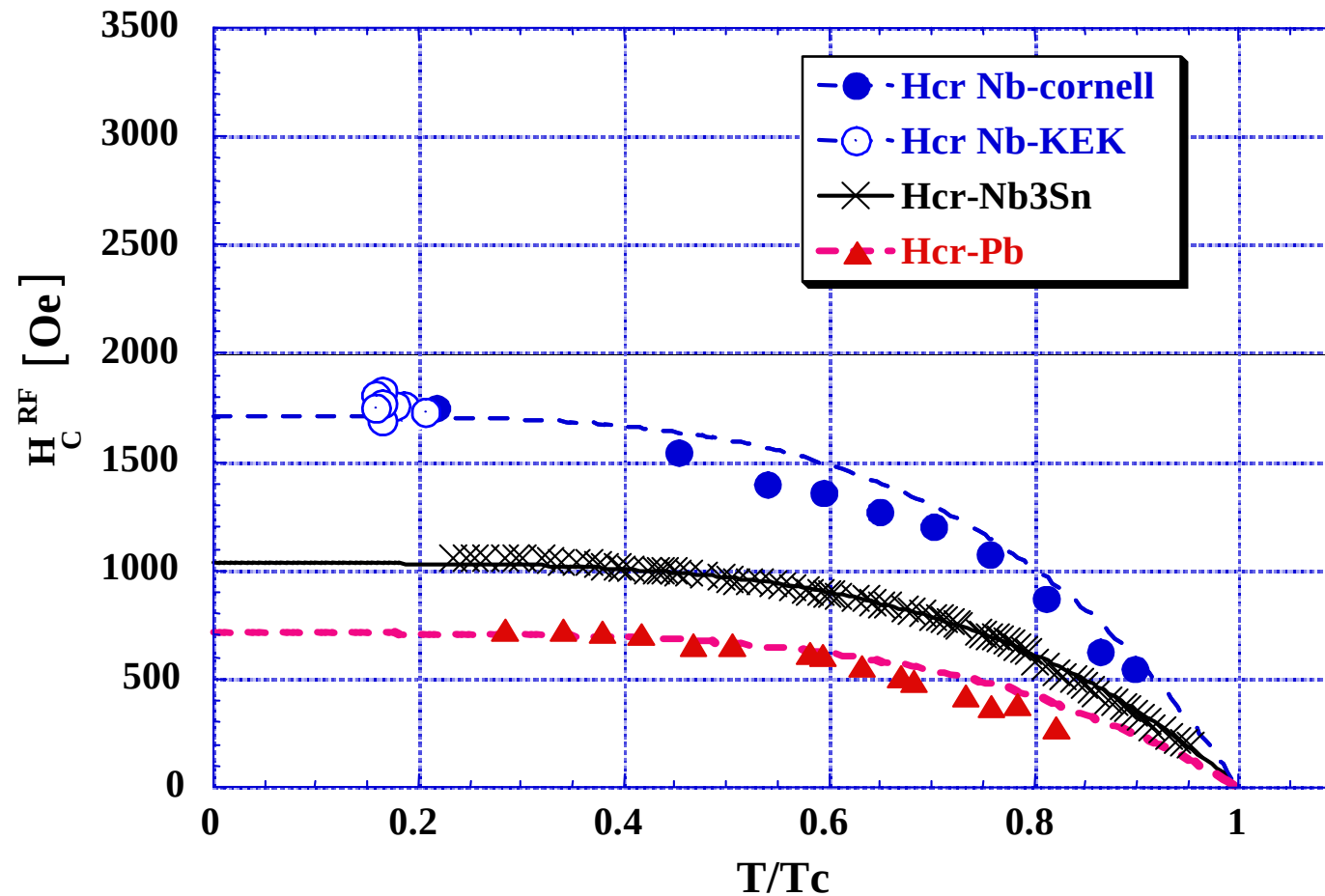
Vortex Line Nucleation Modelは Pb Cavityに有効か

Cornell :Pb Cavity



$$H_c^{\text{RF}}(T) = 720.23 \cdot \left[1 - \left(\frac{T}{7.32} \right)^4 \right]$$

第2種超伝導体に対する有効性



11. Summary

- ニオブ超伝導空洞の製作技術は、高電界については理論的限界に達している。
- Nb_3Sn のような新しい材料には高電界は期待はできない。
- では、Nb超伝導空洞で50MV/mの夢は破れたか？

NO!!