



超伝導加速空洞の開発 ～高性能化への挑戦～

高エネルギー将来委員会
第8回勉強会

2021/3/9

KEK 加速器研究施設 CASA

梅森 健成

Contents

- 超伝導空洞の特徴と紹介
- 超伝導空洞の通常処理
- 高Q値、高加速勾配への挑戦
 - 窒素ドープ
 - 磁束排斥
 - Mid-T真空炉ベーキング
 - 窒素インフュージョン
 - 2-stepベーキング
- さらなる高Q値、高加速勾配に向けて
 - Nb3Sn
 - Multilayer
- 課題・まとめ

Contents

- 超伝導空洞の特徴と紹介
- 超伝導空洞の通常処理
- 高Q値、高加速勾配への挑戦
 - 窒素ドープ
 - 磁束排斥
 - Mid-T真空炉ベーキング
 - 窒素インフュージョン
 - 2-stepベーキング
- さらなる高Q値、高加速勾配に向けて
 - Nb₃Sn
 - Multilayer
- 課題・まとめ

世界の超伝導加速器

世界中で超伝導加速器の運転・建設・計画が行われている。

電子加速器の例

- Euro-FEEL (17.5 GeV, pulse)
- LCLS-II (4~8 GeV, CW))
- SHINE (8 GeV, CW)
- ILC (125 GeV x 2, pulse)

陽子・重イオン加速器の例

- FRIB (重イオン)
- ESS (陽子)
- PIP-II (陽子)



Fig. 7 Accelerator projects with SRF cavity system around the world.

加古永治「超伝導空洞を用いた加速器の現状と展望」低温工学 Vol.54 No.4 2019

超伝導空洞の特徴

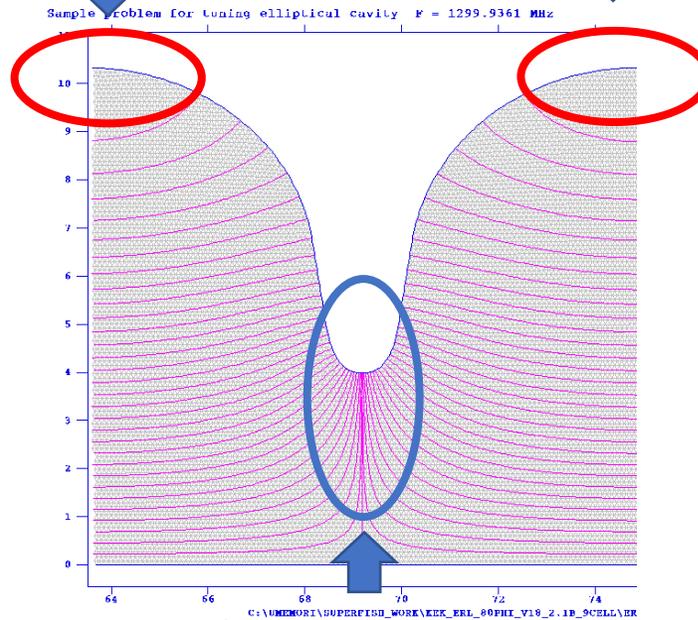
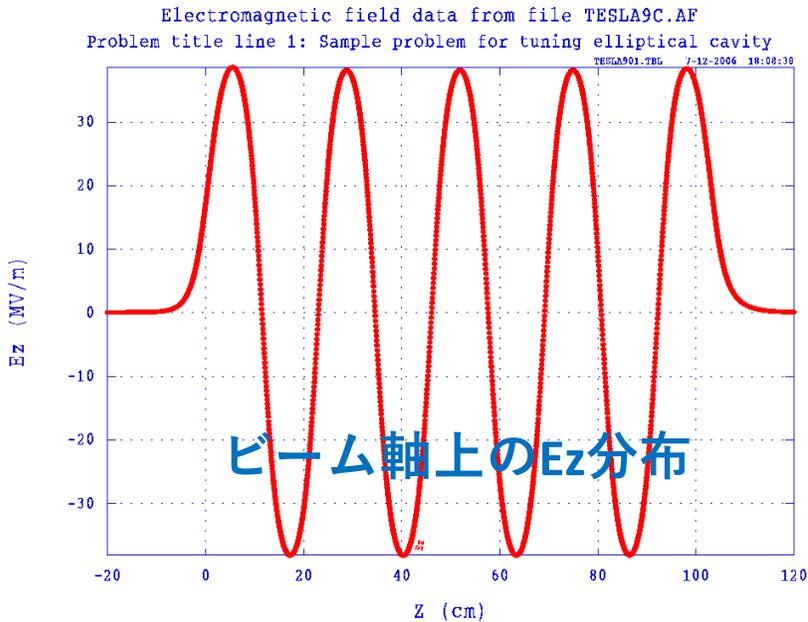
$$P = \frac{V^2}{R}$$



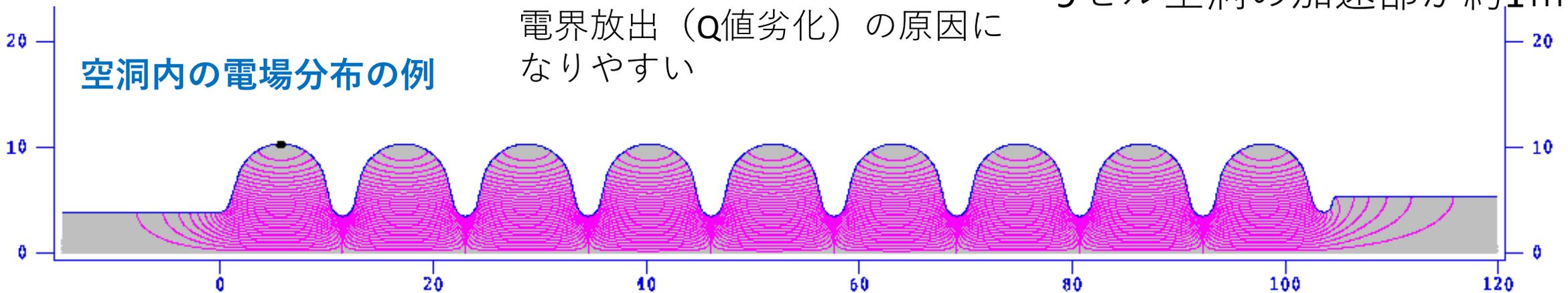
- 超伝導のおかげで、**非常に小さな空洞表面損失**で、**高い加速電圧**を実現することができる。
 - **表面抵抗：数nΩ** ← 常伝導の場合の約100万分の1
 - 例えば、1.3GHz超伝導空洞を2.0Kで運転する場合、10MV加速 (CW)時の典型的な表面ロスのは10W程度
- 小さい表面損失 ⇒ **CW/high duty**での運転 ⇒ **大電流・大強度**の運転に強み
- 超伝導状態および温度をキープするために**He冷凍機**の運転が必須
 - 2.0Kでの熱負荷に対し、冷凍機の運転に数百～千倍の電力を要する。
 - 2.0Kでの10Wの表面ロスに対し、10kW弱の電力を必要とする。

楕円空洞

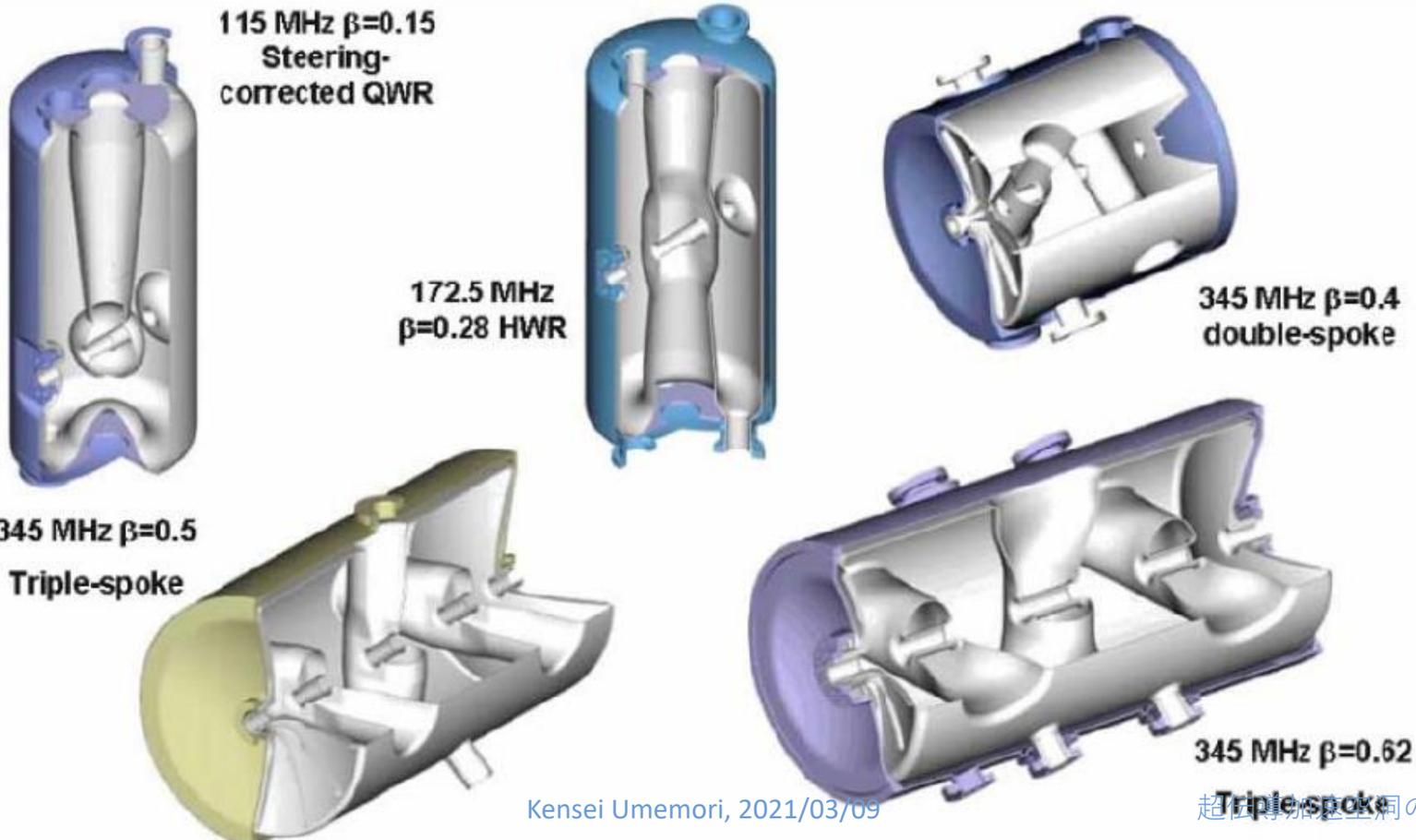
赤道部：磁場が強い
超伝導破壊の原因になりやすい



- 1.3GHz空洞の場合
- 半波長 = セル長が約11.5cm
- 9セル空洞の加速部が約1m



Low-Velocity Structures for Heavy Ions $\beta = v/c : 0.28 - 0.62$



Kensei Umemori, 2021/03/09

超伝導加速空洞の開発～高性能化への挑戦～

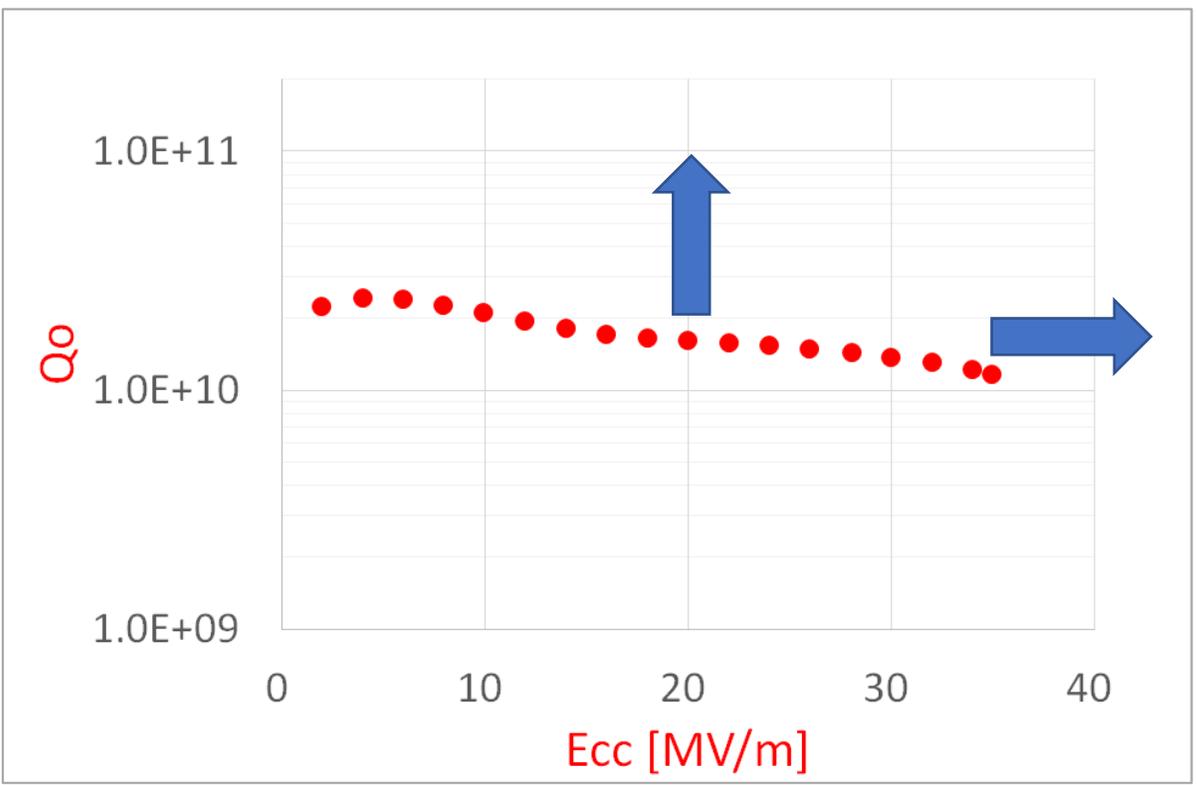
今日はlow- β 空洞の話はしません。。。速度の遅い陽子や重イオンを加速するための超伝導空洞には、様々な形状の物がある。（基本は同軸構造およびその応用形状）

形状が複雑で難しいが、楕円空洞用に開発されてきた技術を適用することで、昨今の性能向上は目覚ましいものがある。

超伝導空洞の性能を示す重要パラメ



Q値(Q₀)と加速勾配 (E_{acc})



Q₀ = 2πf x U / P
U: 空洞の蓄積エネルギー [J]
P: 空洞表面での損失 [W]
f: 共振周波数

Q₀ ∝ 1/R_s
R_s: 表面抵抗 [Ω]

E_{acc}: 加速勾配 [MV/m]

我々は 高加速勾配と高Q値の実現 を目指して、日々超伝導空洞開発の研究を進めている。

研究の目的



• 超伝導空洞の高性能化

- 高Q値化：高効率（低負荷）での運転を実現
- 高加速勾配化：より短い距離(少ない空洞台数)で多くの加速を実現

パルス加速器（Euro-XFEL, ILC等）

- ILC-TDRでは、
 - 31.5MV/m, $Q_0 > 1 \times 10^{10}$ (operation)、35.0MV/m, $Q_0 > 0.8 \times 10^{10}$ (qualification)
- High-Q/high-G R&Dでは、35/38.5 MV/mまで押し上げるのが目標

ニオブの加熱臨界磁場～220mT
1.3GHz空洞の場合、約50MV/mに相当
通常処理の場合、42MV/mあたりに壁がある

CW加速器（LCLS-II, SHINE等）

- 20MV/m前後の加速勾配で、 3×10^{10} 程度のQ値を目指す

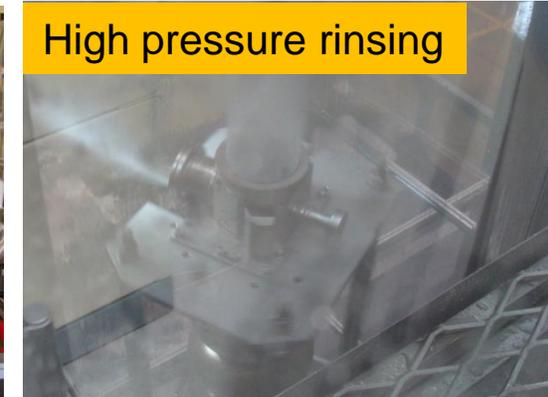
これらのR&Dを通して、Nb表面の理解を深め自由自在にコントロールできるようにする事も重要。究極は、高加速勾配かつ高Q値の実現。

Contents

- 超伝導空洞の特徴と紹介
- 超伝導空洞の通常処理
- 高Q値、高加速勾配への挑戦
 - 窒素ドーピング
 - 磁束排斥
 - Mid-T真空炉ベーキング
 - 窒素インフュージョン
 - 2-stepベーキング
- さらなる高Q値、高加速勾配に向けて
 - Nb₃Sn
 - Multilayer
- 課題・まとめ

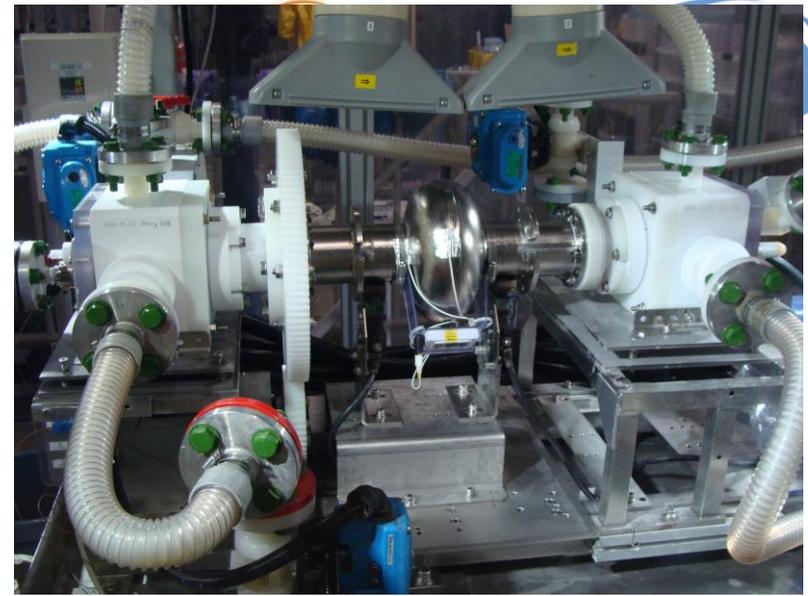
標準表面処理工程

- (多量)電解研磨 ~100um
- 熱処理 800deg x 3h
- 周波数調整
- 仕上げ電解研磨 ~20um
- 超音波洗浄
- HPR(超純水高圧洗浄)
- 空洞アセンブリ
- ベーキング 120 deg x 48h
- 縦測定
- 内面検査

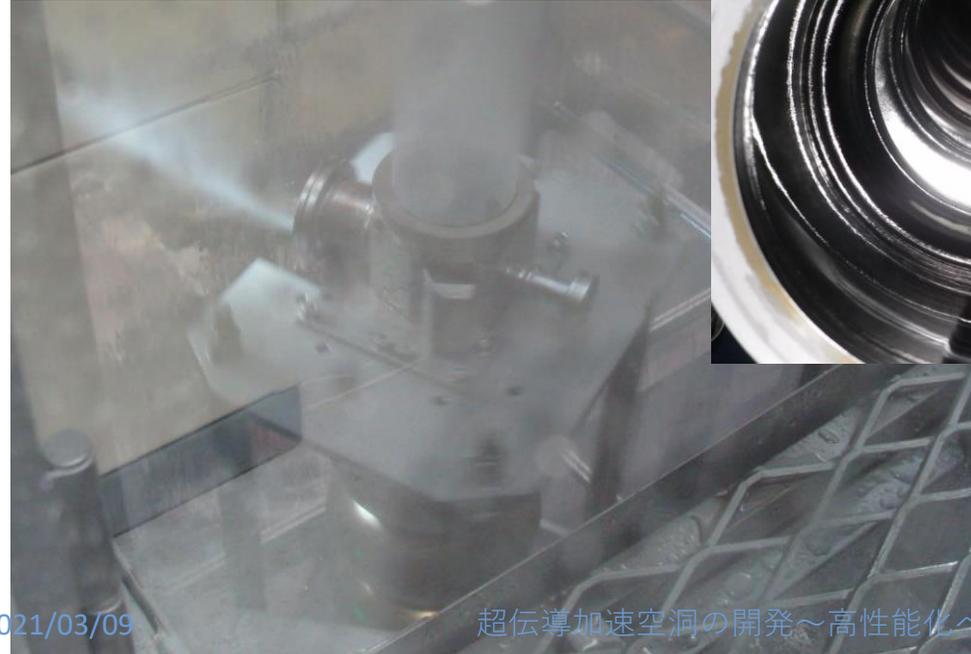


空洞表面処理のポイント

- 電解研磨でとにかくスムーズな綺麗な表面を
- HPR（高圧洗浄）で、空洞表面のダストを洗い流す
- 空洞アセンブリにおいて、ダストを空洞内に入れない



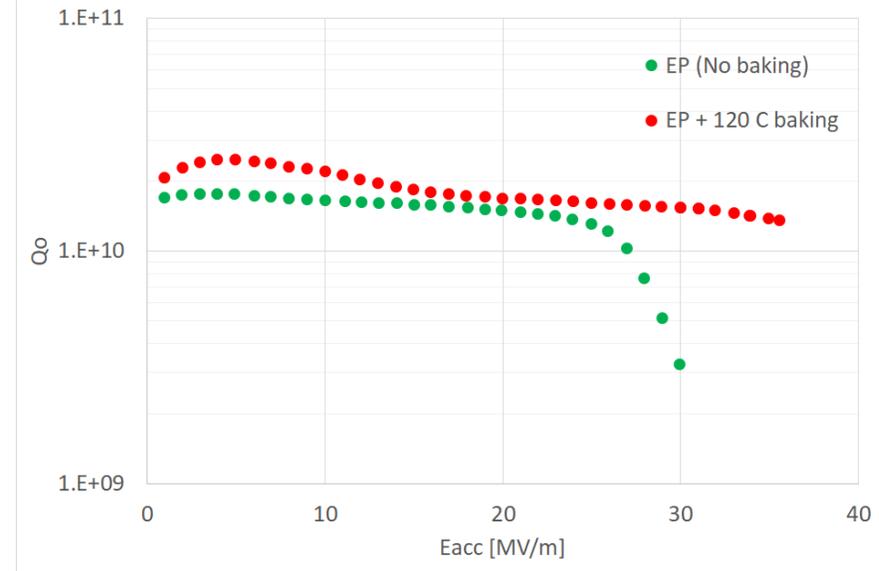
Kensei Umemori, 2021/03/09



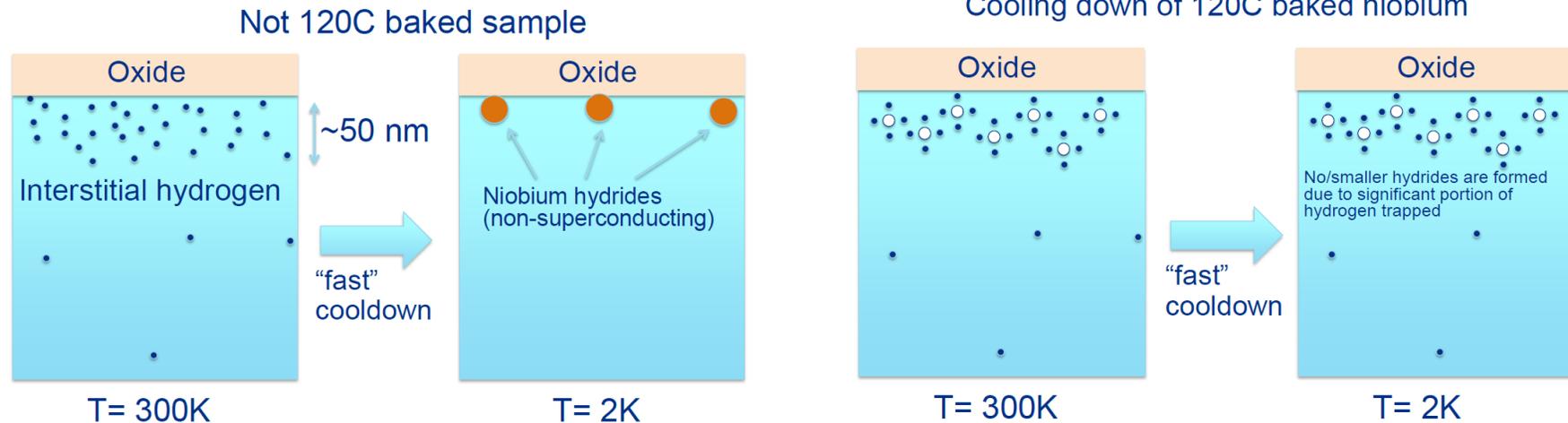
120度ベーキングの効果

- 脱ガス (メインは水)
- 高電界(>25MV/m)のQ値向上

ベーキングをしないと25MV/mを超えたあたりからQ値の劣化が起こる



One hypothesis of effect of 120 C baking



基本、ニオブ
にとって水素
は敵！

ベーキングで拡散した酸素が、表面付近での水素化ニオブの生成をブロック??

A. Romanenko, F. Barkov, L. D. Cooley, A. Grassellino, Supercond. Sci. Technol. **26** (2013) 035003

※ 表面およびごく表面に近い層が、空洞性能に重要な役割を担っている

Contents

- 超伝導空洞の特徴と紹介
- 超伝導空洞の通常処理
- 高Q値、高加速勾配への挑戦
 - 窒素ドーピング
 - 磁束排斥
 - Mid-T真空炉ベーキング
 - 窒素インフュージョン
 - 2-stepベーキング
- さらなる高Q値、高加速勾配に向けて
 - Nb₃Sn
 - Multilayer
- 課題・まとめ

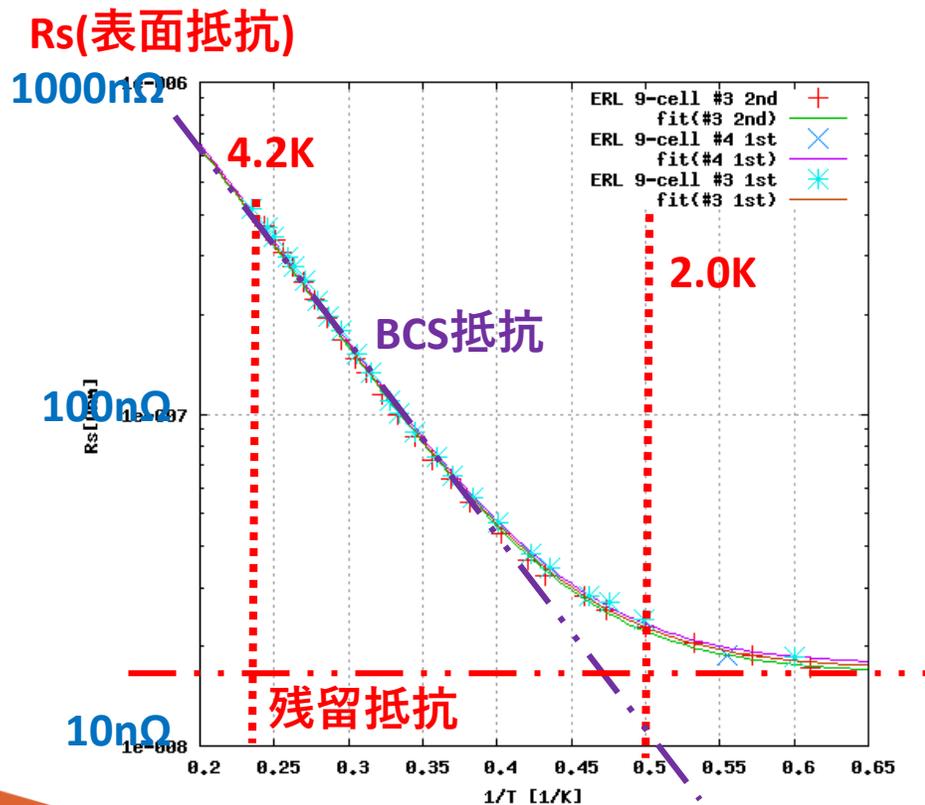
$$R_s = R_{BCS}(T, E_{acc}) + R_{res}(T, B_{trap}, E_{acc})$$

$$= R_{BCS}(T, E_{acc}) + R_{flux_trap}(B_{trap}, E_{acc}) + R_0$$

$$R_{BCS}(T, E_{acc}) = A(E_{acc}) \frac{\omega^2}{T} \exp \left\{ -\frac{\Delta(E_{acc})}{kT_c} \cdot \frac{T_c}{T} \right\}$$



高Q値
= 低い表面抵抗



R_{BCS} (BCS抵抗):

□ 温度に指数関数的に依存

R_{res} (残留抵抗):

□ 温度へは非常に弱い依存性

□ 空洞表面の磁場トラップによる寄与 (R_{flux_trap}) と空洞表面に固有の寄与 (R_0)

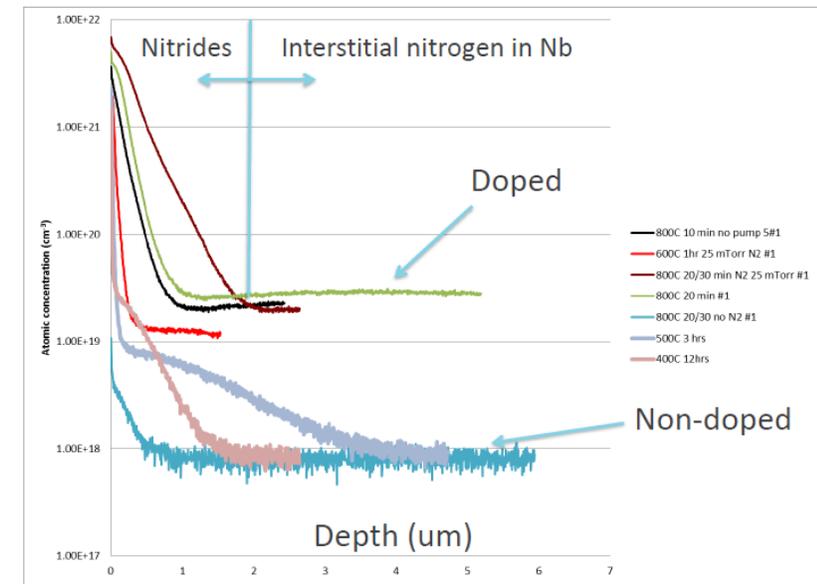
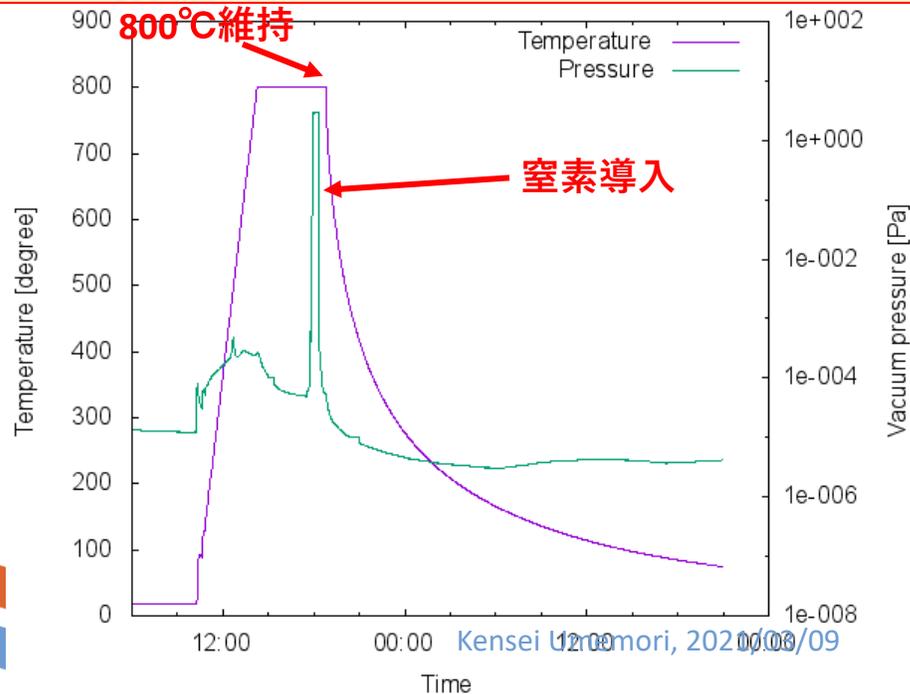
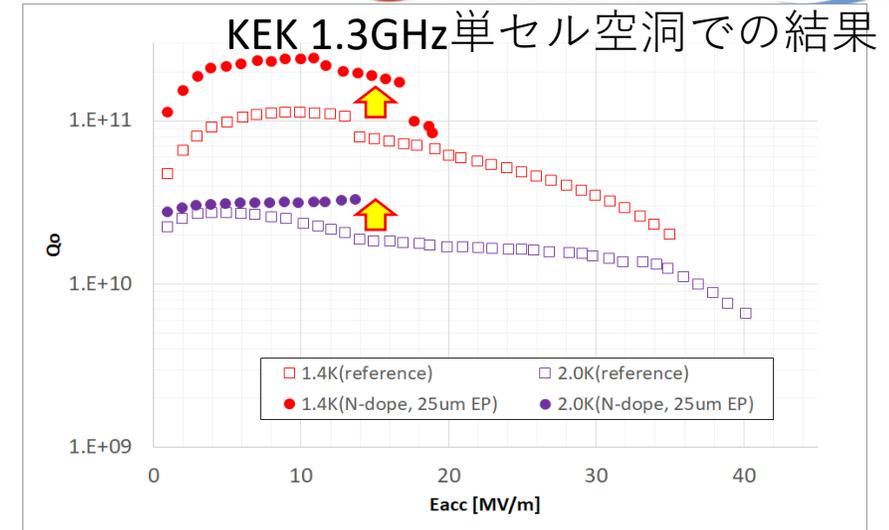
□ 一般的に R_0 は小さく、 R_{flux_trap} が支配的である。

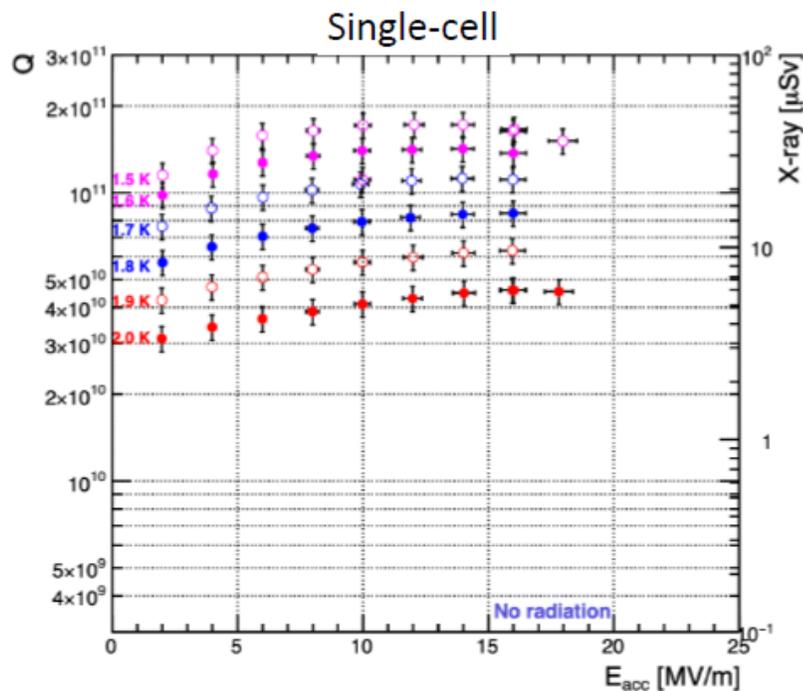
① 窒素ドーピング -- 高Q値の技術

熱処理の際に、**高温(800度)にて短時間(数分~数十分)の間、真空炉に窒素を導入する。**

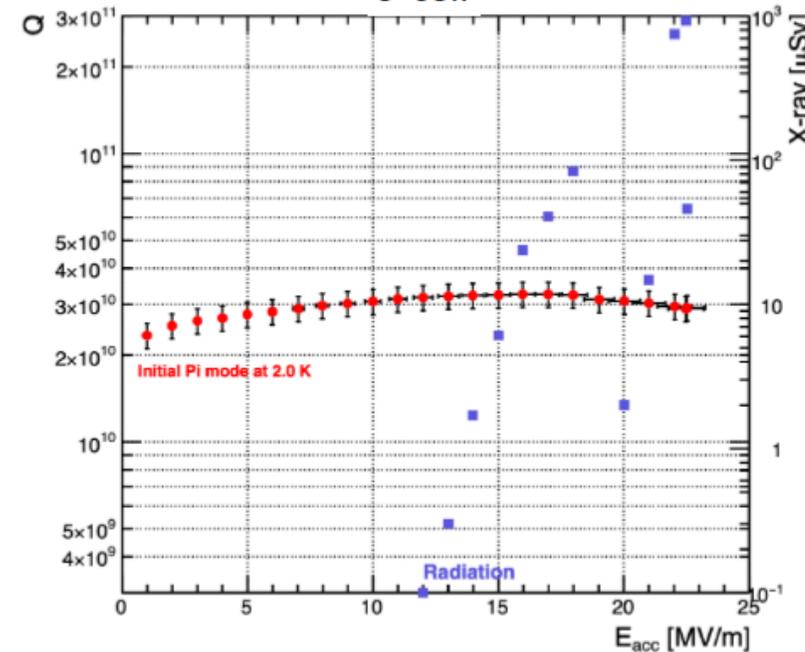


数10umの深さまで窒素が入り込む
表面層は電解研磨で落とす
高Q値が得られる(BCS抵抗が下がる)
加速勾配は下がる





- Q value of $4.6E+10$ at 16 MV/m.
- Quench at 18 MV/m (heating at Not the equator)



- Q value of $3.3E+10$ at 16 MV/m.
- Quench at 22 MV/m (heating at cell-6 equator)

- 窒素ドーピングでのHigh-Qは非常に再現性が良い。
- KEKでもHigh-Qは再現できている。
- 加速勾配が低いのが課題だが、アメリカでは30~35MV/mを達成する窒素ドーピング空洞も出てきた。
- 35MV/m以上の高加速勾配かつ高Q値を達成する窒素ドーピングの実現に向け、R&Dを推進している。

② 磁束排斥 – 高Q値の技術

ニオブ製超伝導空洞は冷却時に磁束をトラップする

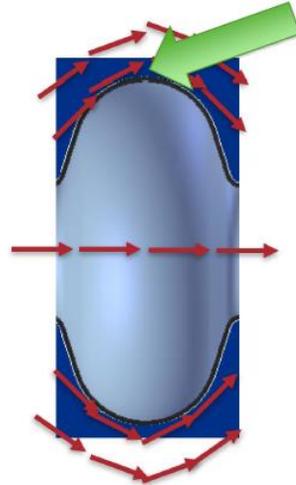
⇒ トラップされた磁束は空洞表面の抵抗となりQ値を下げる

【対策】

- ・そもそも空洞周辺の磁場を十分小さくすること
- ・磁束をトラップしずらいような冷却方法を取る(磁束排斥)

➡ 高Q値を実現

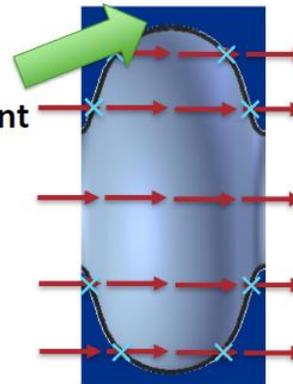
Magnetic Flux
Expulsion



Magnetic field
enhancement

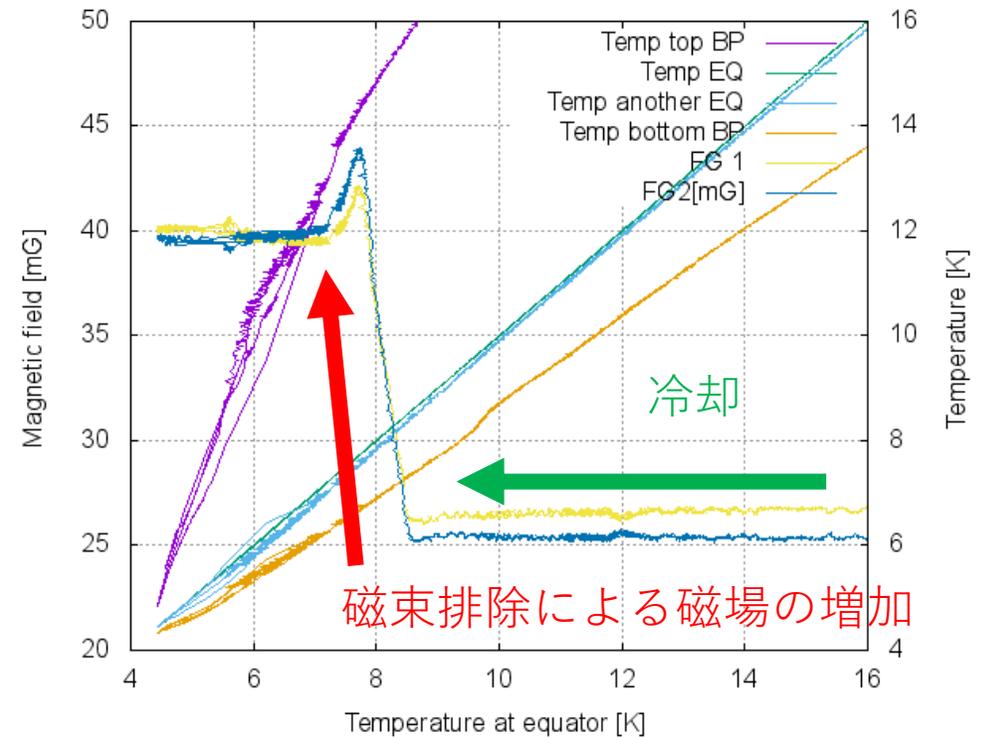
Magnetic Flux
Trapping

No field
enhancement



9 12/13/2017 Sam Posen

Fermilab



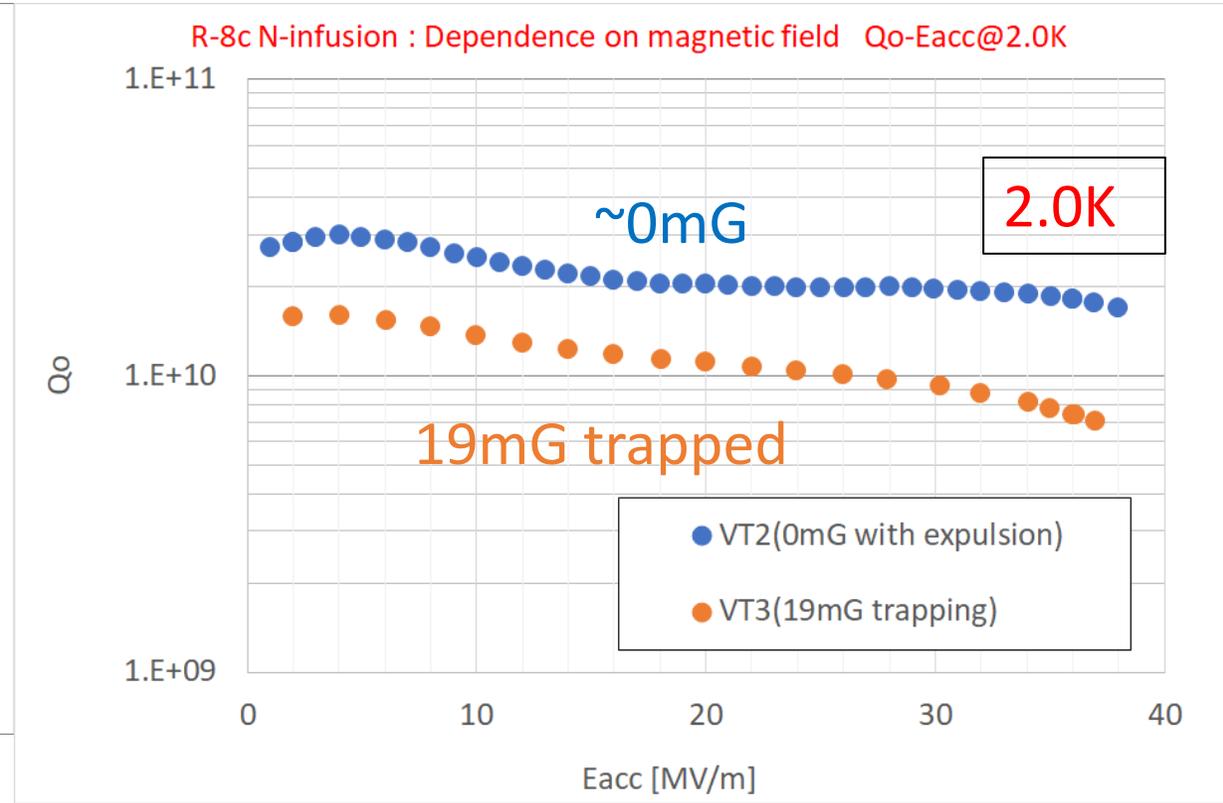
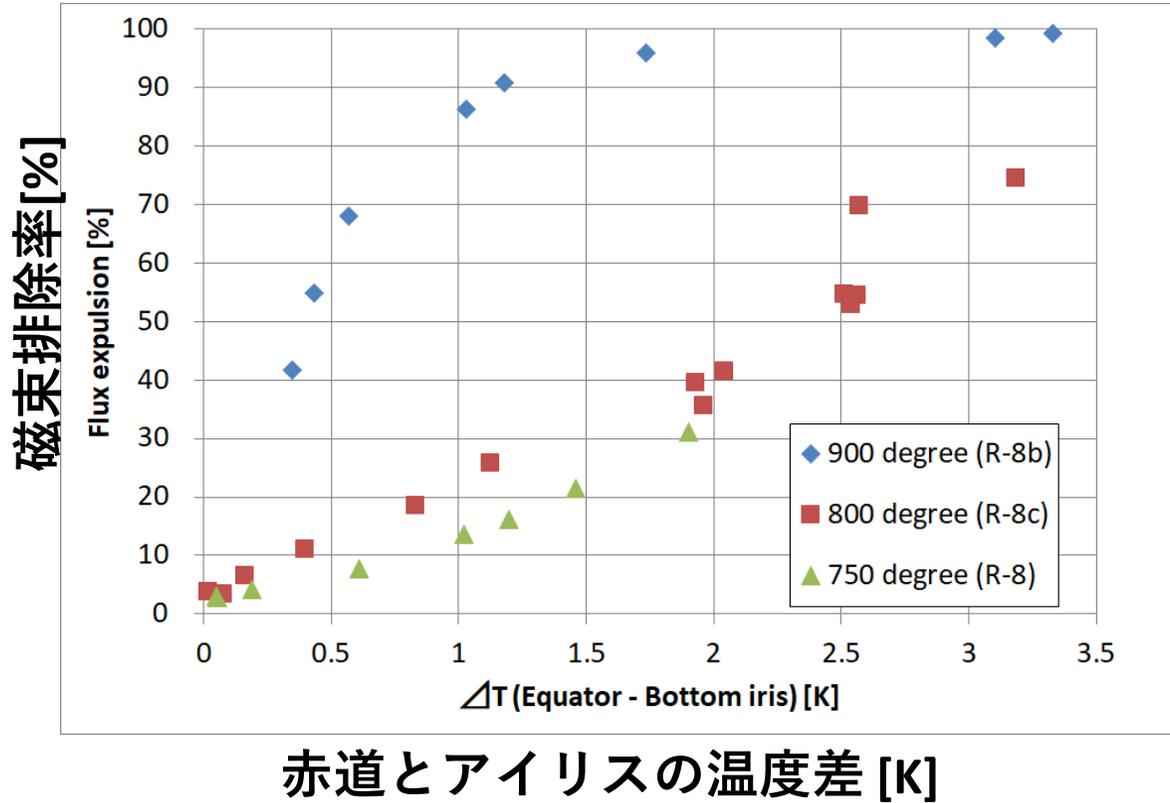
Sam Posen, TTC topical meeting at FNAL (2017)

Kensel C. G. et al., 2021/03/09

超伝導加速空洞の開発～高性能化への挑戦～

磁束排除とQ値への関係

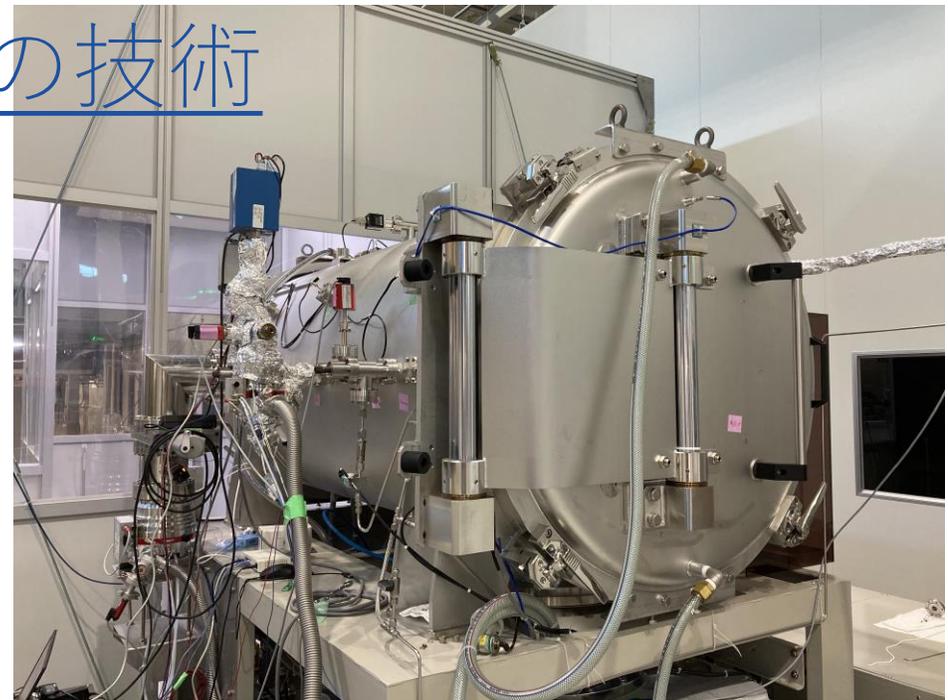
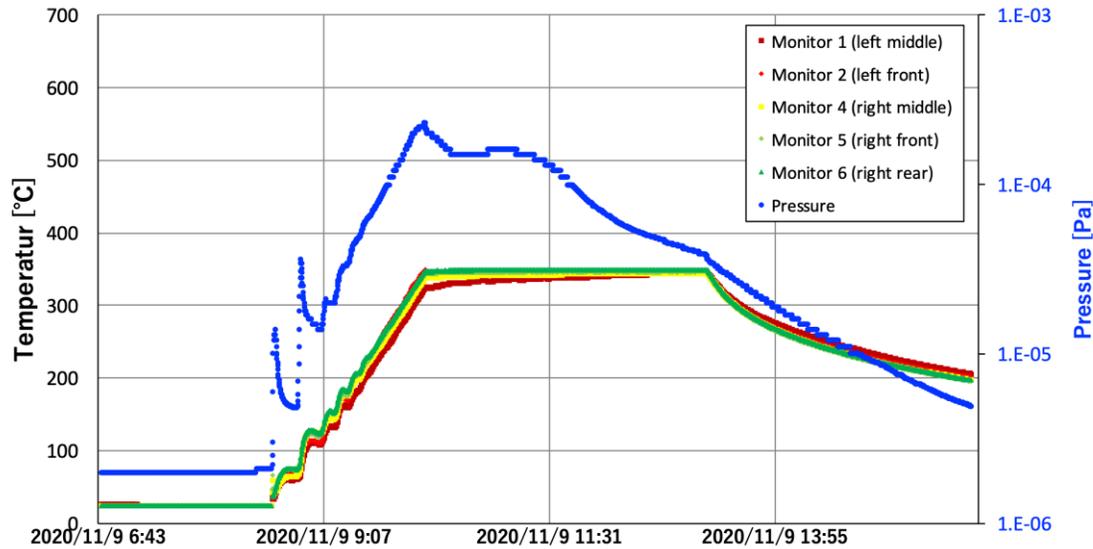
磁束排除はかなりコントロールできるようになってきた。
LCLS-IIにて採用されている技術。



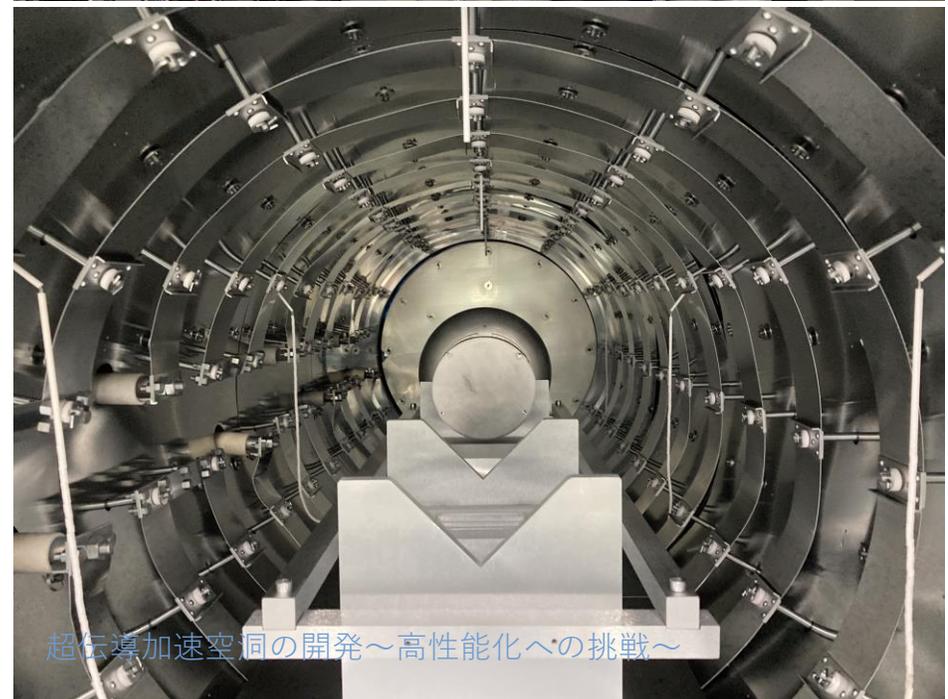
- 熱処理温度を上げる事は、磁束排除に非常に効果的
- 冷却時の温度勾配は磁束排除に効果的

- 磁束を取り込むと、磁束が高周波で揺すられ抵抗成分となる ⇒ Q値の劣化（残留抵抗の増加）につながる

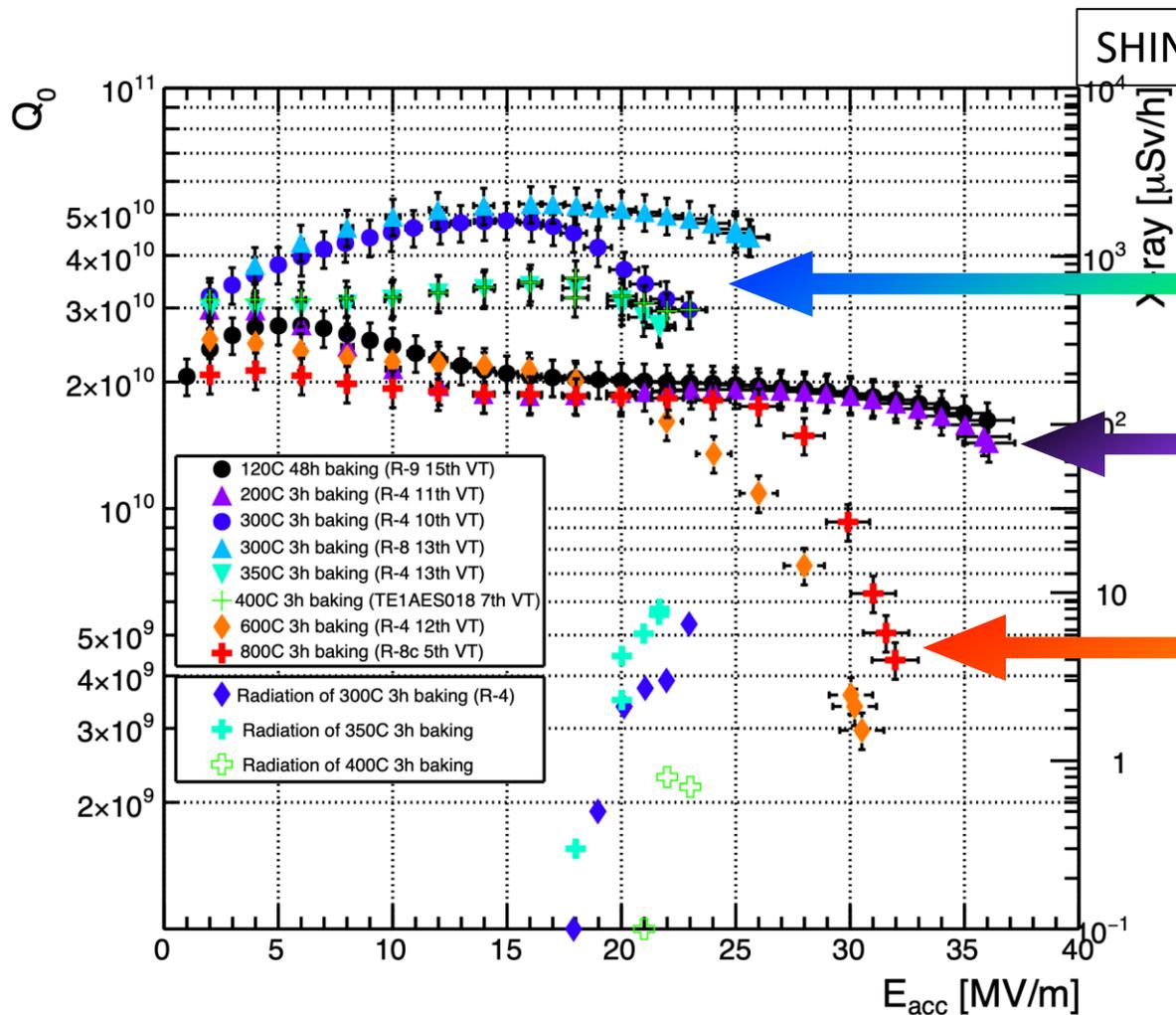
③ Mid-T furnace baking -- 高Q値の技術



- この1~2年で開発された非常に**新しいニオブ空洞の表面処理方法**
- 加熱真空炉で3時間程度の熱処理を施すだけ、という**簡単な手法**。
- **熱処理温度に応じて、非常に敏感に空洞性能が変わる。**
- ニオブ表面の酸化膜の状態が、空洞性能の鍵を握っていると考えている。



Mid-T furnace bakingの熱処理温度による空洞性能の比較



300 ~ 400°C, 3h

- 非常に高いQ値と anti-Q slope が得られる。
- 300°C 熱処理では、2K, 15MV/m で $5e10$ を超えるQ値が得られた。

Standard recipe (120°C, 48h), 200°C, 3h

- 200°C 熱処理の空洞は、標準処理(120°C, 48時間ベーキングの結果に近い。
- 加速勾配が一番高い。

600 ~ 800°C, 3h

- 高いQ値は得られない。
- 25MV/m を超える加速勾配でQ値が劣化 (High Field Q-slope として知られた現象)

Cavity temperature during measurement

- 120 ~ 600°C baking ... at 2.0 K (2.00~2.01 K)
- 800°C baking ... at 2.1 K (2.07K)

- 熱処理温度・時間により空洞性能が大きく変わることがわかった。
- 20MV/m程度での高Q値は、再現性良く得られる。
- 今後は、高加速勾配かつ高Q値を目指して、熱処理条件の最適化を行っている。

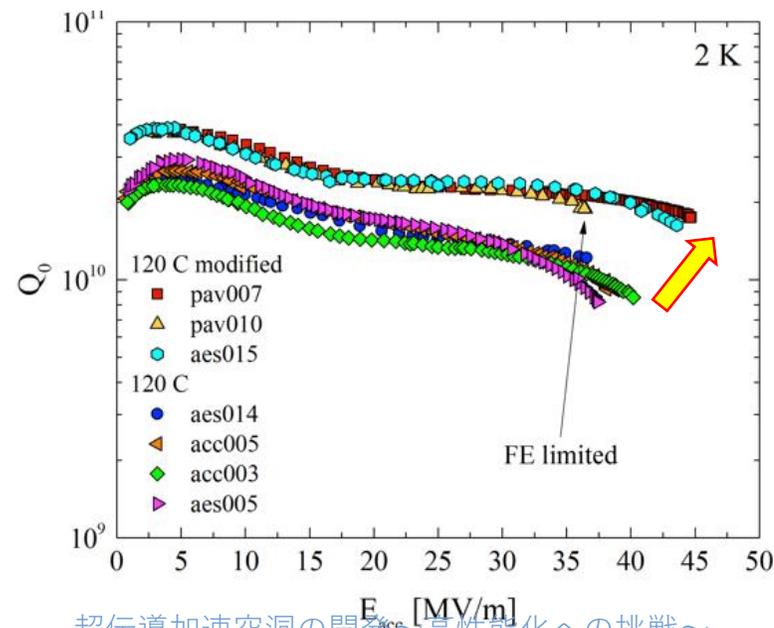
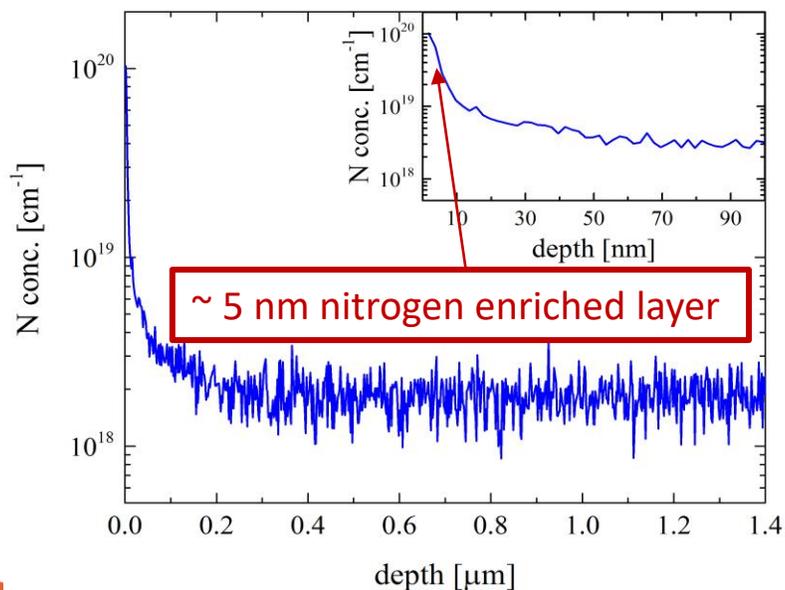
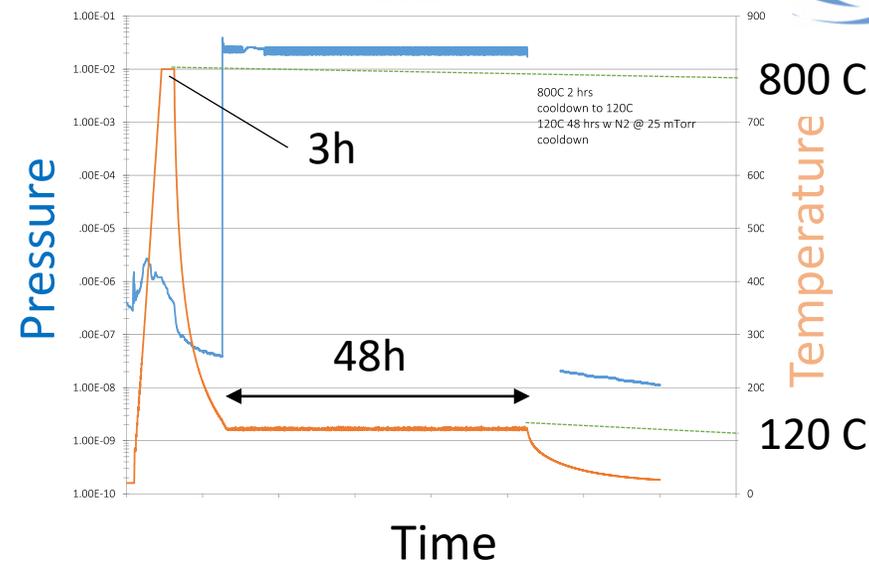
④ 窒素インフュージョン-高Q値 & 高加速勾配の技術



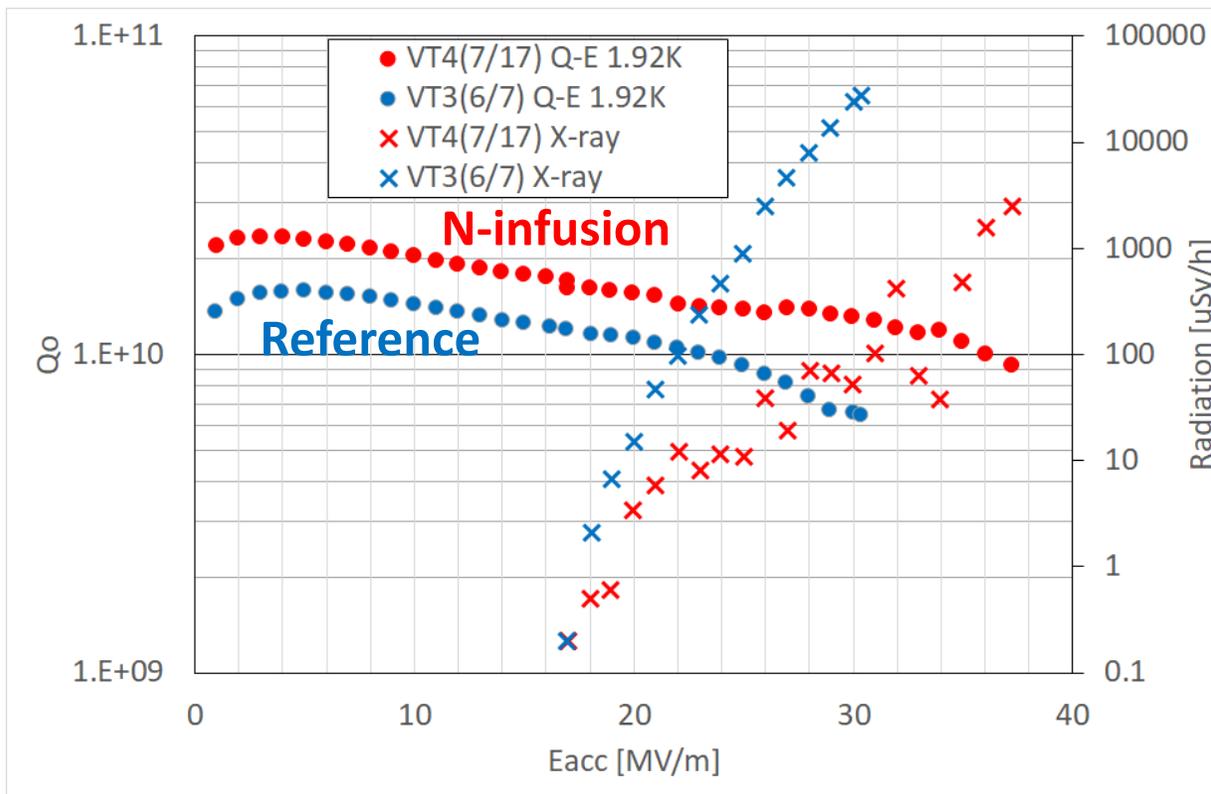
熱処理の際に、**低温(120度)にて長時間 (数十時間) の間、真空炉に窒素を導入する。**



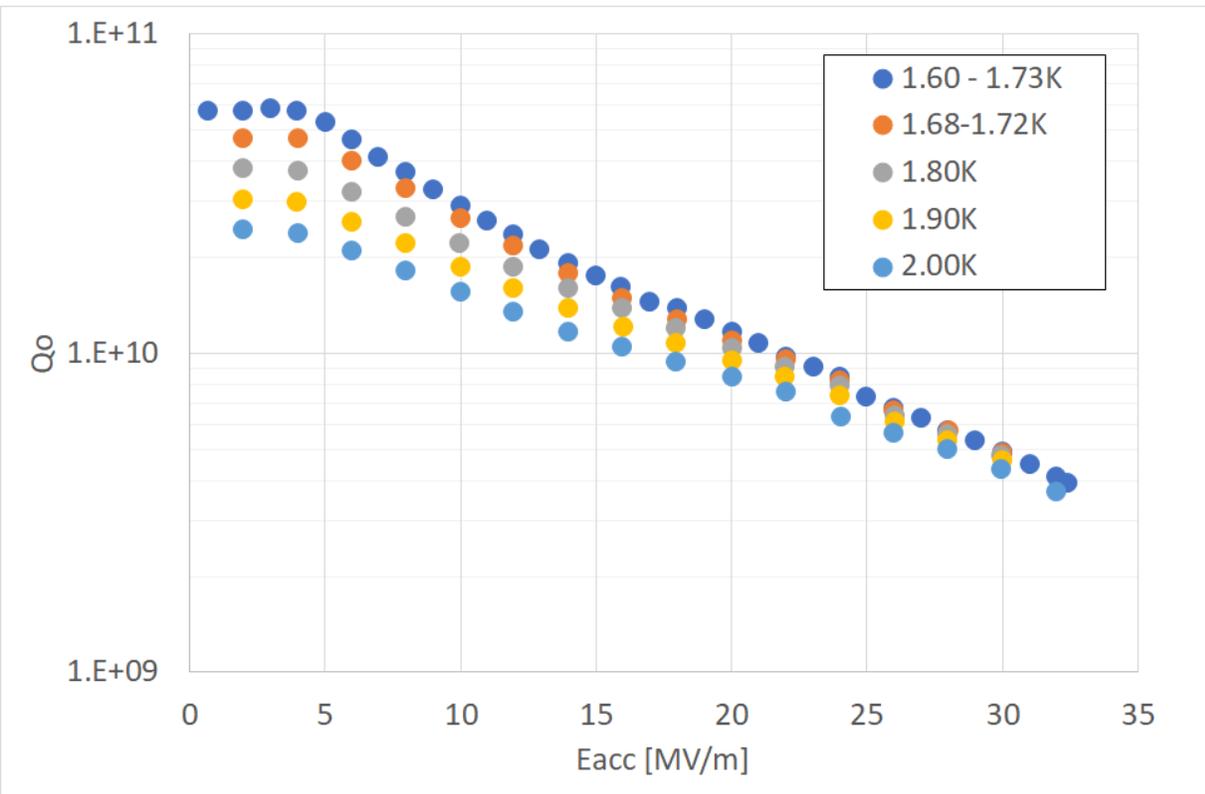
数~10nmの深さまで窒素が入り込む
高Q値が得られる
加速勾配も上がる



うまく行った例



かえって性能劣化してしまった例



- 真空炉のコンタミが原因と思われる性能劣化が改善できなかった。
- 半数近くで性能劣化がみられた。
- ILCの高電界処理の候補だったが、断念した。

⑤ 2-step baking -- 高加速勾配の技術

低温電解研磨

75度,4h + 120度,48hベーキング
急速冷却 (縦測定時)

これらの技術を組み合わせることで高電界かつ高Q値を実現できるとのFNALからの実験データが示されている。

Cavity TE1AES022 post cold EP + 75/120C bake was tested at other labs (while always maintaining vacuum – no disassembly!)

FNAL – Batavia, IL

- Lower branch: ~43 MV/m
- Upper branch +50 MV/m (+210mT)!

JLab – Newport News, Virginia

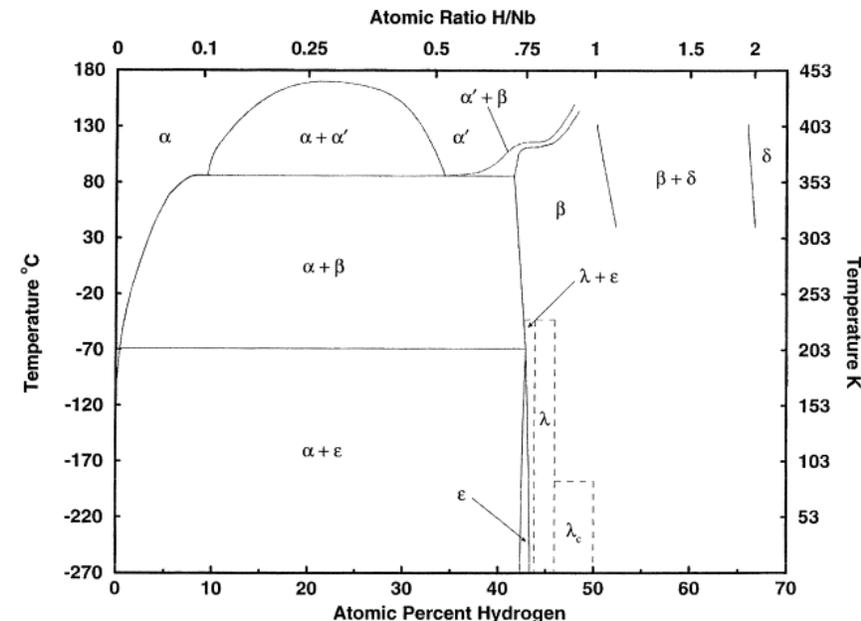
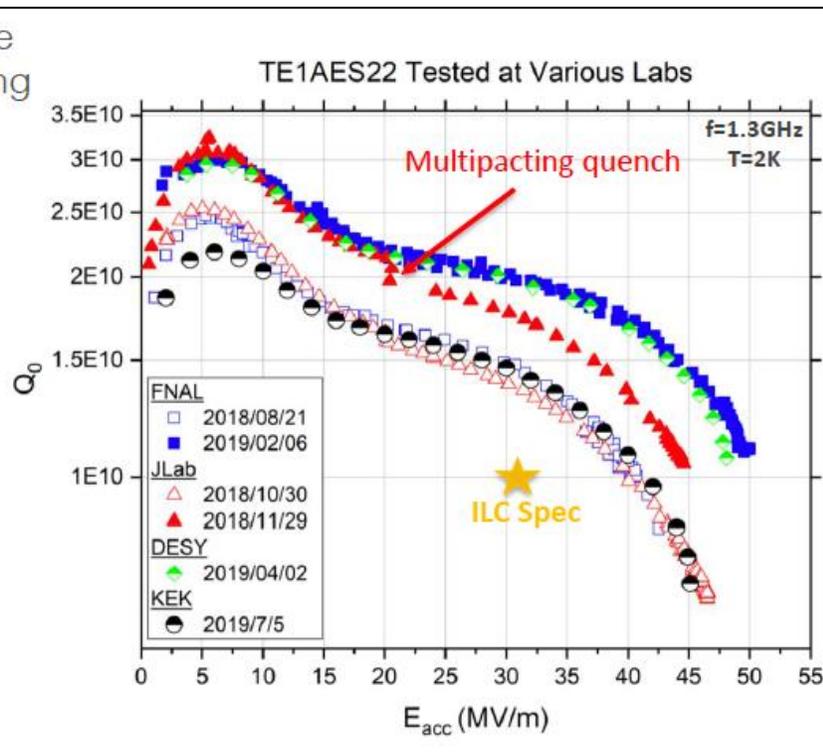
- Lower and Upper branch obtained

DESY – Hamburg, Germany

- Upper branch: +48MV/m confirmed

KEK – Tsukuba, Japan

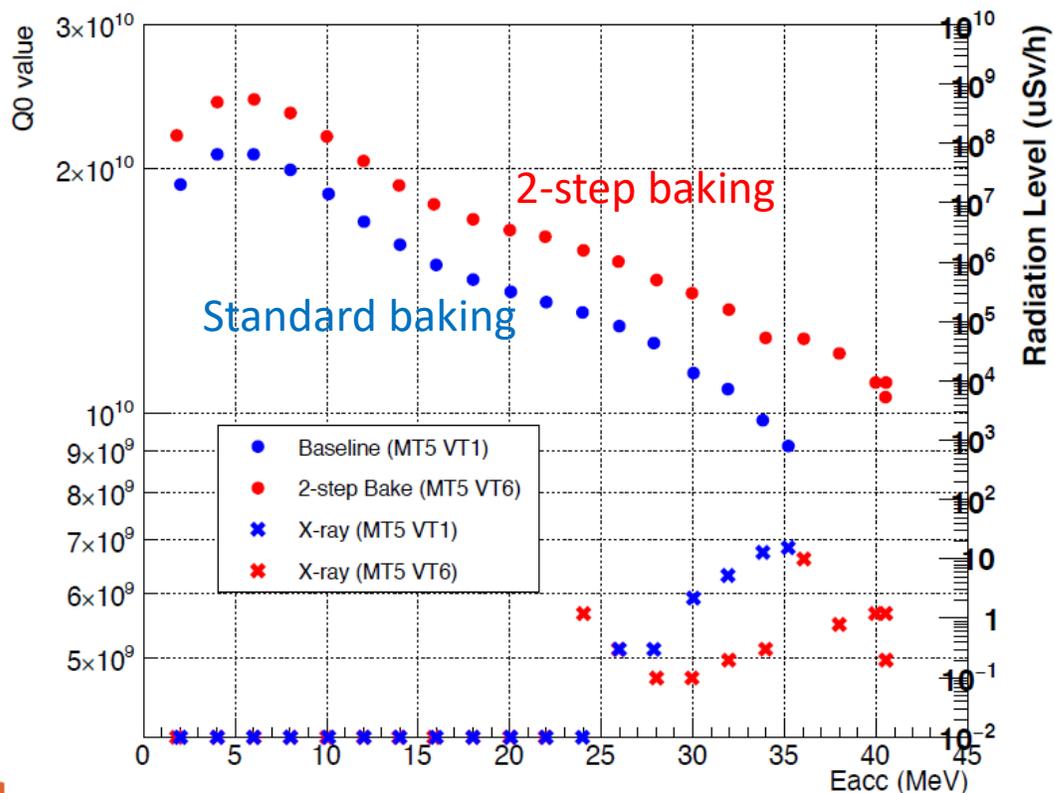
- Lower Branch: +45MV/m confirmed



水素化ニオブの相転移が影響している？

Sergey Belomestnykh, mini-Workshop on Cavity Performance Frontier, 16-17 February 2021

2-step bakingの最近の結果



	VT1	VT6
Bake process	120 °C 48 h	2-step bake
EP process	KEK-standard EP	KEK-cold EP
Cooling process	KEK-standard cooling	Fast cooling

- **低温EP**を行いニオブ表面をリフレッシュしたのち、2-step bakingを施した。
- 縦測定の際は**できるだけ早く冷却**をした。
- **40MV/mを超える加速勾配**が得られた。
- 高電界でも **1e10(@2K)を超える高いQ値**が得られた。

- 2-step bakingを何度か試みたのち、ようやく最近それらしい結果が得られた。
- 本当に2-step bakingの効果が見えているかどうかは再現性も含めて今後調査の必要あり。

Contents

- 超伝導空洞の特徴と紹介
- 超伝導空洞の通常処理
- 高Q値、高加速勾配への挑戦
 - 窒素ドープ
 - 磁束排斥
 - Mid-T真空炉ベーキング
 - 窒素インフュージョン
 - 2-stepベーキング
- さらなる高Q値、高加速勾配に向けて
 - Nb₃Sn
 - Multilayer
- 課題・まとめ

Nb3Sn空洞開発

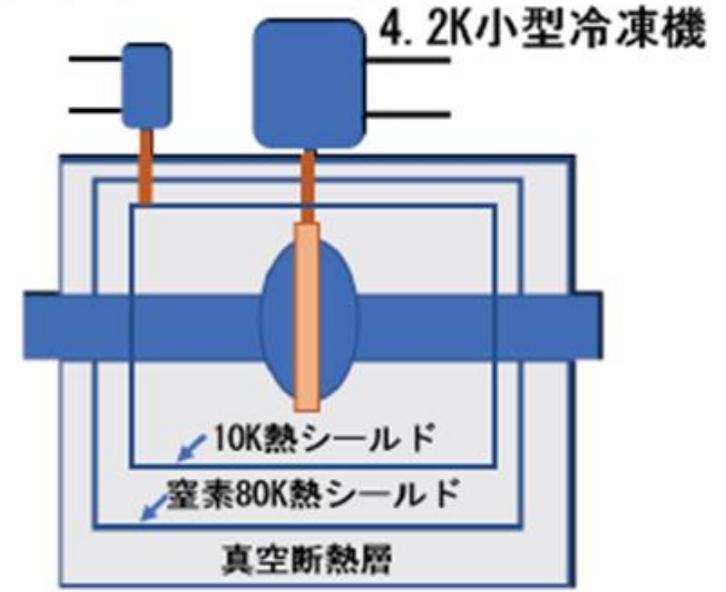
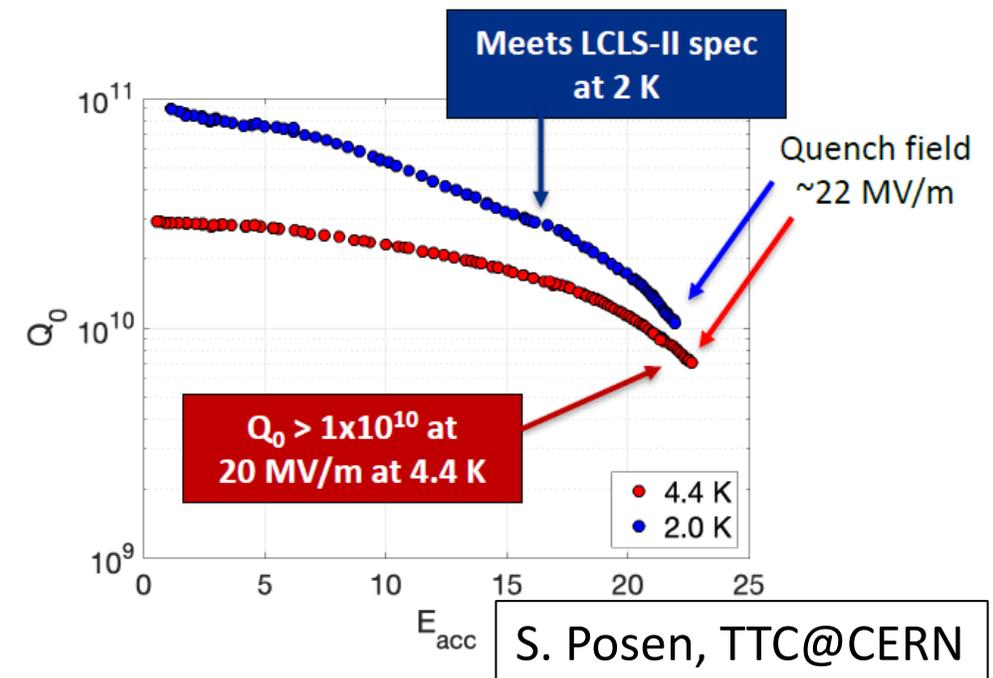
- 臨界温度が高く ($T_c=18K$)、Nbの場合と比べてQ値が高い (表面抵抗が低い)
- 4Kの運転において $Q_0 \sim 1e10$ のQ値が得られ、低負荷運転が可能。

例えば、5MVの加速であれば、5W@4K程度の負荷でCW運転可能



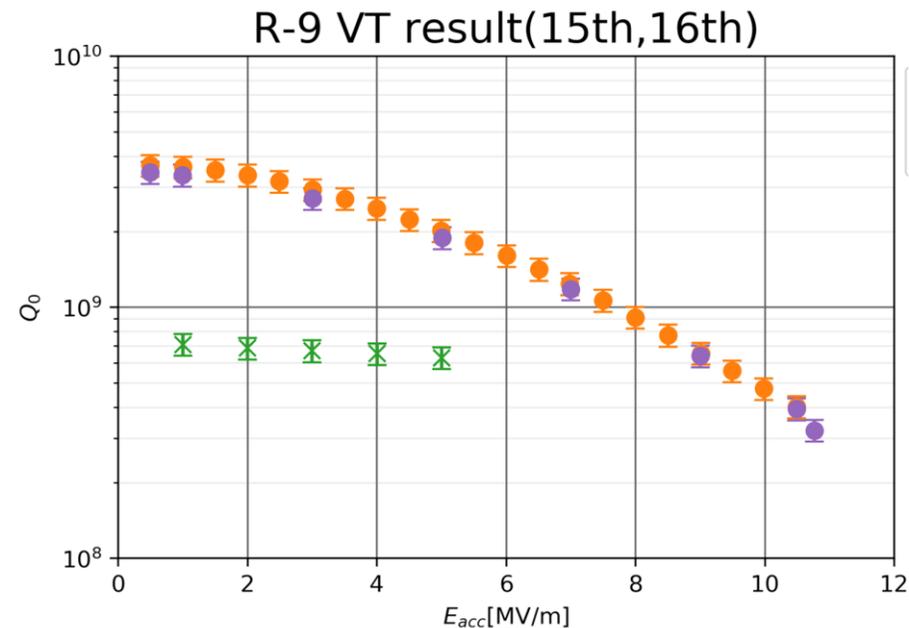
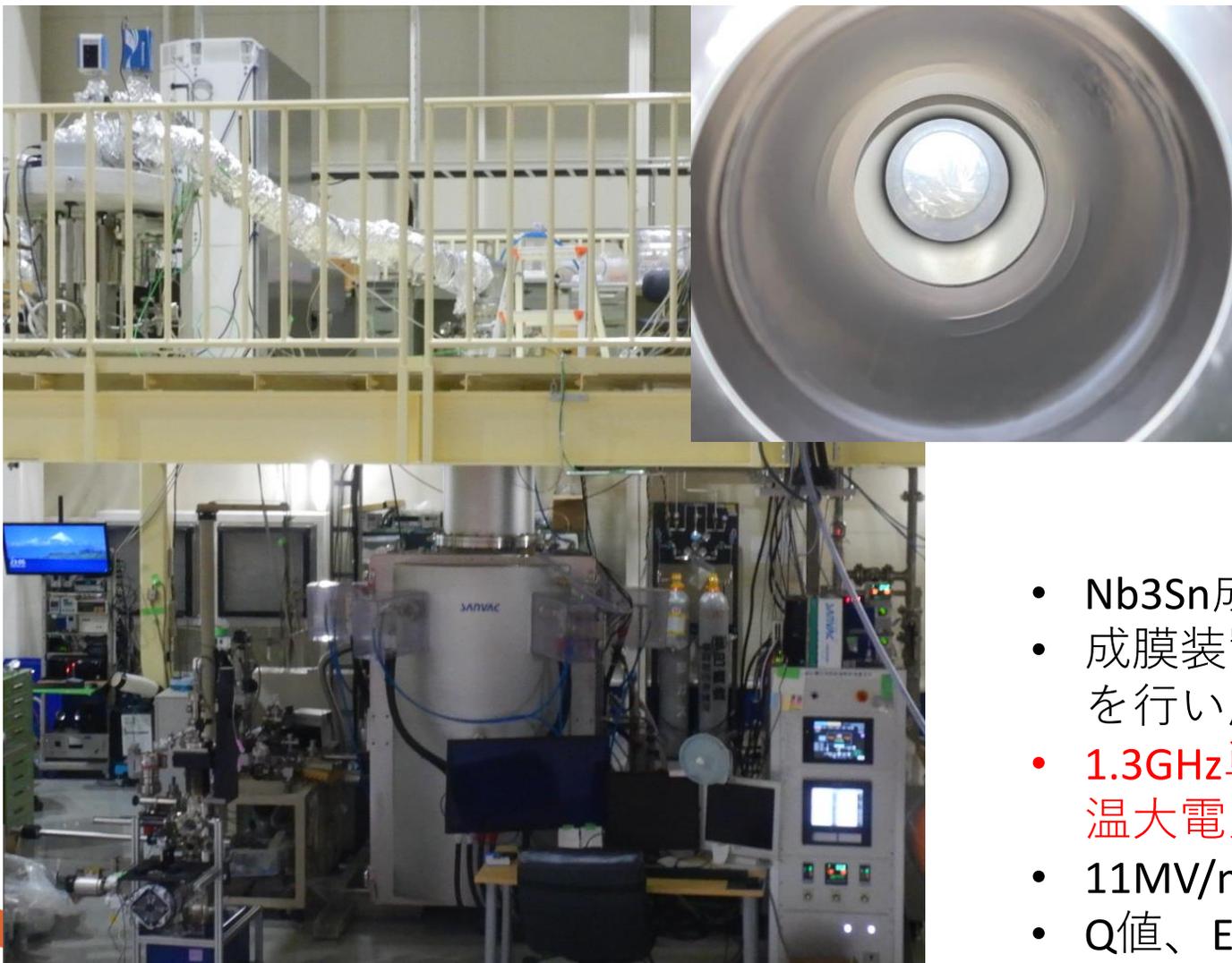
He冷凍機を用いず、小型冷凍機による伝導冷却での小型超伝導加速器のCW(大電流)運転が実現できる。

- He冷凍機がいらない！
- 高圧ガス対応が必要ない！
- 小型超伝導加速器システムの産業・医療応用への展開には最適！



KEKでのNb₃Sn空洞開発状況

Nb₃Sn成膜装置が完成



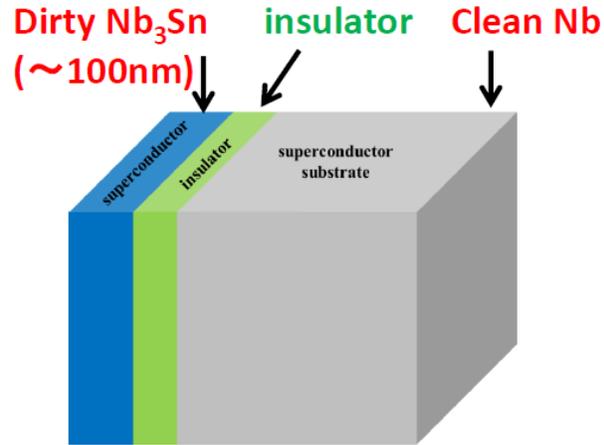
- Nb₃Sn成膜装置が完成し、運転を開始。
- 成膜装置の試運転の後、Nbサンプルへの成膜を行い成膜条件を探った。
- 1.3GHz単セル空洞へのNb₃Sn成膜に成功。低温大電力性能試験を行った。
- 11MV/mまで到達。
- Q値、Eaccともに改善の余地あり。
- 将来へ向けて、大きな一歩を踏み出した。

Multilayer coating, S-I-S or S-S structure

What's next?

Further advanced layered structures

Takayuki Kubo, LCWS2016



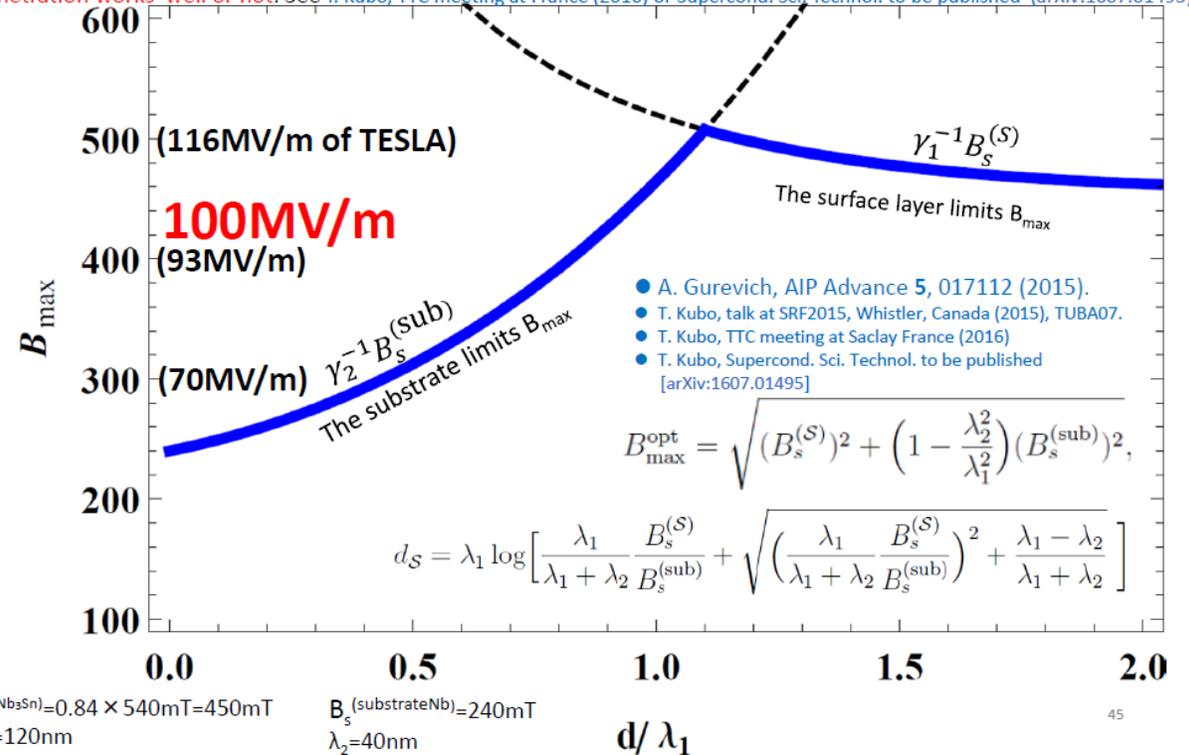
- A. Gurevich, Appl. Phys. Lett. **88**, 012511 (2006).
- T. Kubo, Y. Iwashita, and T. Saeki, Appl. Phys. Lett. **104**, 032603 (2014).
- A. Gurevich, AIP Advance **5**, 017112 (2015).
- S. Posen et al., Phys. Rev. Applied **4**, 044019 (2015).
- T. Kubo, talk at SRF2015, Whistler, Canada (2015), TUBA07.
- T. Kubo, Supercond. Sci. Technol. to be published [arXiv:1607.01495]

Furthermore, introducing the **insulator layer** (1) **prevent the vortex penetration** and (2) **suppress vortex dissipation**, because the vortex core disappears in the insulator layer.

高電界の壁を打ち破るのは、Multilayer structureか？
いずれにしても、これからの超伝導空洞に薄膜技術は非常に重要な技術となる。

e.g.) **Nb₃Sn / thin insulator / Nb substrate**
or
Nb₃Sn / Nb substrate

Note this shows **just theoretical field limits**. Whether we can achieve them depends on **whether a gimmick to avoid vortex penetration works well or not**. See T. Kubo, **TTC meeting at France (2016)** or **Supercond. Sci. Technol. to be published (arXiv:1607.01495)**



Contents

- 超伝導空洞の特徴と紹介
- 超伝導空洞の通常処理
- 高Q値、高加速勾配への挑戦
 - 窒素ドーピング
 - 磁束排斥
 - Mid-T真空炉ベーキング
 - 窒素インフュージョン
 - 2-stepベーキング
- さらなる高Q値、高加速勾配に向けて
 - Nb₃Sn
 - Multilayer
- 課題・まとめ

課題

- 高Q値の技術はかなり確立されてきた。実際の加速器にも技術が適用されている。窒素ドープ空洞(LCLS-II)は、あと1年程度でビーム運転開始。
- 高加速勾配化はそう簡単でないが、鋭意取り組んでいる。海外ではうまく行っている例もあり、再現性も課題。
- また加速勾配向上のためには、以下の作業項目の一つ一つを地道に向上させていくことが重要（普段から取り組んでいる項目）。
 - 欠陥のない空洞製造
 - 信頼性のある(高加速勾配用)表面処理
 - ダストを入れないクリーンルーム作業・真空作業
- ILCに向けては、量産技術の確立も必要

まとめ

- 世界各国において、精力的に超伝導加速器の運転・建設が行われている。
- 超伝導空洞の高性能化（高Q値化、高加速勾配化）については、世界各国が協力して、R&Dを進めている。
- 窒素ドープ、Mid-T真空炉ベーキング、磁束排斥など高Q値の技術はかなり確立されてきている。
- 高加速勾配化のR&Dも進められているが、再現性等が課題となっている。
- 近い将来の高Q値超伝導加速器としては、Nb₃Snが有力
- その先の将来は、多層薄膜構造がニオブを大きく超える加速勾配を実現する候補として有力視されている。