

# 超伝導空洞のHigh-Q運転の 実現へ向けての研究開発

2016/8/10

第13回加速器学会@幕張

梅森 健成(KEK)

## 発表内容

- 表面抵抗について
- High-Qへ向けてのR&D
  - 窒素ドーピング
  - 磁場トラップ
  - Large grain空洞
- まとめ

## 著者

梅森健成、井上均、植木竜一、加古永治、許斐太郎、久保毅幸、  
阪井寛志、清水洋孝、土屋清澄、寺島明男、増澤美佳、道前武、  
山中将、渡辺勇一（高エネルギー加速器研究機構）  
仙入克也、原博史、柳澤剛（三菱重工メカトロシステムズ）

# はじめに

## 超伝導空洞のメリット

- 超伝導のおかげで、非常に少ない空洞表面ロスで、高い加速電圧を実現することができる。
  - 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値は10W程度

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

## 超伝導空洞運転のデメリット

- 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倍の電力を要する。
  - つまり2.0Kでの10Wの表面ロスに対し、数kWの電力を必要とする。



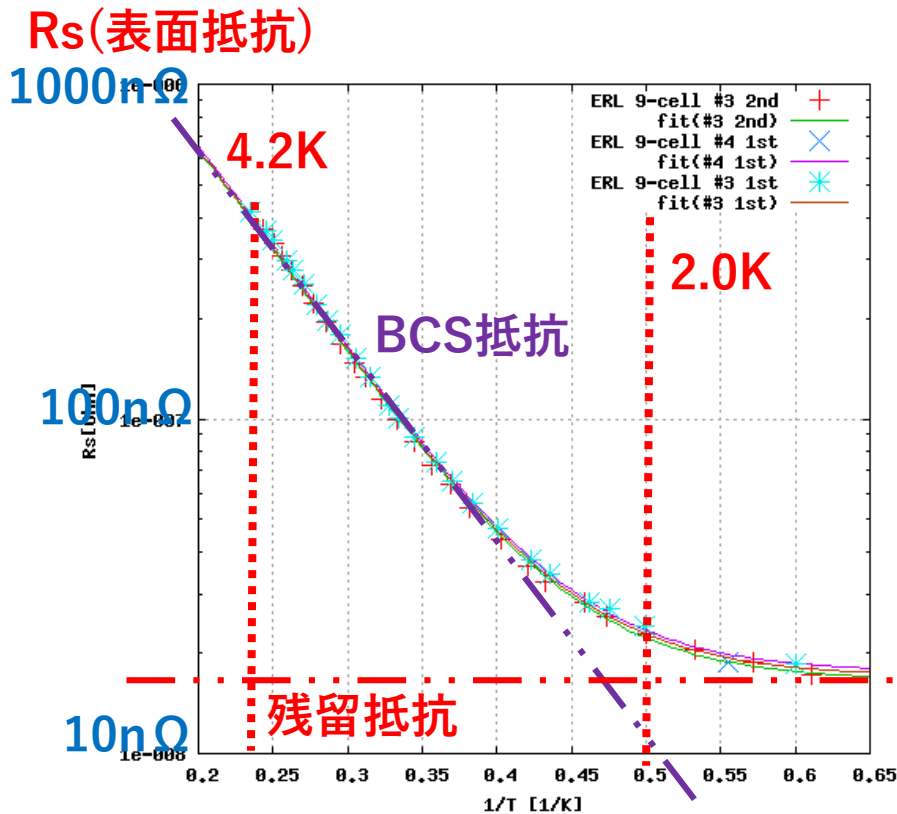
## High-Q運転のメリット

- High-Q運転を実現
  - ⇒ 表面ロスを低減
  - ⇒ 冷凍機負荷を低減（必要電力を低減）

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

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

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



**1/T = 温度の逆数**

**$R_{BCS}$  (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

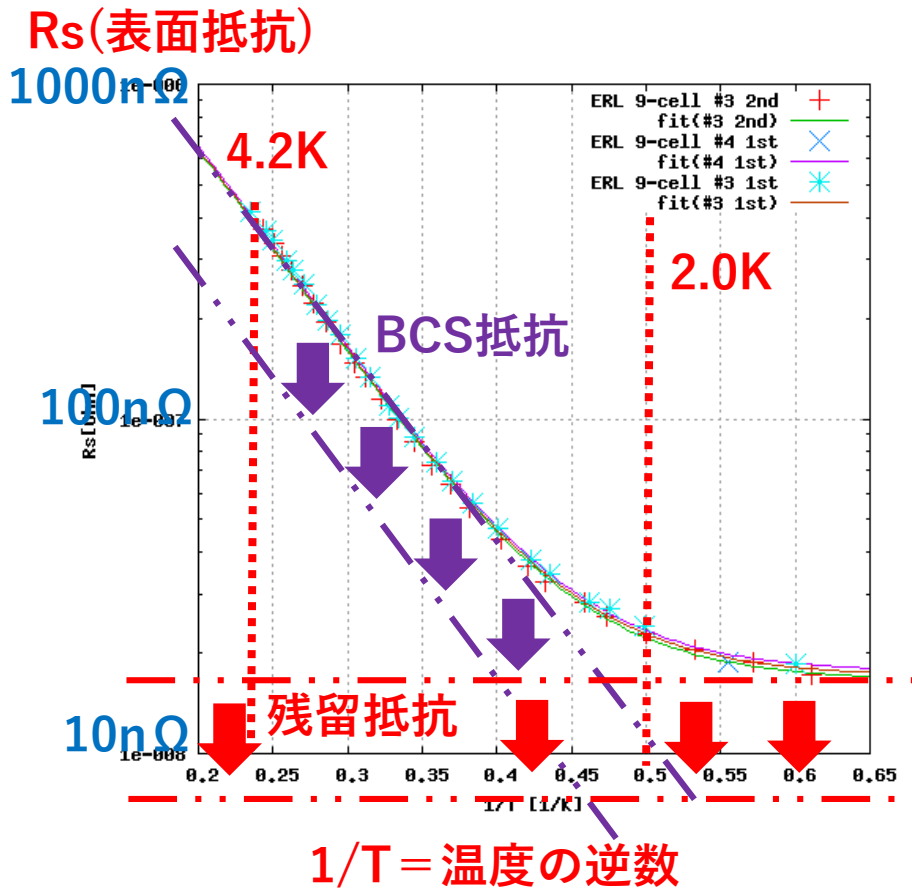
□ 空洞表面の磁場トラップによる寄与 ( $R_{flux\_trap}$ ) と空洞表面に固有の寄与 ( $R_0$ )

□ 一般的に  $R_0$  は小さく、 $R_{flux\_trap}$  が支配的である。

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

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

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



**窒素ドーピング**

⇒ BCS抵抗を下げる

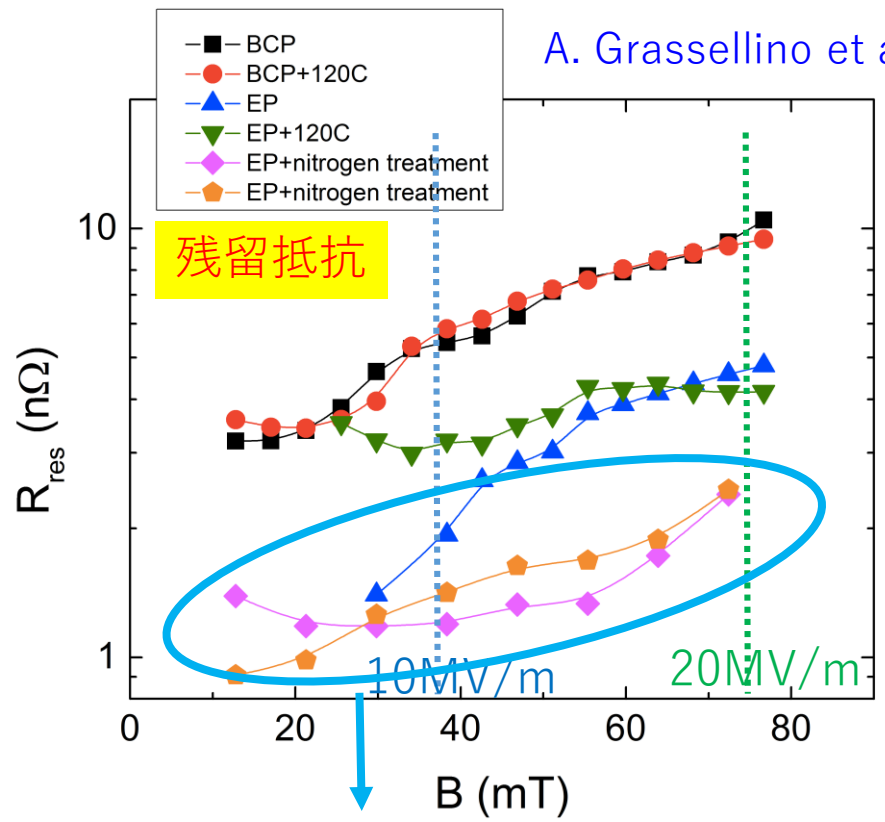
**磁場トラップ対策**

⇒ 残留抵抗を下げる

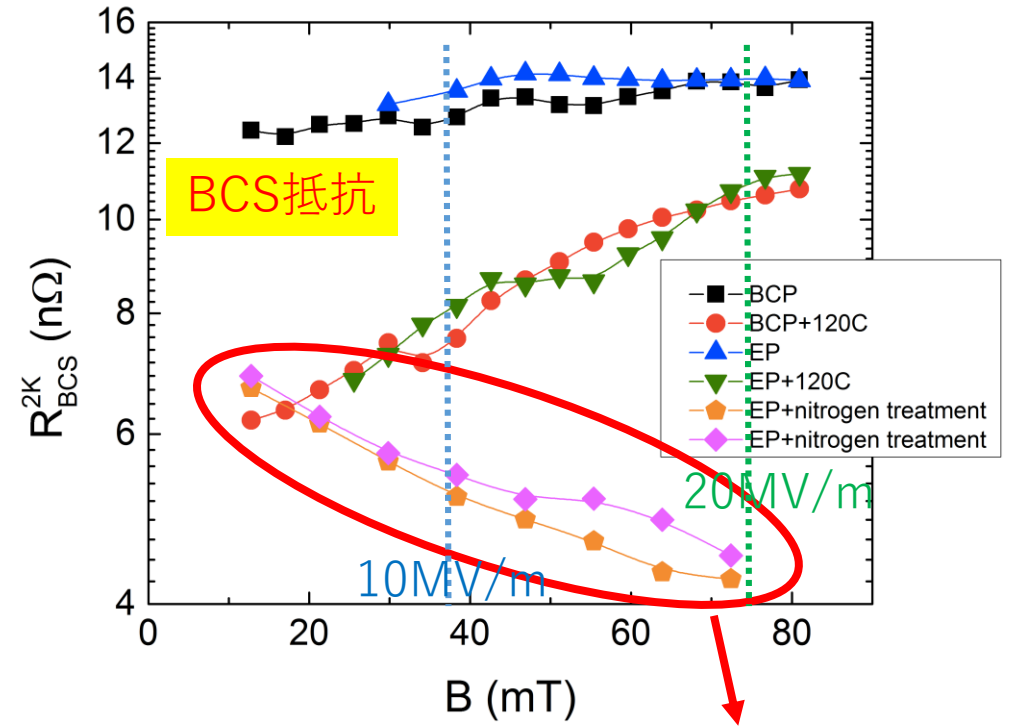
# $R_{res}$ and $R_{BCS}$ from FNAL results

$$R_s(T) = R_{BCS}(T) + R_{res}$$

A. Grassellino et al, 2013 Supercond. Sci. Technol. **26** 102001



磁場のコントロールにより  
残留抵抗も大幅に低減



窒素ドーピングによりBCS  
抵抗が大幅に低減

- 窒素ドーピングによりBCS抵抗は数 nΩ (@2K)まで下げられる。
- 残留抵抗を下げる事は非常に重要になってきている。
- 残留抵抗は実験条件に依存する (磁場環境、冷却状況等)。

窒素ドーピング

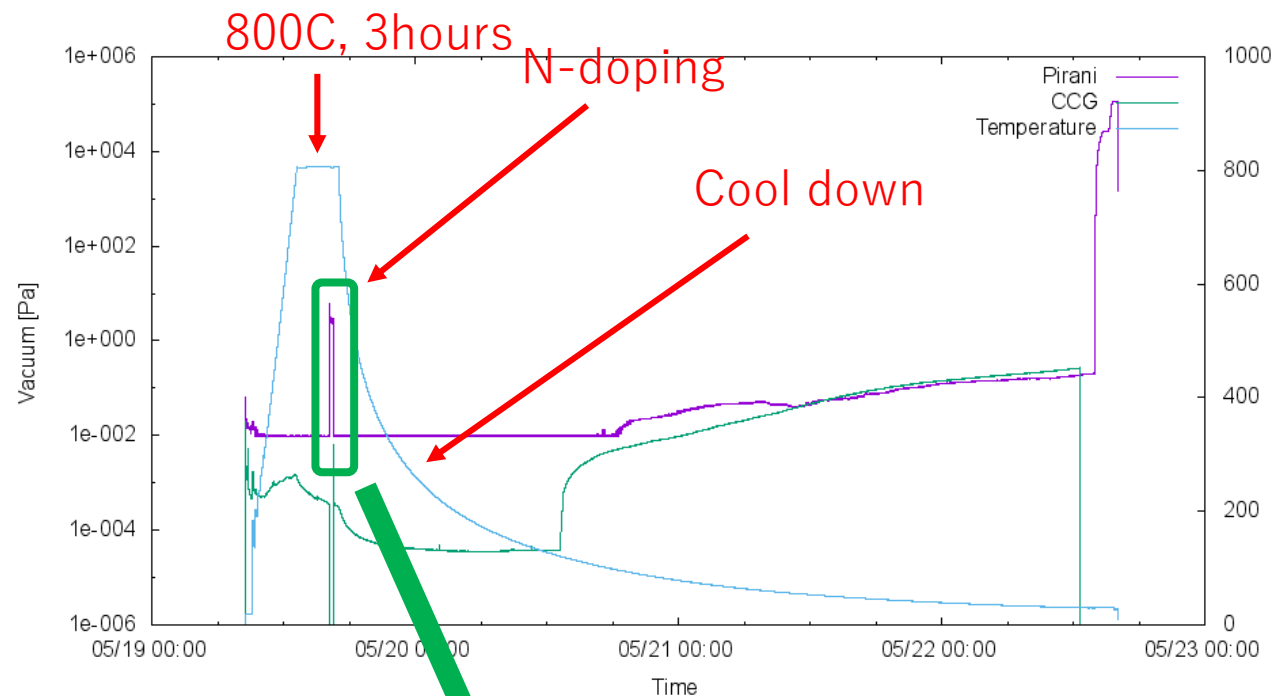
# 窒素ドーピングシステムの構築

- 2つの真空炉それぞれに窒素導入システムを構築
  - A) 9セル用大型真空炉**
  - B) 単セル用小型真空炉**
- 以下の3つのパラメーターにて窒素ドーピングを試みた
  - 1) 800deg, 3h + **3.3Pa N-dope, 2min** + 800deg, 6min
  - 2) 800deg, 3h + **5.5Pa N-dope, 20min** + 800deg, 30min
  - 3) 800deg, 3h + **2.7Pa N-dope, 20min** + 800deg, 30min

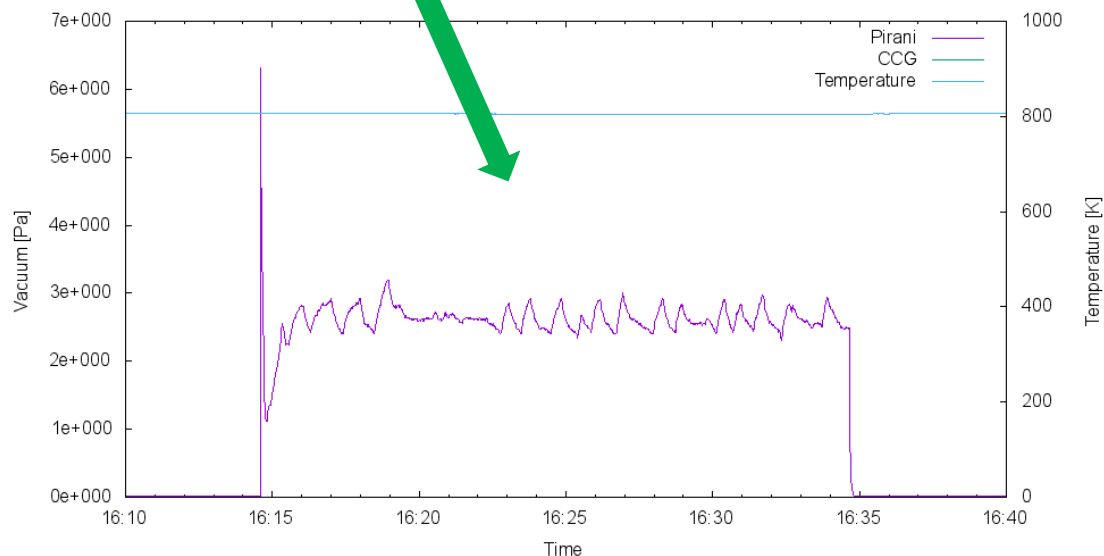




# 窒素ドーピング (大型真空炉を使用)



- 3時間かけて800度へ上昇
- 800度を3時間キープ
- 窒素ドーピング
- **2.7Pa, 20分**
- さらに800度を30分キープ
- Heater OFFして自然冷却

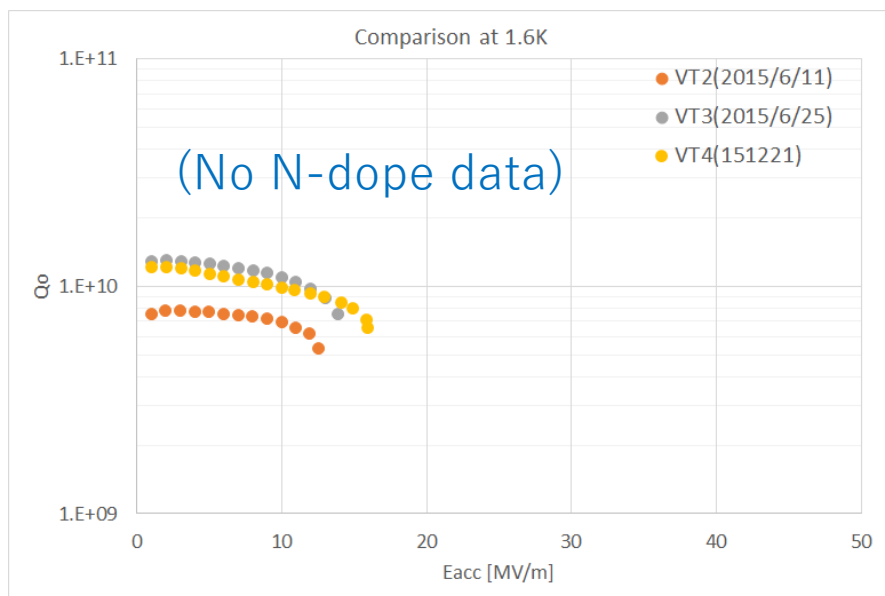
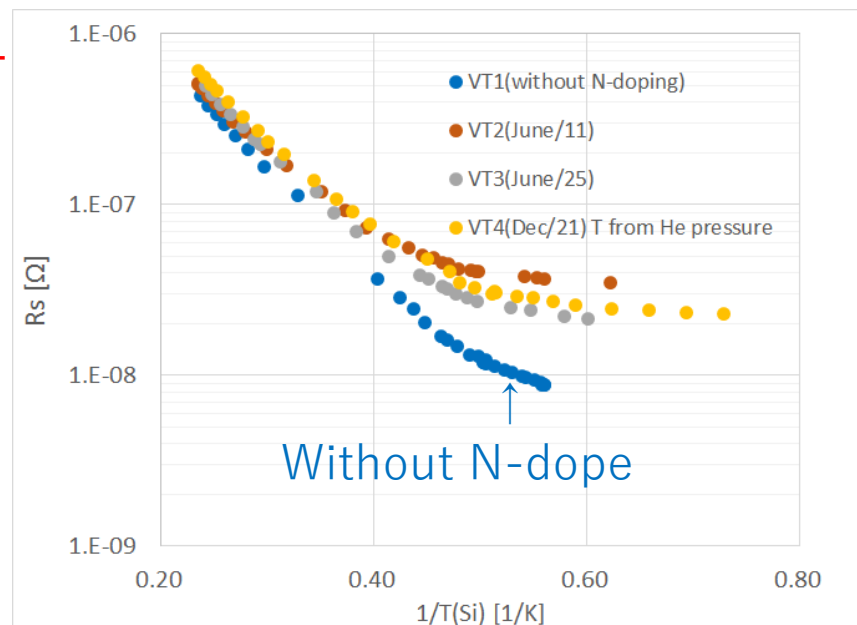
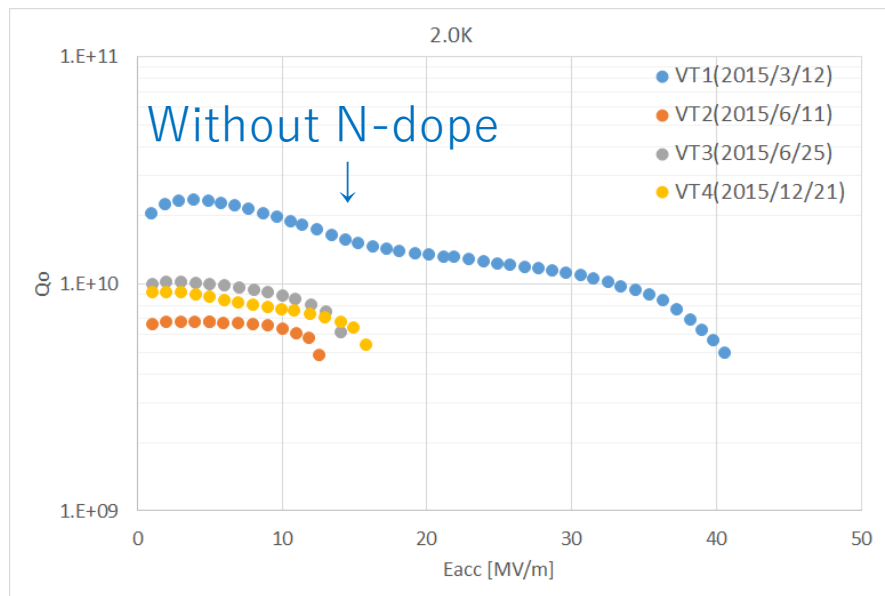


- 窒素導入径を熱処理用真空炉に構築
- 真空度はCCGおよびピラニゲージでモニター
- 窒素圧力はVariable leak valveにてPCより制御
- 真空炉の排気には拡散ポンプを使用

# 使用した単セル空洞の履歴

Date	Process	Details
2015/2/12	EP-1	100um
2015/2	Anneal	750deg, 3h
2015/3/3	EP-2(1)	20um EP-2, HPR, Assembly, Baking(140deg, 48hours)
2015/3/12	<b>VT(1)</b>	Confirm Eacc and Qo
<b>2015/5/19</b>	<b>N-dope(3)</b>	<b>800deg, 3h + 2.7Pa N-dope, 20min + 800deg, 6min</b>
2015/6/2	EP-2(2)	<b>15um EP-2</b> , HPR, Assembly, Baking(140deg, 48hours)
2015/6/11	<b>VT(2)</b>	
2015/6/16	EP-2(3)	<b>15um EP-2</b> , HPR, Assembly, Baking(140deg, 48hours)
2015/6/25	<b>VT(3)</b>	
2015/11/24	EP-2(4)	<b>5um EP-2</b> , HPR, Assembly, (No baking)
2015/11/21	<b>VT(4)</b>	
2016/3/16	<b>VT(5)@FNAL</b>	
2016/3/21	HPR	HPR, Assembly, (No baking)
2016/3/25	<b>VT(6)@FNAL</b>	

# 縦測定結果 (2.7Pa N-dope, 20min)



- ・窒素ドーピング後、15 $\mu\text{m}$ ~35 $\mu\text{m}$ のEPを行い表面を研磨した後、3度の縦測定を行った。
- ・ $Q$ 値は大きく劣化した。
- ・Quench fieldも13MV/mに低下(窒素ドーピング空洞に見られる現象)。
- ・EPで研磨すると $Q$ 値が少しずつ回復していく様子も見られた。
- ・クエンチの場所是一緒だった。

※ 他の2つの窒素ドーピングパラメーターでも、同様に $Q$ 値が劣化するという結果だった

# なぜ、窒素ドーピング空洞のQ値が上がらない？

考えられる理由は以下の通り

## 1. Nb表面が正しく窒素ドーピングされていない

- (理由はわからないが)何か悪さをしている？
- 真空炉の真空システムの違い？(クライオポンプと油核酸んポンプの違い？)
- 窒素ドーピングのシステムが異なるせい？

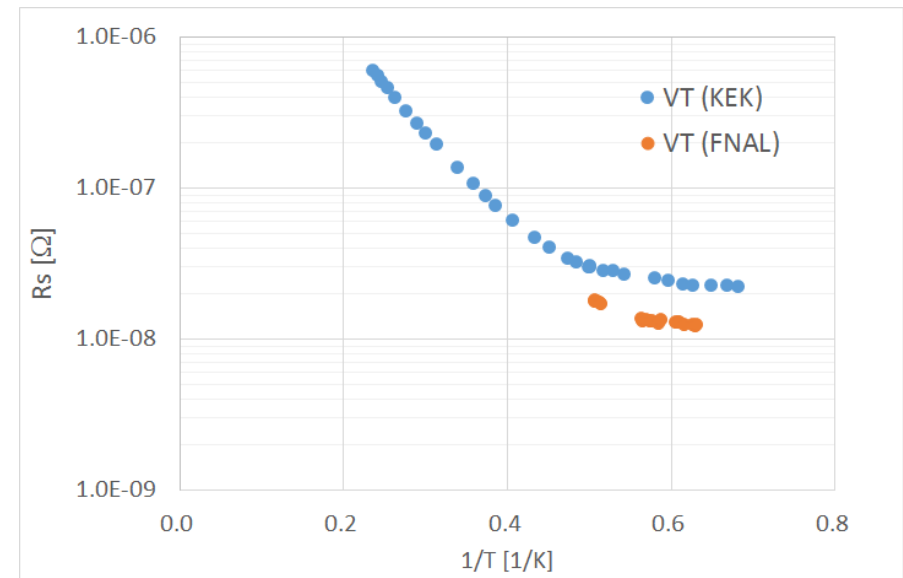
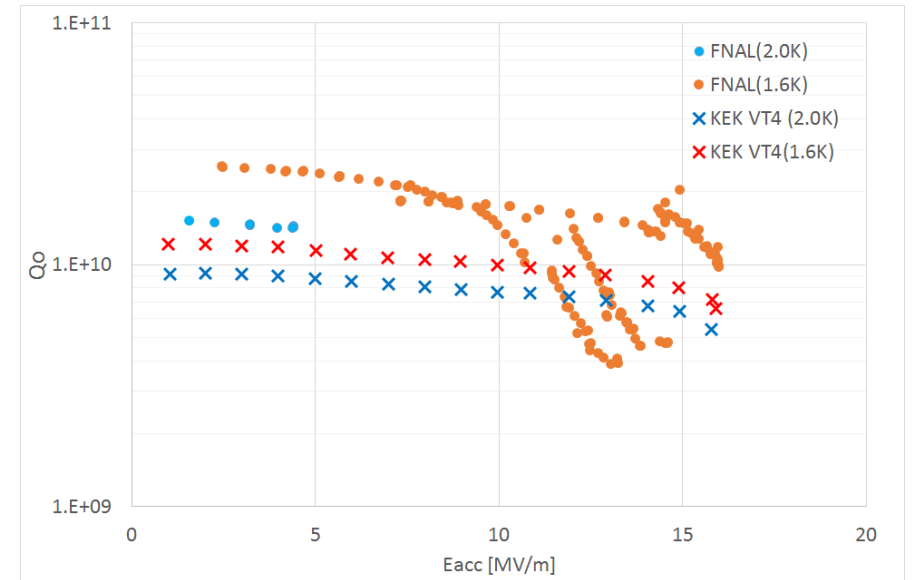
## 2. 縦測定用クライオスタットの磁場の影響

- 窒素ドーピングをした空洞は、クライオスタット内の残留磁場に対し、空洞内にトラップしてしまう感度が、通常空洞の数倍高い事が知られている。
- KEKの縦測定用クライオスタットには10 mG以上の磁場があり、磁場的な環境はあまり良くない。
- 磁場トラップは冷却速度・手順にも依存する。

# FNALでの縦測定結果



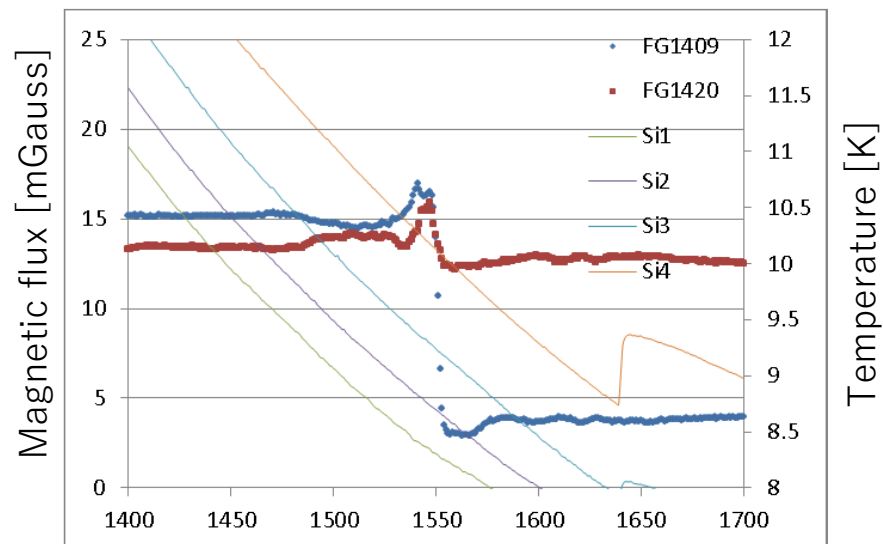
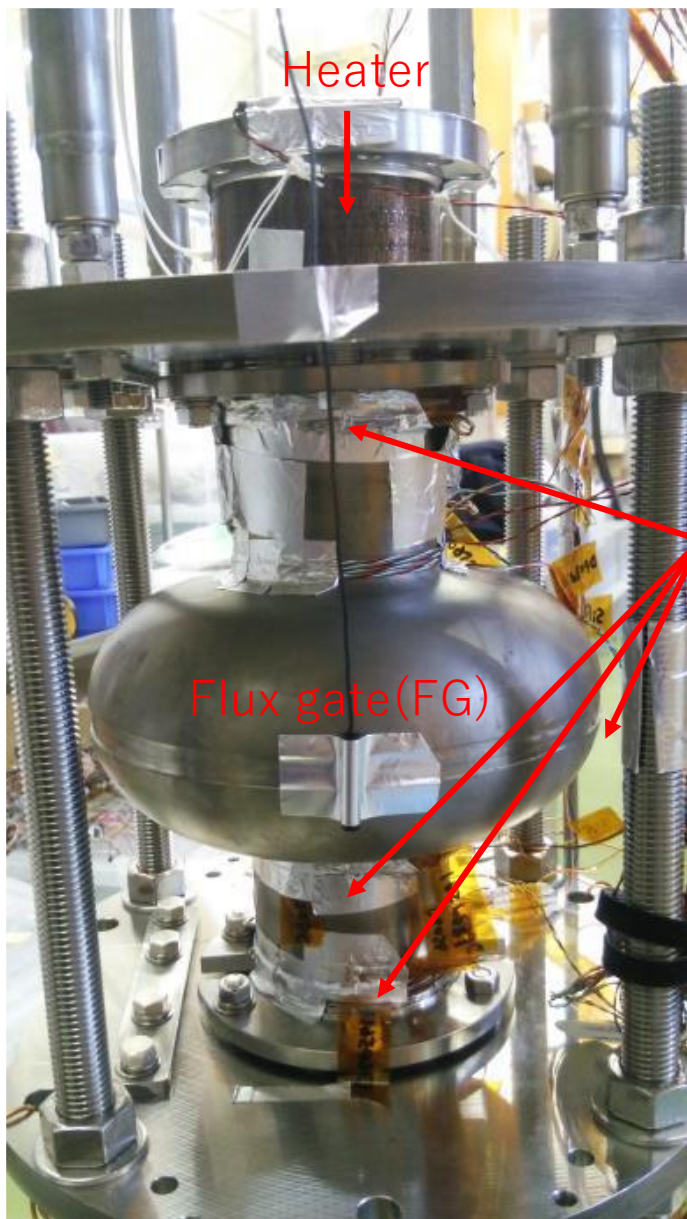
- FNAL(Fermi研究所)にて、KEKで窒素ドーピングした空洞の測定を行った。
- FNALでは、非常に小さな磁場環境のもとで縦測定が行える。
- 多少のQ値の改善は見られたが、通常の窒素ドーピングのQ値よりはだいぶ低かった。



# 磁場トラップの実験の試み

# First test of flux trapping at KEK-STF

空洞周囲の磁場およびその制御、冷却時の温度勾配、空洞表面の処理状況などにより、超伝導に転移する際に空洞にトラップされる磁場の量が影響を受ける



Si temp.  
sensor

Flux gate (FG)

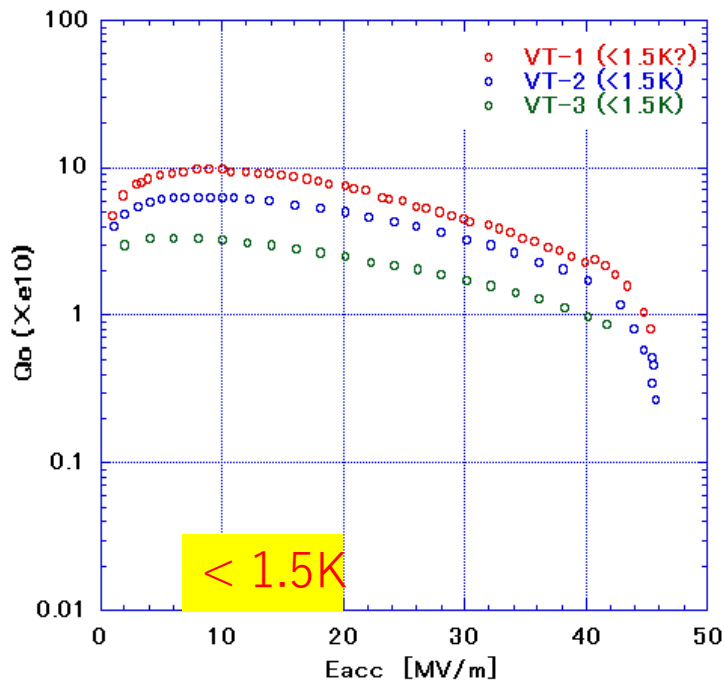
- KEK-STFにてFlux trappingの実験も始めた。
- Flux gate sensorにて空洞外面の磁場を測定。
- 9.2Kにて超伝導に転移する際に、flux expulsionの信号は観測された。
- 冷却時の空洞表面の温度勾配は、ヒーター等を用いて制御。
- 今後、さらに研究を進めて行く。

# Large Grain空洞の 製作と評価

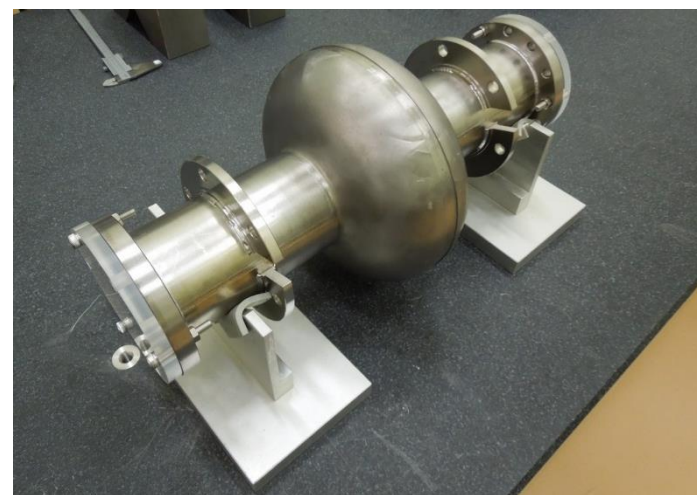


# Large grain 単cell空洞の縦測定結果

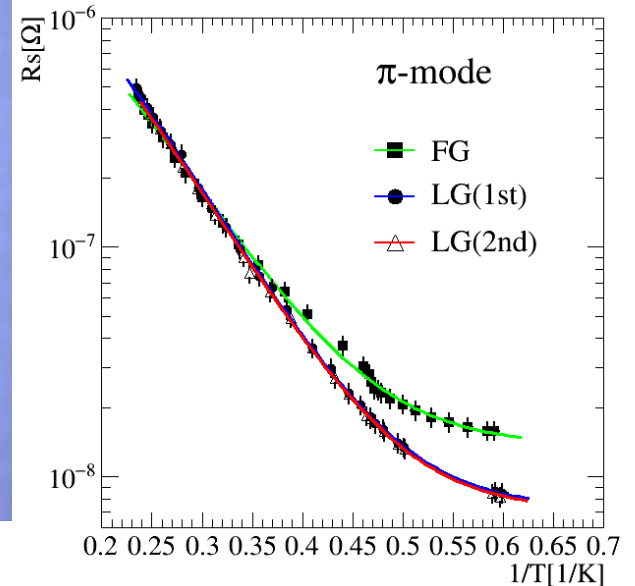
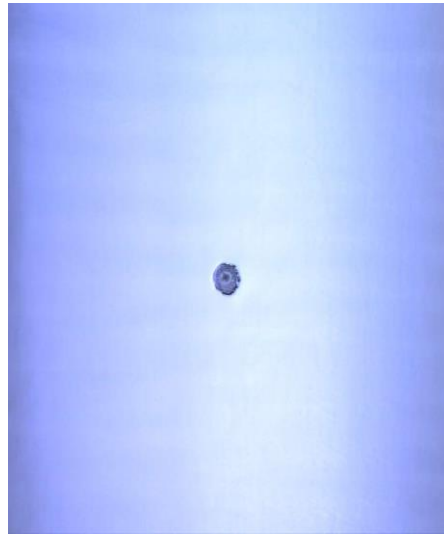
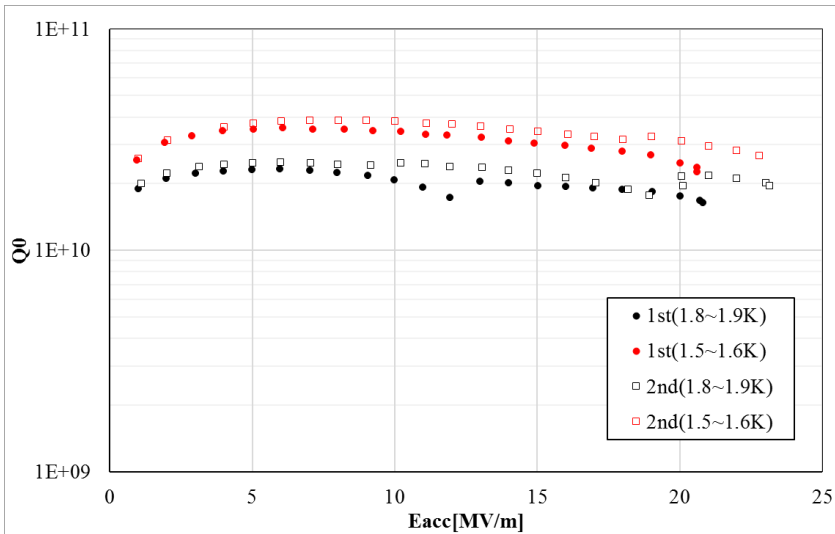
※ Large grain空洞は一般に、fine grain空洞より高いQ値を得やすい



- 到達加速勾配は40 MV/mを超えた。
- 1回目の測定のQ値は非常に高く、 $10^{11}$ に近い値であった。
- ただし、そのQ値は再現されていない。
- KEK縦測定用クライオスタット内の磁場の条件（サポート治具等々含む）が安定しないのが原因か??



# Large grain 9-cell cavityの縦測定結果



- 9-cell large 空洞はKEK-CFFの内作にて製作された。
- 表面処理の後に縦測定を実施。
- 3セル赤道部でのクエンチ(発熱)にて加速勾配は21~23 MV/mに制限された。
- 3セル以外のセルは30MV/m以上の加速勾配に到達した。
- Fine grain 9-cell空洞より高いQ値が得られた。
- 欠陥は局所研磨の後、次回測定。



MOP017 道前武 他 「Large Grainニオブ材を用いた9セル超伝導加速空洞の製造と評価」

## まとめ

- 超伝導空洞のHigh-Q運転を目指すべく、開発研究を進めている。
- 窒素ドーピングの手法をKEKにおいても試してみた。単セル空洞に対し3通りのパラメーターで試みたが、いずれもQ値が下がるという結果になってしまった。Q値劣化の原因については究明中。
- 冷却時に超伝導に転移する際の磁場トラップがQ値に大きな影響を与えており、空洞周囲の磁場のコントロールが重要になってきている。KEKにおいても磁場トラップ実験のためのセットアップを構築し、実験を開始した。
- Large grain空洞は、KEK-CFFの内作により、単セル空洞と9セル空洞が製作された。それぞれ表面処理を行った後に縦測定を行い、fine grain空洞の場合と比較して高いQ値が得られることを確認した。