

# J-PARC 真空炉を用いた 窒素ドーピング超伝導空洞の評価

岡田貴文 (SOKENDAI), 江木昌史, 梅森健成, 加古永治, 許斐太郎,  
佐伯学行, 阪井寛志, 道前武, 堀洋一郎, 山本康史 (KEK),  
神谷潤一郎, 黒澤俊太, 武石健一 (JAEA)

2018/8/8

第15回日本加速器学会年会

# Outline

- はじめに
- 窒素ドーピングとは
- KEKでの窒素ドーピングに関する研究
- J-PARC真空炉を用いた窒素ドーピング
- 結果と解析
- まとめ

# はじめに

## 超伝導空洞

表面抵抗が低く高周波損失が小さい

→ 高い加速電場かつDutyの高い運転が可能

ただし、空洞を超伝導状態に保つ必要がある

冷凍機によって冷却

空洞の熱損失 → 冷凍機負荷

空洞のQ値が高いほうが損失が小さい

→ 冷凍機負荷の軽減

CW加速器では特に有効

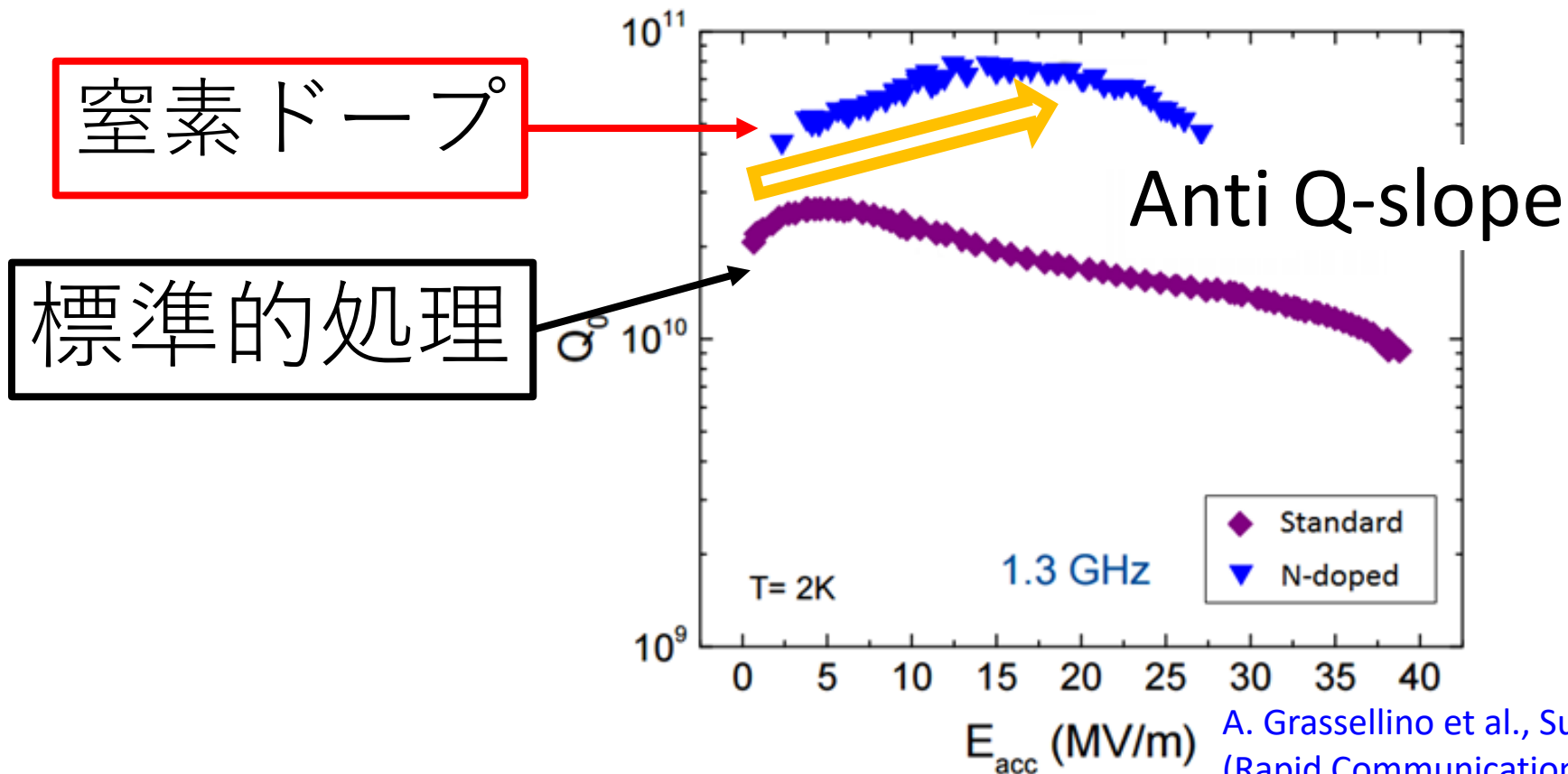


# 窒素ドーピングとは

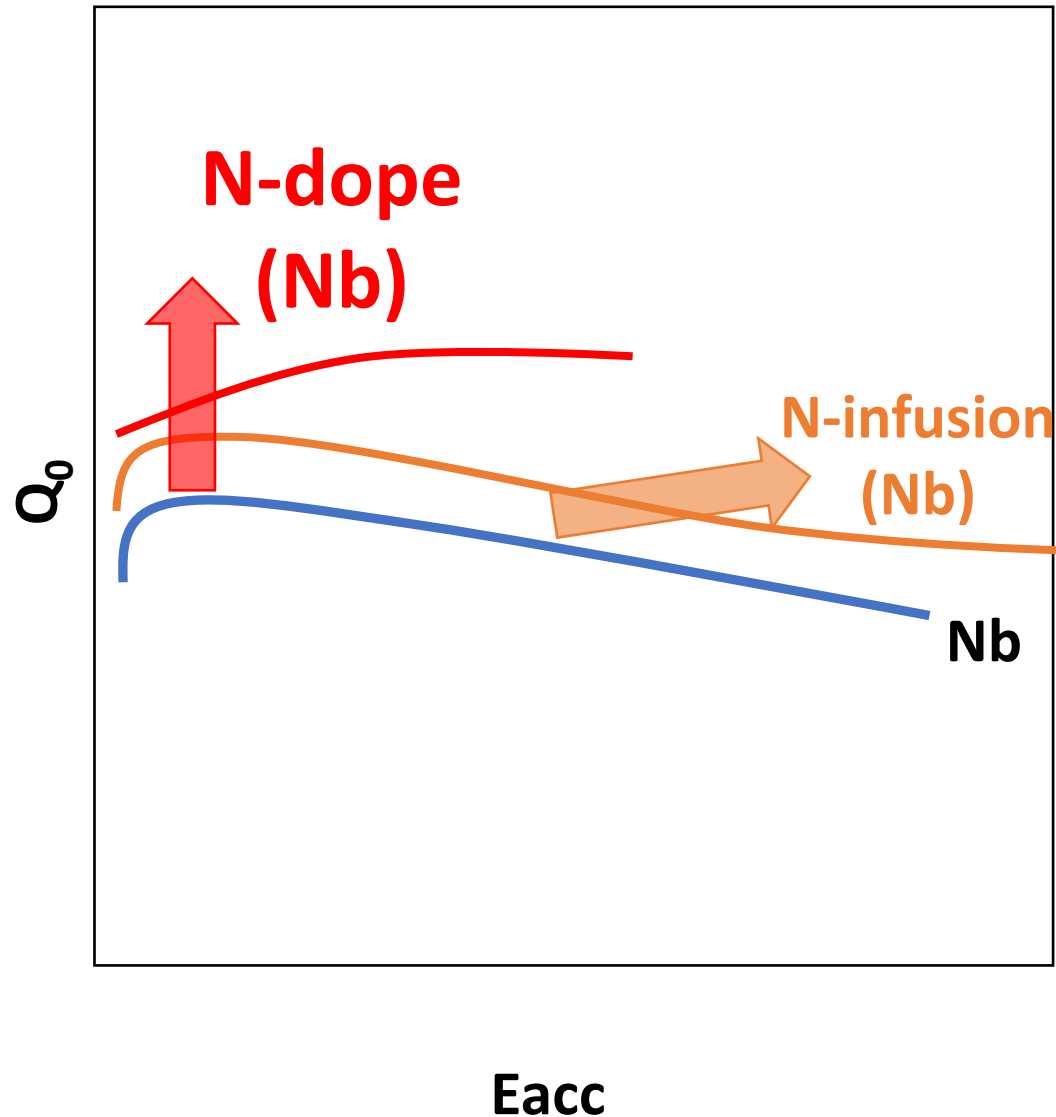
2012年 Fermi で発見 (A. Grassellino)

高温熱処理中に窒素を導入し，EPで最表面を除去

Q値がNb超伝導空洞に対して数倍，但し最大加速電場は下がる



# 窒素ドーピングと窒素インフュージョン



- 窒素ドーピング

- High-Q, Low  $E_{acc}$   
CW加速器, リング  
e.g.) LCLS-II
- 表面の数十 $\mu\text{m}$  + EP

- 窒素インフュージョン

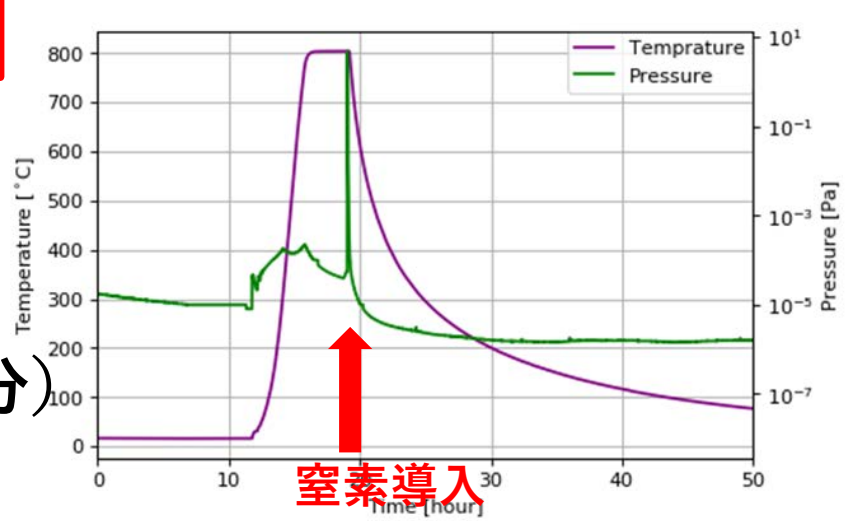
- High-Q, High  $E_{acc}$   
高エネルギー加速器  
e.g.) Future-ILC
- 表面の数nm EPなし

# 窒素ドーピングと窒素インフュージョン

## 窒素ドーピング

熱処理

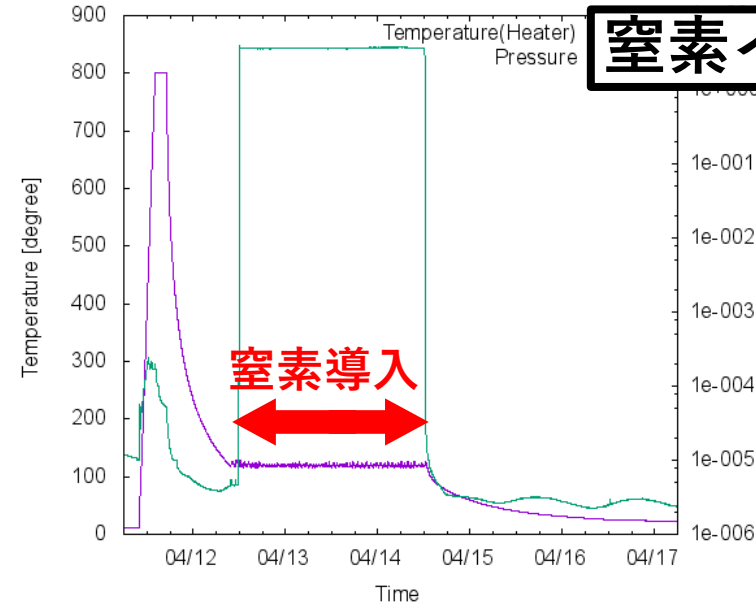
- 800度
- 短時間 (数分-数十分)



## 窒素インフュージョン

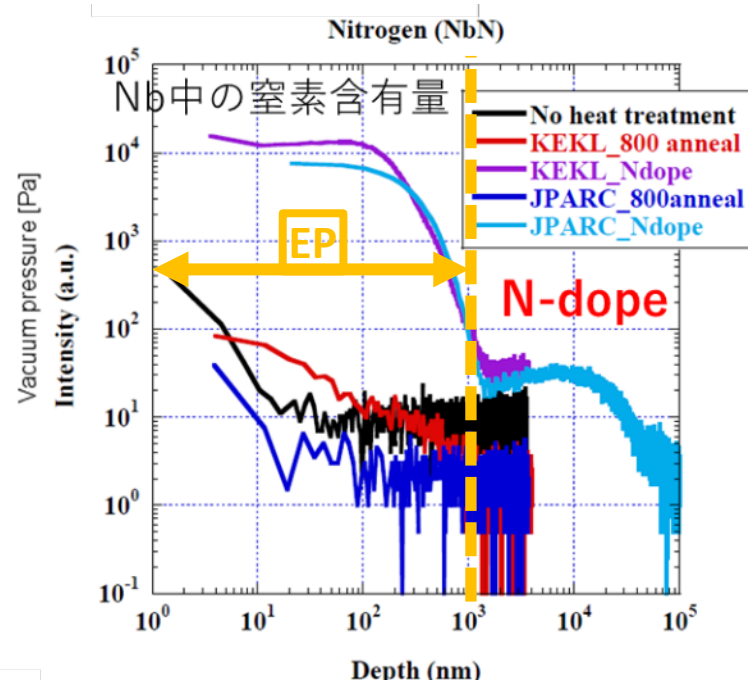
熱処理

- 120度
- 48時間



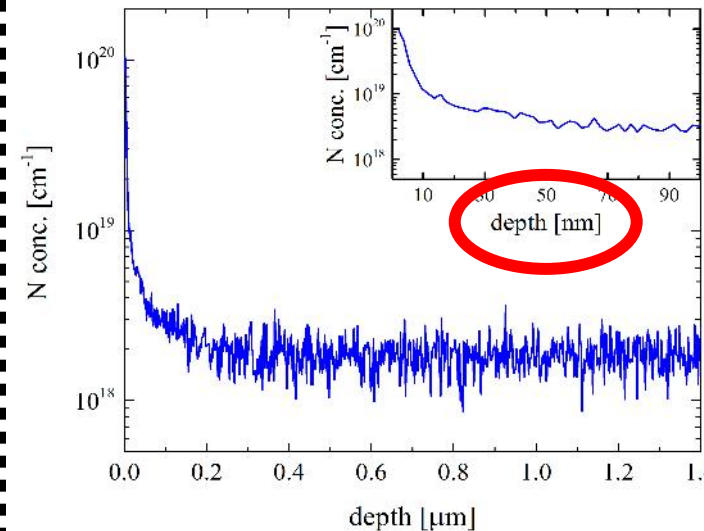
表面

十数 $\mu\text{m}$ に窒素最表面(窒化Nb)はEPで除去



表面

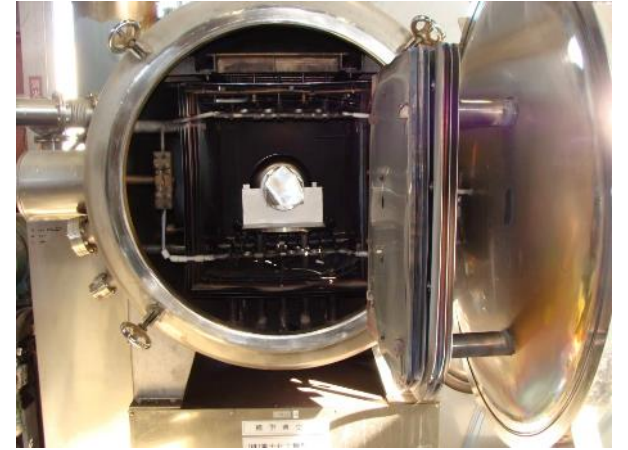
数nmに窒素最表面を使用



# KEKでの窒素ドーピング研究

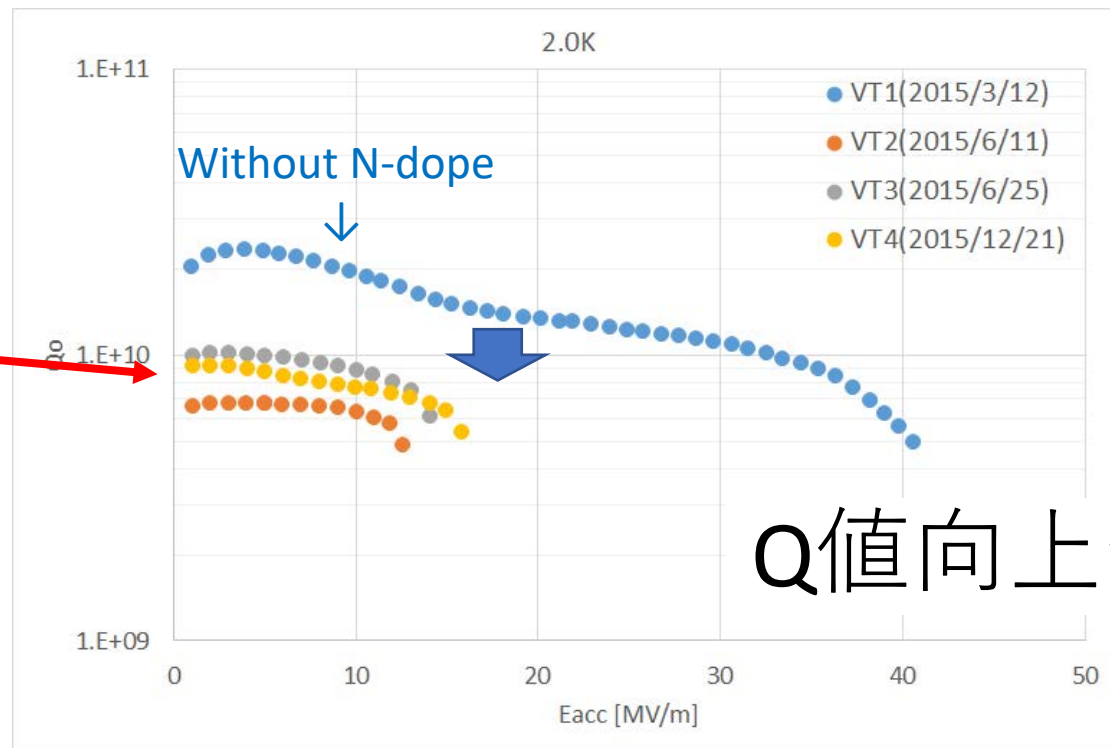
KEK内の真空炉を用いて、窒素ドーピングの研究を行ってきた。

- 小型真空炉を用いた窒素ドーピング
- 大型真空炉を用いた窒素ドーピング



全て、失敗

処理後



K. Umemori, 第13回加速器学会

# KEKでの窒素ドーブ研究

## 考えられた原因

### ➤ 縦測定系の環境磁場

超伝導表面抵抗はトラップされた磁束密度に依存する。

環境磁場の小さい測定系で測定 → Q値向上せず

### ➤ 窒素ドーブのパラメータによる違い

異なるパラメータの窒素ドーブを試したが、すべて失敗

### ➤ 真空炉の違い

他研究所の窒素ドーブの成功例は、クライオポンプによる真空排気系

KEK真空炉は油拡散ポンプを使用

クライオポンプを使用した800°Cアニール可能な真空炉



# J-PARC真空炉を用いた 窒素ドーピング

# J-PARC真空炉を用いた窒素ドープ



K. Umemori, TTC meeting 2017/2/21

## KEK真空炉

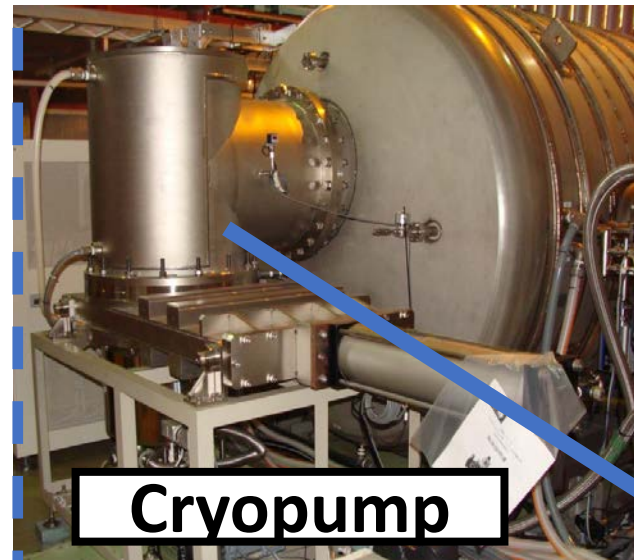
- 到達真空度： $\sim 1 \times 10^{-5}$  Pa
- 油拡散ポンプによる排気 → 不純物混入のおそれ

## J-PARC真空炉

- 良く管理され、クリーンな真空炉
- 到達真空度： $\sim 1 \times 10^{-6}$  Pa
- クライオポンプによる排気 → オイルフリー

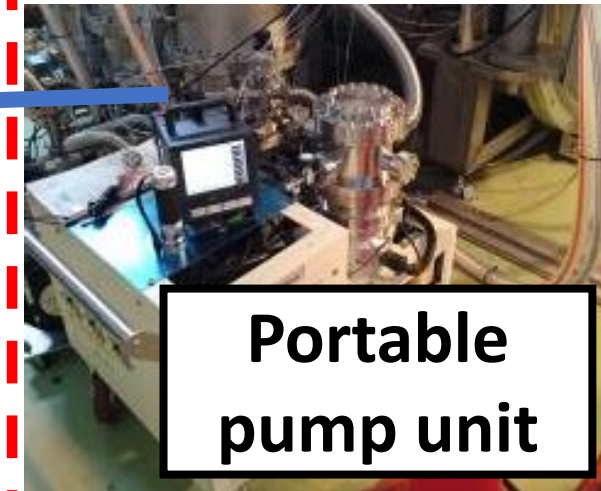
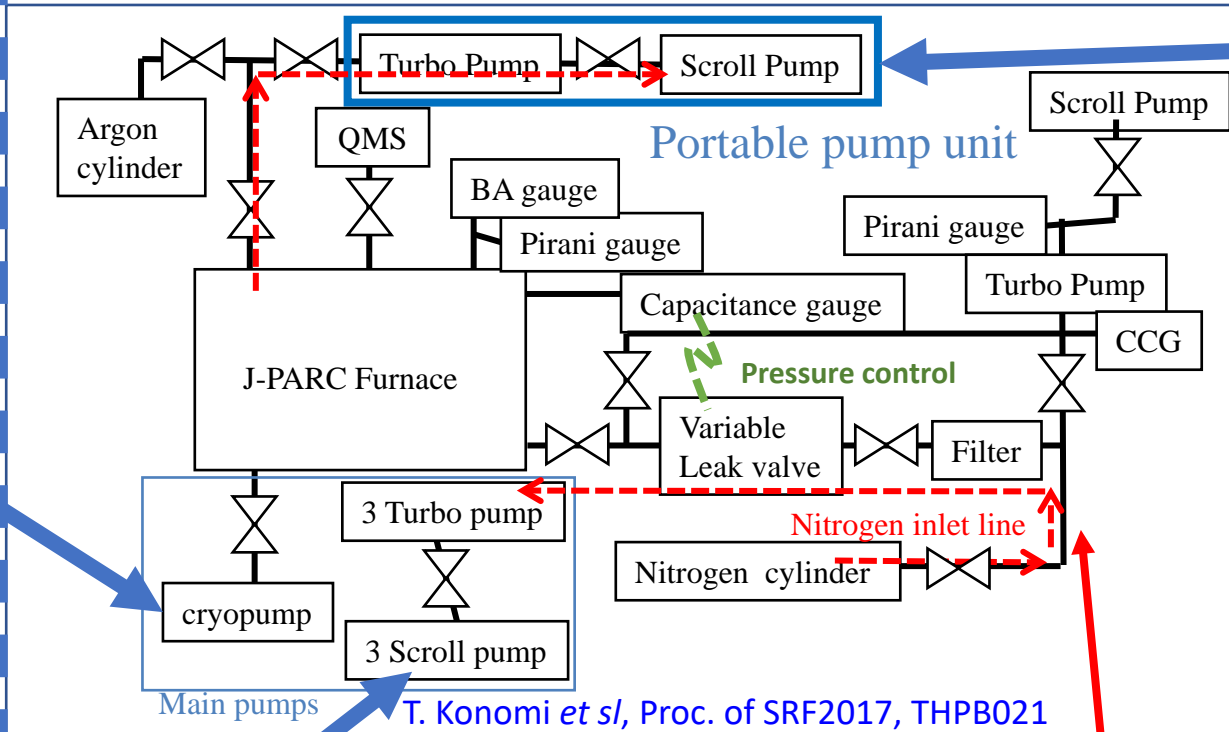


# J-PARC真空炉システム



**Cryopump**

ANELVA CAP220 (10000L/sec)

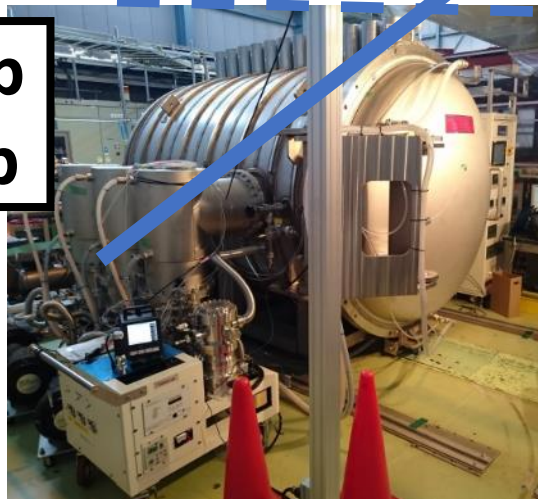


**Portable pump unit**

窒素導入時に使用

**Turbo pump  
Scroll pump**

SIMADZU TMP3202M  
(3000L/sec x3)  
ANEST IWATA ISP500  
(500L/min x3)



**Nitrogen inlet line**

G1 (99.99995 vol%)  
バリアブルリーク  
バルブで流量調整

T. Konomi et al, Proc. of SRF2017, THPB021



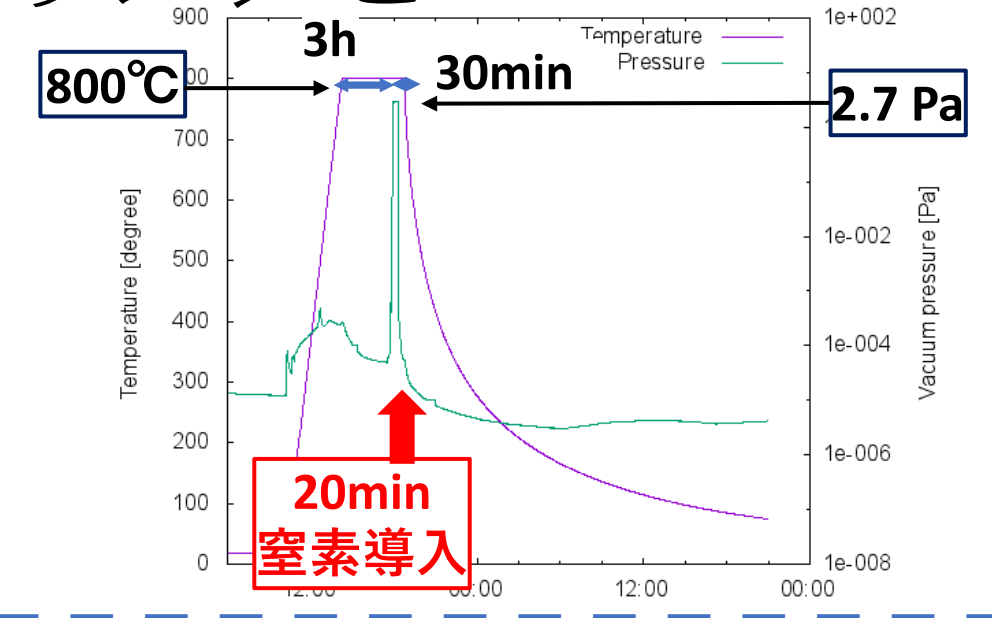
# 窒素ドーピング処理のレシピ

## Heavy Dope (Q値重視)

1セル空洞,  
Nb製Fine grain空洞

レシピ

800°C 3時間 + 2.7 Pa, 20分間の  
窒素導入 + 800°C, 30分間  
+ 15 μm EP

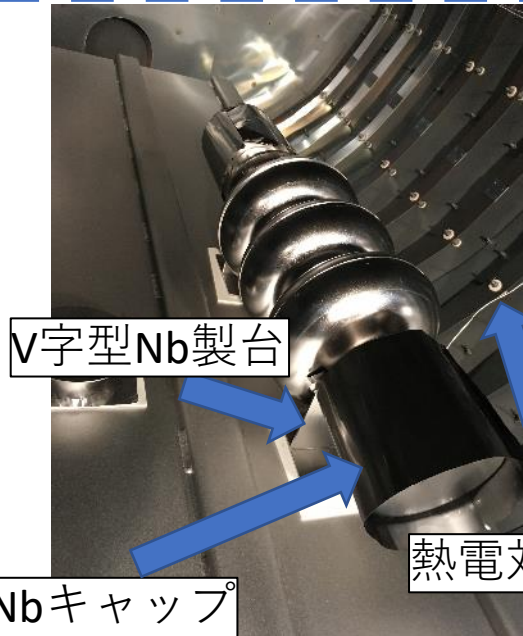


## Light Dope

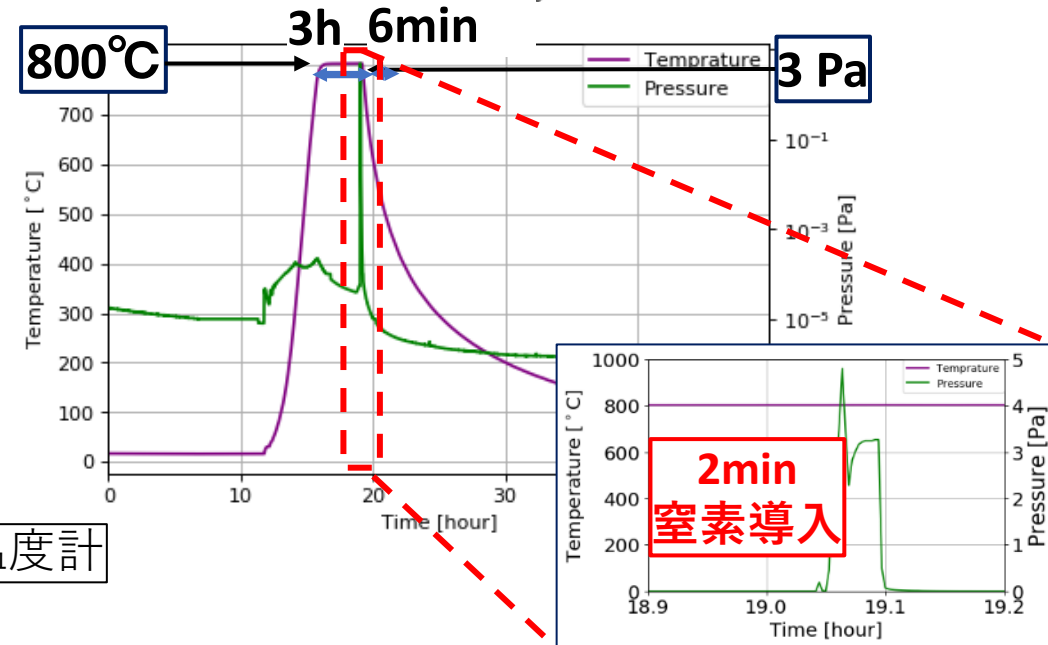
3セル空洞,  
Nb製Fine grain空洞

レシピ

800°C 3時間 + 3 Pa, 2分間の  
窒素導入 + 800°C, 6分間  
+ 5 μm EP



熱電対温度計

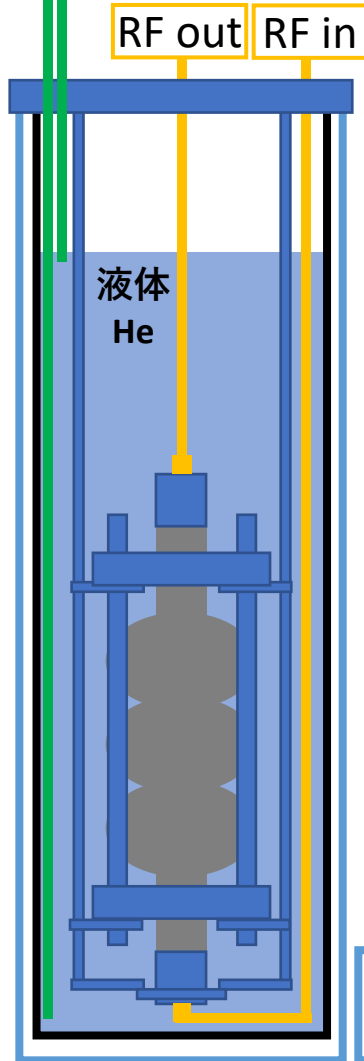


8/8/2018

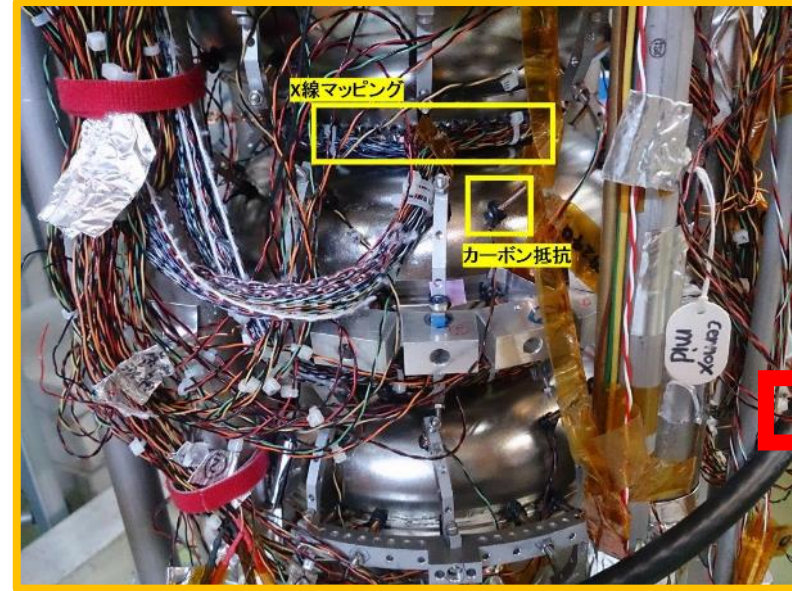
# 空洞性能の測定

# 空洞性能の測定セットアップ

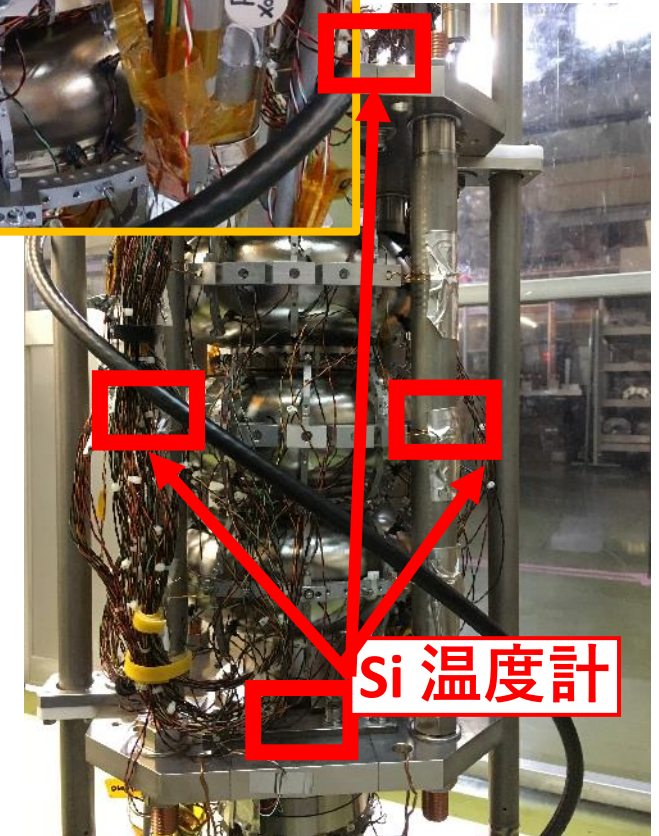
He冷却系



- 超流動Heにより2K冷却
- バリアブルカップラー
- 入射電力  $P_{in}$ , 反射電力  $P_{ref}$ , 透過電力  $P_t$
- 空洞内消費電力:  $P_{loss} = P_{in} - P_{ref} - P_t$
- Q値の測定



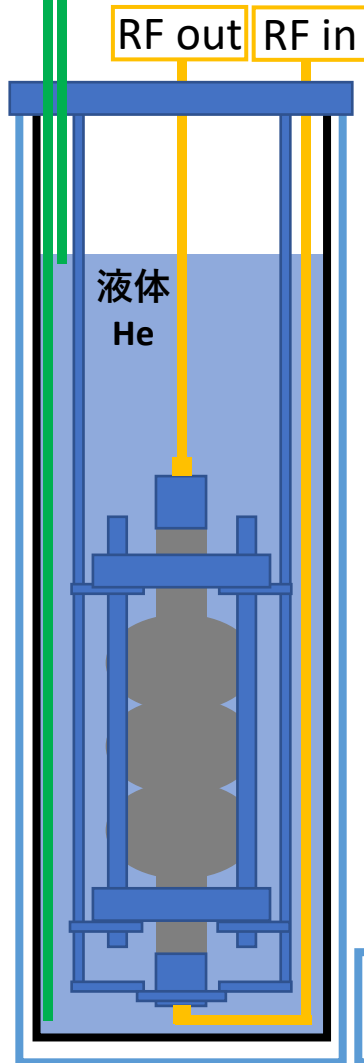
- **ビームパイプ, セル赤道にSi温度計**
- **空洞の温度測定**
- 空洞のセル部にカーボン抵抗温度計
- クエンチ箇所の特特定
- アイリス部にX線検出用PINダイオード
- フィールドエミッションの解析





# 空洞性能の測定セットアップ

He冷却系



➤ 磁気シールドは液体Heの外側

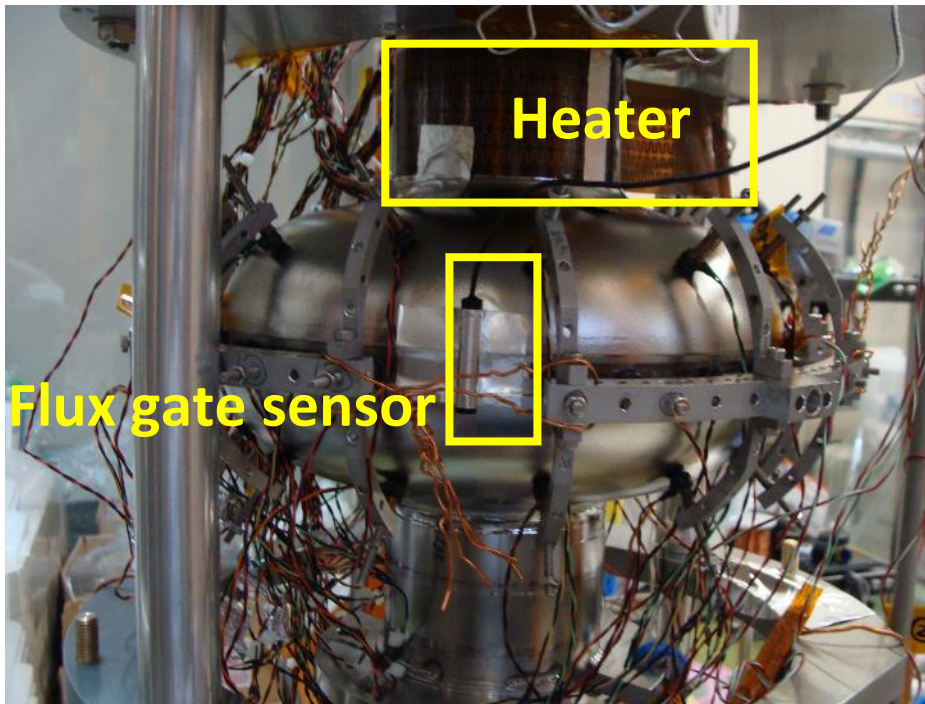
空洞が冷却されていても、遮蔽できている

➤ ソレノイドコイルを用いて、環境磁場を1 mG以下

(3セルコイルは、ジグが合わず使用していない 環境磁場 5-7 mG)

➤ セル赤道部 (2セル目) にフラックスゲートセンサー

磁気  
シールド



8/8/2018

15

# 空洞性能の測定結果

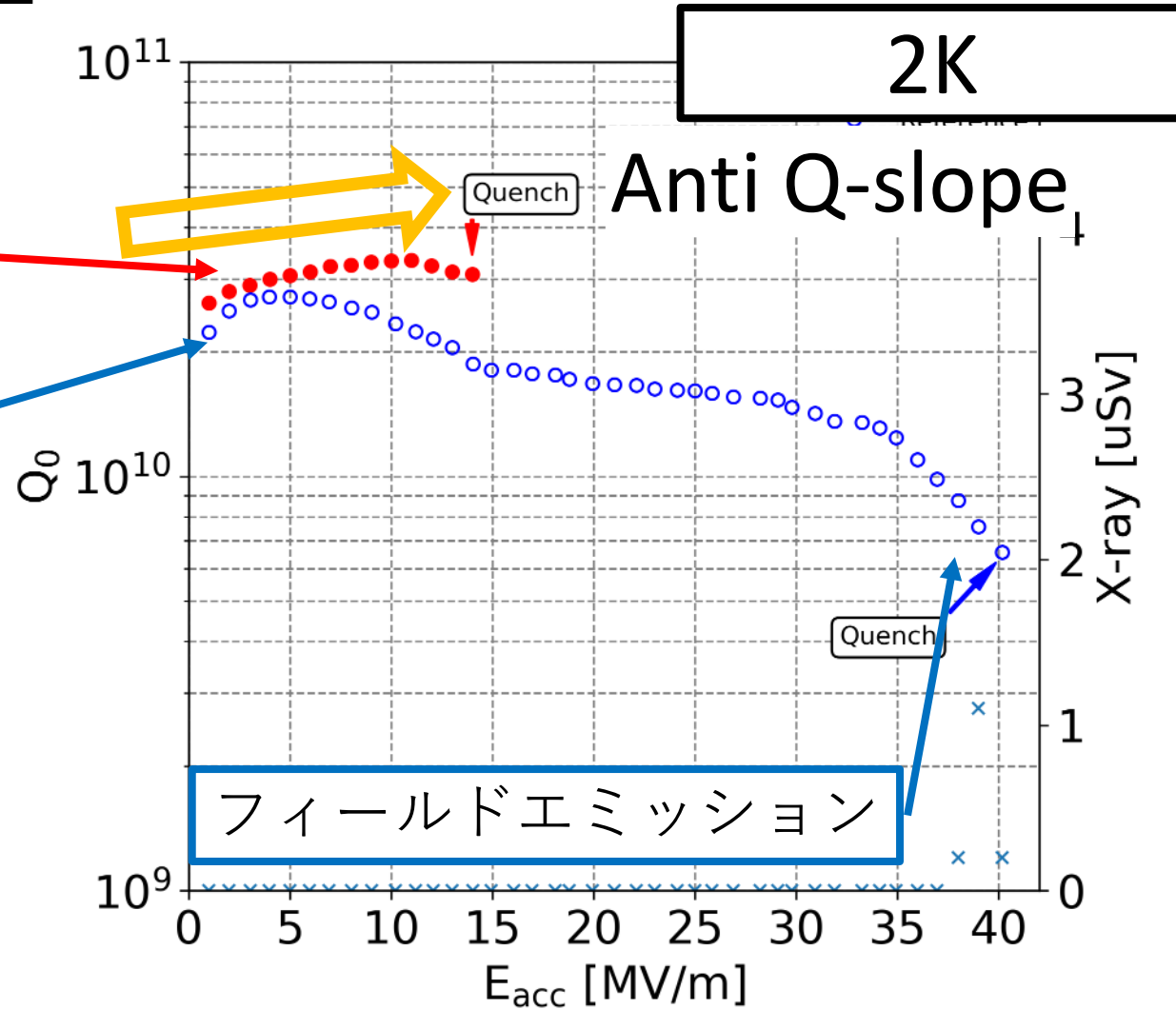
## Heavy Dope

1セル

窒素ドーピング

標準的処理

$E_{acc}$  リミットは  
局所発熱によるQuench  
Quench箇所は  
窒素ドーピング前後で異なる



Q値の向上  
Anti Q-slope

窒素ドーピング  
の成功



# 空洞性能の測定結果

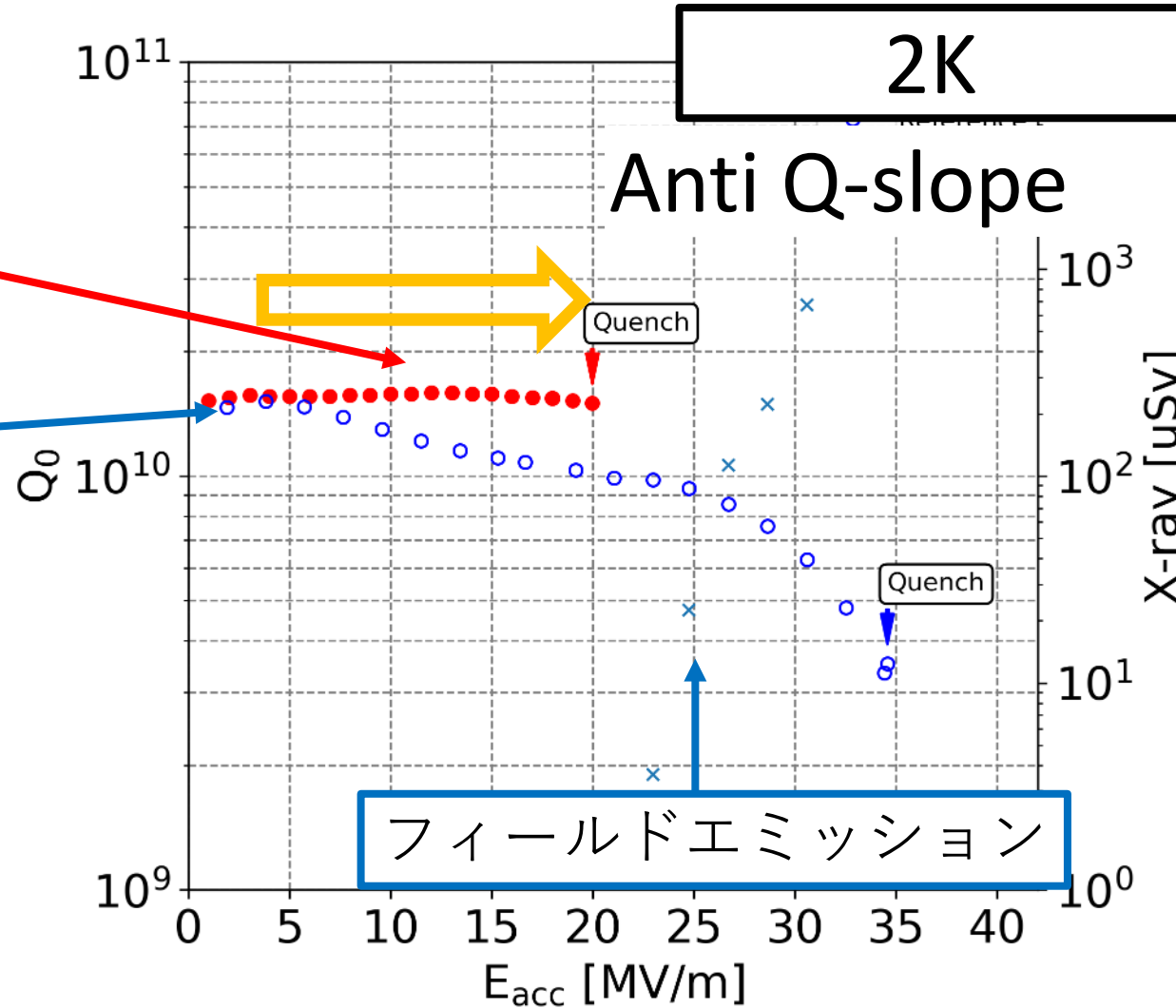
## Light Dope

### 3セル

窒素ドーピング

標準的処理

$E_{acc}$  リミットは  
局所発熱によるQuench  
Quench箇所は  
窒素ドーピング前後で異なる



Q値の向上  
Anti Q-slope

窒素ドーピング  
の成功

# 空素ドーピングのAnti Q-slope

超伝導空洞の表面抵抗

$$Q = \frac{G}{R_s}$$

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

$T$ : 空洞温度

$H$ : RF磁場

$B$ : 環境磁場

温度に依存する  
BCS抵抗

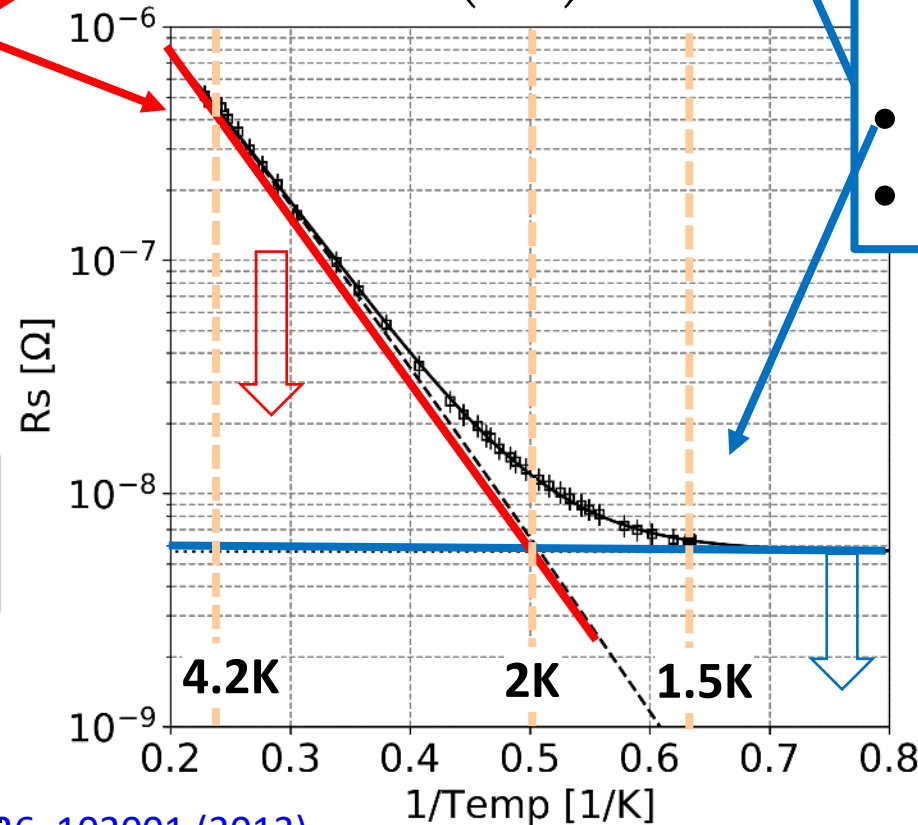
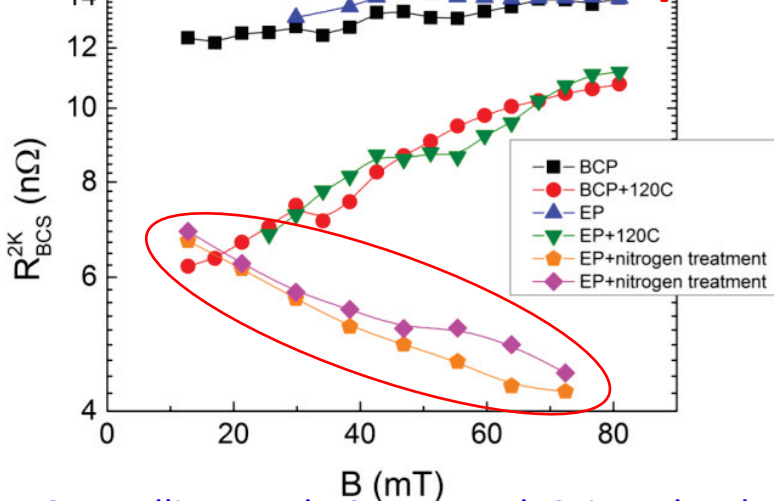
- $\omega^2$ の周波数依存
- 平均自由行程
- 超伝導転移温度

$$\frac{A}{T} \exp\left(-\frac{B}{T}\right)$$

ほとんど温度に依存しない  
残留抵抗

- 磁束トラップ
- 材料内不純物

## 空素ドーピングのAnti Q-slope



材料の不純物除去  
磁場環境の改善

# 空素ドーピングのAnti Q-slope

超伝導空洞の表面抵抗

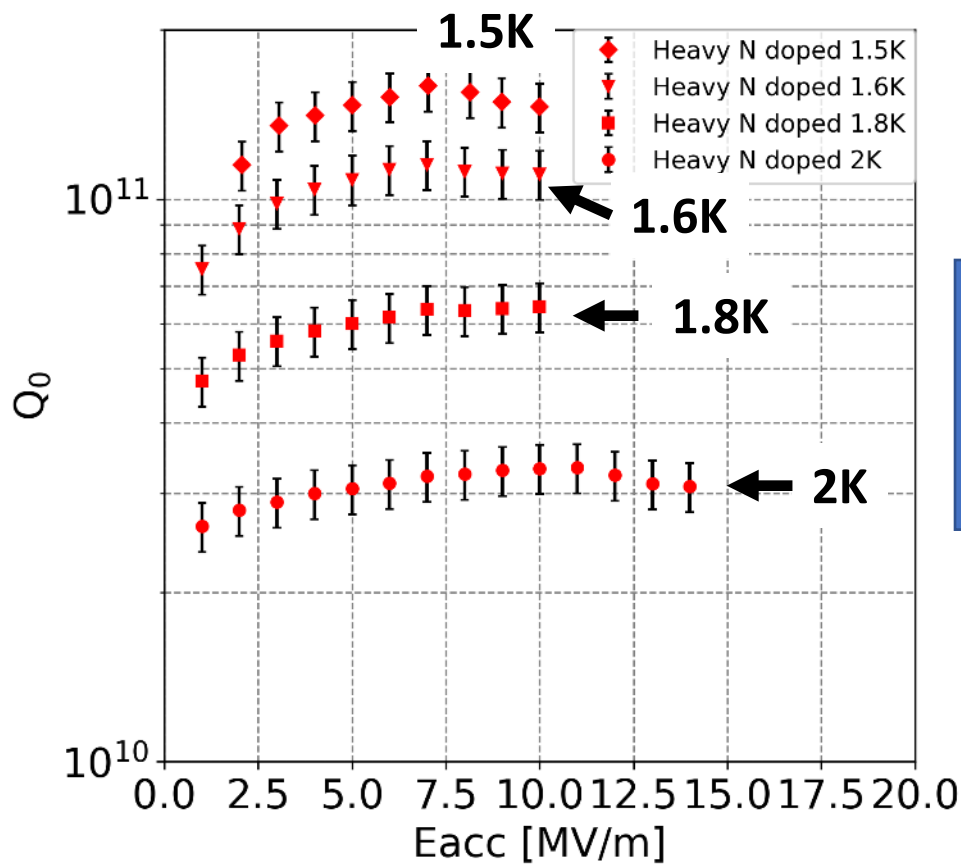
$$Q = \frac{G}{R_s}$$

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

T: 空洞温度

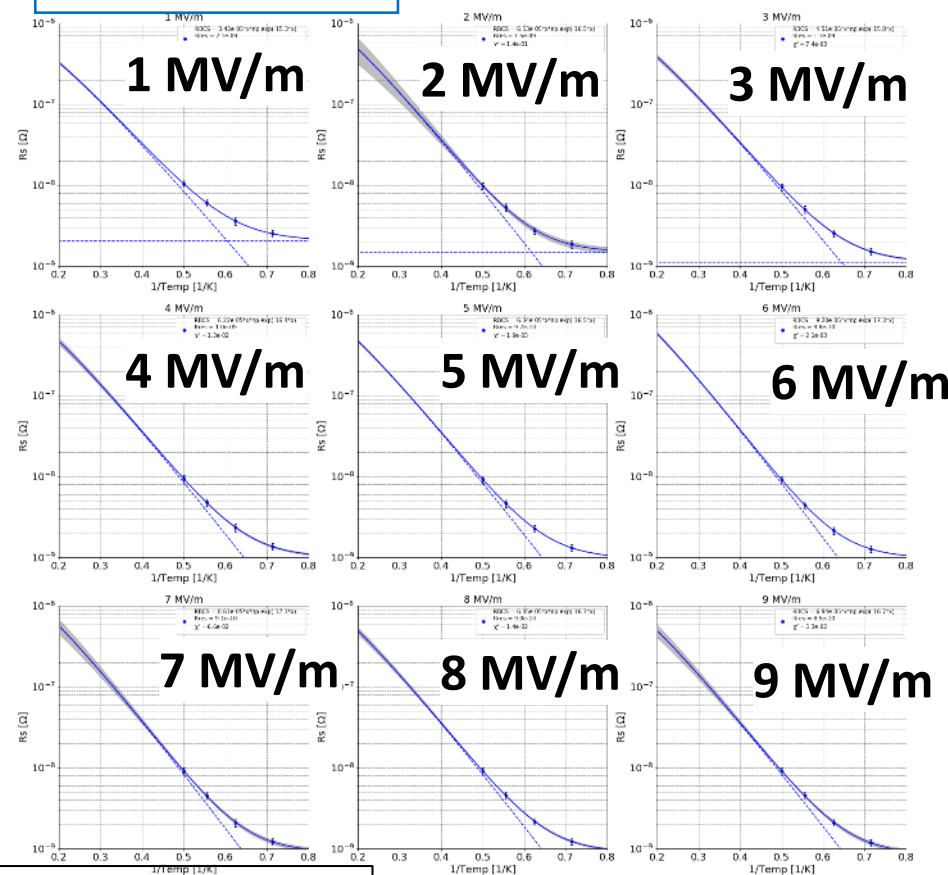
H: RF磁場

B: 環境磁場



$$\frac{A}{T} \exp\left(-\frac{B}{T}\right)$$

各加速電場に対して  
表面抵抗の  
温度依存式

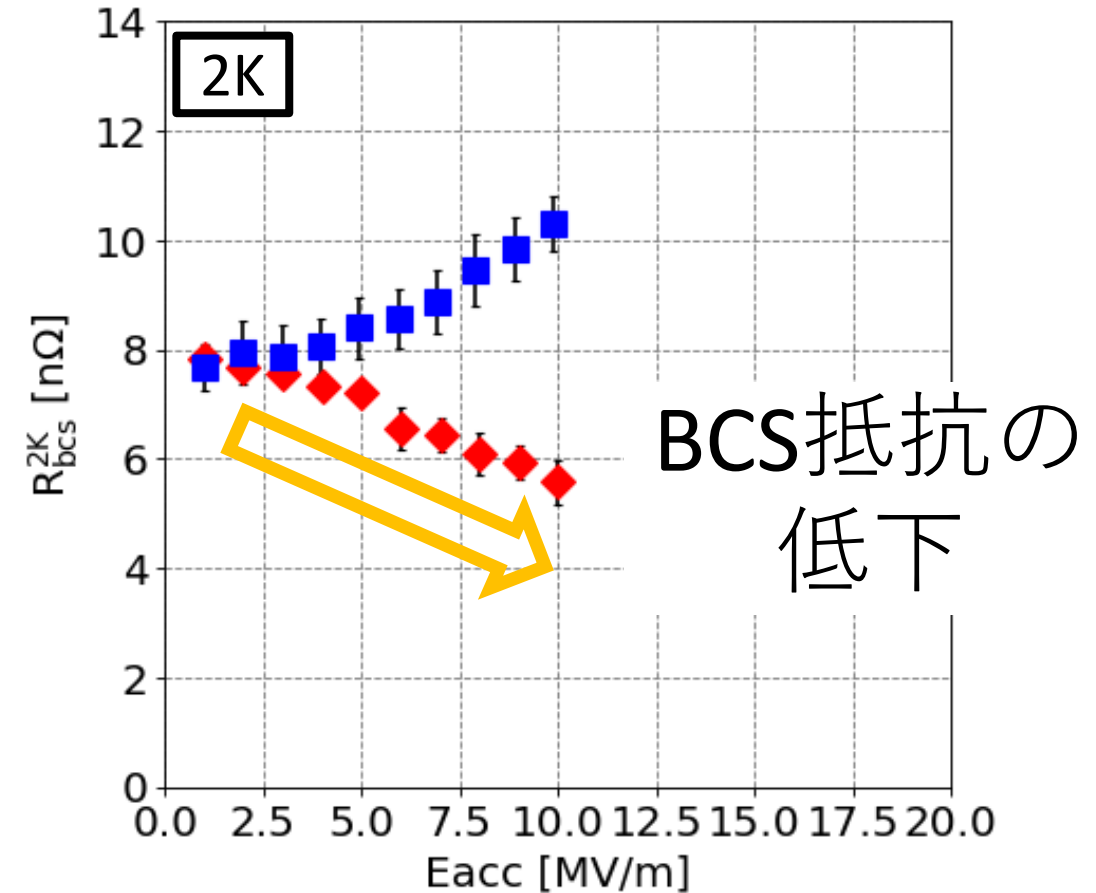
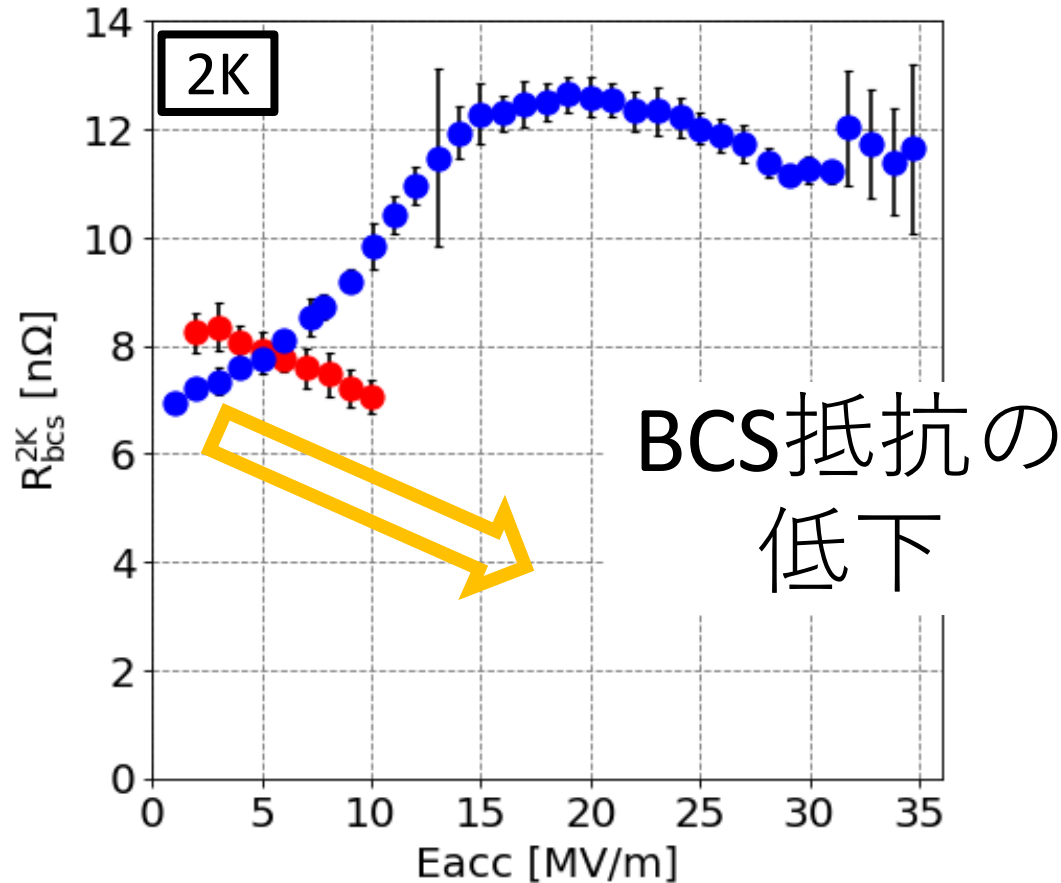


加速電場とBCS抵抗の関係を求める

# BCS抵抗の解析結果

## Heavy Dope 1セル

## Light Dope 3セル



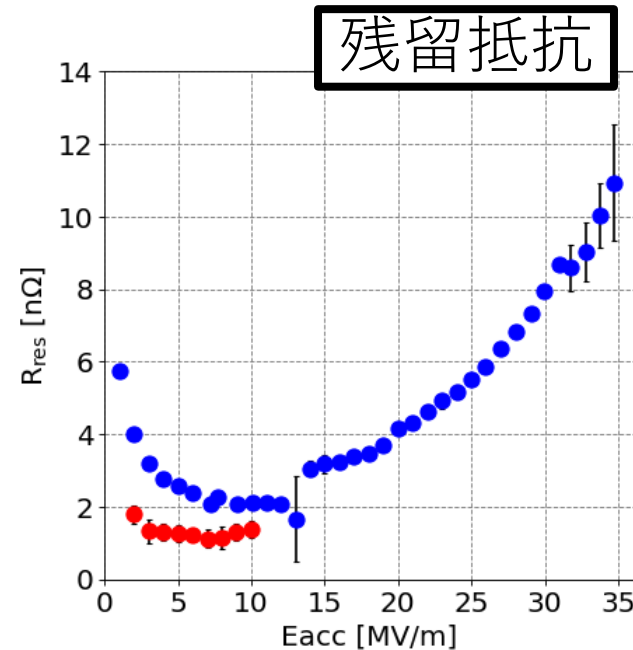
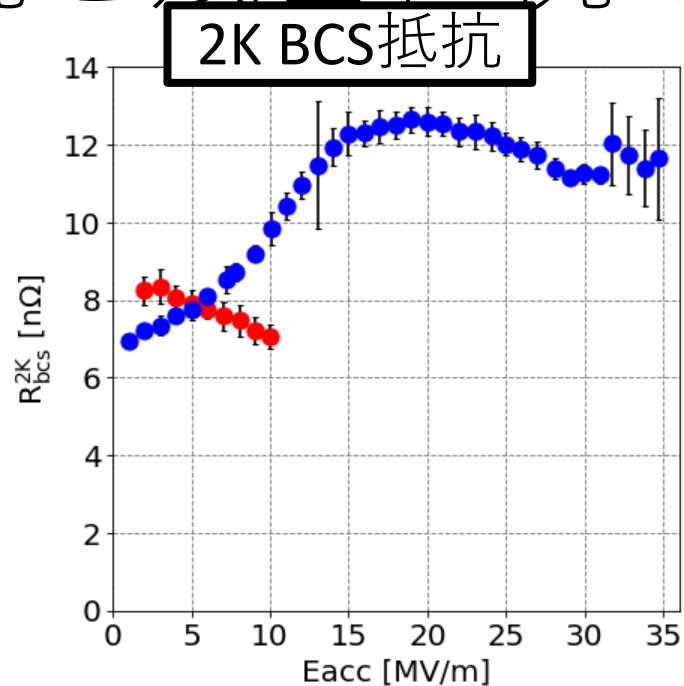
**窒素ドーピングの効果！**

# BCS抵抗と残留抵抗の解析結果

## Heavy Dope

1セル

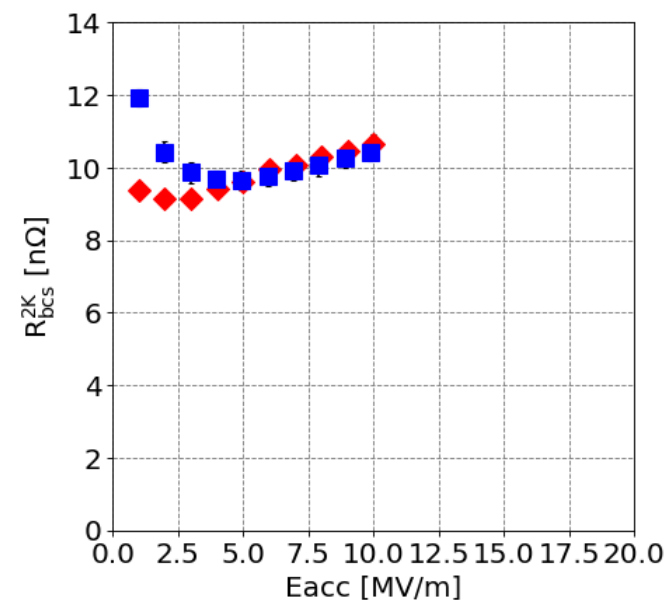
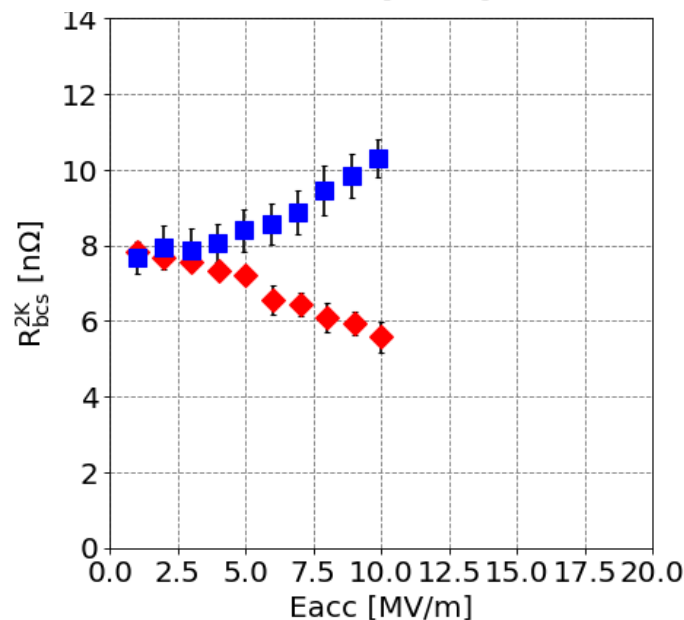
残留抵抗小さい  
(磁場キャンセル)



## Light Dope

3セル

残留抵抗大きい  
Q値が1セルと比較して  
小さい原因



# まとめ

- High-Q超伝導空洞は，冷凍機負荷を減らすために重要である
- KEKでは，KEK内の油拡散ポンプを使用した真空炉で窒素ドーピングの研究を行ったが，いずれも失敗であった。
- 今回，J-PARC内のクライオポンプを使用した到達真空度が高くクリーンな環境の真空炉を使い窒素ドーピングの検証を行った。
- Heavy, Light dopeの2つのレシピを行い，Q値が改善された。
- BCS抵抗の解析の結果，Anti Q-slopeの特徴が観測された。

今後のアクティビティ

窒素ドーピングのレシピの最適化

窒素ドーピングの超伝導特性への影響の調査



# KEK新真空炉

- クライオポンプを使用した，真空炉がKEKのCOI棟に新しく建設
- コンタミのないことが確認されている
- 標準的処理の空洞でQ値のdegradationなし
- 窒素インフュージョン，窒素ドープ用の真空炉
- 今後，この真空炉を用いて行う



8/8/2016



第15回日本加速器学会年会



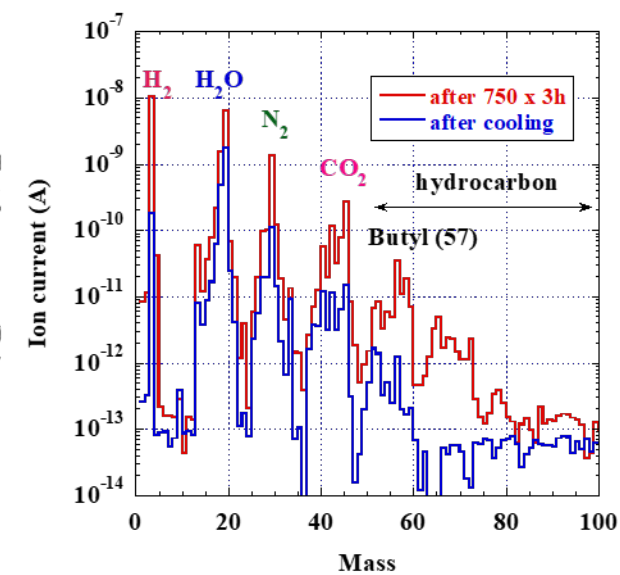
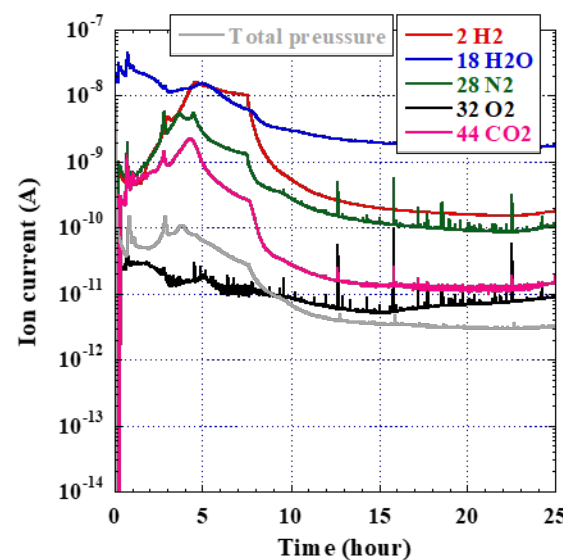
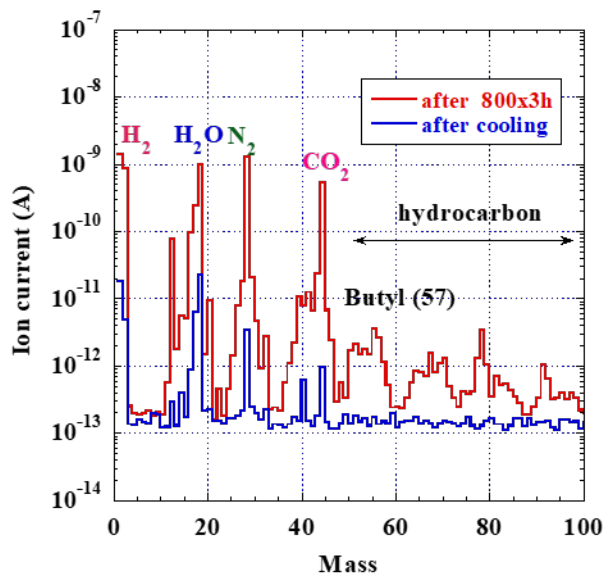
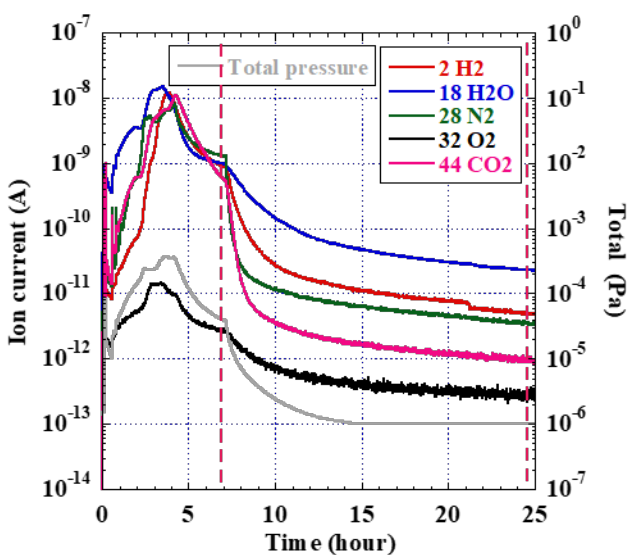
# Appendix



# J-PARC真空炉Q-MASS

J-PARC (800°C x 3h)

KEK Large (750°C x 3h)



T. Konomi, 'J-PARC真空炉を用いた超伝導空洞に対する窒素中熱処理の進捗状況'

異なる炉のQ-MASSはメーカー、キャリブレーションが異なるため比較はできない

それぞれの炉のアニール前後を比較し、J-PARC炉では炭化水素が減少している

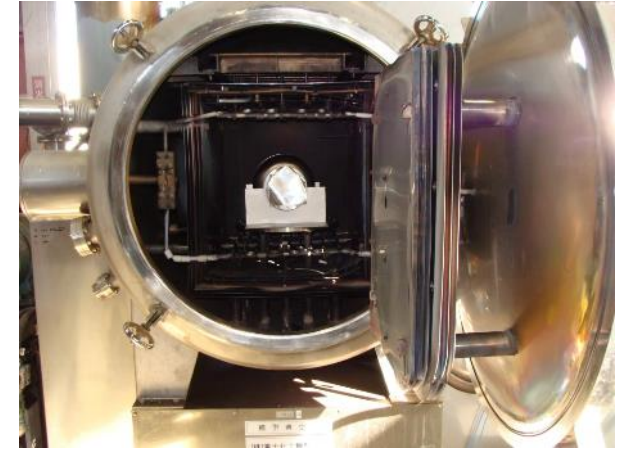
# KEKでの窒素ドーブ研究

## ➤ 小型真空炉を用いた窒素ドーブ

800°C 3時間 + 3.3 Pa, 2分間の窒素導入 + 800°C, 6分間

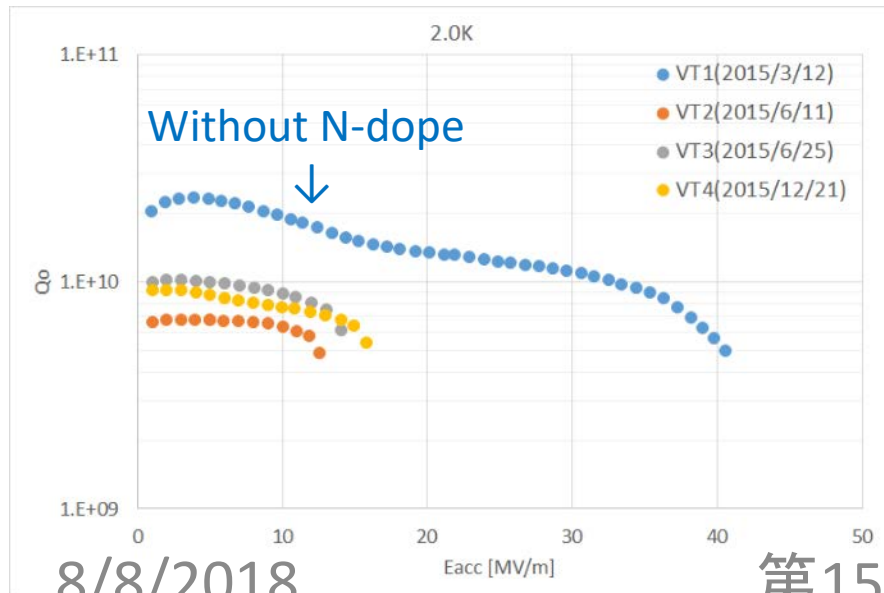
800°C 3時間 + 5.5 Pa, 20分間の窒素導入 + 800°C, 30分間

800°C 3時間 + 2.7 Pa, 20分間の窒素導入 + 800°C, 30分間



## ➤ 大型真空炉を用いた窒素ドーブ

800°C 3時間 + 2.7 Pa, 20分間の窒素導入 + 800°C, 30分間

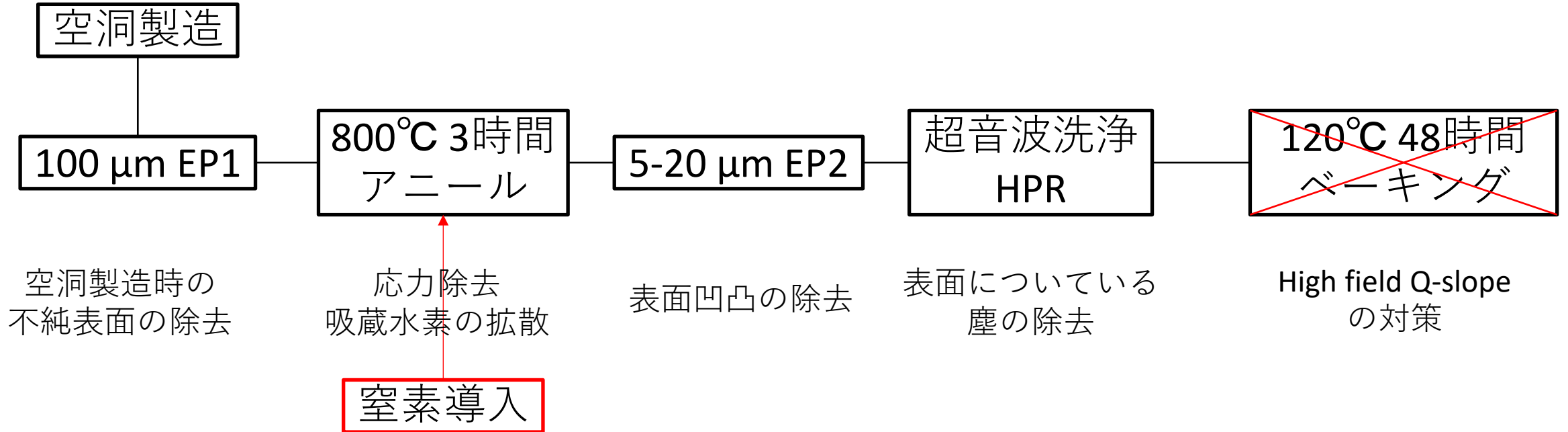


Q値の向上は観測されなかった

K. Umemori, 第13回加速器学会

# 窒素ドーピングとは

## 空洞表面処理の工程



空洞製造時の  
不純表面の除去

応力除去  
吸蔵水素の拡散

表面凹凸の除去

表面についている  
塵の除去

High field Q-slope  
の対策

800°Cアニール中に窒素を数分間導入