

## 高純度銅の低温での $Q$ 値特性試験

### PROPERTY TEST OF THE CRYOGENIC $Q$ -FACTOR FOR HIGH PURITY COPPER

飯野晃弘<sup>#, A)</sup>, 山口誠哉<sup>A, B)</sup>, 遠藤克己<sup>C)</sup>

Akihiro Iino<sup>#, A)</sup>, Seiya Yamaguchi<sup>A, B)</sup>, Katsumi Endo<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization, KEK

<sup>C)</sup> Toyama Co., Ltd.

#### Abstract

Toyama Co., Ltd, KEK and Nihon University have been developing coherent parametric x-ray radiation (PXR) source based on cryogenic electron linac. In this accelerator, it is generated PXR to be irradiated on the single crystal with electron beam of 75MeV. This accelerator is a normal-conducting compact energy recovery linac and is required high  $Q$  factor in the accelerating and decelerating structure. To obtain high  $Q$  factor, the accelerating and decelerating structure is under 20K, and we selected high purity 6N8 copper (6N8 copper) as cavity materials to exceptionally lower DC resistivity at extremely low temperature. We report measurement result and calculation result of residual resistance ratio (RRR) for 6N8 copper and Oxygen-free copper (Class 1), and those of  $Q$  factor for pillbox cavity made of 6N8 copper and of Class 1 in this paper.

#### 1. はじめに

現在、高エネルギー加速器研究機構、株式会社トヤマ及び日本大学を中心とした産学官共同でクライオ電子リニアックを基盤とするコンパクト空間干渉性 X 線(PXR)源の開発を行っている[1]。この X 線は位相が揃っており集光可能である。さらにその透過光はコントラストに優れ、生体軟組織の内部構造を従来に比べ鮮明に映すという特性があるので、X線集束を利用した3次元照射によるがん治療や、医療診断に応用することが期待できる。従来の放射線によるがん治療では、正常な周辺細胞への殺傷性の少ない特性(ブラッグピーク特性)を持つ陽子線や炭素線が使用されてきたが、PXRによる3次元照射

とし、PXR 源となる C バンド加速器のコンパクト化、漏えいする放射線強度の低レベル化等の医療応用へ向けた技術課題を踏まえ、加速器にはエネルギー回収型クライオ電子リニアックが考案された。開発中の加速器の概要図を図 1 に示し、加速管の基本仕様を表 1 に示す。本加速器開発においては、小型化のためビームエネルギーを減速管で 5MeV 以下にして放射線シールドを少なくする事や、極低温に冷却すると電気抵抗が著しく小さくなる特性を持つ超高純度銅材(純度:6N8、以下 6N8 銅)で加源速管を製作し、20K 程度の低温で運転をすることで、高い加速電界を実現し加減速管の長さを短くでき、さらにビームエネルギーを回収するために十分に高い  $Q$  値を得ようと試みる。

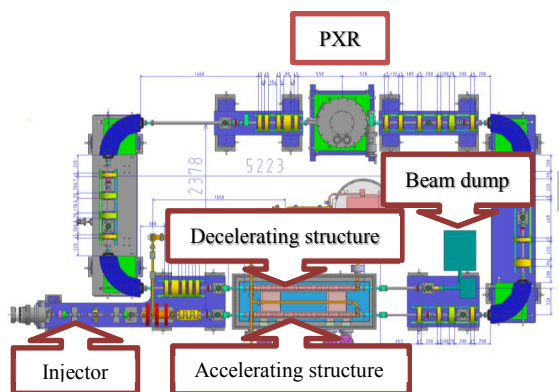


Figure 1: Schematic of the accelerator in development.

は単位面積当たりの X 線束数が減少し正常な周辺細胞に対しがん細胞への相対放射線量比が従来と比較し圧倒的に高くなると考えられており、卓越した医療効果を期待できる。

この開発では、日本大学で研究開発した PXR を基礎

Table 1: Parameters of New Accelerating Structure

Beam energy	75MeV
Structure length	1.3m
Average $E_{acc}$	57.7MeV/m
Resonance frequency	5712MHz
Working temperature	20K
Shunt impedance	300M $\Omega$ /m
Accelerating mode	Traveling wave
Phase advance per cell	$2\pi/3$

本件では、上記プロジェクトに向けて 6N8 銅材の極低温で残留抵抗(電気抵抗)が小さくなる程度を示す指数である残留抵抗比(RRR: Residual Resistivity Ratio)の測定結果及び、6N8 銅材の  $TM_{010}$  モードのピルボックス空洞の極低温での  $Q$  値と RRR の関係を計算と測定より求め、得られた結果を一般的な加速管材料として用いられる無酸素銅(以下 class 1 銅)のものと比較した。

<sup>#</sup> aiino@post.kek.jp

## 2. RRR と $Q$ 値の計算

### 2.1 RRR の計算

RRR と  $Q$  値の関係について算出は以下の手順で行った。NIST(National Institute of Standards and Technology)に記載されている高純度銅の熱伝導率のデータより、Wiedemann Franz 則を基に極低温から常温までの温度領域の電気伝導率  $\sigma$ 、電気抵抗率  $\rho$ 、平均自由行程  $\ell$  を算出した。その後、異常表皮効果が考慮され電子散乱を拡散反射するモデルとした G.E.H.Reuter と E. H. Sondheimer の理論式[2]より  $\sigma$  に依存する表面抵抗  $R_s$  を求め、 $Q$  値を算出した。この理論式で算出された  $R_s$  の電気伝導率依存性が実験値とよく一致する事は複数の文献で確認されている [3]。周波数が 2856GHz、5712GHz、8568GHz、11424GHz の時、この理論式より算出した  $\sigma$  と  $R_s$  の関係を図 2 に示す。なお  $\sigma^{1/2}$  が 400000 の時、 $R_s$  は 1 となるように規格化されている。また RRR は式(1)より定義され、極低温での電気伝導率に比例する。

$$RRR = \frac{\rho(300K)}{\rho(4K)} = \frac{\sigma(4K)}{\sigma(300K)}. \quad (1)$$

図 2 より、いずれの周波数でも、電気伝導率が RRR100 相当の 4K での電気伝導率  $\sigma(4K)$  と同程度である時、 $1/R_s$  の増加が緩やかになる。そして電気伝導率が RRR500 以上となる  $\sigma(4K)$  と同等の時、 $1/R_s$  は飽和することが分かる。

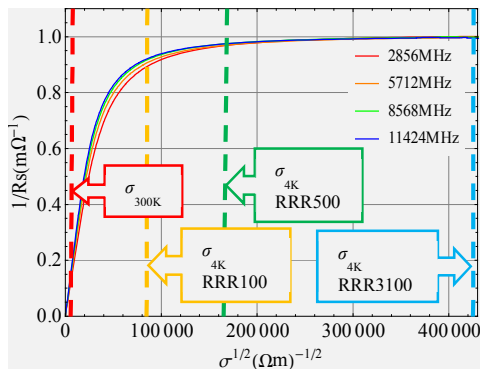


Figure 2: DC conductivity dependence of surface impedance of copper.

### 2.2 $Q$ 値の計算

TM<sub>010</sub> ピルボックス空洞の  $Q$  値は、式(2)の関係より求められる。ここで、 $\omega$  は角振動数、 $\mu_0$  は真空の透磁率、 $r$  は空洞内径、 $L$  は空洞内長さである。

$$Q_0 = \frac{\omega W}{P} = \frac{\omega \mu_0}{2R_s} \frac{rL}{(L+r)}. \quad (2)$$

式(1)、式(2)、図 2 より、周波数が 2856GHz、5712GHz、8568GHz、11424GHz についてそれぞれピルボックス空洞( $r=40.176\text{mm}$ ,  $L=100\text{mm}$ )の 300K での  $Q$  値に対する

20K での  $Q$  値 ( $Q_0(20K)/Q_0(300K)$ ) と RRR の関係を図 3 に示す。図 3 より、2856GHz、5712GHz、8568GHz、11424GHz の周波数ともに RRR500 以下では RRR が高くなるに連れて  $Q_0(20K)/Q_0(300K)$  は高くなっていくが、RRR500 以上では、 $Q_0(20K)/Q_0(300K)$  は飽和し一定となった。C バンドの場合では、RRR500 以上で  $Q_0(20K)/Q_0(300K)$  は 5.3 倍になった。この結果より、RRR を 500 より高くしても 20K で  $Q_0$  は高くなり一定であると考えられる。また  $Q_0(20K)/Q_0(300K)$  が飽和する原因は以下のように考えられる。電子の平均自由行程が RF の侵入する表皮深さより短い常温付近では、RF により生じた表面電子は表皮内で散乱され電気伝導に寄与するので、電気伝導率が増大すると表面抵抗は小さくなる。しかし極低温では異常表皮効果により、RF により生じた表面電子の平均自由行程が表皮深さより十分に長くなり、一部の電子が銅内部へ伝搬するようになる。このため表面電子の平均自由行程が長くなると表面電流に寄与する電子数はしだいに飽和し一定となる。この結果、異常表皮効果が表れる極低温では電気伝導率が高くなると表面抵抗は減少しやがて一定となる。RRR は極低温での電気伝導率に比例し、 $Q$  値は表面抵抗に反比例するので、RRR が高くなると  $Q$  値はしだいに飽和し一定となる。また図 3 は、極低温での電気伝導率が RRR500 以上に対応する時、異常表皮効果が顕著に表れると考えられる。

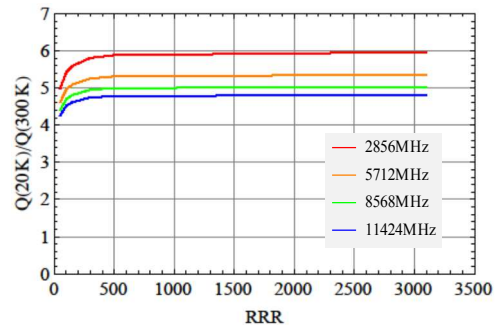


Figure 3: RRR dependence of  $Q_0(20K)/Q_0(300K)$ .

## 3. RRR と $Q$ 値の測定

### 3.1 RRR の測定

RRR と  $Q$  値の測定では、まずピルボックス空洞の材料となる高純度銅材の RRR を測定し、その後製作したピルボックス空洞について常温から極低温までの  $Q$  値の温度依存性の測定を行い、 $Q$  値と RRR の関係を求める。RRR の測定値では、式(1)より、極低温と常温での電圧の測定値よりそれぞれの電気抵抗率  $\rho$  を求め算出した。本測定では、4端子法を用い、Keithley Model 2401 Low Voltage SourceMeter Instrument と Nanovoltmeter 2182A との組み合わせによるデルタモードで計測した。RRR10,000 の試料でも極低温時の測定で十分な電圧測定感度を得られるように、電流を 1A、試料サイズを断面  $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ 、長さ  $100\text{mm}$  に選定した。図 4 にクライオスタット内へ設置する前の銅材試料設置状況を示す。RRR

の測定では、6N8 銅材と class 1 銅材について行った。両材料とも 300°C、500°C、700°C、900°C でそれぞれ 3 時間のアニール処理を施したものを測定した。 $\rho$  の温度依存性を図 5 に示す。次に 300K での抵抗率と 20K での抵抗率の比 ( $\rho(300K)/\rho(20K)$ ) のアニール処理温度 ( $T_a$ ) 依存性の測定結果を図 6 に示す。

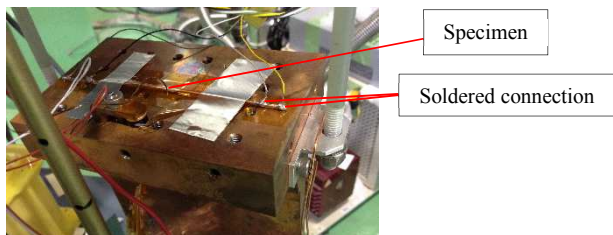


Figure 4: Layout of the DC conductivity measurement for 6N8 copper and class 1 before setting in cryostat.

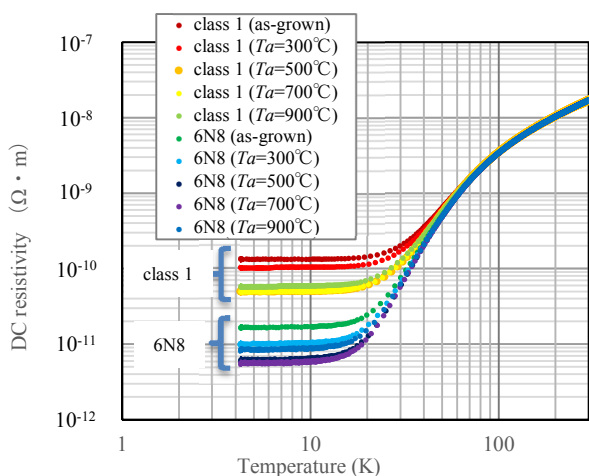


Figure 5: Annealed temperature dependence of DC resistivity.

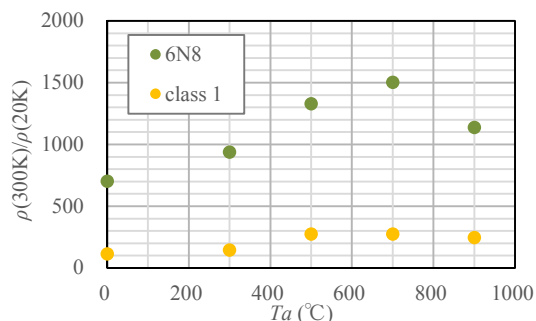


Figure 6: Annealed temperature dependence of  $\rho(300K)/\rho(20K)$ .

図 6 より、 $\rho(300K)/\rho(20K)$  は class 1 銅では最大 300 程度が得られ、6N8 銅では最大 1500 程度が得られた。そして  $T_a$  が 700°C の時、 $\rho(300K)/\rho(20K)$  は最も高くなった。この原因はアニール処理を施すと、材料内部で応力が除去される。そして応力が減少した材料内部では結晶性が高くなるので、結晶欠陥に起因する残留抵抗

が減少し RRR が高くなることが考えられる。また  $T_a$  が高い方が原子運動は活性であるので応力除去の効果は高くなるが、 $T_a$  が高すぎると、結晶粒は肥大し高結晶性化の効果は薄くなると考えられる。

### 3.2 Q 値の測定

2 章で Q 値を計算したサイズと同様のpillbox空洞を 6N8 銅材と class 1 銅材で製作した。なお本空洞の接合には熔融温度が約 900°C である金ロウにて真空ろう付けを行った。図 7 にクライオスタット内へ設置する前のpillbox空洞の Q 値測定状況を示す。6N8 銅材空洞の Q 値の温度依存性の測定結果を図 8 に示し、class 1 銅材空洞の Q 値の温度依存性の測定結果を図 9 に示す。次に 300K での Q 値に対する各温度での Q 値の比 ( $Q_0(T)/Q_0(300K)$ ) について、これらの空洞の測定結果と計算結果を図 10 に示す。また  $Q_0(20K)/Q_0(300K)$  と RRR の関係を図 11 に示す。 $Q_0(20K)/Q_0(300K)$  について、6N8 銅材空洞では 5.2 あり、class 1 銅材空洞では 4.8 であった。これらの値は共に計算値と比較し数%程度低い値である。これらの結果より、class 1 銅材から 6N8 銅材まで RRR を高めると、 $Q_0(20K)/Q_0(300K)$  は高くなり、やがて一定になると考えられる。

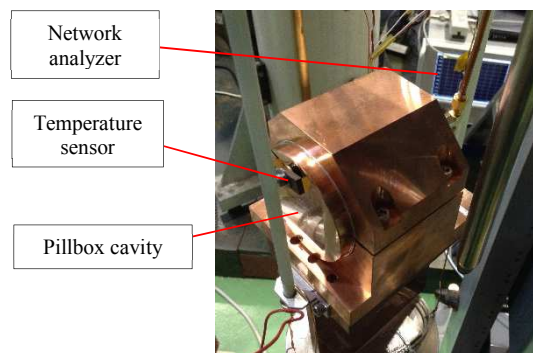


Figure 7: Layout of the Q factor measurement for the pillbox cavity before setting in cryostat.

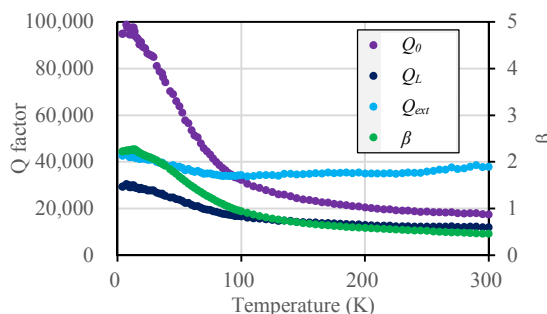


Figure 8: Temperature dependence of Q-factor for 6N8 copper.

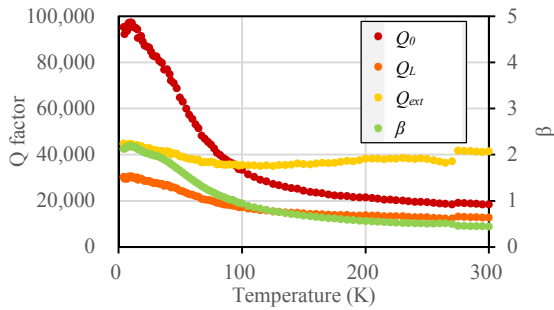


Figure 9: Temperature dependence of Q-factor for class 1 copper.

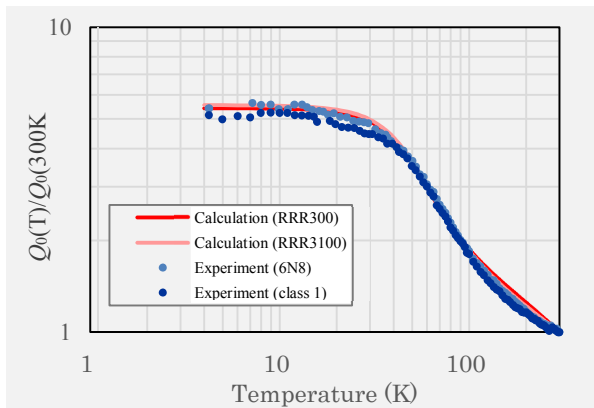


Figure 10: Temperature dependence of  $Q_0(T)/Q_0(300K)$ .

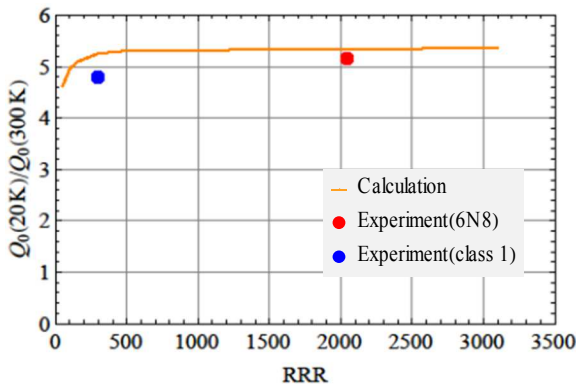


Figure 11: RRR dependence of  $Q_0(20K)/Q_0(300K)$ .

#### 4. まとめ

これまでの計算及び測定結果より、RRR500 相当の電気伝導率以上では加速管運転温度である 20K での  $Q$  値は飽和することが明らかになった。class 1 銅より RRR が高い材料では 20K での  $Q$  値は十分高くなるが、6N8 銅より RRR を高くした材料では 20K での  $Q$  値は飽和し変化しないことが予想され、6N8 銅は本加速管に適した材料と考えられる。また、 $\rho$  の測定結果より、熱履歴の温度が  $700^{\circ}\text{C}$  に近いほど  $\rho(300\text{K})/\rho(20\text{K})$  が高くなるので、より高い  $Q$  値を得るためには接合温度やアニール処理温度は  $700^{\circ}\text{C}$  に近いほど良いと考えられる。

#### 謝辞

RRR 測定にあたり、KEK 機械工学センターの井上均氏及び日本アドバンステクノロジー株式会社 植木竜一氏に大変なご尽力を頂きました。深く感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] I. Sato, et al., "Developments of Coherent X-ray source based in cryogenic electron Linac" Proceedings of the 11<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2014).
- [2] G. E. H. Reuter and E. H. Sondheimer, Proc. R. Soc. London, A 195(1948),336-364.
- [3] W. Weingarten, CAS RF engineering for particle accelerators, CERN 92-03, p.318 (1992).