

銅合金を用いた SuperKEKB 陽電子源用フラックスコンцентрレータ A NEW FLUX CONCENTRATOR MADE OF CU ALLOY FOR THE SuperKEKB POSITRON SOURCE

榎本嘉範、阿部慶子、岡田尚起、高富俊和

Yoshinori Enomoto*, Keiko Abe, Naoki Okada, Toshikazu Takatomi

KEK

Abstract

A Flux Concentrator (FC) made of Cu alloy was developed to avoid discharge problem caused by deformation. The alloy has 40 times higher yield strength than that of Oxygen free copper (OFC) after brazing process. Evaluation results of several alloys are described from brazing, mechanical and electrical point of view. Manufacturing process including heat treatment are shown in the following section. Consideration on increase of Ohmic heat due to higher resistance is discussed in detail. The alloy will be a candidate to replace OFC in some application where brazing is necessary and higher yield strength and good electrical conductivity are required.

1. はじめに

Flux concentrator (FC) はターゲットで生成された陽電子を効率的にキャプチャーするための Adiabatic Matching Device (AMD) の一種であり、大強度陽電子源においてキーとなるデバイスである。元々は 1980 年代に SLAC の SLC プロジェクトで開発されたもの [1-4] であるが、KEK 電子陽電子入射器では SuperKEKB で必要とされる大量の陽電子 [5] をリングへ入射するために、これまで KEKB で使われていた Quarter Length Transformer (QWT) 方式の陽電子源 [6] に変わって FC 方式の陽電子源 [7] を導入することとなった。Figure 1 に SuperKEKB の陽電子源の断面図を、Fig. 2 に主要部の写真を示す。陽電子のキャプチャー効率を上げるためにはより強い磁場が望まれるため、FC には設計定格で 12 kA のパルス電流 (half sine 形状で数 μ s 幅) を流す予定でいた。しかしながら、電流を上げていくとそれに伴って、電圧もあがり、0.2 mm しかないコイル巻線間のスリットで放電が起こるようになる。特に大きな放電があった後で外観を観察すると、Fig. 3 に示すように放電痕が生じ、スリットの幅も狭くなっている。この状態になると、定格電流での運転はできない。運用を開始した 2015 年より、長年この問題に悩まされてきたが、機械的特性の優れた新たな銅合金材料を用いることによって、問題を解決することができた。本稿ではその詳細について説明する。

2. 材料評価

2.1 材料に要求される特性

従来の FC は無酸素銅 (C1020) を用いて作られてきた。FC の製作はまず無酸素銅の円柱から内面をテーパ状加工し、外周側面にはパイプを埋める溝を掘る。次に銅パイプを円柱外周にロウ付けし、最後に放電加工にてスパイラル状にブロックを切る事によって完成となる。したがって (1) ロウ付け性

が良いことが要求される。また前章で見たように変形を防ぐため、(2) 高い機械的特性を有している必要がある。加えて大電流を流すので、(3) 電気抵抗が小さく熱伝導率が高いことも望まれる。無酸素銅は (1) と (3) の条件を満たしている。一方 (2) については条件にもよるが、ロウ付け後の無酸素銅の耐力は一般に高いとは言えない。そのためより高い耐力をもちつつ、ロウ付けも可能で、電気抵抗もある程度小さな材料として銅合金に着目し、各種性能を評価することにした。今回具体的に評価した合金は CuCr (SH-1)、CuZr (SH-2)、CuNiSi (NC50) の 3 種類と比較対象用の無酸素銅 (C1020) である。

2.2 ロウ付け性の評価

ロウ付け性の評価として、各材料の切板の上にロウ材をワイヤーで固定し、真空炉でロウ付け時と同様の加熱を行った時のロウの流れ具合を観測した。ロウ剤は銀ロウ (BAg-8) とパラジウムロウ (BPd-4) の 2 種類をテストした。Figure 4 に結果を示す。SH-1、SH-2 はいずれのロウ剤も流れが悪く、しかも表面が合金成分の析出のためか変色してしまった。一方 NC50 は C1020 と同等の良好なロウ付け性を示した。

2.3 機械的特性の評価

機械的特性の性能評価試験として JIS Z2241 4 号試験片による引張試験を行った。C1020 (黒) と NC50 (赤) について得られた応力ひずみ線図を Fig. 5 に示す。また合わせて、Table 1 に SH-1、SH2 も含めた各材料の硬さ、引張強度、伸び、耐力を電気伝導率と合わせて示す。電気伝導率は Ether NDE の sigma check を用いて測定し International Annealed Copper Standard (IACS) を単位として表示している。それぞれの材料に関して、ロウ付け前後の特性を見るために、ロウ付け時と同等の加熱を行う前と後の材料を用意し測定を行った。C1020 の加工前の耐力は 322.3MPa であるが、ロウ付けに伴う加熱により、12.9MPa まで低下する。一方 NC50 では加工前の耐力は 551.8MPa と C1020 より高い値を示しており、ロウ付け相当の加熱後でも 109.7MPa と C1020 に比べて約 8 倍の値を保っている。さらに重要なことはロウ付け後に時

* yoshinori.enomoto@kek.jp

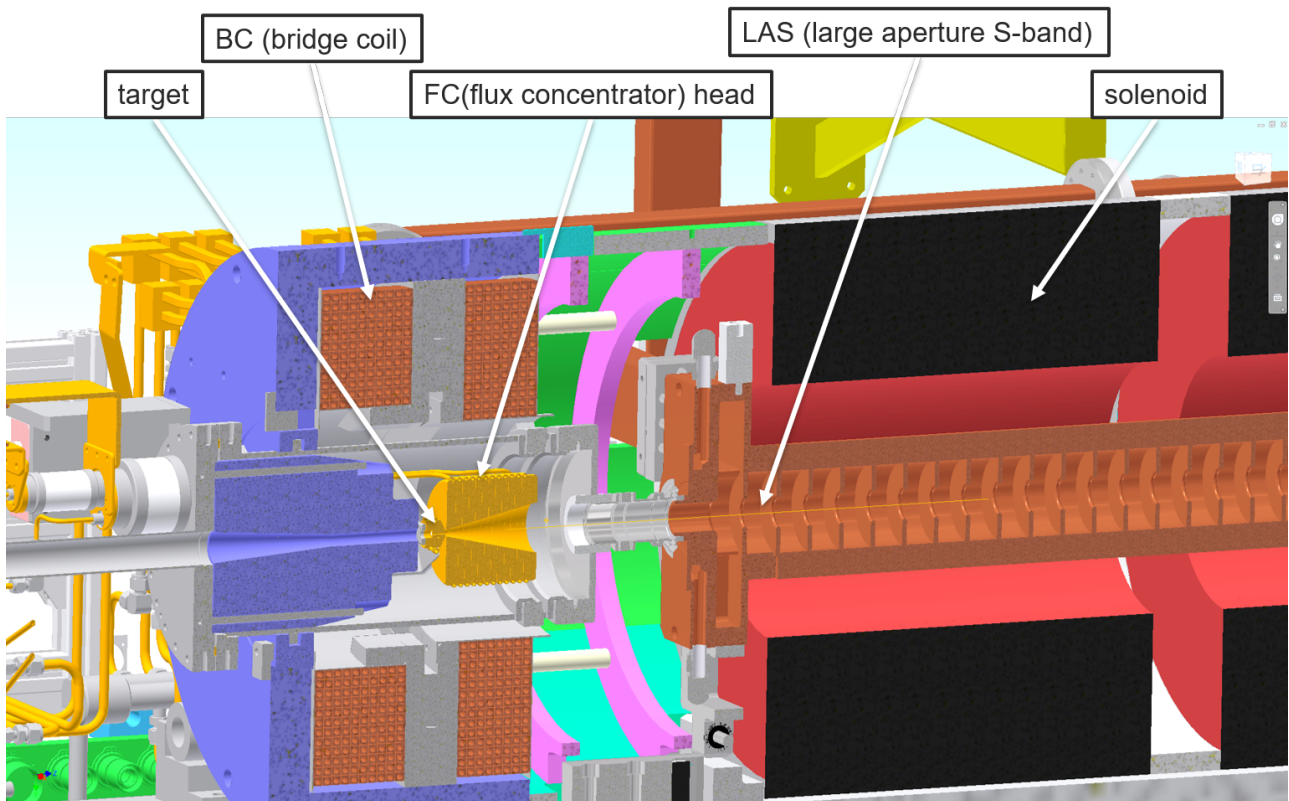


Figure 1: Cross sectional view of the SuperKEKB positron source.



Figure 2: Flux Concentrator (FC) mounted on a vacuum flange with several components. Red arrow shows electrical connection point to the FC.

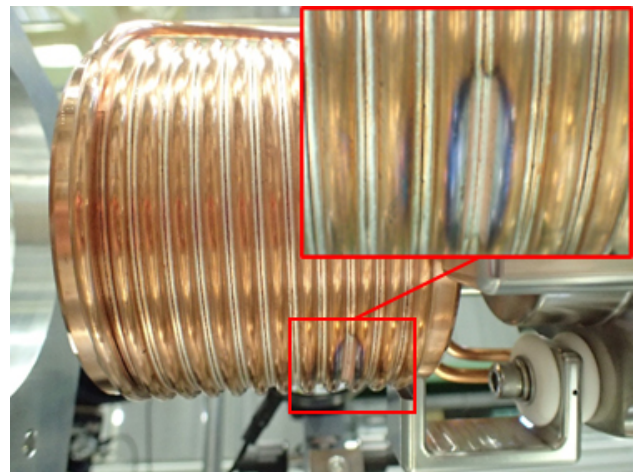


Figure 3: Discharge mark after a large discharge.

効硬化処理を行う事により、耐力が加工前とほぼ同等の 513.1MPa まで戻ることである。この値は加熱後の C1020 に比べて約 40 倍であり、塑性変形に対して大幅に強くなるといえる。

3. 製作

NC50 を用いた FC の具体的な製造方法は以下の通りである。

1. NC50 の円柱から内外形を切削加工する
2. 銅パイプを円柱外周へ巻きつけ、真空炉で銀ろうを用いてろう付けする
3. 電気伝導率の測定を行い溶体化処理ができていることを確認する
4. 真空炉で時効硬化処理を行う
5. 電気伝導率の測定を行い時効硬化処理ができていることを確認する
6. 放電加工機でスパイラル状に円柱ブロックをカットしコイル形状とする

Table 1: Summary of Mechanical and Electrical Properties of Tested Materials

| Material | | C1020 | | SH-1 | | SH-2 | | NC50 | |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Heat cycle | | no | yes | no | yes | no | yes | no | yes |
| Aging | | no | no | no | no | no | no | no | yes |
| Electrical conductivity | %IACS | 102.2 | 102.1 | 90.8 | 76.0 | 81.1 | 68.5 | 50.3 | 25.1 |
| Hardness | | 87.4 | 30.4 | 71.6 | 60.0 | 45.9 | 55.8 | 95.3 | 61.2 |
| Tensile strength | MPa | 327.4 | 232.1 | 402.6 | 237.2 | 443.1 | 238.3 | 648.7 | 323.7 |
| Elongation | % | 21.6 | 54.4 | 36.8 | 56.8 | 32.6 | 51.4 | 14.8 | 46.6 |
| Yield strength | MPa | 322.3 | 12.9 | 293.6 | 57.9 | 348.2 | 40.8 | 551.8 | 109.7 |

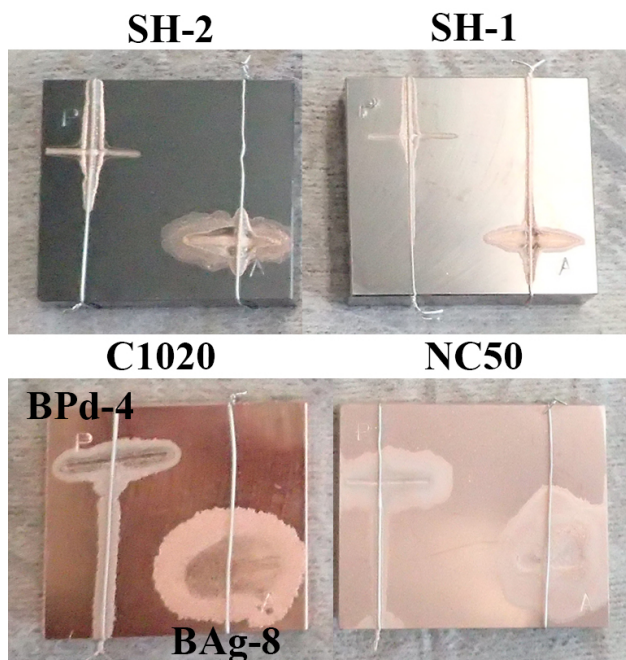


Figure 4: Results of brazing property test.

7. フィードスルーなどとともに真空フランジ上へくみたる。

Figure 6 に銅パイプをロウ付けする際の温度プロファイルを示す。銀ロウによる通常のロウ付け温度に比べて、大幅に高い 950°C まで加熱を行い、かつ加熱後はなるべく速やかに冷却することによって、ロウ付けと同時に溶体化処理を行うことがポイントである。溶体化処理がうまくできた場合電気伝導率が当初の半分 (25%IACS) 程度になるため、この測定により非破壊で状態を評価することができる。その後真空炉中で時効硬化処理を行い再度電気伝導率の測定を行う。時効硬化処理が成功していれば、電気伝導率は元の値 (50%IACS) に戻る。その後 Fig. 7 に示した、スパイラル加工ができるように改造した放電加工機を用いて、円柱ブロックをカットしコイル形状とすることで、FC 本体が完成する。

4. 発熱

材料の変更に伴って懸念される事項の一つに発熱の増加がある。Table 1 に示すように、NC50 の電気伝

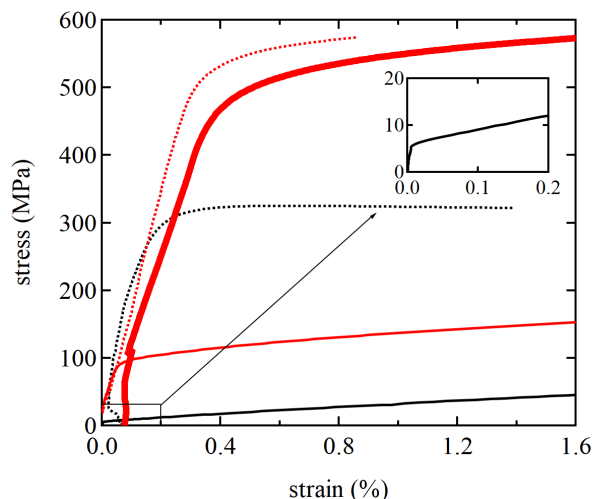


Figure 5: Strain-stress graph of NC50 (red) and C1020 (black) before (dashed line) and after (solid line) heat cycle. Thick solid line shows the result of NC50 after aging.

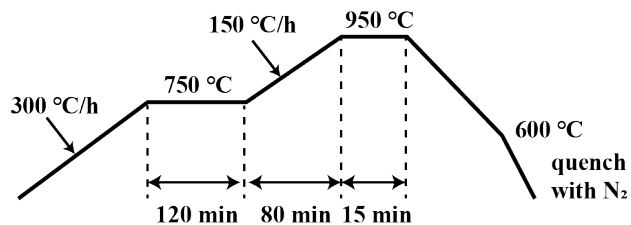


Figure 6: Temperature profile during brazing process of the Cu pipe to the block.

導率は C1020 の約半分であるため、同じ大きさの直流電流を流した場合は約 2 倍の発熱が想定される。一方パルス電流の場合は、表皮効果により電流は表面からある深さの部分 (表皮深さ δ) にしか流れない。 ρ を体積抵抗率、 ω を電流の周波数、 μ を透磁率とすれば δ は

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (1)$$

と表され、抵抗率 ρ の 1/2 乗に比例して電流が流れる断面積が大きくなるので、抵抗 (= 発熱) の増加は ρ ではなく $\rho^{1/2}$ に比例する。

Figure 2 の赤矢印部にインピーダンスアナライザ

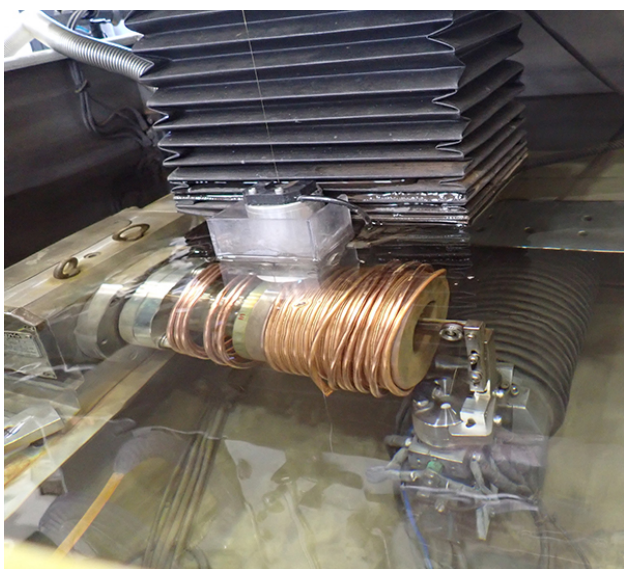


Figure 7: Wire Electric Discharge Machining of the FC.

(keysight, E4990B) を接続し測定したインピーダンス Z 、抵抗 R 、インダクタンス L の測定結果を Fig. 8 に、いくつかの周波数における抵抗値を Table 2 にそれぞれ示す。パイプ部やフィードスルー接続部はいずれも無酸素銅製のため、全体としての抵抗の差は NC50 と無酸素銅 (C1020) の抵抗率の差である 2 倍よりはかなり小さい。Table 3 に冷却水の温度上昇と流量から求めた全発熱量の値を示す。NC50 と C1020 の発熱量はそれぞれ 790 W、680 W であったのでその比は 1.16 になる。これは Table 2 に示した R の測定値の比に近い値になっている。

Table 2: Comparison of Resistance of FC Made of OFC (C1020) and NC50 at Several Frequency

| Frequency [kHz] | R_{C1020} [m Ω] | R_{NC50} [m Ω] | $\frac{R_{NC50}}{R_{C1020}}$ |
|-----------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------|
| 1 | 3.24 | 3.78 | 1.17 |
| 10 | 12.8 | 15.1 | 1.18 |
| 100 | 65.0 | 86.3 | 1.33 |
| 1000 | 268 | 392 | 1.46 |

Table 3: Comparison of Total Heat Dumped to the Cooling Water

| | C1020 | NC50 |
|---------------------------------|-------|-------|
| Inlet cooling water temp. [°C] | 32.20 | 31.85 |
| Outlet cooling water temp. [°C] | 39.07 | 39.87 |
| Cooling water temp. rise [°C] | 6.84 | 8.02 |
| Cooling water flow rate [L/min] | 1.42 | 1.41 |
| Total heat load [W] | 680 | 790 |

発熱分布は、表皮効果により電流が表面を流れる

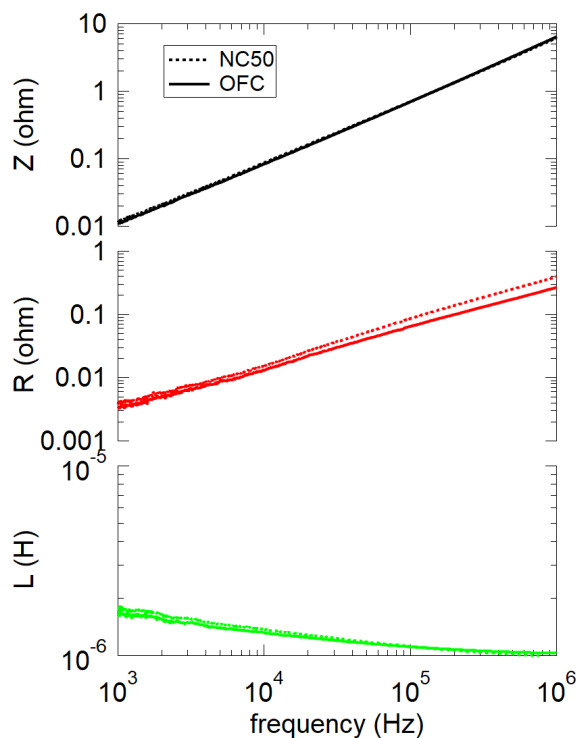


Figure 8: Impedance, Resistance and Inductance value as a function of frequency for FC head made of OFC (C1020) and NC50.

ことを反映して、Fig. 9 に示すように、テーパー内面が大きくなると予想される。実際 Fig. 9 中の矢印の方向から ZnSe 製 viewport を通して赤外線カメラ (Vision Sensing, VIM-384G2EL) で測定した温度分布は Fig. 10 のようになっている。12 kA で運転中、NC50 では最大温度は約 54 度、一方 C1020 では約 45 度であった。

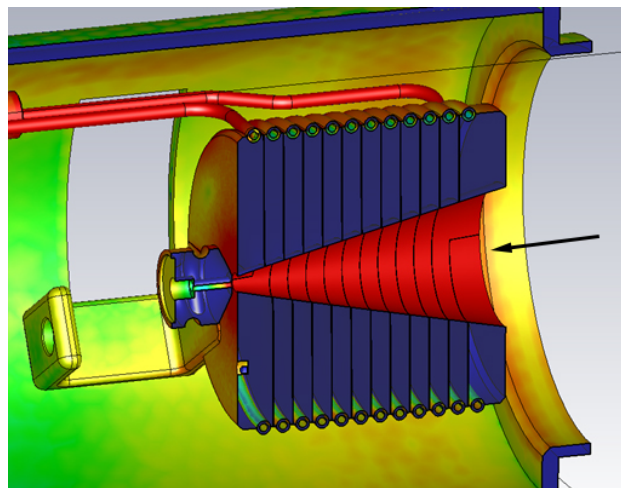


Figure 9: Result of heat distribution simulation.

Table 4: Bunch Charge of Positron with Primary Beam Parameters and Positron Yield Before and After Replacement of the FC

| Date | design | 2020/7/1 | 2020/10/12 | 2021/7/6 |
|---|--------|----------|------------|----------|
| Primary beam energy [GeV] | 3.46 | 3.01 | 2.87 | 2.92 |
| Primary beam bunch charge @ target [nC] | 10 | 8.2 | 8.1 | 9.0 |
| Positron yield @ first BPM after target [e_+/e_-] | 0.58 | 0.23 | 0.51 | 0.59 |
| Positron bunch charge @ first BPM after target [nC] | 5.8 | 1.9 | 4.1 | 5.3 |
| Positron bunch charge @ linac end [nC] | 4.0 | 1.3 | 2.1 | 3.0 |

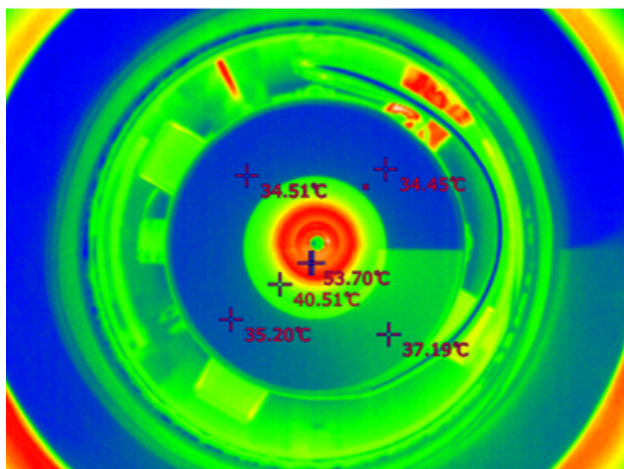


Figure 10: Measured temperature distribution of the FC made of NC50 during operation at 12 kA.

5. 設置と運用

NC50 を用いた新しい FC は 2020 年の夏期メンテナンス期間中にビームラインに設置され、以後トラブルなく定格電流で運転されている。Table 4 に設計値、FC を置き換える前 (2020/7/1)、置き換え後 (2020/10/12)、更にビームチューニングを進めたとき (2021/7/6) について陽電子の電荷量を示す。2020 年の夏期メンテナンスにおいては、FC の交換以外にも、キャプチャーセクションソレノイド内に軌道補正用ステアリング磁石を設置したりといった改造が行われた [8]。またその後のビームチューニング等によっていくつかのパラメータに変更、最適化がなされたりしている。そのため純粋に FC の交換のみの効果とは言えないが、総合的な性能として、入射器終端部での陽電子の電荷量は 1.3 nC/bunch から 3.0 nC/bunch へと大幅に増加している。

6. まとめ

無酸素銅のかわりに銅合金を用いることによって、変形の問題を克服し定格電流の 12 kA で運転できる FC を開発することができた。これによって、他の改良と合わせて陽電子の電荷量を入射器エンドで 1.3 nC/bunch から 3.0 nC/bunch まで大幅に高めることができた。今回採用した NC50 合金はロウ付け性、

電気伝導率、機械的特性が高い次元でバランスしており、特に適切な熱処理によってロウ付け後であっても、加熱前と同等の非常に高い耐力を得ることができる。したがって、FC に限らず様々な用途で無酸素銅の代替として、あるいは無酸素銅では実現できない機能を実現できる材料として活用できる可能性がある。

謝辞

本研究は大和合金株式会社および三芳合金工業株式会社に材料試験や熱処理のノウハウについて多大なご支援を頂きました。ここにお礼申し上げます。

参考文献

- [1] S. Ecklund, "THE STANFORD LINEAR COLLIDER POSITRON SOURCE", SLAC-PUB-4437, October, 1987; <https://www.slac.stanford.edu/pubs/slacpubs/4250/slac-pub-4437.pdf>
- [2] J. E. CLENDENIN *et al.*, "SLC POSITRON SOURCE STARTUP", SLAC-PUB-4704, September, 1988; <https://www.slac.stanford.edu/pubs/slacpubs/4500/slac-pub-4704.pdf>
- [3] J. E. CLENDENIN, "HIGH-YIELD POSITRON SYSTEMS FOR LINEAR COLLIDERS", SLAC-PUB-4743, April, 1989; <https://www.slac.stanford.edu/pubs/slacpubs/4500/slac-pub-4743.pdf>
- [4] A. V. Kulikov *et al.*, "SLC POSITRON SOURCE PULSED FLUX CONCENTRATOR", SLAC-PUB-5473, June, 1991; <https://www.slac.stanford.edu/pubs/slacpubs/5250/slac-pub-5473.pdf>
- [5] K. Akai *et al.*, "SuperKEKB collider", Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A, vol. 907, pp. 188-199, 2018; <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.08.017>
- [6] I. Abe *et al.*, "The KEKB injector linac", Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A, vol. 499, pp. 167 - 190, 2003; [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)01787-4](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)01787-4)
- [7] T. Kamitani *et al.*, "SuperKEKB POSITRON SOURCE CONSTRUCTION STATUS", in *Proc. IPAC2014*, Dresden, German, June 15-20, 2014, pp. 579-581. doi:10.18429/JACoW-IPAC2014-MOPRI004
- [8] K. Kakiyama *et al.*, "SuperKEKB 入射器における陽電子用 DC ソレノイドの測定と BPM、ステアリングコイル設置", In these proceedings.