Cu 空洞コーティング用 Nb スパッタ法の開発

浅野清光・Gerald ENDERLEIN*・
Dieter PROCH*

文部省高エネルギー物理学研究所 ☎305 つくば市大穂1-1

* ドイツ電子シンクロトロン研究所

(1993年10月21日受付, 1993年12月15日掲載決定)

Development of a Nb Sputtering Method for the Coating of a Cu Cavity

Kiyomitsu ASANO, Gerald ENDERLEIN*
and Dieter PROCH*

National Laboratory for High Energy Physics
1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki 305

* Deutsches Elektronen Synchrotron, DESY
Notkestraße 85, 2000 Hamburg 52, Germany

(Received October 21, 1993:

Accepted December 15, 1993)

We have developed a DC magnetron sputtering apparatus for the coating of Nb films on the inner surfaces of a 500 MHz Cu cavity. Q_0 values at 4.2 K by pipe cooling have been determined in order to optimize the various coating processes. The Nb films can be sputtered successively after sputter-cleaning the inner surfaces of the cavity by switching the polarity of the DC power supply operated at a constant power.

高エネルギー物理学研究所 (KEK) のトリスタン主リングにおいて、508 MHz の Nb 製超伝導高周波加速空洞の運転が、約5年間にわたり順調に続けられている。1988年夏に、5連空洞16台が主リングに据え付けられ、ビームエネルギーが28 GeV から30 GeV に上げられた。1989年夏には、さらに16台が加えられ、秋には、ビーム電流8~10 mA で、エネルギーは32 GeV に上がった。このとき、運転に使用された5連の超伝導空洞は29台で、全加速電圧は200 MV (平均加速電界4.7 MV/m) に達した。一方、Cu製の9連常伝導空洞は、104台で320 MV であった。その後、ビームエネルギーは29 GeV に設定され、より大電流での安定な運転を目

指している。

一方、ドイツの電子シンクロトロン研究所 (DESY) の HERA (プロトン・電子衝突型リング、周長6.4 km) にも、1991年春に、500 MHz の4連超伝導空洞が12台設置され、同年6月に、ビーム電流4.5 mA で、ビームエネルギーは30.3 GeV に上げられた。このとき、超伝導空洞による全加速電圧は、37 MV であった。

これら KEK および DESY での超伝導空洞は、いずれも厚さ約2.5 mm の高純度 Nb 板材から、成形、電子ビーム溶接、内面の表面処理などの種々の工程を経て製作されている。Nb 製空洞の電場の上限を決める種々の原因のうち、最も多い例は、空洞表面の欠陥部の発熱によって、周囲の Nb の温度が上昇し、超伝導が破れる現象である。このため、Nb の熱伝導度を改善し、欠陥部の発熱を空洞の外側の液体ヘリウムによって効率よく冷却して、超伝導破壊を防ぐことが重要となる。

空洞壁の熱伝導度を上げるため、Cu 空洞の内面に Nb 薄膜をスパッタする方法がある。この方法は、b. c. c 金属である Nb の板材から製作された空洞に比較して、つぎのような利点を有している。

1) 低温での Cu の熱伝導度は、Nb の100倍以上高いので、たとえば表面に欠陥や汚れがあったり、ごみなどが付着していても、Nb 空洞より熱的安定性ははるかに高い。

2) Nb 板材の純度が高くなると、熱伝導度が改善されるが、反面、機械的強度が低下する。また、スパッタリング法では、板材の場合に問題となる内部の欠陥 (インクルージョン、空孔など) のない Nb 表面を作成できる。

3) 下地の Cu 空洞内面を電解研磨することにより、非常に光沢度の高い滑らかな Nb 薄膜表面をスパッタリング法で作成できる。スパッタされた Nb 薄膜表面は、Nb 空洞内面の電解研磨面よりも光沢度ははるかに高い。

4) より高い T_c (超伝導臨界温度) を有する超伝導物質が空洞用材料として適用可能となった場合、Nb/Cu 空洞の Nb 薄膜を溶解し、ターゲットを交換することにより、その物質をコーティングできる。Cu 基板上の Nb 薄膜のみを溶かすための専用の粉末が市販されている。

5) Nb/Cu 空洞の冷却に、パイプクーリングが適用可能になる可能性がある。パイプクーリングが実現すれば、液体ヘリウムの使用量の低減と、クライオスタットの構造が簡単にできる。

6) Al の上に Cu を電着し、あとで Al を溶かす方法により、Cu の溶接部をなくすることができる。この方法は、多連結型の空洞に適している。

7) Nb/Cu 空洞は、外部磁界の存在による影響が少ない。

8) Nb/Cu 空洞のほうが、Nb より材料費が安い。

スイスのジュネーブに本部のあるヨーロッパ原子核研究機構 (CERN) の LEP (巨大電子陽電子衝突型リング) に使用予定の 352 MHz, 4 連超伝導空洞は、上記の理由から Nb/Cu 空洞で 168 台の製作が開始されている。これにより、LEP のビームエネルギーを 100 GeV に近づける計画で、1994 年に、全 192 台の 4 連超伝導空洞の運転が開始されようとしている。SPS (スーパープロトンシンクロトロン) でのビームテストの後、LEP に 4 連 Nb 空洞 4 台と、4 連 Nb/Cu 空洞 8 台が設置され、ビーム電流 3.8 mA で 75 MV の加速電圧が得られている¹⁾。

低い電場では、Nb/Cu 空洞のほうが Q_0 値が高く、5~6 MV/m 以上で、電界放出電子のために急激に Q_0 値が落ちる。最近、Nb/Cu 空洞で、高圧純水シャワー洗

浄を施すことにより、 Q_0 値がさらに上がり、より高い加速電場が得られるようになった²⁾。

われわれは、500 MHz の Cu 空洞内面に、Nb 薄膜をコーティングするための DC マグネトロンスパッタリング装置を開発し、DESY 研究所内に建設した。この装置の概略図を Fig. 1 に示す。DC 電源の極性を反転することにより、Cu 空洞の内表面のスパッタクリーニング後、真空を破らずに連続的に Nb をスパッタすることができる。Nb ターゲットを移動し、500 MHz の Cu 空洞内面全体、およびカットオフチューブ内面に、Nb 薄膜をコーティングし、パイプクーリングにより 4.2 K まで冷却し、 Q_0 測定を行った。スパッタクリーニングは、CERN 研究所で行われているような非常に複雑な Cu の表面処理を簡略化できる。

スパッタクリーニング中は、Nb ターゲットを下のポットの位置に移動し、同軸の Cu パイプ (70 mm ϕ) 外面に、Cu 空洞内表面をスパッタした。このときのスパ

Fig. 1 Schematic diagram of a DC magnetron sputtering apparatus for the coating of a 500 MHz Cu cavity with Nb films.

Fig. 2 SEM micrograph of a cross section of Nb film sputtered in the 500 MHz Cu cavity.

ツタクリーニング条件は、Ar 圧力 3×10^{-2} Torr, 電圧 600~700 V で、放電電流は約 2 A であった。

Nb 薄膜のコーティングには、Nb ターゲット (残留抵抗比 100, 長さ 300~500 mm) とマグネット (0.2 T, 長さ 100 mm) を、500 MHz Cu 空洞の中心に移動した。システムの到達真空度は、 3×10^{-9} Torr で、Nb スパッタリング条件は、Ar 圧力 3×10^{-4} Torr, 放電電圧 330 V で、放電電流は 5.0 A であった。

スパッタリング中は、空洞を 150°C に一定とした。2 時間のスパッタリングで、空洞内の平均膜厚は、 $5.4 \mu\text{m}$ であった。空洞への Nb コーティング前に、カットオフチューブ内へ Nb スパッタリングを行った。Nb ターゲットのプリスパッタリングは、空洞外に、Nb のゲッター膜を作成するために重要である。

Nb 薄膜をコーティングした Cu 空洞を、クライオスタットに装着し、空洞外壁のパイプクリーニングにより、液体窒素による予冷を行わずに、4.2 K まで 3 時間で冷却した。これまで、空洞に 4 回 Nb スパッタリングを行い、4.2 K での Q_0 値は、 2.3×10^9 であった。

Nb 膜中の不純物は、主として酸素で約 1 at. % であった。一方、炭素は、Nb 膜の最表面のみであった。Cu 上の Nb 膜の SEM 写真を Fig. 2 に示す。この

柱状構造は、Thornton の報告³⁾と一致して、Ar 圧力よりむしろ基板温度に強く依存している。また、この構造は、Nb/Cu 空洞での高電界での Q_0 値の低下と関係していると考えられる。結晶粒を大きくするには、スパッタリング中の空洞温度を高くすればよいが、Cu 空洞の形状などから、200°C 以上の加熱はできない。膜厚は、空洞の赤道部で厚く、カットオフチューブに向かって、しだいに減少した。

Nb 薄膜 Cu 空洞は、Nb 空洞に比べて、超伝導破壊に対して高い熱的安定性を有するため、高電界加速空洞よりはむしろ、大電流用加速空洞として、その有効性を発揮すると期待される。

文 献

- 1) G. Cavallari: Proc. 5th Workshop on RF Superconductivity, August 19-23, 1991, DESY, Hamburg, p. 23.
- 2) Ph. Bernard, D. Bloess, W. Hartung, C. Hauviller and W. Weingarten: Proc. 5th Workshop on RF Superconductivity, August 19-23, 1991, DESY, Hamburg, p. 487.
- 3) J. A. Thornton: J. Vac. Sci. Technol. **11**, 666 (1974).