



超伝導オーディオインターコネクト： 77KにおけるYBCOセラミック導体による ゼロ抵抗信号伝送



超伝導オーディオインターコネクト：77KにおけるYBCOセラミック導体によるゼロ抵抗信号伝送

M. Ferro, L. Solder, H. Park, B. Impedance

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2024.

要旨

初の超伝導オーディオインターコネクトケーブルの開発と特性評価を報告する。導体は液体窒素を充填した真空ジャケット付きホウケイ酸ガラスクライオスタット内で77 Kで動作するYBCO（イットリウムバリウム銅酸化物、 YBaCuO ）セラミックテープである。DC抵抗はゼロ---低くもなく無視できるのでなく、ゼロ---であり、ナノボルト感度での四端子測定により確認された。マイスナー効果は信号経路の完全な反磁性遮蔽を提供し、すべての外部磁束を排斥する。超伝導導体を通じて伝送されるオーディオ信号はゼロの抵抗損失、ゼロの熱ノイズ寄与、および完全な磁気免疫を示す。ケーブルは1メートルあたり年間約310リットルのLN受動補給により連続動作する。

1. はじめに

すべての従来型オーディオケーブルには抵抗がある。この抵抗は小さく---一般的にメートルあたりミリオームからオームのオーダー---であるが、ゼロではない。非ゼロ抵抗の結果は三つある：(1) 抵抗性信号損失（減衰）、(2) 熱ノイズ発生（ジョンソン-ナイキストノイズ、抵抗と温度に比例）、(3) 周波数依存インピーダンス変動（表皮効果、近接効果）。これらの効果は十分に特性評価されており、従来型ケーブルにおいて信号伝送の基本的物理限界を代表する。

超伝導はこの三つすべてを除去する。超伝導体は臨界温度（ T_c ）以下で正確にゼロのDC抵抗を持つ。ゼロ抵抗はゼロ減衰、ゼロのジョンソン-ナイキストノイズ、そして---低周波オーディオ帯域では---ゼロの周波数依存インピーダンス変動を意味する。信号は導体の一端に入り、数学的に完全な忠実度で他端から出る。

さらに、マイスナー効果---超伝導体内部からの磁束の完全な排斥---は、いかなる量の従来型ミュンメタル、銅編組、または導電性ポリマーも及ばない遮蔽を提供する。超伝導ケーブルは外部磁場を減衰させるのではなく、絶対的に排除する。

エンジニアリングの課題は超伝導状態の維持にある：YBCOは92 K以下の連続冷却を必要とする。我々は冷媒として液体窒素（1気圧での沸点77 K）を使用し、ケーブルジャケットとして機能する真空ジャケット付きホウケイ酸ガラスクライオスタット内を循環させる。これは確かに従来型のケーブル設計ではない。

2. ケーブル構造

SCインターコネクトは中心から外側に向かって以下の要素で構成される：

導体：YBCOセラミックテープ（SuperPower SCS4050-AP）、幅4.0 mm × 厚さ0.1 mm、77 Kおよび自己磁場で臨界電流100 A。テープは制限された柔軟性を許容するためステンレス鋼フォーマー上にらせん状に巻かれている。

信号経路：2本のYBCOテープ（信号とリターン）が0.5 mm PTFEスペーサーを挟んで同心状に巻かれている。特性インピーダンスはオーディオ周波数で75 Ohmに設計され、標準的なインターコネクトの慣行に適合する。

クライオスタット：二重壁ホウケイ酸ガラスデュワー、外径48 mm、内径28 mm。壁間空間は103 Pa未満に排気される。導体アセンブリは内部ボア内の液体窒素に浸漬される。両端の充填ポートは標準6 mm LN供給チューブを受け入れる。

コネクタ：クライオ対応ロジウムメッキXLRコネクタ、真空フィードスルーシールおよび熱遮断（G10ガラス繊維スペーサー）を改修し、温かいコネクタ本体から冷たい導体への熱伝導を防止。

ケーブル全体の外径は48 mm。ケーブル重量は乾燥時2.4 kg/m、LN充填時3.8 kg/m。最小曲げ半径は300 mm（柔軟な導体ではなくガラスクライオスタットにより制限）。

3. 結果

DC抵抗：Keithley 2182Aナノボルトメーターと6221電流源を用いた四端子法で測定。77 K（LN浸漬）で100 mA DCを通電する1.5 m導体の電圧は器機ノイズフロア1 nV未満であった。計算上限： $R < 10$ Ohm。すべての実用的な目的において、抵抗はゼロである。

ACインピーダンス：1 kHzで75.0 +/- 0.1 Ohm（純粋にリアクティブ---抵抗成分なし）。インピーダンスは温度ロックされている：導体がLN浴により一定の77



Kに維持されるため、熱ドリフトがない。30日間の測定キャンペーンにわたるインピーダンス安定性は ± 0.0003 Ohmであった。

ノイズフロア：抵抗器のジョンソン-ナイキストノイズ電圧は $V_n = \sqrt{4 \times k_B \times T \times R \times \text{帯域幅}}$ 。R=0 (超伝導体) の場合、温度や帯域幅に関係なく $V_n = 0$ 。超伝導インターコネクトは信号経路に正確にゼロの熱ノイズを寄与する。

磁気遮蔽：50 Hzで1 mT (10 Gauss) を発生するヘルムホルツコイルをケーブルから50 mmに配置した。クライオスタット内部 (導体に隣接) のフラックスゲート磁力計は0.01 nT未満を測定した----160 dBを超える減衰。これはマイスナー効果である：超伝導体は吸収 (ミューメタルのように) ではなく、印加磁場に完全に対抗する表面電流を生成することにより外部磁場を能動的に排除する。

4. 考察

SCインターコネクトはLNの連続供給を必要とする。真空ジャケットクライオスタットの熱リーク率はケーブル長1メートルあたり1日約0.85リットルのLNである。1.5 mインターコネクトペアの年間LN消費量は約930リットル----少量配達 of 現行商用LN 価格 (1リットル1ドル) で年間約930ドルである。

ケーブルはLN充填ポートが定期的補給 (環境温度に応じて3-5日ごと) のためにアクセス可能に設置されなければならない。内蔵圧力逃し弁はLN沸騰率がベント容量を超えた場合の危険な過加圧を防止する。O₂欠乏センサーがクライオスタットに装着され、周囲酸素濃度が19.5%を下回ると視覚的 (琥珀色LED) および可聴 (85 dBブザー) 警告を提供する。

室内換気要件は最低10回/時の換気回数 (ACH) ----ほとんどの住宅空間の換気を超える基準であるが、専用HVAC設備により容易に達成可能。

これらの要件は重大である。オーディオケーブルを所有するという意味における根本的な変化を代表する。SCインターコネクトは接続して忘れる製品ではない。それはインフラストラクチャ----監視、メンテナンス、液体窒素供給業者との関係が必要とする生きたインフラストラクチャである。ゼロ抵抗を要求するリスナーにとって、これがその代償である。

5. 結論

SCインターコネクトは従来の導体には達成不可能なことを達成する：ゼロDC抵抗、ゼロ熱ノイズ、およびマイスナー効果による絶対的磁気免疫。エンジニアリングと運用の負荷----極低温冷却、真空断熱、LN物流----は相当であるが、献身的なリスナーにとっては管理可能である。超伝導オーディオは導体最適化の論理的終着点を代表すると我々は信じる：すべての抵抗を除去したとき、改善すべきものは何も残らない。

参考文献

- [1] J. G. Bednorz, K. A. Müller, "Ba-La-Cu-O系における高温超伝導の可能性," Z. Phys. B, vol. 64, pp. 189-193, 1986.
- [2] M. K. Wu et al., "新しい混合相Y-Ba-Cu-O系における93 Kでの超伝導," Phys. Rev. Lett., vol. 58, pp. 908-910, 1987.
- [3] SuperPower Inc., "SCS4050-AP YBCO被覆導体仕様," Rev. 12, 2023.
- [4] W. Meissner, R. Ochsenfeld, "超伝導の出現における新効果," Naturwissenschaften, vol. 21, pp. 787-788, 1933.
- [5] J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer, "超伝導の理論," Phys. Rev., vol. 108, pp. 1175-1204, 1957.
- [6] ASME BPVC Section VIII, Division 1: 圧力容器の構造規則 (極低温サービス) .