

# **Chapter 4**

## **— Wiring and Connections —**

# 4章各節の項目

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
  - 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
  - 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
  - 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
  - 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
  - 4.8.1 Heat-Sinking
  - 4.8.2 Vacuum-Sealing
  - 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
  - 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
  - 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
  - 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
  - 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
  - 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
  - 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
  - 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
  - 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
  - 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
  - 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
  - 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
  - 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
  - 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
  - 4.8.1 Heat-Sinking
  - 4.8.2 Vacuum-Sealing
  - 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
  - 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
  - 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
  - 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

# 4.1.1 一般的なガイドライン

耐久性の高い絶縁皮膜、リード線の用途分け、1点でのグラウンド取り

## 1. 耐久性の高い絶縁皮膜のあるワイヤーを選ぶ

(標準的なポリビニル性の絶縁素材は柔らかく、はんだづけの温度でショートし、ニスで熱的に繋がると溶け、ねじられたら容易に傷んでしまう。そういう環境に晒されないならOK。ワイヤーの絶縁は Sec. 4.3と Appendix A4.4で取り上げる)

## 2. 主用途を担うリード線は他から分離する

(高電流測定では電圧応答に感度の高いリード線は電流リード線から分離する。これは電圧リード線で高電流の変化に誘引されるノイズピックアップを減らす。同じ理由から電圧リード線によるヒートシンクは電流リード線から分離するよう努める。低電流測定では電流応答に感度の高いリード線を電圧リード線や他のノイジーなリード線から遠ざける。コンピュータ、ヒーターなどの温度コントーラーからのパルス信号を避ける目的。)

## 3. 装置は1点のみでグラウンド(GND)に落ちるべき

(木の枝のようにグラウンドに接続されるべきである。ある地点から別の地点へ電流がはしたことによる偽電圧(spurious voltage)を避ける目的。もしグラウンディングに選択の余地があれば、ノイズを減らすために同じグラウンドサンプルのできる限り近くにグラウンドを設けると良い。``grounding and shielding techniques'' by Morrison 1998)

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sink Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

# 4.1.2 DC/低周波数時のワイヤリング

## ツイストケーブルはタイトに作る

✓ (電圧ピックアップや実験室のノイズピックアップを最小限に抑えるために)  
対応するペアでしっかりとツイストする。

10 kHz程度までは磁気的に引き起こされるノイズ電圧を最小化するためには、ツイストケーブルの方がコアキシャルケーブルよりも有効的。というのも、コアキシャルケーブルの鞘は磁場をシールドせず、またケーブル内の電流パターンも完全な対称性を持たないからである。

「Ekinの経験則」

#32~#36の太さのワイヤーについては、ワイヤーの絶縁性を痛めることなく十分タイトにツイストできるため、ツイスト長(あるいはピッチ)をワイヤー直径の1/20以下程度にするのが妥当である。

「可変速の電動ドリルとフックを組み合わせたツイストケーブルの作り方」

一定の長さのワイヤーの両端を万力にしっかりと固定しワイヤー中央部分をフックにかけてピンとはり、その状態でドリルを回して捻る。フックは太めの単線銅線(e.g. AWG #12 or 直径 2 mm)を曲げてフック状にするだけで簡単に作れる。このように柔らかく滑らかな素材を使うことでねじり中にワイヤーを軽く引っ張っても切断させにくくなる。ねじった後はトルクが戻る時にペアをピンと張ったままにしておかないとワイヤが緩み絡まってしまう。ねじった線の端(フックに巻きつけた部分など)は切り落とす。複数線ケーブルを作る場合は、最初に対応するワイヤーペアごとにしっかりとねじっておくと良い。最終的にケーブルとしてまとめる前に、ねじり終えたペア同士の間でショートしてないかを確認する。

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

# 4.1.2 DC/低周波数時のワイヤリング

微小な直流信号を扱う際の宿敵：熱起電力→詳細な対策はSec. 4.6.

## ✓ 热起電力が問題になる例: 大電流を流す超伝導体の測定

→ACテクニックが使えない。信号電圧が非常に小さい( $1\mu\text{V}$ 未満)。不意の熱起電力は導線や電気接合部に沿った温度勾配によって生じる。最小化の方法はSec. 4.6で詳しく取り上げる。

## ✓ 热起電力が問題にならない例: (低周波の)交流測定。手動のナイフスイッチ測定

→サンプル測定用の電流が比較的小さい( $< 100\text{ mA}$ ) 場合や、抵抗温度計を使用する場合に適している(交流ブリッジ回路についてはEkin and Wagner 1970に詳細あり)。

→やや大きい電流 ( $\sim 10\text{ A}$ ) を使う場合には手動のナイフスイッチによって電流の向きを反転させると低周波の効果を得ることができる。2回の測定値の絶対値を平均することで、ゆっくり変動する熱起電力を1次のオーダーで打ち消すことができる。ただし、この方法は電流がさらに大きくなると現実的でなくなる。その場合にはSec. 4.6で述べる詳細なテクニックを用いる。

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

# 4.1.3 AC/高周波時のワイヤリング

交流配線を扱う際の一般的なガイドライン (Colclough 2002) → 詳細は Sec. 4.8

## ✓ ツイストペアにして役割の違う配線は分離して扱う

電流線はツイストペアにし、電圧線も別にツイストペアとして作る。異なる機能をもつ配線同士の間のキャパシティブな結合を最小化するために、それぞれのグループをまとめて、別々のプラスチックスリーブに通る。この処理を怠ると、配線間の浮遊容量の影響で位相ズレが生じることがある。特に高抵抗の試料や接点を扱う際に問題になる。異なる配線の束ごとに専用のコネクタやフィードスルーを用いる。

## ✓ 高周波ノイズの対策に金属製デュワー(あるいは金網?)を用いる

金属製デュワーは高周波ノイズからの良いシールド効果をもたらす。ノイズの周波数が測定信号とは大きく異なる場合でもかなりの遮蔽効果がある。可能な限りRFフィルタ（高周波フィルタ）を使用し、特にクライオスタット（低温装置）の上部で不要なノイズを遮断する。プラグとソケットの間にぴったり収まるタイプのフィルタ（特に市販のD型コネクタ用）は、安価で効果的。

## ✓ 防水型シールドつきのコネクタがRFノイズの遮断に有効

防水型シールドつきのコネクタが高周波ノイズを効果的に遮断する。円形の軍用タイプコネクタは、実際にはシールド性能があまり高くない。D型コネクタ（たとえばDB-25）は金メッキや削り出しピンを備えた精密な構造で人気がある。プロ用マイクコネクタもよく機能する。([Morrison 1998] 望ましいのは)差動信号を扱うリード線は、同一のコネクタ内の隣接するピンを使用し、別体に別々のBNCコネクタを通さない。

## ✓ 大きなクライオスタットではサンプルを着脱できるよう設計する

大型のクライオスタットでは、試料ホルダーを装置本体から着脱できるように設計すると良い。低温でも使用可能なコネクタには、Fischer社やLemo社のcylindrical contact insertsや、ミニDコネクタ、高品質なICプラグ/ソケットがある (Appendix A1.7のConnectorsを参照)

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sink Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

# 4.1.4 ワイヤリングテクニック

## (苦労によって得られた) 実践的アドバイス！手を抜くんじゃない！

1. 2本の極細ピンセットと先の尖ったメスを使い、拡大鏡のもとで作業する。大きな倍率のヘッドルーペや安価な双眼実体顕微鏡（5~20倍程度）を使用する。モニター出力付き顕微鏡だと尚良い。
2. ピンセットをしまう。
3. 十分に熱を加えてはんだを完全に溶融させ、よく流れる状態にする。良いはんだづけは、滑らかで凹面形状のはんだ面と、しっかりとした濡れ性でわかる。**接触不良の原因の大半は、加熱不足の悪いはんだづけ**である。温度制御機能つきのはんだごてを使い、適切な出力と清潔な先端を保つ。ショートしないよう隣接点とのクリアランスにも注意する。  
日本語でわかりやすいはんだづけの試料: <https://www.youtube.com/watch?v=dQ7AUjb1tkA>
4. 細線を用いた配線では「活性化」ロジン（松ヤニ）や「非腐食性」フラックスは避ける。ラベル表記を惑わされることなく、純粋なロジンフラックスまたは非活性ロジンをアルコールで溶かしたフラックスだけを使う。（詳しくはSec. 3.3.4 “bête-noire of soldering”を参照）
5. 直流電圧に感度の高い配線を除き、プラグ・ソケット式の配線やはんだ端子ストリップを用いて**分割統治**することを考える。冷凍機の多くの部分の再構成ができる。分割統治されていない場合は、ほぼ再構成不可能である。1~2 mmの電子プラグ・ソケットを用いたピンスペーサーングが有効。
6. すべてのはんだ接続部分を端子ストリップやコネクタで固定する（よう努める）。ワイヤー/ワイヤーの自由な接続が避けられない場合、太いワイヤーであれば機械的な強度をえるためにねじってからはんだづけする（頻繁な着脱をしない場合）。一方で#30 AWG (~0.25 mm)より細い線では端と端をオーバーラップさせてはんだづけする方が強度的に優れており、絶縁チューブを接合部ごしにかぶせやすい。
7. 機会的保護のため、ワイヤーはゆるくフィットするポリエチレンまたはTeflon™素材のスパゲッティチューブ、スパイラルチューブに通す

8. 保護・シールド・取り回しを容易にするために、ステンレス製の冷凍機サポート管の中にワイヤーを通す（よう努める）。金属の鋭いエッジによる断線を防止し、浮遊容量を低減するために、この場合もスリーブを併用する。
9. 自由に揺られてしまうワイヤーは、デンタルフロス、糸、紐、プラスチックタイ、テープ、BluTack™などでしっかりと固定する  
(Appendix A3.10とサプライヤーの情報を参照)。振動に誘起される電圧ピックアップを最小化し、ワイヤーを保護できる。たるんだ配線はノイズ源となり、また事故のもとにもなりうる。
10. ワイヤーを固定・接着する前に、ワイヤーが触れるクライオスタッフの表面を滑らかに整える。特にワイヤーが通過する穴の縁は丸く削り、鋭利な角には保護テープを貼る。
11. 絶縁が弱いワイヤーは、ニスを含ませた薄紙をニスを足しながらワイヤー表面に貼り付けると保護できる。ただし、乾く前のニスはポリビニルホルマール絶縁膜を柔らかくしてしまうので注意。レンズクリーニング用のティッシュは多孔質でをよく吸収するのでこの用途に適している。煙草紙もよい。薄い紙を1枚ワイヤーの上に置くと保護効果を高められる。
12. 配線の導通を端から端までオームメータ（マルチメータ？）で確認する。配線間、配線と筐体と間で  $20\text{ M}\Omega$  より大きい絶縁が保たれていることを確認する。IMI 7031ニスを絶縁と固定に用いる場合は、乾燥するまで絶縁テストを行ってはいけない。乾く前のニスは高抵抗回路を示し、余計な焦りを生む。
13. 低温物理でありがちな問題は、「装置上面のワイヤーが底面のどれに対応するかわからない」ことである。遅延なく応答してくれるビープモードでマルチメータを使うと、ほんの少しだけワイヤーに触れるだけでも即座に気づくことができる。
14. クライオスタッフの配線を必ず記録する。忘れないと思っていても半年後には忘れている。

# 4.2 冷凍機デザインのためのワイヤー選び

熱容量、熱電効果、ジュール発熱に影響があるワイヤーを適切に選ぼう

Table 4.1 Cryostat-wiring recommendations.

| Wiring Application                             | Wire Material   | Typical Size (AWG and metric) <sup>a</sup>   | Comments   |
|--|---|--|--|
| Sample-voltage sensing                         | Copper  | AWG: #34–#40 (0.160–0.080 mm) typically #36 (0.127 mm)   | For dc measurements (ref. Sec. 4.6): Use continuous leads (no connections) to reduce thermoelectric voltages by about an order of magnitude<br>When connections are necessary, copper–copper joints minimize thermoelectric voltages   |
| Thermometer leads and low-current sample leads | Phosphor bronze                                       | AWG: #32–#40 (0.202–0.080 mm) typically #36 (0.127 mm)   | Phosphor bronze offers good thermal isolation ( $\text{low } \lambda$ ) in a wire size convenient to handle<br>Low magnetoresistance<br>Easy to solder   |
| Heater fabrication                             | Phosphor bronze<br>Manganin<br>Constantan<br>Nichrome | AWG<br>#36 (~0.127 mm) (~7 $\Omega/\text{m}$ at 4 K)<br>#36 (~0.127 mm) (~34 $\Omega/\text{m}$ at 4 K)<br>#36 (~0.127 mm) (~39 $\Omega/\text{m}$ at 4 K)<br>#32 (~0.200 mm) (~34 $\Omega/\text{m}$ at 4 K)<br>(the relatively larger wire size for Nichrome is needed to provide adequate surface area for dissipating heat) | Stable, high resistance is needed for heater wire<br>Phosphor bronze is easier to solder than Manganin, Constantan, or Nichrome (in order of increasing difficulty)<br>Phosphor bronze has the smallest magnetoresistance and volume susceptibility, so it is recommended for use in magnetic fields |
| Heater power leads                             | Copper  | AWG: #30 (~0.255 mm)<br>(size depends on current; see Sec. 4.9.1 for optimum diameter)   | Copper's low resistivity is needed to supply the higher currents required by heaters   |

<sup>a</sup> AWG: American Wire Gauge, see Appendix A4.1a. Wires are commonly available only in even gauges.

The conversion from inches to AWG is given by the equation: AWG gauge = 30 – 20  $\log_{10}(d/0.01")$ , where  $d$  is the wire diameter in inches.

The nearest common metric wire sizes are tabulated in Appendix A4.1b.

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

## 4.2.2ワイヤーの素材特性

RRRは導線中の不純物の指標の一つ

Fig 4.1と A4.2はそれぞれ熱伝導と物理特性の温度変化を表している。

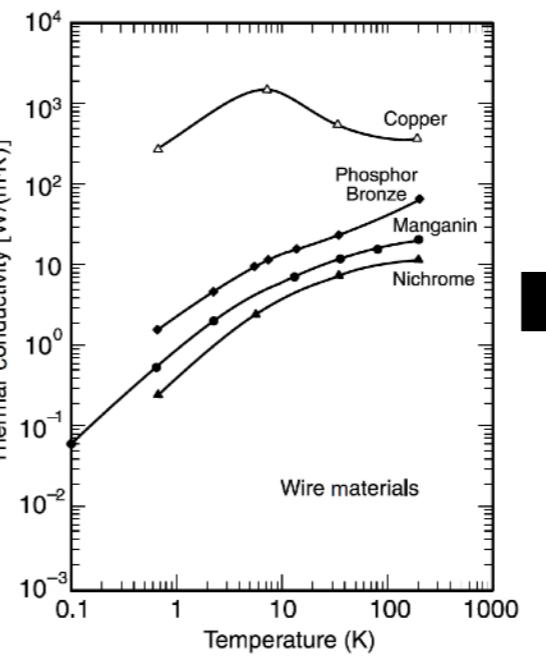
伝導体の純度を表す指標として残留抵抗比(RRR)がある。

RRR: Residual Resistance Ratio  $\equiv R_{293\text{ K}}/R_{\sim 4\text{ K}} \equiv \rho_{293\text{ K}}/\rho_{\sim 4\text{ K}}$

例：Appendix A4.2によると、電解タフピッチ (ETP) 銅線（一般的な計測用ワイヤー）の低温 (4 K) における抵抗率は  $0.016 \mu\Omega \text{ cm}$ 、室温 (293 K) では  $1.71 \mu\Omega \text{ cm}$  であることがわかる。したがって、抵抗比 (RRR: Residual Resistivity Ratio) は  $1.71 / 0.016 \approx 107$  となる。RRRがおよそ100の銅線は、中程度の純度を持つことを示しており、コストと性能のバランスが取れた、ほとんどの配線用途に適した選択である。

純度の低い``dirtyな”合金ではRRRは1を少し超えるくらい、つまり $4.2\text{ K} \rightarrow 293\text{ K}$ で変化する抵抗はほんの少しだけである。

典型的なRRRの値はA4.3を参照

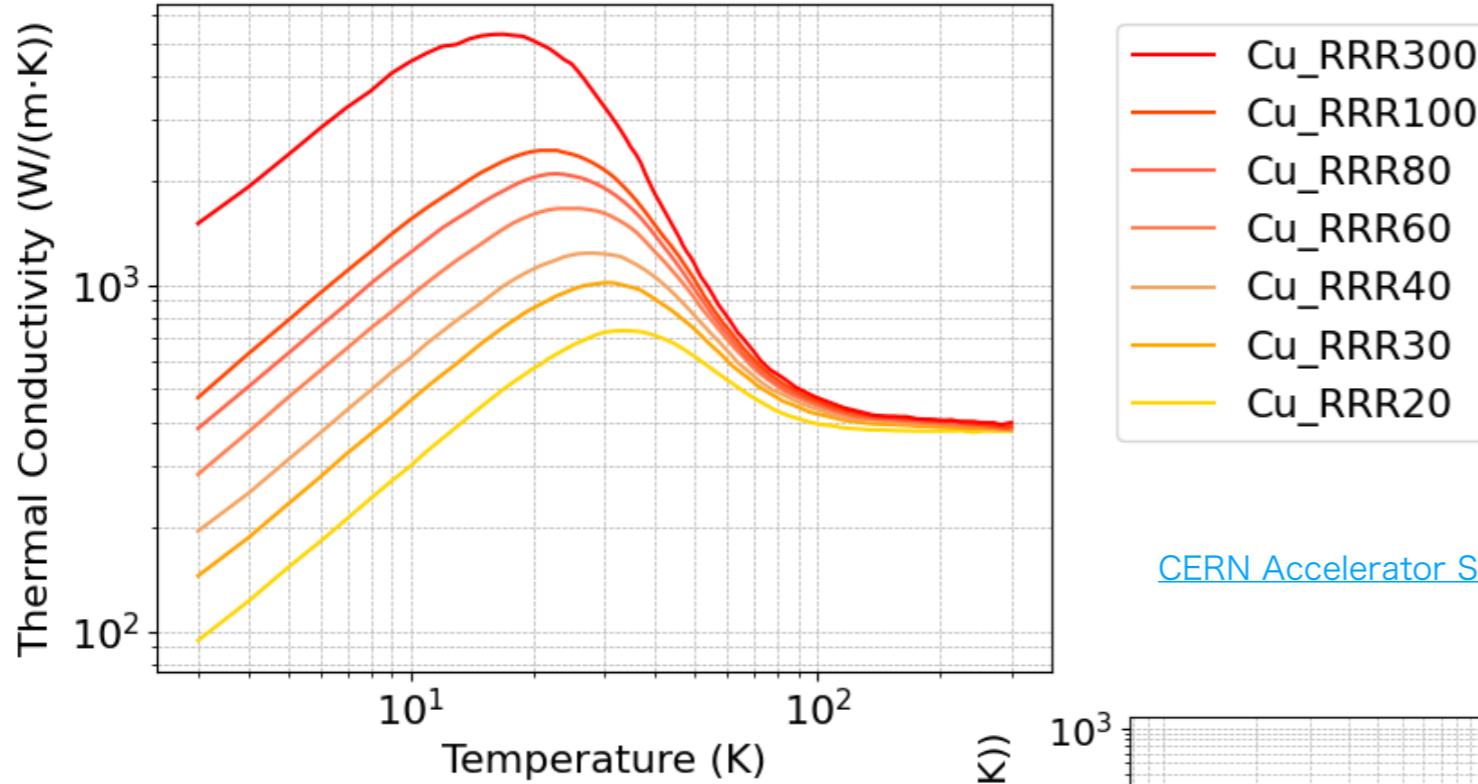


次ページに  
例を増やした

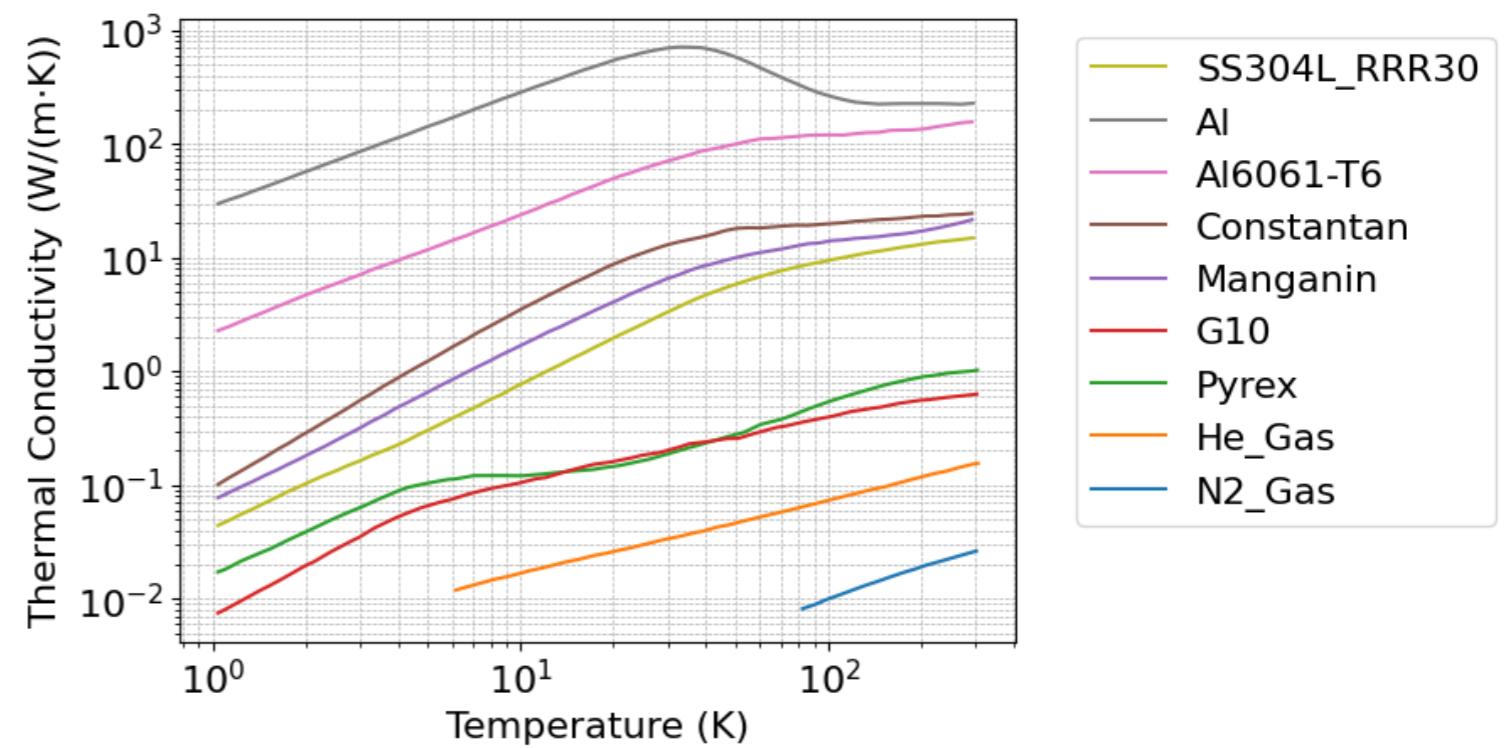
Fig. 4.1 Thermal resistivity of common wire materials (data compiled by Lake Shore Cryotronics 1995).

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

# 熱伝導度 v.s. 温度



[CERN Accelerator Schoolの資料\(2013\)より](#)



### A4.3 RESIDUAL RESISTANCE RATIO (RRR) OF SELECTED WIRING AND CONDUCTOR MATERIALS (SEC. 4.2)

RRR values of additional materials are tabulated in Appendix A3.1.

| Material   | Resistivity at 293 K<br>[ $\mu\Omega\text{cm}$ ] | Resistivity at 4 K<br>[ $\mu\Omega\text{cm}$ ] | RRR<br>( $\rho_{293\text{ K}}/\rho_{4\text{ K}}$ ) |
|--|--|--|--|
| Copper   | 1.68   | ~0.015   | ~110   |
| ETP (common wire, rod,<br>and plate material)  |  |  |  |
| Oxygen-free copper <sup>a,b</sup><br>99.95% pure; annealed<br>~500°C for ~1 h in argon<br>or vacuum ( $\leq 10^{-4}$ torr) | 1.68   | ~0.010   | ~160   |
| Oxygen-free copper <sup>a</sup><br>99.95% pure; unannealed   | 1.71   | ~0.038   | ~45  |
| Copper ground strap <sup>a</sup><br>(1/4 in. wide flexible<br>braid)   | 1.74   | ~0.070   | ~25  |
| Silver foil <sup>a</sup><br>(rolled)   | 1.61   | ~0.019   | ~85  |
| Aluminum 99.9995% <sup>c</sup><br>(pure rolled foil annealed<br>350°C for 1 h)   | 2.65   | ~0.0005  | ~5000  |

$$\text{RRR} \equiv R_{293\text{ K}}/R_{4\text{ K}} = \rho_{293\text{ K}}/\rho_{4\text{ K}}$$

<sup>a</sup> Measured by R. McDonough (1995), unpublished data, National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO.

<sup>b</sup> See annealing information in footnote c of Appendix A3.1.

<sup>c</sup> Measured by P. Kirkpatrick (1997), unpublished data, National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO.

# 4.3 絶縁素材の選定

絶縁素材にはポリイミド（カプトンテープ）がベスト。扱いに慣れよう！

## A4.4 代表的なワイヤー絶縁素材の耐熱温度

| Wire insulation               | Thermal rating |       |
|-------------------------------|----------------|-------|
| Polyvinyl Formal (Formvar™)   | 105°C          | 221°F |
| Tetrafluoroethylene (Teflon™) | 200°C          | 392°F |
| Polyimide (Kapton™)           | 220°C          | 428°F |

Source: *Temperature Measurement and Control* (2002), Sec. 3, Lake Shore Cryotronics, Inc., Westerville, OH.

ポリイミドは、機械的に強く、高い耐熱性を持ち、銅導体に密着しているため（Teflon™チューブ内の裸線とは異なり）、熱シンクへの熱的接触が良好で、効率的な熱アンカーを作ることができる。

ポリビニルホルマール絶縁膜は、化学ストリッパーで取り除くことができる。一方で、ポリイミドは非常に強靭で除去が難しい。(A1.7に挙げているサプライヤーの) 強力な化学ストリッパーを使えば取り除くことはできるが、一般的には時間がかかる。

実用上の最も良い方法は、除去したい部分を数秒間、炎（マッチやライター）にかざしてポリイミドを軟化させ、金属ブラシまたはカミソリの刃で軟化したポリイミドを削り取る。（このとき、刃を導線に対して逆方向に引くように動かすこと。） カミソリを使うこの方法は、絶縁部分と導体露出部の境界をはっきりとさせることができ、はんだ端子のすぐそばまで絶縁を保つことができる。（隣接する端子とのショートを防止できる。）この方法は密着したTeflon™絶縁を剥がす際にも有効である。（必ず端材で練習し、ワイヤーを傷つけすぎない感覚をつかむこと。）

綿を用いた保護（Cotton overwrap）も絶縁性の弱いワイヤーを補強するのに有効である。綿はニスをよく吸収し、機械的な保護としても機能する。

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

# 4.4 測定器配線のヒートシンク

中継地を設けられないときは試料台に巻きつけて熱アンカーを取ろう！

✓ 大きなクライオスタッフで、十分なスペース（直径2 cm以上）がある場合は銅製のヒートシンクポスト方式（Fig 1.7やFig 4.2）が、温度計や計測用リードの熱的な固定に便利で柔軟な仕様である。この場合、リード線は試料に接続する前に、**銅製のヒートシンクポスト**（またはボビン、またはテンパリングポスト？）に巻きつけられる。この構成では、「ポゴピン」（Sec 7.4.3で説明）などのスプリング式ピンラックを使用して、試料との電気的接地を行うことができる。**温度計**は試料の近く、Fig 4.2の模式図では銅製試料プラットフォームの反対側で約5 mm離れた位置に取り付けられる。

✓ 測定プローブをより小さくする必要がある場合（直径1.5 cm以下）、例えば高磁場マグネットの小さなボアの中に収めるためには、Fig 1.8およびFig 4.3に示してある方式を用いることができる。この場合、計測用リードは個々の銅ポストを設けるスペースがないため、試料支持ロッド本体に巻きつけることで試料温度まで導かれる。Fig 1.8に示したように、電圧リードと電流リードは、電流リードをプローブ本体の別の位置に巻きつけ、電圧リードとは異なる場所で熱的に固定することで分離する。

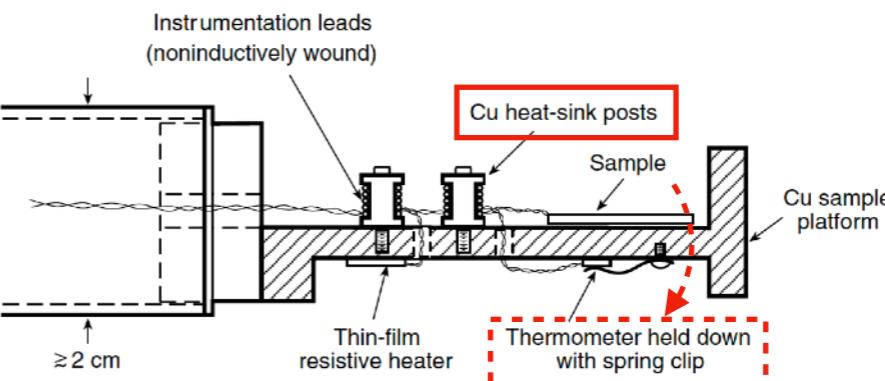


Fig. 4.2 Cross-sectional view of a heat-sink scheme for larger probes ( $\geq 2$  cm diameter) where there is enough room to screw copper posts to the sample platform. The instrumentation leads are first twisted in pairs to minimize sensitivity to induced voltages and then noninductively wound onto the heat-sink posts (see Fig. 4.4 and the accompanying tip). Finally, they are cemented in place with varnish or epoxy.

（必要な巻きつけ長については Sec 4.4.2およびA4.5を参照）

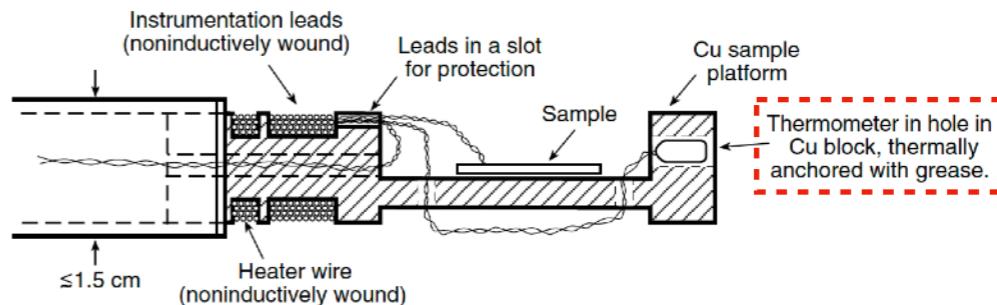


Fig. 4.3 Cross-sectional view of a heat-sink scheme for smaller probes ( $\leq 1.5$  cm diameter) that uses a groove cut around the circumference of the sample holder. Standard twisting and noninductive winding techniques are used, as described in the text.

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

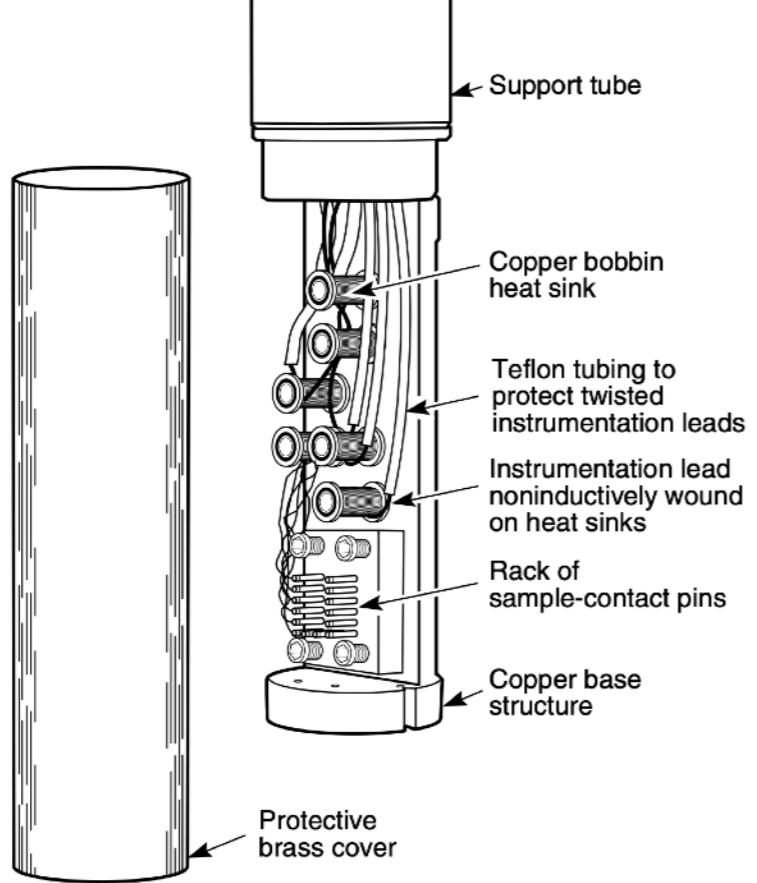


Fig. 1.7 Sample-holder section of a low-current dipper probe, showing copper base structure and sample holder for temperature stability, and copper-bobbin heat-sinking arrangement for the instrumentation leads (based on a design by Russek 1990).

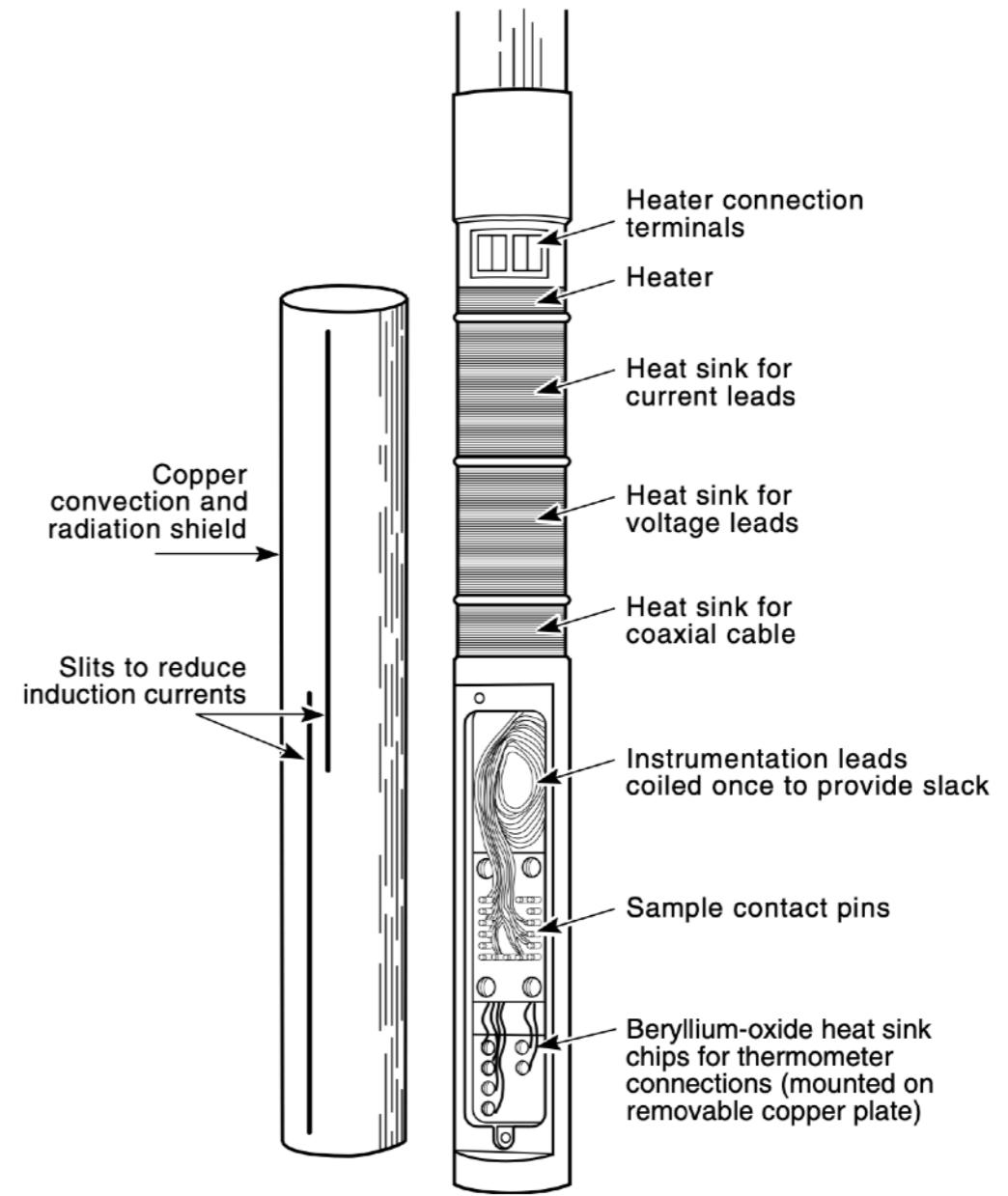


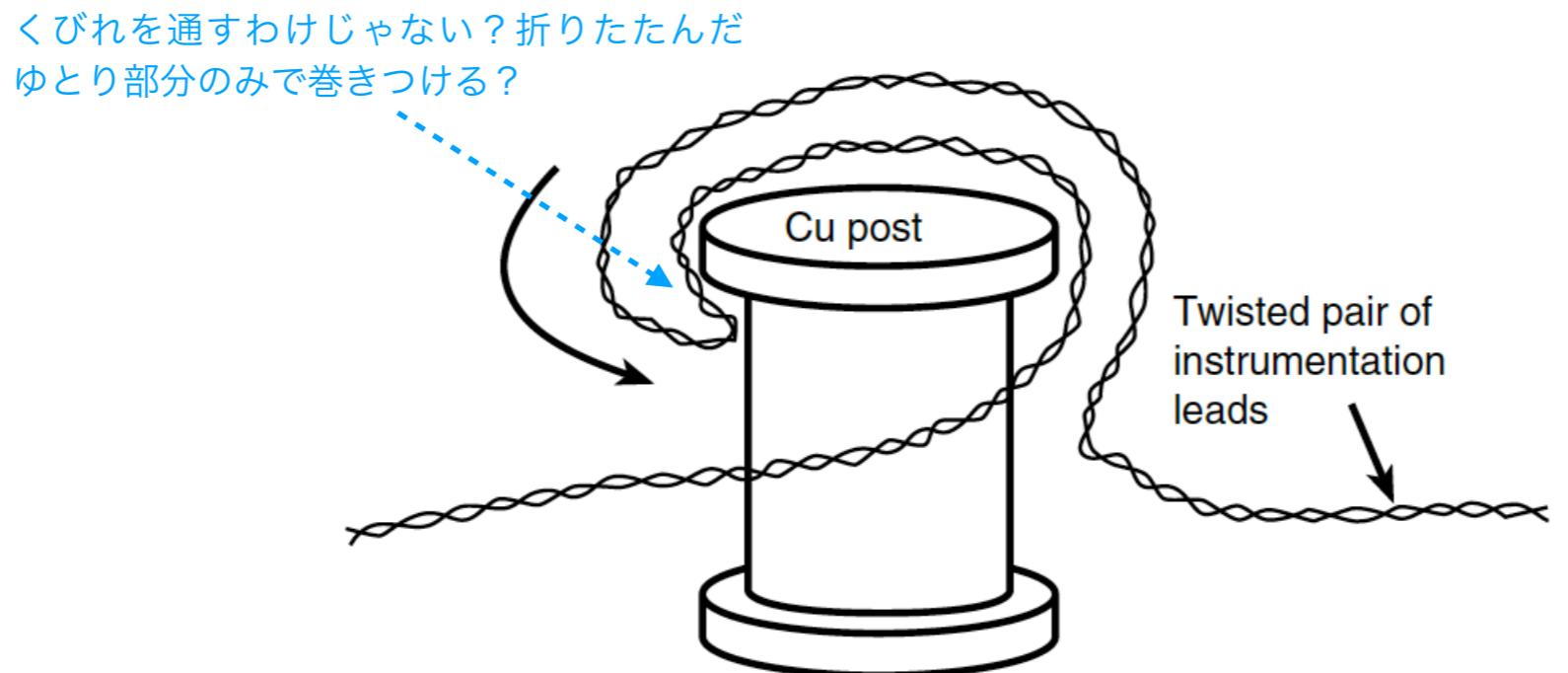
Fig. 1.8 Illustration of a small-diameter dipper probe for testing within the confined space of a high-field magnet (based on a design by Anlage 1988).

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

## 4.4.1 ワイヤーアンカーテクニック

### 磁場内で用いる測定器の設計では誘導起電力に気をつけよう

✓ クライオスタットを磁場内で扱う時は、磁気的に誘因される電圧を十分に減らすべく測定用リード線はFig 4.4に示したように「非誘導的に」銅製ボビンに巻きつけるべきである



**Fig. 4.4** Illustration of noninductive winding scheme for further minimizing induced voltages in instrumentation leads when making measurements in high magnetic fields.

## 4.4.2 熱アンカーに必要なワイヤー長

### 熱抵抗が大きい素材は短い中継で試料へ、銅はよく冷やすために長く

ヒートシンクへよく熱固定するために必要なワイヤーの長さをA4.5に示す。

- ✓ リン酸銅やコンスタンタン製のリード線の場合、数センチ程度の短い「テンパリング（熱緩衝）」長で十分。熱抵抗が銅線よりも高いためである。温度計や他の低電流 ( $\leq 10 \text{ mA}$ ) デバイスに適する。
- ✓ 銅は、リード線内でのジュール熱の発生を抑えるための高電流リード線として必要となる。熱起電力による干渉電圧を最小化するために、感度の高い直流電圧測定においては、最大で約100 cmものテンパリング長が必要な場合もある。

#### A4.5 THERMAL ANCHORING: REQUIRED WIRE LENGTHS (SEC. 4.4)

Tabulated values give the tempering length required to bring the designated wire material to within 1 mK of the heat-sink temperature  $T_s$ .

$T_1$  is the temperature where the lead was last thermally anchored.

##### Thermal anchoring: required wire lengths

| Material               | $T_1$<br>[K] | $T_s$<br>[K] | Tempering length for various wire gauges <sup>a</sup> [cm]                  |   |   |  |
|------------------------|--------------|--------------|---|---|---|--|
|                        |              |              | 0.005 mm <sup>2</sup><br>(#40 AWG) <sup>b</sup><br>(~0.080 mm) <sup>c</sup> | 0.013 mm <sup>2</sup><br>(#36 AWG)<br>(~0.125 mm) | 0.032 mm <sup>2</sup><br>(#32 AWG)<br>(~0.200 mm) | 0.21 mm <sup>2</sup><br>(#24 AWG)<br>(~0.500 mm) |
|                        |              |              | [cm]  | [cm]  | [cm]  | [cm]   |
| Copper                 | 300          | 80           | 1.9   | 3.3   | 5.7   | 16.0   |
|                        | 300          | 4            | 8.0   | 13.8  | 23.3  | 68.8   |
| Phosphor<br>bronze     | 300          | 80           | 0.4   | 0.6   | 1.1   | 3.2  |
|                        | 300          | 4            | 0.4   | 0.7   | 1.3   | 3.8  |
| Manganin               | 300          | 80           | 0.2   | 0.4   | 0.4   | 2.1  |
|                        | 300          | 4            | 0.2   | 0.4   | 0.7   | 2.0  |
| Stainless<br>steel 304 | 300          | 80           | 0.2   | 0.3   | 0.6   | 1.7  |
|                        | 300          | 4            | 0.2   | 0.3   | 0.5   | 1.4  |

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

## 4.4.3 酸化ベリリウムヒートシンクチップ

### BeOチップ：高い熱伝導性と電気的絶縁性を兼ね備えた素材

温度計や試料近くで優れた熱固定を行う方法に、ベリリウム酸化物（BeO）ヒートシンクチップを使うことがある。これらのチップは、低膨張係数材料（例：シリコンダイオードセンサー）と高膨張係数材料（例：銅やエポキシ樹脂）の間の膨張のミスマッチを吸収する機械的緩衝層としても利用される。

✓ Fig. 4.5の例では、BeOチップの片面が全面金属で覆われており、もう一方の面にリード線用の端子パターンが刻まれている。これにより、銅製ヒートシンクへのはんだづけが優れた熱伝導性を可能にし、試料ステージからの電気的絶縁も確保できる。

(液体窒素温度域では銅の数倍あるが、液体ヘリウム温度域では銅の約千分の一程度)

極低温 (<1 K) では何時間遅れて  
ステージと同じ温度になるんだろう?  
あるいはホントに冷えてるの?

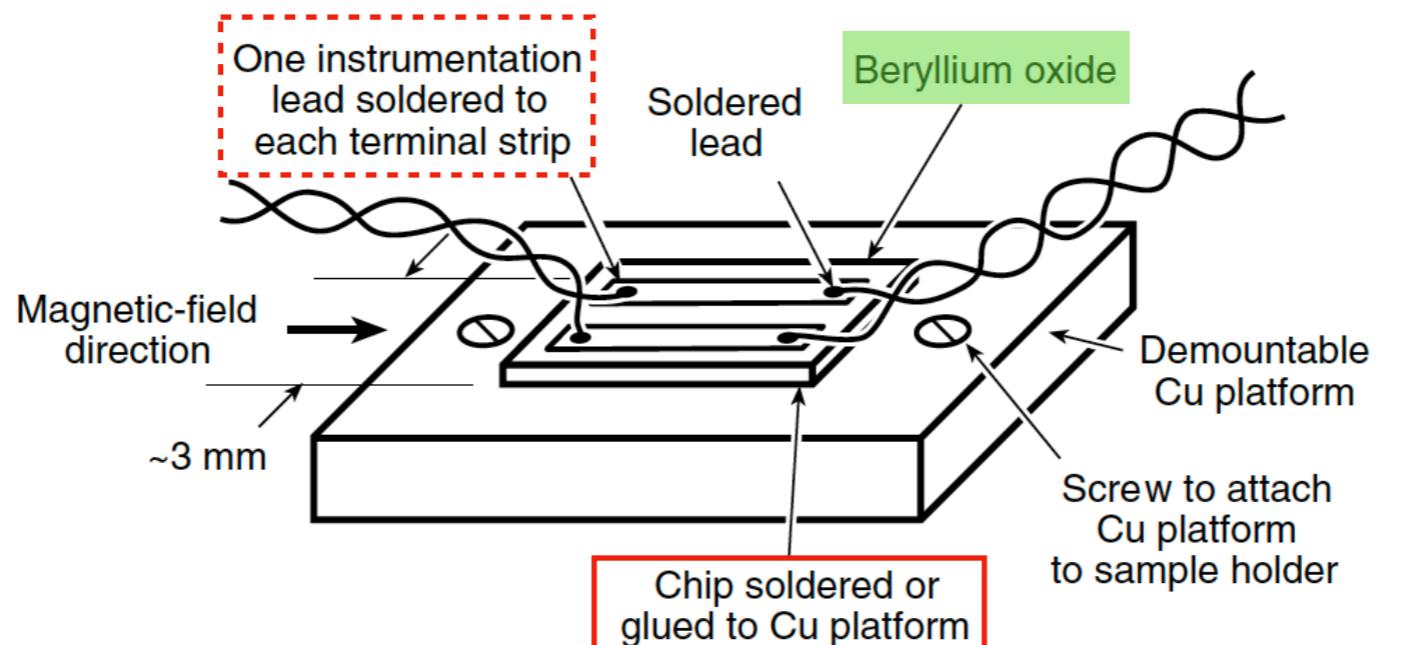


Fig. 4.5 Beryllium-oxide heat-sink chips for thermally anchoring instrumentation leads.

### 4.4.3 酸化ベリリウムヒートシンクチップ

チップと銅製ホルダーは測定装置のベースから取り外せるようにしよう

✓ BeOチップは小型の銅製プラットフォームにまずははんだづけし、その小型プラットフォームをねじ止めまたはグリースで大きな銅ベース構造に取り付けることを推奨。これにより小型プラットフォームを簡単に取り外すことができ、計測用リード線をヒートシンクチップにはんだづけしやすくなる。  
チップを装置のベース構造に直接はんだづけまたは接着した場合、(BeOの高い熱伝導性のために)チップの反対側にリード線をはんだづけするためにベース全体をはんだづけ温度まで加熱しようものなら、前述のワイヤー絶縁が軟化する問題に出くわしてしまう。

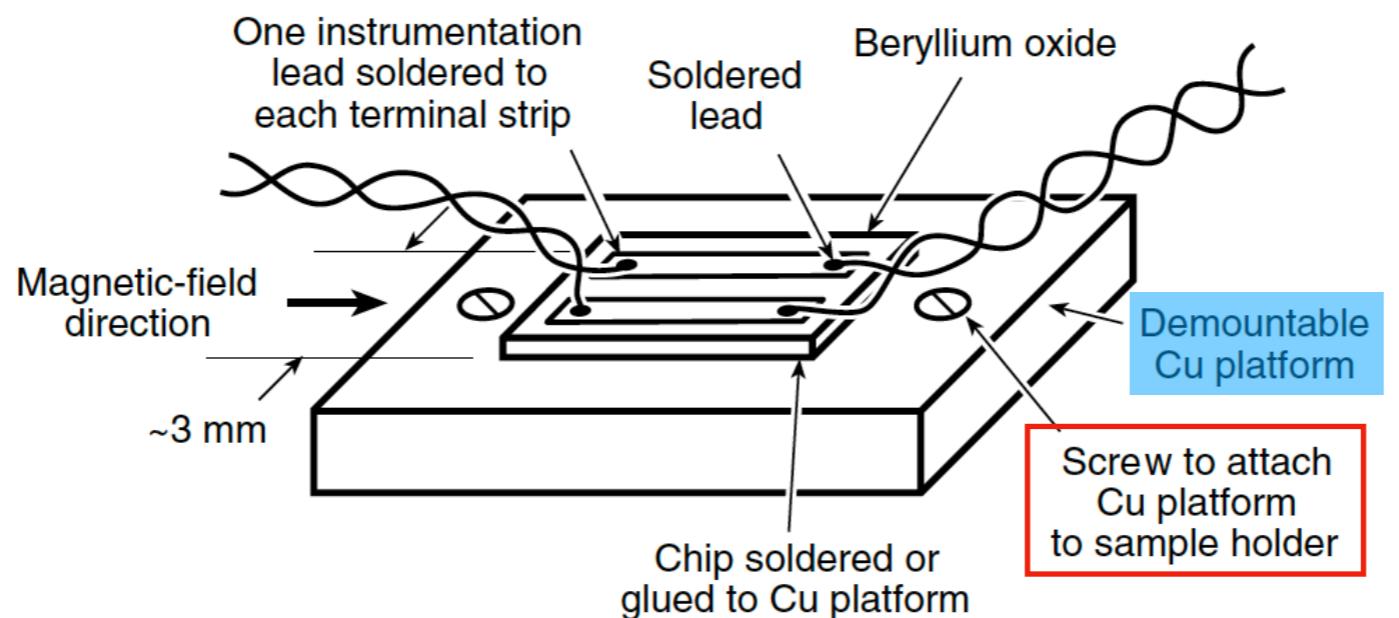


Fig. 4.5 Beryllium-oxide heat-sink chips for thermally anchoring instrumentation leads.

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sink Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

## 4.4.3 酸化ベリリウムヒートシンクチップ

磁束を拾わないよう、磁場方向とは平行に

✓ 磁場中で使用する場合は、チップ面を磁場方向と平行に配置する。磁場変動に誘導される電圧にさらされる有効ループ面積を最小限に抑えるためである (Fig. 4.5.)。同じ理由から、リード線はチップへのはんだづけ直前までツイストする。ヒートシンクチップの磁化率は「非磁性」ステンレス鋼と同程度である。

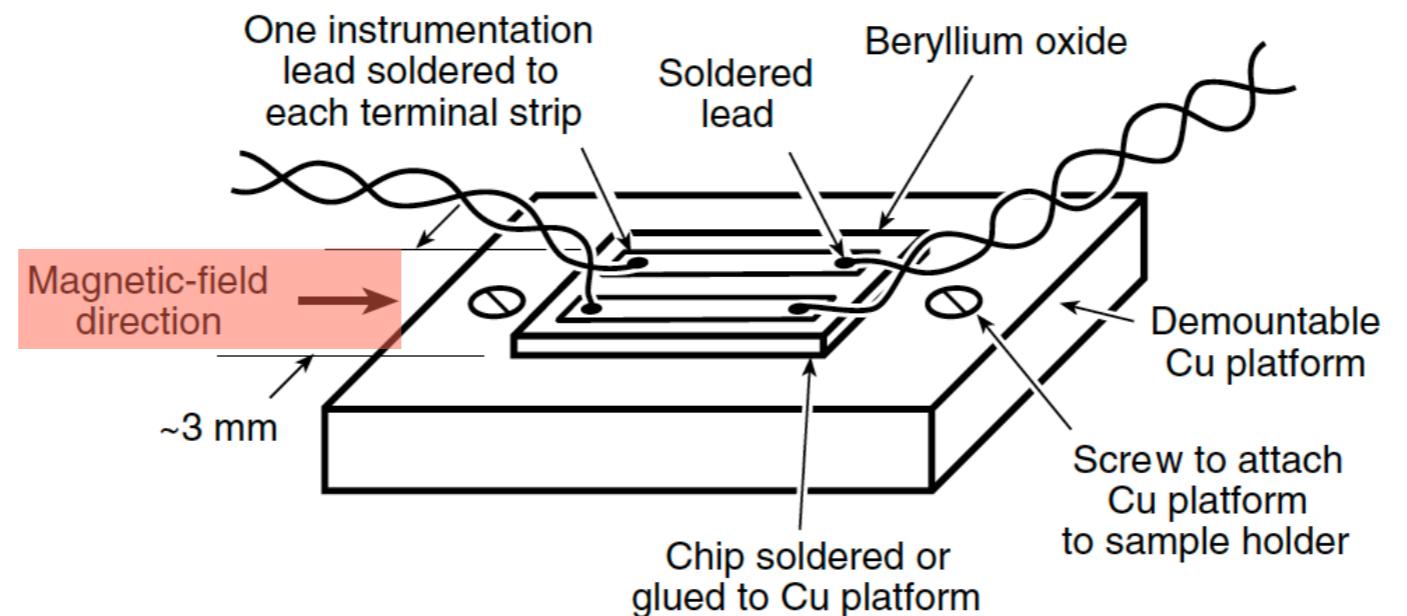


Fig. 4.5 Beryllium-oxide heat-sink chips for thermally anchoring instrumentation leads.

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

## 4.4.3 tips

### 細いワイヤーを小さな試料に繋げるときは中継点を考えてみて

細いワイヤを小さな試料に接続する場合、特に銀ペイントによる接着が弱い場合には、まず計測用リード線を図 4.6 に示すような、よりしっかりしたヒートシンクまたはタグストリップに取り付けることを検討しよう。その後、ピンセットでワイヤを曲げ、試料上の適切な位置に軽く押し当てる。最後に、はんだまたは銀ペイントを用いて、リード線を小さな試料に接続する。

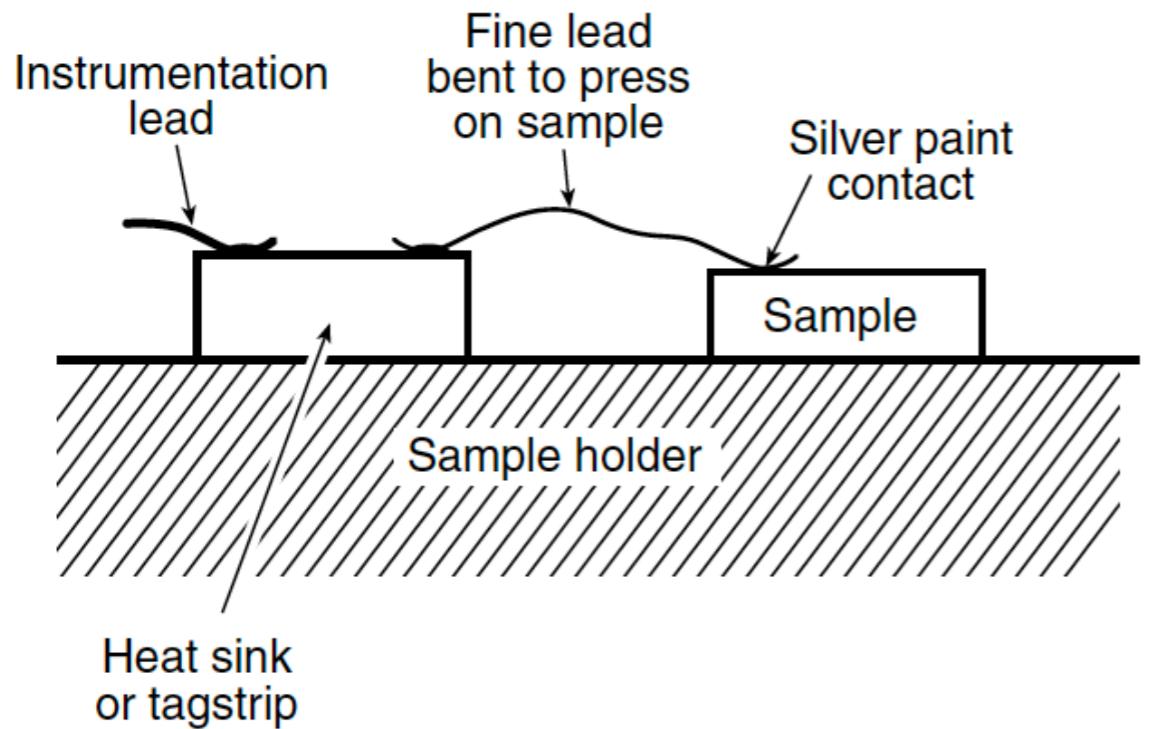


Fig. 4.6 Technique for attaching fine electrical leads to small samples, especially when using weak silver paint to contact the sample.

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

# 4.5 はんだづけ

## 対象とする素材にあわせた「はんだ」と「フラックス」を選ぼう

A3.7で既にまとめたように、材料や許容できる温度に応じた適切なはんだを表にまとめた。A3.8にははんだづけ対象の金属の種類ごとに使用すべきフラックスを、A3.9には一部の超伝導特性をまとめた。

ワイヤーとの接合には以下のはんだ・フラックスの組み合わせが好まれる：

- **銅線の場合のおすすめ**

63%Sn–37%Pb または **63%Sn–36.65%Pb–0.35%Sb** の共晶はんだ  
活性化されていない純粋なロジンフラックス

- **アルミニウム線の場合のおすすめ**

95%Zn–5%Al のはんだ、**反応性**フラックス

- **薄膜貴金属表面への接触接続の場合のおすすめ**

97%In–3%Ag の共晶はんだ、**フラックスなし** (pp. 331–332 参照)

より気を遣う材料（ニクロムヒータ線など）には、63%Sn–37%Pbの共晶はんだとA3.8にあげられた強力な酸性フラックスを併用する。はんだづけの後には、重曹と水との溶液でフラックス残留物を中和し、石鹼水またはアルコールで洗浄することが重要である。

十分な加熱によって、はんだがスムーズに流れ、リード線をしっかりと濡らすことが重要。そうすることで、見つけるのが難しい抵抗を持った「冷たい」はんだ接合を防ぐことができる。十分な熱はまた、フラックスを活性化させ、清潔で酸化物のない表面を作るのも必要である。

利点は続く節で

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sink Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sink Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

## 4.5.1 熱サイクルによるはんだ接合の割れ

### 熱サイクルによる割れ防止のために少量のアンチモンを含んだはんだを使おう

室温と極低温とを行き来する熱サイクルによって、はんだに亀裂がはいることがある↓  
Pb-Snの共晶はんだは一般的に問題ないが、少量のアンチモン(Sb)を添加することで潜在的な問題を最小限に抑えられる。

そこでおすすめは

(クライオスタット内の) 銅線接続：

**63%Sn-36.65%Pb-0.35%Sb**の共晶はんだ（融点183°C）と  
純粋なロジンフラックスの組み合わせ。

より高温ではんだづけしないといけない電気接続：

スズの少ない**93%Pb-5.2%Sn-1.8%Ag**はんだ（融点299°C）



図1 チップ抵抗のはんだ接合部外観と断面の模式図

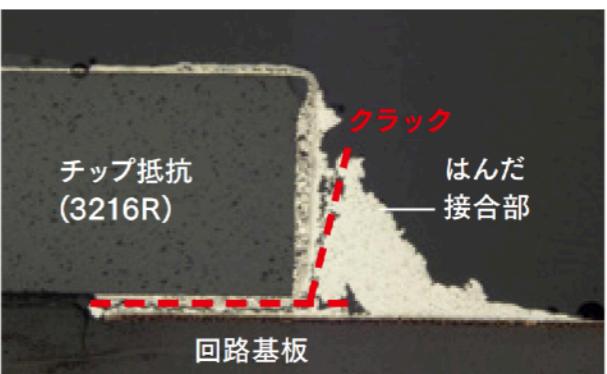


図2 冷熱サイクル試験後のはんだ接合部断面

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

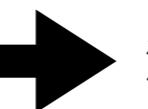
## 4.5.2 銀や金の薄膜へのはんだづけ

**はんだ（スズ）が金や銀の薄膜を溶かすことに注意、In-Agを使おう**

銀や金の薄膜でコーティングされた表面にはんだづけを行う際には、スズ(Sn)を含むはんだの使用を避けることが望ましい。特に高温超伝導 (Sec. 8.3.3) への電気接続に使用される貴金属コンタクトパッドへのはんだづけで顕著な問題となる。

強力な溶解剤 (leaching agent) としてスズは厚さ $1\mu\text{m}$ 以下の貴金属薄膜を完全に溶かすことがある。

貴金属薄膜には97%In-3%Agの共晶はんだを用いて、融点 (143°C) よりわずかに高い温度で加熱するのを推奨する。この組成では、温度を共晶点付近に保つ限り、余分な銀の溶融を最小限に抑えることができる。フランクスは使用せず、代わりに接合表面をアルコールできれいに洗浄すると良い



濡れ性が高いからと安易に金メッキ線を使わない

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

# 4.5.3 超伝導はんだ残留物

## はんだは超伝導になる、7 K以下あるいは0(10) mT以下の測定は要注意

「一般的なはんだは液体ヘリウム温度で超伝導状態になる」

「新しい効果」として報告された研究が実際には超伝導化したはんだによる現象だった例が過去にある。

可変温度測定において、試料に対する電圧リード線の接触点の位置がはんだの臨界温度付近で実質的に変わることがある。はんだ塊が突然超伝導状態となり、試料の一部に超伝導の迂回路(shunt)を作ってしまうため。結果として、測定される輸送特性が偽の変化を示す。この影響は、特に低電流で行う輸送測定で顕著で、流れる電流が全てごく薄いはんだコーティング層を通っていることも。

磁場のスイープでも同様の問題が発生する。印加磁場がはんだの臨界磁場 ( $H_c$ ) を超えると、はんだの超伝導が抑制され、電圧端子間の実行的な長さが変化し、異常な磁場依存性を示すことがある。これは高磁場下での測定では一般的に遭遇しない問題でもある。多くのはんだ材料の臨界磁場は非常に低く（例：60%Sn-40%Pbはんだで  $H_c \approx 0.08$  T）、高磁場中でははんだが常伝導状態に保たれるため。一方で、低磁場環境では誤解を招きやすい。

[再掲] A3.9はんだ材料の超伝導特性（臨界温度 $T_c$ および臨界磁場 $H_c$ ）

A3.9 SOLDER: SUPERCONDUCTING PROPERTIES (SEC. 3.3.4)

| Solder<br>[wt%]    | $T_c$<br>[K] | $H_c$ (1.3 K)<br>[T] | Melting temperature<br>[°C] |
|--------------------|--------------|----------------------|-----------------------------|
| 60Sn-40Pb          | 7.05         | 0.08                 | 182–188                     |
| 50Sn-50Pb          | 7.75         | 0.20                 | 182–216                     |
| 30Sn-70Pb          | 7.45         | 0.15                 | 182–257                     |
| 95Sn-5Sb           | 3.75         | 0.036                | 232–240                     |
| 50In-50Sn          | 7.45         | 0.64                 | 117–125                     |
| 50In-50Pb          | 6.35         | 0.48                 | 180–209                     |
| 97.5Pb-1.0Sn-1.5Ag | 7.25         | 0.11                 | 309                         |

$T_c$  ≡ superconducting transition temperature of the solder

$H_c$  ≡ superconducting critical field of the solder

Source: W. H. Warren and W. G. Bader (1969), *Rev. Sci. Instrum.* 40, 180–182.

# ワイヤーチェンバーの例だけど

KOTO (南條さんより)



- 50 umのNi-Auメッキタングステン(現アライドマテリアル) TGC開発の余り
- Sn/Agの共晶はんだ、張力 300g重
- ワイヤーピッチ 1.8 mm, カソードピッチ1.4 mm
- 熱接触アルミフレームの上にFR4基盤を作製し、フライスで平面出し

ATLAS (田中さんより)  
Wire winding

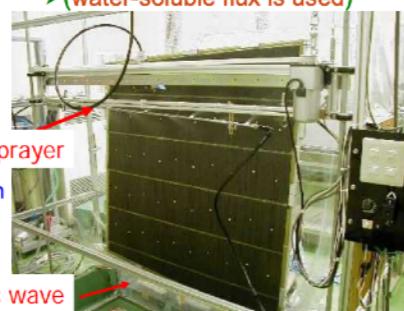


Washing machine:

➤to remove some dusts on the cathode plane by mist.

➤Washing away the solder flux with ultrasonic cleaning

➤(water-soluble flux is used)



Wire winding machine

✓ Consists of a linear actuator and a rotating table.

✓ Total ~ 800,000 wires

Anode Wire: Gold plated Tungsten  
(A.L.M.T. co. Ltd.)

Solder: Sn(80)+Zn(20)

■ Flux: Water soluble flux

Mist sprayer

Ultrasonic wave

- Sn/Zn 72:28の非共晶はんだ  
→粘性が高い (広がりが少ない)→

## 共晶はんだと鉛フリーはんだの違いと比較の一覧

[リンク](#)

使用面においてはやはり融点の違いがいろいろなシーンで難しさを生み出しています。  
共晶はんだと鉛フリーはんだを下表で比較してみました。

共晶はんだ（鉛はんだ）と鉛フリーはんだの違いと比較

|                 | 共晶はんだ<br>(鉛はんだ)                                    | 鉛フリーはんだ                                  |
|-----------------|--|--|
| 融点              | 約183°C   | 約217°C                                   |
| 成分              | 鉛を含む (他、スズ、ビスマス、銀等)                                | 鉛を含まない (他、スズ、銅、ニッケル、銀、ゲルマニウム、インジウム、亜鉛等)  |
| ぬれ性             | ぬれ広がりがよい   | ぬれ性はよくない                                 |
| コスト・価格          | 比較的安価  | 高コスト                                     |
| 仕上がり状態          | 表面に金属光沢がある   | 金属光沢がなく白っぽい                              |
| 種類              | JISでは19種類  | JISでは30種類                                |
| 比重              | 鉛がある為重い (7.4から11前後)                                | 鉛がない分軽い (7.4から8.4前後)                     |
| 機械的強度<br>(引張強さ) | 10前後から43MPa前後                                      | 機械的強度は鉛がない分強い                            |
| 電気抵抗            | 電気抵抗は成分により異なるが13前後から55前後 ( $10^{-2} \mu\Omega m$ ) | 電気抵抗は鉛はんだより小さい                           |
| はんだごて温度         | 低め (約260°C。約250°C 3秒で合金層形成される)                     | 高め (但し360°C以下に抑えないとオーバーヒートや使用不能になることがある) |
| はんだごて寿命         | ごて先の消耗はゆっくり  | ごて先の消耗が早い (鉛はんだの約3倍。はんだ食われの為)            |
| 利用分野            | 航空・電車等一部高信頼性が求められる分野                               | 電子部品、家電製品のほぼすべて                          |

<https://atlas.kek.jp/old/sub/documents/jps200503/jps-tanaka.pdf>

# 4.6(.1) 热起電力を低く抑える技術

## 均質な素材でワイヤーを作ろう、はんだづけは必要箇所にとどめよう

電気リード線の高温端と低温端の温度勾配によって生じる（ゼーベック効果）。戻り線が同じ材質で作られており、均質で、かつ途中に接合が存在しない場合、下り線で発生した熱起電力と等しく反対方向の電圧が生成され、互いに打ち消す。この理想的な条件下では、室温側で上りと下りの両リード線を接続した電圧計は、理論的には熱起電力を検出しないはず。

キーポイント2点：

1. **均質なワイヤー材料を使う。**可能であれば熱電対用に製造されたワイヤーが理想的。

2. **はんだ接合をできるだけ避ける。**はんだとワイヤー材料の熱起電力の不一致が、熱起電力の主要因となるから。上りと下りに対応する一対の接合部が完全に同じ温度に保たれていないと、時間的に変動する熱起電力のドリフトがリード線内に生じる。

A4.6a (元素) およびA4.6b (技術材料) に熱起電力をあげる→次ページ

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

# 4.6(.1) 热起電力を低く抑える技術

## A4.6a THERMOELECTRIC VOLTAGES OF SOME ELEMENTS RELATIVE TO COPPER (SEC. 4.6)

Tabulated thermoelectric voltages are *relative to copper* with the reference junction at 0°C.

A positive sign means that, in a simple thermoelectric circuit, the resultant voltage direction produces a current from the material to the copper at the reference junction (0°C).

Values have been *ordered by their absolute magnitude* at -100°C or, when not available, at +100°C. Thus, the higher a material's position in the table, the closer its thermoelectric voltage matches that of copper.

**Thermoelectric voltages of some elements relative to copper**

| Element    | -200°C<br>[mV] | -100°C<br>[mV] | 0°C<br>[mV] | +100°C<br>[mV] | +200°C<br>[mV] |
|------------|----------------|----------------|-------------|----------------|----------------|
| Gold       | -0.02          | -0.02          | 0           | +0.02          | +0.01          |
| Silver     | -0.02          | -0.02          | 0           | -0.02          | -0.06          |
| Iridium    | -0.06          | +0.02          | 0           | -0.10          | -0.34          |
| Rhodium    | -0.01          | +0.03          | 0           | -0.06          | -0.22          |
| Carbon     | —              | —              | 0           | -0.06          | -0.29          |
| Indium     | —              | —              | 0           | -0.07          | —              |
| Zinc       | +0.12          | +0.04          | 0           | 0.00           | +0.06          |
| Cadmium    | +0.15          | +0.06          | 0           | +0.14          | +0.52          |
| Thallium   | —              | —              | 0           | -0.18          | -0.53          |
| Tungsten   | +0.62          | +0.22          | 0           | +0.36          | +0.79          |
| Lead       | +0.43          | +0.23          | 0           | -0.32          | -0.74          |
| Cesium     | +0.41          | +0.24          | 0           | —              | —              |
| Tin        | +0.45          | +0.25          | 0           | -0.34          | -0.76          |
| Cerium     | —              | —              | 0           | +0.38          | +0.63          |
| Tantalum   | +0.40          | +0.27          | 0           | -0.43          | -0.90          |
| Magnesium  | +0.56          | +0.28          | 0           | -0.32          | -0.73          |
| Platinum   | +0.19          | +0.37          | 0           | -0.76          | -1.83          |
| Aluminum   | +0.64          | +0.43          | 0           | -0.34          | -0.77          |
| Molybdenum | —              | —              | 0           | +0.69          | +1.36          |
| Thorium    | —              | —              | 0           | -0.89          | -2.09          |
| Lithium    | -0.93          | +0.63          | 0           | +0.06          | —              |
| Sodium     | +1.19          | +0.66          | 0           | —              | —              |
| Rubidium   | +1.28          | +0.83          | 0           | —              | —              |
| Calcium    | —              | —              | 0           | -1.27          | -2.96          |
| Palladium  | +1.00          | +0.85          | 0           | -1.33          | -3.06          |
| Mercury    | —              | —              | 0           | -1.36          | -3.16          |
| Potassium  | +1.80          | +1.15          | 0           | —              | —              |
| Cobalt     | —              | —              | 0           | -2.09          | -4.91          |
| Nickel     | +2.47          | +1.59          | 0           | -2.24          | -4.93          |
| Antimony   | —              | —              | 0           | +4.13          | +8.31          |
| Bismuth    | +12.58         | +7.91          | 0           | -8.10          | -15.40         |
| Germanium  | -45.81         | -26.25         | 0           | +33.14         | +70.57         |
| Silicon    | +63.32         | +37.54         | 0           | -42.32         | -82.40         |

Source: Calculated from thermal emf data compiled in the *American Institute of Physics Handbook* (1972), 3rd edition, Chapter 4, McGraw-Hill, New York.

## A4.6b THERMOELECTRIC VOLTAGES OF SELECTED TECHNICAL MATERIALS RELATIVE TO COPPER (SEC. 4.6)

Tabulated thermoelectric voltages are *relative to copper* with the reference junction at 0°C.

A positive sign means that in a simple thermoelectric circuit the resultant voltage direction produces a current from the material to the copper at the reference junction (0°C).

Values have been *ordered by their absolute magnitude* at +100°C. The higher a material's position in the table, the closer its thermoelectric voltage matches that of copper.

**Thermoelectric voltages of selected technical materials relative to copper**

| Technical Material               | -200°C<br>[mV] | -100°C<br>[mV] | 0°C<br>[mV] | +100°C<br>[mV] | +200°C<br>[mV] |
|----------------------------------|----------------|----------------|-------------|----------------|----------------|
| Silver coin<br>(90%Ag-10%Cu)     | —              | —              | 0           | +0.04          | +0.07          |
| 60%Ni-24%Fe-16%Cr                | —              | —              | 0           | -0.09          | +0.18          |
| Copper-beryllium                 | —              | —              | 0           | -0.09          | -0.21          |
| Manganin                         | —              | —              | 0           | -0.15          | -0.28          |
| Yellow brass                     | —              | —              | 0           | -0.16          | -0.34          |
| Copper coin<br>(95%Cu-4%Sn-1%Zn) | —              | —              | 0           | -0.16          | -0.35          |
| Phosphor bronze                  | —              | —              | 0           | -0.21          | -0.49          |
| Solder (50%Sn-50%Pb)             | —              | —              | 0           | -0.30          | —              |
| Solder (96.5%Sn-3.5%Ag)          | —              | —              | 0           | -0.31          | —              |
| 18-8 Stainless steel             | —              | —              | 0           | -0.32          | -0.79          |
| 80%Ni-20%Cr                      | —              | —              | 0           | +0.38          | +0.79          |
| Spring steel                     | —              | —              | 0           | +0.56          | +0.80          |
| Gold-chromium                    | —              | —              | 0           | -0.93          | -2.15          |
| Iron                             | -2.73          | -1.47          | 0           | +1.13          | +1.71          |
| Alumel                           | +2.58          | +1.66          | 0           | -2.05          | -4.00          |
| Chromel P                        | -3.17          | -1.83          | 0           | +2.05          | +4.13          |
| Nickel coin<br>(75%Cu-25%Ni)     | —              | —              | 0           | -3.52          | -7.84          |
| Constantan                       | +5.54          | +3.35          | 0           | -4.27          | -9.28          |

Source: Calculated from thermal emf data compiled in the *American Institute of Physics Handbook* (1972), 3rd edition, Chapter 4, McGraw-Hill, New York.

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

# 4.6(.1) 热起電力を低く抑える技術

## 接合の数は極力減らし、まず圧接、次にはんだ、という順で検討する

解決策：

1. 高感度の電圧リード線の接合箇所を最小限に抑える
2. 接合部と同じ温度に保つ
3. はんだを使用せず接合を行う（銅と銅の直接圧接）  
銅に対して熱起電力の小さいはんだを使う(A4.6b参照)
4. 接合面を綺麗に保ち、酸化膜を除去しておく

対策が効果的であるには、試料から電圧計までの経路全体にわたって対策が徹底されている必要がある。接合部は通常、試料および電圧計部分を除き、他の箇所では全く必要ない。試料からプローブを通り「コネクタ」ボックスまで連続したリード線を用いて接合を一切設けない構成が可能。高感度の電圧リード線にわたって接合を排除することで熱起電力による干渉を一桁以上低減できることを確認した。

極低温環境でも室温環境でも、**裸線と銅ブロックとをネジとワッシャーでとめる (Fig 4.7)**、あるいは（全銅製のワニ口クリップを用いた）スプリングで直接圧接することによって、はんだなしの接合が可能である。接合面にある銅酸化物は熱起電力を何桁も増加させるため、必ず非金属製の研磨パッド（例：Scotch-Brite™）で銅表面を清掃する。金は酸化皮膜を作らず、熱起電力も銅とほぼ同じであるため、接合部の金メッキも有効。銀は酸化しやすいため接触メッキ材としては不適。

銅線同士を確実に電気に繋ぐためには、インジウムまたはIn-3%Au合金を含んだはんだを使う。これらは鉛ベースはんだに比べ熱起電力が非常に銅に近い（In系で差は0.7  $\mu\text{V}/\text{K}$ 、50%Sn-50%Pbは3  $\mu\text{V}/\text{K}$ 、A4.6a参照）。カドミウム系の低熱起電力はんだは、毒性があり、濡れ性が悪いので使用は推奨されない。

温度計リード線で熱伝導を小さくしたい場合は、コンスタンタンよりもリン青銅 (phospher bronze) やマンガニン (Manganin) の方が望ましい。コンスタンタンやマンガニンは商用温度計センサーに使用される銅線との熱起電力差が小さい。温度計の信号レベルはmVオーダーであるため、熱起電力による搅乱はほとんどの場合問題にならない。ただし、温度計ダイオードをもちいた交流整流 (AC rectification) には注意が必要で、（クライオコントローラーで使われているPulse-Width-Modulatedパワーといった）交流源からダイオードのリード線を遠ざけてあげることで整流効果を最小化することができる。

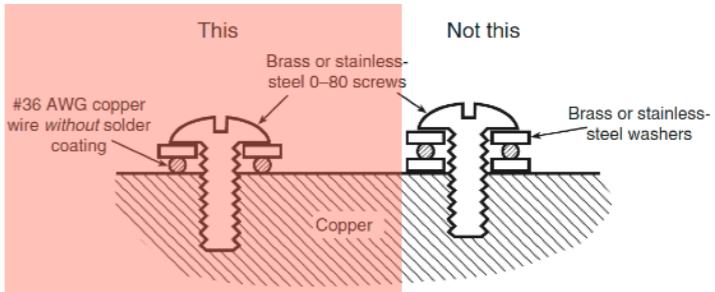


Fig. 4.7 When attaching a bare copper wire to a copper block, make sure that the wire is in direct contact with the block, not between washers, as is common, for example, with telephone-wire connectors. Clean the wire and the block with Scotch-Brite™ to remove the surface oxide.

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

## 4.6.2 電圧計の接続

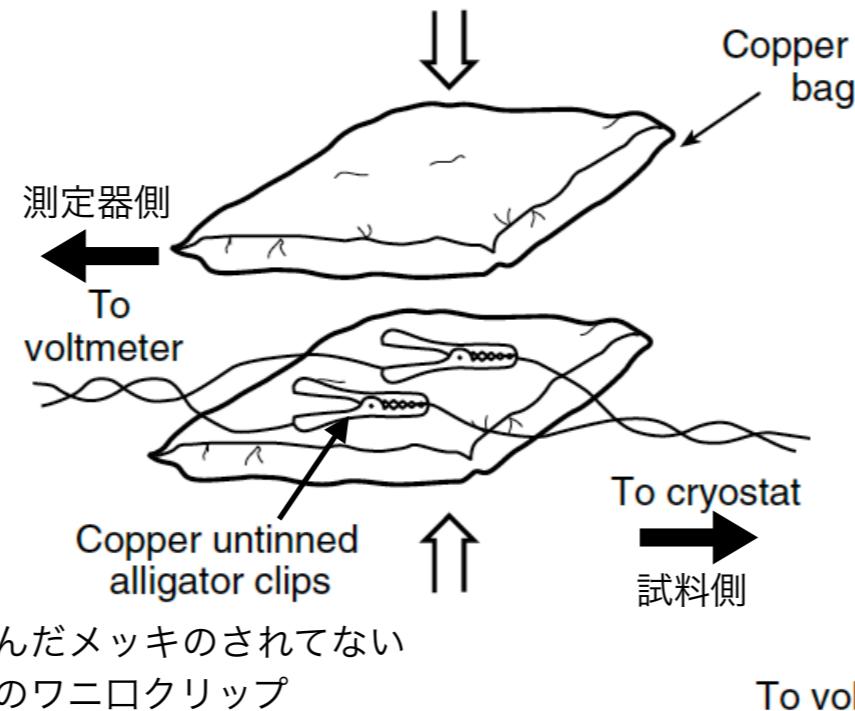
### 物理的に接続を切り替え、熱平衡になるまで十分時間を取ろう

高感度のDC測定では、室温側の電圧計の接続でも熱起電力ドリフトを最小限に抑える設計が必要。

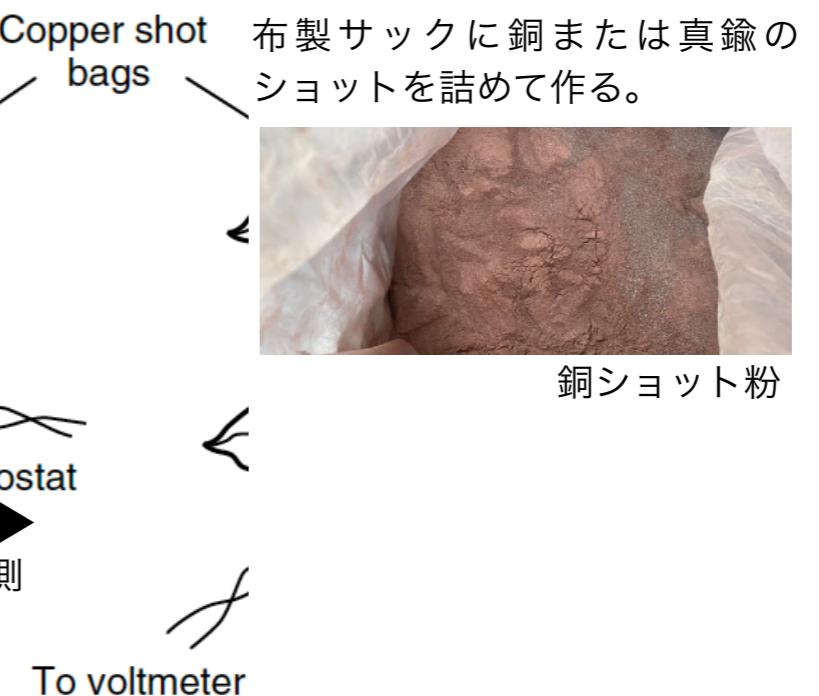
マルチプレクサスイッチを使って複数の電圧を切り替えて測定する場合は、必ず低熱起電力タイプを使用する。正確な測定のために熱平衡に達するまでに何度も20秒程度の辛抱が必要になるので、可能であればマルチプレクサを使わぬ方がよい。

専用のナノボルトメータを使用し、測定開始時に一度だけ接続、測定開始前に接続部が熱平衡に達するまでの十分な時間を確保する。プラス端子とマイナス端子は、（ドリフトを抑制するための）大きな熱容量をもち、（温度差を最小化するために）お互いに熱接触が十分とれていることが望ましい。

(a) 最もシンプルな構成



(b)



接触面の酸化銅皮膜は大きな熱起電力を生むため、銅表面は綺麗に保つ。

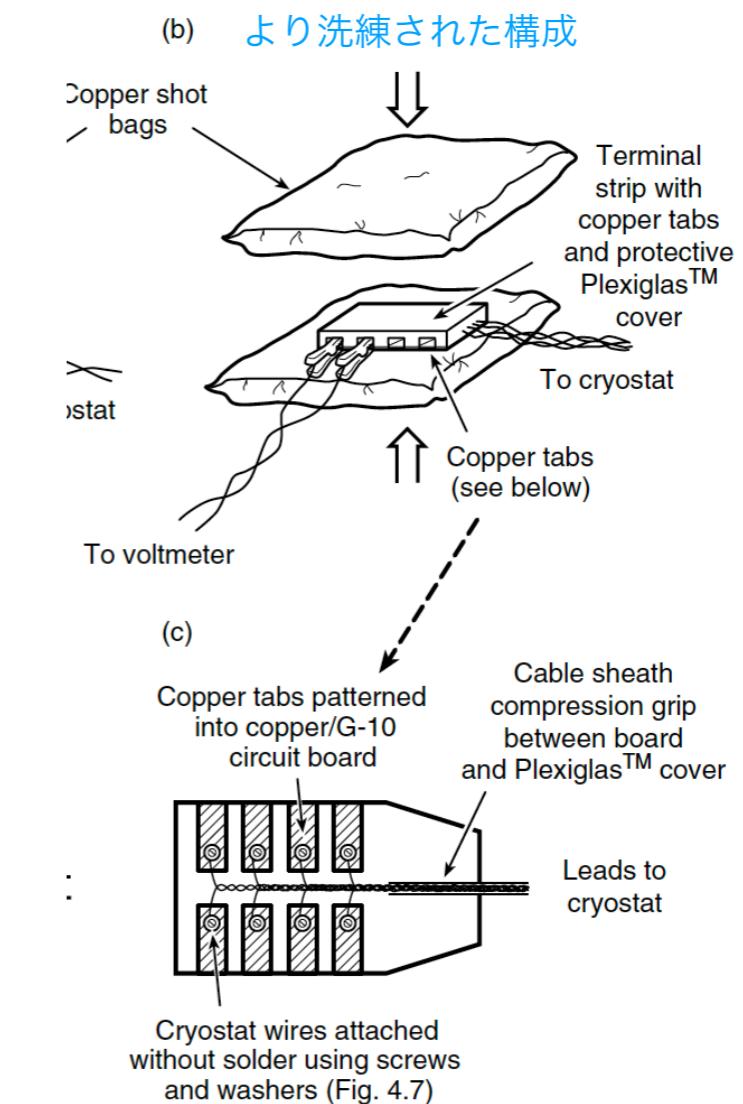
- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

## 4.6.2 電圧計の接続

絶縁を保ったまま、熱的には良く繋がっている

多くの計測用リード線を使うときにはほぼ必須となる構成 (Fig 4.8bやFig 4.8c) :

- 各端子に銅のコネクタを付け、ネジやワッシャーなど銅の直接的な圧接によって クライオスタットのリード線に連続的に接続する
- ワニ口クリップを異なる端子タブへ簡単に移動させられる。  
※ワニ口クリップのあごの向きに注意。クライオスタット側のリード線が直接繋がっている銅タブに接触されること。もう一方のあごはスプリングやヒンジピンを介して弱く繋がっているだけで十分な接触が保証されない。



(d) 手間はかかるが究極の構成

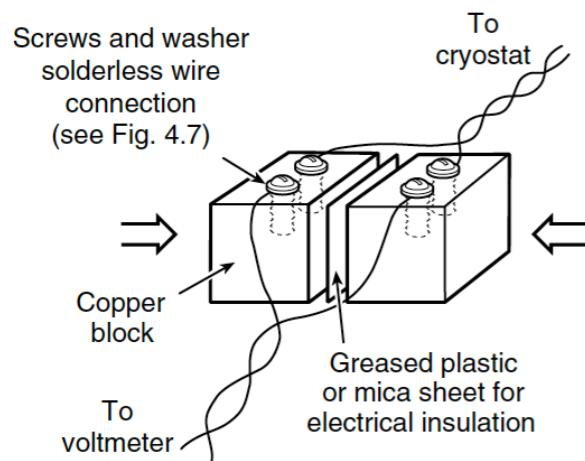


Fig 4.8dの構成は少し手間がかかるが極めて優れた温度安定性をもたらす：

- 2個以上の銅ブロックがグリースによって熱的に繋がっている状態
- 薄いマイカ（雲母）あるいはプラスチックシートが、ブロック間の電気的絶縁を保持するが熱的には良好に接触している
- リード線は、ネジとワッシャーで銅ブロックに固定
- ブロック全体を紙やティッシュを敷き詰めたダンボール箱に入ることで空気の対流を抑制

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sink Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

# 4.7 真空電極リードスルー

コネクタ部分でいかに断熱し、湿気を防ぐか

## 4.7.1 室温リードスルー

市販の真空コネクタは通常、室温での使用を前提に設計されている。冷やされると、材料間の熱収縮率の違いによって真空シールが割れてしまう。コネクタが十分に暖かく保たれていないと、水分や霜が付着して短絡してしまう。Fig 1.6のDipper Probeではステンレス製の支持チューブが高い熱抵抗が、この熱的・湿気的な絶縁を果たす。

Fig 1.14に示されているような大型プローブでは、ヘッドプレート（トッププレート？）から突出した4~6 cmのステンレス製チューブ先端にコネクタをつけることで、この機能を確保する。

クライオスタットのヘッド部に設置されるコネクタボックスに見られる2種類の基本的な型：

- ・ 非真空型 (nonvacuum type)  
クライオスタットから出てくるリード線が、コネクタボックスに入る前に真空シールされている
- ・ 真空型 (vacuum type)  
コネクタボックスが真空になっていて、リード線がボックスの外に出るときには個別の真空タイトなコネクタが付いている

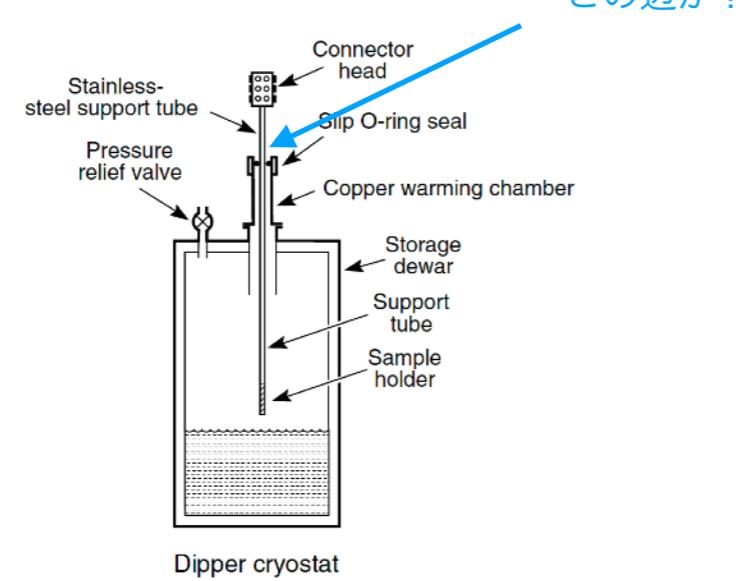


Fig. 1.6 Variable-temperature dipper probe for low-current measurements.

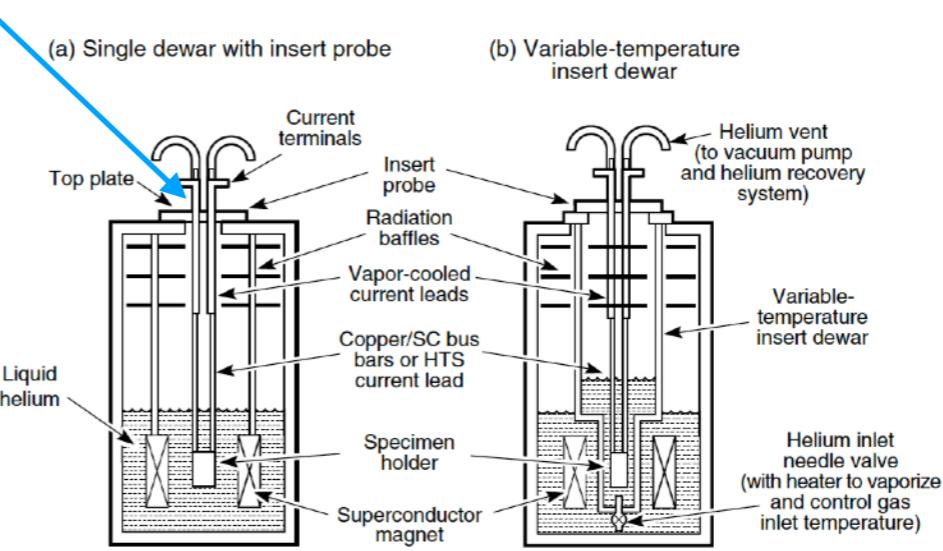


Fig. 1.14 Dewar arrangements for high-current testing: (a) single dewar for cooling both sample and superconducting magnet; (b) separate insert dewar that can be pumped to vary the temperature of just the sample bath.

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sink Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

# 4.7 真空電極リードスルー

G10とエポキシで絶縁、真空気密を保持。リード線はポリイミド皮膜

## 4.7.1 室温リードスルー (Nonvacuum connector boxes)

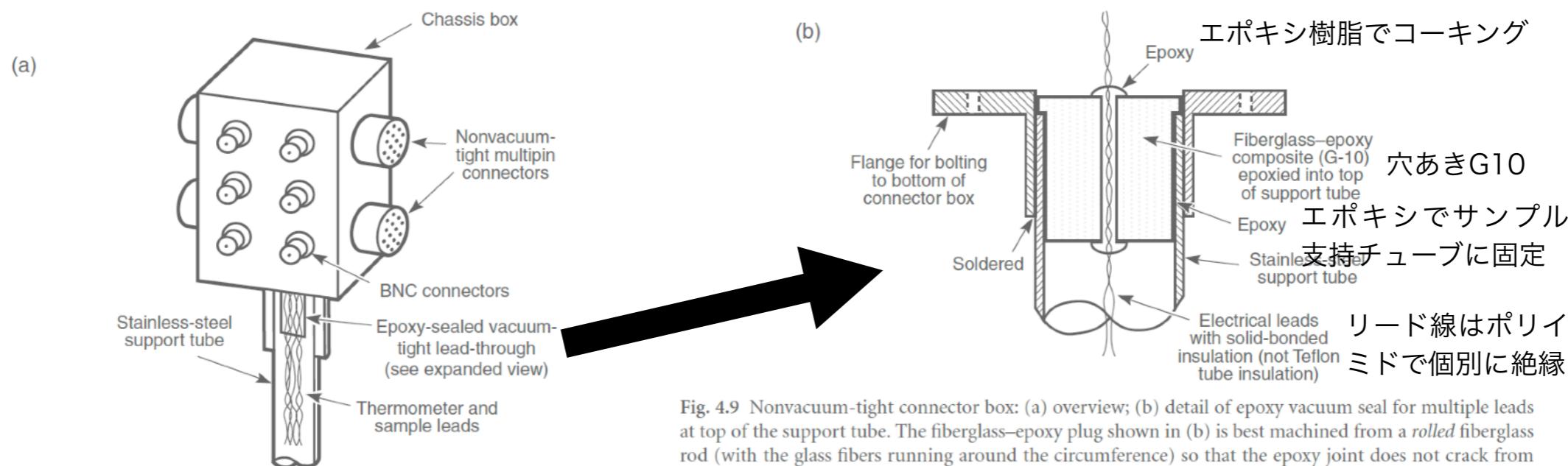


Fig. 4.9 Nonvacuum-tight connector box: (a) overview; (b) detail of epoxy seal for multiple leads at top of the support tube. The fiberglass-epoxy plug shown in (b) is best machined from a *rolled* fiberglass rod (with the glass fibers running around the circumference) so that the epoxy joint does not crack from stress generated by differential thermal contraction with the stainless-steel support tube.

利点：構造が単純で製作が容易。複数のリード線を一度にまとめてシールでき、コネクタボックス側では真空気密のコネクタにしなくて良い。

欠点：あとからリード線を追加したり断線したリード線を交換できない。そのため、最初に配線するさいに予備のリード線を数組追加しておくのが賢明。

コネクタを外してリード線をはんだづけできるよう、ワイヤーに余分な長さ(slack wire)を持たせてコネクタボックスの外まで引き出せるようにしておく。コネクタボックス上面にコネクタを設けず空けておく利点は、クライオスタットを上下逆さにしても安定し、低い作業姿勢でも取り回ししやすくなる。

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

# 4.7 真空電極リードスルー

小型のプローブにはDコネクタだけの構成で十分かも？

## 4.7.1 室温リードスルー (Nonvacuum connector boxes)

小型向けのマルチピンコネクタ構成 (Fig 4.10) :

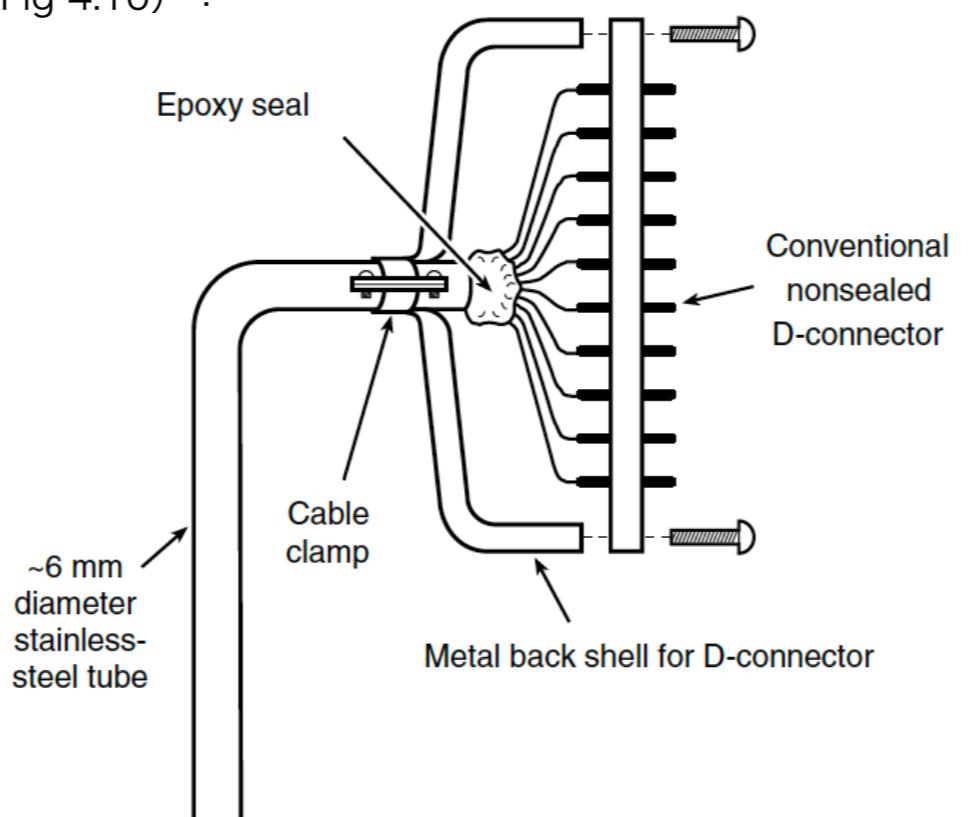


Fig. 4.10 Cross-sectional view of a conventional multipin D-connector adapted with a vacuum seal (Colclough 2002).

利点：コネクタボックスが要らない。コネクタのバックシェルをそのままステンレスチューブにクランプできる。バックシェル内側にエポキシ真空シールを収めるだけの十分なスペースがある

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

# 4.7 真空電極リードスルー

## 4.7.1 室温リードスルー (Vacuum connector boxes)

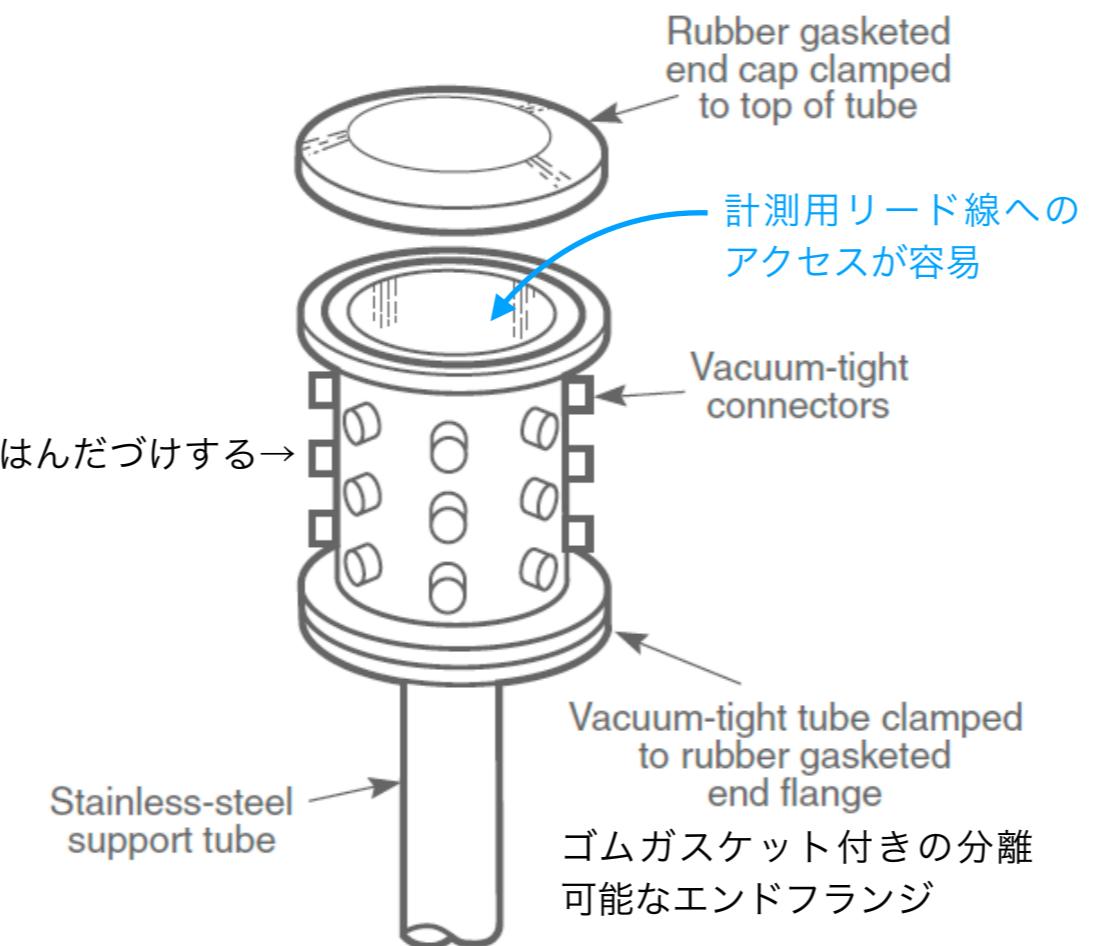


Fig. 4.11 Vacuum-tight connector chamber (about 5–8 cm inside diameter) with removable cover, made from commercially available vacuum fixtures (Mendez 1988).

利点：柔軟に改造できる

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

# 4.7 真空電極リードスルー

## 4.7.1 室温リードスルー (Vacuum connector boxes)

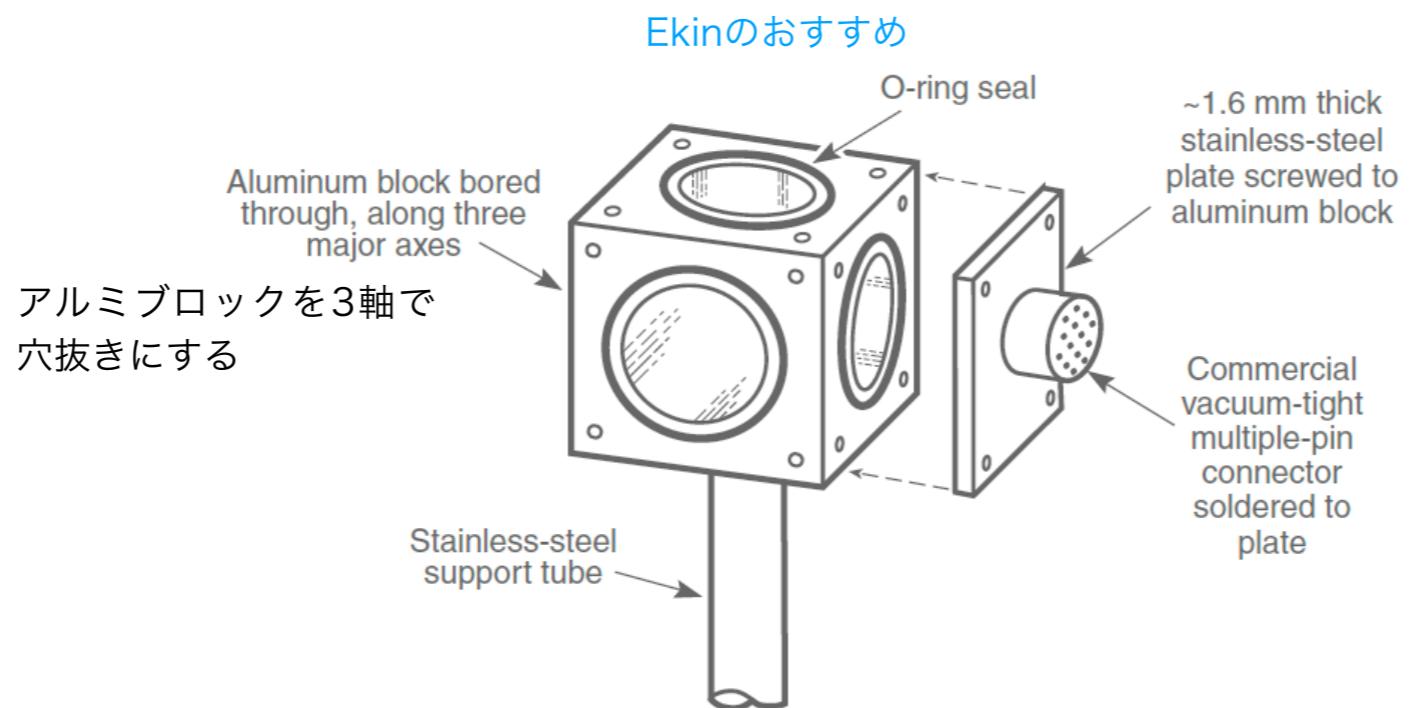


Fig. 4.12 Vacuum-tight aluminum connector box with removable plates for mounting commercial vacuum-tight multiple-pin connectors.

Fig 4.10とFig 4.12では、マルチリードケーブルを各種の計測装置へ接続するための分配ボックスをあらかじめ作らないといけない欠点があるものの、数本のマルチピンコネクタを接続するだけでプローブヘッドへの配線が簡単になることは利点。

(RF測定ではスクリュー式は遮蔽が劣るが) 基本的にはスクリュー式よりもバネヨット式(挿入後にひねってロックするタイプ) が便利

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

# 4.7 真空電極リードスルー

## 4.7.1 室温リードスルー (Vacuum lead-throughs for LowTemp Volt. Leads)

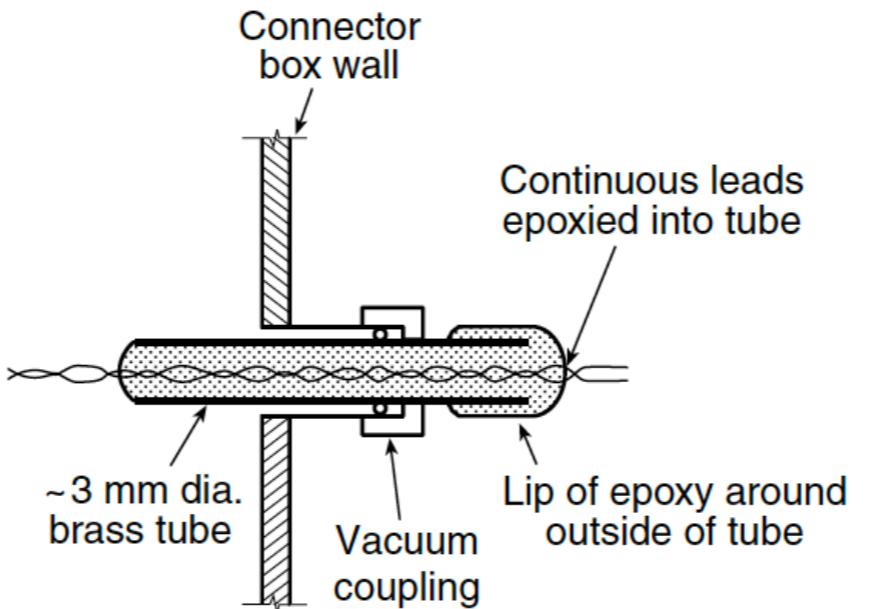


Fig. 4.13 Removable vacuum lead-through for *continuous* leads. The lip of epoxy provides a good vacuum seal and also prevents the tube from being sucked through the vacuum coupling; the epoxy lip can be conveniently made by using the technique shown below in Fig. 4.14.

高感度リード線を真空壁を貫通させるには、リードスルー構造が有効。直径3 mmの真鍮チューブ内に計測リード線を通し、エポキシ樹脂で真空シールする。このチューブを市販のクイックカップル型の真空シールへ差し込む。

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

# 4.7 真空電極リードスルー

## 4.7.2 冷凍真空容器リードスルー

エポキシの方が真鍮のチューブより大きく縮んでしまうために真空リークが起きることがある。対策として、真鍮チューブの内側だけでなく外側からもエポキシで包み込んであげる方法が有効：

1. 熱収縮チューブを真空チューブに被せ、下端をはんだごてであぶる
2. 熱収縮チューブと真鍮チューブとの間に形成された型の内部にエポキシを充填する。エポキシが真鍮の外側を包み込み、上部にはエポキシのビーズ形状が作られる。
3. エポキシが硬化したら、鋭利なナイフで熱収縮チューブを切り取れば、エポキシで内外をコーティングしたリードスルー完成！

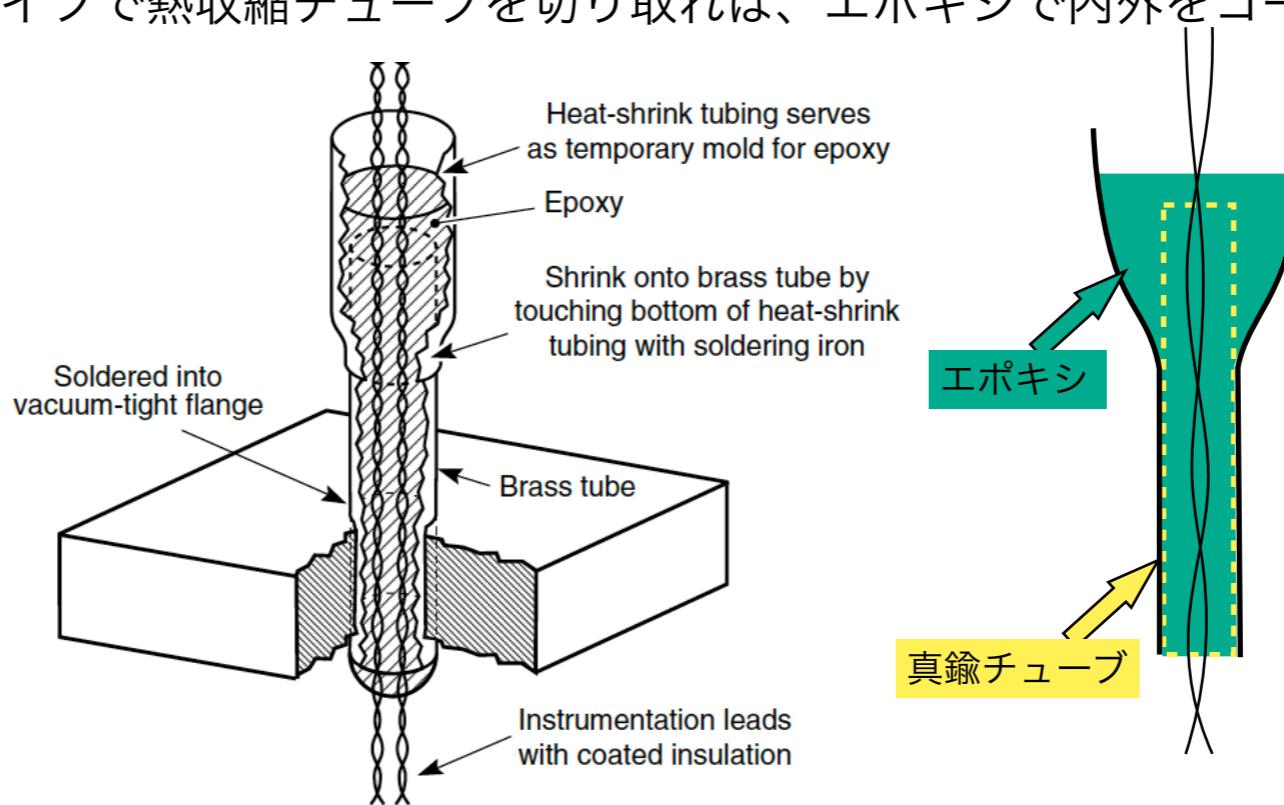


Fig. 4.14 Fabrication technique for cryogenic vacuum-tight electrical lead-through. Heat-shrink tubing serves as a mold for the epoxy and is later removed.

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

# 4.7 真空電極リードスルー

## 4.7.2 冷凍真空容器リードスルー

- ・真鍮との熱収縮率をよく一致させるためにフィラー入りのエポキシ（例：Stycast 2850FT）を選ぶ
- ・真鍮チューブの直径はリード線を通すのに十分な最小限のサイズに保つことが望ましい。エポキシ層の厚みを減らし、冷却時の応力を小さくするため。
- ・計測リード線全体を十分にエポキシで皮膜すること
- ・ポリイミド、エナメル、ニスで接着的に絶縁されたワイヤーを使うこと

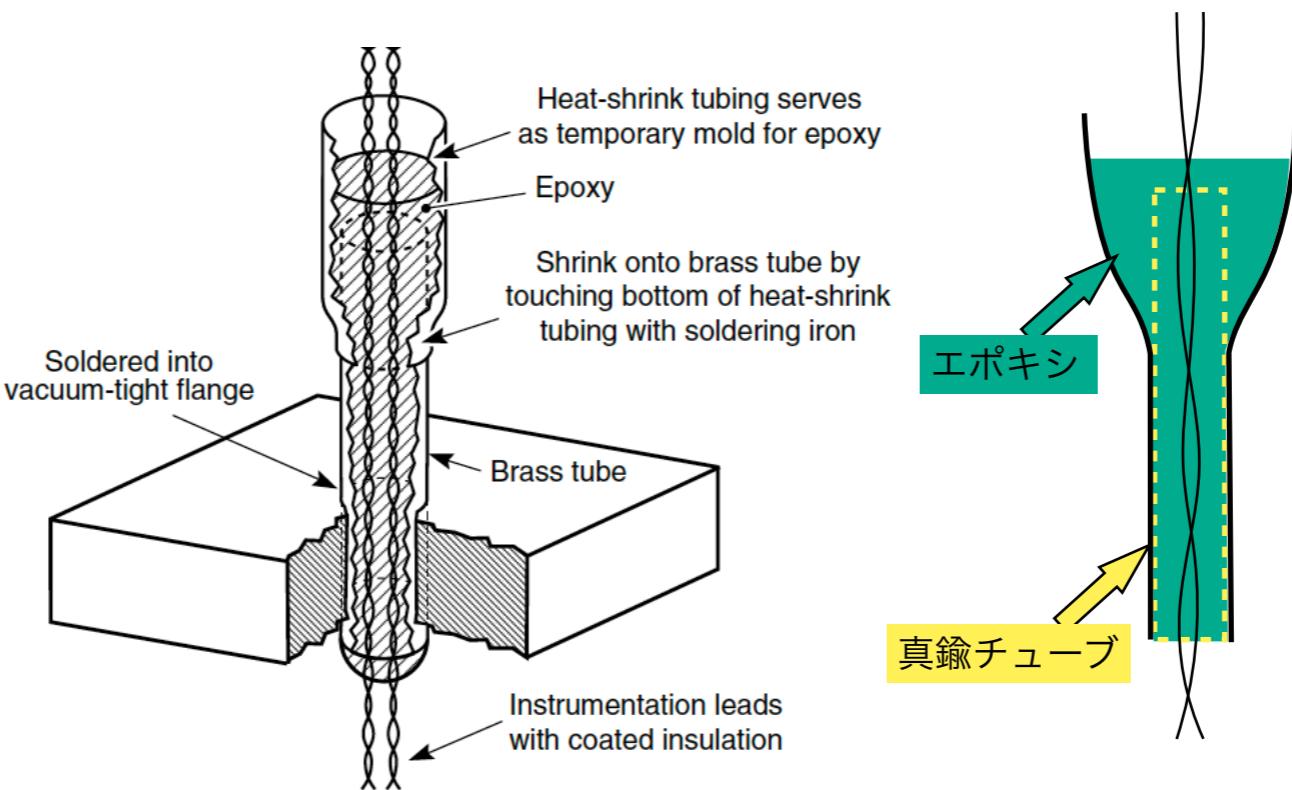


Fig. 4.14 Fabrication technique for cryogenic vacuum-tight electrical lead-through. Heat-shrink tubing serves as a mold for the epoxy and is later removed.

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sink Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

# 4.8 RFコアキシャルケーブル

## 扱う信号の周波数に応じた熱サイクルに強いケーブルを選ぼう

冷凍機用RF同軸ケーブルの選定とヒートシンクの設置は、測定目に強く依るところがある。一般に、熱伝導率が低く柔軟性の高い小型の同軸ケーブルをよく用いる。

### 100 MHz以下：

終端がそれほど重要ではないため、**固体誘電体(solid dielectric)**でできたケーブルが使える。課題としては、誘電体に熱サイクルの負荷がかかることで、同軸鞘内でセンターコネクタの位置が軸方向にずれてしまうことがある。1 mのケーブル長では、SMAコネクタの中心ピンがわずかに突き出すなど、**コネクタの熱サイクルによる経時劣化**が見られる。劣化による信号反射への影響は小さく、測定精度に大きな問題はない

### 1 GHz以上：

終端の品質がクリティカルになる。中央の導体に**Teflon™**のような膨張型誘電体(**expanded dielectric**)を使用した同軸ケーブルが推奨される。膨張型誘電体は、膨張と収縮を柔軟に対応しコネクタ部分へのストレスを減らす。

ケーブル内部の導体材料は、電気的減衰(attenuation)と熱侵入(heat leak)のトレードオフになる。一般に、熱侵入を最小化したいときは最も電気的抵抗の大きなケーブルを選ぶ。ステンレス鋼製同軸ケーブルは、熱リリークが最も小さいが信号を大きく減衰させる。銅製同軸ケーブルは、電気的特性は優れているが熱リリークも大きい。(A1.7のサプライヤーカタログを参照のこと)

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

# 4.8 RFコアキシャルケーブル

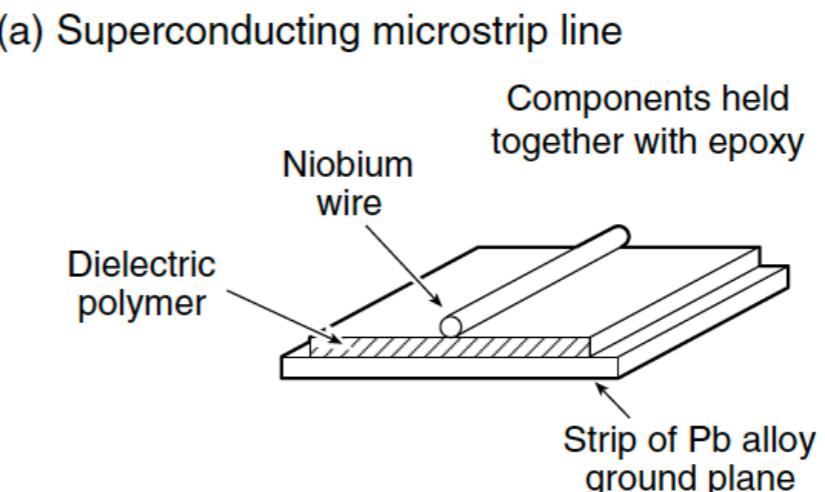
液侵がベスト、だが真空を通す場合は資料への熱流入を防止しよう

## 4.8.1 ヒートシンク

液侵(direct immersion)はどんな種類のケーブルに対しても十分なヒートシンク効果がある。特に膨張型誘電体を使用したケーブルは、中心導体が外側の鞘と熱的によく繋がっているわけではないため、液体に直接浸漬させる方法が強く推奨される。Fig 4.15aのように平面RFストリップラインの短いセクションに変換するのも良い。このストリップラインは必ずしも超伝導である必要はないが、液侵によって中心導体を直接冷却できる。

液体を通さずに真空中にケーブルを通す場合は、ケーブルを伝って流入する熱を途中で遮断するためのヒートシンクを設ける必要がある。小型の同軸ケーブルを銅製のヒートシンクポストに巻き付け、外側の鞘をはんだで固定する。ニスははんだに比べて熱接触で劣るため、より長いケーブル区間でヒートシンクする必要がある。A4.5から必要なヒートシンク長を見積もることができる。

1 K以下では、同軸ケーブルのヒートシンク要求は、1 K以上よりも厳しくなる。この場合、中心導体自体を独立にヒートシンクに接続する必要がある。1 K未満でのヒートシンク技術の詳細は、Richardson and Smith (1988) に詳しくのっている。



- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sink Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

# 4.8 RFコアキシャルケーブル

固体誘電体は気密性が高いが、膨張型誘電体は室温側をよくシールする

## 4.8.2 真空シーリング

十分な気密性を有している**固体誘電体ケーブル**は追加の真空シールを必要としないが、高真空を得る必要があるときは室温で気密保護された同軸コネクタを使用する必要がある。

**膨張型誘電体ケーブル**は気密が不十分なので、ほぼ全ての真空用途において室温側に**気密シールつきの同軸コネクタ**を設ける必要がある。

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

# 4.8 RFコアキシャルケーブル

平面RFマイクロストリップは極低損失で高熱抵抗、はんだから超伝導同軸も作れる

## 4.8.3 超伝導 RF トランスマッショングライン

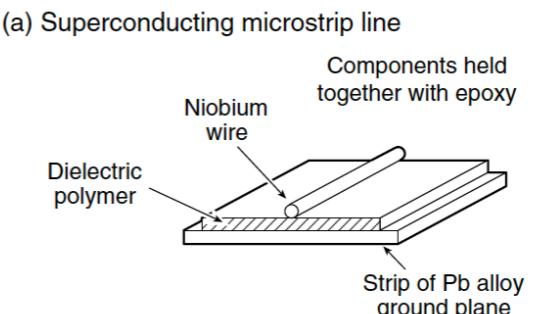
極低損失かつ高熱抵抗を実現するために、超伝導材料からマイクロストリップラインを製作することができる。

- ニオブ線が誘電体層を介して、鉛または鉛合金製のグラウンドプレーンから絶縁されている。
- 誘電損失は依然として絶縁部に起きたる。

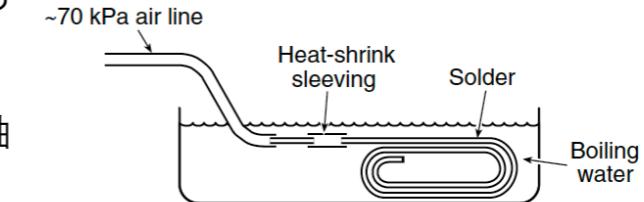
単芯はんだからフラックスを溶かし出したり、それ自身を超伝導チューブとして使うことで超伝導同軸ケーブルまたはシールドされたツイストペアを作ることができる。

Fig 4.15bでは、沸騰した水と低圧エアラインを利用してハンダフラックスを除去している。単芯はんだから空気が出始めたら付属のプラスチックチューブと注射器を使ってイソプロパノールを通して洗い流す。その後、（先端を滑らかにした）硬いリン青銅線を10~20 cm程度はんだチューブの中に通す。同軸ケーブルの中心導体として、シアノアクリレート（瞬間接着剤）をもちいて、小径ニオブ線（ワニス絶縁）を中に残ったままであるリン青銅線に取り付け、グリースを塗布してニオブ線をはんだチューブから引き戻す。

容量や特性インピーダンスの制御は十分ではないものの、こうして得られる超伝導同軸ケーブルは非常に柔軟性が高く、SQUID測定や高Q調整回路に最適である。



(a) Superconducting microstrip line



(b) Technique for removing flux from single-core solder

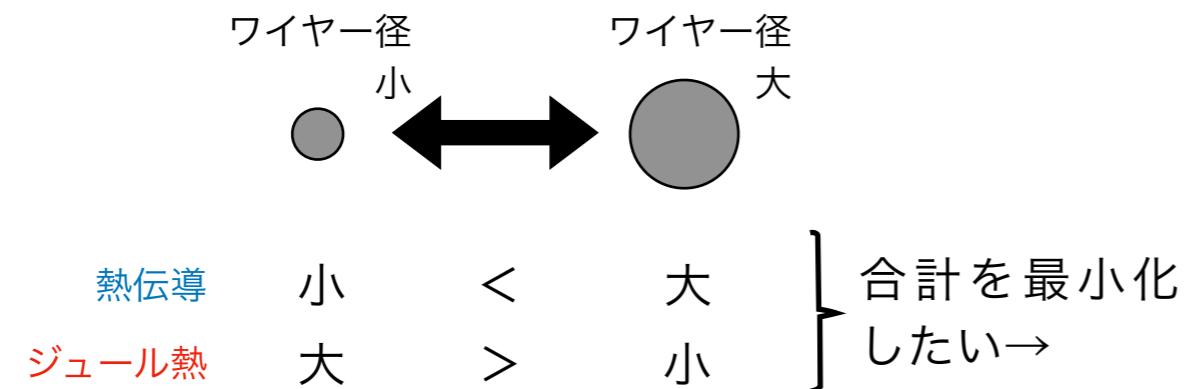
Fig. 4.15 Superconducting rf transmission lines: (a) cross section of a microstrip line made of niobium wire and a lead-alloy strip; (b) technique for removing flux for single-core solder wire to produce a superconducting coaxial cable (Colclough 2002).

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sink Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Wires, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

# 4.9 高電流リード線

配線径は熱流量と発生するジュール熱の合計を最小化するよう決める

## 4.9.1 銅線：最適な直径



$$LI/A \approx 5 \times 10^6 \text{ A/m} \quad (4.1) \text{式}$$

290~4.2 K (定常状態) における接続に最適な銅線サイズ

$$LI/A \approx 10 \times 10^6 \text{ A/m} \quad (4.2) \text{式}$$

77 Kから4.2 K (定常状態) 間の接続に最適な銅線サイズ

$$\dot{q}_{\text{copper leads}}/I = 84 \text{ mW/A} \quad (4.3) \text{式}$$

最適サイズに設計された一対の銅リードを通る熱流束、290~4 K

$$\dot{q}_{\text{copper leads}}/I = 18 \text{ mW/A} \quad (4.4) \text{式}$$

最適サイズに設計された一対の銅リードを通る熱流束、77~4 K

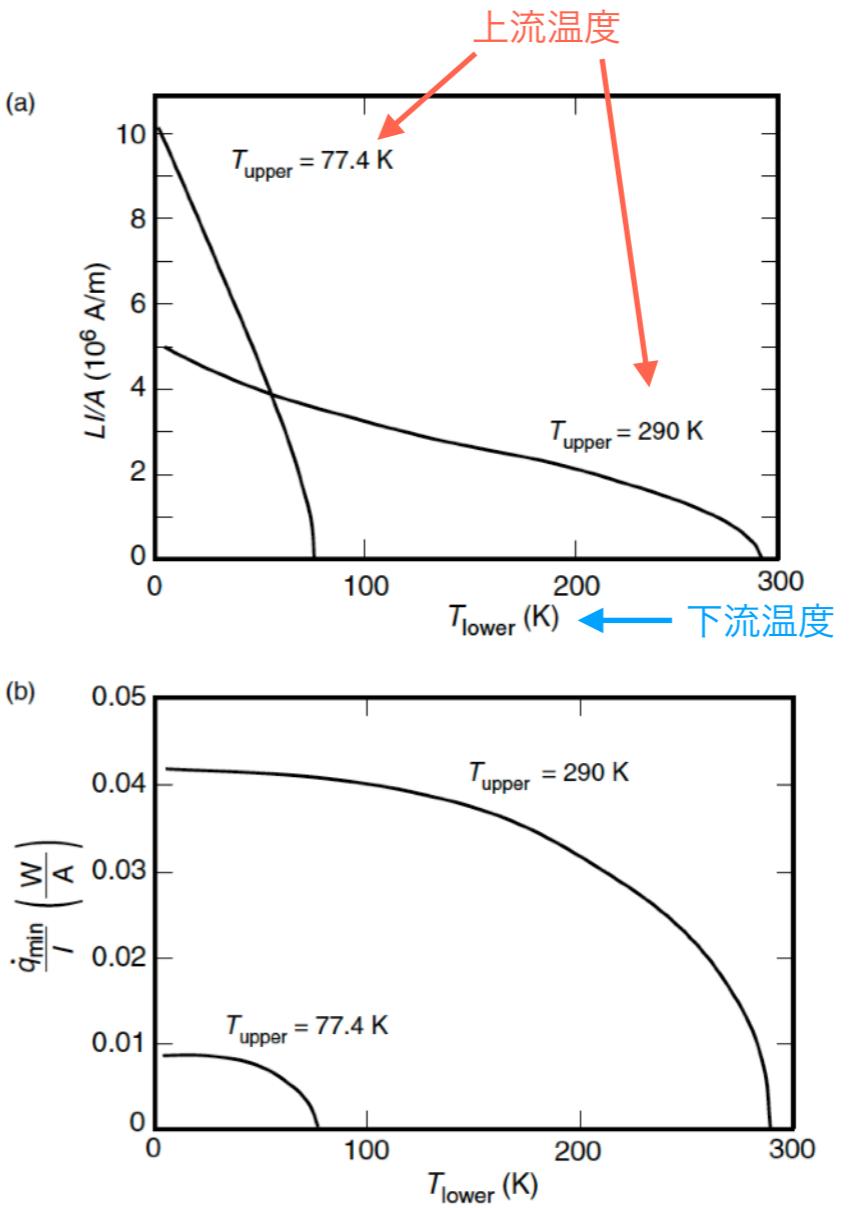


Fig. 4.16 Optimum wire diameter (a), and minimum heat input (b) for a single copper wire conducting current  $I$  from a region of the cryostat at temperature  $T_{\text{upper}}$  to a temperature  $T_{\text{lower}}$ . (We assume that the copper wire has a typical residual resistance ratio of 100 and that no heat transfers from the wire to the evaporating helium gas.) In graph (a),  $L$  is the length of the conductor between the upper and lower temperatures, and  $A$  is the optimum cross-sectional area. In graph (b),  $\dot{q}_{\text{min}}$  is the corresponding minimum heat input (from McFee 1959).

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

# 4.9 高電流リード線

## 追加の注

### 4.9.1 銅線：最適な直径

✓ 図4.16および付録A4.1aのデータはリード線における定常電流を想定している。臨界電流測定のような間欠的・低デューティサイクルの電流需要においては、リード線におけるジュール熱は、リード線に沿った定的な熱流に比べ、時間経過に伴う寄与が小さくなる。低デューティサイクルでの動作では、リード線に沿った背景熱伝導を低減するため、より細い線径サイズを選択することが推奨される。

✓ 銅の代わりに真鍮やアルミニウムなどの材料を使用しても、最小熱流入量は顕著に変化しない。金属における電気伝導度と熱伝導度の比が、ヴィーデマン・フランツ・ローレンツの法則 [式(2.4)] によってほぼ一定であるため。ただし、材料の導電率が低下するにつれて最適線径は大きくなるため、低電流計測リード線においては利点となり得る。

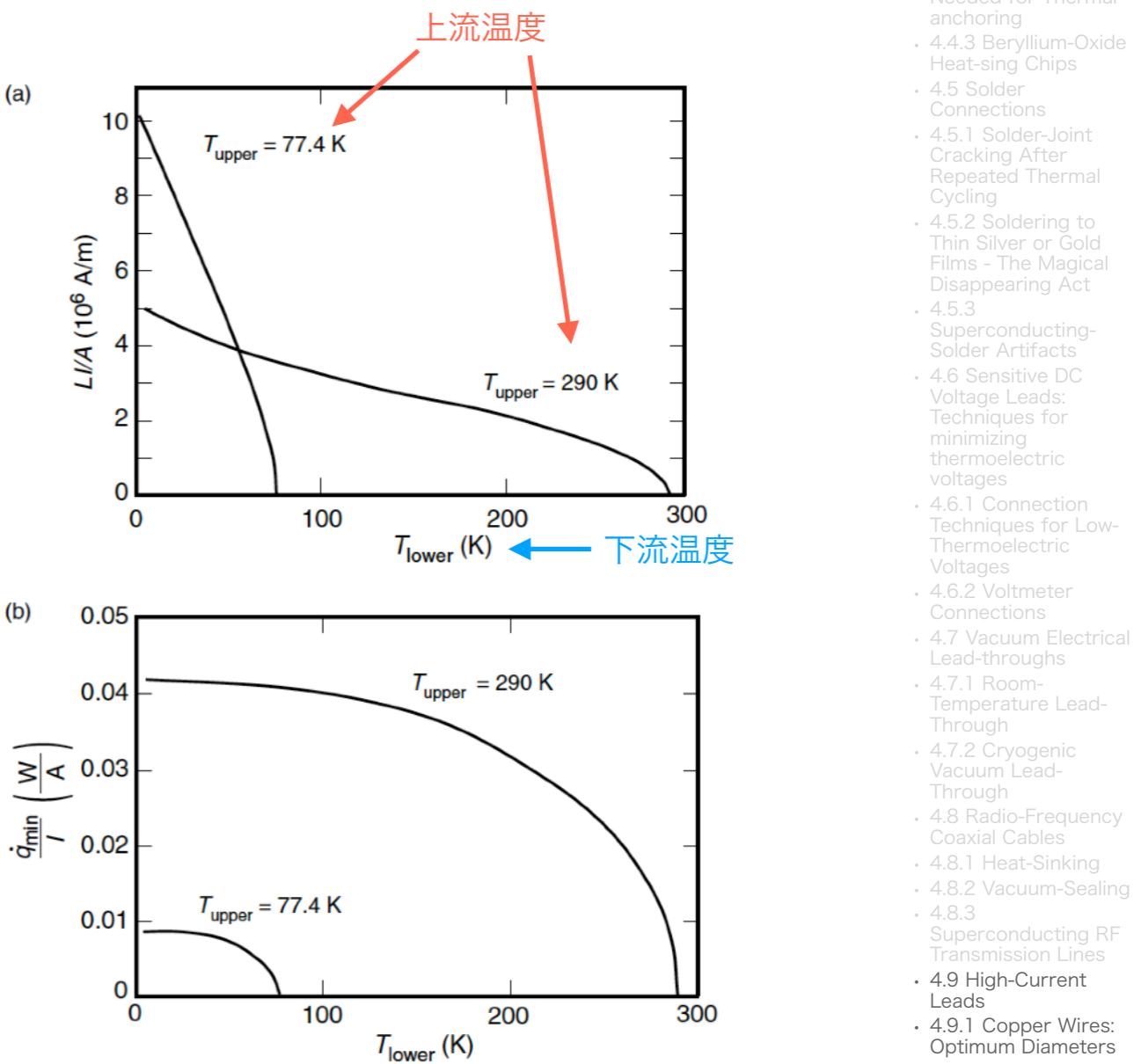


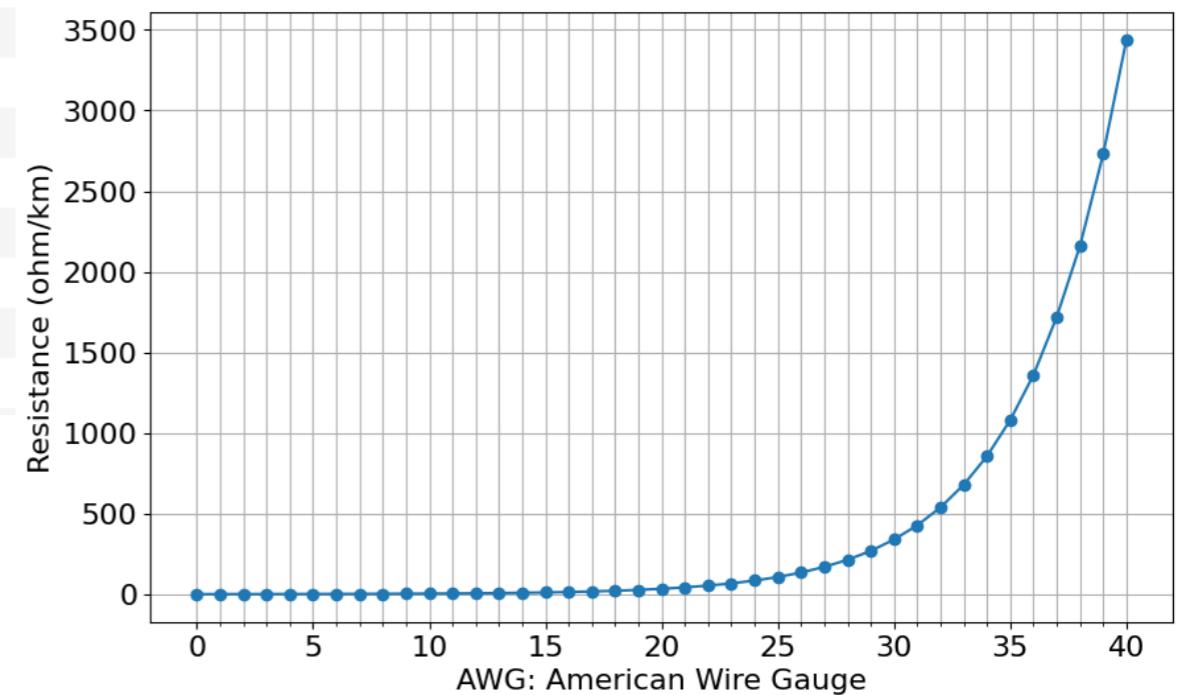
Fig. 4.16 Optimum wire diameter (a), and minimum heat input (b) for a single copper wire conducting current  $I$  from a region of the cryostat at temperature  $T_{\text{upper}}$  to a temperature  $T_{\text{lower}}$ . (We assume that the copper wire has a typical residual resistance ratio of 100 and that no heat transfers from the wire to the evaporating helium gas.) In graph (a),  $L$  is the length of the conductor between the upper and lower temperatures, and  $A$  is the optimum cross-sectional area. In graph (b),  $\dot{q}_{\min}$  is the corresponding minimum heat input (from McFee 1959).

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

# 資料の補足にA4.1をcsvにまとめた

```
In [9]: df = pd.read_csv('wire_gauge_area_resistivity_heat_conduction_optimum_current.txt')
AWG = df['AWG']
Dia = df['Diameter(20degC)'] # mm
CrossSec = df['Cross_sectional_area(20degC)'] # mm2
Resistance = df['Resistance_of_annealed_copper_wire(20degC)'] # ohm/km
HeatCond = np.array([
    df['Heat_conduction(300-4.2K)'].values,
    df['Heat_conduction(300-76K)'].values,
    df['Heat_conduction(76-4.2K)'].values
])
OptimumCurr = np.array([
    df['Optimum_current(290-4K)'].values,
    df['Optimum_current(77-4K)'].values
])
df
```

|    | AWG | Diameter(20degC) | Cross_sectional_area(20degC) | Resistance_of_annealed_copper_wire(20degC) | Heat_conduction(300-4.2K) |
|----|-----|------------------|------------------------------|--|---------------------------|
| 0  | 0   | 8.25200          | 53.480000                    | 0.322                                      | 8.660000                  |
| 1  | 1   | 7.34800          | 42.410000                    | 0.407                                      | 6.870000                  |
| 2  | 2   | 6.54300          | 33.630000                    | 0.513                                      | 5.450000                  |
| 3  | 3   | 5.82700          | 26.670000                    |  |                           |
| 4  | 4   | 5.18900          | 21.150000                    |  |                           |
| 5  | 5   | 4.62100          | 16.770000                    |  |                           |
| 6  | 6   | 4.11500          | 13.300000                    |  |                           |
| 7  | 7   | 3.66500          | 10.550000                    |  |                           |
| 8  | 8   | 3.26400          | 8.366000                     |  |                           |
| 9  | 9   | 2.90600          | 6.634000                     |  |                           |
| 10 | 10  | 2.58800          | 5.261000                     |  |                           |



# 4.9 高電流リード線

蒸発するヘリウムも冷却に使うことで熱流入をさらに減らすことができる

## 4.9.2 蒸気冷却リード線、あるいはWiedemann-Franz-Lorenzの法則を破る方法

蒸発したヘリウムガスのエンタルピーを利用してリード線を  
さらに冷却することができる

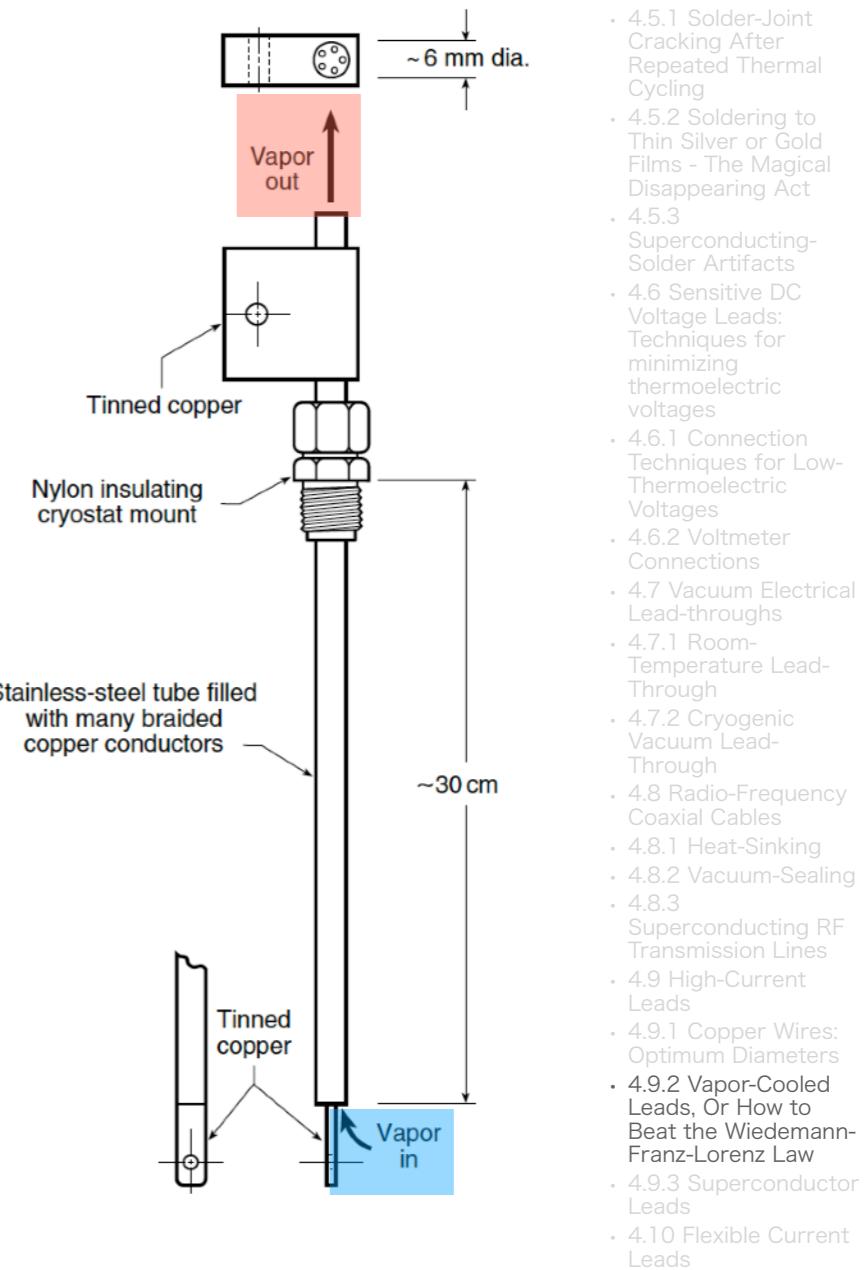
$$\dot{q}_{\text{copper leads}}/I = 2.2 \text{ mW/A} \quad (4.5) \text{式}$$

蒸気冷却された1対のリード線を通る熱流束、300–4 K

Fig 4.16で求められた最適な断面積を多数の細いワイヤーに分割することで、(ワイヤーが密に束ねられていない場合に限って)ヘリウム浴への熱流入を低減できる。例えば、100 Aを流すときに最適なサイズの銅線リード1組を用いた場合は液体ヘリウムの消費率は11 L/h以上だが、蒸気冷却リードに変えると0.3 L/hに抑えられる。

Fig 4.17は典型的な蒸気冷却リードの構造を示している。大面積の導体表面をよく冷やすために、ステンレス鋼管に編み込まれた導体を充填し、ヘリウムガスが管内を流れるための上下の通気孔を設ける

Fig. 4.17 Schematic illustration of 150 A vapor-cooled high-current lead (courtesy of Cryomagnetics, Inc.).



- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Strength of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sink Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

# 4.9 高電流リード線

高温超伝導リード線が最も効果的な熱流抑制をかなえる

## 4.9.3 超伝導リード線

高温超伝導体を用いたリード線は、銅単体よりも数桁高い電流密度を流すことができ、熱伝導率は一方で約1/500以下である(Watanabe et al. 1996)。約60K以下では、高温超伝導材料は導線への熱漏れを最小限に抑えながら電流を伝送するという素晴らしい働きをする。 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$  (Bi-2223) は、約30K以上の高温域において $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  (Bi-2212) よりもはるかに高い臨界電流密度を有し、かつ現時点では $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  (YBCO) よりも製造コストが低い。

Fig. 4.19はBi-2223の様々な温度における臨界電流密度を磁場の関数として描いている。高温超伝導リード線が性能を発揮する条件：

1. クライオスタットの低磁場領域に配置され
2. 長手方向に沿った有利な配向で磁場と整列している

HTS電流リードの使用法とシステム応用に関する詳細は、Chang and Van Sciver (1998) および Pfotenhauer and Lawrence (1999) に記載されている

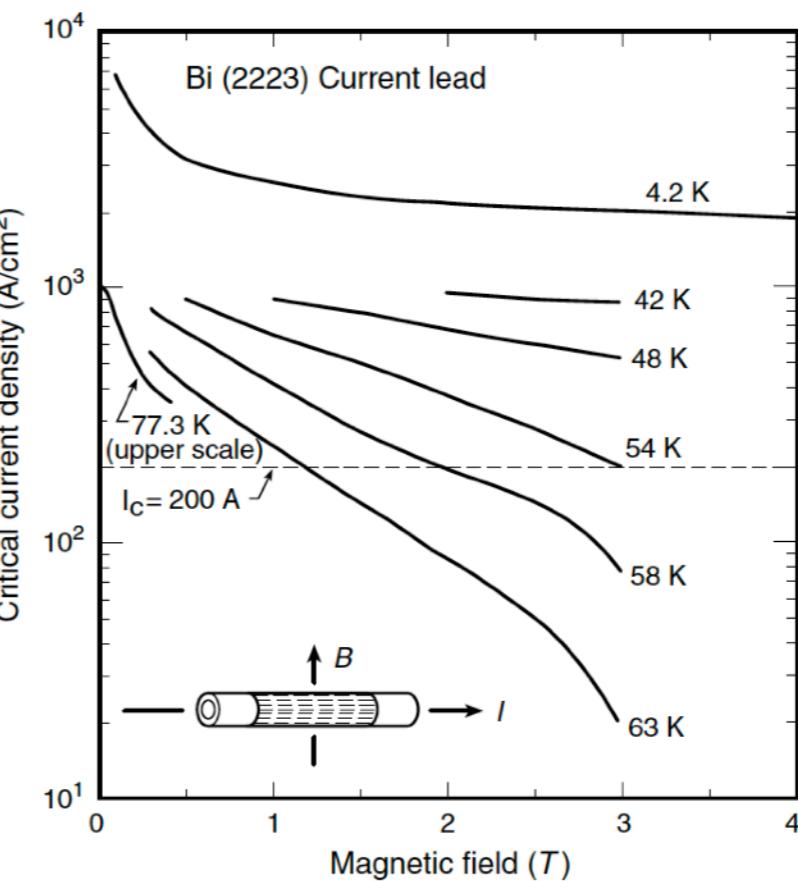


Fig. 4.19 Critical-current density as a function of magnetic field at various temperatures from 77–4.2 K for a  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$  current lead (from Watanabe et al. 1996). Data were obtained with the magnetic field applied in the least favorable orientation, perpendicular to the axis of the lead.

- 4.1.1 General Guidelines
- 4.1.2 DC and Low-Frequency
- 4.1.3 AC High-Frequency Wiring
- 4.1.4 Wiring Installation Techniques
- 4.2 Wire Selection
- 4.2.2 Wire Material Properties
- 4.3 Insulation Selection
- 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads
- 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques
- 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring
- 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sink Chips
- 4.5 Solder Connections
- 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling
- 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act
- 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts
- 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages
- 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages
- 4.6.2 Voltmeter Connections
- 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs
- 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through
- 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through
- 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables
- 4.8.1 Heat-Sinking
- 4.8.2 Vacuum-Sealing
- 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines
- 4.9 High-Current Leads
- 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters
- 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law
- 4.9.3 Superconductor Leads
- 4.10 Flexible Current Leads

|   |
|---|
| • 4.1.1 General Guidelines  |
| • 4.1.2 DC and Low-Frequency  |
| • 4.1.3 AC High-Frequency Wiring  |
| • 4.1.4 Wiring Installation Techniques  |
| • 4.2 Wire Selection  |
| • 4.2.2 Wire Material Properties  |
| • 4.3 Insulation Selection  |
| • 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads  |
| • 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques   |
| • 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring                                 |
| • 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips   |
| • 4.5 Solder Connections  |
| • 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling                        |
| • 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act       |
| • 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts  |
| • 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages |
| • 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages                       |
| • 4.6.2 Voltmeter Connections   |
| • 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs   |
| • 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through   |
| • 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through   |
| • 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables  |
| • 4.8.1 Heat-Sinking  |
| • 4.8.2 Vacuum-Sealing  |
| • 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines                                       |
| • 4.9 High-Current Leads  |
| • 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters   |
| • 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law           |
| • 4.9.3 Superconductor Leads  |
| • 4.10 Flexible Current Leads   |

# 4.10 電流フレキシブルなリード線

時に試料と電流バスバーの間に柔軟な電流接続が必要になるときがある

フレキシブルリード線が必要となる装置の例：

- ・可変角測定用クライオstatt
- ・応力を加えずに試料を冷却する必要のある輸送測定用サンプルホルダー
- ・振動に敏感な実験用の熱接触が挙げられる。

広範囲の多次元的な動きが必要な場合、通常は銅線ブレードを使用するのが一般的な解決策。市販の接地ストラップなどはA4.3に基づくと典型的にはRRR~25程度である。銅と銀の多芯編み込み線を用いることでより低効率を低くできる。全体の電気抵抗を最小限に抑えるため、編み込み線は必要な動作範囲を確保できる最短の長さに保つ。一方、電気伝導のための段面積は曲げやすさと両立する範囲で大きくとる。

Fig. 4.20に示されている設計は、応力を加えずに試料を冷却したい用途に適しており、試料を試料ホルダーとは異なる速度で熱収縮できる。このFree-floatingタイプのフレキシブルリード線は、曲げ剛性を最小限にしつつ電気伝導を最大化するような矩形構造になっている。LN<sub>2</sub>温度では、はんだづけの容易さと、低い電気抵抗率から銅が選ばれやすい。

LHe温度では、材料の種類よりも純度の方がはるかに重要である(Sec. 6.3参照)。この場合はアルミニウムがよい選択となる。市販されている高純度( $\geq 99.9995\%$ )アルミニウムは比較的安価で、RRR~5,000もの純度がある。このような柔軟なリード線を用いればO(100)A規模の輸送電流を試料に供給できる。高磁場測定におけるローレンツ力を最小限に抑えるため、フレキシブルリード線の電流軸は、Fig. 4.20に示すように外部磁場の方向と平行に配置する必要がある。

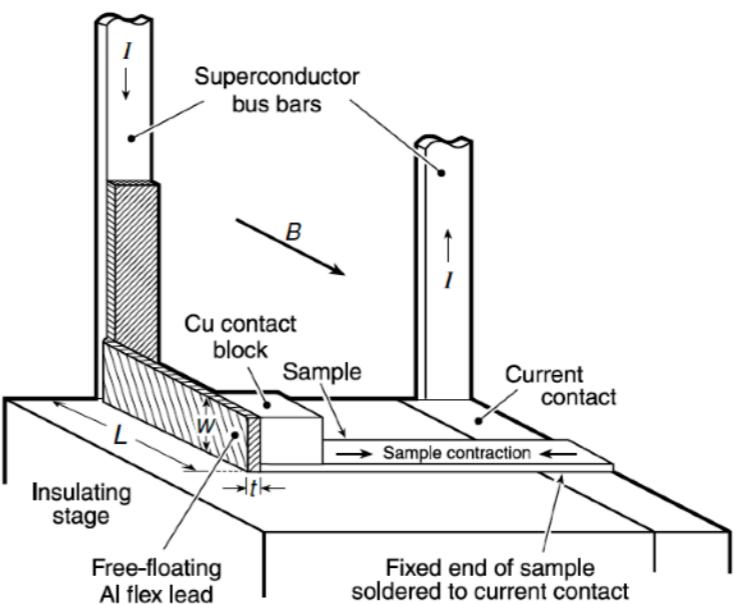


Fig. 4.20 Flexible high-current lead designed to accommodate small amounts of motion, such as cool-down strain from different thermal contraction rates between a test sample and holder (Kirkpatrick et al. 1999).

|   |
|---|
| • 4.1.1 General Guidelines  |
| • 4.1.2 DC and Low-Frequency  |
| • 4.1.3 AC High-Frequency Wiring  |
| • 4.1.4 Wiring Installation Techniques  |
| • 4.2 Wire Selection  |
| • 4.2.2 Wire Material Properties  |
| • 4.3 Insulation Selection  |
| • 4.4 Heat sinks for Instrumentation Leads  |
| • 4.4.1 Wire-Anchoring Techniques   |
| • 4.4.2 Length of Wire Needed for Thermal-anchoring                                 |
| • 4.4.3 Beryllium-Oxide Heat-sing Chips   |
| • 4.5 Solder Connections  |
| • 4.5.1 Solder-Joint Cracking After Repeated Thermal Cycling                        |
| • 4.5.2 Soldering to Thin Silver or Gold Films - The Magical Disappearing Act       |
| • 4.5.3 Superconducting-Solder Artifacts  |
| • 4.6 Sensitive DC Voltage Leads: Techniques for minimizing thermoelectric voltages |
| • 4.6.1 Connection Techniques for Low-Thermoelectric Voltages                       |
| • 4.6.2 Voltmeter Connections   |
| • 4.7 Vacuum Electrical Lead-throughs   |
| • 4.7.1 Room-Temperature Lead-Through   |
| • 4.7.2 Cryogenic Vacuum Lead-Through   |
| • 4.8 Radio-Frequency Coaxial Cables  |
| • 4.8.1 Heat-Sinking  |
| • 4.8.2 Vacuum-Sealing  |
| • 4.8.3 Superconducting RF Transmission Lines                                       |
| • 4.9 High-Current Leads  |
| • 4.9.1 Copper Wires: Optimum Diameters   |
| • 4.9.2 Vapor-Cooled Leads, Or How to Beat the Wiedemann-Franz-Lorenz Law           |
| • 4.9.3 Superconductor Leads  |
| • 4.10 Flexible Current Leads   |

# 4.10 電流フレキシブルなリード線

## Nb-Ti超伝導線、YBCO-coated線が（現時点で）実用上最強

市販されているlow-T<sub>c</sub>の編み込みリード線は細い銅線と延性のあるNb-Ti超伝導線の混合構造を持ち利点としては、

- ・高温または高磁場では銅が電流を担う
- ・Nb-Tiの臨界温度および臨界磁場以下で動作するときは超伝導線が主に働き抵抗ゼロの電流伝導

Nb-Tiの実用動作限界は、磁場の印加なしに約8 K、約8 Tの磁場があっても液体ヘリウム中であれば動作する。

電子機器その他の応用でLN2温度付近（～77 K）で使用する場合、究極の選択はYBCO-coated導体テープである。YBCO-coatは、厚さ1～2 μmのYBCO超伝導薄膜を、厚さ約50 μmの柔軟な基板テープ（通常はニッケル合金）上に成膜、その上に1～10 μmの銀層を析出させて完成する。

銀層は、機械的安定性と超伝導層との低抵抗接続を両立するボンド層として機能する（Sec. 8.4）。YBCOおよび基板・安定化層の熱伝導率特性はA4.7に記載。

この混合テープの熱伝導度は、主に銀/銅の安定化層および基板によって決まっている。輸送電流はテープ幅1 mmあたり約100 Aまで流すことができるため、厚さ50 μm × 幅1 mm程度の小断面積でも比較的高電流の伝送が可能。YBCO混合テープは曲げひずみ限界が0.4%に達し、最少曲げ半径約6 mmまで使うことができる。

# Tables in Appendix

A4.1a Wire gauge size, area, resistivity, heat conduction, and optimum current

| American wire gauge (AWG) or Brown & Sharpe (B&S) | Diameter 20°C <sup>a</sup> | Cross-sectional area at 20°C <sup>a</sup> | Resistance of annealed copper wire at 20°C <sup>a</sup> | Heat conducted along 1 m of copper wire between the indicated temperatures <sup>b</sup> [W] |          |          | Optimum current for 1 m of copper wire with one end at 4 K and the other at temperature $T_{upper}^c$ [A] |                    |
|---|----------------------------|---|---|---|----------|----------|---|--------------------|
|   |                            |   |   | 300–4.2 K   | 300–76 K | 76–4.2 K | $T_{upper} = 290$ K   | $T_{upper} = 77$ K |
| 0000  | 11.68                      | 107.2                                     | 0.161   | 17.4  | 10.0     | 7.35     | 536   | 1072               |
| 000   | 10.40                      | 85.03                                     | 0.203   | 13.8  | 7.94     | 5.83     | 425   | 850                |
| 00  | 9.266                      | 67.43                                     | 0.256   | 10.9  | 6.30     | 4.62     | 337   | 674                |
| 0   | 8.252                      | 53.48                                     | 0.322   | 8.66  | 5.00     | 3.67     | 267   | 535                |
| 1   | 7.348                      | 42.41                                     | 0.407   | 6.87  | 3.96     | 2.91     | 212   | 424                |
| 2   | 6.543                      | 33.63                                     | 0.513   | 5.45  | 3.14     | 2.31     | 168   | 336                |
| 3   | 5.827                      | 26.67                                     | 0.646   | 4.32  | 2.49     | 1.83     | 133   | 267                |
| 4   | 5.189                      | 21.15                                     | 0.815   | 3.43  | 1.98     | 1.45     | 106   | 212                |
| 5   | 4.621                      | 16.77                                     | 1.03  | 2.72  | 1.57     | 1.15     | 84  | 168                |
| 6   | 4.115                      | 13.30                                     | 1.30  | 2.15  | 1.24     | 0.912    | 66  | 133                |
| 7   | 3.665                      | 10.55                                     | 1.63  | 1.71  | 0.985    | 0.724    | 53  | 106                |
| 8   | 3.264                      | 8.366                                     | 2.06  | 1.36  | 0.781    | 0.574    | 42  | 84                 |
| 9   | 2.906                      | 6.634                                     | 2.60  | 1.08  | 0.620    | 0.455    | 33  | 66                 |
| 10  | 2.588                      | 5.261                                     | 3.28  | 0.852   | 0.491    | 0.361    | 26  | 53                 |
| 11  | 2.305                      | 4.172                                     | 4.13  | 0.676   | 0.390    | 0.286    | 21  | 42                 |
| 12  | 2.053                      | 3.309                                     | 5.21  | 0.536   | 0.309    | 0.227    | 16  | 33                 |
| 13  | 1.828                      | 2.624                                     | 6.57  | 0.425   | 0.245    | 0.180    | 13  | 26                 |
| 14  | 1.628                      | 2.081                                     | 8.28  | 0.337   | 0.194    | 0.143    | 10  | 21                 |
| 15  | 1.450                      | 1.650                                     | 10.4  | 0.267   | 0.154    | 0.113    | 8.2   | 16                 |
| 16  | 1.291                      | 1.309                                     | 13.2  | 0.212   | 0.122    | 0.0898   | 6.5   | 13                 |
| 17  | 1.150                      | 1.038                                     | 16.6  | 0.168   | 0.0969   | 0.0712   | 5.2   | 10                 |
| 18  | 1.024                      | 0.8231                                    | 21.0  | 0.133   | 0.0769   | 0.0565   | 4.1   | 8.2                |
| 19  | 0.9116                     | 0.6527                                    | 26.4  | 0.106   | 0.0610   | 0.0446   | 3.3   | 6.5                |
| 20  | 0.8118                     | 0.5176                                    | 33.3  | 0.0838  | 0.0483   | 0.0355   | 2.6   | 5.2                |
| 21  | 0.7230                     | 0.4105                                    | 42.0  | 0.0665  | 0.0383   | 0.0282   | 2.0   | 4.1                |
| 22  | 0.6439                     | 0.3255                                    | 53.0  | 0.0527  | 0.0304   | 0.0223   | 1.6   | 3.2                |
| 23  | 0.5733                     | 0.2582                                    | 66.8  | 0.0418  | 0.0241   | 0.0177   | 1.3   | 2.6                |
| 24  | 0.5105                     | 0.2047                                    | 84.2  | 0.0332  | 0.0191   | 0.0140   | 1.0   | 2.0                |
| 25  | 0.4547                     | 0.1624                                    | 106   | 0.0263  | 0.0152   | 0.0111   | 0.81  | 1.6                |
| 26  | 0.4049                     | 0.1288                                    | 134   | 0.0209  | 0.0120   | 0.00884  | 0.64  | 1.3                |
| 27  | 0.3606                     | 0.1021                                    | 169   | 0.0165  | 0.00954  | 0.00700  | 0.51  | 1.0                |
| 28  | 0.3211                     | 0.08098                                   | 213   | 0.0131  | 0.00756  | 0.00556  | 0.40  | 0.81               |
| 29  | 0.2859                     | 0.06422                                   | 268   | 0.0104  | 0.00600  | 0.00440  | 0.32  | 0.64               |
| 30  | 0.2548                     | 0.05093                                   | 339   | 0.00825   | 0.00476  | 0.00349  | 0.25  | 0.51               |
| 31  | 0.2268                     | 0.04039                                   | 427   | 0.00654   | 0.00377  | 0.00277  | 0.20  | 0.40               |
| 32  | 0.2019                     | 0.03203                                   | 538   | 0.00519   | 0.00299  | 0.00220  | 0.16  | 0.32               |
| 33  | 0.1798                     | 0.02540                                   | 679   | 0.00411   | 0.00237  | 0.00174  | 0.13  | 0.25               |
| 34  | 0.1601                     | 0.02014                                   | 856   | 0.00326   | 0.00188  | 0.00138  | 0.10  | 0.20               |
| 35  | 0.1426                     | 0.01597                                   | 1080  | 0.00259   | 0.00149  | 0.00110  | 0.080   | 0.16               |
| 36  | 0.1270                     | 0.01267                                   | 1360  | 0.00205   | 0.00118  | 0.000869 | 0.063   | 0.13               |
| 37  | 0.1131                     | 0.01005                                   | 1720  | 0.00163   | 0.000939 | 0.000689 | 0.050   | 0.10               |
| 38  | 0.1007                     | 0.007967                                  | 2160  | 0.00129   | 0.000744 | 0.000546 | 0.040   | 0.080              |
| 39  | 0.08969                    | 0.006318                                  | 2730  | 0.00102   | 0.000590 | 0.000433 | 0.032   | 0.063              |
| 40 <sup>d</sup>                                   | 0.07988                    | 0.005010                                  | 3440  | 0.000812  | 0.000468 | 0.000344 | 0.025   | 0.050              |

<sup>a</sup> Data obtained partially from calculations (see following footnotes) and partially from tabulations in the CRC Handbook of Chemistry and Physics (1987;2002), CRC Press, Inc., Boca Raton, FL; and from the Machinery's Handbook (2000), 26th edition, Industrial Press, New York.

<sup>b</sup> Heat conduction for a length other than 1 m is obtained by dividing the values in the table by the desired wire length (in meters). In obtaining the values for heat conduction, it was assumed that there was no gas cooling of the wire. If helium gas boil-off were used to cool the wire with maximum efficiency, the resultant heat flow would be 1/12 of the values given for an upper temperature of 300 K, and 1/4 of the values shown for 77 K. Calculations were based on the thermal conductivity integrals of ETP copper, Appendix A2.1. From V. Johnson (1960), National Bureau of Standards; Wright Air Development Division (WADD) Technical Report 60-56, Part II; and D. H. J. Goodall (1970), A.P.T. Division, Culham Laboratory, Abingdon, Oxfordshire, UK.

<sup>c</sup> Optimum current is for steady-state operation. For wires that carry current with only a low duty cycle, the optimum current should be adjusted to a higher value because in that case the Joule heating is intermittent, whereas the heat flow down the current lead is continuous. Optimum current for a length other than 1 m is obtained by dividing the values in the table by the desired wire length (in meters). Values were calculated from Eqs (4.1) and (4.2) in Sec. 4.9.1, which were derived by R. McFee (1959), *Rev. Sci. Instrum.* 30, 98–102.

<sup>d</sup> For wire sizes smaller than #40 AWG, the diameter can be calculated by using a ratio of 1:1.123 for consecutive AWG sizes.

540 **Appendix: Data Handbook**

**Room-temperature resistivities for several common wire materials relative to copper**

These ratios can be used to obtain the resistance-per-length for wire materials other than copper by multiplying the room-temperature values given for copper in the fourth column of the above table by the ratio  $\rho_{293\text{ K}}/\rho_{\text{Cu } 293\text{ K}}$ . (Calculated from Appendix A4.2 and the *CRC Handbook of Chemistry and Physics 2002*.)

| Material            | $\rho_{293\text{ K}}/\rho_{\text{Cu } 293\text{ K}}$ |
|---------------------|--|
| Aluminum            | 1.579  |
| Brass (70%Cu–30%Zn) | 3.62   |
| Constantan          | 29   |
| Manganin            | 28   |
| Nichrome            | 64   |
| Phosphor bronze     | 7.5  |
| Platinum            | 6.26   |
| Silver              | 0.946  |
| Tungsten            | 3.15   |

**A4.1b WIRE GAUGE: METRIC AND AMERICAN WIRE GAUGE (AWG) SIZE COMPARISON  
(SECS 4.1 AND 4.2)**

**Wire gauge: metric and AWG size comparison**

| AWG or<br>B & S | Nearest common<br>metric gauge wire<br>diameter at 20°C<br>[mm] | Metric wire<br>cross-sectional area<br>at 20°C<br>[mm] | Resistance of<br>annealed copper<br>wire at 20°C<br>[Ω/km] |
|-----------------|---|--|--|
| 5               | 4.750   | 17.72  | 1.0  |
| 6               | 4.250   | 14.19  | 1.2  |
| 7               | 3.750   | 11.04  | 1.5  |
| 8               | 3.350   | 8.814  | 1.9  |
| 9               | 2.800   | 6.158  | 2.8  |
| 10              | 2.500   | 4.910  | 3.5  |
| 11              | 2.240   | 3.941  | 4.3  |
| 12              | 2.000   | 3.142  | 5.4  |
| 13              | 1.800   | 2.545  | 6.7  |
| 14              | 1.600   | 2.011  | 8.5  |
| 15              | 1.400   | 1.539  | 11.1   |
| 16              | 1.250   | 1.227  | 13.9   |
| 17              | 1.120   | 0.9852   | 17.4   |
| 18              | 1.000   | 0.7854   | 21.8   |
| 19              | 0.900   | 0.636  | 26.9   |
| 20              | 0.800   | 0.503  | 34.0   |
| 21              | 0.710   | 0.396  | 43.2   |
| 22              | 0.630   | 0.312  | 54.8   |
| 23              | 0.560   | 0.246  | 69.4   |
| 24              | 0.500   | 0.196  | 87.1   |
| 25              | 0.450   | 0.159  | 108  |
| 26              | 0.400   | 0.126  | 136  |
| 27              | 0.355   | 0.0990   | 173  |
| 28              | 0.315   | 0.0779   | 219  |
| 29              | 0.280   | 0.0616   | 278  |
| 30              | 0.250   | 0.0491   | 348  |
| 31              | 0.224   | 0.0394   | 434  |
| 32              | 0.200   | 0.0314   | 544  |
| 33              | 0.180   | 0.0255   | 672  |
| 34              | 0.160   | 0.0201   | 850  |
| 35              | 0.140   | 0.0154   | 1110   |
| 36              | 0.125   | 0.0123   | 1390   |
| 37              | 0.112   | 0.00985  | 1740   |
| 38              | 0.100   | 0.00785  | 2180   |
| 39              | 0.090   | 0.0064   | 2700   |
| 40              | 0.080   | 0.0050   | 3400   |

## A4.2 PHYSICAL PROPERTIES OF COMMON WIRE MATERIALS (SEC 4.2)

### Wire materials: composition, resistivity, melting temperature, thermal expansion, magnetoresistance, and magnetic susceptibility

| Wire material     | Chemical composition                 | Resistivity <sup>a</sup><br>at 293 K,<br>77 K, 4.2 K<br>[ $\mu\Omega\text{cm}$ ] | Melting range <sup>a</sup>                         | Coef. thermal expansion <sup>a</sup><br>[ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ] | Magnetores. <sup>a</sup><br>$\Delta R/R_0$ @<br>4.2 K and 10 T<br>(perpendicular<br>to wire) <sup>d</sup> | Volume susceptibility <sup>a</sup><br>[SI]  |
|-------------------|--------------------------------------|--|--|---|---|---|
| Copper (ETP)      | 100 wt% Cu                           | 1.68<br>0.21<br>~0.02  | 1056–1083°C<br>(20–100°C)                          | $1.68 \times 10^{-5}$   | 188% <sup>f</sup>   | $3.2 \times 10^{-5}$ @R.T. <sup>b</sup><br>$2.5 \times 10^{-5}$ @4.2 K <sup>b</sup>   |
| Constantan        | 55 wt% Cu<br>45 wt% Ni               | 49.9   | 1300–1340°C <sup>c</sup><br>(20–100°C)             | $1.5 \times 10^{-5}$  | -2.56%  | Ferromagnetic <sup>d</sup><br>Ferromagnetic <sup>d</sup>  |
| Manganin          | 83 wt% Cu<br>13 wt% Mn<br>4 wt% Ni   | 48.2<br>45.4<br>42.9   | 1100–1160°C <sup>c</sup><br>(85 wt%Cu–<br>15wt%Mn) | $1.9 \times 10^{-5}$<br>(20–100°C)                                  | -2.83%  | 0.0027 @R.T. <sup>d</sup><br>0.022 @76 K <sup>d</sup><br>0.0125 @4.2 K <sup>d</sup>   |
| Nichrome          | 80 wt% Ni<br>20 wt% Cr               | 109<br>107<br>106  | 1400°C<br>(20–1000°C)                              | $1.73 \times 10^{-5}$   | 0.69%   | $5.2 \times 10^{-4}$ @R.T. <sup>d</sup><br>$8.3 \times 10^{-4}$ @76 K <sup>d</sup><br>$5.6 \times 10^{-3}$ @4.2 K <sup>d</sup>    |
| Phosphor bronze A | 94.8 wt% Cu<br>5 wt% Sn<br>0.2 wt% P | 12.8<br>11.0<br>10.7   | 950–1050°C<br>(20–300°C)                           | $1.78 \times 10^{-5}$   | 4.5% <sup>e,g</sup>   | $-5.2 \times 10^{-5}$ @R.T. <sup>d</sup><br>$-4.7 \times 10^{-5}$ @76 K <sup>d</sup><br>$-3.3 \times 10^{-5}$ @4.2 K <sup>d</sup> |

<sup>a</sup> Except where otherwise cited, data were compiled from *Metals Handbook*, (1961), Vol. 1, *Properties and Selection of Materials* (1995), 8th edition, American Society for Metals, Materials Park, OH; *Temperature Measurement and Control*, Lake Shore Cryotronics, Inc., Westerville, Ohio; and C. A. Thompson, W. M. Manganaro, and F. R. Fickett (1990), *Cryogenic Properties of Copper*, Wall Chart, NIST, and the references cited therein.

<sup>b</sup> F. R. Fickett (1992), *Adv. Cryog. Eng. (Mater.)*, 38B, 1191–1197.

<sup>c</sup> T. B. Massalski, ed. (1990), *Binary Alloy Phase Diagrams*, ASM International, Materials Park, OH.

<sup>d</sup> M. Abrecht, A. Adare, and J. W. Ekin (2006), *Rev. Sci. Inst.*, to be published. Susceptibilities at 4.2 K were determined from magnetization vs. magnetic-field data; room-temperature and 76 K susceptibilities were calculated from the magnetization measured at  $H = 100$  Oe, except where noted.

<sup>e</sup> The magnetoresistance of phosphor bronze varies with (trace) impurities in the wire.

<sup>f</sup> The magnetoresistance of pure copper is strongly dependent on its purity; it can be determined from a normalized “Kohler” plot, such as that shown in Fig. 5.16 of F. R. Fickett, Chapter 5 in *Materials at Low Temperatures*, eds. R. P. Reed and A. F. Clark, ASM International, Materials Park, OH.

<sup>g</sup> At 76 K and 10 T, the magnetoresistance of phosphor bronze is much smaller than at 4 K, decreasing to about  $\Delta R/R_0 = 0.08\%$  (Abrecht et al. 2006, footnote d).

#### A4.4 WIRE INSULATION: THERMAL RATINGS (SEC. 4.3)

| Wire insulation               | Thermal rating   |
|-------------------------------|------------------|
| Polyvinyl Formal (Formvar™)   | 105°C      221°F |
| Tetrafluoroethylene (Teflon™) | 200°C      392°F |
| Polyimide (Kapton™)           | 220°C      428°F |

*Source: Temperature Measurement and Control (2002), Sec. 3, Lake Shore Cryotronics, Inc., Westerville, OH.*

## A4.5 THERMAL ANCHORING: REQUIRED WIRE LENGTHS (SEC. 4.4)

Tabulated values give the tempering length required to bring the designated wire material to within 1 mK of the heat-sink temperature  $T_s$ .

$T_1$  is the temperature where the lead was last thermally anchored.

### Thermal anchoring: required wire lengths

| Material               | $T_1$<br>[K] | $T_s$<br>[K] | Tempering length for various wire gauges <sup>a</sup> [cm]                  |   |   |  |
|------------------------|--------------|--------------|---|---|---|--|
|                        |              |              | 0.005 mm <sup>2</sup><br>(#40 AWG) <sup>b</sup><br>(~0.080 mm) <sup>c</sup> | 0.013 mm <sup>2</sup><br>(#36 AWG)<br>(~0.125 mm) | 0.032 mm <sup>2</sup><br>(#32 AWG)<br>(~0.200 mm) | 0.21 mm <sup>2</sup><br>(#24 AWG)<br>(~0.500 mm) |
|                        |              |              | [cm]  | [cm]  | [cm]  | [cm]   |
| Copper                 | 300          | 80           | 1.9   | 3.3   | 5.7   | 16.0   |
|                        | 300          | 4            | 8.0   | 13.8  | 23.3  | 68.8   |
| Phosphor<br>bronze     | 300          | 80           | 0.4   | 0.6   | 1.1   | 3.2  |
|                        | 300          | 4            | 0.4   | 0.7   | 1.3   | 3.8  |
| Manganin               | 300          | 80           | 0.2   | 0.4   | 0.4   | 2.1  |
|                        | 300          | 4            | 0.2   | 0.4   | 0.7   | 2.0  |
| Stainless<br>steel 304 | 300          | 80           | 0.2   | 0.3   | 0.6   | 1.7  |
|                        | 300          | 4            | 0.2   | 0.3   | 0.5   | 1.4  |

Source: D. S. Holmes and S. S. Courts (1998), Chapter 4 in *Handbook of Cryogenic Engineering*, ed. J. G. Weisend II, Taylor & Francis, Philadelphia, PA; based on an earlier calculation by J. G. Hust (1970), *Rev. Sci. Instrum.* 41, 622–624. (The difference in values between the earlier and later evaluations for copper stems from the use of mean thermal conductivity values by Hust and thermal-conductivity integrals by Holmes and Courts.)

<sup>a</sup> The calculated results pertain to wires with thin, well-bonded insulation such as Formvar or polyimide (not Nylon™ or Teflon™ sleeve insulation) in a vacuum environment (i.e. not cooled by surrounding gas). The insulation-plus-adhesive layer attaching the wire to the heat sink is assumed to have a thickness about equal to the wire diameter and a thermal conductivity typical of varnish, namely 0.01, 0.02, and 0.05 W/(m K) at 4, 20, and 78 K, respectively. The length of untempered conductor between  $T_1$  and  $T_s$  is assumed to be 25 cm; however, increasing this length by a factor of 10 shortens the required tempering length by a factor of less than two.

<sup>b</sup> American Wire Gauge (Appendix A4.1a).

<sup>c</sup> Nearest metric wire size (Appendix A4.1b).

#### A4.6a THERMOELECTRIC VOLTAGES OF SOME ELEMENTS RELATIVE TO COPPER (SEC. 4.6)

Tabulated thermoelectric voltages are *relative to copper* with the reference junction at 0°C.

A positive sign means that, in a simple thermoelectric circuit, the resultant voltage direction produces a current from the material to the copper at the reference junction (0°C).

Values have been *ordered by their absolute magnitude* at –100°C or, when not available, at +100°C. Thus, the higher a material's position in the table, the closer its thermoelectric voltage matches that of copper.

**Thermoelectric voltages of some elements relative to copper**

| Element    | –200°C<br>[mV] | –100°C<br>[mV] | 0°C<br>[mV] | +100°C<br>[mV] | +200°C<br>[mV] |
|------------|----------------|----------------|-------------|----------------|----------------|
| Gold       | –0.02          | –0.02          | 0           | +0.02          | +0.01          |
| Silver     | –0.02          | –0.02          | 0           | –0.02          | –0.06          |
| Iridium    | –0.06          | +0.02          | 0           | –0.10          | –0.34          |
| Rhodium    | –0.01          | +0.03          | 0           | –0.06          | –0.22          |
| Carbon     | —              | —              | 0           | –0.06          | –0.29          |
| Indium     | —              | —              | 0           | –0.07          | —              |
| Zinc       | +0.12          | +0.04          | 0           | 0.00           | +0.06          |
| Cadmium    | +0.15          | +0.06          | 0           | +0.14          | +0.52          |
| Thallium   | —              | —              | 0           | –0.18          | –0.53          |
| Tungsten   | +0.62          | +0.22          | 0           | +0.36          | +0.79          |
| Lead       | +0.43          | +0.23          | 0           | –0.32          | –0.74          |
| Cesium     | +0.41          | +0.24          | 0           | —              | —              |
| Tin        | +0.45          | +0.25          | 0           | –0.34          | –0.76          |
| Cerium     | —              | —              | 0           | +0.38          | +0.63          |
| Tantalum   | +0.40          | +0.27          | 0           | –0.43          | –0.90          |
| Magnesium  | +0.56          | +0.28          | 0           | –0.32          | –0.73          |
| Platinum   | +0.19          | +0.37          | 0           | –0.76          | –1.83          |
| Aluminum   | +0.64          | +0.43          | 0           | –0.34          | –0.77          |
| Molybdenum | —              | —              | 0           | +0.69          | +1.36          |
| Thorium    | —              | —              | 0           | –0.89          | –2.09          |
| Lithium    | –0.93          | +0.63          | 0           | +0.06          | —              |
| Sodium     | +1.19          | +0.66          | 0           | —              | —              |
| Rubidium   | +1.28          | +0.83          | 0           | —              | —              |
| Calcium    | —              | —              | 0           | –1.27          | –2.96          |
| Palladium  | +1.00          | +0.85          | 0           | –1.33          | –3.06          |
| Mercury    | —              | —              | 0           | –1.36          | –3.16          |
| Potassium  | +1.80          | +1.15          | 0           | —              | —              |
| Cobalt     | —              | —              | 0           | –2.09          | –4.91          |
| Nickel     | +2.47          | +1.59          | 0           | –2.24          | –4.93          |
| Antimony   | —              | —              | 0           | +4.13          | +8.31          |
| Bismuth    | +12.58         | +7.91          | 0           | –8.10          | –15.40         |
| Germanium  | –45.81         | –26.25         | 0           | +33.14         | +70.57         |
| Silicon    | +63.32         | +37.54         | 0           | –42.32         | –82.40         |

Source: Calculated from thermal emf data compiled in the *American Institute of Physics Handbook* (1972), 3rd edition, Chapter 4, McGraw-Hill, New York.

#### A4.6b THERMOELECTRIC VOLTAGES OF SELECTED TECHNICAL MATERIALS RELATIVE TO COPPER (SEC. 4.6)

Tabulated thermoelectric voltages are *relative to copper* with the reference junction at 0°C.

A positive sign means that in a simple thermoelectric circuit the resultant voltage direction produces a current from the material to the copper at the reference junction (0°C).

Values have been *ordered by their absolute magnitude* at +100°C. The higher a material's position in the table, the closer its thermoelectric voltage matches that of copper.

**Thermoelectric voltages of selected technical materials relative to copper**

| Technical Material               | –200°C<br>[mV] | –100°C<br>[mV] | 0°C<br>[mV] | +100°C<br>[mV] | +200°C<br>[mV] |
|----------------------------------|----------------|----------------|-------------|----------------|----------------|
| Silver coin<br>(90%Ag–10%Cu)     | —              | —              | 0           | +0.04          | +0.07          |
| 60%Ni–24%Fe–16%Cr                | —              | —              | 0           | –0.09          | +0.18          |
| Copper–beryllium                 | —              | —              | 0           | –0.09          | –0.21          |
| Manganin                         | —              | —              | 0           | –0.15          | –0.28          |
| Yellow brass                     | —              | —              | 0           | –0.16          | –0.34          |
| Copper coin<br>(95%Cu–4%Sn–1%Zn) | —              | —              | 0           | –0.16          | –0.35          |
| Phosphor bronze                  | —              | —              | 0           | –0.21          | –0.49          |
| Solder (50%Sn–50%Pb)             | —              | —              | 0           | –0.30          | —              |
| Solder (96.5%Sn–3.5%Ag)          | —              | —              | 0           | –0.31          | —              |
| 18–8 Stainless steel             | —              | —              | 0           | –0.32          | –0.79          |
| 80%Ni–20%Cr                      | —              | —              | 0           | +0.38          | +0.79          |
| Spring steel                     | —              | —              | 0           | +0.56          | +0.80          |
| Gold–chromium                    | —              | —              | 0           | –0.93          | –2.15          |
| Iron                             | –2.73          | –1.47          | 0           | +1.13          | +1.71          |
| Alumel                           | +2.58          | +1.66          | 0           | –2.05          | –4.00          |
| Chromel P                        | –3.17          | –1.83          | 0           | +2.05          | +4.13          |
| Nickel coin<br>(75%Cu–25%Ni)     | —              | —              | 0           | –3.52          | –7.84          |
| Constantan                       | +5.54          | +3.35          | 0           | –4.27          | –9.28          |

Source: Calculated from thermal emf data compiled in the *American Institute of Physics Handbook* (1972), 3rd edition, Chapter 4, McGraw-Hill, New York.

#### A4.7 THERMAL CONDUCTIVITY OF YBCO-COATED CONDUCTORS (SEC. 4.10)

The thermal conductivity of YBCO-coated conductors (e.g. for flexible current leads; see Sec 4.10) is tabulated in terms of each of the major components of these composite conductors. For any particular YBCO conductor, the total thermal conductivity along the length of the composite conductor  $\lambda_{\text{total}}$  is the sum of the contribution of each component  $\lambda_i$  weighted by its fractional cross-sectional area. Thus, for tape conductors

$$\lambda_{\text{total}} = \sum (d_i/D) \lambda_i,$$

where  $d_i$  is the layer thickness of the  $i$ th component and  $D$  is the total thickness of the tape.

##### Thermal conductivity of component materials of YBCO-coated conductors

| Material   | Thermal conductivity [W/(m·K)]        |                   |                   |       |         |
|--|---------------------------------------|-------------------|-------------------|-------|---------|
|  | 20 K                                  | 50 K <sup>a</sup> | 90 K <sup>a</sup> | 110 K | 295 K   |
| YBCO( <i>a</i> – <i>b</i> ) 123 phase <sup>b</sup><br>(Calc. from melt-textured data)  | 14                                    | 27                | 22                | 21    | ~18     |
| YBCO( <i>c</i> ) 123 phase <sup>b</sup><br>(Calc. from melt-textured data)<br>( $\lambda_{a-b}/\lambda_c \approx 6.3$ )                                      | 3.5                                   | 4.4               | 3.2               | 3.0   | ~2.8    |
| YBCO( <i>a</i> – <i>b</i> ) 123 + 40% 211 phase <sup>b</sup><br>melt textured  | 10                                    | 19                | 16                | 15    | ~14     |
| YBCO <sup>c</sup><br>sintered  | 5                                     | 8                 | 5                 | 5     | 5       |
| Ag <sup>d</sup>  | Depends on<br>Ag purity<br>(Sec. 2.2) | 1180              | 620               | 560   | 450     |
| Cu (RRR = 100) <sup>e</sup>  | 2430                                  | 1220              | 497               | 452   | 397     |
| Inconel 625 <sup>f</sup><br>$\lambda = 24.7992 \times 10^{-6} T^2 + 1.989348 \times 10^{-2} T + 7.899798$<br>(valid 116–1255 K)                              |                                       |                   |                   | 7.4   | 9.8     |
| Hastelloy C-276 <sup>f</sup><br>UNS N10276<br>$\lambda = 3.565928 \times 10^{-6} T^2 + 1.349819 \times 10^{-2} T + 5.726708$<br>(valid 105–811 K)            |                                       |                   | 7.0               | 10    | (100 K) |
| Nichrome <sup>f</sup><br>UNS N06003 (77.3%Ni, 21%Cr)<br>$\lambda = 2.099567 \times 10^{-6} T^2 + 1.480732 \times 10^{-2} T + 8.265973$<br>(valid 273–1073 K) |                                       |                   |                   | 13    |         |

<sup>a</sup> The abrupt rise in thermal conductivity below  $T_c$  is due to condensation of electrons into superconducting pairs, eliminating them as scatterers of phonons, and thus enhancing the dominant phonon contribution to the thermal conductivity.

<sup>b</sup> M. Ikebe, H. Fujishiro, T. Naito, K. Noto, S. Kohayashi, and S. Yoshizawa (1994), *Cryogenics* 34, 57–61.

<sup>c</sup> A. Jezowski, J. Mucha, K. Rafalowicz, J. Stepień-Damm, C. Sulkowski, E. Trojnar, A. J. Zaleski, and J. Klamut (1987), *Phys. Lett. A* 122, 431–433.

<sup>d</sup> Calculated from the resistivity of silver (Appendix A6.5a) by using the Wiedemann–Franz Law (Sec. 2.2) for electronic thermal conduction ( $\lambda = L_N T/\rho$ , where  $L_N = 2.44 \times 10^{-8} \text{ V}^2/\text{K}^2$ ).

<sup>e</sup> Cryogenic Materials Properties Program CD, Release B-01 (June 2001), Cryogenic Information Center, 5445 Conestoga Ct., Ste. 2C, Boulder, CO 80301-2724; Tel. (303) 442-0425, Fax (303) 443-1821.

<sup>f</sup> R. Radebaugh et al. (2003), <http://www.cryogenics.nist.gov/> and the references listed therein.