## ⑥ キャビティ長の制御方法

すべての安定化スキームは、HeNe レーザーのキャビティ長の直接的または間接的な正確な制御に基づいています。

- **薄膜または巻線ヒーター**: これは最も一般的なアプローチです。最初に、チューブは、ボア加熱だけで熱平衡に達する温度を十分に上回る温度まで加熱されます。これをどのくらい高く設定するかは、許容可能な周囲温度範囲での動作と過度に高温で動作するレーザーとの間のトレードオフになります。次に、モードフィードバックに基づいてチューブ温度と実際のキャビティ長が一定に維持されるように、ヒーター出力を使用して対流冷却のバランスを取ることができます。動作点でのヒーター電力は通常、ボア放電電力の 1/4～1/2 です。

**薄膜ヒーターを用いる安定化レーザーの分解写真**

薄膜（Kapton）ヒーターは、さまざまな構成で複数のメーカーから入手可能です。しかし、サイズ、抵抗、抵抗の温度係数に関してカスタマイズすることもできます（場合によっては多額の費用がかかります）（これにより、別個のセンサーを使用せずに実際の抵抗を使用してチューブ温度を決定できます）。薄膜ヒーターは通常、裏面に粘着剤が付いているため、取り付けが非常に簡単です。

巻線ヒーターは、ヒーター電流によって生成される磁場を最小限に抑えるために、適切なサイズと長さの銅「磁石」ワイヤーを「バイファイラースタイル」で巻いて実装できます。これはより労働集約的ですが、プロトタイプまたは少量の生産では許容可能です。

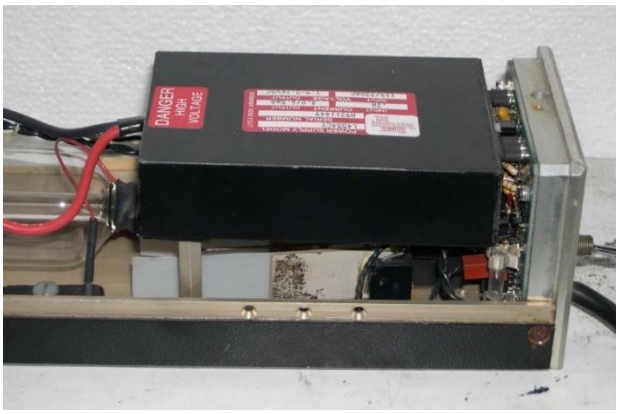
- **誘導ヒーター**: 最新の HeNe レーザー管のミラーマウントステムは金属でできているため、低電力の高周波源で駆動される小さなコイルを介してエネルギーをステムに結合することができ、その後、共振器の長さを一定に維持するために調整することができます。これは Aerotech 社の Syncrolase S100 で先駆的に開発され、Melles

Griot 社が 05-STP-909/910/911/912 で採用しました。ミラーマウントステップの熱時定数はガラス管の熱時定数よりもはるかに小さいため、応答性が優れています。ただし、使用できる長さが限られているため、チューブの他の部分が拡張するときにロックを確実に維持するのは困難な場合があります。このアプローチの利点の 1 つは、コイルを取り付けることができる適切な長さの「任意の」HeNe レーザーチューブを安定化できることです。

**Aerotech 社製 Syncrolase S100 の外観**

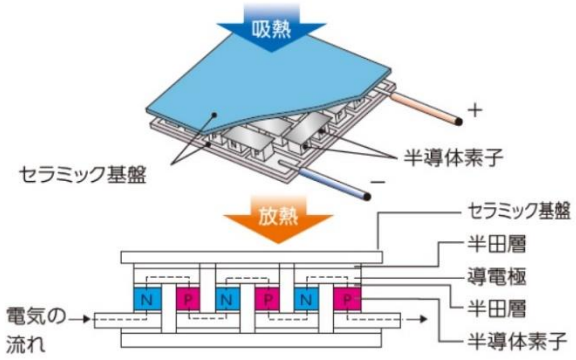
**Melles Griot 社(現 Pacific Lasertec 社)製 05STP910/912 の外観**

- **ボアヒート/ファン**: このかなり特殊なアプローチは、私たちの知る限りでは、初期の安定化された HeNe レーザーの一部で Teletrac 社によってのみ使用されています。それを面倒だと言う人もいるかもしれませんが、実際には非常にうまく機能します。初期加熱は、HeNe ボア放電とチューブ近くの 2 個の小さな電球の両方によって行われます。設定温度に達すると、電球がオフになり（チューブがロックされている間は使用されません）、低振動の PZT ファンがアクティブに冷却します。PZT ファンは、モードフィードバックに基づいて可変振幅で振動する一対のブレードにすぎません。冷却によって目的のモードが定位置に引き込まれると（私も）非常に興奮します。😀このアプローチの利点の 1 つは、アクティブ冷却を使用すると（たとえ弱かったとしても）、熱だけを使用した場合よりも周囲温度に近い低い温度でレーザーを実行できることです。欠点は、振動を最小限に抑えるように設計されていても、PZT ファンは完璧ではないことです。また、干渉計ベースのデバイスでは、微小な振動でも問題になる可能性があります。



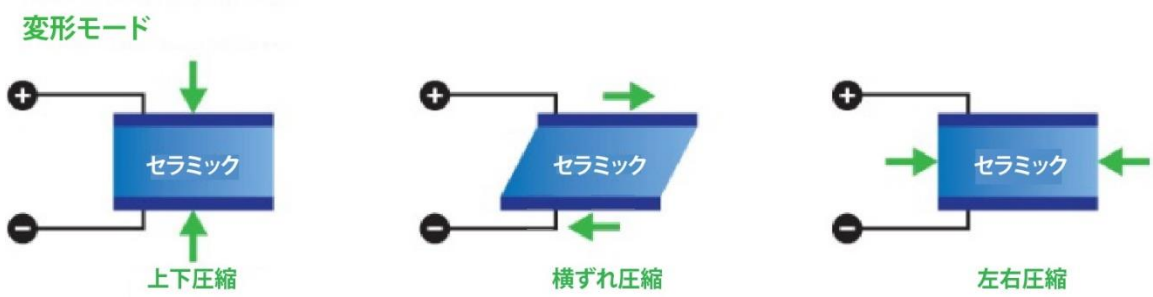

**Teletrack 社製安定化レーザーの電源下にある開閉する2枚の白いブレード**

- **熱電冷却器（TEC):** 原理的には、TEC（実際に冷却と加熱の両方が可能）を使用してキャビティ長を制御できます。ただし、これらは通常平面状のデバイスであるため、円筒状のチューブに適合させるのは困難な場合があります。これには、熱伝導率の高い材料で作られたアダプターが必要になります。その場合でも、熱遅延により安定化が不可能になる可能性があります。ただし、ミラーマウントステムの 1 つでこれを行うことは可能かもしれません。

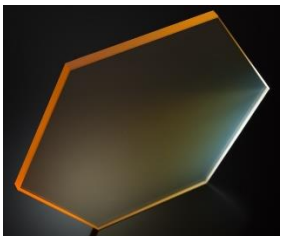



**ペルチェ素子の基本構造図**

- **PieZo トランスデューサ（PZT):** PZT は、適切な条件下でキャビティ長の制御に十分な狭い範囲の動きを提供できます。初期の Hewlett Packard（HP)社製計測レーザー(5500A/B/C および 5501A）では、ミラー間隔ロッドとチューブエンベロープの「内側」のカソード端ミラーの間に PZT を使用していました。したがって、適切なロックポイントを保証するのに十分な範囲をカバーするのに十分な変位だけミラーを直接移動させることになります。ただし、ミラー間隔ロッド（PZT とともに共振器長を決定する）が ZeroDur™で作られていたとしても、しばらくすると、共振器長が依然として範囲外にドリフトする可能性があり、ロックポイントをリセットする必要がある場合があります。その後の HP 社製レーザー(現在まで)では抵抗ヒーターが使用されていますが、抵抗ヒーターは依然としてチューブ内にあります。（参考 URL：ピエゾ素子のチュートリアル（thorlabs.co.jp））




**ペルチェ素子の基本構造図**



**ZeroDur™ の外観**

キャビティ長を定義するチューブ構造が ZeroDur™のような材料で作られていない場合、一般的な PZT が対応できる以上に全長が何桁も変化するため、PZT を使用することは困難です。少なくとも、PZT を使用してフィードバックループを閉じる前に、レーザーはアクティブな温度制御を使用し、熱平衡に達するまで何時間もウォームアップする必要があります。これが、Spectra-Physics 社製 119 レーザーの実装方法です。

**Spectra Physics 社製安定化 HeNe レーザー119 ヘッドの外観**

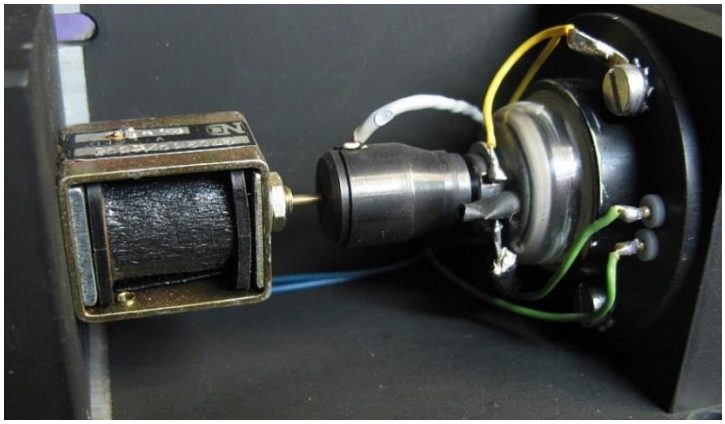
PZT は熱放散よりも桁違いに速い応答を持っていますが、一般に高電圧駆動が必要であり、これがさらにことを複雑にします。変調が必要な場合を除き、安定化レーザーには高帯域幅は実際には必要ありません。ただし、PZT は適度な電圧だけで小さなディザ（外部振動子）を簡単に提供できるため、Nikon 社製 NKL-85 や Spectra-Physics 社製 119 などのいくつかの安定化 HeNe レーザーや、とりわけ NIST と Frazier 社によって製造されたヨウ素安定化 HeNe レーザーでこの目的に使用されています。

**Nikon 社製 85 安定化レーザーヘッドの外観**

**Frazier 社製ヨウ素安定化レーザーヘッド 100 の外観**

- **電気機械**: 最後に、ガラスと金属はミクロスケールで弾性があります。したがって、原則として、一般的なソレノイドのような外部電磁アクチュエータは、ミラーマウントステムの 1 つを押したり引いたりして、実際にチューブを十分に絞ったり伸ばしたりしてキャビティの長さを制御できます。数ミクロンをカバーするには（重量）ポンドのオーダーです。共振器長の制御にこのアプローチを使用している市販の安定化 HeNe レーザーは知りませんが、少なくとも 1 つ(Spindler＆Hoyer 社) がディザリング（外部振動子）にそれを使用していました。

Spindler and Hoyer 社製安定化レーザーZL-150 の外観



同機内部のディザーソレノイドとビームサンプラー