

熱電気の ハンドブック

目次

製品情報

サーモエレクトリックの歴史と概略	2
サーモエレクトリック・アプリケーション	3
構造と機能	4
装置を選ぶのに必要なパラメータ	8
設計/選択チェックリスト	9
サーモエレクトリック多段（カスケード）装置	11
代表的装置の性能	12

アセンブリー情報

アセンブリーチップス	13
熱交換器へのラップ型モジュールの取付け方法	15
熱交換器へのハンダ付け型モジュールの取付け方法	17

性能と特性

装置の動作公式	19
熱伝導式	20
単位変換テーブル	21
信頼度と平均故障間隔（MTBF）	24

製品情報

サーモエレクトリックの歴史と概略

サーモエレクトリック・ヒートポンプとは？

サーモエレクトリック・ヒートポンプはフロンガス使用の蒸気圧縮（吸収）による冷蔵庫と同じ冷却機能を持っています。これらすべてのユニットでは、エネルギーは、ある部分から引出されて温度が下がり、高温にある「ヒートシンク」で廃棄されます。蒸気サイクル装置には可動部分があり、流動する液体を必要としますが、サーモエレクトリックのものは全く可動部がありません。

メルコアの固体ヒートポンプは高性能の結晶半導体材料から作られたサーモカップルを使用します。ヒートポンプに電流を流すとサーモカップルの両面間に温度差が生じます。最大定格温度差は 70°C 以上です。

固体ヒートポンプは 1834 年のペルチェ効果の発見以来知られています。しかしこの装置が実用的になったのは、半導体サーモカップルの材料が開発されたつい最近です。メルコアはピスマス・テルライド（ピスマスの第四合金：テルリウム、セレンとアンチモニーを蒸着処理したサーモエレクトリックな性質を持つ多結晶半導体）を利用しています。カップルは電気的には直列、熱的には並列に結合されてモジュールになります。モジュールは金属化セラミック・プレートの間にパッケージされ、圧縮しても高い機械的強度を持ちながら最適な電気絶縁と熱伝導度を達成しています。代表的なメルコアのモジュールは 3~17 のサーモカップルから出来ています。高度の計測・通信システム用のハイテクなアプリケーションには非常な小型で低電流のモジュールが必要です。しかし成長期の商用アプリケーション用には低価格大容量のモジュールの必要があります。モジュールは並列に取付けて熱伝導効果を高めたり、多段階カスケードに積層して大きい温度差を得ることもできます。

サーモエレクトリック・ヒートポンプを使うべきか？

サーモエレクトリック装置はすべての冷却問題に対する解決法ではありません。けれどもシステムの設計基準に高信頼性、小型、小容量、低価格、低重量、電気的安全性や正確な温度制御などの要素が入っているときは、サーモエレクトリック装置を考えてください。

メルコアのモジュールとアセンブリ

オプト TEC シリーズ：サブミニチュア、中小容量、低電流モジュールで、決定要因が高信頼性、制限スペース、最小消費電力であるシステムで温度を厳密に保つのに使われます。

CP シリーズ：低価格、中高容量の汎用モジュール。設備、実験室の装置、消費財などの冷却装置用また民生・軍用アプリケーション用です。

マルチステージ(カスケード) シリーズ：大温度差用に設計された標準またはカスタムのマルチステージ（カスケード）TEC。

ヒートポンプ・アセンブリ：FRIGICHIP と熱交換器を含むパッケージ。カスタマの仕様にもとづき設計・製作。

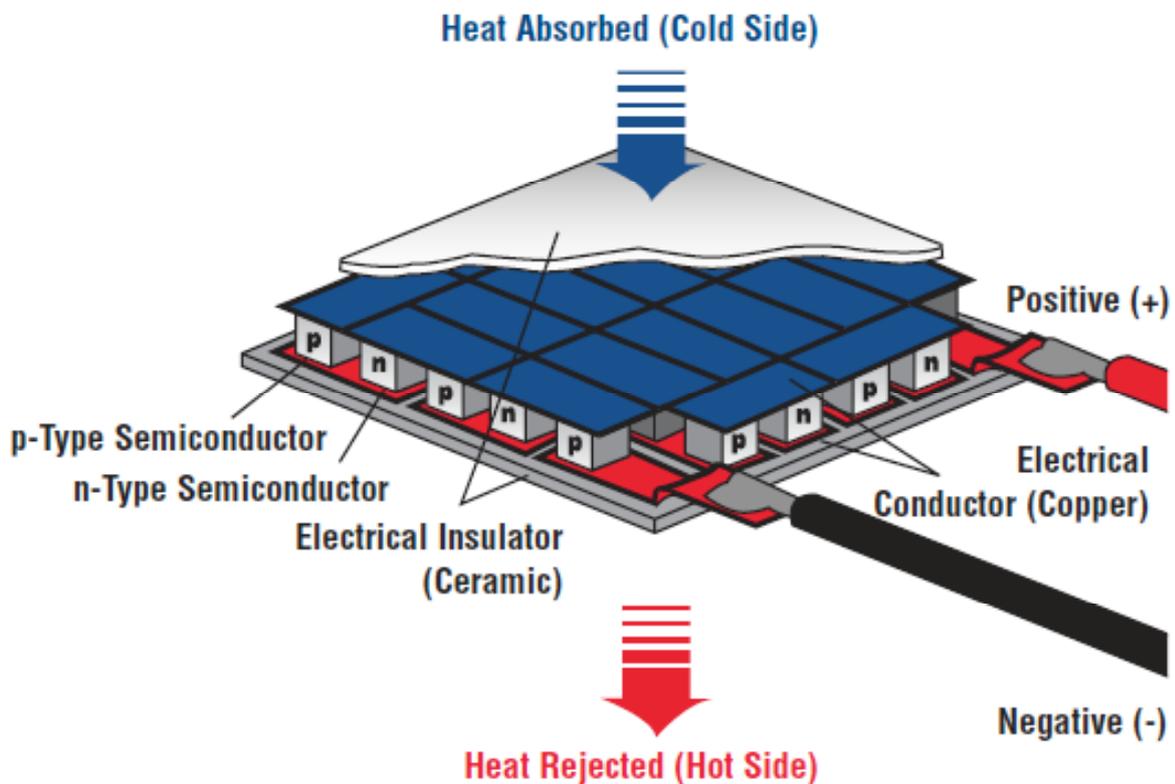
サーモエレクトリック・アプリケーション

サーモエレクトリックの応用

サーモエレクトリック（ペルチェ）ヒートポンプは、固体または流体を冷却することができます。従来の蒸気圧縮システムと違い、サーモエレクトリック・ユニット（モジュール）は小型です。代表的なサイズは $1 \times 1 \times 0.09$ （単位：インチ）です。わが社の最小サブミニチュア・モジュールのサイズは $0.16 \times 0.16 \times 0.09$ （単位：インチ）です。このユニットは、氷点以下に温度を下げるのが簡単にできます。

競争上の優位性

サーモエレクトリック・システムを 1 立方インチ内で作ることができます。より代表的には約 $20 \sim 30 \text{in}^3$ の容積を占めます。電源は DC です。容積と重量が小さいばかりでなく、可動部がなく信頼性は最高です。さらに重要な特長は、科学・軍用・航空宇宙アプリケーションにおいて大切である精密な温度制御が、簡単にできることです。



構造と機能

サーモエレクトリック冷却システムは従来型システムと良く比較されるので、二つの冷却方法の差を示すことが、システムそのものを説明するおそらく最良の方法です。

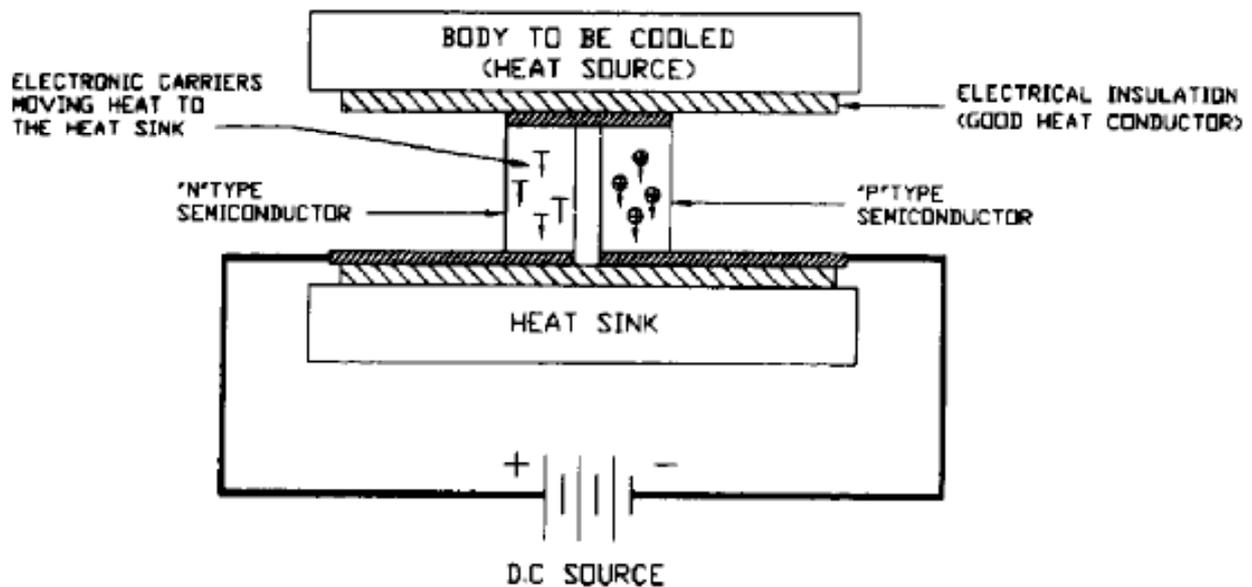
従来型冷却システムは3つの重要部品を含みます。蒸発器(Evaporator)、コンプレッサ(圧縮器)とコンデンサ(放熱器、凝縮器)です。蒸発器すなわち冷却部は高圧の冷媒が膨張、沸騰、蒸発する部分です。液体から気体になるときにエネルギー(熱)が吸収されます。コンプレッサは冷媒ポンプとして働き気体を液体に再圧縮します。コンデンサは蒸発器で吸収した熱と圧縮による熱を合わせた熱を外部に放出します。

サーモエレクトリックも似た部分を持ちます。冷接点では、電子がp型半導体素子の低エネルギー・レベルからn型半導体素子の高エネルギー・レベルに流れて、エネルギー(熱)が吸収されます。高温接点では電子が高エネルギーレベルの素子(n型)から低エネルギーの(p型)素子に流れ、エネルギーがヒートシンクに放出されます。

サーモエレクトリック・クーラーはヒートポンプで、可動部分、液体、気体を持たない固体装置です。従来型のヒートポンプ、吸収冷凍機、熱エネルギーの移動を含む他の装置と同じく熱力学の基本法則が、この装置に適用されます。

T.E.冷却システムの理解の助けになる類似点は、温度を測るのに使う標準のサーモカップルです。この型のサーモカップルは、二つの接点が出来るように、異なる金属からなるワイヤーを結んで作られます。一つの接点を基準温度に保ち、もう一方を測定物に付着させます。システムの使い方は次のとおりです。ある点で回路を開き、発生した電圧を測ります。この一連の考えを逆転させて、一組の固定接点を考えます。エネルギーを供給すると一つの接点は冷たくなり、もう一方の接点は熱くなります。

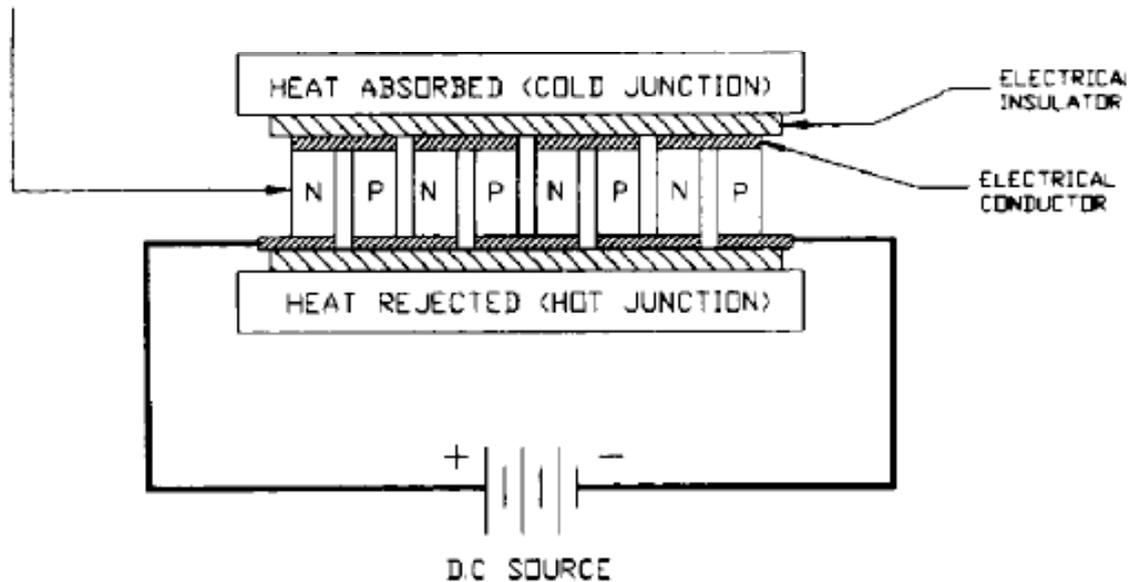
[図 1 : 代表的な TE カップルの断面図]



サーモエレクトリック冷却カップルは、添加物の多い2つの半導体素子(主成分はビスマス・テルライド)からできており、電子の過剰状態(n型)または不足状態(p型)を作ります。冷接点で吸収された熱は熱接点に、回路と複数のカップルを流れる電流に比例した速度で送り出されます。

[図2：代表的な TE モジュール・アセンブリ]

BISMUTH TELLURIDE
ELEMENTS WITH 'N' &
'P' TYPE PROPERTIES



実際は、カップルはモジュール内で結合されます。電気的には直列、熱的には並列です。普通モジュールが、市販で得られる最小単位です。

様々なサイズ、形状、動作電流、動作電圧、ヒートポンプ容量のモジュールがあります。けれども、現在の傾向は多数の低電流動作のカップルの型をしたものです。ユーザはモジュールの品質、サイズまたは容量を選び、余計な電力料金を払わないで要求に正確に応えることができます。

他の冷却方法の代わりにサーモエレクトリックを使う「必要性」が多くあります。この「必要性」はサイズ、設置面積、重量、信頼性や真空中などの環境条件を特に考慮したからです。これら条件のどれも必要でなければ、他の冷却方法を考えるべきで、事実そうした方が望ましいのです。

サーモエレクトリックの採用を決めたら、次の問題は特定の要求に応えるサーモエレクトリックを選ぶことです。装置を選ぶ前に、三つのシステム・パラメータを決める必要があります。

それら三つとは：

- ・ T_c : 冷面の温度
- ・ T_h : 熱面の温度
- ・ Q_c : T.E. の冷面で吸収される熱量

多くの場合、冷面の温度は、いわゆる、いくつかの物体はある温度に冷却されるという問題の一部として得られます。一般に物体がサーモエレクトリックの冷面に直接密接にしていれば、物体の望む温度は、T.E.の冷面の温度 (T_c) と考えられます。冷却される物体が、T.E.の冷面に密接しないことが求められる場合があります。たとえば、T.E.冷面に熱交換器を必要とする大容量冷却です。この種のシステムを採用すると、T.E.の表面温度 (T_c) を最終的に望む温度より数度低くする必要があります。熱面温度は以下の二つの主要パラメータで決まります。

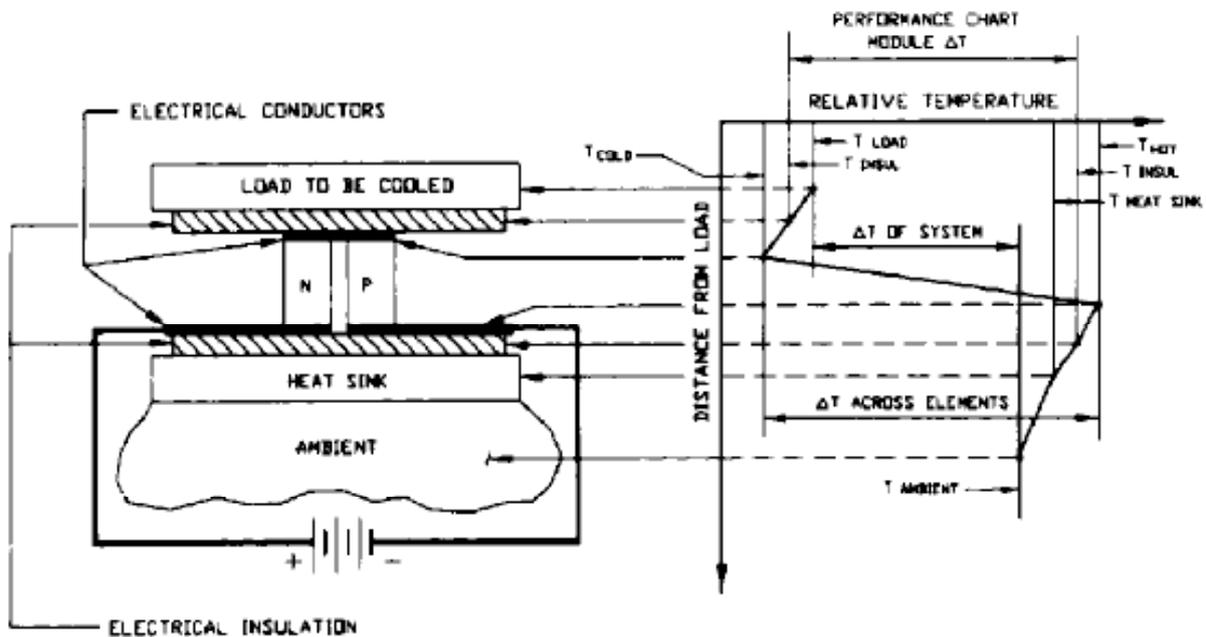
1) 熱が廃棄されている周囲環境の温度。

2) T.E.の熱面と周囲の間にある熱交換器の効率。

これら二つの温度 (T_c & T_h) とその差 (ΔT) は非常に重要なパラメータで、望みとおり動作するように設計

するときには正確に決める必要があります。図3はサーモエレクトリック・システムの代表的温度断面図を示します。

[図3：TEC内の代表的温度関係]



三つ目のそして正確に測るのが最も難しいパラメータは、T.E.の冷面に吸収される熱量です。T.E.に対するすべての熱負荷を考慮する必要があります。これらの熱負荷には以下のものがあり、それだけに限られません。電子装置からの活動中の、すなわち I^2R 熱負荷と、冷面や暖温度のもの（例えば、電気リード、絶縁物、空気またはガスなどの周囲物、機械的締め金具、その他）との接点を經由する伝導です。放射熱効果を考慮する必要があるときもあります。

サーモエレクトリック装置一段は、約 67°C の「無負荷」温度差を作ることができます。これより大きい温度差は、サーモエレクトリックを他の上に積層して達成できます。この方法をカスケードとよぶことが多いです。カスケードされた装置の設計は、一段の装置より複雑で、この論文の範囲を越えます。カスケードが必要な場合、メルコアの社員から設計支援が得られます。三つの基本的パラメータが定量化されると、特定モジュールまたはモジュール群を選ぶ過程が始まります。 Q_c & T_H の定量化に役立つ代表的な熱移動式を記述します。

特定用途向けのモジュール、モジュール群が沢山あります。「最良」のモジュールを選び出すのに使われるもう一つの基準は性能係数 (C.O.P : Coefficient of Performance) です。C.O.P.は冷接点で吸収される熱を入力で割ったものと定義されます (Q_c/P)。最大C.O.P.の利点は、入力が最小であることです。したがって、熱交換器で廃棄される全ての熱は最小になります ($Q_H = Q_c + P$)。これらの利点を生かすと高くつくしますので、この場合、C.O.P. 最大で運転させるには装置を増設するかまたはより大きい T.E. 装置を付けることが必要です。最小 C.O.P.の利点は初期費用が最小であることが自然と分かります。

電源/温度制御は T.E.システムを成功させるための追加項目として考慮する必要があります。サーモ・エレクトリック装置は D.C.装置です。D.C.にどんな A.C.成分が重なっていても有害です。リップルによる悪化は次のようになります。

$\Delta T/\Delta T_{\text{max}} = 1 / (1 + N^2)$ 、ここで N は電流リップル (%)
メルコアは、リップルは 10%以内を推奨します。

温度制御は普通二グループに分けて考えます。オープン・ループ/クローズド・ループと、手動/自動の二つです。方法に関係なく、最も検出・測定しやすい装置のパラメータは温度です。そこで冷接点（または加熱モードのときの熱接点）は制御の基準として使われます。制御される温度はある基準温度、普通周囲温

度か T.E.の対面温度と比較されます。

オープン・ループ方式ではオペレータは電源を調節して誤差をゼロに減らします。クローズド・ループではこれを電子的に行います。いろいろな制御回路は膨大、複雑であり、この論文で絶えず改良するつもりです。この特殊分野専門の相談を受ける制御回路、制御システムのメーカーが数社あります。制御の精度、価格はアプリケーションによって変わります。

装置を選ぶのに必要なパラメータ

T.E.装置を選ぶ前に知っておく必要のある最低の仕様があります。特に、三つのパラメータが必要です。このうち二つは、温度勾配を決める T.E.装置両側の温度です。三つ目は装置によって排熱しなければいけない全熱量です。

T.E.両側の温度勾配(実際の DT)は、測定 DT(システム ΔT)とは違います。これら二つの ΔT の差は無視されることが多く、システム設計に影響されます。 ΔT 間の差は、システムの高温側または低温側で使われる熱交換器の型に依存することが多い。

不幸にも、この差を正確に決めるための「厳格な法則」はありません。システムの高温側での代表的な許容値は：

- 1.フィン強制空気：10～15°C
- 2.自由対流：20～40°C
- 3.液体交換器：液温度より 2～5°C高温

です。

システムの低温側熱束密度は、高温側よりかなり小さいので、高温側許容値の約 50%の（同じ型の熱交換器を使った場合）許容値を使う必要があります。習慣として、選択して得られた数字をチェックしてヒートシンク設計パラメータの適切性を再確認するのが良い。

選択工程で決める必要のある三つ目のパラメータは、T.E.装置によって排熱される全熱量です。この値を見積もることは最も難しいことが多いのです！物体の温度を下げるには、熱がそこに注入されるよりも早く、それから熱を除去する必要があります。装置から熱を除去する方法には大きく分けて一般的に二つあります。第一は実際の、または「活性的」な熱負荷です。これは、その名の通りの負荷です。この負荷は、電気部品の I^2R によるものかも知れないし、空気除湿負荷または冷却物体の負荷かもしれません。「他の」もう一つ負荷は寄生的負荷と多く呼ばれます。これは、物体は周囲の温度より低温であるという事実によります。この負荷は、周囲空気の伝導・対流、絶縁からの漏れ、ワイヤー経由の伝導、水の凝縮、ある場合の氷の生成などです。これらどの寄生的負荷の発生源でも無視することは出来ません。

特定アプリケーションにとっては非常に重要になると思われるものが他にあります。物理的サイズ、入力電源の制限、価格です。これらは重要であるにもかかわらず、二次的なものに過ぎません。メルコアのサーモエレクトリック装置の選択/推奨する方法は、コンピュータ設計プログラム AZTECM を使用することです。これは、所期の高温側動作温度、希望低温側温度、実際の ΔT を通過して排熱される全熱負荷に対して最適なサーモ・エレクトリックの設計を選びます。

アプリケーションの実際条件を明示する助けになる「チェックリスト」を添付します。さらなる支援が必要でしたら、わが社の技術者にご連絡ください。

設計／選択チェックリスト

下記に要求した項目は、望みの性能を達成するためのサーモエレクトリックを設計／選択するために極めて重要です。

アプリケーションの実際条件と制限要因をできるだけ多く明示してください。（すべてのパラメータには単位を示してください。）

I. 周囲環境

温度 = _____

- 空気
- 真空
- その他

II. 冷接点

温度 _____

サイズ _____

絶縁物? _____ 型 _____ 厚さ _____

冷却方法

- プレート
- フィン
- 液体 (パラメータ) _____
- その他 _____

III. ヒートシンク

- フィンなし対流
- フィン強制対流
- 液冷
- ヒートシンク最高温度 _____
- またはヒートシンク定格 (°C/W) _____

IV. 冷接点の熱負荷 = _____

(該当する場合、以下を記入してください。)

能動的:

$I^2R =$ _____

受動的:

放射 = _____

対流 = _____

絶縁損失 = _____

伝導損失 = _____ (例: リード)

過渡負荷 = _____ (重量-時間)

V. 最大出力

(最も重要)

- 電流 _____
- 電圧 _____
- 出力 _____

・無制限

VI.サイズ制限： _____

VII.最も効率的な応答を得るために、

アプリケーションの概略を寸法付きで書き、予想される物理構成、サーモエレクトリック・モジュールの位置を示してください。

この記入用紙を印刷して、空白を埋めてください。

クロニクス株式会社

TEL:03-3374-5261
FAX:03-3374-5410

サーモエレクトリック多段（カスケード）装置

多段サーモエレクトリック装置は、一段装置が要求を満たせないところだけで使うべきです。図 4 は ΔT 、C.O.P.max、段数を示します。C.O.P.は装置の冷温側で吸収される熱量（吸収熱量：サーマル・ワット）を入力（電気：ワット）で割ったものです。この数字はカスケードを考えるときの確認に役立ちます。というのは、それは各段の有効 ΔT レンジを示すからです。 ΔT が、第一段装置と第二段装置の C.O.P. バーが拡散し始める 40°C ($T_c = -5^\circ\text{C}$) と、一段装置が最大 DT に近づく 65°C ($T_c = 30^\circ\text{C}$) の間にあり、またヒートポンプの「遮断」 $Q_c = 0$ のとき、二段カスケードを考える必要があります。より大きい ΔT のときは、段数を決めるのに同じような決断をしなければいけません。ここでも二つの重要な要素は ΔT と C.O.P. となります。

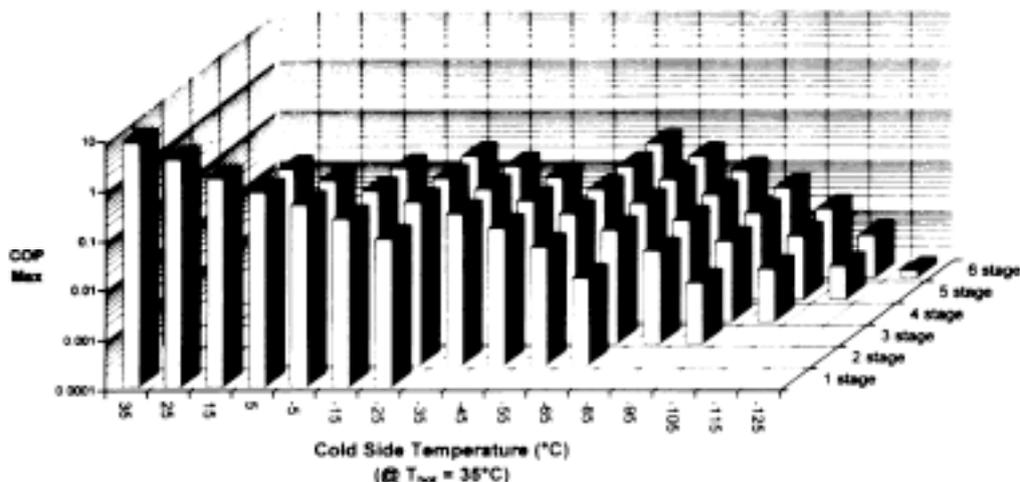
常に考えるべき非常に重要な要素が他にあります。それは価格です。普通段数が増えると、価格も増加します。アプリケーションの中には、C.O.P.と価格の折り合いをつける必要があります。

どの T.E.システムでも選択作業を始めるために、少なくとも三つのパラメータを明確にしておく必要があります。

- ・ 冷温側温度： T_c
- ・ 高温側温度： T_h
- ・ 除去熱量（T.E.の冷温表面で吸収される熱量）： Q_c （ワット）

$\Delta(T_h - T_c)$ と熱負荷が決まると、図 4 を利用して必要な段数を求めることができます。C.O.P.と Q_c が分かれば、入力を見積ることが可能です。図 4 に挙げた値は理論的最大値です。実際に製作される装置がこの最大値を達成するのは稀ですが、この値にできるだけ近づけるべきです。

[図 4：段数の関数とした DT と C.O.P.最大値]



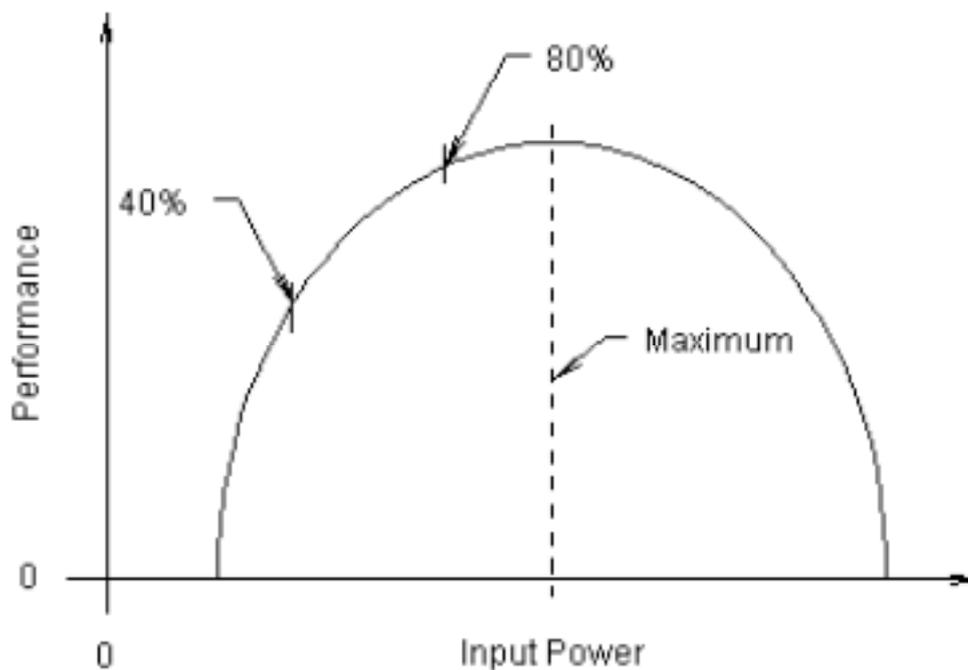
メルコアは、「スタンダード」なアプリケーションを持っていませんが、一連の「スタンダード・カスケード」製品を提供します。各カスケードに対する要求は独自であり、選んだ各装置は、その要求を個々に満たすべきです。メルコアはコンピュータ支援設計システムを開発して装置選びに役立てました。上記の三つのパラメータはプログラムへの入力として使われます。物理サイズ、動作電圧・電流などの他のパラメータは、制限つきで最終選択するのに使われます。セラミック・パターンを利用して、種々のカスケードを 4 万種以上組立てることが可能です。これにより「標準」に近い価格でカスタムに近い設計が可能になります。三つのパラメータが確定したら、カスケード選択に関する支援を得るためにメルコアに連絡してください。

代表的装置の性能

どのサーモエレクトリック装置に対して性能と入力をプロットしても、結果グラフは下図のようになります：逆さの парабола。性能は、 $\Delta T(T_H - T_C)$ または冷温側の熱量(Q_C) または最も多い場合であるこれらパラメータを組合せたものになります。入力は電流(I)、電圧(V) または $I \cdot V$ の積です。

ΔT_{max} または $Q_{C,max}$ は、曲線が最高にある点です。 I_{max} または V_{max} も同じです。頂点に非常に近いところで動作させるのは、相対的に効率的ではないので、多くの装置は最大出力の 40~80% の間で運転させます。

上記にしたがい装置は曲線の昇り坂の非線形のところを普通運転されます。自動または閉ループの制御を使うときは、電流または電圧の制限は最大部よりも下方に設定する必要があります。



アセンブリー情報

アセンブリーチップス

サーモエレクトリック (TE) システムの組立てに使われる技術は、最適なデバイスの選択と同じくらい重要になります。組立ての目的、すなわち熱の移動を行うことを心に留めておくべきです。一般に、冷却モードにおける TE デバイスは、対象物体から周囲に熱を移動します。冷却される対象物と周囲のすべての機械的なインターフェイスもまた熱インターフェイスです。すべての熱インターフェイスは、熱の流れを禁止し熱抵抗を付加する傾向があります。さらに組立て技術を考えるとき、すべての正当な努力をして熱抵抗を最小にすべきです。

熱交換器表面の機械的な許容値は、Total Indicated Reading が最大 0.003 インチのとき、0.1in/in を越してはいけません。共通プレート間では、ひとつ以上の TE モジュールを使用する必要があり、モジュール間の高低は、0.001in.を越さないようにします。(ご発注の際、高耐性ラップ型モジュールを要求してください)。多くの TE アセンブリ品は、一面以上の"サーマルグリース"インターフェイスを使用しています。グリースの厚さを、 $0.001\pm 0.0005\text{in.}$ ($0.025\pm 0.013\text{mm}$) に保ちます(印刷機用のインクローラーがこの作業に最適です)。このタイプの許容値を保つと、高いレベルの清浄度が維持されます。汚れ、チリと垢は、最小にすべきです。この種の汚染物質との親和性を良くするために "グリース"結合が使用される場合、このことは非常に重要です。

一旦、TE モジュールが熱交換器の間に組み込まれると、モジュールを囲む熱交換器の間に何らかの形の絶縁あるいは、シールがされます。モジュール (エレメント・マトリクス) 内は、オープン DC で温度勾配があるので気体流れが起きやすい。気体は水を含むので気体の流れを最小にするべきです。代表的な T.E.モジュールの厚さは約 0.2 インチであり、どのような絶縁によっても熱漏れを最小にできます。また絶縁/シールすると物理的損傷を防ぐことができます。

絶縁あるいはシールは、独立気泡ポリウレタン・フォームをキャビティの周りに挿入し、RV タイプの物質でシールすることで最も簡単に行えます。またはより物理的に完全にするにはエポキシ塗布でシールします。どんな方式が使用されても、およそ上に述べた保護をとるべきです。入力リードのストレインを除くことが望ましいことが多い。リードそのものを保護するだけでなく、モジュール周りのシールを完全に保つためです。

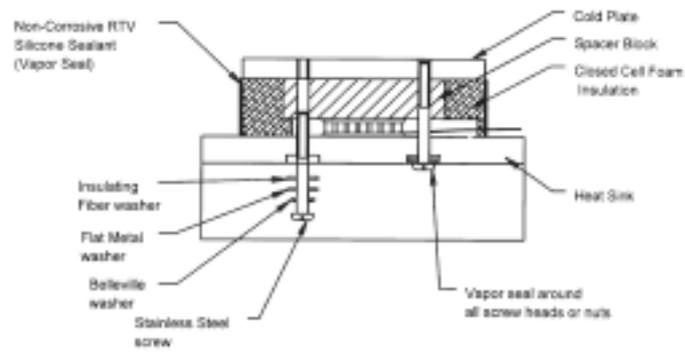
組立ての概念図を載せる (図 6)。この図は、代表的なアセンブリの推奨構造の詳細を示します。スペーサーブロックの使用は最大の熱移動を起こします。しかもシステムの最高温度部と最低温度部を最大の絶縁量により分離します。「スペーサーブロック」は、低い熱フラックス密度のためシステムの冷却側に使用します。さらに給水と周囲から最高に保護するための蒸気シールの詳細を示します。

この図に示す推奨項目に従うならば、性能が著しく向上すると信じます。この型の組立てをテストする時、温度を監視することが重要です。流速だけでなく、冷却液体の温度、入口、出口温度が必要です。気体または液体を使うときは、このことは当然です。T.E.への入力電源、電圧と電流も潜在的な問題の原因を確定するのに役立ちます。

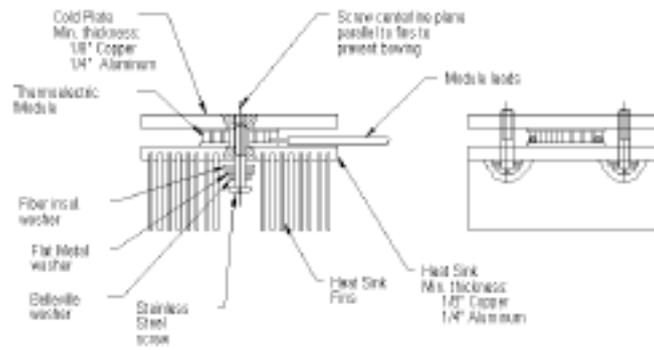
ハンダ付け型 (タイプ TL)モジュール CP と、ラップ型 (タイプ L)モジュール FC のステップ毎の組立手順を添付します。

より詳しい助けが必要なときは、わが社の技術者に連絡ください。顧客に信頼性のある効率的な製品アプリケーションを保証してきた長年の経験が、製品の成功に必須であることが分かります。

[図 6]組立て概略図



[図 7]組立て手順図



熱交換器へのラップ型(Lapped)モジュールの取付け方法

重要：2つ以上のサーモエレクトリック装置を共通プレートに設置するときは、サーモエレクトリック装置の厚さは0.0015インチ(0.0038センチ)以内であること。ラップされたサーモエレクトリック装置の精密許容差に関する詳しいことはEngineeringDepartmentに連絡下さい。

ステップ1：次のステップで冷却プレートとヒートシンク面を準備して下さい。

- A) モジュール領域を平坦度 +/-0.001 インチ以内に研磨またはラップする。
- B) ボルト孔位置をモジュールの反対側エッジにできるだけ近づけ(1/8インチを推奨する。最大1/2インチ)、熱交換器フィンと同じ平面にする。この配置によってフィンが付くことによる構造強化が利用され、曲がりや防がれます。一表面にクリアランスホールを開け、もう一方の表面にタップを切ります。(アセンブリ情報の図を見てください) スペースを使って面間の距離を長くすると、スペースがシステムの冷却側にあるときの方が効率が良くなります。
- C) サーモエレクトリックモジュール領域内のすべてのバリ、クズ、異質物を取り除きます。

ステップ2：サーモエレクトリックモジュール、熱交換器、冷却面を完璧に清浄・脱脂します。

ステップ3：サーマルグリース(Wakefield EngineeringのType 120またはDowのType 340)を使って、モジュールの熱面と熱交換器のモジュール領域に薄い連続膜を作ります。

ステップ4：熱側を下にして熱交換器にモジュールを配置します。

ステップ5：モジュールを前後に軽く揺らして、下向きに均等な圧力を加えて、エッジ周りにサーマルコンパウンドが流れないように注意します。この動作を抵抗が感じられるまで続けます。

ステップ6：冷却面、冷却プレートに対してステップ3を繰り返します。

ステップ7：モジュールに冷却プレートを配置します。

ステップ8：モジュールではなく冷却プレートに対してステップ5を繰り返します。特に均等な圧力になるように注意します。モジュールがネジとネジの中央になるように保ちます。そうしないと圧力が不均等になります。

ステップ9：ボルト締めをする前に、あらかじめ荷重をかけて冷却プレート、熱交換器、モジュールアセンブリを圧縮すると最良の結果が得られます。クランプと「おもし」を使ってモジュールの中心線に軽く荷重をかけるのです。2モジュール・アセンブリに対してはモジュール中心線に位置する3つのネジを使います。真中のネジはモジュールの間にします。予備荷重をかけるには、真中のネジにまず力を加えます。ネジを交互に替えて少しずつトルクを加え注意してネジ止めします。トルク制限つきドライバを使います。TECアセンブリの推奨圧縮力はモジュール表面インチ平方あたり150~300ポンド(64~128kg)です。1ネジ当たりのトルクは次の式を使います。

$$T = (C \times D \times F \times \text{in}^2) / (\text{ネジ数})$$

T = 1ネジ当たりのトルク{インチ-ポンド}

C = トルク係数(許容数値:0.20、潤滑状態で:0.15)

D = ネジサイズ定格(4/40 = 0.112、6/32 = 0.138、8/32 = 0.164)

F = 力(lbs / in²)

in² = モジュール表面積(縦 x 横)

一時間後にトルクをチェックして、必要ならば締め直します。**ステンレスのネジ、ファイバ絶縁ショルダワッシャ、はがねスプリングワッシャ(Bellevillまたはスプリットロック型)を使います。(アセンブリ情報を見てください。)**

注意：

1. 良好なサーマルグリース面を得るには、トルクによる面の曲がりがあるてはいけません。曲がりを防ぐため、一つの面または両方の面が 1/8 インチ（銅のとき）または 1/4 インチ（アルミのとき）より薄いときはトルクを小さくします。
2. リード線をモジュールタブにビスマス・錫ハンダではんだ付けします(136°C)。リード線に代わるものが必要なときはビスマス・錫ハンダを使います。

鉛・錫ハンダ（180°C）を使用しないでください。

熱交換器へのハンダ付け型(Solderable)モジュールの取付け方法

ステップ1：冷却プレート、ヒートシンク面を準備して一表面にはクリアランスホールを開け、もう一方の表面にタップを切ります（アセンブリ情報の図を見てください）。スペーサを使って面間の距離を長くするときは、スペーサがシステムの冷却側にあるときの方が効率が良くなります。

ステップ2：モジュール領域の冷却プレートを平坦度 ± 0.001 インチ以内に研磨またはラップします。サーモエレクトリックモジュール、ヒートシンク、冷却面を完璧に清浄・脱脂します。

ステップ3：ヒートシンク面はハンダ付け可能でなければいけません（銅またはアルミメッキ銅）。光研磨と脱脂を完璧にしてヒートシンクのモジュール領域を清浄にします。インディウム-錫共晶型ハンダとフラックスで錫化します。

ステップ4：モジュール表面を完全に脱脂し、軽くフラックスします。錫化・清浄化されたヒートシンク面を $120\sim 130^{\circ}\text{C}$ ($250\sim 265\text{F}$) に熱します。モジュールを 138°C 以上にはいけません。さもないと内部ハンダがリフローします。面上にモジュールを配置します。モジュール上のハンダが溶けて、余計なフラックスが除かれるまで数秒待ちます。すべてのハンダが溶けると、モジュールはハンダ上にき易くなります。モジュールを軽く振るとヌレがよくなります。

・注意：すべてのハンダが溶けると、モジュール上に軽い引きずり効果がでて、ハンダ不足現象が現れます。モジュールを退けてハンダを加えて交換面を熱します。ユニットを冷やし、ハンダを固めます。アセンブリにモジュールが二つ以上使われるときは、ハンダ付け中、モジュールの平らな冷却面を共通面に保つ必要があります（ステップ3）。最初に、冷却面を下にし適切に整列させるようにモジュールを金属またはグラファイトのグラウンド平面プレートに両面テープで固定するのが一番良い方法です。モジュールと平面プレートのこのアセンブリにより、モジュールをヒートシンクにハンダ付けすることが簡単になり、しかもすべてのモジュール冷却面は共通面に保たれ適切に整列されます。

ステップ5：アセンブリ冷却後、完全に洗浄して、すべてのフラックス残渣を取除きます。

ステップ6：アセンブリを冷却プレートにボルト締めできる準備ができました。サーマルグリース（Wakefield Engineering の Type 120 または、Dow の Type 340）を使ってモジュールの最上面、冷却プレートのモジュール面、対面に薄い連続膜を作ります。モジュールを前後に軽く揺らして下向きに一樣な圧力を加えて、エッジ周りにサーマルコンパウンドが流れないように注意します。この動作を抵抗が感じられるまで続けます。

ステップ7：ボルト締めをする前に、あらかじめ荷重をかけて冷却プレート、熱交換器、モジュールアセンブリを圧縮すると最良の結果が得られます。クランプと「おもし」を使ってモジュールの中心線に軽く荷重をかけるのです。2 モジュール・アセンブリに対してはモジュール中心線に位置する3つのネジを使います。真中のネジはモジュールの間にします。予備荷重をかけるには、真中のネジにまず力を加えます。ネジを交互に替えて少しずつトルクを加え注意してネジ止めします。トルク制限つきドライバを使います。TEC アセンブリの推奨圧縮力はモジュール表面インチ平方あたり $150\sim 300$ ポンド ($64\sim 128\text{kg}$) です。1ネジ当たりのトルクは次の式を使います。

$$T = (C \times D \times F \times \text{in}^2) / (\text{ネジ数})$$

T = 1ネジ当たりのトルク(インチポンド)

C = トルク係数 (許容数値: 0.20、潤滑状態で: 0.15)

D = ネジサイズ定格 ($4/40 = 0.112$ 、 $6/32 = 0.138$ 、 $8/32 = 0.164$)

F = 力 (lbs / in²)

in² = モジュール表面積 (縦 x 横)

一時間後にトルクをチェックして、必要ならば締め直します。ステンレスのネジ、ファイバ絶縁ショルダワッシャ、はがねスプリングワッシャ (Bellevill またはスプリットロック型) を使います。(アセンブリ情報を見てください。)

注意：

1. 良好なサーマルグリース面を得るには、トルクによる面の曲がりがあるてはいけません。曲がりを防ぐため、一つの面または両方の面が 1/8 インチ（銅のとき）または 1/4 インチ（アルミのとき）より薄いときはトルクを小さくします。
2. リード線をモジュールタブにビスマス・錫ハンダではんだ付けします(136°C)。リード線に代わるものが必要なときはビスマス・錫ハンダを使います。

鉛・錫ハンダ（180°C）を使用しないでください。

性能と特性

装置の動作公式

コールド面でのヒートポンプされる熱容量(W)	:	$Q_c = 2N[\alpha I T_c - I^2 \rho / 2G - \kappa \Delta T G]$
電圧(V)	:	$V = 2N[I \rho / G + \alpha \Delta T]$
最大電流(A)	:	$I_{max} = (\kappa G / \alpha) [\sqrt{(1 + 2Z T_H)} - 1]$
最適電流(A)	:	$I_{opt} = \kappa \Delta T G [1 + \sqrt{(1 + Z T_{ave})}] / (\alpha T_{AVE})$
最適 COP (I_{opt} での計算の場合)	:	$COP_{opt} = (T_{ave} / \Delta T) \{ [\sqrt{(1 + Z T_{ave})} - 1] / [\sqrt{(1 + Z T_{ave})} + 1] \} - 1/2$
$Q=0$ での最大 ΔT	:	$\Delta T_{max} = T_H - [\sqrt{(1 + 2Z T_H)} - 1] / Z$

記号	定義
T_H	ホット面の温度(単位 K)
T_C	コールド面の温度(単位 K)
ΔT	$(T_H - T_C)$ (単位 K)
T_{ave}	$1/2(T_H + T_C)$ (単位 K)
G	面積/TE エLEMENTの長さ(単位 cm)
N	サーモカップルの数
I	電流(単位 A)
COP	パフォーマンス係数(Q_c / IV)
α	ゼーベック係数(volts/K)
ρ	抵抗率(単位 ohm cm)
κ	熱伝導率(単位 watt/cm K)
Z	フィギュアオブメリット($\alpha^2 / \rho \kappa$)(単位 K^{-1})
S	デバイスのゼーベック電圧($2\alpha N$)(volts/K)
R	デバイスの電気抵抗($2\rho N/G$)(単位 ohms)
K	デバイスの熱コンダクタンス($2\kappa NG$)(単位 watt/K)

熱伝導式

注意：熱伝導の比較的複雑な性質により、これらの式の適用により求められる結果は有用ですが、概算値としてのみ扱われなければなりません。どのデバイスでも最終選択する前に、設計安全マージンを考慮してください。

1) 絶縁容器の壁を介しての獲得熱または損失熱：

$$Q = (A \times \Delta T \times K) / \Delta X$$

ここに

- * Q=熱流 (watts)
- * A=容器の外面積 (m²)
- * ΔT=温度差 (容器の内部対外部) (Kelvin)
- * K=絶縁体の熱伝導率 (Watt/meterKelvin)
- * ΔX=絶縁体厚さ (m)

2) 対象物の温度変化に要する時間：

$$t = (m \times C_p \times \Delta T) / Q$$

ここに

- * t=時間間隔 (秒)
- * m=対象物の質量 (kg)
- * C_p =材料の比熱 (J/kg-K)
- * ΔT=対象物の温度変化 (Kelvin)
- * Q=付加または除去された熱 (Watts)

注意：サーモエレクトロニクス装置は、ΔT が変動しているときには一定の割合で暖めたり冷やしたりしない。平均の Q は近似的に以下の通りである。

$$Q_{ave} = (Q \Delta T_{max} + Q \Delta T_{min}) / 2$$

3) 対流による表面へ、または表面からの伝達される熱：

$$Q = h \times A \times \Delta T$$

ここに

- * Q=熱 (Watts)
- * h=熱伝達係数 (W / (m²K)) (1~30="自由"対流式-ガス、10~100="強制"対流式-ガス)
- * A=露出面積 (m²)
- * ΔT=表面温度一周囲 (Kelvin)

単位変換テーブル

熱伝導率	1BTU/hr-ft°F = 1.73W/m-K 1W/m-K = 0.578BTU/hr-ft°F
パワー (熱流割合)	1W = 3.412BTU/hr 1BTU/hr = 0.293W
面積	1ft ² = 0.093m ² 1m ² = 10.76ft ²
長さ	1ft = 0.305m 1m = 3.28ft
比熱	1BTU/lb-°F = 4184J/kg-K 1J/kgK = 2.39x10 ⁻⁴ BTU/lb-°F
熱伝導係数	1BTU/hr-ft ² -°F = 5.677W/m ² -k 1W/m ² -k = 0.176BTU/hr-ft ² -°F
質量	1lb = 0.4536kg 1kg = 2.205lb

材料名	密度	熱伝導率	比熱	熱膨張係数× 10-4
	kg/m3	W/m-K	J/kg-K	cm/cm/°C
空気	1.2	0.026	1004	-
アルミナセラミック-96%	3570	35.3	837	6.5
アルミニウム窒化セラミック	3300	230	920	4.5
アルミニウム	2710	204	900	22.5
アルゴン (ガス)	1.66	0.016	518	-
ベークライト	1280	0.23	1590	22
ベリリウムセラミック-99%	2880	230	1088	5.9
ビスマス テルル化物	7530	1.5	544	13
ガラス	8490	111	343	18
ブロンズ	8150	64	435	18
コンクリート	2880	1.09	653	14.4
コンスタンタン	8390	22.5	410	16.9
鋼	8960	386	385	16.7
鋼タングステン	15650	180- 200	385	6.5
ダイヤモンド	3500	2300	509	-
エチレングリコール	1116	0.242	2385	-
ガラス (一般)	2580	0.8	795	7
グラスウール	200	0.04	670	-
金	19320	310	126	14.2
黒鉛	2560	5.7	837	3.6
鉄 (鋳物)	7210	83	460	10.4
コパール	8360	16.6	460	5
鉛	11210	35	130	29.3
モリブデン	10240	142	251	4.9
ニッケル	8910	90	448	11.9
窒素 (ガス)	1.14	0.026	1046	
プラチナ	21450	70.9	133	9
プレキシガラス (アクリル 製)	1410	0.26	1448	74
ポリウレタンフォーム	29	0.035	1130	-
ゴム	960	0.16	2009	72
シリコン (無添加)	2330	144	712	-
銀	10500	430	235	-
半田 (錫/鉛)	9290	48	167	24.1
ステンレス鋼	8010	13.8	460	17.1
鋼 (低炭素)	7850	48	460	11.5
スチロフォーム	29-56	0.029	1.22	-
テフロン	2200	0.35	-	-

サーマルグリース	2400	0.87	2093	-
錫	7310	64	226	23.4
チタン	4372	20.7	460	8.2
水 (@70°F)	1000	0.61	4186	-
木 (樫)	610	0.15	2386	4.9
木 (松)	510	0.11	2805	5.4
亜鉛	7150	112	381	32.4

信頼性と平均無故障時間(MTBF)

サーモエレクトリック・デバイスは可動部分がないため非常に信頼性が高い。信頼性は多少アプリケーションに依存しますが、様々の顧客が行ったテストの結果計算される MTBF は室温で約 20 万から 30 万時間です。高温(80°C)では、MTBF は控えめに約 10 万時間です。多数の顧客の実地経験では過去 10 年間 Cp タイプのモジュール 7 百 5 十万個、オプト TEC タイプのモジュール 8 万個のうち故障返品率は 0.1%以下です。返品されたすべてのモジュールの 90%以上は、顧客側の機械的誤使用または過熱によるものです。このように製品の欠陥と思われるのは、システム内で使われる 1 万モジュール当たり 1 ヶ以下です。そこで適切に取扱い、適切な組立て技術を使えば、非常に信頼性のあるシステムを作ることができます。

過去の故障解析によると、故障原因は一般的に次の二つのタイプに分類されます：

不適切な取扱いによる機械的破損、または誤ったシステム組立て技術によるものです。

湿気：

湿気がサーモエレクトリック・モジュール部分に入らないこと。湿気があると電気侵食が起こり、サーモエレクトリック材料、伝導体、ハンダを劣化させます。湿気があるとグラウンドへの電気経路が出来て、電氣的ショートや高温側から冷却側への熱的ショートが起きます。適切なシール方法や乾燥空気を使えば、これらの問題をなくすことができます。

衝撃と振動：

種々の組立てタイプのサーモエレクトリック・モジュールが、軍事/航空宇宙アプリケーションで長年使われてきました。サーモエレクトリック・デバイスは航空機、兵器、宇宙船、船舶や他の多くの似たシステムで要求される衝撃や振動の条件を満たすのに成功してきました。サーモエレクトリック・デバイスは引張りと圧縮には非常に強いが、せん断には比較的弱い。強い衝撃や振動のある環境では組立て方法に注意して、サーモエレクトリック・デバイスの「許容圧縮荷重」以下にする必要があります。

機械的マウント：

サーモエレクトリック・モジュールのよくある故障は、不均等なトルク・締め付け、熱交換器の機械的状態によって起こされる不均等な圧縮力によるものです。多結晶サーモエレクトリック材料は水平軸より垂直軸（成長軸）のほうが弱い。そこでサーモエレクトリック・エレメントは圧縮力には非常に強いが、せん断方向には弱くなり易い。組立て中、不均等なトルクや不均一な表面熱交換器は大きなせん断力を起こしやすい。推奨する圧縮力は 150PSI〔ポンド/平方インチ絶対圧力〕です（適切なマウント技術については組立て説明書を見てください）。

モジュールの不注意な過熱：

直接ハンダ付けはモジュールの動作・保存温度に制限を与えます。80°C以上の温度では二つの現象により有用時間が非常に短くなります。

80°C以上ではサーモエレクトリック材料内の固溶度が大きくなり固溶速度が速くなるためサーモエレメント内への銅拡散がおきます。100-110°Cでは固溶度と拡散速度の相乗効果のため 100 時間以内にデバイスの性能は 約 25%落ちます。

ハンダ付け（ビスマス-錫合金）において 85°C以上で少量のセレン、テルリウム、アンチモニー、ニッケルが自然とビスマス錫ハンダ内に溶ます。基本ハンダの融点 は 136°Cですが、全ての物質が混合すると少し共晶相になるか、85°C以上で高効率の固体反応が起きます。この反応は、サーモエレクトリック材料内の卵割面間への物理的侵食によりサーモエレメントの端を薄い層に裂き始めます。この結果 85°C以上で接触面に機械的障害が起きます。