

## ウルトラボルト社製 高圧電源の熱管理について (AP-6Note)

電子機器の長期信頼性は、発生熱をいかに放散させるかというシステム全体の設計に直接関係します。同様にウルトラボルト社製高圧電源の長期寿命と信頼性は、正しい熱管理によって達成されます。

物理法則によると、ある電圧レベルを他に変換する過程では、エネルギー損失は避けられません。その損失(電源自体を操作する電力)は通常熱として消費されます。ウルトラボルト社製高圧電源の熱効率は、定格電圧を出すフルパワー状態および通常の運転状態で75~92%と非常に優れています(モデルに依存)。それ以外の高圧電源の入力電力は、熱に変わります。熱放散の適切な方法はこのアプリケーションノートで説明します。

電源の運転効率は、熱計算の重要な変数の1つですが、種々の方法で決定することができます。ウルトラボルト高圧電源に添付された受入テスト手順(ATP)には、いくつかの共通な運転ポイントと関連データが含まれます。ATPデータはさまざまな点で電源の運転効率を決定するのに使用することができます。一方、特定の運転状態におけるウルトラボルト社製高圧電源の効率は、当社のカスタマ・サービス部門で入手できます。代表的な運転効率は、電源データシートの入力電圧対効率グラフにも記載されています。このグラフは電源のシリーズでさまざまなモデルに対して代表的な値のみ示しています。

このアプリケーションノートの分析や計算例は、ユーザ供給のヒートシンクのない電源(H オプション・ユニット)と、ユーザ供給のヒートシンクのある電源およびその他の冷却方法が用意されている電源に分かれます。

### ①. 電源にヒートシンクを付けない場合

ウルトラボルト社製 2A12-P4は、公称12VDC入力にて、公称2KV( $P_{DCout} = 4W$ )で2mA が連続的に供給されている。この運転ポイント(公称出力、公称12V 入力電圧)におけるATPから、入力電流は390mA ( $P_{DCin} = 4.68W$ )となっております。

下記の通りに放散される熱エネルギーを決定できます。

$$P_{heat} = P_{DCin} - P_{DCout}$$

$$P_{DCin} = V_{in} I_{in}$$

ユニットの効率は

$$P_{DCout} / P_{DCin}$$

これにより

$$\begin{aligned} P_{DCin} &= V_{in} I_{in} = (12V \times 0.39A) \\ &= 4.68W. \end{aligned}$$

したがって、

$$\begin{aligned} P_{heat} &= P_{DCin} - P_{DCout} = (4.68W) - (4W) \\ &= 0.68W \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{効率} &= P_{\text{DCout}} / P_{\text{DCin}} = (4\text{W}) / (4.68\text{W}) \\ &= 86\% \end{aligned}$$

従ってこの電源は上記の運転条件では0.68Wの熱を放散し、この運転ポイントでのDC効率は86%になります。

ウルトラボルト社製”A”シリーズ(例えば2A24-P4)は標準のプラスチック・ケースに収められており、特別なヒートシンクはなく、全表面は大気に面しています。この条件での、電源ケースの温度上昇を計算します。なおこの電源がPCBのソケットに実装されていると仮定します。

まず、標準4W “A”シリーズの全表面積(SA)を計算する必要があります。全表面積(SA)は簡単な幾何学から計算できます。その高圧電源は2つの等しい面3組からなる6つの面で構成されている。(“A”シリーズのデータシートの寸法から長さ:L、幅:W、高さ:Hで表す)

$$\begin{aligned} \text{全表面積 SA} &= 2 \times (L \times W + L \times H + W \times H) \\ &= 2 \times (3.7 \times 1.5 + 3.7 \times 0.77 + 1.5 \times 0.77) \\ &= 19.11 \text{ in}^2 \end{aligned}$$

1W は、全表面が大気露出している場合、1 平方インチあたり約100°C上昇することが広く知られています。(単純化するために、空気は静止していると仮定)

以上により、0.68W が放散されます。

$$\begin{aligned} \Delta T &= (P_{\text{heat}} / SA) \times (100^\circ\text{C} \times \text{in}^2 / \text{W}) \\ &= (0.68\text{W} / 19.11 \text{ in}^2) * (100^\circ\text{C} * \text{in}^2 / \text{W}) \\ &= 3.56^\circ\text{C} \end{aligned}$$

最終的にウルトラボルト社製高圧電源を収納したエンクロージャが、連続運転温度40°C (Tambient)に保持されていると仮定すると、ウルトラボルト社高圧電源の最終ケース温度は43.56°C (T+Tambient)となります。幸いにも、これは“A”シリーズの最高推奨運転温度の65°Cより低い値です。実際のケース温度は、電源のマウント、取り付け方法の熱放散特性によって、これとは少し異なることかもしれません。

電源内の部品により放散熱が異なるため、この電源には温度の高い部分と低い部分が生じます。この温度の高い部分は一般に“ホット・スポット”と呼ばれます。この電源をプリント回路ボードに取り付けると、回路ボードに接した電源面からの熱放散が妨げられることに留意してください。この点を考慮するために、この特殊なケースの表面計算は露出面を5 つとし、取り付け面の冷却効果を見做すとして行います。また、電源がソケットで回路ボードに取り付けられている場合、取り付け側は対流によって少し冷却されます。これも計算に取り入れる必要があります(スケール・ファクタ)。ウルトラボルト社高圧電源の取り付け方法については、AP-3 で説明します。

定格出力で動作する4W ユニットの場合には、この計算からわかるように、4W ユニットで補助的熱シンクが必要になることは稀です。ただし、プラスチック・ケースの「A」シリーズを連続的に運転する20W では、約3.5W が放散されます(概略計算のために効率85%と仮定していますので、個々の計算にこの値は使用しないでください)。補助ヒートシンクがなく、プリント回路ボードに取り付けた電源の1つの面だけを考慮すると、ケースの温度上昇は26°Cとなり、環境温度が40°C のときは許容温度上昇条件を満たすことができません。20W「A」シリーズの設計は、他すべてのシリーズのウルトラボルト社高圧電源と同様に、熱放散物質を用いるとインタフェースが改善されます。20W の上面には、プラスチック・ケース“A”では実際に0.062 インチの厚さのアルミニウム板が使用されており、シャーシ壁や顧客が取り付けした他のヒートシンクなどの外部ヒートシンクに効率的に熱を伝えます。このアルミニウム板は(上述のように)電源内の部品熱放散の違いによって発生する電源内部「ホ

ット・スポット」の影響を受けます。

4A24 P20-H、4KV 20W は、2,500V で3mA(定格20W 出力よりはるかに低い)および24V で0.46Aを供給します。

この時の放散される熱エネルギーは

$$\begin{aligned}P_{\text{heat}} &= P_{\text{DCin}} - P_{\text{DCout}} \\ &= (24\text{V} \times 0.46\text{A}) - (2.5\text{kV} \times 3\text{mA}) \\ &= 3.54\text{W}\end{aligned}$$

したがって、この電源から、指定された運転条件では3.54W の熱が放散されます。(負荷が高いために効率は68%)。比較のために、応用ノートの付属書類には、上記のウルトラボルト社高圧電源のフル出力電圧の場合について、代表的効率例として89%を用いた例が分析してあります。

## ②. 電源にウルトラボルト社製ヒートシンク(-H)を付けた場合

上記の電源をH オプションヒートシンクの付いたプリント回路ボードに取り付け、取り付け面以外の全表面が大気に露出している。

まず、標準20W “A” シリーズの露出表面積を計算する必要があります。単純な形状(“A” シリーズ・データシートからの寸法)から、大気に触れる表面積(取り付け面と熱シンク側は無視)は、

$$\begin{aligned}SA_1 &= 2 \times (LH + WH) = 2 \times (3.7 \times 0.77 + 1.5 \times 0.77) \\ &= 8.01\text{in}^2.\end{aligned}$$

また、-H ヒートシンクにより別途13 平方インチの表面が追加されるため、全露出面積は

$$\begin{aligned}SA_{\text{tot}} &= SA_1 + SA_{\text{hs}} = (8.01\text{in}^2) + (13\text{in}^2) \\ &= 21.01\text{in}^2.\end{aligned}$$

この場合にも、1W により、1 平方インチの面積の温度が約100°C上昇すると仮定します(単純化の為に空気は静止していると仮定)。

以上により、3.54W が放散されます。ΔTas

$$\begin{aligned}\Delta T &= (P_{\text{heat}} / SA_{\text{tot}})(100^\circ\text{C} \cdot \text{in}^2 / \text{W}) = (3.54\text{W} / 21.01\text{in}^2)(100^\circ\text{C} \cdot \text{in}^2 / \text{W}) \\ &= 16.85^\circ\text{C}.\end{aligned}$$

エンクロージャ内部のウルトラボルト社高圧電源の連続運転温度が40°C の場合、電源の最終平均ケース温度は56.9°Cとなります(電源内の部品熱放散特性の違いにより、電源のある部分が他の部分より温度が高くなる場合があります)。むろん、この値は、“A” シリーズの推奨最大温度の65°Cを下回っています。

ここでの計算では、電源はすべて連続的に電力を供給しつづけていると仮定している点に留意することが重要です。ウルトラボルト社高圧電源の低負荷サイクルまたはパルス運転では、ここで求めた平均値よりかなり低い値となります。その場合、高圧電源には補足ヒートシンクは不要です。たとえば、10%負荷サイクルで運転される電源では、連続全出力運転の場合、ごくわずかの熱放散しかなく(補助ヒートシンクを設けなくても運転することができます)。

これらの電源が全定格出力未満で運転される場合には、運転効率はその潜在的な最大効率より低くなることに留意する必要があります。ウルトラボルト社高圧電源は全定格出力時に最大効率を発揮するように設計されています。

要約すると、補助ヒートシンクを持たない高圧電源を取り扱う場合(または-Hヒートシンクのみを持つ場合)、

計算を単純化するために、いくつかの基本ルールを設定することができます。電源の表面積を計算するときに、自由に空気が入り出ることができる面だけを計算に取り入れる必要があります。もし、高圧電源をソケット付きで回路ボードに取り付ける場合など、ある面が表面に非常に接近しているときには、隠れた側の実際の表面積のごく一部しか計算に取り入れるべきではありません。-Hヒートシンクを使用するときは、その面の面積は計算式に一度しか取り入れないようにします(特定の側については、-Hヒートシンク面積のうち、13 平方インチが空気に触れる面積です)。

### ③. ユーザ供給のヒートシンクを電源につけた場合及びその他の冷却方法

テストの結果、ウルトラボルト社製 6C24-P125、定格負荷に対して6kV を供給するが、24V では5.9A の電流を供給します。

上記の運転状況にて、シャーシ内壁に取り付けられた場合、全面が覆われた金属コンテナの寸法が 12 インチ×6 インチ× 4 インチ(= 288 平方インチ)とすると高圧電源は十分冷却されます。(コンテナの外表面だけが自由空気に触れている)。金属コンテナの全表面が自由空気に触れております金属コンテナの熱伝導が良く、高圧電源と金属コンテナ間の熱抵抗インタフェースが低いという仮定すると

$$\begin{aligned} P_{\text{heat}} &= P_{\text{DCin}} - P_{\text{DCout}} = (24\text{V} \times 5.9\text{A}) - 125\text{W} \\ &= 16.6\text{W} \text{ (効率 : 88\%)} \end{aligned}$$

ここで、高圧電源は覆われたコンテナ内部に取り付けられるため、高圧電源の表面積からは外部の空気に直接熱が放散されません。その代わりにその熱エネルギーはシャーシに伝達されます。外部の空気に熱を放散させる唯一の表面は、シャーシの表面です。このコンテナ内の高圧電源の表面による冷却は、高圧電源からシャーシ壁への熱伝達による冷却と比べると無視できます。したがって、全熱放散面積は12 インチ×12 インチ×2 インチ = 288 平方インチとなります。

16.6W が放散されるので

$$\begin{aligned} \Delta T &= (P_{\text{heat}} / SA_{\text{tot}})(100^{\circ}\text{C} \cdot \text{in}^2 / \text{W}) = (16.6\text{W} / 288 \text{in}^2)(100^{\circ}\text{C} \cdot \text{in}^2 / \text{W}) \\ &= 5.7^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

シャーシの温度上昇5.7°Cは、ほとんどの全ての条件下で十分に許容される値です。したがって、高圧電源は熱的にかなり満足のいく動作をします。

上記の例では、いくつかの仮定を設けましたが、それをここで検討します。

まず、高圧電源とシャーシ壁の間の熱抵抗インタフェースが低いという仮定を設けました。これは、高圧電源は、ヒートシンクすなわち上記の例ではシャーシに向けて、なんらの支障もなく熱をよく伝えることを意味しています。現に、熱エラストマー(0.010 インチまたは0.020 インチが代表的厚さ)、両面熱テープ、または熱グリースなどの良好な熱伝導体を使用すればこの条件は達成されています。この熱伝導体は高圧電源とヒートシンクの間設置され、高圧電源は、ブラケットやその他の取り付け金具によってヒートシンクに固定されます。これらの金具に十分なトルクを加えて締め付け、熱伝導体に必要な面圧を与えます。たとえば、60W 電源に#8 スタッドを取り付ける場合、8kgf・mのトルクを加えて、熱エラストマーの熱伝導体に「コールド・フロー」を起こします。また、高圧電源 とそのヒートシンクの間熱抵抗を低く保ち、伝熱量を大きくするために、できるだけ多くの高圧電源面が滑らかなヒートシンク媒体(熱インタフェースを介して)に接するようする必要があります。

第2 に、上記の例では、ヒートシンク媒体であるシャーシ壁は熱の良導体であると仮定しました。この仮定

は、空気に触れているヒートシンクの全表面が熱放散体であるとして、計算を単純化するためのものです（放散すべき熱はこの放散媒体の露出面に容易に伝達されます）。ご存知の通り通常、ヒートシンクは金属製（アルミなど）であり、その熱伝導性がよいことはよく知られています。

高圧電源を設計する場合、計算式には多くの設計変数を導入して実際の計算方法が決定されます。空気流は非常に重要なものの1つですが、残念ながら複雑すぎるのでここでは分析しておりません。概して言えば、簡単なファンを利用した強制空冷を採用すると、（単に対流に依存するだけではなく、大量の空気への熱伝達によって）空気流が放散熱を効率的に除去するため、ヒートシンクの必要サイズを大幅に下げることができます。高圧電源周りの環境温度も非常に重要な変数です。環境温度が25℃であれば、15℃の温度上昇が許容されますが、環境温度が60℃であれば許容範囲外となります（たとえば、大量の熱を放散する同じシャーシ内の他の装置による）。取り付け方法ももう1つの重要な設計変数です。高圧電源を大型シャーシ壁に取り付けたときは、補助ヒートシンクはほとんど不要となります。不思議なことに、冷却設計の助言で最も重要なものの1つとして、安全マージンを大きくとることが指摘されます。コーティングにすこしでもゴミが含まれていると、ヒートシンクの冷却効率は大幅に低下します。ファン排気に異物があるときやゴミで覆われていると、ファン自体の冷却効率が大きく低下します。排気フィルタや定期的清掃が重要であることも明らかです。また、負荷変動（こまかい設計変更による）によっても高圧電源からの放散熱が増大します（実際に熱放散が変化する）。要約すると、熱計算に大きな安全マージンを設けておけば、高圧電源が使用されるあらゆる状態でも十分有効に冷却することができます。そのためには、通常想定される値より環境温度を単に高くして計算するだけで達成されます。

熱ジャンクション解析と実際の熱抵抗値を使用した熱計算も可能ですが、ここではその方法は採用しません。概して計算結果は正確ですが、ここに説明した方法でも安全マージンを正しく設定すれば、高圧電源に必要な冷却条件を十分評価することができます。空間条件が厳しい強制空冷などの複雑な冷却条件に対しては、ここに提案した方法よりさらに掘り下げた解析が必要となりますが、その場合にも、ウルトラボルト社のカスタム・サービスと併せて熱管理のテキストを参照することを推奨します。

ウルトラボルト社 高圧電源を正しく冷却すれば、長期にわたってトラブルのない運転が約束されます。

ウルトラボルト社製品モデルの表面積

ウルトラボルト社製品モデル	全表面積(平方インチ)
Aシリーズ/Fオプション/Cオプション/F-Cオプション	19.11/25.26/28/37.69
10Aシリーズ/Cオプション	20.46/29.2
15Aシリーズ/Cオプション	25.26/35.4
20Aシリーズ/Cオプション	31.5/43.2
25A,30Aシリーズ/Cオプション	39.93/57
Cシリーズ/Cオプション	19.11/28
Cシリーズ 60W/125W	54.28
Cシリーズ 250W	98.88
8C~15Cシリーズ	98.88
20C~25Cシリーズ	98.88

## 追加

4A24 P20-H(4KV 20W)、5mA で4KV(定格20W 出力)、89%効率で24V から0.94Aを供給  
放散熱エネルギーは

$$\begin{aligned} P_{\text{heat}} &= P_{\text{DCin}} - P_{\text{DCout}} = (24\text{V} \times 0.94\text{A}) - (4\text{kV} \times 5\text{mA}) \\ &= 2.56\text{W}. \end{aligned}$$

この電源は、上記の条件での運転時に2.56Wの熱を放散します。

この電源をHオプション(ヒートシンク)のあるプリント回路ボードに取り付け、取付側以外のすべての側が自由空気に触れている。この状態での電源ケースの温度上昇を計算します。

まず、20W、Aシリーズの露出面を計算しなければなりません。簡単に幾何学から(Aシリーズのデータシートからの寸法)、自由大気面のSA(ヒートシンク側と取付側は無視)は、

$$\begin{aligned} SA_1 &= 2(lh + wh) = 2(3.7\text{in} \times 0.77\text{in}) + (1.5\text{in} \times 0.77\text{in}) \\ &= 8.01\text{in}^2 \end{aligned}$$

-H ヒートシンクを取り付けると、表面積が約13 平方インチ増加するため、静止空気に触れる全面積は、

$$\begin{aligned} SA_{\text{tot}} &= SA_1 + SA_{\text{hs}} = (8.01 \text{ in}^2) + (13 \text{ in}^2) \\ &= 21.01 \text{ in}^2 \end{aligned}$$

この場合にも、1W により、1 平方インチの面積の温度が約100°C上昇すると仮定します(単純化のために空気は静止していると仮定)。

熱放散が2.56W であるため、

$$\begin{aligned} \Delta T &= (P_{\text{heat}} / SA_{\text{tot}})(100^\circ\text{C} \cdot \text{in}^2 / \text{W}) = (2.56\text{W} / 21.01 \text{ in}^2)(100^\circ\text{C} \cdot \text{in}^2 / \text{W}) \\ &= 12.2^\circ\text{C} \end{aligned}$$

ウルトラボルト社高圧電源が取り付けられているエンクロージャの連続運転温度を40°Cと仮定すると、高圧電源の最終平均ケース温度は52.2°Cとなります。この値は、“A”シリーズの推奨最高温度の65°C を十分下回っています。