

電子機器の熱設計と見積りの 「つぼ」と「こつ」

沖電気工業株
国峰尚樹

1. 放熱はエレクトロニクス技術者共通の課題

最近の熱問題、とりわけマイクロプロセッサ（以下MPU）の放熱は「チップ電力危機」といわれるほど深刻さを増している。以前「冷却」は一部の熱設計技術者が解決すべき問題であった。しかし、機能・性能を追求し、「熱」は最後につじつまを合わせるという従来プロセスでは熱の壁を打ち破れない状況になっている。回路・ソフト技術者が総力を上げた「低電力化」と「低熱抵抗化」の連携が今や不可欠となり、設計に関わるすべての人が熱を意識しなければならなくなった。このような環境下では、機器設計に関連するすべての技術者は放熱に関する「つぼ」（おさえるべき要点）と「こつ」（設計の勘所）を知っておくべきである。

本稿ではこうした観点から、技術分野を問わず設計者が理解しておくべき熱設計のつぼとこつについて解説する。

2. 熱設計のつぼ ～課題を洗い出す！～

2 - 1 放熱経路をマクロに捉える

電子機器の放熱経路は伝導、対流、放射という基本要素で構成されている。現実にはこれらの要素が絡み合って多数の熱源が相互に影響を及ぼしあう複雑な状態となるが、巨視的に表現すれば、どんな実装形態であれ、放熱経路は概ね図1のようになる。

熱源（チップ）で発生した熱はまず、部品内部の熱伝導によって放熱部（部品ケース）に伝えられる。部品ケースに達した熱の多くは周囲の空気（装置内部空気）へ対流によって伝達されるが、一部はリードを經由しプリント配線板に、また一部は放射により筐体へ伝えられる。プリント配線板に伝えられた熱は、徐々に内部空気に拡散しながら筐体へと伝導される。内部空気へ伝えられた熱のほとんどは換気口を通過して外部へ放出されるが、一部は筐体へ伝達される。種々の経路を経て筐体に達した熱は、筐体表面へと抜けて、外部空気へ放散される。

これがおおまかな電子機器の放熱経路である。電子機器の熱対策とは、これら放熱経路を構成する熱抵抗を最小化することに他ならない。

図中に各熱抵抗を下げるための方策を示した。同じ熱対策といっても、対策すべき対象部分によってその方法は全く異なる。例えば内部空気温度が高い（内部空気と外気との間の熱抵抗が大きい）場合には換気量を増やしたり、筐体表面の放熱能力を高めたりする方法が効果的だが、内部空気と部品との間の熱抵抗が大きい場合には、放熱器の設置や風速の増加するが有効である。

電子機器の冷却を考えるには、このような放熱マップを頭に描いてアプローチすることが大切である。

2 - 2 機器の放熱能力限界を知る

自然空冷機器で熱源の温度を一定値以下（例えば半導体チップ温度100以下など）にするには、内部発熱量を一定値以下に抑えなければならない。これは機器から外気への放熱能力が筐体表面の「自然対流・放射の放熱能力」と通風孔の「自然換気の放熱能力」によって制限されるためである。この限界ラインを理論式から求め、実際の市販電子機器をプロットしたものが図2（自然空冷放熱限界グラフ）である。自然空冷機器では、明らかに消費電力の限界ラインが存在することがわかる。また単位体積あたりの電力（消費電力密度）は小型の機器ほど大きくなる傾向がある（図2右図）。これは機器外形が小さくなるほど容積に対する表面積の割合が大きくなり、放熱面で有利になるためである。

一方、強制空冷機器では冷却能力をファンによって制御できる。従って機器の許容消費電力はファンの風量（換気量）に依存し、以下の式で推定できる。

許容消費電力（W） $1150 \times$ 内部空気の許容温度上昇（ $^{\circ}\text{C}$ ） \times ファンの実効風量（ m^3/S ）

ただし、内部空気の許容温度上昇は5～15 $^{\circ}\text{C}$ とし、ファンの実効風量は最大風量の3/4とする。上式をグラフ化したものを図3に示す。

2 - 3 部品の放熱能力限界を知る

消費電力が機器の放熱能力限界より小さくても安心はできない。部品の発熱集中の問題があるためである。部品実装設計では、各部品について「部品の放熱能力 > 部品の消費電力」を検証しなければならない。

電子部品などの「固体発熱源」の放熱能力は、 $\text{放熱能力} = \text{放熱面積} \times \text{表面の熱伝達率} \times \text{温度差}$ で表される。すなわち、放熱能力を高めるには、放熱面積を拡大するか熱伝達率を増大させるか、どちらかしか方法は存在しないのである。

放熱面積を拡大するには表面積を拡大する、部品の熱を伝導によって拡散し「等価表面積」を拡大する、などの方法がある。熱伝達率には対流熱伝達率と放射熱伝達率があり、対流熱伝達率を向上させるには、風速を増大させる、流れを乱流化するなど、また放射熱伝達率を向上させるには高温側の放射率を上げる、周囲の吸収率を上げるなどの方法がある。

この放熱面積と熱伝達率との相関は、**図4**のようなグラフにしてみると分かりやすい。例えば1W以下の部品であれば、熱伝達率（縦軸方向）は自然空冷の領域でも本来の部品の表面積だけで充分冷却できる（左下領域）。しかし部品の消費電力が大きくなると、ヒートシンクやヒートプレートなどで放熱面積を増やす対策（横軸）か、ファンなどで熱伝達率を上げる対策（縦軸）のどちらかを採らなければならない。通常は騒音や塵埃の問題が起こらない「面積拡大策」が先に採られる。

この流れをノートパソコンで見てみよう。消費電力の大きいMPUを冷却するため、まずアルミプレートを使用し、横軸の対策で対応してきた。プレートの面積が大きくなると熱源から遠い部分の温度が下がるため、フィン効率が低下する。そこでヒートパイプを使用して実効放熱面積を高め、さらに横軸右方向に進んできた。それでも放熱面積が足りなくなると、筐体フレームやキーボード、ディスプレイまでも放熱面積として使用し、横軸の限界まで放熱面積を拡大してきた。しかし消費電力がさらに増えつづけているため、縦軸の策が必要になった。CPUクーラといわれる小型ファンやダクト構造により風速を増大し、熱伝達率を向上させている。

このようにごく初期の段階で機器の放熱能力と主要部品の放熱能力を検証し、冷却方法を検討しておくことが重要である。この段階で難しい計算は不要で、**図2～4**あたりを見つけ、問題を認識する程度でよい。

2 - 4 熱的に厳しい部品をリストアップする

機器の使用される電子部品の数は膨大であり、すべての部品の温度を計算することは難しい。しかし電子部品の熱的条件の厳しさは、消費電力密度（部品表面の熱流束）を計算すれば簡単に予測できる（単純に消費電力ではないことに注意！）。例えばスプレッドシートを使用して次のような計算を行う（**表1**参照）。

・まず部品の寸法から表面積を計算する。

・次に消費電力を表面積で割り「消費電力密度」を求める。

部品の温度上昇は概ね消費電力密度に比例するため、「消費電力密度」をキーにソートすると熱的に厳しい順に部品を並べることができる。

さらに、消費電力密度を熱伝達率（自然空冷では $10 \sim 15 \text{ W/m}^2\text{K}$ ）で割れば大体の部品表面温度上昇を推定することができる。

このように単純な計算であれば、専門知識も必要ない。熱計算を難しいものと捉えず、簡単方法で全体を大掴みにして、注意すべき部品を見つけ出すことが大切なのである。

3. 熱設計のこつ ～対策を立てる～

以上述べた「つぼ」を押さえて設計に臨めば、大きな失敗を招くことはないが、これで充分かというところではない。実務設計では、課題を具体的に解決していくための「こつ」を理解しておかないと、適切な対策を短期間に低コストで実現することは難しい。

効果的な熱対策を施すには、以下の手順で検討と評価を進めるとよい。

案の抽出：採り得る手段（オプション）を漏れなく抽出する

- 1次評価：抽出したオプションを概算評価し、絞り込む
- 具体設計：熱設計の定石を踏まえて、具体設計を行う
- 2次評価：具体策を定量的に評価し、有効性を確認する

このステップを効率的に進めるには、次の3つのスキルが必要だ。

- ・ 論理思考プロセスによって系統立った検討を行える
- ・ 熱設計の常套手段や設計手法を理解している
- ・ 評価のための道具を使い分けられる

3 - 1 論理思考プロセスで対策オプションを抽出する

伝熱の基礎式は単純すぎて設計には役立たないと考えられがちであるが、実設計において論理思考に基づいて対策を立案する上では、基礎式を理解が重要である。

といってもそれほど難しい話ではない。以下の4つの単純な式を知っていれば充分である。式を構成するパラメータから、低熱抵抗化の方策が以下のように導かれる。

$$\text{対流：} W = S h (T_w - T_a)$$

S：放熱面積、h：熱伝達率、 T_w ：壁面温度、 T_a ：空気温度

低熱抵抗化 放熱面積を増やすか、熱伝達率を向上させる

$$\text{伝導：} W = A / l (T_1 - T_2)$$

：熱伝導率、A：断面積、l：長さ、 T_1 T_2 ：2点の温度

低熱抵抗化 熱伝導率を高めるか、断面積を増やすか、厚みを減らす

$$\text{放射：} W = S F f (T_w^4 - T_a^4)$$

S：放射面積、：定数、F：形態係数、f：放射係数

低熱抵抗化 表面積を増やすか、放射係数・形態係数を高める

$$\text{換気：} W = V C_p (T_a - T)$$

V：風量、：空気比重量、 C_p ：空気比熱、 T_a ：機器内部空気温度、T：外気温度

低熱抵抗化 風量を増やすか、比重量・比熱を高める

例えば図5に示す機器において、部品の温度が異常に高くなってしまったとしよう。

これに対する対策オプションを基礎式から発想すると次のようになる。

部品の温度 T_p は、式から

$$T_p = W_p / (S h) + T_a$$

となり、論理的に次の対策オプションが導かれる。

部品温度が高い理由は、

(1)部品の熱流束 (W_p / S) が大きい (2) h が小さい (3) 周囲空気温度 T_a が高い
のいずれかである。

(1)のケースでは、放熱面積が発熱量に比較して大きすぎる、周囲からの放射受熱(等価発熱増大)が原因として想定でき、対策は伝導による等価放熱面積の拡大、放熱器の設置、放射受熱の遮断、などが挙げられる。

(2)のケースでは、風速が小さい(対流熱伝達)、放射率が小さい(放射熱伝達)ことが想定され、風速増加、乱流化、放射率向上が有効であろう。

(3)のケースでは、風量が小さい(淀みの発生等)、上流側部品の総発熱量が大きい、周囲部品からの受熱が大きいなどの原因が考えられる。従って対策は風量の拡大、空気の流路変更(上流の発熱の影響を受けない通風パスの設定、通風孔の設置等)、周囲部品からの断熱などである。

これらを系統図にまとめた例を図6に示す。

このように、基礎式を眺めることにより、網羅的に対策オプションを導くことができる。また、基礎式を使って各オプションが実現可能かどうか概算する。例えば風速を何倍にしたら、所定の温度まで下げられるか?(熱伝達率は風速の関数となる) それは現実的に可能な範囲か? など対策実現性の目処をつけることができる。

3 - 2 熱対策常套手段を活用して対策を立てる

論理的にオプションを抽出する際に重要なことは、「冷却常套手段」を知っておくことである。放熱面積を拡大する、風速を増大させる・・・といった抽象論から具体的な構造に落とすには、先人の知恵を活用するのが手っ取り早い。

具体的な内容は紙面の都合で割愛するが、低熱抵抗化の方法は大別すると7種類になる。それぞれの策について確率された設計手法や構造上のノウハウがある(表2参照)。

こうした「コツ」を知らずに設計すると、性能を求めて試行錯誤を繰り返すことになる。いくらシミュレーションを駆使しても、定石を踏まえた適切な設計がなされていない限り、設計の生産性は上がらない。詳しい内容は文献(2)、(3)などを参照されたい。

3 - 3 適切な検証ツールを使って評価する

対策オプションの評価に当たっては、「検証ツール」が必要である。

専用設計計算式や熱回路網法による温度計算、熱流体シミュレーション、実験による計測が一般的な検証手段である。

「専用計算式」は使用範囲が部品やヒートシンク、筐体などの単体計算に限定されるが、スキルが不要で、すぐに結果が得られるため、設計者に広く使用されている。

「熱回路網法」は複数の熱源の相互作用も含めて解くことができる。構成要素をマクロな熱抵抗に置き換えて解くため、感度解析やパラメータ設計に適しているが、熱等価回路モデルを作成するには専門知識が要するため、利用者は限定される。

「熱流体シミュレーション」を行うには専用のソフトウェアを購入しなければならない。詳細な温度予測が可能になるが、それに見合った詳しいデータの入力(3次元設計モデル)と利用技術を必要とする。

熱対策オプションの1次評価や冷却方式設計では設計指針の検証が中心になるため、専用計算式や熱回路網法が適している。

2次評価や具体設計の検証には、熱流体シミュレーションによる総合評価を行うことが望ましい。

実験評価は最も信頼できる結果が得られるが、物作りを伴うため開発期間の短縮が難しい。従って検証に十分な時間と費用をかけることのできる製品に限定される。

このように開発・設計の各ステップにおいて、使用すべき検証手段を使い分けることで試行錯誤を最小限にして、効率的に課題を潰していくことができる。

以上、設計者が理解しておくべき熱設計の「つぼ」と「コツ」について述べた。

今後さらに厳しさを増す機器の熱問題に対応するには、設計に関わるすべての人が「自分の設計対象の熱的課題を認識できること」、そして系統的に打ち手の検討ができるような「論理思考プロセスを鍛えること」が重要となっていくであろう。

参考文献

- 1) 国峰尚樹、"熱設計へのシミュレーション活用のための基礎技術"、電子技術 2000年11月号、日刊工業新聞社
- 2) 国峰尚樹、エレクトロニクスのための熱設計完全入門、日刊工業新聞社、1997年
- 3) 伊藤謹司、国峰尚樹：トラブルをさけるための電子機器の熱対策設計、日刊工業新聞社、1992年
- 4) 国峰尚樹："設計者は熱を見積もった設計を心がけよ!"、電子技術 1999年8月号 日刊工業新聞社
- 5) 第一回熱設計・対策シンポジウム予稿集
- 6) 伊藤謹司(オフィス・ジェーアイ)："熱設計なんでも相談室"(ホームページ)
<http://thermo-clinic.com>

図1 電子機器の放熱経路

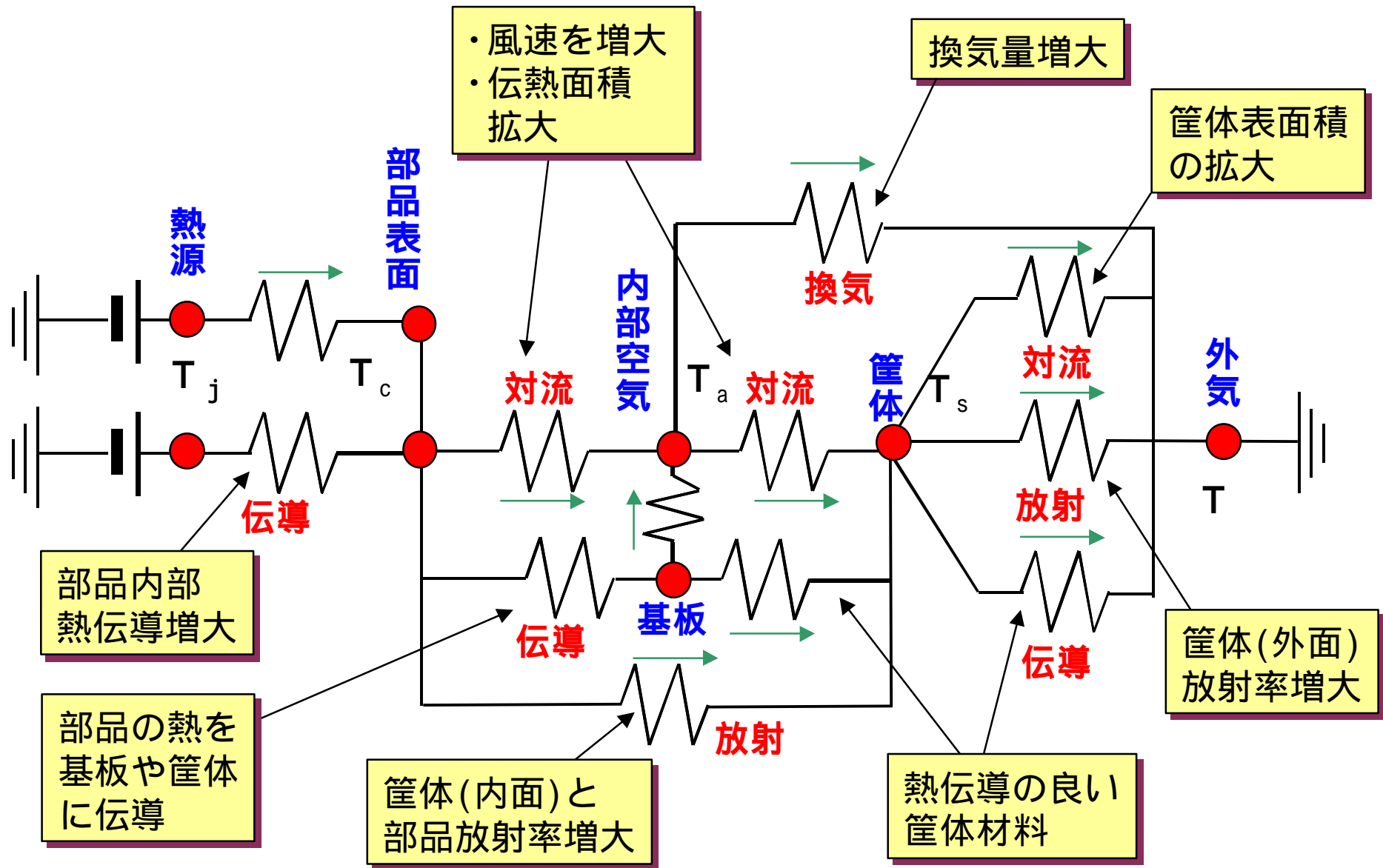


図2 自然空冷放熱限界グラフ

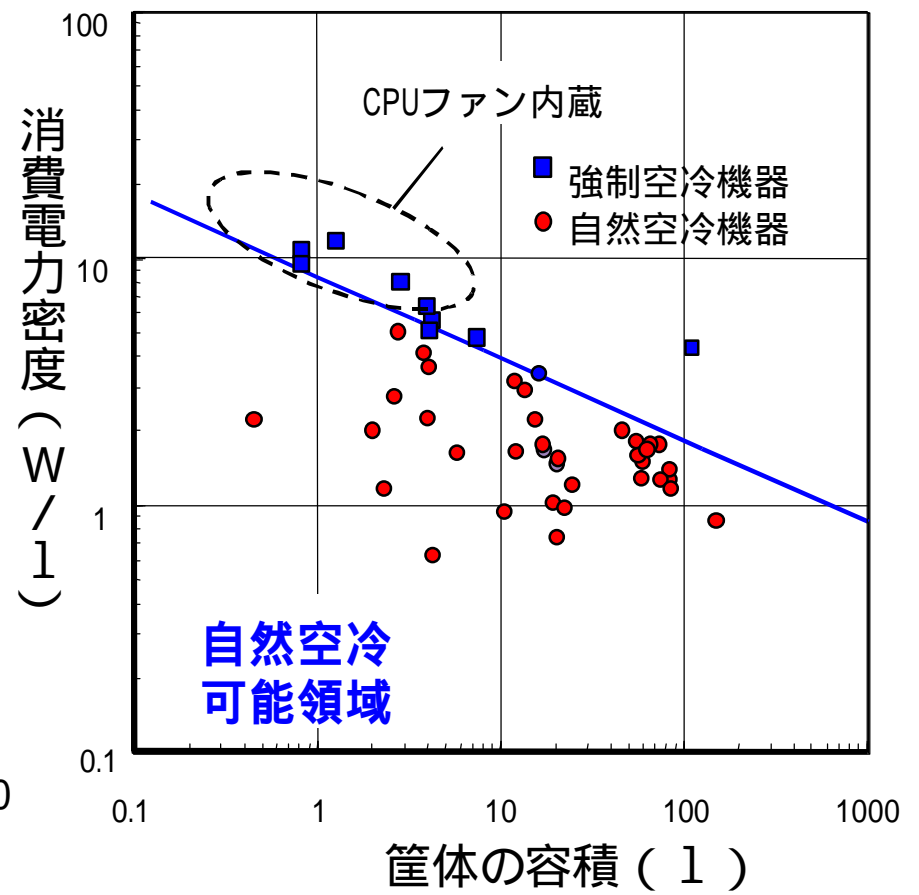
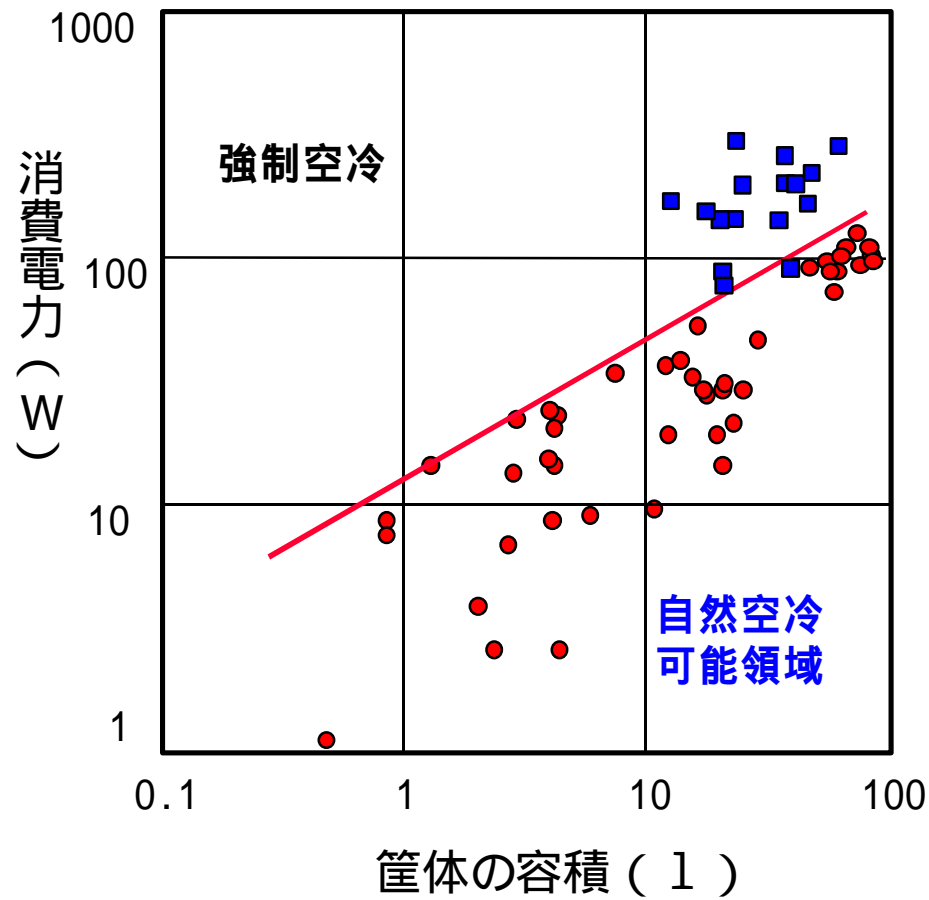


図3 強制空冷の換気風量と許容消費電力

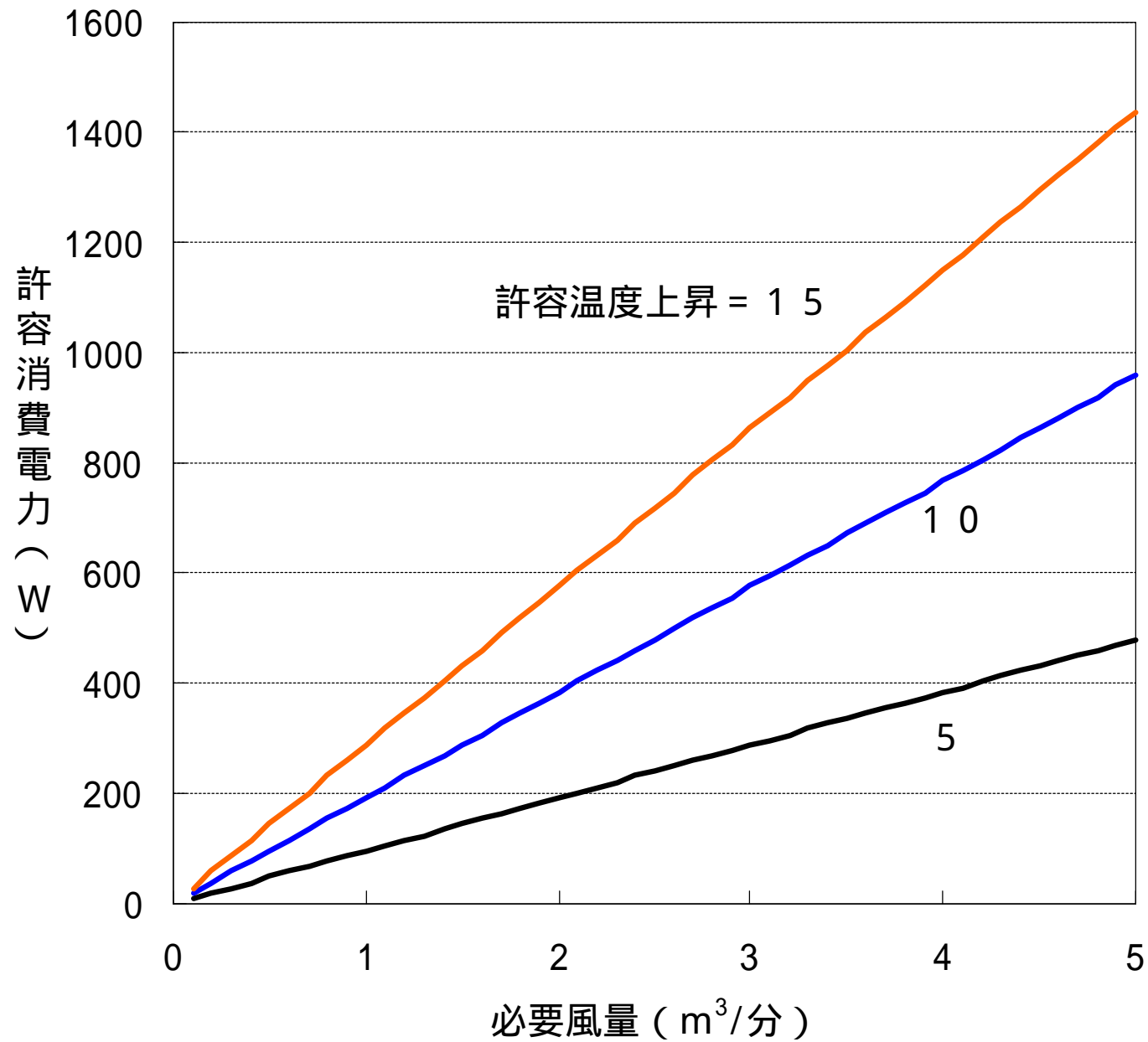
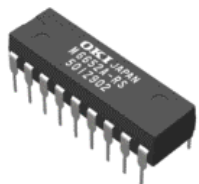
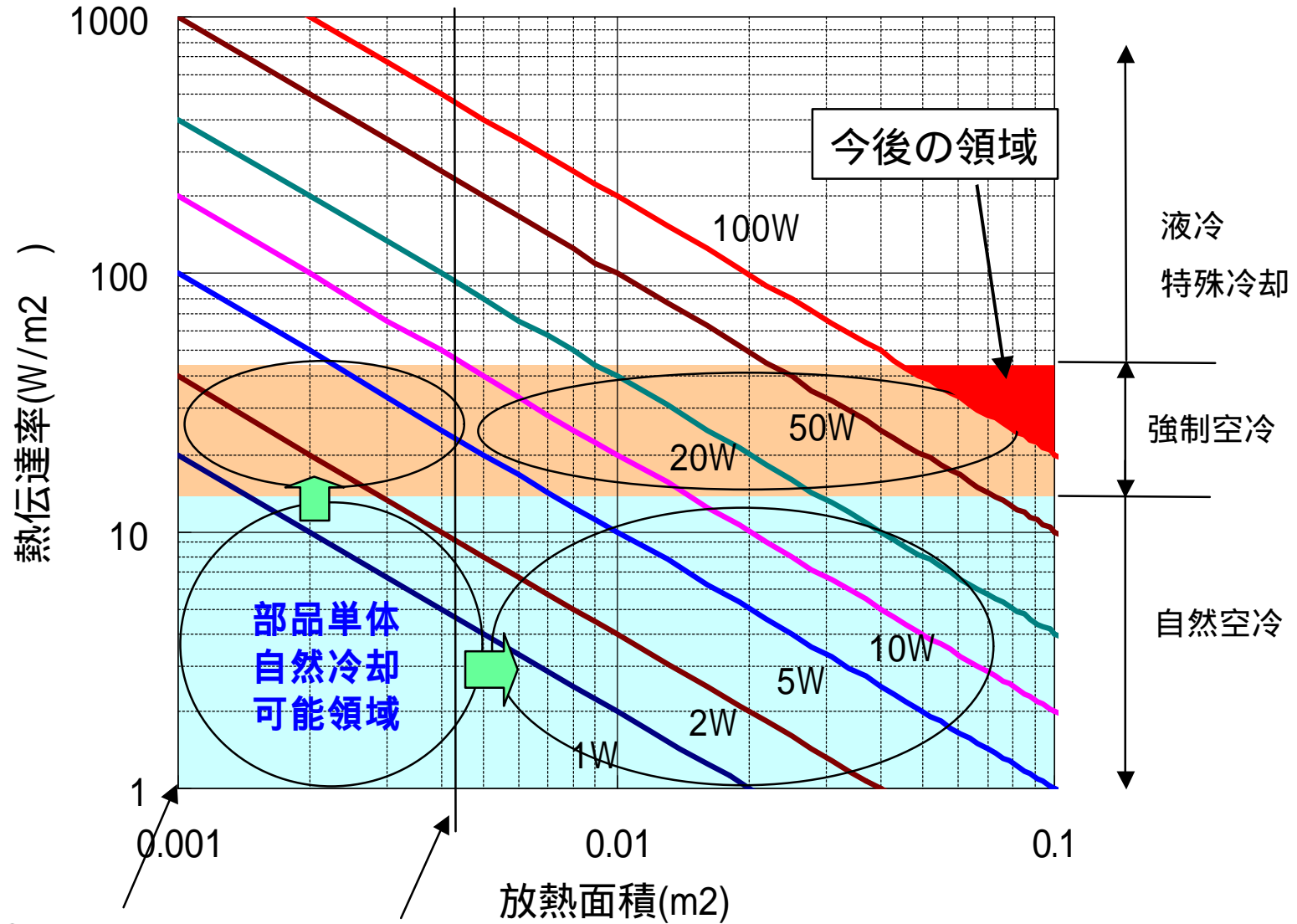


図4 部品の放熱限界グラフ



DIP



PGA

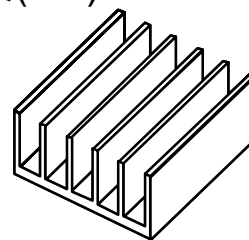


表1 部品の熱的条件チェック表

室温： 25

部品パッケージ	温度上限 ()	外形寸法(mm)			消費電力(W)			Rjc /W	Rja (/ W)				表面積 (m ²)	表面熱流密度 W/m ²	予測温度()				順位
		縦	横	高さ	MAX	TYP	実測		0m/s	0.5m/s	1m/s	2m/s			0m/s	0.5m/s	1m/s	2m/s	
PGA-133ピン(セラミック)	90 85	35.6	35.6	3.3	1.5	1.2		2					0.002998	400.2108845	67.42109	55.05015	46.95161	41.22507	7
PGA-209ピン(セラミック)	80 70.4	44.7	44.7	3.5	1.8	1.4		2					0.004622	302.9004885	58.09005	51.26289	44.39077	39.53144	6
PGA-257ピン(セラミック)	85 65	50.8	50.8	4.1	3	2.4		2					0.005994	400.3736821	69.83737	62.86169	53.17815	46.33085	9
SOP-44ピン(プラスチック)	90 80.4	13	28.2	2.65	0.8	0.5		7					0.00095	526.3185596	81.13186	50.48609	44.04652	39.49305	5
QFP-44ピン(プラスチック)	90 74.5	9.5	10.5	1.5	0.1	0.1		25					0.00026	385.3564547	66.03565	41.26107	37.23054	34.38053	8
QFP-80ピン(プラスチック)	85 70	14	14	2.1	1	0.6		12					0.00051	1177.394035	149.9394	83.24034	68.29097	57.72017	1
QFP-160ピン(プラスチック)	90 70	28	28	3.75	1.2	0.9		15					0.001988	452.7162978	83.77163	66.25446	58.12537	52.37723	4
QFP-304ピン(プラスチック)	85 60	40	40	3.75	2.2	1.7		10					0.0038	447.3684211	86.73684	74.78106	65.17971	58.39053	3
QFP-208ピン(セラミック)	90 79.5	39	39	2	2.5	2.1		3					0.003354	626.118068	93.91181	76.60188	63.33327	53.95094	2

必ずカタログに記載されている

カタログに記載されていない場合もある

上段 = $\frac{R_{jc}}{R_{ja}} \times \text{熱伝達率} + \dots$

下段 = $\dots + (\text{のデータがある場合})$

= $\frac{\dots}{\dots}$ または $\frac{\dots}{\dots}$ で計算

= $(\dots + \dots + \dots) \times 2 \times 10^{-6}$ で計算

*熱伝達率 $\left\{ \begin{array}{l} = 10 \text{ (自然空冷時)} \\ = 3.86 \times (\text{風速/部品長さ}) \end{array} \right.$

図5 対策が必要な機器の例

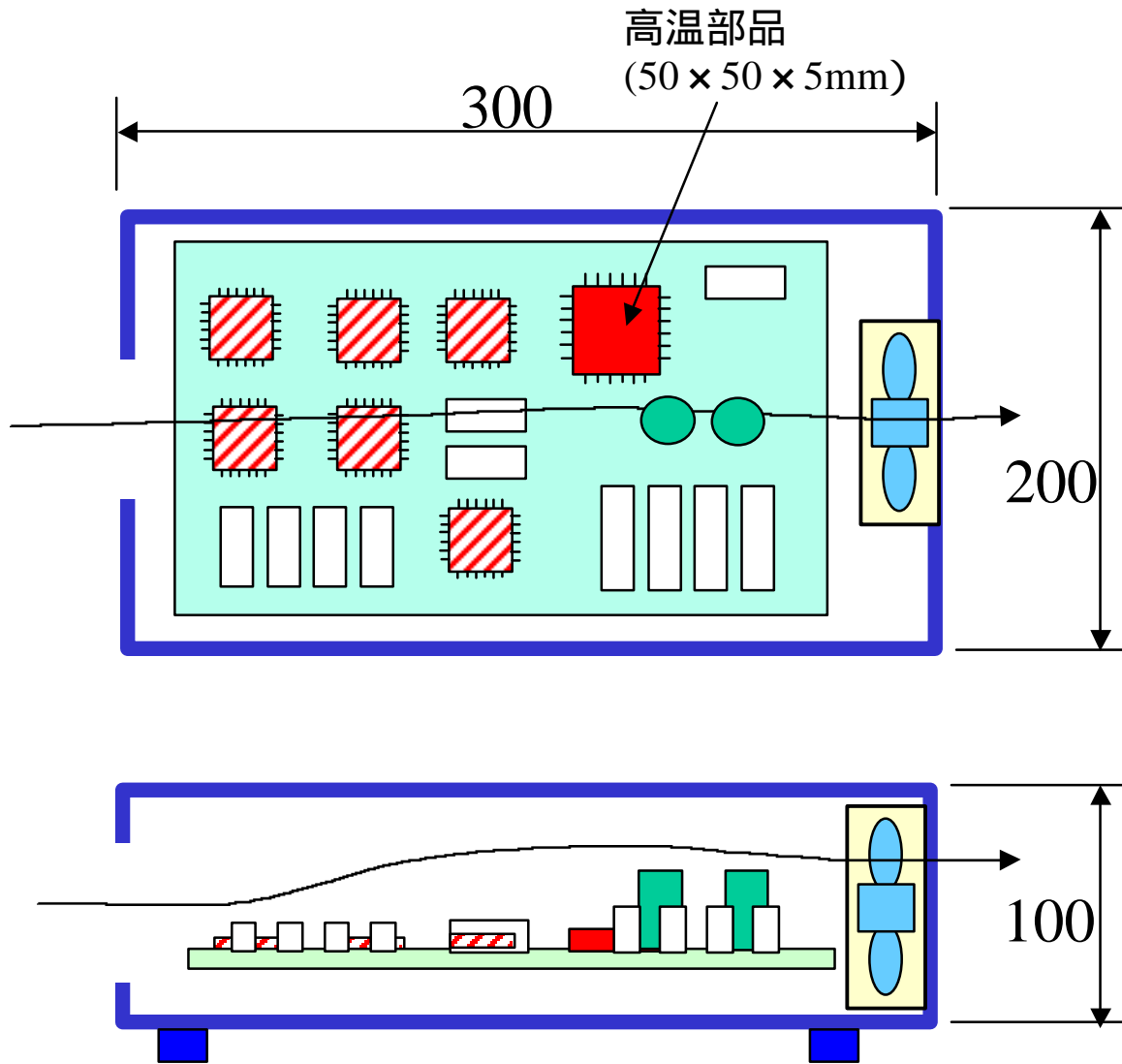


図6 熱対策系統図

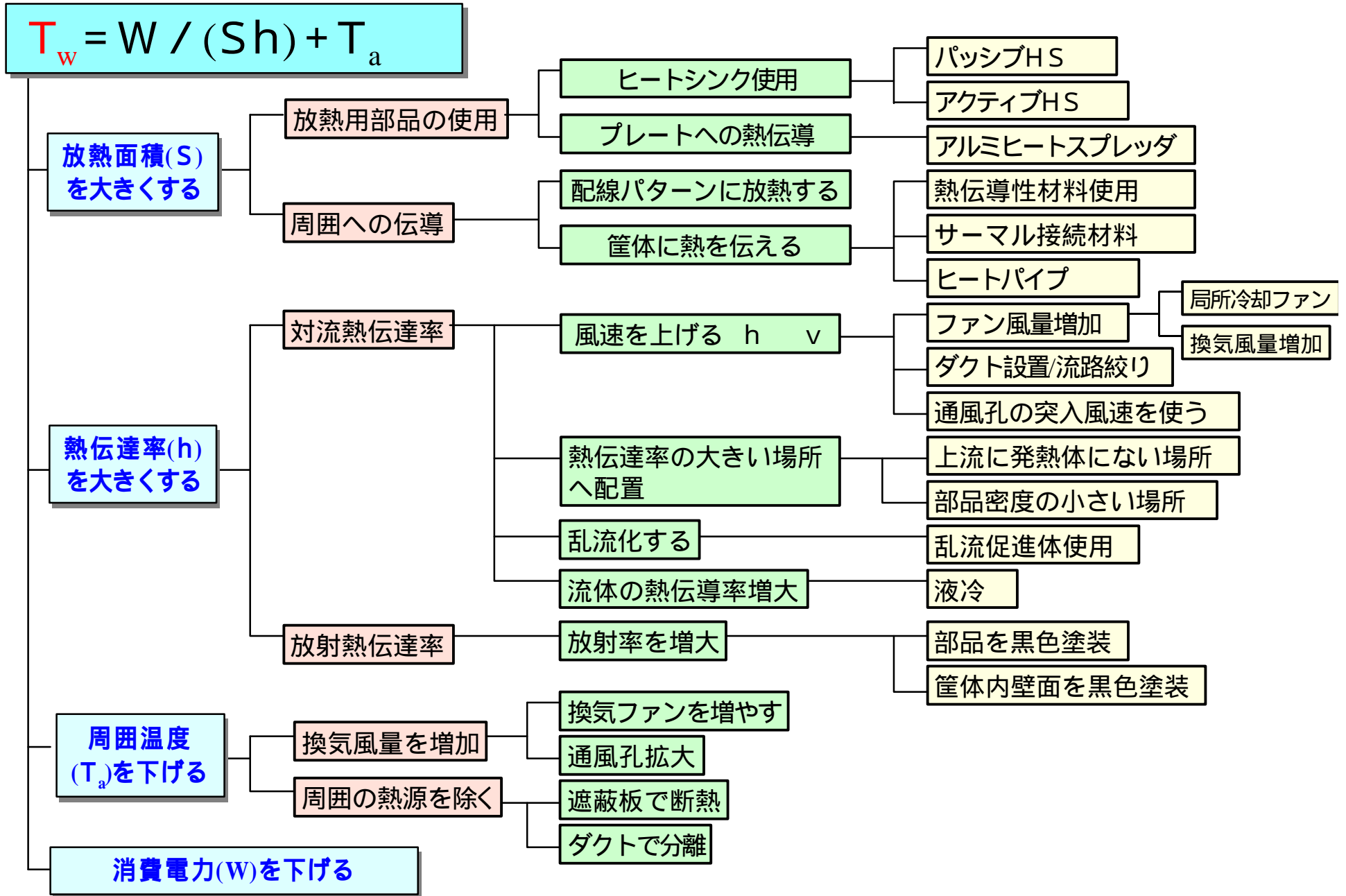


表2 低熱抵抗化策分類と常套手段

低熱抵抗化策	部品レベル	P C Bレベル	ユニット・筐体レベル
放熱面積の拡大	<ul style="list-style-type: none"> ヒートシンクの設置 ・ヒートシンク選択/ 設計法 ・ヒートシンクの取付法 	<ul style="list-style-type: none"> ヒートスプレッドパターンの設置 ・ヒートスプレッドパターン設計法 	<ul style="list-style-type: none"> 筐体表面積拡大 ・放熱フィンの最適設計法
伝導による熱の拡散	<ul style="list-style-type: none"> 部品材料・構造改良 ・熱伝導構造設計法 ヒートパイプの利用 ・ヒートパイプ選定/実装法 	<ul style="list-style-type: none"> 配線パターンやサーマルビアへの伝導 ・放熱パターン/サーマルビア設計法 ・メタルコア基板活用法 	<ul style="list-style-type: none"> 筐体と部品の結合による熱伝導 ・熱伝導構造設計法
放熱面の風速増大	<ul style="list-style-type: none"> 局所冷却ファン取付 ・選定/実装法 煙突効果の利用 ・煙突効果利用ノウハウ 		<ul style="list-style-type: none"> ダクト構造による風速増大 ・ダクト設計法 通風口効果、煙突効果 ・通風口設計法
放熱面の放射率増大	<ul style="list-style-type: none"> 表面放射率向上 (黒色塗装等) 		<ul style="list-style-type: none"> 筐体内外面の塗装
換気風量の増加			<ul style="list-style-type: none"> 通風口の最適化 ・通風口設計法 ファン容量制御 ・ファン活用ノウハウ
熱伝達率の増大	<ul style="list-style-type: none"> 乱流促進構造の利用 ・乱流促進体設計法 	<ul style="list-style-type: none"> 衝突冷却 ・冷却構造設計法 	
その他	<ul style="list-style-type: none"> 冷凍機 蓄熱器 ペルチェ素子 液冷・蒸発冷却 ・各種冷却器設計法 		