

テクニカルデータ HEATING ELEMENTS

カンタルグローバ® SD



目次

はじめに	3
商品概要	
GLOBAR® SD HEATING ELEMENTS	4
グローバSD発熱体	4
グローバSDマルチレッグ発熱体	5
アプリケーション	6
発熱体使用方法	8
ロッドタイプの設置	8
マルチレッグタイプの設置	9
マルチレッグタイプの垂直設置	9
マルチレッグタイプの水平設置	11
発熱体の設置間隔	12
グローバSD発熱体の抵抗温度特性	12
電気仕様	13
発熱体の経年変化特性	14
発熱体の表面負荷	14
通電手順	14
使用温度の制限	14
耐雰囲気特性	16
コーティング及びグレージング処理	17
連続運転及び間欠運転における注意事項	17
電力供給	18
発熱体結線方法	18
発熱体結線時の各発熱体の抵抗ばらつき	19
電圧マージンについて	19
電力供給設備	19
1 可変出力トランスを使用する場合	20
2 サイリスタ制御を使用する場合	21
2.1 位相制御	22
位相制御出力のモニタリング方法	23
2.2 Fast-Cycle 制御 (ON/OFF制御)	24
ON/OFF制御出力のモニタリング方法	25
3 トランスとサイリスタを組み合わせる場合	25
4 直接結線する場合	25
ご注文に際して	26
ロッドタイプ発熱体	26
マルチレッグタイプ発熱体	26
アクセサリ	27

はじめに

カンタルはサンドビックマテリアルテクノロジー (SMT) 部門に属し、シリコンカーバイド (以下SiC)

発熱体の世界的な製造メーカーです。生産工場はスコットランドのパーズにあり、販売、技術サポートについては各国の関連会社や代理店を通して供給させて頂いています。

カンタルのグローバSD発熱体は α -SiCを再結晶化させることによって作られており、広い温度領域で性能が最大限生かされるように設計されています。カンタルのグローバSD発熱体は大気中、あるいは特定雰囲気中において、600°C ~1600°Cの範囲内で主に使用されます。当然ながら、特定雰囲気中においては各雰囲気によって最高発熱体温度は制限されます。詳細については図11をご覧ください。

カンタルのグローバSD発熱体は水平設置、垂直設置のどちらでもご使用になれます。材料自体が強い熱間強度特性を持っており、最高温度での運転においても発熱体を支持する必要はありません。

カンタルのグローバSD発熱体は金属発熱体に比べ、高い表面負荷で使用でき、連続運転、間欠運転のどちらにおいても優れた特性を持っています。これらの特徴は炉設計における製造コスト、メン

テナンスコストの低減に大きく寄与し、発熱体の交換も運転中に可能なため運転停止の期間を最小限に抑えることができます。

カンタルのグローバSD発熱体には棒状タイプもしくは管状タイプがあり、直径は10mm~55mmの範囲で製造可能です。また、現在お使いの他社製品のサイズ、抵抗値に調整して提供させて頂くことも可能ですのでご相談ください。

また、シングルロッドタイプに加えまして、2本ロッドタイプ (Uタイプ)、3本ロッドタイプ (Wタイプ)、あるいは4本ロッドタイプもご用意しております。マルチロッドタイプを使用することにより端子数を減らすことができ、発熱体の設置をシンプルにすることができます。

FEATURES

- Can be used in applications ranging from 600°C up to 1600°C (1110 – 2910°F)
- Accepts significantly higher electrical loadings than metallic elements
- Considerable savings in furnace construction cost
- Maintenance is greatly simplified
- Available in multi-leg derivatives



商品概要

GLOBAR® SD HEATING ELEMENTS

グローバSD発熱体

材料には粒子状の高純度 α -シリコンカーバイド（以下 α -SiC）を用い、押し出し成形によって棒状あるいは管状ロッドを成形し、これを2500°C以上の雰囲気下で各粒子を再結晶化することによってグローバSD発熱体は作られています。

この焼成プロセスにより隣接している粒子間を電氣的に強く結合させます。また、それぞれの粒子サイズの配合割合は最適な密度と所定の抵抗値(@1,000°C)になるように厳密に管理されています。

グローバSD発熱体は中央の発熱部と抵抗値の低い両端の端子部によって構成されています。ご要望に応じ、端子長の異なる発熱体を提供することも可能です。

グローバSD発熱体は用途に合わせ、1ピース品と3ピース品を用意させて頂いています。1ピース品は端子部と発熱部の接合面がない一体品で、端子部はSiCのポーラスになっている空間に低抵抗材料の金属シリコンを含浸させて作られます。

一方、3ピース品は低抵抗の端子部を信頼性ある反応焼結法 (Reaction Bonding) により強固に結合することで作られます。

発熱部の抵抗率は端子部の値よりも十分に高いために、電圧が印加された際の発熱はほとんど発熱部で発生します。

炉壁断熱材を通過する端子部は比較的低温に保たれ、端部がアルミニウムでスプレー処理されています。スプレー処理はアルミニウム製接続帯との接触抵抗を下げるために施されています。

標準サイズは図1にも示されている通りで、直径10mmから55mmの範囲内で製造可能です。直径10mmのものを除き、すべての発熱体は管状タイプになっています。10mmのものについては棒状タイプになります。

STANDARD DIMENSIONS FOR GLOBAR® SD ELEMENTS

Ø A, MM	10	12	14	16	20	25	32	38	45	55
B max.	350	500	600	600	850	850	1250	1450	2400	2400
L max.	650	950	1000	1150	1450	1600	2000	2250	3300	3300

Ø A, IN	3/8	1/2	9/16	5/8	3/4	1	1 1/4	1 1/2	1 3/4	2 1/8
B max.	13.8	19.7	23.6	23.6	33.5	33.5	49.2	57.1	94.5	94.5
L max.	25.6	37.4	39.4	45.3	57.1	62.3	78.7	88.6	129.9	129.9

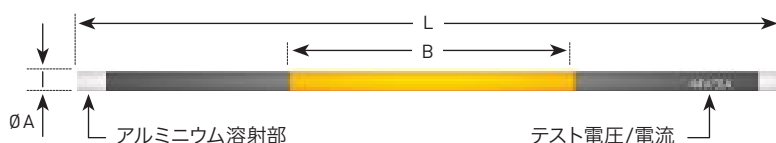


図1 カンタル グローバSD発熱体 標準寸法 (mm)

グローバSDマルチレッグ発熱体

グローバSDマルチレッグ発熱体は標準のグローバSDと材料も製造プロセスもまったく同一の発熱体を2~4本使用して作られます。発熱部と端子部は反応焼結で接合するため、その境目は明確になっています。また、各発熱体の抵抗値は均一に揃えられており、これにより負荷を均一に分布できます。各発熱体は特殊な方法によってSiC製のブリッジ部で結合されています。この結合部は α -SiCの一体構造になっています。結合部にセメントや溶接材を使用すると完成品の最高使用温度を制限してしまうため、そのようなものは一切使用していません。この接合ブリッジ部は発熱部ではないので用途によってはエンドサポートとしても使用できます(図7参照)。

Uタイプの発熱体は2本の発熱体で構成され、単相仕様になっていますが、結線の仕方によっては電力の安定供給が可能な三相での使用も可能です。またCUタイプはUタイプと同等品で、ブリッジ長を短くしたものです。設置スペースが限られるような炉構造の場合に使用されます。

Wタイプ発熱体は3本の発熱体を用い、効率的な3相スター結線構造を構成します。

Mタイプ発熱体は4本の発熱体を用い、Uタイプ発熱体を2つ合わせたような構造をとり、これにより端子数と炉壁の穴の数を減らすことが可能です。4本の発熱体のホットゾーンの長さは同一ですが、用途に合わせ、不均一な熱分布を取るために内側2本を短く、あるいは長くすることもできます。

図2に示すブリッジ厚み“ $\varnothing F$ ”は発熱部の長さに含まれていませんのでご注意ください。詳細のサイズ、抵抗値については別紙“発熱体サイズリスト”に記載されております。その他の非標準サイズにつきましてもご要望にお応えいたしますので、都度ご相談ください。

また、シャンク間距離(D)、サポート用スロット位置(E)などは現在お使いの他社製品に合わせた形でご提供可能ですのでご相談ください。

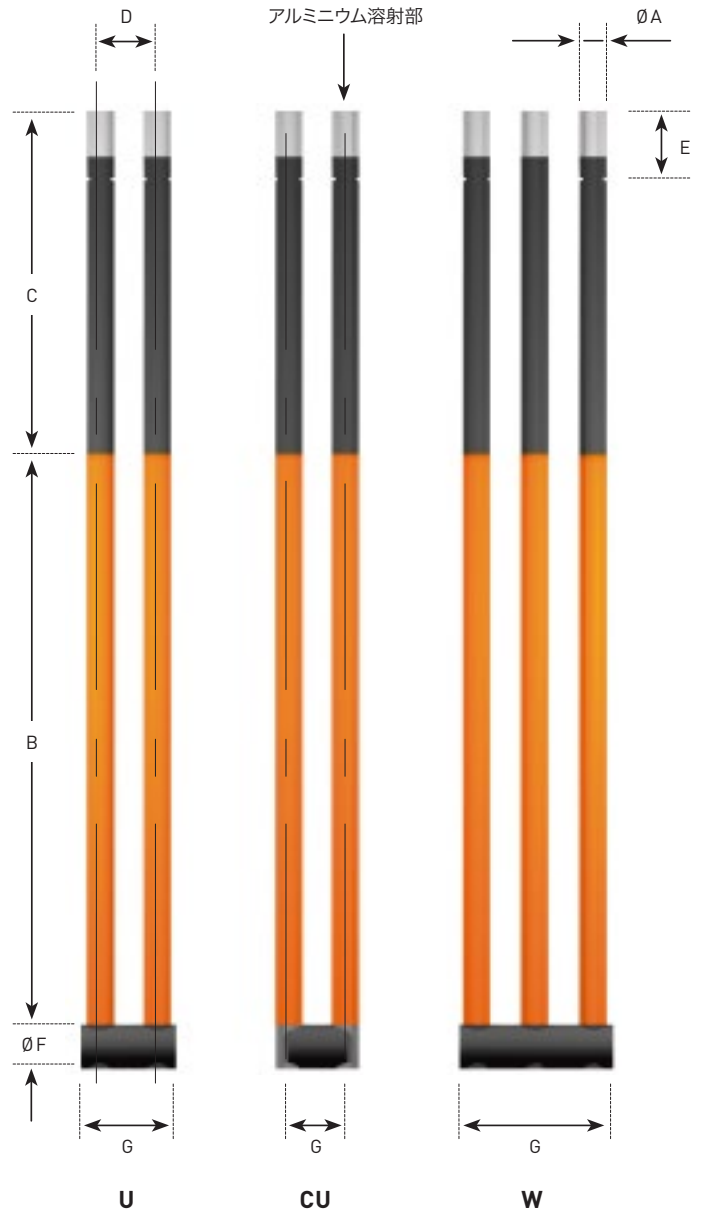


図2 カンタル グローバSDマルチレッグ発熱体 標準寸法 (mm)

STANDARD DIMENSIONS FOR KANTHAL GLOBAL SD MULTI-LEG ELEMENTS

ØA	MM	IN	MM	IN	MM	IN	MM	IN	MM	IN	MM	IN	MM	IN
	16	5/8	20	3/4	20	3/4	25	1	32	1 1/4	38	1 1/2	45	13/4
B max.	500	19.7	800	31.5	800	31.5	850	33.5	1400	55.1	1400	55.1	1400	55.1
C max.	400	15.7	500	19.7	500	19.7	550	21.7	625	24.6	625	24.6	625	24.6
D	35	1.38	38	1.50	52	2.05	52	2.05	64	2.52	89	3.50	108	4.25
E	45	1.77	45	1.77	45	1.77	45	1.77	45	1.77	75	2.95	75	2.95
ØF	25	0.98	32	1.26	32	1.26	38	1.50	44	1.73	54	2.13	54	2.13
G (U)	60	2.36	65	2.56	79	3.11	87	3.43	102	4.02	145	5.71	165	6.50
G (CU)	35	1.38	38	1.50	52	2.05	52	2.05	64	2.52	89	3.50	108	4.25
G (W)	95	3.74	106	4.17	134	5.28	139	5.47	166	6.54	234	9.21	273	10.7

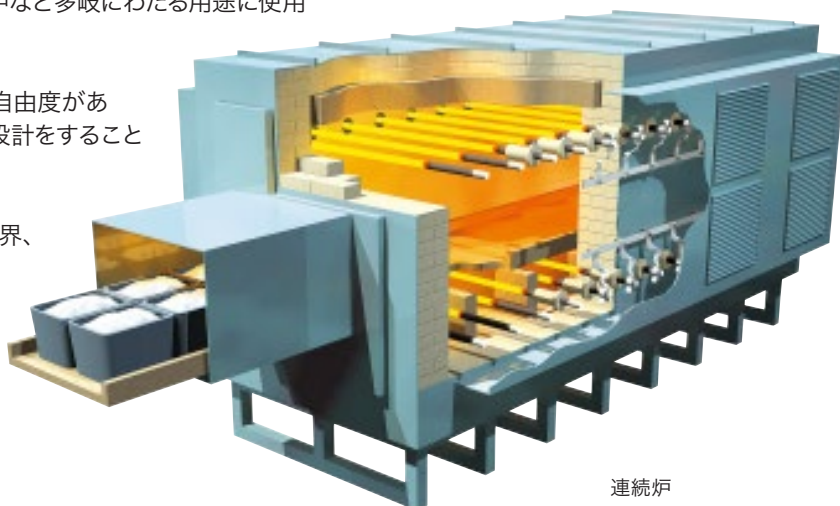
アプリケーション

すべてのグローバSD発熱体は図3に示すように、水平、あるいは垂直に設置して使用します。両端に端子をもつロッドタイプの場合には両サイドに十分なスペースが必要で、それがスペース的に難しい炉構造の場合や、炉幅が長すぎる炉の場合には、端子が片側にのみ配置されるマルチレグタイプが発熱体を使用します。

グローバSD発熱体は広範の温度領域、さまざまな雰囲気下において、小型実験用炉から大型産業用熱処理用の炉など多岐にわたる用途に使用されています。

グローバSD発熱体を用いた炉は設計に自由度があり、シンプルな設置や長寿命を考慮した設計をすることが可能です。

業界としてはガラス業界、セラミックス業界、電子部品業界、金属産業、あるいはR&D用途などがあります。図3には典型的な応用例を示します。

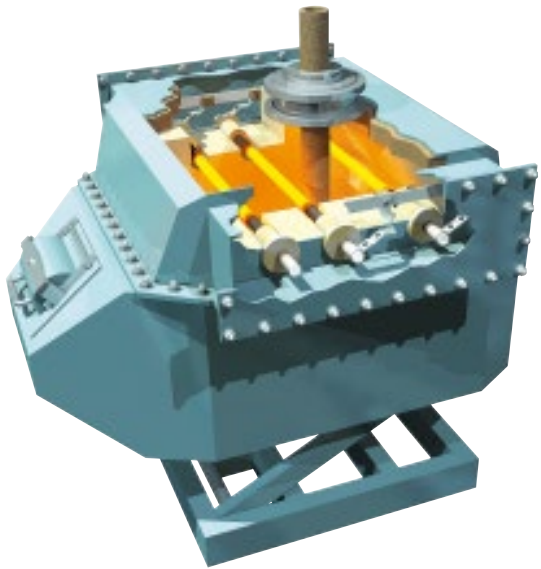


連続炉

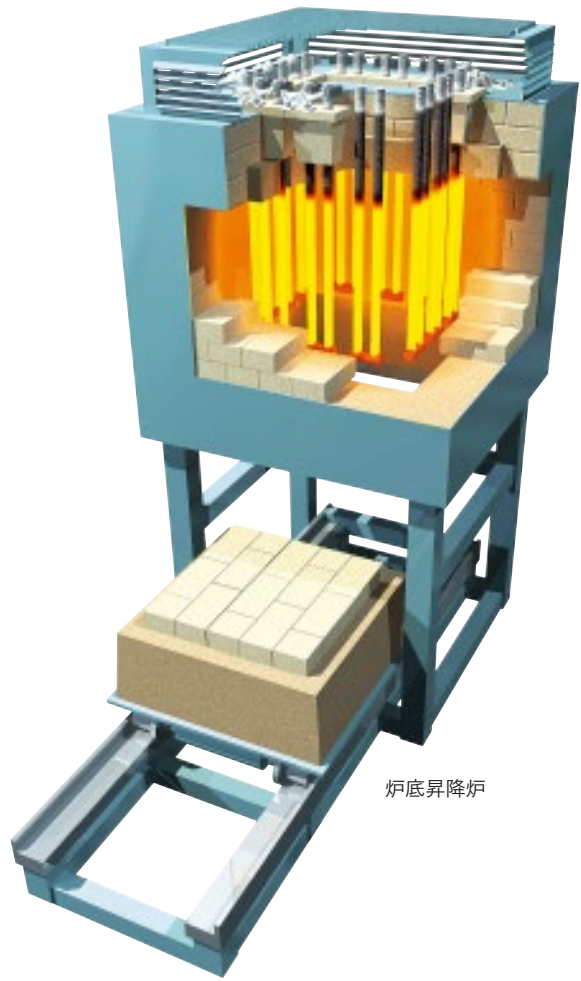


アルミニウム溶解炉と保持炉

図3 典型的な応用例



低圧ダイカスト炉



炉底昇降炉



ロータリハースキルン

発熱体使用方法

ロッドタイプの設置

SiC発熱体は頑丈なためサポートシステムが不要な発熱体ですが、衝撃に対しては弱く、したがって開梱時の発熱体の取り扱いにおいては、機械的な衝撃を発熱体を与えないように注意が必要です。基本的に発熱体は両手で取り扱うようお願い致します。

設置時の注意点としては、貫通穴に挿入する際、発熱体は横方向にも縦方向にも自由度を持たせるように設置してください。それぞれの発熱体の貫通穴は一直線状に並ぶように配置してください。発熱体を設置する前に、一直線状に配置されているかどうかを確認するために同サイズの棒を通して確認することをお勧めします。

決して、発熱部が貫通穴に入らないように注意してください。発熱体が局所的にオーバーヒートし、早期の破損につながります。

図4あるいは、別紙“アクセサリサイズリスト”に示してある通り、全てのグローバSD発熱体の直径に合った導入スリーブを用意しております。

グローバSD発熱体の設置に際しては、特別な導入スリーブを用いる場合もあります。

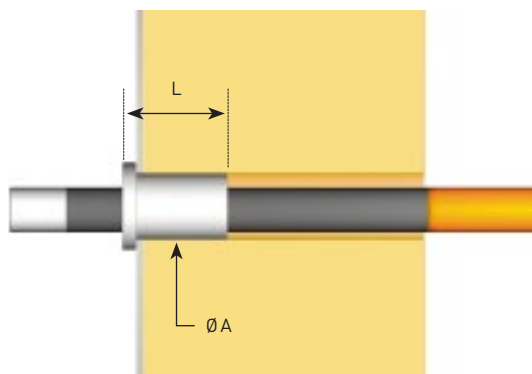


図4 標準スリーブの形状とその設置方法

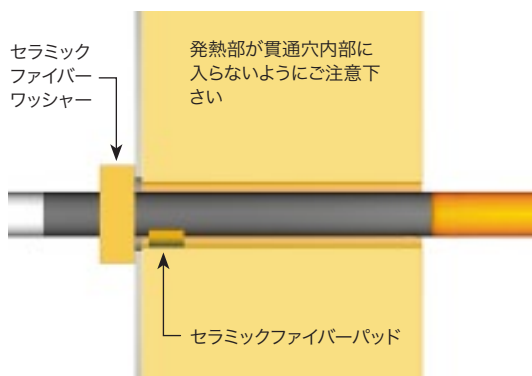


図5 スリーブなしの場合の設置方法

PATTERN STANDARD DIMENSIONS

PATTERN	Ø ELEMENT		Ø A		L	
	MM	IN	MM	IN	MM	IN
SL10	10	3/8	18	0.71	75	2.95
SL14	12 & 14	1/2 & 5/9	26	1.02	75	2.95
SL20	16 & 20	5/8 & 3/4	31	1.22	75	2.95
SL29	25	1	43	1.69	75	2.95
SL32	32	1 1/4	47	1.85	75	2.95
SL38	38	1 1/2	56	2.20	75	2.95
SL45	45	1 3/4	62	2.44	75	2.95
SL55	55	2 1/8	70	2.76	150	5.91

単位はmm その他のサイズもご要望に応じます

スリーブは外側から挿入し、穴の径はスリーブが余裕をもって入る程度の大きさを確保し、決してセメントなどで固定しないでください。

一般的にスリーブは断熱材厚みよりも短いものですが、発熱体と断熱材の接触を避けるために図4に示すように発熱体と断熱材の間には十分な空間が保てるように断熱材の穴を空けてください。発熱体と断熱材が接触すると、溶着する可能性があり、早期の破損につながります。

レンガを使用した炉など、スリーブを使用しない場合には、発熱体の直径に応じて穴のサイズを所定以上確保してください。直径が20mmまでの場合には、穴のサイズを直径+4~5mm、25mmから55mmの場合には直径+8~10mm程度確保してください。

また、断熱材の厚みが通常よりも厚い場合や、穴の中に不揮発性の凝縮物が発生しうるような場合には上記サイズよりもさらに大きくする必要があります。

発熱体は常に穴のセンターに位置するようにセラミックファイバのパッドなどで端子部を支持するように配置してください。決して端子部と貫通穴とが接触しないように注意してください。セラミックファイバやそれに類する断熱材で発熱体を覆わないように注意してください。早期破損の原因となります。

図5に示すように、端子先端部分での熱放散を避けるために、やわらかいワッシャータイプのセラミックファイバで発熱体の外側を覆うようにする場合があります。

いずれの場合にも、スリーブフランジ、あるいはファイバワッシャーから発熱体先端部までの距離は発熱体の直径の2~3倍程度の長さを確保してください。

アルミニウム製の接続帯は酸化しにくく平らで柔らかいため、電氣的に発熱体と良好なコンタクトが取れ、SiC発熱体の接続帯として弊社の推奨となっております。

この接続帯は通常、設置が簡単で特別な道具を必要としないHタイプのクリップを用いて発熱体に留められます。設置スペースが限られるような場合には、Cタイプのクリップを用いますが、この場合は特別なプライヤが必要となります。これらのクリップはばねの力によって良好な接触を維持しています。これを維持するためには、近傍温度は約250°C以下に保つ必要があります。それ以上の高温に晒

される場合には、タイプG、タイプDのクランプを使用します。これらのクランプはステンレス製のねじで固定するようになっています。ねじの焼き付きや、使用後の再締付け、使用後の取り外しにくさを防ぐために、設置前には高温対応の潤滑油を塗布することをお勧めします。また、使用後24時間経過後に、再度締付けすることを推奨します。発熱体結線部の温度を適度に保ち、端子ガード自体も十分に放熱できるように設置してください。雰囲気制御するような炉では、密閉されたターミナルボックスを使用する必要があります。そのため、以下の項目にも留意する必要があります。

- 炉壁から発熱体先端までの距離を発熱体直径の4-5倍程度確保してください。
- ターミナルカバーの表面積を十分大きくとり、適度に冷却を促進すること。場合によっては、表面積を確保するために、フィン付きのカバーを使う場合もあります。
- Dタイプのクランプを使用し、通常よりも発熱体との接触面積を広く取るようにします。
- ターミナルボックスに導入するプロセスガスの比率を増やして冷却を促進します。
- 特に厳しい環境においては、なんらかの強制冷却装置を導入します。

グローバSD発熱体を垂直に設置する際には、電氣的に絶縁されたサポート材料を端子部分に使用します。直径16mm以上の発熱体に対しては、別の方法として、ご要望に応じて、Uタイプの垂直設置の場合と同様の方法で炉の天井部から吊りし、サポートスロットとワッシャーを用い支持する方法もあります(図6参照)。

マルチレッグタイプの設置

マルチレッグタイプの発熱体は開梱、ハンドリングの際には注意が必要です。必ず、両手で持ち、発熱体にストレスがかからないようにします。設置時は、輸送時に発熱体に取り付けられているストラップを必ず取り除いてください。

マルチレッグタイプの垂直設置

マルチレッグの発熱体は通常、垂直方向で使用します。その際には、あらかじめドリルで穴を開けた耐火物を用い、そこに発熱体を差し込み、炉壁天井部に固定します。

発熱体と耐火物はあらかじめ組み上げておき、所望の位置で固定しておきます。耐火物の正確な形状やサイズは発熱体のサイズと炉壁寸法によって決定されます。

発熱体は通常、図6に示すような特別にデザインされたサポートワッシャーによって支持しますが、場合によっては、発熱体ブリッジの下に適切なサイズのセラミックスを置いて、その上にヒータを乗せる形で支持する場合があります。

特に運転温度が高い場合や天井断熱材の厚みが薄い場合には、端子部のオーバーヒートに注意が必要です。多くの場合、ターミナルボックスが適切に換気されていれば、サポートワッシャーの下に置かれるセラミックファイバの厚みは25mm程度で十分です。より過酷な環境下では、ケーシング上部からさらに75~100mm程度離れた位置にサポートプレートを設置して、そこでそれぞれの端子を支える方法をとります。

この炉壁とサポートプレートとの間の空間により、端子部の対流が起こりやすい環境を作ります。

別の方法として、発熱体に切り込むスロットの位置を通常的位置からずらして使用する方法があります。これにより冷却される領域をより多く確保します。

サポートブロックは耐火物材料と同等のもので、発熱体の最高温度（これは炉温よりも相当高くなります）に対応したものを使用してください。

当然、高温時において隣接する端子間の漏電を防ぐために高い絶縁特性を有していなければなりません。一般的に高アルミナ、低Fe分の耐火物、あるいは真空成形したセラミックファイバが適しています。

発熱体を通させる穴は、それぞれが平行で、且つ、穴と穴のセンター間距離が正確である必要があります。一般的に穴の直径は発熱体直径が19mmまでは+6mm大きく、それ以上の直径に対しては+9mm以上確保してください。

カンタルはUタイプ及びCUタイプの一般的なサイズに対応したLB（ロケーションブロック）を用意しています。ロケーションブロックのフランジは発熱体の重量を支えられるようには設計されておりません。したがって、発熱体のサポートの際には、頑丈な断熱材ボードを使用し、このボードに発熱体の直径に合わせた穴を開け、これをフランジの上に乗せて、発熱体の重みがこのボードにかかるようにしてください。

LBロケーションブロックはご使用になる最大の発熱体温度に対応して、1250°C用、1400°C用、1500°C用の3種類を用意しています。

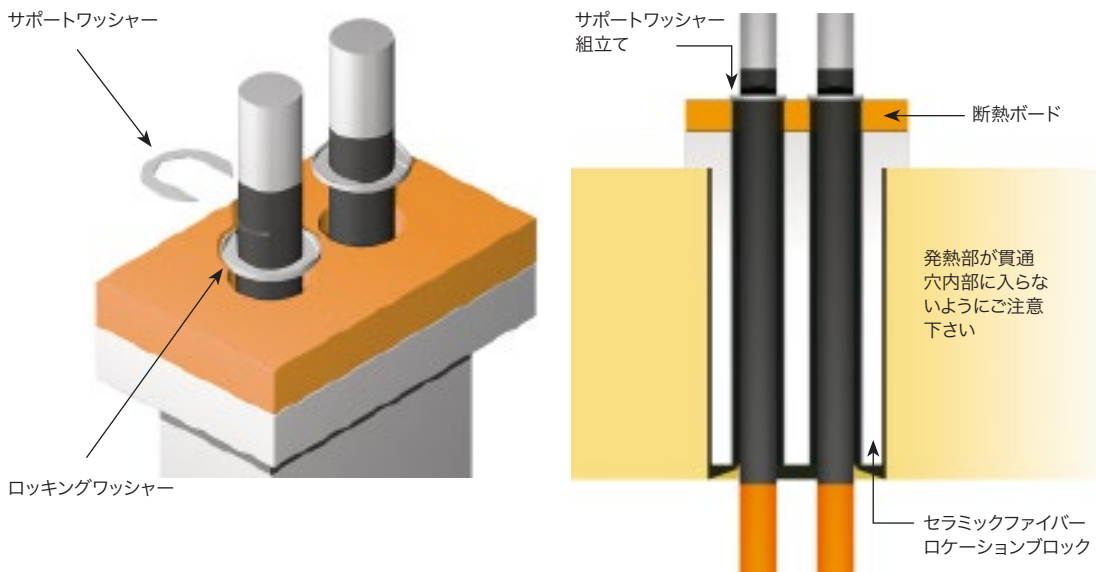


図6 典型的な垂直設置方法

発熱体の局所的なオーバーヒート、またこれによる短寿命化を避けるため、発熱部は必ずLBロケーションブロックの外に配置するようにしてください。発熱体を炉床から指し込んで垂直設置する場合、端子部の電気絶縁及び、熱絶縁がとれた材料の上に端子先端をのせる形で支持してください。

比較的長い発熱体を上記のように炉床から垂直設置する場合には、発熱体を安定に保つために、ブリッジ部分をサポート材やフックのようなもので支持する必要があります。

Mタイプの発熱体は2本タイプ、3本タイプに比べて端子間が広いので、SLスリーブを用いて配置する端子と炉のケーシングを絶縁するようにしてください。

マルチレッグタイプの水平設置

マルチレッグタイプを水平設置する場合（特に発熱体が高い場合）には以下の点に注意してください。発熱体の端子部が加熱時、冷却時に横方向に自由に熱膨張及び収縮できるように、表面の滑らかな硬い材料で支持するようにしてください。アルミナ製のチューブを発熱体端子と直角の方向で配置する方法が適しています。炉の貫通穴はスロット形状か十分な空間を確保できるような形状にし、端子がセラミックチューブのみによって支えられるようにしてください。決して炉壁断熱材と接触しないように注意してください。

発熱体は端子側だけでなく、ブリッジ側でも常に支えられるようにしてください。また、ブリッジ部が水平に保たれるように注意してください（図7）。

発熱体を支えるチューブも発熱体と水平になるようにしてください。水平に保たれていないと、安定して発熱体を支えることができず、早期の破損につながる場合があります。

ただ実際には、水平を保つことは困難であるため、弊社では水平位置を自動的に保つためにブリッジ部にピボットピンを取り付けた発熱体も特別に用意しています。このピボットピンにより発熱体は自由に動くことができ、ブリッジ部への機械的ストレスを緩和することができます。別の方法としては、アルミナチューブを図7のように標準のブリッジ部の下に置く方法があります。これにより発熱体に対してブリッジが自由に動くことができます。

水平設置は端子とブリッジが同一平面上にくるように設置してください。ブリッジ部を立てた形の水平 縦置きは、発熱体が高い場合には可能ですが、基本的に発熱体両端を均等に支えることが難しいため推奨しません。

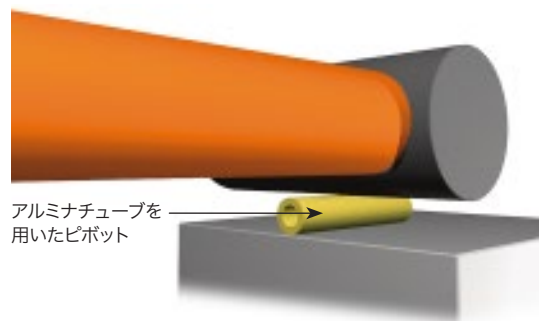
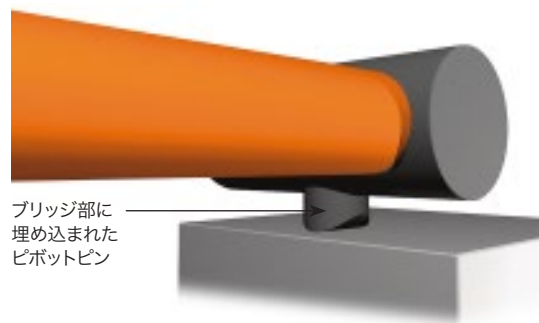
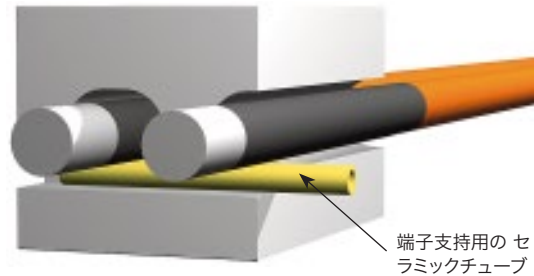


図7 典型的な水平設置方法

発熱体の設置間隔

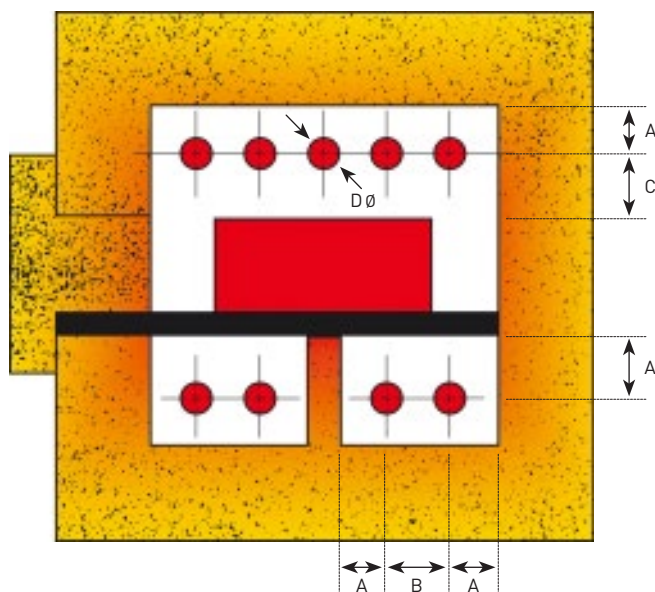
発熱体の設置間隔は最低でも直径の2倍程度、できれば2.5～3倍程度が望ましいです。発熱体中心と炉壁の間隔は発熱体直径の1.5倍、発熱体と被発熱体の間隔は発熱体直径の2倍確保してください。均熱性を上げる場合（特に発熱体の隣接間隔が広い場合）には発熱体と被発熱体の距離は更に広げたほうがいいです（図8参照）。

マルチレッグの発熱体の場合には隣接するブリッジ間の距離を最低15mm確保できるようにレッグ間距離を最低距離よりも更に広げたほうがいいです。

グローバSD発熱体の抵抗温度特性

カンタルのSiC発熱体は金属発熱体よりも高い抵抗率を有しており、より高い表面負荷で使用できます（表面負荷：発熱体表面の単位発熱量（W/cm²））図9に抵抗率-温度特性を示します。

グローバSD発熱体は室温においてはばらつきを持った高い抵抗率を有しますが、温度が上昇すると同時に下がり始め、約700°Cにおいて抵抗率が一番低くなります。そして700°Cを超えると、温度と共に上昇する特性を有しております。図9の点線に示すような低温時の抵抗ばらつきは不純物量のわずかな違いから生じており、室温時の抵抗測定結果と実際の動作温度での抵抗値とは何ら相関はありません。したがって、抵抗測定は常に1000°C以上の一定温度下において行わなければなりません。その抵抗測定は、通常、印加電圧をそれぞれの発熱体に流れる電流値で除算することで求めます。



- A = [1.5 × D] = 発熱体中心部から炉壁までの最小距離
- B = [2 × D] = 発熱体中心間の最小距離
- C = [2 × D] = 発熱体中心部から炉床板、あるいはワークまでの最小距離
- D = 発熱体直径

炉床板の下部から加熱する場合には、炉床板は出来る限り薄くし、かつ、その熱伝導率は最低14W/mK以上のものを使用してください。

炉床板のオーバーヒートを防止するために出力制限が必要な場合もあります。

図8 推奨の発熱体設置間隔

電気仕様

別紙サイズリストに記載されている定格抵抗値は発熱体温度が1000°Cにおけるものです。

抵抗値は通常±15%の公差をもっています。この定格抵抗値は電力供給する際の電圧変動範囲を計算する際に使用され、最低許容抵抗値は最大許容電流を計算する際に考慮します。詳細については後述します。

テスト時の印加電圧値と電流値はそれぞれの発熱体に出荷時にマークされていますが、これは開放大気中で発熱体を1000°Cまで上げた際のそれぞれの測定結果です。これらの値は抵抗値をあわせる際に用いられます。記載されているテスト電圧値はキャリブレーション用途のみのものであり、未使用発熱体に印加する最大の推奨電圧はマークされている電圧の80%以下にしてください。

別紙のサイズリストには標準の発熱体サイズが記載されていますが、発熱部の長さが違うなどの非標準品についても製造することができます。

(1000°Cでの抵抗を100として規格化)

定格抵抗値 (%)

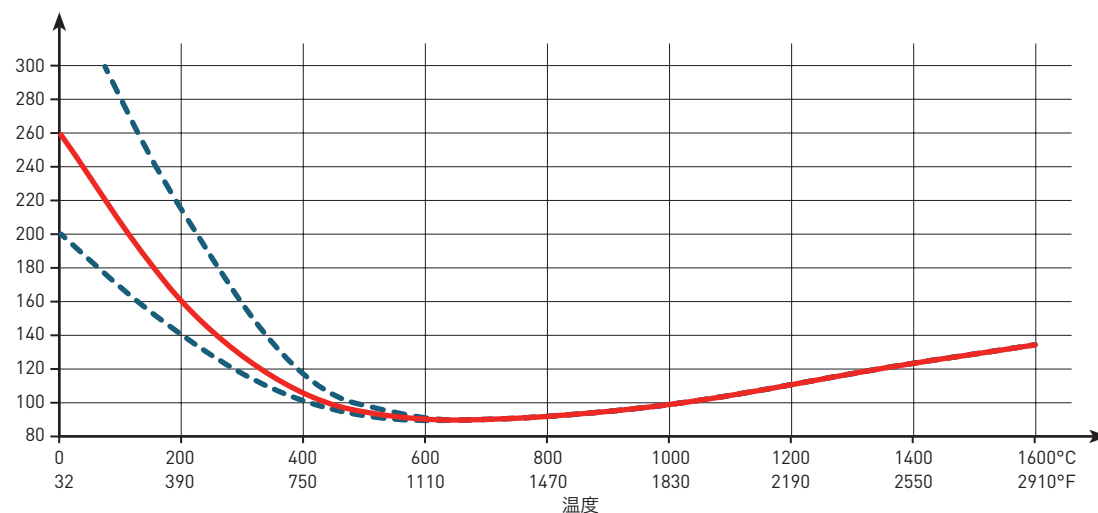


図9 典型的なR/T (抵抗温度) 特性

発熱体の経年変化特性

すべてのSiC発熱体は使用するにつれて抵抗が増加します。この増加率は以下の項目に強く影響を受けます。

- 炉内温度
- 発熱体表面負荷値 (W/cm²)
- 発熱体周辺の雰囲気
- 運転方法 (連続運転/間欠運転)
- 運転実績と運転制御方法

一般的な指標として、グローバSD発熱体は、大気中の連続運転にて1000時間あたり1,400°Cで5~6%程度、1000°Cで3%程度の抵抗値増加率を持っています。ただし、雰囲気、運転方法などの条件を変更すれば上記の抵抗増加率の結果も大きく変わりますので注意が必要です。

発熱体の表面負荷

SiC発熱体は電力に関しては明確な定格がなく、定格電力は求められる温度、発熱体を使用する雰囲気、そして、運転方法などで決まります。

W/cm²で記載される表面負荷値はそれぞれの発熱体の電力を発熱体表面積で割ることで求めます。この値については別紙サイズリストに記載されています。計算する場合には以下の式で求めます。

$$\pi \times D \times L$$

Dは発熱体の外径 (cm) で、Lは発熱体の発熱部長 (cm) です。

発熱体の温度は発熱体に印加される表面負荷に直接比例します。したがって、炉設計の際には、長寿命化観点では、炉の仕様を満たし、かつ、極力低い負荷値に設定すべきであり、その値は、おおよそ通常3~8W/cm²の範囲になります。

図10に炉内温度、発熱体の表面負荷、発熱体温度の関係を示します。たとえば、炉内温度1400°C、発熱体表面負荷値が5W/cm²の場合には発熱体温度は1450°Cになります (赤のラインに相当します)。また、炉内温度1100°C、発熱体の表面負荷値が6W/cm²の場合には発熱体温度は約1200°Cになります (茶色のラインに相当します)。

グラフの曲線部分は大気中でのそれぞれの表面負荷値の最高発熱体温度を示していますが、これらの値はあくまでもガイドラインであり、最高発熱体温度で使用する場合にはできるだけ低い表面負荷値を用いるべきです。また、還元性雰囲気や、その他のプロセスガス雰囲気においても、できるだけ低い表面負荷値を用いるべきで、その温度については図11に示す通りになります。最小推奨表面負荷は3W/cm²です。この負荷以下の場合には、炉内温度が低いと発熱体温度が600°C以下となり、発熱体抵抗値が高くなるため、加熱に必要な電圧も高い値が必要となるので注意が必要です。

通電手順

あらゆるセラミックス材料は急速加熱に対し弱く、比較的サーマルショックに強いグローバSD発熱体においても、低温から加熱する際には印加する電圧をリミットまで上げる際には、発熱体の加熱速度には注意が必要です。

各発熱体にマークされている電圧以上は決して印加しないように注意してください。一般的には、それよりも低い電圧を以下の式から求めます。

$$V = \sqrt{WR}$$

Wは各発熱体の設計電力 (W)、Rは標準抵抗値です。

使用温度の制限

グローバSD発熱体は大気中においては最大で炉内温度1600°Cまでで使用できますが、雰囲気ガス下においてはこの上限温度を下げる必要があります。炉温の最低温度制限はありませんが、発熱体温度が900°C以上になるように発熱体の表面負荷値を設定してください。

RECOMMENDED ELEMENT LOADINGS FOR KANTHAL GLOBAR SD OPERATED IN AIR

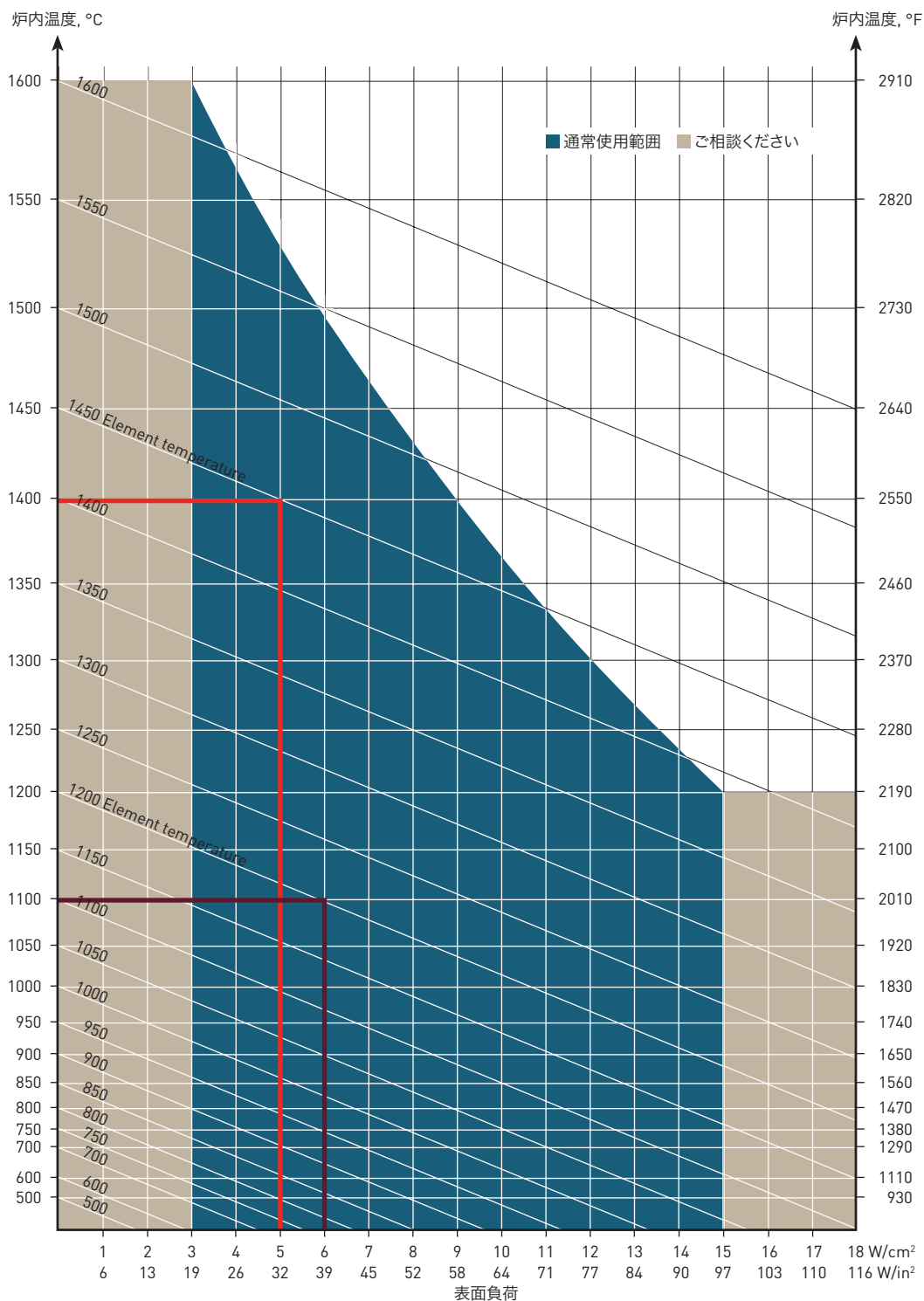


図10 表面負荷チャート (表面負荷と炉内温度、発熱体温度との関係)

耐雰囲気特性

グローバSD発熱体はクリーンの大気下での使用がもっとも適していますが、多くのプロセスガス下においても使用することができます。SiCの酸化は大気中では容易に行われます。酸化物である二酸化珪素（シリカ：SiO₂）はSiC粒の表面に安定的なアモルファスの状態で形成され、その後の酸化反応を遅らせる働きを持っています。これはシリカの層が酸素の拡散を防いでいるためです。この低速酸化プロセス（Passive Oxidation）には酸素濃度で最低1%以上を必要とし、これよりも低い酸素濃度下においては、安定したシリカの層が形成されないために、高速酸化反応（Active Oxidation）が起こります。

高速酸化反応は水蒸気雰囲気でも発生します。これはシリカが水蒸気雰囲気においては結晶状になり、保護層として機能しなくなるためです。水蒸気にさらされた発熱体は、短期間であっても、かなりダメージを受け、その後に大気雰囲気に戻したとしても決してもとの酸化皮膜の状態には戻りません。したがって、炉は発熱体を設置する前に、必ず乾燥処理をし、その際に発熱体が必要である場合には、必ず十分に炉の換気が行われていなければなりません。水蒸気が炉内に蔓延することは避けてください。

グレースト（Glazed）処理されたグローバSD発熱体は水蒸気が発生しうる環境では非常に有効です。特に、発熱体をレンガや耐火物に初めて設置する場合で、水蒸気が発生が避けられないような際には、最低限、最初の発熱体にはグレースト品を用いることをお勧めします。

グローバSD発熱体は希ガス雰囲気、還元ガス雰囲気においても、最高発熱体温度に制限はありますが、十分使用することができます。

たとえば、純水素雰囲気では、現実的な使用環境における最大発熱体温度は約1200°Cです。水素濃度が低くなれば、最大発熱体温度は上げることができ、商業ベースでよく用いられているエンドガス雰囲気、エクソガス雰囲気においては1300°C以上でも十分使用可能です。純窒素雰囲気では炉内温度が1300°Cを超えるとシリコンの窒化反応が起こります。純酸素雰囲気でも使用可能ですが、若干酸化速度が速くなります。また、純酸素雰囲気下ではアルミニウム製の結線ブレードが発熱反応しますので、これを避けるために端子部は雰囲気から保護するなどの処理が必要になります。図11にさまざまな雰囲気に対する最大推奨発熱体温度を示します。

その他の揮発性のプロセスガスについてもSiC表面かシリカの保護膜にダメージを与えることで発熱体の寿命に影響を与えます。アルカリ性ガス、ハロゲンガス、金属酸化物、あるいは、ハロゲン化合物は特に反応性が強く、浸蝕を最小限にするために注意が必要です。例えば、ファーンズチャンバーに十分な換気システムを設置したり、発熱体に接触する反応性ガスの量を最小限にするなどの方策を取ります。

また、換気システムは、発熱体の貫通穴に揮発性物質が凝縮するのを防ぎます。貫通穴に揮発物質が凝縮し、固着すると、結果的に発熱体の動きが妨げられ、破損につながります。

MAXIMUM ELEMENT TEMPERATURE IN VARIOUS ATMOSPHERES

雰囲気	最大発熱体温度		詳細
	°C	°F	
大気	1625	2950	3ピース品の場合には1500°C
純酸素	1500	2730	大気よりも酸化速度が速くなります
窒素	1350	2460	1350°C以上においてはSiCの窒化反応が起こります
ドライな水素	1200	2190	露点が高い場合には酸化反応が起こります
ドライな発熱型ガス（エクソガス）	1400	2550	ガスの組成に依存します
ドライな吸熱型ガス（エンドガス）	1250	2280	ガスの組成に依存します
真空	1200	2190	一般的に非常に短い期間の使用に限ります

図11 各雰囲気下における最大発熱体温度

上記の方法などで多くの場合には揮発物質による発熱体への侵食を最小限に抑えますが、非常に深刻な場合には、耐火物や、金属チューブに発熱体を収めて使用する場合があります。この場合には、発熱体の温度はかなり高くなります。特にセラミック製の場合には放射率と熱伝導率が極端に低いために、これが顕著となり、発熱体のオーバーヒートを避けるため、負荷を下げる必要があります。雰囲気中に炭化水素化合物を含む場合には、電気伝導性のあるカーボンが炉壁、耐火物の隙間や発熱体自身に堆積することによって電力供給回路が短絡する可能性があります。

この問題はガス中に含まれるカーボンの量をコントロールすることによって軽減することが可能ですが、できれば、定期的に炉を開放し、酸素を導入し、堆積したカーボンを燃焼させることが望ましいです。ただし、高温に晒されない部分に堆積したカーボンは上記の方法でも燃焼させることが出来ないために取り除くことが出来ません。

コーティング及びグレージング処理

さまざまな運転環境下で寿命を延ばすために特別な表面処理を施した発熱体も開発されています。特に化学反応による浸蝕は深刻で、それぞれのケースに対応した製品をご用意させていただいておりますので詳細についてはご相談ください。

連続運転及び間欠運転における注意事項

グローバSD発熱体は連続運転、間欠運転ともにご使用いただけますが、炉内温度1400°Cかそれ以上の温度での連続運転が寿命を最大化するという意味では適しています。約900°C以下になるとシリカ膜の体積変動によりシリカの保護層が剥離し、SiCが酸素に直接晒され、結果、再び高速酸化反応が起こり抵抗値が増加します。実用上差し支えなければ、非生産時の期間は約900°C程度に炉内温度を保持することが望ましいです。

1400°C以下の炉内温度においては、シリカの成長速度は比較的遅く、周期的な運転による劣化の影響は少なく済みます。特に周期が短い場合にはこれが顕著です。1400°C以上における間欠運転でも相応の寿命は期待できますが、この温度領域のアプリケーションにはグローバSG発熱体（スパイラルタイプ）が適しています。



電力供給

グローバSD発熱体は通常の抵抗負荷体と見なせますので、一般的な電気法則を適用できます。すなわち電圧V、電流I、電力W、抵抗をR (Ω) とすると

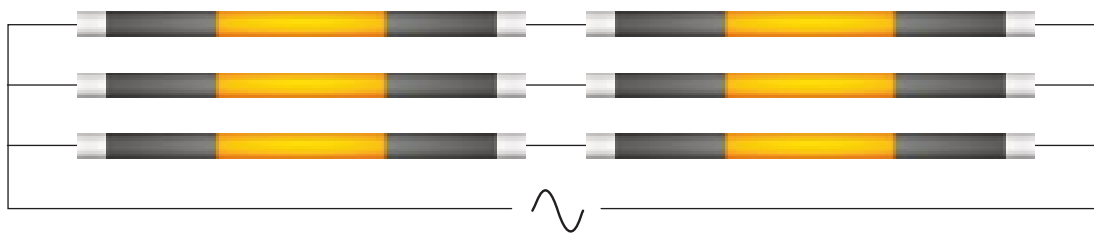
$$\begin{aligned} V &= IR = \sqrt{WR} = \frac{W}{I} \\ W &= VI = I^2R = \frac{V^2}{R} \\ I &= \frac{V}{R} = \sqrt{\frac{W}{R}} = \frac{W}{V} \\ R &= \frac{V}{I} = \frac{V^2}{W} = \frac{W}{I^2} \end{aligned}$$

発熱体を最適な環境で使用するためには、発熱体の結線、制御、設置を適切に行う必要があります。

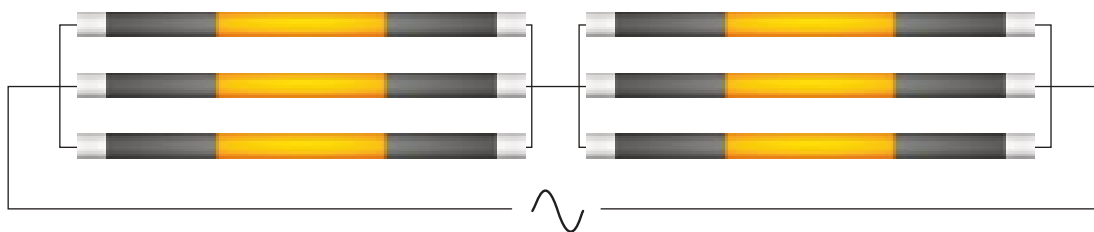
発熱体結線方法

グローバSD発熱体は並列結線、直列結線、あるいはそれらの組み合わせで使用しますが、並列結線が結線方法としては理想的です。並列結線の場合には各発熱体間に抵抗値のばらつきがあったとしても、使用中にそのばらつきは吸収される方向にはたります。一方、直列結線の場合にはばらつきが存在すると、使用中に更にそのばらつきが拡大する方向に進み、発熱体の寿命を縮める結果になります。グローバSD発熱体の抵抗増加はかなりゆっくり進むため、抵抗ばらつきの影響は比較的軽微で、各発熱体の抵抗値が十分マッチングが取れていれば、4本までの直列結線は問題ありません。

ただし、炉内温度が1400°Cを超えるような場合には直列結線の本数は2本までに制限してください。直列-並列結線の組み合わせは現実的には最も効果的な使用方法になります。この場合には、直列結線したものをそれぞれ並列に結線する方法にしてください。並列結線したものを直列結線するとある一本の発熱体が破損した場合に並列結線した残りの発熱体に、多くの電流が流れてしまうために推奨いたしません。



推奨の直列並列結線



もうひとつの直列並列結線

図12 直列/並列 組み合わせ結線

3相結線の場合には、スター結線（Y結線）とデルタ結線（ Δ 結線）がありますが、スター結線の場合には、各相間抵抗に関係なく、バランスを取るために4本線による供給方法が理想的です（1本が中性線）。3本のみによる供給方法を取らざる終えない場合には各発熱体の抵抗値は十分にマッチングが取られている必要があります。

発熱体結線時の各発熱体の抵抗ばらつき

直列結線の場合には、各発熱体の抵抗値のばらつきは5%以内に抑えることをお勧めします。一方、並列結線の場合にはそれが10%以内まで緩和されます。

使用後間もない期間で発熱体が破損した場合には、通常、持っているスペアの中で一番抵抗値の高いもの（電流値の低いもの）を選択して交換します。比較的長期間使用後に発熱体が破損した場合には、制御グループの発熱体すべてを交換することが望ましいです。同一結線内に発熱体が新旧混在すると、抵抗値のばらつきが大きくなり、新しい発熱体、もしくは、古い発熱体に過剰な負荷がかかることになり、結果的に全体の発熱体の寿命を縮めてしまうためです。

使用中の抵抗のマッチングを容易にするために、現実的には比較的小さな制御グループに分割したほうが良いです。たとえば、合計48本の発熱体を炉に設置する場合には、1グループ16本を3グループよりも1グループ6本を8グループに分割したほうが、抵抗値のマッチングを取る際に単純化でき、使用上融通がききます。

グループの全体の発熱体を交換した際には電源を投入する前に、電力供給している電圧の出力値を適切な値に戻してください（タップの設定を戻すなど）。一瞬であっても過剰な電圧が発熱体に印加されると取り返しのつかないダメージを発熱体に与える可能性があります。

古い発熱体は同一期間使用した発熱体と一緒に保管しておく、後々再使用することができますが、発熱体を炉内から取り出す前に、可能であれば、使用時の電圧値、電流値を控えておき、取り出した発熱体の端子部にそれを記載しておく、後々再利用時に抵抗のマッチングを取るのに役立ちます。室温における発熱体の抵抗値はなんの意味も持たず、抵抗値測定は必ず1000°C以上の一定温度にて実施してください。

タイプの違う発熱体を同一の制御グループに結線すると、抵抗値の違いから、どちらかの発熱体に過剰な負荷がかかりますので決して行わないでください。

どちらの発熱体に過剰な負荷がかかるかは、結線方法によって異なります。

電圧マージンについて

使用中の発熱体の抵抗値の増加を補うために通常は電圧可変の電源装置（トランス）を使用します。どの程度の変電圧幅を持たせるかどうかは、発熱体の抵抗増加率と期待寿命に依存しますが、一般的には新品の発熱体の寿命を全うするためには、50-100%程度を確保します。

たとえば、新品の発熱体に最大負荷を与えるのに125V必要な場合には、100%の電圧マージンを確保するためには125V~250V、50%なら125V~187.5Vが必要になります。

1400°C以上の高温で長期間使用する場合や、低温であっても炉の運転条件によって発熱体の抵抗増加率が極端に高い場合には100%程度の電圧マージンをとることを推奨します。一方、発熱体温度が低い場合や、運転頻度が低い場合は50%かそれ以下でも十分な場合もあります。

電力供給設備

使用期間中、設計上の電力を常に確保するためには、通常、可変の電圧設備を用います。発熱体の性能を十分に引き出すためには装置の選定は非常に重要です。

電力供給設備には以下のようにさまざまなものがあります。

1. 可変出力トランス
2. サイリスタ制御（SCR）
 - a. 位相角制御
 - b. サイクル制御
3. サイリスタ/トランス制御
4. 直接結線法

一般的にタップ付きのトランスは、サイリスタとの組み合わせで使用しない場合、ON/OFF制御の役割をします。装置自体は頑丈で、電気的には短期間の過剰負荷には応答しません。また重量的に重く、スペースをとり、比較的高価であるのが一般的です。

サイリスタ制御は、よりコンパクトで、電力を連続的に調節でき、3相制御で温度を精密に制御することができる反面、大きな定格値を持ったサイリスタが必要で、さらには、制御時に電力供給ラインに対して外乱となる場合があります。

通常はサイリスタ制御のみで50%以上の電圧マージンをとることは現実的ではありません。最も高価な方法ですが、3相制御で大きな電圧マージンが必要な場合の最適手段は、サイリスタと可変電圧幅をもったトランスを組み合わせる方法です。

サイリスタのみの制御は一般的に低温用途の炉、実験炉や抵抗増加率が極めて低い場合に用いられます。

産業用の高温連続炉の場合で、大きな電圧マージンと正確な温度制御が求められるような炉の場合には、パフォーマンスの観点で、サイリスタ/トランスの組み合わせ制御を用いることがベストです。

1 可変出力トランスを使用する場合

小さなラボや実験炉などでは連続的に電圧を可変するトランス（スライダック）がよく用いられますが、通常高価であり、大型炉には向きません。通常はマルチタップ型のトランスを使用するほうが経済的です。タップ付きトランスの電圧ステップ間隔は初期投入電圧の7%を越えないように設定します。初期投入電圧は $V_{max} = \sqrt{WR}$ で計算されます。Wは炉の設計電力、Rは発熱体の標準抵抗から計算した炉全体の抵抗値です。

トランスの2次側の最大電流能力を決定するには常に発熱体の抵抗ばらつきを考慮する必要があります。トランスの2次側の最大電流は

$$I_{2nd} = \sqrt{\frac{W}{R_{min}}} \text{ で計算されます。}$$

例えば、炉全体の容量が5kWでグローバSD発熱体を使用し、全体の抵抗値が 2Ω ($\pm 15\%$) の場合に、トランスの仕様は以下のように計算されます。

$$\begin{aligned} \text{定格最大電圧は} \\ = \sqrt{WR} = \sqrt{5000 \times 2} = 100 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{電圧ステップ間隔は} \\ 100\text{Vの}7\% = 7\text{V以下にします。} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{最小合成抵抗（規格内で最も低い抵抗値）は} \\ = 2\Omega (-15\%) = 1.7\Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{なので、最大2次電流は} \\ = \sqrt{\frac{5000}{1.7}} = 54 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{必要な最小電圧は} \\ = \sqrt{5000 \times 1.7} = 92 \text{ V} \end{aligned}$$

となります。
電圧マージンを100%とすると仕様は以下ようになります。

入力：単相（供給電圧を満たすように）
出力：92Vから197Vまで7V刻み、15ステップ
（4つの粗調整×4つの精調整）
供給能力：5kVA（92V下限、最大2次電流54A）

(II) タップ付きトランスを使う場合には、タップ変更の際に発生する出力の減少を許容するように設計しなければなりません。たとえば、7%の電圧タップの場合には次のタップに切り替えられるまでの間電力は約12.6%落ちることになります。

1stタップの使いはじめと2ndタップ切り替え直後の電力は等しいので

$$\begin{aligned} \frac{V^2}{R_1} &= \frac{(1.07V)^2}{R_2} \\ - \frac{R^2}{R_1} &= 1.07^2 \end{aligned}$$

（R1は初期の抵抗、R2は次のタップに切り替える直前の抵抗）したがって使い始めと切り替える直前の電力の差は

$$\begin{aligned} \frac{V^2}{R_1} \\ \frac{V^2}{R_2} \{1 - (1/1.07^2) \times 100\} = 12.6\% \end{aligned}$$

(III) 92V以下のタップも状況によって必要な場合もあります。

(IIII) 電流計は電圧が一定である1次側回路に設置してください。この表示電流値から2次側の電圧設定値に依存せず、発熱体全体で消費される電力が算出することができます。

2 サイリスタ制御を使用する場合

サイリスタは主電源を高速にON/OFFスイッチングすることで発熱体への平均出力を制御する半導体デバイスです。それぞれのサイリスタは一方方向のみに電流を流す性質があるので、これをペアで逆方向に設置することでAC（交流）電源を制御することができます。サイリスタは適切なドライバユニットや温度調節コントローラから与えられるパルス信号によってスイッチング制御されます。

サイリスタ自体は非常にシンプルな装置で、通常は閉ループのフィードバック制御によって供給電圧、負荷特性などのばらつきを補償するように制御をかけます。

一般的な制御モードとしては、電流の2乗フィードバック (I2)、電圧の2乗フィードバック (V2)、電力フィードバック (VI) などがあります。

多少の例外はありますが、通常、電圧の2乗フィードバック (V2) がSiC発熱体には適しています。

電流制御の場合、抵抗の増加と共に発熱体への負荷を増やす傾向があります。電力制御、電流制御ともに発熱体の抵抗値が非常に高い場合に低温状態から加熱すると発熱体に大きなダメージを与える可能性があります。負荷抵抗値が高い状態で、電流制御、あるいは電力制御をかけると発熱体に最大電圧をかけようとするため、その最大電圧が発熱体の許容最大電圧を超える場合に問題になります。

電圧制御の場合には、電力供給は発熱体の抵抗温度特性によって制御されるので、比較的低い出力からスタートし、発熱体が過熱され始めると徐々に出力が上がるようになります。

サイリスタの出力特性は制御方法によって決まります。以下が典型的な2種類の制御方法です。

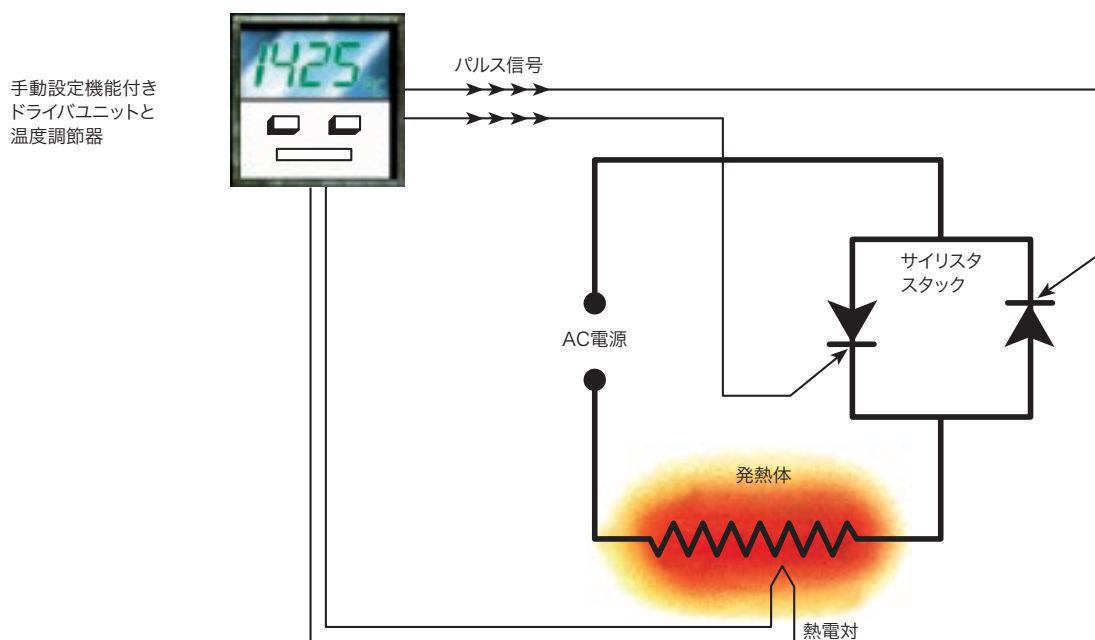


図13 サイリスタユニット

2.1 位相制御

位相制御のサイリスタはAC電源周期の半周期に1回トリガをかけ、電流値がゼロクロスする時点でスイッチをOFFにします。このようにして、交流サイン波を打ち抜き、サイリスタ出力段での実効値を最大出力値から絞り込みます。SiC発熱体の制御の場合、サイリスタの出力に制限をかけておき、抵抗増加と共にこの制限値を調整していきます。これにより、発熱体にかかる推奨電圧を超えないように制御します。

位相制御の場合には電流制限を設ける場合があります。これによりサイリスタに何らかの原因で設定電圧と関係ない過剰な電流が流れた場合にもサイリスタの破損を防ぎます。ただし、この電流制限は発熱体への制御には用いないでください。電力 (I^2R) は発熱体の抵抗値が増加すると共に徐々に増加し、低温から過熱した際には発熱体に過度の負荷がかかった結果、発熱体にダメージを与える可能性があります。

位相制御サイリスタは滑らかで急激な変化のない出力電圧を実現できるのでSiC発熱体の制御には理想的です。しかしながら、同時に高周波による信号干渉、波形歪みを引き起こす可能性があります。位相制御サイリスタを使用する場合には上記の可能性を考慮する必要があります。位相制御サイリスタの使用は国によっては、法律で厳しく制限される場合もあります。

電流がまったく流れないと、負荷を制御する位相角が不確かな出力を発熱体を与える可能性があります。出力位相角が非常に小さい場合には大型の設備に大きな影響を与えかねないので、一般的には新品の発熱体を使用した状態での初期の2次側の出力電圧が供給電圧の60%以下にならないようにします。

供給ラインのケーブルは発熱体に流れる実効値を満たすように選定してください。(この電流値は (供給電力) ÷ (サイリスタ出力電圧) であって (供給電力) ÷ (供給電圧) ではありません)。初期投入電圧よりも電源電圧は高く設計されるので、高い電圧マージンを持たば持つほど、ケーブルにはより大きな定格のものがようになります。

3相制御の場合、第3次高調波成分の発生によって供給電源の波形が歪波形となって結果的に中性線に大きな電流が流れることがあります。スター結線3相4線回路の場合で最大で各相に流れる2倍の電流が中性線に流れます。したがって中性線はこの過剰電流に耐えうる定格のものを用いるようにしなければなりません。

3相3線のスター結線はこの問題を回避するために用いますが、この場合、相間電圧の不バランスが問題になります。特に各発熱体の抵抗値のマッチングが取れていない場合にはこれが顕著になります。大規模設備においては、供給電源の歪みを最小化するために6線オープンデルタの使用を推奨します。サイリスタはそれぞれの相電流を制御するように配置するため、クローズドデルタ結線のようにライン電流を制御するための大きな定格のサイリスタを必要としなくなるため、設置コストを削減できます。また、各相を個別に制御できるため、制御の自由度も高まります。

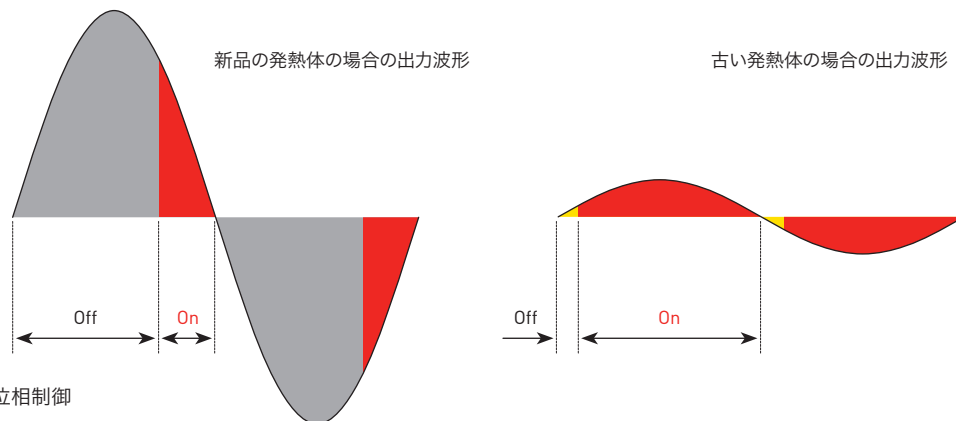


図14 位相制御

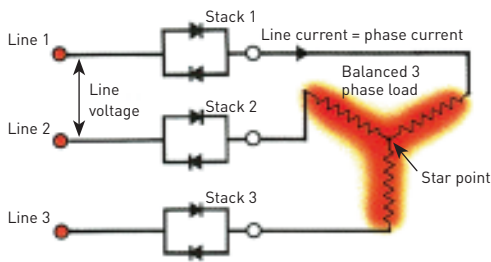
各サイリスタに流れる相間電流と電圧はトランスのみの場合の計算方法（抵抗値の公差を考慮に入れて、流れる最大電流を計算する方法）と同様の方法で計算することができます。

位相制御出力のモニタリング方法

ほとんどの電圧計、電流計では正確な実効値（RMS）を求めることができないので、間違っただけの過剰な負荷をかけるように注意が必要です。

現在出回っているデジタル式の測定器の中には正確に非正弦波形に対応するものもありますが、適切な装置かどうかは供給メーカーにご相談することをお勧めします。

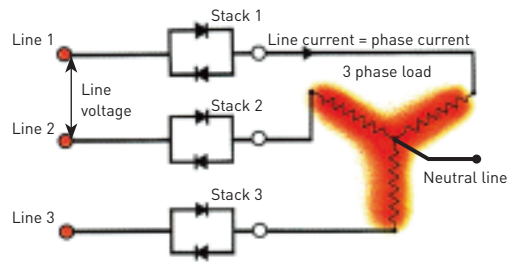
正確な実効値を求めるためには7以上のクレストファクタ（信号の実効値に対する最大値の比率）をもつホール素子を用いた測定装置の使用をお勧めします。



Three-phase, three-wire, star-connection (phase-angle firing)

スタック定格電圧 = ライン電圧 = 相電圧 $\times \sqrt{3}$
 スタック定格電流 = ライン電流 = 相電流
 注) 相抵抗と負荷はバランスが取れている必要があります。

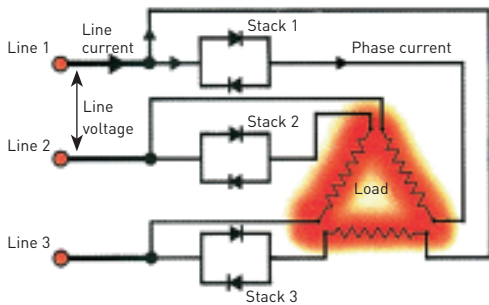
図15 3相3線スター結線（位相制御）



Three-phase, four-wire, star-connection (phase-angle firing)

スタック定格電圧 = 相電圧 = $\frac{\text{ライン電圧}}{\sqrt{3}}$
 スタック定格電流 = ライン電流 = 相電流
 中性線定格 = ライン電流 $\times 2$ (安全率を見て)

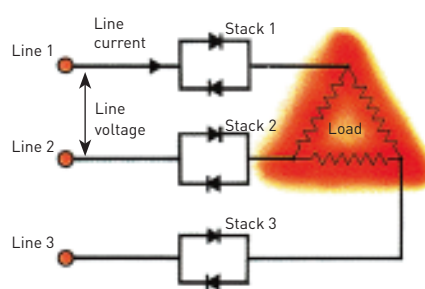
図16 3相4線スター結線（位相制御）



Three-phase, open delta connection

スタック定格電圧 = ライン電圧
 スタック定格電流 = 相電流 = $\left(\frac{\text{ライン電流}}{\sqrt{3}} \right)$

図17 3相オープンデルタ結線



Three-phase, closed delta connection

スタック定格電圧 = ライン電圧
 スタック定格電流 = ライン電流 = 相電流 $\times \sqrt{3}$

図18 3相クローズドデルタ結線

2.2 FAST-CYCLE 制御 (ON/OFF制御)

Fast-Cycle制御のサイリスタはサイクルの立ち上がりでトリガーがかかり、数周期ON状態となり、

その後、数周期OFF状態となる動作を繰り返します。これにより、実効的な入力信号を制御します。発熱体の抵抗増加と共に、手動でON/OFF期間の比率を逐次変更する必要があります。

発熱体にかかる平均出力が始動時の温度や雰囲気に対して推奨制限内に収まる場合でも、一時的にはそれぞれのサイクルでフル電圧が印加されるため、平均化された値の数倍の負荷が瞬間的に発熱体にはかかります。短期的にはこれによる影響はそれほどありませんが、長期的には抵抗増加の一因になり、発熱体の寿命に影響を与えます。したがって、発熱体にかかる負荷は、最大出力時でも15W/cm²を超えないように設計する必要があります。

このON時の瞬間的な出力の影響を少なくするために、ON/OFFの周期はできるだけ短く設定してください。例えば、50HzではON/OFF周期を30サイクル以下にします。

(50%出力) = (15サイクルのON期間) + (15サイクルのOFF期間)

低周期のサイリスタは数秒に一回程度の周期のため、SiC発熱体を直接制御するには適していません。ただし、従来の電気機器の接触器の代わりとして、タップ付きトランスの2次側に使われる場合があります。

単一周期でON/OFFを切り替えるタイプのサイリスタがSiC発熱体に適しています。すなわち、以下のように50%出力の場合には1サイクルづつONとOFFが切り替わるものです。(50%出力) = (1サイクルのON期間) + (1サイクルのOFF期間) サイリスタの定格電圧は供給電圧と同じか、それ以上にしてください。電流の定格については実効供給電圧 (RMS) を最小の合成抵抗値で割って算出してください。

(サイリスタ定格電流) = (供給電圧) ÷ (最小合成抵抗)
したがってON/OFF制御用のサイリスタの定格は位相制御のサイリスタの定格よりもずっと大きなものになります。

サイリスタからの出力を計算する場合、まず供給電圧の出力を求め、これとリミット制限のかかっているサイリスタのON/OFFの比率から求めます。例えば、供給電圧が200Vで全発熱体の合成抵抗

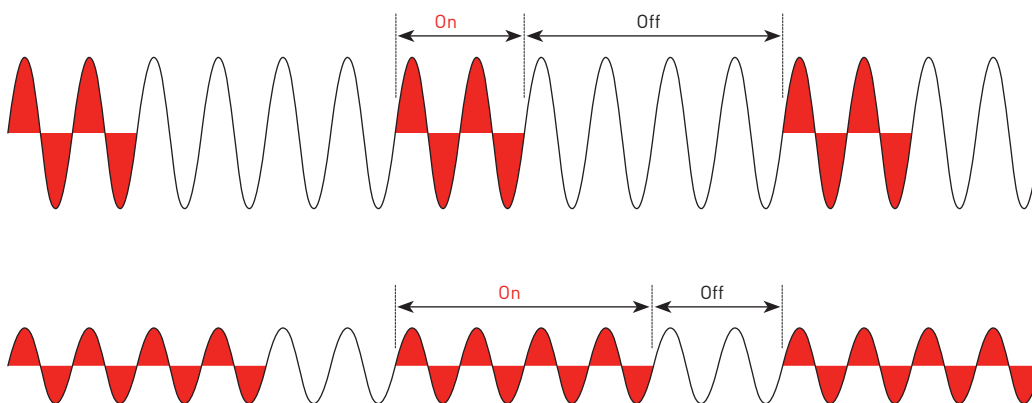


図19 Fast-Cycle サイリスタ出力波形

が4Ωの場合、出力は10,000Wになります(2002/4)もし必要な電力が5kWなら、サイリスタの出力も5kWである必要があります、サイリスタは50%出力に設定されなければなりません。(5kW/10kW) ON/OFF制御用のサイリスタは高効率であり、発熱体に対してはフル出力しかかからないため、主電源の累積的な波形歪みを生じません。ただし、負荷が高い場合には電圧が落ちる際に電圧フリッカを生じ、精密機器に影響を与える場合があります。

ON/OFF制御出力のモニタリング方法

電圧計や電流計でON/OFF制御時の正確な出力を得ることは難しく、多くの場合、実際のサイリスタ出力よりも小さい値を示します。したがって、間違えて発熱体に過剰な負荷をかけないように注意が必要です。

所望の出力設定は上記に示したとおり、既知の発熱体の抵抗値を用いて求めることができます。設定値に何か異常があった場合には設定をまず低出力状態に戻し、炉内温度を上げるのに必要な出力値が得られるまで調整します。この間、制御をかけないようにします。そして、設定された出力では発熱体の抵抗が増加することによって炉内の温度を保つことが出来なくなるまで(間欠運転の場合には目的の温度に達することが出来なくなるまで)設定値そのままにして制御をかけないようにします。

その後、再び十分な出力が得られるまで少しずつ設定値を上げるようにします。

3 トランスとサイリスタを組み合わせる場合

前述したようにサイリスタの使用にはある程度の制限があり、場合によって適切な電圧マージンをとることができないことがあります。その場合、適切な発熱体寿命を得るためにサイリスタとタップ付きトランスを組み合わせる必要があります。サイリスタはトランスの1次側でも2次側でも構いませんが、1次側に設置する場合には特に注意が必要です。トランスは多くの場合、2~3個のタップ付きのものを使用し、その間の調整をサイリスタで行います。

上記の組み合わせを用いる場合にはトランス、サイリスタの供給業者には、仕様段階で装置が求める性能を予め知らせてください。弊社は炉の設計に関しても技術的なサポートをさせて頂いておりますので、お困りの際は、発熱体の詳細仕様、出力、温度、供給電源などの情報と共にご連絡ください。

4 直接結線する場合

全発熱体の合成抵抗値が十分高く、発熱体に過剰な負荷がかからない場合に限っては、供給電源から直接結線する方法も可能です。ただし、初期の投入電力は本来必要な電力よりも高くなるように設計します。これにより、抵抗増加によっても、しばらくの間は所望電力よりも高い値を保つことができます。

(例:電源電圧200Vで10kW必要であれば、本来は合成抵抗は4Ωを選定しますが、直接結線の場合にはそれよりも低い値、例えば3.8Ωを選定します。すると、抵抗が4Ωに到達するまでは10kW以上の出力を保つことができます)

この方法は装置のコスト面では有利ですが、最小限のマージンしか確保できない上に、初期の過剰負荷を避けるために発熱体もかなりの数が必要になります。

ただし、経年劣化した発熱体の結線方法を変更することでマージンを広げることは可能です。

例えば、

(3本直列) × (2本並列) から (2本直列) × (3本並列) に変更

(2本直列のデルタ結線) から (2本並列のスター結線) に変更

ただし、そもそもの特性から、比較的低温のアプリケーション(例えば1100°C以下)や1300°C以上でも不定期に運転するバッチ式炉などに直接結線の使用は限るのが通常です。

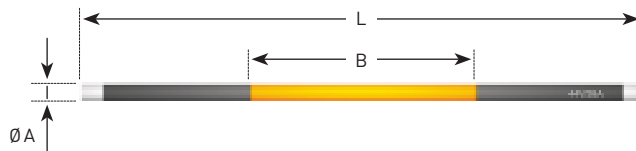


ご注文に際して

カンタルグローバSD発熱体を発注する際に必要な最小限の情報を以下に示します。

ロッドタイプ

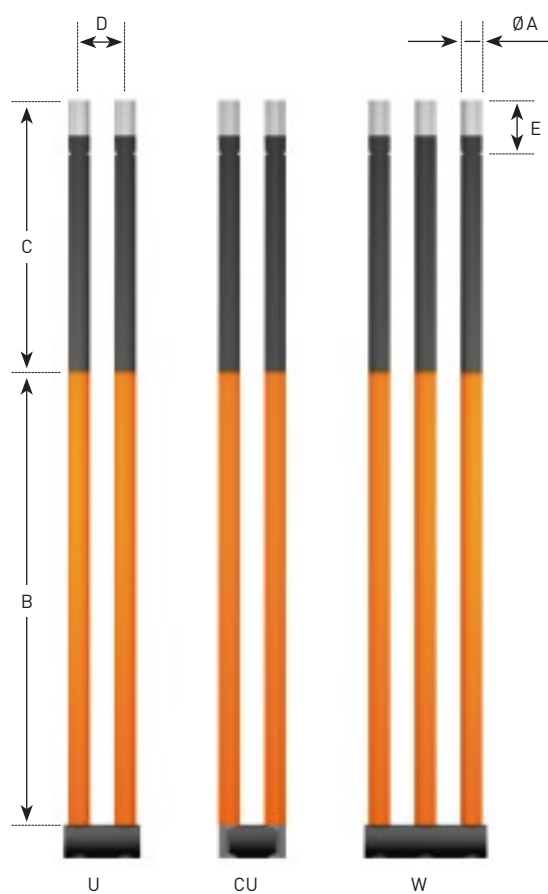
- エLEMENTタイプ (Globar® SD)
- 直径, mm ($\varnothing A$)
- 発熱長, mm (B)
- 全長, mm (L)
- 定格抵抗値, Ω



マルチレッグタイプ

- エLEMENTタイプ (Globar® SD-U/CU/W)
- 直径, mm ($\varnothing A$)
- 発熱長, mm (B)
- 端子長, mm (C)
- シャンク間距離, mm (D)
- スロット位置* (E)
- 定格抵抗値, Ω

*特に指定がない場合には標準の位置になります。



アクセサリ

以下のアクセサリを標準で取り揃えております。(詳細は別紙アクセサリリストをご参照ください)



LBブロック



SLスリーブ



CT1 クリップツール
スモールサイズ 直径
16mm以下用



CT2 クリップツール
ラージサイズ 直径
18mm以上用



HCクリップ



CCクリップ



Gクランプ



Dクランプ



D1ブレード



D2ブレード



S1ブレード



S2ブレード



Q1ブレード



Q2ブレード

