

2003/09/01

revised 2004/12/06

1100°Cマッフル炉製作記

固体地球研究センター・神崎正美
mkkanzaki@misasa.okayama-u.ac.jp

(これを見て作製して事故等起きても責任はもちません。質問等にはできるかぎりお答えします)

目的：セラミックスファイバーボードを使った1100°C程度まで加熱できるマッフル炉を作る。脱CO₂や仮焼用に使う。低融点のものならガラス合成にも使える。MoSi₂炉の混雑緩和も目的。自作とそれほど変わらない価格で買える安価なマッフル炉（実際にはコントローラ込みで考えるとそうでもない）もあるため自作する意義は何かというと、市販品はセラミックスファイバー一体ものであるため、ヒーターが悪くなると直すことが出来なく、全体を買い換えなくてはならない。自作だと悪くなった部分のみ取り替えればいため、安くつき長く使える。

Part 1：マッフル炉部

設計：時間もなかったためセラミックスファイバーボードと一体化しているヒーターユニットを使った。マッフル炉の場合、内面に6面ある訳であるが、市販のものは3－4面が発熱面になっているものが多いようである。今回の場合は上下面と左右側面の4面にヒーター付きのセラミックスボードを使うことにした。ヒーターのない前面は試料入り口になり、背面は熱電対と電線が集まることになる。炉内部空間は100x100x150mm程度になるようにする。少し奥行き方向を長めにとってあるのは温度勾配を考えてである。経験的にこの程度なら1kW弱程度の電力となる。

ヒーター：webで探して、坂口電熱で扱っていたものがサイズ的によさそうなので買った(http://www.sakaguchi.com/index_f.html)。ただ坂口電熱から直接購入は出来ないようであり、業者経由で買った。いくつかの形状(板、円筒、半円筒)があり、詳しい形状等がpdfになったものが上記ホームページから手に入る。スタンダード平型のもので、型番はVF-04A06Sの全端非発熱型タイプ8型を2枚、全面発熱型タイプ5型を2枚を買った。最も小さいサイズであり、ヒーター部分の大きさは102x152mmである。厚さは51mmと結構あるので、厚さ方向には別に断熱材を加える必要はなさそう。ヒーターのない端部分は幅50mm程度で、厚さと対応させていると思われる。したがって全端非発熱型タイプのサイズは203mmx254mmとなる。電線の取り出しはBリード(平板)にした。Photo1は左が全面発熱型タイプで、右が全端非発熱型タイプである。ヒーター面積自体は全く同じであるが、余白部分のあるなしで大きさが違う。左側は埋め込まれたヒーターがかすかに見える。メンテナンスの時写した写真なので少し汚い。



Photo 1. 2種類のボード（ヒーター部分は全く同じ形状）

このボードは1枚約2万円程度であった。納期6週間と言われたが、2週間弱で届いた。届いたボードを見ると結構形状はいびつであり、組み立てると傾いたりしそうなので、削った。ヒーター自体は元々ほとんど露出していないが、削ったので一部見えかかっているところがある。ボードにはWatlowと書いてある。Webで調べたところこのボードはWatlow社が作っているようだ (<http://www.watlow.co.jp/>)。その情報によるとヒーター材質はIron-chrome-aluminum合金とあるので、カンタル線と似たような組成であろう。最高使用温度1205℃となっている。許容ワット密度1.8W/cm²。

このボードの電圧は60Vで275Wとなっている（他に120, 240Vの規格）。4枚ボードがあるので、2枚ずつ直列で、それらを並列に配線するようにした。なので電源には120V欲しいところであるが、100V電源を使っても実際には1100℃まで問題なく到達した。

その他材料：

- 1) アルミアングル、アルミ板、ハンドル、ネジ等
- 2) セラミックスファイバーボード（フタと背面および隙間用）
- 3) セラミックス板 100x100mm（底敷き用）

組み立て

ヒーターは既にセラミックスポートと一体なので、基本的にはボードを組み立てるだけである。枠はアルミのアンクルと下、左右側面にアルミ板を使っていい加減に組み立てている（Photo 2）。全端非発熱型タイプ（大きい方）を上下に置いて、全面発熱型タイプを側面にする。そうすると側面の前後に隙間があるので、ここは手持ちのセラミックスファイバーボード（デンカアルセン）で埋める。あとは前に100x100mm（厚さ50mm）の開口部が残っている。ここは入り口なので、ファイバーボード（25mm厚）を100x75mmにカットしたもの4枚を重ねて、フタにする（Photo 3）。これもアルミアングルと電気パーツのアルミハンドルを使っている。これが開口部に入れられるように加工する。このままだとフタが落ちやすいので、アルミアングルをフタの下に来るようにフレームに取付、フタを支持する。炉後部はボードを2枚はめ込み、熱電対用の穴を開ける。ボードからのリード線（板状）は後部に集まるが、リード線に穴を空けて、2つ直列でそれらが並列になるように配線する（Photo 4）。熱電対の支え金具は別の電気炉の廃品の流用であるが、旋盤とボール盤で簡単につくれる。

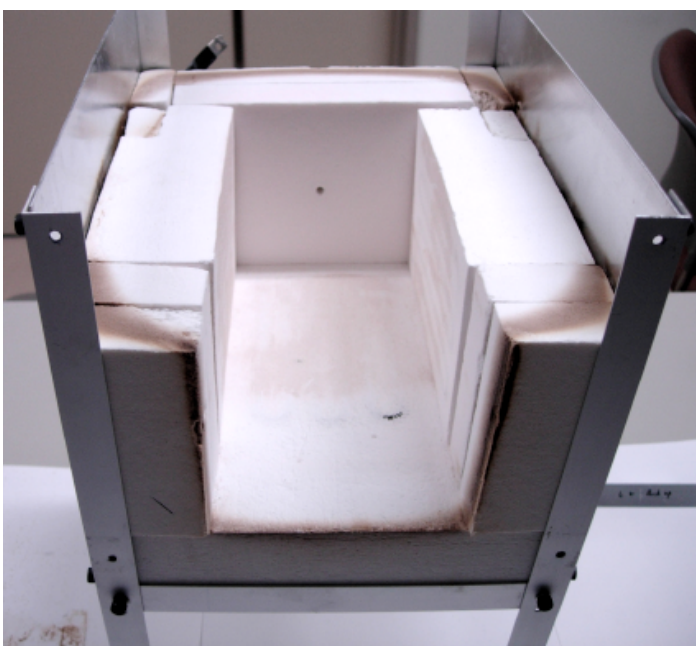


Photo 2. 組み立て途中



Photo 3. フタ部分（ボード4枚重ね）

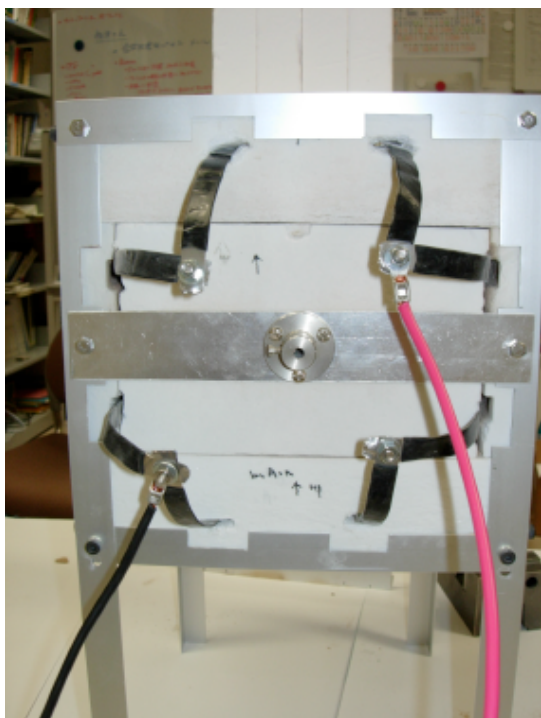


Photo 4. 背面（リード線の配線と熱電対取付具）

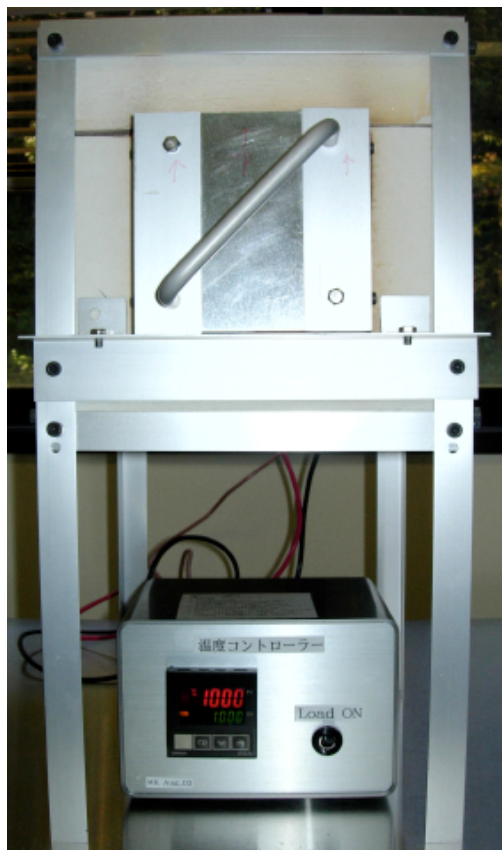


Photo 5. 加熱中の電気炉とコントローラー

Part 2：温度制御装置部



Photo 6. コントローラー前面

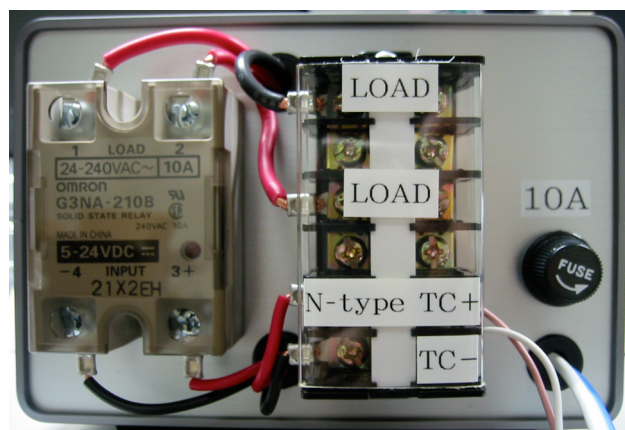


Photo 7. コントローラー背面

設計：上記のマッフル炉を制御する．上記の炉の場合本当は120Vの方がいいのであるが，適当なトランスもないので，電源は100Vとしている．比較的安価な温度調整器とSSR（ソリッドステートリレー）の組み合わせを使った．この炉の使い道から考えて，プログラム機能は付けなかった．熱電対と炉への出力の接続のためにケース外面に端子台を付ける．コントローラー自体の電源SWとそれ用のヒューズは省略．また電源ランプもなしで行う．熱電対はNタイプを使

う。このタイプはあまり使っているのを聞かないが、クロメル-アルメル（Kタイプ）熱電対と似た組成であり、Kタイプよりも寿命が長いということなので今回使ってみる。

マッフル炉はボード自体規格の総和が1kWを少し越えるため念のため20Aで設計した。が実際にはヒーター仕様の120V(60Vx2)はかけられないので、本当は最大7.7Aしか流れないはずなので、10Aでもよかったのではないかと思う。トランスを使えば120Vかけることもできるだろう。その場合は20Aの方が安心。

温度コントローラーパーツリスト：

1) 温調器（オムロンE5CN-QTC） 15000円。Nタイプ熱電対に対応していることと、SSR出力用で2自由度PID制御可能であることで選択。警報等のオプションもないプレーンなもので最も安い。プログラム機能はない。

2) SSR 20AでDC入力のもの（オムロンG3NA-220B DC5-24） 2900円。上記写真は最初別の電気炉用に設計したので、10Aのものが付いている。当然温調器の制御出力（電圧）がSSRの入力と対応しないとダメである。端子付きで便利そうなのでこれを選んだ。ゼロクロス機能と動作表示灯が付いている。今回はケース裏面の外部露出して取り付けであり、多少とも冷却を期待している。端子なしならもっと安いものがある。

3) ヒューズケースとヒューズ：20Aのガラス管型のヒューズは見つからなかったので、セラミック式ヒューズのものを使っている。1個100円（10個組）。ケースは入手経路不明だが200円くらいである。

4) 電源SW：単極(2P)でよい。定格20A以上のもの。500円くらい。ランプをつけるなら2連の4Pを使う。

5) ケース：タカチの100H,150W,120Dのもの。2900円。

6) 端子台：ケース内配線のために3Pのもの1つと、外部端子用に6Pのもの1つ。実際に必要なのはそれぞれ2Pと4P分である。定格20A以上のもの。それぞれ480円と720円。

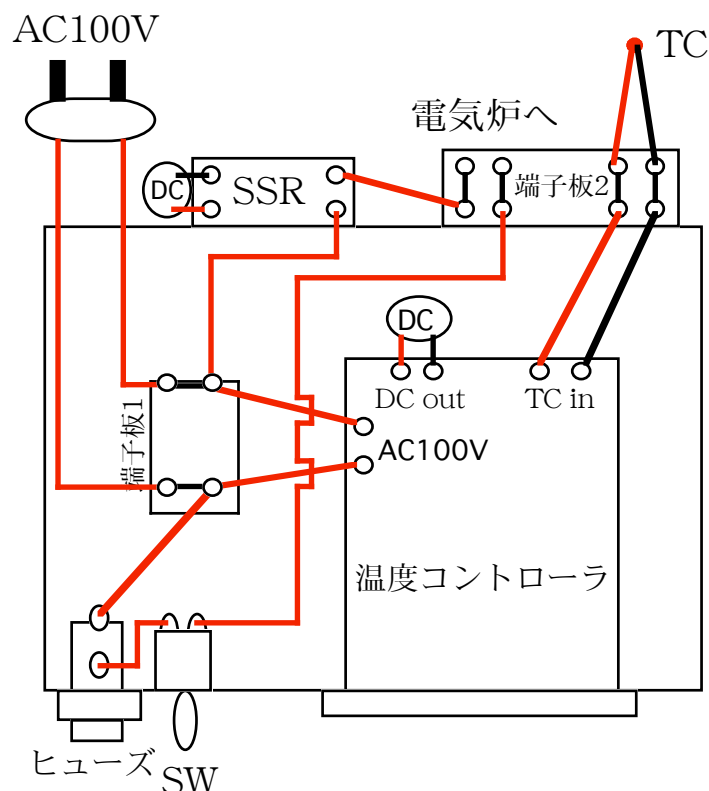
7) Nタイプ熱電対：シースタイプのものがRSにあった。MgOで絶縁されていて、1300Cまで使用可能。3340円。

8) その他：圧着端子、電線、ボルト、ナット、グロメットなど少々。
総額3万円弱くらい。

ほとんどアールエスコンポーネンツから購入した。価格はアールエスコンポーネンツの2004年のカタログから。

なのでこの電気炉で使った予算は約12万円程度となった。

実体配線図：



温度コントローラーの作成：

ケースを加工して、温度コントローラー、電源SW、ヒューズ用の穴を空ける。端子台、SSR取り付け用の穴を開ける。内部の端子台はケース底から貫通したボルトが外部に出て欲しくないので、ケースにタップでネジを切って、取り付ける。AC100V、熱電対、外部端子台への配線用の穴を空ける。

ケースにパーツを取り付けて、配線をする。ネジで締められるところは圧着端子で取り付ける。それ以外（ヒューズとSW部分）はハンダ付けする。熱電対の配線とコントローラーとSSR間の配線は直流なので極性に注意する。

配線を何度もチェックして、負荷をつなぐ前に電源をつなぐ。問題なくコントローラーが働いて室温を示せば、温度コントローラー側はとりあえずOK。電気炉を負荷としてつないで最終的なチェックする。

Part 3：マッフル炉のテスト

マッフル炉のテスト運転。コントローラーの出力部分に電気炉ヒーターとつなぐ。コントローラーの使い方はAppendixを参照。何の問題もなく1100℃まで加熱することができた。Photo 8は加熱中フタを取ったときの様子。炉自体は予め熱処理されているようで、加熱しても特に変化はなかった。ただフタや隙間に使ったボード（デンカアルセン）には有機バインダーが入っているので、加熱中それらが不完全燃焼して焦げ臭い。

この温度コントローラーの場合、出力している時間（ONの時間）の長さでPID制御する。現在何%の出力かは直接分からないが、ONである時間（これはOUT1と表示されている時間）を計ることにより大体何%であるか推定できる。上記の電気炉の場合、1000℃で50%程度、1100℃で60%程度であった。ちゃんと時間を計ったことはないが、1100℃まで30分以内に到達する。温度的にはヒーターの資料を見る限り、もう少し上げることは可能であろうが、寿命を考えると最高1100℃とした方がよさそう。オートチューニングを使ってPIDパラメータを決めた。炉の熱容量が小さいので、制御周期をデフォルトの20秒よりは短くした方がよさそう。

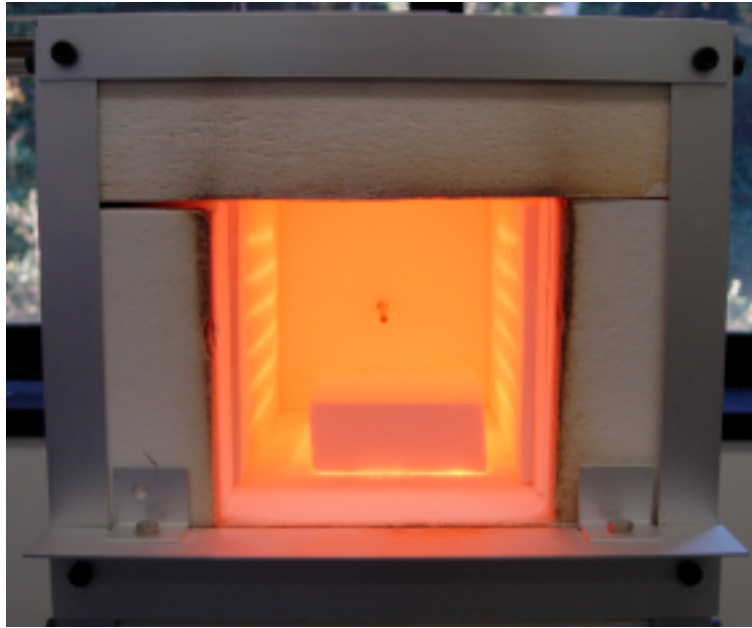


Photo 9. 加熱中の炉内の様子（フタを取った状態）

Appendix

温度コントローラー（オムロンE5CN-QTC）の使用方法

簡易マニュアル用（印刷してコントローラー上面に貼った）

左端：レベルキー；左から２番目：モードキー

- 1) 電源を接続
- 2) Load SW ON
- 3) 上下矢印SWで温度設定
- 4) 左下にOUT1が10秒毎に表示されれば正常に運転中.
StoPが表示されている時はモードキーを押してr-5で
上矢印キーを押してrUnにする
- 5) レベルキーを押すとAtモードと運転モードが切り替わる
- 6) At（オートチューニング）を使う場合はAtモードで矢印キーで
rUnにする. At中は設定温度が点滅する.
- 7) PID値を変更するにはAtモードでモードキーを押すと
PIDパラメータが表示される. inSは入力オフセットなので0にする.
- 8) レベルキーを3秒以上押し続けると初期設定モードになる.
このモードでは熱電対の種類 (in-t, N-type=8, K-type=0など) ,
上下限温度設定, 制御周期(CP)などが設定できる.
レベルキーを1秒以上押し続けると運転モードに戻る.