

## (続) ベーキング自動化システムの開発

川崎, 昌二  
九州大学応用力学研究所技術室

<https://hdl.handle.net/2324/14019>

---

出版情報 : 九州大学応用力学研究所技術職員技術レポート. 9, pp.62-70, 2008-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

## (続)ベーキング自動化システムの開発

九州大学応用力学研究所技術室 川崎昌二

### 1. はじめに

応用力学研究所高温プラズマ力学研究センター（平成 19 年 4 月、炉心理工学研究センターより改組）では、次期装置であるプラズマ境界力学実験装置（QUEST：Q-shu Univ. Exp. with Steady-State Spherical Tokamak）が平成 17 年度から建設が開始され、装置完成予定が平成 20 年 3 月である（この原稿の執筆段階では建設中）。また併行して、小型 PWI 実験装置（CPD：Compact PWI Experimental Device）を用いた研究を進めてきている。図 1 に QUEST の概念図と概略寸法を示す。

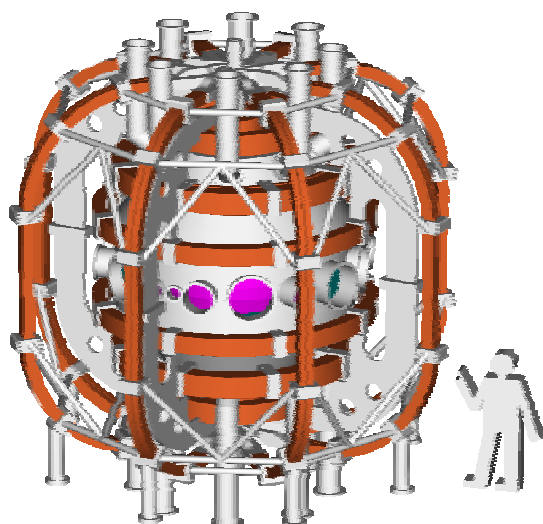
前回の応用力学研究所技術職員技術レポート Vol.8 で CPD の真空容器ベーキング自動化システム<sup>1)</sup>について報告したが、その後、次期装置 QUEST 用に新たに出力増強したコントローラの製作、及びプログラムの安定性、操作性の向上、機能の追加などの改良をおこない、平成 19 年 11 月までの CPD のベーキング及び実験（高温壁）において、本システムの温度コントロールや安定性等が確認できたのでその報告を行う。

### 2. QUEST 用ベーキングヒータ及び熱電対について

QUEST の高温プラズマ閉じ込め容器（真空容器）のベーキング温度仕様は 150℃ である。メーカーによるベーキングヒータの設計としては、真空容器の昇温時間を真空容器に保温材を取り付けた状態で 0℃ から 150℃ まで 10 時間（15℃ / Hour）とされている。なお実際のベーキングヒータ容量としては、約 2 倍の余裕を見て設計・製作されている。

ベーキングヒータは、4.8 kW のシーズヒータを真空容器の赤道面より上に 4 箇所、下に 4 箇所の合計 8 箇所に等分割された各セクションに 3 本ずつ合計 24 本取り付けられている。また熱電対も同じく各セクションに 2 本ずつ合計 16 本の K(CA) 型熱電対を取り付けられている。

各ベーキングヒータはすべて同じ仕様で、1 本あたりの容量約 1.6 kW、電圧 200 V である。したがってベーキングヒータの全容量は約 38.4 kW、各セクションでは約 4.8 kW である。



真空容器直径	2.8m
真空容器高さ	2.8m
装置高さ	約 6.6m
赤道面高さ	3.5m
トイダル磁場コイル直径	5m
トイダル磁場コイル本数	8 本

図 1 QUEST の概念図と概略寸法

### 3. ベーキング電源について

前回の技術報告にも記載したが、現在 CPD のベーキングには次に示すベーキング電源盤(1)及び(2)を使用しており、QUEST のベーキングにもこの電源盤を使用予定である。図 2 にベーキング電源盤(1)及び(2)の概念図を示す。

「ベーキング電源盤(1),(2)仕様」

- ・ 定格入力 : 三相 200V 75kVA、
- ・ 最大出力 ( 1 回路 ): 三相 21kVA 200V 60A ( 連続定格 )
- ・ 出力電圧調整範囲 : 0V ~ 200V 4 回路内蔵、スライダック制御方式 ( 手動 )

現在、各電源盤へはそれぞれ建家の別々の分電盤 ( AC200V 50A ) から供給している。

本ベーキングコントローラは PID 制御であるが、出力は ON-OFF のパルス幅変調であるため QUEST のベーキングヒータにフルに電圧 200V を印加すると瞬時値では三相電源の線電流が分電盤容量を超えてしまう ( 表 1 参照 )。そのためベーキングヒータに印加する電圧を下げ三相電源の線電流の瞬時値を抑える必要がある。ただし、本ベーキングコントローラで制御する場合にはベーキングヒータの印加電圧は、昇温時間で決まる電圧 ( 電力 ) より 1.5 ~ 2 倍程度の余裕が必要となってくる。また昇温時間の他に、ベーキングヒータの接続方法によっても三相電源の各線間に流れる電流が異なるのでその検討も行った。

表 1 に昇温時間およびベーキングヒータの接続方法による三相電源の線電流の違いを示す。また、図 3 に非対称負荷 結線によるベーキングヒータ接続例、図 4 に対称負荷 結線によるベーキングヒータ接続例を示す。それぞれの接続方法の特徴として、次のことが考えられる。

- ・ 図 3 の接続方法は、ベーキング電源盤各出力に、真空容器の各セクション 3 本のベーキングヒータを並列に接続する方法である。結線方法が簡単で、電力制御用のソリッドステート・リレー ( SSR ) が各チャンネル 1 個ですむが電源の線間電流にアンバランスが発生する。
- ・ 図 4 の接続方法は、各セクションの 3 本のベーキングヒータを 結線にし、SSR を 3 個接続 ( 3 個とも同時にオン、オフ ) する方法である。結線方法が多少複雑になるが、電源の線間電流にアンバランスは発生しないので理想的である。ただし、高価な SSR が各チャンネルに 3 個ずつ必要になる。

以上のことを考慮した結果、当面は電源電圧を下げて SSR が各チャンネル 1 個ですむ図 3 の非対称負荷 結線による接続方法で行うことにした。

### 4. QUEST 用ベーキングコントローラについて

QUEST 用ベーキングコントローラの構成は、CPD 用 ( 前回の技術レポート Vol.8 ) と同じである ( オムロン社製 E5ZE 使用 <sup>2)</sup><sup>3)</sup> )。但し、1 チャンネル当たりのベーキングヒータ電流が増えたので出力の SSR を定格電流 20A から 40A に増強し、SSR 保護のためのヒューズを追加した。そのためケースの寸法が大きくなったが外観は同じである。

また、コントローラは QUEST 本体近くのベーキング監視盤内 ( 前回の技術レポート Vol.8 図 3 ) に設置されるが、実験中は安全上本体室に入室できないので温度設定を変更する時や、温度モニターする時不便である。したがってベーキングコントローラを遠隔で操作できるようにするため、制御用パソコンとコントローラ間を既設の LAN 回線を使用し接続できるようにした。そのための CONTEC 社製 RS-232C - Ethernet メディアコンバータ ( RP-COM ( FIT ) H ) をコントローラの RS-232C 入力端子に外付け追加した。この製品は仮想 COM モード、透過モード、モデムモードの 3 つの動作モードが選択できる。今回はメディアコンバータが 1 個で済

む仮想 COM モードで使用することにした。ただし、制御用パソコンには製品添付の仮想 COM ドライバーをインストールする必要がある。

## 5. ベーキング自動化プログラムの改造について

今回のプログラムの改造については、安定性の向上(バグ等でプログラムが停止しないこと)、操作性の向上(他の人が操作できること)などを念頭に主に次のような改造を行った。

### (1) プログラム再起動対策

何らかの原因でプログラム又はパソコンが停止した場合でもコントローラはパソコンからの直前までの指令によって運転を継続している(無人運転でも安心ではある)しかし、これまではプログラムを再起動するたびに温度設定値や各種設定値を再度設定する必要があり、そのためにはコントローラの運転を一度停止する必要があった。今回はプログラムを再起動すると自動的にコントローラが運転状態であるかを検出し、運転状態ならばそれまでの設定値を再読込できるようにした。このことによりコントローラの運転を停止することなくプログラムが継続できるようになった。

表 1 昇温時間とベーキングヒータの接続方法による三相電源の線電流の違い

	A	B	C	D	E
設定温度 ( )	150	150	150	150	150
昇温時間 (H) 0 150	2.7	7.5	10.0	15.0	30.0
変化率 ( /H)	55.9	20.0	15.0	10.0	5.0
全容量 (kW)	38.4	17.5	14.6	11.7	8.7
ヒータ電圧 (V)	200	135	123	110	95
1本あたり容量 (W)	1600	730	607	486	364
1本あたり抵抗 ( )	24.96	24.96	24.96	24.96	24.96
全本数	3x8	3x8	3x8	3x8	3x8
<b>[対称負荷 結線]</b>					
1chの相電流 (A)	8.01	5.40	4.93	4.41	3.82
4chの相電流 (A)	32.05	21.61	19.71	17.64	15.27
4chの線電流 (A)	55.51	37.43	34.14	30.56	26.45
<b>[非対称負荷 結線]</b>					
1ch 接続(v-w, u-w) の相電流 (A)	24.04	16.21	14.78	13.23	11.45
2ch 接続(u-v) の相電流 (A)	48.08	32.42	29.57	26.46	22.91
線電流 Iu (A)	63.60	42.88	39.11	35.01	30.31
線電流 Iv (A)	63.60	42.88	39.11	35.01	30.31
線電流 Iw (A)	41.64	28.07	25.61	22.92	19.84

- A : ヒータに 200V 通電した場合
- B : 昇温時間を 7.5 時間とした場合
- C : 昇温時間を 10 時間とした場合 (設計値)
- D : 昇温時間を 15 時間とした場合
- E : 昇温時間を 30 時間とした場合

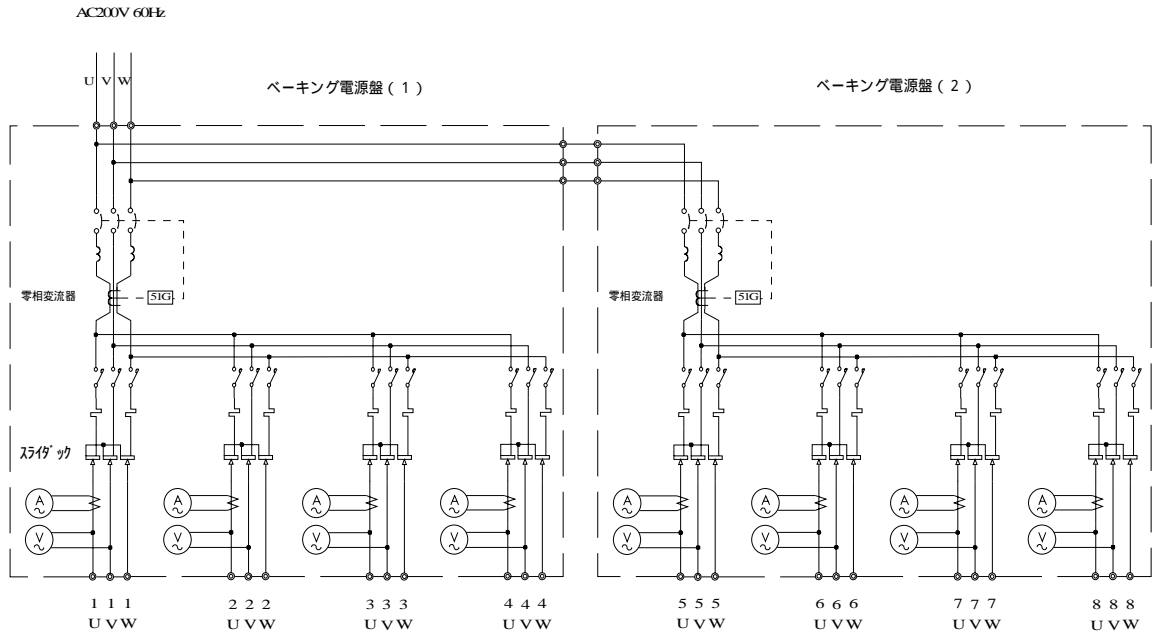
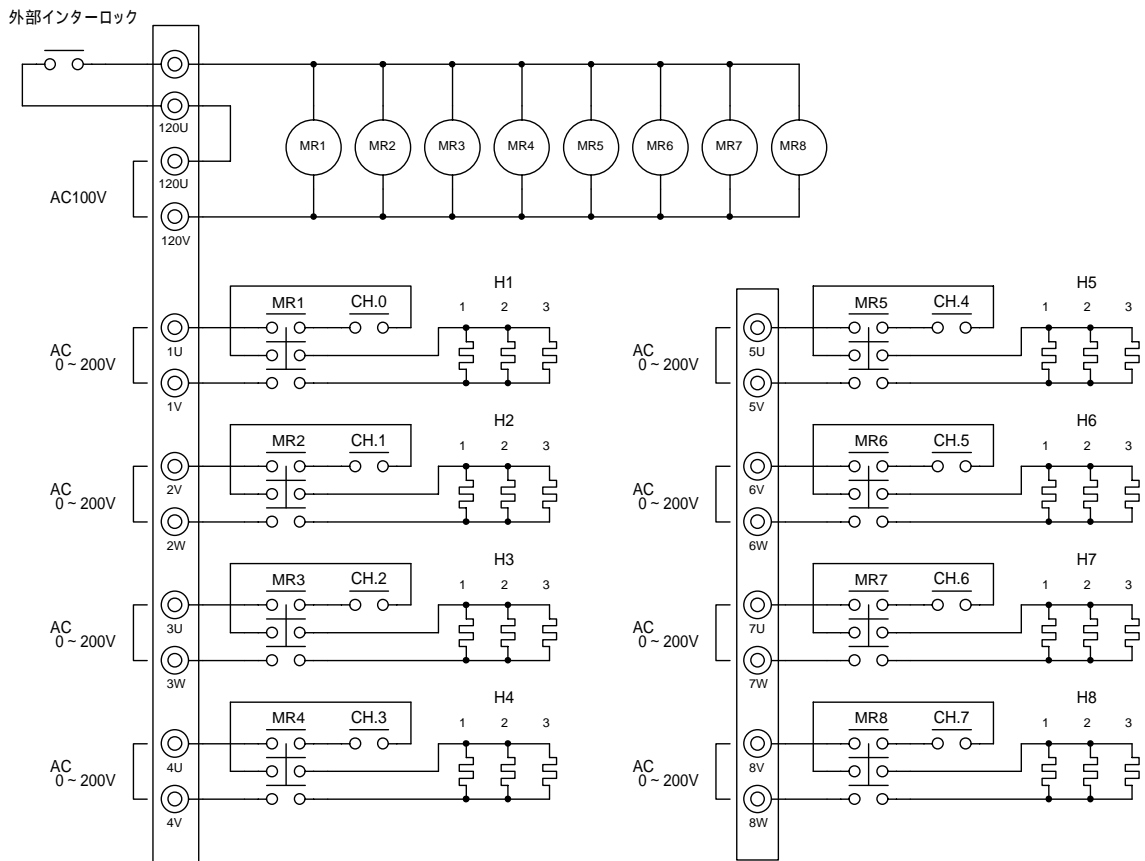


図2 ベーキング電源盤(1),(2) 概念図



CH.0 ~ CH.7 8CH ベーキングコントロール出力

図3 非対称負荷 結線によるベーキングヒータ接続例

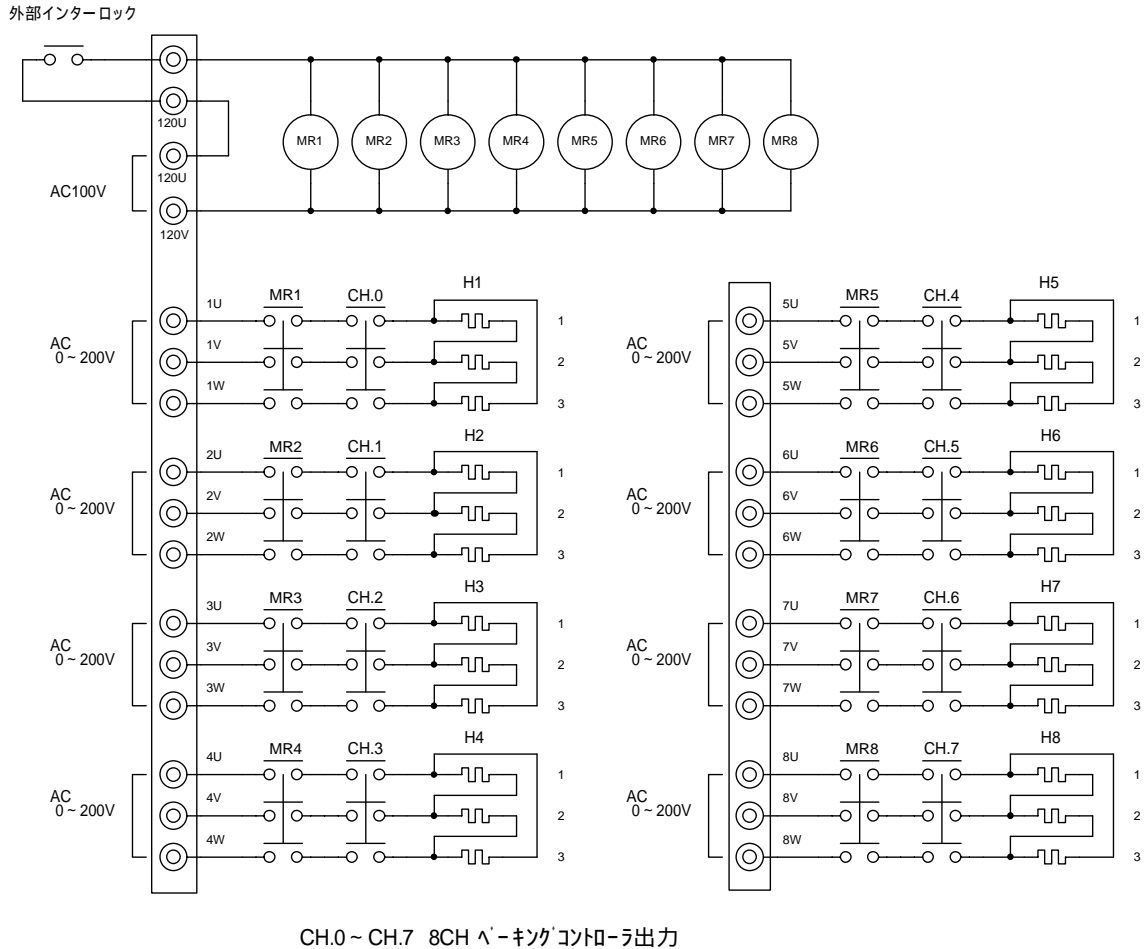


図 4 対称負荷 結線によるベーキングヒータ接続例

(2)チャンネル間温度一律モードの追加 (図 5)

これまで各チャンネルは設定値に従って独自に温度制御を行うようになっていたが、今回新しくコントローラを増設したことなどにより、使用しないチャンネルを利用して、温度制御できない箇所の温度をモニターして、加温中に制御している箇所との温度差が一定以上になった場合、加温を一時停止し温度差が一定以下になるまでその温度で保持するようにした。このモードは何らかの原因 (例えばベーキング電源の出力電圧が低い場合やベーキングヒータの一部断線など) で温度上昇が遅いチャンネルがあった場合にも有効である。

もちろん、各チャンネル別々の温度で制御したいことも有り得るので、従来のモードであるチャンネル間温度単独モードも選択できるようにした。

(3)履歴保存ファイルの分割 (図 6)

CPDの実験ではこれまでの単なる実験前のベーキングだけではなく、プラズマ生成中も真空容器を高温に保つという実験がなされ、実験期間中、長期にわたりベーキングコントローラを運転する必要がでてきた。そのため、一定時間 (最小は 1 分間隔) ごとにベーキング温度を記録していく履歴保存ファイルが肥大化し、ファイルの保存やグラフの表示に時間がかかるようになってきた。QUEST でも同様の高温壁での実験が予定されているため、ファイルが一定のサイズになったら自動的に連番にしたファイルを作成して保存するようにした。

#### (4)エラーログファイルの作成 (図 6)

プログラムの機能拡充とともにタイムイベントによって同時進行しているルーチンが増えてきた。そのため、タイミングによってはお互いに干渉し合う時がある。たとえば履歴保存ファイルでは、温度データの記録、グラフ表示のための読み出し、後述の FTP 転送などがあり、またコントローラ E5ZE との通信においては、現在温度の取得、温度設定値の書込や読み出し、コントローラの状態読み出しなどがあげられる。これらの問題については、busy フラグを出して回避するようにしているが想定外のことが起きないとも限らない。また、FTP 転送においても外的要因にて転送に失敗することが想定される。そこでこれらのエラーが発生したときプログラムが停止しないようエラー処理をおこなうと同時に、後でその原因を突き止めやすいように自動的にエラーログファイルに記録するようにした。

#### (5)HB・HS 警報設定の追加 (図 7)

本ベーキングコントローラで使用している E5ZE 多点温度調節器の機能の一つである HB 警報 (ヒータ断線検出) と HS 警報 (SSR 故障検出) を利用できるようにした。これらの警報が発生するとコントローラ前面の警報 LED ランプが点灯し、警報ブザーが鳴る。また後面から外部インターロック用に設けている警報接点出力が ON になる。なお、警報ブザー及び警報接点出力は他の警報と共用である。

#### (6)ユニットの状態表示 (図 8)

前回、ユニットの動作状態表示と異常状態表示をユニットの基本設定と同じフォームの中で表示するようにしていたが、分かりにくかったためメインメニューから独立のフォームとして呼び出せるようにした。これによりコントローラの状態把握が容易になった。

#### (7)ヒータ電流値・SSR 漏れ電流値の表示 (図 9)

ベーキング中の各チャンネルのヒータ電流値及び SSR の漏れ電流値をモニターできるようにした。ただしこのとき表示されているヒータ電流値は SSR が ON の時の電流であり、ON-OFF の平均値ではない。

#### (8)FTP 転送機能の追加 (図 10)

実験期間中、長期にわたり真空容器を高温に維持するために本ベーキングシステムの連続運転をおこなった。そのため自宅にいても真空容器の温度を監視できるようにするため、実験棟内設置の FTP サーバーに制御パソコン内の温度データを記録と同期して定期的に転送し、外部からはそのファイルをダウンロードして見ることにより状況を把握できるようにした。

#### (9)その他

CPD ベーキング中に起こった色々なバグ取り、操作性の悪さの改善、機能の拡充などをおこなった。また、他の人が操作できるようにヘルプファイルの充実をおこなった。

### 6. CPD における実績

本ベーキング自動化システムを稼働してから現在まで、真空容器の 150 ベーキング 3 回、60 及び 100 における実験を 3 回おこなってきた。とくに最近では昇温開始から停止までの日数が 42 日間及び 80 日間の 2 回にわたり連続で真空容器の温度制御 (100 および 60 一定) をおこなった。その間一度、42 日間の無人運転時に落雷によって実験棟全体が停電し真空容器温度が室温まで戻ってしまったというアクシデントがあったが、その他は全く問題無く運転を継続できた。図 11 に 80 日間連続運転時の記録を示す。



図 5 運転モードの追加

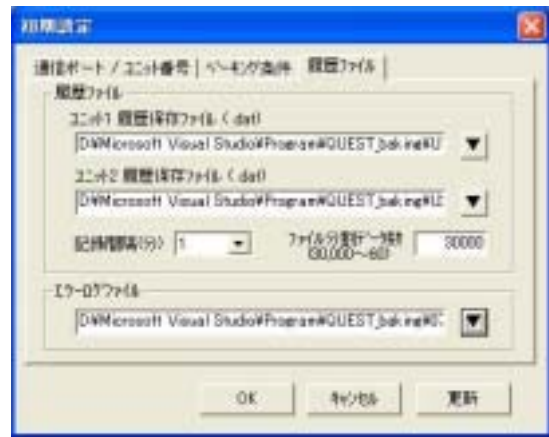


図 6 履歴保存ファイル分割、エラーログファイル作成



図 7 HB・HS 警報設定



図 8 ユニット状態表示 (左：動作状態表示、右：異常状態表示)





図9 左：ヒータ電流値、右：SSR 漏れ電流値

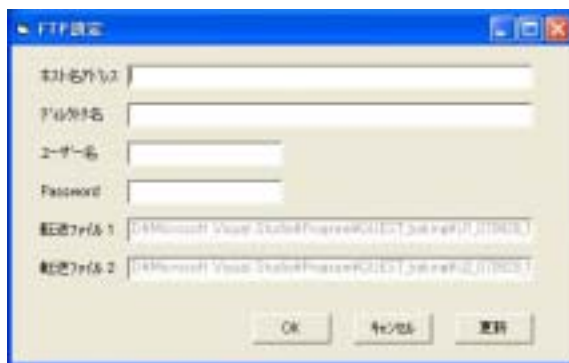


図10 左：FTP 設定画面、右：FTP 転送中画面

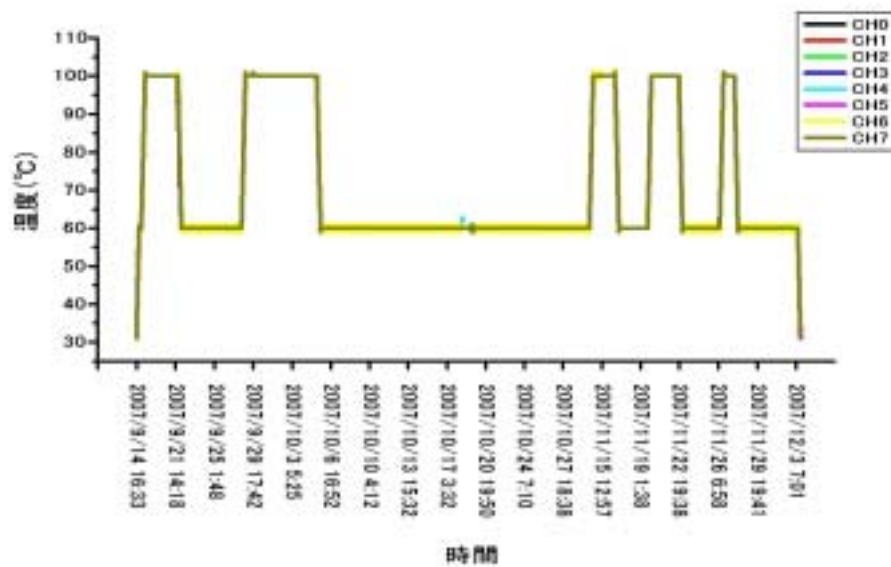


図11 長期間（80日間）運転時の記録

## 7. 最後に

本ベーキング自動化システムによる QUEST のベーキングはこれからである。ベーキングの対象が CPD から QUEST に変わるので PID パラメータの調整を再度行わなければならない。CPD に比べ真空容器の直径が約 2.3 倍（表面積約 5.5 倍）であるため加熱のレスポンスが遅いことが考えられるが、熱容量が大きくなるので安定性が良くなり、精度も上がると思われる。また、各チャンネル間のヒータの配置（伝熱面積）は等しいので制御性は良いのではないかとと思われる。

プログラムに関しては、前述のように多数の改良とバグ取りを行ってきたのでかなり安定してきたのではないかと考えている。但し、QUEST の実験パターンによっては追加機能が必要になる可能性がある。今後もプログラムの追加・改良をしていく予定である。

## 謝 辞

ベーキング自動化システムの開発に当たっては、開発を認め予算措置をして戴いた、高温プラズマ工学研究センター長 佐藤浩之助 教授はじめ、助言を頂いた中村一男 教授および高温プラズマ工学研究センターの先生方に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 川崎昌二：小型 PWI 実験装置(CPD)におけるベーキング自動化システムの開発，九州大学応用力学研究所 技術職員技術レポート(March 2007)Vol.8，pp.32-50 .
- 2) 型 E5ZE 多点温度調節器 ユーザーズマニュアル(カタログ番号 SCHS-711A)2004 年 10 月現在，オムロン株式会社
- 3) 型 E5ZE 多点温度調節器 ユーザーズマニュアル(通信編)(カタログ番号 SCHS-712)1995 年 4 月現在，オムロン株式会社