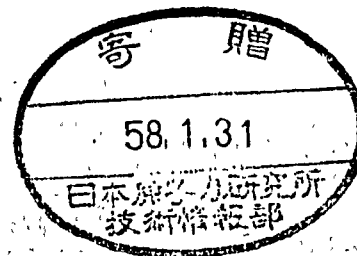


KEK 82- 9  
September 1982  
1/E

COMPUTER CONTROL SYSTEM  
FOR  
THE KEK 1-M HYDROGEN BUBBLE CHAMBER  
(in Japanese)

N. UJIE, N. ISHIHARA, T. OHAMA,  
Y. OTAKE, R. SUGAHARA and M. TADANO



NATIONAL LABORATORY FOR  
HIGH ENERGY PHYSICS

© National Laboratory for High Energy Physics, 1982

KEK Reports are available from

Technical Information Office  
National Laboratory for High Energy Physics  
Oho-machi, Tsukuba-gun  
Ibaraki-ken, 305  
JAPAN

Phone: 0298-64-1171

Telex: 3652-534 (Domestic)

(0)3652-534 (International)

Cable: KEKHO

COMPUTER CONTROL SYSTEM  
FOR  
THE KEK 1-M HYDROGEN BUBBLE CHAMBER

N. Ujiie, N. Ishihara, T. Ohama, Y. Otake, R. Sugahara and M. Tadano

KEK, National Laboratory for High Energy Physics  
Oho-machi, Tsukuba-gun, Ibaraki 305, JAPAN

Abstract

A temperature and pressure control system of the KEK 1-m hydrogen bubble chamber has been converted from a conventional analogue system to a Direct Digital Control System (DDC) using a minicomputer YODIC 100. The system has two operation modes. The "cooling mode" of the DDC system (mode I) enables us to automatically cool the chamber down to 45 K with a desired cooling rate. The "constant operation control mode" (mode II) can keep the fluctuation of the temperature and the pressure of the chamber to within  $\pm 0.02$  K and  $\pm 0.02$  kg/cm<sup>2</sup>, respectively. The constitution and the performances of the DDC system are described.

## § 1. はじめに

水素泡箱は、高エネルギー物理実験に使用される荷電粒子の飛跡検出器で、(1)それ自身が陽子ターゲットであること、(2)全立体角 ( $4\pi$ ) をカバーできること、(3)空間分解能が非常に良いこと等の特徴をもっている。KEK 1 m 水素泡箱は、75 cm 水素泡箱に続いて建設され、実際に高エネルギー実験のデータを提供している我国で最初の、又唯一のものである。KEK 1 m 水素泡箱の主要なパラメーターをTable 1に、また装置の断面図をFig. 1に示す。泡箱装置全体は、高圧可燃性ガス、極低温、真空、油圧、光学、電磁石等の広範囲にわたる技術の集積として成り立つもので、それぞれの分野で独特の工夫がなされ既に報告されている<sup>4)</sup>。ここでは、新しい試みとして、従来アナログ調節計によってなされていた水素泡箱の温度、圧力制御系を、計算機を利用したデジタル制御 (Direct Digital Control: DDC) 系に置き換え、満足のいく結果を得ることができたので、その構成と特性について述べる。

## § 2. DDCの目的

従来水素泡箱装置では、ミニコンピューター YODIC 100 を用いて、本体の温度、圧力をはじめとする種々のデータを収集、記録してきた。一方、アナログ調節計を使用する従来の温度制御系では、目的が液化水素温度における定値制御であるために、冷却過程における自動制御には役立たない。YODIC 100 に DDC の機能を付加すれば、冷却時、定値制御時の両方において自動制御が可能となる。

### 2.1 泡箱の冷却

KEK 1 m 水素泡箱は、材質BK7、直径1 (m)、厚さ14.5 (cm) の大口径窓ガラスを有し、それは、インジウムを緩衝材としてチタンの枠によって本体に固定され、真空シールは inflatable gasket によってなされている。これを室温から液化水素温度まで急激に冷却すると、ガラスの熱収縮の不均一性に起因する応力により、ガラスが破壊することは明らかである。そこで窓ガラス全体が均一に収縮していくよう、緩慢に冷却する必要がある。冷却速度が4 (K/h) 程度であれば、十分に安全であることが経験によって確かめられている。従来、冷却は運転員が冷却系の弁の開閉を手動で加減しながら行ってきたが、約1週間の冷却期間中、冷却速度を一定に保つことは容易ではない。

冷却時における自動制御を、「MODE - I」と呼ぶこととし、以下に概略を述べる。泡箱の冷却配管系統図はFig. 2に示す通りである。ここにTC01, TR03, PC04, PC05は各々デジタル調節計であり、計算機内にあるものと考えて良い。「MODE - I」で主として使用されるのは、neck cooler と呼ばれる熱交換器の系統である。冷媒の液化水素は、neck cooler の入口弁TCV - 1で一定圧力(従って一定温度)となってneck coolerに入る。neck cooler を流れる冷媒は、泡箱内のガスとneck cooler に接する泡箱本体(以下本体と略す)の一部の熱を奪って気化する。Fig. 2において、出口弁PCV - 3のスイッチは、冷却時にはTR03の方へ連結されていて、本体上部の温度を銅-コンスタンタン熱電対でモニターし、冷却速度が一定になる様PCV - 3の弁開度を調節する。neck cooler は、熱伝導によって本体の上部を冷却し、同時にガスの対流によって下部を冷却する。本体の温度分布は、銅-コンスタンタン熱電対を用いて上下(CC3, CC1)、左右計4点でモニターされている。特に上下の温度差が設定値以上に大きくなるようなら、アラームと同時に出口弁PCV - 3が閉じて、本体の温度分布が均一になるまで待期するようになっている。このようにして、室温から約45 (K) まで、ほぼ4 (K/h)

の速度で冷却していく。

## 2.2 温度、圧力定値制御

水素泡箱の温度、圧力制御は、制御対象が（１）液化水素であること、（２）沸点と臨界点の中間に温度を保持すること、（３）沸騰を抑えるため、温度に対応する蒸気圧以上の圧力を保持することなどのため容易ではない。しかも３ヶ月程度の連続運転期間中、粒子識別の際の重要なパラメータである泡密度を一定に保つために、温度、圧力の「ゆらぎ」はそれぞれ0.05（K）、0.05（％）以下に安定に保たれることが要求される。この目的のために、各国の泡箱は個々の泡箱の形状の違いや、特性を考慮してそれぞれ独自の制御方式を開発してきた。KEK 1m水素泡箱においても、冷媒が気体と液体が混在する２相の水素であること、温度と圧力を別個の熱交換器を用いて独立に制御すること、などの特殊性を生かすべく独特の制御方式が採られてきた。

DDC のもう１つの目的は、従来のアナログ自動調節計と同等の精度で定値制御を行なうことである。これを「MODE - II」と呼ぶことにし、以下に概略を述べる。温度制御は Fig. 2 の neck cooler によって行なわれる。この時本体内の液面は、cold piston の上部までであるものとする。冷媒の液化水素は、弁TCV - 1によって泡箱内部の液化水素温度より低い一定温度に調節され、neck cooler に流入し、本体内の液化水素と熱交換して気化し、出口弁PCV - 3を通り流出する。この時、弁PCV - 3の切換スイッチは、VT01の方へ連結されており、蒸気圧温度計（VPT）によって液化水素の温度をモニターし、これが一定になるようにPCV - 3の弁開度を調節する。

圧力制御は gas cooler によって行なわれる。弁PCV - 4によって一定温度となった冷媒は、gas cooler で水素ガスの一部を凝縮させることにより、本体内部の圧力を下げ、自らは気化し、弁PCV - 5を通り流出する。調節計PC05は、本体圧力をモニターし、これが一定となるよう出口弁PCV - 5の弁開度を調節する。

## § 3. 冷却時の温度制御

### 3.1 基本方程式

本体を室温から液化水素温度まで冷却するときの固有の熱的特性について簡単に述べる。冷却時には、主として neck cooler の効果を利用しているので、Fig. 3 に示すようなモデルで考えて良い。neck cooler での熱交換率は充分良く、第1近似として、輻射の影響は対流や熱伝導に比して無視し得るものとする、次のような連立微分方程式を得る。ここで簡単のため、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $k_1$ 、 $k_2$  は定数とし、冷媒は100%液状で neck cooler に流入し、完全にガス化して neck cooler と同温度で流出するものとする。

$$C_1 \frac{d\theta_1}{dt} = -k_1(\theta_1 - \theta_2) \quad (3.1)$$

$$C_2 \frac{d\theta_2}{dt} = -mC_p \left\{ (\theta_2 - \theta_1) + \frac{a}{C_p} \right\} + k_1(\theta_1 - \theta_2) + k_2(\theta_T - \theta_2) \quad (3.2)$$

$C_1$  : 本体の熱容量

$C_2$  : neck cooler の熱容量

$\theta_1$  : 泡箱本体の温度

$\theta_2$  : neck cooler の "

$\theta_T$  : top plate の "

$k_1$  : 本体と neck cooler の間の見かけの熱伝導率（対流を含む）

$k_2$  : top plate と neck cooler の間の見かけの熱伝導率

$m$  : 冷媒の質量流量

$C_p$  : 冷媒ガスの定圧比熱

$\theta_1$  : neck cooler 入口での冷媒の温度       $a$  : 冷媒の蒸発潜熱  
 $t$  : 時間

簡単のため、top plate の温度を  $\theta_T = 0$  (°C) とし、冷媒の流量が  $m = m_1$  のとき、neck cooler、本体が共に平衡状態にあるとすると、

$$\theta_1 = \theta_2 = \frac{m_1 C_P}{k_2 + m_1 C_P} \left( \theta_1 - \frac{a}{C_P} \right) \quad (3.3)$$

となる。これは、冷却過程のような比較的温度の高い所では、冷媒の蒸発潜熱の効果を、見かけ上  $\theta_1$  より  $a/C_P$  だけ温度の低いガスの冷媒で冷却していることと等価に扱ったものである。流量を  $m_1$  から  $m_2$  にステップ状に増したときのインディシャル応答は、初期条件が式 (3.3) で与えられるとして式 (3.1)、(3.2) を解くと次のようになる。

$$\theta_1(t) = \left( \frac{m_2 C_P}{k_2 + m_2 C_P} - \frac{m_1 C_P}{k_2 + m_1 C_P} \right) \left( \theta_1 - \frac{a}{C_P} \right) \left[ 1 - \frac{1}{\beta - \alpha} (\beta e^{\alpha t} - \alpha e^{\beta t}) \right] + \frac{m_1 C_P}{k_2 + m_1 C_P} \left( \theta_1 - \frac{a}{C_P} \right) \quad (3.4)$$

$$\theta_2(t) = \theta_1(t) - \frac{C_1}{k_1} \left( \frac{m_2 C_P}{k_2 + m_2 C_P} - \frac{m_1 C_P}{k_2 + m_1 C_P} \right) \left( \theta_1 - \frac{a}{C_P} \right) \frac{\alpha \beta}{\beta - \alpha} (e^{\alpha t} - e^{\beta t}) \quad (3.5)$$

但し  $\alpha$ 、 $\beta$  は次のように表わされる。

$$\alpha = A - B$$

$$\beta = A + B$$

$$A = -\frac{1}{2C_2} \left\{ k_1 \left( 1 + \frac{C_2}{C_1} \right) + (k_2 + m_2 C_P) \right\}$$

$$B = \frac{1}{2C_2} \left[ \left\{ k_1 \left( 1 + \frac{C_2}{C_1} \right) + (k_2 + m_2 C_P) \right\}^2 - 4 \frac{C_2}{C_1} \cdot k_1 (k_2 + m_2 C_P) \right]^{1/2}$$

実際の計算では、 $C_2/C_1 = 1/24$  程度であり、 $B$  の第 2 項は第 1 項に比較して小さいので次式のように簡略化される。

$$\alpha = -\frac{1}{C_2} \left\{ k_1 \left( 1 + \frac{C_1}{C_2} \right) + (k_2 + m_2 C_P) \right\} \quad (3.6)$$

$$\beta = -\frac{k_1}{C_1} \cdot \frac{k_2 + m_2 C_P}{k_1 \left( 1 + C_1/C_2 \right) + (k_2 + m_2 C_P)} \quad (3.7)$$

冷却過程では、本体全体を一様に冷却していくことが望ましいが、 $\theta_1(t)$  は、 $\theta_2(t)$  よりも常に高い。また冷却過程には、次のような特徴がある。式 (3.4) から  $\theta_1(t)$  の冷却速度は、

$$\frac{d\theta_1}{dt} = -\left( \frac{m_2 C_P}{k_2 + m_2 C_P} - \frac{m_1 C_P}{k_2 + m_1 C_P} \right) \left( \theta_1 - \frac{a}{C_P} \right) \left( \frac{\alpha \beta}{\beta - \alpha} \right) (e^{\alpha t} - e^{\beta t}) \quad (3.8)$$

となる。また式 (3.5) から、 $\theta_1(t)$ 、 $\theta_2(t)$  の温度差は、

$$\theta_2(t) - \theta_1(t) = -\frac{C_1}{k_1} \left( \frac{m_2 C_p}{k_2 + m_2 C_p} - \frac{m_1 C_p}{k_2 + m_1 C_p} \right) \left( \theta_1 - \frac{a}{C_p} \right) \left( \frac{\alpha \beta}{\beta - \alpha} \right) (e^{\alpha t} - e^{\beta t}) \quad (3.9)$$

となつて  $\left( \frac{d\theta_1}{dt} \right)_{\max}$  のときと、 $(\theta_2(t) - \theta_1(t))_{\max}$  のときは同時に起こり、その時の到達時間は、

$$t_{\max} = \frac{1}{\beta - \alpha} \log \frac{\alpha}{\beta} \quad (3.10)$$

となる。

### 3.2 冷却速度制御による冷却

インディシャル応答を式(3.4)の代りに関数  $f(t)$  を用いて次のように表わすことにする。

$$f(t) = \theta_1(t) - \theta_1(0) \quad (3.11)$$

本体の伝達関数を  $F(s)$  とすると ( $s$  はラプラス演算子)

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[ F(s) \cdot \frac{\Delta m C_p}{s} \right] \quad (3.12)$$

となるので、 $F(s)$  は次のように求められる。

$$\begin{aligned} F(s) &= \frac{s}{\Delta m C_p} \mathcal{L}[f(t)] \\ &= -\frac{k_0}{(1 + T_\alpha \cdot s)(1 + T_\beta \cdot s)} \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\text{ここで、} k_0 = -\frac{1}{\Delta m C_p} \left( \frac{m_2 C_p}{k_2 + m_2 C_p} - \frac{m_1 C_p}{k_2 + m_1 C_p} \right) \left( \theta_1 - \frac{a}{C_p} \right) \quad (3.14)$$

$T_\alpha = -1/\alpha$ 、 $T_\beta = -1/\beta$  で、 $k_0$  は本体固有のゲインである。

泡箱本体の冷却速度制御は、Fig. 4 に示す閉ループを組んで行なう。閉ループを構成する機器の中で、本体、CPU以外の機器や弁は、単に比例要素のみとして良いので、式(3.13)から一巡伝達関数は次式のようなになる(個々のゲインについては、Appendix 1 参照)。

$$G(s) = -K_T \cdot K_{mv} \left\{ K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_D \cdot s \right) \right\} \cdot K_{EP} \cdot K_{CV} \cdot k_0 \cdot \frac{1}{(1 + T_\alpha \cdot s)(1 + T_\beta \cdot s)} \quad (3.15)$$

$K_T$  : CC 熱電対のゲイン

$K_{CV}$  : 弁のゲイン

$K_{mv}$  : mV 変換器のゲイン

$T_i$  : CPU で設定する積分時間

$K_p$  : CPU で設定するゲイン

$T_D$  : " 微分時間

$K_{EP}$  : 電空変換器のゲイン

本体の特性が2次遅れ要素であるから、Bode 線図の位相曲線が $-180^\circ$ と交わることはないので、ゲインを上げて安定である。

この冷却速度制御系は「1型」なので、ランプ入力 $1/s^2$ （即ち、冷却速度一定）を入力したときの特性は、

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{1}{1+G(s)} \cdot \frac{1}{s^2} = -\frac{T_i}{K} \quad (3.16)$$

但し  $K = K_T \cdot K_{mv} \cdot K_P \cdot K_{EP} \cdot K_{CV} \cdot k_0$

となって、オフセットを残しながらも追従する。

更にこの方法とは別に、「CC 1とCC 3の温度差を一定」に保ちつつ制御する方法も併せて考えることができる（Appendix 2参照）。

#### § 4. 定常運転時の温度、圧力制御

ピストンのやや上部まで液化水素が満たされていて、定期的に膨張、圧縮が繰り返されている状態でのモデルをFig. 5に示す。gas cooler の温度 $\theta_P$ が一定のとき、本体温度 $\theta$ に対する方程式は次のようになる。

$$C \frac{d\theta}{dt} = k(\theta_P - \theta) - q_N(h - h_i) + Q_1 \quad (4.1)$$

C : 液化水素を含む本体、及び  
neck cooler の熱容量

$\theta$  : 本体温度（neck cooler とほぼ等温）

$\theta_P$  : gas cooler の温度

$q_N$  : neck cooler を流れる冷媒の質量流量

$h_i$  : neck cooler 入口での冷媒の enthalpy

$h$  : " 出口 "

$k$  : gas cooler と本体の間の見かけの熱伝導率

$Q_1$  : 本体に加えらるる熱量（主に膨張、圧縮サイクルに伴う熱量）

$h$  は  $\theta$  の関数なので、式(4.1)の変形を行うと（Appendix 3参照）次のようになる。

$$C \frac{d\theta}{dt} = -\left(k + \frac{q_N}{0.0702}\right) (\theta - \theta') \quad (4.2)$$

$\theta'$  : 質量流量が $q_N$ のときの本体到達温度

これを解いて、本体温度

$$\theta(t) = \theta' + (\theta_0 - \theta') \exp\left[-\frac{1}{C} \left(k + \frac{q_N}{0.0702}\right) t\right] \quad (4.3)$$

$\theta_0$  :  $t = 0$ での本体温度

を得る。このとき時定数  $T$  は、



$$T = \frac{C}{k + \frac{q_N}{0.0702}} \quad (4.4)$$

と表わされ、流量  $q_N$  が増えれば、 $T$  は小さくなることがわかる。

圧力制御の場合も同様に、本体温度  $\theta$  が一定のとき、基本式は次のように書くことができる。

$$C_G \cdot \frac{d\theta_P}{dt} = k(\theta - \theta_P) - q_G(h - h_i) + Q_2 \quad (4.5)$$

$C_G$  : gas cooler の見かけの熱容量                       $k$  : gas cooler と本体の間の見かけの熱伝導率  
 $\theta_P$  : gas cooler の温度                                       $q_G$  : " を流れる冷媒の質量流量  
 $\theta$  : 本体温度     $h_i$  : " 入口の冷媒の enthalpy  
 $Q_2$  : gas cooler に流入する熱量                       $h$  : " 出口の "

(主に top plate 即ち室温部より)

したがって、 $\theta_P(t)$ 、時定数についても、式(4.3)、(4.4)と同様に求まる。

## § 5 DDC システムの構成

### 5.1 CPU システム

CPU システムのブロック図を Fig. 6 に示す。YODIC 100 CPU と各入出力 (I/O)、及び端末機器の情報伝達は、すべて Process - Bus (P-Bus) を通じて行なわれる。

CPU は 1 語 16 bit で構成され、32 K 語のコア・メモリーを持つ。情報転送は Byte (8 bit) 単位で、1 語データを 2 回にわけて転送する。使用言語はアセンブラで、処理機能を上げるために浮動小数点演算機能をもつ。

この CPU は、特に制御用ミニコンピューターという観点から、ソフトウェアの暴走を抑えるため、2 レベルのメモリー保護機能を持つ。1 つは書込みが条件つきで可能で読出し自由な半固定領域、1 つは書込不可能で読出し自由な固定領域である。いまは、半固定領域=固定領域としているので、半固定領域はない。更に各 I/O、端末機器には優先度に対応した 4 レベルの割込機能がある。

### 5.2 制御アルゴリズム

DDC の PID 制御式は次式のように表わされる。

$$V_n = K_P \left[ e_n + \frac{T_S}{T_I} \cdot \sum_{i=0}^n e_i + \frac{T_D}{T_S} \cdot (e_n - e_{n-1}) \right] \quad (5.1)$$

$V_n$  : 出力

$K_P$  : 比例ゲイン

$T_I$  : 積分時間

$T_D$  : 微分時間

$T_S$  : サンプルング周期

$e_i, e_n, e_{n-1}$  :  $i, n$  :  $n-1$  時点での設定値との偏差

この式において、 $n \rightarrow \infty, T_S \rightarrow 0$  とすると、

$$V = K_P \left[ e + \frac{1}{T_I} \int e dt + T_D \cdot \frac{de}{dt} \right] \quad (5.2)$$

を得るが、これはアナログのPID制御式そのものである。

式(5.1)、(5.2)は位置型(又は全値出力型)のPIDアルゴリズムと言われるが、ここでは次に示されるような、「サンプリング時点での出力変化量のみ」が演算される速度型(又は増分型)が採用されている。

速度型アルゴリズムにおいて、時系列に連続な出力値  $\Delta V$  は、 $V_n$  と  $V_{n-1}$  の差分で与えられる。

式(5.1)を  $V_{n-1}$  について求めると

$$V_{n-1} = K_P \left[ e_{n-1} + \frac{T_S}{T_I} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} e_i + \frac{T_D}{T_S} \cdot (e_{n-1} - e_{n-2}) \right] \quad (5.3)$$

となる。

式(5.1) - (5.3)より

$$\Delta V = K_P \left[ (e_n - e_{n-1}) + K_I \cdot e_n + K_D (e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \right] \quad (5.4)$$

但し  $K_I = T_S / T_I$ 、 $K_D = T_D / T_S$

従ってDDCにおける制御は、式(5.4)から明らかのように、制御パラメータ  $K_P$ 、 $K_I$ 、そして  $K_D$  が一定なら、偏差の測定値  $e_n$ 、 $e_{n-1}$ 、 $e_{n-2}$  の値のみで制御される。

6)~9)

### 5.3 ハードウェア・システム

DDCシステムは、その概念がFig. 7に示されるように、制御演算はすべて計算機が行なう。計算機の入力側では、アナログ入力値はデジタル入力値に、出力側では、デジタルからアナログ信号値に変換する電気的変換器が追加される。このように、DDCにおいて取扱う信号は、「デジタル量」であることが重要な点である。

このシステムでは、Fig. 8に示すように、旧来のアナログ調節計をDDCシステムの故障時のバックアップ調節計として使用している。アナログとDDCシステムの切換えは、出力側の3方電磁弁で行なわれる。冷却時、及び、定常運転時に使用される4ヶの制御バルブ(Fig. 2参照)への出力ハードウェアは、4台のマニュアル・ステーション(M/S)を内蔵する「マニュアル・ステーション・コントローラ」、及び4台の電空変換器、更に出力制御モジュール「ACM-D」などから構成されている。マニュアル・ステーションは、TAG-NOに対応して、そのTAGの入出力データを「0~100%」の指示値で指示計に指示する。

更に緊急時の割込機能として、「EMERGENCY」釦がマニュアル・ステーション・コントローラに内蔵されていて、割込時にはFig. 2の入口弁TCV-1、PCV-4は「全閉」、出力弁PCV-3、PCV-5は「全開」となる様安全を重要視して設計された。マニュアル・ステーション・コントローラのフロントパネルをFig. 9に示す。

### 5.4 ソフトウェア・システム

泡箱の制御は、機能上§2に既に述べられている様に2つに大別される。1つは常温から目標温度(~45K)まで冷却制御(MODE-I)を行なうものと、冷却後本体温度、圧力を一定値に制御する定値制御(MODE-II)とに分けられる。

(a) 冷却制御(MODE-I)

本体の冷却速度を制御するプログラムと、本体上下の温度をモニターし、アラームが発生するプログラムとが同時に走る。

#### (a - 1) 冷却速度制御

泡箱本体の冷却過程で、最も効率よく、冷却効果が高めるものは neck cooler の冷却ラインである。neck cooler は、冷媒の入口圧力制御弁 TCV - 1 と、流量を制御する出口弁 PCV - 3 から構成される。( Fig. 3 参照)。冷却速度制御においては、我々は入口圧力を一定にして、1 時間当りの冷却速度 ( $d\theta/dt$ ) が次式を満たすように、CC 3 の温度を目標温度に近づけていく。

$$\theta_{Low} < \left( \frac{d\theta}{dt} \right)_{CC3} < \theta_{High} \quad (5.5)$$

$\theta_{Low}$ : ~ 1.5 (K/h) (冷却速度下限設定値)

$\theta_{High}$ : ~ 5 (K/h) ( " 上限 " )

冷却目標温度は、始めに「1 時間当りの冷却温度」として、冷却前に、冷却制御 TAG の 1 つである設定 TAG に設定する。実際の冷却速度制御は、「1 時間当りの冷却温度」を 6 等分した値を  $\alpha$  として、10 分毎に  $\alpha$  だけ温度を下げていく。1 時間後に、CC3 の温度は現在の温度より  $6\alpha$  だけ低くなり、設定値と等しくなる。この時点で、設定値は再度 CPU により自動的に「 $6\alpha$ 」だけ低い温度に設定される。更にこの冷却速度は、10 分、30 分、60 分、90 分の時間々隔で、式 (5.5) に対応した制御巾で計算された上下限値を各々もち、この冷却速度が 10 分毎にモニターされる。冷却速度がこの上下限設定値を外れた時アラームが発生し、次の 10 分間は  $\alpha$  は更新されず、アラームが解除されるのを待つと同時に、アラーム発生前の制御データは消去される。CC3 の温度制御データは、制御情報としてコンソールへ出力され、プロセス・タイプライタへ印字出力される。

上記動作は CPU によって自動的に制御され、最終目標温度 (~ 45 K) まで冷却が続行される。

#### (a - 2) 温度差 $\Delta\theta$ の監視

冷却過程において最も重要なことは、本体上部の温度 (CC3) と下部の温度 (CC1) 差  $\Delta\theta$  が、余り大きくならない様に冷却することである。 $\Delta\theta$  が大きすぎると、本体及びガラス窓の熱歪が増大し、泡箱ガラス窓の破損につながるので大変危険である。本体は、温度モニターとして、本体上部に CC3、下部に CC1 の熱電対があり、十分安全な温度範囲で冷却を続行してゆく。温度差  $\Delta\theta$  は次式で定義される。

$$\Delta\theta = CC1 - CC3 \quad (5.6)$$

$\Delta\theta$  の上限値は、ガラス窓の破壊に対して安全係数 8 を見込んで約 20 (K)、下限値は冷却効率を考慮して約 15 (K) となっている。従って  $\Delta\theta$  の制御範囲は次式のようなになる。

$$\theta_{Low} < \Delta\theta < \theta_{High} \quad (5.7)$$

$\theta_{Low}$ : 15 (K) (温度差下限設定値)

$\theta_{High}$ : 20 (K) ( " 上限 " )

$\Delta\theta$  のアラーム検出は 1 分毎に行なわれ、アラーム発生時は制御画面の特定エリアにその情報が出力される。

#### (b) 定値制御 (MODE - II)

「MODE - I」から「MODE - II」への切換えは、マニュアルで行なわれ再スタートする。この flow を Fig.

10に示す。図中「Initial data set」は、DDCに必要なパラメータを設定し、「Manual Station (M/S) set」は、アナログ調節計からDDCへ切替える時、アナログ調節計の制御値(PV値)と、DDCの制御値をマッチングさせ、バンプレスに切替えるための作業を示す。

§2で既に述べられているように、本体内の温度、圧力の変動は、泡密度と泡の成長速度に変動をもたらすので、泡箱の定値制御は、Vertex Detectorとしての泡箱の性質を左右する非常に重要なものとなる。制御温度、圧力は、通常以下のような値で制御される。

$$\text{Pressure} = 4.8 \pm 0.02 \text{ (ata)}$$

$$\text{Temperature} = 3.8 \pm 0.02 \text{ (ata)} (= 25.8 \text{ K})$$

$$\text{但し } 1 \text{ ata} = 1(\text{kg/cm}^2) \text{ abs}$$

## 5.5 制御プログラム<sup>10)</sup>

DDCシステムのより具体的な位置づけを、Data Logging Systemと併せて考えると、Fig. 11のように示される。このDDCシステム・ソフトウェア「DDCSYS」は、Fig. 12に示すように、以下のものから構成される。

- a) SCAN MAIN
- b) DDCBC
- c) OMOUT
- d) DDC LIST類とTAG-NO
- e) MAN/MACHINE コミュニケーション

a) 「SCAN MAIN」プログラムは、各入力チャンネルに対して、サンプリング周期毎に起動されるタスクで、起動されると、サンプリング周期より短い周期でアナログ入力モジュール「AIM」を起動し、A/D (Analog to Digital converter)の動作終了の割込で入力データを読み取る。続いて「AIM」のチャンネルに対応したTAGの「TAGLIST アドレス」をセットしてメイン・プログラム「DDCBC」にとぶ。

b) 「DDCBC」は、プロセス制御の中核となるプログラムで、下記のプログラム(サブルーチン群)から構成される。これらプログラムのGeneral FlowをFig. 13に示す。

- b-1) INPUT SCALING: AIMによる入力Raw dataのスケールリングを行なう。
- b-2) INPUT TREAT: a)の「SCAN MAIN」で読み込まれたデータは、そのままでは使用できないので、直線化や、Root補正、フィルタリング、アラーム処理などの前処理を行なう。
- b-3) CONTROL: TAG LISTで指定された制御モードで、測定値(PV又はMeasure値)の値から制御出力を計算する。
- b-4) CONNECT: カスケード制御や、フィードフォワード制御時に他のTAGへの結合を行なう。
- b-5) RATIO/MISCEL: 比率、一般演算(PID以外の演算)を行なう。
- b-6) DATA: 指定したTREND記録計への出力etc。

我々の場合、b-5, 6)は使用していない。

- c) 「OMOUT」: 出力制御サブルーチン

d) 「DDC LIST 類と TAG - NO」: DDC の処理すべき機能は、すべてこの「LIST」中に記述されている。計算機は、この TAG - NO に対応する LIST の記述内容に従って処理を行なうだけである。この LIST 間を Fig. 14 の (a) に、LIST 群の関係を (b) に示す。LIST 類は以下の 4 種の LIST 群から構成される。

- d - 1) AIM DECODE LIST: アナログ入力モジュールのチャンネル番号から、読込入力データの処理すべき飛先アドレス (TAG LIST の先頭アドレス) を指定する LIST 群。
- d - 2) TAG LIST: この LIST は、入力処理、演算制御など、各 TAG に固有な処理すべき内容を備えている。また FUNCTION LIST 及び CONNECTION LIST の飛先アドレス等も含まれる。メイン・プログラム「DDCBC」は、この LIST を解釈して制御を行なう。
  - d - 2 - 1) 入力処理: Root, 線型化, 温度補正, フィルタリング, スパン, アラーム等の入力処理を行なう。
  - d - 2 - 2) 演算処理: 通常の制御モード (PID 又は PI etc), 及び比率等の各種演算を行なう。「DDCBC」は、この TAG LIST の記述内容を解釈して制御する。
- d - 3) FUNCTION LIST: TAG NO に付随して演算されるすべての制御情報、測定値、PID パラメータ、サンプリング周期、各種アラーム、AUT/MAN 切換モード等がリスト・アップされている。「DDCBC」は、プロセスに対応して、これらの制御情報を新しく書きかえる。
- d - 4) CONNECTION LIST: TAG LIST のポインターで指定されるアドレスがある時、他の TAG 間とを結合する LIST である。これら LIST 類のサイズや構成は、演算モードで異なる。

e) 「MAN/MACHINE コミュニケーション」: 一般にアナログ制御システムにおいて、運転員の管理する情報量は膨大な量になる。例えば 1 ループでの PID パラメータ、AUT/MAN モード、制御モード、偏差値、上下限アラームの設定など。これらの多くの制御情報を、多数のループで的確に把握するために、オペレータズ・コンソールは、上記制御情報の表示と、制御パラメータの入力機能を持つ。この DDC システムでは、MODE I, II において、Fig. 2 に示すように 4 つの制御ループを持ち、各バルブに対応した TAG NO を持つ。更にコンソールは、TAG NO に対応した制御情報をカラーでグラフィック表示をする。この画面は、表示変更機能をもつ押し釦「PAGE」を押す毎に、4 ケの制御バルブに対応する制御画面がサイクリックに表示される。制御画面の表示例を Fig. 15 に示す。

## § 6 結果と考察

### 6.1 冷却時の温度制御

本体の冷却は次のように行なわれる。本体内に窒素ガスを約 1.2 ata に保った状態で、室温から冷却を開始し、本体温度が約  $-60$  (°C) になると、窒素ガスを水素ガスに置換する。これは、スコッチライトと呼ばれる光の反射板の中に常温で水素ガスが浸入するのを防ぐために行なうものである。この作業中は、冷却を休止するため、ガス置換終了後再度冷却を開始する時には、本体と neck cooler はほぼ等しい温度になり、しかも温度変化の時間勾配は、0 となっている。再冷却を開始した時の時刻を  $t = 0$  とすると、 $t = 0$  で本体温度  $\theta_1$  と neck cooler 温度  $\theta_2$  が共に  $-61$  (°C) のとき、冷媒流量をステップ状に  $\Delta m = m_2 - m_1$  だけ増加させた後の温度変化、即ち冷却時におけるインディシャル応答が Fig. 16 のごとく得られる。このとき、冷媒流量は実験的に求めてはいないが、次のようにして基本方程式から求めた式 (3.4)、(3.5) と比較することが

できる。冷媒の温度  $\theta_1 = -250$  (°C), 蒸発潜熱  $a = 452$  (J/g), 水素ガスの比熱  $C_p = 14.19$  (J/g·°C), 本体の熱容量  $C_1 = 1218 \times 10^3$  (J/°C), neck cooler の熱容量  $C_2 = 50.9 \times 10^3$  (J/°C), 熱伝導率  $k_2 = 0.1976$  (J/°C·sec) (Appendix 4, (a) ~ (f) 参照) とし, Fig. 16 で冷媒の流量を  $m_2 C_p = 30 k_2$  (Appendix 4, (g) 参照),  $k_1 = 72 k_2$  を仮定すると実験とはほぼ一致していることがわかる。この事と式 (3.6), (3.7) から

$$\alpha = 4.11 \times 10^{-4} \quad (\text{sec}^{-1})$$

$$\beta = 3.40 \times 10^{-6} \quad (\text{sec}^{-1})$$

となる。また流量が  $m_1$  のとき平衡状態であり, その時  $-61$  (°C) であったとすると, 式 (3.3) より,

$$\theta_1 = \theta_2 = \frac{m_1 C_p}{k_2 + m_1 C_p} \left( \theta_1 - \frac{a}{C_p} \right) = -61 \quad (\text{°C})$$

であるから, 式 (3.4), (3.5) は次のようになる。

$$\theta_1(t) = -211.8 \times \left[ 1 - \frac{1}{\beta - \alpha} (\beta e^{\alpha t} - \alpha e^{\beta t}) \right] - 61 \quad (6.1)$$

$$\theta_2(t) = \theta_1(t) - 62.15 \times (e^{\alpha t} - e^{\beta t}) \quad (6.2)$$

このように流量  $m_2 C_p$ , 及び  $k_1$  を適当に仮定することによって, 実験とうまく一致させることができるので, 式 (3.1), (3.2) は妥当な表現式であったと言って良く, この基本式から導いた本体の伝達関数である, 式 (3.13) もまた適切であったと言って良い。Fig. 16 では, 簡単のため比  $k_1 / k_2 = 72$  を, 比  $C_1 / C_2 = 24$  の3倍に選んだ。

DDC の「MODE - I」において, 熱電対 CC3 でフィード・バックをかけ, 本体を冷却したときの様子を, 温度  $60 \sim 45$  (K) ( $-213 \sim -228$  °C) 付近について示したのが Fig. 17 である。冷却速度の指定は  $4$  (K/h) で, CRT のキーボードから SET 値として入力された制御値は, CRT 上に表示された熱電対 CC3 の値で示され, 非常に良く SET 値に追従していることがわかる。CC3 の最終目標値を  $45.43$  (K) としてあるので, この温度になると, CPU は SET 値を  $45.43$  (K) に保持するようにしてある。しかし, 泡箱自身は慣性で冷え続け, 数時間後に再び SET 値に近接する。Fig. 17 (a) には, 制御弁 PCV - 3 の弁開度も示されているが, SET 値  $45$  (K) 付近より閉り始め, 泡箱温度を制御しようとしている様子がわかる。このとき, 本体上下の温度差  $\Delta\theta$  の許容値は  $25$  (K) を与えていたが, 実際は約  $20$  (K) であり, 許容値範囲内で制御されていることもわかる。この様子も Fig. 17 (b) に示されている。このときの PID の値は次のようにして求められた。式 (3.15) に示されたように, 本体の特性は 2 次遅れ要素であるから, Bode 線図の位相曲線が  $-180^\circ$  と交わる所はないが, 急に接近する所の角周波数  $\omega_0 = 2$  ( $\text{h}^{-1}$ ) をもって臨界角周波数に相当するものとすれば, 持続振動の周期に対応する値  $T_c$  は,  $T_c = \pi$  (h) となる。これから Ziegler - Nichols の限界感度法<sup>8), 9)</sup> にならって, この制御系の積分時間  $T_i$ , 微分時間  $T_d$  の最適値として,

$$T_i = 0.5 T_c = 1.57 \quad (\text{h})$$

$$T_d = 0.125 T_c = 0.393 \quad (\text{h})$$

を得る。比例感度は, いくら高くても良い (発振しない) ということで, 実験時は  $K_p = 14.65$ , ループ・ゲイン  $K = 31.8$  (Appendix 1 参照), サンプリング時間は,  $T_s = 99$  (sec) とした。

制御特性を調べるために、P制御のみと、PID制御を比較したのが Fig. 18 である。両者の間に、泡箱の冷却制御について大きな差異はないが、10分毎に階段状に降下する（冷却する）SET値に対して、P制御値は-04（K）のオフセットがある。これに対して、PID制御はSET値のほぼ中心にPV値が分布していることがわかる。PID制御の場合、式（3.16）からオフセットを計算すると、 $4(K/h) \times T_i / K = 0.2(K)$ となる。

## 6.2 定常運転時の温度、圧力制御

定常運転時における本体の時定数は、温度に関して式（4.4）に示されているが、圧力に関して全く同様で、いずれの場合も、gas cooler と本体間の見かけの熱伝導率  $k$  をパラメータとし、冷媒の流量  $q_N$ 、又は  $q_G$  によって変化しているのが特徴である。ここでは、式（4.4）に注目し、実験と比較することによって基本となる式（4.1）の妥当性を検討する。まず  $k$  を実験的に求めるために、次のようにして「インディシャル応答」を求めた。ピストンを一定周期 2.6（sec）、ストローク 27.6（mm）で連続動作させ、温度調節自動弁 PCV-3 の弁開度 30% としたとき、本体は、温度 VPT = 2.6（ata）（= 24 K）、圧力 PIA = 4.8（ata）で定常状態にあった。次に弁 PCV-3 の弁開度を 21.4% にステップ状に閉じたとき、VPT は時間と共に Fig. 19 に示すように変化した。この変化が式（6.3）で表わされるものとする、時定数  $T = 3.24$ （h）と求まる。

$$\Delta \theta(t) = \Delta \theta_{\infty} (1 - e^{-t/T}) \quad (6.3)$$

$\Delta \theta(t)$  : 温度変化

$\Delta \theta_{\infty}$  :  $t = \infty$ での温度変化

液化水素を含む本体、及び neck cooler の熱容量は、計算により  $C = 388$ （kJ / K）（Appendix 4, (h) 参照）となり、弁 PCV-3 の弁開度 21.4% に対応する冷媒の流量は、実測より  $q_N = 2.22$ （kg / h）、またインディシャル応答の実測より、 $T = 3.24$ （h）となるので、式（4.4）から  $k = 88.1$ （kJ / K·h）を得る。そこで式（4.3）は次のように表わされる。

$$\theta(t) = \theta' + (\theta_0 - \theta') \exp \left[ -\frac{1}{388} \left( 88.1 + \frac{q_N}{0.0702} \right) t \right] \quad (6.4)$$

式（4.4）、（6.4）より計算した時定数と、弁 PCV-3 を弁開度  $x = 26.5\%$ （ $C_v = 0.05$ ）から、 $x = 0\%$ （ $C_v = 0.02$ ）、及び  $x = 23.5\%$ （ $C_v = 0.045$ ）から  $x = 100\%$ （ $C_v = 0.63$ ）に、ステップ状に変化させたときの温度曲線から求めた時定数を Fig. 20 に示す。 $x = 100\%$  の場合は、温度曲線のごく最初の部分から求めたもので、すぐ過剰な冷媒が液のまま neck cooler から流出するようになり、式とは合わなくなる。ここで、冷媒流量が  $q_N$  のときの  $t = \infty$ での本体温度  $\theta'$  は、式（4.1）より

$$k(\theta_p - \theta') - q_N(h - h_i) + Q_i = 0$$

となるので、

$$\theta' = -\frac{(h - h_i)}{k} q_N + \frac{k\theta_p + Q_i}{k} \quad (6.5)$$

を得る。Appendix 3 に示すように、gas cooler の温度は  $\theta_p = 27.1$ （K）（ $\sim 4.8$  ata）であり、浸入熱は  $Q_i = 522$ （kJ / h）と求められるので、 $(h - h_i)$  は一定で、 $(h - h_i) = 267$ （kJ / kg）となり、

$$\theta' = 159.9 \cdot \frac{1}{\eta} q_N + 33.0$$

$$= -3.03 q_N + 33.0 \quad (6.6)$$

$$\text{但し } \eta = 52.9 \text{ (kg/h)}$$

を得る。この式を実験と比較したのが Fig. 21 で非常に良く一致している。但し  $\theta'$  は、neck cooler 入口の冷媒温度 22.0(K) より下ることはない。また、式 (6.6) の勾配は一定であるから、冷媒流量に対する温度のゲインは一定である。しかし実際の運転時においては、モニターしているのは流量ではなく弁開度であるから、弁開度に対する温度のゲインを求めておくのが便利である。弁開度を  $x\%$  (圧力換算で 0.2 ~ 1.0%) とすると、 $q_N = \eta C_v$  としてゲイン  $K_0$  は

$$\begin{aligned} K_0 &= \frac{d\theta'}{dx} = \frac{d\theta'}{dq} \cdot \frac{dq}{dx} \\ &= \left(-159.9 \times \frac{1}{\eta}\right) \cdot (4.31 q_N) \\ &= -689 C_v \end{aligned} \quad (6.7)$$

となり、グラフに示すと Fig. 22 のようになる。[4]図には、Fig. 24 のデータから求めた  $d\theta'/dx$  の値も記している。

定常運転において、温度設定を例えば 0.5 (K) だけ変更する場合には、CPU ゲイン  $K_P$  を大きくすると、設定直後の弁の状態は全開。又は全閉となり PID 制御の範囲と越えてしまう。以下にこのような「ON」、 「OFF」制御時における全体の温度変化の実例を上げ、それが式 (6.4) に従っていることを示す。TC 01 の PID 設定値を  $K_P = 14.65$ 、 $K_I = K_D = 0.5$  ( $T_I = 4 \text{ sec}$ 、 $T_D = 1 \text{ sec}$ 、 $T_S = 2 \text{ sec}$ ) としたときに、温度設定値を 3.26 (ata) (= 25.1 K) から 3.76 (ata) (= 25.8 K) とすると、弁 PCV-3 は設定変更と同時に全開となり、約 15 分間は全開のまま、その後、急激に全閉となる。全開時の温度変化を示すのが Fig. 23 である。弁が全開のときは  $q_N = 33.3$  (kg/h) であるから、Fig. 21 からわかるように、 $\theta'$  は neck cooler 入口での冷媒温度に近くなる。 $\theta' = 22.6$  (K) と推定して、式 (6.4) から求めた曲線も Fig. 23 に示してあるが、実験との一致は良い。Fig. 24 では、 $K_P = 14.65$ 、 $K_I = 0.25$ 、 $K_D = 1$  ( $T_I = 8 \text{ sec}$ 、 $T_D = 2 \text{ sec}$ 、 $T_S = 2 \text{ sec}$ ) で、3.26 (ata) (= 25.1 K) から 3.76 (ata) (= 25.8 K) に温度設定を変更したとき、弁が一度全開した後 PID 制御状態に入り、3.76 (ata) (= 25.8 K) に落付く様子、続いて設定を 3.76 (ata) から 3.26 (ata) に戻したとき、弁が全開、全閉の後、PID 制御により 3.26 (ata) に落付く様子が共に見られる。PID 制御に入ったと見なせる所では、既に温度変動は十分小さく、記録紙上では安定な直線部分としか表われていない。蒸気圧温度計 (VPT) の指示によって、本体温度は  $\pm 0.02$  (K) の範囲内で設定値に安定に制御されていることがわかった。圧力制御に関しても、状況は温度制御と全く同じであるので省略する。

## § 7. 結 論

DDC システムを導入することによって得た一番の利点は、冷却期間中、冷却速度を自動的にコントロールすることができたことである。この他に、本体上下の温度差を一定に保つように、冷却速度をコントロールする方法も考えられ、Appendix 2 に示すような検討もなされてきたが、時間がなく実験できなかった。

定値制御については、従来のアナログ制御と同様に、温度については  $\pm 0.02$  (K)、圧力についても  $\pm 0.02$



(ata) の精度で安定にコントロールすることができた。精度を上げるためには、ゲインも上げなければならないが、今回使用した高いゲインでは、過渡応答時に「ON」、 「OFF」制御となってしまう、PID制御の「制御性」については論じることができない。「ON」、 「OFF」制御については、泡箱本体の基本式から得られる予想と結果が良く一致しており、理解が深まったと言って良い。

DDC 定値制御による連続運転は、約1週間行なわれ、その間に「 $\bar{P}$ -P 反応」の写真(共同利用実験番号 E 62) が連続して、しかも安定に撮影された。DDC のテストが行なわれた 1981 年の 5 月から 7 月の間の運転は、KEK 1 m 水素泡箱にとって最後の運転でもあった。このテストで得られた知識、経験と成果を、KEK 1 m 水素泡箱の今後に直接活かすことはできないとしても、他の泡箱や低温機器への応用に間接的に役立てることができると確信する。

おわりに、本研究を支援して下さった西川所長、諏訪教授、尾崎主幹、高橋(嘉)教授に厚く御礼申し上げます。さらに DDC システムの作製に御協力いただいた、横河電機の岡田、正木両氏の御尽力に感謝すると共に、試験運転に御協力戴いた KEK 泡箱グループ、及び日本酸素の方々に御礼申し上げます。

## Appendix 1

本体固有のゲイン  $k_0$  は、式 (3.14) より

$$k_0 = -\frac{1}{\Delta m C_p} \left\{ \frac{m_2 C_p}{k_2 + m_2 C_p} \left( \theta_i - \frac{a}{C_p} \right) - \frac{m_1 C_p}{k_2 + m_1 C_p} \left( \theta_i - \frac{a}{C_p} \right) \right\}$$

と表される。式 (3.3) は、冷媒の流量が  $m_1$  のときの平衡温度  $-61$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) であるから、

$$\frac{m_1 C_p}{k_2 + m_1 C_p} \left( \theta_i - \frac{a}{C_p} \right) = -61$$

であり、従って  $\theta_i = -250$  ( $^{\circ}\text{C}$ )、 $a = 452$  ( $\text{J/g}$ )、 $C_p = 14.19$  ( $\text{J/g}\cdot^{\circ}\text{C}$ ) とすると

$$m_1 C_p = 0.276 k_2$$

$$\Delta m C_p = 30 k_2 - 0.276 k_2 \approx 29.7 k_2$$

となる。一方流量  $m_2 C_p = 30 k_2$  のときの見掛けの平衡温度を、上記  $\theta_i$ 、 $a$ 、 $C_p$  を使って計算すると

$$\frac{m_2 C_p}{k_2 + m_2 C_p} \left( \theta_i - \frac{a}{C_p} \right) = -273 \text{ (}^{\circ}\text{C)}$$

となるから、式 (3.14) の意味する所は冷媒の流量変化  $\Delta m C_p$  に対する本体の温度変化  $\Delta \theta$ 、すなわち本体固有のゲインとなり、 $k_2 = 0.1976$  ( $\text{J/K}\cdot\text{sec}$ ) (Appendix 4 (f) 参照) より

$$k_0 = -\frac{\Delta \theta}{\Delta m C_p} = -\frac{1}{29.7 k_2} (-273 + 61) = \frac{7.14}{k_2} = 10.03 \times 10^{-3} \left( \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{J}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}} \right)$$

である。ここで用いた、CC-熱電対のゲイン  $K_T$  は  $-61$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) 付近では

$$K_T = 32.7 \times 10^{-3} \text{ (mV}/^{\circ}\text{C)}$$

である。また mV 変換器のゲイン  $K_{mv}$ 、空電変換器のゲイン  $K_{EP}$  は、それぞれ

$$K_{mv} = 1.44 \text{ (mA/mV)}$$

$$K_{EP} = 0.0500 \left( \frac{\text{kg}/\text{cm}^3}{\text{mA}} \right)$$

である。弁 PCV-3 の弁特性 (イコールパーセント) から、弁開度  $x$  ( $0.2 \sim 1.0$  ( $\text{kg}/\text{cm}^3$ )) と弁の  $C_v$  値の間の特性は、 $d(C_v)/dx = 4.31 C_v$  の関係があり、冷媒の流量  $m$  が  $C_v$  値に比例すると仮定するとき

$$\frac{d(mC_p)}{dx} = 4.31 m C_p$$

となる。今、 $m_2 C_p = 30 k_2$  を代入すると、バルブのゲイン  $K_{cv}$  は、次の様な値になる。

$$K_{CV} = \frac{d(mC_p)}{dx} = 129.3 k_2 = 92.0 \times 10^3 \left( \frac{J/C \cdot h}{kg/cm^2} \right)$$

使用した CPU のゲイン  $K_p$  は、

$$K_p = 14.65$$

だったので比例制御の場合のループの一巡伝達関数は、

$$\begin{aligned} G(s) &= -K_T \cdot K_{mv} \cdot K_p \cdot K_{EP} \cdot K_{CV} \cdot \frac{k_0}{(1+T_\alpha \cdot s)(1+T_\beta \cdot s)} \\ &= -31.8 \frac{1}{(1+0.676s)(1+81.7s)} \end{aligned} \quad (A. 1)$$

となる。ただし、 $T_\alpha = -\frac{1}{\alpha} = 0.676h$ 、 $T_\beta = -\frac{1}{\beta} = 81.7h$  である。(6. 1 節参照)  
式 (A. 1) の Bode 線図を Fig. A. 1 に示す。

## Appendix 2

泡箱本体を冷却していく場合、云うまでもなく本体全体が一様な温度で、しかも運転者の設定した時間勾配で冷却されていくことが望ましい。しかし現実には本体のある点、例えば CC1 の温度をある設定した速度で冷却していこうとすると、neck cooler やそれに近い点 CC3 の温度は、CC1 に比べてずっと低くなり、冷却温度差  $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$  の大きさが窓ガラスの安全上しばしば問題になる。

この速度一定の冷却法は、 $\Delta\theta$  の許容範囲で  $\frac{d\theta_1}{dt}$  をある一定値に制御しようとするものであるが、現実には冷却中簡単に  $\Delta\theta$  の範囲を超えてしまうおそれがあるので、 $\frac{d\theta_1}{dt}$  をかなりひかえ目に選んでおかなければならない。そこでこれより効率のよい冷却法として、逆に  $\Delta\theta$  を許容範囲いっぱいまで冷却し  $\frac{d\theta_1}{dt}$  がある許容範囲内であればよいとする方法がある。本所泡箱の冷却の場合、経験的には  $\frac{d\theta_1}{dt}$  は、そう簡単には許容範囲を超えることはなく有効と思われるので以下にその検討を試みる。

まず、 $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$  を計算で求めると、式 (3. 9) から

$$\Delta\theta(t) = \frac{C_1}{k_1} \left( \frac{m_2 C_p}{k_2 + m_2 C_p} - \frac{m_1 C_p}{k_2 + m_1 C_p} \right) \left( \theta_i - \frac{a}{C_p} \right) \frac{\alpha\beta}{\beta - \alpha} \left( e^{\alpha t} - e^{\beta t} \right)$$

式 (6. 2) を借用して

$$\frac{C_1}{k_1} \left( \frac{m_2 C_p}{k_2 + m_2 C_p} - \frac{m_1 C_p}{k_2 + m_1 C_p} \right) \left( \theta_i - \frac{a}{C_p} \right) \frac{\alpha\beta}{\beta - \alpha} = -62.5 (^\circ C)$$

であるから、 $\Delta\theta$  の様子は Fig. A. 2 のようになる。

冷媒をステップ状に  $m_2 C_p - m_1 C_p = \Delta m C_p$  だけ変化させたときの温度変化を  $\Delta\theta(t)$ 、伝達関数を

F(s) とすると

$$\Delta \theta(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[ F(s) \frac{\Delta m C_p}{s} \right]$$

となる。ラプラス変換すると

$$\begin{aligned} F(s) \frac{\Delta m C_p}{s} &= \mathcal{L} \{ \Delta \theta(t) \} \\ &= \frac{C_1}{k_1} \left( \frac{m_2 C_p}{k_2 + m_2 C_p} - \frac{m_1 C_p}{k_2 + m_1 C_p} \right) \left( \theta_i - \frac{a}{C_p} \right) \frac{\alpha \beta}{\beta - \alpha} \times \\ &\quad \times \left( -\frac{1}{1 + T_\alpha \cdot s} + \frac{1}{1 + T_\beta \cdot s} \right) \frac{1}{s} \\ &\quad - \frac{1}{\alpha} = T_\alpha, \quad -\frac{1}{\beta} = T_\beta \end{aligned}$$

故に

$$\begin{aligned} F(s) &= \frac{-1}{\Delta m C_p} \frac{C_1}{k_1} \left( \frac{m_2 C_p}{k_2 + m_2 C_p} - \frac{m_1 C_p}{k_2 + m_1 C_p} \right) \left( \theta_i - \frac{a}{C_p} \right) \frac{\alpha \beta}{\beta - \alpha} \times \\ &\quad \times \left( \frac{1}{1 + T_\alpha \cdot s} - \frac{1}{1 + T_\beta \cdot s} \right) \\ &= k_0 \left( \frac{1}{1 + T_\alpha \cdot s} - \frac{1}{1 + T_\beta \cdot s} \right) \end{aligned}$$

$$k_0 = -\frac{1}{\Delta m C_p} \cdot \frac{C_1}{k_1} \left( \frac{m_2 C_p}{k_2 + m_2 C_p} - \frac{m_1 C_p}{k_2 + m_1 C_p} \right) \left( \theta_i - \frac{a}{C_p} \right) \frac{\alpha \beta}{\beta - \alpha}$$

となる。ブロック図 Fig. A. 3 において、 $\Delta m C_p = 29.7 k_2 = 21.14 \times 10^3 \text{ (J/}^\circ\text{C}\cdot\text{h)}$  (Appendix 1 参照) とすると、各々のゲインは、

$$k_0 = \frac{62.5}{\Delta m C_p} = \frac{62.5}{m_2 C_p - m_1 C_p} = \frac{62.5 \text{ (}^\circ\text{C)}}{21.14 \times 10^3 \text{ (J/}^\circ\text{C}\cdot\text{h)}} = 2.95 \times 10^{-3} \text{ (} \frac{^\circ\text{C}}{\text{J/}^\circ\text{C}\cdot\text{h}} \text{)}$$

$$K_T = 32.7 \times 10^{-3} \text{ (mV/}^\circ\text{C)}$$

$$K_{mv} = 1.44 \text{ (mA/mV)}$$

$$K_P = K_P \text{ (mA/mA)}$$

$$K_{EP} = 0.05 \text{ (kg/cm}^3 \text{) / (mA)}$$

$$K_{CV} = 92.0 \times 10^3 \text{ (J/}^\circ\text{C}\cdot\text{h) / (kg/cm}^3 \text{)}$$

であるから、

$$K = K_T \cdot K_{mv} \cdot K_P \cdot K_{EP} \cdot K_{CV} \cdot k_0 = 0.639 K_P$$

とすると CPU を含む一巡伝達関数  $G(s)$  は次のようになる。

$$G(s) = 0.639 K_p \left( \frac{1}{1+T_a \cdot s} - \frac{1}{1+T_\beta \cdot s} \right) \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_D \cdot s \right)$$

またステップ入力  $\Delta \theta \text{ set}$  に対する閉回路特性  $\Delta \theta(s)$  は次のようになる

$$\frac{\Delta \theta(s)}{\Delta \theta \text{ set}} = \frac{G(s)}{1+G(s)} \cdot \frac{1}{s}$$

このような回路では、微分項は積分項に比べて効かないので、簡単にこの制御系の特性を知るため、比例ゲイン  $K_p = 1$ 、微分時間  $T_D = 0$  の場合について、積分時間  $T_i$  に対する  $\Delta \theta(t)$  の効果を見ると、遅れ要素  $T_a = 0.676(\text{h})$ 、 $T_\beta = 81.7(\text{h})$  として  $T_i = 1(\text{h})$  では

$$\frac{\Delta \theta(t)}{\Delta \theta \text{ set}} = \mathcal{L}^{-1} \left[ \frac{\Delta \theta(s)}{\Delta \theta \text{ set}} \right] = 0.98 \left[ 1 - 0.68 e^{-0.49t} - 0.32 e^{-1.94t} \right]$$

$T_i = 0.5(\text{h})$  では

$$\frac{\Delta \theta(t)}{\Delta \theta \text{ set}} = 0.991 + 1.073 e^{-1.22t} \sin(0.65t + \phi)$$

$$\phi = -112.6^\circ$$

$T_i = 0.1(\text{h})$  では

$$\frac{\Delta \theta(t)}{\Delta \theta \text{ set}} = 1.00 + 1.00 e^{-2.21t} \sin(2.8t + \phi)$$

$$\phi = -95.6^\circ$$

となり、Fig. A. 4 のようになる。泡箱本体の冷却には、 $T_i = 0.1(\text{h})$  の例が効果的である。

### Appendix 3

泡箱に液化水素を満し、定常的に膨張・圧縮が繰り返されている状態で系が全体として平衡にあるとすると、

$$C \frac{d\theta}{dt} = k(\theta_p - \theta) - q_N \cdot (h - h_i) + Q_1 = 0$$

である。本文より  $k = 88.1 (\text{kJ}/\text{K}\cdot\text{h})$  であり、 $\theta_p = 27.1(\text{K})$  (4.8 ata) である。 $Q_1$  は泡箱内で定常的に発生する熱、すなわち放射によってガラス窓より入って来る熱が約 20 (W)<sup>5)</sup>、膨張・圧縮ごとの Carnot Cycle に

よる熱が約 125 (W) で合計  $Q_1 = 145 (W) = 522 (kJ/h)$  と見込まれる。通常、泡箱装置は水素圧縮機と液化器が持っている能力の半分位の所で運転しており、その出力は大体 250 (W) である。これを 2 分して neck cooler と gas cooler に使用している。従ってこのことから Carnot Cycle による発熱の見当をつけることも出来るが、膨張・圧縮ごとの泡箱内の体積、圧力変化、いわゆる PV 曲線から経験的にもこの程度の値が得られている。

ここで、弁 PCV-3 の弁開度  $x$  に対応した  $C_v$  値によってきまる冷媒の流量  $q = \eta C_v$  ( $\eta$  は定数) と、その流量で平衡に達した温度、又は平衡に達すると推定される温度  $\theta$  を実験値から拾い、上式に入れて  $h - h_i$  を求めると Table A. 1 となり、 $h - h_i$  は一定となる。特に、完全に温度平衡に達したことを確認したものの (\* 印) から求めた値は良く一致しており、その平均値は  $267 (kJ/kg)$  である。定数  $\eta = q / C_v$  は、 $x = 21.4(\%)$ 、 $C_v = 0.042$  のとき測定した冷媒の流量  $q = 2.22 (kg/h)$  を用いて  $\eta = 52.9 (kJ/h)$  とした。常温付近では計算式<sup>20)</sup>もあるが、低温で適用すると測定値の方が 3 倍大きい。

文頭に述べた状態で系が平衡にあるとすると、冷媒は Fig. A. 5 において、 $\theta$ 、上の enthalpy  $h_0$  の点で流入し、温度  $\theta$ 、上  $h_0$  の点で流出する。冷媒の流量は少く、neck cooler を通る間に完全に熱交換され、冷媒中の液はガス化され、さらにガスは、泡箱本体の温度と同じ温度になって流出するものとする。冷媒の流量が、 $q_0$  で平衡状態にあったものとし、今ステップ状に流量を  $q_0$  から  $q'$  に変化したとすると、neck cooler へ入る冷媒の enthalpy は、それに伴って  $h_{i0}$  から  $h_{i'}$  に変わり、また流出ガスの enthalpy も本体温度の低下とともに  $h$  から  $h'$  になり、やがて  $h'$  になって再び平衡に達する。今  $q_0$  から  $q'$  に変化して後、時間  $t$  を経た時の本体温度を  $\theta$  とすると、次式が成立する。

$$\begin{aligned} C \frac{d\theta}{dt} &= k(\theta_P - \theta) - q'(h - h_{i'}) + Q_1 \\ &= k \left\{ (\theta_P - \theta') + (\theta' - \theta) \right\} - q' \left\{ (h - h') + (h' - h_{i'}) \right\} + Q_1 \end{aligned}$$

冷媒の入口温度  $\theta_P$  はこの場合常に一定で使用しているので、「 $\theta - S$ 」線図から「 $\theta - h$ 」の関係を見てみると次の関係がある。

$$\theta - \theta' = 0.0702 (h - h')$$

さらに平衡点  $\frac{d\theta}{dt} = 0$  では、次のようになり

$$k(\theta_P - \theta') - q'(h' - h_{i'}) + Q_1 = 0$$

以上の 3 式から、 $h - h'$ 、 $h' - h_{i'}$  を消去すると

$$C \frac{d\theta}{dt} = - \left( k + \frac{q'}{0.0702} \right) (\theta - \theta')$$

となる。

## Appendix 4

- (a) neck cooler 入口の蒸気圧から、冷媒の温度は 22 ~ 23 (K) であるので、 $\theta_i = -250$  (°C) とし  
て差支えない。
- (b)  $-252.8$  (°C) で  $a = 107.8$  (cal/g) =  $452$  (J/g)<sup>13)</sup> となる。
- (c)  $0$  °C, 1 atm で  $C_p = 14.191$  (J/g°C), 2 原子分子では温度にあまり依存しないので、この値を代  
用した。<sup>13)</sup>
- (d) 本体の熱容量は、構成要素であるステンレス部分とガラスの部分とにわけて考える。ステンレス部分  
の質量 =  $2236$  (kg) で、比熱 =  $0.11$  (cal/g°C) =  $0.462$  (J/g°C) (18Cr 8Ni, 20 °C)<sup>14)</sup>,  
比熱 =  $0.10$  (cal/g°C) (オーステナイト系ステンレス 200 K)<sup>15)</sup> 同様にして、ガラス (BK-7)  
部分の体積 =  $109.6 \times 10^3$  (cm<sup>3</sup>), 比重 = 2.53, 比熱 =  $0.67$  (J/g°C) (10 ~ 50 °C)。但し、ク  
ラウンガラスのデータを参照した<sup>13)</sup>。比熱 =  $0.132$  (cal/g°C) =  $0.55$  (J/g°C) (200 K, パイレッ  
クス)<sup>22)</sup>
- (e) 同様に neck cooler の熱容量は、以下の構成要素から求められる。  
ステンレス部分の質量は、体積 =  $11.80 \times 10^3$  (cm<sup>3</sup>), 比重 = 7.82 (18Cr 8Ni, 20 °C)<sup>14)</sup>, 銅部分  
の質量は、質量 =  $21.8$  (kg), 比熱 =  $0.0915$  (cal/g°C) =  $0.384$  (J/g°C) (20 °C),<sup>14)</sup> 比熱 =  
 $0.380$  (J/g°C) (0 °C)<sup>13)</sup> 比熱 =  $0.35$  (J/g°C) (200 K),<sup>16)</sup> 比熱 =  $0.350$  (J/g°C) (200  
K)<sup>21)</sup>, 比熱 =  $0.0854$  (cal/g°C) =  $0.359$  (J/g°C) (200 K)<sup>22)</sup>
- (f) 泡箱本体温度を 20 (K), top plate 温度を 273 (K) とし、流入熱量 50 (W) として計算する  
(Reference 5) 参照) と、

$$k_2 = \frac{50 \text{ W}}{273 \text{ (K)} - 20 \text{ (K)}} = 0.1976 \text{ (J/K} \cdot \text{sec)}$$

を得る。


- (g)  $m_2 C_p = 30 k_2$  から  $m_2 = 0.418$  (g/sec), 標準状態では  $16.7$  (NM<sup>3</sup>/h) となる。
- (h) (d) と同様にして、ステンレス部分の質量 =  $2328$  (kg), 比熱 =  $0.004$  (cal/g°C) =  $0.017$   
(J/g°C)<sup>15)</sup>, 銅部分については、質量 =  $21.8$  (kg), 比熱 =  $0.016$  (J/g°C) (25 K)<sup>17)</sup>, 比熱 =  
 $0.015$  (J/g°C) (-250 °C)<sup>13)</sup>, ガラス部分については、質量 =  $277$  (kg), 比熱 =  $0.027$  (J/g°C)  
(20 K, 但しパイレックス・ガラスのデータ)<sup>16)</sup>, 比熱 =  $0.0055$  (cal/g°C) =  $0.023$  (J/g°C) (20  
K)<sup>22)</sup> であり、液化水素については、体積 =  $420$  (ℓ), 密度 =  $0.0646$  (g/cm<sup>3</sup>) (25 K, 飽和状態)<sup>18)</sup>,  
比熱 =  $2.991$  (cal/g°C) =  $12.53$  (J/g°C) (25 K, 飽和状態)<sup>19)</sup> から、低温での泡箱本体の熱  
容量を求めることができる。

## References

- 1) H. Hirabayashi., et al. Jpn.J. Appl. Phys. 11 (1972) 1187.
- 2) I. Kita : Cryogenic Engineering 3 (1968) 112(in Japanese).
- 3) H. Hirabayashi., et al. : Cryogenic Engineering 6 (1971) 146 (in Japanese).
- 4) Y. Doi., et al. : KEK-77-25 (1978).
- 5) N. Ishihara., et al., Jpn.J. Appl. Phys. vol 18, No 7(1979) 1341 ~ 1351pp
- 6) DDCによるプロセス制御(1)~(3). 横河電気(1967).
- 7) 山下, 保志: デジタルプロセス制御. コロナ社(1969).
- 8) 増淵正美: 自動制御. 朝倉書店(1978).
- 9) 増淵正美: 自動制御基礎理論. コロナ社(1971).
- 10) 宮崎誠一: 化学プロセスの制御. 産業図書(1971).
- 11) 長谷川健介: 制御理論入門. 昭晃堂(1977).
- 12) YODIC 100 Instruction Manual : ADCOC. YOKOGAWA ELECTRIC WORKS (1978).  
" : ADSEC. "
- 13) 理科年表 : 丸喜(1981).
- 14) 機械実用便覧 : 日本機械学会(1972).
- 15) ステンレス鋼便覧 : 日刊工業(1975).
- 16) 小林俊一 : 低温技術. 東大出版会(1977).
- 17) Handbook on Materials for Superconducting Machinery (NBS) : Nov (1974). MSIC-HB-04
- 18) ENCYCROPEDIE DES GAZ : L'AIR LIQUIDE (1976).
- 19) Properties of Materials at Low Temperature (Phase 1): PERGAMON PRESS (1961).
- 20) バルブ便覧 : 日本バルブ工業会編. 日刊工業(1969).
- 21) 田沼静一 : 低温. 共立出版(1974).
- 22) RUSSELL B. SCOTT : CRYOGENIC ENGINEERING. D.VAN NOSTRAND COMPANY INC. (1966).



### Figure Captions

- Fig. 1 Cross-sectional view of the bubble chamber.
- Fig. 2 Cooling loops for the DDC of the bubble chamber.
- Fig. 3 Cooling model of the chamber.
- Fig. 4 Control loop for the chamber cooling.
- Fig. 5 Model for a constant operation.
- Fig. 6 Overview of the computer system.
- Fig. 7 Conceptional diagram of the DDC.
- Fig. 8 Actual DDC diagram.
- Fig. 9 Photograph of the Manual Station (M/S) controller.
- Fig. 10 Flow-chart of the MODE-I & II.
- Fig. 11 DDC software system.
- Fig. 12 Diagram of the DDCSYS.
- Fig. 13 General flow-chart of the main control program DDCBC  
A symbol mark () shows subroutine program; flows shown by dotted lines are not used in our system.
- Fig. 14 Correlation in LIST connection:  
(a) i-th TAG connection in LIST,  
(b) allocation of LIST group.
- Fig. 15 Typical hard-copy output from the CLM-3 in a cooling process.
- Fig. 16 Indicial response for the chamber cooling.  
Dotted lines show the results of the calculation, and solid ones experimental data.  $T_{\max}$  is the time when  $(d\theta_1/dt)$  has the maximum and also at that time the difference  $(\theta_1 - \theta_2)$  has the maximum.
- Fig. 17 Cooling of the bubble chamber in the MODE-I:  
(a) a cooling curve and corresponding valve opening,  
(b) temperature difference  $\Delta\theta$  between the lower (CC1) and the upper (CC3) thermo-couples of the chamber, and cooling rate.

- Fig. 18 Difference between P control and PID control in the MODE-I.
- Fig. 19 Temperature indicial response in a constant operation.
- Fig. 20 Time constant  $T$  as a function of  $C_v$  value.  
The figure also shows the correspondence between  $C_v$  and  $x$  (valve opening).
- Fig. 21 Equilibrium temperature of the bubble chamber versus amount of coolant flow.
- Fig. 22 Bubble chamber gain  $K_0$  versus  $C_v$  value of the valve PCV-3.
- Fig. 23 Temperature indicial response when the valve PCV-3 goes to full-open.
- Fig. 24 Examples of step response in the MODE-II temperature control.
- Fig. A.1 Bode diagram of a round transfer function of the bubble chamber in cooling process.
- Fig. A.2 Time dependence of temperature difference  $\Delta\theta$  between the thermo-couples CC1 and CC3.
- Fig. A.3 Block diagram for the temperature difference control.
- Fig. A.4 Transient responses in the temperature difference control for various values of the integral time  $T_I$ .
- Fig. A.5 Temperature-Entropy diagram of hydrogen.

Table 1. Principal parameters for the KEK 1 m bubble chamber

---

1. Body	
Material	Modified CK-20 (3.8% Mn stainless steel)
Expansion volume	430 ℓ
visible volume	280 ℓ
Inner diameter	90 cm at front side and 105 cm at rear side
Inner depth	38 cm
2. Window glass	
Material	BK-7 optical glass
Dimension	92 cm front side and 100 cm rear side diameter, and 14.5 cm thickness
Refractive index	1.516
3. Cooling system	
Hydrogen liquefier	Simple Linde type, 60 ℓ/hr
Reservoir tank	4000 ℓ volume
Cooling loop	Three cooling loops: a neck-cooler loop, a piston-cooler loop and a gas-cooler loop
4. Hydraulic expansion system	
Cold piston	SUS316L stainless steel with Teflon piston ring of 45 cm diameter
Maximum stroke	5 cm
Stroke for 1% expansion	2.7 cm
Maximum piston velocity	4 m/sec
Expansion cycle time	35 msec
5. Optics	
Illumination	Bright field type using Scotchlite SPR-1042
Lens	Focal length and opening of 54.95 mm/8, field angle of 60 degrees and magnification of 1/27
Camera	Three-eyed pulse-drive camera
6. Magnet	
Central maximum field	18 kG
Maximum current	6500 A
Stored energy	5.3 MJ
Power dissipation	2.2 MW
Magnet yoke	Iron SM41C of about 100 t
Coil	Copper of about 15 t
Coil gap	70 cm wide × 104 cm × 84 cm

---

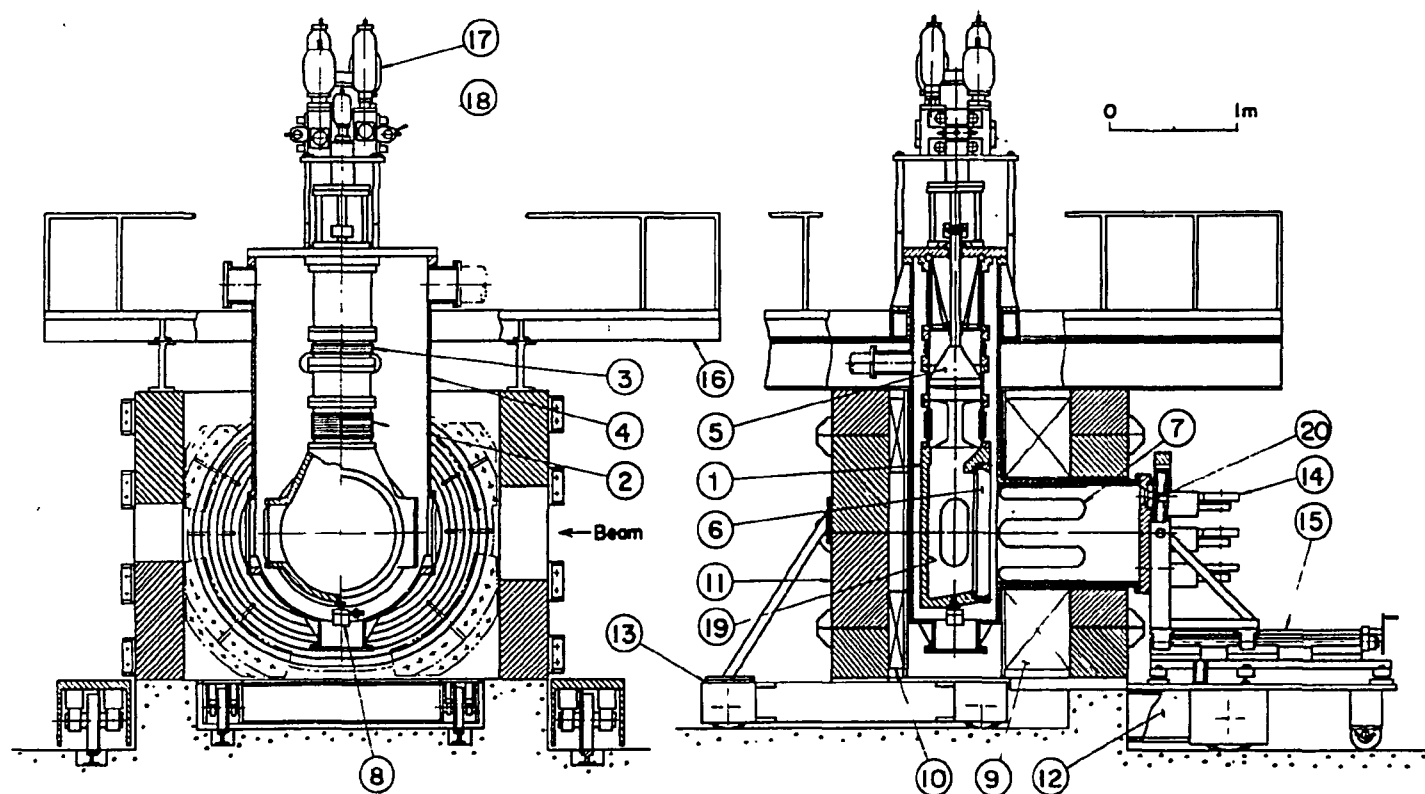


Fig. 1 Cross-sectional view of the bubble chamber

- |                             |                                      |
|-----------------------------|--------------------------------------|
| (1) chamber body            | (10) auxiliary coil                  |
| (2) neck cooler             | (11) magnet yoke                     |
| (3) gas cooler              | (12) carrier for front block of yoke |
| (4) vacuum tank             | (13) carrier for rear block of yoke  |
| (5) cold piston             | (14) cameras and its panel           |
| (6) viewing window          | (15) movable stage for camera panel  |
| (7) camera extension shield | (16) stage                           |
| (8) cold valve              | (17) actuator of hydraulic expander  |
| (9) main coil               | (18) servo valves                    |

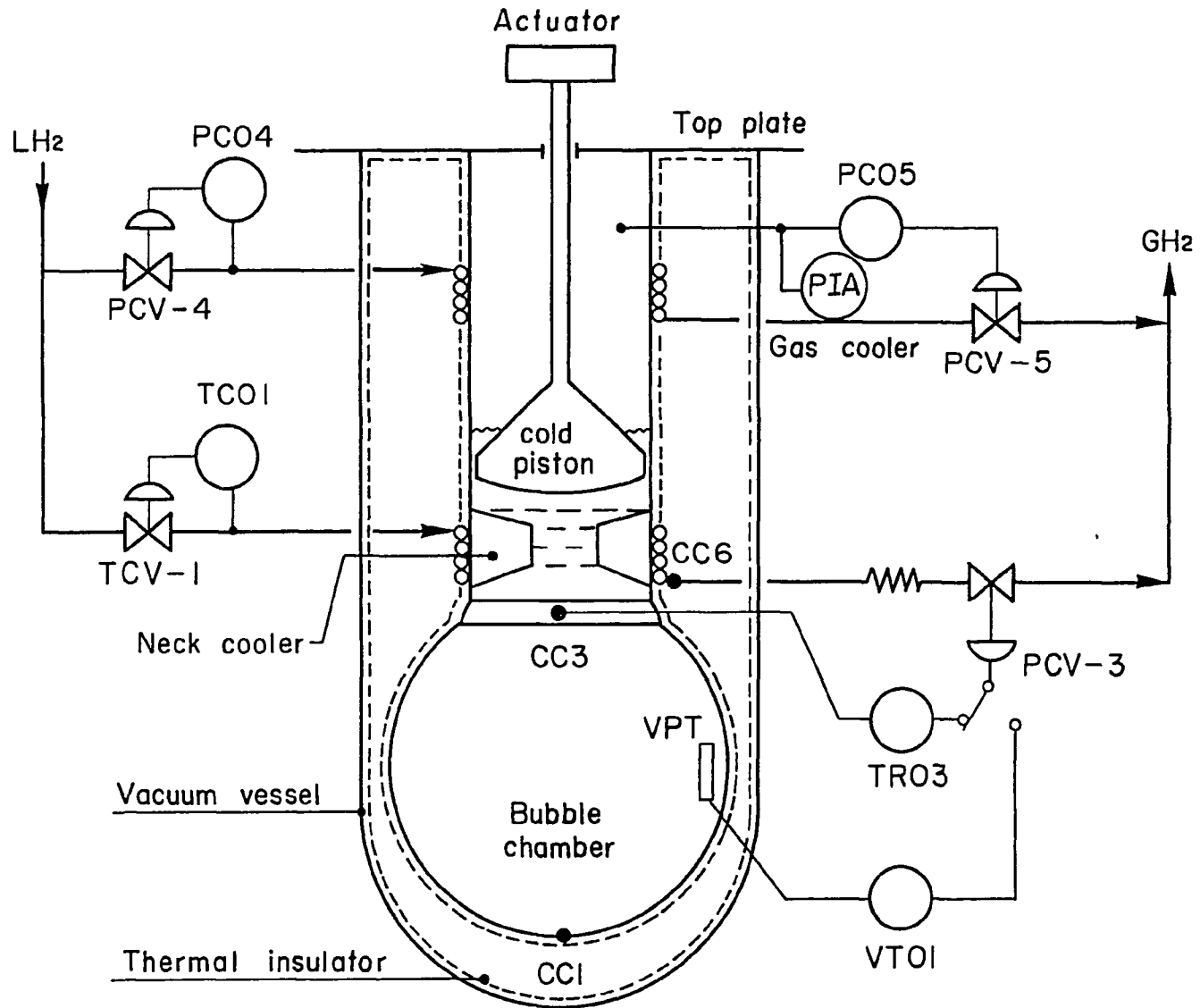


Fig. 2

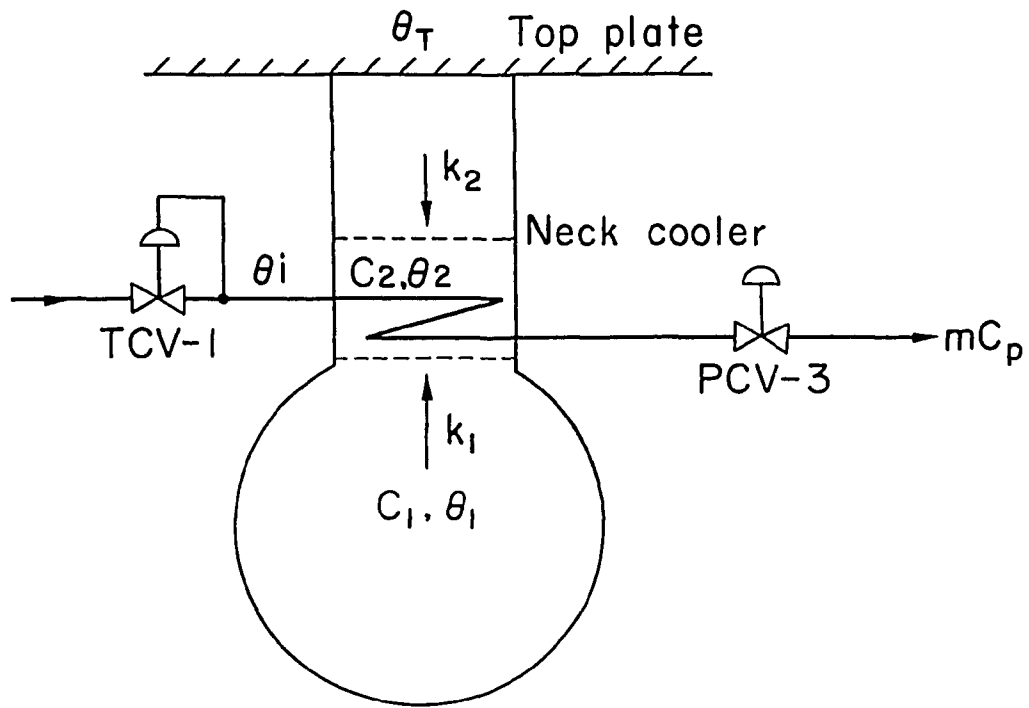


Fig. 3

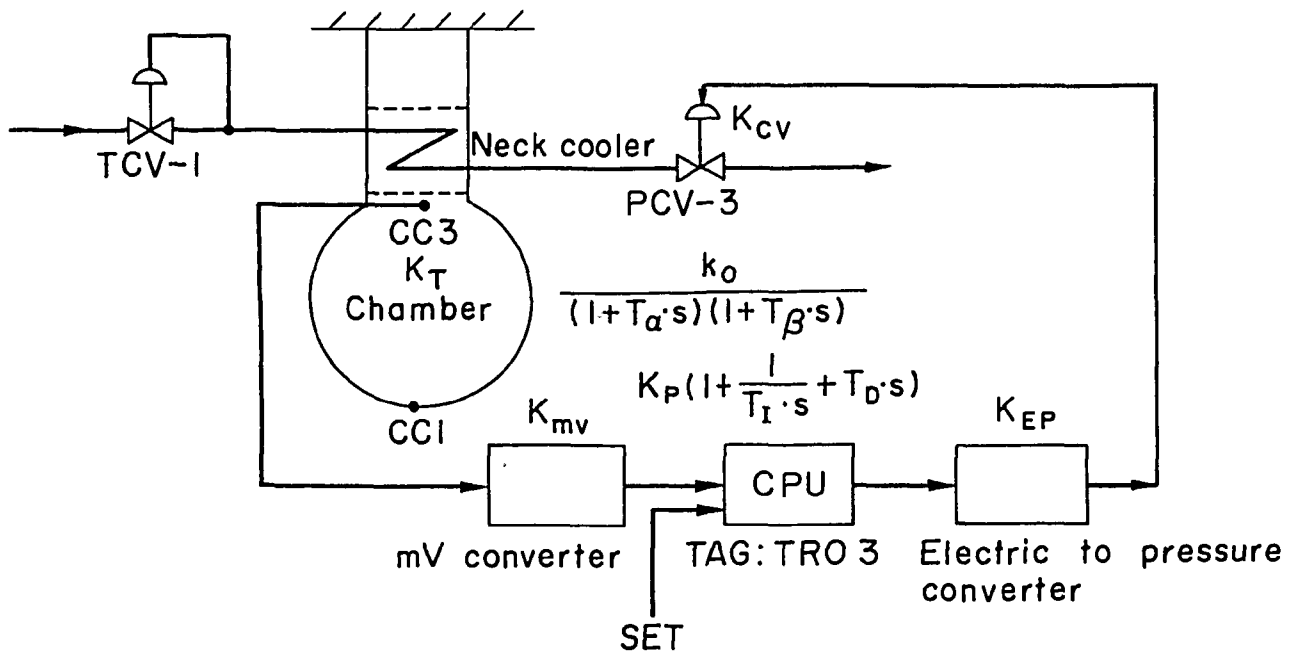


Fig. 4

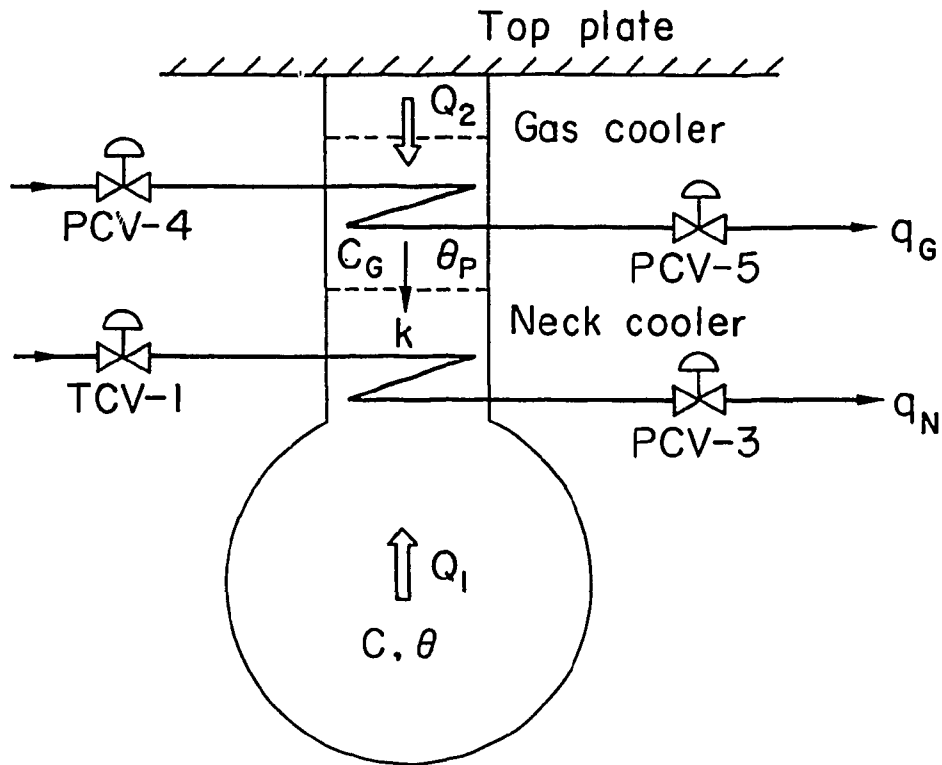
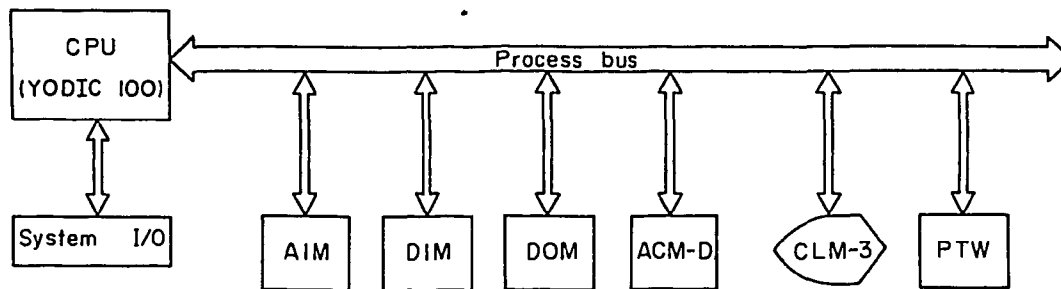


Fig. 5



AIM : Analog input module

DIM : Digital input module

DOM : Digital output module

ACM-D : Analog output module

CLM-3 : Operators console & data display

PTW : Process type writer

Fig. 6





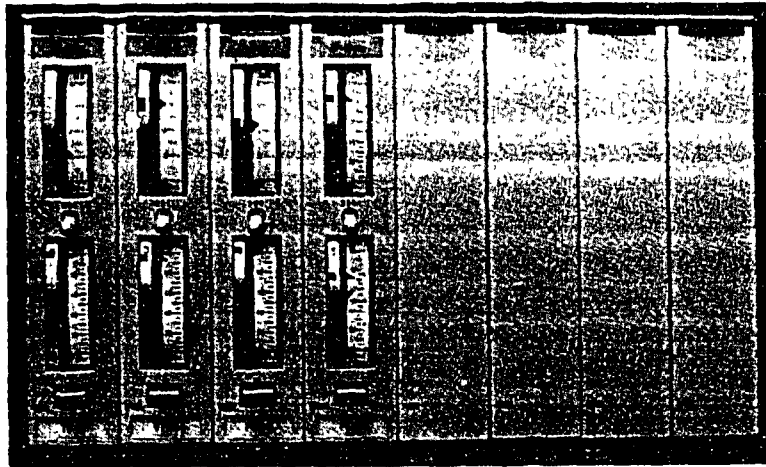


Fig. 9

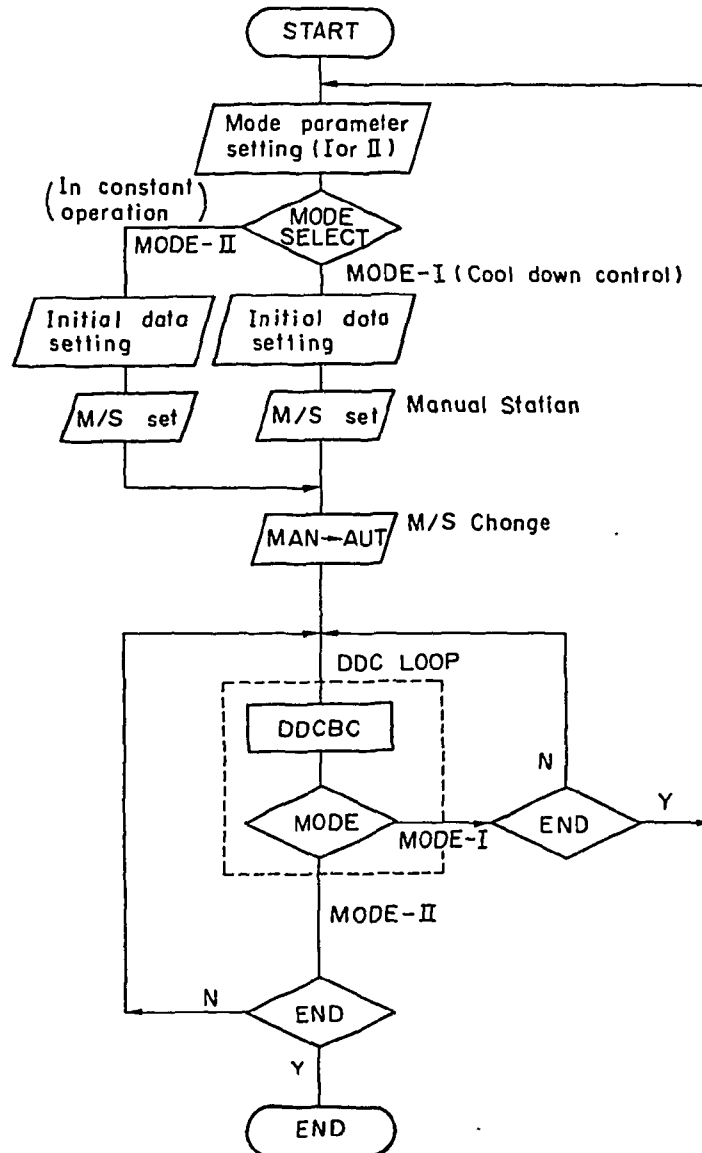
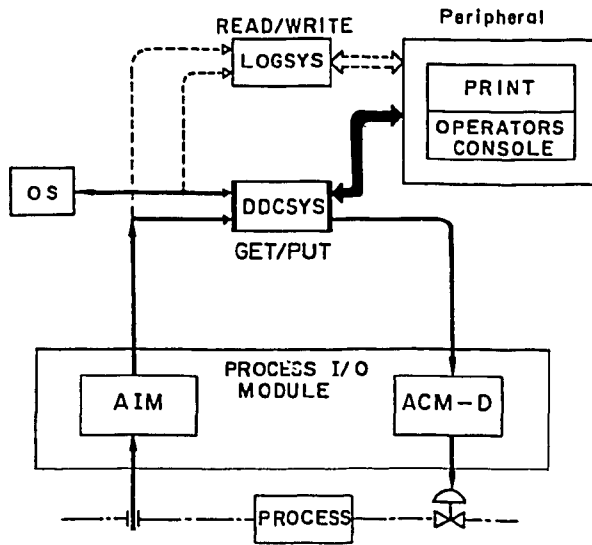


Fig. 10



OS : Operating system.  
 READ/WRITE : Read & write subroutine (2Word data)  
 GET/PUT : Read & write subroutine (1Word data)  
 LOGSYS : Data logging system.

Fig. 11

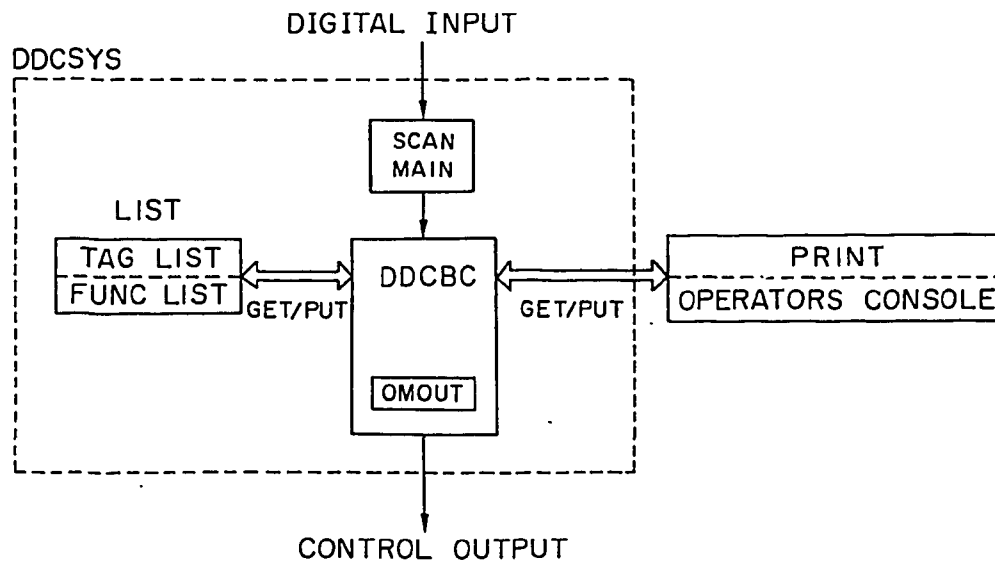
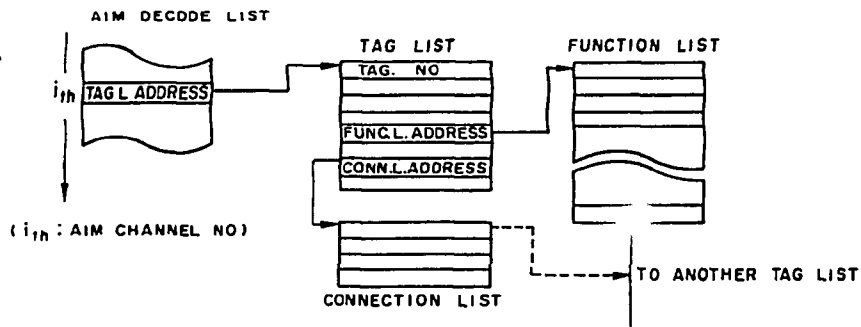
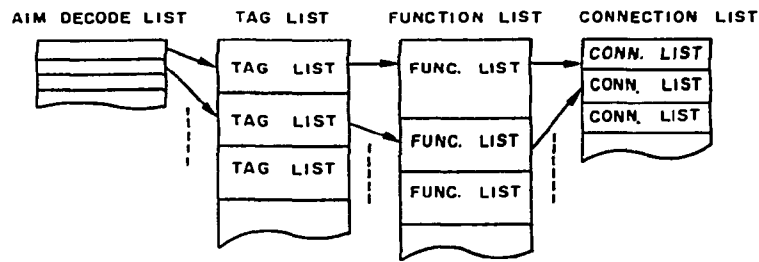


Fig. 12



(a)



(b)

Fig. 14

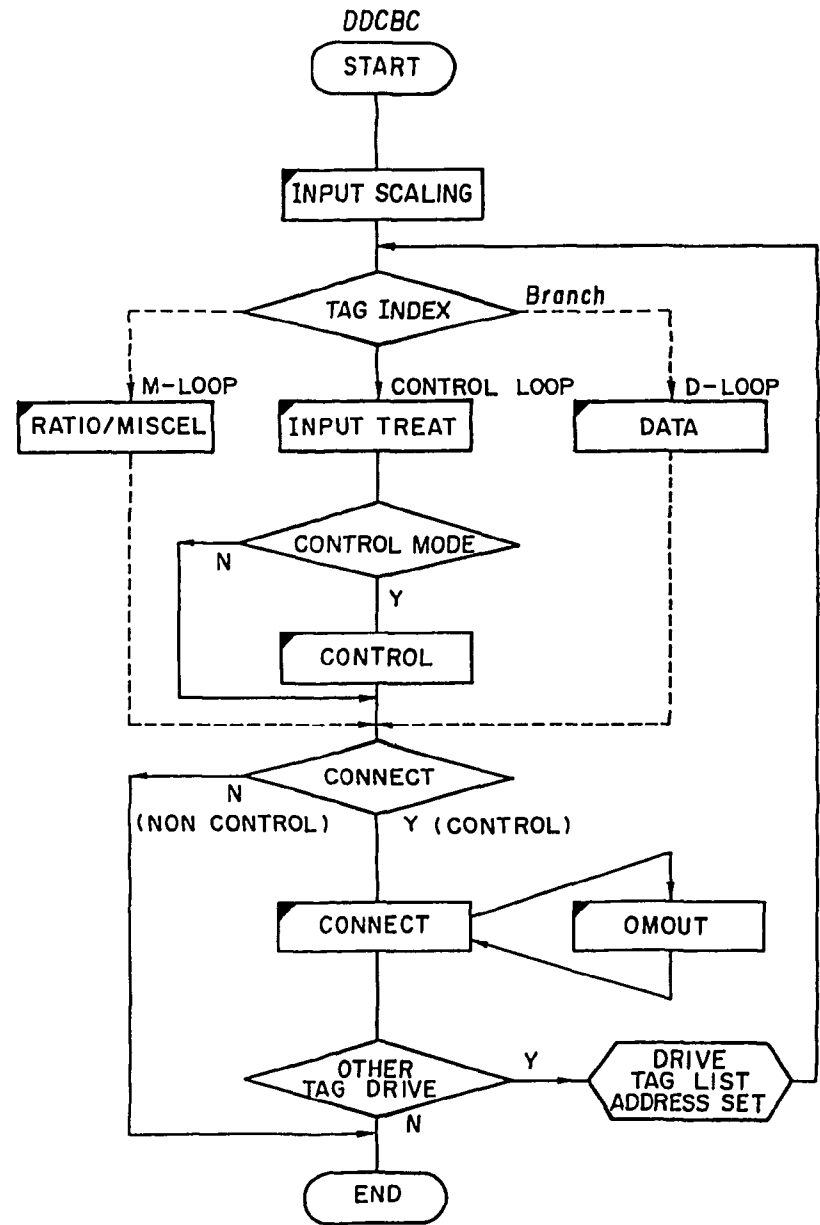


Fig. 13



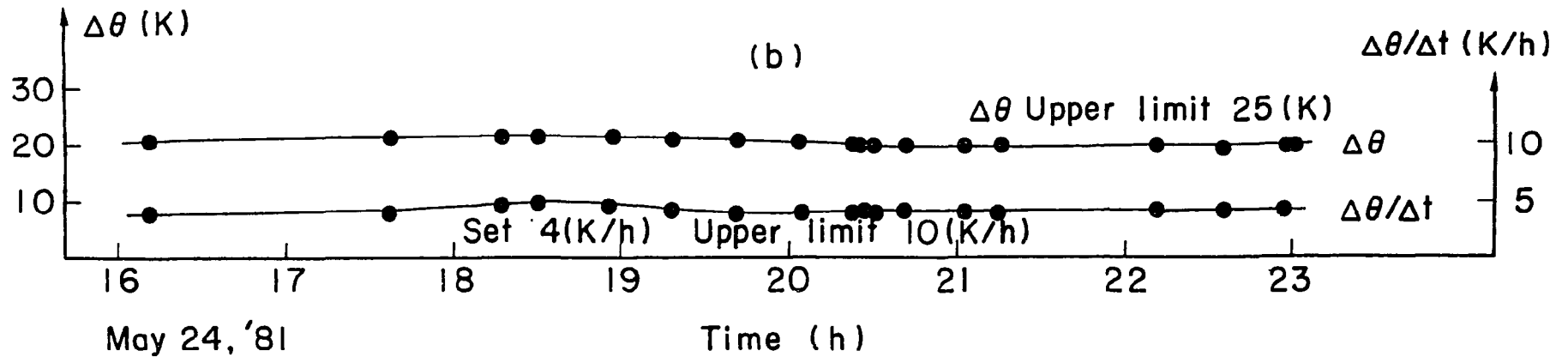
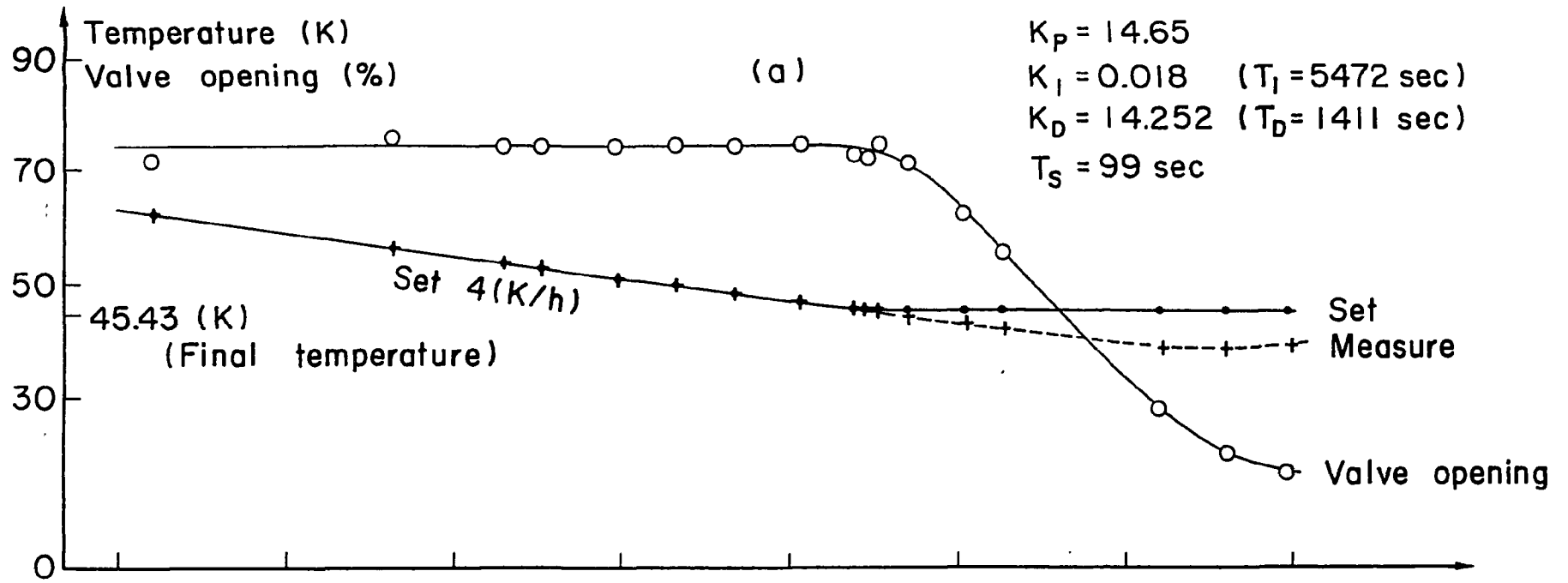


Fig. 17

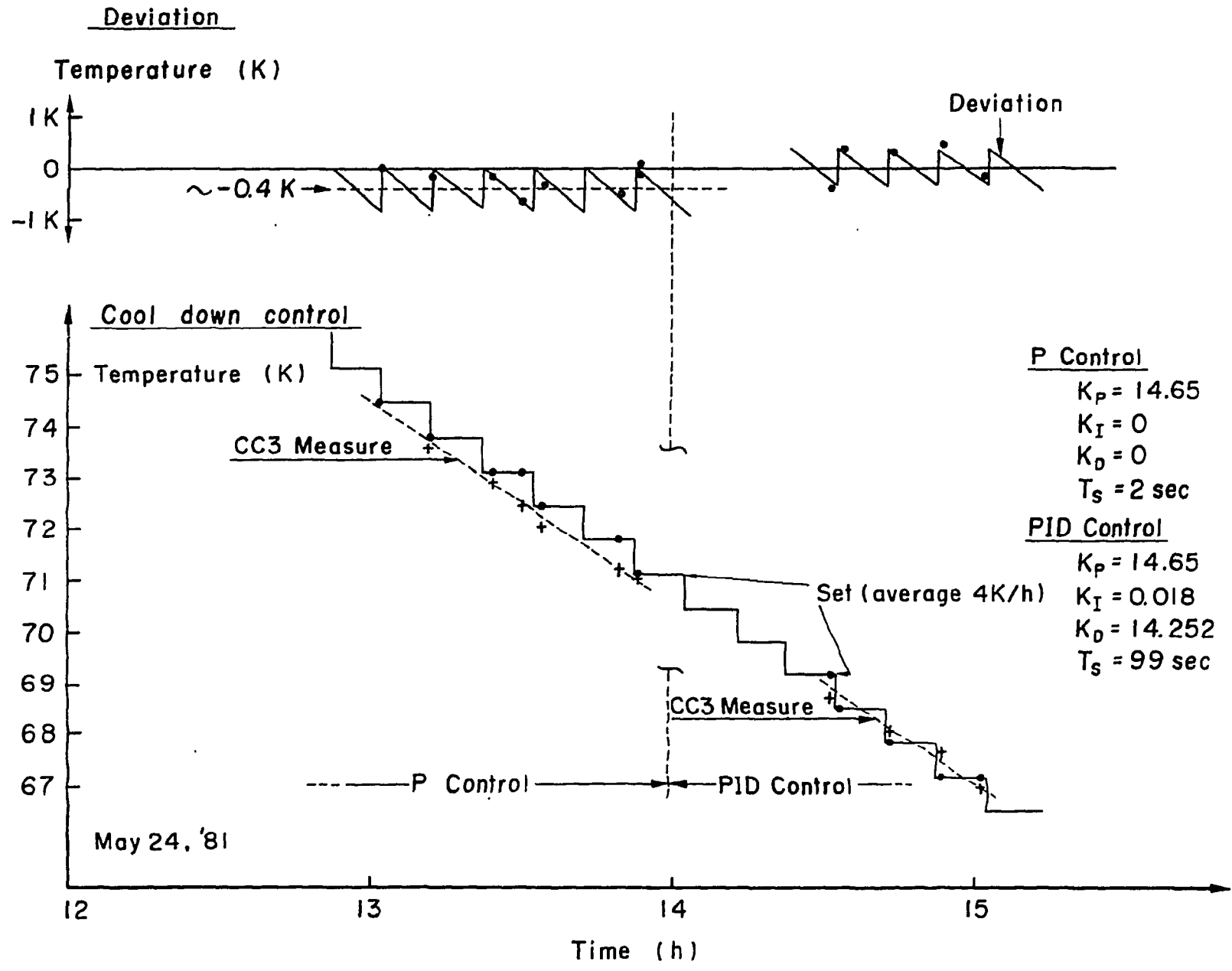


Fig. 18

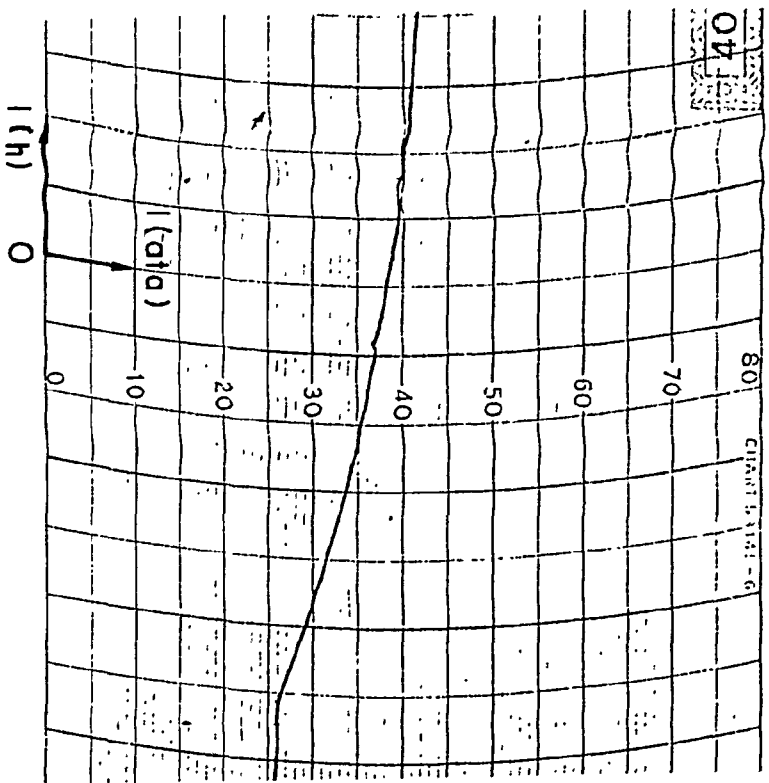


FIG. 19

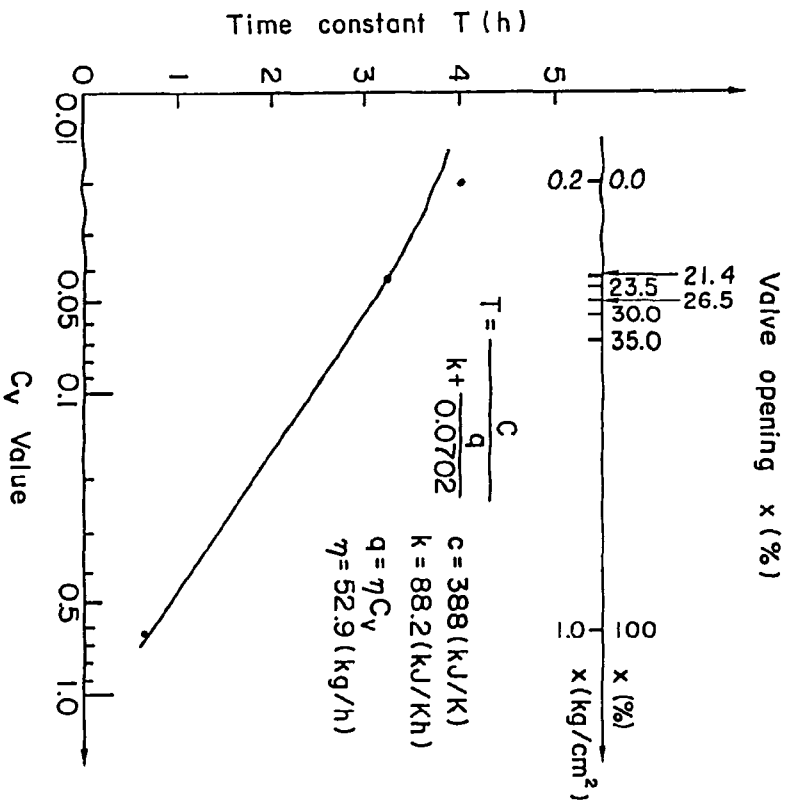


FIG. 20

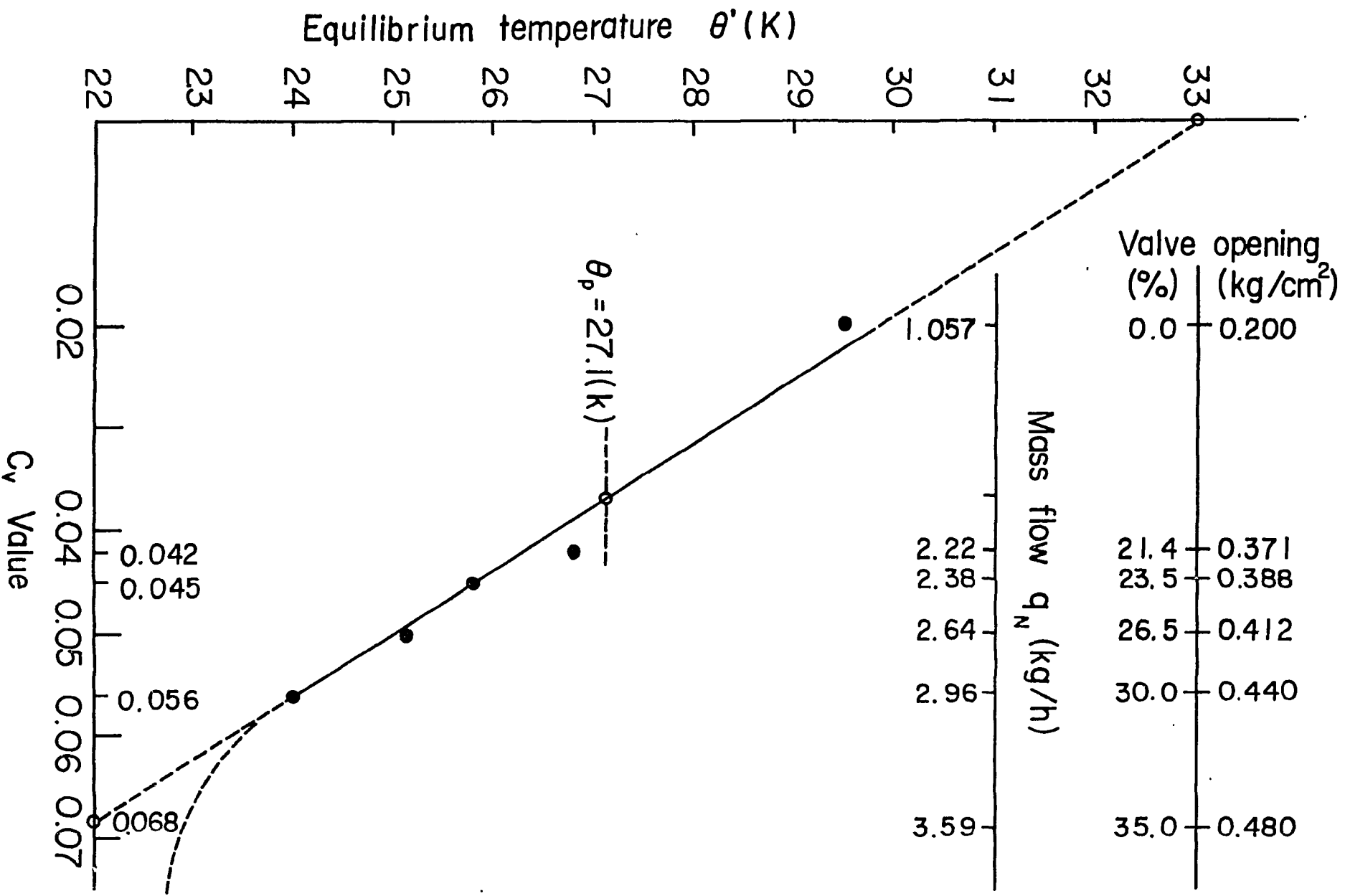


FIG. 21  
—37—



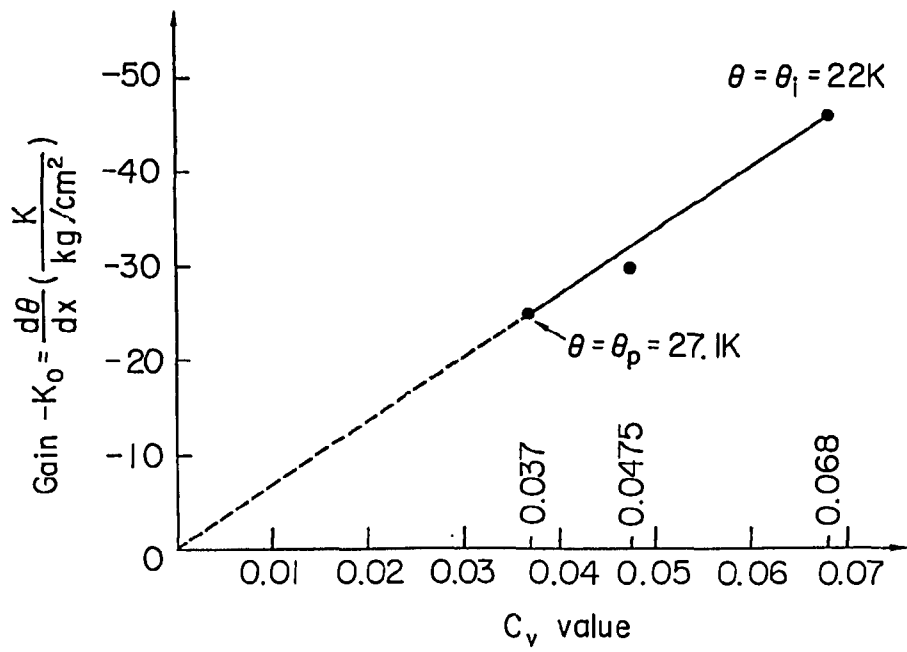


Fig. 22

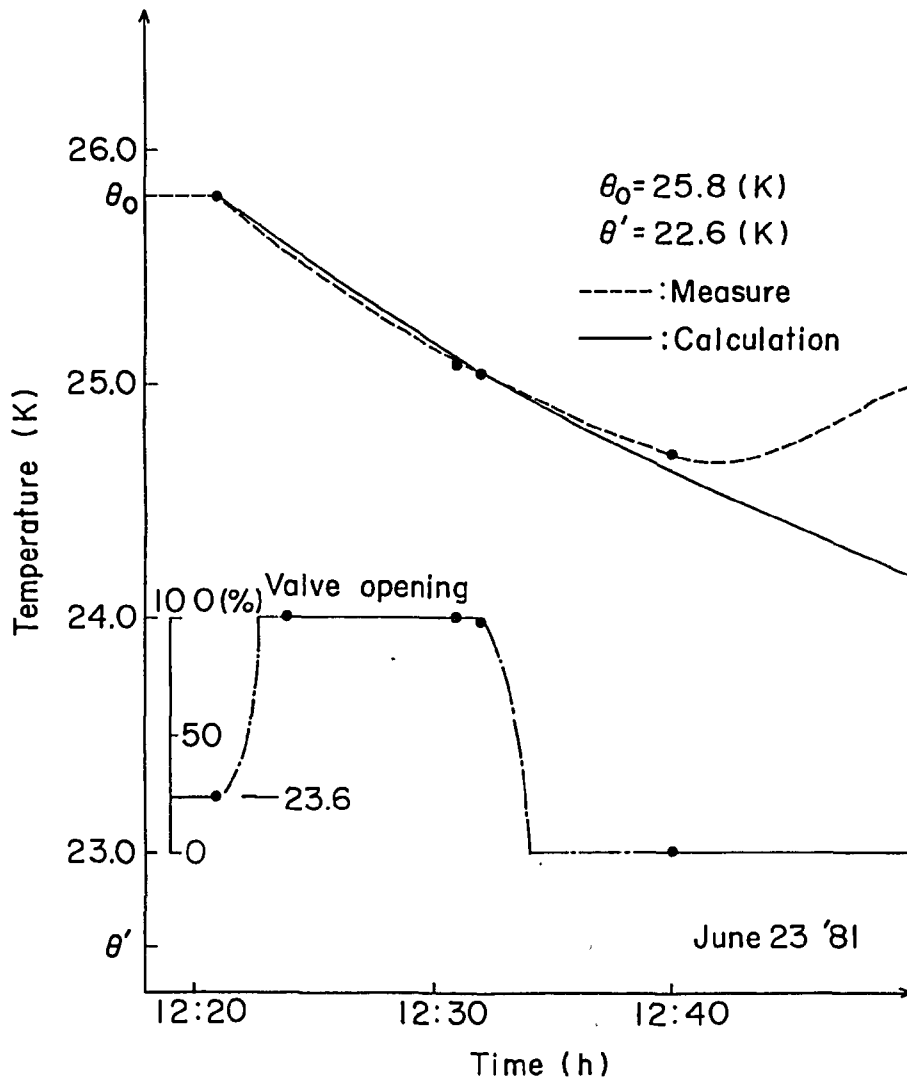
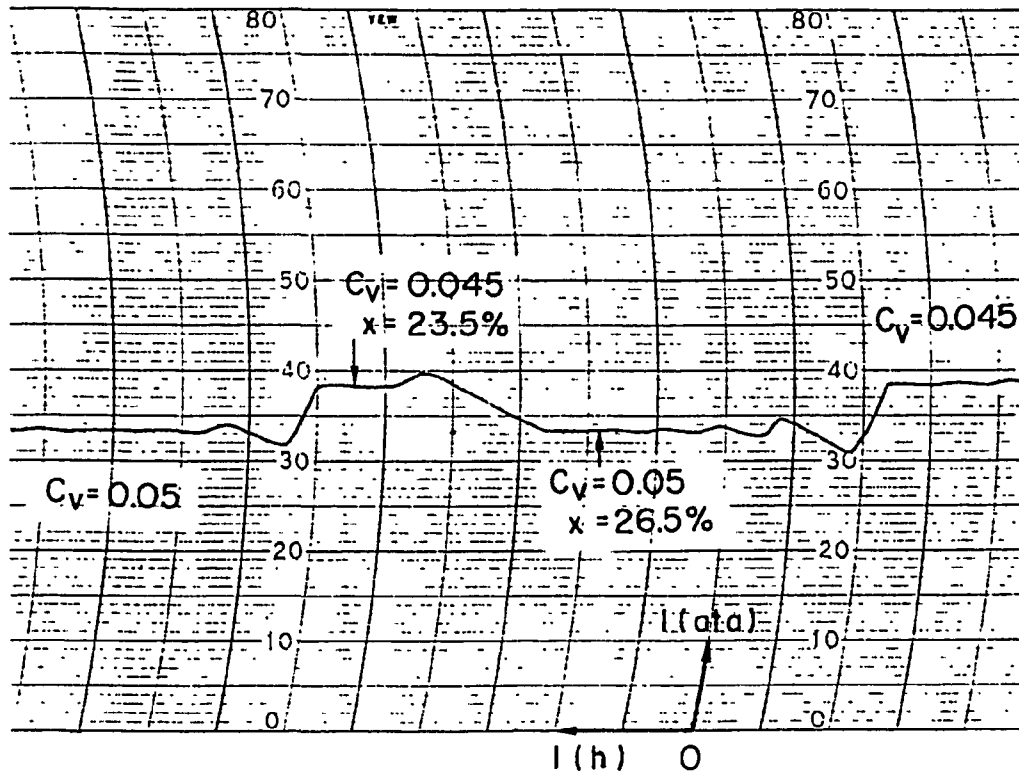


Fig. 23



$K_P = 14.65$	←	→	$K_P = 14.65$
$K_I = 0.25$			$K_I = K_D = 0.5$
$K_D = 1$			$T_S = 2 \text{ sec}$
$T_S = 2 \text{ sec}$			

Fig. 24

Table A.1 Enthalpy of coolant dissipated through the neck cooler and characteristics of the control valve PCV-3

$x$ (kg/cm <sup>2</sup> )	0.20	0.371	0.388	0.412	0.440	0.480
$x$ (%)	0.0	21.4	23.5	26.5	30.0	35.0
$C_v$	0.020	0.042	0.045	0.050	0.056	0.068
$q_N$ (kg/h)	1.057	2.22	2.38	2.64	2.96	3.59
$\theta'$ (K)	29.5	26.8	25.8*	25.1*	24.0*	~22.0
$h-h_i$ (kJ/kg)	293	247	268	264	269	~270

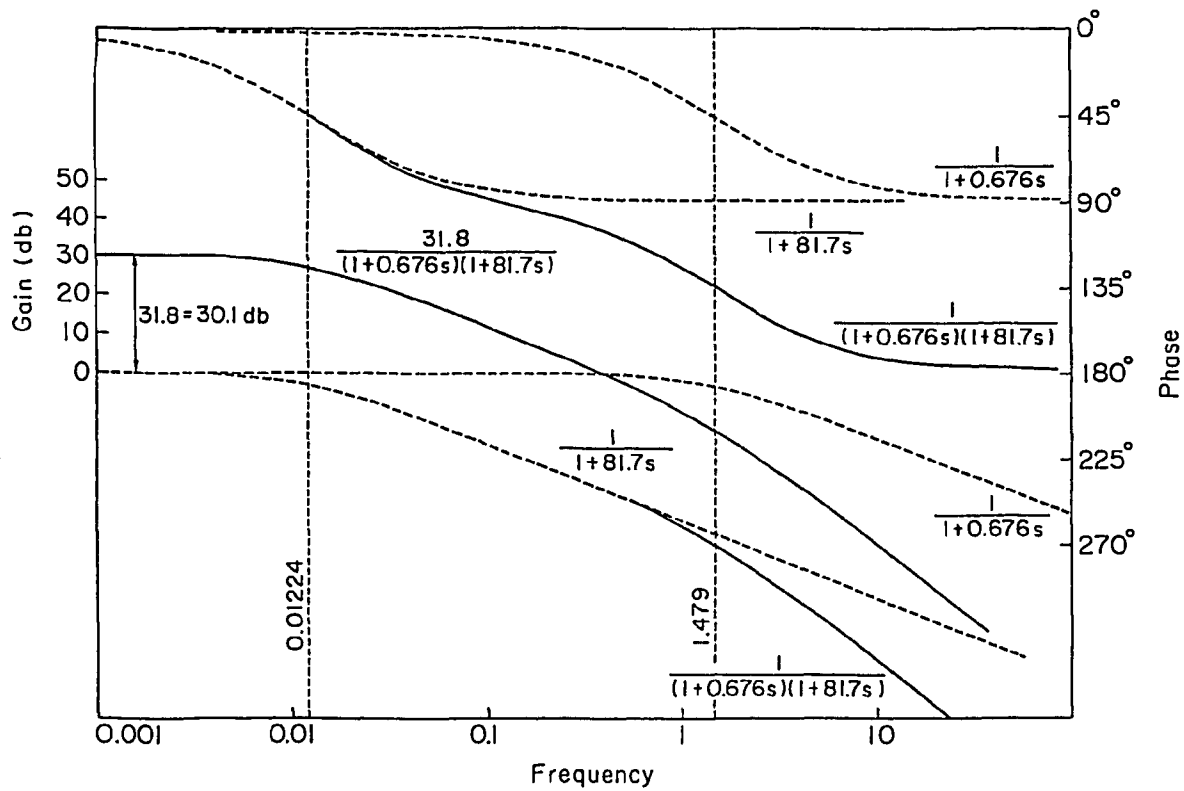


Fig. A.1

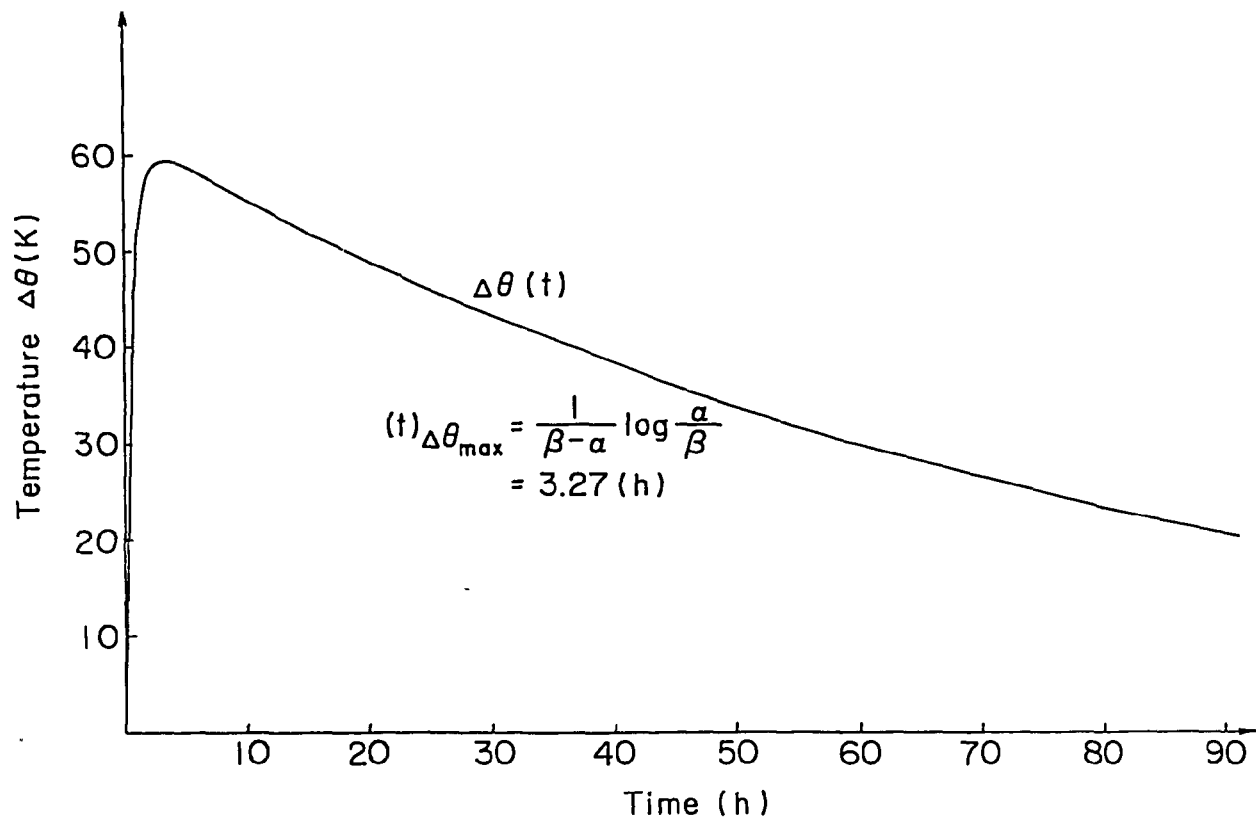


Fig. A.2

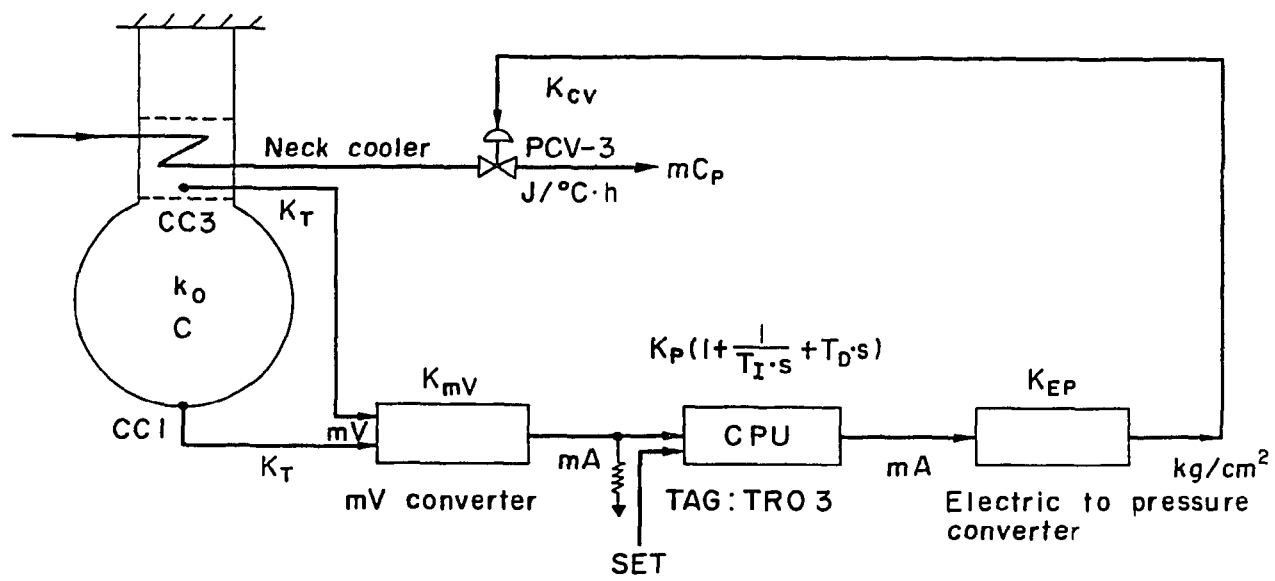


Fig. A.3

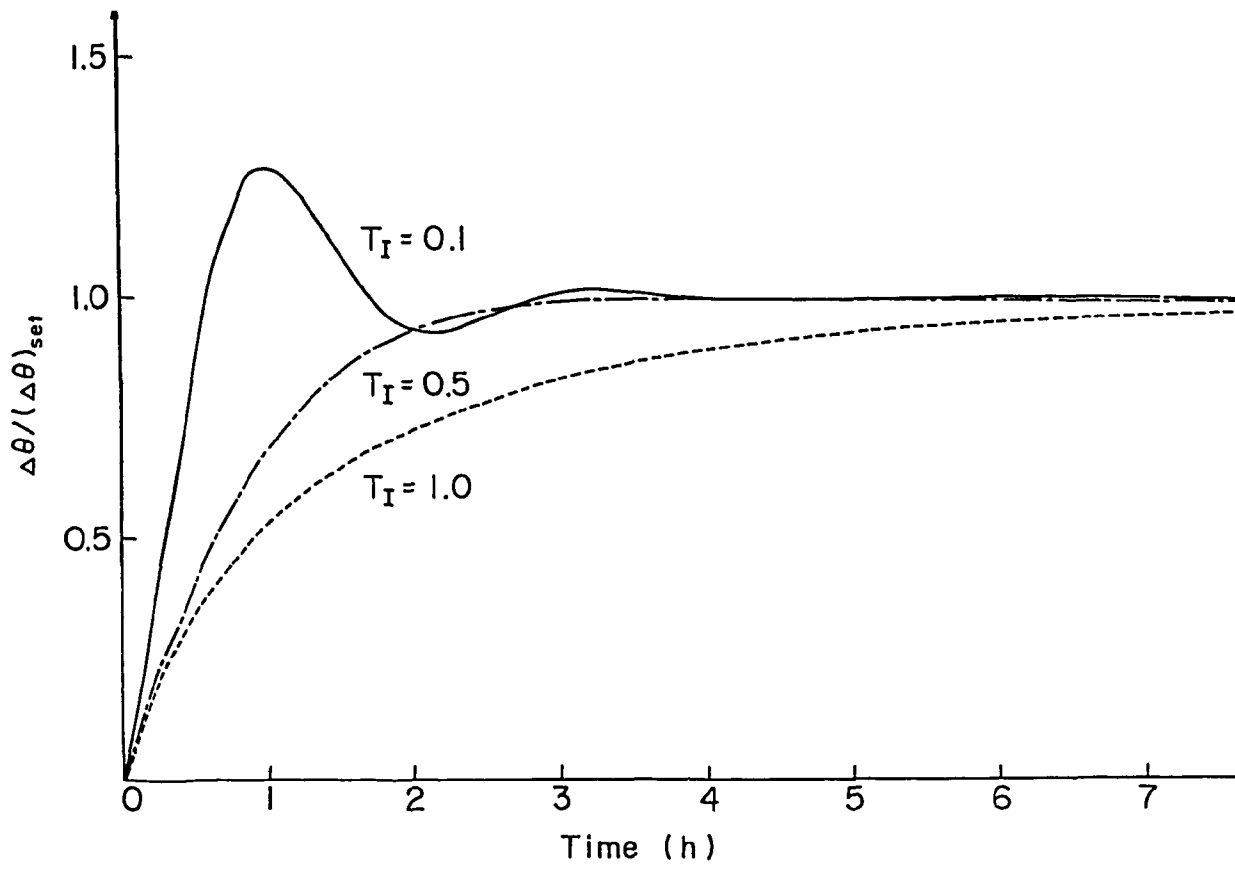


Fig. A.4

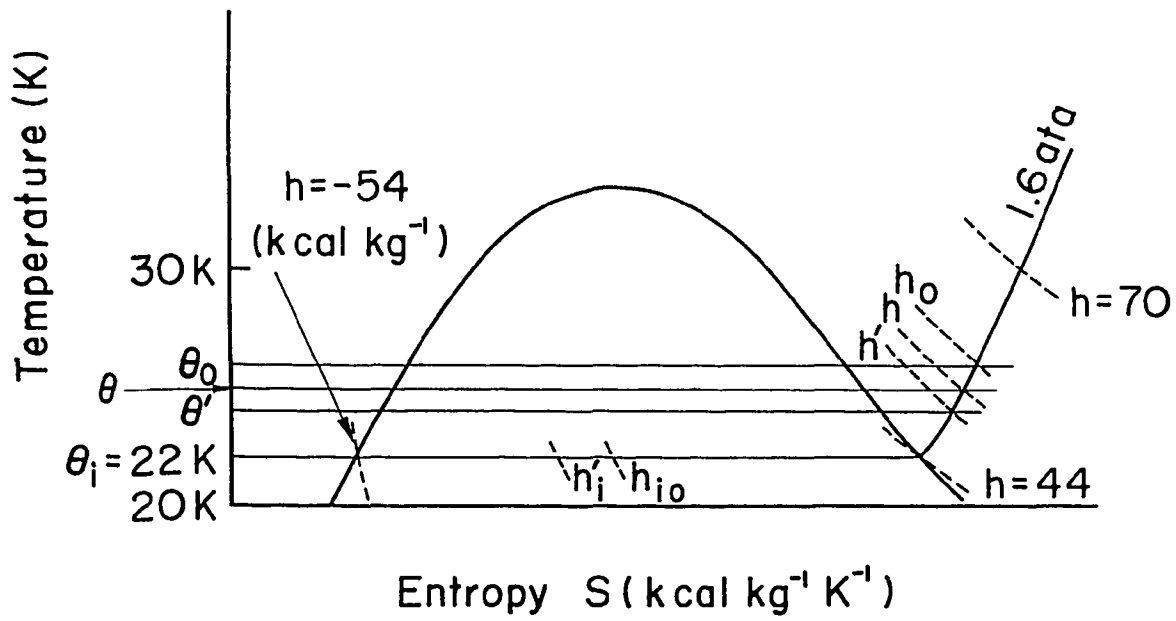


Fig. A.5