

IMPROVEMENT OF TEMPERATURE CONTROL SYSTEM
FOR THE
INJECTOR LINAC BY A PID CONTROLLER

Eiki Tojyo and Katuhide Yoshida
Institute for Nuclear Study, University of Tokyo

Abstract

A heating controller of PID type has been adopted as the temperature controller for the injector linac of INS electron synchrotron in place of simple ON/OFF controller. By this method the regulation accuracy of ± 0.1 °C can easily be attained and as a result the stability of the electron beams circulating in the electron synchrotron has been much improved.

INS 電子ライナックの冷却系では、これまでずっと熱交換器に入れた複数個のヒーターと冷凍機をON/OFF 動作させることによって、加速管の温度制御を行ってきた。しかしながらこの方式では、2 位置動作につきまとうヒステリシス特性のため、設定温度に対する制御幅は、最良の場合でも ± 0.15 °Cが限界である。そこで昨秋よりヒーター電源の一部にPID コントローラーを導入することにより、制御幅を ± 0.1 °C以内に収めることができたので、以下に概略を報告する。

1. 冷却系の構成

Fig.1 にES-Linacの冷却系（加速管関係）のブロック図を示した。この冷却システムは初期（1960年頃）に作られたものを1976年に部分改修し、更に昨年、加熱電源にPID コントローラーを取りつけたものである。冷却水のループの一部に裸配管部が ~ 12 mあり、地温や室温の影響を受け易いこと、更に昨年までは先に述べたON/OFF 制御方式で運転してきたため、設定温度に対して $\pm 0.15 \sim \pm 0.25$ °Cの変動を生じ、シンクロトロンビームに同期変動を引き起こす場合が多かった。（Fig.2 参照）しかし現在の時点で配管系を保温材によって全面補修することは、経費その他の点で得策でないと判断し、裸配管部があっても設定温度を中心値 ± 0.1 °C以内に抑える方法を検討した結果、ヒーター電源の一部にPID コントローラーを取りつければ良いということになった。

センサーは本来ならば1 本だけにして、各ヒーター電源・冷凍機に共通の入力信号を伝送すべきであるが、取敢えず並列化している。入水側多岐管と加速管の間は約1m程度離れているが、この部分での測定温度を以て加速管の温度としている。加速管を出た水は保温材で囲まれた ~ 25 mの水路を経て、マイクロ波系の発振器の空胴を同一温度で冷却したのち、出水側多岐管を経て熱交換器に戻る。従って設定温度が変わればマイクロ波の発振周波数も比例して変化する。これで原理的には加速管のマイクロ波特性、従って加速特性は不変となる筈だが実際にはキャンセルできない要因がある。（シンクロトロンは入射器に対して感度の高いアナライザーとして機能するから、僅かの加速特性の変化に感じる。）

ヒーター電源は始動時のみON/OFF のヒーターとPID 動作のヒーターを全て投入し、定常時はPID 動作用ヒーターのみを用いる。

2. PID コントローラーの設計

PID コントローラーの基本的なパラメーターは、温度制御の精度と、伝達関数を決めるP, I, D 各項動作の設定領域である。温度の表示・制御上の精度は ≤ 0.05 °Cを目標とした。その理由は、我々の冷却系及びシンクロトロン加速システムでは、加速管の設定温度を ± 0.1 °C以上変えると（ $\Delta f \sim 5$ kHzに相当）シンクロトロンを周回する電子ビームが現実的に同期的に変動を起こすことを確認しているためである。

PID コントローラーの伝達関数は一般に、次の式で与えられる：

$$F(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right)$$

K_p は比例ゲイン, T_i はReset Time, T_d はRate Time である。これらの各パラメーターの

設定領域の設計は、予備実験に基づいて、下表のように定められた。1/Kpを小さめに設計したのは、抵抗測温体の場合、感度は通常 $\sim 0.05^{\circ}\text{C}$ が限界なので、コントローラ側の感度を高くしないと最終的に $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ の制御誤差内で動作させることが難しかったからである。制御系の望ましい動作としては高精度性、安定性、速応性の各要素が要求されるが、ここでは主に、この順序で優先度を考慮した。

<PID 温度コントローラの仕様>

表示方式	デジタル3桁	
表示精度	$\pm 0.20\%$	(0— 50°C F.S.)
設定方式	デジタル4桁	
設定精度	$\pm 0.02\%$	(0— 50°C F.S.)
出力信号	0—10mV, 5Ω	
P 動作 1/Kp	0.1—5.0 %	
I 動作 Ti	0.0—10 分	
D 動作 Td	0.0—5.0 分	
センサー感度	$\leq 0.05^{\circ}\text{C}$	
サイリスタ電源	3 ϕ , 10kW ; ゼロクロス型	

3. 制御特性の改善とビームの安定化

Fig. 3 に改修前と改修後の温度制御特性の典型例を示した。立ち上がり時間に関しては両者とも大差ないが、設定温度 ($\sim 30^{\circ}\text{C}$) に収束したのちは、明らかにPID動作の方が改善されている。従って改修後はFig. 2 に現れていたような、加速管の温度変化に伴うシンクロトロンビームの同期的変動分は除去できるようになった。

また、立ち上がり時間以外の、例えば1～2時間以上の間に、加速管の温度が変わって行く場合に対しても、追尾は可能である。このようなゆるやかな外乱の原因としては、外気温、地温の変化や、数時間内での、ゆるやかな加速器の運転モードの変更などがあげられる。

但し、PID動作の各動作定数を変更することにより、動作特性は必ずしも一意的でないので、主として季節単位で一定の組替えを行って動作させている。

4. 今後の課題

以上述べてきた方式で、冷却系の温度制御特性を更に向上させようとするれば、およそ次のような課題が考えられる。但し、目標値としては、 $|\Delta T| < 0.05^{\circ}\text{C}$, Rise Time < 20 minを前提としている。

- 1) センサーの感度を上げる。→サーミスタセンサーで 0.01°C の感度を持たせる。
- 2) 速応性と制御パラメーターの組合せの容易化。→PID制御をI-PD制御に変える〔1〕。
- 3) 季節変化に対する共通最適化。

こうして、PIDコントローラの導入により、冷却配管の一部に裸配管部など、ゆるやかな外乱のある場合でも、以前より温度制御特性が改善された。

おわりに本改修作業に協力されたシマデン株式会社の各位に感謝する。

参考文献

- 〔1〕北森俊行：PID, I-PD 制御からの発展の道（システムと制御 Vol.27, No.5, P.287, 1983）

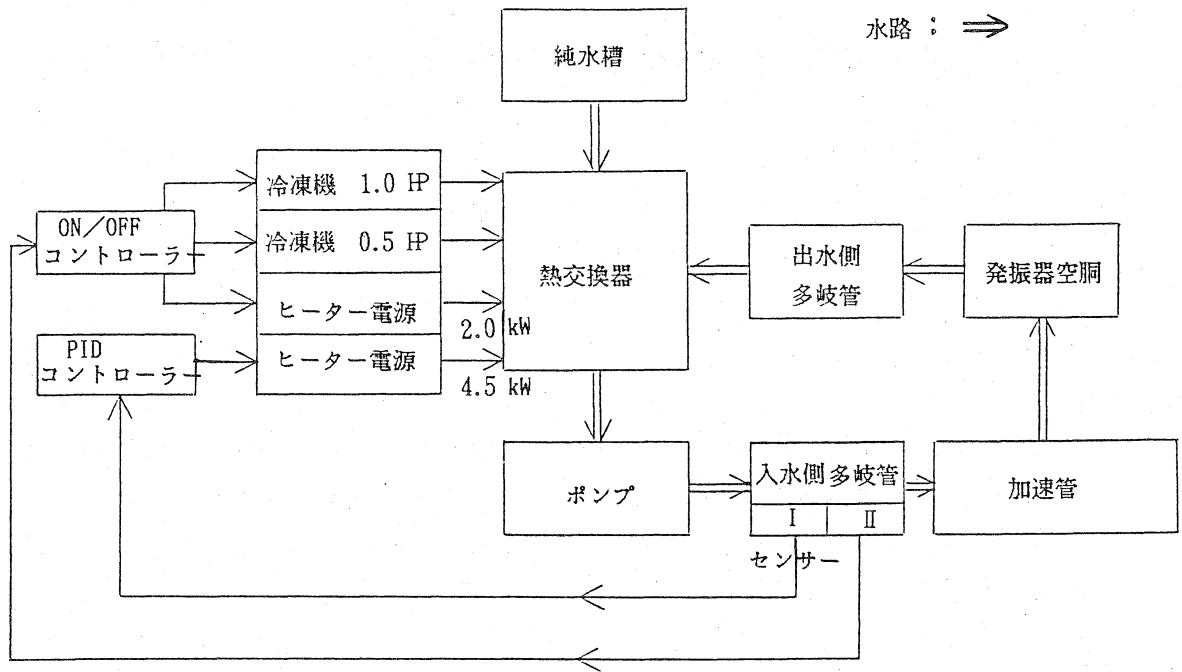


Fig. 1 ES-Injector Linac の冷却系 (加速管関係のみ表示)

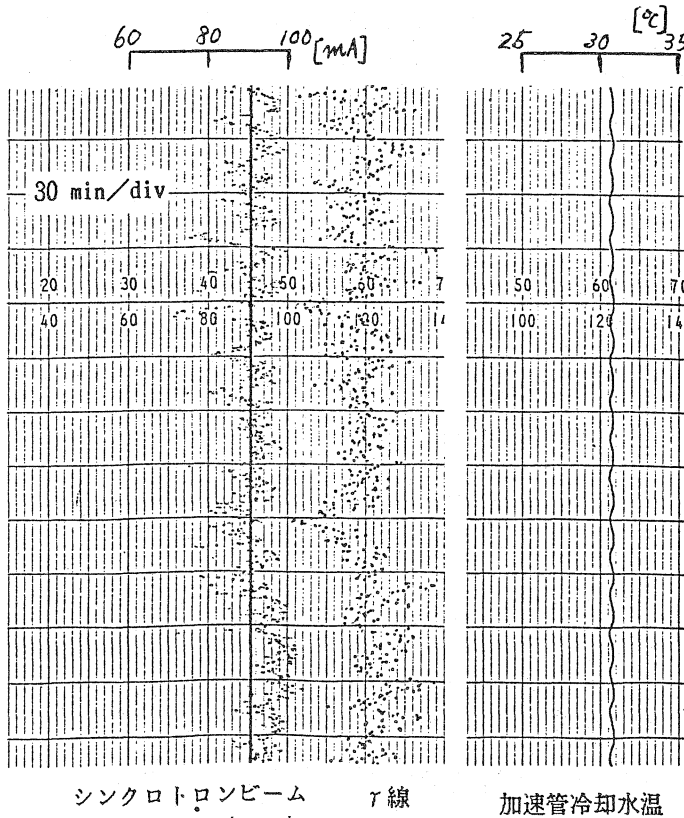


Fig. 2 入射用加速器の温度変化による
シンクロトロンビームの周期的変動
($E = 1.0 \text{ GeV}$, $I = 95 \text{ mA}$)

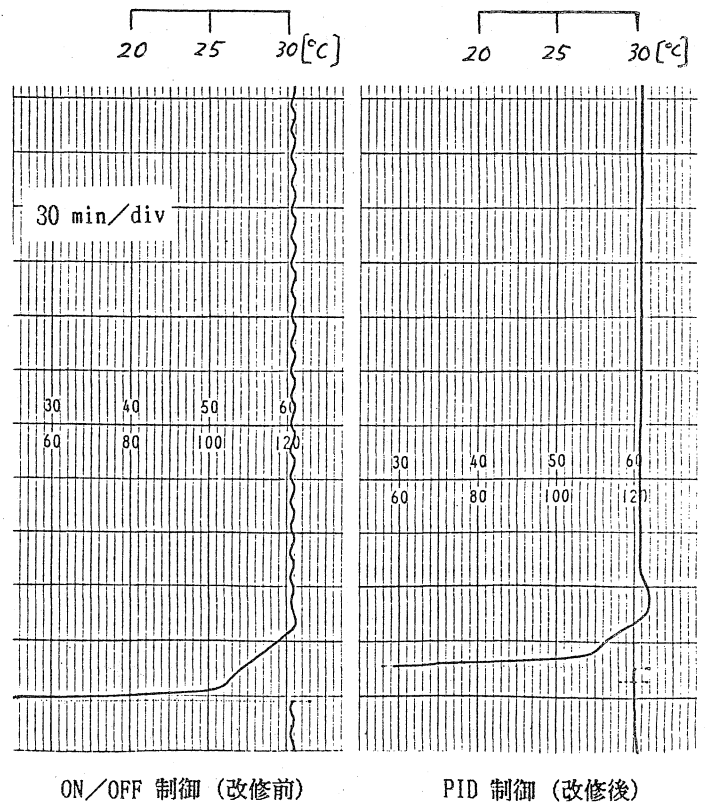


Fig. 3 温度制御特性の比較