

PRECISE TEMPERATURE REGULATION SYSTEM FOR C-BAND ACCELERATING STRUCTURE

S. Takahashi^{1,A)}, K. Onoe^{B)}, T. Saeki^{C)}, T. Inagaki^{B)}, and T. Shintake^{B)}

^{A)} SPring-8/JASRI

1-1-1 Kouto, Mikazuki, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

^{B)} SPring-8/RIKEN

1-1-1 Kouto, Mikazuki, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148

^{C)} KEK

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaragi, 305-0801

Abstract

$\pm 0.1^\circ\text{C}$ temperature regulation of the accelerating structure with/without RF-power is one of the most challenging parameters in SCSS (SPring-8 Compact SASE Source) project, which is aiming at constructing X-ray radiation facility based on the SASE-FEL^[1]. Since the heat dissipation in the C-band accelerator is about ten times larger than the conventional S-band accelerators and its level varies with different operational modes, an active control system is necessary. We designed the precise temperature regulation system for the C-band high-gradient accelerator, which monitors the structure temperature and provides feedback on the water temperature at inlet using an electric heater and a flow-rate control valve. The performance of the prototype model of this scheme, which is capable of handling 4 kW heat loss for the high-gradient test using one accelerating structure, is described in this paper.

Cバンド加速管の精密温調システム

1. はじめに

SCSSプロジェクトのキーコンポーネントであるCバンド加速管は、従来のSバンド加速管の2倍の周波数(5712MHz)をもつことから、加速管長さを約半分にできる。SCSS用に製作されたCバンド加速管の写真をFig.1に示す^[2]。加速管は、クライストロンから高周波パルス電力が入力されて高電界を発生する際に発熱するため、加速管内部には冷却水が供給される構造となっている。発熱すると線膨張率に応じて加速管のサイズが膨張し共振周波数が変化する。Cバンド加速管の場合、 1°C の変化が100kHzに相当し、これを $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ($\pm 10\text{kHz}$ に相当)の範囲内に制御することが要求される。従来は、こういった精密温調を行う際に加速管入口の冷却水温度を一定に制御する方式が採用されてきたが、Cバンドの場合、加速電界40MV/m、パルス繰り返し60ppsの定格では平均消費電力が2kWでSバンドの10倍であり、かつそのレベルが各運転モードに応じて0~2kWの範囲で変化することから、従来技術で加速管本体温度を要求仕様内に抑えることは困難である。そこで我々は、チラーシステムに電気ヒータと流量調整弁を加えた新しいフィードバックシステムを導入した。

2. Cバンド加速管

Cバンド加速管は全長約1.8m、無酸素銅製で、口ウ付けにより連結された91枚のセルから構成されている。Fig.2に1セルの1/4モデル図(有限要素法によ

るモデリング)と、断面図を示す。各セルの寸法は、共振周波数が 30°C の状態以最適化されるように設計・製作されている。



Fig.1: Photograph of the C-band accelerating structure for the SCSS project.

冷却水路は外周部に8本設けられているが、加速管長手方向の温度勾配を無くすために、流れの方向が交互に逆向きになっている。Table1に加速管での電力消費が最大の2kWとした場合の1水路あたりの冷却水量と、流速、 ΔT_1 、 ΔT_2 の関係を示す。 ΔT_1 は

¹ E-mail: takahasi@spring8.or.jp

加速管の入口、出口での冷却水の温度差を、 ΔT_2 は冷却水と加速管本体（温度センサー取付部）との温度差を表す。この表から、流速が1m/sec（流量は4l/min）程度の時 ΔT_1 は1°C程度になっている。妥当な値であると判断した。この場合、冷却水は全体で32l/min（4l/min×8流路）流すことになり、加速管の8本の冷却水路の平均温度はどのセルにおいても入口温度よりも0.5°C高くなる。

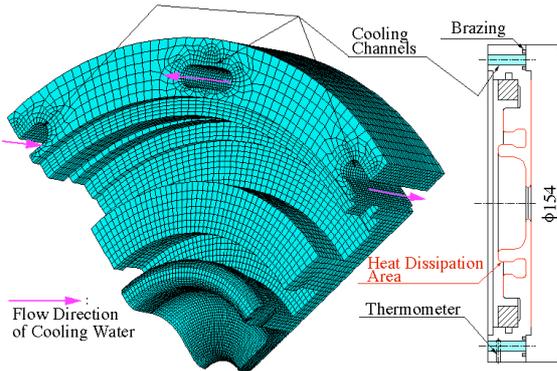


Fig.2: One-fourth FEM model and the cross-sectional view of an accelerating cell.

Table 1: ΔT_1 (temperature difference of the cooling water between the inlet and the outlet of the structure) and ΔT_2 (temperature difference between the cooling water and the copper body at the thermometer position) for various cooling water flow rates per channel when the heat dissipation is 2.0 kW. Velocity for each flow rate is also shown.

Flow Rate (l/min)	Velocity (m/sec)	ΔT_1 (°C)	ΔT_2 (°C)
2	0.48	1.80	1.33
3	0.72	1.20	0.99
4	0.96	0.90	0.80
5	1.20	0.72	0.68

Cバンド加速管では従来の10倍もの電力が入るため、冷却水と加速管本体との間で大きな温度差ができると予想されることから、加速管内部の詳細な温度分布をANSYS（3次元有限要素法）により計算した。解析では冷却水路壁面での熱伝達、加速管内部での熱伝導が考慮されている。1セルの1/8部分をモデル化し、セルあたりの全入熱量を21.4W（加速管全体では2kW）とした。冷却水路壁面における熱伝達係数は、冷却水流量（4l/min）と相当直径に基づいて5400W/m²/Kとし、冷却水バルク温度は30°Cに設定した。Fig.3にANSYSの定常温度解析結果を示す。加速管中央セルの外表面から10mm深さに取り付けられた温度センサーの位置での温度は30.8°Cと見積もられた。すなわち、冷却水バルク温度と加速管本体温度（温度センサー部）との差（= ΔT_2 ）は0.8°Cとなる。また、周波数を決定する加速管中心部での

温度は、温度センサー位置よりも約1.6°C高く32.4°Cとなっている。従って、この条件での運転モードにおいては、加速管中心部での温度を30°Cにするには、加速管入口での冷却水温度を、約27.1°C（= $30.0-1.6-\Delta T_2-\Delta T_1/2$ ）にすればよい。従って、空調温度としては25°C程度が最適である。別の運転モードに対しては、フィードバックシステムが自動的にこの入口温度を制御することになる。一方、過渡熱解析の結果から、RFパワーのON/OFF後の温度センサーの位置での時定数は約40秒と見積もられた。

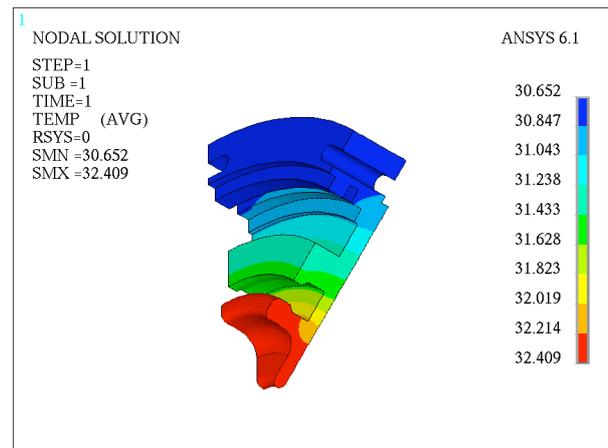


Fig.3: Temperature distribution of the center cell. The heat dissipation is 21.4 W per cell, and the cooling water flow rate per channel is 4 l/min.

3. 高電界テストスタンドにおける検証

Fig.4は、Cバンド加速システムの1ユニットを示しており、2本の50MWクライストロン、パルスモジュレータ、パルスコンプレッサー、4本の加速管、およびそれらに付随する導波管系から構成されている。40MV/mの加速勾配を検証する高電界試験には、図中の色付きの機器のみが用いられる。従って、高電界試験での消費電力は、実機での定格に比べて2倍（4kW）となっている。

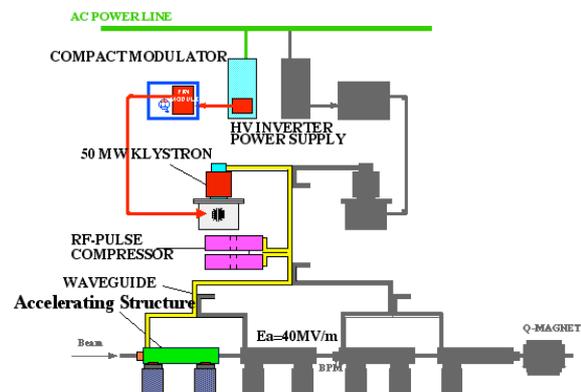


Figure 4: One unit of the C-band main linac. The colored components will be prepared at the high-gradient test.

3.1 チラーシステム

高電界試験用に、冷却能力60kW（冷凍機2台）、循環流量300l/minのチラーを準備した。主冷凍機はコンダクタンスの異なる3本のキャピラリーを装備しており、冷媒量が3ビット制御（=8段階に可変）される。このステップ状の変化を線形化するために、インバータ制御方式の副冷凍機が併設され、この組み合わせにより冷却水吐出温度は $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以下に安定化される。また、加速管の銅本体の防食を考慮し、チラーシステムは窒素ガス加圧（ 0.2kgf/cm^2 ）の密閉型とした。

3.2 温調システム

Fig.5は、高電界試験における加速管の冷却系統とフィードバックシステムを表している。冷却水は加速管近傍に設置された電気ヒータにより加熱された後、加速管に供給される。ヒータの基本的な役割は、RFパワーがOFFの状態も含めたいかなる運転モードにおいても加速管本体温度を $30.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内に維持するために、加速管による電力消費分とチラーからの供給水の温度変動分を補うことにある。ヒータパワーは直接加速管本体に入るため、レスポンスが非常に早くなる。また、ヒータによる電気消費量を節約するために、ヒータの直前に流量調整弁を設けた。RFパワーがOFFの場合には、流量調整弁の開度を約25%まで絞ることにより、少ない消費電力で冷却水温度を 30°C までかさ上げできる。

本システムの制御にはPLCを採用した。加速管本体の温度センサーには、4線式のシース型测温抵抗体（Pt100 Ω 、シース径0.8mm）を取り付けた。PLCの基本制御は、制御対象である加速管本体の温度計測を行い目標値（ $30.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ ）との制御偏差を求め、ヒータパワーと流調弁開度にフィードバックをかけて、加速管に流入する冷却水温度を操作するものである。ヒータパワーはノイズを低減するためにゼロクロス方式のサイリスタ制御を取り入れている。

Fig.6は制御用タッチパネルの一例であり、温調システムの状態が一目でわかる工夫を凝らしている。このパネル上で全てのパラメータの設定も行える。

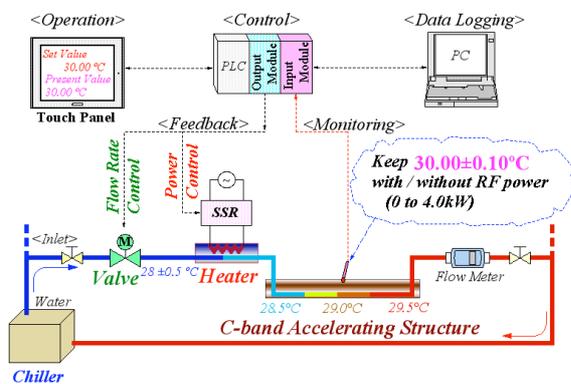


Fig.5: Cooling water circuit for the one accelerating structure and the feedback system.

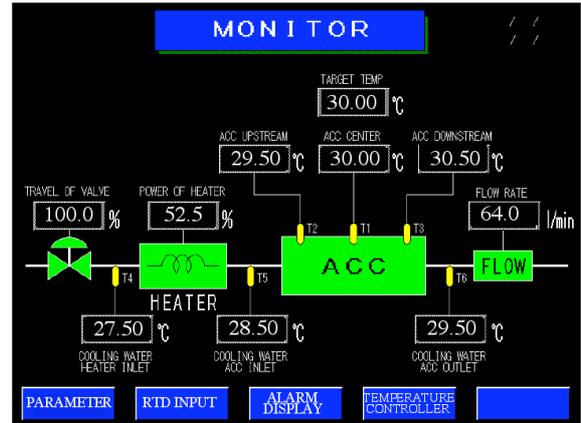


Fig.6: Monitor display of the control touch panel.

3.3 制御試験

まずRFパワーがOFFの時の制御特性を調査した。Fig.7に、チラーからの冷却水吐出温度が仕様値の最大幅である $\pm 0.5^\circ\text{C}$ で変動している状態で制御をかけた場合の結果を示す。チラーの変動に応じてヒータ出力と流量調整弁開度がPID制御され、ターゲット温度が仕様値である $30 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内に収まっている。現在PIDパラメータの最適化やソフトのバグ出しを行っている最中であるが、冷却水のチラー出口温度は約 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 、加速管本体温度は $\pm 0.06^\circ\text{C}$ まで制御できることを確認している。今後は、準備が整い次第、RFパワー最大投入時や、各運転モード変更時の制御特性について検証していく予定である。

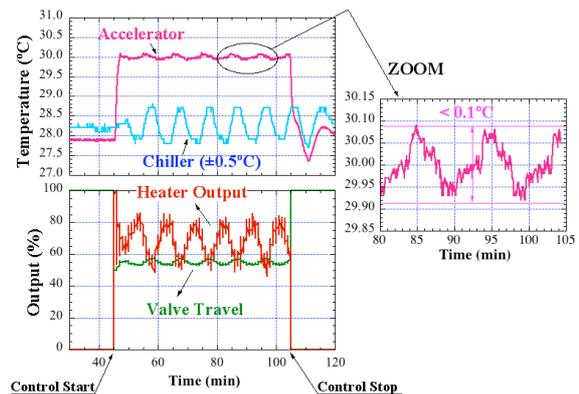


Fig.7: Experimental result of the temperature regulation system without RF power. The temperature fluctuation of $\pm 0.5^\circ\text{C}$ from the chiller system is regulated below $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

参考文献

- [1] 新竹積 “SPring-8 SCSS計画（X線FEL技術開発）の現状”，本研究会
- [2] 稲垣隆宏 “C-bandチョークモード型加速管の高電界試験”，本研究会