

# THE TEMPERATURE CONTROL SITUATION OF SACLA DEVICE COOLANT FACILITIES

Tobinaga Takashi<sup>A)</sup>, Ohta Norihiro<sup>B)</sup>, Sekiguchi Yoshihiro<sup>C)</sup>

A) SPring-8 service Co.,Ltd.

1-20-5 Kohto, Shingucho, Tatsunoshi, Hyogo 679-5165

B) SAN-EI GIKEN

4-7-6, Iizuka, Kawaguchi-shi, Saitama, 332-0023

C) RIKEN

2-1, Hirosawa, Wako-shi, Saitama, 351-0198

## Abstract

We installed the device coolant facilities of SACLA by construction. We were able to contribute to compactness of SACLA enough. The cooling such as an acceleration pipe or the modulator is purposes, but, as for this device coolant facilities, very high control of  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  is required to do acceleration pipe temperature constantly. SACLA succeeded in laser oscillation in this June. In the device coolant facilities, We could show a predetermined function and was able to realize control with more than of expectation.

## SACLA 装置冷却水設備の温度制御状況

### 1. はじめに

一昨年の本学会大会において、XFEL=SACLAの装置用冷却水設備は建屋機械設備工事と一体として発注したことを報告した。その装置冷却水は、 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ という非常に高度な温度制御が求められている。

装置冷却水は、加速器マシン類を水冷却するものである。特に重要なのは、加速管の冷却である。SACLAにおいて採用されたCバンド加速管は、駆動周波数が高いためRFとの共振周波数にシビアな装置である。そのため加速管が熱膨張し共振周波数がずれないように恒温に保つ必要がある。

建屋側から供給される装置冷却水は、加速管へ送られる直前に $\pm 0.01^\circ\text{C}$ に制御される。その制御はサイリスタヒータにより精密に加温されるが、元となる冷却水の温度制御がよいほど容易に制御される。そのため、建屋側から供給される装置冷却水の温度は $\pm 0.1^\circ\text{C}$ を要求されたものである。

建屋建設完成時の試験において、模擬負荷による

制御試験を実施した。その際は非常に良好な制御が行われることを確認することができた。昨年度末よりSACLAは稼働を始め、実負荷による温度制御の状況を計測することが可能となったので、その結果を報告する。

### 2. 試運転調整時に $\pm 0.05^\circ\text{C}$ を達成

装置冷却水の精密温度制御は、熱交換器における冷却水と1次冷水との熱交換による冷却制御と、ヒーターにより冷却水の加熱を行う加熱制御の、2つの制御及びバッファタンクにより行われる(図1)。SACLAにはL1~L6までの6系統の装置冷却水設備が設置されている。それらは次の①~③のプロセスにより、送水温度を $\pm 0.1^\circ\text{C}$ の範囲となるよう制御する。

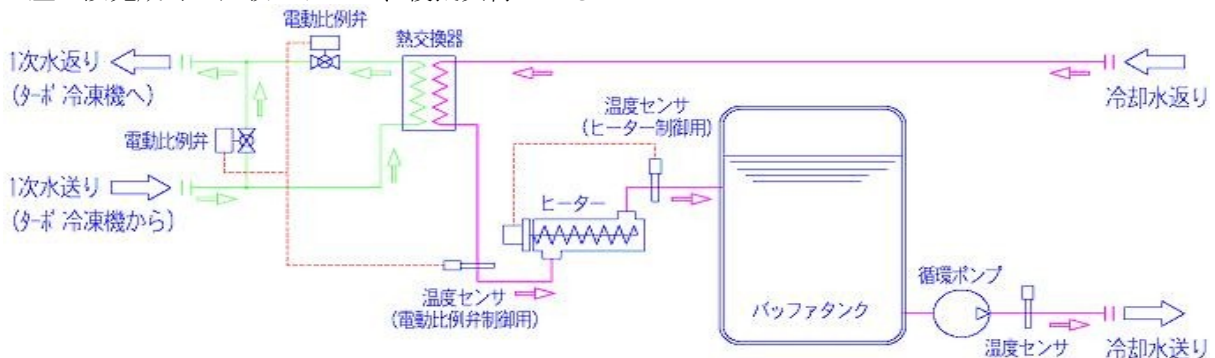
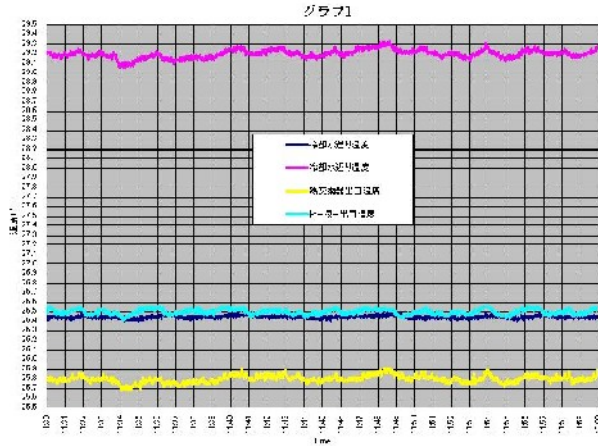


図1 システム図

①熱交換機による初段調整

マシンから温度上昇し返ってきた冷却水（グラフ 1 桃色線）を熱交換器により冷却制御を行う。

熱交換器による冷却制御は、熱交換器出口の冷却水温度を測定し、1次冷水側の電動弁によって、熱交換器への1次水流量を比例制御することにより行う。（グラフ 1 黄色線）



1次冷水の冷却には、インバータターボ冷凍機を採用した。インバータターボ冷凍機は、インバータにより冷凍機の圧縮圧力を可変させることによって、冷凍機の冷却能力を調整するものである。そのため、その温度制御は定常負荷時において±0.5°Cを達成可能である。

この1次冷水を利用し、装置冷却水の温度制御を行うことにより、冷却水の精密な温度制御が容易となった。熱交換機部分での制御だけでも±0.15°Cを達成することができ、もともとの設計条件であった±0.2°Cを満たす。

②ヒーターによる二段目調整

さらに温度幅を縮めるため、熱交換器により冷却制御された冷却水にヒーターによる加熱制御を行う。

ヒーターによる加熱温度制御を行うに当たり、熱交換器による冷却制御では、設定温度に対し0.5°C程度過剰に冷却する。装置冷却水温度をいったん設定温度よりも下げてから、ヒーターで加熱する事により温度制御を行う。

その結果、熱交換器出口で±0.15°C程度であった冷却水の温度安定度はヒーターによる温度制御を行うことにより±0.1°C以内となる（グラフ 1 水色線）。

③バッファタンクによる三段目調整

熱交換器及びヒーターで温度制御を行われた冷却水をバッファタンクに通し、循環ポンプによりマシンに送水を行う。最終的にバッファタンクを通すことにより冷却水の温度リップル（微細なゆらぎ）を小さくし冷却水温度を安定させる。最終的に冷却水温度安定度は±0.05°C以内とすることができた（グラフ 1 紺色線）。

3. ヒーターは無駄？

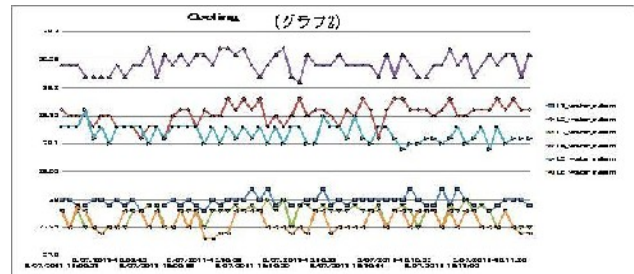
本冷却システムでは熱交換器による冷却温度制御

において0.5°C程度のオフセットを入れ、冷却水温度を一旦下げてからヒーターによる加熱温度制御を行っている。そのため、ヒーター分だけ余分に電力を消費してしまうことになる。装置冷却水設備の試運転調整においては、オフセット値を0.5°Cとして試験したが、オフセット値を小さくすればヒーターでの加温そのものをしなくても、必要十分な温度制御ができるならそれにこしたことはないのである。試運転で得た±0.05°Cは素晴らしい結果ではあるが過剰な制御である可能性もあるのである。

それには加速管直前に設置された、さらに装置冷却水温度を±0.01°Cに制御するヒーターの消費電力との関連も今後検討していきたい。システム全体としての、温度安定性と省エネルギー性を向上させる必要がある。

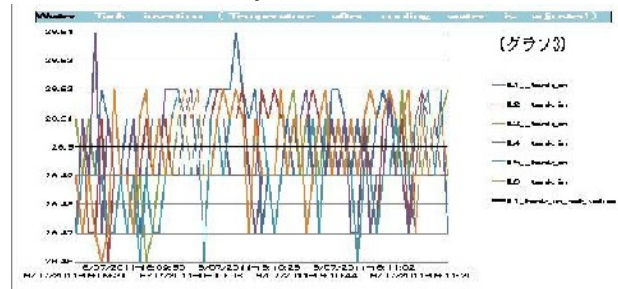
4. レーザー発振時の冷却水温度

2011年6月7日16時10分、SACLAは世界最短波長（1.2Å）となるX線レーザーの発振に成功した。



マシン側より還ってきた冷却水をグラフ 2 に示す。装置冷却水設備は1～6の6セットあるが、それぞれ戻り温度はバラバラである。

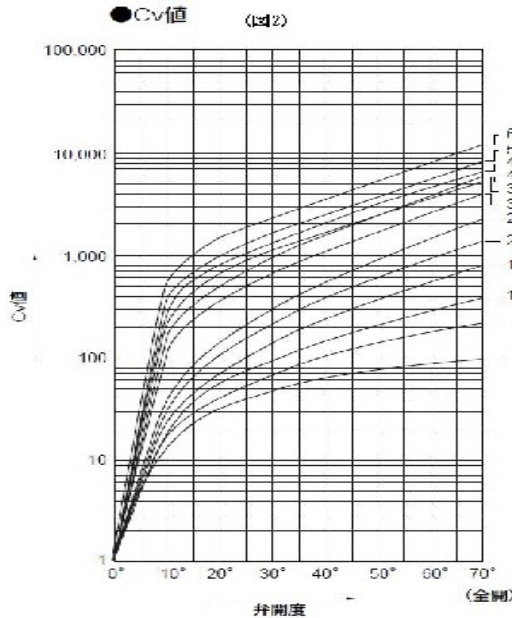
戻ってきた冷却水を、熱交換器と電気ヒーターで調節した後の温度がグラフ 3 である。温度制御は、26.5°Cの設定値に対し熱交換器出口ではP制御でのオフセット分を考慮し26.4°Cまで過冷却し電気ヒーターで26.5°Cまで昇温させる個別PID制御である。装置冷却水設備引渡後、温度安定性と省エネルギーとの兼ね合いで、オフセット値は0.1°Cとしていた。1～6全ての系統で±0.04°C以内で温度制御が行われていたことがわかる。



その後マシンに送水する前に循環水量の1.5～3倍の容量を持つタンクで攪拌し冷却水温度を均一化した後、送水ポンプにてマシンに送水している。

制御での問題点としては、P（比例）制御での偏差が少ない時に操作量が過小となり、制御量が設定

値とずれたところで安定してしまうことである。これを補正する為に I (積分) 制御を行うが、熱交換器での比例制御弁の特性として、約 10%の弁開度までは CV 値 (図 2) の傾きが大きくなる為、ローパワー時は I 制御でもオーバーシュートとアンダーシュートを繰り返すハンチングが起きてしまう。この状態で D (微分) 制御を行うと益々ハンチングが大きくなる為、D 制御は使用しない事にした。従って熱交換器出口では目標値より 0.1°C 少ない温度まで過冷却して昇温微調節を電気ヒーターで行うパラメータとした。



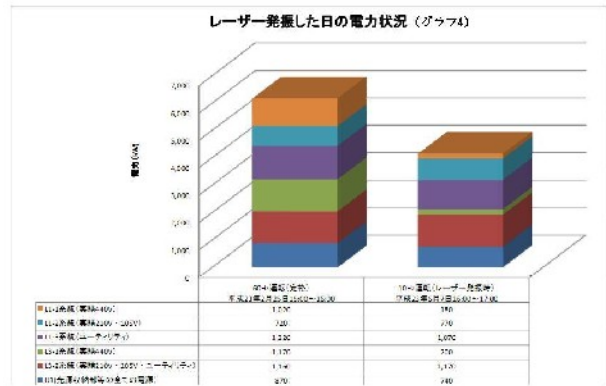
PID 制御はそれぞれ役割の違うものを足して、全体の操作量としている。従ってチューニングが困難なのは当たり前であり、パラメータは更なる改善の余地がある。

### 5. 非常に省エネマシンだった SACLA

マシンからの装置冷却水へ渡される発熱量を、5000kW として装置冷却水設備は設計した。ところが実際に加速器を運転してみると、その発熱量は思いの外少なかったのである。グラフ 4 に、全負荷運転時とレーザー発振時の消費電力を示す。

マシンで消費された電力のほとんどすべては、装置冷却水へ熱として渡される。マシンで消費される電力は、グラフの実験 440V と実験 210V・105V である。全負荷運転時でも装置冷却水へ渡される熱量は 3000kW 強であった。L6 系統のみマシン側の発熱量の変更により冷却容量が若干不足してしまったが、その他の系統は最大冷却容量の半分程度で運転できた。装置冷却水制御も期待以上のものが得られた。

ところがレーザー発振時は、マシンの運転モードは全負荷時の 1/6 程度の出力であったため、その発熱量は 1200kW 程度しかなかった。低負荷での運転であったため、熱交換器比例弁開度が 10% 近くギリギリまで落ち込んでしまっていた。



### 6. 低負荷運転時でのトラブル発生

試運転調整では非常にうまくいっていた精密温調であったが、昨年 6/7 に装置冷却水の温度設定値を 25°C から 26.5°C に上げることにした。ところが 1 次冷水との温度差が開いてしまい、そのため CV 値が 10% 以下の変化量が急峻な領域に入ってしまった。制御が非常に不安定となってしまい、装置冷却水温度変化幅は 1°C を超えるほどにもなってしまった。

熱交換器出口の比例制御弁開度を 10% 以上とし CV 値の変化を緩やかにするためには、一次冷水の温度を上げる事が有効である。ところが本施設は空調の熱源と共通になっている事から、多湿時期では除湿運転が必要であり、1 次冷水温度は 10°C 以上に上げることができない。クライストロギャラリー等は外気導入を最低量としているため冷水温度を上げてもさほど支障はないが、加速器トンネル系のオールフレッシュ外調機は除湿能力が不足し、基準値である 25°C / 15°C DP (54% RH) での空調ができなくなってしまう。

改善策として冷水比例制御弁のバイパス弁 (常時閉止) に小口径の精密バルブ及びプレッシャーレギュレーターを増設し、ローパワー時に対応する。又は加速器トンネル系外調機のプレヒートコイルを冷水コイルに変更しダブル冷水コイルによる除湿効果を高め、冷水温度を上げて比例制御弁開度を 10% 以上とする。あるいは加速器トンネル系の冷凍機を別置し、装置冷却水系と分離する等設備改善の検討を行っているところである。

### 7. 空気調和衛生工学会技術賞受賞

本施設は装置冷却水設備まで含めて、建屋機械設備工事として発注された。加速器装置に近い部分まで一般の建設工事として設置することはまれ (たぶん日本初) である。建築工事や電気設備工事と総合的に配置を検討することにより SACLA のコンパクト性に貢献できたこと、装置冷却水設備において通常の建設設備工事での要求水準を遙かに超えた温度制御を達成できたことなどが評価された。空調冷却設備技術の向上にも大きく貢献したとして、学会技術賞に値するものとされたものである。