

INVESTIGATION OF HEATING PROBLEM OF GATE VALVES IN THE SPRING-8 STORAGE RING

Masaya Oishi¹, Masazumi Shoji, Yuichi Okayasu, Yukiko Taniuchi, Hiroto Yonehara, Haruo Ohkuma
Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPRING-8)
1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5198

Abstract

The SPRING-8 storage ring is running with various kinds of operation modes. Initially the operation modes were restricted by a beam instability, however the limitation was overcome introducing a bunch-by-bunch feedback system. Now, heat load for a finger-type RF shields in gate valves is a major issue for the restriction^[1]. More specifically, the temperatures inside the gate valves are controlled less than 100 °C taking account the creep rupture of beryllium-copper of the shields. However, we investigated more precise heat mechanism of the gate valves for future upgrades, such as bunch current increase, short pulse beam operation and so on. As a result, it is found that a thermal contact resistance between the shield and the valve body is a major issue to be considered.

SPRING-8蓄積リング ゲートバルブ発熱調査

1. はじめに

SPRING-8蓄積リングでは、挿入光源、高周波加速空洞、入射部が設置されている直線部とアーク部の通常真空チェンバ部を機器設置時あるいは保守時に仕切るため、ベリリウム銅製のRFシールド付きダブルシールオールメタルゲートバルブを約90台設置している。1999年8月、保守のため閉めていたゲートバルブのうち1台が開かなくなるトラブルがあった。予備品と交換し、取り出したバルブを調査した結果、バルブの開閉動作の際に、RFシールドを縮めるためのバネの損傷が原因であることがわかった。自由長35.5 mmのバネが5.4 mmから10.5 mm伸び、4個中3個が脱落していた。このようにバネが伸びるには、温度が400°C以上になったと考えられ、運転中のRFシールド周辺の温度調査を開始した。

2. ゲートバルブ構造と発熱問題

ゲートバルブのRFシールドおよび周辺の断面図を図1に示す。ゲートバルブの面間は120mmで、口径は高さ40mm、幅90mmの楕円である。両端のICF152フランジ①に、SUS製の反力板②をM4ネジで固定している。一方、ベリリウム銅製のRFシールド③は、SUS製の支持板④と接触板⑤にM3ネジを介して挟まれて固定されている。支持板にはバネ⑥が取り付けられ、ゲートが「開」状態ではカム機構で接触板⑤は反力板②に押しつけられる。ゲートが「閉」になるときは、カムが緩み、バネにより両側の接触板同士の間隔が縮まり、弁体と入れ替わるように移動する。

RFシールドと支持板にセラミクスコーティングした熱電対をつけた改造ゲートバルブを準備して、温

度測定ができるようにした。ただし、この改造によりゲートの「閉」はできない。このゲートバルブを蓄積リングのモニターセクションに設置し、温度の常時計測をした。計測の結果例を図2に示す。

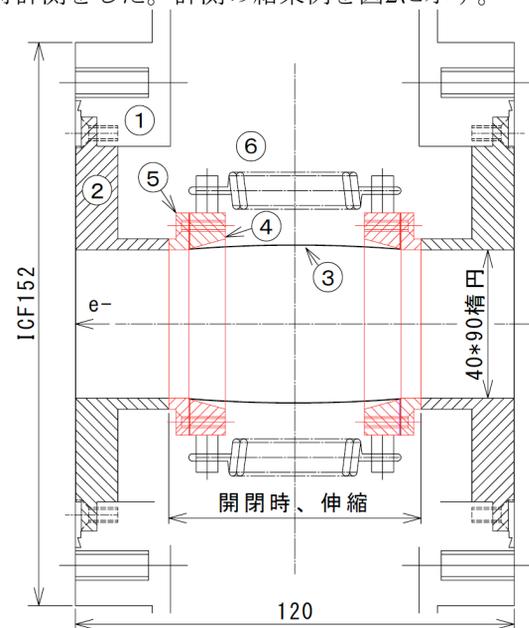


図1：ゲートバルブ断面

運転モードによっては、RFシールドの温度が100°C近くまで上昇するものがあることがわかった。もし、ゲートバルブのシリンダーの圧空が漏洩し、シリンダーが動くと、反力板と接触板の接触が緩み、フランジ側への熱移動が無くなる。RFシールド、支持板、接触板の発熱は、支持板からカム機構とロッドを介して外部に逃げることになるが、動きをス

¹ E-mail: moishi@spring8.or.jp

ムズにするため、部品間の接触が少なくなっているために、断熱状態となっており、従って、400°C以上にバネが温度上昇する恐れは十分にある。

SPRING-8蓄積リングのゲートバルブは、圧空喪失事故を懸念し、シリンダー圧空コントロール用の電磁弁はダブルソレノイド方式を採用し、開あるいは閉命令を出した30秒間のみ、圧空をシリンダーに供給し、それ以外は、電磁弁を閉とし、圧空を遮断、圧空ラインからの圧空喪失事故があってもバルブの開閉状態に影響が及ばないようにしている。逆に、電磁弁からシリンダー周辺で圧空の漏洩があった場合、シリンダーの圧力が低下し反力板と接触板の接触が緩む。1999年のゲートバルブの故障は、このような圧空漏洩による発熱が原因と推定された。現在では、圧空が漏洩し、シリンダーが動いたことをリミットスイッチで検知すると、圧空を再度供給するシーケンスに変更したため、トラブルは再発していない。

しかしながら、ビーム運転時にRFシールドが100°C近くまで温度上昇することには変わらない。運転モード（バンチモード）に対する制限は、当初はビーム不安定の発生にあったが、bunch-by-bunch feedbackシステムの導入により改善され、現在は、主にゲートバルブの発熱が制限原因となっている。ベリリウム銅のクリープ温度を考慮すると、RFシールドの許容温度は安全率を含め100°Cと考える。現状では、ユーザーからの更なるバンチ電流の増大の要求、また、将来期待される短パルス電子ビーム運転などには応えられない。そこで、ゲートバルブの発熱について更に調査を行った。

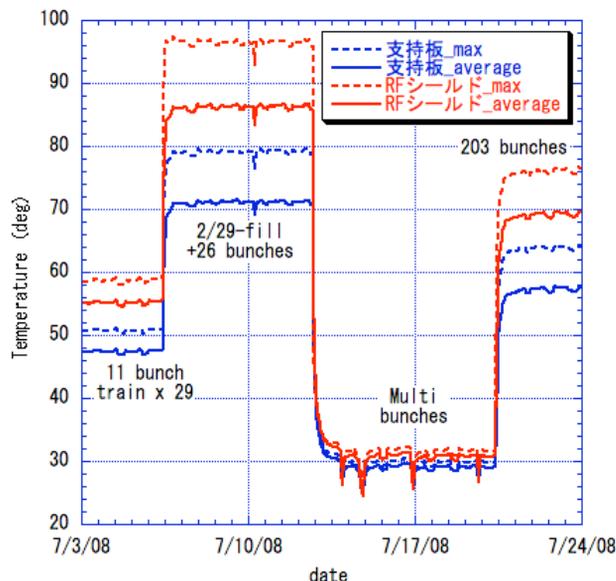


図2：ゲートバルブGV1のRFフィンと支持板温度。運転モードの依存性が見える。

3. 発熱の抑制

RFシールドの発熱は、シールド材料の電気抵抗が

原因であり、それを改善すれば抑制できると考え試験を行った。RFシールドに使用しているベリリウム銅の導電率は純銅に比べ約25%である。それに対し銀は純銅相当以上の伝導率であるため、ベリリウム銅のRFシールドに銀メッキを施し、リングに設置・比較した。結果を表1と図3に示す。RFシールドがベリリウム銅製の2台と銀メッキ製1台を比較した。表1には運転モード毎に各バルブの運転停止時からの温度上昇を示す。参考に発熱の原因と考えているバンチ電流の電力相当として、バンチ電流の二乗とバンチ数の積を示す。結果はRFシールドにメッキをしていないGV1、GV2に対し銀メッキを施したゲートバルブの温度は若干低めとなった。しかし、銀メッキにより表面抵抗がベリリウム銅の約1/4に減少し、発熱が抑制されることを期待したが、それほど顕著な効果は見られなかった。

このゲートバルブの改造では、接触板と反力板にも熱電対を設置した。図3の接触板と反力板の温度差が大きく、この間の接触熱抵抗が大きいことを示している。ベンチテストでRFシールドからフランジへの伝熱特性を調査することとした。

なお、今回、銀メッキの効果を確認できなかったが、銀メッキの仕様と導電率の相関を調査する必要がある。

表1：運転停止時からの支持板の温度上昇を運転モード別に示す。GV1とGV2のRFシールドはベリリウム銅製でメッキ無し。

運転モード Bunch mode	バンチ電流 ² * バンチ数 (mA ²)	GV1 (°C)	GV2 (°C)	銀メッキ (°C)
Multi bunches	5. 21	4. 9	3. 3	3. 1
203 bunches	49. 26	32. 2	27. 4	24. 0
11 bunch train*29	31. 35	23. 3	17. 1	14. 6
1/7-fill+ 5 bunches	65. 76	37. 4	38. 6	28. 9

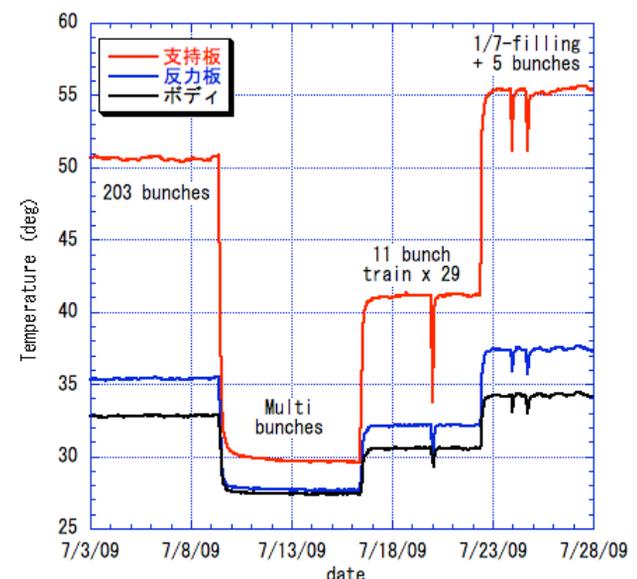


図3：RFシールドを銀メッキしたゲートバルブの温度変化。反力板の温度が支持板に比べ低い。

4. 伝熱特性ベンチテスト

図2、表1の温度測定を行ったGV1をリングから外し、伝熱特性のベンチテストを行った。比較のため、接触板と反力板での発熱を抑えるように無酸素銅製に交換した改造品（NA型）と、更に、厚さ3mmの楕円部を、熱伝導と接触熱抵抗の改善のため厚さを10mmの楕円とした改造品（NB型）と比較した。

ベンチテストは、熱電対を取り付けた支持板側のフランジにアルミ製閉止板を取り付け、アルミ閉止板をヒータで加熱し、内部の温度の遷移を観測した。アルミ閉止板は70℃に温度調節をかけて保持し、ゲートバルブフランジ部および反力板で約55℃となるようにした。ゲート弁内部は真空排気を行った。ゲート弁外表面は保温していない。始めにゲートは開とせず、接触板と反力板の間に隙間ができるようにし、アルミ製閉止板とフランジの温度が一定となったところで完全に開とし、接触板と反力板を接触させ、支持板等の温度を観測した。

図4に結果を示す。横軸の時間は、接触板と反力板を接触させた時刻を0とした経過時間である。GV1の支持板温度は、改造品NA、NBの支持板温度に比べ明らかに温度上昇が遅く、伝熱特性が悪いことがわかる。

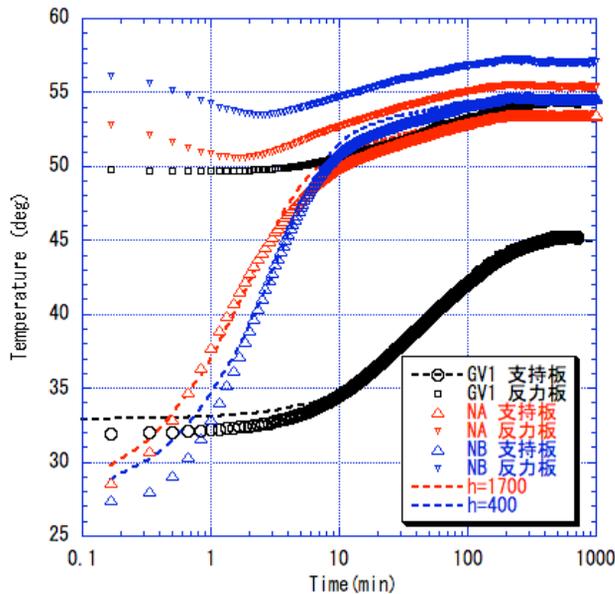


図4：ベンチテスト結果

支持板の温度変化を、非定常熱伝導の集中熱容量モデル^[2]として以下の式でフィッティングを行い、接触板と反力板間の面積での熱伝達率として評価した。支持板と接触板は温度差が無いため一体と考えた。また、この場合、熱伝達率 h は、接触板と反力板の接触熱抵抗を熱伝達率として評価することになる。

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = \exp\left(-\frac{hS}{c\rho V} t\right)$$

ここで T は支持板温度、 T_i は支持板温度の初期値、

T_{∞} は支持板最終温度、 V は支持板と接触板の体積、 ρ は密度、 c は比熱、 S は接触板と反力板の接触面積、 t は時間である。密度と比熱は計算の簡単化のため銅に対してもSUSの値を使用した。

GV1の熱伝達率はフィッティングの結果47~53 W/m²K、フランジ温度 T_{∞} は41~43℃となり、これは、反力板と接触板の接触が悪いことを示している。NA型とNB型は、 T_{∞} を反力板の温度変化に合わせて変えると、きれいにフィッティングができ、NA型の熱伝達率が1700、NB型が400 W/m²Kであった。NB型はNA型より、反力板と接触板の厚さを増し、熱伝導と接触熱抵抗の改善を試みたものであるが、トータルの熱伝達はNA型より小さい結果となった。接触が上手くいっていないことを示している。

フランジからRFシールドへの熱抵抗を反力板の熱伝導 R_k 、反力板と接触板の接触熱抵抗 R_c 、RFシールドの熱伝導 R_{rf} と比較する。反力板とRFシールドの熱伝導は、形状と材質がわかっているため計算で求めることができ、 R_c は図4のフィッティングの結果である。表2に結果を示す。明らかにGV1は接触熱抵抗が支配的であり、この改善が効果的であることを示している。NA型、NB型はRFシールドの熱伝導の方が大きいため、これ以上の改善は効果がなく、むしろRFシールドの熱伝導改善、あるいは発熱抑制が必要なことを示している。

表2：各ゲートバルブの熱抵抗(K/W)

ゲートバルブ	R_k	R_c	R_{rf}
GV1	1.881	31.25	4.85
NA	0.075	0.92	4.85
NB	0.035	1.39	4.85

5. まとめ

電子ビームによるRFシールドの温度上昇に起因するゲートバルブの発熱に関して調査を行った。ベンチテストで伝熱特性の測定を行い、RFシールド（支持板、接触板）とゲート弁本体（反力板）間の接触熱抵抗が問題であることがわかった。

今後、接触熱抵抗の小さなNA型、NB型のゲートバルブをリングに設置し、温度を調査する。また、発熱の抑制のために、銀メッキについても調査を行う予定である。

参考文献

- [1] M.Shoji, et al., to be published in Vacuum (in press).
- [2] 日本機械学会, "JSME Textbook Series Heat Transfer, (2005), p39.