

SPring-8 蓄積リング冷却施設から収納部への振動の伝搬経路の推定と除振 改造による収納部床振動の減少

VIBRATION REDUCTION ON THE TUNNEL FLOOR BY SUGGESTION OF VIBRATION PROPAGATION AND REMODELING OF COOLING SYSTEM IN SPRING- 8 STORAGE RING

松井佐久夫[#],
Sakuo Matsui[#]
RIKEN

Abstract

The vibration source of the magnet and floor was investigated from the time of ring construction completed. The floor vibration in the tunnel only near the cooling machine room seems to travel through the floor from that room. The vibration of the vacuum chamber could not be removed by removing the fluctuation of the water pressure with accumulator. The vibration source seems to be the flowing water in the chamber. The cooling system of the SPring-8 storage ring was remodeled because of aging and efficiency. At the same time many vibration suppression units were inserted between the floor and pillars and the vibration reduction mat under the pump were also graded up. The effect of vibration reduction was large at the maintenance path and small on the tunnel floor.

1. はじめに

一周 1436m の蓄積リングのユーティリティとして実験ホールや収納部の空調と電磁石、電源、RF 関係、真空チャンバー、フロントエンドなどの機器の冷却の施設が用意されている。全周は A、B、C、D の 4 つに分割され、内周側の各冷却機械室からダクトや配管でそれぞれの場所に送られる(図 1)。

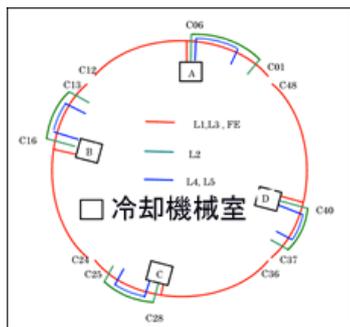


Figure 1: Cooling pipes from the cooling machine rooms.

冷却機械室には大型のモーターやポンプ、冷凍機、隣接する屋外には大きな冷却塔が設置されている。このような施設から直接の、また機器も含めたダクトや配管が振動源となり電子ビーム、放射光を振動させている。振動抑制の対策が施されてきたが、今回、20 年の老朽化と技術進歩による効率アップのため大幅な熱源機器更新工事とそれに伴う機械室での除振対策も施された。これまでの調査や実験と今回の改修による収納部等の振動の変化を報告する。

2. これまでの調査や実験

2.1 建設直後 1996 年

架台や電磁石の機械的な固有振動等はあらかじめ R&D や計算も可能であるが、冷却施設からの振動の伝搬などは地盤の違いなどの不確定要素も多い。冷却施設が完成し電磁石に供給されるようになってから C ブロックの冷却機械室から保守通路、収納部までの床の振動測定を開始した。

減衰は横軸に 2 箇所エクspansionsも含めた距離、縦軸に 30、60、90Hz 弱の卓越振動数の振幅を機械室のポンプ下、保守通路、収納部の 3 点を対数でプロットすると 3 成分ともほぼ直線的に減衰していることがわかった。また、全周の収納部床で冷却施設が稼動時最大でも振幅は 3nm、ほとんどの場所で 1 nm 以下と小さいことを明らかにしている。さらに架台や電磁石での振動モードの特定まで行い、電磁石の振幅は 0.1 μm 以下なので電子ビームへの影響は小さいと評価している。 [1]

2.2 日揮 (株) による調査 1999 年

実際に電子ビームが蓄積され放射光を供給するようになり、1999 年 7 月振動調査業務として日揮 (株) により C ゾーンの機械室や収納部で調査された。機械室の床の振動はポンプが直接与える影響より配管を支える架構からの方が大きく、機械室全体が振動源になっていると推測し、また収納部天井への冷却水配管も調査しているが、収納部床面の振動は機械室から床の伝播が支配的と評価している。さらに、振動の流体的要因については回転周波数 30

[#]matsui@spring8.or.jp

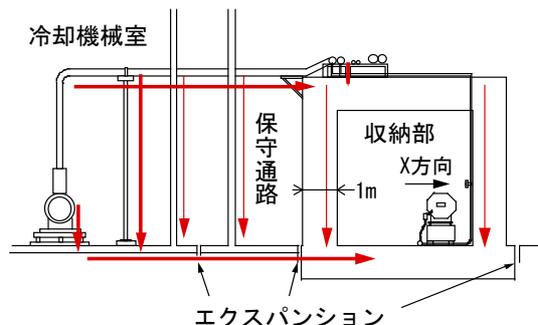


Figure 2: Cross section from machine room to tunnel.

Hz 弱、60Hz 弱に羽根の数をかけた、175Hz とか 233Hz 付近が脈動の基本周波数になること、しかしこれらの周波数は比較的高く、実際には配管系との干渉からより低い次数の 30Hz 弱、60Hz 弱のピークが発生しているとしている。機械室に近い収納部ではこの機械的要因が支配的で、離れたところでは冷却水循環による要因が支配的と評価している。

対策として機械室の配管のサポート部に適当なバネ定数の防振ゴムの挿入と、脈動と液中共鳴からくる騒音対策には継手タイプのパイプサイレンサーを試験的に入れ効果を確認する、をあげている。

2.3 脈動対策 石川島播磨重工業 (株) 2000 年

2000 年からビームの軌道安定化プロジェクトがスタートし振動の低減もテーマになり、指摘されていた脈動の減少に石川島播磨重工業 (株) により低脈動ポンプとしてモノポンプ (ねじポンプ) がとりあげられ、遠心ポンプと比較された。しかし、スペクトルではピークの幅は狭いが回転次数の周波数で、小さくない脈動が発生していた。ただ幅が狭いので並列で位相差をあたえると脈動を少し低減できた。

また、2001 年インライン型のアキュムレーター (パイプが二重でガスやゴムの弾性により圧力の変動を吸収する) を試作し冷却水の脈動の低減実験を行った。実際に蓄積リング 36 セルの A 架台の横の壁や電磁石直近にアキュムレーターを挿入した

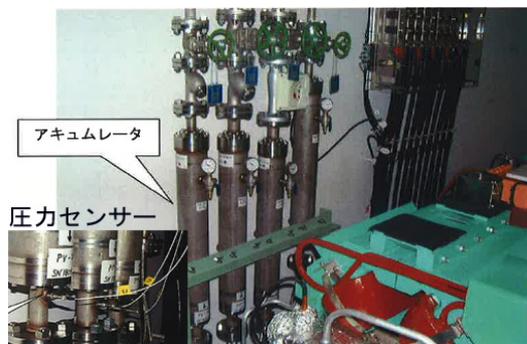


Figure 3: Accumulator on the wall and pressure sensors.

(図 3)。結果、冷却水の脈動は大幅に低減したが、電磁石や真空チャンバーの振動には効果は見られな

く、(図 4) 現状の電磁石や真空チャンバーの振動は内部の冷却水起源が支配的と判断された。

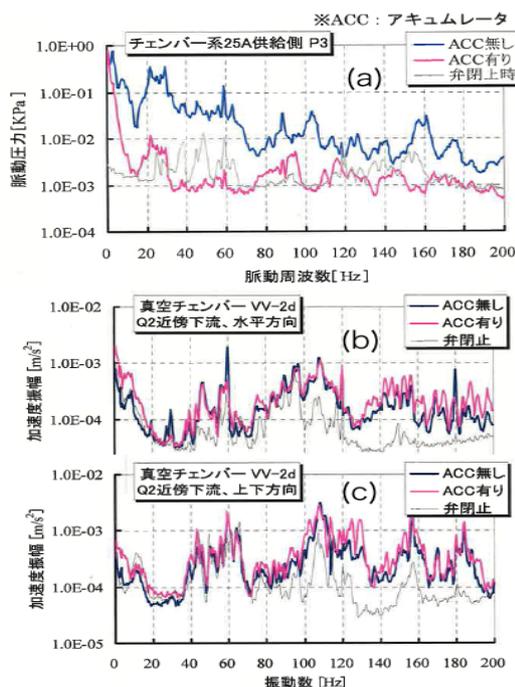


Figure 4: Effect of the accumulator.

2.4 チャンバーの振動が原因 2000 年

この時期、電子ビームの振動の主たる原因が 4 極電磁石中のアルミ製真空チャンバーの振動による渦電流と判明した。チャンバーは放射光の熱負荷に耐えるよう場所により数 m/s の流速、 10^4 台の高いレイノルズ数になり振動を誘起している。[2, 3]

そこでチャンバーの固定に架台上の数カ所でのステンレス板の追加、アブソーバ 2 への配管系統の改造、流量の低減などの結果ビーム振動も減少した。現在も残っている振動の原因は垂直方向の場合、真空チャンバーを流れる冷却水起源が半分で、残りは床一架台からくる機械的な振動と推測されている。

2.5 収納部躯体と冷却配管による振動伝搬 2003 年

2003 年に収納部床と天井の振動を全周測定し、冷却配管が固定されている高さ 5m の躯体があるために遠くまで振動が伝わるのが明らかになった。特に X 方向は構造的にゆれやすく天井の振動では 5-65Hz の幅のパワーで一桁下がるのに 150-300m 必要で、垂直方向は少し短い 100m 程度であった。

2.6 熱源機器更新工事 2014 年

現在のビーム振動をさらに減少させるのは容易ではないが次期の加速器 SPring8 II ではエミッタンスが小さいため振動を抑えなければ実効的なエミッタンスが増大する。アルミ製の真空チャンバーを使う場合は、床からくる部分も含め振動を極力小さくする必要があり、このことと、建設からすでに 20 年が経過し冷却施設の老朽化と効率アップのため除振

も含めた大掛かりな熱源機器更新工事（2014.1~3）が行われた。

3. 伝播経路の特定

冷却室に近い収納部床への伝播には、保守通路など距離 10m 程度の床と、収納部躯体上部に固定の冷却配管が考えられる（図 2）。図 5 に収納部全周の床と天井の垂直方向 30-95Hz の領域の振動のパワーを示している。天井は 1/100 にしてプロットしている。A、B ブロックについては機械室に近いところで床の振動が急激に大きくなっていることがわかる。

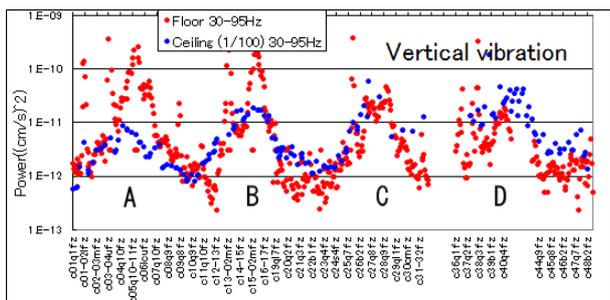


Figure 5: Vibration power comparison between floor and ceiling of the tunnel.

収納部の天井と内部の床にセンサーを設置し、天井で跳んだ時のスペクトルは両方ともよく似た形で、振幅はパワーにすると床は天井のほぼ 1/100 であった。また、機械的な振動は重ねあわせが成り立ち、点 i での加振による点 j への周波数応答関数と点 j での加振による点 i への周波数応答関数は一致するという相反定理が成り立つ。仮に天井に振動が伝搬しているとする天井も床も尖り方は似てくるが、床に来ている場合は、床から天井へは振幅で 1/10 なので影響は小さく、床だけが尖ることになる。これらのことから A、B ブロックでは収納部の天井ではなく床に振動が伝播してきていることが推測される。また、機械室と収納部の垂直方向のスペクトルで大きさは違うが形が似ている場所もあり振動が床を伝播してきたと考えられる。

図 6 は±30mの範囲で 5m毎に振動（速度）の強さの変化を 3 次元的に表しており短い範囲で大きなピークがあることが理解できる。しかし、C、D ブロックではピークは顕著ではない。D ブロックではポンプが他より収納部から遠い位置にあったり配

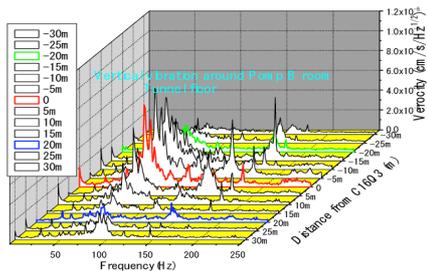


Figure 6: Floor vertical vibration near the pump room.

置も異なる。構造的に似ている A、B、C でも差が出てくる背景には振動を伝播する地盤の質も影響している可能性もある。

4. 改造工事

4.1 除振台のグレードアップ

ポンプの振動の床への伝播を抑えるためにゴム製の除振台が使われている。今回、固有振動数がこれまでの 4Hz から 2.3Hz 相当品にグレードアップした。これにより図 7 のように固有振動数より高いところでは床への伝播はより抑制されることがわかる。

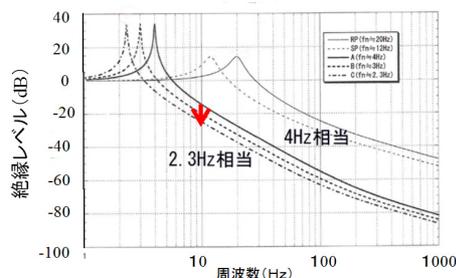


Figure 7: Vibration reduction as the frequency.

4.2 配管サポート防振ユニットの挿入

配管を支えている支柱が床に振動を伝播させているため、この支柱の下部をいったん切断し床との間に図 8 のような特許機器（株）製の防振ユニットを挿入した。これを機械室のほとんどの支柱に施した。

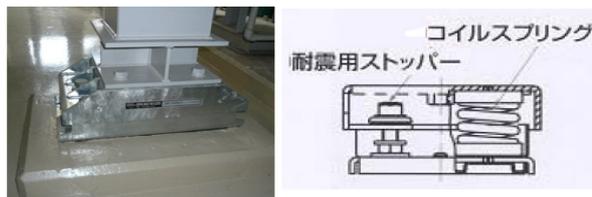


Figure 8: Vibration dumping unit made by Tokkyokiki Corporation.

4.3 パイプサイレンサーの挿入

機械室は振動だけでなく騒音も大きい。すでにポンプの出口などで配管への振動の伝播を抑える継ぎ手が使われていたがこれをより高性能なパイプサイレンサーに置き換えた。

4.4 インバータ制御の導入

負荷に応じたポンプの運転が可能になった。

5. 収納部振動測定

5.1 センサー、測定器

動コイル型速度出力 Geospace 製 Geophone GS11D（固有振動数 4.5Hz 出力 1V/kine(cm/s) 直径 3cm、長さ 3cm の円筒）でアルミ板に水平用 2 個、垂直用

1 個を固定し、同時に 4 枚 12 個の測定を自動車用バッテリー駆動の小野測器の多チャンネル FFT Graduo 24bit 分解能、1024Hz サンプルで 60 秒のデータをノート PC に記録した (図 9)。

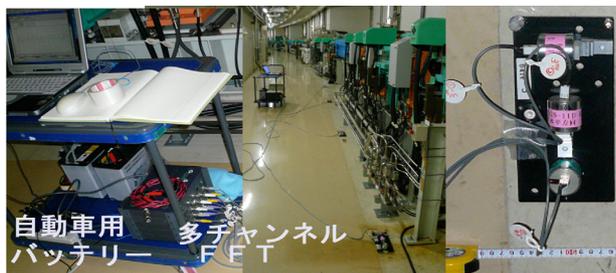


Figure 9: Vibration measurement system.

このセンサーはサーボタイプではなく 5Hz 付近以下では出力が歪んでくるが収納部の床で低い振動数はなく高い周波数まで平坦な特性を持ちかつ 1 個 1 万円程度と安価で多くの場所での測定が可能である。構造も単純なので特性の安定さはサーボタイプより優れている。インピーダンス 4kΩ で 1V/kine の出力が得られるのでアンプなしで直接 AD 変換できる場合が多い。取り回しの容易な細い同軸ケーブルが使用可能である。1Hz 程度まで必要な場合はやや大きい HS-1 を使っている。

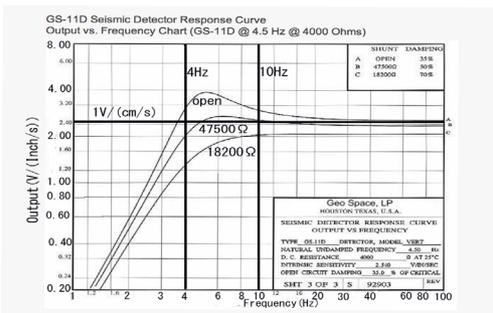


Figure 10: GS-11D response as frequency.

速度スペクトルを見る場合、加速度センサーでは一度積分が入るため図 11 のように低い周波数でバックグラウンドが大きくなりわかりにくくなる。また、実際の機械的振動では振幅が小さいのであまり問題にならない高い周波数が加速度センサーでは強調されるが、むしろ周波数の低い振幅の大きなところが重要になることに注意しなければならない。

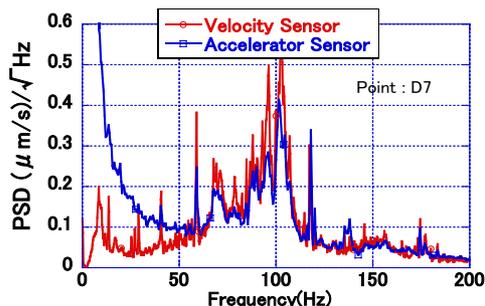


Figure 11: Velocity PSD spectra of two type sensors.

5.2 測定場所

収納部での測定 1430m で 420 カ所、間隔は平均 3.5m である。センサーの位置は冷却水のヘッダーに近いが、厚く柔らかい塗装を避けるため架台の端から約 50cm リング内側である。(図 9)

5.3 測定結果 1 収納部床

図 12 に改造前後での全周の収納部床の水平 X 方向 (半径方向) と垂直方向の振動の変位スペクトルを示す。右から A B C D ブロックの順番である。改造前に比べ少し振幅が小さくなっていることがわかる。水平で 17Hz 付近の振動は躯体の固有振動であるが垂直方向の 4-5Hz 付近の強く見えるところはセンサーの固有振動があるためで実際の振動ではない。

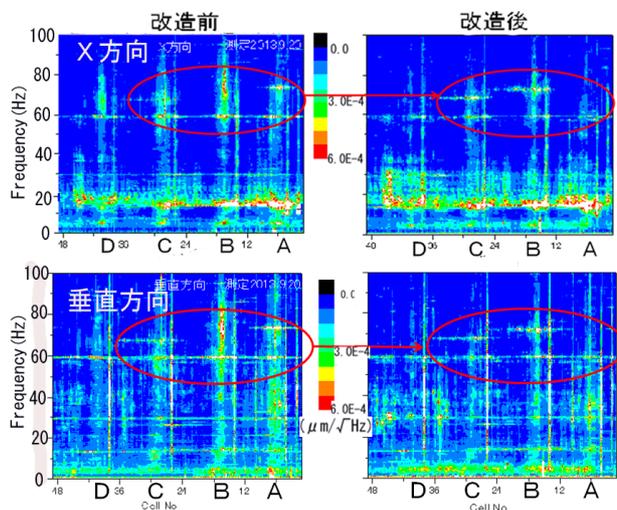


Figure 12: Vibration change of the tunnel floor in the X and vertical direction before and after remodeling.

5.4 測定結果 2 収納部天井

図 13 右は保守通路から L1 パイプが収納部上部に固定されているところを見上げた写真で、多くの冷却パイプが似たような方法で収納部に固定されていて、この部分を見る限り収納部を加振させている。機械室では床への振動の伝搬が小さくなるため逆にパイプの振動は増大する可能性がある。壁貫通部では工事はなされていない。そこでパイプの振動を測定した (図 13 左)。



Figure 13: Sensors on the L1 pipe(left). Looking up L1 pipes on the support from maintenance path (right).

図 14 にCとDのL1パイプの工事前後（赤：改造前、青：改造後）の振動を示しているが、ほとんど変化していない。

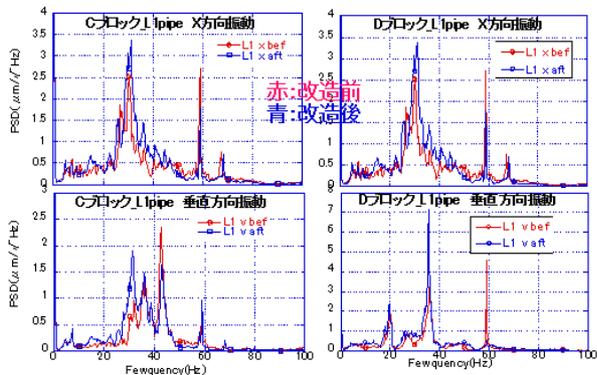


Figure 14: L1 pipe vibration before and after remodeling.

5.5 電子ビーム

改造の前後での電子ビームの振動を早乙女氏（(公財)高輝度光科学研究センター）からいただいたので図 15 に示す。ほとんど変化は見られない。

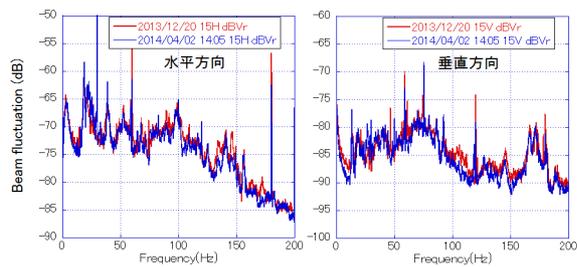


Figure 15: Beam fluctuation before and after remodeling.

6. 保守通路振動測定

6.1 測定

冷却機械室周辺と収納部間の保守通路の図 16 の赤点の位置の床振動を特許機器（株）が測定した。他のブロックも同様に測定した。



Figure 16: Measured points in the maintenance path.

6.2 測定結果

改造前後での各ブロックの垂直方向変位の結果を図 17 に示す。下段が改造後で明らかに小さくなっている。X方向についても同様に減少していた。

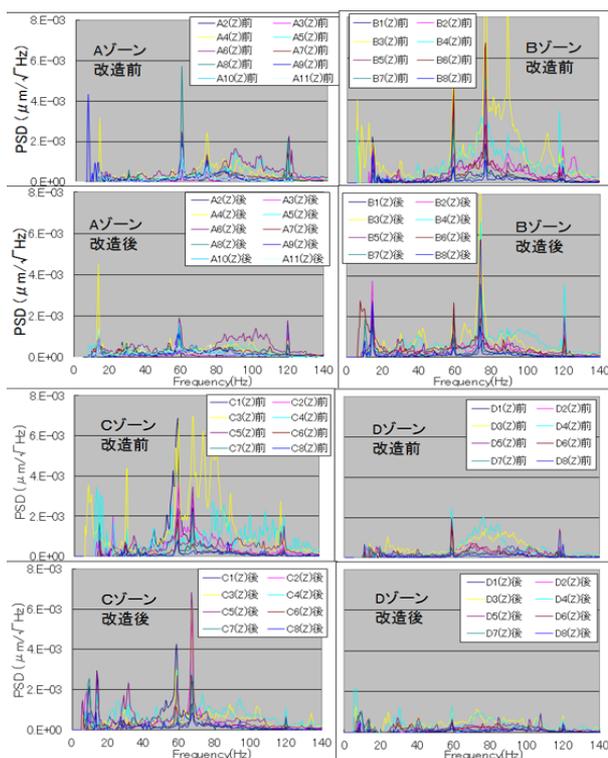


Figure 17: Vertical vibration displacement on the maintenance path floor before and after remodeling.

7. まとめ

真空チャンバーの振動は冷却水の脈動による影響は少なく、内部を流れる水による励起が大きい。

冷却機械室の振動の床への伝搬を低減化した結果、保守通路の床では全般的に減少、収納部の床ではA、Bゾーンで減少、収納部天井の配管固定部はあまり変化せず、結局、機械室の床から収納部へ伝わる振動をかなり抑えることができたので次は配管からの伝搬を減少させることに目標を絞ることができる。

現状のビーム振動には寄与していないが、次期の低エミッタンスリング SPring8 II（冷却水による振動は現状より低減させる）に向けた準備が進んだ。

改造にあたり議論や保守通路のデータなど特許機器（株）に協力いただいた。また、成重雅彦氏（理化学研究所）にもいろいろと世話いただいた。謝意を表します。

参考文献

- [1] 長谷川清光, Engineering Note Mag-006-96 1996.10.9. 蓄積リングの振動測定.
- [2] 依田哲彦他, ” SPring-8 蓄積リング真空チェンバーの振動抑制”, 第10回加速器およびストレージリングにおける超高真空研究会プロシーディングス, KEK Proceedings 2004-1, つくば, 2004年3月.
- [3] S.Matsui, et al., Jpn. Appl. Phys. Vol.42(2003)ppL338.