

SPring-8-II 用真空機器の熱解析及び構造解析

THERMAL AND STRUCTURAL ANALYSES OF VACUUM COMPONENTS FOR SPring-8-II

鈴木伸司^{*,A)}, 出羽英紀^{A)}, 正木満博^{A)}, 増田剛正^{A)}, 大石真也^{A,B)}, 小路正純^{A,B)}, 高野史郎^{A,B)}, 田村和宏^{A,B)},
谷内友希子^{A)}, 上田 庸資^{A)}, 渡部貴宏^{A,B)}

Shinji Suzuki^{*,A)}, Hideki Dewa^{A)}, Mitsuhiro Masaki^{A)}, Takemasa Masuda^{A)}, Masaya Oishi^{A,B)},
Masazumi Shoji^{A,B)}, Shiro Takano^{A,B)}, Kazuhiro Tamura^{A,B)}, Yukiko Taniuchi^{A)}, Yosuke Ueda^{A)},
Takahiro Watanabe^{A,B)}

A) JASRI

B) RIKEN

Abstract

Vacuum components for SPring-8-II storage ring are under development. We must consider the necessity of cooling them and how to cool them if necessary because they are heated by the impedance and irradiation of synchrotron radiation. In addition, the stress generated in the accelerator operation must be less than 0.2% yield strengths of their materials. We have optimized their design via thermal and structural analyses using the finite element method.

1. はじめに

大型放射光施設 SPring-8 のアップグレード計画である SPring-8-II [1] では、消費電力を半減しながらも、電子ビームの低エミッタンス化により 100 倍以上の高輝度化を目指している。現 SPring-8 は 2027 年にシャットダウンし、約 1 年の停止期間中にほぼ全ての蓄積リングの機器の撤去と、新しい機器の据えつけを行う予定となっている。周長 1435 m の SPring-8-II 蓄積リングの真空系 [2] を構成する真空チェンバーには、偏向磁石中に設置される偏向部チェンバー (Bending Section Chamber: BSC) と、多極磁石中に設置される直線部チェンバー (Straight Section Chamber: SSC) の、断面形状の異なる 2 種類のチェンバーがある。真空チェンバーは、抵抗性インピーダンス及び放射光の入熱により発熱するため、水冷の必要性についての検討が必須であり、水冷が必要な場合には入熱分布、磁石磁極形状等を考慮した上で最適な冷却チャンネルの構造・配置を決定しなければならない。加えて、真空引きによって発生する応力は材料のステンレスの 0.2% 耐力以下でなければならない。真空系に組み込まれるチェンバー以外の真空機器についても同様の検討を行う必要がある。真空チェンバー等の熱膨張を吸収するためのペローズ、ビーム位置モニター (Beam Position Monitor: BPM) が挙げられる。これら真空機器の定常状態での温度分布・応力分布を調べるため、有限要素解析ソフトの Ansys [3] を用いて熱解析及び構造解析を行なった。本稿では、SPring-8-II 用真空機器の熱解析及び構造解析の結果について報告する。

2. 真空チェンバー

2.1 直線部チェンバー SSC

SSC の断面図を Fig. 1 に示す。電子ビームが通過する部分の断面形状が菱形となっているのが特徴である。直線部に設置される四極磁石や六極磁石の磁極との干渉

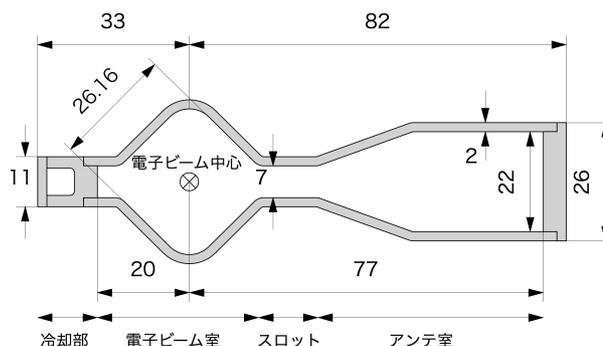


Figure 1: Cross-sectional view of SSC.

を避けつつ、電子ビームとチェンバー壁の距離を出来るだけ離すためである。まず構造解析について説明する。モデルの長さは 1.7 m、材質は SUS316L、メッシュサイズは 1 mm とした。拘束によって発生する応力を最小限に抑えて応力を評価するため、Kinematic mount [4] と呼ばれる、剛体の運動を止める最低限の拘束条件を与えた。SSC の大気部分には大気圧 0.1 MPa を作用させ、重力加速度も考慮した。変形量と応力の結果を Fig. 2a と Fig. 2b にそれぞれ示す。変形量が最も大きいのはスロットと呼ばれるくびれの部分であり、0.22 mm つぶされる。チェンバーのペーキング時に想定される最大温度が 150°C であり、応力はこの温度時の 0.2% 耐力以下であることが要求される。最大応力は放射光が通過するアンテナ室上下の角部分の 110 MPa である。SUS316L の 0.2% 耐力の 130 MPa (150°C) を下回っており、構造的な問題はなさそうである。ただし、アンテナ室の幅が Fig. 1 の SSC よりも 43 mm 広い SSCd [2] は、板厚が 2 mm の時の応力が 0.2% 耐力を超えてしまうことがわかったので、板厚を 2.1 mm とすることで目標の応力以下に抑えた。実際のチェンバー製作においては、部品共通化の観点から、断面形状の違いによらず SSC の板厚を 2.1 mm に統一することとした。

次に、熱解析について説明する。使用したモデルは中

* shinji.suzuki-at-spring8.or.jp

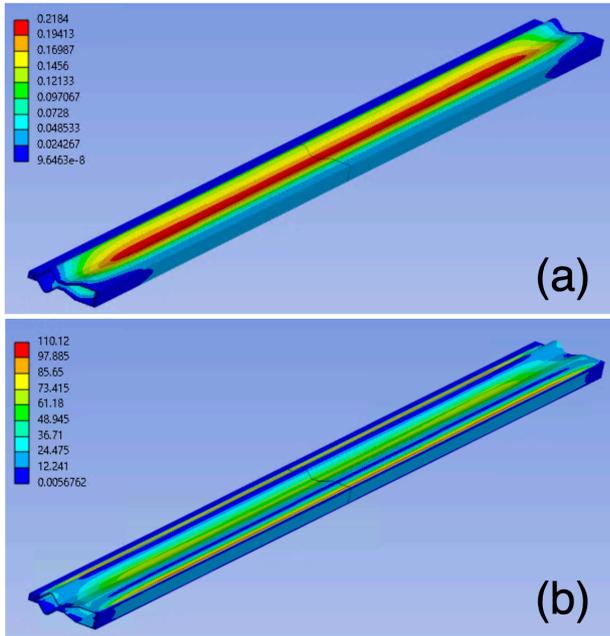


Figure 2: (a) Displacement distribution of SSC. (b) Stress distribution of SSC.

心面から上半分だけのモデルであり (Fig. 3)、中心面を堺に対称の条件を課している。これにより計算する有限要素の数が減るので計算速度が向上する。入熱源として電子ビーム通過によるインピーダンス発熱と放射光照射を考える。抵抗性インピーダンスによる入熱分布は、電磁界シミュレーションソフトの CST Studio Suite [5] の Wakefield ソルバーを用いて求めた。バンチ電流は 0.5 mA、バンチ長 14 ps、バンチ間隔は 11.8 ns と厳しい熱負荷条件とした。最大で 0.3 mW/mm^2 の入熱量を電子ビーム室の表面に与えた。スロット部へ照射される放射光の入熱パワーが最も大きい箇所は挿入光源 (Insertion Device: ID) 下流の SSC であり、約 8 m 上流の偏向磁石 (0.43 T, 0.5 m) がその光源である。放射光による入熱を Spectra [6] を用いて計算した。電子ビーム中心から 3.5 mm の高さのスロット部には最大で $1.7 \mu\text{W/mm}^2$ (斜入射角 0.5 mrad を考慮) の入熱となるが、これは極めて小さい量なので無視できる。しかし、SSC の製作誤差や真空引きによるスロット部のつぶれ、SSC の光軸がずれた場合などを考慮すると放射光とスロット部が近づくことになり、入熱パワーは大きくなると考えられる。スロット部開口半幅 (設計値 3.5 mm) の取り得る最小値は、 $(11[\text{外寸}]-0.5[\text{製作誤差}]-0.44[\text{つぶれ量}])\div 2 - 2[\text{板厚}]-0.5[\text{据付誤差}] = 2.5 \text{ mm}$ となる。さらに放射光が 1 mm ずれた場合にはスロット部はビームから 1.5 mm まで近づく。この場合スロット部への入熱パワーは、 $85 \mu\text{W/mm}^2$ となる。これはパワー分布の最大値となるが、安全のためスロット部に一様に 0.1 mW/mm^2 を与えて解析を行なった (放射光入熱ありの場合)。

冷却の条件として、水冷の有無、空気への放熱の有無のそれぞれの条件で解析を行なった。冷却水の温度は現在の SPring-8 と同じ 30°C で流量は 4 L/min、 27°C の空気 (蓄積リング収納部の平均温度) に触れる部分の熱伝

達係数は $1 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ とした。水冷管の熱伝達係数は、レイノルズ数 Re の広い領域に対応できる次の Gnielinski の式 [7] を用いて求めた。

$$Nu = \frac{hd}{\lambda} = \frac{(f/2)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7\sqrt{f/2}(Pr^{3/2} - 1)} \quad (1)$$

ここで Nu はヌセルト数、 h は熱伝達係数、 d は代表長さ、 f は管摩擦係数、 Pr はプラントル数である。 30°C の水の物性値 (密度 $\rho = 0.9956 \text{ g/cm}^3$ 、熱伝導率 $\lambda = 0.6147 \text{ W/(mK)}$ 、比熱 $C = 4.1797 \text{ J/(gK)}$ 、粘性係数 $\mu = 7.973 \times 10^{-4} \text{ Pas}$) を用いて、流体に固有な物性値であるプラントル数は $Pr = \mu C / \lambda = 5.42$ である。水冷管の断面は円ではないが、断面積 S と辺長 l から導出できる水力直径 (相当直径) を代表長さとして扱うことができ、 $d = 4S/l = 6.15 \text{ mm}$ である。冷却水の流速 $u = 2.24 \text{ m/s}$ と水の物性値を用いて、レイノルズ数は $Re = \rho u d / \mu = 17236$ となる。 $Re > 4000$ の時は熱を伝えやすい乱流となる。管摩擦係数は、 $f = (3.64 \log_{10} Re - 3.28)^{-2} = 6.78 \times 10^{-3}$ である。したがって、熱伝達係数は、 $h = Nu / \lambda / d \sim 12000 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ と求められる。

熱解析の一例として、水冷あり、空気への放熱なし、放射光入熱ありの条件での温度分布を Fig. 3 に示す。アンテ室の大部分が最高到達温度の約 40°C まで上昇することがわかる。発熱によって発生する応力は最大で 22 MPa と小さく、発熱による構造への影響は無視できる。全ての条件での温度の値を Table 1 にまとめる。水冷をしない場合には最低でも 83°C であり、最大で 90°C に達する。チェンバー温度が 90°C になってもチェンバー自体に問題はないが、蓄積リング収納部の温度を上昇させないために水冷は必須である。空気への放熱なしの条件は多極磁石に囲まれた場合を想定しているが、空気への放熱の有無の影響は小さい。

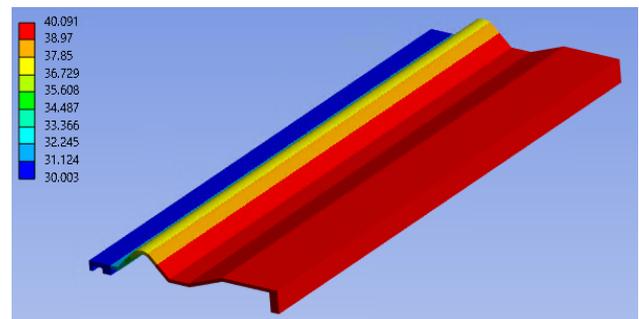


Figure 3: Temperature distribution of SSC w/ heat input of synchrotron radiation and water cooling, w/o heat dissipation into air.

2.2 偏向部チェンバー BSC

BSC の断面形状を Fig. 4 に示す。BSC は偏向磁石の平行な磁極に挟まれるため直線的な形状となる。SSC の場合と同様に真空引きを想定した構造解析を行なった結果、最大応力は 90 MPa であり、SUS316L(150°C) の 0.2% 耐力以下であった。最も変位量が多い箇所は、電子ビーム室とアンテ室の境界の角部で 0.12 mm のつぶ

Table 1: Temperature Results of SSC under Each Condition

放射光入熱	水冷	空気への放熱	最低 [°C]	最高 [°C]
なし	なし	あり	75	82
なし	あり	あり	30	36
なし	あり	なし	30	38
あり	なし	あり	83	90
あり	あり	あり	30	38
あり	あり	なし	30	40

れであった。BSC は SSC よりも 1 mm 厚い 3 mm の板厚で設計されているので SSC よりつぶれ量は小さい。

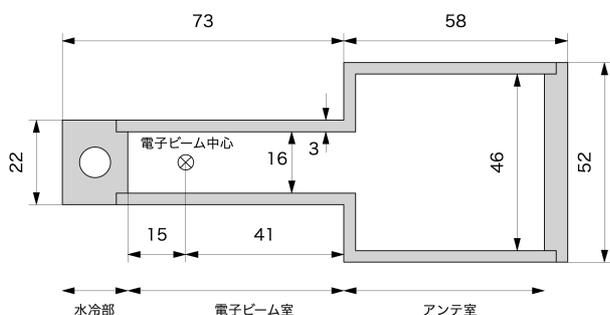


Figure 4: Cross-sectional view of BSC.

熱解析の入熱条件は、SSC と同様に抵抗性インピーダンスと放射光を考慮する。抵抗性インピーダンスによる発熱は、電子ビーム室表面で最大 1 mW/mm^2 である。次に放射光による入熱を考える。設計では電子ビーム中心からこの面までの距離は 8 mm であるが、真空引きにより上面と下面ともに 0.12 mm つぶれる。このつぶれ量、製作誤差、据付誤差を考慮した際の開口半幅（設計値 8 mm）のとり得る最小値は、 $(22[\text{外寸}]-0.5[\text{製作誤差}]-0.24[\text{つぶれ量}])\div 2 - 3[\text{板厚}]-0.5[\text{据付誤差}] = 7.1 \text{ mm}$ となる。さらに放射光の軸が 1 mm ずれたと仮定した場合には 6 mm まで近づく。放射光のパワー密度が最も大きいと考えられる光源は、中心軸外に放射光が分布する円偏向モード時の ID17 である。電子ビーム中心から垂直に 6 mm の位置での放射光のパワー分布を Fig. 5 に示す。BSC の長さは 2.15 m の直線とし、光源から 6 m 下流の位置とした。最大値は $40 \mu\text{W/mm}^2$ であり、この最大値を含むよう $s=1850 \text{ mm}$ から $s=2150 \text{ mm}$ のパワー分布を用いた（BSC は 300 mm のモデル）。BSC の水冷管（直径 8 mm）の熱伝達係数は SSC の場合と同様に Eq. (1) を用いて $h \sim 7100 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ と求められる。

水冷あり、空気への放熱なし、放射光ありの場合は、SSC と同様に冷却部がある電子ビーム室左側の温度が低く、冷却部から遠いアンテナ室の領域が最大温度（ 36°C ）となった。Table 2 に各条件での温度をまとめる。上記の条件は運転時を想定した条件であるが、放射光の入熱を考慮しない場合でも最高温度は 36°C と変わらないため、放射光のパワーは無視できることがわかる。SSC と同様に、水冷がなしで空気への放熱のみの場合は 100°C 近くまで温度が上昇してしまうので、水冷は必須である。BSC は SSC よりも内壁と電子ビームの距離が近いので、抵抗性インピーダンスによる発熱量が大きく、SSC より

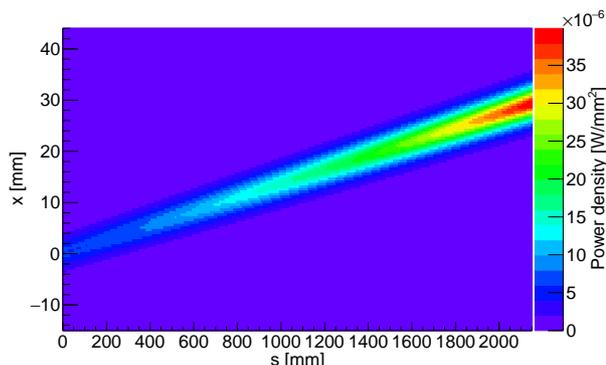


Figure 5: Power density distribution of ID17 at $y = 6 \text{ mm}$. The distance from the light source is 6 m at $s = 0 \text{ mm}$.

Table 2: Temperature Results of BSC under Each Condition

放射光入熱	水冷	空気への放熱	最低 [°C]	最高 [°C]
なし	なし	あり	84	97
なし	あり	あり	30	35
なし	あり	なし	30	36
あり	なし	あり	86	98
あり	あり	あり	30	35
あり	あり	なし	30	36

も高い温度になると予想された。そのため、水冷チャンネルを増やすことも検討していたが、熱解析の結果、1つの冷却チャンネルのみでも 36°C までの上昇に抑えられるため、追加の冷却チャンネルは不要であると判断した。

3. ベローズ

全 44 箇所のノーマルセルには ICF152 規格の長さ 75 mm の長ベローズが 9 台と、長さ 55 mm の短ベローズが 8 台設置される予定である。ベローズ内部にはビーム不安定性を抑制するため、バネ性のあるベリリウム銅製 (C1720) RF フィンガーが取り付けられる。このフィンガー部の段差やテーパといった幾何学的インピーダンスが発熱源となる。CST Studio Suite の計算結果から、長ベローズ（短ベローズ）の RF フィンガー部に 0.7 W (0.4 W)、ステンレス (SUS316L) 部に 2.6 W (1.4 W) を適用し、除熱は空気への放熱のみとして熱解析を行なった。長ベローズの温度分布を Fig. 6 に示す。RF フィンガー部付近で最大 99°C に達している。SPring-8-II の総運転時間を $24 \text{ h} \times 300 \text{ 日} \times 30 \text{ 年} = 216 \text{ kh}$ と仮定した場合のベリリウム銅の応力緩和率は約 10% と見積もられるので、バネ力劣化の問題はなさそうである。短ベローズは最大 68°C であった。

4. ビーム位置モニター BPM

4.1 BPM の熱解析

SPring-8-II 用 BPM [8] の水冷の必要性の検証及び水冷の方法を検討した。解析に使用した BPM ブロックのモデルを Fig. 7 に示す。BPM は SUS ブロックに 4 個のボタン電極 [9] が取り付けられた構造となっており、

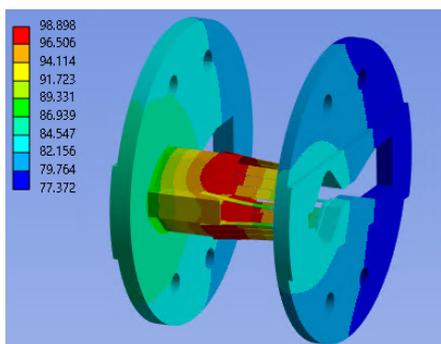


Figure 6: Temperature distribution of the long bellows. The outer part is hidden for convenience.

SSC の断面形状と同じ開口領域を持つ。電極と取付穴のギャップに生じる捕獲モードによる発熱が問題にならないか検証する。Figure 7 は片面に水冷チャンネルがあるモデルであるが、両面水冷モデルと水冷チャンネルがないモデルの解析も行った。各モデルのビーム方向の厚さは 50 mm、45 mm、40 mm となっており、水冷チャンネルがない面は薄くなっている。

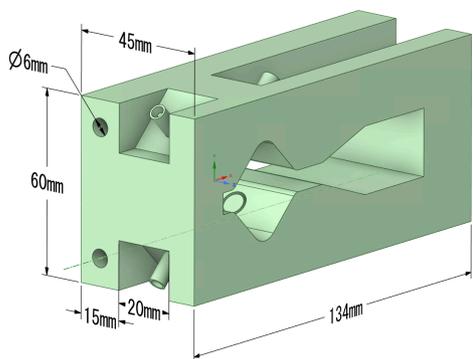


Figure 7: 3D model of BPM used for thermal analysis. The model has a water cooling channel on single side.

BPM 前後の SSC との熱のやり取りも考慮するため、前後に長さ 30 cm の SSC を接続したモデルで解析を行った。SSC は水冷あり、空気への放熱はなしとした。BPM ブロックの冷却水の温度と流量は SSC と同じとし(熱伝達係数 12000 W/(m²K))、空気への放熱はありとした。以上の条件で得られた温度を Fig. 8 に示す。片面水冷、両面水冷と冷却能力が高いほど、左右の電極表面温度の差がなくなっていくのがわかる。各 BPM ブロック冷却モデルでの解析結果を Table 3 にまとめる。熱膨張による変位量は、片面水冷と両面水冷の場合は各電極が 5 μm 以下に収まっているが、水冷なしの場合は 10 μm を超える電極もあり、電極間の変位量の差ももっとも大きい。これらの変位量の差は、BPM で測定される電子ビーム位置の系統誤差となってしまいが、片面水冷と両面水冷の場合、変位量の差は数 μm 以内と許容できる量である。温度上昇による円柱状のボタン電極の直径の変化を $\Delta\phi$ として表に示した。温度が上がると熱膨張によって電極の直径は大きくなり、電極からピックアップされる信号の大きさも変化する。温度変化 ΔT による直径の大きさは、 $\phi = \phi_0[1 + \alpha\Delta T]$ と表せる。ここで α

は材料に固有な量である線膨張係数であり、電極の材料である Mo の値は 5.2×10^{-6} である。冷却なしの場合が最も直径の変化量が 0.6 μm と大きく、片面水冷と両面水冷の場合は 0.2 μm 程度の膨張に収まっている。温度、変位量、直径の変化量の全てにおいて両面水冷が片面水冷より電極間の違いが小さいが、片面水冷で問題がない大きさに収まっているので、BPM を薄くできる片面水冷を採用することとした。両面水冷よりも製作コストを抑えることができ、また BPM の前後に配置される機器とのクリアランスに余裕を持たせられる設計となった。

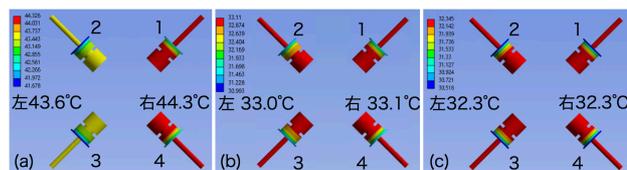


Figure 8: Temperature distribution of the button electrodes. (a)W/o water cooling. (b) W/ water cooling on single side. (c) W/ water cooling on both sides.

4.2 BPM 架台の構造解析

ノーマルセル部には各セルに計 7 台の BPM が設置される。その内 3 台は BPM を支える単独の架台が必要であり、その他の BPM は光吸収体のチェンバーに溶接されて支持される。この BPM 架台を設計するにあたり、まず BPM に働く力を考える。s 方向に関しては、BPM に働く力と前後に設置されるチェンバー架台からの反力が釣り合うので力を受けない。y 方向には BPM 前後に配置されたチェンバーやペローズの重量を受ける。これら真空機器の重量はまだ未定であるが、24.1 kg と仮定した。ペローズは x,y 方向ともに 1 mm 程度オフセットしてアライメントが実施されると想定し、ペローズのオフセットによる反力を見積もる。ペローズバネ定数は x と y 方向にそれぞれ 98.3 N/mm と仮定した。上記の力は加速器運転時に常時働く力とし、この条件で架台が破損しないこと、及び各方向の変位量は s 方向には 0.1 mm、x/y 方向には 0.05 mm 以内に収まることを設計の指針とした。また地震発生時を想定し、チェンバーの重量に 0.5G を乗じた力 ($24.1 \text{ kg} \times 4.9 \text{ m/s}^2 \sim 120 \text{ N}$) を各方向に受けても破損しないことも要求した。これらの条件を Table 4 にまとめる。

解析に使用した BPM 架台のモデルを Fig. 9 に示す。BPM 架台には調整機構が備わっており、s と x 方向には紫色で示したプレート押しボルトによって動かせるようになっているが、この機構は構造解析に影響しないのでモデルでは省略している。位置を調整した後は、大きい円盤状のスペーサーをボルトで締め付けることによりプレートを固定する。BPM の高さは下の支持台から立てた 4 本のスタッドボルトを用いて高さを調整する。調整幅は s 方向には $\pm 7.5 \text{ mm}$ 、x/y 方向には $\pm 10 \text{ mm}$ と設定した。BPM 架台は磁石等も置かれる共通架台上に載せられるが、共通架台の高さはまだ未定であったため、架台の高さは約 300 mm となるように設定した。Ansys において、ボルトで締結される部材の摩擦係数は 0.5 とし、ボルトの初期締め付け力によって各部材を固定した。

Table 3: Thermal Analysis Results for Maximum Temperature and Displacement under Each Cooling Condition

	左電極 (2,3)	右電極 (1,4)	電極 (1-4)	SSC	左電極 (2,3)	右電極 (1,4)
	最大温度 [°C]	最大温度 [°C]	変位量 [μm]	最大温度 [°C]	$\Delta\phi$ [μm]	$\Delta\phi$ [μm]
水冷なし	43.6	44.3	8.6/12.8/8.8/7.6	44	0.60	0.63
片面水冷	33	33.1	3.1/4.2/2.9/2.2	40	0.20	0.22
両面水冷	32.3	32.3	2.8/3.8/2.5/1.8	40	0.19	0.19

Table 4: Expected force F acted in the accelerator operation and earthquakes and permissible displacement Δ . Δ_{res} indicates analysis results of displacement.

	F [N]			Δ [mm]			Δ_{res} [mm]		
	s	x	y	s	x	y	s	x	y
運転時	0	100	350	0.1	0.05	0.05	0.01	0.02	0.01
地震時	120	100	350						
	0	220	350						
	0	100	470						

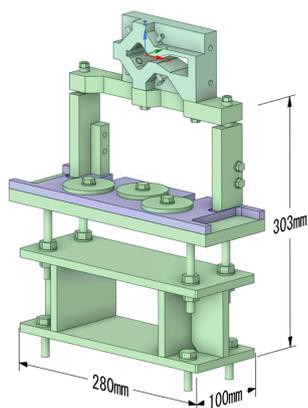


Figure 9: 3D model of BPM girder used for analysis.

各方向の変位量の結果を Table 4 に示す。いずれの方向においても運転時の変位量は目標を達成していることがわかった。Figure 10 に応力の結果を示す。最大応力の 316 MPa は BPM 架台を共通架台に固定させる M10 ボルト (初期締付力 12250 N) で発生する (Fig. 10a)。この M10 ボルト (SCM435) の降伏点は 900 MPa であるので問題はない。ボルト以外の部分の最大応力 199 MPa は、上記の M10 ボルトを通す支持台の穴の角で発生するが (Fig. 10b)、支持台 (SS400) の降伏点 235 MPa 以下である。その他の部分についても応力は降伏点より十分に下回っていることを確認した。また、地震発生時の荷重を与えた場合の解析結果の図は省略するが、運転時と同様に最大応力は同じボルトで発生しており、ボルト以外の部分で発生する応力も耐力を下回っていることが確認できたので破損はしないだろう。

5. まとめ

今回の熱解析及び構造解析により、SPring-8-II 用真空機器の設計を最適化することができた。これまで機器製造会社に解析を依頼していたが、我々が解析を行うことによって、設計の最適化を早く進めることが可能に

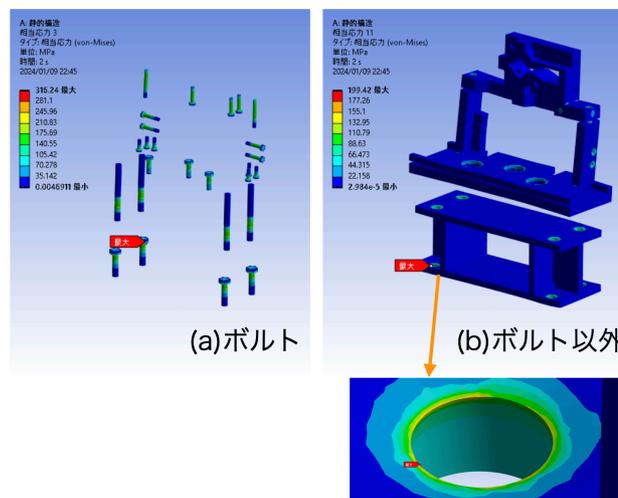


Figure 10: Stress distribution of BPM girder. (a) Shows bolts only. (b) Shows the other.

なった。SPring-8-II における光診断に用いる X 線取出し窓や、電子ビームエミッタンスを低減するために用いるダンピングウィグラーからの放射光を受け止める光吸収体など、まだ設計が検討されていない機器について熱解析・構造解析を実施し、設計の最適化を行なっていく。

謝辞

解析に関する助言をいただいたビームライン光学技術推進室の高橋直氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] T. Watanabe and H. Tanaka, Synchrotron Radiation News, 36, 3 (2023).
- [2] 田村和宏他、第 21 回日本加速器学会年会プロシーディングス、THP075 (2024).
- [3] <https://www.ansys.com/ja-jp>
- [4] G. M. Voellmer *et al.*, NASA Technical Report Sever. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20030052215>
- [5] <https://www.3ds.com/ja/products-services/simulia/products/cst-studio-suite>
- [6] T. Tanaka and H. Kitamura, J. Synchrotron Rad., 8, 1221 (2001).
- [7] V. Gnielinski, Int. Chemical Engineering, 16, 359 (1976).
- [8] 前坂比呂和他、第 21 回日本加速器学会年会プロシーディングス、FRP005 (2024).
- [9] M. Masaki *et al.*, Proc. IBIC2016, TUPG06, 360 (2016).