

SuperKEKB のための球形空洞型パルス圧縮器の熱解析

THERMAL ANALYSIS OF A SPHERICAL-CAVITY-TYPE PULSE COMPRESSOR FOR THE SuperKEKB PROJECT

野村 伊久磨^{A)}, 佐治 晃弘^{#,A)}, 井原 功介^{A)},
肥後 壽泰^{B)}, 恵郷 博文^{B,C)}, 東 保男^{B)}, 坂東 佑星^{C)}, 林 显彩^{D)}, 施 嘉儒^{D)}
Ikuma Nomura^{A)}, Akihiro Saji^{#,A)}, Kousuke Ihara^{A)},
Toshiyasu Higo^{B)}, Hiroyasu Ego^{B,C)}, Yasuo Higashi^{B)}, Yusei Bando^{C)}, Xiancai Lin^{D)}, Jiaru Shi^{D)}
^{A)} Toyama Co., Ltd.

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization, KEK

^{C)} Graduate University for Advanced Studies

^{D)} Tsinghua University

Abstract

Spherical-cavity-type pulse compressors (SCPC) were developed at SLAC (USA) and Tsinghua University (China). The SCPC has a single sphere cavity structure more compact than a SLAC Energy Doubler (SLED). KEK is developing a SCPC for the SuperKEKB project to replace the aged SLED. Toyama Co., Ltd, optimized the cooling system of the SCPC via thermal analysis so that the resonant frequency shift due to the thermal deformation in pulsed-power operation of 40 MW was estimated approximately 80 kHz and can be tuned using tuning pins attached to the SCPC.

1. 序論

球形空洞型パルス圧縮器は SLAC (米国) や清華大学 (中国) で開発された実績がある[1, 2]。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では、KEKB より使用してきた 2 孔結合型パルス圧縮器 (S バンド) の老朽化が進み、現行モデルと置き換え可能な球形空洞型パルス圧縮器の開発を行っている (Fig. 1)。このパルス圧縮器の特徴は共振部が 1 つの球体となっており非常にコンパクトなので、現行モデルと同等のエネルギー増幅率を持ちながら [3] 小型化や軽量化、コストダウンが期待できる。試作機を製作するにあたり、株式会社トヤマは設計契約を受けて熱解析及び機械設計を行った。本投稿では、熱変形が少なくなるように検討した冷却機構の詳細及び熱解析結果について報告する。

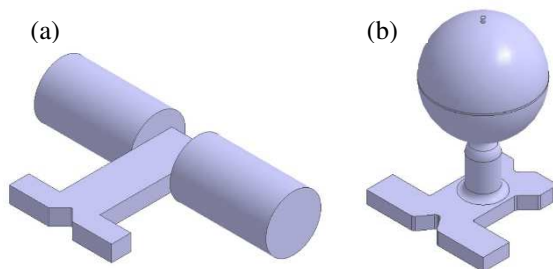


Figure 1: Pulse Compressors (a) SLAC Energy Doubler (SLED), (b) Spherical-cavity-type pulse compressor (SCPC).

2. 解析条件及び解析モデル

まず解析条件について説明する。パルス圧縮器に投入される定常状態の RF 電力は、電力量 40 MW、パルス幅 4 μsec 、繰り返し 50 Hz であり、入力平均電力に対

する空洞内壁損失の割合 (熱損失率) は 15 % と計算され、定常運転における球形空洞内に生じる熱損失量は 1200 W (0.58 W/cm^2) 程度となる。球形空洞内の熱損失量は一様ではなく、Fig. 2 に示す分布を持っているが、Fig. 2 より分かるように、熱損失は空洞内面で比較的均一であり、結合孔付近で局所的に増加することが分かる。本熱解析では、この熱損失分布を反映し、全体の熱損失量が 1200 W 程度となる熱流束分布を与えた。なお解析ソフトウェアには ANSYS Workbench Mechanical 2019R3 を使用した [4]。

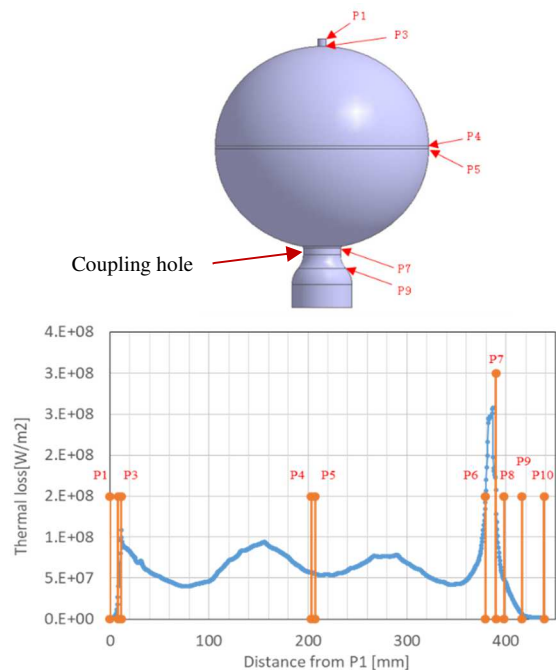


Figure 2: Heat losses at each surface along a lateral line from top to bottom.

次に解析モデルについて説明する。Fig. 3 に解析モデルの断面図を示す。材質について、SUS316L 材である水冷配管を除く材質は無酸素銅である。本解析に用いた物性値は、参考文献[5, 6]より引用した。流路系統については、全体及び局所的な温度上昇を抑えるために、隣接する系統間で入口と出口の配置が可能な限り重ならないように A から E までの 5 種類の系統を配置した。これらの流路図を Fig. 4 に示す。主系統である A 系統は、Fig. 4 では対称に 4ヶ所配置されるうちの一か所を示すが、中央付近ではチューナー穴を避けるように円周上等間隔に計 16 か所の流路を配置した。また全系統の合計流量を供給可能な 55 L/min とし、各系統の流量を Table 1 に示す。冷却水温度は 30 °C である。本解析での環境温度も同様に 30 °C とした。各系統における流路の熱伝達率については、流路断面積により流速が変化する為、流路の断面ごとに熱伝達率を設定した。

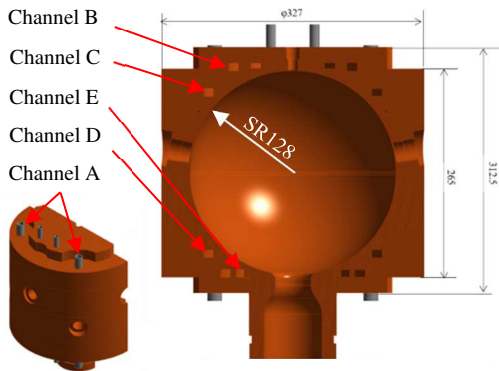


Figure 3: Cross sectional view of the SCPC.

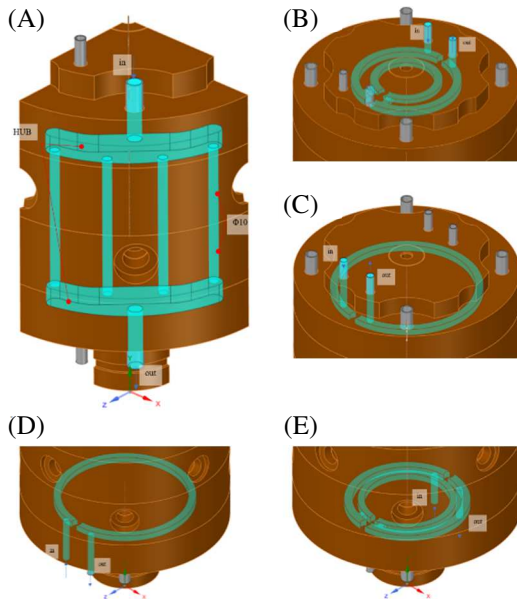


Figure 4: Cooling channels.

Table 1: Flow rates of the cooling channels.

Channel	Number of channels	Flow rate [L/min]
A	4	10.5
B	1	3.25
C	1	3.25
D	1	3.25
E	1	3.25

3. 解析結果

解析は以下の手順で行った。まず熱解析では冷却水の流路に沿った温度上昇を無矛盾に解くことができない為、まず水温を 30 °C 一定とした場合の定常運転時の熱解析を実行し、この解析結果から各流路により持ち去られる熱流を評価した。そしてこれらの熱流と、冷却水の流量と比熱から、流路における水温の上昇値を計算した (3.1 章)。次に、流路に沿って線形に水温が上昇すると仮定し、再度熱解析を実行した (3.2 章)。最後に、水温上昇を仮定し再度熱解析した結果から、定常運転時の球形空洞内面の熱変形を静的構造解析で計算した。 (3.3 章)

3.1 水温が 30 °C 一定の時の熱解析

水温を 30 °C に固定した場合の熱解析結果を Fig. 5 示す。平均温度は 31.7 °C、球形空洞内表面の最高温度は 32.5 °C となった。局所的に温度が高い箇所は RF チューニングするための薄肉部及び結合孔付近である。Table 2 に、熱解析結果から得た各流路を通過する熱流と、冷却水の流量と比熱から計算された温度上昇量を示す。

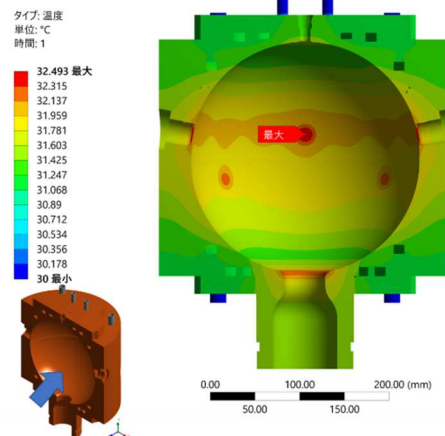


Figure 5: Temperature distribution in the SCPS calculated by the ANSYS simulation. The temperature of cooling water is fixed at 30°C.

Table 2: Heat loads of the cooling channels obtained from the ANSYS simulation and calculated temperature increases in temperature of cooling water.

Channel	Heat loads [W]	Increase in water temperature [°C]
A	194.3	0.16
B	116.0	0.51
C	114.4	0.50
D	110.6	0.49
E	142.9	0.63

3.2 水温上昇を仮定した場合の熱解析

3.1 で得た水温上昇値から、各部の入口から出口にかけて水温が線形に上昇すると仮定した場合の温度分布を流路内面に与え、この条件で熱解析を再度実施した。流路内面の水温上昇の模式図の一例を Fig. 6 に示し、熱解析結果を Fig. 7 に示す。平均温度は 32.1 °C、球形空洞内表面の最高温度は 32.8 °C となった。水温上昇を反映しても相対的な温度分布は変わらなかった。

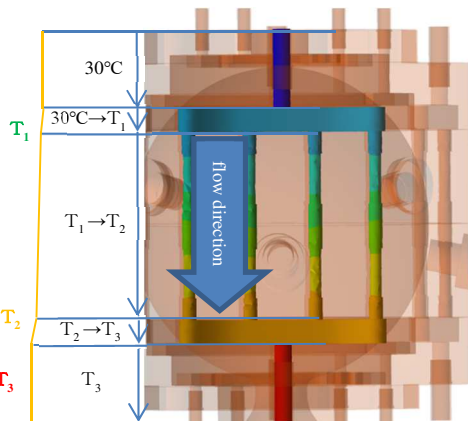


Figure 6: Schematic diagram of increasing water temperature (Channel A).

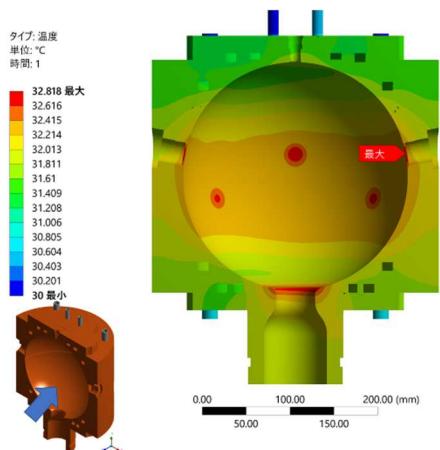


Figure 7: Temperature distribution in the SCPC when the increases of water temperature were incorporated into the ANSYS simulation.

3.3 静的構造解析

3.2 で求めた温度分布をもとに静的構造解析を行なった結果を Fig. 8 に示す。球面変形量の最大値は 4.4 μm、最大値と最小値の差は 1.3 μm となった。定常運転時に生じるこの熱変形量は平均 4 μm を下回る程度になり、これに対応する周波数変化は 80 kHz 程度が見込まれる。これは、チューナーの押し引きピン (Fig. 9) による調整範囲内で、空洞の運転前周波数を高く設定しておき、運転と共に周波数が下降して同調される設計である。なお静的構造解析条件について、拘束境界条件については球面の中心を原点とした 2 軸の回転方向の変位を固定した。また重力は考慮していない。

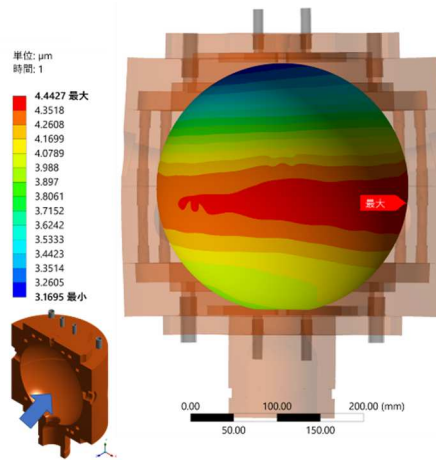


Figure 8: Thermal deformation of the SCPC calculated by the ANSYS simulation. The static structural analysis was performed with the temperature distribution obtained in Section 3.2.

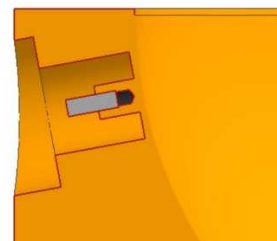


Figure 9: Push-pull type tuning pin located on the outer sphere radius of the cavity.

4. まとめ

我々は、SuperKEKB で使用するために開発中の球形空洞型パルス圧縮器の冷却機構を含む機械設計及び熱構造解析を行った。その結果、定常運転時の熱変形量は最大 4.4 μm、周波数変化は 80 kHz 程度が見込まれる。従ってこれまで検討した冷却機構によって熱変形による周波数変化は十分に小さくなり、RF チューニングで微調整できる見込みであることを確認した。現在 KEK では、本解析モデル形状を採用した試作機の製作を進めており、本年度中には製作完了する予定となっている。

参考文献

- [1] J. W. Wang, *et al.*, "Development for a supercompact X-band pulse compression system and its application at SLAC," PHYSICAL REVIEW ACCELERATORS AND BEAMS 20, 110401 (2017)
- [2] Wang, Ping, *et al.* "Development of an S-band spherical pulse compressor." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 901 (2018): 84-91.
- [3] H. Higo, *et al.*, "SuperKEKB のための S バンド球形空洞型パルス圧縮器の設計", FRPP39, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Japan, Sep. 2-4, 2020.
- [4] Ansys Mechanical | 有限要素法解析ソフトウェア
<https://www.ansys.com/ja-jp/products/structures/ansys-mechanical>
- [5] ITER Materials Properties Handbook
- [6] SUS316L | シリコロイ ラボ
<https://www.silicolloy.co.jp/material/sus316/>