

STF ビームダンプの開発

DEVELOPMENT OF STF BEAM DUMP

森川祐, 江木昌史, 福田将史, 早野仁司, 大山隆弘, 山本康史, 照沼信浩, 道園真一郎
Yu Morikawa, Masato Egi, Masafumi Fukuda, Hitoshi Hayano, Takahiro Oyama, Yasuchika Yamamoto,
Nobuhiro Terunuma, Shinichiro Michizono
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

STF (Superconducting RF Test Facility) in KEK has an electron accelerator for testing of superconducting acceleration cavity. The final specification of the STF beamline accelerates electron beam with an average current of 42 μA to energy of 900 MeV. This time, we developed an aluminum alloy beam dump that can receive the STF final specification electron beam (beam power 37.8 kW) without special beam operations such as beam raster or expanding the beam size. The STF beam dump has been put into operation in March 2019. It has been confirmed that the STF beam dump operates with no problems under the current beam conditions (beam energy 280 MeV, average current 280 nA). In this report, we report on the thermal design of this STF beam dump, radiation shield design, and an overview of the operating situation.

1. はじめに

KEK の STF(Superconducting RF Test Facility)では超伝導加速空洞の試験用電子加速器があり、ビームラインの最終仕様では平均電流 42 μA の電子ビームをエネルギー 900 MeV まで加速する予定である。今回、STF 最終仕様の電子ビーム(ビームパワー 37.8 kW)をビーム走査など特別なビーム操作なく受けられるアルミ合金製ビームダンプ(以下、ビームダンプ 2 と呼ぶ)を開発した。また本ビームダンプ 2 は 2019 年 3 月より運用開始しており、現状のビーム条件(ビームエネルギー 280 MeV, 平均電流 280 nA)で問題なく動作することが確認された。今回はこのビームダンプ 2 の熱設計や放射線遮蔽体設計、運転状況の概要について報告する。

2. ビームダンプ 2 の開発

今回、STF 既設のクライオモジュールである CM1 及び CM2a を用いたビーム加速試験を行うにあたり、新たにこのビームを受けるビームダンプ 2 の開発が必要となった。2019 年 3 月のビーム運転ではエネルギー 500 MeV, 平均電流 300 nA, ビーム強度 135 W を上限として原子力規制庁の運転許可を受けている。しかし、STF ビームラインは更なるクライオモジュールの追加とビーム電流の増強が将来的に計画されており、最終的にはエネルギー 900 MeV \times 平均電流 42 μA のビーム強度 37.8 kW となる予定である。ビームダンプ 2 では、この最終仕様である 37.8 kW のビーム熱に耐えるように開発した。

2.1 構造設計

STF は超伝導電子加速器の R&D マシンであり、試験内容に応じてビームダンプ 2 に入射されるビームエネルギーやビームサイズは変化する。これらビーム条件の変化に対応するため、ビームサイズが数 mm 程度と小さい場合においても発熱密度を除熱可能な程度まで低減できるよう、ビームダンプの構成材料には低原子番号素材であるアルミ合金(A6061-T6)を採用した。図 1 に開発したビームダンプ 2 の構造を示す。ビームは直径 $\phi 80$ mm、

長さ 1,000 mm のフィン付きアルミ円柱(コア部)に入射される。このコア部は円筒形状のアルミ(アウター部)に挿入されており、ビームダンプ後部より導入された冷却水がコア部とアウター部の隙間を流れることでコア部のビーム熱を除熱する。またコア部にはアルミ合金製フランジが接合されており、ビームダンプはビームラインに連続して接続されている。ビームダンプ後部には 10 mm 厚の SUS 製円柱が設置され、コア部で落ち切らなかった γ 線を止める。

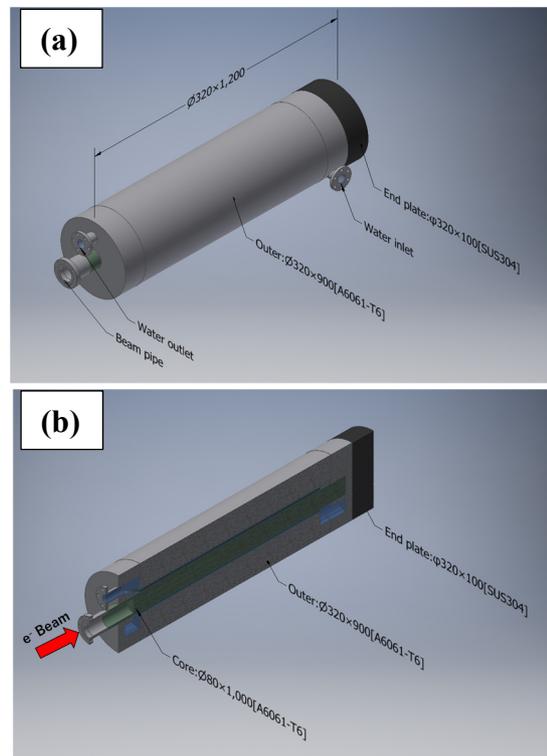


Figure 1: Design of beam dump 2. (a) Outline drawing. (b) Cross section.

2.2 除熱性能

図 2 にモンテカルロコード FLUKA[1]で計算したビームダンプ内の 1 cm 辺りのビーム発熱総量(Longitudinal Power)およびビームパルス毎の最大発熱密度(Peak Energy Deposition Density)を示す。最大発熱密度はコア部の深度 10 cm で最大値 110 J/cm³であるが、1 cm あたりの発熱量は深度 20 cm で最大値 830 W/cm となる。図 3 に汎用有限要素解析ソフト ANSYS で計算したビームパルス入射直後の温度分布を示す。最高温度は 1 cm あたりの発熱量が最大値となった深度 20 cm 地点で観測され 200 °C を下回る。アルミ合金は 200 °C 以上で軟化するが、ビームダンプ 2 ではこの軟化温度を下回るように設計した。ただし、コア部の最大発熱部が軟化点を越えたとしても、塑性変化が生じるだけで即損傷となるわけではない。

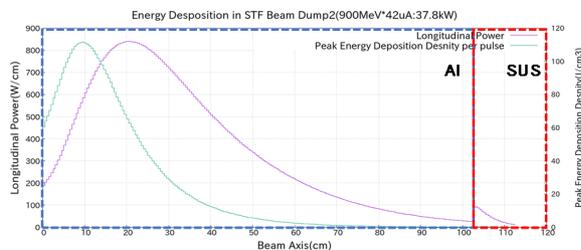


Figure 2: Longitudinal power & peak energy deposition density in beam dump2.

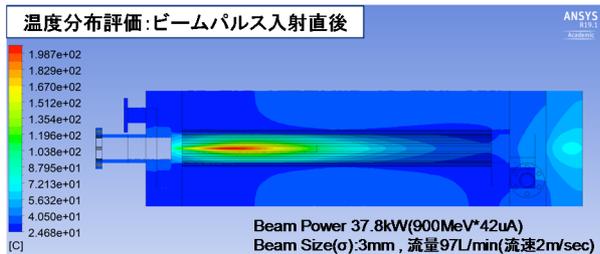


Figure 3: Temperature distribution just after the beam pulse completed.

2.3 熱応力-構造耐久性

図 4 は ANSYS により計算した STF 最終仕様ビームのパルス入射直後のコア部相当応力分布である。最高相当応力は 155 MPa であり、ビーム発熱集中部分の圧縮応力に起因する。ビームパルス入射直後が最高温度を観測するとともに最大の圧縮応力が生じるが、一方でビームパルス入射直前が最も除熱が進み圧縮応力も緩和される。ビームパルス入射直前ではこの圧縮応力は 121 MPa まで緩和されることが同計算で見積もられた。STF のビームは 5 Hz のパルス運転であるが、上記評価よりビームダンプ 2 コア部では 5 Hz で 155 MPa ⇔ 121 MPa と上下する圧縮応力に晒されることになる。パルスビームを受ける場合、繰り返し応力による金属疲労も考慮して装置寿命を考えなければならない。この金属疲労の程度は応力比(繰り返し応力の最小値/最大値の比)によっても大きく変わる。ビームダンプ 2 では圧縮応力の最大強度は 155 MPa であり、応力比は 121MPa/155MPa で 0.78 となる。参照文献[2]では応力比毎の S-N 曲線が

繰り返し 1×10⁸ 回まで記載されている。今回使用したアルミ合金:A6061-T6 の S-N 曲線を図 5 に示す。図 5 を見るに応力比が 0.5 であっても、少なくとも 1×10⁸ 回の繰り返し応力に耐えることが分かる。これは 5 Hz ビーム運転で約 5,600 時間に相当する。

3. ビームダンプ 2 のインストール

3.1 インストール

ビームダンプ 2 は 2018 年 12 月に完成し納品された。図 5 にインストール中のビームダンプ 2 を示す。2019 年 1 月には真空系と冷却水系の繋ぎ込みが完了した。この

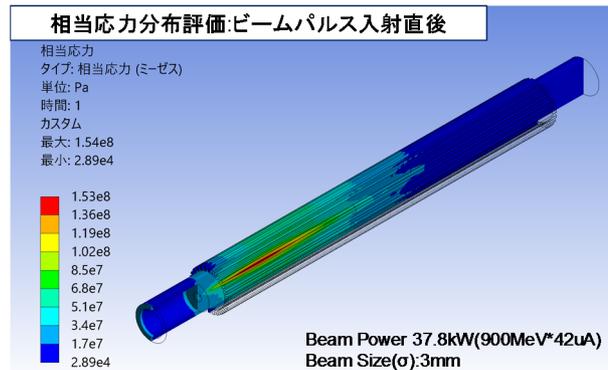


Figure 4: Von-Mises stress distribution in core part of beam dump2.

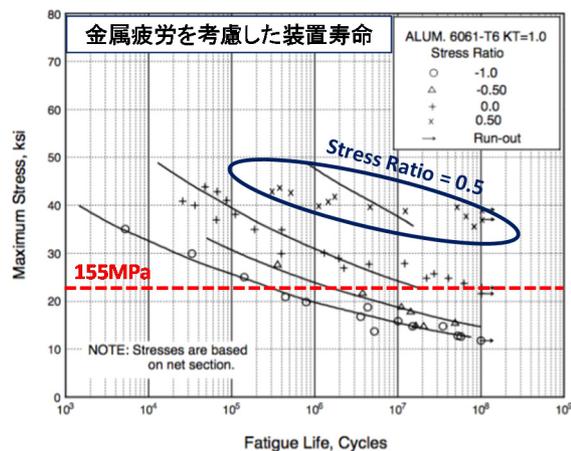


Figure 5: Cycle fatigue of aluminum alloy (A6061-T6)[2].

間、ビームダンプ 2 は 2 週間の 1 MPa 耐水圧試験を行ったが漏水なくクリアした。あお、現在の冷却水系は 10 kW の冷却性能を持つチラーに直結した閉ループとなっており、最大 30 L/min の流量を供給が可能となっている。今後、ビーム強度の強化に合わせて、冷却性能や放射化物のフィルター系を強化する必要がある。

3.2 放射線遮蔽体の設置

図 6 に設置したビームダンプ 2 の放射線遮蔽体を示す。ビームダンプ 2 の放射線遮蔽体はダンプ後部以外全て鉄製である。ダンプ側部は最小 50 cm 厚、ダンプ直上は最小 100 cm 厚となるように鉄遮蔽体を設置している。ダンプ後部には厚み 40 cm の鉄に加え、50 cm 厚のコン

クリートが設置されている。ビームパイプや冷却水パイプ、各種センサー類は遮蔽体前方の 10 cm の隙間から遮蔽体外へ取り出される。

ビームダンプ 2 の直上 800 cm 地点が最も近接する一般区域境界である。事前のモンテカルロ計算や簡易式による評価では、許可を受けている最大強度のビーム運転でも一般区域境界では最大 $0.01 \mu\text{Sv}/\text{hour}$ の線量となることが見積もられた。この線量は一般区域の放射線量上限値である $0.2 \mu\text{Sv}/\text{hour}$ を下回っている。

4. ビーム運転

4.1 温度応答

2019 年 3 月には初照射がなされた。この間の最大ビーム強度はおよそ $280 \text{ MeV} \times 275 \text{ nA}$ の約 75W 程度であった。ビームダンプ 2 には熱電対が多数取り付けられているが、運転期間中には最大 $0.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 程の温度上昇が確認された。

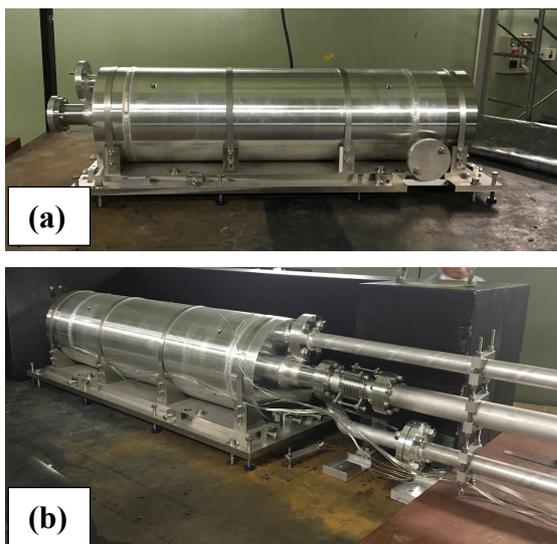


Figure 5: Installing the beam dump2. (a) Before pipe connection. (b) After pipe connection.

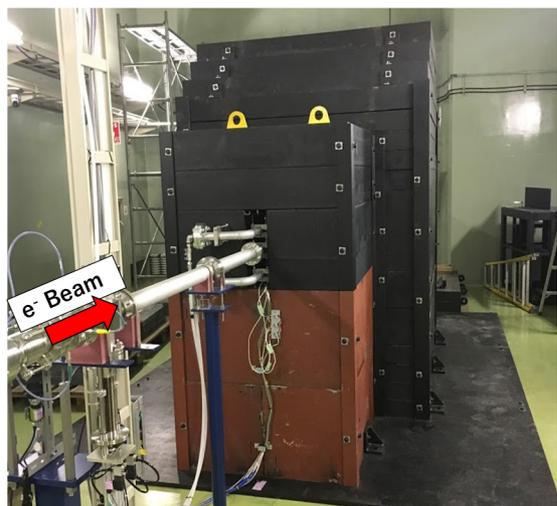


Figure 6: Radiation shield of STF beam dump2.

4.2 遮蔽体周辺の放射線量

運転中にビームダンプ 2 直上の最近接している一般管理区域において有意な放射線量の上昇は確認されなかった。また、75 W のビームを約 2 時間照射し、ビーム停止 10 分後に遮蔽体のビームパイプ出口で放射線量を測定したところ、約 $5 \mu\text{Sv}/\text{hour}$ であった。

4.3 遮蔽体内外の中性子フラックス

設置した遮蔽体の遮蔽性能を確認するため、遮蔽体内外の中性子フラックスを金箔とアルミペレットを用いた放射化法により評価した。金箔は熱中性子の捕獲反応 $\text{Au}197(n,\gamma)\text{Au}198$ 、アルミペレットは速中性子 ($10 \text{ MeV} \sim$) による $\text{Al}27(n,\alpha)\text{Na}24$ 反応を利用して各エネルギー帯の中性子フラックスを評価する。金箔はサイズ $\phi 6 \text{ mm} \times t 2 \mu\text{m}$ 、アルミペレットはサイズ $\phi 8 \text{ mm} \times t 5 \text{ mm}$ の物を使用した。図 7 は放射化試料の設置場所を示している。遮蔽体内部には試料導入用に設置したレールを用いて放射化試料を導入する。なお、この導入レールはビーム軸から平行に 18 cm 離れた位置に設置されている。遮蔽体外にはビーム軸高さ ($Z=120 \text{ cm}$) のビームダンプ側部や直上など任意の位置に設置した。本放射化試験のビーム運転ではビームエネルギー 275 MeV で 70 W のビームを 3000 秒照射した。図 8 は遮蔽体内の放射化プロファイルであり、横軸がビーム軸で縦軸が放射能の



Figure 7: Setting of gold foil and aluminum pellet. (a) Inside shield. (b) Outside shield.

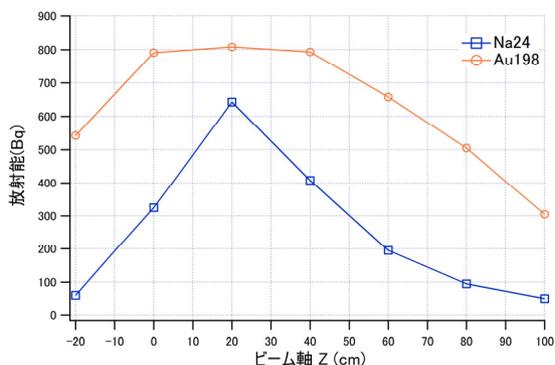


Figure 8: Activation inside the shield.

実測値である。Z=0 の地点がビームダンプ 2 の入射点であり、Z=20 で金箔とアルミペレットともに最も放射化している。これは電子ビームによる電磁シャワーが最大に発展した位置と一致する。表 1 は遮蔽体外での放射能測定値の一覧である。遮蔽体外ではアルミペレットの放射化が確認されず、金箔は遮蔽体内の 1/100 程度の値となっていた。遮蔽体外での放射化は主に熱中性子起因であり、本評価は今後のビーム強度増強時の放射化試算に利用する。

Table 1: Activity and Thermal Neutron Flux Outside the Shield

位置	Au198(Bq)	遮蔽体
側部 1	6.89	鉄 50 cm
側部 2	5.78	鉄 60 cm
後部	2.37	鉄 40 cm + コンクリート 50 cm
直上	2.98	鉄 100 cm

5. 今後の方針

ビームダンプ 2 本体の開発及びインストールは完了し、初のビーム運転も無事終了。次年度はビーム強度を上げた運転が計画されており、ビームダンプ性能の本格的な試験ができる見込みである。ビームダンプ 2 本体以外では、冷却水系の更新を進める予定である。ビームダンプ 2 では除熱性能を向上させるためにコア部近くを冷却水が流れるため、冷却水の放射化が起こる。また、構成材料であるアルミ合金は冷却水に対して微量ながら腐食していく。現在は簡易な閉ループ冷却水系にビームダンプ 2 を繋げているが、放射化物や腐食物対策に向けて、フィルター系を強化した冷却水系に更新する。

参考文献

- [1] Alfredo Ferrari, Paola R. Sala, Albert Fasso, Johannes Ranfit, FLUKA: A multi-particle transport code, Version 2011-2x, CERN.
- [2] METALLIC MATERIALS AND ELEMENTS FOR AEROSPACE VEHICLE STRUCTURES. No. MIL-HDBK-5H, Dept of Defense, 1998.