

電子陽電子入射器の陽電子発生部放射線遮蔽体

RADIATION SHIELD STRUCTURE FOR THE POSITRON TARGET REGION OF KEKB INJECTOR LINAC

松本修二^{#,A)}, 岩瀬広^{B)}, 柿原和久^{A)}, 紙谷琢哉^{A)}, 佐波俊哉^{B)}, 肥後寿泰^{A)} 山岡広^{A)}
Shuji Matsumoto^{#,A)}, Hiroshi Iwase^{B)}, Kazuhisa Kakihara^{A)}, Takuya Kamitani^{A)}, Toshiya Sanami^{B)},
Toshiyasu Higo^{A)}, Hiroshi Yamaoka^{A)}

^{A)} Accelerator Laboratory, KEK, Tsukuba, Ibaraki, Japan

^{B)} Radiation Science Center, KEK, Tsukuba, Ibaraki, Japan

Abstract

The design, fabrication and construction of the new iron-made radiation shield for the positron target and positron capture section of KEKB injector Linac is reviewed. The shield has been developed for shielding sufficiently against the high intensity beam operation for Super KEKB.

1. はじめに

これまで KEKB 電子陽電子入射器の第二セクター第一ユニット（以下簡単に“ユニット#2-1”と呼称）に設置されていた陽電子ターゲットは、SuperKEKB で必要となる陽電子増強のために、入射器上流のユニット#1-5 へ移設された[1]。陽電子生成部では、タングステン合金ターゲットに 3.5GeV 電子ビームをあてることで陽電子を発生させる。それをターゲット下流に置かれたパルス収束マグネット(Flux Concentrator: FC) で捕獲し、さらに DC ソレノイド中に置かれた S バンド加速管により初期加速する。電子ビームがターゲットに衝突した際に発生する放射線のみならず、捕獲、初期加速過程でも、多くのビームロスが起るので、ターゲットとその近傍は、陽電子生成運転中には、入射器の他の場所と比較して、非常に多量の放射線を発生する。

もともとターゲットが設置されていたユニット#2-1 は、トンネル上部に位置する地上部のクライストロンギャラリーとの間に 2.5m 厚みの重量コンクリートが施されてあるが、移設先のユニット#1-5 は、他の大半の入射器ユニット同様、通常のコンクリート床になっている（厚みは同じく 2.5m）。放射線発生シミュレーション計算結果より、①かつての重量コンクリートによる遮蔽の寄与を補うだけでなく、②今後のビーム増強に伴う地上部への漏洩放射線の遮蔽のため、鉄を主体とする遮蔽体を陽電子生成部および捕獲部のビームライン上に配置する必要があることがわかった。

ユニット#1-5 の陽電子生成部から 6m の範囲（ビームラインに沿った下流方向）にわたり、加速器本体上部と天井との間に鉄遮蔽体を配置する。このため、ビームラインに沿って柱、桁および梁よりなる剛性の高い支柱構造体（ヤグラ構造）を配置し、その上に鉄遮蔽ブロック（遮蔽体）を積み重ねる（図 1）。以下では、このような入射器陽電子発生部遮蔽構造全体の設計・設置について報告する。

設計では、構造体の耐震性の確保のため、構造計算により固有振動を評価し、構造体が設置されたのち、固有振動の測定もおこなった。設置後行なわれたビーム運転での漏洩放射線の測定についても簡単に述べる。



Figure 1: The radiation shield at the unit#1-5. Before and after the shield installation (Top and bottom).

2. 放射線遮蔽評価

陽電子生成運転時の電子ビーム（3.5GeV、10nC/bunch、2バンチ）に対する MARS コード[2]による放射線シミュレーションによると、陽電子発生部および捕獲部の 6m の範囲のビームライン上に鉄を主体とした最大で 500mm 程度の厚みの遮蔽体を配置すれば、地上部のクライストロンギャラリーでの漏洩放射線量を十分低減できることが判明した（ギャラリーは放射線管理区域で、許容空間線量は毎時 20 マイクロ Sv 以下。）さらに貫通孔からの漏洩等も考慮し（図 2）、遮蔽体の横幅を 1250mm（ビームラインの東側 500mm、西側 750mm）として、良好な結果を見たので、これに基づき遮蔽構造の設計を開始した。なお、ビームラインから見て上方の建屋一階部分は、1250mm 幅の遮蔽体でちょうどおわれる設計になっている。

SuperKEKB 運転まで陽電子ビーム強度が段階的に上がるのに合わせて、遮蔽の厚みも段階的に増やす方針を取ることとした。ヤグラ構造自体は、最終（最大）の重量負荷、すなわちビームライン上 6m に幅 1250mm、厚み 500mm の鉄遮蔽体を余裕を持って積載できる設計である。最大積載時の遮蔽体のすべてが鉄の場合、総重量はおよそ 30 トンとなる。

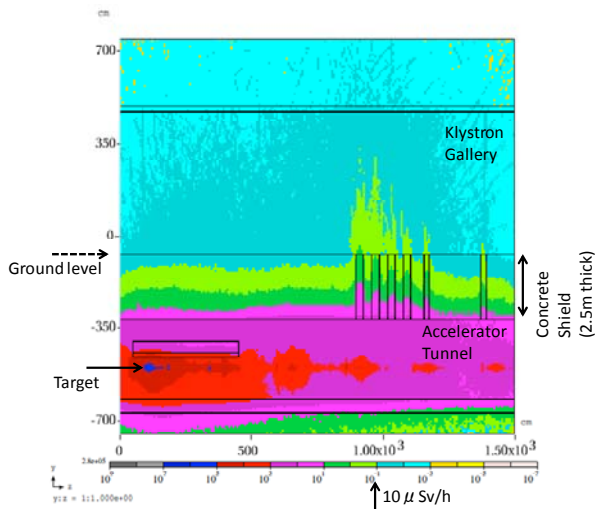


Figure 2: A side view of the accelerator tunnel and the gallery of KEKB Injector Linac with the result of the MARS simulation of the radiation shielding.

3. 遮蔽構造体

3.1 遮蔽体構造の設計

ユニット#1-5 近傍のトンネル天井の床上高さは 3m である。一方、加速器機器の上端は同 1.5m である（上端を決めているのは、捕獲部加速管のソレノイド磁石）。ソレノイド上端～天井の隙間に遮蔽体を挿入するわけだが、ソレノイド磁石上端と遮蔽体下端との隙間を 100mm 確保するとして、使える高さは床上 1.6m～3m の範囲となる。また、遮蔽体の

組立作業にも用いられる現場クレーンの揚程は、フック下端高さが床より最大で 2.2m となっている [3]ので、これを組立作業に使用した場合の遮蔽体の設置に使える空間は同 1.6～2.2m の範囲になり、500mm がクレーンを用いて積載できるほぼ最大の遮蔽厚みになる（もともとこうなるようクレーンは設計されている）。

ヤグラ構造は、①ビームラインに沿ってその両側に柱（200mm 鋼角柱：図 3 上図で緑色出表示）を並べ、②それぞれの柱列の上に L 字状の桁を通し（同青色）、③二本の平行な桁の間に梁を渡す（同赤色）。これら①、②、③すべて SS400（一般構造用圧延鋼材）製である。また積載する鉄遮蔽体（同灰色）も同様である。現場トンネル天井の高さ以外の設計上考慮すべき条件は、A. トンネル通路の幅の確保（ビームラインにそった既存通路上に）、B. 加速器機器の配置、特に FC の退避、C. 現場 1t クレーンで組立可能 等々である。



鉄遮蔽体（灰色）、柱（緑）、桁（青）、梁（赤）。

Figure 3: A bird view drawing of the shield.

遮蔽体設置のスペースは限られているので、高さ方向には省スペースを心がけた設計になっている。遮蔽体を支える桁（図 3、青色部）は、規格 H 鋼でなく、長板 2 枚を溶接した L 字型鋼にすることで、柱天頂部と梁の間のスペースを節約するとともに、遮蔽体下に収まる加速器機器のメンテナンスをやりやすくした。また、梁（同赤色部、厚さ 100mm の鋼板）は、遮蔽体も兼ねている。

積み重ねる遮蔽体（灰色）は、すべて同じ大きさ（100mm 厚×1250mm 幅×1000mm 長さ）、重量は 990kg で、現場のクレーンにて積み下ろしができる。



Figure 4: Column base plate

3.2 雛段のハツリ 柱基板

入射器トンネルの床は通路および通路より一段高い雛段に加速器が設置されている。雛段は、床と同じ鉄筋コンクリートではなく、モルタルを高さ180mmほど盛ったものなので、遮蔽体の荷重を受けるには適切でない。そこで、雛段上に設置される遮蔽体の片側のすべての柱の立つ位置の周りのモルタルを除去してトンネル床面を掘り出した。次に床レベルの調整と防水機能を兼ねて、掘った穴の底部に様に防水モルタルを50mm厚で打設した。そのうち、このモルタル面上に柱基部をアンカー固定した。図4に雛段部の柱基部の設置状況を示す。なお、このハツリ処置は、次節で述べる「斜め柱」の基部についても同じく施した。

3.3 振動防止用斜め柱の必要性

先の大震災からの入射器復旧の際の架台の改修作業[4]にならい、遮蔽構造体の固有振動数は15Hz以上となるよう、必要な場合は、振動抑制の対策を行なうこととした。図5に、現状の遮蔽体積載状況下での振動シミュレーション結果を示す。

図5上図は、斜め柱「なし」で、ビーム方向に直角(X方向)とビーム方向(同Y方向)の固有振動数(Hz)は、それぞれ12.7(X)/16.6(Y)となっている。これに、振動抑制柱(斜め柱)を追加すると、同22.6(X)/19.2(Y)となった。柱を追加することで、固有振動を15Hz以上にできることが期待される。

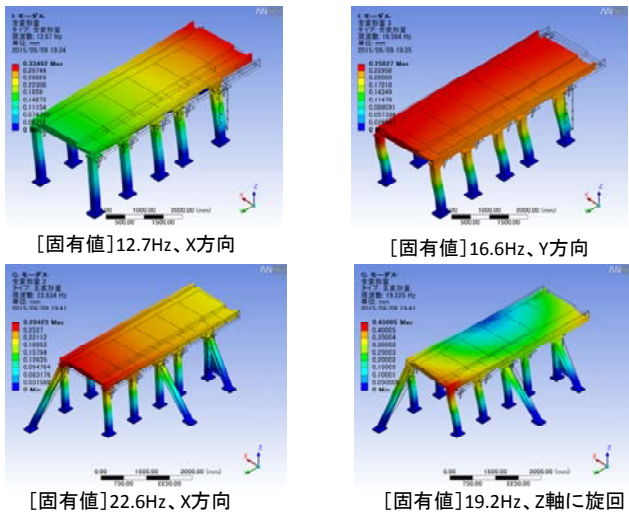


Figure5: ANSYS Simulation of the structure oscillation with/without the braces (top/bottom).

3.4 固有振動測定

設置された構造体の振動試験を行ない、図5で計算された場合について、固有振動数を実測した(ハンマー打ちによる応答を加速度計で計測)。斜め柱なしのとき、実測値7.2(X)/11.6(Y)であった。いずれの方向も、実測値は計算値よりも低い。実測値/計算値の比は0.57(X)/0.77(Y)である。

一方、図5下図での斜め柱設置のときは、計算値22.6(X)/24.8(Y)に対し[5]、測定値は15.9Hz(X)/17.5Hz(Y)となって、やはりこのときも、測定値の方が低く、計算0.70(X)/0.71(Y)となり、柱を追加した状況でも、実際の振動数は、計算値の約70%になっている。これのずれの原因として、柱-桁、桁-梁、等々の構造体の連結部分は、実際にはボルトにより締結されているが、計算モデルではそれらの多くの箇所が理想的に固着した条件で計算されていることが考えられる。以下に述べるように、今後、遮蔽増強のため、定格運転までの間、遮蔽体の追加を行なってゆくが、モデル計算に際しては、このファクターを考慮して振動を評価し、最終的には、振動を実測することで対応する方針である。

4. 遮蔽性能評価

4.1 ビーム運転時の遮蔽

遮蔽体構造は2015年3月に、梁上に遮蔽体を一枚ずつおいた状況(遮蔽量=鉄200mm厚×6m)で第一段階での設置が完了した。この状況の下で、同年4月より陽電子ビームのコミッションング運転を行ない、その間にギャラリーへの漏洩放射線の計測を行なった。その後2015年5月末、上流側4mの範囲に鉄遮蔽体を追加して厚み400mm(下流の残り2mの範囲は同200mmのまま)とした状況で、ビーム運転を行ない、漏洩放射線の計測も行なった。

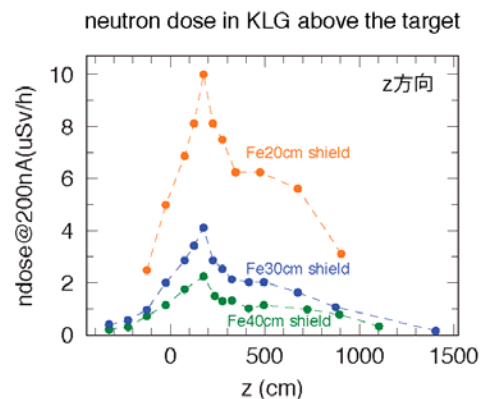


Figure6: Radiation measured on the ground floor (Klystron Gallery) along the direction z (along the beam-line).

図6はそれらの放射線計測の結果をまとめたものである。この図は、ビーム軸に沿った方向のクライストロンギャラリー床上面ビームライン直上位置で測定された漏洩放射線の分布(z=0はターゲット位置)で、遮蔽体の厚みの効果を見たものである。それぞれの厚みに対する放射線量を、ターゲットに衝突させたビーム電荷量を200nAで規格化してある。遮蔽量を増やすと放射線量がすべての観測点で一様に減衰しているのがわかる。Super KEKB運転時の衝突ビーム電荷量は最大で1250nAであるので、この結果から、地上の建屋内部での放射線遮蔽については、一応の目処が立った。

4.2 ビーム横断方向の放射線分布と遮蔽の強化

図 7 に、ビームラインを直角に横断する方向（東西方向）のターゲット直上地表位置での水平方向の放射線分布を与える。分布がターゲットを中心として左右対称でなく、ビームラインの西側で少し高いのは、ターゲット近傍のトンネルとギャラリー間の貫通孔からの影響（図 2 参照）や、建屋西側のコンクリート量が東に比べて薄いこと（図 8）が考えられる。図 7 の測定結果は、ビーム強度 200nA の場合に換算されている。よって、建屋内部では、ビーム定格運転時（1250nA）でも、問題ないことが示されている。ただし、建屋外（図 7 で $x < 0$ 、 $x > 850\text{cm}$ ）の放射線量は、現状の一般区域（空間線量 0.2 マイクロ Sv 以下）としての運用がこのままでは厳しい。

上記貫通孔には、ポリエチレンがシールド材として 50cm 厚程度、隙間に詰め込まれているが、まだ改良の余地がある。また、トンネル内の陽電子遮蔽体の幅を現状の 1250mm から東西方向に広げることが可能で、それにより、地表部分の放射線量は下げられることが期待される（図 8）。遮蔽能力の増強については、目下検討中である。

neutron dose in KLG above the target on the x direction

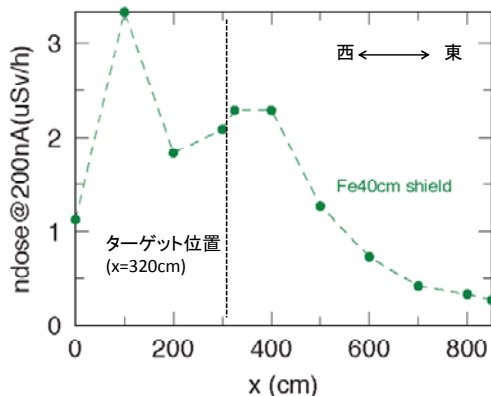


Figure7: Same as Figure 6 but along the x direction, the line perpendicular to the beam line.

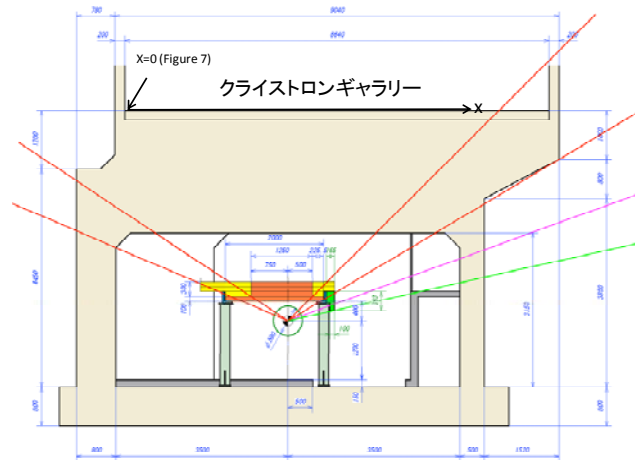


Figure8: A section view of the KEKB Injector Linac with the shielding structure for the positron target in the tunnel. The orange shield plates already exist and these will be reinforced by additional shields (indicated by yellow and green) for the reduction of radiation outside the Linac building.

謝辞

本構造体の設計・製造・設置に関して S P エンジニアリング（株）高本賢介、額賀和広両氏に尽力いただいた。（株）トヤマ 飯野陽弼氏には、構造体設計全般について、また製造段階では、特に溶接工程の管理について多くの有益な助言をいただいた。KEK 入射器・本間博幸氏に放射線管理に関し助言をいただいた。ここに感謝します。

参考文献

- [1] T.Kamitani, et al., THP044 “SuperKEKB 陽電子増強の現状”, These Proceedings.
- [2] N.V. Mokhov, K.K. Gudima, C.C. James et al, "Recent Enhancements to the MARS15 Code", Fermilab-Conf-04/053 (2004); <http://www-ap.fnal.gov/MARS/>.
- [3] Y.Arakida, “KEK-B 陽電子源建設のための高揚程化クレーン設置”, SAPI28, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9-11, 2014, Aomori, Japan.
- [4] K.Kakihara, et al., “KEK 電子陽電子入射器の加速ユニット架台”, SAPI29, ibid.
- [5] 計算値には、Z 軸旋回を含んだ動きが 19.2Hz と 24.8Hz にあり、測定値の X/Y から 24.8Hz が測定に対応した振動とみなした。