

DEVELOPMENT OF VACUUM WINDOWS FOR J-PARC HADRON BEAMLINE

Yutaka Yamanoi^{1,A)}, Keizo Agari^{A)}, Hiroaki Watanabe^{A)}, Tetsuro Nakamura^{B)},
Masaharu Ieiri^{A)}, Yoji Katoh^{A)}, Akio Kiyomichi^{A)}, Yoshinori Sato^{A)}, Shin'ya Sawada^{A)},
Yoshihiro Suzuki^{A)}, Minoru Takasaki^{A)}, Hitoshi Takahashi^{A)}, Kazuhiro Tanaka^{A)}, Akihisa Toyoda^{A)},
Megumi Naruki^{A)}, Erina Hirose^{A)}, Michifumi Minakawa^{A)}, Ryotaro Muto^{A)},

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} MIRAPRO Co., LTD., 1100 Anadaira, Sutama-cho, Hokuto-shi, Yamanashi, 408-0111

Abstract

High Energy Accelerator Research Organization (KEK) and Japan Atomic Energy Agency (JAEA) constructed Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) in Tokai, Ibaraki. It succeeded in the slow extraction beam at 19:35 January 27, 2009 to the hadron beam line, and the observation of Kaon in the K1.8BR beam line.

The secondary particle generation target of the hadron beam line adopts the rotating disk method of water-cooled directly. It is necessary to become interrupted the vacuum line at the rotating disk target because of water-cooled. Therefore the beam window was needed in the design that considered similar thermal loading, corrosion to the target, and the exchange function.

J-PARC ハドロンビームライン真空窓の開発

1. はじめに

2009年1月27日19時35分 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と日本原子力研究開発機構 (JAEA) が茨城県東海村に建設を進めている大強度陽子加速器施設 (J-PARC) のハドロンビームラインに陽子ビームを通し、K1.8BRビームラインでK中間子を観測することに成功した。現在、さらにK1.8本流、KL、K1.1ビームラインの建設を進めており、秋から再びビームを通して、二次ビームラインの調整を行う予定である。

ハドロンビームラインの二次粒子生成ターゲットは、直接水冷の回転円盤方式 (フルビーム750kW時) を採用している。それは、出来るだけ小さな一点から二次粒子を発生させることと、標的自身の冷却システムを考慮しての設計である。

直接水冷のため、ターゲット前後ではビーム輸送ラインの一部が一旦大気圧に戻ってしまう。真空ビームパイプの端面となるこのビーム窓の製作には、ターゲットと同じビームによる熱負荷、冷却水による腐食、さらに交換機能などを考慮した設計が必要となった。本発表ではこの設計方法と実機製作を行った結果を報告する。

2. 設置場所

ハドロンビームラインのビーム窓は、全部で4箇所である。最上流は50GeV主リング加速器との真空-真空隔壁である。加速器側の真空仕様が 10^{-5} Pa以上の高真空に対して、ハドロンビームラインは

single-passのため 10^{-1} Pa程度のために、ここをアルミニウム100マイクロンで真空を分離している。

次は二次粒子生成標的T1の前後である。ここは標的が水冷であり、標的に対してビームサイズが小さくフォーカスされ、標的下流は二次粒子によるビーム発熱が大きいため特別な設計が必要とされる箇所である。4箇所目はビームダンプ入り口である。

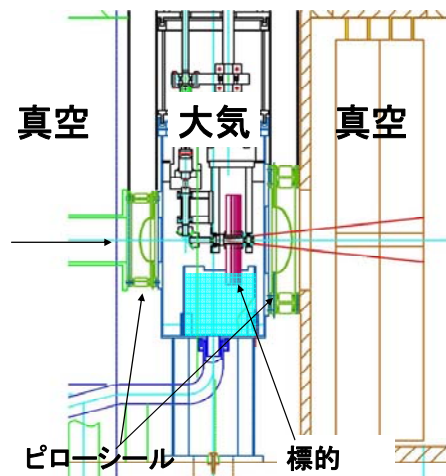


図1：標的前後のビーム窓

¹ E-mail: yamanoi@post.kek.jp

3. ビーム窓の設計

3.1 材質

標的上のビーム強度は 3.3×10^{14} ppp、サイズは光学上 $\sigma_{x,y} = 1.3$ mm、ビーム損失は最大30%で設計されている。そのため標的上流ではビームによる発熱密度の高さが問題となる。窓の材料として候補に挙げたのが、SUS、Ti、窒化アルミニウムAlN、Beなどであるが、SUS、Tiは一般的に耐熱性、耐腐食性に対して強く、加工も容易であるが、保温性が高く、連続のビーム入射に対して周縁の遠方から十分な冷却が出来ない。窒化アルミニウムAlNは密度が 3.255 g/cm^3 、融点 2200°C 、熱伝導率 $150\text{--}250 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ でビーム発熱も小さく冷却効率も優れている。しかし、沸騰水に溶解する性質があり、標的表面で加熱された水蒸気に依る腐食-破損の危険があるため採用しなかった。

実機製作に採用したのは、ベリリウムBeである。ベリリウムは密度 1.850 g/cm^3 、熱伝導率 $216 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、0.2%耐力 241 MPa でベリリウム自身のビーム発熱も小さく、周縁から冷却する効率も非常に優れ、加工上の安全性を除いてビーム窓の材料として最も優れていると評価した。

3.2 設計

標的前後の窓のサイズは2種類である。考慮した点は、既存の真空接続装置との組み合わせが可能な外径寸法にすることであった。標的上流（ $\Phi 300$ タイプ）は、ベリリウム円盤サイズ直径 260 mm 、厚さ 4 mm 、下流（ $\Phi 500$ タイプ）は直径 460 mm 、厚さ 8 mm である。

窓の発熱分布は、総陽子数 3.3×10^{14} 個、 $\sigma = 1.3 \text{ mm}$ として計算を行った。

1パルス当たりの陽子個数密度NP (個数/ mm^2)

$$NP(r) = 3.11 \times 10^{13} \text{Exp}\left\{-\left(1.3\sqrt{2}/r\right)^2\right\}$$

r (mm) ; ビーム中心からの距離

1パルス当たりの発熱密度分布Q (J/ mm^2)

$$Q(r) = NP(r) \cdot 2[\text{MeV}/(\text{gr}/\text{cm}^2)] \cdot t (\text{cm}) \cdot \rho (\text{gr}/\text{cm}^3) \cdot 1.6 \times 10^{-13}$$

t ; 窓の厚さ、 ρ ; 窓の密度

図2は直径 260 mm の場合の発熱分布である。

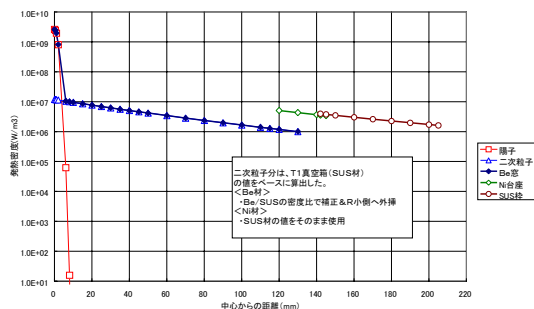


図2：発熱密度分布

図3は熱平衡状態までの中心部温度のシミュレーション結果である。240サイクル（820sec）後にほぼ熱平衡状態に達し、図4に示すように入射中で最高 90.03°C 、入射後2.7秒後 52.38°C であった。また、ビーム入射に関わらず大気圧によって常に押されている。大気圧のみの中心部の変位は 0.253 mm 、熱平衡状態での最大変位は 0.233 mm となって、中心部は裏表の熱膨張の差によって変形が戻されると予想される。最大応力はベリリウム円盤の周縁部に発生し約 88 MPa であった。そのためベリリウム材の固定方法が問題となった。

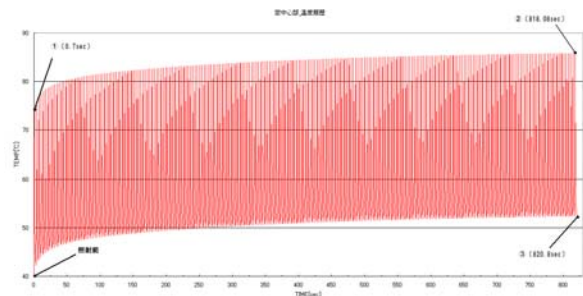


図3：中心部の温度推移

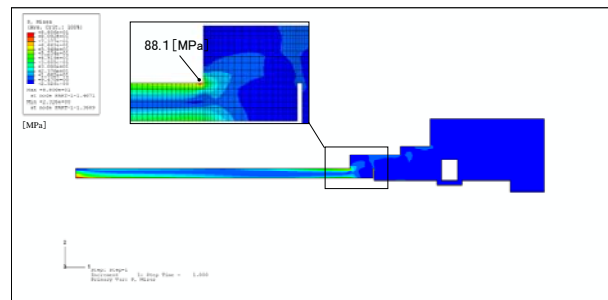


図4：発熱時の応力分布

4. ベリリウム円盤の固定

周縁のピローシールの材質はSUS304であり、周縁は全体の除熱のため 40°C の冷却水温度になっている。ベリリウムは熱膨張して圧縮応力を受けるために緩衝材として、BeとSUSの間に線膨張係数が近いニッケルの緩衝領域を設けることとした。 100°C におけるBeの線膨張係数は $12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、ニッケル $13.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、SUS $17.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ である。

700°C においてもベリリウム $17 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、ニッケル $16 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ と近いため、ろう付けによって接合した。ろう材は3種類の候補でろう付け部の破断試験を行った。ろう材1は1.25%Ti入り活性ろう材、ろう材2は2%Ti入り活性ろう材、ろう材3はニッケル片をメタライズした後BaG-8ろう付けを用いた。結果はろう材2と3では接合部の剥離が 20 MPa 程度で生じた。ろう材1ではBeの母材での破断となり接合部

の最大強度の測定は出来なかったが接合部に関しては安定性があり、接合部強度93MPa以上であることから、このろう材を採用した。完成したニッケル周縁付きベリリウム円盤を図5に示す。



図5：完成したニッケル周縁付ベリリウム円盤

図6にピローシール (SUS304)、緩衝材 (Ni200)、ベリリウム窓 (Be) の断面構造を示す。ハッチング部分がニッケルの周縁フランジとベリリウム円盤である。ニッケルとベリリウムのろう付け以外はすべてEBWまたはTig溶接されている。

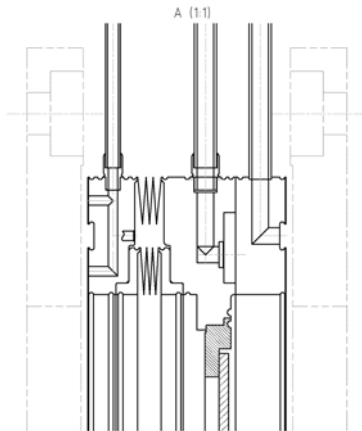


図6：断面構造図

5. 今後の予定

直径260mmのベリリウム円盤をニッケルにろう付けする方法を確立し、ピローシールの内部に組み込むことが出来た (図7)。本年の夏期作業ではビームラインに設置し、10月よりビームを通して使用する。標的の下流の直径460mmのベリリウム窓については現在製作中で、来年の夏期作業中に設置する予定である。



図7：ピローシールに組み込んだ様子

参考文献

- [1] 田中万博他、大強度陽子加速器施設原子核素粒子実験施設建設グループ ハドロンビームラインサブグループ中間報告書、KEK Internal 2002 - 8 (2002)
- [2] 山野井豊他、第3回日本加速器学会年会報告、pp472-pp474 (2006)