

Development of Vacuum Windows for J-PARC Hadron Beamline

Keizo Agari, Masaharu Ieiri, Yohji Katoh, Yoshinori Sato, Yoshihiro Suzuki
 Hitoshi Takahashi, Minoru Takasaki, Kazuhiro Tanaka, Akihisa Toyoda, Hiroyuki Noumi
 Erina Hirose, Michifumi Minakawa, Yutaka Yamanoi, Hiroaki Watanabe
 High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) is now under construction in Tokai-mura by the High Energy Accelerator Research Organization (KEK) and the Japan Atomic Energy Agency (JAEA). J-PARC 50GeV-PS (Proton Synchrotron) aims to provide more than 100 times higher beam power than that of KEK 12GeV-PS. An experimental hall for nuclear and particle physics (Hadron-hall) [1] is designed to handle intense slow-extraction proton beam and provide kaons, pions, and other secondary particles for multi-purpose physics use.

In the Hadron (HD) beamline, there are three types of vacuum window. One is used for separation of vacuum between 50 GeV-PS and HD beamline. Other are needed for disconnecting vacuum at the T1 target chamber and the Beam dump, respectively, which are operated in atmospheric pressure. These windows have to be made of radiation-resistant materials because of directly exposing to intense beam. In addition, although diameters of windows are rather big, these have to be as thin as possible to reduce beam loss and radiation shields. In order to meet these requirements together with realistic mechanical structure, we have made detail calculations of thermal and mechanical stress from energy deposition and differential pressure, and obtained realistic configurations for each window.

J-PARC ハドロンビームラインにおける真空窓の開発

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 (J-PARC、図1)¹⁾は現在高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究開発機構で建設が進められている。J-PARCの陽子ビームはリニアック、3GeV-PS、50GeV-PSを通過して最大50GeV、15 μ Aまで加速され、原子核素粒子実験施設²⁾またはニュートリノ実験施設へと取り出される。原子核素粒子実験施設へ取り出された陽子ビームはスイッチヤード (SY)、ハドロン (HD) ホールへ導かれ、T1標的で二次粒子が生成される。

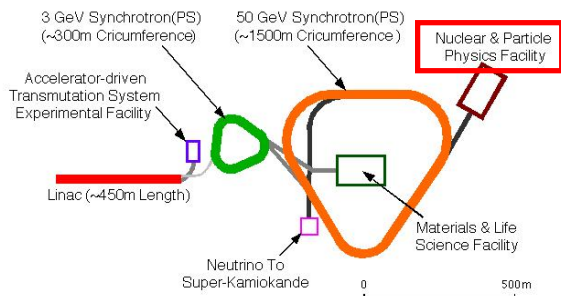


図1 J-PARC概要

2. 真空窓の設置場所

HDホールでは、加速器より取り出された陽子ビームを取り扱うが、真空度は図2や下記のように分類される。

1. 加速器から取り出された高真空区間 ($10^{-5} \sim 10^{-4}$ Pa)
2. 1.からT1標周辺までの低真空区間 (数Pa)
3. T1標的からビームダンプの上流までの区間 (数Pa)

HDホールの真空度が加速器と比べ低いのは、取り出された一次粒子は1回のみビームラインを通過し、ビームダンプまでの距離にして250mしかなく、高真空は要求されないためである。またT1標的、ビームダンプは大気圧下で運転するため分類され、これにより真空窓がそれぞれ必要になる。それぞれの窓の材質、形状は密度、厚さが放射線管理上、それぞれの遮蔽体構造によって決定している。この施設に

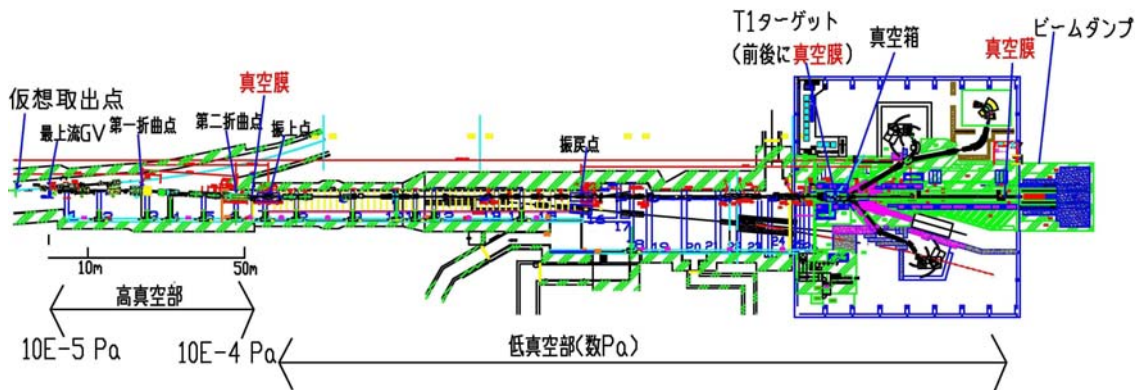


図2 HDホールの真空

3. それぞれの窓の開発状況

3.1 加速器とHDホール間の窓

この窓は加速器とHDホールの真空度が異なるため設置しなければならない。負担する荷重として $\sigma_x=20\text{mm}$ 、 $\sigma_y=10\text{mm}$ の正規分布の陽子ビームのエネルギー寄与による熱応力と加速器とHDホールの真空度差による圧力(数Pa)である。この窓の材質はアルミニウムを選定し、直径 $\Phi 200\text{mm}$ 、厚さ 0.1mm とした。また窓の端部には冷却用の配管が附属されている。下図は実際に製作したビーム窓である。

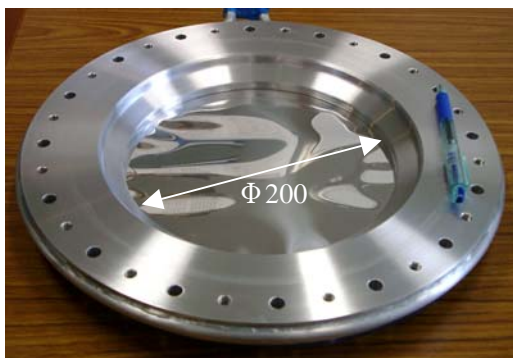


図3 加速器とHDホール間の真空窓

この窓が熱応力や数Paの圧力に耐えるか、有限要素法によるシミュレーションを行った。二次元円柱モデルで、陽子ビームは $\sigma=5\sim 30\text{mm}$ まで変化させた。拘束条件としては、端部を 30°C に固定した場合と簡略化したダクトの外周部に熱伝達係数 $10\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ を与えた場合の2種類を行った。構造計算では圧力として 1Pa を与えた。

計算結果より、端部を 30°C に固定と $10\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ を与えた場合では、温度、応力共に差は無かった。また最大応力が 0.5MPa であり、水冷しなくても実用上問題は無い。

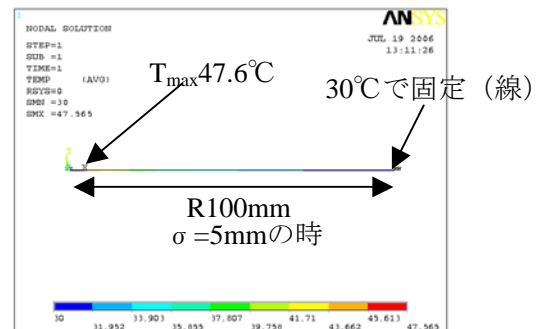


図4 発熱計算結果 (30°C固定の時)

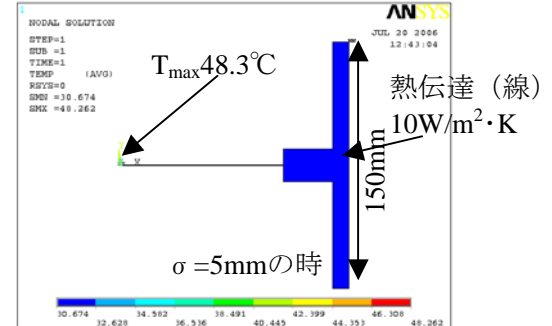


図5 発熱計算結果 (熱伝達の時)

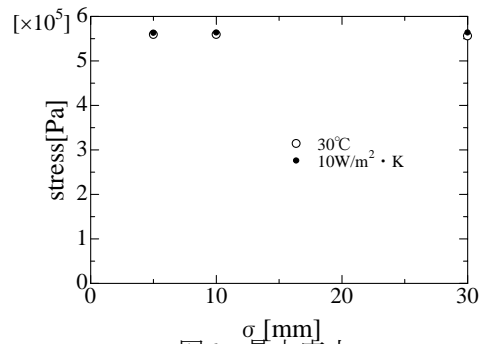


図6 最大応力

3.2 ビームダンプ近傍

ビームダンプは大気中で運転されるため、ビームライン最下流部で真空窓を設置しなければならない。この部分でのビームは、ビーム密度を分散させるため陽子ビームを広げる。そのためビームダクトは大口径になり、真空窓も大口径なものが必要とされる。またこの窓にはエネルギー寄与による熱応力と大気圧が負荷される。

まず有限要素法による二次元円柱モデルのシミュレーションを行った。この窓の材質は低密度、高熱伝導性を持つベリリウムを採用し、直径Φ400mmで固定し、厚さtを変化させ、発熱、構造計算を行った。入射される陽子ビームはσ=50mmの正規分布で、厚さ4mmの時、窓全体への熱入力101Wになった。熱伝達係数は空冷を仮定し、10W/m²・Kとし図7のように上面に設定した。構造計算では窓円周部を線で固定し、上から下へ大気圧が掛かるようにした。

図8より最大応力は厚さt:4mmから増加する傾向が見られた、これは厚さが増加するにつれてエネルギー寄与による熱応力が増えたためだと考えられる。また比較のために、たわみの基礎式から求めた応力も計算したが、これにはエネルギー寄与による熱応力は含まれていない。

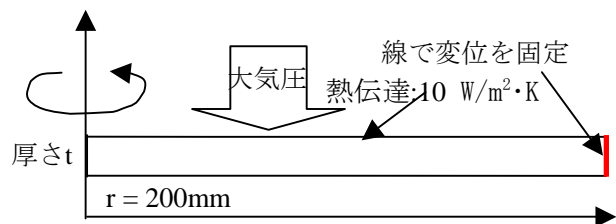


図7 計算モデル (ビームダンプ直前)

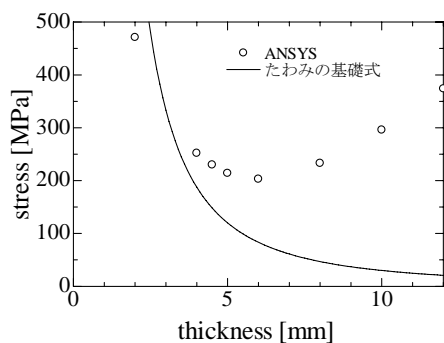


図8 計算結果 (円板)

次に図9のように初期状態から膨らみhを持たせることにより、構造的に強くした窓の計算を行った。計算条件は上記と同じで、窓の厚みは4~6mm、膨らみは0~12mmまで変化させた。

図10より膨らみhを増加させると、最大応力が減少したがh=6mm以上になるとそれ以降で応力は減少しなかった。特にt=4.0~4.5mm、h=4.0mm以上では応力が100MPa以下になることがわかった。

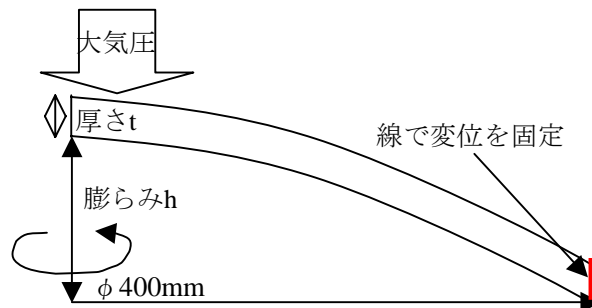


図9 計算モデル

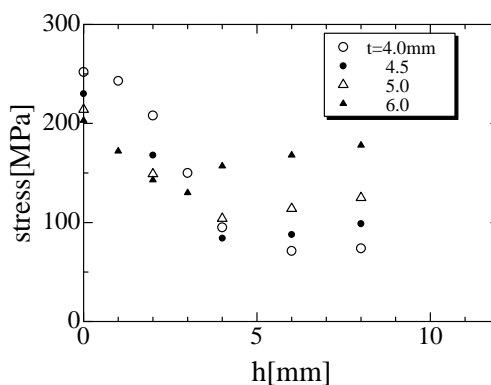


図10 計算結果 (膨らみを持ったとき)

4. まとめと今後の予定

ハドロンビームラインの真空窓を開発するため、シミュレーションを行った結果、以下のことがわかった。

- 加速器とHDホールの真空度の違いによる窓は水冷無しのアリミニウムで温度、応力共に問題無い。
- ビームライン最下流部の窓はベリリウムで、膨らみが増えることにより最大応力は減少する傾向が見られた。特にt=4mm、h=4mm以上では100MPa以下になった。

5. 謝辞

一連の研究は、文部科学省科学研究費「基盤研究(A):17204019」と「基盤研究(A): 18204026」によって支援されている。

参考文献

- [1] <http://www.j-parc.jp>
- [2] K. AGARI *et al.*, "Design of slow extraction beam line at 50GeV-PS in the High Intensity Accelerator Facility", Proceedings of the 13th Symposium on Accelerator Science and Technology, October 2001, p. 464-466