

Muon Production Target in J-PARC

Shunsuke Makimura^{A)}, Naritoshi Kawamura^{A)}, Kusuo Nishiyama^{A)}, Yasuhiro Miyake^{A)}, Takashi Anzai^{B)}, Tomoya Suzuki^{B)}, Takahiro Sawahata^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization, Institute of Materials Structure Science, Muon Science Laboratory
1-1 Oho, Tsukuba-City, Ibaraki-Prefecture, 305-0801

^{B)} KINZOKU GIKEN CO., LTD.

276-21, Motoishikawa, Mito-City, Ibaraki-Prefecture, 310-0843

Abstract

At J-PARC muon science facility, the most intense pulsed muon beam will be produced by 3 GeV/1 MW/25 Hz proton beam. As a muon target, we are going to adopt an isotropic graphite (IG-43) with a thickness of 20mm, which shape is like a disk. As a frame, copper is adopted and a stainless steel tube is buried in the copper frame. The heat loss, which is generated by the proton beam, is estimated to be 3.3kW on graphite and 600W on the copper frame in NMTC/JAM^[1]. So far it is evaluated that the static and dynamical properties such as the thermal properties, stress properties, shockwave, transient response, and so on^[2]. In addition, the dimensional change of graphite by the radiation damage must be considered. The proton beam will give shrinkage on the graphite of beam spot. Then the large stress will take place on the boundary of the beam spot. Now one candidate of the solution is to utilize the residual stress on the process of the fabrication, because the target will be fabricated in shrink fit. The evaluation and the measurement of the residual stress in muon target will be reported.

J-PARC計画におけるミュオン標的の開発

1. ミュオン標的

ミュオン標的としては20mm厚、直径70mmの円盤状の等方性黒鉛周囲に40mm厚の外径150mmの銅フレームを配置する。黒鉛材と銅フレームの間には熱膨張係数の違いによる応力の吸収材として厚さ2mmのチタンを挿入する。図1にミュオン標的の写真及び概念図を示す。このとき陽子ビームによる発熱により標的中心では1500°C近くになり、温度勾配による応力は40MPaの圧縮応力となる。

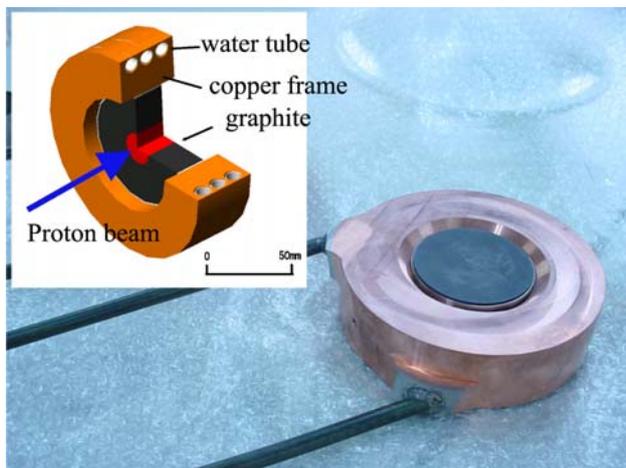


図1 ミュオン標的の写真及び概略図

2. 黒鉛材の放射線照射による寸法変化

黒鉛材は原子炉において炉心材料として多く用いられ、その放射線照射による影響は大きな研究対象

となっている。図2は1150~1250°Cで中性子照射した場合の巨視的な寸法の照射による変化である^[3]。寸法は照射によって収縮し、収縮率は照射量が増大するにつれ大きくなる。収縮率は約850°Cでもっとも小さく、照射温度がそれより低くても高くても収縮率は増大する。ロットの軸方向の違い (A.G., W.G.) はほとんど見受けられない。

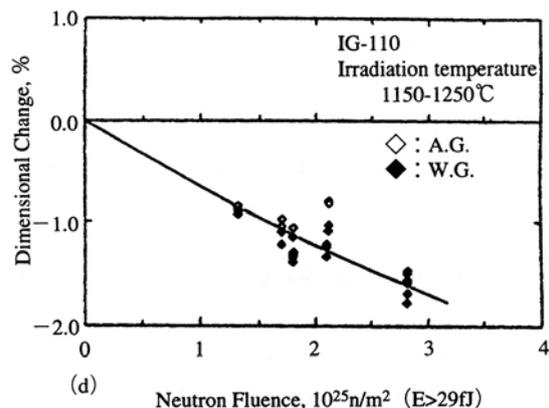


図2 黒鉛材の中性子照射による寸法変化

この寸法変化による応力を評価するために1dpa ($1 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$) の照射によって1%の収縮が起こると仮定した。ミュオン標的においては標的中心において照射量が最大となり1dpa/年となる。ビームプロファイルを考慮すると陽子ビーム照射部で中心より周囲に向かって収縮率は小さくなり、照射部以外ではほとんど収縮しない。河村によって計算された放

射線損傷分布を図3に示す。

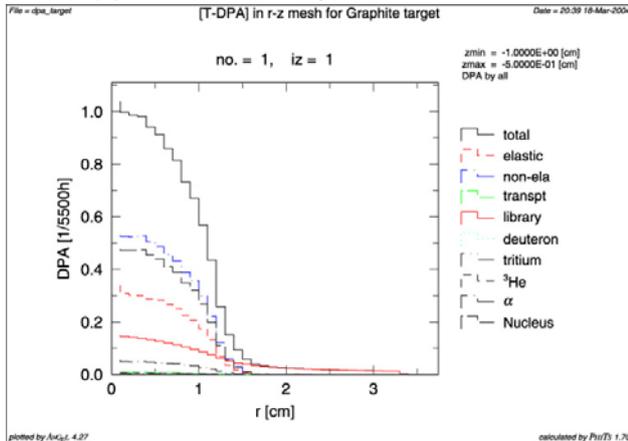


図3 陽子ビームによる放射線損傷分布図

現在、標的の交換サイクルは半年であると予定されているので、標的中心部において0.5%の収縮が起きることとなる。有限要素法ANSYSを用いた収縮による応力分布評価図を図4に示す。標的中心周辺で黒鉛材の引っ張り応力強さ38MPaと同程度の引っ張り応力が発生することがわかる。

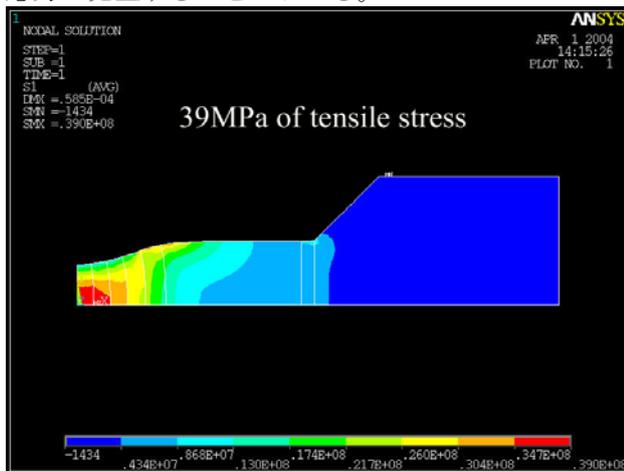


図4 黒鉛材の収縮による応力分布評価図

3. ミュオン標的における残留応力

3.1 ミュオン標的の製作法

ミュオン標的は以下の手順で製作される。(金属技研との共同開発)

手順1; ステンレス配管を銅フレーム内にHIP法により埋め込む。(1000°C、100MPa)

手順2; 銅フレーム、チタンリング、黒鉛材を真空銀ロウ付けする。(700°C)

手順2の際、チタンリング及び黒鉛材は約3°のテーパで挿入する。(図5) この際、50ミクロンの銀箔を黒鉛-チタン界面およびチタン-銅界面に挿入した。

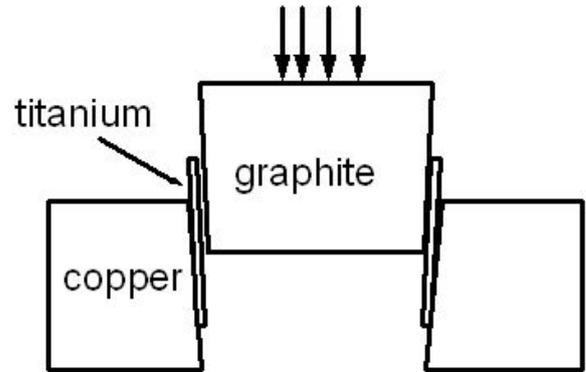


図5 真空銀ロウ付けの概念図

3.2 残留応力解析

約700°Cで押し込まれた黒鉛およびチタンはいわゆる焼きばめ状態となる。すなわち高温において黒鉛外径とチタン内径が同寸法、同様にチタン外径と銅内径が同寸法となる。この三種類の材料が常温まで冷却されると熱膨張係数の大きなチタン(9ppm/K)、銅(16ppm/K)はより大きく収縮し、熱膨張係数の小さい黒鉛材(5ppm/K)には圧縮応力が発生する。一般に金属が弾性限界を超えると塑性変形を起こすことはよく知られているが、高温において弾性限界は小さくなり、特に銅においては顕著である。この冷却過程における銅、チタンのヤング率、接線係数を表1、2のように定義し、二直線近似を行った^[4]。黒鉛材に関してはほとんど塑性変形しないので、二直線近似は行わない。

温度 (°C)	ヤング率 (GPa)	0.2%耐力 (MPa)	接線係数
0	110	47	1123
20	110	47	1123
200	104	68	596
400	92.1	49	358
600	78	42	209
700	71	34	50

表1 銅のヤング率、0.2%耐力、接線係数

温度 (°C)	ヤング率 (GPa)	0.2%耐力 (MPa)	接線係数
0	108.5	304	1085
20	108.5	304	1085
200	108.5	147	1085
400	108.5	78	1085
600	108.5	50	1085
700	108.5	40	1085

表2 チタンのヤング率、0.2%耐力、接線係数

その他の条件として黒鉛のヤング率を10.8GPaとし、黒鉛、銅、チタンのポアソン比はそれぞれ0.2、0.3、0.34とした。この条件の下に700°Cより常温までである有限時間内で温度下降させた。この結果を図7、8に示す。約50MPaのほぼ一様な圧縮応力が黒鉛材に発生するであろうことがわかる。

3.3 残留応力の測定

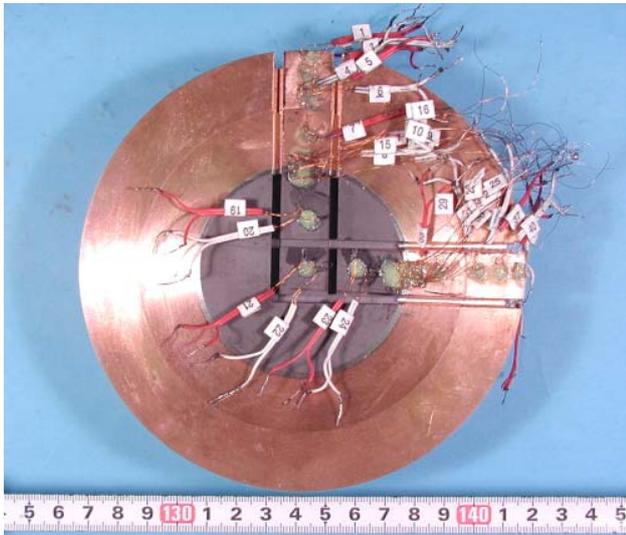


図6 切断後の測定試験片

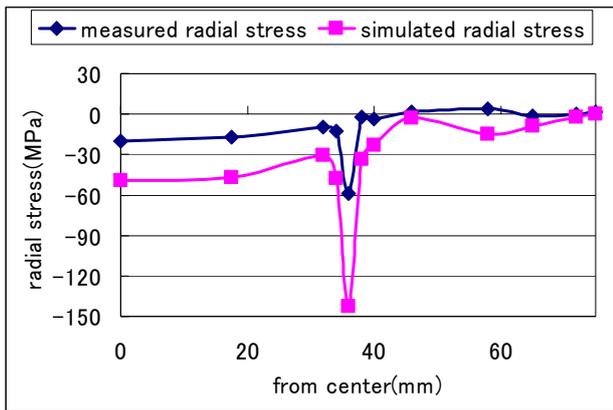


図7 計算結果と測定結果の比較 (半径方向)

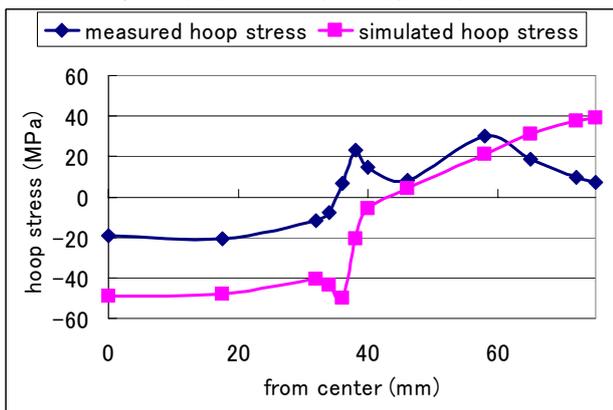


図8 計算結果と測定結果の比較 (周方向)

前節においては残留応力の計算を行ったが、実際にはその他の多くの要素が関わり残留応力が発生するはずである。ミュオン標的を模擬した試作機を製作し残留応力の測定を行った。残留応力の測定のた

めに標的表面にひずみゲージを貼り、その周囲を切断することにより応力解放を実施した。このとき例えば黒鉛上では圧縮応力により押し縮められたひずみが解放され変位が計測される。この変位を応力に変換することにより残留応力測定を行った。ひずみゲージは二軸計測型のものを用い、半径方向に10個厚み方向に2個貼り付けた。また一様性を確認するために各々垂直な半径方向に関しても測定を行った。図6に歪みゲージを貼り付け切断を行った試作機の写真を示す。

図7、8に半径方向応力、周方向応力の測定結果および計算値との比較を示す。測定の結果、黒鉛上においては計算値の1/2以下の約20MPaのほぼ様な圧縮応力が発生していることがわかった。応力分布の概形は計算結果と測定結果で一致している。計算結果と測定結果の値が異なる理由としては以下のようなものが推測される。まず、銀ロウ箔の厚みであるが、昇温され熔融した後、ある厚みを有し合金層を形成し凝固する。二つ目は真空内にて冷却されるために冷却時間が多く必要となりクリープ現象が起きている可能性がある。しかし、結果として約20MPaの圧縮応力が黒鉛上に発生することがわかった。黒鉛の放射線損傷による収縮から予想される引っ張り応力が圧縮応力により相殺されると仮定するとミュオン標的の寿命を延ばすことが可能となる。

4. まとめ

- ・ J-PARC計画におけるミュオン標的は黒鉛材、銅フレーム、チタン層にて形成される。
- ・ 黒鉛材は放射線損傷により収縮し約39MPaの引っ張り応力が発生する。
- ・ 温度依存型弾塑性変形を考慮し残留応力の評価を行った。約50MPaの圧縮応力が発生する。
- ・ 残留応力の測定を行った。約20MPaの圧縮応力が発生していた。
- ・ 黒鉛材の引っ張り応力は残留応力により50%程度相殺可能である。

参考文献

- [1] N.Kawamura, KEK-MSL Report 2000 (2000)13.
- [2] S. Makimura, "Design of Muon Target at J-PARC", Proceedings of the 14th Symposium on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Japan 2003 (2003)p.22-24
- [3] 松尾秀人, 炭素1991 [No.150] 290-302
- [4] 金属データブック改訂4版, 日本金属学会, p181,204