

J-PARC/ MLF/ MUSEにおけるミュオン標的の開発

第三回MLFシンポジウム, 平成24年1月20日

J-PARC Center, MLF Division, Muon Section

Shunsuke Makimura

shunsuke.makimura@kek.jp

Contents

1. Introduction

Muon Target at J-PARC/ MLF/ MUSE

Replacement of Muon Target

Muon Rotating Target

Commissioning in Summer 2011,,Etc.

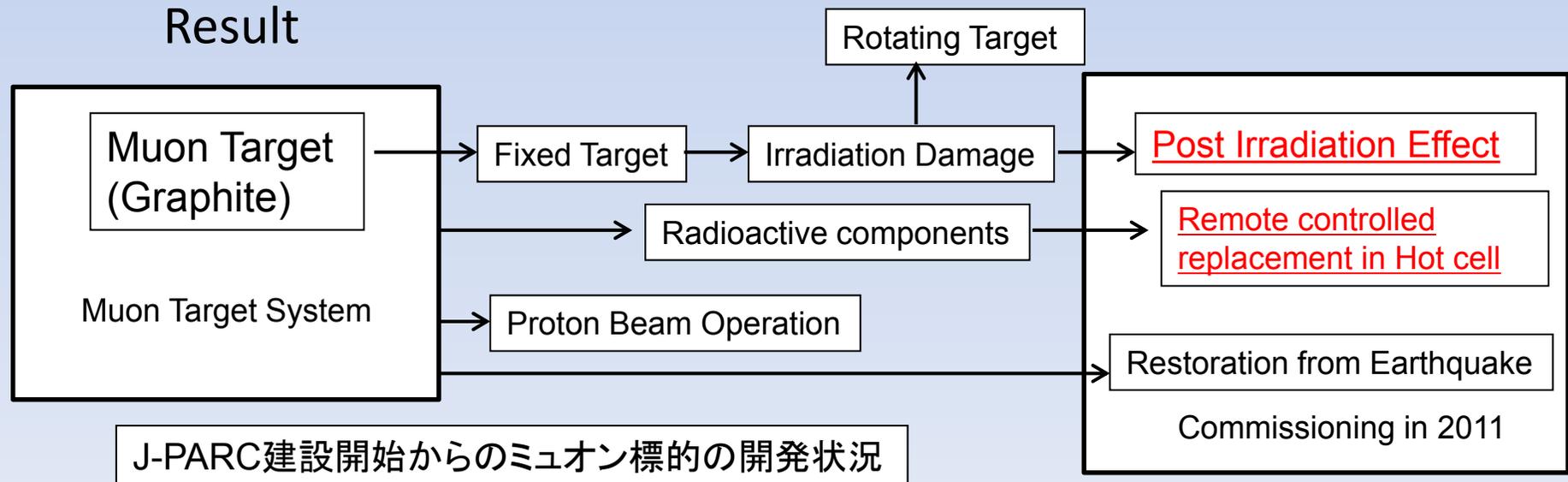
2. Post Irradiation Effect to thermal conductivity of Graphite

Post Irradiation Damage of Graphite

Laser Spot Heating Methods

Measuring Device

Result

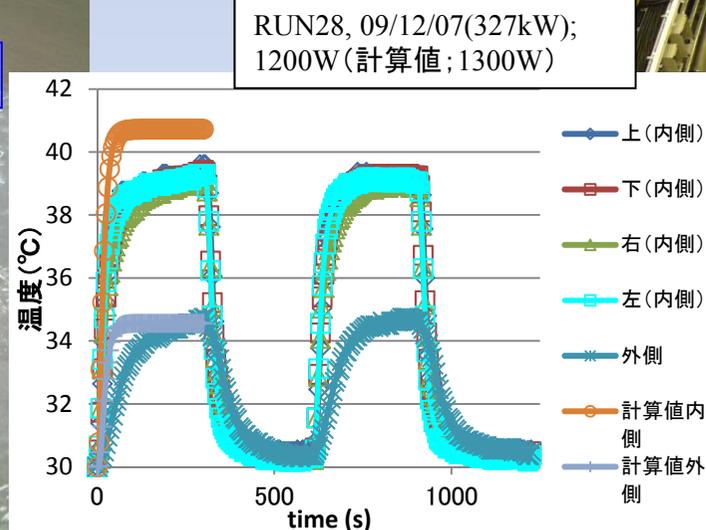
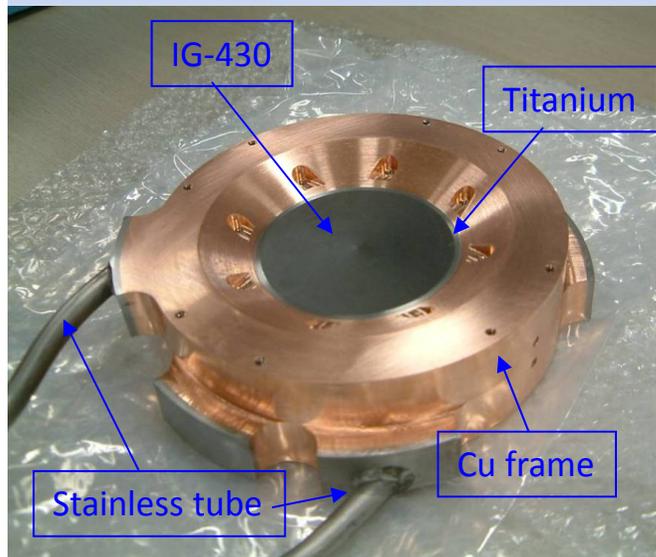
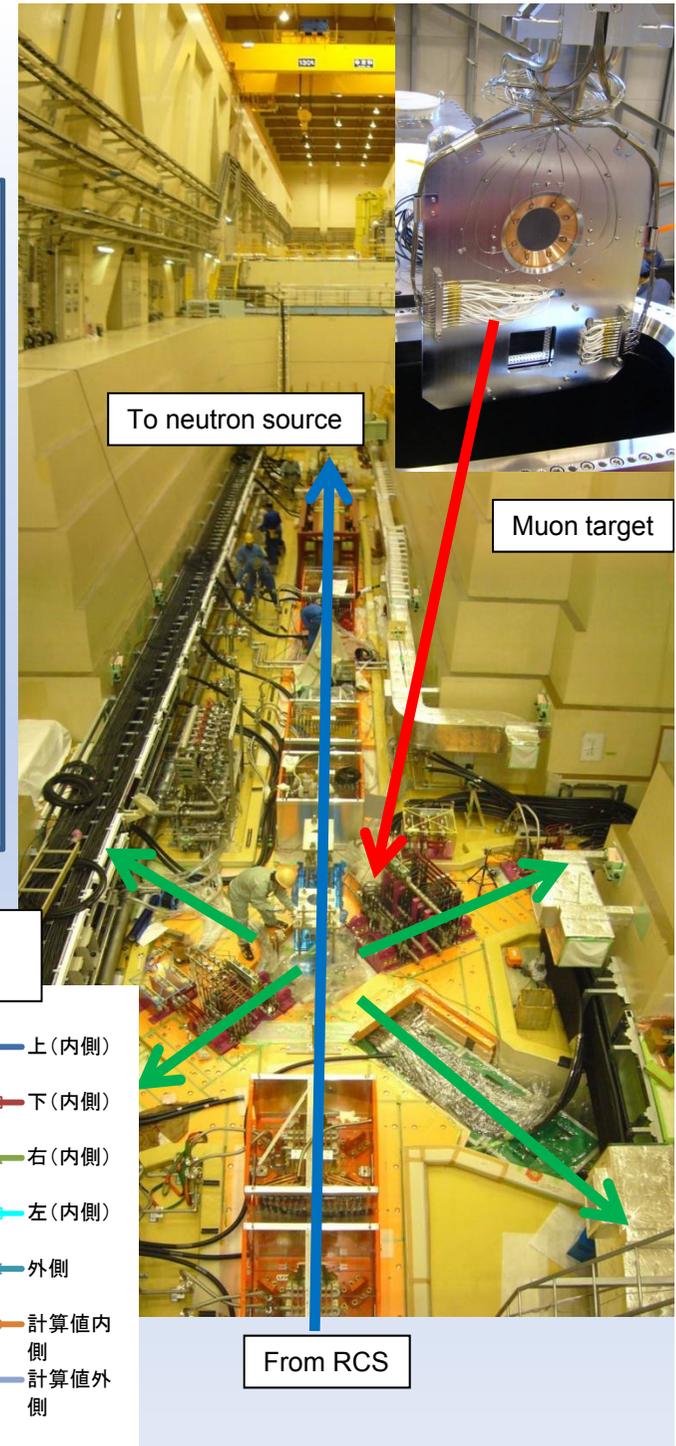


Muon Target at J-PARC/MLF/MUSE

MLF/M2トンネルの真空容器に設置される。陽子ビームはミュオン標的を貫通して中性子標的へ到達する。標的で発生したパイオンまたはミュオンは実験室へ輸送される。標的周囲は高度に放射化。

等方性黒鉛 (IG-430) ~ 厚み20mm、 ϕ 70mm
ビームロス; 3.3kW (黒鉛)、600W (銅) $1\sigma=6\text{mm}$
中心温度 ~ 1400°C 程度、チタン層 (応力吸収材)
黒鉛材の陽子ビームによる損傷が寿命を決定。

順調に運転中。



ミュオン標的の交換

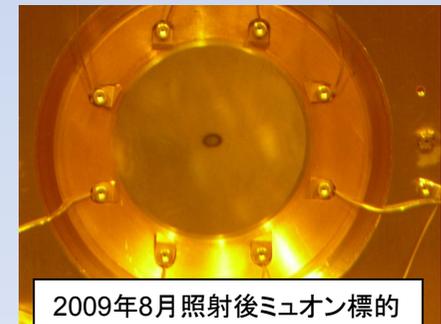
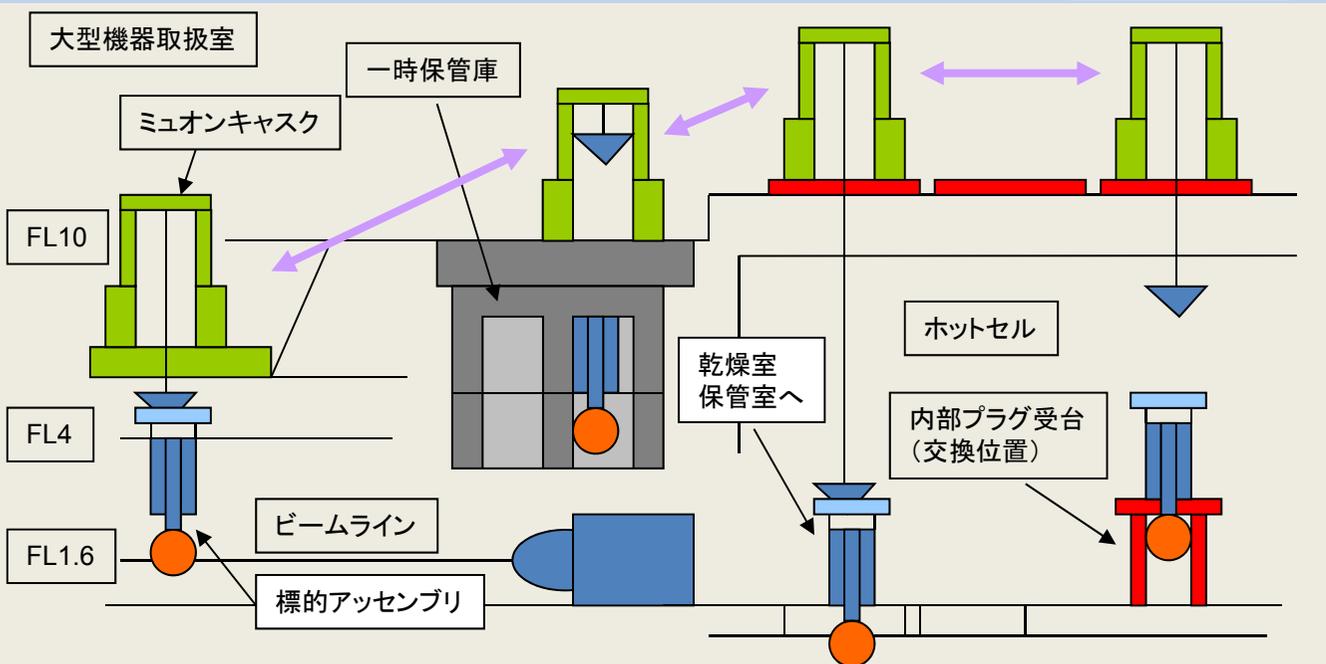
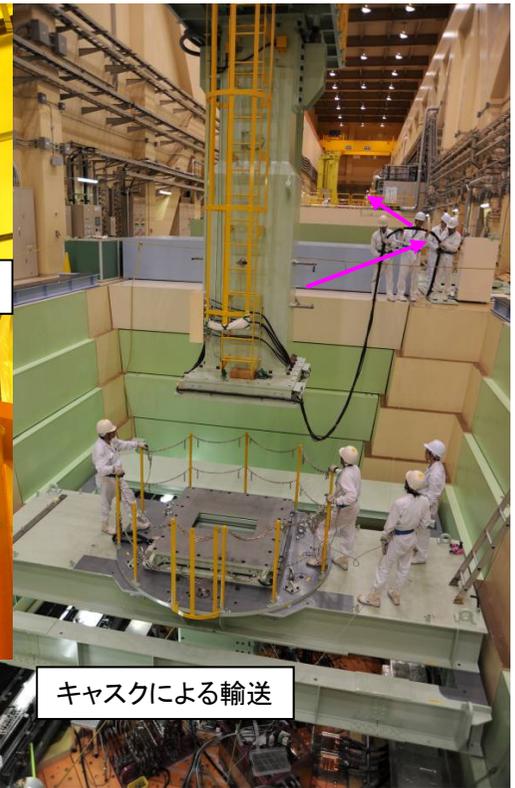
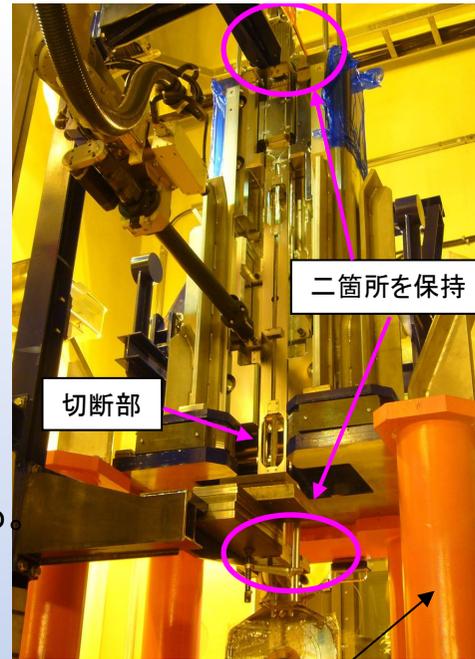
ホットセルへの輸送

ミュオン標的は高度に放射化。(表面線量;数Sv/h)
 半年に一度の交換は遠隔操作室(ホットセル)にて行う。
 2トンのプラグシールドと一体化されて輸送。
 遮蔽機能付き容器キャスクにて輸送される。

ホットセルでの交換作業

内部プラグ受け台上にプラグシールドを設置して交換する。
 2008年4月、10月、2009年8月
 遠隔交換コミッショニングを実施した。

半年に一回;10人×三週間



回転標的開発状況

黒鉛材の照射密度を小さくするために**黒鉛材を回転**させる。**軸受が寿命を決定**する。

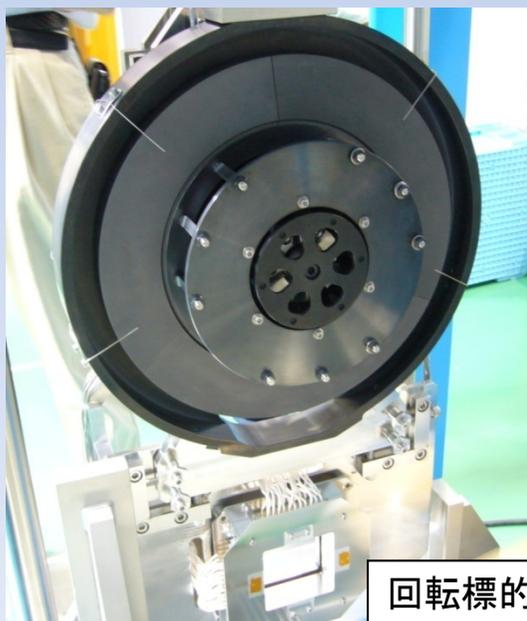
回転標的軸受評価試験によって軸受寿命の評価途上。(目標寿命;10年)
1年間の**加熱回転試験**を経て、決定する。

回転標的実機製作。
平成24年度夏期シャットダウン中に**遠隔操作コミショニング**。

平成25年度夏期シャットダウン中。
ビームライン導入。



回転標的実機(製作工場)



回転標的本体



固定標的交換時の写真



軸受寿命の確認(加熱回転試験)

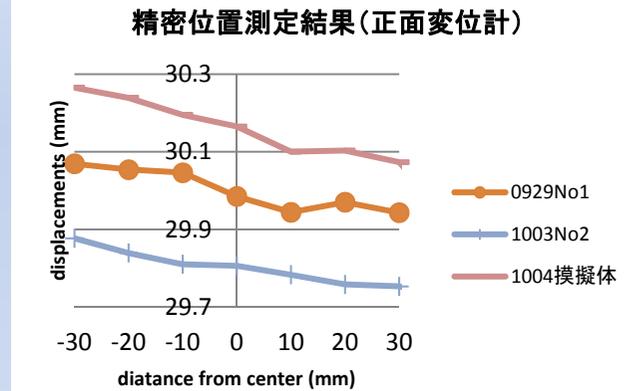
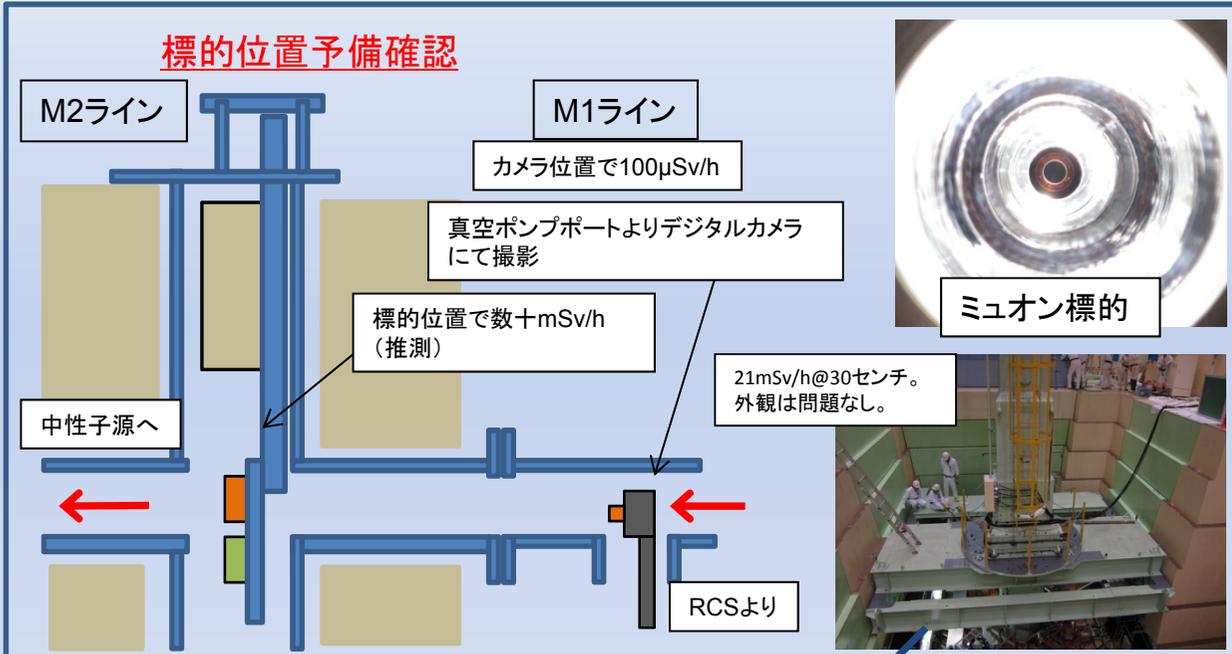
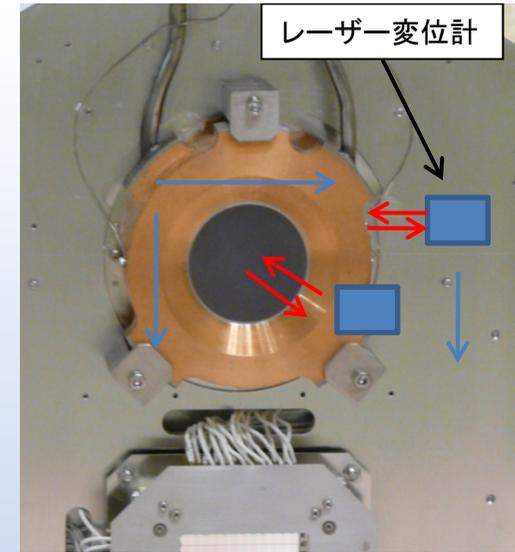


軸受の解体後に観察

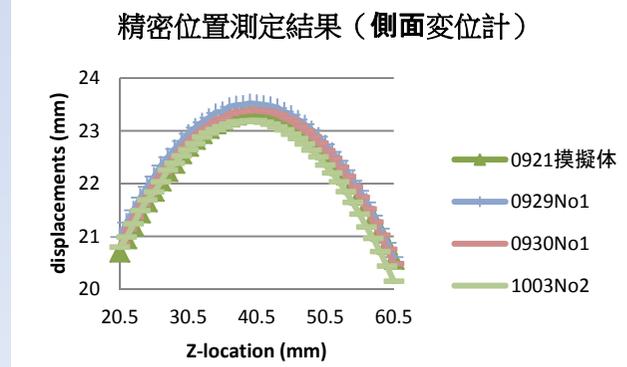
Commissioning in Summer, 2011

放射化機器取扱室で遠隔操作で計測する。

- ① 東日本大震災によって標的位置がずれていないか？
- ② 黒鉛材に亀裂が発生していないか？
- ③ 陽子ビーム照射が寸法に与える影響の計測。
Post Irradiation Effect (PIE)試験。
- ④ 陽子ビーム照射が熱伝導率に与える影響の計測。(PIE)



① **標的位置確認**
 当初、真空容器底面ピンに対する空間的な位置精度は $\pm 0.5\text{mm}$ で標的系を製作した。
 二次ライン輸送を考え、目標精度を $\pm 1\text{mm}$ と想定する。計測精度 $\pm 0.1\text{mm}$ 。
 実測値; 設計値に対して $\pm 0.2\text{mm}$ 以下。
 継続して使用可能。



Post Irradiation Effect of Thermal Conductivity to Graphite

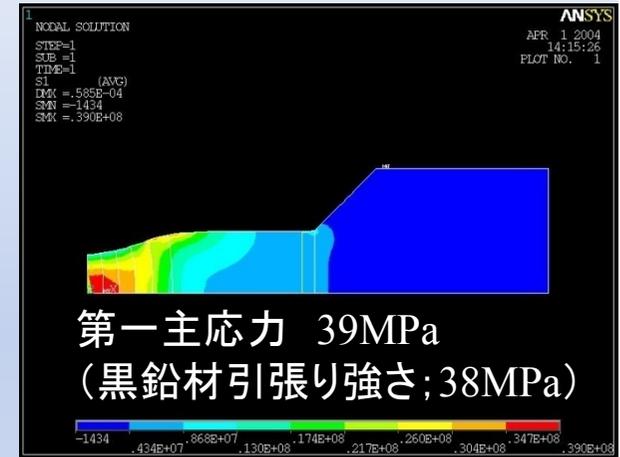
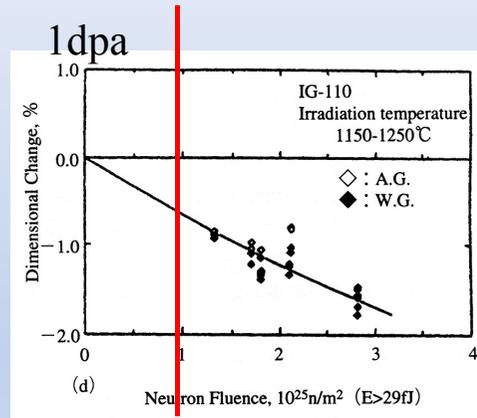
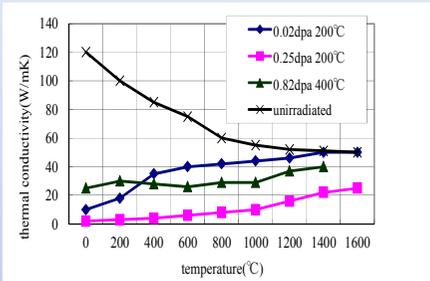
(Commissioning in Summer, 2011)

等方性黒鉛の放射線損傷

IG430の照射データは存在するが、IG110のように整理されていない。

等方性黒鉛は中性子による照射効果が調査されている。ミュオン標的においては熱伝導率および寸法変化が重要。照射量と損傷度は比例しない。照射時の温度が重要である。照射による格子欠陥の度合いを示すDPA値で照射量を評価する。設計時; 1dpa/year@1MW, 1σ=6mm、寿命は0.8dpa。半年。これまでの照射量; 0.25dpa (中心において)

	20kW	120kW	220kW
σ_x [mm]	1.5	4.4	5.5
σ_y [mm]	1.2	2.4	3.0
Acc. power[MWh]	13	267	189



IG110照射データ

T.Maruyama et al., Journal of Nuclear Materials 195 (1992) 44-50.

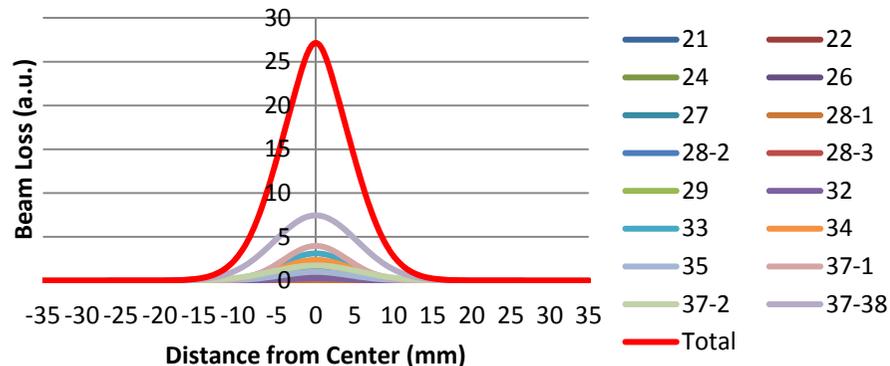
黒鉛材の放射線損傷 (熱伝導)

H. Matsuo, graphite1991 [No.150] 290-302

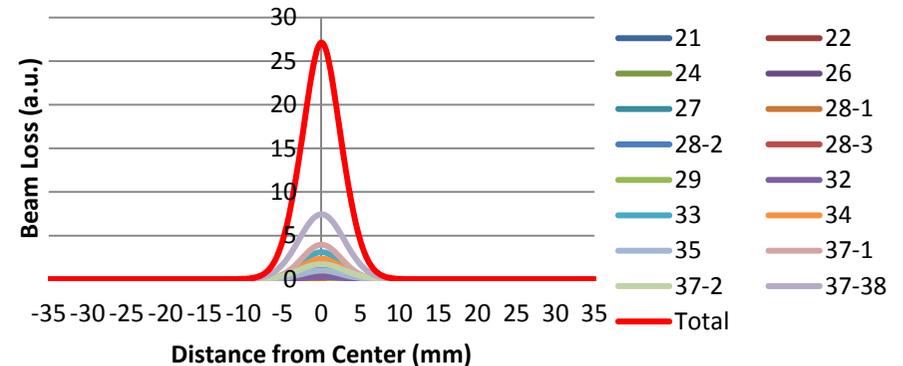
寸法変化が寿命を決定している。0.8dpaで破損と予測。

黒鉛材の放射線損傷 (寸法変化)

Beam Loss on Target for Each RUN (Horizontal)



Beam Loss on Target for Each RUN (Vertical)



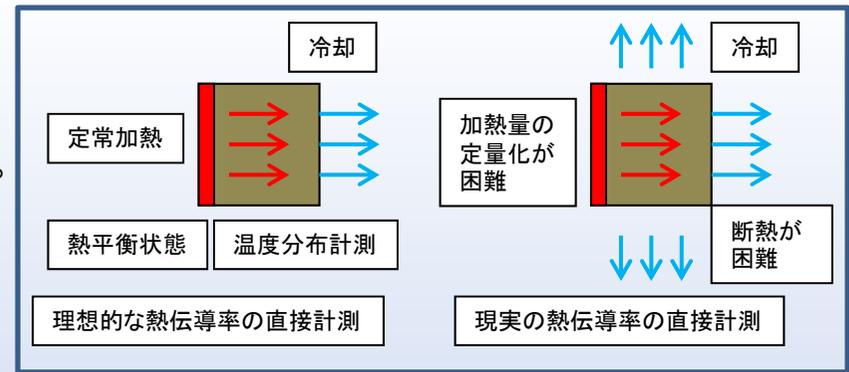
熱伝導率の計測(レーザースポット加熱法)

熱伝導率を直接計測する事は非常に難しい。熱拡散率を計測する。
中性子照射が比熱、密度に与える影響は1%以下。

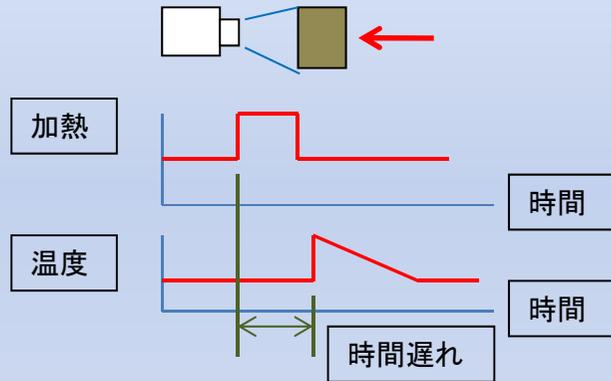
C. H. Wu, Journal of Nuclear Materials 208 (1994) 1-7.

$$\lambda = D\rho c$$

λ ; 熱伝導率(W/m/K), D ; 熱拡散率(m²/s), ρ ; 密度 (kg/m³), c ; 比熱 (J/kg/K)



通常の熱拡散率測定(レーザーフラッシュ法)



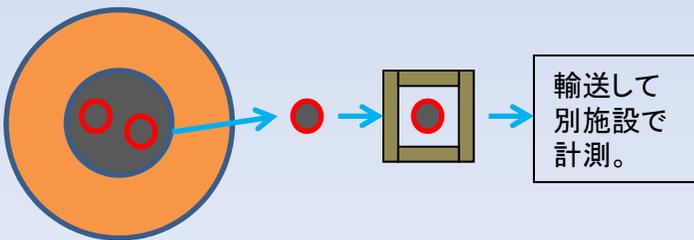
原子力、加速器分野における熱拡散率の計測。

試料切り出し、試料輸送が必要。

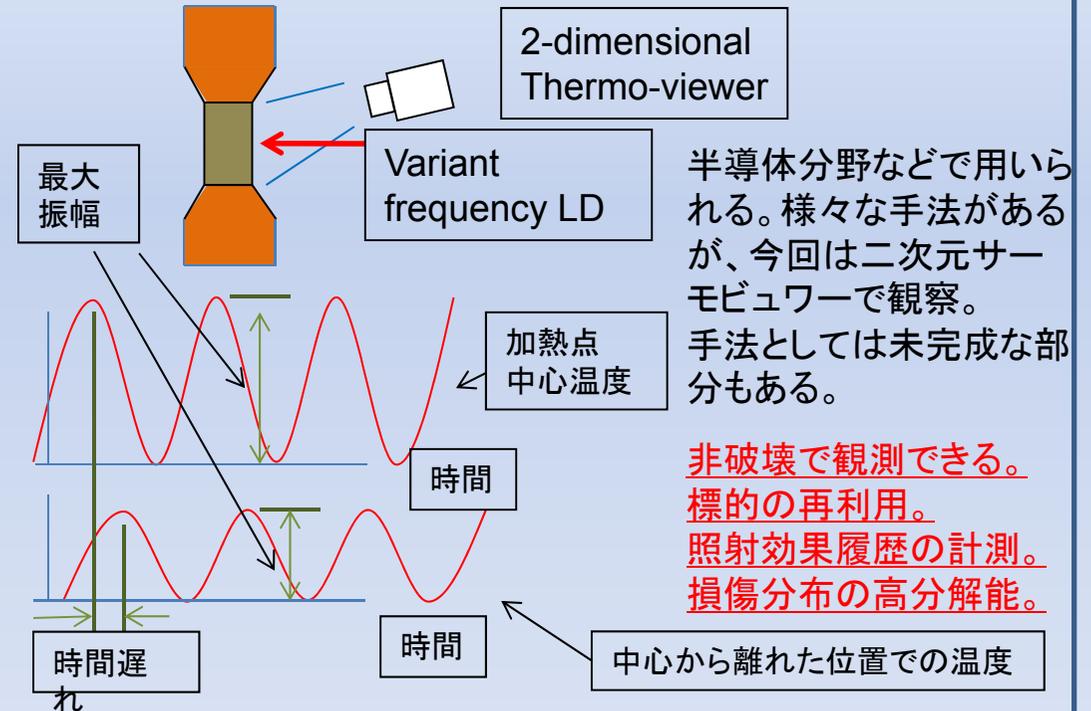
損傷分布の分解能の不足。

非破壊では無い。

マンパワー不足。



今回の熱拡散率測定(レーザースポット加熱法)



半導体分野などで用いられる。様々な手法があるが、今回は二次元サーモビューワで観察。手法としては未完成な部分もある。

非破壊で観測できる。
標的の再利用。
照射効果履歴の計測。
損傷分布の高分解能。

ベテル株式会社

県内中性子利用連絡協議会の柏渕氏よりご紹介を受ける。

茨城県の中小企業の中性子利用及び研究者の支援を目的として、産学連携を推進する。

レーザースポット加熱法

基本原理

無限大の大きさを持つ薄膜に周期加熱 $P e^{i\omega t}$ をした際の加熱源からの距離 r の位置での温度広がりには次式で表わされる。

(H. S. Carslaw and J. C. Jaeger 1959 Conduction of Heat in Solids p263)

$$T(r, k) = \frac{P}{4\pi D r c} \cdot e^{-kr+i(\omega t - kr)}$$

空間分解能
に関わる。

D: 熱拡散率、c: 比熱、ここで波数 k は以下で表わされる。(熱拡散長の逆数)

$$k = \sqrt{\frac{\omega}{2D}} = \sqrt{\frac{\pi f}{D}} \quad \text{よって位相遅れは} \quad \theta = -\sqrt{\frac{\pi f}{D}} \cdot r$$

すなわち位相遅れの距離 r 依存性または周波数 f 依存性を計測すれば D が求まる。

実際には厚みの効果や境界条件の評価や温度計測手法の評価が重要となる。

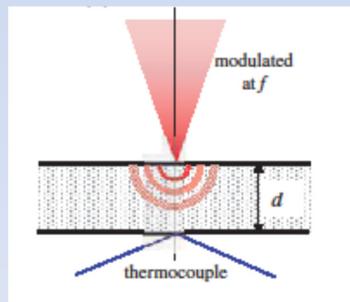
(H. Kato et al., Meas. Sci. Technol. 12 (2001) 2074-2080)

異方性のある材料の熱拡散率測定(産総研)

原理的にはレーザー強度の絶対値に依存しない測定法。

計測周波数の大きい液体窒素を使用する一点計測型放射温度計。

材料により周波数、位置を変える。



実際の装置開発

遠隔操作での使用を考え汎用の二次元赤外線カメラを使用する。



ベテル(株) Thermo-wave analyzer

レーザー周波数を上昇させないと空冷の効果が無視できない。レーザー周波数を上昇させると赤外線カメラの計測周波数を上昇させる必要がある。(赤外線カメラは高い！！)

黒鉛材は熱拡散率が大きいのでカメラの感度を考慮したS/N比を上げるためにはレーザー強度を上げる必要がある。

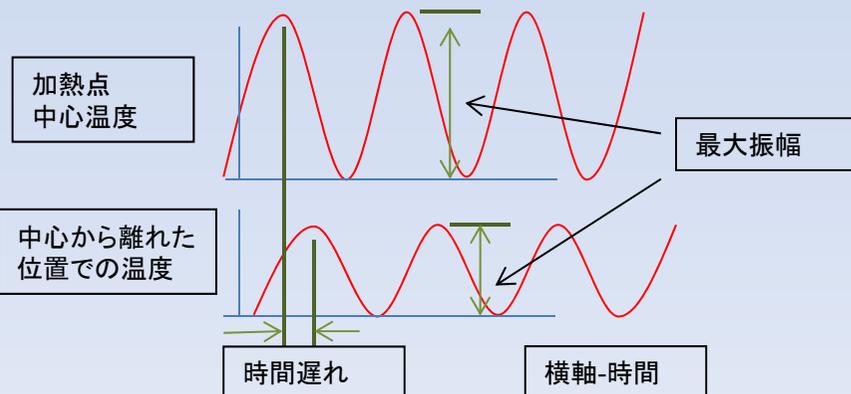
等々の問題点を抱える。

カメラ計測周波数30Hz、レーザー周波数1Hz、レーザー強度2W、ダイオードレーザー808nm

最大振幅の距離依存性を利用する。

相対的な計測しか出来ない。

別の正確な手法にて同じ材料の熱拡散率を計測し、校正する



装置概要

プラグシールドの着座面を基準とし、三次元駆動装置を設置。
駆動装置上にレーザー変位計(標的正面、側面)および熱拡散率測定装置を取り付ける。

駆動分解能;0.5 μ m。計測誤差平均5 μ m以下。

ミュオン標的の表面線量は1MW, 1年照射後、5Sv/h

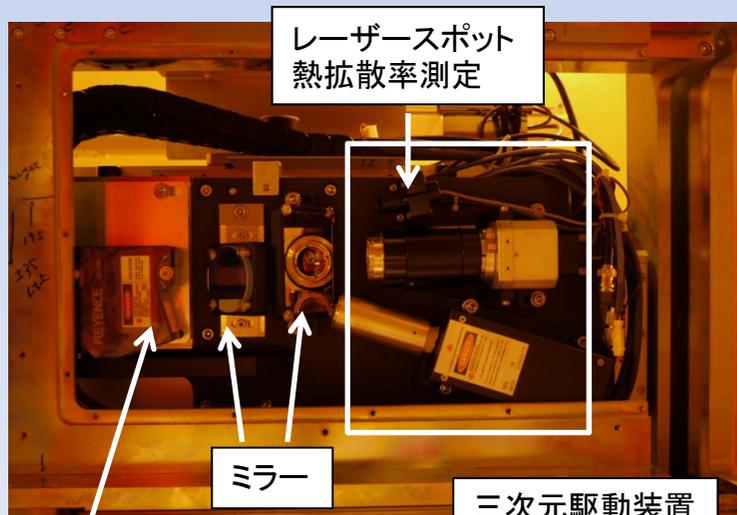
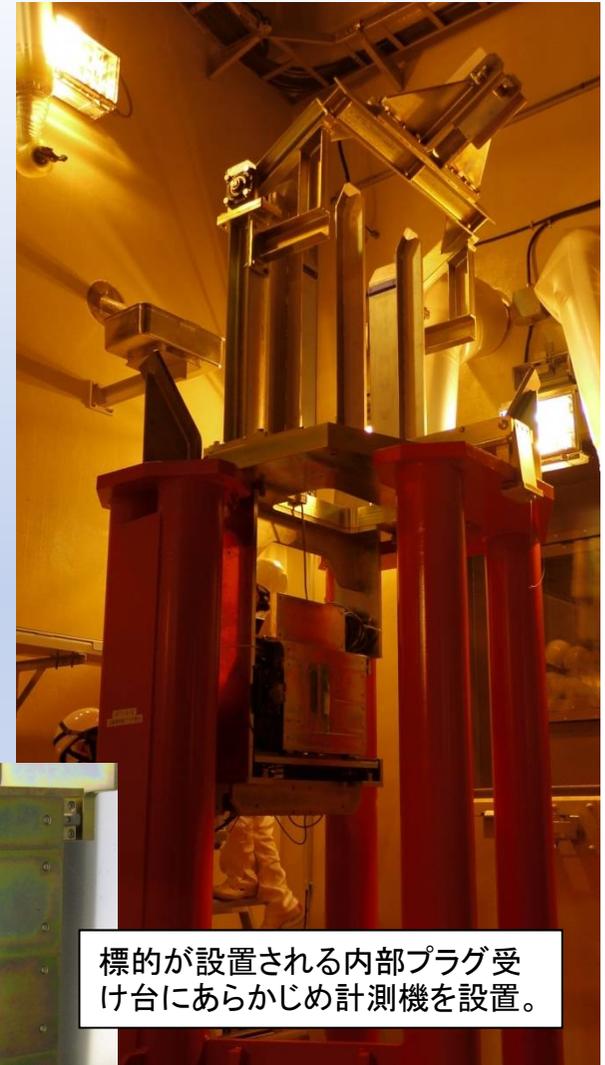
(今回は低い線量率500mSv/hであるが、将来的に1MW運転で使用する事を考慮して評価する。)

計測装置の耐放射線性を1kGyと見積もると寿命は200時間。

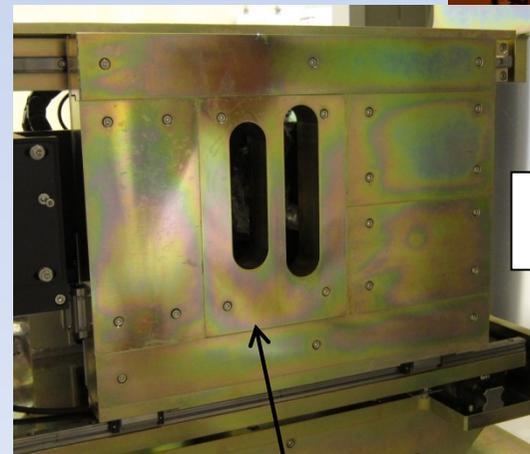
50mmの鉄遮蔽体で線量率80%減。

→1Sv/h。寿命は1000時間程度。

50mmの鉄遮蔽体越しに計測を行う。ミラー反射計測。



レーザー変位計による位置確認。



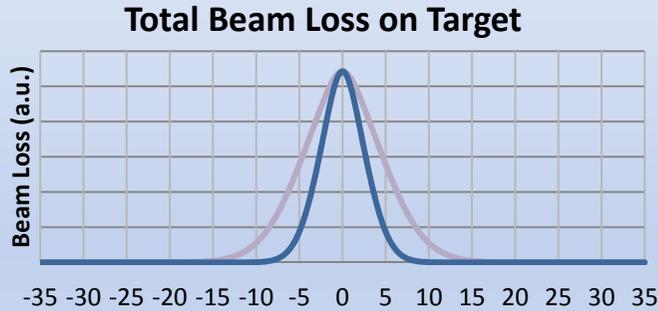
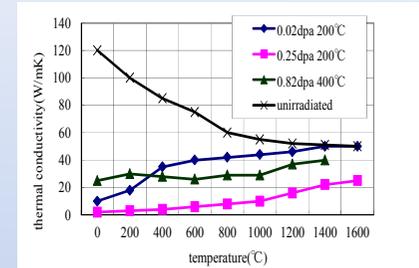
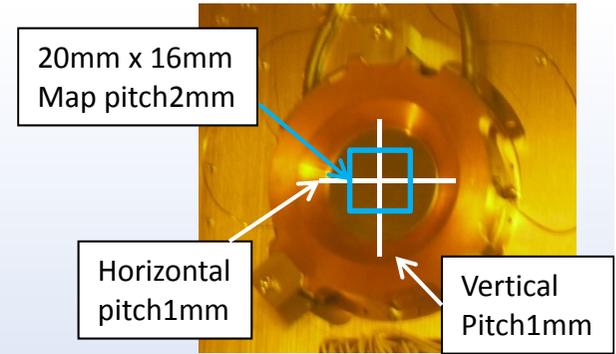
標的が設置される内部プラグ受け台にあらかじめ計測機を設置。

放射線を考慮し、ミラー反射および遮蔽体設置。

陽子ビーム照射黒鉛熱拡散率測定

同じ黒鉛材を試料として切り出し、より精度の高い手法で熱拡散率を計測すると未照射の場合の黒鉛の熱伝導率は170W/m/K程度。
未照射材料を基準に相対評価。

中心部が高温のためアニールの効果が確認出来る。(200°C)
220kW時のビームプロファイルを確認出来る。
計算に使用した値より熱伝導率は高め。

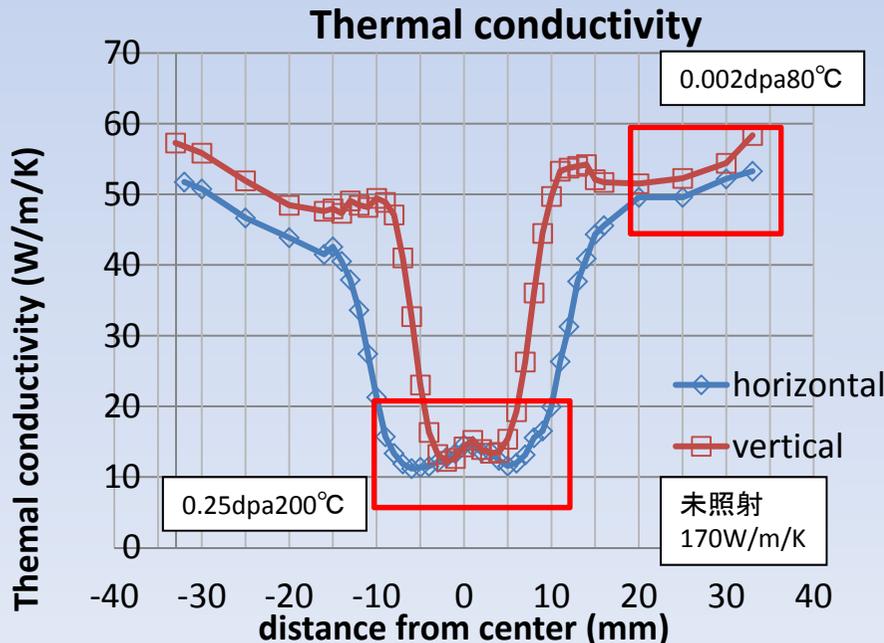


Total (Horizontal)

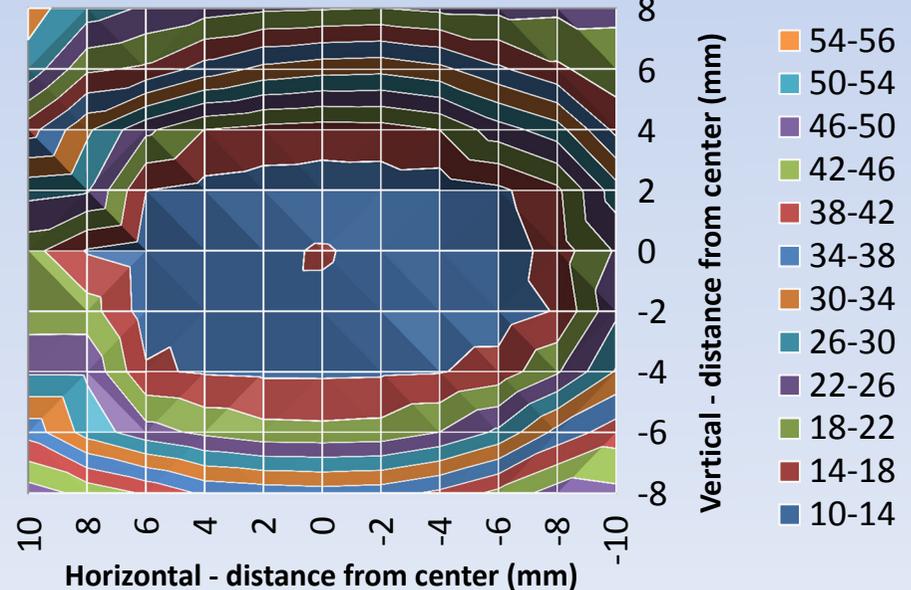
Total (Vertical)



IG110照射データ



2-dimensional map of thermal conductivity



Summary

- ミュオン標的を製作し、順調に運転を継続している。
- 遠隔操作コミッショニング、回転標的の開発を継続中。
- 震災の影響を計測し、継続使用可能であることを確認。
- 熱拡散率測定装置を製作し、照射済みミュオン標的を計測した。
- 高空間分解能、高精度に計測出来る事を実証した。
- 次回、運転後も熱拡散率に与える照射の影響を調査したい。
- 照射が寸法に与える影響を計測し、より正確な寿命を推測する。

使用済み機器
の保管と廃棄

	2011 Earthquake	2012 MLF symposium	2013 Rotating target installation	2014
Intensity of Proton beam		Continuous 140kW	Continuous 300kW?	Continuous 600kW?
Fixed Target		Stable continuous Mu generation	Maintenance & Servicing	Back-up of R.T.
Rotating Target		Durability tests of Bearing	Improvement of assembly	Installation operation
Remote handling PIE	PIE #1	Test of R.T.	PIE #2	PIE #3?
Storage & Disposal		Design of Storage and Disposal		



ご清聴ありがとうございました。
頑張ろう！！J-PARC！！



標的の寸法確認

標的の外観確認

2009年照射後標的では中心部にビームの痕跡が確認できたが、今回は無くなっていた。原因は不明。

標的の寸法確認

模擬体、標的No1(照射標的)、標的No2(未照射標的)を比較して変形量が許容値以内であることを確認する。

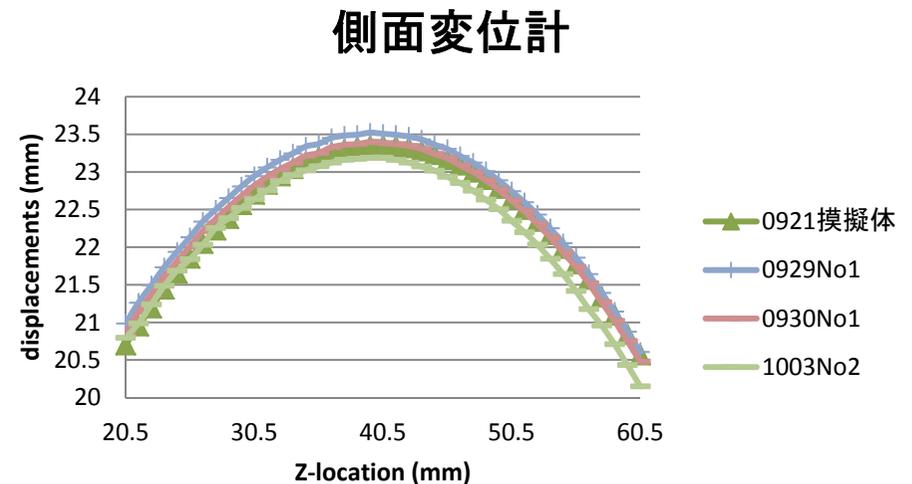
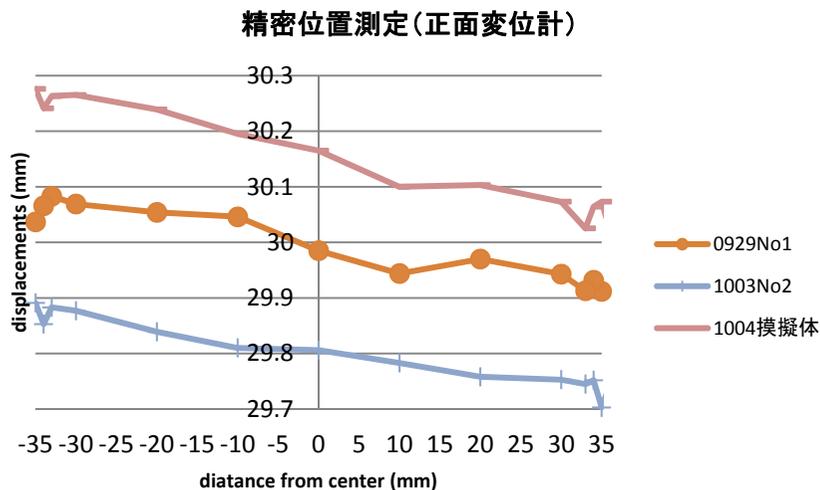
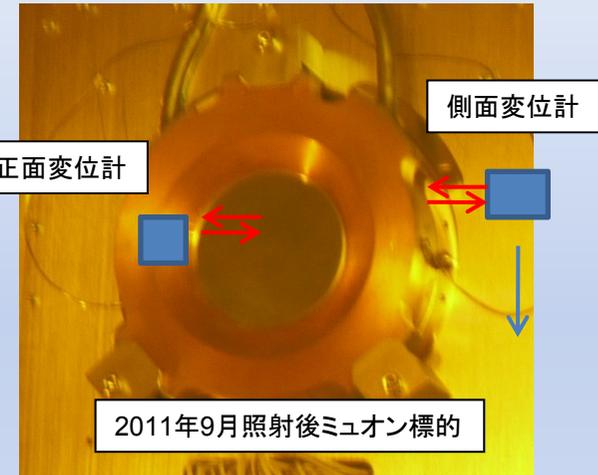
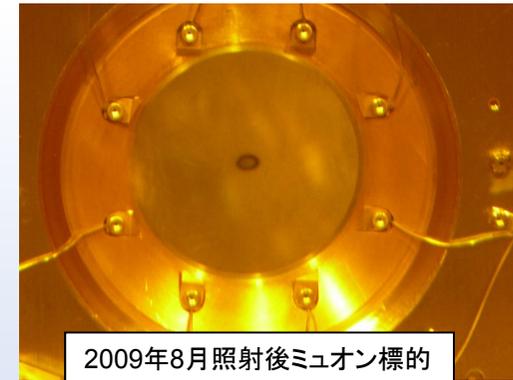
模擬体は設置誤差を少なくした理想値と仮定する。

製作時の理想値からの誤差; $\pm 0.5\text{mm}$ 以内。

今回の許容誤差; $\pm 1\text{mm}$ 以内。

結果; 理想値(模擬体)に対して標的一号機は0.2mm以内のずれであることを確認。(±0.5mmが仕様。)

使用可能であることを確認。



結果の妥当性の議論

今回は周波数変調レーザー照射部の最大振幅で熱拡散率を評価している。
(最大振幅と熱拡散率は反比例する。)

問題点;

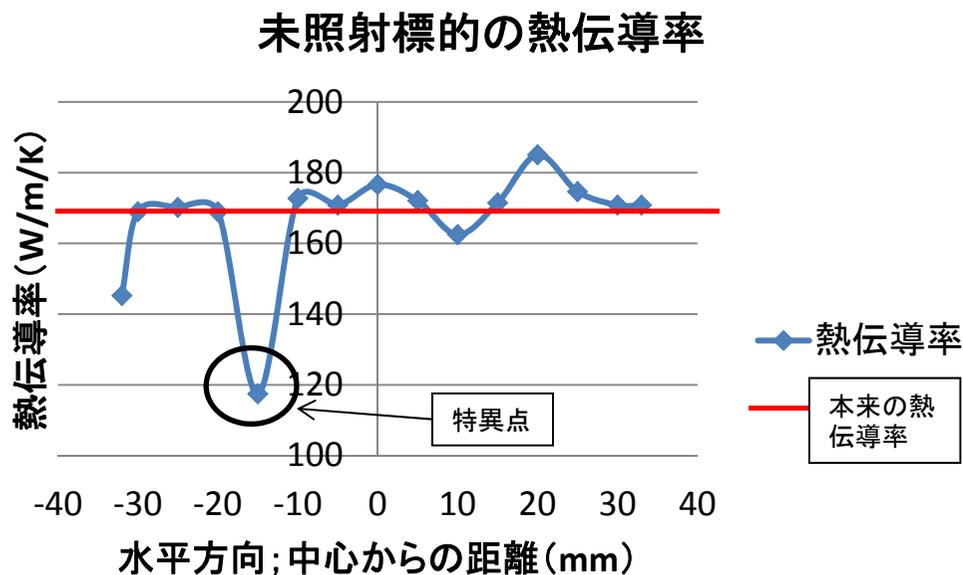
中心部の最大振幅はレーザー強度、レーザー吸収率(反射率)、輻射率に依存する。

改善案;

振幅の位相遅れ、または照射部からの距離と最大振幅の傾きで評価すれば精度は大幅に向上する。

しかしながら、今回は自動で温度分布画像をFFT処理するソフトが未完成である事とカメラのサンプリングレートが少ない(30フレーム/秒)事で改善できなかった。

典型的な温度分布画像を時間をかけて処理すれば、精度は向上する可能性はある。



	照射中心	照射外周	未照射中心	未照射特異点
回数	10	10	10	3
最大値 (W/m/K)	14.5	55.6	186.5	118.1
最小値 (W/m/K)	14.1	54.2	175.3	117.5

再現性の確認

再現性はある。表面状態などの影響か？