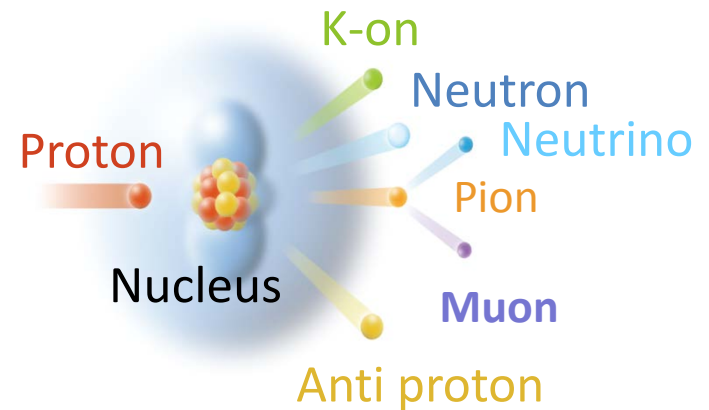


第10回加速器学会年会, 5th, Aug., 2013 @ 名古屋大学

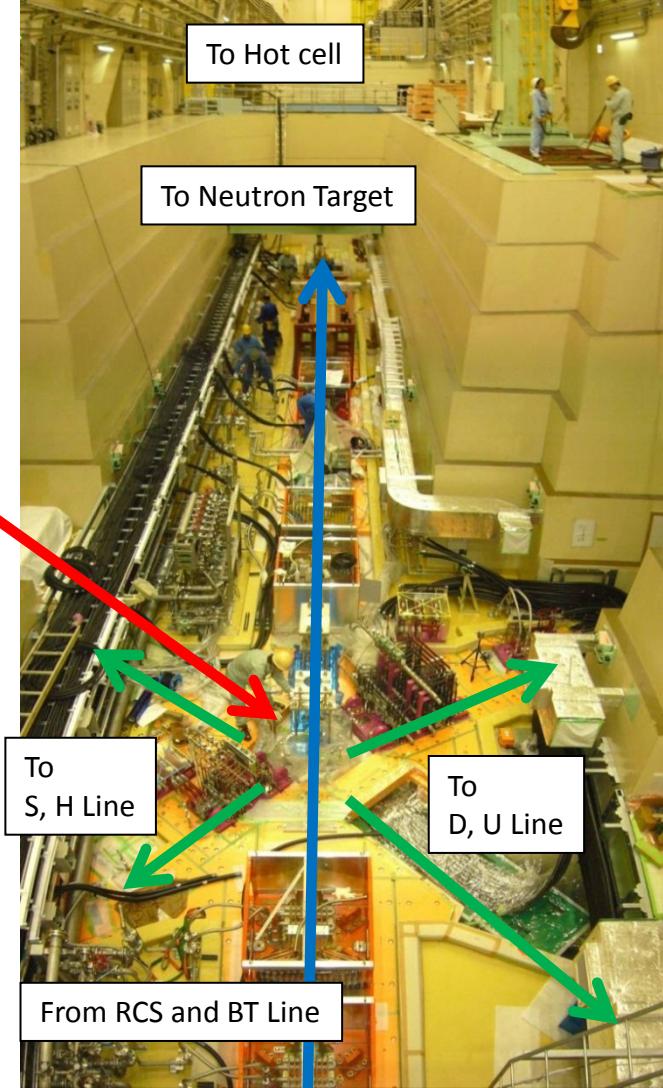
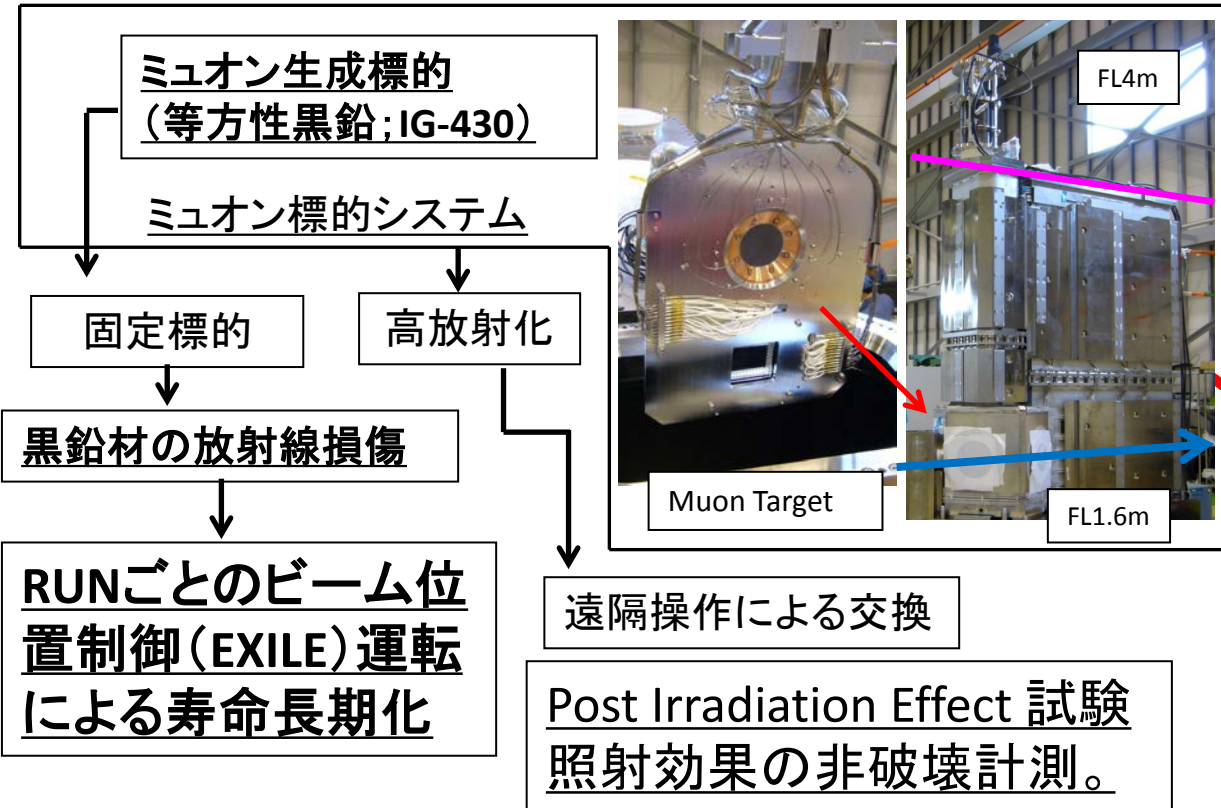
J-PARC/MUSEにおけるミュオン生成標的 の300kW陽子ビーム運転報告



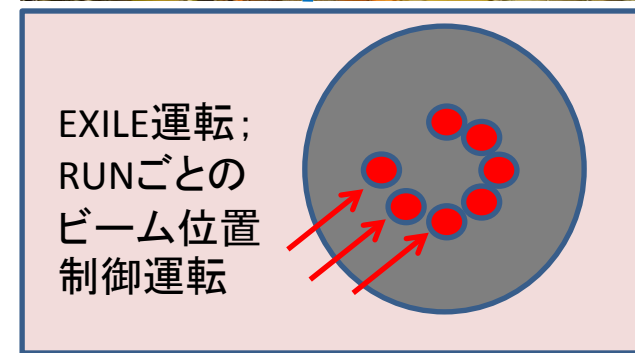
J-PARC Center, MLF Division, Muon Section
高エネルギー加速器研究機構(KEK-IMSS)

牧村俊助

Introduction



	2008	2009	2009	2010	2011	2012	2013
Proton Beam	Sep. Day 1	Dec. 300kW	20kW Op.	120kW Op.	200kW Op.	200kW Op.	300kW Op.
Fix. Target	Successful Operation without replacement				Earthquake		
Hot cell	Com. #1 & 2	Com. #3	Com. #4			Com. #5	
EXILE 運転				PIE 試験		EXILE 運転	



ミュオン生成標的 (固定標的方式)

等方性黒鉛 (IG-430)

厚み; 20 mm、直径; 70 mm

チタン層; 熱応力吸収材

4-kW 発熱 @1MW, $\phi=16$ mm ($2\sigma=8$ mm)

黒鉛材の陽子ビーム照射損傷
(寸法変化と熱伝導率)

Lifetime; 0.8dpa (@1MW, 1dpa/year)

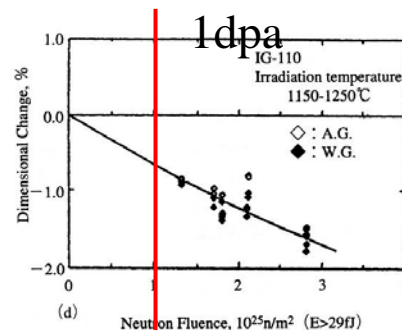
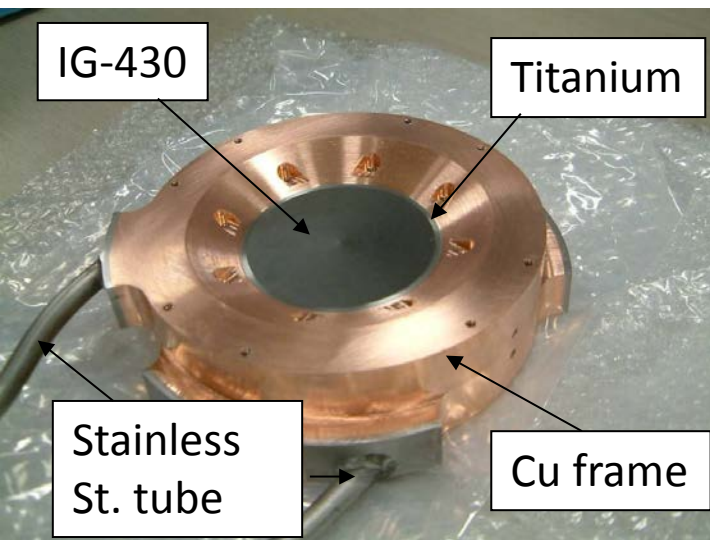
PHITSによる計算。



ミュオン標的の交換作業

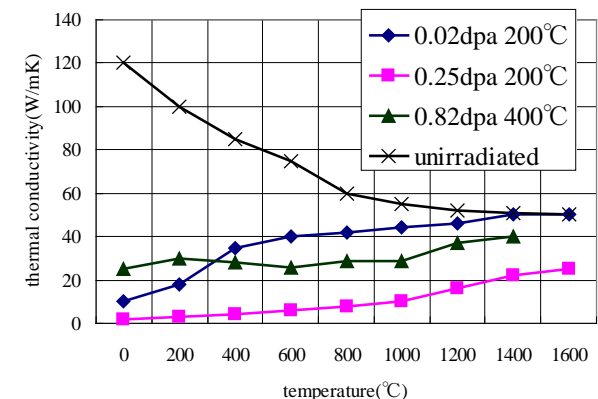


キャスクによる輸送
(ビームライン)



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

最大収縮率1%/year
graphite on the beam spot



Irradiation effect to thermal conductivity
T. Maruyama et al., Journal of Nuclear
Materials 195 (1992) 44-50.

ミュオン標的の運転監視

- 冷却水IN, OUT温度
- 流量(撮像管カメラ)
- 銅フレーム温度

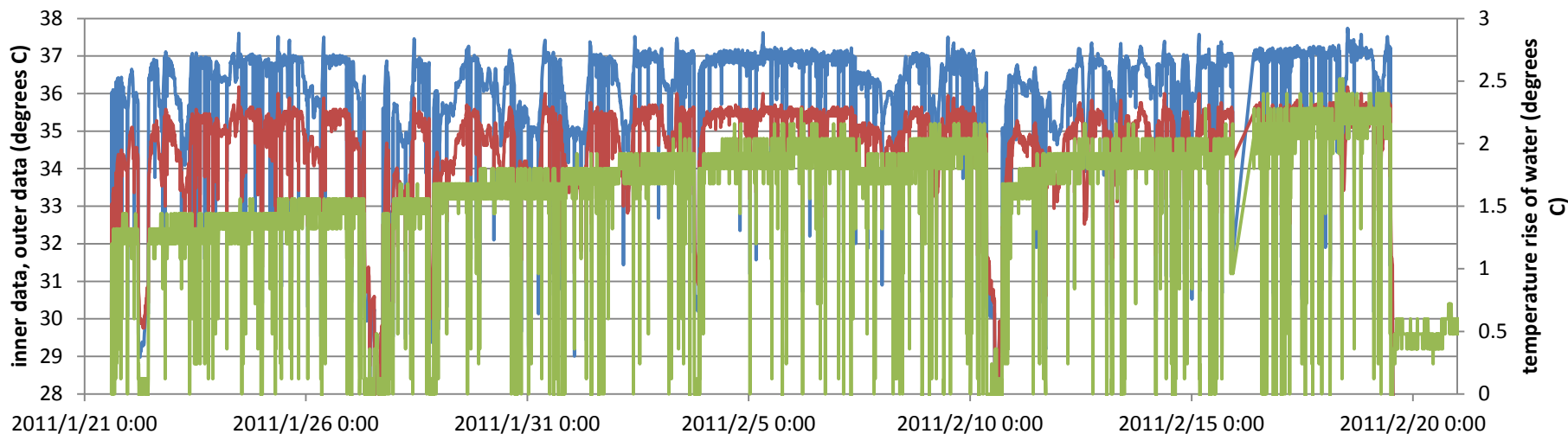
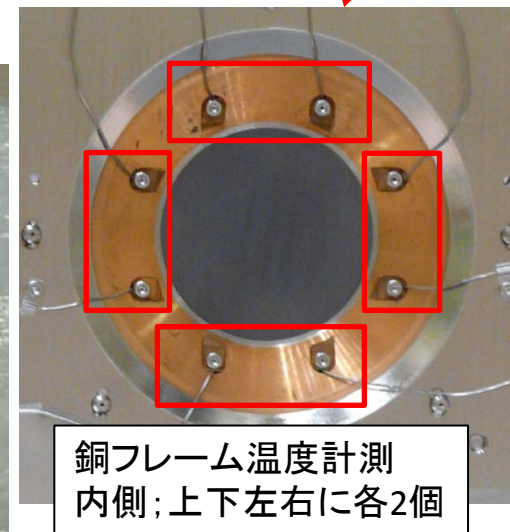
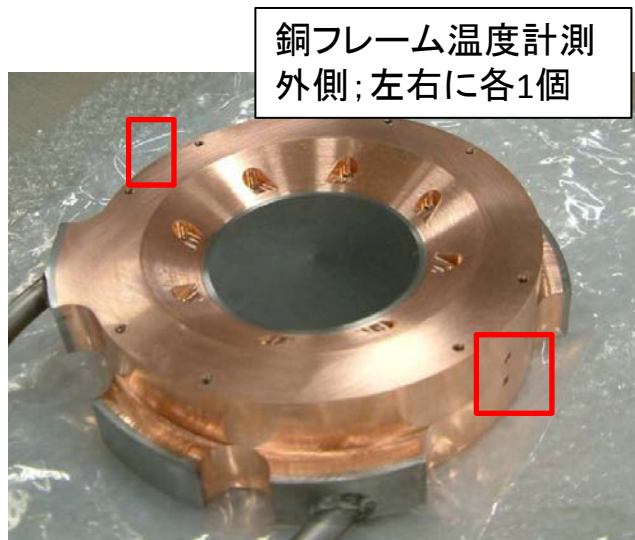
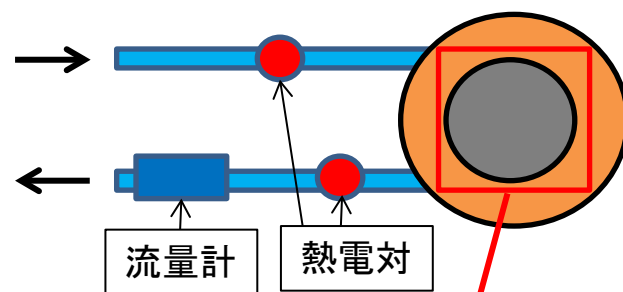
- ✓ 内側;上下左右
- ✓ 外側;左右

- ◆ ビームロス;
解析に一致

- ◆ 配管と冷却水間の
熱伝達係数

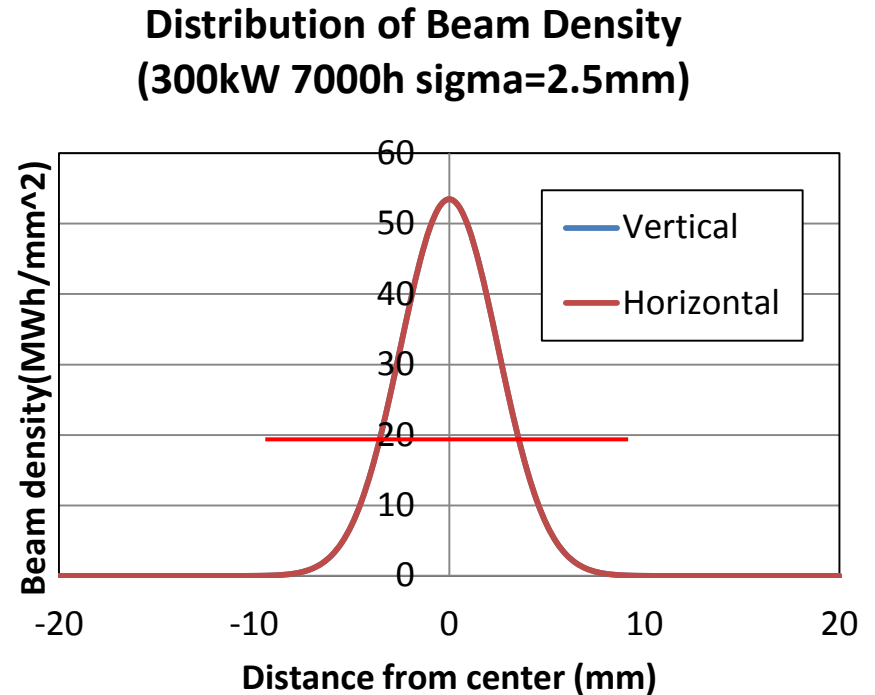
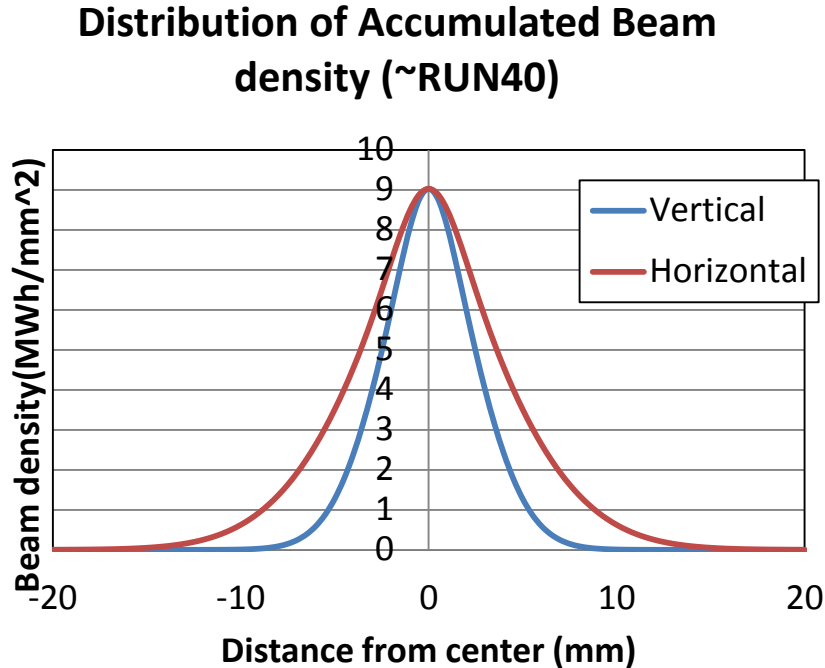
12000W/m²/K@9L/min.

- ◆ 温度分布解析との比較



RUN40までの積算照射量

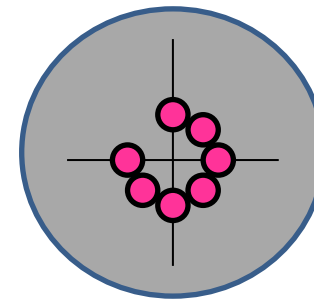
RUN40終了 (2012年3月)までの黒鉛材における積算照射量は中心において9 MWh/mm²であった。(黒鉛寿命は照射効果の収縮を考えると約20 MWh/mm²)



2013年夏期シャットダウン前までの7000時間を計画しているプロファイルで運転すると、寿命を大幅に超えてしまう。

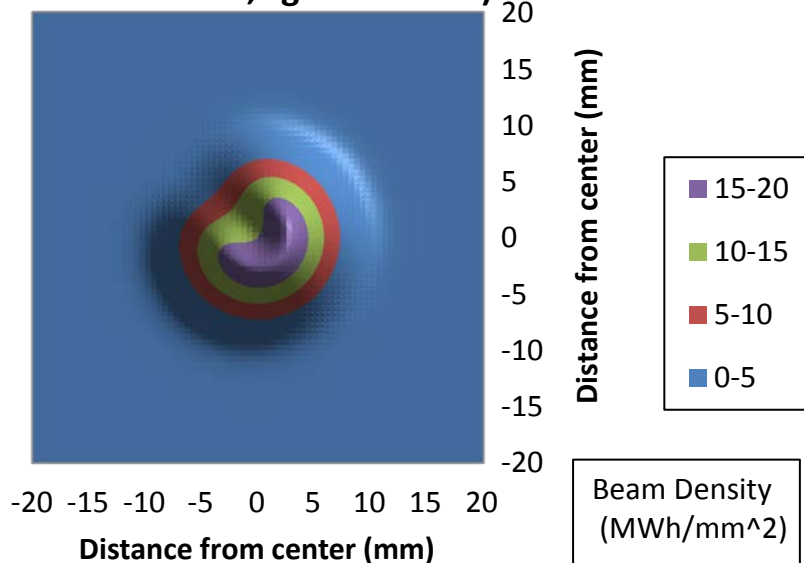
EXILE運転の検討 (by 明午氏)

標的前後のステアリング電磁石で陽子ビーム軌道を平行に移動。ビームロスをほとんど変えずに運転する事が可能となった。

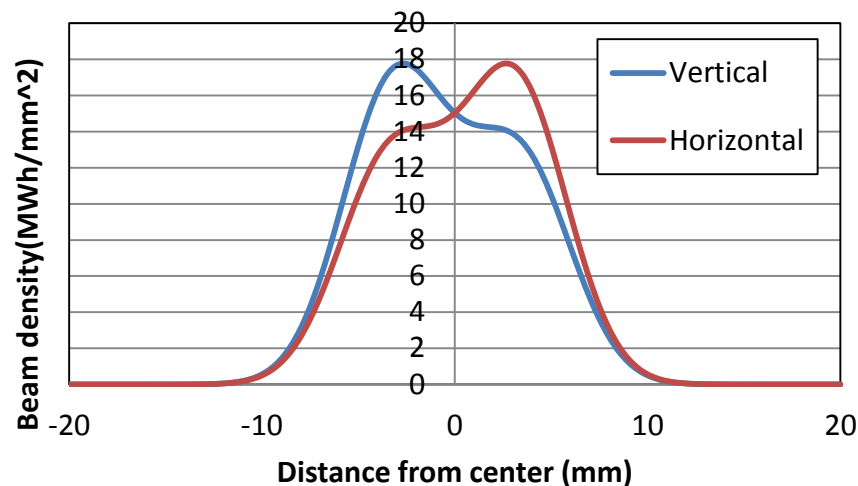


Beam painting
by off-set beam

Distribution of Beam Density
(0.3MW 1000h x7, sigma=2.5mm)



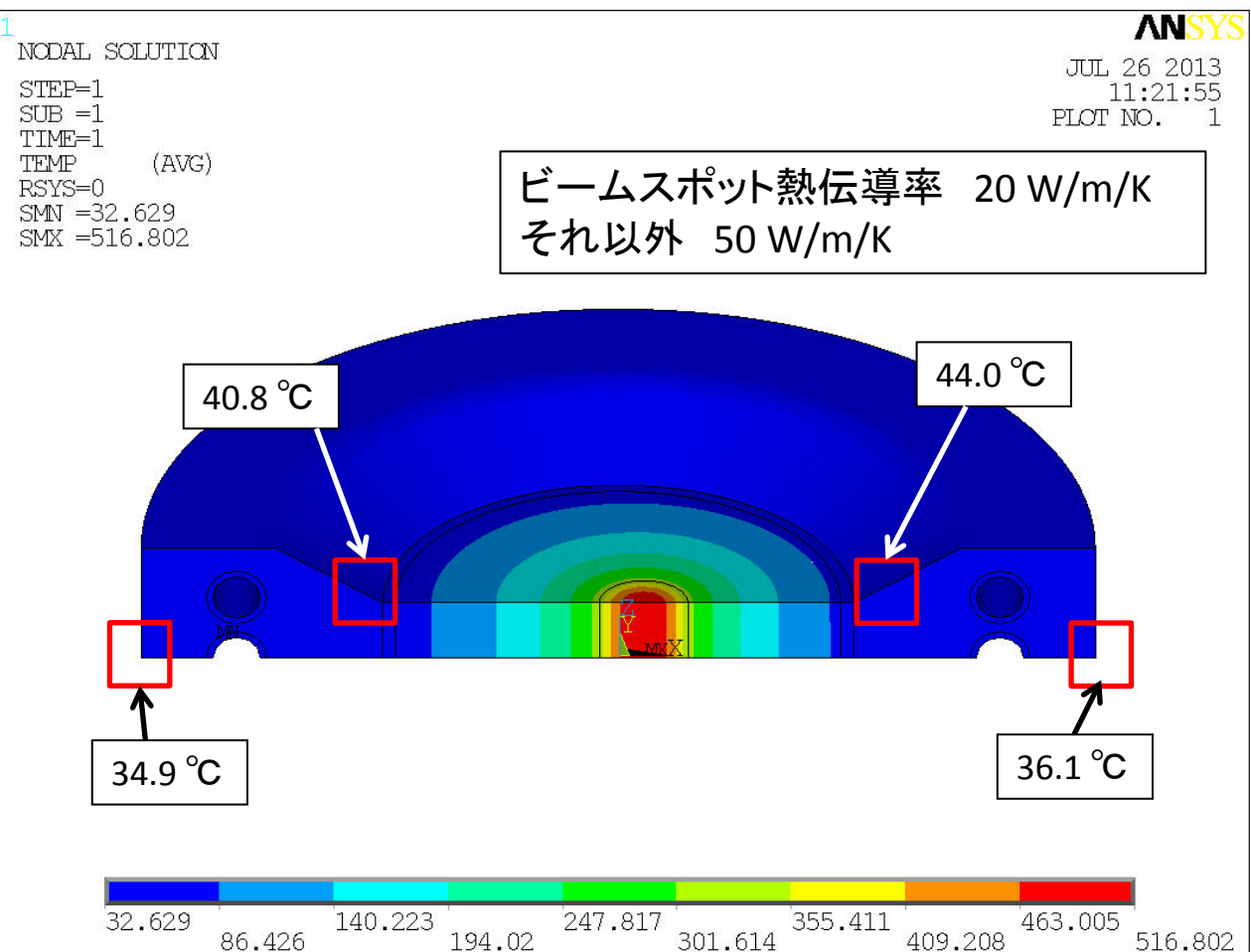
Distribution of Beam Density
(0.3MW 1000h x7, sigma=2.5mm)



EXILE運転を実施しない場合 (55 MWh/mm²) から 18 MWh/mm² と大幅に改善した。実際にRUN41から運用を開始している。

EXILE運転の影響

陽子ビームライン、下流への影響の確認。→O.K. by 明午
ミュオン二次ラインへの影響の確認。→O.K. by ミュオンGr.
ミュオン標的への影響の確認。→O.K. 今回ご紹介。



解析における銅フレームの温度差

- 300 kW
 - 内側 3.2 °C
 - 外側 1.2 °C
- 200 kW
 - 内側 2.2 °C
 - 外側 0.7 °C

実際のログで検知できるか？

解析と実測値の比較

RUN No	40	41	42	43-1	43-2	44	45	46	47
ビーム位置	中心	右側	上側	下側	下側	左側	右上	右下	左下
ビーム強度	113 kW	206 kW	209 kW	212 kW	206 kW	212 kW	273 kW	282 kW	309 kW
期間	2012/3/5	2012/3/17	2012/4/24	2012/5/29	2012/6/11	2012/10/27	2012/12/6	2013/1/14	2013/2/25
	~3/14	~3/21	~4/29	~6/6	~6/20	~11/12	~12/12	~1/20	~3/4
平均流量	9.5 L/min	8.9 L/min	8.9 L/min	8.1 L/min	7.2 L/min	9.7 L/min	8.3 L/min	8.0 L/min	8.0 L/min
IN上1	31.9	35.2	37.2	35.1	35.5	36.9	39.2	37.4	39.0
IN上2	31.9	35.7	37.1	35.4	35.7	36.0	39.3	37.7	38.0
IN右1	31.9	36.3	35.6	34.5	34.8	33.9	38.3	38.1	37.1
IN右2	32.4	37.4	35.5	36.4	36.9	34.7	38.8	40.0	38.9
IN下1	32.5	36.7	34.7	37.3	37.8	35.0	37.6	39.7	39.6
IN下2	32.5	35.7	34.7	37.2	37.7	36.0	37.2	38.8	40.4
IN左1	32.1	34.6	34.8	35.8	36.2	36.2	36.7	37.3	39.9
IN左2	32.0	34.3	35.7	34.7	35.0	36.5	37.2	36.8	39.3
OUT右	31.3	34.9	33.9	34.0	34.3	33.6	36.5	36.9	36.3
OUT左	31.2	33.6	33.8	34.1	34.3	34.4	35.5	35.7	37.2
IN温度差	-	2.4	2.4	2.0	2.1	2.1	1.9	2.7	2.6
OUT温度差	-	1.3	-	-	-	0.8	-	-	-

解析における銅フレームの温度差

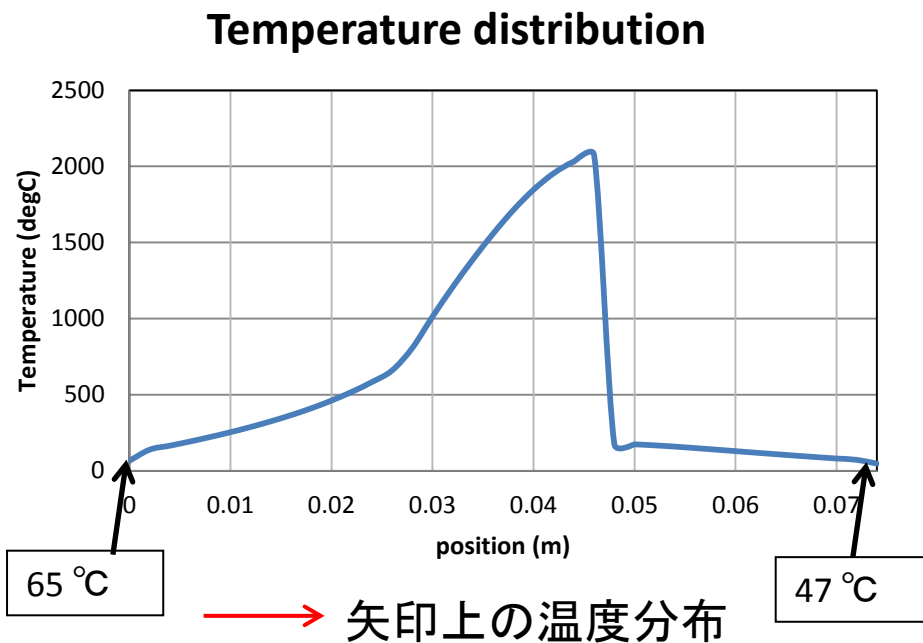
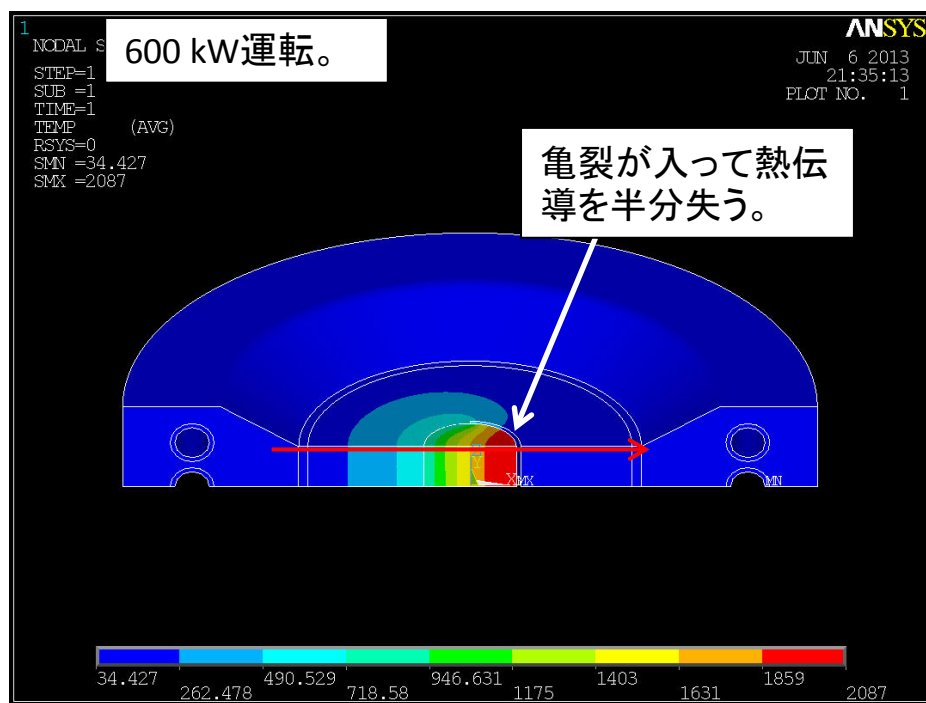
300 kW; 内側 3.2 °C、外側 1.2 °C

200 kW; 内側 2.2 °C、外側 0.7 °C

完全には一致しないが、傾向は解析を反映している。

温度均衡確認の別の利用法

300 kWでは亀裂が発生した場合(半分の熱伝導を失う)でも、運転可能であるが、例えば、600 kW運転の場合に、黒鉛に亀裂が入ると黒鉛の消耗量が大きくなってくる。温度差が検知できるか？



温度差、 18°C 。十分検知可能である。
インターロック組み込みを計画中。

300 kW運転のまとめ

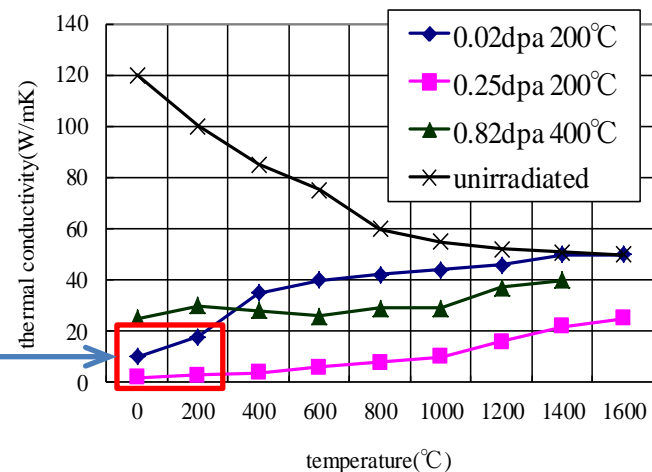
- ◆ 2008年の運転開始以来、一度も交換しないでミュオン標的を使用している。
- ◆ 黒鉛材の放射線損傷を分散させ、長寿命化するためにRUNごとのビーム位置制御(EXILE)運転を2012年3月から開始している。
- ◆ 標的の運転状況を温度計測系、冷却水監視系によって記録している。銅フレーム温度は解析に近い値を示している。

黒鉛材の Post Irradiation Effect 試験

- ◆ 黒鉛材の陽子ビーム照射による物性値の変化は無視できないほど大きく、この効果が寿命を決定している。
- ◆ 設計では材料照射用原子炉における中性子照射データを採用している。真空中照射のデータは、多くない。
- ◆ 実際の陽子ビームによる照射効果を計測したい。
- ◆ ミュオン標的においては、熱伝導率の劣化と寸法変化（主に収縮）が重要。
- ◆ 今回は2011年夏期に実施した陽子ビーム照射が黒鉛材の熱伝導率に与える影響のPIE試験に関して報告する。

Irradiation effect to thermal conductivity
T. Maruyama et al., Journal of Nuclear
Materials 195 (1992) 44-50.

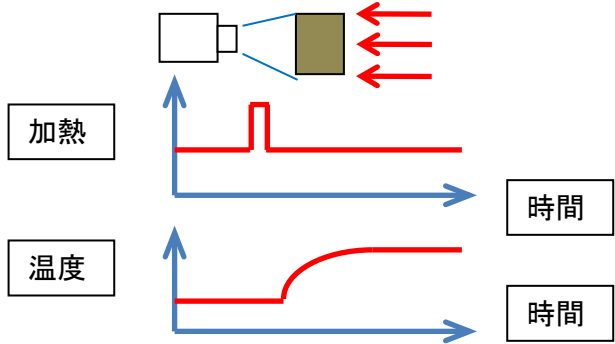
このあたりが計測できるはず。



陽子ビーム照射が黒鉛の熱伝導率に与える影響の計測

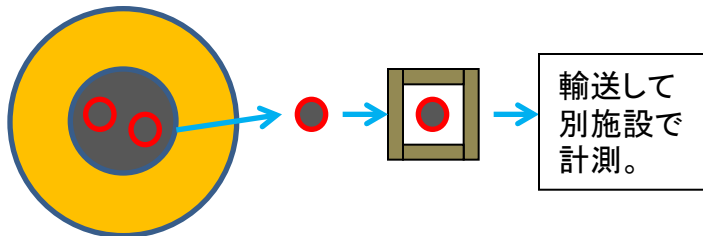
ミュオン標的の寿命を決定する黒鉛材のビーム照射による損傷の計測を開始した。
比熱と密度は照射の影響が大きいので熱伝導率は熱拡散率と同義に扱える。

通常の熱拡散率測定 (レーザーフラッシュ法)

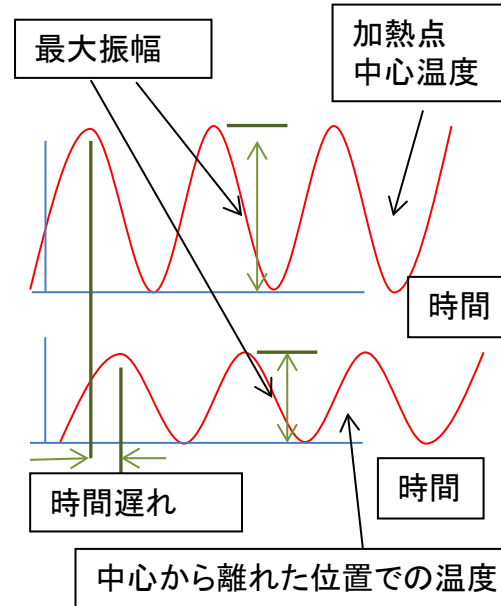
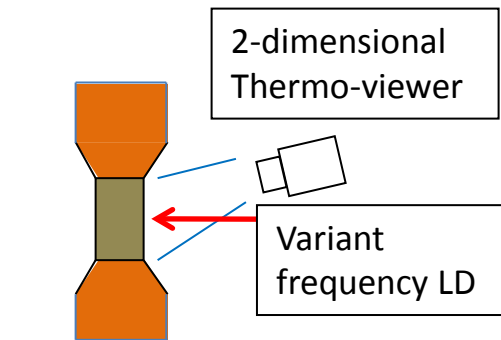


原子力、加速器分野における熱拡散率の計測。

- 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。(計画、管理)



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。従来は一点を輻射温度計で計測し、熱拡散率の精密測定(特に異方性のある材料)。近年、二次元サーモビューワで観察出来るようになった。
手法としては未完成な部分もある。

原子炉、加速器分野では使用実績は無い。

利点

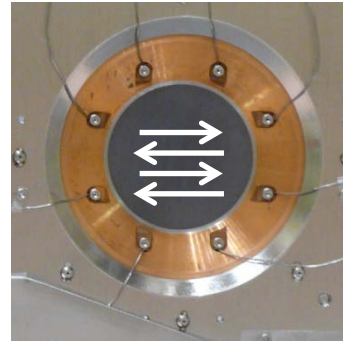
- 非破壊で観測できる。
- 標的の再利用。
- 照射効果履歴の計測。
- 損傷分布の高分解能。
(劣化度によるが3mm程度)

計測装置

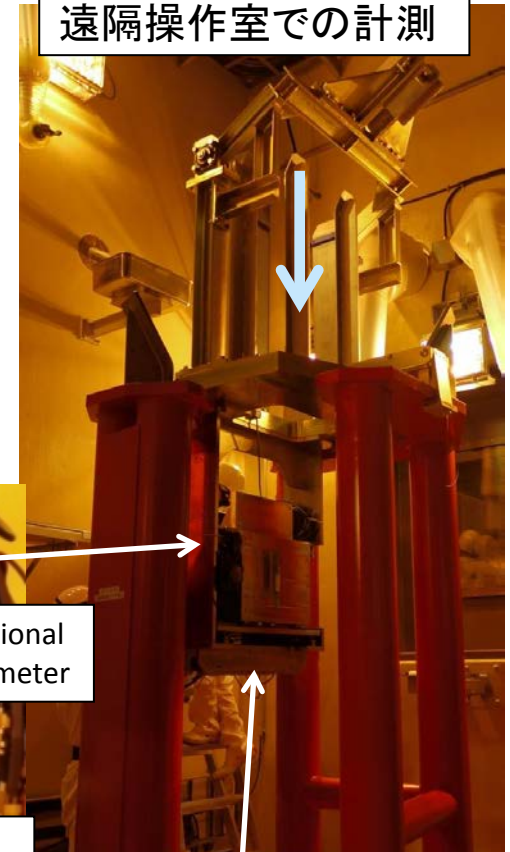
ミュオン標的は高度に放射化。遠隔操作室での計測。

計測装置の寿命を延ばすために遮蔽体越しに像をミラー反射して計測を行う。

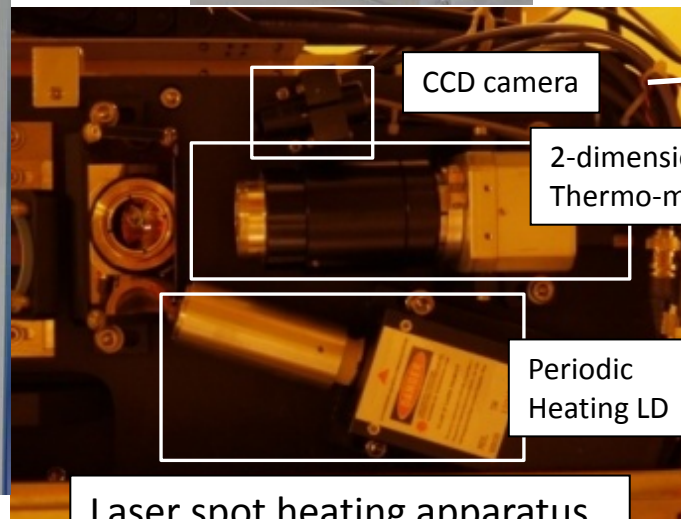
計測装置は三次元駆動ステージに載せられ、移動しながら局所的に計測する。



遠隔操作室での計測



三次元駆動ステージ
遮蔽体ごしの計測

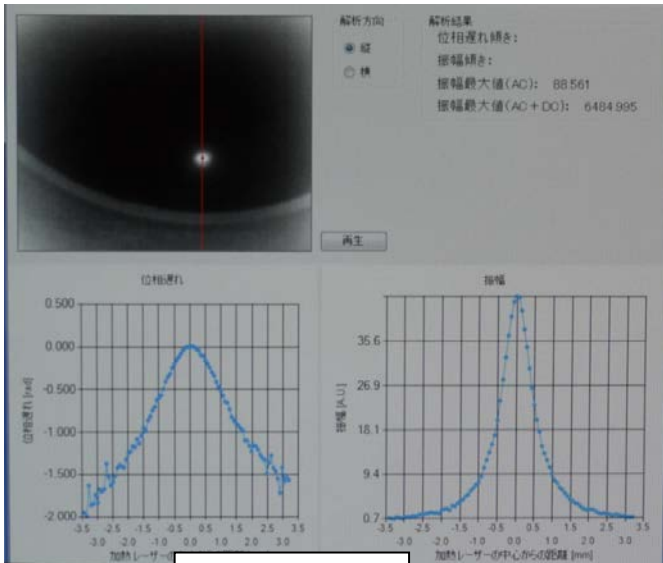


CCD camera

2-dimensional
Thermo-meter

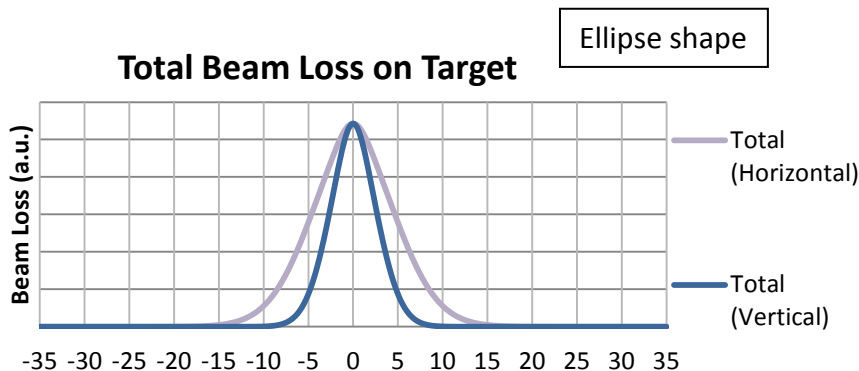
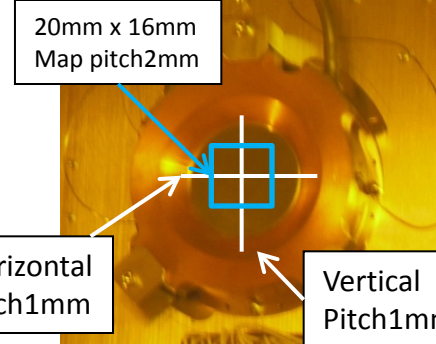
Periodic
Heating LD

Laser spot heating apparatus

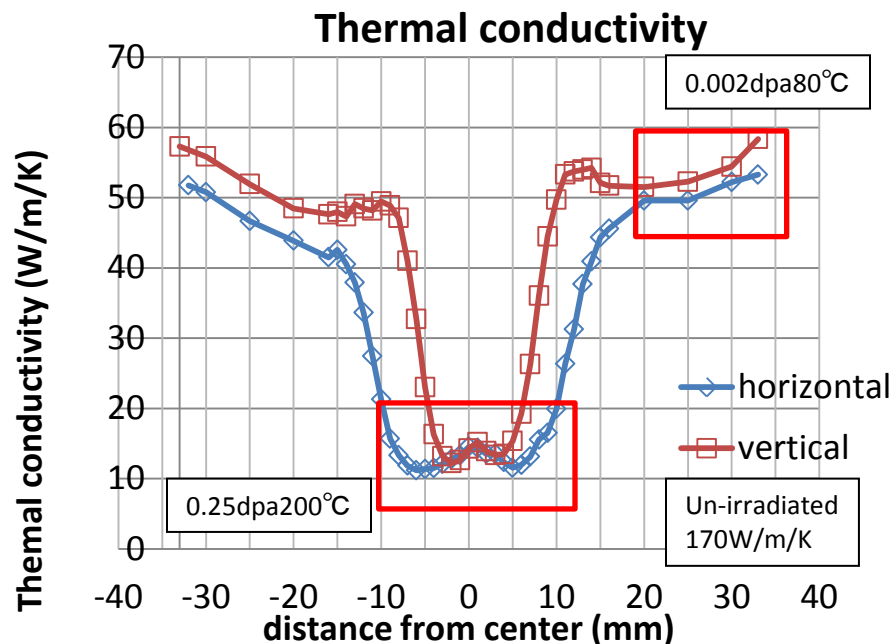


計測例

陽子ビーム照射が黒鉛の熱伝導率 に与える影響の計測



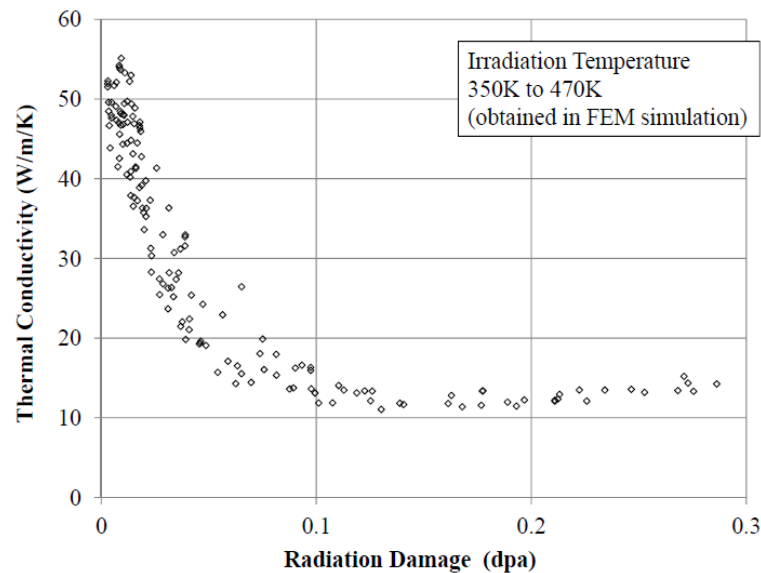
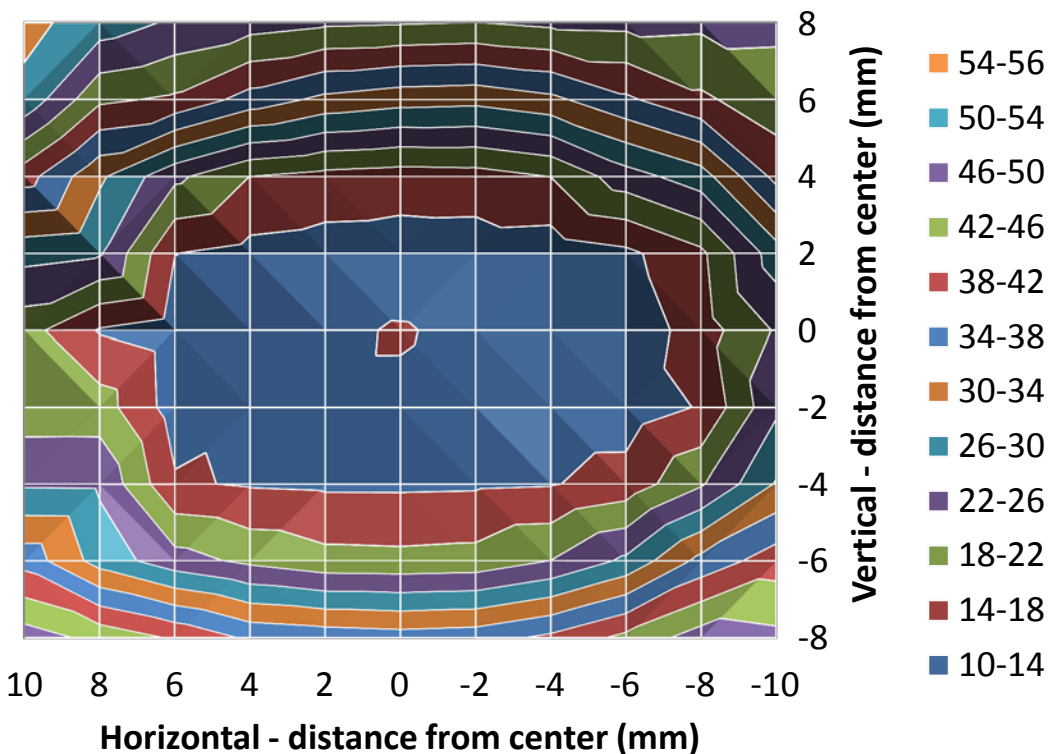
	照射量 (dpa)	熱伝導率 予測値	熱伝導率 実測値
Center of target	0.25 (200 degC)	5 W/m/K	15 W/m/K
Edge of target	0.002 (80 degC)	15W/m/K	50 W/m/K



- ◆ 熱伝導率の劣化度はビーム照射量に比例しない。
- ◆ 高温で照射された場合には熱伝導率は回復する。
- ◆ 楕円形上のビームプロファイルが観測できる。
- ◆ 熱伝導率は予想より高そうである。

陽子ビーム照射が黒鉛の熱伝導率に与える影響の計測

2-dimensional map of thermal conductivity



- ◆ 楕円形上のビームプロファイルが観測できる。
- ◆ 0.1 dpa程度で劣化度は飽和している。

PIE試験まとめ

- ◆ 2011年夏期に3GeV陽子ビーム照射が黒鉛材の熱伝導率に与える影響を計測した。
- ◆ 非破壊で計測できるレーザースポット加熱法を採用した。
- ◆ 熱伝導率の劣化の計測に成功した。

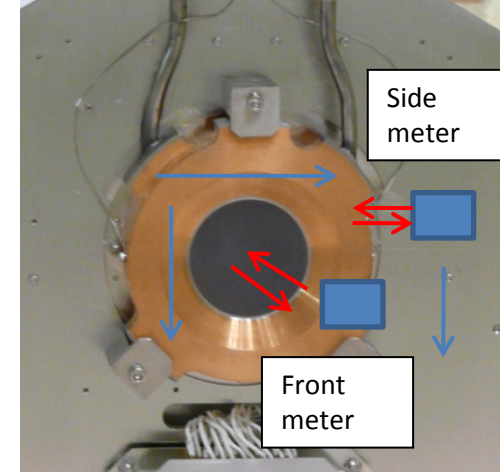
ミュオン標的今後の予定

- ◆ 熱伝導率測定の精度を向上させる。陽子ビーム照射が寸法変化に与える影響を計測する。
- ◆ 黒鉛材の長寿命化を目指し製作している回転標的を導入する。

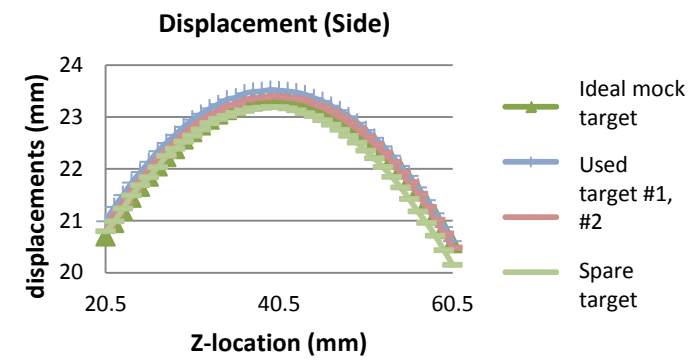
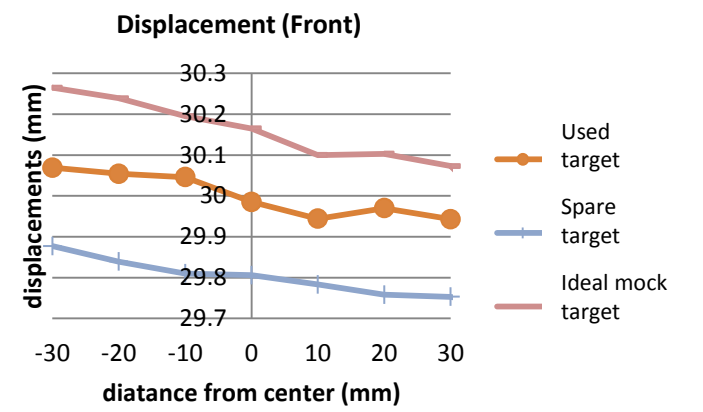
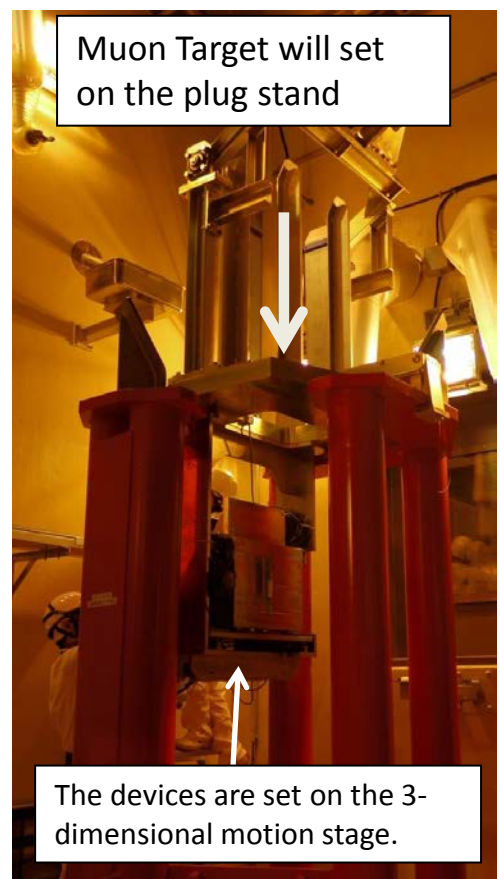
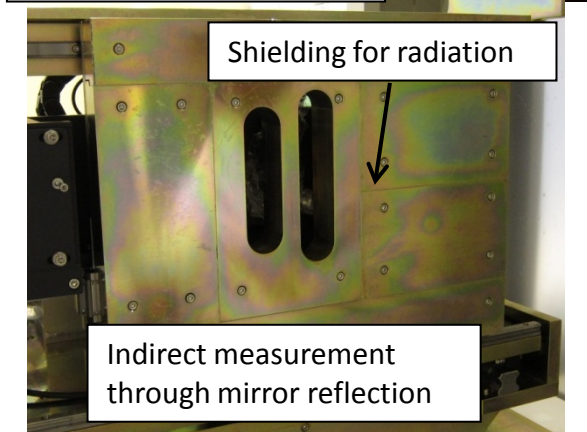
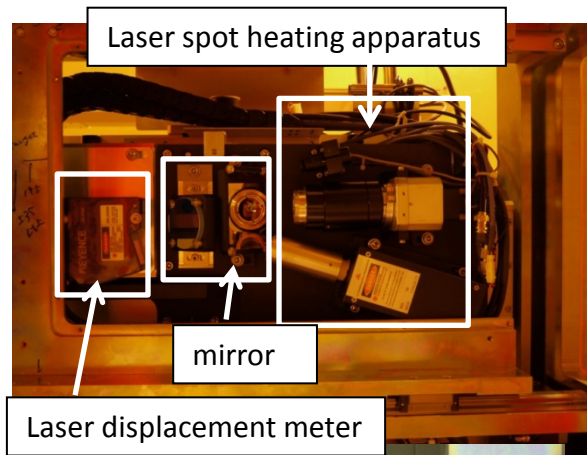
遠隔操作コミッショニング 2011年夏#1

標的の精密位置確認

東日本大震災による標的の変形量の確認。
 切断部の変形。プラグシールドガイドに対する精密位置確認。
 三次元駆動装置にレーザー変位計を設置して計測。
 計測装置の耐放射線性は高く無い。そのため遮蔽体越しに計測。
 使用済み標的を理想的な位置を再現した標的(テンプレート)と比較した。誤差は0.2mm以下。(元々±0.5mmで製作)



① Measurement by Laser displacement meter



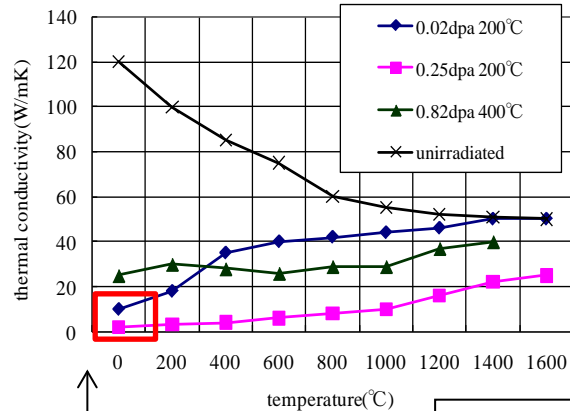
Used Target were located within 0.2mm precision against the ideal mock target.

Commissioning in Summer, 2011

Radiation damage to thermal conductivity of graphite

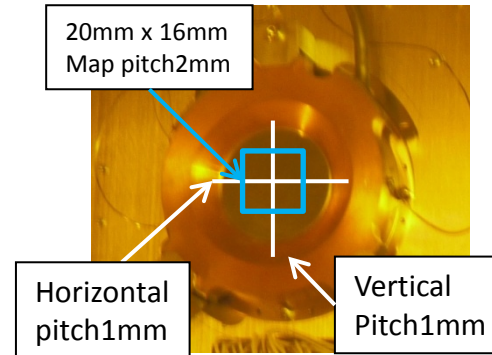
The variation of thermal conductivity irradiated by neutrons

Annealing effect

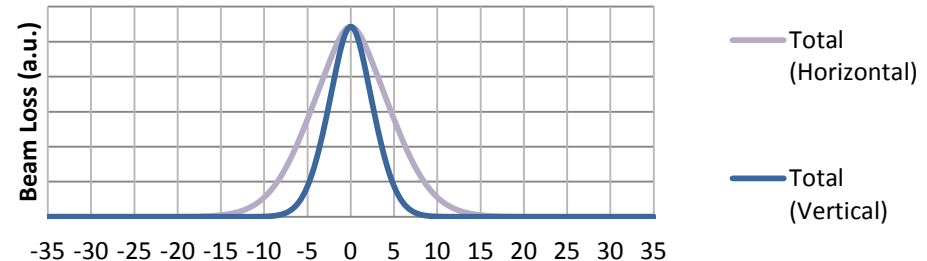


Data for IG110

Measurement in Hot cell



Total Beam Loss on Target



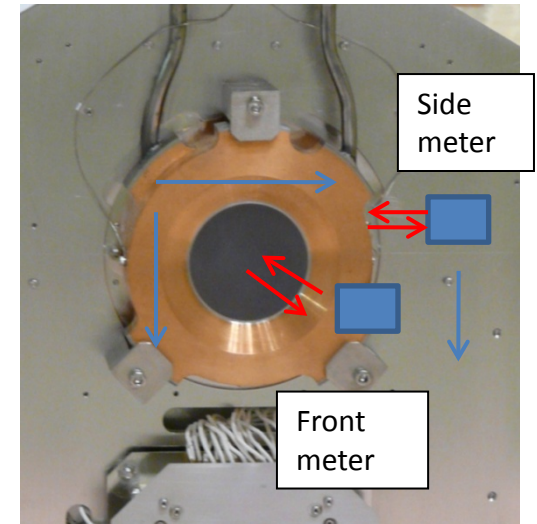
From Simulation
Th. Conductivity must be,
0.25dpa on center; 5W/m/K
0.002dpa on edge; 10W/m/K

If the decrement of conductivity is proportional to radiation dose, the distribution for the thermal conductivity corresponds to the beam profile.

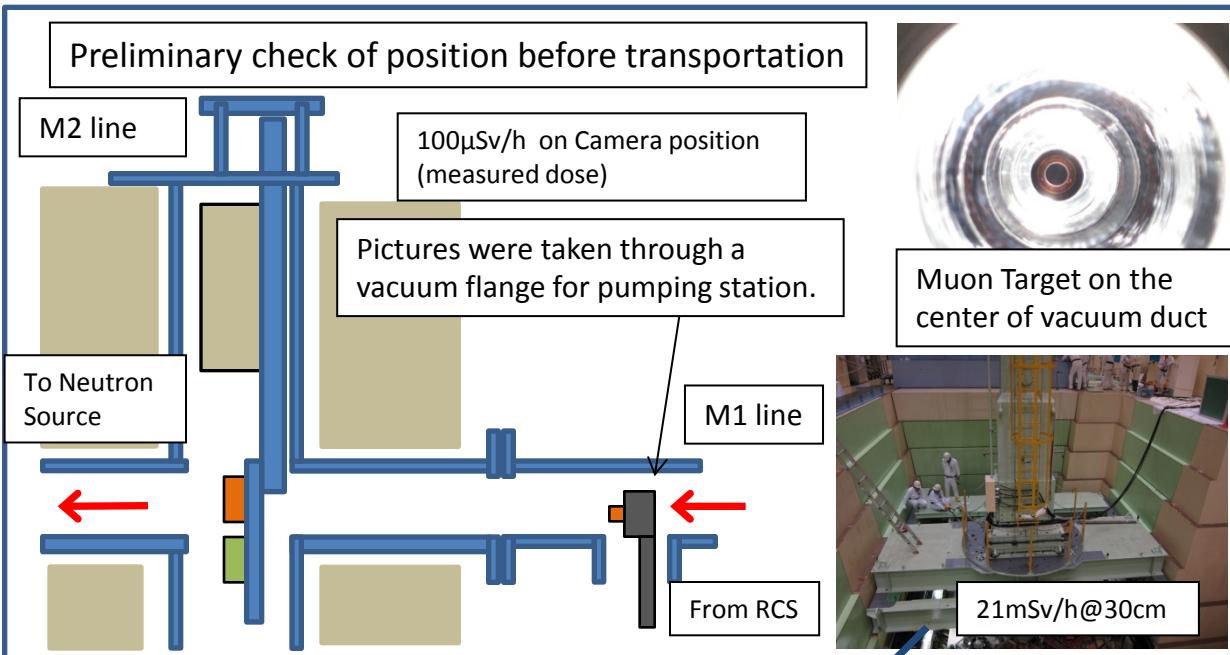
Commissioning in Summer, 2011

- ① Measurement of Used Target position
(Check of the distortion by the Earthquake)
- ② Measurement of the radiation damage to thermal conductivity of graphite

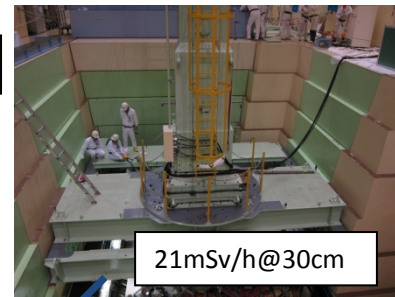
Measurement in Hot cell



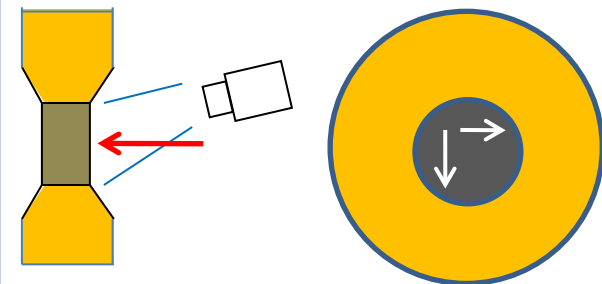
- ① Measurement by Laser displacement meter



Muon Target on the center of vacuum duct



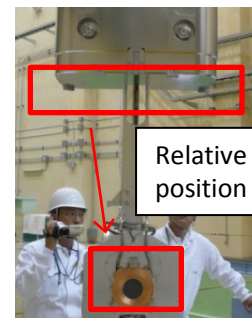
2-dimensional thermo-viewer



Variant frequency LD

- ② Measurement of Thermal conductivity

- ① Measurement of Target position
Originally the muon target was relatively located within $\pm 0.5\text{mm}$ precision to the pins of the target chamber in the beam line.
Resolution; Below $\pm 0.1\text{mm}$



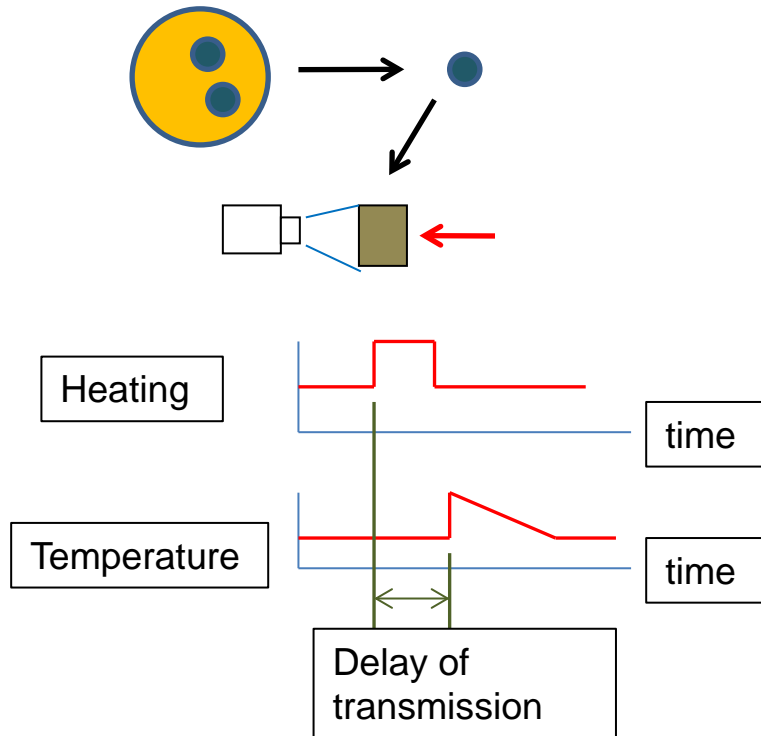
Commissioning in Summer, 2011

Radiation damage to thermal conductivity of graphite

Thermal diffusivity are measured instead of Th. conductivity.

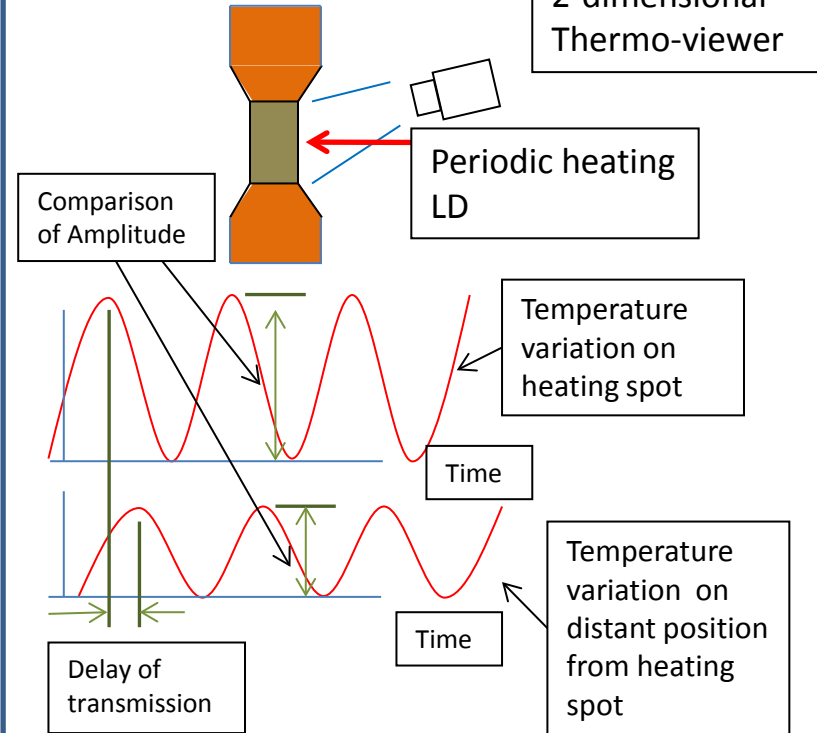
$\lambda = D\rho c$ (λ ; Th. Conductivity(W/m/K), D ; Th. diffusivity(m²/s), ρ ; Density (kg/m³), c ; Th. Capacity (J/kg/K))

Conventional Method (Laser flash method)



The target must be destroyed.
We must consider the scattered radioactive powders.
The spatial resolution is limited by sample size.

Laser Spot Heating Method



Non-destructive measurement
Target can be used again.
Measurement for History of rad. damage
High spatial resolution

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

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 $Pe^{i\omega t}$ 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)

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

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)

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

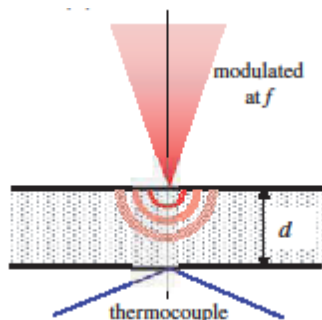
すなわち位相遅れの距離 r 依存性または周波数 f 依存性を計測すれば D が求まる。

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。

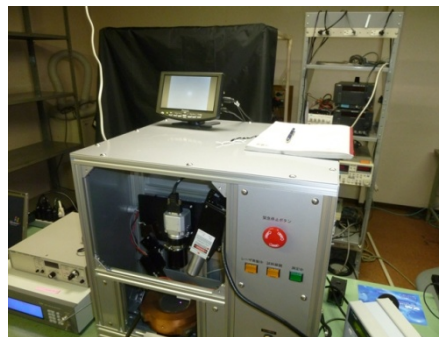
(H. Kato et al., Meas. Sci. Technol. 12 (2001) 2074-2080)

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である。



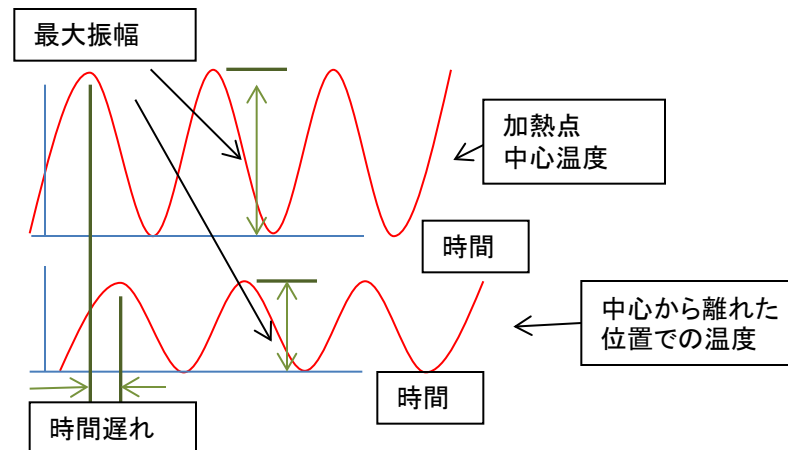
実際の装置開発



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いのでカメラの感度を考慮したSN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。

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。



Theoretical Background of this technique

Thermal transport equation

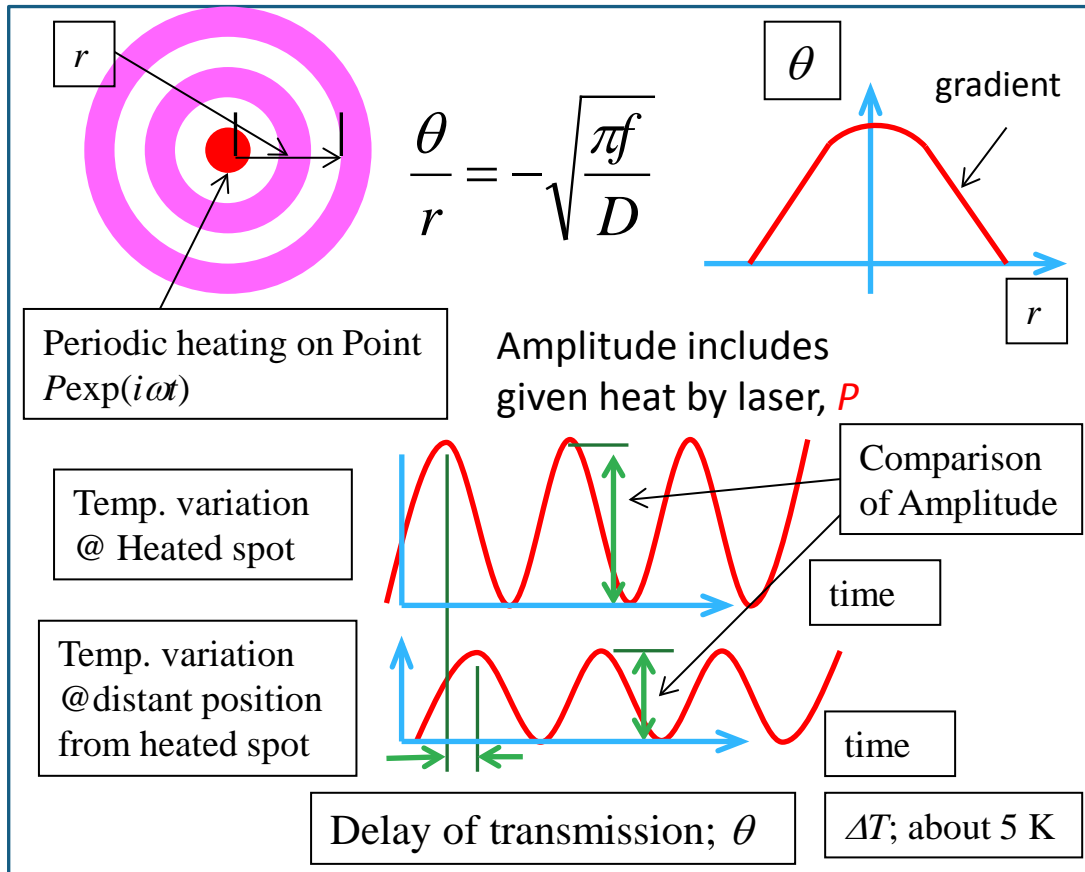
D; Th. diffusivity(m²/s), ρ; Density (kg/m³), c; Th. Capacity (J/kg/K)

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

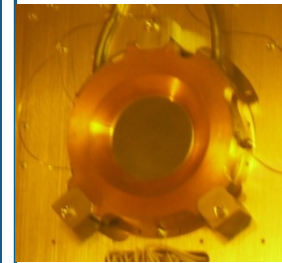
Amplitude
θ

$$k = \sqrt{\frac{\omega}{2D}} = \sqrt{\frac{\pi f}{D}} = \lambda^{-1}$$

Carslaw H S and Jaeger J C 1959 Conduction of Heat in Solids (Oxford: Clarendon)p 263



Feasibility of Apparatus



Thermo-meter

Distribution of Th. Cond. must be measured.

2-dimensional infrared thermo-meter

Expensive!!

Evaluation by Delay

High quantitative performance

Evaluation by Amplitude

Low quantitative per., but low costs

Relative measurements based on an exact Th. Cond., obtained by other technique (Laser flash method).

Un-irradiated Th. Cond. 170W/m/K

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。

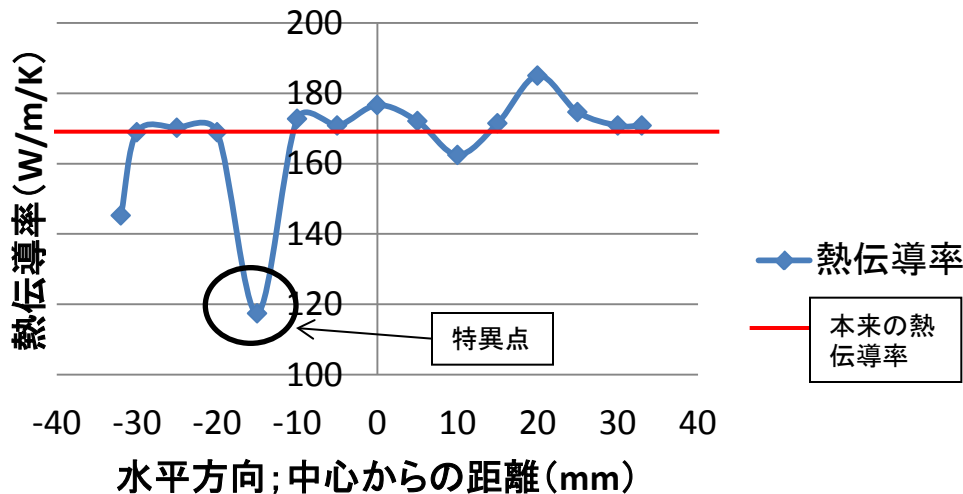
改善案;

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。

未照射標的の熱伝導率

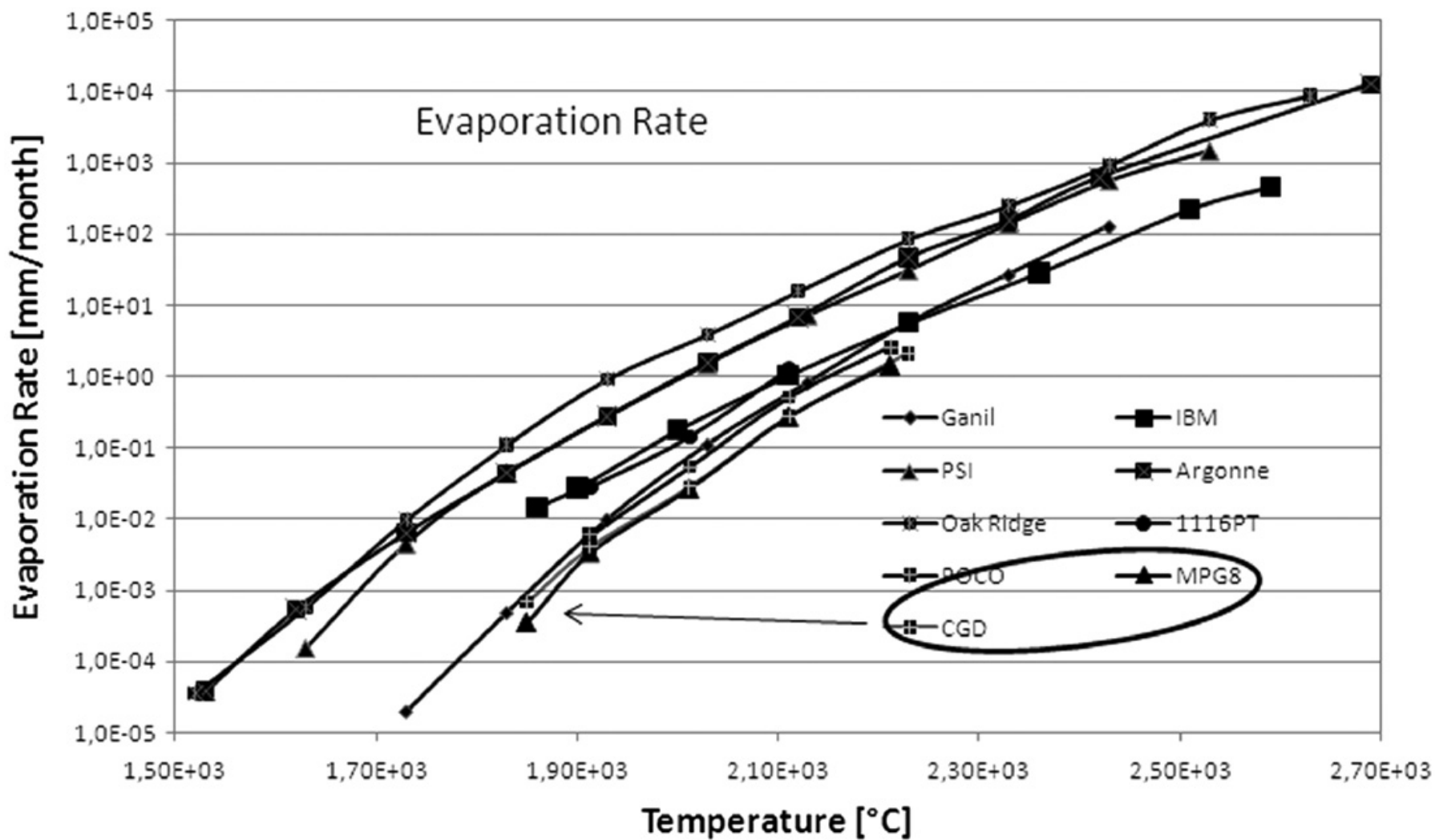


	照射中心	照射外周	未照射中心	未照射特異点
回数	10	10	10	3
最大値 (W/m/K)	14.5	55.6	186.5	118.1
最小値 (W/m/K)	14.1	54.2	175.3	117.5

再現性の確認

再現性はある。表面状態などの影響か？

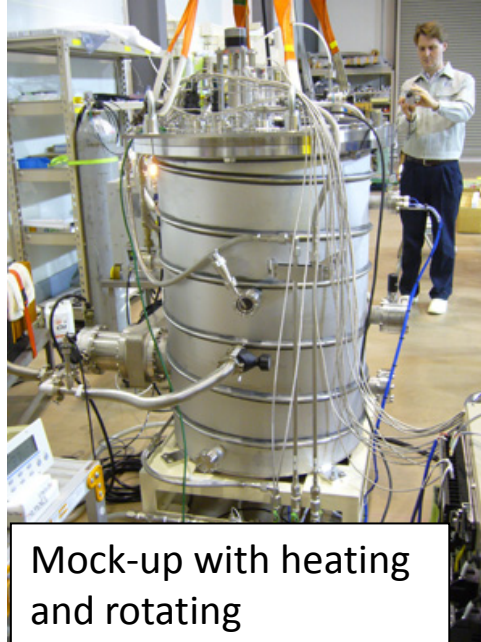
黒鉛の真空中の蒸発量



黒鉛の蒸発速度 (M.S. Avilov et al., NIM A618 (2010) 1)

回転標的の開発

ミュオン標的の長寿命化のために黒鉛材の放射線損傷を分散させる。黒鉛材寿命;30年。
ベアリングの寿命が重要。目標寿命;10年。
固体潤滑材を比較検討するために加熱回転可能な軸受寿命評価機を製作した。現在、試験は進行中。
ビーム運転でモーター電流によって軸受の健全性や損傷度を計測するための制御系を構築中。
回転標的実機を製作し、遠隔操作コミッションングを2012年の夏に実施する。
2013年夏にビームラインへ導入予定。

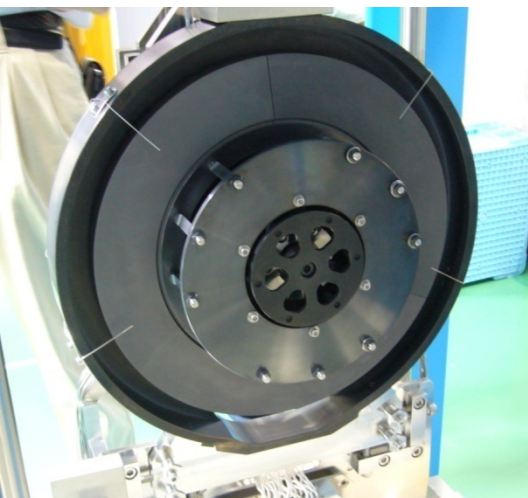


Mock-up with heating and rotating

Rotating Target to be installed



Durability tests of bearings



Rotating Target



The control system fabricated by Kobayashi



Disassemble and Observation

