

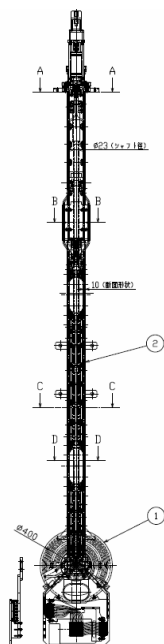


OHO23
9/5, 2023

ミュオン標的とその運用

KEK 物質構造科学研究所

J-PARC 物質・構造科学ディビジョン ミュオンセクションの
的場史朗

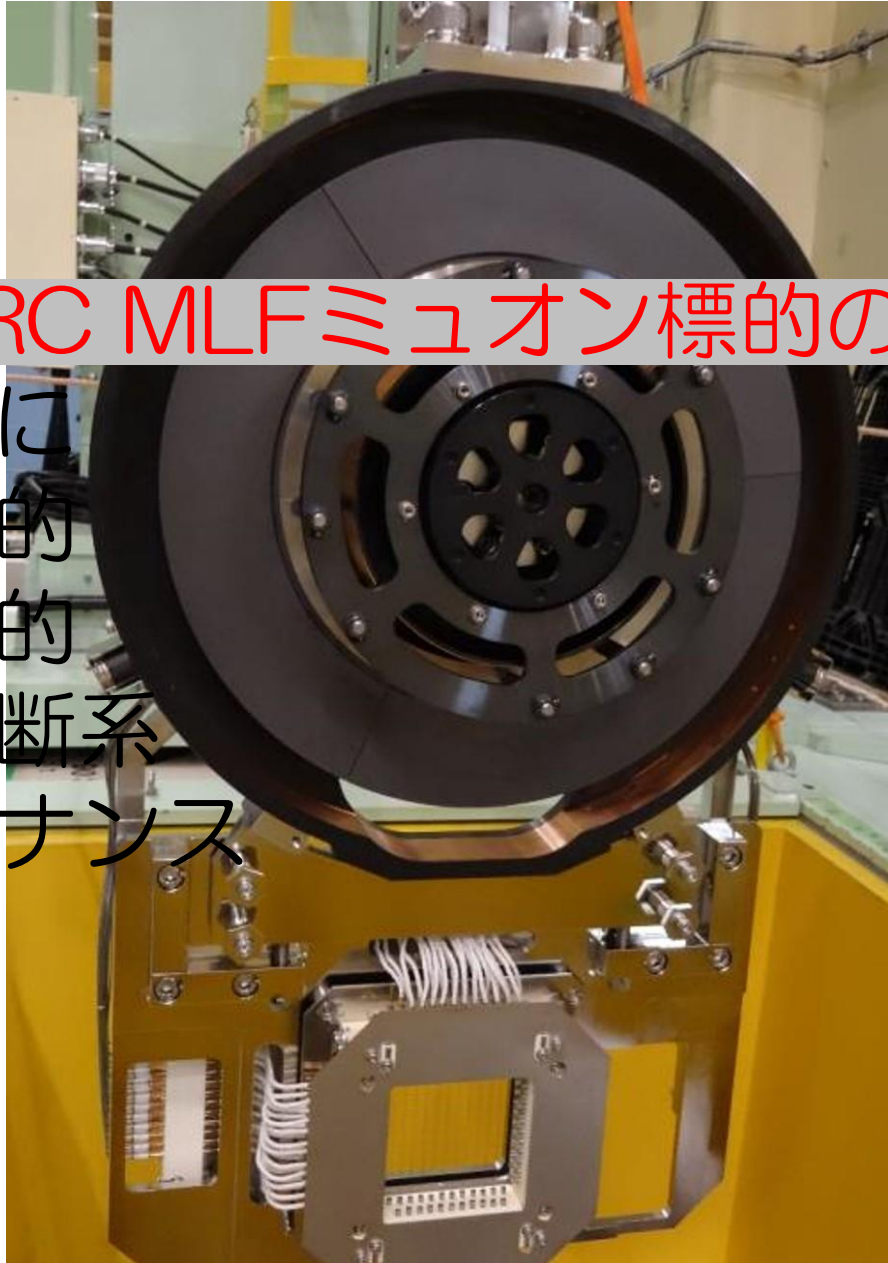


~2.5 m

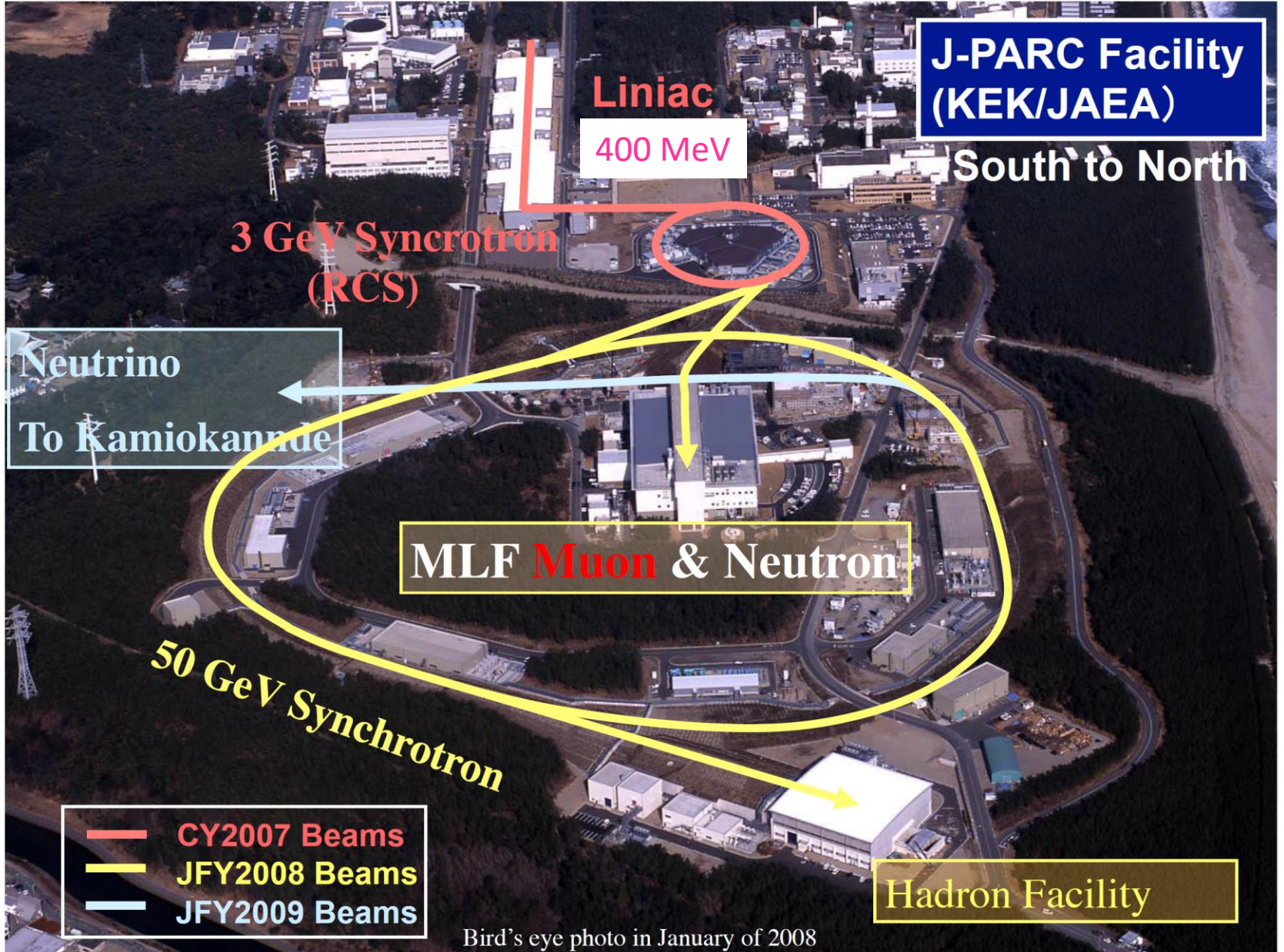


目次

- J-PARC MLFミュオン標的の簡単な紹介
- はじめに
- 固定標的
- 回転標的
- 安全診断系
- メンテナンス



J-PARC

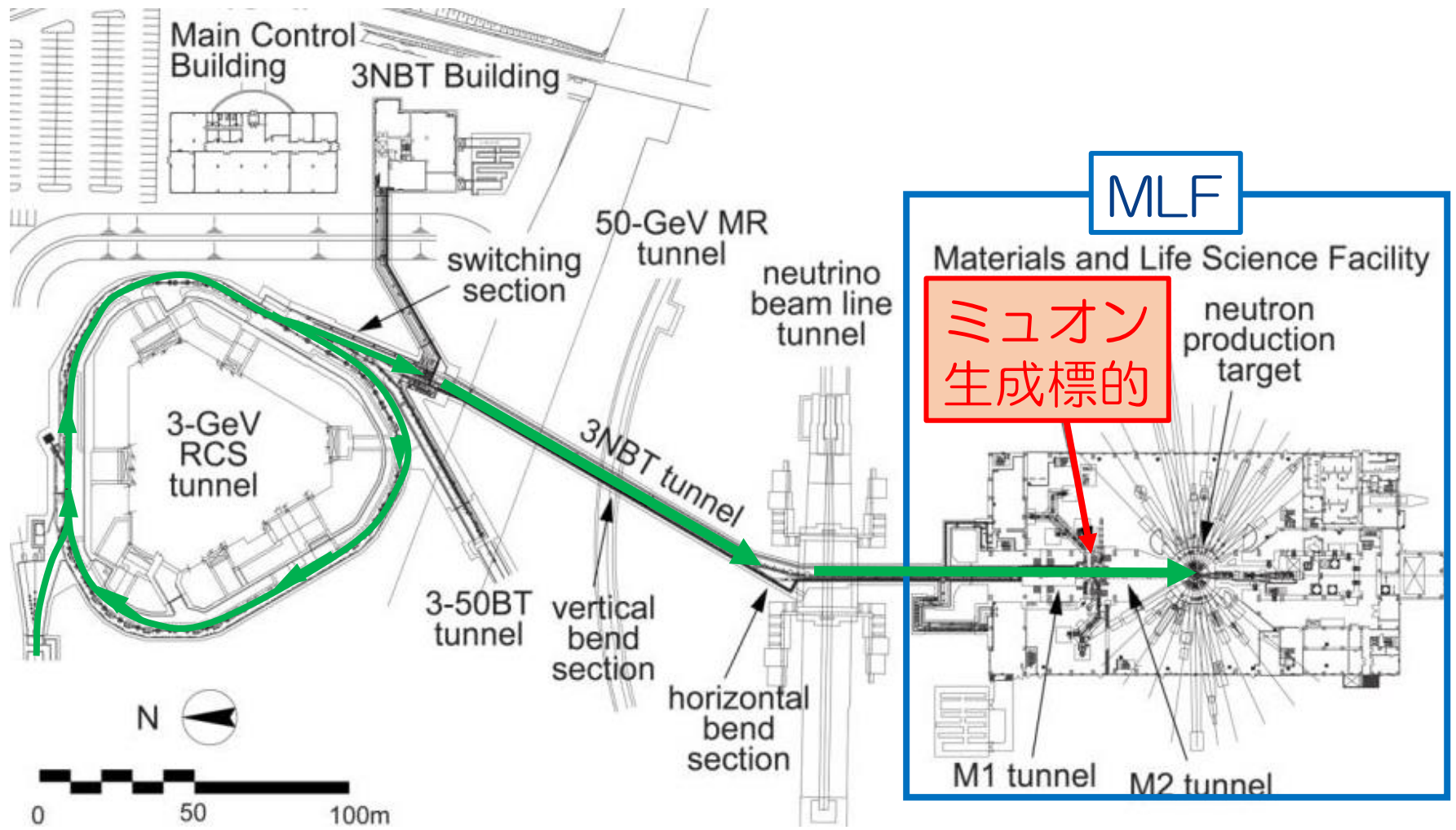


J-PARC MLF

● 1 MW陽子ビーム

3 GeV, 0.33 mA, 25Hz

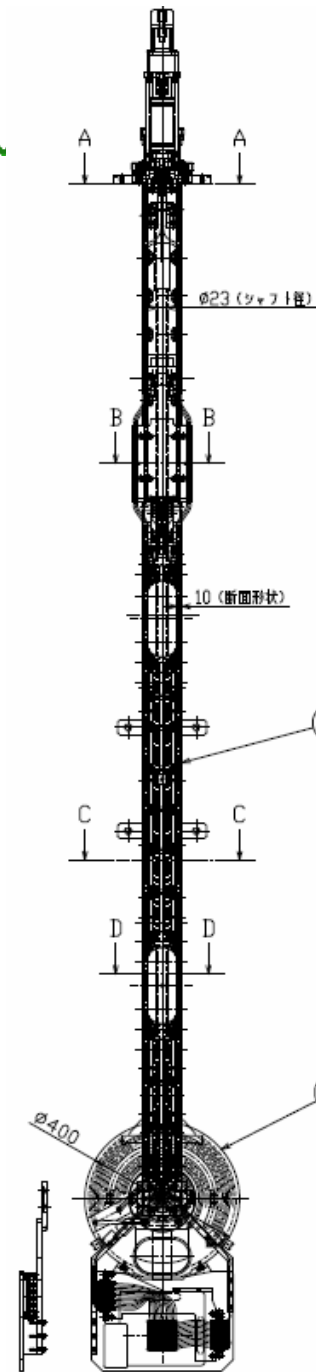
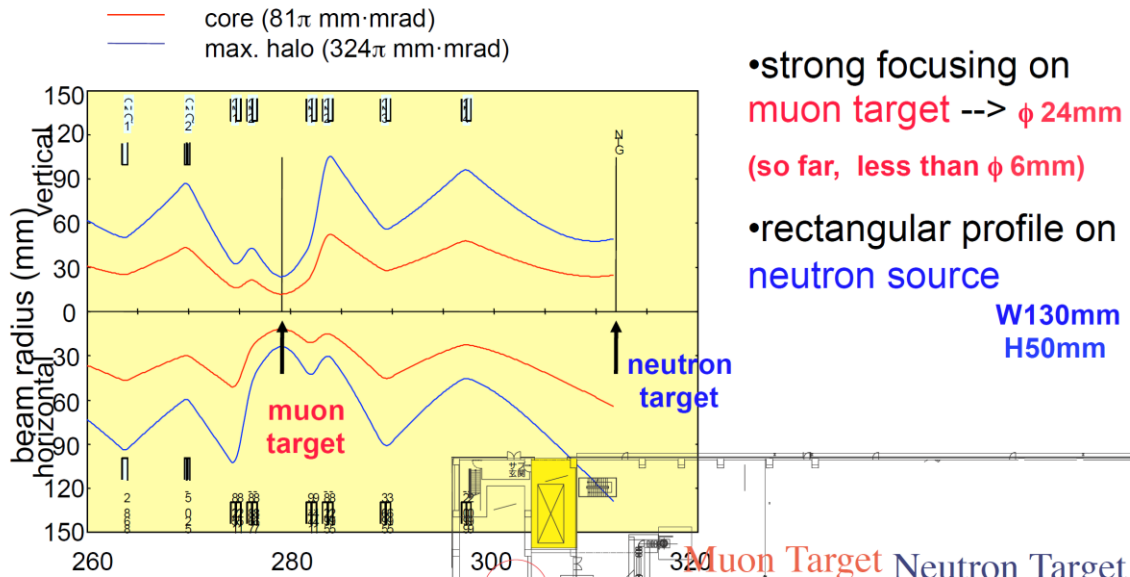
Double pluses, パルス幅~100 ns, 間隔~600 ns



ミュオン生成標的(回転標的)

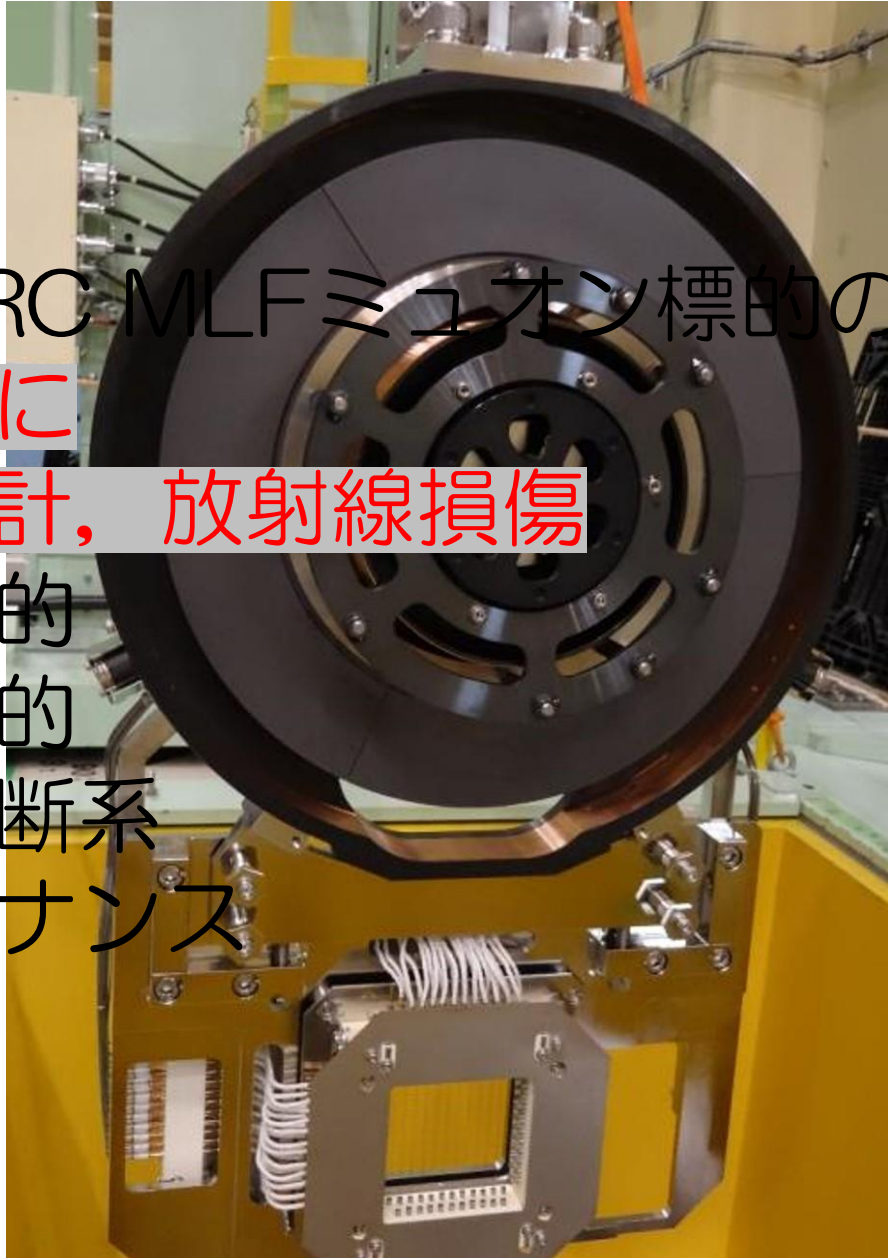
- 等方性黒鉛
- 厚さ2 cm, 直径33 cm
- 15回転/分
- 3.9 kWの発熱(1 MW時)
最大920 K程度(計算値), 輻射冷却
- 陽子ビーム径
- 寿命~10年程度の見積もり(軸受け)

Proton Beam Envelope



目次

- J-PARC MLFミュオン標的の簡単な紹介
- はじめに
標的設計, 放射線損傷
- 固定標的
- 回転標的
- 安全診断系
- メンテナンス



標的設計

● 標的に要求される設計

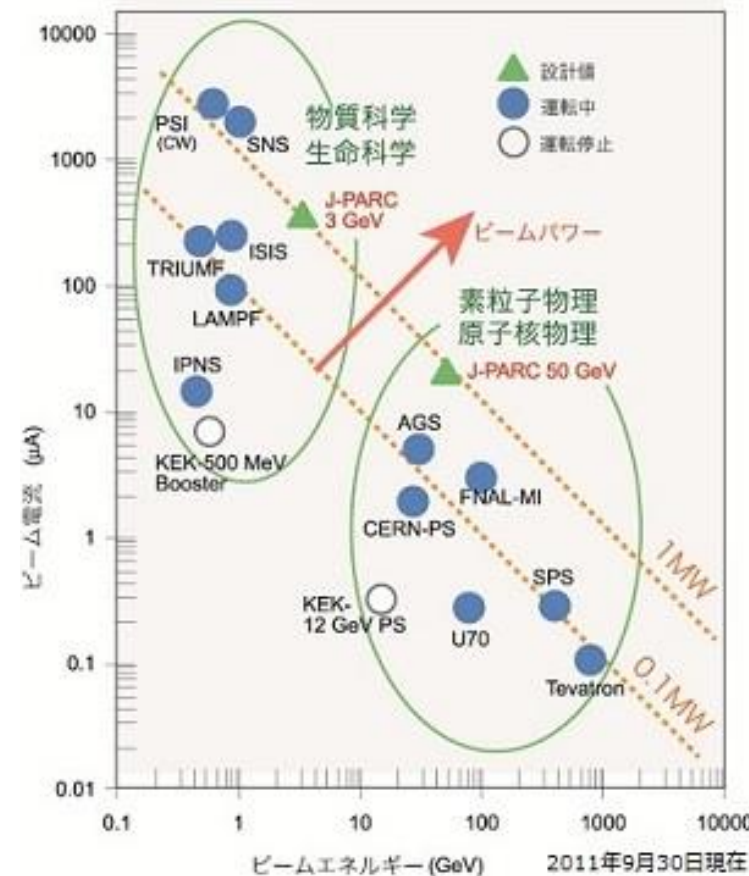
1) 二次粒子利用の目的(収量, 輝度, ビームサイズ等々)
MLFは多目的パワーフロントティア施設

2) ミュオン収量最大化のための標的材料, 形状, 二次ライン設計
(次の講演)

3) 標的材や周辺機器の熱解析, 構造解析,
耐放射線性

4) 遮蔽, メンテナンス(含む遠隔操作),
放射化物処理等の計画・設備

上記が様々な制約の中で工学的に成立するか?



標的材料としての黒鉛

真空内での耐熱温度

黒鉛は融解しないで表面から蒸発する。

1 mm/月 @ 2000°C

0.001 mm/月 @ 1600°C

瞬間的な温度上昇では2000°C以下、
10年継続使用には1600°C以下で使用
可能。回転標的では700°C以下。

熱衝撃

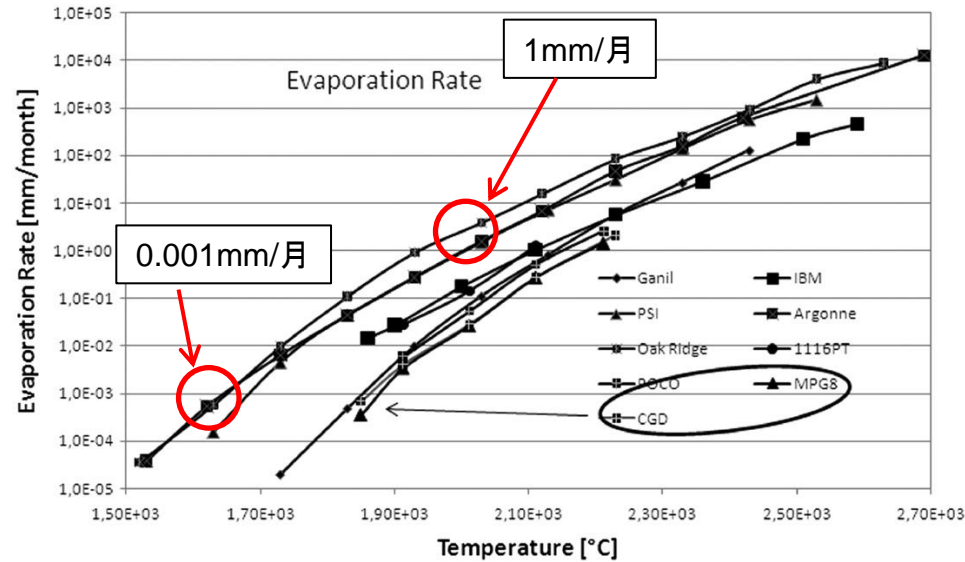
黒鉛は密度が小さいので発熱密度
が小さく、ヤング率が小さいので熱衝
撃に強い。

ヤング率

・金属: Al 70GPa-W 400GPa

・黒鉛: 10GPa

繰返し応力に強い



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

熱応力

E; ヤング率 10.8GPa

α ; 線膨張係数 4.8ppm/K

ρ ; ポアソン比 0.21

$$P = \frac{E\alpha\Delta T}{1 - 2\rho}$$

最大シビアビーム条件 (4kW、直径8mm)

温度上昇; 146°C、熱応力; 13MPa (応力強さ90MPa)

放射線損傷の指標(DPA)

損傷の原因は、材料中の原子の移動に起因

●吸収線量：Gy

放射線の照射によって単位質量あたりの物質が吸収するエネルギー量

※照射損傷は放射線の種類やエネルギーによって異なる

●平均はじき出し原子数 DPA (Displacement per Atom) : dpa

1 dpa = 全原子が平均的に1回は格子位置から弾き飛ばされる

$$DPA = \Phi t \sigma_d$$

Φ : フラックス, t : 照射時間, σ_d : はじき出し断面積

衝突カスケードによって損傷は局所的に起こる

格子間原子空孔のペア：フレンケル対

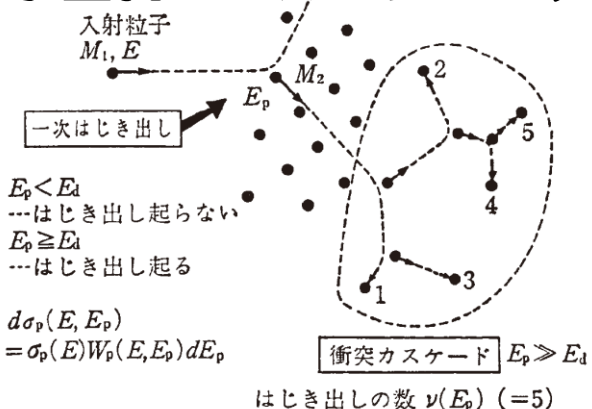


図1 照射損傷計算の基本的考え方。一次はじき出し原子の生成

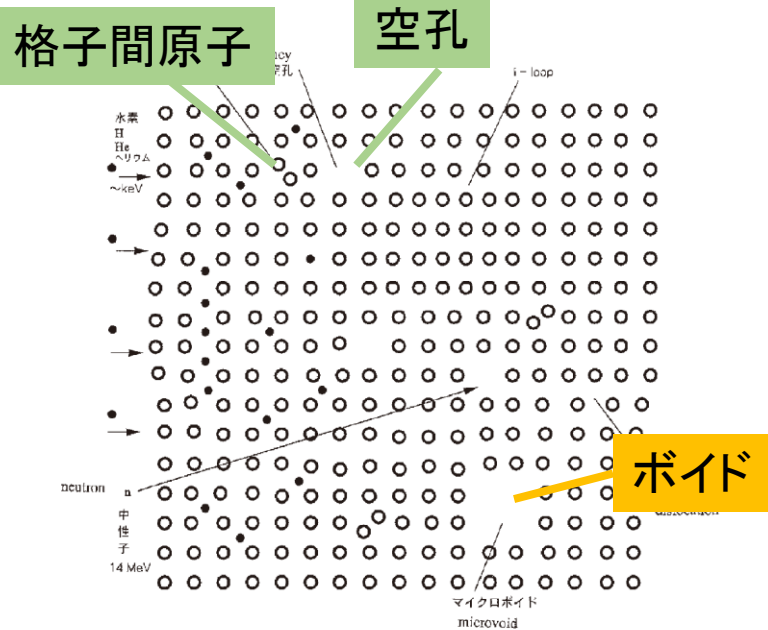
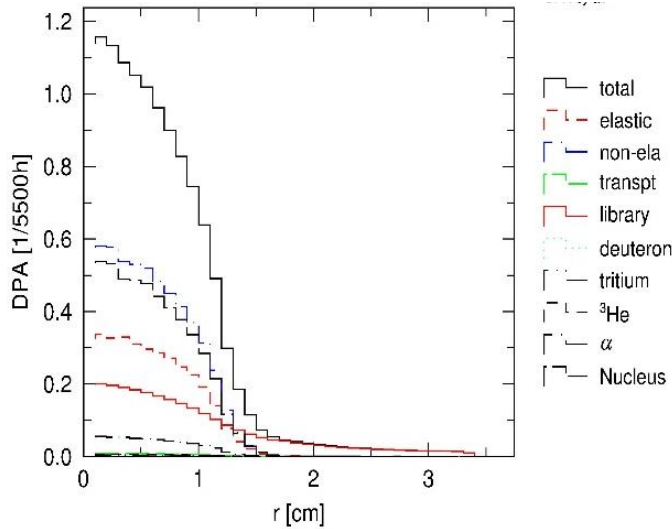
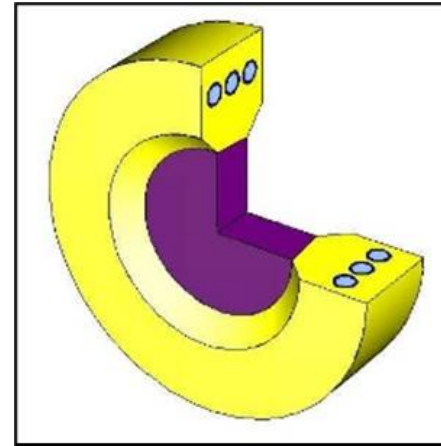


図5 種々の欠陥の模式図、結晶の表面から粒子の照射を受けている状態。

ミュオン標的的のDPA



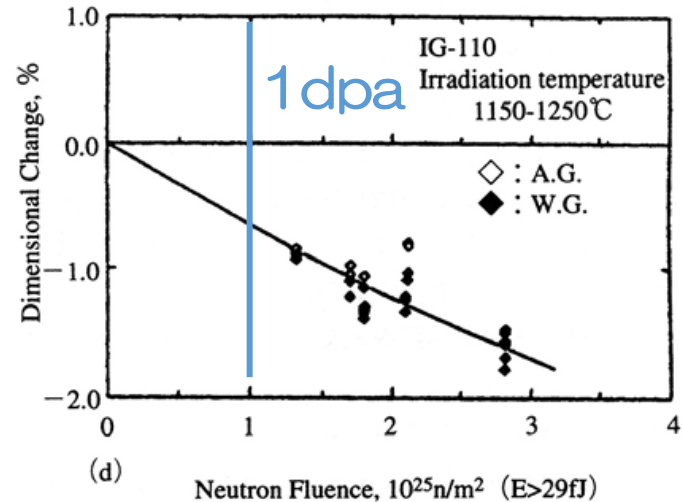
黒鉛のDPA (横軸は半径)



計算モデル (固定標的を模してあり, 中心に2cm厚黒鉛円板, その周囲に銅製フレームと冷却水配管を配置)

- 空孔・格子間原子が移動し, 対消滅やボイドの成長
→ 損傷は材料温度にも依存

中性子照射量に対する等方性黒鉛材料寸法の変化量. 照射中温度: 1150-1250°C
1 dpaで約0.8%の収縮



松尾秀人, “原子炉用黒鉛および炭素材料の照射損傷”, 炭素TANSO 150 (1991) 290.

黒鉛材料の寿命

中心部のみ収縮し，他は寸法変化なし
→引っ張り応力発生

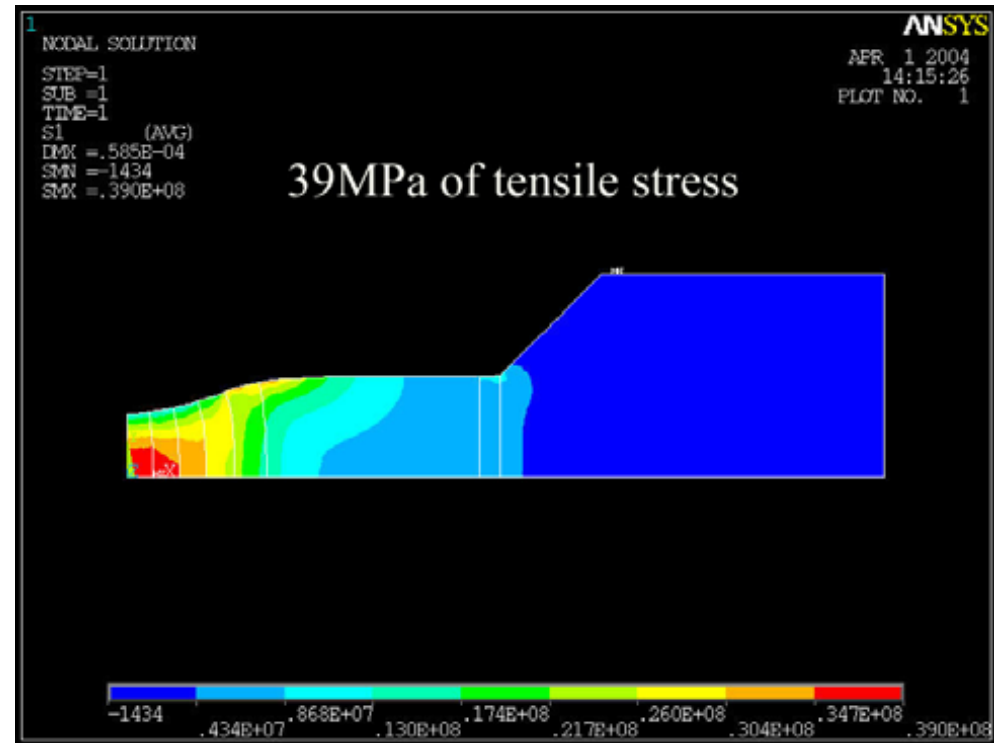
有限要素法による解析

- ANSYS
- 0.5%収縮(1 MW, 半年)

標的中心周辺で黒鉛材の引っ張り応力強さ38 MPaと同程度の引っ張り応力が発生

→1 MWだと半年で黒鉛材の寿命

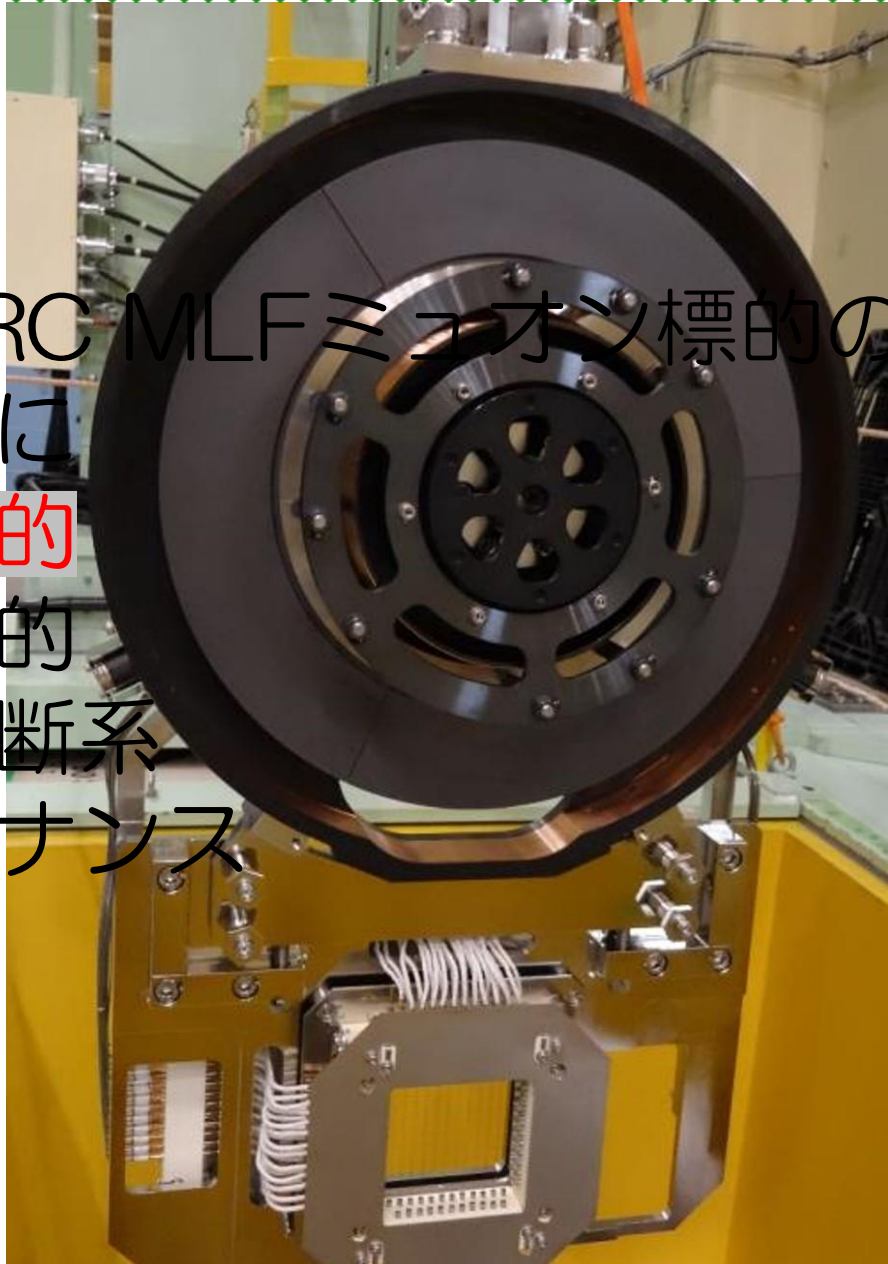
- ①最初は固定方式にて経験を蓄積
- ②J-PARC出力上昇に合わせて回転方式を導入



黒鉛材の放射線損傷による収縮に伴う
応力分布図。

目次

- J-PARC MLF ミュオン標的の簡単な紹介
- はじめに
- 固定標的
- 回転標的
- 安全診断系
- メンテナンス



固定標的概要

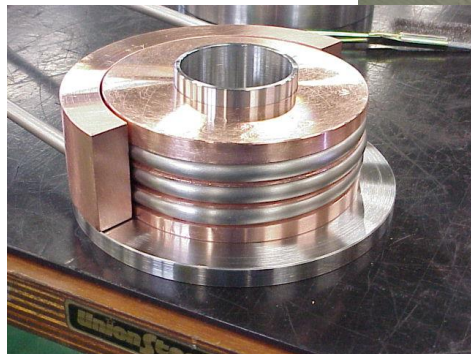
等方性グラファイト
IG-430U (東洋炭素)
直径: 70mm
厚さ: 20mm

陽子ビーム径: 16 mm (2σ)
4kW加熱 @ 1MW 陽子ビーム

2mmTiリング
(応力吸収)

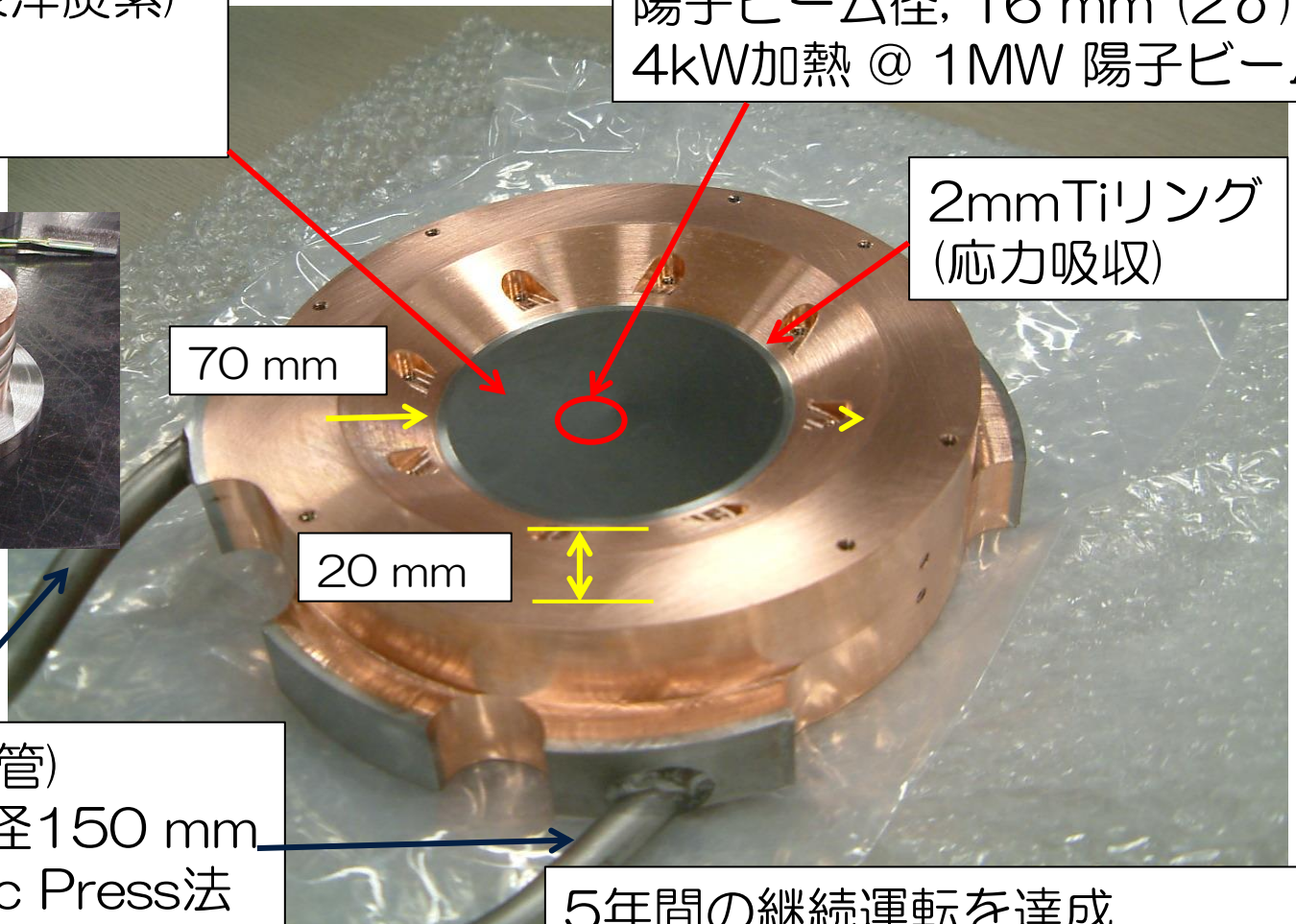
70 mm

20 mm



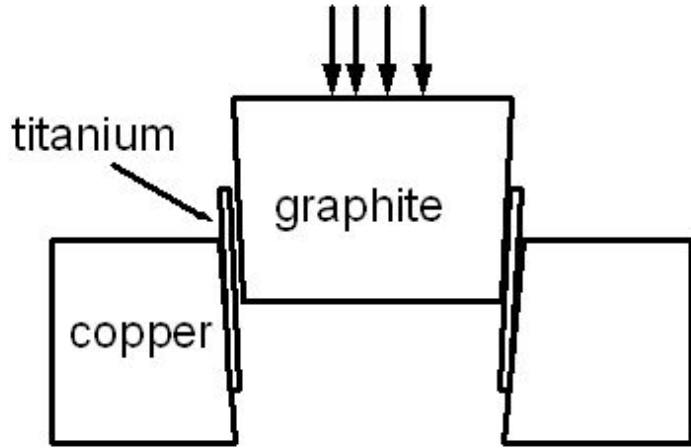
SUS冷却水配管)
銅フレーム外径150 mm
Hot Iso-static Press法

5年間の継続運転を達成
(ISIS/RAL; @200kW, 寿命~1年)



熱による寸法変化

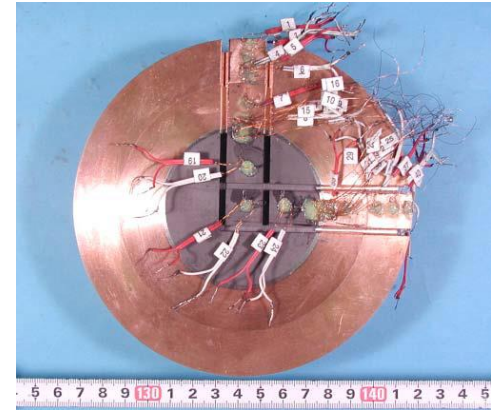
- 英国ISISでは、熱膨張の繰り返し疲労により破損
→銅と黒鉛の中間の熱膨張係数のチタンを緩衝材に使用



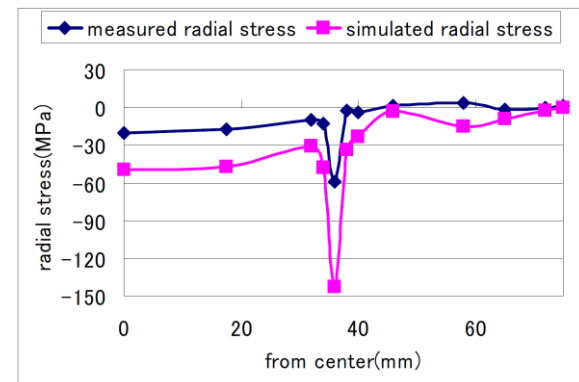
真空銀ロウ付けの概念図。
チタンリング及び黒鉛材を約 3° のテーパで挿入
50ミクロンの銀箔を黒鉛-チタン界面およびチタン-銅界面に挿入

700度で銀ロウ付け

焼き嵌め状態による圧縮20 MPaを差し引き、0.8 dpaが固定標的の寿命

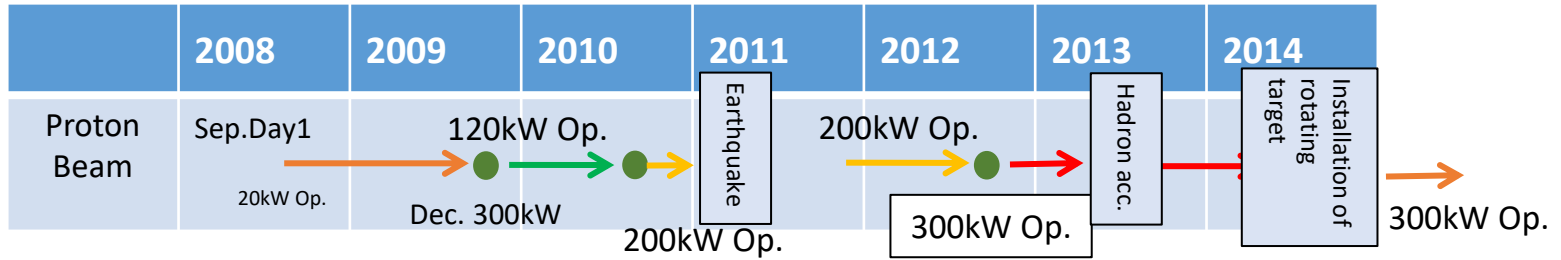


ひずみゲージを使用した残留応力の測定



半径方向の残留応力。●は測定値、■は計算値。黒鉛部ではおおよそ20 MPaの圧縮応力

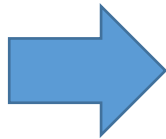
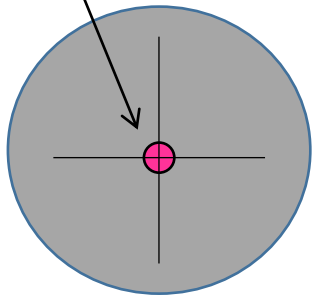
固定標的概要



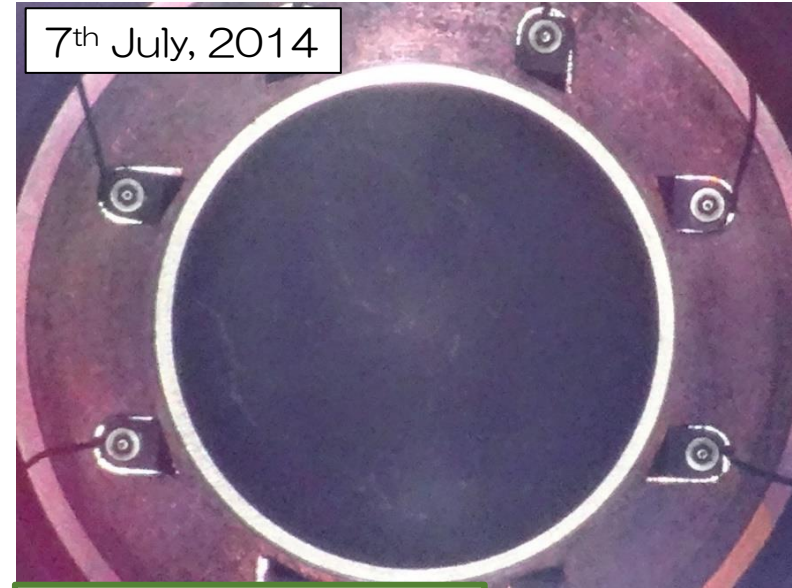
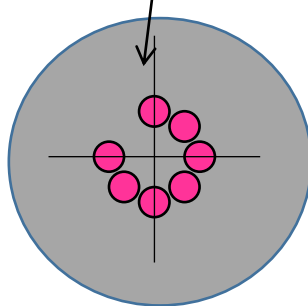
- 照射損傷による黒鉛の収縮
固定標的の寿命
< 1year @1MW beam operation

EXILE運転～2012
三週間毎にスポット移動

Beam spot



Beam spot

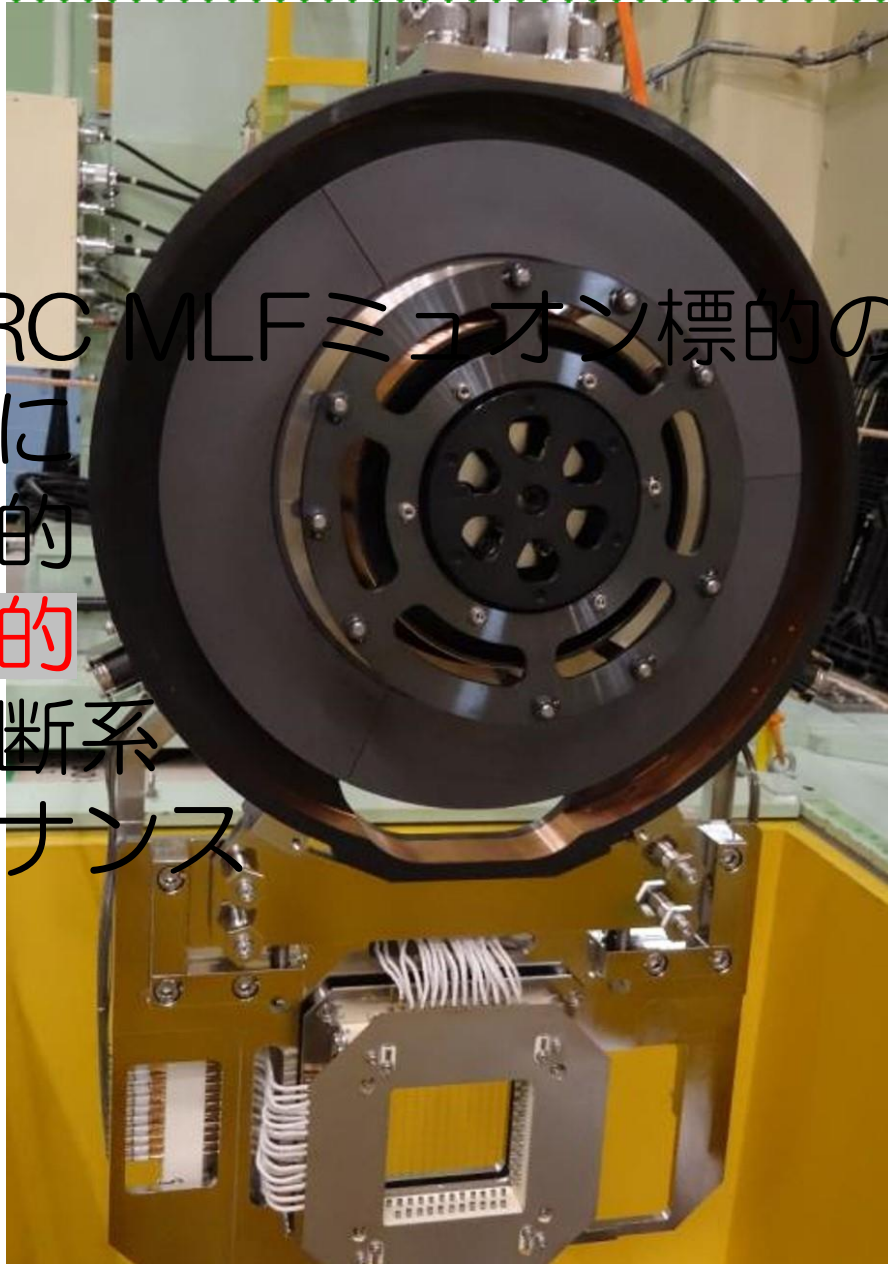


クラックは観測されず

- 回転標的へ更新

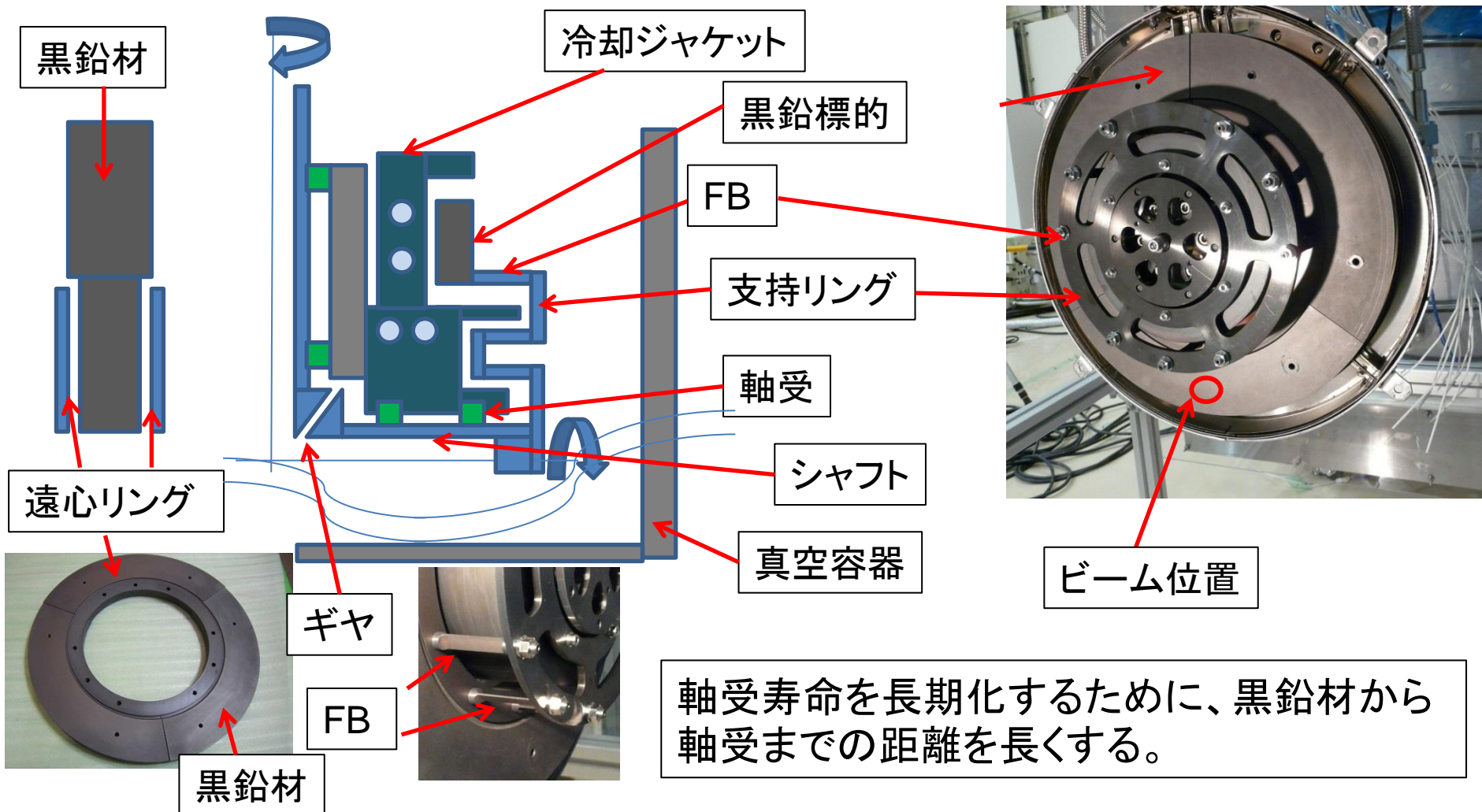
目次

- J-PARC MLF ミュオン標的の簡単な紹介
- はじめに
- 固定標的
- 回転標的
- 安全診断系
- メンテナンス



回転標的基本構造

- ① 黒鉛材; 三分割された黒鉛標的材料
- ② 標的支持材; 遠心リング、(FB)、支持リング、シャフト
- ③ 軸受 ④ 冷却ジャケット ⑤ 真空容器



固体潤滑剤型軸受け JTEKT(KOYO) カタログより

放射線; **100MGy/年**、真空; **10⁻⁵Pa**、高温; **150°C**、ラジアル荷重; **33N**、スラスト荷重; **20N**

I.D. =17mm, O.D.= 40mm, w=12mm, 隙間C4

	形式	耐熱 (°C)	圧力 (Pa)	放射線	保管	寿命 (時)
MoS ₂	リテーナ	<300	10 ⁵ to 10 ⁻⁵	一般的	大気	1100
WS ₂	<u>セパレータ</u>	<350	10 ⁵ to 10 ⁻⁵	<u>例は少</u>	<u>大気</u>	<u>110000</u>
AIP-Ag	<u>リテーナ</u>	<350	10 ⁻³ to 10 ⁻¹⁰	<u>一般的</u>	<u>真空</u>	<u>5800</u>

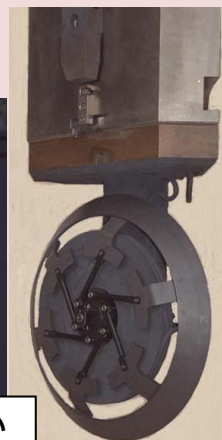


PSI方式



M target

ビームロスなどはMUSEに近いが、軸受と標的の距離が離れている。寿命10年以上。



寿命1年

E target

G. Heidenreich, Batavia Illinois 2002, Proc. AIP 642, 122 (2002).

- 二硫化モリブデン; 汎用固体潤滑材
- 二硫化タングステン; 有望な候補
使用実績が少ないが潤滑材の量が多く寿命が圧倒的に長い。
- 銀コーティング;
使用実績はあるが寿命が短い。
真空内保管に注意が必要。

黒鉛材寿命; 30年。軸受寿命が重要となる。目標寿命; 10年。

回転体

温度差による熱応力

黒鉛材 フラットバー(FB)

遠心リング; インコネル材

- ◆ 黒鉛材の回転による遠心力をフラットバーに負荷しない。
- ◆ 黒鉛材内の温度差を低減し、遠心リングの温度を低くするために黒体化処理しない。

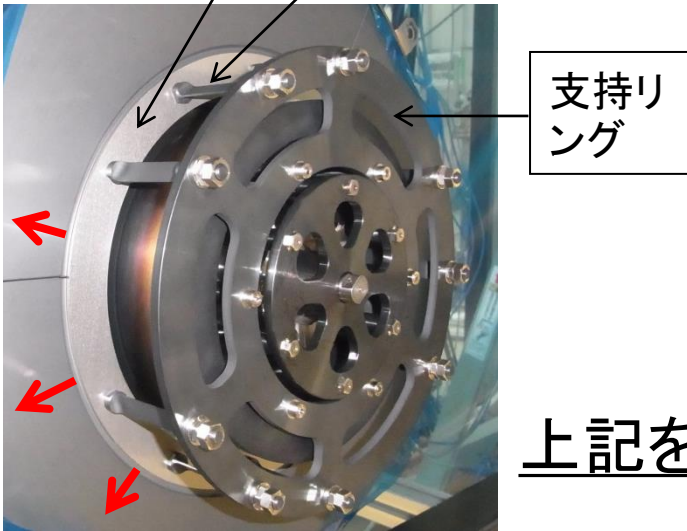
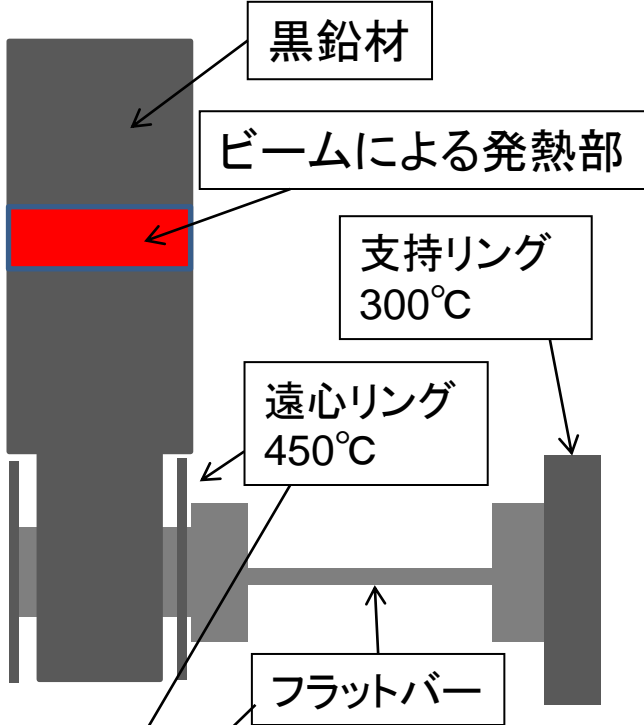
フラットバー(FB); インコネル材、耐力 200MPa

- ◆ 黒鉛材を保持する片持ち梁
- ◆ 回転体の慣性モーメントを急停止
(厳密には適用できないが、断面二次モーメント、断面二次極モーメント)

300 r.p.m.を0.5秒で停止させても1MPa

- ◆ 遠心リング、支持リング間の温度差
 $450^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C} = 150^{\circ}\text{C}$ (後述評価)
80MPa (両端回転拘束で熱伸び分の変位)

上記を考慮し、評価、試作機による試験を実施。



回転加熱試験機

このあたりだけ模擬

確認事項

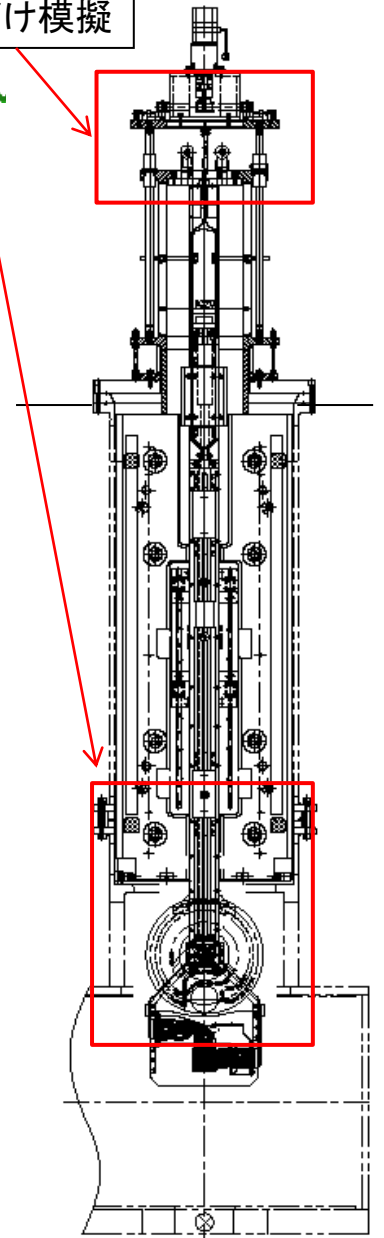
軸受寿命、標的本体の構造。冷却ジャケットの製作。モーター、真空回転導入、制御系など。

仕様

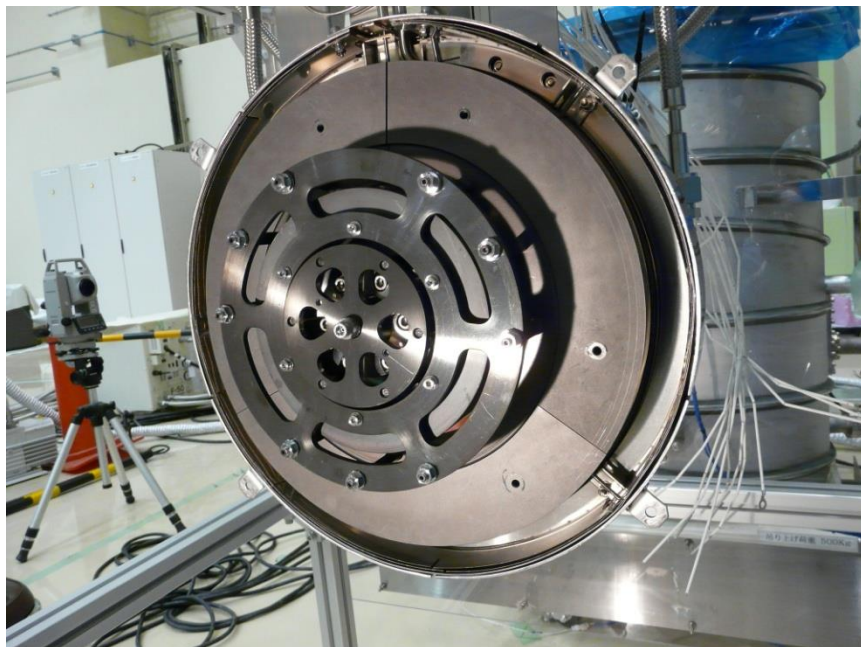
黒鉛750°C(陽子ビーム1.4MW相当)まで加熱。

回転標的先端のみ製作し、付随する問題点を洗い出す。実機と同じ回転数だと10年近く回転させないと結果が出ないので、**高速回転。(実機15 r.p.m.に対して300 r.p.m.)**

二週間連続試験(ビームラインにて1年分相当)。



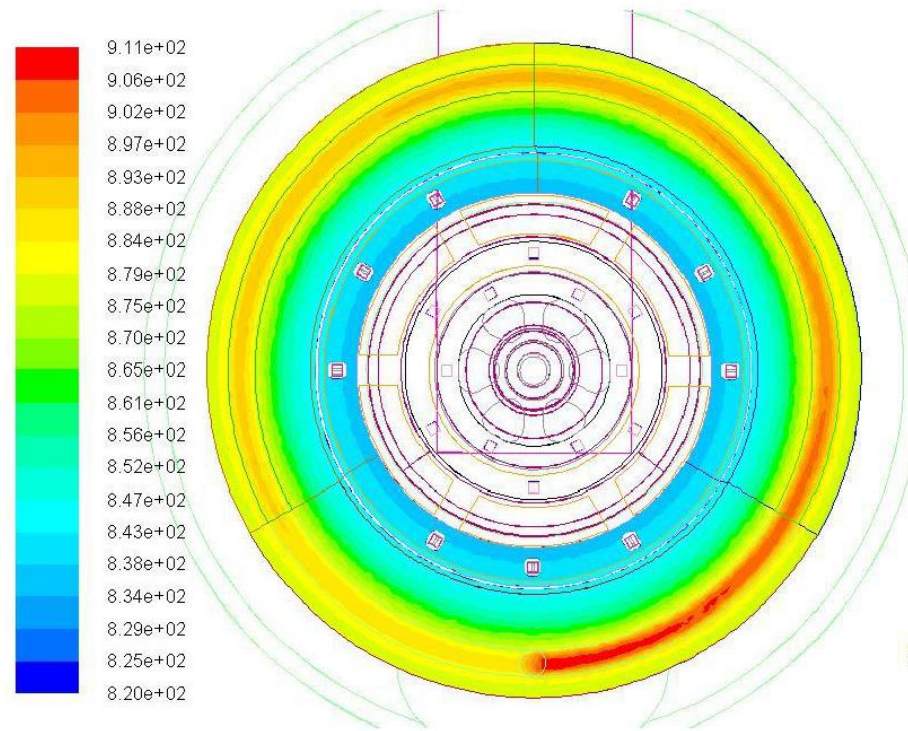
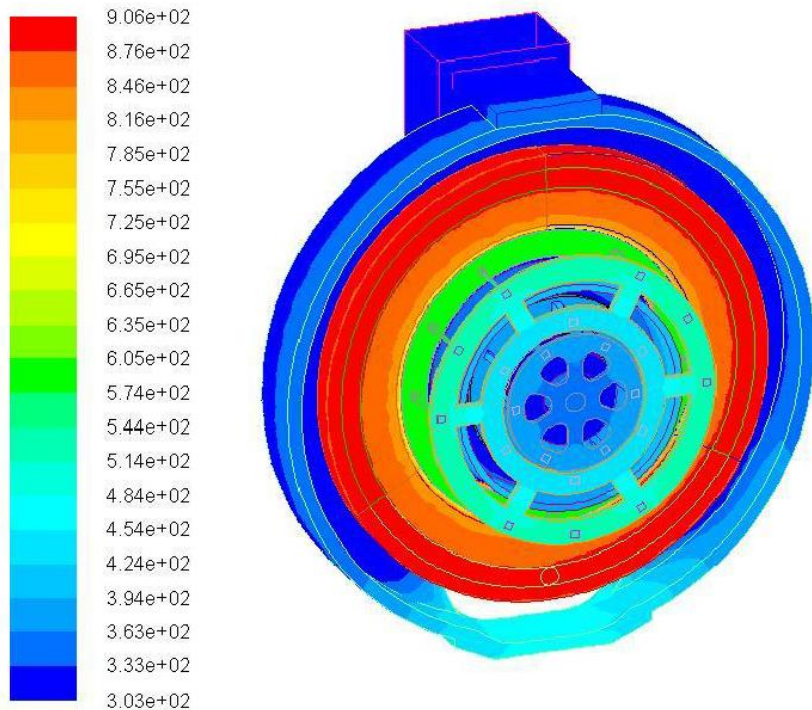
加熱試験機では遮蔽体は模擬しない。



有限要素法による評価(回転機構)

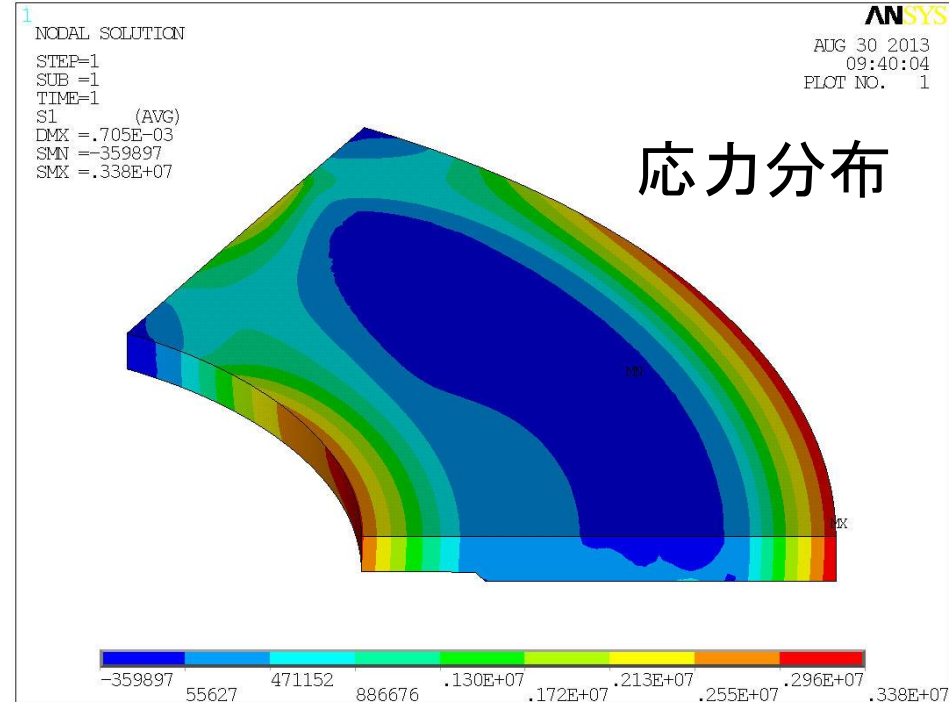
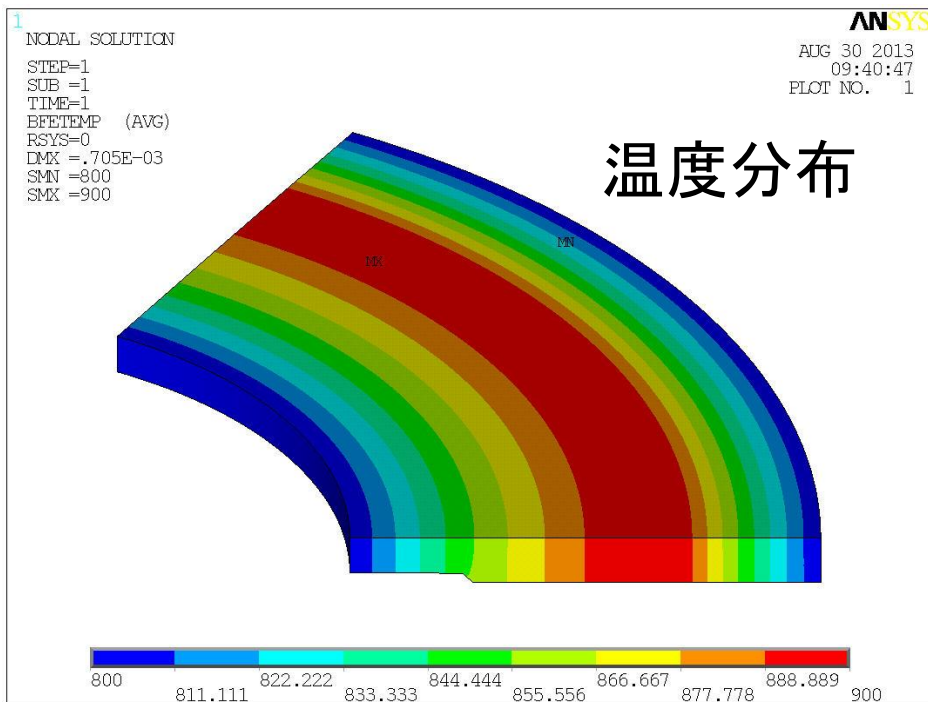
- ◆ 黒鉛内の温度差は100°C程度
- ◆ FB温度差;80°C、軸温度;140°C

誤差を考慮しながら、厳しい条件で試験に採用する。

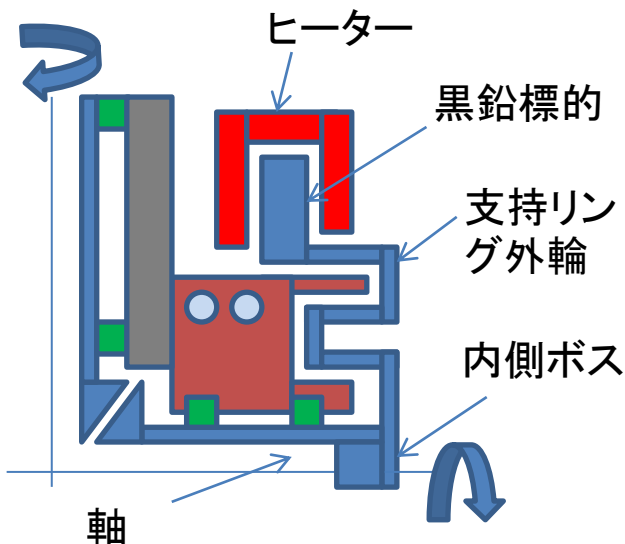


有限要素法による評価(標的黒鉛)

黒鉛上の100°Cの温度差
(ビーム照射部900K、外周、内周800K)
応力は3 MPa(引張強さは39 MPa)



解析と模擬実験の比較



陽子ビームラインでの軸温度(評価値); 120 °C

試験機での目標温度; 140 °C

陽子ビームラインでは黒鉛標的から支持リング外輪への輻射の影響が大きい。試験機ではヒーターリフレクターで抑制される。

FBの温度差、軸温度、計算誤差を考慮し試験機では過酷な条件を採用。

黒鉛材; 650 °C (陽子ビームライン)

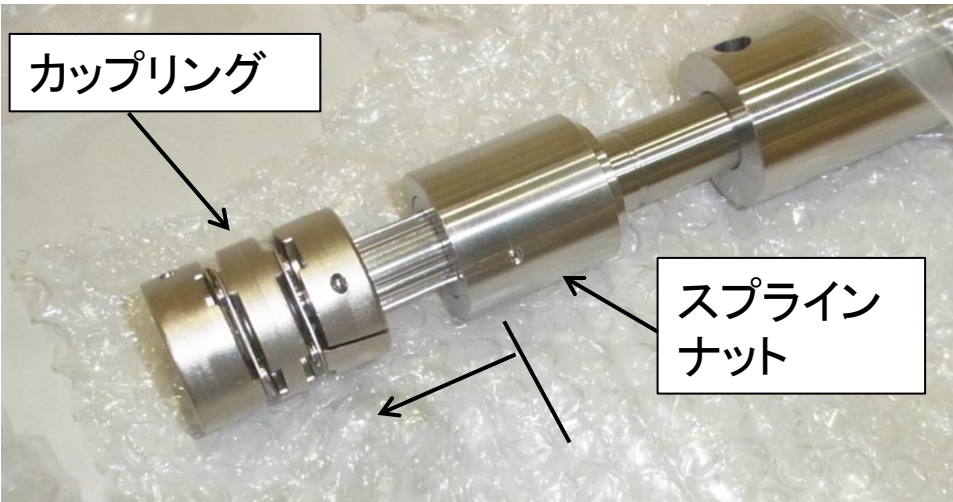
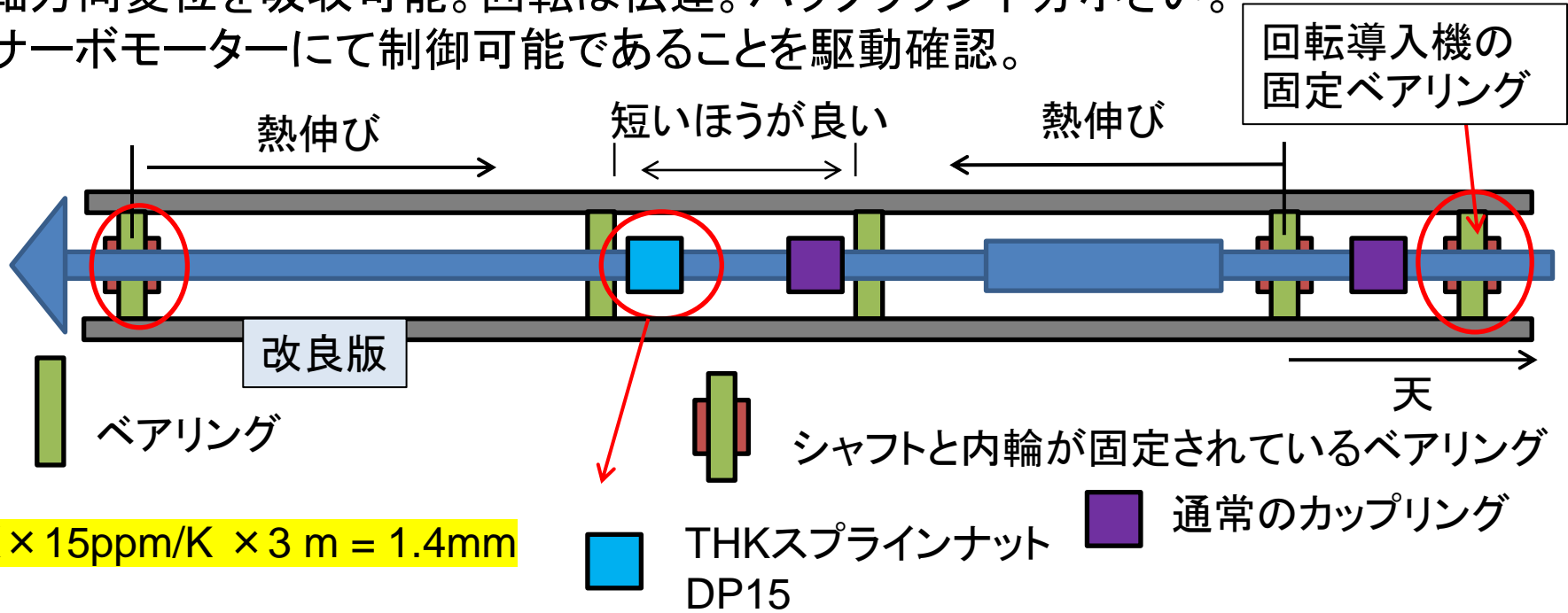
750 °C (試験機)

	黒鉛材 (°C)	支持リング外輪 (°C)	内側ボス (°C)	軸 (°C)
実機評価値	650	300	135	<u>120</u>
試験機評価値	750	310	160	140
試験機実測値	750	340	165	<u>135</u>

軸温度、黒鉛材の最高温度、フラットバーの温度差は実機より過酷な条件。

回転軸とスプラインナット

軸方向変位を吸収可能。回転は伝達。バックラッシ十分小さい。
サーボモーターにて制御可能であることを駆動確認。



回転駆動系・伝達系

大気から真空への回転導入;磁気結合型。

大気と真空は完全に隔離。

伝達トルク $5.3\text{N}\cdot\text{m}$ 許容回転速度 500r.p.m.

耐放射線性;希土類コバルト磁石、SUS304,440C

真空内;二硫化モリブデン潤滑

大気中;グリース使用→(耐放性グリースに変更)

マイタギア

SUS440C焼き入れ、無潤滑。

定常回転中はほぼ荷重0。加減速も低速で良い。

積算時間、表面観察。

SEM観察。使用前、使用後の比較を実施して問題ないことを確認。

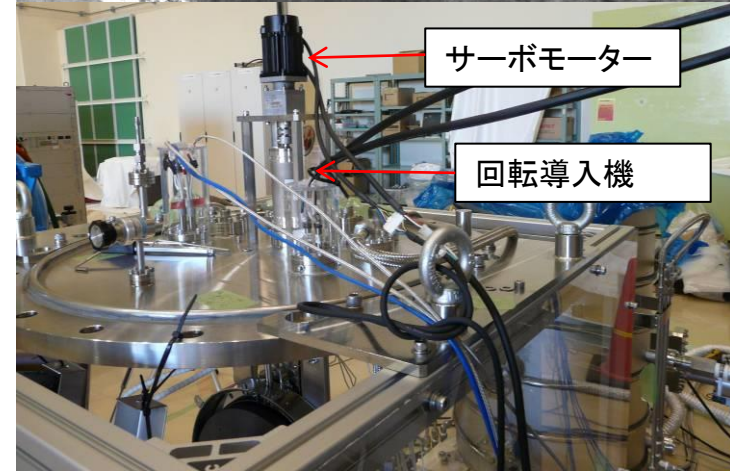
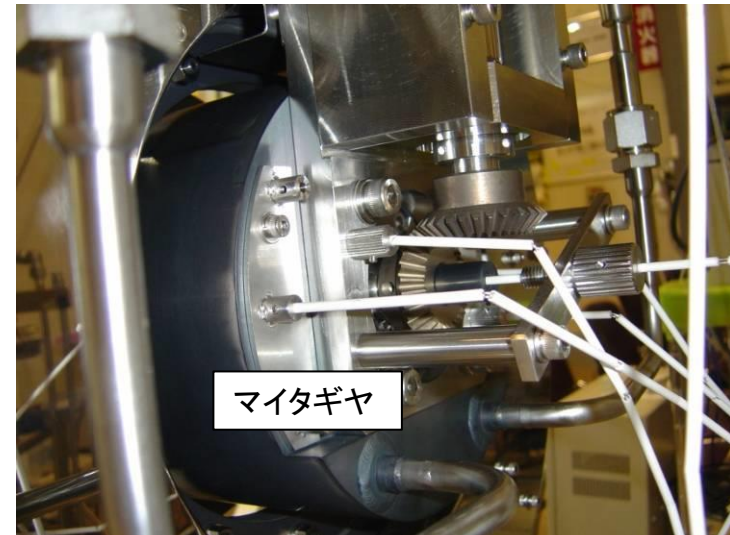
モーター(ワコー技研)

レゾルバ式ACサーボモーター(ギア付き)。

耐放射線性モーター製作。

定格出力 60W 、定格トルク 0.76Nm

レゾルバ、およびモーター電流にて軸受の健全性を確認するシステムの構築。



PSIとKEK・J-PARC共同プレスリリース

16 May 2022 Things run smoother without lubricants

【プレスリリース】ミュオンをつくるため、黒鉛円板は回り続ける ～日本とスイスの国際協力による挑戦～



Critical components: Bearings

- Ball bearings:

No grease as lubrication! → brittle due to hard irradiation
so called radiation hard grease does not help → proofed

in use since ~2002:



Balls Si_3N_4 , GMN, Germany
Coating: MoS_2 , Ag for ring & cage
1 -2 x exchange/year
←→ Graphite wheel lasts much longer: ~ 4Years
(39 Ah record)

in test this year:

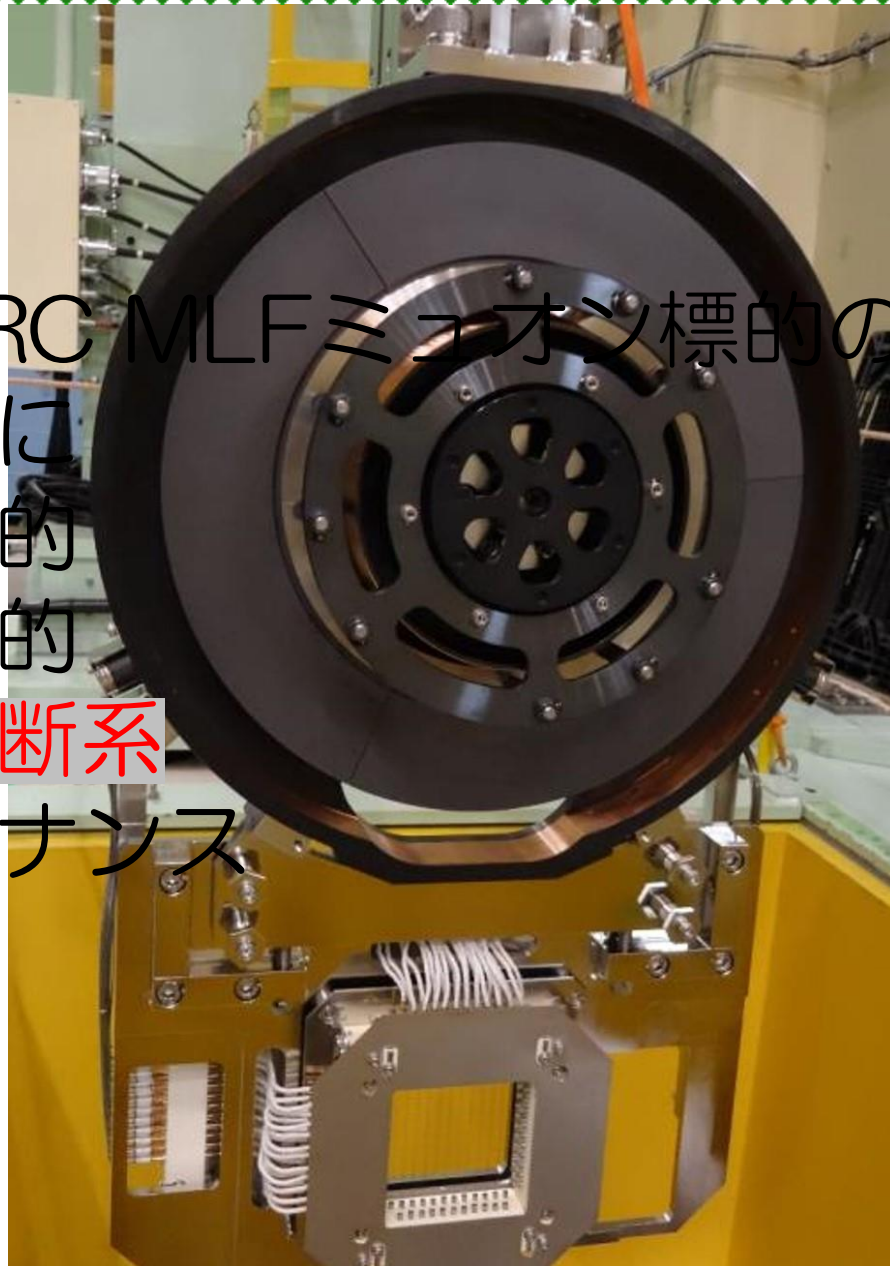


Shun Makimura
(JPARC)

Balls stainless steel + WS_2 blocks
Koyo, Japan
Test (without radiation): > 420 days
In beam 2021, no change!
(Motor current very smooth and stable)

目次

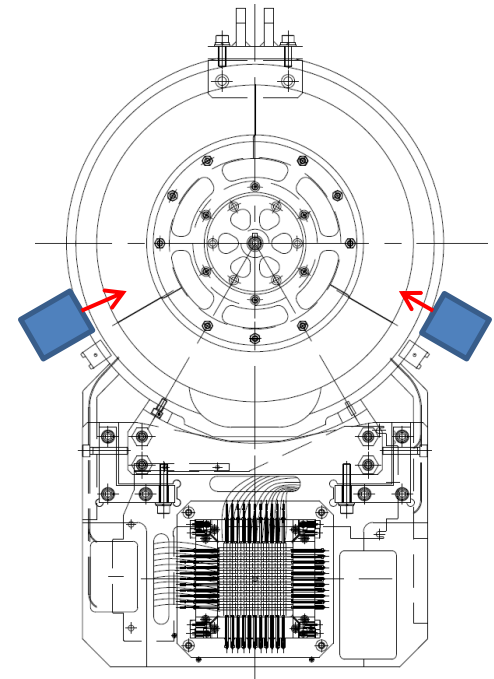
- J-PARC MLF ミュオン標的の簡単な紹介
- はじめに
- 固定標的
- 回転標的
- 安全診断系
- メンテナンス



当初設計のモニタリング

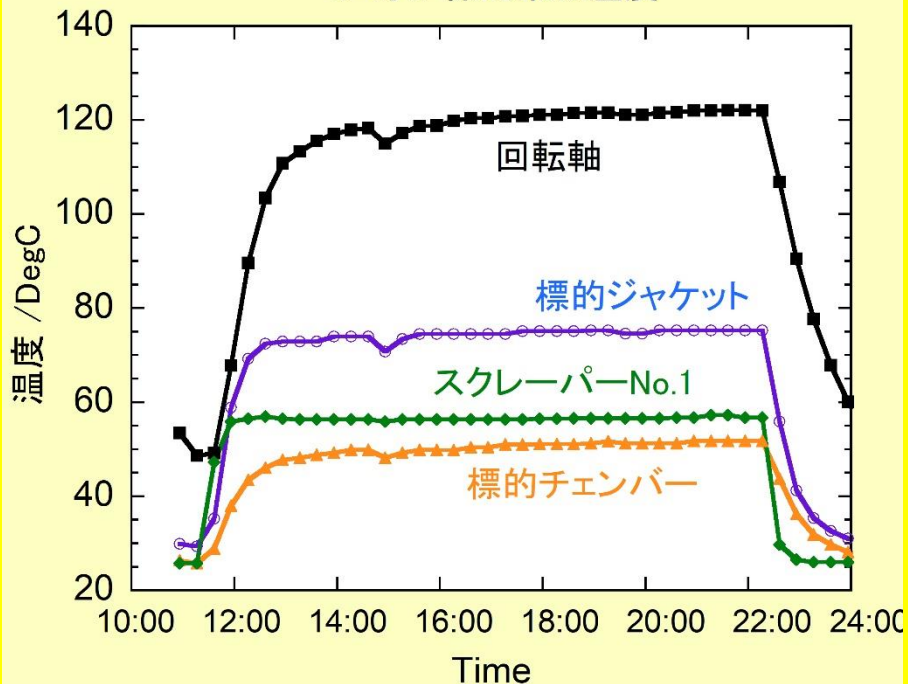
- ◆ 冷却ジャケット～冷却水流量、差圧、冷却水温度、ジャケット温度
- ◆ 回転体～軸温度
(非接触温度計～黒鉛の温度不均衡を計測)
- ◆ 回転モーター～運転状況、モータートルク
- ◆ 上下駆動～運転状況、位置不定
- ◆ (真空度、Qマス、ロスモニタ、CT)

(下線はMachine Protection Systemでビーム停止。それ以外は注意報)



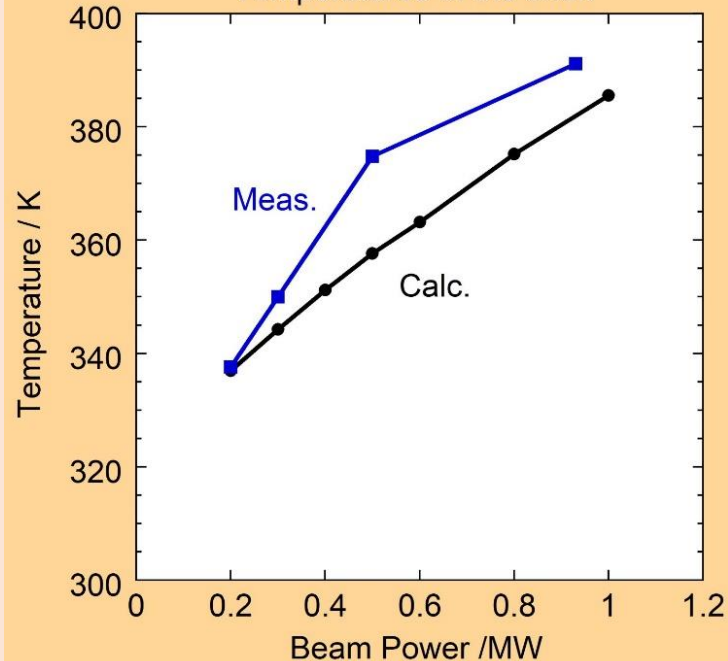
1 MWビーム運転中の温度

ミュオン標的系の温度



長時間安定1MW運転のおかげで、
標的系温度の飽和まで観測

Temperatures of the shaft



回転軸温度は評価値とほぼ一致

散乱ビームの熱電対へのエネルギー付与のため
実測値が上昇していると考えられる。

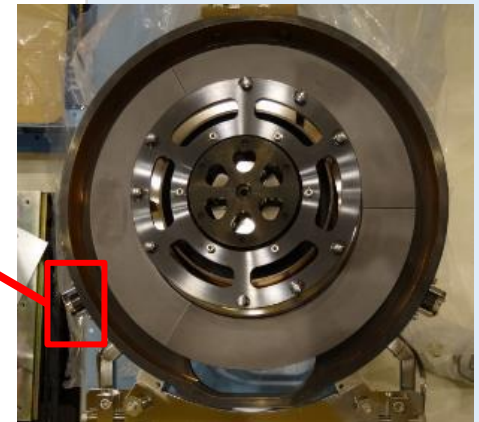
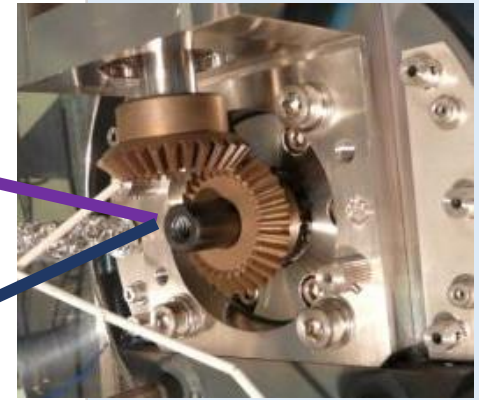
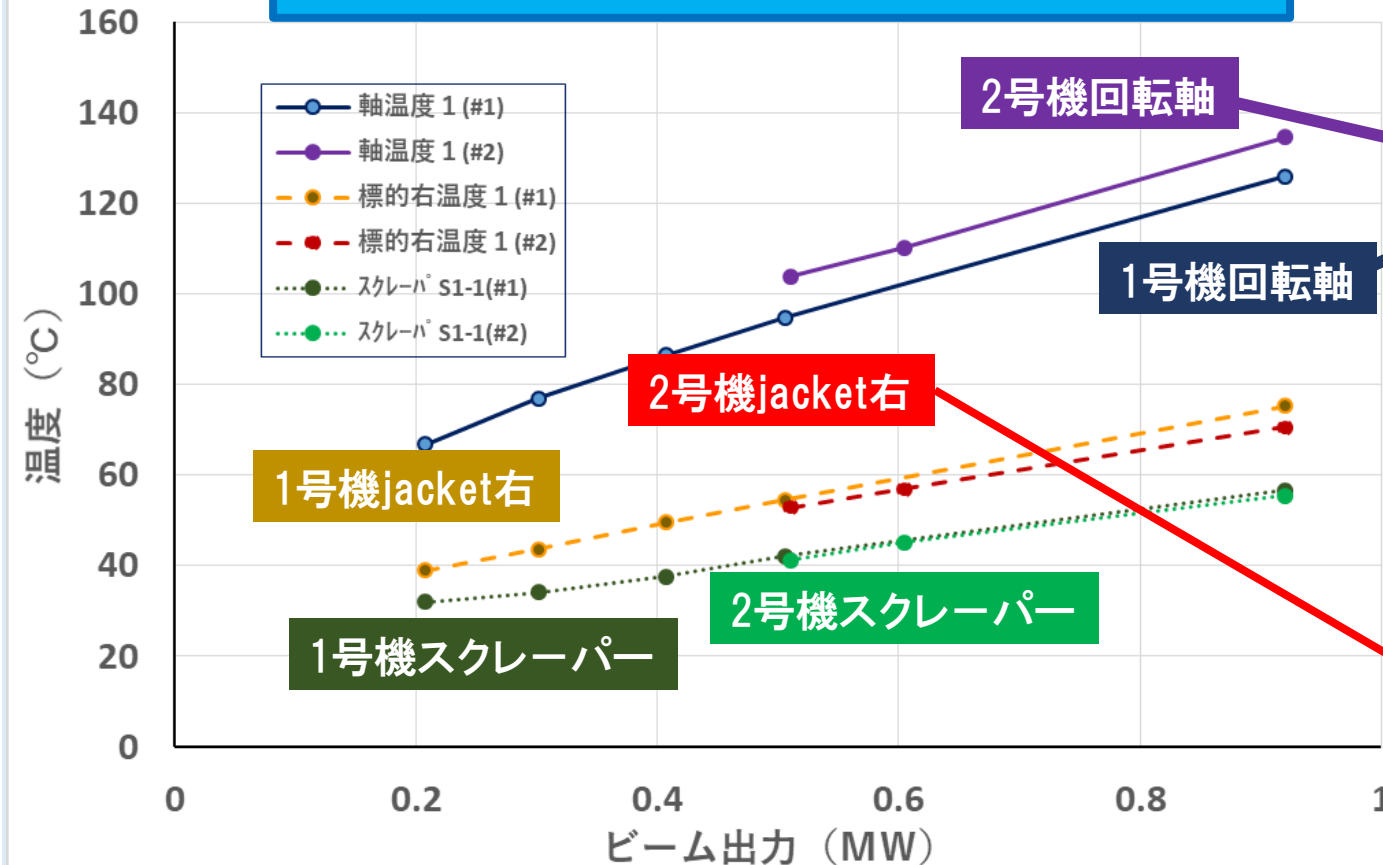
©1MWにおけるミュオン標的系温度は、当初設計の評価値をほぼ再現
※2015年に交換したスクレーパーNo.1温度は評価値55度に対して実測値57度

→ 1MW 対応完了

各温度のビームパワー依存性

- ミュオン標的系の温度分布の観測を行い、全て設計値であることを確認した。
 - ・ 回転軸耐熱温度 < 300度, スクレーパー耐熱温度 < 100度(温度差80度)
 - ・ 1号機と2号機の温度分布の違いは個性の範囲内(下図参照)

ミュオン標的系温度のビームパワー依存性



赤外カメラによるミュオン標的観察

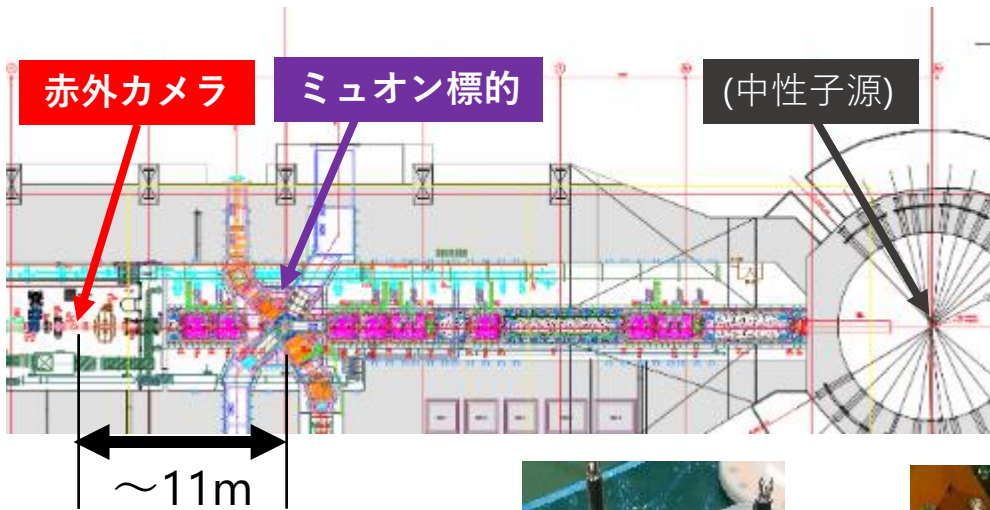
■ 回転停止による温度上昇を迅速に検知

■ ミュオン標的の温度の直接観測

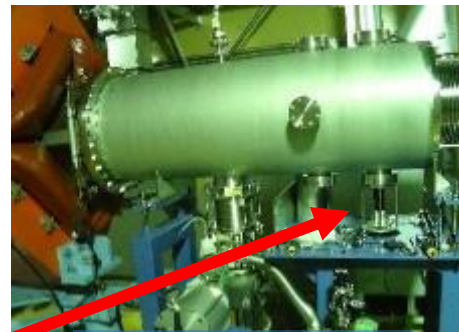
■ 標的の放射線や外力による損傷の観測

・ 赤外カメラ・赤外真空窓は照射試験実績(高崎研・放医研・JRR4等)があり, カメラは1 MW運転で1年程度(5Gy以上), 真空窓は長期間(50MGy)の耐放性

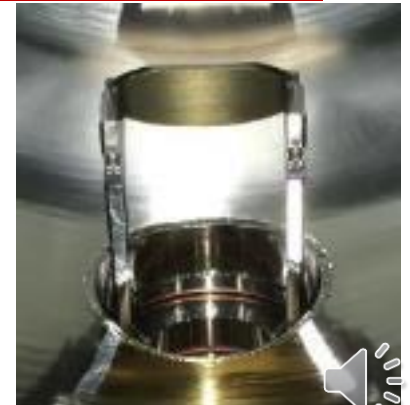
陽子ビームダクト内部に金蒸着を設置し, 反射赤外線をカメラで測定



赤外カメラ



ポート付きダクト



ダクト内の赤外ミラー

■ 赤外カメラ仕様
ビジョンセンシング社
VIM-640
Geレンズ焦点距離150mm
標的位置で1.7mm空間分解能

赤外カメラによる温度測定結果

◎赤外カメラによる直接観測に成功(図1, 図2)

▲放射線エラーにより, 稼働率は30%程度

→根本的解決にはカメラから制御・通信部を分離してビームダクトから距離を取り, 被ばく低減を図る必要あり.

○放射線損傷および熱応力・外力によるヒビ等の評価を継続中

○周辺に設置した熱電対による測定→飽和するまで1時間程度

赤外カメラによる測定→ビーム照射による温度上昇の飽和を正しく観測(図3)

図1.赤外カメラ画像

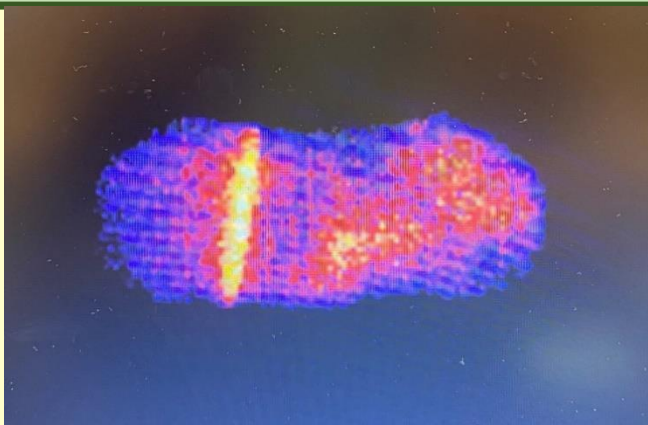


図1補足.
停止中にデジカメ
で撮影した標的画像



図2.ミュオン標的の温度の
ビームパワー依存性

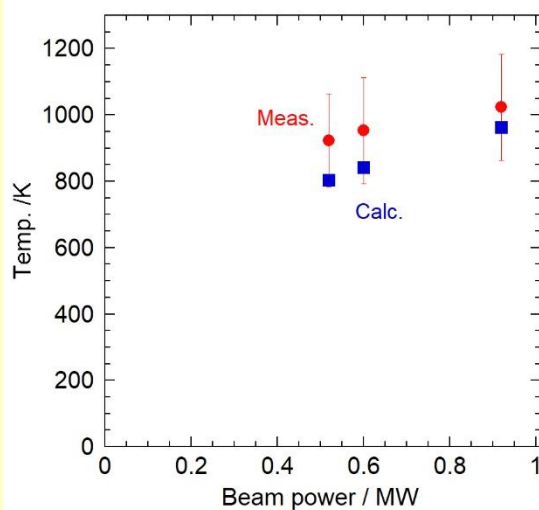
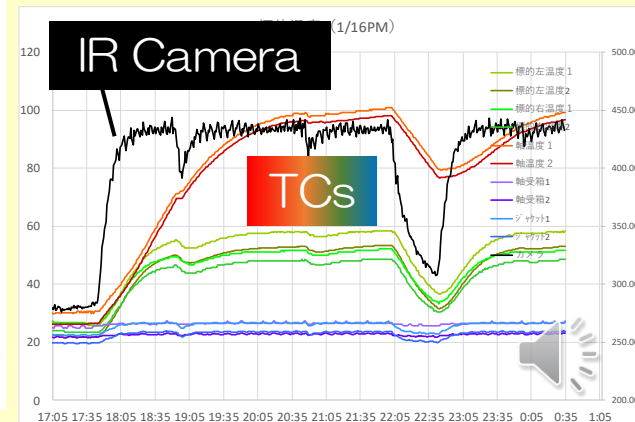


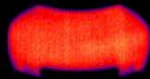
図3.赤外カメラ及び熱電対
を用いた温度測定の時
間応答の比較



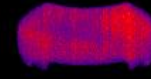
Infrared camera

- Interlock for beam stop
 - Abnormal temperature rise
 - Rotation stop by an image recognition technique
- Life prediction for the rotating system
 - Evaluate damage to graphite and rotating shaft by image recognition

Movie. 1 Infrared camera at 1 MW



Movie. 2 at 600kW (CCW)



画像の解析

- 検出画像を、時間依存しない**画面位置に固有な像**と、時間依存する**回転標的位置に固有な像**の合成と推定

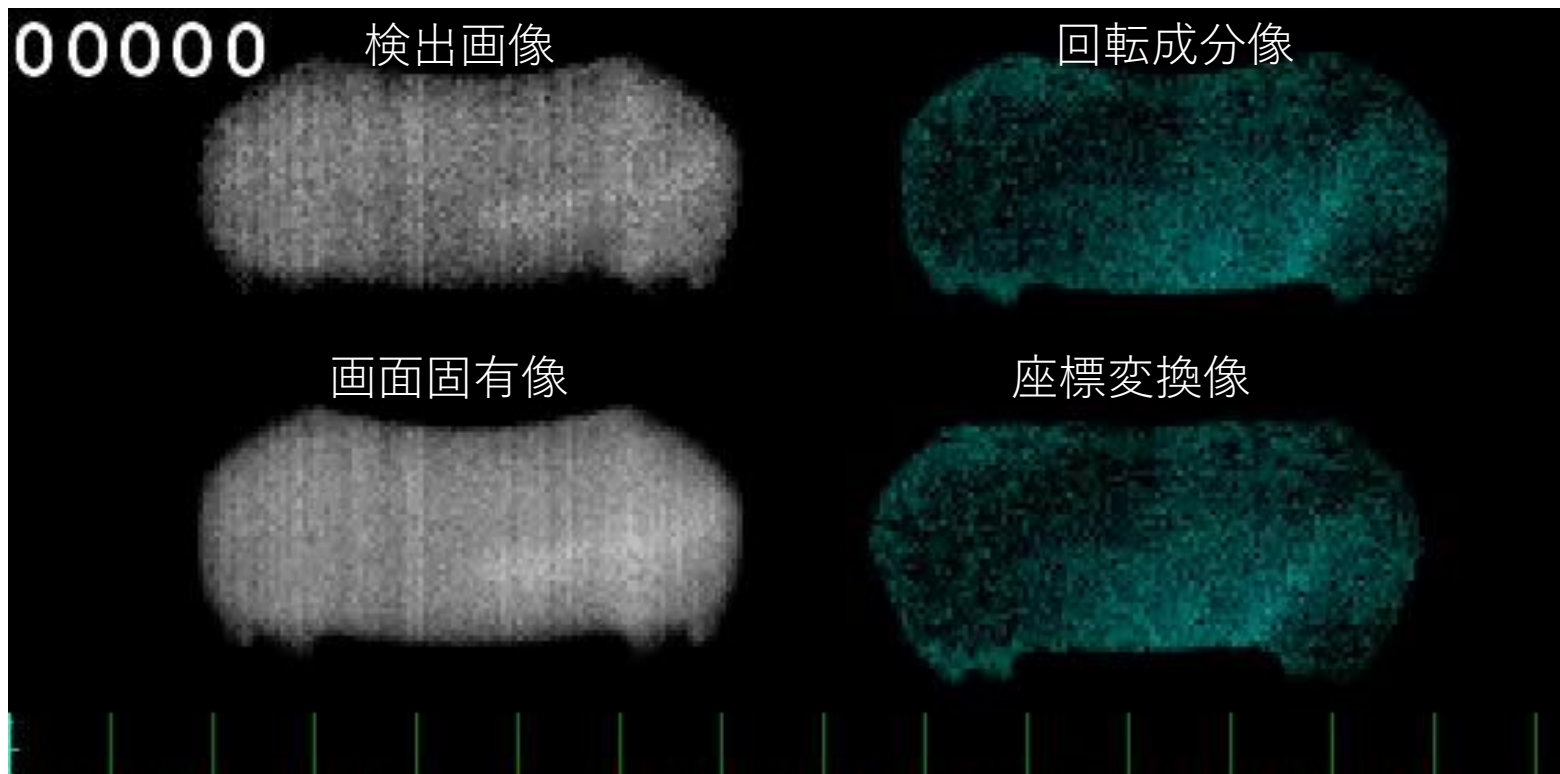
$$\text{検出画像}(t) = \text{画面固有像} + \text{回転成分}(t)$$

- 画面固有の成分は、動画に関して時間平均をとれば取り出せる

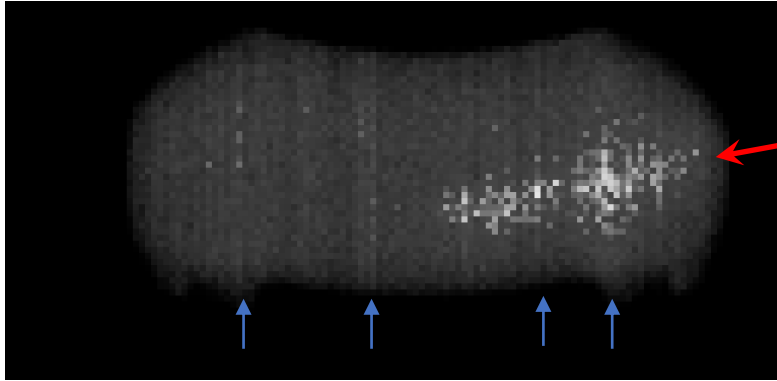
$$\text{画面固有像} = \sum_t \text{検出像}(t) / (\sum_t 1)$$

- 画面の場所に依存しない回転成分は、画面固有成分からのズレとして取り出せる。

$$\text{回転成分}(t) = \text{検出画像}(t) - \text{画面固有像}$$



画面固有像の分析



- 陽子ビームによる局所加熱の分布が横方向の**痕跡**として確認できる。
- ピクセルの感度のばらつきが確認できる。縦縞（青↑）が主で、ピクセル単位のばらつきもある。

- J-PARCの”早い取り出し”では2480ミリ秒毎に4パルスの欠損
→周期的な熱的擾動

- 赤外カメラは99.4ミリ秒毎に撮影（推定値）

- 25回撮影後は $99.4 \times 25 = 2485$ ミリ秒

→連続撮影により**5ミリ秒単位のストロボ撮影**が可能。このストロボ撮影による5m秒ごとの熱拡散画像から熱伝導解析を試算した結果熱伝導率として

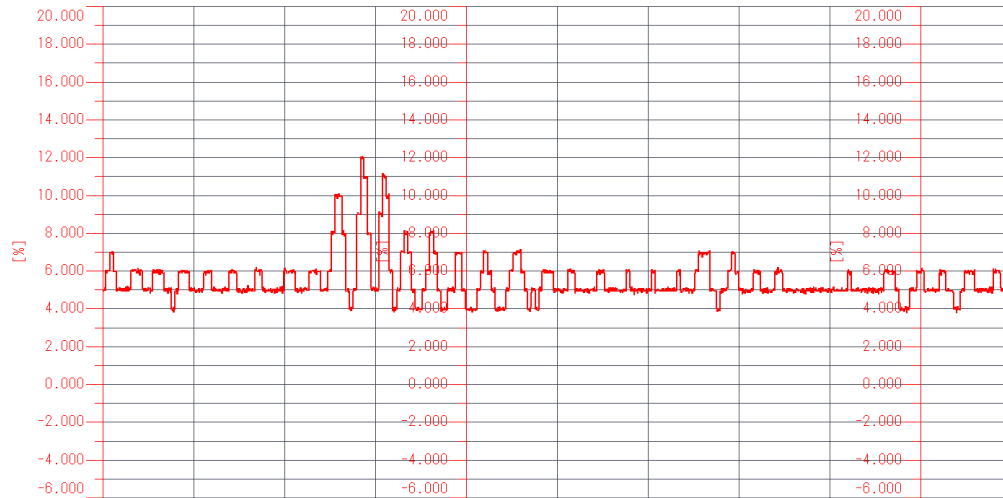
$$k = D \rho C_p = 144.18 \text{ W/K/m}$$

が算出された。（標的材料のIG430Uは $k \sim 140 \text{ W/K/m}$ ）

※現在、長期間撮影データを用いて詳細解析中



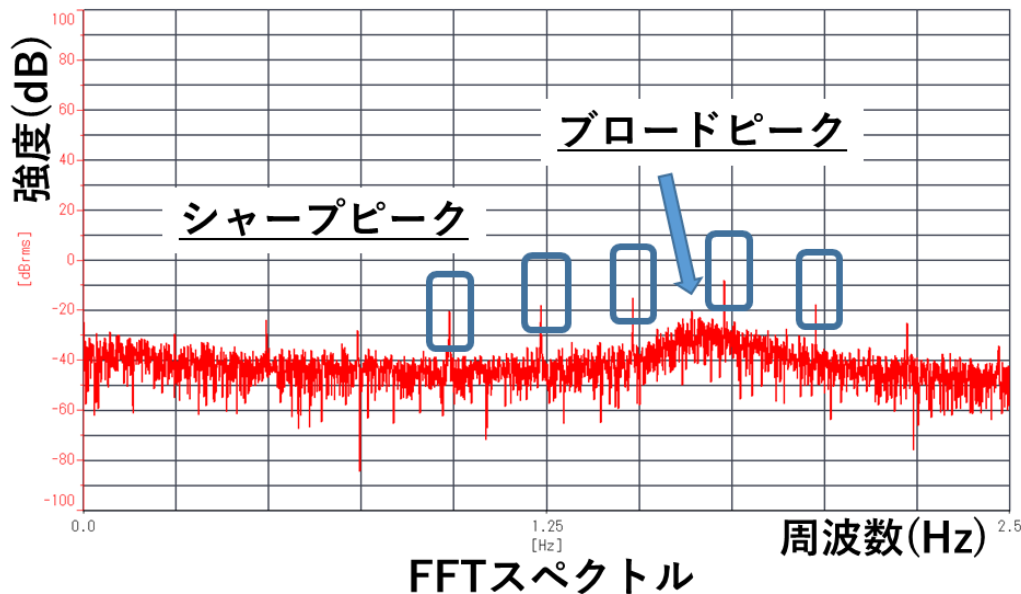
回転モーターのトルクモニタ



トルク波形データ

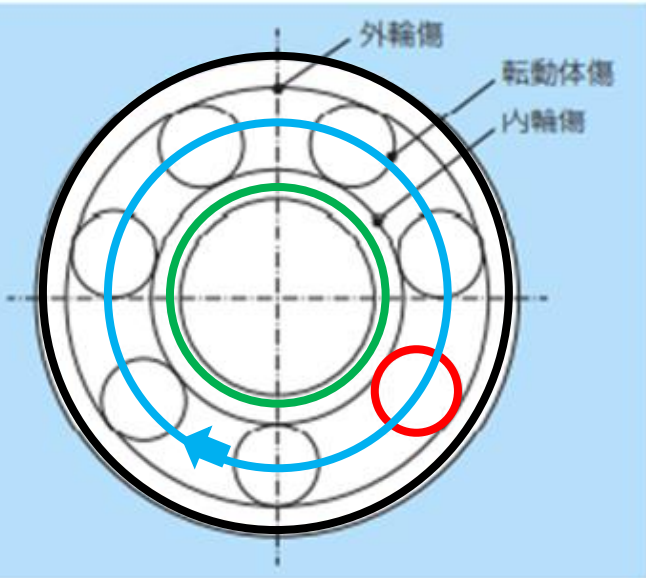
○2021年の回転導入機交換以降、
顕著な速度及びトルク信号の振幅
(500-600ms)が確認された

FFTスペクトルから以下の2種類
のピークが見られた



- ・ブロードしたピーク
- ・シャープなピーク

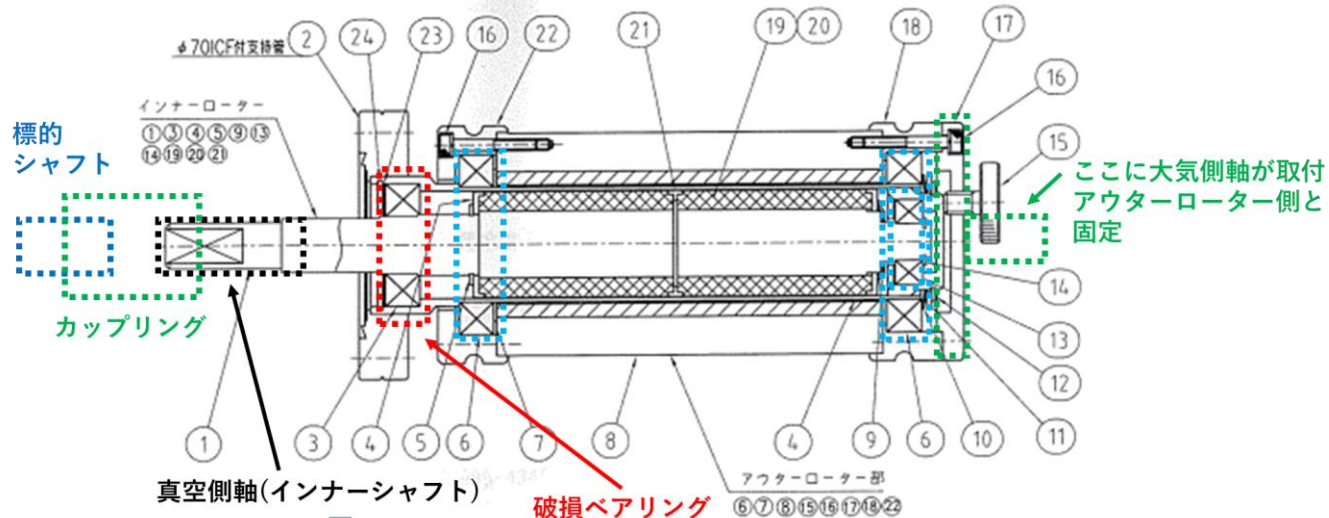
回転モーターのトルク解析



- 黒：外輪（固定輪）
- 緑：内輪（矢印方向に回転：図では内輪回転を示す）
- 赤：回転体（回転体自転運動）
- 青：保持器（矢印方向に回転）

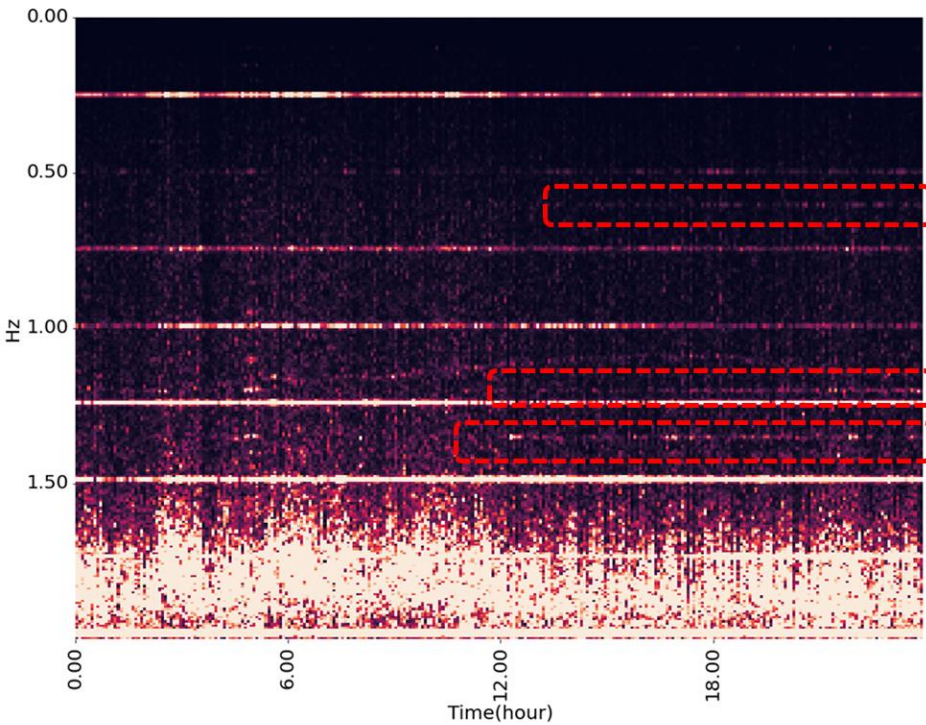
その他
 回転体通過振動数(回転体の個数に依存した振動)等

回転導入機の構造 ○2022年の回転導入機交換作業において、回転導入機の下部ベアリングの破損を確認



回転モーターのトルク解析

20220122_outtorque



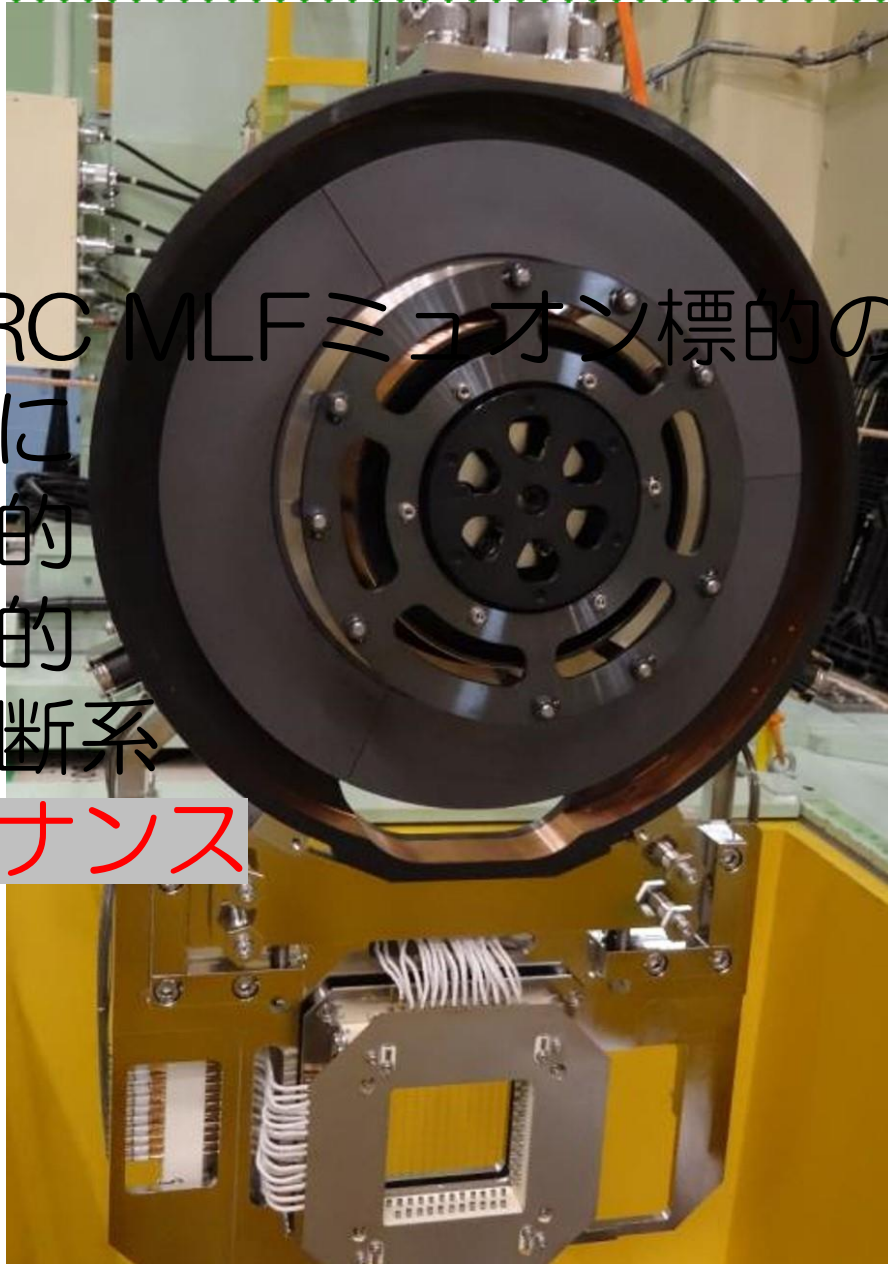
	回転導入機真空 インナーシャフト下※
保持器回転振動数	0.1Hz
転動体自転振動数	0.59Hz
転動体通過振動数	0.90Hz
内輪損傷時	1.35Hz
外輪損傷時	0.90Hz
転動体損傷時	1.18Hz

このデータはIPDガスケット設置後 2022/1/23でも確認され、以降も2月まで継続して確認されている

→インナーシャフト下側ベアリングへの影響が見えていた

目次

- J-PARC MLF ミュオン標的の簡単な紹介
- はじめに
- 固定標的
- 回転標的
- 安全診断系
- **メンテナンス**



夏期定期メンテナンス項目

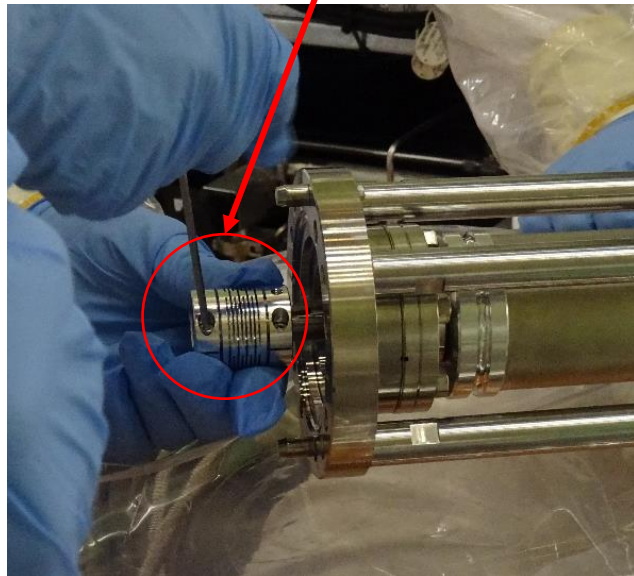
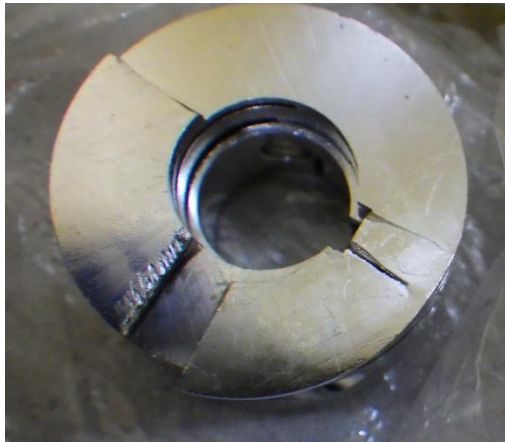
- 冷却水ストレーナ清掃(一年に一回程度)
 - ボールネジ等グリスアップ(一年に一回程度)
 - 回転導入機、モーター交換(二、三年に一回程度)
- 長期シャットダウン時に線量が低下してから作業可能。20~30 μ Sv/h程度の作業環境。
-

- それ以外の予測不能な故障
- 運用、内容による。必要に応じて遠隔操作室に輸送する。新標的を用意しておき、一週間程度の交換作業。ビーム停止の必要がある。
100~300 μ Sv/h程度の作業環境。

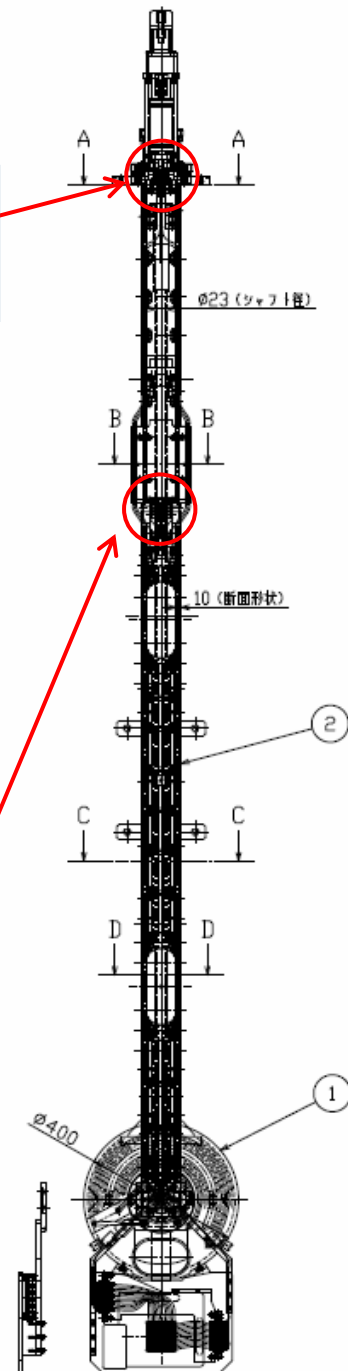
回転結合器の損傷

- 損傷が判明したカップリングは上部の回転導入機の接続。
→新たに選定し正しくキー溝加工されたカップリングと交換

カップリング（軸同士を接続する部品）



- 回転標的には、もう一カ所、同じカップリングを使用している箇所がある。（現場作業では交換が困難）

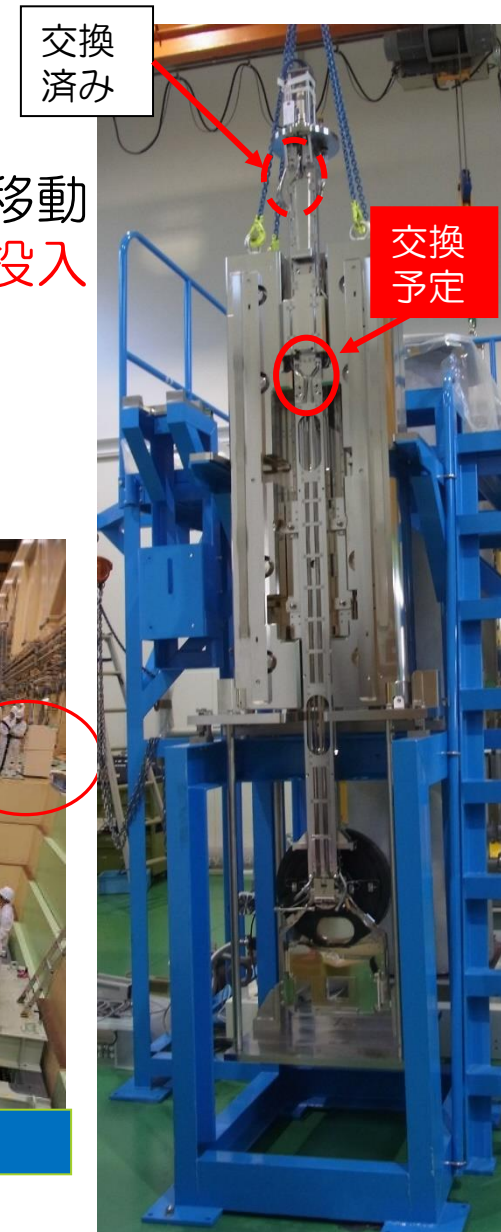
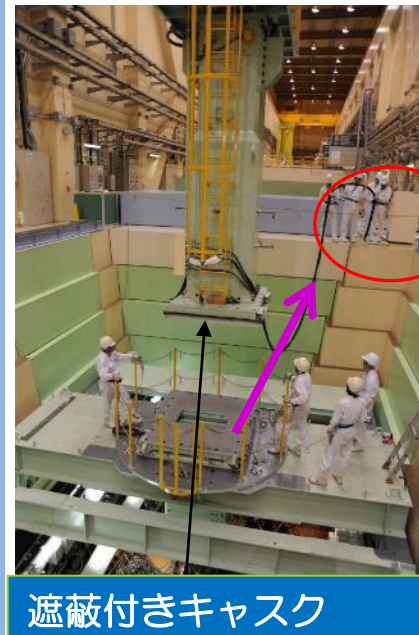
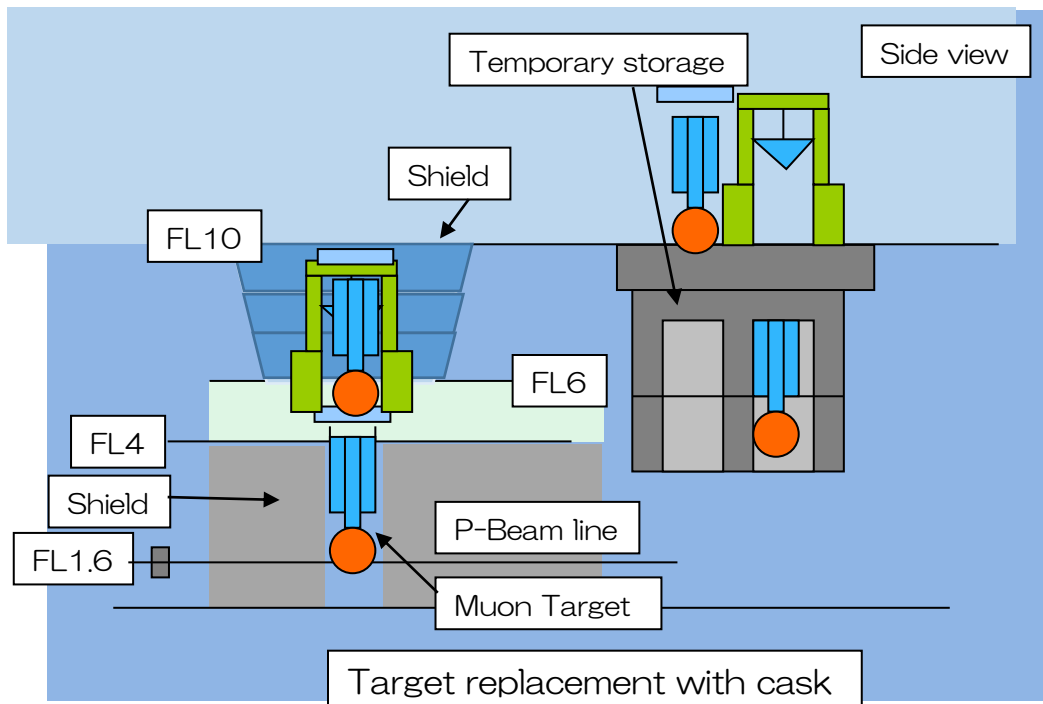


標的改修の概要

使用中のミュオン標的の回転カップリングを改修して再利用
高線量のためビームラインから取り出して作業

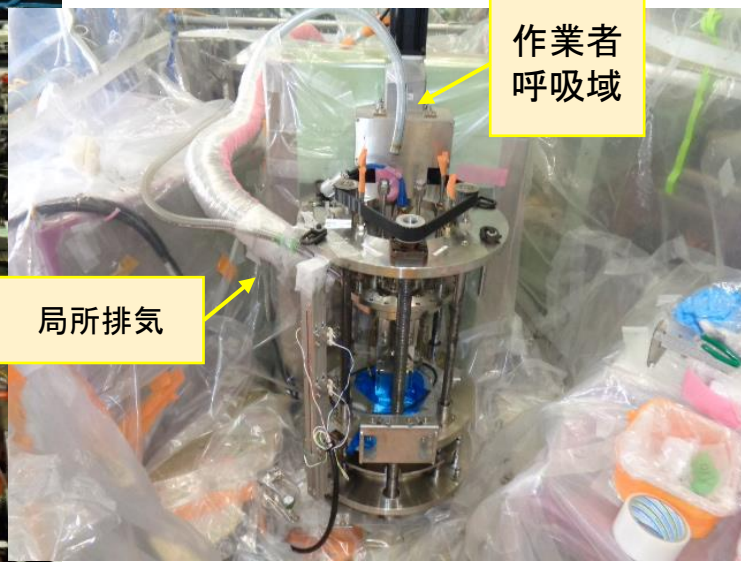
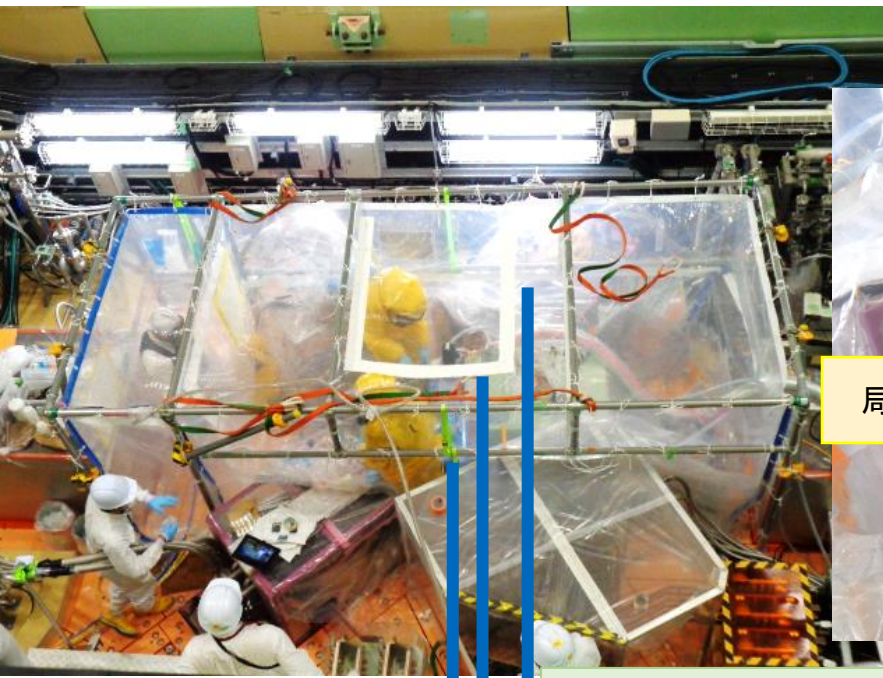
- ① M2天井遮蔽取り外し
- ② 運搬用キャスクを用いてミュオン標的を一時保管庫へ移動
- ③ **カップリングを適正品に交換。交換不可なら二号機を投入**
- ④ 改修済みor新品ミュオン標的をビームラインに挿入

● 2014年の固定→回転標的交換作業と同等



作業時の汚染対策～グリーンハウス・エアラインシステム・トリチウムモニタ

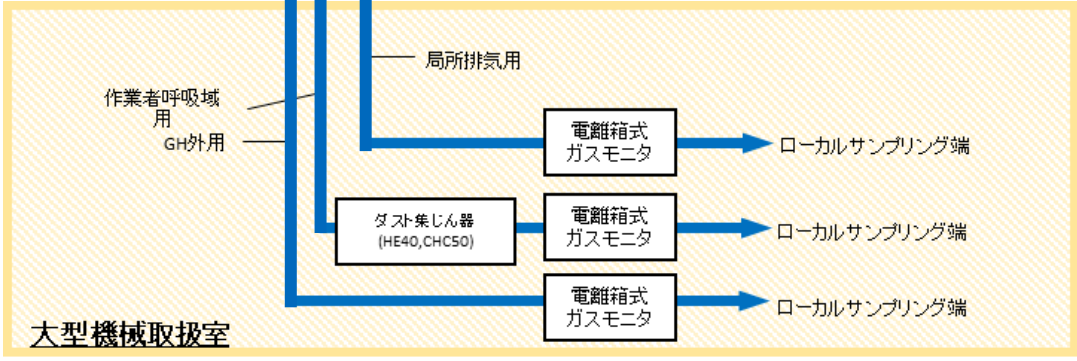
・トリチウムは、標的と陽子ビームの核反応により0.5 TBq/年@1 MW程度発生し、時装置表面に付着し、気中のH2O分子と置換して拡散する。



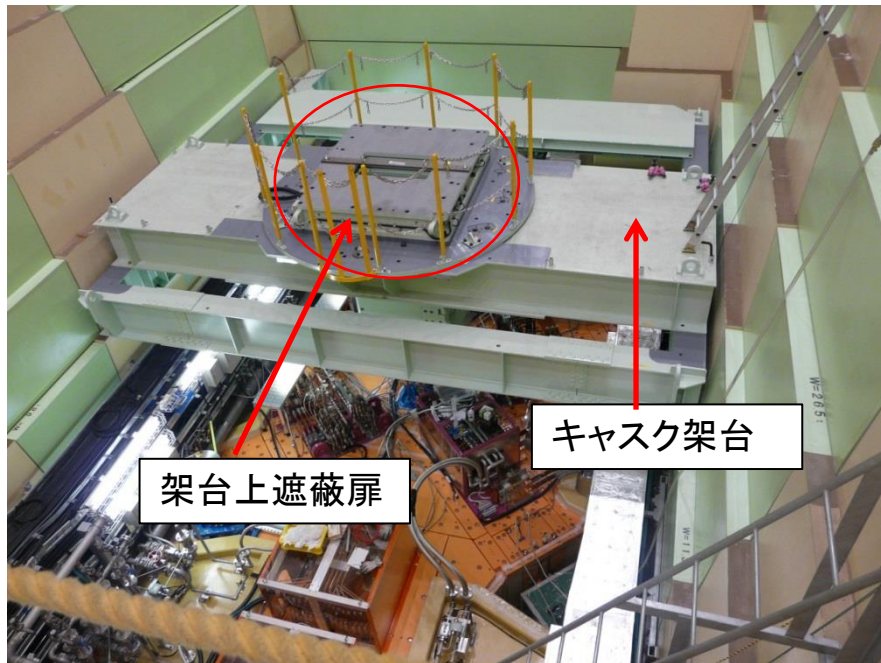
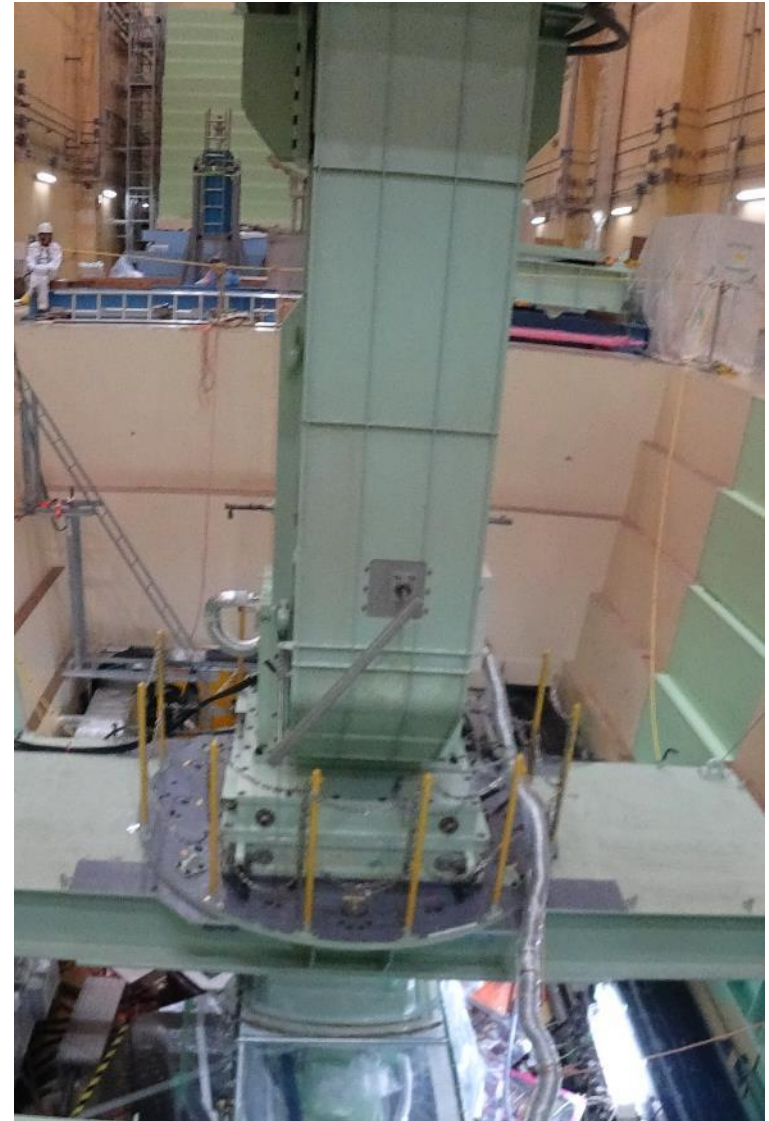
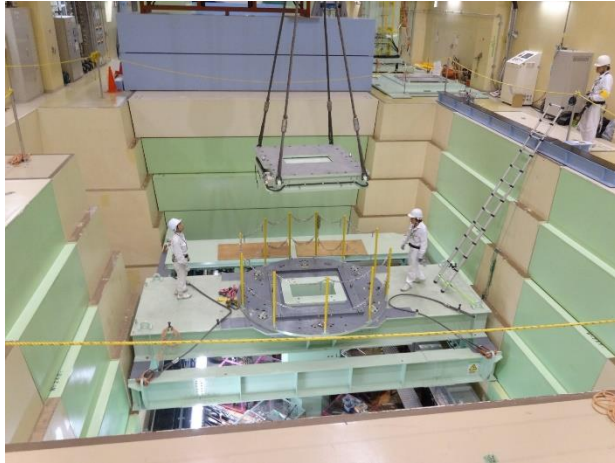
グリーンハウス

局所排気

エアラインマスク
アノラックスーツ



架台上遮蔽扉・キャスク設置



キャスククレーンによる引き抜き・輸送

- 作業員は大型機器室に退避
- キャスク内は送風機により負圧
- 排気をモニタ (<math>< 0.2 \text{ Bq/cc}</math>)
- ホールドポイント
トリチウム濃度(スタックへの排気量)

スタック

トリチウムモニタ

送風機



キャスククレーン

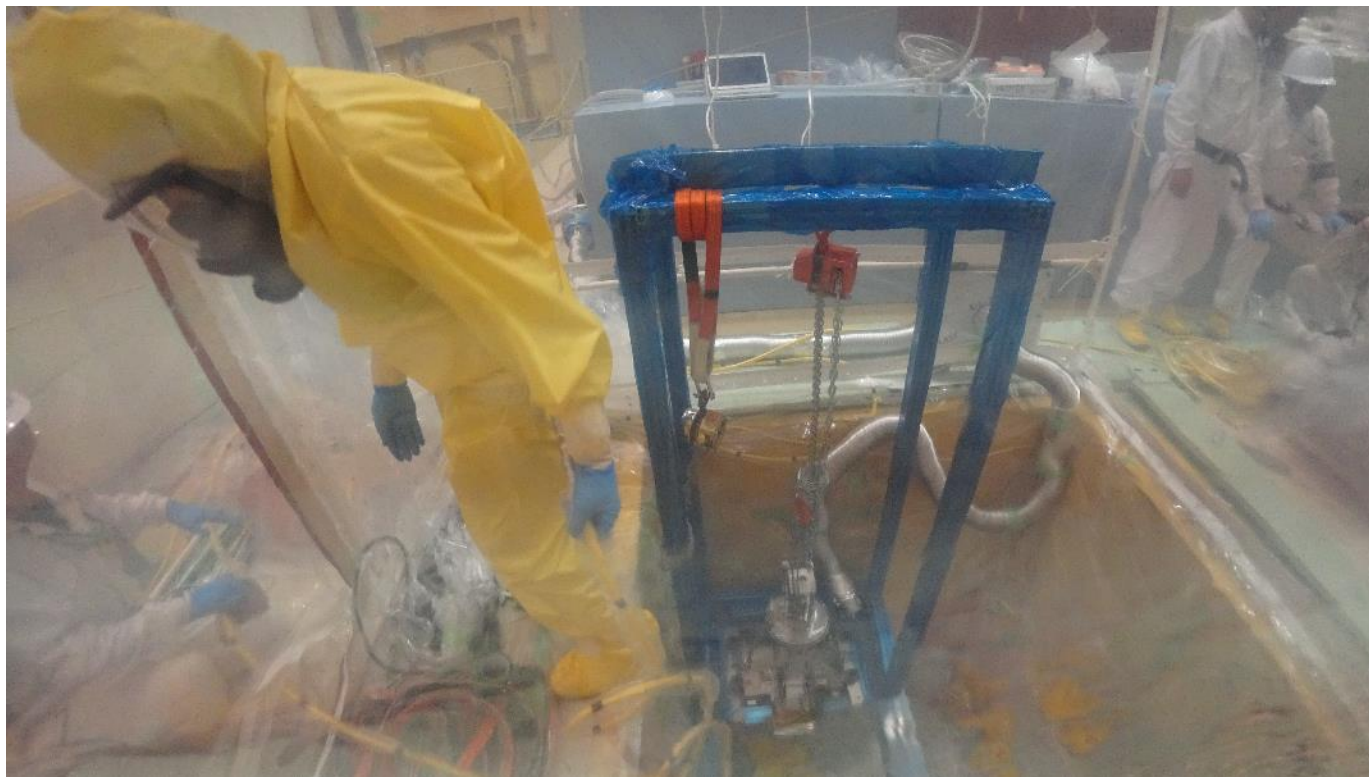


キャスク内の負圧試験

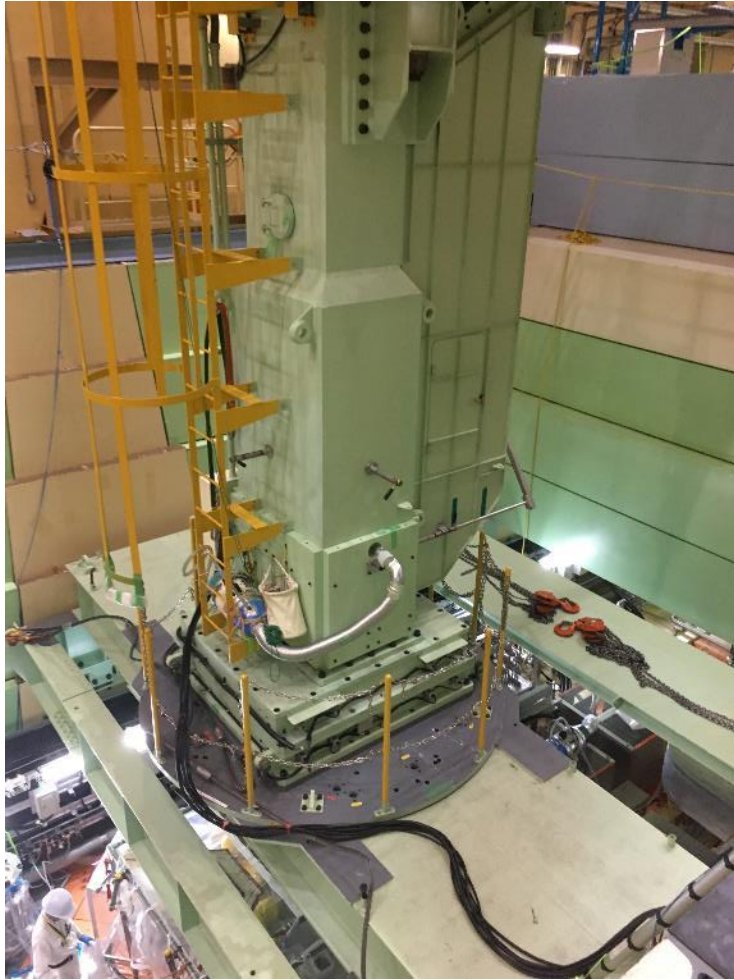
ロッド引き上げ時の線量

- ロッドをチェーンブロックで引き上げ、作業場所の線量を測定
 - ・ロッド付近で2 mSv/h，作業椅子付近で0.5 mSv/h
 - 10時間程度の作業で5mSvの被ばくとなる
- ポータブルゲルマニウム線量計による測定
主核種はCo60(半減期 5.27年)

カップリング交換作業を中止し，標的二号機投入作業へ移行



二号機挿入(9/8/9-23)



主作業終了 10/3



まとめ



- ・J-PARC MLFにて、ミュオン生成のための固体標的・回転標的を開発し、利用運転を行っている。
- ・1 MW陽子ビームを受け入れるための放射線耐性、熱・構造評価、安全診断系、メンテナンス等の様々な取り組みを示した。
- ・耐放射線長寿命軸受け等の回転系要素開発が長寿命化へ大きく寄与している
- ・原子炉級の放射線対策が求められるが、経験を蓄積し安定運用を継続できている。