

# HDターゲット

1. 固定標的
2. 回転標的

KEK / J-PARCセンター  
高橋 仁

# ハドロン生成標的に要求される項目

- 荷電二次ビームラインからの要求:  
2次粒子を選別するために二次ビーム源はなるべく点線源に近い方が望ましい
- 中性二次ビームラインからの要求:  
実験のバックグラウンド低減のために二次ビーム源はなるべく点線源に近い方が望ましい



標的材: 白金(密度 $21.4\text{g/cm}^3$ )、金(密度 $19.3\text{g/cm}^3$ )  
一次ビーム幅:  $(\sigma_x, \sigma_y)=(2.5\text{mm}, 1\text{mm})$

cf.

- J-PARCニュートリノ標的:
  - 炭素(密度 $1.8\text{g/cm}^3$ )
  - $(\sigma_x, \sigma_y)=(4\text{mm}, 4\text{mm})$
- J-PARC中性子標的:
  - 水銀(密度 $13.5\text{g/cm}^3$ )
  - $(\sigma_x, \sigma_y)=(39\text{mm}, 18\text{mm})$

2023年夏時点の最大ビーム強度:

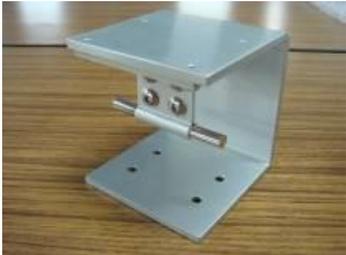
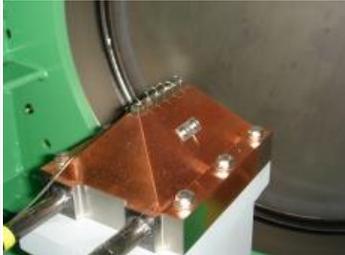
- ハドロン実験施設: 65 kW
- ニュートリノ実験施設: 520 kW
- 中性子実験施設: 830 kW

ビーム強度はハドロン施設が1桁小さいが、  
ビームのエネルギー密度は他施設と同等  
かそれ以上、発熱密度はハドロンが最大

※それ以外の要求:

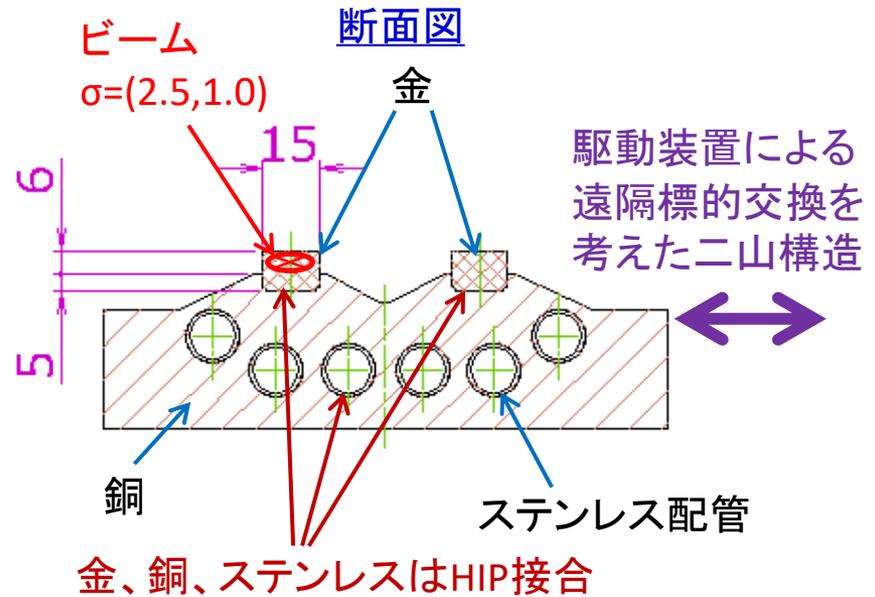
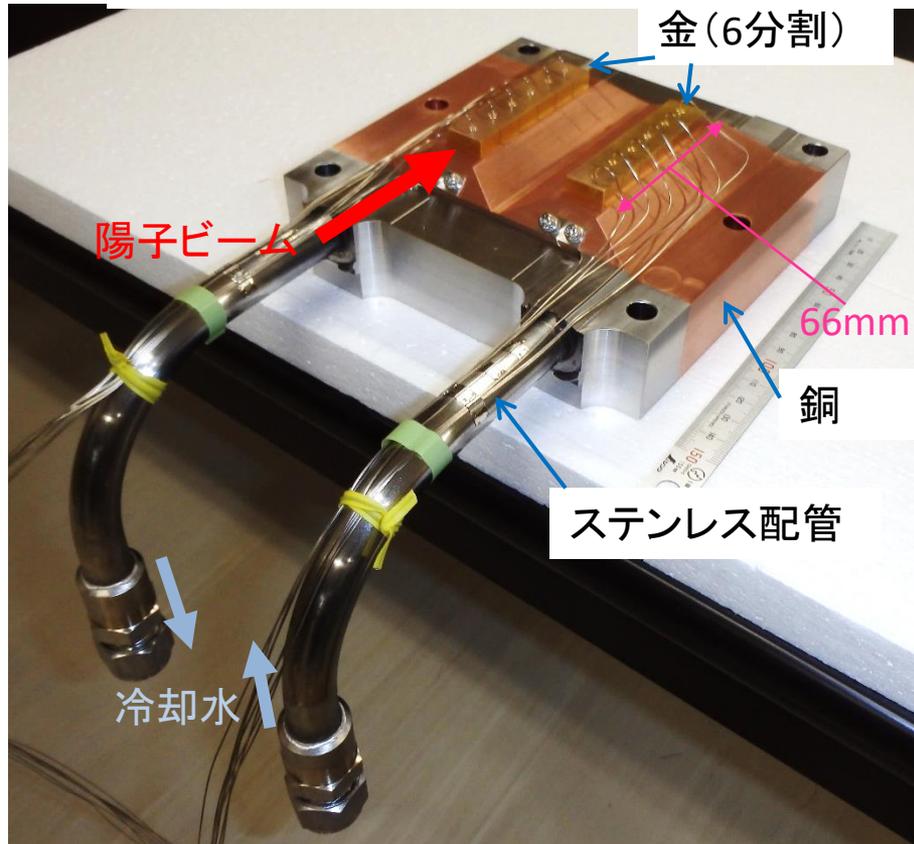
- 放射線的、化学的に安定、安全であること
- 大強度ビームに耐えられる冷却効率を持つこと
- 高い残留放射能によるメンテナンス時の作業被曝を低減すること

# 過去のハドロン標的

期間	2009年10月 -2010年3月	2010年10月 -2010年11月	2012年1月 -2012年7月	2012年12月 -2013年5月
ビーム強度	3 kW	5 kW	10 kW	24 kW
標的	白金 (60mm)	白金 (60mm)	白金 (60mm)	金 (66mm)
冷却方法	自然空冷(対流)	自然空冷(対流)	間接水冷	間接水冷
外観形状				

# **固定標的**

# 一つ前の標的: 50kW標的

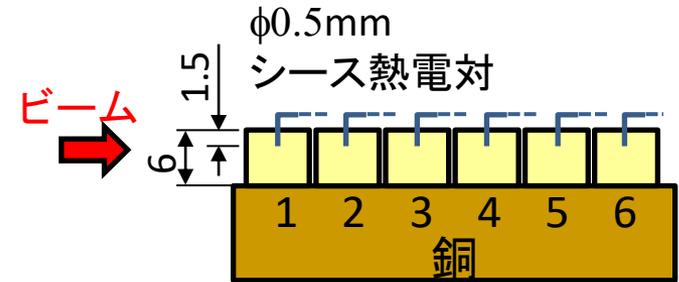


- 最大強度: 50 kW (6s cycle) => 57 kW (5.2s cycle)
- 間接水冷
- 熱伝導率の高さと銅に近い熱膨張率から標的材として金を選択
- 標的は気密容器に収納され、標的の健全性の監視のため容器内にHeガスを循環させる

# 50kW標的のビーム運転状況

- 2014年9月インストール
- 2015年4月ビーム運転開始

各金ピースの温度を熱電対で100msごとに測定

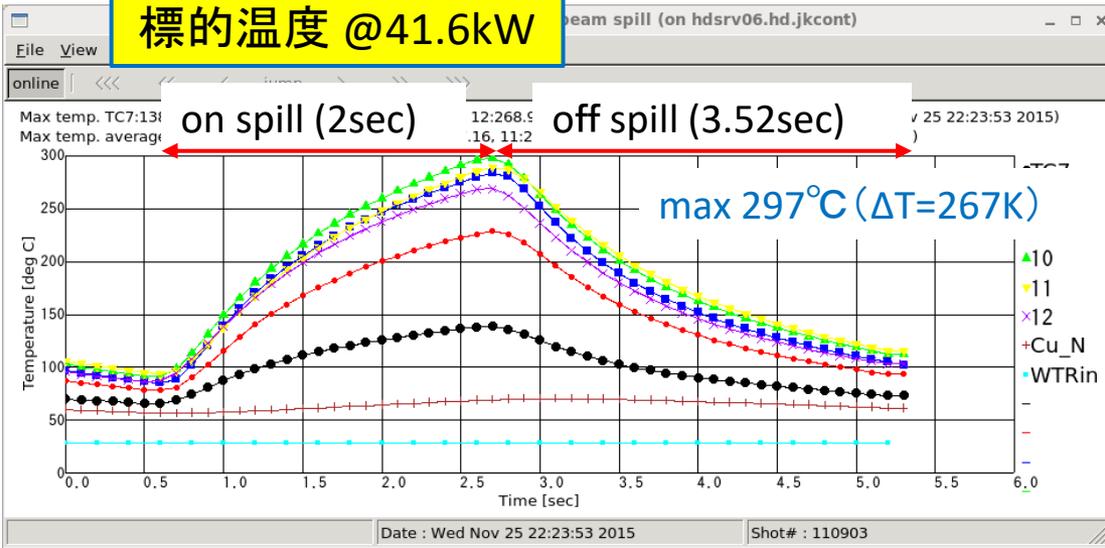


連続運転のビーム強度：  
2018年度最大51kWを達成

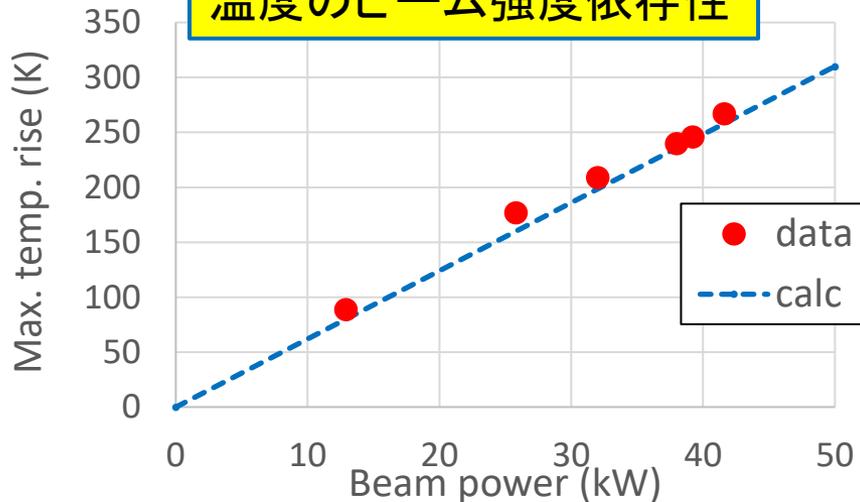


**更なる強度増強のため標的更新**

標的温度 @41.6kW

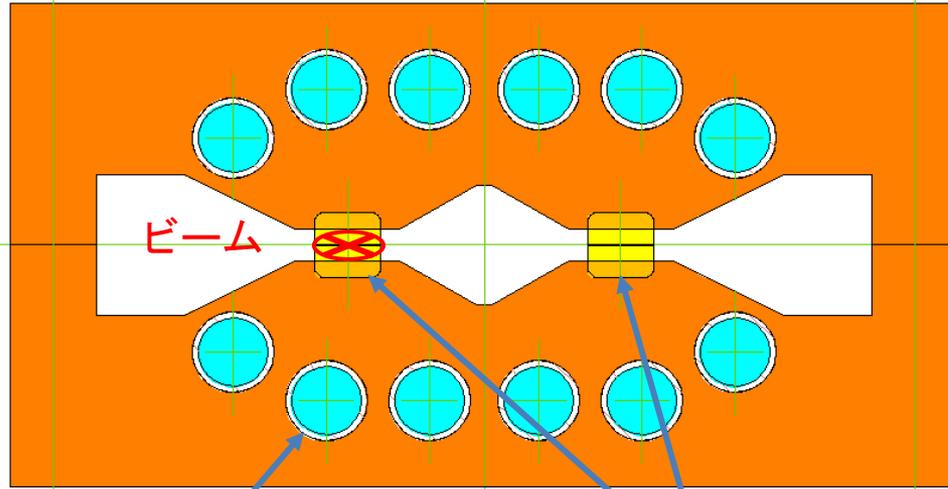


温度のビーム強度依存性

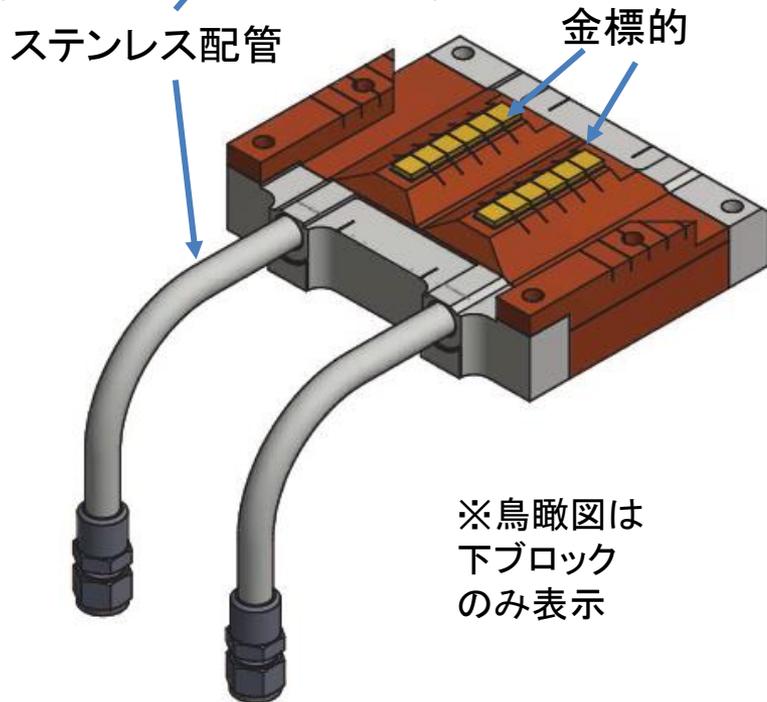


温度の実測値は計算とよく一致

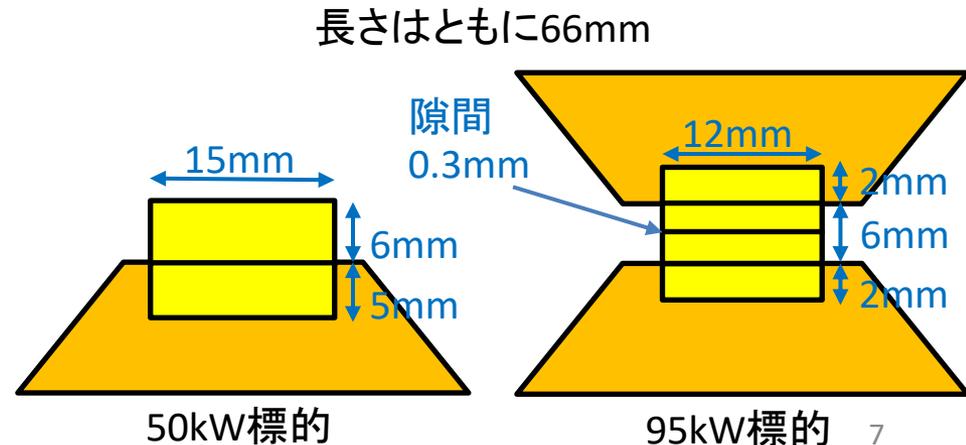
# 現在の標的: 95kW標的



- 最大ビームパワー: 95kW (5.2秒サイクル)
- 基本的な構造は前標的と同じ間接水冷方式
- 金の上にも銅冷却ブロックを接合して冷却能力を増強
- 二次ビーム収量と冷却効率から金のサイズを最適化
- 熱応力緩和のため、金を上下に分割し隙間を設ける
- 製作方法(HIP接合)はすでに確立

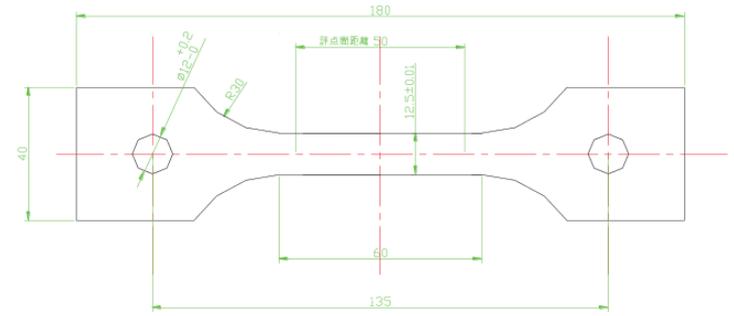
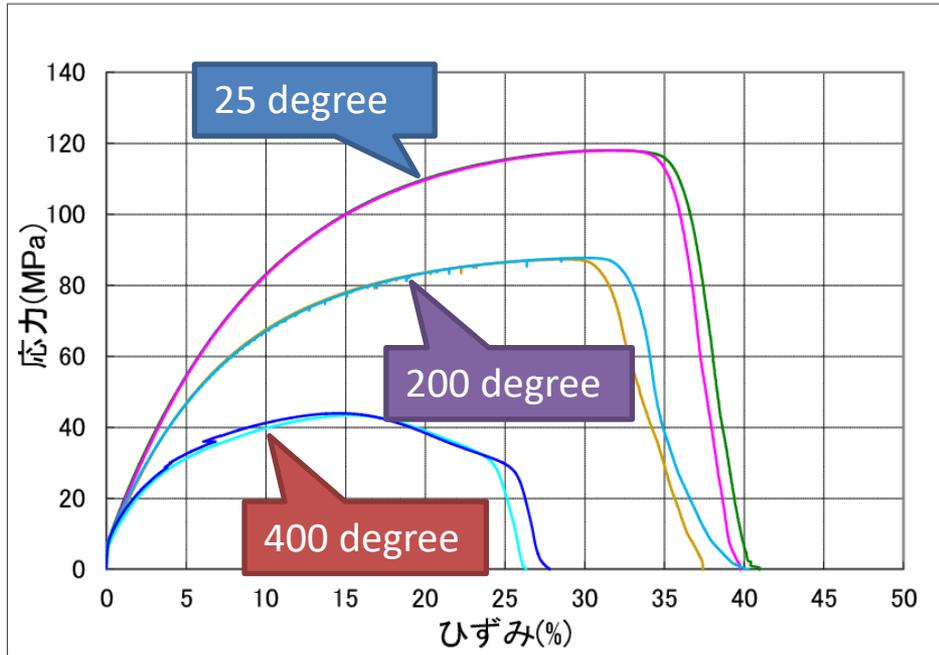


## 新旧の金標的サイズの比較



# 設計基準

実際のHIPと同じ熱処理を与えた金圧延材の  
JIS Z2241 13B号試験片で引張試験を行った



温度 (°C)	引張強度 (MPa)	0.2%耐力 (MPa)
25	118	8.6
200	87	7.8
400	43	7.6

金-銅のHIP接合については、  
上記の各温度で剪断試験を  
行い、上記引張強度以上の  
接合強度があることを確認

## 許容応力

- 熱応力:  $S_M \times 3$
- 低サイクル疲労(連続ビームのon/off):  $10^4$ 疲労強度/2
- 高サイクル疲労(shot毎):  $10^7$ 疲労強度/2

設計応力強さ  $S_M = \min(S_B \times 0.85/3, S_y \times 0.85/1.5)$

$S_B$ : 引張強度、 $S_y$ : 降伏強度 又は 0.2%耐力

$10^4$ 疲労強度: 引張強度/2

$10^7$ 疲労強度: 引張強度/3

JIS-B8266(圧力容器)における  
溶接管の基準

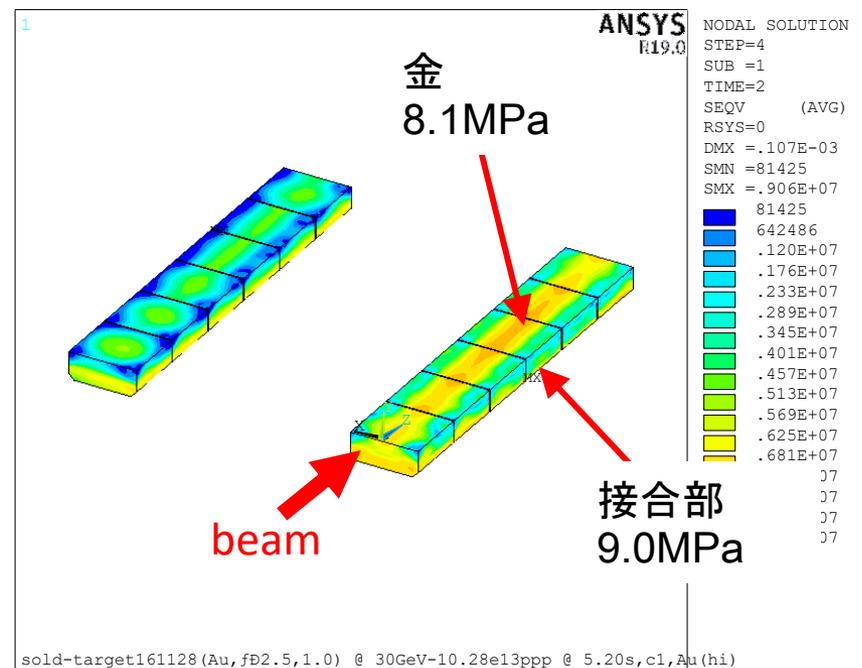
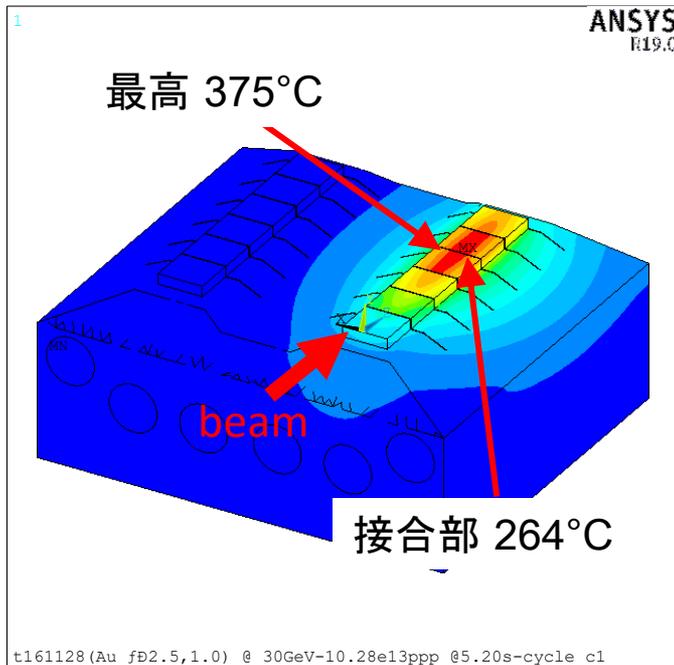
金疲労強度の文献値:

~引張強度  $\times 0.7$  (@ $10^4$ )、 $\times 0.4$  (@ $10^7$ )

# 熱解析

- 粒子シミュレーションMARS+有限要素法ANSYS
- ビーム: 30GeV、95kW、5.2秒サイクル
- 水温: 全て30°Cに固定
- 熱伝達率: 10000W/m<sup>2</sup>/K

※下ブロックのみ表示



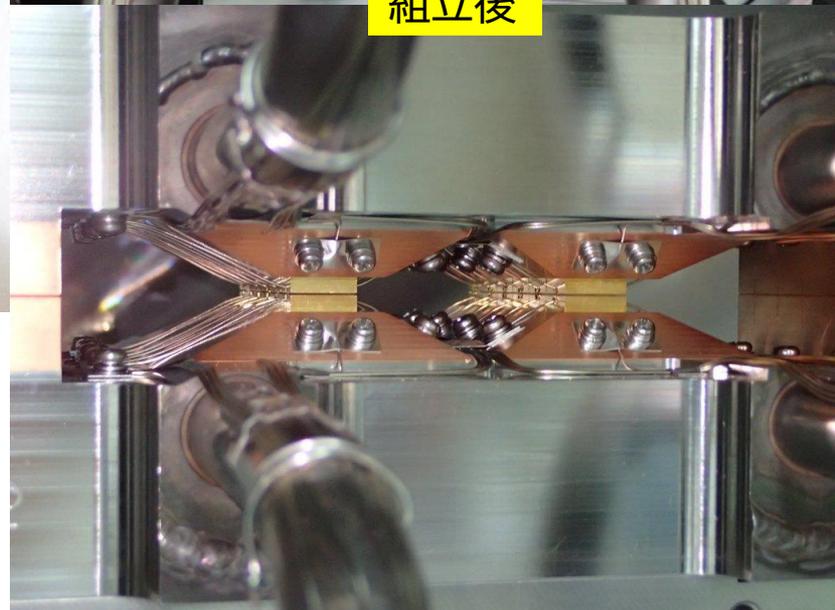
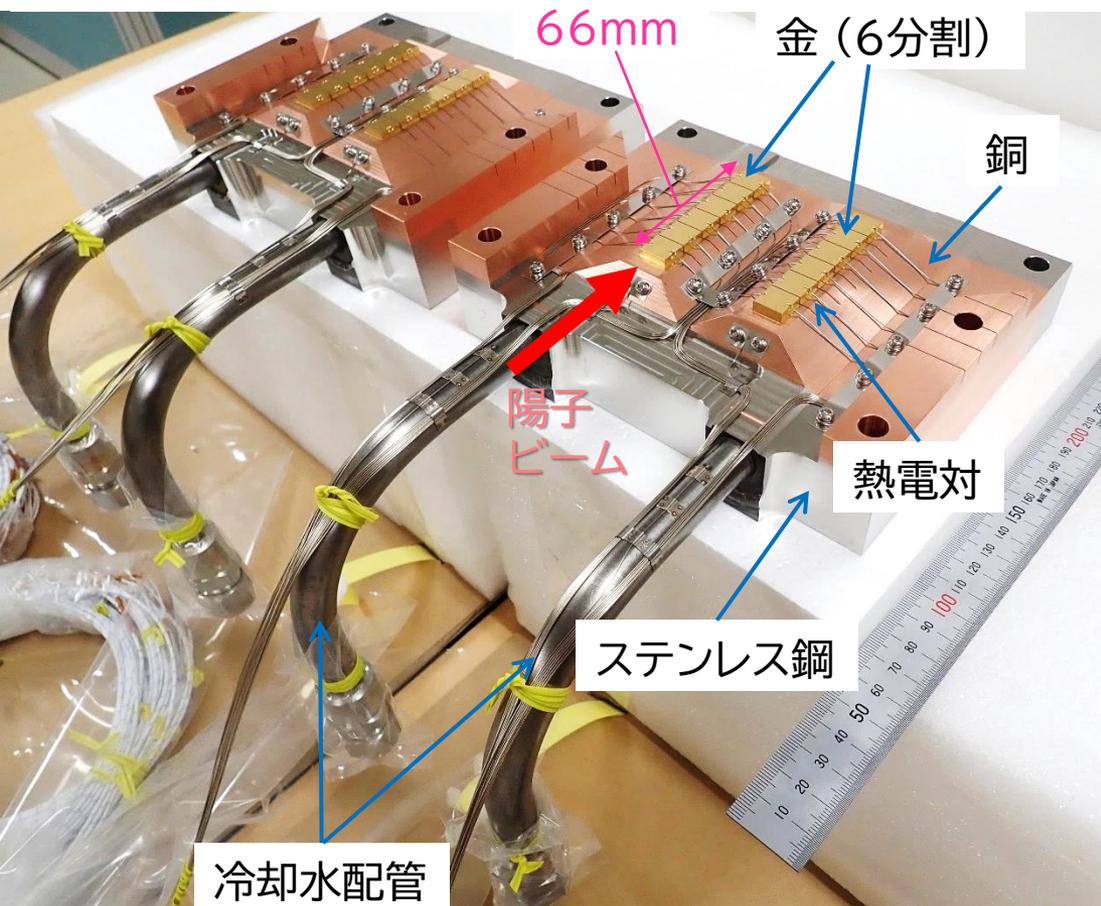
高さ方向の熱伸び: max 0.10mm

# 強度評価結果 (95kW、5.2秒サイクル)

	応力分類	応力計算結果	許容応力
金本体 (375°C)	熱応力	8.1 MPa	13.0 MPa
	高サイクル疲労 (Shot毎) に対する等価応力振幅	7.9 MPa	8.1 Mpa
	低サイクル疲労 (連続運転のon/off) に対する等価応力振幅	8.2 MPa	12.2 Mpa
接合部 (264°C)	熱応力	9.0 MPa	13.2 Mpa
	高サイクル疲労 (Shot毎) に対する等価応力振幅	9.0 MPa	12.2 Mpa
	低サイクル疲労 (連続運転のon/off) に対する等価応力振幅	9.2 MPa	18.3 MPa

いずれのケースも許容応力以下

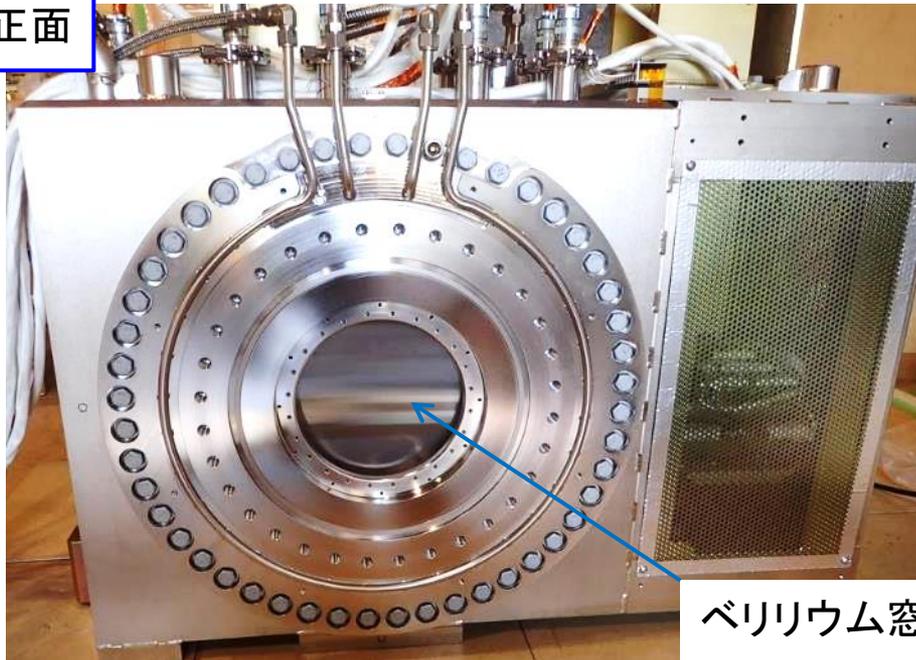
# 95kW標的



- 間接水冷型の固定金標的
- 最大ビーム強度: 95 kW (5.2秒サイクル)
- 気密容器内でヘリウムガスを回し、その放射性物質濃度を測定することで、標的の健全性を監視
- 2019年インストール、2020年運転開始

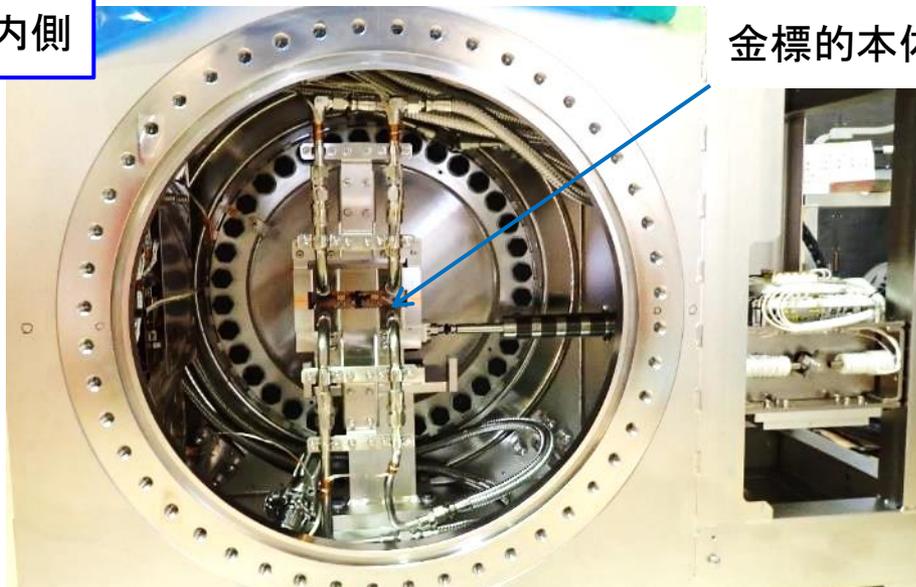
# 標的容器と窓

正面



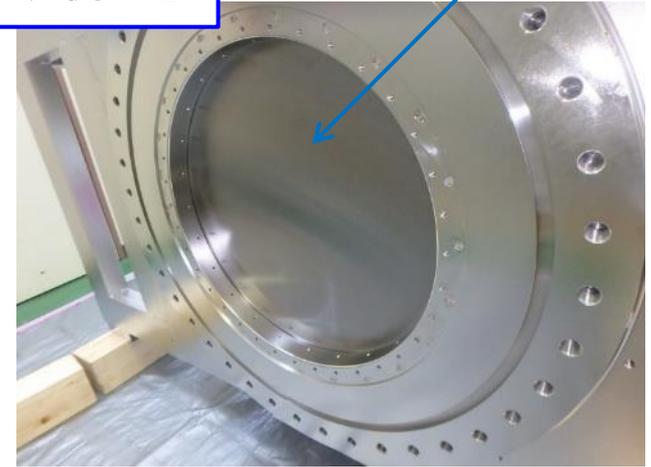
ベリリウム窓

内側

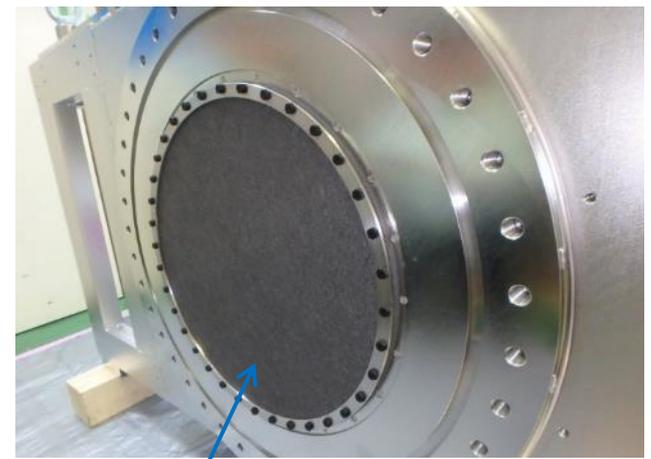


金標的本体

下流側の窓



ベリリウム窓

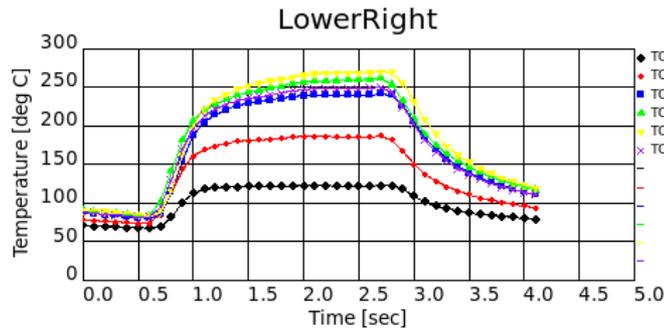
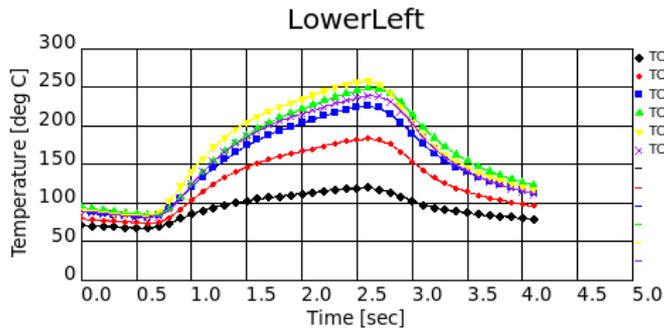
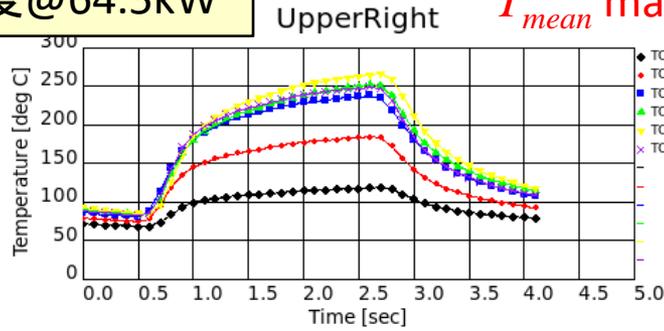
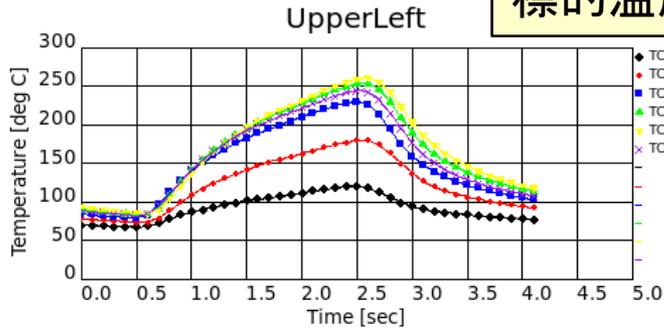


C/C composite partition wall  
to prevent Be fragments from scattering

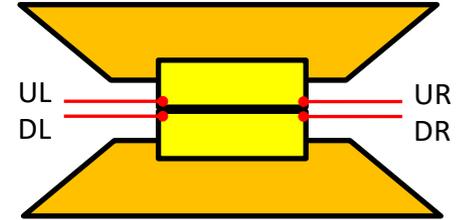
# 95kW 標的のビーム運転状況

標的溫度@64.5kW

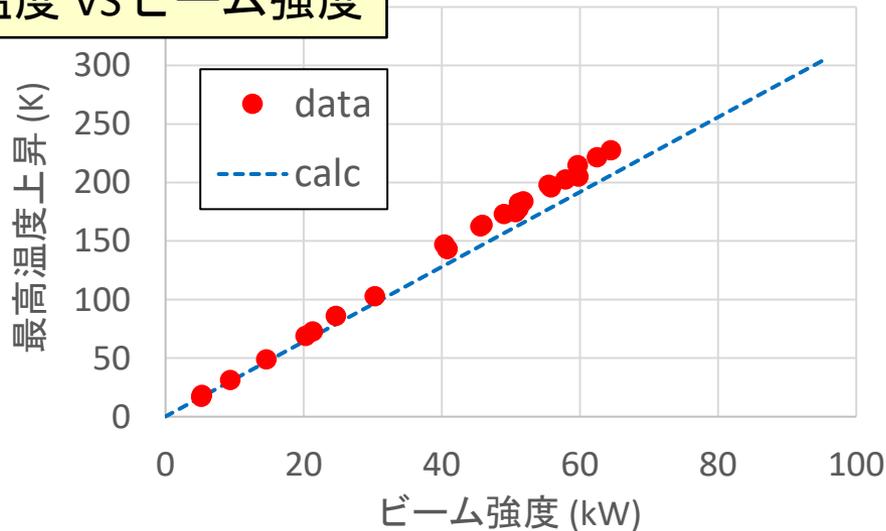
$T_{mean}$  max 263°C ( $\Delta T=228K$ )



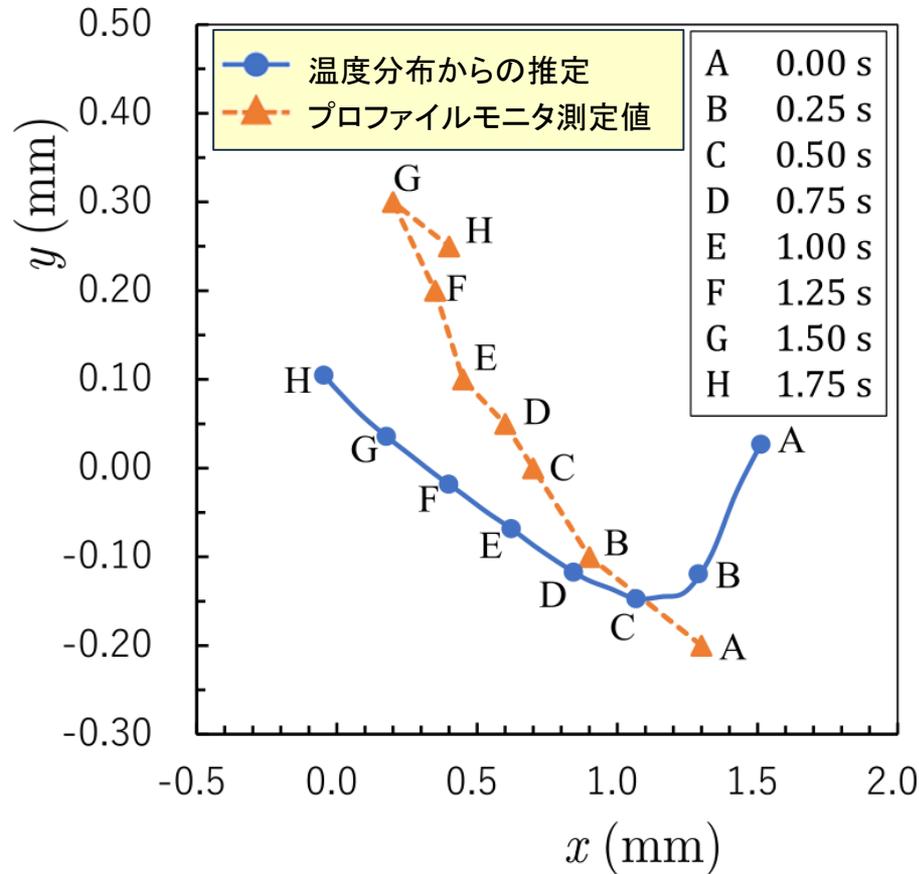
$$T_{mean} = \frac{T_{UL} + T_{UR} + T_{DL} + T_{DR}}{4}$$



溫度 VS ビーム強度



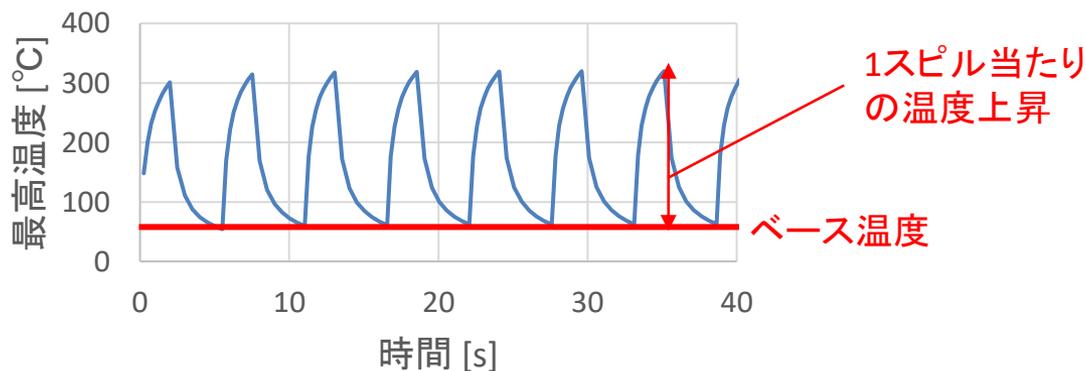
# ビーム中心位置と温度分布



スピル中のビーム中心位置の変化を温度分布から推定  
➡ 標的より1m上流のビームプロフィールモニターでの測定の傾向を再現

# 高繰り返し化の影響

- 取り出し時間が変わらないならば、同じ平均パワーでは繰り返しが早い方がpppが少ないので標的には有利。
- 1スピルでの温度上昇はpppに依存するので、pppが同じならば繰り返しを早くしても1スピルでの温度上昇は同じだが、その後のオフ・スピルでの冷却時間が短くなるので、その分ベース温度が上がり、最高温度が上がる。



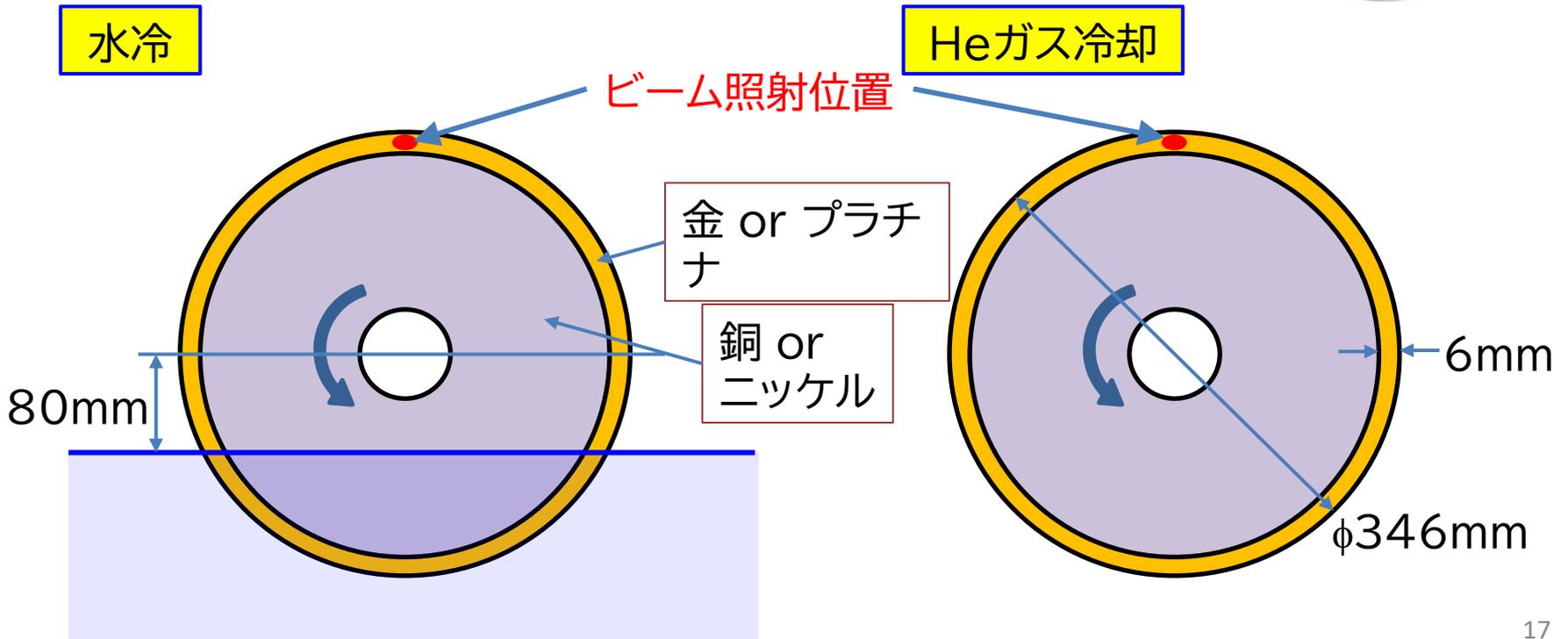
スピル周期が短くなれば、より高い  
ビーム強度まで受け入れ可能

# 回轉標的

# 次の標的: 回転標的

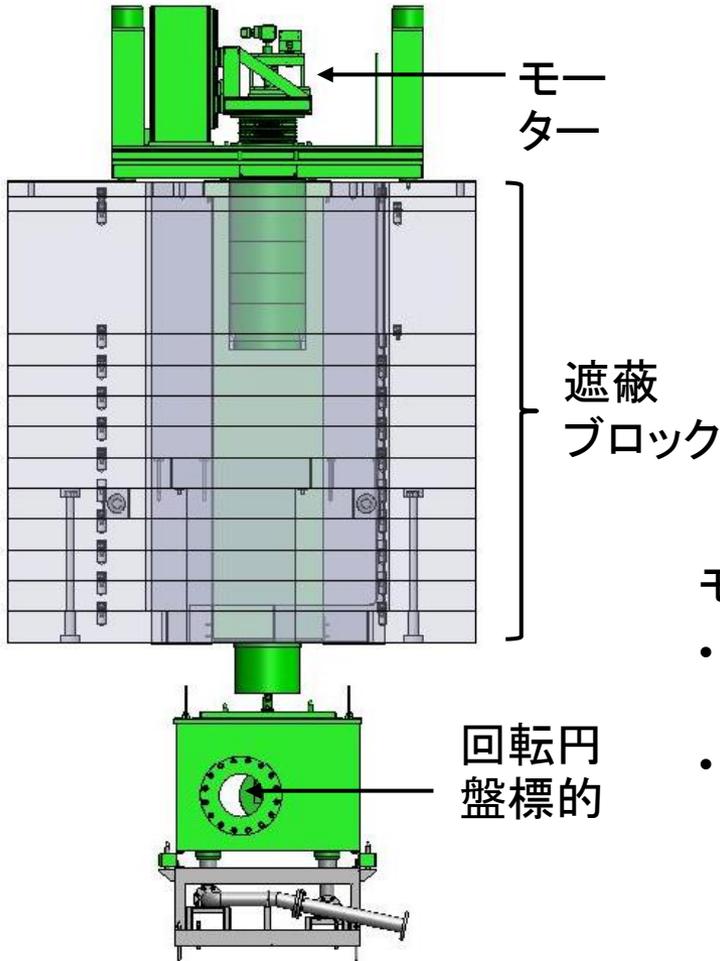
150kW以上のビーム強度に対応

- ニッケルの端に金または白金を接合した円盤型標的 (“ユーロコイン”)
- 回転させることでビーム発熱を分散
- 直接水冷またはHeガス冷却



# 回転駆動方法

以前のデザイン



新しいアイデア

水車方式



風車方式

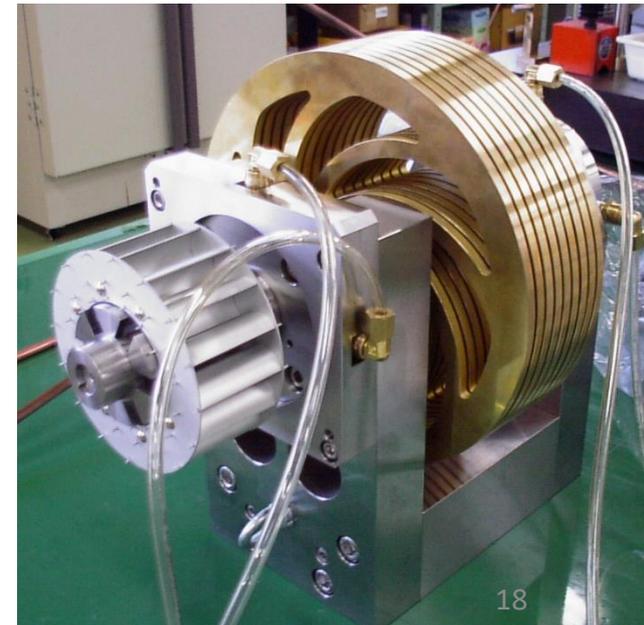


モーターやシャフトが不要

- 標的容器の気密性確保が容易
- 高放射線環境下の装置の小型化

問題:

- 標的容器の気密性
- 標的近傍の装置の大型化



# 冷却・回転方法の比較

## 水冷＋水車

- 冷却効率が高い
  - より高いビーム強度を受入可能
- 回転トルクが高い
- 耐食性が必要
- 大量のトリチウムが発生
- 水循環系のR&Dが必要
  - 下部タンクからの汲み上げ
  - イオン交換樹脂筒
  - 復水器
- Heガス循環系のR&Dも必要
  - Heガスに水分が混ざる

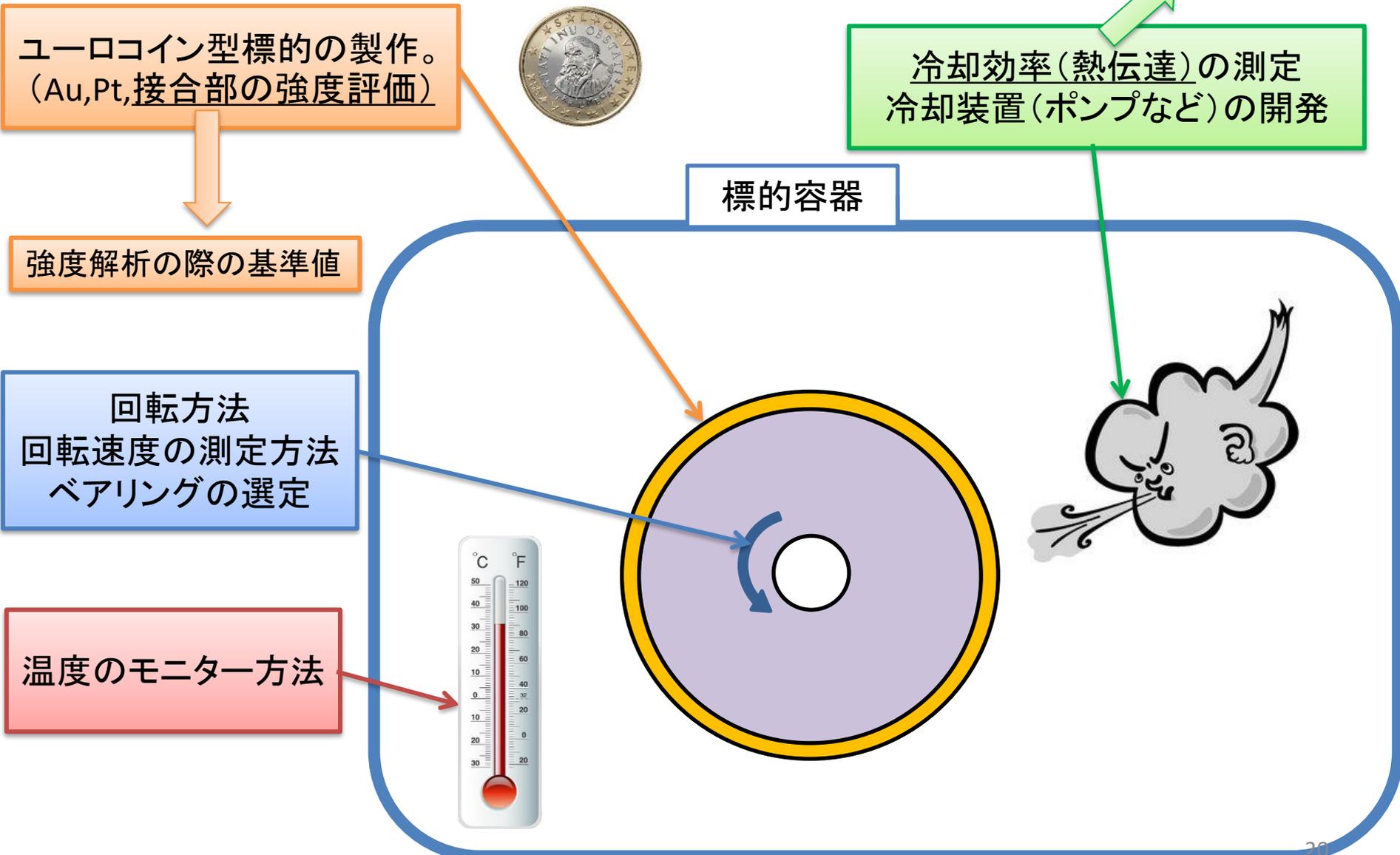
## Heガス冷却＋風車

- 余計な“汚い”ものの発生が圧倒的に少ない
  - NOx, 水素ガス, トリチウム
- 水循環系が不要
- 冷却効率が不明
- 回転トルクが不明
- 大流量のHeガス循環系が必要

“*clean*”であることが  
最大のポイント

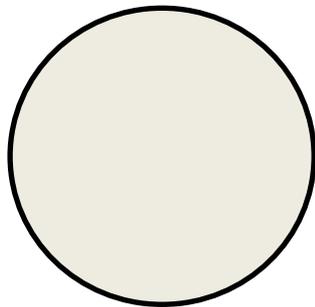
Heガスを第1候補として開発中

# 回転標的のR&D

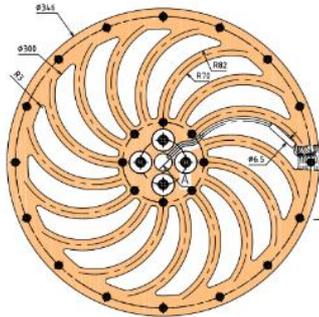


# Heガス冷却の冷却効率

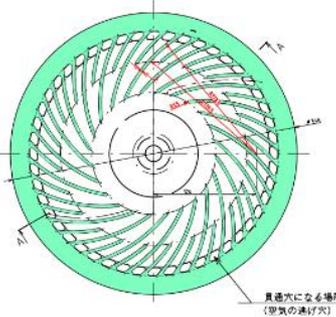
平板型



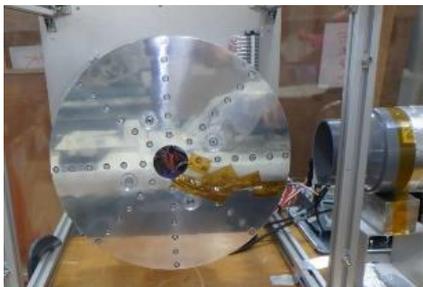
スポーク型



ターボフィン型

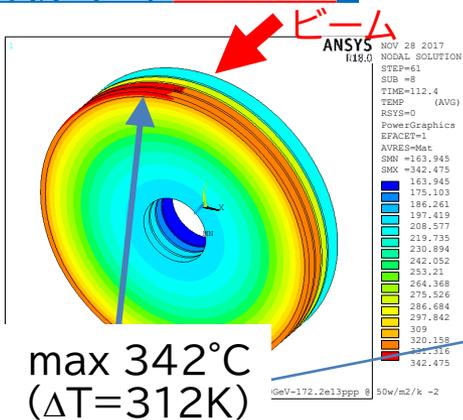


円盤の形状を変えながら、冷却効率を測定



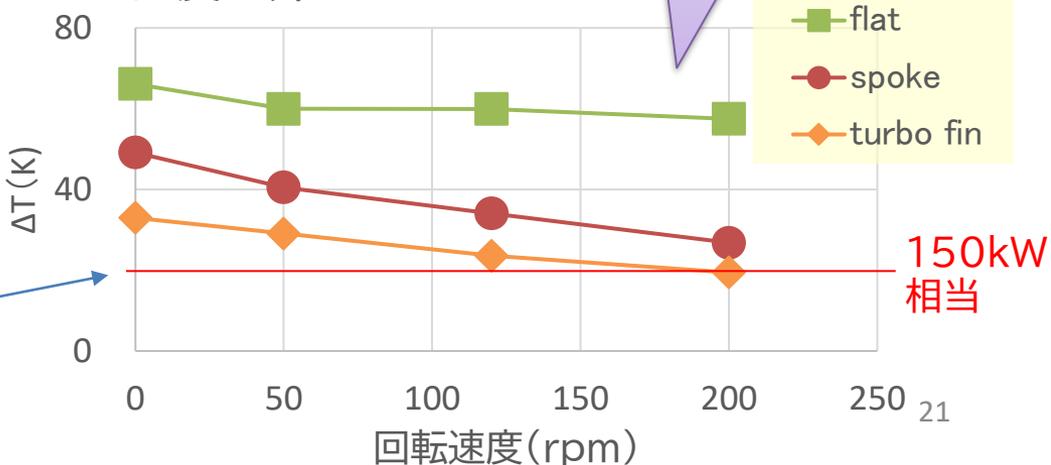
150kWビームの受け入れに十分な冷却効率を達成!

## 熱解析 (金, 150kW)



テストベンチで  
 $\Delta T=20K$ の温度  
上昇に相当

## 温度上昇@100W

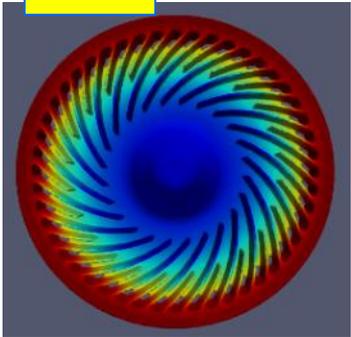


# 気体軸受

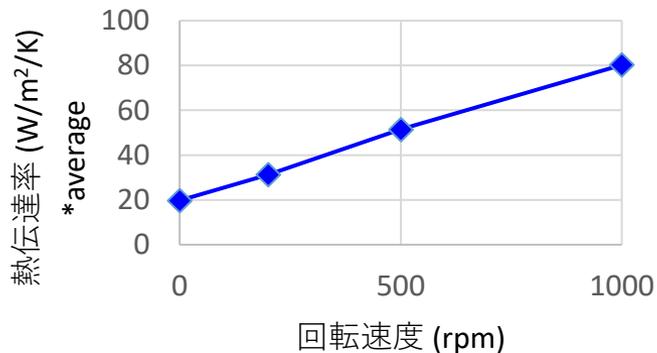
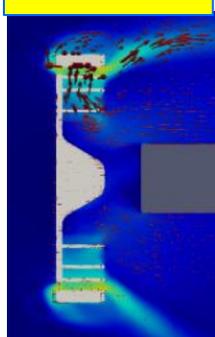
## ターボフィンの流体解析(CFD)

シミュレーション結果@500rpm

温度



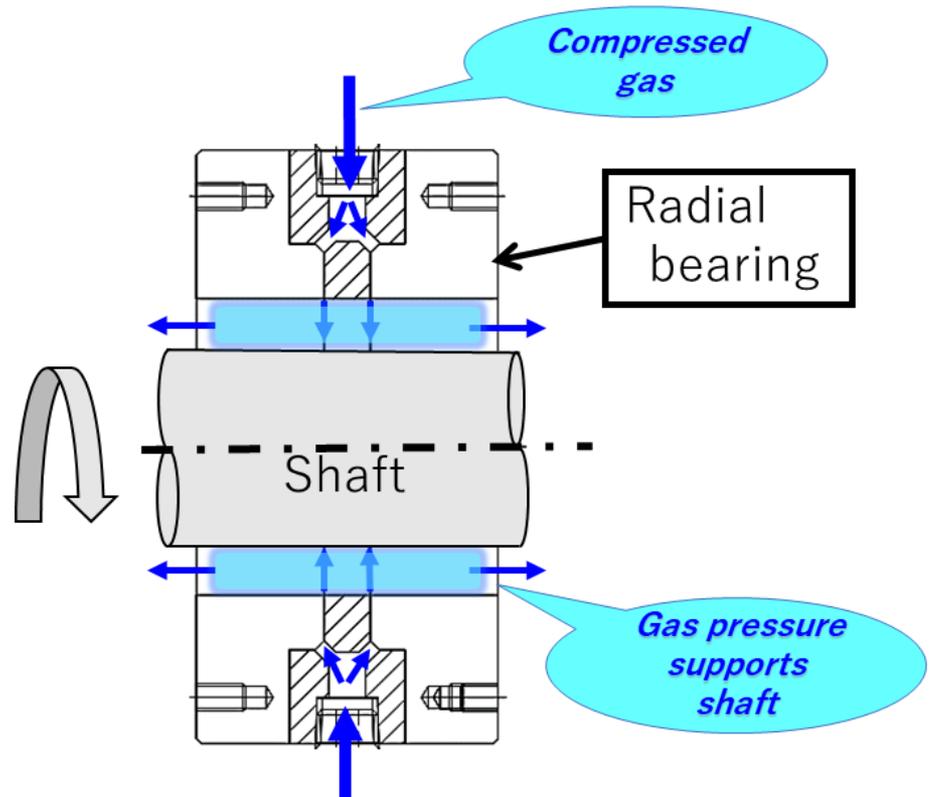
ガス流速



より高速に回転させた方がより良い冷却効率が期待できる  
→しかし、一般に高速にすると軸受の寿命が短くなる

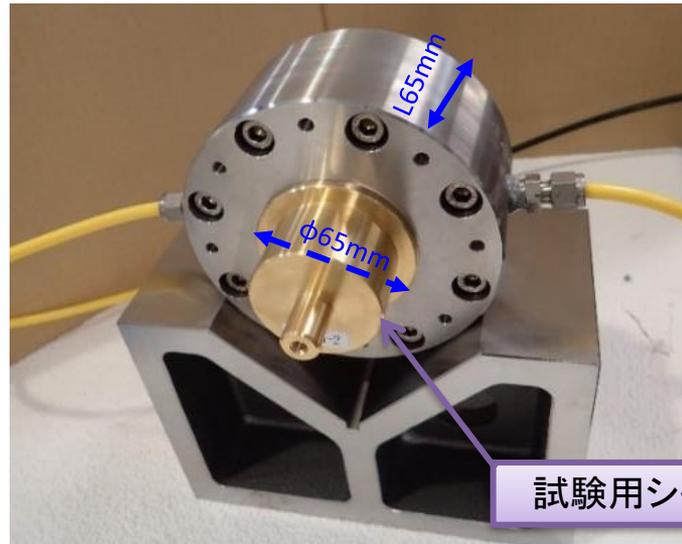
## 気体軸受

- ✓ (基本的に) 高放射線環境でも寿命がない
- ✓ より高速回転が可能  
(cf. 耐放射線ボールベアリング: max 330rpm)



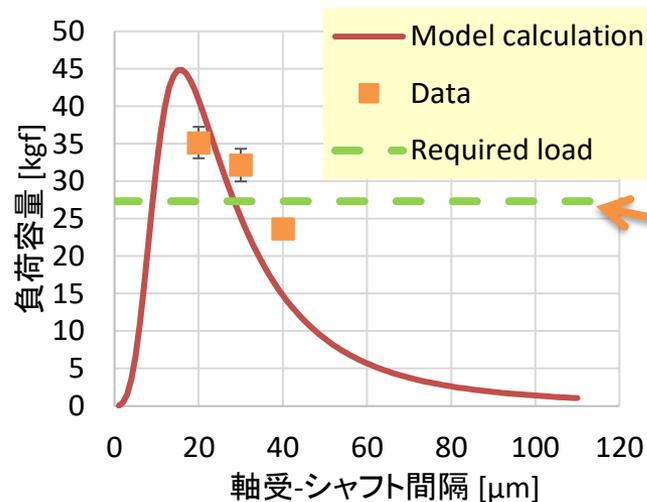
# 気体軸受の試作

気体ラジアル軸受  
試作1号機



試験用シャフト

## 静的負荷容量の測定結果

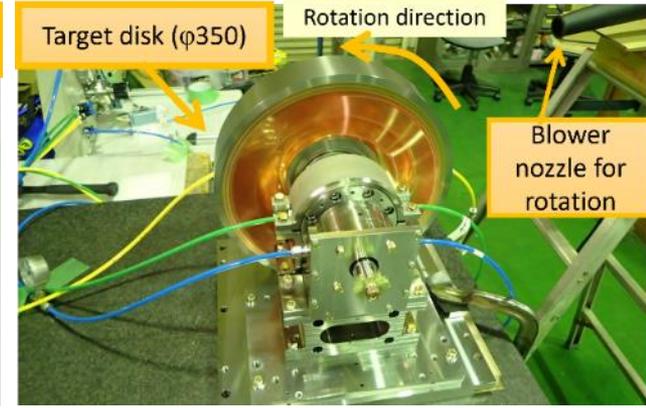
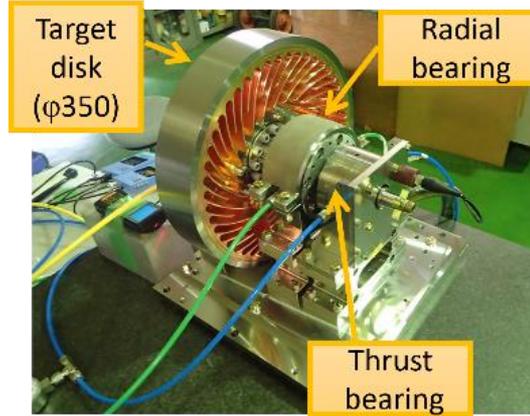
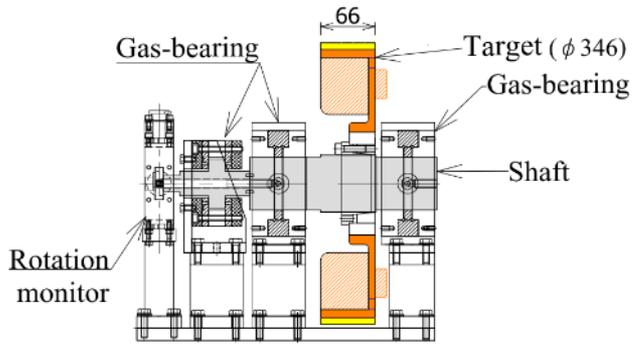


要求負荷容量：  
ディスク重量 × 1.3  
(1.3: 安全係数)

十分な負荷容量を達成！

# 気体軸受の回転試験

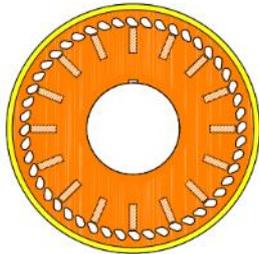
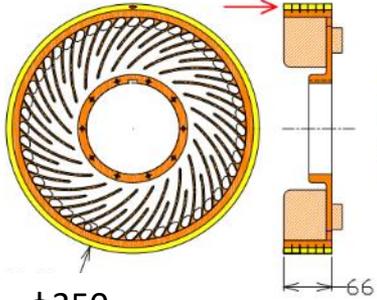
## 試験セットアップ



## 回転試験用ダミーディスク

上流面

下流面

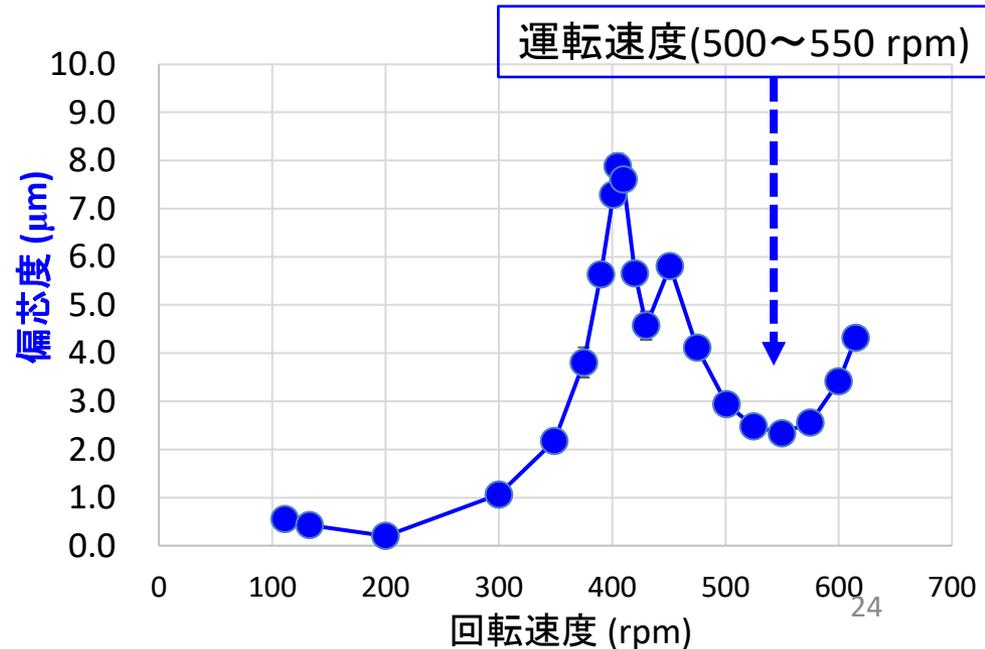


φ350  
(実機:φ346)

重量は実機より  
1.6kg重い

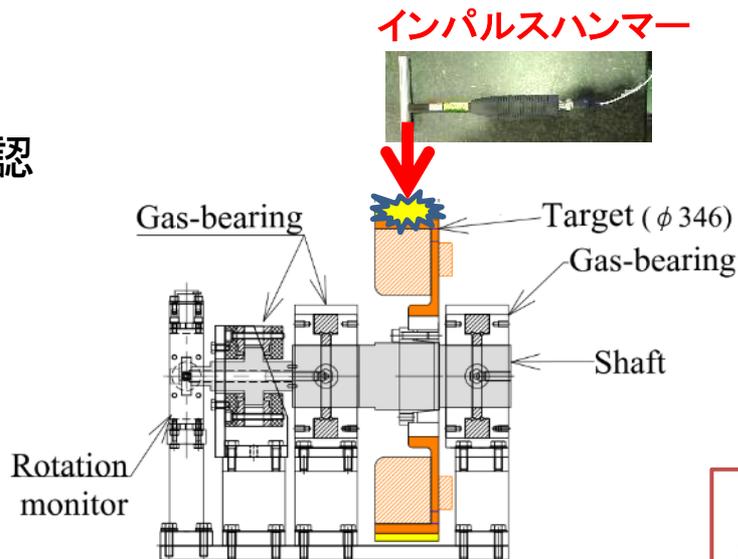


Heガスで最高550rpm (空気最高615rpm) までの高速回転に成功!!

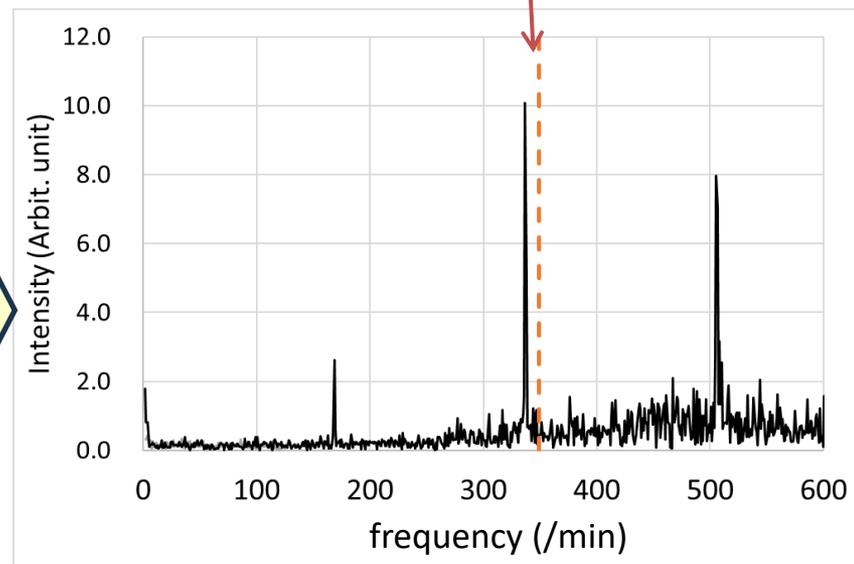
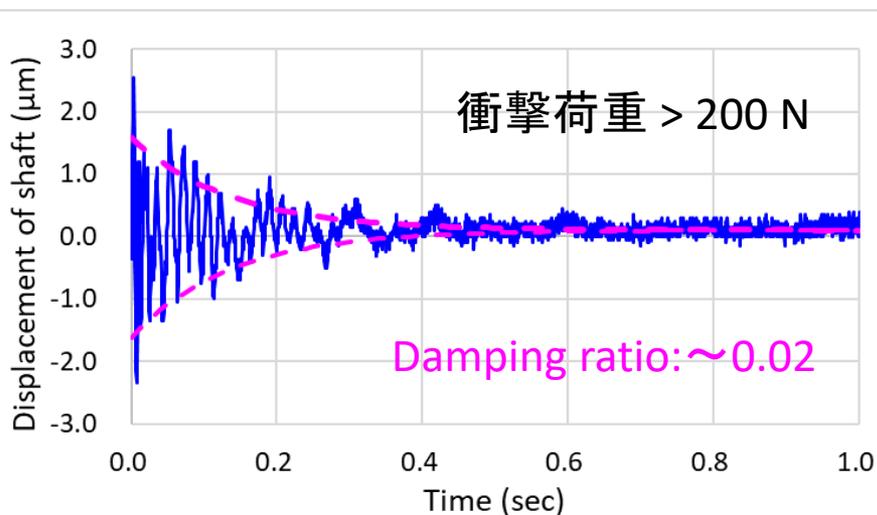


# 気体軸受の安定性

気体軸受の安定性を確認  
するためインパルスハン  
マー試験を実施



## 結果

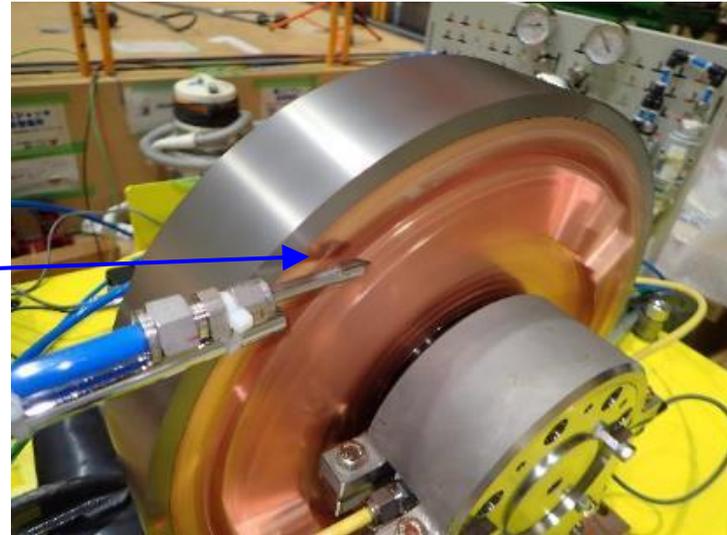
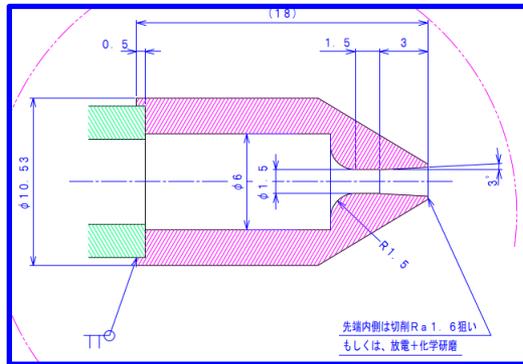


共振周波数は計算と一致

# 回転駆動用ラバールノズル(ソニックノズル)

風車駆動のためのラバールノズル(ソニックノズル)を試作し、回転駆動試験を行った

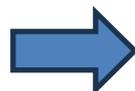
ラバールノズル



## 試験結果

ノズルのしぼり径	最高回転速度	供給ガス圧	ガス流量
ノズル無し (チューブ端)	~100 rpm	—	—
$\phi 0.5$ mm	225 rpm	0.70 MPa	20.1 l/min
$\phi 1.0$ mm	421 rpm	0.60 MPa	65 l/min
$\phi 1.5$ mm	<b>542 rpm</b>	<b>0.45 MPa</b>	<b>122 l/min</b>

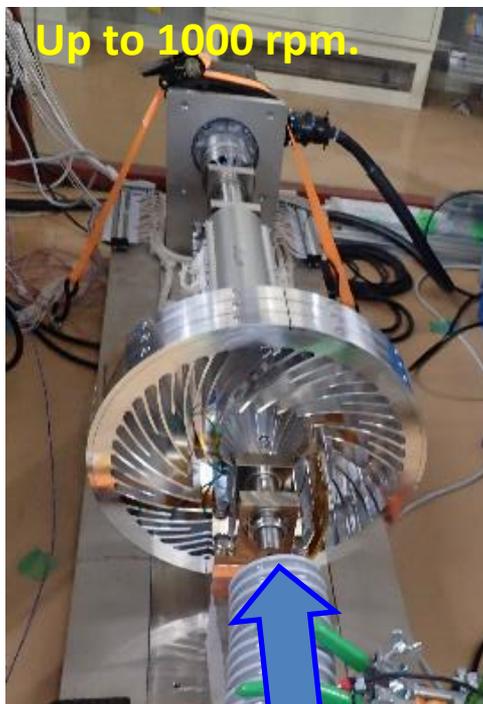
\*500 rpm is planned operation speed.



しぼり径 $\phi 1.5$ mmを採用

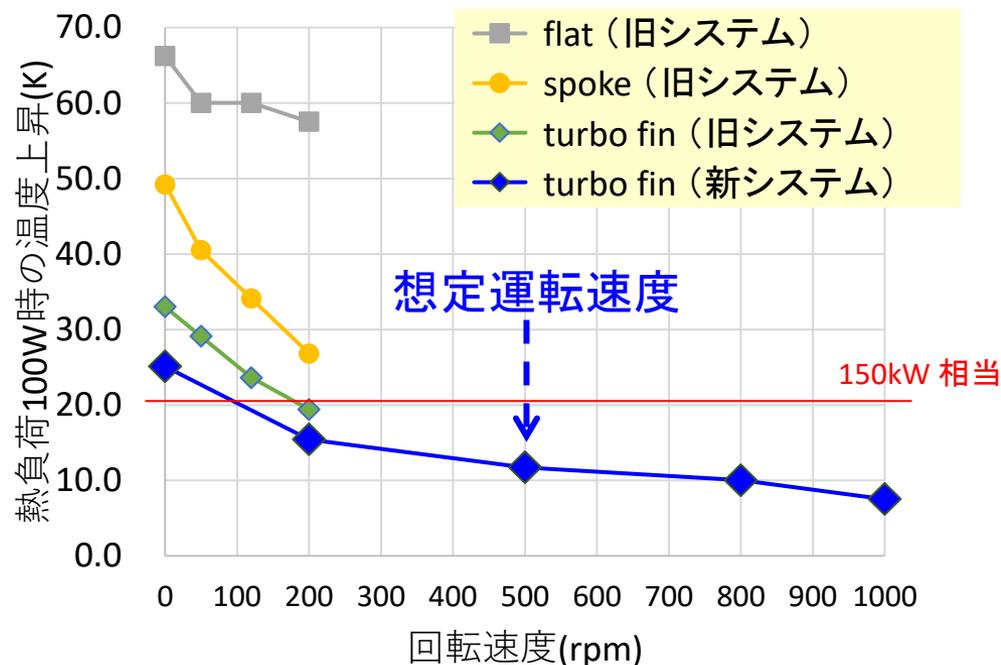
# Heガス冷却の冷却効率(2)

200rpm以上の回転速度で冷却効率測定をするための新しいテストベンチを製作



温度管理された空気  
(新規導入)

## 測定結果(空気)

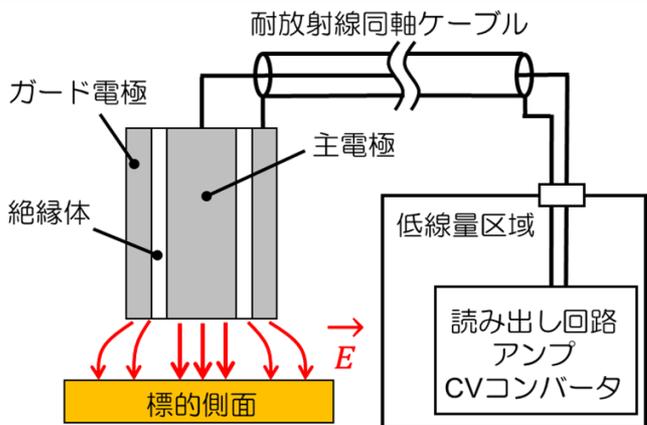


150kWビームに対して十分に高い冷却効率を500rpmで達成！

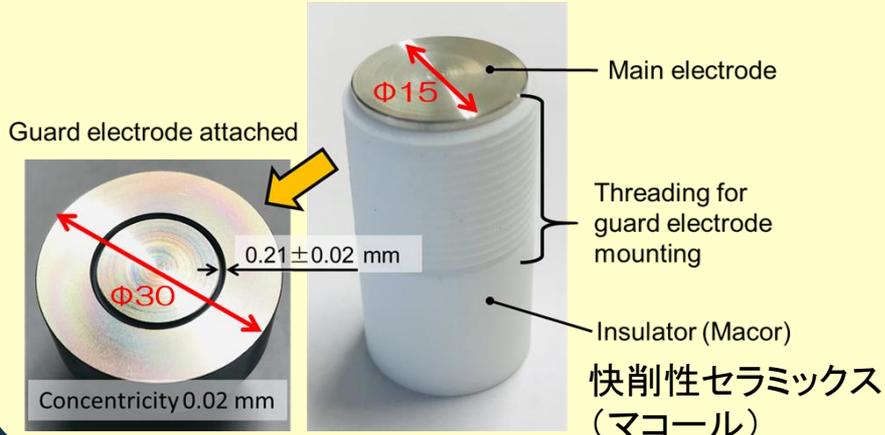
# 耐放射線変位計

標的円盤の監視のため、静電容量式の耐放射線変位計を開発

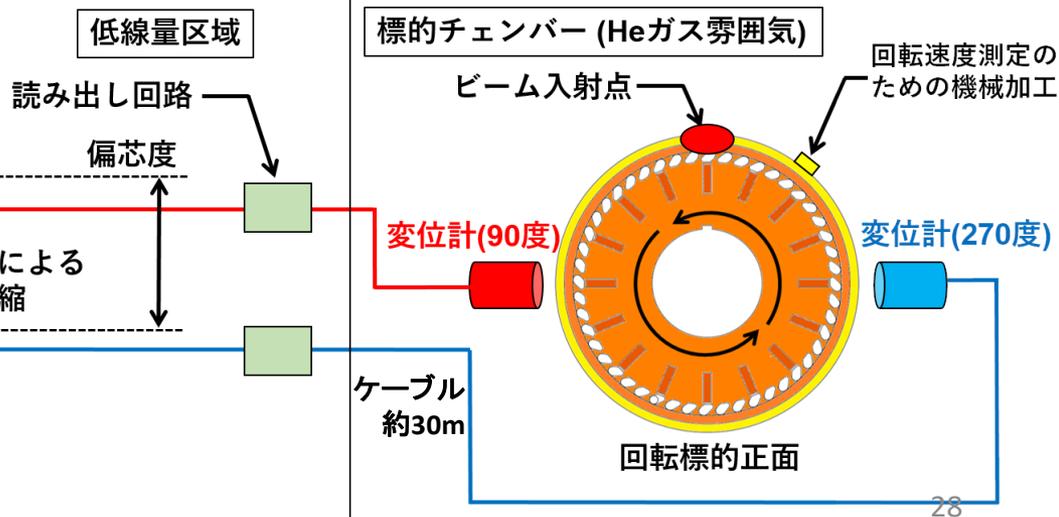
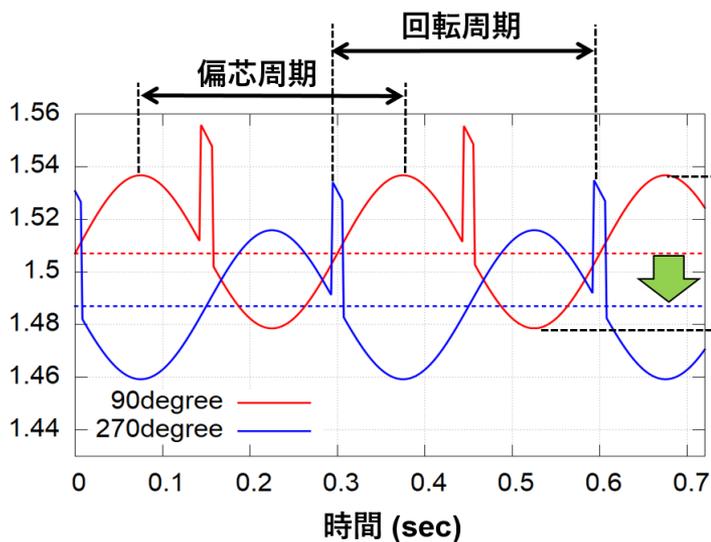
## 静電容量式変位計プローブの構造



## 耐放射線性変位計プローブ (セラミック絶縁) 試作機

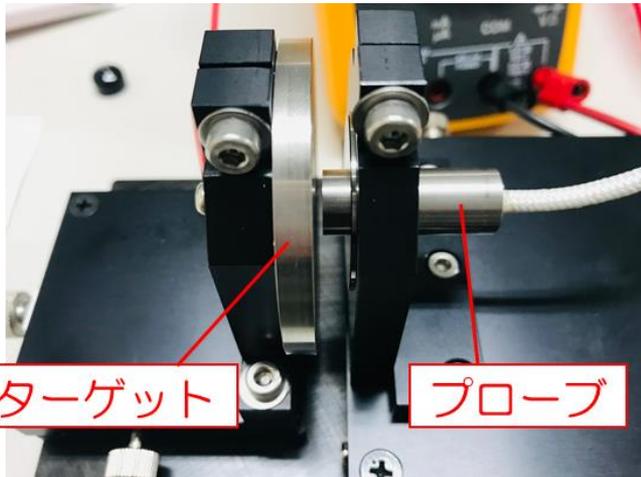


## 変位計による標的監視の概念図



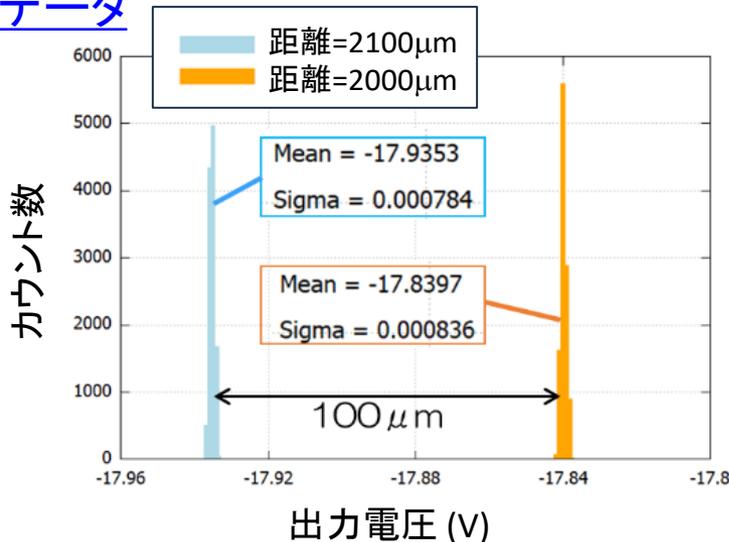
# 耐放射線変位計の分解能測定

## 分解能測定の設定アップ

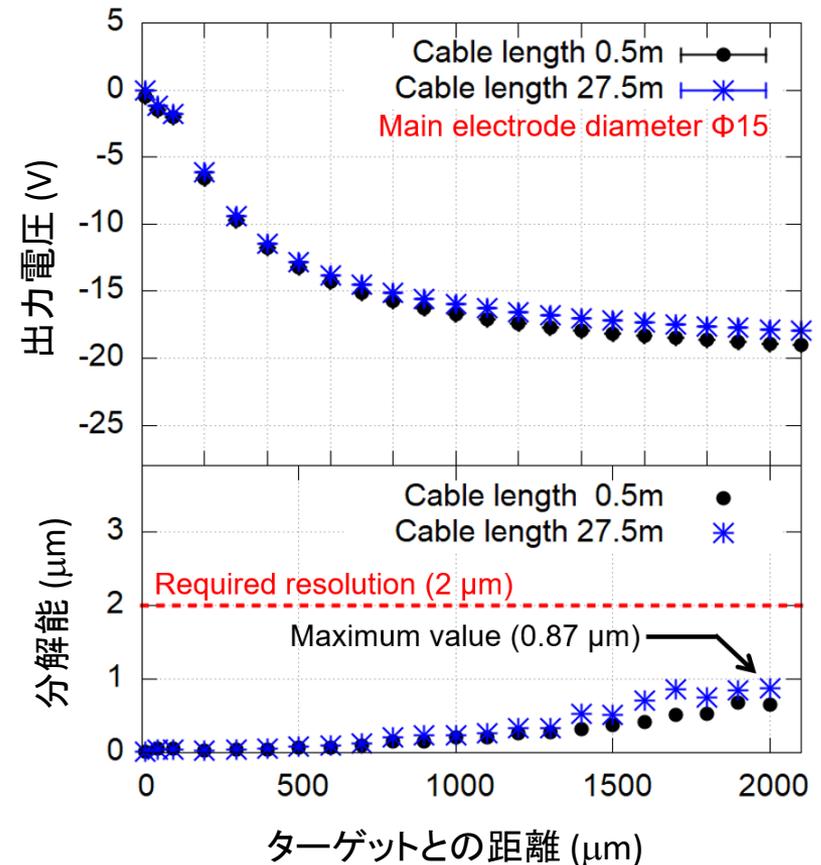


プローブとターゲットとの距離を変えながら出力電圧を測定

## 測定データ

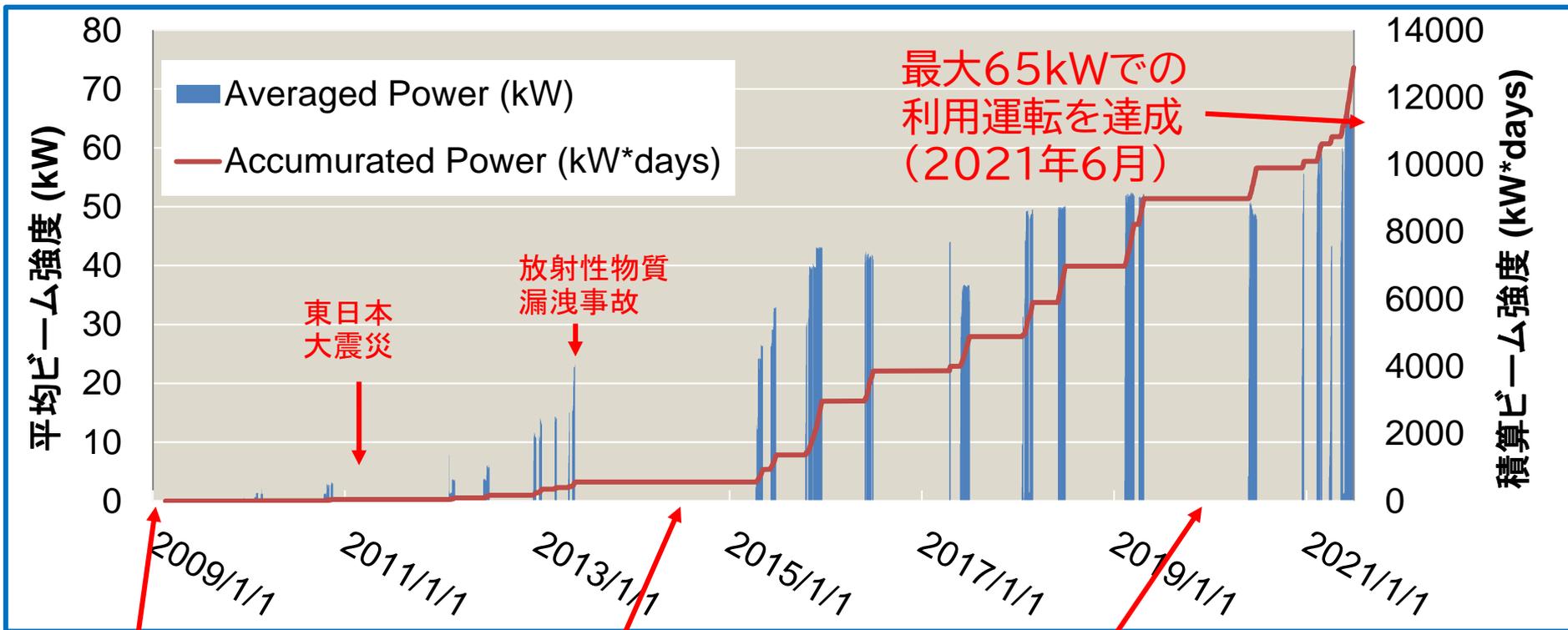


## 測定結果



要求分解能を達成!

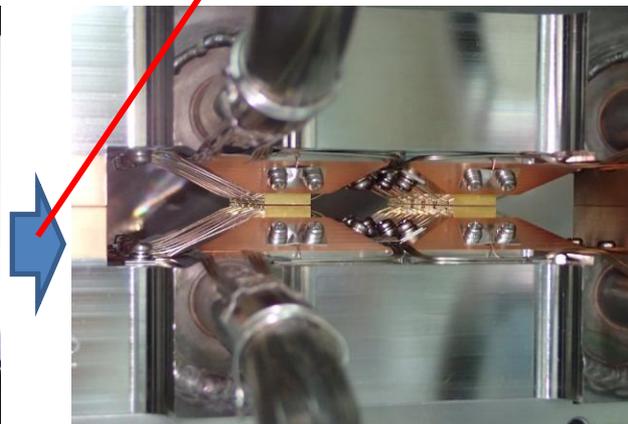
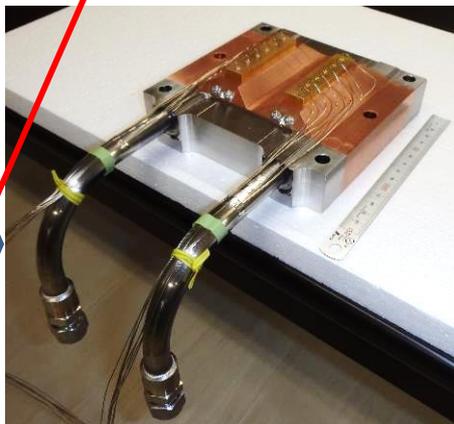
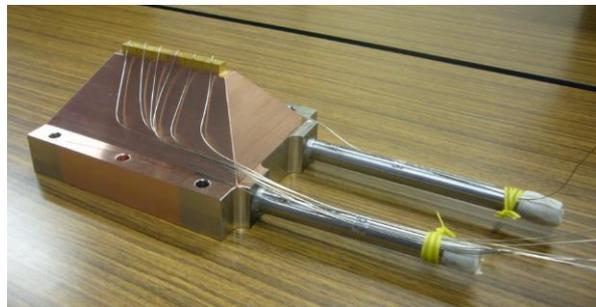
# まとめ: ビーム強度増強は標的開発とともに



1<sup>st</sup> beam  
2009/1/27

標的交換

標的交換



回転標的へ