

第22回加速器学会年会@東京都市大学
2025年8月7日
THO067



高放射化場での効率的な測量を実現する 三次元測定機を用いた測量手法の確立

高エネルギー加速器研究機構

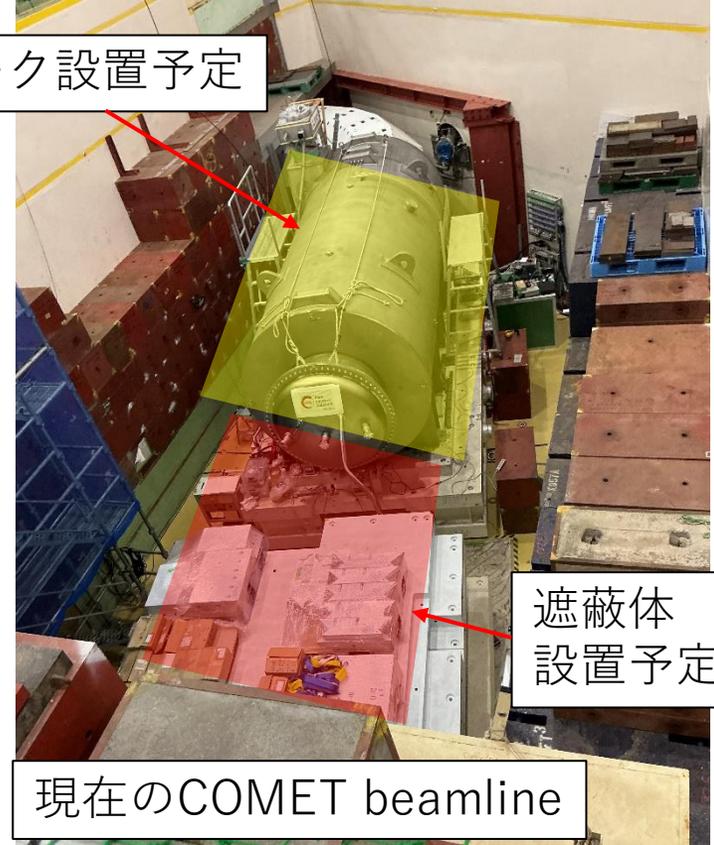
井上 薫、牧村 俊助（代理発表）、内山雄祐、深尾祥紀、
角直幸、吉田誠、飯尾雅実

Motivation

- COMET一次ビームラインは高度に放射化 (1~10 mSv/h)
- 場所が狭く測量機器の設置が困難。
- そのため、従来の測量とは異なる手法を導入して、
 - すでに設置されている装置をなるべく動かさない
 - 低コストで短時間に被曝の少ない測量作業を実現することを目標としている。

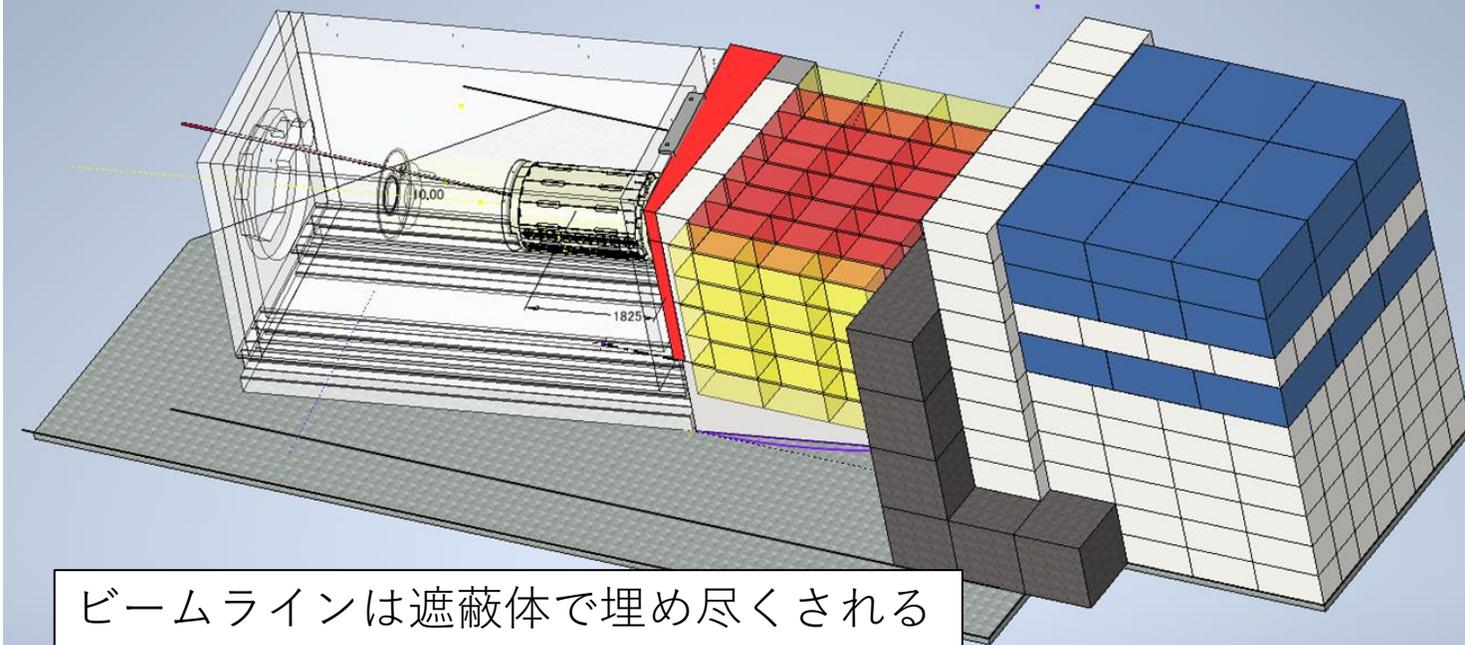
精度 ± 0.5 mm で良いので、
被ばく量を低減した測量を実現

鉄ヨーク設置予定

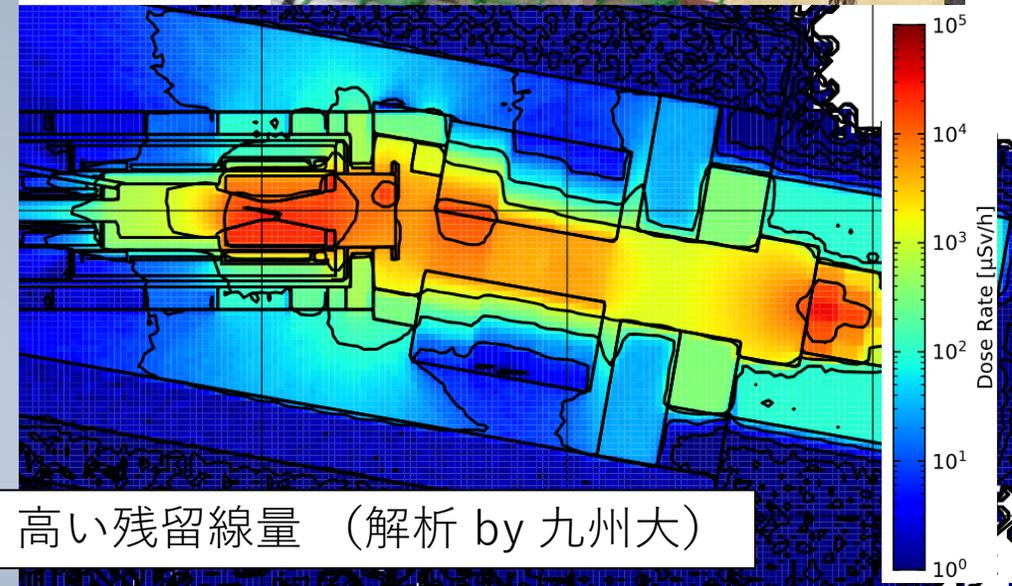


遮蔽体
設置予定

現在のCOMET beamline



ビームラインは遮蔽体で埋め尽くされる



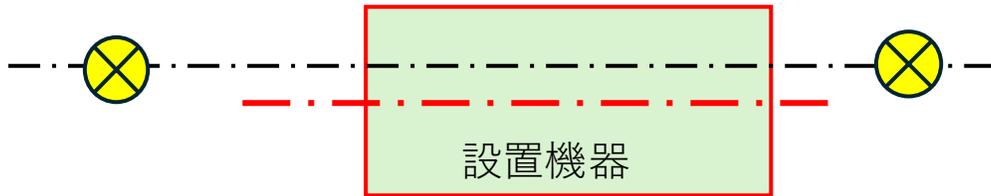
高い残留線量 (解析 by 九州大)

従来の測量手法と本手法の比較

絶対位置が既知の基準点に対する相対位置を計測

固定マーカ②

固定マーカ①



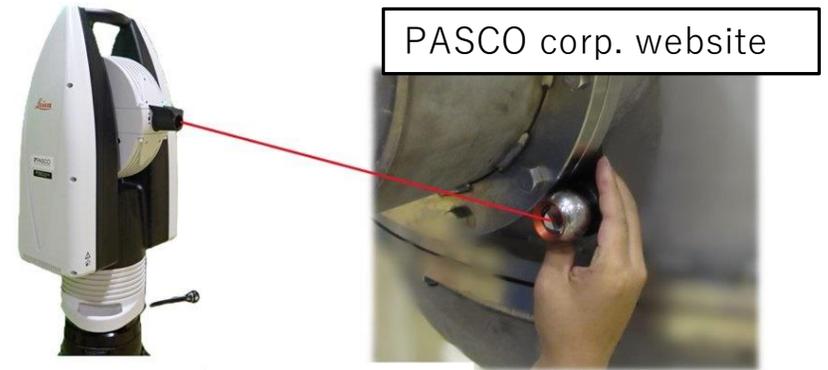
デジタルセオドライト



オートレベル

セオドライト・レベル方式

- 基準となる線上に測量機を設置する必要がある
- 測量機を水平に設置する必要がある
線量の高い場所で長時間の作業が必要
測量機を設置する場所の機器の移動が必要



レーザートラッカー方式

- 精密な広範囲な測量が可能
- 慎重なリフレクタの追尾が必要
- 機器が高価・スキルが必要

本研究の三次元測定機方式

- 測定範囲はレーザートラッカーより狭い
- 広範囲カメラでリフレクタの再追尾が可能
- 機器が安価・ユーザーフレンドリー
- 軽量・移動が容易

KEYENCE WM-3000

~
線~
使用例~



高放射化場での効率的な測量手法の確立

手近に使える装置があった

7つのプロ-マ-カが発する近赤外線光をム-バブルカメラで捉えて三次元測定

ワイドエリア三次元測定機：KEYENCE WM-3000

可搬側三次元測定機：大型装置の測定 → ビームライン測量に応用



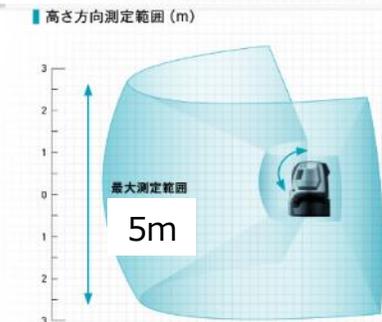
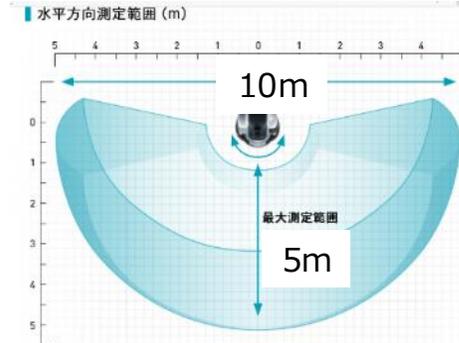
可搬側プローブを追尾するカメラユニット

人が容易に手で運べる

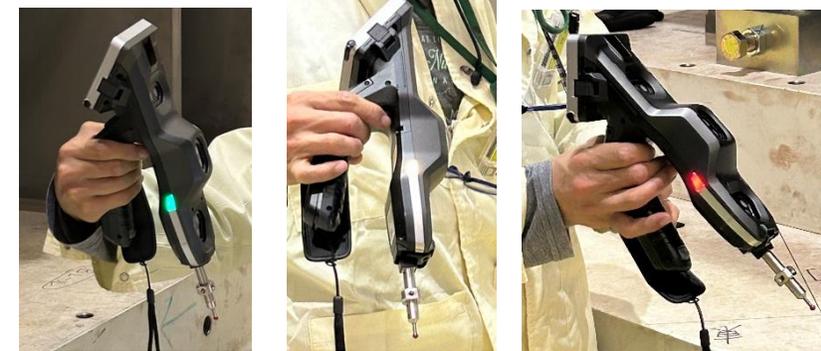


可搬側プローブ：

- 複数のセンサーでスタイラス先端位置を決定
- 追尾が外れても再追尾が容易



カタログのアピールでは計測範囲は広いが、精密に測定できる範囲は狭い。
(仕様表には記載)



LEDで測定可能レンジを区別 (緑→黄→赤)

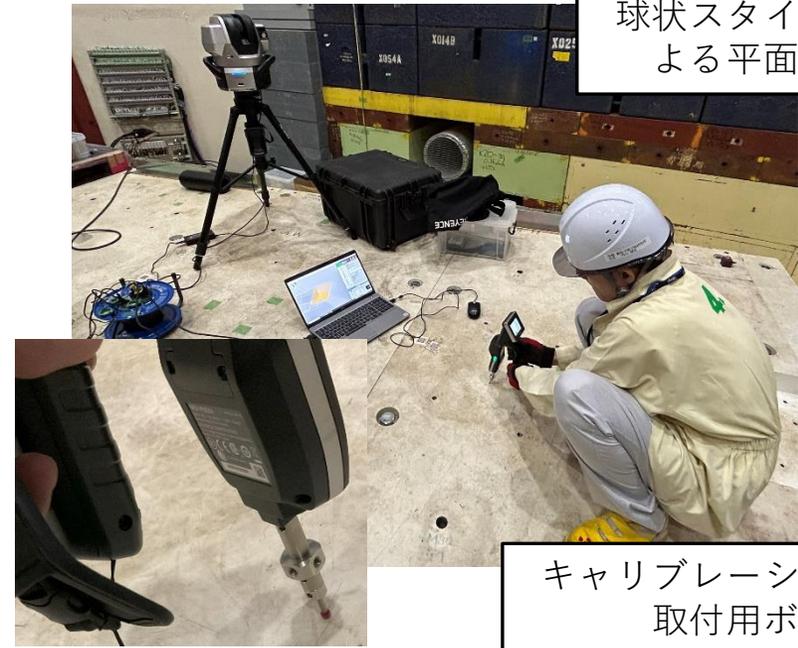
測量用プローブ：スタイラスの使い分け



先端のスタイラスの使い分け
球直径：0.2mm（針状）と5mm（球状）

針状スタイラス

- 従来のケガキ線基準を点測定
- 0.2 mm直径の中心
- 視力によって誤差が出やすい
- 測定に時間がかかる



球状スタイラスによる平面測定

キャリブレーションコーン
取付用ボルト



キャリブレーションコーン
取付基準座



球状スタイラス

- 複数の点測定から平面、円筒などを計測
- キャリブレーションコーンを使用すると点測定で再現性が高い
- 適切な測定範囲であれば精度が高い
- 短時間で測定できる

測量例①

☐ 陽子ビームライン座標系

別手法で測定したマーカーから定義

- 下部鉄ヨーク上面 (XY平面)
- 捕獲ソレノイド軸 (X軸)
- 捕獲ソレノイド垂直軸 (Y軸)
- 標的位置原点 (X軸、Y軸交点)

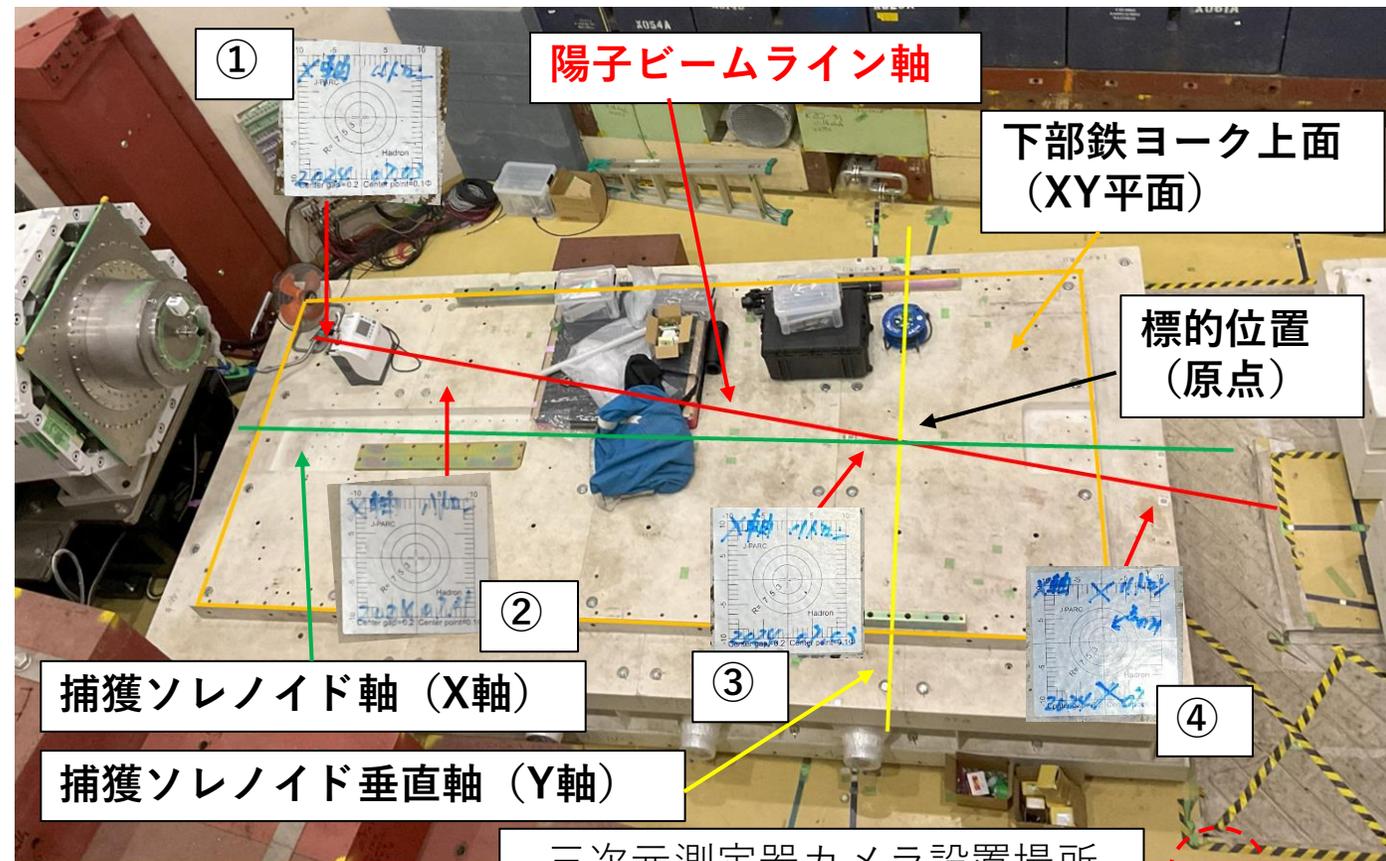
☐ 陽子ビームライン軸

- 別手法で測定したマーカー4点から定義

陽子ビームライン軸とY軸の交点は原点と重なるはずだが不一致 ($dX=-2.3$, $dY=-0.4$)

調査の結果、点①がカメラから離れすぎていて精度が出ていないことが判明

点②～④で陽子ビームラインを再定義すると一致 ($dX=-0.4$, $dY=-0.08$)



	偏差
点①	-0.158
点②	0.300
点③	0.070
点④	-0.211

	偏差
点①	-
点②	0.003
点③	0.138
点④	-0.134

精密に測量できる範囲外では急激に精度が低下。どこから低下するか判断が難しい。→ 判断の確立が今後の課題

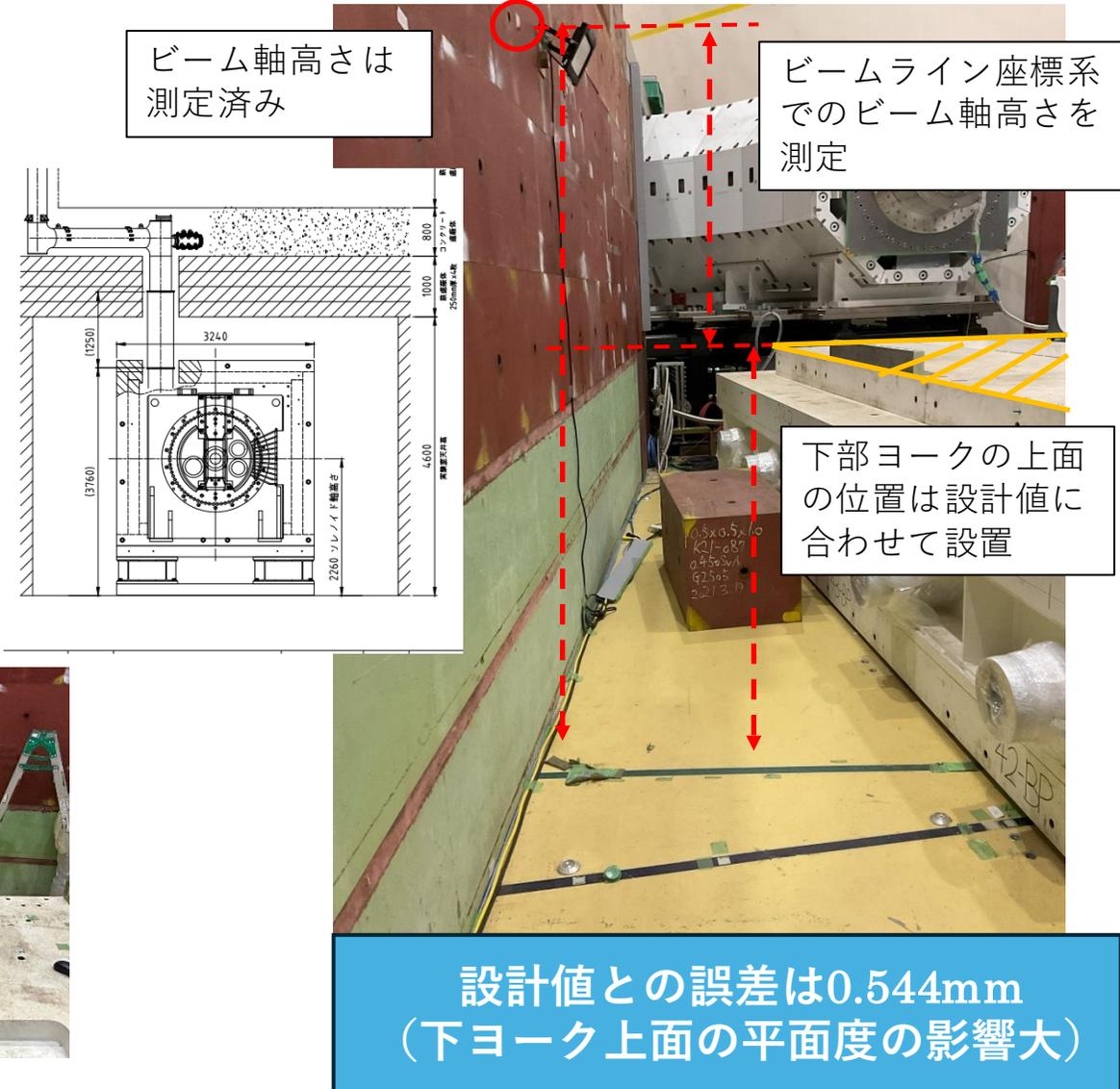
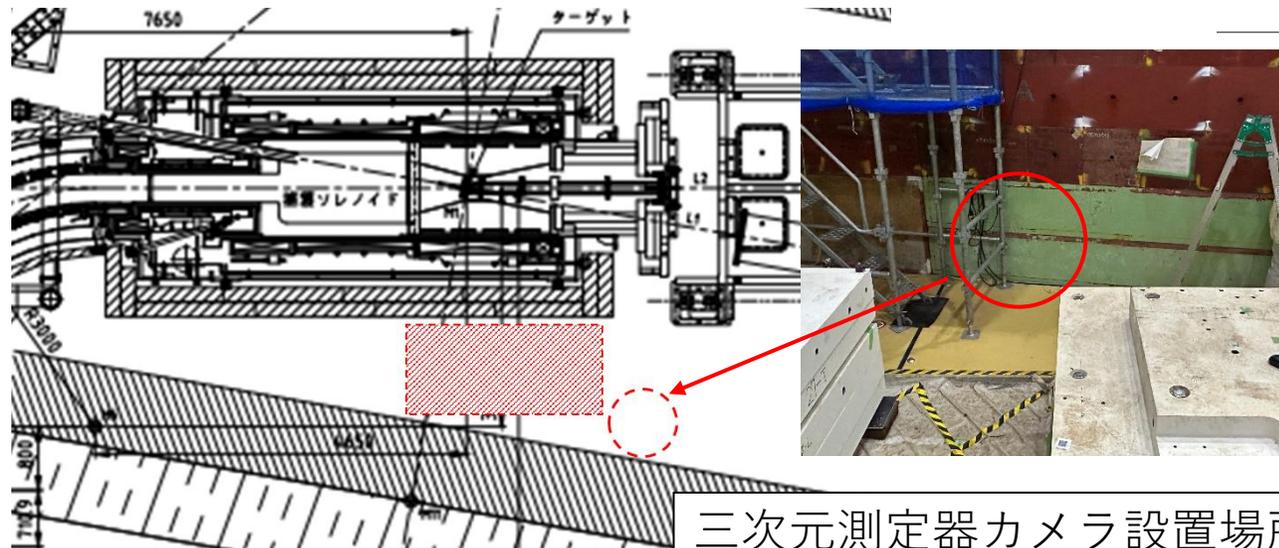
測量例②

下部ヨーク上面とビームライン高さの測定

- ❑ 側面のビーム軸高さマーカーはオートレベルを用いて、精密に設置されている
- ❑ 下部鉄ヨークの上面は、設計値に一致するように設置済み（±0.5 mm程度）

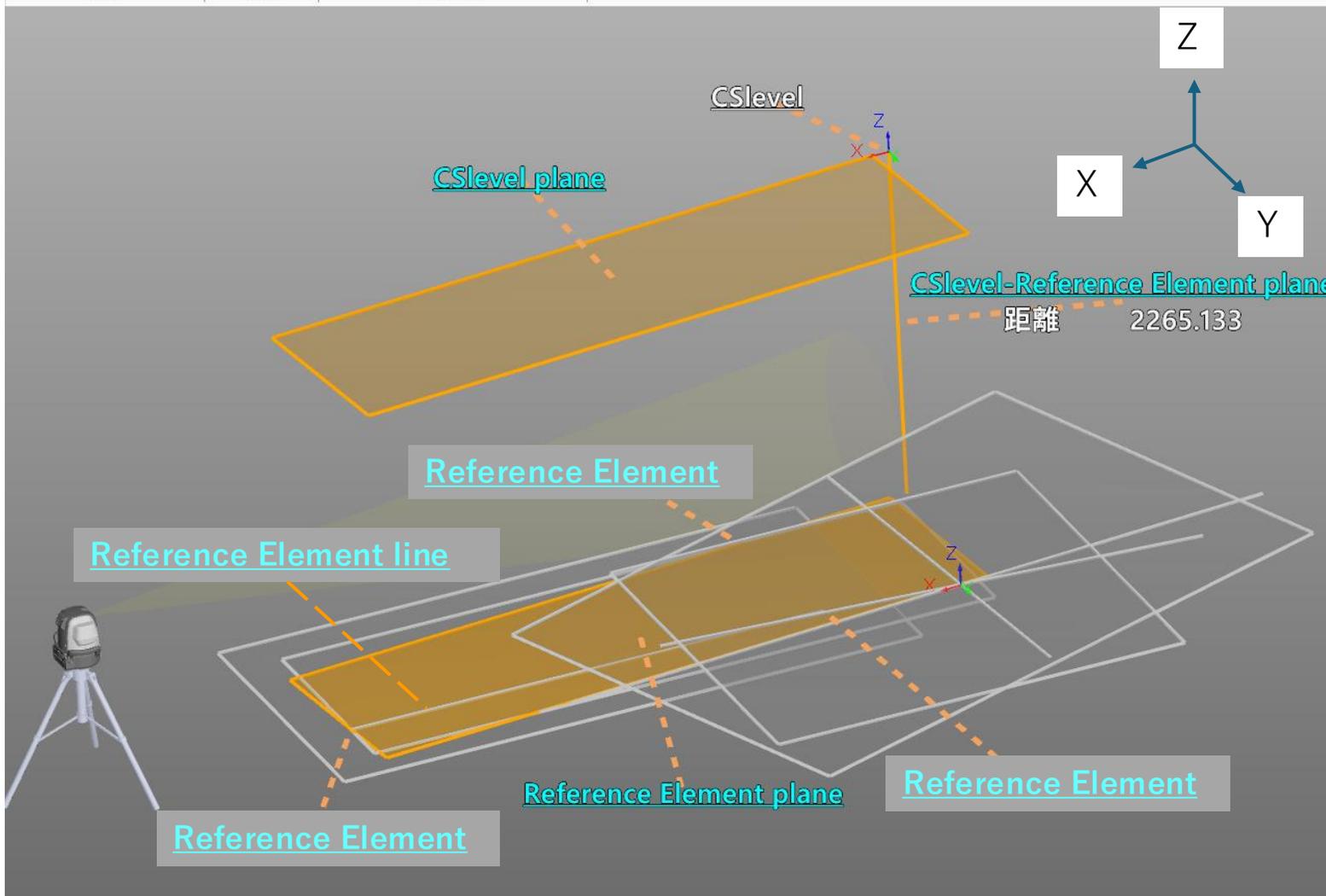
三次元測定機による測量

- ❑ 下部鉄ヨークの上面に準備したマーカーを参照して、三次元測定機でビームライン座標系を構築
- ❑ 側面のビーム軸高さマーカーを測定



設計値との誤差は0.544mm
(下ヨーク上面の平面度の影響大)

測量アプリ画面例



検出状態
統計/解析 メイン画面

要素ツリー

- [9] reference2
- [10] reference3
- [11] referenc...
- [12] referenc...
- [13] referenc...
- [14] work coo...
- [15] Target_CS...
- [16] Target_Pr...
- [17] Target_C...
- [18] Referenc...
- [19] CSlevel p...
- [20] referenc...
- [21] referenc...
- [22] referenc...
- [23] referenc...
- [24] referenc...
- [25] カメラ移動002
- [26] referenc...
- [27] referenc...
- [28] referenc...
- [29] referenc...
- [30] referenc...
- [31] referenc...
- [32] CS-DS p...
- [33] CS-DS p...

20240827_152641_1reference(TargetPoint-Pla)

基本測定 補助要素 幾何公差 座標系 ユーザ

要素間測定

距離
角度
演算
CAD距離

基本測定要素

平面

直線

点

円

円筒

円錐

球

特殊測定要素

点-補正なし

楕円

単一点円

段差円筒

長穴

角穴

コーナー円

C面直線

トラス

CAD比較

自由曲面

公差一括設定...
出力・表示...

ナビ画像...

要素情報

測定結果 測定点

No.	偏差	X座標	Y座標	Z座標
1	0.000	-1335.692	1634.312	-922.131

偏差一覧表示
再計算

基準面：CSlevel Plane

Reference Element 測定点3点より平面 (Reference Element plane)を作成してソレノイド軸高さに平行移動

原点：CSlevel

基準軸：Reference Element line

ここまでの測量では精度の低さが目立つ

本開発での目標

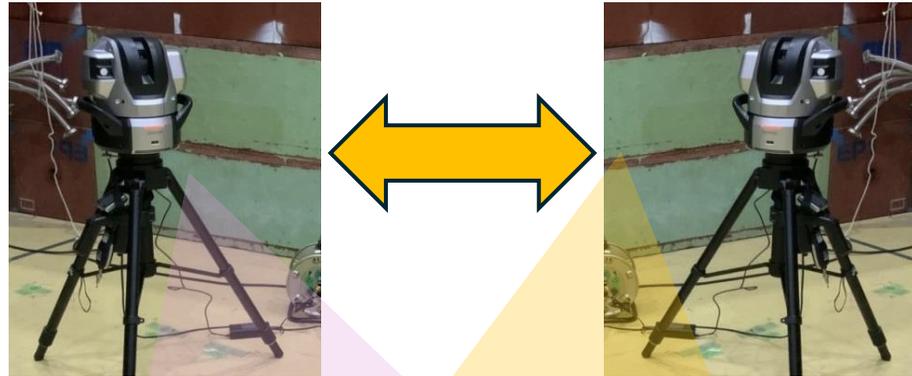
- 高放射線場での測量
 - 狭所での測量
 - 短時間での測量
 - 低コスト

精度が低くても機能を生かして自由度を高める

重要な技術の紹介：カメラ移動

位置が既知の基準座の測定 → ベストフィット座標系
新規の基準座を測定して過去の座標を入力

→ 過去の座標系を呼び起こすことができる



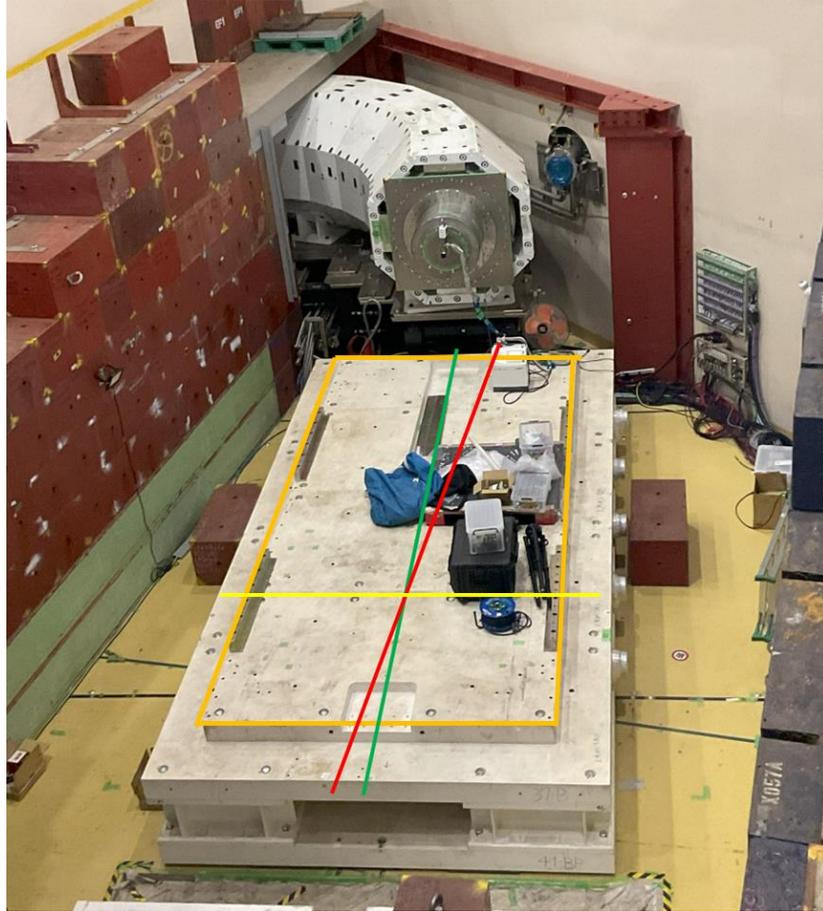
適用できる状況

- 測量を開始する際に、測量機を設置
→過去に測量したビームライン座標系を呼び起こす
- 見通しの悪いビームラインを跨いだ測量



これまでの測量では、カメラ移動後に同じ計測点を測量すると、誤差 $\pm 50 \mu\text{m}$ 以内に収まっている。(計測点までの距離・角度にも影響を受けると推測)

基準座の配置による測量の高速化



①測量例で示したように別手法で測定したマーカーを基準に「ビームライン座標系」を定義



- ②基準座を埋め込みビームライン座標系上の位置を計測
- 様々な位置・高さに基準座を配置
 - 測量時に基準座を測定すればビームライン座標系を呼び起こせる。
 - 新機器をビームライン設置する際の測量の高速化を実現

基準座の配置

- 三次元測定機で精度の高い測定できる範囲は狭い
→ 誤差の大きな測定範囲で使用している
- ビームライン座標系を狭い範囲の基準座測定で拡大
→ 誤差の蓄積
- 基準座を各所に配置して計測を継続している

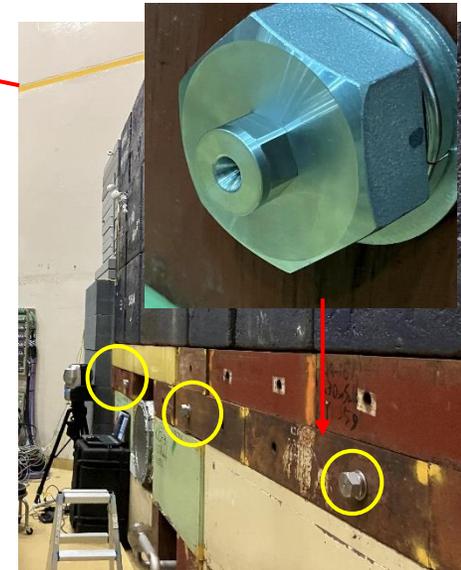
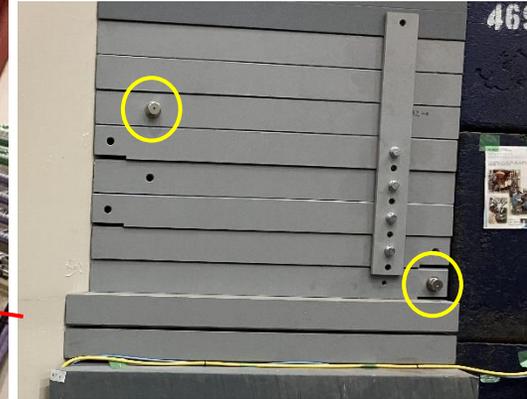
□ カメラ移動後（1回）に同じ場所を計測： $\pm 50 \mu\text{m}$

（今後の計画）

- 一周回って同じ場所を再測定 → 誤差測定
- 誤差補正によって測定精度を向上

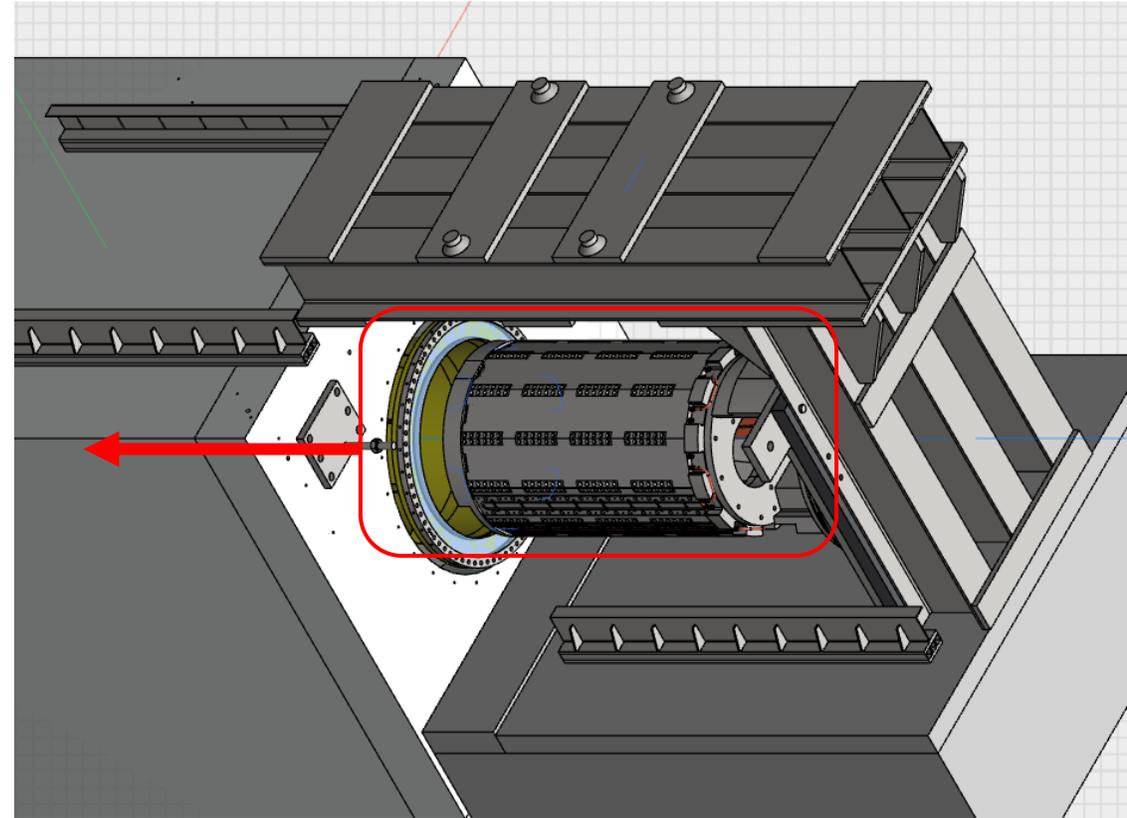
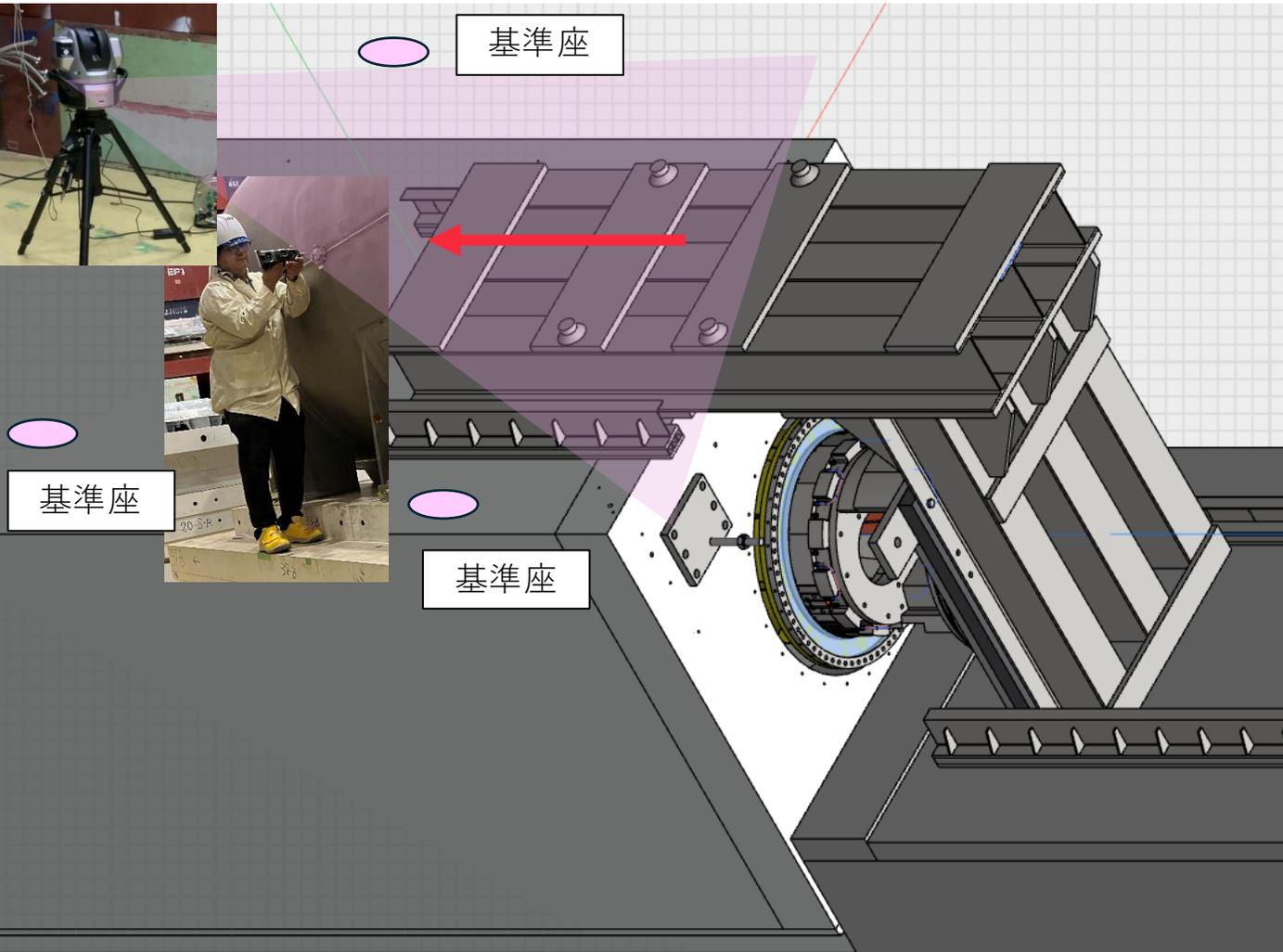


このうち少なくとも三点を計測できれば、ビームライン座標系を呼び起こせる。（三点以上計測できれば精度の向上も期待できる）



想定している活用法

- 捕獲ソレノイド遮蔽体：超伝導電磁石を標的で発生した二次粒子から守る（放射化した大型遮蔽体）
- 上部のL型吊具で吊りながらガイドに沿って捕獲ソレノイド内に挿入
- 線量の低い鉄ヨーク上部で測量をしながら精密に設置



まとめ

- COMET実験室は高度に放射化・遮へい体で埋め尽くされる
- 狭所で短時間に（低コストで）測量できる手法の確立を目指している
- Keyence三次元測定機を使用した測量手法の開発を進めている

- 一度に測定できる範囲は狭く、広い範囲に拡張すると精度は高くない
- ビームライン座標系を基準にした基準座を施設に多数、準備して
 - 高放射線場での測量
 - 狭所での測量
 - 短時間での測量
 - 低コスト

な測量手法の開発を進めている

- ✓ 本研究でを使用した三次元測定機は This work was supported by QUP, World Premier International Research Center Initiative (WPI), MEXT, Japan.の支援を受けたものです。
- ✓ 本研究でを使用したキャリブレーションコーン固定用ボルトはKEK機械工学センターの製造支援を受けたものです。