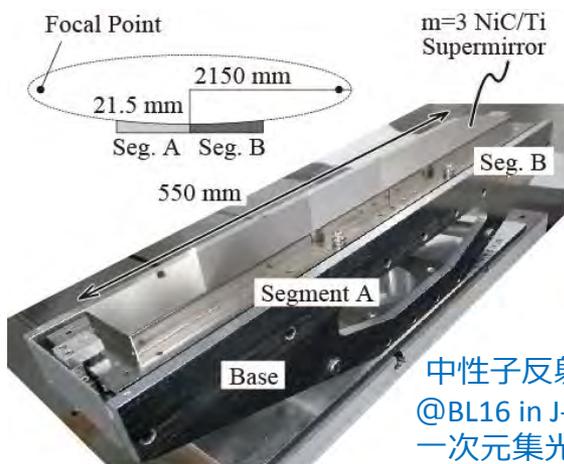
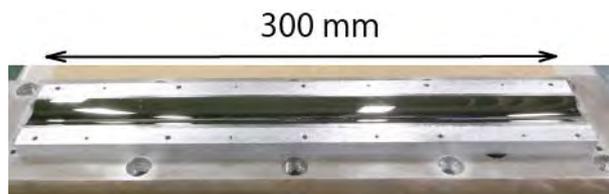




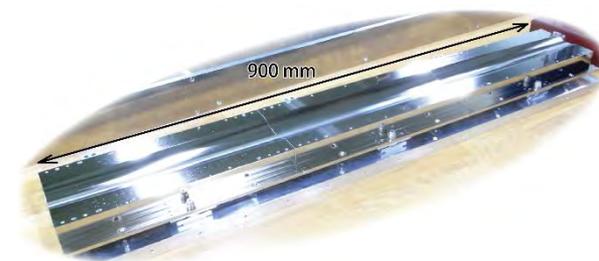
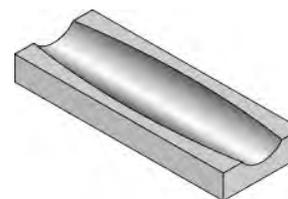
京大炉・理研連携による 金属母材中性子集光スーパーミラー開発の現状



中性子反射率計SOFIA
@BL16 in J-PARC/MLF用
一次元集光楕円ミラー



小型中性子源HUNS@北大用
回転楕円ミラー



中性子スピネコー分光器群
VIN ROSE@BL06 in J-PARC/MLF用
大型回転楕円ミラー（開発中）

理化学研究所

京都大学原子炉実験所

KEK

北海道大学

細畠拓也

日野正裕

山田悟史

古坂道弘

山形豊

吉永尚生

堀耕一郎

武田晋

小田達郎

遠藤 仁

河合利秀

竹田真宏

森田晋也

研究背景と目的

中性子ビーム利用装置の
発展と多様化

カスタムメイドの
集光素子へのニーズの高まり

従来の中性子集光ミラー

ガラス母材（研削/研磨）

↓
スーパーミラー成膜

利点：超高精度

欠点：

- 加工に時間がかかる
- 3次元的な自由曲面加工が困難
- 耐放射線性が低い

コスト的に導入困難
(欲しくても手が届かない)

京大炉・理研による中性子集光ミラー

金属母材（アルミ等削り出し）

↓
無電解ニッケルリンめっき（超精密切削・研磨）

↓
スーパーミラー成膜

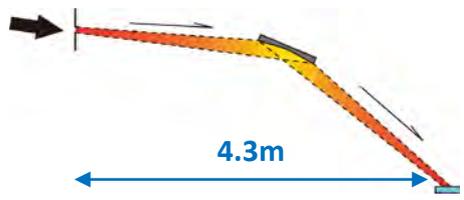
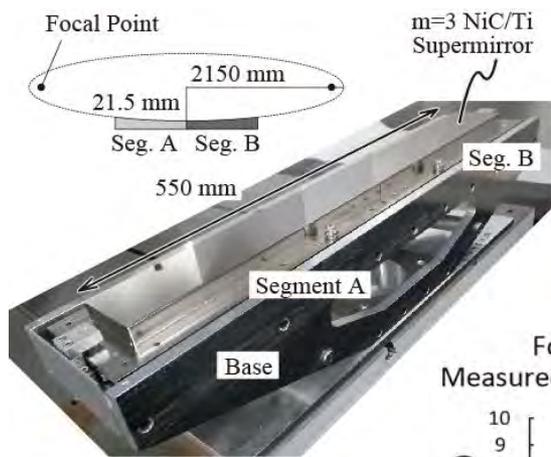
- ガラスと同等の超平滑面 (粗さ $<5 \text{ \AA}_{\text{rms}}$)
- 自由曲面加工が容易かつ高速
- 耐放射線性が高い
- 遮蔽体へのミラー性能付与も可能

低コストかつ高い設計自由度で
中性子集光ミラーの普及を目指す

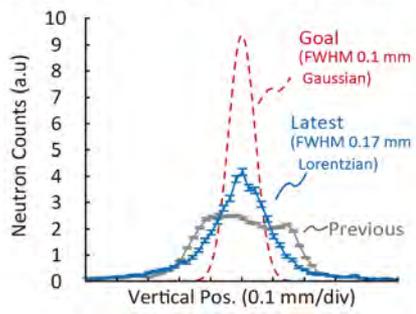
開発の現状

中性子反射率計SOFIA@BL16 in J-PARC/MLF用 一次元集光楕円ミラー

試作改良を繰り返し、目標スポットサイズ0.1 mm
(10mm サンプルへの10mrad入射) まであと一歩

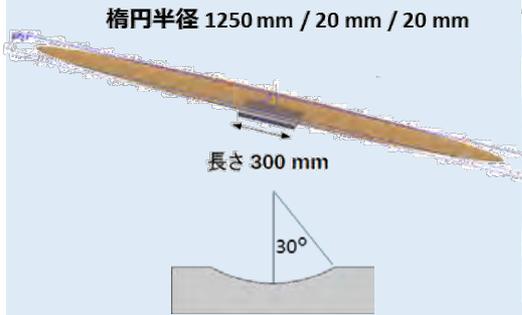


Focusing Spot Size
Measured at BL16 in J-PARC/MLF

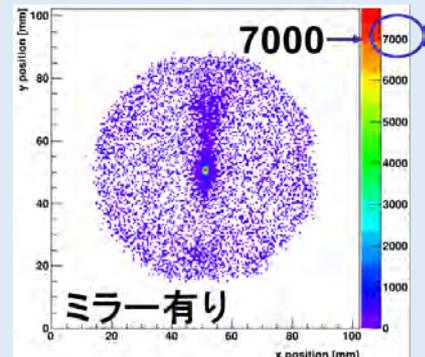
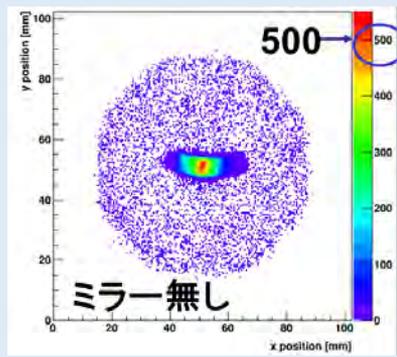


小型中性子源HUNS@北大における小角散乱用 回転楕円ミラー

傾斜の大きな曲面のスーパーミラー化に成功

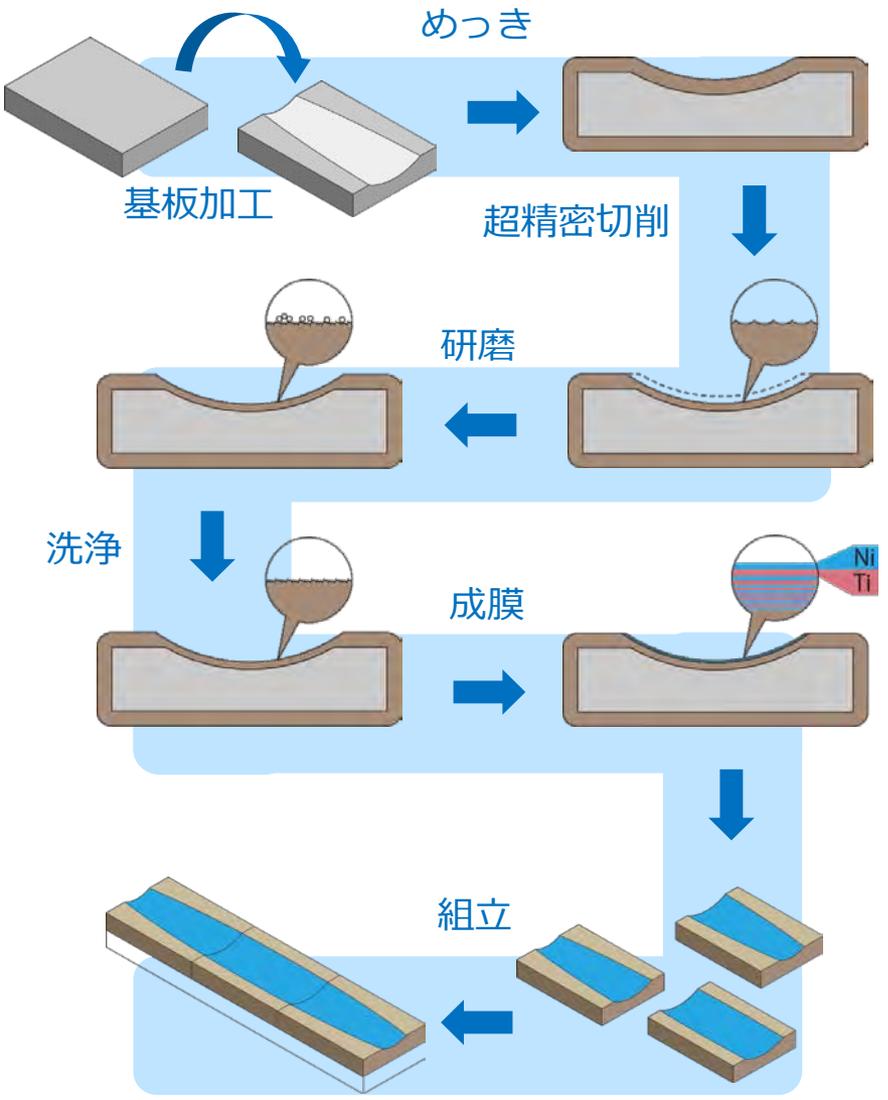
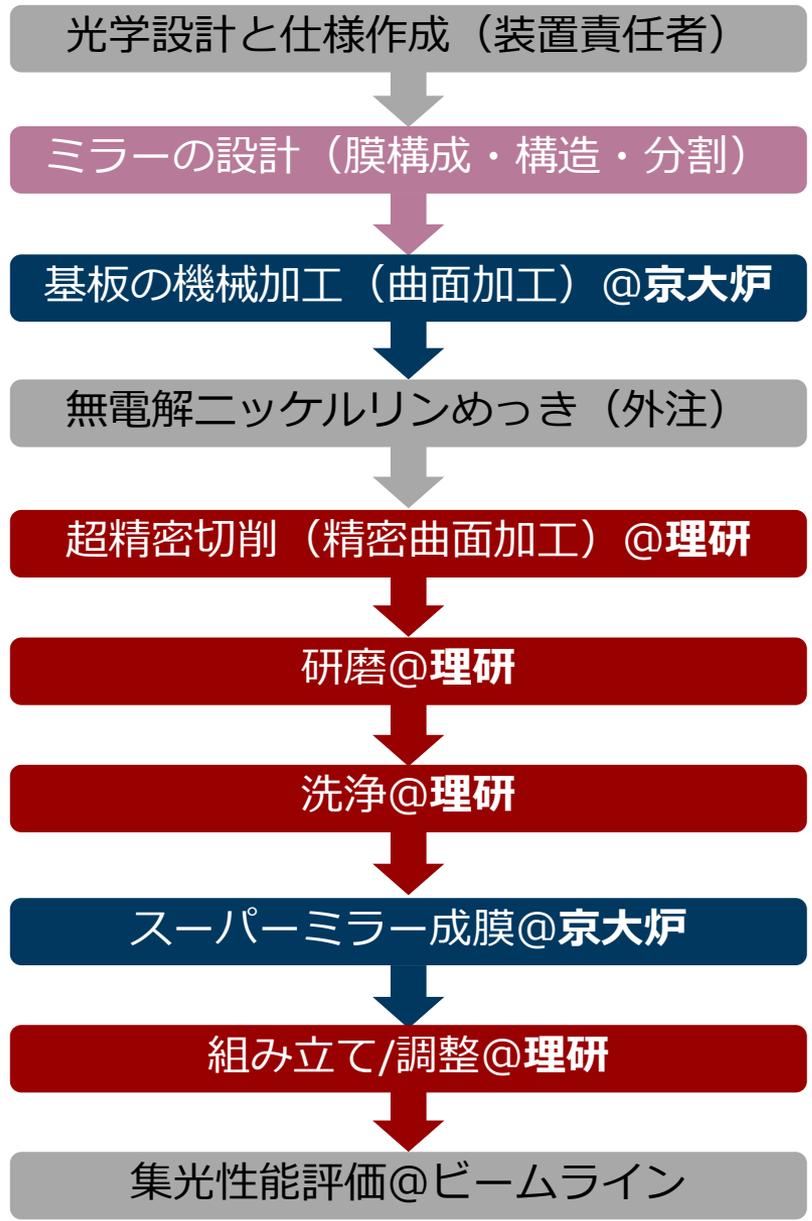


Focusing Experiment @BL06 in J-PARC/MLF

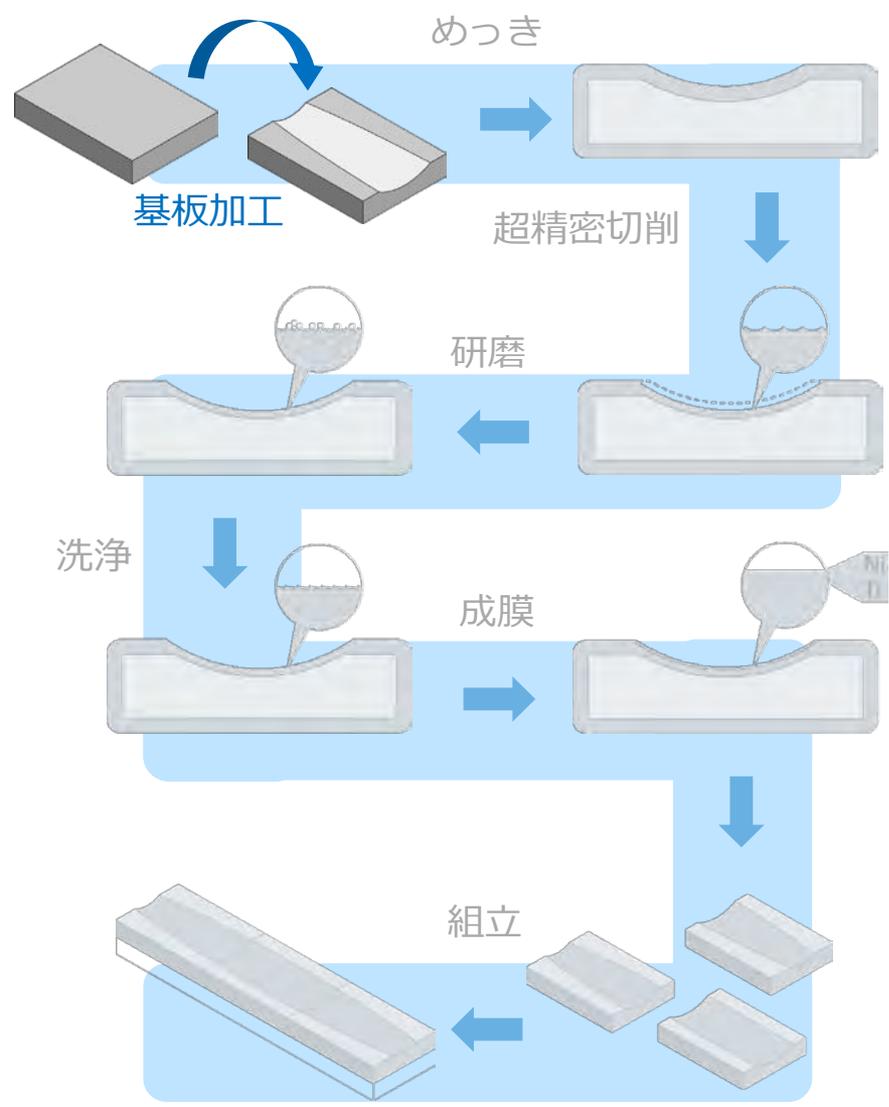
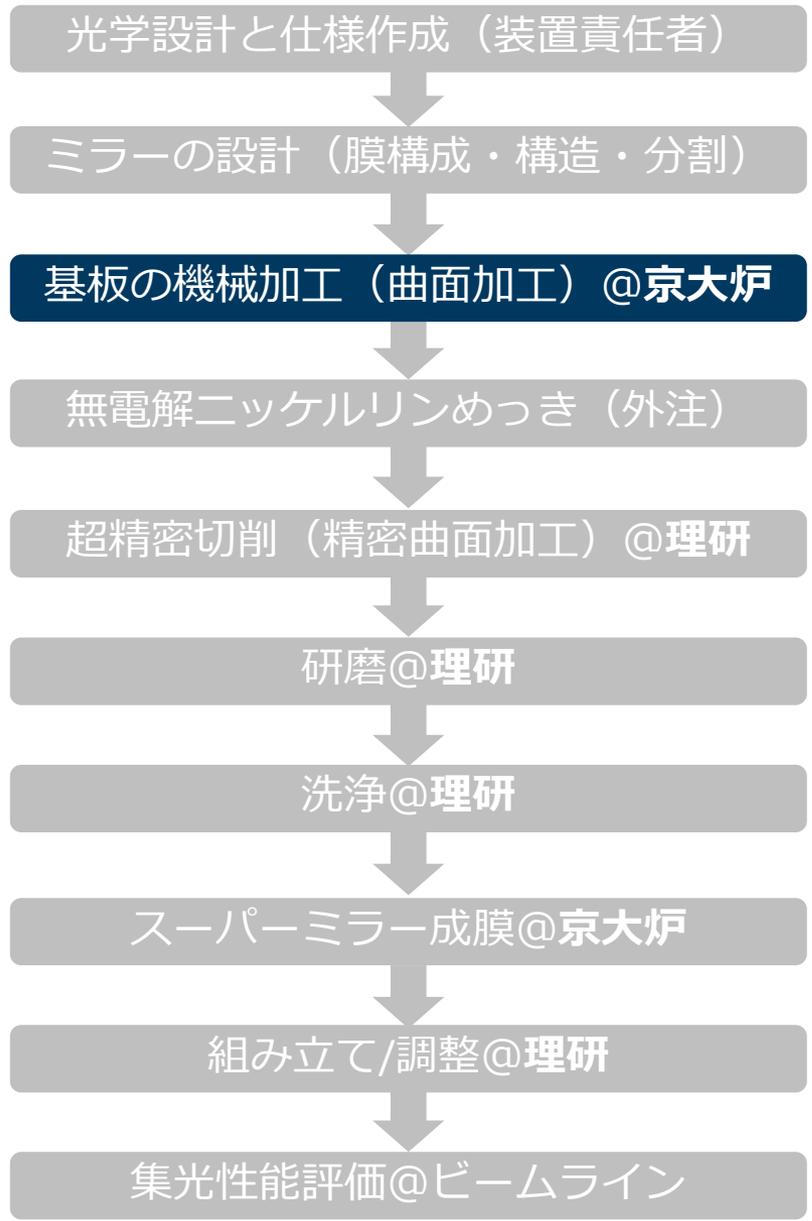


製造プロセスはほぼ確立し、高性能化／実用化を目指す段階

中性子集光ミラー製作の流れ



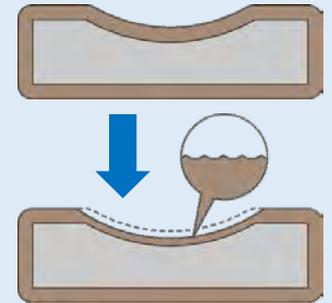
中性子集光ミラー製作の流れ



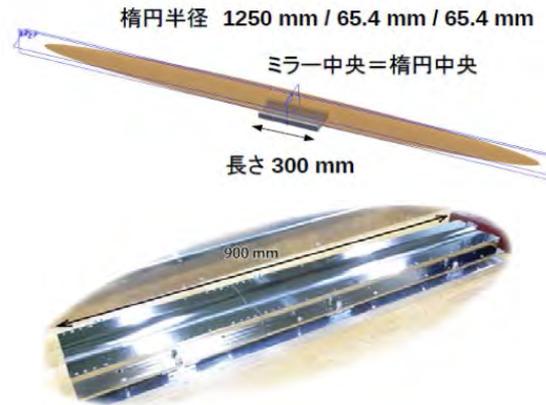
基板の下加工

要求：1メートル級の基板を $\pm 20\mu\text{m}$ の形状精度で曲面加工（非常に難しい）

- 超精密切削の仕上げ代の範囲内に収める
- 長尺の集光ミラーへの要求（高NA化）

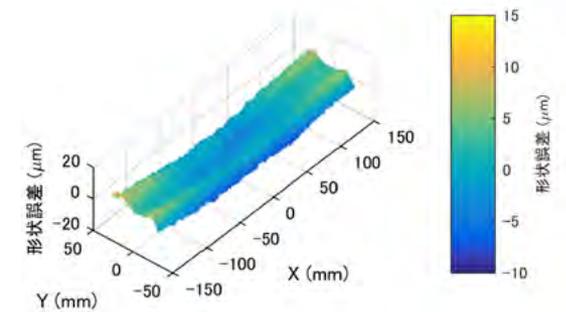


1 mストロークの
大型マシニングセンタを
京大炉に導入



組み立てた状態で
一括加工

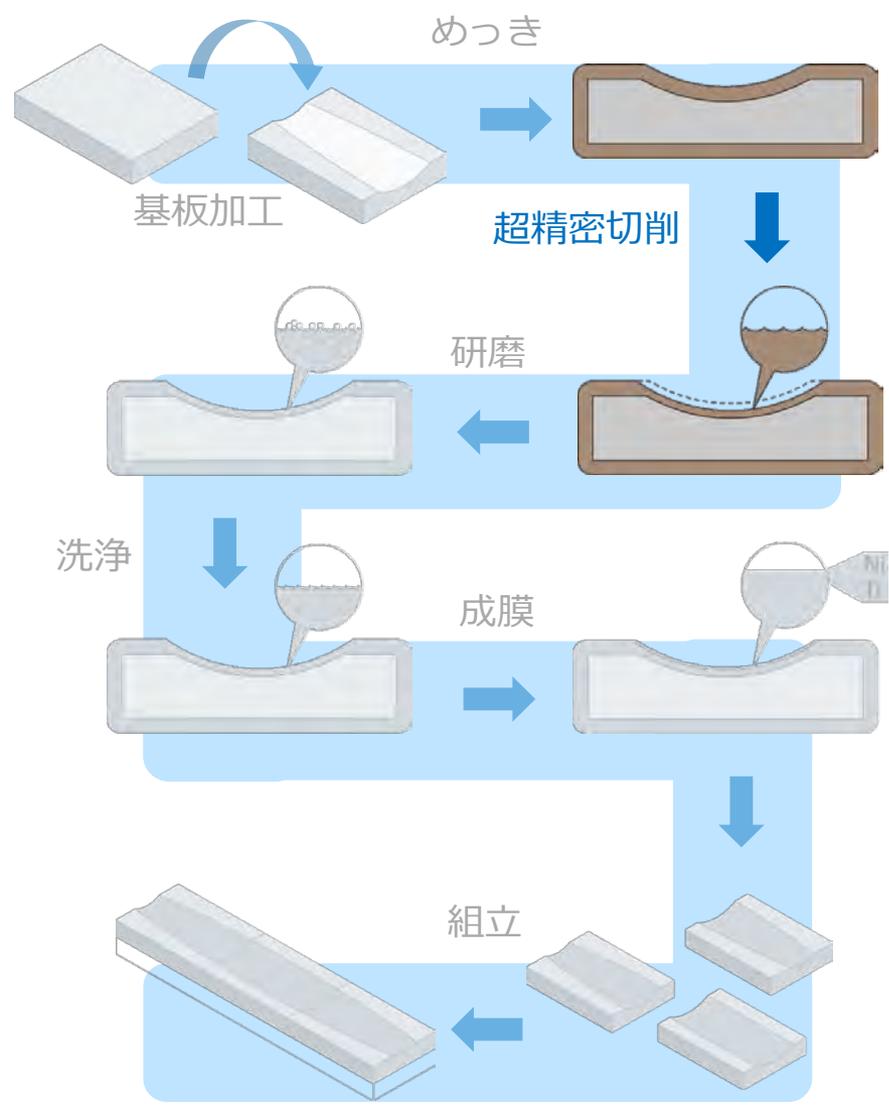
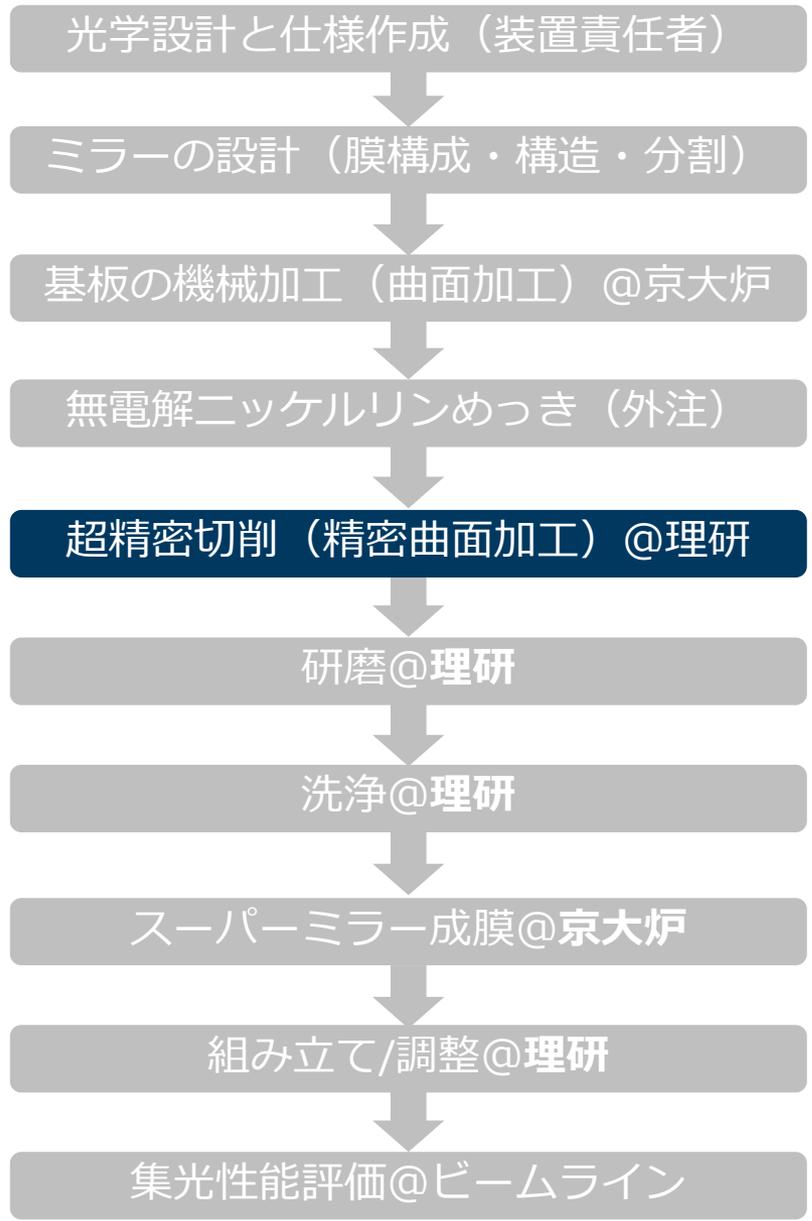
- 形状の連続性
- 光軸合わせ



目標精度 $\pm 20\mu\text{m}$ を達成

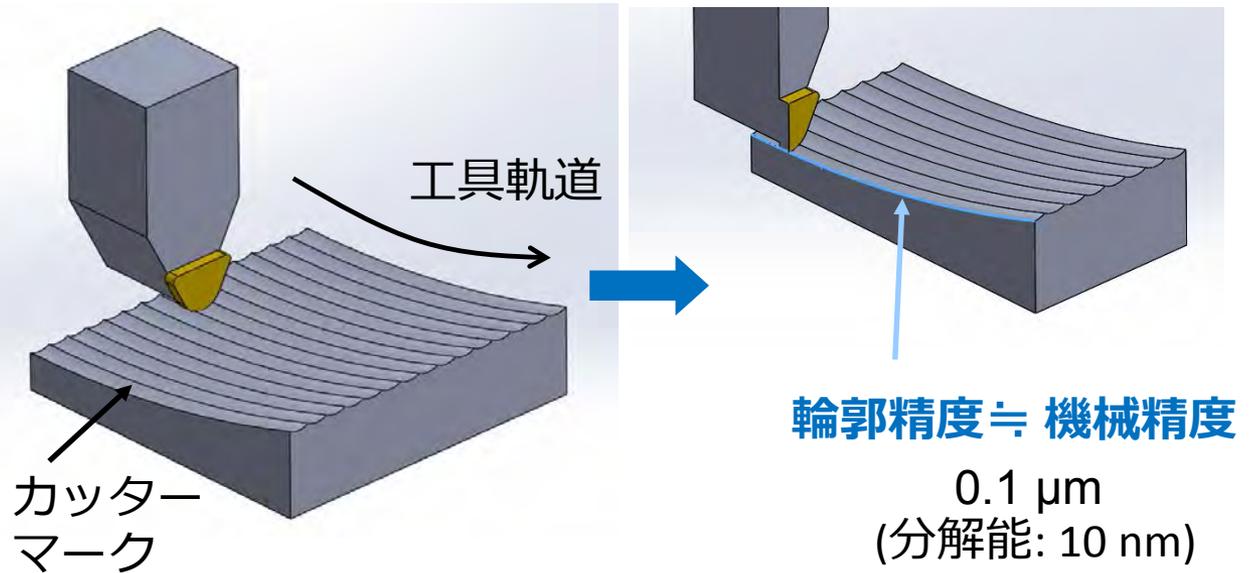
- 温調環境の整備
- 材料からの応力の事前除去
- 固定・切削方法の工夫

中性子集光ミラー製作の流れ

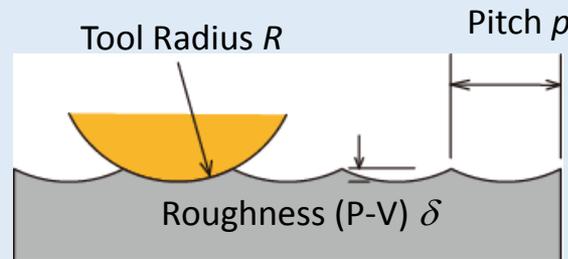
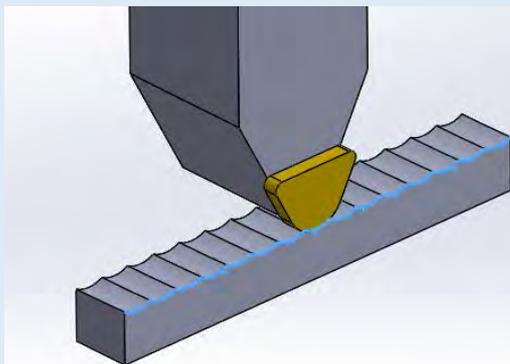


単結晶ダイヤモンド工具による超精密切削

サブミクロン形状精度 + 制御可能な表面粗さ (研磨の全段階として)
母材表面のニッケルリンめっき (100 μm) の範囲内で加工する



刃先形状の転写による表面粗さ

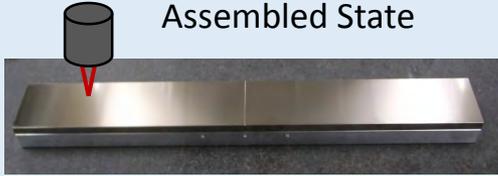


$$\delta = \frac{p^2}{8R}$$

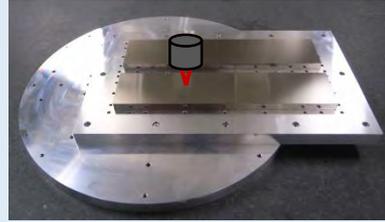
短いピッチ = スムーズな面
(加工時間とのトレードオフ)

修正加工と形状測定

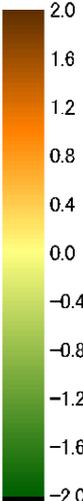
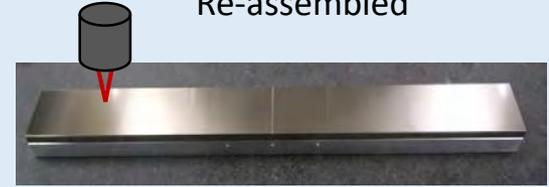
Form Measurement at Assembled State



Fixed on Base Plate for Machining

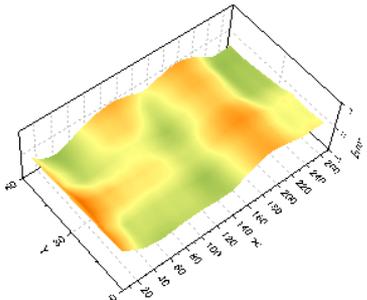


Re-assembled

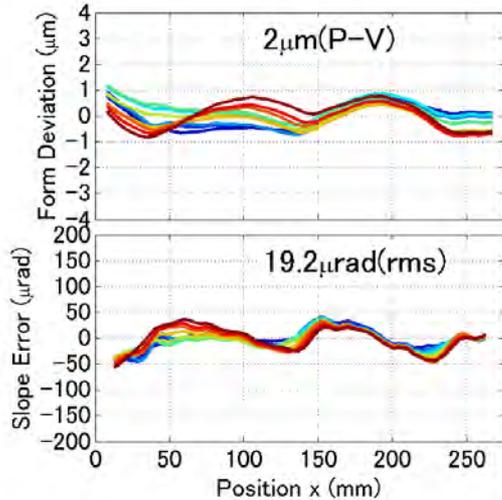
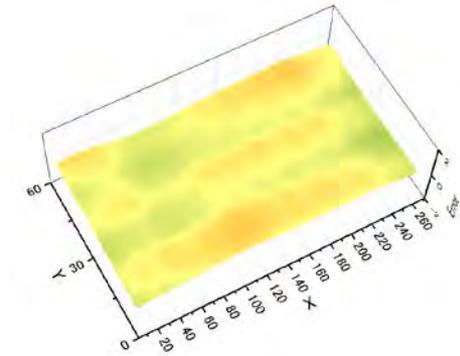
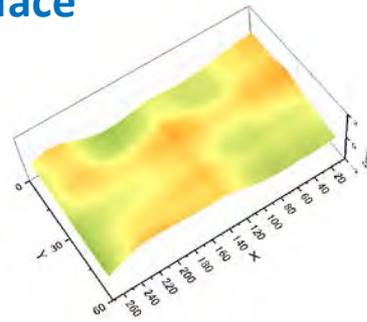


(μm)

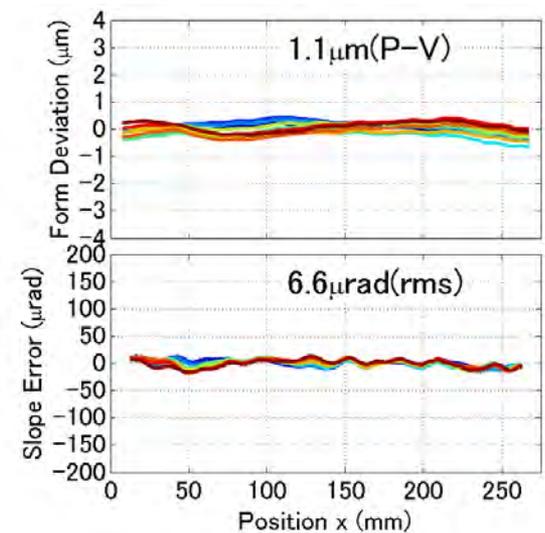
Form Deviation from Ideal Elliptical Surface



Corrective Cutting

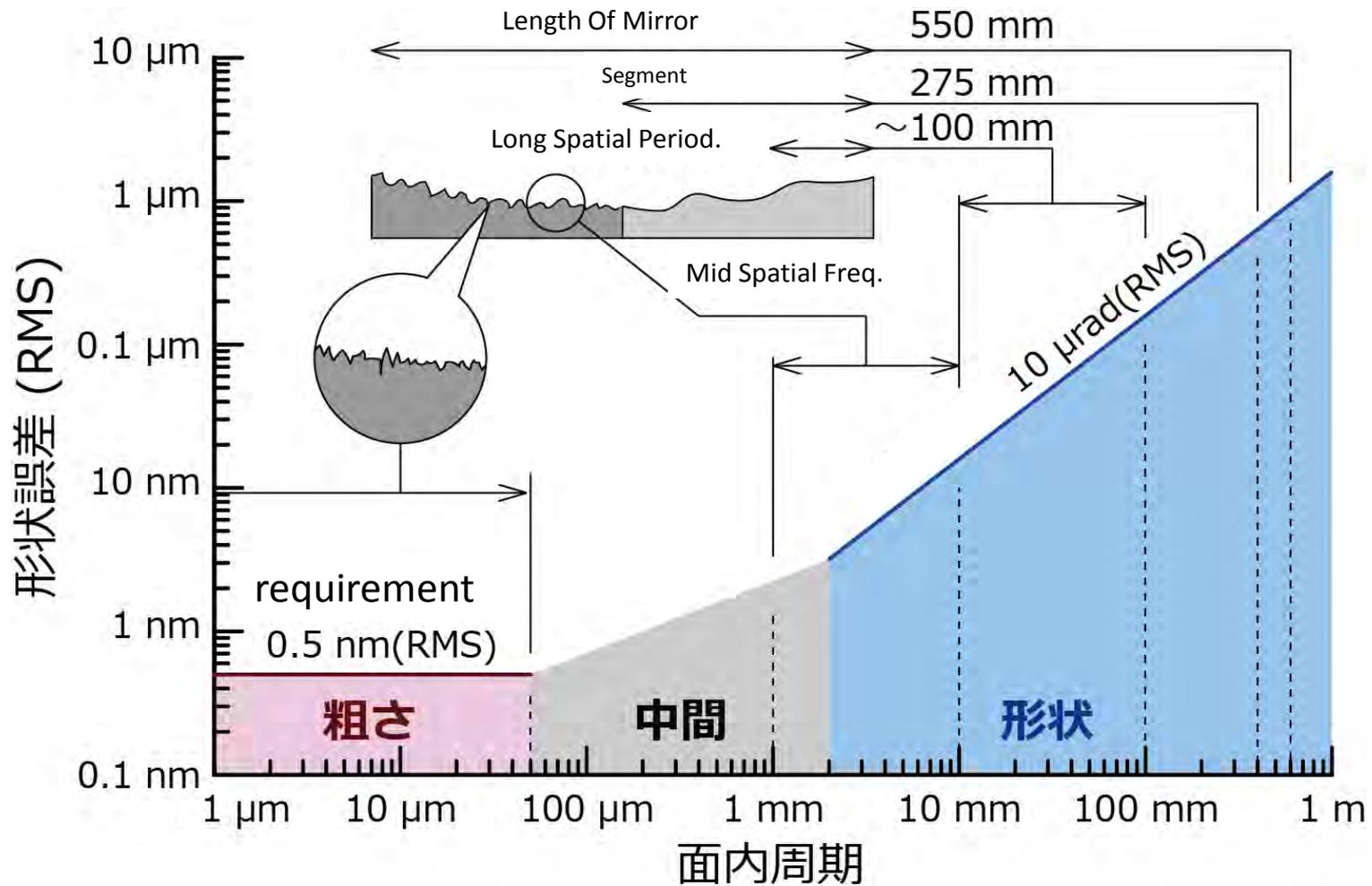


Successful Reduction of Form Deviation



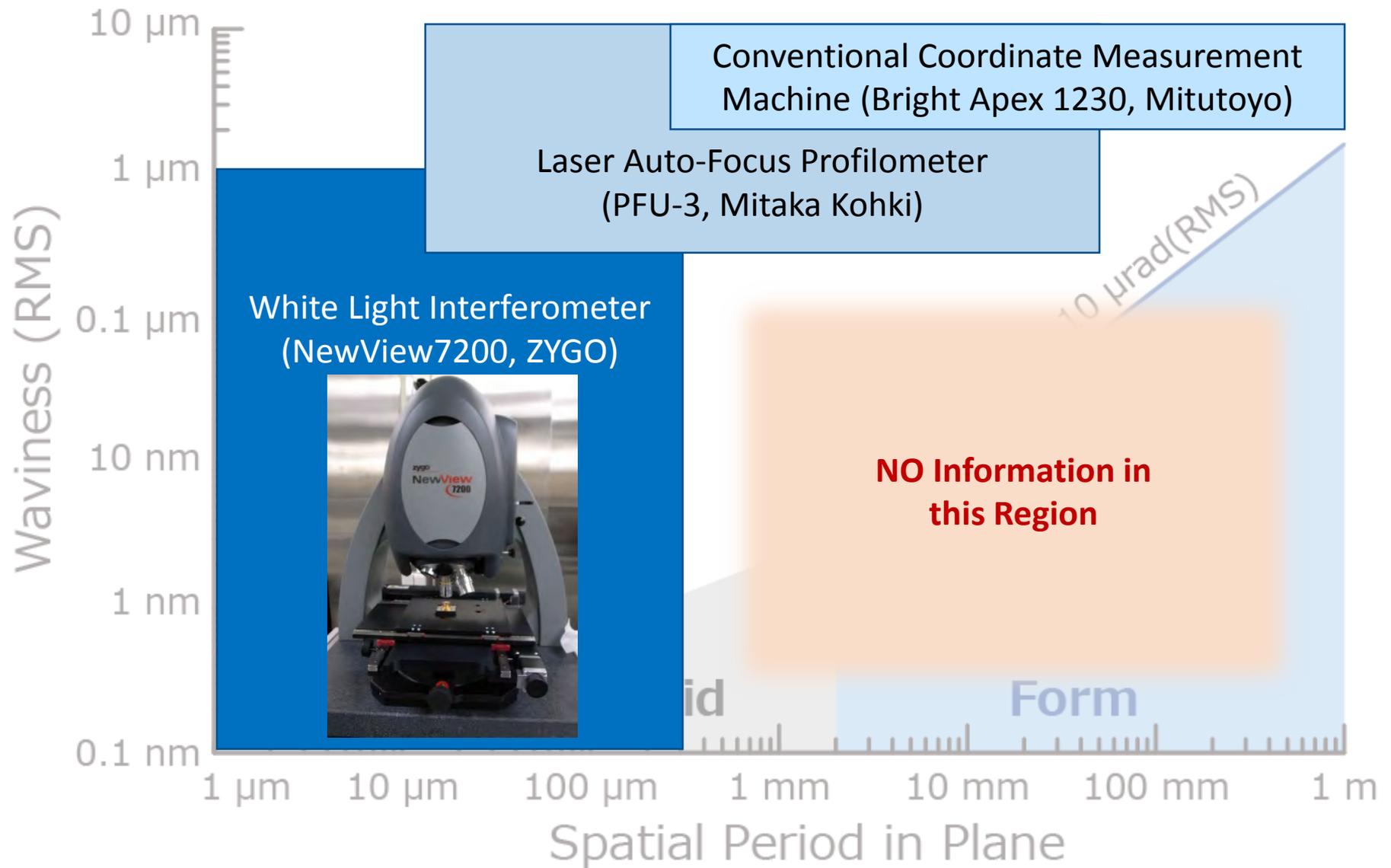
形状測定技術について

形状誤差と周期

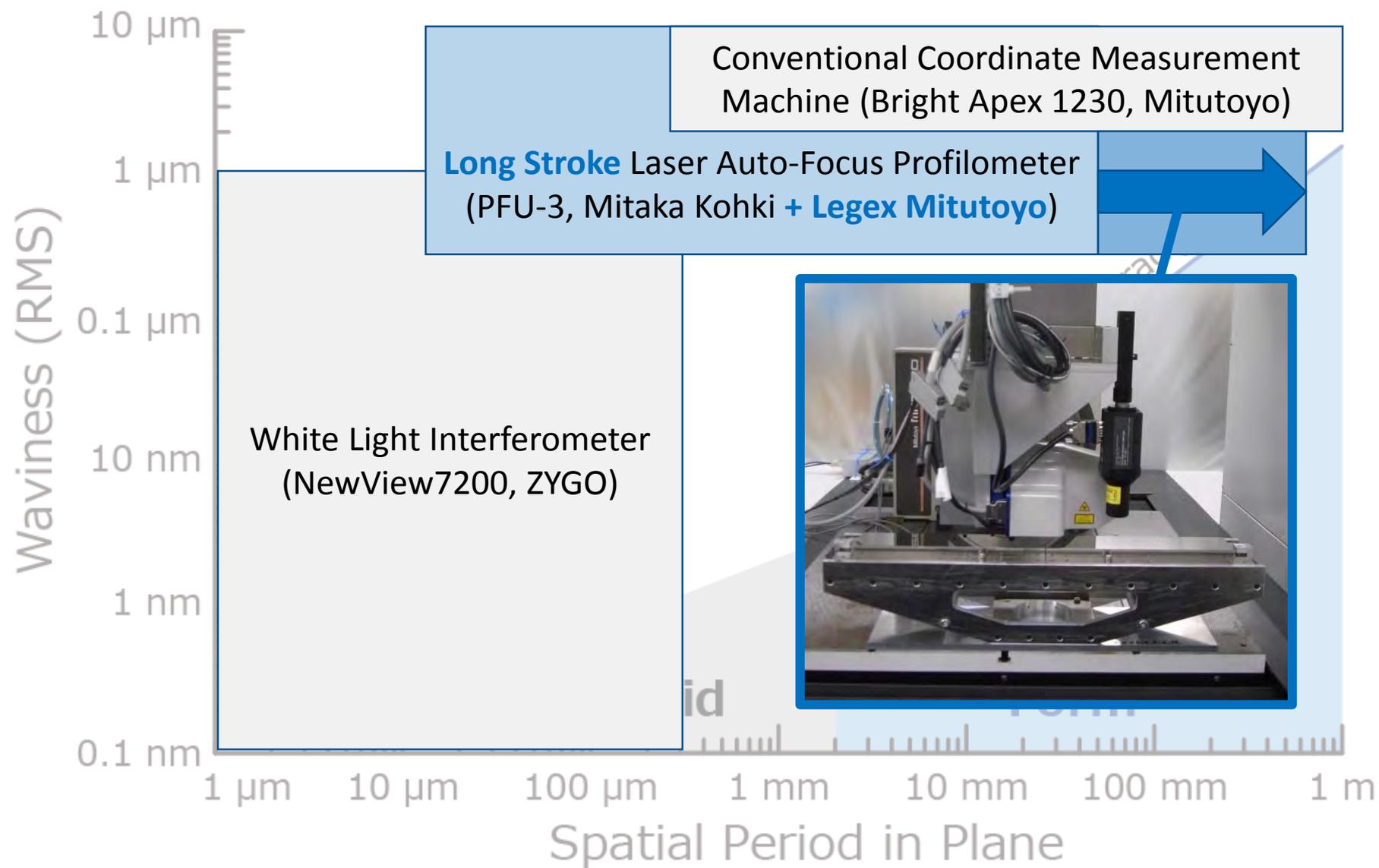


すべての領域を測れる測定機は無い
➔ 複数の測定機の使い分けが重要

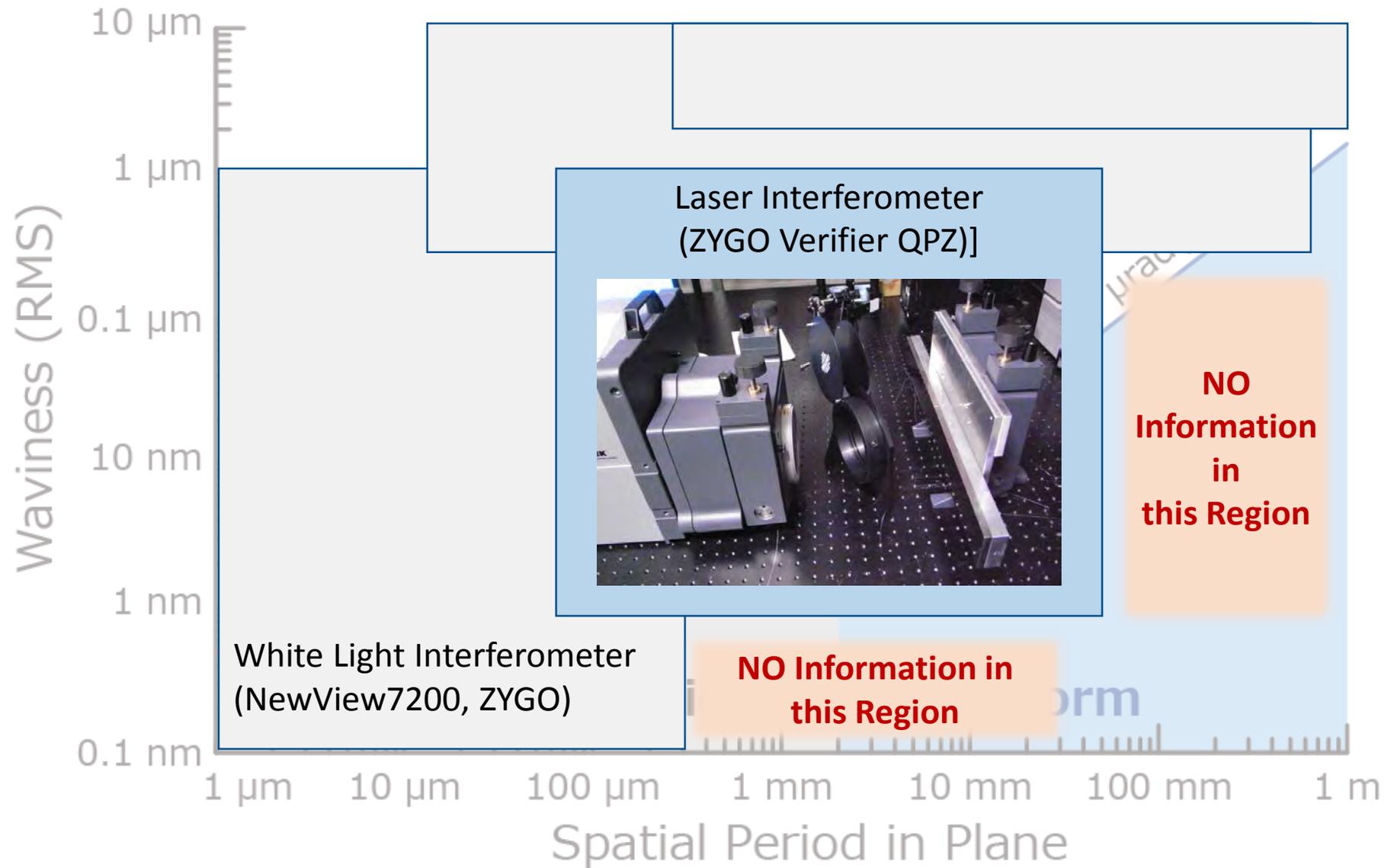
理研の形状測定機(2 Yrs. Ago)



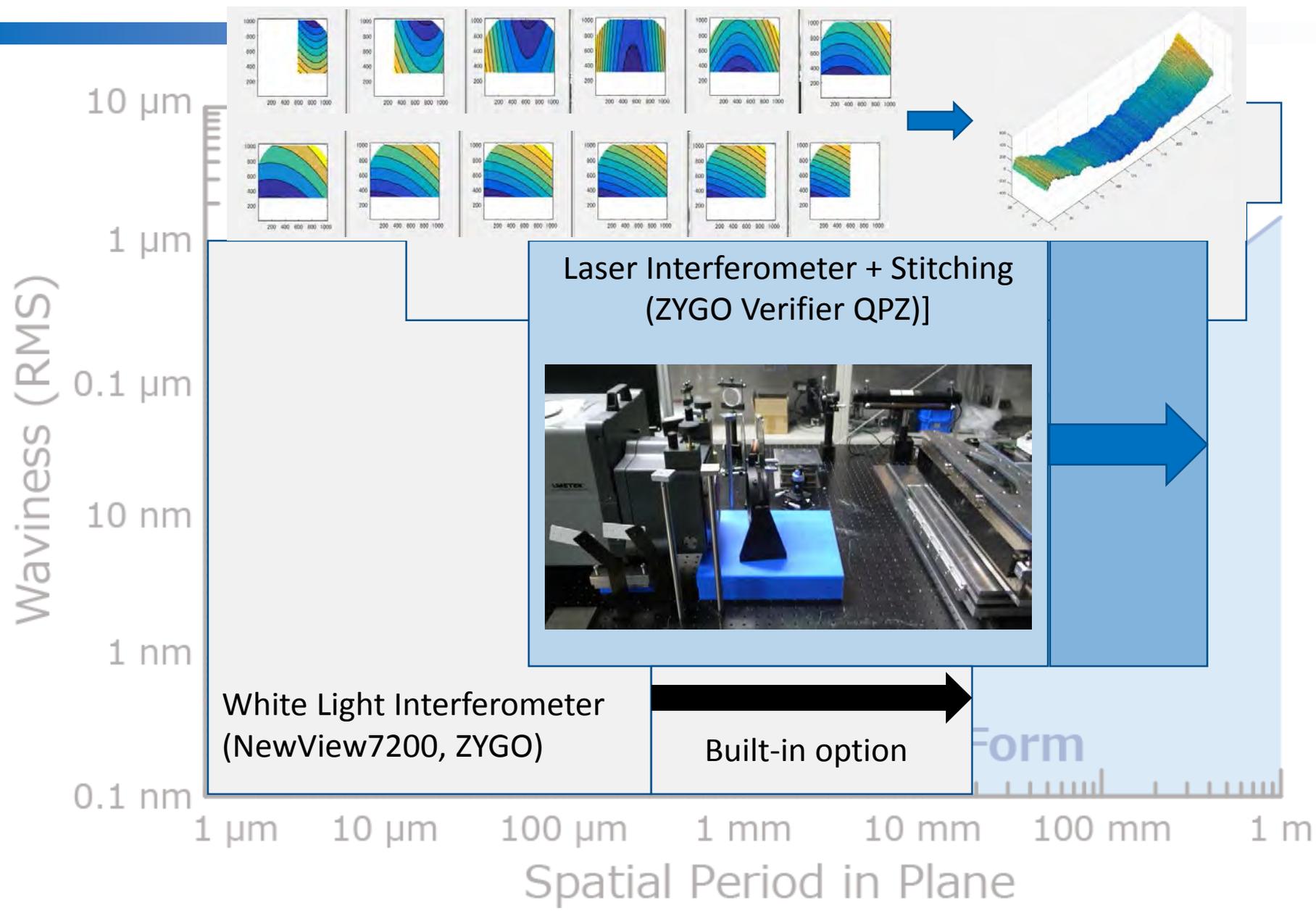
長ストローク非接触測定機の開発



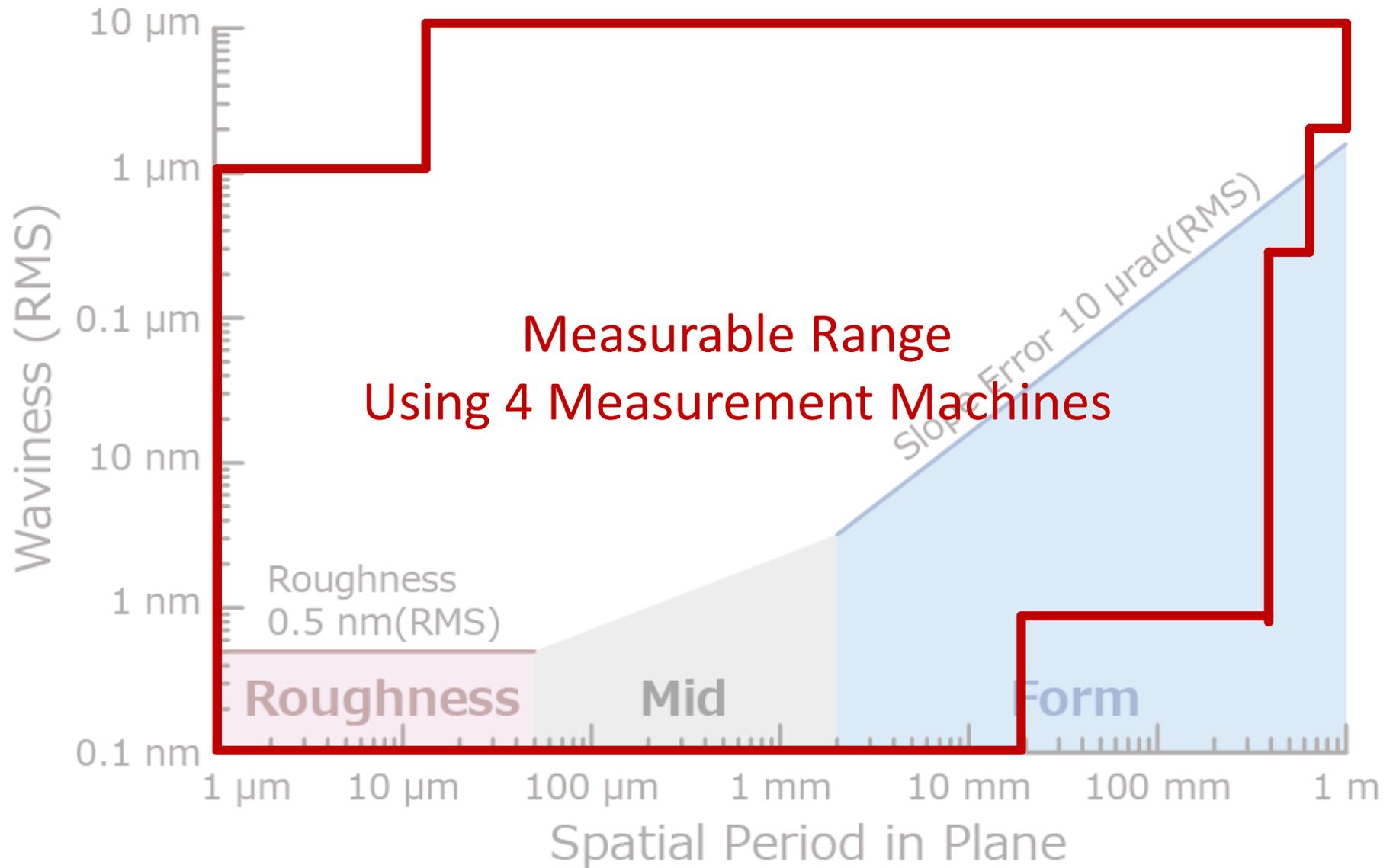
レーザ干渉計の導入



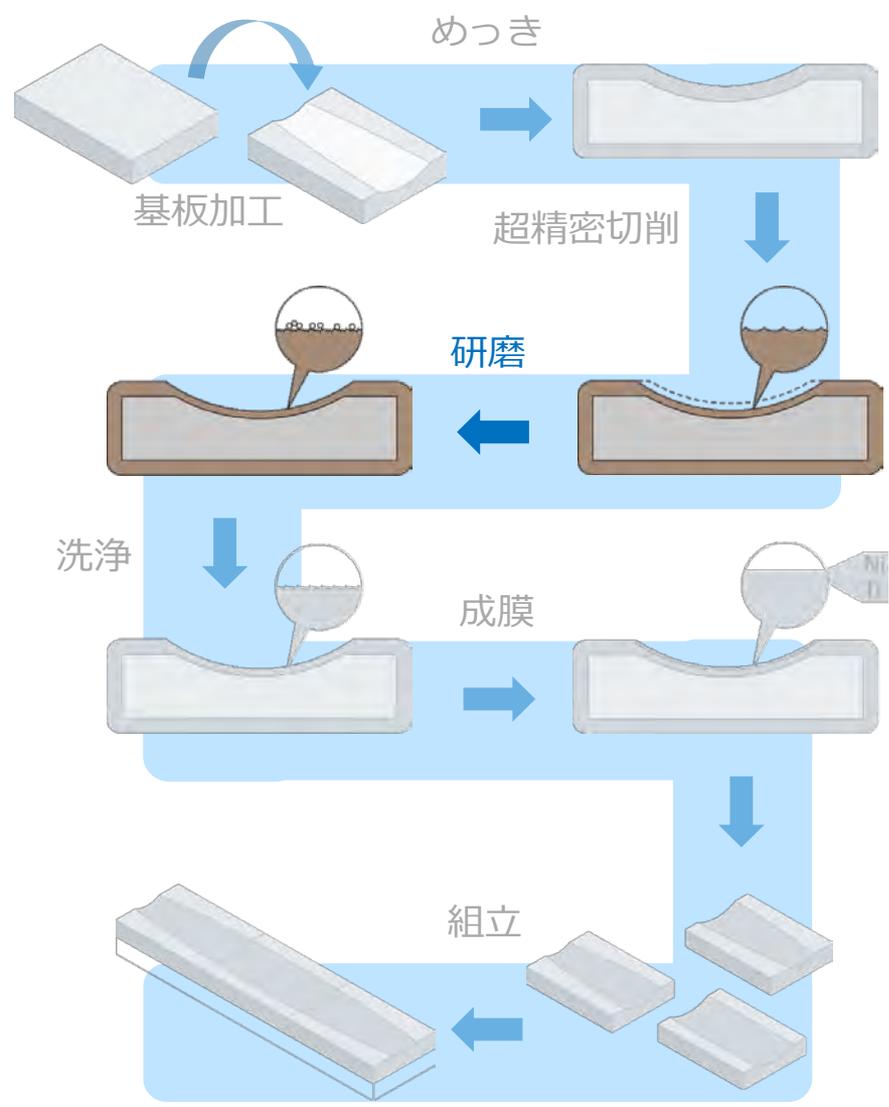
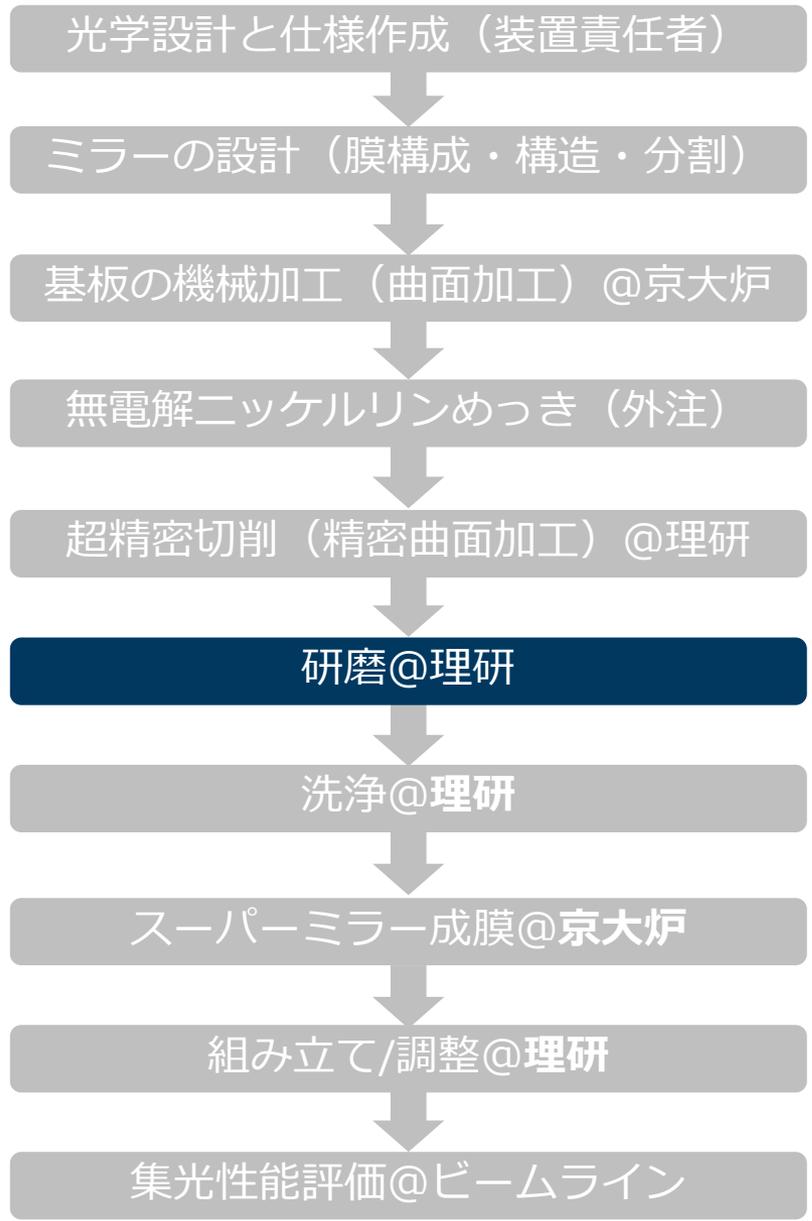
データステッチングの導入



現在の測定可能領域



中性子集光ミラー製作の流れ



中性子ミラー専用研磨装置

研磨剤循環装置付き
自作研磨装置

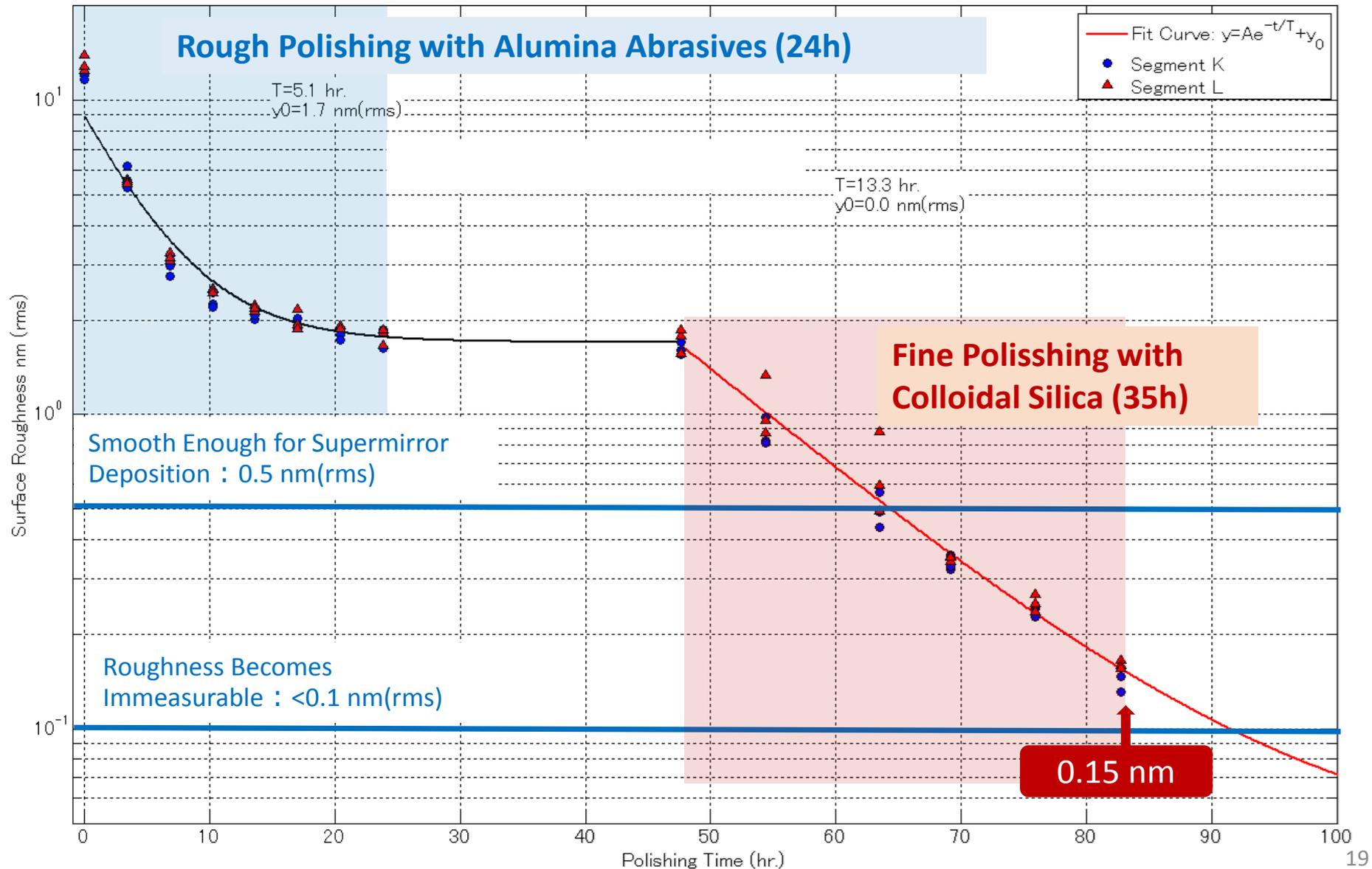


回転楕円面の場合

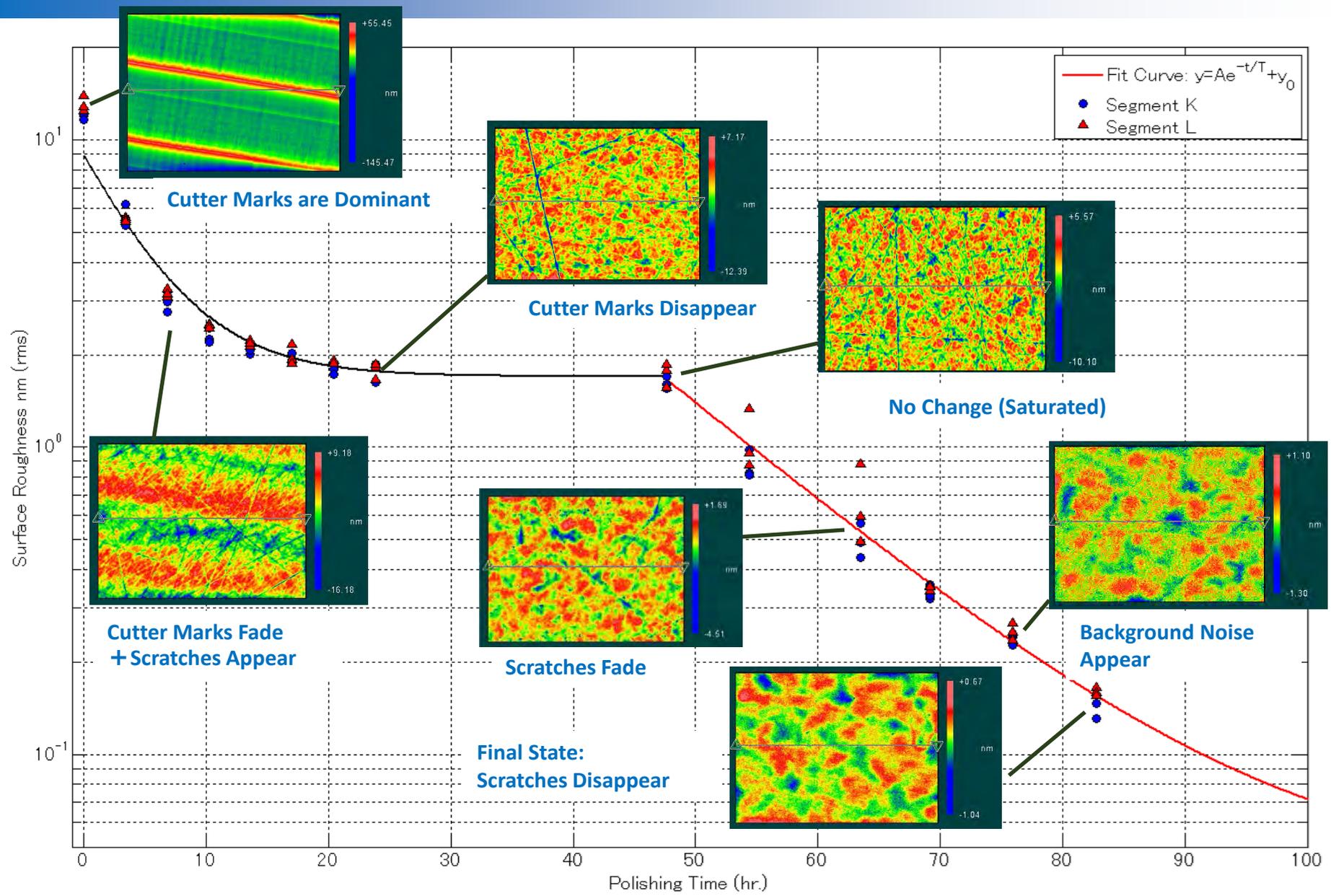


個別のミラーに合わせて容器・ツールおよび研磨条件の最適化を実施

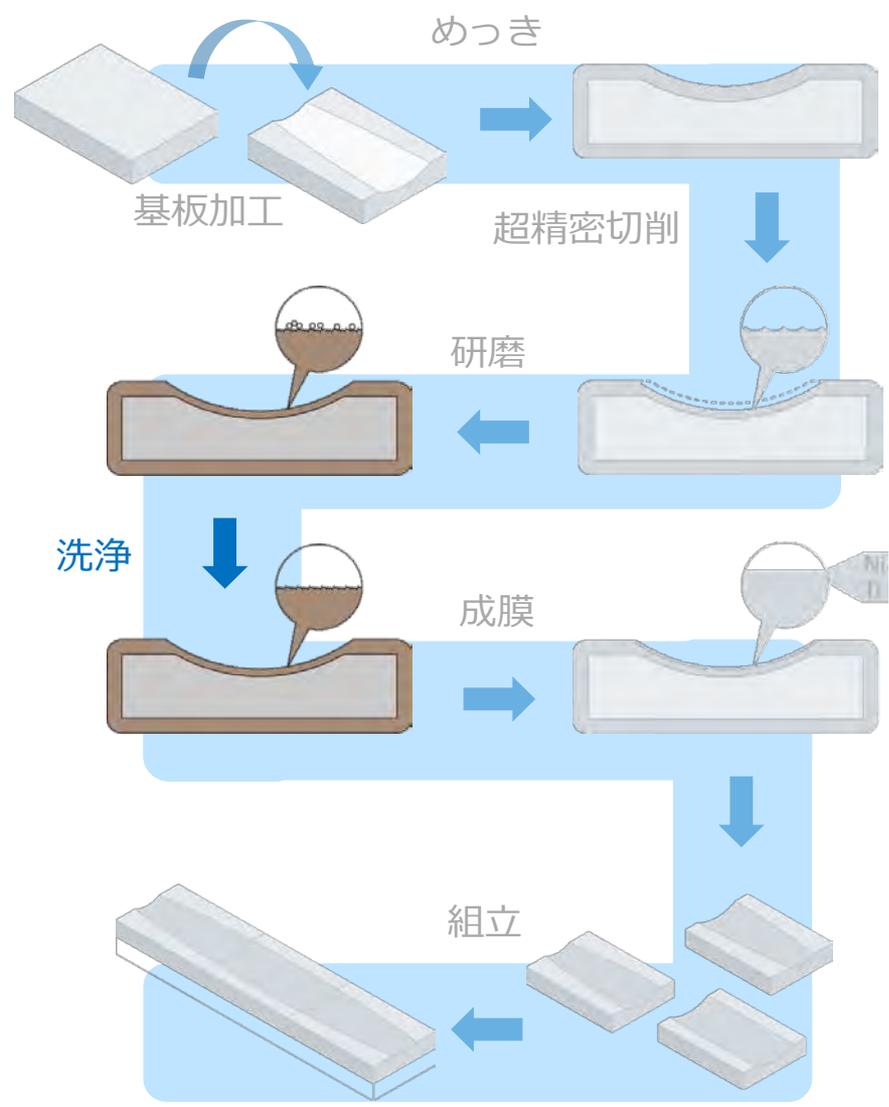
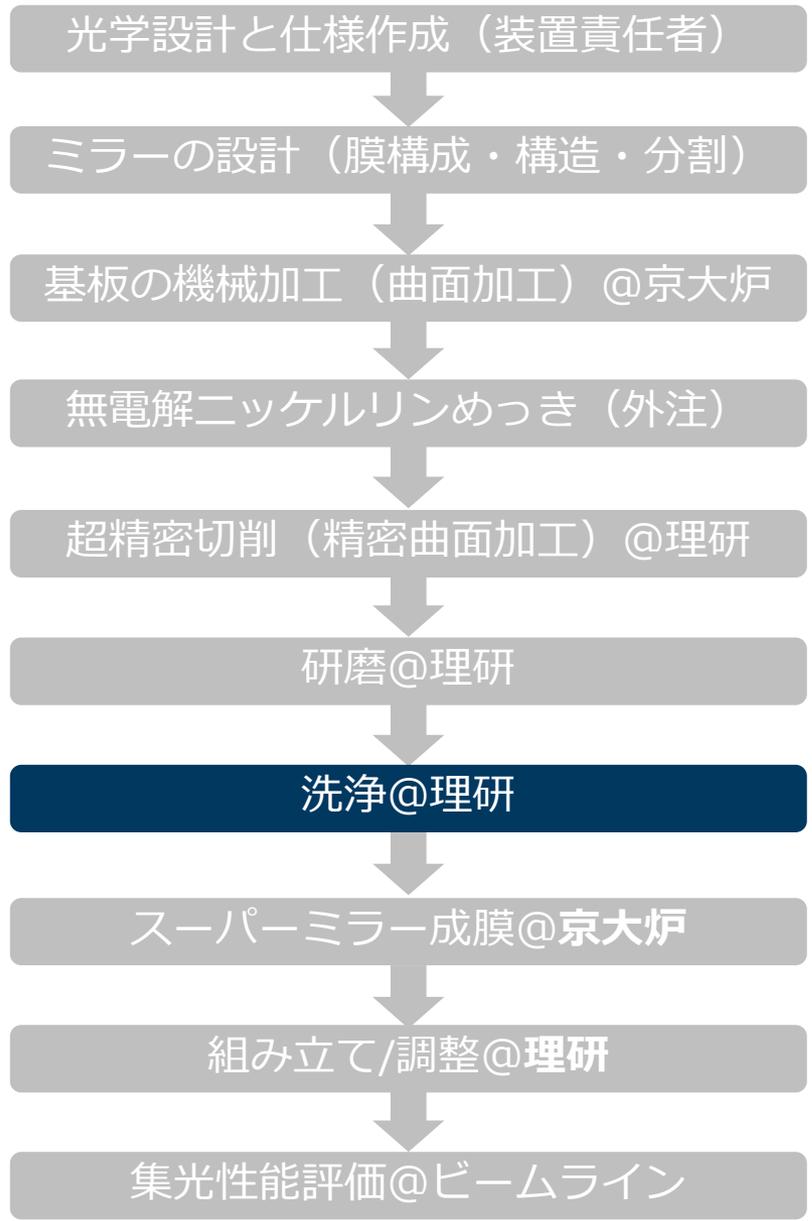
研磨時間と表面粗さ(面積 : 295 x 200 mm²)



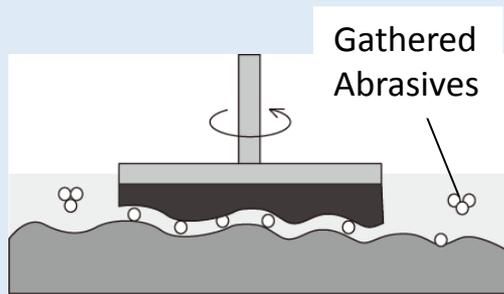
研磨時間と表面粗さ(面積 : 295 x 200 mm²)



中性子集光ミラー製作の流れ



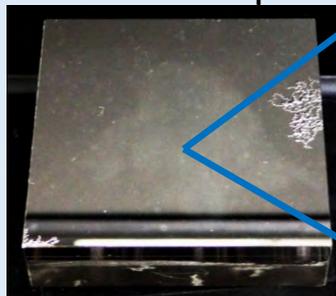
研磨剤による表面汚染の影響



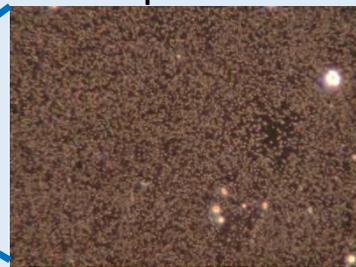
Polishing in Still Slurry
(No Flow)



Failure of Supermirror Deposition Due to **Contamination**



Diffused Surface
(Low Reflectivity)



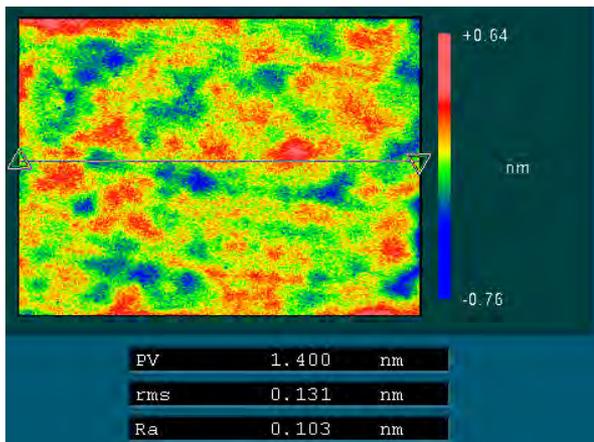
92 μ m



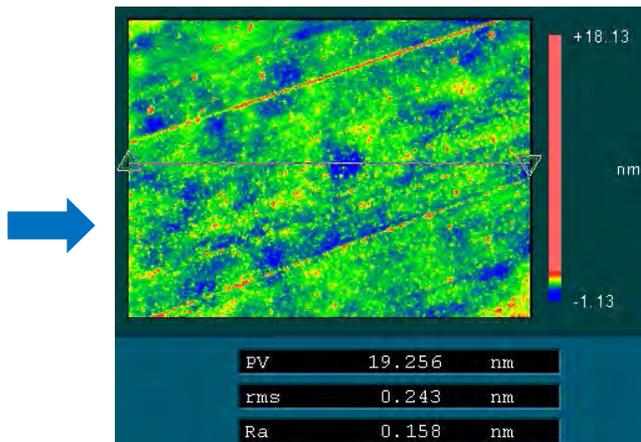
Peeled Coating

Silica Abrasives (80 nm dia.) are Much Smaller than Measurement Resolution

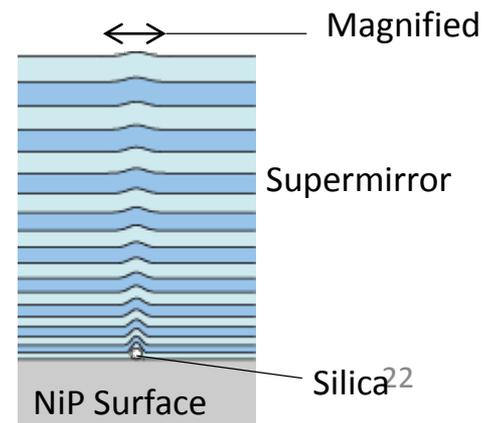
Without Supermirror



After Deposition



Observable Only
After Mirror Deposition



洗浄工程

No Photo

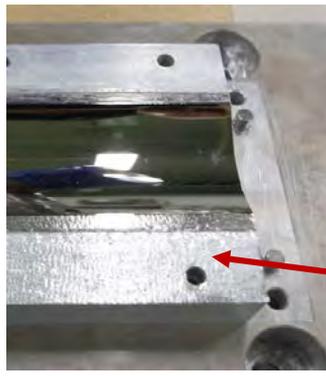
On-machine Scrubbing
with Alkaline Detergent
and PVA Sponge



Ultrasonic Washer
(Solvent: 1-Bromopropane)
for Degreasing & Dust Removal



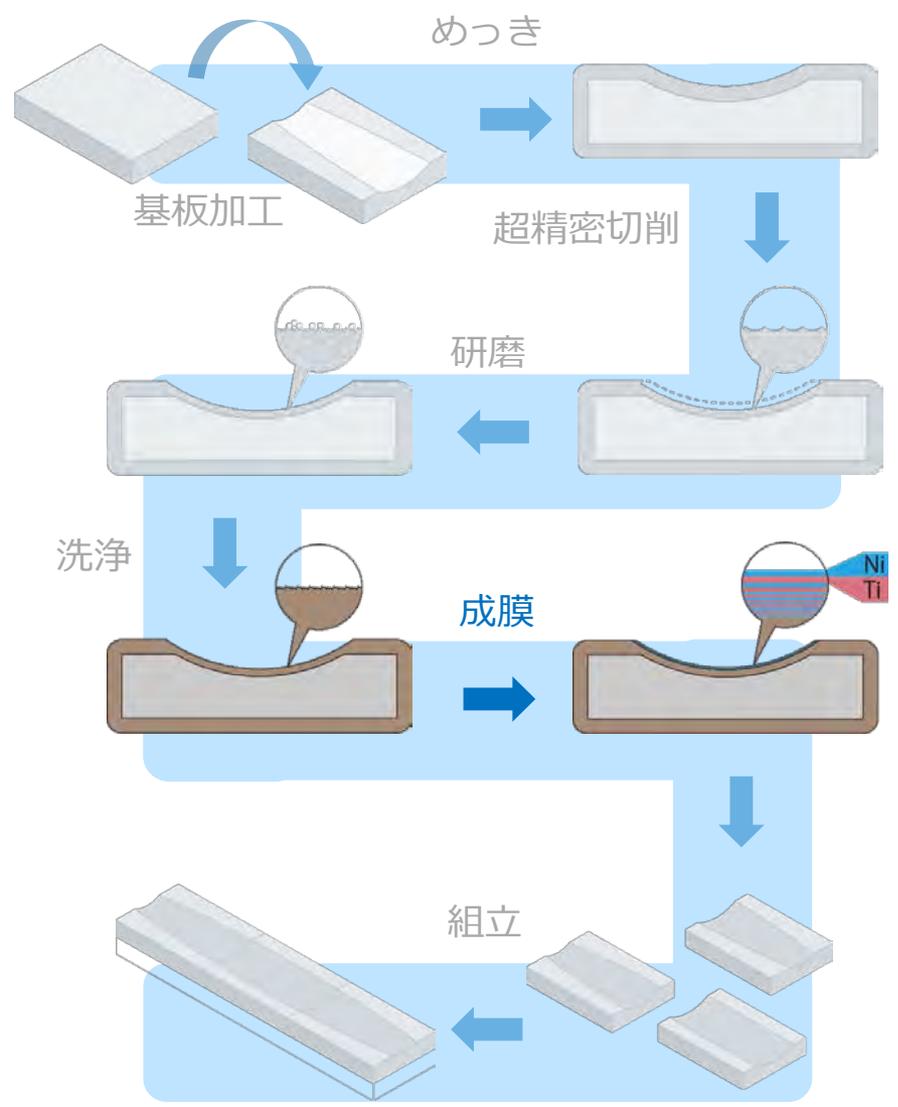
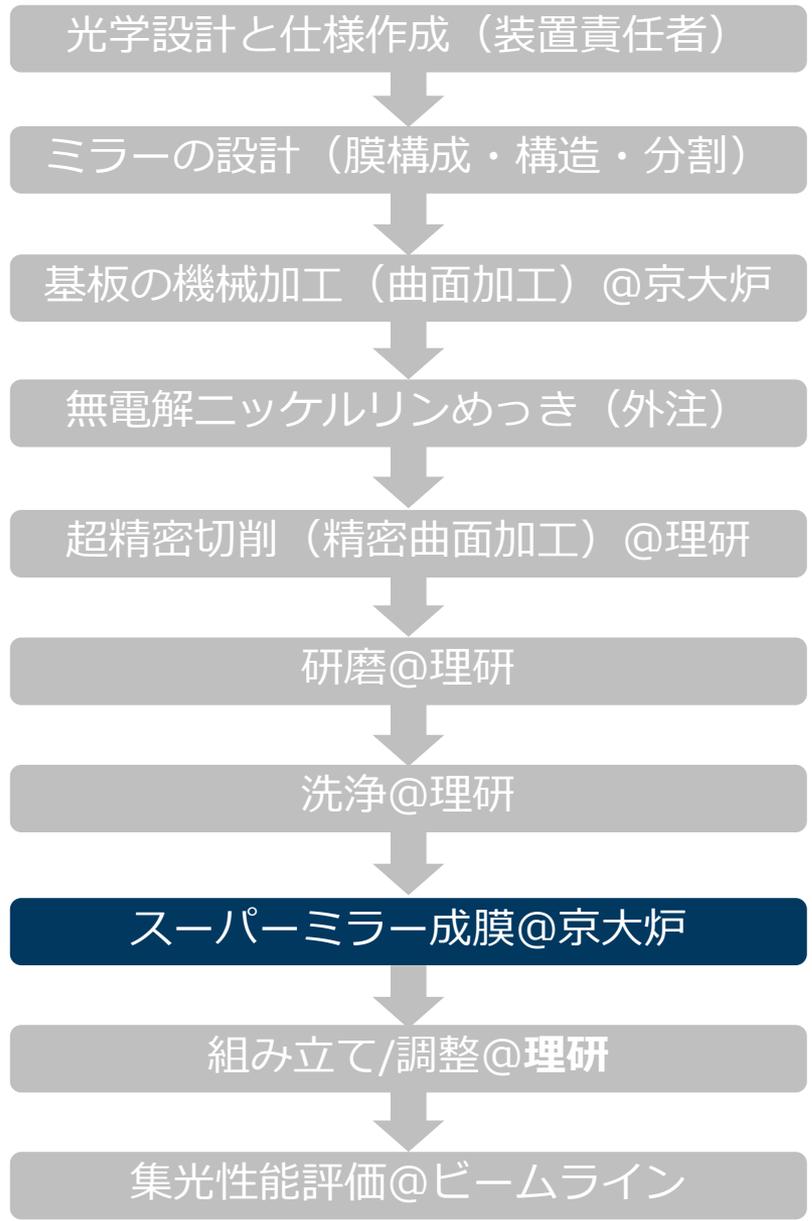
1 MHz Ultrasonic
Pulse Jet Nozzle
for Rinsing



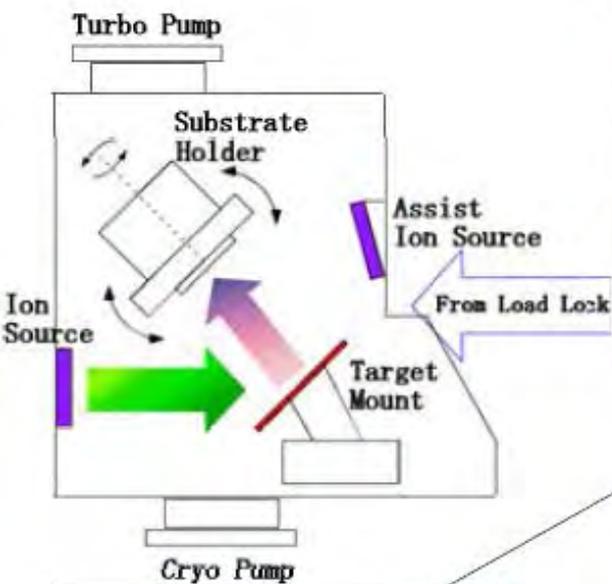
Grinding for Removal of
Contaminated Surface

洗浄方法の工夫により
曇り・剥離のない
スーパーミラー成膜が
可能になっている

中性子集光ミラー製作の流れ

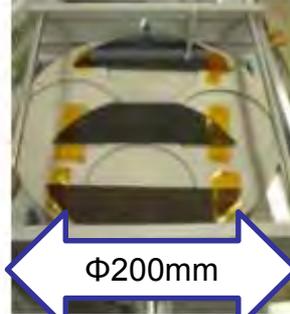


京大炉のイオンビームスパッタ装置のプロセスチェンバー



From Load lock

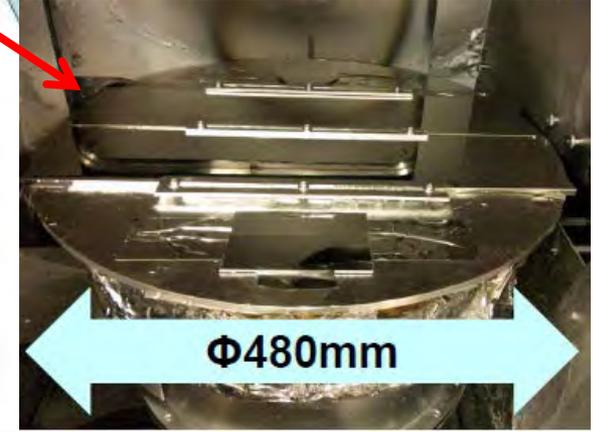
$\Phi 200 \rightarrow \Phi 500$



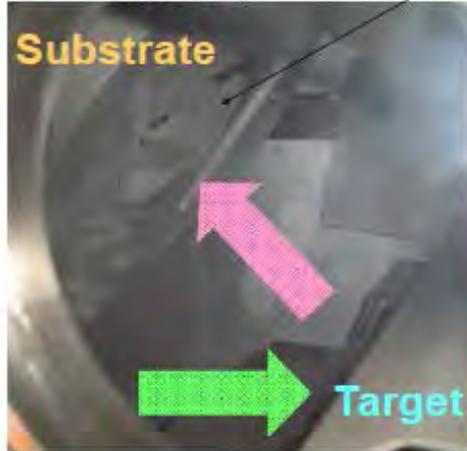
$\Phi 200\text{mm}$



Substrate holder Target (Nickel/Carbon)



$\Phi 480\text{mm}$

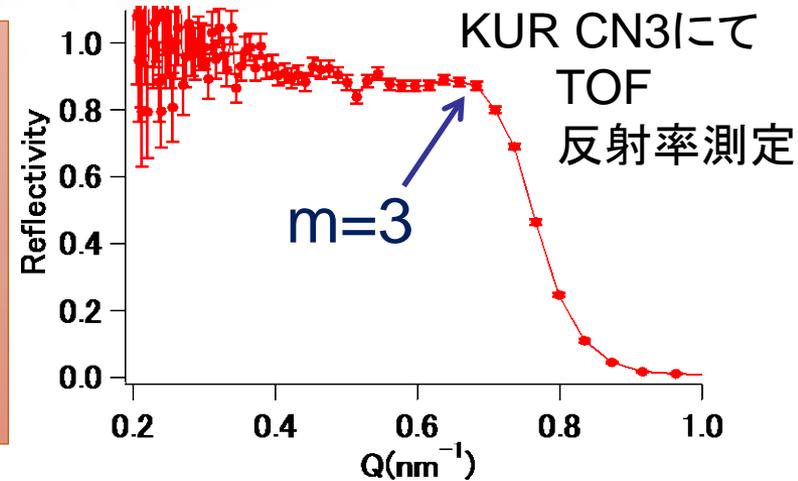


Substrate

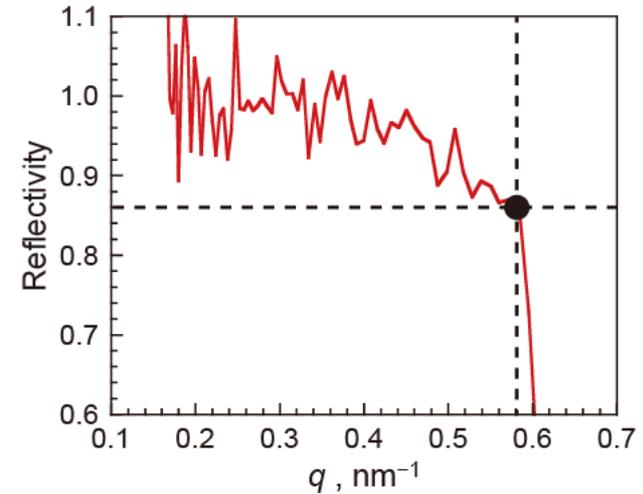
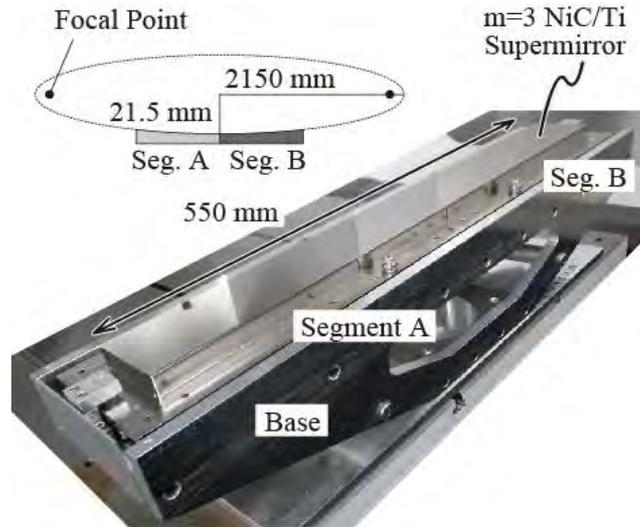
Target

$\Phi 500\text{mm}$ のエリアでミラー製作可能。長尺や導管自作も可能に！
 ※ $\delta d/d < 5\%$ $\Phi 400\text{mm}$

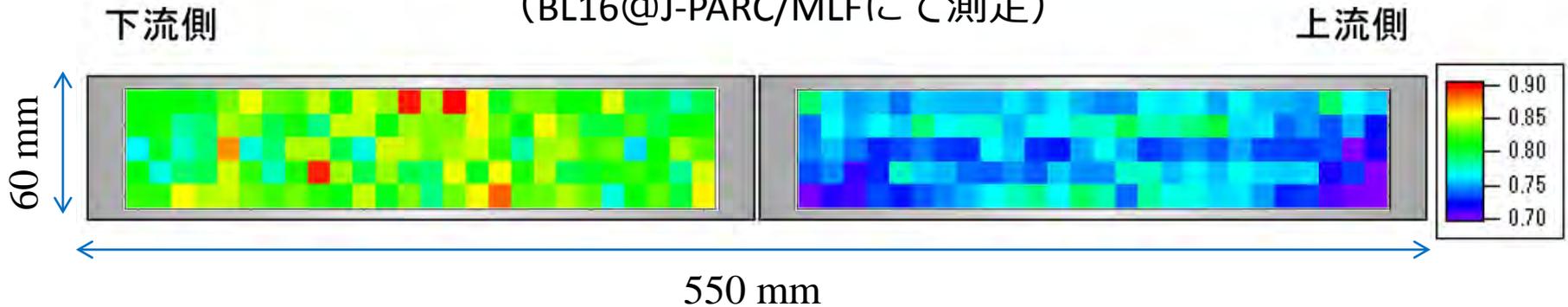
真空槽の変更は無し



一次元集光楕円ミラーの反射率

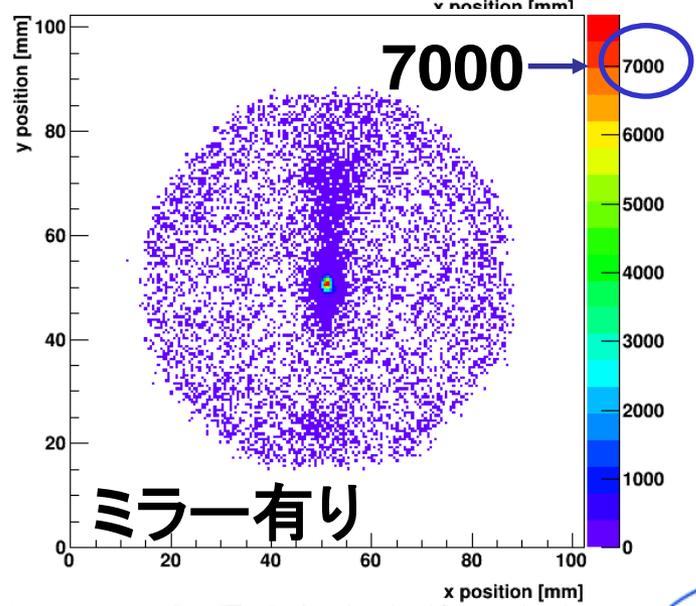
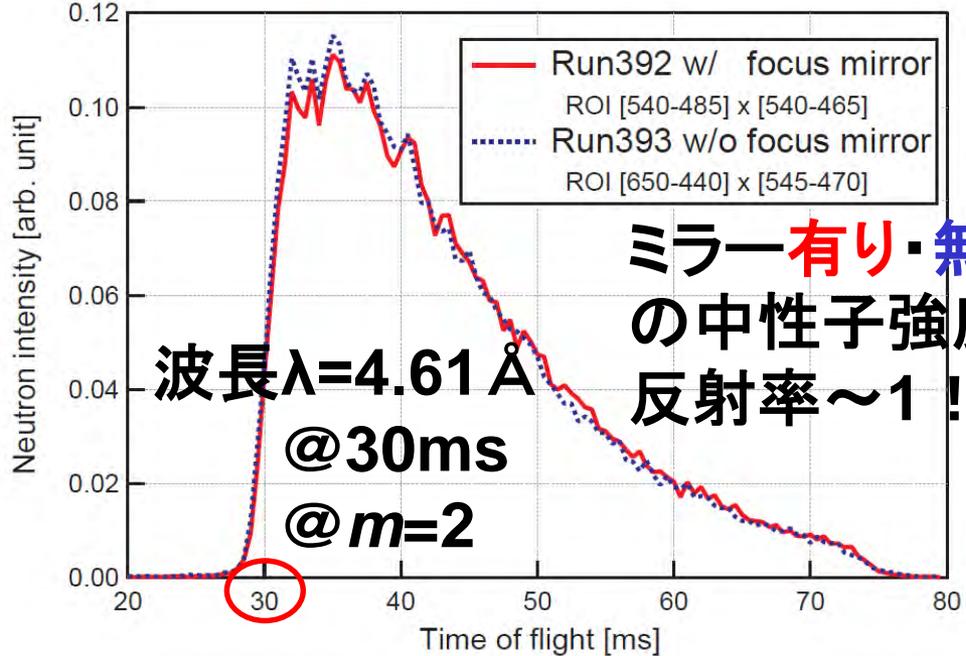
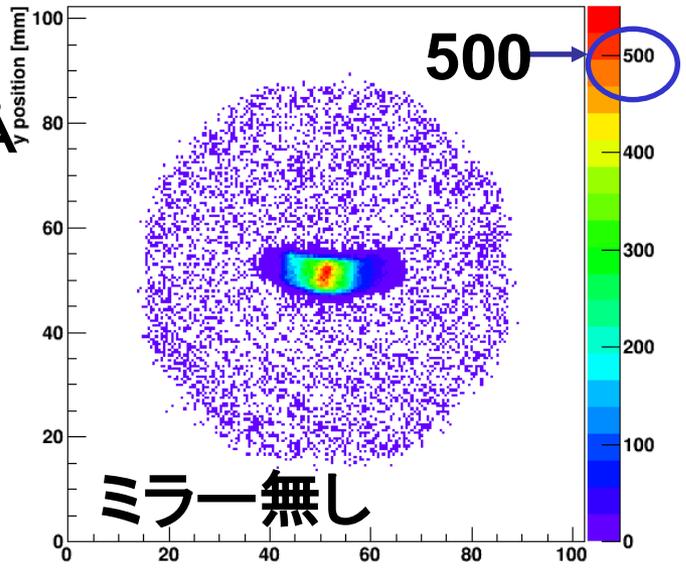
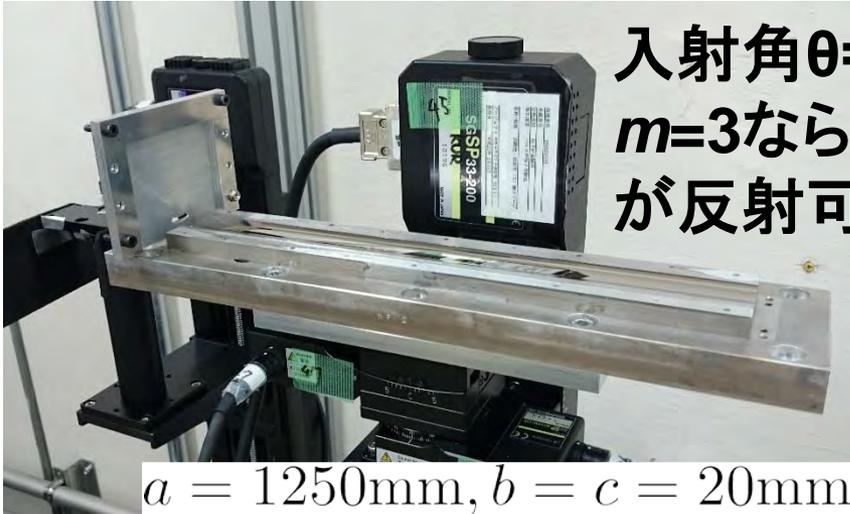


10 mm × 10 mmエリア毎の反射率@ $q=0.58 \text{ nm}^{-1}$
(BL16@J-PARC/MLFにて測定)

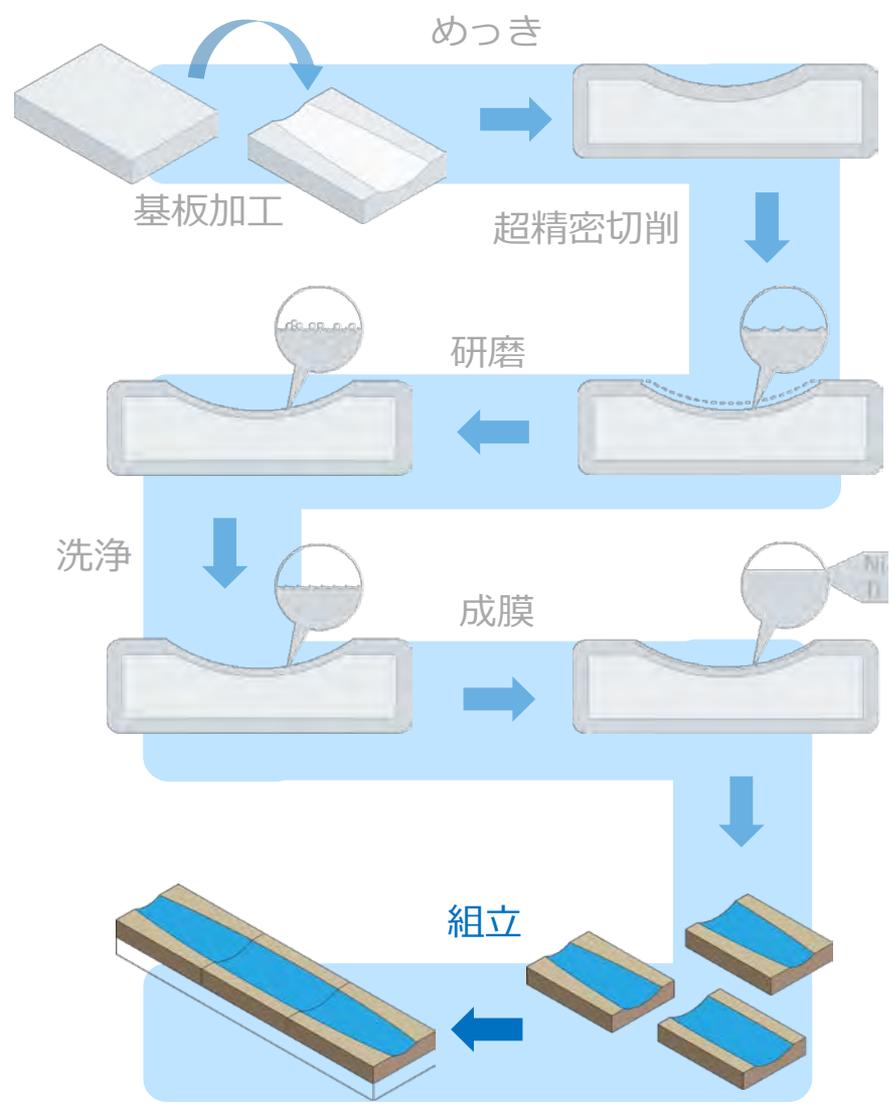
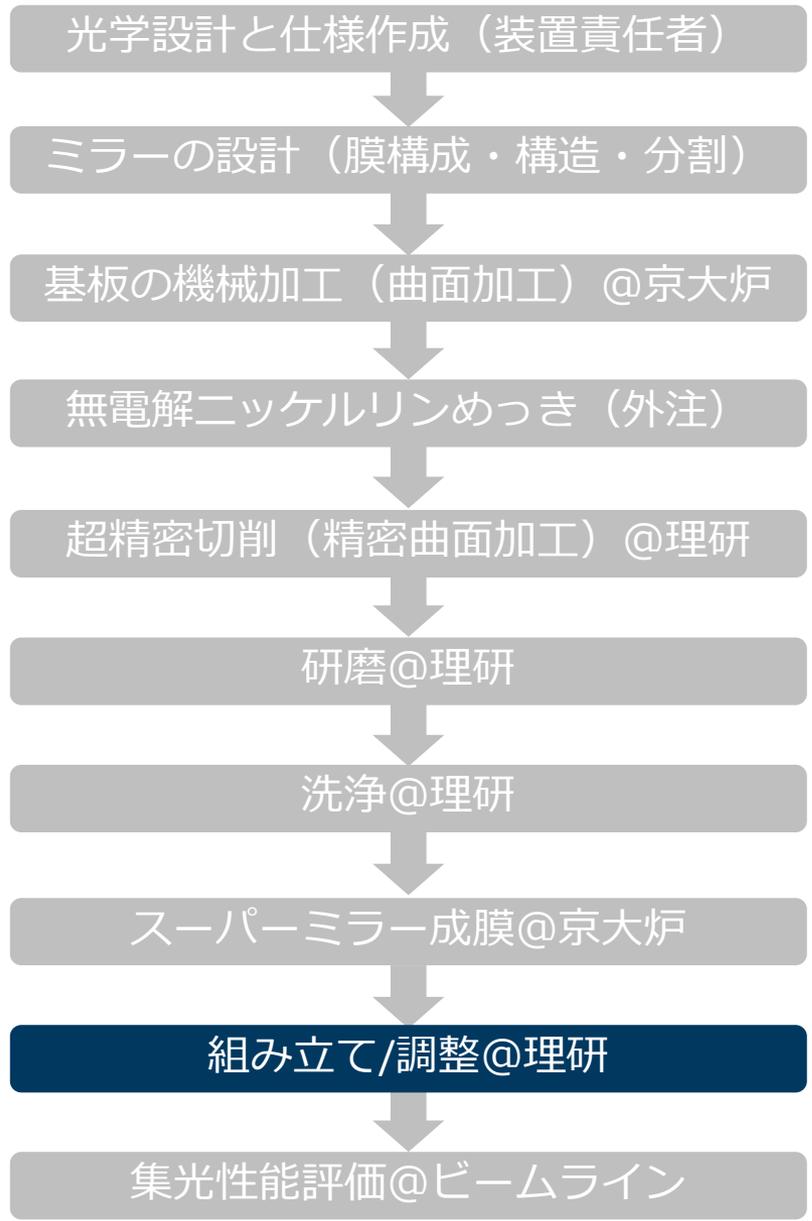


- ミラーセグメント内の反射率はほぼ均一
- 研磨条件均一化に課題（個体差の解消）

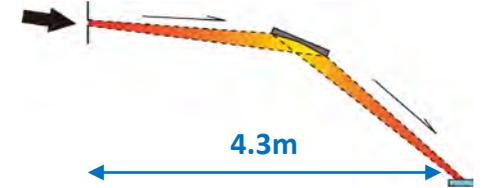
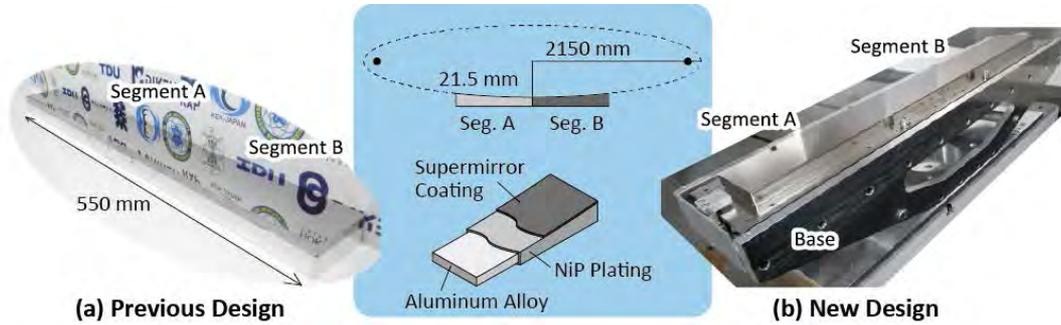
L=30cm回転楕円体m=3 スーパーミラー集光実験



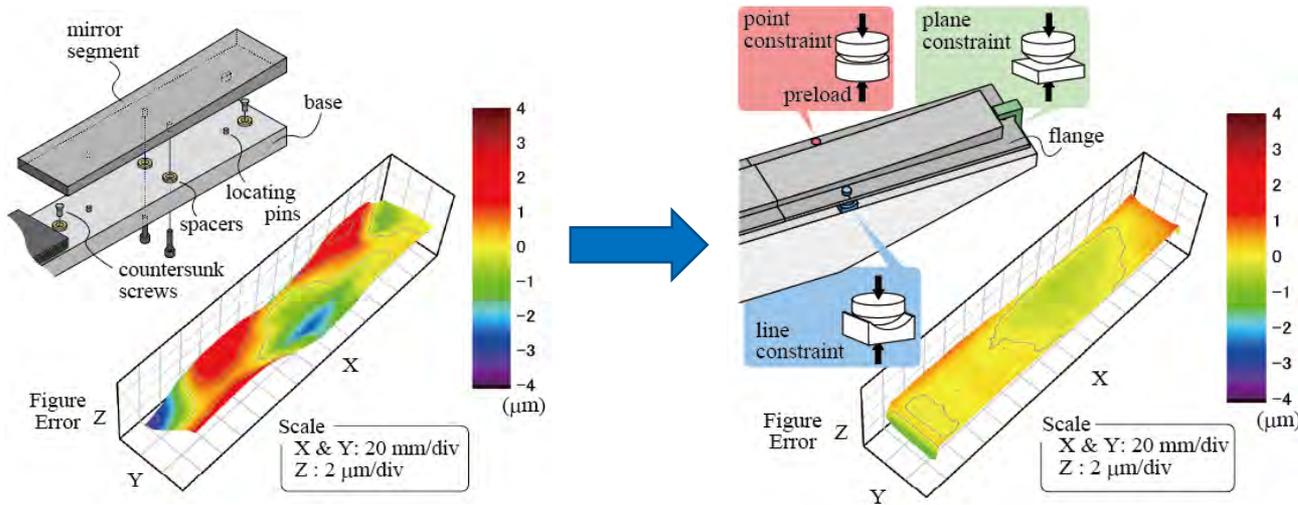
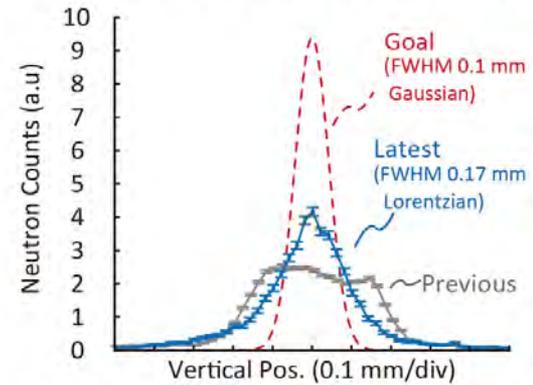
中性子集光ミラー製作の流れ



固定方法の重要性



Focusing Spot Size Measured at BL16 in J-PARC/MLF



長周期形状の高精度化のためにはストレスの無い固定方法が重要

アライメント調整手順

組み立て

非接触形状測定

形状フィッティング

スペーサ加工量の算出

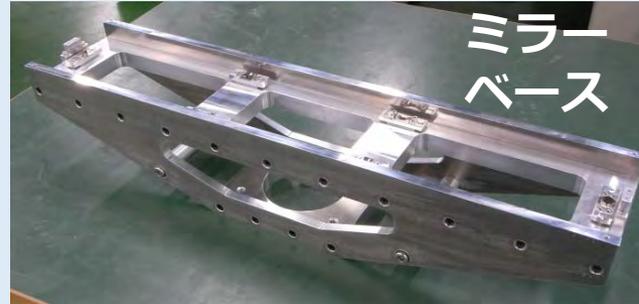
分解

スペーサのダイヤモンド旋削

NiPミラーセグメント

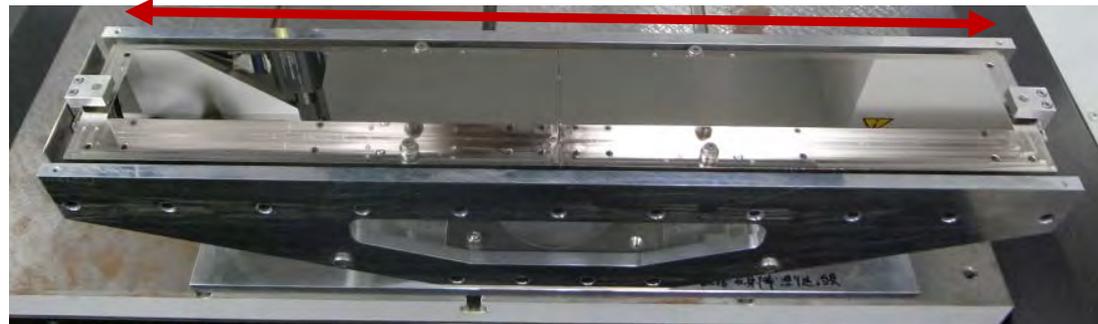


裏面



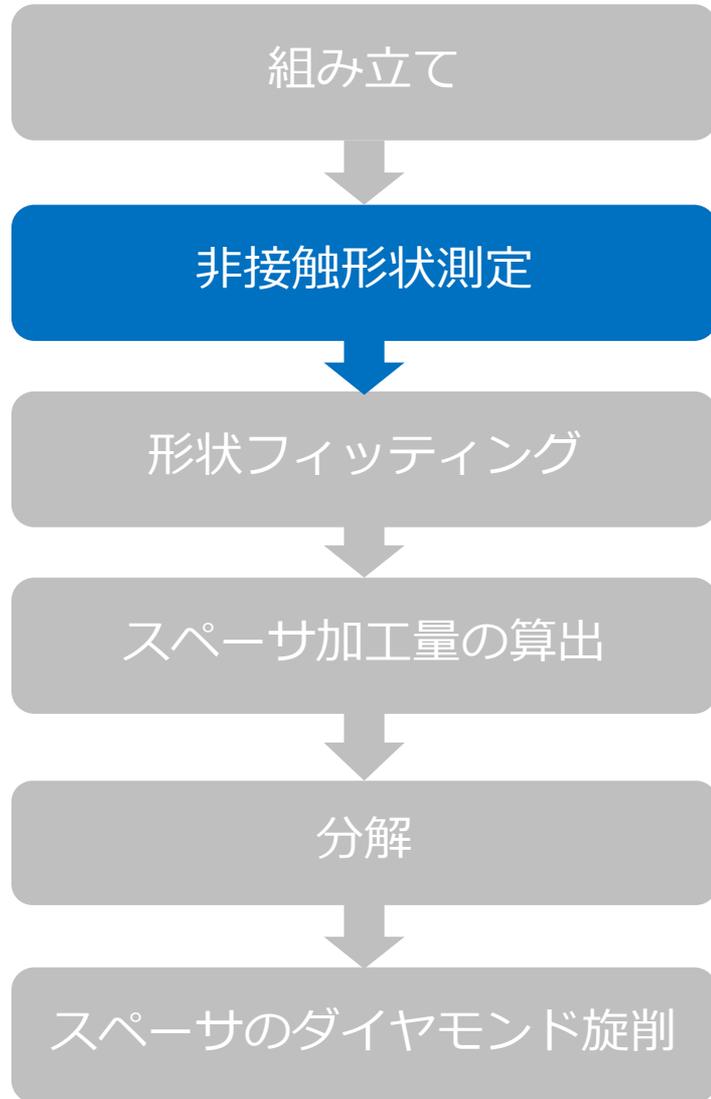
事前に均等厚さに加工したスペーサ×6枚

550 mm



組立状態

アライメント調整手順

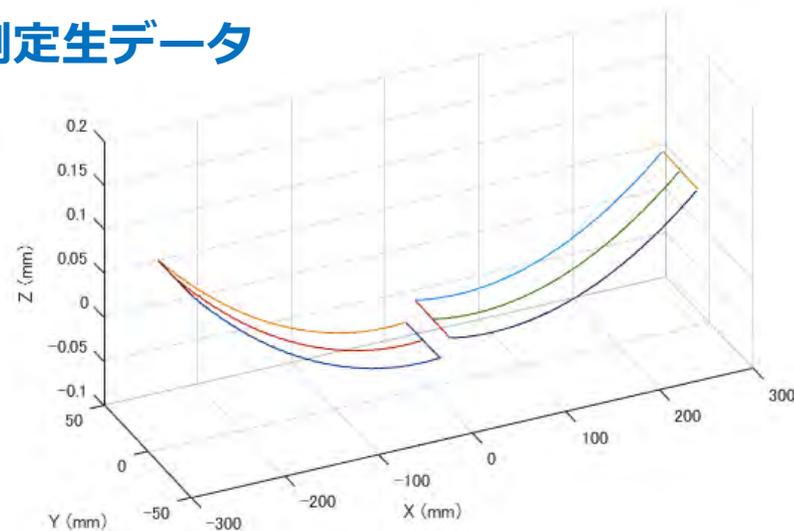


非接触測定機
三鷹光器 PFU-3
on ミットヨ LEGEX

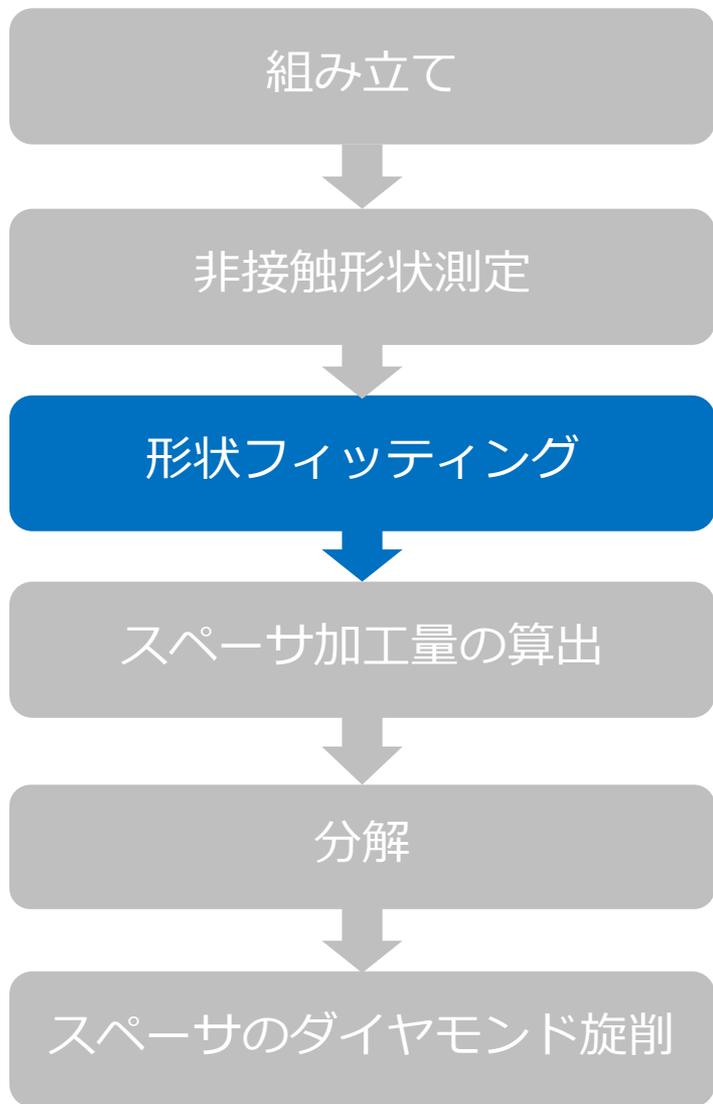


レーザーAF
分解能: 1 nm

測定生データ



アライメント調整手順



フィット関数

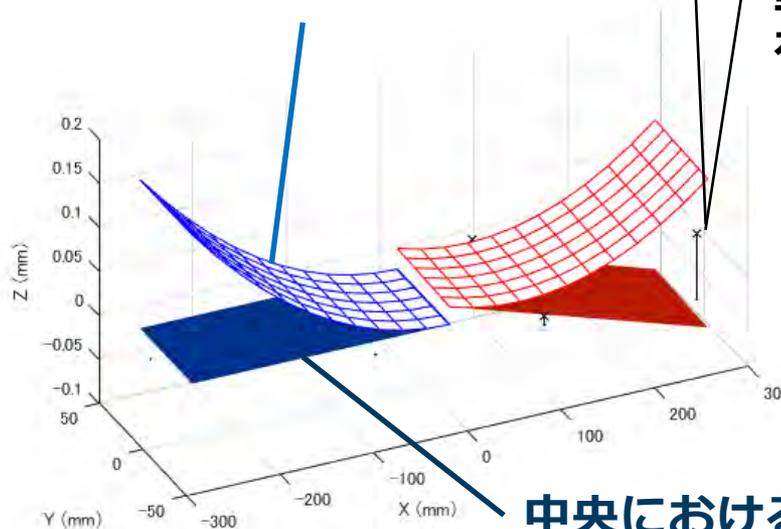
$$b \left(1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \right) + c_x x + c_y y + z_0$$

a, b : 楕円半径
 c_x, c_y : 傾き
 z_0 : 高さオフセット

楕円面

接平面

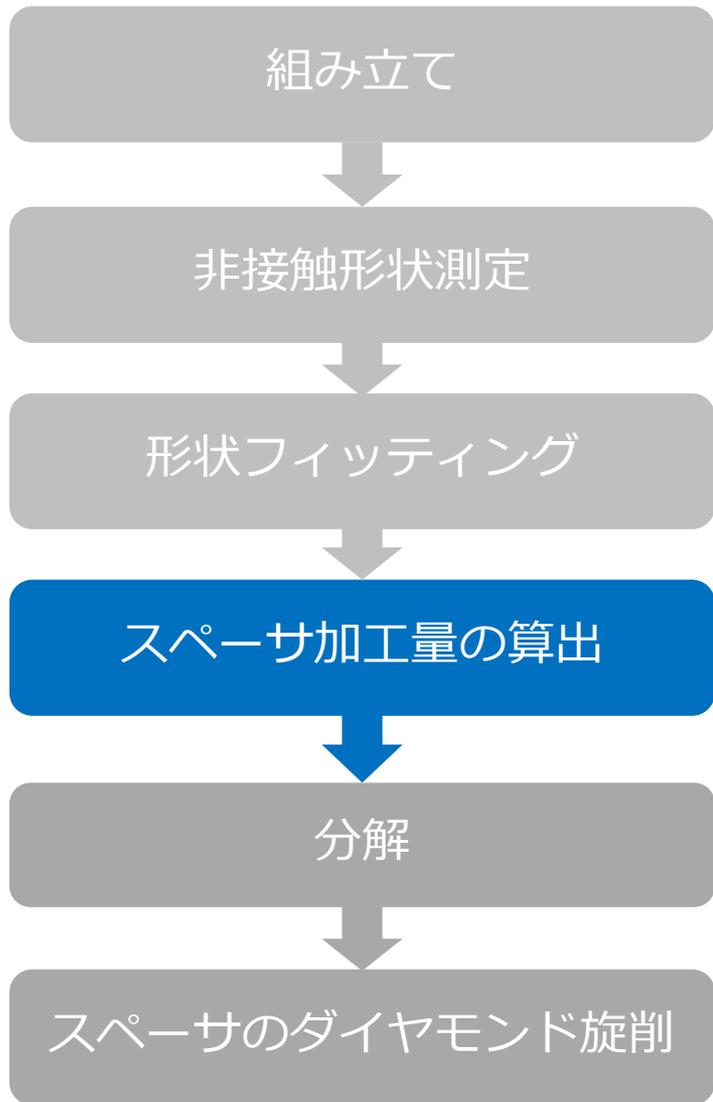
最適フィット楕円面



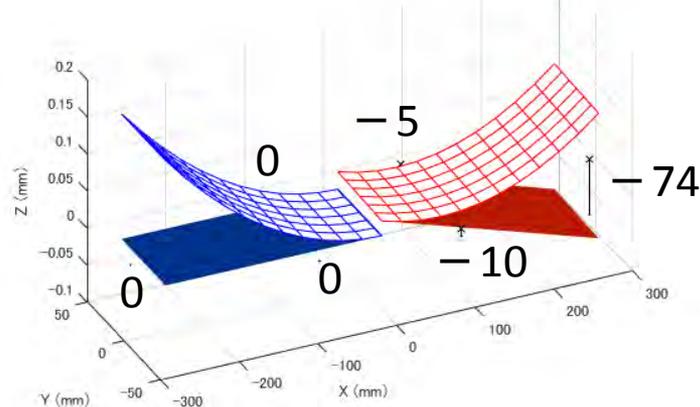
支持点の
XY座標から
垂線の高さを
求める

中央における接平面

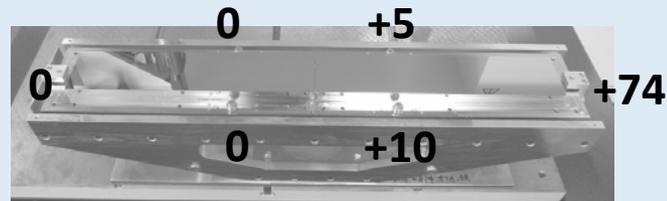
アライメント調整手順



各支持点における高さ誤差 (μm)



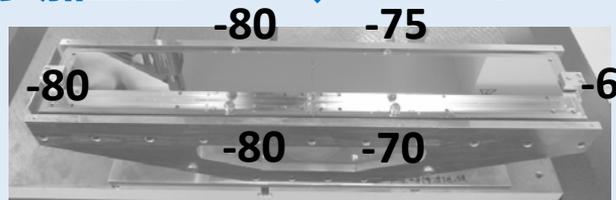
修正量



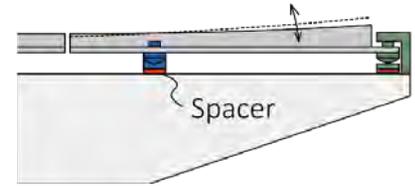
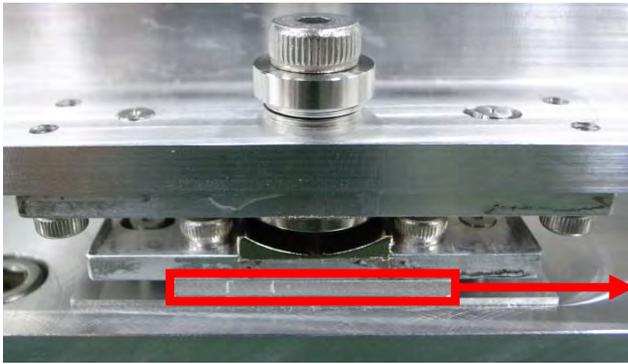
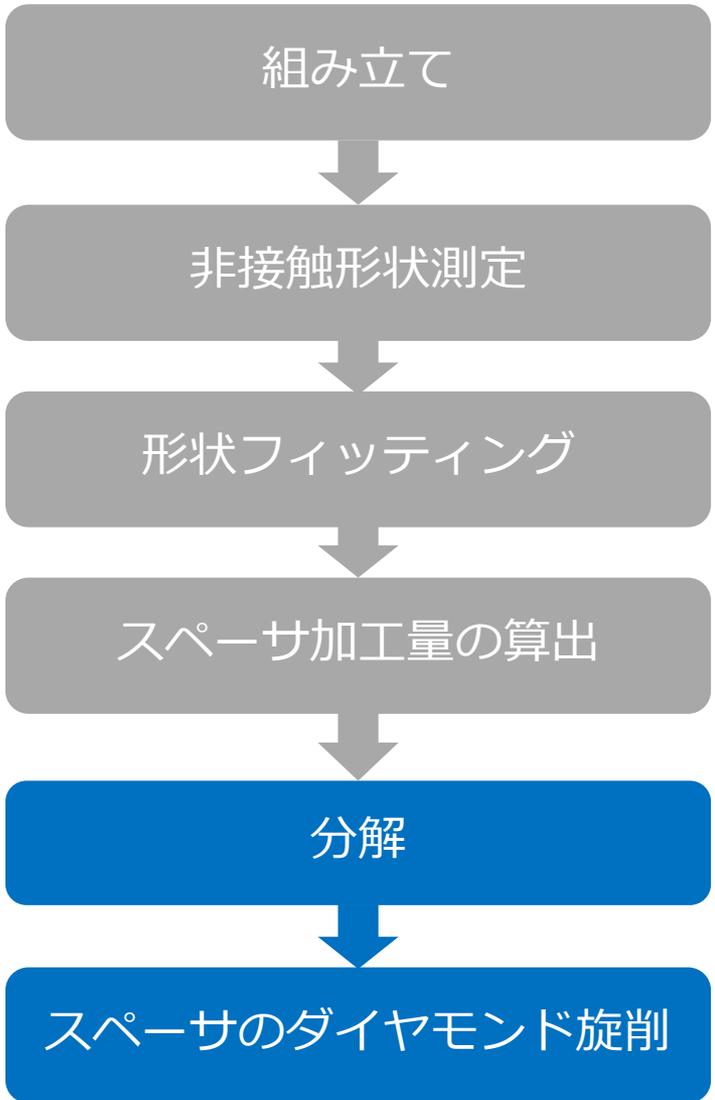
除去加工なので+の修正は不可

スペーサ加工量

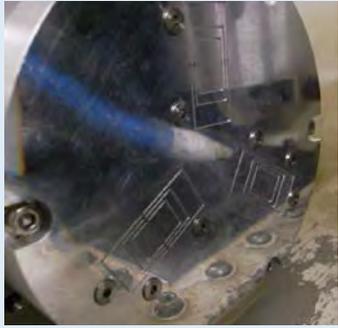
全体をオフセット



アライメント調整手順



高さ調整用スペーサ
(共締め)



真空チャック



スペーサの吸着



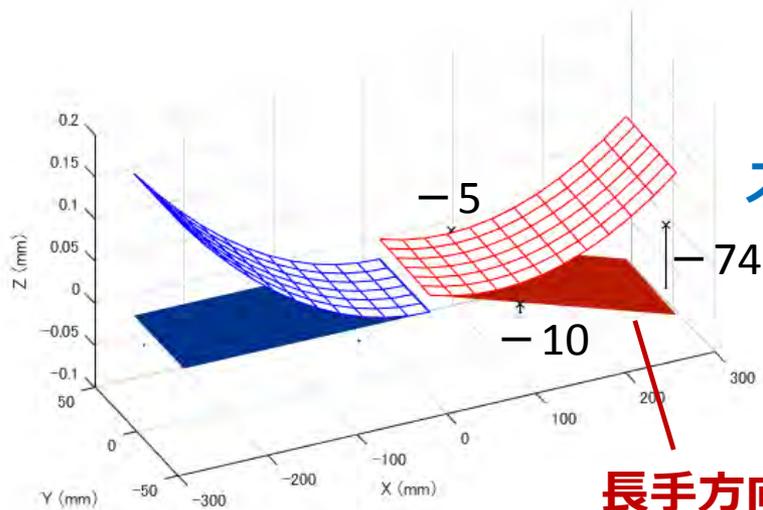
ダイヤモンド旋削

分解能 (10 nm)
単位で
相対厚さを調整



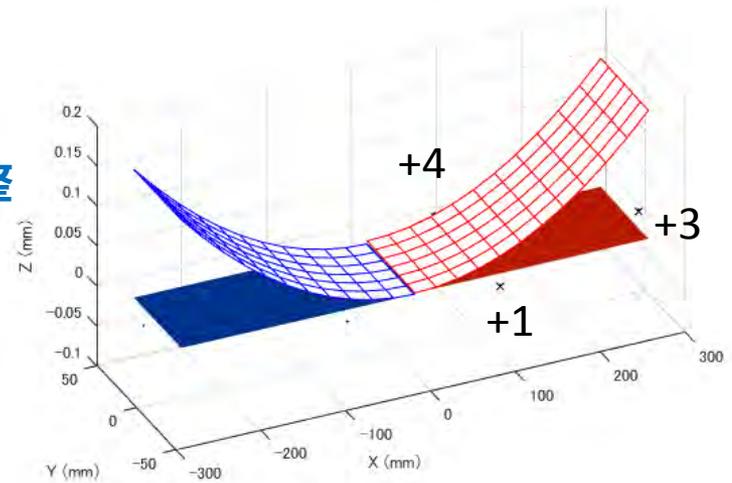
加工が終了した
スペーサは
ダミーに交換

調整結果

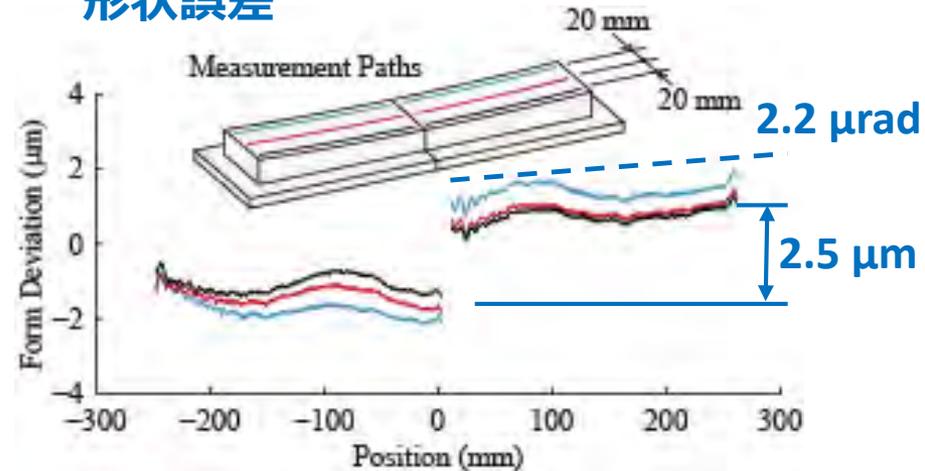


スペーサ調整

長手方向傾き
-328 μrad



形状誤差



- 段差 $2.5\mu\text{m}$: 実用上問題なし (原因は不明)
- 集光ミラーとして最も重要な長手方向傾きは数 μrad オーダーで調整可能

まとめと今後の展望

京大炉・理研連携により開発を進めている金属母材を用いた中性子集光ミラーの**製作工程はほぼ確立**しており、さらなる**高性能化および実用化を目指す段階**に入っている

当面は中性子反射率計 (SOFIA@BL16 in J-PARC/MLF) およびスピンエコー分光器群 (VIN ROSE@BL06 in J-PARC/MLF) における**実用化を目指して開発を進める**

中期的には、**小型中性子源 (特に線源近傍) への展開**を目指す (強度が弱いからこそ役に立つ)

長期的には、京大炉・理研発の中性子集光ミラーの**日本中／世界中のビームラインへの普及を目指す**