

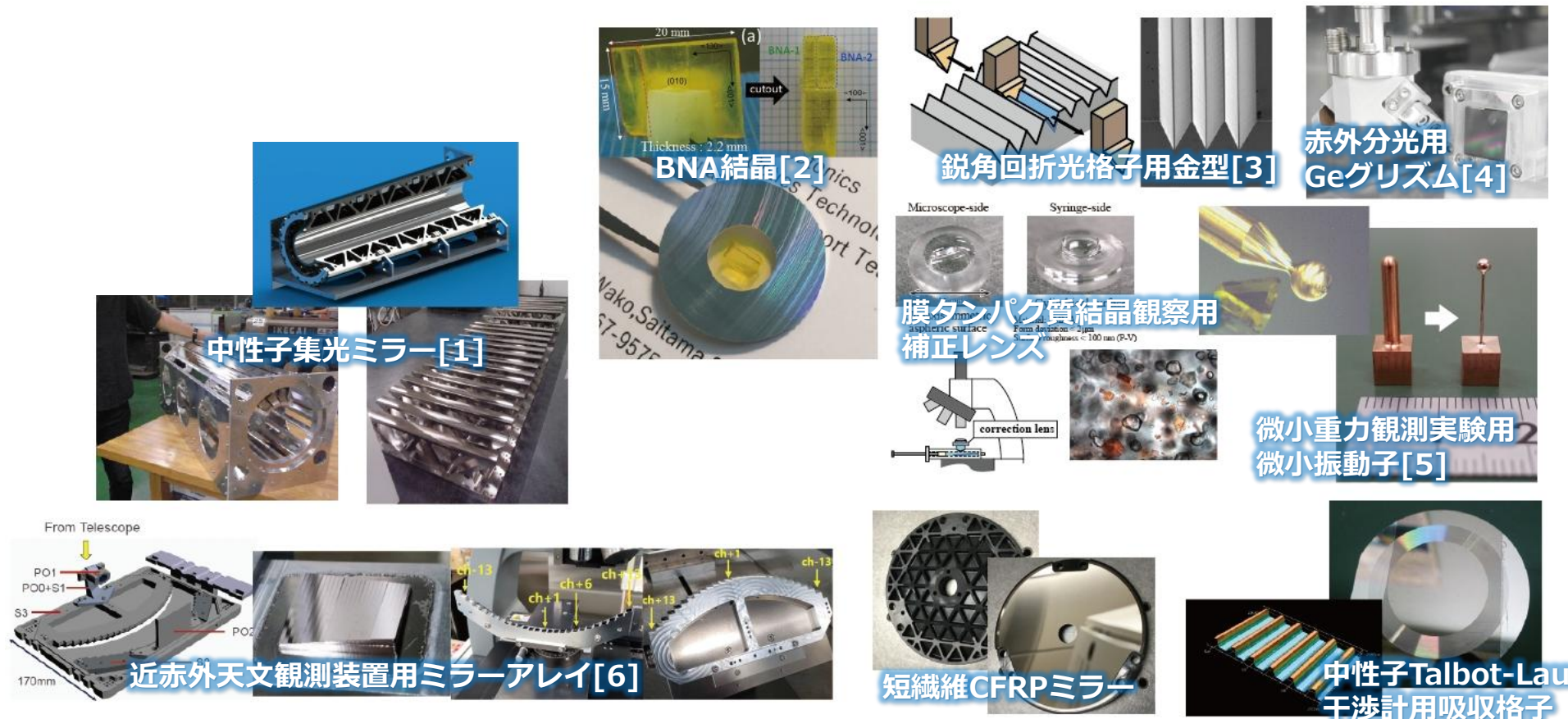
光学素子金型製造技術の 大規模な中性子線集束システムへの展開

理化学研究所 光量子工学研究センター
先端光学素子開発チーム
上級研究員 細畠 拓也

2026年6月16日

理化学研究所における光学素子開発

- ダイヤモンド切削を中心とした**光学素子製造技術の研究開発**
- **超精密加工技術**によって「**世界に一つ**」の光学部品を開発
- 異分野連携で**最先端の基礎科学研究向けのものづくり**



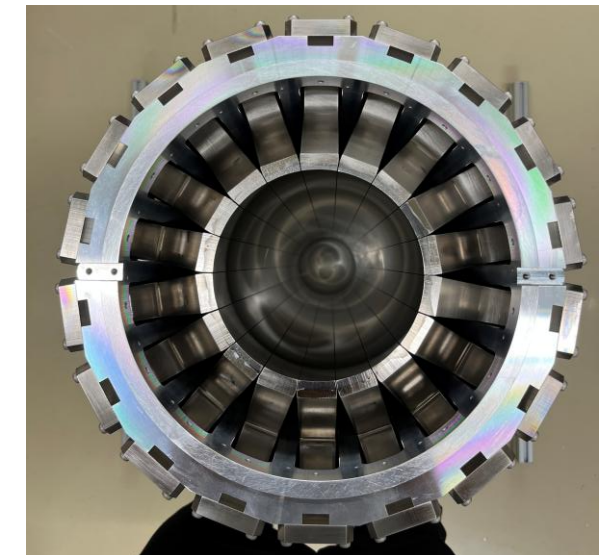
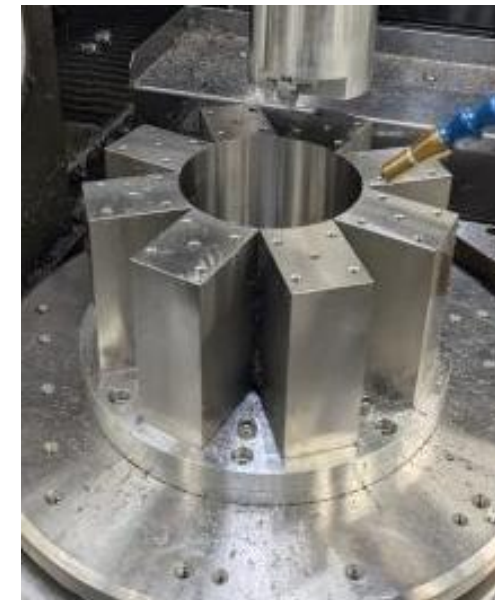
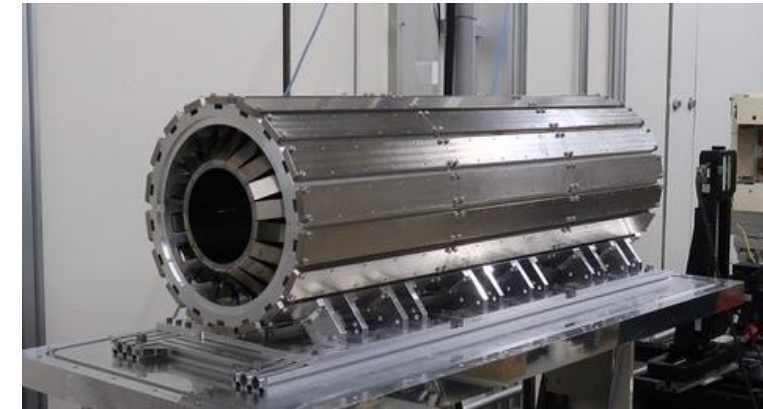
図の出典

- [1] T. Hosobata et al., JPS Conf. Proc. 22, 011010 (2018).
 [2] Notake, T. et al., Sci Rep 9, 14853 (2019).
 [3] 細島 拓也ほか, 精密工学会学術講演会講演論文集, p. 678-679 (2019S).
 [4] T. Hosobata et al., in Proc. 8th Int. Conf. of Asian Soc. For Prec. Eng. and Nanotech. (2019)
 [5] 細島 拓也ほか, 精密工学会学術講演会講演論文集, p. 703-704 (2020S).
 [6] K. Kushibiki et al., J. Astron. Telesc. Instrum. Syst., Vol. 10, No. 1, 015004 (2024).

著者オリジナル図版を使用

はじめに：本技術で企業に提供したい価値

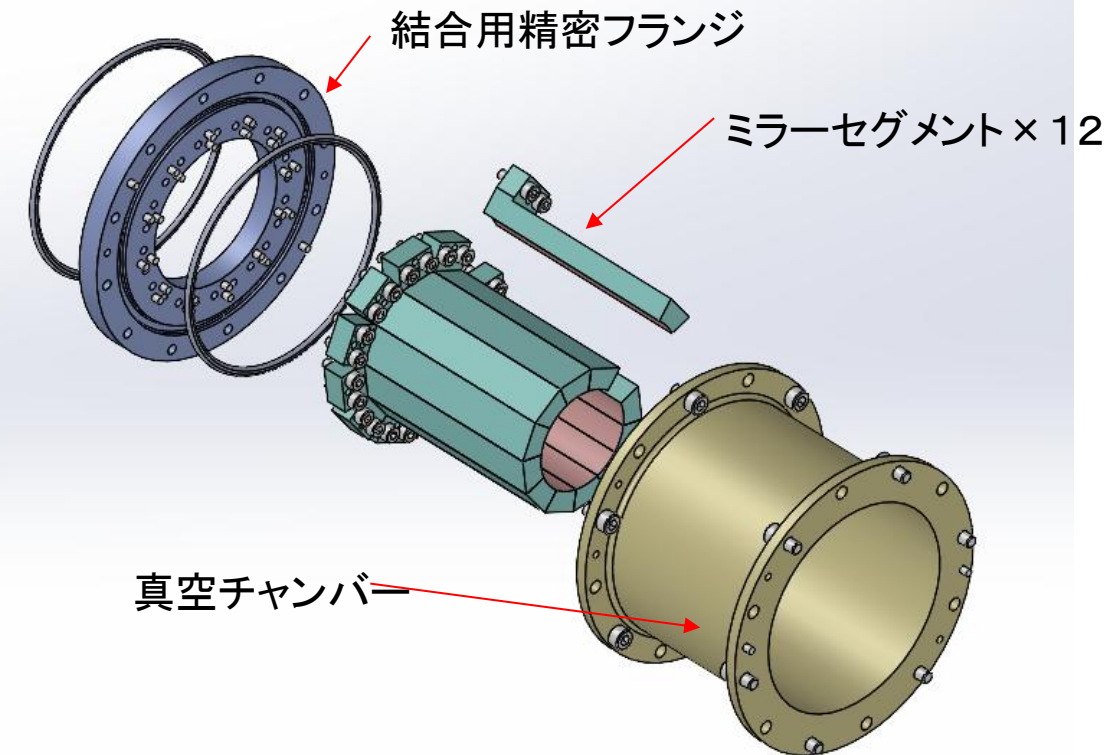
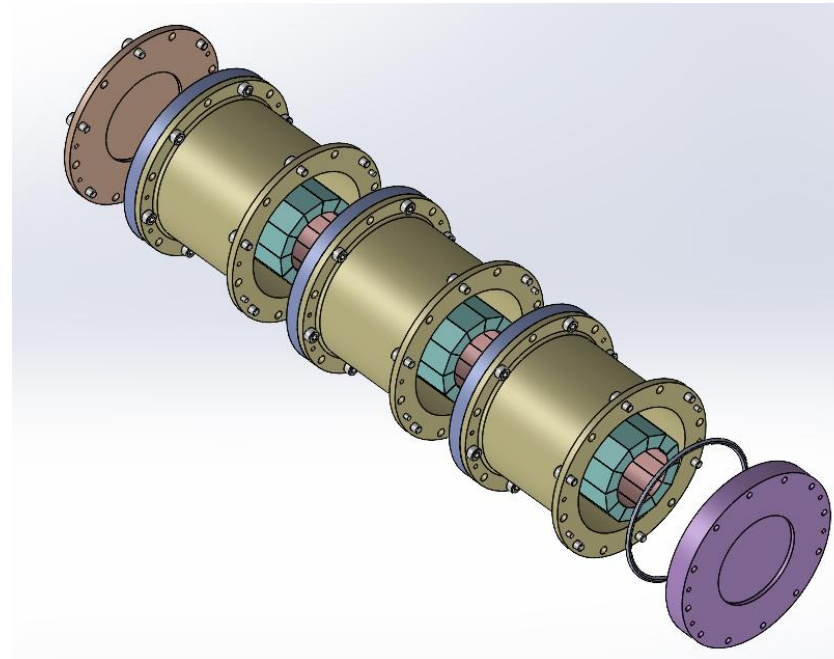
- 中性子ミラー開発で得た「**高精度内面部品の製造技術**」を、企業の特許部品開発へ展開したい
- 本技術の直接的な対象：**中性子集束装置**
- 発明（製造技術）
 - 分割された高精度部品を**一体物として加工**
 - **加工後に分解**し、平面上で成膜・表面処理
 - 使用時には高精度に**再組立**
- 展開先候補：
 - 分析・計測装置内の特殊部品
 - 真空装置内の高精度内面部品
 - 内面に機能膜を形成する部品



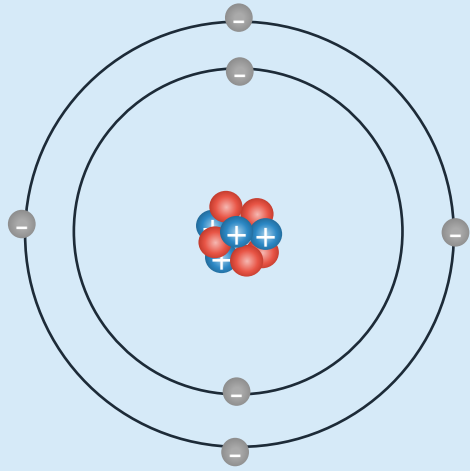
中性子ミラーのための高精度内面部品の製造技術

中性子ミラーを実証対象とした，高精度内面部品の製造技術

- 技術の本質：**分割型高精度内面部品の加工・研磨・成膜・再組立て・複数結合**
- 企業との連携目的
 - － 共同研究
 - － 試作
 - － 応用探索
 - － 技術移転

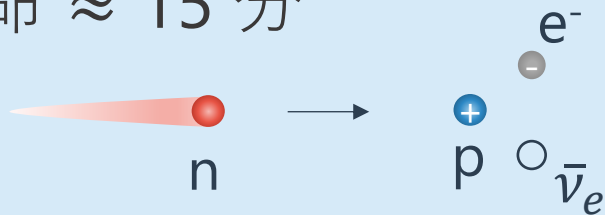


中性子による新材料の構造解析

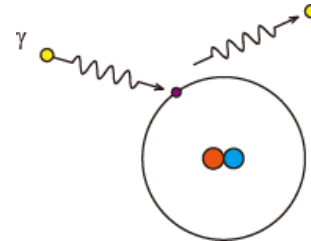


電荷 = 0
重さ $\approx$ 陽子

寿命 $\approx$ 15 分

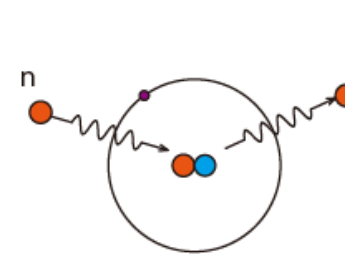


光子 (X線)



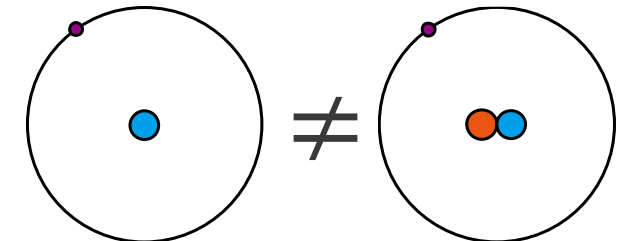
電子で散乱

中性子



原子核で散乱

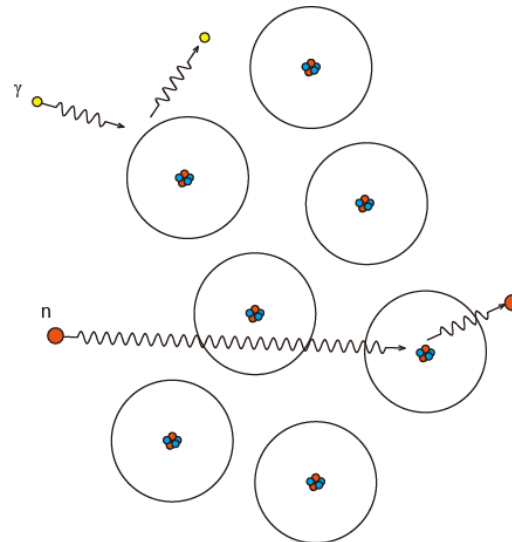
同位体ラベリング



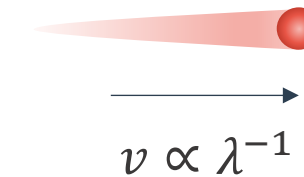
水素

重水素

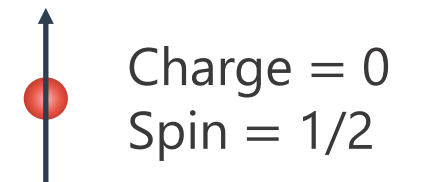
材料の深い部分まで侵入



飛行時間法による
分光



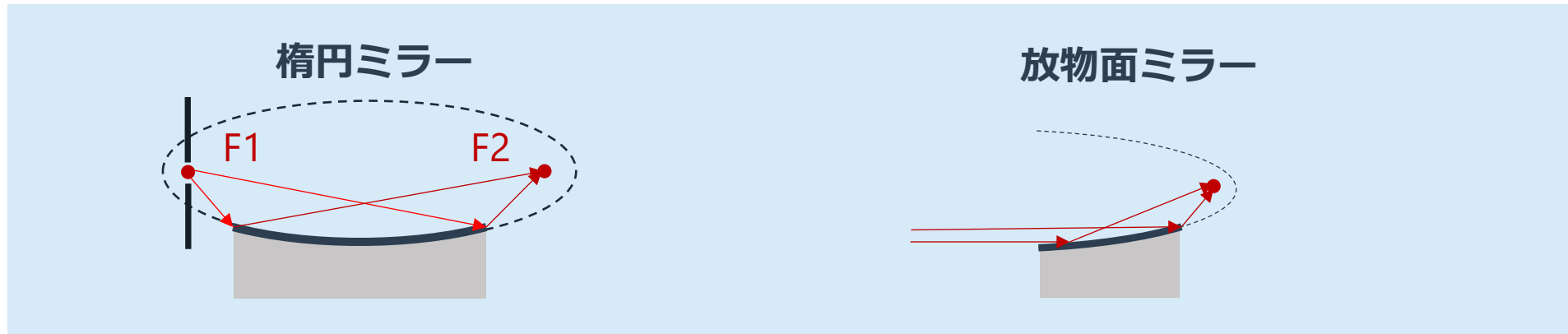
磁気特性の測定



“中性子ならではの”測定が
材料科学に革新をもたらしている

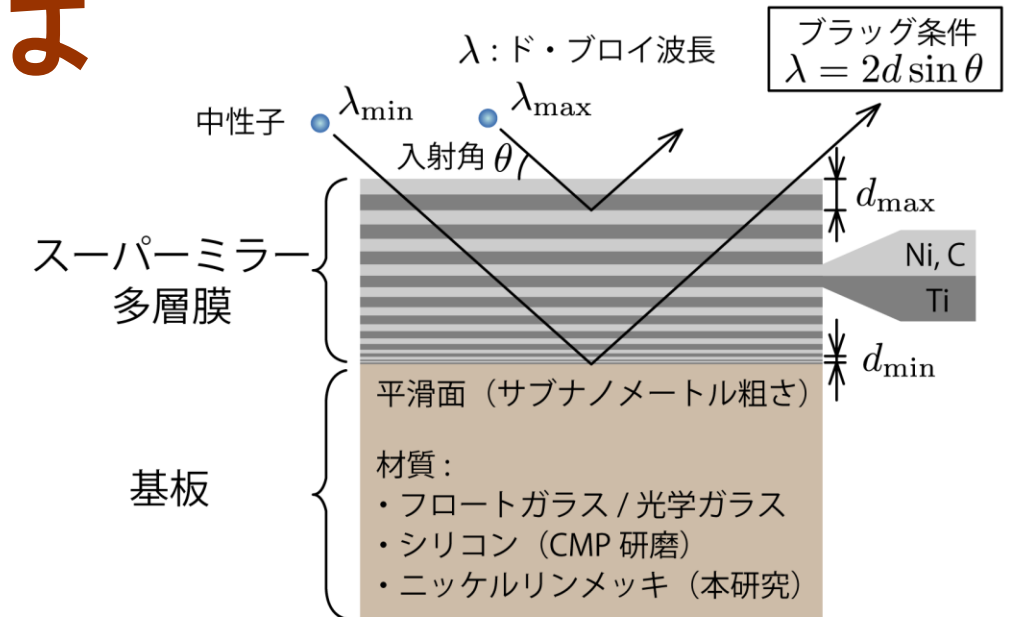
中性子ビーム利用と収束光学の必要性

- 低エネルギー中性子線は放射光(X線)と相補的に用いられる
- 日本の大強度中性子源:
加速器施設J-PARC、研究用原子炉JRR3(茨城県東海村)
- 世界の大強度中性子源:
European Spallation Source(欧州連合)など各地域に大規模施設
- 大強度中性子源でも中性子強度はまだまだ弱く、材料分析の効率化のために
「中性子線を試料に集める」技術へのニーズが高い
- 理化学研究所発の金型技術による「金属製中性子集光ミラー」に注目が集まる



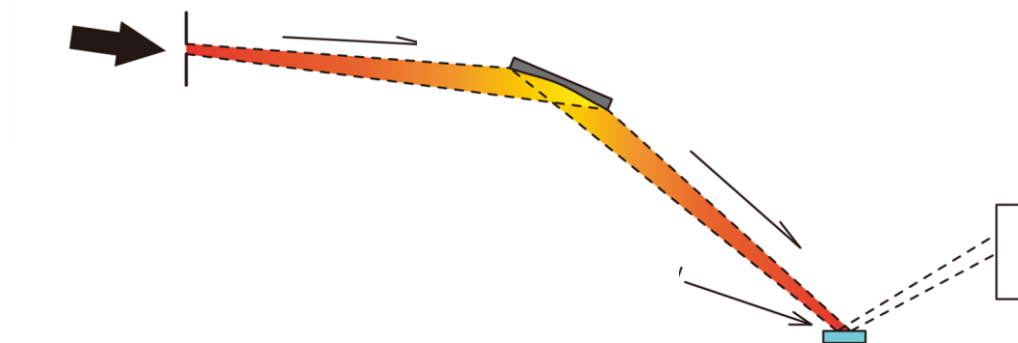
中性子集束スーパーミラーとは

- **金属多層膜スーパーミラー(Ni/Ti)**
 - 中性子線を反射できる角度の増大
 - 反射できる中性子のエネルギー範囲を拡大
- スーパーミラーを成膜した曲面は**中性子を集める「レンズ」**
- 曲面基板材料として高い耐放射線性を有し、超精密加工が容易な**ニッケルリンめっき(光学金型材料)に注目**



構成例	膜厚: 約 3 μm	全反射臨界角 ニッケル単体の 2.9 倍 $\frac{\theta}{\lambda} = 2.9 [^\circ/\text{nm}]$
	層数: 420 層	
	$d_{\min}$: 9.8 nm	
	$d_{\max}$: 73.1 nm	

図の出典: 細島拓也ほか、「中性子集束スーパーミラーのための金属基板の小径ツール研磨」,
「機械技術」2020年4月号, 著者オリジナル図版を使用



スーパーミラー多層膜

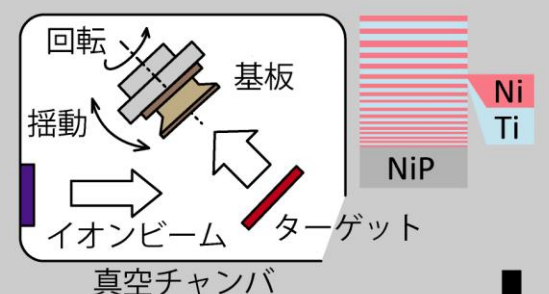
精密な曲面基板

従来技術(セグメント個別製作・組立)

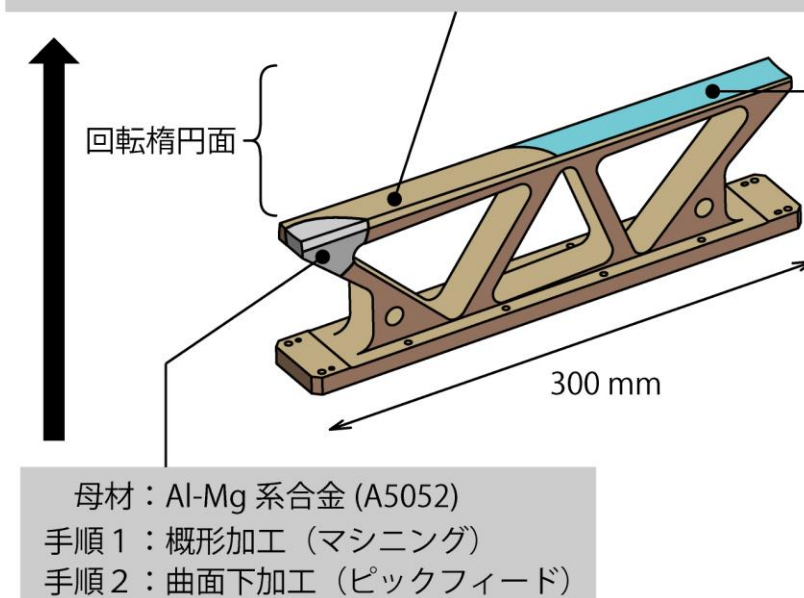
手順3：ニッケルリンメッキ（膜厚 100 μm ）
 手順4：曲面加工（ダイヤモンド切削）
 手順5：粗研磨（小径ツール研磨・アルミナ砥粒）
 手順6：仕上研磨（小径ツール研磨・コロイダルシリカ）

手順7：洗浄
 流水式超音波洗浄
 など

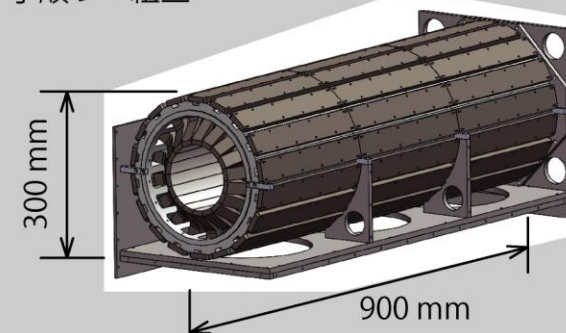
手順8：成膜（イオンビームスパッタ）



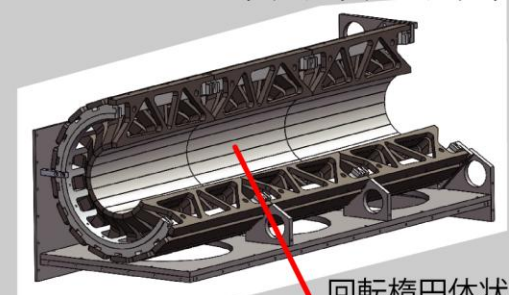
スーパーミラーセグメント



手順9：組立

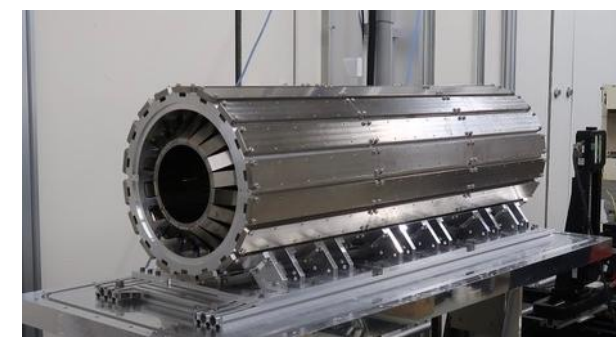


54 セグメントアセンブリ



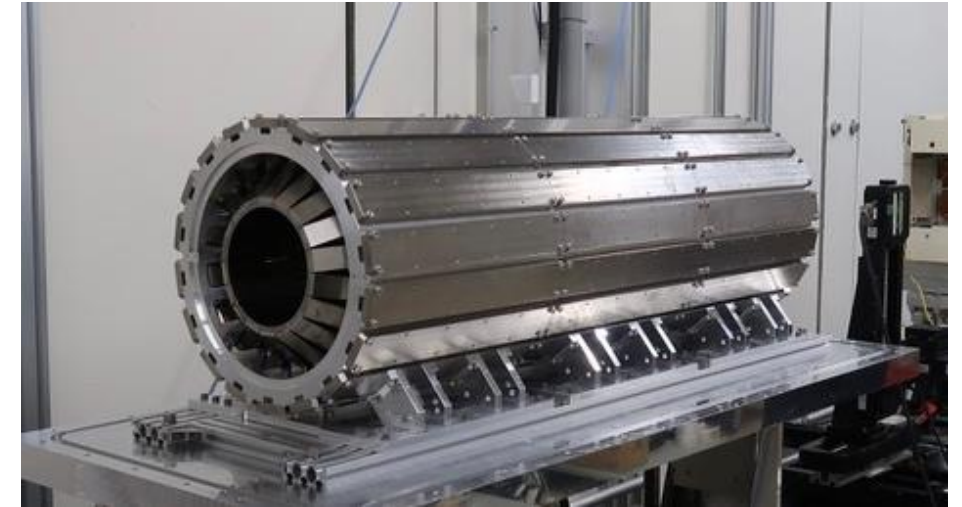
図の出典：細島拓也ほか、「中性子集束スーパーミラーのための金属基板の小径ツール研磨」,
 「機械技術」2020年4月号、著者オリジナル図版を使用

数百～数千倍の中性子強度が得られる
 900mm長さの全周型回転楕円スーパーミラーが開発された



従来技術の問題点

- 製造時間が長く、**量産性が低い**
- 2ユニット(108セグメント)の製作に要した期間は**8年間**！
- 研究所の限られた製造リソースを考慮しても**製作期間が長すぎる(持続不可能)**
- **世界中中性子施設から問い合わせがあるが、提供できない**



1ユニット:54セグメント



解決すべき技術課題

Q. なぜそんなに製作期間がかかるのか？

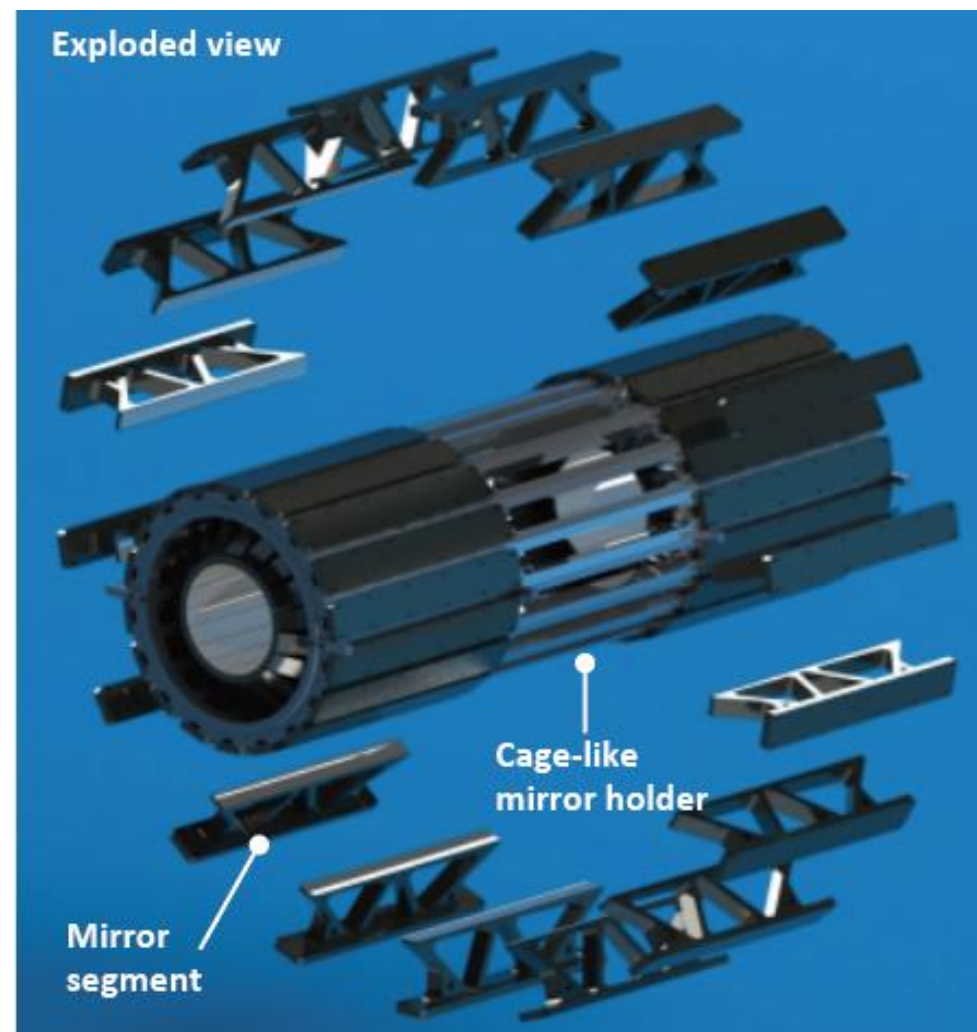
A. **分割セグメントを一つずつ
切削・研磨・洗浄**しているから

Q. なぜ分割するのか？

A. **内面に多層膜をイオンビームスパッタで
成膜**する必要があるから



解決策：
曲面の一括加工
＋分解して成膜
＋再組み立て

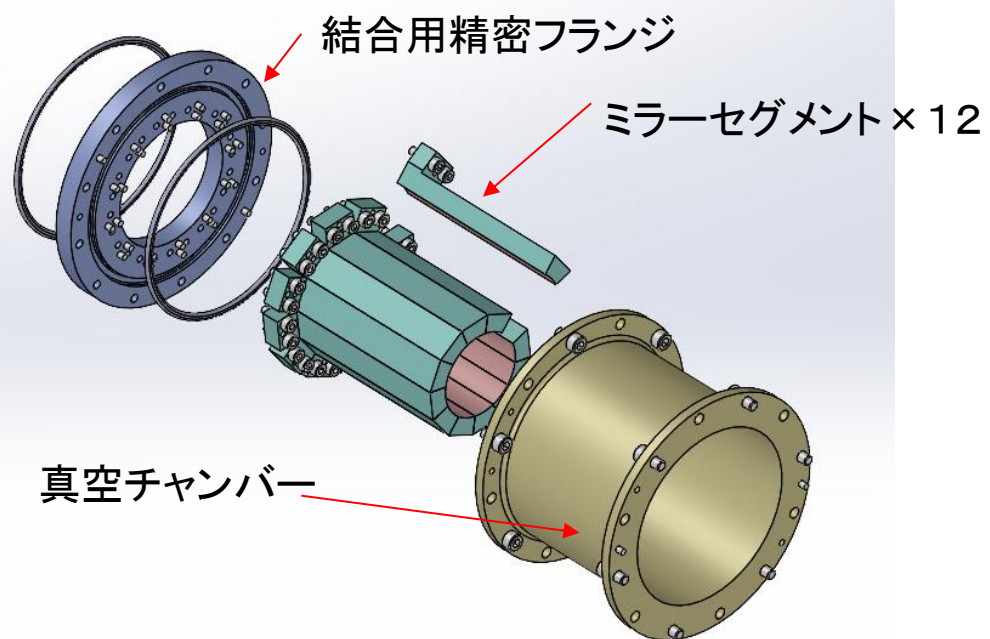


図の出典：T. Hosobata et al., JPS Conf. Proc. 22, 011010 (2018).
著者オリジナル図版を使用

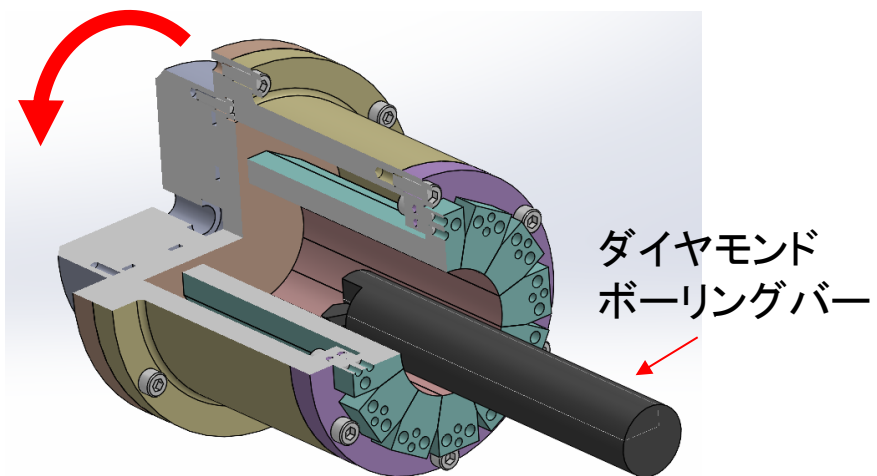
新技術の基本コンセプト

ユニット単位の一括製造

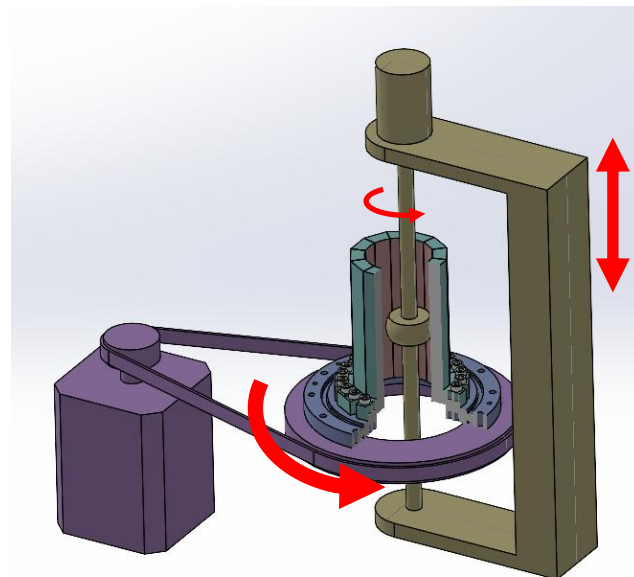
ミラーユニットの構造



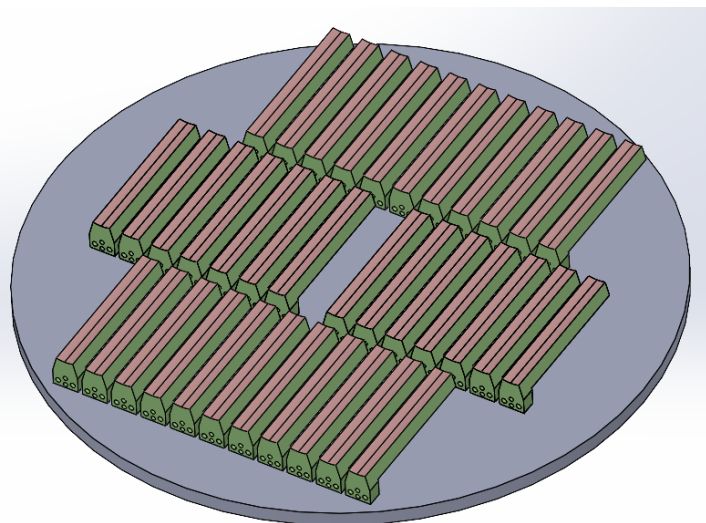
一括形状創成(中ぐり旋削)



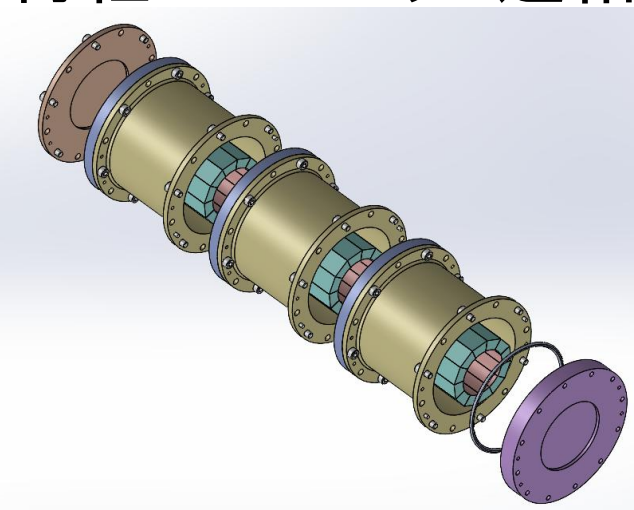
一括内面研磨・洗浄



平面展開・内面成膜



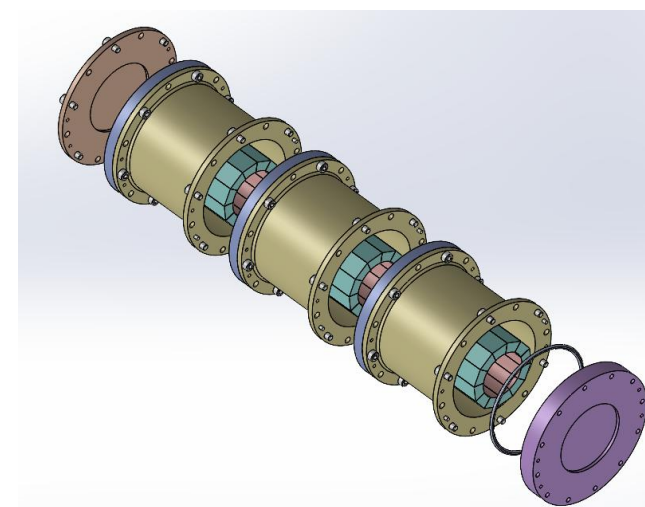
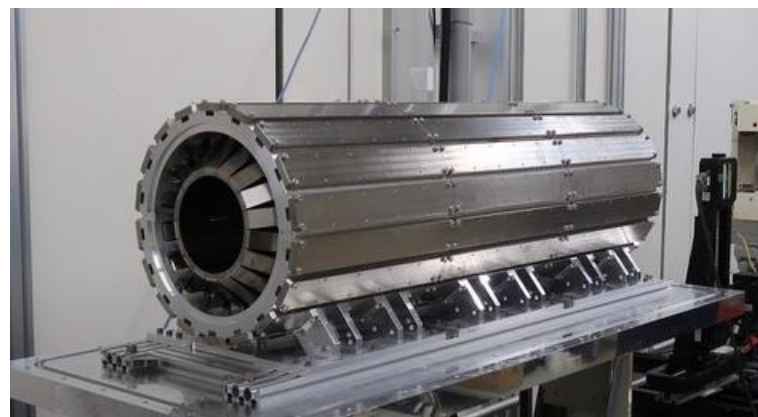
再組立・ユニット連結



従来技術との比較

分割構造の自由度を保ちつつ，一体加工で精度を出す

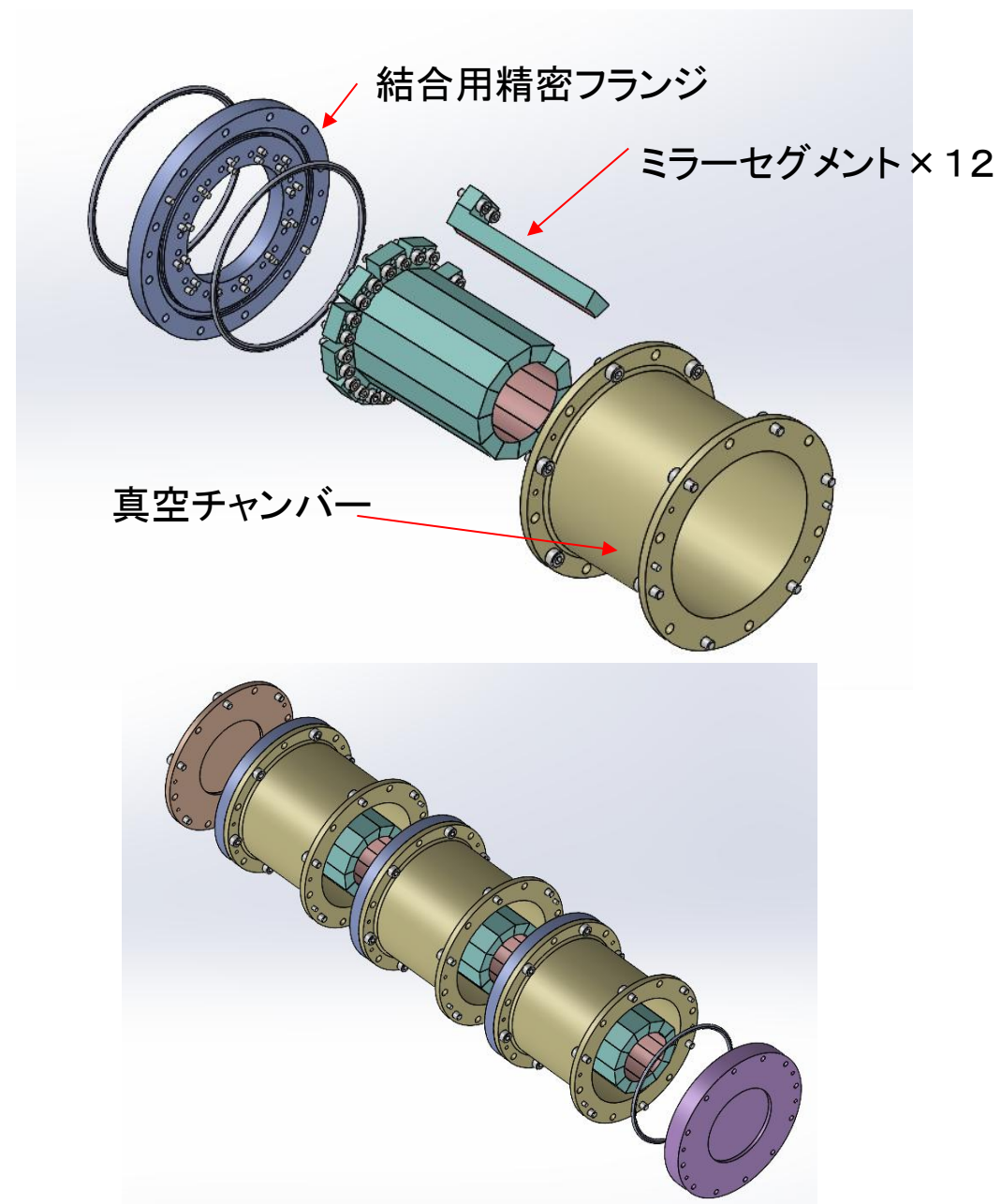
	従来技術	新技術
製造単位	セグメントごと	360° ユニット一括
納品単位	アセンブリ全体	ユニットごと
基準面	工程ごとに異なる	結合フランジ
拡張性	なし	ユニット連結
製造時間	2ユニット108セグメントで8年	ユニット一括加工により大幅短縮※



※現時点では内面の一括旋削加工に成功。研磨・洗浄を含む全工程の時間短縮効果は今後の試作で評価する。

本技術で可能になること

- 高精度の内面を有する筒状光学
部品の製造
- 全周分のユニットを一体の回転対
称面として一括加工
- 加工後に展開して表面処理・成膜
- 再組立て時の位置再現性の確保
- 軸方向に長い構造への拡張



想定される用途

中性子光学部品を入口として、高精度内面部品の
製造・表面処理・再組立て技術を展開する

本命用途：中性子ミラー・導管

- 新造施設向けの計画的製造
 - 中性子導管の長さはkm単位！
 - 新試験研究炉
(もんじゅサイト@福井県敦賀市)
 - J-PARC第2ターゲットステーション
(茨城県東海村)
- 既存ビームラインへの個別納品
 - 世界各国の中性子実験施設で需要あり
- 施設改修時の大量納品
 - 中性子導管は多層膜劣化時に総交換

波及効果： 高精度内面部品の製造技術

- 分析装置・計測装置内の
高精度筒状部品
- 真空装置内の高精度内面部品
- 内面に機能膜を形成する基板部品
- 分割加工後に再組立て精度が
必要な特殊部品

企業に提供できる価値

「高精度内面＋機能膜＋再組立て」を可能にする技術の提供

企業側の課題	提供できる技術
内面形状を高精度に作れない	超精密切削による内面形状創成
成膜前の基板精度・粗さが不足する	Ni-Pめっき面の切削・研磨
加工・研磨・成膜・組立で基準がずれる	基準面を統一した工程設計
一体物では成膜・洗浄できない	分割・展開・再組立て構造の設計
少量特殊部品の製造プロセスが作れない	試作から工程手順書化までの支援

実用化に向けた課題

まずは「具体的な部品課題」を持つ企業と、試作テーマを設定したい

課題1: 量産工程への落とし込み

- － 加工機, 測定器, 治具, 洗浄, 成膜, 組立の工程設計
- － 企業設備で再現可能な手順への変換

課題2: 標準形状・標準ユニットの設定

- － 中性子ミラー, 導管, 筒状基板など, 事業化しやすい形状を選定
- － 少量多品種か, 標準品展開かを検討

課題3: 中性子用途以外への適用検証

- － 真空装置, 分析装置, 薄膜形成基板などへの応用探索
- － 企業が持つ具体的な部品課題で試作評価

社会実装への道筋

まずは福井県の新試験研究炉への導入が課題

現状、中性子ミラー用金属基板の技術を有しているのは理化学研究所のみだが、この事業で要求される大量生産能力は無い⇒パートナー企業が不可欠

時期	技術課題	社会実装への取り組み
基礎研究	既存技術による回転楕円ミラーの開発が完了	実現可能性は実証済み
現在	内面の一括旋削加工に成功。研磨・洗浄装置を開発中	試作パートナー探索
1年後	1ユニット試作，研磨・洗浄を含む工程確認	共同研究，試作受託，助成金申請
3年後	中性子用途での試作評価，工程手順書化	企業設備への移管条件を整理
5年後	新試験研究炉等での実証・導入検討	受注製造体制を企業と構築

企業への期待

共同研究により、中性子分野に限定せず、
具体的な製品開発課題への適用可能性を検討したい

1. 中性子・放射光・分析装置関連企業
 - － 中性子光学部品の試作・評価
 - － ビームライン部品, 導管, 集光系への適用検討
2. 真空装置・薄膜装置関連企業
 - － 内面に成膜する基板構造の設計
 - － 分割・展開・再組立てを前提とした部品開発
3. 精密加工・特殊部品メーカー
 - － 高精度内面部品の加工プロセス開発
 - － 少量高付加価値部品の共同試作

企業への貢献・PRポイント

理化学研究所における超精密加工ノウハウの提供

- 加工困難な高精度部品の試作・工程設計の支援
- 加工・研磨・成膜・組立を含む工程設計
- 通常の加工法では難しい内面光学形状の試作
- 最先端の加工機・計測器を用いたトレーニング
- 研究用途から産業用途への橋渡し
- 少量高付加価値部品の開発支援

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 中性子収束装置およびその製造方法
- 出願番号 : 特願2023-190128
- 出願人 : 理化学研究所, 京都大学
- 発明者 : 細畠拓也、竹田真宏、山形豊、
日野正裕

※ 本特許は中性子収束装置を対象とするが、技術要素である分割型内面部品の一括加工・再組立て設計は、他の高精度内面部品にも展開可能

お問い合わせ先

株式会社理研イノベーション
ライセンス部

license-contact@innovation-riken.jp

TEL : 048-235-9308 (代表)