

JT-60SAトムソン散乱計測装置用 集光光学系の開発

The Development of Collection Optics for Thomson Scattering System in JT-60SA

2024年1月15日（月）

核融合エネルギーフォーラム主催：ITER/BA成果報告会2023

京セラSOC株式会社 第二技術部

羽田 賢輔

京セラSOC株式会社

1. 京セラSOC株式会社は**光学製品メーカー**です。

Kyocera SOC Corporation is a **manufacturer of optical products**.

光学ユニット（対物レンズ等）と光学素子（ミラー、フィルター、レンズ等）の特注設計・製作、及びレーザーのカatalog品販売を行っています。

2. 弊社と核融合との関わりは**2009年に始まりました**。

Our involvement with fusion **began in 2009**.

当時の原子力研究開発機構のトムソン散乱計測担当者と当時の弊社社長が、かつて一緒に仕事をしていたという縁がきっかけでした。

3. 弊社は、**JT-60SAトムソン散乱計測装置用集光光学系**に関して、概念設計（2009年度）から製作（2020～2022年）まで関わらせて頂きました。

We have designed and produced **the correction optics for Thomson scattering system in JT-60SA**.

本日は、この話をします。

1. 京セラSOC(株)について	1. KYOCERA SOC Corporation
1 – 1. 会社概要	1-1. Company Profile
1 – 2. 製品と適用分野	1-2. Products & Applications
2. JT-60SAトムソン散乱計測装置用 集光光学系	2. Introduction of Correction Optics for Thomson Scattering System in JT-60SA
2 – 1. 集光光学系の位置付け	2-1. Purpose and Place of Correction Optics
2 – 2. 集光光学系	2-2. Correction Optics Details
3. 集光光学系の開発	3. Development of Correction Optics
3 – 1. 集光光学系の設計	3-1. Design
3 – 2. 集光光学系のレンズ系	3-2. Lens System
3 – 3. 集光光学系の構造	3-3. Structure
3 – 4. 集光光学系の製作	3-4. Production
4. まとめ	4. Summary

1. 京セラSOC(株)について

- 1 – 1. 会社概要
- 1 – 2. 製品と適用分野

2. JT-60SAトムソン散乱計測装置用 集光光学系

- 2 – 1. 集光光学系の位置付け
- 2 – 2. 集光光学系

3. 集光光学系の開発

- 3 – 1. 集光光学系の設計
- 3 – 2. 集光光学系のレンズ系
- 3 – 3. 集光光学系の構造
- 3 – 4. 集光光学系の製作

4. まとめ

1. KYOCERA SOC Corporation

- 1-1. Company Profile
- 1-2. Products & Applications

2. Introduction of Correction Optics for Thomson Scattering System in JT-60SA

- 2-1. Purpose and Place of Correction Optics
- 2-2. Correction Optics Details

3. Development of Correction Optics

- 3-1. Design
- 3-2. Lens System
- 3-3. Structure
- 3-4. Production

4. Summary

1 - 2. 製品と適用分野 / Products & Applications

工業 Industry

主な波長帯：紫外
Wavelength: UV



半導体パッケージ露光



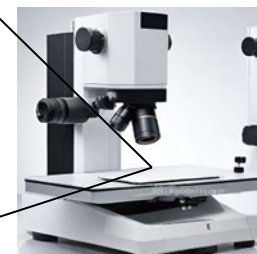
半導体マスク/ウェハ欠陥検査



レーザー加工

ライフサイエンス Life Science

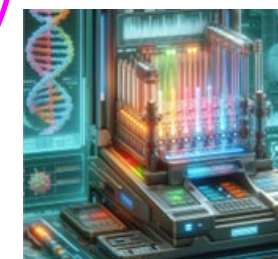
主な波長帯：可視
Wavelength: VIS



生物顕微鏡



フローサイトメータ



DNAシーケンサ

京セラS O Cの製品 KYOCERA SOC Products

**光学ユニット
Optical Units**
紫外-可視-赤外
ハイスpek
特注対応

**光学素子
Optical Elements**
高精度
高耐力
特注対応

**レーザ
Lasers**
可視
小型
高信頼性

宇宙・防衛 Space & Defense

主な波長帯：赤外
Wavelength: IR

- ・かぐや
- ・はやぶさ
- ・はやぶさ2
- ・しきさい など



人工衛星



防衛機器

高NA紫外対物レンズ



広視野高NA
対物レンズ



IRレンズ



長作動距離
液浸対物レンズ



マスク/ウェハ検査用
対物レンズ



fθレンズ



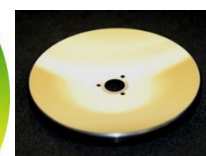
UV加工用レンズ



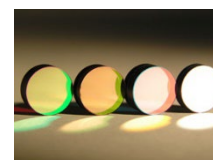
PBS



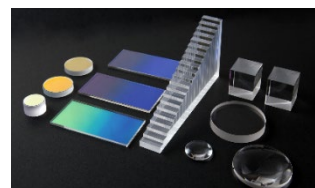
大口径レンズ



非球面レンズ/ミラー



分光フィルタ



単レンズ/ミラー/プリズム



フリースペース



ファイバカップル



マルチカラー
レーザモジュール

355nm	505nm	594nm
375nm	515nm	633nm
405nm	532nm	642nm
445nm	542nm	785nm
473nm	543nm	1064nm
488nm	561nm	

波長ラインナップ

1 - 1. 会社概要 / Company Profile

商 号 : 京セラ S O C 株式会社
KYOCERA SOC Corporation

U R L : <https://www.ksoc.co.jp/>

設 立 : 1954年1月28日 (昭和29年)

今年 7 0 周年

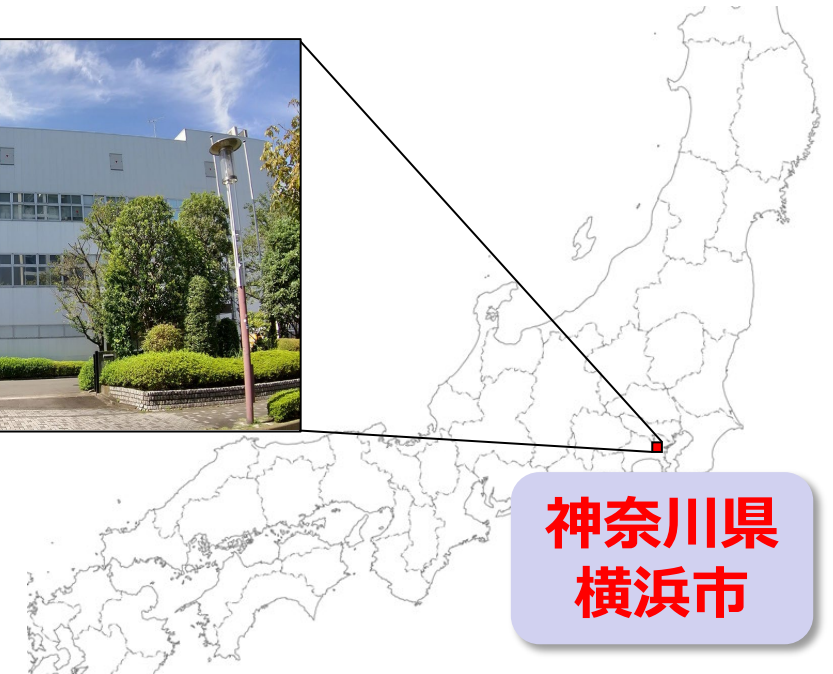
資 本 金 : 5,000万円

売 上 高 : 78億円 (2023年3月期)

従業員数 : 275名 (2023年4月1日現在)
内、技術部門60名、製造・検査部門136名

モノづくりの会社

所在地



神奈川県
横浜市

【沿革】 / History

- 1954 昭和光機製造株式会社 設立 (東京都世田谷区)
- 1959 日本電気株式会社の関連会社となる
- 1994 昭和オプトロニクス株式会社に社名変更
- 2020 6月 京セラ株式会社の関連会社となる
10月 京セラ S O C 株式会社に社名変更
本社移転 (東京都世田谷区→横浜市緑区)

1. 京セラSOC(株)について

1 – 1. 会社概要

1 – 2. 製品と適用分野

1. KYOCERA SOC Corporation

1-1. Company Profile

1-2. Products & Applications

**2. JT-60SAトムソン散乱計測装置用
集光光学系**

2 – 1. 集光光学系の位置付け

2 – 2. 集光光学系

**2. Introduction of Correction Optics
for Thomson Scattering System in JT-60SA**

2-1. Purpose and Place of Correction Optics

2-2. Correction Optics Details

3. 集光光学系の開発

3 – 1. 集光光学系の設計

3 – 2. 集光光学系のレンズ系

3 – 3. 集光光学系の構造

3 – 4. 集光光学系の製作

3. Development of Correction Optics

3-1. Design

3-2. Lens System

3-3. Structure

3-4. Production

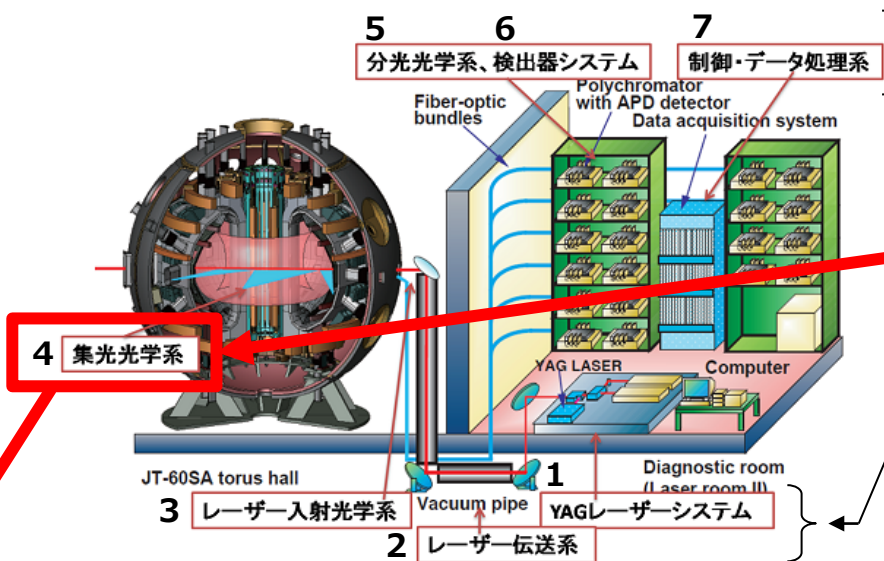
4. まとめ

4. Summary

2-1. 集光光学系の位置付け / Purpose and Place of Correction Optics

【1. トムソン散乱計測装置 (JT-60SA)】

1. Thomson Scattering System (JT-60SA)



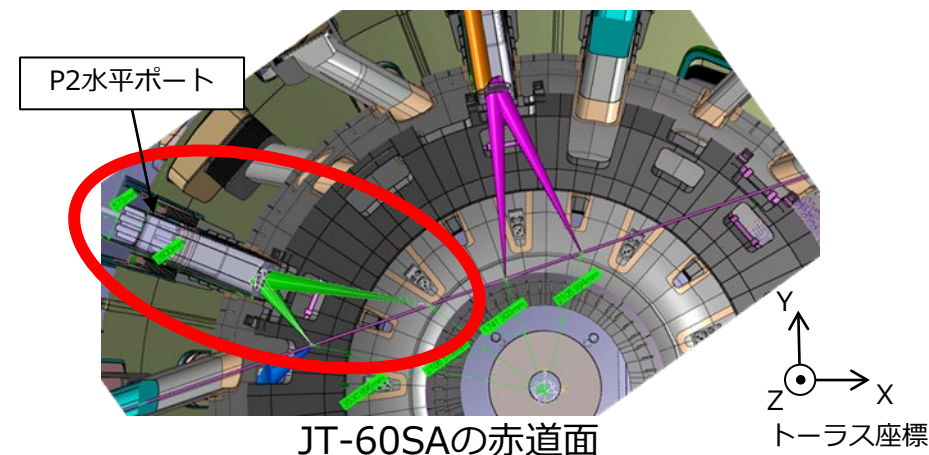
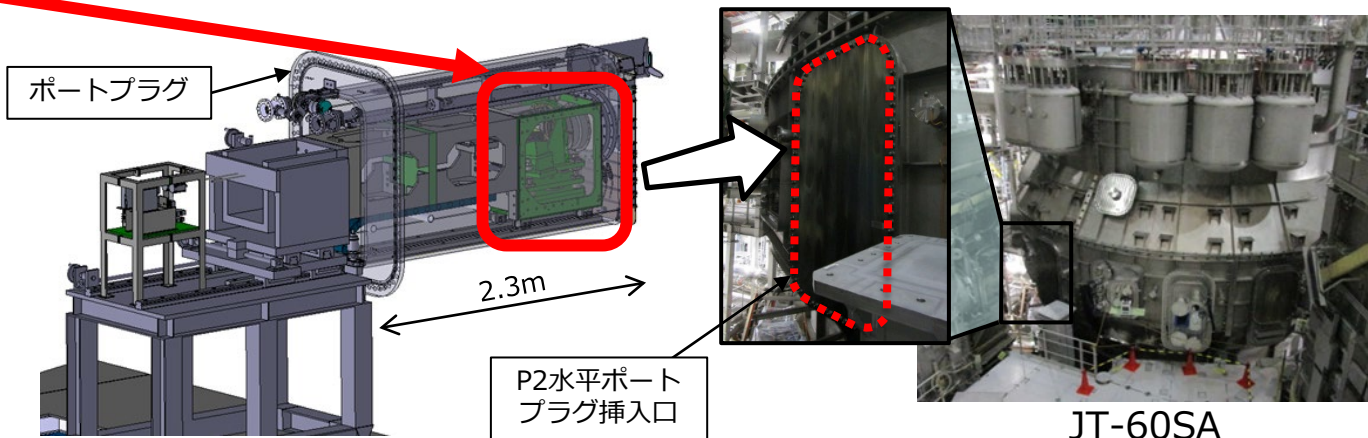
【2. プラズマ中の電子温度・電子密度の計測】

2. Measurement of Electron Temperature and Density in Plasma

- ①レーザービームをプラズマに打ち込む : 左図 1 → 2 → 3
- ②プラズマ中の電子によりレーザービームが散乱される = トムソン散乱
- ③散乱光を集光する : 左図 4
- ④集光したデータを解析する : 左図 5 → 6 → 7
散乱光スペクトルの拡がりの計測 ⇒ プラズマ中の電子温度がわかる
散乱光強度の計測 ⇒ プラズマ中の電子密度がわかる

【3. JT-60SAのP2水平ポートに配置】

3. Placed at P2 Horizontal Port of JT-60SA



1. 京セラSOC(株)について

1 – 1. 会社概要

1 – 2. 製品と適用分野

1. KYOCERA SOC Corporation

1-1. Company Profile

1-2. Products & Applications

2. JT-60SAトムソン散乱計測装置用 集光光学系

2 – 1. 集光光学系の位置付け

2 – 2. 集光光学系

2. Introduction of Correction Optics for Thomson Scattering System in JT-60SA

2-1. Purpose and Place of Correction Optics

2-2. Correction Optics Details

3. 集光光学系の開発

3 – 1. 集光光学系の設計

3 – 2. 集光光学系のレンズ系

3 – 3. 集光光学系の構造

3 – 4. 集光光学系の製作

3. Development of Correction Optics

3-1. Design

3-2. Lens System

3-3. Structure

3-4. Production

4. まとめ

4. Summary

3-1. 集光光学系の設計 / Design

集光光学系の仕様

【1. 設計パラメータの最適化】

【2. レンズ設計】

【3. 構造設計】

1. Parameter Optimization

2. Lens Design

【配置】

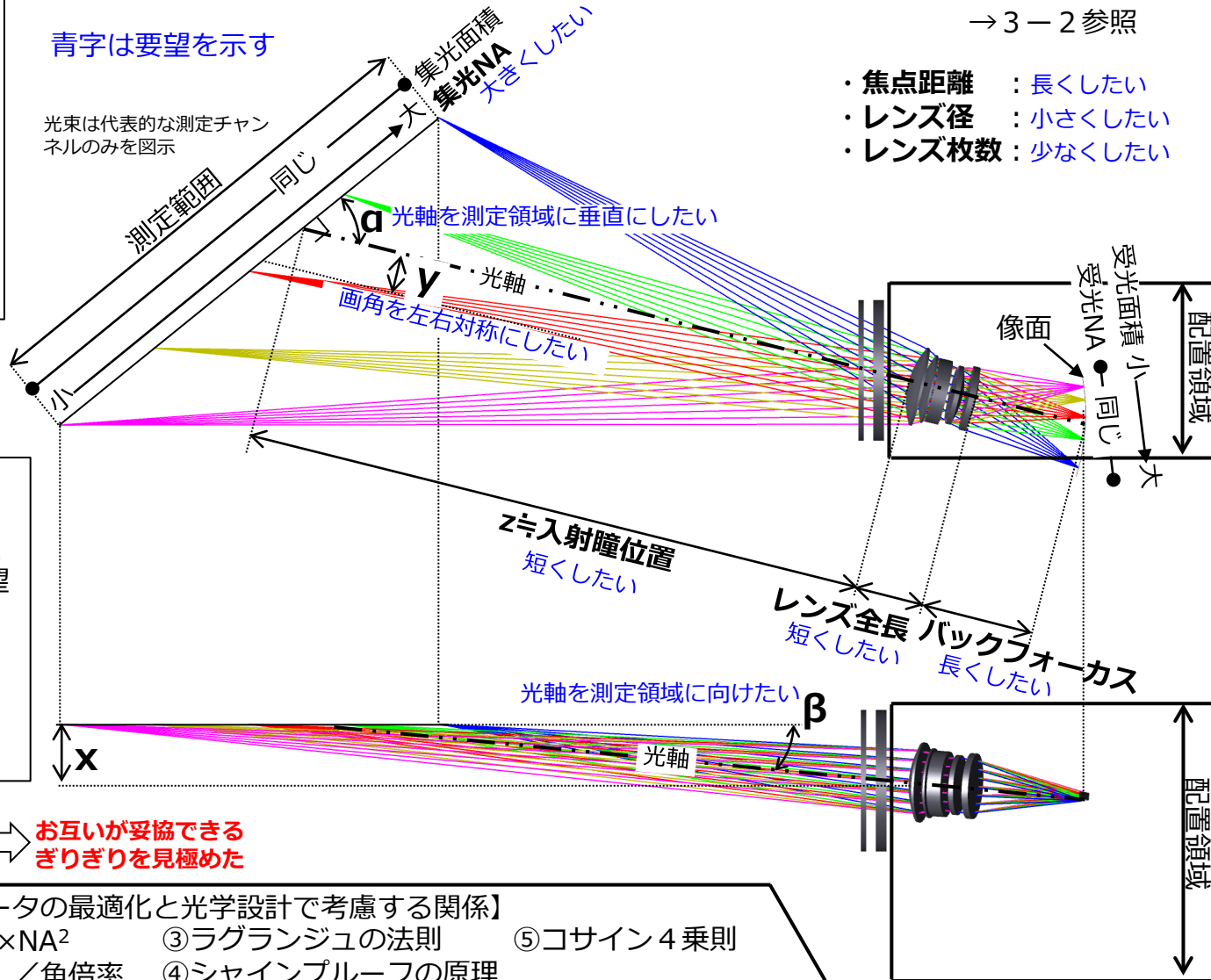
3. Structural Design

トレードオフ①
【計測仕様とレンズ】

入射瞳位置	短	長
集光NA	大	小
レンズ径	小	大
レンズ枚数	多	少
レンズ全長	長	短
焦点距離	短	長
バックフォーカス	短	長

青字は要望を示す

光束は代表的な測定チャネルのみを図示



- ・焦点距離 : 長くしたい
- ・レンズ径 : 小さくしたい
- ・レンズ枚数 : 少なくしたい

→ 3-2 参照

バックフォーカス空間のミラーで光束折り曲げ

- ① 像面を配置領域内に収める
- ② 像面調整機構の配置空間を確保

→ 3-3 参照

【要件】

1. 機能
2. 配置
3. 材料
4. 強度

パラメータは相関している
→ バランスのいい所を探した

トレードオフ②
【レンズと配置】

	レンズの要望	配置の要望
位置		
x	長	短
y	短	短
z	短	長
角度		
α	大	小
β	大	小

1つ以外真逆の要望 → お互いが妥協できるぎりぎりを見極めた

【設計パラメータの最適化と光学設計で考慮する関係】

- ① 立体角 $\propto n \times NA^2$
- ② 横倍率 = $1 / \text{角倍率}$
- ③ ラグランジュの法則
- ④ シャインブルーの原理
- ⑤ コサイン 4 乗則

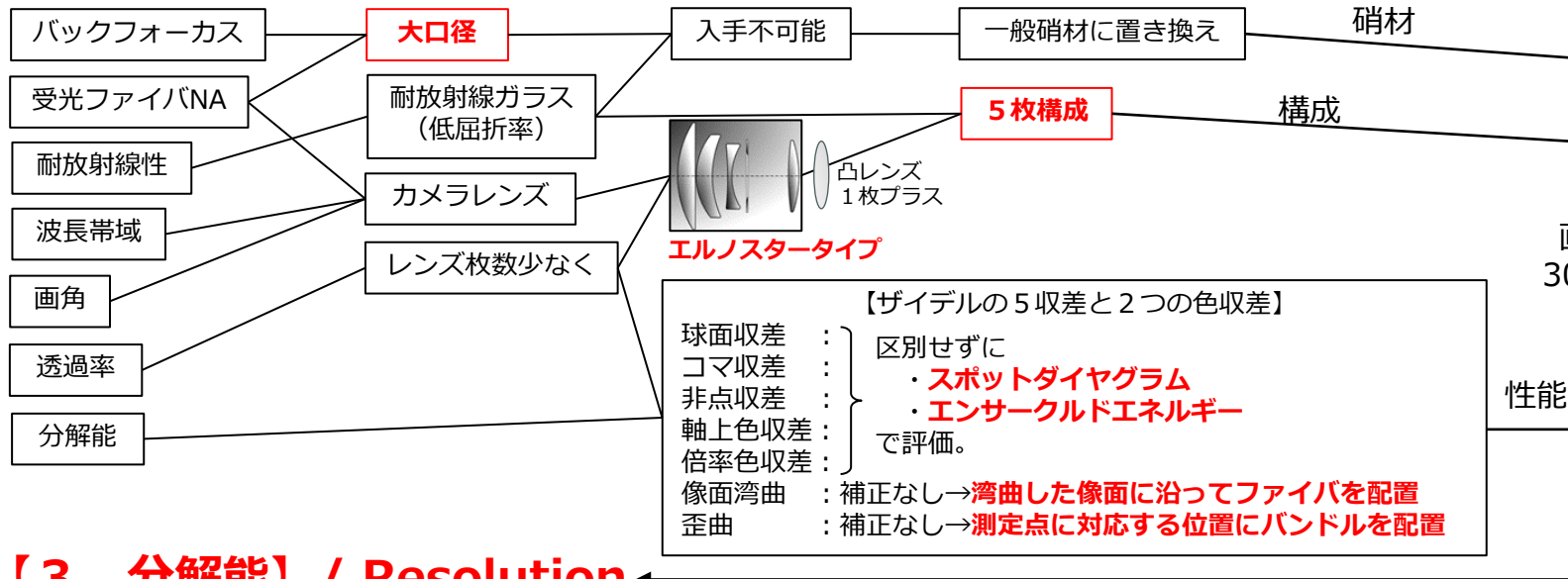
像面調整機構とレンズ系調整機構を下側に配置



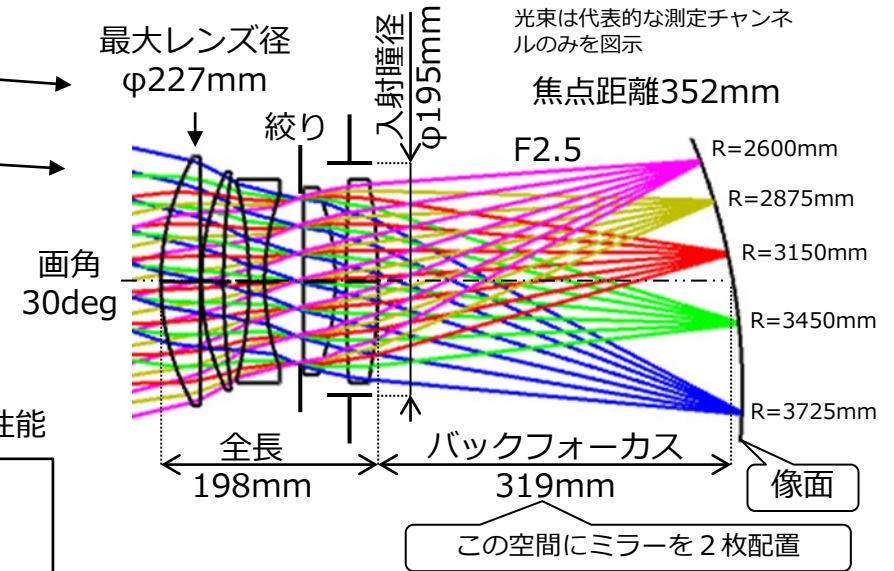
3-2. 集光光学系のレンズ系 / Lens System

【1. レンズ設計】 / Lens Design

設計要件

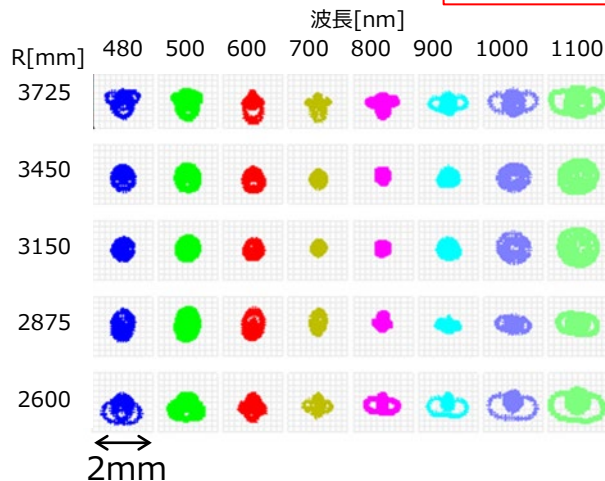


【2. レンズ形状】 / Lens Shape

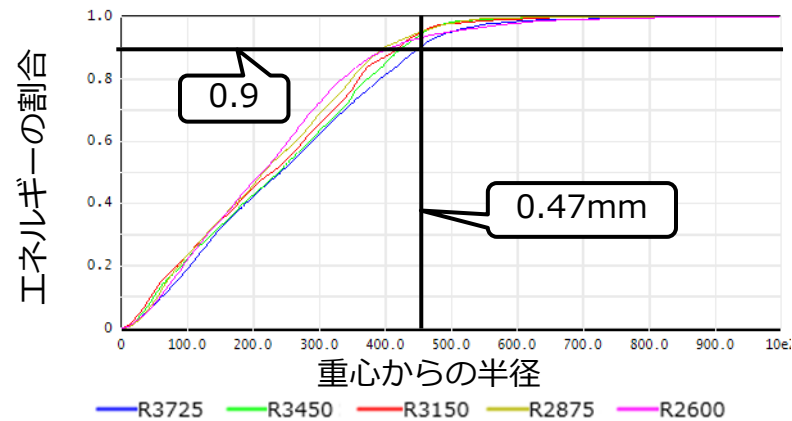


【3. 分解能】 / Resolution

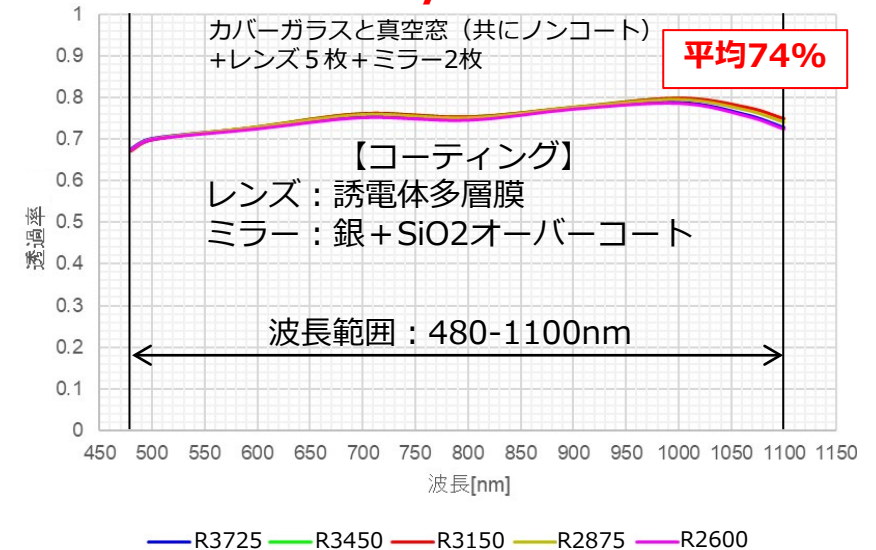
スポットダイアグラム半径 < 0.38mmRMS



エンサークルドエネルギー90% ⇔ 半径<0.47mm



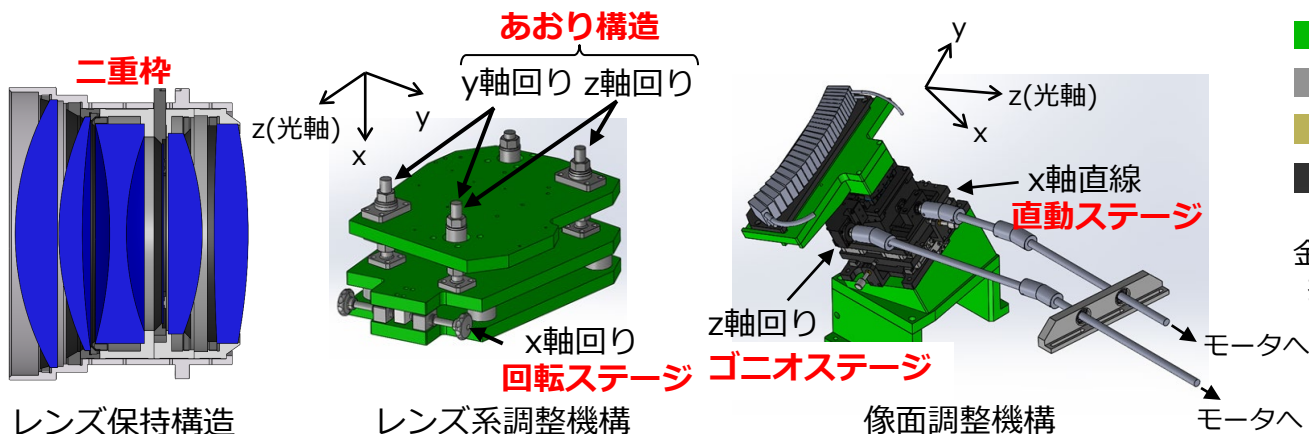
【4. 透過率】 / Transmittance



3-3. 集光光学系の構造 / Structure

【要件1. 機能】 / Function

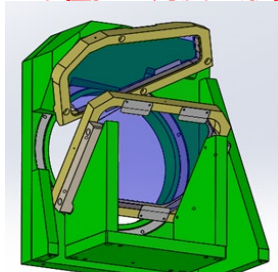
- ①結像性能を担保できるレンズ保持構造
- ②レンズ系調整機構（回転3軸）
- ③像面調整機構（直線1軸、回転1軸）



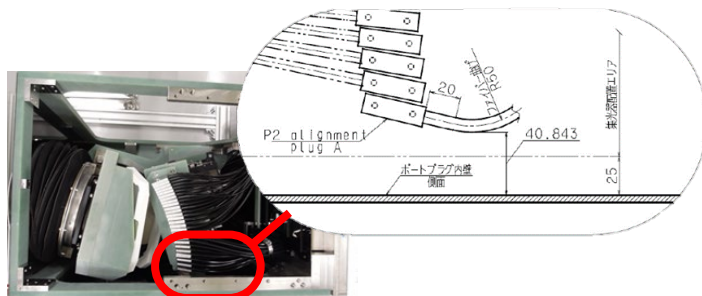
【要件2. 配置】 / Arrangement

- ①2枚のミラーで光路折り曲げ
- ②ファイバーバンドルの引き回し

ミラーの位置・角度・形状を工夫



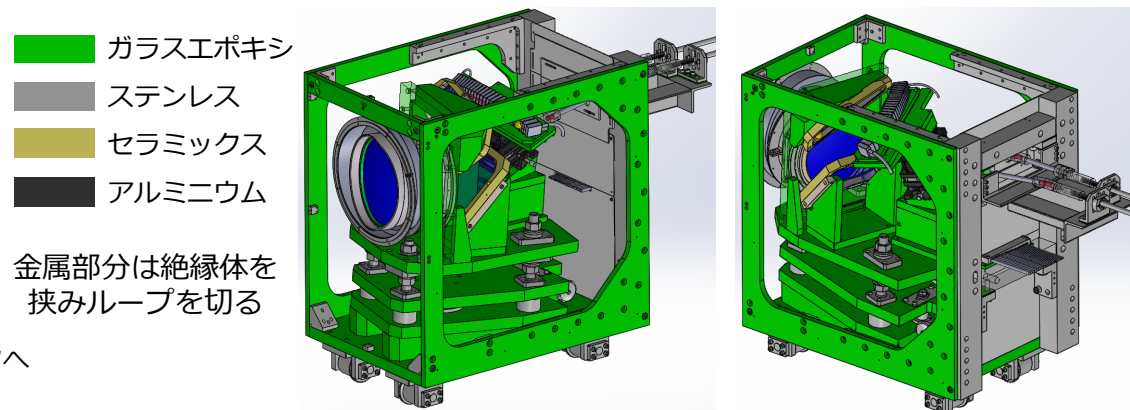
ミラーマウント



ファイバーバンドルの引き回し

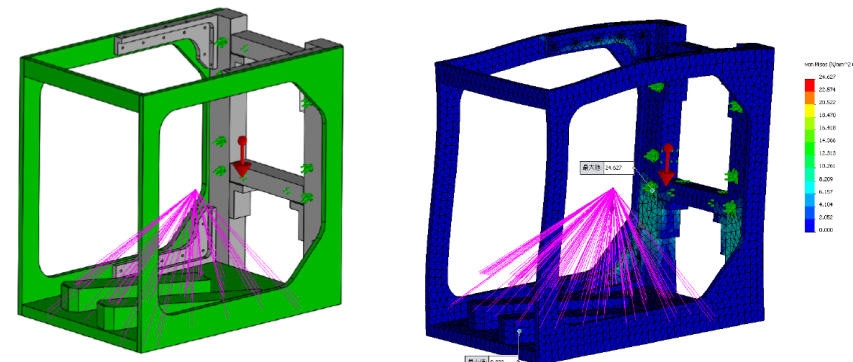
【要件3. 材料】 / Materials

ディスラプション時の渦電流を最小にするために可能な限り絶縁体を用いる



【要件4. 強度】 / Strength

地震の際に塑性変形、破壊が起きないこと



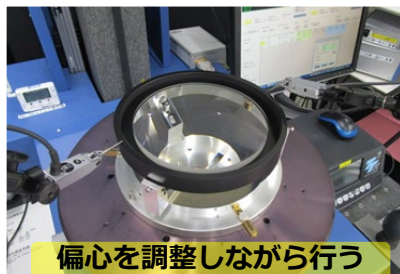
強度解析による確認

3-4. 集光光学系の製作 / Production

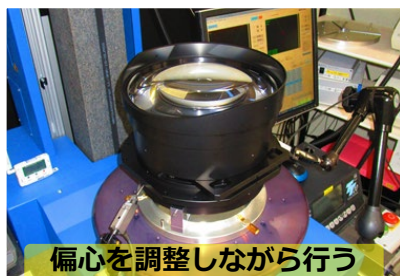
1. レンズ組立 1. Lens Assembly



1-1. レンズ、内枠、外枠

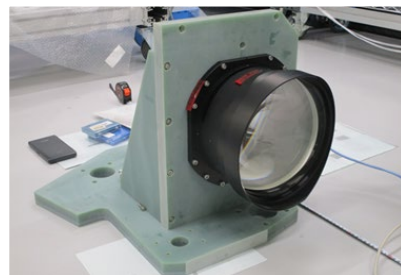


1-2. 単レンズを内枠へ固定



1-3. 内枠を外枠へ組込

2. 光学系組立 2. Optics Assembly



2-1. 組レンズをマウントへ
取付け

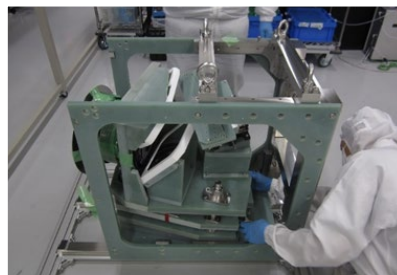


2-2. ミラーをマウントへ取
付け

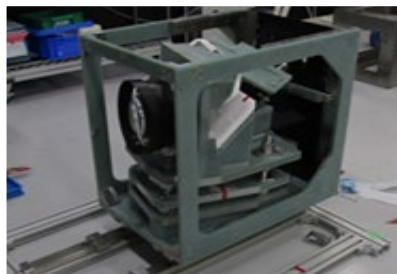


2-3. 調整機構、ファイバー
ホルダの取付け

3. 全体組立 3. Overall Assembly



3-1. フレームの取付け



3-2. フレーム組立完了

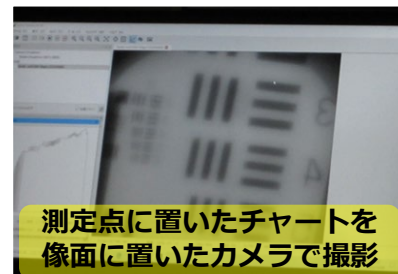


3-3. カバーの取付け

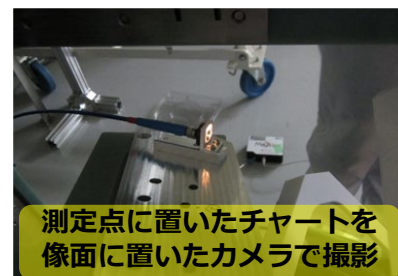
4. 検査A(測定点→像面) 4. Inspection A (From Measurement Point to Image)



4-1. 測定点に光源を設置



4-2. 像面上の解像力を確認※



4-3. 透過率を測定※

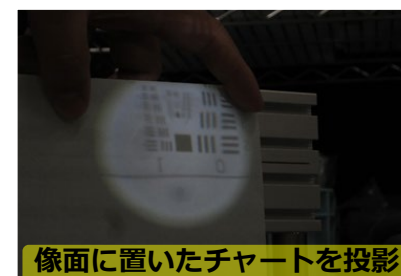
5. 検査B(像面→測定点) 5. Inspection B (From Image to Measurement Point)



5-1. 測定点に沿ってスク
リーンを設置



5-2. スクリーン上の位置
を確認※



5-3. スクリーン上の解像力
を確認※

※検査はいずれも代表的な測定点で行った

1. 京セラSOC(株)について

1 – 1. 会社概要

1 – 2. 製品と適用分野

1. KYOCERA SOC Corporation

1-1. Company Profile

1-2. Products & Applications

2. JT-60SAトムソン散乱計測装置用 集光光学系

2 – 1. 集光光学系の位置付け

2 – 2. 集光光学系

2. Introduction of Correction Optics for Thomson Scattering System in JT-60SA

2-1. Purpose and Place of Correction Optics

2-2. Correction Optics Details

3. 集光光学系の開発

3 – 1. 集光光学系の設計

3 – 2. 集光光学系のレンズ系

3 – 3. 集光光学系の構造

3 – 4. 集光光学系の製作

3. Development of Correction Optics

3-1. Design

3-2. Lens System

3-3. Structure

3-4. Production

4. まとめ

4. Summary

4. まとめ / Summary

1. 京セラSOC株式会社 / Kyocera SOC Corporation

光学ユニット・光学素子の特注設計・製作
及びレーザーのカatalog品販売を行っています。



光学ユニット



光学素子



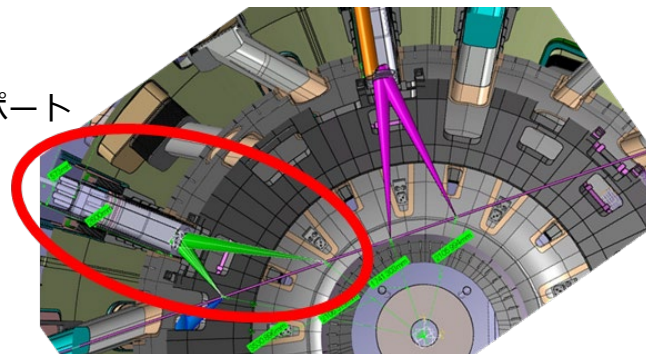
レーザー

2. JT-60SAトムソン散乱計測装置用集光光学系 / Correction Optics for Thomson Scattering System in JT-60SA

【特徴】

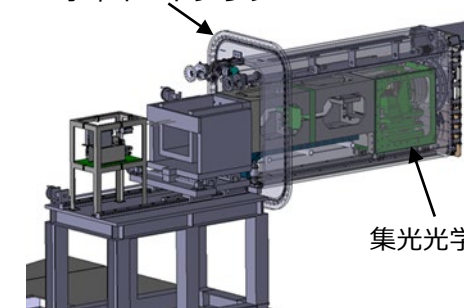
- ①広い測定範囲と広い波長帯域
- ②3次元的な結像関係
- ③狭い配置領域と大口径レンズ

P2水平ポート



JT-60SA

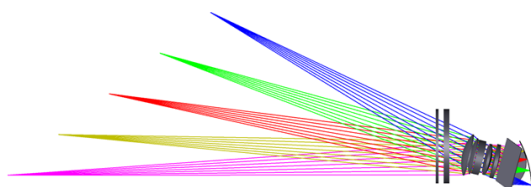
P2水平ポートプラグ



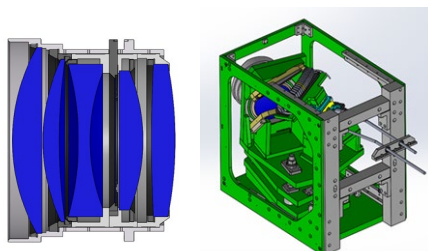
集光光学系

3. 集光光学系の開発 / Development of Correction Optics

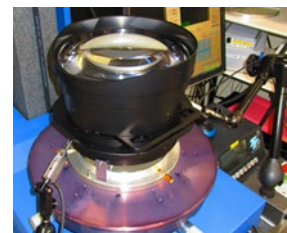
設計パラメータの最適化、レンズ設計、構造設計、製作を行い、昨年完了しました。



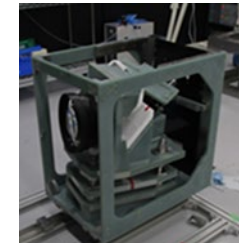
光学設計



構造設計



レンズ組立



全体組立



性能確認



**ご清聴ありがとうございました。
Thank you for your attention.**



京セラSOC株式会社