

An aerial photograph of the Osaka University campus, showing various buildings, green spaces, and a parking lot under a clear blue sky.

共同利用・共同研究施設から生まれた データ活用による社会実装 -半導体リソグラフィ用EUV光源-

藤岡 慎介(大阪大学 レーザー科学研究所)

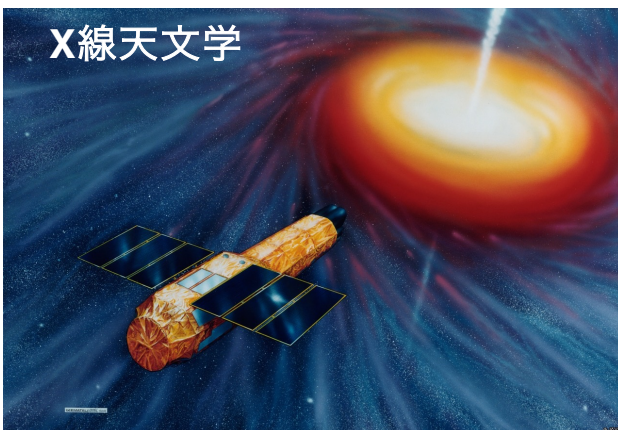
1. パワーレーザーを使った科学の概要
2. 半導体製造用極端紫外光源に関する研究
3. パワーレーザーDXプラットフォームの紹介
4. まとめ

超域プラズマ科学

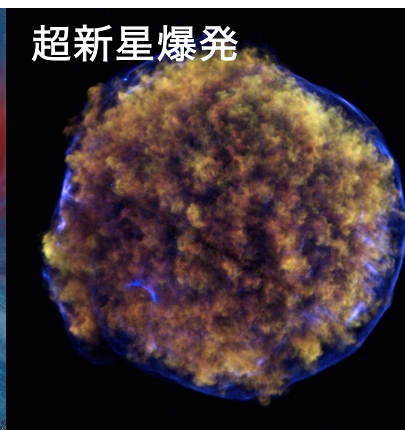
パワーレーザーで生成する 多様な極限環境はプラズマ科学の学際的发展の源泉



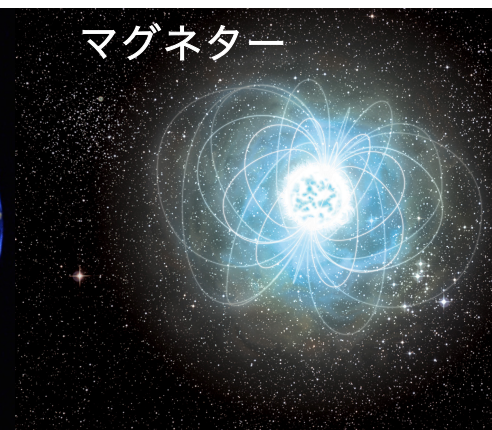
ILE, Osaka



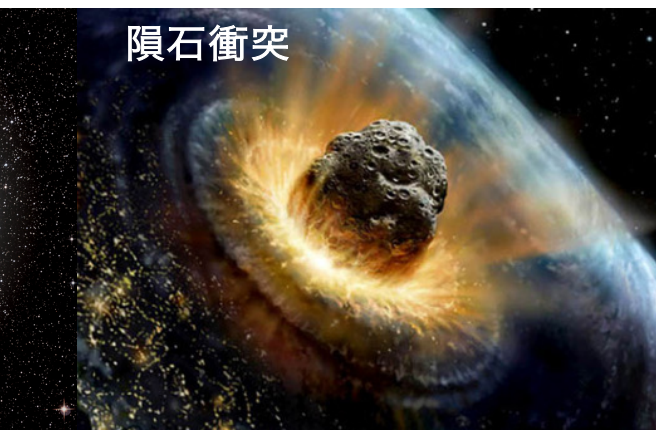
X線天文学



超新星爆発



マグネター



隕石衝突

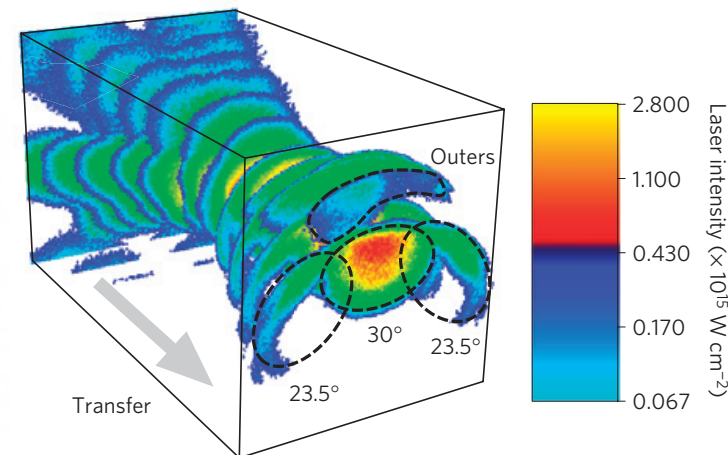
粒子加速



半導体デバイス製造



プラズマフォトンクス



研究基盤EXPO2025/北陸研究データ基盤

超域プラズマ科学

「エネルギー」「強度」「繰り返し」の異なる 複数のパワーレーザー施設が国内外で稼働中。

エネルギー

状態の空間スケール
及び持続時間を決定。

強度

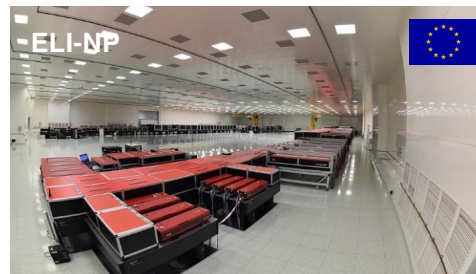
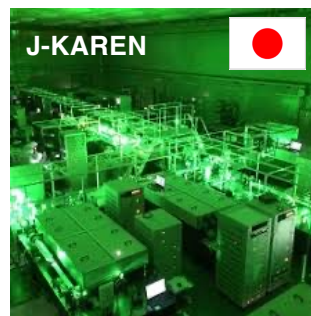
レーザーが実現する状態
(圧力, 温度, 速度等) を決定。

繰り返し

再現性の担保, 稀現象の
観測, 社会実装に不可欠。

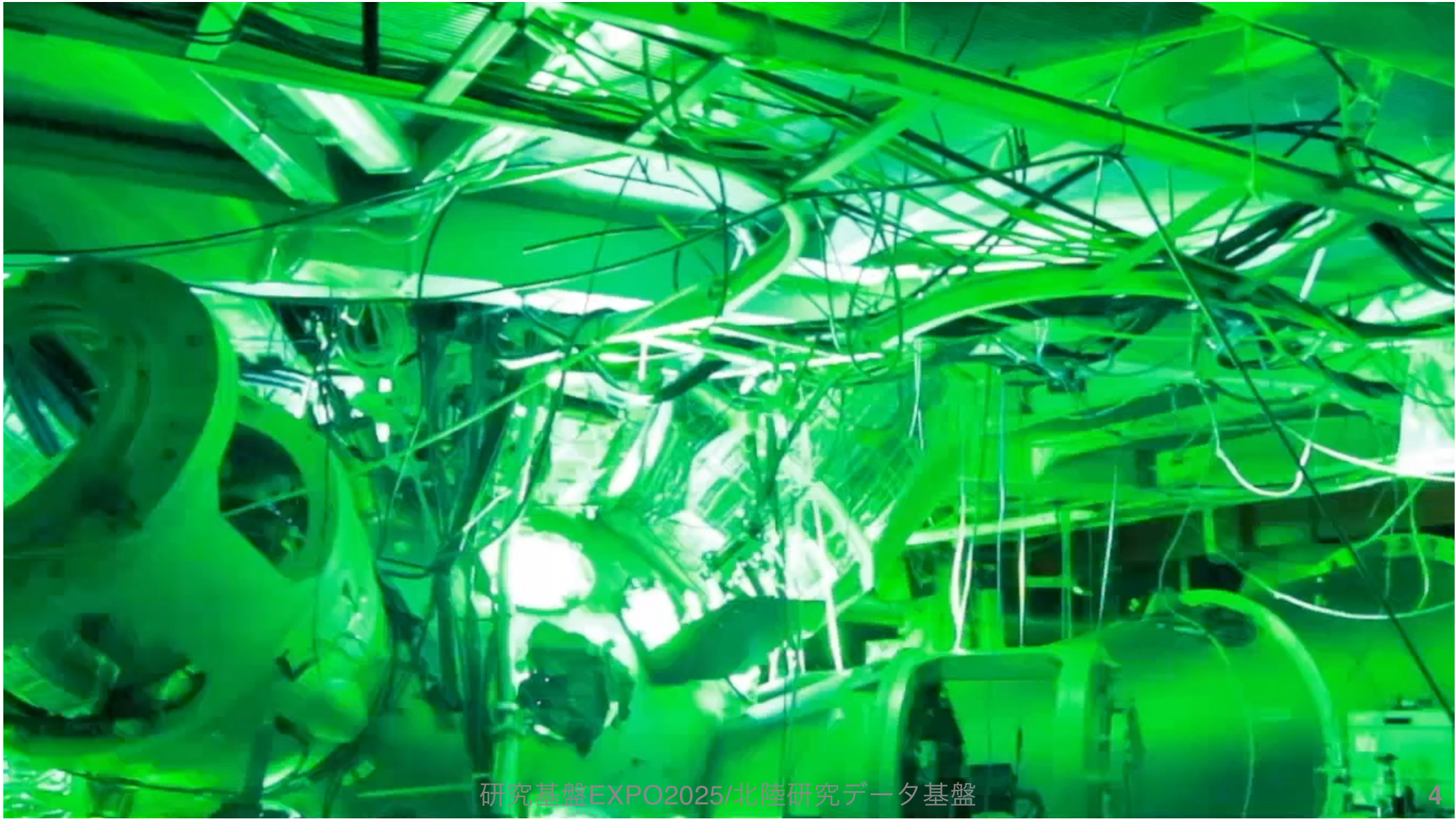
他ビームとの連結

計測の精緻化や新たな現象の
発見に有益。



注：一部の施設を取り上げている。

幅広いパラメータ領域での研究開発を実現し、学術成果を社会課題解決に繋げる。



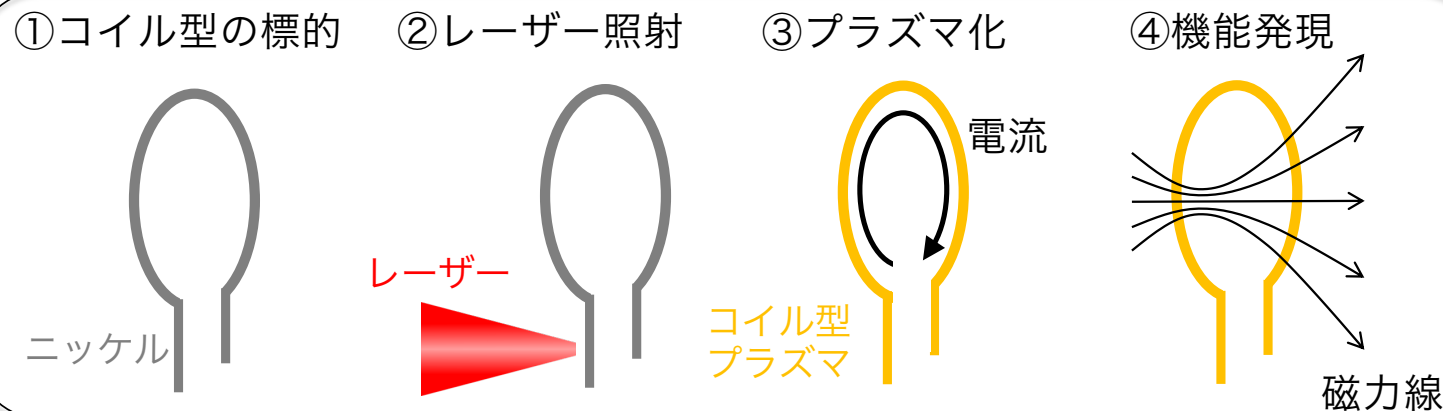
パワーレーザーの魅力

**どんな元素でも & どんな物質でも & どんな場所でも、
パワーレーザーを使えば機能性プラズマを作ることが可能。**

レーザープラズマの一例



レーザープラズマ生成過程



どんな元素でも・・・

放射冷却が大きい高Z元素もレーザーでプラズマ化可能。

(例) スズ($Z=50$) をプラズマ化し半導体リソグラフィー用の光源に応用。

どんな物質でも・・・

レーザー標的(ターゲット)を形を保ったままプラズマ化。

(例) コイル型のプラズマを作り大電流を流し超強磁場を発生。

どんな場所でも・・・

レーザーが届くところであればどこでもプラズマを作ることが可能。

(例) レーザー駆動放射線による橋脚検査や爆発物検知への応用。

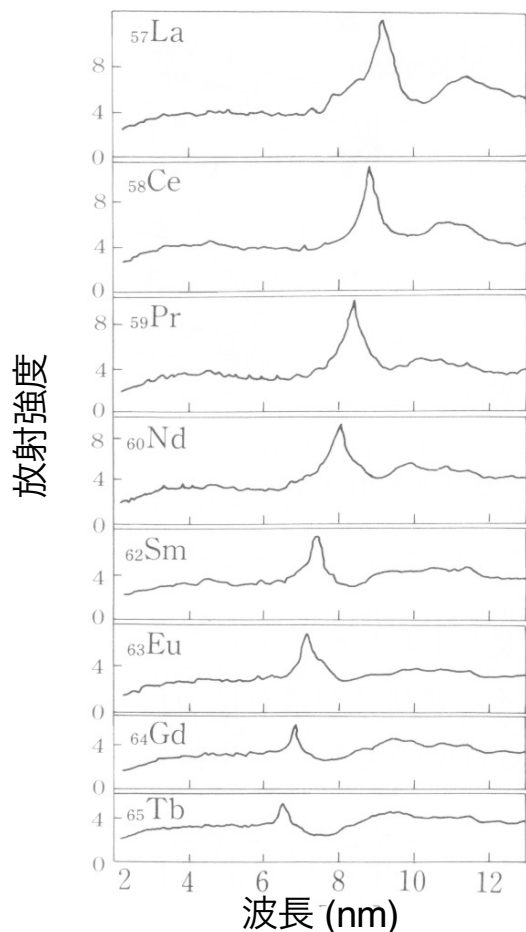
レーザープラズマの魅力1 -どんな元素でも-

高Z元素も放射冷却で冷める前にプラズマ化が可能.

高Zプラズマは高輝度な軟X線源 (極端紫外光源) として半導体産業で利用中. ILE, Osaka

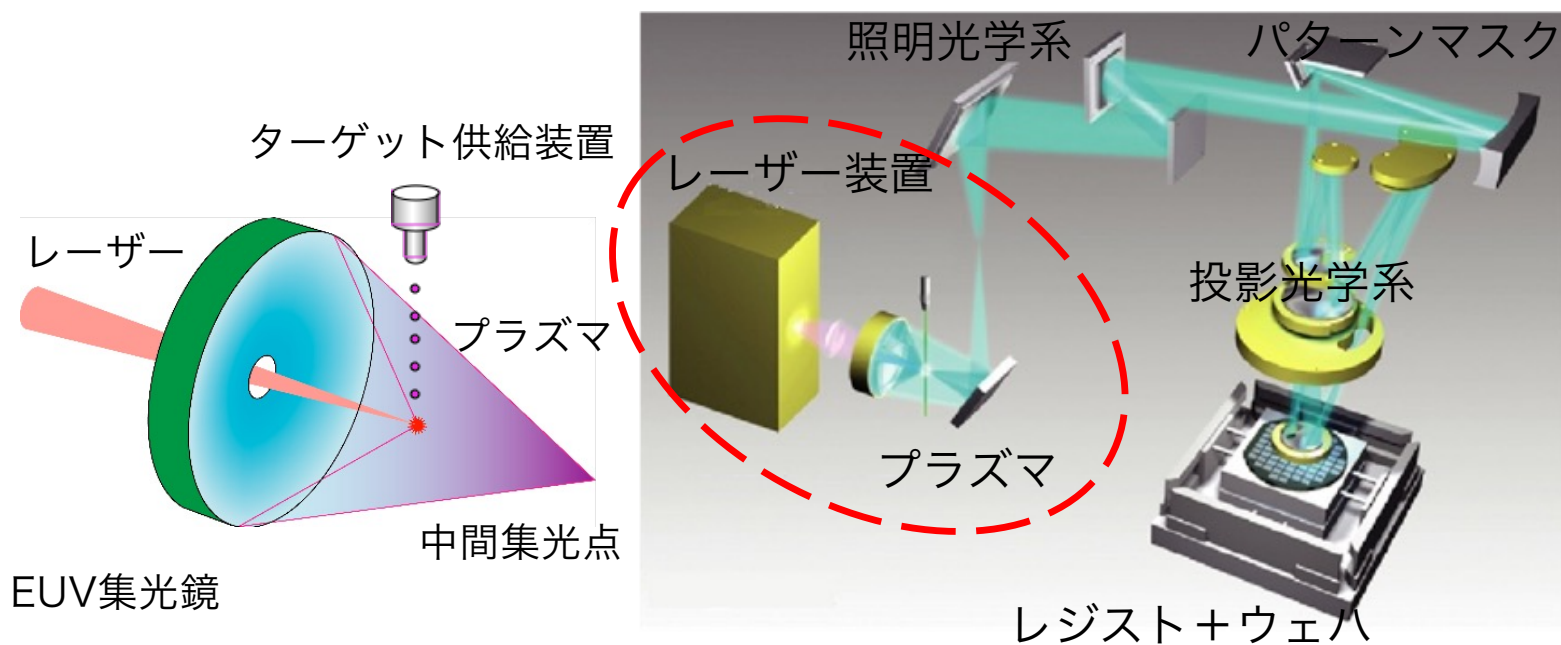


X線スペクトルのZ依存性



極端紫外光半導体リソグラフィシステム

連続供給されるスズ液滴に連続的にレーザーを照射することで、極端紫外 (波長13.5 nm) 光源プラズマを生成.

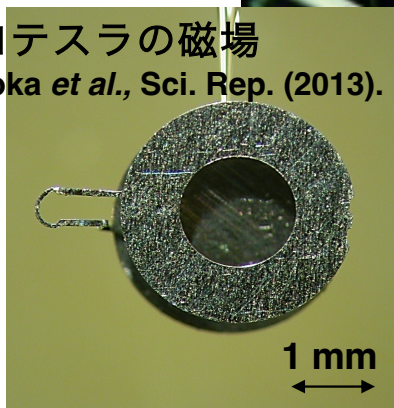


サムスン日本研究所と装置開発に関する共同研究を実施中

研究基盤EXPO2025/北陸研究データ基盤

レーザープラズマの魅力2 -どんな物質でも-
**特殊な形状を有するプラズマを生成することで、
 強電磁場・高圧力・高輝度の環境を実験室に実現。**

> キロテスラの磁場
 S. Fujioka *et al.*, Sci. Rep. (2013).

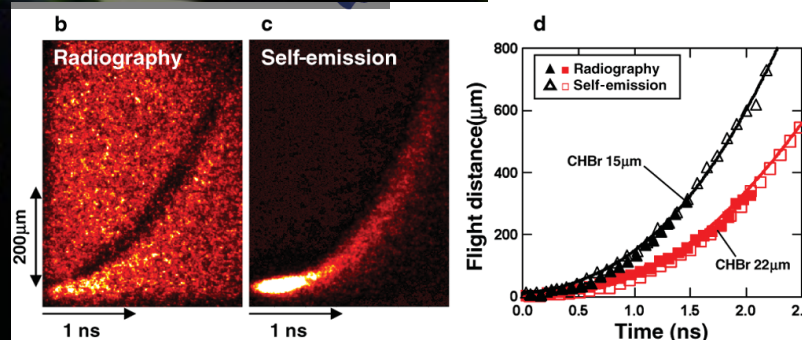
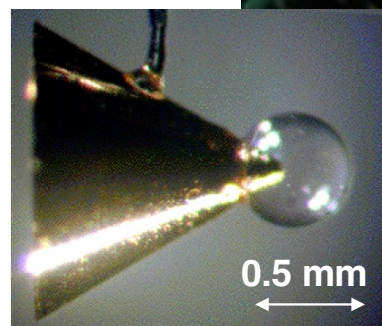


> 100万度のオーブン
 S. Fujioka Phys. Rev. Lett. (2005).



> 1000 km/sの飛翔体
 H. Azechi *et al.*, Phys. Rev. Lett. (2009).

> 10^{21} の輝度のX線源
 S. Fujioka *et al.*, Nat. Phys. (2009).



> 200億気圧の圧力
 K. Matsuo *et al.*, Phys. Rev. Lett. (2020).

レーザープラズマの魅力3 -どんな場所でも-

大出力レーザーの小型化が進み、

レーザーによる橋脚検査や放射線源による構造物検査の研究・開発が進行中。



ILE, Osaka

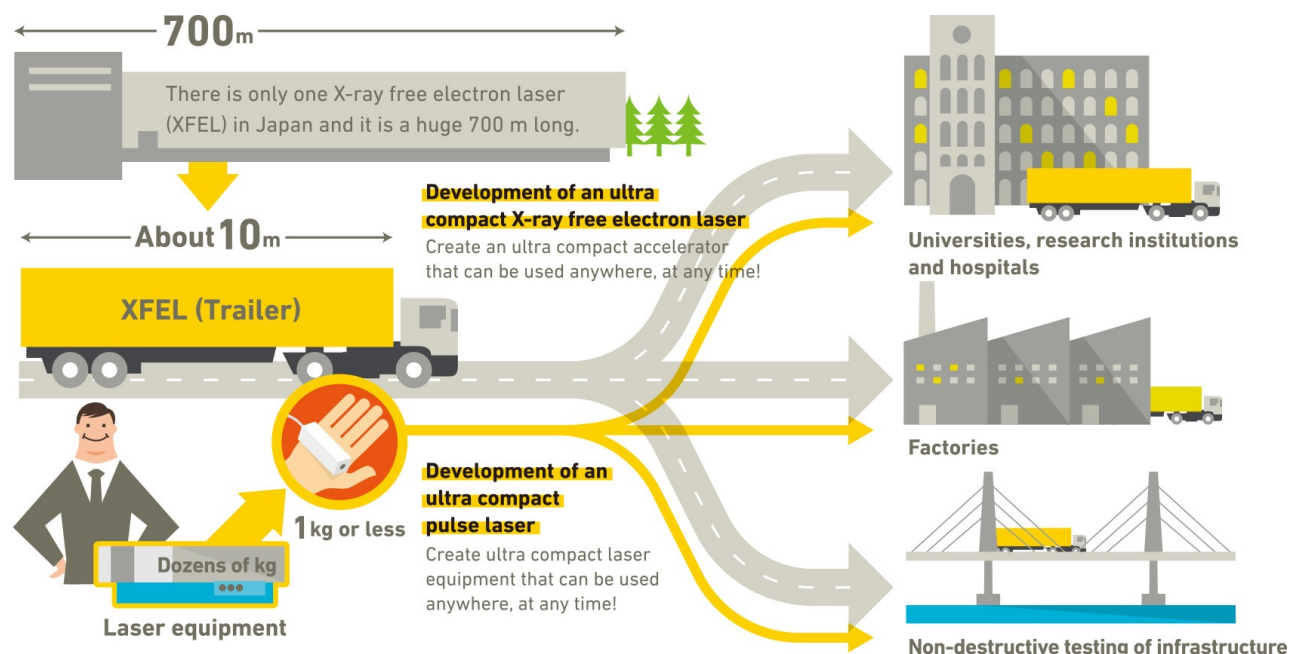
ImPACT Program “ユピキタスパワーレーザーによる安全・安心・長寿社会の実現”

高出力化で高繰り返し化(数J@300Hz)

可搬性のレーザーで放射線を現場に届ける



製造現場などでメンテナンスフリーで
使える可搬型の超小型レーザー



極端紫外光源プラズマ

極端紫外光は最先端の半導体デバイスの製造で利用中。

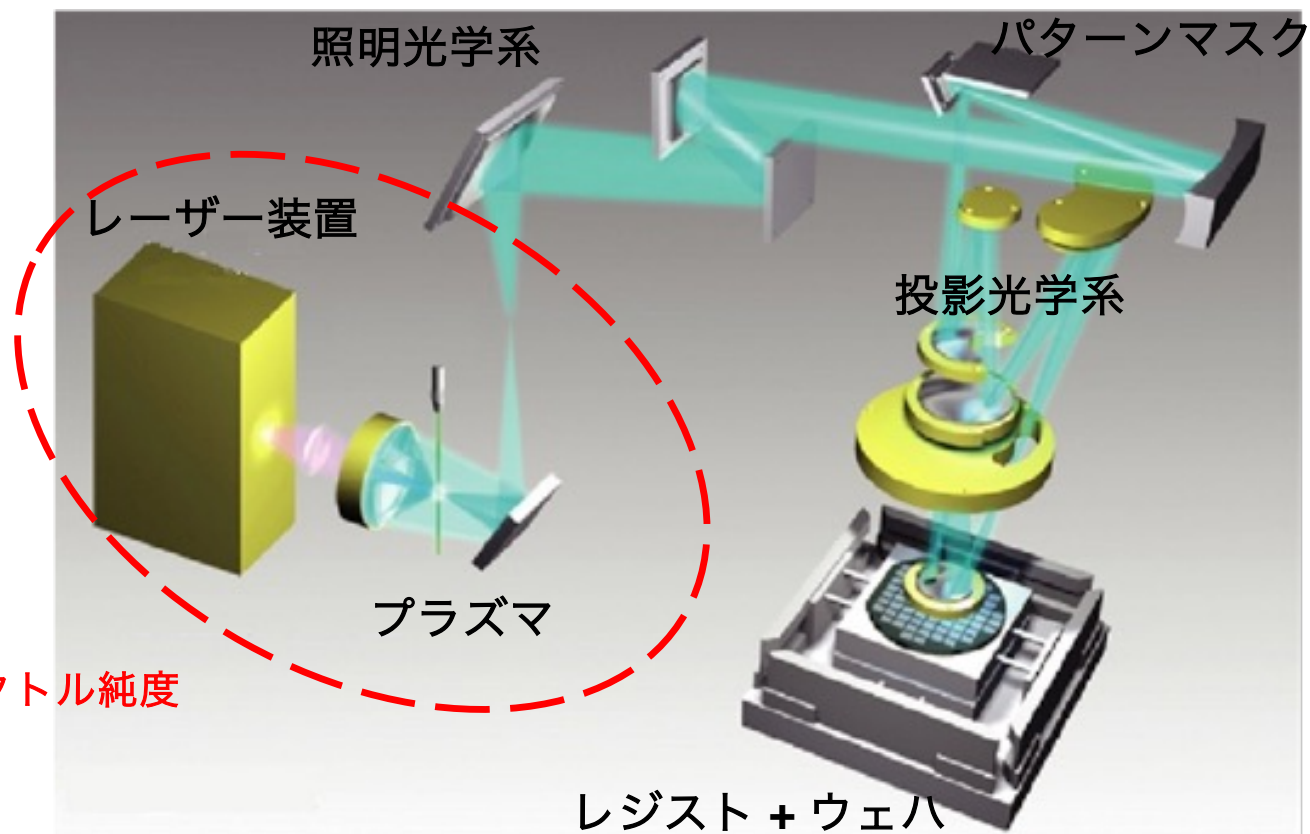
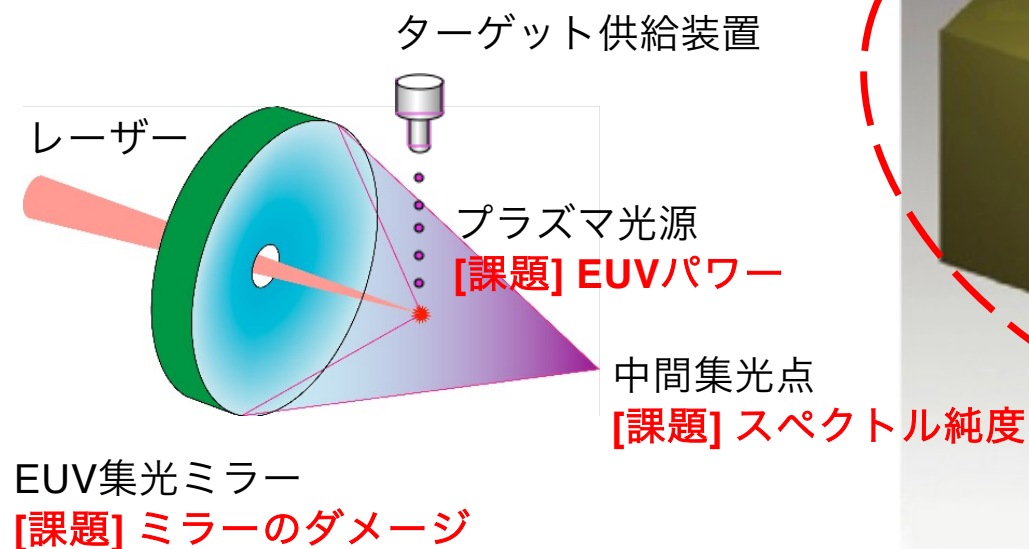
極端紫外光源のパワー不足が常に課題。



ILE, Osaka

EUV光源システム

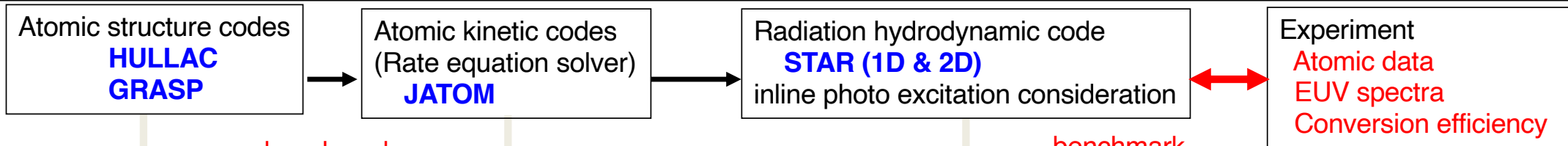
EUV光源はレーザー，ターゲット供給装置，EUV集光ミラーで構成される。



極端紫外光源プラズマ

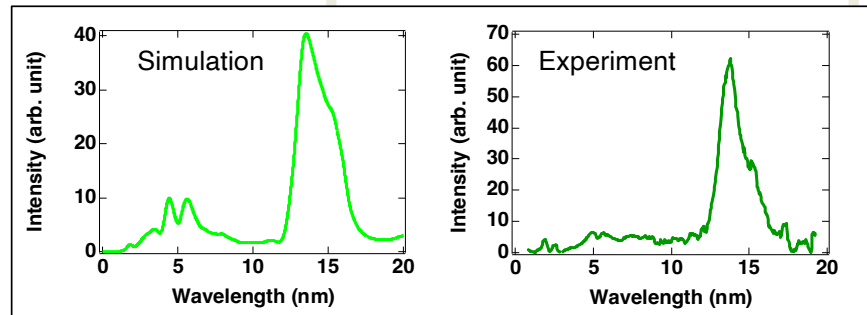
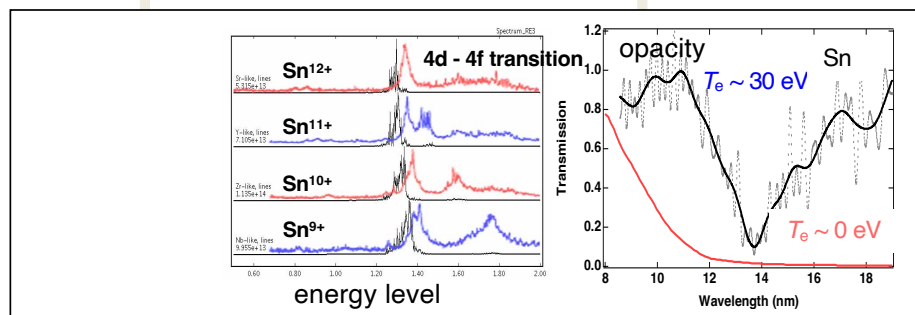
極端紫外光源プラズマ中でのエネルギーの伝播の理解.

多価イオンの原子構造, レート方程式, 放射流体の実験結果と計算を比較



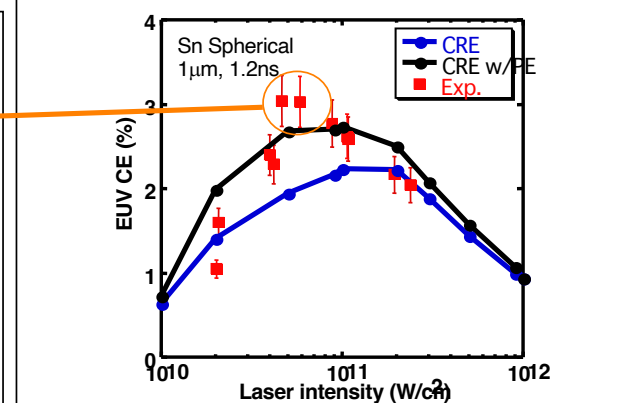
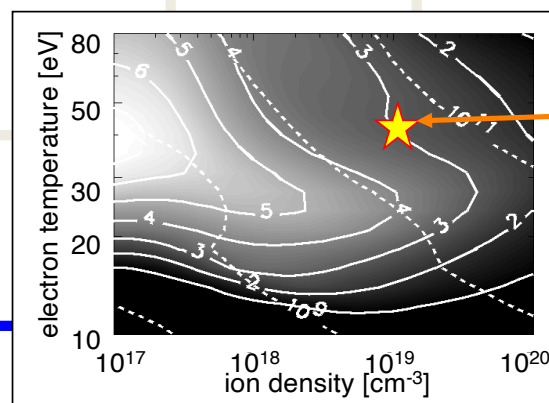
benchmark

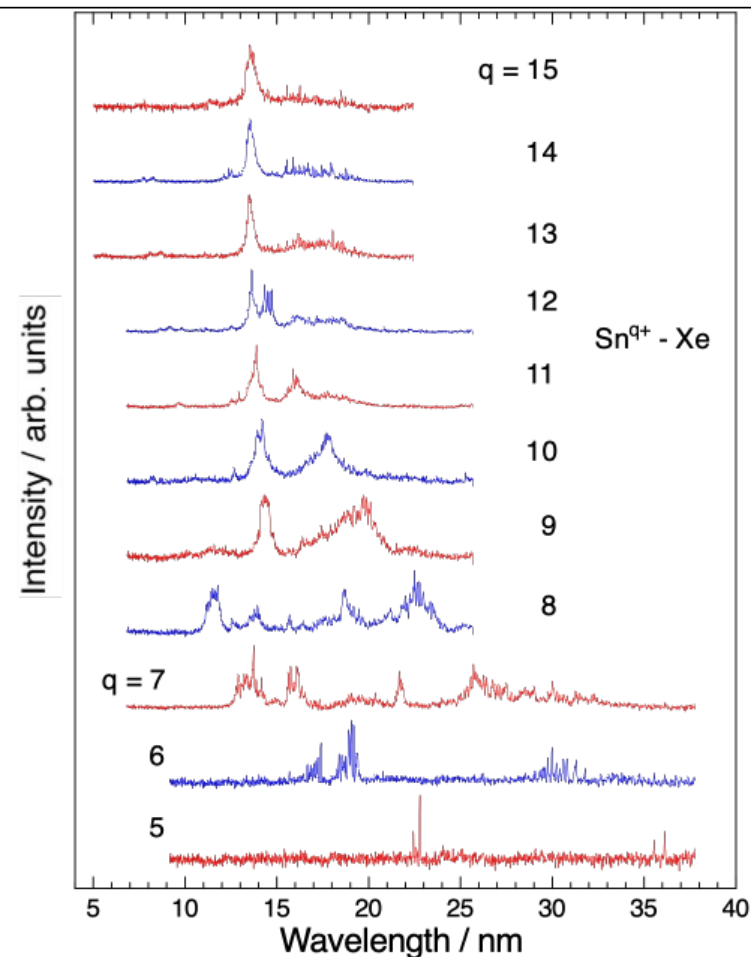
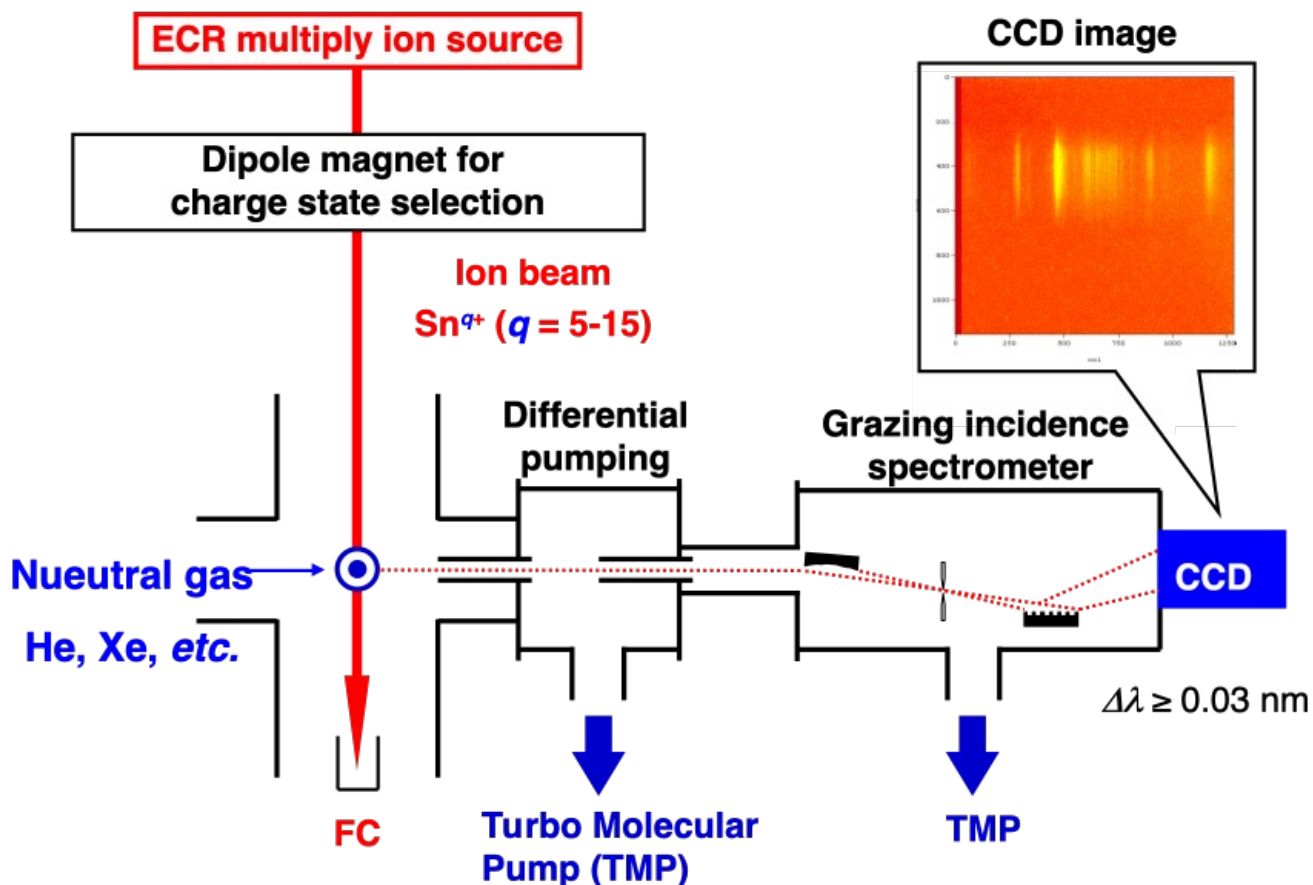
benchmark



Analytical model
Power balance

Optimization of laser
& target conditions



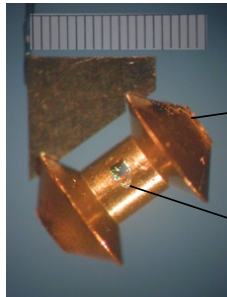


極端紫外光源プラズマ

レーザー加熱オーブンを利用して一様なスズプラズマを生成し、スズプラズマのX線に対する吸収率を計測しシミュレーションを修正。

Opacity measurement

Laser-produced oven (dog-bone cavity) was used to heat uniformly a tin foil.



Laser inlet hole

Observation window

Sn plate for probing x-ray source

Thermal radiation ($T_R = 50$ eV)

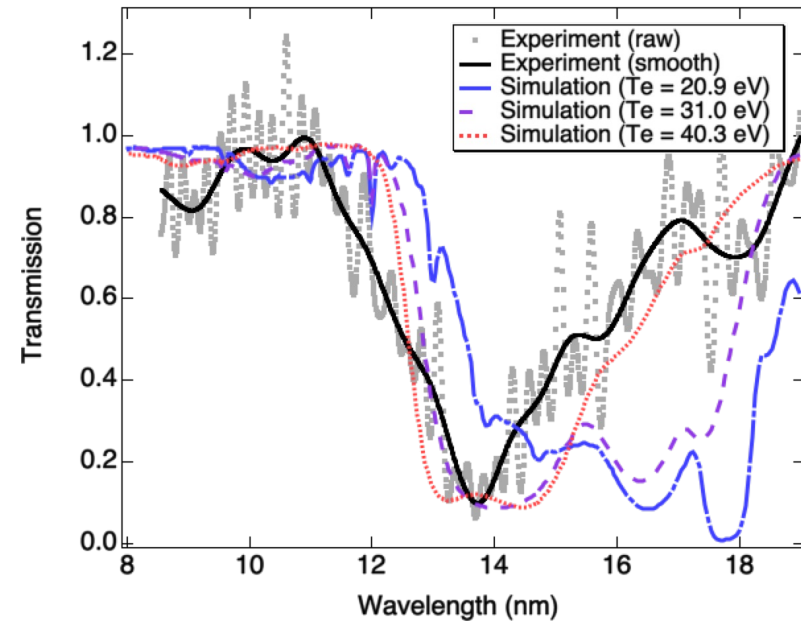
Opacity sample (Sn with CH tamper)

Dog-bone gold cavity

S. Fujioka *et al.*, Phys. Rev. Lett., Vol. 95, 235004, (2005).

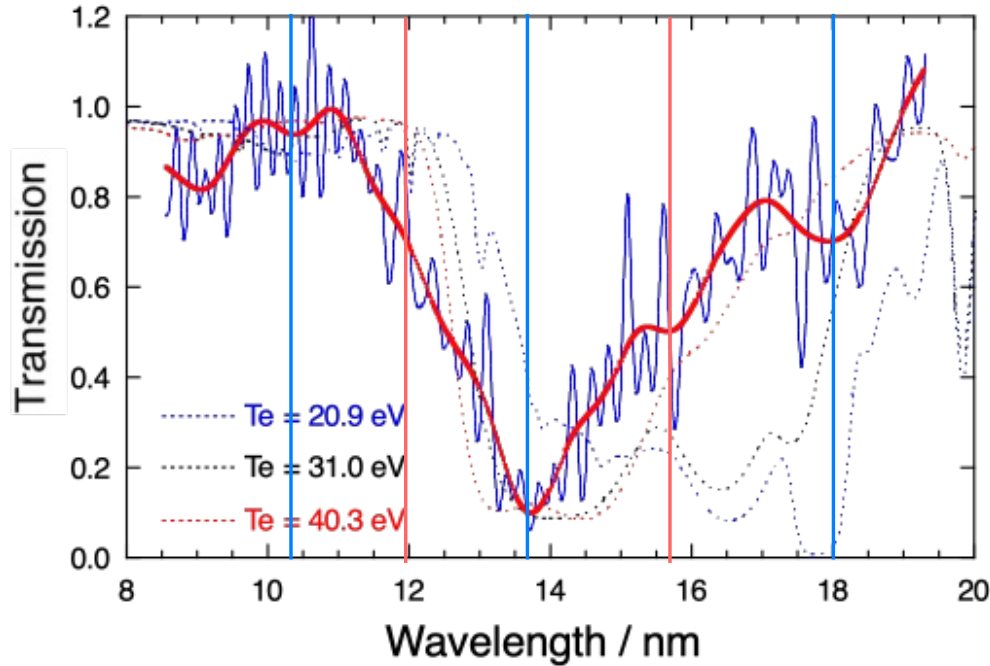
Measured and calculated opacity

It is hard to calculate transmittance of EUV light through a Sn plasma. The measured opacity was compared with that calculated by a complex simulation code.

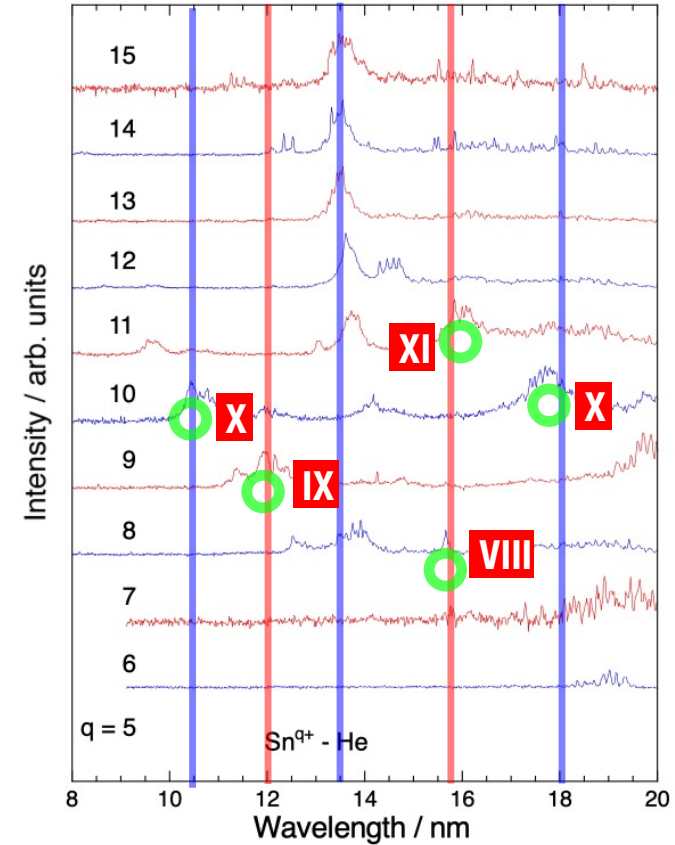


極端紫外光源プラズマ

荷電交換による単一イオンからの放射及びオパシティー計測によって、
極端紫外放射に寄与するイオンの価数を同定。

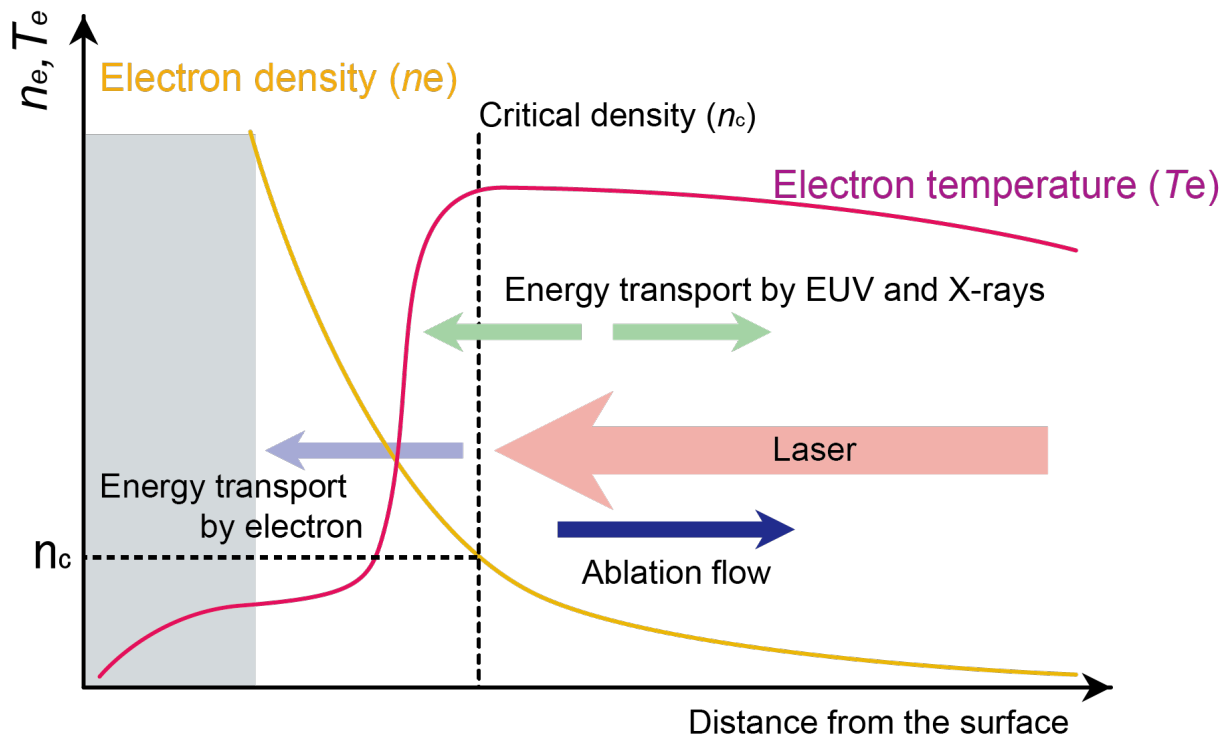


- 11 nm 4d-5f of Sn⁹⁺
- 12 nm 4d-5f of Sn⁸⁺
- 13.5 nm 4d-4f of Sn^{10+ ~ 15+}
- 16 nm 4d-5p of Sn¹⁰⁺
- 18 nm 4d-5p of Sn⁹⁺

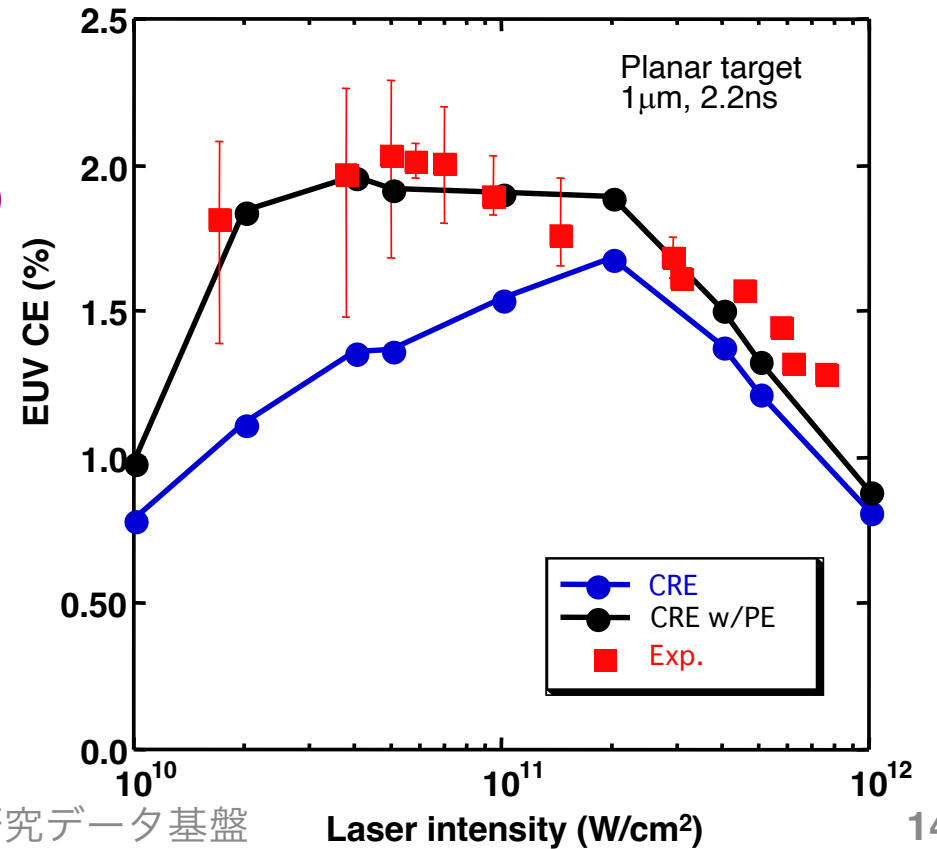


Plasma profile

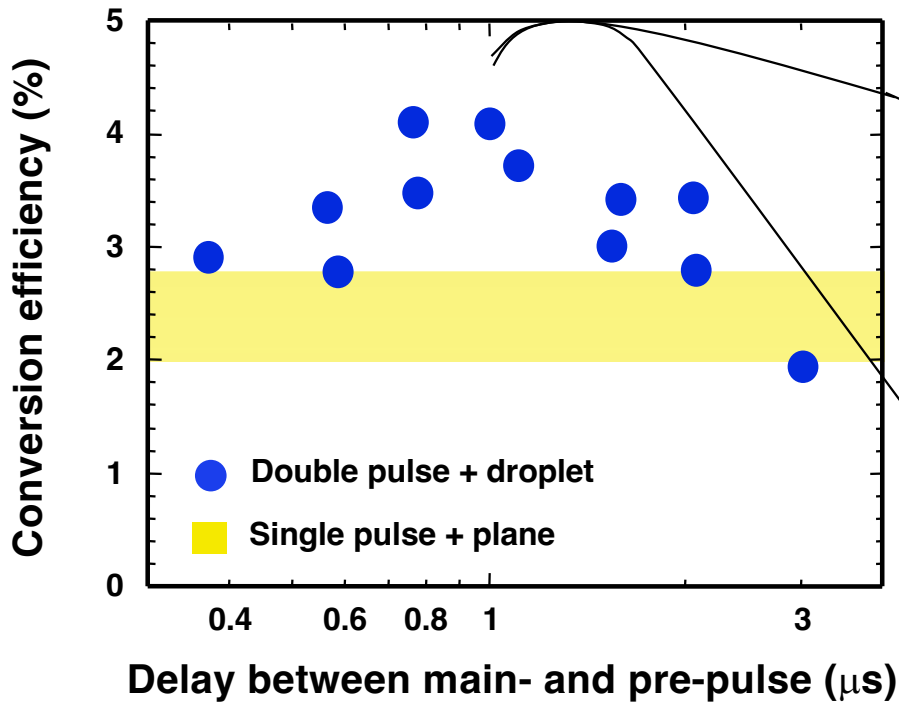
Steep gradients of density and temperature profiles.



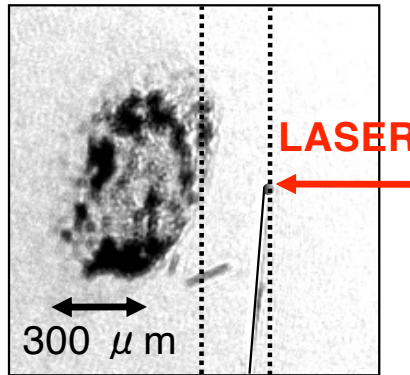
**CRE: Collisional Radiative Equilibrium
w/PE: with Photo-Excitation**



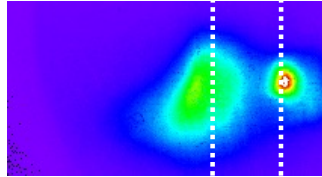
EUV-CE depending on delay between main- and pre-pulse



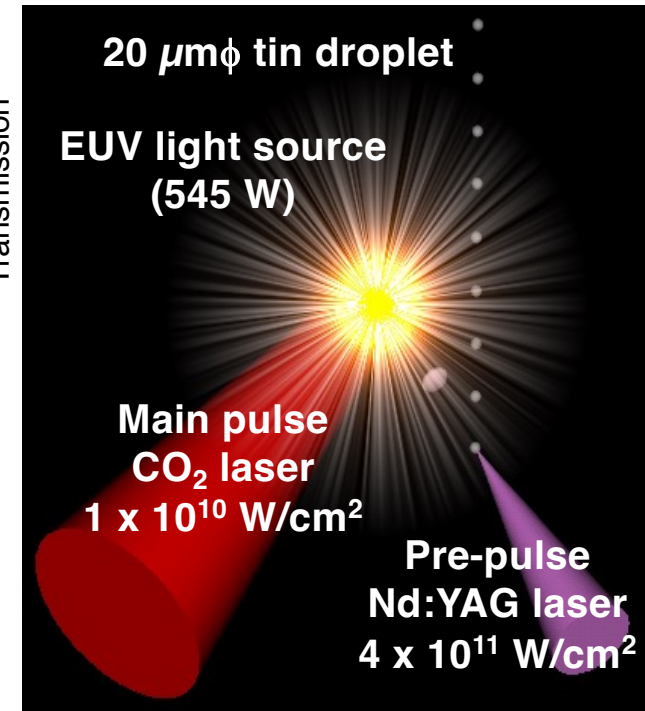
Visible shadow



13.5 nm emission image



Schematic of EUV light source based on two-color double pulses



Density High ← → Density Low

LSTC 技術研究組合 最先端半導体技術センター Leading-edge Semiconductor Technology Center

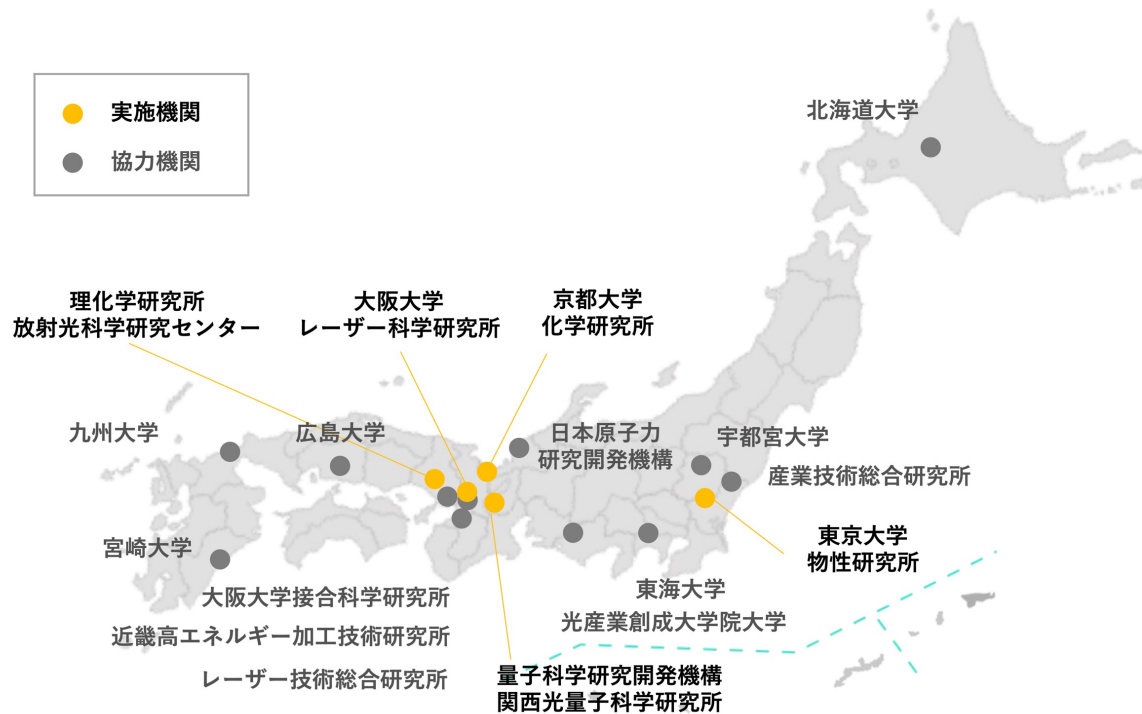


先端研究基盤共用促進事業

(先端研究設備プラットフォームプログラム)

パワーレーザーDXプラットフォーム

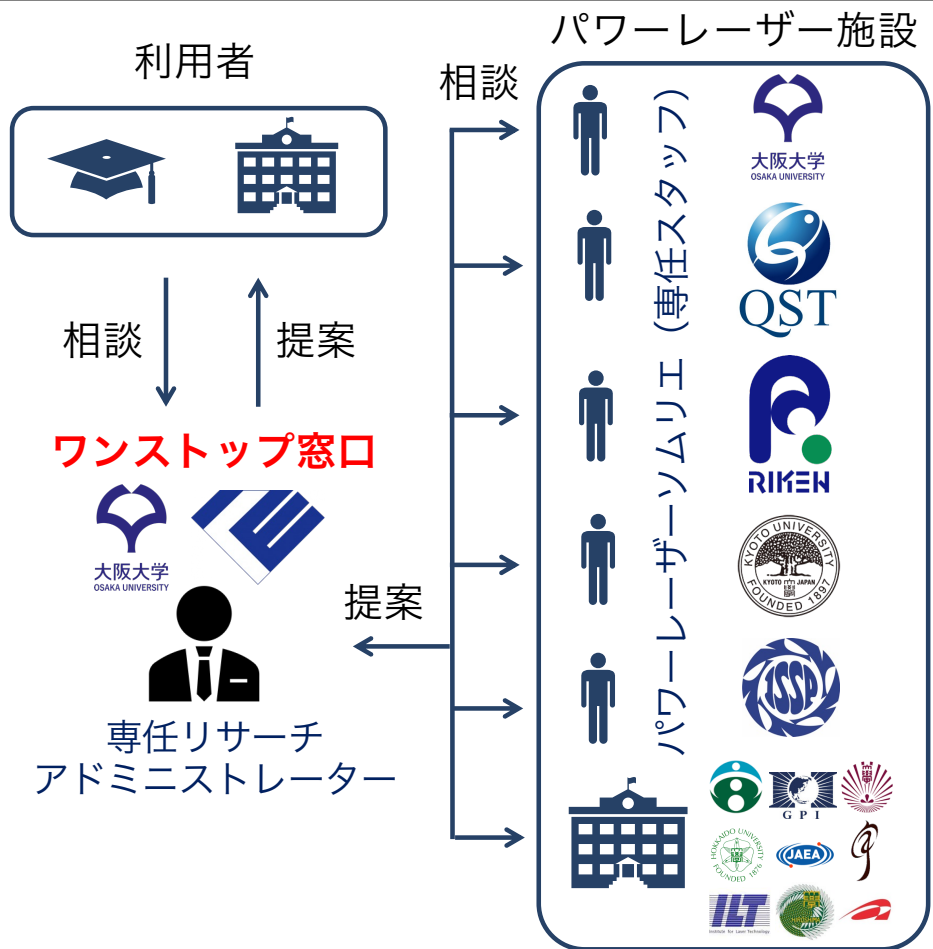
<https://powerlaser.jp>



業務主任者：藤岡慎介
(大阪大学 レーザー科学研究所 教授)

ワンストップサービスの実現

ワンストップサービスで、利用者と国内のパワーレーザーを繋ぐ。
ウェブサイト及びブース出展を通じて多様な情報を多方面に発信。



- [進捗状況]**
- 専任スタッフ (パワーレーザーソムリエ) を代表・実施機関に配置
 - ワンストップ窓口を設置し、利用に係わるコンサルティング機能を運用。
 - 利用に関する手続き、公募情報、イベント等の情報をウェブサイトで発信。
 - 光・レーザー及び計測に関する国際展示会に出展し、多様な参加者に情報提供すると共に技術相談を実施。
 - 大学・研究所、企業、施設のマッチング。

ウェブサイト
<https://powerlaser.jp>



光・レーザー展示会(OPIE)



実施体制

「エネルギー」「強度」「繰り返し」「他ビームとの連結」など 特徴の異なる国内の多様なレーザー施設が連携。



代表機関 大阪大学 レーザー科学研究所

利用者と多種多様なパワーレーザーを繋ぐ窓口であると共に、世界屈指のエネルギーを誇るパワーレーザーで大きな時間・空間スケールでの極限環境を求める利用者が特色あるターゲット。



実施機関 量子科学研究開発機構 関西光量子科学研究所

世界最高級のレーザー強度を誇り、強度の極限への研究発展を目指す利用者がターゲット。パワーレーザーの自動アラインメント及びダメージ検知等の導入を牽引。



実施機関 理化学研究所 放射光科学研究センター

パワーレーザーとX線自由電子レーザーを組合せ、極限環境下での精緻な計測を求める利用者がターゲット。放射光施設で得られたノウハウを活用しリモート実験環境の構築を牽引。



実施機関 京都大学 化学研究所

リモート化とスマート化が進んだ繰り返しパワーレーザーで実験・計測のリモート化・スマート化を進め、強度の極限の追求とデータ蓄積を求める利用者がターゲット。



実施機関 東京大学 物性研究所

独自の超短パルス・ハイパワーレーザーと精緻な計測器を組合せ、レーザー応用の学理を求める利用者がターゲット。ワンストップサービスを通じて、パワーレーザー加工の学術と産業を橋渡し。

協力機関 北海道大学, 宇都宮大学, 光産創大, 広島大学, 九州大学, 宮崎大学, 産業技術総合研究所, JAEA敦賀総合研究開発センター レーザー・革新技術研究所, レーザー技術総合研究所, 大阪大学接合科学研究所 (R5参加), 近畿高エネルギー加工技術研究所 (R5参加), 東海大学 (R5参加)

オープンサイエンスの推進に関するガイドラインを ウェブサイトにて公開し利用者からのコメントを募集。

パワーレーザーDXプラットフォーム事業(以下 PLDX事業)では、第六期科学技術・イノベーション基本計画の理念に基づき、パワーレーザー分野におけるオープンサイエンスを実現するためのポリシーを策定する。本ポリシーは、PLDX事業における研究活動を通して取得および作成した研究データの公開と研究設備・機器の共用化について、その基本的事項を定めるものである。

- オープンサイエンスにおけるデータの取り扱い
 - a. 定義と範囲
 - b. データの保管
 - c. データの公開、非公開および猶予期間
 - d. 研究設備・機器の共用
 - e. 研究データ及び研究設備・機器の引用・利用条件
- 免責



オープンサイエンスに関する講演会を開催

2022/6/28 「物質・材料分野におけるオープンデータ・サイエンス」

石井真史氏 (物質・材料研究機構 統合型材料開発・情報基盤部門)

2023/2/28 「大学における学術データガバナンスの構築に向けた取り組み」

松原茂樹氏 (名古屋大学 情報連携推進本部 情報戦略室)

2023/3/9 「mdx :データ活用のためのプラットフォームの現状と2023年4月以降の運用について」

川瀬順也氏 (東京大学 情報基盤センター データ科学研究部門)

2024/3/9 「生命科学分野の国際データベースPDBと大阪大学」

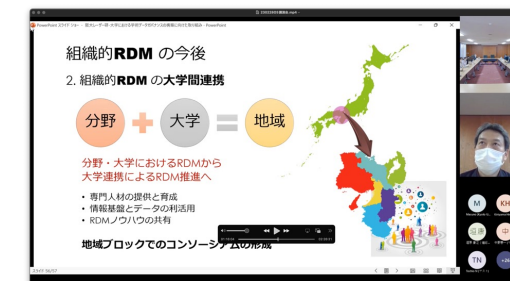
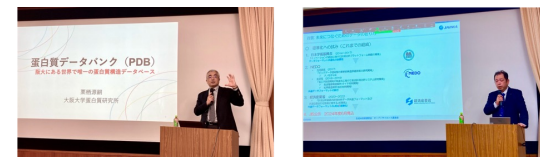
栗栖 源嗣氏 (大阪大学蛋白質研究所)

2024/3/9 「計測分析データの共通データフォーマット化の取り組み内容と標準化の状況について」

高杉憲司氏 (日本電子株式会社)

2024/3/9 「JSTの法人としての研究データを含むオープンサイエンス方針」

李 東真氏 (国立研究開発法人科学技術振興機構)



まとめ

- パワーレーザーで多様で魅力的な極限実験環境は学際的科学の発展の源泉.
- パワーレーザーで生成される極端紫外光 (**Extreme Ultraviolet: EUV**) は, 最先端半導体製造の鍵となるツール.
- 実験データベースとシミュレーションの比較により当時世界最高性能の**EUV**光源を実現. この技術は現代の**EUV**光源にも活かされている.
- パワーレーザー施設の国内・国際連携を推進中.

Acknowledgement

This work was supported in part by the Joint Usage/Collaborative Research Center Project of the Institute of Laser Engineering, Osaka University, and National Institute of Fusion Science, National Institutes for Quantum Science and Technology, a Grant-in-Aid for Scientific Research, the "Power Laser DX Platform Project" (JPMXS0450300021) of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, and the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) Core-to-Core Program, A. Advanced Research Networks (JPJSCCA20230003).



POWER LASER DX PLATFORM



JAPAN SOCIETY FOR THE PROMOTION OF SCIENCE
日本学術振興会

研究基盤EXPO2025/北陸研究データ基盤