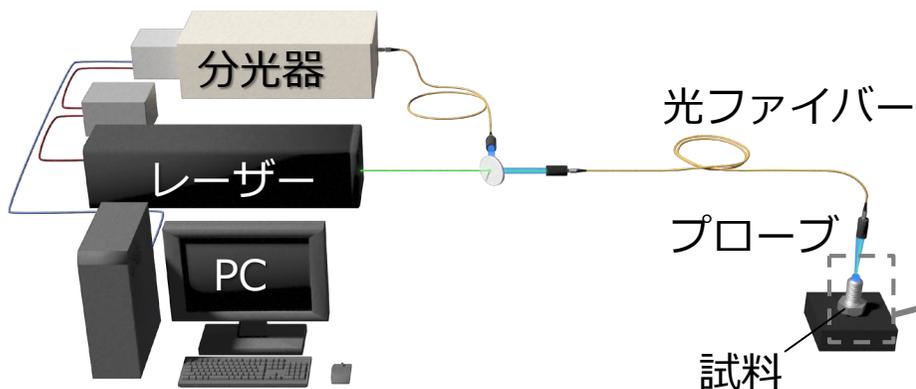


レーザーによる燃料デブリの「その場」分析

狩野 貴宏

廃炉環境国際共同研究センター(CLADS)
遠隔技術ディビジョン先進放射線計測研究グループ

レーザー誘起ブレイクダウン分光法 (LIBS)



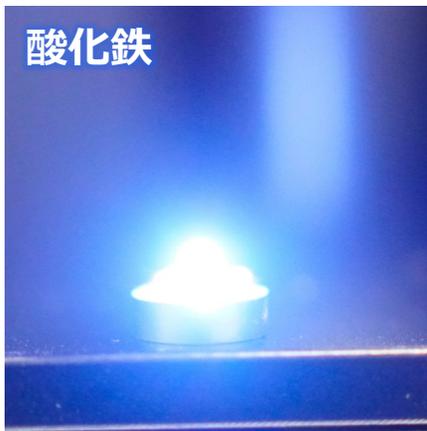
- ・レーザーや分光器などから構成された元素分析のための装置
- ・集光したレーザーを試料に照射し、生成されたプラズマの発光スペクトルを観測

レーザーにより生成されるプラズマ



- ・ボルトを試料とした例
- ・緑色のレーザーにより青白いプラズマが生成
- ・分光器により正確な分析

酸化鉄

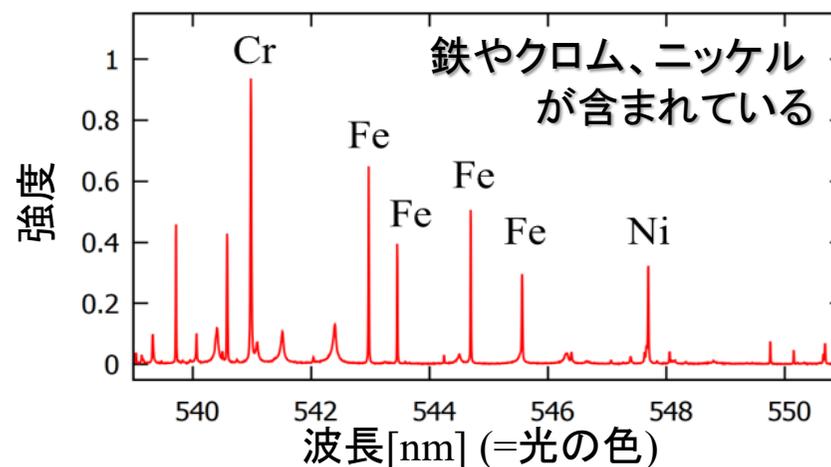


酸化ガドリニウム

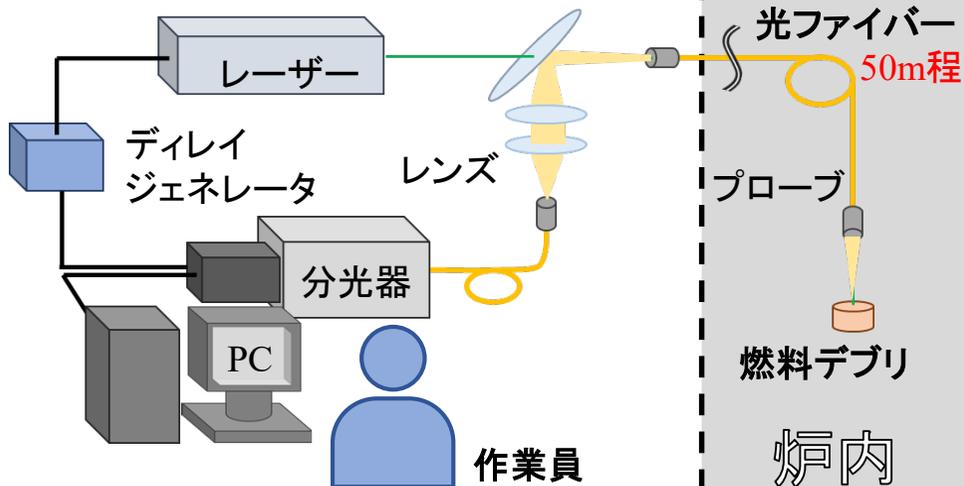


元素の種類によりプラズマの発光スペクトル (プラズマが出す光の色) が異なる

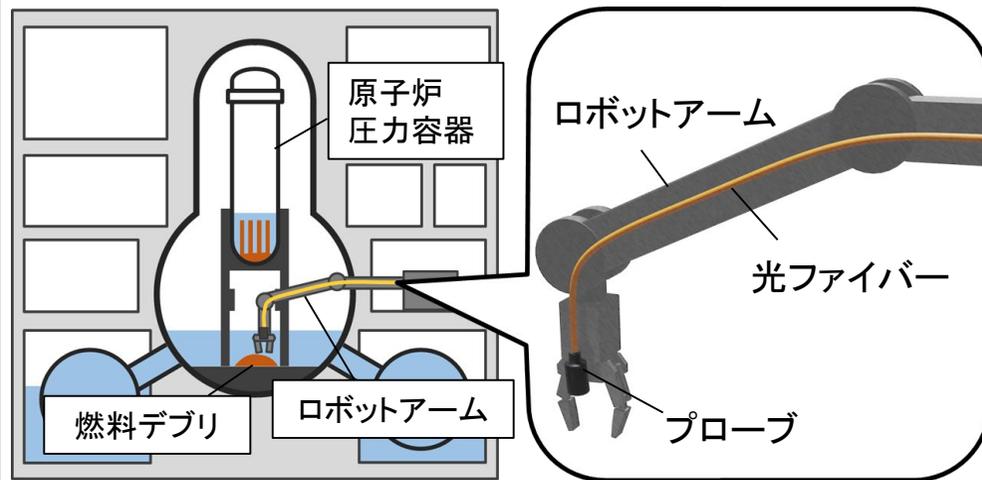
分析結果



光ファイバーLIBS装置



LIBSによる燃料デブリのその場分析



レーザー誘起ブレークダウン分光法 (LIBS) の特徴

- ・ 試料の前処理が不要で、かつ短時間で多種類の元素を同時測定できる
- ・ レーザー光もプラズマ発光も「光」なので、光ファイバーを用いて容易に遠くまで伝送できる

廃炉作業への応用

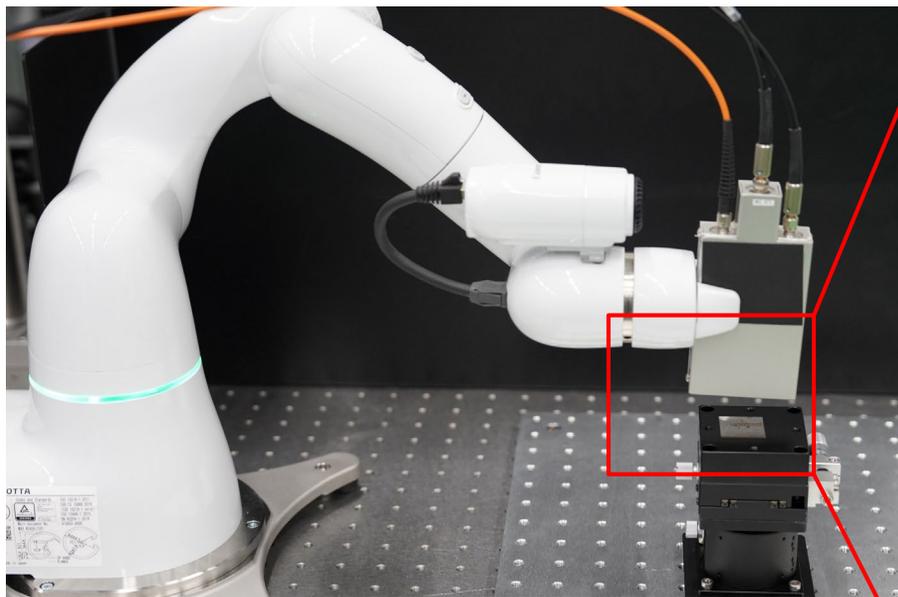
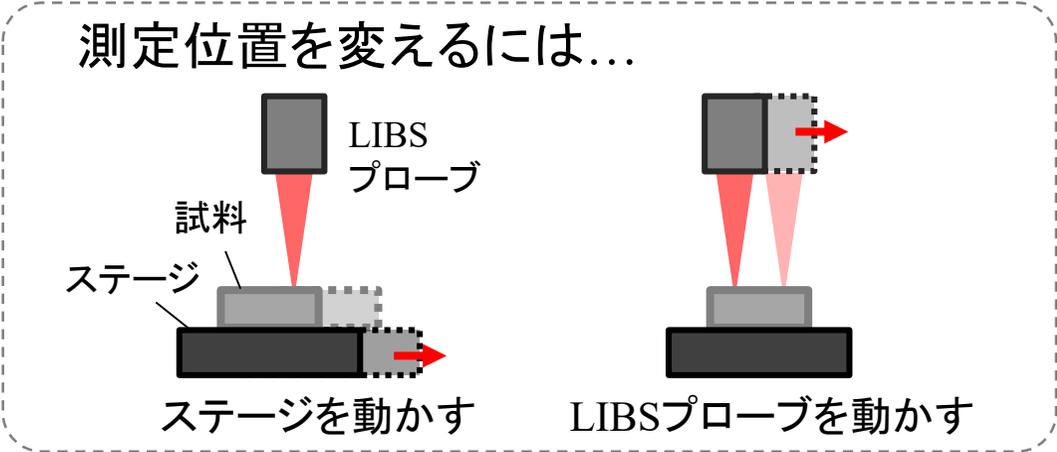
- ・ ロボットアームに光ファイバーを取り付けるなどすれば、炉内にある燃料デブリ等をその場分析することができる
- ・ 作業員が安全な位置から炉内にある燃料デブリの状態を把握することができる
- ・ 大量のデブリからウランを含む燃料デブリと瓦礫等を迅速に区分できる

LIBSによる測定では、レーザーを照射した位置での元素情報を得ることができる

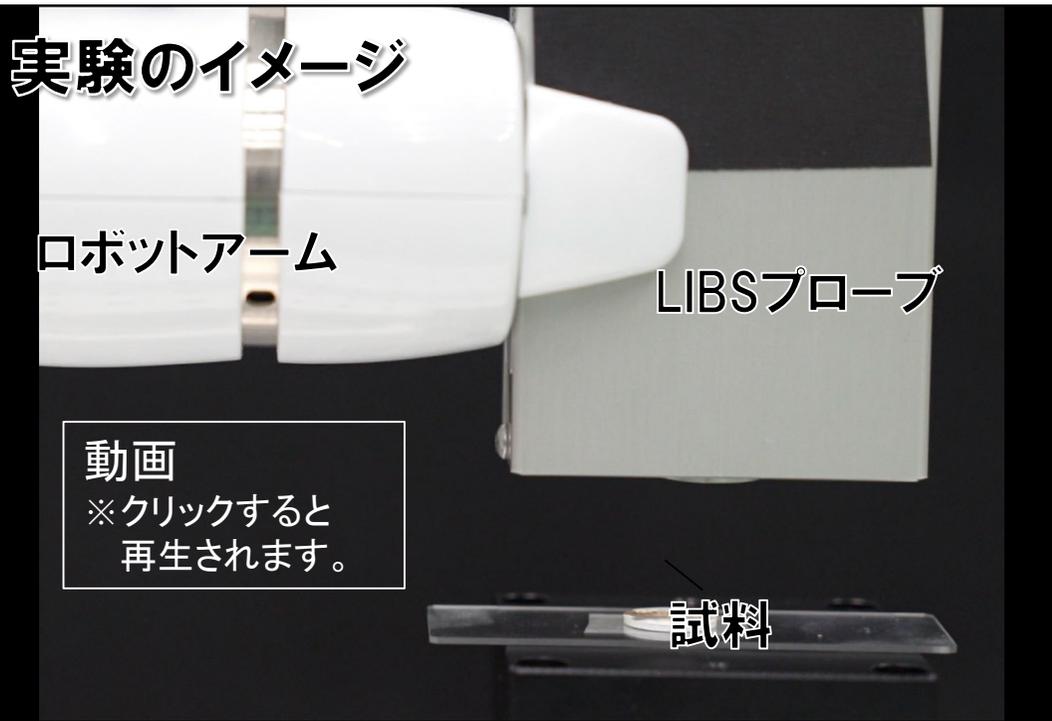


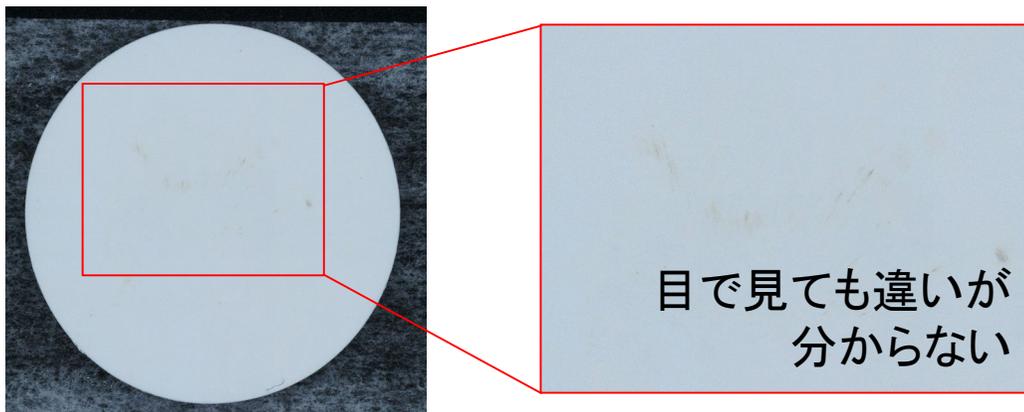
動かしながら
繰り返し測定

元素分布を測定することができる



ロボットアームがLIBSプローブをつかんで動くことで面分布を測定



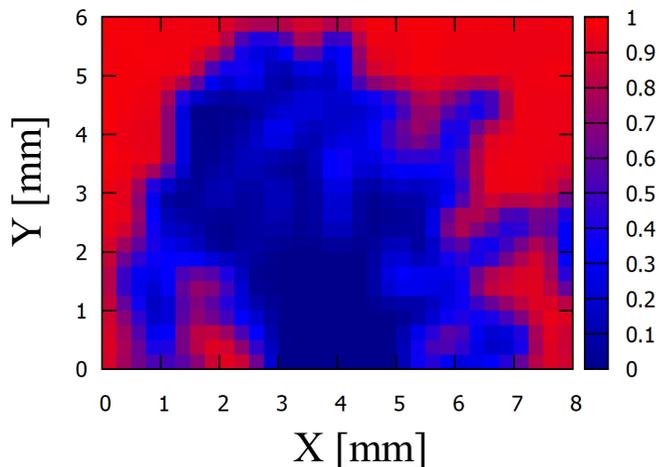


実験条件

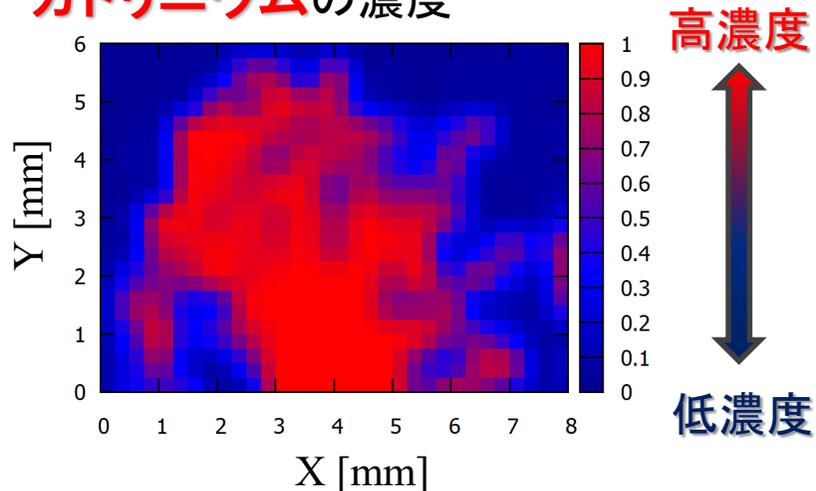
- レーザーのエネルギー: 1mJ
- 繰り返し周波数: 10Hz
- ショット回数: 各位置でそれぞれ20回
- 観測遅延時間: 1 μ s
- 観測時間幅: 10 μ s
- 測定範囲: 8mm x 6mm
- 測定間隔: 0.5mm
- 各点での測定時間: 2秒

LIBSによる分析結果 (元素組成分布)

ジルコニウムの濃度

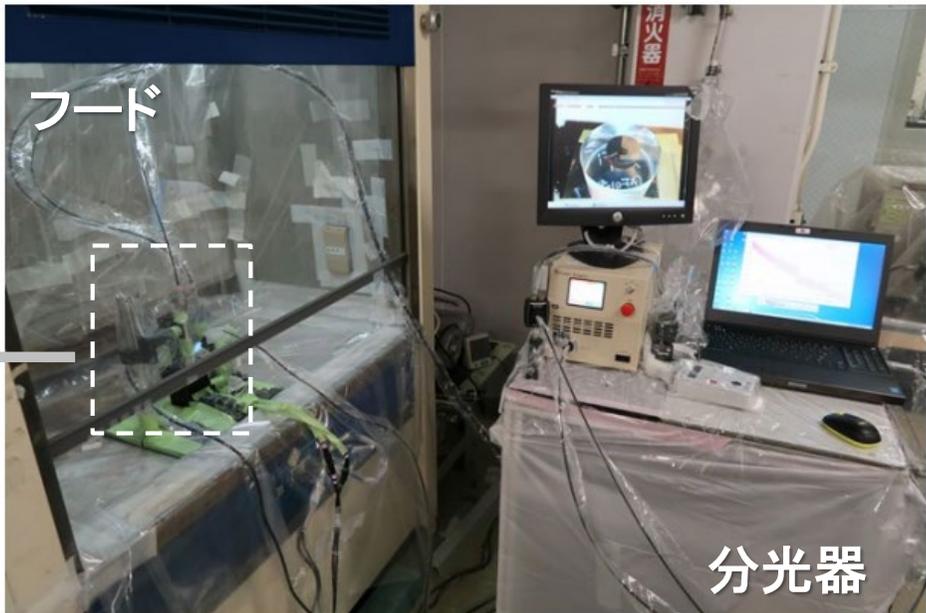
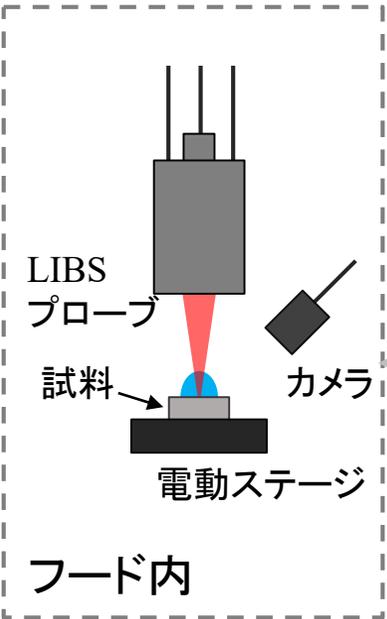


ガドリニウムの濃度



位置をずらしながら測定することで**元素組成の分布が可視化**できる

- ・ **ウランを含む試料**をマイクロチップLIBSにより測定した
- ・ SEM/EDS(電子顕微鏡)の分析結果と比較した



EDS(エネルギー分散型X線分光法)

試料に電子線を照射した際に観測される特性X線を測定することで元素分析を行う

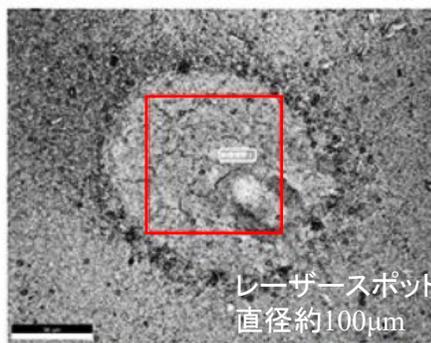
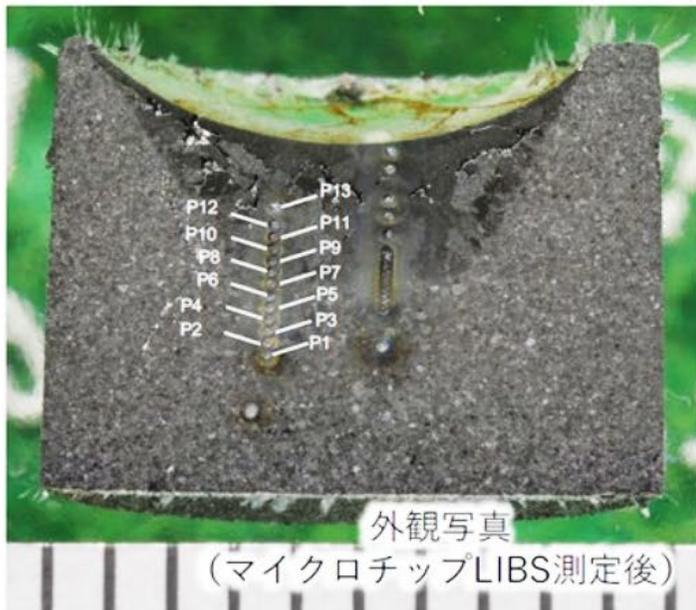
マイクロチップLIBS

プローブ内のレーザー結晶でパルスレーザーを生成することで、従来より離れた位置での測定を可能とする技術

LIBSの実験条件

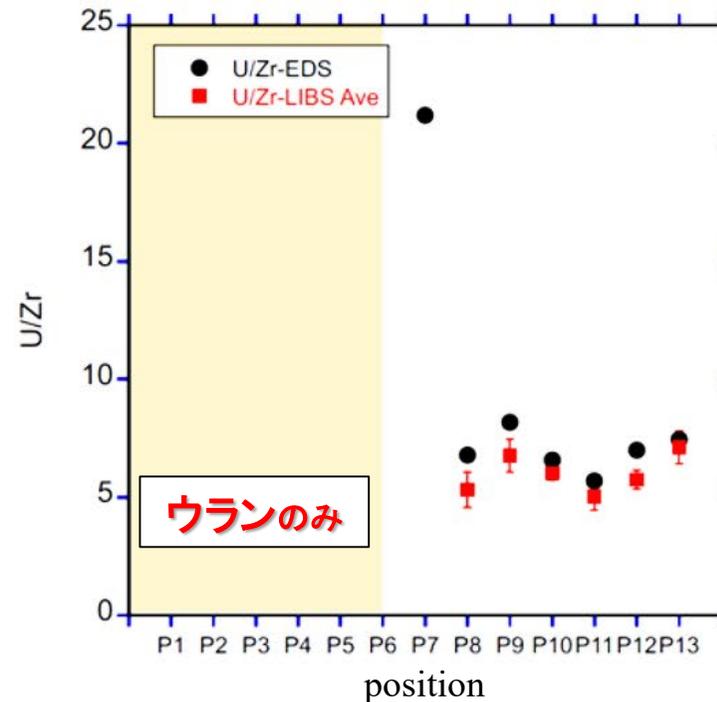
レーザーのエネルギー: 1.2 mJ
 繰り返し周波数: 5 Hz
 ショット回数: 100回、5回平均
 観測遅延時間: 1 μs
 観測時間幅: 50 μs

- ・ウランを用いるためビニールで養生している
- ・LIBSプローブと試料はフード内にある
- ・カメラと電動ステージによりレーザーの照射位置を調整



P1部：赤枠がEDS分析範囲

UO₂るつぼ
ZrO₂のグリーンペレット
2600°C Ar

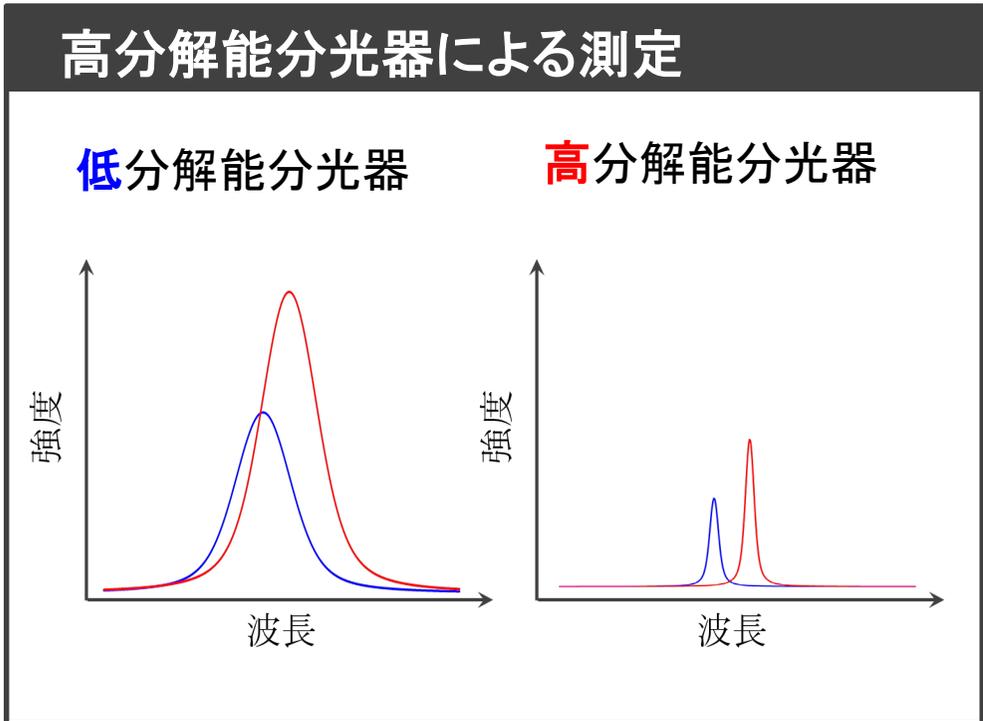


- P1-P6はウランのみを検出
- EDS分析結果とLIBSの結果は概ね一致
- 境界領域(P7)では差が生じている → LIBSとEDSの測定範囲の違いによるもの

LIBSによりウランをその場分析できることを確認

- 燃料デブリ中のウランの物性評価において核分裂性のU-235の測定は重要である
- U-238とU-235の発光波長差は極めて小さいため、通常分光器でU-235の分別測定は困難
- 高分解能分光器を用いれば測定できるが、全体的にスペクトル(光)の強度が小さくなってしまふ
- マイクロ波で発光寿命を延ばし時間積分した発光量を大きくすることができる

⇒ マイクロ波と高分解能分光器を組み合わせU-235の測定に挑戦



高速度カメラによるプラズマの撮影

試料: ジルコニウム (測定時間: 25.4 μs)

マイクロ波あり

動画

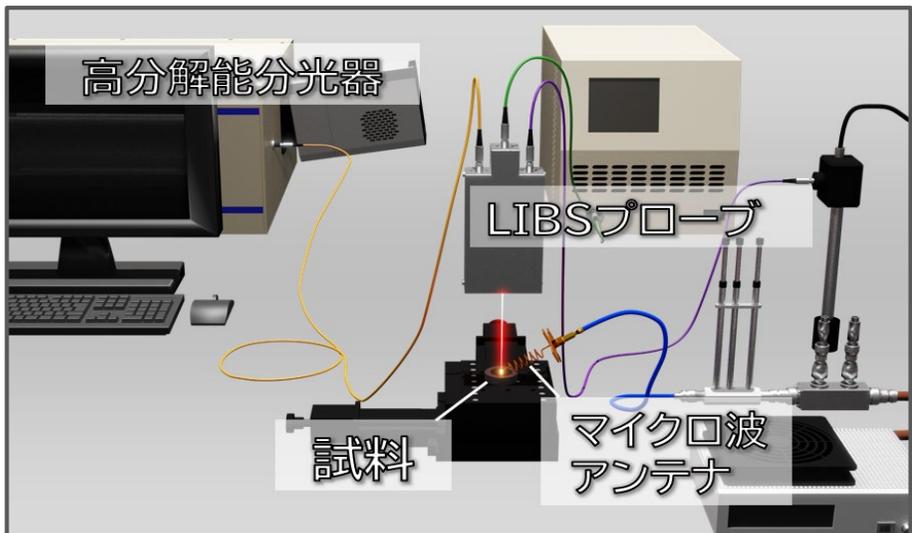
※クリックすると再生されます。

マイクロ波なし

動画

※クリックすると再生されます。

実験装置

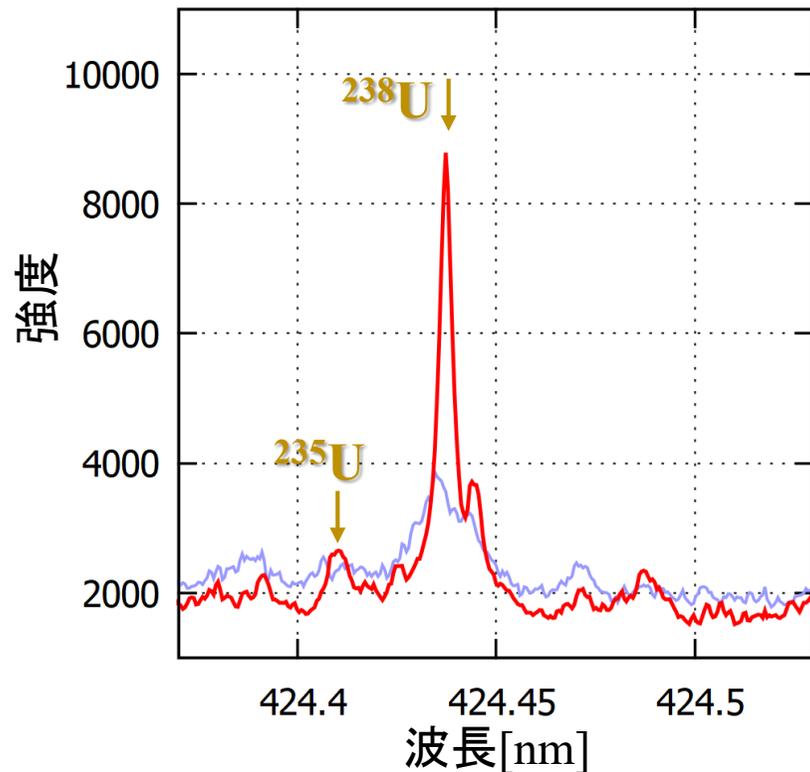


実験条件

レーザーのエネルギー: 1.0mJ	マイクロ波の周波数: 2.45GHz
繰り返し周波数: 10 Hz	マイクロ波のパワー: 1000W
ショット回数: 200回	マイクロ波の照射時間: 1000 μ s
観測遅延時間: 0.5 μ s	
観測時間幅: 1000 μ s	

実験結果の例

— マイクロ波あり
— マイクロ波なし



マイクロ波を用いてない場合、ノイズの影響でU-235の光はほとんど観測できない
 マイクロ波を用いた場合、U-235の光がはっきりと観測することができる

マイクロ波と高分解能分光器によりLIBS計測でU-235を測定ができる可能性

まとめ

- ◆ LIBSの廃炉作業への応用を目指した研究を行っている
- ◆ LIBSを用いれば**炉内にある燃料デブリ等をその場分析**ができる
- ◆ ロボットアームなどを用いて位置をずらしながら測定することで**元素組成分布を測定**できる
- ◆ **ウランを含有した模擬デブリ**をLIBSとエネルギー分散型X線分光法(EDS)により分析・比較し、**概ね同様の結果を取得**

今後の予定

- ◆ マイクロ波と高分解能分光器を用いたLIBSにより**U同位体測定の可能性**を評価
- ◆ **大規模取り出しでの燃料デブリの確認、燃料デブリと廃棄物の迅速分別への利用**を目指したい

研究の魅力とやりがい

- ◆ 短時間で測定できる点から廃炉作業の効率化に貢献でき、光ファイバーにより遠隔から分析できる点は作業員の安全性向上につながる技術であり、**廃炉作業の効率化や安全性に貢献できる**ところに魅力がある。
- ◆ 実験を通して元素分析における**新たな知見を得る機会**もあり、やりがいがある。