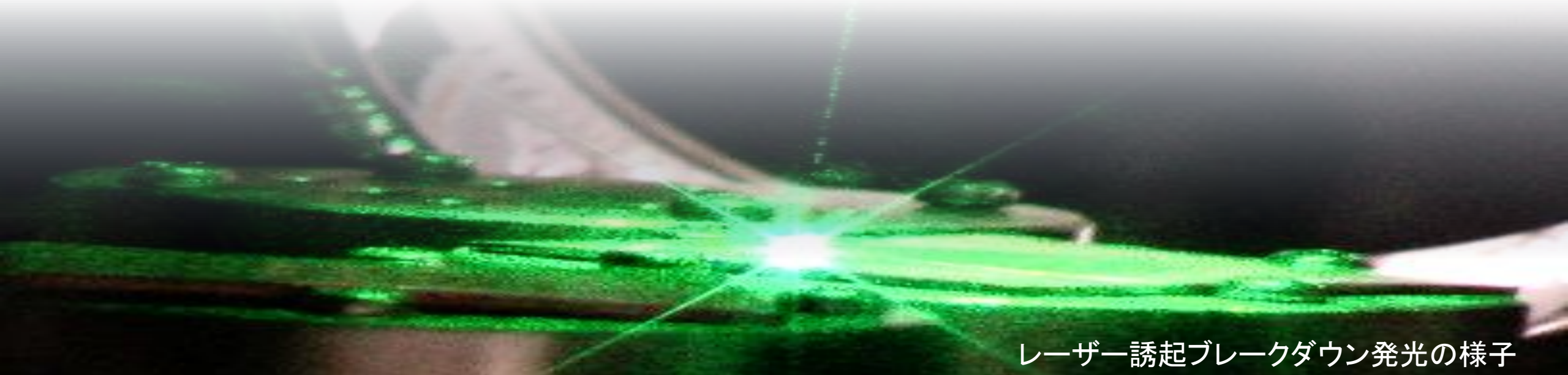


遠隔分析技術

(レーザーを利用した炉内デブリのその場スクリーニングをめざして)

若井田 育夫

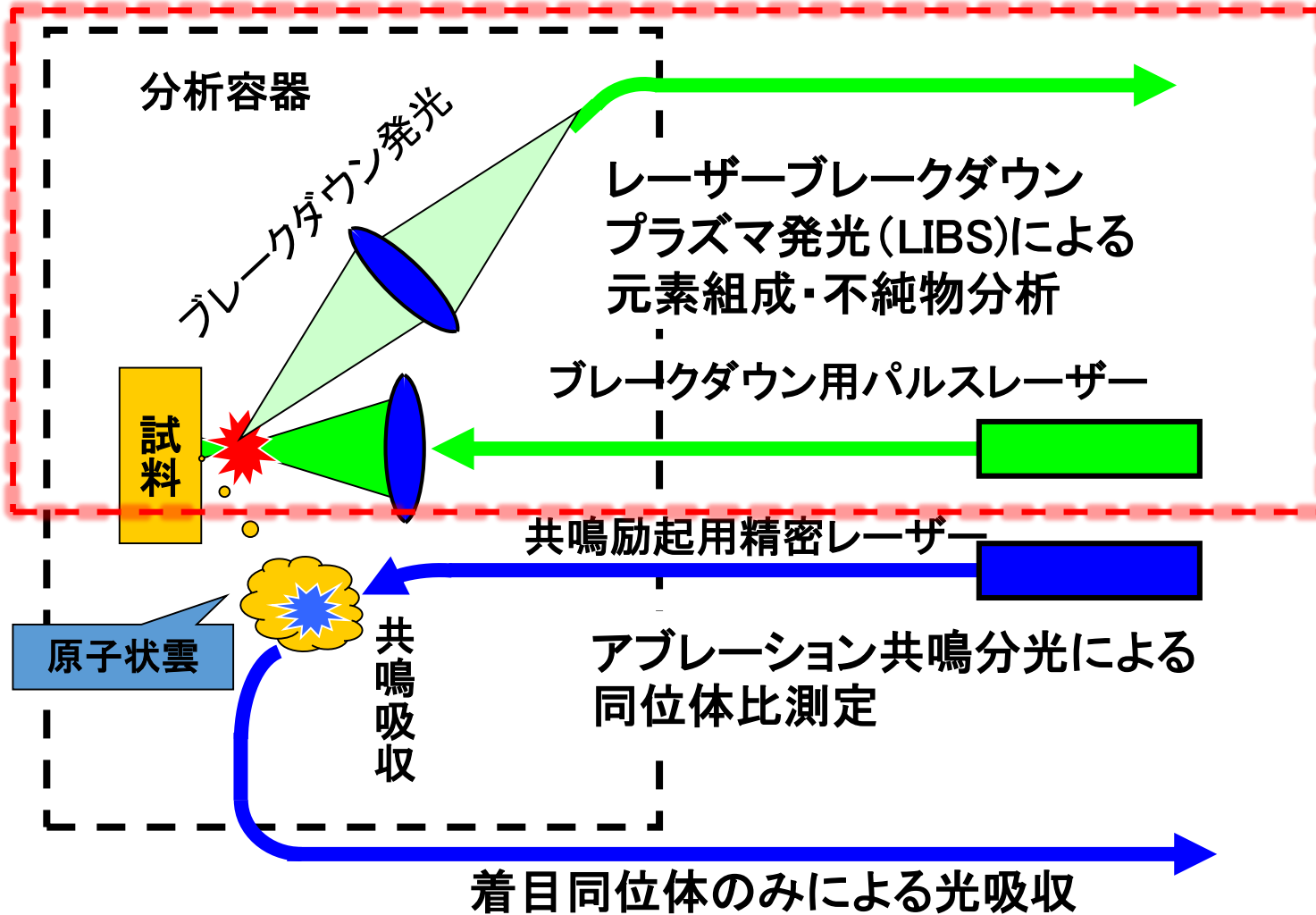
日本原子力研究開発機構 廃炉環境国際共同研究センター



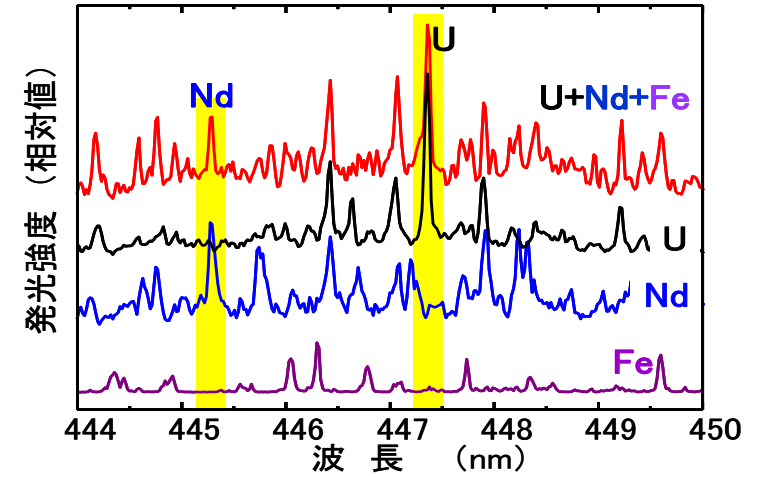
レーザー誘起ブレークダウン発光の様子

1. レーザー遠隔分析の概念
 - ・レーザー遠隔分析技術
 - ・光ファイバー利用LIBS
2. 可搬型ファイバーLIBSの複雑系模擬デブリへの適用
 - ・標準試料による検量線取得
 - ・多成分複雑系試料での分析特性
3. システムの耐放射線、放射線環境下分析特性
 - ・耐放射線性光ファイバー
 - ・照射環境でのLIBS分析特性
4. まとめと課題

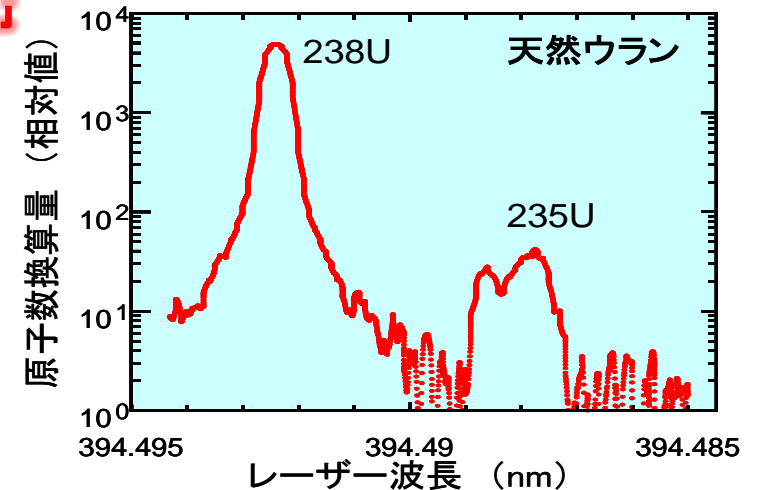
光で問い合わせ、光で分析する 遠隔・非接触・直接分析

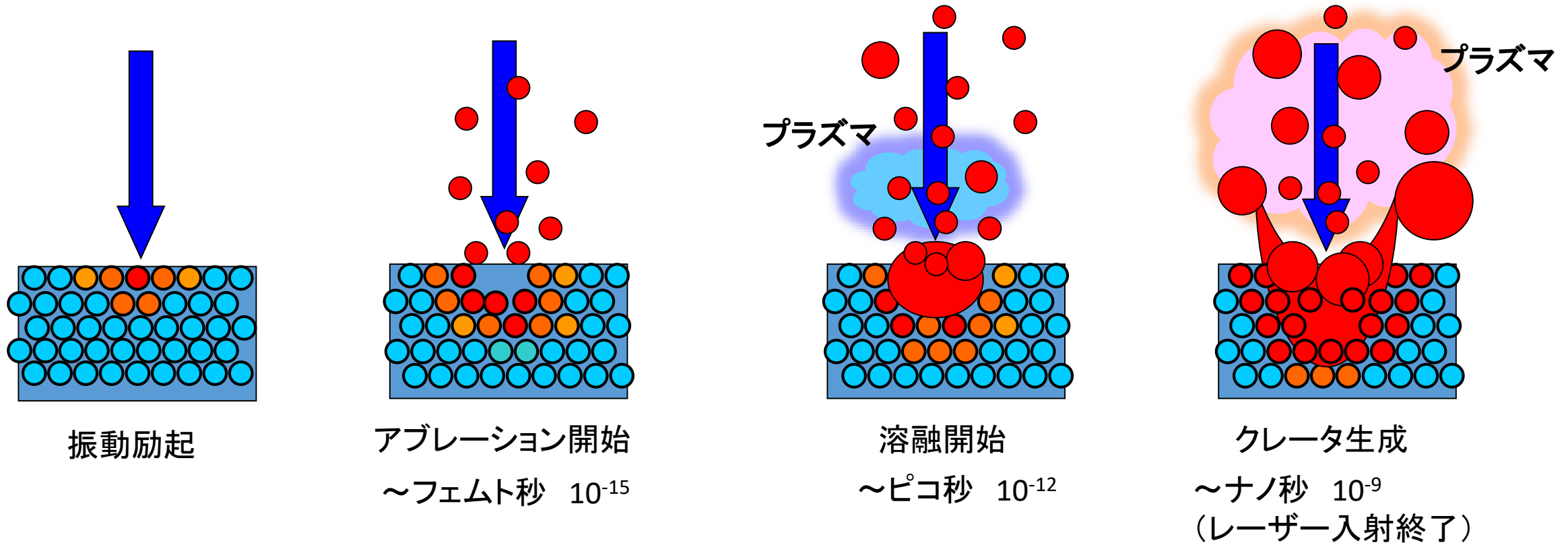


発光分光: 元素組成



共鳴分光: 同位体比





エネルギーの熱的な拡散が不十分な段階で事象が終了

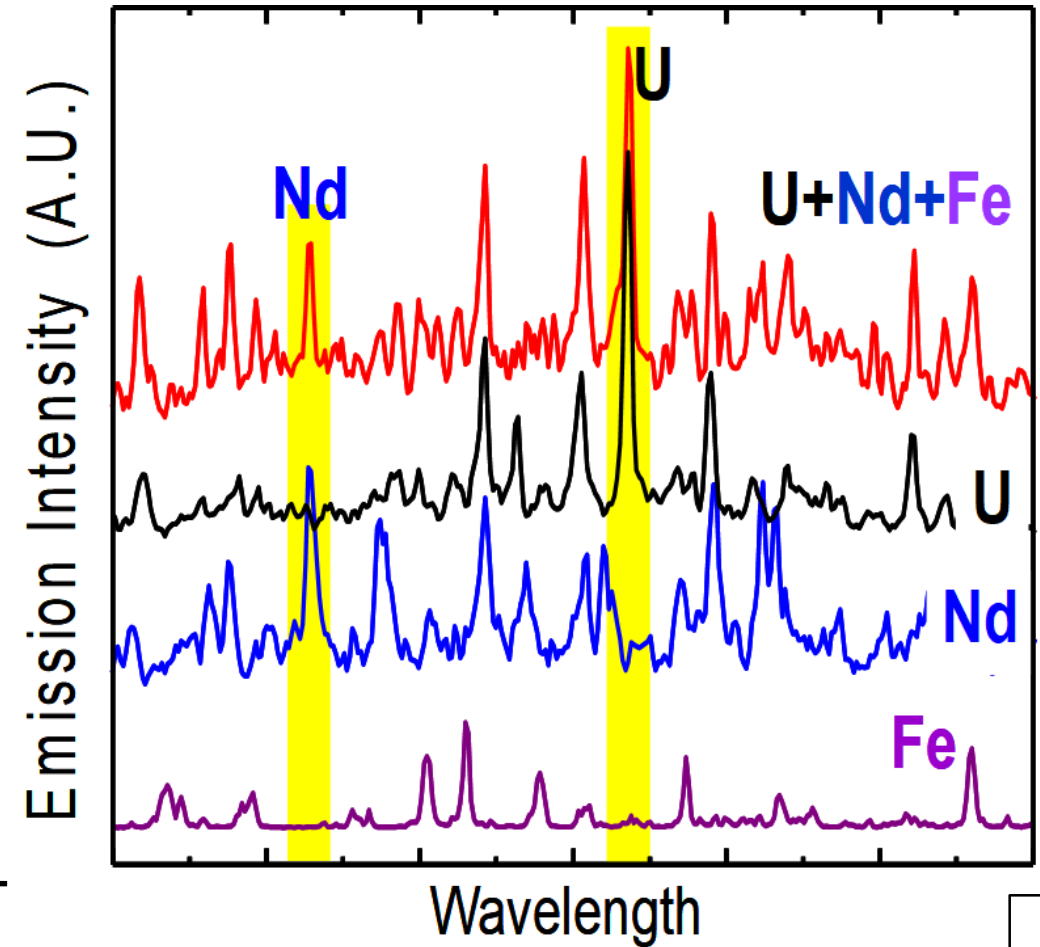
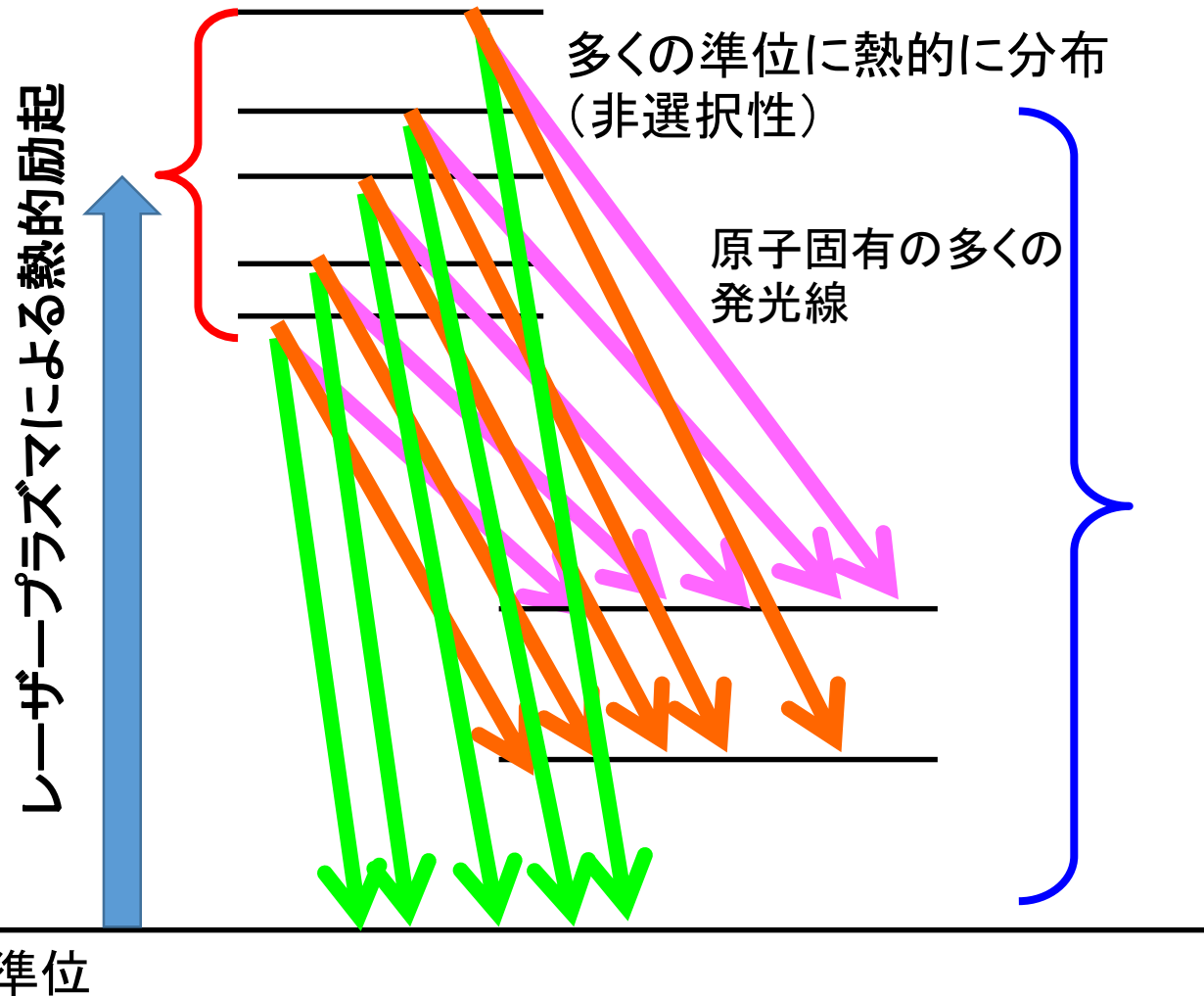
エネルギーの緩和、熱平衡状態

※医療分野での応用は、この性質を利用している例が多い

レーザー誘起ブレークダウン発光分光 (Lase IInduced BBreakdown S Spectroscopy)

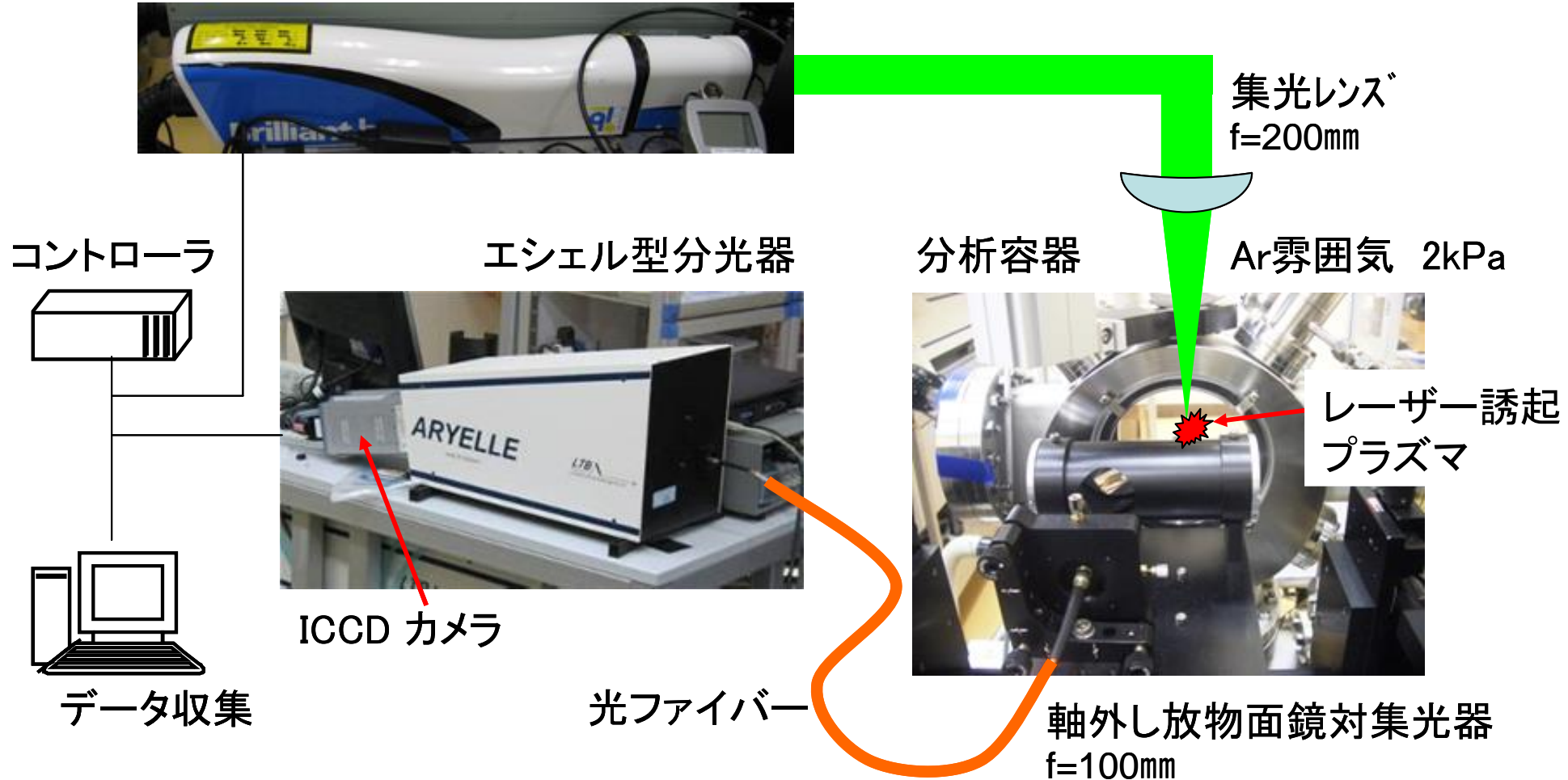
原子内の電子のエネルギー準位

原子固有の発光線



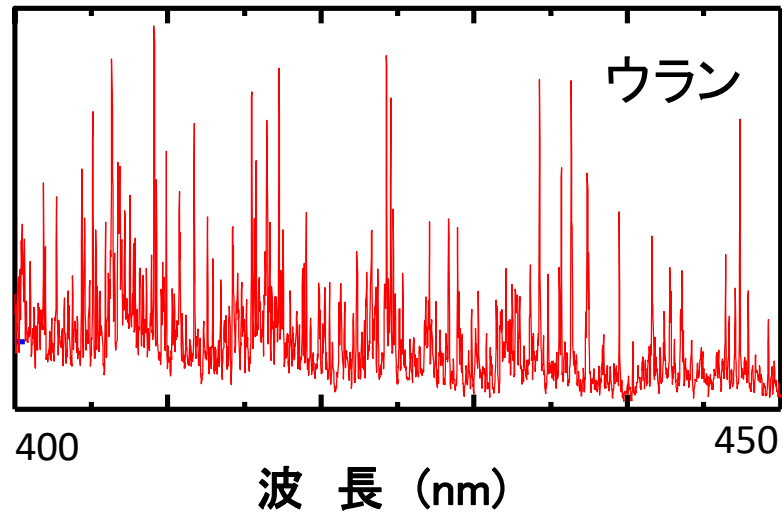
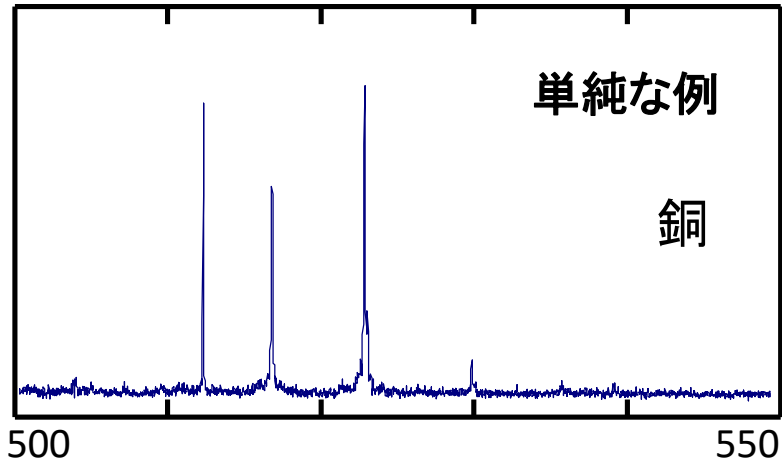
Nd YAG レーザー (完成度が高く現在最も信頼性の高い光源)

波長: 532nm、1064nm パルス幅: ~5ns エネルギー: 5mJ 繰り返し: 10Hz



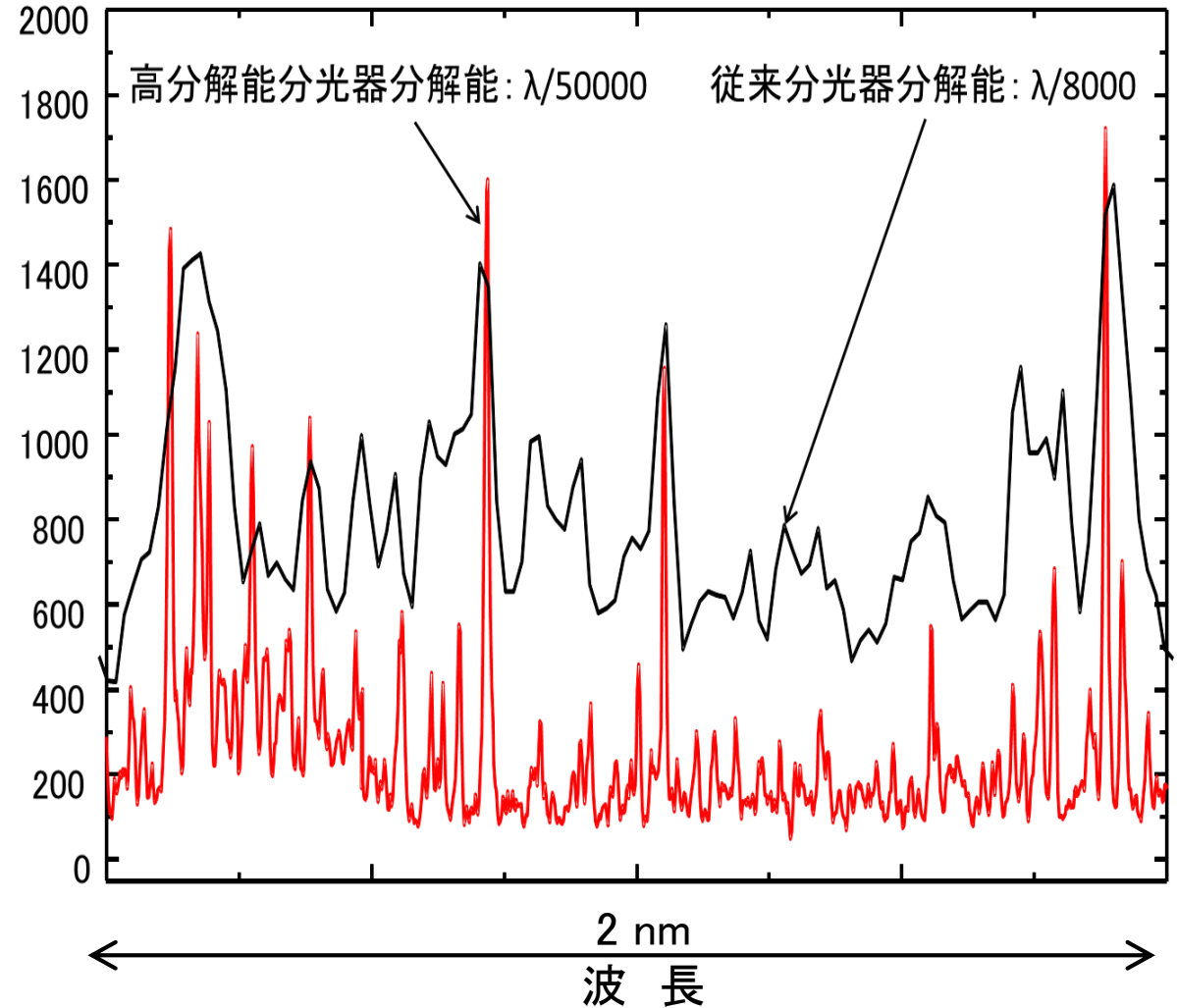
現実

発光スペクトル観測例
(ウランは複雑なスペクトル構造を持つ)



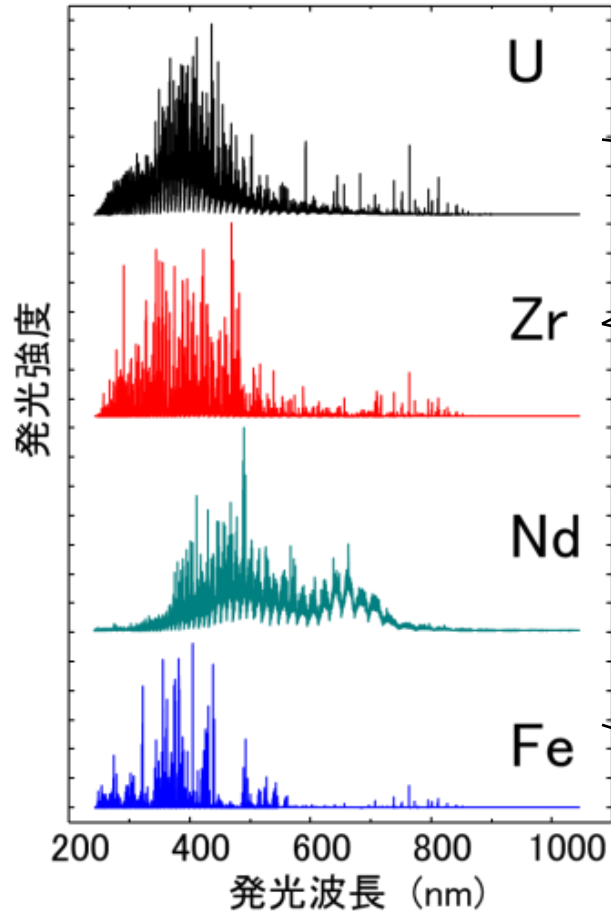
取り組み

高分解能分光技術の開発

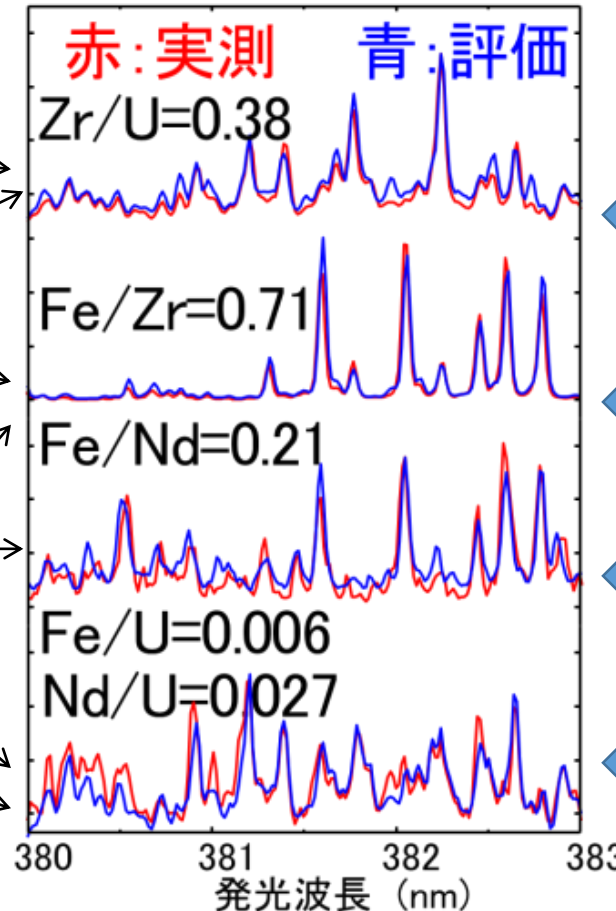


多成分組成のデブリ評価を実現：構成物質の基礎分光データが不可欠

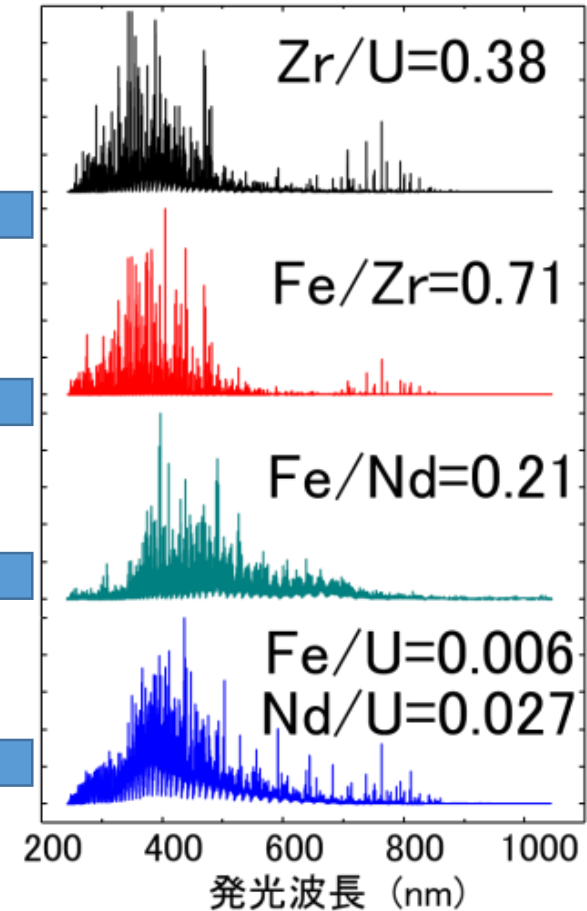
元素発光データ例

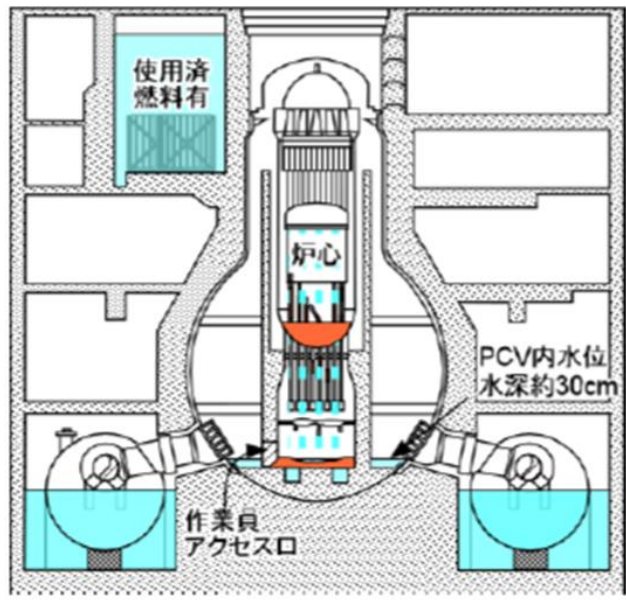


元素発光データからの
混合物発光評価例

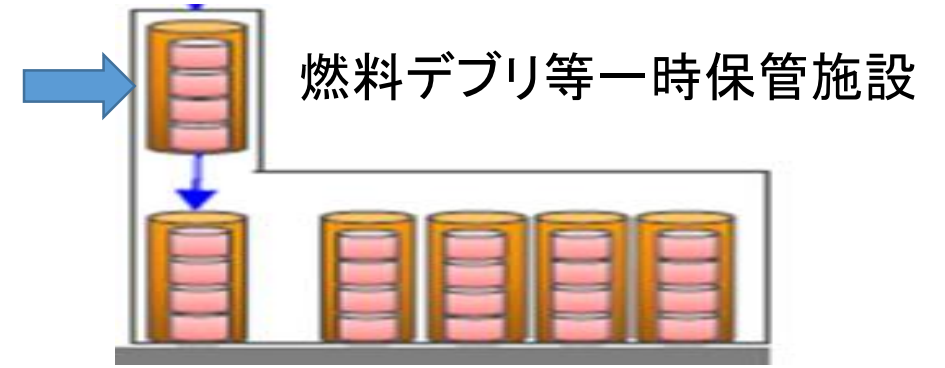
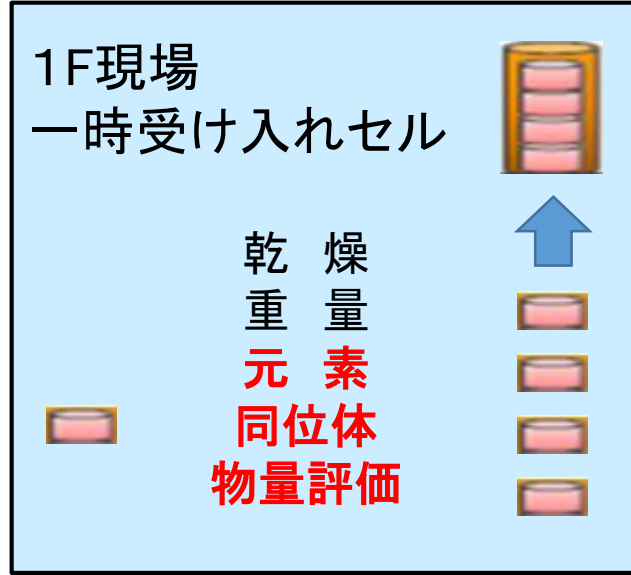
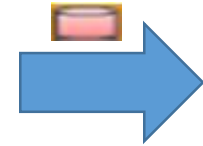


混合物発光データ例





取り出し
運搬



施設間輸送

高精度詳細精密分析施設
(大洗・東海地区。大熊センター)

炉内その場分析 スクリーニング

取り出した燃料デブリのホットセル内分析

取り出し時

デブリの予測によらない素性判断

- ・作業の安全と効率の両立

取り出し完了時

有意残存量のないことの実測値に基づく評価

- ・絶対的な安全性
- ・国民の安全安心の醸成

取り出し後の取り扱い

燃料デブリの素性判断

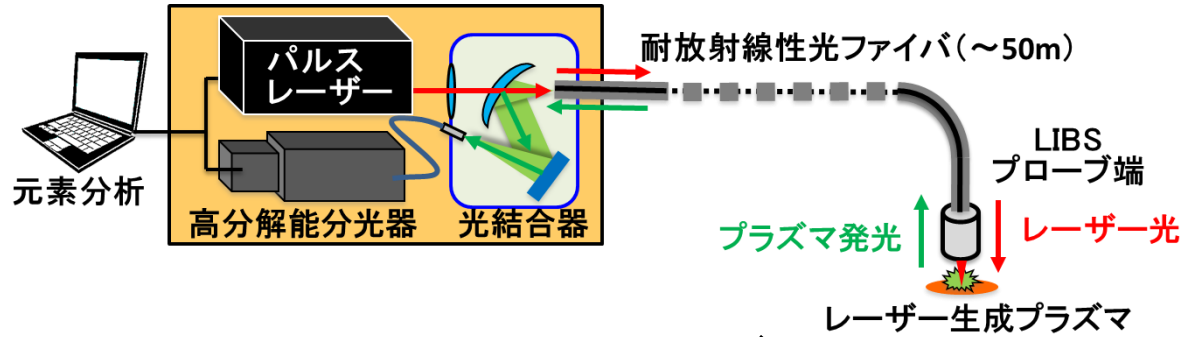
燃料デブリ/廃棄物の分別、ラベリング

燃料デブリのランク付け(U含有量)

燃料デブリの一樣・非一樣性(U濃縮度)

- ・安全で的確かつ経済的な長期保管の実現
- ・国民の安全・安心の醸成

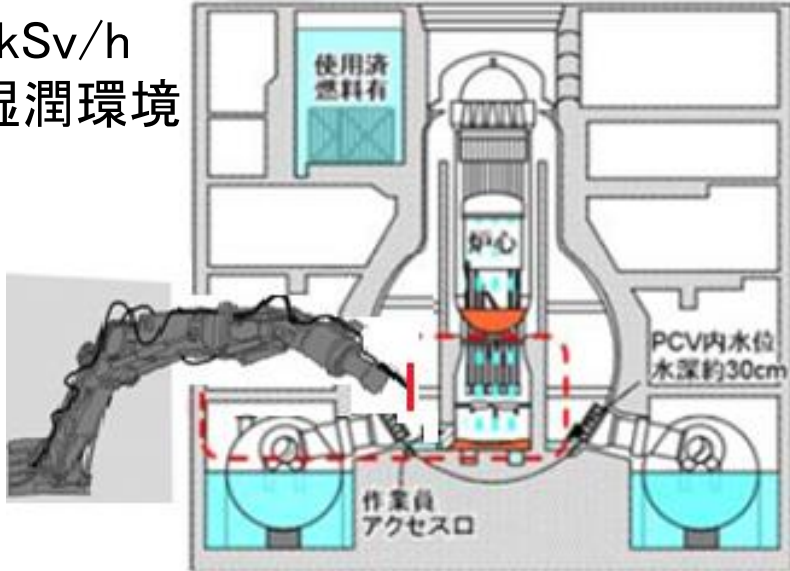
基本型



- ・過酷環境に対する堅牢性
- ・光ファイバーによるレーザー光の搬送
- ・光ファイバーによる遠隔操作性
- ・気中でも水中でも使用可能
- ・LIBSによる非接触・その場・迅速元素分析の実現

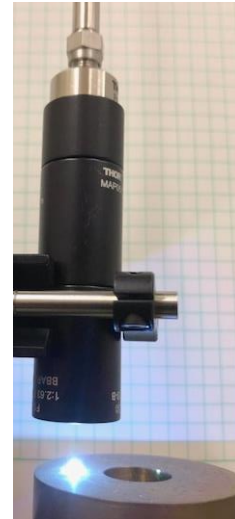
炉内その場分析への適用

1kSv/h
湿潤環境

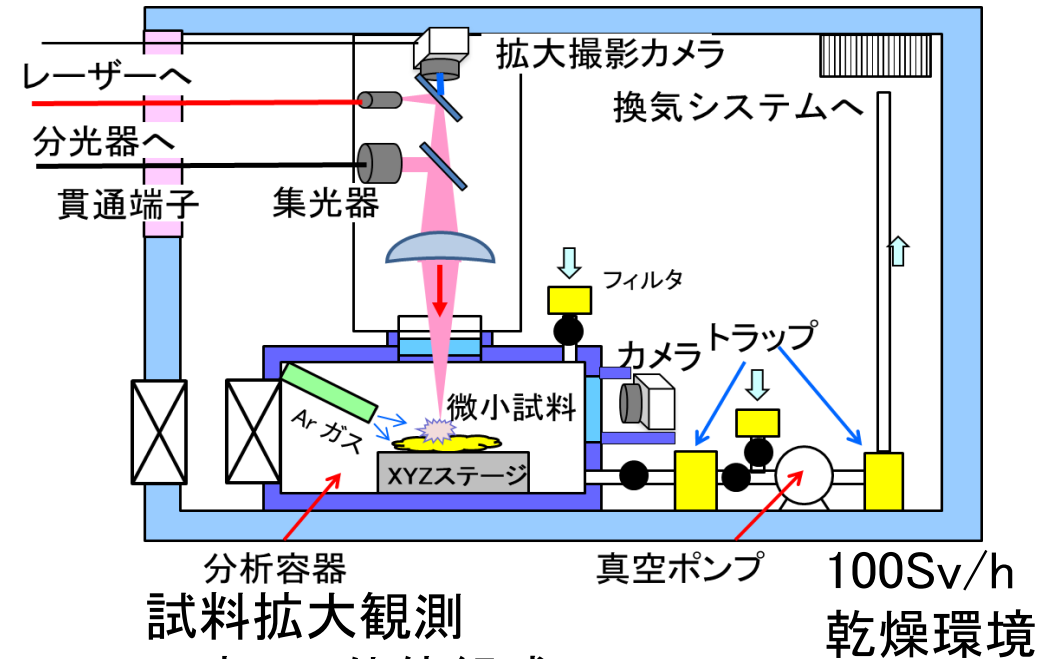


ロボットアームへの装着
多点測定による分布、素性把握
有意な残存量がないこと

ホットセル内その場分析への適用



基本型の
活用



試料拡大観測
元素、同位体組成
疑似三次元分布(表面汚染の区別)

光ファイバー(最長50m)

プローブヘッド

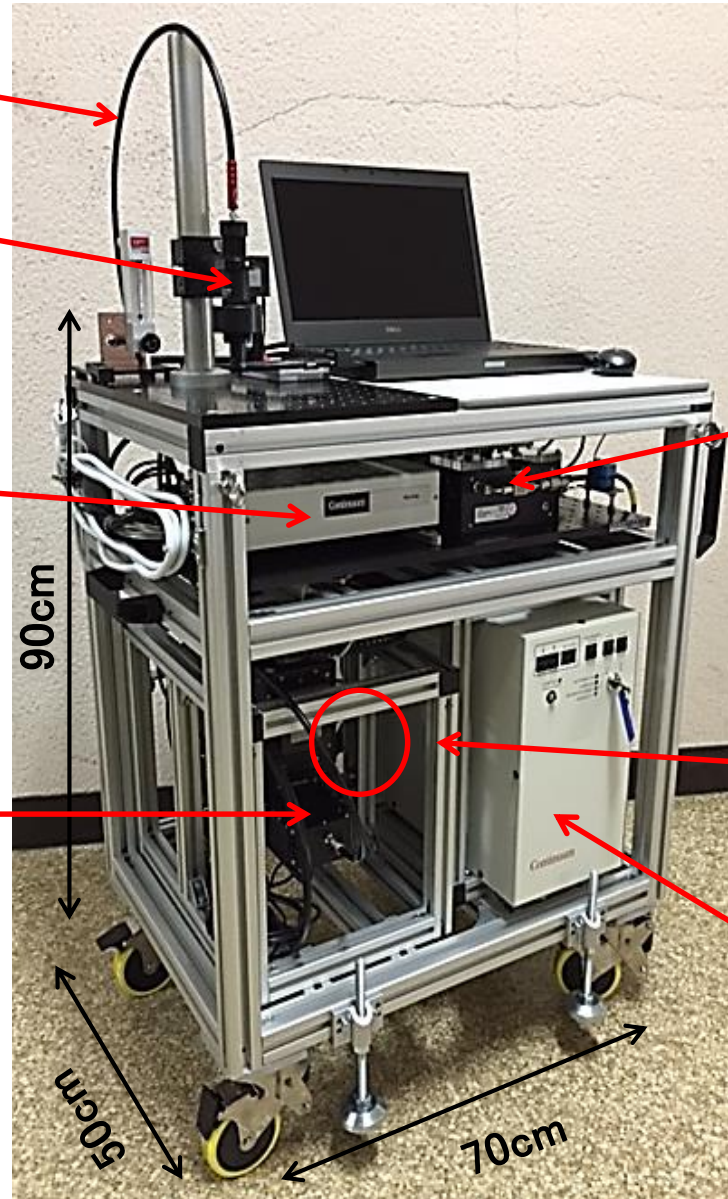
レーザー発振器

LD励起レーザー利用で
小型・軽量化可能

高分解能

エシェル分光器

($\lambda / 50,000$)



重量: 約60kg

光カップリング
ボックス

振動緩衝器

レーザー電源

LD励起レーザー利用で
小型・軽量化可能

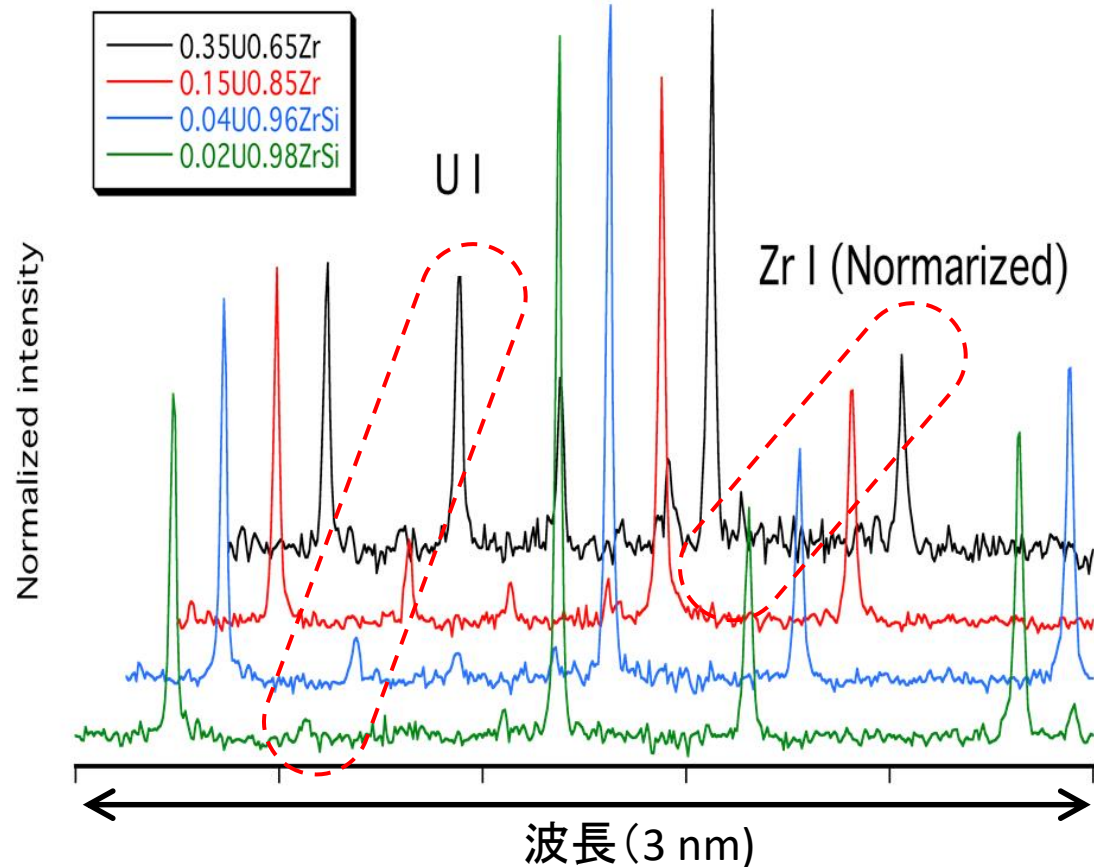
1. レーザー遠隔分析の概念
 - ・レーザー遠隔分析技術
 - ・光ファイバー利用LIBS
2. 可搬型ファイバーLIBSの性能評価
 - ・標準試料による検量線取得
 - ・多成分複雑系試料での分析特性
3. システムの耐放射線、放射線環境下分析特性
 - ・耐放射線性光ファイバー
 - ・照射環境でのLIBS分析特性
4. まとめと課題



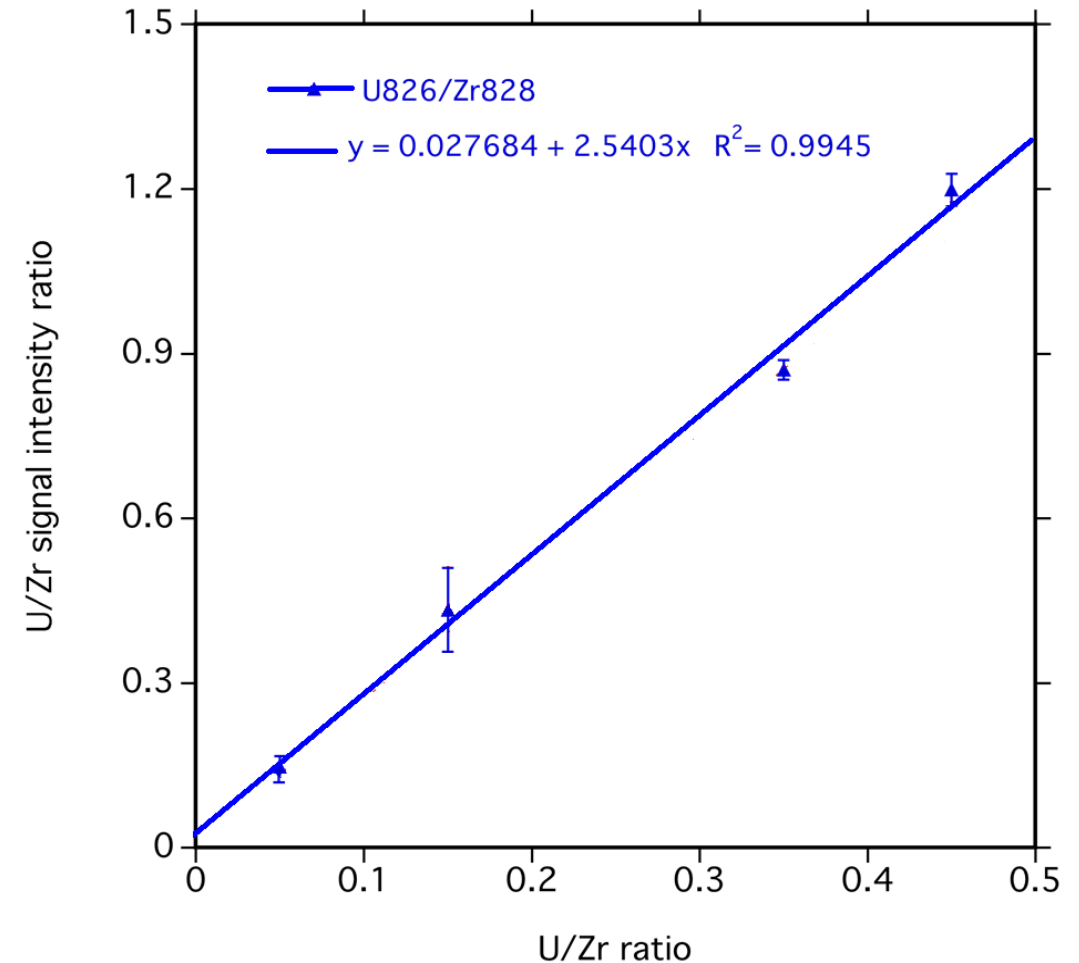
【模擬デブリ簡易分析検証実験の様子】

- ・標準模擬デブリ(均一組成Zr/U酸化物)による検量線の取得
- ・取得した検量線で多成分不均一試料を分析
- ・エネルギー分散型X線分析 (SEM/EDX)と比較

標準試料によるLIBS検量線の例



耐放射線性ファイバ透過波長領域での
U/Zr酸化物LIBS発光スペクトル観測例



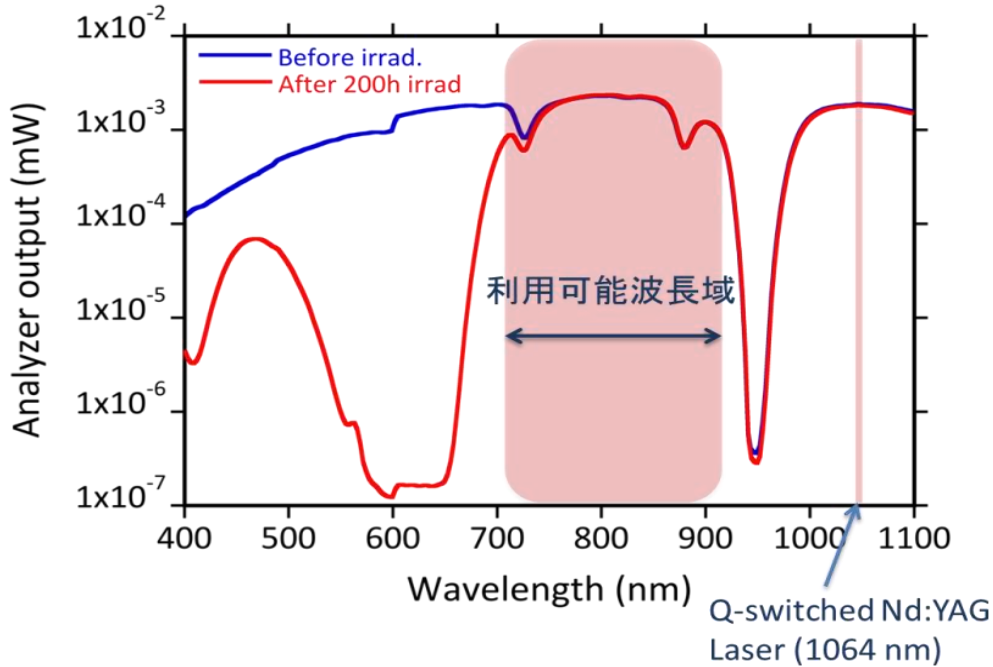
LIBS発光スペクトルからのU/Zr検量線

※組成比に対する発光強度比の相関は比較的良い(LIBS:発光強度は状況により変化)

1. レーザー遠隔分析の概念
 - ・レーザー遠隔分析技術
 - ・光ファイバー利用LIBS
2. 可搬型ファイバーLIBSの複雑系模擬デブリへの適用
 - ・標準試料による検量線取得
 - ・多成分複雑系試料での分析特性
3. システムの耐放射線、放射線環境下分析特性
 - ・耐放射線性光ファイバー
 - ・照射環境でのLIBS分析特性
4. まとめと課題

可視域に透過特性のある耐放射線性光ファイバーがあると、**発光線の選択肢**が広がる

従来の耐放射線性光ファイバー
石英コアにOH基をドーブ



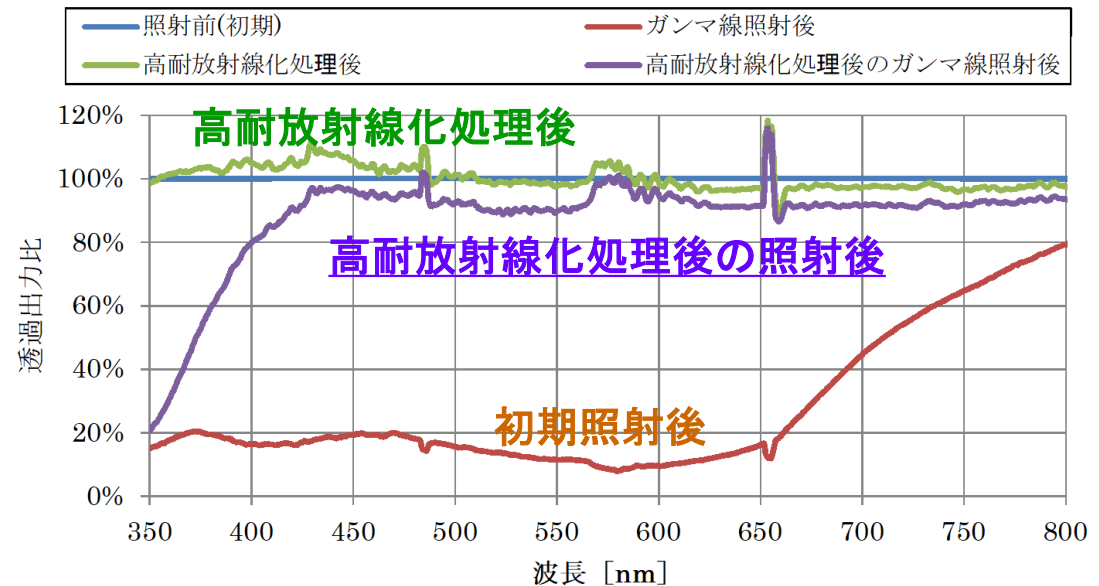
積算線量～1MGy照射後の透過特性

利用可能波長域 : 近赤外領域: 700～900nm

新規耐放射線性光ファイバー

- ・石英コアにフッ素(またはOH)をドーブ
- ・MGyのγ線照射により損傷、透過率減衰
- ・高耐放射線化処理による性能回復

高耐放射線化処理後のガンマ線照射後の伝送特性(紫外～近赤外)

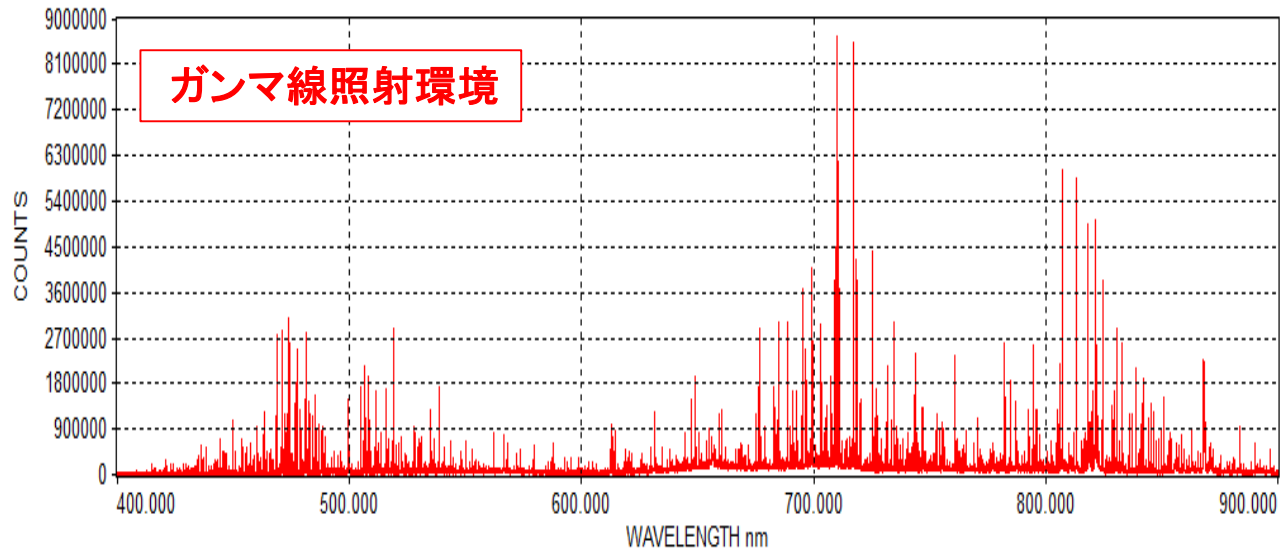
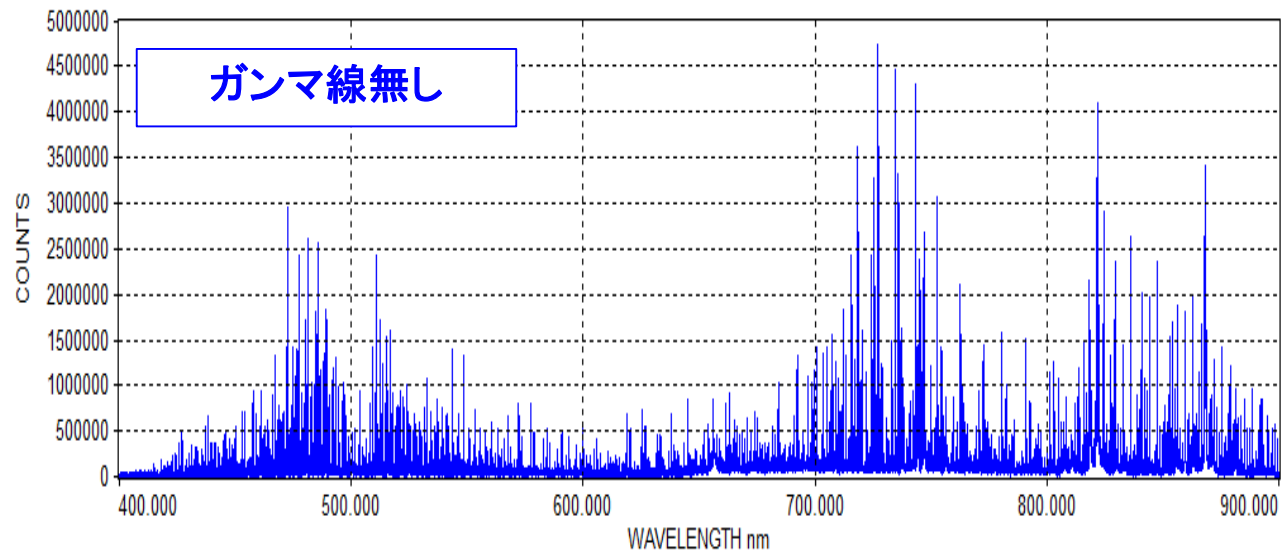


積算線量～1MGy照射後 90%透過領域:>450nm
950nmの水の吸収も見られない

※本試験後に**国内の試験生産廃止**。同等性能とされる外国製品の性能評価中。

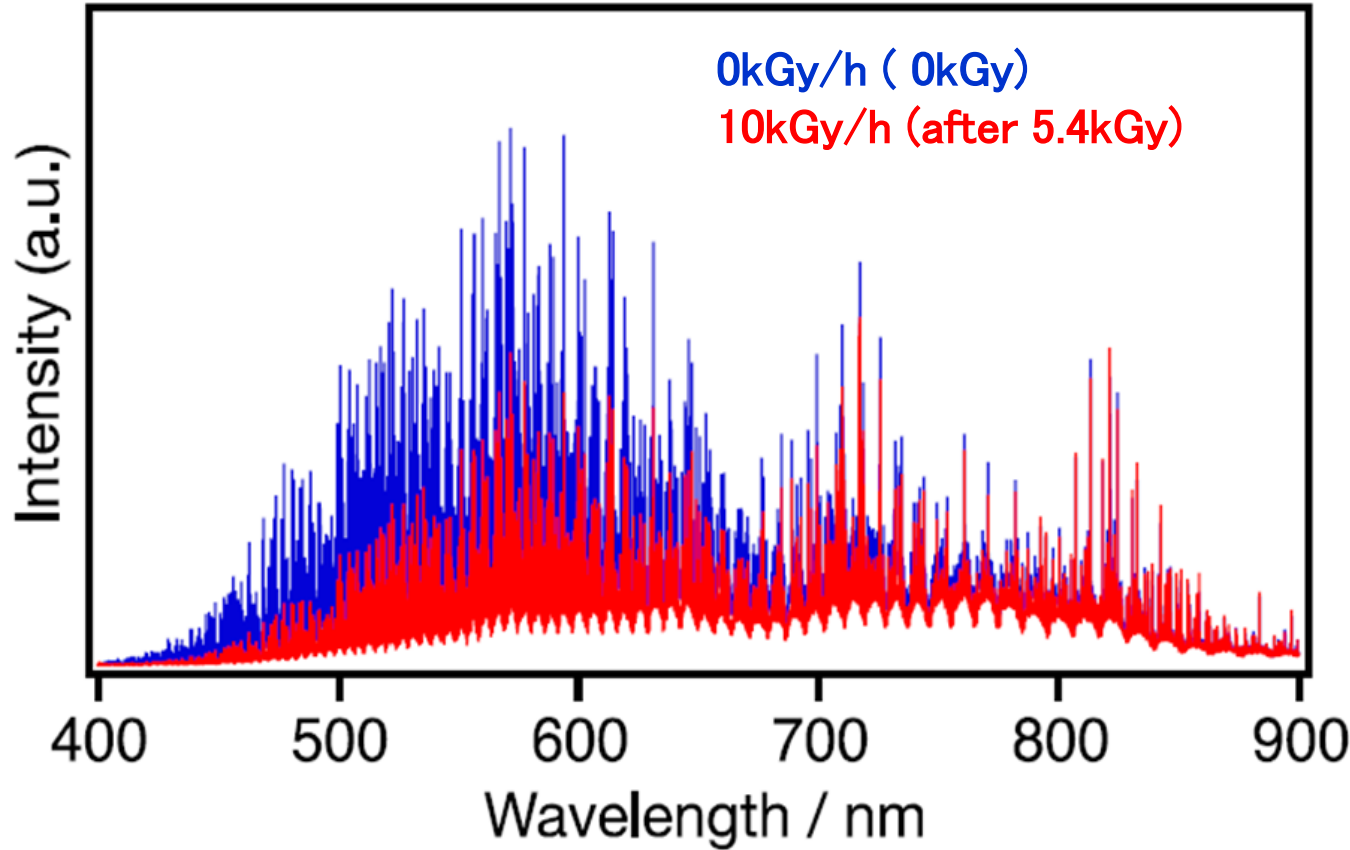
【金属試料での発光特性】

60Co 照射条件: 12.1kGy/h

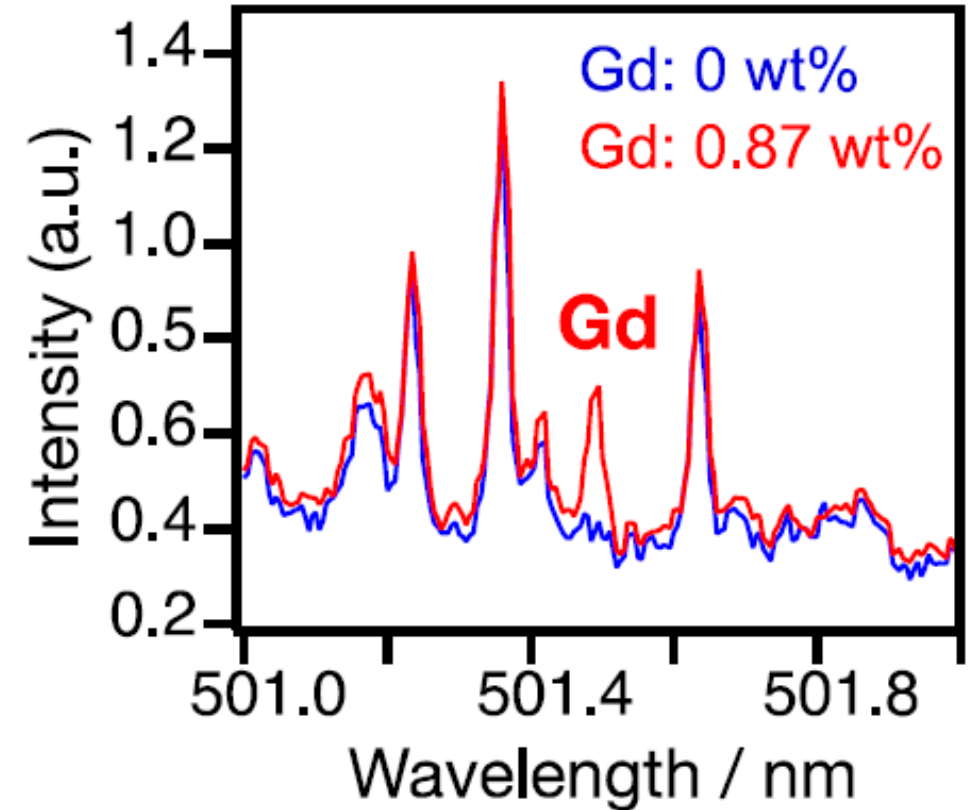


強い放射線環境下でもスペクトルの出現特性はほぼ変わらない

【酸化物試料での発光特性】



Ce酸化物(U代替え物質)焼結試料のスペクトル例*)



Ce酸化物中のGdの発光スペクトル*)
(放射線環境無し)

可視域で光ファイバの透過率減衰による影響がみられるが、**近赤外域では変化は見られない。**

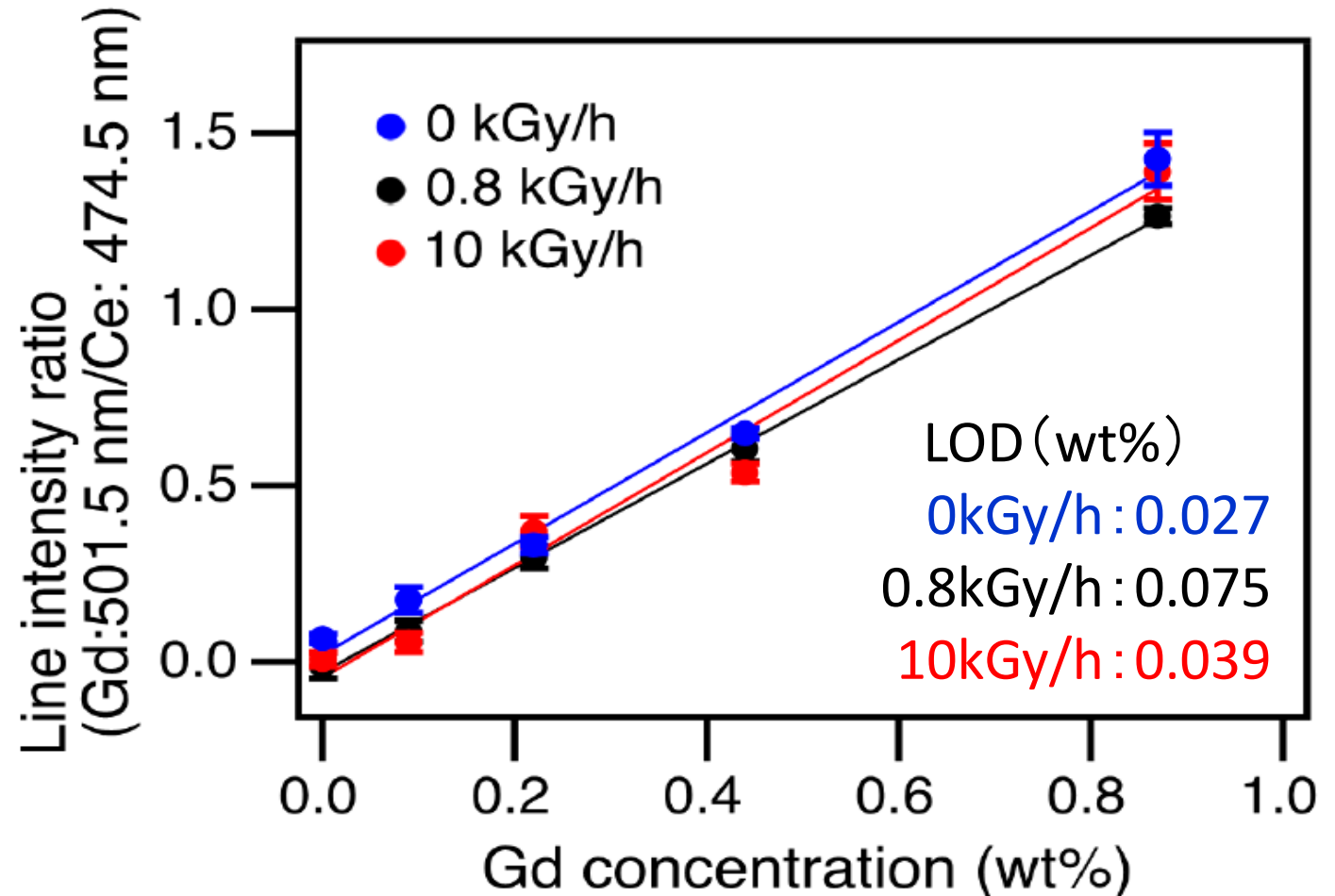
*) Ryuzo Nakanishi, Morihisa Saeki, Ikuo Wakaida, Hironori Ohba, Detection of Gadolinium in Surrogate Nuclear Fuel Debris Using Fiber-Optic Laser-Induced Breakdown Spectroscopy under Gamma Irradiation, Appl. Sci. 2020, 10, 8985

線量率の異なる環境における感度特性 (Ce酸化物中のGd酸化物の濃度依存性)*)

〔ガンマ線照射環境の
詳細影響評価〕



線量率の検量線に
及ぼす影響を評価



高線量率環境下でも分光分析、簡易定性分析特性が変わらないことを実証

*) Ryuzo Nakanishi , Morihisa Saeki, Ikuo Wakaida, Hironori Ohba, Detection of Gadolinium in Surrogate Nuclear Fuel Debris Using Fiber-Optic Laser-Induced Breakdown Spectroscopy under Gamma Irradiation, Appl. Sci. 2020, 10, 8985

炉内遠隔分析技術

- ・光ファイバー利用遠隔LIBS手法は、
 - ・**定性分析可能な遠隔分析法**として基礎的性能を有する。
 - ・**10kGy/h、数MGy程度**の照射環境下でも分析特性が劣化しない。

【課題と今後】

○課題: LIBS装置のシステム供給の確立、照射燃料等を利用した**実績の確保**、プローブ搬送技術との組み合わせ

◎今後: 炉内デブリスクリーニング技術として、**使用済み燃料等によるセル内遠隔試験やシステム供給を可能とする**開発計画を策定。

ロボット専門家とのコラボによるプローブ搬送技術の確保

ご清聴ありがとうございました。

本報告には、以下の成果の一部が含まれます。

- 文部科学省原子力システム研究開発事業「低除染TRU燃料の非破壊・遠隔分析技術開発」及び同事業「次世代燃料の遠隔分析技術開発とMOX燃料による実証的研究」
- 文部科学省英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 原子力基礎基盤戦略研究プログラム 廃炉加速化研究プログラム(国内研究)「先進的光計測技術を駆使した炉内デブリ組成遠隔その場分析法の高度化研究」

