

格納容器／圧力容器 内部観察技術の開発

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門
福島廃止措置技術開発センター 基盤技術開発Gr

伊藤 主税

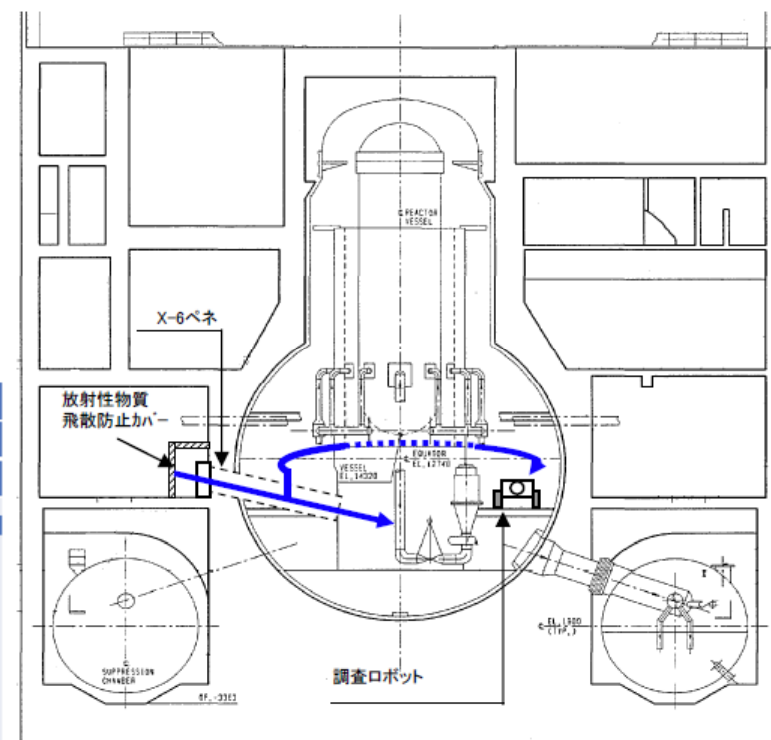
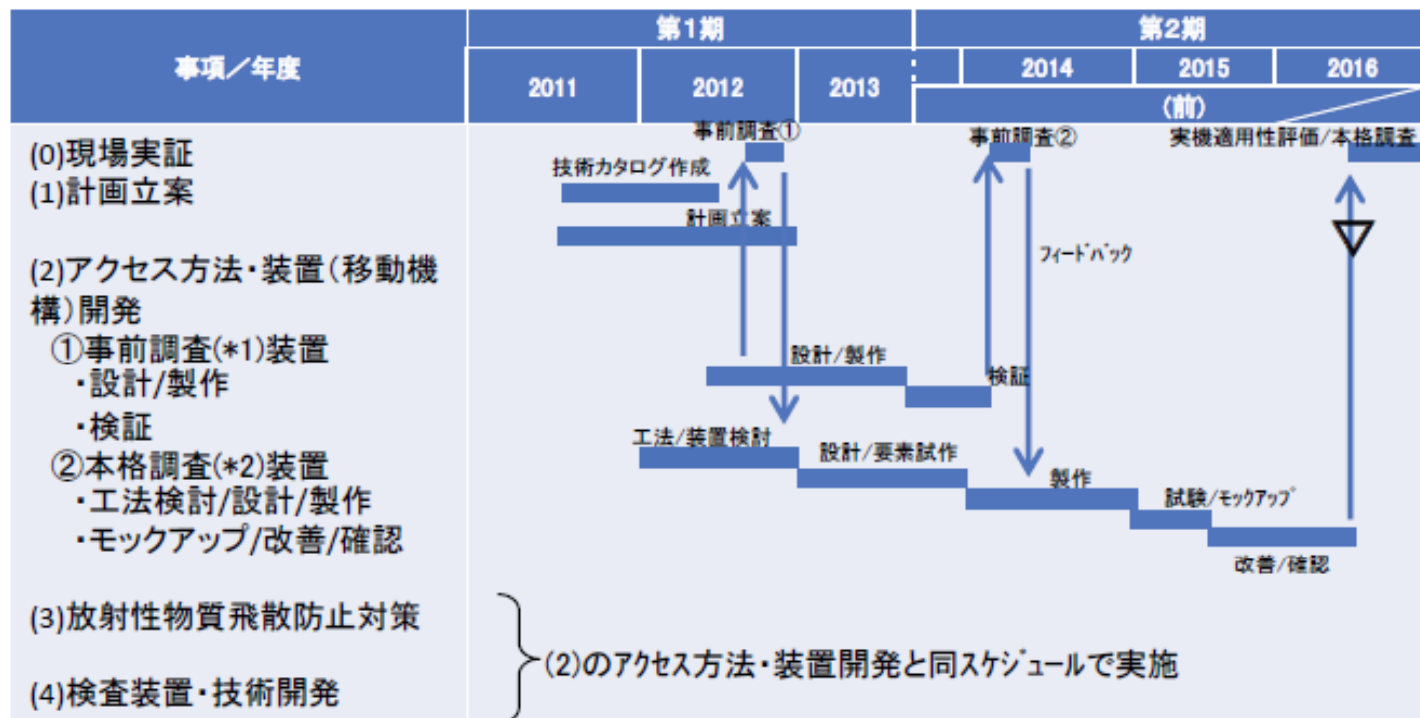
報告内容

1. 格納容器/圧力容器内部調査技術の開発の国プロ工程
2. 原子力機構が実施してきた技術開発
 - (1) 炉内レーザーモニタリング・内部観察技術
 - 観察技術
 - 元素分析技術
 - 放射線計測技術
 - (2) 宇宙線ミュオンを用いた非破壊検査技術
 - (3) 自己出力型ガンマ線検出器
3. まとめ

格納容器内部調査技術の開発計画

目的 燃料デブリの取出しに向けた原子炉格納容器内のデブリの位置及び状況の調査、ペDESTAL等の状況確認等

目標 原子炉格納容器内部の調査方法の確定(2016年)



*1) 事前調査: 本格調査のためのPCV内事前調査
*2) 本格調査: 燃料デブリの位置の把握

出典: 東京電力(株)福島第一原子力発電所1～4号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ、原子力災害対策本部
東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議、平成25年6月27日
http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/130627/130627_01d.pdf

圧力容器内部調査技術の開発計画

目的 燃料デブリの取出しに先立つ原子炉圧力容器内の状況把握

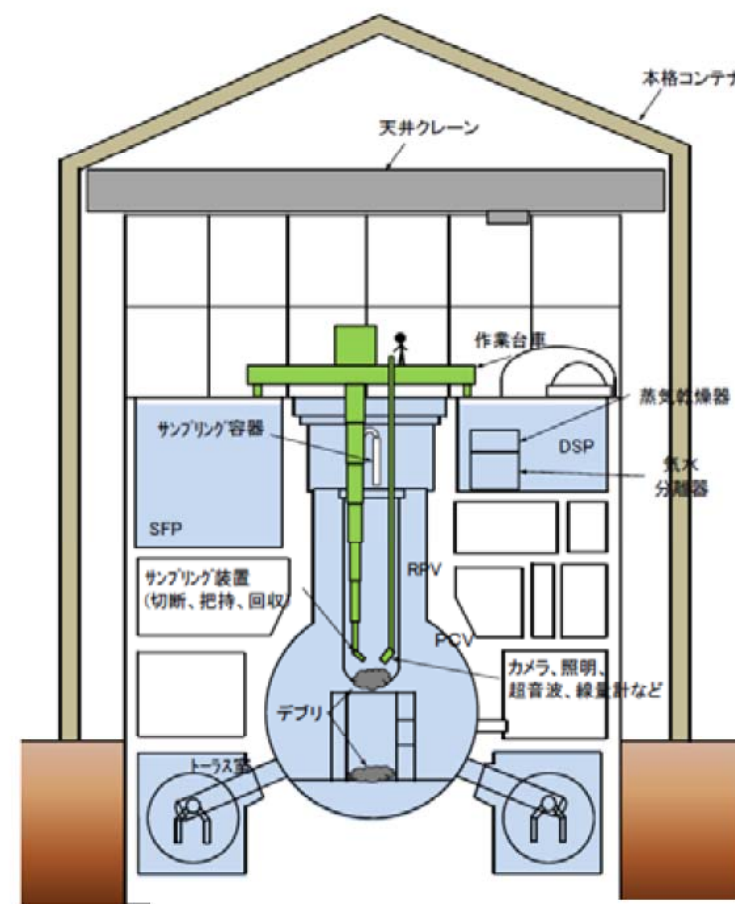
目標 原子炉圧力容器内部の調査方法の確定(2018年)

目標工程

事項／年度	第1期			第2期					
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
				(前)			(中)		
1. 計画立案									
2. アクセス技術の開発									
3. 調査技術の開発									
4. サンプルング技術の開発									
5. 実機適用性評価試験								▽1	▽2

▽1 (2018下): 原子炉圧力容器内部調査方法の確定

▽2 (2019下): 原子炉圧力容器内部調査の開始

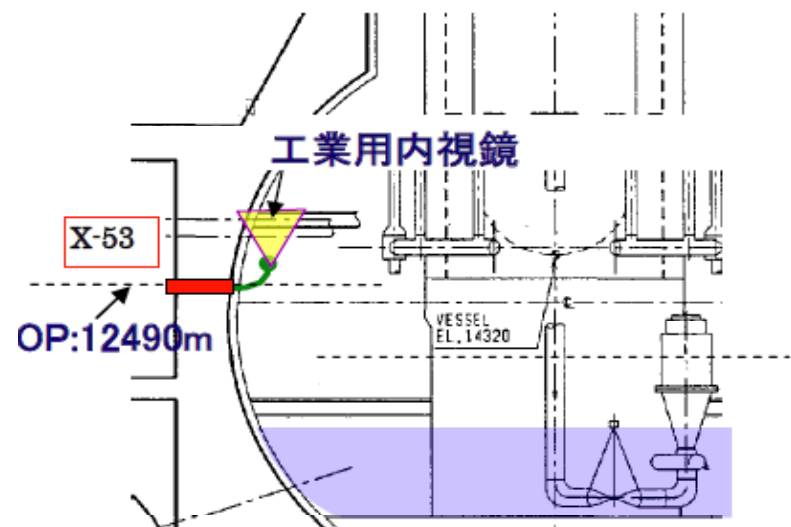


RPV内部調査概念図

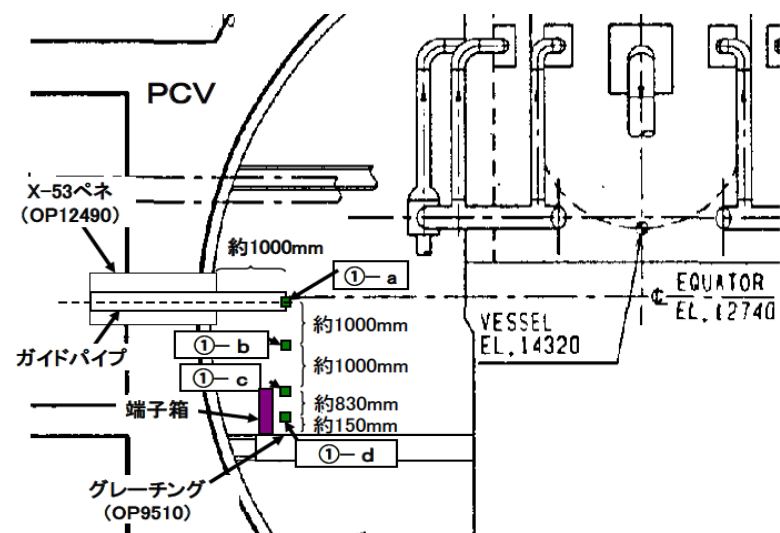
出典: 東京電力(株)福島第一原子力発電所1～4号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ、原子力災害対策本部
東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議、平成25年6月27日

http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/130627/130627_01d.pdf

1F2号機の格納容器内部調査(予備調査)結果



配管と思われる構造物



線量測定結果

①-a	39.0 Sv/h
①-b	54.1 Sv/h
①-c	57.4 Sv/h
①-d	72.9 Sv/h



<主な仕様>

挿入部の外径	Φ8.5mm
挿入部の有効長	10m (PCV内挿入長: 約2m)
挿入部の使用温度範囲	~100℃ (空気中)、~30℃ (水中)
耐放射線性	1000Gy

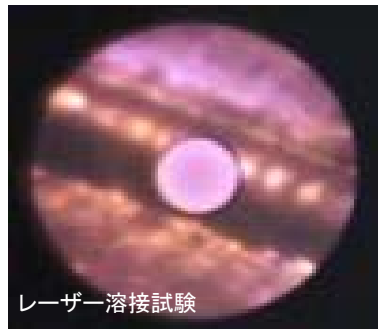


(1) 炉内レーザーモニタリング・内部観察技術の開発

複合型光ファイバスコープ

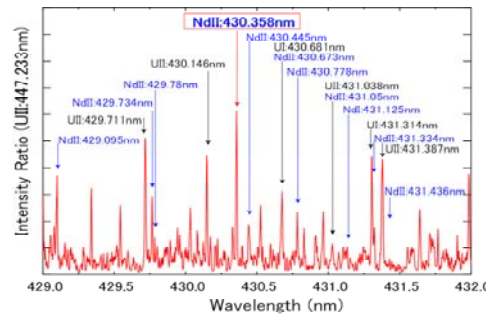
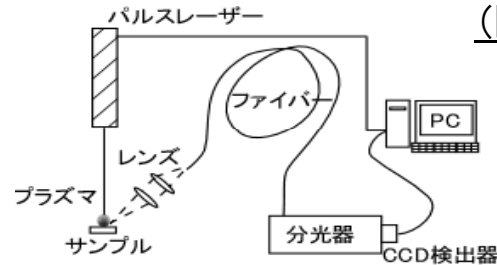


照明光機能付



レーザー溶接試験

レーザー誘起ブレイクダウン分光 (LIBS)

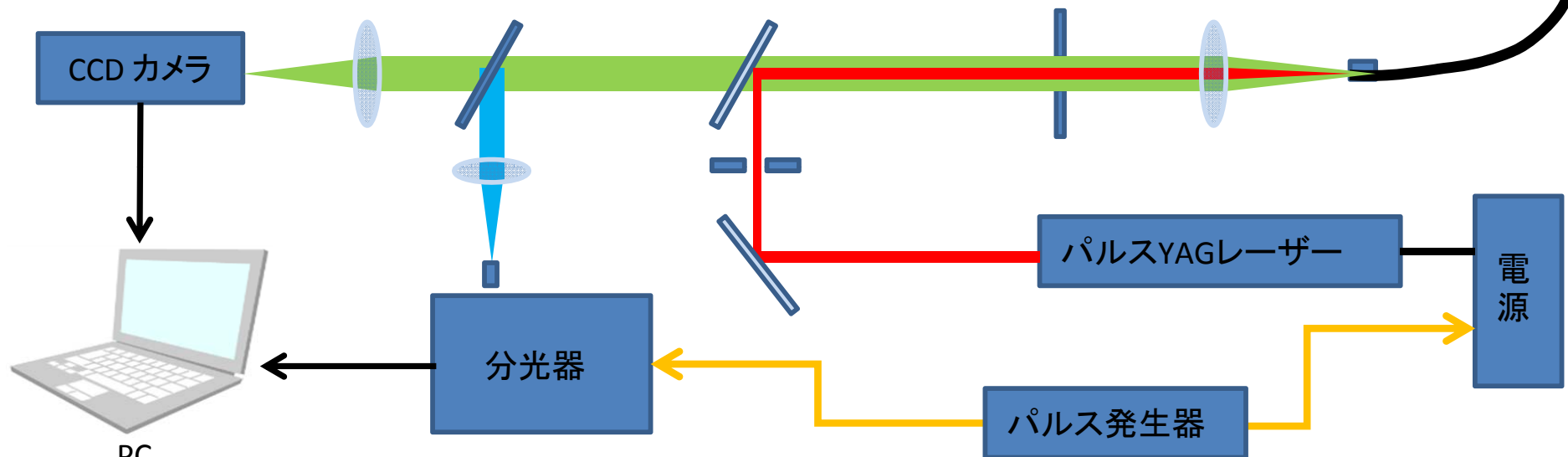
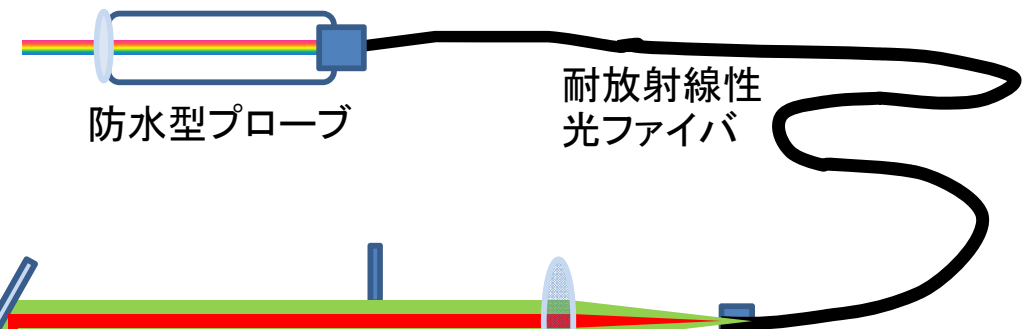


ウラン混合酸化物試料の分光データ例

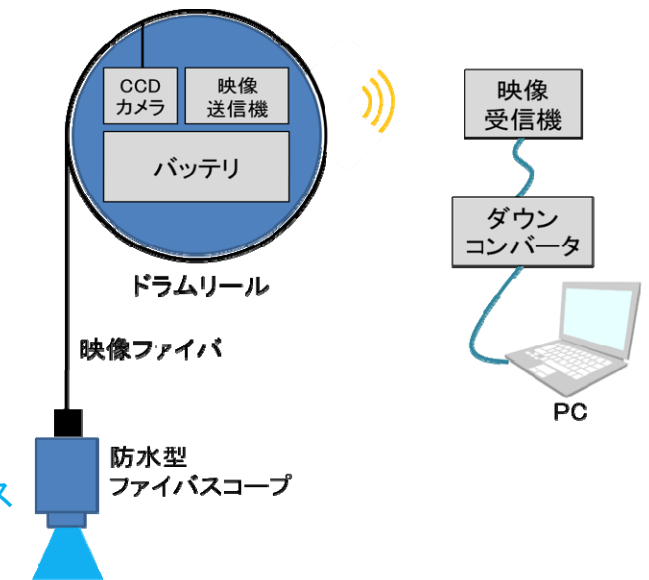
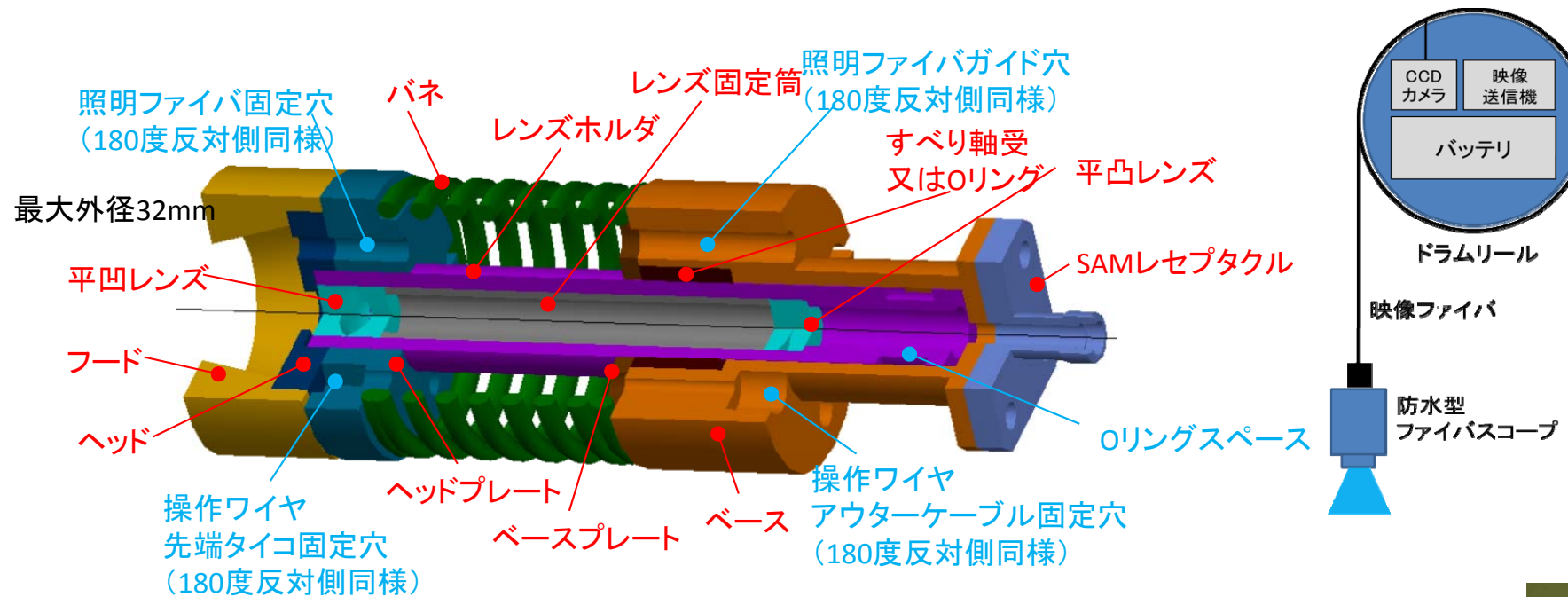
文部科学省原子カシステム研究開発事業「次世代燃料の遠隔開発とMOX燃料による実証的研究」より

目標

- ・システム共通
遠隔(ファイバ長15m以上)、耐水性、耐放射線性(10^4Gy/h で1日以上、 $\sim 10^6\text{Gy}$)
- ・防水スコープによる観察
(空間分解能1mm: イメージファイバ3万画素目標)
- ・LIBS分光による水中での元素分析
(核燃料物質、Fe, Zr等の識別)
- ・放射線計測機能($10^0\text{Gy/h} \sim 10^4\text{Gy/h}$)

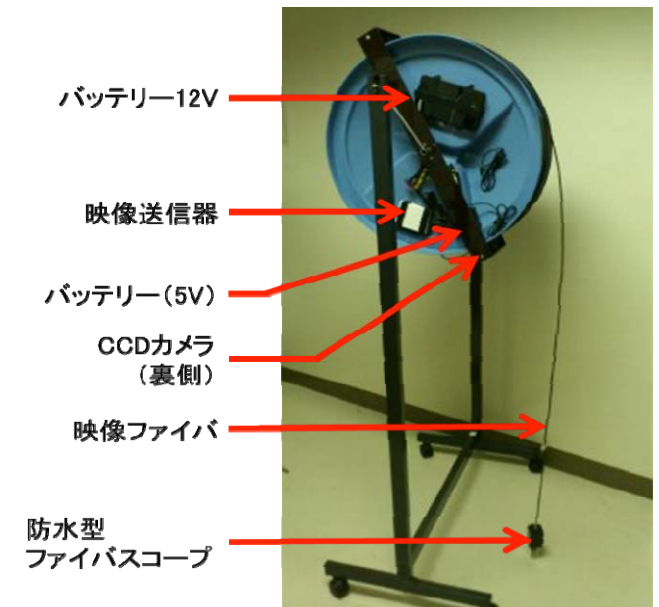


(1) 炉内レーザーモニタリング・内部観察技術の開発 焦点距離調整防水スコープと無線結合による画像伝送



仮組み立て中の試作機

- ・10mmから無限遠まで観察可能な防水広角スコープ及び映像伝送システムを開発・試作
- ・耐放射線性イメージファイバを組み込み、観察実験により観察性能を実証



(1) 炉内レーザーモニタリング・内部観察技術の開発 冠水燃料模擬デブリの観察

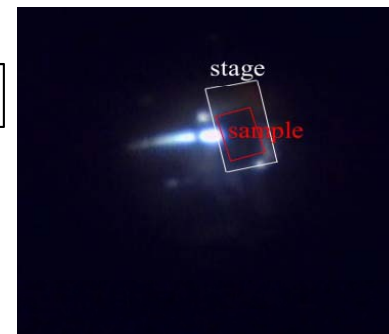
模擬デブリ接近の様子



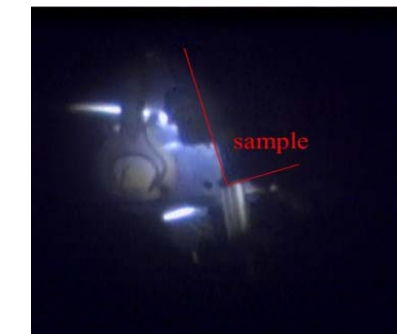
水槽上から



2m



1m



0.5m



10mm

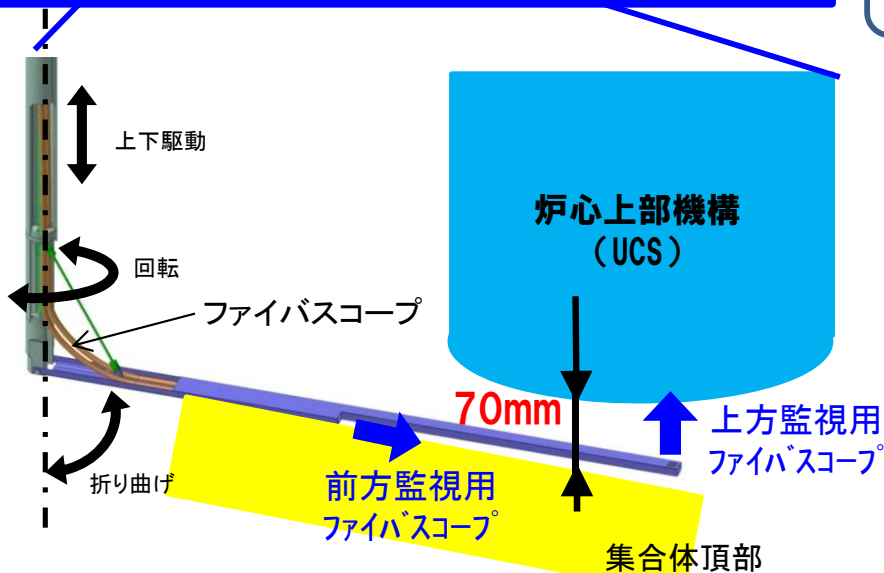
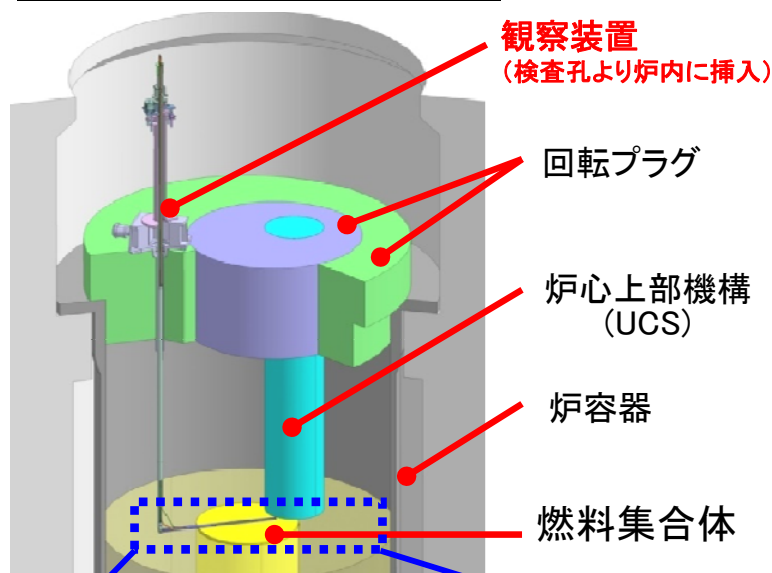


10mm
圧空による排水

高速実験炉「常陽」における原子炉容器内観察実績

炉心上部機構下面(狹隘部)等の観察

炉心上部機構下面観察装置

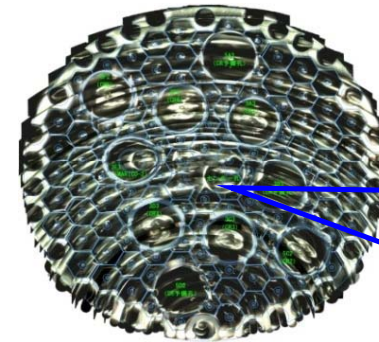


観察装置先端部の構造

UCS下面の観察画像

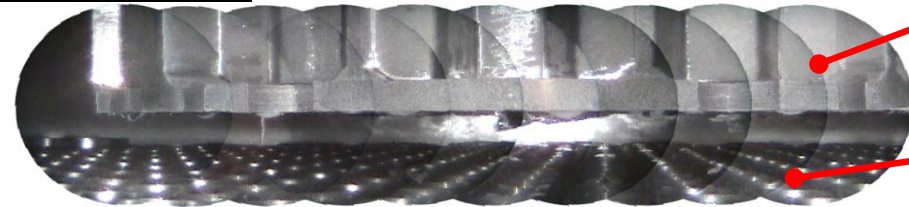
画像を合成し、UCS下面の全体状況を把握
(右図は35,000枚の画像を合成)

ガンマ線量率
～ 300 Gy/h



撮影画像例

UCS側面の観察画像



UCS下端側面

集合体頂部

炉容器内観察画像(例)

・「常陽」における原子炉容器内観察・測定技術

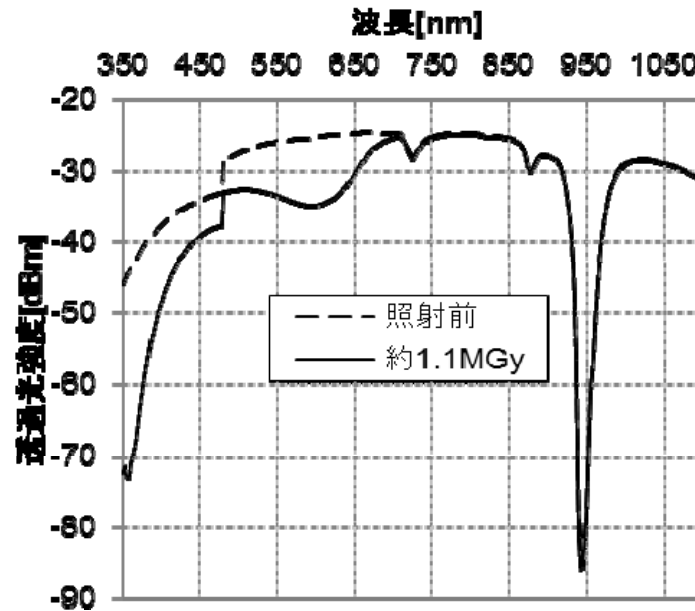
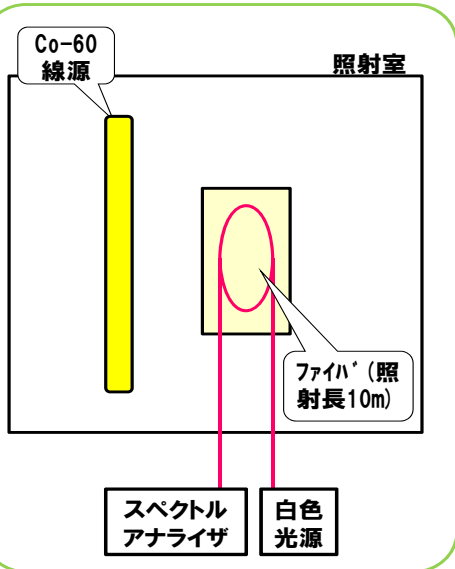
密閉性の確保(装置の装脱荷、観察・測定時)
限定された原子炉容器内へのアクセスルート
高温・高耐放射線環境下で使用可能な装置
装置の遠隔操作

・画像拡張処理技術と組合わせた全体状況の把握

- ⇒ 今後、「常陽」の燃料交換機能の復旧作業を通じて観察技術を検証・確立
- ⇒ 1F廃止措置作業へ反映

(1) 炉内レーザーモニタリング・内部観察技術の開発 光ファイバの耐放射線性向上

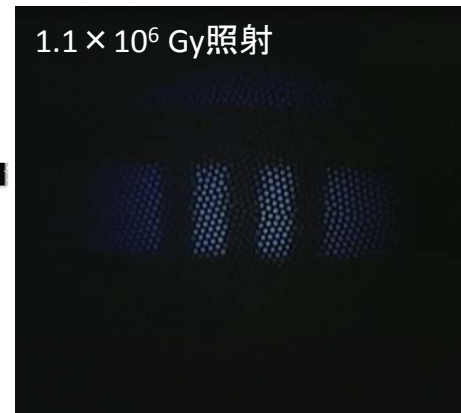
OH基を1000ppm含有させて耐放射線性を向上させたイメージファイバ10mを100万Gyまでガンマ線照射し、伝送性能を確認



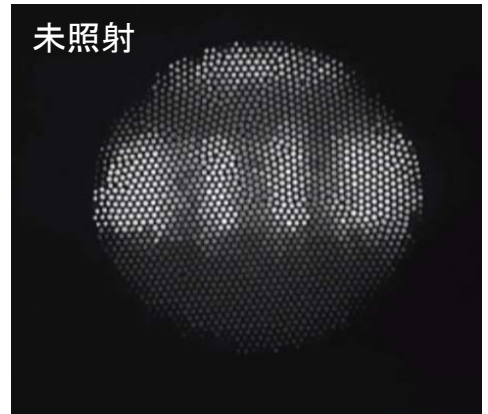
可視光画像



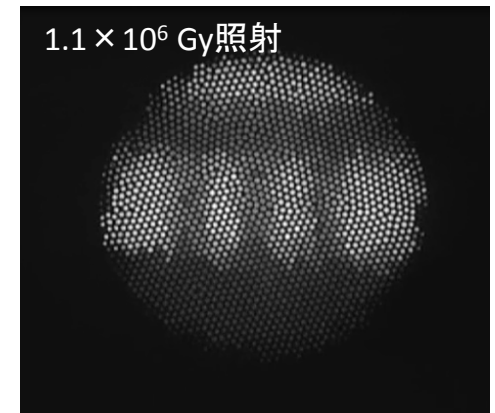
1.1 × 10⁶ Gy照射



赤外線画像



1.1 × 10⁶ Gy照射



イメージファイバの照射体系
(高崎研・⁶⁰Co照射室)

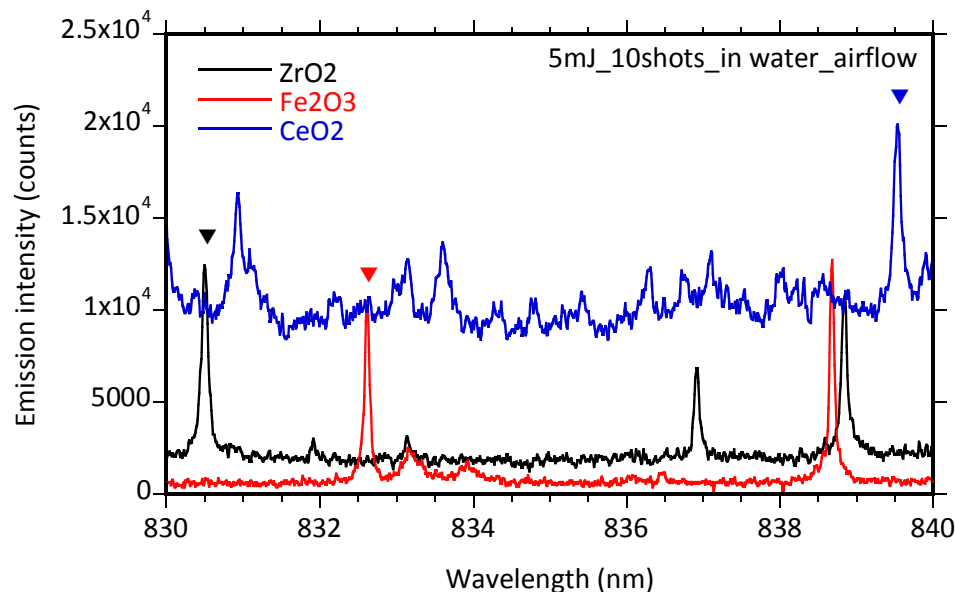
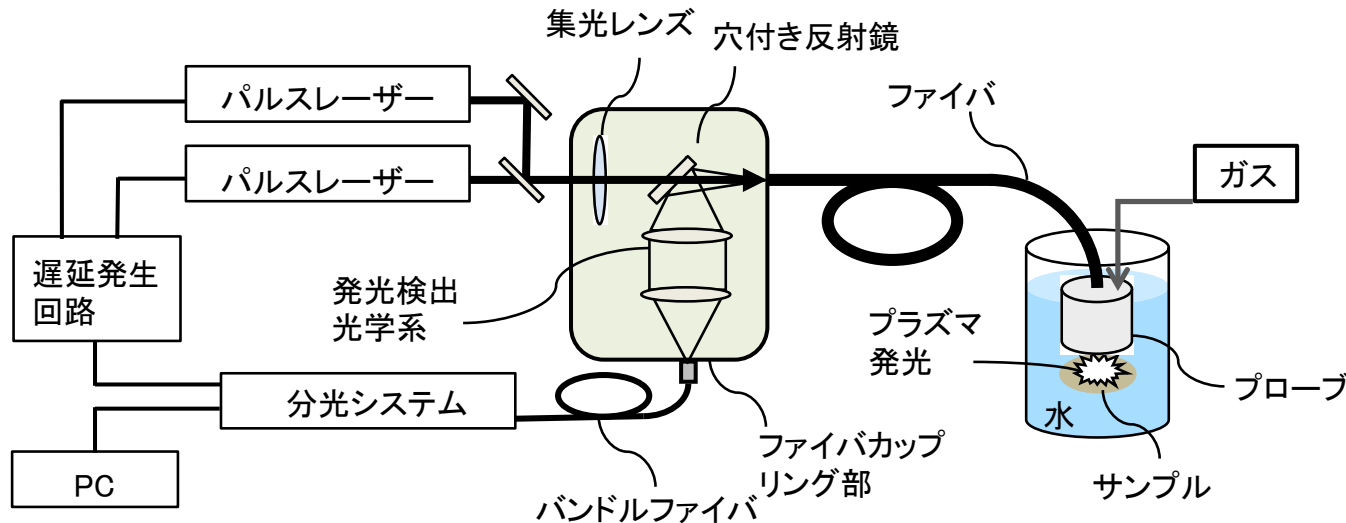
CCD増感



クラッド領域を広げ、隣接するコアへの光漏れを抑制することにより、赤外線映像をより鮮明に改善

(1) 炉内レーザーモニタリング・内部観察技術の開発 放射線環境下での水中LIBS分光技術の開発

水中遠隔LIBS(レーザー誘起ブレイクダウン分光)による元素分析法



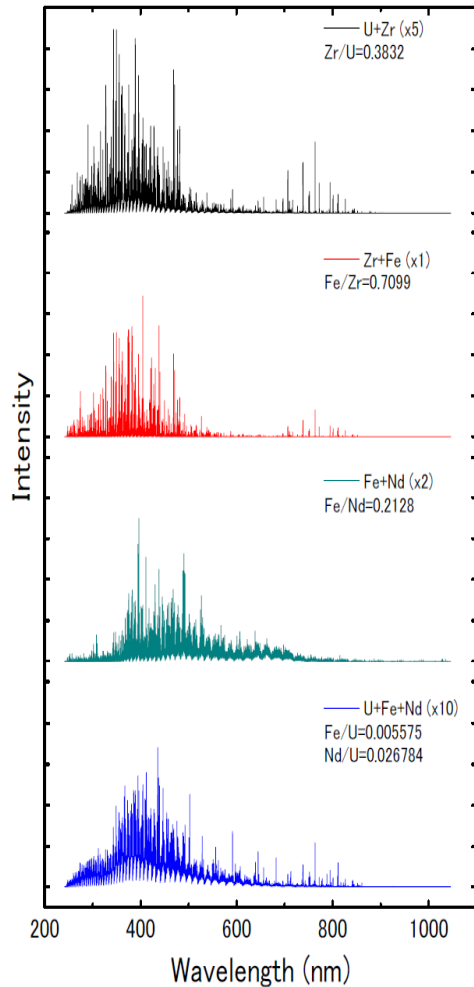
- 可搬型の遠隔・水中LIBS装置を開発し、U/Zrの分別観測が可能なことを確認。
- 1.6 MGyまで照射した光ファイバにより、赤外線を用いてLIBS分光が可能なことを確認。
- 模擬デブリの赤外線領域でのLIBS分析により、U, Zrの発光ピークを測定。

γ線照射済光ファイバを用いた水中LIBS分光予備実験により、水中で候補スペクトルピークが観測できることを確認

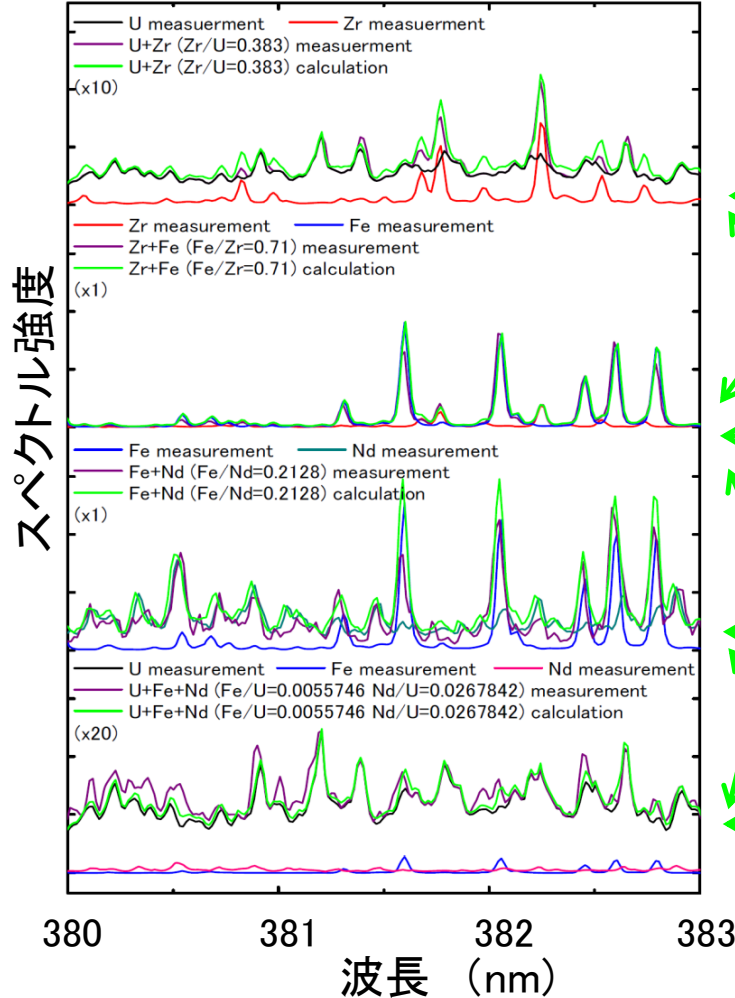
(1) 炉内レーザーモニタリング・内部観察技術の開発 LIBS分光スペクトルによる元素識別技術の開発

既知の単体の分光データから、混合物の発光スペクトルを評価

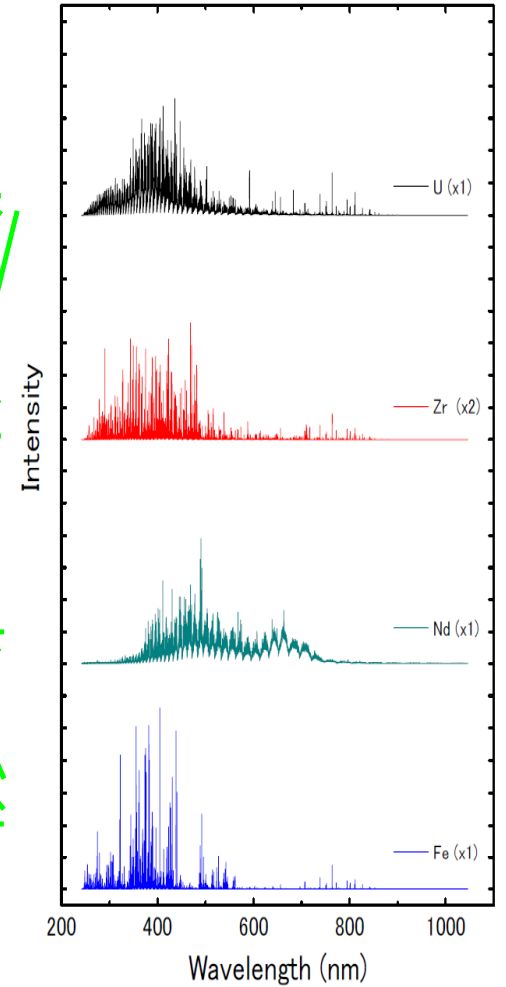
混合酸化物からのスペクトル



混合酸化物のスペクトル評価と測定値の比較

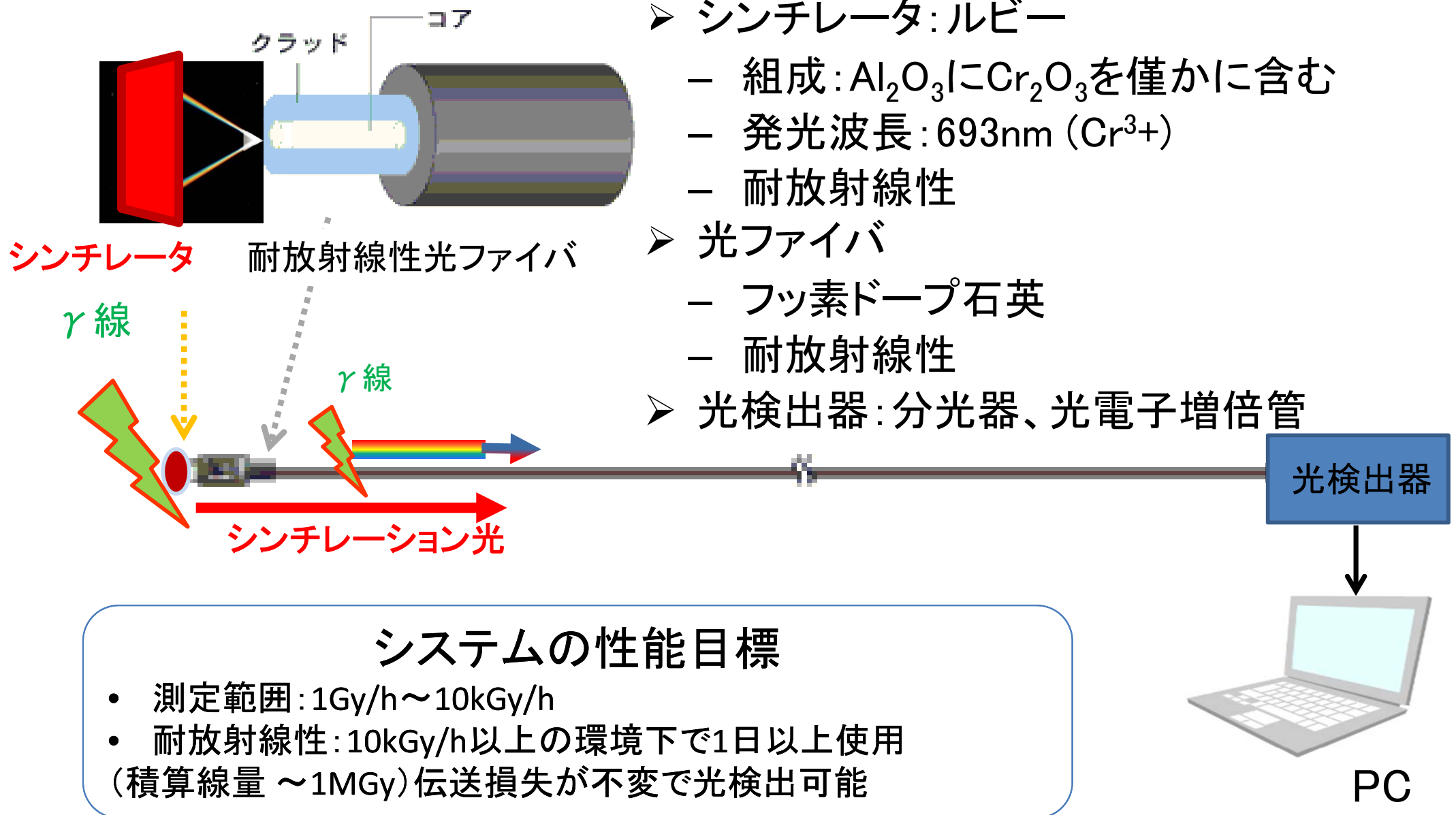


単体酸化物からのスペクトル

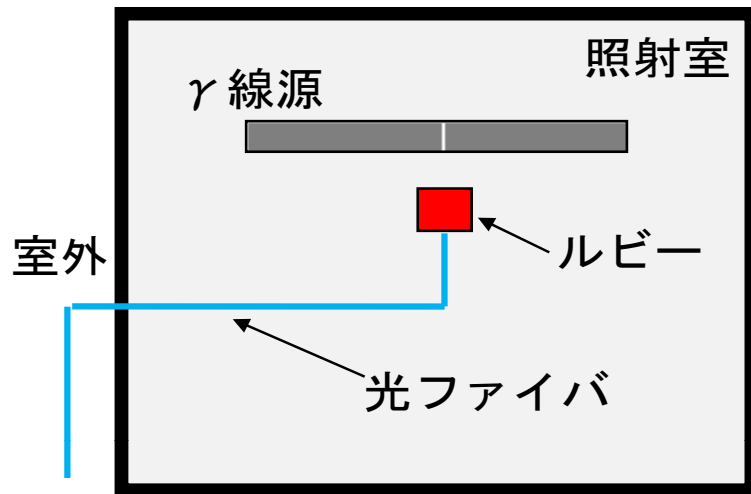


単体のスペクトルを加算して評価したスペクトルは実測値と比較的良く一致
今後は、Puを含む核燃料物質や主要構造物質の識別性を評価

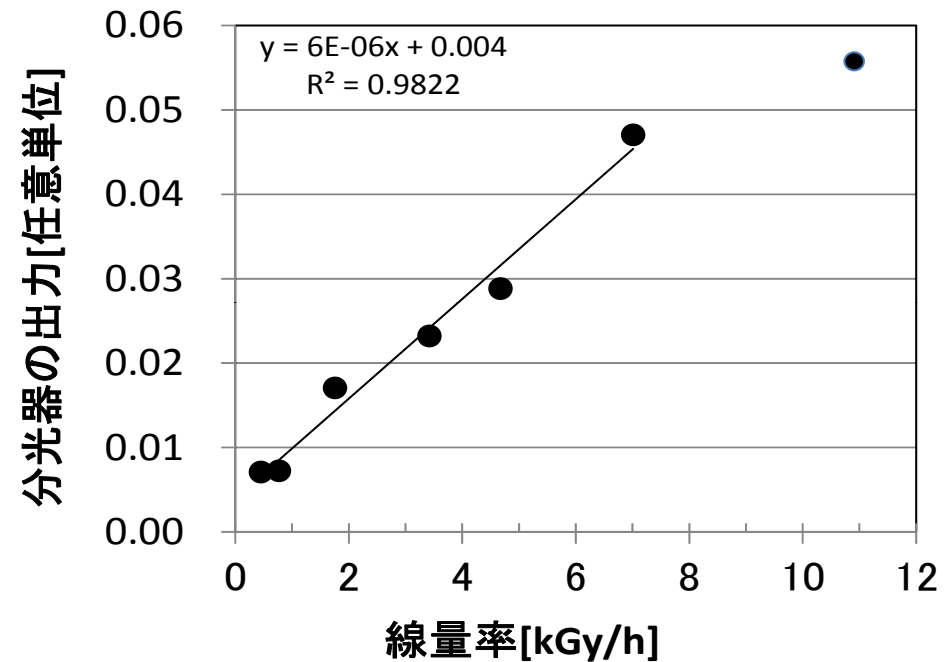
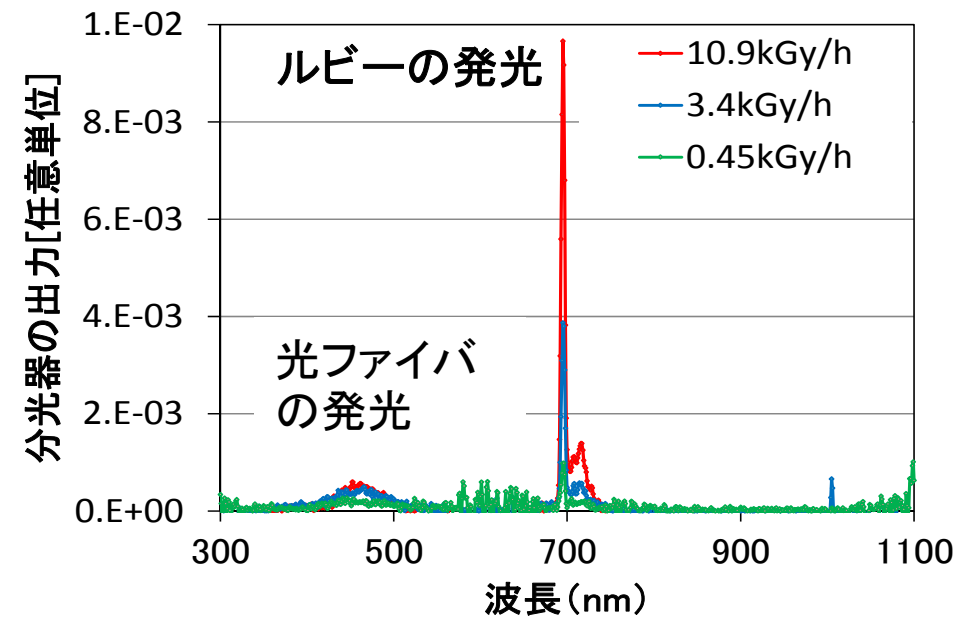
(1) 炉内レーザーモニタリング・内部観察技術の開発 放射線計測機能の追加



(1) 炉内レーザーモニタリング・内部観察技術の開発 ルビーシンチレータ及び光ファイバによる放射線計測試験



(JAEA高崎研・ ^{60}Co 照射室)



(1) 炉内レーザーモニタリング・内部観察技術の開発 プロトタイプ試作と実用化への課題

1. プロトタイプ製作

各技術のプロトタイプ製作、
性能実証

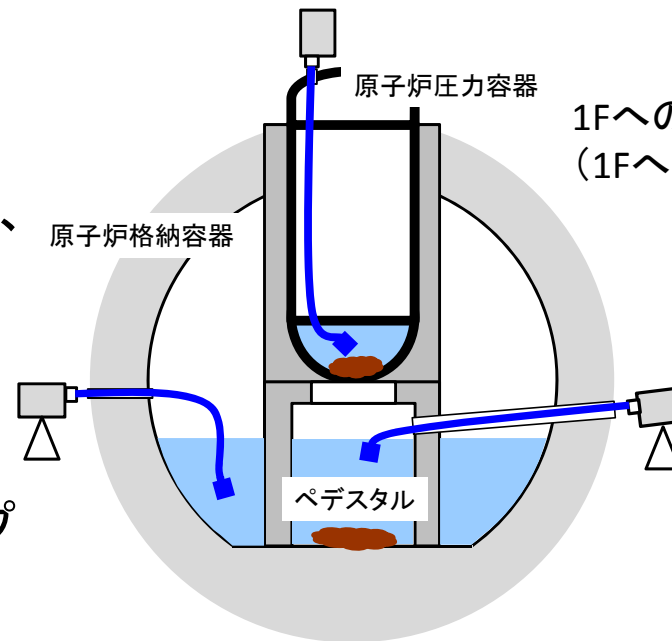
- ・ 観察プロトタイプ
- ・ 元素分析プロトタイプ
- ・ 放射線計測プロトタイプ

⇒ 国プロへ提案

2. 赤外線領域のU/Pu分光スペクトルデータ採取

- ・ 長波長帯用高分解能分光器を導入
- ・ U, Puの存在比を変えて
分光スペクトル測定
- ・ U, Pu識別方法を整備

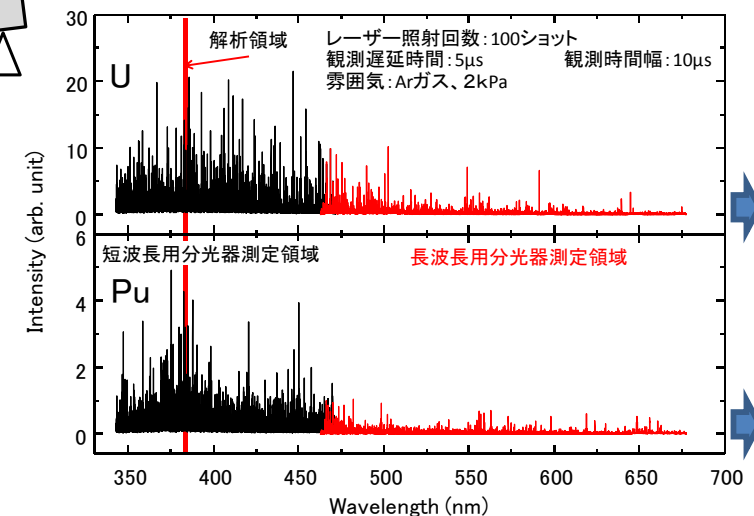
⇒ 今後、多元系での識別方法構築へ



1Fへの適用イメージ

(1Fへ試験的に適用可能なプロトタイプを製作)

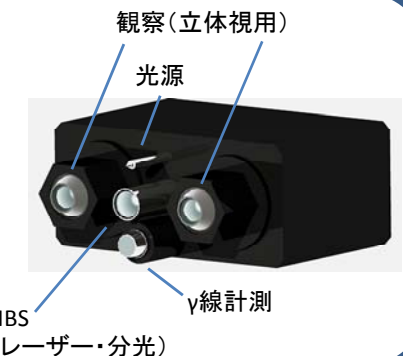
分光スペクトルデータ



近赤外線領域へ拡充

複合化システムの開発・実用化

プロトタイプ開発までの成果に基づ
く国プロへの採用により、ニーズに
合致させた複合化R&Dを実施



複合型プローブのイメージ

(2) 宇宙線ミュオンを用いた非破壊検査技術の開発

宇宙線ミュオンを利用して、原子炉建屋外から燃料デブリの位置、状況を把握する革新的な非破壊検査技術

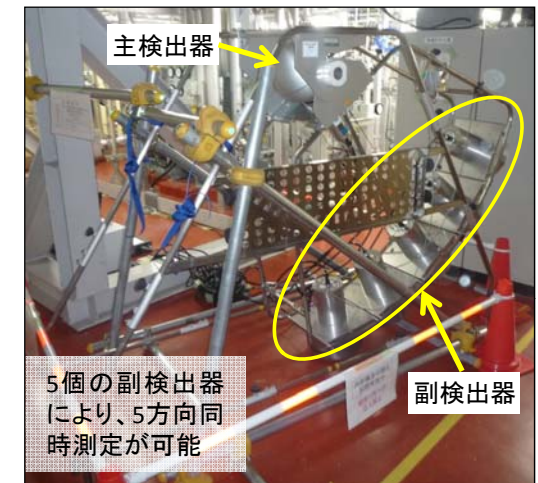
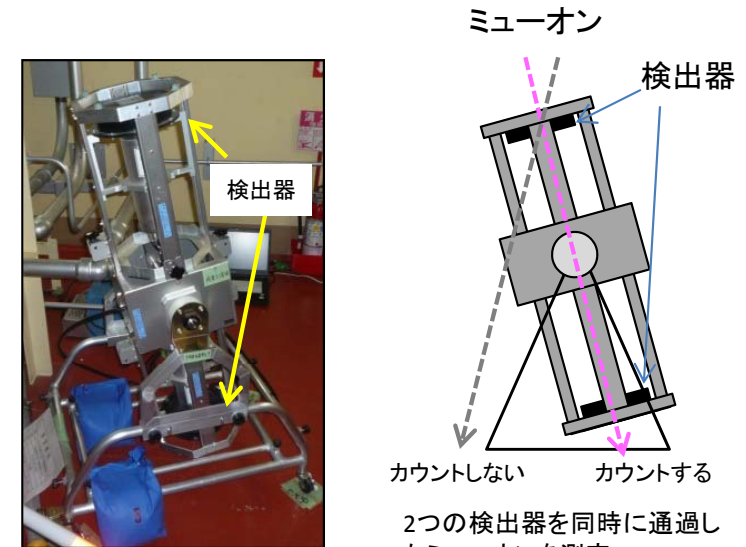
- 高温工学試験研究炉HTTRに既存のマルチ受光システムを設置して、内部構造の可視化予備試験を実施。
- マルチ受光システムで得られるデータの解析モデルを作成し、可視化予備試験結果を解析し、本非破壊検査手法の適用性を評価



- 計測時間短縮策及び空間分解能向上策を策定。
- 今後の技術開発により压力容器内部の非破壊検査に適用可能な技術が達成できるかどうかを検証。



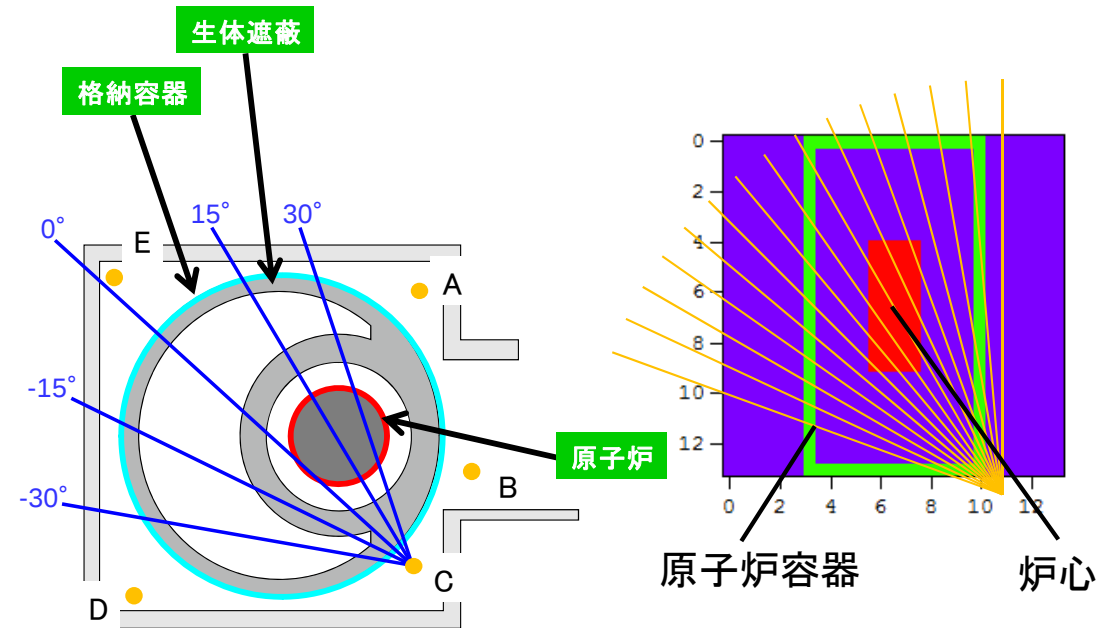
- 計測時間の短縮化(3ヶ月程度→1週間程度まで短縮)
- 分解能の向上(1m単位→20cm単位へ)の技術開発を行い、3次元・マルチ受光システム技術を確立する。
- 現地にて活用できるオンライン・モニタリングシステムを完成させる。



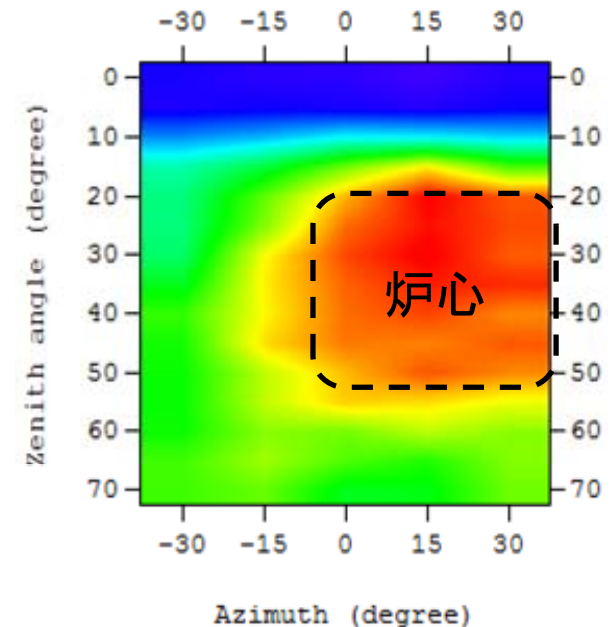
ミュオンラジオグラフィ用受光システム
(上:シングル、下:マルチ)

(2) 宇宙線ミュオンを用いた非破壊検査技術の開発 HTTR内部構造可視化試験

- 3台(シングル×2、マルチ×1)の装置をHTTR格納容器外周に設置し、HTTR(高温工学試験研究炉)内部構造の可視化予備試験を実施。
- HTTRの解析モデル(密度データ)を作成し、可視化シミュレーションを実施。



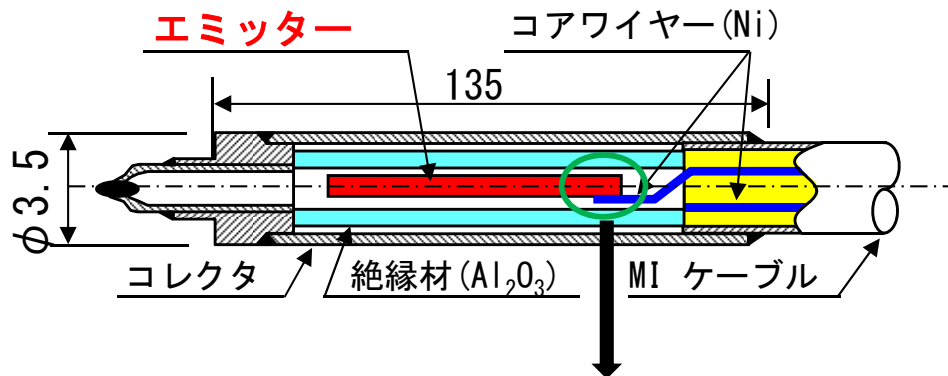
- HTTRの炉心部と遮蔽コンクリート等を判別できることを確認
- 測定時間を1週間へ短縮し、空間分解能を20～50cmへ向上させる高度化改良計画を立案



(3) 自己出力型ガンマ線検出器 (SPGD) の開発

【開発項目】

- (1) γ 線を検出するためのエミッタ材の選定
- (2) SPGDの製作性に関する検討
- (3) γ 線源等を用いた系統的な照射試験

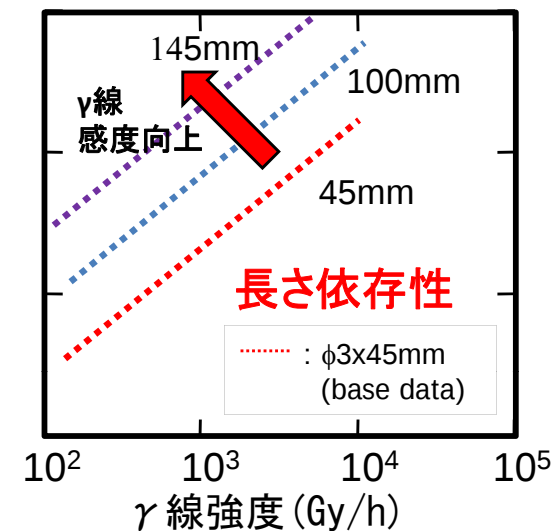
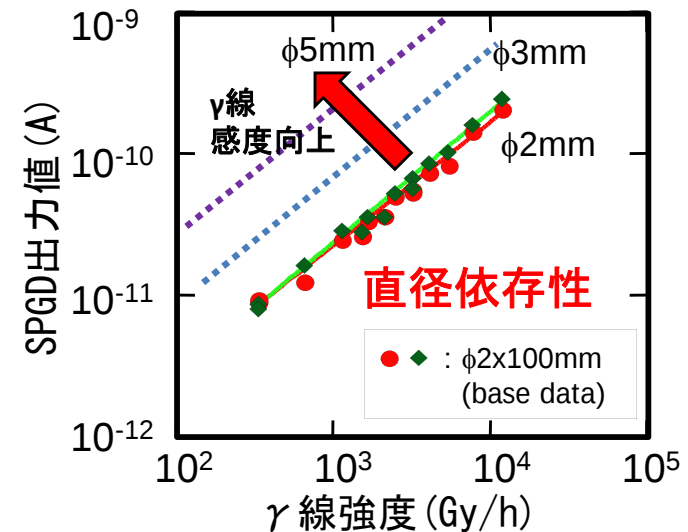


エミッタ材とMIケーブルの芯線であるNi
との接合技術開発

溶接部の健全性 : 良
絶縁抵抗 : $> 1 \times 10^9 \Omega$

【達成目標】

福島原発の要求 $\Rightarrow 10 \sim 10^2 \text{ Gy/h}$
(測定感度を1桁以上向上)

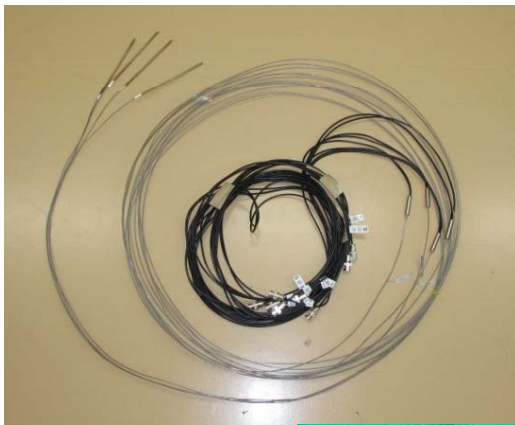


エミッタ形状及び装荷量の決定

(3) SPGDの開発

改良型SPGDの製作・校正試験

【SPGDの製作】

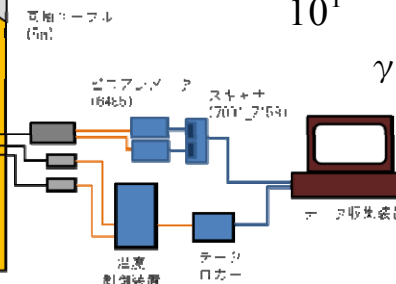
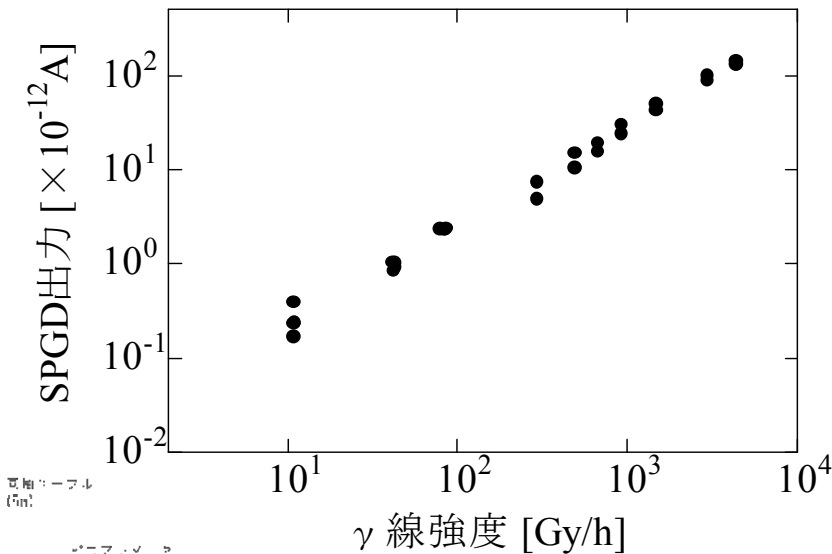
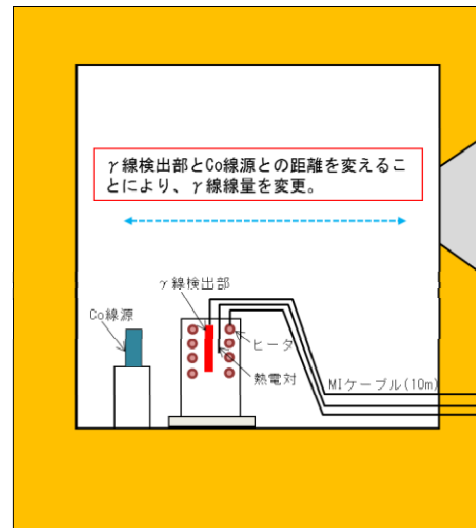


SPGDの
外観

検出器部分
($\phi 2 \times 100\text{mm}$)



【Co-60を用いた校正試験】



- エミッタ材の選定 (Pbを選定)、信号ケーブル (MIケーブル) と芯線の接合性最適化等を行い、長期間精度よく測定できるよう信頼性を向上。
- エミッタの長さ・直径等を変更して高感度化させ、測定範囲を従来の 10^2Gy/h 以上から 10Gy/h 以上 (上限は 10^6Gy/h) へ拡大。 10Gy/h 以上で良好な線形性を確認
- 1F炉内線量率計測への試用等を検討

まとめ

燃料デブリの取り出しに向けて、原子炉格納容器・圧力容器内の燃料デブリの位置等の状況調査に資するため、これまで機構が進めてきた基盤的な技術開発の成果を展開することによる研究開発を推進。

各技術とも、要素技術開発と1Fへの適用(可能)性の把握は概ね完了。各々の結果に応じて、今後、次のステップへ進む。

今後、国プロが実施する格納容器・圧力容器内部調査技術開発等において、本研究開発の成果に基づく提案を行い、技術の適用を目指す。