



# 福島第一原子力発電所の廃止措置に向けた 放射線計測技術の課題と東芝の取り組み

－ 第四回「放射線計測フォーラム福島」－

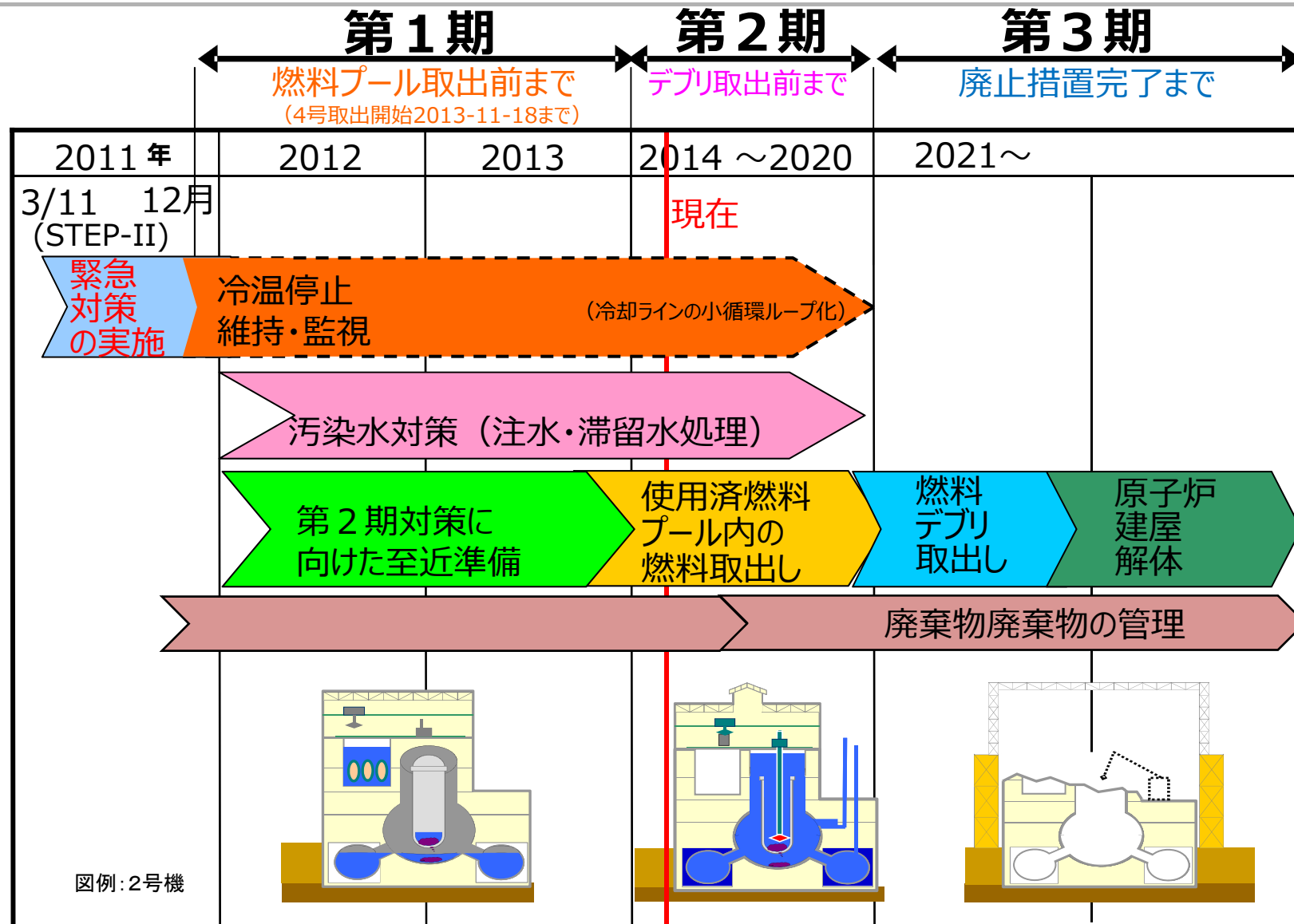
2015年07月14日  
株式会社東芝 原子力事業部  
原子力電気システム設計部  
電気システム設計第二担当  
泉 幹雄

# 内容

---

1. 福島第一原子力発電所の中長期ロードマップ
2. 緊急対策としての取り組み
3. 短期的な取り組み（汚染水対策）
4. 中期的な取り組み（除染・遮蔽・SFP取り出し）
5. 長期的な取り組み（燃料デブリ取り出し・廃棄物対策）
6. まとめ

# 1. 福島第一原子力発電所の中長期ロードマップ<sup>(\*1)</sup>



\*1: 東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ(平成27年6月12日改訂)

## 2. 緊急対策としての取り組み

2011	～	2015	2016～2020	2021～
3/11 ▼ <b>緊急対策の実施</b> ・汚染水の移送設備 ・4号機SFPの水位確認 -コンクリートポンプ車による水位、線量確認 ・電源復旧 ・環境モニタリング - 1F-3ガンマカメラによる汚染分布測定 - R/Bフロアのダストモニタリング - 3号機 SFP上のダストモニタリング	冷温停止達成 ▼2011/12	<b>Goal</b> -冷温停止状態の達成・維持 -漏洩リスクを最小とする冷却水再循環ループの構築.		

### 3. 短期的な取り組み（汚染水対策）

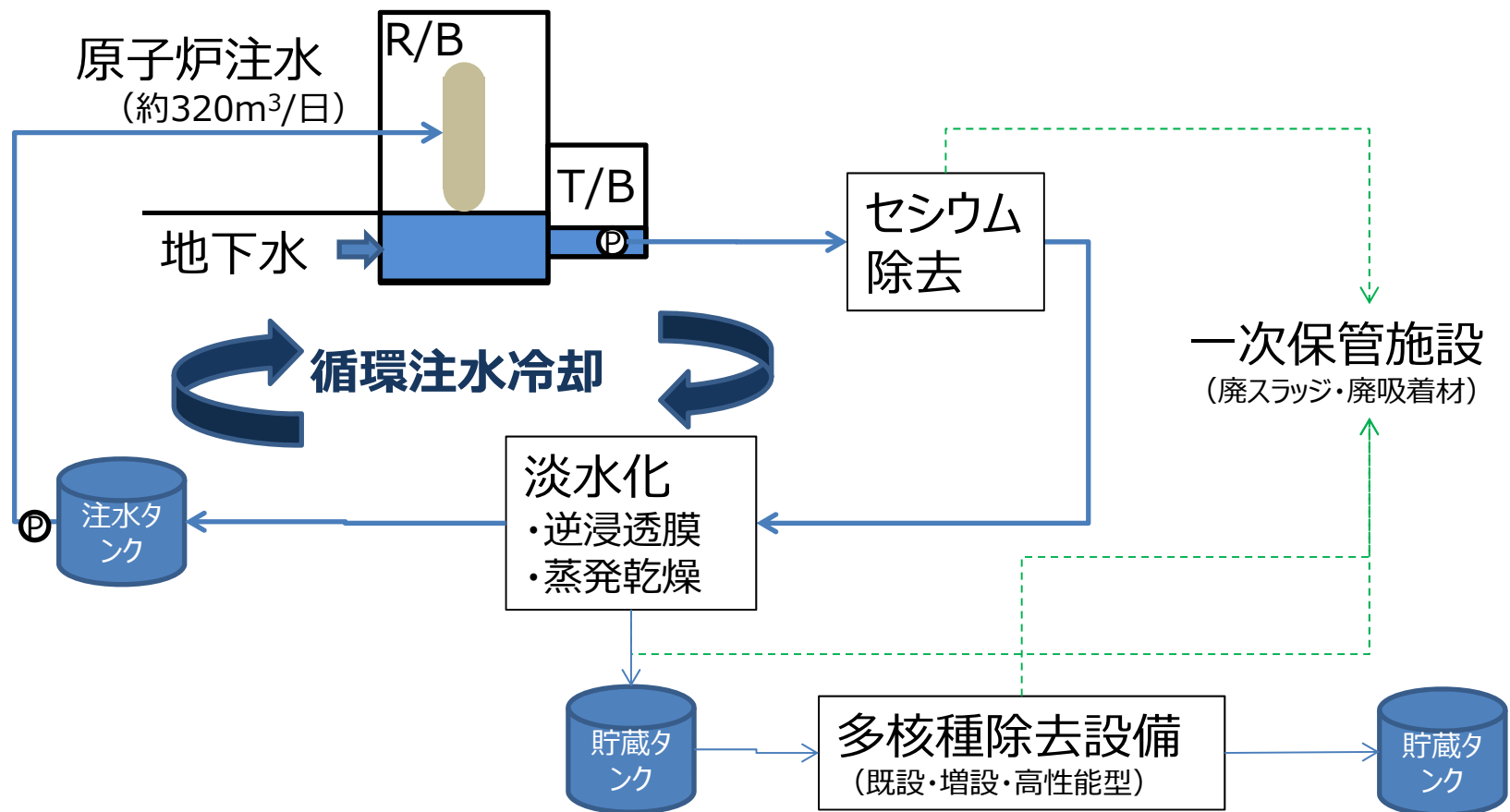


▽：東京電力（株）福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ(平成27年6月12日改訂)でのマイルストーン

## 3.1 汚染水対策：放射線計測への課題

### ■ 現状の課題

- 中期的に増加し続ける滞留水の貯蔵・管理  
地下水流入による汚染水の増加、累計70万m<sup>3</sup>（2015年頃）



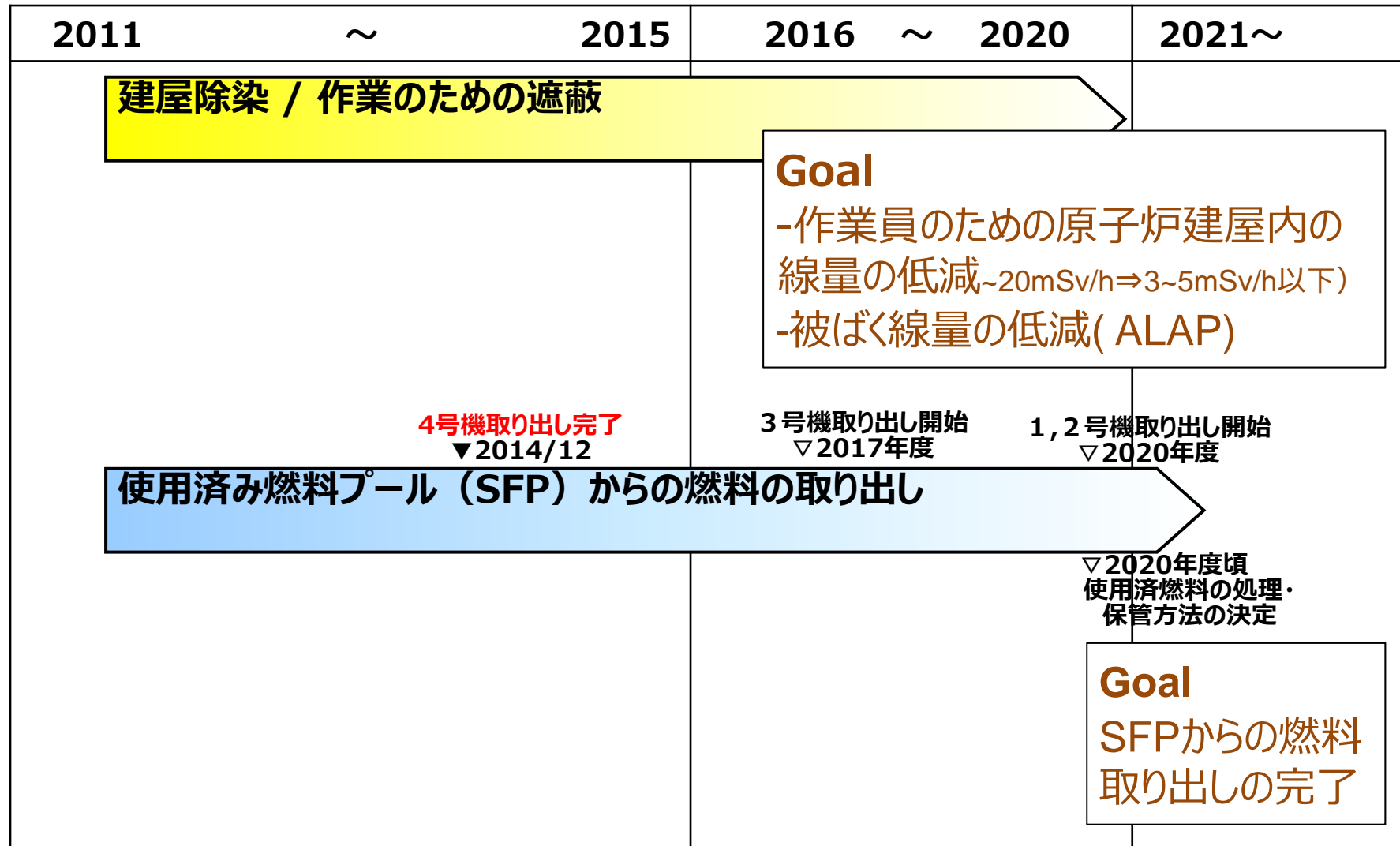
## 3.1 汚染水対策：放射線計測への課題

---

### ■ 放射線計測への課題

- 汚染水を「漏らさない」
  - ・水漏洩箇所の遠隔探索・特定技術
  - 高 $\gamma$ 線場での $\beta$ 線核種の漏えい分布測定技術
- 汚染水を「取り除く」：処理水の長期的取扱い
  - 長期海洋放出に向けた多量・低濃度のトリチウム測定
  - 処理状態の監視： $\beta$ 核種のオンライン分析

## 4. 中期的な取り組み（除染・遮蔽・SFP取り出し）



▽： 東京電力（株）福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ(平成27年6月12日改訂)でのマイルストーン



## 4.2 除染・遮蔽：放射線計測への課題

---

### ■ 現状の課題

- 除染作業により3～5 mSv/h以下への低減：  
(各号機ともCs-134,137が主汚染源)

→広範囲で汚染しているため近傍床面の除染では効果小

→高所や配管からの寄与も含めた除染対策が必要

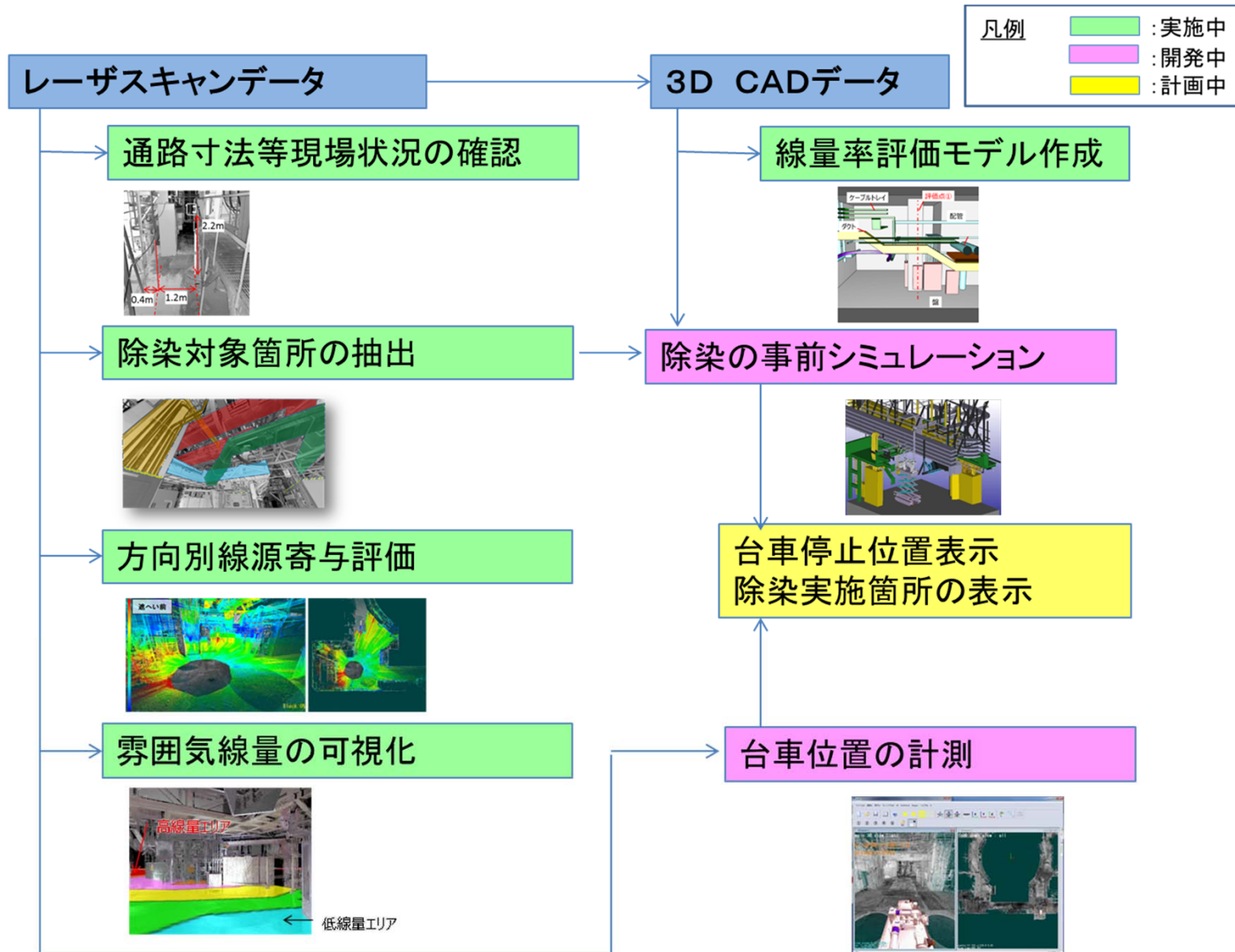
⇒汚染位置の事前評価が、除染効率化の上で重要

### ■ 放射線計測への課題

- 1F-2オペフロで最大約800mSv/h

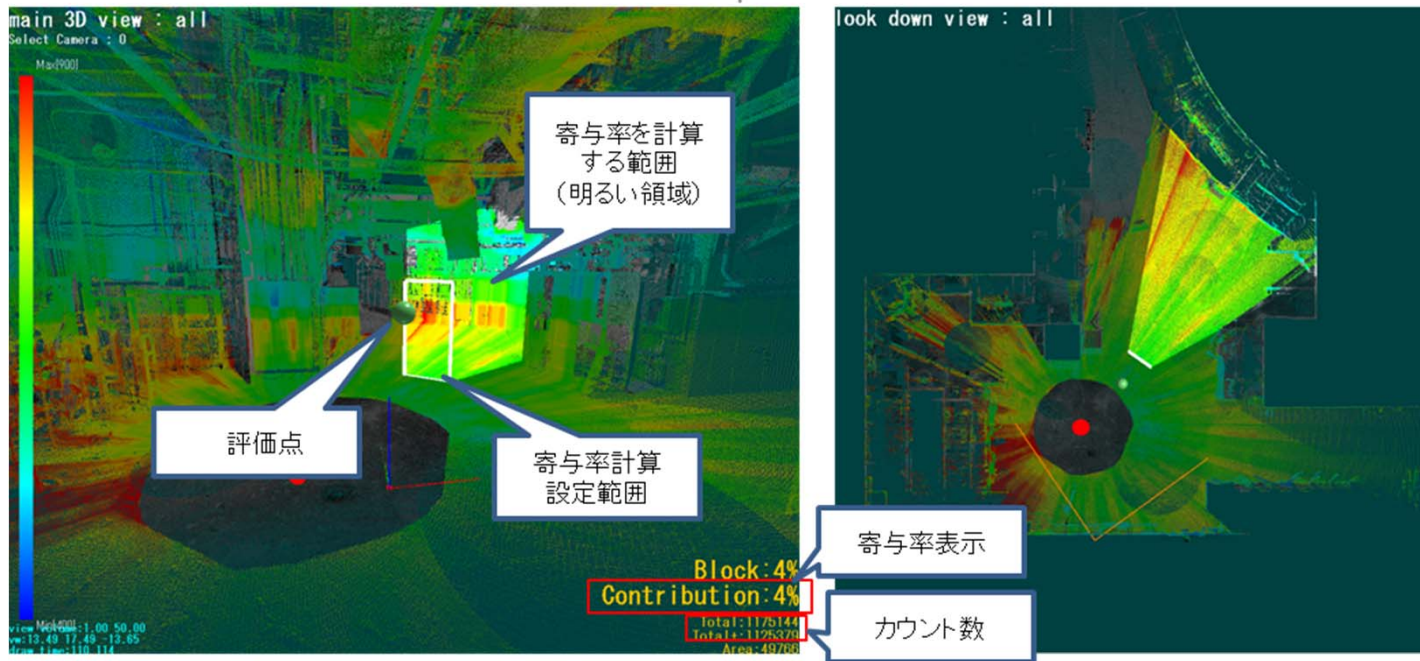
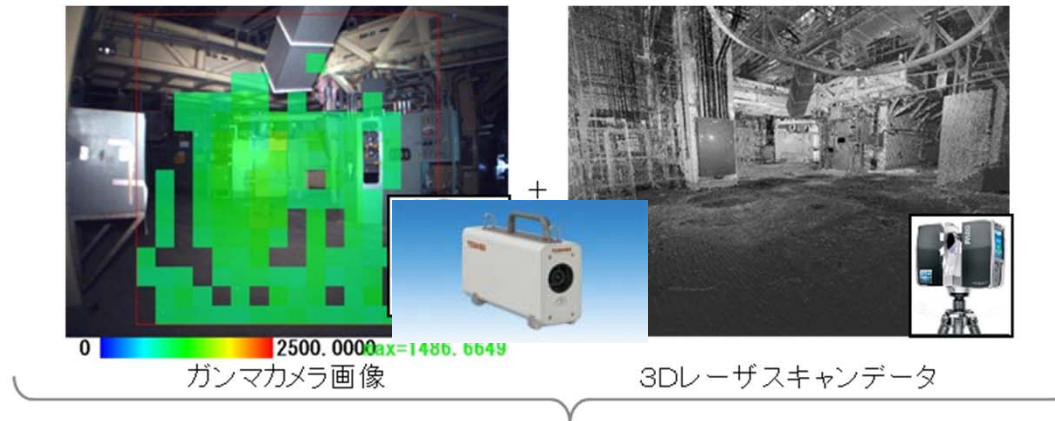
⇒高線量場で、小型軽量の汚染位置特定技術

# 4.3 除染・遮蔽：除染効率化のサポート技術

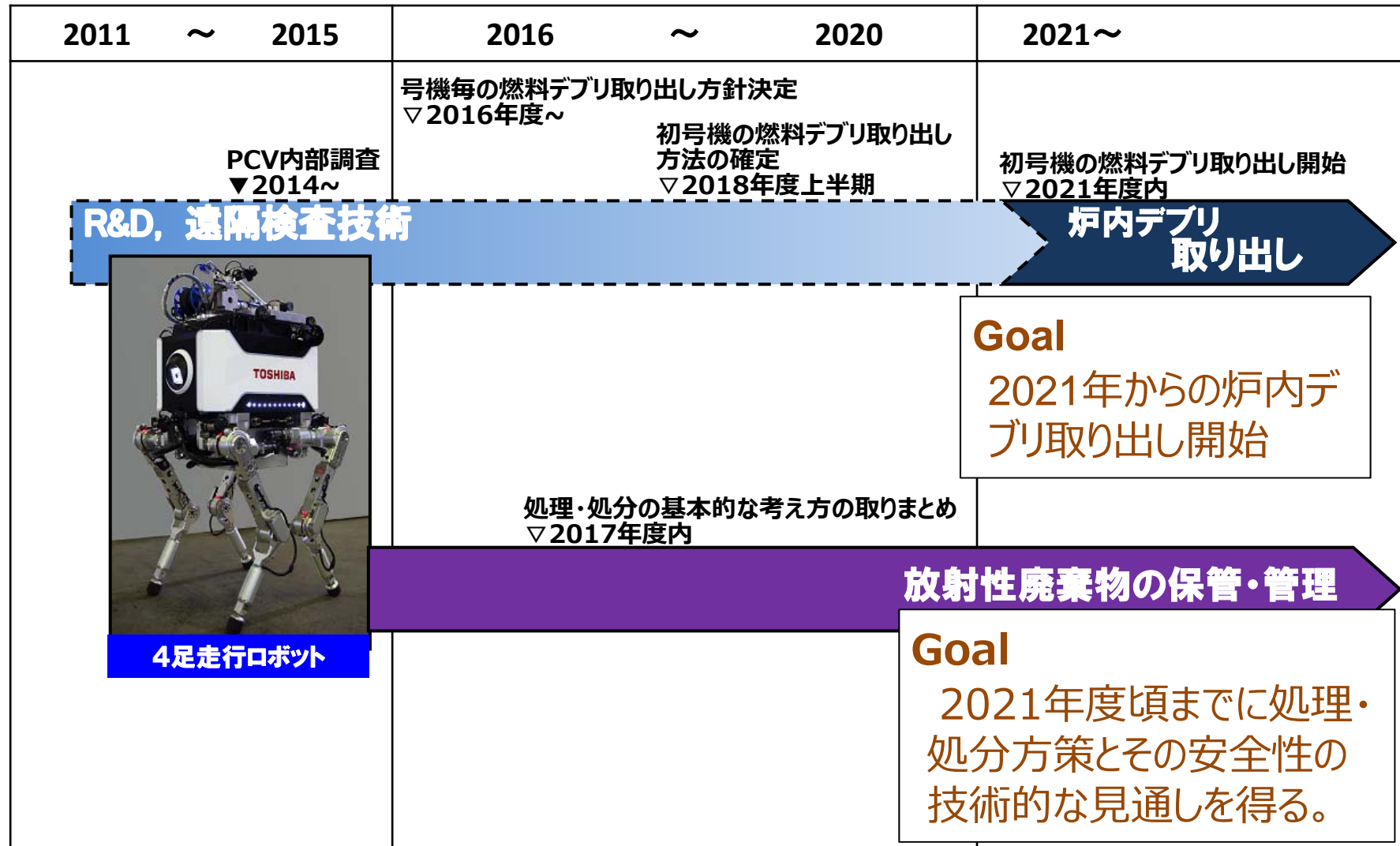


# 4.3 除染・遮蔽：除染効率化のサポート技術

## 方向別線源寄与評価

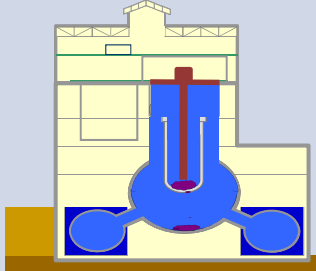
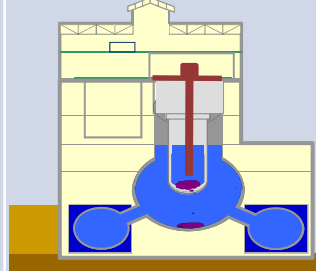
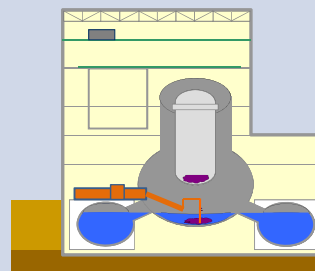
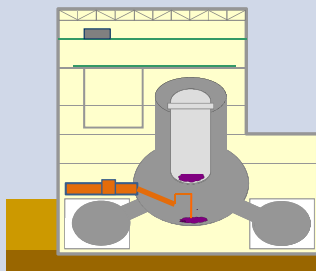


## 5. 長期的な取り組み（燃料デブリ取り出し・廃棄物対策）



▽：東京電力（株）福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ（平成27年6月12日改訂）でのマイルストーン

# 5.1 燃料デブリ取り出し：工法選定

工法	完全冠水	冠水	気中	完全気中
原子炉内の水位	原子炉格納容器頂部 	炉心燃料領域より上 	炉心燃料領域より下 	水なし 
デブリの冷却	← 水冷 →		← 空冷 →	
遮蔽 (取出開口部)	← 小 →		← 大 →	
飛散防止 (デブリ切断時)	← 冠水による飛散防止 →		← 散水 → ← 気中での飛散防止要 →	
PCV漏えい部 補修	← 冠水のためのPCV漏えい部補修・要 →			
デブリへの アクセス経路	← 上部から →		← 側面部から → ← 底部から →	

東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ(平成27年6月12日改訂)での工法比較から抜粋・追記

## 5.1 燃料デブリ取り出し：工法選定⇒炉内状態把握

### 取り出し手順や工法の具体化



燃焼・溶けた燃料の位置、量の把握が重要（デブリ分布）

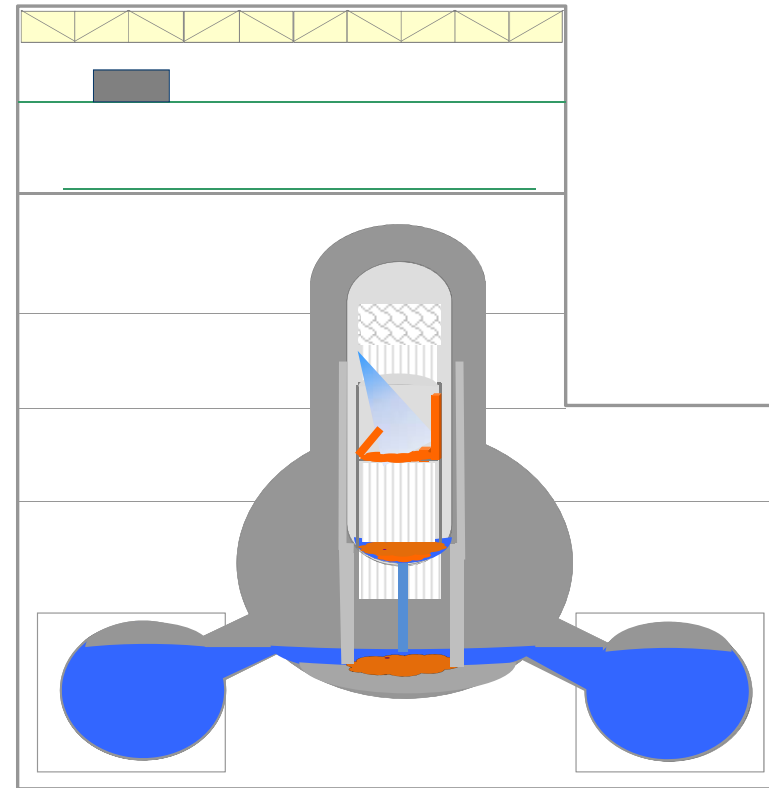
- ◆燃料集合体の損傷状態
- ◆溶けた燃料の密度等の分布



圧力容器内部は  
高放射線場でアクセス困難



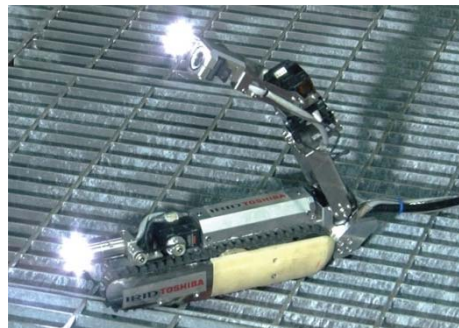
- ・小型センサをロボットで挿入
- ・外部から非侵襲での測定



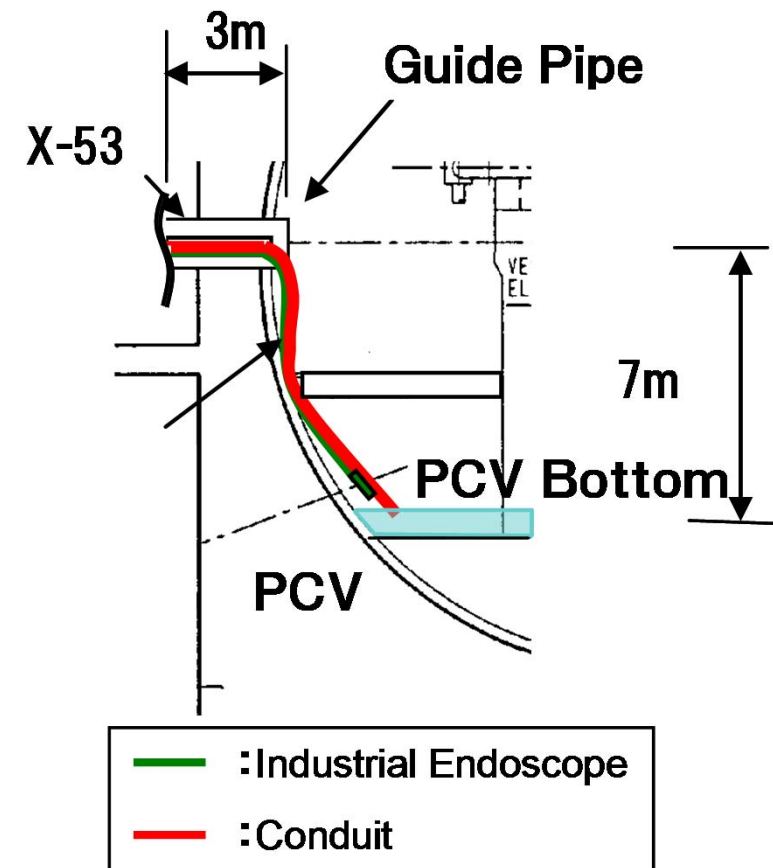
## 5.1 炉内状態把握：センサ直接挿入による把握

### ■ 現状の課題

- ◆ 原子炉格納容器バウンダリの確保
  - ・維持が課題→ペネトレーションの利用
- ◆ 使用可能な装置サイズが制限
  - 高精度カメラ・照明など使用不可
- ◆ 暗所・霧（水蒸気）の雰囲気



格納容器調査  
ロボット



RPV: Reactor Pressure Vessel  
PCV: Pressure Containment Vessel

### 2号機PCV内部調査

### ■ 放射線計測への課題

- ◆ PCV内部調査では耐放射線性より小型でケーブルレス、多点測定可能なセンサ
- ◆ デブリ近傍では1000Sv/hレベル→ガンマ発熱対策要

## 5.1 炉内状態把握：デブリの識別・性状把握、臨界検知

### ■ 現状の課題に対する放射線計測関連の開発項目

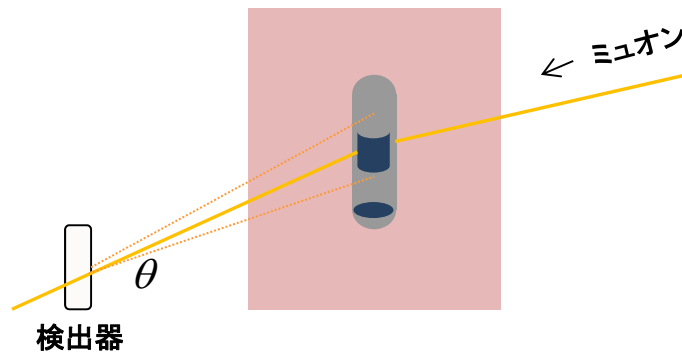
- ◆ デブリ分布の可視化（カメラでは識別困難）、取り出し後の残量確認  
→ 中性子/ガンマ方向・強度、核種・エネルギー弁別（Eu-152, Ce-133等）  
による中性子カメラ/ガンマカメラ、LIBS等との組み合わせ
  
- ◆ デブリ性状の詳細分析のためには、搬出必要  
→ その場又は1F内での組成等の簡易分析技術
  
- ◆ 冠水・部分冠水工法時には、水減速により反応度が上昇  
→ 臨界可能性のある部位の評価（デブリ分布可視化）技術  
→ 臨界検知のための高ガンマ線場での微弱中性子の測定技術



常温動作、超小型・高感度、耐環境、指向性・スペクトロメータ技術

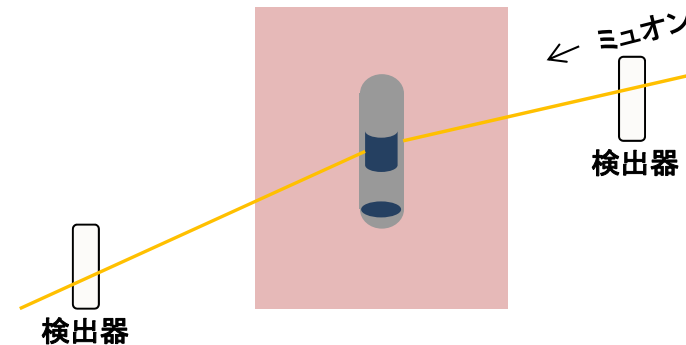
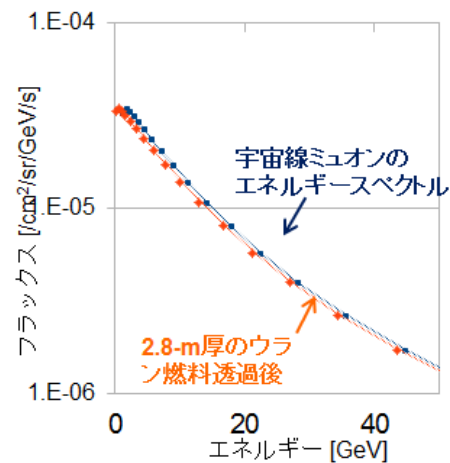


## 5.2 非侵襲測定の開発例：宇宙線ミュオン利用（手法）



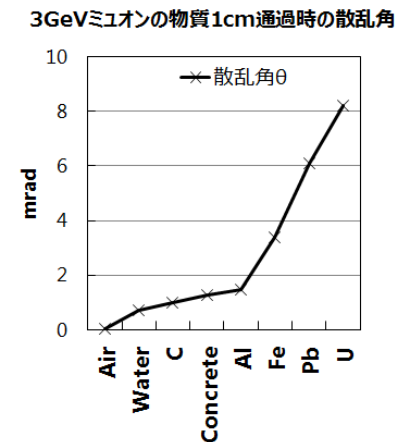
透過法：影を撮影

- ミュオンの高い透過性を利用
- フラックスの減衰を測定
- 散乱による分解能の劣化



散乱法：物質の3次元特定

- ミュオンの散乱角を測定
- 物質ごとに固有の散乱角
- 散乱点推定による物質位置特定

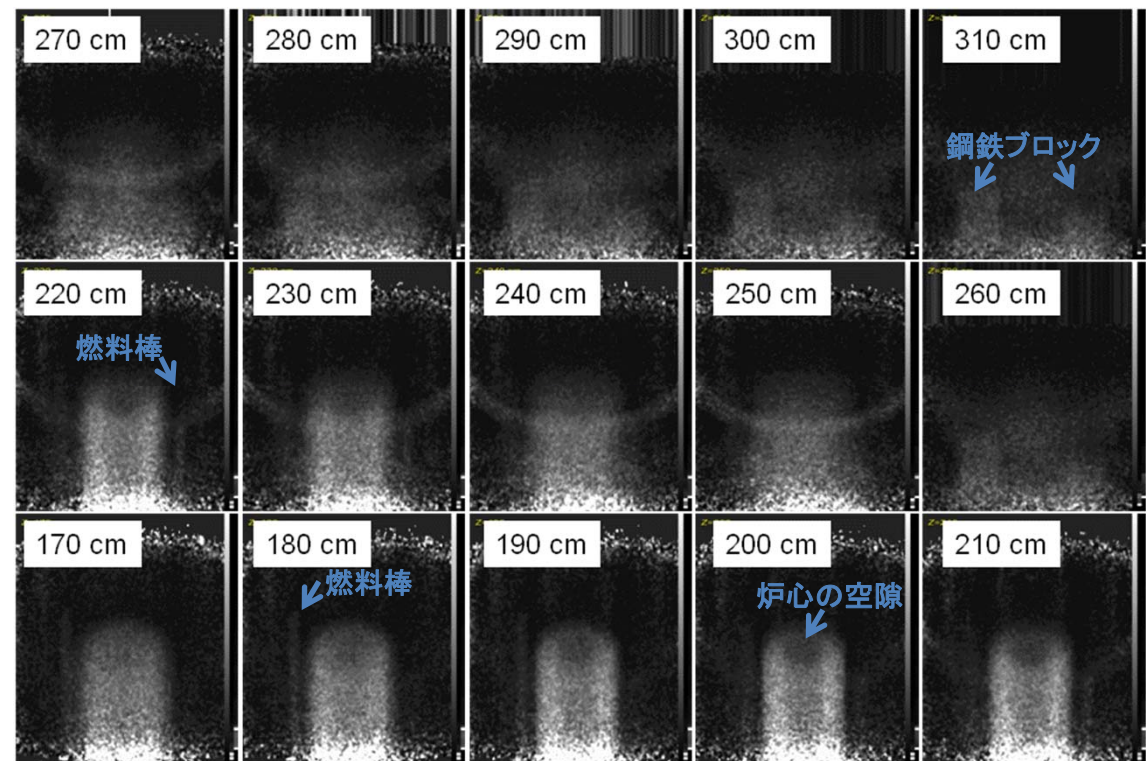
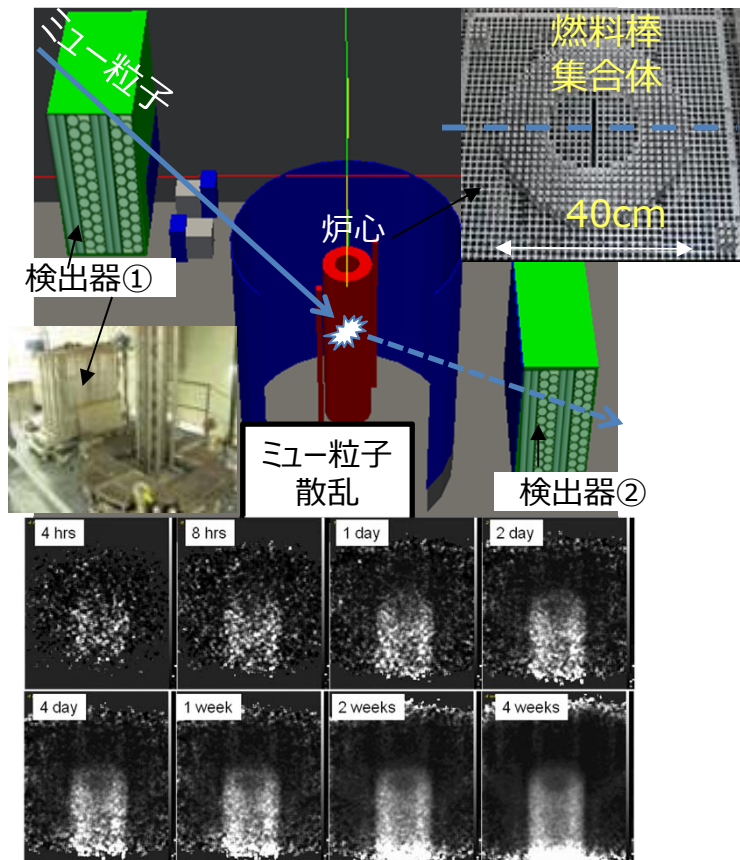


## 5.2 非侵襲測定の開発例：散乱法の実証

- 1m×1mの面積の小型検出器（LANL所有）を使用
- 2013年夏に1ヶ月間の測定
- 世界初、炉内燃料を画像化 ⇒ 分解能3cm
- 福島第一の1/10の縮小実験

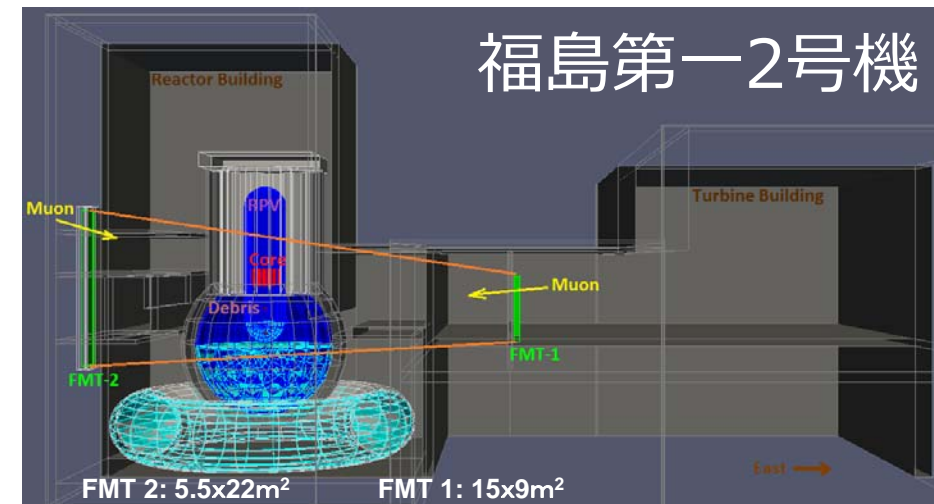


東芝臨界集合体

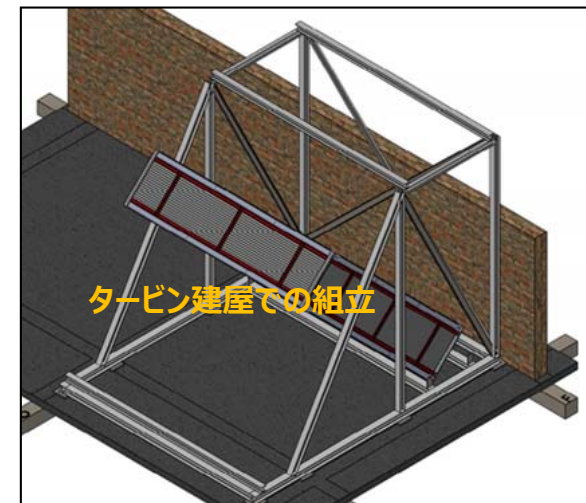
C. Morris et al., *Appl. Phys. Lett.* 104, 024110 (2014).

## 5.2 非侵襲測定の開発例：1F-2でのシミュレーション

- GEANT4モンテカルロシミュレーションによる実現性検討
  - GEANT4シミュレーションは業界標準のモンテカルロ
  - 炉心、建屋、圧力容器、コンクリート壁など原子炉の主要構造をモデル化



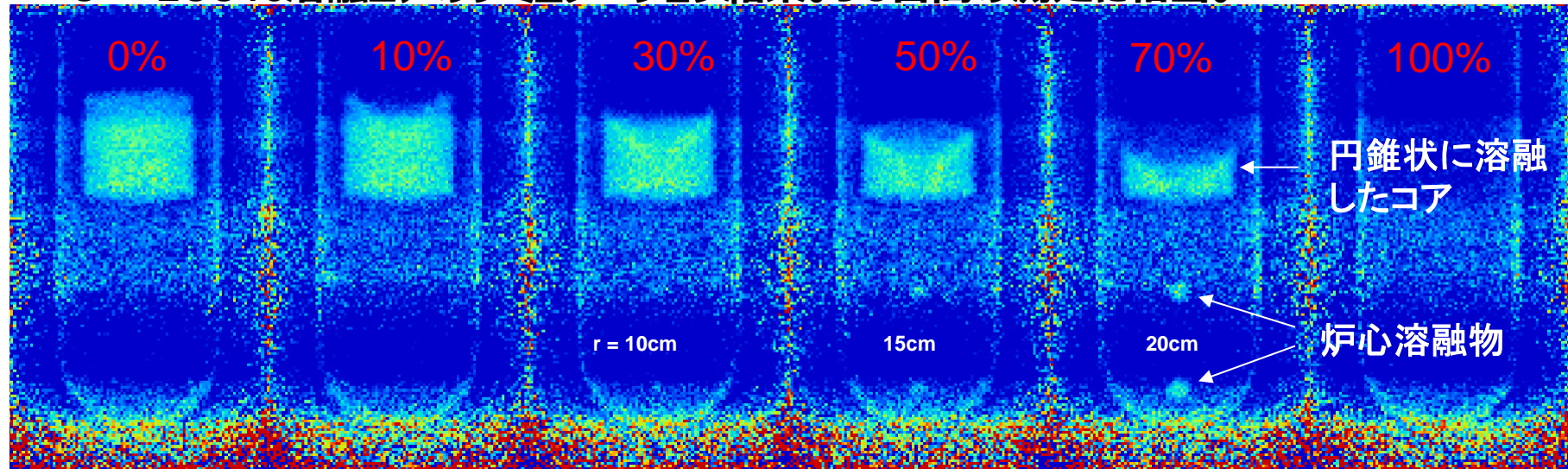
- 検出器は、建屋前とタービン建屋2Fへの設置を想定
  - 建屋前検出器は6cm厚鉄板で遮蔽
  - タービン建屋2Fは線量が低く、遮蔽体なしでも大丈夫の見込み



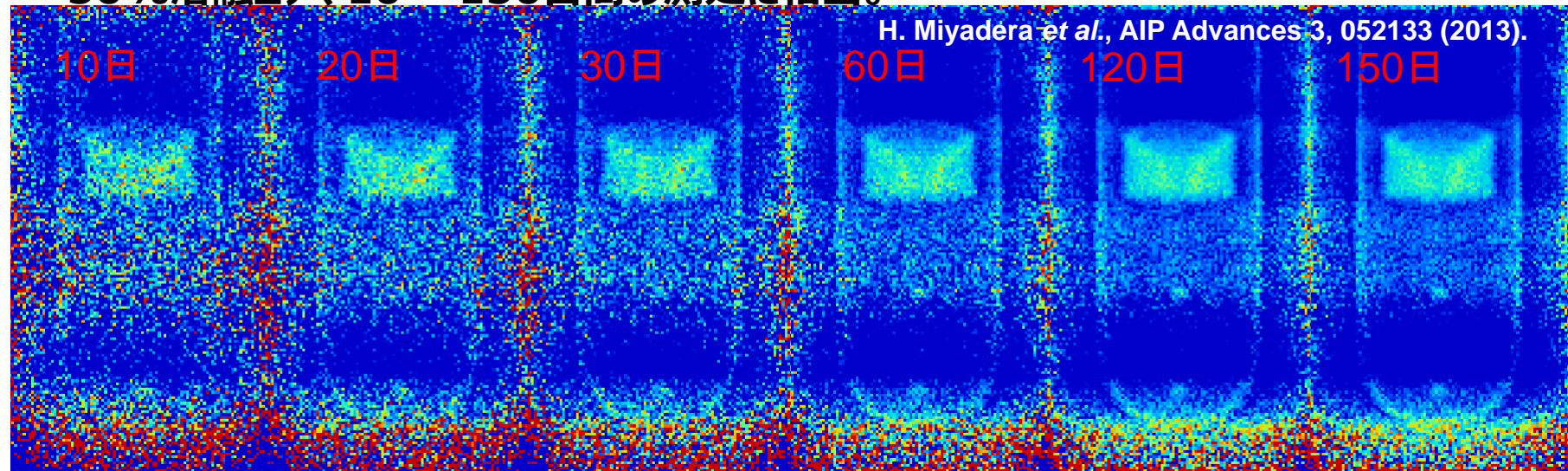
H. Miyadera *et al.*, AIP Advances 3, 052133 (2013).

## 5.2 非侵襲測定の開発例：1F-2でのシミュレーション

0 - 100%溶融コアのシミュレーション結果。90日間の測定に相当。



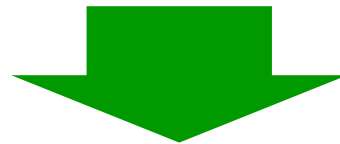
50%溶融コア、10 - 150日間の測定に相当。



## 5.3 廃棄物対策：大量で混在した廃棄物の定量

### ■現状の課題に対する放射線計測関連の開発項目

- ・大量かつ性状が特殊な固体・液体廃棄物の多核種・迅速放射能定量
  - 高 $\gamma$ 場での $\alpha$ 核種付着廃棄物の弁別、滞留水 $\alpha$ 濃度モニタ
- ・難測定核種 = 純 $\beta$ 核種 (Sr-90)
  - 容器外側から非破壊で計測する必要有り
- ・デブリ・核物質の計量管理
  - 再処理プロセスと異なる性状、処理プロセス
  - デブリ取り出し後等での残量が検出限界以下であることの証明
  - 検出限界以上量のインプロセス・計量管理



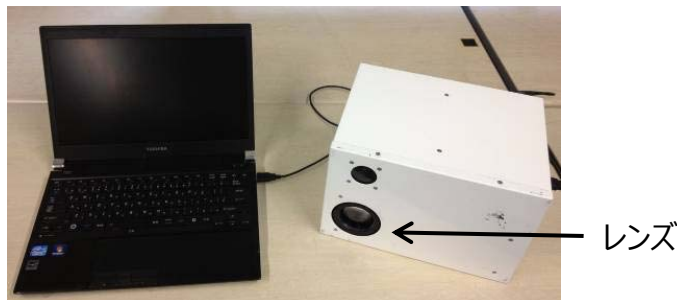
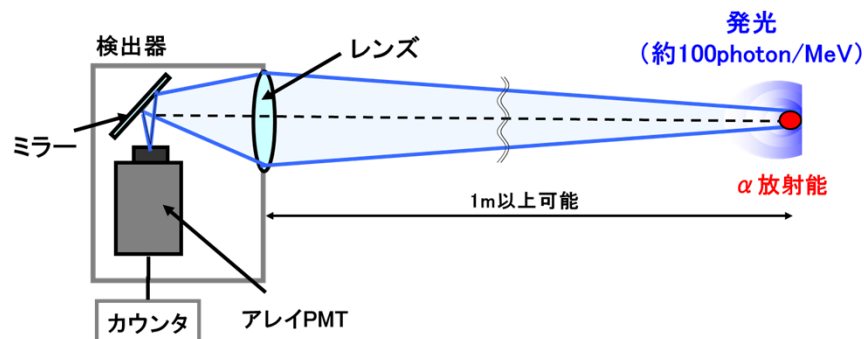
⇒インプロセス・高感度・その場測定可能なアクティブ非破壊測定システムは有望な手段の一つ

## 5.4 廃棄物対策の開発例：アルファカメラ（原理）

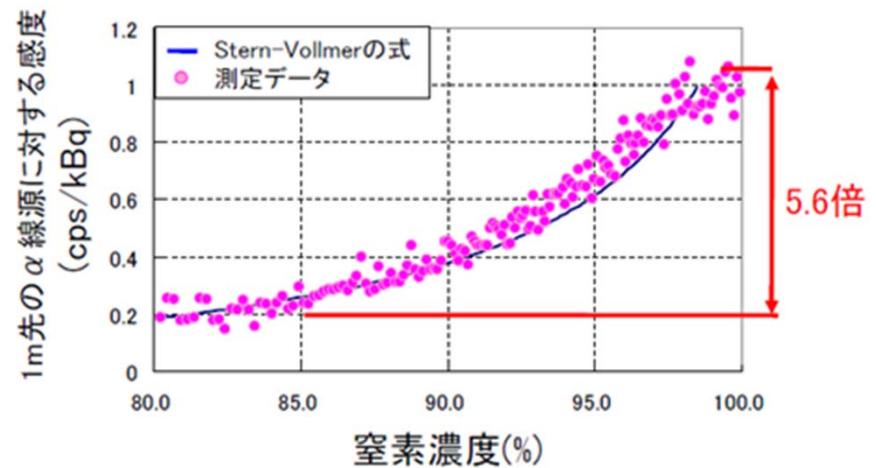
$\alpha$ 線は1cm以上離れると検出器には届かない

⇔ 空気中の窒素の紫外線を数100光子発光

紫外線の計測で、1m以上離れても測定可能(従来5mm)



窒素濃度と発光量との関係



## 5.4 廃棄物対策の開発例：アルファカメラ（課題）

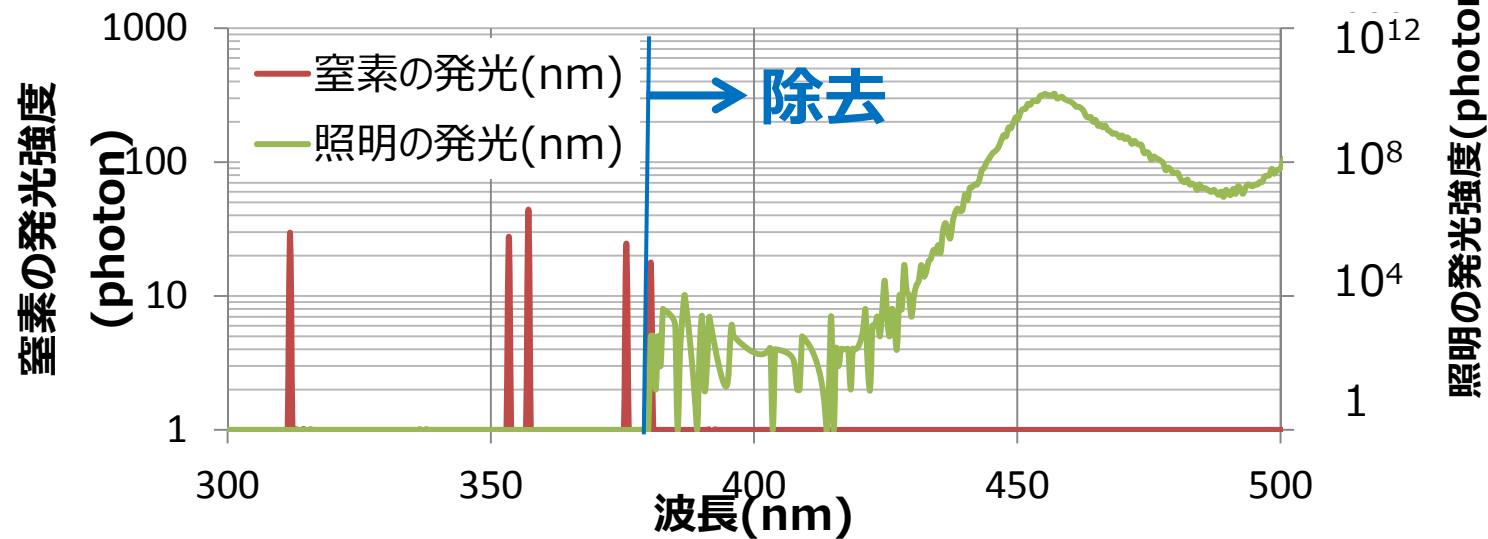
### 課題

1m離れた場合、検出器に届く光は**数光子程度**

⇒照明等の光に埋もれて計測できない



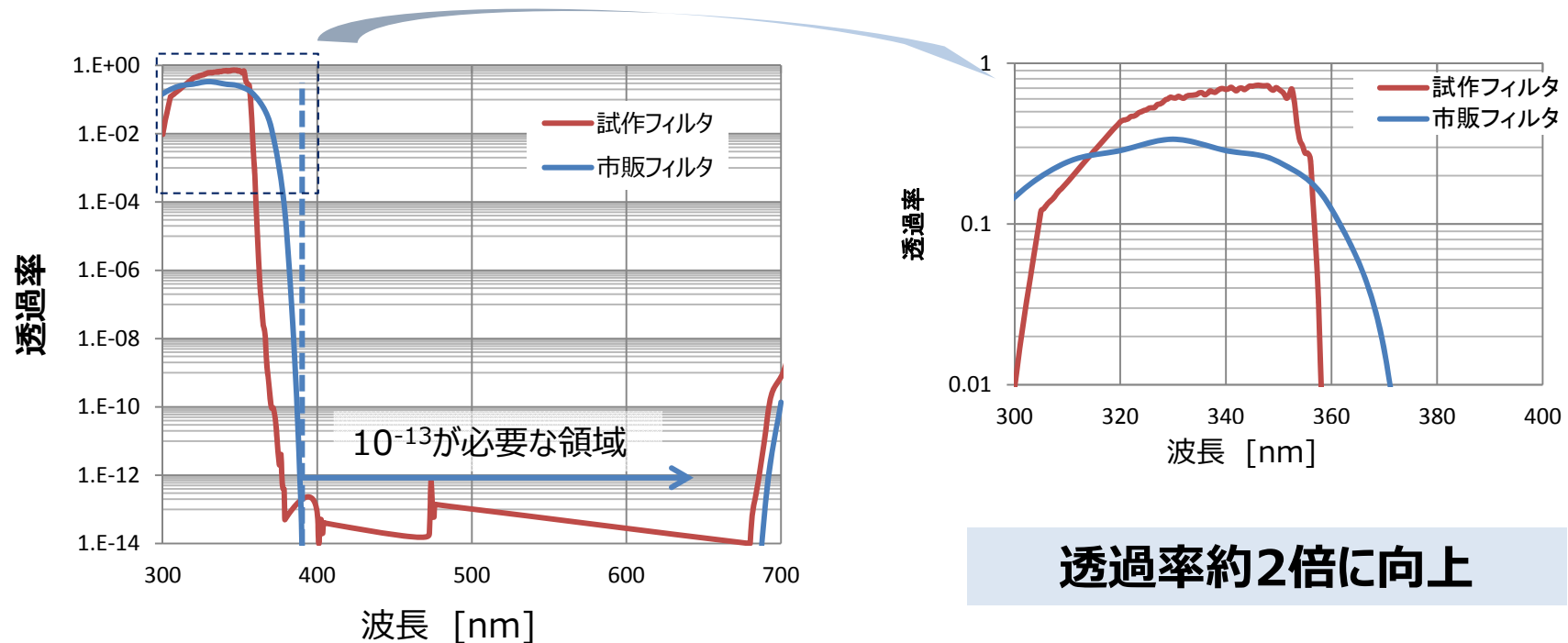
照明光を除去できる高性能フィルタの設計・試作を実施



## 5.4 廃棄物対策の開発例：アルファカメラ（設計）

### アルファカメラ用フィルタ

- ノイズ除去：380nm以上の光の透過率  $10^{-13}$
- 感度向上：320nm～360nmの透過率大



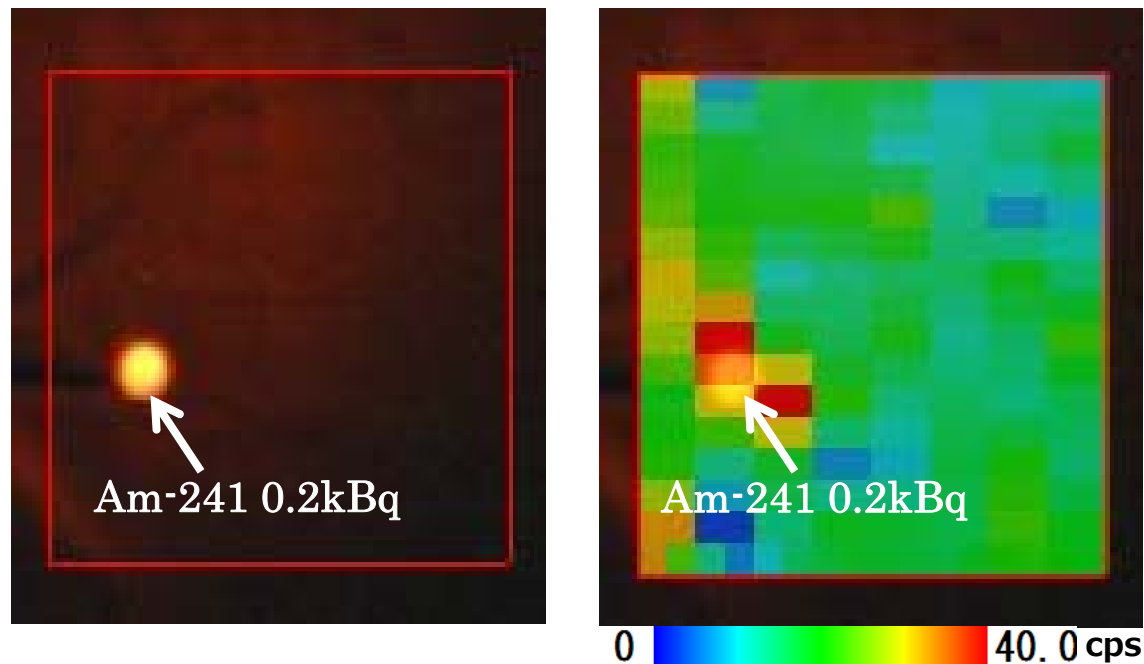


## 5.4 廃棄物対策の開発例：アルファカメラ（試験結果）

標準 $\alpha$ 線源：Am-241を用いて測定性能を評価

線源：Am-241  
測定距離：1m

$\alpha$ 放射能の管理基準 $4\text{Bq}/\text{cm}^2$ を、  
1m以上離れて3分で測定可能



$\alpha$ 線源の測定結果

- ◆ 測定距離5mmを1mまで範囲を拡大
- ◆  $\alpha$ 線の有無を遠隔で測定できることを確認

## 6.まとめ

---

### ■ 注水・滞留水処理

- ◆ 高 $\gamma$ 線場での $\beta$ 線核種の漏えい監視
- ◆ 海洋放出に向けた多量・低濃度のトリチウム測定

### ■ 除染・遮蔽

- ◆ 更に軽量で高線量場での汚染位置特定技術

### ■ デブリ取り出し時

- ◆ 臨界監視：高 $\gamma$ 線場での高感度中性子測定
- ◆ デブリ識別：その場でのデブリ分析技術

### ■ 廃棄物管理／計量管理

- ◆ 多量の、混在した廃棄物の分別・定量・保管管理

**TOSHIBA**  
**Leading Innovation >>>**