

第5回 放射線計測フォーラム福島

2015年12月7日

福島復旧・復興を支える

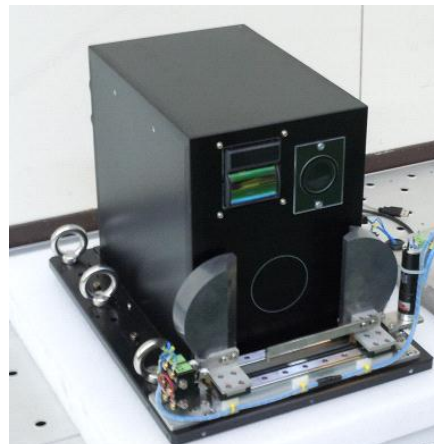
日立における放射線計測技術の開発

株式会社 日立製作所 研究開発グループ
エネルギーイノベーションセンタ 原子力システム研究部
田所 孝広

内容

1. **ガンマ線強度分布測定技術(ガンマカメラ)**
2. **過酷環境対応の放射線計測技術**
3. **まとめ**

1. ガンマ線強度分布測定技術(ガンマカメラ)

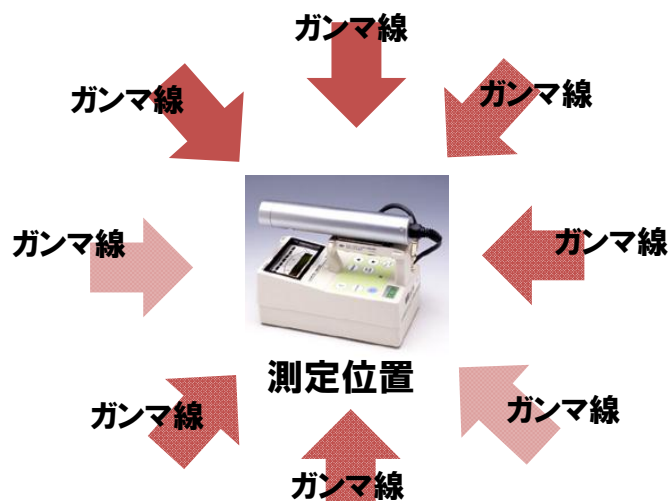


日立ガンマカメラ



従来の測定器 - 線量率計及びサーベイメータ -

ガンマ線は360度方向から飛来

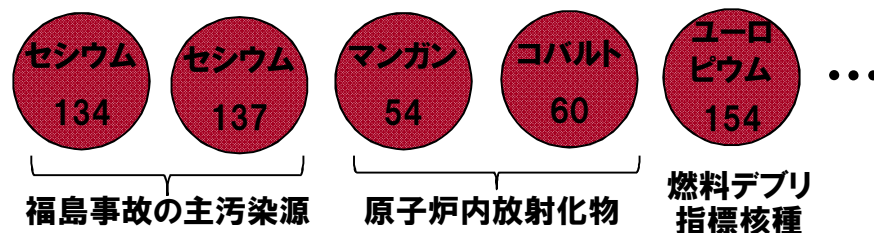


測定器位置での線量率を測定

**ガンマ線源を
見落としなく同定することが困難**

(どこを除染及び遮蔽すれば、
線量率低減が図れるのかよくわからない)

放射性物質には種類(放射性核種)がある



各放射性核種からガンマ線の総量を測定

核種を特定することができない

特に、福島第一原子力発電所原子炉建屋内の
高線量率エリア(数mSv/h~数Sv/h)では、
核種を特定し、その分布情報が必要

**高線量率環境下での核種ごとの
ガンマ線強度分布が測定不可**

(核種に応じた除染及び遮蔽方法の選定が
必要だが、対応困難)

ガンマ線強度分布の可視化

ガンマ線源を見落としなく、短時間で広範囲を視覚的に測定

さらに

- 放射性核種の特特定 → 汚染源（飛散核種、放射化物、燃料デブリ等）の特特定
核種毎に異なる除染及び遮蔽方法の適用計画策定
- 高線量率環境対応 → 福島第一原子力発電所の原子炉建屋内への適用
（原子炉建屋内線量率 数mSv/h～数Sv/h）
- リアルタイム測定 → 作業環境、作業状況等のその場測定

調査の迅速/正確/安全化

汚染箇所及び汚染核種
の特定
調査装置

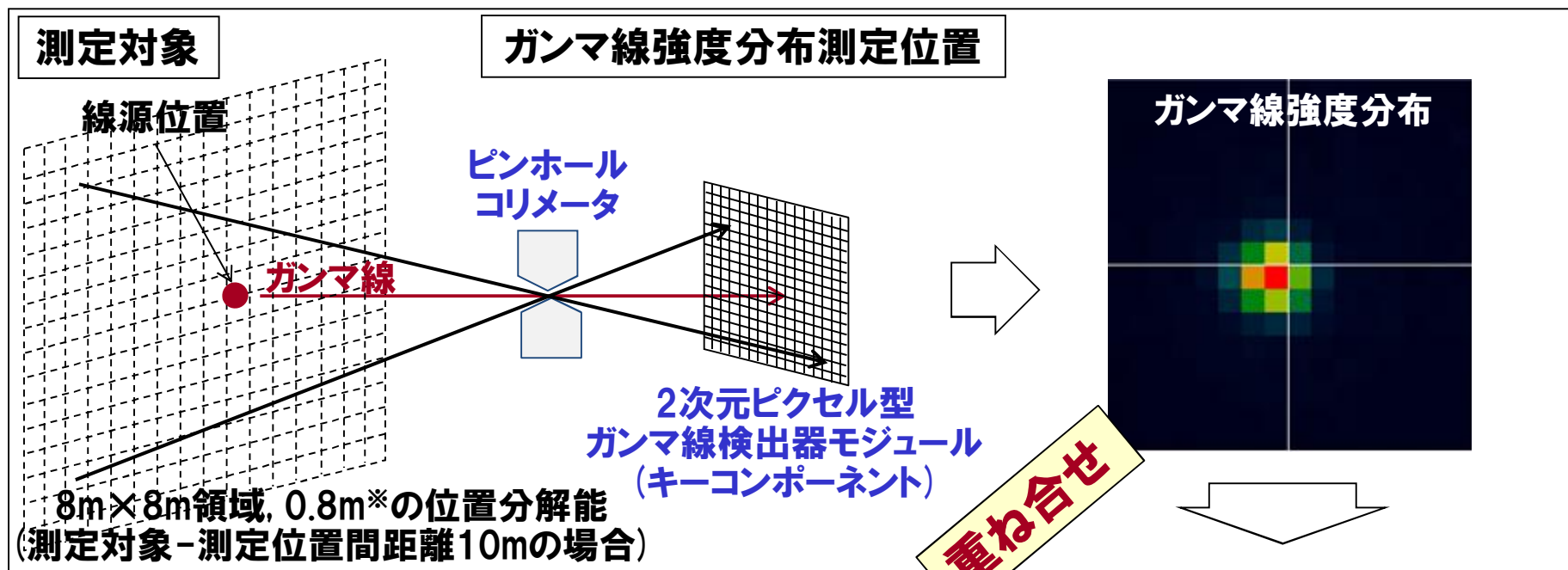
作業の迅速/安全化

除染及び遮蔽の計画
実施状況・効果確認
作業環境モニタ

監視・安全安心情報の提供

汚染物保管状況の確認
可視化情報の提供
監視モニタ・情報提供


ガンマ線強度分布可視化の原理



※ 0.8mの位置分解能があれば汚染機器の特定が可能、測定対象-測定位置間距離5mの場合、4m×4m領域で、位置分解能0.4m

ガンマ線検出器モジュール

**従来の
半導体利用
ガンマ線
検出器
(単チャンネル)**

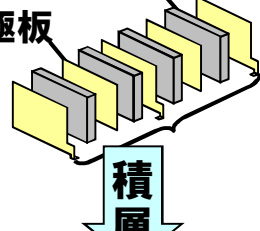


他社市販品

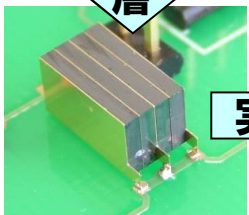
CdTe半導体素子
(ガンマ線検出用素子)

電極板

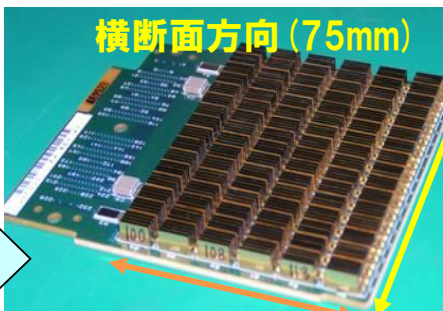
積層



実装



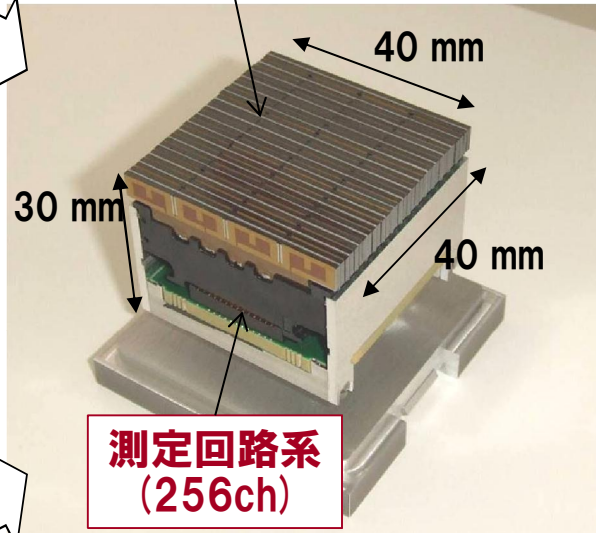
**ガンマ線検出用素子の
稠密実装技術**



横断面方向 (75mm)

深さ方向 (60mm)

**ガンマ線検出素子
(16ch×16ch)**



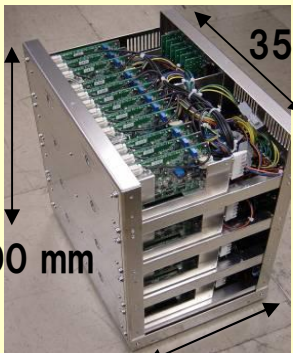
40 mm

30 mm

40 mm

測定回路系
(256ch)

従来の測定回路系



350 mm

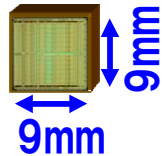
400 mm

240 mm

48ch ディスクリート回路

**測定回路系体積の
1/1000化を実現**

高集積/低ノイズ
アナログASICを開発



9mm

9mm

48ch ASIC※1

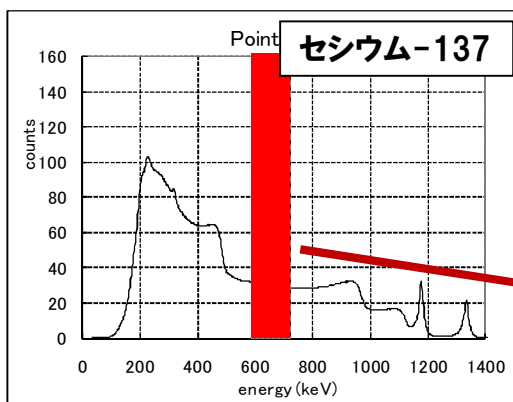
**小型多チャンネルの
2次元ピクセル型
ガンマ線検出器モジュール
を開発**

※1 ASIC: Application Specific Integrated Circuit

多チャンネル核種分析

全ピクセル (256ch) において、各ピクセル毎のガンマ線エネルギースペクトルを導出

(1) 核種毎の強度分布の可視化を実現

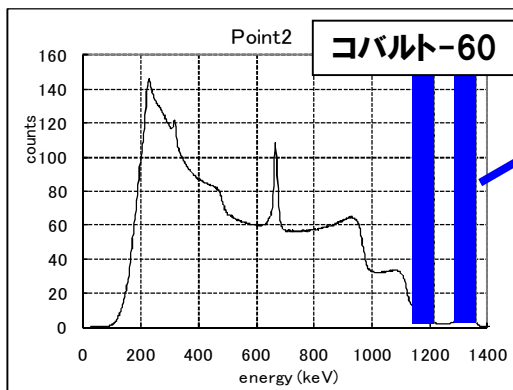


セシウム-137
の強度分布



コバルト-60の
強度分布

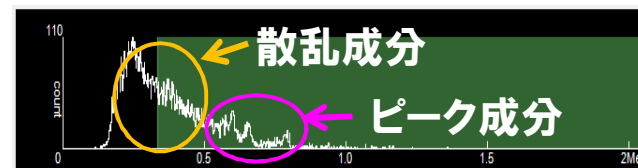
測定イメージ図



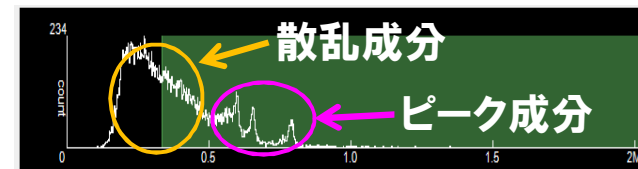
ガンマ線エネルギースペクトルの一例 (核種毎に、特徴的のピークを持つ)

(2) 線源位置の推定

線源位置	ガンマ線スペクトル	
	散乱線成分	ピーク成分
内部	大	小
表面近傍	小	大



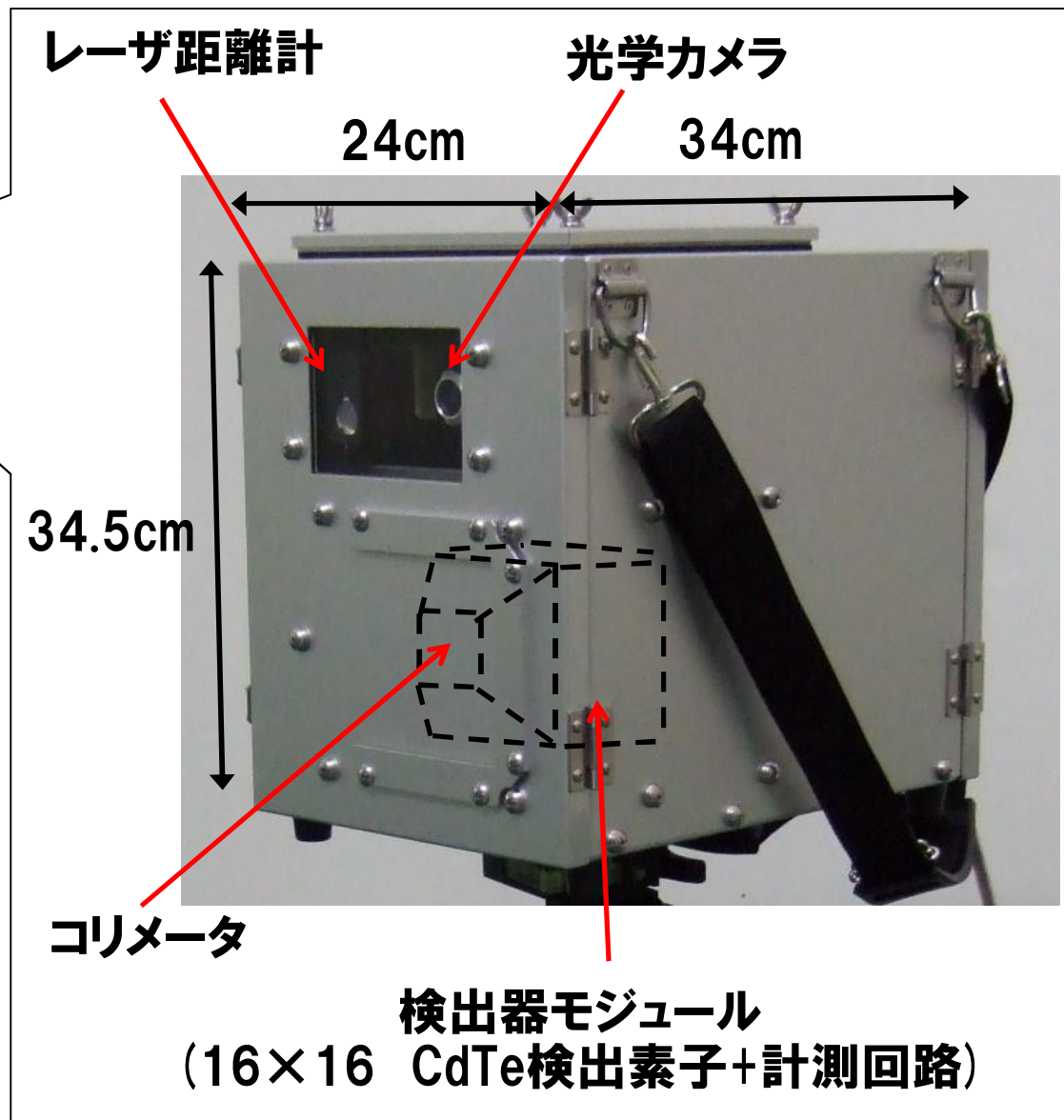
$\frac{\text{散乱成分}}{\text{ピーク成分}} = \text{大} \Rightarrow$ 散乱によりエネルギーが減少
→ 汚染源が内部に存在



$\frac{\text{散乱成分}}{\text{ピーク成分}} = \text{小} \Rightarrow$ 直達成分大
→ 汚染源が表面近傍に存在



三脚に固定
(追加遮蔽無し時)



測定結果表示

ガンマ線強度表示:可変

測定開始、停止

測定中画面
収集

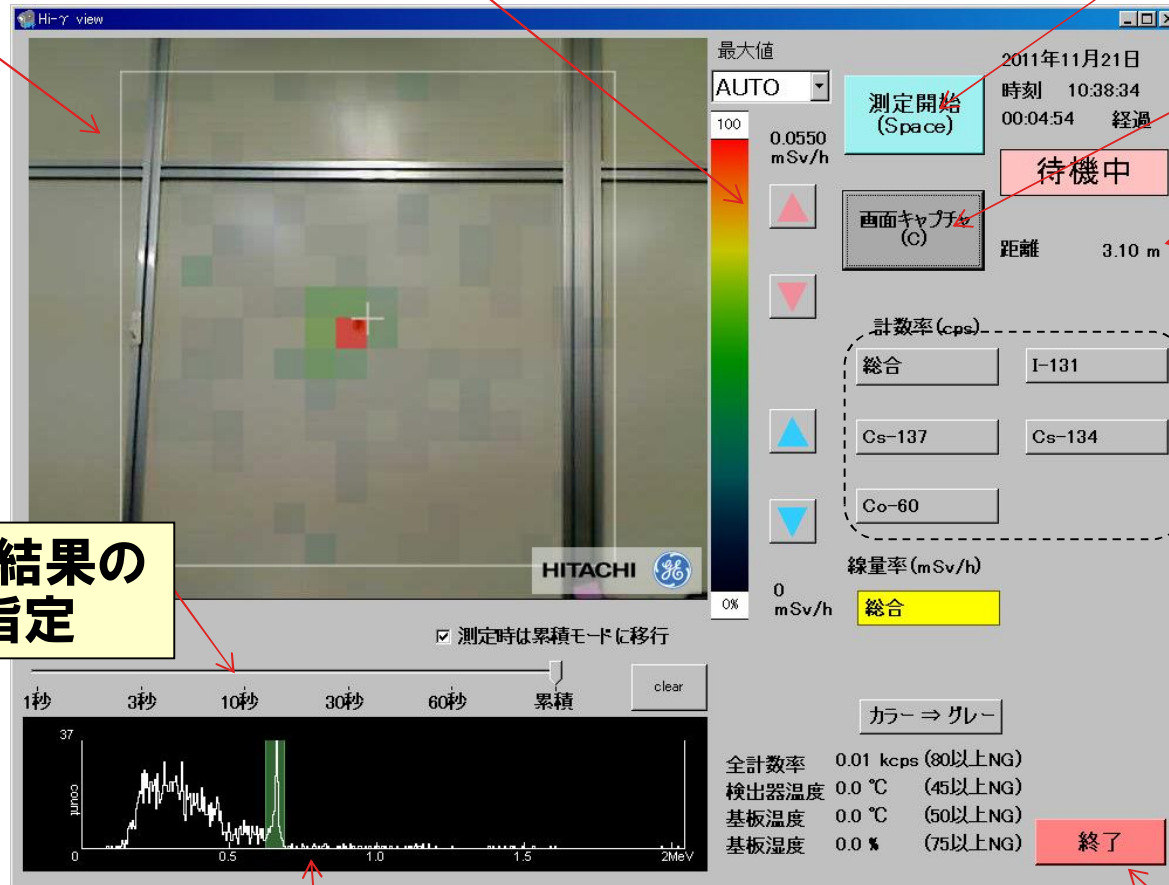
距離

核種
選択

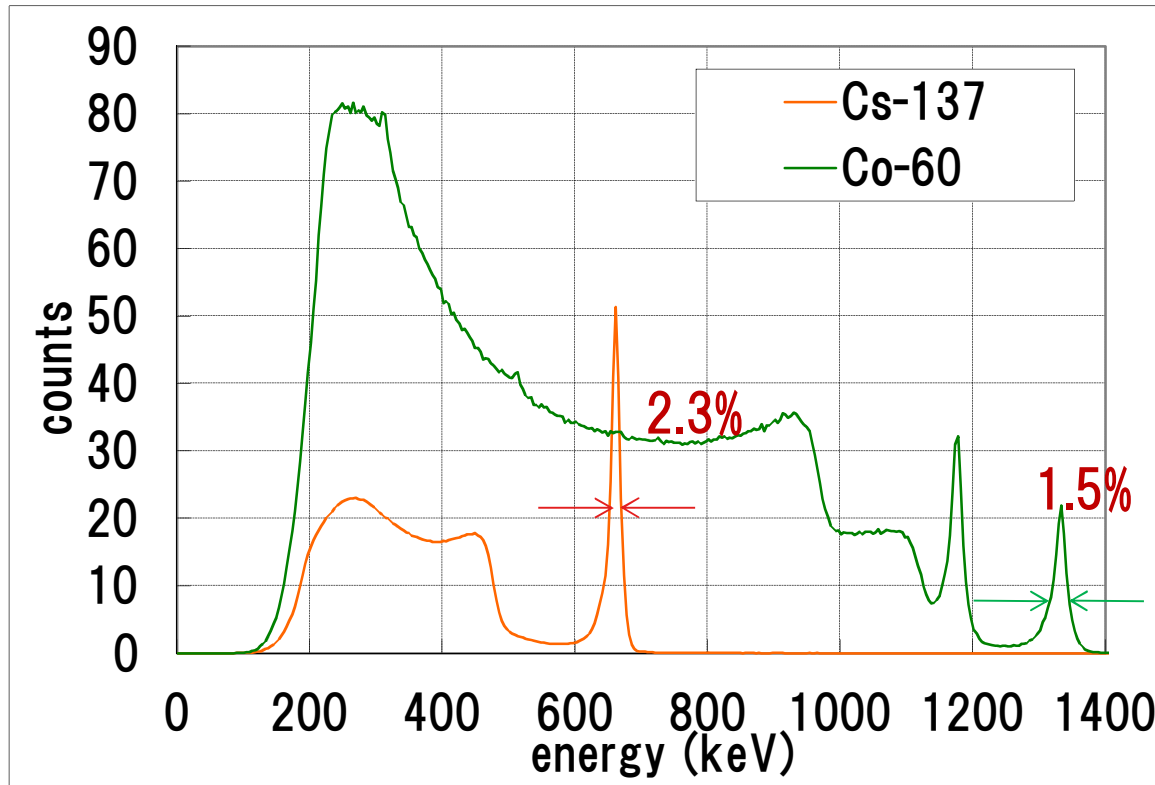
表示する測定結果の
積分時間指定

ガンマ線エネルギースペクトル

測定終了



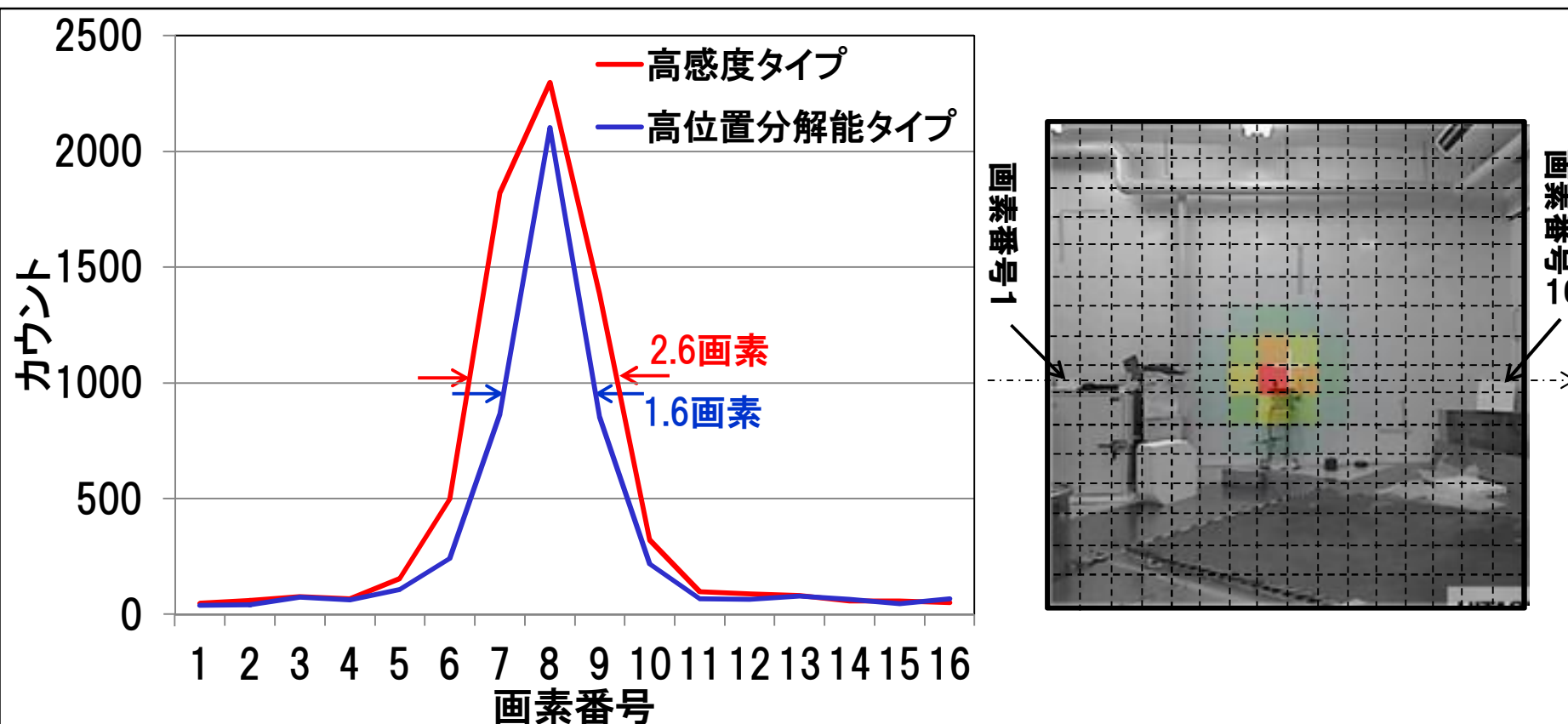
標準密封線源を用いてエネルギー分解能を測定



Cs-137の分解能:2.3% (FWHM)
(2MeVまでのガンマ線の測定可)



I-131、Cs-134,137 (汚染主要核種)
Co-60 (放射化物)、Eu-154 (燃料デブリ)
K-40 (自然放射能) の判別が可能



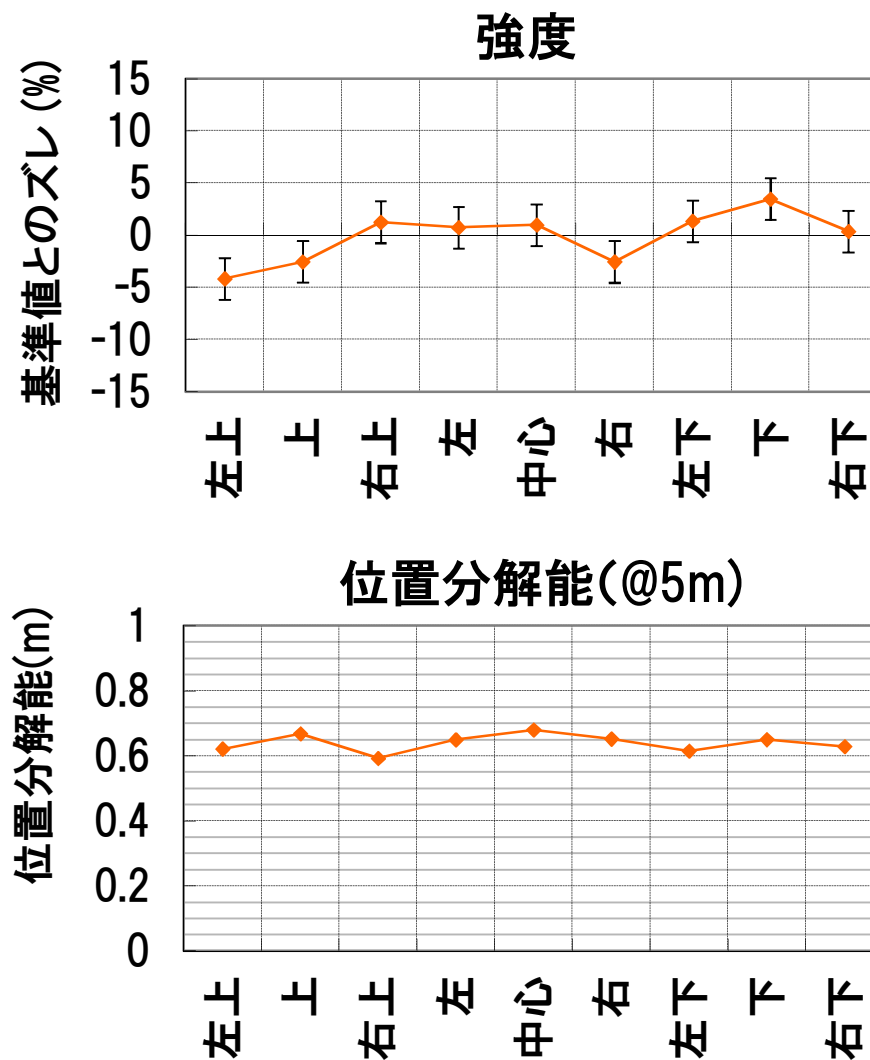
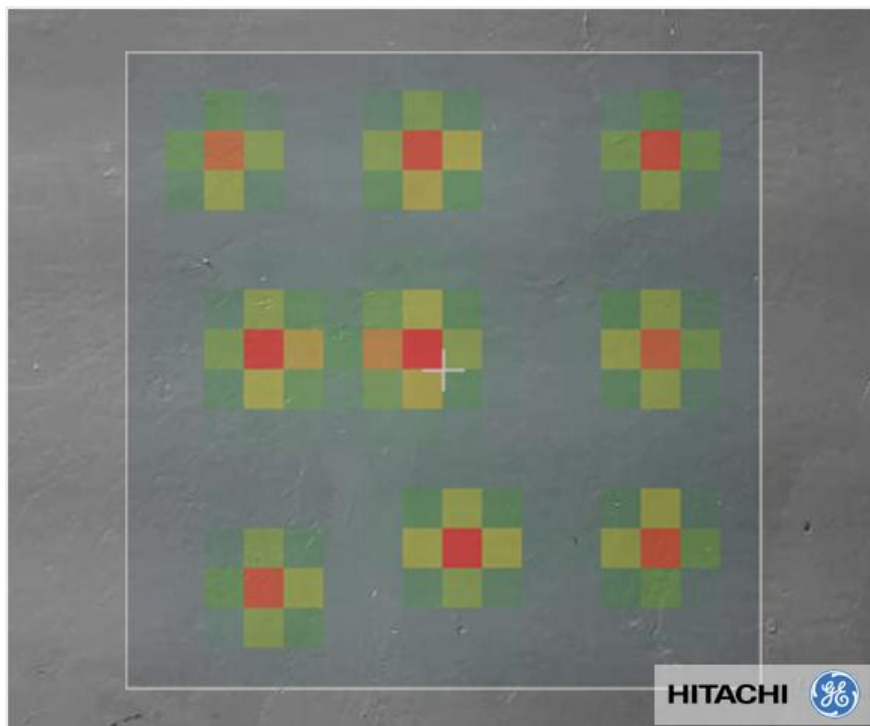
- **高感度タイプ** (コリメータ径:4mm)
位置分解能 2.6画素(FWHM) (カメラから5mの位置に換算して0.65m)
- **高位置分解能タイプ** (コリメータ径:2mm)
位置分解能 1.6画素(FWHM) (カメラから5mの位置に換算して0.4m)

ピンホールコリメータは視野端で特性が変化

→ 視野内の9点の特性を評価

強度: 各点で±5%以内のばらつき

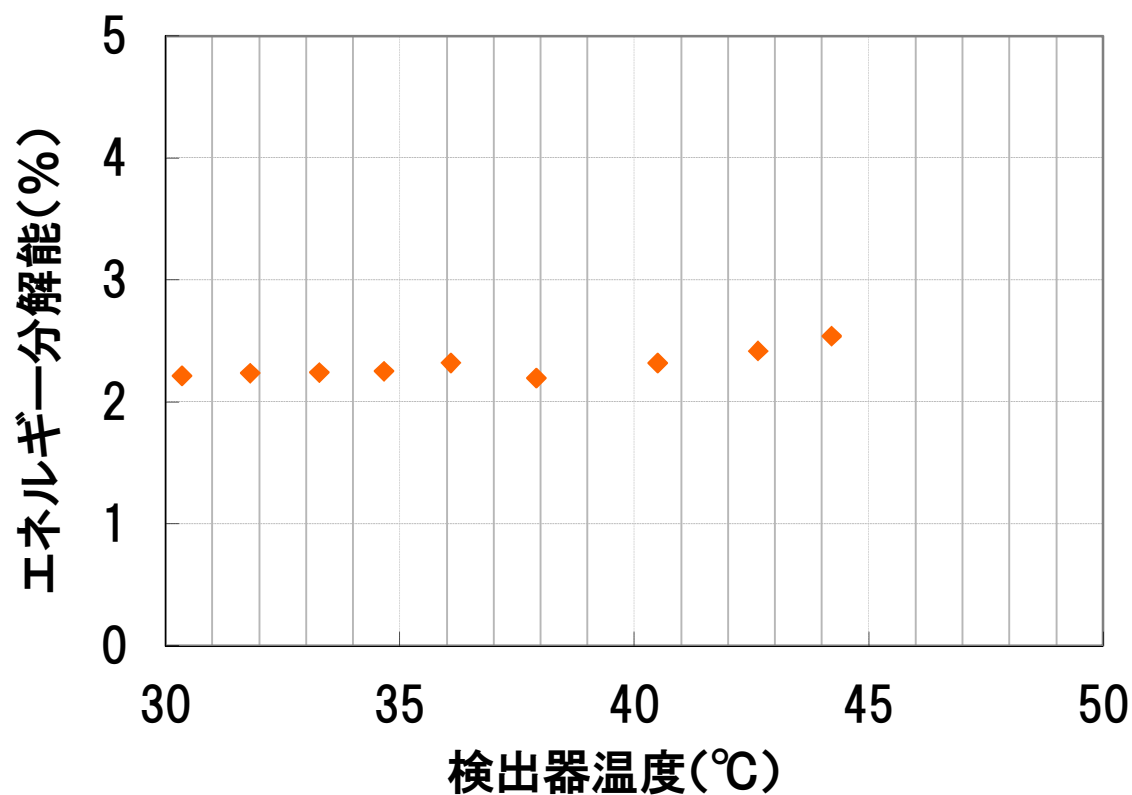
**位置分解能: 0.60~0.67 (m) の範囲
(4mm φ コリメータ使用)**



ガンマカメラを恒温槽に入れ、温度を変化させた際の分解能変化を測定

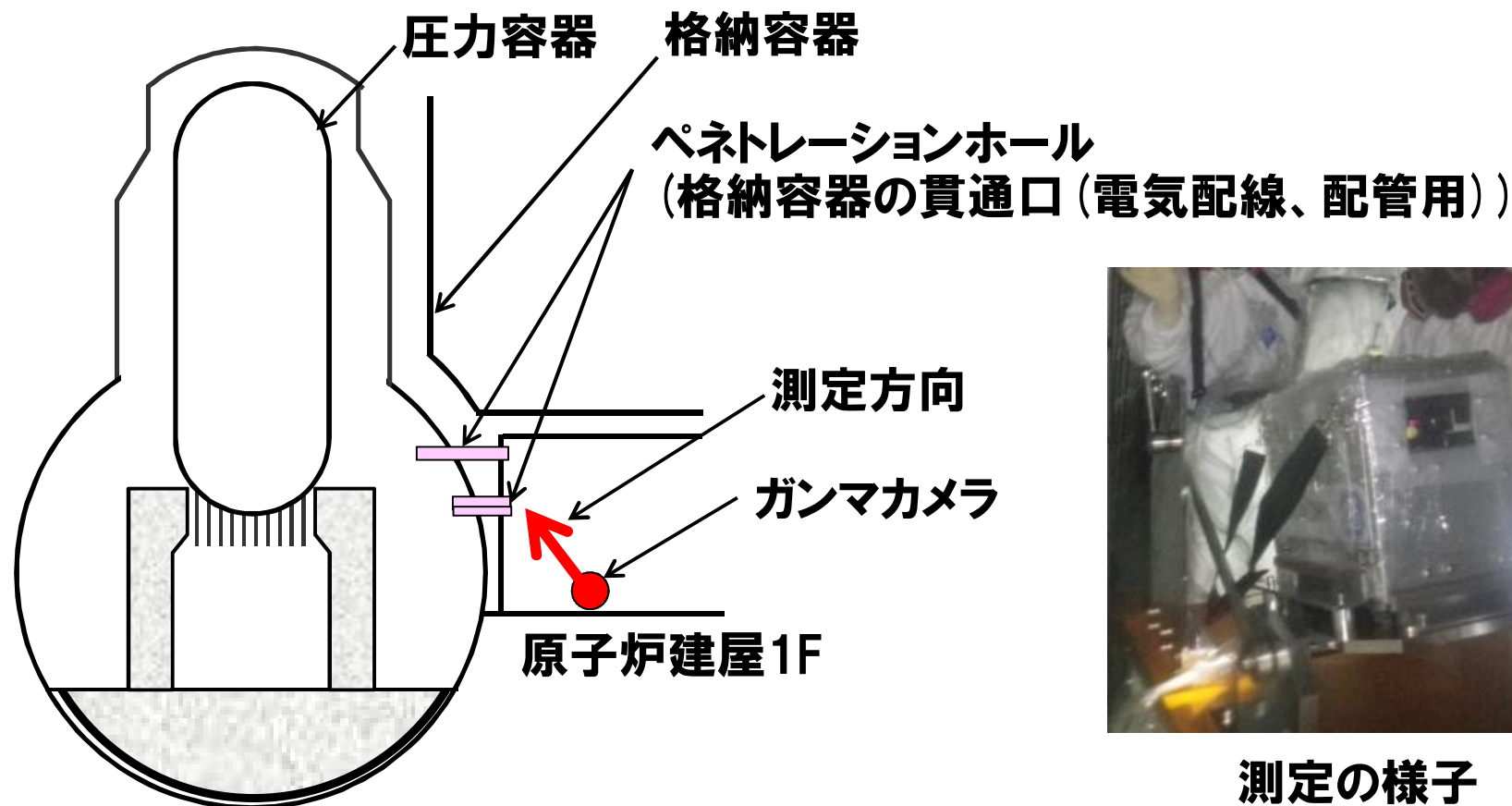
分解能: 2.2~2.5% (FWHM) @662keV (30~45°C)

⇒ 高い温度においても動作可能



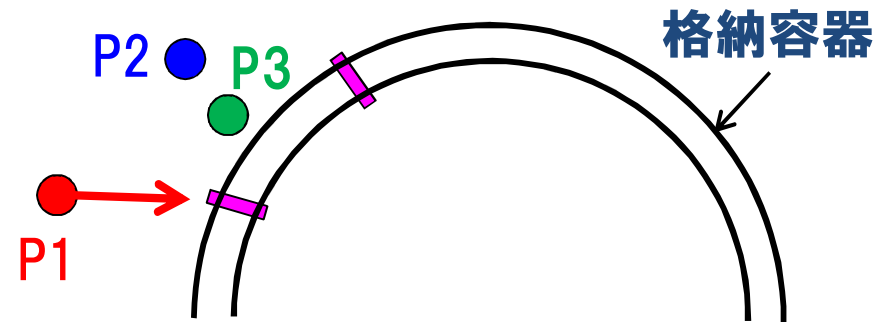
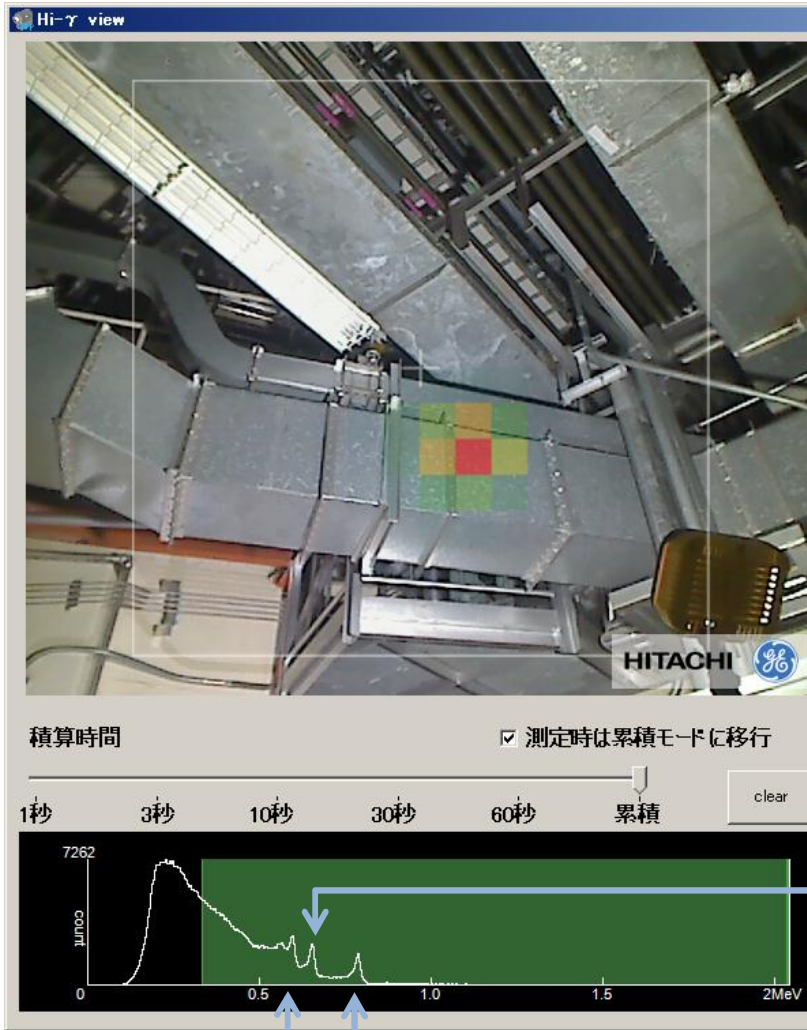
測定場所 原子炉建屋内 格納容器外

対象 ペネトレーションホール



測定の様子

P1からペネを測定



ホットスポットの線量率測定

ガンマカメラの測定値: 140 mSv/h

線量計の測定値: 153 mSv/h

Cs-137: 662 keV

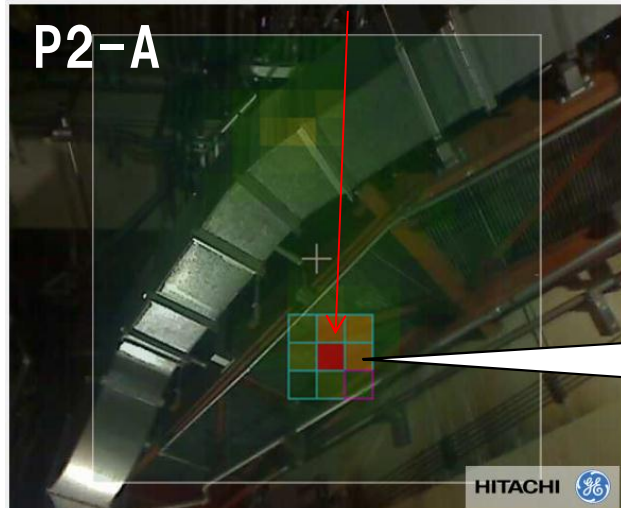
線源核種を特定

Cs-134: 605 keV
796 keV

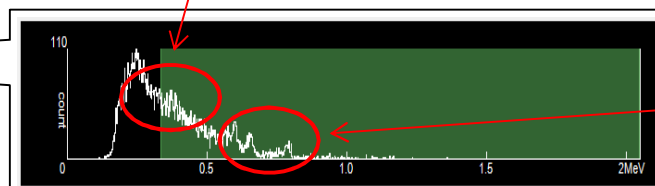
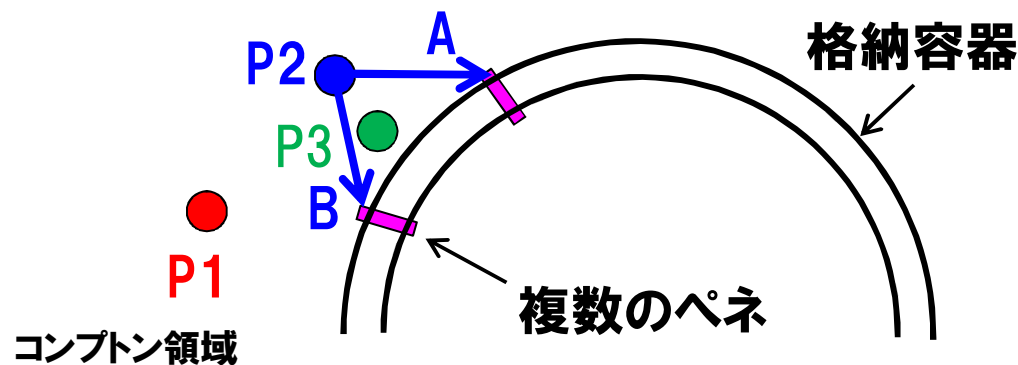
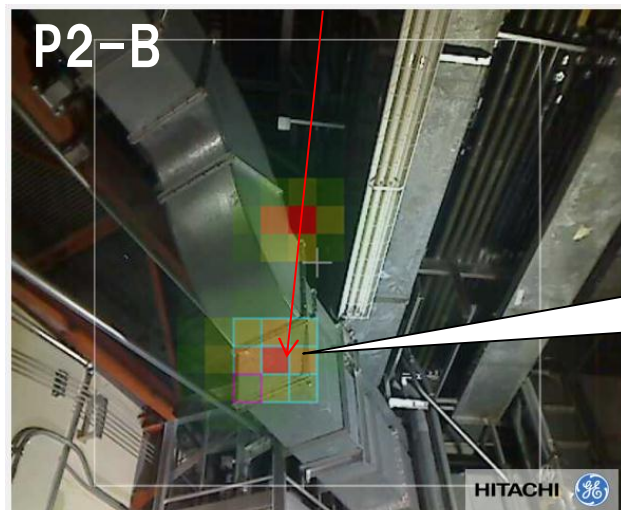
試作機を用いた測定例 - 線源位置の特定 -

P2から異なるペネを観測

格納容器の内部が閉止されている貫通口



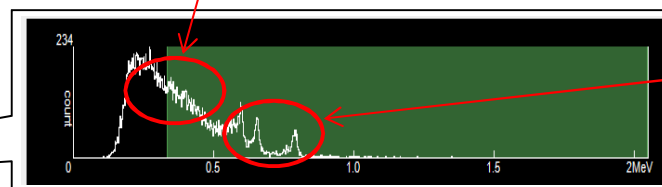
格納容器の外側で閉止されている貫通口



ピーク計数率/コンプトン計数率の値が小さい。

格納容器内部からの散乱線が支配的

コンプトン領域



ピーク計数率/コンプトン計数率の値が大きい。

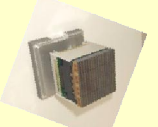
ペネ内部からの直達成分が支配的

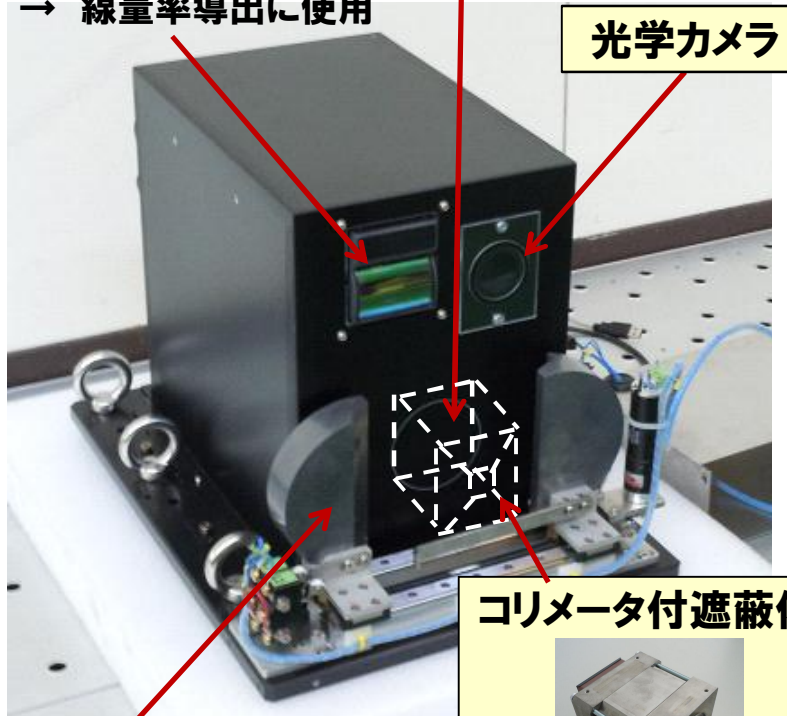
高線量率対応ガンマカメラ開発機※

**スキャン型
レーザ距離計**

各ピクセル毎に、
測定対象までの
距離を測定
→ 線量率導出に使用

**2次元ピクセル型
ガンマ線検出器
モジュール
(コリメータ付遮蔽体
に内蔵)**





光学カメラ

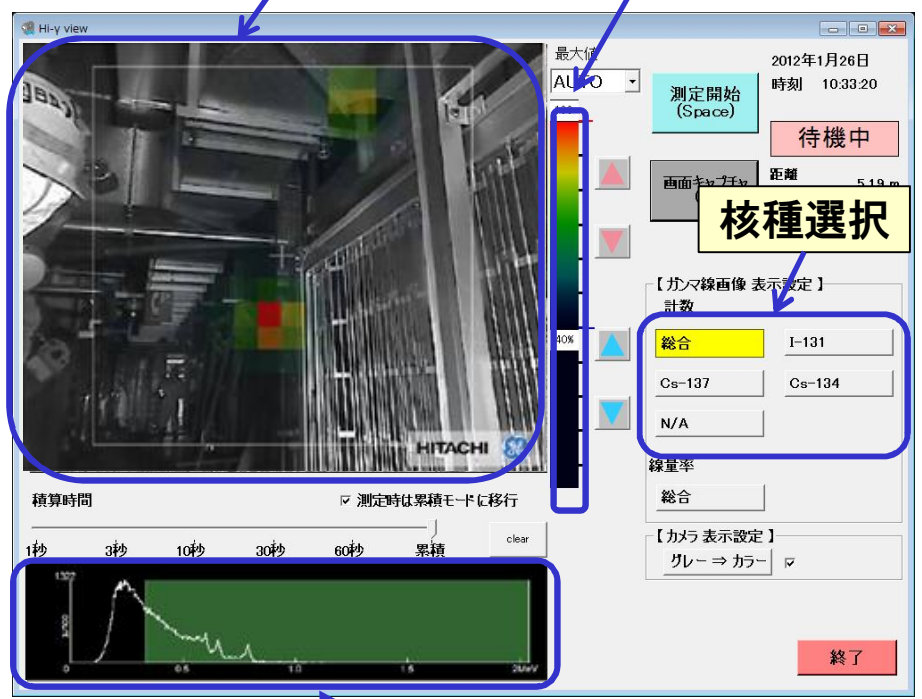
コリメータ付遮蔽体

シャッター機構

適用線量率範囲：～ 300mSv/h (装置設置位置)
**■ 福島第一原子力発電所原子炉建屋内高線量率エリア
 ～数Sv/h**
 (装置設置位置での線量率300mSv/hで、数Sv/hのエリアを測定可)

**ガンマ線強度分布
可視化画面**

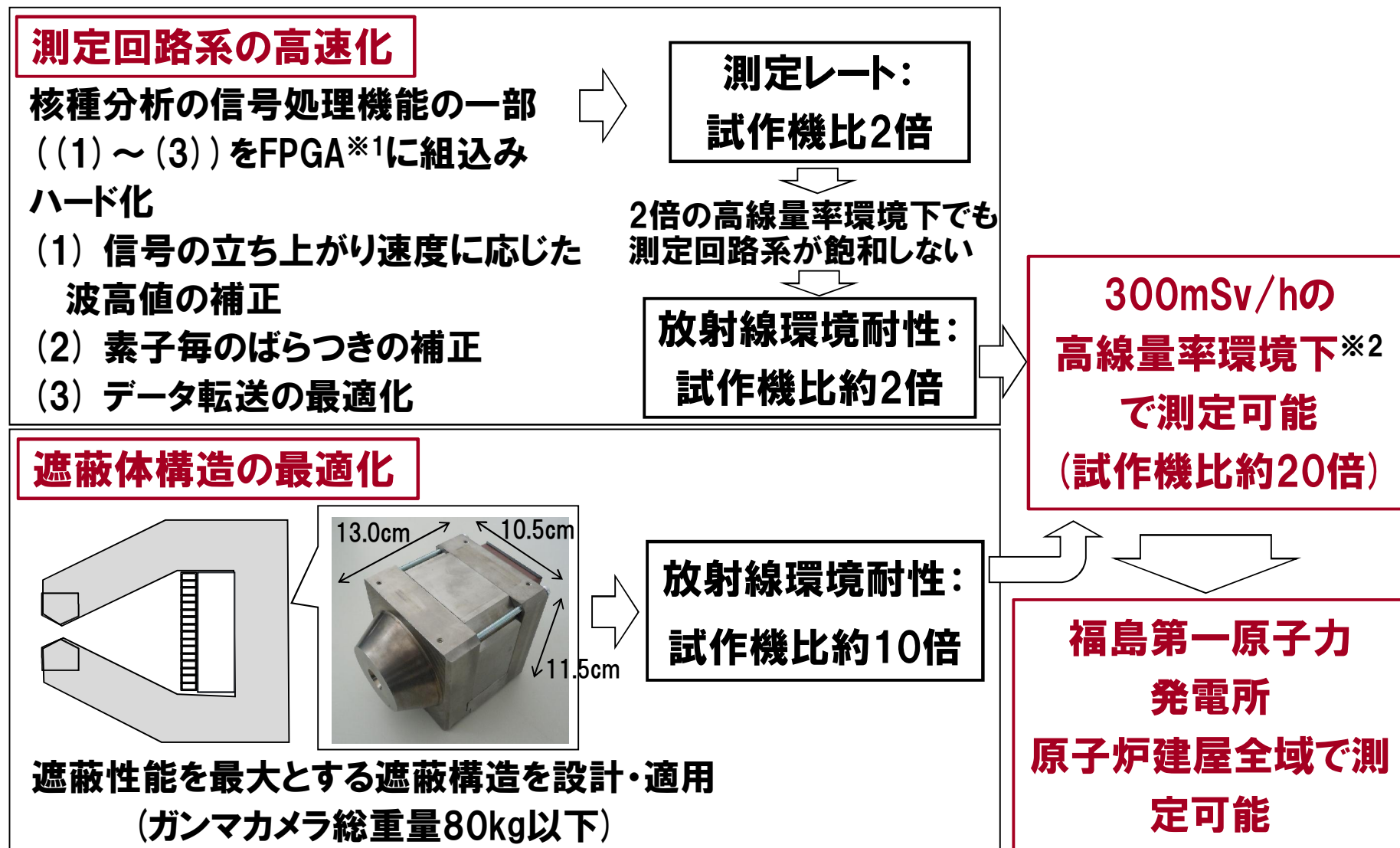
**ガンマ線強度
スケール**



核種選択

ガンマ線エネルギースペクトル

※本装置は、新エネルギー・産業技術総合開発機構の2012年度「災害対応無人化システム研究開発プロジェクト / 計測・作業要素技術の開発」により、開発した装置である。



※1 FPGA (Field-Programmable Gate Array) : 書き換え可能な大規模集積回路

※2 装置設置位置300mSv/hの高線量率環境下で測定可能であれば、原子炉建屋内全域 (~数Sv/h) を測定可能。

シャッター機構と差分処理

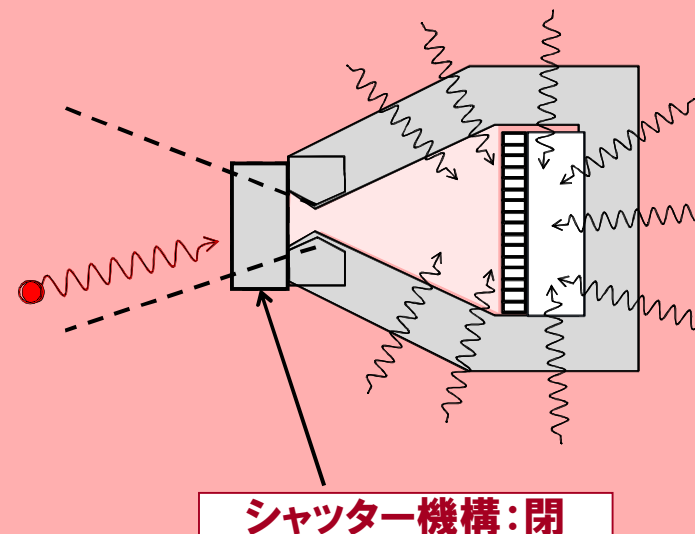
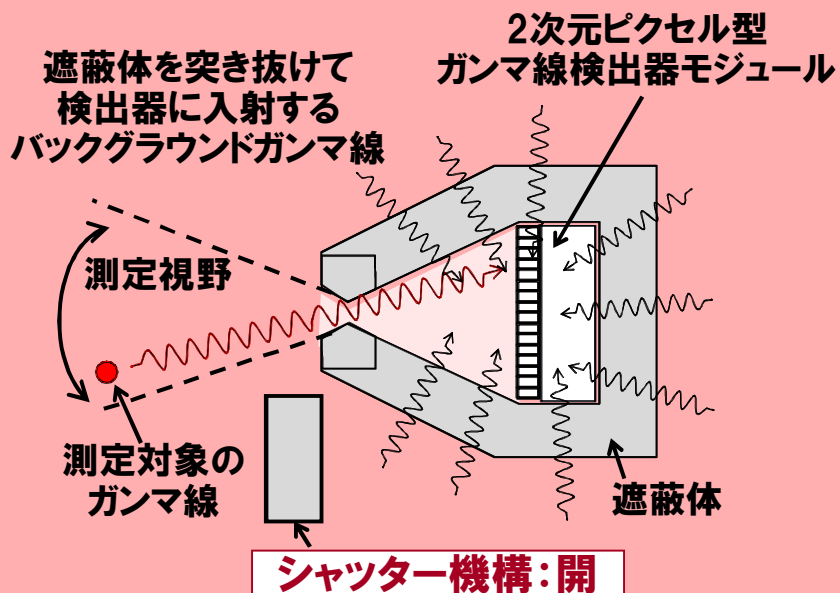
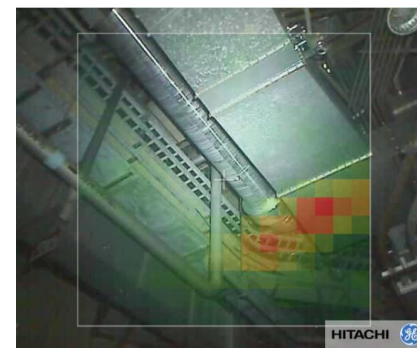
シャッター開時の測定



シャッター閉時の測定

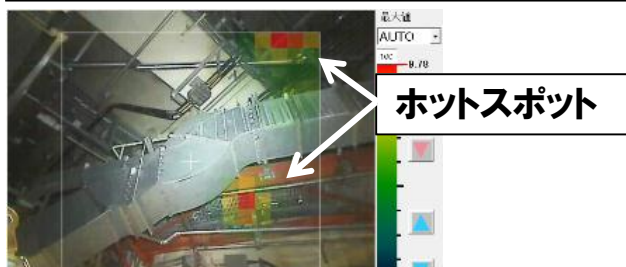


測定対象からのガンマ線のみ抽出



2012.5-7 測定実施エリア

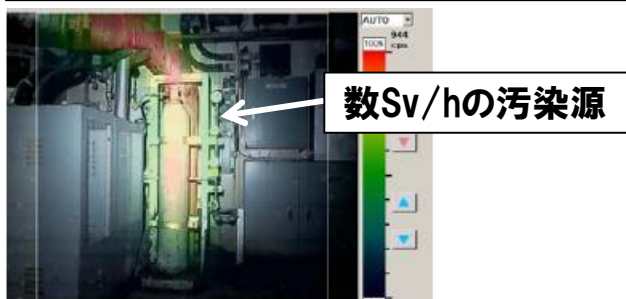
ガンマカメラの測定結果をもとに
PCV内部調査用ペネ※1の選定・調査計画策定/調査実施
→ 廃炉のための調査作業の加速



ガンマカメラ測定結果例※3

2013.12 測定実施エリア

高線量率（～数Sv/h）の汚染源特定
→ 廃炉のための除染・遮蔽作業の加速

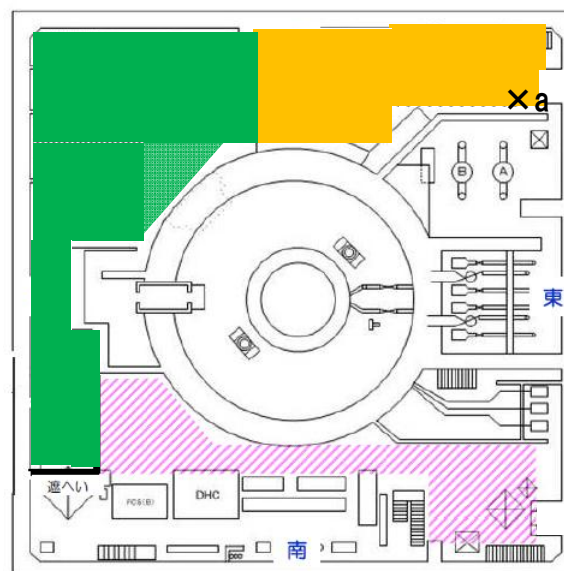


ガンマカメラの測定結果例※3

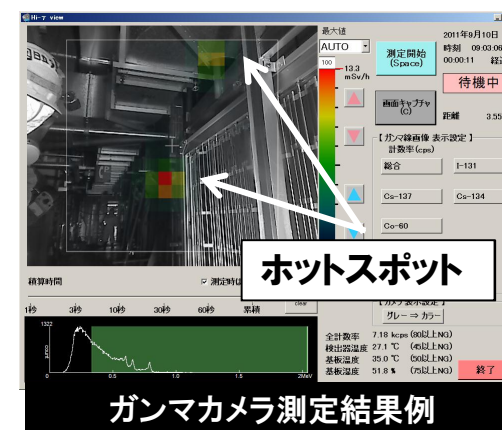
2011.9 測定実施エリア

ガンマカメラの測定結果をもとに
遮蔽体設置の最適化/設置工事実施
→ 遮蔽体設置コスト低減:約1/2
作業者の被ばく低減:約1/2

遮蔽実施前後の線量率
a地点 90mSv/h → 10mSv/h
PCV (格納容器) 内ガス管理システム※2工事実施
→ 作業者の被ばく低減:1/9
廃炉のための機器設置作業の加速



福島第一原子力発電所1号機 原子炉建屋※3



ガンマカメラ測定結果例

※1 PCV内部と外部を貫く管（電気配線、ガス配管他に使用）
※3 東京電力株式会社ホームページ資料より抜粋

※2 PCV内ガス内放射性核種を測定（臨界になっていないことの確認）

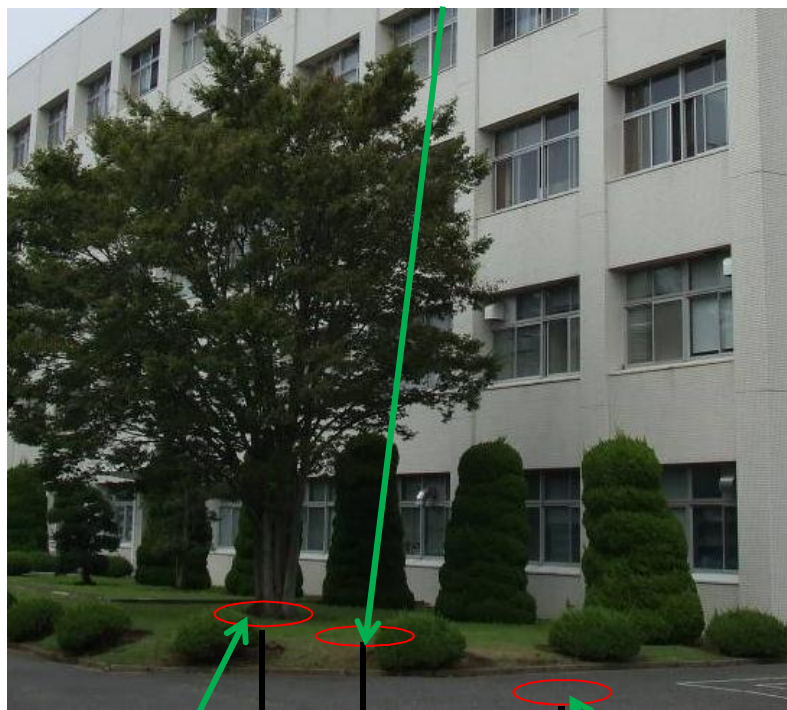
一般環境（茨城県北部）での測定例（試作機使用）

測定場所

茨城県 日立市

対象:木(ケヤキ)

ガンマカメラ設置位置



木の根元

アスファルト

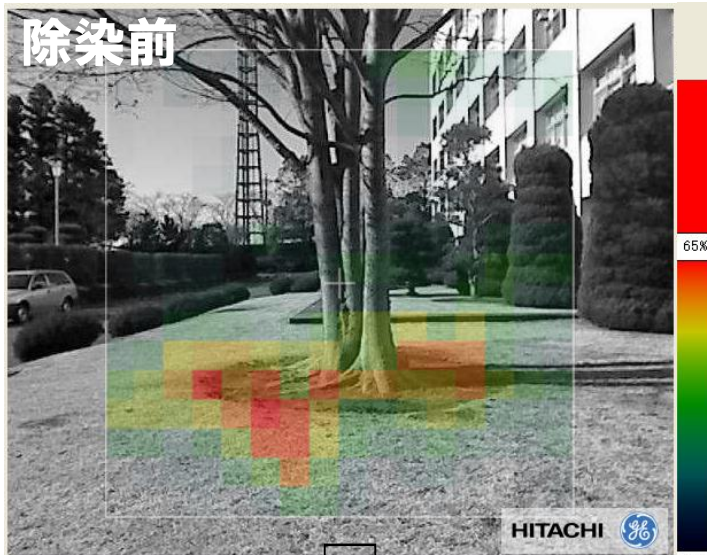
空間線量

サーベイメータの測定値 [$\mu\text{Sv/h}$]

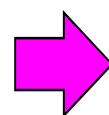
場所	地表からの距離 [cm]		
	10	50	100
木の根元	1.92	0.85	0.58
アスファルト	0.21	0.19	0.19
ガンマカメラ 設置位置	0.36	0.29	0.27

- ・木の根元の線量率が高い
- ・設置位置の線量率は0.3 $\mu\text{SV/h}$

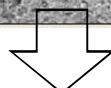
除染の効果確認 (試作機使用)



- 測定時間30分
- 根元に集積



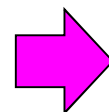
低線量率環境下で放射線分布可視化
(さらなる高感度化が必要)



汚染箇所の表面の土壌を削ることで、除染を実施



- 根元の集積が低下
(除染係数=1.96)



除染効果が確認可能

原子力発電所外の一般環境及び発電所内の低線量率エリア用

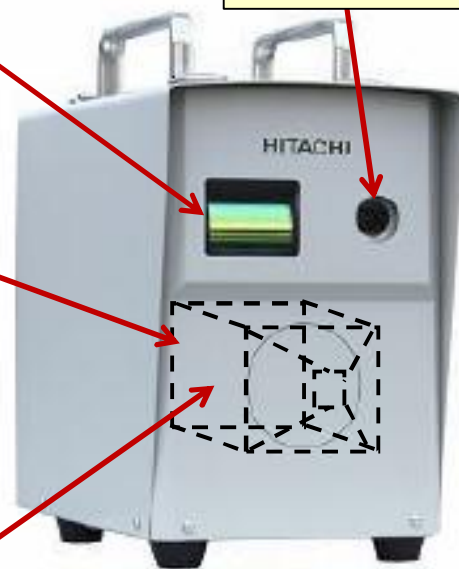
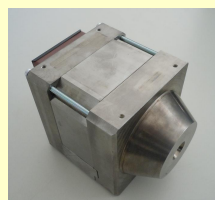
小型化 : 試作機の70%の体積

高感度化 : 試作機比約5倍の感度

スキャン型
レーザ距離計

光学カメラ

コリメータ付
遮蔽体

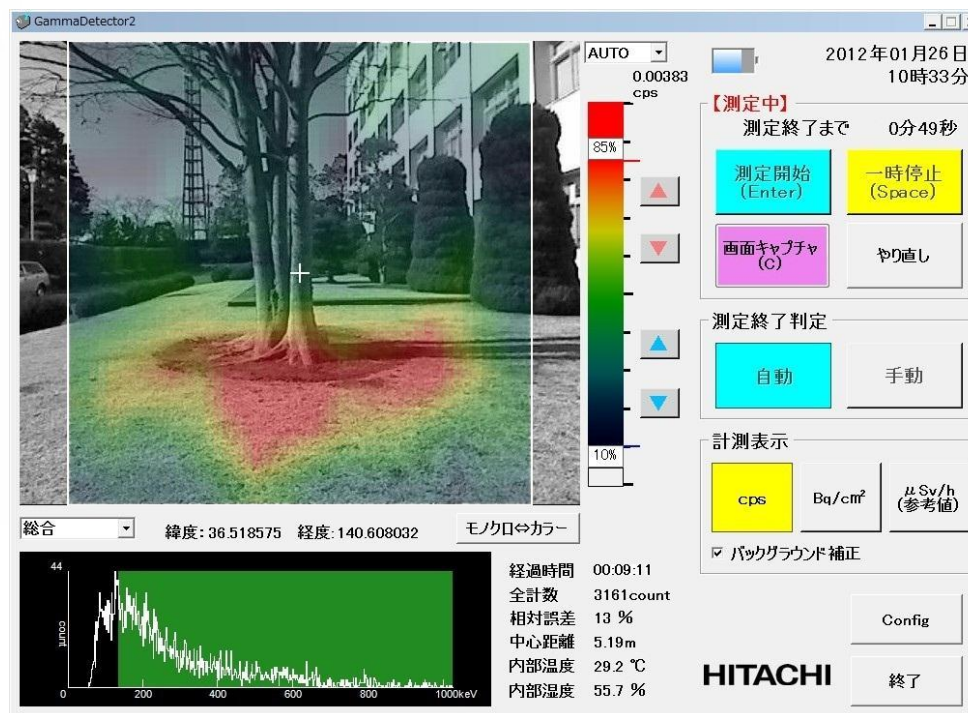


2次元ピクセル型
ガンマ線検出器
モジュール
(コリメータ付遮蔽体に内蔵)



- 最大放射線バックグラウンド 10mSv/h (Cs-137)
- 帰還困難区域(除染未実施) 数 μ Sv/h~数10 μ Sv/h
- 除染実施後エリア 0.01 μ Sv/h ~
- 発電所内の低線量率エリア 数10 μ Sv/h程度

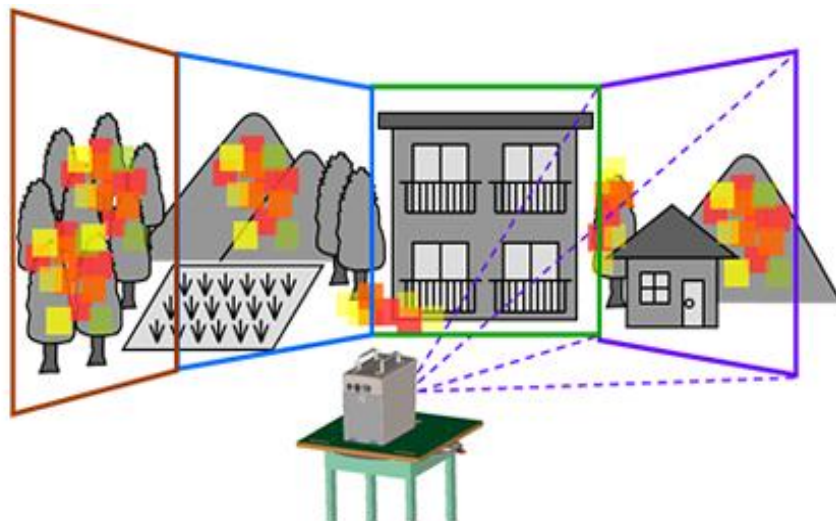
※いずれもカメラ位置1mでの空間線量率



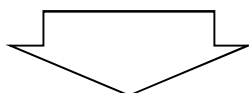
一般環境は、バックグラウンドガンマ線が弱いことからシャッター機能を設けていない。

パノラマ測定機能

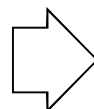
ホットスポット等の影響評価の高精度化



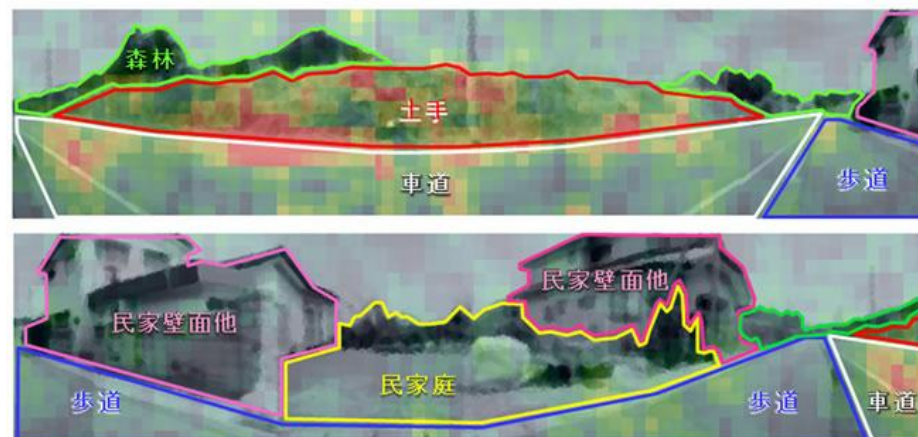
周囲360度からガンマカメラに
飛来する放射線量を測定



周囲に偏在するホットスポット等の影響を
定量分析



除染後の線量率予測が可能



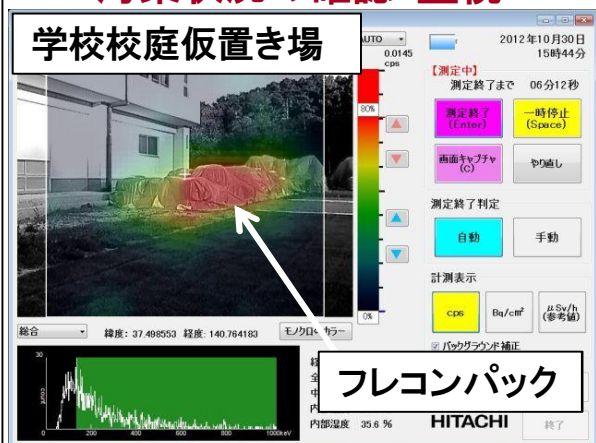
項目 \ エリア	土手	車道	歩道	民家庭	民家壁面地	森林	空 (選択エリア外)	全体
実測値 [$\mu\text{Sv/h}$]	0.09	0.11	0.07	0.04	0.03	0.06	0.05	0.45
除染率	70%	80%	80%	85%	0%	0%	0%	-
除染後予測 [$\mu\text{Sv/h}$]	0.03	0.02	0.01	0.01	0.03	0.06	0.05	0.21

※上図は機能イメージを表わすもので、実際の画面とは異なります。

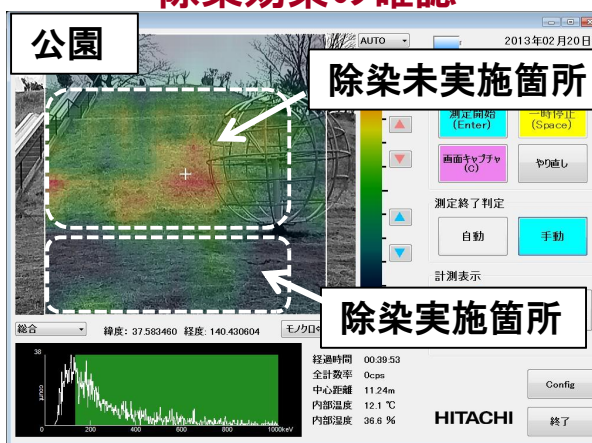
■ 安全・安心情報の提供

民家、公園、学校、公共施設等の測定(環境省からの受託)

汚染状況の確認・監視



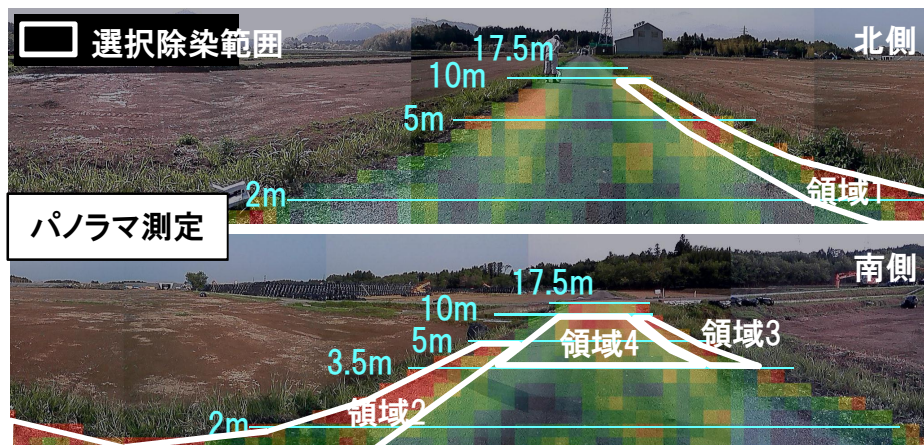
除染効果の確認



除染結果の検証



■ 作業の効率化による除染の加速、及び、汚染物低減

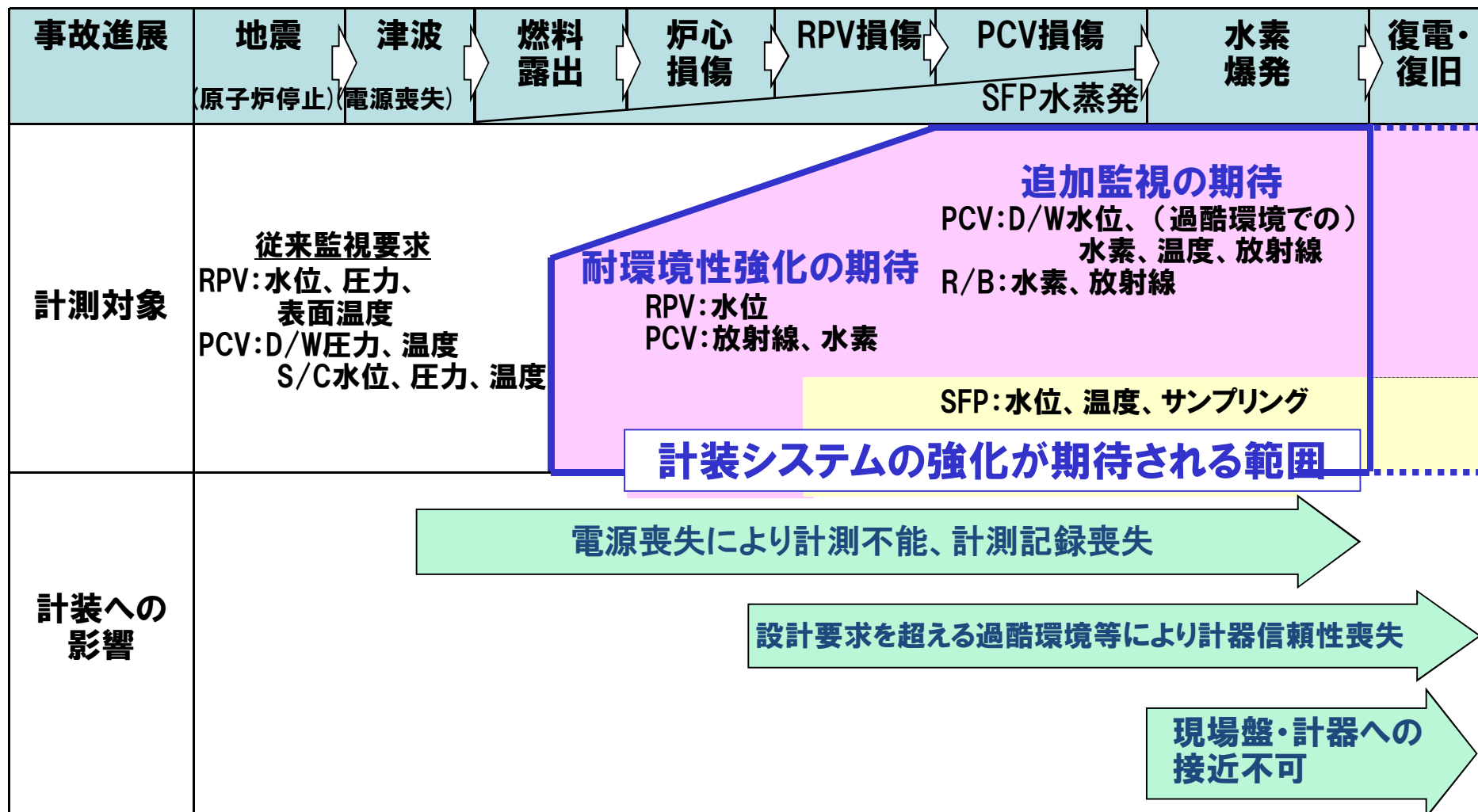


除染方法	所要時間[分]			
	高圧水洗浄	吸引清掃	高圧水洗浄	合計
選択範囲	15	15	25	55
残り全面	40	29	40	109

除染作業時間を約35%に低減
汚染物低減

2. 過酷環境対応の放射線計測技術

福島第一原子力発電所事故事象の整理と課題



【略語】

RPV: 原子炉圧力容器、PCV: 原子炉格納容器、D/W: ドライウェル、S/C: 圧力抑制室

R/B: 原子炉建屋、SFP: 使用済燃料貯蔵プール

過酷事故時の放射線モニタへの要求 → 多様化、多重化

■ 多様化への対応

	従来	本開発
検出器	電離箱	光ファイバ型モニタ
信号の種類	電気信号 (検出部に高電圧印加)	光信号 (検出部に電圧印加不要)
信号の伝送	電線	光ファイバ
モニタ概要		

多重化に関しては、複数の検出器を並列に設置することで対応。

環境条件

プラントの状態	SA1※1	SA2※2	SA3a※3
PCV環境条件	<ul style="list-style-type: none"> ・171°C / 蒸気 ・0.31MPa ・5×10^6Gy/6ヶ月 	<ul style="list-style-type: none"> ・300°C / 蒸気 ・1.0MPa ・5×10^6Gy/6ヶ月 	
R/B環境条件	<ul style="list-style-type: none"> ・66°C / 湿度100% ・3.4kPa ・3×10^5Gy/6ヶ月 	<ul style="list-style-type: none"> ・66°C / 蒸気 ・0.01MPa ・3×10^5Gy/6ヶ月 	<ul style="list-style-type: none"> ・100°C / 蒸気 ・0.01MPa ・2×10^6Gy/6ヶ月
計測時間	3日以上	3日以上	3日以上
D/W及びS/C線量率	○	○	
R/Bエリア線量率	○	○	○

※1 SA1: 炉心が損傷しているが、原子炉压力容器 (RPV) 内に保持されている状態。

※2 SA2: 原子炉压力容器 (RPV) 破損により、熔融燃料が格納容器内に放出された状態。

※3 SA3a: 格納容器 (PCV) が損傷している状態。(スクラム24時間後に注水は成功)

開発目標

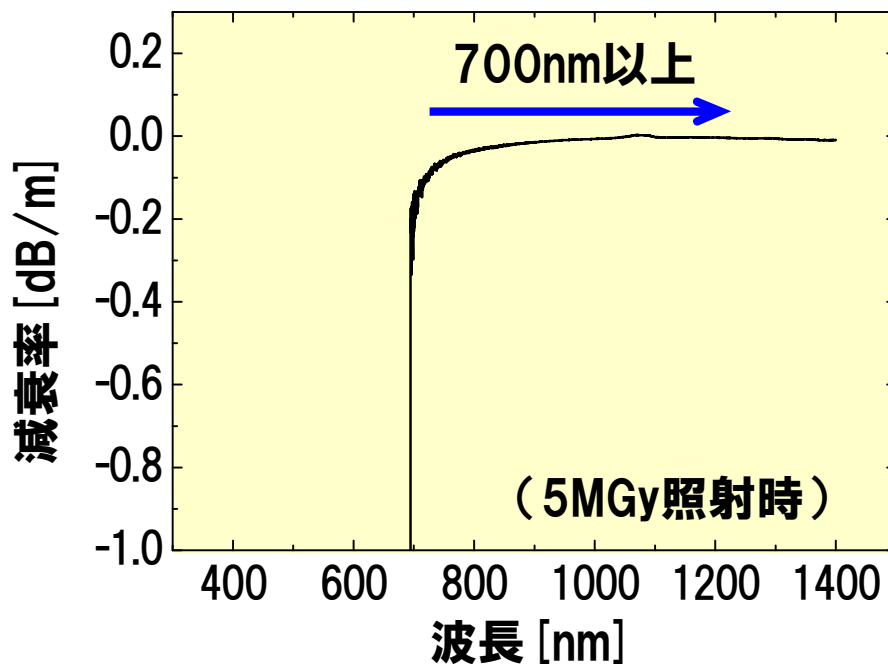
計測パラメータ	計測レンジ	精度	耐高温性	耐放射線性
D/W及びS/C線量率	$10^{-2} \sim 10^5$ Gy/h	±4%FS以内※4	300°C (72h)	5×10^6 Gy
R/Bエリア線量率	$10^{-3} \sim 10^1$ Gy/h	±4%FS以内※4	100°C (72h)	2×10^6 Gy

※4 ±4%FS以内: 直線目盛換算フルスケール100%の±4%以内

課題

高線量照射時に、光ファイバの
光透過特性が劣化

光ファイバ(耐放性)の光透過特性



対応

放射線照射により
長波長(700nm以上)で発光する素子
(Nd:YAG)の適用

本開発の素子	発光波長[nm]
Nd : YAG	1060

従来素子	発光波長[nm]
Tl : NaI	415
BGO	480
Ce : GSO	430
Ce : LSO	420
Ce : YAP	347

光ファイバ型放射線モニタの測定原理

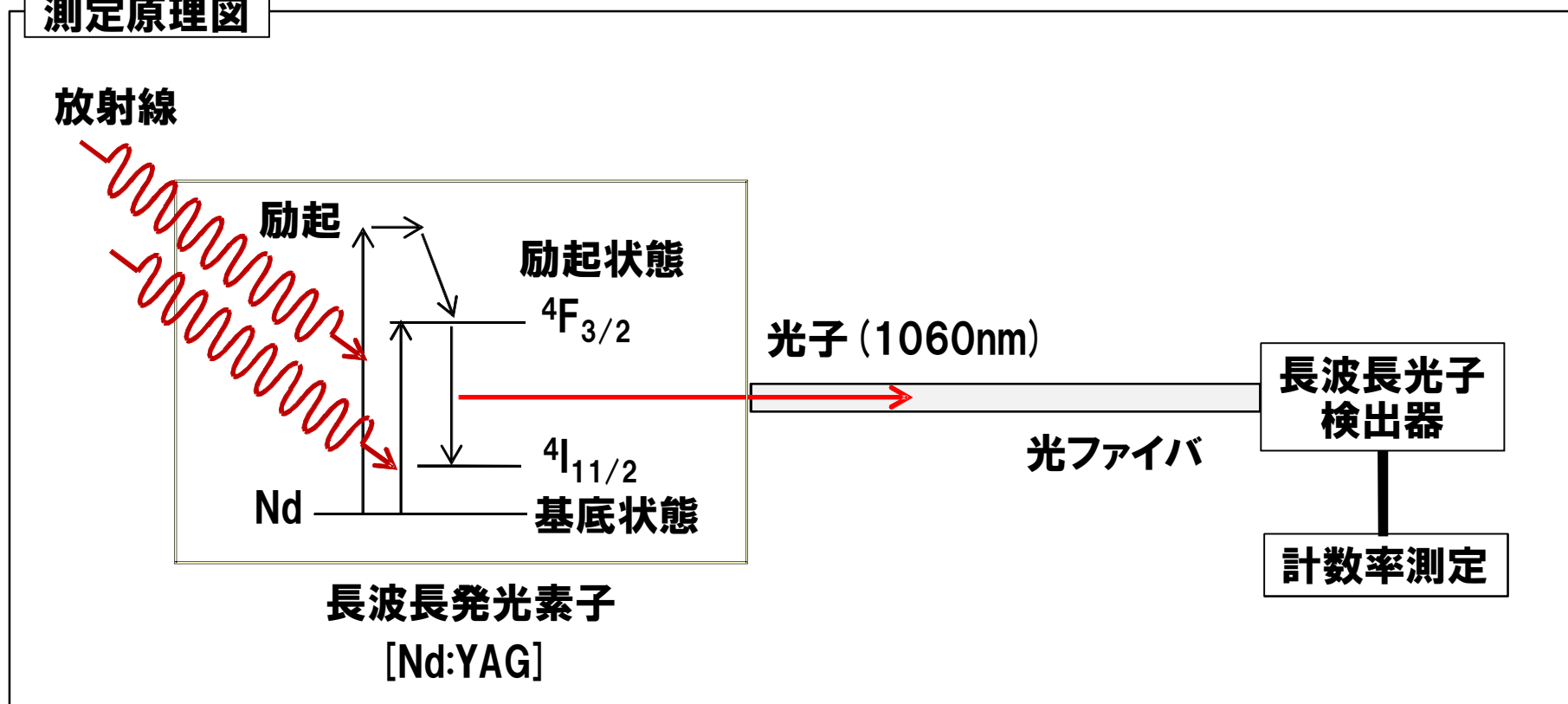
放射線が素子入射 → 素子中のNdが励起

→ $4F_{3/2}$ 励起状態から $4I_{11/2}$ 励起状態への遷移時に1060nmの光子を放出

→ 光ファイバで伝送 → 光子を検出 → 電気信号に変換 → 計数率測定

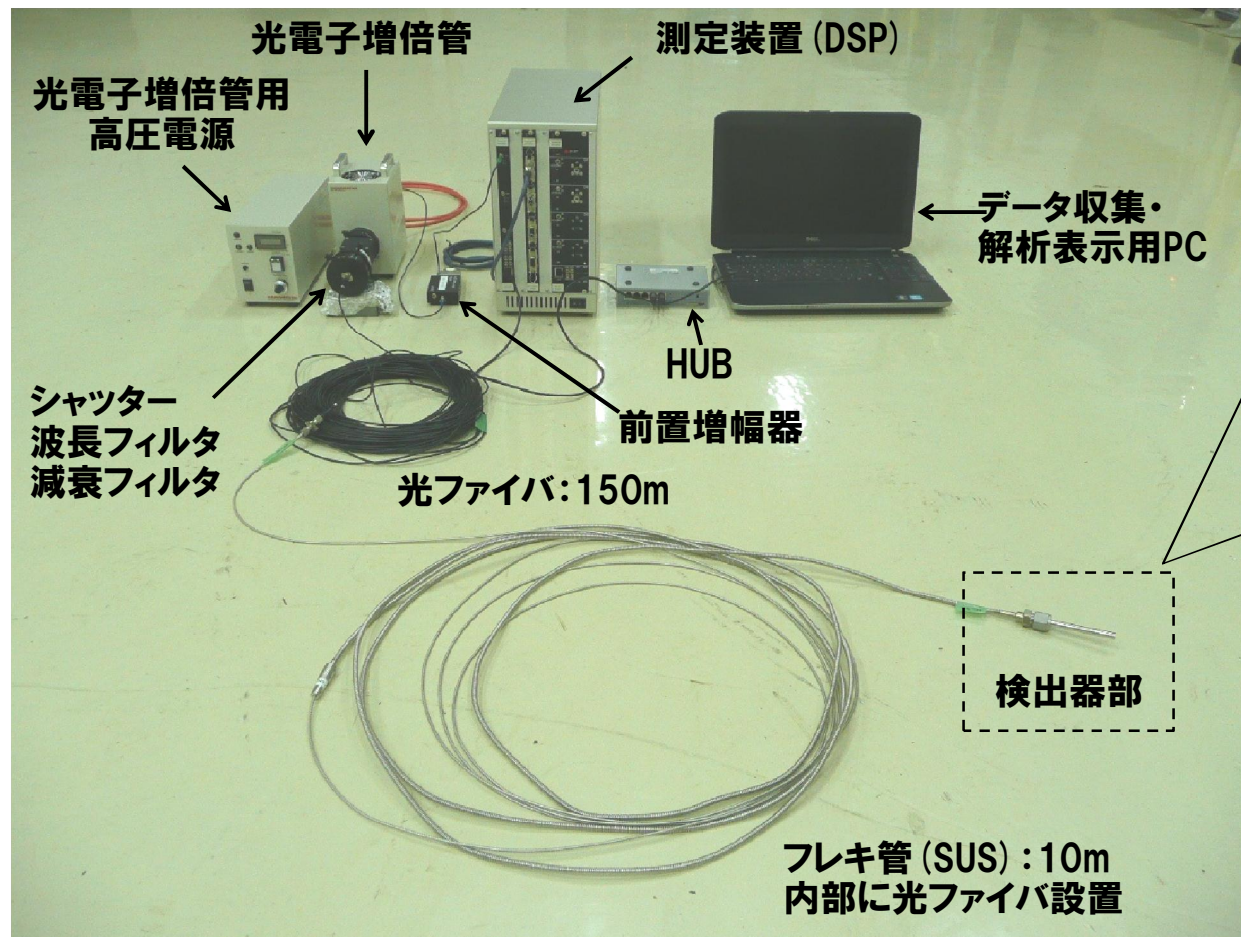
線量率が計数率に比例する場合、計数率を測定することで線量率が計測できる。

測定原理図



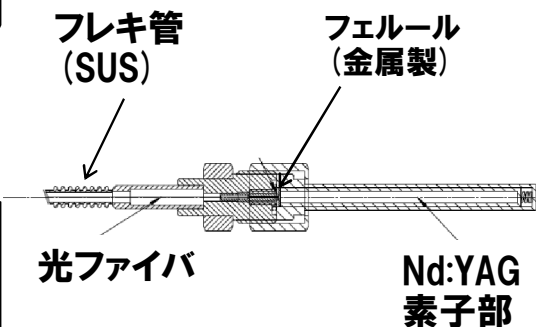
試作モニタ概要

検出器部での発光を、光ファイバで伝送し、波長フィルタ及び減衰フィルタで調整後※1、光電子増倍管で電気信号に変換し、測定装置 (DSP※2) で測定。



光ファイバ: ポリイミドコート
(フレキ管から検出器部まで、
耐熱300℃以上で設計。)

検出器部構造



※1 波長フィルタでBG光除去、減衰フィルタで光量調整

※2 DSP: Digital Signal Processor

試験場所

大阪府立大学放射線研究センター

試験内容

線量率をパラメータに、計数率を測定

使用線源:Co-60

線量率範囲: $10^{-2}\text{Gy/h} \sim 9.53 \times 10^4\text{Gy/h}$

※1 $10^{-2}\text{Gy/h} \sim 10^2\text{Gy/h}$

減衰フィルタ無し、測定計数率の補正無し。

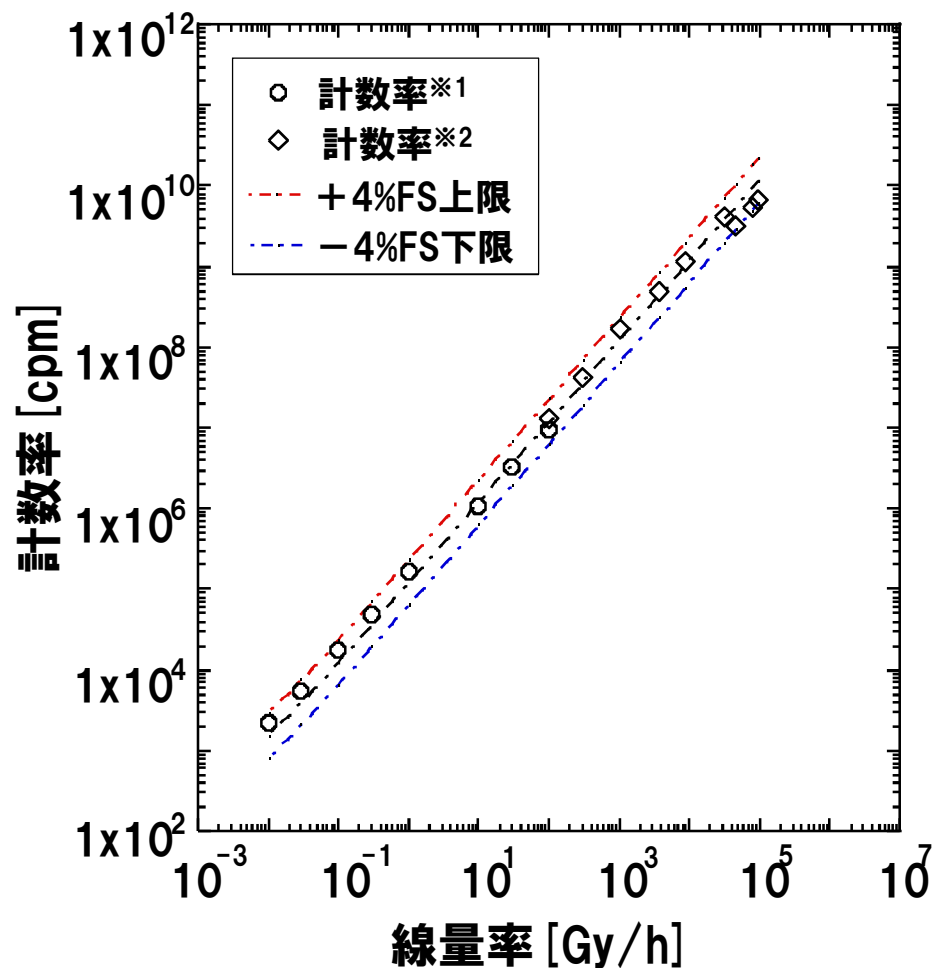
※2 $10^2\text{Gy/h} \sim 9.54 \times 10^4\text{Gy/h}$

減衰フィルタ (1/10) を3枚使用、

測定計数率 $\times 1000$ を計数率とした。

試験結果

$10^{-2}\text{Gy/h} \sim 9.54 \times 10^4\text{Gy/h}$ まで、
目標仕様である $\pm 4\%FS$ 以内での
線量率線形性を確認。



試験場所

大阪府立大学放射線研究センタ

試験内容

使用線源:Co-60

線量率: 9.53×10^4 Gy/h

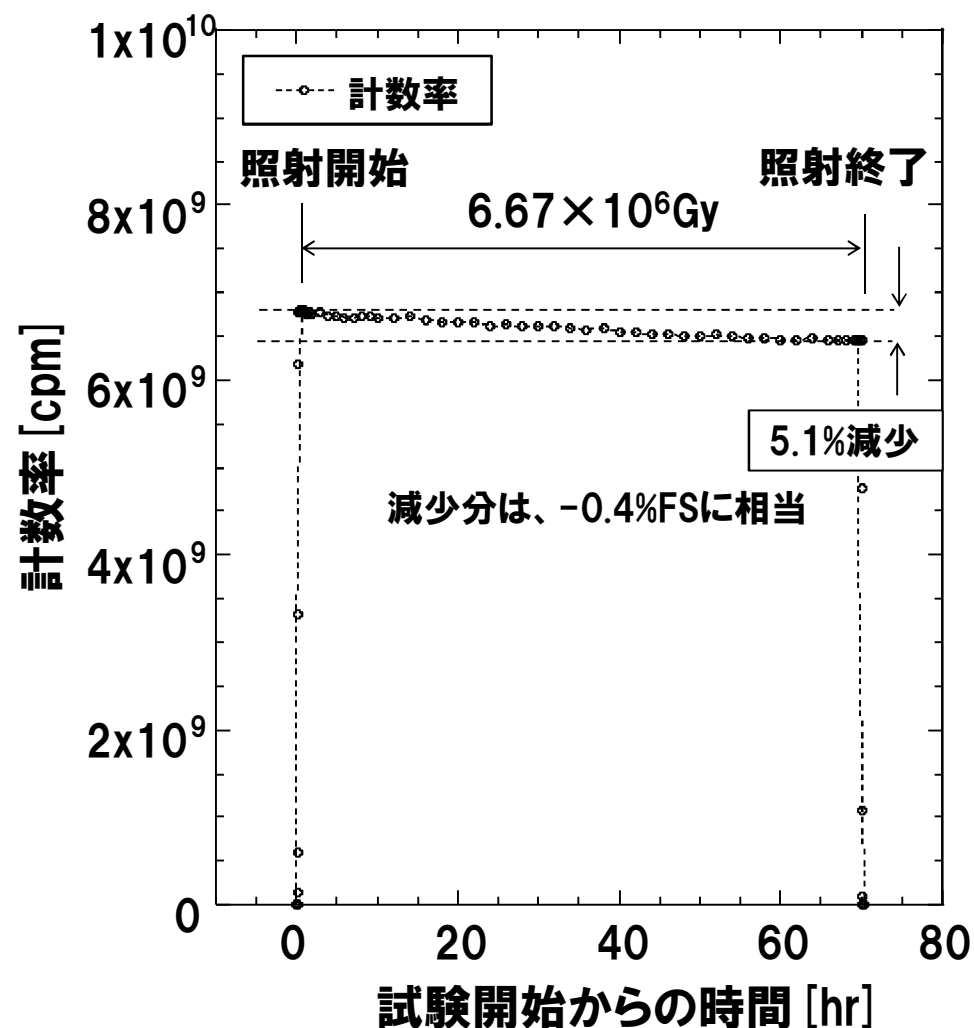
積算線量: 6.67×10^6 Gy (照射時間:70hr)

※2 減衰フィルタ(1/10)を3枚使用、
測定計数率×1000を計数率とした

試験結果

高線量率環境下で、70時間安定に測定。
照射後の計数率が、照射開始時に対して
5.1%(0.4%FS)減少。

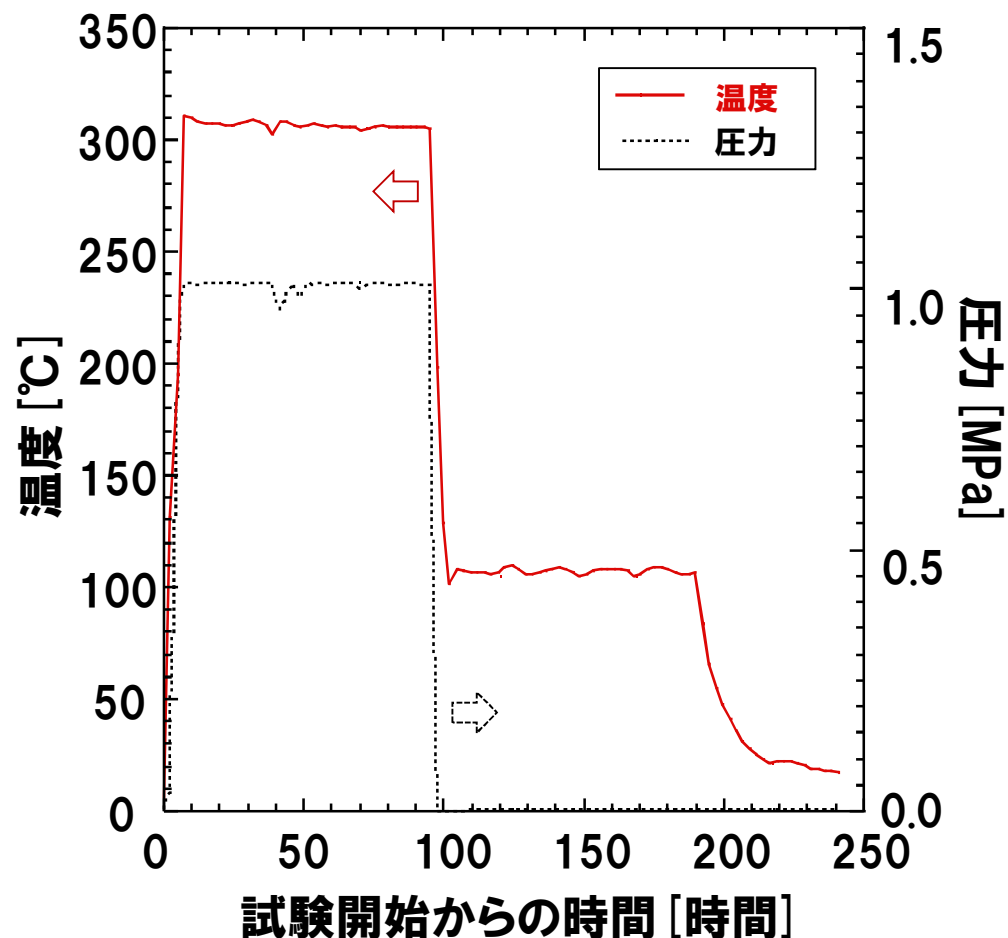
(目標仕様(±4%FS以内)に対する影響は、
十分小さい。)



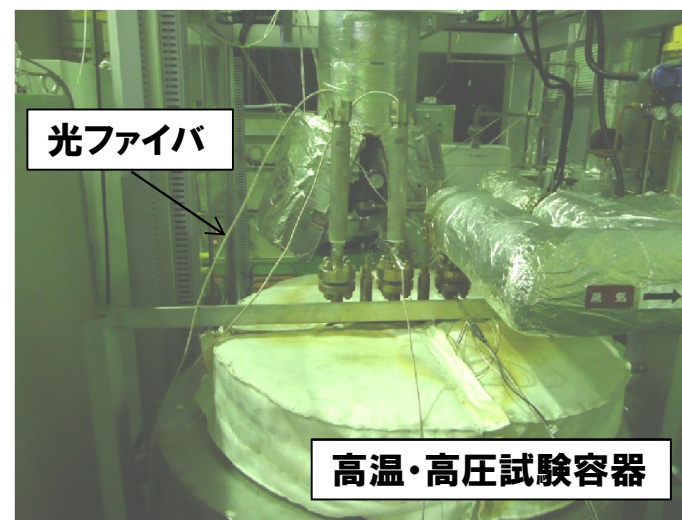
性能評価試験結果 -耐環境試験-

試験内容

300℃、1MPaの水蒸気に3.5日間、及び、
100℃、0.01MPaの水蒸気に3.5日間、計7日間曝露。
曝露前後で、線量率に対する計数率を測定。



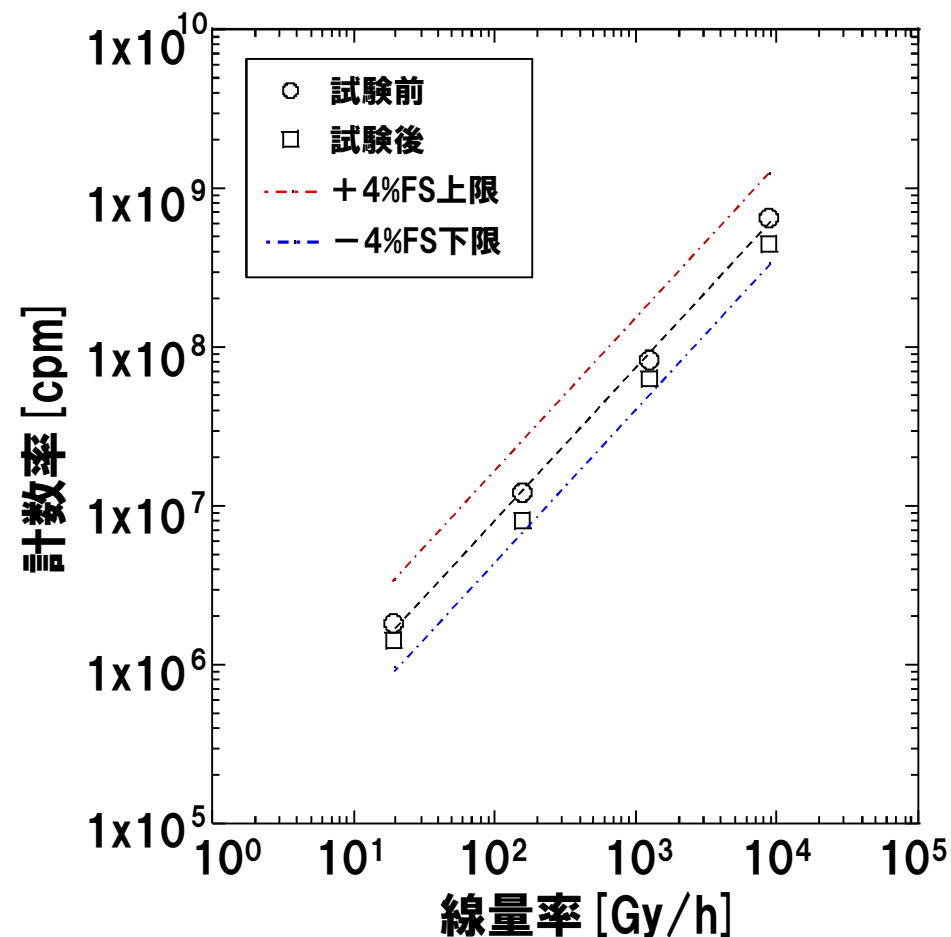
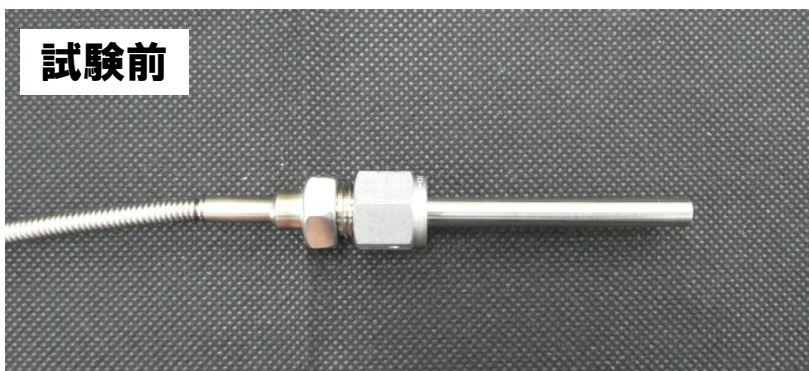
試験の様子



試験結果

試験後、検出器外観が黄色に変色（表面が酸化）。

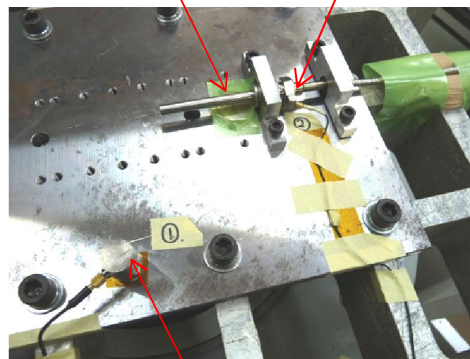
計数率が約30%減少（約-2.9%FS）したが、目標仕様（±4%FS以内）を満たすことを確認。



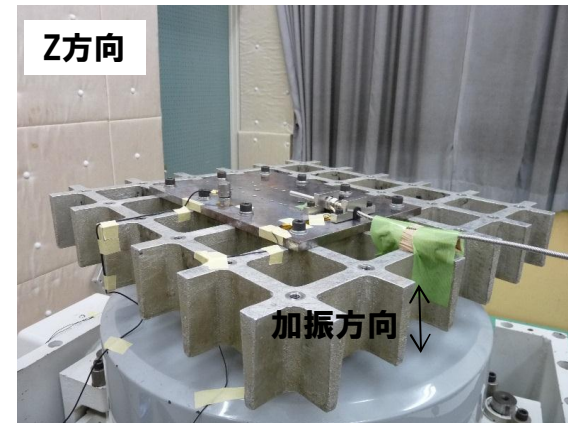
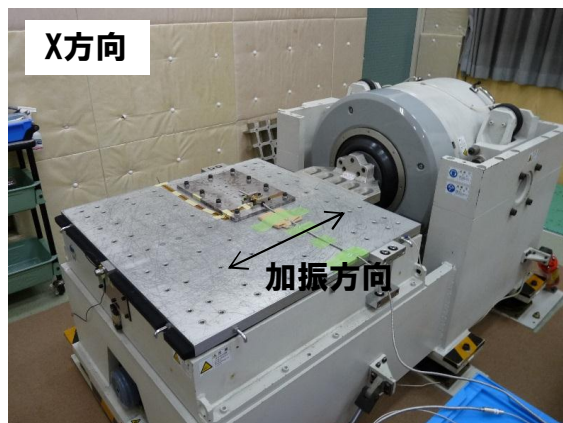
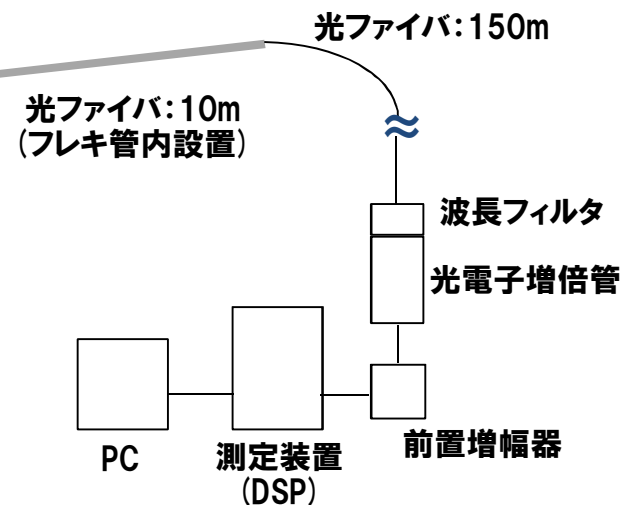
試験内容

- 正弦波掃引試験
5～33Hzを連続掃引
(共振周波数の有無の確認)
- 加振試験
X及びY方向:4G
Z方向 :2G
(加振の測定への影響確認)

Cs-137線源 (2.0MBq)測定点② (センサ)



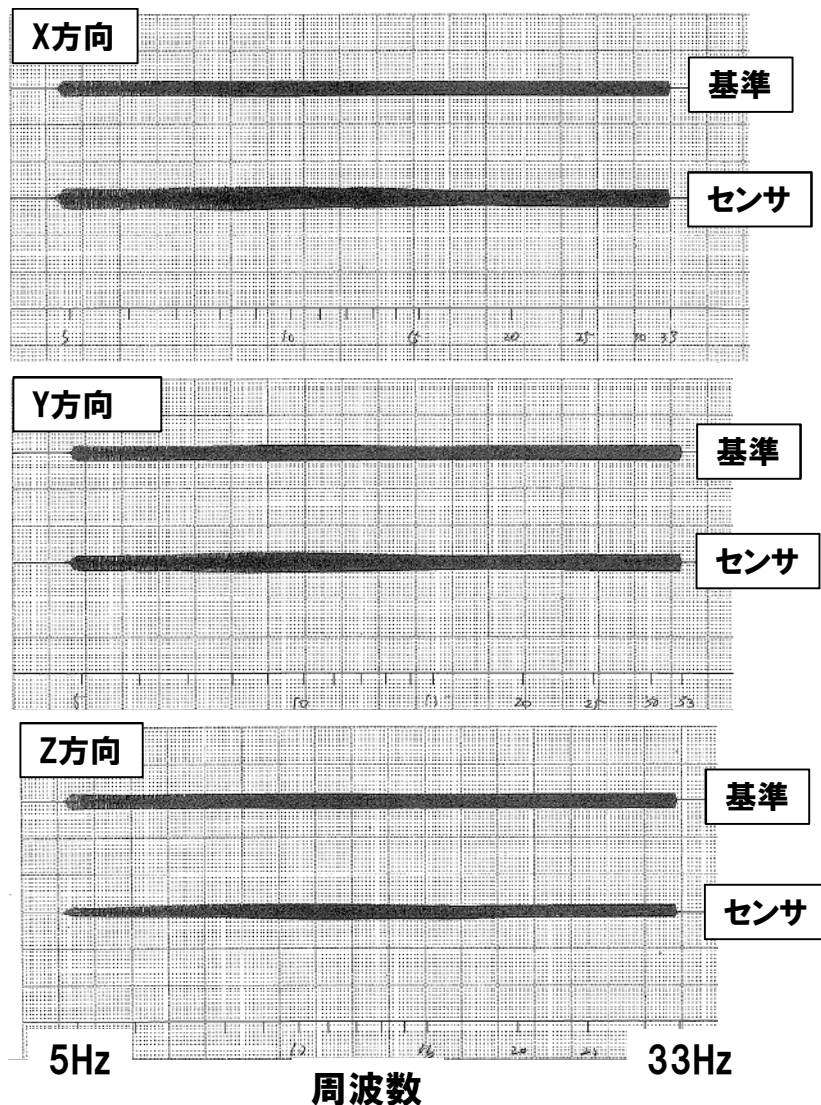
測定点① (基準)



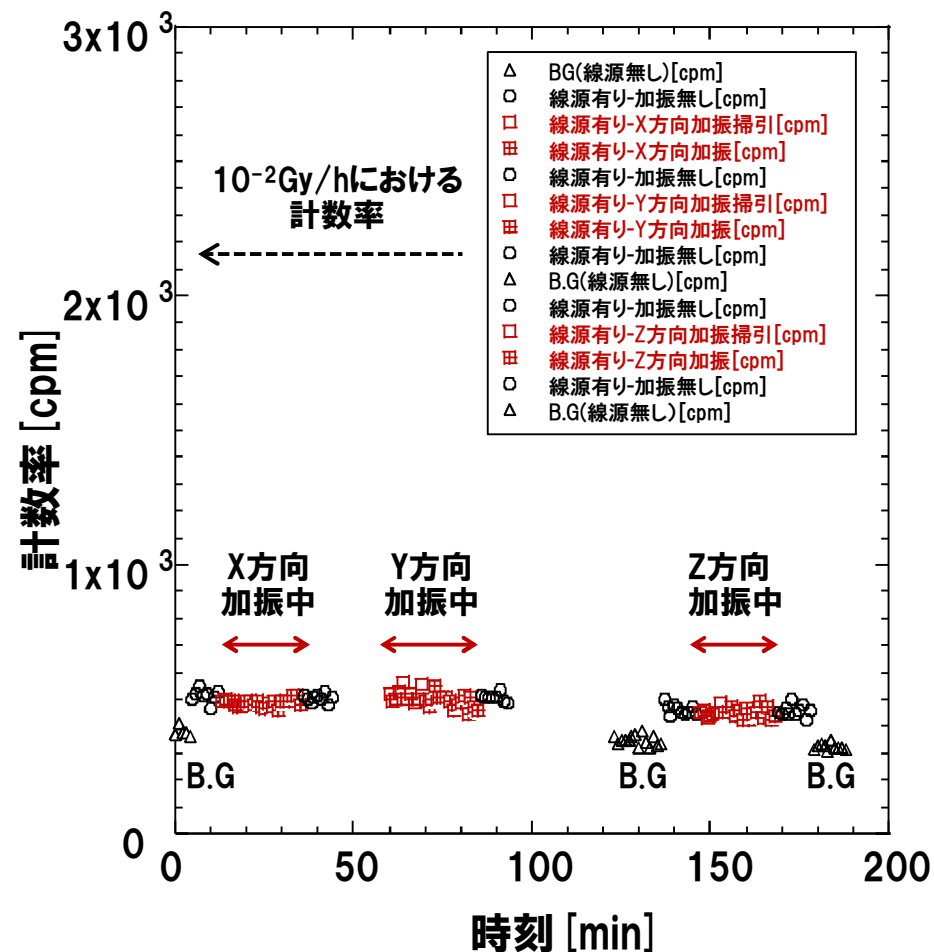
性能評価試験結果 -耐震試験結果-

試験結果

正弦波掃引試験 → 共振無し



加振試験 → 加振無しと比較して変化無し
(X及びY方向:4G、Z方向:2G)

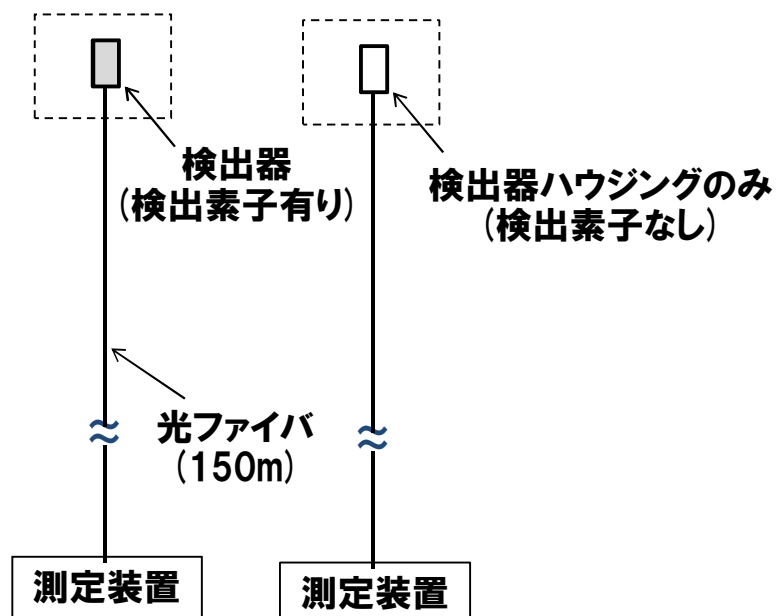


試験内容

検出器ハウジング内に、
検出素子有り、検出素子無しの
2つのケースにおいて、
下記、線量率条件下で、計数率を測定。

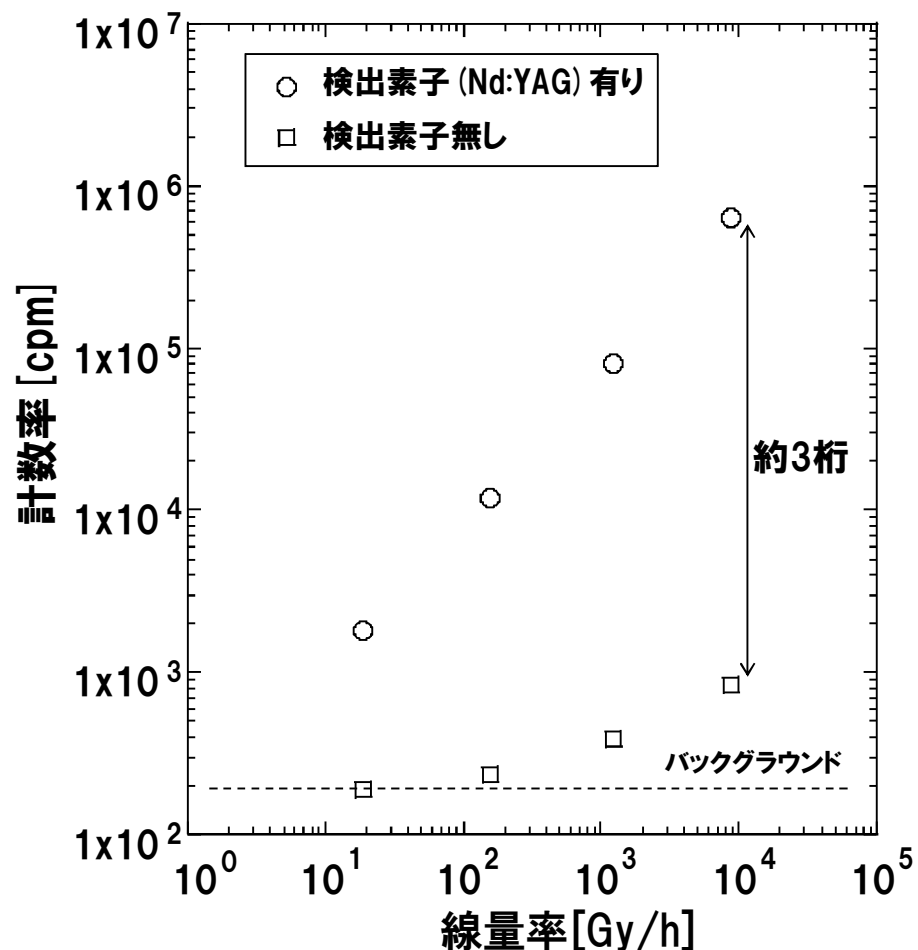
18.94Gy/h、155.2Gy/h、
1.25kGy/h、8.77kGy/h

試験体系



試験結果

検出素子有りが、無しの場合の約3桁高い計数率。
検出素子無しの場合の発光は、光ファイバ部分の
発光と考えられる。



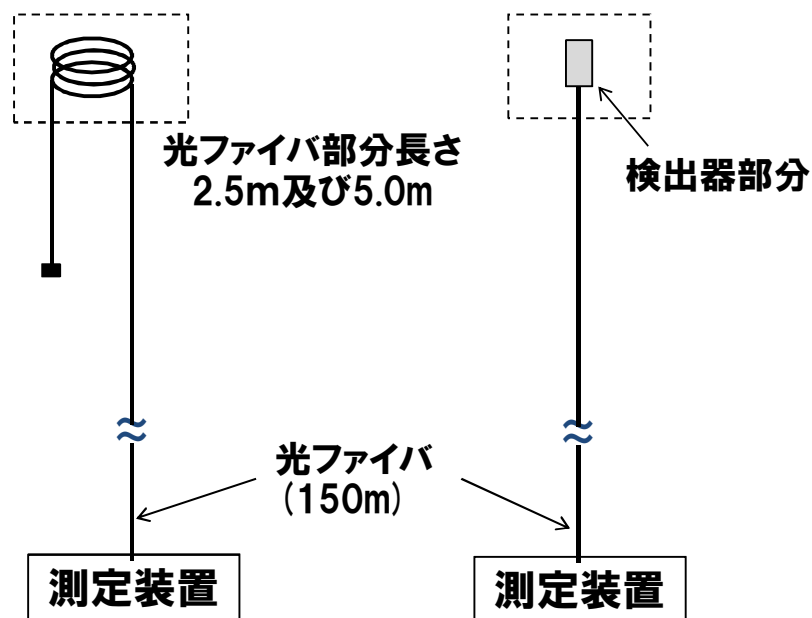
試験内容

光ファイバ部分と検出器部分を別々に、高線量率環境に設置し、それぞれの部分からの計数率を比較。

試験体系

■ 光ファイバ部分照射 ■ 検出器部分照射

高線量率照射領域 1.25×10^3
($1.25 \times 10^3 \sim 8.77 \times 10^3 \text{ Gy/h}$) 及び、 $8.77 \times 10^3 \text{ Gy/h}$



試験結果

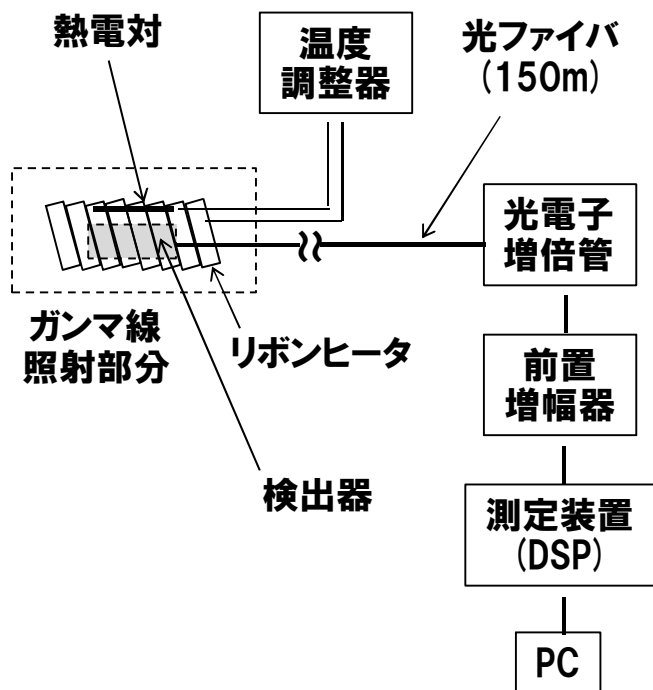
- 高線量率照射の
光ファイバ部分のネット計数率: 607cpm (2.5m)
: 1098cpm (5.0m)
- 検出器部分のネット計数率 : 381761cpm
(1.25×10^3 と $8.77 \times 10^3 \text{ Gy/h}$ のネット計数率の平均値)

光ファイバの100m部分が全て、
 $1.25 \times 10^3 \sim 8.77 \times 10^3 \text{ Gy/h}$ の線量率環境下に
設置されている場合の光ファイバによる計数率は、
22000~24000cpmと推定される。
これは、同じ線量率環境下にある
検出器部分からの計数率 (381761cpm) の
約6% (約+0.5%FS) であり、目標仕様 ($\pm 4\% \text{ FS}$ 以内)
に与える影響は小さい。

試験内容

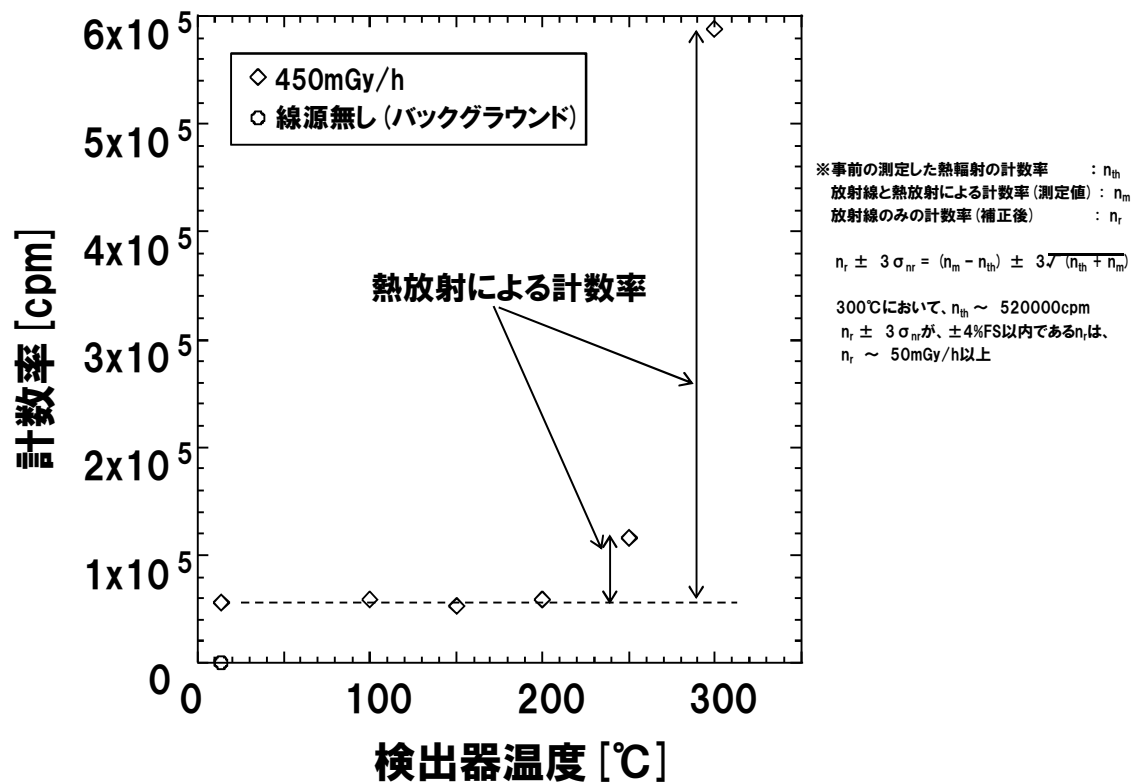
450mGy/hの線量率環境下で、
室温から300℃まで、
温度を変化させたときの
計数率を測定。

試験体系



試験結果

200℃までは、熱放射の影響無し。
300℃において、450mGy/hの放射線による計数率の約10倍。
温度を測定データをもとに熱放射を補正した場合、
測定精度±4%FS以内で測定可能な線量率は、約50mGy/h*。



3. まとめ

ガンマ線強度分布測定技術(ガンマカメラ)

高線量率対応、一般環境用のガンマカメラを開発し、
福島第一原子力発電所内外で適用

過酷環境対応の放射線計測技術

過酷事故時に線量率を計測可能な光ファイバを用いた
放射線計測技術を開発
過酷事故対応以外の適用も検討中

燃料デブリの検知技術の開発

高放射線環境下での

- ① 核種分析技術 (Eu-154が指標核種)
- ② 中性子検知技術 (Cm-242,244が指標核種)

汚染水他のモニタリングに関する技術の開発

Sr-90の迅速計測技術の開発

本講演は、下記の関係各位を中心に実施した内容をまとめたものです。

株式会社 日立製作所 研究開発グループ

**田所 孝広, 名雲 靖, 岡田 耕一, 富永 和生, 上野 克宜,
上野 雄一郎, 石津 崇章, 高橋 勲**

日立GEニュークリア・エナジー株式会社

**藤島 康剛, 遠藤 洋, 米谷 豊, 和田 将平, 佐々木義之,
小山三輝雄, 村田 昭, 松井 哲也**

日立アロカメディカル株式会社

君島 淳, 鈴木 康彦

謝辞

本発表におけるガンマカメラは、その使用の一例として、経済産業省 資源エネルギー庁の平成25年度発電用原子炉等廃炉・安全技術開発費補助金(原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発)に係る補助事業において、国際廃炉研究開発機構の業務として福島第一原子力発電所内の調査に適用しました。

高線量率対応のガンマカメラは、新エネルギー・産業技術総合開発機構の2012年度「災害対応無人化システム研究開発プロジェクト /計測・作業要素技術の開発」により、開発した装置です。

過酷環境対応の放射線計測技術の開発は、国内電力会社および国内プラントメーカーの共同研究成果の一部であり、経済産業省 資源エネルギー庁の発電用原子炉等安全対策高度化技術開発補助金交付事業として実施したものです。

ご清聴有難うございました。

第5回 放射線計測フォーラム福島

2015年12月7日

**福島復旧・復興を支える
日立における放射線計測技術の開発**

HITACHI
Inspire the Next