

平成25年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金
(原子炉内燃料デブリ検知技術の開発)

完了報告

平成27年12月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構

「原子炉内燃料デブリ検知技術の開発」の目的

ミュオンによる透視技術で、2018年度（平成30年度）上半期の「燃料デブリ取り出し方法の確定」までに、燃料デブリの分布（内部も含めた3次元状態）を廃炉技術開発に提供する。



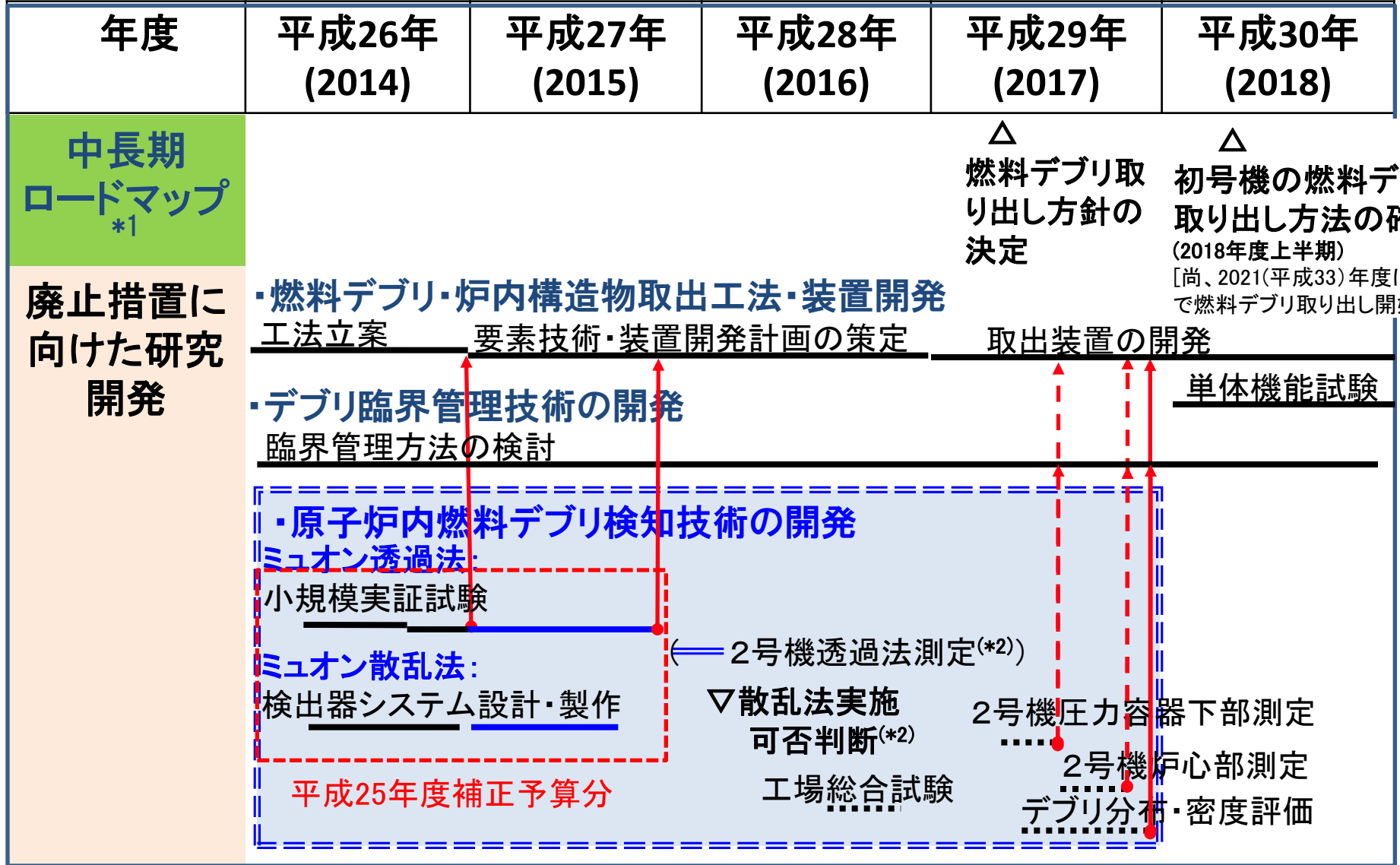
<ミュオン透過法の開発>

- ・小規模実証試験として、高放射線環境下でのミュオン測定を実証する。
- ・1号機の燃料デブリの有無を1m程度の識別能力で評価し、格納容器からの燃料デブリ取り出し方法の検討に資する。

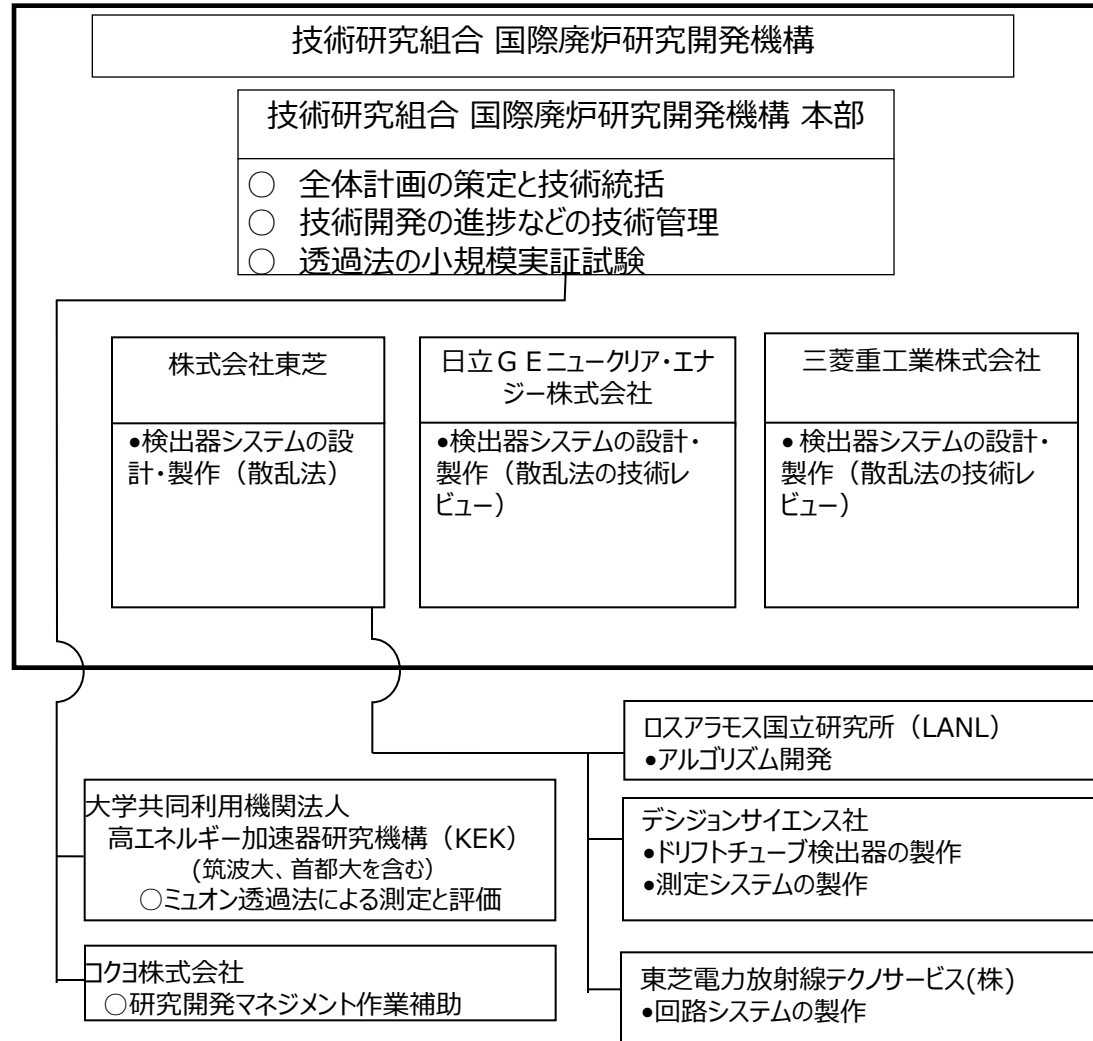
<ミュオン散乱法の開発>

- ・炉内残存燃料の位置等を確認できる識別能力（30cm程度）で圧力容器内（炉心部、圧力容器下部）の燃料デブリ分布を測定できることを実証する。
- ・散乱法の実施が必要と判断された場合には、2号機の燃料デブリの3次元分布、情報（燃料デブリの内部状態、組成等）を提供し、効率的な燃料デブリ取り出し方法の選定へ寄与する。

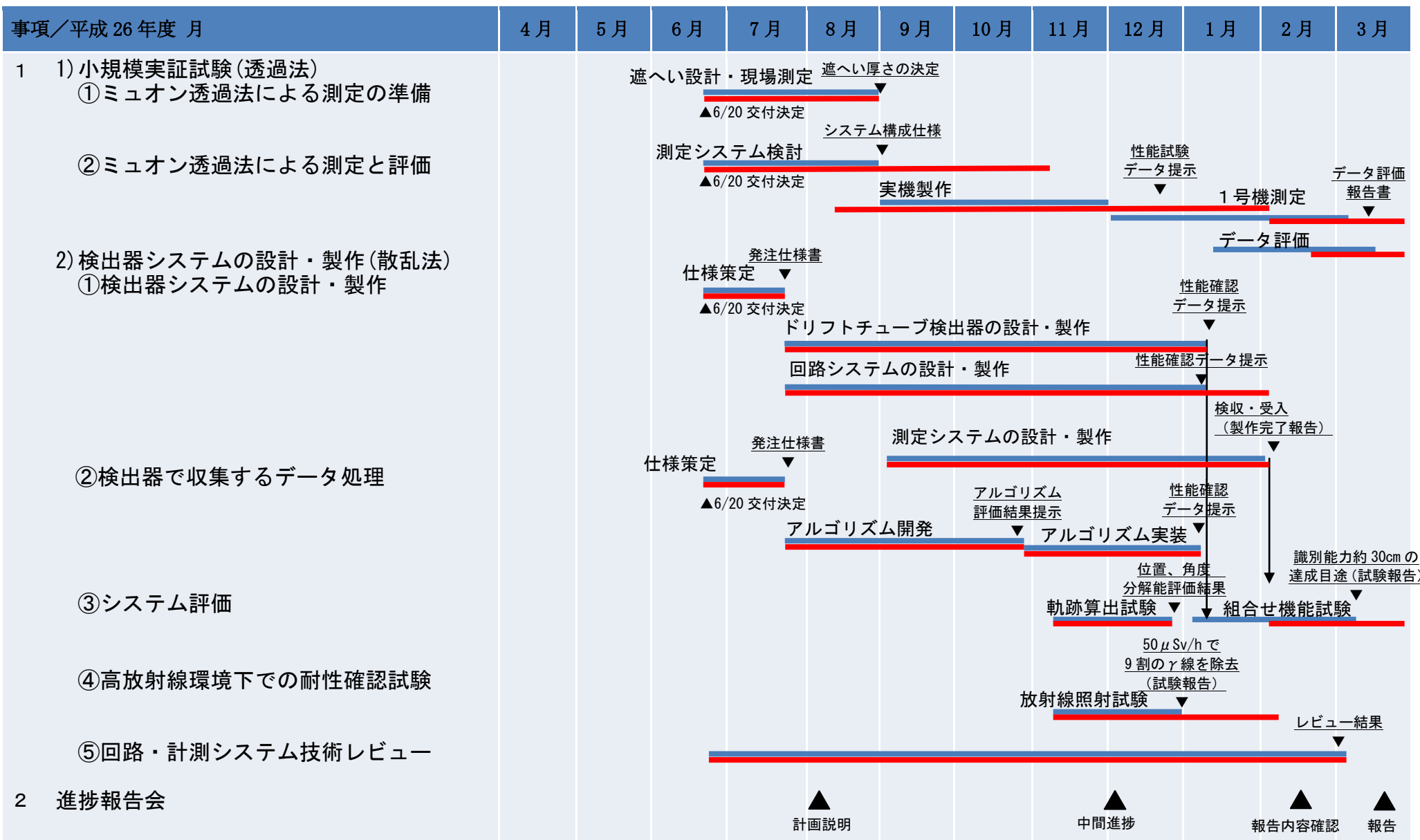
1. 全体計画ーロードマップとの関係



*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)
 *2:2号機の最新の調査・解析により原子炉圧力容器内に燃料が殆ど残っていない可能性が示されたことから、2号機の透過法測定結果、格納容器内下部調査結果等を踏まえ、圧力容器内の燃料デブリ分布の詳細な測定(散乱法)の必要可否を判断する。



2. 平成26年度実施計画と実績



2. 平成27年度実施計画と実績

事項／平成27年度 月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	実施状況と課題
1 1) 小規模実証試験(透過法)	測定装置の小型化の検討									
① ミュオン透過法による測定の準備	1号機測定									
② ミュオン透過法による測定と評価	2地点による測定 2/12 開始～5/19 完了 ▲ ▲ 3地点目測定 5/25 開始 ▲ 測定終了									
	測定データの解析									
	KEK での水平ミュオン測定									
2) 検出器システムの設計・製作(散乱法)	測定手法の改良開発									
① 検出器システムの設計・製作	アルゴリズム改良・オンライン監視機能開発									
② 検出器で収集するデータ処理	アルゴリズム改良・オンライン監視機能開発 ▲									
③ システム評価	校正用データ採取									
④ 放射線環境下での耐性確認試験										
⑤ 回路・計測システム技術レビュー										
2 進捗報告会	7/1 ▲ 10/2 ▲ 12/21 ▲									

- ・測定装置を完成させ、ミュオン測定可能なことを確認した
- ・研究期間内の測定を全て終了
- ・定量評価を終了
- ・所定の鉄ブロック厚の測定を終了
- ・改良を抽出完了
- ・校正の有効性と分解能向上を確認
- ・アルゴリズムを検証するためのデータ等の採取完了
- ・技術レビューを完了

3. 成果

3.1 透過法:小規模実証試験

1. 概要

・高放射線環境下でのミュオン測定システムの適用性を確認し、1F-1でミュオン測定・燃料デブリ評価を実施する。

2. 小規模実証試験計画

①ミュオン透過法による測定の準備

- a. 遮へい設計と現場試験（平成26年度完了）
- b. 測定装置のシステム構成検討（平成26年度完了）
- c. 設置性を向上したシステム構成検討（平成27年度完了）

②ミュオン透過法による測定と評価

- a. 1号機でのミュオン測定（平成26年度）と測定データ拡充(平成27年度完了)
- b. データ評価（シミュレーション含む）による燃料位置推定(平成27年度完了)
- c. 水平方向ミュオン強度分布測定によるデブリ分布推定精度の向上
（平成27年度完了）

3.1 透過法:小規模実証試験(平成26年度成果)

①a.遮へい性能評価試験



・作業の様子



外 ←
内 →



・遮へい能力の検証のため、設置場所での線量(0.4mSv/h程度)より高い、3号機原子炉建屋前で試験を実施
 ・実施場所の線量は0.8mSv/h程度であったものの、コンテナ内では0.45mSv/h程度に低下



遮へい無



遮へい有

・コンテナ内に設置した、10cm厚の線量計用の遮へい内部の線量は数 μ Sv/hに低下

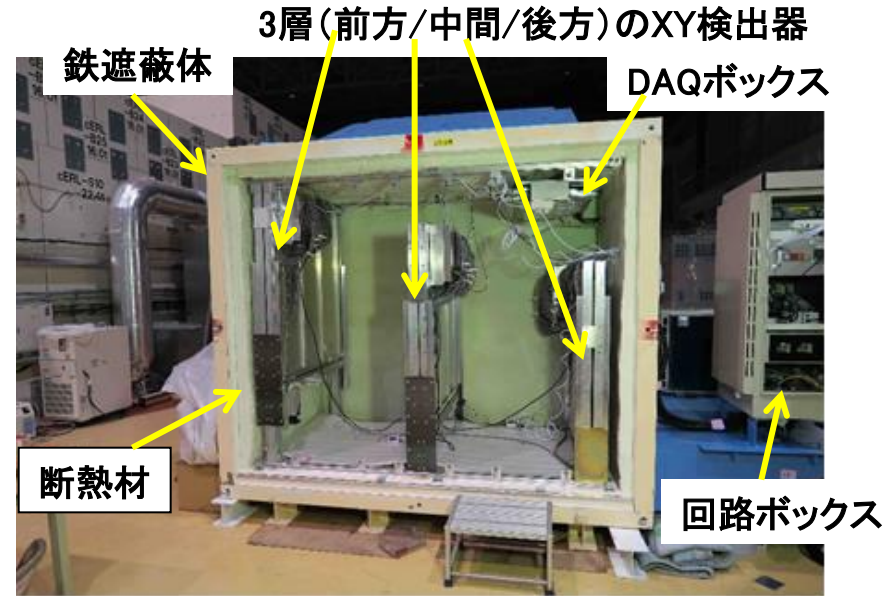
①b.測定装置のシステム構成検討と1号機への設置

■測定装置システム (2台) の製作完了

- ・γ線遮蔽のための10cm厚鉄遮蔽体
- ・遮蔽体の内部に3つのXYユニット検出器と信号処理を行う回路 (DAQボックス) を格納
- ・断熱材とエアコンにて内部温度を $20^{\circ}\pm 3^{\circ}$ に設定
- ・遮蔽の必要のない機器は外の回路ボックスに設置

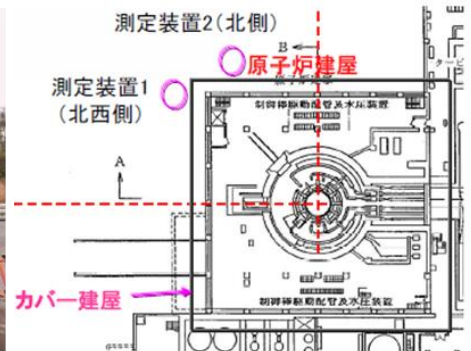
■1号機への設置完了 (東京電力による作業)

- ・2/10：測定装置2台の設置完了
- ・2/12：測定装置2台への受電完了
- ・2/12：測定開始



断熱材を施した鉄遮蔽体内部の測定装置

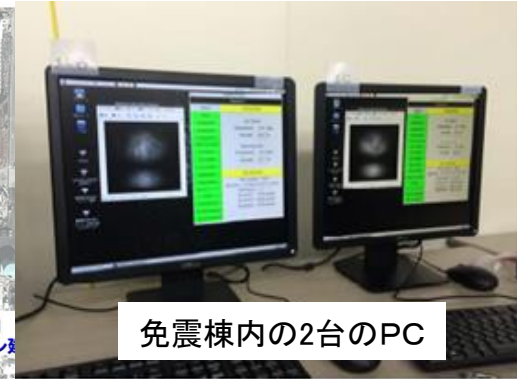
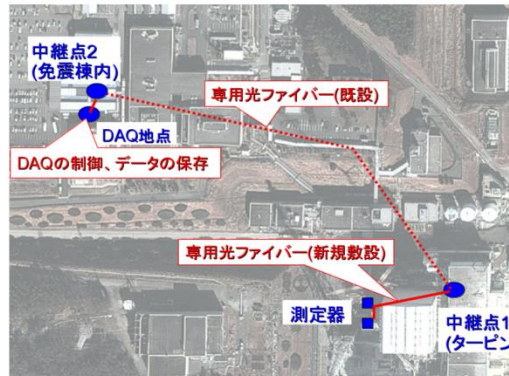
2台の測定装置の1号機への設置 (KEKから福島への搬送、1号機への設置)



①b.測定装置の1号機への設置と稼働

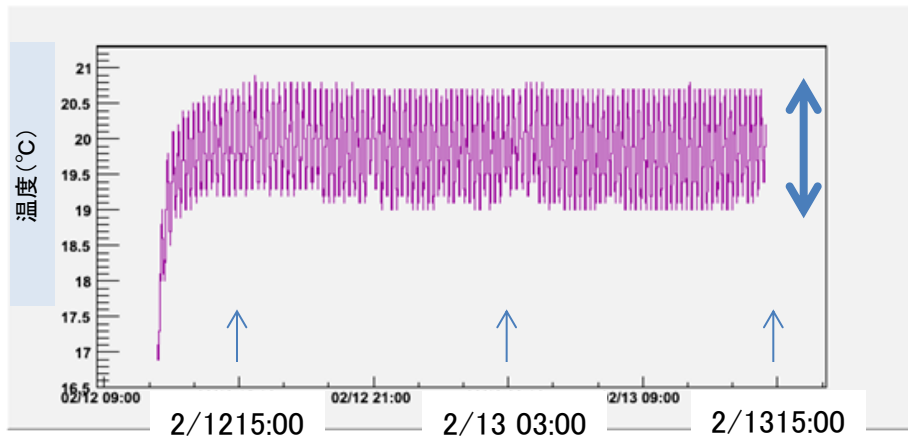
(1)免震棟PCへのデータ送信順調

- ・専用光ファイバーにて、2か所の中継点を経由して、免震棟内の2台のPCに順調にデータ送信



(2)遮蔽体内部の温度制御は順調

19°~20.5° (20°±3°以内)



測定装置2の遮蔽体内の温度履歴

(3) 1号機設置後の検出器ユニット正常動作確認

- ・計数率にバラツキがない
- ・環境放射線による計数率の上昇がない
- ・KEK地点に比べ各検出器の計数率は10%減、3ユニット同時計数率は50%減、これは、ミュオンが原子炉建屋内物質による吸収・散乱によるものと推定。

	測定装置1		測定装置2	
設置場所	KEK	1号原子炉北西	KEK	1号原子炉北
前方XYユニット計数率	71Hz	61Hz	88Hz	78Hz
中間XYユニット計数率	77Hz	70Hz	76Hz	67Hz
後方XYユニット計数率	77Hz	69Hz	84Hz	75Hz
3ユニット同期事象計数率	0.87Hz	0.39Hz	0.92Hz	0.44Hz

KEK地点と1号機装置地点の検出器ユニットの事象計数率

3.1 透過法:小規模実証試験(平成27年度成果)

②a. 1号機でのミュオン測定データの拡充

【第1回目測定の詳細】

測定期間：平成27/2/12～5/19
(96日間)

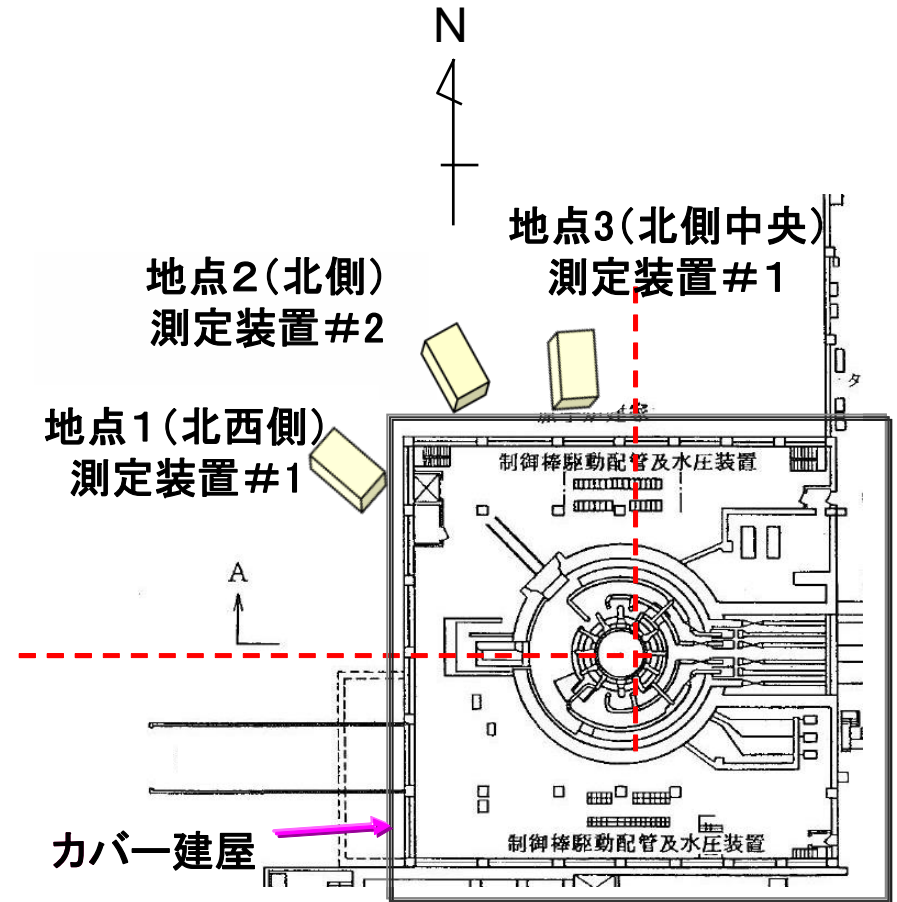
測定地点1：北西側

測定地点2：北側 (コーナー寄り)

【第2回目測定の詳細 (データ拡充)】

測定期間：平成27/5/25～9/7
(106日間)

測定地点3：北側中央



1号機原子炉建屋

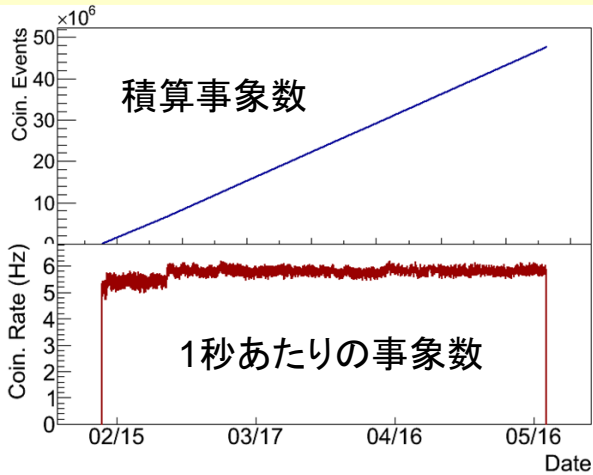
【第1回目、第2回目測定でのデータ収集結果】

地点1：北西側

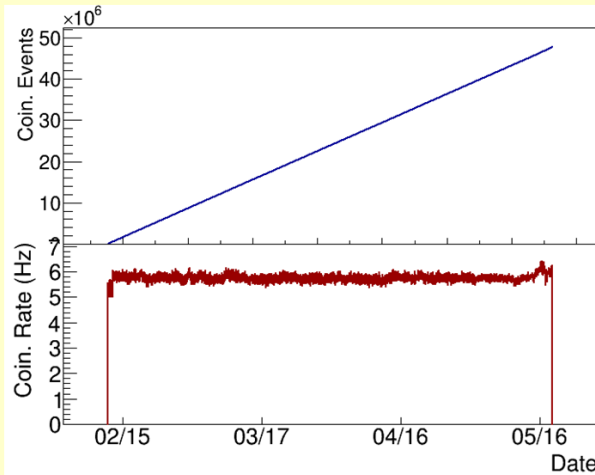
地点2：北側

地点3：北側中央

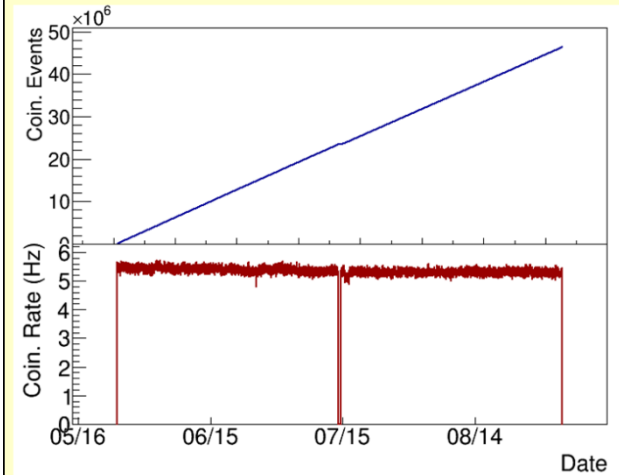
2月12日～5月19日



2月12日～5月19日



5月25日～9月3日



全事象数: 4,762万事象
実稼働時間: 95.80日

全事象数: 4,774万事象
実稼働時間: 95.80日

全事象数: 4,633万事象
実稼働時間: 100.03日

(注) 地点3の7月15日付近の停止期間は計画的な停電によるもの

第1回、2回目共に長期停止期間は無く、安定してデータを収集

【第1回目測定での地点1（北西）の測定結果】

図3 96日分のデータを用いた画像

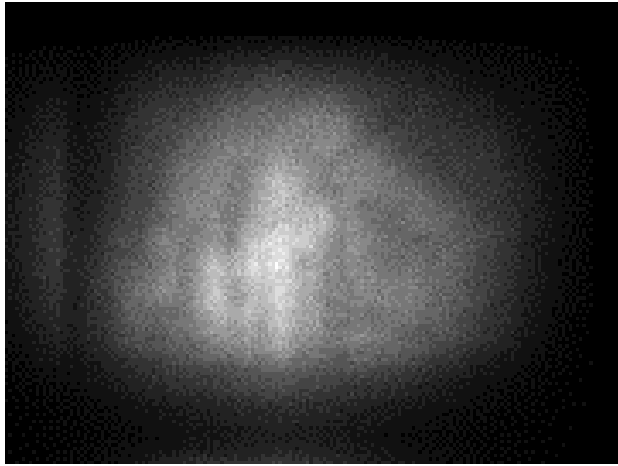
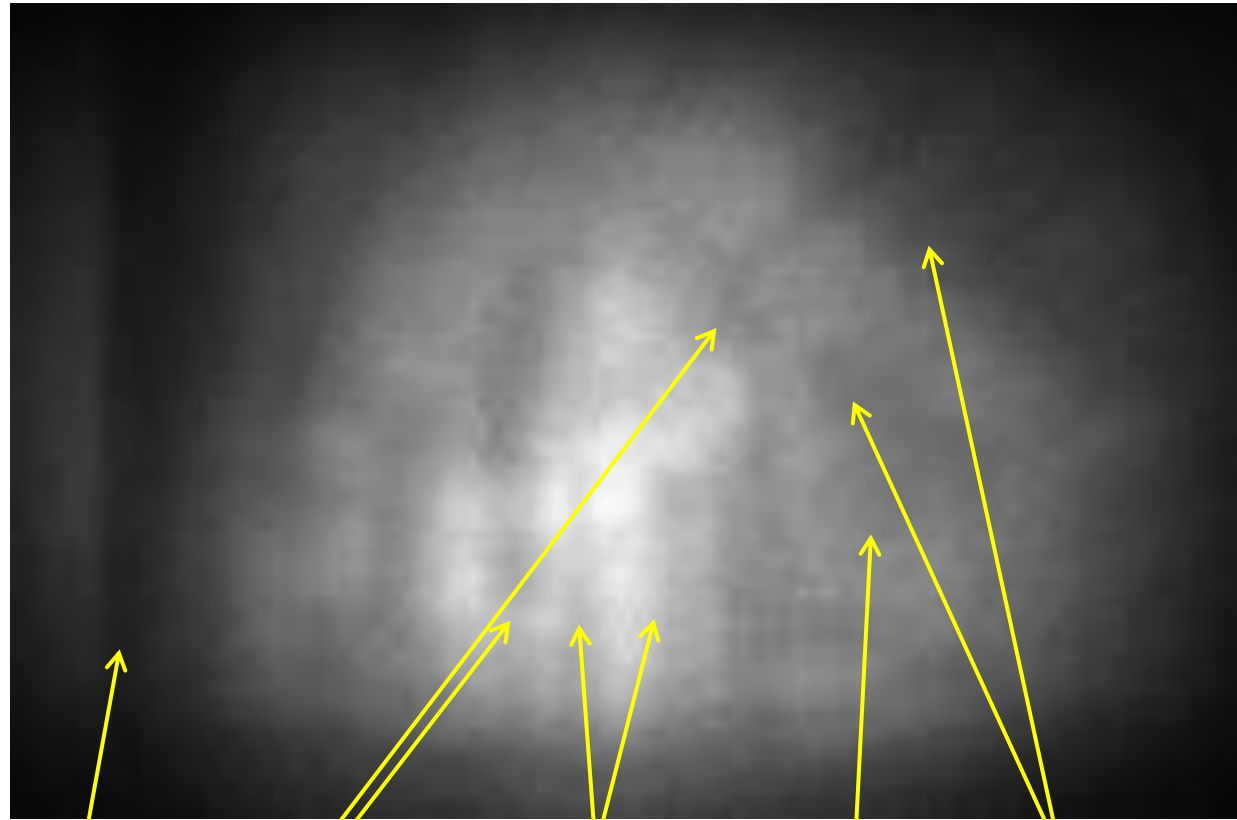


図1 26日分のデータによる画像



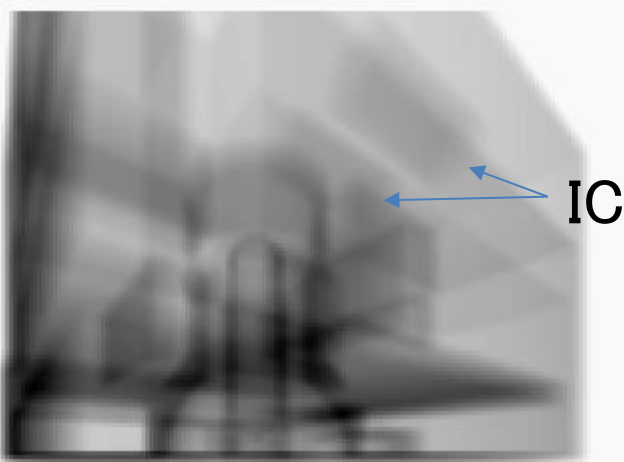
原子炉建屋
の北側壁

格納容器

原子炉圧力容器
と生体遮へい壁

燃料プール

非常用
復水器 (IC)



IC

約3か月のデータで、存在が確認できる機器等に変化はないが、境界が26日分より鮮明になっている（統計誤差が大きく低減）
透過法は1～3か月程度の測定で必要な情報が取得可能

図2 設計情報を用いた推定図（ICあり）

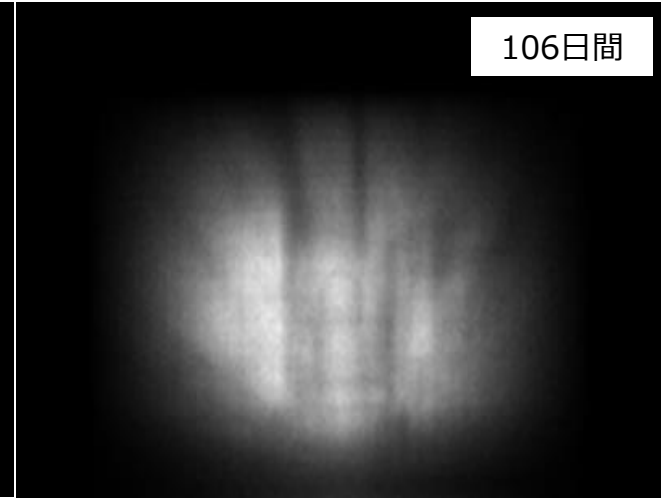
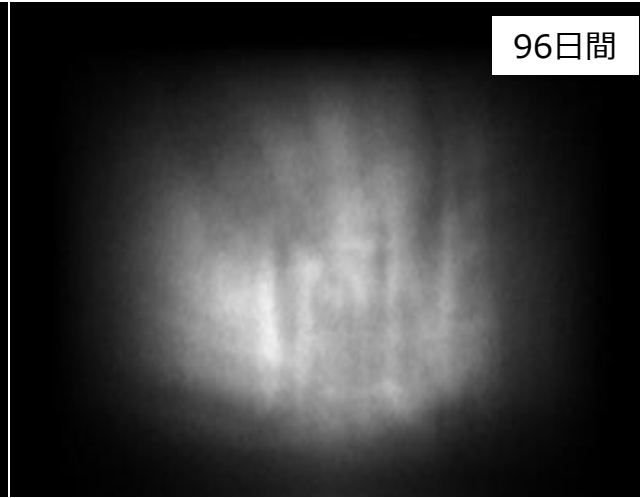
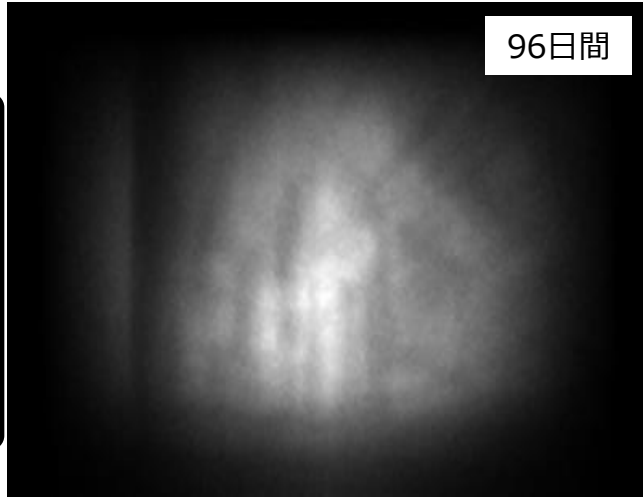
【3地点におけるミュオン観測データとミュオン透過率データ】

地点1：北西側

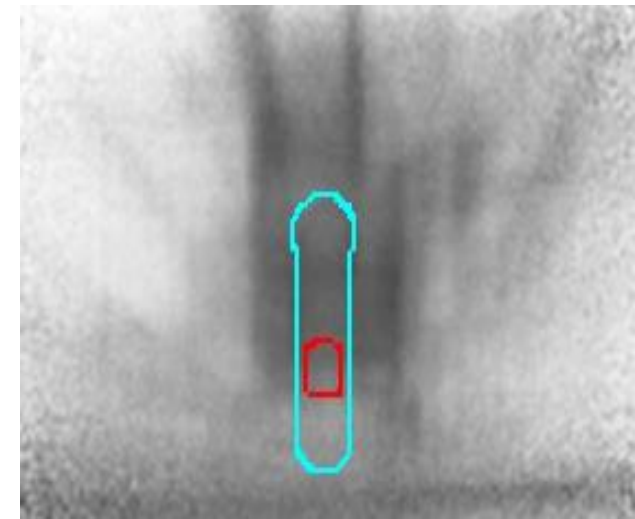
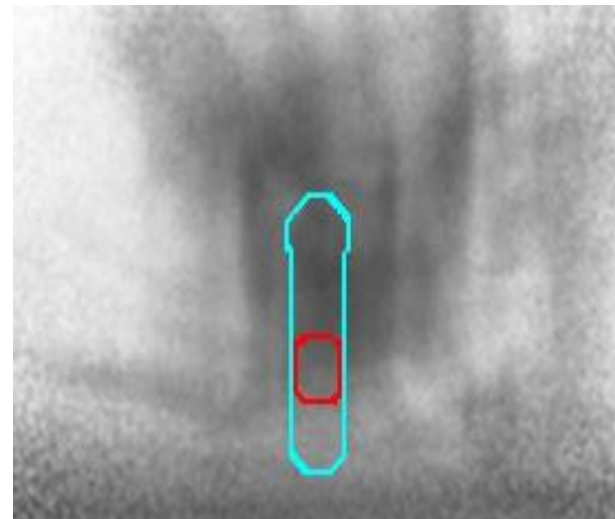
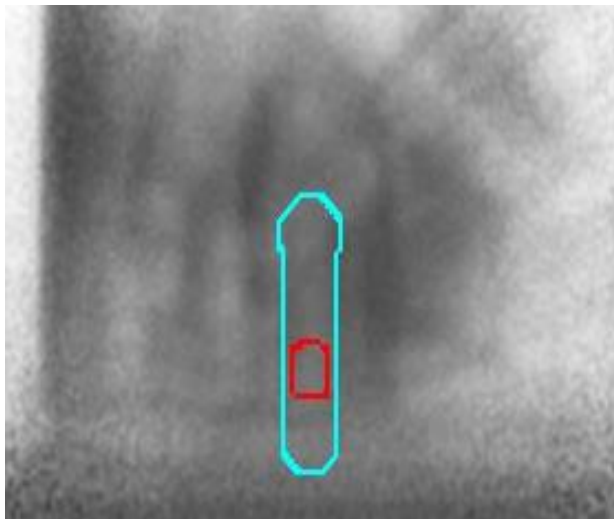
地点2：北側

地点3：北側中央

観測データ



透過率



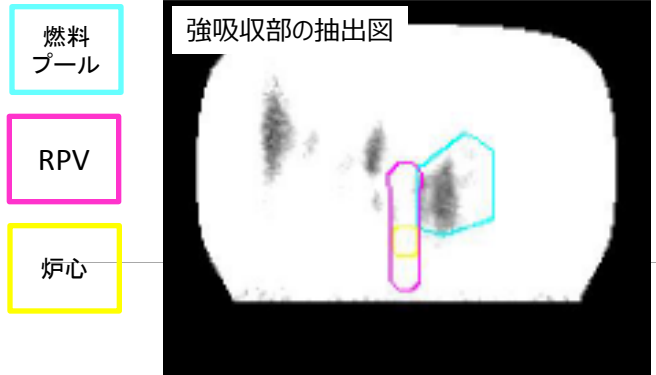
【3地点におけるミュオン透過率の定量評価（予測値との比較）】

(高さ22m~22.8m：炉心位置の中央高さ付近)

地点1：北西側

地点2：北側

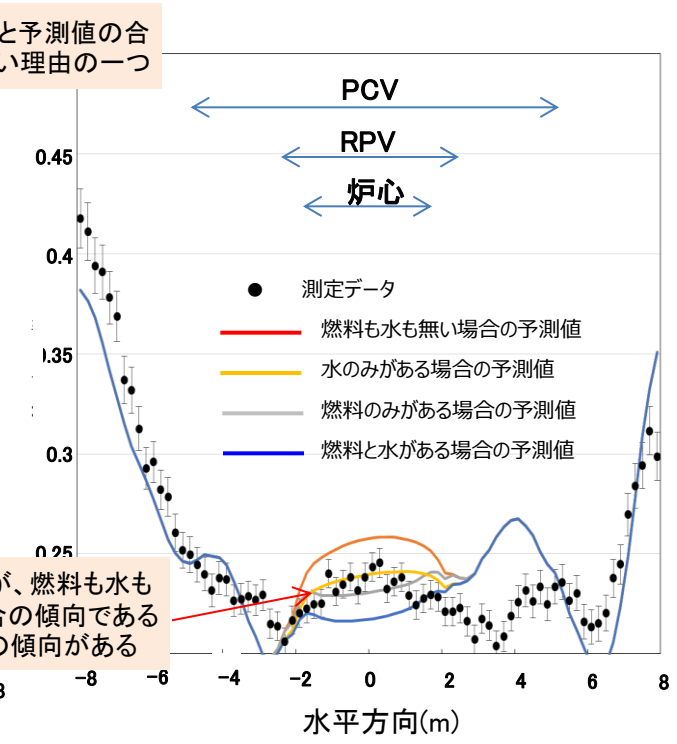
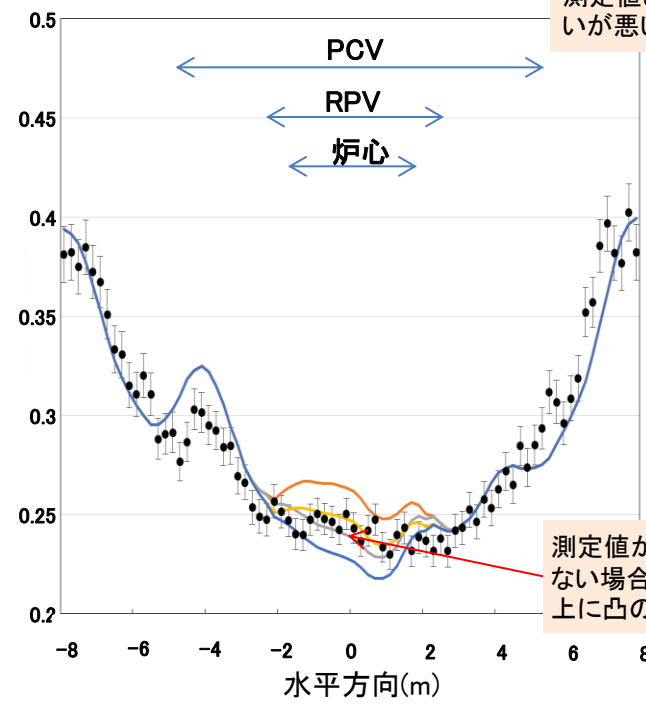
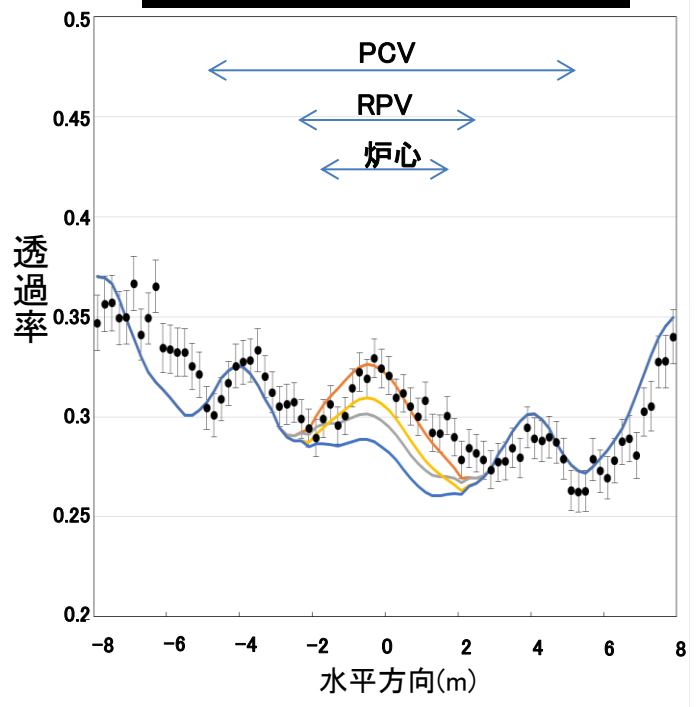
地点3：北側中央



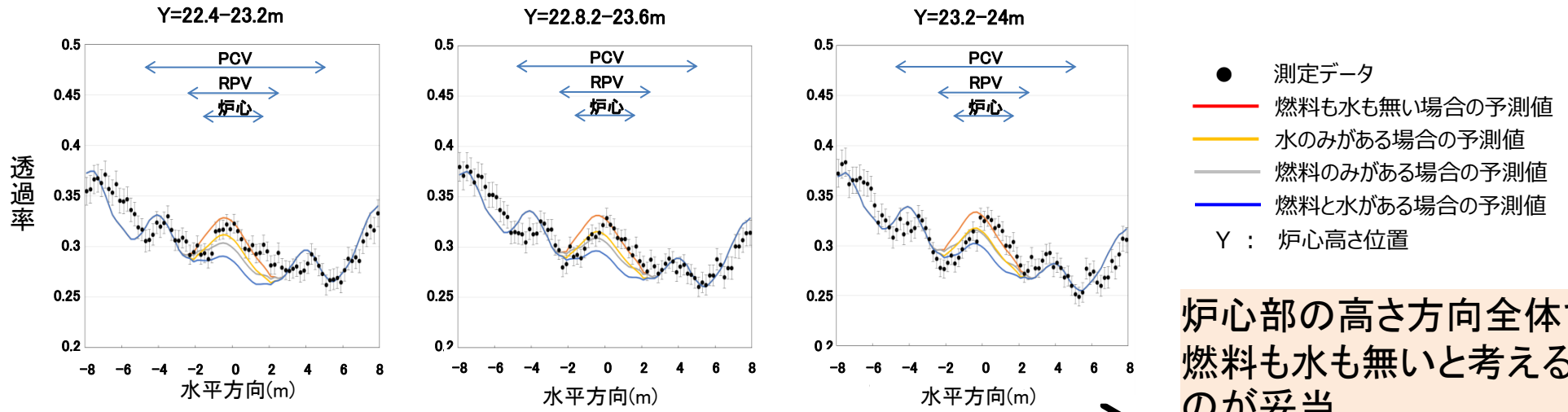
強吸収部の抽出図

強吸収部の抽出図

燃料プールと炉心位置がかぶっている

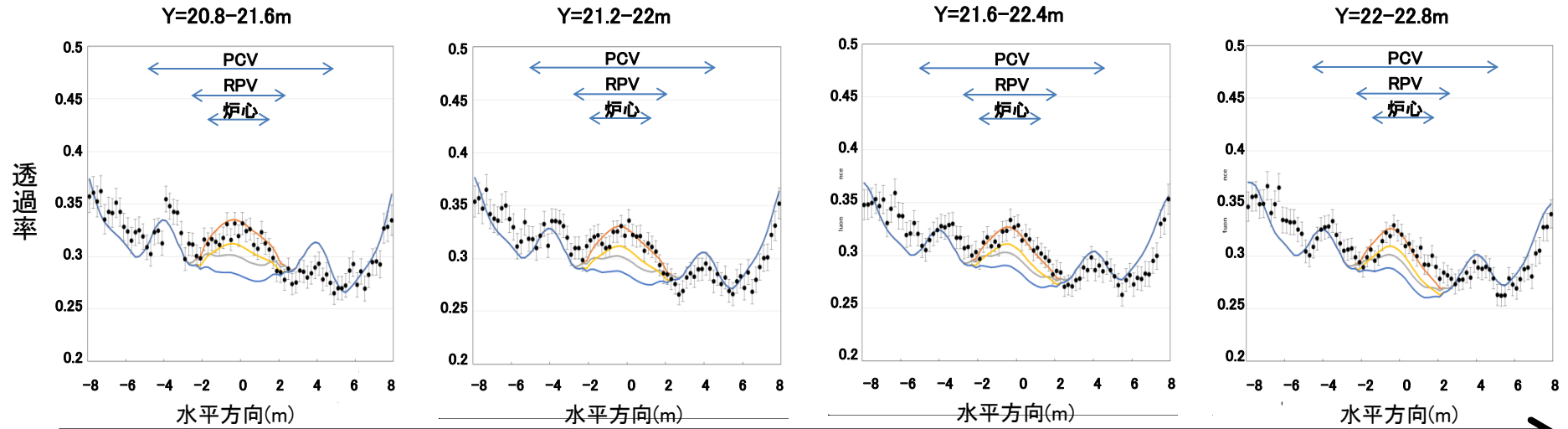


【ミュオン透過率の炉心部高さ方向分布の定量評価 （予測値との比較（地点1））】



炉心部の高さ方向全体で
燃料も水も無いと考える
のが妥当

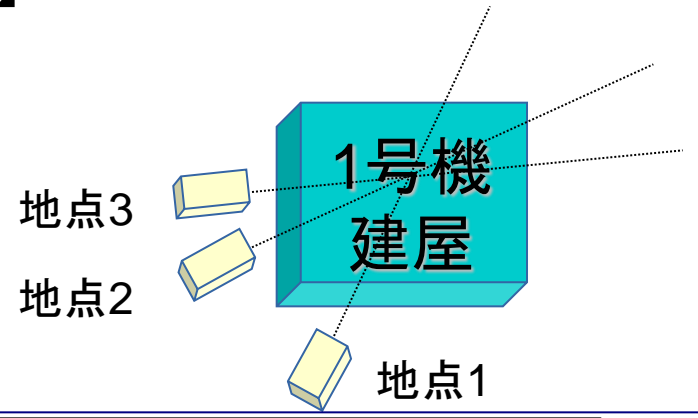
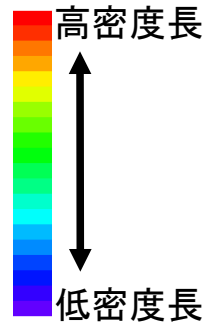
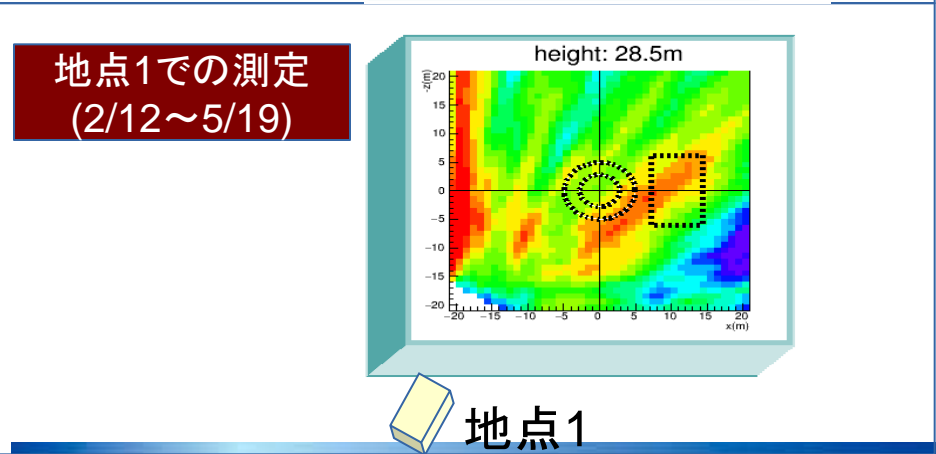
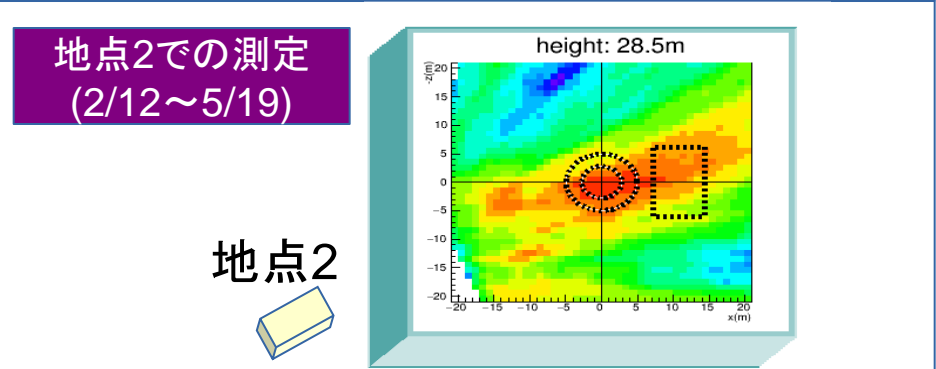
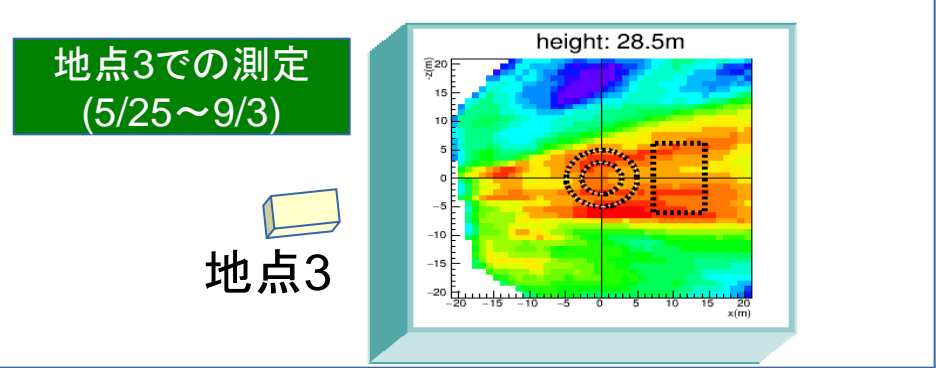
炉心上側



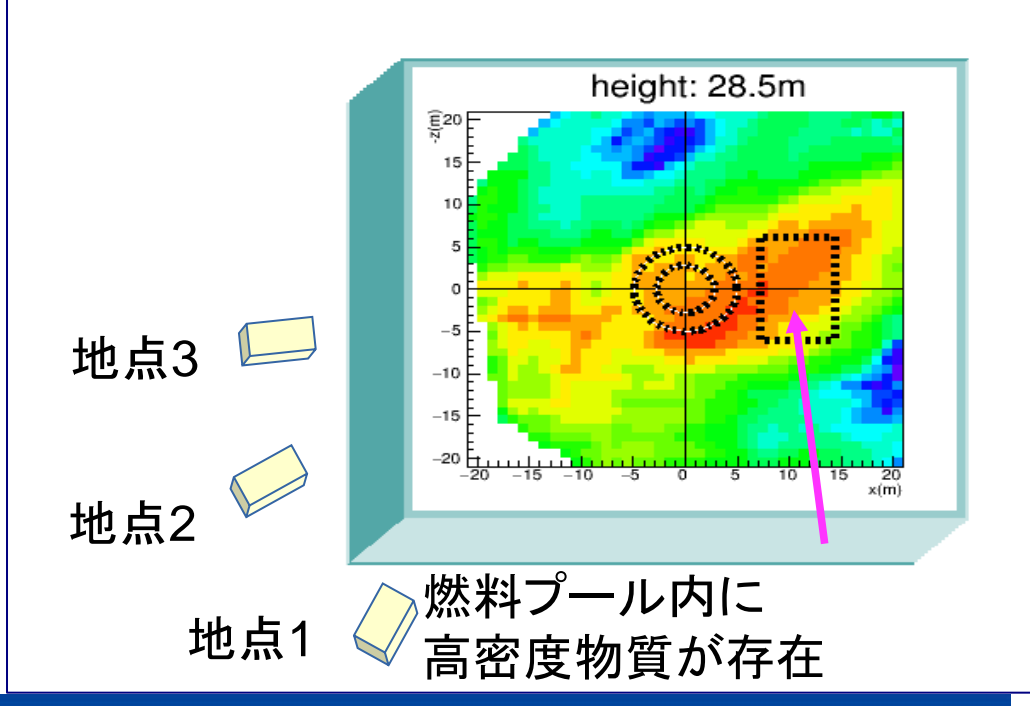
炉心下側

炉心中央

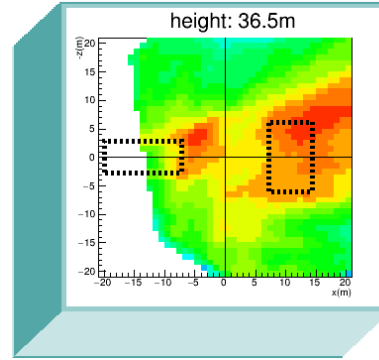
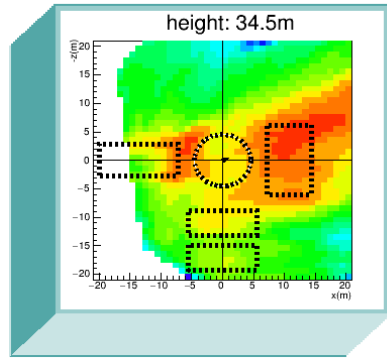
【3地点からの情報による高密度長箇所の推定】 (高さ28.5m : プール内の燃料中央高さ付近)



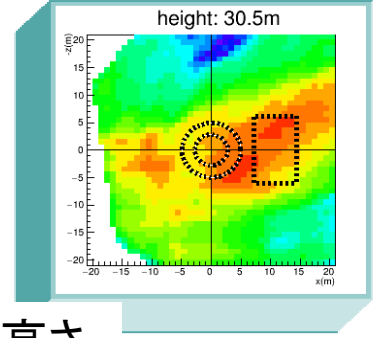
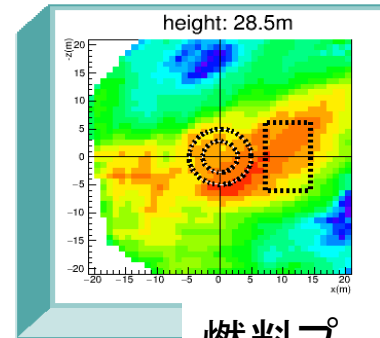
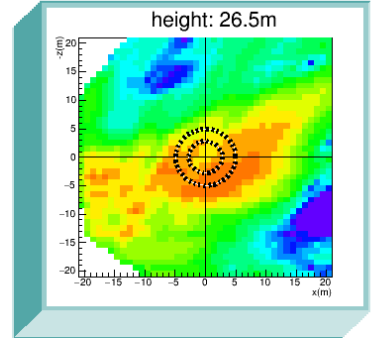
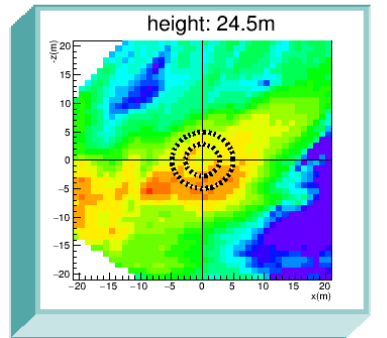
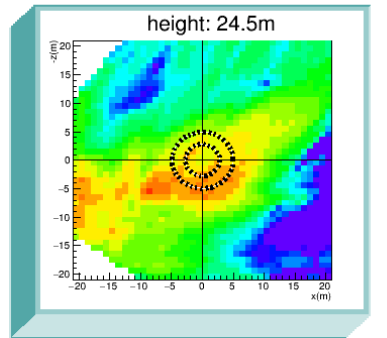
3台の測定結果の合成 (3台ともに高密度と推定する場所)



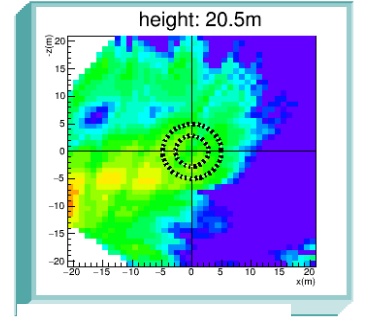
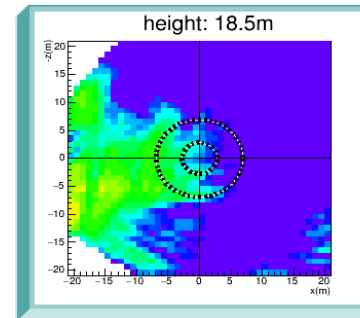
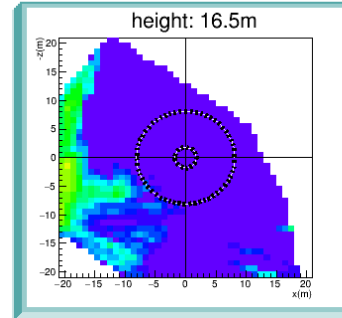
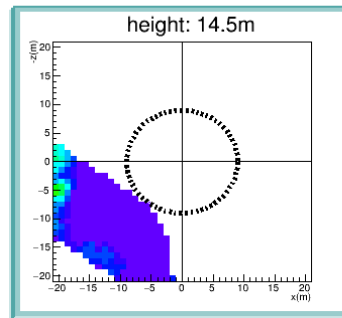
【各高さ断面における高密度箇所の分布】



オペフロ高さ →



燃料プール高さ →



炉心高さ →

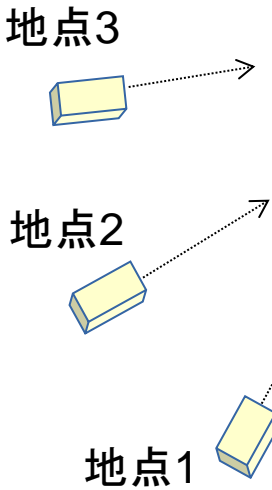
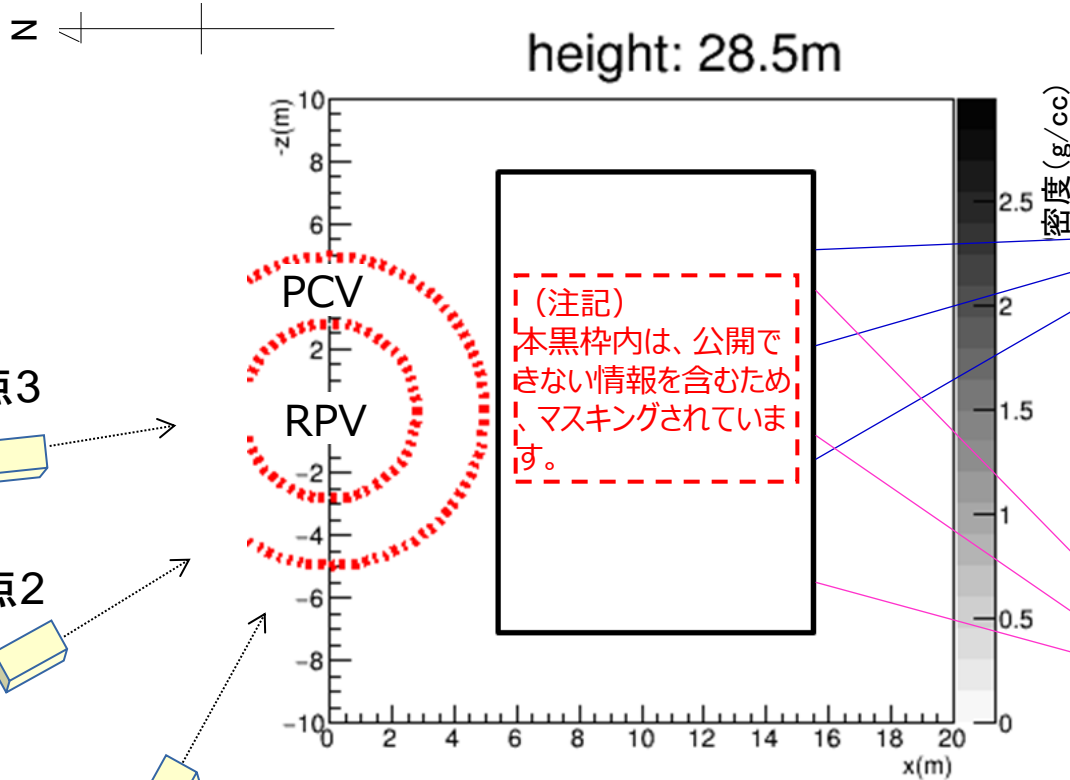


【燃料プール内の高密度箇所への推定】

燃料プール内を1m立方の領域に分割し、各領域に密度を与えて、測定された密度長が得られるように密度分布を逆算し、燃料プール内の高密度箇所の推定を実施した。

プール内の燃料の中央高さ付近

height: 28.5m



“推定”と“実際”の合いの良い場所

➤ 比較的領域が大きく、隙間なく燃料が配列されている場所は概ね実際の燃料の配置と一致



➤ **メッシュが1m×1mより、1m程度の識別能力は達成できていると考える**

“推定”と“実際”の合いの良い場所

➤ PRV、PCV、燃料プール底のコンクリートによる減衰の見積もりの不定性

【測定データの評価まとめ】

- ① 3地点で各々約3か月間の測定を実施し、炉内状況推定に十分なデータを取得
(但し、現場の工事進捗状況により、当初予定地からは外れた位置に設置)
- ② 原子炉建屋内構造を模擬した予測値との比較から、以下の結論に帰着
「元々の炉心位置には、燃料も水もないと考えるのが妥当」
(理由)
 - ・燃料プール内の燃料との重なりがほとんどなく予測精度が高い地点1の結果では、「燃料も水もない」場合の予測値との合いが非常に良い
 - ・「燃料も水もない」場合は、炉心部近傍の透過率の水平方向分布形は上に凸となるが、燃料プール内の燃料との重なりがある地点2, 3のデータも含めその形状を有している
- ③ 地点1の結果について、炉心高さ方向の透過率分布より、
「炉心位置の高さ方向全体で、燃料も水もないと考えるのが妥当」
- ④ 3地点目の情報を入れた3次元評価から、「燃料プール内には高密度領域の存在、炉心部位置には高密度領域が存在しない」情報が得られた。燃料プール内で比較的領域が大きく、隙間なく燃料が配列されている場所は概ね実際の燃料の配置と一致。メッシュが1m×1mより、1m程度の識別能力は達成と考える

3.1 透過法:小規模実証試験(平成27年度実績)

①c.設置性を向上したシステム構成検討

(1)目標

- 1号機での測定実績を踏まえた改良検討
- ◆ 測定装置の設置場所の制約が少ないシステム
- ◆ 圧力容器底部の観測性の向上



小型で測定性能を維持したシステムの開発

①装置の小型化

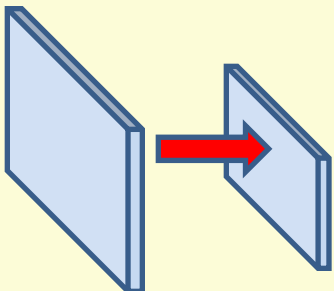


<現行>

外形寸法
長さ 2.5m
幅 2.0 m
高さ 2.1m

<小型化仕様(目標)>

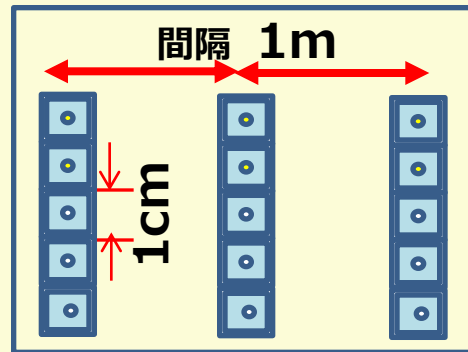
外形寸法
長さ 1.5 m
幅 1.0 m
高さ 2.5m



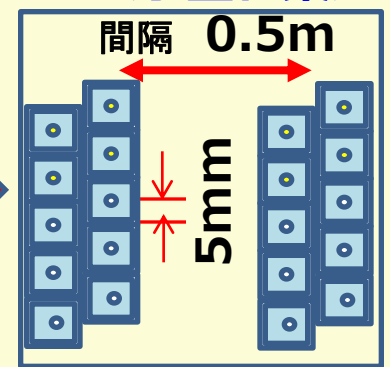
②測定器は3層から2層へ

- シンチレータ層の間隔を半分とし、シンチレータを半分ずらして重ねて位置分解能を維持
(実績よりチャンスコインシデンスの影響は少ない)

<現行>



<小型化案>



③測定器コンテナは温度コントロール無し

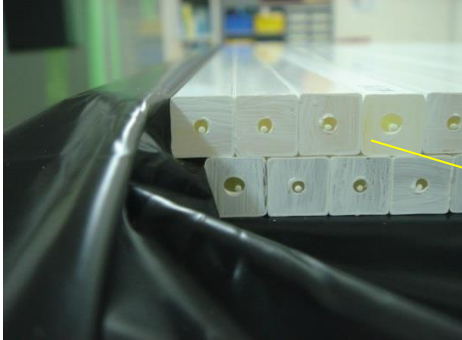
- M P P C *に供給する電圧を個別に調整
⇒断熱層なし 除湿は必要

④室外機の部分は屋根に設置など

* MPPC:マルチ ピクセル フォトン カウンター

(2)小型化装置の製作

現行に比べて、接地面積で4分の1程度の大きさの、ハンドリング性が向上した小型の測定装置を開発した。

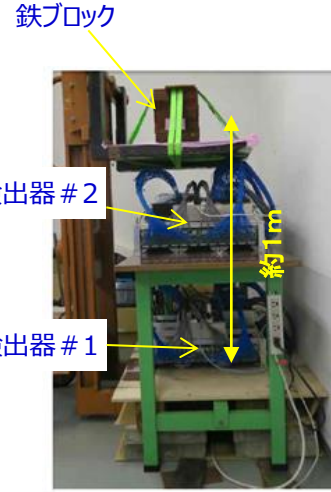


(a)1cmのシンチレータを5mmずらして2層に重ね合わせた検出器の断面

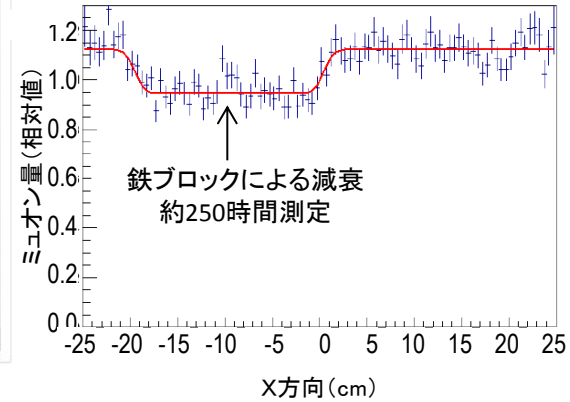
(b)X方向2層、y方向2層を重ねて組みあげたxx-yy検出器（検出器1ユニットの大きさは、54cm×54cm×12.3cm）

(3)小型化装置の性能確認

鉄ブロック（30cm×20cm×20cm）を透過するミュオン量を測定し性能を確認した。



(c)2台の検出器を用いた透過法ミュオン測定



(d)小型検出器を用いた鉄ブロックによるミュオン透過量測定

(参考)小型化装置の現場適用について

現行と比べて分解能が同等で、かつ大幅にハンドリング性が向上した装置を開発できたため、今後の現場適用については、東京電力と調整していく。

鉄ブロックエッジ部の肩の広がりより分解能を推定

	対象までの距離	角度分解能
●本試験	約1m	8 ± 3 mm
●福島推定	約40m	約30cm



今後の原子炉透視に十分使用可能と考える

3.1 透過法:小規模実証試験(平成27年度実施実績)

②c.水平方向ミュオン強度分布測定によるデブリ分布推定精度の向上

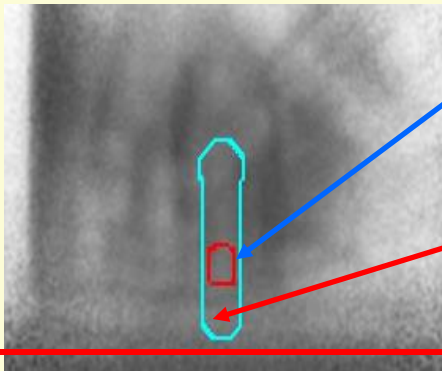
(1)目標

1号機の測定において、7度以上の角度までは見えているが、水平線の近くの透視画像が不鮮明になり、圧力容器底部の評価に影響

(推論)ミュオン飛来数の低下と相まって、飛来角度が水平線に近づくにしたがって観測されるミュオンのエネルギーが大きくなり物質の透過力が増すことが要因?

測定データに基づく分析を実施し評価に反映

①福島での観測結果



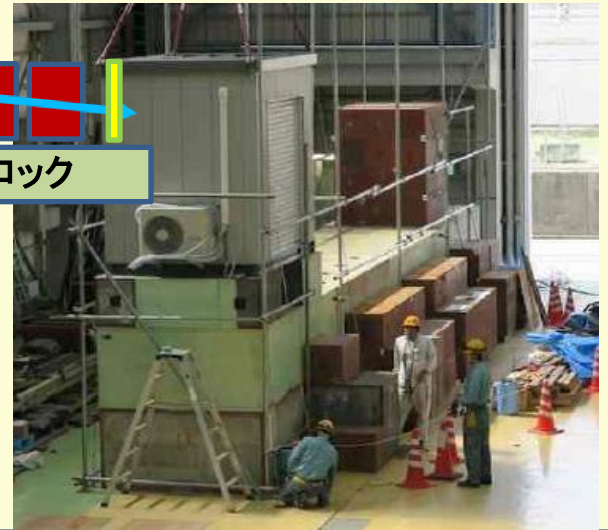
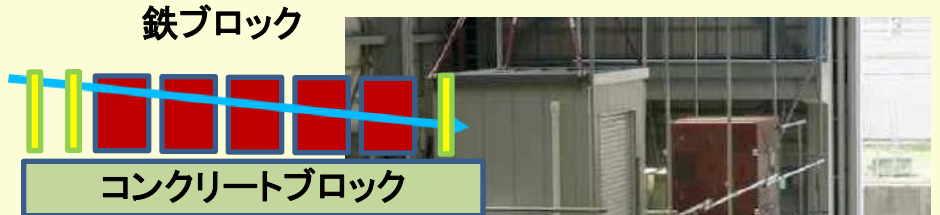
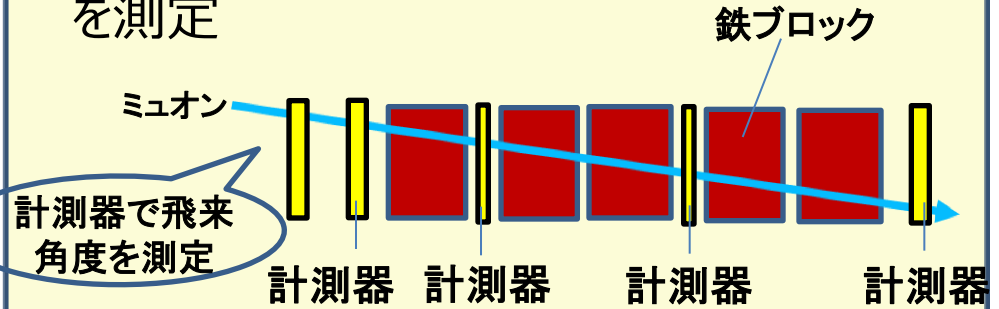
7度以上の角度までは見える

水平線の近くで不鮮明になる

水平線

②低角度ミュオンのエネルギー分布測定

通過する鉄の量からミュオンのエネルギーを測定



(2)水平方向ミュオン強度分布測定結果と考察

- 仰角が少なくとも100mrad (5.7度) 程度までは、9.5m厚の鉄ブロックをも透過するような高いエネルギーのミュオンが存在し、約60~70%を占める。



- 燃料デブリの場合の考察

ミュオン減衰量は概ね密度長 (密度 x 長さ) に依存

・鉄の密度： 7.9g/cm³

・燃料デブリの密度： 6~8g/cm³ (TMI-2岩状)

岩状燃料デブリ (空隙も存在) は、鉄の密度と同等かやや低いため、右図より、やや透過量が多くなる傾向と推定する。



- 1号機のRPV底部の観測結果の考察

地点 1 : 炉心までの水平距離X : 約36m

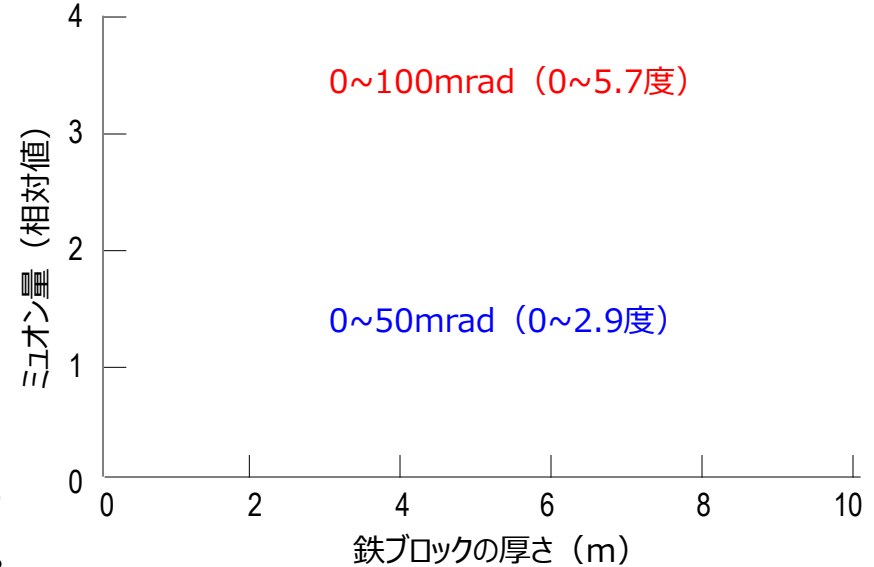
RPV底部高さH : 約3.3m

RPV底部仰角 : 約5度

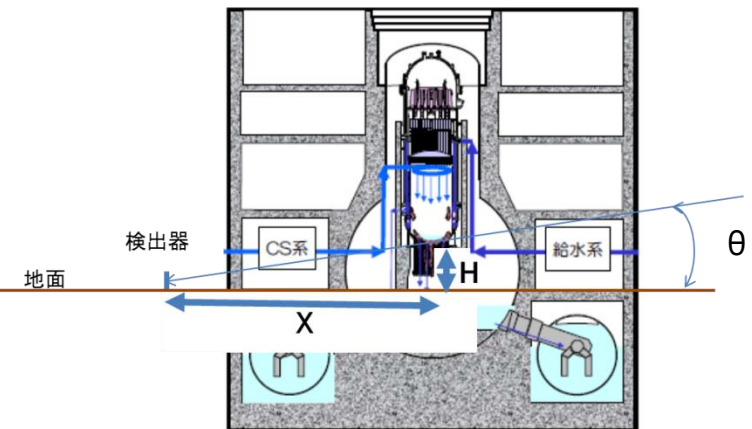
これより、1号機の観測では、約10m厚の燃料デブリをも透過するような高エネルギーミュオンの割合が多かったと推定。このことから、数m厚の燃料デブリによる減衰量を測定するには、誤差が多いと考える。

(注) RPV内径：約4.8m (1号)、約5.7m (2/3号)

今後は、7度以上の角度が得られるように検出器配置を考慮する必要がある



(a)鉄ブロック厚さとミュオン透過量の仰角方向依存性 (KEK@つくばでの測定)



(b)観測対象と検出器の位置関係と仰角θ

3. 2 散乱法：検出器システムの設計・製作(平成26/27年度実施内容)No.24

[達成目標]

- ・散乱法用の検出器システムの設計・製作を行うとともに、これらの測定手法・評価手法を確立すること。

[実施状況]

①検出器システムの設計・製作の実施

- ・ドリフトチューブ検出器の設計・製作（平成26年度完了）
- ・回路システム・測定システムの設計・製作（平成26年度完了）
- ・測定手法の改良開発（平成27年度計画）

②検出器で収集するデータ処理

- ・アルゴリズム開発・実装
 - －ミュオントラッキングアルゴリズム（平成26完了）
 - －検出器位置校正アルゴリズム（平成27年度：実機配置による校正）
 - －燃料デブリ識別アルゴリズム（平成27年度：統計精度の改善手法）
- ・オンライン監視機能の開発（平成27年度：構成検討完了）

3.2 散乱法：検出器システムの設計・製作(実績と計画)

③システム評価

- ・組み合わせ機能試験（平成26年度完了）
[位置分解能1mm、角度分解能5mrad以下を確認]
- ・シミュレーションを加味した1Fでの識別能力等の評価（平成26年度完了）
[炉心燃料の両端における分解能が30～40cmを確認]
- ・検出器位置校正用等のデータ採取（平成27年度・5月完了）
- ・工場総合試験・測定（計画変更：散乱法の実施要否判断後に）

④高放射線下での耐性確認試験

- ・放射線照射試験（平成26年度完了）
[50 μ Sv/h環境で、位置分解能:1.1mm、角度分解能:1.7mrad、
ミュオンに対する検出効率：9割以上を確認]

1. 概要

ミュオン検出器システムを構成するドリフトチューブ検出器、回路システム等の設計・製作

2. 製作内容

(1)ドリフトチューブ検出器

- 耐放射線性の検出器封入ガス (Ar:CO₂:N₂=96:3:1) を使用

(2)回路システム

- 同時計数と飛跡の違い (直線性：図 1) に直目した γ 線除去のロジックを搭載
- 同時計数を、高イベントレートまで可能とする高速のアナログ回路

(同時計数のゲート時間幅：1 μ s 以下)

- ミュオンは飛跡に沿って直線に、複数センサで同時に反応
- γ 線は、単発で離散的に反応

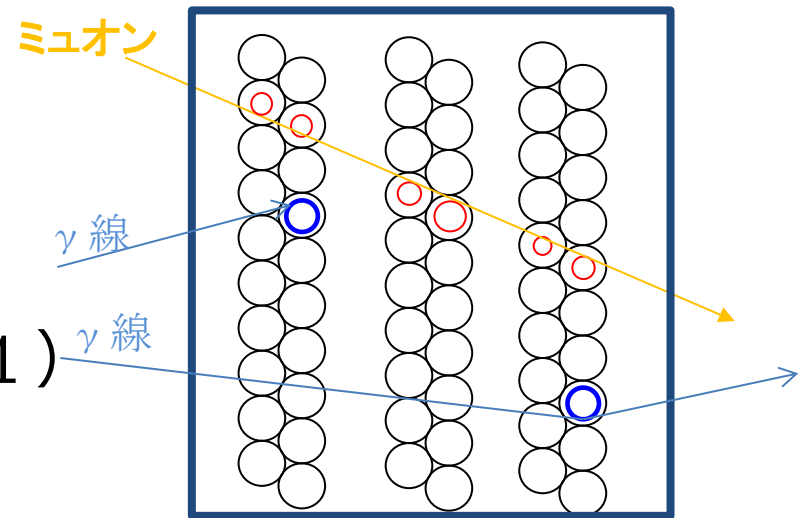


図 1 ミュオンと γ 線の反応の違い

3.2 散乱法：①検出器システムの設計・製作の実施(成果) ドリフトチューブ検出器の設計・製作(平成26年度成果)

■3.5m長ドリフトチューブ検出器

- ◆耐放射線封入ガスを採用し、6720本の製作 (写真1)
- ◆印加電圧2000~2075Vで、ほぼ平坦な特性となることを確認 (図1)
- ◆ドリフト時間が検出器半径 (芯線からの距離) に比例することを確認(図2)



写真1 ドリフトチューブ検出器

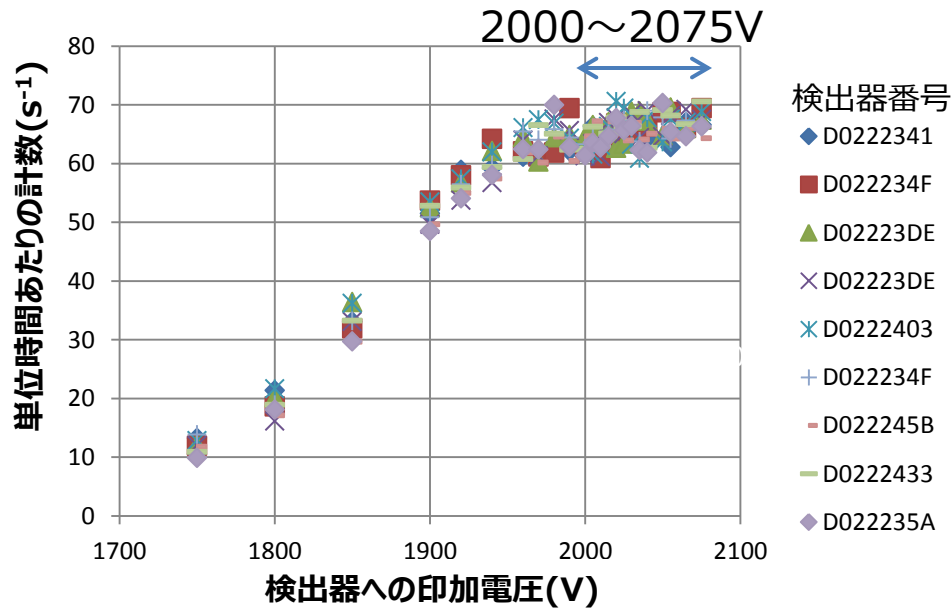


図1 プラトー特性例

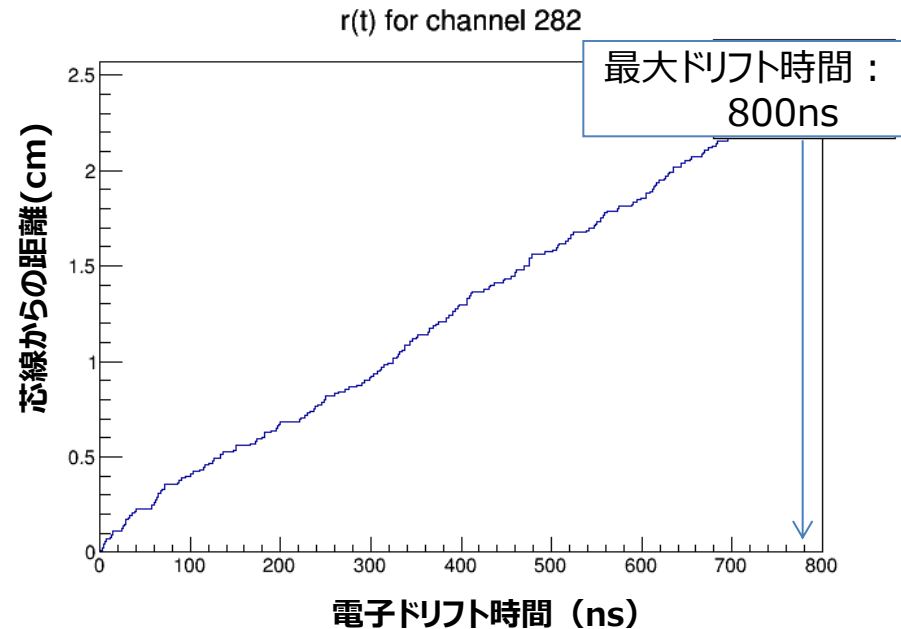


図2 電子のドリフト時間と芯線からの距離

3.2 散乱法：①検出器システムの設計・製作の実施(成果) 回路システム・測定システムの設計・製作(平成26年度成果)

■ 3レベルコンポジットディスクリミネータ

(ノイズに影響されずに検出器出力の立ち上がり開始時間を測定)

- ◆ 3つの閾値の通過時間から、立ち上がり開始時間(t_0)を推定 (図1)
 - ◆ 立ち上がり時間パルス幅：200ns (図2)
 - + 検出器の最大ドリフト時間：800ns (No.27参照)
- ⇒合計 1 μ s となり、同時計数のゲートパルス幅 1 μ s (目標値) を達成

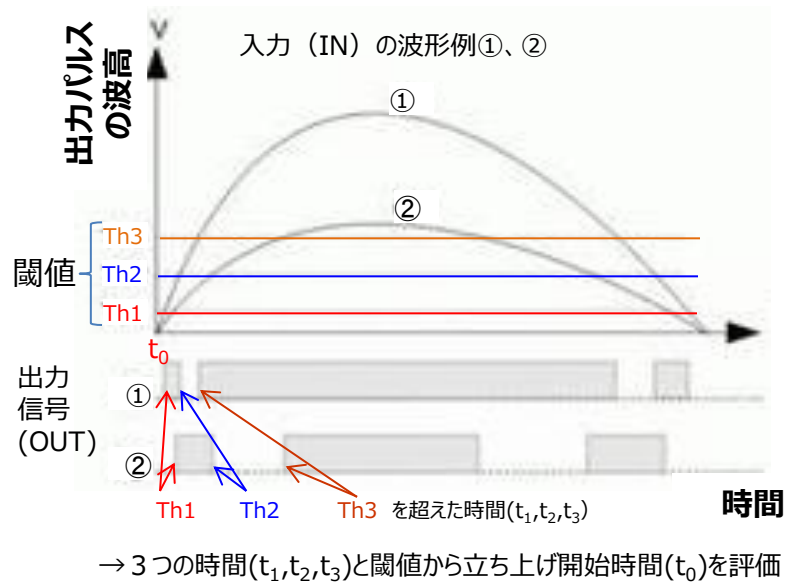


図1 3レベルコンポジットディスクリミネータの動作説明図

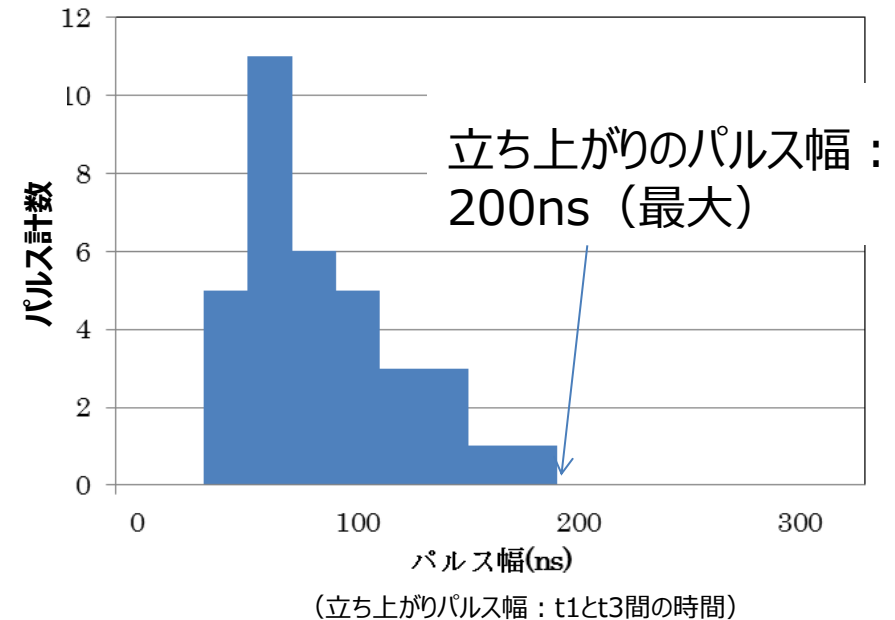


図2 検出器出力のパルス幅のヒストグラム

3.2 散乱法：①検出器システムの設計・製作の実施(成果) 回路システム・測定システムの設計・製作(平成26年度成果)

■ガンマ線除去リアルタイム処理を回路に搭載

- ◆ 4層以上の同時計数での除去
- ◆ 直線上に並ぶ検出器をパターン化し、マッチング処理するロジックを搭載
⇒両者によりγ線場(50μSv/h)でも95%でミュオンを識別 (シミュレーション)

パターン例(赤円)

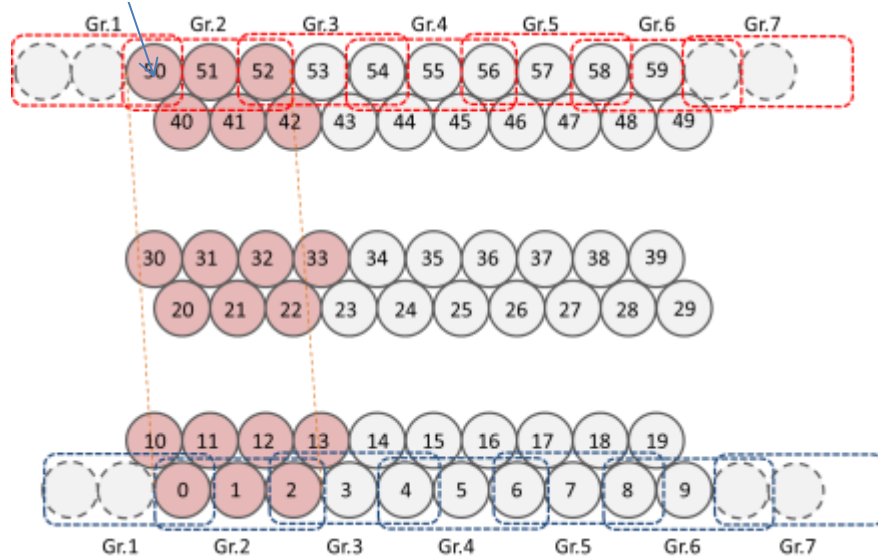


図1 パターンの作成イメージ
(円はドリフトチューブ断面で、円内数字は検出器番号
上下7グループに分け、49パターンを作成)

(100%:ミュオンを100%識別)

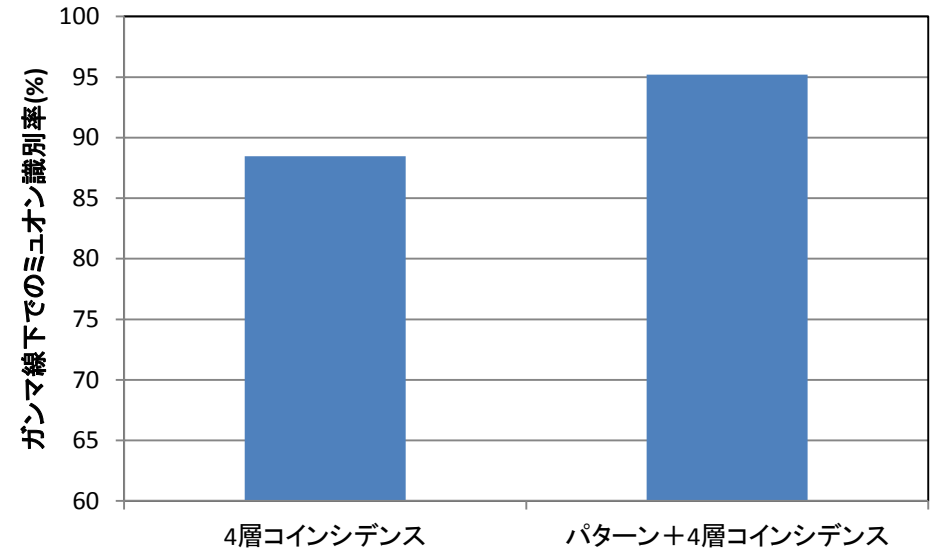


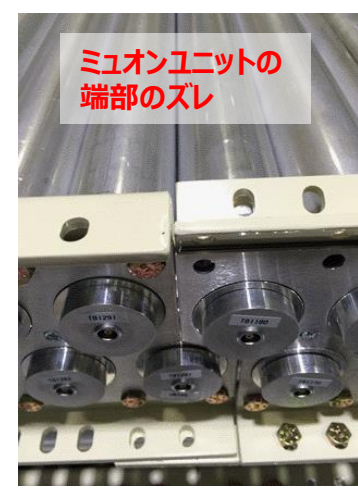
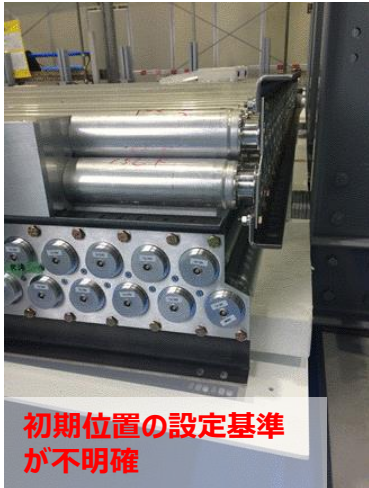
図2 ガンマ線場でのパターン化によるミュオン識別率の比較
(シミュレーションによる、50μSv/hのγ線場でのミュオンの識別率)

3.2 散乱法：①検出器システムの設計・製作の実施(成果) 測定手法の改良開発(平成27年度成果)

[実機施工に向けた改良項目の抽出完了]

- 取合い上の干渉回避と、基準設定による組立の簡便化→結合部材の改造、手順で対応
- 回路基板の保護方法、実機での施工性の向上→基板取付、保護カバーの設計で対応
- 検出器の位置ずれ→ユニット単位での位置ずれの校正方法で対応可能
- 組立後3.5m 長ドリフトチューブ検出器6720 本中約4.3%が不良
(性能に影響しない範囲であることを確認)

[今後の予定] 製作による改良は、実施可否判断後となるが、今後組立手順・治具設計への反映、検出器故障の推移の評価で実機施工には影響しないことを確認。



3.2 散乱法：②検出器で収集するデータ処理(計画)

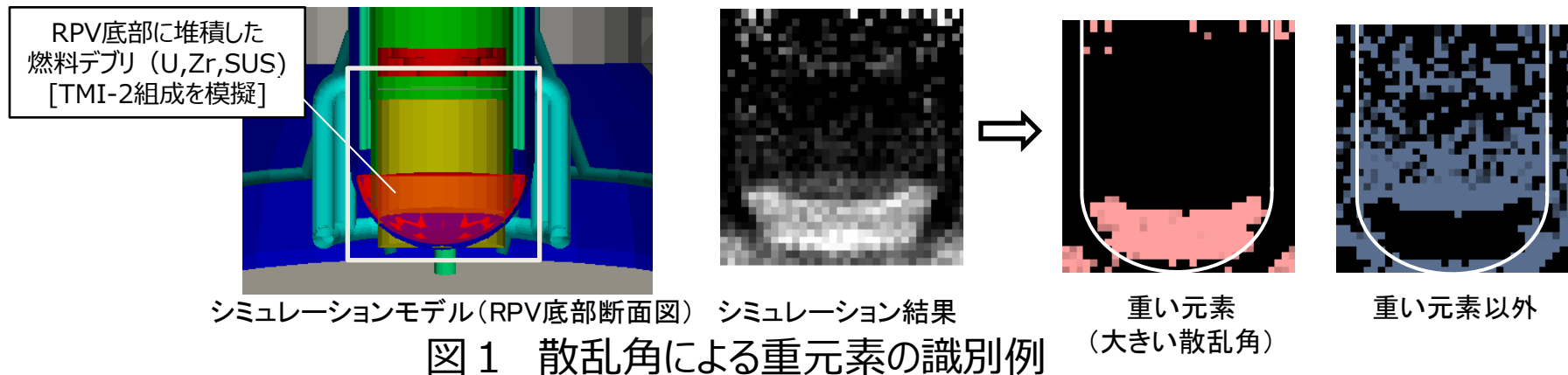
1. 概要

データ処理PCに搭載するアルゴリズム開発

- ・位置分解能1mm以下、角度分解能5mrad以下で校正可能
- ・燃料デブリ識別アルゴリズムの密度校正方法等を確立

2. 開発アルゴリズム

- (1)ミュオントラッキングアルゴリズム⇒検出器内での反応位置推定
- (2)検出器位置校正アルゴリズム⇒実測データによる検出器位置の校正
- (3)燃料デブリ識別アルゴリズム⇒ウラン等の重元素とコンクリート、鋼材の識別手法の検討 (図1)



3.2 散乱法：②検出器で収集するデータ処理(成果) トラッキングアルゴリズム(平成26年度成果)

- ドリフト時間からミュオン軌跡を求めるアルゴリズム
- 放射線環境下で動作するトラッキングアルゴリズム

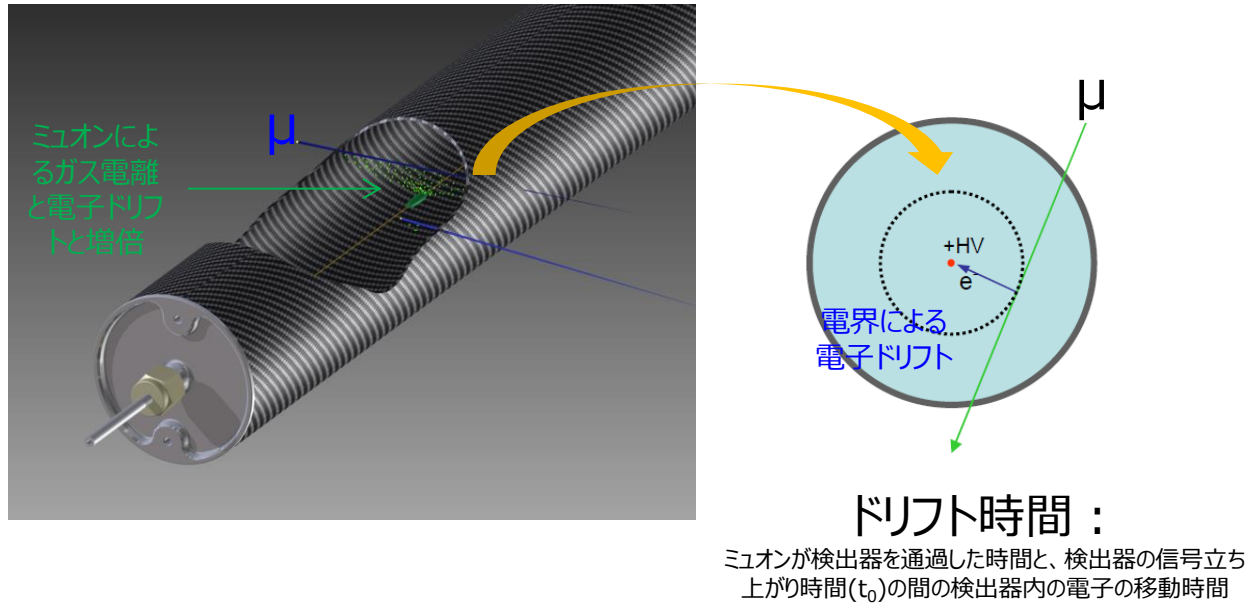


図1 ドリフトチューブ検出器の原理説明図

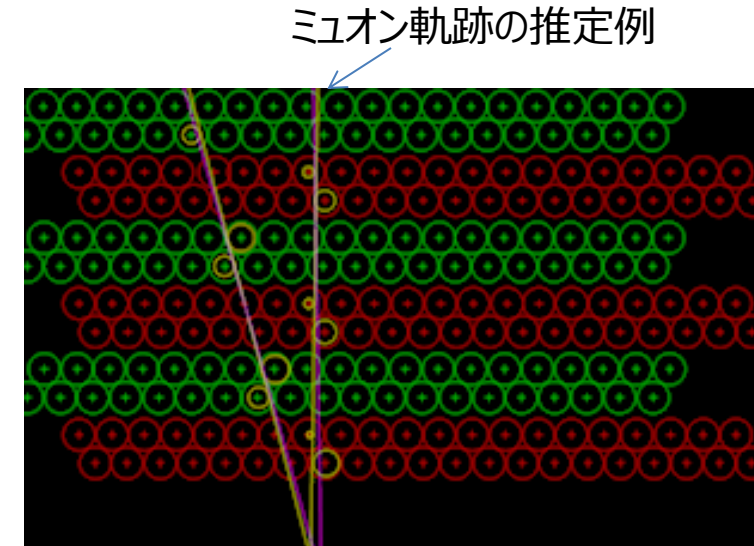


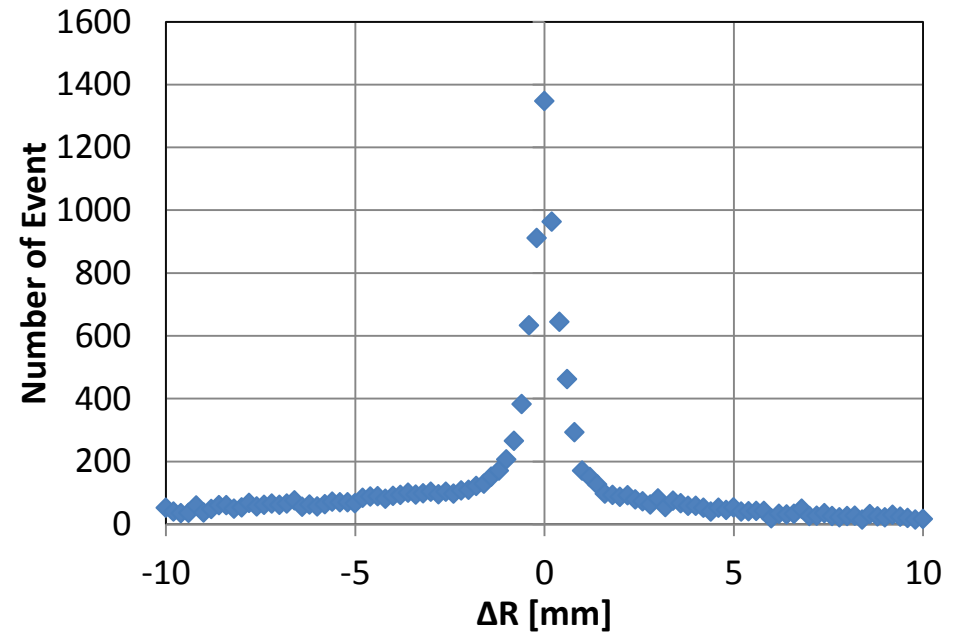
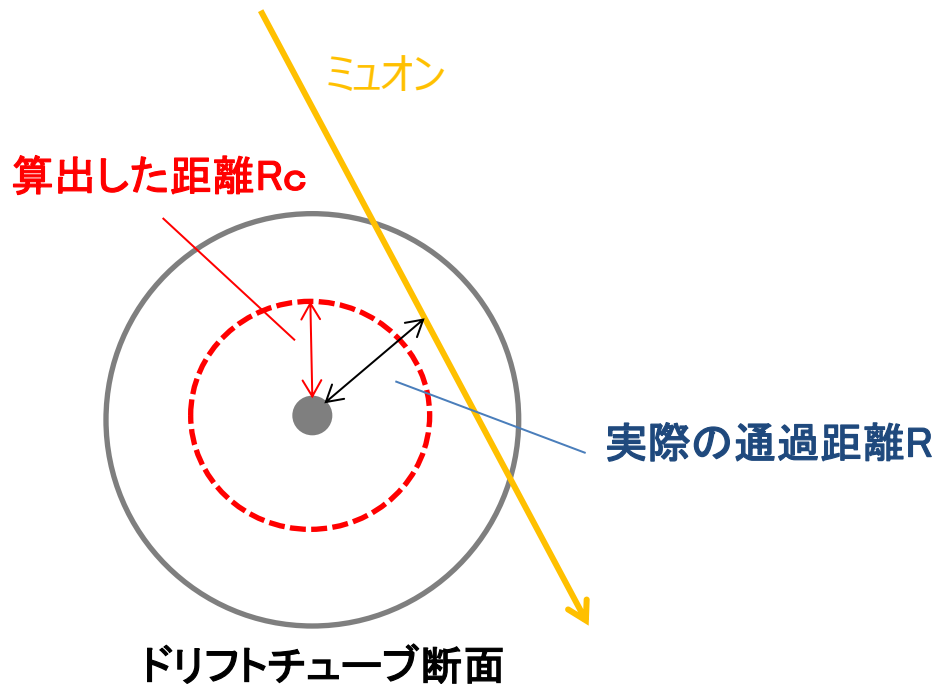
図2 各検出器のドリフト時間からのミュオン軌跡の推定アルゴリズムの推定結果例

3.2 散乱法:②検出器で収集するデータ処理(成果)

トラッキングアルゴリズム

LANL検出器と東芝回路の組み合わせ試験(平成26年度成果)

- トラッキング精度をアルゴリズムから算出した R_c とミュオン軌跡通過距離 R の差 ΔR で評価
 - ◆ 半値全幅 (FWHM)で $\pm 0.8\text{mm}$ であることを確認
 - ◆ 角度分解能 1.3mrad を達成



全チャンネルの ΔR 分布

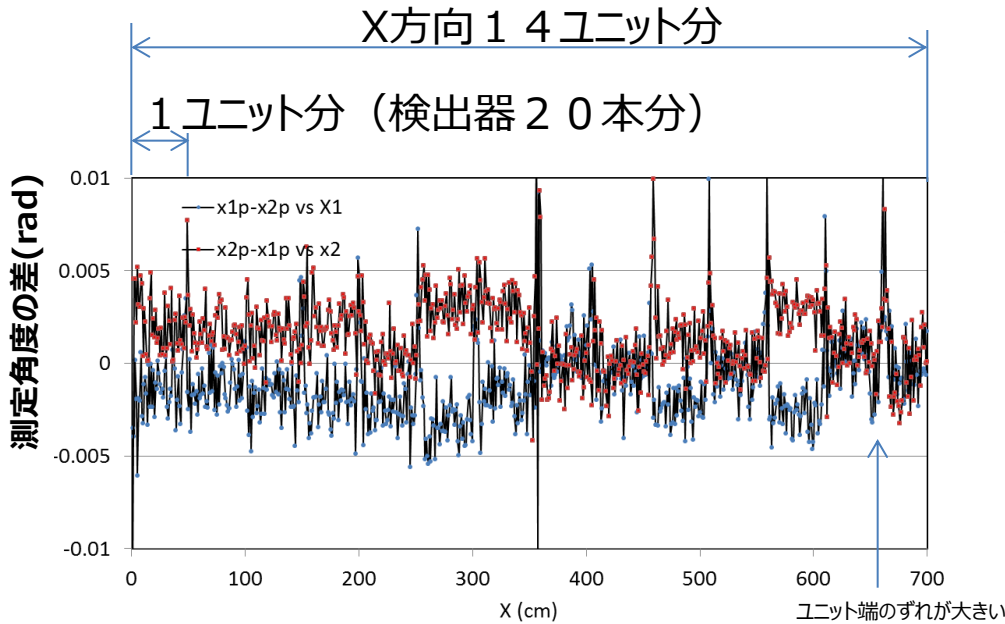
3.2 散乱法: ②検出器で収集するデータ処理(成果)

検出器位置校正アルゴリズム

■位置校正アルゴリズムの構築(平成26年度成果)

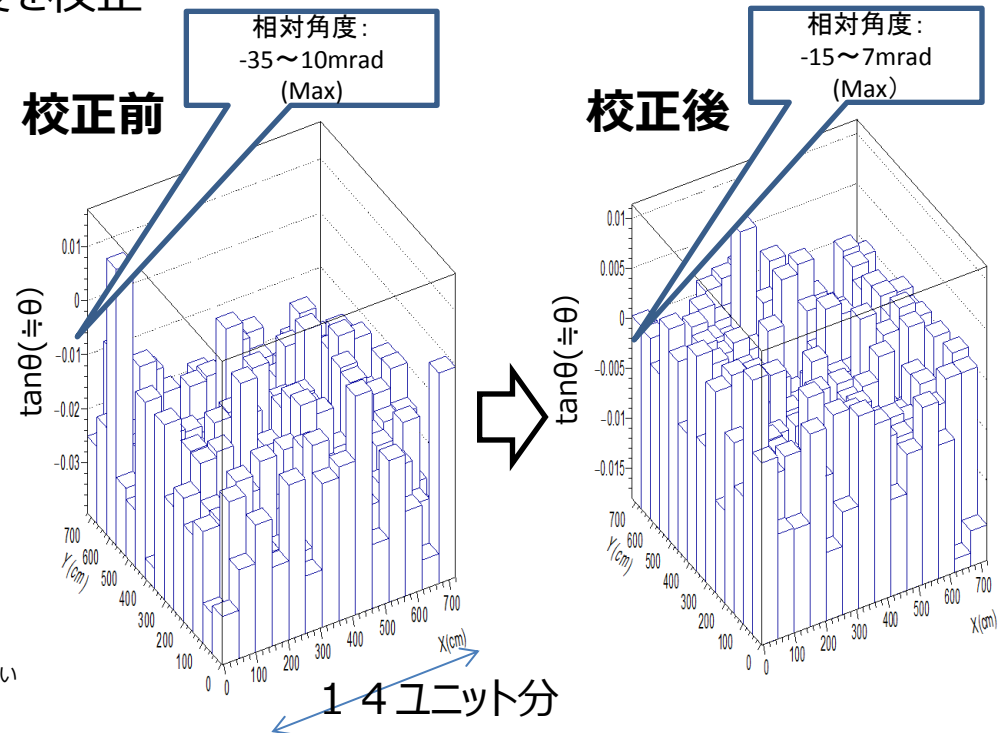
■システム評価試験データによる実機配置の校正(平成27年度成果)

- ・検出器位置校正アルゴリズムを、システム評価試験での測定データを基に装置に実装
- ・実測データから、ドリフトチューブの位置および角度を校正



検出器上下でミュオン測定角度の差異(校正後)

ほぼ全領域で5mrad以下の精度



上段検出器と下段検出器の相対角度
 角度校正後は検出面上のほぼ全領域で
 ±5mrad (σ) の精度

3.2 散乱法:②検出器で収集するデータ処理(成果) 燃料デブリ識別アルゴリズム

■ 海拔0m校正データ取得 (米国サンジエゴで93時間測定) (平成26年度成果)

- ◆ ミュオンエネルギー分布には標高依存性あり→福島と同じ海拔0m測定
- ◆ 1.2m厚(1382 g/cm²)、0.6m厚(691 g/cm²)の鉛を用い、散乱角の角度依存性を測定 (ミュオン散乱角 $\propto 1/E$)
- ◆ エネルギー毎の理論散乱角でフィッティング ⇒ 校正データベース
- ◆ シミュレーション、解析アルゴリズムへの反映

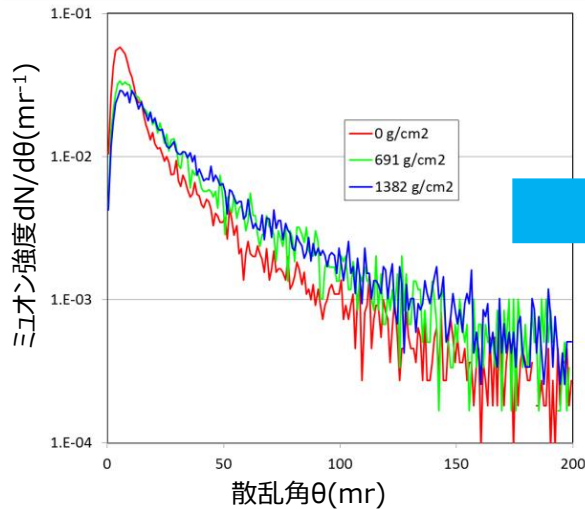


図1 各物質を透過した際のミュオンの散乱角依存性を測定

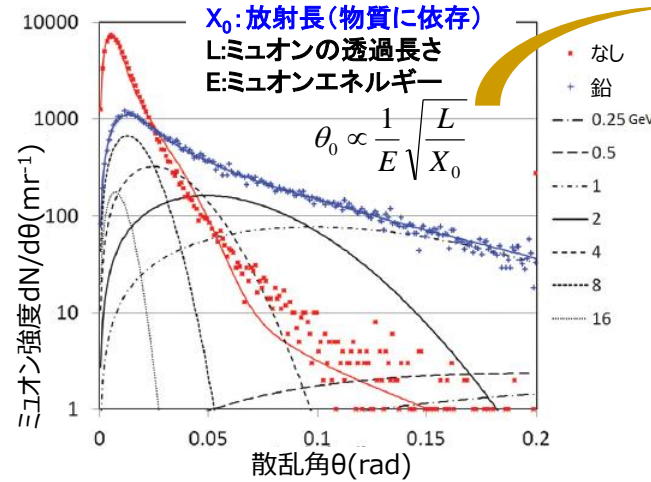


図2 エネルギー毎の理論散乱角で、各物質の透過データをフィッティング
→ミュオンエネルギー分布を校正

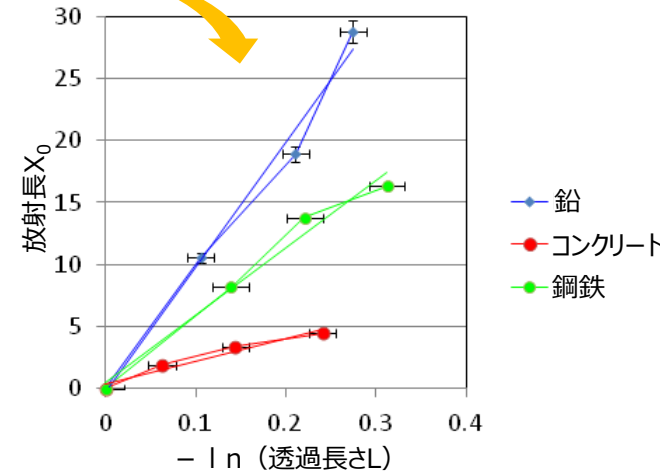


図3 校正したエネルギーと測定した散乱角から放射長を求め、物質を識別

3.2 散乱法：②検出器で収集するデータ処理(成果)

燃料デブリ識別アルゴリズム(平成27年度成果)

統計精度の改善手法：システム評価試験(後述)への補正手法の適用

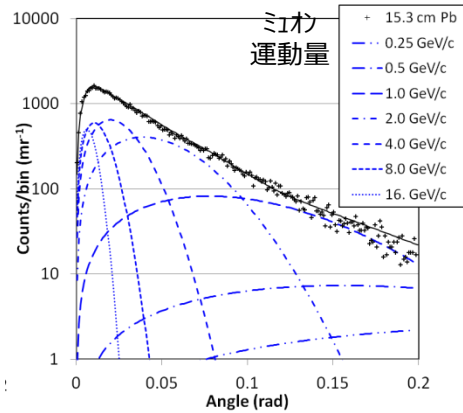


図1 鉛の散乱角分布理論値

散乱角分布の測定値が、複数のミュオンエネルギーの重ね合わせであると仮定しフィッティングを行う

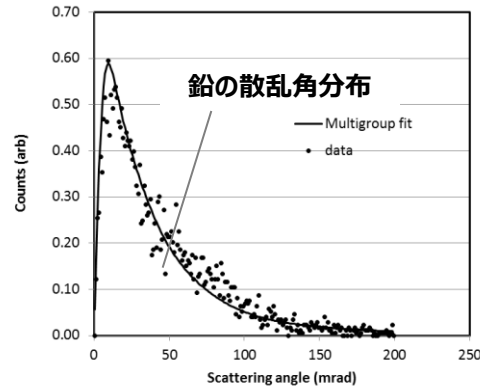


図2 CMC試験結果への適用

マルチグループフィッティングにより鉛ブロックの測定値を再現可能

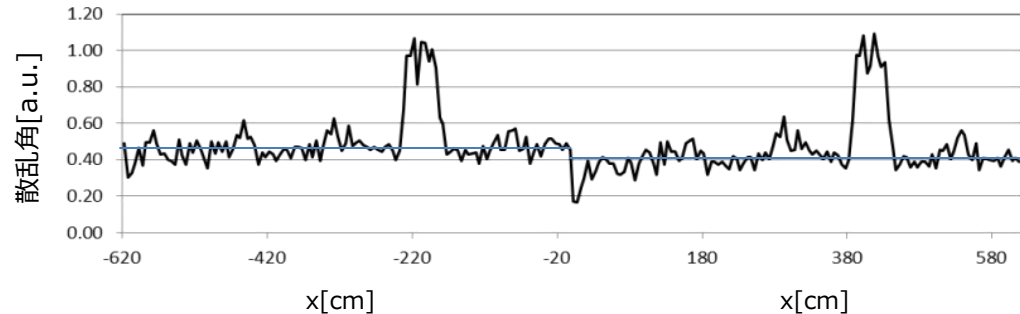
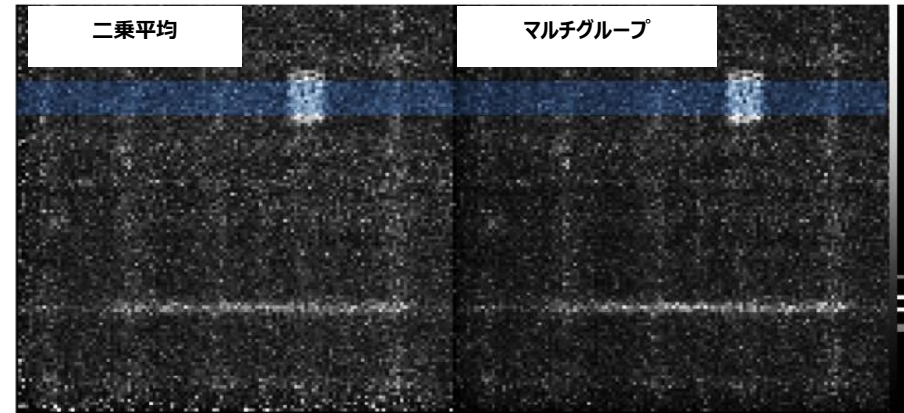


図3 システム評価試験結果へマルチグループフィッティングによるコントラストの向上
従来の散乱角の処理方法(二乗平均)と比較してコントラストが約5%向上。
鉛と他の構造物の散乱強度の差が初期値40%から60%に改善。

3.2 散乱法：②検出器で収集するデータ処理(成果)

燃料デブリ識別アルゴリズム(平成27年度成果)

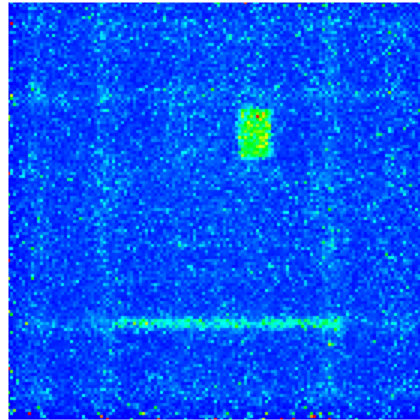
統計精度の改善手法：一般医療分野で用いられる手法 (ML-EM法) の適用(1/5)

システム評価試験 への適用

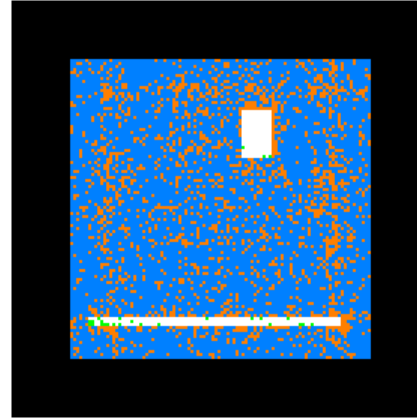
従来手法(PoCA)

注：PoCA：Point of Closest Approach (ミューオンが1点で散乱したと仮定し、散乱角の確率密度関数に対する尤度を最大にする散乱分布を求める)

散乱濃度



鉛検知結果



白…鉛を正しく判別
青…鉛以外を正しく判別

緑…鉛を鉛以外に誤判別
オレンジ…鉛以外を鉛に誤判別

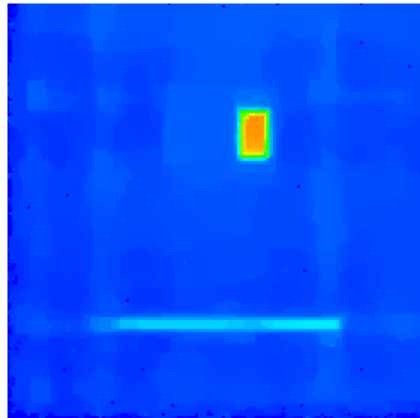
黒…注目領域外

誤検知率(#1)=25.49%

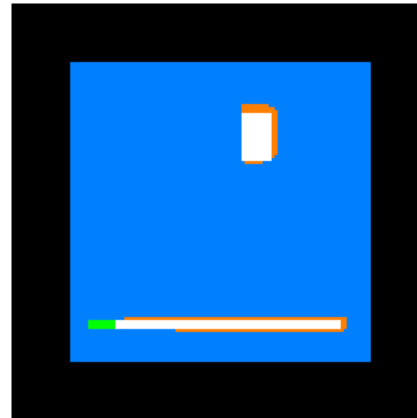
1 :鉛以外のボクセルを鉛として検知した数÷鉛以外のボクセル数

改善後(改良ML-EM)の鉛判別結果の評価

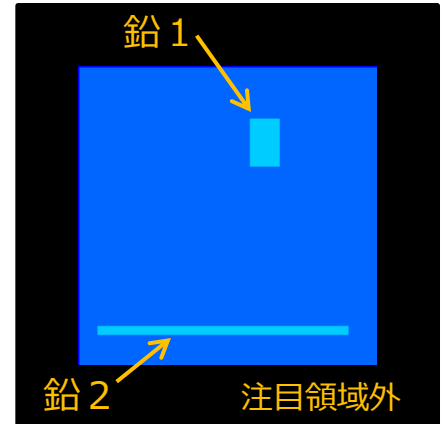
散乱濃度



鉛検知結果



正解配置 (高さ130 cm断面)



改善手法(改良ML-EM)

注：ML-EM(多重散乱を仮定し、散乱角の確率密度関数に対する尤度を最大にする散乱分布を求める)の耐ノイズ性能を向上させたもの

画像全体のノイズが大幅に低減され、誤検知率が改善された

誤検知率(#1)=3.17%

3.2 散乱法：②検出器で収集するデータ処理(成果)

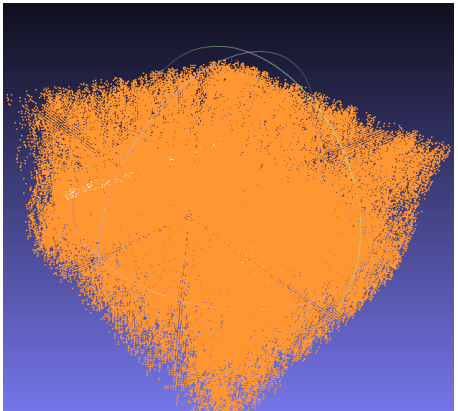
燃料デブリ識別アルゴリズム(平成27年度成果)

統計精度の改善手法：一般医療分野で用いられる手法 (ML-EM法) の適用(2/5)

検知結果の3次元表示

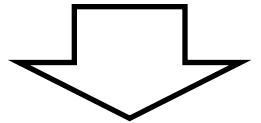
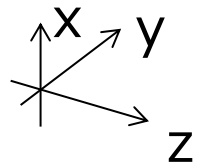
従来手法(PoCA)

- ・誤検知が散在し、鉛の3次元位置の把握は難しい



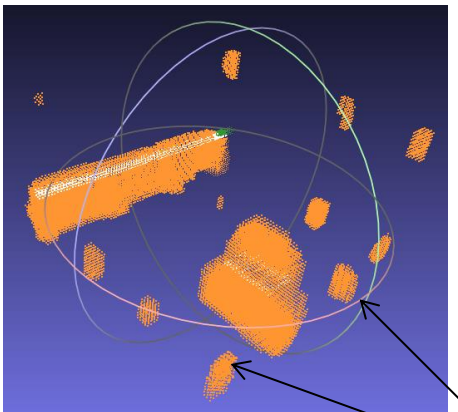
誤検知率=25.49%

- 白…鉛を正しく判別
- 青…鉛以外を正しく判別
- 緑…鉛を鉛以外に誤判別
- オレンジ…鉛以外を鉛に誤判別
- 黒…注目領域外



改善手法(改良ML-EM)

- ・金属フレームが一部残っているが、細かな誤検知がなくなり、鉛の塊が認識できる
- ・鉛とその下の構造物が融合してミュオン進行方向は伸びが大きい
- ・水平方向の重心のずれは30cm以下であった

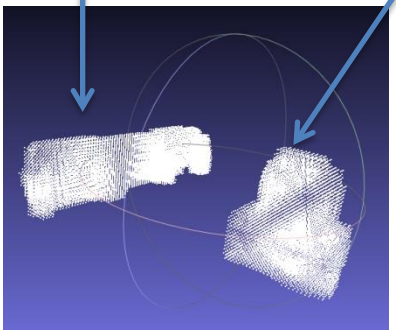


誤検知率=3.17%

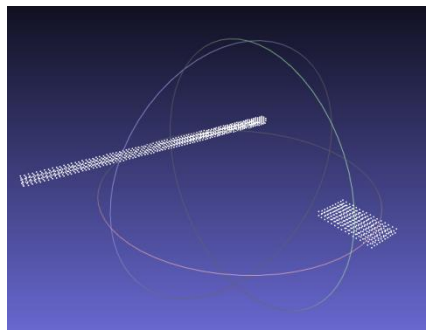
フレーム部分が残っている

重心の誤差
 x座標 : +32.62cm
 y座標 : -28.34cm
 z座標 : -0.68cm

重心の誤差
 x座標 : +21.7cm
 y座標 : -4.17cm
 z座標 : -6.40cm



正解の鉛と重なる部分だけ抽出

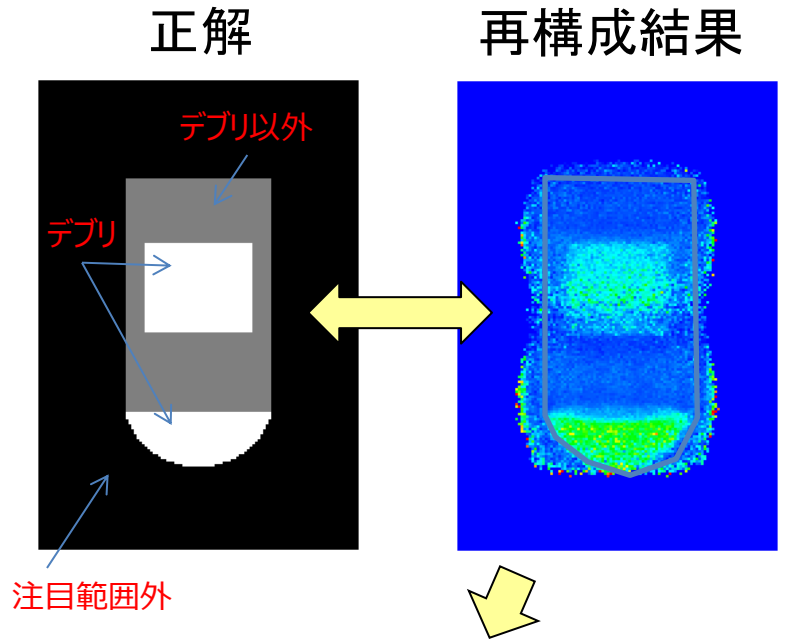
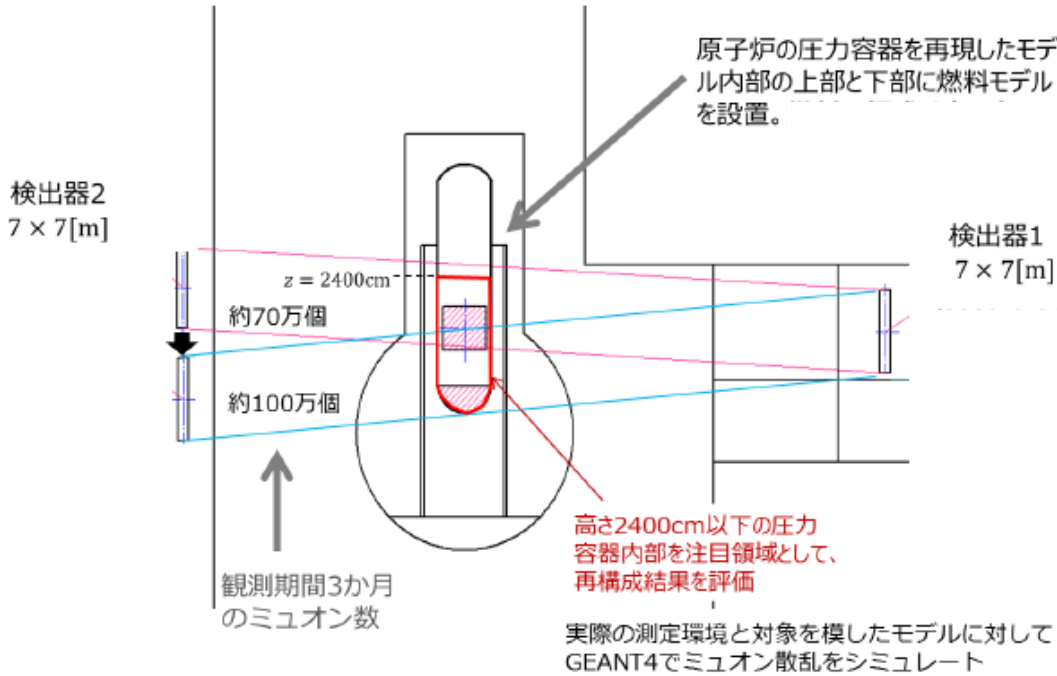


正解配置

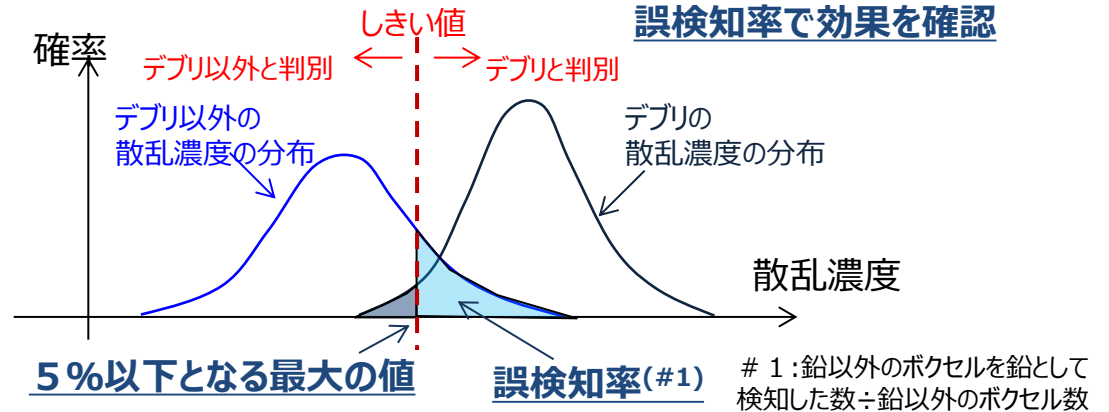
3.2 散乱法：②検出器で収集するデータ処理(成果)

燃料デブリ識別アルゴリズム(平成27年度成果)

統計精度の改善手法：一般医療分野で用いられる手法 (ML-EM法) の適用(3/5)



評価モデル



3.2 散乱法：②検出器で収集するデータ処理(成果)

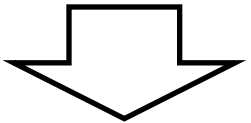
燃料デブリ識別アルゴリズム(平成27年度成果)

統計精度の改善手法：一般医療分野で用いられる手法 (ML-EM法) の適用(4/5)

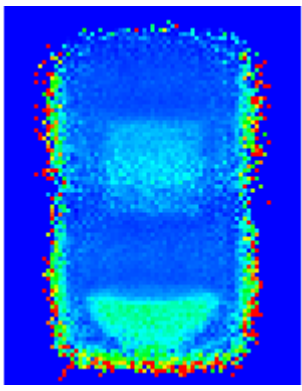
1 Fシミュレーションへの適用 (誤検知率の改善)

従来手法(PoCA)

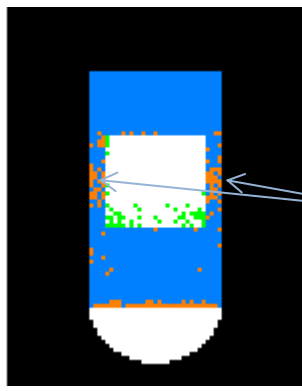
注：PoCA：Point of Closest Approach (ミュオンが1点で散乱したと仮定し、散乱角の確率密度関数に対する尤度を最大にする散乱分布を求める)



散乱濃度



デブリ判別結果



白…デブリを正しく判別
 青…デブリ以外を正しく判別
 緑…デブリをデブリ以外に誤判別
 オレンジ…デブリ以外をデブリに誤判別
 黒…注目領域外

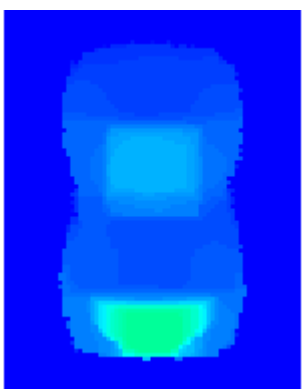
誤検知率=21.66%

改善後(MAP-EM)のデブリ判別結果の評価

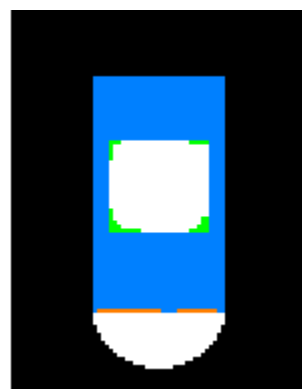
改善手法(MAP-EM)

注：MAP-EM：Maximum Likelihood-Expectation Maximization(ML-EM：多重散乱を仮定し、散乱角の確率密度関数に対する尤度を最大にする散乱分布を求める)に、Maximum A Posteriori (MAP：平滑化処理を追加)の手法を追加したもの

散乱濃度



デブリ判別結果



散在していた小さな誤検知がなくなり、デブリ境界がはっきりした

誤検知率=14.12%

3.2 散乱法：②検出器で収集するデータ処理(成果)

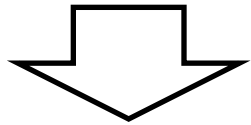
燃料デブリ識別アルゴリズム(平成27年度成果)

統計精度の改善手法：一般医療分野で用いられる手法 (ML-EM法) の適用(5/5)

1 Fシミュレーションへの適用 (測定時間の短縮)

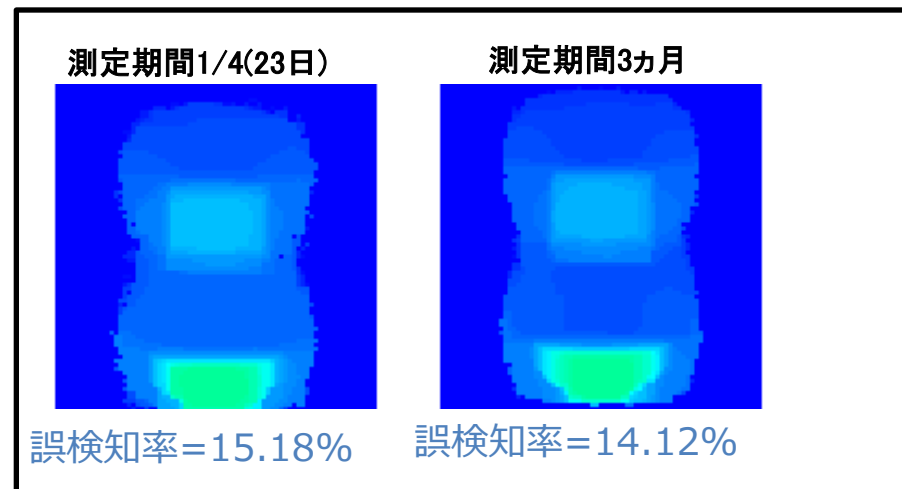
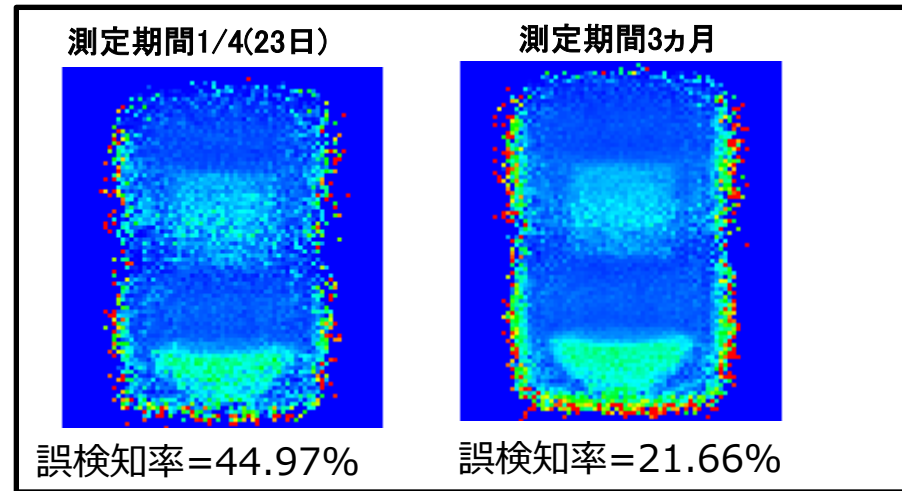
従来手法(PoCA)

- ・従来手法では統計量が少ない条件での精度低下



改善手法(MAP-EM)

- ・画像全体に現れるノイズが低減される。
- ・改善手法では統計量が少ない条件での精度が大幅に向上
- ・測定期間1/4で誤検知率、約15%

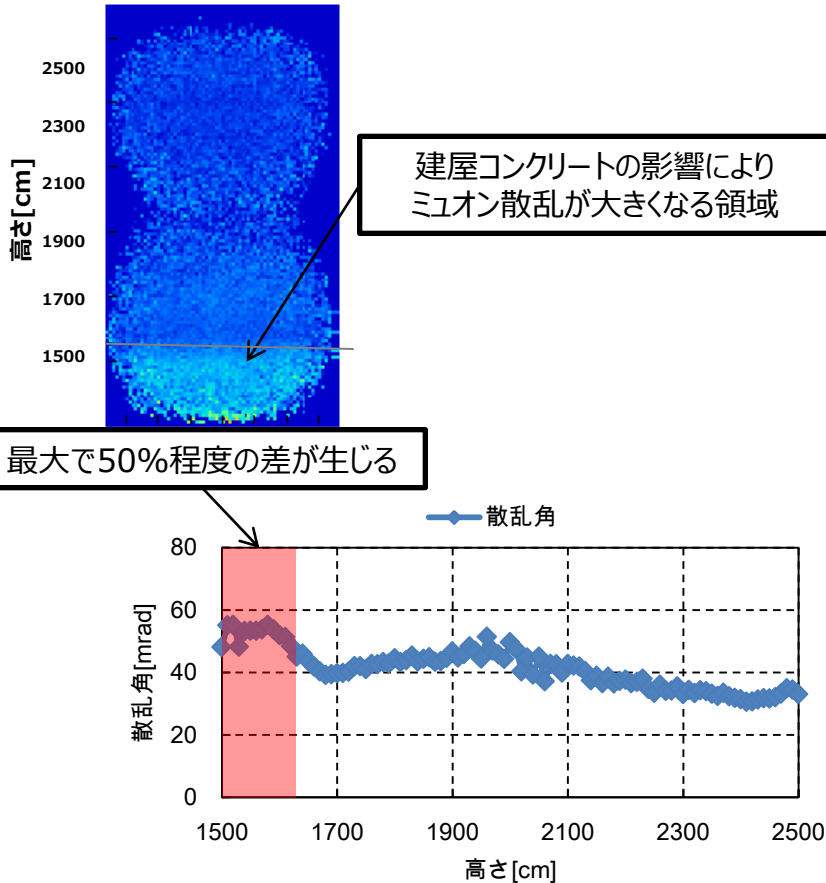


3.2 散乱法：②検出器で収集するデータ処理(成果)

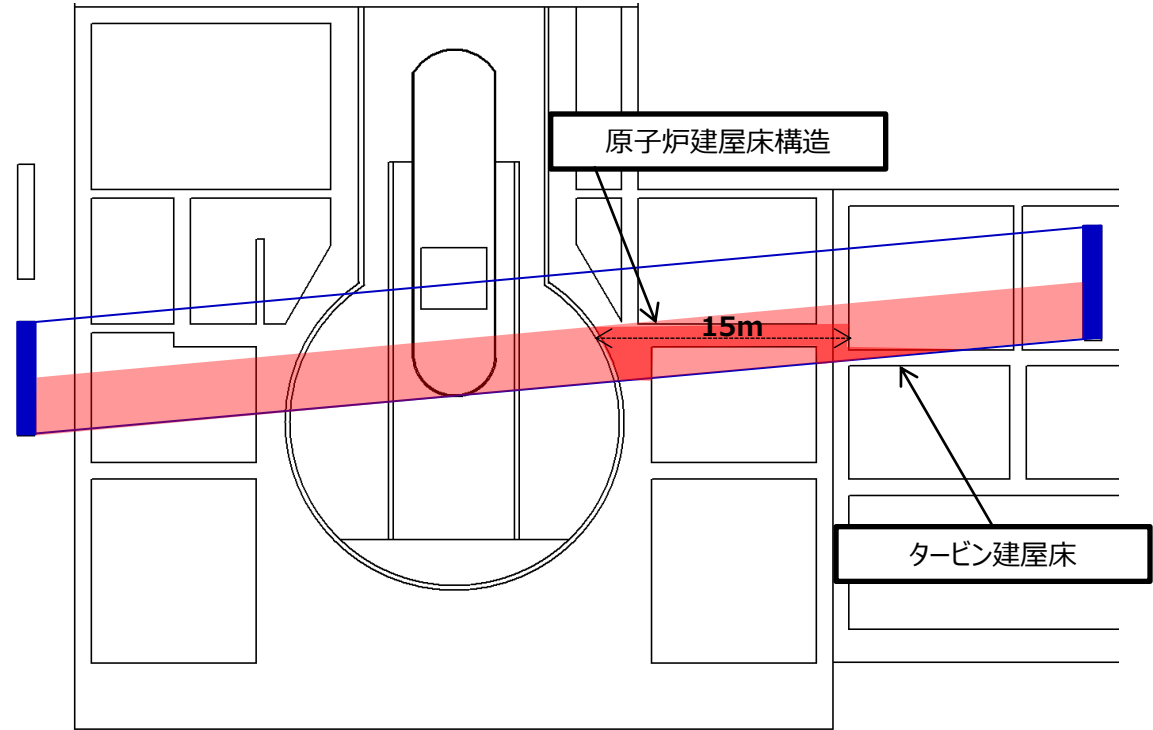
燃料デブリ識別アルゴリズム(平成27年度成果)

統計精度の改善手法：原子炉建屋、タービン建屋の床の影響補正(1/2)

シミュレーション結果 (デブリが存在しない条件)



高さ方向の散乱角分布 (幅2m平均値)



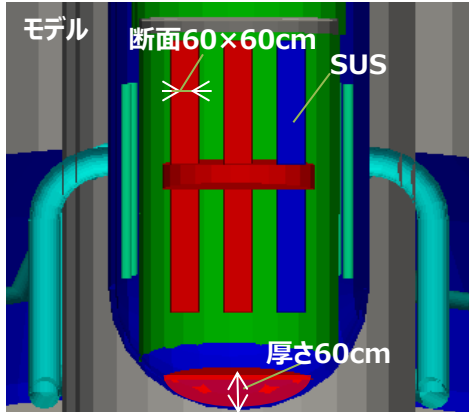
検出器配置と画像化範囲

- ・建屋床を通過する距離が長い(10m以上)場合は画像上の散乱角が大きくなる
- ⇒デブリと区別するためには元の構造を考慮する必要がある

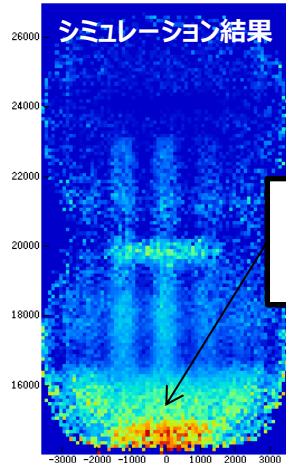
3.2 散乱法：②検出器で収集するデータ処理(成果)

燃料デブリ識別アルゴリズム(平成27年度成果)

統計精度の改善手法：原子炉建屋、タービン建屋の床の影響補正(2/2)



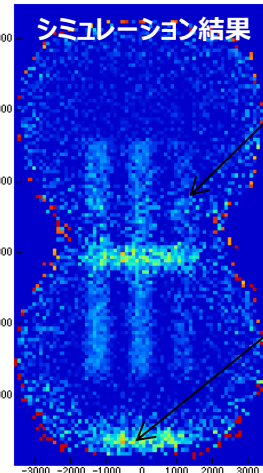
同じ形状の燃料デブリとSUSが存在し、RPV底部に薄く燃料が堆積した条件



建屋床の影響により燃料位置が不明確に

構造物による散乱が重なり、燃料位置が不明確に

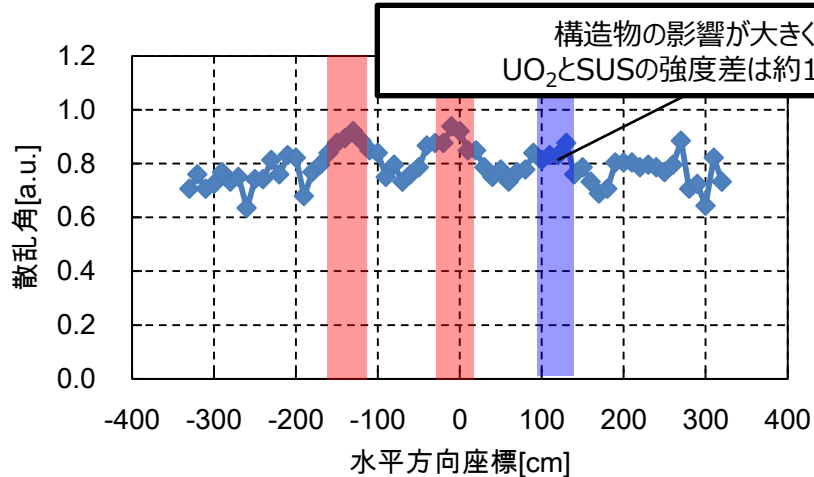
燃料なし条件の散乱分布との差分を評価



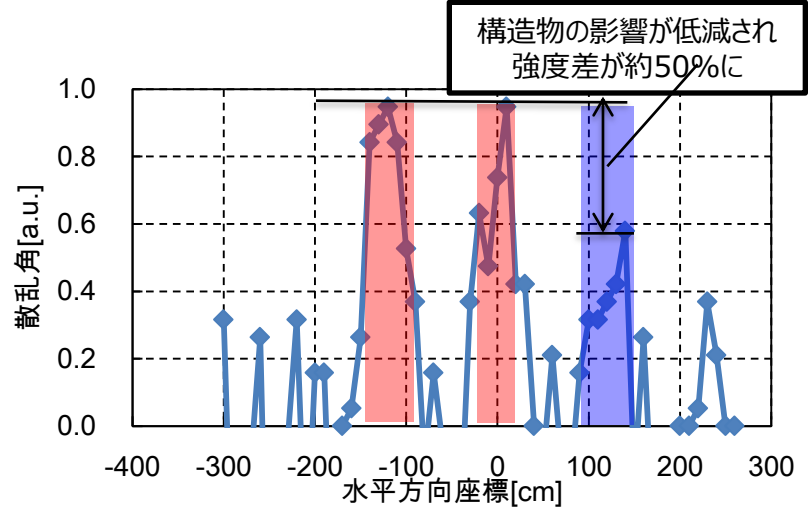
燃料デブリと同じ形状のSUSの散乱は低い

燃料デブリの存在する位置が明確に現れる

構造物による影響を低減



柱状燃料部分の水平方向の散乱角分布 (高さ30cm平均値)



構造物による影響を除いた散乱角分布 (高さ30cm平均値)

3.2 散乱法：②検出器で収集するデータ処理(成果)

オンライン監視機能開発(平成27年度成果)

[達成目標] 検出器の異常診断および環境モニタを構築し、検出器位置校正などの既存データ収集システムと統合し機能すること。

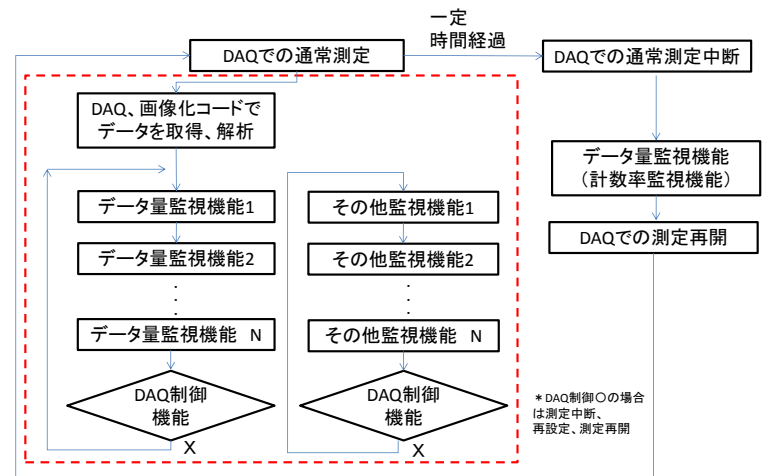
[実施状況]

➤ 検出器の異常診断機能

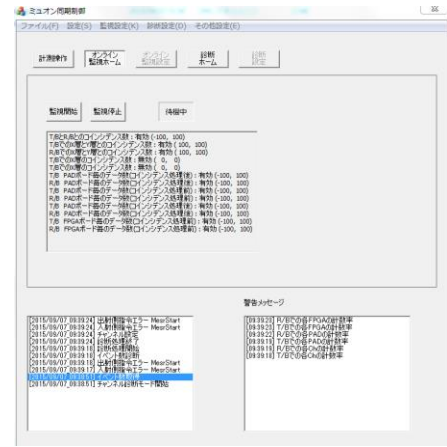
データ量監視としてコインシデンス処理の有無、検出器の構成単位毎にデータを22項目に分類し検出器駆動電源の電圧・電流値、データ記録用サーバHD残量監視を監視するソフトの製作完了

➤ 環境モニタおよび異常診断機能の統合

既存データ収集システム (DAQ) との統合として、異常を検知した際は自動でDAQ制御、異常原因を特定、システムの再起動や異常検出器でのデータ収集無効化のアルゴリズム構築を完了



エラー検知ロジック例



オンライン検出器診断の画面例

3.2 散乱法：③システム評価の実施(計画)

1. 概要

通常環境において、検出器システムを組み上げ、システム性能を評価

- ・1Fにおける識別能力：30cm程度

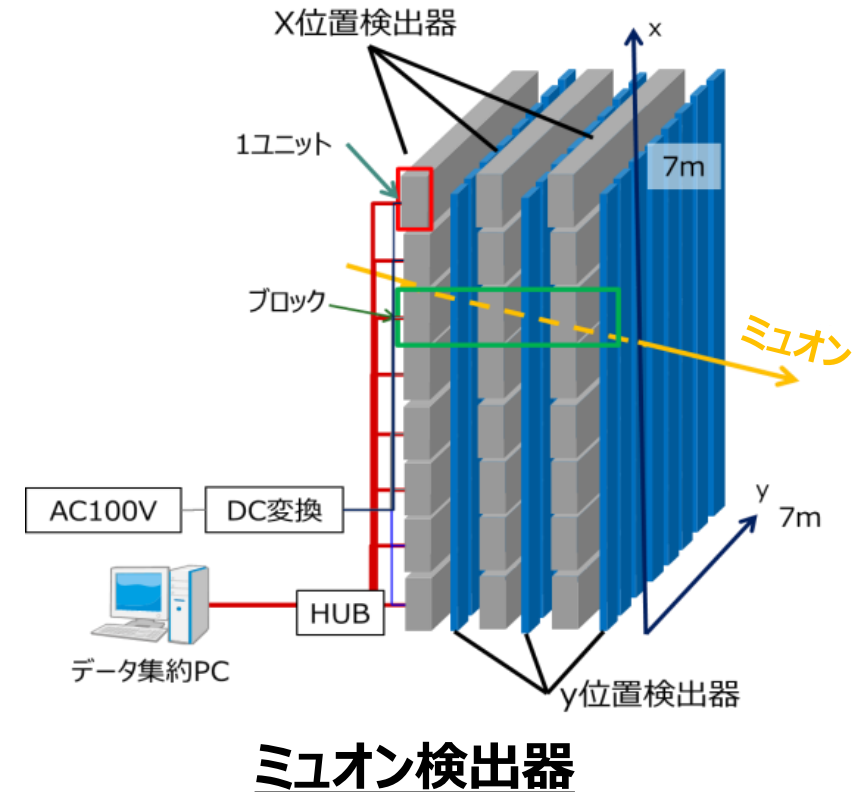
2. 試験計画

(1) 試験項目

- ・ミュオンイベントの測定レートの角度依存性
- ・ミュオン軌跡の算出誤差

(2) シミュレーションを加味し

1Fでの識別能力等(注1)を評価



(注1：高放射線環境下での測定期間と識別能力、燃料デブリ等の組成、炉内構造物の影響等の誤差評価)

3.2 散乱法：③システム評価の実施(成果) 組み合わせ機能試験(平成26年度成果)



3.5m長ドリフトチューブを
10本・2列で束ねる



上下2層組み上げ



3.5mを2本接続し7m長化
(ユニット化)



ユニットを7m×7mに長を並べる



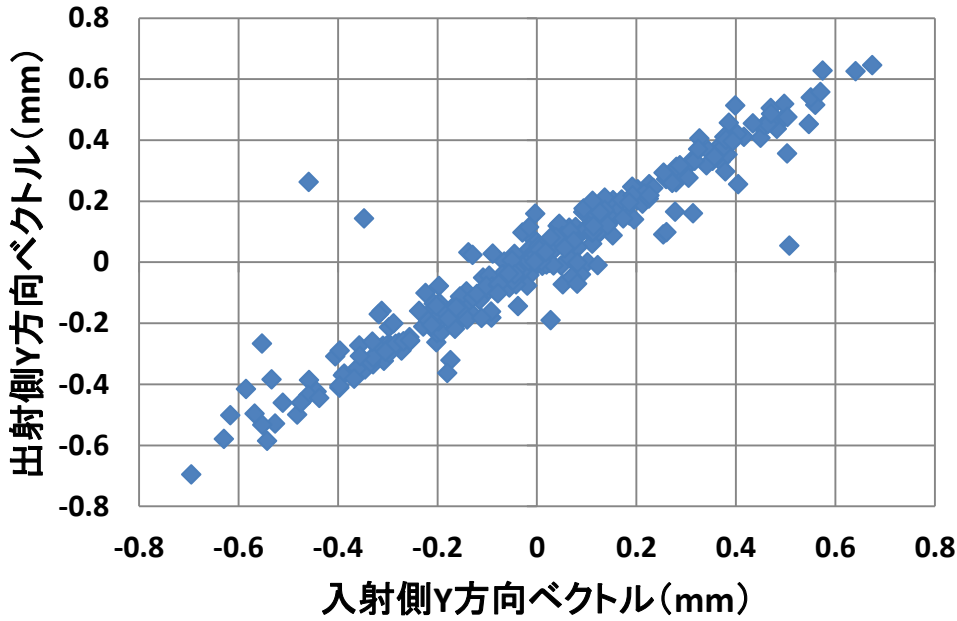
X, Y交互の方向に6層積層化

3.2 散乱法:③システム評価の実施(成果) 組み合わせ機能試験(平成26年度成果)

- ◆ 7m×7mの有感面積を持つ検出器でミュオンの軌跡を算出できることを確認
- ◆ 2基の検出器で独立にミュオン軌跡を算出し、トラッキング位置・角度分解能が1mm以下、5mrad以下になることを確認



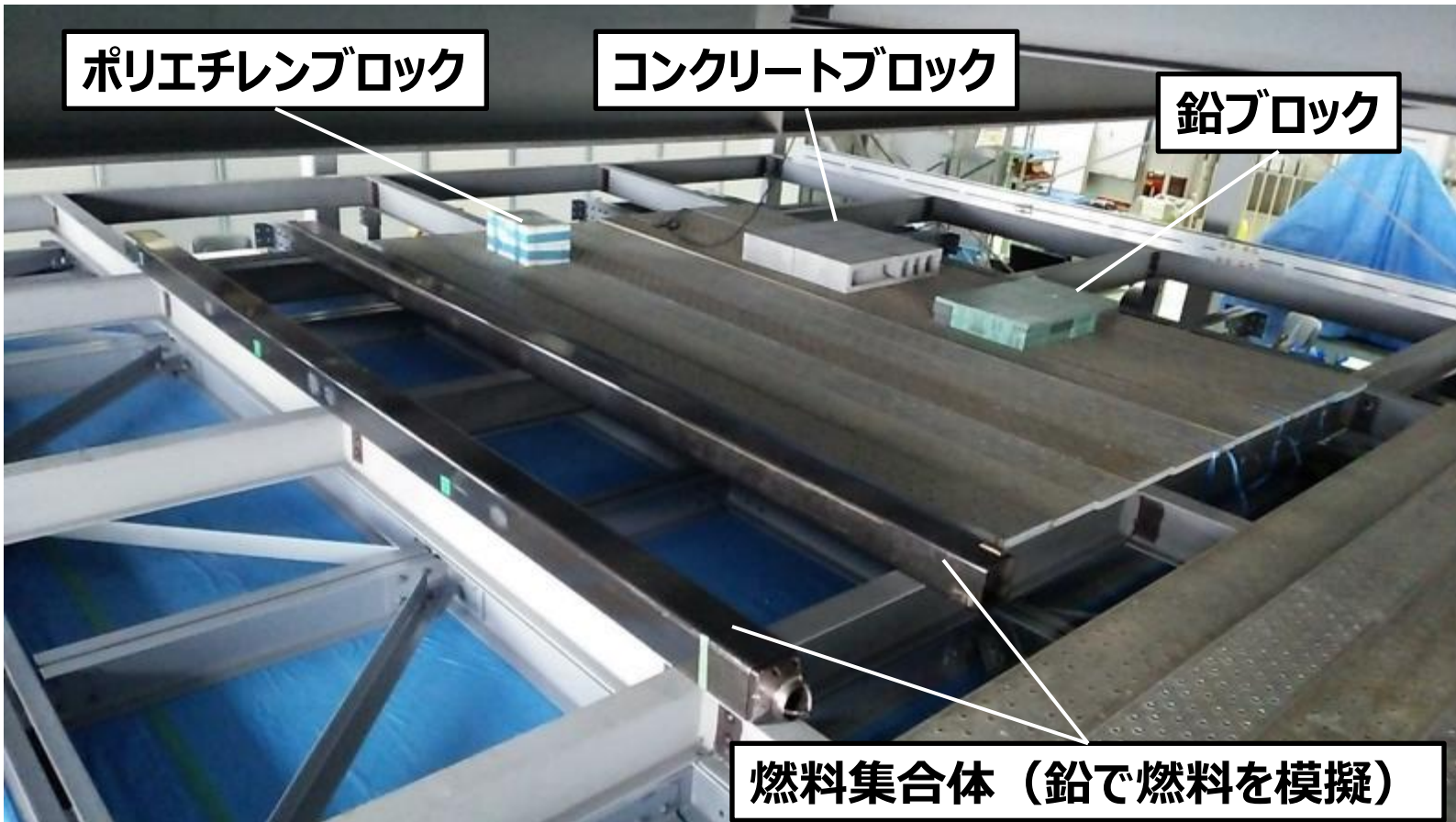
入射側と出射側ベクトルの比較



散乱点の分布

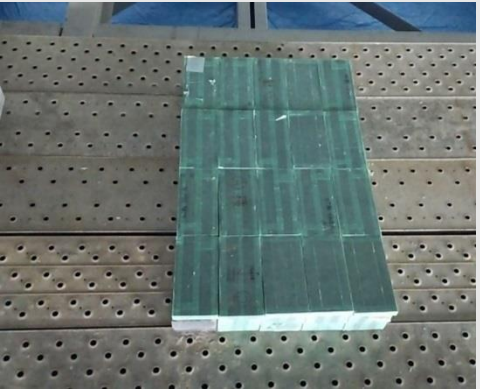
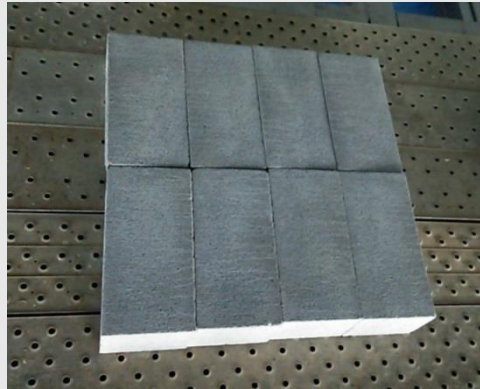
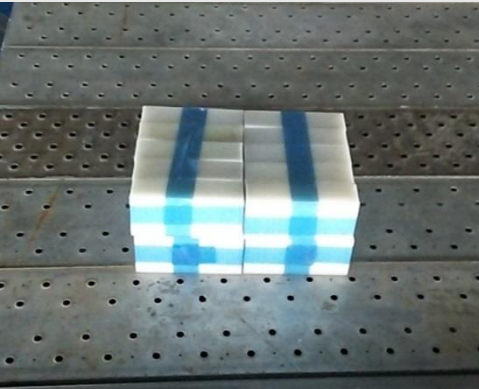
	分解能	4検出器の平均した際の分解能
位置分解能 [mm]	±1.4	±0.7
角度分解能 [mrad]	4.4	2.2

3. 2 散乱法：③システム評価の実施(成果) 検出器位置校正用等のデータ採取(平成27年度成果) 原子炉内構造材に対する性能検証(試験体系)

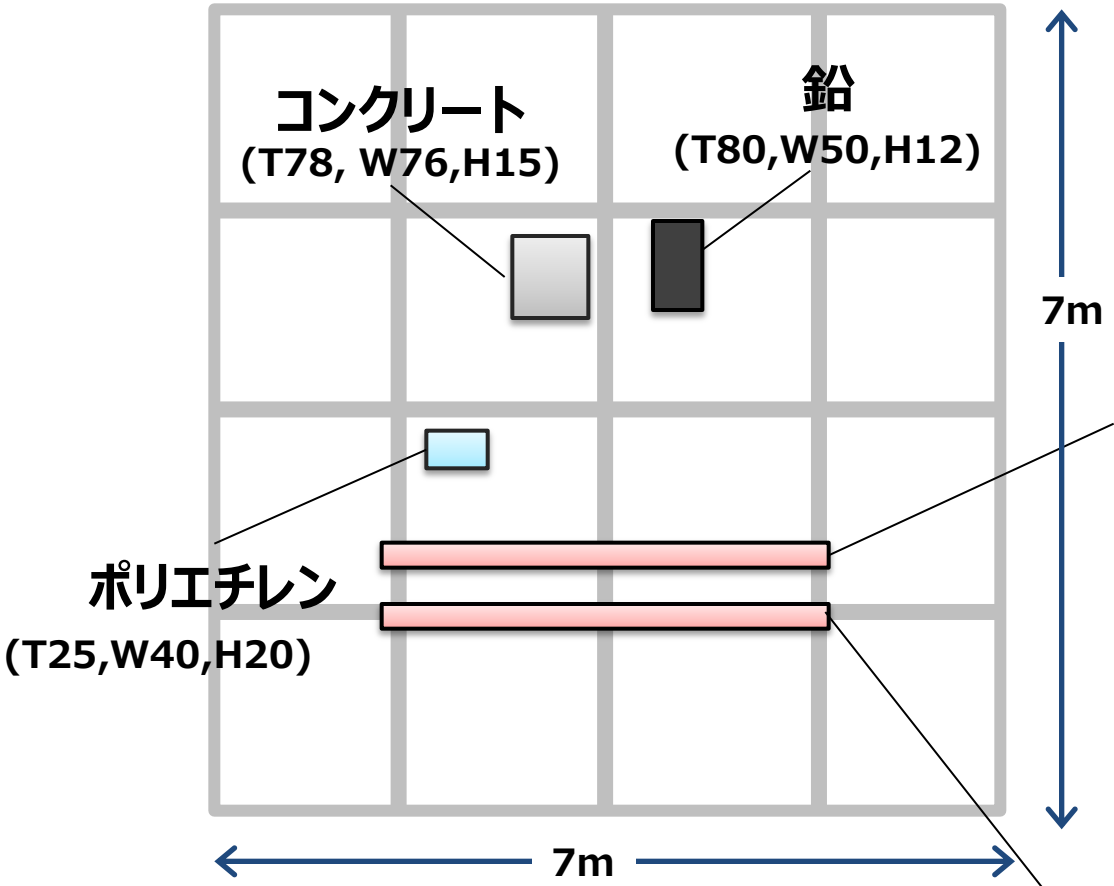


注：2つのミュオン軌跡検出器(上・下)の間に、福島第一原子力発電所の炉心模擬材として、鉛ブロック(燃料模擬)、コンクリートブロック(生体遮蔽、建屋)、ポリエチレンブロック(水模擬)を配置

原子炉内構造材に対する性能検証（原子炉内構造材の模擬材 1）

模擬試料	鉛	コンクリート	ポリエチレン
原子炉内 構造物	核燃料	遮蔽壁、建屋壁、床等	水
原子番号の物 質平均値	82	10.1	4.1
密度[g/cm ³]	11.3	平均1.9(一部空洞)	平均0.9
外形[cm]	T80,W50,H12	T78,T76,H15	T25,W40,H20
外観写真			

原子炉内構造材に対する性能検証 (原子炉内構造材の模擬材2)



模擬材の平面配置



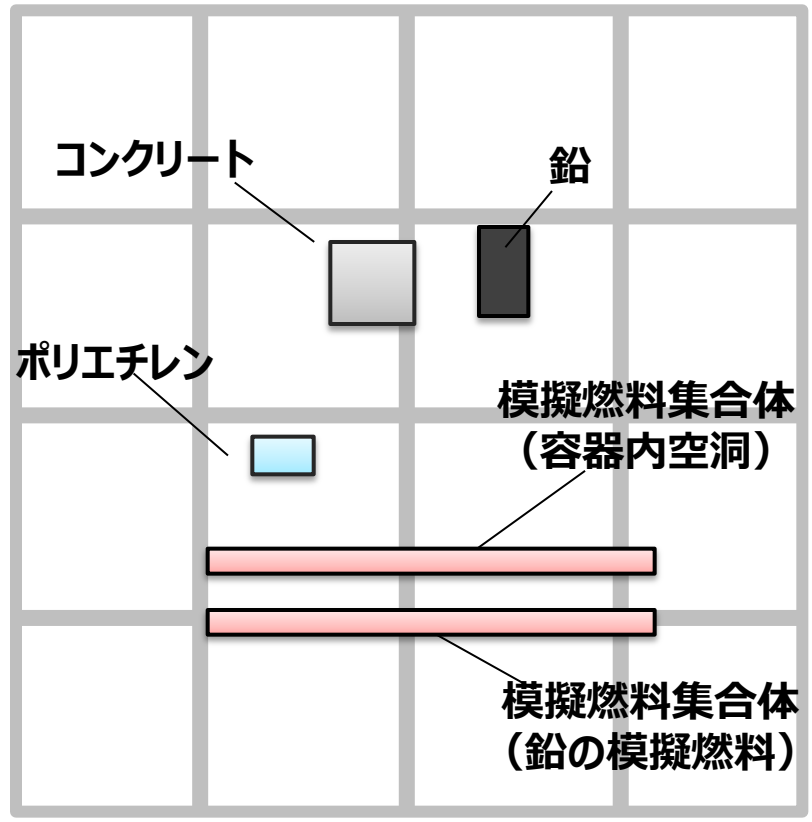
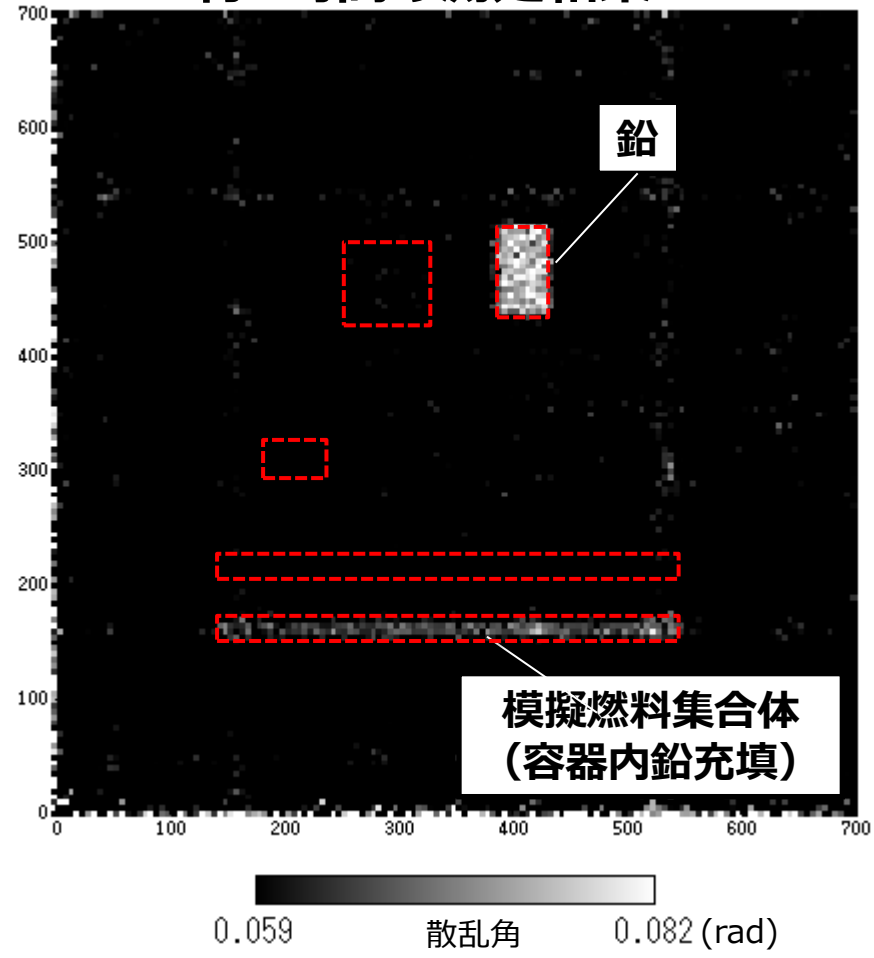
模擬燃料集合体 (容器内空洞)
(T14, W421, H14)



模擬燃料集合体 (容器内鉛充填)
(T14, W421, H14)

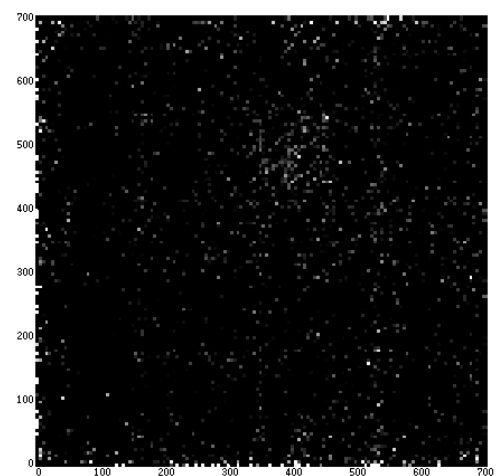
原子炉内構造材に対する性能検証 (測定結果)

約1時間の測定結果



⇒散乱角を、鉛の散乱角で弁別することで、ポリエチレンやコンクリートが見えず、鉛のみの像が現れる。つまり、原子炉では、構造物に影響されずウランを可視化できる。

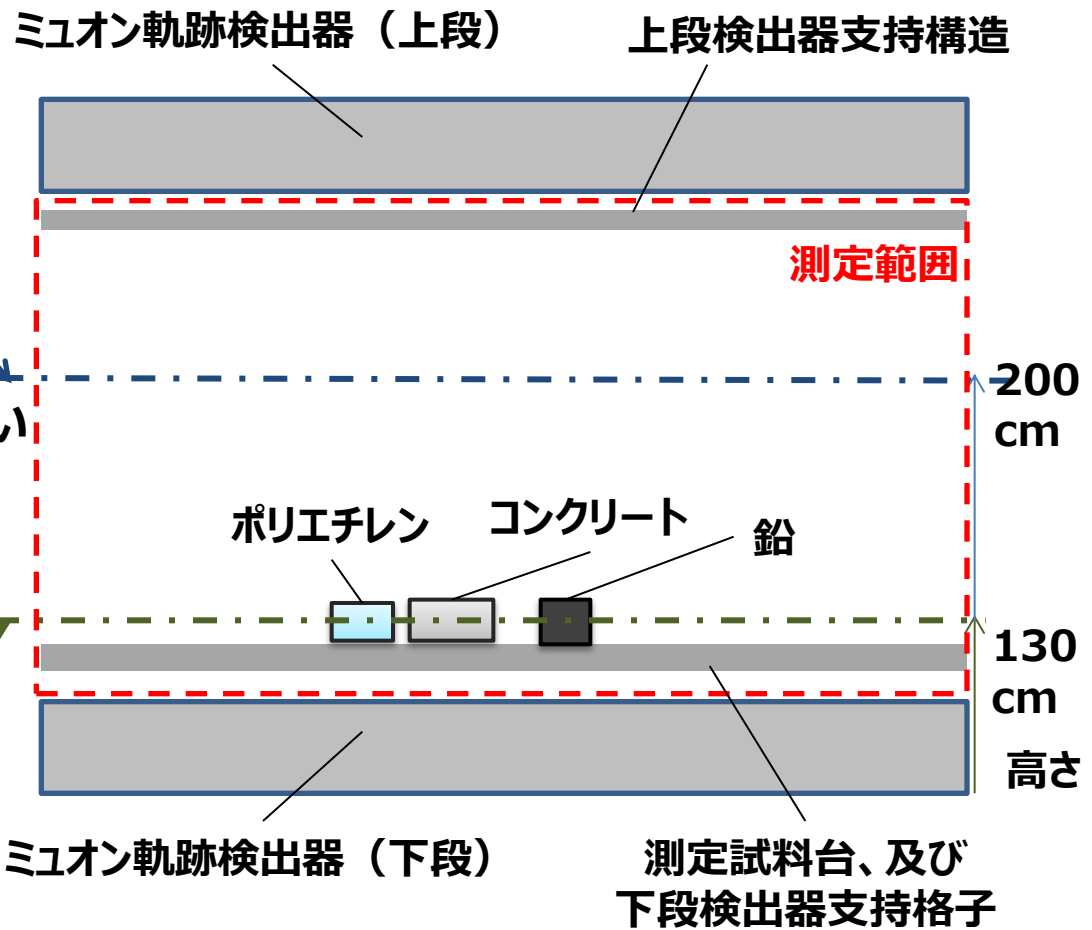
3次元データの取得 (各高さ断面での2次元分布)



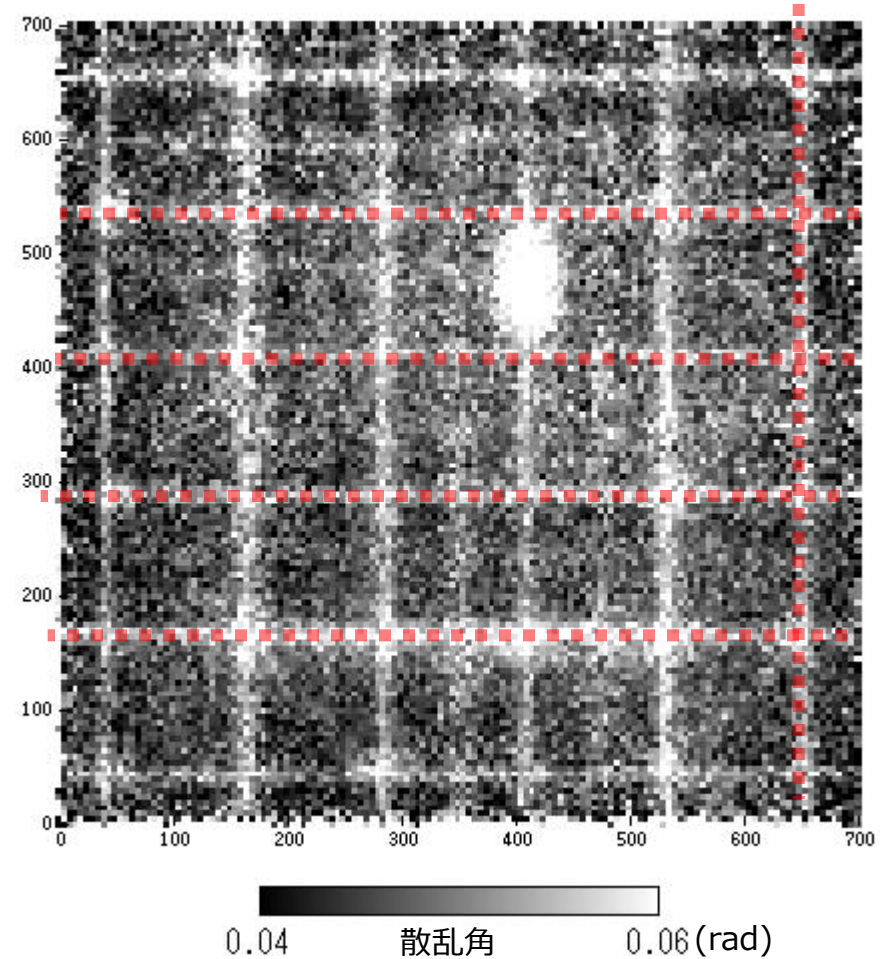
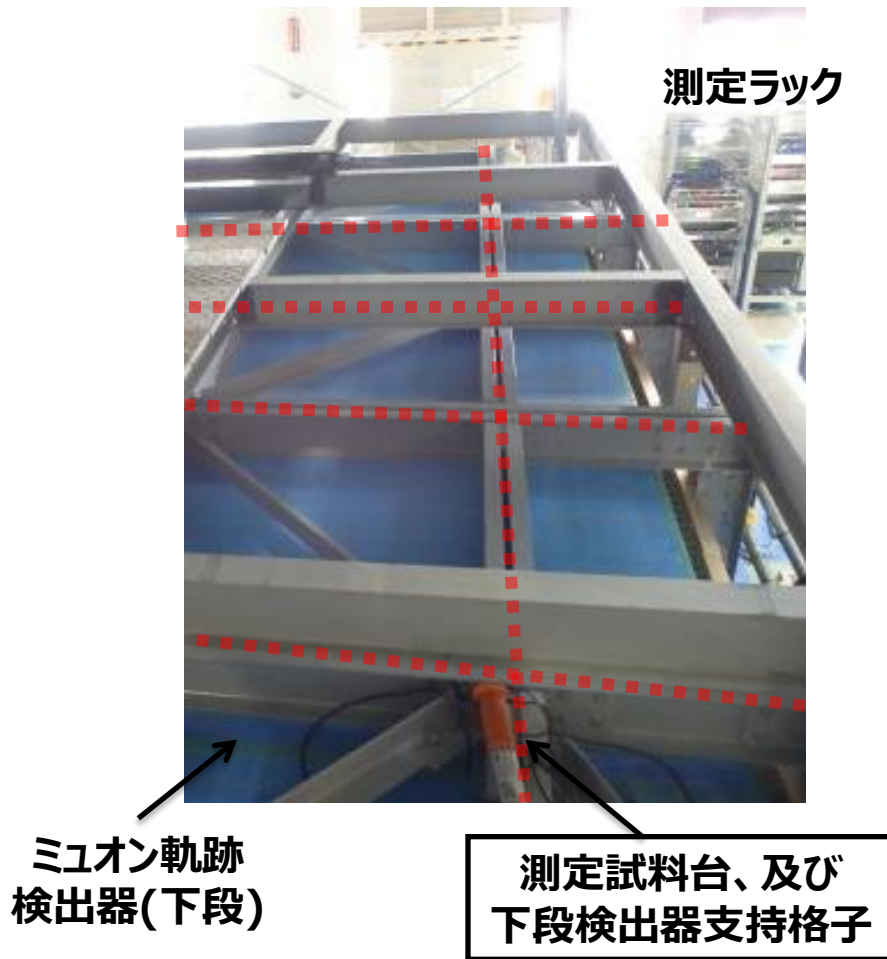
構造物が存在しない断面では画像が得られない



断面画像から鉛が存在する断面が特定できる



3次元データの取得 (測定エリアの下部断面での2次元分布)



下部断面⇒測定試料台・下段検出器の支持構造を画像化

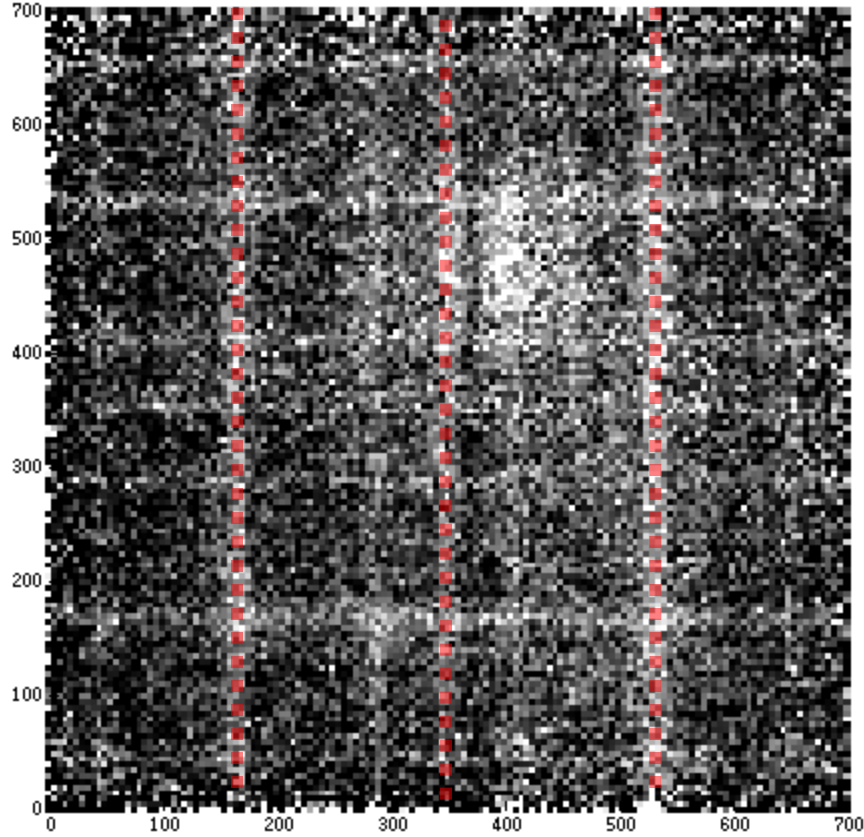
3. 2 散乱法:③システム評価の実施(成果)

3次元データの取得 (測定エリアの上部断面での2次元分布)



ミュオン軌跡
検出器(上段)

上段検出器支持構造



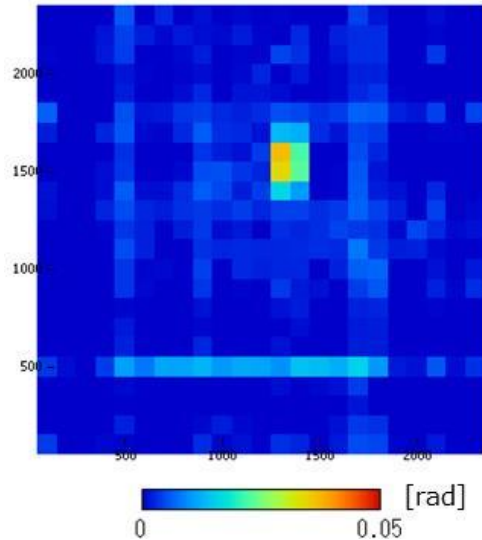
0.045 散乱角 0.06 (rad)

上部断面⇒上段検出器の支持構造の断層を画像化

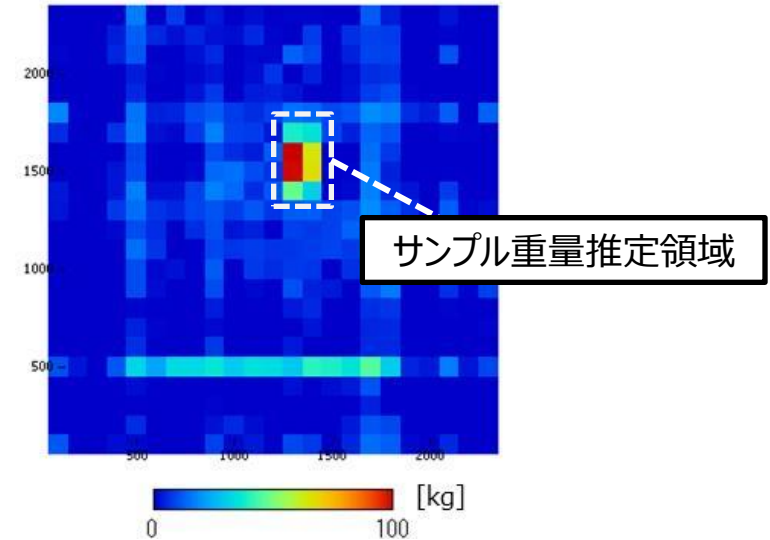
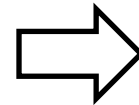
3.2 散乱法：③システム評価の実施(成果)

鉛重量の評価

- 単位ボクセル($30 \times 30 \times 30 \text{cm}^3$)に鉛が100%含まれると仮定した場合の散乱角と測定値との割合を比較
→ボクセル領域中は空気を多く含むため、測定される散乱角は鉛100%の条件より低い値となる
- 鉛サンプル領域で測定された散乱角の平均値から、領域中の鉛の割合および重量を推定



30cm角ボクセル単位での平均散乱角分布



30cm角ボクセル単位での重量分布

	測定サンプル	推定値
ボクセル数	—	8
平均散乱角[rad]	0.106(鉛100%)	0.020
体積[cm^3]	48000	40754
重量[kg]	547	473

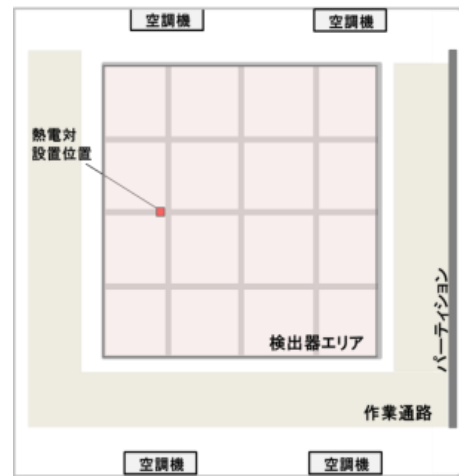
3. 2 散乱法: ③システム評価の実施(成果)

検出器位置校正用等のデータ採取(平成27年度成果)

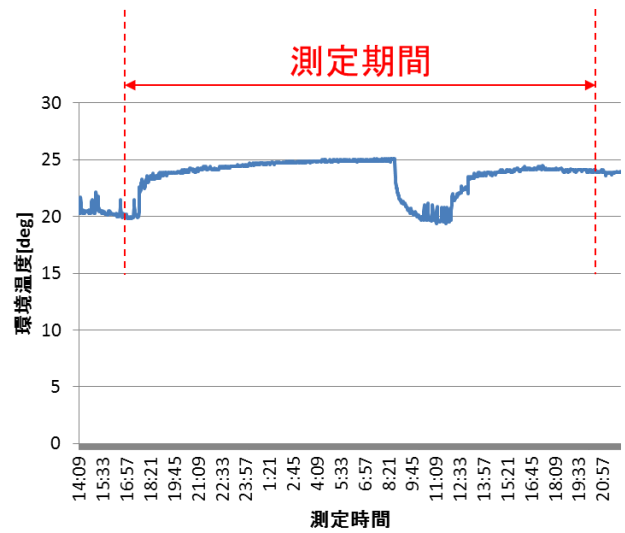
測定データの安定性

空調による温度コントロールできている環境で、長時間の動作安定性を評価

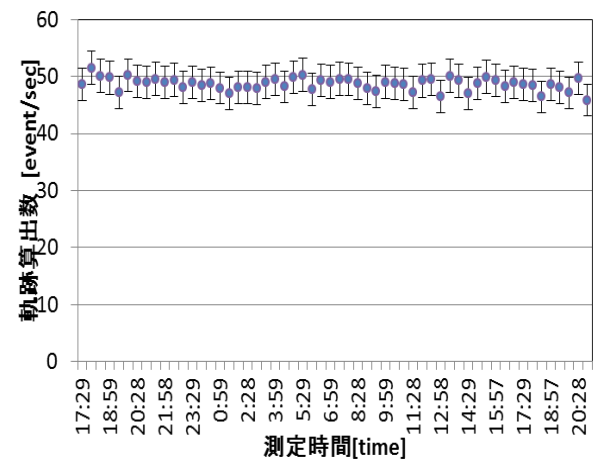
- ミュオン軌跡(画像化に使えるデータ)は統計誤差内で一定であることを確認
- 温度変化(20~25°C)で性能が変化しないことを確認



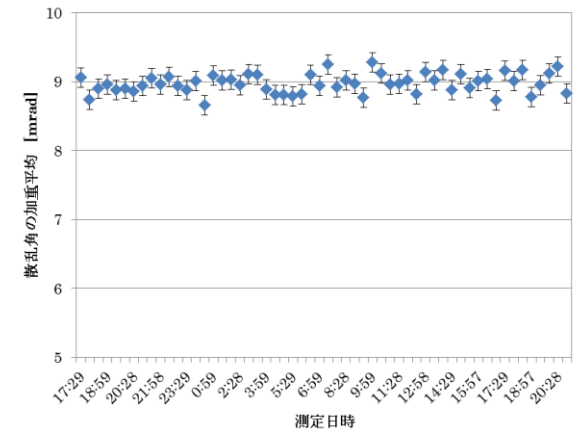
実験室の空調と温度計配置



環境温度変化(終夜運転)



ミュオン軌跡数の時間推移

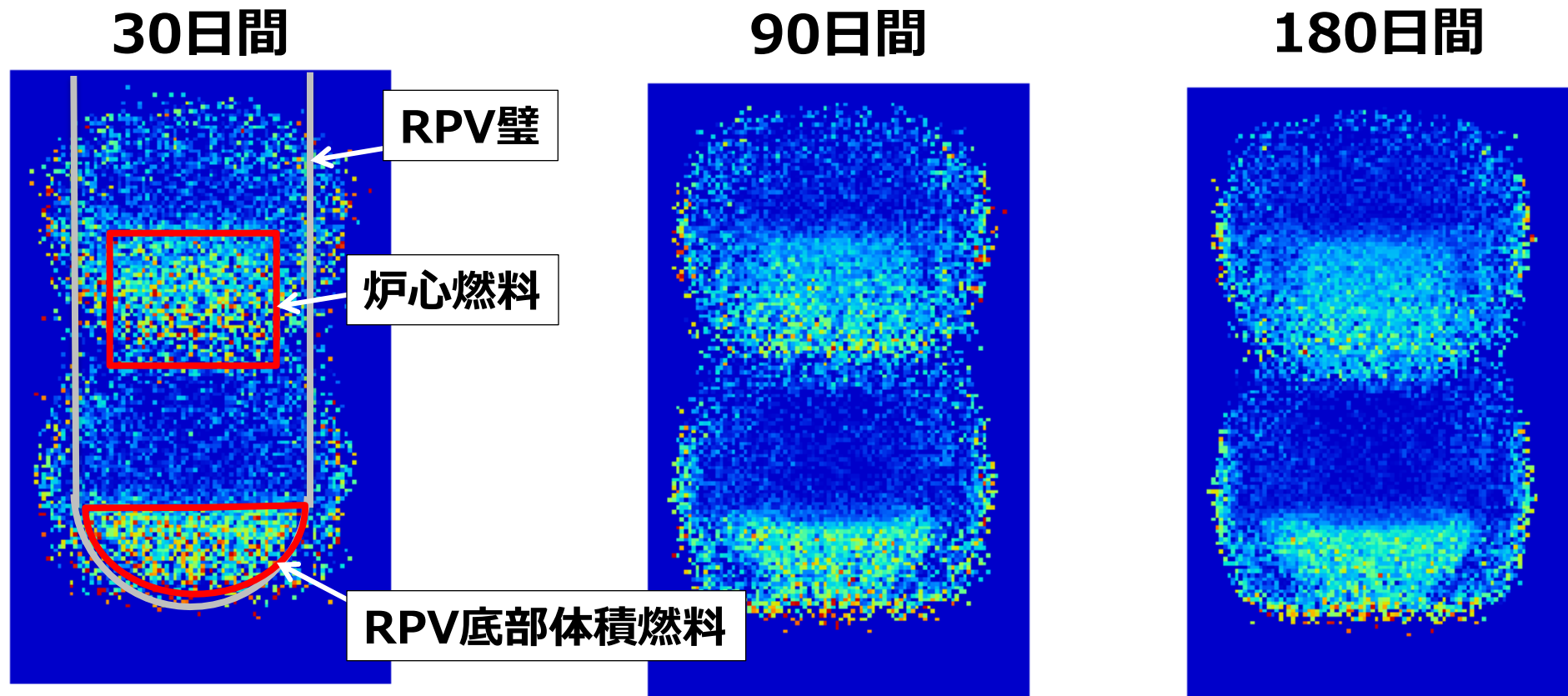


散乱角の加重平均値の変化

3.2 散乱法：③システム評価（成果）

シミュレーションを加味した1Fでの識別能力等の評価（平成26年度成果）

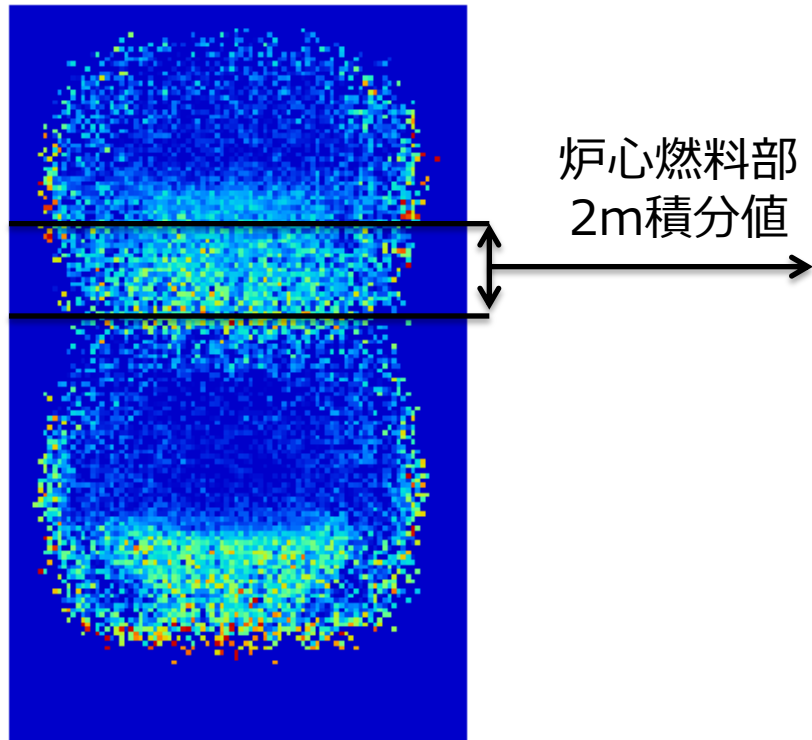
- ◆ 実際の測定体系を再現したモデルでのシミュレーションを実施
- ◆ 検出器の位置分解能1mm、角度分解能5mradを反映
- ◆ 2か所での測定結果を重ね合わせた画像を再現



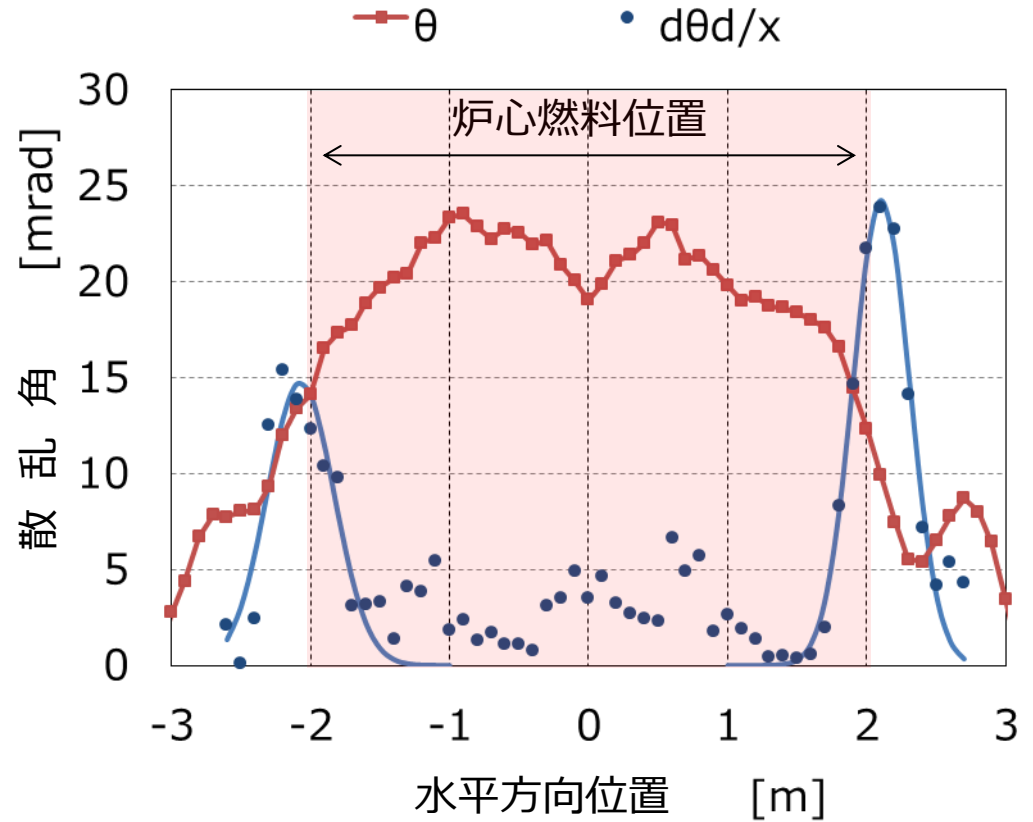
3.2 散乱法:③システム評価(成果)

シミュレーションを加味した1Fでの識別能力等の評価(平成26年度成果)
分解能の評価

- ◆ 炉心燃料の両端に対する分解能を推定
- ◆ 散乱角の立ち上がりの半値幅で30~40cmの分解能



散乱角分布
(90日間測定時)



水平方向散乱角分布

1. 概要

ガンマ線照射下でのミュオン軌跡の検出性能を検証

- ・ γ 線信号の除去率：9割以上、 γ 線除去時の検出効率：9割以上

2. 試験計画

(1)使用機器

- ・小型ミュオン検出器を使用 (右図)
- ・ガンマ線照射設備 (Cs-137)

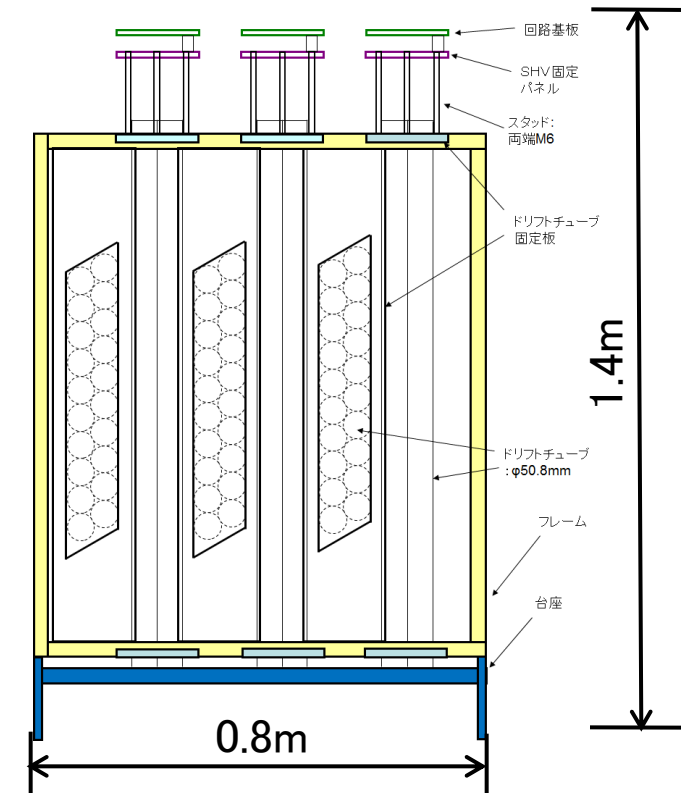
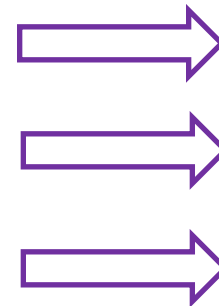
(2)照射線量

- ・イベントレート40kHz相当
(7m長・50 μ Sv/h照射時相当)

(3)評価項目

- ・ミュオン粒子の数え落とし (検出効率)
- ・ミュオン軌跡の算出精度
- ・最適な遮へい条件、 γ 線除去アルゴリズム・パラメータの選定

ガンマ線照射

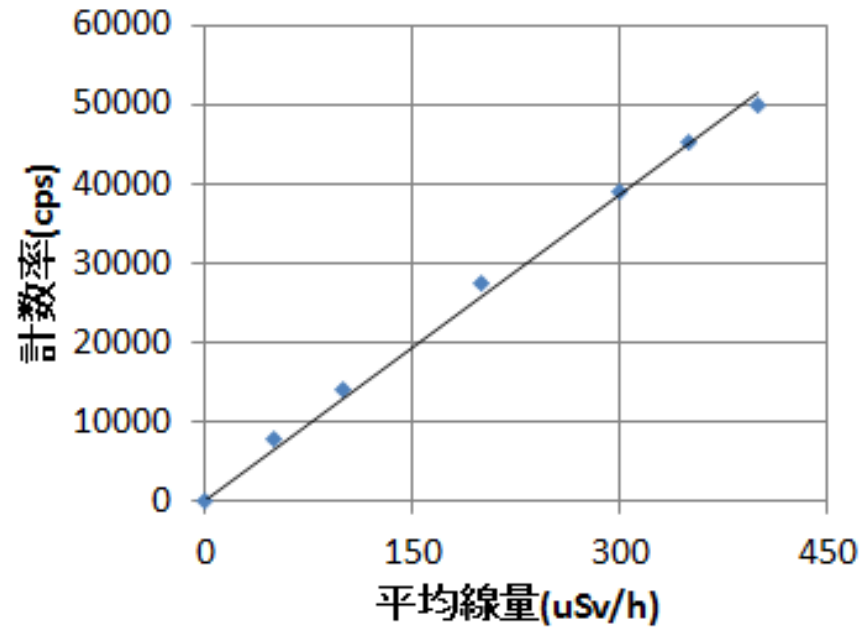


3.2 散乱法:④高放射線下での耐性確認試験(平成26年度成果)

試験条件

- ◆ 設計最大線量50 μ Sv/h照射時の7m長検出器の計数率を模擬：
⇒1m長検出器に50 μ Sv/hの約7倍（体積比）まで照射

Cs-137線源



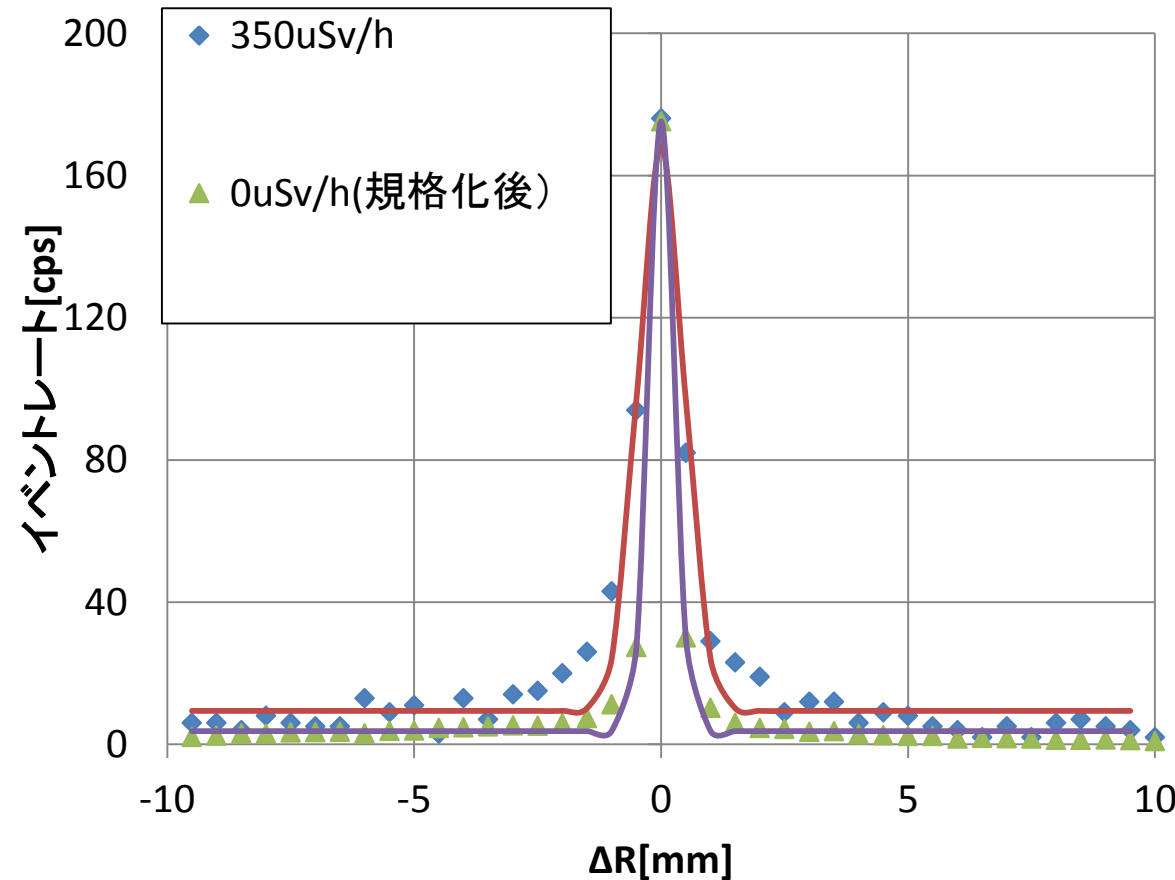
小型ミュオン軌跡検出器

(有感面積:1m \times 1m)

計数率は、ほぼ線量に比例。
⇒照射条件を350 μ Sv/hに設定

軌跡算出精度

- ◆ ガンマ線環境で取得したデータでミュオン軌跡を算出
- ◆ 軌跡算出時の誤差から性能を評価 (No.27と同様)



	実験室 0μSv/h	350μSv/h 照射
位置分解能 (FWHM)	0.6mm	1.1mm
角度分解能 (FWHM)	0.9mrad	1.7mrad

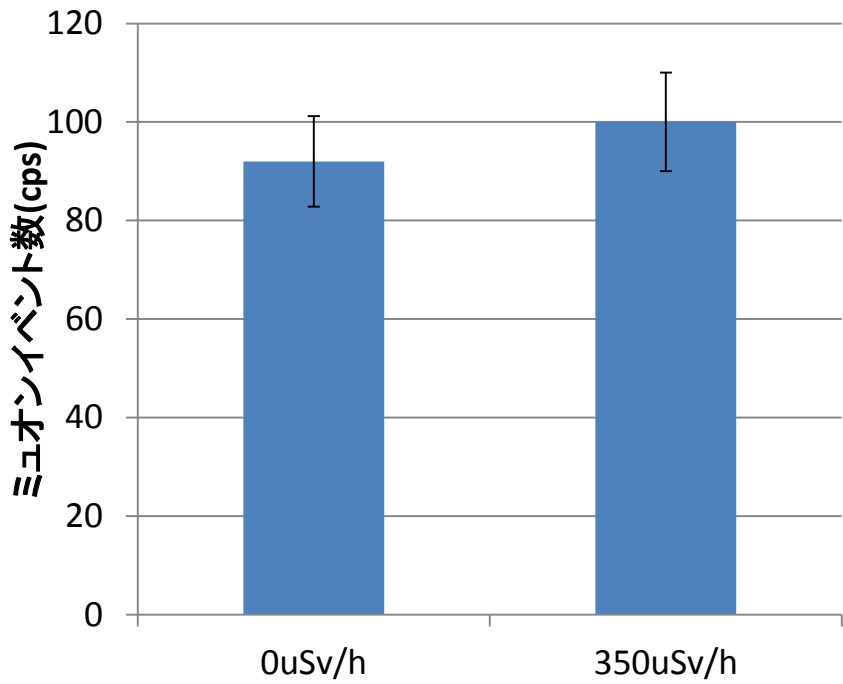
50μSv/h × 7m長センサ
相当の照射条件において
目標分解能を確認

(30cm分解能では、検出器の位置分解能が01.mm程度悪化した場合、1%以下の影響と評価)

ミュオン検出感度

◆ 実験室環境(γ線未照射時)と高線量環境350uSv/hにおけるミュオンイベントの数を比較

ミュオンイベント:すべての検出チャンネル(3~6チャンネル)のトラッキングの誤差が、fitting誤差の2.2mm(±1.1mm)以下のイベント



	実験室 0μSv/h	350μSv/h環境
ミュオン 検出効率比	1	1.08 ± 0.16

誤差の範囲内で検出効率が変わらないことを確認

4. 研究開発の運営等(成果)

(1) 中長期的視点での人材育成

- KEK参加により、大学からのプロジェクト参加を推進した。(筑波大学、首都大学)
- 主に入社3年~6年の若手が、ミュオン技術に長けた指導者のもと、検出器および回路の開発・評価を行い、放射線計測の基本および最先端の技術を習得した。

(2) 国内外の叡智の結集

- LANLの参加により、日米共同PJとして実施。LANLは散乱法を考案し、最先端技術を保有。1Fでの早期実現に参画。解析技術は国内にフィードバック。
- 国内・国際発表
原子力学会2015年春の年会での発表(2015.3.20) (透過法)
保全学会第12回学術講演会での発表(2015.7.14) (透過法)
大阪ニュークリアサイエンス協会主催「第56回放射線科学研究会」での発表(2015.4.17) (散乱法)
第23回ICONE国際会議での発表(2015.5.19) (散乱法)
第11回非破壊検査国際会議での発表(2015.5.19) (散乱法)
日本中間子科学会機関誌「めそん」への投稿(2015年秋号) (散乱法)

(3) 情報発信の充実

- IRIDシンポジウムでの発表・展示(2015.7.23)
- IRIDホームページでの研究開発成果進捗状況の公開(2015.12.2)

(4) 外部委員会の設置・運営等

- 本プロジェクト専門のレビュー分科会を開催し、技術的な助言を受け研究開発の推進に役立てた。(2015/1/15,16)

(5) 廃炉作業や他の研究開発との連携

- 「燃料デブリ・炉内構造物取り出しの基盤技術」、「燃料デブリ臨界管理技術の開発」プロジェクト等との情報交換が必要な項目について明確化した。

1) 小規模実証試験 (透過法：識別能力1m程度)	達成内容
① ミュオン透過法による測定の準備	<ul style="list-style-type: none">・遮蔽性能試験等により遮蔽厚を10cmに選定。・1F現場測定でγ線による計数上昇のなく正常に計測できることを確認。 <ul style="list-style-type: none">・遮蔽体内の温度制御、データの伝送は順調であり、長期にデータを取得できることを確認。・現行と分解能が同等で、かつ大幅にハンドリング性が向上した小型の装置を開発。
② ミュオン透過法による測定と評価	<ul style="list-style-type: none">・福島第一原発の高放射線環境下で、適切な遮へいの設置により、検出器によるデータ取得ができること。 <ul style="list-style-type: none">・福島第一原発1号機の原子炉内の燃料デブリまたは使用済み燃料プール内の燃料を1m程度の識別能力により検知できていること。 <ul style="list-style-type: none">・約一か月のデータで格納容器の外観等が確認。一方、炉心位置に1mを超えるような大きな燃料の塊は確認できていない。・統計的処理実施のため計3地点で約90日間の測定を実施し、炉心部には燃料がないと考えることが妥当な結果を得た。・仰角の小さい水平方向は相対的にエネルギーの高いミュオンが多いため、圧力容器下部の低い位置の透視には、対象物と検出器の位置関係に配慮が必要。

2) 検出器システムの設計・製作 (散乱法：識別能力30cm程度)	達成内容
① 検出器システムの設計・製作	<ul style="list-style-type: none"> ・立ち上がり時間200ns以下で、ゲート時間幅1μsを達成
② 検出器で収集するデータ処理	<ul style="list-style-type: none"> ・現場設置性に合致したシステム構成であること。組立および位置校正データ等に基づき性能に影響する課題を抽出し、実機適用に向け改良が完了していること。 ・ユニット化した組立方法を構築 ・改良項目を抽出し、実機設計時に対応可能なことを確認済み ・位置分解能± 0.8mm、角度分解能1.3mradを達成 ・高線量ではそれぞれ1.1mm、1.7mradでほぼ達成 ・オンラインモニタリングの構成は検討済みで、機能することは確認。 ・密度表示方法、しきい値の設定方法を構築完了。 ・測定期間を1/4としても誤認識率が下がらないアルゴリズムを確認。

2) 検出器システムの設計・製作 (散乱法：識別能力30cm程度)

③ システム評価

・福島第一原発の環境において30cm程度の識別能力を示すこと。また、誤差要因について測定への影響がシミュレーション等で評価されていること。
・検出器起立時の性能が検証できていること。

・1m装置から性能達成に目途。
・シミュレーションにより実機体系（検出器分解能を模擬）での評価を実施し、30～40cmの分解能（炉心燃料端部断面）を確認。
・起立時の性能試験は、国プロ再開時に実施可能である。

④ 高放射線環境下耐性確認試験

・γ線バックグラウンド除去アルゴリズムを試験で検証⇒γ線信号の除去率：9割以上、γ線除去時の検出効率：9割以上

・コインシデンス数4で、99.6%の除去率達成
・γ線照射時の検出効率は誤差の範囲内で未照射時と一致

<ミュオン透過法の開発>

- ・高放射線環境にある福島第一においても、長期間、無人運転による測定が可能なシステムを開発し、原子炉建屋内の強吸収物質分布情報を短期間に取得できるシステムであることを実証した。
- ・1号機における3か月程度の測定によって、元々の炉心位置には燃料がほとんど無いと考えることが妥当な結果を取得できたとともに、燃料プール内の評価によって、1m程度の識別能力があることを実証した。
- ・今回の測定現場状況を踏まえ、より小型化した装置の開発を行い、従来と同等の性能でよりハンドリング性の高い装置を製作し、今後の原子炉透視に十分使用可能であることを確認した。

<ミュオン散乱法の開発>

- ・識別能力（30cm程度）で圧力容器内（炉心部、圧力容器下部）の燃料デブリ分布を測定できる大型の検出器システムの製作、及び、燃料デブリの情報（分布、組成等）を評価するデータ処理アルゴリズムの製作を完了した。
- ・福島第一適用での課題であった大型検出器システムの測定性能、及び高線量下での測定性能は、それぞれシステム評価試験、高放射線環境下耐性確認試験により、福島第一環境で使用できることを実証した。
- ・更に、検出器システムの性能を加味したシミュレーションにより、福島第一環境での燃料デブリの識別性能を評価し、更に、アルゴリズムの改善により、それらの性能の向上を達成した。
- ・以上の成果より、散乱法の実施が必要と判断された場合には、2号機の燃料デブリ情報を提供し、効率的な燃料取り出し方法の選定へ寄与できる目途を得た。

—以上—