

2011 March

Unit1-3 reactor damaged
Unit1,3,4 roof damaged
Fuels in storage pools are safe

Unit-4

Unit-3

Unit-2

Unit-1

7 Apr 2011 Muon Radiographyの第一人者である永嶺氏がKEKに提案し、高崎氏を中心とするグループが結成

Sept 2011 筑波大が参加 検出器の設計製作を開始

Mar2012—Dec2013 日本原電での観測（予行観測）

Mar2015—2017 福島第一1～3号炉の観測

ミューオンラジオグラフィによる 福島第一原発の透視

筑波大学

原 和彦, 金 信弘, 高田義久, 高橋 優⁽¹⁾, 橋本就吾⁽²⁾, 高橋和希⁽³⁾,
伊藤史哲, 佐藤和之⁽⁴⁾

高エネルギー加速器研究機構

鈴木厚人⁽⁵⁾, 永嶺兼忠⁽⁶⁾, 藤井啓文, 高崎史彦, 林 浩平, 児玉英雄

首都大学

住吉孝行, 角野秀一, 市川星磨

東京大学

山下 了

⁽¹⁾JAXA、⁽²⁾NEDO、⁽³⁾(株)東芝、⁽⁴⁾JAEA、⁽⁵⁾岩手県立大学、⁽⁶⁾理化学研究所

東京電力、国際廃炉機構

TCHoU研究交流会 2021.6.25

発表内容

- 宇宙線ミュー粒子とラジオグラフィ
- 測定装置
- 原電原子炉での実証実験^{*1}
- 福島第一原発(1～3号炉)の観測^{*2}

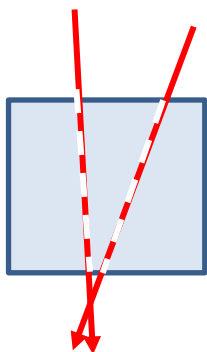
^{*1} 原電のご理解で実証実験が可能になりました

^{*2} 東京電力および国際廃炉機構との共同

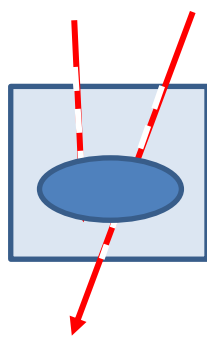
宇宙線ミュー粒子とラジオグラフィ

宇宙線ミュー粒子:

大気で発生し、ほぼ一様に降り注ぐ (1Hz/手のひら)



建物などは貫く



重い物質では止まる
高エネルギー成分は貫く

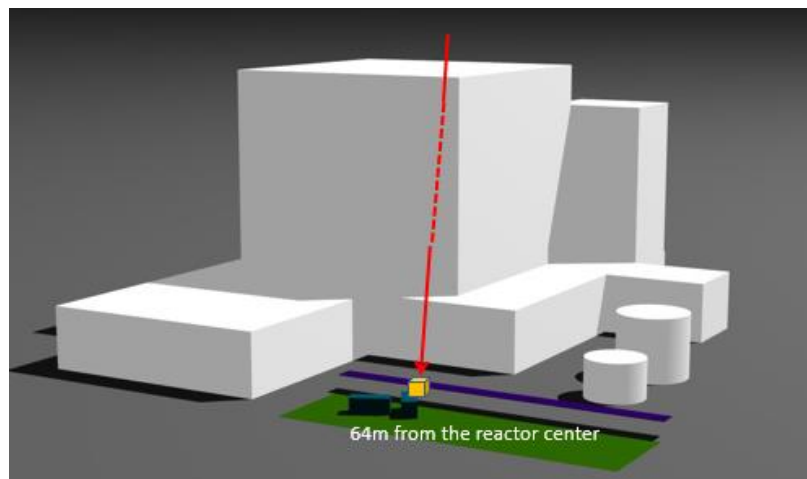
小さなミュー粒子観測装置で大構造物の質量分布が測定できる～X線撮影(radiography)

観測装置への要求:

ミュー粒子の飛来方向観測(+時間分解能)

設置しやすいコンパクトさ

環境放射線耐性



応用:

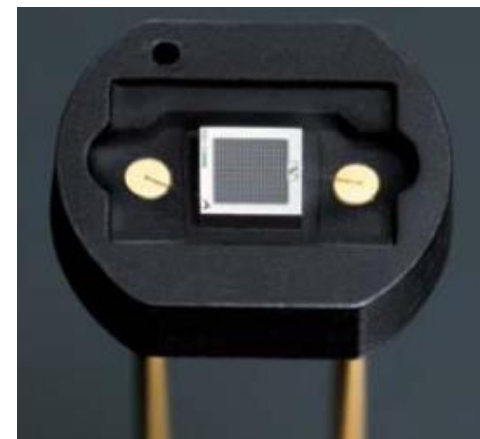
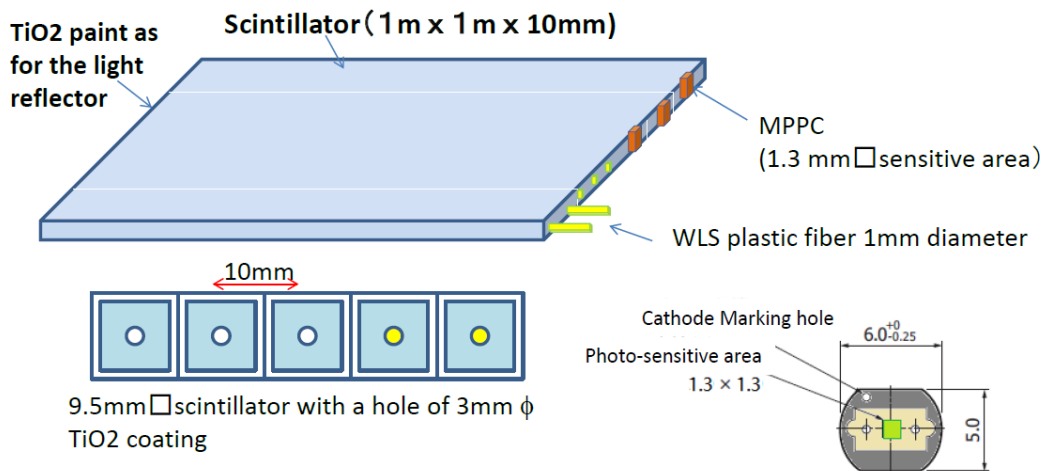
アクセスできない原子炉内部の検査
遠隔にある火山の内部様子
溶鉱炉の隔壁の健全さ検査
ピラミッド内の空隙

....

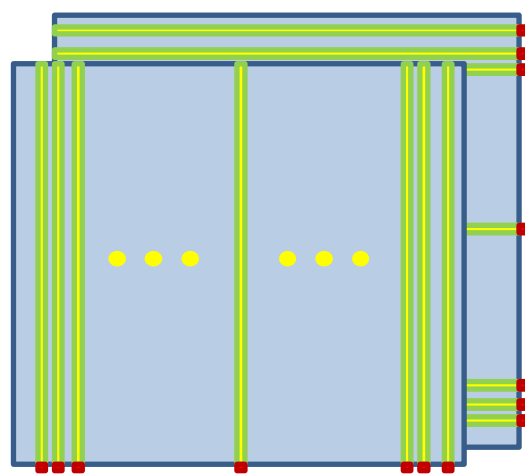
シンチレータ検出器層

福島原発の内部を調査する目的で開発

←CDF/ILC素粒子実験の技術



MPPC(667pix)
1.3x1.3mm



XY-unit

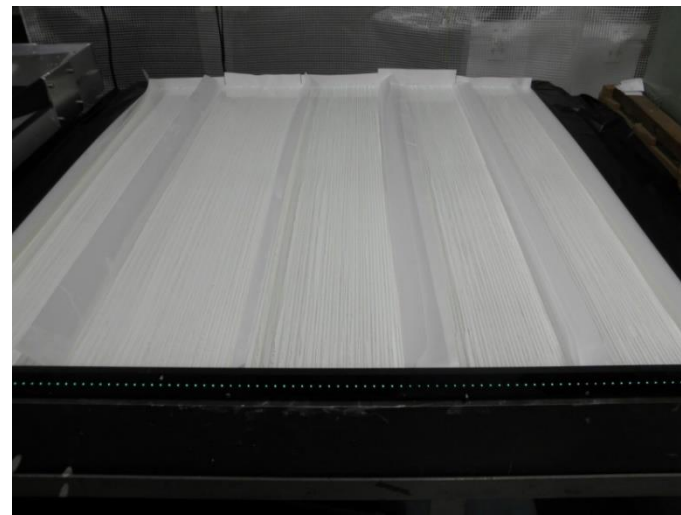
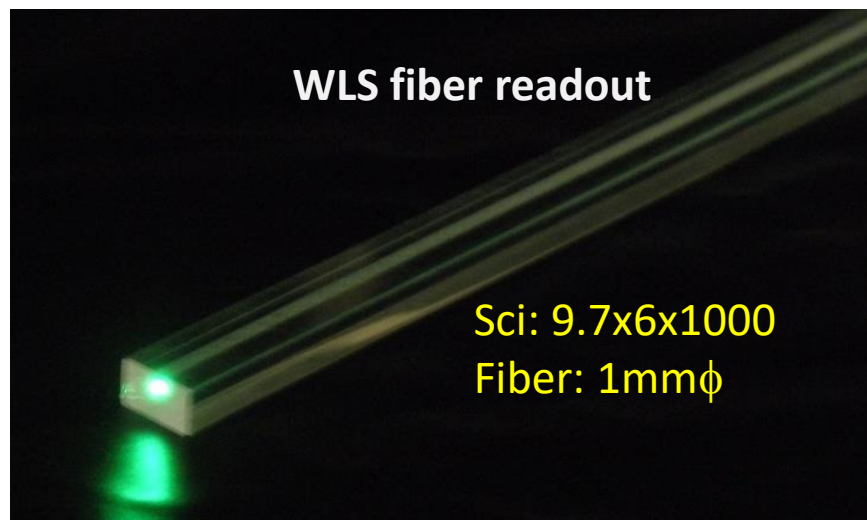
Scintillator bar (1cm角)+
波長変換ファイバー(1mm ϕ)



MPPC
Multi pixel
photon counter



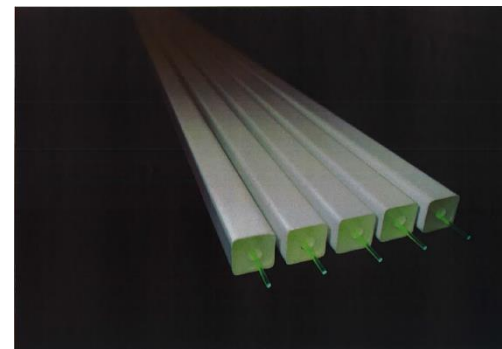
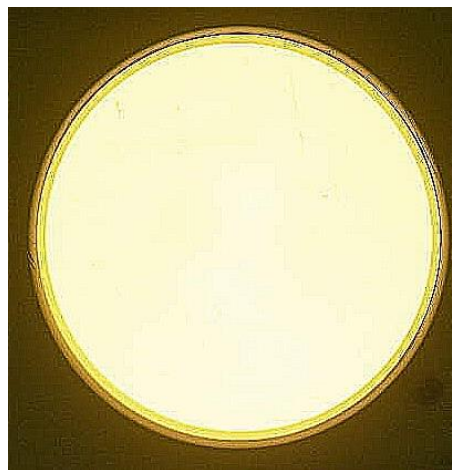
Scintillator bars + WLS



- 最初のシンチレータ層は板からの切り出し + 溝堀り (Eljen EJ-200)
- 3辺白ペイントした20本ごとにまとめて波長変換ファイバーをのせ、白色PETフィルムで表面反射させる
(この技術はSSC/CDF用に開発)

波長変換ファイバーは、クラレ製 (Y11)
2重クラッド構造
(SSC/CDF用に開発したもの)

ペンキ塗りが大変
⇒ 押出し成型シンチレータ + TiO₂ 表面処理
組み立て効率向上とコスト低減



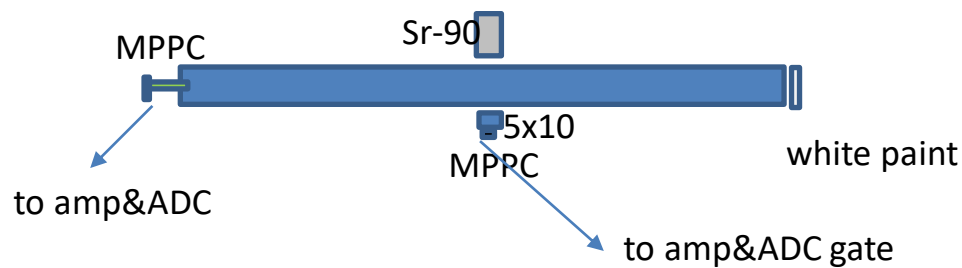
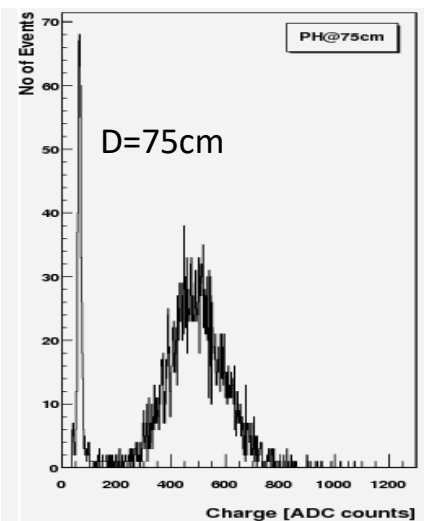
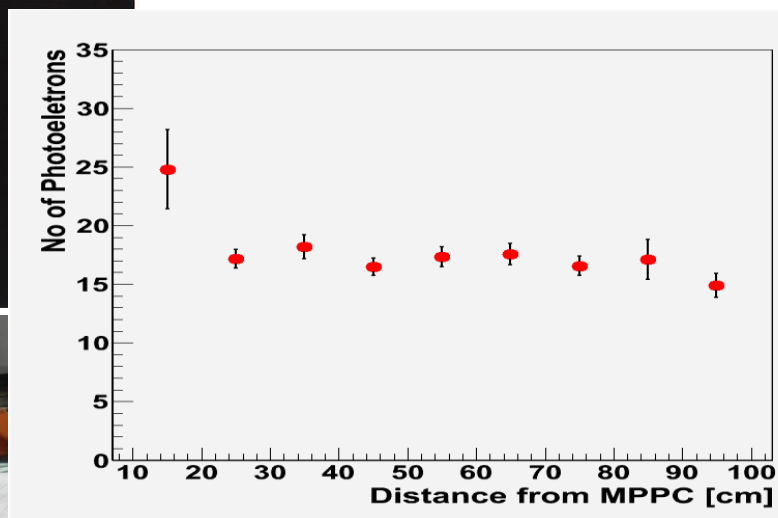
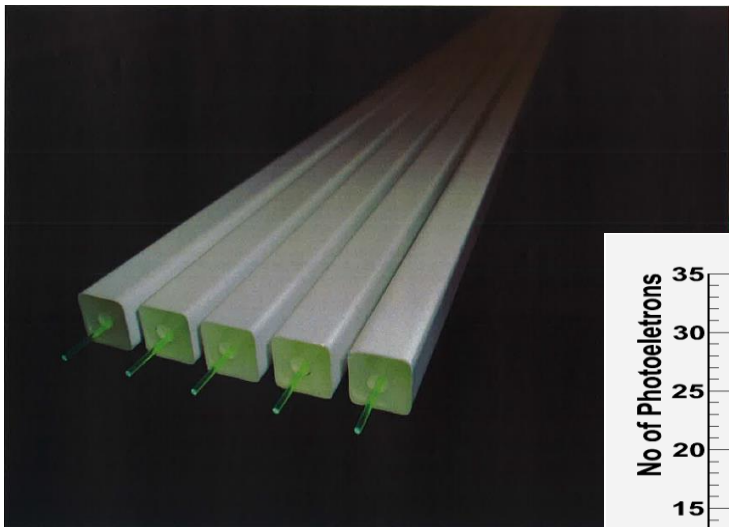
New scint/fiber

プラスチックシンチレータ

Scintillator bar with hole: extruded & TiO₂ coated

[Fermilab](#): Anna Pla-Dalman et. al.

Light yield was measured using penetrating Sr-90 β -rays



測定装置@原電



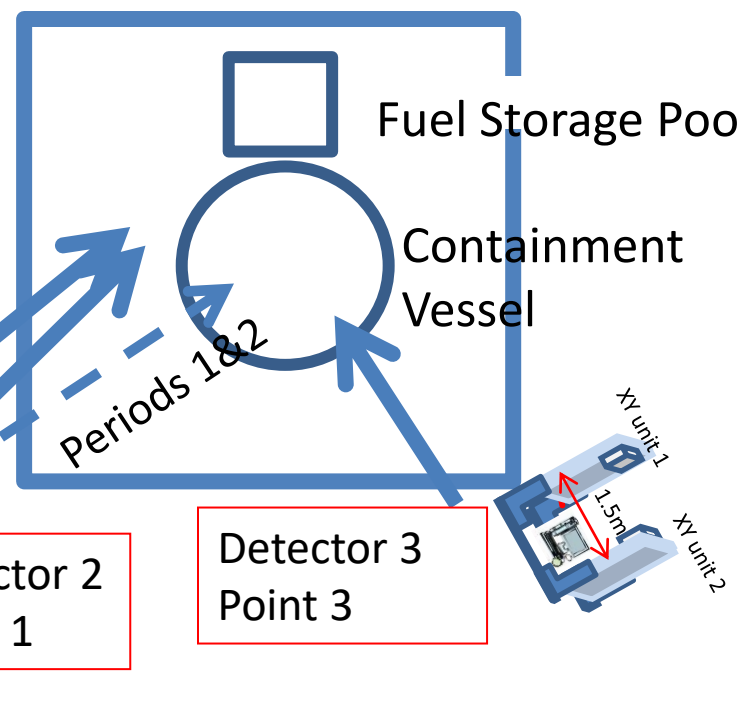
XYユニットでミュー粒子の通過位置と飛来方向を測定する。

Detector 2
Point 2

Detector 2
Point 1

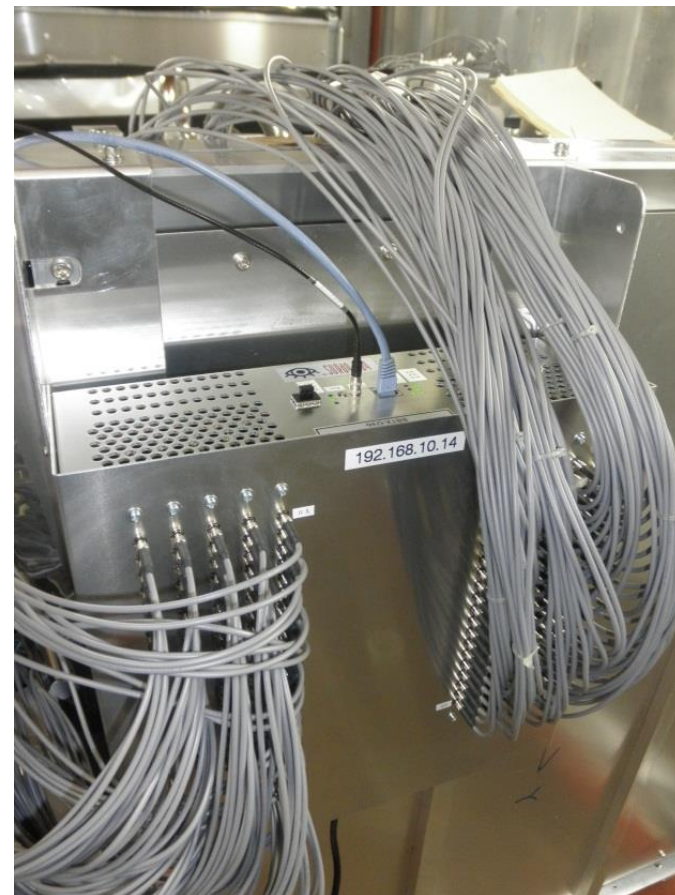
Detector 3
Point 3

64m from the core

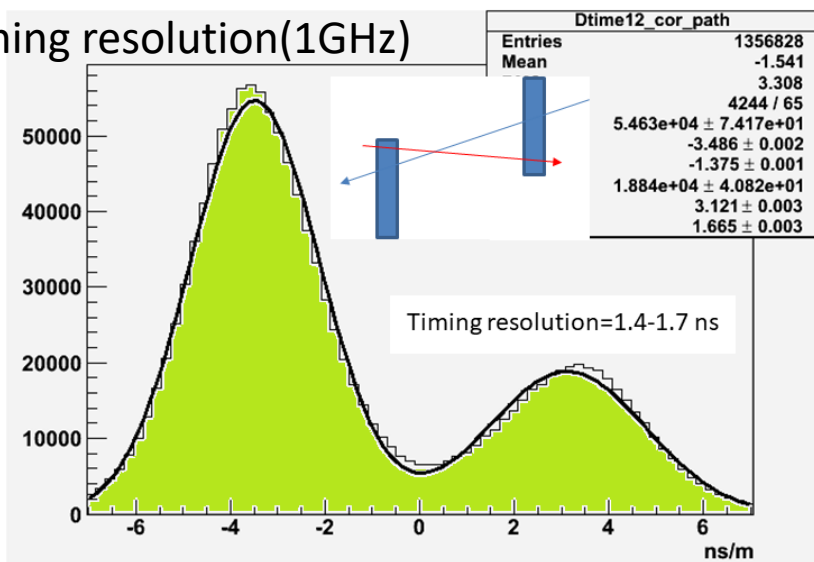


MPPC DAQ System

200 SMB coaxial cables/unit



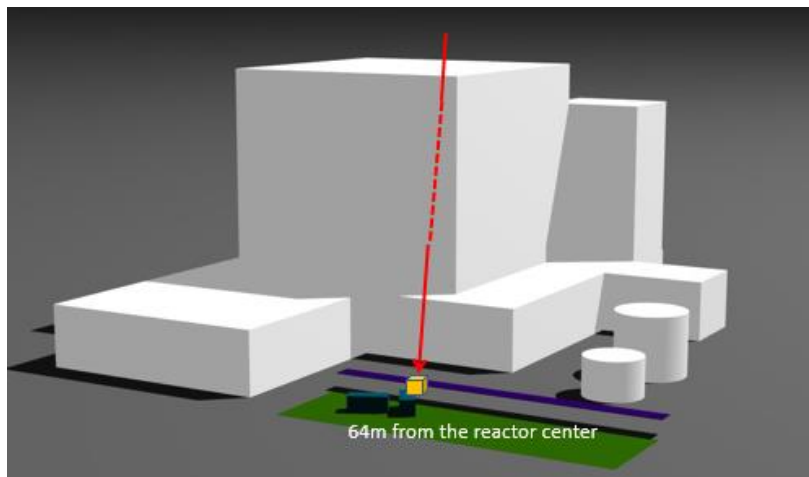
Timing resolution(1GHz)



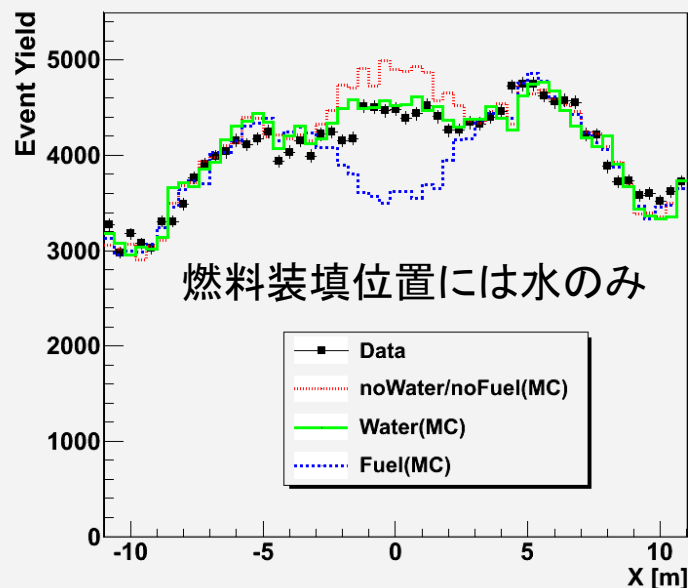
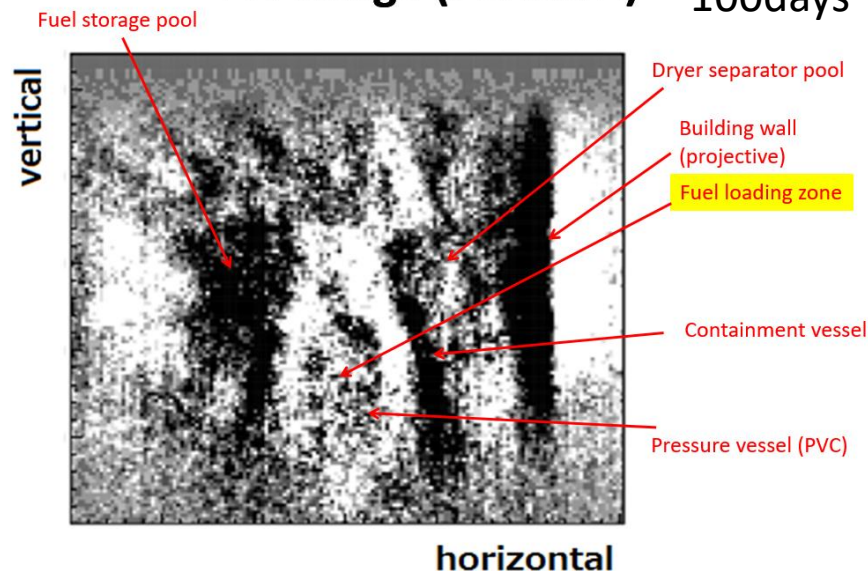
Provide biases ($\sim 71V$) to 200 MPPCs
 Look for coincidence of XY planes
 (single cluster in each allowed)
 Clock: 125Mhz $\rightarrow$ 1 GHz

Performance of a remotely located muon radiography system to identify the inner structure of a nuclear plant <https://doi.org/10.1093/ptep/ptt046>

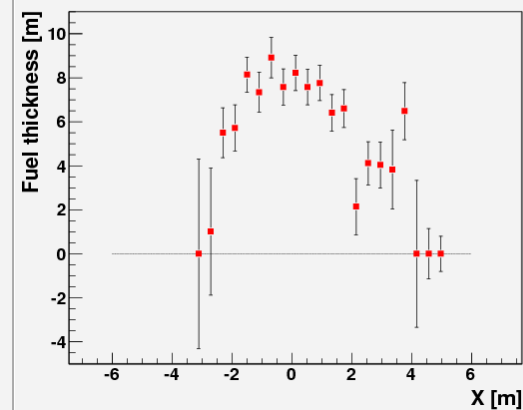
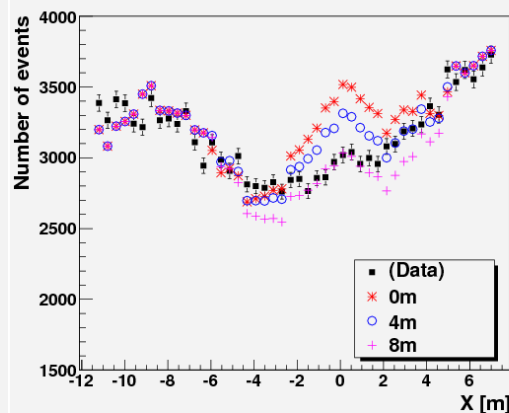
原電原子炉での実証実験: 1方向測定



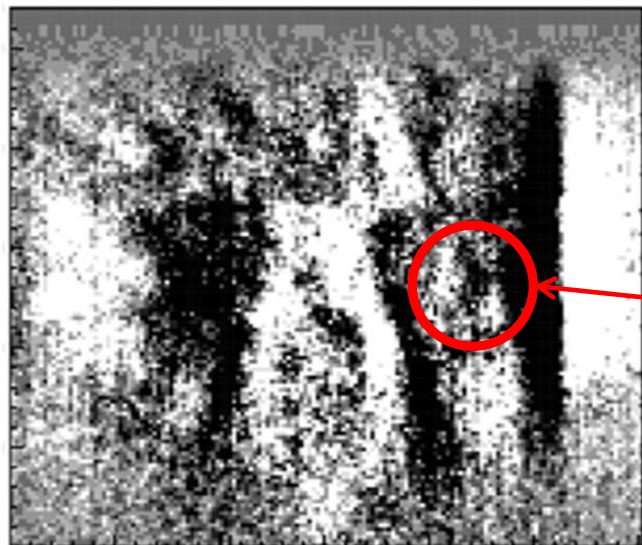
2D image (Period 1) 100days



燃料プール内の燃料量の推定



vertical

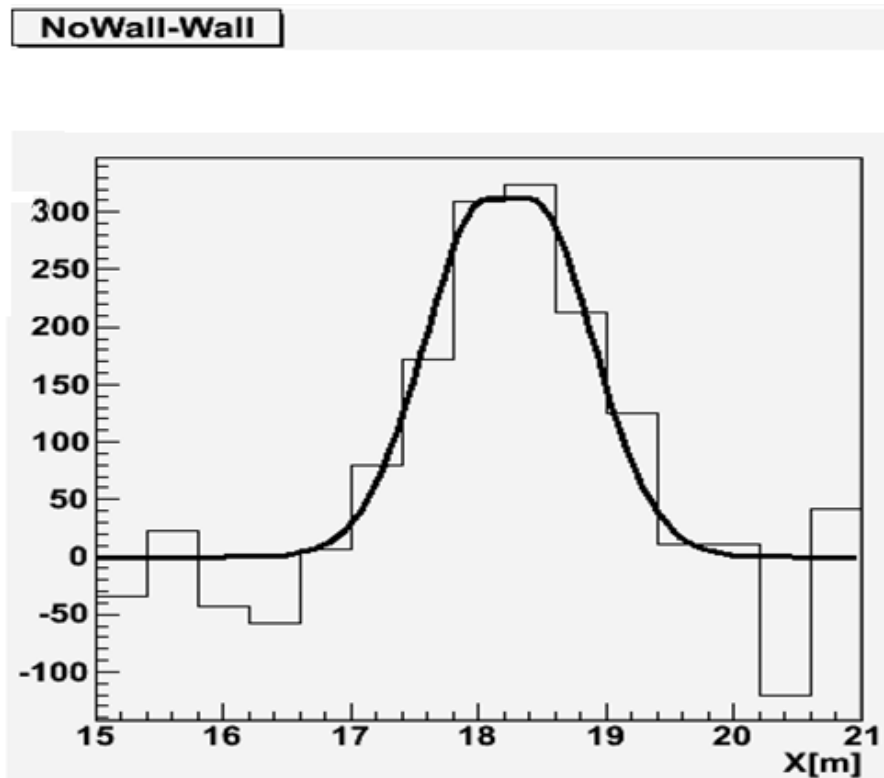
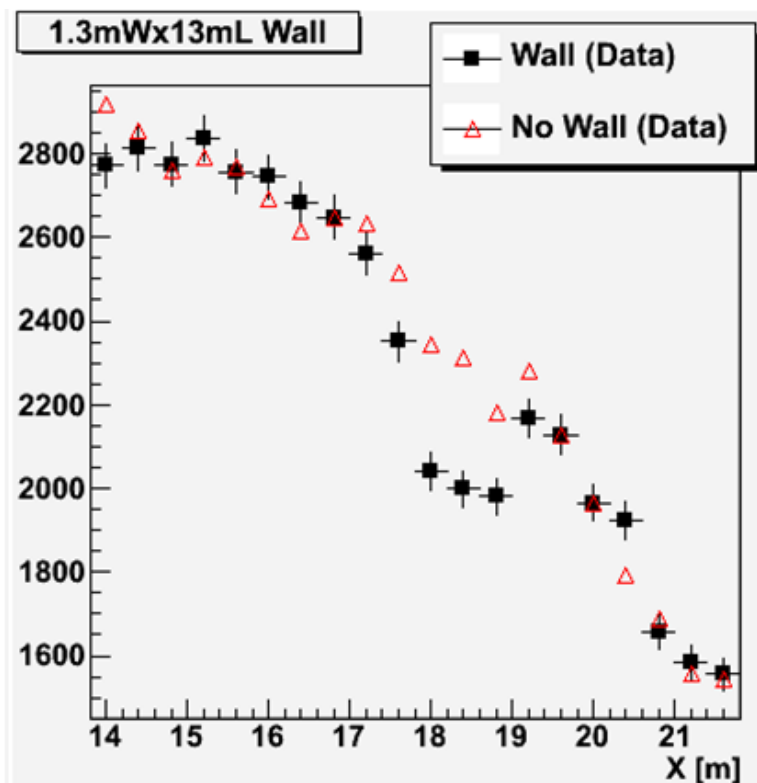


Resolution study

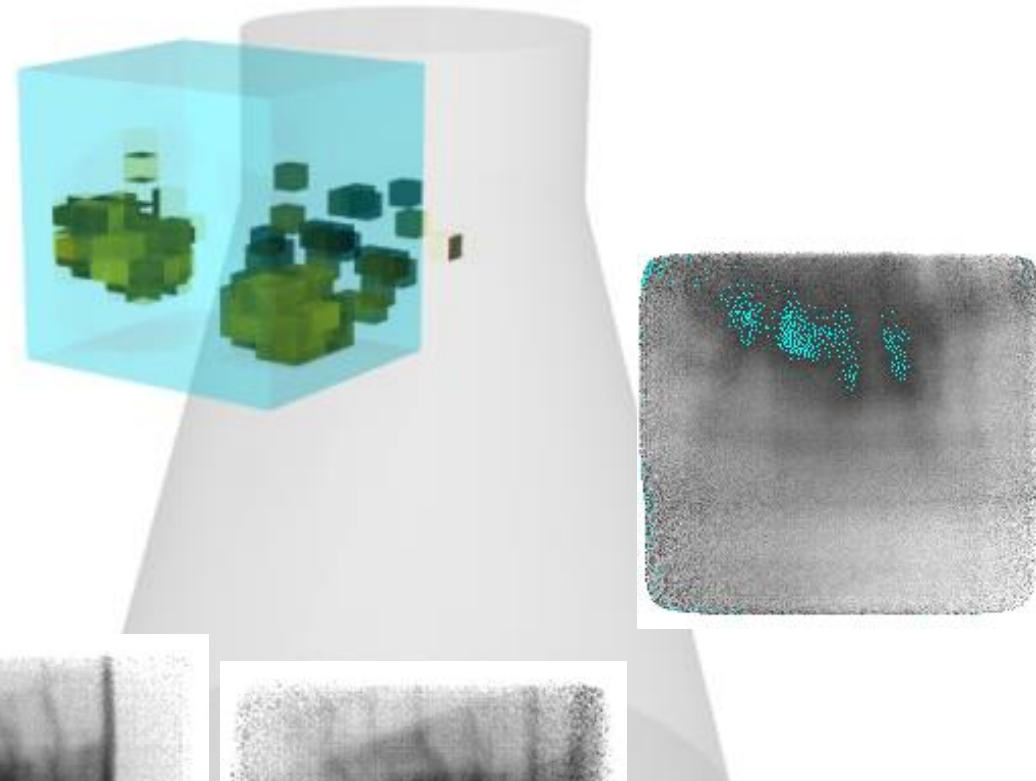
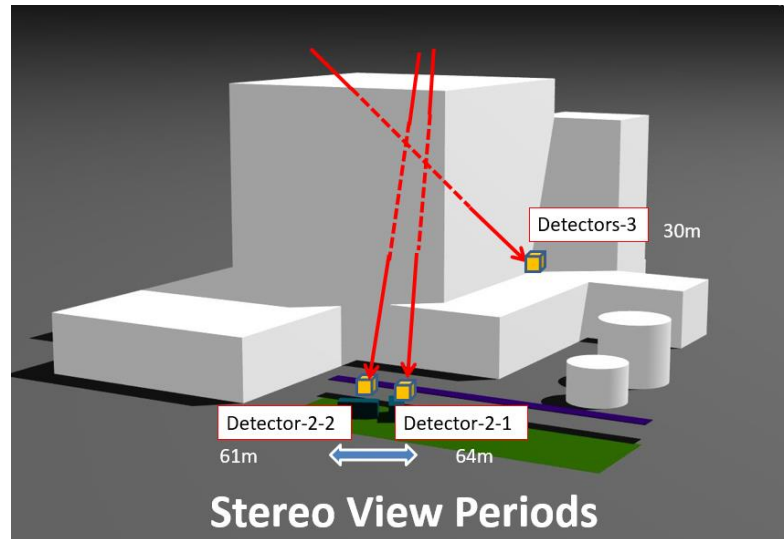
Almost projective wall supporting the Dryer Separator pool (Depth~13m)

horizontal

Fitted resolution: 49.1 ± 2.7 cm
(expected geometrical resolution=12cm)



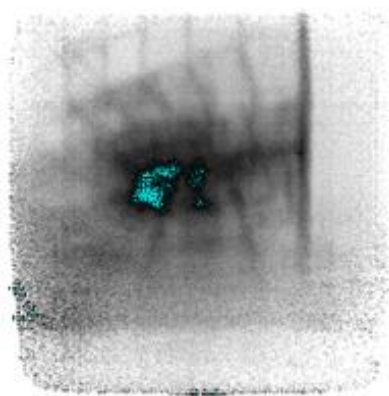
原電原子炉での実証実験: 3方向測定



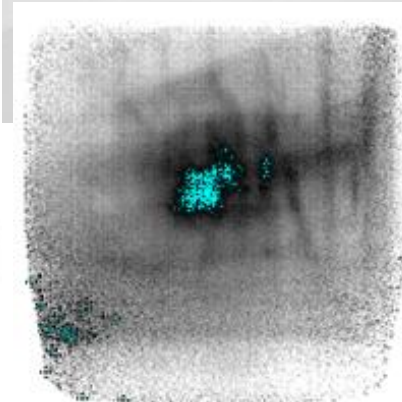
燃料プールを1m立法で区画

吸収が多い区画を青
 $\ln(\text{Nobs}/\text{Nexp}) > 1.35, 1.4, 1.9$

2/3の測定で青区画⇒緑



Point-1
(173days, 1524kEv)



Point-2
(94days, 722kEv)

Point-3
(208days, 816kEv)

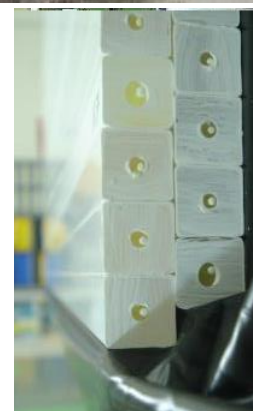
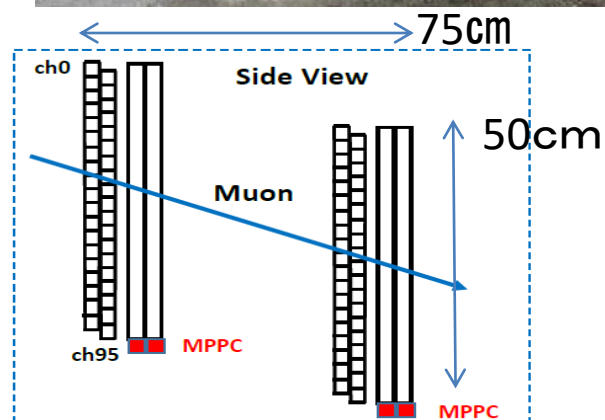
福島第一原発での観測

福島原発1号機用装置 2015年度



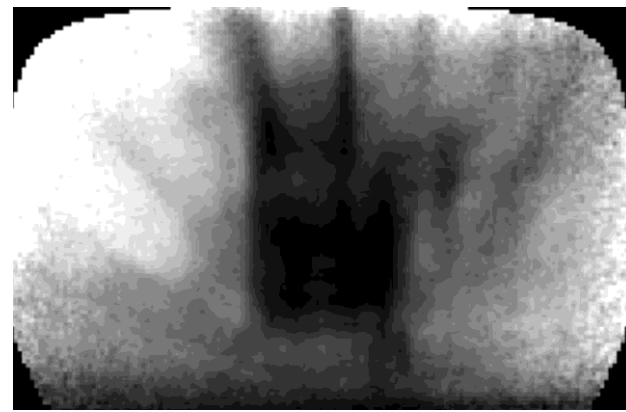
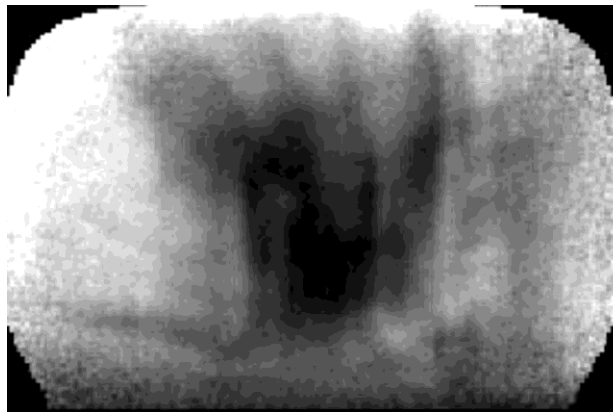
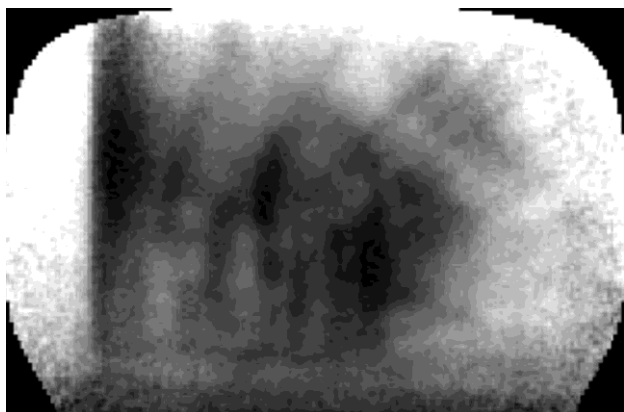
1m x 1mユニット
を3セット使用

福島原発2、3号機用装置 2016,17年度

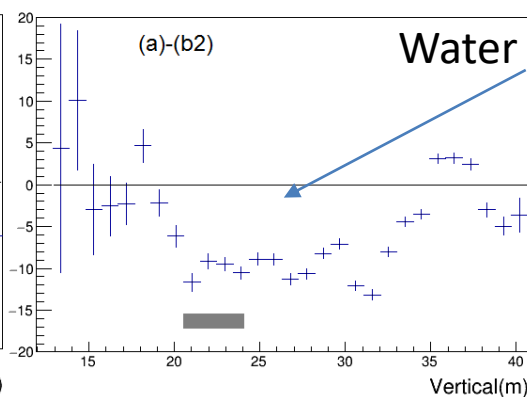
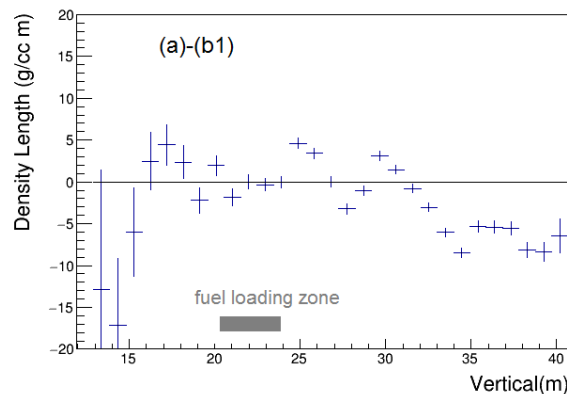
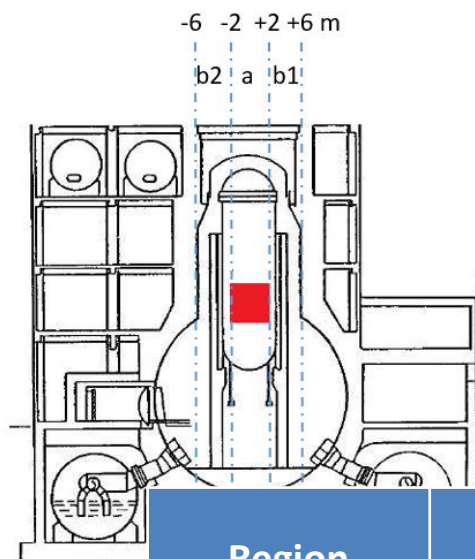


1号炉内燃料デブリ位置把握

2015



3観測方向で、燃料装填位置に強い吸収がない



Region	15.2 m < h < 20.3 m (underneath loading zone)	20.3 m < h < 24.0 m (loading zone)	24.0 m < h < 31m (above loading zone)
(a)-(b1)	4±25(stat)±32(syst) tons	1±7(stat)±5(syst) tons	32±6(stat)±11(syst) tons
Excess in (a)	33±25(stat)±43(syst) tons	22±7(stat)±22(syst) tons*	70 tons expected

* 160tons originally

福島第一原子力発電所 2号機 ミュオン測定による炉内燃料デブリ位置把握について

東京電力ホールディングス
株式会社プレスリリースより

TEPCO



東京電力ホールディングス株式会社

IRID

本資料の内容は、技術研究組合国際炉研究開発機構（IRID）の事業の一環として、東京電力が実施するものである。

©Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. All Rights Reserved.

無断複製・転載禁止 東京電力ホールディングス株式会社

PTEP

Prog. Theor. Exp. Phys. **2021**, 023C01 (11 pages)
DOI: 10.1093/ptep/ptaa137

Investigation of the status of Unit 2 nuclear reactor of the Fukushima Daiichi by Cosmic Muon Radiography

Hirofumi Fujii¹, Meiki Gi², Kazuhiko Hara³, Shugo Hashimoto^{3,†}, Kohei Hayashi¹, Hidekazu Kakuno⁴, Hideyo Kodama¹, Masato Mizokami⁵, Shinya Mizokami⁵, Kanetada Nagamine¹, Kotaro Sato¹, Shunsuke Sekita⁵, Hiroshi Shirai², Shin-Hong Kim³, Takayuki Sumiyoshi⁴, Atsuto Suzuki^{1,‡}, Yoshihisa Takada³, Kazuki Takahashi^{3,§}, Yu Takahashi^{3,||}, Fumihiko Takasaki^{1,*}, Daichi Yamada⁵, and Satoru Yamashita⁶

¹High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

²TEPCO systems corporation, Tokyo 135-0034, Japan

³University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305-8571, Japan

⁴Tokyo Metropolitan University, Hachioji, Tokyo 192-0397, Japan

⁵Tokyo Electric Power Company Holdings, Incorporated, Tokyo 100-8560, Japan

⁶University of Tokyo, Tokyo 113-8654, Japan

*E-mail: fumihiko.takasaki@kek.jp

[†]Present address: JAXA, Tokyo 182-8522, Japan

[‡]Present address: Iwate Prefectural University, Iwate 020-0693, Japan

[§]Present address: Toshiba Co., Ltd., Tokyo 105-8001, Japan

^{||}Present address: NEDO, Kanagawa 212-0014, Japan

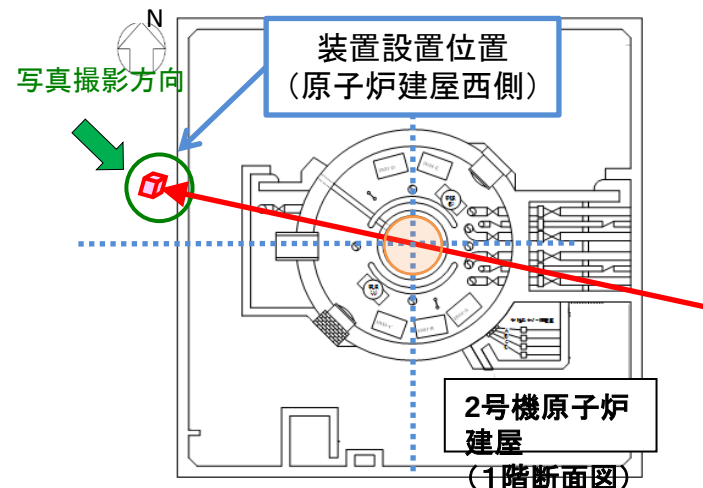
<https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa137>

2号機の観測

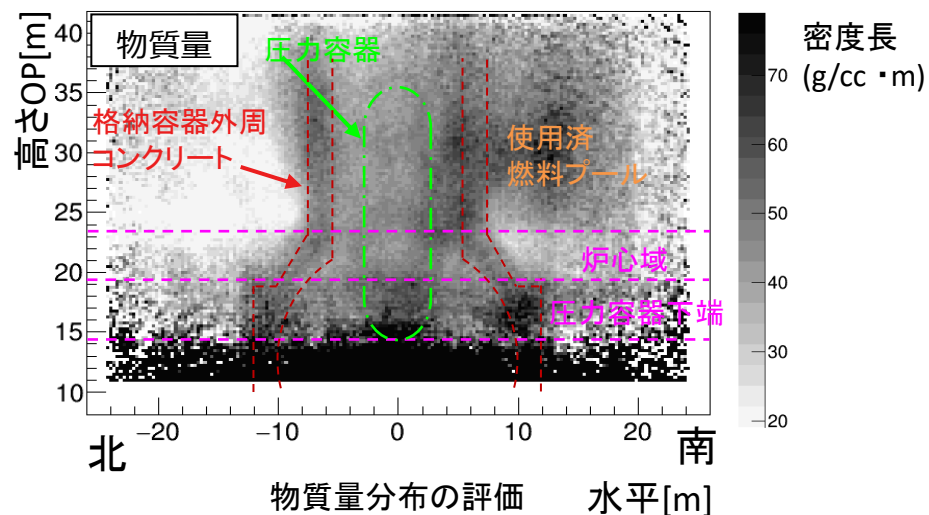
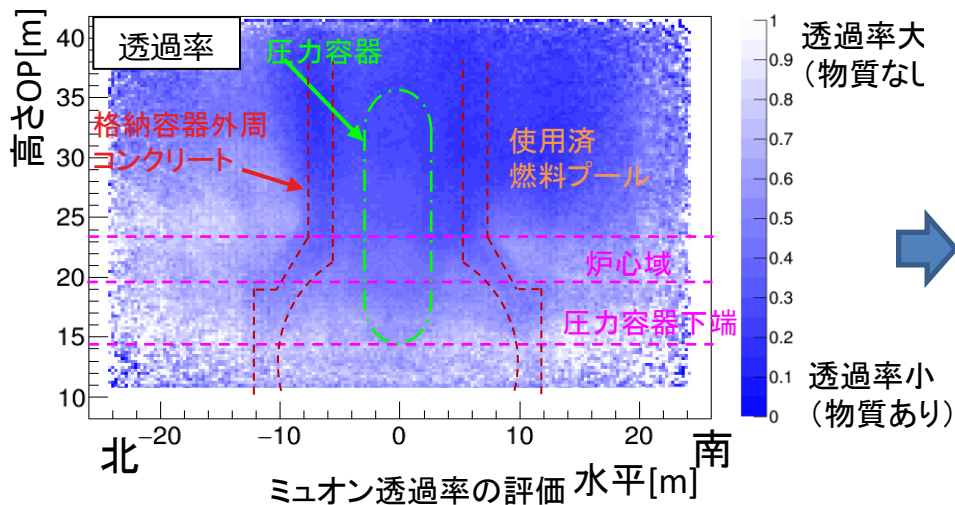
- 国プロ「原子炉内燃料デブリ検知技術の開発」にて，原子炉を通過する宇宙線ミュオンの測定により，炉内燃料デブリを検知する技術を開発。
- 2号機において平成28年3月～7月にミュオン透過法の測定を実施。



ミュオン測定装置設置
(小型装置, 約1m × 1m × 高さ1.3m)

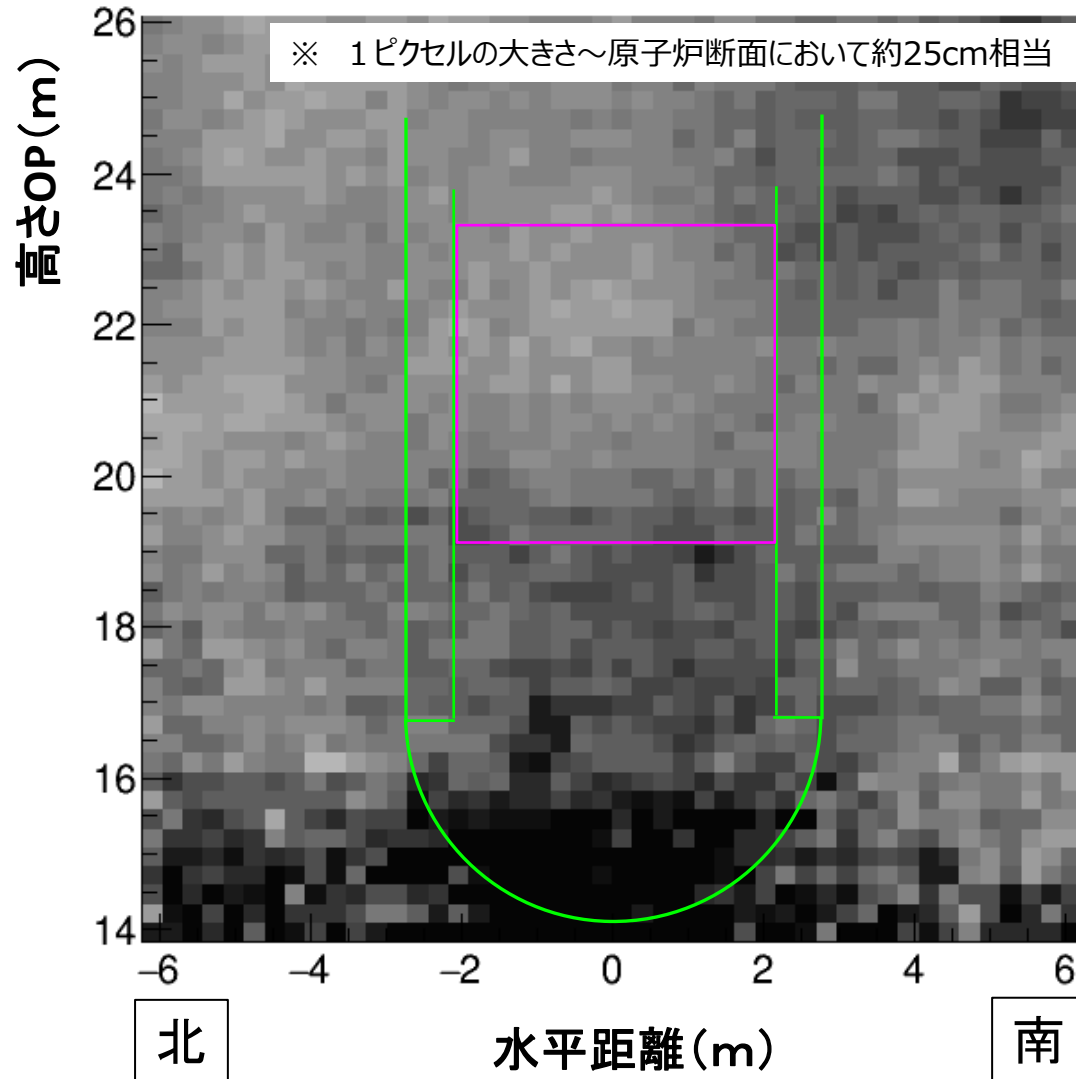


(測定結果 H28.7.22 時点)

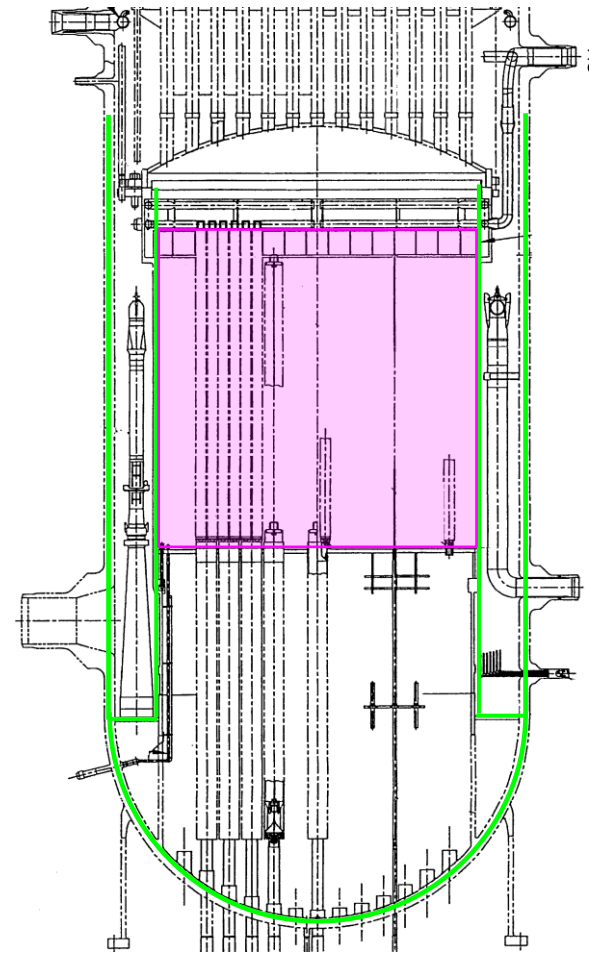


圧力容器下部における物質質量分布（圧力容器底部詳細）

- 圧力容器底部に燃料デブリと思われる高密度物質の影を確認。



(測定結果 H28.7.22 時点)

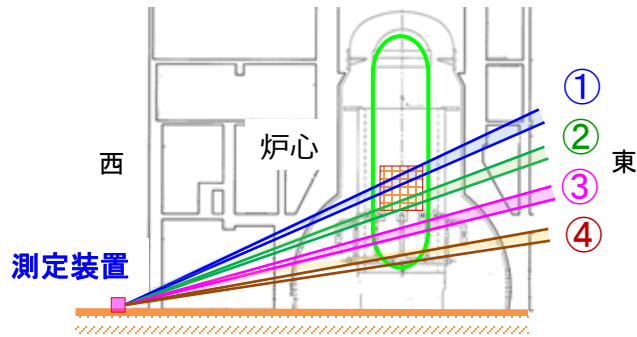


圧力容器下部の構造

統計的手法による圧力容器内の物質質量分布評価

“Method-1”

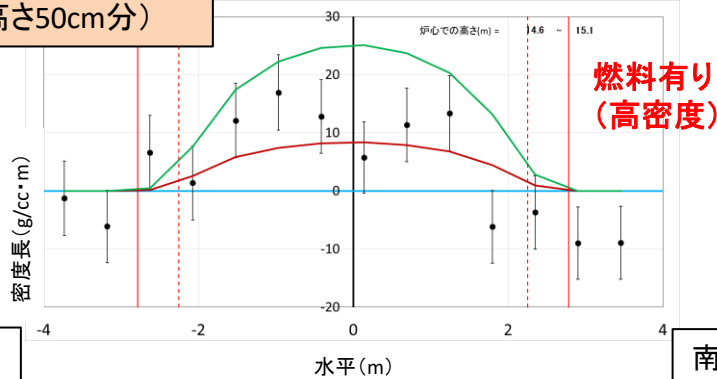
- シミュレーションと測定されたミュオン計測数の比較により、圧力容器内の物質量の分布を評価。



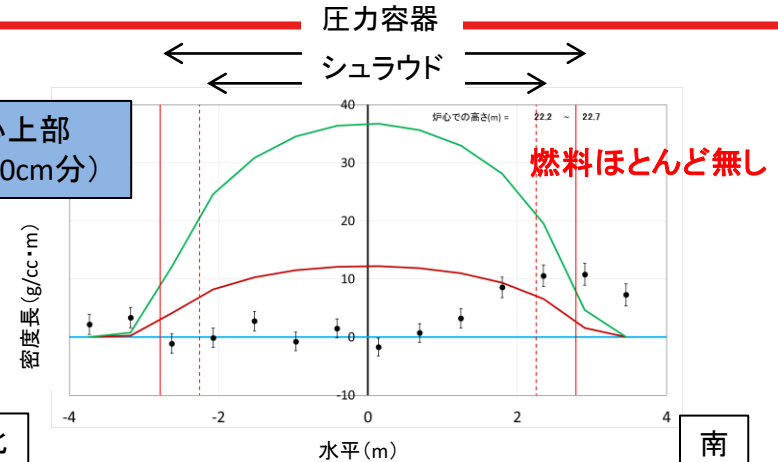
- シミュレーション評価 (燃料無し)
- シミュレーション評価 (燃料有り, 2g/cc)
- シミュレーション評価 (燃料有り, 6g/cc)
- 測定値を用いた評価

(測定結果 H28.7.22 時点)

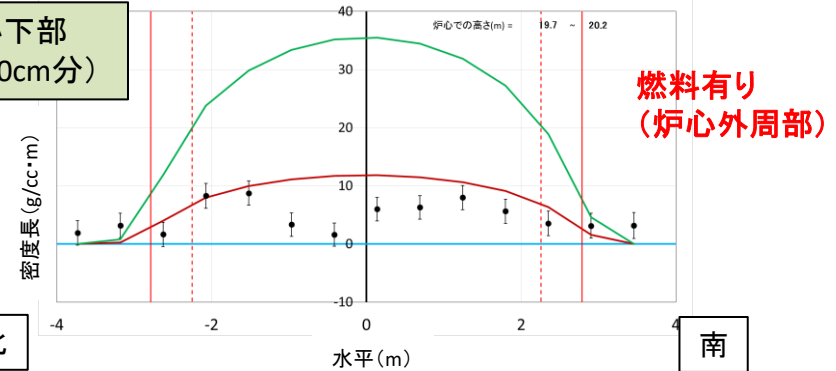
④ 圧力容器底部
(高さ50cm分)



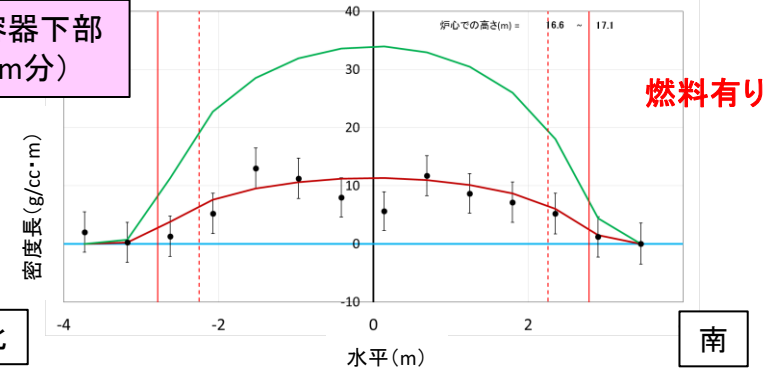
① 炉心上部
(高さ50cm分)



② 炉心下部
(高さ50cm分)



③ 圧力容器下部
(高さ50cm分)



圧力容器内の物質量の定量評価

■ ミュオン測定結果から圧力容器内の物質量を定量評価

- 2次元的な測定情報から、原子炉建屋の構造の影響などを考慮し、圧力容器内に存在する物質量を評価

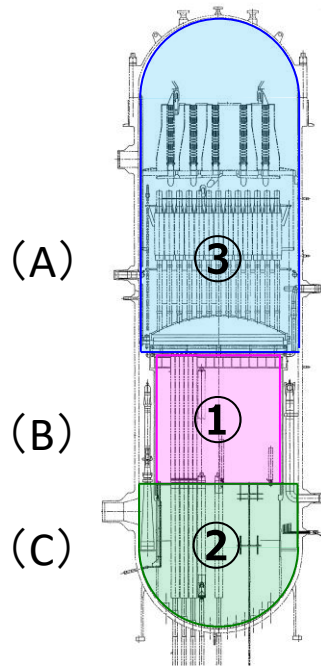


Table 1. The amount of material inside the RPV estimated by Method-1, in comparison with the values calculated for the undamaged case. The uncertainty numbers are for statistical and systematic ones. The estimations based on Method-2 are also listed.

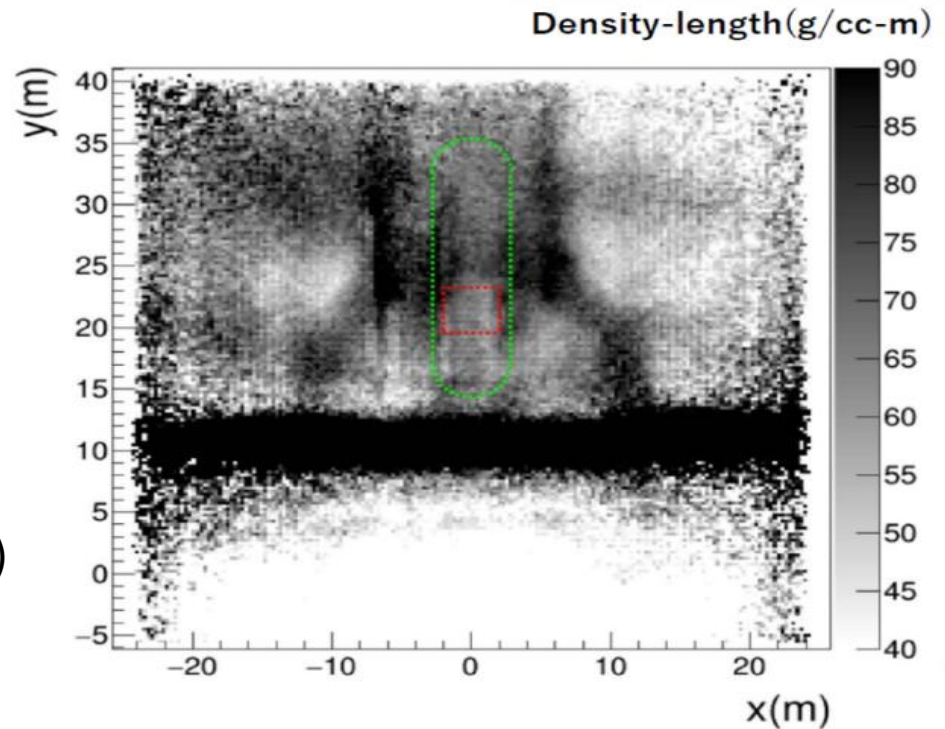
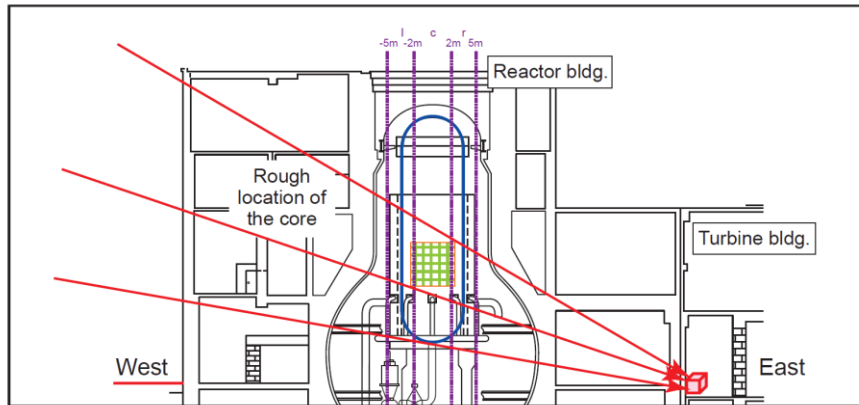
Volume in RPV	Weight (tons) Method-1	Weight (tons) Method-2	Undamaged assumed weight (tons)
(A) Above the loading zone: (A)	$96 \pm 6 \pm 29$	$134 \pm 5 \pm 35$	80 for Method-1 114 for Method-2
(B) In the loading zone (within shroud): (B)	$49 \pm 5 \pm 33$	$17 \pm 3 \pm 19$	160 (fuel assembly) 15 (control rods)
(C) Below the loading zone: (C)	$159 \pm 9 \pm 51$	$197 \pm 10 \pm 60^*$ $156 \pm 8 \pm 57$	35 excluding water
(B) + (C)	$208 \pm 11 \pm 60$	$173 \pm 9 \pm 60$	210

前後物質を差引く
(設計図に基づく)

両隣り分布から
前後物質を差引く

■ 定量評価の結果から、燃料デブリの大部分は圧力容器底部に存在していると推定

3号炉内燃料デブリ位置把握



Measured weight Original wt (drawing)

Above fuel loading zone

$37 \pm 4^{+42}_{-56}$ tons 42 tons

In fuel loading zone

$14 \pm 4 \pm 42$ tons 210 tons

Below fuel loading zone

$88 \pm 8^{+76}_{-63}$ tons 25 tons

Contributions to the systematics	Loading zone 19.7<y<23.5m	RVC bottom 14.3<y<19.7m
Cosmic muon momentum distribution	± 34	± 44
Difference of materials in upper region to calculation	-21	-21
Data acquisition (2-plane coincidence required or not)	± 6	± 5
Calculation of overlapping materials from drawings	± 7	± 7
Estimation of overlapping materials (data subtraction)	+21	+60
Difference of RCV bottom wall estimation to calculation	± 0	± 2
Region definition (difference for 1-bin displaced regions)	± 8	± 9
Estimation of materials inside the regions	± 3	± 6
Total	± 42	$^{+76}_{-51}$

The fuel loading zone is almost empty

福島第1原発1～3号機
のデブリ状況



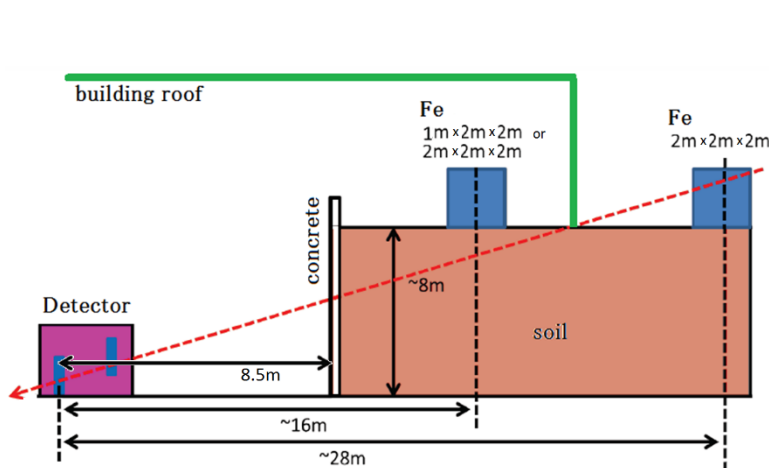
1～3号機核デブリの状況

まとめ

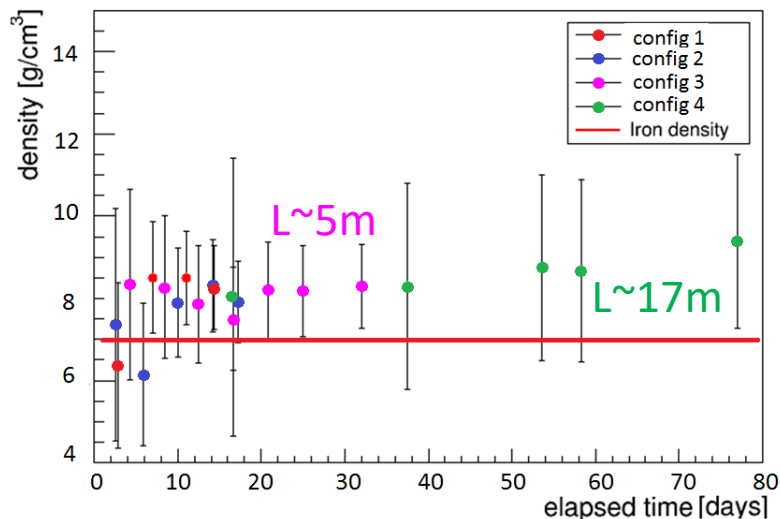
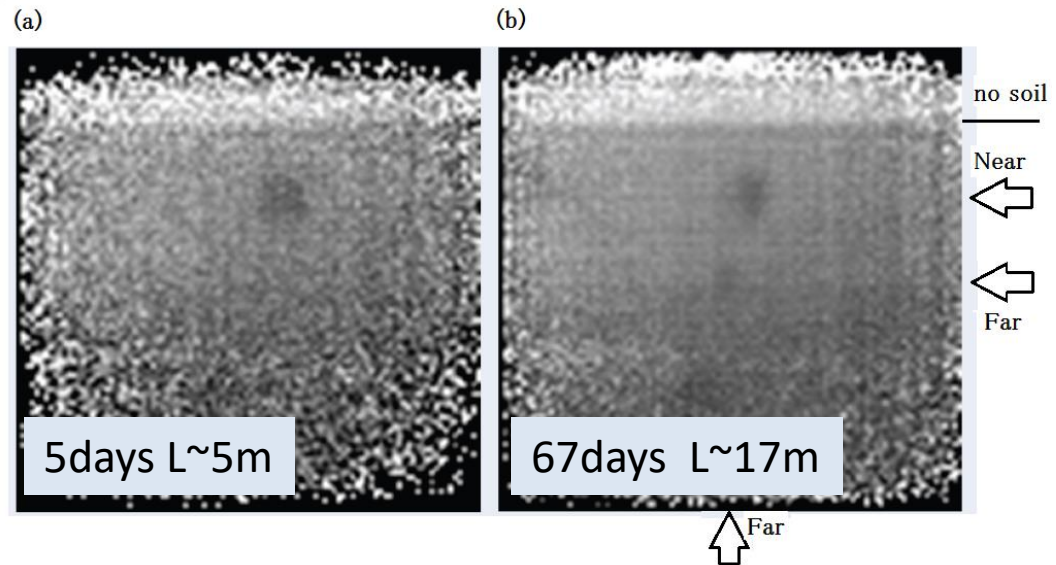
- ◆ 福島第一原発の燃料デブリの状況を把握する目的で、宇宙線ミュー粒子を用いたラジオグラフィ装置を開発建設した。
- ◆ 東京電力、国際廃炉機構の支援を受け、で1～3号機の観測を行い、燃料デブリの状況に関するはじめての観測に成功した。核燃料はほとんど残らず、2号炉では圧力容器下部に燃料デブリが残っていると推定できる。
- ◆ ミューオンラジオグラフィにより低角度のミュー粒子フラックスの不定性は大きいものの、燃料デブリ重量に関する情報を得ることができた。

日本原電の原子炉による予行観測は極めて有益であった
あらためて、実験に関するご理解に感謝します。

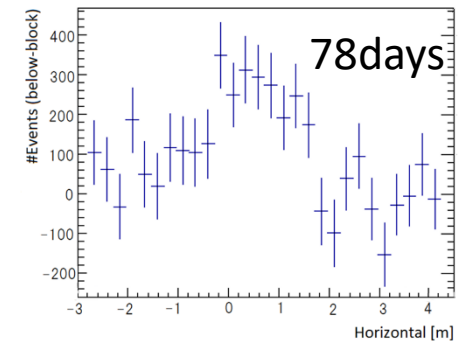
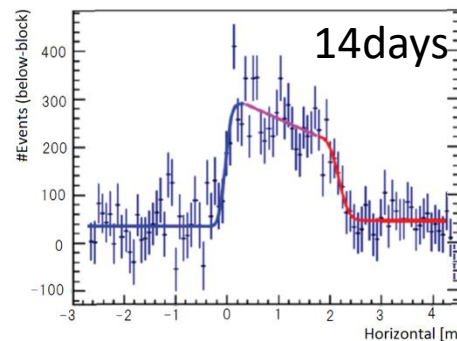
地下からの透視実験



KEKの敷地で観測



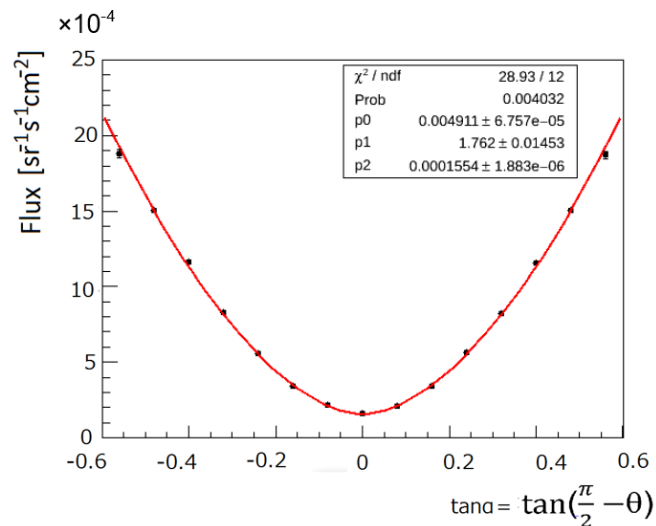
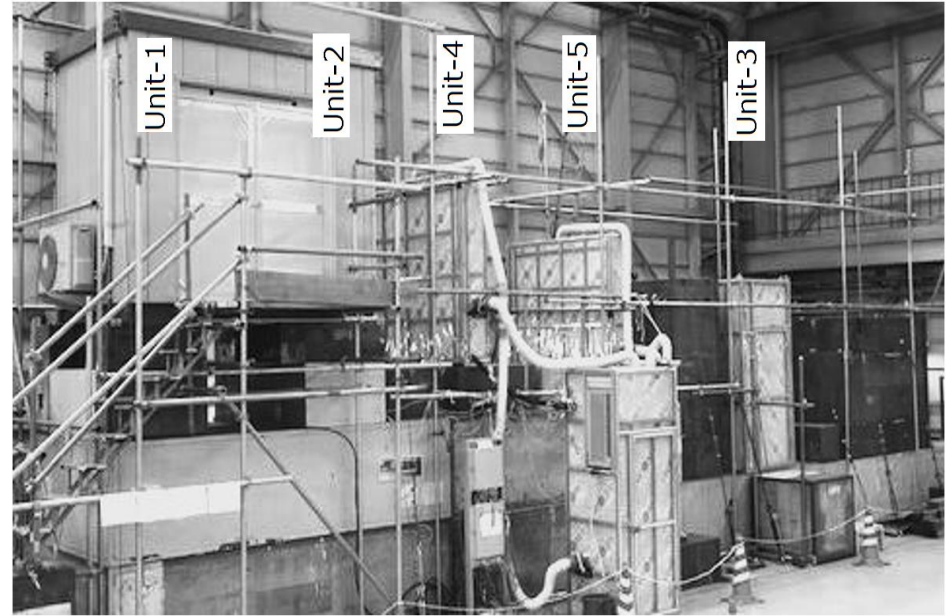
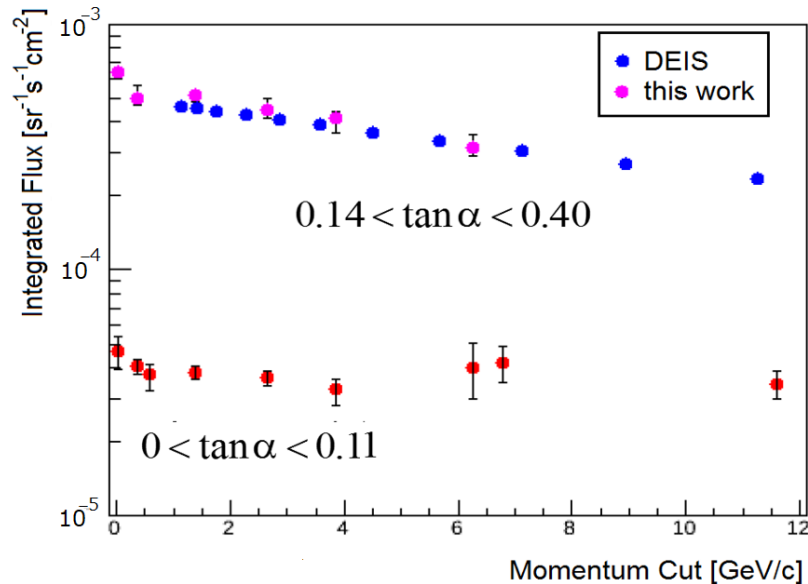
地上構造物の密度推定の確度と測定日数



2m立法の鉄ブロックを地中長Lで測定

Integrated cosmic muon flux in the zenith angle range for momentum threshold up to 11.6 GeV/c <https://doi.org/10.1093/ptep/ptx164>

前方ミュー粒子フラックスの測定



$$\text{Flux}(\tan \alpha; p_{\text{cut}}) = C p_{\text{cut}}^{-D}$$

$$C(\tan \alpha) = p + q(\tan \alpha)^m$$

$$D(\tan \alpha) = r + s \log(\tan \alpha)$$

Parameters applicable range	$p_{\text{cut}} < 6.1 \text{ GeV/c in}$ $p_{\text{cut}} < 3.9 \text{ GeV/c in}$	$p_{\text{cut}} < 11.6 \text{ GeV/c in}$
p [$\text{sr}^{-1}\text{s}^{-1}\text{cm}^{-2}$]	$(2.29 \pm 15.74) \times 10^{-5}$	$(6.32 \pm 0.49) \times 10^{-6}$
q [$\text{sr}^{-1}\text{s}^{-1}\text{cm}^{-2}$]	$(4.4 \pm 3.6) \times 10^{-4}$	$(1.60 \pm 0.19) \times 10^{-3}$
m	1.80 ± 0.93	1.33 ± 0.05
r	0.03 ± 0.20	$(2.7 \pm 3.8) \times 10^{-2}$
s	0.11 ± 0.39	$(-1.0 \pm 1.3) \times 10^{-2}$
Fit deviations	Relative : 26% Normalized: 0.28 182 data points	Relative: 14% Normalized: 1.26 77 data points