



筑波大学  
*University of Tsukuba*



# 宇宙線を用いた 大規模構造のイメージング

原 和彦（数理物質系）

- 導入・経緯
- 原電東海での予備測定
- 福島第一原子炉での測定
- 落ちたデブリの測定のために
- 今後の応用例

# 経緯

11 Mar. 2011 東日本大震災

7 Apr. 2011 永嶺教授からKEK鈴木機構長に提案書

KEKメンバー(高崎教授主導)による検討開始

Sep. 2011 筑波大(金、原)参加。検出器の設計、製作を進める(橋本、高橋<sub>優</sub>)

Mar. 2012 Detector#2 (Det#1 は永嶺製)で原電原子炉の透視性能評価

Feb. 2013 Detector#3 を90度の位置に設置(伊藤M)

Dec. 2013 原電での予備実験終了 ⇒KEKで地下からの透視性能評価(佐藤S)

2014年度 IRID(国際廃炉機構)のプロジェクトに採択

福島用の検出器遮蔽を設計(高橋<sub>和</sub>M)、製作

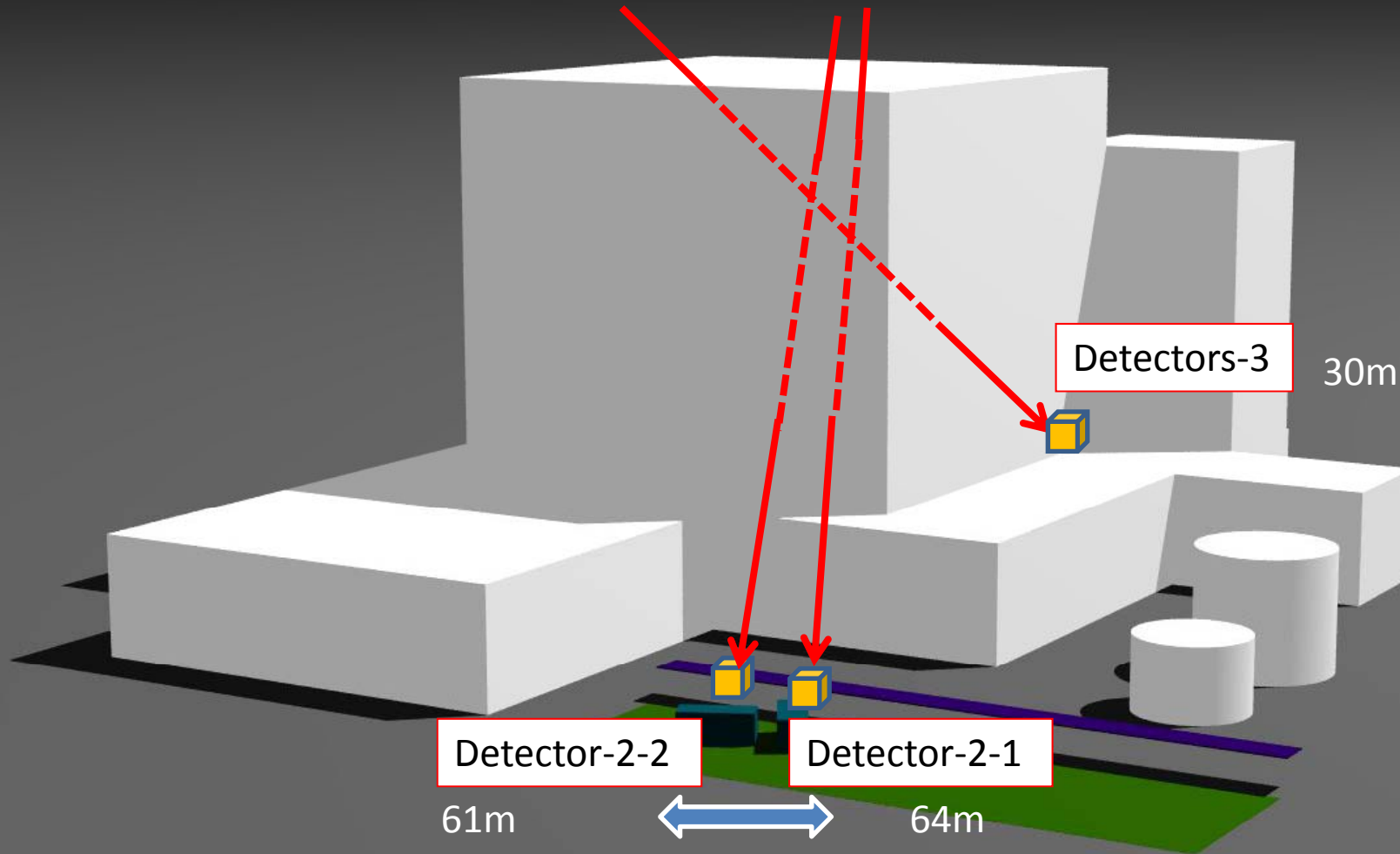
2015 Feb-May 2台で、1号炉脇から観測(高橋<sub>和</sub>M、佐藤)

2015 May-Sep 1台の位置を変更して1号炉を観測

2015年度 KEKで水平ミュオン成分の観測(高橋<sub>和</sub>M)

可搬性の高い小型システムの製作

# Muon Radiography



宇宙線ミュー粒子はほぼ決まったエネルギー分布・角度分布で一様に降り注ぐ  
ミュー粒子は高い透過性(1GeV/cでFe 0.7mがレンジ)

⇒より低運動量、より高物質質量により、背後での測定できるミュー粒子数が減少

大規模構造の遠隔透視—火山、ピラミッド、原子炉

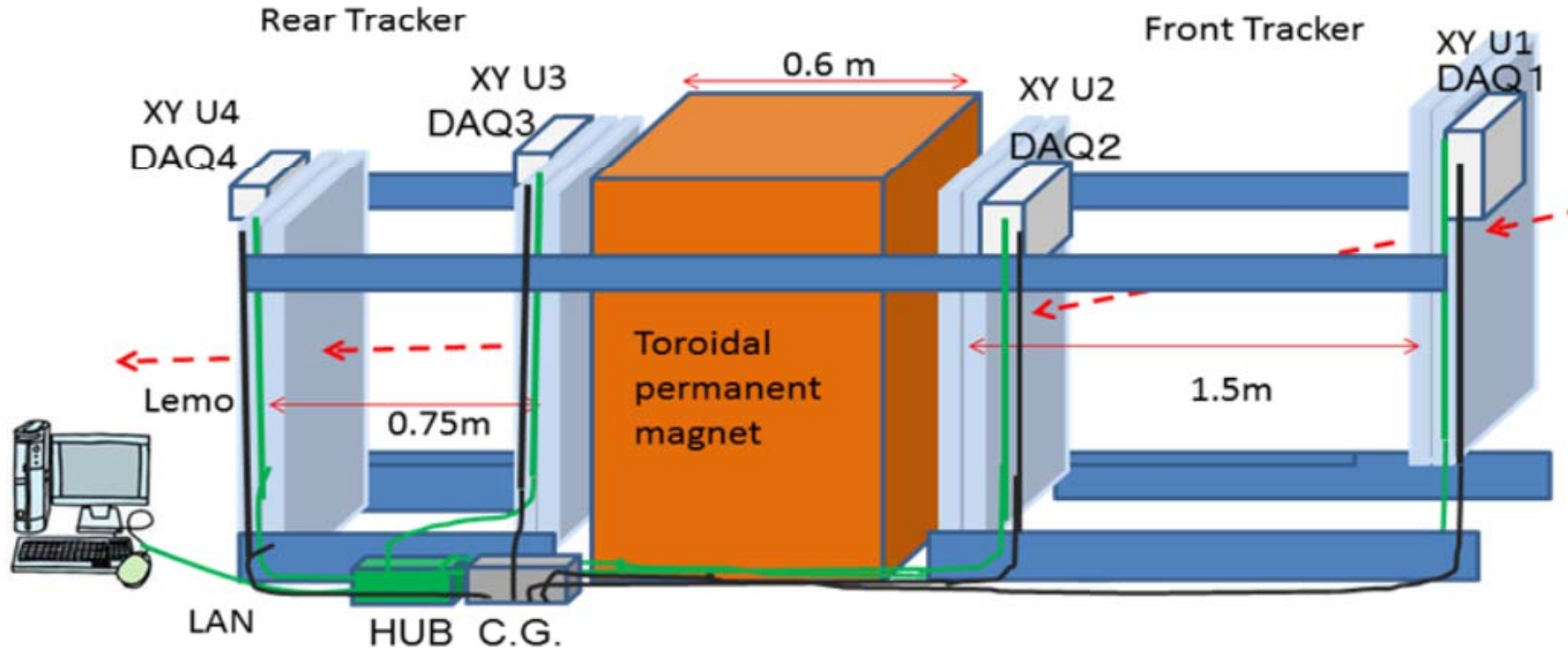
# Detector system 2

Placed in a 20-ft shipping container

XY units: 0.2 t

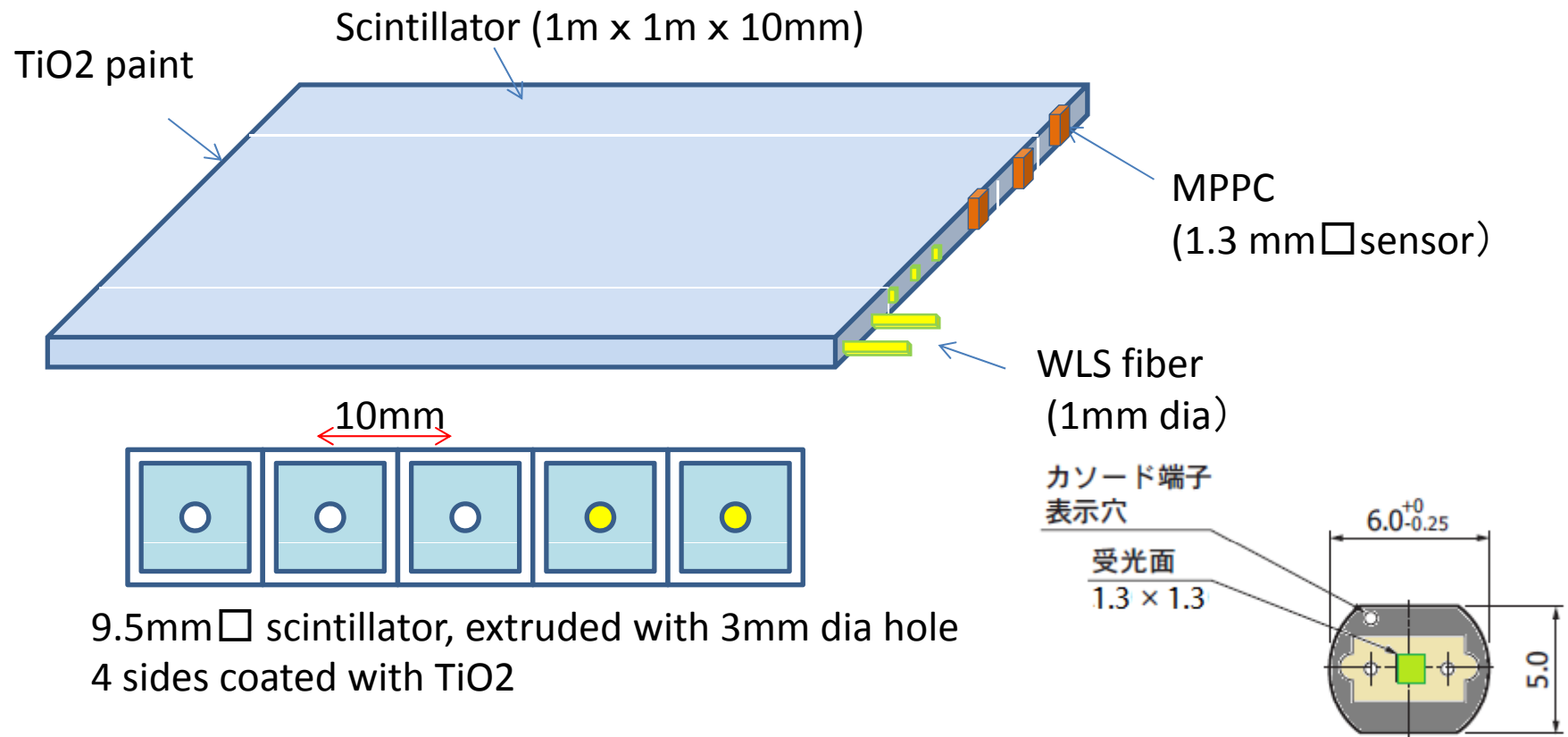
Toroid: 5.3 t

Container others: 3.5 t



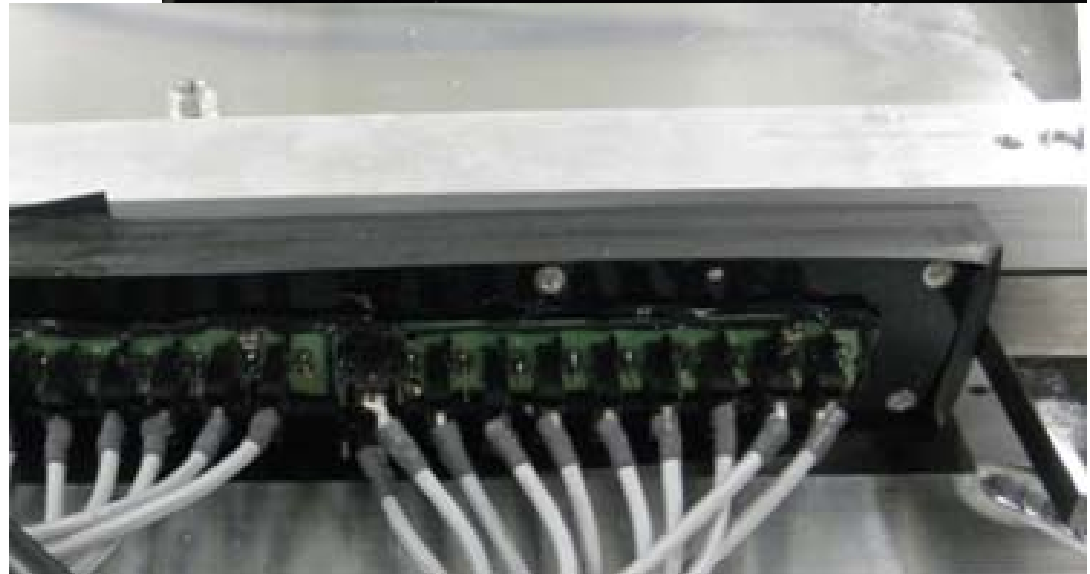
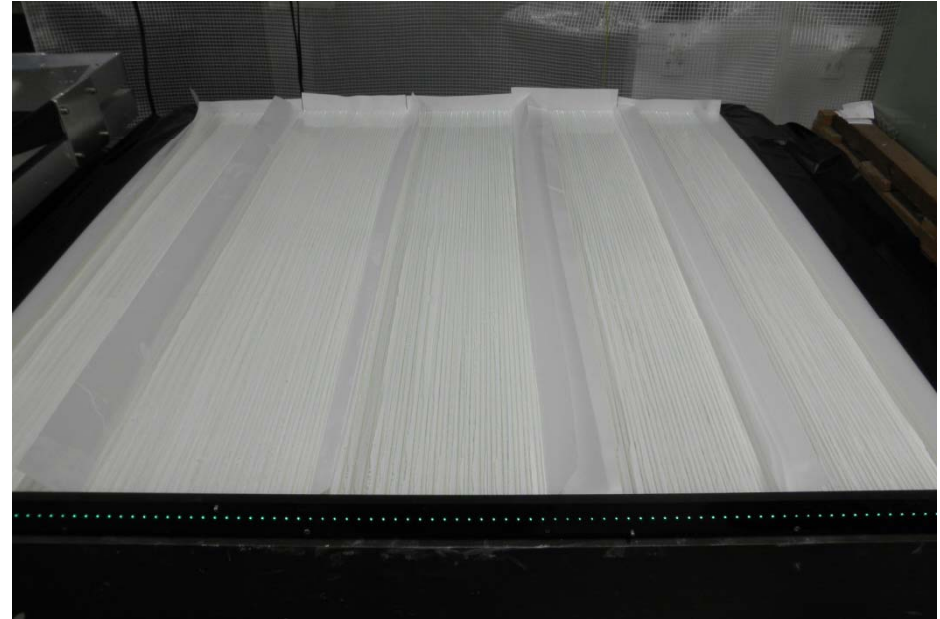
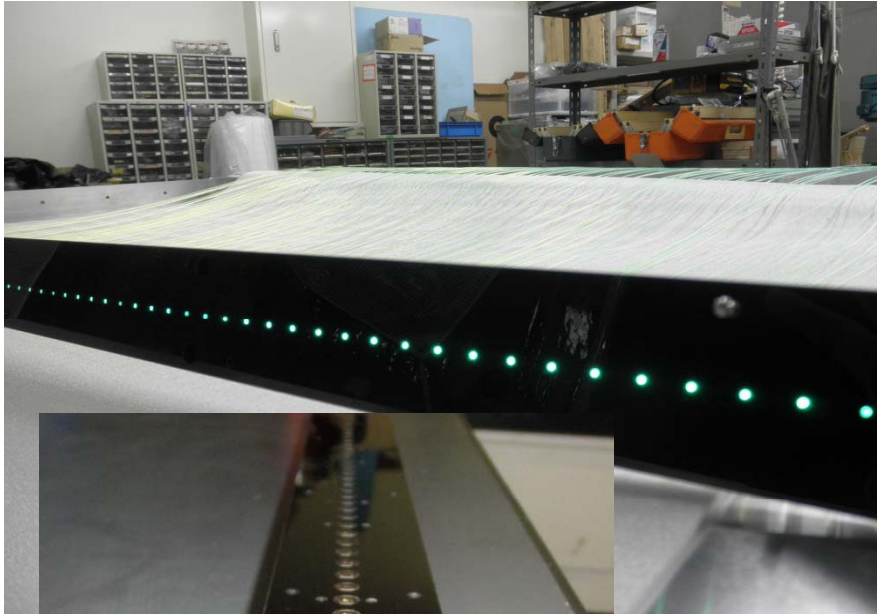
Clocks in 4 DAQ boxes are synchronized every  $1 \mu\text{s}$

# New planes with FNAL scintillator bars

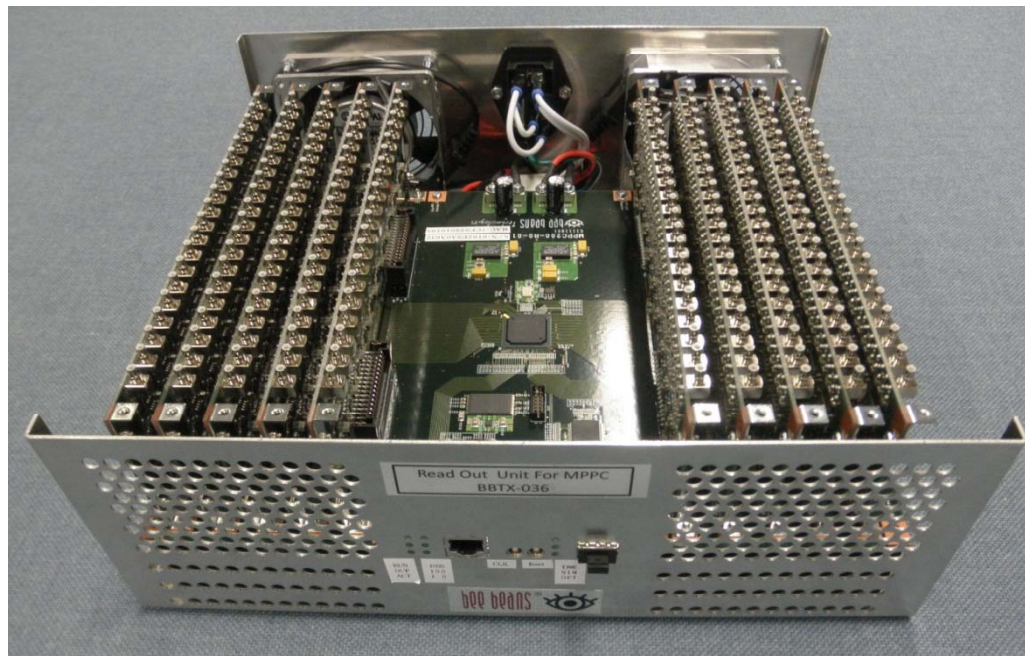


Scintillator bars w/ paint fabricated by FNAL (group of Anna-Pla)

# 1mx(1cmx100) scintillator plane



# MPPC DAQ System

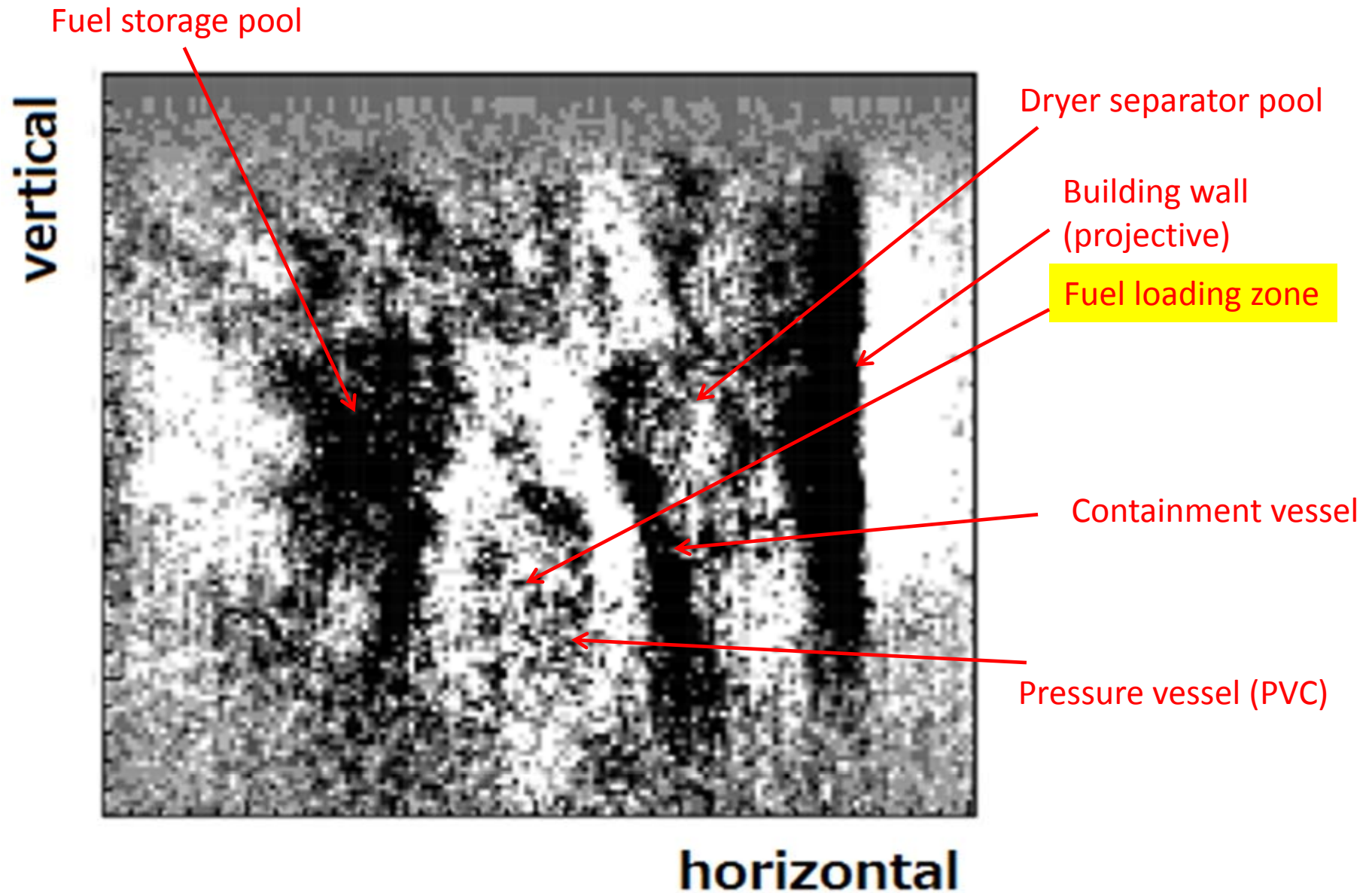


Provide biases ( $\sim 71\text{V}$ ) to 200 MPPCs  
Look for coincidence of XY planes  
(single cluster in each allowed)  
Clock:  $125\text{MHz} \rightarrow 1\text{GHz}$



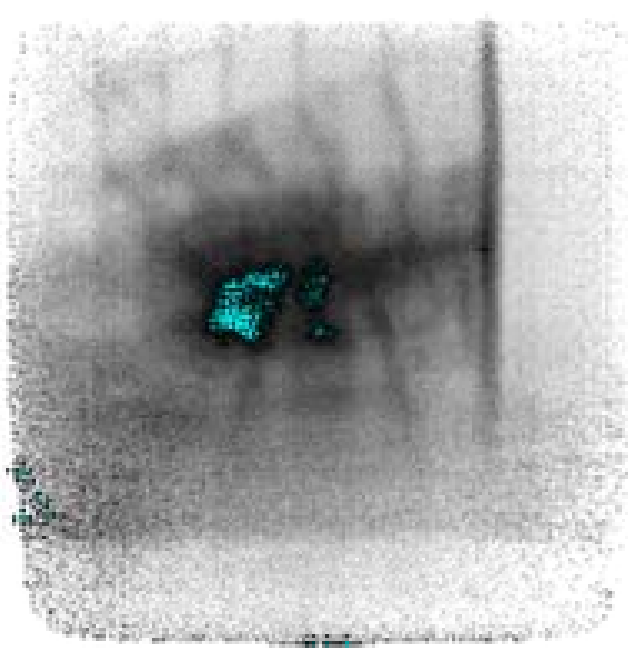
200 SMB coaxial cables/unit

# 2D image (Period 1)

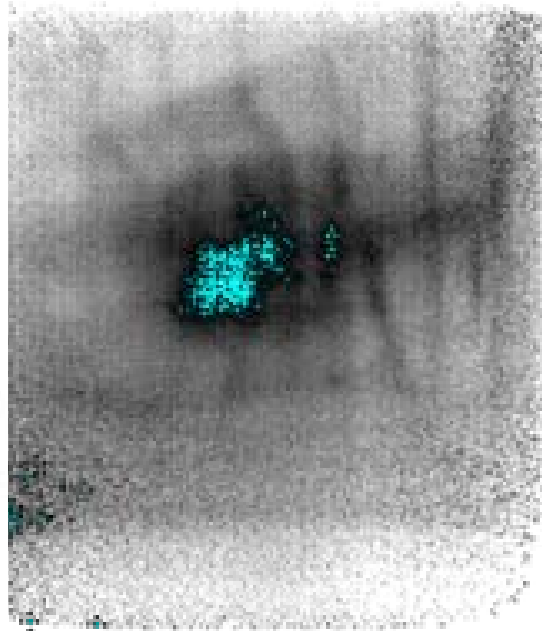




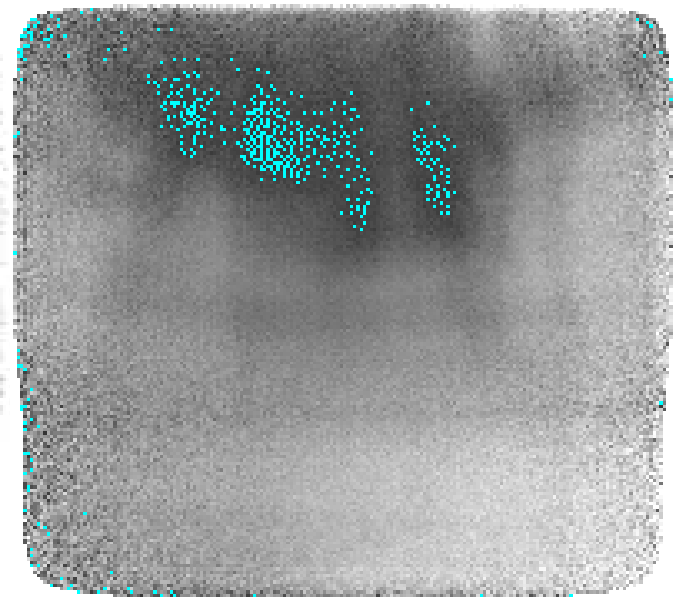
## Area with large absorption (Period 2)



Point-1  
(173days,1524kEv)



Point-2  
(94days,722kEv)



Point-3  
(208days,816kEv)

Points with larger absorption,  $-\ln(N_{obs}/N_{exp}) > 1.35, 1.4, 1.9$ , distribute inside the fuel storage pool

Mesh the pool at  $(1m)^3$  and color the mesh if two of the three say "heavy"

# Distributions of heavy objects



Reconstructed distribution of heavy objects



Period-2 view

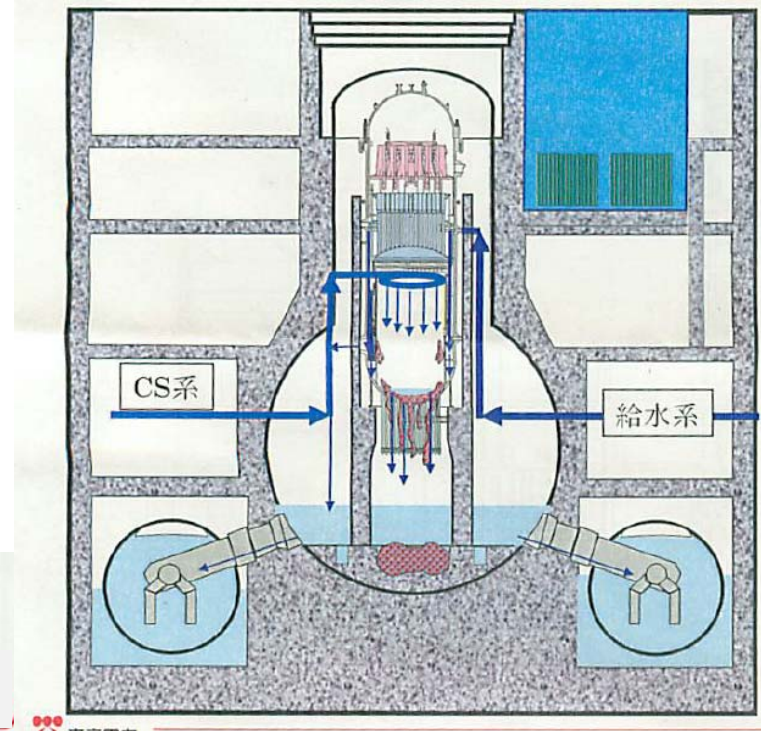


Period-2 view (behind)



# FD Unit-1

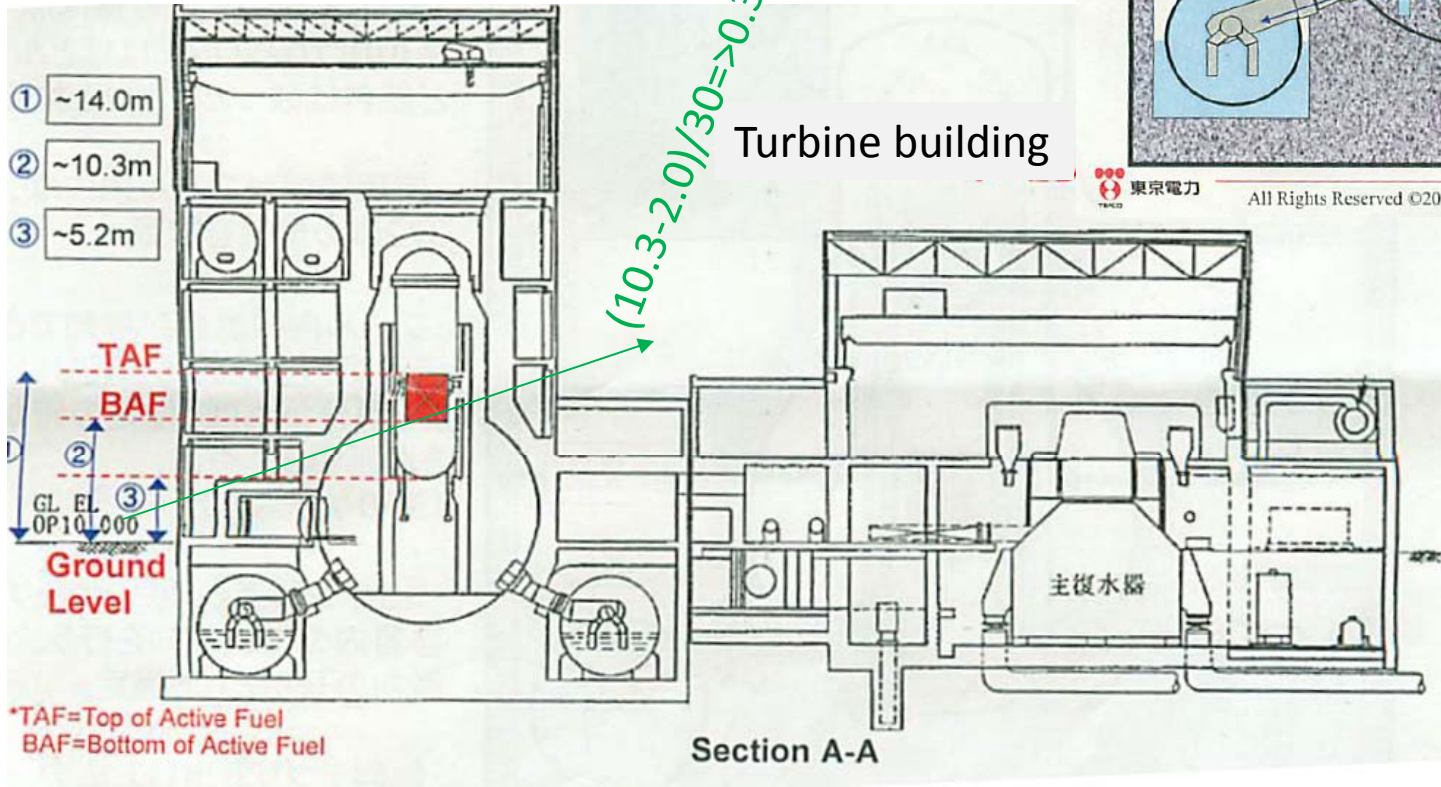
Unit 1-4 are all GE Mk-I type reactors



東京電力 All Rights Reserved ©2014The Tokyo Electric Power Company, Inc.

Reactor building

Turbine building

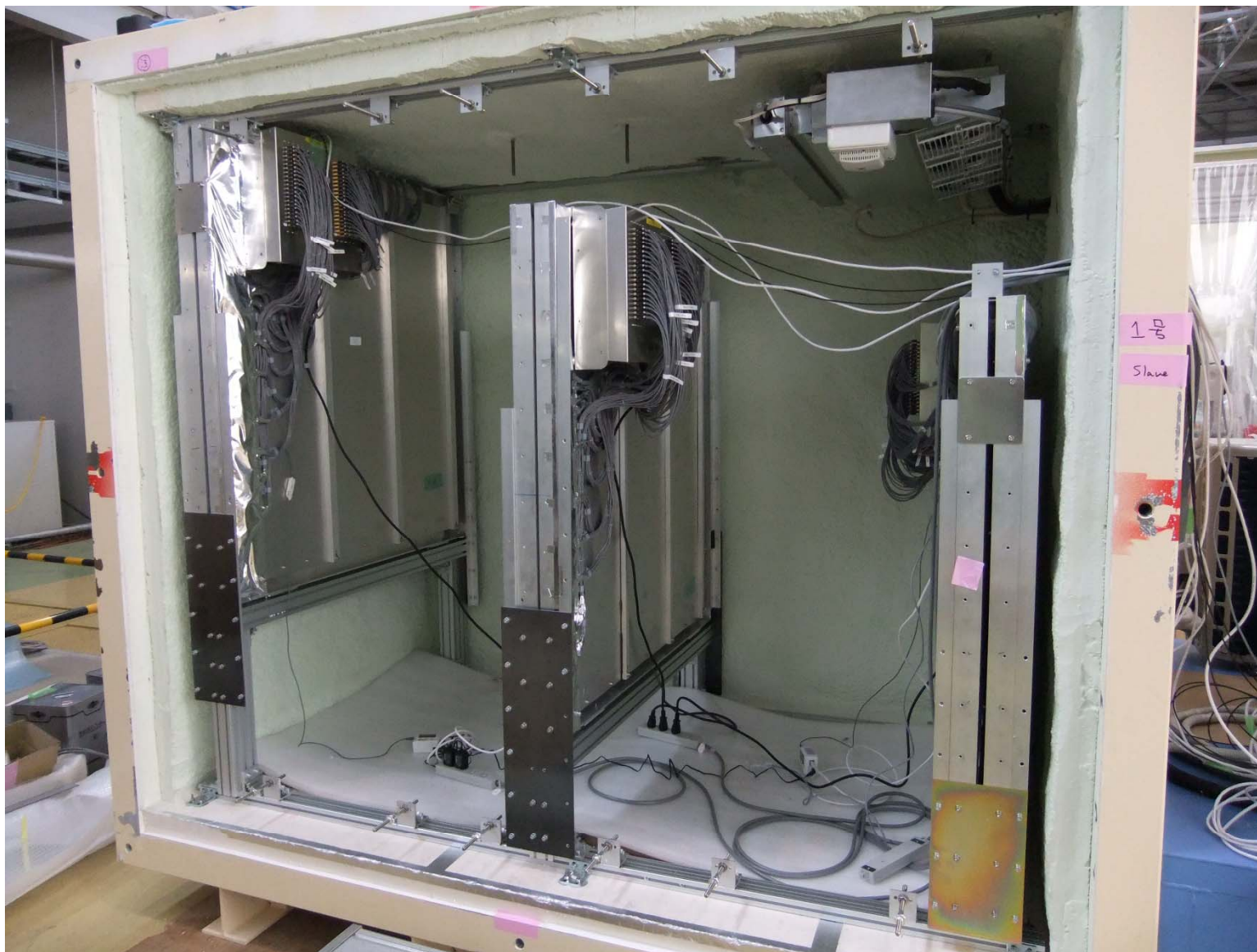


\*TAF=Top of Active Fuel  
BAF=Bottom of Active Fuel

Section A-A

~1mSv/h

# 放射線遮蔽のため10cmの鉄コンテナ



# IRID press release

<http://irid.or.jp/wp-content/uploads/2015/03/20150327.pdf>



図2 炉心高さ断面  
高吸収体の交点無し

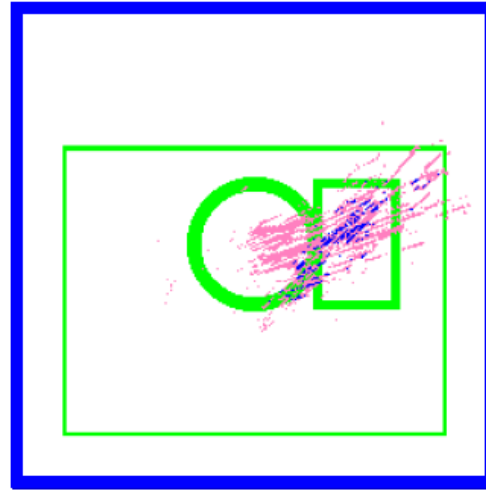
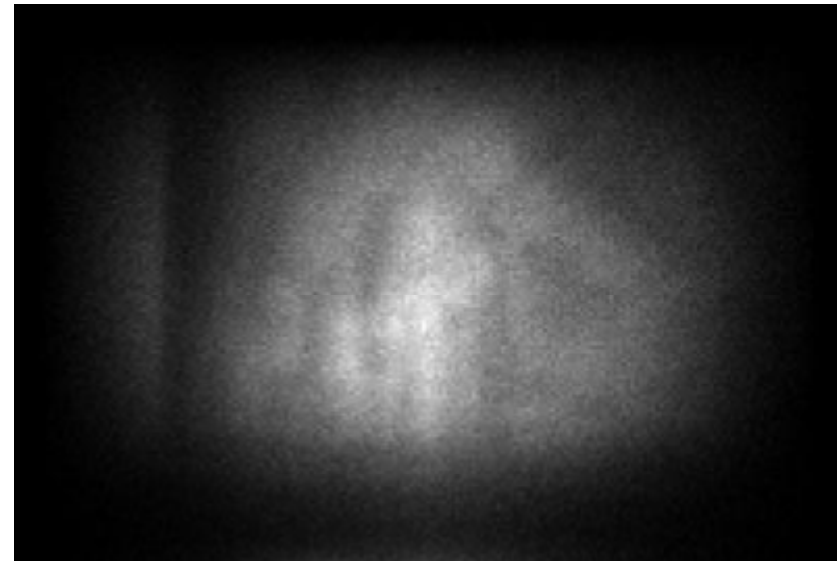
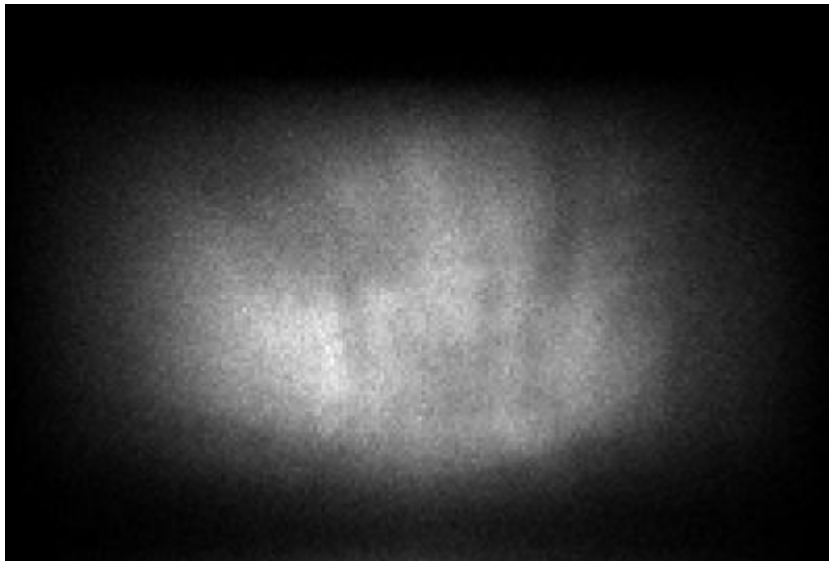
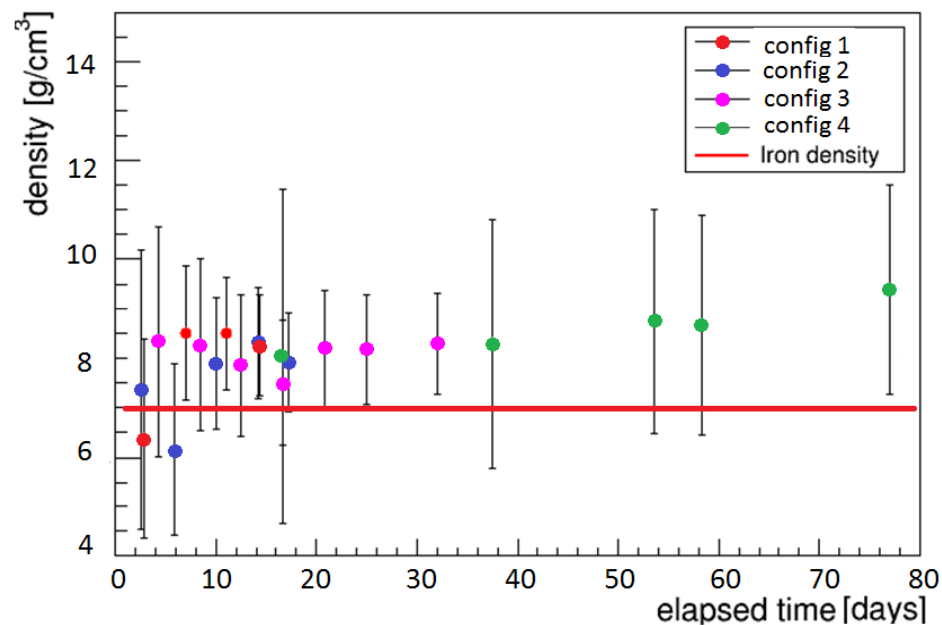
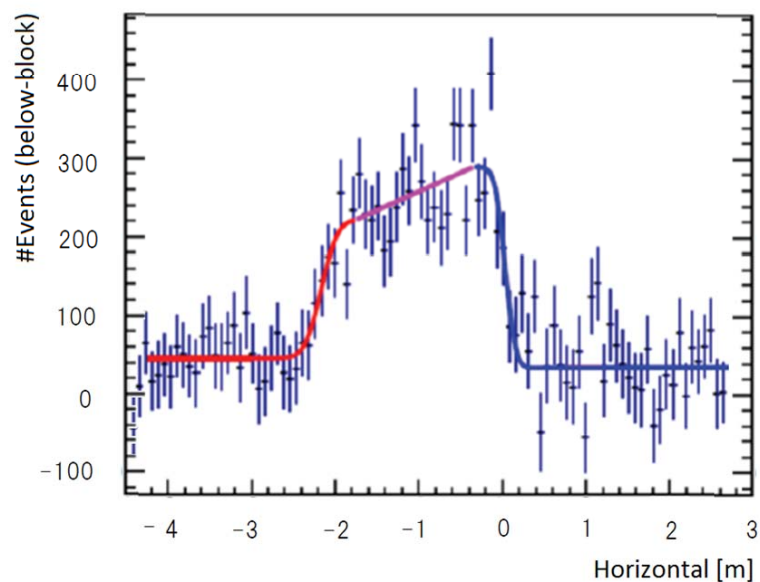
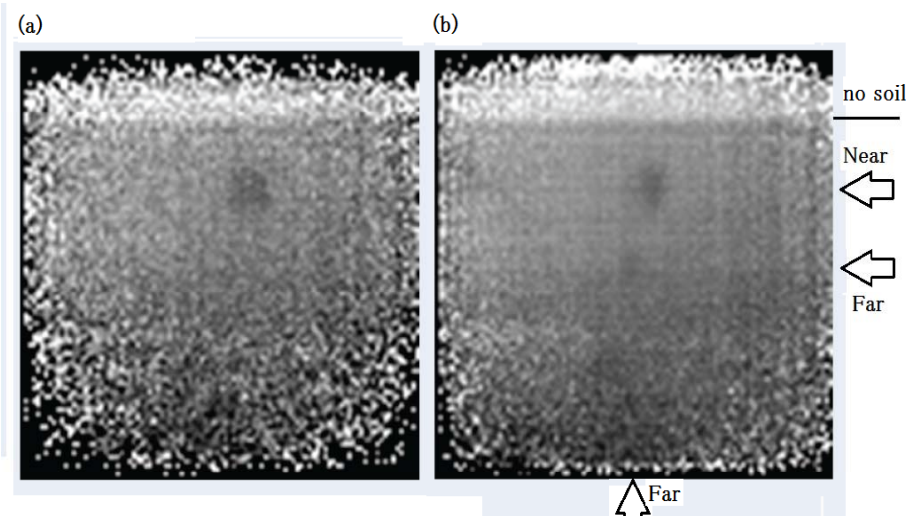
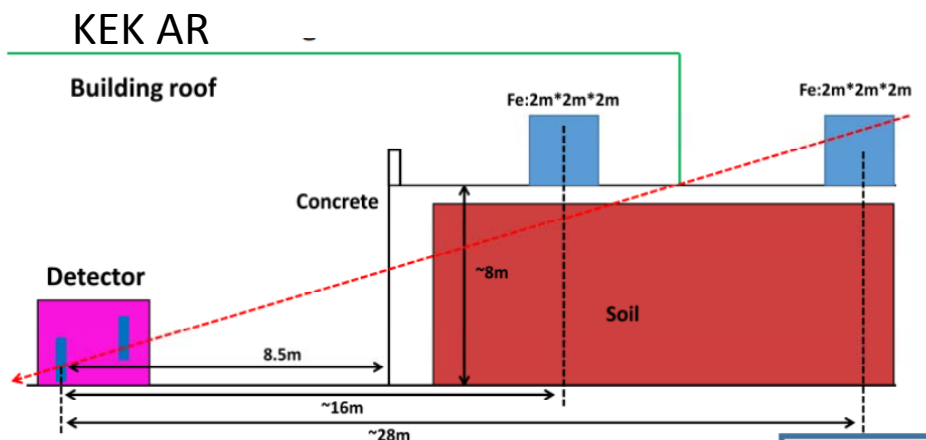


図3 SFP高さ断面  
高吸収体の交点あり

燃料プールに重いものはあるが  
燃料装填位置にはない



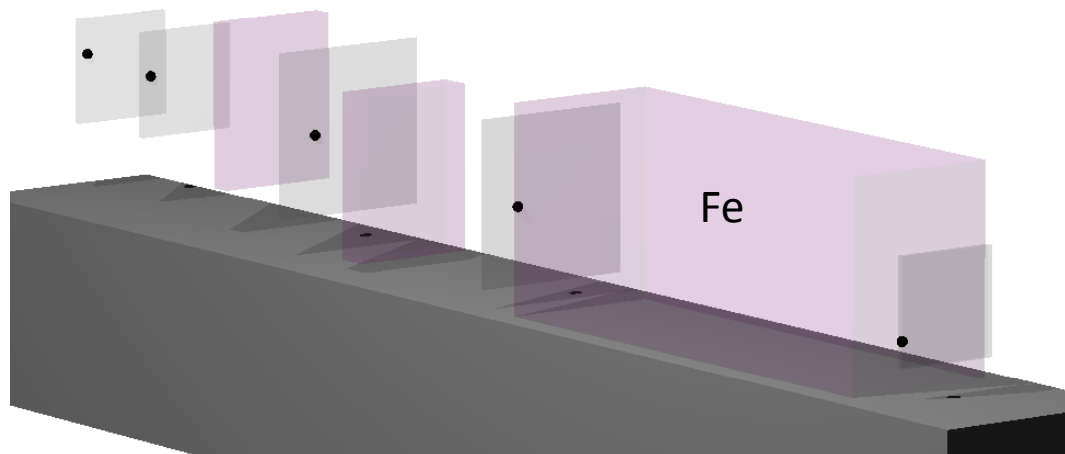
# 地下からの透視可能性



# 水平ミューオンの測定

3 XY(1m □) + 2 XY(1.6m □)

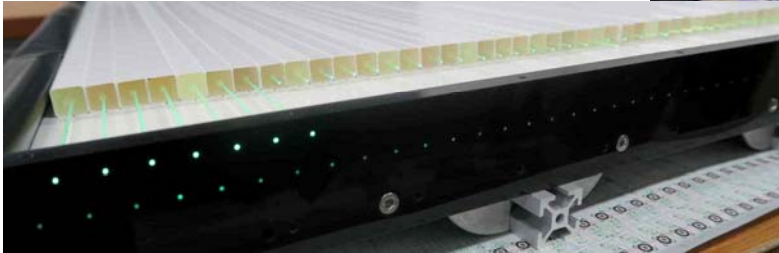
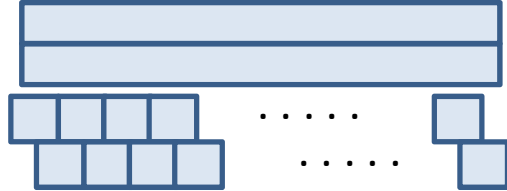
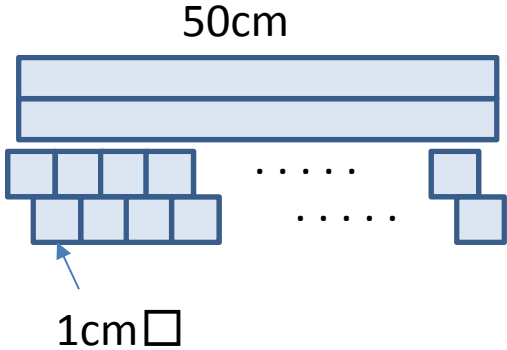
KEK東カウンターホール





# 50cm□ Detector

小型化して地中に埋めやすく



第2回 各学部主催 (創制時の原研科)

## 宇宙線ミュオン粒子を使った原子炉燃料デブリの遠隔観測

福島第一原子力発電所 ほか

数理工学系 准教授 原 和彦/教授 金 信弘/教授 高田 毅久

## 1 概要

東京電力福島第一原子力発電所の原子炉燃料格納容器からの回復作業のために、燃料デブリの現状を知ることが極めて重要であるが、高い放射能のために直接観測することは困難である。一様に降り注ぐ宇宙線ミュオン粒子を用いることで、遠隔から原子炉の内部を観測できる可能性がある。我々は燃料デブリで用いる技法を用いて検出器を製作し、実際に原子炉内部が観測できることを示した。現在は、福島第一原子炉で実際に観測するための装置を建設している。

## 2 活動内容

宇宙線ミュオン粒子は物質の透過性が高く、ほぼ決った角度で一様に降り注ぐが、重い物質があると吸収されたり散乱されたりして入射線路から外れてしまう。この性質を使って、原子炉建屋の外から原子炉に向けて宇宙線の角度を測定すると前方にある物質量に従った減少が観測される(図4を参照)。この原理を用いて、アクセスが困難な原子炉内部の燃料デブリを観測できるかの実証実験を実際の原子炉を用いて実施した(2012年2月-2013年12月)。

観測装置は、1cm幅x1m長のシンチレータ検出器からなるもので、これを100本ずつXY方向に組むことでミュオン粒子の通過位置を測定する。このようなXYユニットを1.5m幅で設置することで、ミュオン粒子の通過方向も測定できる。この観測装置に使用されているシンチレータや検出しセンサー、検出し回路などは我々が燃料デブリ実験に開発してきたもので、今回はこれらを活用した。

観測対象となる原子炉建屋は約40m立方であり、また燃料槽の部分だけでも4m立方の大きさであるが、実証実験ではこの観測装置を64mの位置に設置



図1 (左) 観測に用いた検出器の構成。(中) 1m x 1mのシンチレータ検出器とデータ収集装置を取り付けたXYユニット。観測装置は4ユニットの組み合わせ。(右) 64mの距離から観測された中性子束の分布。

してミュオン粒子の分布を観測した。図1(右)に約100日の測定で得られたミュオン粒子数の分布を示す。GE MARK-II型原子炉に特有なコーン形状をした格納容器やその内部にある円柱形の圧力容器が観測できる。

検証実験の期間中を通して原子炉はメンテナンス状態にあり、燃料は圧力容器に充填されていなかった。圧力容器内の中性子密度分布をシミュレーションと比較することで、建屋に水相当の物質で満たされていることが結論できた(図2)。

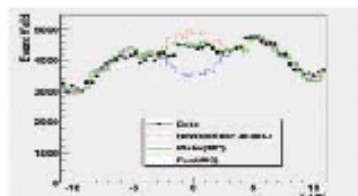


図2 燃料格納位置でのミュオン粒子数分布とシミュレーションと比較。

実証実験では、さらに進めて、燃料プール内に移動されている燃料集合体を観測することを試みた。燃料プールは観測装置の視野中心の左上、格納容器の背後に位置するために、大まかに形状は指定できても画像でできる指定には詳細な原子炉構造のシミュレーションが必要で、現状入手できる情報から指定精度は限定的である。そこで90度方向に2台目を90mに設置して2方向から観測した。2つのデータを合わせることで実行方向の燃料集合体の分布も指定できる。これらの方向から観測して、1m立方の空間領域ごとに重い物質によるミュオン粒子数の減少が顕著であるかを判定した。

図3はそのようにして判定した燃料プール内の吸収

の大きな部分の分布である。ふたつにグループされる塊が観測された。この観測した原子炉の実際の状況は情報公開の制約により不明であるが、通常、使用済みと使用中の燃料集合体は分離されるの



図3 燃料プール内の吸収の強い部分の分布

で、その状況にあると考えるのは妥当である。

実証実験は22か月に及ぶものであったが、検出方法の確立などに要する期間も含まれ、実際には複数の検出器を配置することで観測期間を短くすることができる。また、観測には原子炉の床などの構造体があると指定を複雑化させる。1m<sup>3</sup>のサイズのデブリならば、検出器を建屋の壁を隔てて直接格納容器を見ることができる配置に設置できれば64mの距離では、約90日で判定できるとシミュレーション結果が得られている。設置距離を近くする、また、複数の装置で同時観測することで、約1か月で同サイズのデブリ存在の有無が判定できると指定している。

## 3 反省や研究室の学生の声

燃料デブリの状況を把握することは、デブリ除去の初期段階で必須であり社会的な期待も高い。実証実験結果の公表後、多くのメディアで紹介され、原は福島県の2つのテレビ局の要請に応じて出演し、検出器の説明をした。

燃料デブリ実証実験では各学年1名を充て、この活動を継続して実施できる体制にしている。修士1年の学生は「自分も東北出身であり、東日本大震災からの復興の役に立てることは嬉しく思っている。福島出身の友人からは「このような研究をしている人がいるということを知り、感動している。今後も頑張りたい」という言葉をもらい、よりいっそう頑張りたいと思った。研究に携わった当初は、このような簡単な装置で構造が見えるのかと思ったが、実際に解析して構造を見ることが出来たときは非常に感動した。現地での実験も現場になりつつあり、より気合が入っている。この実験で、少しでも復興に貢献できたらと思う。」と意気込みも高い。

## 4 今後の展望と課題

この検出器のひとつの特徴は約2m立方のサイズに収まるコンパクトさであり、これにより設置場所の制約が緩和でき、観測したい場所、観測に適した場所を選択して設置することが不可能ではない。実証実験およびこの特徴を評価され、田原典が研究開発機構(IRID)プロジェクトに採択され、今年度中に福島第一原子炉1号機のデブリ評価を開始する。

実証実験のための検出器製作は、高エネルギー加速器研究機構(KEK)の資金を用いて本学素粒子実験研究室が行ったものであるが、今後は、IRIDの受託を受けたKEKと協力して活動を進める。

放射能のない実証実験の環境下と異なり福島第一では約1mSv/hの放射線レベルがあり、測定装置はその環境下でも動作しなくてはならない。そのため、2014年8月に検出器の一部を福島第一に持ち込み鉄の遮蔽体を置くことで検出器の動作状況を確認した。これにより10cm厚の鉄で覆うことで環境放射線の影響を受けずに測定できると結論し、現在は遮蔽体を含めた検出器建設を進めている。来年2月からは2台の検出器を中心から30~40mの位置に設置して現場での測定を開始する予定である。

宇宙線ミュオン粒子は、大気分子と反応して生成され、空から降り注ぐものであり、福島第一では、燃料格納位置に降るデブリはこのミュオン粒子を使って観測できる。しかし、圧力容器を突き抜けて落ち格納容器まで達したものは地表に検出器を置く現在の予定では観測できない。現IRIDの計画には盛り込まれていないが、地面を掘って地下からミュオン粒子を観測することができれば、そのようなデブリにも感度があるはずである(図4)。実際に特定長の地面を通してミュオン粒子の分布を測定できるかの検証実験をKEKの施設で実施している。

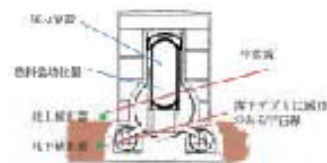


図4 地下に設置し地下デブリを観測できるか

## 今後の発展

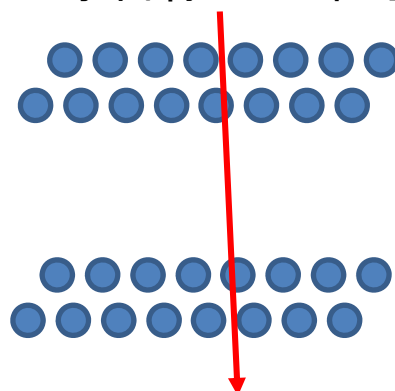
## 社会インフラの透視



橋梁点検車(目視、ハンマー、クラックゲージ)



宇宙線ミュオン粒子を使う

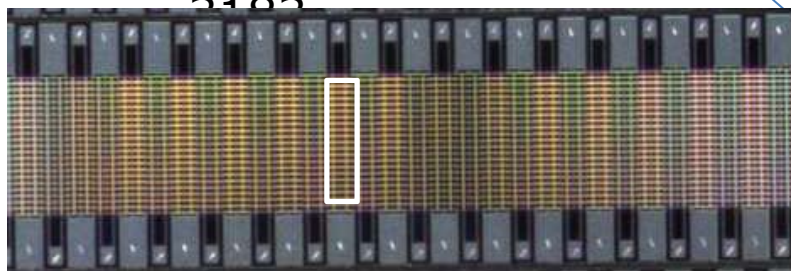


シンチファイバー~1mm径  
(CDF SciFiで開発済み)  
詳細な要求は要検討

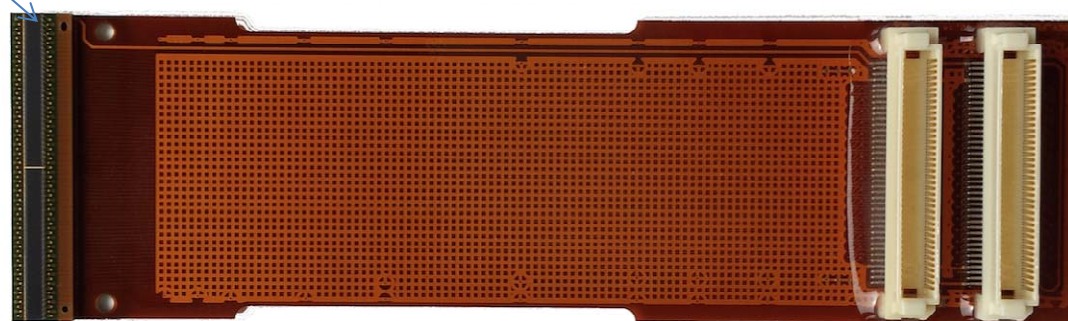
XY読出しの最適化が必要

LHCb MPPC array

Hamamatsu S10943-  
3102



Sensitive area:0.23mmx1.5mm  
(96pixels)  
Pitch=0.25mm



64chx2 readout cable

# まとめと展望

## 宇宙線を用いた大規模構造の透視

- KEK
- 測定装置を開発し、原子炉の透視性能を実証
  - 福島1号炉での燃料棒の現状を確認(ほぼ溶け落ちている)
  - 福島2号炉の観測(検討中)
  - 溶け落ちたデブリの観測のために
    - KEK地下からの観測実証
    - 水平ミュオンの頻度と運動量の測定
    - 検出器の小型化による現場への適用
- IRID/KEK

## 宇宙線を用いた社会インフラの透視