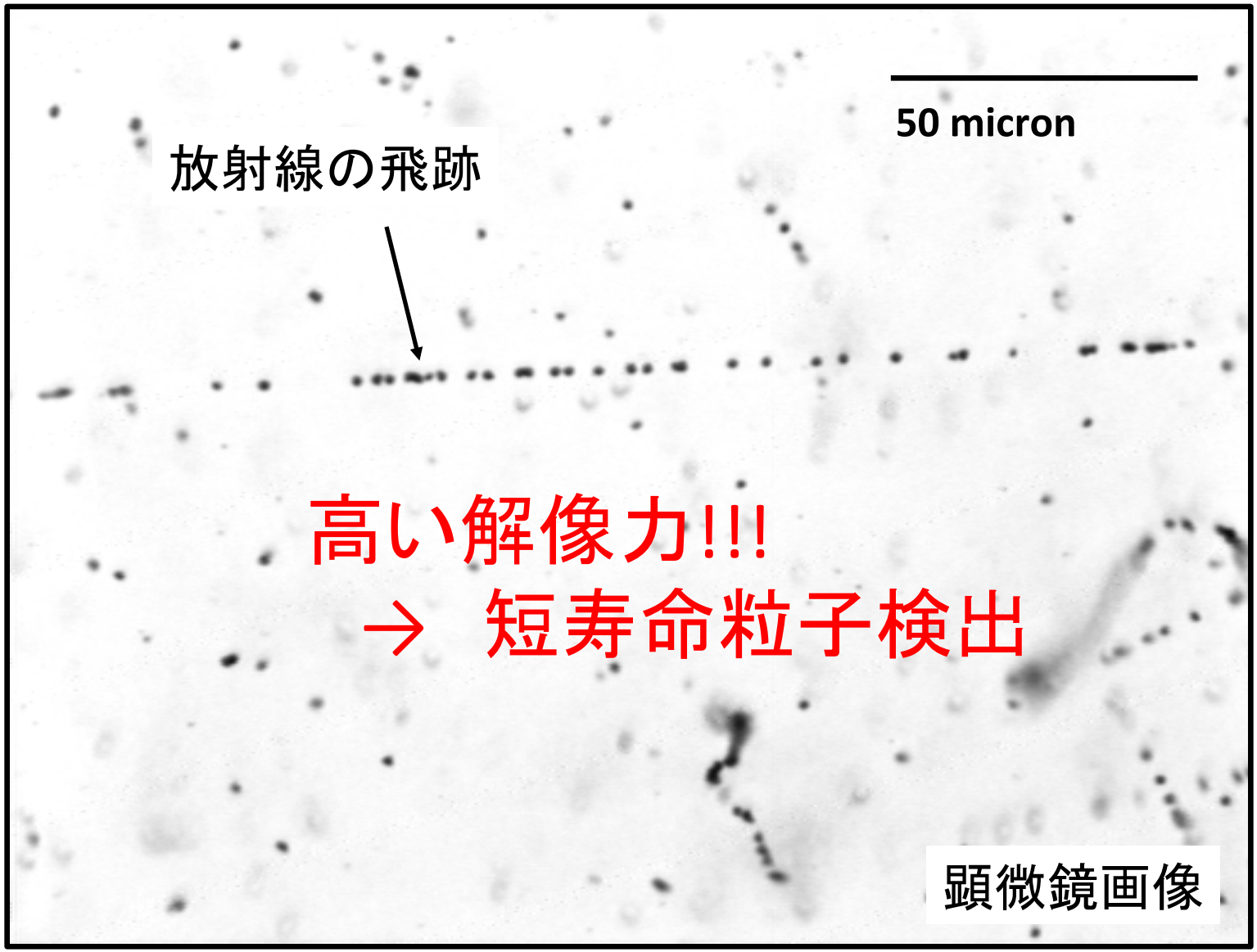
原子核乾板自動解析システムの開発と応用

名古屋大学　F研
森島　邦博

原子核乾板の光学顕微鏡像

Sub micron crystal 3D tracking device

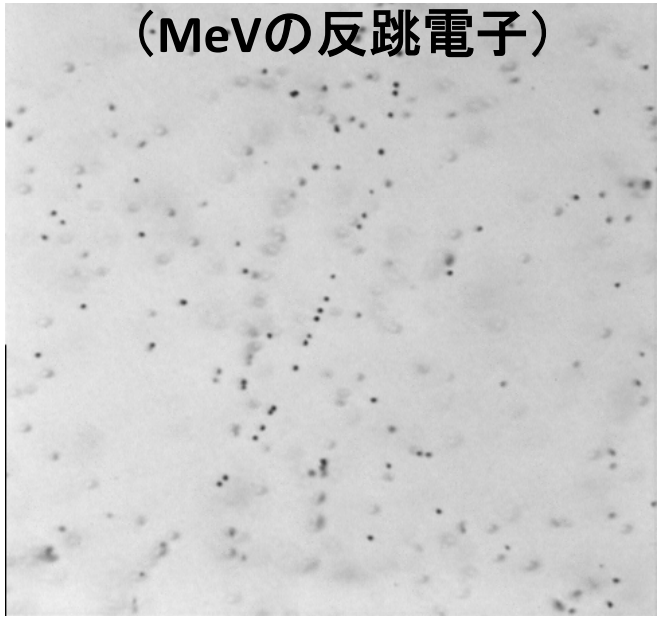


原子核乾板による放射線計測

銀粒子サイズ~1μmの解像力
3次元形状・濃さを認識

陽子・中性子

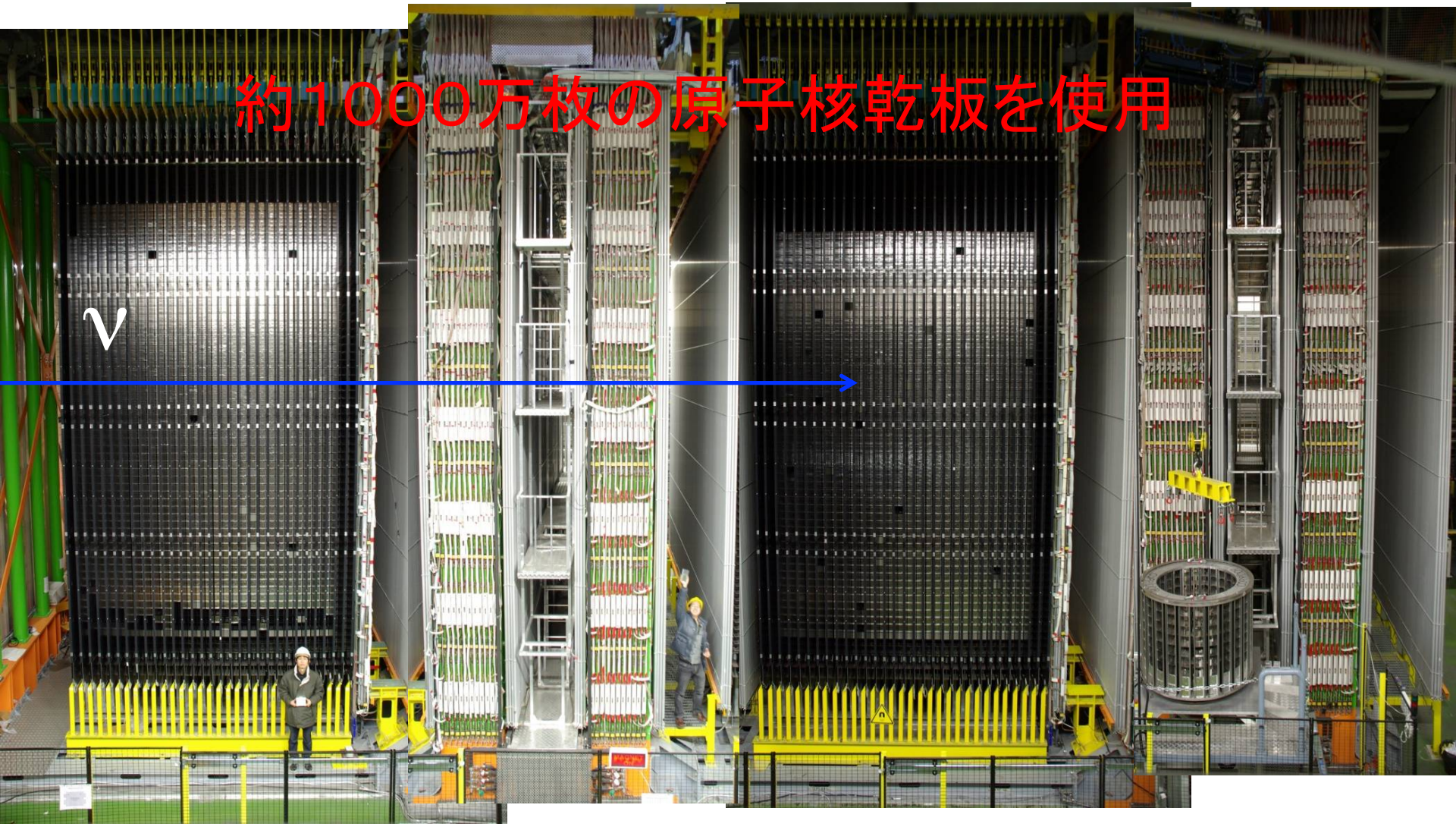
電子・ガンマ線
（MeVの反跳電子）



宇宙線ミューオン
（最小電離粒子）

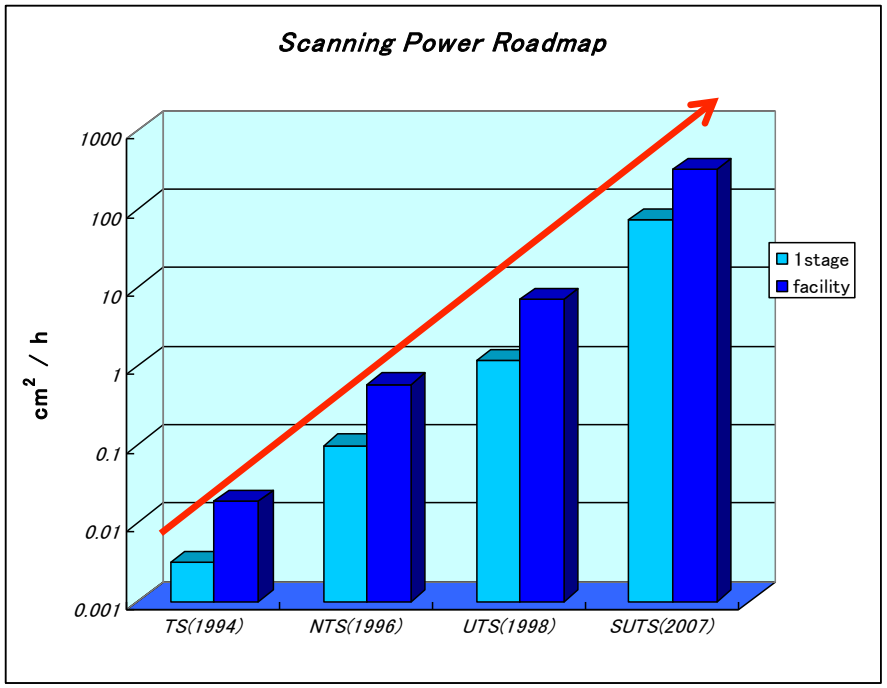
顕微鏡画像

ニュートリノ振動直接検出実験OPERA



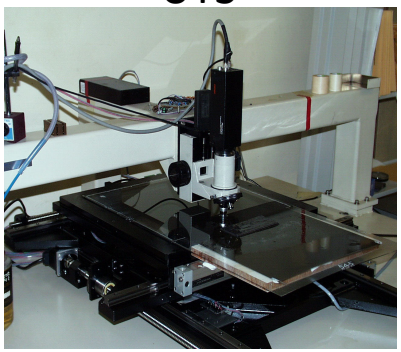
超高速自動解析を前提とした史上最大規模の原子核乾板実験

原子核乾板自動飛跡読み取り装置
Track Selector の歴史

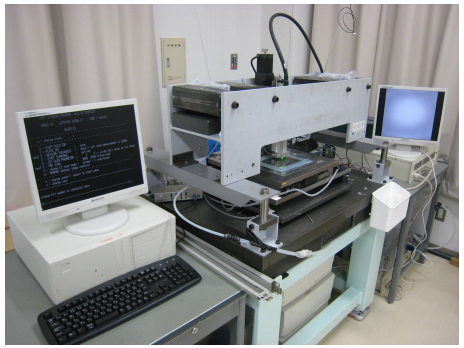


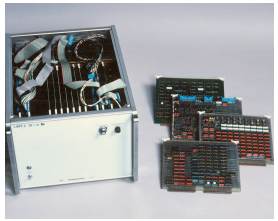
実験規模と技術の発展と共に進化

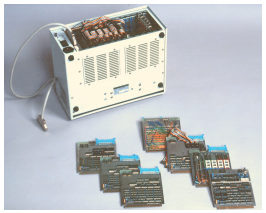
UTS

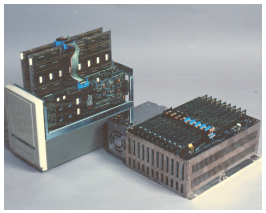


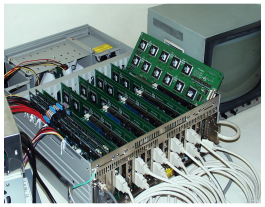
S-UTS：OPERA

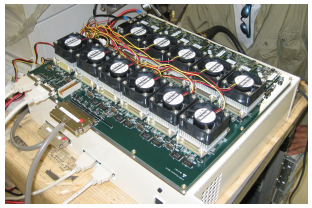








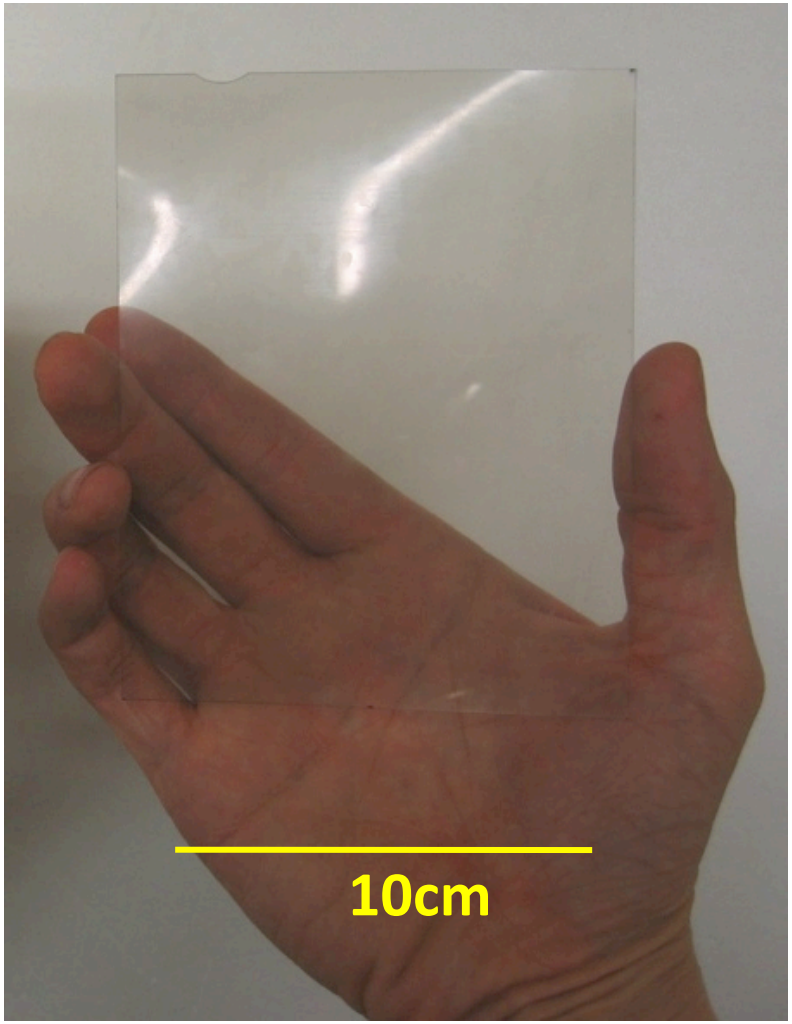




EarlyTS	TS（0.0025）	NTS（0.08）	UTS（1cm²/h）	S-UTS（72cm²/h）	HTS（~10⁴cm²/h）
	CHOUS	CHORUS	DONUT	OPERA	次世代
1985	1994	1996	1998	2006~	2014~

機械塗布原子核乾板：OPERAフィルム

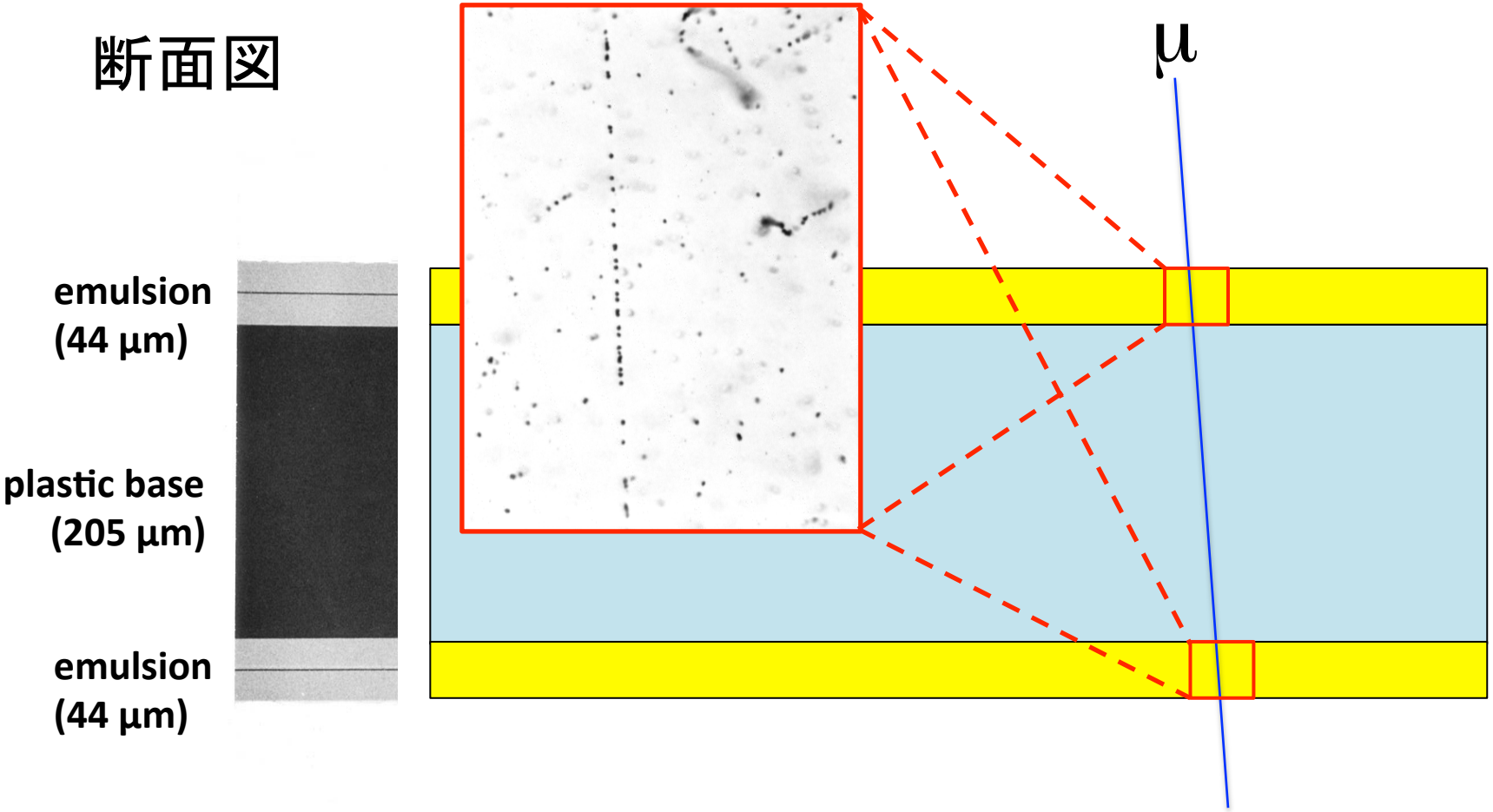
名古屋大学と富士フイルムの共同開発



断面の電子顕微鏡写真

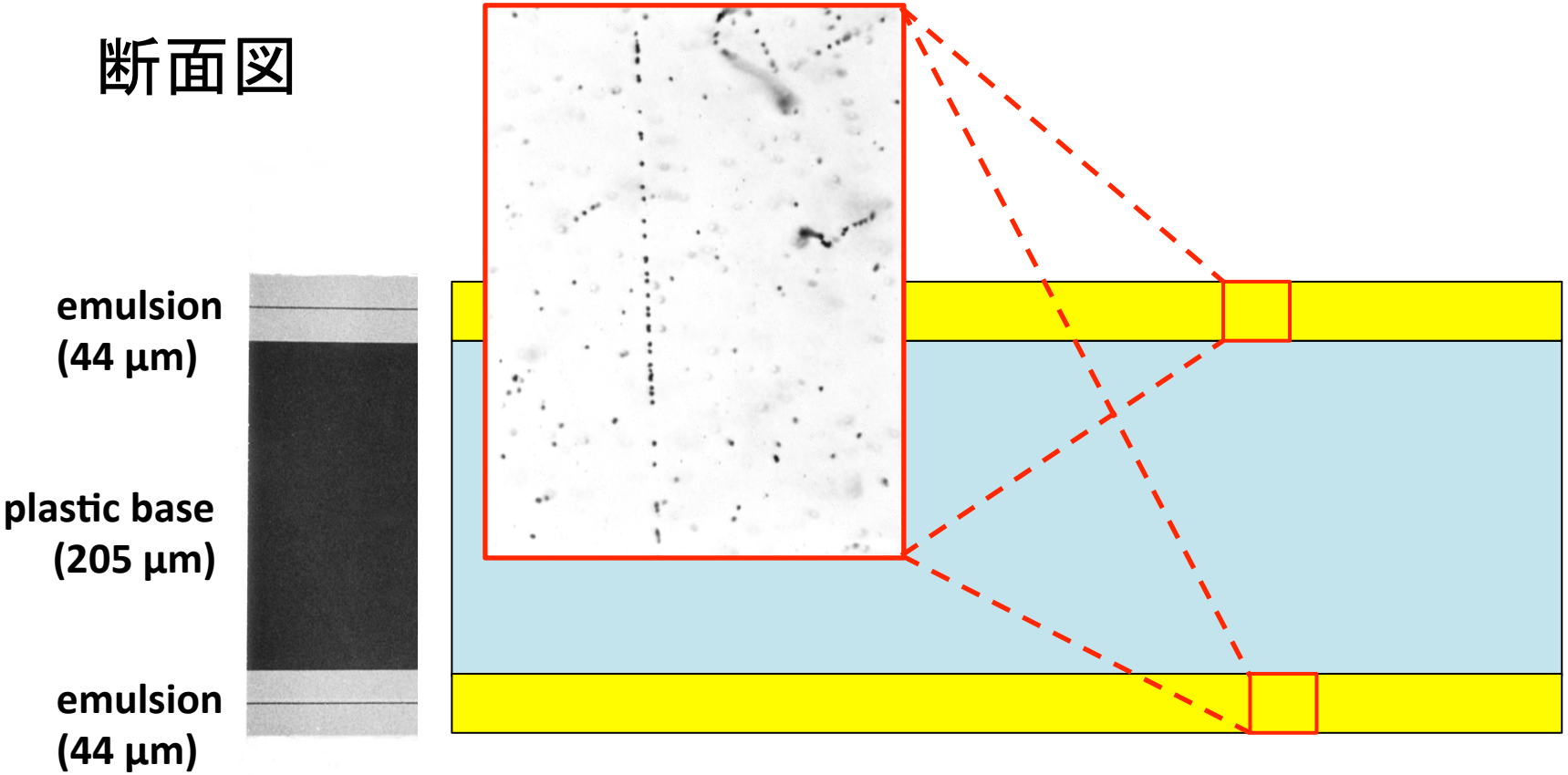
原子核乾板OPERAフィルムの構成

断面図

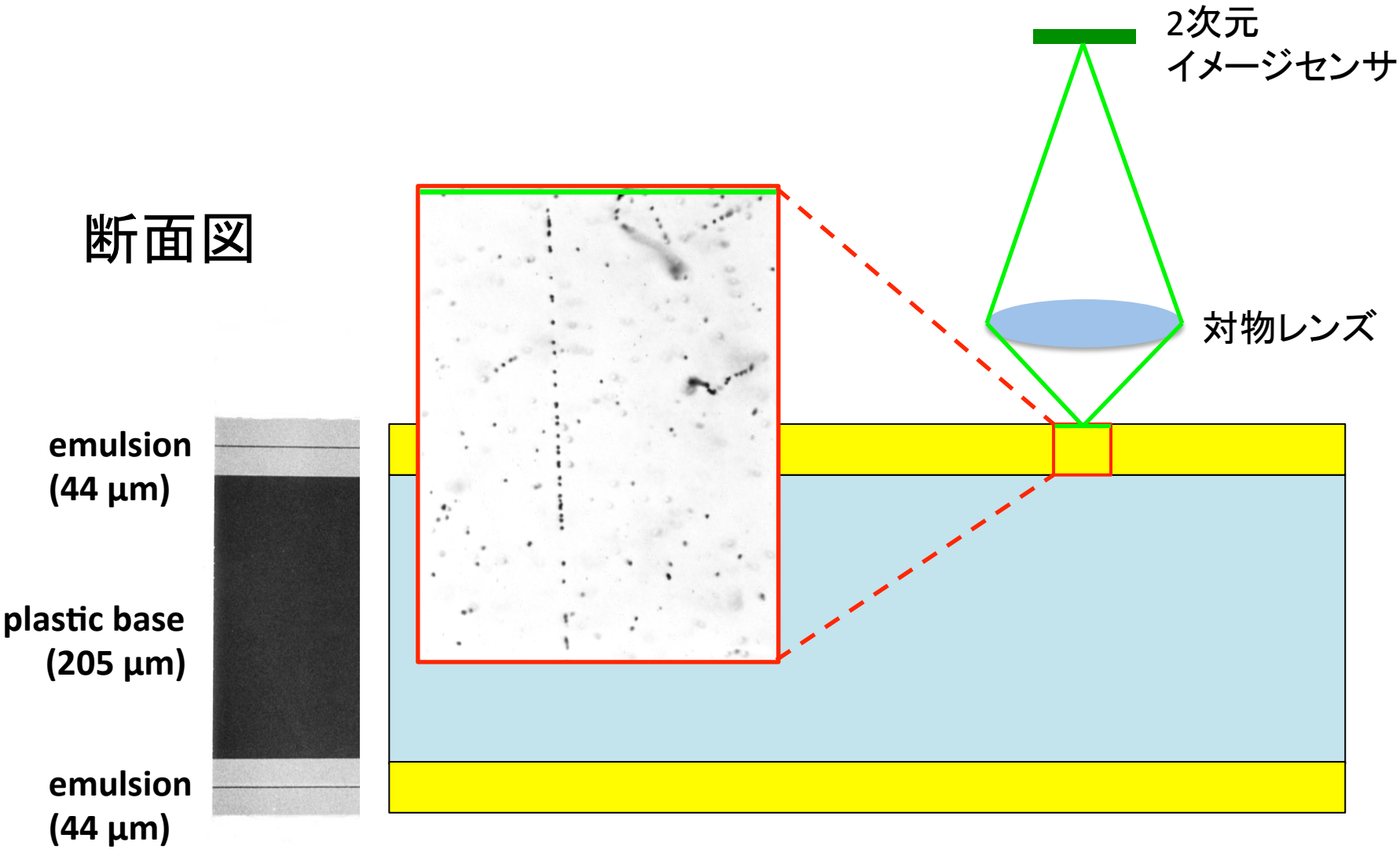


原子核乾板の読み出し

断面図

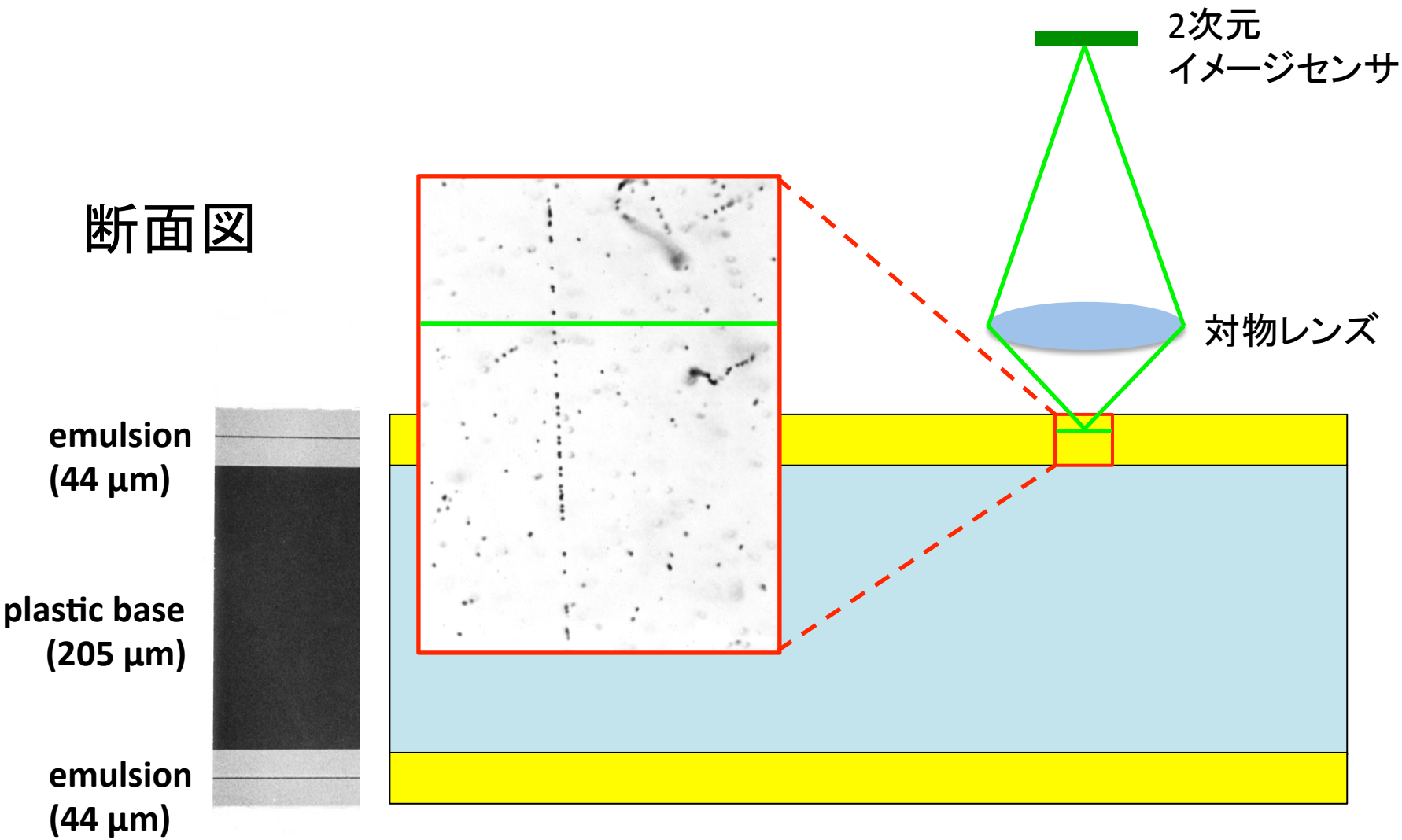


原子核乾板の読み出し


2次元
イメージセンサ
対物レンズ
断面図
emulsion
(44 µm)
plastic base
(205 µm)
emulsion
(44 µm)

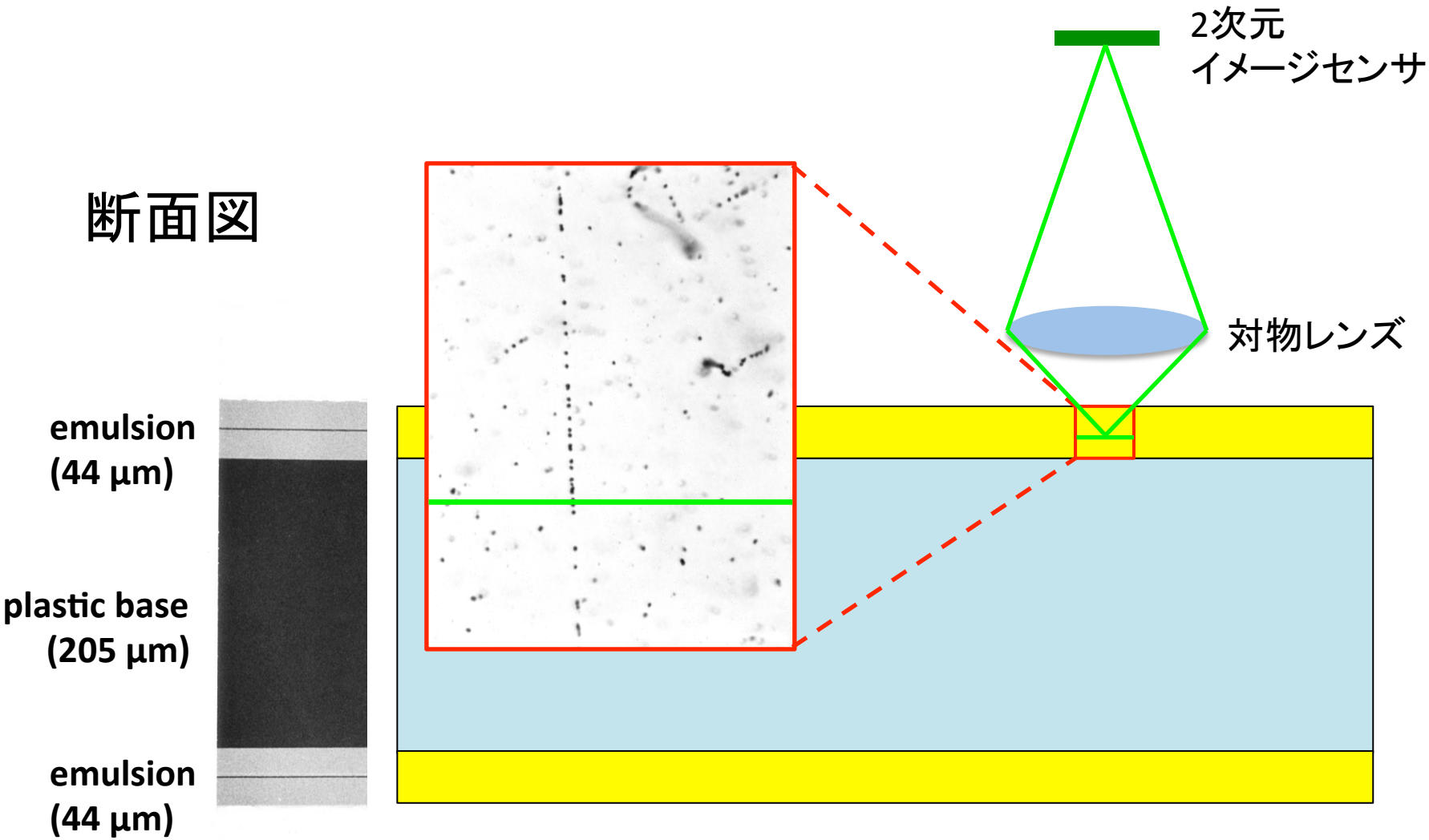
原子核乾板の読み出し

断面図



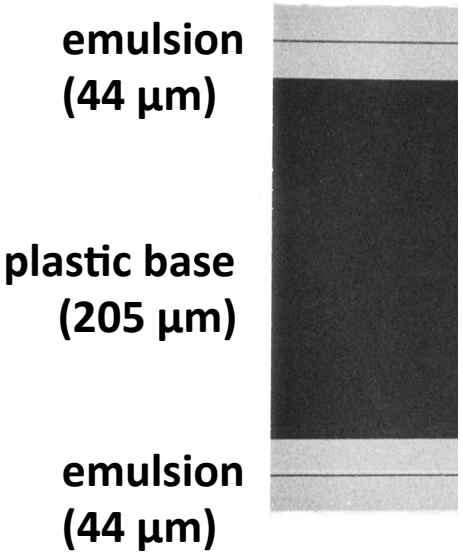
原子核乾板の読み出し

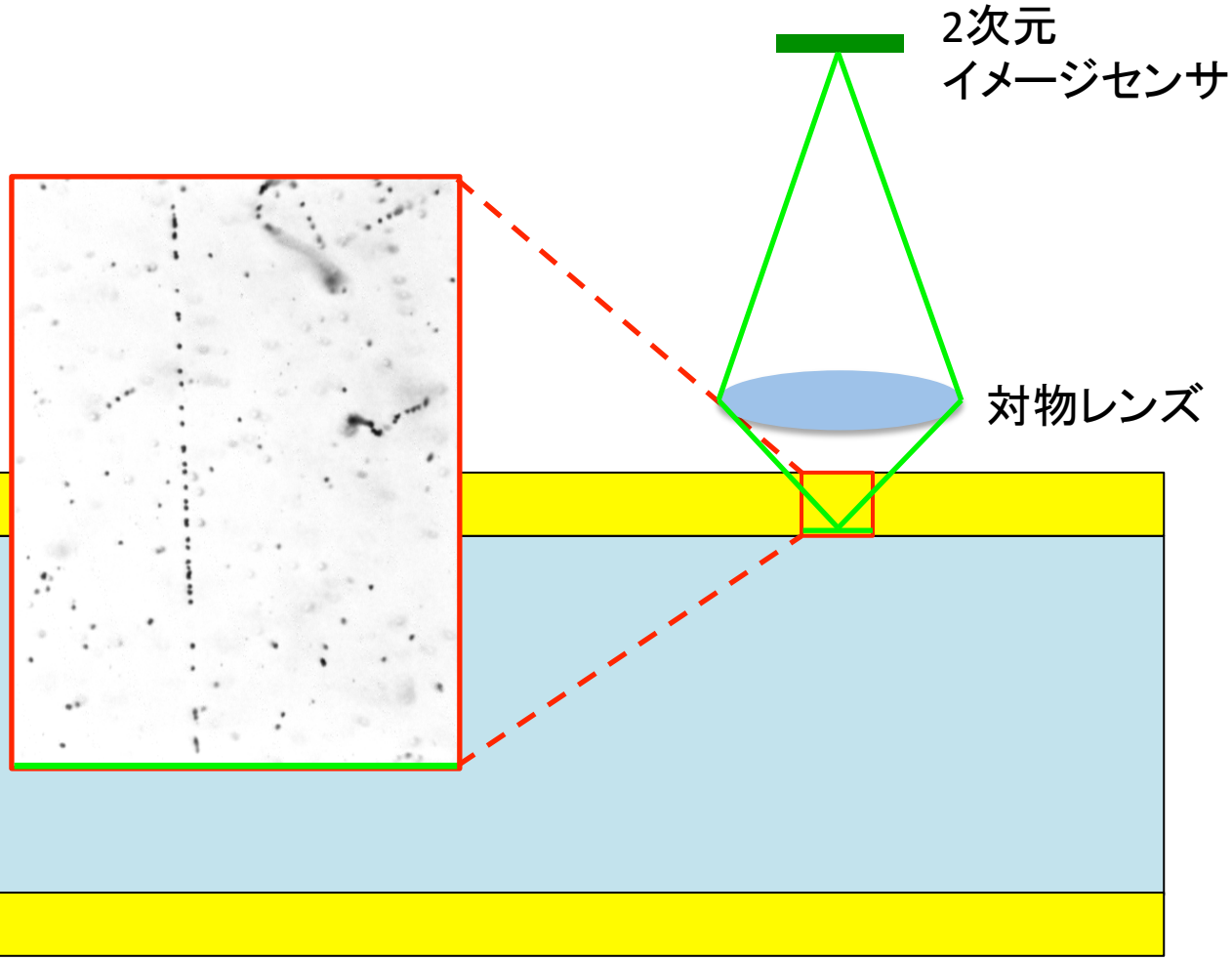
断面図



原子核乾板の読み出し

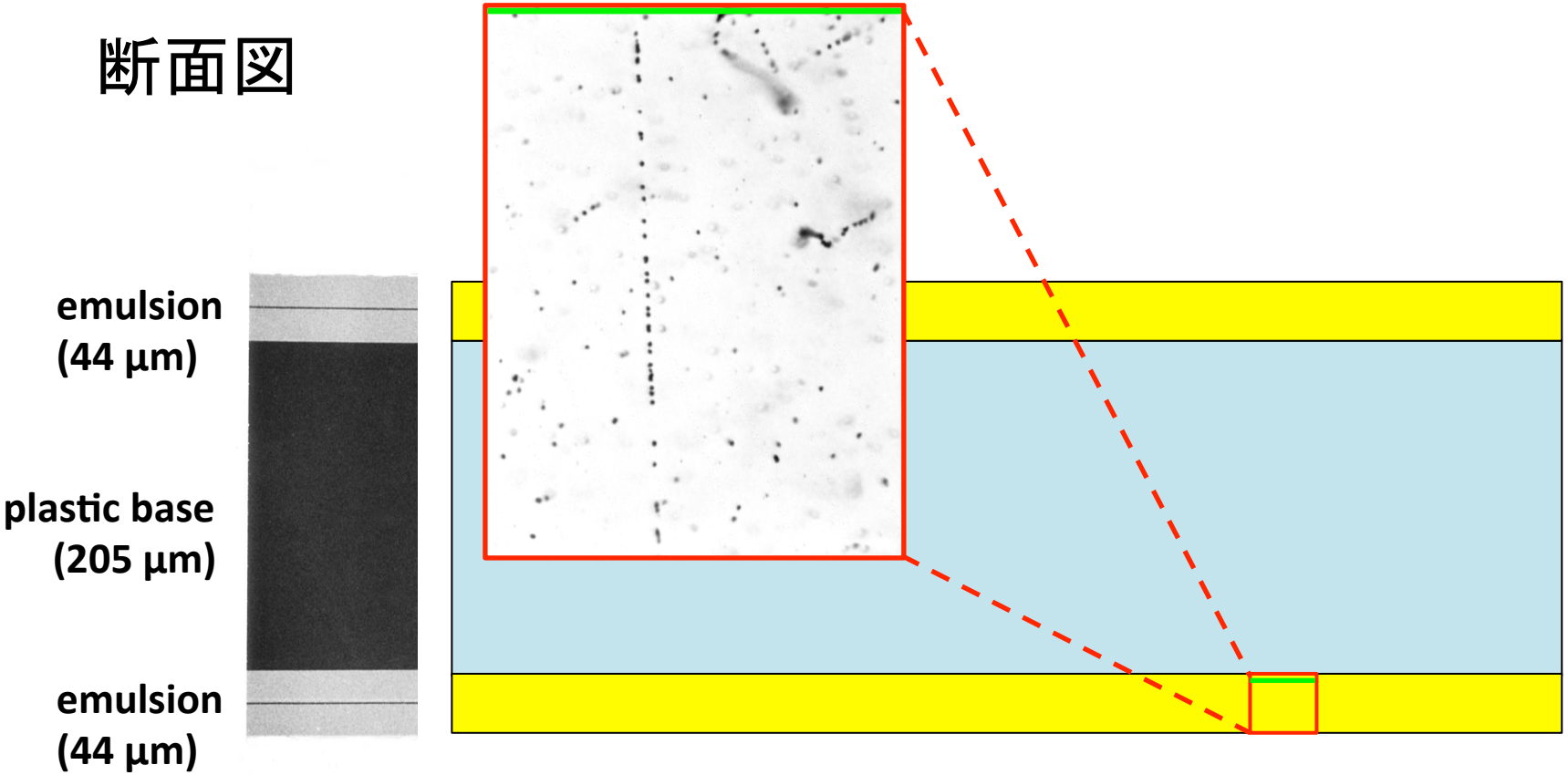
断面図





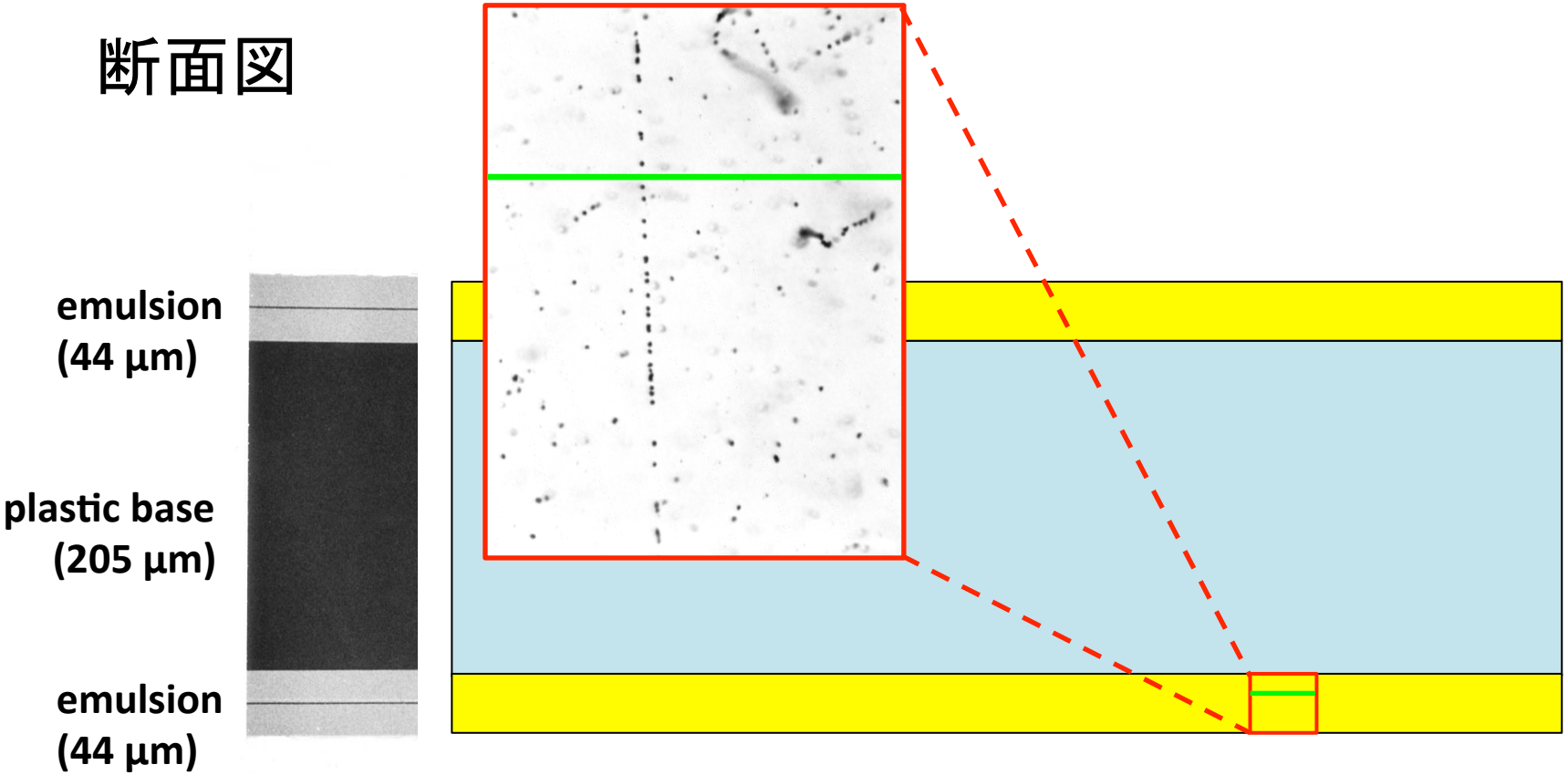
原子核乾板の読み出し

断面図



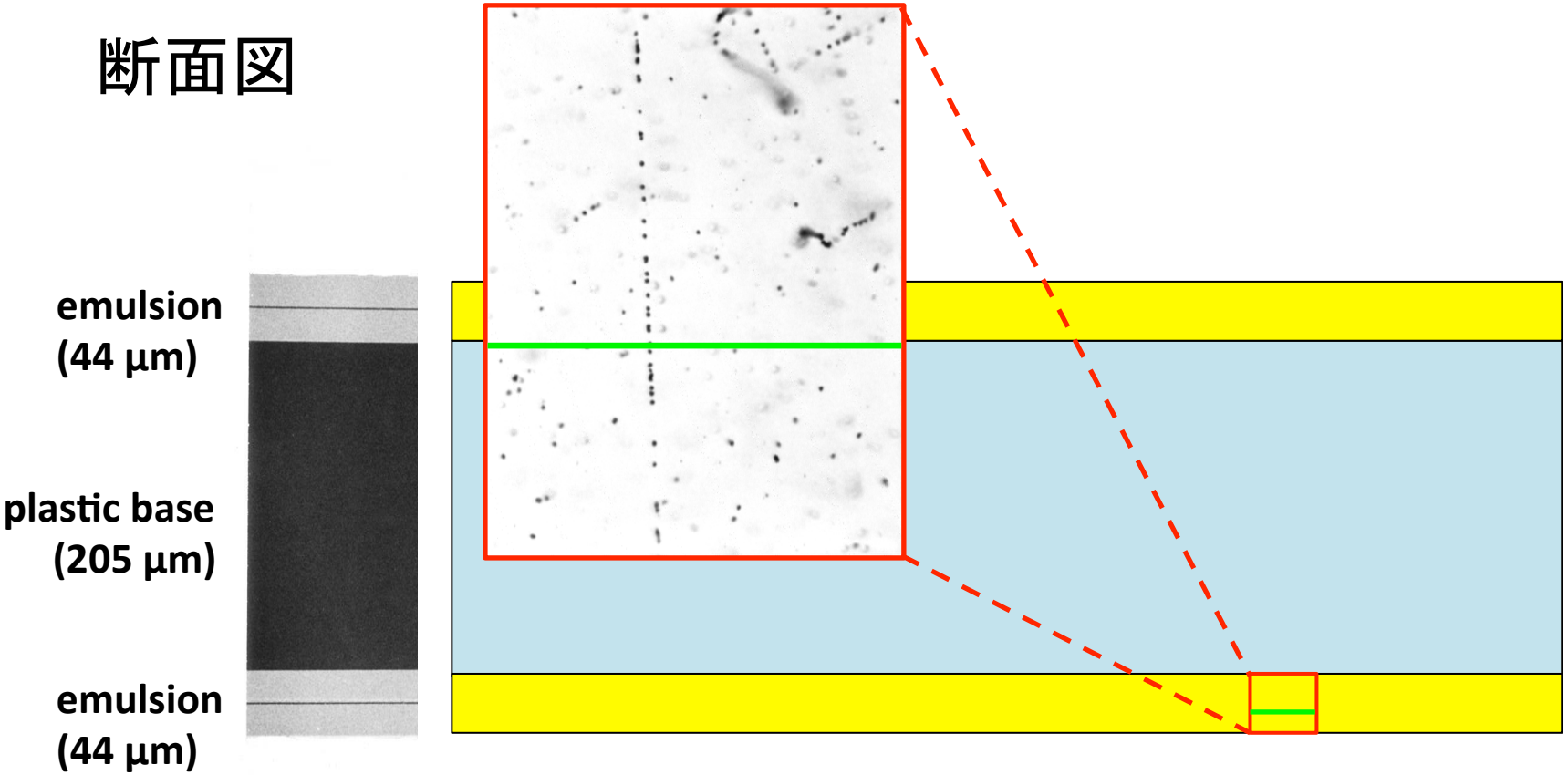
原子核乾板の読み出し

断面図



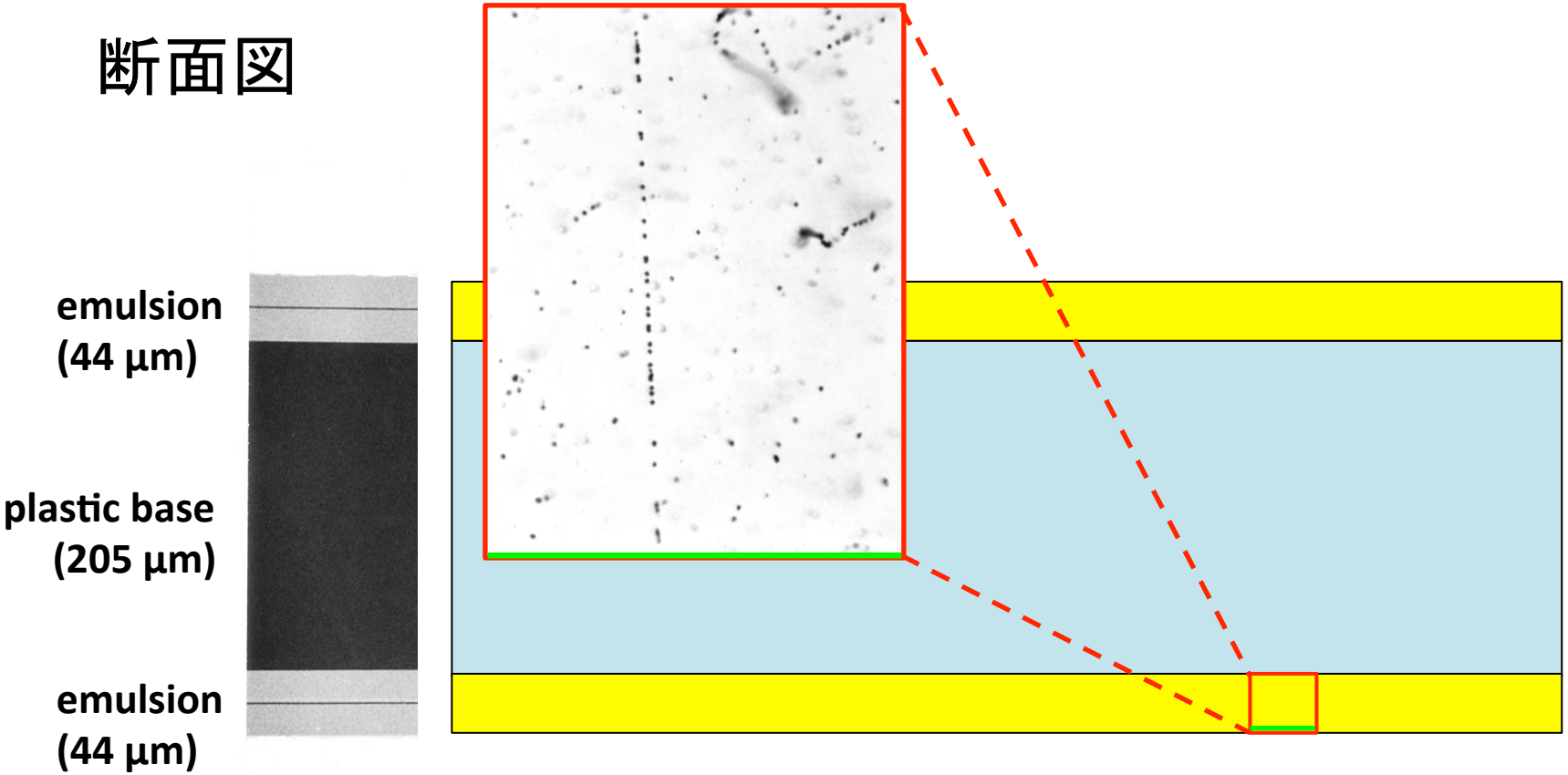
原子核乾板の読み出し

断面図

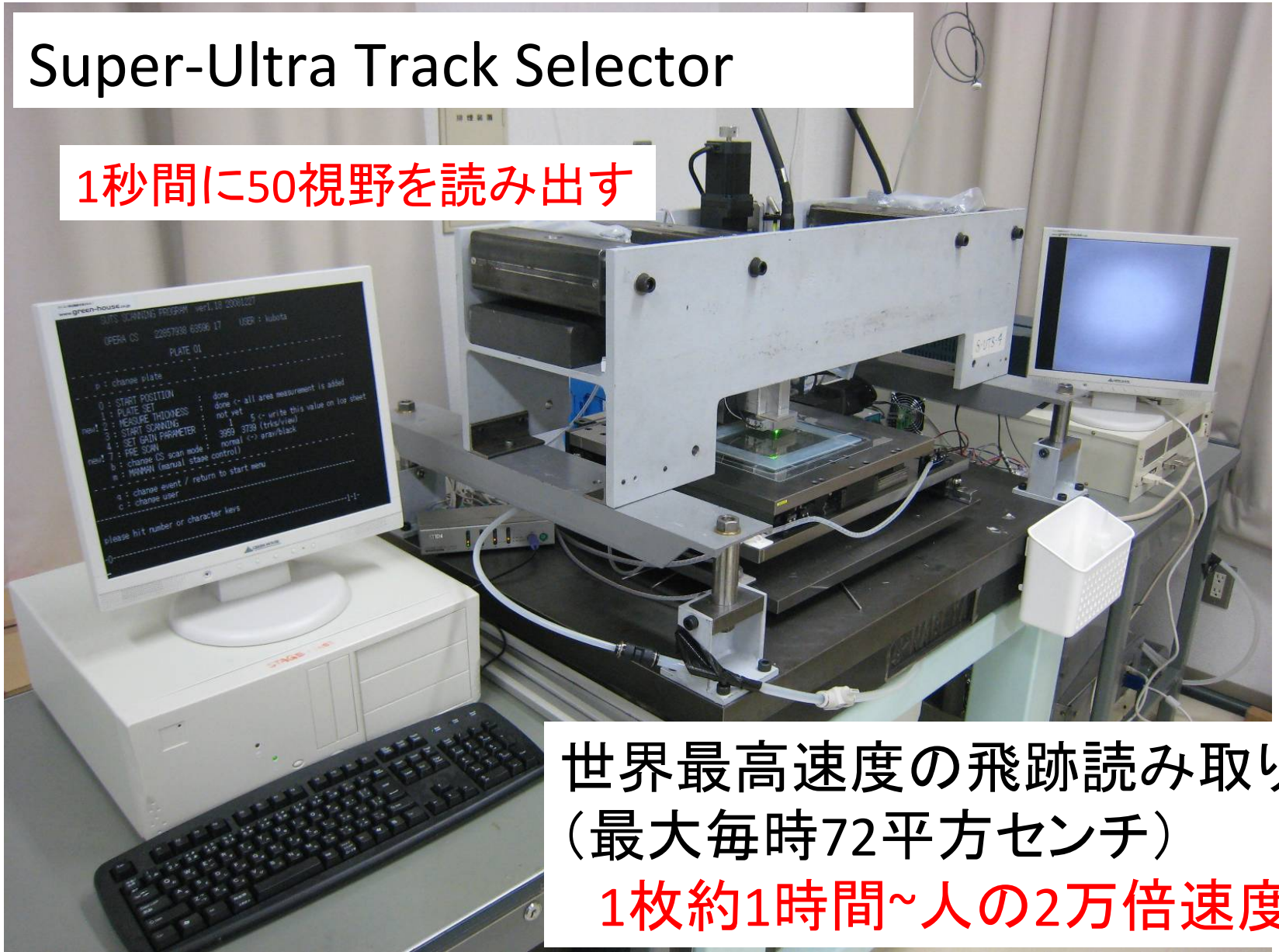


原子核乾板の読み出し

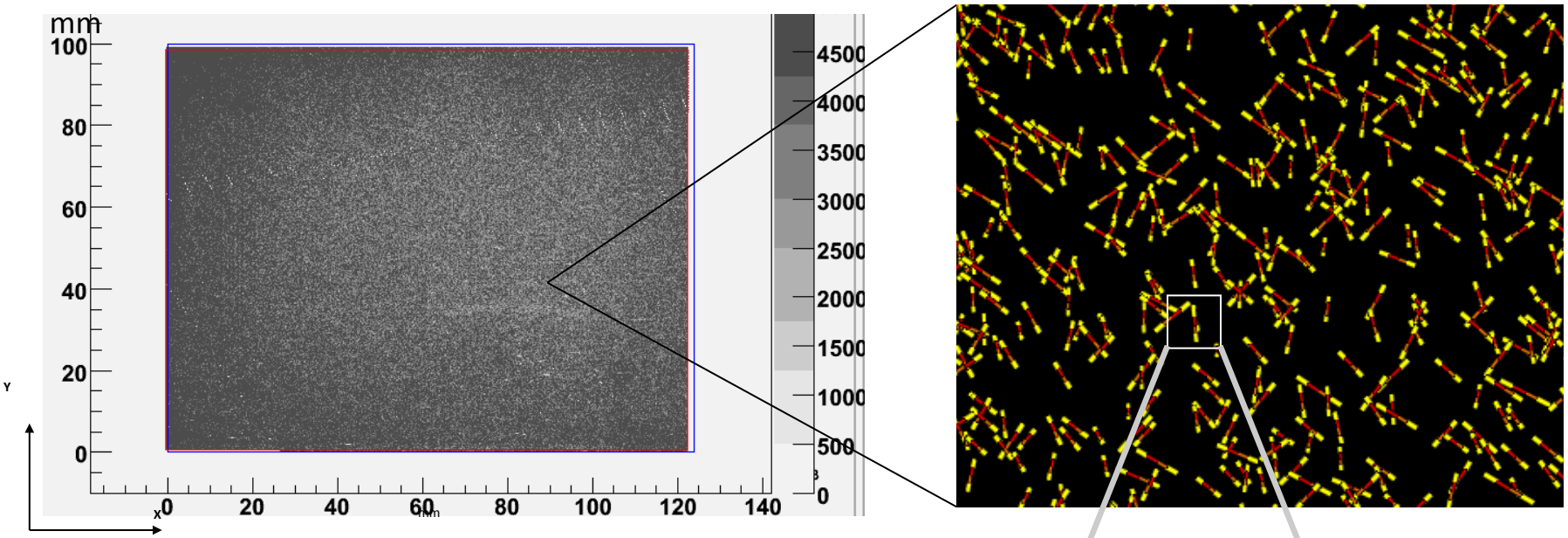
断面図



原子核乾板の自動飛跡読み取り装置S-UTS

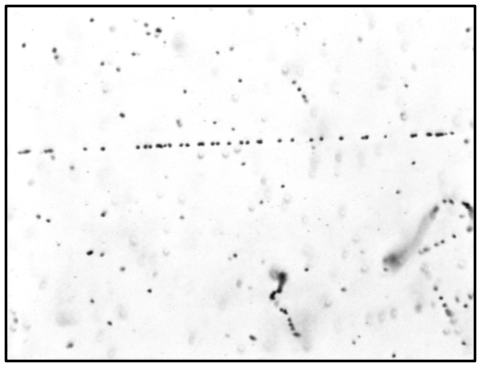


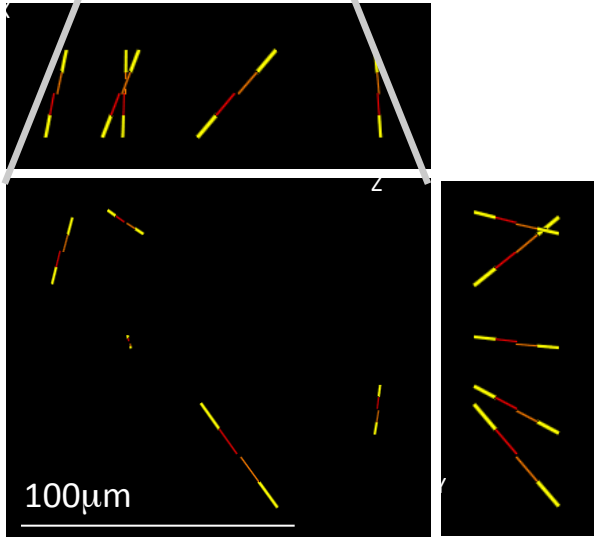
読み出した三次元飛跡情報の生データ



読み取られた飛跡の位置分布
（OPERAフィルム１枚全面、総飛跡本数約１億本）

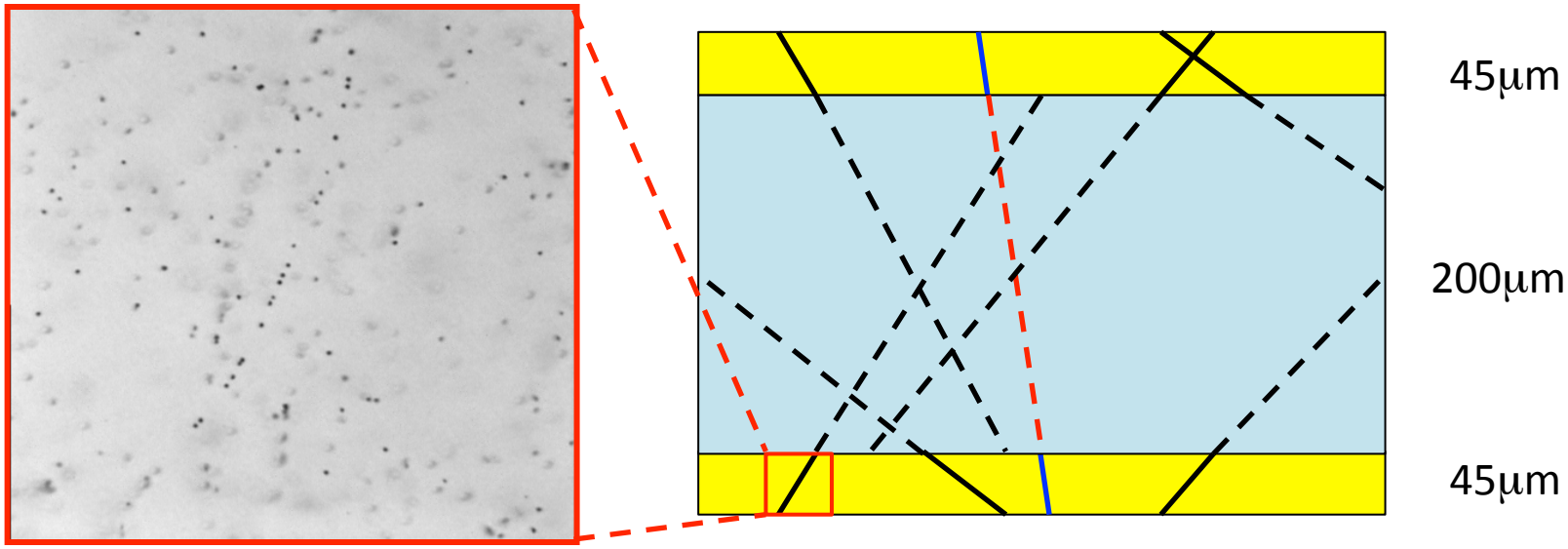
顕微鏡1視野





大量なバックグラウンドデータ中での飛跡の選び出し

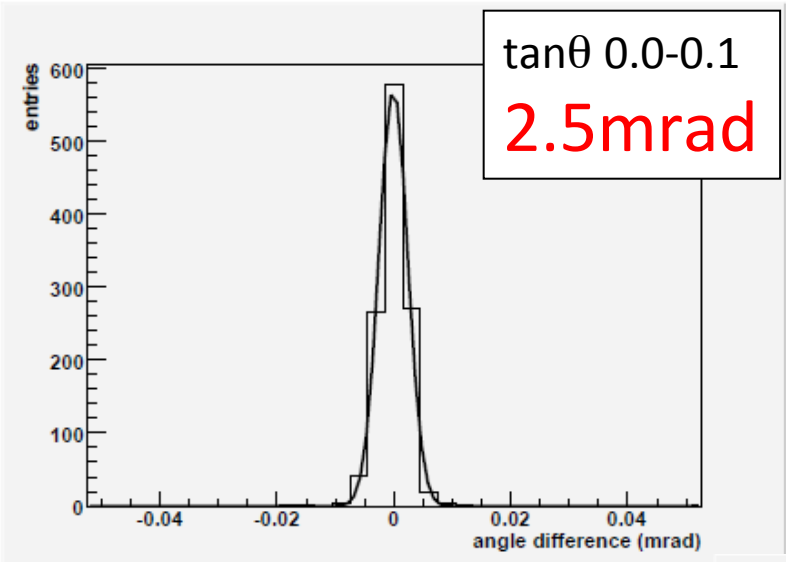
両面乳剤層で認識された飛跡情報から高エネルギーミューオンの飛跡を選別する

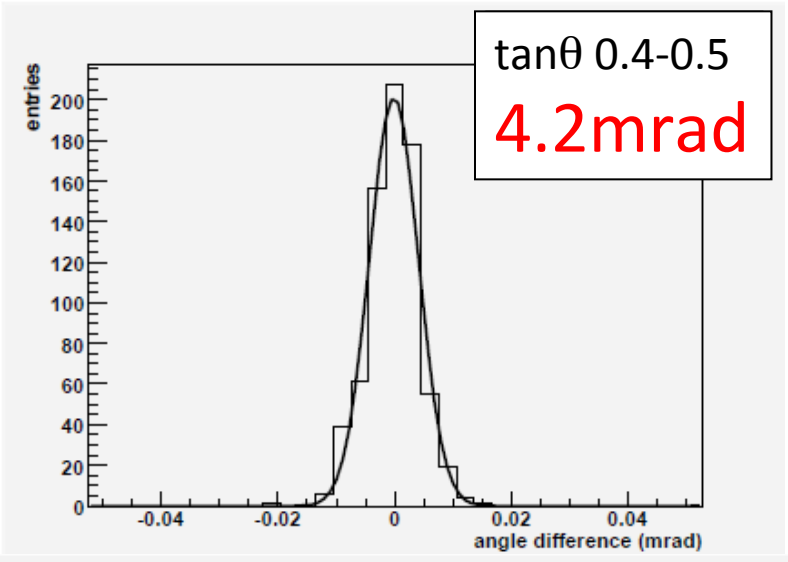


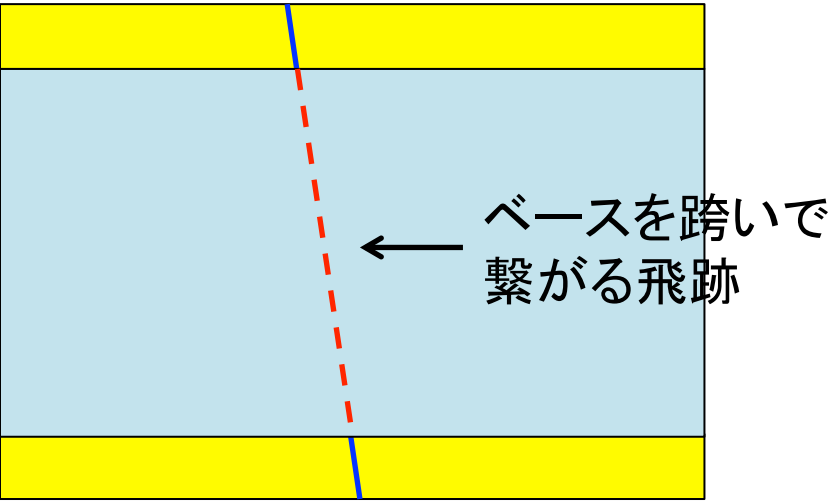
蓄積された環境放射線による
低エネルギー電子飛跡が
主要なバックグラウンド

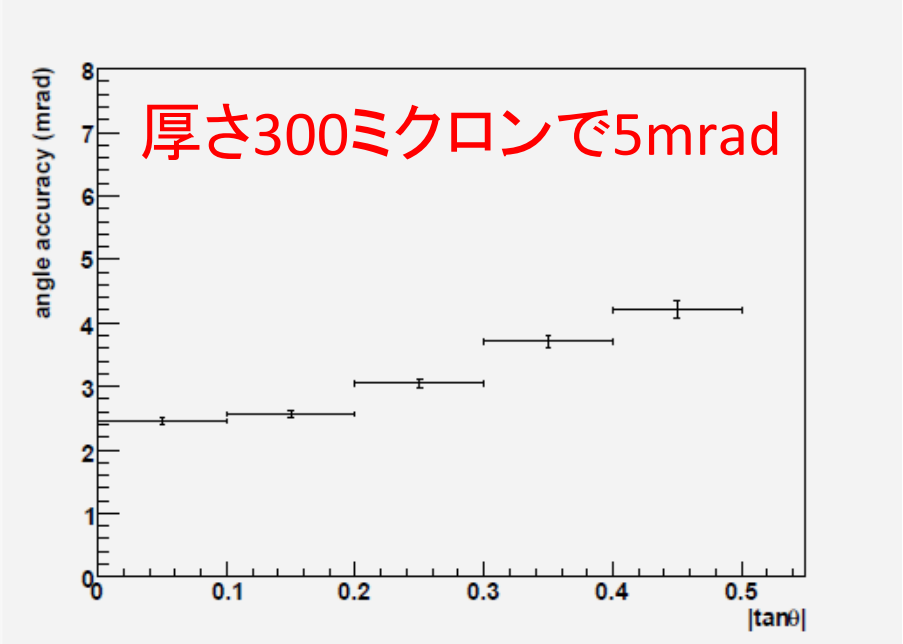
ベースを跨いで繋がる飛跡を全組み合わせで探索
→ ノイズ除去

S-UTSによるOPERAフィルム読み出しの角度精度

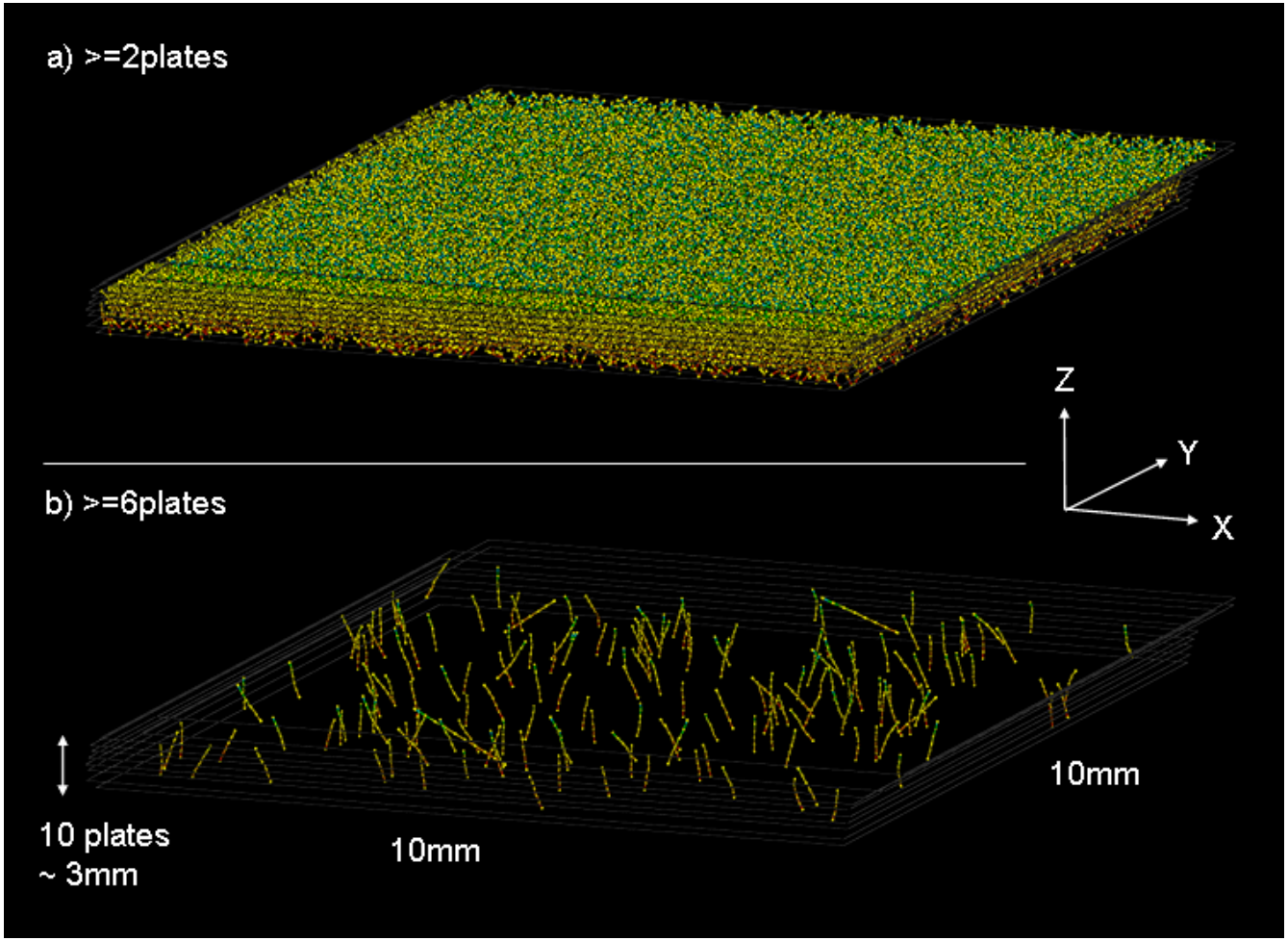






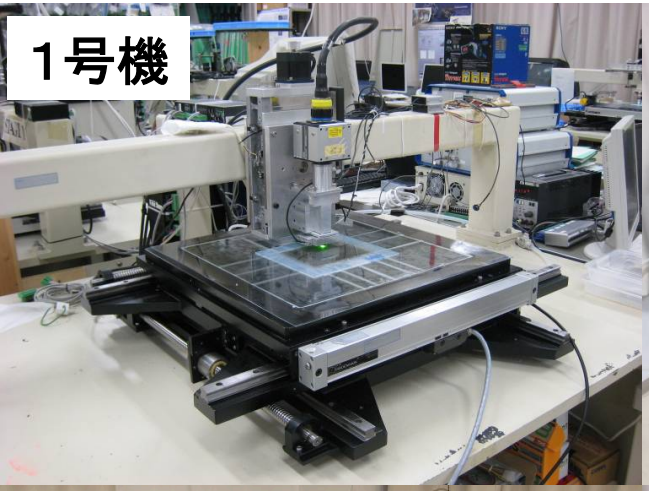


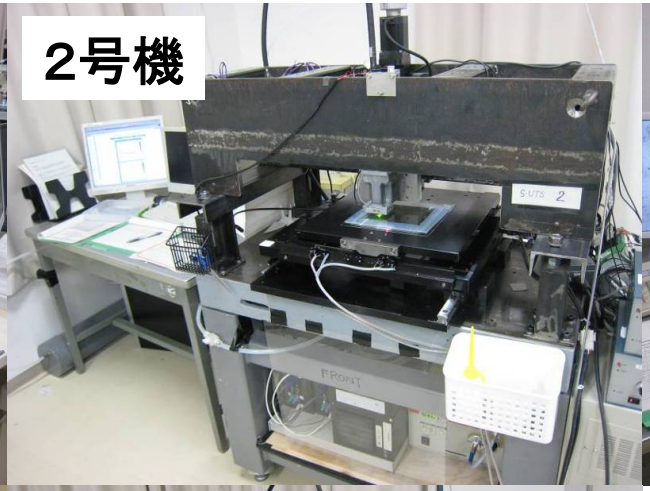
読み出した飛跡の3次元飛跡再構成技術 (NETSCAN法)

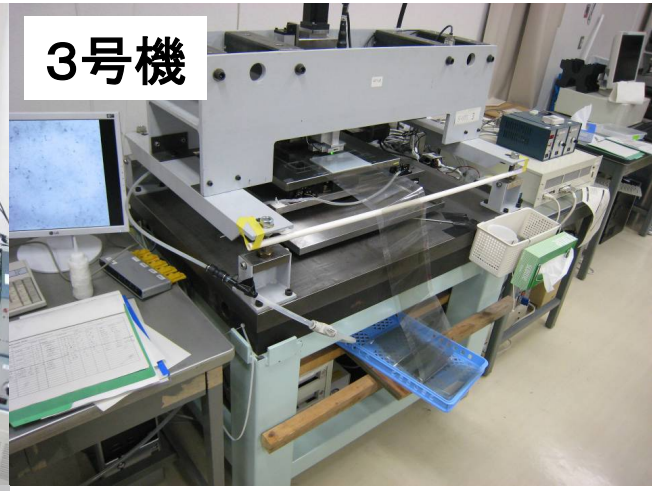


14MeV高エネルギー中性子の3次元再構成

ニュートリノ振動実験OPERAのための
超高速自動飛跡読み取り装置S-UTSの開発（2007～）







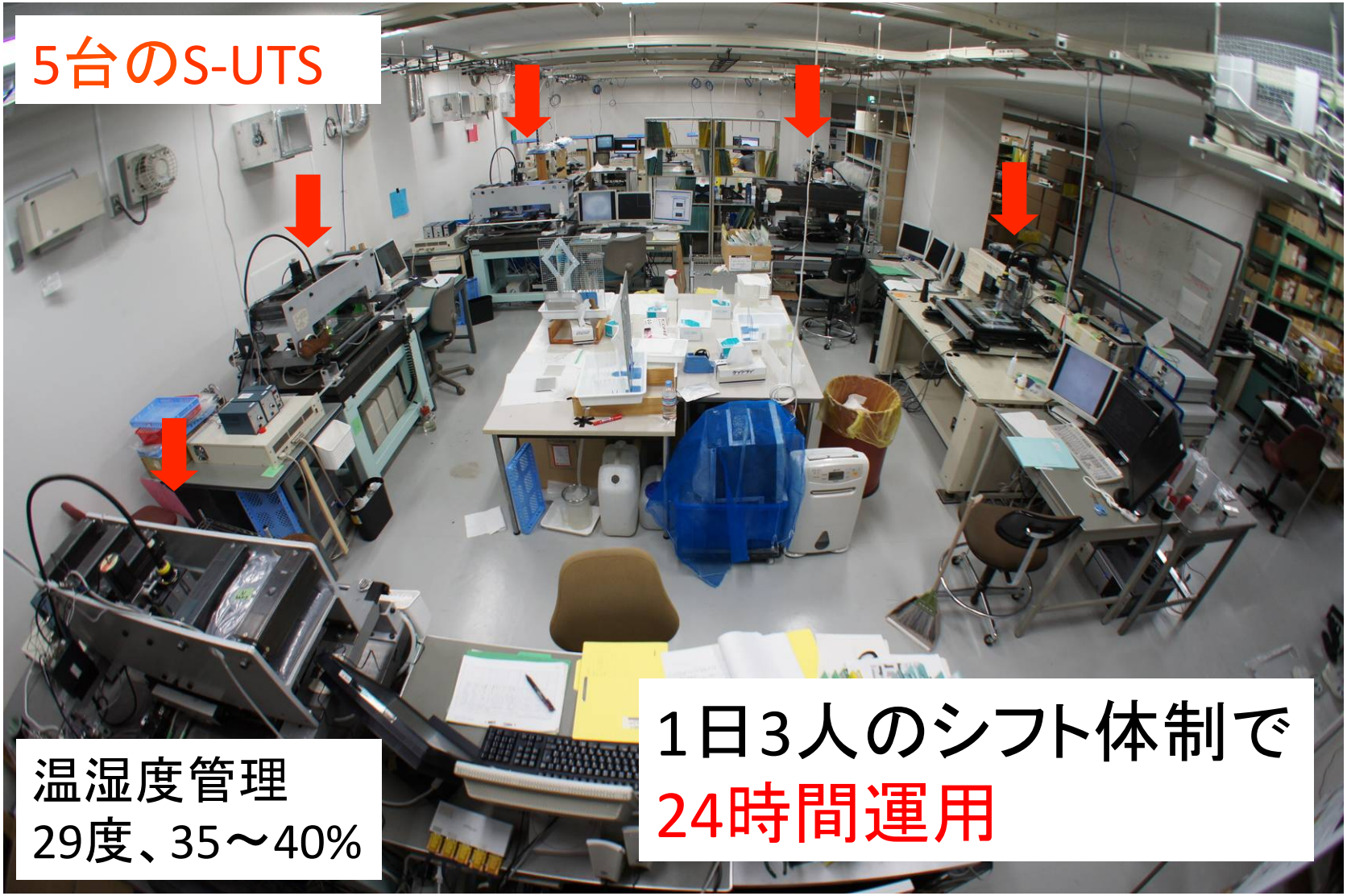
性能
位置精度：0.5μm
角度精度：3mrad
OPERAフィルムに対する
MIP検出効率：95%

全5台のS-UTSによるピーク読み取り速度 ~ 300 cm^2/h

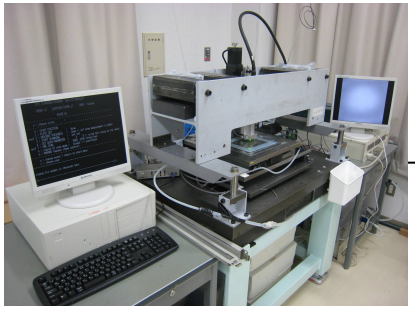
→ 博士（理学）の学位を取得（「超高速原子核乾板自動飛跡読み取り装置S-UTSの開発とその基本特性」）

名古屋大学素粒子飛跡読み取り室

（理学部新D館1階）



S-UTSオンラインシステム



飛跡情報

30GB/h

オンライン
データ処理
PC

処理結果

データ
サーバ

チェック結果

オンラインモニタ
ディスプレイ

SUTS-02

RUNNING

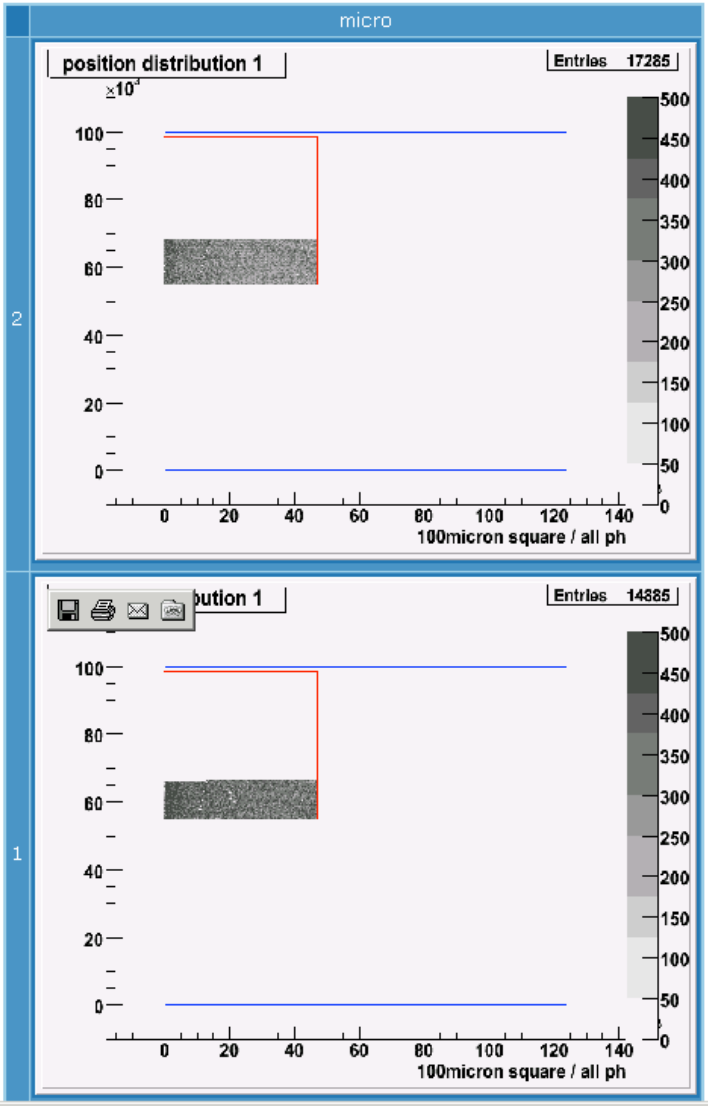
naka

OPERA_CS
902150 15170710 PL02

end time
Sat Jan 16 16:41:29 2010

S-UTS 02 - online data taking monitor -

plot | scanning parameter | detail infomation



SUTS-02

RUNNING

naka

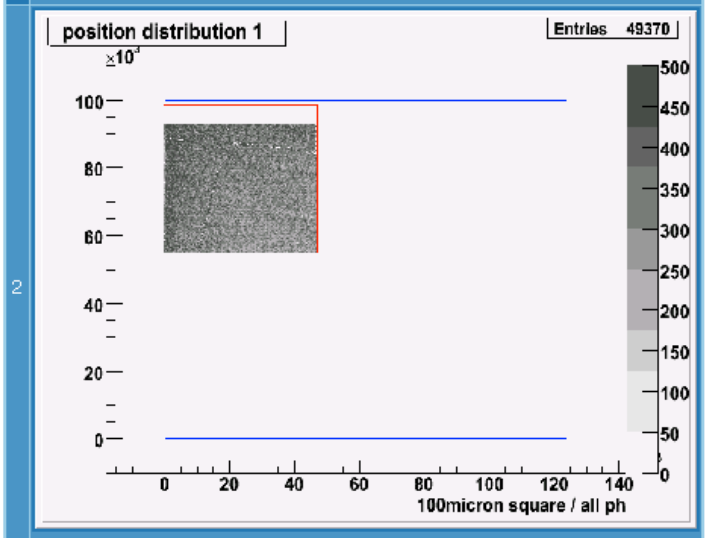
OPERA_CS
902150 15170710 PL02

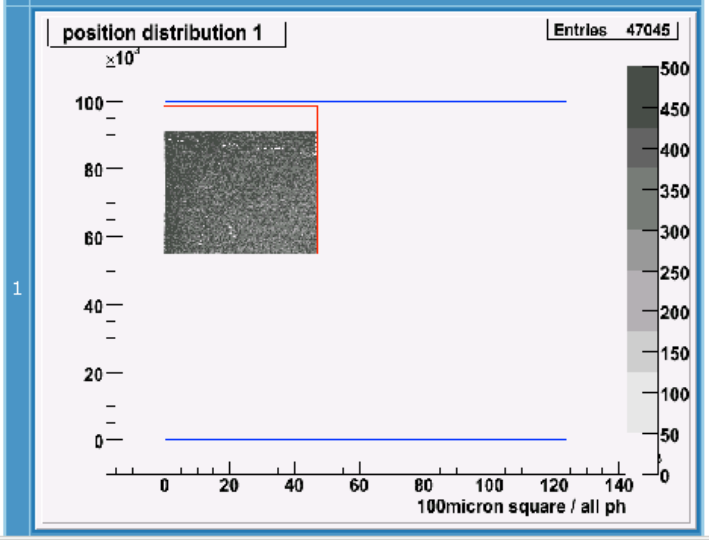
end time
Sat Jan 16 16:44:24 2010

S-UTS 02 - online data taking monitor -

plot | scanning parameter | detail infomation

micro





SUTS-02

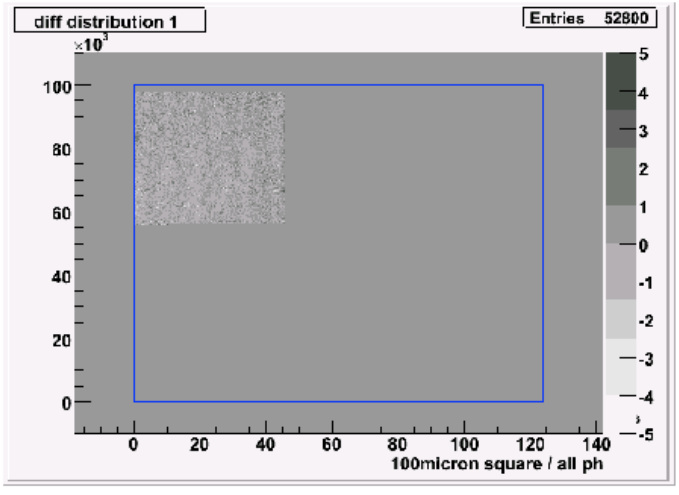
FINISHED

naka

OPERA_CS
902150 15170710 PL02

end time
Sat Jan 16 16:44:20 2010

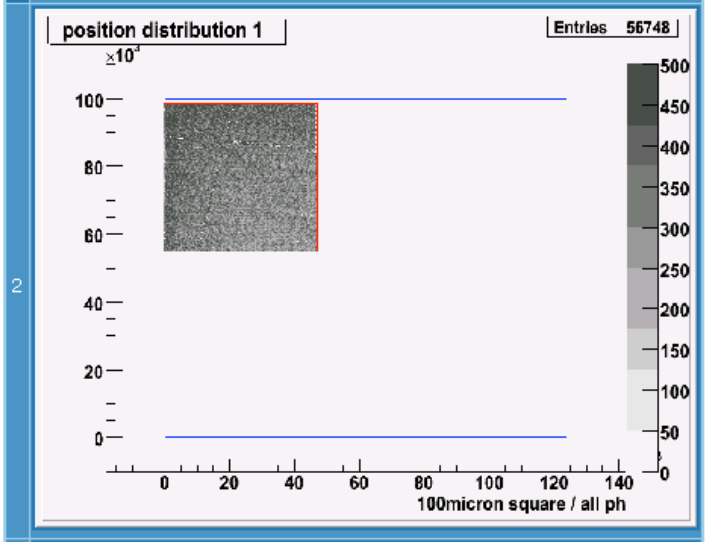
PLATE SET QUALITY : good

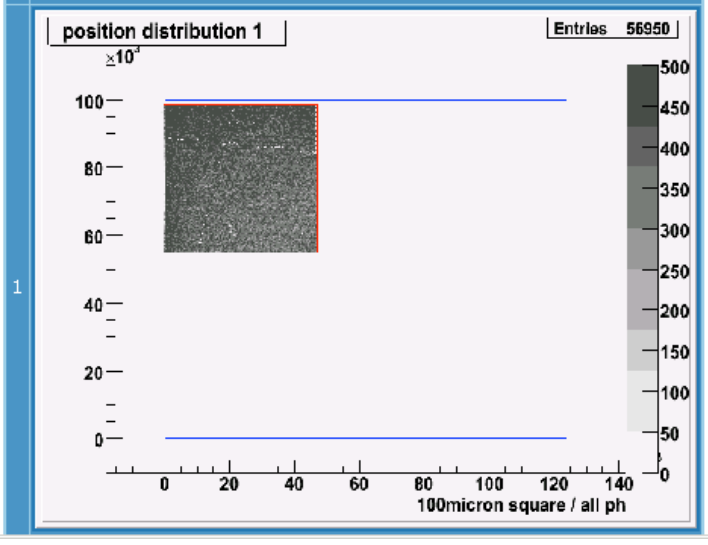


S-UTS 02 - online data taking monitor -

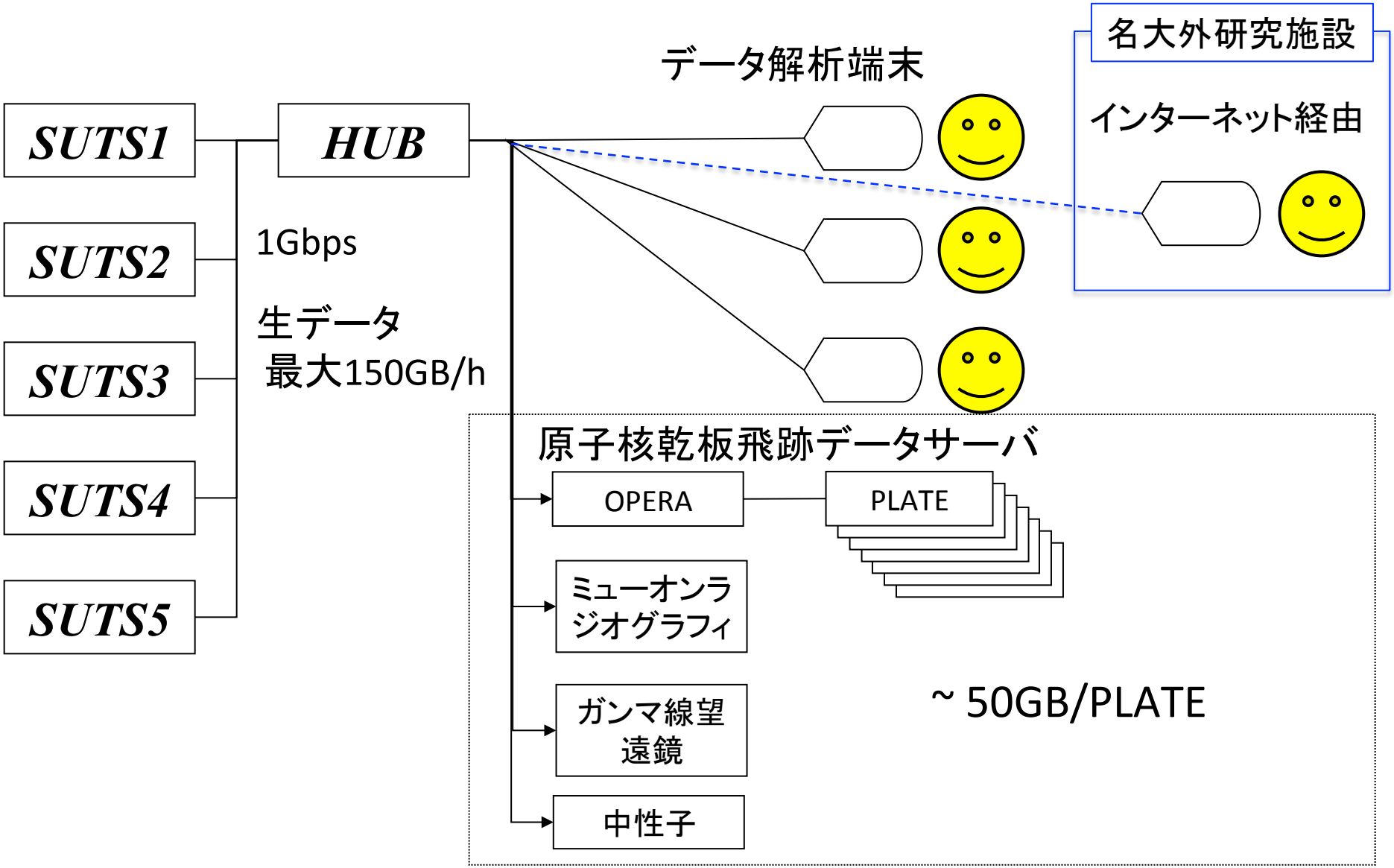
plot | scanning parameter | detail infomation

micro



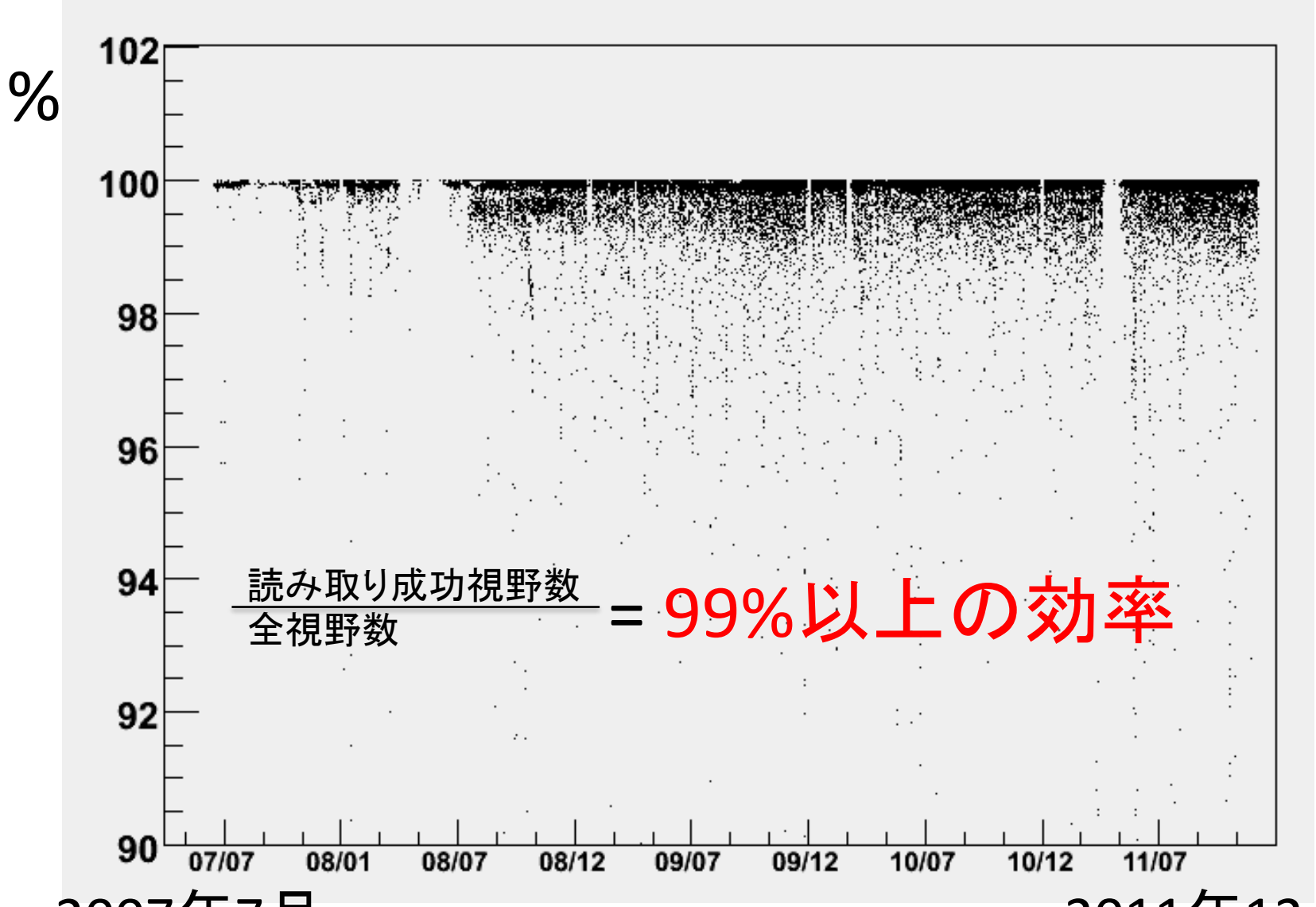


S-UTS online DAQ/解析システム

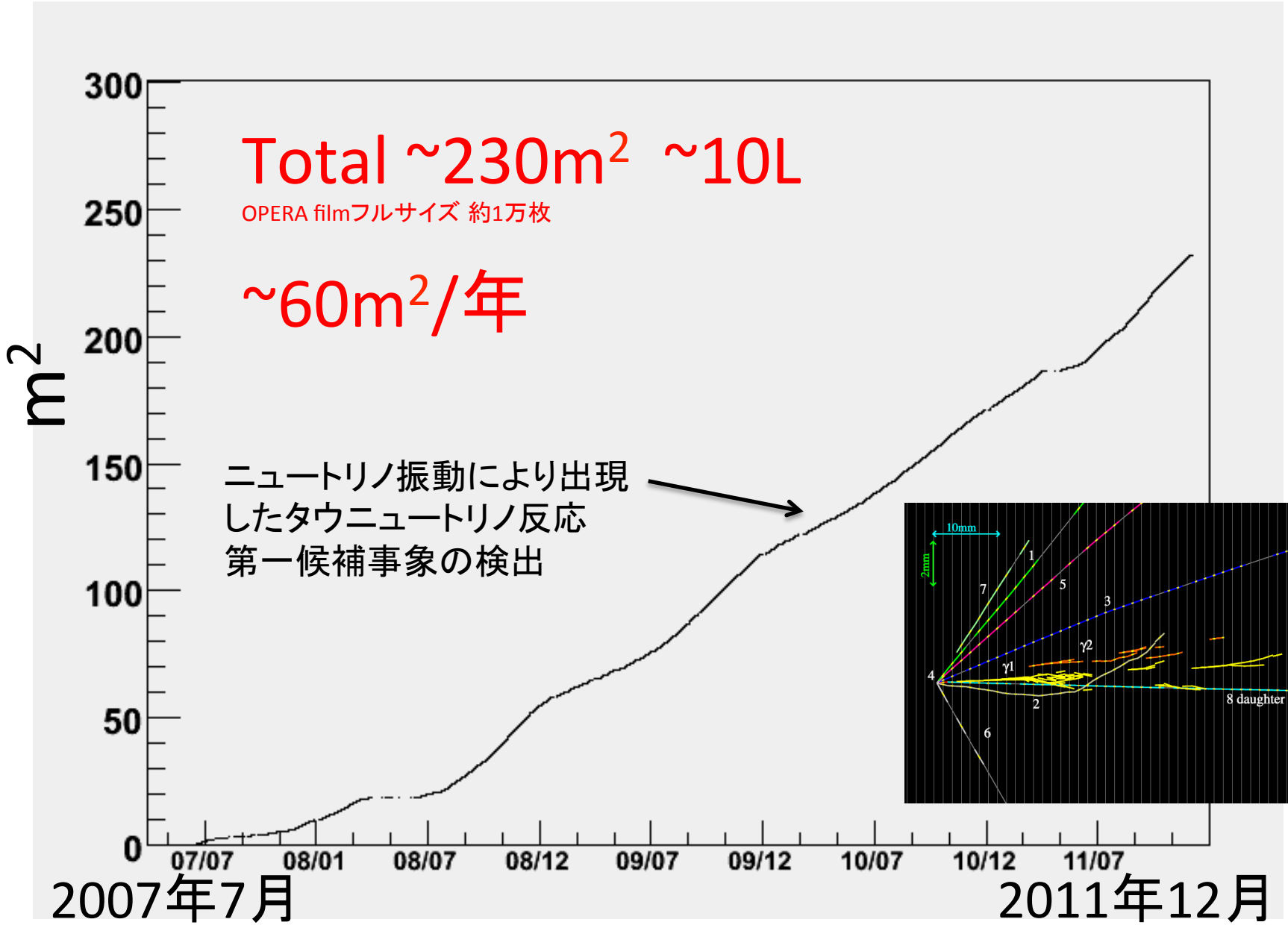


ユーザーは端末からフィルム単位で格納された飛跡データへアクセス

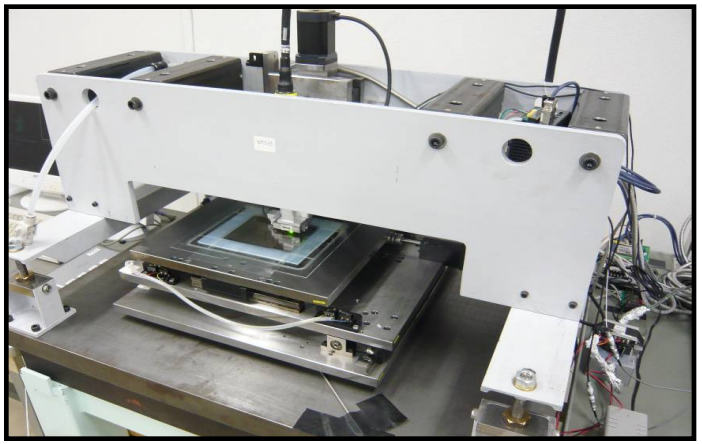
Data taking quality



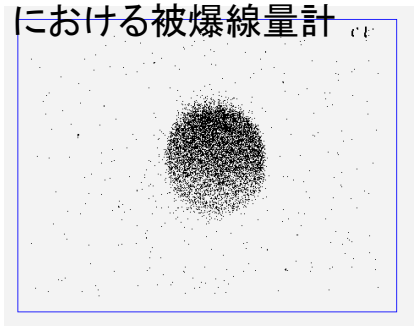
2007年から現在までにS-UTSで読み出した原子核乾板量



S-UTSによる原子核乾板技術の他分野への広がり



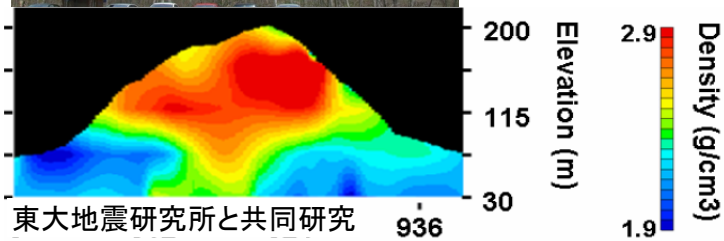
中性子検出器
（方向感度、エネルギー測定）
- ダークマターバックグラウンド
- 核融合プラズマ診断
- 2次元イメージセンサ
- 原子炉・加速器・宇宙における被爆線量計



応用分野

ミューオンラジオグラフィ
ミューオンを用いた巨大構造物の非破壊検査

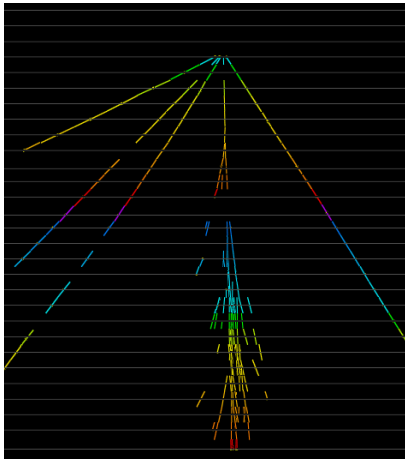
火山「昭和新山」



東大地震研究所と共同研究　936

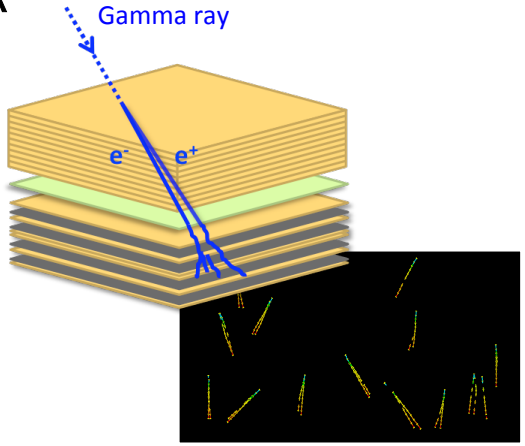
素粒子物理

ニュートリノ振動実験OPERA



天文学

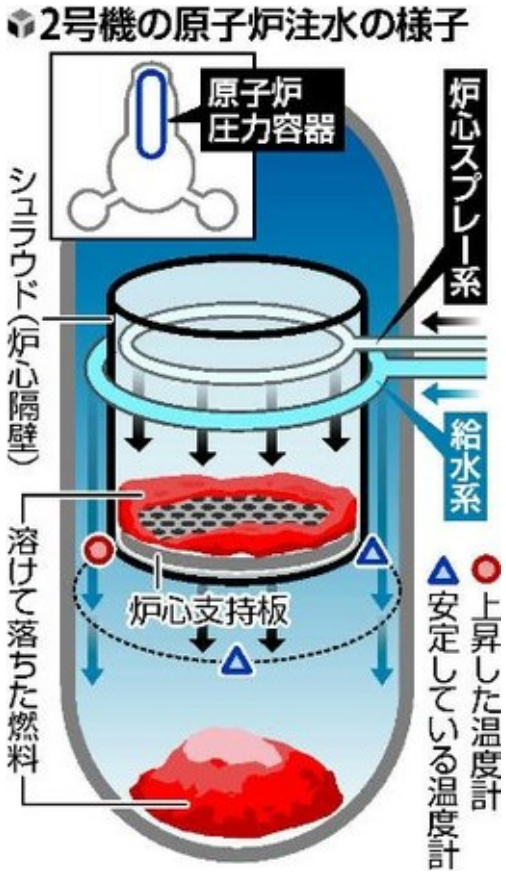
ガンマ線望遠鏡



福島第一原子力発電所炉内状況の推定

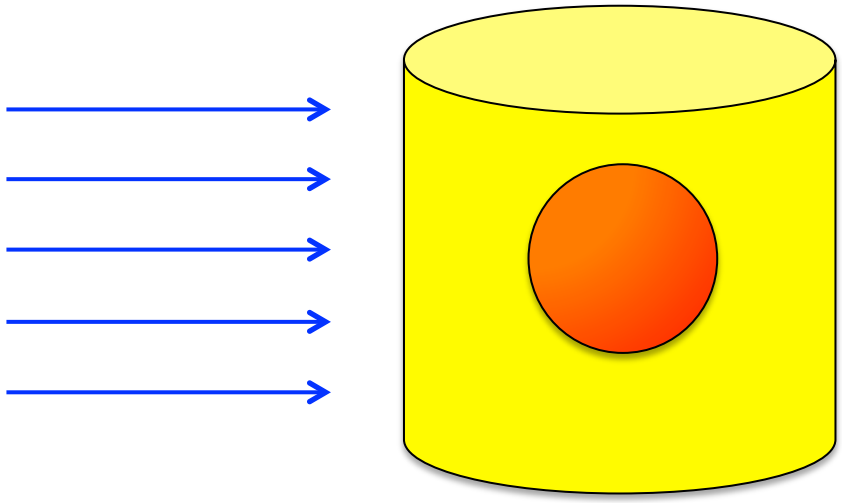
原子炉格納容器内の燃料デブリ（溶融後固化したもの）の分布状況の把握

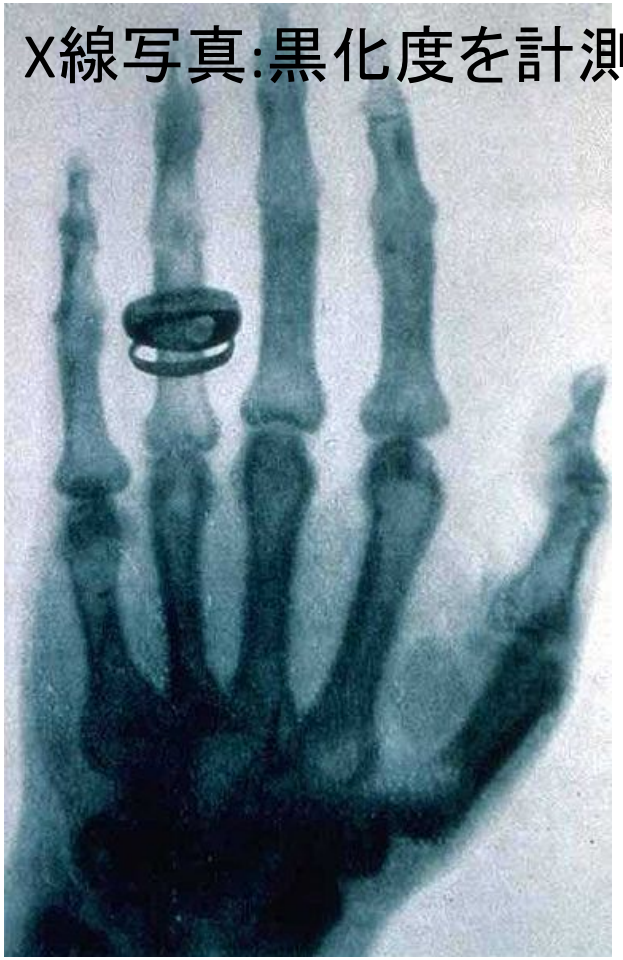
→　遠隔非破壊計測技術



放射線ラジオグラフィの原理

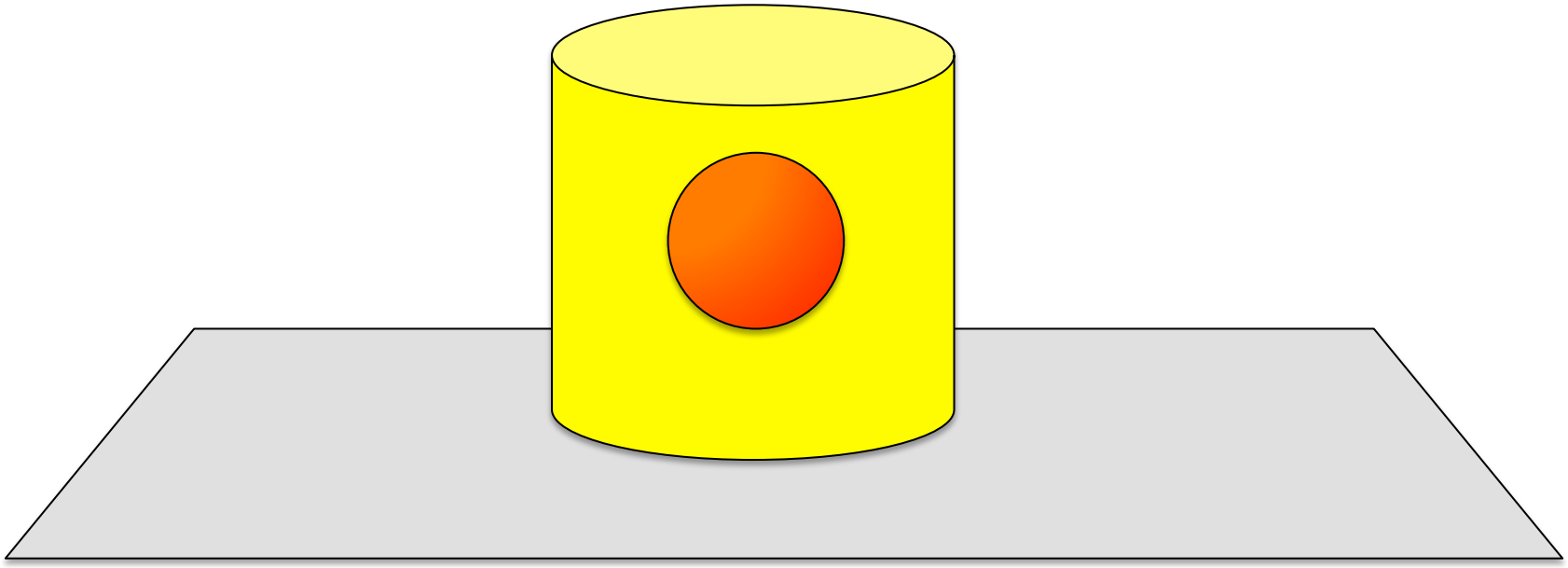
物質の積算密度を
入射放射線の減少量から求める



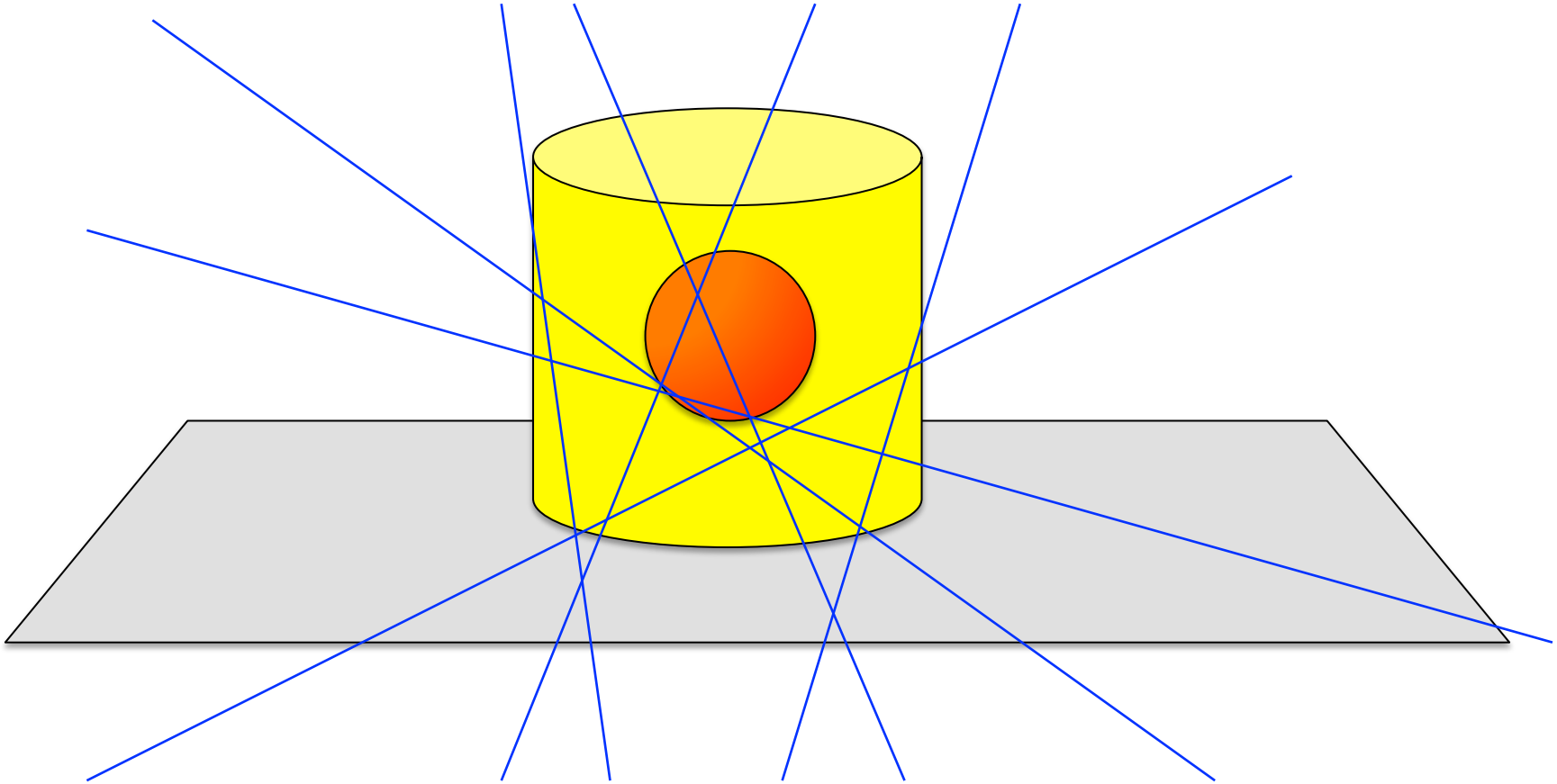


1896年1月23日にレントゲンが撮った
Alfred von Kollikerの手のX線写真

宇宙線ミューオンラジオグラフィ

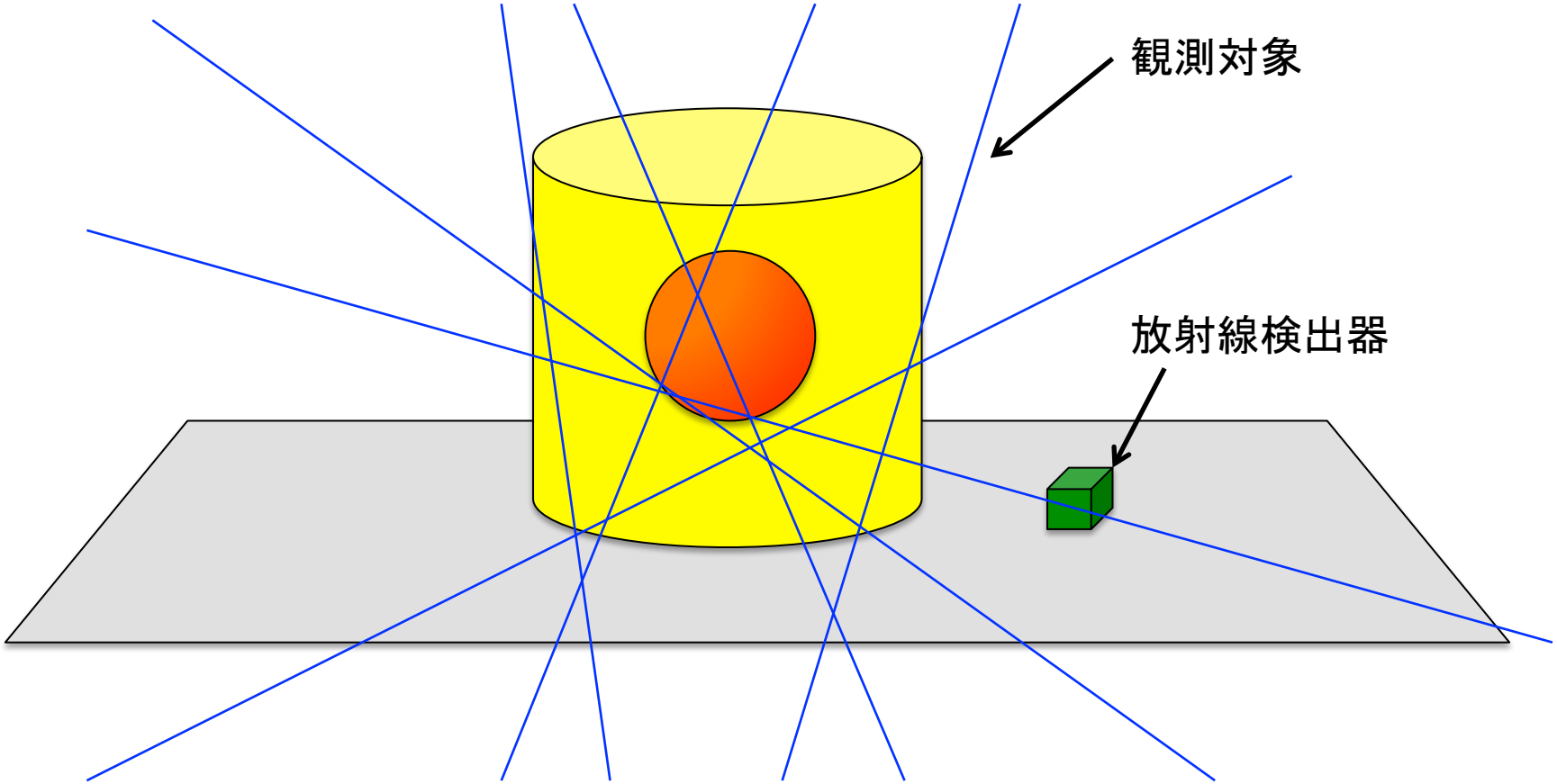


宇宙線ミューオンラジオグラフィ



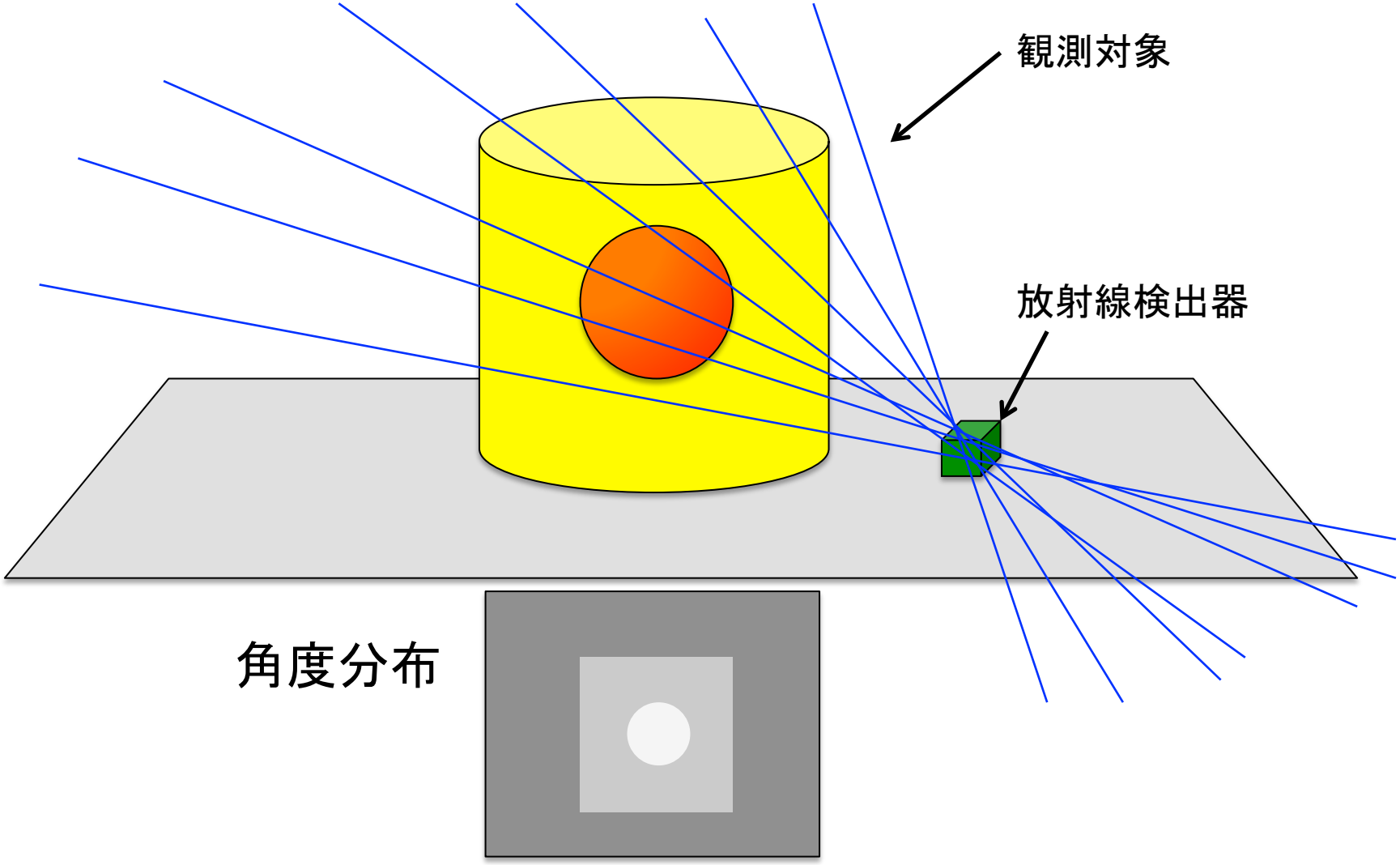
宇宙線ミューオンは決まった角度分布で
上空から地球上へ降り注いでいる

宇宙線ミューオンラジオグラフィ



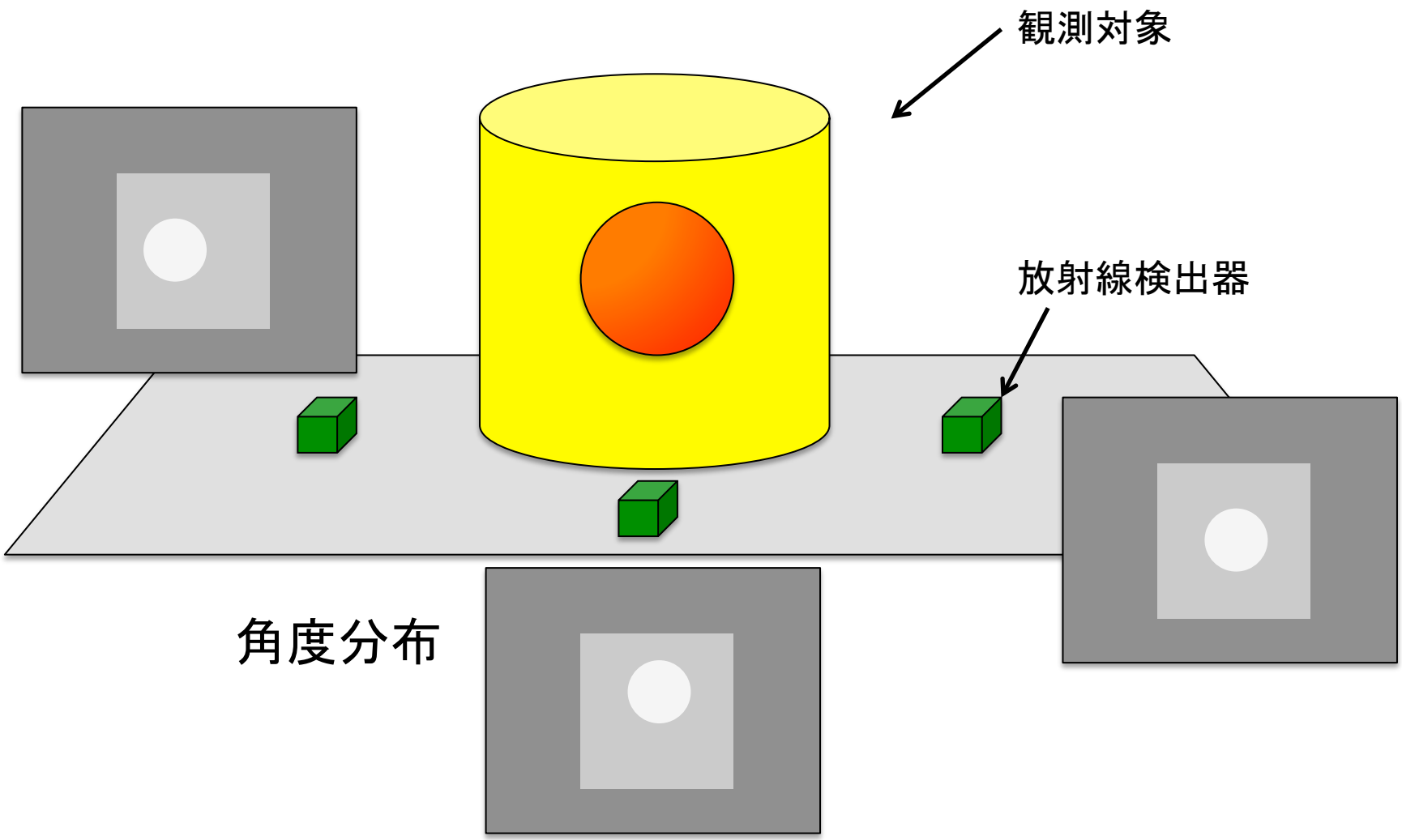
宇宙線ミューオンは決まった角度分布で
上空から地球上へ降り注いでいる

宇宙線ミューオンラジオグラフィ



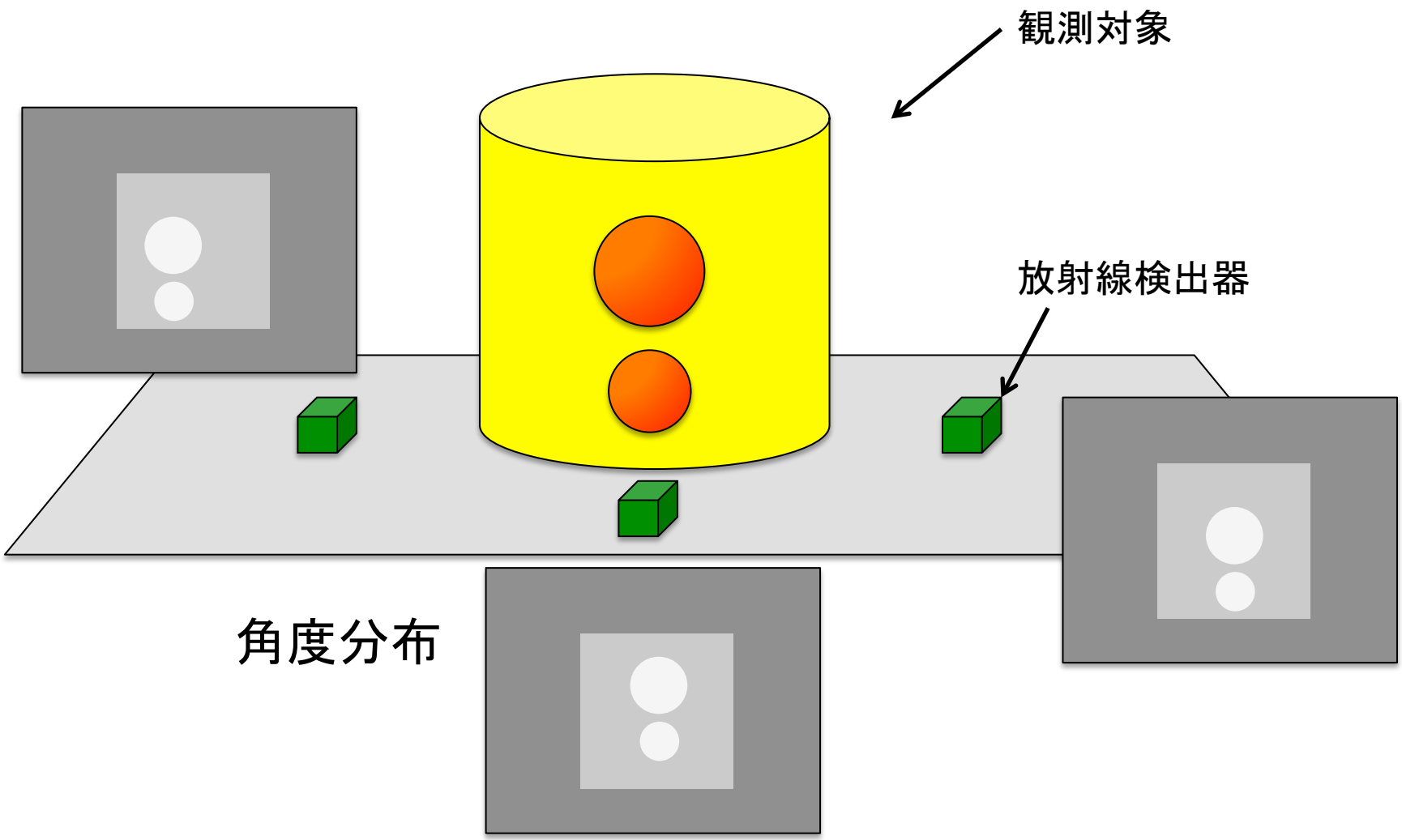
ミューオンの3次元角度情報の検出

宇宙線ミューオントモグラフィ



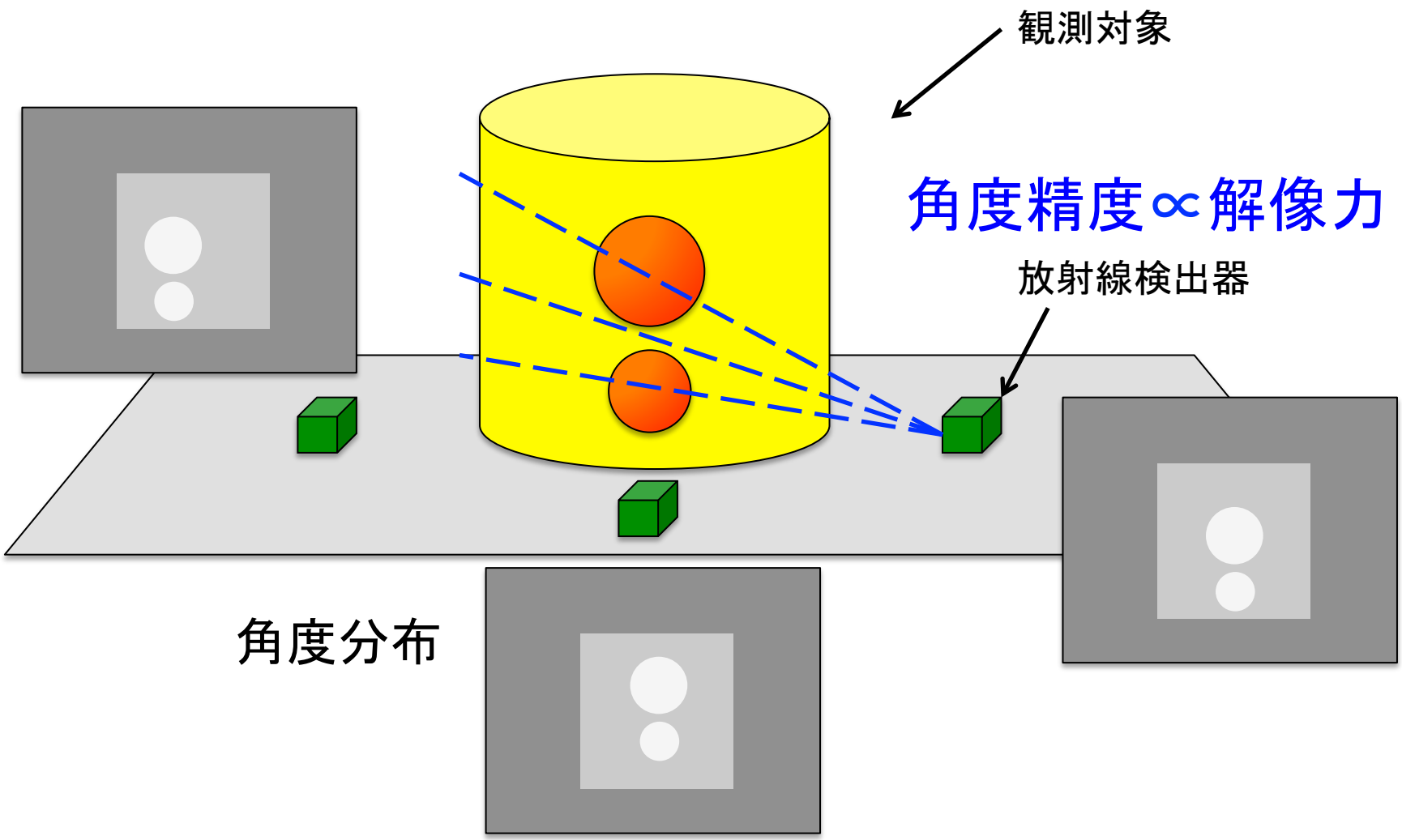
複数検出器による多点同時観測

宇宙線ミューオントモグラフィ



複数検出器による多点同時観測

宇宙線ミューオントモグラフィ

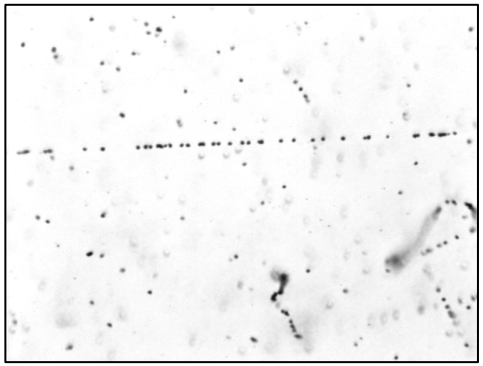


複数検出器による多点同時観測

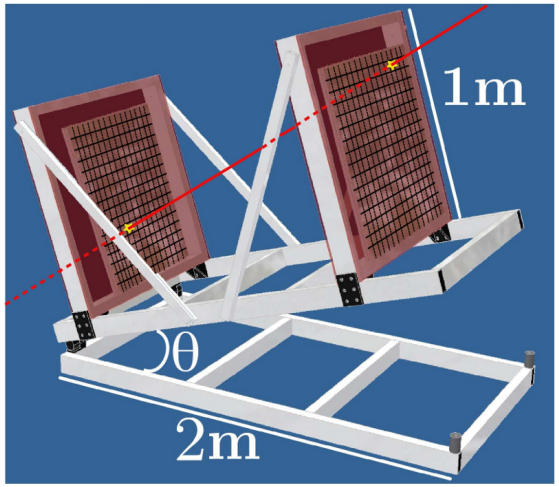
ミューオン像を得るためのミューオン検出器

- 原子核乾板

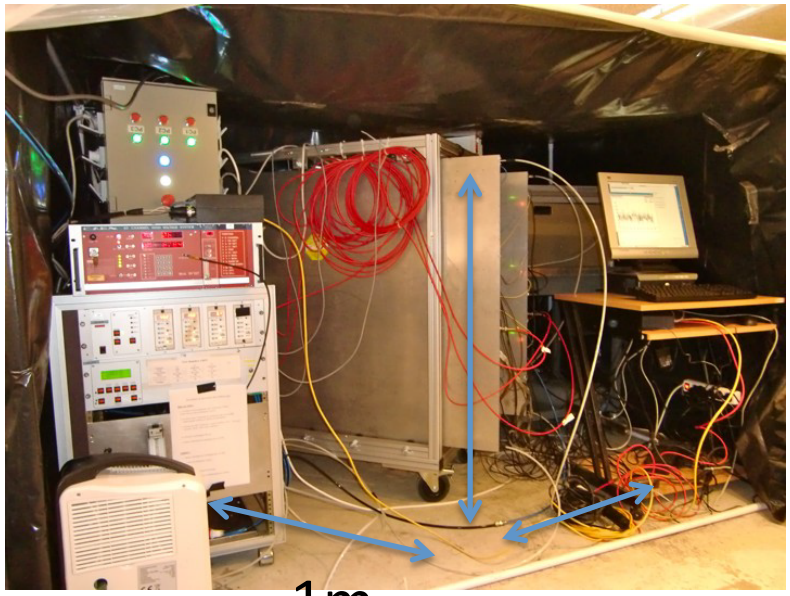
銀粒子サイズ～1ミクロン



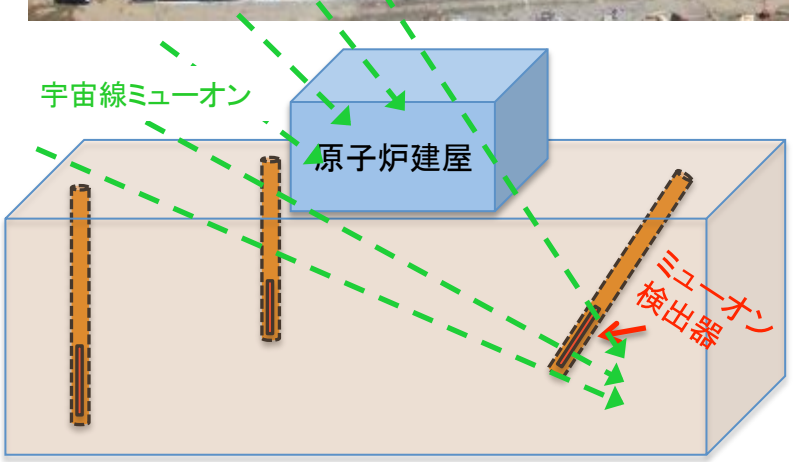
- 電子検出器
  - リアルタイム性



検出器セグメンテーション
～1mm(ファイバー)～100mm



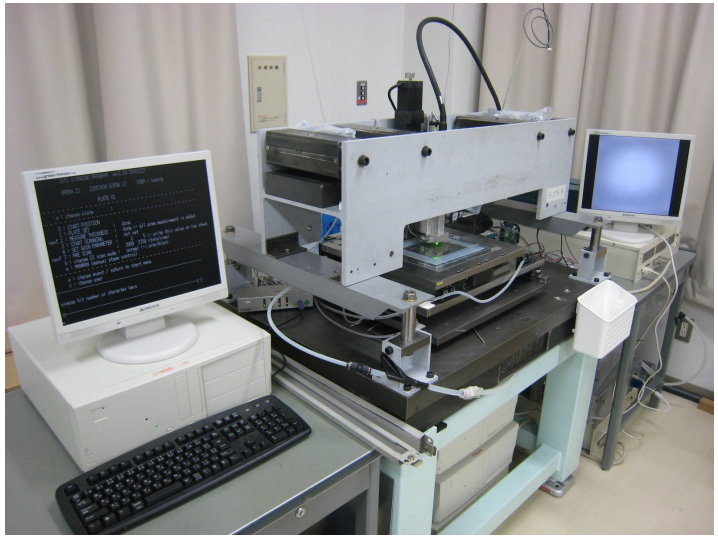
福島第一原子力発電所における観測に対する困難



- 高放射線環境(?)
  - 遮蔽
- 設置スペース
  - 遠方、地下
- 電源供給

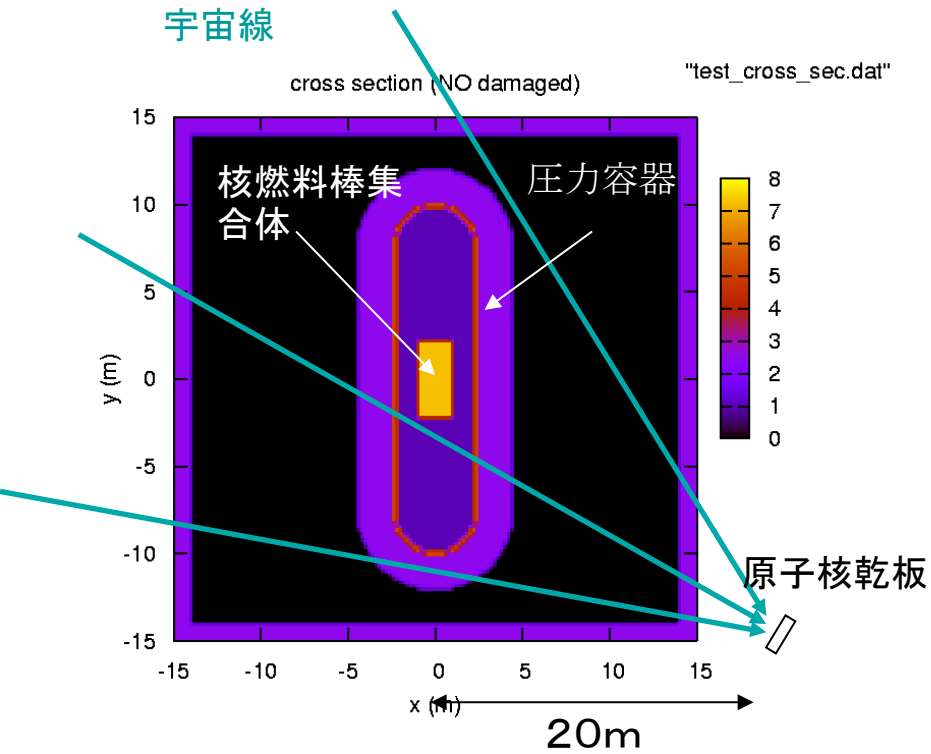
原子核乾板のアドバンテージ

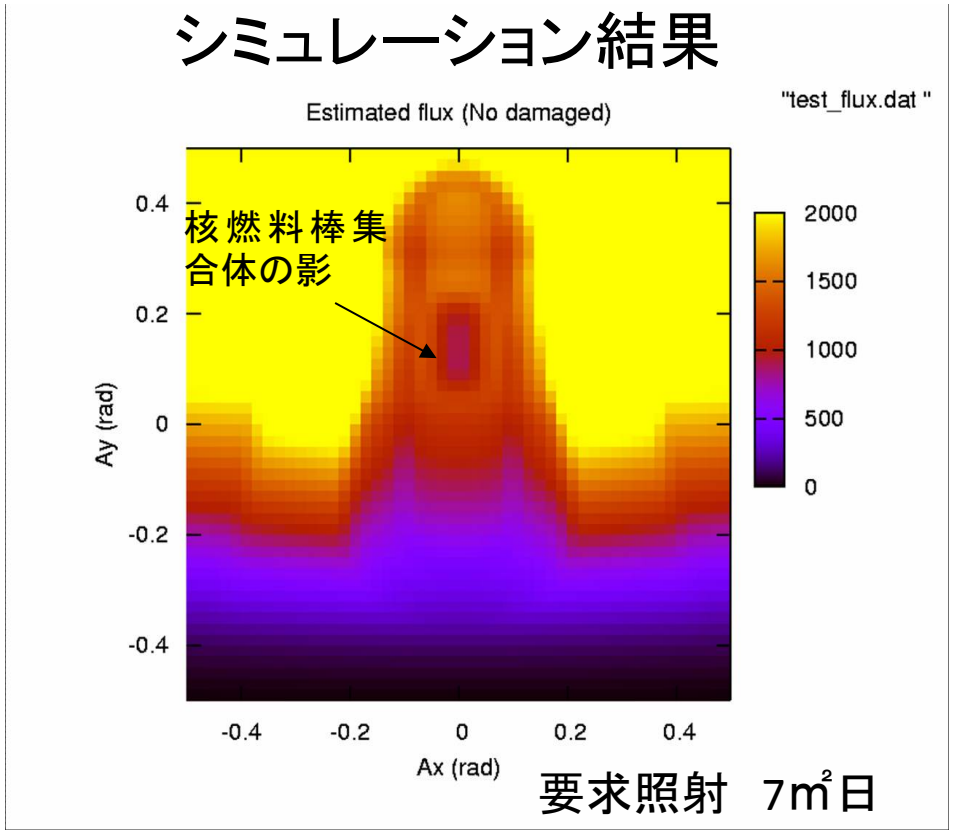
・高解像力　~1mrad : 100m先で10cmの解像力
・電源不要、小型、軽量
・積分型検出器（飛跡情報の蓄積）
・多点同時観測＝トモグラフィ



従来の欠点
・原子核乾板の均質性
　→　機械塗布OPERAフィルム
・読み取り時間
　→　S-UTS,HTS
・飛跡の蓄積ノイズ（主に、環境放射線）
　→　NETSCAN
　　の超高速解析技術より克服

福島第一原子力発電所炉内状況推定への適用検討

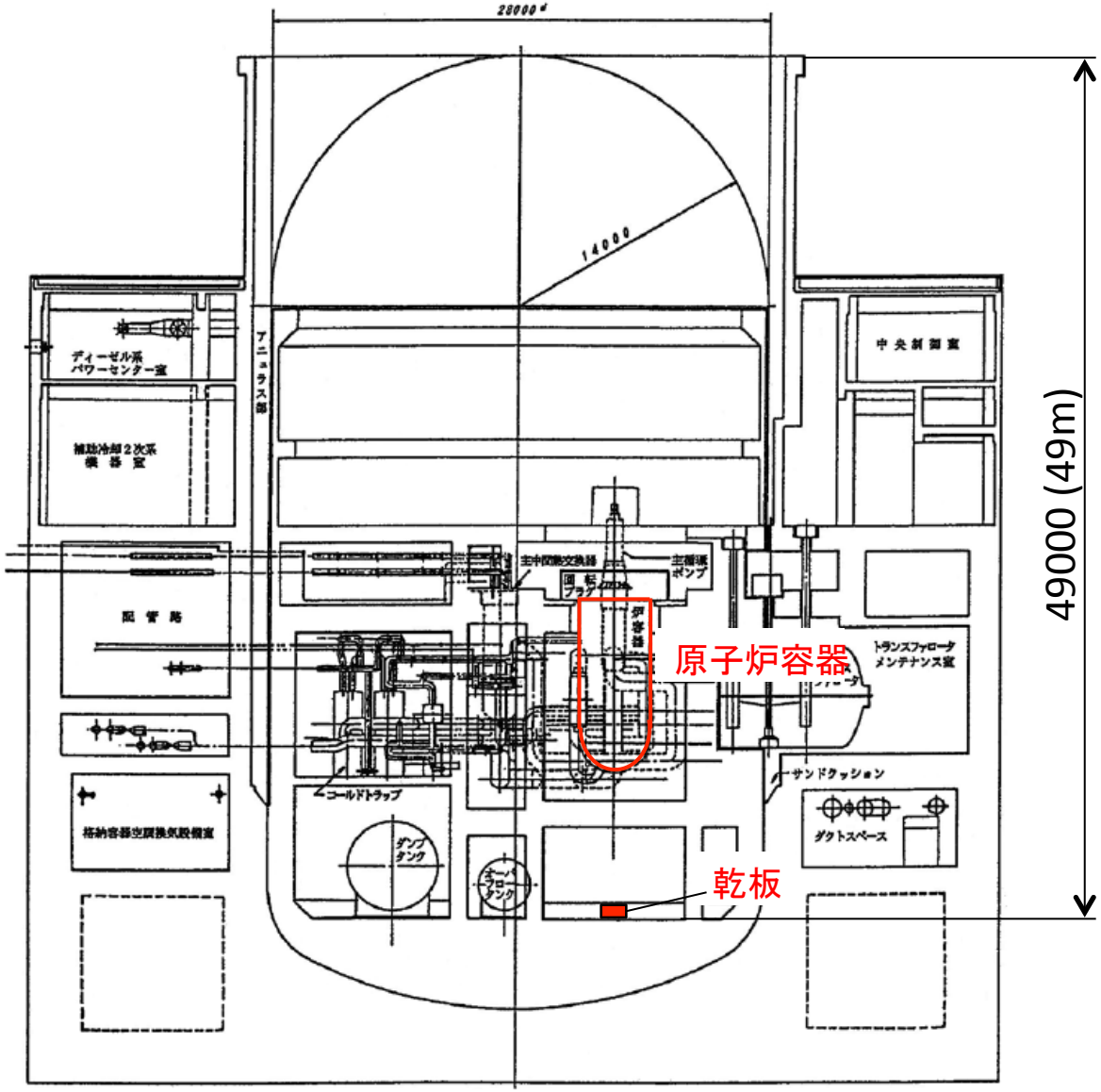




放射線環境	シールド無し	鉛5cm（5x10^{-3}）	鉛10cm（10^{-5}）
1　mSv/h	10h　17㎡	6日　1.2㎡	100日　0.07㎡
10		0.6日　12㎡	10日　0.8㎡
100			1日　8㎡

高速増殖実験炉「常陽」における イメージング実証試験

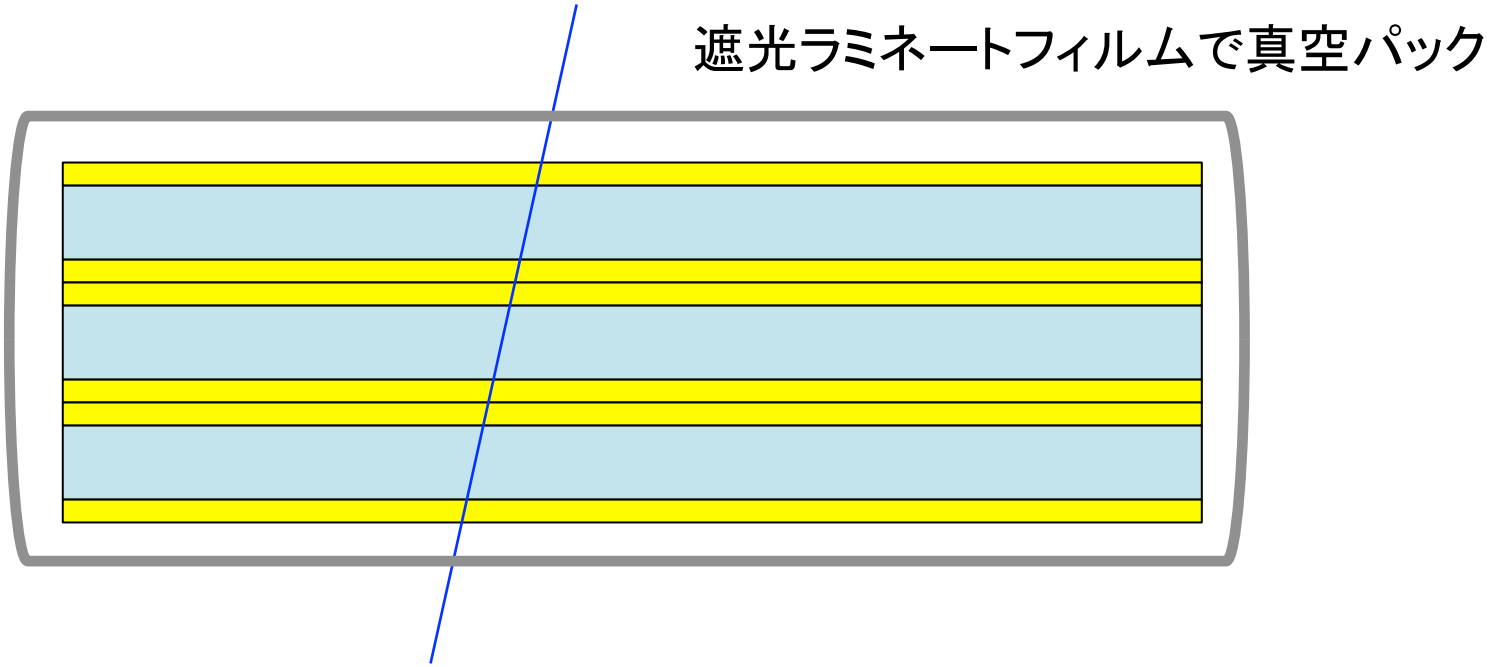
実施体系



今回の試験における原子核乾板検出器構成

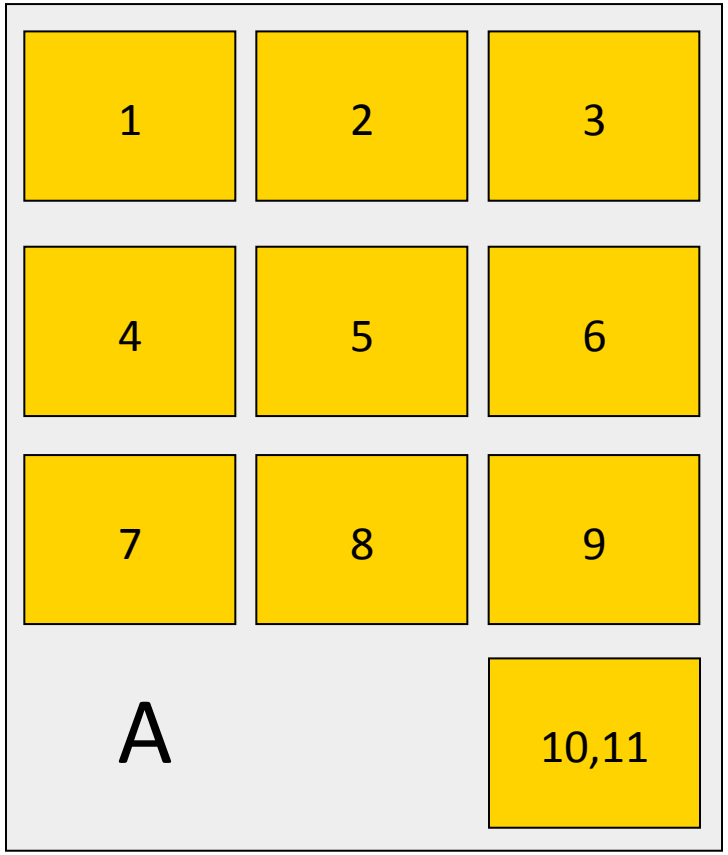
3枚の原子核乾板のみのECC(Emulsion Cloud Chamber）

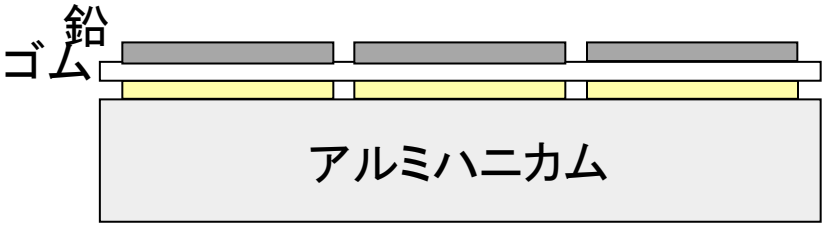
断面図

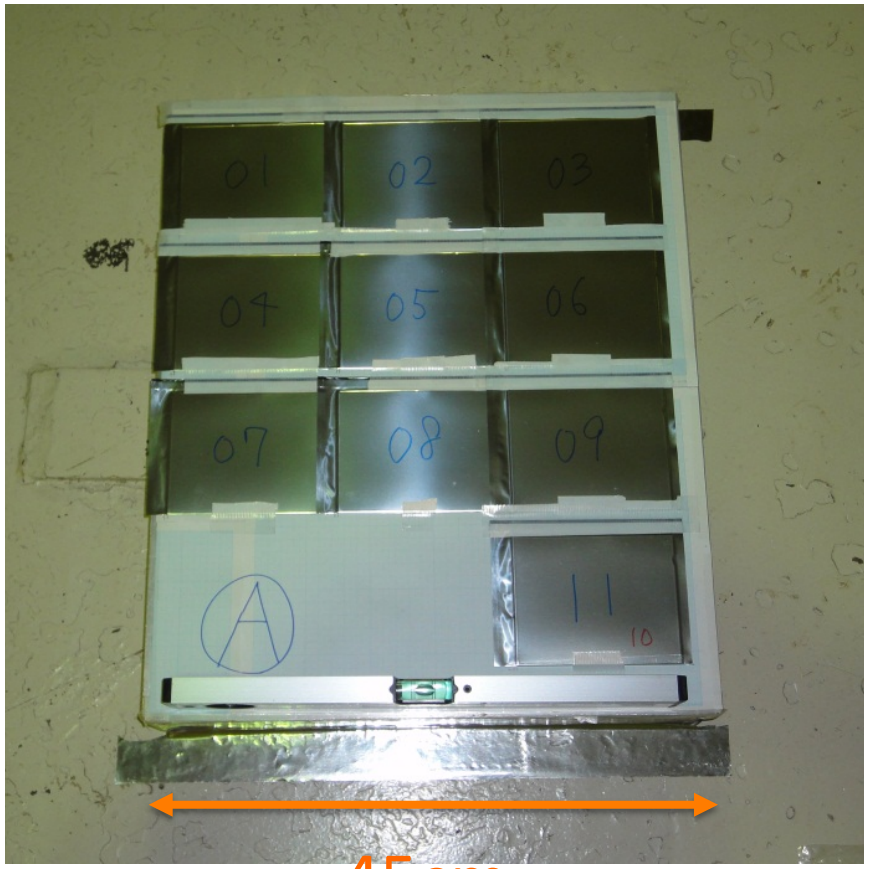


・シグナルとノイズの識別・・・2枚以上の接続を要求
・検出効率向上・・・3枚中2枚での検出を要求

原子核乾板検出器

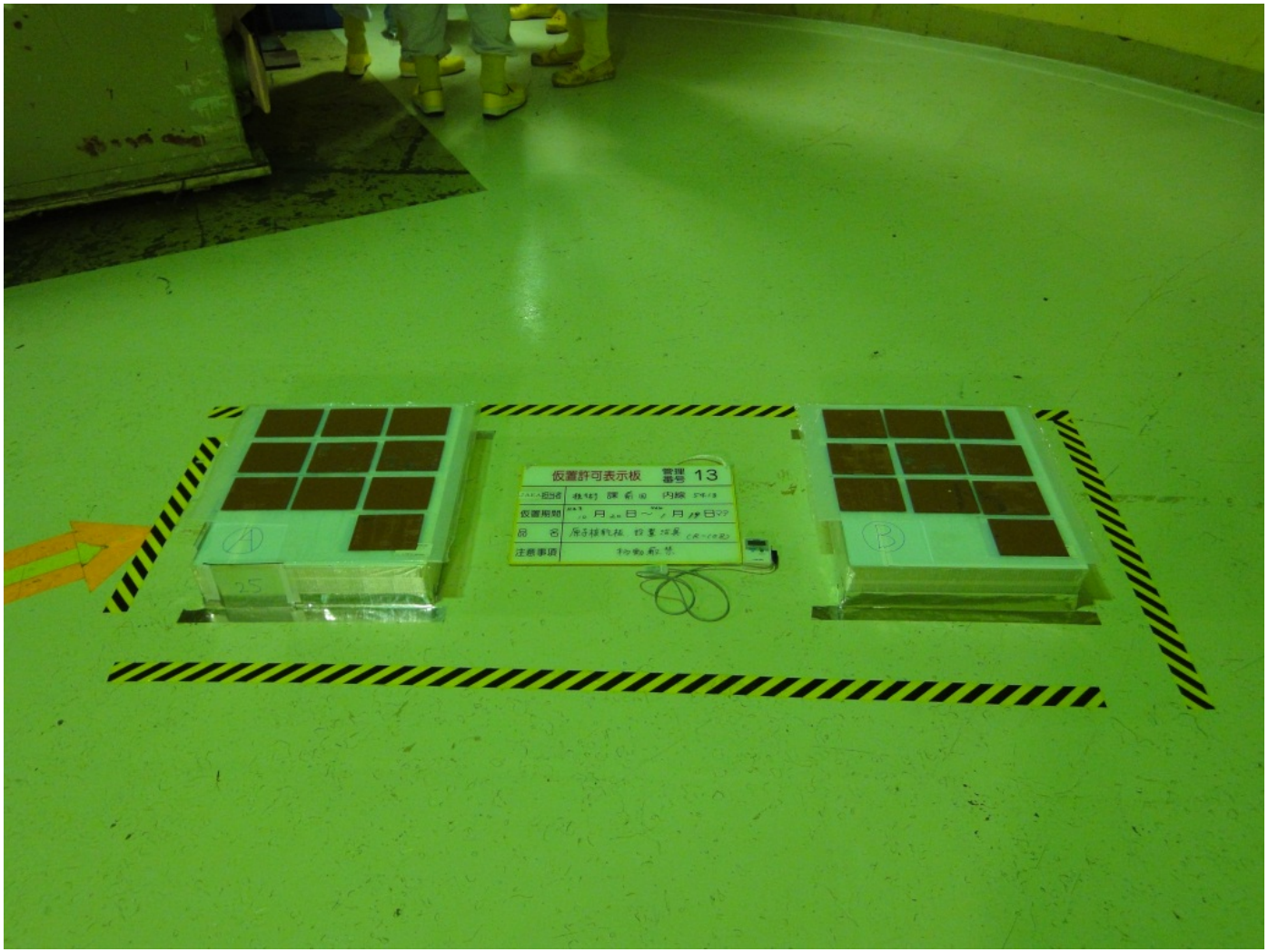




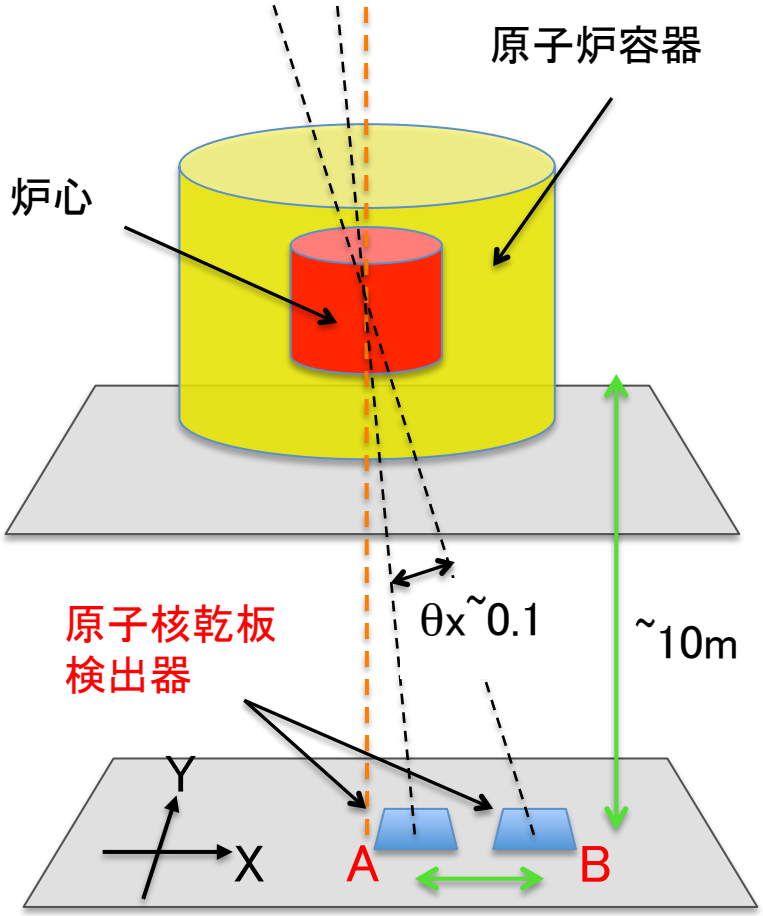


45cm

炉心の下に2組設置

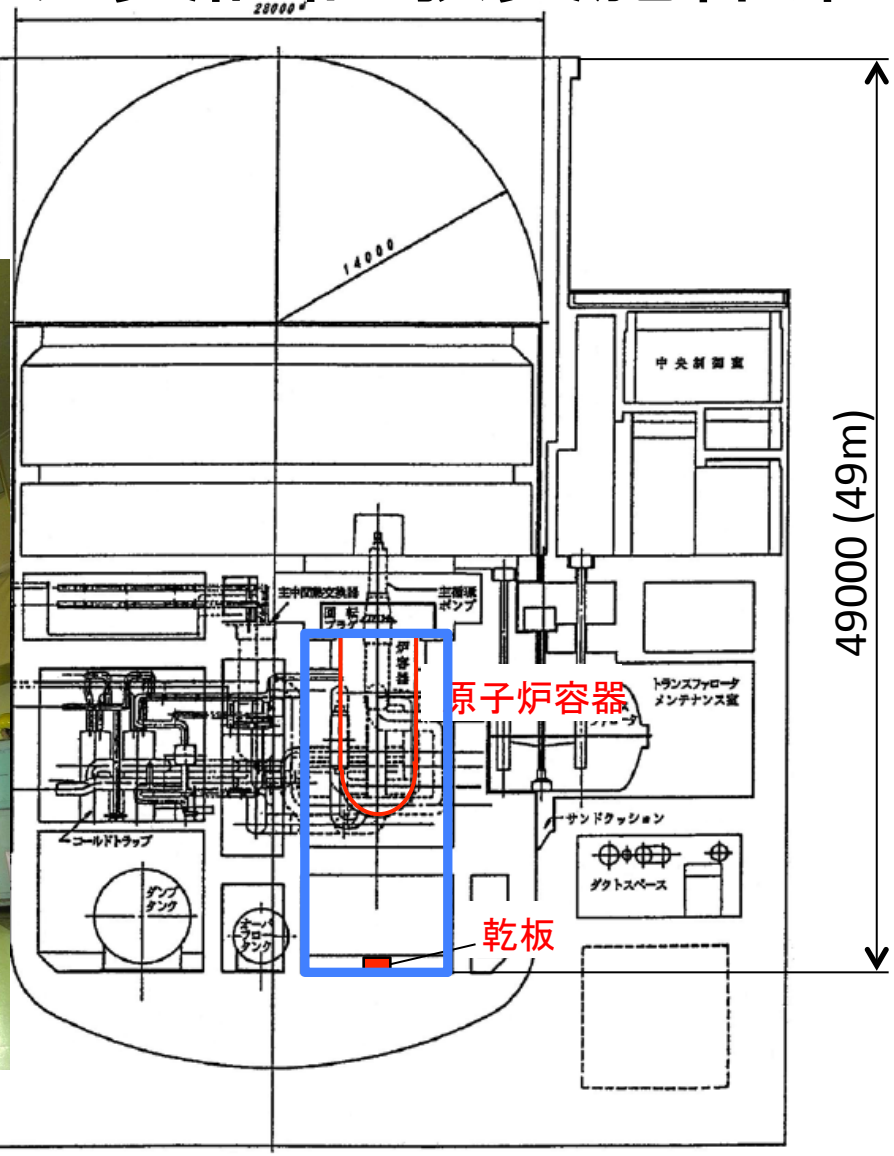


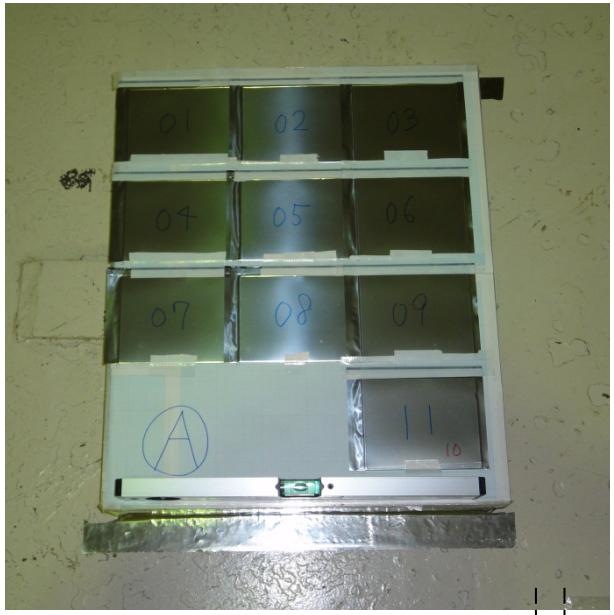
名古屋大学で検出器製作
「常陽」設置期間：21日間x0.1m^2
名古屋大学で現像



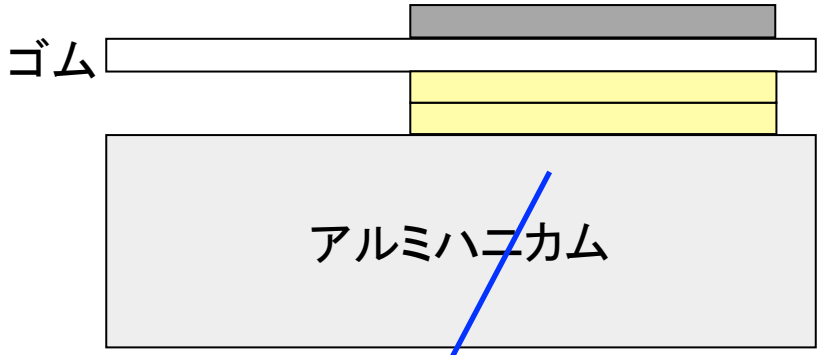
飛跡読み出し@名古屋大学素粒子飛跡読み取り室
（理学部新D館1階）

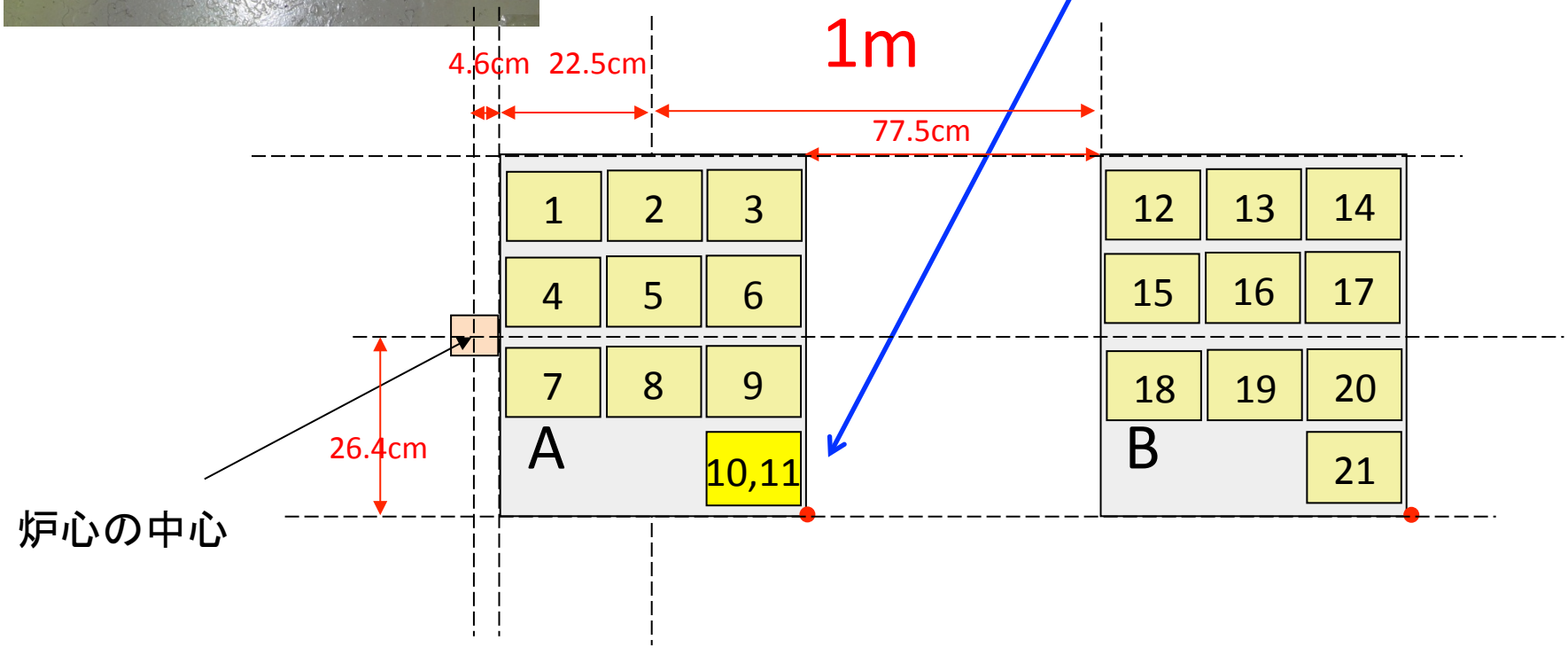
高速増殖実験炉「常陽」における イメージング実証試験実施体系



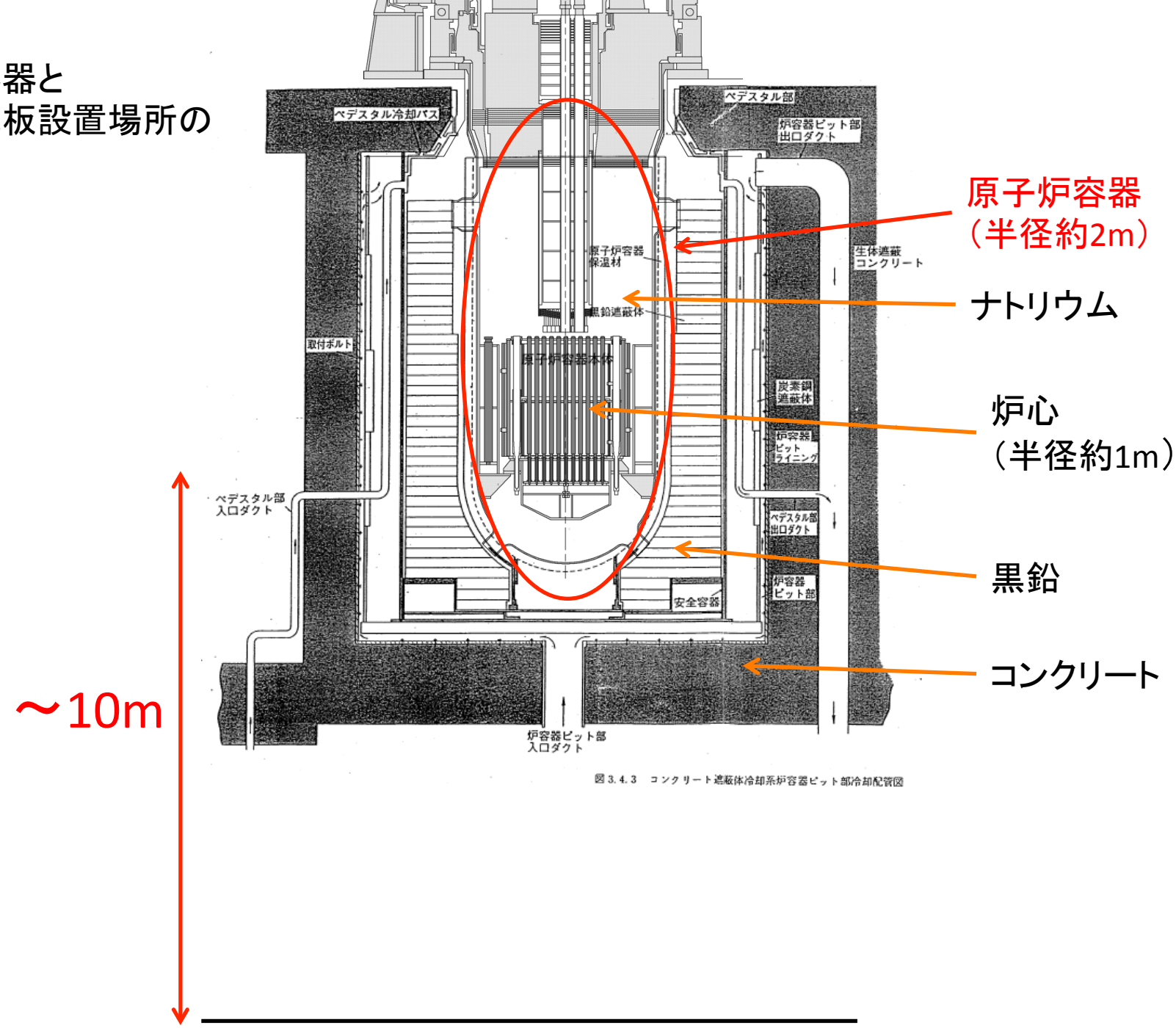

01
02
03
04
05
06
07
08
09
A
11

性能評価用のサンプル

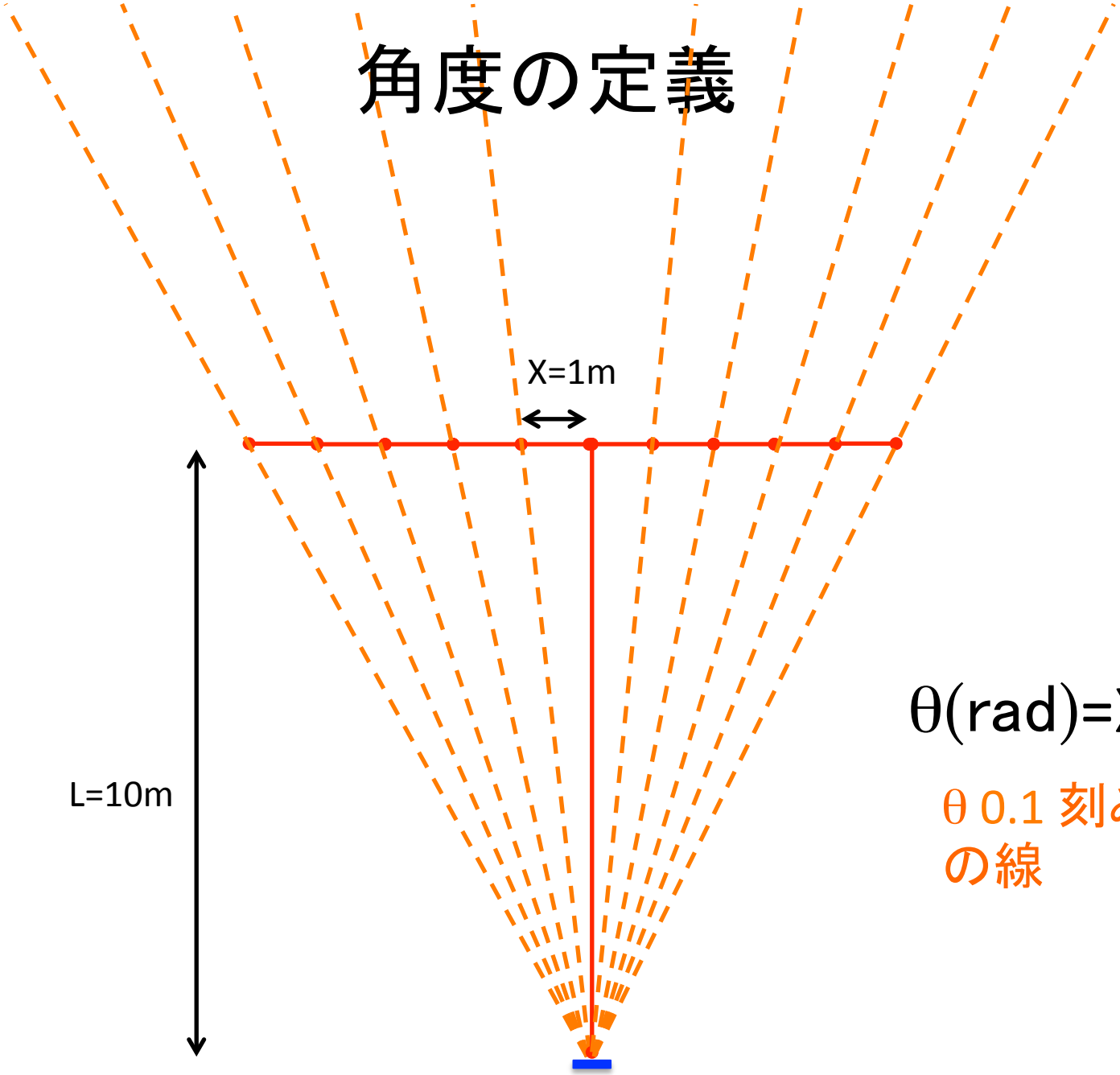

ゴム
アルミハニカム


1m
4.6cm
22.5cm
77.5cm
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10,11
A
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
B
26.4cm
炉心の中心

原子炉容器と原子核乾板設置場所の断面図



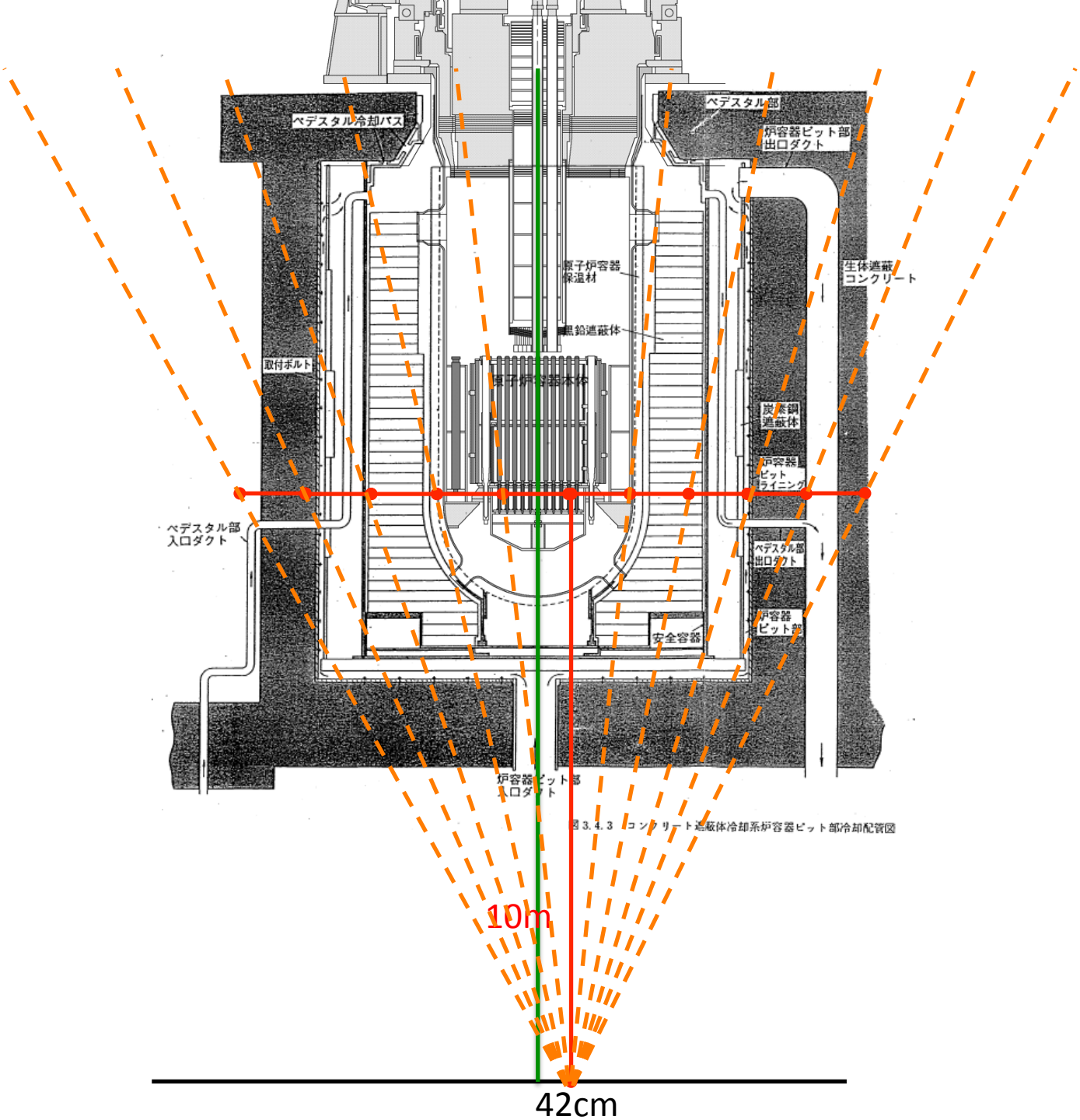
角度の定義



$\theta(\mathrm{rad})=X/L$

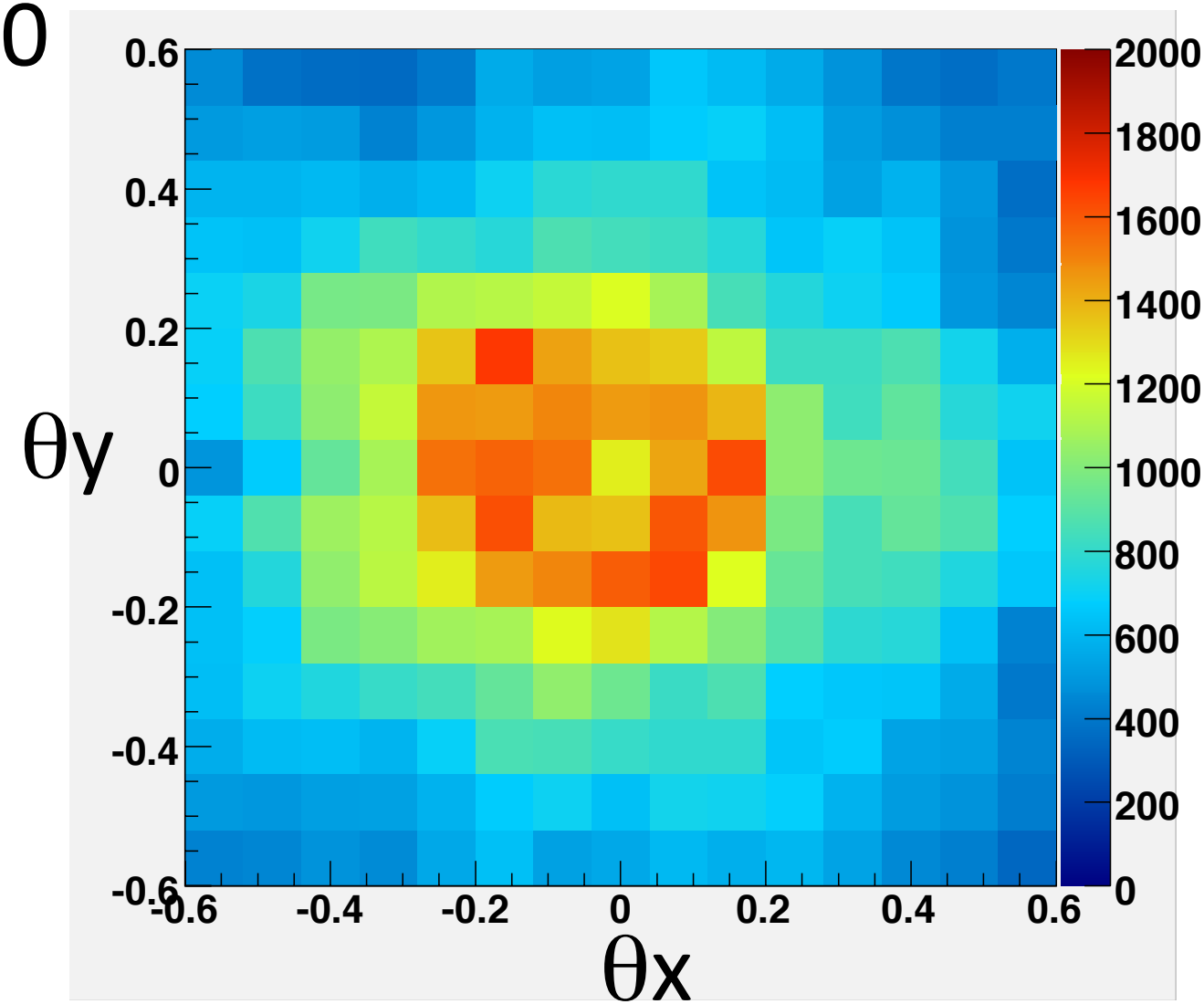
θ 0.1 刻みの線

CH10


ペデスタル冷却パス
ペデスタル部
炉容器ピット部
出口ダクト
原子炉容器
保温材
生体遮蔽
コンクリート
黒鉛遮蔽体
取付ボルト
原子炉容器本体
炭素鋼
遮蔽体
炉容器
ピット
ライニング
ペデスタル部
入口ダクト
ペデスタル部
出口ダクト
炉容器
ピット部
安全容器
炉容器ピット部
入口ダクト
図 3.4.3 コンクリート遮蔽体冷却系炉容器ピット部冷却配管図
10m
42cm

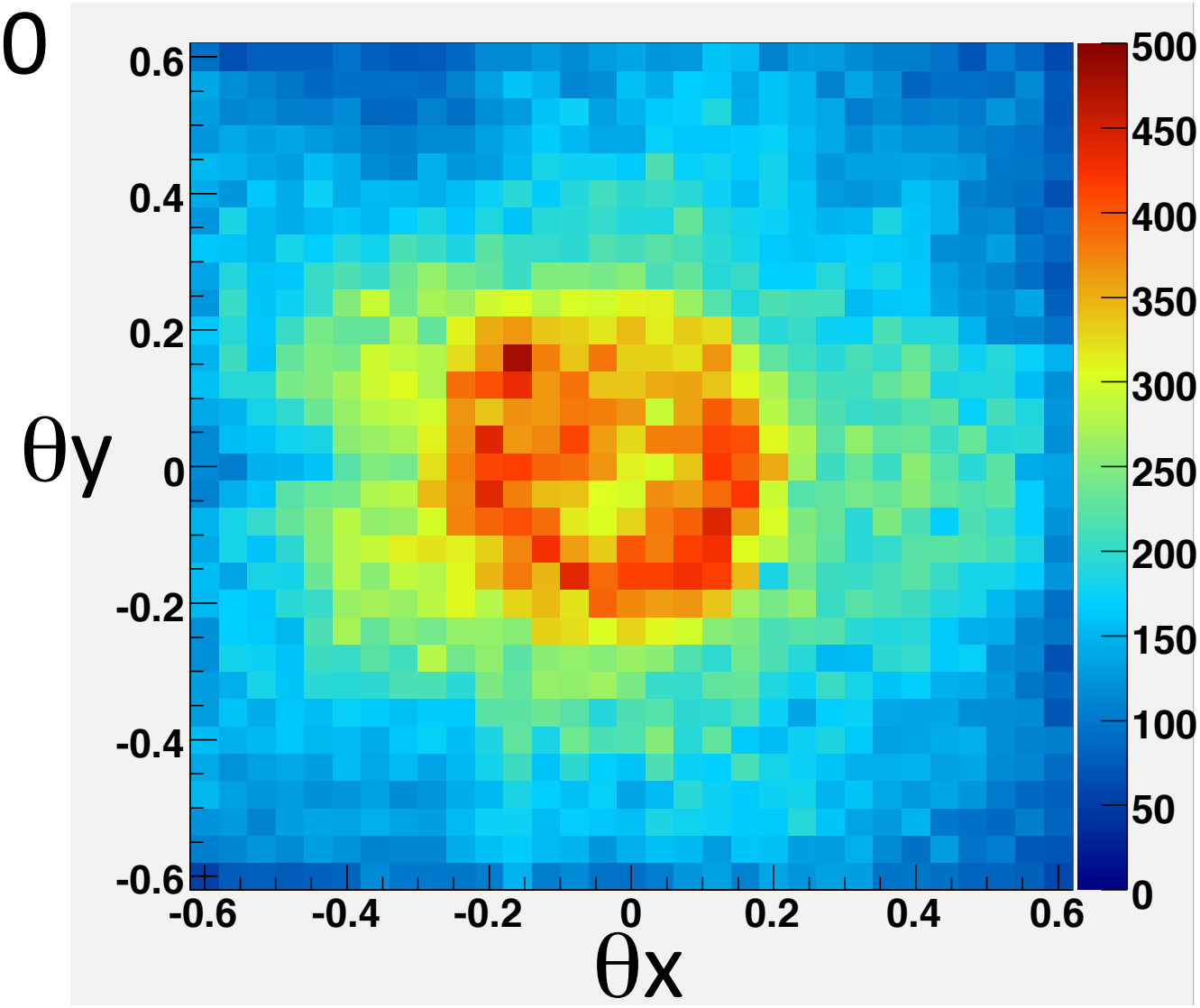
二次元角度分布（80mrad区切り、80cm@10m）

CH10



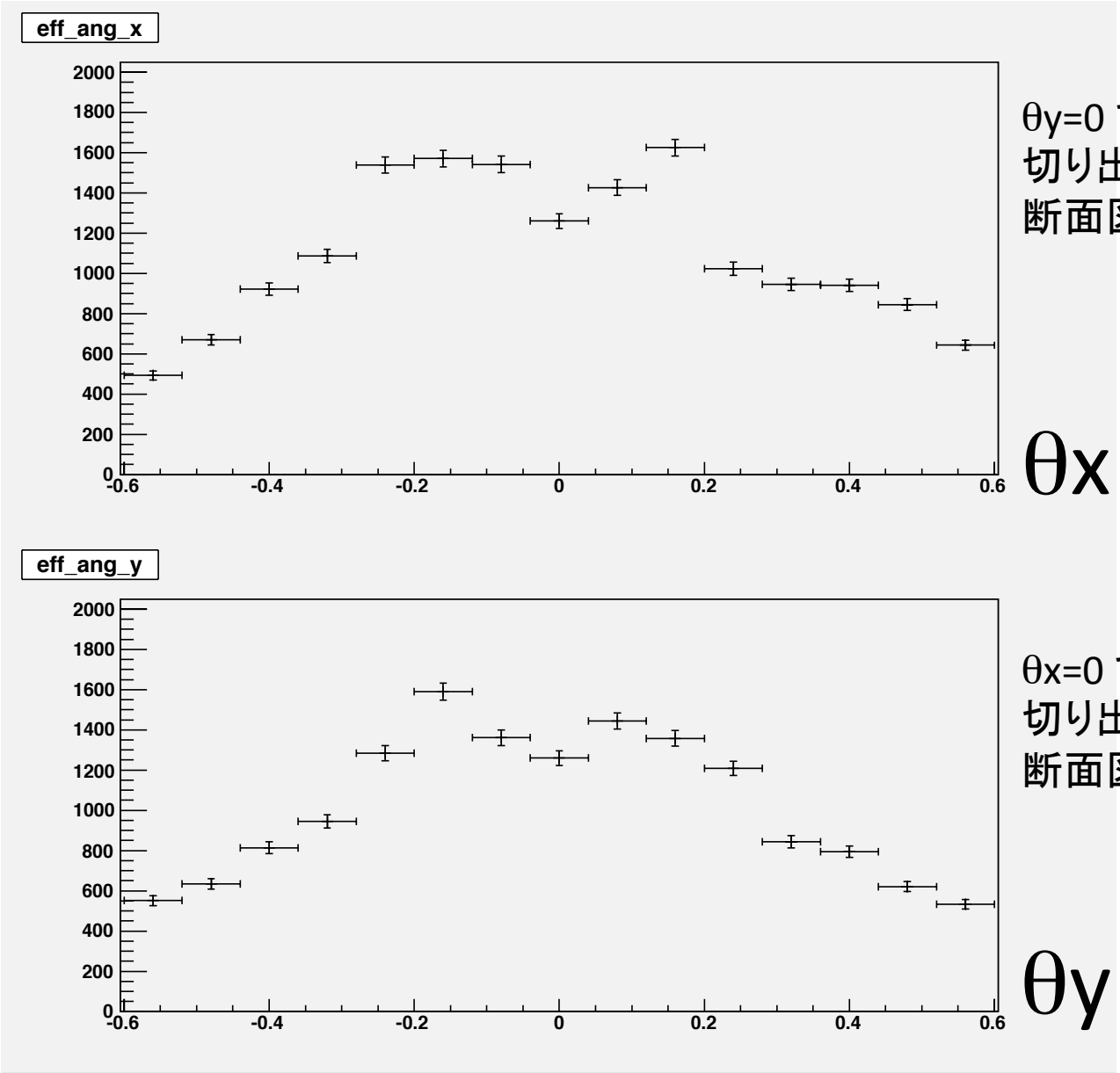
二次元角度分布（40mrad区切り、40cm@10m）

CH10



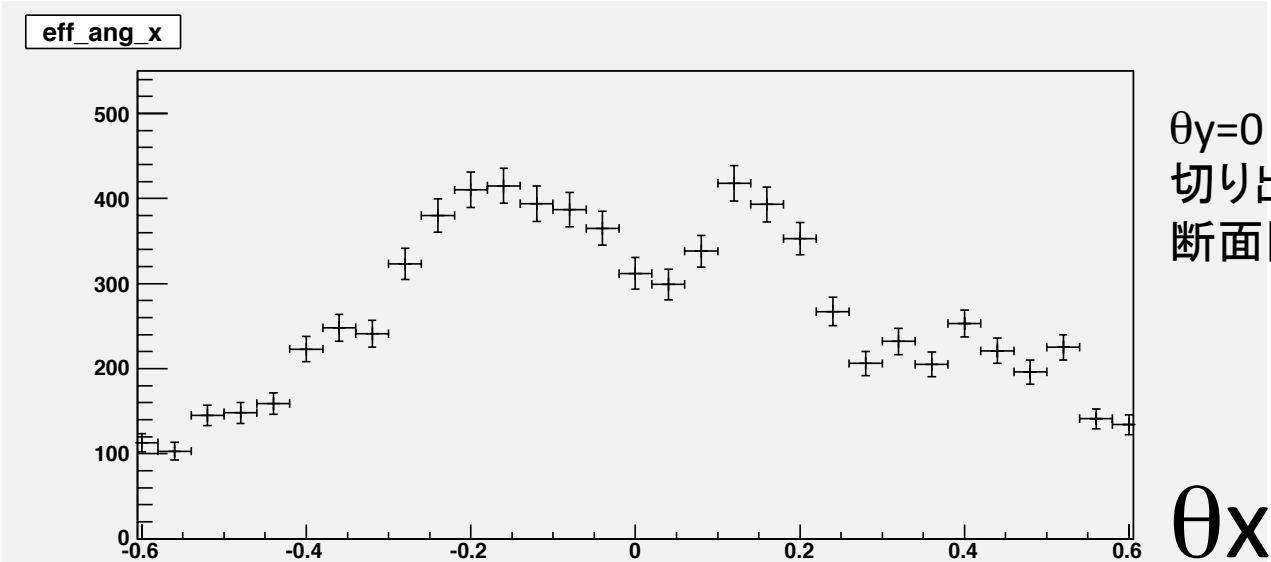
断面図（80mrad区切り、80cm@10m）

CH10



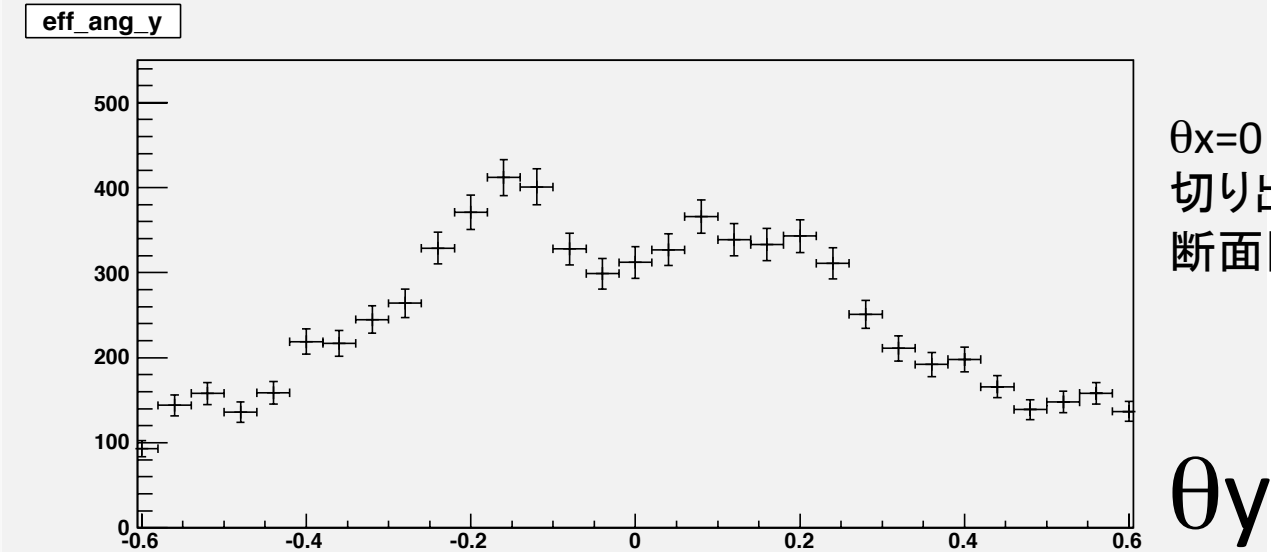
断面図（40mrad区切り、40cm@10m）

CH10



θy=0 で
切り出した
断面図

θx



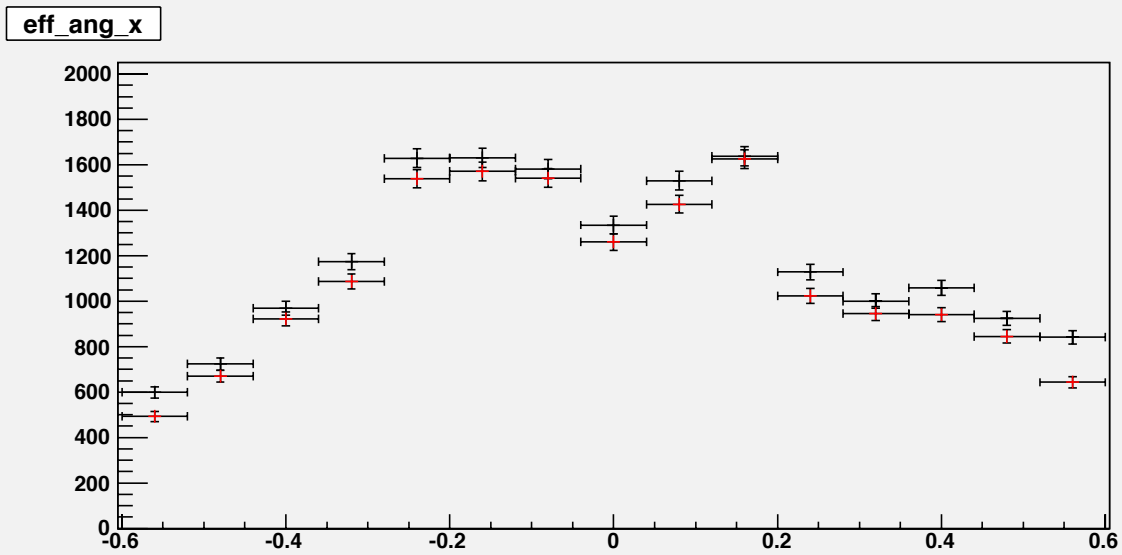
θx=0 で
切り出した
断面図

θy

同じ位置に重ねて設置した2つのパックの結果比較
(80mrad区切り、80cm@10m)

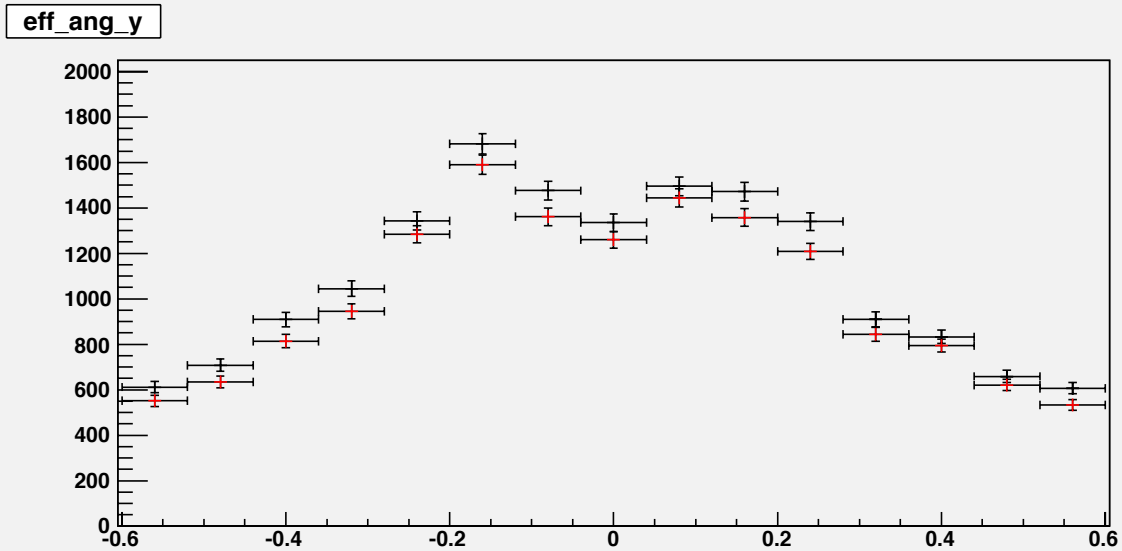
CH10

CH11



θy=0 で
切り出した
断面図

θx



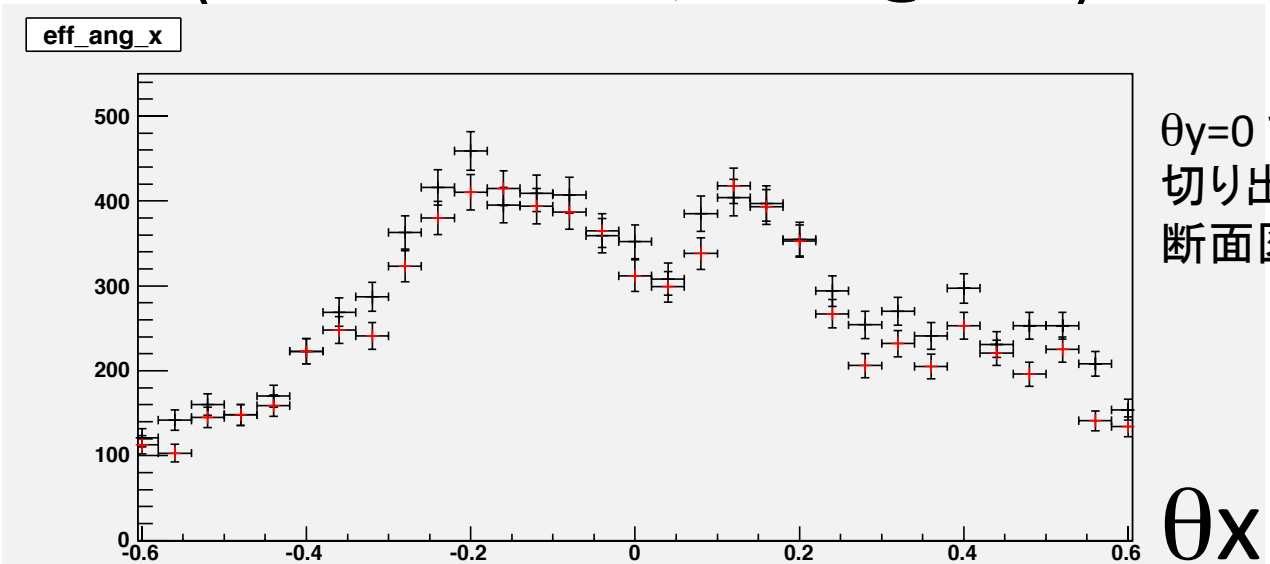
θx=0 で
切り出した
断面図

θy

同じ位置に重ねて設置した2つのパックの結果比較
(40mrad区切り、40cm@10m)

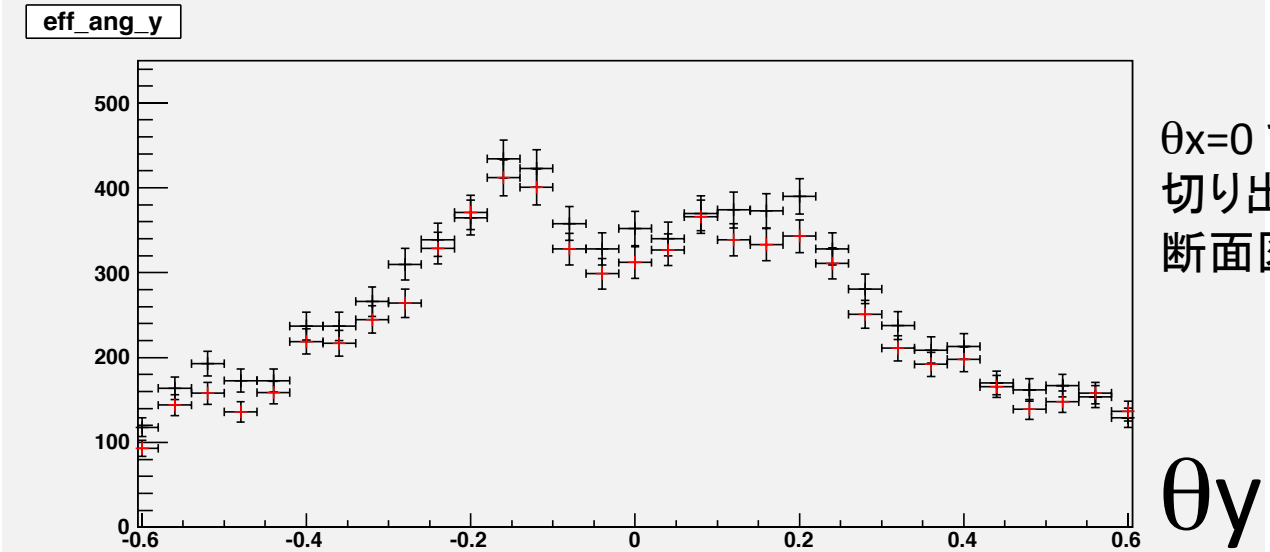
CH10

CH11



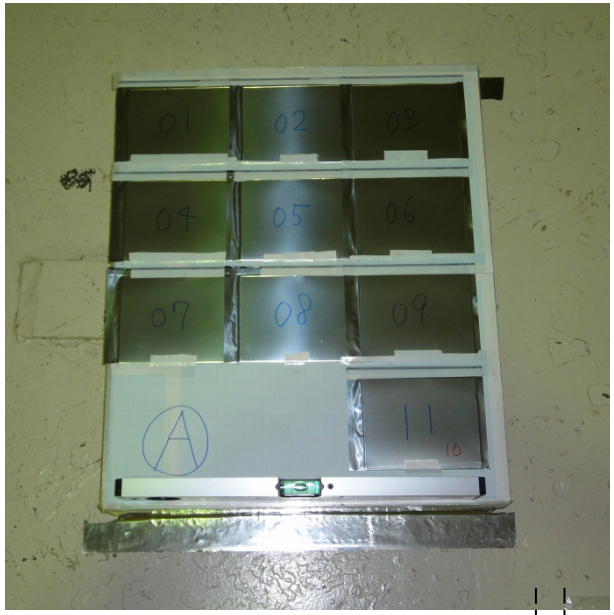
θy=0 で
切り出した
断面図

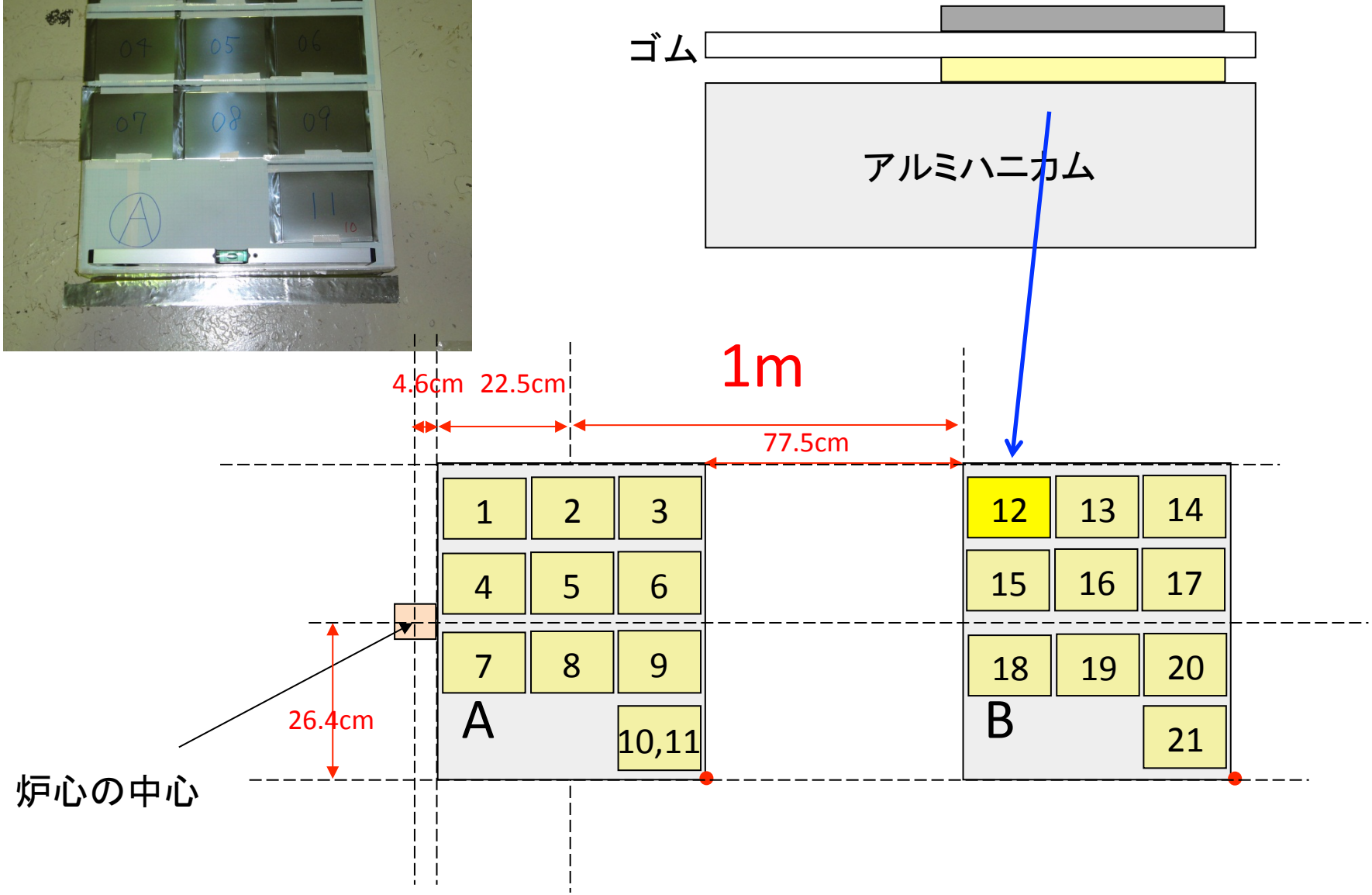
θx



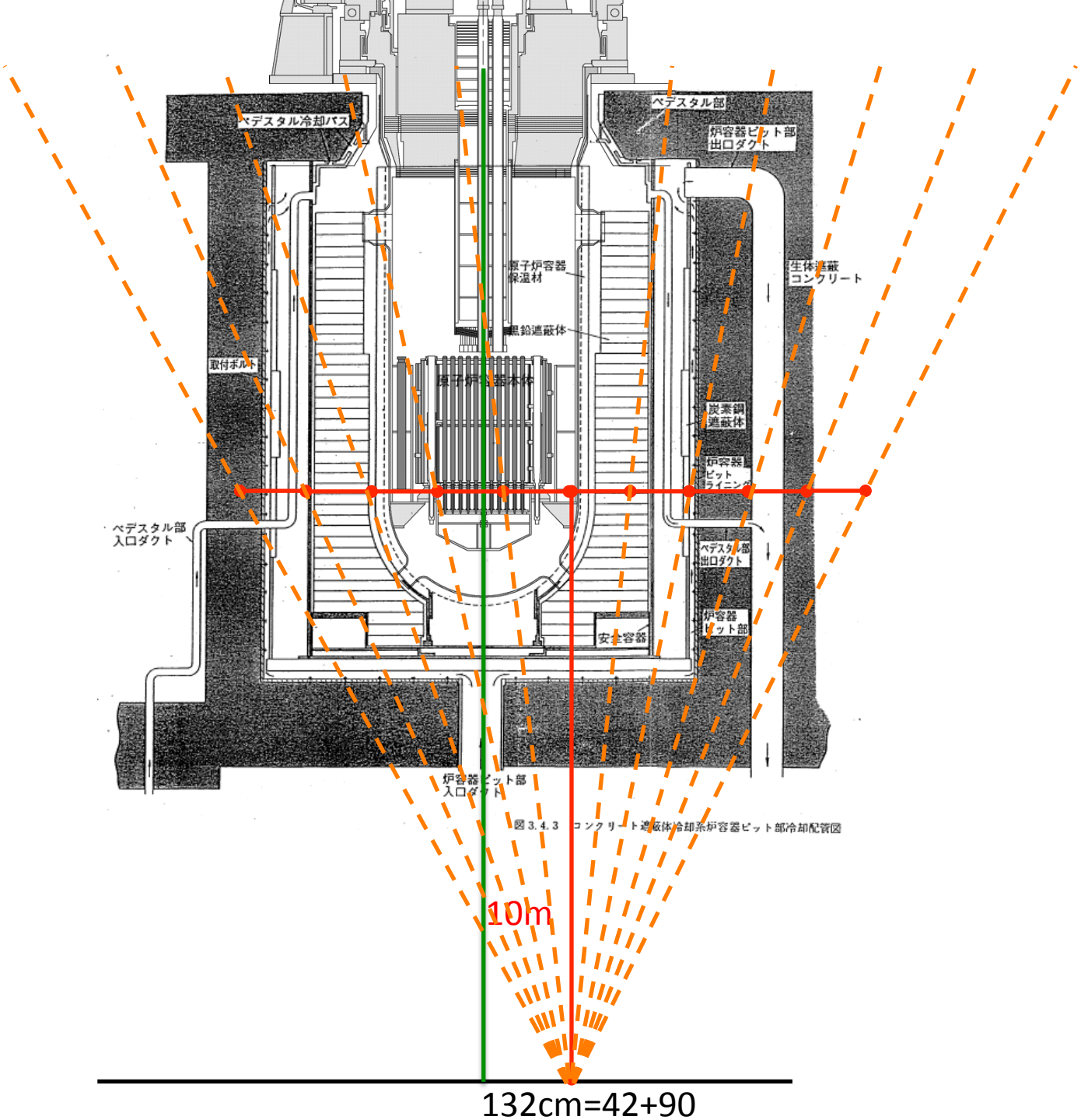
θx=0 で
切り出した
断面図

θy


01
02
03
04
05
06
07
08
09
A
11

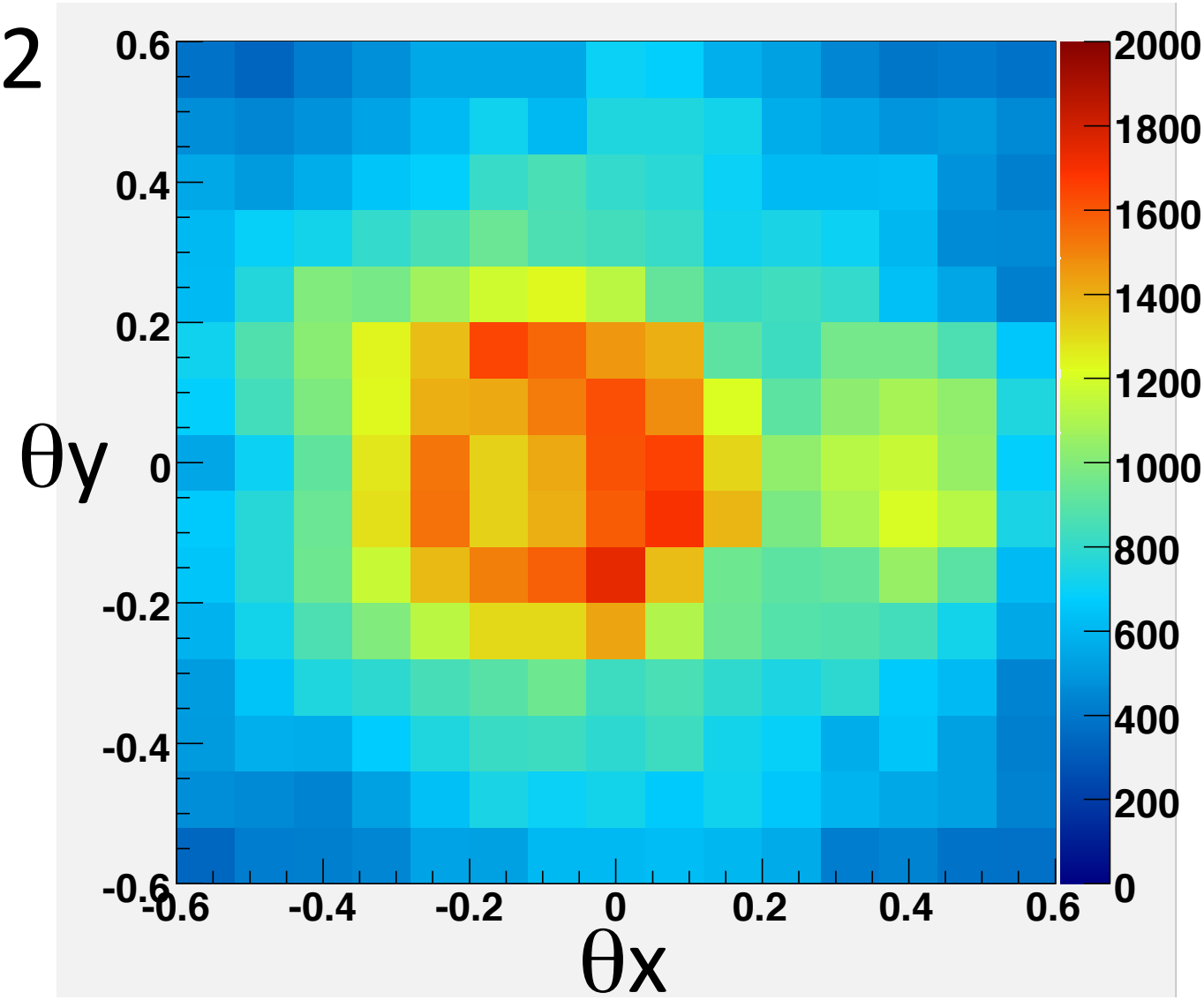

ゴム
アルミハニカム
1m
4.6cm
22.5cm
77.5cm
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10,11
A
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
B
26.4cm
炉心の中心

CH12


ペデスタル冷却パス
ペデスタル部
炉容器ピット部
出口ダクト
原子炉容器
保温材
生体遮蔽
コンクリート
黒鉛遮蔽体
取付ボルト
原子炉容器本体
炭素鋼
遮蔽体
炉容器
ピット
ライニング
ペデスタル部
入口ダクト
ペデスタル部
出口ダクト
炉容器
ピット部
安全容器
炉容器ピット部
入口ダクト
図 3.4.3 コンクリート遮蔽体冷却系炉容器ピット部冷却配管図
10m
132cm=42+90

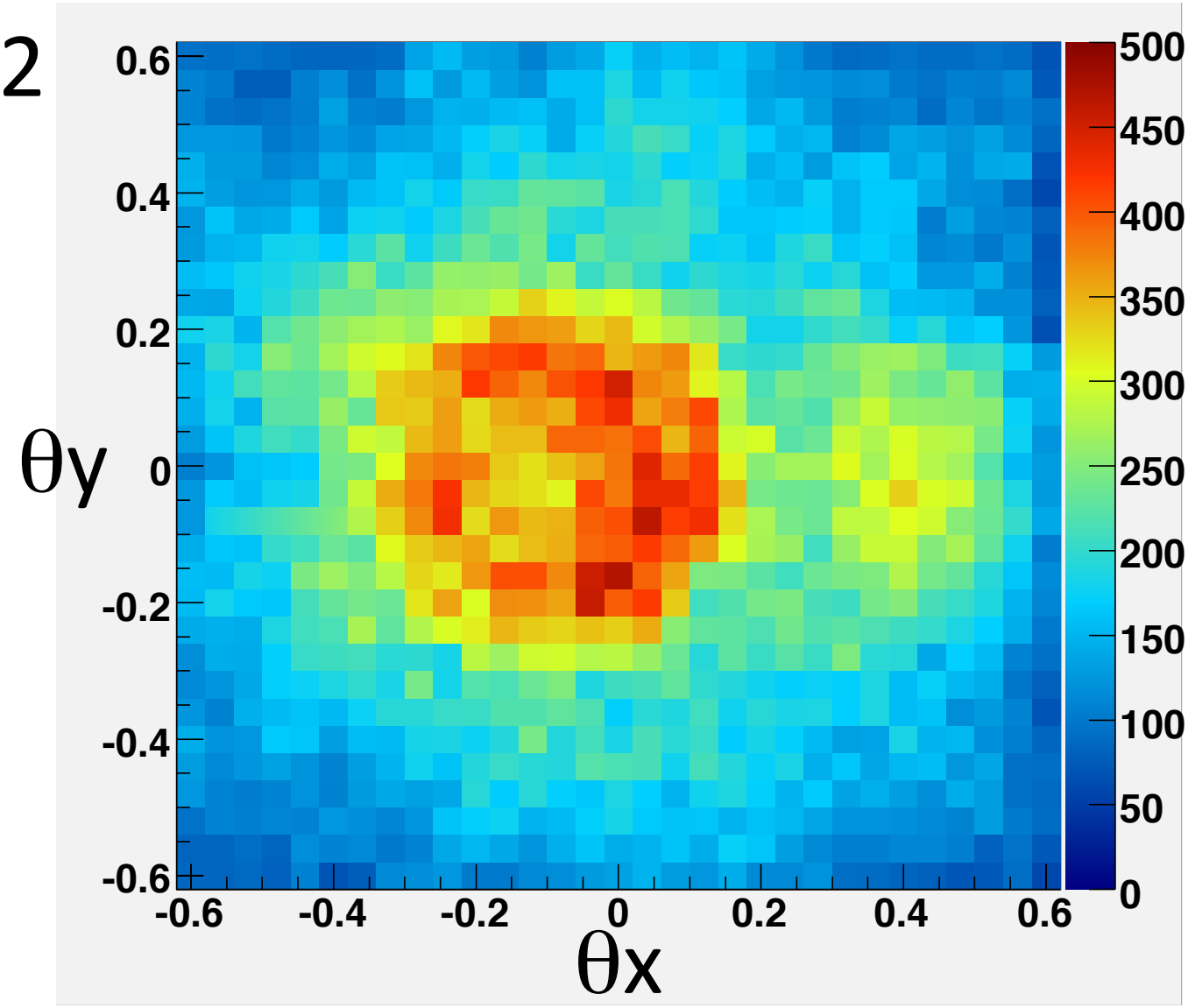
二次元角度分布（80mrad区切り、80cm@10m）

CH12

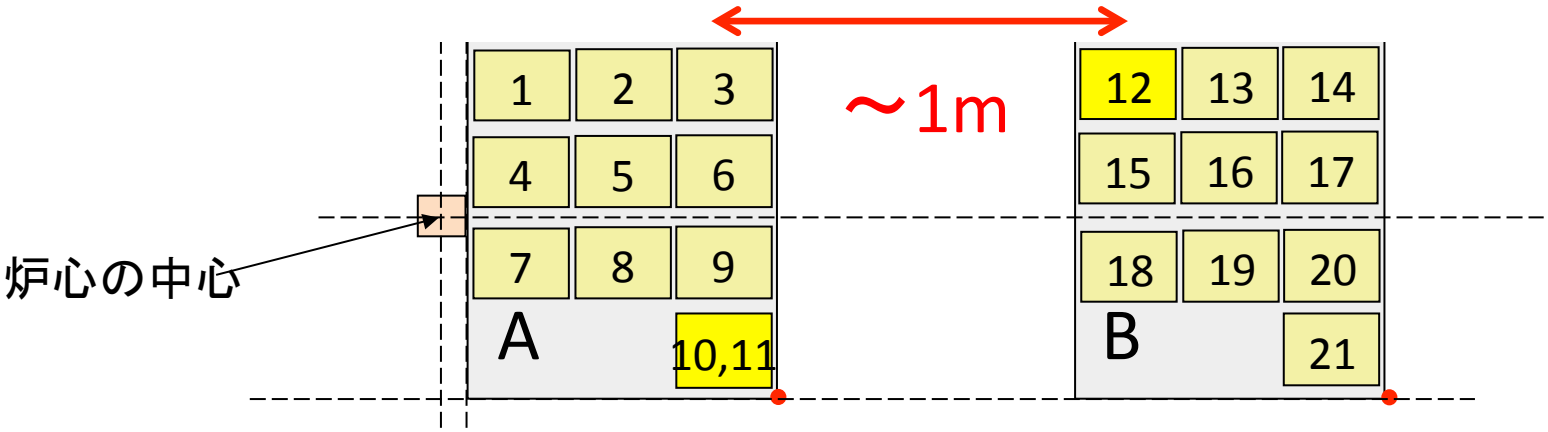


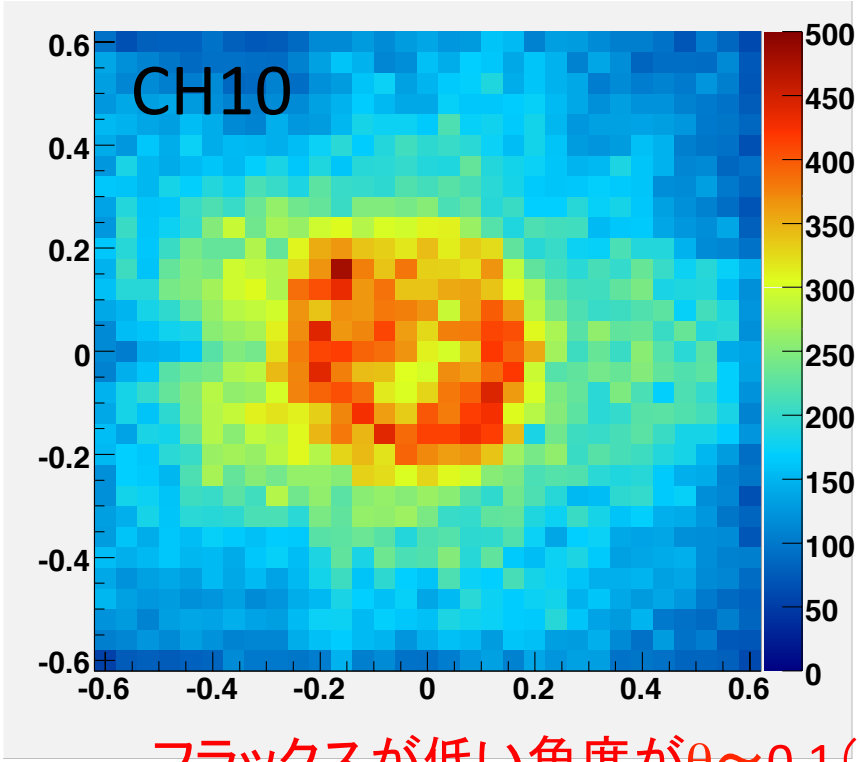
二次元角度分布（40mrad区切り、40cm@10m）

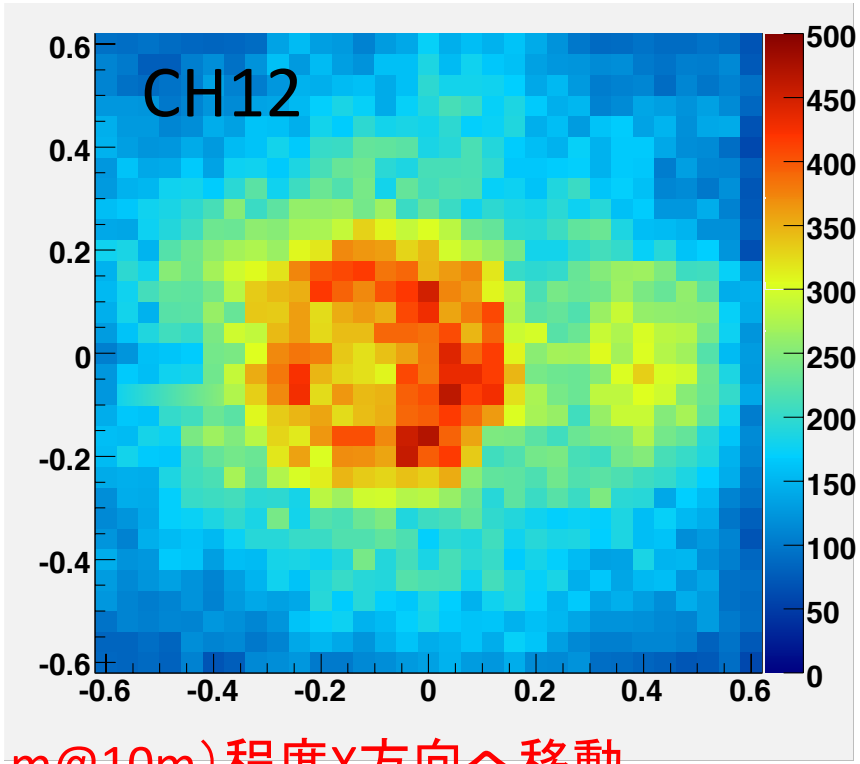
CH12



CH10とCH12の比較（約1m離れている）



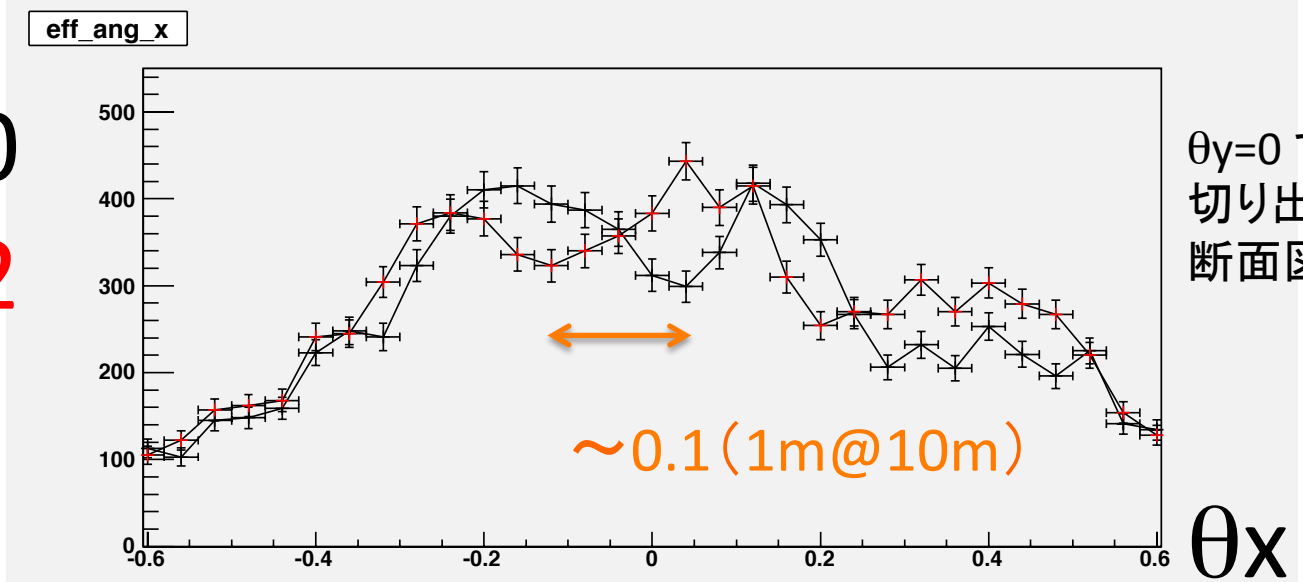




フラックスが低い角度がθ～0.1（1m@10m）程度X方向へ移動

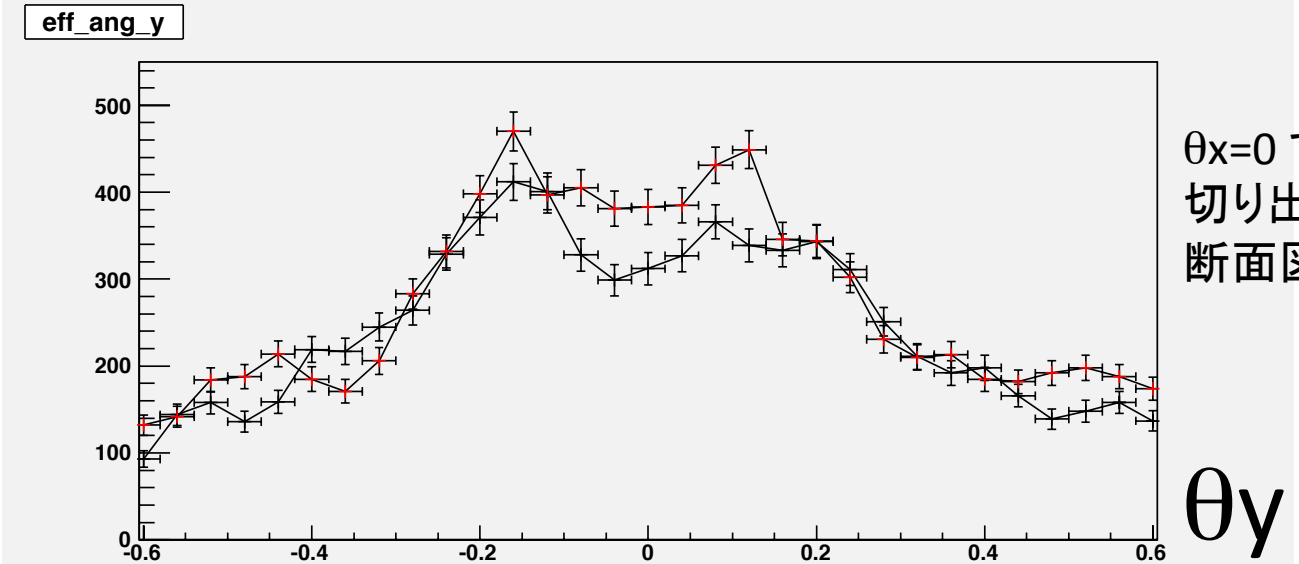
断面の比較

CH10
CH12



θy=0 で
切り出した
断面図

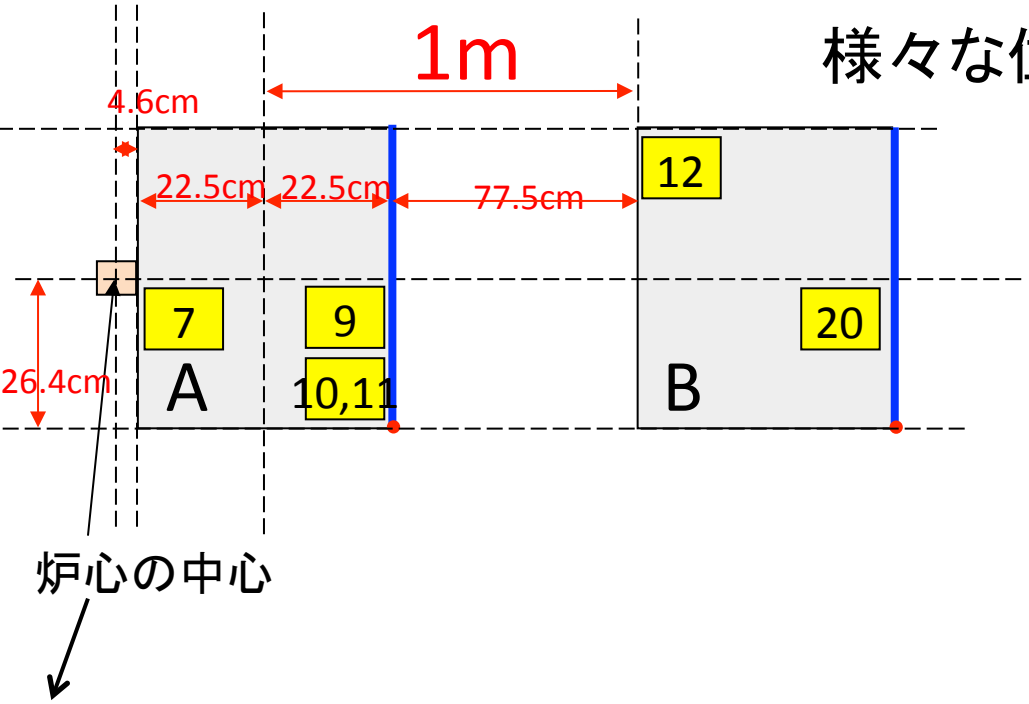
θx

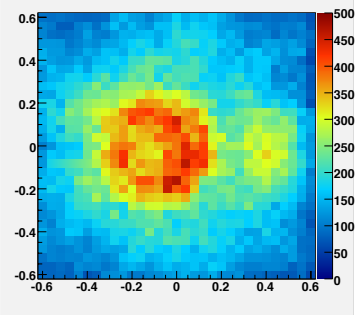


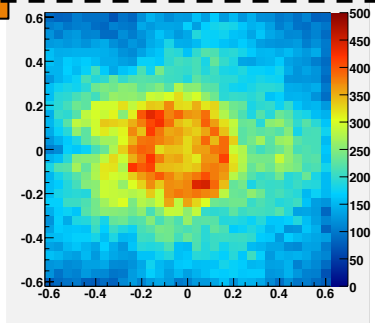
θx=0 で
切り出した
断面図

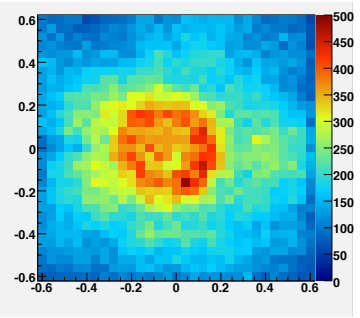
θy

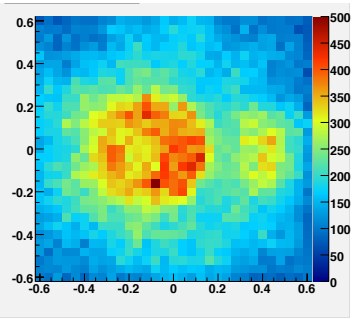
様々な位置における角度分布の比較

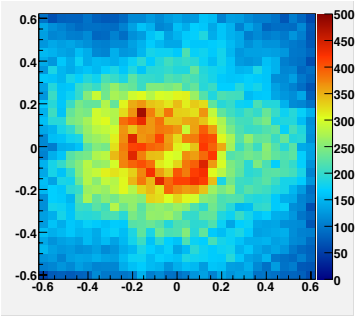












1枚の画像は、フィルム1パック
10cmx12.5cmサイズから得たもの

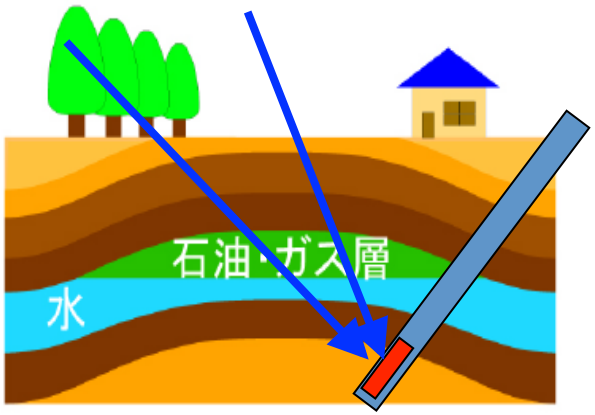
ミューオンラジオグラフィの研究対象

老朽大型人工構造物（内部の鉄筋腐食検査）

橋（>15m）～14万　内50年経過　～8000

ダム（国交省管轄）～500　内50年経過　～50

資源探査

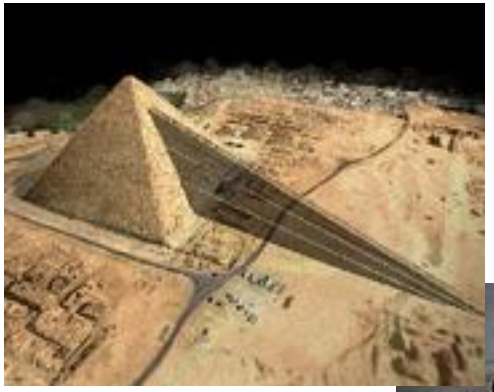


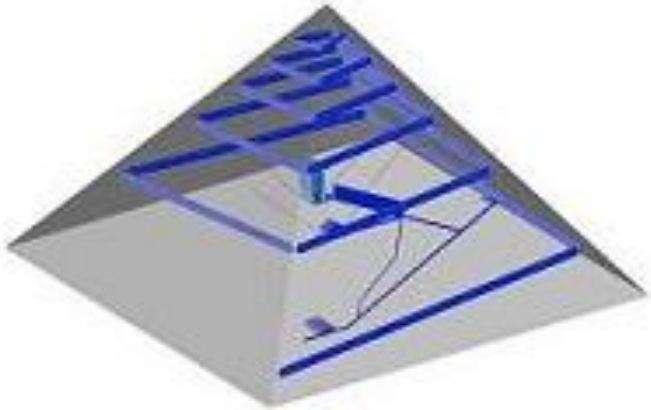
細いボーリング孔へ設置可能

ピラミッドの建造の謎

ピラミッド建造の方法に関して様々な説がある

- 直線傾斜路説
- 螺旋傾斜路説
- Houdinの内部トンネル説





まとめ

OPERA実験で培われた超高速原子核乾板読み取り技術により、原子核乾板を用いた電源不要・コンパクトな検出器による宇宙線ミューオンラジオグラフィが実現できる。

福島第一原子力発電所炉内状況の推定への適用検討として、高速増殖実験炉「常陽」におけるイメージング実証試験を行っている。
現在、解析中であるが、炉心構造と考えられる位置にミューオンの減少を観測した。

実スケールの原子炉（浜岡原子力発電所など）での実証

ミューオンラジオグラフィは、他にも、ピラミッドの建造の謎の解明、資源探査など興味深い研究対象がある