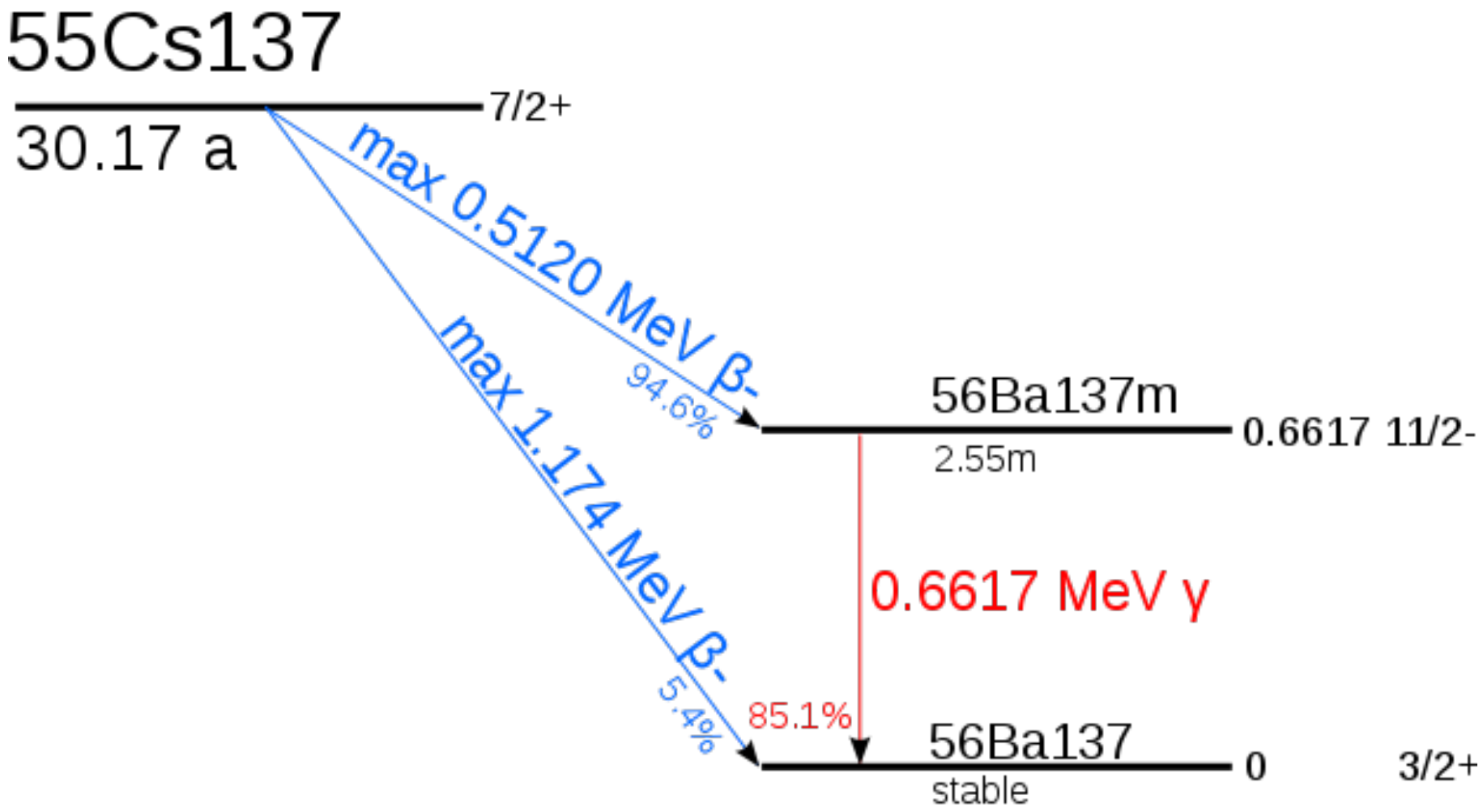
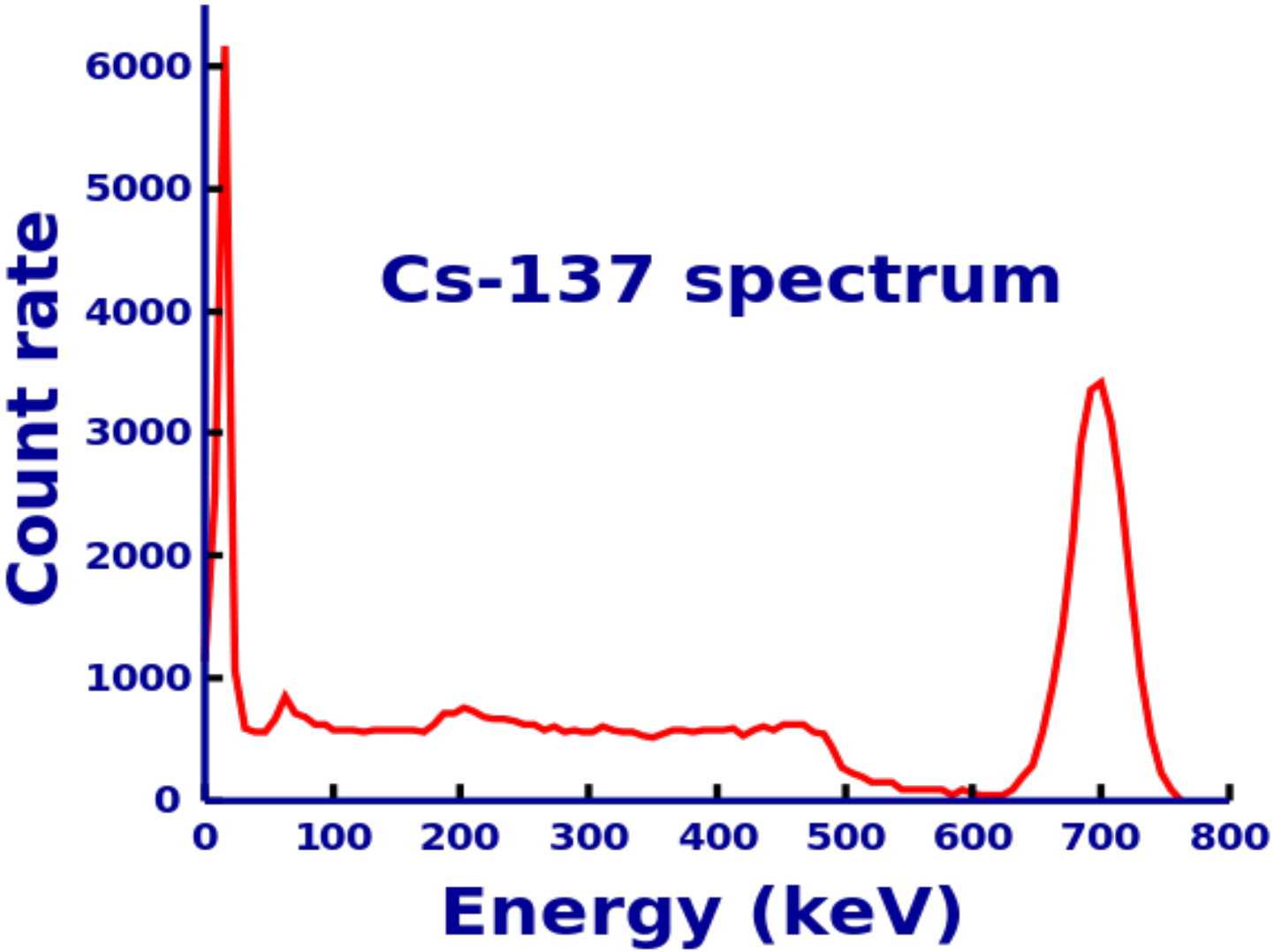
原発事故で放出された放射性セシウム（Cs-137）を目で見るガンマ線カメラの最近の進歩

豊田亘博
（大阪大学）

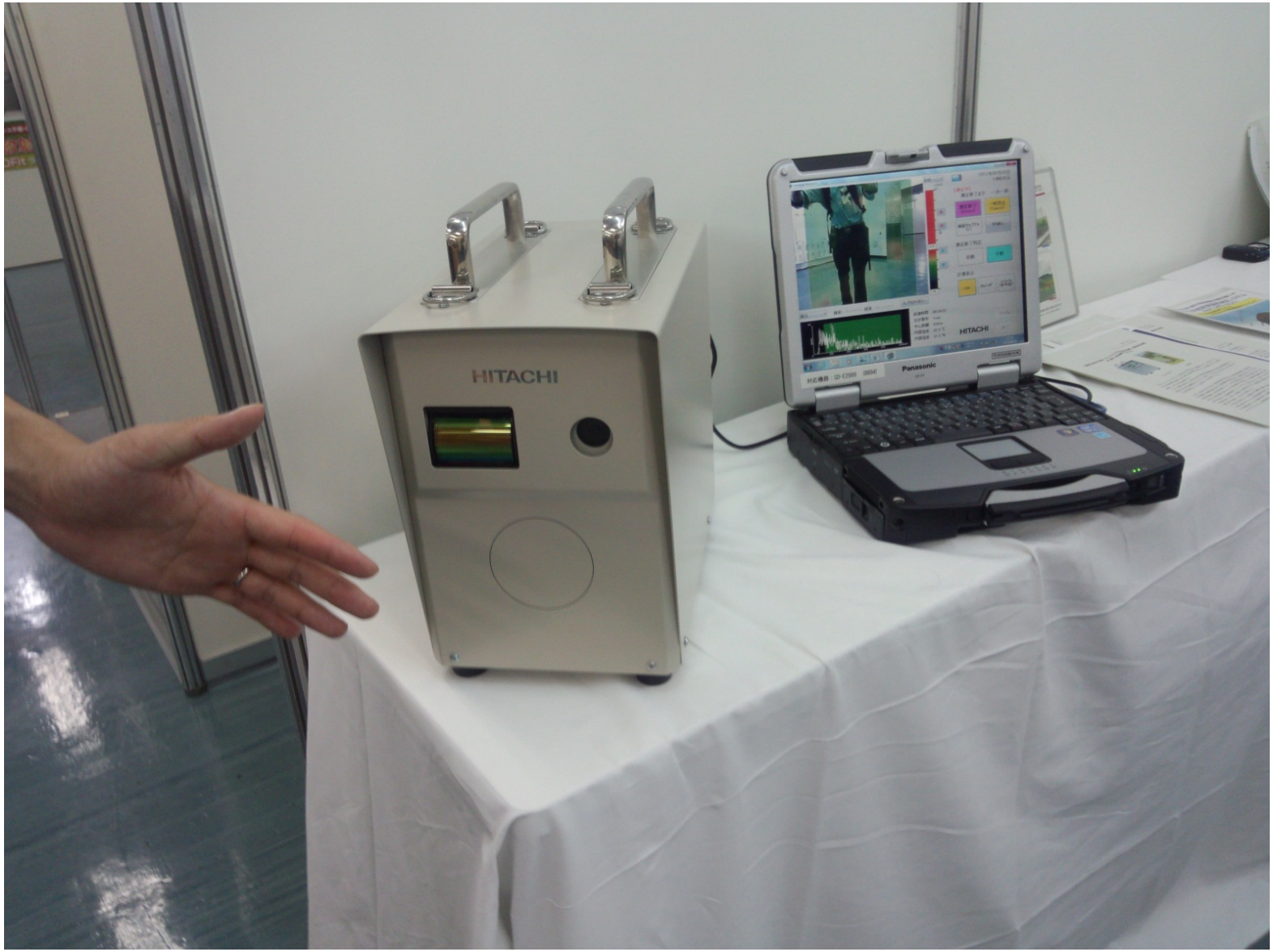
Cs-137 の崩壊図


55Cs137
7/2+
30.17 a
max 0.5120 MeV β-
94.6%
max 1.174 MeV β-
5.4%
56Ba137m
2.55m
0.6617 11/2-
0.6617 MeV γ
85.1%
56Ba137
stable
0
3/2+

Cs-137 のガンマ線スペクトル

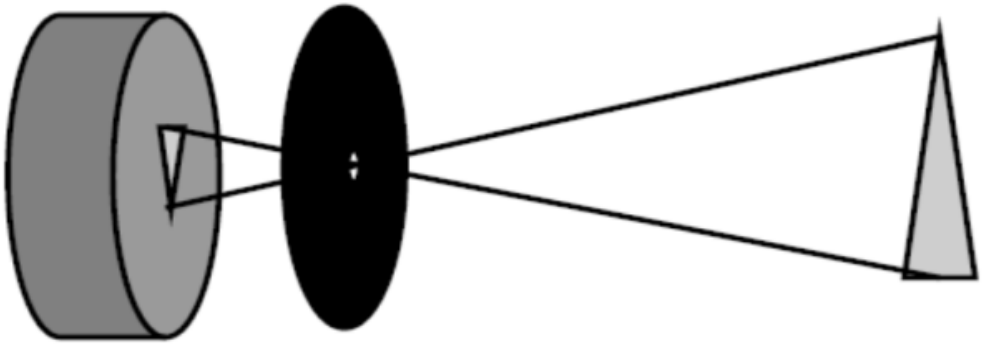


単眼の「ガンマカメラ」
針孔写真機の原理によるピンホールコリメータ方式



ピンホールコリメータ方式に基づく「ガンマカメラ」
→多孔窓（マルチホール）による「セシウムカメラ」

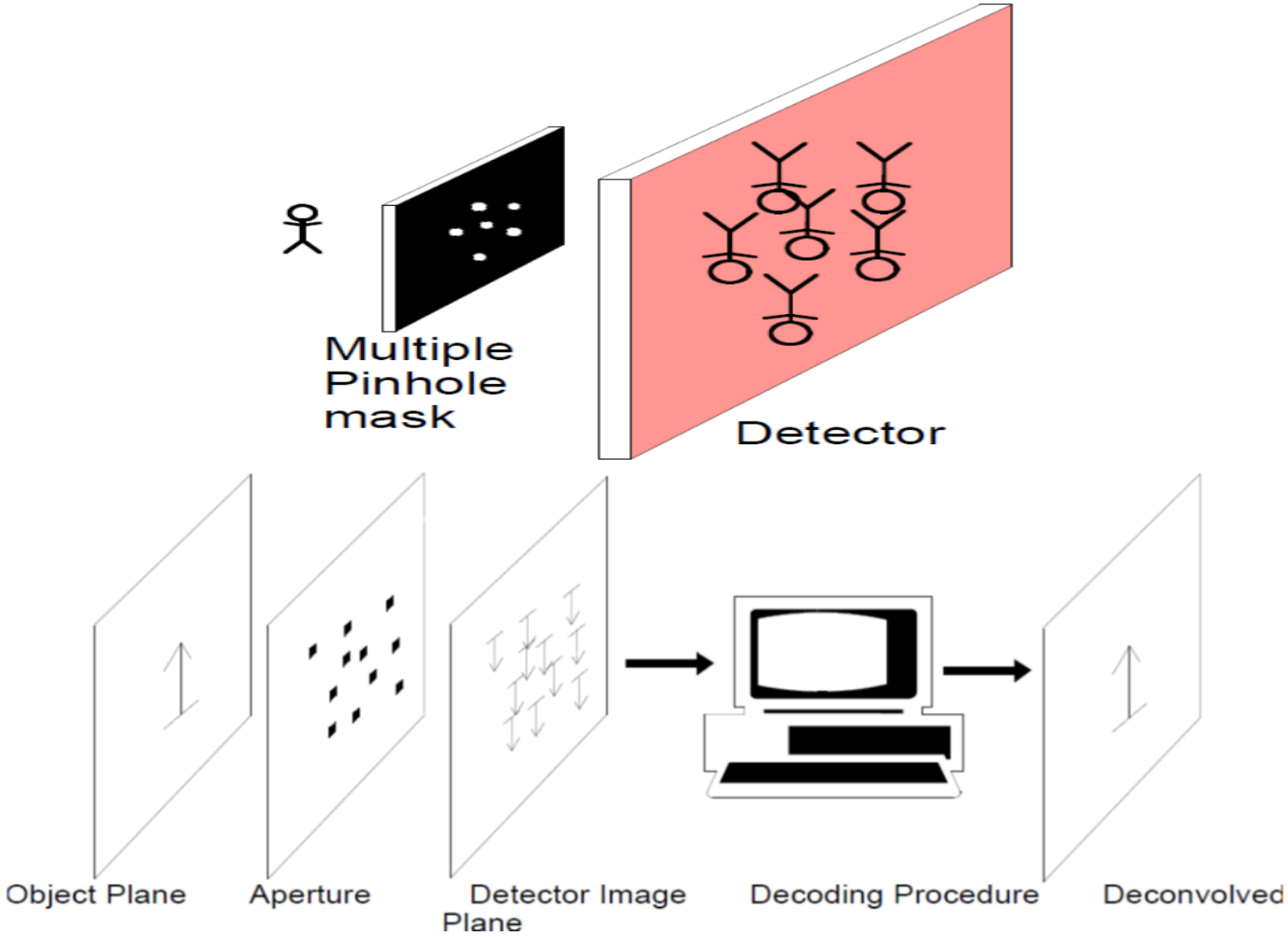
- 孔の大きさ：入射光量と解像度のバランス
- 課題１：アーチファクト（偽像）の出現
  →コンピュータソフトで解消し鮮明な画像
- 課題２：撮像時間の長いこと（20分～40分）
  →5分以内の短時間で撮像を完了
- 課題３：重量 30Kg以上（一人では運べない）
  →20Kg以下に軽量化



コンプトンカメラ

- 二つの結晶（ガンマ線検出器）を組み合わせ
- 入射するガンマ線を散乱体検出器でコンプトン散乱を起こさせ、次いで散乱したガンマ線を吸収体検出器で捉える
- 入射ガンマ線の飛来する方向とエネルギーを半導体光素子（MPPC）で計測し、画像化。

符号化多孔マスクの原理



符号化多孔マスク（Coded Aperture）の例

- Hexagonal Uniformly Redundant Array (HURA)

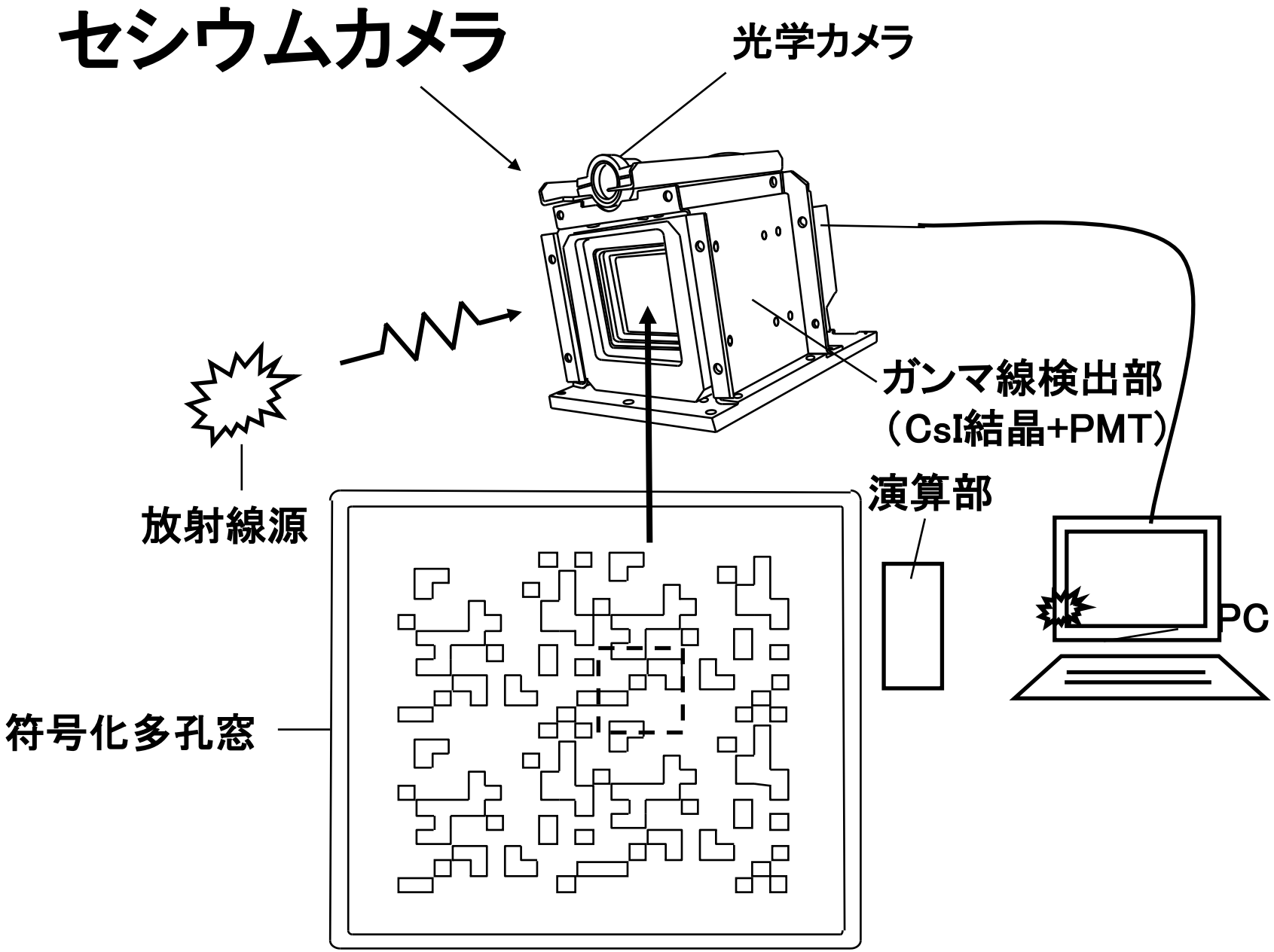
ピンホールコリメータと符号化多孔窓（Coded Aperture）による光学像の比較

実際の物体　ピンホール　多孔窓　符号化多孔窓　再構成画像

符号化多孔窓による利点

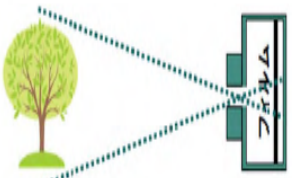
- 高い分解能
- 鮮明な映像
- 短い撮像時間

セシウムカメラ



ガンマ線可視化の三方式

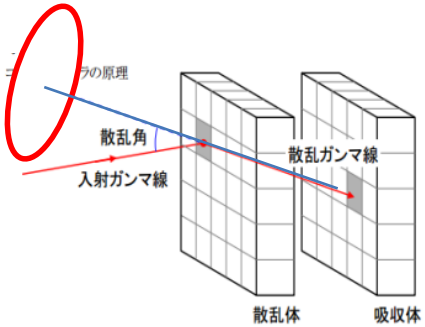
単眼



針孔写真機の原理でもっとも簡単

1. 入射光が少ないので撮像時間が長い
2. 解像度が悪い
3. 幻像の出現
4. 重い鉛遮へい（35kg）

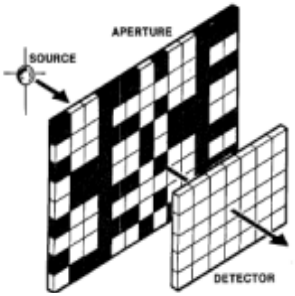
コンプトン散乱

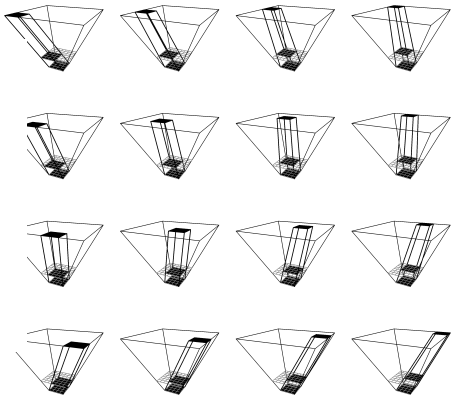


光子のコンプトン散乱の角度とエネルギー損失から入射方向を推定

1. 長い撮像時間
2. 入射光がたくさん検出器に当たると画像化が難しい
3. 幻像の出現
4. 鉛遮へいが不要なので軽量（2kg）

符号化多孔マスク





マスクを通った光のパターンから入射方向を決定

1. マスクの多数の孔から入射するので短時間に解像度の良い画像が得られる
2. あらかじめバックグランドの幻像（ノイズ）を消去
3. 鉛遮へいが必要なので重量は20kg

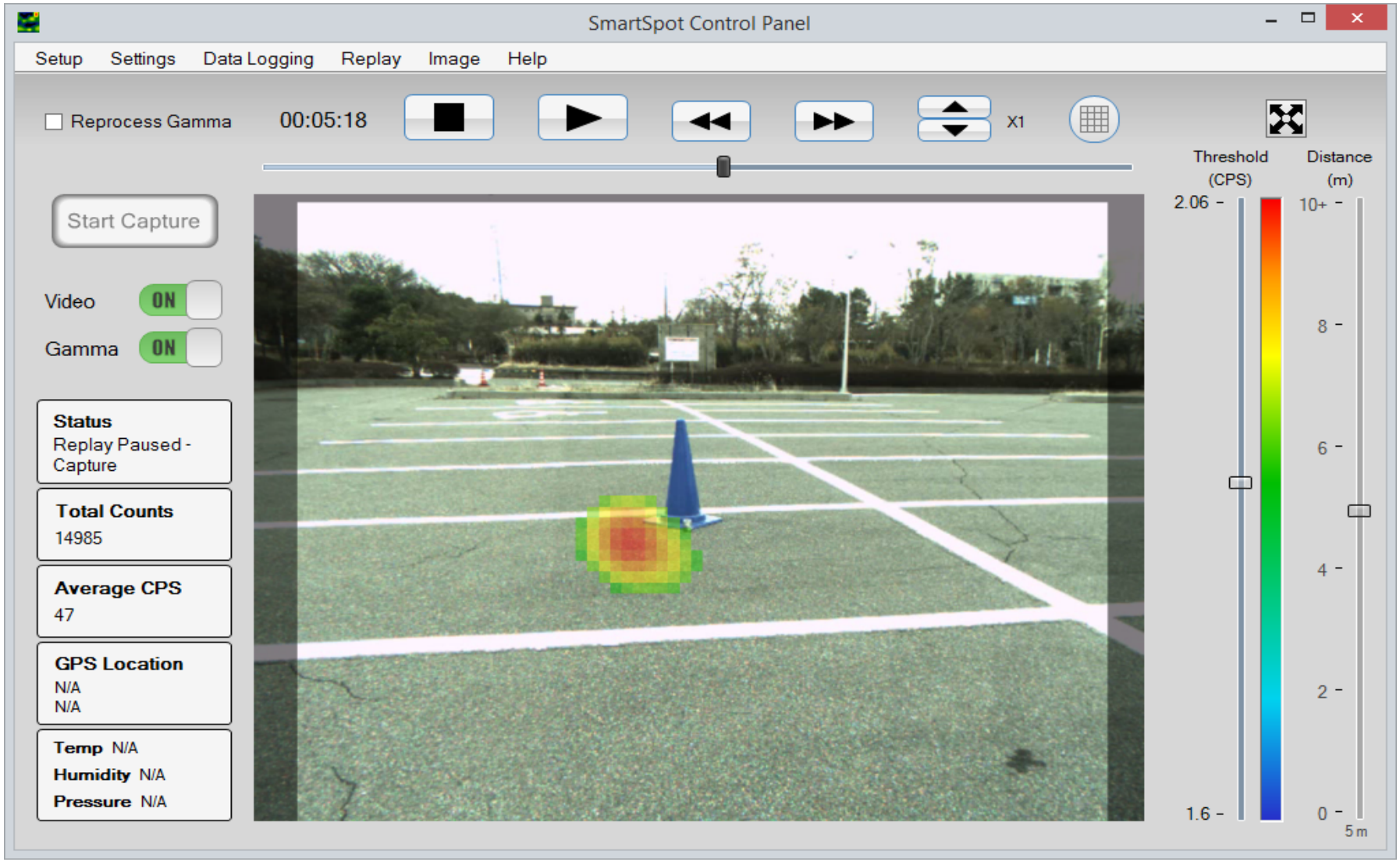
福島県富岡町の現地で比較試験

除染を終えた富岡町スポーツセンターの駐車場（BGD 0.5μSv/h）

SmartSpot コントロールパネル
構成
映像
ヘルプ
00:00:00
5 メート
(計数毎秒)
13
9.8
6.5
3.3
0
測定開始
現在の実行状態
再現のみ
総計数
0
平均計数毎秒
0
GPS位置情報
-
-
温度 -
湿度 -
気圧 -
SmartSpot™500

ひび割れに入り込んだCs-137からガンマ線

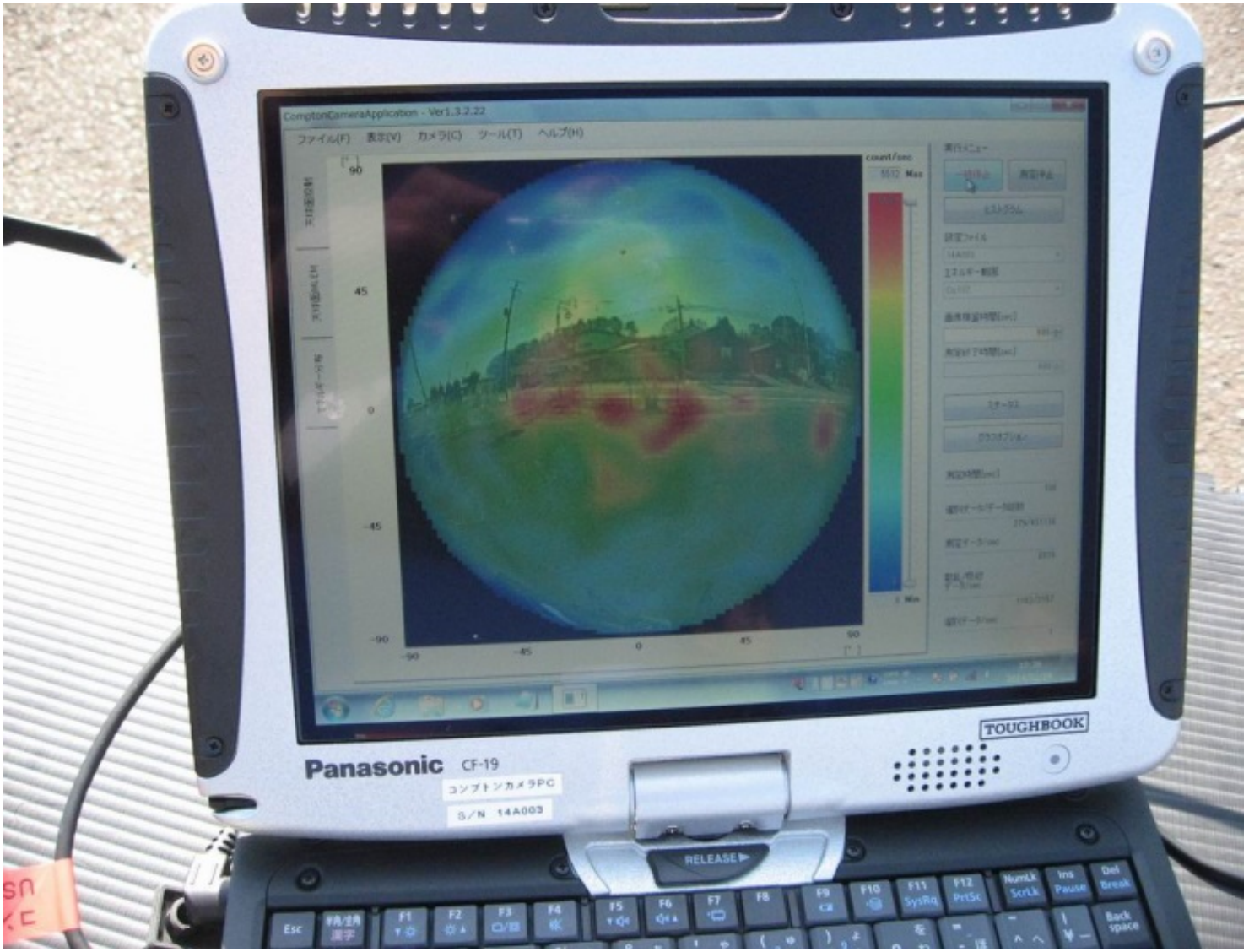
符号化多孔マスクで2MBqのCs-137線源から5mの位置で5分間撮像



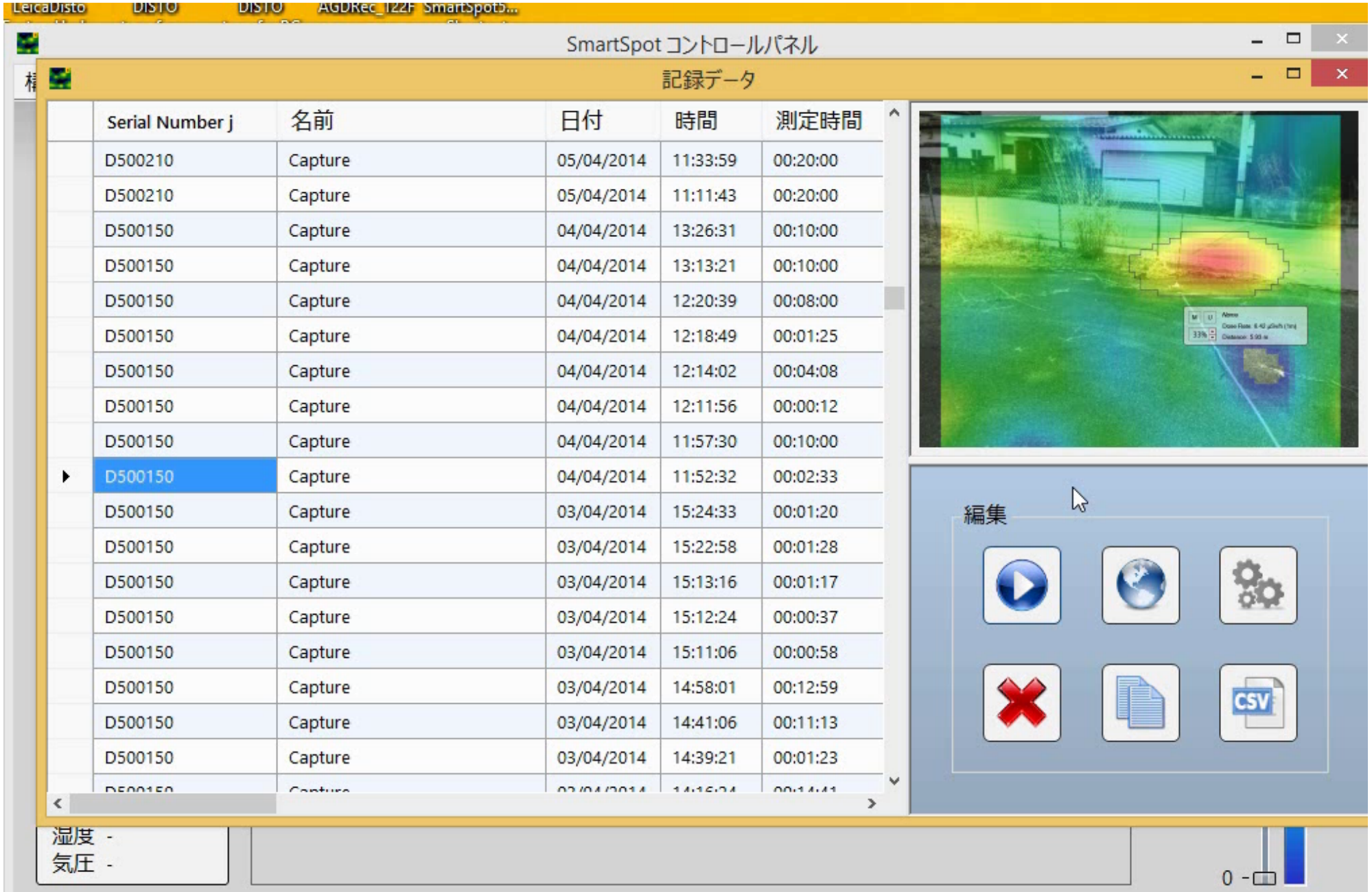
GammaDetector2
AUTO
0.00438
cps
100%
0%
2014年04月04日
13時40分
【測定中】
測定終了まで　--分--秒
測定終了
(Enter)
一時停止
(Space)
画面キャプチャ
(C)
やり直し
測定終了判定
自動
手動
計測表示
cps
Bq/cm²
μSv/h
(参考値)
バックグラウンド補正
Report
総合
緯度: --.------
経度: ---.------
モノクロ⇔カラー
経過時間 00:10:20
全計数 616count
相対誤差 24 %
中心距離 4.70m
内部温度 23.7 ℃
内部湿度 28.3 %
HITACHI
TOUGHBOOK

単眼カメラで20分の撮像画像

コンプトンカメラ画像

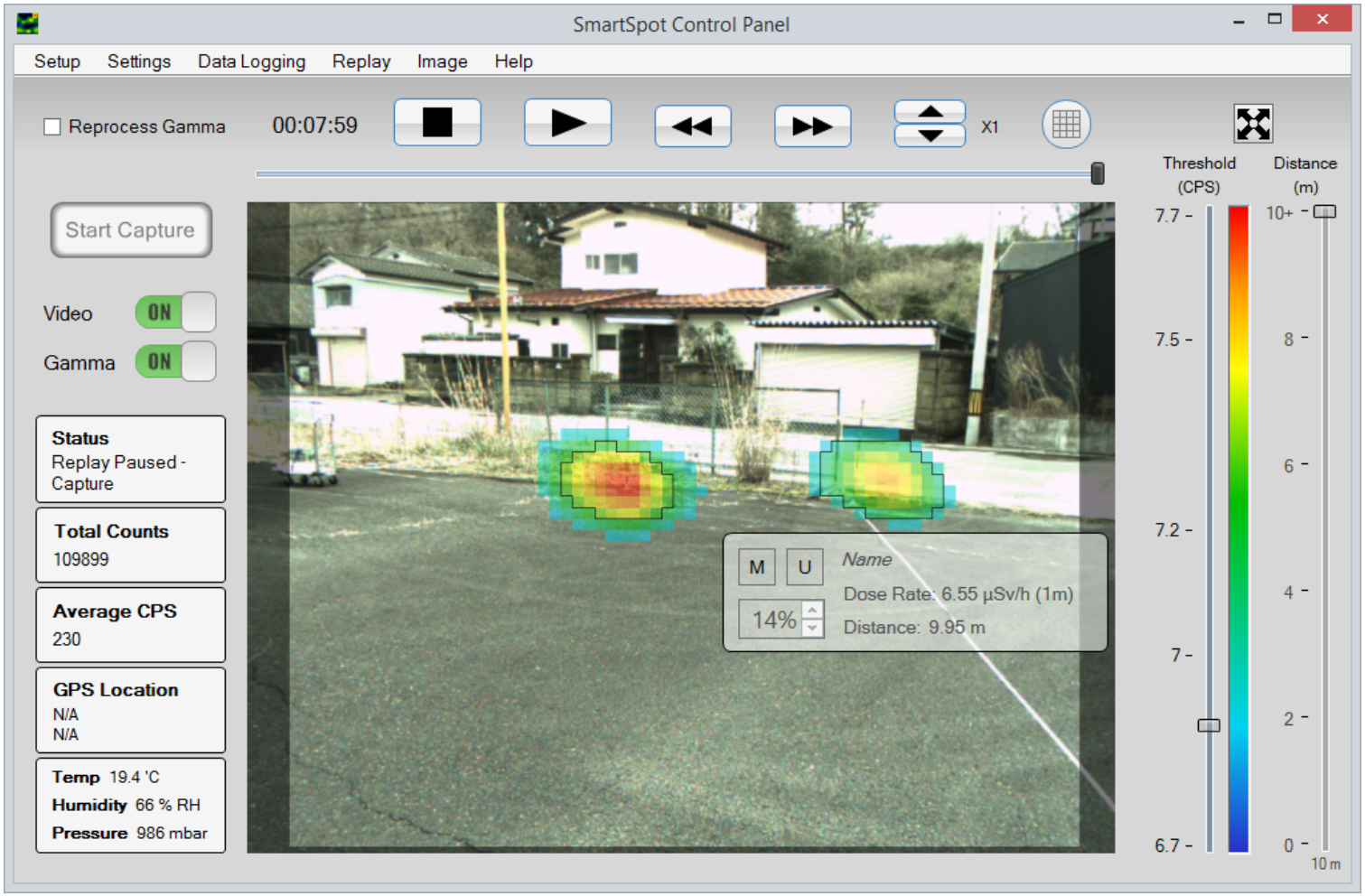

ComptonCameraApplication - Ver1.3.2.22
ファイル(F)
表示(V)
カメラ(C)
ツール(T)
ヘルプ(H)
count/sec
Panasonic
CF-19
コンプトンカメラPC
S/N 14A003
TOUGHBOOK
RELEASE

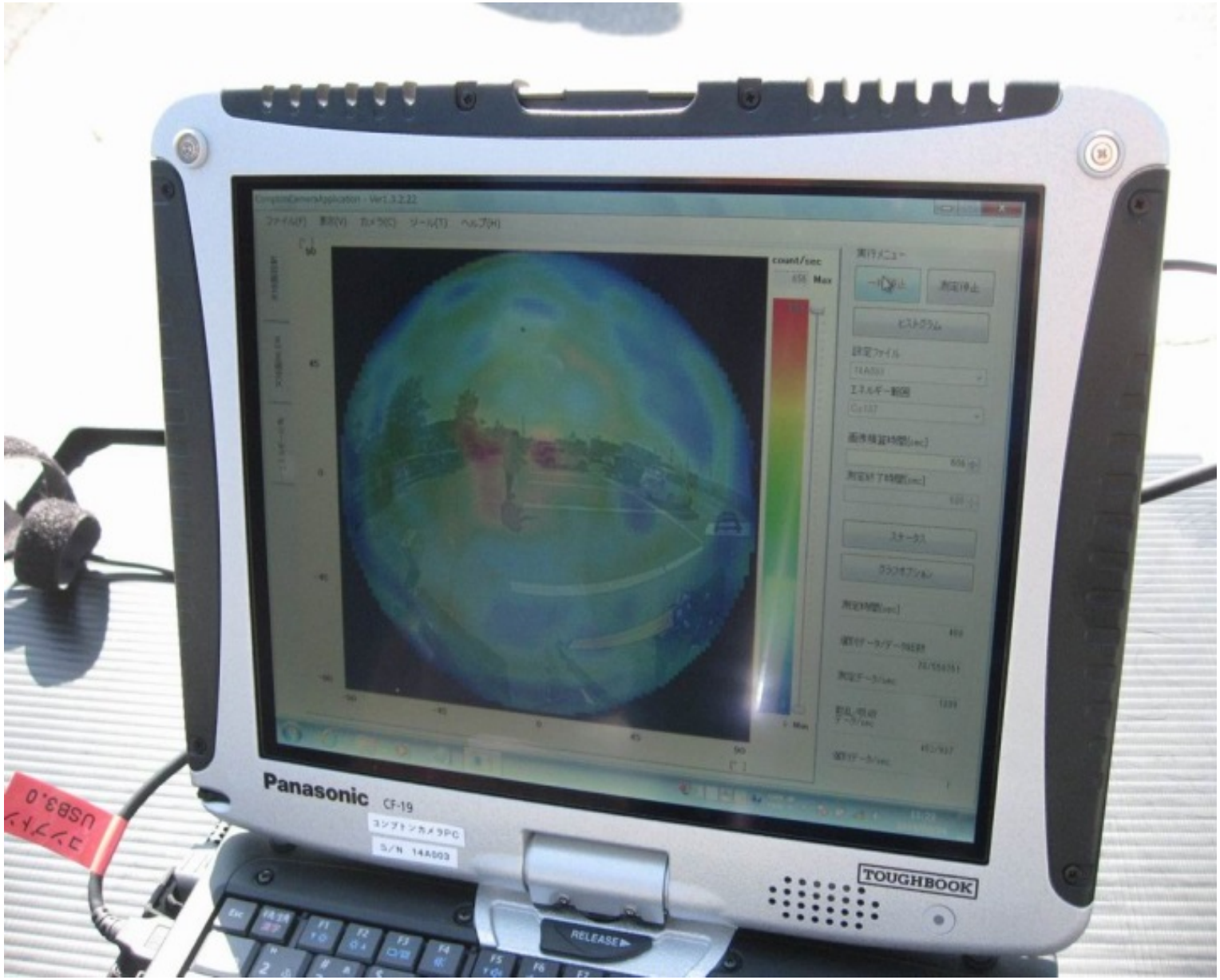
Panasonic


SmartSpot コントロールパネル
記録データ
Serial Number j
名前
日付
時間
測定時間
D500210 Capture 05/04/2014 11:33:59 00:20:00
D500210 Capture 05/04/2014 11:11:43 00:20:00
D500150 Capture 04/04/2014 13:26:31 00:10:00
D500150 Capture 04/04/2014 13:13:21 00:10:00
D500150 Capture 04/04/2014 12:20:39 00:08:00
D500150 Capture 04/04/2014 12:18:49 00:01:25
D500150 Capture 04/04/2014 12:14:02 00:04:08
D500150 Capture 04/04/2014 12:11:56 00:00:12
D500150 Capture 04/04/2014 11:57:30 00:10:00
D500150 Capture 04/04/2014 11:52:32 00:02:33
D500150 Capture 03/04/2014 15:24:33 00:01:20
D500150 Capture 03/04/2014 15:22:58 00:01:28
D500150 Capture 03/04/2014 15:13:16 00:01:17
D500150 Capture 03/04/2014 15:12:24 00:00:37
D500150 Capture 03/04/2014 15:11:06 00:00:58
D500150 Capture 03/04/2014 14:58:01 00:12:59
D500150 Capture 03/04/2014 14:41:06 00:11:13
D500150 Capture 03/04/2014 14:39:21 00:01:23
編集
CSV
湿度 -
気圧 -
0 -

バックグランドが1.5μSv/hの駐車場に存在するホットスポット（13 MBqの Cs-137）

ホットスポットまでの距離を測定することによりホットスポットの放射能量を表示




count/sec
Max
Panasonic
CF-19
S/N 14A003
TOUGHBOOK
RELEASE

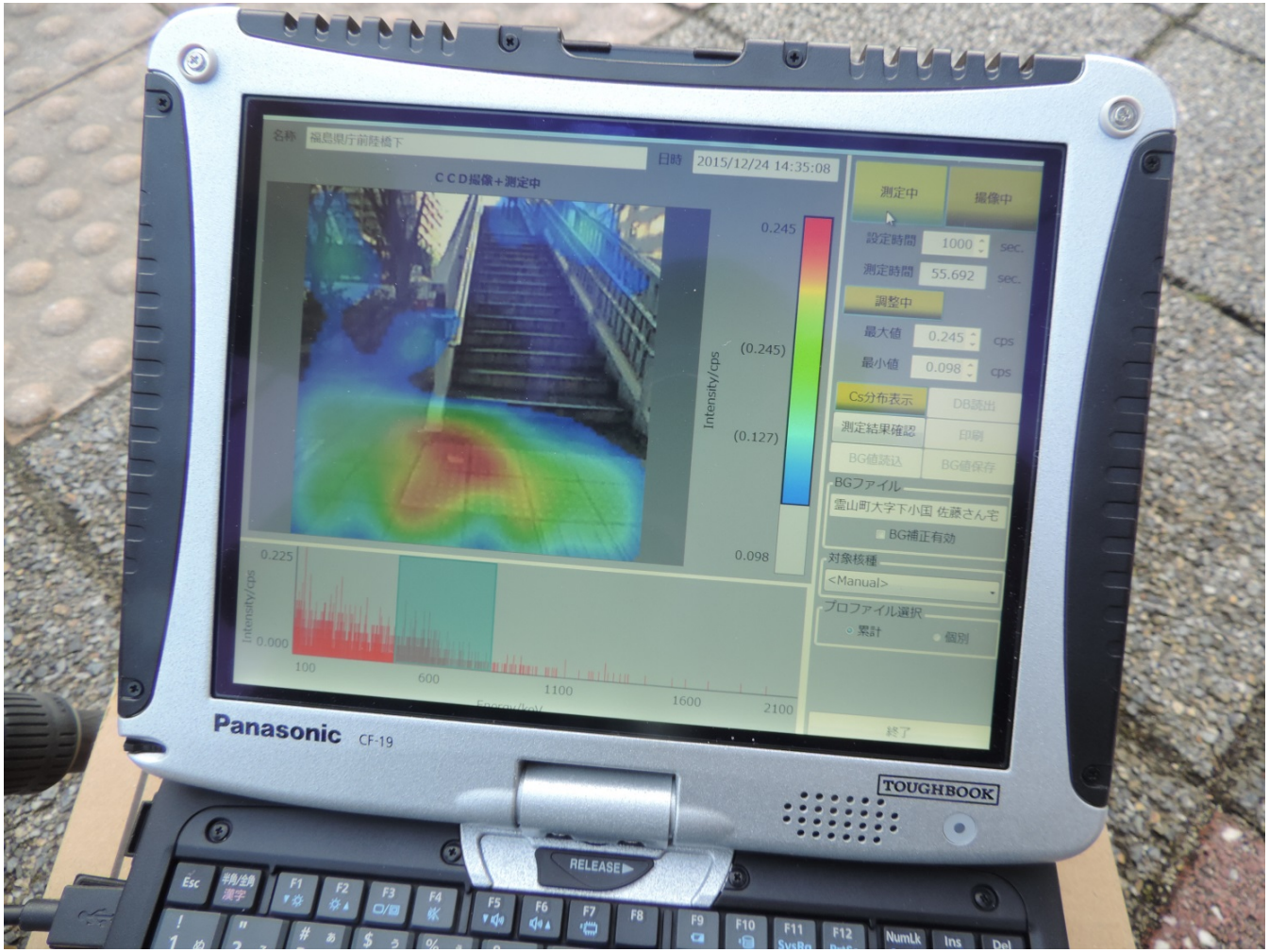
福島市中心部の除染済み陸橋

陸橋の下部にCs-137のホットスポット

符号化多孔マスクガンマカメラによる映像

マルチコリメータ方式による複眼カメラ

同じ陸橋下部で


名称
福島県庁前陸橋下
日時
2015/12/24 14:35:08
CCD撮像+測定中
0.245
(0.245)
(0.127)
0.098
Intensity/cps
測定中
撮像中
設定時間
1000
sec.
測定時間
55.692
sec.
調整中
最大値
0.245
cps
最小値
0.098
cps
Cs分布表示
DB読出
測定結果確認
印刷
BG値読込
BG値保存
BGファイル
霊山町大字下小国 佐藤さん宅
BG補正有効
対象核種
<Manual>
プロファイル選択
累計
個別
終了
0.225
0.000
100
600
1100
1600
2100
Panasonic
CF-19
TOUGHBOOK
RELEASE

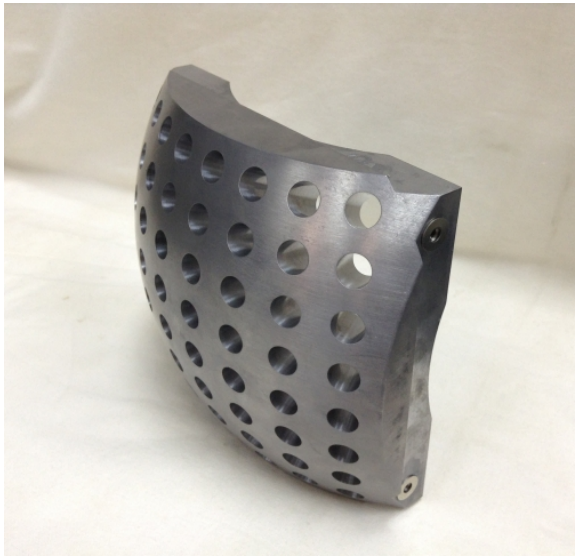
マルチコリメータ方式

■マルチコリメータ

- 20mm厚の球殻上に複数の開口を設けた遮蔽体
- 開口を放射状に配列

  →特定の角度だけのガンマ線が開口を通過する
- 8×8計64個の開口を有する

左右方向：9.6度間隔
上下方向：8.1度間隔 → 左右67.2度、上下56.7度の視野角を実現する

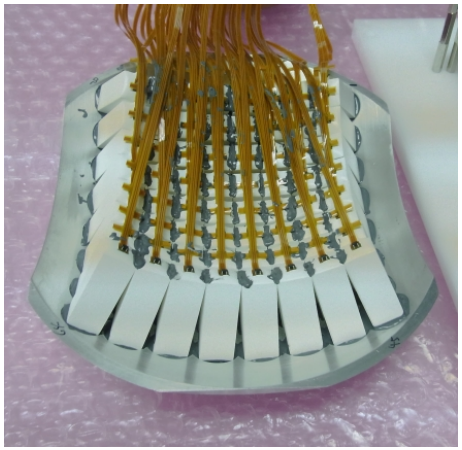


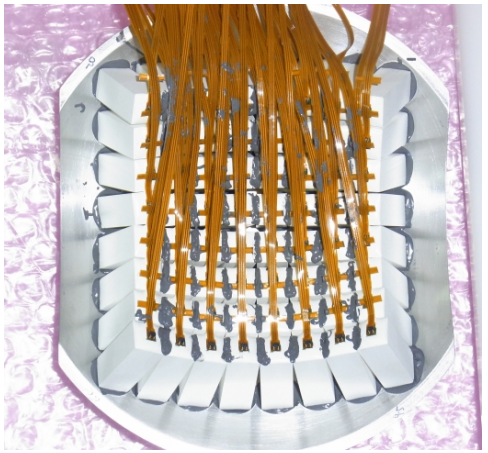
- このコリメータの後方にガンマ線検出器を配置することでガンマ線の飛来方向を特定する

検出器の構造

■開口部に合わせた配列構造を持つ検出器

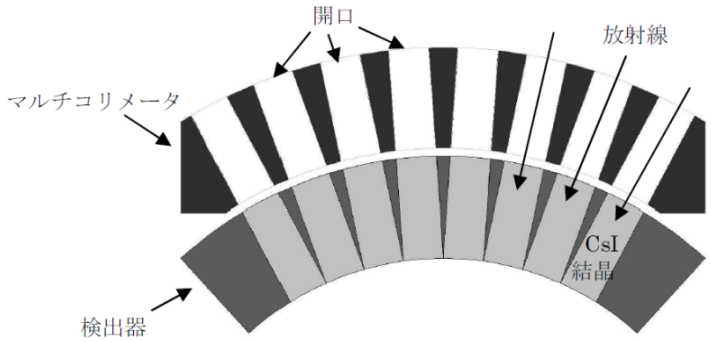
- 64個の開口に対し、64個の検出素子を持つ
  - 各開口を通過したガンマ線をそれに対する検出素子が測定する
  - 強度の大きい検出器の位置がガンマ線の飛来方向となる
    → 位置の特定が可能
- マルチコリメータ同様球殻状かつ放射状に配列(特許申請中)
  - 放射状の開口からより効率よくガンマ線を捉えるための構造
  - 検出素子はCsI結晶、サイズは1素子あたり 口10mm 高さ25mm
  - 半導体光検出素子 はMPPCを採用



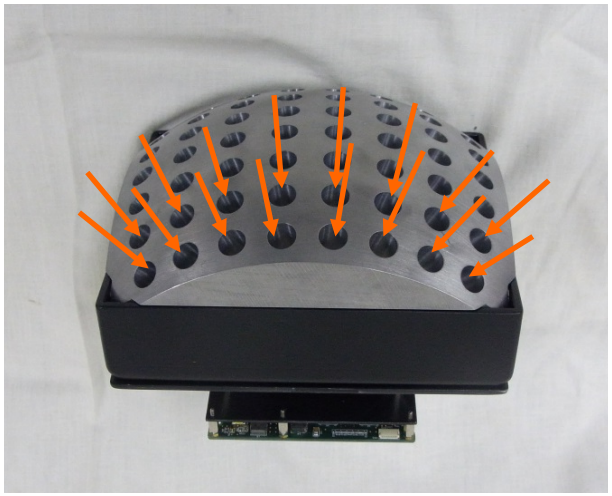


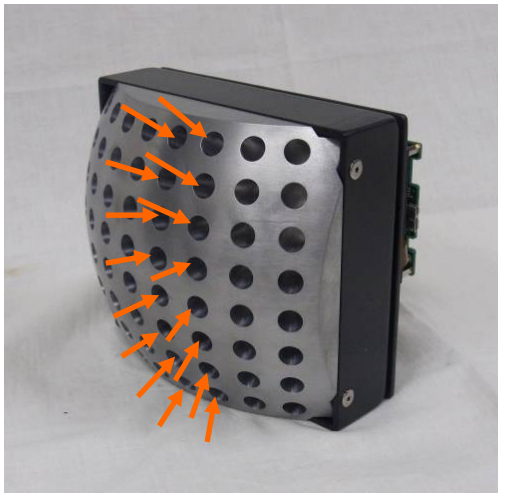
ガンマ線飛来方向の特定

・1対の開口部と検出素子がガンマ線の飛来方向を特定



断面図

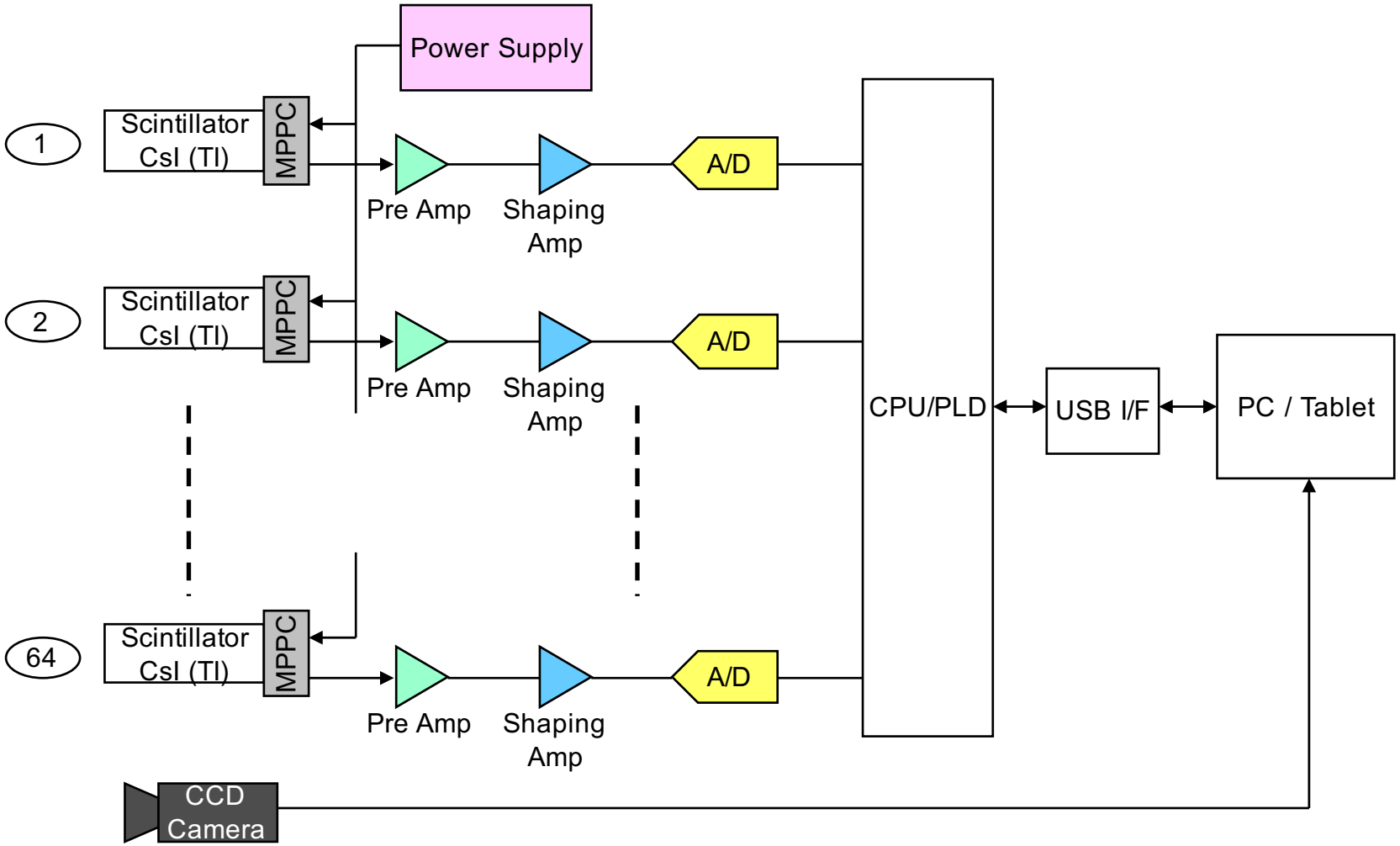




・さらに、8×8個の検出器から得られたデータをもとに、計算による平滑化および補間処理を実施し、80×80の微細メッシュ化を行う

システム構成

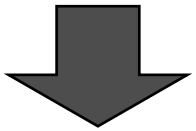
■ブロック図



マルチコリメータ方式の特徴

■特徴

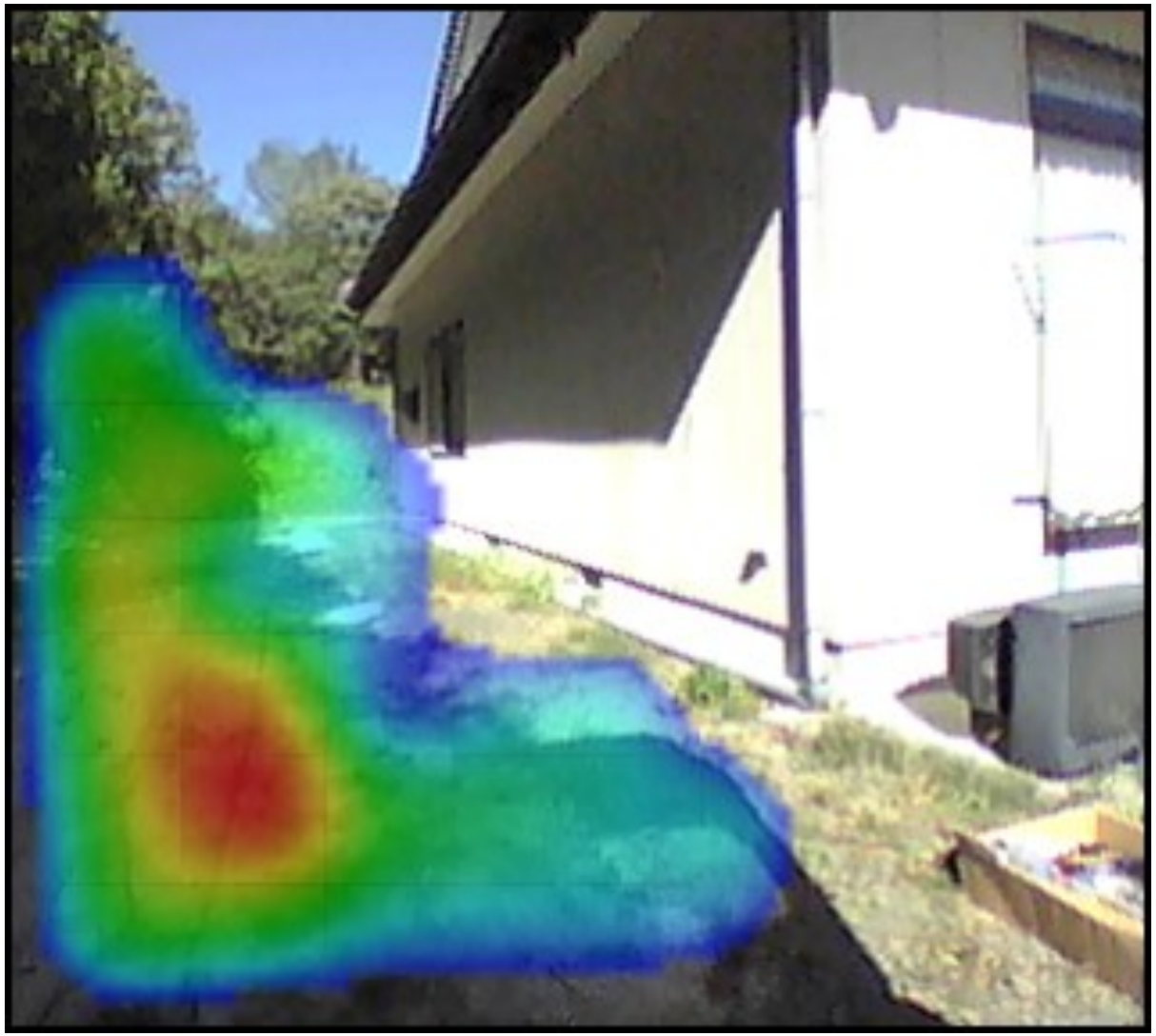
・ピンホール方式と比べて大きな開口面積が確保できるため明るい
　　→ 検出効率の高い放射線可視化法
　　→ 測定時間の短時間化
・コンプトン散乱方式のようなアーティファクトが無い
　　→開口部と検出素子が1対1の関係
　　→原理的に計算によるアーティファクトが発生しない
・Coded Mask方式のような複雑な遮蔽体構造や計算処理を必要としない
　　→装置の軽量化
　　→位置特定の信頼性が得られやすい



マルチコリメータ方式は
測定時間が短い
ホットスポットの表示に信頼性が高い
軽量撮像時間が短い

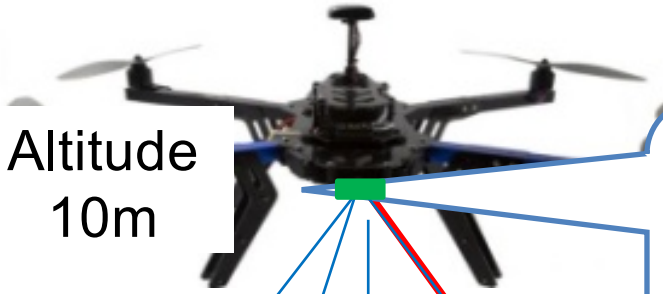
福島県飯館村の家屋で（除染後）

溝にホットスポット



空中から撮像の試み

ドローン



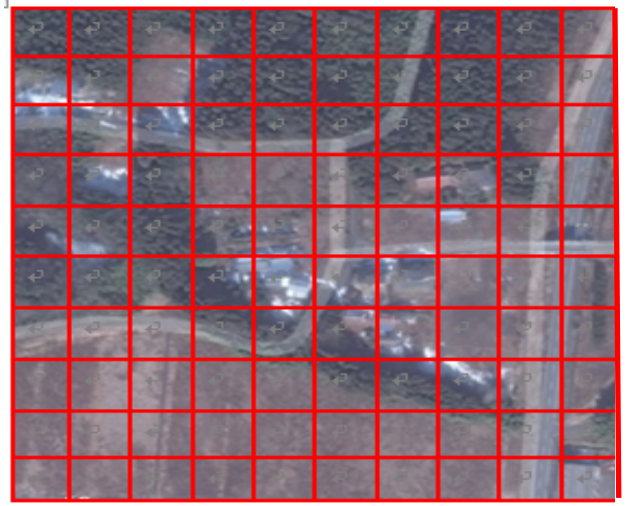
Altitude
10m

Measurement unit
- Gamma ray detector
- CCD camera
- GPS
- Communication module

2.4GHz/5GHz Radio

Display unit
- Optical images
- Cs−137 distribution
- Location information
- Flight route

Measurement area
12m × 12m
100m²



Surveying perfomance:
100m × 100m/day

ドローンにカメラを搭載

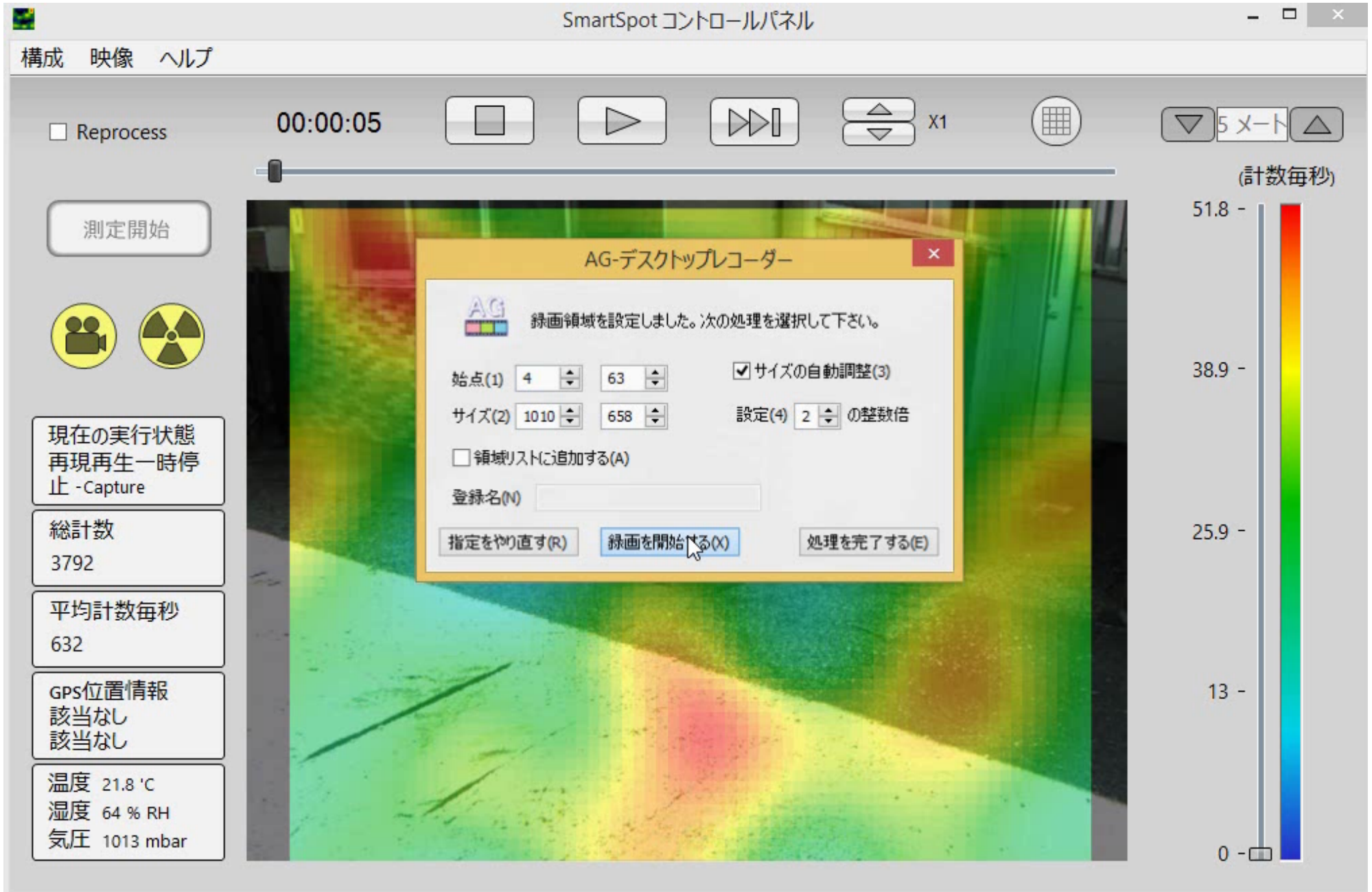
ドローンが墜落（ペイロードvs重量）

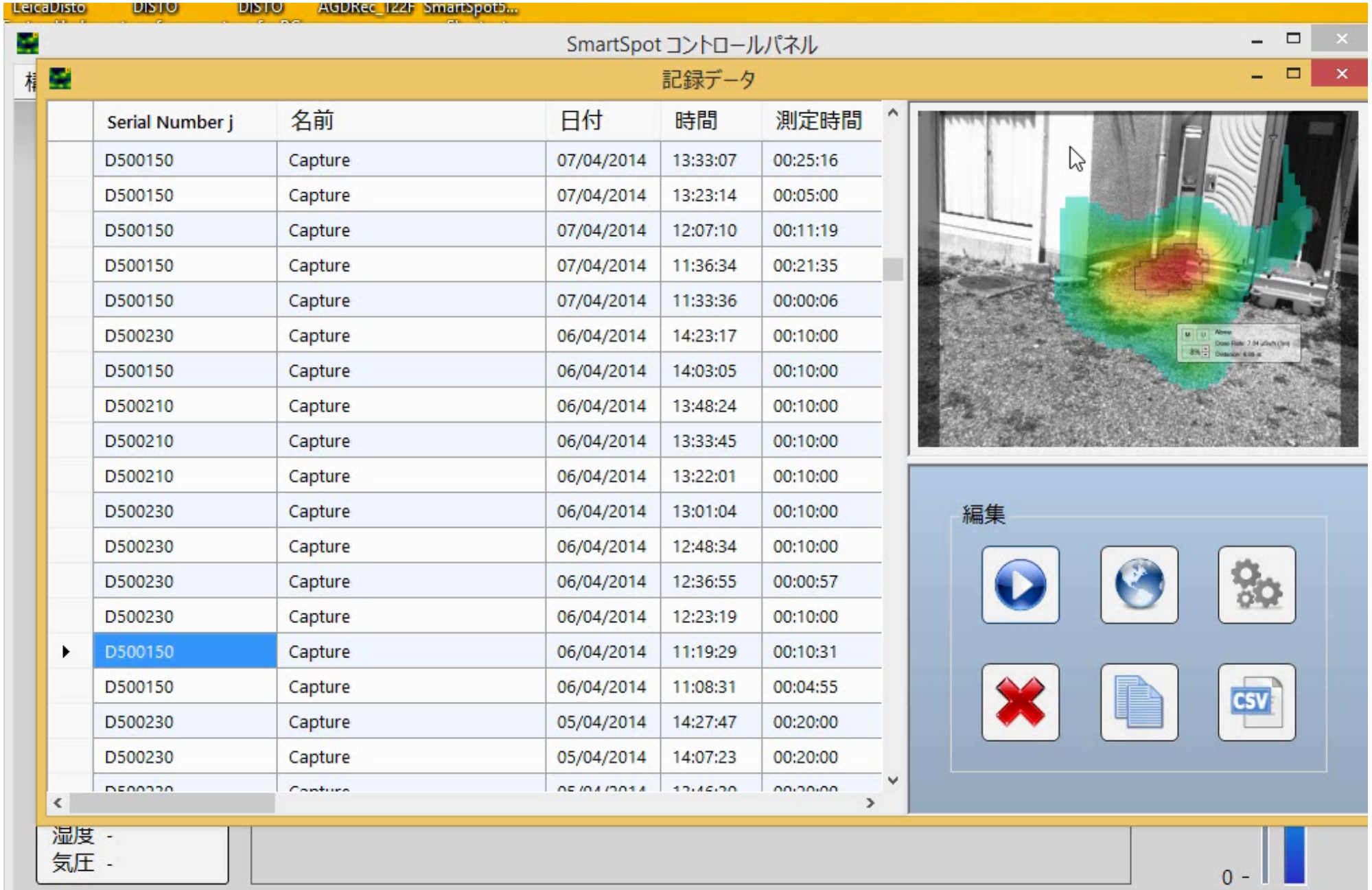
期待される応用例

- 居住地域、農地、牧場、森林、河川の汚染分布
- １F近くの汚染分布
- １F敷地内の汚染分布
- 老朽化原発の廃炉
- 原発再稼働の伴う避難計画に組み込み
- RIテロ対策、NBC対策
- 石油・天然資源に混入するNORM（U、Th）

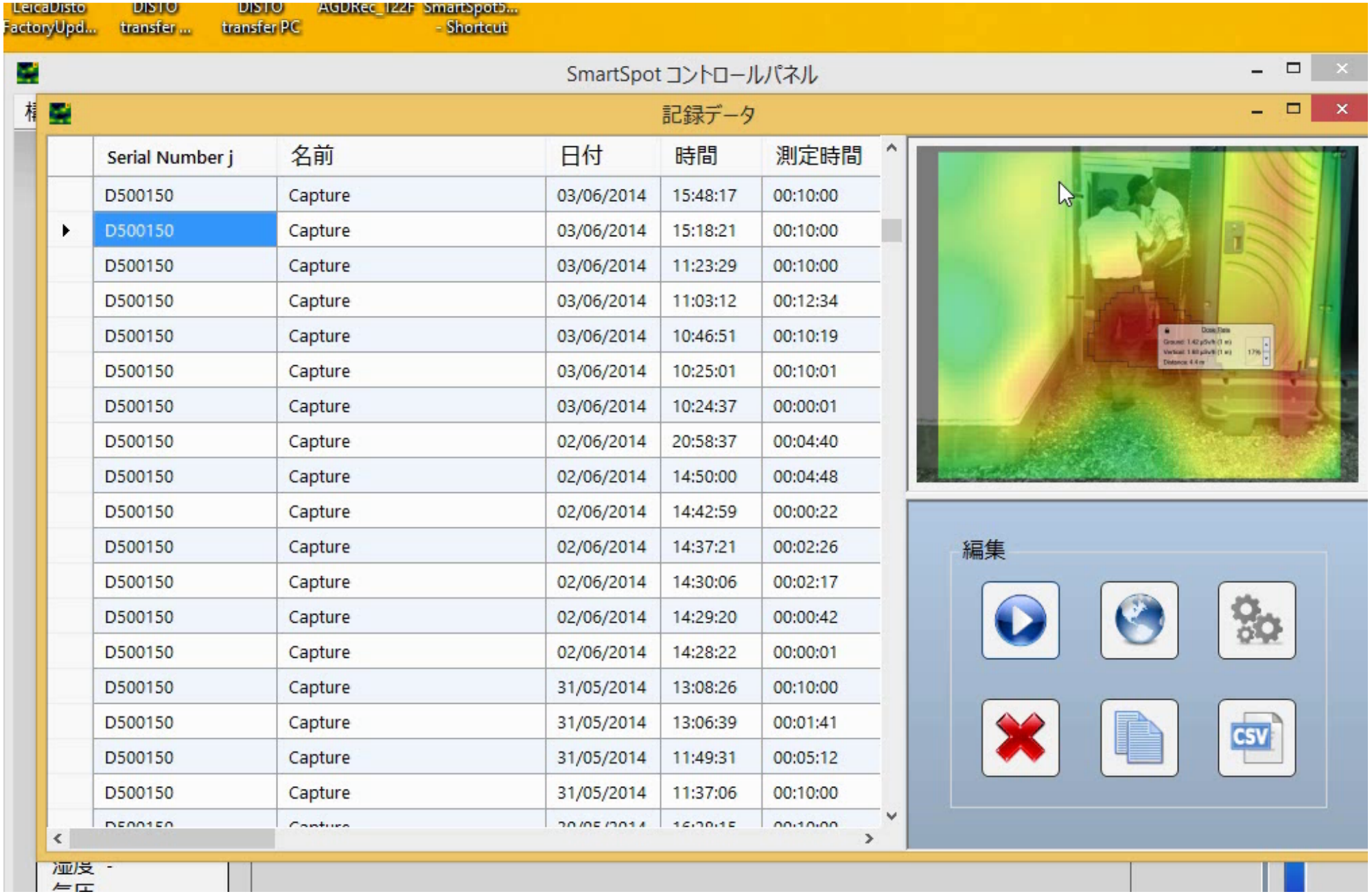
連絡先

- 豊田亘博（とよたのぶひろ）
- nobletoyota@yahoo.co.jp
- Tel: 0797-89-4111, 090-3948-3148


SmartSpot コントロールパネル
構成 映像 ヘルプ
Reprocess
00:00:05
X1
5 メート
(計数毎秒)
51.8
38.9
25.9
13
0
測定開始
現在の実行状態
再現再生一時停止 -Capture
総計数
3792
平均計数毎秒
632
GPS位置情報
該当なし
該当なし
温度 21.8 'C
湿度 64 % RH
気圧 1013 mbar
AG-デスクトップレコーダー
録画領域を設定しました。次の処理を選択して下さい。
始点(1) 4 63
サイズ(2) 1010 658
サイズの自動調整(3)
設定(4) 2 の整数倍
領域リストに追加する(A)
登録名(N)
指定をやり直す(R)
録画を開始する(X)
処理を完了する(E)


SmartSpot コントロールパネル
記録データ
Serial Number j
名前
日付
時間
測定時間
D500150 Capture 07/04/2014 13:33:07 00:25:16
D500150 Capture 07/04/2014 13:23:14 00:05:00
D500150 Capture 07/04/2014 12:07:10 00:11:19
D500150 Capture 07/04/2014 11:36:34 00:21:35
D500150 Capture 07/04/2014 11:33:36 00:00:06
D500230 Capture 06/04/2014 14:23:17 00:10:00
D500150 Capture 06/04/2014 14:03:05 00:10:00
D500210 Capture 06/04/2014 13:48:24 00:10:00
D500210 Capture 06/04/2014 13:33:45 00:10:00
D500210 Capture 06/04/2014 13:22:01 00:10:00
D500230 Capture 06/04/2014 13:01:04 00:10:00
D500230 Capture 06/04/2014 12:48:34 00:10:00
D500230 Capture 06/04/2014 12:36:55 00:00:57
D500230 Capture 06/04/2014 12:23:19 00:10:00
D500150 Capture 06/04/2014 11:19:29 00:10:31
D500150 Capture 06/04/2014 11:08:31 00:04:55
D500230 Capture 05/04/2014 14:27:47 00:20:00
D500230 Capture 05/04/2014 14:07:23 00:20:00
編集
CSV
湿度 -
気圧 -
0 -

D530 150
#4


LeicaDisto FactoryUpd...
DISTO transfer ...
DISTO transfer PC
AGDRec_122F
SmartSpot5... - Shortcut
SmartSpot コントロールパネル
記録データ
Serial Number j
名前
日付
時間
測定時間
D500150 Capture 03/06/2014 15:48:17 00:10:00
D500150 Capture 03/06/2014 15:18:21 00:10:00
D500150 Capture 03/06/2014 11:23:29 00:10:00
D500150 Capture 03/06/2014 11:03:12 00:12:34
D500150 Capture 03/06/2014 10:46:51 00:10:19
D500150 Capture 03/06/2014 10:25:01 00:10:01
D500150 Capture 03/06/2014 10:24:37 00:00:01
D500150 Capture 02/06/2014 20:58:37 00:04:40
D500150 Capture 02/06/2014 14:50:00 00:04:48
D500150 Capture 02/06/2014 14:42:59 00:00:22
D500150 Capture 02/06/2014 14:37:21 00:02:26
D500150 Capture 02/06/2014 14:30:06 00:02:17
D500150 Capture 02/06/2014 14:29:20 00:00:42
D500150 Capture 02/06/2014 14:28:22 00:00:01
D500150 Capture 31/05/2014 13:08:26 00:10:00
D500150 Capture 31/05/2014 13:06:39 00:01:41
D500150 Capture 31/05/2014 11:49:31 00:05:12
D500150 Capture 31/05/2014 11:37:06 00:10:00
編集
CSV