

事故から4年を経て、私たちはどのような放射線計測を
行い、これからどのように進めていこうとしているのか
ーサイトの現場よりー

鈴木敏和

(株) 千代田テクノル
技術アドバイザー
東京電力株式会社
技術アドバイザー

廃止措置に向けて

- ・4号機使用済み燃料プールから核燃料取り出し完了
- ・汚染水（RO濃縮塩水）の処理完了、
フランジ型汚染水タンクの解体開始
- ・海水配管トレンチ内の汚染水除去
- ・敷地境界実効線量制限値未満の達成
- ・地下水バイパス運用開始（山側12本揚水井戸稼働）
- ・イメージングによる1号機炉内調査
- ・新型ロボットによる1号機格納容器内調査

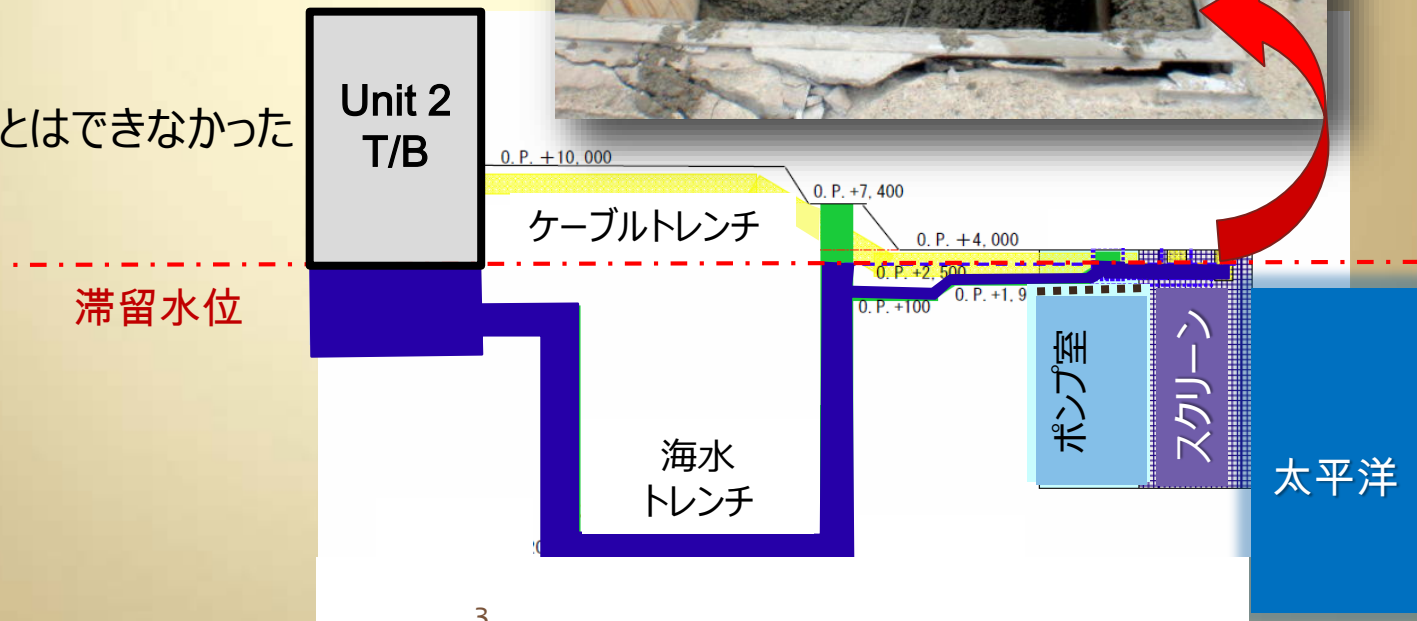
2号機海水配管トレンチ内滞留水

-2号機タービン建屋からの漏えい-

2011年4月2日、2号機海水配管トレンチに流れ込んだ高レベル汚染水により、取水口付近のケーブルピットでは1000mSv/h以上の線量率が観測された

この事態が確認されるとすぐに、ケーブルピットにはコンクリートが流し込まれた。

しかし、漏えいを止めることはできなかった



2号機海水配管トレンチ内滞留水

-2号機タービン建屋からの漏えい-

2011年4月2日、2号機海水配管トレンチに流れ込んだ高レベル汚染水により、取水口付近のケーブルピットでは1000mSv/h以上の線量率が観測された

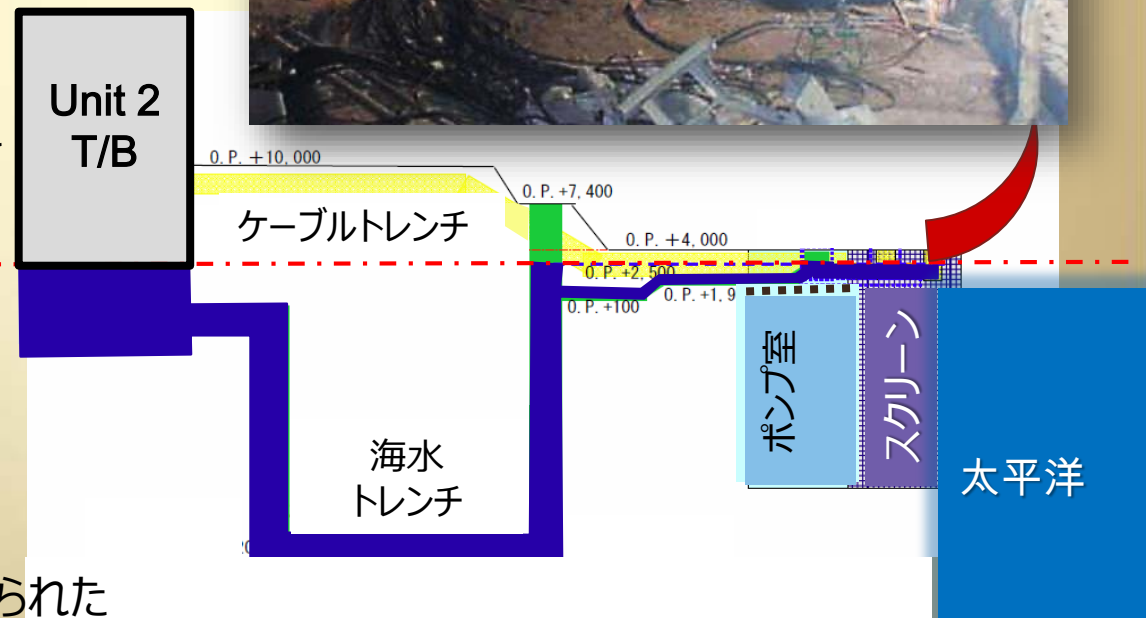
この事態が確認されるとすぐに、ケーブルピットにはコンクリートが流し込まれた。

しかし、漏えいを止めることはできなかった



水ガラスを砂利部分に流し込み、
止水実施

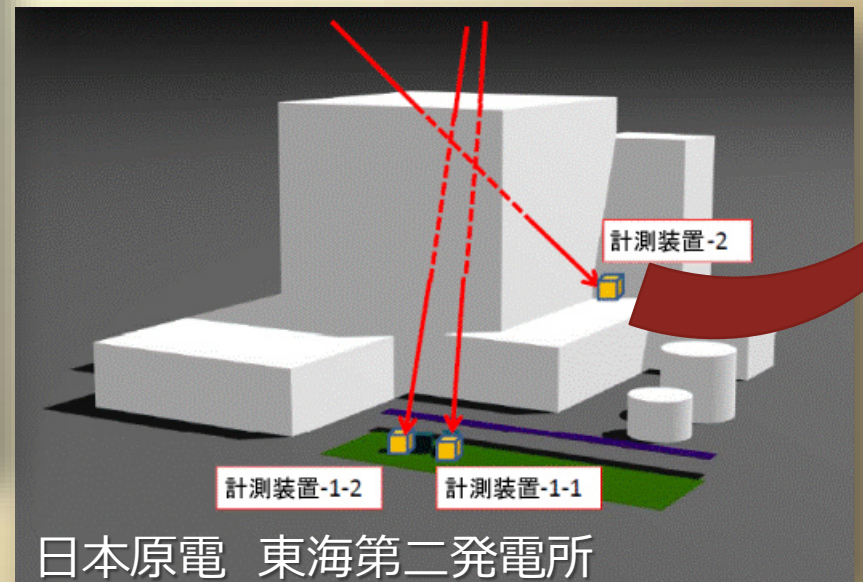
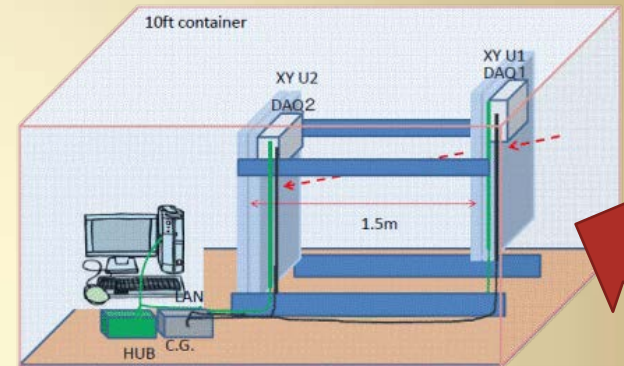
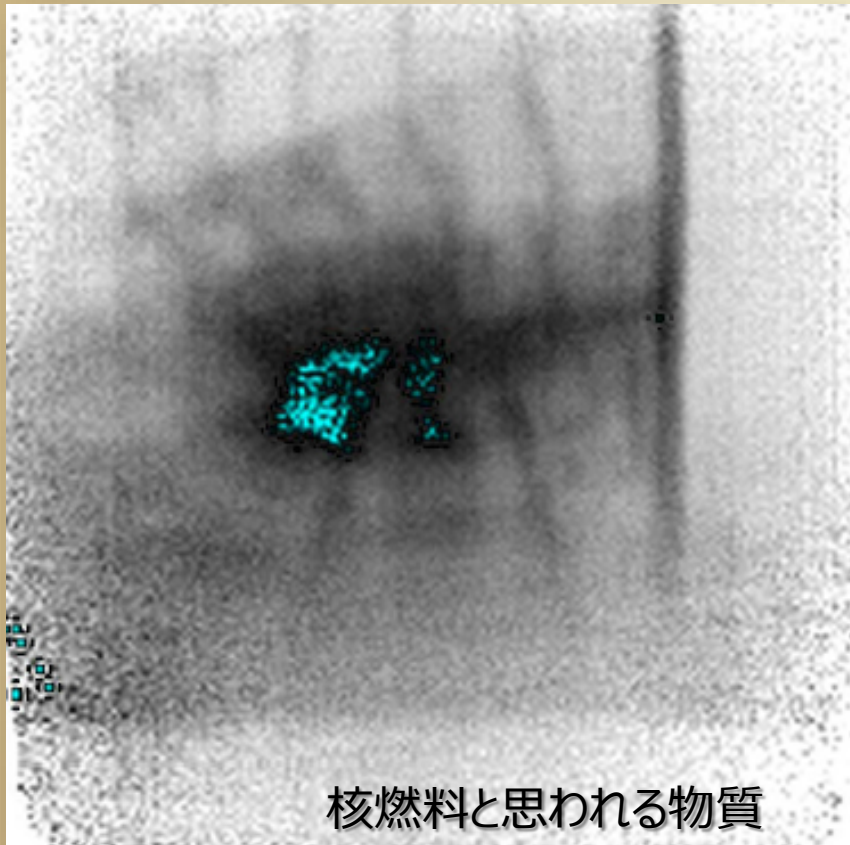
高レベル汚染水がトレンチ内に閉じ込められた



1号機ミュオンイメージング

KEK開発の透過法

検出器は厚さ10mmのプラスチックシンチレータ



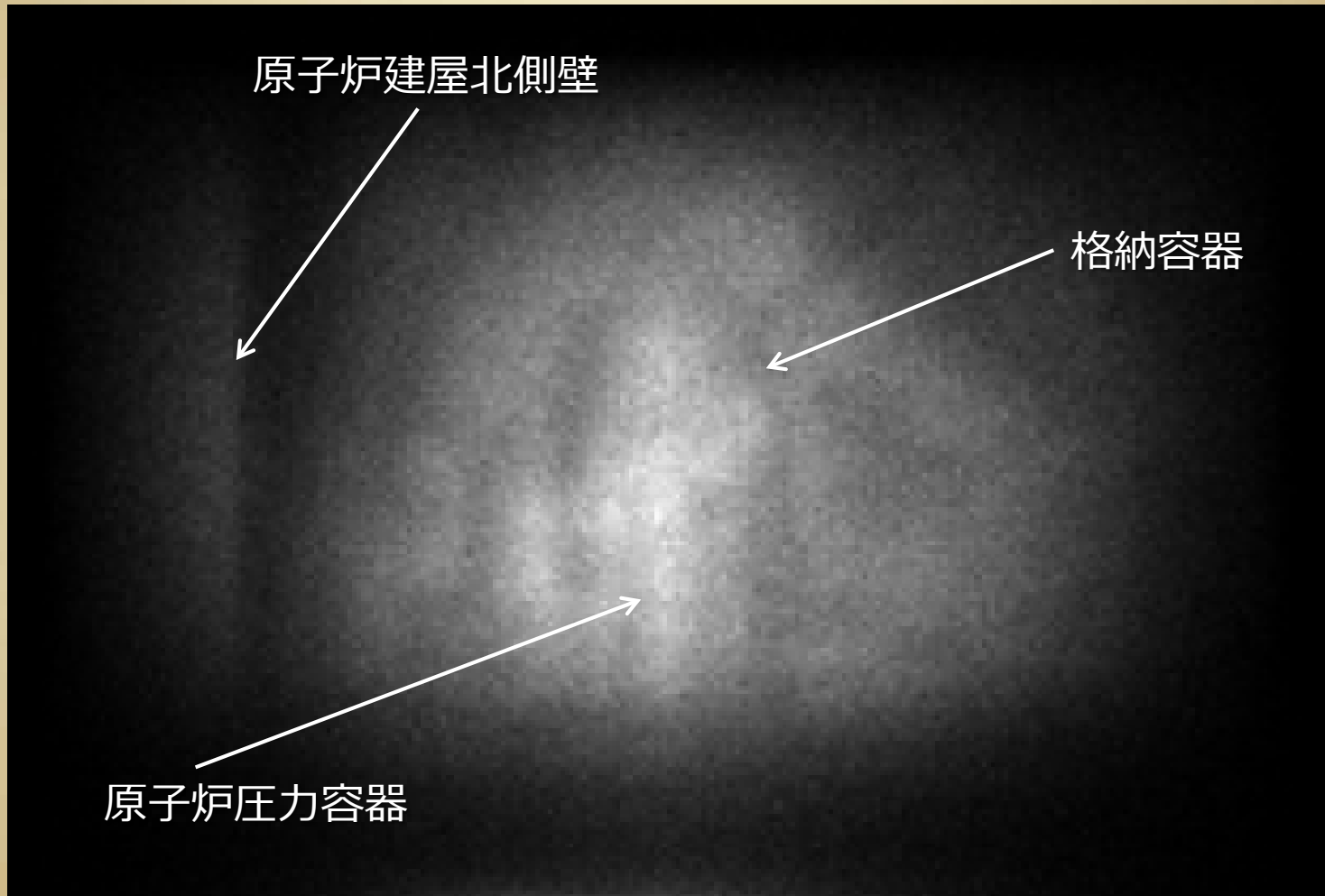
1号機ミュオンイメージング



ミュオン(約1個/m²)

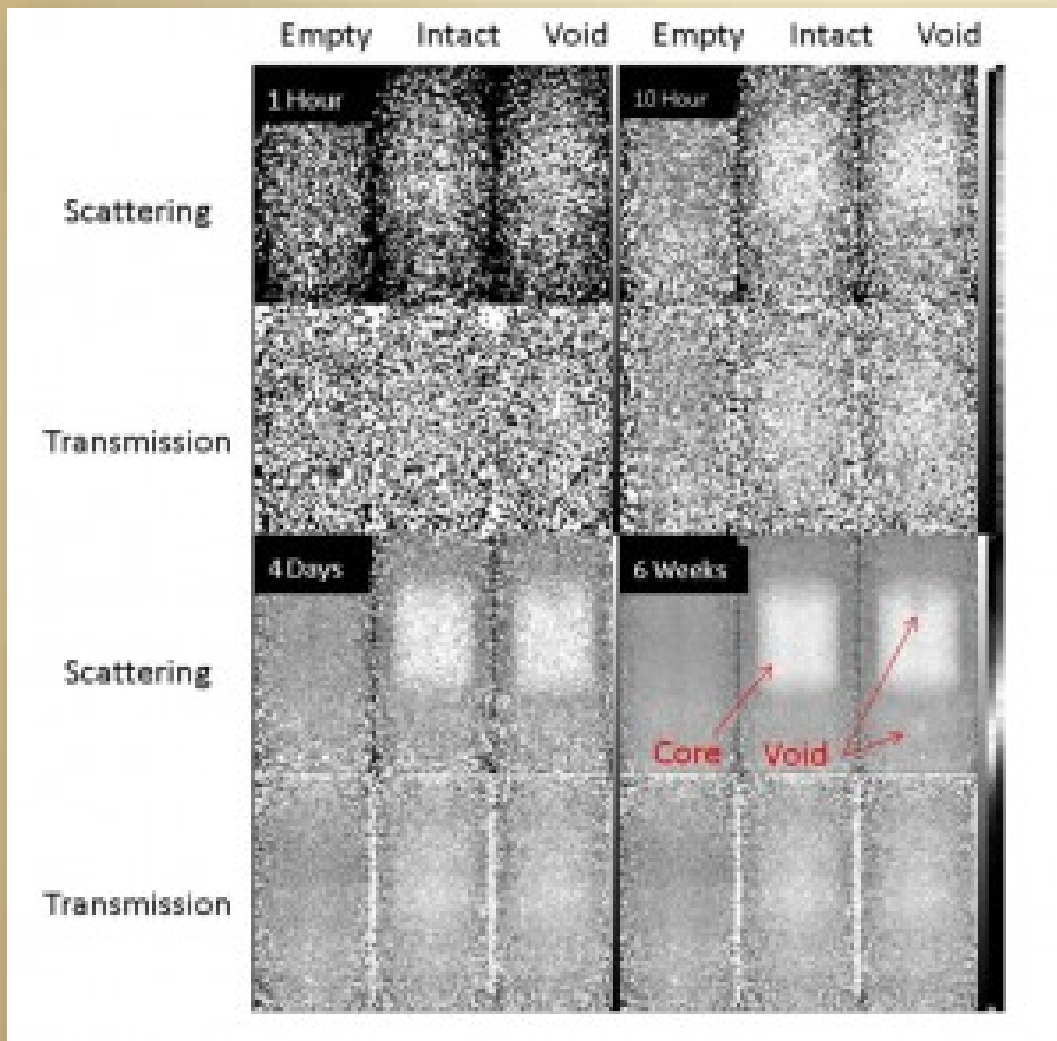


1号機ミュオンイメージング



分解能は1 m程度であることから、少なくとも1mを超えるデブリは無いとかがえられる

2号機ミュオンイメージングへの期待



東芝がロスアラモスから技術
導入した散乱型イメージング
装置を使用



ポイントは炉内FPからの高線
量率 γ 線による偶発同時計数
等、妨害要素の除去

*Konstantin Borozdin et al.,
Phys. Rev. Lett.(2012)
doi:10.1103/PhysRevLett.109.1
52501)*

告示濃度比

東京電力株式会社福島第一原子力発電所原子炉施設の
保安及び特定核燃料物質の防護に関する規則
(平成二十五年四月十二日原子力規制委員会規則第二号)

$$\frac{\text{セシウム134濃度}[Bq/L]}{60[Bq/L]} + \frac{\text{セシウム137濃度}[Bq/L]}{90[Bq/L]} + \frac{\text{ストロンチウム90濃度^注[Bq/L]}{30[Bq/L]} + \frac{\text{トリチウム濃度}[Bq/L]}{60000[Bq/L]} \leq 0.22$$

敷地境界実効線量評価値

		評価値（平成27年3月31日申請）
RO 濃縮水貯槽以外	気体廃棄物	約0.03mSv/年
	固体廃棄物及び設備 （直接線・スカイシャイン線）	約0.56mSv/年
	構内散水	約0.075mSv/年
	液体廃棄物等	約0.22mSv/年
	小計	約0.89mSv/年
RO濃縮水貯槽		約0.9mSv/年※
合 計		約1.79mSv/年

制限値 2mSv/年

水モニタリング

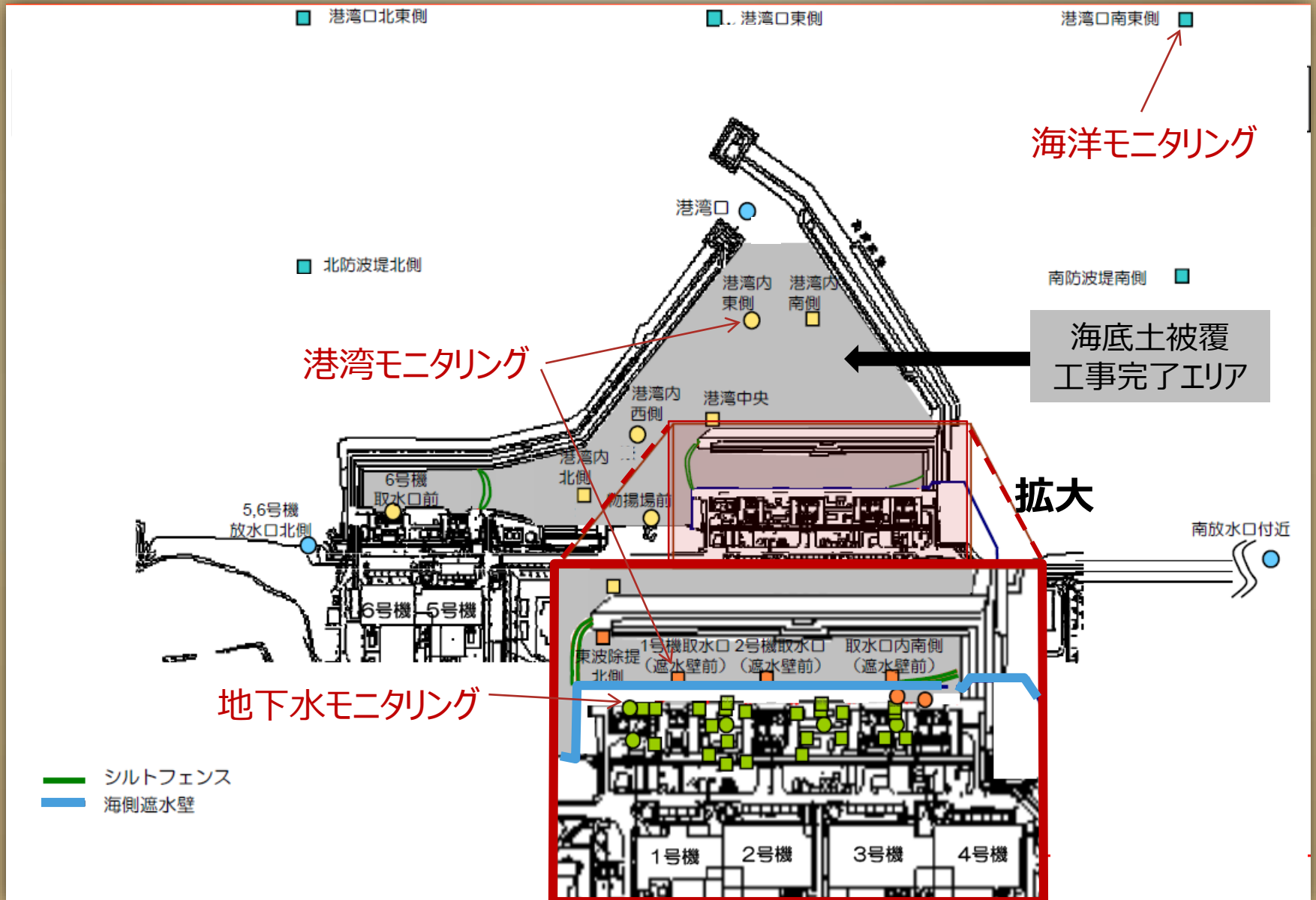
北側



東側

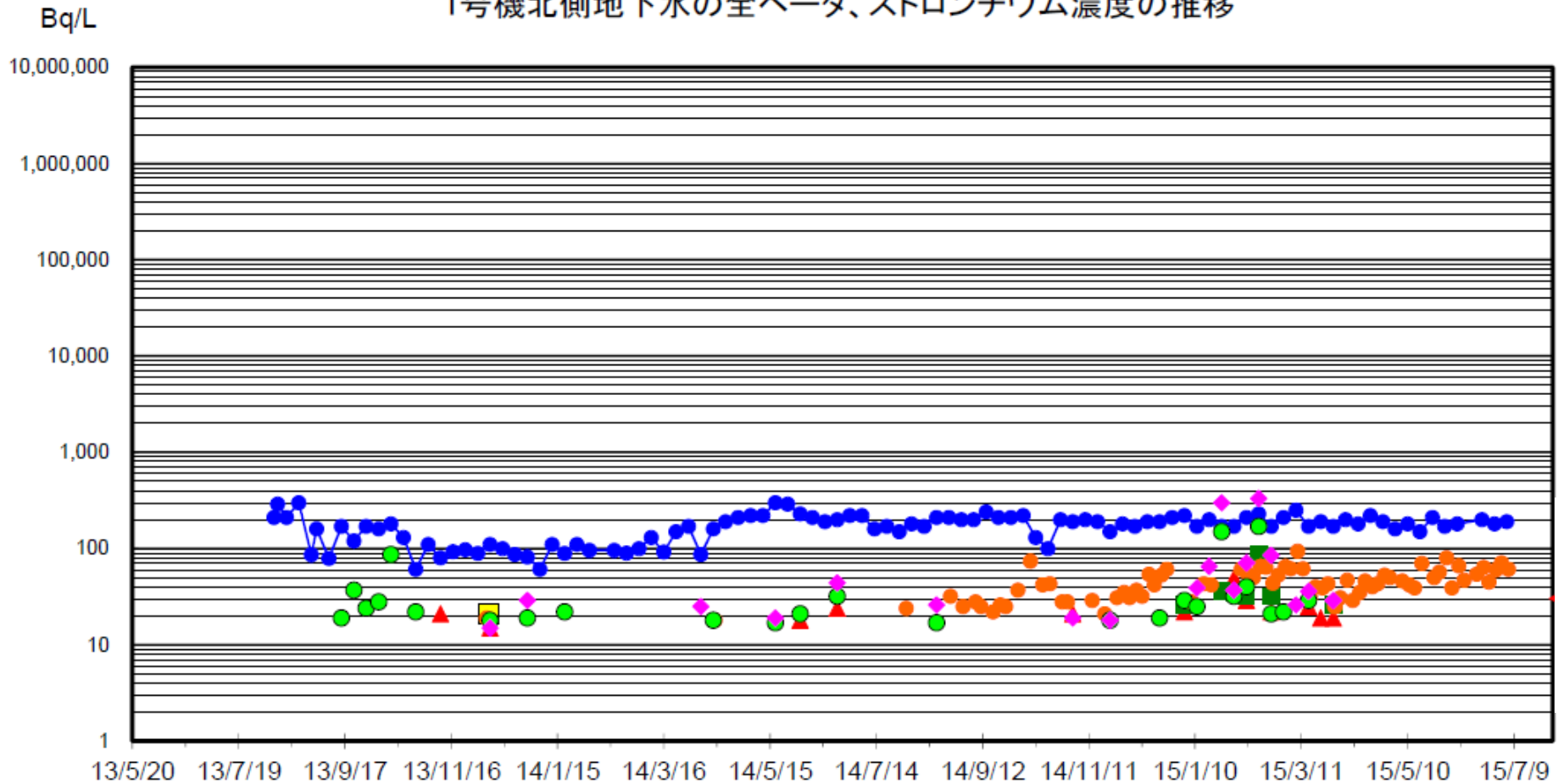
南側

地下水・海水放射能測定



地下水・海水放射能測定

1号機北側地下水の全ベータ、ストロンチウム濃度の推移



● 地下水No.0-1
全β

■ 地下水No.0-1-1
全β

▲ 地下水No.0-1-2
全β

■ 地下水No.0-3-1
全β

● 地下水No.0-3-2
全β

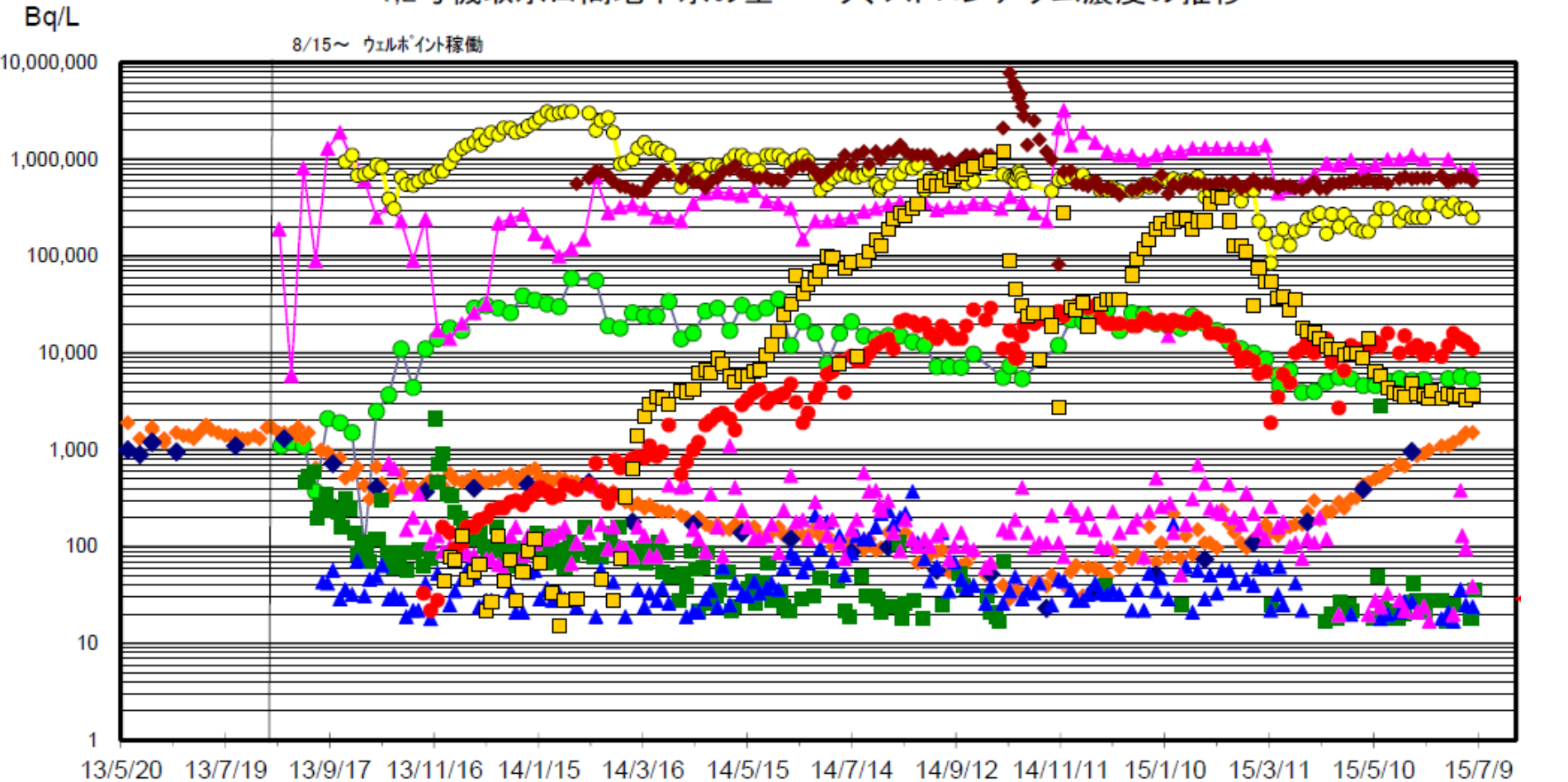
● 地下水No.0-2
全β

◆ 地下水No.0-4
全β

地下水・海水放射能測定

1,2号機取水口間地下水の全ベータ、ストロンチウム濃度の推移

8/15～ ウェルポイント稼働



◆ 地下水No.1
全β

◆ 地下水No.1
Sr-90

● 地下水No.1-8
全β

■ 地下水No.1-9
全β

▲ 地下水No.1-11
全β

▲ 1,2号機ウェルポイント
全β

● 地下水No.1-16
全β

◆ 地下水No.1-6
全β

▲ 地下水No.1-12
全β

● 地下水No.1-14
全β

■ 地下水No.1-17
全β

14

K 排水路問題

北側



南側

K排水路問題

北側



K排水路問題の経緯

2013年8月の汚染水タンクからの漏えいの際し、従来、非管理であった一般排水路（C排水路）からの排水が問題となり、K排水路も対象となった

2014年2月頃から排水路の清掃や瓦礫撤去、山側法面フェーシングを実施してきたが、K排水路に関しては低減効果が確認できなかった



K排水路に係る側溝清掃状況



K排水路清掃状況

K排水路問題の経緯

2013年8月の汚染水タンクからの漏えいの際し、従来、非管理であった一般排水路（C排水路）からの排水が問題となり、K排水路も対象となった

2014年2月頃から排水路の清掃や瓦礫撤去、山側法面フェーシングを実施してきたが、K排水路に関しては低減効果が確認できなかった

K排水路は港湾内へは接続されておらず、直接外洋への放出構造となっていた。降雨時に濃度の上昇がみられたことから、2014年11月より汚染源特定調査開始された

2015年1月に2号機原子炉建屋大物搬入口屋上の溜り水の濃度が高いことが確認された

K 排水路問題経緯



No.	水質調査箇所	Cs134	Cs137	全β	Sr90	H-3	採水日
①	2号R/B屋上(北)	200	650	920	10	ND(<100)	H27.1.16
	2号R/B屋上(中)	340	1,100	1,900	12	ND(<100)	H27.1.16
③	2号R/B屋上(南)	300	990	1,900	20	ND(<100)	H27.1.16
④	大物搬入口屋上	6,400	23,000	52,000	分析中	600	H27.2.19
⑤	大物搬入口竖樋(東)	920	3,200	9,700	分析中	ND(<100)	H27.2.18

K排水路問題の経緯

2013年8月の汚染水タンクからの漏えいの際し、従来、非管理であった一般排水路（C排水路）からの排水が問題となり、K排水路も対象となった

2014年2月頃から排水路の清掃や瓦礫撤去、山側法面フェーシングを実施してきたが、K排水路に関しては低減効果が確認できなかった

K排水路は港湾内へは接続されておらず、直接外洋への放出構造となっていた。降雨時に濃度の上昇がみられたことから、2014年11月より汚染源特定調査開始された


2015年1月に2号機原子炉建屋大物搬入口屋上の溜り水の濃度が高いことが確認された

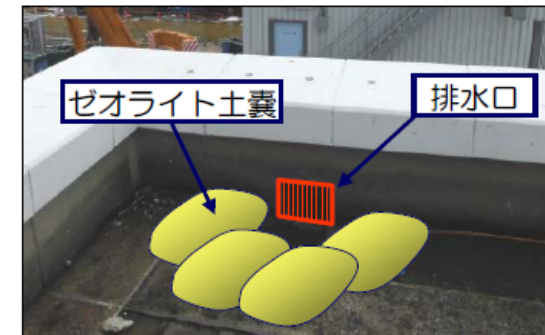
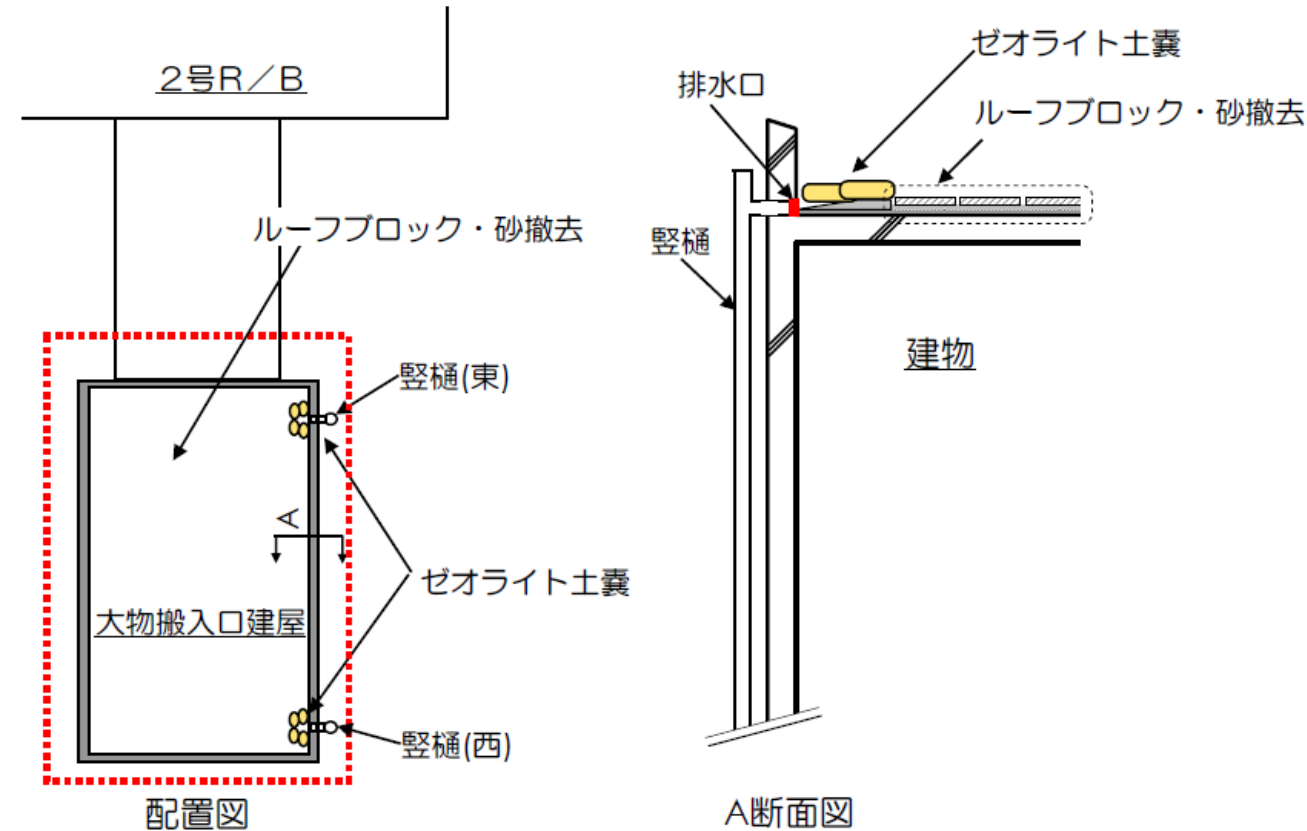
2014年年4月から採取していたK排水路排水濃度測定値を2015年2月まで公表しなかったことに対し、情報公開の在り方に厳しい批判が寄せられた

K 排水路問題の物理的対策 1

2号機原子炉建屋

- 2号機原子炉建屋 大物搬入口屋上部の雨水の汚染防止対策を実施する
 - ・ 屋根排水口廻りにゼオライト土嚢を設置する。
 - ・ 汚染源と考えられる屋上のルーフブロック、敷き砂等の撤去を実施する。

凡例  汚染防止対策を実施する範囲



ゼオライト土嚢 設置イメージ

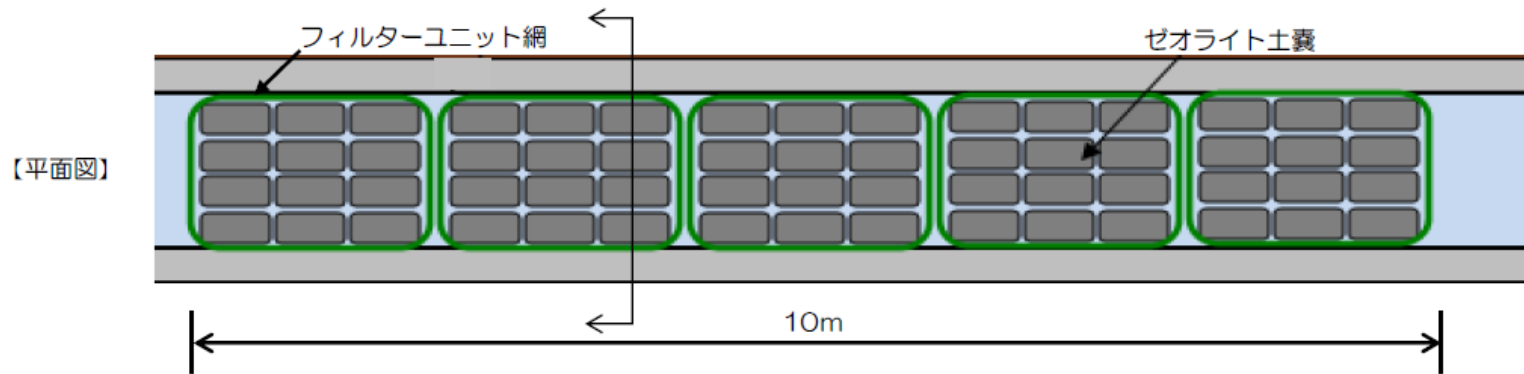


屋上写真

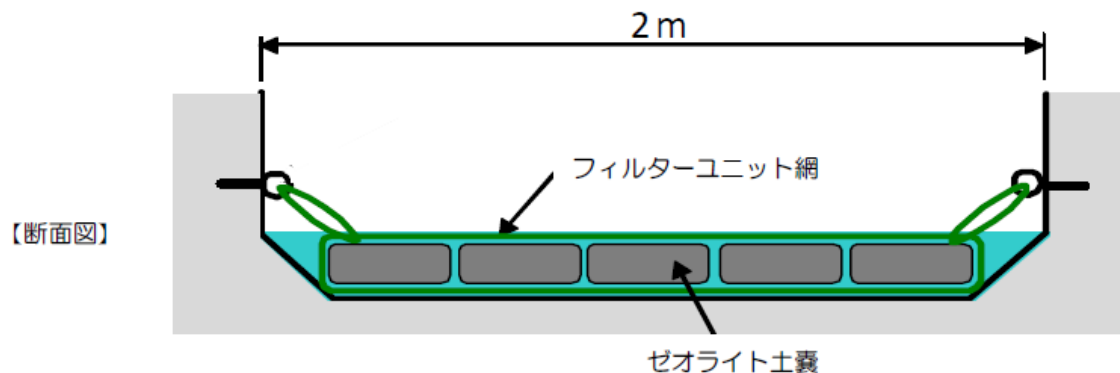
K排水路問題の物理的対策 2

K排水路内

- ゼオライト土囊を排水路底面部へ敷き詰める



- ゼオライト土囊は流出防止のためフィルターユニット網に複数個単位で入れて、網をボルトで固定する。



K排水路問題の物理的対策 3

K排水路のルート変更工事完了までの間、
暫定的にC排水路（港湾内に接続）へのポンプ移送実施



K排水路の現状

単位: Bq/L

採取場所	K排水路排水口								
採取日	6月27日	6月27日	6月28日	6月28日	6月29日	6月29日	6月30日	6月30日	7月1日
採取時刻	11:50	15:50	12:00	16:00	11:50	15:50	11:50	15:50	11:50
Cs-134(約2年)	49 [*]	62 [*]	23	20	11	9.6	5.3	3.1	9.7
Cs-137(約30年)	180 [*]	250 [*]	99	69	42	41	21	22	36
全β	380 [*]	450 [*]	190	150	120	94	75	79	140

採取場所	K排水路排水口 □ 降雨時の影響								
採取日	7月1日	7月2日	7月2日	7月3日	7月3日	7月4日	7月4日	7月5日	7月5日
採取時刻	15:50	11:50	15:50	11:50	15:50	11:50	15:50	11:55	16:00
Cs-134(約2年)	19	10	7.7	28 [*]	4.4	7.4	4.9	11	6.3
Cs-137(約30年)	76	41	31	120 [*]	27	35	21	38	29
全β	170	72	63	260 [*]	43	75	57	100	98

採取場所	K排水路排水口								
採取日	7月6日	7月6日	7月7日	7月7日	7月8日	7月8日	7月9日	7月9日	
採取時刻	11:50	15:50	11:50	15:50	11:50	15:50	11:50	15:50	
Cs-134(約2年)	8.1	4.9	6.2	4.6	5.4	5.1	6.5	5.0	
Cs-137(約30年)	28	21	22	22	19	23	24	24	
全β	68	62	49	62	59	46	99	51	

放射能分析室

環境管理棟
(4m盤地下水試料等の取扱場所)



5,6号機化学分析室
(滞留水試料等の取扱場所)



化学分析棟
(地下水バイパス試料等の取扱場所)



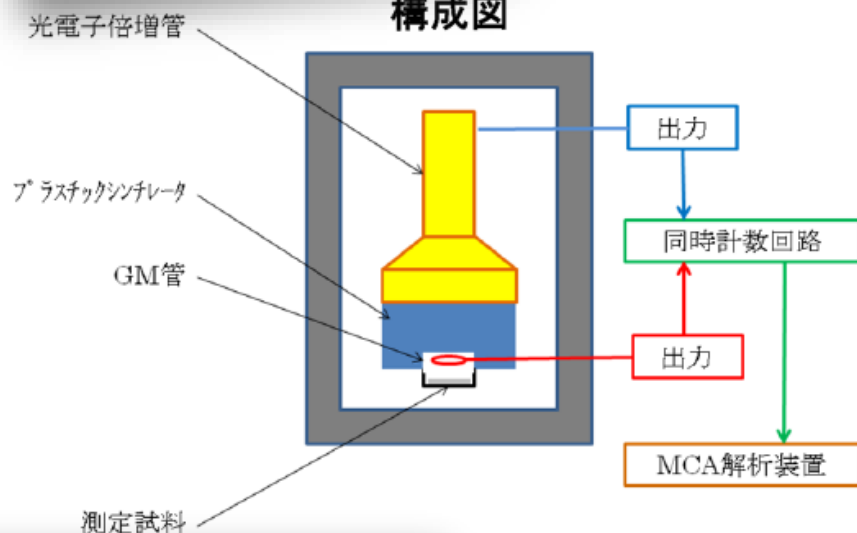
放射線計測

項目	場所	測定対象	γ線	全β線	Sr	H3	
高レベル放射能	5, 6号機ホットラボ	滞留水等	Ge半導体検出器 (ORTEC)	-	低BG GFC LBC-4211	β線スペクトロメータ ピコβ	-
中低レベル放射能	環境管理棟ラボ	地下水等	Ge半導体検出器 (ORTEC)	低BG LSC LSC-LB5B	低BG GFC LBC-4202B	-	低BG LSC LSC-LB5B
微弱レベル放射能	化学分析棟ラボ	地下水バイ パス等	Ge半導体検出器 (ORTEC)	低BG LSC LSC-LB7	低BG GFC LBC-4202B	β線スペクトロメータ ピコβ	低BG LSC LSC-LB7
空間線量率	モニタリングポスト 8地点	地上1.6m 線量率	4気圧Ar封入式 球形電離箱	26年度最大 4.471 μ Gy/h			
積算空間線量	環境線量測定点 21地点	地上1.0m 積算線量	ガラス線量計 (SC-1)	26年度最大 30.54mGy/3M			

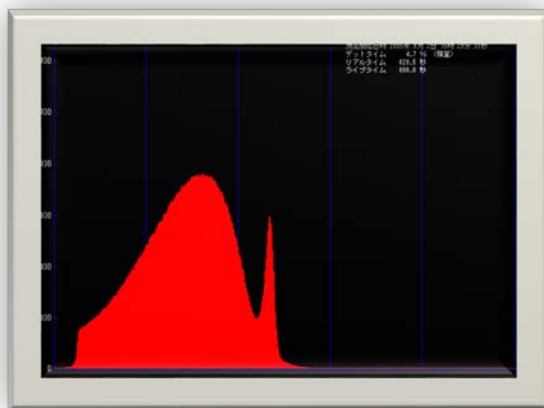
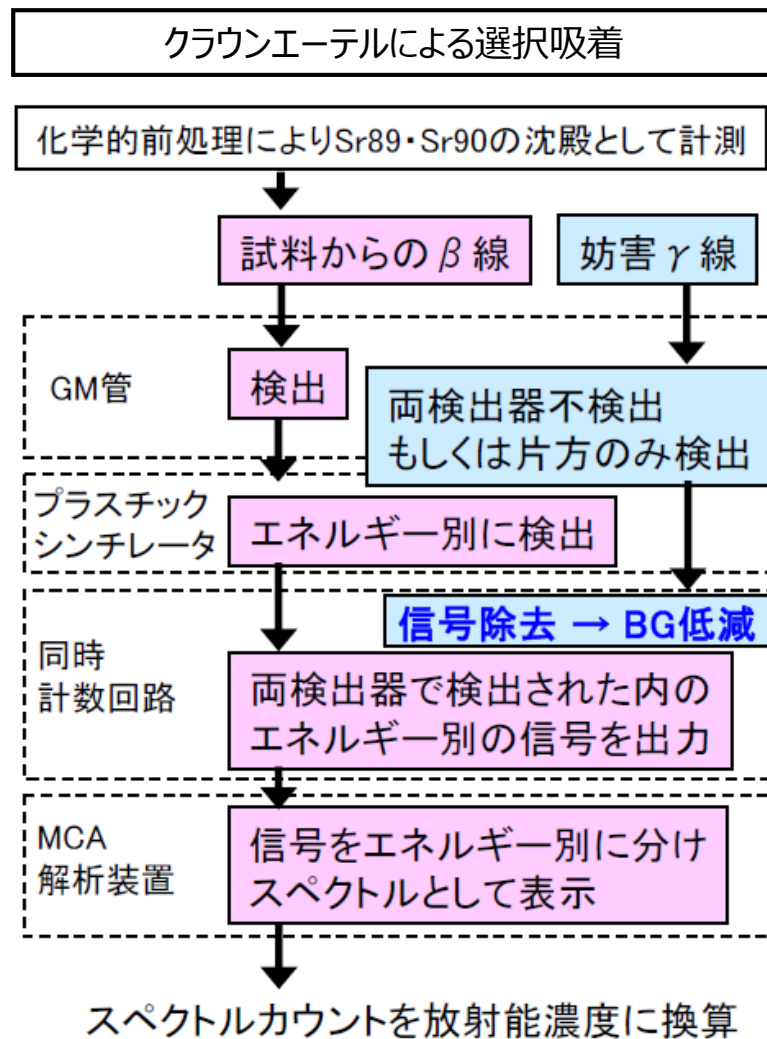
β線スペクトロメータ



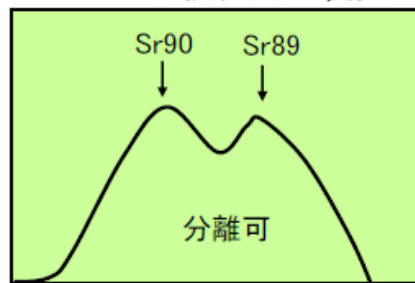
構成図



又は

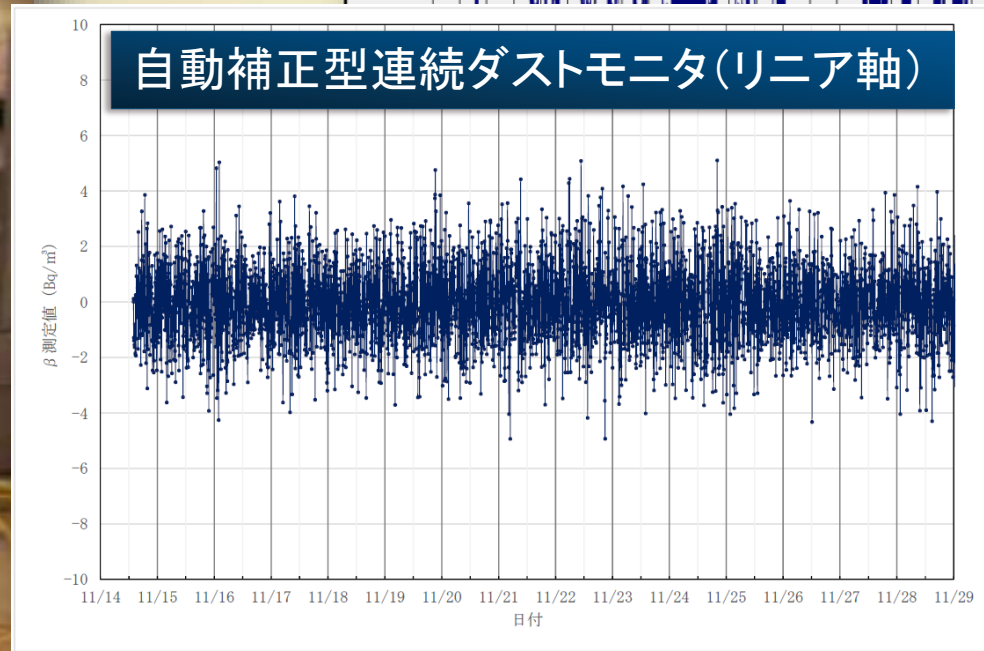
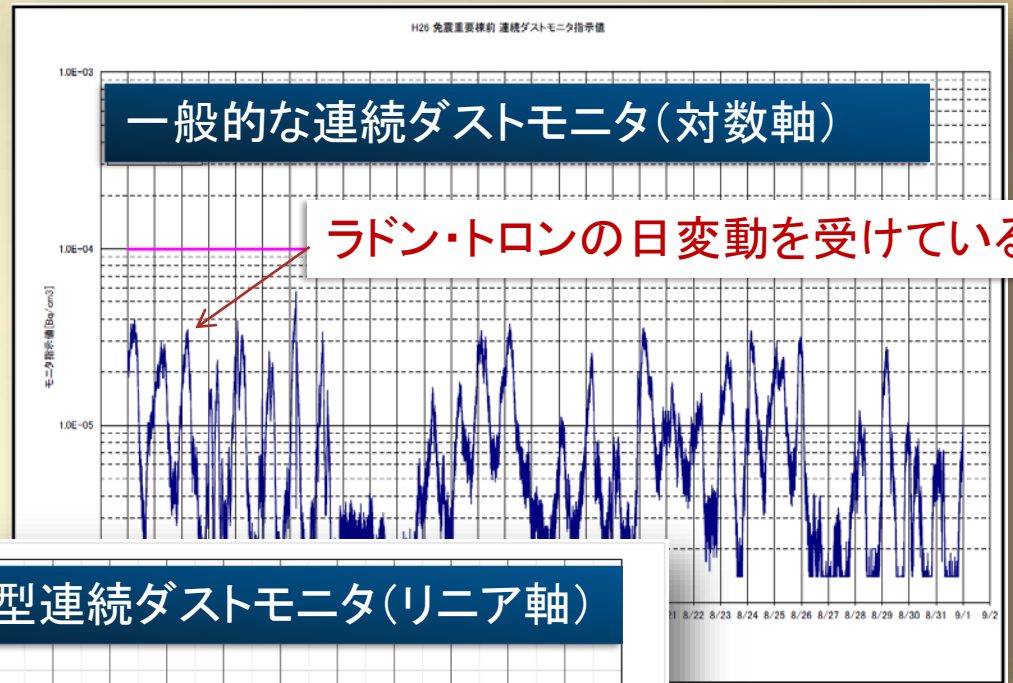


ベータ核種分析装置



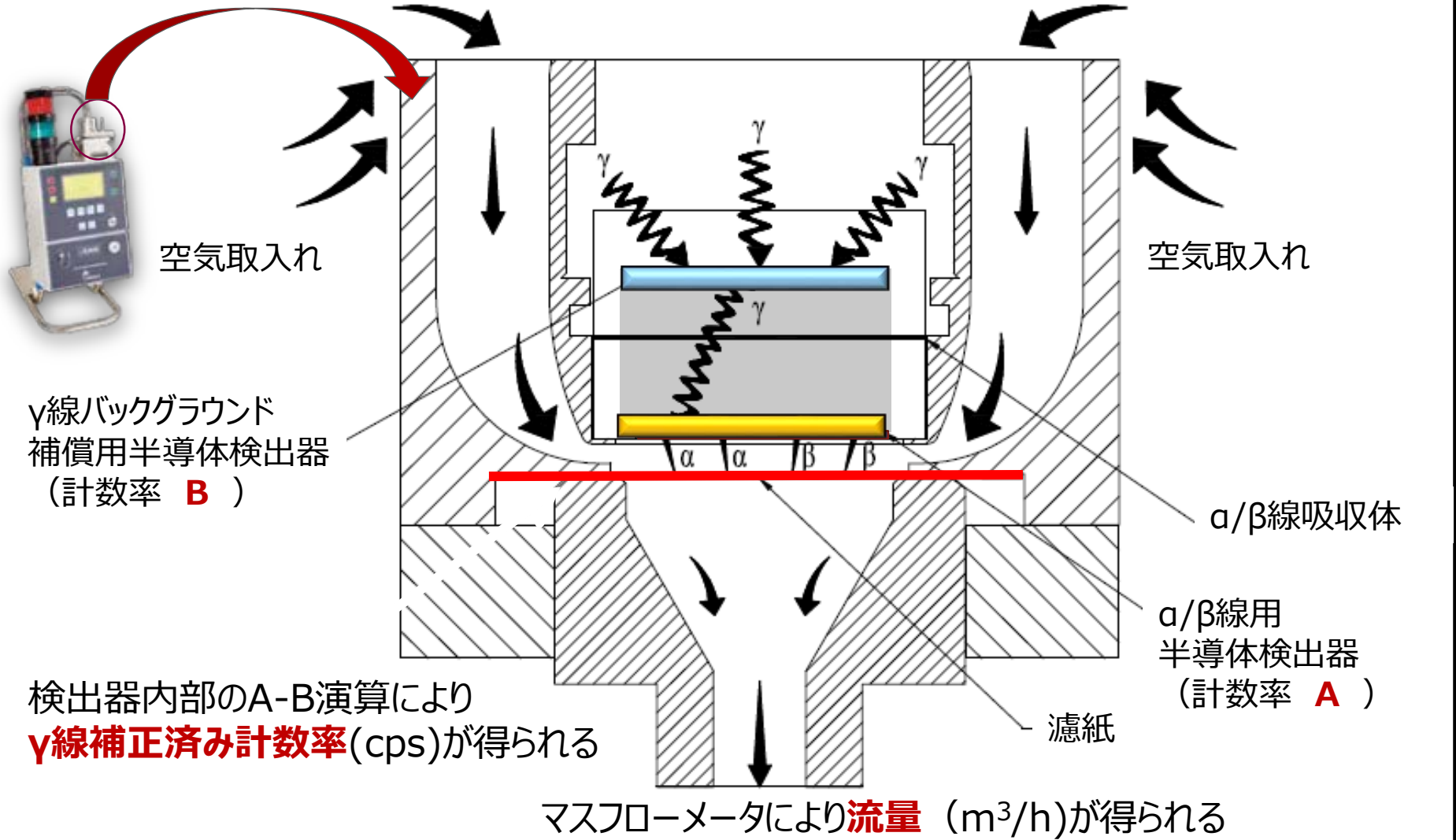
ラドン・トロン自動補正型連続ダストモニタ

環境中の γ 線、ラドン・トロンの影響を受けずに空気中の α ダスト、 β ダストを高い安定度で計測



ラドン・トロン自動補正型連続ダストモニタ

2重PIPS (Passivated Ion-implanted Planar Silicon) 検出器による自動 γ 補正



ラドン・トロン自動補正型連続ダストモニタ

IEC61578に基づくラドン・トロン補正

放射能 (Bq) = γ 補正済み計数率(cps)/検出効率(%)で定義される。

$$\begin{aligned} \text{積算空气中濃度(Bqh/m}^3\text{)} &= \text{放射能(Bq)}/\text{流量(m}^3\text{/h)} \\ &= \gamma\text{補正済み計数率(cps)}/\{\text{検出効率(}\%\text{)} \times \text{流量(m}^3\text{/h)}\} \end{aligned}$$

空气中濃度(Bq/m³) = 積算空气中濃度 (1時間)_n - 積算空气中濃度 (1時間)_{n-1}
の演算を300秒毎の移動平均として行っている。

従って、定期的な校正要素は

① 検出効率(%)校正 = 標準面線源放射能(Bq)/ICAMの計数率(cps)
代表値 ~ 23-30% (4n) 程度

② 流量(m³/h)校正 = 基準流量計を用いたマスフローメータの校正



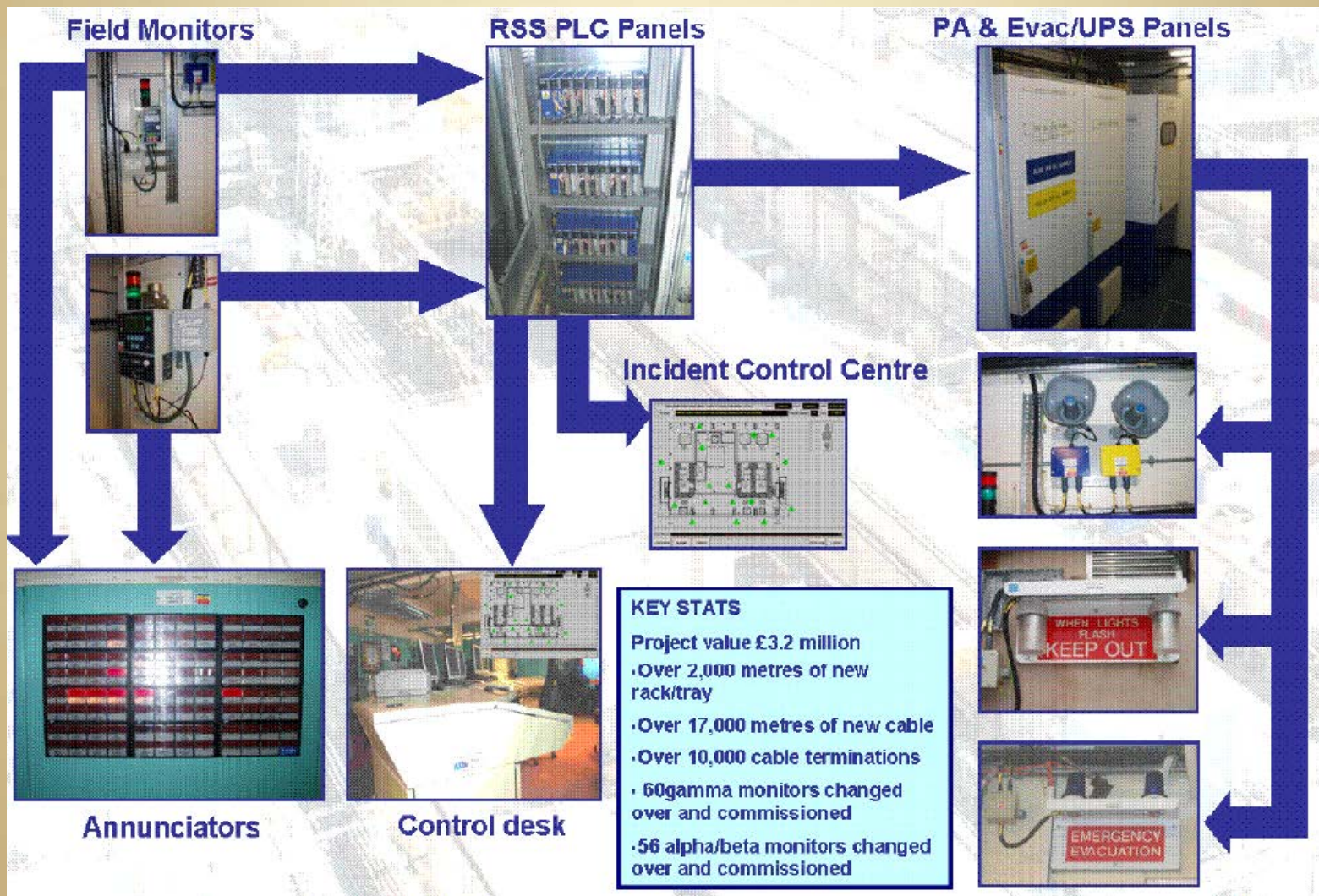
ラドン・トロン自動補正型連続ダストモニタ

海外での使用例： I A E A サイバースドルフ研究所



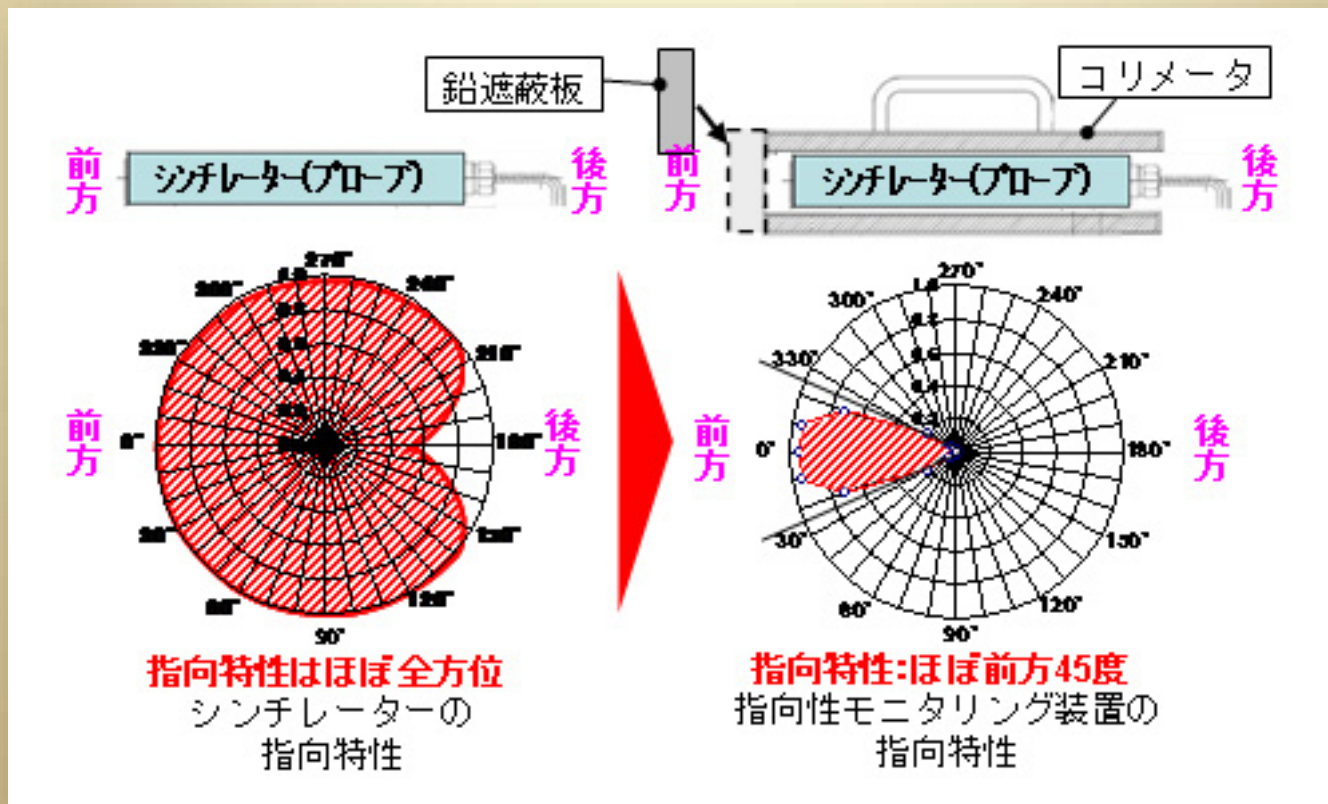
ラドン・トロン自動補正型連続ダストモニタ

海外での使用例：英国 セラフィールド



指向性モニタリング装置

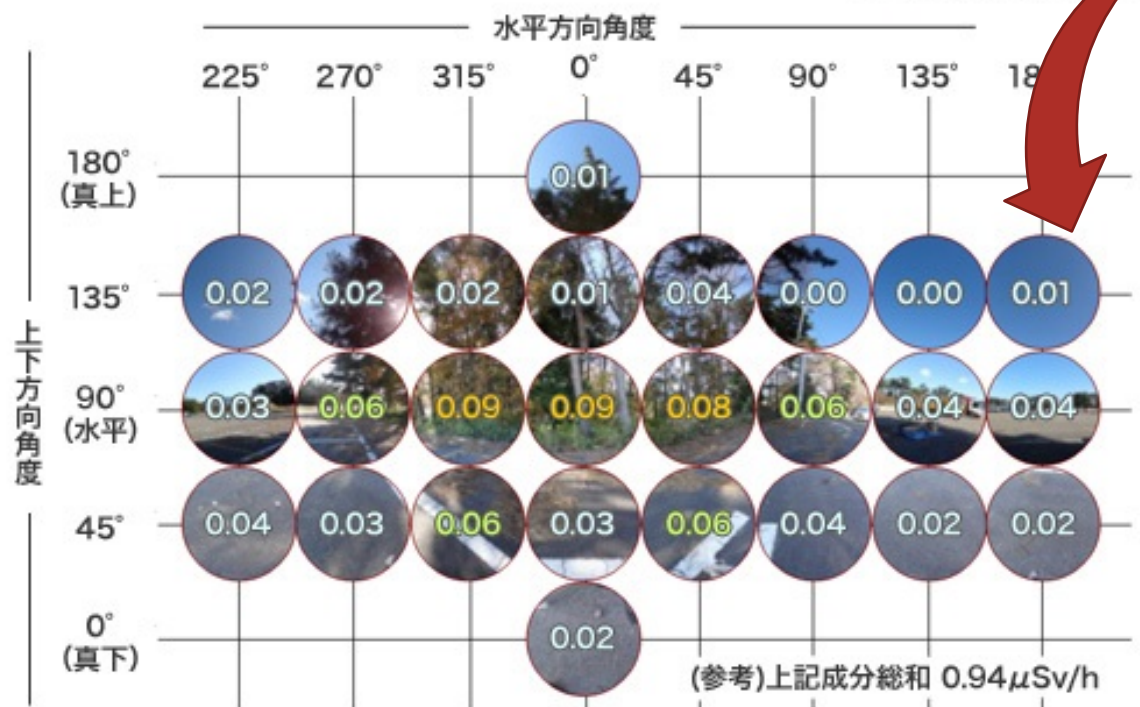
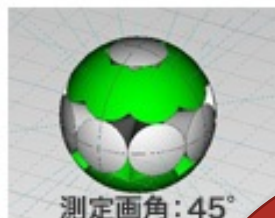
- 360度全方位を45度ずつ26分割して計測
- 空間線量率に及ぼす影響が大きい方向・対象物を定量的に把握することが可能
- 鉛遮蔽板を着脱して計測することにより、計測精度を高めている。



指向性モニタリング装置

指向性モニタリング測定結果イメージ

- ・駐車場の林縁、高さ1mにて計測 ・空間線量率 : $0.90\mu\text{Sv/h}$
- ・樹冠部やアスファルト部よりも林床部土壌からの影響が大きい



周辺線量当量率と
分割線量率総和はほぼ等しい

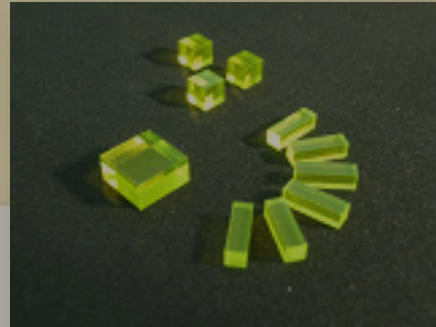
$0.90\mu\text{Sv/h}$ の場で $\Sigma = 0.94\mu\text{Sv/h}$

空間イメージングへ

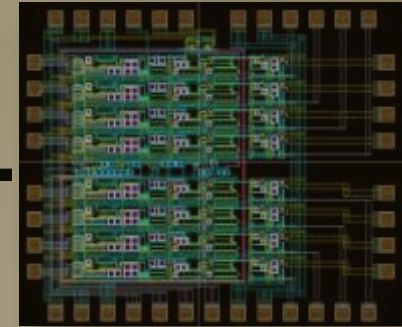
コンプトンカメラ

検出器の構成

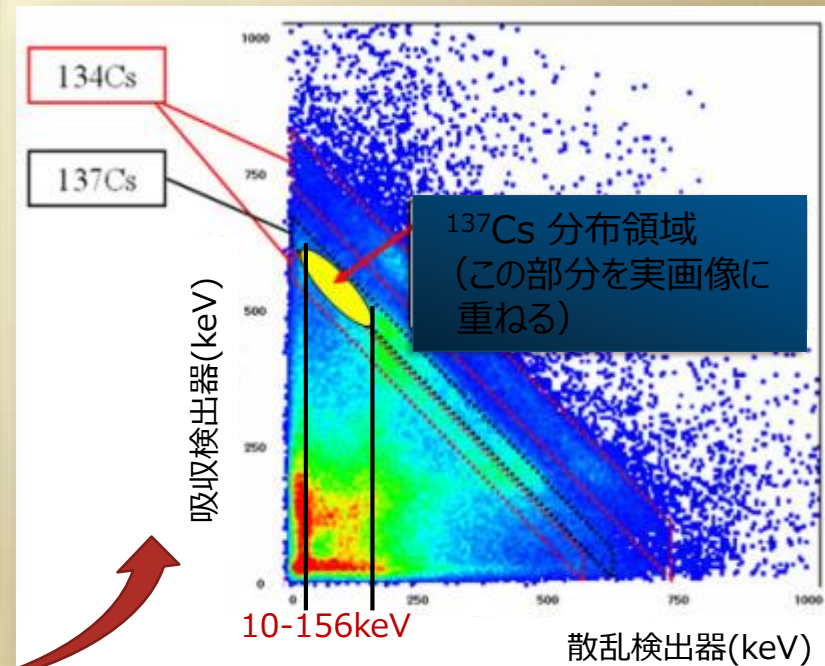
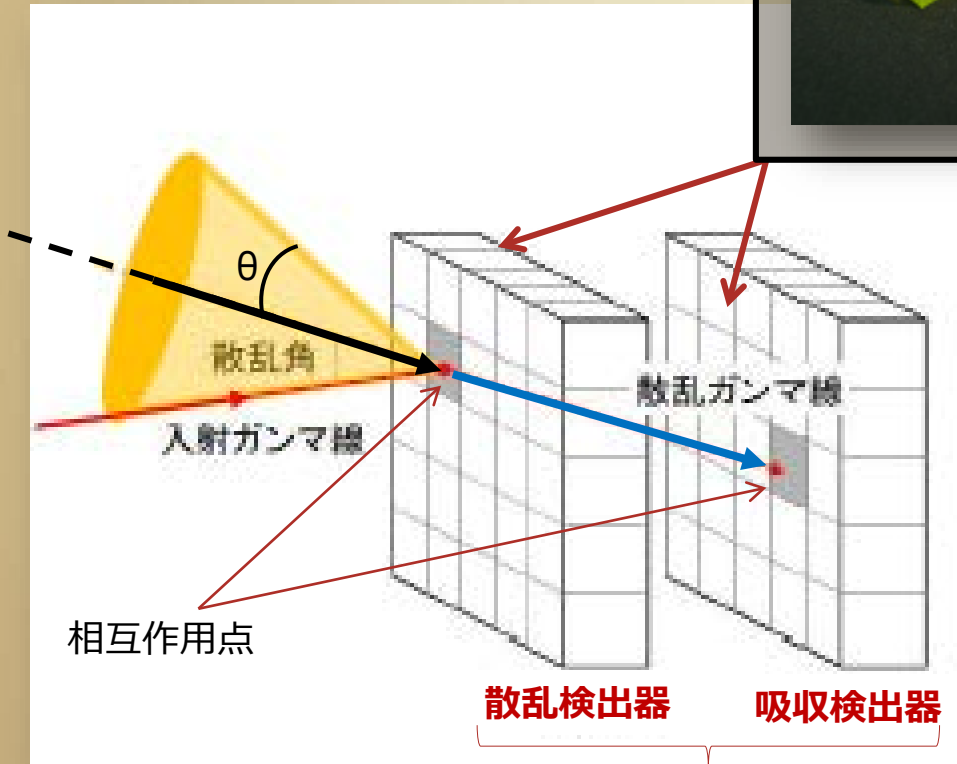
GAGGシンチレータ



MPPC



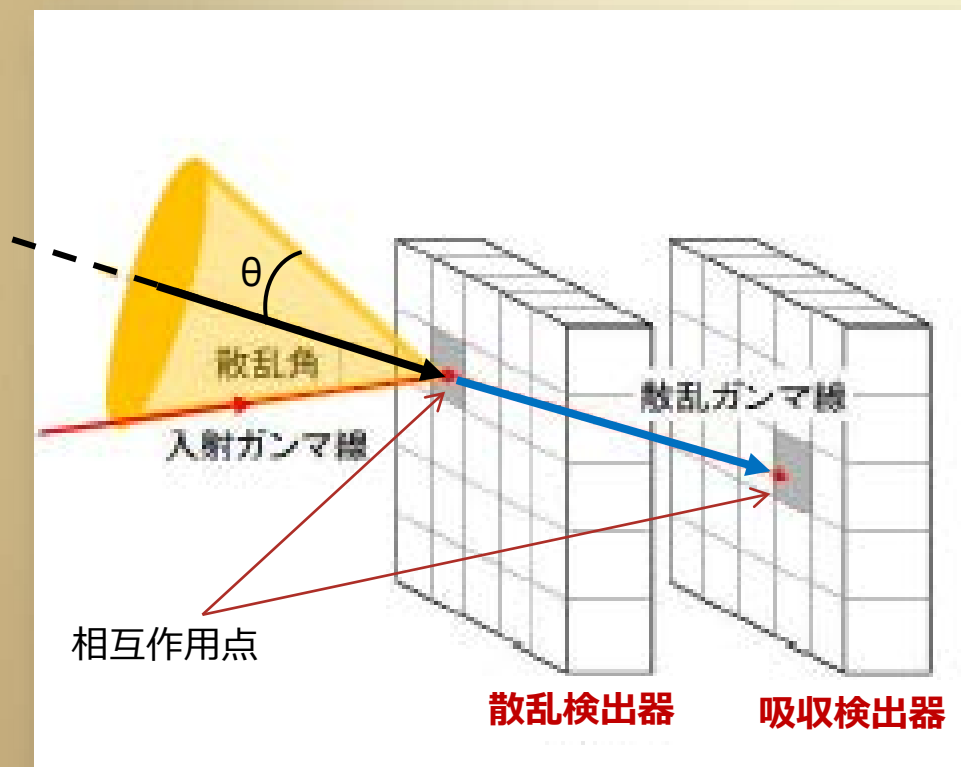
+



コンプトンカメラ

下記方程式から散乱検出器と吸収検出器で測定された γ 線の相互作用点を結ぶ直線を軸とし、散乱検出器における相互作用点を頂点とした、散乱角 θ の2倍の開角を持つ1つの円錐面が定まる。その円錐面は γ 線源の位置を通るため、多数の測定から定められる**円錐面の重ね合わせ**から、 γ 線源の位置の描出が可能となる。

コンプトンカメラ方式の大きな特徴は、機械的なコリメータを必要としない γ 線撮像装置であるという事に尽きる



$$\cos \theta = 1 + mc^2 \left[\frac{1}{E_\gamma} - \frac{1}{E_\gamma - E_1} \right]$$

$$E_\gamma = E_1 + E_2$$

E_γ : 入射 γ 線のエネルギー

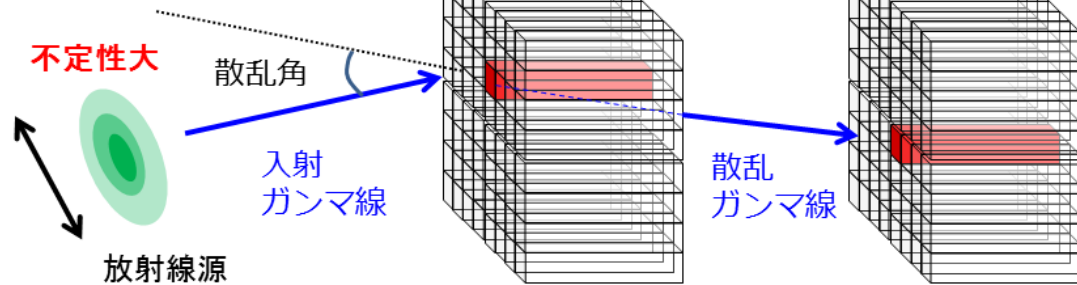
E_1 : 散乱検出器で測定されたエネルギー

E_2 : 吸収検出器で測定されたエネルギー

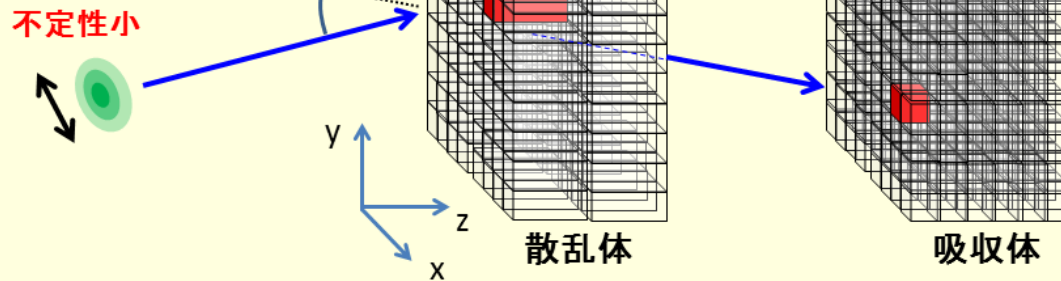
$m_e c^2$: 電子の静止質量エネルギー

高分解能コンプトンカメラへ

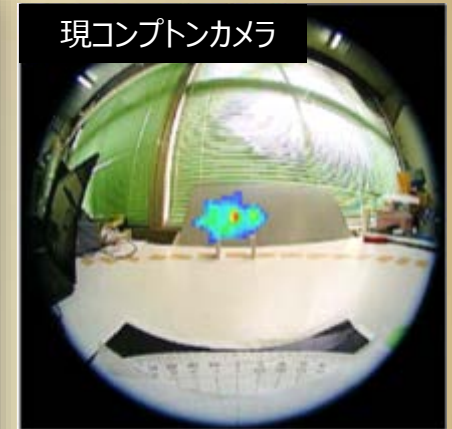
従来方式



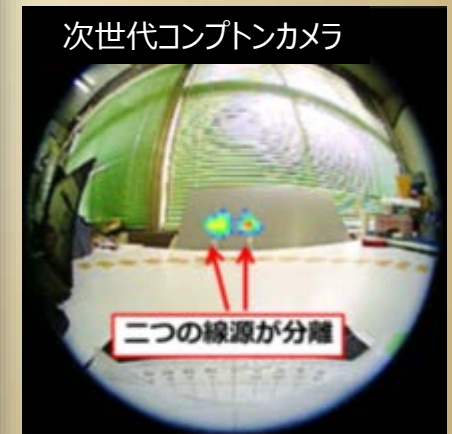
3次元方式



現コンプトンカメラ



次世代コンプトンカメラ



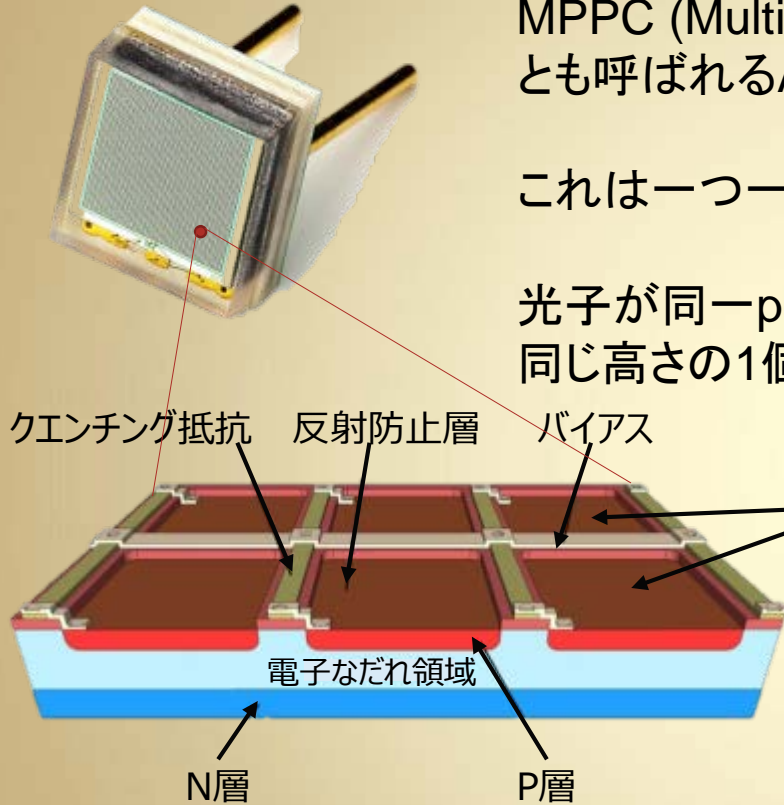
シリコンフォトマルへ

コンプトンカメラで用いる光検出器

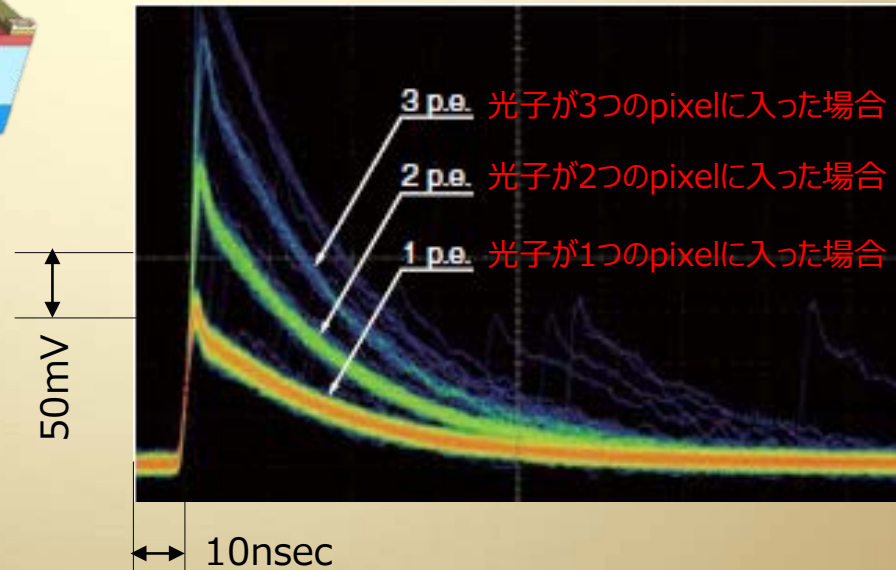
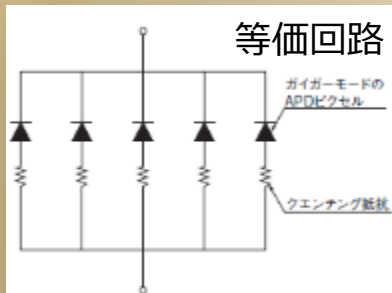
MPPC (Multi Pixel Photon Counter)はシリコンフォトマルとも呼ばれるAPDの集合体で、機器を大幅に小型軽量化できる

これは一つ一つのAPDが微小のGM管のような働きをする

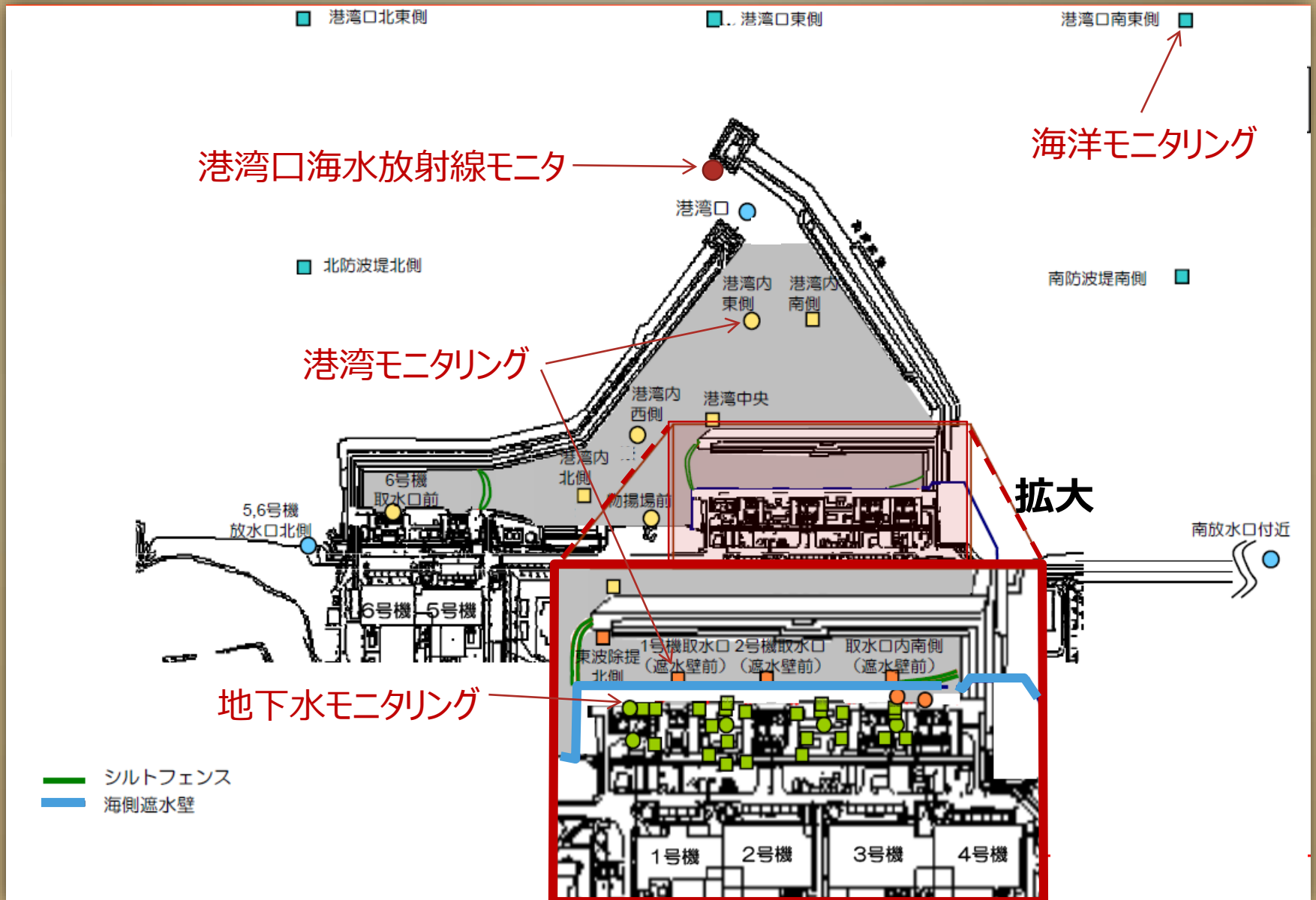
光子が同一pixel(すなわちAPD)に何個入っても、出てくるパルスは同じ高さの1個だが、別のpixelに入ればパルス波高は加算される



一つ一つのpixelはAPD (Avalanche Photo Diode)で構成される

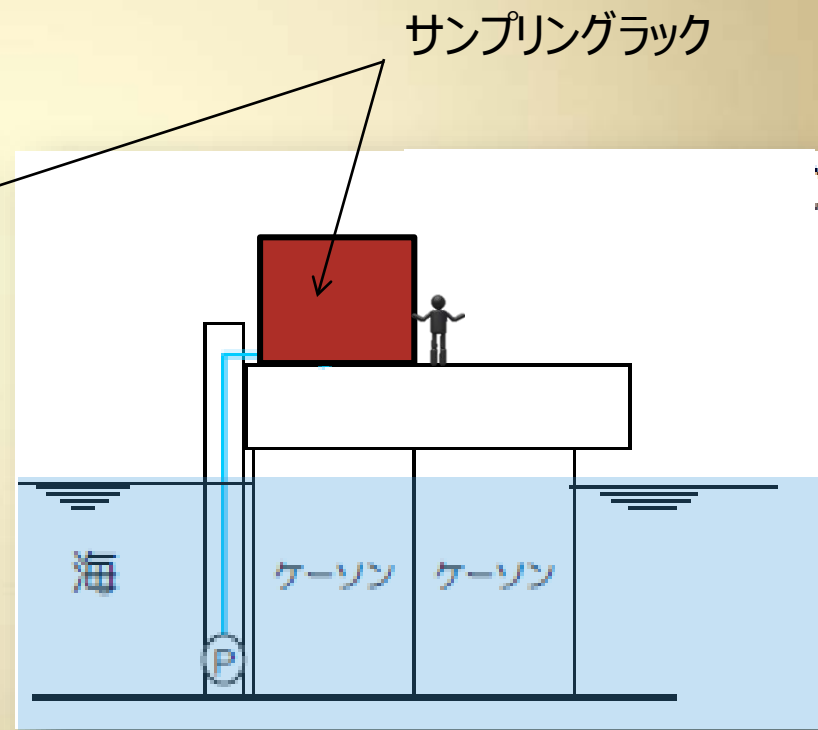


港湾口海水放射線モニタ

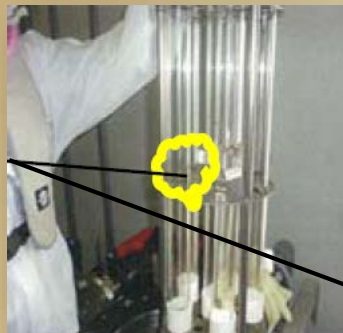


港湾口海水放射線モニタ

目的：定期的に行っている海洋モニタリングを連続監視



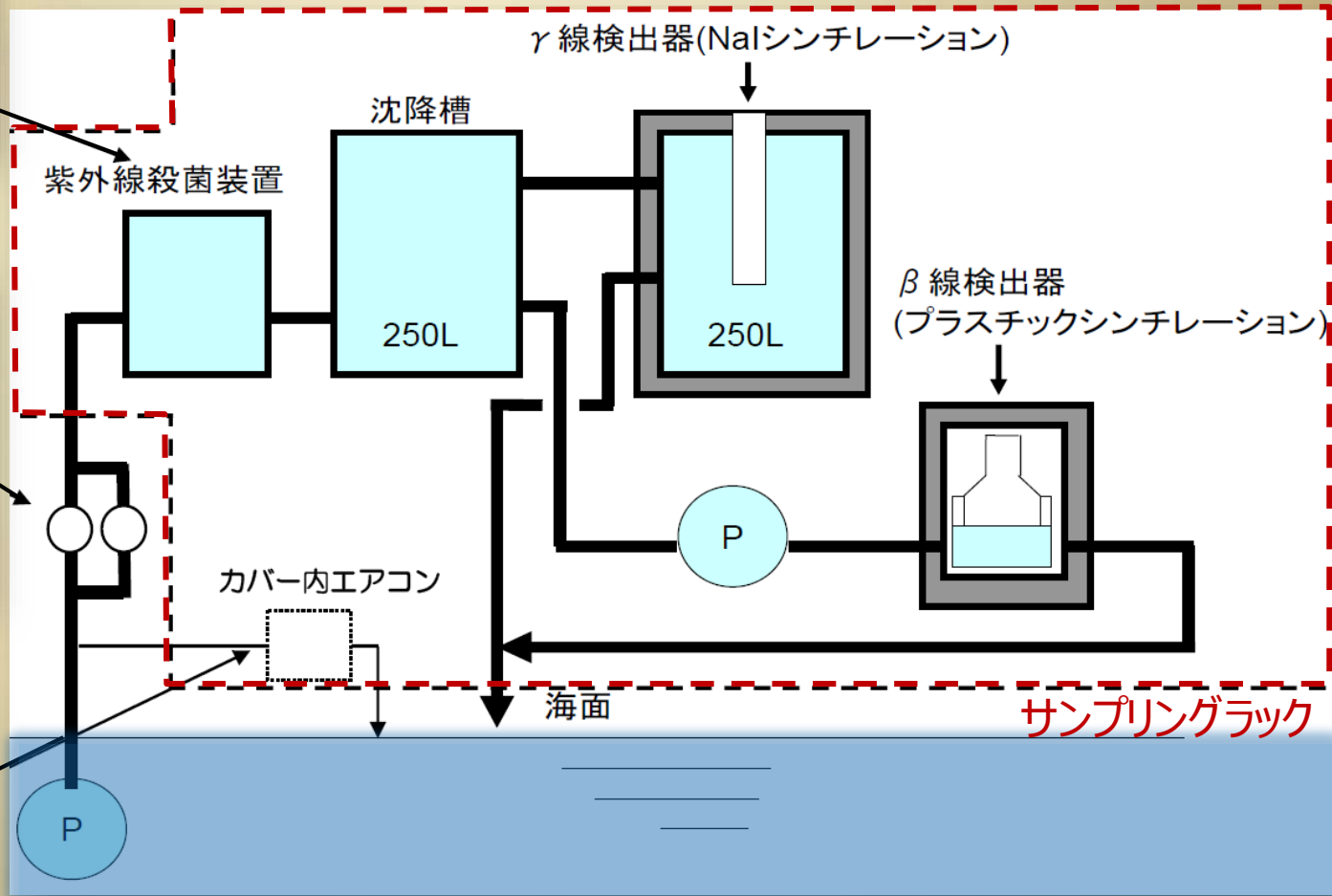
港湾口海水放射線モニタ



陸上ストレーナ

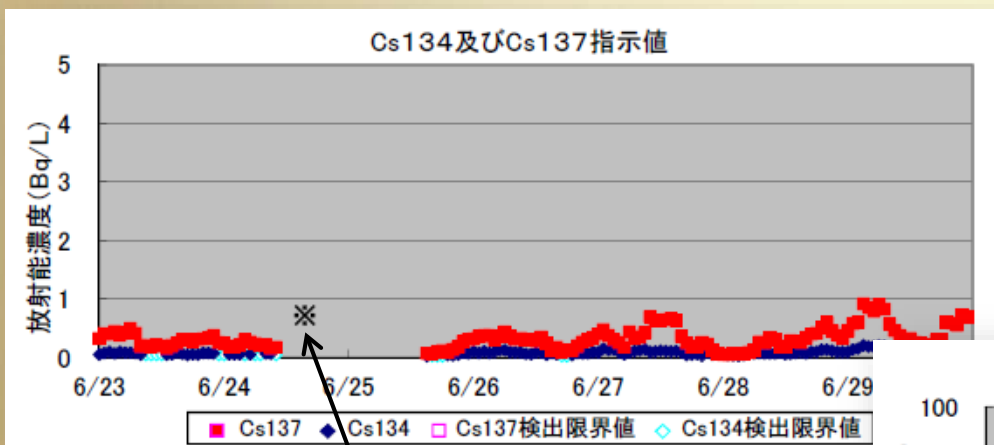


エアコンストレーナ



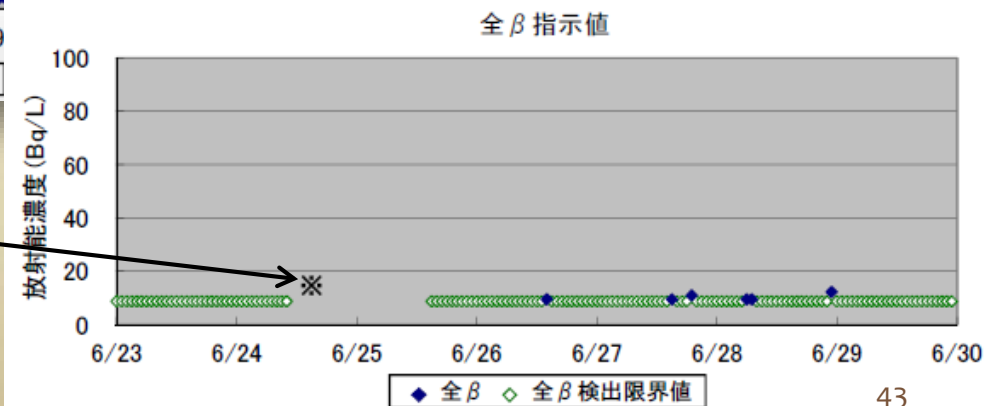
港湾口海水放射線モニタ

核種	告示濃度限度 (Bq/ℓ)	平均実測値 (Bq/ℓ)	検出限界値 (Bq/ℓ)
Sr-90	30	-	分離測定機能無
Cs-134	60	0.11	0.02
Cs-137	90	0.46	0.05
H-3	60000	-	分離測定機能無
全β	-	9.6	8.7

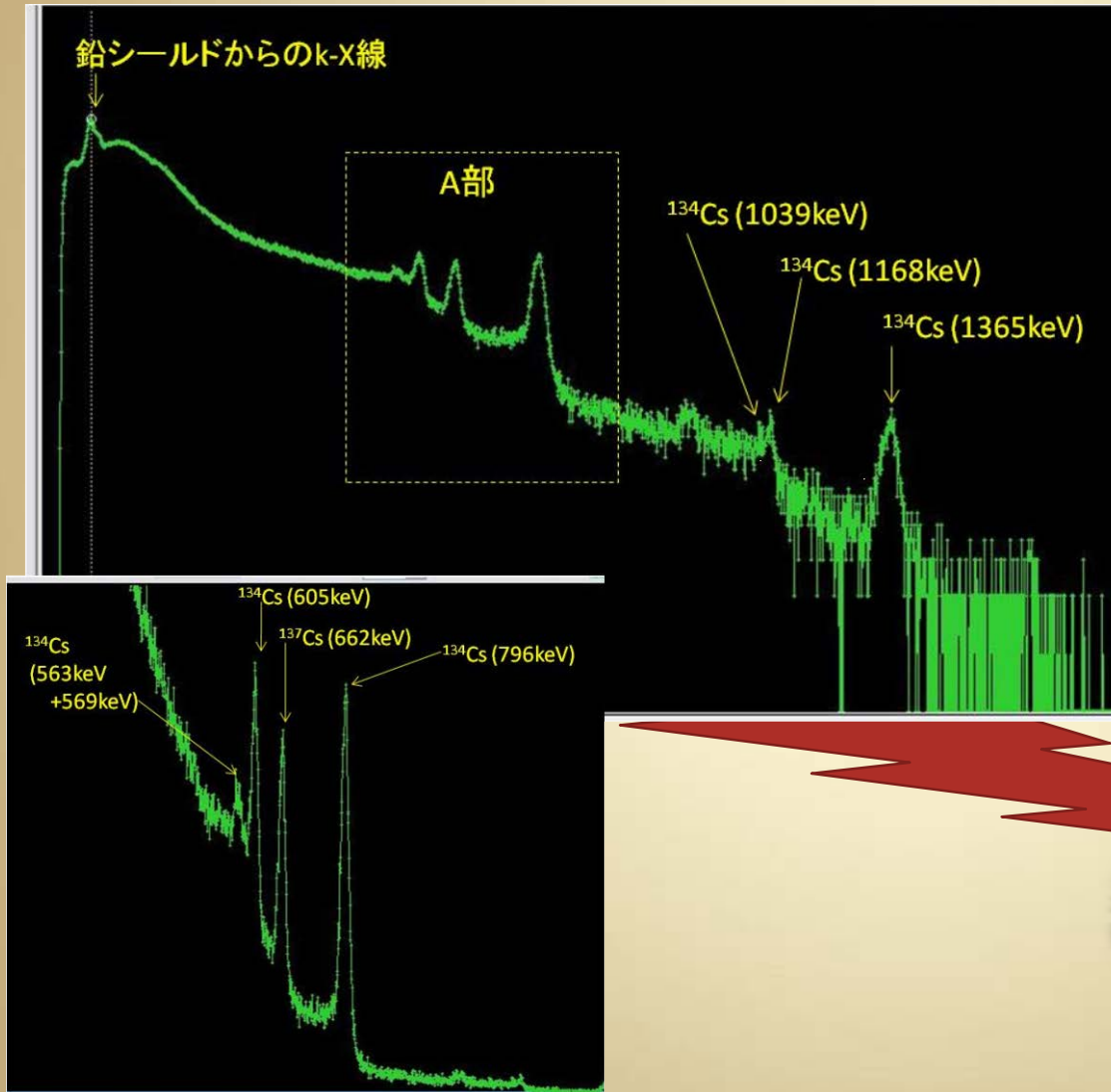


- ・主として海水中のK-40寄与分
- ・サンプリング分析によるSr-90濃度は1Bq/ℓ以下

清掃に伴う欠測、手分析評価



高線量率 γ 線スペクトロメータ



CZT常温半導体検出器



外観と構成



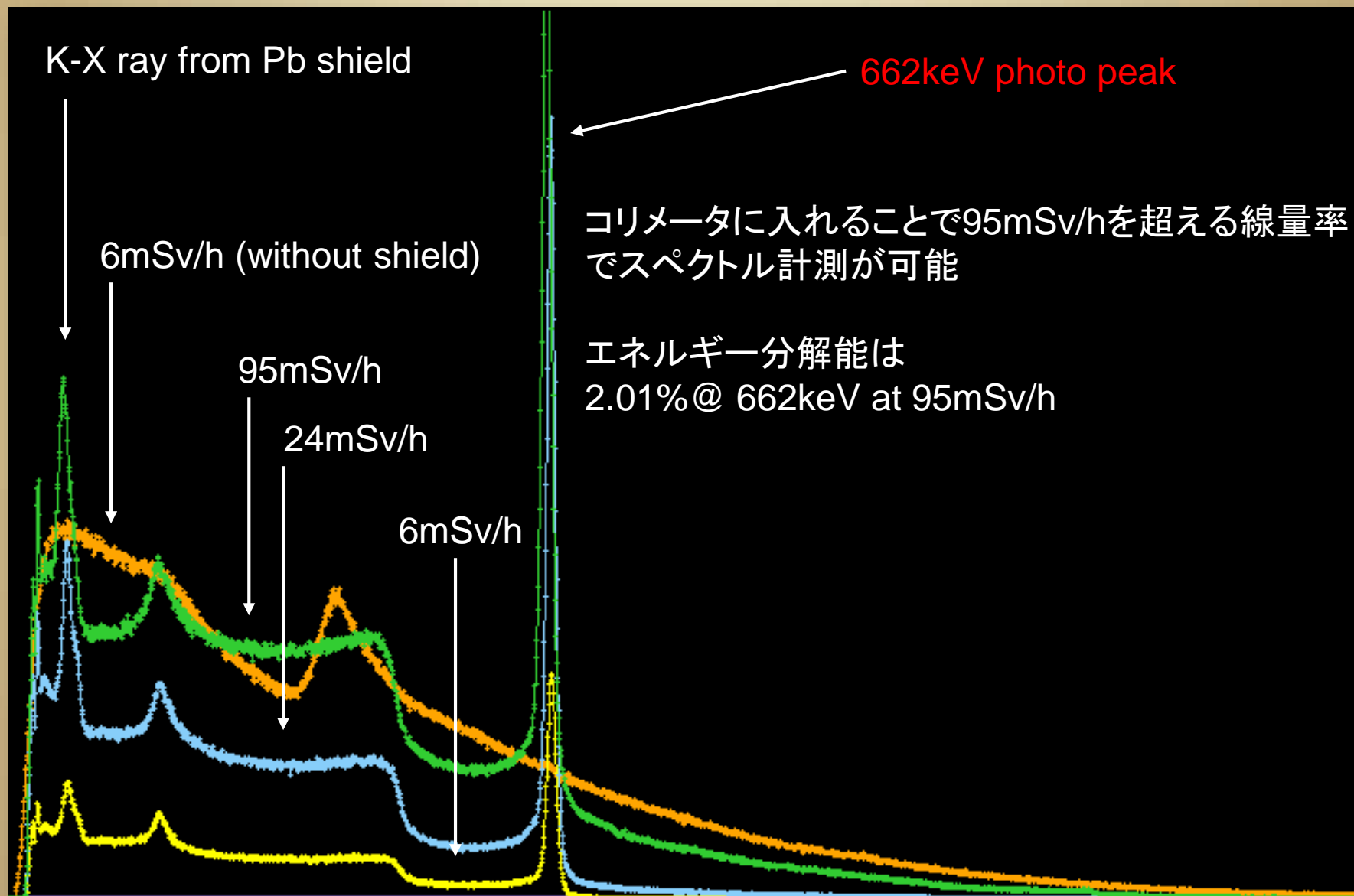
CZTスペクトロメータ

0.1mmΦコリメータ付鉛シールド

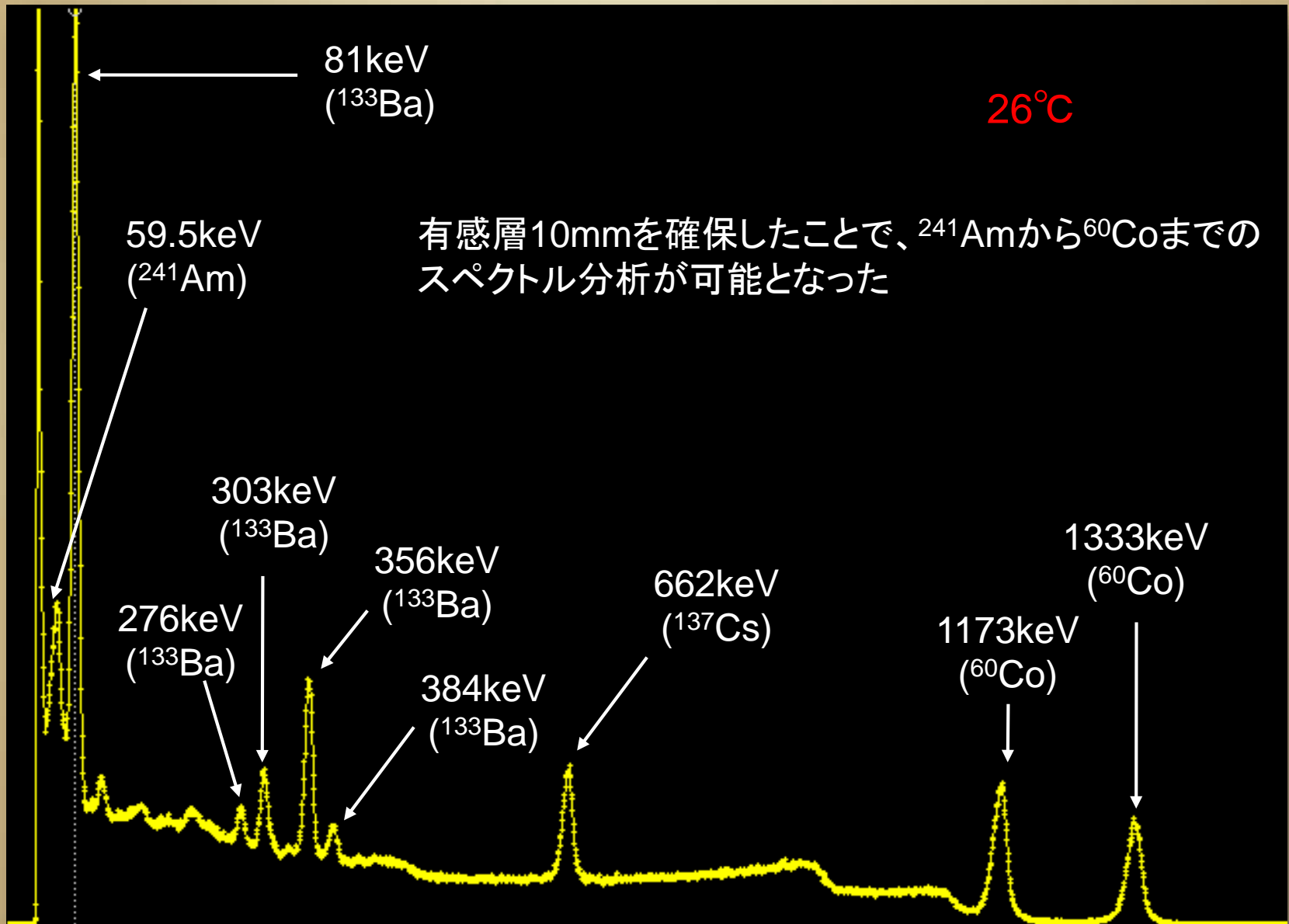
(自然BG遮蔽と高線量率γ線コリメート機能を兼ねる)



高線量率用コリメータ使用時の ^{137}Cs 出力波高分布

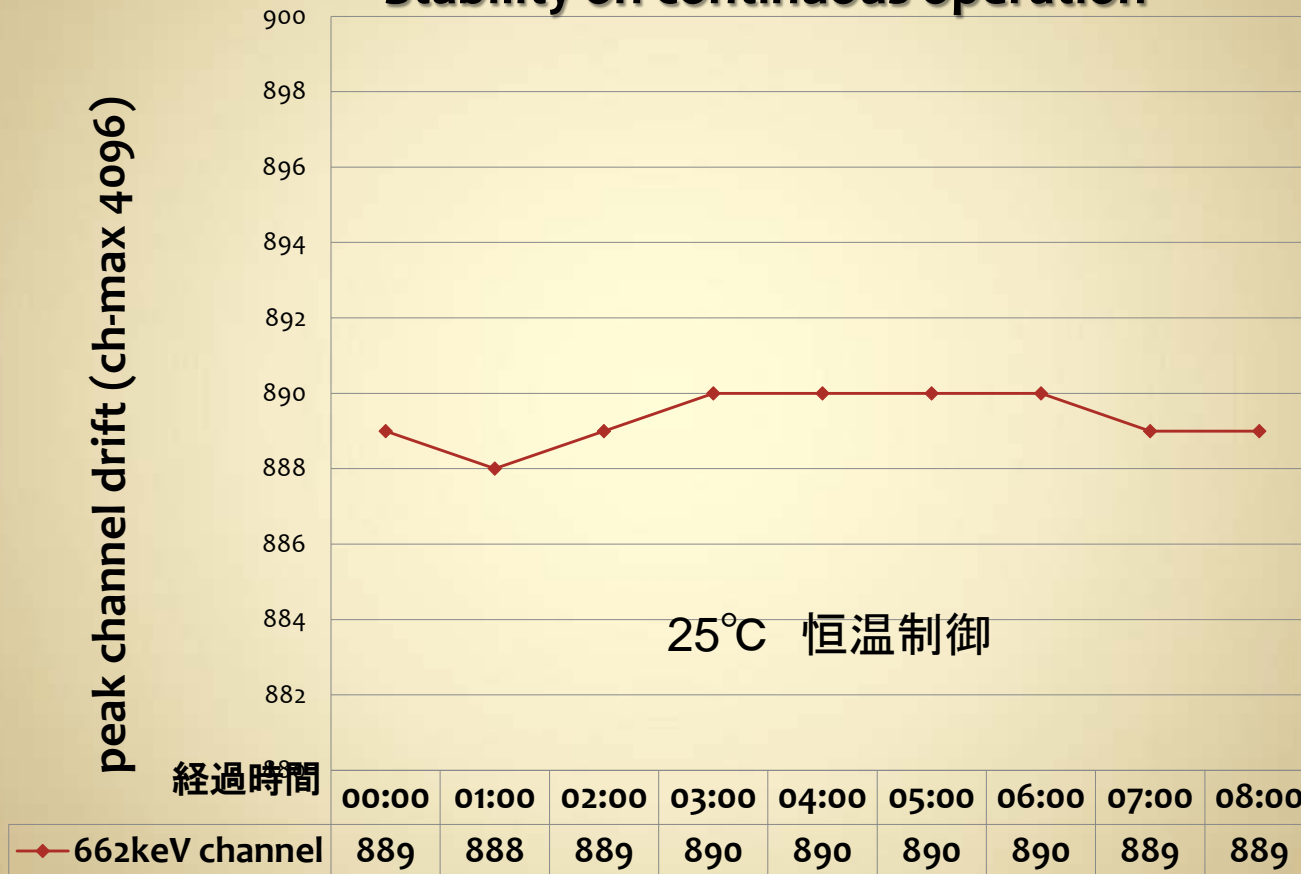


エネルギー分析例



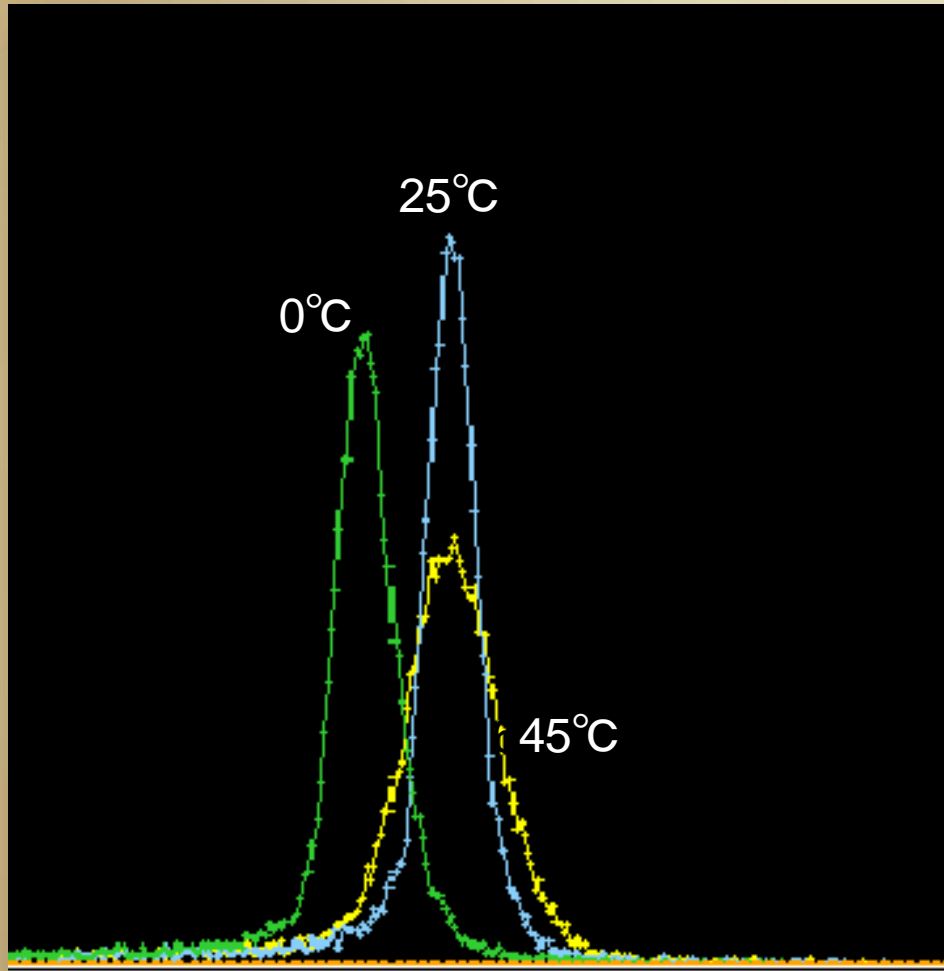
ゲイン安定性

Stability on continuous operation



8時間の連続動作で662keV相当
ピークチャンネルドリフトは±1ch (全4096ch)であった

光電ピークの温度依存性



20°C以上でゲイン変動は見られないが
エネルギー分解能は低下する

20°C以下では温度の低下と共に
ゲインは低下する

エネルギー分解能は15°Cにおける
1.46% @ 662keVを最高として温
度が下がっても、上がっても低下する

リアルタイム線量率モニタ

0.1 μ Sv/h \sim 100mSv/h

70か所



写真提供：日本スペースイメージング（株）、(C)DigitalGlobe

リアルタイム線量率モニタ

免震重要棟、入退管理棟に大型画面を設置

