

測定値から見る放射線測定器の性能

第 11 報 原発事故 1 年半後の測定器動向

The performance of a radioscope evaluated by measured values.

The 11th report Trend of the measuring instrument after one and a half years from the nuclear power plant disaster

非破壊検査株式会社 藪下 延樹

1. はじめに

原発事故後放射能汚染地域が発生して急激に放射線測定器(測定器、サーベイメータ)の需要が伸び、さらに、放射能汚染地域の「除染工事」に伴う除染効果の確認に高品質な「エネルギー補償型」測定器の使用が監督官庁の環境省から求められるようになった。そのため、従来型に加えて、エネルギー補償型等の開発・実用化が急速に進みつつある。このように、測定器事情が急変した。原発事故 1 年半後の現在の測定器動向や性能を主に WEB 上で調査・分析した結果を報告する。

2. 情報源

今回の測定器動向や性能を調査した情報源及び測定条件を表 1 に示した。

表 1 調査した情報源及び測定条件

No.	情報源	測定場所	測定条件	測定間隔
1	WEB 上のみかけデータ「放射線・放射線測定器のメモ」 ^{<1>}	東京 20 ~ 40 階ビルの中層階	自然放射線(B G)を測定	1 分
2	WEB 上の YouTube ^{<2>} を分析した自己データ ^{<3>}	大阪ビル 1 階等	同上	1 秒
3	発表済の自己データ ^{<3>}	大阪ビル 1 階	同上	1 秒

WEB 上のみかけ H P の例を図 1、自然放射線(B G)測定例を図 2 に示した。図 1 から同 H P は大手検索サイト Yahoo(Google も結果は同じ)で「放射線測定器」で検索すると、542 万件中の第 1 位にヒットする人気 H P である。人気 H P であるために、多数の測定器が集まり、図 2 の多数測定器の比較実験が継続的に可能となった。図 2 のプロット点は 1 分ごとの実測値を表し、実測値が時間的に大きく変動していることが分かる。また、機種によってこの実測値が異なっている。



図 1 Yahoo「放射線測定器」で検索結果とみかけ HP の例

* 堀場 PA-1000 Radi

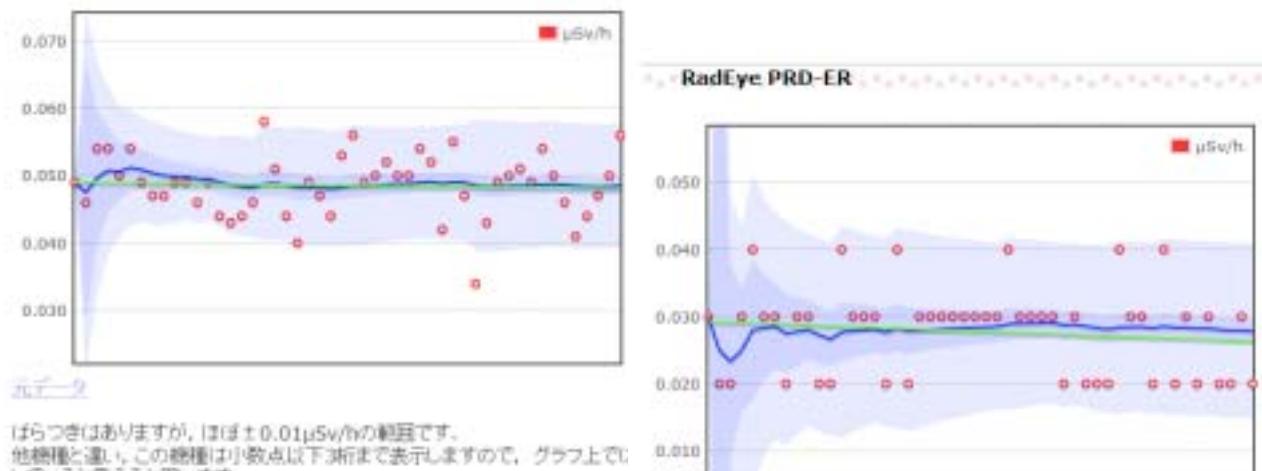


図 2 みかけ HP 自然放射線測定例(第 2 回 2011/10/02) ^{<1>}

3. 新型測定器の動向

主な市販測定器の種類と特性を表 2 に示した。従来の気体電離型測定器(電離箱、GM 管等)では、線が図 3 のように間接電離放射線で検出効率が非常に悪く(図 4 参照、 150keV 、透過厚さ 20mm で 0.03% 程度)、電離電流やカウント数が小さいために、BG レベルの指示値のバラツキ(変動)が大きい欠点があった^{<3>}。この欠点を補うために、最近は、線を高密度検出素子で確実に捕えて(図 4 参照)、エネルギー依存性等は回路的に演算補正する測定器が多数新登場している。これら高密度検出素子容量と出力数の比較例を表 3、同搭載測定器のコストパフォーマンス例を図 5 に示した。この演算補正した「エネルギー補償型」測定器は事故前シンチレーション(以下、シンチ)式で実用化されていた。事故後は GM 式でも非演算補正で新登場している。特筆すべきは、表 2 の PET 樹脂シンチで従来器と比較して価格を $1/10$ 程度に低減できそうな見込みである。

表2 主な市販測定器の種類と特性^{<1>}参考

No.	測定器種類	主な市販時期	エネルギー補償型の有無	検出可能な放射線			エネルギー分解能評価	比感度(同一寸法)評価	製造コスト	検出素子密度 g/cm ³	検出素子(センサー)の説明 ^{<1>}
				線	線	線					
1	GM	事故前	有				×	1	低	0.001 3	線を検出できるのはマイカ窓のみ。ガラスやプラスチックで覆われているものは 線を検出不可。 線も検出はできるが感度は良くない。
2	Si 半導体	事故前	無	×	×		5	2	低	2.33	エネルギー20keV 以下向きで , Cs134/137 等の 600keV のエネルギーについては検出が難しい(通り抜けてしまう)。
3	NaI(Tl)シンチ	事故前	有	×	×		1	2	中	3.67	NaI 自体の感度は低いが、大きな結晶を作りやすく、大きな結晶を搭載した測定器が多い。結晶を大きくすることで、GM 管に比べて 10~1000 倍の感度を持たせることができ、高感度の測定器によく利用されている。
4	CsI(Tl)シンチ	事故前	有	×	×		2	2	中	4.51	NaI より感度が少し高く、エネルギー分解能も少し改善。NaI と同様に大きな結晶を搭載した測定器が多く、スペクトル分析機種での採用例が多い。
5	LaBr ₃ (Ce)シンチ	事故後	有	×	×		3	3	高	5.06	エネルギー分解能が NaI(Tl) の約 2 倍良好。核種分析機能付きの上位機種などで利用される。海外メーカーが特許を持っており、生産できる会社は限られる。
6	CdTe(CdZnTe)半導体	事故後	有	×	×		4	5	高	5.85	物質的には NaI や Ge より高感度だが、大きな CdTe 素子を利用する技術が成熟していないため、大きな結晶を利用しやすい NaI などに比べると感度を高くしにくい。日本メーカーの技術で、今後が期待できる。
7	PET樹脂シンチ	事故後	無	×	×			1	低	1.35	ペットボトル樹脂(以下、PET樹脂)のポリエチレンテレフタレートが放射線計測用シンチとして高いポテンシャルを持つことが確認されて開発中。従来シンチの 1/10 程度の低価格化が見込める。

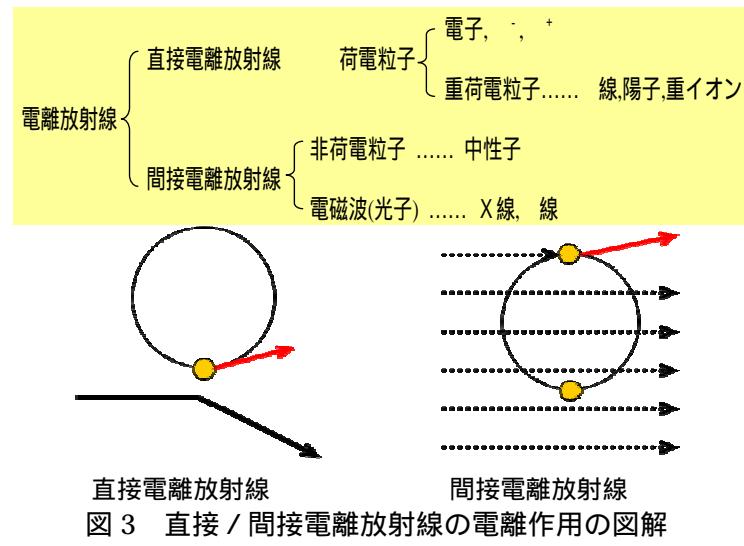


図3 直接 / 間接電離放射線の電離作用の図解

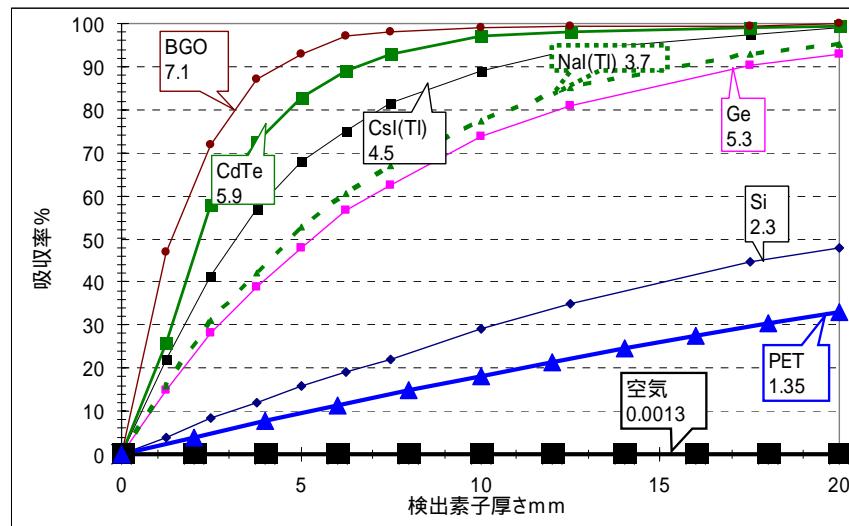


図4 測定器検出素子の比較 (150keV、パラメータの数字 : 密度) <4>参考

表3 検出素子容量と出力数の比較例<3>に追記

測定器名称	メーカー名	型番号	検出素子容量 (mL)	概算価格@万円	BGカウント数 cps	備考・センサー部の放射線透過写真
3" シンチ	EMF	EMF211	347.5	130	381.99	
1" シンチ	Aloka	TCS171B	12.9	52	27.79	
1" シンチ	HPI	HPI5000	12.9	35	34.8	
GM	HPI	HPI5000GM	25.5	28	0.58	
GM	Aloka	H-2006 GM	27.5	28	0.85	
2" CsIシンチ	シンメトリー	iFKR-508	51.6	158	116.6	光電子増倍管不使用
1" CsIシンチ	リック	iFKR-254	12.9	100	30.3	光電子増倍管不使用
CsIシンチ	テクノA P	TC100S	未公開	20	2.9	光電子増倍管不使用
CdTe半導体		TA100U	0.1	23	0.9	
1" LaBr3シンチ		TS100	12.9	195	29.2	光電子増倍管不使用？

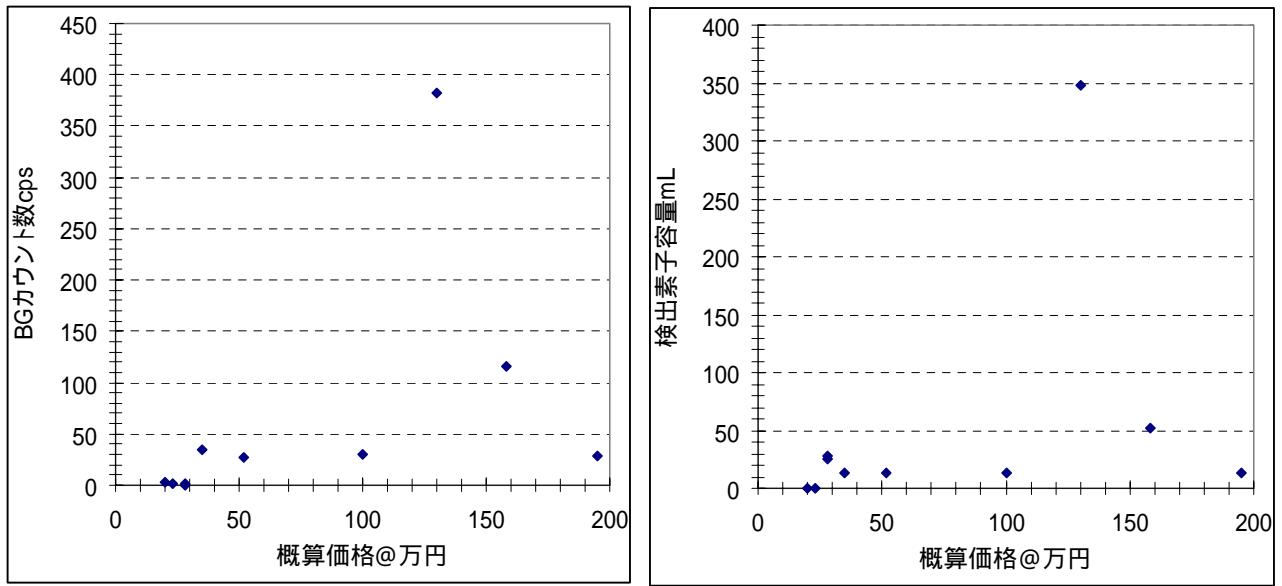


図 5 測定器のコストパフォーマンス例

4. エネルギー補償型測定器

日本原子力開発機構が WEB 上に測定器検出素子のエネルギー特性の基礎実験結果を公開されているので図 6 及び図 7 に引用させて頂く。図 7 の測定結果から、検出素子の密度の大きいものほどエネルギー依存性が大きいと考えられる。



図 6 エネルギー特性実験使用の検出素子^{<5>}

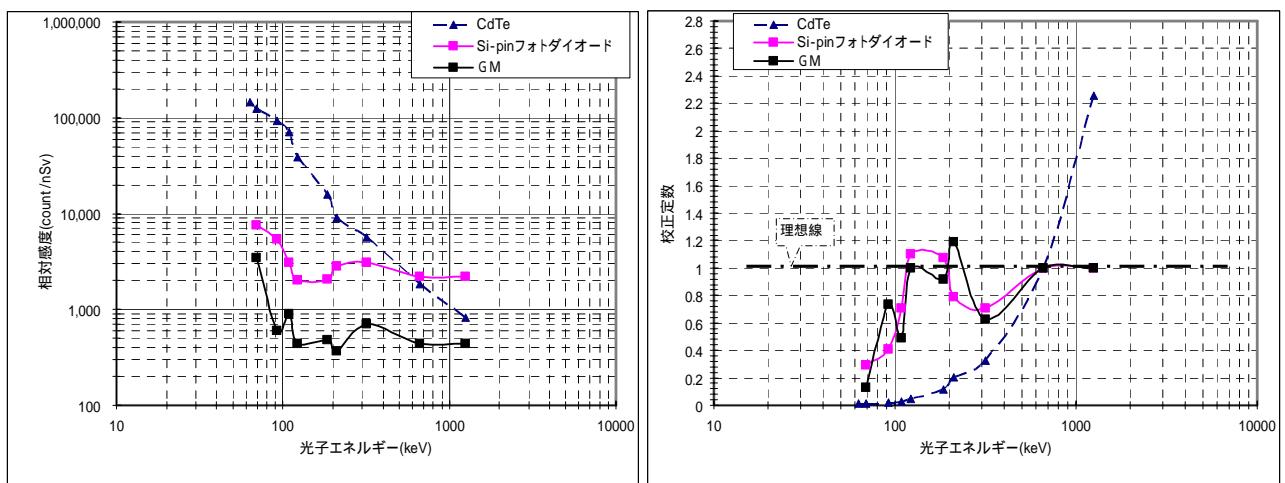


図 7a 相対感度 (ディスクリレベル : 50keV) ^{<5>}

図 7b 校正定数(左記から発表者作成)

4.1 シンチ式エネルギー補償型測定器

シンチ式エネルギー補償型測定器は元々手動で入射エネルギーごとの指示値に異なる校正定数を掛けてエネルギー補正する作業を測定器自らが行い、エネルギー補正済みの指示値を直接表示する先端測定器である。シンチ式エネルギー補償型測定器のエネルギー依存性の例を従来型並びに元々成績の優秀な電離箱型と比較して図 8 に示した。シンチ式エネルギー補償型測定器は元々成績の優秀な電離箱型と同等レベルのエネルギー補正を行っている。

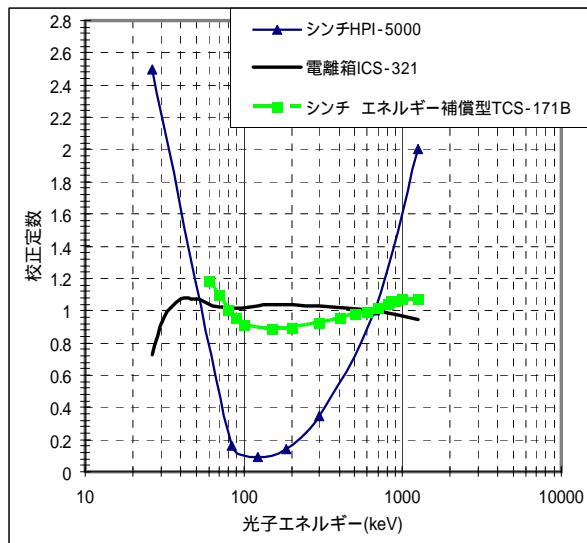


図 8 シンチ式エネルギー補償型測定器のエネルギー依存性の例

4.2 GM 式エネルギー補償型測定器

GM 式測定器は元々、エネルギーを分析する能力はない。そこで、GM 式エネルギー補償型測定器は元のエネルギー特性を GM 管外周に巻いたフィルターでエネルギーと吸収率の特性から吸収補正して、可能な限り均一になるように機械的(物理的)にエネルギー補正を行ったものである。GM 式エネルギー補償型測定器の校正定数の例を従来型並びに理想線と比較して図 9 に示した。図 9 から、機械的エネルギー補正の効果が認められる。

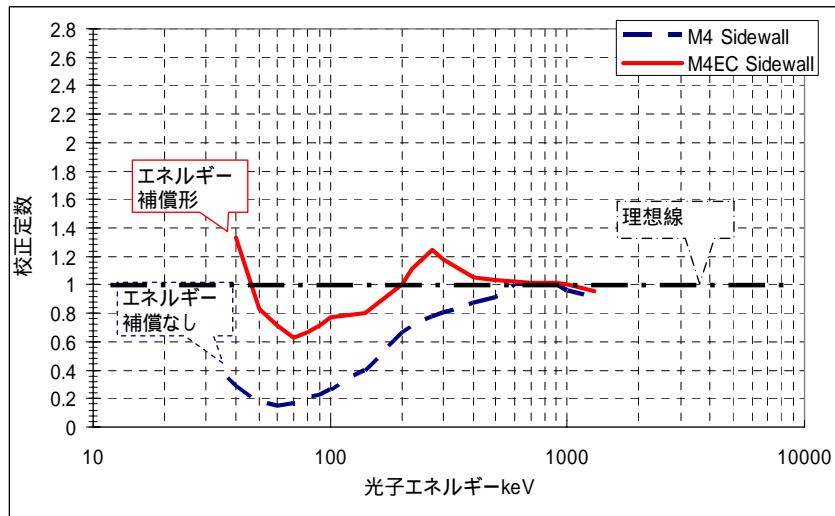


図 9 GM 式エネルギー補償型測定器のエネルギー依存性の例⁶⁾

5. BG 指示値のバラツキ

5.1 WEB 及び YouTube 上の BG 指示値データ

表 1 の情報源 1 (みかけデータ、測定間隔 1 分) 及び 2 (YouTube からの第 6 報自己データ、測定間隔 1 秒) の同一機種で BG 時の測定条件 (場所、時期、測定者) の異なる指示値を図 10 に示した。この測定条件の異なる経時データの比較を標準偏差 () で分析して図 11 に示した。図 10 の経時データでは測定間隔が異なるために、見た目のデータは大きく異なる。しかし、図 11 の標準偏差では、指示値の平均が異なることを考慮すると、標準偏差 () を用いて、指示値のバラツキを分析評価に使用できると思われる。

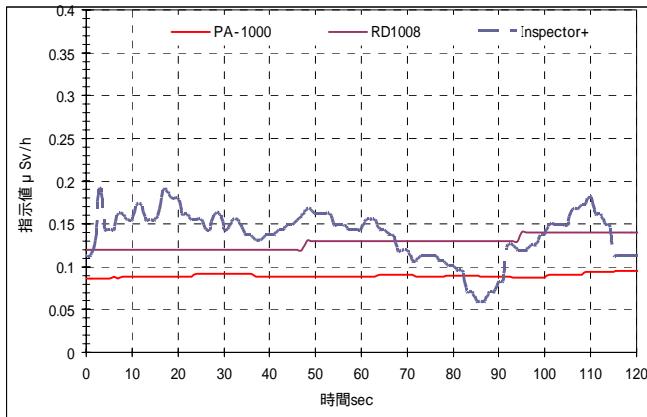


図 10a 自己データ(測定間隔 1秒、第 6 報)

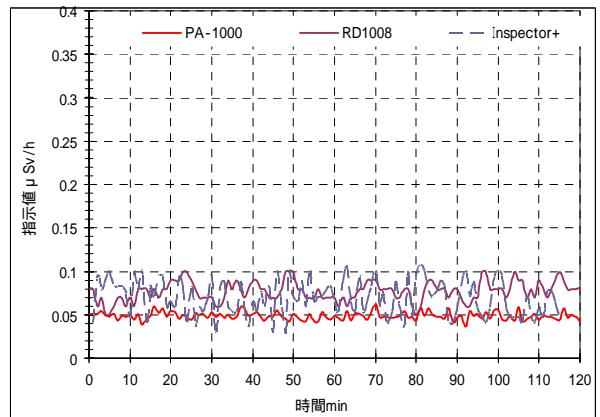


図 10b みかけデータ(測定間隔 1分)

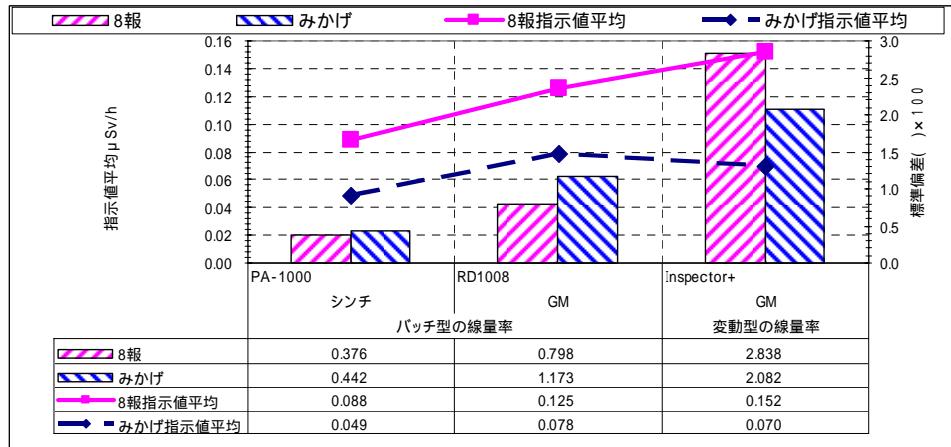


図 11 測定条件の異なる集計データの比較

5.2 分析に用いる指示値データ

前節の分析で、測定条件の異なる経時データが分析に使用できることが確認できたので、表 1 のデータを用いて BG 時の指示値のバラツキ分析を行う。次に、みかけデータで再現性試験（指示値平均及び標準偏差を第 2 回～第 9 回で取得）を同一機種について実施し結果を図 12 に示した。再現性は比較的良好であった。分析に使用するデータ例を図 13 に示した。図 13 b のみかけデータは平均的な第 3 回目データを示した。第 8 報で発表済みの自己データを図 13a に示した。

また、測定器の仕様とこの分析データのバラツキ（標準偏差）等を表 4（抄）に示した。表 4 では全データ 73 の内 31 について示した。

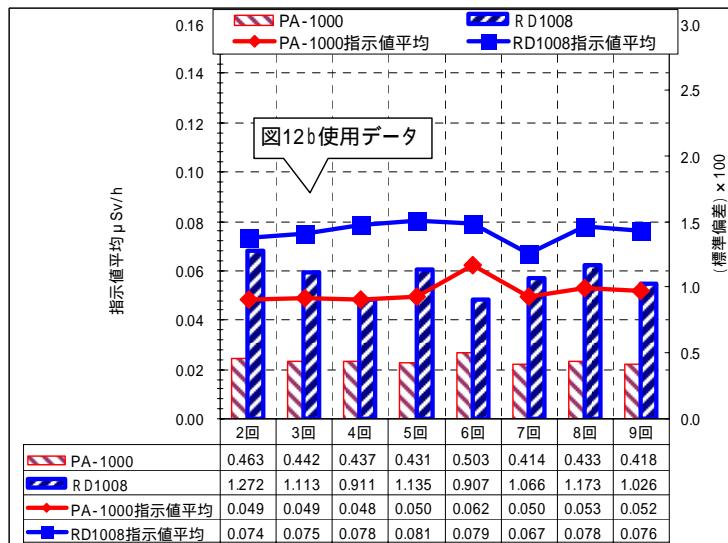


図 12 みかけデータの再現性試験(第 2 回～第 9 回)

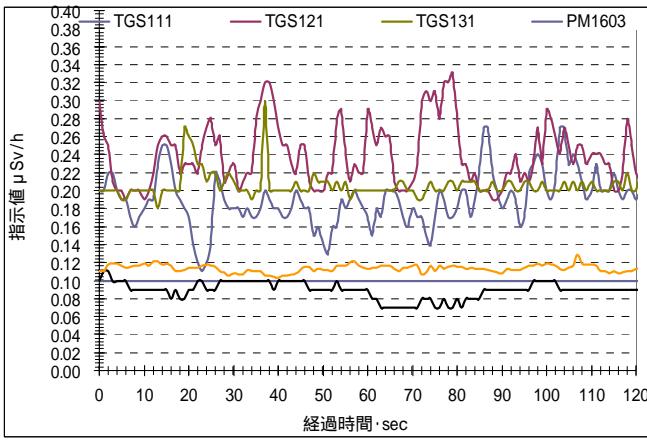


図 13a 自己データ（測定間隔 1秒、第 8 報）

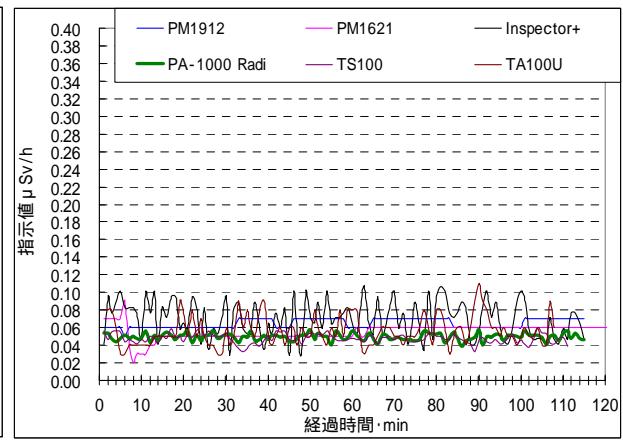


図 13b みかけデータ（測定間隔 1 分）

表 4 測定器仕様と BG 時のバラツキ（標準偏差）例（抄）

GM / シンチの別	名称	型番号	メーカー名	BG感度 (0.07 μSv/h)カウント数 cps	公称/実測 感度 cpm / μSv/h	時定数・サンプリング時間	エネルギー補償型の 適否	測定回数	測定年月日	データ数	指示値平均 (μSv/h)	BG (0.07 μSv/h)測定 時の標準偏差 ×100	センサー部
Csl	PM1703MA	Polimaster		7.00	6,000	-	×	8	2012.02.24	136	0.06	3.7E-07	Csl((Tl))シンチレータ(3cc)
Csl	PM1703MA	Polimaster		7.00	6,000	-	×	6	2011.11.27	111	0.05973	0.1629	Csl((Tl))シンチレータ(3cc)
Csl	PM1703MO-1B	Polimaster		7.00	6,000	-	×	4	2011.10.23	120	0.05025	0.20344	Csl((Tl))シンチレータ(3cc)
Csl	PM1703MA	Polimaster		7.00	6,000	-	×	2	2011.10.02	50	0.0486	0.35051	Csl((Tl))シンチレータ(3cc)
Csl	2.2mL シンチPA-1000	掘場		2.33	2,000		×				0.088	0.376	
Csl	PA-1000	掘場		2.33	2,000	60秒	×	7	2011.12.18	115	0.049617	0.41434	
Csl	PA-1000	掘場		2.33	2,000	60秒	×	9	2012.06.05	116	0.051664	0.41764	
Csl	PA-1000	掘場		2.33	2,000	60秒	×	5	2011.11.13	90	0.049578	0.43057	
Csl	PM1703MA	Polimaster		7.00	6,000	-	×	7	2011.12.18	115	0.052435	0.43106	Csl((Tl))シンチレータ(3cc)
Csl	PA-1000	掘場		2.33	2,000	60秒	×	8	2012.02.24	135	0.0528	0.43259	
Csl	PA-1000	掘場		2.33	2,000	60秒	×	4	2011.10.23	120	0.048367	0.43694	
Csl	PA-1000	掘場		2.33	2,000	60秒	×	3	2011.10.10	192	0.048688	0.44175	
Csl	DoseRAE2	RAESystems				不明	×	9	2012.06.05	116	0.059224	0.45969	Csl((Tl))フォトダイオード(0.3cc)
Csl	PM1703MA	Polimaster		7.00	6,000	-	×	3	2011.10.10	192	0.053021	0.46036	Csl((Tl))シンチレータ(3cc)
Csl	Mr. Gamm	A2700	クリアバルス Mr.Gamma	1.17	1,000	60秒		3	2011.10.10	192	0.044224	0.46294	Csl((Tl))フォトダイオード
Csl	PA-1000	掘場		2.33	2,000	60秒	×	2	2011.10.02	50	0.04854	0.463	
Csl	DoseRAE2	RAESystems				?	×	6	2011.11.27	111	0.102703	0.46605	Csl((Tl))フォトダイオード(0.3cc)
Csl	DoseRAE2	RAESystems				不明	×	2	2011.10.02	50	0.054	0.49487	Csl((Tl))フォトダイオード(0.3cc)
Csl	PM1703MA	Polimaster		7.00	6,000	-	×	9	2012.06.05	116	0.055086	0.50209	Csl((Tl))シンチレータ(3cc)
Csl	PM1703MA	Polimaster		7.00	6,000	-	×	5	2011.11.13	90	0.055	0.5028	Csl((Tl))シンチレータ(3cc)
Csl	PA-1000	掘場		2.33	2,000	60秒	×	6	2011.11.27	111	0.06227	0.50325	
Csl	DoseRAE2	RAESystems				不明	×	3	2011.10.10	192	0.055469	0.50948	Csl((Tl))フォトダイオード(0.3cc)
Csl	DoseRAE2	RAESystems				不明	×	4	2011.10.23	120	0.092167	0.52153	Csl((Tl))フォトダイオード(0.3cc)
Csl	DoseRAE2	RAESystems				不明	×	8	2012.02.24	136	0.092426	0.73531	Csl((Tl))フォトダイオード(0.3cc)
GM	PM1208M	Polimaster			-	×	6	2011.11.27	111	0.07	0		
GM	PM1203M	Polimaster		0.18	150	-		7	2011.12.18	115	0.078087	0.39505	エネルギー補償 GM管
GM	PM1621	Polimaster		0.18	150	-		2	2011.10.02	50	0.0664	0.48487	エネルギー補償
GM	PM1912	Polimaster			-	×	7	2011.12.18	115	0.064783	0.5189		
GM	PM1621	Polimaster		0.18	150	-		3	2011.10.10	192	0.056875	0.72086	エネルギー補償 GM管
GM	RADEX GM RD1008	RADEX		0.23	200	12分48秒	×				0.125	0.798	
GM	RD1008	RADEX		0.23	200	12分48秒	×	6	2011.11.27	111	0.079369	0.90734	

6. 分析結果

表4の測定器仕様とBG時のバラツキ(標準偏差)から測定器性能を分析した。検出素子容量と感度の関係を図14に示した。同図から検出素子容量と感度は比例関係のあることが分かった。次に、感度と標準偏差の関係を図15に示した。同図から感度の対数値と標準偏差は反比例の関係にあることが分かった。図15でエネルギー補償型測定器による標準偏差を楕円で囲んだ。GM式エネルギー補償型測定器は元々低感度であるために、更に感度低下が懸念されたが、このデータからではその懸念はない。一方、シンチ式エネルギー補償型測定器は原理的に元々エネルギー補償による感度低下の懸念はない。

次に、図15は表4の全部データを用いて複雑なために少し見にくいで、主に自己データを用いた代表的データを表5に抜粋して図16に感度と標準偏差の関係(代表的データ)を示した。

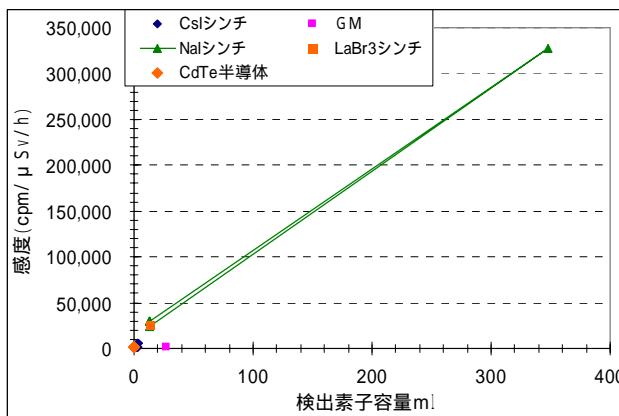


図14 検出素子容量と感度の関係

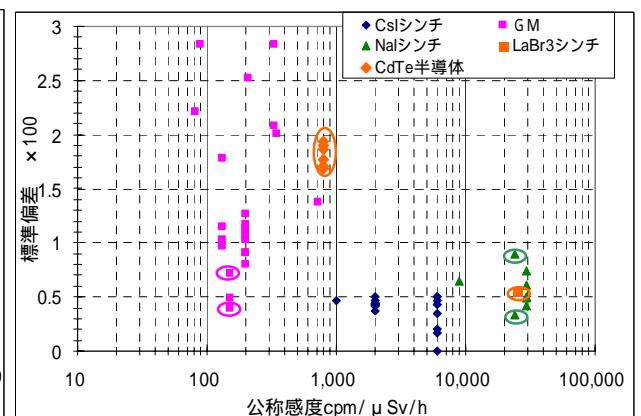


図15 感度と標準偏差の関係(全部データ)

表5 測定器仕様とBG時のバラツキ(代表的データ)

測定器の種類	型番号	メーカー名	検出素子体積 ml	BG感度 (0.07 μSv/h)cps	公称/実測感度 cpm/μSv/h	エネルギー補償の有り	測定場所	BG平均値 (μSv/h)	標準偏差 × 100(BG測定時)
GM	PM1912	Polimaster				×	東京	0.065	0.519
GM	PM1621	Polimaster		0.18	150		東京	0.057	0.721
GM	Inspector+	SEIntl		0.39	334	×	東京	0.070	2.082
GM	TGS-131	Aloka	27.5	0.85	729	×	大阪	0.206	1.379
CsIシンチ	PA-1000 Radi	堀場	2.2	2.33	2,000	×	東京	0.050	0.414
1"NaIシンチ	TCS171B	Aloka	12.87	27.79	23,820		大阪	0.079	0.339
1"NaIシンチ	HPI5000シンチ	HPI	12.87	34.80	29,829	×	大阪	0.113	0.417
3"NaIシンチ	EMF211	EMF JAPA	347.5	381.99	327,420		大阪	0.069	0.355
LaBr3シンチ	TS100	テクノAP	12.87	29.17	25,000		東京	0.048	0.546
CdTe半導体	TA100U	テクノAP	0.1	0.93	800		東京	0.057	1.686

測定場所と測定間隔: 東京ビル中層階で1分間隔、大阪ビルの1階で1秒間隔

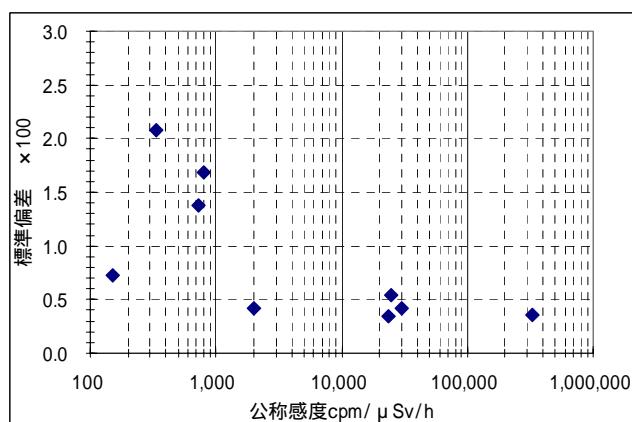


図16 測定器仕様とBG時のバラツキ(主に自己データによる代表的データ)

7. 測定器開発に挑戦 HP例

測定器事情の変化を受けて、個人で測定器開発に挑戦するHPが数多く出現している。要因の一つには団塊世代の大量退職やその方々の正義感・社会との繋がり感があると思われる。内容も程度が高く、GM測定器は少なく、今の世代に乗って固体半導体を検出素子として、無料のMCA(Multi Channel Analyzer)を使用して、エネルギースペクトル分析するものまである。その成果は検出素子に費用が掛けられないので検出素子が小さく、低感度であるが個人ユースとしては十分に使用できると思われる。その代表的なHP例を紹介する。読者諸氏も時間を見つけてこの測定器開発に挑戦されたら如何でしょうか。

- (1) PIN フォトダイオードを使った放射線検出器：図 17
(http://www.asahi-net.or.jp/~gt6s-sbic/electro/pingm_1/inex.html)
回路図や作り方まで懇切丁寧に教えてくれる。

(2) CsI シンチレータとフォトダイオードによるベクモニ用ガンマ線検出器；図 18
(<http://doku.bimyo.jp/benikumo/index.html>)
無料の MCA (商品名：ベクモニ) に接続して、エネルギースペクトル分析が前提の測定器開発で BG を低減する鉛遮へい体の製作方法まで懇切丁寧に教えてくれる。

(3) 半導体センサー搭載のスマートホーン端末測定器；図 19
(<http://www.radiation-watch.org/p/blog-page.html>)
この測定器は個人開発ではない完成品もあり、(1)項のフォトダイオード等を 8 個搭載した感度を高めた測定器ではあるが、発表者の感覚ではまだまだ感度が足りないと思われる。この測定器の価格は数千円で、(1)、(2)項を自作する場合の材料費（フォトダイオード等を 1 個搭載）とほぼ同価格で 8 個搭載した完成品が購入できる。この測定器は GM 管を用いていないが、何故か商品名は「ポケットガイガー」である。

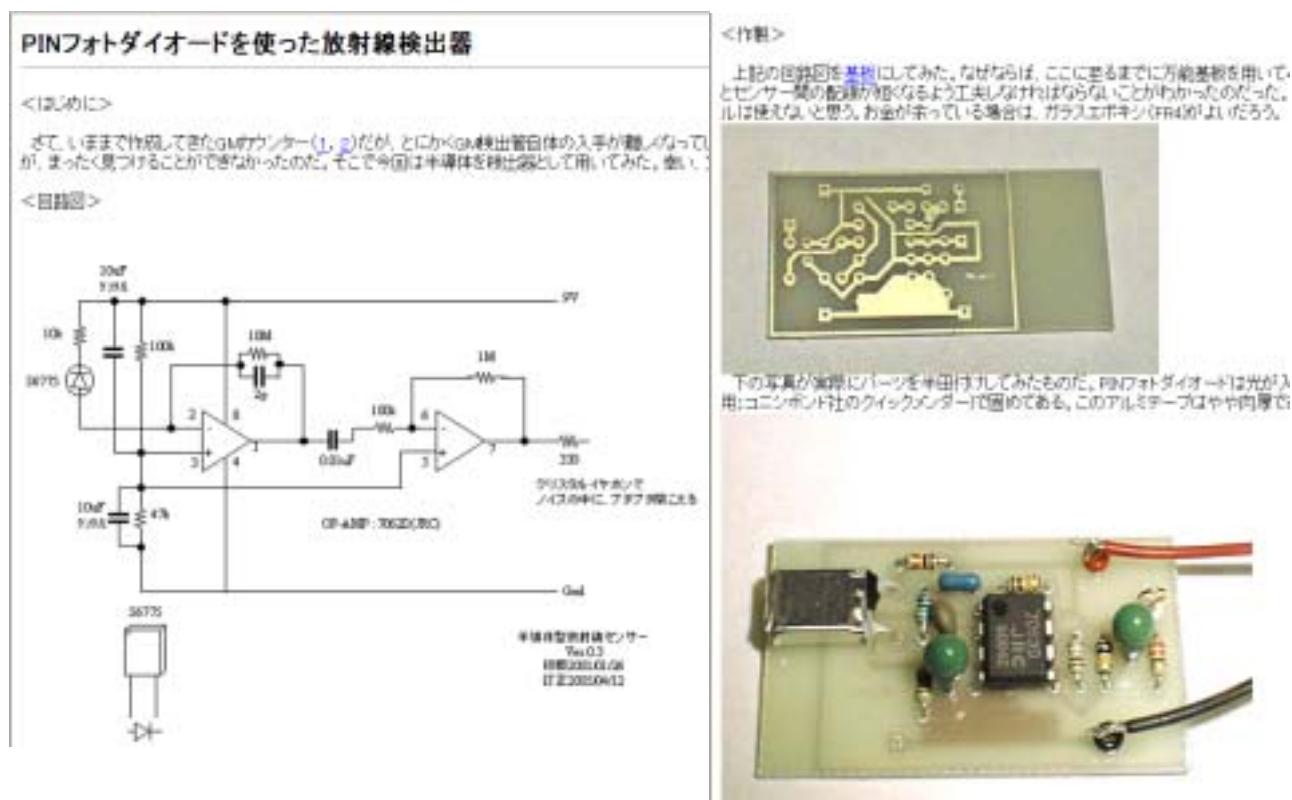


図 17 PIN フォトダイオードを使った放射線検出器



図 18a Cs Iシンチレータとフォトダイオードによるベクモニ用ガンマ線検出器

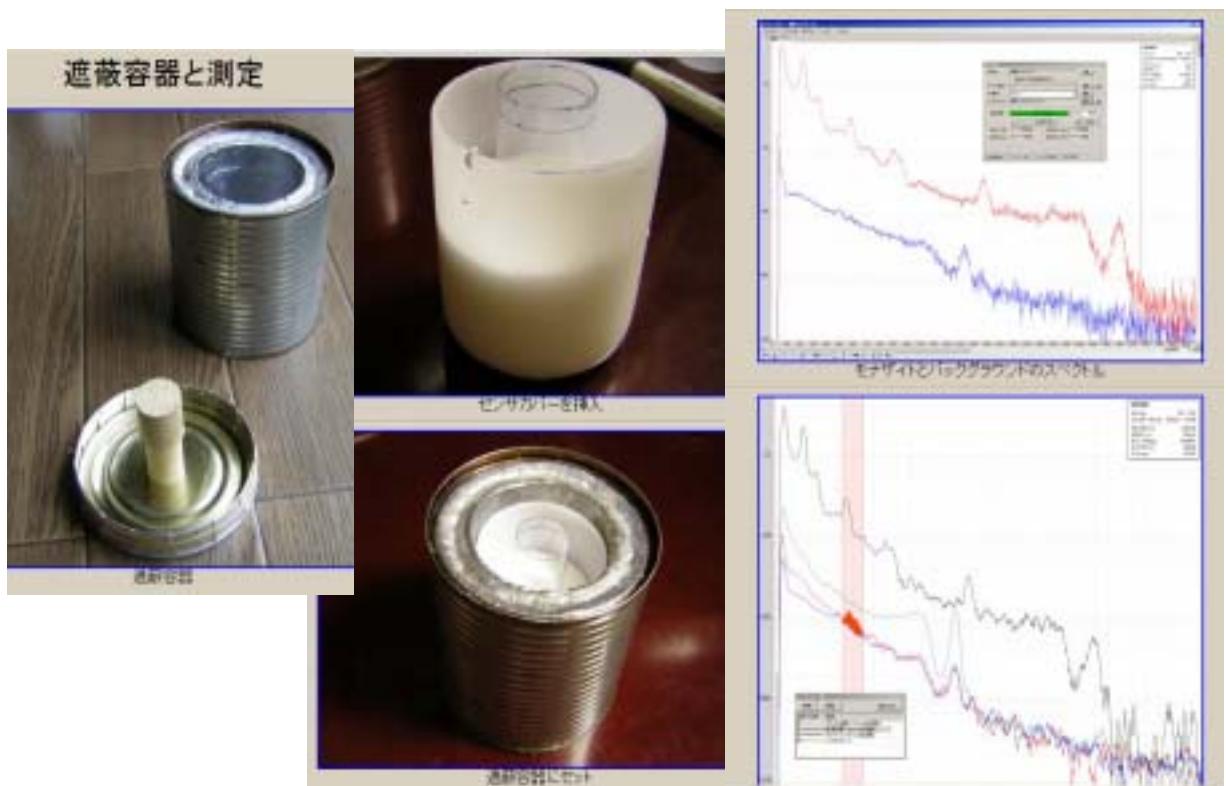


図 18b ベクモニ用ガンマ線検出器の鉛遮へい体の製作方法とエネルギースペクトル分析



図 19 半導体センサー搭載のスマートホーン端末測定器

8. まとめ

- (1) 原発事故 1 年半後の新しい測定器として LaBr₃ シンチや CdTe 半導体センサーを使用した測定器が登場したが、それら新センサーは高価格や製造上の問題等でまだ開発途上と思われる。(表 2 参照)
- (2) 原理的に開発が無理と思われていた GM 測定器にエネルギー補償型が登場したことは、特筆に値すると考えられる。ただ、GM 式エネルギー補償型測定器は元々低感度であるために、更に感度低下が懸念されたが、図 8 の今回のデータからでは懸念はない。
- (3) センサー容量と公称感度に比例関係のあるため(図 14 参照)、感度の高い測定器を製作するにはセンサー容量を大きくする必要がある。センサー容量が小さい低価格品は指示値のバラツキが大きい。(図 16 参照)

参考文献

- <1>みかげページ：放射線・放射線測定器のメモ、<http://www.mikage.to/radiation/>、(2012)
- <2>blower70：放射線測定器比較 7 Inspector+, PA-1000 Radi, Radex RD1008 RD1706, Pripyat, <http://www.youtube.com/watch?v=X-1E0q4Chaw>、(2011)
- <http://www.youtube.com/watch?v=BYr9ySSKKY>、(2011)
- <3>藪下延樹、辻本忠：測定値から見る放射線測定器の性能 第 6 報 比較的安価な放射線測定器の性能評価、JSNDI 第 8 回放射線シンポジウム講演会論文集 P39～P44 (2012)
- <4>アクロラド：CdTe 半導体の高吸収率について(150keV)、<http://www.acrorad.co.jp/cdte.html>、(2012)
- <5>日本原子力開発機構：家庭用放射線メータの開発、<http://rphpwww.jaea.go.jp/senryo/research/meter-1.htm>、(2012)
- <6>Arrow-Tech Inc.、Monitor 4 Survey Meter、<http://www.dosimeter.com/survey-meters/monitor-4-survey-meter/>、(2012)