



展 TENBO 望

放射線緊急時初動対応の展望



黒木 健郎
Kuroki Kenro

(警察庁科学警察研究所)



土屋 兼一
Tsuchiya Ken'ichi

1 はじめに

東日本大震災における津波の被害を受けた東京電力(株)福島第一原子力発電所事故とそれに伴う放射性物質の漏洩においては、初動対応での放射線計測や防護の点で大きな問題提起となった。特に、使用済み核燃料プールへの放水や原子炉・燃料プールの赤外線による計測など警察、消防、自衛隊による活動は高線量の被ばくが予想される場であったにもかかわらず、現場隊員の被ばく量の管理に対する備えが十分であったとはいえない。また、今回の事故が原子力施設の弱点を公にしてしまった点も今後の大きな課題である。さて、放射線緊急時初動対応としては、このような原子力災害のほかにも、放射性物質及び核物質を用いたテロにおける初動対応が考えられる。世界的にBCRN (Biological, Chemical, Radiological, Nuclear) テロの脅威が高まっている中、安全・安心な社会の実現のためテロ対策は重要な課題であり、化学剤(C)、生物剤(B)を用いたテロに対応するための研究開発が推進されている。しかし、放射

性物質及び核物質を用いたテロ(RNテロ)は、放射線被ばくによる人的被害だけでなく広範囲の汚染による社会的混乱や心理的不安など社会活動に対する影響も大きい。これまであまり研究開発が行われてこなかった。その理由として、日本では放射性物質・核物質を用いた大規模な事件・事故がなかったことが挙げられよう。日本以外に目を向けると、これまで放射性物質及び核物質を用いたテロ事件の事例としてセシウム(^{137}Cs)を公園に埋め爆破すると脅迫した事件(1995年 ロシア)や、ロシアから密輸されたプルトニウム500gが押収された事件(1998年 ドイツ)、ウラン500gの密売が摘発された事件(2007年 スロバキア)等が報道されている。また、1998年にチェチェンにおいて放射性物質を搭載した鉄道コンテナに爆弾が仕掛けられた事件は、放射性物質拡散デバイス(Radiological Dispersal Device, RDD)が発見された初の事案となっている¹⁾。しかし、日本においても2000年代以降悪意による放射性物質関連事案が増加しており、ヨウ素(^{125}I)等のばらまき事件(2000年 大阪)やイリジウム

(^{192}Ir)の窃盗事件(2008年 千葉)等が起きている。また、1999年に茨城県東海村で起きたJCO 臨界事故では、約20時間臨界状態が継続し、100名以上の一般公衆が被ばくした。この事故は核物質さえ入手できれば臨界を継続させるRDDが製作できることを公にしてしまったと言える。こうしたRNテロの脅威の高まりを受けて、警察庁科学警察研究所では平成20年度から「RテロにおけるRN物質探知技術と現場活動支援機材の研究開発」を開始し、テロ現場における初動対応部隊の安全を確保する機材の開発や評価を行ってきた。本稿では、これまで得られた成果の中から高線量場における個人線量計の評価について紹介したい。また、今後放射線緊急時初動対応において、どのような放射線計測技術が求められるか述べたい。

2 個人線量計の種類と初動対応現場での利便性

放射線緊急時初動対応において過度の被ばくを防止するため、現場隊員は個人線量計を装着し積算線量を把握する必要がある。 γ 線による線量把握は当然のことであるが、これまであまり重要視されなかった中性子線量の測定は、核種が未知の段階で対応するRNテロ現場においては重要となる(核物質が使用されている可能性がないとは言えないため)。さらに、高線量率場における現場では、リアルタイムでの線量管理も求められる。放射線業務従事者がRI施設で着用するフィルムバッジでは、被ばく線量をその場で把握できないため、現場隊員の活動時間や活動範囲を現場で管理することは困難である。そのため、隊員の個人線量計として電子式の半導体型線量計が好ましいといえる。一般的に半導体型線量計は、逆電圧をかけたSi等の半導体に放射線が入射することで電子・正孔対が生成されエネルギー損失に比例した電流をパルスとして測定することで線量が得られる。 γ 線の場合半導体内で電離された電子・正孔対

をパルス信号とするが、中性子の場合半導体検出器の周囲に配置したコンバータ(中性子との反応断面積が大きい軽元素素材)内で弾性散乱や核反応により生成された陽子・ α 線が半導体内で電離しパルス信号となる。これらのパルス信号の頻度から、 γ 線・中性子線各々について人体への影響を考慮した1cm線量等量(単位:Sv)へと変換する。一方、異なる検出方式を利用した個人線量計としてOSL(Optical Stimulated Luminescence)型線量計や過熱液滴型線量計(バブルディテクタ)がある。OSL型線量計²⁾は $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ からなる輝尽発光を利用した検出器が使用されており、中性子用の場合 $^6\text{LiCO}_3$ が検出器にコーティングされている。使用後はLED光を照射し放出される蛍光を光電子増倍管で電子に変換し、増幅したものを読み取る。バブルディテクタ³⁾は弾性体ポリマー(アクリルアミド)中に低沸点液体の液滴を多数固定させたものである。放射線の入射により液滴が気泡化しポリマー中に固定される。これを自動計数装置によりCCDカメラで撮影し、気泡の数を読み取ることで線量等量を計算する。気泡生成のしきいエネルギーを変更することで熱中性子から速中性子まで6か所のエネルギー領域ごとの中性子フルエンスも測定可能である⁴⁾。最近、OSL型線量計やバブルディテクタといったパッシブな線量計において可搬型読み出し装置が市販されており、現場での線量把握が可能となった。そこで、我々はこれらの検出方法の異なる3つのタイプの線量計について緊急時初動対応での使用という観点から性能評価を行った。まず、核物質から自発核分裂で生成される中性子と同様のスペクトルを持つ標準中性子場において各線量計の指示線量のばらつきを測定した。評価する線量計は中性子と γ 線を測定できるものを選択した。半導体型線量計はADM-353(日立アロカメディカル(株))、NRG13(富士電機(株))、OSL型線量計はmicroStar OSLN(長瀬ランダウア(株))、バブルディテクタがBD-PND(長瀬ランダウア(株))

である。標準中性子場として(独)産業技術総合研究所の中性子標準を利用した。中性子源はカリホルニウム (^{252}Cf 400 MBq) で平均 2 MeV のスペクトルを持つ。人体を模擬したファントム ($30\times 30\times 15\text{ cm}^3$ の水槽) に各種線量計を 5 台ずつ装着した (NRG13 のみ 1 台)。例として 1.03 mSv/h の中性子場で 1 時間照射した結果を表 1 に示す。OSL 型線量計及びバブルディテクタは半導体型検出器に比べ指示値のばらつきが目立つ。バブルディテクタは、泡の数が 1 検出器中で最大 100~150 個と制限があるため、統計誤差でも最低 10% の誤差が生じる上、読み出しの系統誤差も加わる。OSL 型線量計は半導体型線量計と異なり、電池も必要なく安価であり、アニーリングを行えば何度も利用できるため、大規模な人数での使用では有効となる。半導体型線量計 ADM-353 の指示線量が基準線量と比較して 1/2 と低いのはアメリシウム-ベリリウム ($^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$) 線源で校正されているためである。 $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ は平均 4.5 MeV のスペクトルを持つため、 ^{252}Cf と同様のスペクトル場で使用する場合、レスポンスの補正が必要である。2 エネルギー間のレスポンスの補正を行ったところ場の線量に近い 0.91mSv となった。JIS 規格⁵⁾ では、個人線量計の校正に用いる基準中性子源は $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ となっているが、基準線源以外の線源もレスポンス補正をすれば使用可能なため、 ^{252}Cf 又は $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ のどちらを校正用線源として使用しているか注意が必要であ

る。放射線取扱施設での作業と異なり、テロ現場では放射線源の種類は未知なことが多い。 γ 線の場合、NaI, LaBr₃ (Ce) 等のシンチレータや CdTe, CZT (CdZnTe) 等の半導体検出器 (高価だがエネルギー分解能の良い可搬型電子冷却式 Ge 検出器も市販されている) を用いた γ 線スペクトル測定により核種を同定し、個人線量計指示線量に対してレスポンスの補正が必要である。臨界を利用したデバイスによるテロを想定した場合、中性子のエネルギー範囲は 0.025 eV~数 MeV と広く、現場での中性子スペクトル測定は難しいのが現状である。

3 高線量率 γ 線中性子混合場における半導体式個人線量計の評価

原子力災害や臨界を利用したデバイスによるテロは高線量率の中性子 γ 線混合場が予想される。市販されている多くの線量計は低線量率場 (~1 mSv/h) では良く評価されているが、テロ現場で予想され得る高線量率場 (~10 Sv/h) における性能評価は少ない。フランスの SILENE では臨界事故を想定した各種個人線量計の線量評価が行われ各種線量計の 80% がばらつき $\pm 25\%$ 以内に収まることが報告されている⁶⁾。しかし、これらの線量計はすべて非電子式のパッシブな線量計であり、電子式の半導体型個人線量計の評価はなされていない。そこで、我々は半導体型個人線量計について臨界場における中性子指示線量の精度について評価実験を行っ

表 1 各種個人線量計の特徴と中性子照射における指示線量 (基準線量 1.03 mSv)

検出方式	半導体型①	半導体型②	OSL 型	過熱液滴型
線量計	ADM-353	NRG13	Micro Star OSLN	BD-PND
中性子指示線量 (mSv)	0.51 ± 0.02	1.46	0.92 ± 0.22	1.70 ± 0.30
中性子測定線量範囲 (mSv)	0.01-1000	0.01-1000	0.1-10000	0.05-5
特徴	しきい値の設定、振動による警報が可能	しきい値の設定、線量の無線伝送が可能	電池不要、安価	電池不要、寿命が短い (90 日)

た。また、半導体型線量計の利点はリアルタイムで線量を把握することだが、緊急時初動対応においては、防護服（化学防護衣）の着用や作業の集中により着用者本人が頻りに線量の確認をすることは難しい。線量計によってはデジタル表示のほかにあらかじめ設定していたしきい値を超えたことを音、光、振動で着用者に警告するものがある。また、無線で線量計の指示線量を送信し一元管理できるものもある。いずれにせよ、これらの機能は半導体機器を用いたものであるが、高線量率場においてこれらの機能が正常に動作するのか検討されておらずあわせて評価した。評価実験は(独)日本原子力研究開発機構の過渡臨界実験装置 TRACY を用いた。TRACY は低濃度ウラン溶液の臨界事故の模擬実験が可能な実験施設で臨界事故の事象解明と評価手法の開発等を目的としている⁷⁾。

今回評価した線量計は NRG13（富士電機(株)）、ADM-353（日立アロカメディカル(株)）、DMC2000GN（MGP 社）である。我々はファントムに各種線量計を装着して照射を行い各社線量計の指示線量を比較した。NRG13 は無線で γ 線及び中性子各々の指示線量を無線親機に送信することが可能なため遮へいされた無線親機に 10 秒に 1 回の頻度で線量計から送られたデータ（測定時間と指示線量）を記録した。ほかの 2 つの線量計はデジタル表示部を CCD カメラで撮影し、撮影時間とともに指示線量をビデオ録画した。富士電機(株)の指示線量を基準にしたほかの線量計の指示線量を図 1 に示す。ここでは 2 通りの照射条件について紹介する。

- (1) 直接照射（図 1 の Irradiation (1)）
- (2) 緊急時初動対応において中性子遮へい防護の使用を想定し水遮へい体（30 cm 厚）を線量計の前方において照射（図 1 の Irradiation (2)）

照射条件 (1) では、ADM-353 と NRG13 で最大 1.7 倍指示線量が異なる。なお、ADM-353 は 1,000 mSv 以上では測定線量範囲を超えたため線量表示値の 999.9 mSv とした。一方、水遮

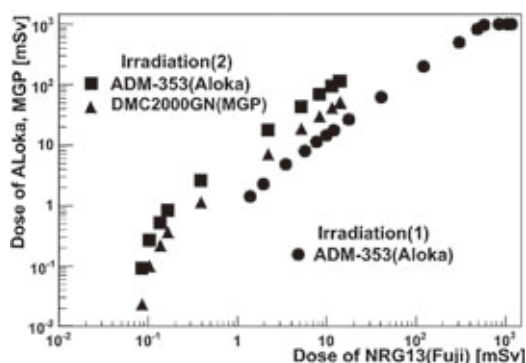


図 1 臨界事故を模擬した中性子 γ 線混合場における個人線量計の中性子指示線量の比較⁹⁾
横軸が NRG13 の指示線量、縦軸が ADM-353 及び DMC2000GN の指示線量

へい体をおいた照射条件 (2) では、指示線量に最大 8.3 倍の差が生じた。これらは、各線量計のエネルギー応答によるものと考えられるが、絶対的な線量値の評価を含め検討中である。さらに、低線量域と高線量域で傾向が異なる現象が見られるため原因を検討する必要がある。照射条件 (2) では水遮へい体により中性子スペクトルが低エネルギー側（エネルギー応答が線量計間で大きく変化する 1 MeV 以下）へシフトした効果と考えられる。ADM-353 は熱中性子から速中性子までのエネルギー領域でレスポンスを詳細に測定⁸⁾しているため、今回の測定結果をよく検討したい。

広い中性子エネルギーを一度に測定可能な検出器は存在せず、壁や地面による散乱の効果も考慮する必要があり、中性子のスペクトル測定は容易ではない。現状は中性子場を仮定して線量計算を行い安全側を用いる方法が考えられる。今後、中性子場において数点でもエネルギースペクトル場が測定できれば、線量計の熱中性子及び速中性子の各々のパルス信号頻度から線量換算する際に利用し、より正確な線量把握が可能となる。また、半導体機器（AVR マイコン）の誤動作の起こるまでの積算線量も測定したが、線量率によらず中性子で約 300 Gy まではビット反転等のシングルイベント現象や積

算効果のような誤動作が見られなかった⁹⁾。半致死線量 (LD₅₀₍₃₀₎)4 Sv よりも 2 桁強い線量までは半導体機器の誤動作は起きないことから、初動対応の現場では半導体機器の放射線による誤動作を考える必要はないことが分かった。

4 おわりに

福島第一原発事故によって高線量率場での緊急時初動対応作業が現実として起こることが実証された。今後は、テロ対策も含めた放射線緊急時初動対応を十分に想定しておく必要がある。しかし、市販されている個人線量計やサーベイメータ等の放射線計測機器の多くは、テロ現場などの高線量率場での使用を考慮されたものではない。我々は、高線量率場における各種検出方式や各社線量計での指示線量のばらつきについて評価した。また、こうした線量計の評価実験を踏まえて、テロ現場に最適と考えられる無線式個人線量計、各種サーベイメータ、集塵機能付きのキャリングケース型放射線測定装置や現場活動時間を確保するための中性子用防護盾を開発している¹⁰⁾。今後、現場活動での利便性も考慮しながら改善を重ねていく予定である。さらに、核物質探査を目的とした速中性子到来方向測定装置の開発も進めており¹¹⁾、既存の放射線計測技術のほかにも、新しい技術を取り入れながら放射線緊急時対応の研究開発に取り組んでいきたい。

【謝辞】

本研究は日本原子力研究開発機構安全研究センター及び産業技術総合研究所との共同研究の

成果です。本稿で解説した実験を行うに当たり多大なご協力をいただきました日本原子力研究開発機構及び産業技術総合研究所の共同研究者の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 板倉周一郎, 中込良廣, 日本原子力学会和文論文誌, **5**(2), 136-151 (2006)
- 2) Yukihiro, E.G., *et al.*, *Radiation Measurements*, **43**(2-6), 309-314 (2008)
- 3) Ing, H., Noulty, R.A. and McLean, T.D., *Radiation Measurements*, **27**(1), 1-11 (1997)
- 4) 坂本弘巳, 他, 九州大学医療技術短期大学部紀要第 23 号, 47-50 (1996)
- 5) JIS ハンドブック 39 放射線 (能), X 線, γ 線, β 線及び中性子用電子式個人線量 (率) 計, Z4312 日本規格協会 (2009)
- 6) Medioni, R., *et al.*, *Radiation Protection Dosimetry*, **110**(1), 429-436 (2004)
- 7) Yamane, Y., *et al.*, *Proceedings of the 7th International Conference on Nuclear Criticality Safety 2003*, 791-796 (2003)
- 8) Aroua, A. and Hofert, M., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **A372**, 318-321 (1996)
- 9) Tsuchiya, K., *et al.*, Evaluation of personal dosimeters and electronic modules under high-dose-field, 2010 IEEE Nuclear Science Symposium Conference record (2010)
- 10) 土屋兼一, 黒木健郎, 黒沢健至, 五十嵐直明, 電気学会研究会資料. NE, 原子力研究会, 37-41 (2011)
- 11) 土屋兼一, 他, 第 48 回アイソトープ・放射線研究発表会要旨集, 124 (2011)

◆ 本テーマの企画：日本アイソトープ協会理工学部会 ◆