

原子炉事故における β 線被ばく

辻村 憲雄

Tsujimura Norio

1. はじめに

ウランの核分裂によって生じる核分裂生成物 (FP) は、陽子数と中性子数の均衡を欠く中性子過剰核を持つため、両者の均衡を保てるどころまで β 崩壊を繰り返す、この過程で β 線 (あるいは β 線と γ 線の両方) を放出する。これら FP 及びその放射化生成物は原子力施設を構成する系統機器内に通常閉じ込められるので、それが有効に機能している限り β 線による被ばくは問題にはならない。ところが、事故などによって外部への漏洩が生じると、FP などは β 線と γ 線の混合放射線場を形成し、特に β 線はその場にいる作業員の体表面 (皮膚) に高い線量を与える¹⁾。

本稿では、原子炉事故における β 線被ばくの特徴と過去の事例について紹介するとともに、2011年3月に発生した東京電力(株)福島第一原子力発電所事故に際し、筆者らが支援活動の一環として取り組んできた発電所構内における β 線量率の測定と計算、並びにその線量率に基づき算出した作業員の β 線被ばく線量の推定結果について紹介する。

2. 原子炉事故における β 線被ばくの特徴

原子炉事故における β 線被ばくの特徴を概説するに当たり、ここではそれを事故対応の段階と線源と体表面の幾何学的な配置とで分類する。

事故対応の段階は、事故直後における緊急対

応の段階と事故発生後しばらく経過してからの除染・復旧などの対応の段階とに大きく分けることができ、それぞれの段階における β 線被ばくの特徴は大きく異なる。前者の段階では、例えば、事故による β 線被ばくの可能性は低いと考えるなどして、 β 線用個人線量計を事前に用意していなかったり、あるいは β 線用個人線量計が用意されていたとしてもそれを測定に適した部位に装着していなかったりなどの不備がしばしば生じる。また、 γ 線に比べて透過力の小さい β 線は、厚手の防護衣などを着用することによって線量を容易に下げることが可能であるが、例えば放射線状況などが正確に把握できていない状態での緊急対応では本来使用されるべき防護装備が必ずしも十分ではない場合もあり得る。このため、線量限度はもとより数 Sv を超える β 線皮膚線量を作業員が受け急性放射線症の発症に至ってしまったチェルノブイリ原子力発電所事故 (後述) のような事例もある。このときの被ばく線量は、個人線量計からの評価が困難な場合、計算などによって遡及的に評価される。一方、事故発生後しばらく経過してからの除染や復旧などの作業の段階においては、被ばくの主たる要因となる核種や作業場所の放射線状況などは既に判明しているため、その状況に対応する適切な個人線量計と防護装備を備えた管理プログラムの下で、事前に定めた作業計画に基づく線量を超えないような管理が行われる。

線源と体表面の幾何学配置に基づく分類で

*放射能測定・除染技術等に関する調査検討専門委員会

は、線源が体表面に密着している場合と離れている場合とに分けることができる。前者は、FPなどを含む埃や液体などが皮膚や衣服に付着する場合で、その部位から汚染が取り除かれるまで近接した距離からβ線に曝され続けるため皮膚は局所的に高い線量を受ける。一方、後者では、サブマージョンや、地表などの平面上に広く堆積したFPなどからβ線被ばくを受ける。ここでサブマージョンの場合は、全身におおむね一様にβ線が入射するが、平面状に広がった線源の場合は、線源からの距離によって線量率が大きく変化するので、例えば地面が線源の場合であれば線源により近い下肢が最大のβ線被ばくを受ける。

3. 過去の原子炉事故におけるβ線被ばく事例

原子炉事故において作業者がβ線被ばくを受けた事例は幾つかあるが、β線による皮膚線量評価の重要性が大きくクローズアップされたのは1986年4月のチェルノブイリ原発事故であった。被ばくが極めて重篤であったことに加え、個人線量計や防護装備が適切ではなかったなど事故対応時の被ばく管理体制がきちんと組織化されていなかったことでも知られる。事故直後の緊急対応の段階では、従事した多く（100人以上）の発電所運転員や消防士に急性障害が見られ、一部の者のβ線による皮膚線量はγ線による骨髄線量の10～30倍、最大で400～500 Gyと推定された²⁾。β線被ばく部位は作業の状況によって変わるが顔や手足などであった³⁾。また、復旧作業の段階については、顔の高さにおけるγ線による線量率に対するβ線による線量率は、一般的な除染作業で平均5倍、3号炉の中央ホールの除染で平均28倍であったと報告された²⁾。

チェルノブイリ原発事故以前の事例では、例えば米国のSL-1事故（1961年1月）、TMI-2事故（1979年3月）がある。SL-1事故では、原子炉の核暴走の結果、原子炉そのものが損壊

し、燃料とFPなどを含む冷却水の漏えいによって施設内外を汚染した。除染・解体作業時の放射線管理に係る詳細な報告があり、腰の高さでβ線による線量率はγ線による線量率の約4～5倍であったこと、β線による被ばくが作業管理をする上で制限因子になったことなどが報告された⁴⁾。TMI-2事故においても、復旧作業中のβ線被ばくが問題になり、徹底したβ線防護対策が立案・実施された⁵⁾。

4. 福島第一原子力発電所事故におけるβ線被ばく

(1) 発電所構内で採取した土壌試料からのβ線量率の測定^{6,7)}

2011年3月21～22日にかけて、1, 2号機のスタックから約500～1,000 mの地点で採取した土壌試料（計5点）を深さ5 cmになるまで直径13 cmのプラスチック容器に入れ、土壌表面から高さ5 cmにおけるβ線及びγ線の線量率を電離箱式サーベイメータ（応用技研AE-133B）で測定した。同試料のγ線核種分析によると、主たる核種は¹³¹I, ¹³²Te-¹³²I, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs-^{137m}Baなどであった⁸⁾。

線量率の測定結果を表1に示す。いずれの試料においてもβ線量率はγ線量率よりも高く、その比（β/γ）は2～7であった。試料に含まれる放射性物質は、容器に充填する過程で深さ5 cmまでほぼ均一に分散したと考えられる。一方、現地の試料採取地点においては、放射性

表1 土壌試料の高さ5 cmにおける線量率測定結果（2011年4月12日測定）

試料番号 採取地点	線量率 (μSv/h)		β/γ
	β線	γ線	
①南南西約750 m	23	3.3	7
②南南西約500 m	9.4	1.5	6
③北約500 m	100	47	2
④南南西約1,000 m	17	4.9	3
⑤西北西約500m	59	21	3

物質は地表部分に薄く堆積していただいで深くまで浸透していなかったと考えられるので、現地の β/γ 比は更に大きな値であったと推定された。

(2) 発電所構内で採取した土壌試料に基づく線量率の計算⁶⁾

地表に沈着した放射性物質によって形成された β 線と γ 線の混合放射線場で作業する者は、 γ 線については回転照射に近いジオメトリで全身におおむね一様な被ばくを受けるが、 β 線については線源に近い下肢が最大の被ばくを受ける。このとき、 γ 線については、胸に取り付けた個人線量計で適切に被ばく線量を測定できるが⁹⁾、下肢の β 線被ばく線量は胸につけた個人線量計では測定できない。そこで、事故当時における作業者の β 線による被ばく線量の程度を推定することを目的に、モンテカルロ手法に基づく β 線の輸送計算を実施した。

図1に計算体系を示す。ここで、線量を受ける者は、空気-大地インターフェースからなる体系において一様に汚染された地面に直立すると仮定された。空気からなる直円柱の側面(体表面を模擬する)に外側から入射し横切る β 線及び γ 線のエネルギー及び角度微分フルエンスに、換算係数¹⁰⁾(β 線:ICRU Report 57表A.44~A.46, γ 線:同レポート表A.21及びA.24)を乗じることによって、 β 線による70 μ m線量当量(皮膚線量に相当する)、 β 線による3mm線量当量(目の水晶体の線量に相当する)、及び γ 線による1cm線量当量を地面からの高さの関数として得た。本計算において使用された線源核種は、^{129m}Te-¹²⁹Te, ¹³²Te-¹³²I, ¹³¹I, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs-^{137m}Ba などであり、

その同位体組成と濃度は前述の発電所構内で採取された土壌試料の分析結果に基づいた⁸⁾。フレッシュな地表沈着であるため、線源は地表から深さ0.1mmまでの一様分布とした。

図2に、2011年3月中旬に発電所構内の三地点で観測された γ 線の線量率¹¹⁾と、本計算

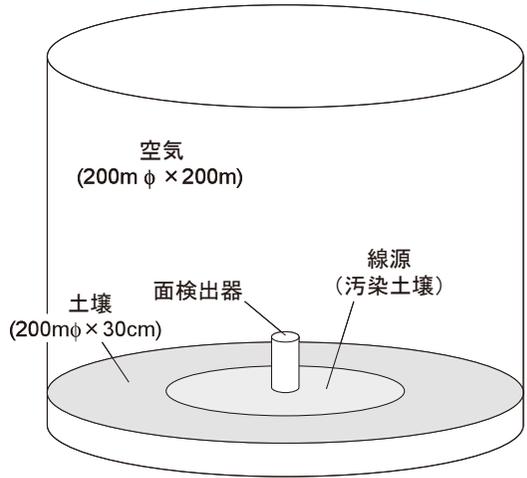


図1 地表からの β 線と γ 線の輸送計算の体系

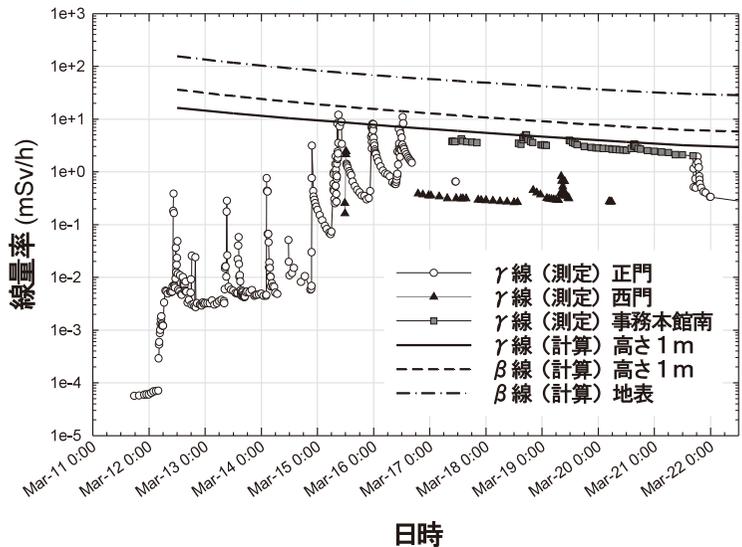


図2 発電所構内における線量率の推移
 プロットは仮設モニタによる γ 線量率の測定値¹¹⁾、実線と点線・一点鎖線はそれぞれ γ 線量率と β 線量率の計算値(事務本館南付近で採取された土壌試料の放射能分析結果に基づく)である

によって得られた β 線 $70\ \mu\text{m}$ 線量当量率と γ 線 $1\ \text{cm}$ 線量当量率の推移を示す。計算は、事務本館南側（■プロット）に比較的近い地点で採取された土壌試料の分析結果に基づき、試料採取日を起点にその前後に半減期補正（外挿）したものである。 γ 線の線量率の実測値と計算値は、放射性物質の外部への放出がやや沈静化した3月16日午後以降ほぼ同様の時間変化を示しており、このことは、本計算が現地の放射線状況をよく再現していることを示すものである。 β 線 $70\ \mu\text{m}$ 線量当量率 $>$ γ 線 $1\ \text{cm}$ 線量当量率であり、 β 線量率に最も寄与する核種は ^{132}I であった。胸に付けた個人線量計の高さにはほぼ相当する地上 $130\ \text{cm}$ での γ 線 $1\ \text{cm}$ 線量当量に対する地上 $50\ \text{cm}$ 及び地上 $160\ \text{cm}$ での β 線 $70\ \mu\text{m}$ 線量当量の比はそれぞれ約 10 、約 2 であった。したがって、3月中旬に屋外作業に従事した者の個人線量計で記録された γ 線被ばく線量を例えば $100\ \text{mSv}$ と仮定すると、 β 線による皮膚線量はひざ付近で約 $1\ \text{Sv}$ （ $=100\ \text{mSv} \times 10$ ）、顔面付近で約 $200\ \text{mSv}$ （ $=100\ \text{mSv} \times 2$ ）であったと推定された。ただし、これらは、いずれも防護されていない裸の皮膚に対する値であり、作業着や呼吸保護具などによる遮へいの効果や実際の地表の粗さによる β 線の減衰を考慮に入れると、 β 線量は更に下がると考えられる。また、顔面高さにおける β 線の $70\ \mu\text{m}$ 線量当量に対する $3\ \text{mm}$ 線量当量の比は $0.02\sim 0.03$ 程度であった。したがって、ここで同じ作業者を想定すると、 β 線による目の水晶体の線量は $4\sim 6\ \text{mSv}$ （ $=200\ \text{mSv} \times 0.02\sim 0.03$ ）と推定された。

事故発生当初における発電所構内の β 線量率の測定と計算並びにその情報に基づく作業者の β 線被ばく線量の推定を試みた。作業の場所や内容に係る詳細が十分ではなかったため、ここでは公開情報のみに基づく単純化したモデルで

の推定にとどまるが、チェルノブイリ原発事故における作業者の β 線被ばく事例に比べると今回の事故における β 線量はかなり低いものであったと言える。また、本研究の結果から、原子炉事故の際の緊急対応における β 線防護対策の重要性が改めて確認された。

参考文献

- 1) ICRU, Dosimetry of external beta rays or radiation protection, ICRU Report 56 (1997)
- 2) UNSCEAR 2008 Report, Annex D (2011)
- 3) Barabanova, A. and Osanov, D.P., The dependence of skin lesions of the depth-dose distribution from β -irradiation of people in the Chernobyl nuclear power plant accident, *Int. J. Radiat. Biol.*, **57**, 775–782 (1990)
- 4) Final report of SL-1 recovery operation, May 1961 thru July 1962, IDO-19311 (1962)
- 5) Hildebrand, J.E., Personnel contamination protection techniques applied during the Three Mile Island Unit 2 cleanup, *Nucl. Technol.*, **87**, 531–534 (1989)
- 6) Tsujimura, N., Yoshida, T., and Furuta, S., Measurements and calculations of beta dose rates on contaminated ground at the Fukushima Daiichi nuclear power plant site, *Proc. of IRPA13* (2012). Available at <http://www.irpa13glasgow.com/information/downloads/>
- 7) Tsujimura, N. and Yoshida, T., Beta dose rate measurements with an end-window GM survey meter in environments contaminated by the Fukushima Daiichi nuclear accident, *Prog. Nucl. Sci. Technol.* (in press)
- 8) <http://www.tepco.co.jp/cc/press/11040609-j.html>
- 9) 辻村憲雄, 吉田忠義, 日本保健物理学会第46回研究発表会 C18 (2013)
- 10) ICRP, Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiations, ICRP Publication 74, *Ann. ICRP* 26 (3/4), (1996)
- 11) <http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/fl/index-old-j.html>

((独)日本原子力研究開発機構
核燃料サイクル工学研究所)