一般論文

動力試験炉における放射線作業被曝の統計解析

加藤正平^{*1}, 穴沢 豊^{*1}, 松野見爾^{*1}, 古田敏城^{*1}, 秋山 勇^{*1}
浅野善江^{*1}, 岩谷征男^{*1}, 松井 浩^{*1}

(1980 年 8 月 1 日受理)
(1980 年 10 月 6 日再受理)

Statistical Analyses of the Data on Occupational Radiation Exposure at JPDR

Shohei KATO,^{*1} Yutaka ANAZAWA,^{*1} Kenji MATSUNO,^{*1} Toshishiro FURUTA,^{1*}
Isamu AKIYAMA,^{*1} Yoshie ASANO,^{*1} Yukio IWAYA,^{*1} Hiroshi MATSUI^{*1}

In the statistical analyses of the data on occupational radiation exposure at JPDR, statistical features were obtained as follows.

- (1) The individual doses followed log-normal distribution.
- (2) In the distribution of doses from one job in controlled area, the logarithm of the mean(μ) depended on the exposure rate (r (mR/h)), and the σ correlated to the nature of the job and normally distributed. These relations were as follows.
$$\mu=0.48 \ln r-0.24, \sigma=1.2 \pm 0.58$$
- (3) For the data containing different groups, the distribution of doses showed a polygonal line on the log-normal probability paper.
- (4) Under the dose limitation, the distribution of the doses showed asymptotic curve along the limit on the log-normal probability paper.

KEY WORDS: occupational exposure, log-normal distribution, planned dose, dose limitation, specific radiation job, radiation control, JPDR.

I はじめに

原子力発電所における従事者の被曝は、出力の増加と稼働時間の増加にともない年々総被曝線量 (total man rem) が増加していることが報告されており^{1,2)}, 今後の原子力開発にとって従事者の被曝低減対策がますます重要となってきた。被曝の低減を考える際に、被曝線量の統計的性質を明らかにしておくことは有意義なことで考えられる。ここでは、被曝低減対策の一助とすることを

目的とし、BWR タイプである日本原子力研究所動力試験炉 (以下 JPDR と略称する) における被曝管理データについて統計解析をおこない、放射線作業による被曝線量の統計的性質を明らかにした。

II 解析の項目および方法

大きな職業グループ内の年線量当量分布は、(1) 式で表わされる対数正規分布則によく合うことが報告されている^{3,4)}。

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^x \frac{1}{x} \exp\left\{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} dx \quad (1)$$

ただし、 $F(x)$: 分布関数

^{*1} 日本原子力研究所保健物理部; 茨城県那珂郡東海村 (〒319-11)

Division of Health Physics, Japan Atomic Energy Research Institute; Tokai-mura, Nakagun, Ibaraki-ken.

Table 1 Sample number, average dose and parameters, μ and σ , of dose distribution for specific jobs.

Job description	Sample number	Average dose (mrem)	Parameter	
			μ	σ
Inspection of forced circulation pump	85	47	3.1	1.1
Decontamination of pool and tank	117	48	2.7	1.4
Decontamination and inspection of pressure vessel	50	47	3.5	0.73
Installation and calibration of instruments	88	22	2.8	0.67
Installation of shield	139	119	4.1	1.1
Decontamination and inspection of valves	152	75	1.4	2.6
Opening and shutting pressure vessel	113	37	3.8	0.81
Inspection of CRD	55	70	3.4	1.2
Nondestructive inspection	46	231	4.5	1.8

μ : 尺度のパラメータ

σ : 形のパラメータ⁵⁾

ここでの解析では種々の被曝線量分布の対数正規則への適合性を調べるとともに、対数正規分布を決定するパラメータに影響を与える因子を探ることに主眼を置いた。解析は、JPDR で 1968 年から 1977 年の期間におこなわれた放射線作業のうち、作業内容と被曝線量との関係が明確に記録されているものを対象におこなった。解析項目を以下に示す。

- 1) 特定作業における被曝線量の分布
- 2) 特定作業に関わる 1 回立入当たりの被曝線量の分布
- 3) 運転、保守、および放射線管理の各グループの被曝線量の分布
- 4) 特定個人の 1 回立入当たりの被曝線量の分布
- 5) 被曝線量制限値と実際の被曝線量の関係

III 解析および考察

1. 特定作業における被曝線量の分布

特定の放射線作業中に受けた被曝線量の分布を求め、作業内容と分布の関係を調べた。被曝線量はフィルムバッジによる測定値を用いた。対象とした作業はデータ数が解析するに十分な程度備わっているものを選んだため 9 作業に限られた。Table 1 に解析対象作業名とサンプル数および算術平均被曝線量を示す。一例として 3 つの作業についての被曝線量分布を対数正規確率紙にプロットしたものが Fig. 1 である。Table 1 と Fig. 1 に示されるように、平均被曝線量が小さい作業ではほぼ直線となり対数正規分布則によく従っていた。平均値の高い

Fig. 1 Log-probability plot of doses to specific job workers.

○, Installation and calibration; △, inspection and decontamination of pressure vessel; ●, nondestructive inspection.

作業は、非破壊検査にみられるように高線量側で直線からはずれ、そり上がった。大部分は直線となり対数正規分布に従っていることから、分布を決定するパラメータ μ と σ をグラフから推定し、Table 1 に示した。ただし、ここでは、直線からはずれた分布については近似値として低線量側の直線部分より求めた μ と σ を示した。被曝線量分布の σ は計器設置作業に対し 0.67 で最も小さく、配管バルブ除染では 2.6 で最大となり 9 作業についての平均は 1.3 であった。

σ および μ の値の大きさを決定する因子については、このデータからでは明確ではない。これについては後節

で解明していく。

2. 特定作業 1 回立入当たりの被曝線量の分布

被曝線量分布のパラメータに影響を及ぼす要因を探るため、特定作業 1 回立入当たりの被曝線量分布について調べた。ここで特定作業で 1 回立入当たりの所要時間は平均して 2~3 時間である。この間に受けた被曝線量はポケット線量計で測定されている。記録される被曝線量測定値としてはもっとも小さきぎみな作業と被曝線量との対応のあるデータである。このポケット線量計記録と放射線作業届とをもとに解析をおこなった。対象とした作業と作業内容をまとめたものを **Table 2** に示す。

(1) 異なる被曝形態が混在している場合の分布

特定作業 1 回立入当たりの被曝線量の分布のうち、原子炉廻り水袋撤去、压力容器配管非破壊検査、および強制循環ポンプ溶接部余盛除去の各作業についての被曝線量分布は、**Fig. 2** に示すような折線となり対数正規分布則に従っていない。原因を明らかにするため各作業について適当なグループに分けて各々のグループについての被曝線量分布を調べた。

溶接部余盛除去作業について、職員と業者についてのグループに分けて各々の分布を示したものが **Fig. 3** である。両グループはそれぞれ直線となり対数正規則に従っていることがわかる。原子炉廻り水袋撤去作業については準備・後始末作業と本作業とに分け、また压力容器配管非破壊検査については業者の監督、業者の作業員、および職員の 3 グループに分けて分布をとると **Fig. 3**

Fig. 2 Log-probability plot of doses to specific job workers consisted of different groups.

△, removal of water bag around the vessel; ●, nondestructive inspection of the vessel; ○, scraping welded pipes of forced circulation pump.

Fig. 3 Log-probability plot of doses to personnel and employees engaged in scraping of welded pipes of forced circulation pump.

○, personnel; △, employee.

Fig. 4 Log-probability plot of doses to the job workers under a dose limitation.

△, shielding outside vessel; ○, non-destructive inspection inside shielding; ●, recovery of sleeve.

と同様に各グループは直線を示した。以上のことから、分布が折線を示し対数正規分布則に従っていない場合、それは異なったパラメータを持つ被曝形態が混在しているためであることがわかる。

(2) 被曝管理上の制限が働いた場合の被曝線量の分布
作業場の照射線量率の高い場合、被曝管理が特に厳重におこなわれる。立入時間の制限などの被曝管理のおこなわれた作業例として、炉外遮蔽の設置、遮蔽内非破壊検査、およびスリーブ復旧などの作業がある。これら各作業の被曝線量分布を示したものが **Fig. 4** である。各

Table 2 Exposure

Job description	Exposure level (mR/hr)		Number of person	Period (days)
	Max	Ave		
Repair of primary pipes inside shield	300	1	31	52
Repair of primary pipes outside shield	1400	100	17	35
Recovery of sleeve	800	100	17	46
Recovery of shield block	200	50	12	22
Installation of water bag around the vessel	1000	300	7	9
Shielding outside the vessel	600	200	14	46
Cutting feed water line pipe	200	50	16	14
Removal of blocks at forced circulation pump	700	150	14	15
Measurement of stress of pipes	400	30	9	8
Removal of temporary shields	300	100	10	6
Recovery of heat insulation	8	<1	7	6
Clean-up in high pressure poison system	1400	80	13	5
Inspection of pipes with radiation test	1200	100	27	21
Removal of shield for boarding and shutting vessel	10	2	8	12
Overhauling of pumps	10	5	9	30
Clean-up of pools	30	0.1	10	76
Inspection inside surface of vessel	200	3	7	38
Exchange seal shaft	10	1	5	11
Shielding to exchange seal shaft	20	10	2	42
Discharge of resin demineralizer	60	1	10	5
Exchange of CRD shaft	13	3	9	8
Ultrasonic test outside shield	8	2	11	97
Radiation test outside shield	8	2	6	97
Valve fitting	10	0.5	12	13

作業は共通して高被曝線量側で直線性を失い、対数正規分布則に従わなくなっている。分布として 100 mrem の線が漸近線となるような曲線となったのは、JPDR における被曝管理では 1 週間の被曝線量を 100 mrem 以下に制限することを目安にしたことが 1 回立入り時の被曝線量にも影響を与えたためと考えられる*2。

(3) 特定作業 1 回立入り当たりの被曝線量分布のパラメータについて

これまでみてきたのは対数正規分布に従っていない場合についてであったが、大部分は Fig. 5 に示すような直線を示し対数正規則に従っていた。そこで各作業につ

いての分布のパラメータをグラフより推定し Table 2 にまとめた。ただし高線量領域で曲線となったものについては、近似値として低線量域の直線部分より求めた。

Table 2 はにその他に作業日数、作業人員なども記載している。分布のパラメータを決定する要因は単純なものとは考えられないが、いま μ と作業場の平均照射線量率 r (mR/hr) との関係を Fig. 6 でみると、明らかに両者には相関がみられ、最小二乗法を用いて次式の関係が得られる。

$$\mu = 0.48 \ln r - 0.24 \quad (2)$$

一方、 σ の値については、シールシャフト交換のための遮蔽設置の 0.52 から最大は原子炉廻り水袋設置の 2.6 まであり、 σ の大きさを決定している要因をみつけることは困難であった。 σ の頻度分布を調べると平均 1.2、標準偏差 0.58 の正規分布に従っていた。

*2 ここで、Fig. 5 の非破壊検査については、被曝線量の予測が難かしいために、作業時間の制限などが困難で、そのため線量制限下の作業とはいえ、この種の作業による被曝線量分布は 100 mrem においても曲線にならないものと考えられる。

from specific jobs.

Total	Exposure (mrem)		Planned dose (mrem)	Sample number	Parameter		
	Max	Ave			μ	σ	$\bar{x}$
5500	610	262	700	506	0.96	1.68	8.4
7200	1030	424	660	144	2.77	1.72	25.5
2140	210	126	300	154	2.14	1.78	17.0
970	210	81	300	253	0.47	1.67	6.5
520	180	74	300	24	4.44	2.6	24.4
3740	580	267	500	103	2.30	1.9	25.0
690	191	43	300	56	1.79	1.22	12.6
1440	320	100	400	128	1.28	1.08	8.8
110	70	12	300	46	0.34	1.98	5.8
999	170	100	500	73	2.44	1.03	11.6
553	160	79	300	134	-1.05	2.4	4.6
550	280	42	300	117	1.66	1.25	11.1
1690	200	63	300	176	1.08	1.25	7.5
110	40	13	no limitation	102	-0.18	1.08	3.0
341	53	38	300	197	-0.51	1.2	1.86
103	35	10	100	181	-1.56	1.05	1.14
715	114	102	400	191	-0.62	1.63	2.5
98	24	20	100	128	-0.11	1.51	3.5
264	111	41	100	36	1.34	0.52	5.2
254	38	23	100	48	0.59	1.00	3.7
287	53	32	100	262	-0.32	0.99	2.1
504	153	46	300	410	-0.58	1.17	1.84
1927	1190	386	800	201	1.19	1.49	9.4
372	54	31	300	67	1.79	0.69	4.1

以上の解析結果を実際の放射線管理に適用する例として、特定作業一回立入（約3時間）当たりの平均被曝線量の推定が考えられる。推定には測定した放射線作業場の平均照射線量率を用いて、(2)式から μ を求める。さらに $\sigma=1.2$ を用いると、その作業に従事することによる被曝について概略の被曝線量の分布が推定でき、また次式によって平均被曝線量 $\bar{x}$ の推定が可能と考えられる。

$$\bar{x} = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) \quad (3)$$

3. 運転、保守、放射線管理の各グループの被曝線量の分布

運転、保守、放射線管理の各グループの放射線作業の内容は原子炉の運転モードにより異なってくる。解析にはフィルムバッジで測定された3カ月積算被曝データを

用いて、運転中および停止中の各グループの被曝線量分布を調べた。その結果、それぞれの被曝線量分布は対数正規分布則に従っていた。**Table 3**に各グループについての解析対象としたサンプル数、パラメータ、および平均値を示す。

運転グループの運転中の平均線量 $\bar{x}$ は停止中の2倍になっている。一方、保守グループの $\bar{x}$ は運転中より停止中が大きくなっている。このことは運転グループはパトロールなどで原子炉出力に依存した照射線量率の場所に立入ることが多いことを反映しているものと考えられ、一方、保守グループは停止中に補修などで高照射線量率の場に立入ることが多いことを反映しているものと考えられる。

σ について保守グループの停止中の値は運転中の値の約3倍となっている。一方、放射線管理グループの σ は

Fig. 5 Log-probability plot of doses to specific job workers.

△, ultrasonic inspection; ○, radiation inspection outside shield; □, shutting of vessel.

Fig. 6 Logarithm of geometric mean of occupational exposure as a function of average exposure rate at working area.

運転中と停止中とはほぼ等しく値は小さい。これらのことは次のことを反映していると考えられる。すなわち、保守グループの運転中の作業は簡単な保守、点検に限られるが、停止中は大規模な検査、補修作業が多く内容も多岐にわたる。一方、放射線管理グループの作業は主として放射線測定、表面汚染密度や空气中放射能濃度の測定、および作業立合であり、運転中と停止中とは内容的に差はない。このことから、 σ の値は作業の種類に依存し、作業内容が多岐にわたるほど大きくなる傾向を示すと考えられる。

4. 特定個人の1回立入当たりの被曝線量の分布

これまでの解析で、特定作業に注目しそれに関与した

従事者全体について調べることによって、 μ と照射線量率、および σ と作業内容との関係を明らかにしてきた。ここでは特定個人の1回立入当たりの被曝線量の対数正規分布則への適用性を調べ、特にパラメータ σ に影響を及ぼす因子について検討した。

解析対象者として保守、補修の従事者のうち、溶接あるいは非破壊検査といった特殊技術者（Table 4 のDからJ）と、日常点検者（AからC）を選んで解析した。各対象者の1回立入当たりの被曝分布はいずれも対数正規分布則に従っていた。各対象者の作業名とパラメータをTable 4 に示す。日常点検者については作業者間の σ にはばらつきが目立つが、特殊技術者については作業が同じであれば作業者間の σ の値のばらつきは小さく、作業が異なっていると σ に差が出ている。これらの結果から σ は作業の種類に依存していることがわかる。

ここで μ については、前節で明らかにしたように照射線量率の高い作業（溶接、放射線非破壊検査）の μ は、低い作業（日常点検、超音波非破壊検査）の μ よりも大々くなっている。

5. 被曝線量制限値と実際の被曝線量の関係

JPDRにおいては過大な被曝を招かないように一週間における被曝線量を100 mrem以下となるよう被曝管理をおこなったことをⅢ. 2. (2) 節で述べた。

さらに大きな被曝を招く可能性のある放射線作業に対しては、作業にさき立って作業内容や作業環境などから予測される被曝線量と、作業者に対する被曝管理上の被曝線量制限値とを考慮して、管理上の目安としての被曝線量、すなわち計画被曝線量を定めている。このことによって作業期間の積算被曝線量が制限値を越えることのないように管理している。この計画被曝線量にもとづく作業期間中の被曝線量を解析することによって、このような被曝線量下での作業による被曝線量がⅢ. 2. (2) 節で示したと同様の統計的性質を有することを明らかにする。

計画被曝線量の設定された一定期間の作業について放射線作業届から、計画被曝線量に対する実際に被曝した各個人の被曝線量の比（以下、実績・計画被曝比という）を計算し、その分布を対数正規確率紙に示したものがFig. 7 である。実績・計画被曝比が小さい範囲では直線になっているが、実績・計画被曝比が0.2を越えるところから1.0を漸近線とするような曲線となった。

さきのⅢ. 2. (2) 節で示したように、対数正規分布則に従う場合も何らかの制限が働くと、制限値を漸近値とするような分布を示したが、この実績・計画被曝比についても制限の作用した場合の分布と同じ性質を持って

Table 3 Parameters of dose distribution for different groups during operation and shut down.

Group	During operation				During shutdown*			
	Sample number	$\bar{x}$	μ	σ	Sample number	$\bar{x}$	μ	σ
Operator group	84	44	3.1	1.1	113	23	2.0	1.5
Maintenance group	120	31	3.2	0.65	280	41	2.1	1.8
Radiation control group	111	65	3.7	0.98	84	54	3.5	1.0

Doses for three months measured with film badge (mrem).

* Main jobs were pipe inspection and reconstruction.

Table 4 Parameters of dose distribution for different individuals engaged in specific jobs.

Job description	Person	σ	μ
Routine work	A	1.5	-2.1
	B	2.1	-2.0
	C	1.5	-1.5
Welding	D	1.8	1.1
	E	1.8	1.3
	F	1.8	0.92
Radiation inspection	G	1.4	1.5
	H	1.3	1.8
Ultra-sonic inspection	I	1.0	-0.13
	J	1.1	-0.60

いることがわかる。計画被曝線量がもともと被曝管理上の目安値として設定されていることを考えるなら当然ともいえる。

実績・計画被曝比の小さい範囲、すなわち被曝制限の厳しくない状況では対数正規分布に従うが、実績・計画被曝比が1.0に近くなると、すなわち計画被曝線量近くまで被曝している状況では被曝管理が厳しくなり、分布としては制限値を漸近線とする曲線になったものと考えられる。

実績・計画被曝比の1.0が漸近線となったことは、計画被曝線量を越えないようにする制限措置が満足に実行されたことを示すものであり、同時に、計画被曝線量を設定して被曝管理をおこなうことの有用性を示しているものと言える。

IV 結 論

JPDRにおける放射線作業による被曝線量の統計解析を行なった結果次のことが明らかとなった。

Fig. 7 Log-probability plot of the ratio of observed dose to planned dose.

- (1) 特定作業による従事者の被曝線量、特定作業1回立入り当たりの被曝線量、運転、保守、放射線管理の各グループの3カ月間の被曝線量、および特定個人の1回

立入り当たりの被曝線量は一般に対数正規分布則に従う。

(2) JPDR の作業に対して, 分布のパラメータ μ は主として作業場の照射射量率に依存しており, 特に放射線作業 1 回立入り当たり (約 3 時間) の被曝線量分布の μ と作業場の平均照射線量率 r (mR/hr) との間には, 次の関係があった。

$$\mu = 0.68 \ln r - 0.24$$

(3) パラメータ σ は作業内容を反映し, 作業内容の異なったものが混在していると σ と作業内容との関係が明確でなくなる。また特定作業 1 回立入り当りの被曝線量分布の σ は平均 1.2, 標準偏差 0.58 の正規分布を示した。

(4) パラメータ μ と σ の値の異った被曝集団が混在している場合は, 対数正規確率紙上の分布は折線を示し対数正規分布とならない。

(5) 被曝管理上の制限が強く働いている場合, 対数正規確率紙上の分布は制限値を漸近線とする曲線となり対数正規分布則からはずれる。

(6) 計画被曝線量に対する実績被曝線量の比の分布は対数正規確率紙上において, 約 0.2 より小さいところでは直線となり, それより大きいところでは 1.0 を漸近線とする曲線となる分布を示した。このことは計画被曝線量を越えないようにする制限措置が満足に実行されたことを示しており, 同時に計画被曝線量を設定して被曝管理をおこなうことの有用性をも示している。

本報告を作成するにあたり適切な助言をいただいた日

本原子力研究所保健物理部線量計測課の熊沢蕃氏, および放射線管理第 1 課長 国分守信氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) T.D. MURPHY; A Compilation of Occupational Radiation Exposure from Light Water Cooled Nuclear Power Plant 1969-1973, WASH-1311 (1974).
- 2) C.A. PELLETIER, L. SIMMONS, M. BARBIER and J.H. KELLER; "Compilation and Analysis of Data on Occupational Radiation Exposure Experienced at Operating Nuclear Power Plant," Atomic Industrial Forum, Inc., New York (1974).
- 3) ICRP Publication 26 (邦訳) 国際放射線防護委員会勧告 (1977), 日本アイソトープ協会 (1977).
- 4) United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation 1977 Report; "Sources and Effects of Ionizing Radiation," United Nations, New York (1977).
- 5) J. AITCHISON and J.A.C. BROWN; "The Lognormal Distribution with Special Reference to its Uses in Economics," p.7, Cambridge University Press, Cambridge (1957).