

複数個の輸送容器を積載した使用済核燃料輸送 船内の放射線量率分布測定

山路 昭雄*・植木 紘太郎**

Measurements of Radiation Dose Rates on Board of the Spent Fuel Shipping Vessel Loaded with Three Shipping Casks

By

Akio YAMAJI and Kohtaro UEKI

Abstract

Radiation dose rates were measured on board of the spent fuel shipping vessel HINOURA MARU loaded with two HZ-75 casks and one NH-25 cask. The spent fuels contained in these casks were BWR type. The burn up was about 19,700 MWD/MTU, and the cooling time was about 300 days.

Thermoluminescence dosimeters, an ionization chamber, and a neutron rem-counter were used as the detectors, and 181 measuring points were selected in the holds and on the hatch covers.

On the surface of the HZ-75 cask, the maximum gamma-ray dose rate was observed near the head, especially on the side surface. It is considered that gamma-rays from the activated cobalt-60 in the structure of a fuel assembly contribute to the dose rate. On the hatch cover, the gamma ray dose rates of the port side were higher than those of the starboard side. This indicates that the gamma rays in the port side were mainly due to the radiations from the heads of the casks which were placed toward the port side in the hold.

目 次

	頁
1. 緒 言	1
2. 「日の浦丸」遮蔽設備および輸送容器の概要	2
3. 測 定	4
4. 測定結果および考察	5
5. 結言および今後の課題	24
謝 辞	25
参考文献	25

* 東海支所

** 原子力船部

原稿受付：昭和57年6月23日

1. 緒 言

使用済核燃料の船舶輸送に際しては、通常、複数個の輸送容器を同一船内に積載して輸送が行われる。複数個の輸送容器を積載した船内の放射線量率分布は複雑であり、計算によってこれを精度良く求めることは難しい。現在までのところ、複数個の容器による船内線量率の評価は、それぞれの輸送容器が独立して船内に積載されるとし、個々の容器による船内線量率を簡易計算により求め、それを加算することによって行われている^{1,2,3,4)}。しかし、その評価には構造物等からの散乱線の評価、複数個の輸送容器による遮蔽効果の

評価等が含まれておらず、十分精度の良いものとは言えない。今後、使用済核燃料、放射性廃棄物等の船舶輸送が増加すると予想され、複数の輸送物による船内線量率分布を精度良く評価する合理的な計算法を早急に確立することが望まれる。船内線量率を精度良く評価するための計算法の開発およびその精度評価を行うには、複数の輸送物を積載した船内の線量率分布の測定値が必要である。また、船内線量率分布の測定値は、従事者等の被ばく管理および低減化ならびに輸送容器および輸送船の遮蔽設計を行う上で重要な資料の一つとなる。

本報告は複数個の輸送容器を積載した船内の線量率分布を実船実験により求め、その分布について考察を行ったものである。実験は使用済核燃料専用船「日の浦丸」にて、東京電力㈱福島第一原子力発電所福島港から日本原子力発電㈱東海発電所東海港までの航海で行った。

2. 「日の浦丸」の遮蔽設備および輸送容器の概要

「日の浦丸」の船体主要目を Table 1 に、側面図および平面図を Fig. 1, 2 にそれぞれ示す。「日の浦丸」は第1～第3の船倉を有し、輸送容器は主として第2, 第3船倉に積載され、第1船倉には輸送容器の治具類が積み込まれる。

「日の浦丸」の遮蔽設備は船倉外周の隔壁外側の水タンク、船倉上部の船倉ハッチ等からなる。水タンクのうち、第3船倉と機関室との間にある Aft Shield

Table 1 Specification of "HINOURA MARU"

Length over all	78.25 m
Length between perpendicular	72 m
Molded breadth	12.20 m
Molded Depth (Upper Deck)	5.85 m
Molded Depth (Erection Deck)	7.75 m
Draught	4.20 m
Gross Tonnage	1,289.95 T
NET Tonnage	509.07 T

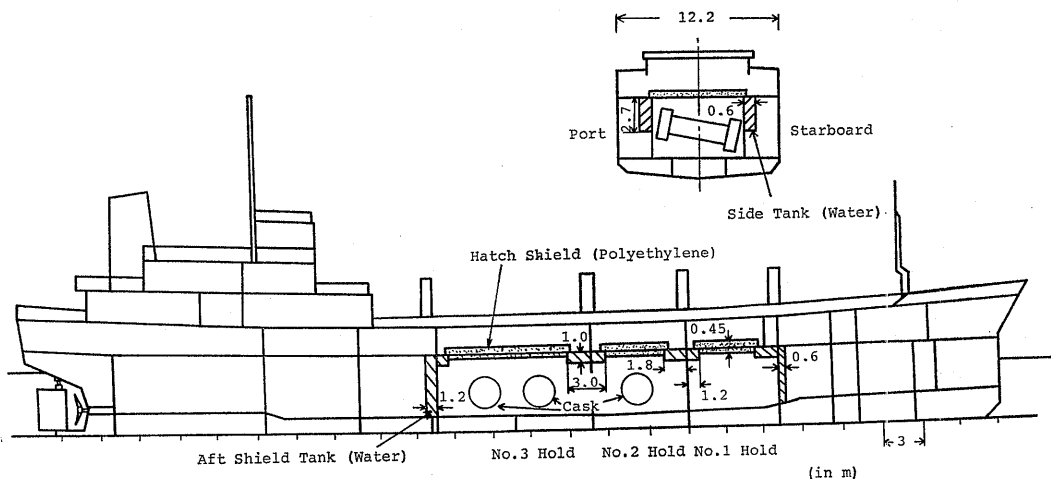


Fig. 1 Shield arrangement of the HINOURA MARU (vertical section)

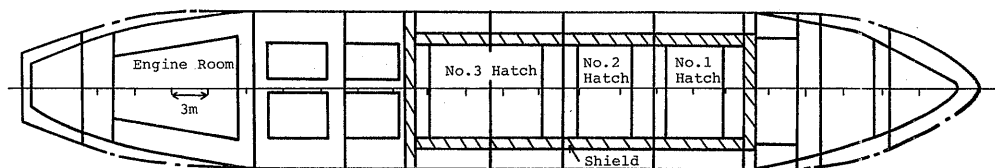


Fig. 2 Shield arrangement of the HINOURA MARU (horizontal section)

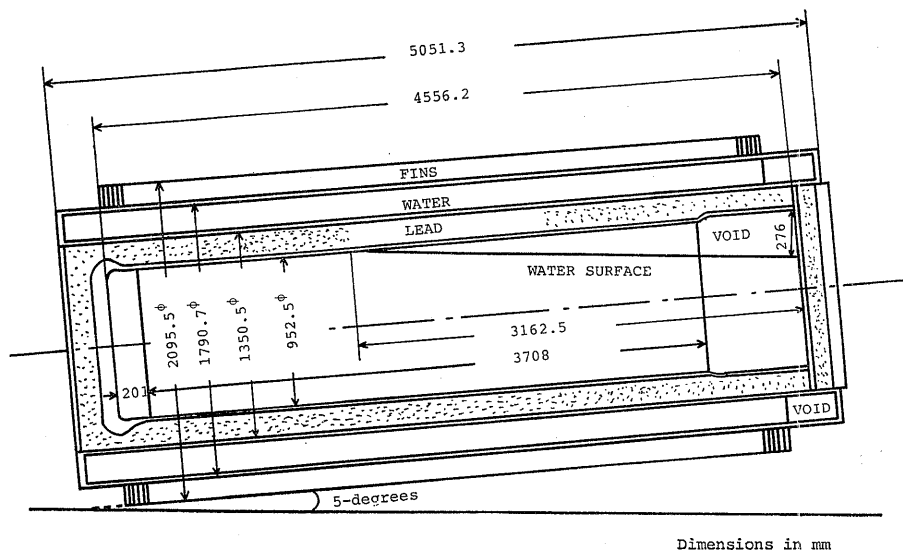


Fig. 3 Vertical section of the HZ-75 shipping cask in No.3 hold

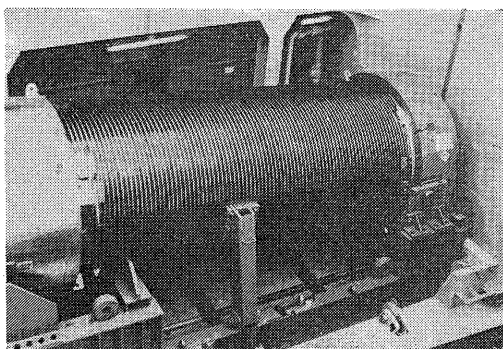
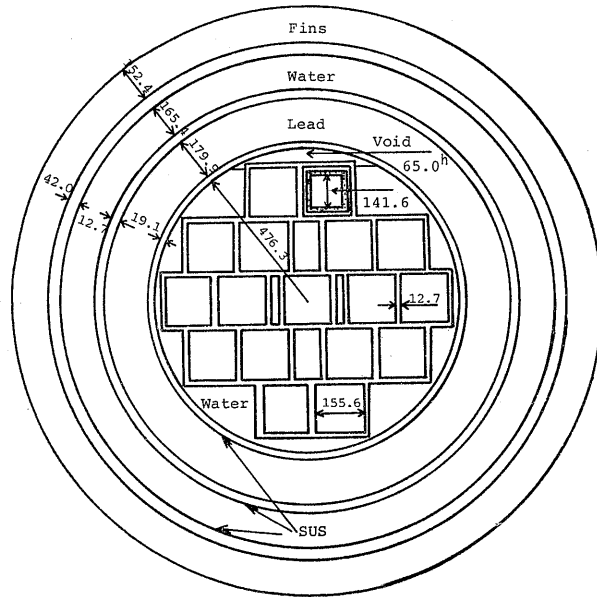


Photo. 1 HZ-75 shipping cask in No. 3 hold

Tank (船尾側遮蔽タンク) の厚さは1.2m, 船倉ハッチ周囲の Upper Shield Tank (上部遮蔽タンク) の厚さは1 m, 舷側の Side Shield Tank (舷側遮蔽タンク) の厚さは60cmである。タンク壁は厚さ約8mmの鋼板である。船倉ハッチは厚さ45cmのポリエチレ

ンを厚さ8mmの鋼板の間に詰めた構造である。

本航海では、第3船倉にHZ-75容器が2基、第2船倉にNH-25容器が1基それぞれ積載された。これらの輸送容器には、燃焼度約19,700MWD/MTU、冷却日数約300日のBWR型原子炉の使用済核燃料が収納されている。このうち、HZ-75容器には1基当たり17体の燃料体、NH-25容器には1体の燃料体がそれぞれ収納されている。Photo. 1に船内に積載されたHZ-75容器を示す。HZ-75容器の構造をFig. 3に示し、BWR型原子炉の使用済核燃料が17体収納された状態におけるHZ-75容器の断面をFig. 4に示す。NH-25容器の構造はFig. 5に示す。これらの輸送容器はその長手方向中心軸がフレームに対し平行で、その蓋部を左舷側とし、水平面に対し5°の傾斜で蓋部が高くなるように積載された。ここで2基のHZ-75容器のうち、船首側の容器をHZ-75容器のNo.1、船尾側の容器HZ-75容器のNo.2とそれぞれ呼ぶ。



Dimensions in mm

Fig. 4 Horizontal center section of the HZ-75 shipping cask loaded with BWR fuels (even level with the ground)

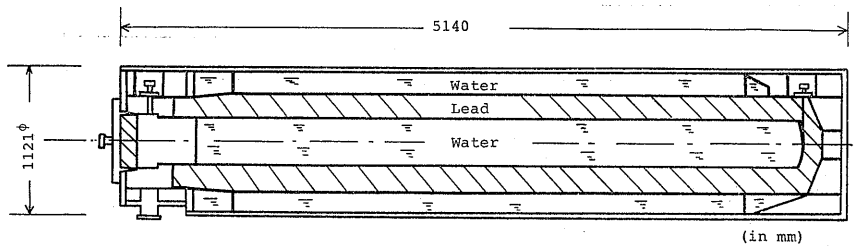


Fig. 5 Vertical section of the NH-25 shipping cask

HZ-75 容器の No. 1, 2 の中心軸はフレーム表示でそれぞれ 61.5, 53.5 であり, NH-25 容器の中心軸はフレーム表示で 73.5 である。ここで, フレーム表示 0 の位置は舵軸であり, 1 フレーム間の長さ (フレームスペース) は 60cm である。(以下, 船首尾方向の位置をフレームで表示する。例えば, NH-25 容器の中心軸はフレーム 73.5 と表示する。) Fig. 6 に輸送容器の船内配置を示す。

3. 測 定

使用した測定器は熱蛍光線量計 (以下, TLD と呼

ぶ。), 電離箱サーベイメータおよび中性子レムカウンタである。TLD 素子は $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$ からなる松下電器産業㈱製の UD-200S を用いた。使用した全ての素子に対し ^{60}Co 線源を用いて校正試験を行い, TLD リーダの読み値を線量に変換するための係数として, リーダ読み値 20mR 以下では 1.012, リーダ読み値 20mR 以上では 1.033 を得た。TLD 測定値に含まれる誤差は校正試験の際の読み値のばらつきに基づき定めた。船内の測定では, 1 組以上の TLD 素子 (1 組は 2 個の TLD 素子よりなる。) を各測定箇所

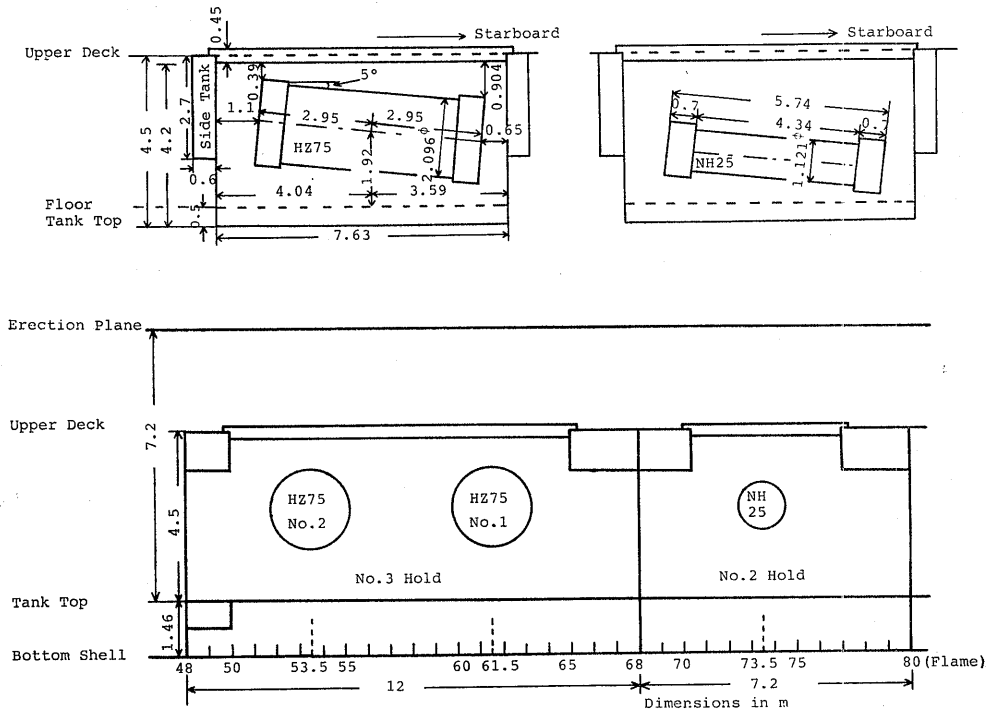


Fig. 6 Configuration of the shipping casks on board

線量率を求めた。2素子の読み値の平均値に含まれる誤差は±10%である。電離箱サーベイメータについては読み値が線量率となるように標準線源を用いて校正を行った。電離箱サーベイメータの読み値に含まれる誤差は±10%である。

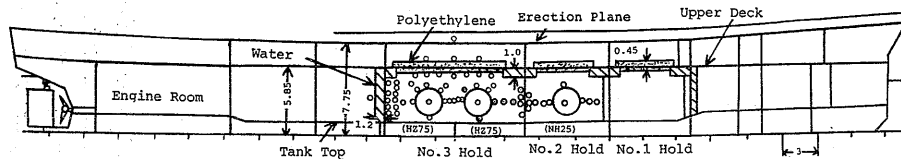
測定箇所は輸送容器表面、第2、第3船倉の空間および隔壁面、第3船倉ハッチ上面および下面、Aft Shield Tank 側面等とした。測定点をFig. 7に示す。測定点は181点である。このうち、第2、第3船倉内ではTLD、電離箱サーベイメータおよび中性子レムカウンタを用い、第2、第3船倉外では線量率が電離箱サーベイメータおよび中性子レムカウンタの検出感度以下であるためTLDのみを用いた。TLD測定のうち、隔壁面等では素子をテープで貼り付け、空間にはひもを通し素子を取り付けた。HZ-75容器の側面には放熱のため銅をステンレス鋼で被覆したフィンが取り付けられている。HZ-75容器側部表面におけるTLDの測定点はフィンとフィンとの間とした。TLD素子の照射時間は約19時間である。その他、船内居住区にもTLD素子を置きバックグラウンドを求めた。

バックグラウンド測定値に含まれる誤差は±10%である。

輸送容器の船内への積載はNH-25容器から行われた。このため第2船倉内においては、NH-25容器のみが積載された状態と第3船倉にHZ-75容器が積載された状態のそれぞれについて測定を行い、第2船倉内の線量率に及ぼすHZ-75容器の影響を求めた。

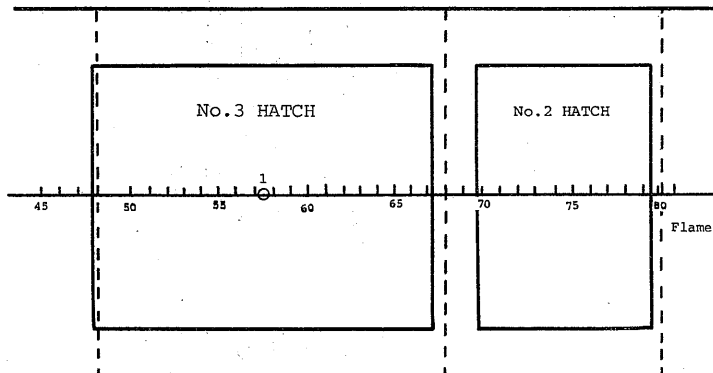
4. 測定結果および考察

測定値は γ 線量率 (mR/h) および中性子線量率 (mrem/h) として求めた。測定結果 Table 2 に示す。このうち、TLDによる γ 線量率は素子の焼鈍からTLDリーダによる線量読み取りまでにおけるバックグラウンドを差し引いた値であり、線量率に含まれる誤差は測定値およびバックグラウンドに含まれる誤差を考慮して求めた。電離箱サーベイメータおよび中性子レムカウンタによる測定では、バックグラウンドは検出感度以下であった。自然放射線による海上でのガンマ線量率は約 $5 \mu\text{R/h}$ と推定される⁽¹⁾ので、電離箱サーベイメータによる線量率には僅かではあるがバックグラ

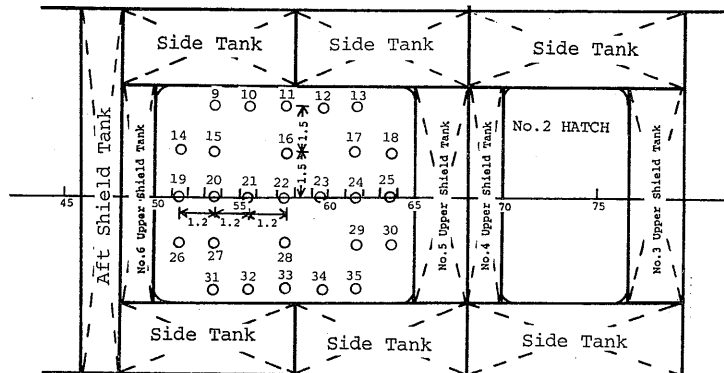


o; Measuring Point
Dimensions in m

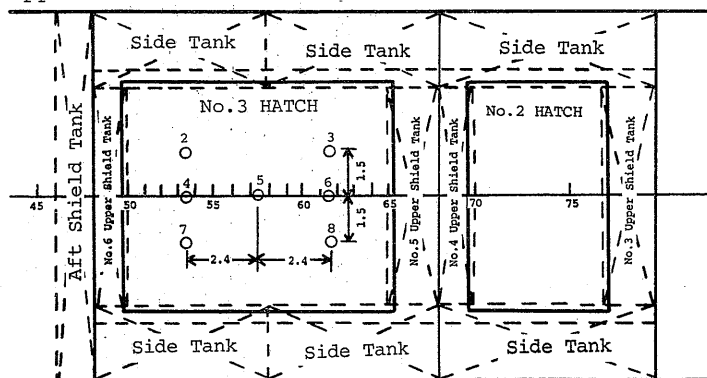
Erection Plane



Under Surface of No.3 Hatch



Upper Surface of No.3 Hatch



Tank Top

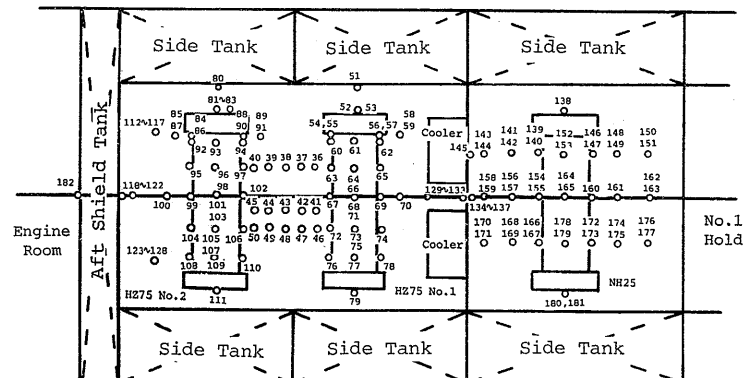


Fig. 7 Measuring points on board

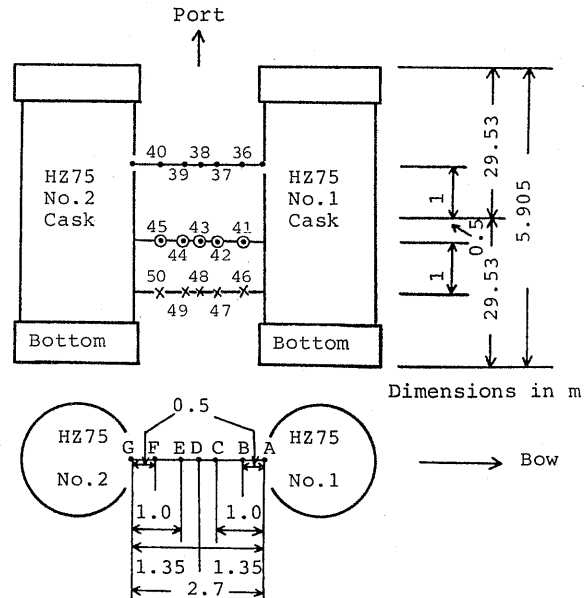
Table 2-1 Measured Values on Board (1/6)

	Measuring Number	Flame	Distance from B.L. (m) *	Gamma Ray Dose Rate (mR/h)
				TLD
Erection Plane	1	57.5	0	0.0118 ±0.0087
Upper Surface of No.3 Hatch	2	53.5	-1.5	0.0373 ±0.0111
	3	61.5	-1.5	0.0413 ±0.0116
	4	53.5	0	0.0150 ±0.0089
	5	57.5	0	0.00962±0.00841
	6	61.5	0	0.0167 ±0.0091
	7	53.5	1.5	0.0183 ±0.0093
	8	61.5	1.5	0.0167 ±0.0091
	Under Surface of No.3 Hatch	9	53.5	-3
10		55.5	-3	0.263 ±0.034
11		57.5	-3	0.318 ±0.039
12		59.5	-3	0.244 ±0.031
13		61.5	-3	0.171 ±0.024
14		51.5	-1.5	1.38 ±0.15
15		53.5	-1.5	3.29 ±0.34
16		57.5	-1.5	1.36 ±0.15
17		61.5	-1.5	3.86 ±0.40
18		63.5	-1.5	1.23 ±0.13
19		51.5	0	0.428 ±0.051
20		53.5	0	0.588 ±0.067
21		55.5	0	0.576 ±0.065
22		57.5	0	0.519 ±0.059
23		59.5	0	0.661 ±0.074
24		61.5	0	0.578 ±0.065
25		63.5	0	0.348 ±0.042
26		51.5	1.5	0.404 ±0.048
27		53.5	1.5	0.440 ±0.052
28		57.5	1.5	0.355 ±0.042
29		61.5	1.5	0.387 ±0.046
30		63.5	1.5	0.244 ±0.031
31		53.5	3.0	0.143 ±0.022
32		55.5	3.0	0.157 ±0.023
33		57.5	3.0	0.160 ±0.023
34		59.5	3.0	0.177 ±0.025
35		61.5	3.0	0.139 ±0.022

* Positive; Starboard Side, Negative; Port Side

Table 2-2 Measured Values on Board (2/6)

Measuring Number	Gamma Ray Dose Rate (mR/h)	
	TLD	Ion Chamber
36	0.483±0.056	
37	0.408±0.048	
38	0.374±0.045	
39	0.384±0.046	
40	0.417±0.050	
41	0.604±0.068	0.61
42	0.469±0.054	0.48
43	0.397±0.047	0.44
44	0.421±0.050	0.40
45	0.463±0.054	0.46
46	0.468±0.054	
47	0.378±0.046	
48	0.375±0.046	
49	0.361±0.044	
50	0.417±0.050	



ンドが含まれている。測定結果および考察を γ 線量率と中性子線量率に分けて以下に示す。

4.1 γ 線量率の測定結果および考察

輸送容器外表面での測定結果に対する考察をまず行い、続いて空間部、隔壁面等での測定結果により複数の輸送容器による船内各区域の線量率についての考察を行う。

(1) HZ-75 容器外表面

輸送容器の円筒部におけるフィン表面の線量率を Fig. 8 に示す。測定点は図に示すように、輸送容器の長手方向中心並びに中心から 1 m および 2 m 離れた円筒表面の真上、真横および真下である。HZ-75 容器の No. 1, 2 共、中心から 2 m 離れた蓋部に近い測定点での線量率が他の測定点での値に比べ高い。この蓋部に近い測定点では、容器真上での線量率が約 10 mR/h で最も高く、容器真横での値は真上での値の 1/2 以下である。輸送容器の長手方向中心および中心から 1 m 離れた表面での線量率は約 1 mR/h またはそれ以下であり、この領域においては容器の真上、真横、真下間の線量率の違いは僅かである。中心から 2 m 離れた底部に近い表面での線量率は 0.5 mR/h 程度であり、中心部表面での線量率に比べ低い値を示した。

HZ-75 容器の蓋部近傍における線量率については、電離箱サーバイメータによりさらに詳しい測定を行っ

た。測定結果を Fig. 9 に示す。測定は輸送容器の表面および容器表面から 1 m 離れた空間で行った。輸送容器表面での測定点は、図に示すように容器の蓋部ショックアブソーバとフィンとの間で容器の長手方向中心表面から 2.2 m 離れた点である。容器表面から 1 m 離れた空間での測定は、上記の容器表面での測定点から半径方向に 1 m 離れた点のうち、容器の真横方向および容器の真上と真横との中間方向の点で行った。容器表面の測定点における線量率は、HZ-75 容器の No. 1, 2 共、容器の真上と船首方向の真横との中間の表面で最も高く、その値は約 20 mR/h である。容器表面から 1 m 離れた点での線量率は約 1 mR/h である。容器表面から 1 m 離れると、各測定点間の線量率の違いは、容器表面におけるそれに比べ小さい。

輸送容器のショックアブソーバ外表面での線量率は、容器の中心軸上において、蓋部で約 1 mR/h、底部で約 0.3 mR/h であり、蓋部の方が高い。

上述のように HZ-75 容器表面での線量率は一様ではない。特に、容器の蓋部近傍で線量率は急激に変化する。この理由として、

(i) 輸送容器の上部および下部では、使用済核燃料から放出される放射線以外に、燃料集合体端部のタイプレートおよびプレナムのステンレス鋼の放射化に伴って放出される γ 線が加わること、

Table 2-3 Measured Values on Board (3/6)

Measuring Number	Measuring Position	Gamma Ray Dose Rate (mR/h)		Neutron Dose Rate (mrem/h)
		TLD	Ion Chamber	
51	Bulkhead		0.90	
52	Upper Cover	1.22 ± 0.13	1.3	0.18
53	Upper Cover		4.1	
54	(a), B		12.0	0.45
55	(a), A		9.0	0.25
56	(a), D		19.5	
57	(a), E		1.7	
58	(a), F		6.0	
59	(a), G		0.75	
60	(b), A	5.29 ± 0.53	4.0	
61	(b), C	12.9 ± 1.3		0.33
62	(b), F	3.51 ± 0.36	2.8	
63	(c), A	0.840 ± 0.092	0.74	
64	(c), C	1.04 ± 0.11		
65	(c), F	0.564 ± 0.064	0.52	
66	(c), H	0.656 ± 0.073		
67	(d), A	0.822 ± 0.090	0.75	0.13
68	(d), C	1.11 ± 0.12		0.45
69	(d), F	0.634 ± 0.071	0.58	0.12
70	(d), G		0.32	<0.1
71	(d), H	0.705 ± 0.079		
72	(e), A	1.01 ± 0.11	0.85	
73	(e), C	0.974 ± 0.105		
74	(e), F	0.737 ± 0.081	0.64	
75	(e), H	0.764 ± 0.083		
76	(f), A	0.635 ± 0.071	0.54	
77	(f), C	0.495 ± 0.057		
78	(f), F	0.419 ± 0.050	0.43	
79	Bottom Cover	0.253 ± 0.033	0.26	<0.1

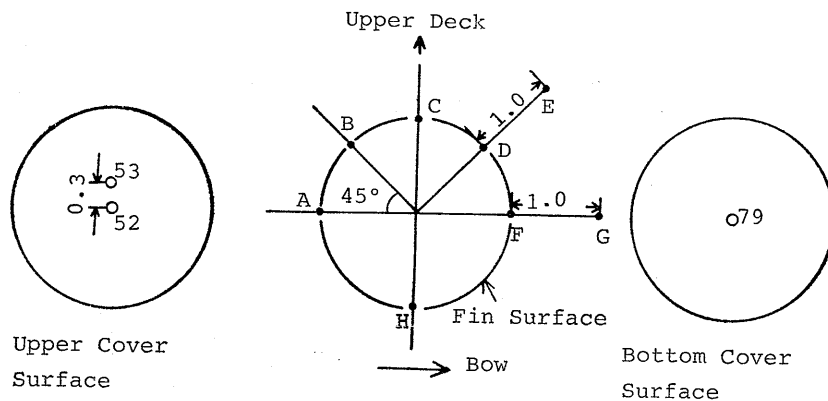
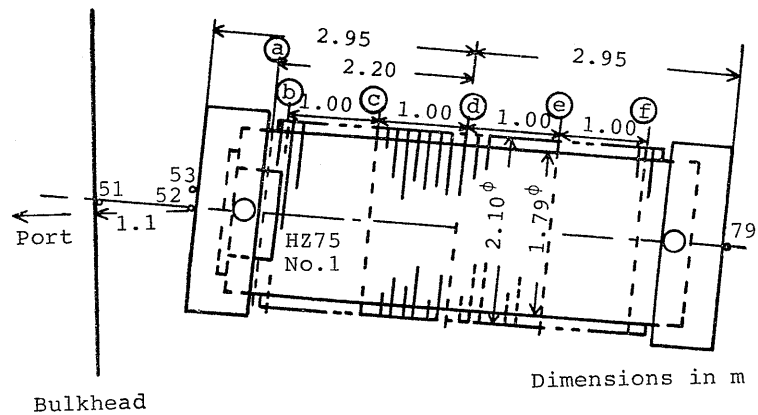


Table 2-4 Measured Values on Board (4/6)

Measuring Number	Measuring Position	Gamma Ray Dose Rate (mR/h)	
		TLD	Ion Chamber
80	Bulkhead		0.75
81	Upper Cover	1.23 ± 0.13	1.5
82	Upper Cover		3.9
83	Upper Cover		0.50
84	(a), C		4.0
85	(a), D		1.0
86	(a), A		6.7
87	(a), B		1.0
88	(a), F		18.0
89	(a), G		1.6
90	(a), H		4.4
91	(a), I		1.0
92	(b), A	4.07 ± 0.41	3.2
93	(b), E	9.27 ± 0.93	
94	(b), H	2.88 ± 0.29	2.2
95	(c), A	0.679 ± 0.075	0.63
96	(c), E	0.872 ± 0.094	
97	(c), H	0.699 ± 0.077	0.61
98	(c), J	0.634 ± 0.071	
99	(d), A	0.713 ± 0.079	0.64
100	(d), B		0.26
101	(d), E	1.01 ± 0.11	
102	(d), H	0.595 ± 0.068	0.66
103	(d), J	0.621 ± 0.070	
104	(e), A	0.795 ± 0.087	0.78
105	(e), E	0.883 ± 0.096	
106	(e), H	0.779 ± 0.086	0.63
107	(e), J	0.829 ± 0.091	
108	(f), A	0.477 ± 0.056	0.47
109	(f), E	0.398 ± 0.047	
110	(f), H	0.534 ± 0.061	0.45
111	Bottom Cover	0.327 ± 0.040	0.25

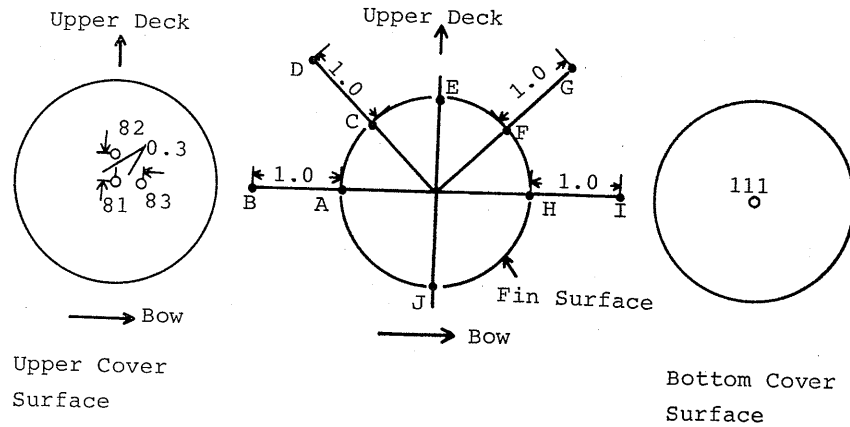
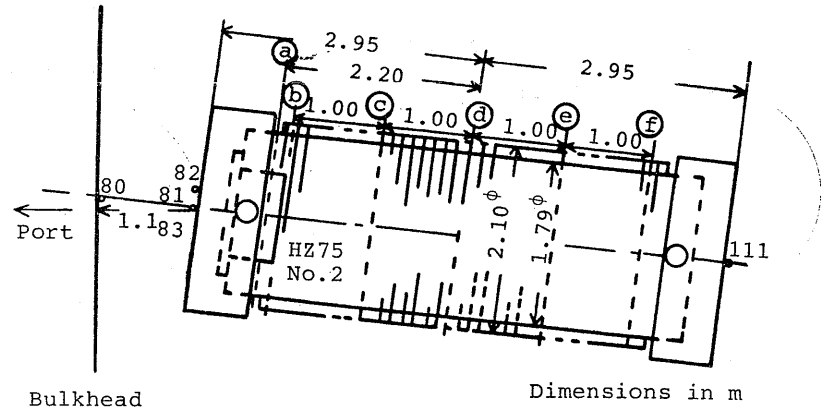


Table 2-5 Measured Values on Board (5/6)

Position	Measuring Number	Flame	Distance from B.L. (m) (1)	Distance from Tank Top (m)	Gamma Ray Dose Rate (mR/h)	
					TLD	Ion Chamber
Surface and near the aft shield tank in NO.3 Hold	112	50	-2.1	1.0	0.172 ±0.024	0.19
	113	50	-2.1	2.0	0.507 ±0.058	0.50
	114	50	-2.1	2.5	0.639 ±0.071	0.72
	115	50	-2.1	3.0	0.618 ±0.069	0.71
	116	50	-2.1	3.5	0.721 ±0.080	
	117	50	-2.1	4.0		0.83
	118	48	0	1.0	0.175 ±0.024	0.15
	119	48	0	2.0	0.214 ±0.029	0.20
	120	48	0	2.5	0.215 ±0.029	0.21
	121	48	0	3.0	0.227 ±0.030	0.23
	122	48.65	0	4.0		0.30
	123	50	2.1	1.0	0.102 ±0.017	0.10
	124	50	2.1	2.0	0.182 ±0.025	0.19
	125	50	2.1	2.5	0.202 ±0.028	0.19
	126	50	2.1	3.0	0.237 ±0.030	0.23
	127	50	2.1	3.5	0.227 ±0.030	
128	50	2.1	4.0		0.23	
Surface and near the bulkhead between No.2 and No.3 Hold	129	-68 (2)	0	1.0	0.235 ±0.030	0.26
	130	-68	0	2.0	0.271 ±0.034	0.30
	131	-68	0	2.5		0.49
	132	68.75	0	2.5		0.35
	133	-68	0	3.0	0.301 ±0.038	0.35
Surface of the bulkhead between No.2 and No.3 Hold	134	68	0	1.5		0.57
	135	68	0	2.0	0.549 ±0.062	0.57
	136 (3)	68	0	2.0		0.54
	137	68	0	2.5		0.57
Surface of aft shield tank in engine room	182	-48	0	2.5	0.00063±0.00699	

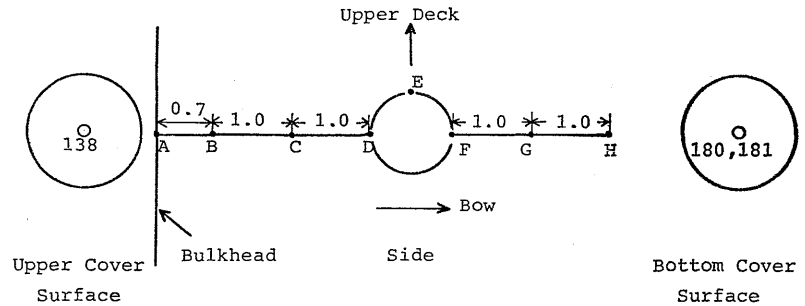
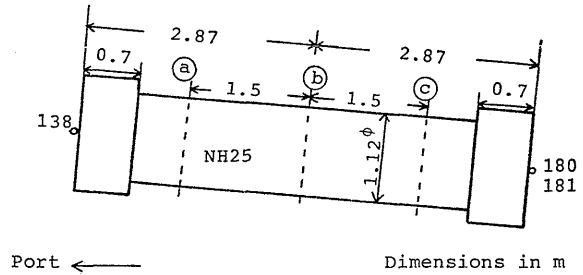
Note; (1) positive; starboard side, negative; port side

(2) aft side of bulkhead

(3) only NH25 cask

Table 2-6 Measured Values on Board (6/6)

Measuring Number	Measuring Position	Gamma Ray Dose Rate (mR/h)		Neutron Dose Rate (mrem/h)
		TLD	Ion Chamber	
138	Upper Cover	0.255±0.033	0.37	<0.1
139	⊙, D	2.09 ±0.22	2.6	<0.1
140*	⊙, D		2.6	
141	⊙, C		0.82	
142*	⊙, C		0.78	
143	⊙, B		0.54	
144*	⊙, B		0.51	
145	⊙, A		0.40	
146	⊙, F	0.595±0.067	0.80	
147*	⊙, F		0.60	
148	⊙, G		0.27	
149*	⊙, G		0.25	
150	⊙, H		0.17	
151*	⊙, H		0.16	
152	⊙, E		1.2	
153*	⊙, E		1.0	
154	⊙, D	3.79 ±0.39	4.1	0.11
155*	⊙, D		3.8	
156	⊙, C		1.3	
157*	⊙, C		1.2	
158	⊙, B		0.70	
159*	⊙, B		0.65	
160	⊙, F	1.42 ±0.15	1.4	
161	⊙, G		0.49	
162	⊙, H		0.27	
163*	⊙, H		0.24	
164	⊙, E	1.78 ±0.18	2.0	0.11
165*	⊙, E		1.8	
166	⊙, D	2.93 ±0.30	3.3	<0.1
167*	⊙, D		3.2	
168	⊙, C		0.92	
169*	⊙, C		0.83	
170	⊙, B		0.50	
171*	⊙, B		0.44	
172	⊙, F	1.07 ±0.11	1.1	
173*	⊙, F		1.1	
174	⊙, G		0.37	
175*	⊙, G		0.33	
176	⊙, H		0.21	
177*	⊙, H		0.18	
178	⊙, E		1.2	
179*	⊙, E		1.1	
180	Bottom Cover	0.916±0.098	0.75	
181*	Bottom Cover		0.70	



Note; *, Only NH25 Cask

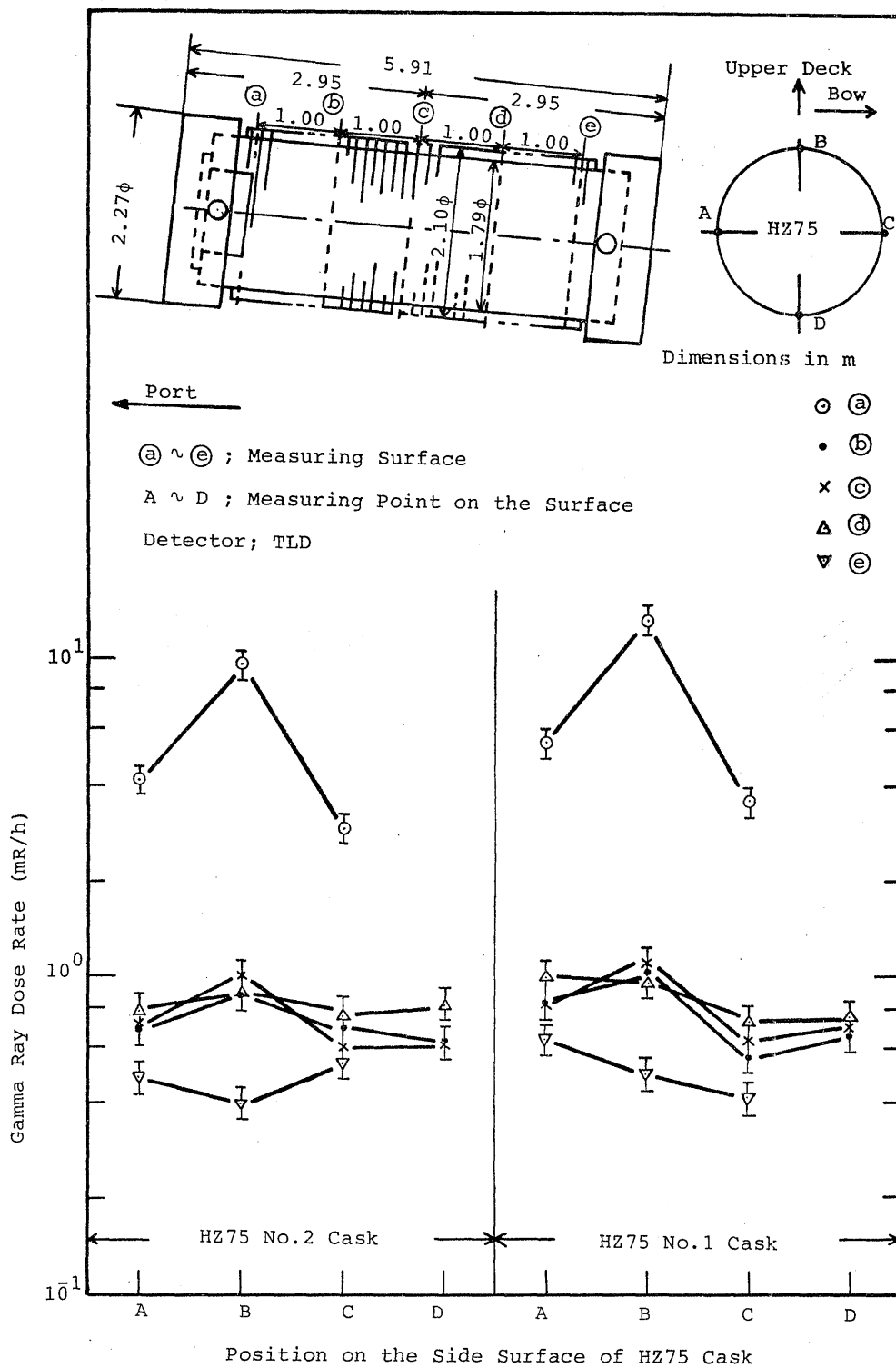
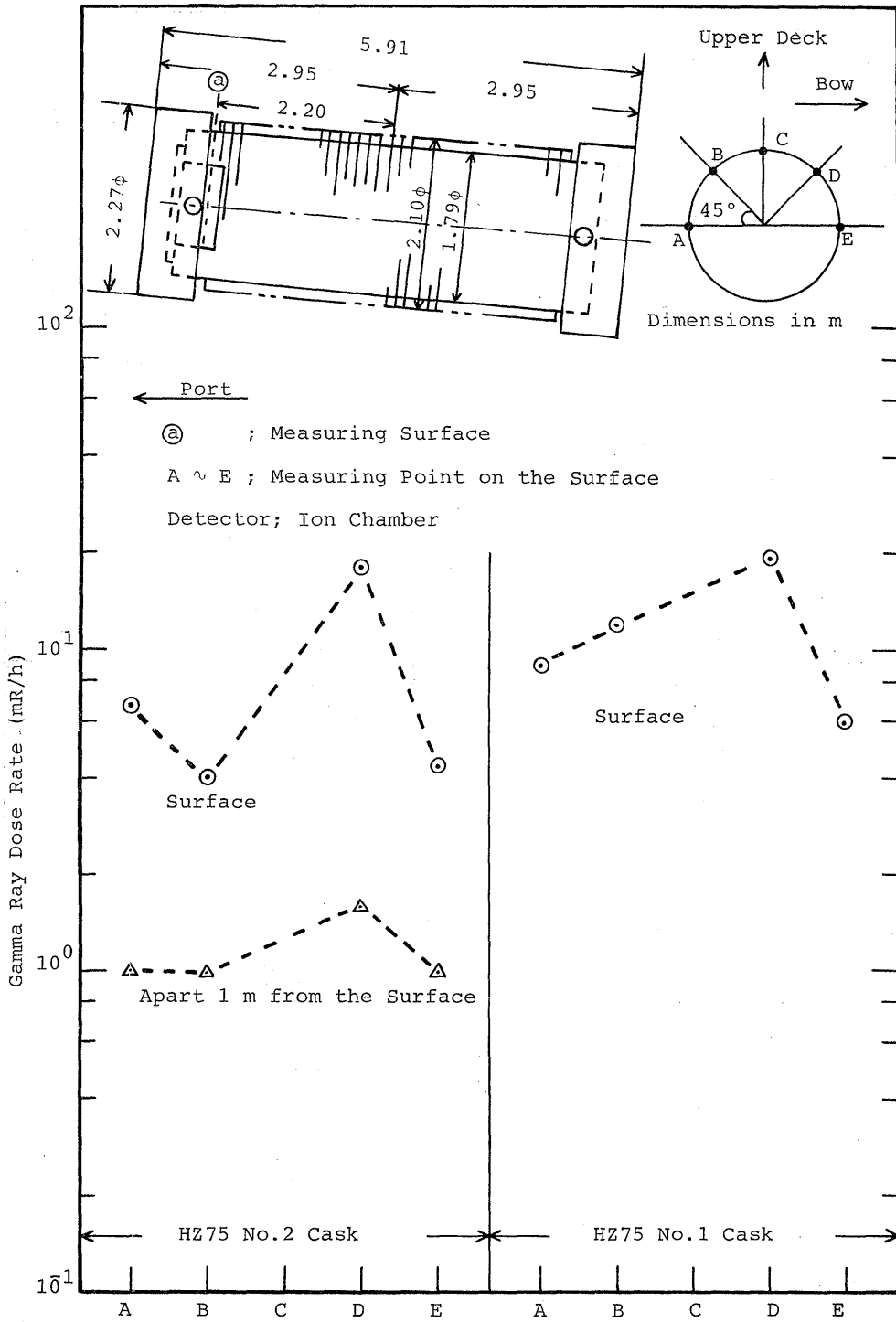


Fig. 8 Gamma ray dose rates on the side surface of HZ-75 shipping casks



Position on the Side Surface of HZ75 Cask
Fig. 9 Gamma ray dose rates around the upper part of HZ-75 shipping casks

(ii) 輸送容器は 5° の傾斜で船内に積載されているため、容器内の水層の上部分にボイド領域が生じ、この部分の遮蔽性能が低下していることが考えられる。

HZ-75 容器フィン表面での線量率は、TLD による値が電離箱サーベイメータによる値に比べ約10%高い。この理由として、TLDでの測定点はフィンの間

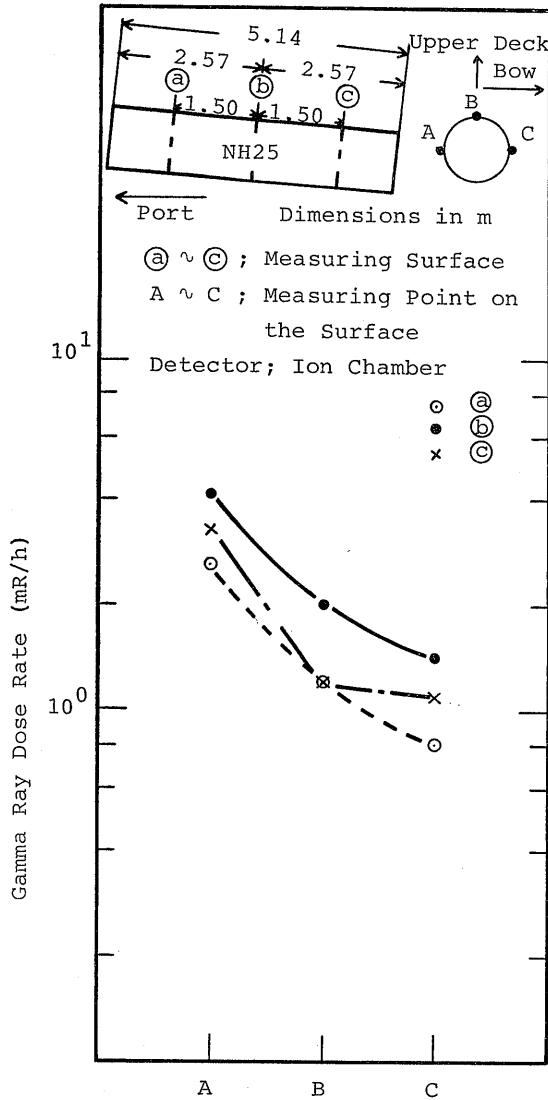


Fig. 10 Gamma ray dose rates on the side surface of NH-25 shipping cask

であること、電離箱サーベイメータでは検出器がTLD素子に比べ大きく、その実効的測定点はフィン表面ではないこと、が挙げられる。

(2) 第2船倉内

第2船倉内では主として電離箱サーベイメータを用いて測定を行った。測定結果に基づき、NH-25容器表面および表面から1m離れた点での線量率とHZ-75容器の有無による第2船倉内の線量率の変化について考察を行う。

A. NH-25 容器表面および表面から1m離れた点での線量率

NH-25 容器には BWR 型使用済核燃料が1体収納された。NH-25 容器は BWR 型燃料を2体収納可能であり、上記の1体の燃料は容器内の船尾側に収納されている。NH-25 容器の円筒表面における線量率を Fig. 10 に示す。測定点は図に示すように輸送容器の長手方向中心および中心から1.5m離れた表面の容器の真上および真横の点である。上記測定点では、船尾側真横の容器表面での線量率が最も高く、燃料体が輸送容器の中心軸に対し偏って収納されている効果が現われている。NH-25 容器の円筒表面での線量率分布は、HZ-75 容器のそれとは異なり、長手方向の中心が最も高く、次いで中心から1.5m離れた底部近傍、蓋部近傍の順であった。長手方向中心の船尾側真横表面での線量率は約4mR/hである。NH-25 容器のショックアップソーバ外表面での線量率は、蓋部で約0.3mR/h、底部で約0.9mR/hであり、HZ-75 容器の場合とは異なり底部の方が高い。容器蓋部および底部表面の線量率に比べ長手方向中心表面の値が高い理由として、NH-25容器内の水層のボイド領域がHZ-75容器でのそれに比べ小さいことが挙げられる。

NH-25 容器円筒表面から船首尾方向に1m離れた点での線量率は Fig. 11 に示すように、船尾側で0.8~1.3mR/h、船首側で0.3~0.5mR/hである。

B. HZ-75 容器の有無による第2船倉内の線量率の違い

「3. 測定」に既述したように、船内への輸送容器の積載はNH-25容器、HZ-75容器の順に行われた。このため、HZ-75 容器の船内積載前に第2船倉内のNH-25容器まわり線量率測定を行い、HZ-75積載後の値と比較することにより、HZ-75 容器からのγ線が第2船倉内の線量率に及ぼす割合を求

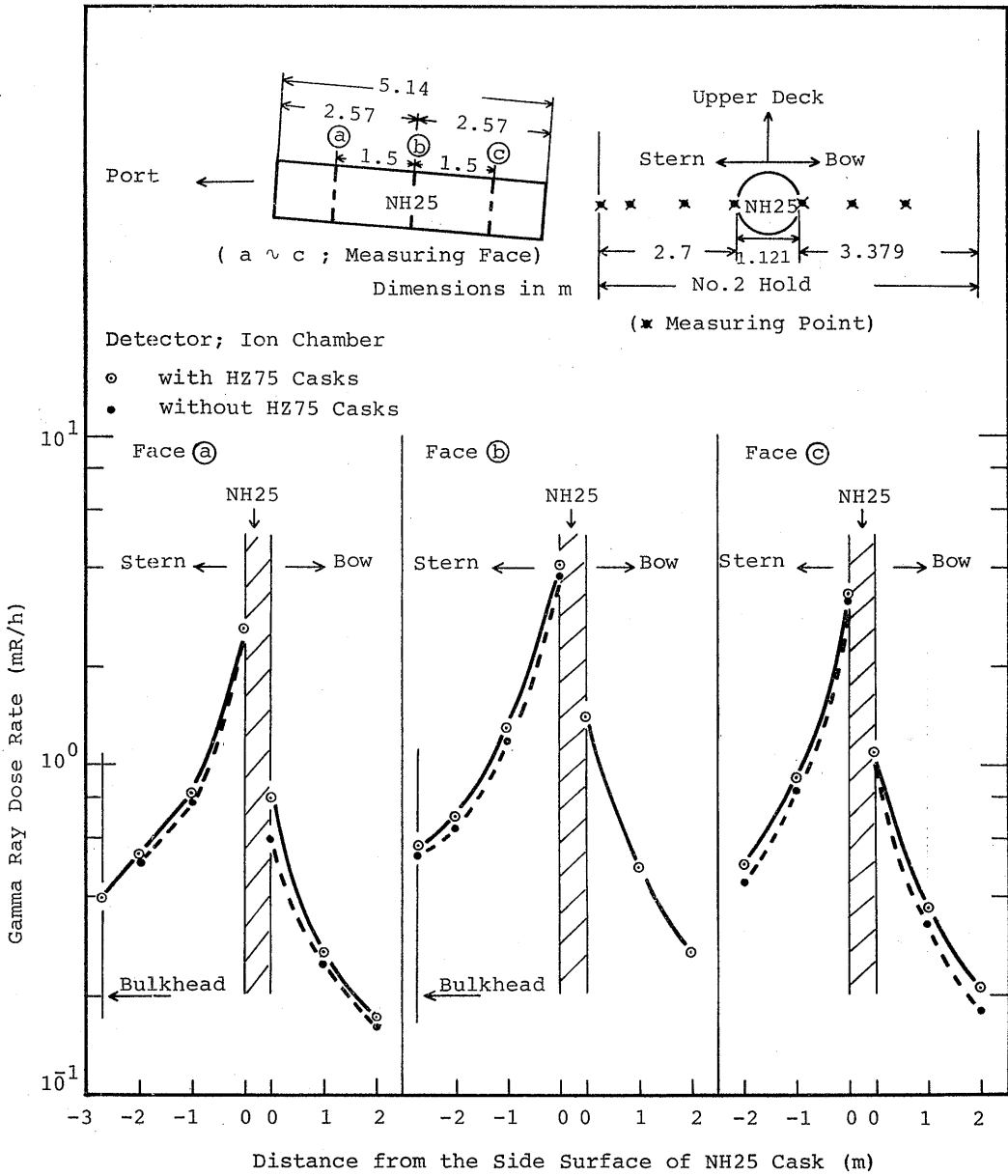


Fig. 11 Gamma ray dose rates around the NH-25 shipping cask

めた。Fig. 11 に、HZ-75 容器積載前の第2船倉内での γ 線量率と HZ-75 容器積載後での値を比較して示す。測定点は図に示すように輸送容器の表面、第2船倉内の空間および第2・第3船倉間の隔壁面である。図および Table 2 から明らかなように、第3船倉内の HZ-75 容器からの γ 線が第2船倉内の線量率

に寄与する割合は10%程度である。

(3) 第2・第3船倉内の船首尾方向

輸送容器の長手方向中心を通る船首尾方向線上での線量率を Fig. 12 に示す。測定値は電離箱サーベイメータによる値である。この線上においては NH-25 容器の船尾側表面で線量率が最も高い。HZ-75 容器の

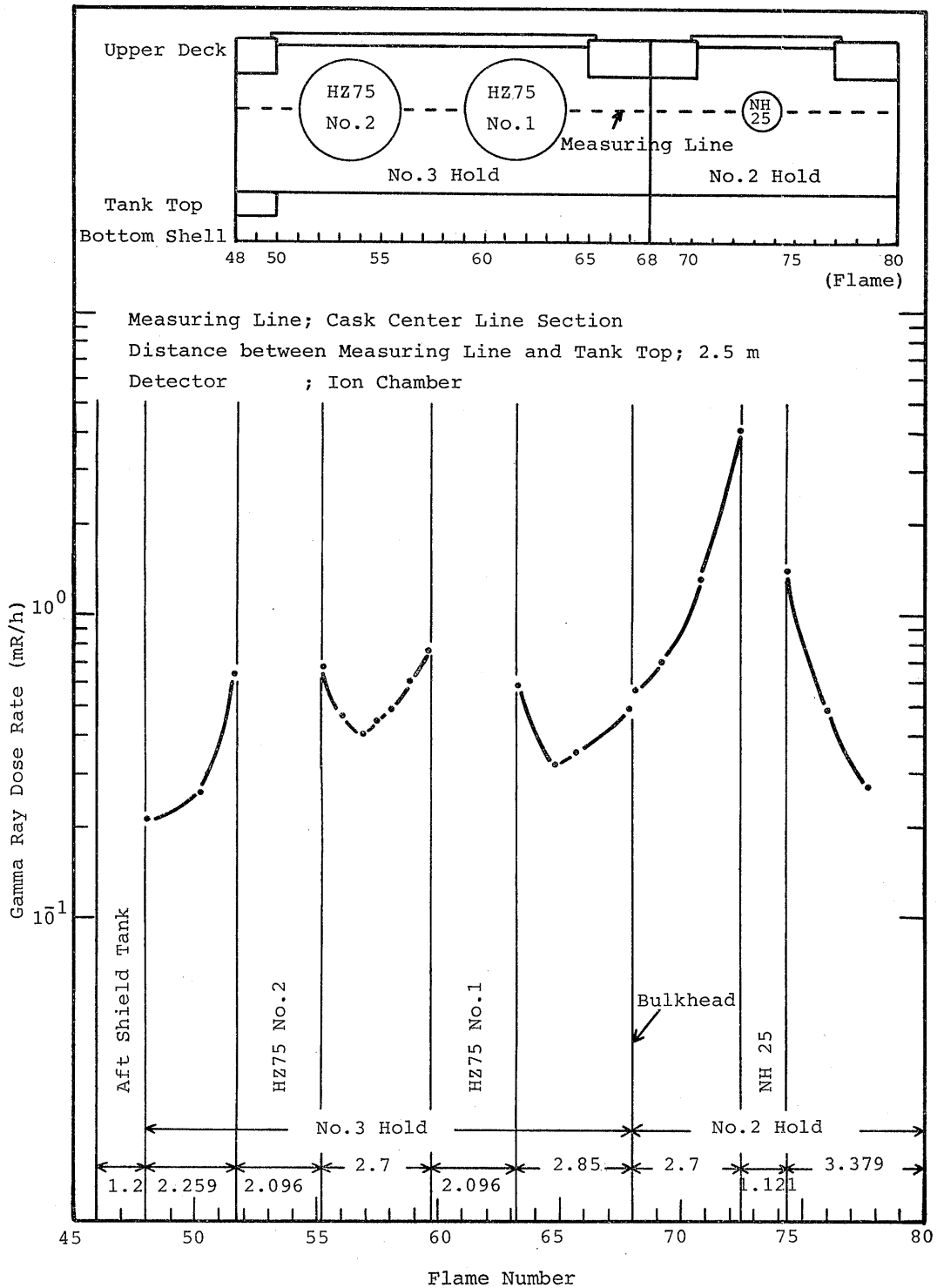


Fig. 12 Gamma ray dose rates distribution along the fore and aft direction in ship center

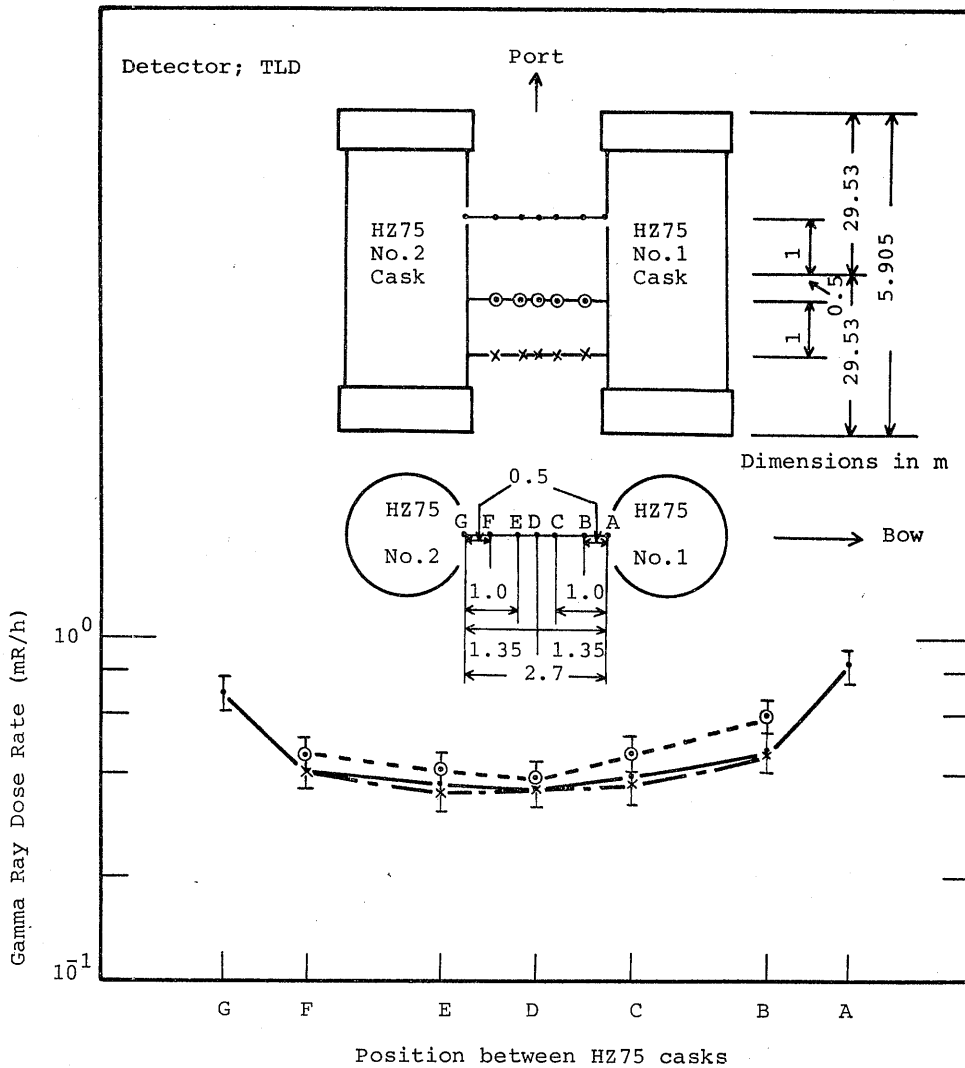


Fig. 13 Gamma ray dose rates between the HZ-75 shipping casks

No. 1 と第 2・第 3 船倉隔壁との間の空間線量率には、NH-25 容器からの γ 線の寄与が見られる。2 基の HZ-75 容器間の空間線量率の変化は、HZ-75 容器の No. 2 と Aft Shield Tank 間でのそれに比べ少ない。

(4) 第 3 船倉内および第 3 船倉上方

2 基の HZ-75 容器間、HZ-75 容器上面、第 3 船倉ハッチ下面および上面、Aft Shield Tank 外壁部等の線量率について考察を行う。

A. 2 基の HZ-75 容器間

2 基の HZ-75 容器間の空間線量率を Fig. 13 に示

す。測定点は図に示すように、輸送容器の長手方向中心から容器蓋方向へ 1 m 向った線上ならびに中心から容器底方向へ 0.5 m および 1.5 m 向った線上における 17 点である。この測定領域では、輸送容器の長手方向中心から容器底部へ 0.5 m 向った線上での線量率が、他の線上での値に比べ僅かではあるが高い。容器表面から 1 m 離れた点の線量率は、HZ-75 容器の No. 2 と Aft Shield Tank との間では容器表面の値の約 1/3 であるのに対し、2 基の HZ-75 容器間では容器表面の値の約 1/2 である。2 基の HZ-75 容器間の空間線量率

がほぼ一様であることの理由として、①線源が空間の両側にあること、②放射線は2基のHZ-75容器等によって散乱を受けることが考えられる。

B. HZ-75容器上面、第3船倉ハッチ下面および上面

HZ-75容器上面ならびにその真上の船倉ハッチ下面および上面での線量率をFig. 14, 15に示す。輸送容器上面と船倉ハッチ下面での線量率の違いは僅かである。容器表面では蓋部近傍の線量率が最も高いことから、船倉ハッチ上面および下面においても容器蓋のある左舷側での線量率は右舷側でのそれより高い。船倉ハッチ上面での線量率は0.1mR/h以下であり、この値は放射線制限区域外の船内線量率基準を十分に下廻る。

Fig. 16に船倉ハッチ上面および下面における船首尾方向の線量率分布を示す。船倉ハッチ下面での測定は船体中心線上ならびに船体中心線から舷側方向へ1.5mおよび3m離れた線上で行った。これらのうち、船体中心線から左舷方向に1.5m離れたラインでの線量率が最も高い。同ライン上では、輸送容器の真上方向で線量率が高く約4mR/hを示し、2基のHZ-75容器の中間であるフレーム57.5の線量率は容器真上方向のその約1/2.6である。その他のラインでの線量率は0.7~0.1mR/hの範囲にあり、位置の違いによる線量率の変化は少ない。船倉ハッチ上面の線量率分布は船体中心線上での値である。船倉ハッチ上面においても、容器真上方向の線量率は2基のHZ-75容器の中間における値よりも高い。

C. フレーム57.5の船体中心

2基のHZ-75容器の中間面であるフレーム57.5の船体中心における上下方向線量率分布をFig. 17に示す。第3船倉内では、2基のHZ-75容器の中間における線量率よりも船倉ハッチ下面の方が高い。船倉ハッチ上面での線量率は下面での値の約1/50である。第3船倉ハッチ上方のErection Plane上面での線量率は船倉ハッチ上面での値に比べ約1.2倍高い。Fig. 16からも明らかなように、船倉ハッチ上面での線量率は船体中心線上よりも船体中心から左舷方向に1.5m離れたライン上の方が高い。Erection Plane上での線量率はこれらの箇所を透過した放射線が支配的であることから、2基のHZ-75容器の中間の船体中心では、船倉ハッチ上面での値よりもErection Plane上面での値が高くなったと考えられる。

D. Aft Shield Tank 外壁部

Aft Shield Tank 壁面から1.2m船首寄りのフレーム50における上下方向線量率分布をFig. 18に示す。測定は船体中心線から、右舷および左舷方向にそれぞれ2.1m離れたラインで行った。このラインにおける左舷側の線量率は同一高さの右舷側のその約3倍である。線量率を上下方向について見ると、右舷側および左舷側のラインとも測定点が高くなるにつれて線量率は高くなる。左舷側のラインでは、タンクトップからの高さ3.5mでの線量率はタンクトップからの高さ1mでの値の約4倍である。フレーム48のAft Shield Tank 壁面においても、Table 2に示したように、上記のフレーム50での線量率分布と同様の分布が得られた。これらの結果から、Aft Shield Tank 外壁部の線量率は左舷側にある輸送容器蓋部からの γ 線の影響を大きく受けていることがわかる。

4.2 中性子線量率測定結果および考察

中性子線量率の測定は、HZ-75容器のNo. 1とNH-25容器の表面にて行った。容器表面以外の点での線量率は、測定器の検出感度以下であった。

(1) HZ-75容器のNo. 1表面

γ 線の場合と同じく、容器上面での線量率は他の表面での値に比べ高い。しかし、容器上面での線量率は γ 線の場合と異なり、容器蓋部上面から長手方向中心上面まで一様な値を示した。容器上面で高い線量率が生じた理由は、容器内の水層上部のボイドによりこの部分の遮蔽性能が低下していることによる。 γ 線の場合と異なり、容器蓋部近傍で線量率の局所的なピークが現れない理由として、①使用した中性子レムカウンタは γ 線検出器に比べ大きく、局所的な箇所の線量率の検出が難しいこと、②輸送容器内の中性子線源は使用済核燃料のみであるのに対し、容器蓋部近傍の γ 線には使用済核燃料以外に放射化物からの γ 線が含まれること、が挙げられる。

(2) NH-25容器表面

容器の長手方向中心の真上および船尾側真横の表面線量率は0.11mrem/h、その他の表面の線量率は測定器の検出感度(0.1mrem/h)以下であった。容器表面での線量率は、 γ 線の場合と同じく、容器の長手方向中心が高い。

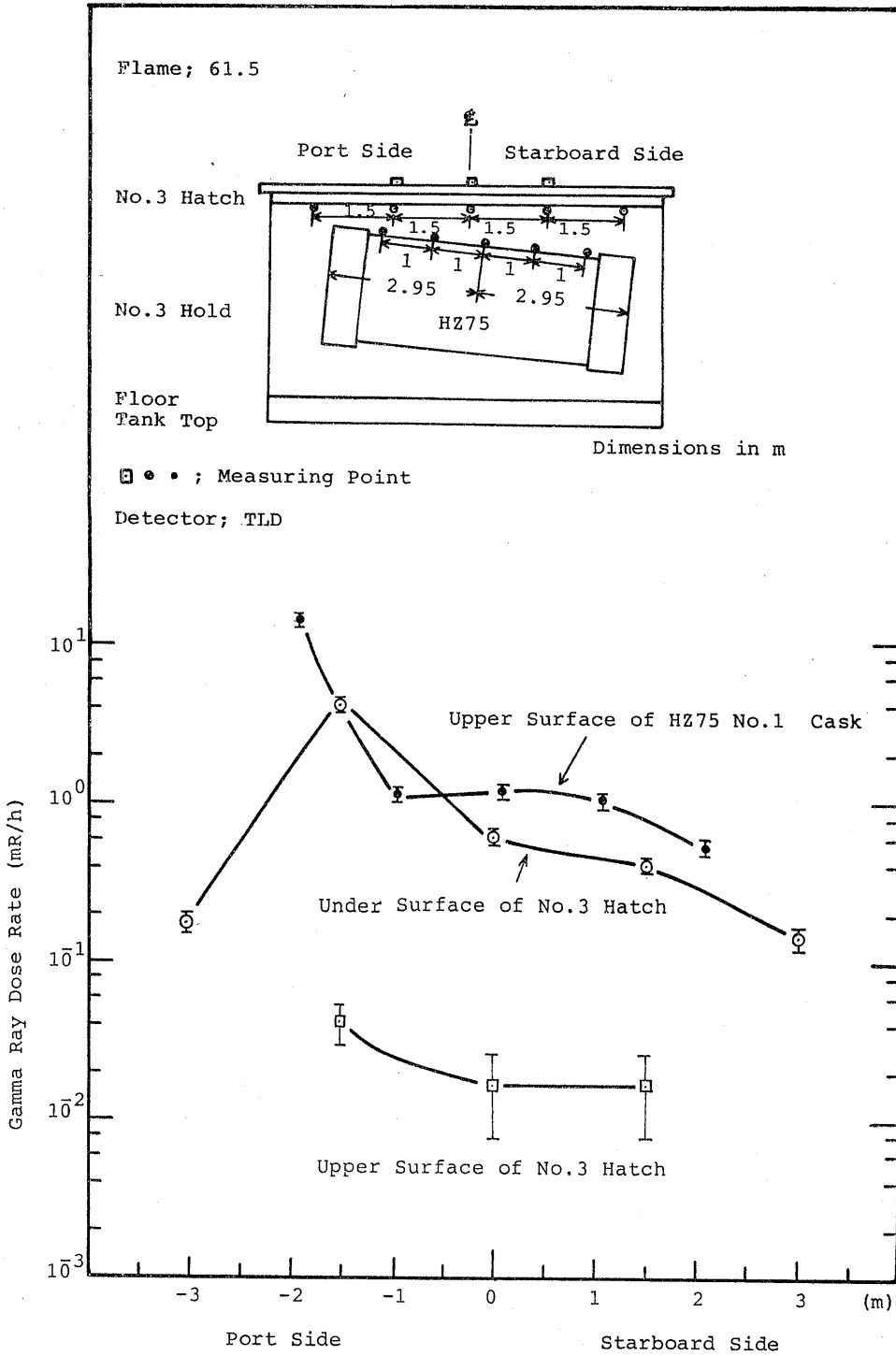


Fig. 15 Gamma ray dose rates on the upper surface of HZ-75 No. 2 shipping cask and the surface of No. 3 hatch

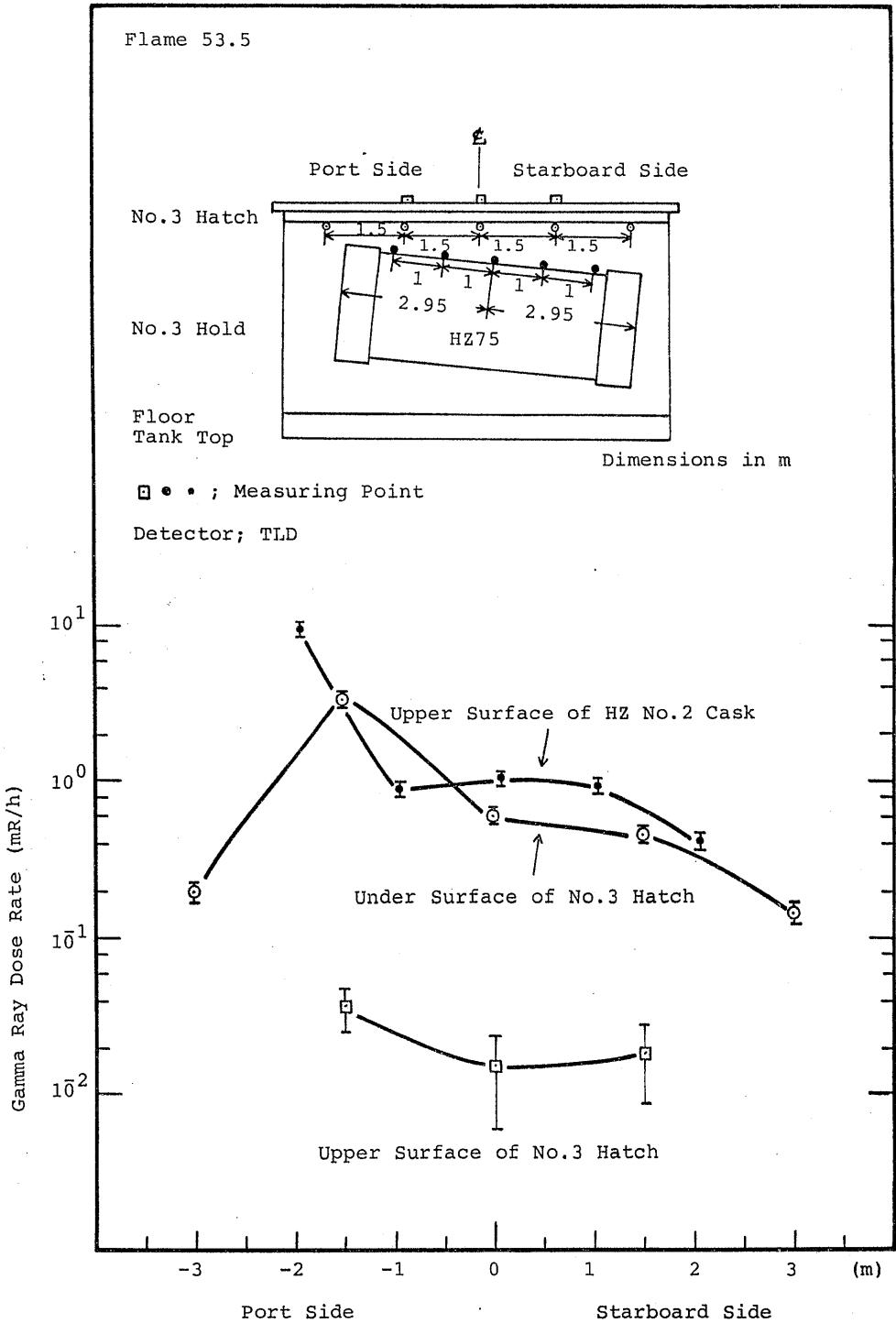


Fig. 14 Gamma ray dose rates on the upper surface of HZ-75 No. 1 shipping cask and the surface on No. 3 hatch

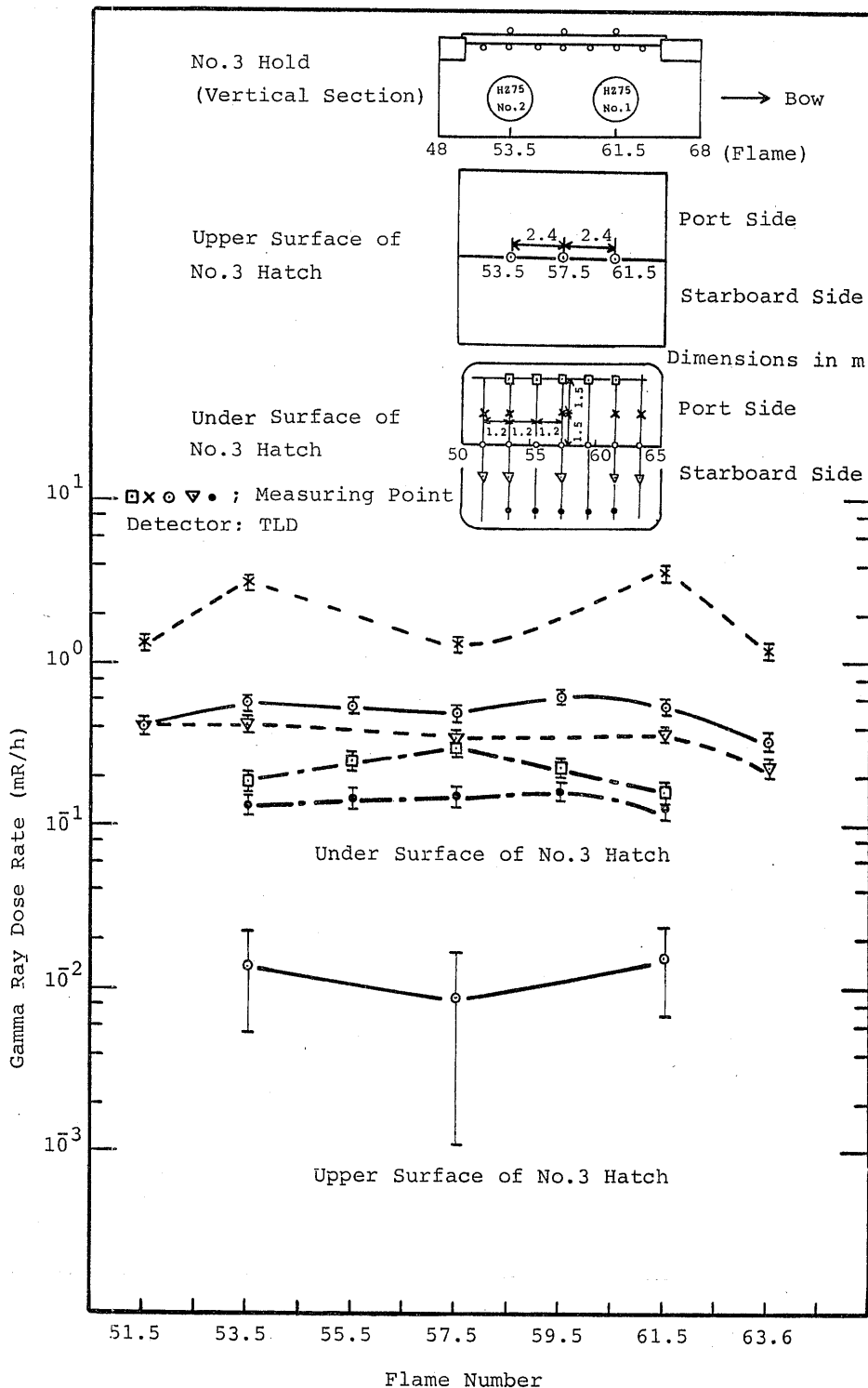


Fig. 16 Gamma ray dose rates on and under the surface of No. 3 hatch

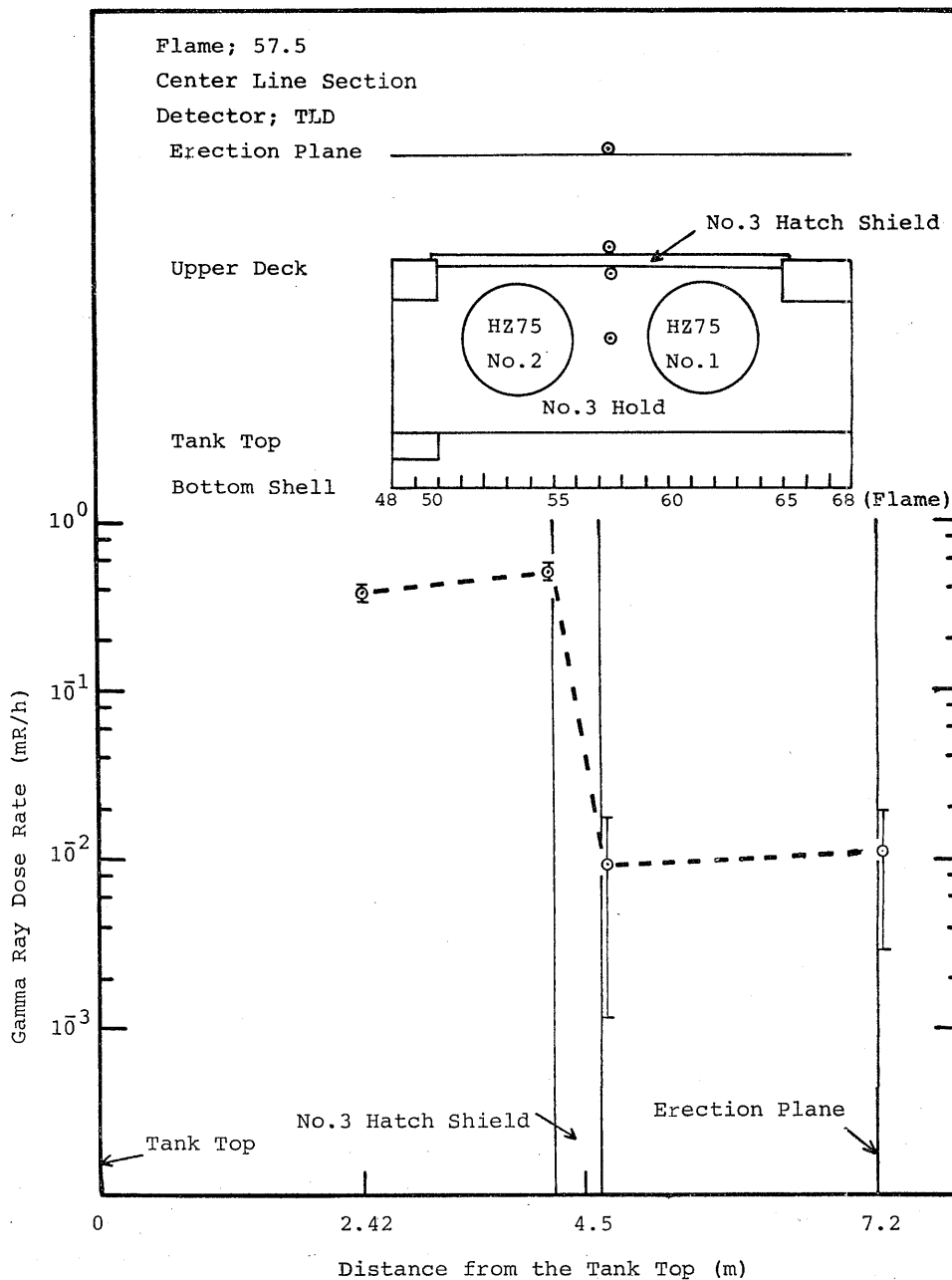


Fig. 17 Gamma ray dose rates on the vertical line of flame 57.5 on ship center

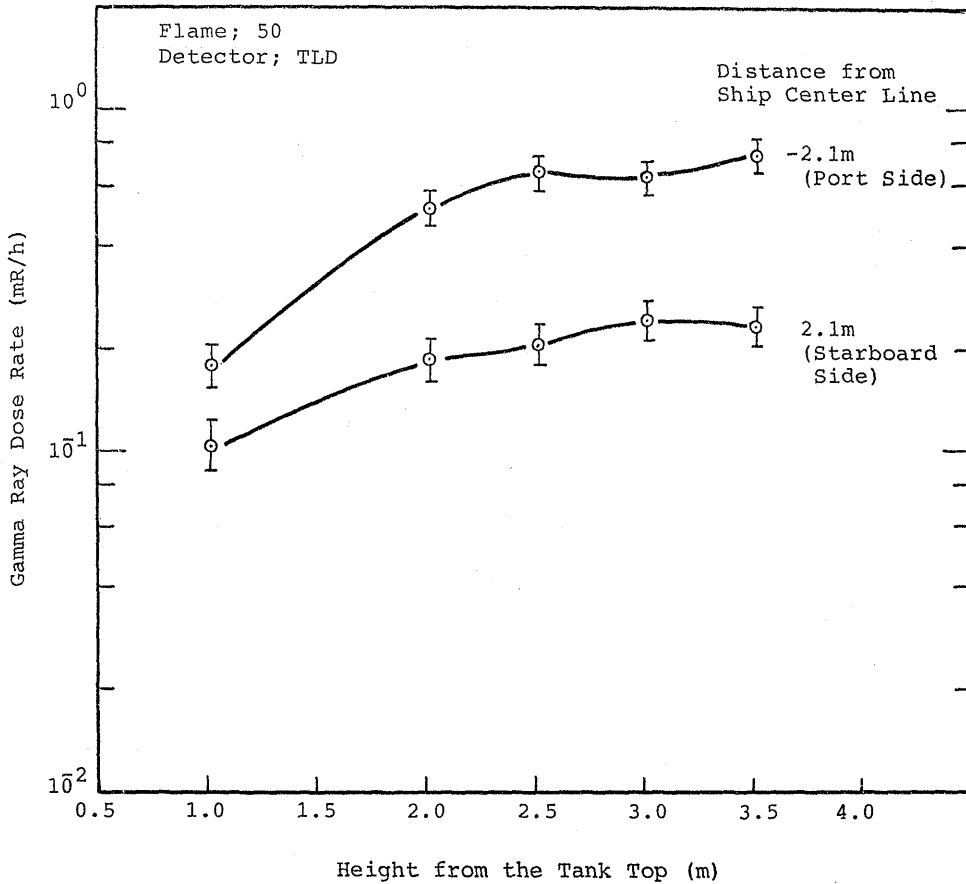


Fig. 18 Gamma ray dose rates on the line apart 1.2m from the fore side wall of aft shield tank

5. 結言および今後の課題

5.1 結 言

複数個の輸送容器を積載した使用済核燃料運搬船内の詳細な放射線量率分布を求めた。

船内の γ 線量率分布測定結果をまとめると次の通りとなる。

- (1) HZ-75容器表面の線量率は、容器の蓋近傍上面で最も高い値を示す。容器の蓋近傍表面での線量率の最大値は20 mR/hである。容器の長手方向中心表面から容器底部の間の線量率は約1 mR/hまたはそれ以下である。
- (2) 第3船倉隔壁近傍では、位置が高くなる程線量率は高く、かつ容器蓋のある左舷側での線量率は同じ高さの右舷側での値より高い。

- (3) HZ-75容器上面での線量率とその真上のハッチ下面の線量率はほぼ等しい。したがって、ハッチ下面において局所的に高い線量率が見られる。
- (4) 第3船倉ハッチ上面においても左舷側での線量率は右舷側での値より高い。ハッチ上面での線量率は 5×10^{-2} mR/h以下である。
- (5) 2基のHZ-75容器の中間面であるフレーム57.5の船体中心において、Erection Plane上での線量率は 1.2×10^{-2} mR/hであり、船倉ハッチ上面での値より約20%高い。
- (6) NH-25容器表面の線量率は容器の長手方向中心で最も高い値を示す。容器表面の線量率の最大値は約4 mR/hである。
- (7) 第2船倉内の線量率には、第3船倉内のHZ-75容器からの γ 線による値が約10%含まれる。

中性子線量率分布測定結果をまとめると次の通りとなる。

- (1) HZ-75 容器表面での線量率は容器の蓋部から長手方向中心の上面の範囲で高い値を示す。しかし、その分布は γ 線の場合とは異なり、ほぼ一様である。HZ-75容器表面における線量率の最大値は0.45 mrem/h である。
- (2) NH-25 容器表面での線量率は、 γ 線の場合と同じく、長手方向中心表面が最も高い。NH-25 容器表面での線量率の最大値は 0.11mrem/h である。本測定値はより合理的な線内線量率分布評価法のみならず、輸送容器および使用済核燃料輸送船の遮蔽設計、輸送容器従事者の被ばく管理および低減化等に対し、有益な資料として利用できるものである。

5.2 今後の課題

本実験は双葉・東海間の短い航海で行われた。このため、船倉外部の γ 線量率測定値はTLD素子の集積線量が低く誤差が大きい。例えば、Erection Plane 上の γ 線量率測定値に含まれる誤差は $\pm 74\%$ である。今後は長期の実船実験により、船倉外部においてもTLD

素子の集積線量高め、精度の良い測定値を揃える。また、PWR型の使用済核燃料を収納した輸送容器についても同様の実験を行う。これらの測定値に基づき、詳細な船内線量率分布を作成するとともに、複数個の輸送容器を積載した船内の線量率分布を合理的に評価する手法の開発を行う。

謝 辞

本実験を遂行するにあたり、種々のご協力をいただいた株式会社エヌ・ティ・エス、東京電力株式会社および日本海運株式会社の皆様に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 植木紘太郎, 他; 船舶技研報告, 17, 279 (1980)
- 2) Sekiguchi, A., et al. : Proc. 6 th Int. Sym. PATRAM' 80, 540 (1980)
- 3) Twite, M., Miller, P.C. : Rad. Protection Nucl. Power Plants Fuel Cycle, 2, 139 (1979)
- 4) Devillers, C., Blum, P. : Nucl. Technol., 35, 112 (1977)