

乾式キャスクを積載した使用済燃料輸送船の 線量率分布測定

植木 紘太郎*

On Board Experiment of Radiation Dose Rate Distributions in a Spent Fuel Shipping Vessel Loaded with Several Dry-Type Casks

By

Kohtaro UEKI

Abstract

An well prepared on board experiment was performed in the spent fuel shipping vessel PACIFIC SWAN loaded with eight dry-type casks of the TN-type. The casks contained the spent fuel of a pressurized water reactor (PWR). The burn-up was approximately 15,000 MWD/MTHM, and the cooling time was 475 days.

The measurements of neutron and gamma-ray dose rate distributions were concentrated on the cask surface, in the hold, on the hatch cover, and also along the pass way. The neutron dose rates were measured with a rem counter and the gamma-ray with an ionization-type survey meter.

The measured neutron dose rates are distributed like a 'haze', while the gamma-ray dose rates are distributed like a 'sward' at any places measured. From the above result, it is recommended that the difference of these distributions of dry-type casks is taken into account to a shielding design or to shielding analysis of spent fuel shipping vessels.

Referring to the detailed results, the maximum dose rate on the cask surface was approximately 3 mR/hr for gamma rays and 0.6 mrem/hr for neutrons at the middle of the cask. It was 0.8 mR/hr for gamma rays and 0.13 mrem/hr for neutrons on the hatch cover of the No.3 hold; these maximum values were observed just above the No.2 cask. Along the pass way on the main deck, the maximum dose rate was 0.3 mR/hr for gamma rays and 0.14 mrem/hr for neutrons.

目次	頁
1. まえがき	50
2. パシフィック スワン, TN-12A キャスク 並びに収納燃料の概要	50
3. 線量率分布測定	52
3.1 測定器および測定値の誤差評価	52
3.2 線量率測定位置	52
4. 測定結果および考察	58
4.1 キャスク表面	58
4.2 ハッチカバー上	62
4.3 メインデッキ廊下	66
4.4 キャスク周辺および船倉内	68
5. 結論	71
謝辞	72
参考文献	72

* 原子力船部

原稿受付: 昭和58年1月5日

1. まえがき

使用済燃料輸送船内の線量率分布を系統的に測定し、データを得ることは輸送船の放射線管理を適正に行なうためにも、また適切な遮蔽設計をするためにも、さらにまたより精度の良い、信頼性の高い遮蔽計算法を開発するためにも不可欠である。

使用済燃料輸送船内の線量率分布を系統的、かつ、詳細に測定した文献は、‘日の浦丸’による実船実験の報告書¹⁾のみである。‘日の浦丸’は一般倉に最大2基のキャスク (Cask) を積載し、最大4基のキャスクを積んで国内輸送している。しかし、我が国の使用済燃料の大半は英国の WINDSCALE および仏国の LA HAGUE で再処理されている。この海外輸送には、‘日の浦丸’に較べかなりの大型船 ‘パシフィック フィシャー’、‘パシフィック スワン’、‘パシフィック クレーン’、‘パシフィック ティール’、等によって行われている。これらの輸送船は英国籍であるため、これまで実船実験による線量率分布を測定する機会がなかった。本報告は‘パシフィック スワン’の航海中 (昭和57年9月2日～9月7日、関西電力大欽発電所から日本原子力発電東海発電所まで)、線量率分布を測定し、まとめたものである。

‘日の浦丸’に積載されたキャスクは HZ-75T および NH-25 と称せられ、いずれも湿式キャスク (Wet-Type Cask) であるが、今回の測定は TN-12 および TN-12A と称せられるキャスクで、いずれも乾式キャスク (Dry-Type Cask) である。‘日の浦丸’の場合は2基のキャスクを積載した船倉内を主に線量率分布を測定したが、‘パシフィック スワン’では4基のキャスクを積載した船倉内外を中心に測定を実施した。同船は第1～第5船倉まであり、最大24基のキャスクを輸送することができる。今回の航海では合計8基のキャスクを第3および第5船倉にそれぞれ4基ずつ分散させ、積載した。測定の中心はそのうち第3船倉である。このような状況から、船倉内外の線量率分布は‘日の浦丸’のそれに較べ、より多くのキャスクからの寄与が絡み合った分布になっていることが予想される。

本報告および文献¹⁾は個々のキャスク表面の線量率分布も含め、船倉内外の線量率分布を広範囲に、しかも系統的に測定しているの、線量率分布の性状が分子だけでなく、遮蔽計算法の改良、新たな複数個のキャスクを取り扱から計算法の開発へ向け、有用なデ

ータとして資するものと期待できる。今後、これらの実船実験データを解析し、将来の使用済燃料輸送船あるいは今後予想される廃棄物輸送船の遮蔽設計に対する指針を見い出したい。

第2章は‘パシフィック スワン’、TN-12A キャスクの紹介、並びに、輸送に供された使用済燃料の仕様について述べる。第3章は測定に使用した計測器とその指示値の誤差評価、キャスク表面および船倉内外の線量率測定位置とその選定について説明する。第4章は本研究の主たる部分であり、ガンマ線および中性子線量率分布について表と図を使って記述する。さらに、これらのデータを評価し、乾式キャスク特有の線量率分布の性状を明らかにする。第5章は本研究によって明らかになった特筆すべき結論を述べる。

2. ‘パシフィック スワン’、TN-12A キャスク並びに収納燃料の概要

‘パシフィック スワン’は英国籍の輸送船で、第1～第5船倉まであり、合計24基のキャスクを積載することができる。Table 1 に‘パシフィック スワン’の船体主要目 Fig. 1 を、に側面の概略を示す。‘パシフィック スワン’の遮蔽は、No. 5 船倉と機関室との間に厚さ75cmの水タンクおよびNo. 5 船倉のハッチコーミング後部に厚さ7.5cmのコンクリートが設けられている。

今回の実船実験では、Fig. 1 のようにキャスクが配置している。すなわち、No. 3 船倉に4基、No. 5 船倉に4基である。測定は主にNo. 3 船倉内外で実施した。No. 3 船倉にはTN-12A と称される乾式キャスクが積載されている。

Table 1 ‘PACIFIC SWAN’ specification

Length Over All	103.9 m
Length between Perpendicular	99.0 m
Molded Breadth	16.0 m
Molded Depth (Upper Deck)	9.5 m
Draught	6.02 m
Gross Tonnage	4,527.48 tons
Net Tonnage	2952 tons
Maximum Number of Packagings	24 Casks

TN-12A キャスクの断面図を Fig. 2 に示す。このキャスクは直径が2.5m、高さが6.5m、重量がおおよそ100 t あり、PWP (Pressurized Water Reactor : 加

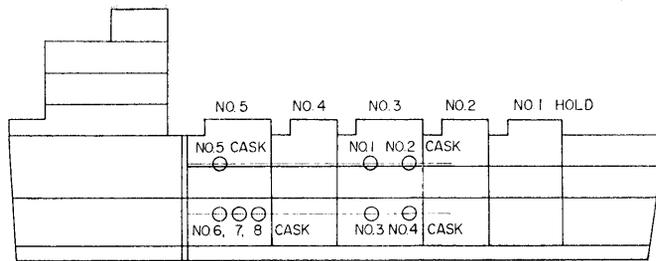


Fig. 1 Vertical view of the PACIFIC RWAN, and the cask arrangement.

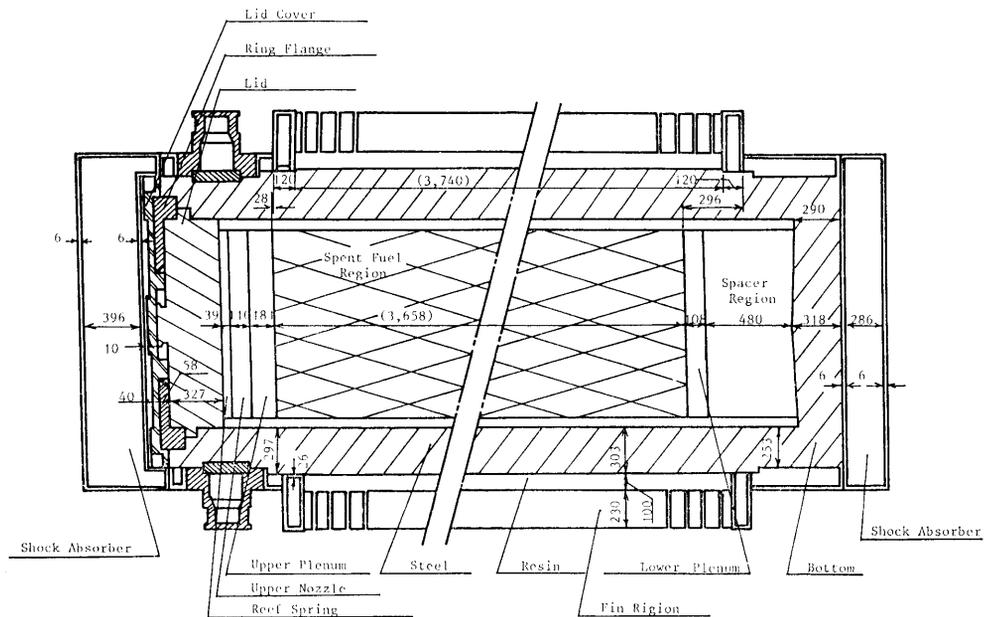


Fig. 2 Shielding structures of the TN-12A cask. Dimensions are all in millimetres.

圧水型原子炉)の使用済燃料集合体を12体収納し、輸送することができる。PWRの集合体1体中の UO_2 の重量はおよそ400kgである。TN-12Aキャスクのは乾式キャスクと称され、文献1)のHZ-75T湿式キャスクあるいは文献2)のEXCELLOX型湿式キャスクに比べ次のような特徴がある。

- 1) キャスクのコア(Core)はアルミニウム製の円筒バスケットで、その中に燃料集合体を収納する空間が設けられている。コア中には崩壊熱の伝達を良くするためにアルゴンガスが充填されている。一方、湿式キャスクのコアには水が充填されており、この水が崩壊熱の伝達と、中性子の遮蔽の両方の役目をしている。
- 2) キャスク本体の構造は軟鋼製であり、この鋼が

- いろいろな事故条件³⁾から燃料を保護している。また、この鋼がガンマ線に対し、ほとんど全部の遮蔽を受け持っている。さらに、速中性子に対しても比較的良い遮蔽体になっている。これに対し、湿式キャスクでは構造材としては軟鋼やステンレススチールを使用するが、乾式キャスクよりもずっと薄く(10cm程度)、ガンマ線遮蔽として鉛層(15~20cm)を別に設けている。
- 3) 中性子遮蔽として軟鋼外筒側面に厚さ10cmのレンジ層がある。これに対し、湿式キャスクの中性子遮蔽は外筒の内側に水層が設けてある。
 - 4) 乾式キャスクは仏国のLA HAGUEで、湿式キャスクは英国のWINDSCALEで再処理される。

Table 2 Specification of the spent fuel installed in the TN-12A.

Reactor Type	PWR	
Burn-Up	15,000	MWD/MTHM
Specific Power	38.4	MW/MTHM
Cooling Time	475	days
Weigh of UO ₂	4.8	tons/Cask

今回輸送された燃料の概要を Table 2 に示す。燃焼度 (Burn-up) がおよそ 15,000MWD/MTHM, 約 390日燃焼で, 475日冷却の燃料であった。

燃料 1 MTHM (Metric Ton of Heavy Metal) 当りのガンマ線および中性子強度は, ORIGEN 2⁴⁾ コードによる計算では次のようである。

$$\begin{aligned} \text{ガンマ線強度} &= 4.055 \times 10^{16} \\ & \quad (\text{photons/sec} \cdot \text{MTHM}) \\ & \quad (11 \text{ MeV} \sim 0.015 \text{ MeV}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{中性子強度} & ((\alpha, n) \text{ 反応} + \text{自発核分裂}) \\ & = 3.990 \times 10^7 \\ & \quad \text{neutrons}/(\text{sec} \cdot \text{MTHM}) \end{aligned}$$

PWRで燃焼度が 15,000 MWD/MTHM というのは, 現在, 多くの場合の燃焼度が $\sim 30,000$ MWD/MTHM に比べ, およそ半分である。これは, 大飲発電所の初期装荷の燃料のためである。

3. 線量率分布測定

3.1 測定器および測定値の誤差評価

ガンマ線量率の測定は ALOKA 社製の電離箱型サーベイメータを使用した。このサーベイメータの指示は, 0 ~ 1 mR/hr, 0 ~ 10 mR/hr, 0 ~ 100 mR/hr の3段切替になっている。今回の測定ではこのうち, 指示値が 0 ~ 0.8 mR/hr では 0 ~ 1 mR/hr の範囲で測定し, 指示値が 0.8 mR/hr を超えた場合は 0 ~ 10 mR/hr の範囲に切り替えて計測した。サーベイメータの指針は絶えず揺れるが, その揺れ方は測定範囲が高線量率になる程小さくなる。そこで, 測定値の誤差を次のように定めた。

$$0 \sim 0.8 \text{ mR/hr} \quad \pm 20\%$$

$$0.8 \text{ mR/hr 以上} \quad \pm 10\%$$

今回の測定で使用したサーベイメータは実験前に校正しており, ⁶⁰Co のガンマ線に対し校正常数 1.0 を得ている。

船内の自然放射線によるバックグラウンドは 5 μ R/hr

程度²⁾と推定されるが, 電離箱型サーベイメータでは有意な値は検出できなかった。

中性子の測定には Studsvic 社 (スウェーデン) の中性子レムカウンターを使用した。このレムカウンターは直径 21.5cm, 高さ 23.0cm の円筒型ポリエチレンの中心に, BF₃ カウンターがある構造になっている。重量は 10.9kg ある。今回の測定では, レムカウンターから出力されるパルス信号を取り出し, パルス数を数え, 計数率から線量率へ変換する方法を採用した。使用したレムカウンターは, Am-Be 中性子に対し, 3.3 cps で 1 mrem/hr になる応答特性を有している。しかし, 実際の中性子場のエネルギースペクトルは Am-Be 中性子スペクトルとは異なるので, 本測定ではこの 3.3 cps に対し $\pm 10\%$ の誤差があると仮定した。さらに, 測定は計数率, N, を計っているので, N に対する統計誤差も考慮した。測定時間は全て 1 min であった。したがって線量率は次のようにして求まる。

$$\begin{aligned} \text{中性子線量率} &= \frac{N}{198} [1 \pm (0.1 + \sqrt{N/N})], \\ & \quad (\text{mrem/hr}) \end{aligned}$$

3.2 線量率測定点の選定

測定点は No. 3 船倉内の 4 基のキャスク表面とその周辺, No. 3 船倉のハッチカバーの上, および Main Deck の廊下に沿って分布している。次にいくつかの図を使って選定された線定位置を説明する。

No. 3 船倉内の 4 基キャスクの配置の様子を Fig. 3 に示す。4 基のキャスクは 1 階に 2 基, 2 階に 2 基並んでおり, キャスク中心間距離はおよそ 6 m ある。4 基のキャスクを Fig. 3 のように No. 1 ~ No. 4 キャスクと呼ぶことにする。No. 1, 2 キャスク中心からハ

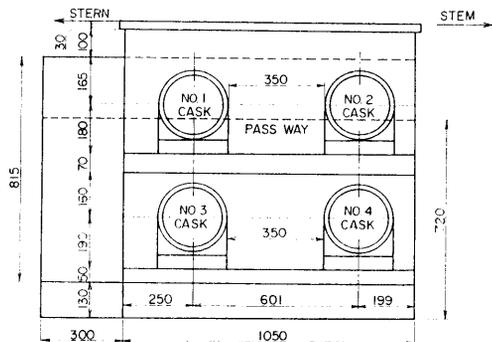


Fig. 3 Vertical view of the No. 3 hold, and the cask arrangement. Dimensions are all in centimetres.

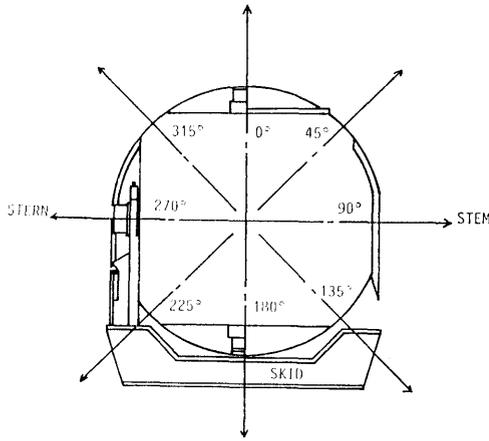


Fig. 4 Measuring directions of the TN-12A casks.

ッチカバーの上面までは、およそ3mである。

Fig. 4 はそれぞれのキャスクに対する測定方向を示したものである。キャスクの真上を0°方向とし、右舷 (Starbord) から左舷 (Port Side) を見て時計回りに90°, 180°, 270° のように方向をとった。したがって、No. 1, 3キャスクでは90°方向が、No. 2, 4キャスクでは270°方向がそれぞれのキャスクと相向っており、反対に、前者の270°方向、後者の90°方向には相対するキャスクがなく、他のキャスクからの寄与があまりない方向であると考えられる。

No. 1 ~ No. 4 キャスク表面におけるガンマ線および

中性子線量率測定位置を Fig. 5~Fig. 10 に示す。No. 1 キャスクのガンマ線量率測定位置は Fig. 5 の A 1 ~ A 14 である。A 2 ~ A 7 が90°方向であり、A 9 ~ A 14 が270°方向である。A 1 と A 8 はそれぞれショックアブソーバの端面中央である。No. 1 キャスクの中性子線量率測定位置はキャスク中央部の90°および270°方向に各1点のみである。No. 2 キャスクのガンマ線量率測定位置は Fig. 6 の C 1 ~ C 14 である。C 2 ~ C 7 が90°方向であり、C 9 ~ C 14 が270°方向である。C 1 と C 8 はそれぞれショックアブソーバの端面中央である。No. 2 キャスクの中性子線量率測定位置は No. 1 キャスクと同様にキャスク中央部の90°および270°方向の2点である。No. 3 キャスクのガンマ線量率測定位置は Fig. 7 の E 1 ~ E 16 である。E 2 ~ E 8 までが90°方向であり、E 10 ~ E 16 が270°方向である。E 1 と E 9 はそれぞれショックアブソーバの端面中央である。No. 3 キャスクの中性子測定位置を Fig. 8 に示す。F 2 ~ F 6 までが135°方向であり、F 8 ~ F 12 までが225°方向である。F 1 および F 7 はそれぞれショックアブソーバの端面中央である。No. 4 キャスクのガンマ線量率測定位置は Fig. 9 の G 1 ~ G 16 である。G 2 ~ G 8 までが90°方向であり、G 10 ~ G 16 が270°方向である。G 1 および G 9 がそれぞれショックアブソーバの端面中央である。No. 4 キャスクの中性子線量率測定位置を Fig. 10 に示す。H 2 ~ H 6 が135°方向であり、H 8 ~ H 12 までが225°方向になっている。H 1 および H 7 はそれぞれショックアブ

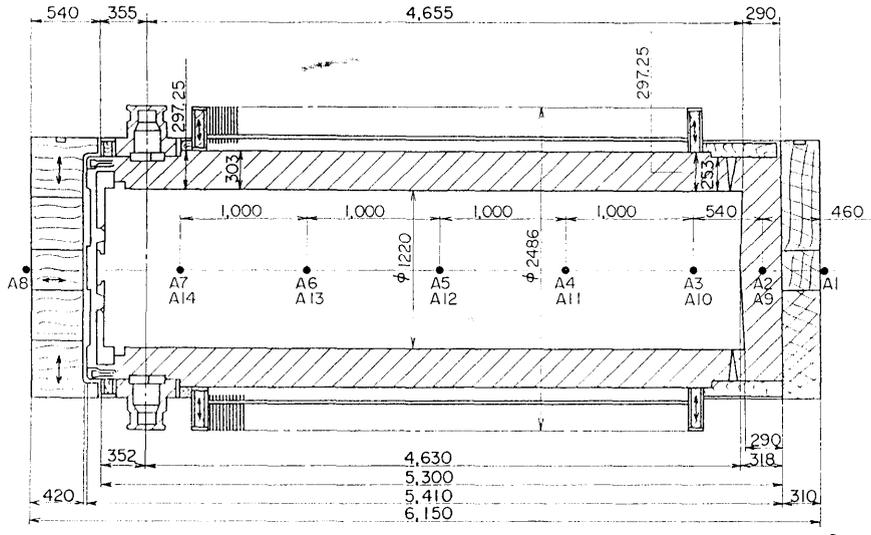


Fig. 5 Measuring sites of gamma-ray dose raete on the No. 1 cask.

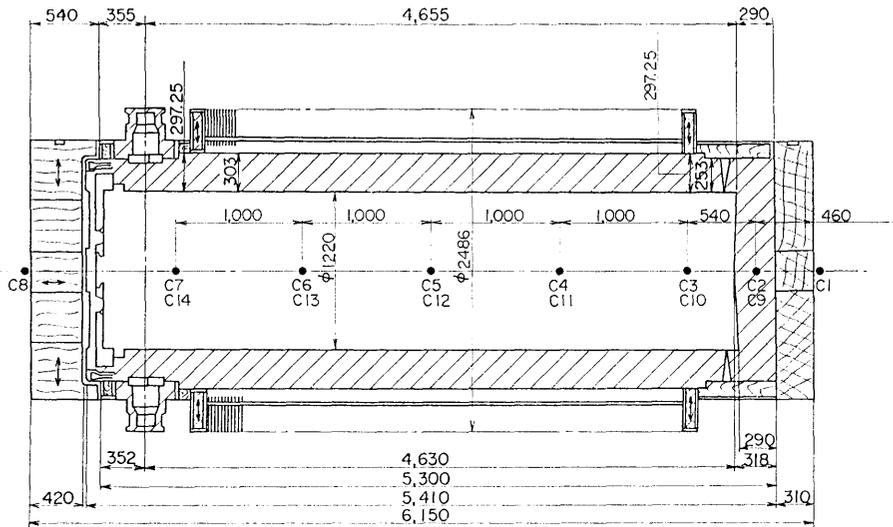


Fig. 6 Measuring sites of gamma-ray dose rates on the No. 2 cask.

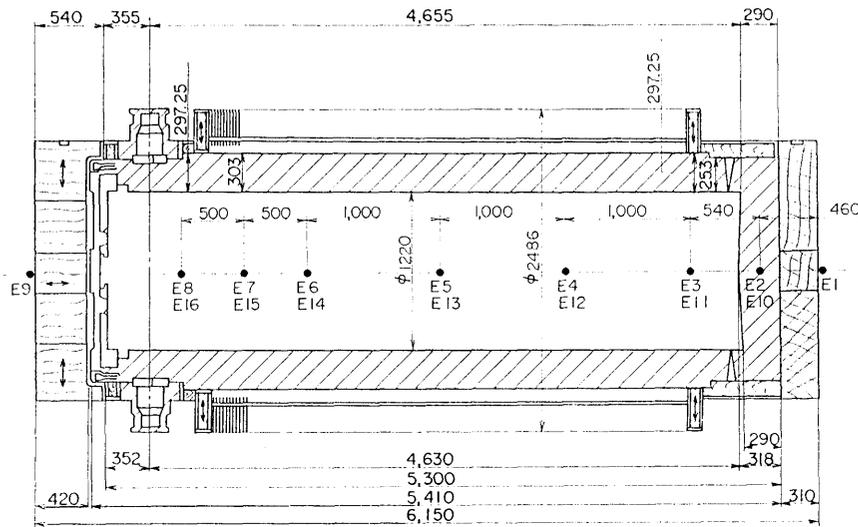


Fig. 7 Measuring sites of gamma-ray dose rates on the No. 3 cask.

ソーバの端面中央である。

以上、キャスク表面における測定位置について述べてきたが、ガンマ線量率についてはサーベイメータをキャスクの表面（フィンの先端）に接近して測定できたが、中性子線量率の計測については接近して測定することが困難であった。そのため、Fig. 11の左図に示すような、スキッドの上をレムカウンターを移動させながら中性子線量率を測定した。したがって、キャスク表面からレムカウンターの実効検出中心まで（レ

ムカウンターのポリエチレン表面から5cm入った位置とする。）の距離はおよそ30cmである。

次にNo. 3船倉のハッチカバー上面の測定点について説明する。ハッチカバー上の測定位置をFig. 12に示す。

- 1) Line I (I 1 ~ I 12) はハッチカバーの左舷—右舷のほぼ中央にあり、Fig. 12の点線で示したキャスクの中央のほぼ真上に位置する。
- 2) Line J (J 1 ~ J 12) はハッチカバーの右舷に

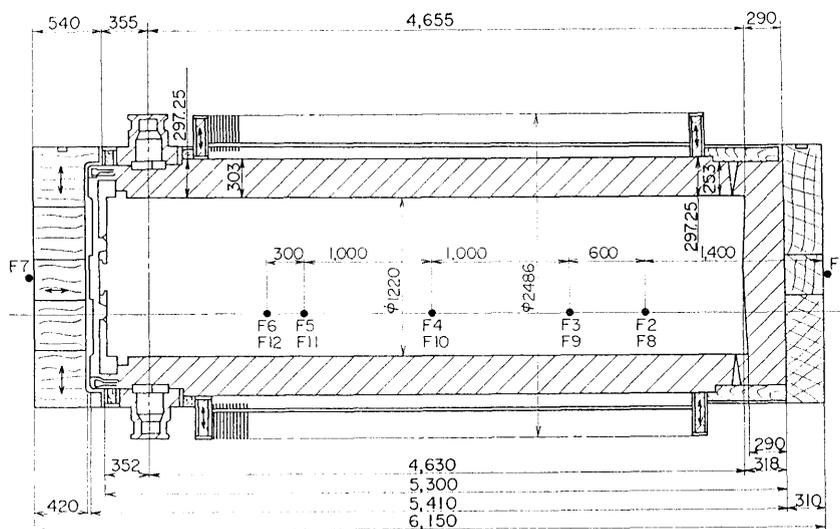


Fig. 8 Measuring sites of neutron dose rates on the No. 3 cask.

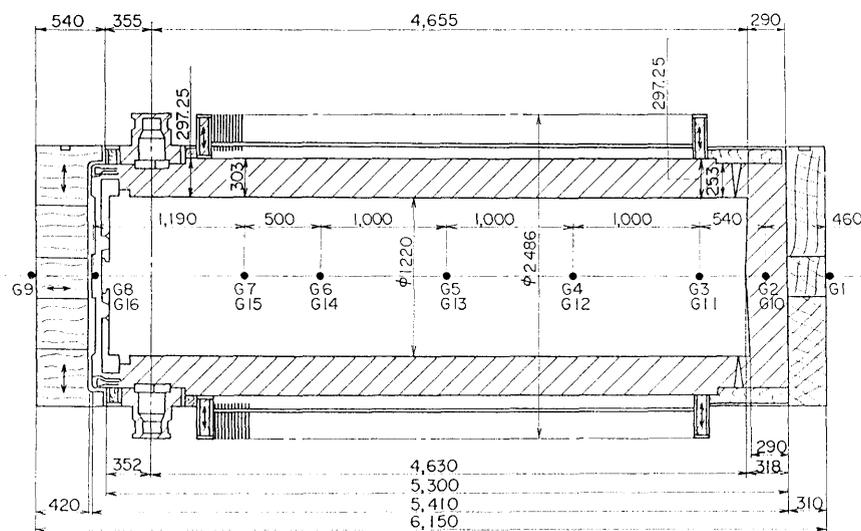


Fig. 9 Measuring sites of gamma-ray dose rates on the No. 4 cask.

Line I より 2 m 寄った位置にある。Line J はキャスクの底部 (Bottom) 付近からの寄与が大きい測定位置になっている。

- 3) Line K (K 1 ~ K12) は Line J と反対に、左舷に Line I より 2 m 寄った位置にある。したがって、Line K はキャスク蓋部 (Lid) 付近からの寄与が大きい位置である。
- 4) Line L (L 1 ~ L10) は No. 1 キャスクのほぼ真上にある。したがって、Line L 上の線量率は

大部分が No. 1 キャスクから寄与によると推定され、No. 2 ~ No. 4 キャスクからの寄与ははかり小さいと考えられる。

- 5) Line M (M 1 ~ M10) は No. 2 キャスクのほぼ真上にある。したがって、Line M 上の線量率は大部分 No. 2 キャスクからの寄与で、No. 1 および No. 3, 4 キャスクからの寄与は僅かであろうと推定される。
- 6) ハッチカバーと No. 1, 2 キャスクとの間の空

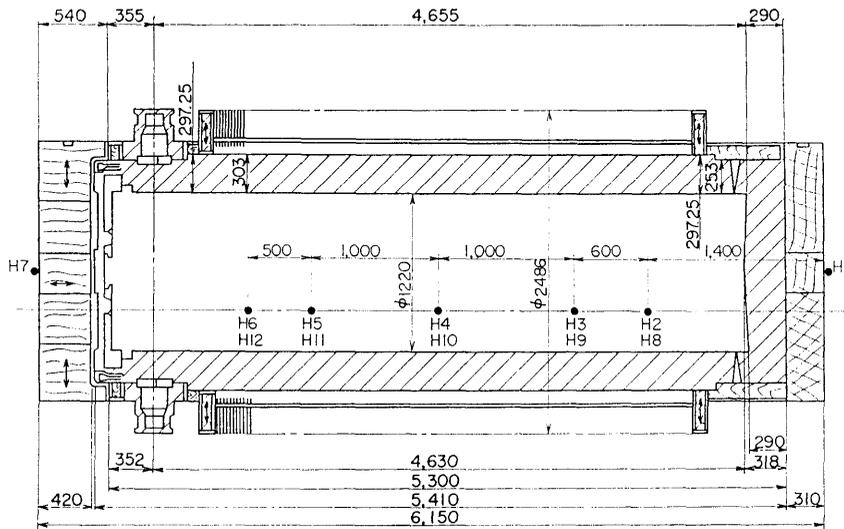


Fig. 10 Measuring sites of neutron dose rates on the No. 4 cask.

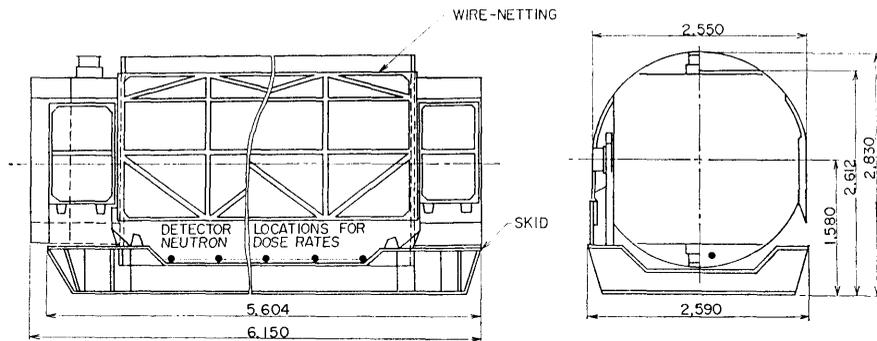


Fig. 11 The TN-12A cask as a packaging, and detector locations around the cask.
Dimensions are all in millimetres.

間にはハッチカバーのリブ (Rib) が補強材として所所に左舷—右舷方向にあるだけで、放射線場を大きく乱すような構造物がない。しかし、キャスク表面近くの 90° ~ 270° 方向には、キャスク固縛装置、トラニオン、スキッド等放射線場を大きく乱す構造物がある。したがって、Line L, M 上の線量率分布は、キャスク表面の分布よりキャスク表面の線量率分布の性状を適格に示すものと考えられる。キャスクの 0° 方向表面とハッチカバー上との距離はおよそ 1.7m あるので、線量率はそれだけ表面より低くなる。

メインデッキの廊下 (Pass Way) に沿って廊下の入口から船首 (Stem) にかけて、およそ 60m に亘って線量率分布を測定した。測定位置は Fig. 13 の Line N (N 1~N20) である。

今回の輸送では、Fig. 1 に示すように、No. 3 船倉に 4 基、No. 5 船倉に 4 基のキャスクが積載されている。このため、それぞれの船倉に面した廊下での線量率が高くなる事は当然であるが、No. 4 船倉附近での測定では No. 3 船倉および No. 5 船倉に積載されたキャスクからの寄与の様子が分る。また No. 2 → No. 1 船倉にかけての測定では、No. 3 船倉に積載されたキャス

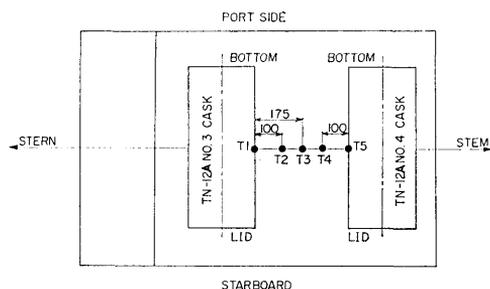


Fig. 15 Measuring sites of neutron dose rates in the No. 3 hold. Dimensions are all in centimetres.

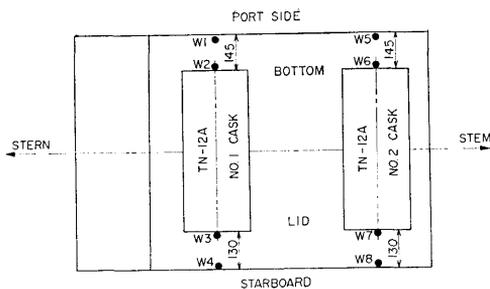


Fig. 17 Measuring sites of dose rates around the casks. All dimensions are in centimetres.

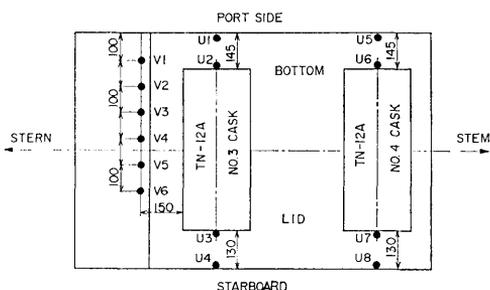


Fig. 16 Measuring sites of dose rates around the casks. The sites of Q1~Q6 are on the second floor of the No. 3 hold. Dimensions are all in centimetres.

3 船倉 1 階の床の上である。

キャスクの蓋および底部周辺およびキャスク表面から少し離れ左舷—右舷方向に測定した図を Fig. 16 に示す。U 1 ~ U 8 は No. 3, 4 キャスクの蓋あるいは底部附近を対象にした測定であり、ガンマ線と中性子線量率を計測している。Line V (V 1 ~ V 6) は No. 3 キャスクの測面から 1.5m 離れ、Fig. 3 の 2 階の床で測定したものであり、Fig. 14 の Line S が同じく No. 3 キャスクの 270° 方向で船首—船尾方向に対し、もっと上方向 (ほぼ 315° 方向) で左舷—右舷方向である。そのため、Line S よりもすぐ上の No. 1 キャスクからの寄与を受ける。Line V はガンマ線量率のみを測定している。

No. 1 および No. 2 キャスクの蓋および底部周辺のガンマ線および中性子線量率を測定した W 1 ~ W 8 を Fig. 17 に示す。

4. 測定結果および考察

4.1 キャスク表面について

まず、TN-12A キャスク表面におけるガンマ線および中性子線量率分布について述べる。前記したように、ガンマ線量率の測定はほぼキャスクのフィン先端で電離箱型サーベイメータによる計測が実施できたが、中性子線量率についてはフィンの先端からレムカウンターの実効的中心まではおよそ 30cm 離れている。

No. 1, 2 キャスク表面におけるガンマ線量率分布の様子を Table 3, 4 にそれぞれ示し、各々の中性子線量率を Table 5 に示す。No. 1, 2 キャスク表面の中性子線量率は Table 5 に示すように各キャスクの中央で、135° および 225° 方向の 2 点のみである。一方、ガンマ線量率の測定はそれぞれのキャスクについて 14 点で計測している。そのうち、No. 1 キャスクについては、A 1, A 8, No. 2 キャスクについては、C 1, C 8 がそれぞれ底部および蓋部ショックアブソーバの端面中央である。また、No. 1 キャスクについては、A 5, A 12 が、No. 2 キャスクについては、C 5, C 12 キャスク側面の 90°, 270° 方向のそれぞれ中央である。

Table 3, 4 でガンマ線の最高線量率は A 1, C 1 である。すなわち、No. 1, 2 キャスクとも底部ショックアブソーバの端面中央部でおよそ 3 mR/hr になっている。これに対し、蓋部ショックアブソーバの端面中央部のガンマ線量率は No. 1, 2 ともおよそ 0.2 mR/hr であり、底部の 1/15 程度である。次にキャスク側面のガンマ線量率分布を調べると、No. 1, 2 キャスクとも 270° 方向、すなわち、それぞれの船尾側側面が 90° 方向 (船首側) よりも 2 倍程高い。270° 方向

Table 3 Gamma-ray dose rates on the No. 1 cask surface.

Detector Location (90°)	Dose Rate (mR/hr)	Detector Location (270°)	Dose Rate (mR/hr)
A1*	3.1 ± 0.31	A9	0.15 ± 0.03
A2	0.2 ± 0.04	A10	0.6 ± 0.12
A3	0.4 ± 0.08	A11	2.5 ± 0.25
A4	1.2 ± 0.12	A12	2.5 ± 0.25
A5	1.3 ± 0.13	A13	2.4 ± 0.24
A6	1.0 ± 0.10	A14	0.3 ± 0.06
A7	0.5 ± 0.10		
A8*	0.22 ± 0.04		

* = Center of the shock absorber.

Table 4 Gamma-ray dose rates on the No. 2 cask surface.

Detector Location (90°)	Dose Rate (mR/hr)	Detector Location (270°)	Dose Rate (mR/hr)
C1*	2.9 ± 0.29	C9	0.3 ± 0.06
C2	0.25 ± 0.05	C10	0.74 ± 0.15
C3	0.3 ± 0.06	C11	2.6 ± 0.26
C4	1.1 ± 0.11	C12	2.6 ± 0.26
C5	1.1 ± 0.11	C13	2.5 ± 0.25
C6	0.8 ± 0.16	C14	1.0 ± 0.10
C7	0.08 ± 0.02		
C8*	0.2 ± 0.04		

* = Center of the shock absorber.

Table 5 Neutron dose rates on the No. 1 and the No. 2 cask surfaces.

Detector Location(135°)	Dose Rate (mrem/hr)	Detector Location(225°)	Dose Rate (mrem/hr)
B1 (No. 1 Cask)	0.61± 0.117	B2	0.57± 0.111
D1 (No. 2 Cask)	0.42± 0.088	D2	0.44± 0.091

のA11, 12, C11, 12でおよそ2.5 mR/hrである。このように、それぞれの270°方向が90°方向よりも高いガンマ線量率を示す要因として、No. 1, 2 キャスクのコアに収納された12体の集合体の配置を調べると、船尾側により燃焼度の高い燃料が収納されていることに依ると考えられる。一方、中性子線量率については Table 5 のように、135°方向と225°方向との違いはほとんどなく、No. 1 キャスクの中央で0.6 mrem/hr, No. 2の中央で0.4 mrem/hrである。コアの中で発生した中性子はコアを形成している厚いアルミ層とその外側の厚い軟鋼層で良く散乱するので、ガンマ

線のようにコア中の集合体の配列にほとんど影響されなくなるものと考えられる。

No. 3, 4 キャスク表面におけるガンマ線量率分布の様子を Table 6, 7 にそれぞれ示し、各々の中性子線量率分布は Table 8, 9 に示す。また、Table 6 のガンマ線、Table 8 の中性子線量率分布をグラフにしたものが Fig. 18 である。したがって、Fig. 18 はキャスク表面の代表的な線量率分布を表している。ガンマ線量率は mR/hr で測定されるが、ガンマ線の場合は、mR/hr \approx mrem/hr、であると見なせるので、中性子線量率と同じグラフに書き入れた場合、対応しや

Table 6 Gamma-ray dose rates on the No. 3 cask surface.

Detector Location(90°)	Dose Rate (mR/hr)	Detector Location(270°)	Dose Rate (mR/hr)
E1*	1.8 ± 0.18	E10	0.1 ± 0.02
E2	0.15 ± 0.03	E11	1.0 ± 0.10
E3	1.0 ± 0.10	E12	2.6 ± 0.26
E4	2.8 ± 0.28	E13	2.6 ± 0.26
E5	3.0 ± 0.30	E14	2.3 ± 0.23
E6	2.6 ± 0.26	E15	1.6 ± 0.16
E7	1.9 ± 0.19	E16	0.46 ± 0.09
E8	0.23 ± 0.05		
E9*	1.4 ± 0.14		

* = Center of the shock absorber.

Table 7 Gamma-ray dose rates on the No. 4 cask surface.

Detector Location(90°)	Dose Rate (mR/hr)	Detector Location(270°)	Dose Rate (mR/hr)
G1*	2.6 ± 0.26	G10	0.2 ± 0.04
G2	0.05 ± 0.01	G11	0.9 ± 0.09
G3	0.35 ± 0.07	G12	2.3 ± 0.23
G4	1.0 ± 0.10	G13	2.4 ± 0.24
G5	1.0 ± 0.10	G14	2.0 ± 0.20
G6	0.9 ± 0.09	G15	1.3 ± 0.13
G7	0.46 ± 0.09	G16	0.22 ± 0.04
G8	0.08 ± 0.02		
G9*	0.23 ± 0.05		

* = Center of the shock absorber.

Table 8 Neutron dose rates on the No. 3 cask surface.

Detector Location(135°)	Dose Rate (mrem/hr)	Detector Location(225°)	Dose Rate (mrem/hr)
F1*	1.08 ± 0.182	F8	0.43 ± 0.089
F2	0.45 ± 0.092	F9	0.54 ± 0.106
F3	0.52 ± 0.103	F10	0.60 ± 0.115
F4	0.69 ± 0.118	F11	0.50 ± 0.100
F5	0.64 ± 0.111	F12	0.60 ± 0.115
F6	0.74 ± 0.135		
F7*	0.42 ± 0.088		

* = Center of the shock absorber.

Table 9 Neutron dose rates on the No. 4 cask surface.

Detector Location(135°)	Dose Rate (mrem/hr)	Detector Location(225°)	Dose Rate (mrem/hr)
H1*	0.33 ± 0.074	H8	0.36 ± 0.079
H2	0.21 ± 0.054	H9	0.40 ± 0.085
H3	0.32 ± 0.072	H10	0.56 ± 0.109
H4	0.60 ± 0.115	H11	0.41 ± 0.086
H5	0.25 ± 0.060	H12	0.36 ± 0.079
H6	0.26 ± 0.062		
H7*	0.38 ± 0.082		

* = Center of the shock absorber.

すいように同一の単位 (mrem/hr) で表わした。

まずNo. 3 キャスクのガンマ線量率について述べる。No. 3 キャスクでは前記のNo. 1, 2 キャスクおよび次に述べるNo. 4 キャスクと較べ, 90°方向と270°方向との違いがほとんどなく, キャスク中央側面でおよそ3 mR/hrである。No. 3 キャスクコアでは収納された12体の燃焼度および冷却日数にあまり差がない。しかし, No. 4 キャスクではNo. 1, 2 キャスクと同じように非対象な線量率分布が見られ, 90°方向では270°方向のおよそ半分になっている。No. 1~No. 4 キャスクを通し, キャスク表面 (フィンの先端) のガンマ線量率は最高3 mR/hr, また, ショックアブソーバの端面

でも最高3 mR/hrを示している。キャスクコアに収納される集合体に燃焼度, 冷却時間の違いがあると, キャスク表面に有意な非対称 (本実験では2倍程度の違い) が生ずることが明らかになった。

次にNo. 3, 4 キャスクの中性子線量率分布を調べる。Table 8で, No. 3 キャスクのF1, すなわち底部ショックアブソーバの端面中央で1 mrem/hrを僅かに超えている。しかし, ガンマ線量率分布程大きな変化がなく, キャスク側面の中性子の最高値は0.7 mrem/hrである。キャスクの船首側 (135°方向) と船尾側 (225°方向) の非対象性についても, No. 1, 2 キャスクと同様に有意な違いが表れていない。

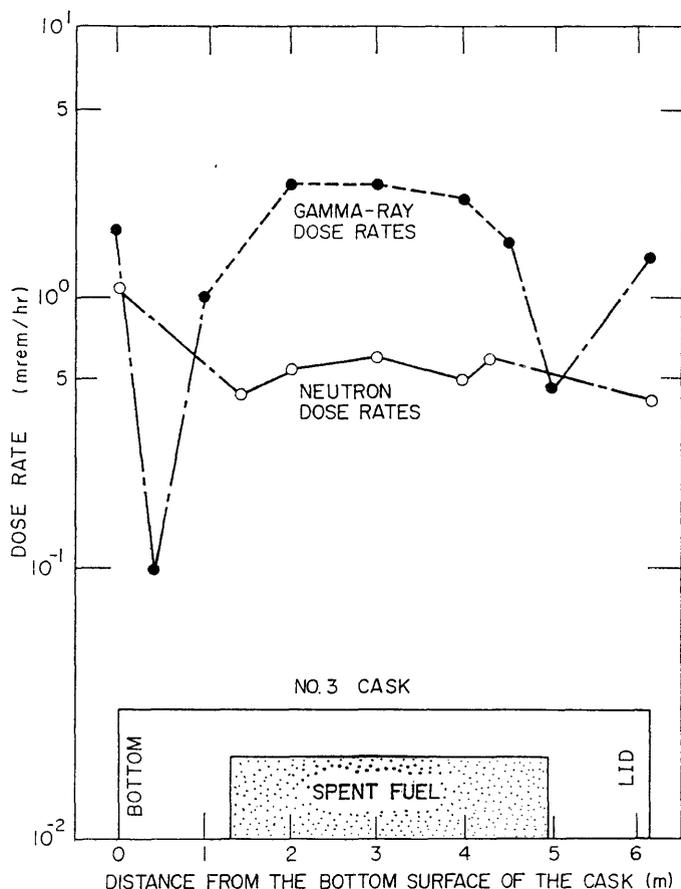


Fig. 18 Dose rate distributions on the cask surface of the No. 3 cask.

No. 3 キャスク表面のガンマ線および中性子線量率分布を表した Fig. 18 を見ると、両者の分布に明らかな違いがあることが良く分る。Fig. 18 で一点鎖線で結んだ蓋部および底部附近に線量率の極小値が見られる。この附近にはキャスク側にはトランニオンが、キャスク固縛装置側にはトランニオンに対する支柱等があり、それらがガンマ線の有効遮蔽体になっている。しかし、それらは鋼製であるため、中性子に対しては遮蔽効果があまりない。

キャスク表面の縦軸方向の線量率分布の特徴は Fig. 18 から分るように、1) ガンマ線量率は燃料中央に対応した表面で最大値を示し、両端に向かって急激に値が小さくなっている（両端のショックアブソーバ端面での線量率を除く）、2) 中性子線量率はキャスク縦軸方向ではほぼ様な分布を示しており、中央と端部との

間に有意な差が出ていない。

4.2 ハッチカバー上について

ハッチカバー上の測定点は船首—船尾方向に Line I, J, Kがあり、No. 1, 2 キャスクの真上の左舷—右舷方向にそれぞれ Line L, Mがある。

ハッチカバー上のガンマ線量率分布を Table 10 に、中性子線量率分布を Table 11 に示す。ハッチカバー上の代表的なガンマ線および中性子線量率分布の様子を調べるため、船首—船尾方向に対しては Line I, 左舷—右舷方向では No. 2 キャスクの真上 1.7 m に対応した Line M の線量率をグラフにしたものがそれぞれ Fig. 19 と Fig. 20 である。前章で述べたように、No. 1, 2 キャスクとハッチカバーとの空間には所どころにリブが補強材として付いているだけで、放射線場を大きく乱すような構造物がない。したがっ

Table 10 Gamma-ray dose rates on the hatch cover of the No. 3 hold.

Detector Location	Dose Rate (mR/hr)	Detector Location	Dose Rate (mR/hr)	Detector Location	Dose Rate (mR/hr)
I1	0.15 ± 0.03	J1	0.20 ± 0.04	K1	0.18 ± 0.04
I2	0.15 ± 0.03	J2	0.10 ± 0.02	K2	0.20 ± 0.04
I3	0.45 ± 0.09	J3	0.27 ± 0.05	K3	0.20 ± 0.04
I4	0.55 ± 0.11	J4	0.35 ± 0.07	K4	0.22 ± 0.04
I5	0.45 ± 0.09	J5	0.30 ± 0.06	K5	0.20 ± 0.04
I6	0.35 ± 0.07	J6	0.22 ± 0.04	K6	0.18 ± 0.04
I7	0.15 ± 0.03	J7	0.20 ± 0.04	K7	0.16 ± 0.03
I8	0.30 ± 0.06	J8	0.15 ± 0.03	K8	0.20 ± 0.04
I9	0.40 ± 0.08	J9	0.17 ± 0.03	K9	0.17 ± 0.03
I10	0.70 ± 0.14	J10	0.17 ± 0.03	K10	0.16 ± 0.03
I11	0.30 ± 0.06	J11	0.15 ± 0.03	K11	0.14 ± 0.03
I12	0.45 ± 0.09	J12	0.28 ± 0.06	K12	0.30 ± 0.06

Detector Location	Dose Rate (mR/hr)	Detector Location	Dose Rate (mR/hr)
L1	0.03 ± 0.006	M1	0.02 ± 0.004
L2	0.07 ± 0.01	M2	0.06 ± 0.01
L3	0.18 ± 0.04	M3	0.15 ± 0.03
L4	0.50 ± 0.10	M4	0.65 ± 0.13
L5	0.56 ± 0.11	M5	0.80 ± 0.16
L6	0.56 ± 0.11	M6	0.60 ± 0.12
L7	0.45 ± 0.09	M7	0.50 ± 0.10
L8	0.17 ± 0.03	M8	0.20 ± 0.04
L9	0.08 ± 0.02	M9	0.08 ± 0.02
L10	0.03 ± 0.006	M10	0.02 ± 0.004

て、Line M 上の線量率分布は、ハッチカバー上はもちろん、キャスク表面の TN-12A キャスクの線量率分布の一般的性状を知る上で、Fig. 18 のデータよりも適当であると考えられる。当然、キャスク表面線量率はハッチカバー上までの距離、1.7m を考慮しなければならぬ。

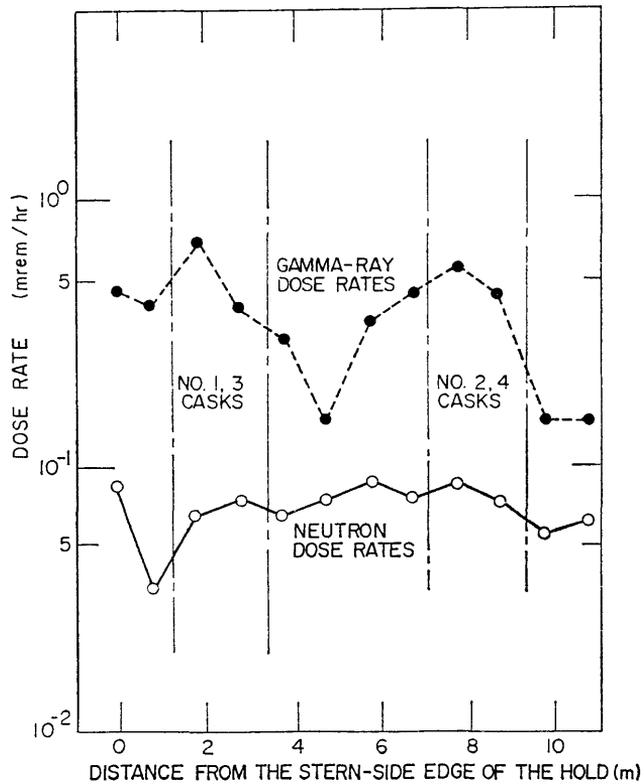
ハッチカバー上のガンマ線量率分布を調べると、最高値は Line M の M5 で 0.8 mR/hr、最低値はハッチカバーの左右舷の端で 0.02 mR/hr を示している。

この M5 の位置はほぼ No. 2 キャスクの中央の真上になっている。最高線量率と最低線量率の比は 40 であり、ここでもガンマ線量率分布は大きい変化があることが分る。

次に、中性子組量率分布を調べる。最高値はやはり Line M の M5 で 0.13 mrem/hr、最低値はハッチカバー左右舷の端で 0.02 mrem/hr である。したがって、両者の比は～7 であり、ガンマ線の 40 倍に対しずっと変化の小さい分布になっていることが知られる。

Table 11 Neutron dose rates on the hatch cover of the No. 3 hold.

Detector Location	Dose Rate (mrem/hr)	Detector Location	Dose Rate (mrem/hr)	Detector Location	Dose Rate (mrem/hr)
I1	0.061 ± 0.024	L1	0.040 ± 0.016	M1	0.015 ± 0.010
I2	0.056 ± 0.022	L2	0.040 ± 0.016	M2	0.045 ± 0.020
I3	0.076 ± 0.027	L3	0.051 ± 0.022	M3	0.096 ± 0.032
I4	0.085 ± 0.029	L4	0.071 ± 0.026	M4	0.106 ± 0.035
I5	0.076 ± 0.027	L5	0.076 ± 0.027	M5	0.126 ± 0.038
I6	0.085 ± 0.029	L6	0.071 ± 0.026	M6	0.111 ± 0.035
I7	0.076 ± 0.027	L7	0.056 ± 0.022	M7	0.086 ± 0.027
I8	0.066 ± 0.025	L8	0.086 ± 0.029	M8	0.076 ± 0.027
I9	0.076 ± 0.027	L9	0.025 ± 0.014	M9	0.061 ± 0.024
I10	0.066 ± 0.025	L10	0.020 ± 0.012	M10	0.051 ± 0.022
I11	0.035 ± 0.017				
I12	0.085 ± 0.029				

**Fig. 19** Dose rate distributions on the Line I on the hatch cover of the No. 3 hold..

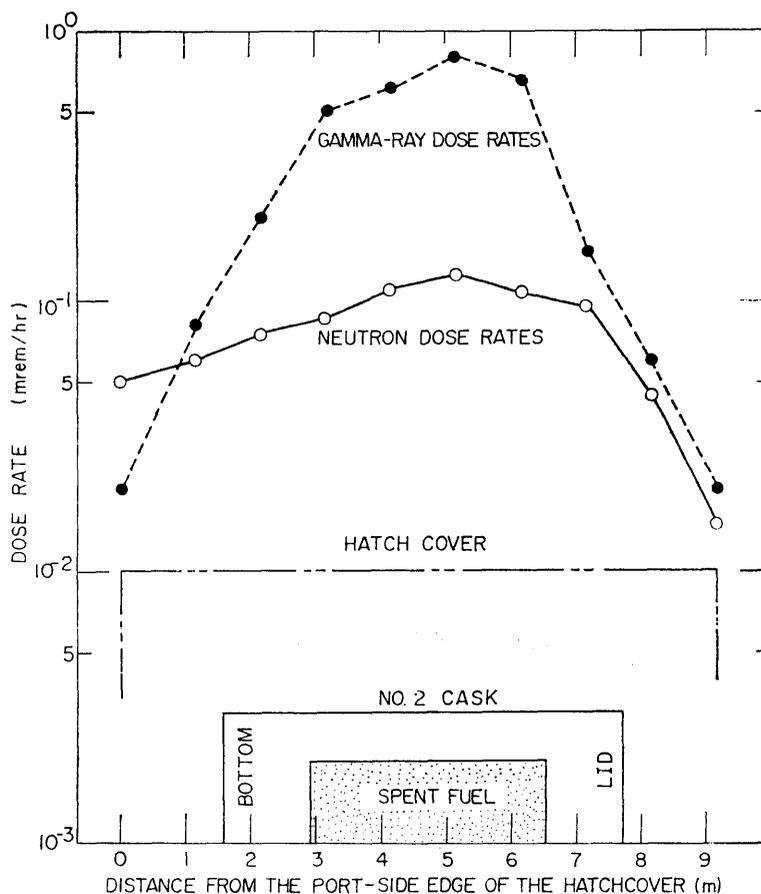


Fig. 20 Dose rate distributions on the Line M on the hatch cover of the No. 3 hold.

さらに、Fig. 19 によって Line I のガンマ線および中性子線量率分布を考察する。ガンマ線量率分布は No. 1, 3 キャスクおよび No. 2, 4 キャスクの真上のハッチカバー上に明らかな極大値が表れ、No. 1, 3 と No. 2, 4 キャスクの間でははっきりした極小値がある。そして、その最大値と最小値との比はおよそ 5 である。ところが、同じ Line I であっても、中性子に対しては測定誤差を考慮すれば有意な違いがなく、したがって極大値、極小値が表れていない。Line I はハッチカバーのほぼ中央を船首一船尾方向に走っており、その附近では ~ 0.09 mrem/hr の中性子線量率である。

最後に、Fig. 20 に示す Line M の線量率分布を考察する。ガンマ線量率はキャスク中央部、すなわち、燃料中央部に対応したハッチカバー上で著しいピーク

が表れている。しかし、中性子の方にも僅かにピークが見られるものの、ガンマ線に比べればはるかに緩いピークである。したがって、中性子線量率は燃料が収納されている領域に対応したハッチカバー上では一様であると考えた方が妥当である。このような分布を反映して、Fig. 20 から分るように、No. 2 キャスクの真上ではその中央部でガンマ線量率が中性子よりもおよそ 7 倍高いが、右舷の端では逆に中性子線量率がガンマ線より 2 倍程高くなる現象が起きている。

本実験から明らかになった重要な知見の 1 つは、乾式キャスクではガンマ線と中性子線量率分布に、Fig. 18, 19, 20 のいずれにも明確に表れているところの相違が生ずる、という事実である。この要因の 1 つは、乾式キャスクのコアを形成している厚いアルミニウム層とその外側の厚い鋼板は中性子に対し吸収面積

(Absorption Cross Section) が非常に小さく、ほとんど散乱断面積 (Scattering Cross Section) しか持たない。そのため、コアで発生した中性子は散乱を繰り返えし、かなり一様な分布になって外筒のレジン層に達するものと見てよい。このレジン層も 10cm であるため、このレジン層を透過してもその後の中性子線量率分布に大きな変化を生じさせないものと推定できる。それとは逆に、コアを形成するアルミニウムや鋼板はガンマ線に対し有効な遮蔽材である。このため、コアで発生するガンマ線強度は燃料部で一様な分布をしていても、キャスク表面に達するまでの平均的透過距離は表面の縦軸方向では位置に依存する。その結果、Fig. 20 から容易に推定できるように、キャスク表面で軸方向に強く依存した線量率分布を示すもの

と考えられる。

乾式キャスク表面およびその周辺の中性子線量率は“霞”のように分布し、ガンマ線は“剣”のような分布である、という表現がよくその性状を表すであろう。文献1)では中性子線量率の測定点が少なく、ガンマ線については燃料集合体のプレナム部や、タイプレートの放射化による ^{60}Co からのガンマ線の寄与が著しく、本報告のような両者の分布の相違は明確に捉えられていない。

4.3 メインデッキ廊下について

メインデッキ廊下で廊下の入口から船首に向けて線量率分布を測定した。ガンマ線量率分布を Table 13、中性子線量率分布を Table 13 に示す。また、Table 12, 13の分布の様子を分かり易いようにグラフにしたも

Table 12 Gamma-ray dose rates along the pass way on the main deck.

Detector Location	Distance from the Entrance of the Pass Way (m)	Dose Rate (mrem/hr)
N1	63.7	0.0
N2	58.6	0.0
N3	54.9	0.0
N4	51.1	0.005 ± 0.005
N5	47.9	0.010 ± 0.008
N6	44.3	0.025 ± 0.014
N7	40.6	0.051 ± 0.022
N8	39.0	—
N9	37.4	0.096 ± 0.032
N10	34.0	0.106 ± 0.021
N11	30.5	0.136 ± 0.040
N12	27.1	0.030 ± 0.015
N13	25.5	0.035 ± 0.017
N14	22.0	0.025 ± 0.014
N15	18.5	0.025 ± 0.014
N16	13.4	0.071 ± 0.026
N17	10.0	0.106 ± 0.035
N18	6.5	0.121 ± 0.037
N19	3.1	0.035 ± 0.017
N20	-0.3	0.0

Table 13 Neutron dose rates along the pass way on the main deck.

Detector Location	Distance from the Entrance of the Pass Way (m)	Dose Rate (mR/hr)
N1	63.7	0.0
N2	58.6	0.0
N3	54.9	0.0
N4	51.1	0.01 ± 0.002
N5	47.9	0.01 ± 0.002
N6	44.3	0.01 ± 0.002
N7	40.6	0.02 ± 0.004
N8	39.0	0.15 ± 0.030
N9	37.4	0.30 ± 0.060
N10	34.0	0.06 ± 0.012
N11	30.5	0.17 ± 0.034
N12	27.1	0.04 ± 0.008
N13	25.5	0.02 ± 0.004
N14	22.0	0.02 ± 0.004
N15	18.5	0.01 ± 0.002
N16	13.4	0.04 ± 0.008
N17	10.0	0.04 ± 0.008
N18	6.5	0.16 ± 0.032
N19	3.1	0.02 ± 0.004
N20	-0.3	0.0

のが Fig. 21 である。

線量率分布を調べると、ガンマ線および中性子とも当然ではあるが、キャスク4基が積載されている No. 3 および No. 5 船倉に面した廊下で線量率の極大値があり、その中間でキャスクが積載されていない No. 4 船倉に面した廊下で極小値が表れている。もう少し詳しく見ると、ガンマ線量率分布は No. 5 船倉に面した廊下では極大値が1つであるが、No. 3 船倉では極大値が2つ表れている。これは、Fig. 1 のキャスク配列から分るように、No. 5 船倉の廊下に直接面したキャスクは No. 5 キャスク1基であるが、No. 3 船倉では No. 1, 2 キャスクの2基が廊下に面しており、各キャスクの底部に対応した位置で極大値が形成されることに依る。一方、中性子線量率分布では極大値が No. 5 船倉に面した廊下で1つ、No. 3 船倉でも1つしか

極大値が生じていない。この理由は、4.1および4.2節で述べてきたように、中性子束分布は‘霞’のように広がっているので、No. 1, 2 キャスク間は3.5m離れていても廊下では両キャスクからの寄与がほとんど同じであること、さらに、階下の No. 3, 4 キャスクからの寄与も無視できないものと考えられるが、その寄与も No. 3 船倉に面した廊下ではあまり変化がないことが考えられる。

廊下におけるガンマ線量率の最高はNo. 3 船倉のNo. 2 キャスクに面した位置で 0.30 mR/hr、最低値は廊下の入口や船首での測定を除いて、No. 4 船倉の廊下で、0.01 mR/hr である。最高と最低線量率との比は30である。一方、中性子線量率は最高がやはり No. 3 船倉に面した廊下で、0.14 mrem/hr、最低は No. 4 船倉の廊下で、0.025 mrem/hr であり、その比はお

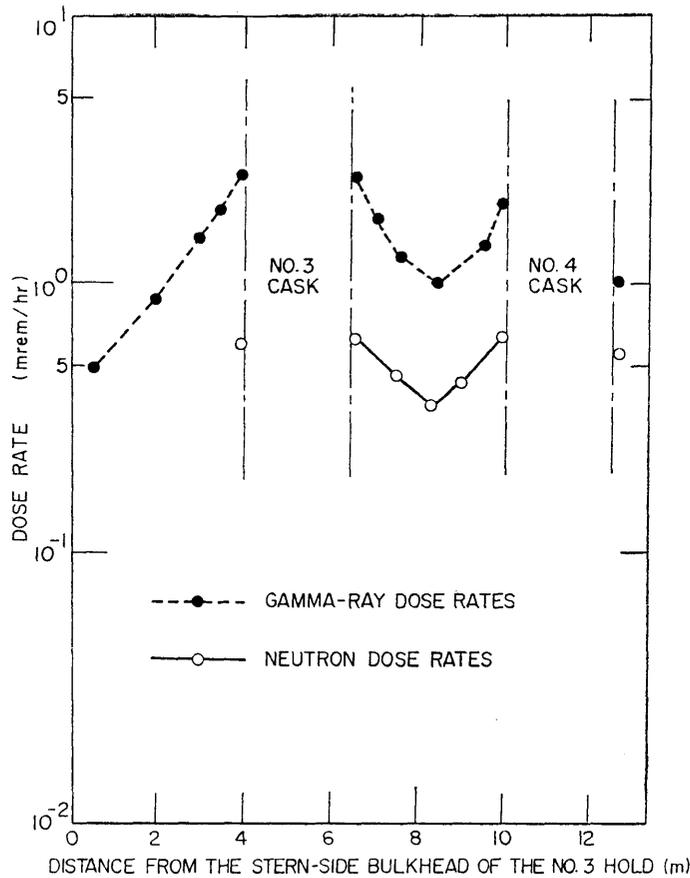


Fig. 21 Dose rate distributions along the pass way on the main deck.

よそ6である。したがって、最高と最低線量率の比はガンマ線の方が中性子よりもずっと大きく、'霞'と'剣'の分布の違いがここでも明確に表れている。

ガンマ線量率の最高値 0.30 mR/hr はハッチカバー上の最高値 0.80 mR/hr のおよそ1/3であるが、中

性子線量率は最高 0.14 mrem/hr で、ハッチカバー上の最高も 0.13 mrem/hr であり、ほとんど同じである。

4.4 キャスク周辺および船倉内について

キャスク表面から少し離れた位置、蓋や底部附近の

Table 14 Gamma-ray dose rates around the No. 3 and the No. 4 casks.

Detector Location	Dose Rate (mR/hr)						
P1	2.9 ± 0.29	Q1	2.5 ± 0.25	R1	2.4 ± 0.24	S1	2.6 ± 0.26
P2	2.0 ± 0.20	Q2	1.8 ± 0.18	R2	2.0 ± 0.20	S2	1.9 ± 0.19
P3	1.6 ± 0.16	Q3	1.3 ± 0.13	R3	1.6 ± 0.16	S3	1.5 ± 0.15
P4	1.5 ± 0.15	Q4	1.0 ± 0.10	R4	1.0 ± 0.10	S4	0.9 ± 0.09
P5	1.8 ± 0.18	Q5	1.4 ± 0.14	R5	1.4 ± 0.14	S5	0.5 ± 0.10
P6	2.0 ± 0.20	Q6	2.0 ± 0.20	R6	2.0 ± 0.20		

特殊な位置および船倉内の線量率分布について述べる。

まず、No. 3 と No. 4 キャスク間のガンマ線量率を Table 14 に示し、Table 15 に中性子線量率を示す。また、Table 14 の Line Q (Q 1 ~ Q 6) および Table 15 の Line T (T 1 ~ T 5) の測定値をグラフに表したものが Fig. 22 である。

Line Q のガンマ線量率分布では最高値が Q 1 (No. 3 キャスクの表面) で 2.5 mR/hr、最低値は No. 3 と No. 4 キャスクの間で 1.0 mR/hr である。Line T の中性子線量率分布では最高は同じく No. 3 キャスク表面で 0.60 mrem/hr、最低はやはり中間で 0.36 mrem/hr である。したがって、最高と最低線量率との比はガンマ線が 2.5 であるのに対し、中性子ではその比がおよそ 1.5 になる。その結果、向合ったキャス

Table 15 Neutron dose rates between the No. 3 and the No. 4 casks.

Detector Location	Dose Rate (mrem/hr)
T1	0.60 ± 0.115
T2	0.46 ± 0.094
T3	0.36 ± 0.079
T4	0.44 ± 0.091
T5	0.46 ± 0.094

ク間の線量率についても中性子の方がガンマ線よりも相互間の寄与が大きい、ということが明らかになった。

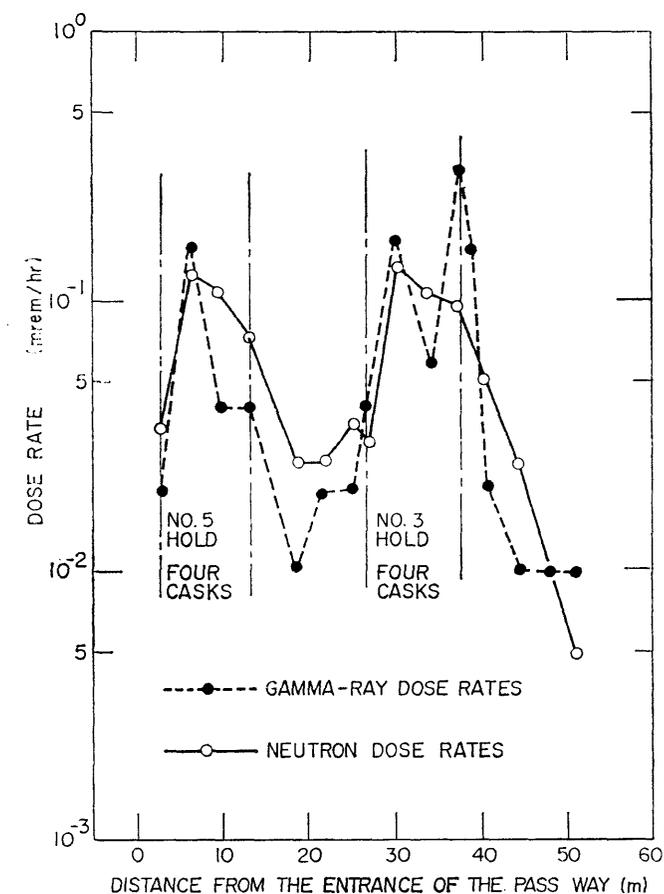


Fig. 22 Dose rate distributions around the No. 3 and the No. 4 casks in the No. 3 hold.

他のキャスクからの影響があまりない、No. 3 キャスクの Line S (S 1 ~ S 5) では、ガンマ線量率がキャスク表面で 2.6 mR/hr, 1 m で 1.5 mR/hr, 2 m で 0.9 mR/hr であり、1 m では表面の60%, 2 m では35%に減衰している。

以上で本実船実験の主な目的を達することができたが、以下、その他の測定結果について述べる。

No. 3, 4 キャスクの蓋部、底部周辺の線量率をまとめた表が Table 16, 17 である。Table 16 はNo. 3 キャスクの270°方向に表面から 1.5m 離れた位置で左舷-右舷方向にガンマ線量率を測定した Line V (V 1 ~ V 6) が含まれている。Line V 上の最高線量率はNo. 3 キャスク中央に対応した V 4, V 5 の位置で、1.7 mR/hr を示している。この値はNo. 3 キャスク表面線量率 2.6 mR/hr の65%に当る。

No. 1, 2 キャスクの蓋および底部附近のガンマ線量率を Table 18 に示す。Table 18 で No. 1 および No. 2 キャスクのショックアブソーバ 底部端面中央で 3 mR/hr というかなり線量率が高いが、この底面が前記のメインデッキ廊下に面しており、No. 3 船倉廊下におけるガンマ線の2つのピークを形成しているものと判断される。

蓋および底部ショックアブソーバ端面から 1 m 程それぞれ中央に入ったキャスク下部 (180°方向) での測定結果を Table 19, 20 に示す。測定位置は Fig. 11 の左図の点で示した位置であり、キャスク表面に接していると考えてよい。この付近は中性子遮蔽用のレジ層や放熱用のフィンが付いておらず、外筒側面のス

Table 17 Neutron dose rates around the lid and the bottom of the No. 3 and the No. 4 casks

Number of the Cask	Detector Location	Dose Rate (mrem/hr)
No. 3	U1	0.25 ± 0.060
Ditto	U2	1.08 ± 0.182
Ditto	U3	0.42 ± 0.088
Ditto	U4	0.18 ± 0.048
No. 4	U5	0.17 ± 0.046
Ditto	U6	0.33 ± 0.074
Ditto	U7	0.13 ± 0.039
Ditto	U8	0.08 ± 0.028

Table 18 Gammaray dose rates around the lid and the bottom of the No. 1 and the No. 2 casks.

Number of the Cask	Detector Location	Dose Rate (mR/hr)
No. 1	W1	1.0 ± 0.10
Ditto	W2	3.1 ± 0.31
Ditto	W3	0.22 ± 0.04
Ditto	W4	0.08 ± 0.02
No. 2	W5	1.0 ± 0.10
Ditto	W6	2.9 ± 0.29
Ditto	W7	0.2 ± 0.04
Ditto	W8	0.06 ± 0.01

Table 16 Gamma-ray dose rates around the lid and the bottom of the No. 3 and the No. 4 casks.

Number of the Cask	Detector Location	Dose Rate (mR/hr)	Number of the Cask	Detector Location	Dose Rate (mR/hr)
No. 3	U1	0.52 ± 0.10	No. 3	V1	0.2 ± 0.04
Ditto	U2	1.8 ± 0.18	Ditto	V2	0.4 ± 0.08
Ditto	U3	1.4 ± 0.14	Ditto	V3	1.4 ± 0.14
Ditto	U4	0.37 ± 0.07	Ditto	V4	1.7 ± 0.17
No. 4	U5	1.0 ± 0.10	Ditto	V5	1.7 ± 0.17
Ditto	U6	2.9 ± 0.29	Ditto	V6	1.4 ± 0.14
Ditto	U7	0.23 ± 0.05			
Ditto	U8	0.08 ± 0.02			

Table 19 Gamma-ray dose rates under the lid and the bottom of the casks.

Number of the cask	Detector Location	Dose Rate (mR/hr)
No. 1	X1 (Bottom)	2.0 ± 0.20
Ditto	X2 (Lid)	4.5 ± 0.45
No. 2	X3 (Bottom)	3.0 ± 0.30
Ditto	X4 (Lid)	1.5 ± 0.15
No. 3	X5 (Bottom)	1.6 ± 0.16
Ditto	X6 (Lid)	2.0 ± 0.20
No. 4	X7 (Bottom)	2.5 ± 0.25
Ditto	X8 (Lid)	1.9 ± 0.19

Table 20 Neutron dose rates under the lid and the bottom of the casks.

Number of the cask	Detector Location	Dose Rate (mrem/hr)
No. 1	X1 (Bottom)	0.77 ± 0.139
Ditto	X2 (Lid)	1.0 ± 0.176
No. 2	X3 (Bottom)	0.75 ± 0.137
Ditto	X4 (Lid)	0.94 ± 0.163
No. 3	X5 (Bottom)	0.63 ± 0.119
Ditto	X6 (Lid)	1.18 ± 0.195
No. 4	X7 (Bottom)	0.65 ± 0.122
Ditto	X8 (Lid)	0.82 ± 0.160

ステンレススチールのライナーが表れている。したがって、ガンマ線および中性子線量率とも本報告中最高値、それぞれ 4.5 mR/hr, 1.2 mrem/hr が測定されている。キャスク表面の規制値は 200 mrem/hr, 1 m の位置で 10 mrem/hr であり、本報告中の値はいずれに対してもはるかに低い。

5. 結 論

本実験から新たに以下のような知見が得られた。

1. 燃焼度15,000 MWD/MTHM, 冷却時間475日 くらいの使用済燃料を4.8 t (UO₂ 重量) 収納した TN-12A 乾式キャスクでは、フィン先端でガ

ンマ線量率が 3 mR/hr, 中性子線量率は 0.6 mrem/hr くらいになる。

2. 船倉内に積載されたキャスク間の線量率分布には向合ったキャスクや周囲の構造物からの散乱線の寄与があるが、その程度は中性子の方がガンマよりも大きい。
3. ハッチカバー上のほぼ中央で、船首—船尾方向では、中性子線量率はどこでもほぼ同じで ~0.1 mrem/hr である。これに対し、ガンマ線量率分布には鋭いピークがあり、最高 0.7 mR/hr から最低 0.15 mR/hr まで大きく変化する。
4. ハッチカバー上で一基のキャスク (No. 2 キャスク) に注目した線量率分布を見ると、ガンマ線

線量率は 0.8 mR/hr が最高で、0.02 mR/hr が最低であり、その比は40もある。一方、中性子線量率は最高が0.13 mrem/hr、最低が0.02 mrem/hr で、その比はおよそ7であり、ガンマ線に比べ一様性の強い分布になっている。

5. メインデッキ廊下における線量率分布では、ガンマ線量率は最高 0.3 mR/hr、最低 0.01 mR/hr であり、その比は30ある。中性子の方は最高が 0.14 mrem/hr、最低が 0.025 mrem/hr であり、その比はおよそ6である。この廊下においても中性子線量率分布の方がガンマ線よりもはるかに一様性が強いことが分る。

以上、中性子とガンマ線の線量率分布の性状について述べてきたが、ここでまとめると、乾式キャスク表面および周辺の線量率分布の端的な表現として、中性子に対しては‘霞状分布’、ガンマ線に対しては‘剣状分布’があてはまる。

使用済核燃料輸送船の遮蔽設計にはこの‘霞’と‘剣’との相違を十分考慮し、計算法の選択とその結果の評価をする必要がある。

謝 辞

本実船実験を実施するに当っては、‘パシフィック スワン’の乗組員、ベンライン日本支店、関西電力本社並びに大飯発電所の関係各位に多大の御協力と便宜をいただきました。ここに感謝の意を表します。

また、本実験には当所、原子力船部の落合技官が乗船し計測に従事されました。ここに併せて謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 山路昭雄, 植木紘太郎; 船舶技術研究所報告, 第19巻第5号 (1982), p. 1~25.
- 2) 植木紘太郎, 他; 船舶技術研究所報告, 第17巻, 第4号 (1980), p. 1~15.
- 3) IAEA Safety Standards, Regulations for Safe Transport of Radioactive Materials, 1973 Revised Edition, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienne(1973).
- 4) A. G. CROFF; A User's Manual for the ORIGIN 2 Computer Code, ORNL/TM-7175, Oak Ridge National Laboratory (1980).