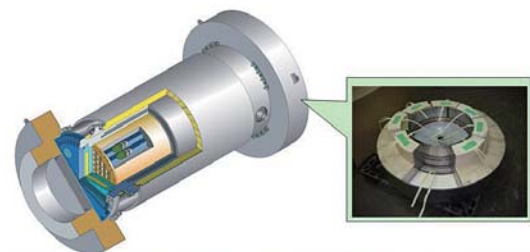


# R-PUF（硬質ポリウレタンフォーム）を用いた キャスク用緩衝体の開発

Development of Impact Limiter Using Rigid Polyurethane Foam for Heavy Cask



岡田 潤 Jun Okada ①  
 芦田 吏史 Satoshi Ashida ②  
 大岩 章夫 Akio Oiwa ③

## あ ら ま し

輸送用キャスクの緩衝体には、木材が主として用いられてきた。しかし、設計で規定する仕様の材料を安定して確保することが難しくなっている。そこで、本研究では、R-PUFを代替材料として選定し、その適用可能性を実験的に評価した。

まず、R-PUF緩衝体を装着した1/3スケールモデルによる9m高さからの自由落下試験を実施し、木材緩衝体試験結果との比較を通じて、R-PUFの緩衝性能が木材より優れていることを確認した。つぎに、800℃に設定された炉内に試験体を30分間保持する試験を実施し、R-PUFの耐燃焼性を確認した。以上の試験結果より、R-PUFはキャスク用緩衝材として要求される緩衝性能および耐燃焼性能を十分に有している。

## Abstract

For the impact limiter of transportation casks, mainly wood has been used for its capability in a limited volume. However, it has become difficult to procure wood that satisfies the characteristics specified by design constantly in large quantities. This study chose rigid polyurethane foams (R-PUF) as an alternative shock absorbing material and investigated its applicability as an impact limiter by experimental methods. The results obtained through drop tests and fire resistance tests suggest that R-PUF works well as a shock absorbing material, and will be useful for impact limiters of large-scale transportation casks.

## 1. 緒 言

当社は、1978年に国産1号機となる原子力発電所の使用済燃料を輸送するキャスク（HZ-75T型）<sup>(1)(2)</sup>の設計・製造を開始して以来、多くの輸送キャスクを設計・製造してきた。また、近年、計画されている中間貯蔵施設向けのキャスク（輸送・貯蔵キャスクと呼ばれ、施設での60年間の貯蔵にも兼用される<sup>(3)</sup>）の設計も行っている。キャスクの基本的な構造は、**図1**に示す

ように、本体、蓋（三重蓋構造）、収納物である使用済燃料集合体を保持するバスケットおよび落下等によりキャスクに加わる衝撃を吸収しキャスクを保護する緩衝体から構成される。本体には、放射線を遮蔽する鉛層（鉛多層タイプのキャスクの場合）、およびレジン層が設けられている。

キャスクの緩衝体は、一般的に、緩衝材をステンレス鋼板で覆う構造となっている。寸法の制限があり、コンパクトな構造が求められているため、少ない体積で十分な衝撃吸収能力を持つ材料として、木材（パルサ材等）が主として用いられてきた<sup>(4)</sup>。しかし、木材は、天然材料であるため、設計で規定する仕様の材料を安定して大量に確保することが難しくなってきた

① Hitachi造船(株) 事業・製品開発本部 技術研究所 機械・インフラ研究室 博士(工学)

② Hitachi造船(株) 事業・製品開発本部 技術研究所 機械・インフラ研究室

③ Hitachi造船(株) 機械・インフラ本部 機械事業部

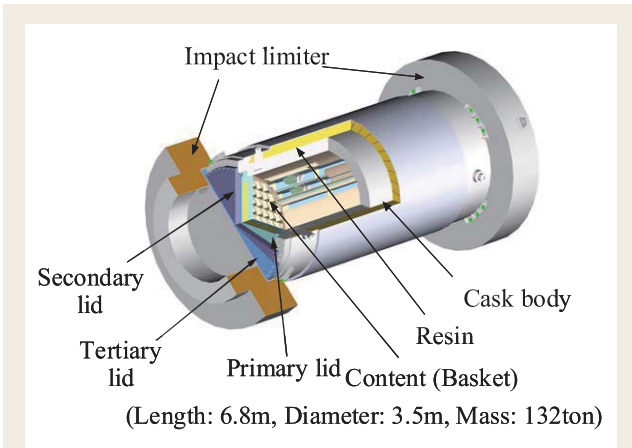


図1 輸送・貯蔵キャスク(BWR燃料69体収納の例)

いる。また仕様（密度、含水率等）を厳しく規定すると入手コストが高くなっていく。

そこで、より緩衝性能が高く、かつ、低コストで製作可能な新型のキャスク用緩衝体の開発を目的に、木材に替わる緩衝材として、硬質のポリウレタンフォーム（以下、R-PUFと表記）を選定し、その実用化に向けて検討を行ってきた<sup>(5)・(8)</sup>。本研究では、R-PUFの緩衝性能および耐燃焼性能に着目して、R-PUFのキャスク用緩衝体への適用可能性について、実験的に検討した。本稿では、これらの実験的検討により得られた知見について報告する。

## 2. 落錘試験

**2.1 実験方法** キャスク輸送時の緩衝体で想定される温度条件下におけるR-PUFの動的な圧縮特性（応力－ひずみ線図）を取得するため、図2に示す直径80mm、高さ35mmおよび70mmの円柱状のR-PUFの試験片を製作した。そして、輸送時に緩衝体がさらされる温度範囲を考慮して、-40℃、-20℃、0℃、25℃、50℃、75℃、および100℃の温度条件下で動的な荷重を載荷する落錘試験を実施した。さらに、従来材である木材の動的な圧縮特性と比較・検討するため、70mm立方のファープライウツドの試験片も製作し、同様の試験を実施した。表1に試験ケースを示す。

試験片が中心部まで所定の温度になるよう恒温槽で温度保持したのち、図3に示す落錘試験装置を用いて、約300kgの重錘を3m高さから自由落下させ、衝突板上に設置した試験片に衝突させた。なお、実機緩衝体の拘束状況を模擬するため、図4に示すように、試験片の側面をR-PUF棒で拘束し、さらに外周部を鋼管で拘束している。

**2.2 計測方法** 計測項目は、非接触式変位計8点（重錘の変位を4点、衝突板の変位を4点）、ロードセルによる荷重を1点の計9点を、サンプリング周波数50kHzで計測した。



(a) R-PUF ( $\rho=0.5\text{g/cm}^3$ )



(b) R-PUF ( $\rho=0.3\text{g/cm}^3$ )



(c) 木材(積層平行)



(d) 木材(積層直交)

図2 落錘試験の試験片

表1 落錘試験の試験ケース

試験片	密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	寸法 (mm)	質量 (g)	重錘 高さ (m)	重錘 質量 (kg)	温度条件 ( $^{\circ}\text{C}$ )
R-PUF(高密度)	0.52	$\phi 79.9 \times 35.5$	91.4	3.00	305.5	-40, -20, 0, 25, 50, 75, 100
R-PUF(中密度)	0.33	$\phi 79.9 \times 70.0$	115.7			
木材(積層直交)	0.57	$69.8 \times 69.8 \times 70.3$	193.6			
木材(積層平行)	0.58	$70 \times 70.4 \times 69.8$	200.9			

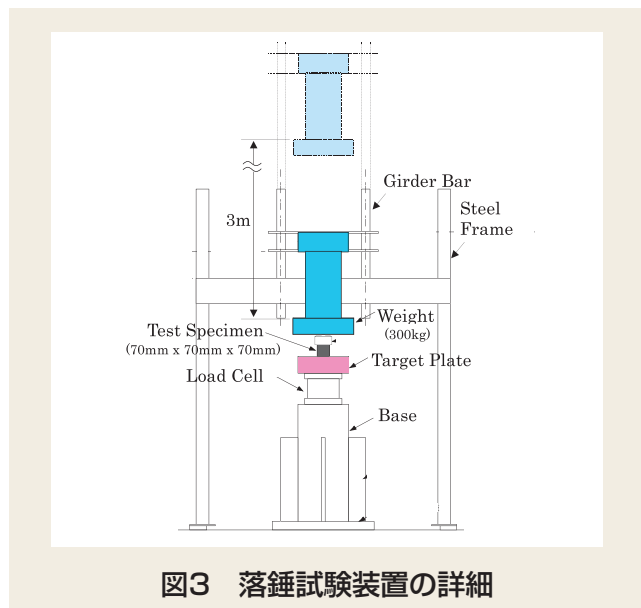


図3 落錘試験装置の詳細

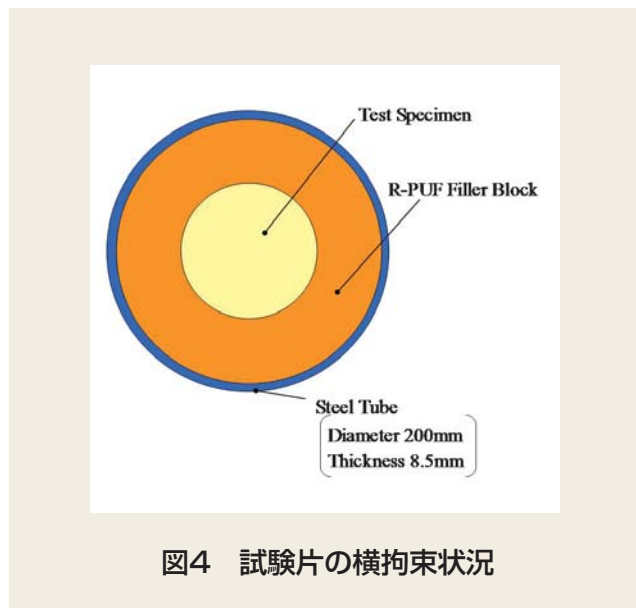


図4 試験片の横拘束状況

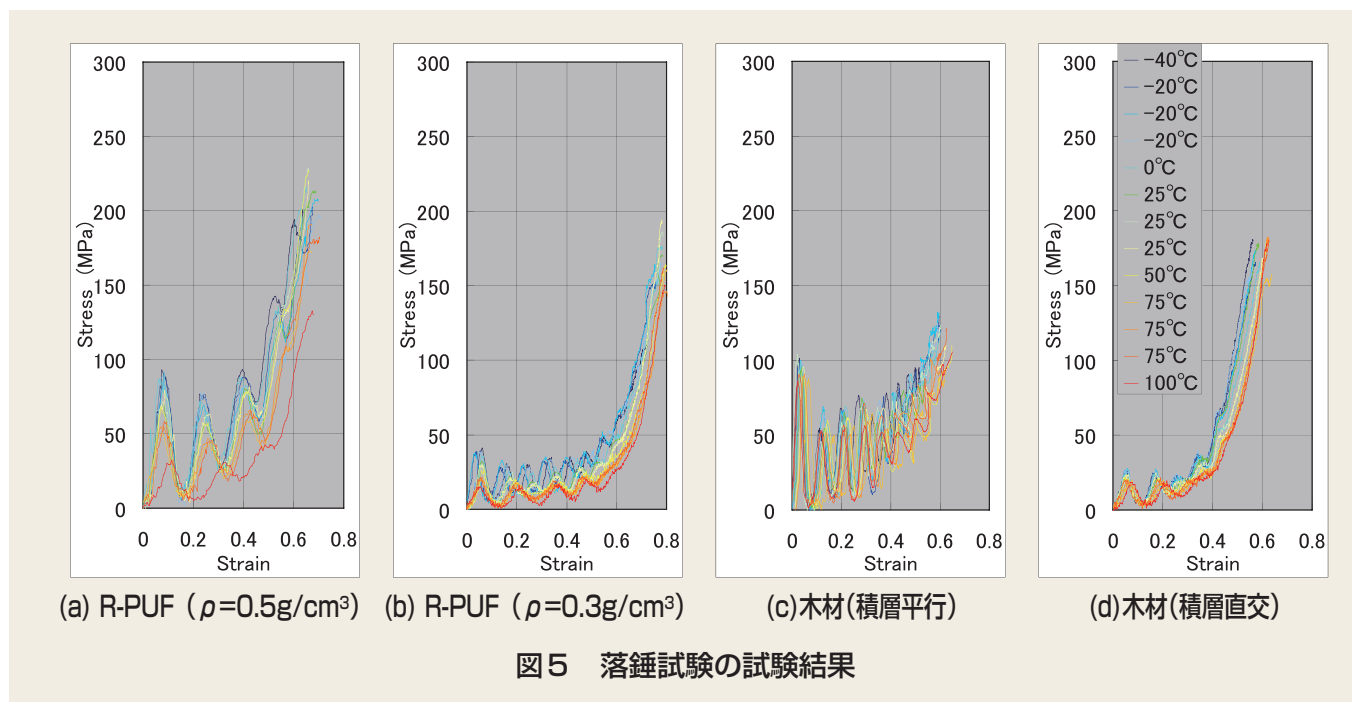


図5 落錘試験の試験結果

試験片の変位挙動は衝突板と重錘の変位より求める。すなわち、重錘と衝突板との変位差を試験体の変位とし、初期寸法との比をもってひずみとする。また、架台に設置したロードセルで衝撃荷重を計測し、その値を試験片の初期断面で割ることで応力を求める。この二つの値を用いて応力-ひずみ線図を作成する。

**2.3 実験結果** 落錘試験より得られた各ケースの動的な圧縮特性（応力-ひずみ線図）を図5に示す。いずれの試験結果においても、応力が増大せずにひずみ値のみ大きくなる挙動（緩衝材が有効に働く領域）を経た後、ひずみの増加に比べて急激に応力が上昇する（緩衝材としての機能損失）。密度が大きなタイプのR-PUFほど、緩衝材が有効に働く領域の応力値は高くなるが、低いひずみ値、すなわち小さな変形で緩衝機能を損失する。また、R-PUFおよび木材とも、

温度が高くなるほど緩衝領域での応力値が低くなる傾向にある。

$\rho=0.3\text{g/cm}^3$ のR-PUFを木材（積層直交）と比較すると、緩衝材の有効に働く領域の応力値は同等であるが、緩衝性能を損失するひずみ値は大きくなっており、より優れた緩衝性能を有している。また、 $\rho=0.5\text{g/cm}^3$ のR-PUFに着目すると、木材（積層平行）と比較して、密度が10%ほど小さいものの、緩衝材が有効に働く領域の応力値はほぼ同等の値となっている。

以上のことより、R-PUFのキャスク用緩衝体の使用温度条件範囲内における動的な圧縮特性を取得したところ、R-PUFは従来材であるファープライウッド（積層平行、積層直交）と比較して、より優れた緩衝性能を有している。

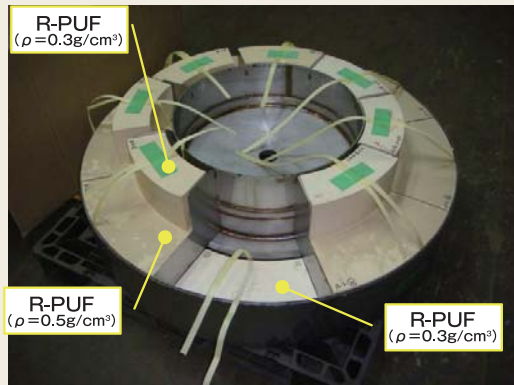
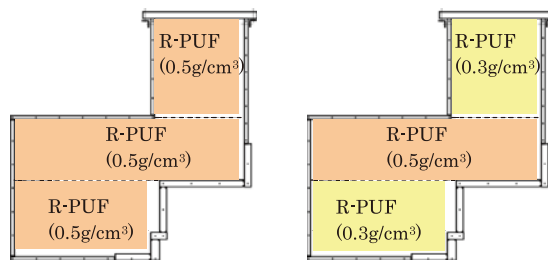


図6 緩衝体内部のR-PUF  
ブロック配置状況(Type B)



(a) Type A (b) Type B  
図7 緩衝体内部のR-PUF密度組合せ

### 3. 1/3スケールモデルの落下試験

**3.1 試験体** R-PUF緩衝体の緩衝性能を確認するため、1/3スケールの緩衝体（緩衝体形状に成形したR-PUFブロックをステンレス鋼板でカバーする構造）を製作した。図6にステンレス鋼板で覆う前の緩衝体内部R-PUFブロックの配置状況を示す。

本研究で選定した緩衝材R-PUFは、密度を変化させることで、その圧壊特性をコントロールすることができる。そのため、異なる密度タイプのR-PUFを組み合わせることで、より優れた緩衝性能を持つ緩衝体の製作が可能となる。そこで、図7に示す2パターンの密度の組合せから構成される1/3スケールの緩衝体を製作した。すなわち、Type Aは $\rho=0.5\text{g}/\text{cm}^3$ のR-PUFのみから構成される。一方、Type Bは $\rho=0.3\text{g}/\text{cm}^3$ のR-PUFと $\rho=0.5\text{g}/\text{cm}^3$ のR-PUFの組合せで構成され、キャスクが水平姿勢で落下する際に最も潰れる領域に密度の低いR-PUFを採用している。

両タイプの緩衝体を、図8に示すBWR燃料69体収納の輸送貯蔵キャスクを模擬した落下試験体に装着し、落下試験を実施することで、その緩衝性能を確認する。なお、落下試験体の寸法は、容器と緩衝体の外径は0.8mと1.2m、緩衝体を含む全長は2.2mで、重量は約5トンである。バスケットおよび燃料棒は重量と外寸法を合わせた模擬体としている。



図8 落下試験体

**3.2 試験方法および計測方法** 落下試験は、IAEA規則<sup>(9),(10)</sup>に従って、当社技術研究所内の落下試験場で実施した。試験状況を図9に示す。落下試験は、クレーンで所定の高さ（ターゲット上面から試験体下端までの距離が9m）まで試験体を吊上げた後、落下させた。衝突のターゲットは、3.5m×3.5m、板厚40mmの鋼板を上面に敷いた厚さ3mのRC製ブロックである。

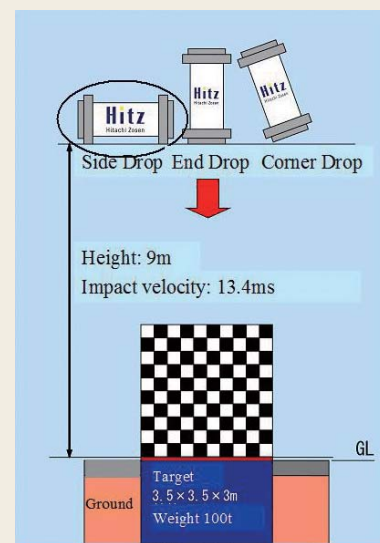


図9 9m落下試験状況(水平落下)

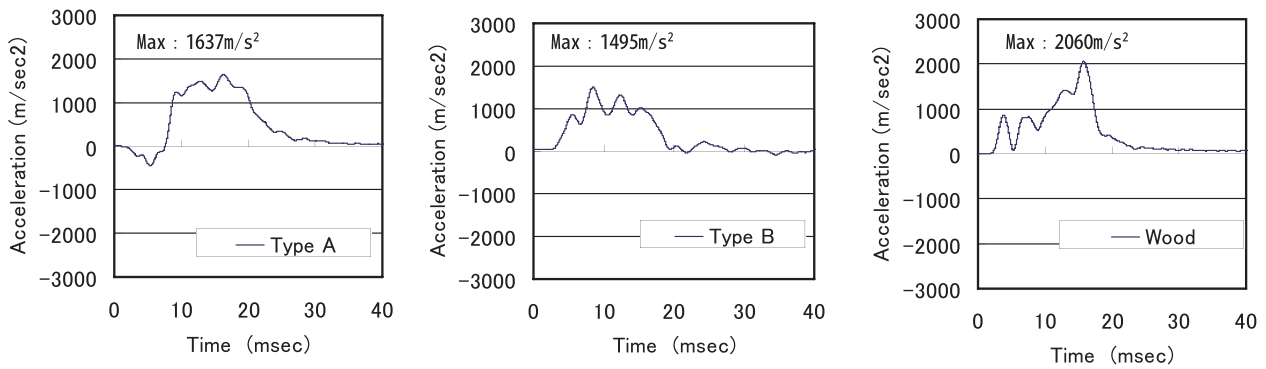


図10 キャスク本体蓋側の加速度の時刻歴応答

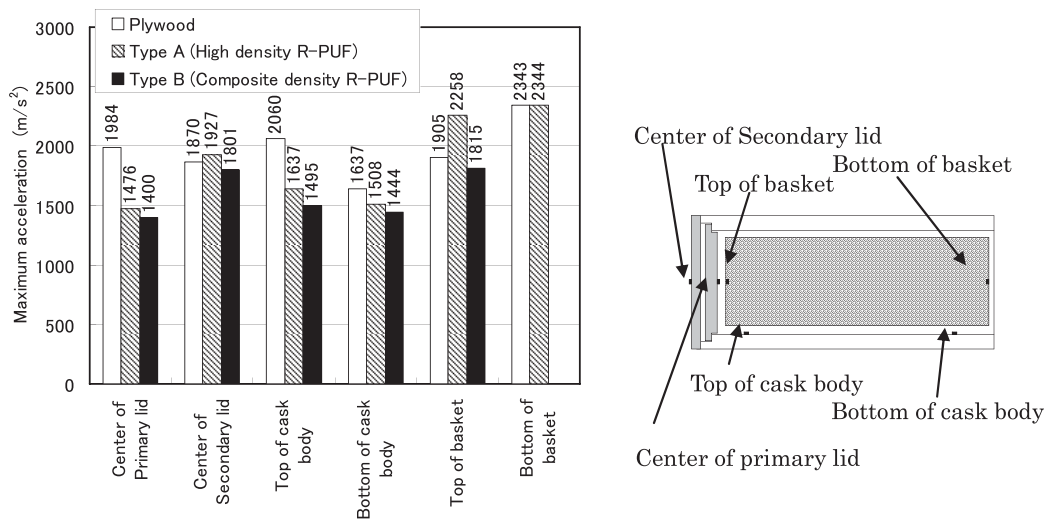
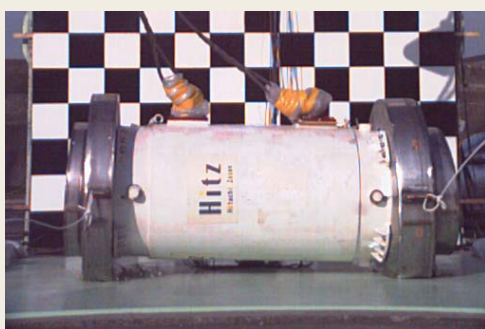
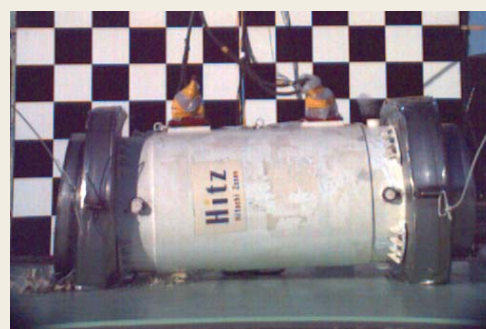


図11 各計測点における衝突加速度の最大値



(a) Type A



(b) Type B

図12 落下試験体の衝突状況(最も緩衝体が変形した瞬間)

計測項目は、一次蓋中央部、二次蓋中央部、キャスク本体の蓋側および底側、重量模擬体の蓋側および底側の合計6点に加速度ピックアップを取り付け、サンプリング周波数50kHzで計測した。また、試験体がターゲットに衝突する瞬間を高速カメラでも撮影し、その破壊状況を詳細に観察する。

**3.3 試験結果** 各ケースのキャスク本体蓋側の加速度の時刻歴応答を図10に示す。Type Aの緩衝

体を装着して試験体を9m高さから自由落下させると、キャスク本体に最大で1637m/s<sup>2</sup>の加速度が発生する。一方、Type Bの緩衝体を装着した場合には、1495m/s<sup>2</sup>の最大加速度となり、R-PUF密度を組み合わせた緩衝体の方がより、キャスク本体への衝撃加速度を低減させている。

また、木材緩衝体を装着した落下試験結果と比較するため、2004年に実施の緩衝材に木材を使用した

1/3スケール落下試験結果<sup>(11)</sup>も図10に示す。木材緩衝体を装着した場合のキャスク本体の最大加速度は、2060m/s<sup>2</sup>であり、R-PUF緩衝体を装着した場合より、20～30%ほど高い衝撃加速度が発生している。キャスク本体蓋側以外の計測点（一次蓋中央、二次蓋中央、キャスク本体底側、重量模擬体）の最大加速度をまとめて図11に示すが、いずれの計測点においても、この傾向は変わらず、R-PUF緩衝体の方が木材緩衝体よりもキャスクに発生する衝撃加速度を低減させる。

また、Type AとType Bの結果を比較すると、いずれの計測点においても、Type Bの緩衝体の方がキャスク本体に発生する加速度を低減させており、優れた緩衝効果を有している。これは、水平姿勢の落下時において最も緩衝材が潰れる領域に、変形しやすい $\rho = 0.3\text{g/cm}^3$ のR-PUFを効果的に配置したためと考えられる。図12に試験体がターゲットに衝突し、緩衝体をもっとも変形した瞬間の状況を示す。緩衝性能に優れたType Bの方が、より大きく変形しているが、両ケースともキャスク本体のターゲットへの衝突は生じなかった。

以上のことから、R-PUF緩衝体の緩衝性能は、木材緩衝体よりも優れていることを確認した。また、R-PUFの密度を組み合わせることで、さらに緩衝性能を向上させられることを確認した。

## 4. 耐燃焼性試験

**4.1 試験体** キャスク用の緩衝体には、緩衝性能のみならず、キャスクが火災事故に遭遇した場合を想定して、耐燃焼性能も要求される。すなわち、緩衝体から付加的な入熱がキャスク本体に伝わらない設計としており、火災時に緩衝体自身に着火して

も火災後は消える自己消火性、着火しても燃焼が十分遅く消火後でも緩衝材が残存している難燃性、および燃焼熱をキャスク本体に伝えない断熱性が求められる。そこで、R-PUFの耐燃焼性能を検討するため、 $\rho = 0.5\text{g/cm}^3$ のR-PUF、 $\rho = 0.3\text{g/cm}^3$ のR-PUF、および木材を対象とした耐燃焼性試験を実施した。

試験体の詳細を表2に示す。R-PUFおよび木材とも、400mm×400mm×400mmの立方体形状に成形し、実機キャスクの緩衝体を想定して、ステンレス鋼板で覆った。火災事故時に加熱が想定される2面（上面、前面）は実機緩衝体のカバープレートと同等の板厚6mmのSUSで製作した。断熱条件が想定される残りの4面では板厚3.2mmのSUS鋼板とし、その周囲に断熱材を設置した。また、缶体は、キャスク落下試験のうち貫通試験による損傷を模擬した $\phi 150$ の孔を上面に設けた。

**4.2 試験方法** IAEAで定める火災事故を想定した条件、すなわち試験体を800℃雰囲気の下で30分間保持する<sup>(9)・(10)</sup>ことで、その耐燃焼性を確認する。800℃までの雰囲気温度の加熱には、図13に示す簡易電気炉を使用した。電気炉の寸法は2m×2m×3mで、試験体をスムーズに投入・取り出せるようレール、台車を設置し、また、試験体投入による炉内温度低下を防ぐために、扉寸法は必要最小限（約1m×1m）とした。さらに、試験体投入後に、速やかに炉内雰囲気温度を800℃に復帰できるように、ヒータを4面に設置した。可燃ガスの発生で内圧が高まることを防ぎ、炉内空気を流すために、吸気孔（下方）と煙突（上方）を設置した。

温度の計測点は、炉内雰囲気、SUS板の背面（実機緩衝体ではキャスク本体に接する面。断熱想定面）および試験体内部（R-PUFおよび木材の内部、深さ



(a) 炉の全景

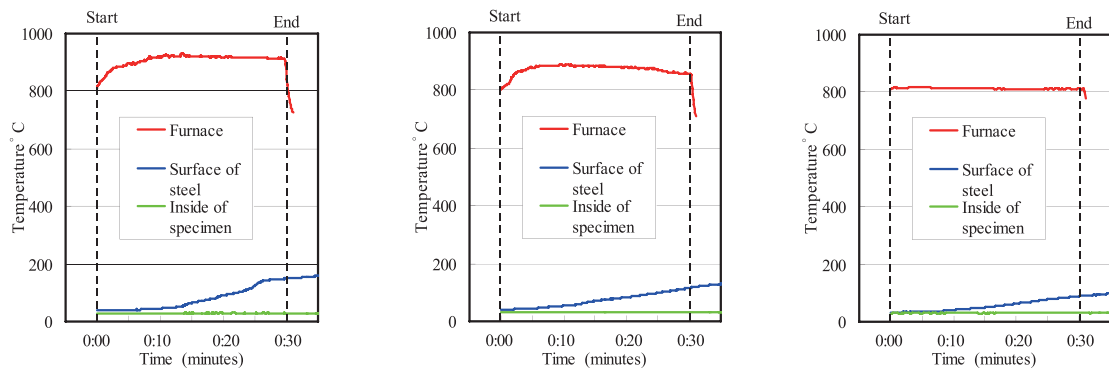
(b) 試験体投入用のレール

(c) ヒータの設置状況

図13 簡易電気炉

表2 耐燃焼性試験の試験ケース

Type of Test specimen	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Size of Test specimen	Thickness of cover plate	Structure of test specimen
High density R-PUF	0.52	400mm x 400mm x 400mm	Heated wall : 6mm	
Middle density R-PUF	0.31		Insulated wall : 3.2mm	
Wood	0.54			

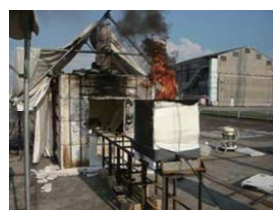


(a) R-PUF ( $\rho=0.5\text{g/cm}^3$ ) (b) R-PUF ( $\rho=0.3\text{g/cm}^3$ ) (c) 木材

図14 炉内投入時の温度の時刻歴(800°C、30分間)



↓ 12分後



↓ 8分後



↓ 3分後



炉から取出した直後の状況

鎮火状況

(a) R-PUF ( $\rho=0.5\text{g/cm}^3$ ) (b) R-PUF ( $\rho=0.3\text{g/cm}^3$ )

(c) 木材

図15 耐燃焼試験

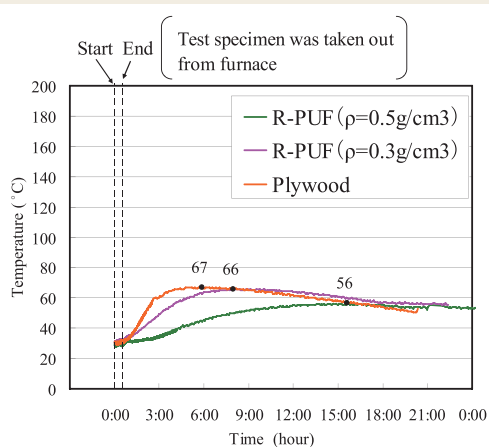


図16 試験体取出し後の温度の時刻歴

200mm) の3点で計測した。

**4.3 試験結果** 各試験体の炉に投入してから取出すまでの温度の時刻歴を図14にまとめる。全ての試験体において、炉内に試験体投入直後に、上面のφ150mm穴から発火した。炉内雰囲気温度800°Cで保持している間の試験体内部(深さ200mm)の温度に着目すると、 $\rho=0.5\text{g/cm}^3$ のR-PUF、 $\rho=0.3\text{g/cm}^3$

のR-PUF、および木材とも、40°C以下となっており、いずれの試験体も内部に熱を伝えておらず、表面は発火しても中心部では有意な温度上昇が見られない。

30分後に炉から取出した際の状況を図15に示す。いずれの試験体も上面φ150mmの孔から火炎が見てとれる。しかし、30°Cの外気に放置して観察したところ、木材試験体は3分後に、 $\rho=0.3\text{g/cm}^3$ のR-PUFは8分後に、また、 $\rho=0.5\text{g/cm}^3$ のR-PUFは12分後に自然に鎮火した。R-PUFの試験体は、木材と比較して、自然鎮火するのに時間が掛かるものの、十数分以内に鎮火する。

試験体取出し後の試験体内部温度の時刻歴を図16に示す。炉内加熱時にはどの試験体も中心温度は炉内と投入時と大きく変わらず、取出し後にゆるやかに上昇していく。ピーク温度は $\rho=0.5\text{g/cm}^3$ のR-PUFが56°C(取出し後15.5hour経過)、 $\rho=0.3\text{g/cm}^3$ のR-PUFが66°C(取出し後8hour経過)、木材が67°C(取出し後6hour経過)であった。そして、全試験終了後に、加熱前後の試験体質量を計測することで、それぞれの試験体の残存率を算出したところ、 $\rho=0.5\text{g/cm}^3$ のR-PUFが80%、 $\rho=0.3\text{g/cm}^3$ のR-PUFが72%、木材が

91%であった。R-PUFは木材より難燃性が若干劣るものの、十分な残存率を有している。

以上のことより、800℃雰囲気で30分間加熱されていても、R-PUFおよび木材とも、内部温度は40℃以下(断熱性)であり、十数分以内に自然鎮火(自己消化性)し、さらに70%以上の残存率(難燃性)を持っている。すなわち、キャスク用緩衝体として、十分な耐燃焼性能を有していることを確認できた。

## 5. 結 言

本研究では、新型のキャスク用緩衝体として、その緩衝材にR-PUFを選定し、適用可能性を評価するため、緩衝性能および耐燃焼性能に着目した実験を実施した。本論文より得られる主な知見は以下のとおりである。

- 落錘試験結果より、R-PUFのキャスク用緩衝体の使用温度条件の範囲内における動的な圧縮特性を取得した。また、R-PUFは従来材であるファープライウッド(積層平行、積層直交)と比較して、より優れた緩衝性能を有している。
- 1/3スケールモデルの9m落下試験より、R-PUF緩衝体の性能は、木材緩衝体よりも優れており、水平落下時にキャスク本体に発生する衝撃加速度を20～30%低減させられる。また、R-PUFの密度を組み合わせることで、さらにR-PUF緩衝体の性能を向上させられる。
- 耐燃焼性試験より、800℃雰囲気で30分間加熱されていても、R-PUFおよび木材とも、内部温度は40℃以下(断熱性)であり、十数分以内に自然鎮火(自己消化性)し、さらに70%以上の残存率(難燃性)を持っている。すなわち、十分な耐燃焼性能を有していることを確認できた。

## 参考文献

- (1) A.Onodera, et.al, The HZ-75T spent fuel shipping cask, 5th International Symposium on Packaging and Transportation of Radioactive Materials, May 1978.
- (2) N.Niomura, et.al, Fabrication Experience of HZ-75T Spent Fuel Shipping Cask, 6th International Symposium on Packaging and Transportation of Radioactive Materials, Nov. 1980.
- (3) 有富正憲ほか：リサイクル燃料資源の確かな安

全備蓄に向けて 使用済み燃料中間貯蔵の現状と対策、日本原子力学会誌、2006、Vol.48、No.9、pp.637-660。

- (4) 谷川雅之ほか：輸送・貯蔵キャスクの落下衝撃試験、日立造船技報、2004、65 (1)、30-33。
- (5) J. Okada et al. : Investigation of Drop Impact Behavior of Cask Using Rigid Polyurethane foams as shock absorbing materials, PATRAM2007,Miami,USA ,2007.
- (6) 岡田 潤ほか：緩衝材にR-PUFを用いたキャスクの落下衝撃挙動に関する検討、日立造船技報、2008、68 (2)、22-25。
- (7) J. Okada et al.; Investigation of Availability of Rigid Polyurethane Foam as Shock Absorbing Material for Heavy Cask,PATRAM2010, London, UK, 2010.
- (8) Y. Sakamoto et al. :Experimental Study of Homogen Process for Lead-Type Multi Layer Cask and Applicability of R-PUF for Shock Absorbing Material, GLOBAL2011, Makuhari, Japan, 2011.
- (9) IAEA: Safety Standards Series No.TS-R-1, Regulations for the Transport of Radioactive Material, 2005 Edition.
- (10) IAEA: Safety Standards Series No.TS-G-1.1 (Rev.1), Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, 2008.
- (11) H.Tobita and K. Araki: Containment Performance of Transportable Storage Casks at 9m Drop Test. PATRAM2004, Berlin, Germany, 2004.

### 【文責者連絡先】

Hitachi日立造船(株) 事業・製品開発本部  
技術研究所 機械・インフラ研究室  
岡田 潤  
Tel : 06-6551-9692 Fax : 06-6551-9086  
e-mail : okada\_j@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation  
Business & Product Development Headquarters  
Technical Research Institute  
Machinery & Infrastructure Laboratory  
Jun Okada  
Tel : +81-6-6551-9692 Fax : +81-6-6551-9086  
e-mail : okada\_j@hitachizosen.co.jp



岡田 潤



芦田 史史



大岩 章夫