

(技術資料)

# 高性能中性子遮へい体 *kobesh*®

## Kobe Steel's Highly Effective *kobesh*® Neutron Shield



赤松博史\*  
Hiroshi Akamatsu



谷内廣明\*(工博)  
Dr. Hiroaki Taniuchi



萬谷健一\*  
Kenichi Mantani

Recently, the management, transport and storage of spent fuels from the nuclear power reactors has become more and more important. A highly effective neutron shield called *kobesh* has been developed by Kobe Steel to improve safety and the overall economic management of spent fuel transport and management. This paper explains the technical characteristics of *kobesh*.

まえがき = 原子力発電所では、エネルギーの有効利用の観点から燃料の高燃焼度化が進んでおり、これに伴い原子力発電所での燃焼を終えた使用済燃料の中性子源強度や発熱量が高くなる傾向にある。

一方、これらの使用済燃料は、我国の場合原子力発電所内のプール貯蔵施設で一定期間保管、冷却された後、現在青森県に建設中の使用済燃料再処理施設や貯蔵施設に輸送されるが、この使用済燃料の輸送や貯蔵に使用される輸送キャスクと貯蔵キャスクには、経済性とリスク低減の観点から、収納効率が高くコンパクトな設計が要求される。使用済燃料の高燃焼度化に伴う中性子線源強度の増加は、輸送キャスクや貯蔵キャスクの遮へいの増強、また発熱量の増加は構成材料の高温化をもたらす。このため、輸送キャスク及び貯蔵キャスクの収納効率を高め、コンパクトな設計とするには、中性子遮へい材の遮へい性能及び耐熱性能の高性能化が望まれている。

このような背景を踏まえ、従来のキャスク用中性子遮へい材に比べて中性子遮へい性能に優れ、耐熱性の高い高性能中性子遮へい材として *kobesh* を開発した。

### 1. *kobesh* のラインアップ

*kobesh* は、主原料の種類から Silicone rubber base タイプ、Polypropylene base タイプ、Ethylene propylene rubber base タイプ及び Titanium hydride base タイプの4種類に大別される。表1に *kobesh* のラインアップ、写真1に *kobesh* の外観写真を示す。

#### 1.1 Silicone rubber base *kobesh*

新たに開発した室温硬化タイプのシリコンゴムに、水酸化アルミニウムや水素化チタンを配合した中性子遮へい材である。シリコンゴムは硬化する前には優れた流動性があり、複雑な部位に容易に鑄込むことができるとともに、あらかじめ型枠に鑄込み成型して輸送キャスク及び貯蔵キャスクの所定の位置に組込むことが可能である。

また、シリコンゴム中に水素化チタン及び水酸化アルミニウムを配合することで、高い水素含有量を確保している。従来のシリコンゴムは水素含有量が  $4.0 \sim 4.5 \times 10^{22} \text{atoms/cm}^3$  程度であったが、本中性子遮へい材料は、水素含有量を  $5.5 \times 10^{22} \text{atoms/cm}^3$  程度まで高めるこ

表1 *kobesh* のラインアップ

Table 1 *kobesh* lineup

Type	Silicone rubber base		Polypropylene base		Ethylene propylene rubber base		Hydrogen titanium base
	SR-O	SR-T	PP-O	PP-R	EP-O	EP-R	
Series	SR-O	SR-T	PP-O	PP-R	EP-O	EP-R	TH-O
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.4 ~	1.4 ~ 1.9	0.9 ~	0.9 ~ 1.3	1.05 ~	1.1 ~ 1.4	2.6 ~ 3.7
H-Content (max. atoms/cm <sup>3</sup> )	$5.0 \times 10^{22}$	$5.5 \times 10^{22}$	$7.7 \times 10^{22}$	$7.6 \times 10^{22}$	$6.1 \times 10^{22}$	$6.4 \times 10^{22}$	$8.9 \times 10^{22}$
B-Content	Variable	Variable	Variable	Variable	Variable	Variable	Variable
Thermal stability for long use (°C)	170	170	120	120	150	150	300
Fabrication method	Pouring pre-shaped	Pouring pre-shaped	Pre-shaped	Pre-shaped	Pre-shaped	Pre-shaped	Pre-shaped
Remarks			Used in fire protecting cover		Used in fire protecting cover		

\*エンジニアリングカンパニー エネルギー本部 高砂機器工場



SR series *kobesh*



PP series and EP series *kobesh*



TH-O series *kobesh*

写真 1 *kobesh*  
Photo 1 *kobesh*

とができ、従来材に比べ優れた中性子遮へい性能を確保している。また、水酸化アルミニウムを配合することにより、火災にさらされた場合の自己消火性も高まっている。

本中性子遮へい材料は、優れた耐熱性、耐火性、広い温度範囲での機械的性質の安定性を有する。

また、炭化ほう素を添加することで、中性子遮へい材が中性子を遮へいする際に (n,  $\gamma$ ) 反応で放出される二次ガンマ線を低減している。

#### 1.2 Polypropylene base *kobesh*

本中性子遮へい材の主な原料は、耐熱性ポリプロピレンである。ほかの *kobesh* に比べ耐熱性で若干劣るものの、ポリプロピレンはポリマ自体に水素を多く含有しており、本中性子遮へい材も  $7.7 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup> という高い水素含有量となっている。

また、ポリプロピレンは、その密度が 0.9g/cm<sup>3</sup> 程度で非常に軽く、輸送キャスク及び貯蔵キャスクの軽量化に有効である。

Silicone rubber base *kobesh* と同様に、炭化ほう素あるいは窒化ほう素を添加することで、中性子遮へい材が中性子を遮へいする際に (n,  $\gamma$ ) 反応で放出される二次ガンマ線を低減している。

#### 1.3 Ethylene propylene rubber base *kobesh*

本中性子遮へい材の主な原料は、水素含有量が高く、耐熱性や機械的性質に優れたエチレンプロピレンゴムである。エチレンプロピレンゴムベースの *kobesh* は、水素含有量が最大で  $6.7 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup> まで添加することが可能である。

本材料についても Silicone rubber base *kobesh* と同様に、炭化ほう素あるいは窒化ほう素を添加することで中性子遮へい材が中性子を遮へいする際に (n,  $\gamma$ ) 反応で放出される二次ガンマ線を低減しており、難燃剤を配合することで耐火性を確保している。

#### 1.4 Titanium hydride base *kobesh*

本中性子遮へい材の主な原料は、水素含有量が高く、熱的安定性に優れた水素化チタンの粉末である。本中性子遮へい材はこの粉末を高温でプレスすることにより、水素含有量を  $8.9 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup> まで高めることが可能である。

## 2. *kobesh* の特徴

輸送キャスク及び貯蔵キャスクには、内部に収納する

使用済燃料から放出される中性子を適切に遮へいするために、中性子遮へい材を配置する必要がある。図 1 に貯蔵キャスクの構造を示す。堅固な鍛造炭素鋼で密封容器を構成し、その周囲に中性子遮へい材を配置する構造である。

また、使用済燃料の発熱により中性子遮へい材部の温度が 100 ~ 150 程度に上昇するため、この温度に耐える必要がある。特に貯蔵キャスクの場合には、数十年間上記程度の温度環境に中性子遮へい材がさらされるため、通常の高分子材料では劣化が進むという問題点がある。

*kobesh* は輸送キャスク及び貯蔵キャスクの中性子遮へい材として、非常に優れた特徴をもつばかりでなく、輸送キャスク及び貯蔵キャスク用の用途以外にも、原子力発電所や再処理施設での中性子線環境における中性子遮へい材料として優れた特徴を備えた材料として当社が開発したものである。

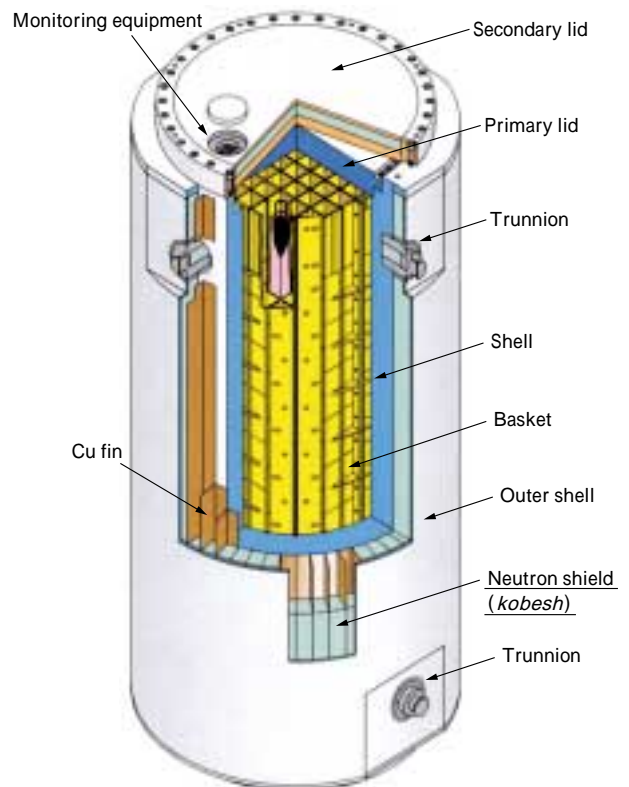


図 1 TK 型輸送貯蔵キャスク  
Fig. 1 TK type transport/storage cask

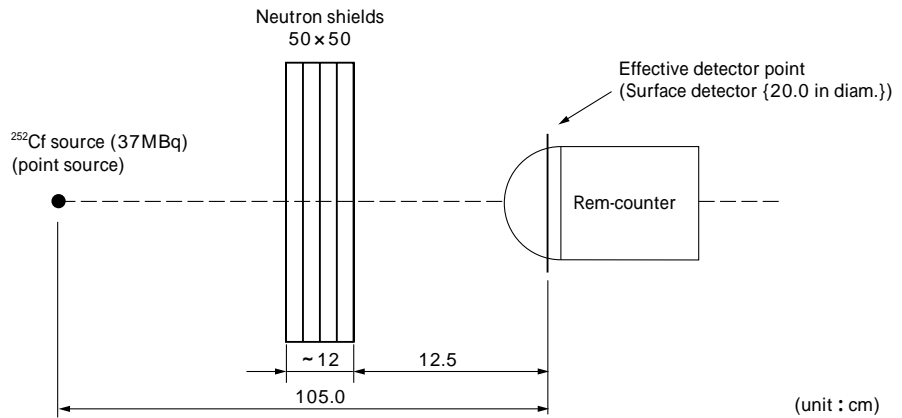


図2 中性子遮へい性能試験（材料単体）  
Fig. 2 Shielding performance test (shielding material only)

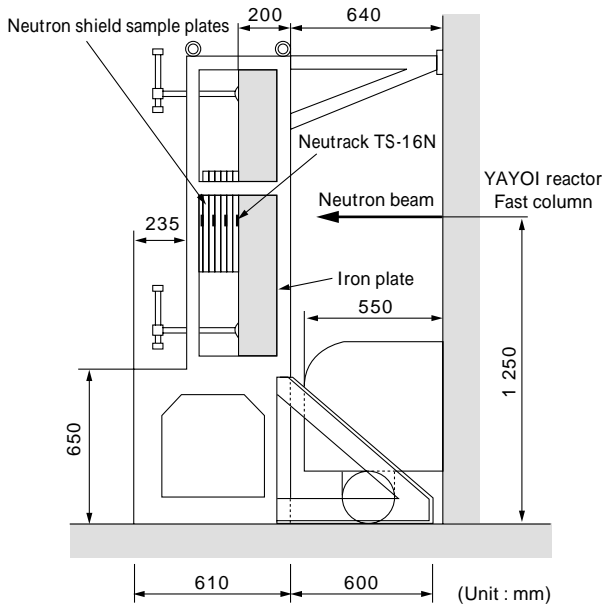


図3 中性子遮へい性能試験（輸送キャスク、貯蔵キャスクの体系）  
Fig. 3 Shielding performance test (transport/storage cask shielding structure)

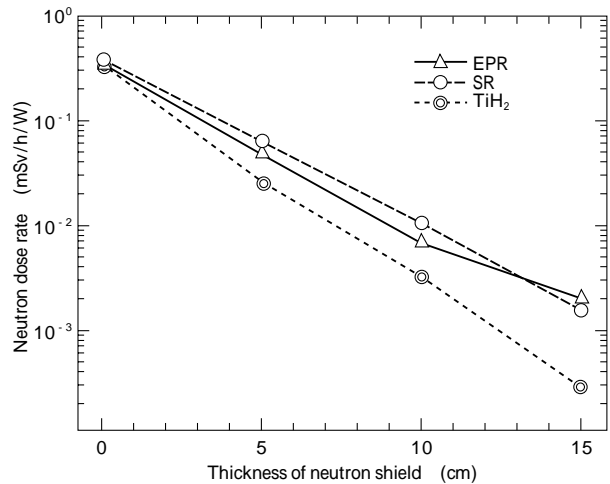


図5 中性子遮へい性能試験結果（輸送キャスク、貯蔵キャスクの体系）  
Fig. 5 Shielding performance test result (transport/storage cask shielding structure)

ガンマ線を低減するためにほう素を効率的に配合している。これにより、輸送キャスク、貯蔵キャスクの使用済燃料の収納効率が増加する。

*kobesh* の開発にあたっては、材料単体での遮へい性能試験、輸送キャスク及び貯蔵キャスクの遮へい体系を模擬して鋼板と組合わせた状態での遮へい性能試験を実施し、中性子遮へい性能を確認している。

これらの試験の概要を図2<sup>1)</sup>及び図3<sup>1)</sup>、試験結果を図4<sup>1)</sup>及び図5<sup>1)</sup>に示す。図4は、図2に示す方法で材料そのものの遮へい性能を確認した試験の結果であり、4種類の *kobesh* それぞれの単体の中性子線に対する遮へい性能に関するデータを取得したものである。図4に示すように、4種類の *kobesh* とともに一般的な中性子遮へい材である水よりも優れた遮へい性能を有し、試験結果と解析結果も非常に良く一致している。図5は、図3に示す方法で鋼とともに使用される実機と同じ体系で遮へい性能を確認した試験の結果であり、これらのデータから、実機の遮へい体系での高精度な解析が可能となった。

## 2.2 高温環境での長期間の耐熱性

すべての *kobesh* は、輸送キャスク及び貯蔵キャスクに収納する使用済燃料の発熱による高温環境に耐えるように開発している。また、貯蔵キャスクに使用する場合には、数十年間にわたり常に高温環境にさらされるため、

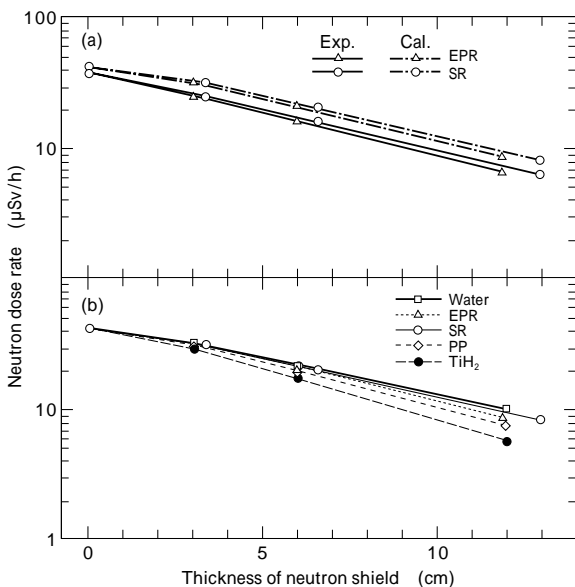
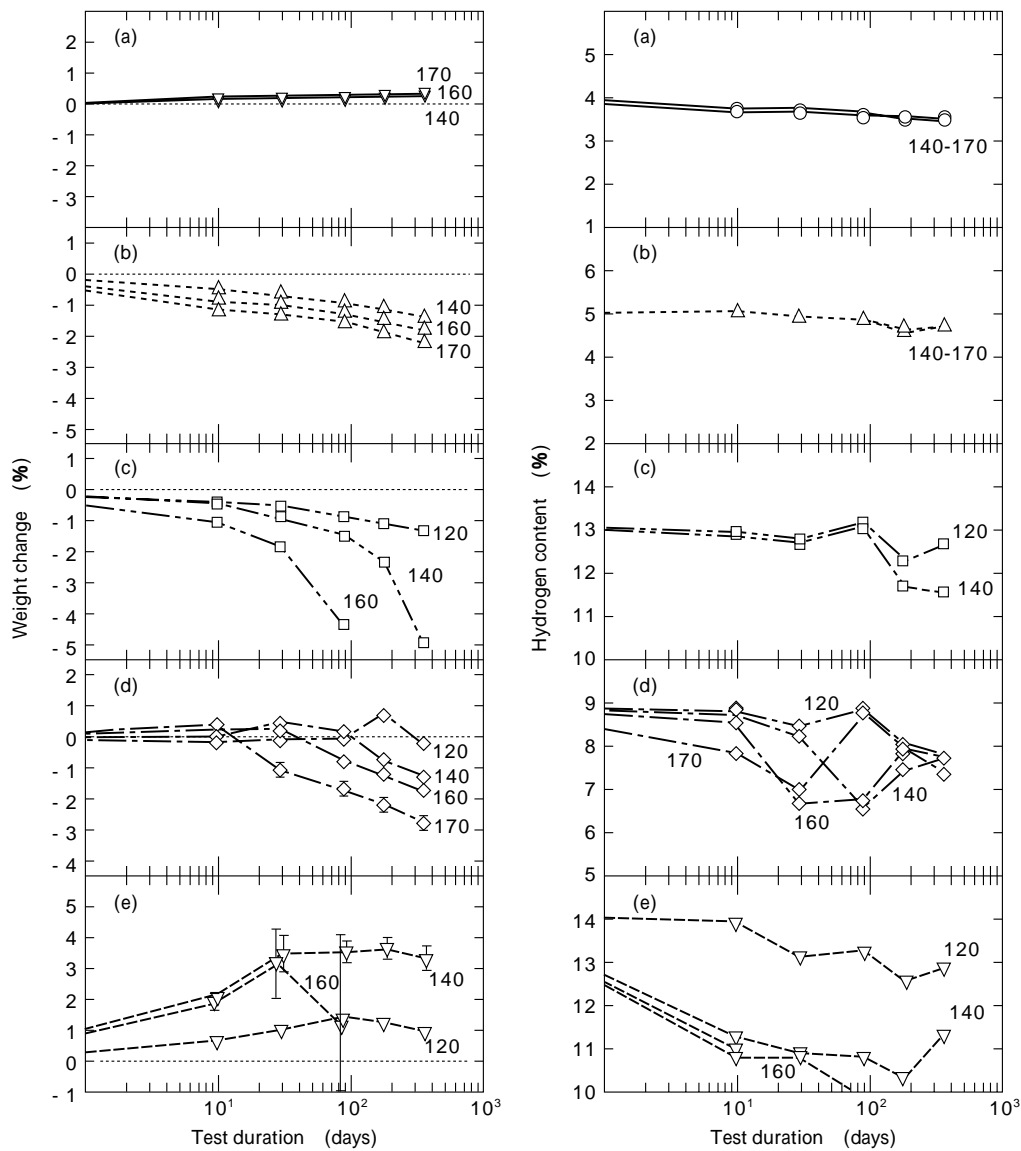


図4 中性子遮へい性能試験結果（材料単体）  
Fig. 4 Shielding performance test result (shielding material only)

## 2.1 優れた中性子遮へい性能

すべての *kobesh* は、中性子線の遮へい効率を高めるために、従来の中性子遮へい材に比べ水素含有量を高め、また中性子が遮へいされる際に放出される二次



(a) Titanium hydride type, (b) Silicone rubber type,  
 (c) Polypropylene, (d) Ethylene propylene rubber type,  
 (e) Polyethylene  
 • Numbers shown in the figures mean ambient air temperature.

図6 長期高温保持試験による熱劣化  
 Fig. 6 Thermal degradation data by long term heat resistance test

1年間にわたる高温保持試験により、材料の遮へい性能の劣化を評価し、許容温度を設定している。試験結果を図6<sup>2)</sup>に示す。

この試験結果から、以下に示すアレニウス則<sup>3)</sup>による外挿評価を行い、使用期間での重量減損などの材料の劣化を予測し、中性子遮へい材としての長期間の使用制限温度を設定している。

$$\ln(t) = A + E/RT \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $t$  : 使用期間

$A$  : 定数

$E$  : 活性化エネルギー (J/mol)

$R$  : ガス定数 (J/mol/K)

$T$  : 温度 (K)

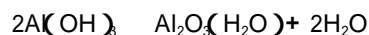
評価例を図7に示す。この結果より、輸送キャスクとして年間150日間輸送し、20年程度の使用を考えた場合、Silicone rubber base *kobesh* は約170、Ethylene

propylene rubber base *kobesh* は150、Polypropylene base *kobesh* は約120の高温での使用が可能であることがわかる。

### 2.3 耐火性

輸送キャスク及び貯蔵キャスクの中性子遮へい材は、火災事故に遭遇した場合、材料が難燃性であることまたは自己消火性があることが要求される。

水酸化アルミニウムは、200以上の高温では以下の反応により水分を解離し、この水分が材料の燃焼継続を止める。



シリコンゴムベースの *kobesh* は、シリコンゴム単体でも十分な自己消火性を持つが、水酸化アルミニウムを配合してさらに自己消火性を高めている。

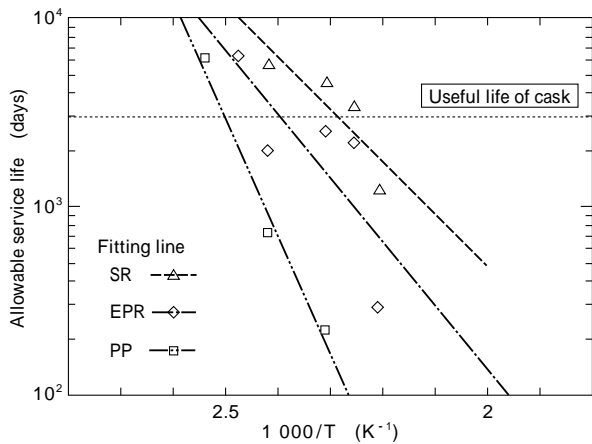


図7 *kobesh* の寿命評価  
 Fig. 7 Evaluation of allowable service life for *kobesh*

そのほかの *kobesh* は、それぞれの材料に適した難燃剤を配合することで難燃性を確保している。

むすび = 近年、各国で原子力発電のバックエンド対策として、使用済燃料の輸送や中間貯蔵などの管理がますます

重要になりつつある。本報告で紹介した高性能中性子遮へい材 *kobesh* は、輸送や中間貯蔵に使用される輸送キャスク及び貯蔵キャスクの安全性を高めるだけでなく、使用済燃料の収納効率を上げることで経済性を向上させるものである。すでに *kobesh* は、日本国内のみならず、欧州や米国でも中性子遮へい材としての豊富な販売実績もあり、今後本分野での主要な材料として用途が期待される。

参考文献

- 1) H. Taniuchi: 京都大学博士論文, Study on Shielding Performance of Spent Fuel Transport and Storage Packages (1999), p.145.
- 2) T. Iida et al.: International Journal of Radioactive Materials Transport Vol.2 (1991), p.79.
- 3) 早川 浄, 高分子材料の寿命とその予測(1989), p.36. ㈱アイビシー.