

(解説)

使用済燃料中間貯蔵のためのTK-26型輸送貯蔵兼用容器

TK-26 Transport and Storage Packaging for Interim Storage of Spent Fuels



下条 純*1
Jun SHIMOJO



赤松博史*1
Hiroshi AKAMATSU



谷内廣明*2 (工博)
Dr. Hiroaki TANIUCHI



横江 大*2
Dai YOKOE

The safety requirements for the dry storage of spent fuel have become increasingly stringent. This change has led to the development of the TK-26 transport and storage package, based on its predecessor, the TN24. The TK-26 has a new structure that ensures greater safety, while maintaining a large fuel storage capacity and excellent economic advantage. The TK-26 structure features a borated aluminum basket that has been newly developed focusing on pressurized water reactor (PWR) fuels. This has enabled the designing of a new basket that is compact, ensures sub-criticality and has higher structural strength with sufficient heat transfer capability. The TK-26 structure also includes measures against the multiplying effect of impact acceleration by slap-down testing and the delayed impact of contents in vertical drop testing, including the 9m drop tests required by the regulations. The effectiveness of these measures has been confirmed through a drop test using a 1/3 scale model, which has verified the validity of the structural safety analysis. The demand for the transport and storage casks is expected to grow. A study is being conducted to standardize the design of the packages and thus to ensure the flexibility and stability of their supply.

まえばき = 原子炉から取り出された使用済燃料は一般的に、“キャスク”と呼ばれる容器により輸送あるいは貯蔵される。この容器は用途によって、輸送容器、貯蔵容器および輸送貯蔵兼用容器に分類される。日本国内では近年、使用済燃料を高い安全性を保持しながら乾式貯蔵することができ、かつ貯蔵後の輸送も可能な輸送貯蔵兼用容器の需要が高くなっている。

当社はこれまでに、鍛造タイプの容器（TK型容器シリーズ）をはじめとする様々なタイプの容器を開発してきた¹⁾。そのなかで、TK-26型輸送貯蔵兼用容器は最新の技術を用いて開発した鍛造タイプの容器であり、加圧水型軽水炉で使用された燃料集合体（PWR燃料）を26体収納することができる。ここでは、TK-26に採用した新しい技術と併せてこの容器の概要を紹介する。

1. TK型輸送貯蔵兼用容器の概要

1.1 開発の歴史

TK型容器は鍛造炭素鋼製の本体からなる鍛造タイプの容器であり、当社ではこれまでにいくつかのTK型容器を設計開発してきた。

TK型輸送貯蔵兼用容器は、1985年にTN Internationalと当社が共同開発したTN24輸送貯蔵兼用容器のプロトタイプ（PWR用）を原型としている。その後、TN24をベースにして国内で最初の乾式貯蔵容器（沸騰水型軽水炉（BWR）燃料用）を開発し、東京電力(株)福島第一原子力発電所において1995年より9基の使用済燃料の貯蔵に使用された。本乾式貯蔵容器の構成を図1に示す。な

お、東京電力(株)福島第一原子力発電所で運用されていた乾式貯蔵容器は、2011年の東日本大震災で津波の被害にあったにもかかわらず、容器の安全性が保持されていたことが確認されている。

最近では、燃料の収納効率をさらに高めた鍛造タイプの容器としてTK-69型輸送貯蔵兼用容器（図2）の開発を行った。この容器はBWR燃料用に開発したものであり、BWR燃料を69体収納可能である。

これらの設計をベースに、さらに安全性および経済性を高めた鍛造タイプの輸送貯蔵兼用容器として開発した

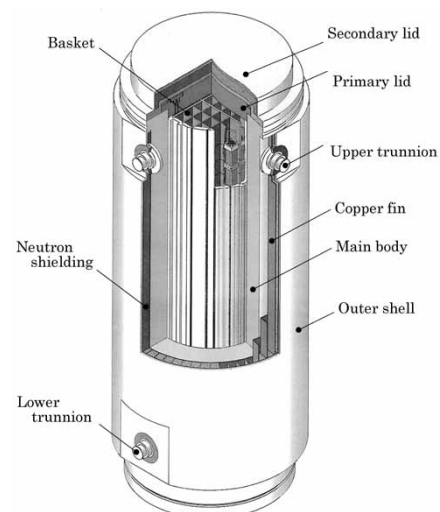


図1 東京電力(株)向け乾式貯蔵容器の構成
Fig. 1 Structure of dry storage packaging for Tokyo Electric Power Company

*1 機械事業部門 産業機械事業部 機器本部 機器工場 *2 トランスニュークリア株式会社

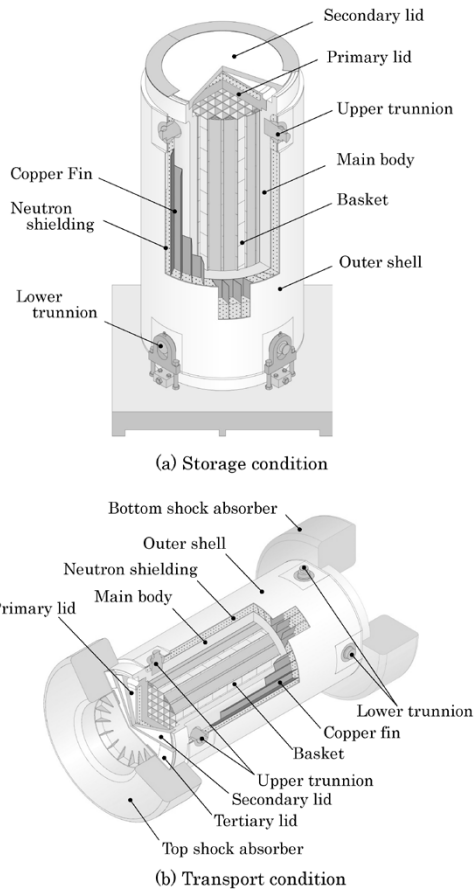


図2 TK-69型輸送貯蔵兼用容器の構成

Fig. 2 Structure of TK-69 type transport and storage packaging

表1 輸送貯蔵容器に対する安全機能要求

Table 1 Functional requirements of safety for transport and storage packaging

	Outline of functional requirements	Main components for satisfying functional requirements
(1)Heat removal	No forced heat removal of decay heat generated by spent fuels	Main body, outer shell, copper fin and basket composed of borated aluminum alloy
(2)Sealing (Containment)	Limiting leakage of radioactive materials of spent fuel	Main body, Lids and Gaskets of lids
(3)Shielding	Shielding gamma-ray and neutron emitted from spent fuel	Gamma-ray : Steel materials of main body, bottom and lids Neutron : Neutron shielding materials of lid, bottom and around main body
(4)Sub-criticality	Controlling fission reaction of spent fuel and maintaining sub-criticality	Basket composed of borated aluminum materials
(5)Structural integrity	Structural integrity for maintaining functional requirements (1) - (4)	Steel materials of main body, bottom and lids Shock absorbing covers for drop tests conditions

のがTK-26であり、2章で詳述する。

1.2 要求機能と基本構造

輸送貯蔵兼用容器には、貯蔵容器としての最長60年間にわたる安全機能の長期健全性に加えて、輸送容器としての安全機能の健全性が要求される。

具体的には、安全機能としては、①除熱機能、②密封機能、③遮蔽（しゃへい）機能および④未臨界^{注1）}維持機能であり、さらにこれらの安全機能を維持するため、貯蔵時の耐震性および輸送時の9m落下試験などに対する構造健全性が要求される。表1はこれらの安全機能に対する要求仕様および構造健全性についての概要をまと

脚注1）容器内に収納されている燃料が核分裂連鎖反応を起こさない安定な状態をいう。

めたものである。

当社の鍛造タイプの容器は、図1および図2に示すとおり共通の基本構造を有する。すなわち、鍛造炭素鋼からなる本体および蓋によって放射性物質を閉じ込めるとともに主にガンマ線を遮蔽し、その周囲に配置されたレジン材料によって主に中性子を遮蔽する。また、中性子遮蔽材の間に設置されている銅フィンによって除熱を促す構造である。

容器の内部には、ほう素添加アルミニウム合金からなる格子構造のバスケットが挿入されており、その格子内に燃料集合体が装荷される。バスケットの格子で使用済燃料の位置を保持するとともに、ほう素添加アルミニウム合金中のほう素10によって中性子を吸収することにより、容器の未臨界性を維持する構造である。

さらに、輸送時の事故を想定した設計条件として9m落下試験があり、落下した際の衝撃加速度を低減する目的で容器の上下部に緩衝体を設置している。

2. TK-26型輸送貯蔵兼用容器の特徴

TK-26は、上記のとおりTN24をはじめとする多くの乾式容器の設計、製造、運用の実績をベースとしながら、さらに進んだ輸送貯蔵兼用容器として開発したものである。経済的優位性を確保しながら、最高レベルの収納体数および高い安全性を有する新しい構造設計を採用している。

また、近年の輸送貯蔵兼用容器は、万一、貯蔵中あるいは貯蔵後に密封機能に異常が生じた場合でも安全な輸送を可能とする対応策として、輸送用三次蓋を使用することが主流になっている。TK-26も輸送時に三次蓋を用いる設計としている。

表2にTK-26の設計仕様の概要を示す。また、図3にTK-26の輸送状態の構成および図4にバスケットの外観を示す。

TK-26の大きな特徴の一つは、新たに開発したほう素添加アルミニウム合金を用いたPWR燃料用のバスケット構造である。この新材料を使用することにより、十分

表2 TK-26型輸送貯蔵兼用容器の設計仕様

Table 2 Design specifications for TK-26 transport and storage packaging

	Specification
1.Fuel	
(1)Fuel type	17×17 and 15×15
(2)Maximum burn up	48,000 MWd/tU
(3)Minimum cooling time	15 years
(4)Number of fuel loaded	26 assemblies
2.Design thermal power	20 kW/cask
3.Dimension	
(1)Storage condition	
Total length	5.1 m
Outer diameter	2.6 m
(2)Transport condition	
Total length	6.5 m
Outer diameter	3.5 m
4.Weight	
(1)Under storage	120 ton
(2)Under transport	132 ton

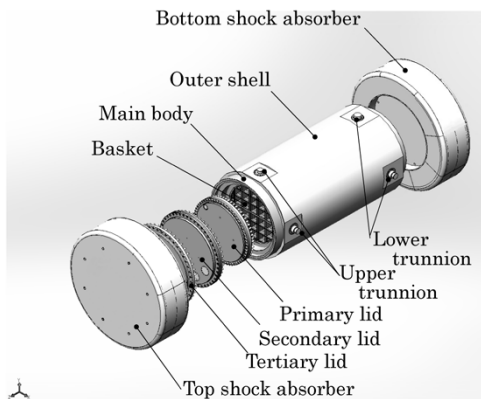


図3 TK-26型輸送貯蔵容器の構成(輸送状態)

Fig. 3 Structure of TK-26 type transport and storage cask (transport condition)

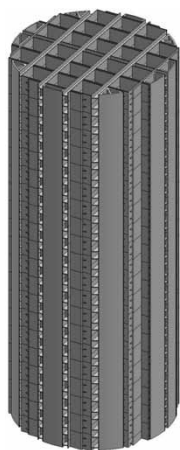


図4 TK-26の新型バスケットの外観

Fig. 4 Appearance of new basket for TK-26

な伝熱性能を確保しながら高い構造強度および未臨界維持性能を有する、非常にコンパクトなバスケットの設計が可能となった。

そのほかの特徴として、9m落下試験における傾斜落下時^{注2)}の衝撃加速度の増倍効果および垂直落下時の内部収納物(バスケット、燃料集合体)の遅れ落下による衝撃(遅れ衝撃^{注3)})への対策が挙げられる。内部収納物の遅れ衝撃力を蓋から緩衝体にスムーズに伝えるように、また、必要な構造強度を維持しながら重量増加を最低限に抑えるよう、フランジ部分(蓋ボルトの締結部)の設計を最適化している。

さらなる特徴として、ますます増加する多様な乾式貯蔵の需要に対応するために、容器設計の柔軟性を確保すること、また、容器を安定的に供給するために設計の標準化についても考慮していることが挙げられる。これは

脚注2) 傾斜落下とは、水平姿勢から容器の底部側が下になるように数度傾いた姿勢で落下させる落下条件である。底部緩衝体が接地して生じる回転エネルギーが容器の蓋側に付加されて大きな衝撃加速度が生じる。

脚注3) 頭部垂直落下時の遅れ衝撃とは、燃料集合体などの内部収納物が容器本体の着地から僅かな時間遅れをとらない一次蓋に衝突して大きな衝撃加速度を与える事象である。9m落下が始まる瞬間に一次蓋のばね効果により内部収納物が浮き上がることにより生じる²⁾。

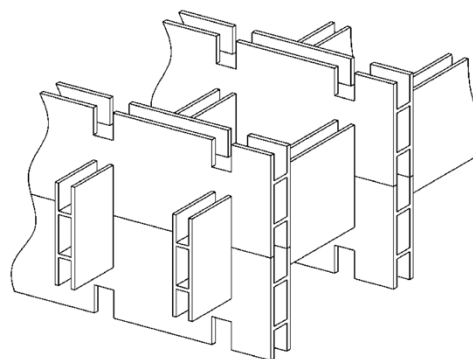


図5 1%B-A3004N-H112を使用した新型バスケットの概念図

Fig. 5 Conceptual view of new type basket using 1%B-A3004N-H112

2種類の異なる中性子遮蔽材を用いることにより可能となる。

2.1 新型バスケットの設計

当社が従来採用してきたバスケット材料はA6061材に約1%のほう素を添加した1%B-A6061-T651の圧延材³⁾である。この材料は2009年に日本機械学会金属キャスク構造規格(2007年版)⁴⁾の事例規格として登録された材料である。

その後、2013年に新たにA3004系の材料に約1%のほう素を添加した1%B-A3004N-H112の押出材⁵⁾を開発し、同様に日本機械学会金属キャスク構造規格(2007年版)の事例規格として登録された。この材料は1%B-A6061-T651に比べて高温強度に優れている。また、押出材であるため様々な立体的な断面形状の部品を製造することができ、とくにPWR燃料用のバスケットに必要な水ギャップ^{注4)}を一つの部品で形成することができる。その結果、容器の未臨界性を維持するとともに高い構造強度を確保し、さらに必要な伝熱性能を有する非常にコンパクトなバスケットの設計が可能となっている。この新型バスケット構造の概念図を図5に示す。

2.2 9m落下試験に対する新たな対策

前述のように、輸送貯蔵兼用容器には9m落下試験が要求され、想定されるいかなる落下姿勢においても構造健全性を維持することが求められる。代表的な落下姿勢として通常、水平、垂直およびコーナ落下姿勢の条件で評価されるが、近年、これらの落下条件に加えて傾斜落下が注目されている。この条件では蓋部への衝撃加速度が水平落下よりも大きくなる場合があることが指摘されているためである。また、頭部垂直落下における燃料などの内部収納物の遅れ衝撃が容器の構造健全性に与える影響についても着目されつつある。

TK-26では、これらの注目されている事象に対し、容器のフランジ構造および蓋構造に加えて緩衝体の構造にも設計上の改良を加えることにより、容器の構造健全性

脚注4) 通常、未臨界維持設計では、安全側の設計とするために新燃料の装荷状態を設計条件とする。PWR燃料の未臨界性を維持するためには、燃料と燃料の間に隙間を設ける必要がある。臨界解析では容器の胴内を満水とした状態が最も厳しい条件となることから、この隙間を“水ギャップ”と呼んでいる。

を維持することを可能としている。

このような設計の有効性を確認するために、1/3スケールモデルによる落下試験を実施し、衝撃加速度および緩衝体の変形量が妥当な範囲に収まることを確認している。9m傾斜落下試験の様子を図6に示す。

なお当社は、これらの落下試験をベースにした落下解析手法も確立している^{6),7)}。

2.3 燃料仕様に対する設計の柔軟性

使用済燃料用の容器に使用される中性子遮蔽材としては、水素などの軽元素を高い比率で含有する材料が使用される。これは、使用済燃料から放出される高いエネルギーを持った中性子が軽元素と衝突して減速されることによって遮蔽されるためである。

TK-26では、中性子遮蔽材としてTN Vyal BTM^{注5)} (以下、Vyal Bという) およびkobesh EPRTM^{注6)} (以下、EPRという) の2種類の材料を使用することができる。Vyal BはTN-Internationalで開発された材料であり、EPRは当社が開発した材料である。

これらの材料を国内の輸送貯蔵兼用容器に使用するためには、密度および熱物性などの一般的な材料データだけでなく、長期使用期間中の熱劣化による重量低減率、放射線による影響などのデータが必要となるが、これらの材料データは既に取得済である⁸⁾。評価試験に用いたVyal BおよびEPRの外観をそれぞれ図7および図8に示す。



図6 9m落下試験(傾斜落下)
Fig. 6 9 m drop test (slap-down condition)



図7 Vyal Bレジンの外観
Fig. 7 Appearance of Vyal B resin



図8 kobesh EPRレジンの外観
Fig. 8 Appearance of kobesh EPR

2.3.1 Vyal BとEPRの違い

これら2種類の中性子遮蔽材は異なる特徴を持つ材料である。

Vyal Bはビニルエステルをベースにしたレジン材料である。容器本体に直接鋳込むことが可能であり、また、成型型を用いてあらかじめブロック成形することも可能である。この材料は比較的硬い表面を持ち、密度は約 $1.8\text{g}/\text{cm}^3$ と比較的大きい。

一方、EPRはエチレンプロピレンゴムをベースにした材料であり、容器本体に直接鋳込むことはできず、プレスによる加熱成形によりあらかじめブロックに成形する必要がある。ゴム系の材料であることから柔軟性があり、放射線のストリーミングを無視できるほどEPRブロックと銅の伝熱フィン間との隙間を十分小さくすることができる。密度が低く(約 $1.2\text{g}/\text{cm}^3$)非常に軽い材料である。

2.3.2 Vyal BとEPRの遮蔽性能

使用済燃料からの放射線は中性子とガンマ線であり、これら2線種の放射線をバランスよく遮蔽する必要がある。中性子遮蔽については前述のとおり水素などの軽元素が有効であるが、ガンマ線遮蔽には密度の高い材料が有効である。

Vyal BとEPRを比較すると、体積当たりの水素含有率はEPRが30%程度高く、密度はVyal Bが30%程度高い。したがって、同じ遮蔽厚さであれば、EPRはVyal Bよりも重量が軽く中性子の遮蔽性能に優れている。他方、Vyal Bは重量が重く中性子遮蔽性能としては若干劣るもののガンマ線遮蔽に優れているという特徴がある⁹⁾。

2.3.3 容器設計への適用

使用済燃料の中性子およびガンマ線の線源強度は、燃焼度^{注7)}と冷却年数によって異なる。一般的には、燃焼度が高いほど中性子およびガンマ線源強度ともに高くなる。とくに中性子源強度はその傾向が顕著である。また、ガンマ線源強度は最初の数年間は高い比率で減衰するが、中性子源強度は冷却年数による減衰は比較的小さい。

容器の遮蔽設計においては、重量および寸法制限を考慮しながら中性子およびガンマ線を適切に遮蔽することが重要である。これらの線源強度の組み合わせと使用す

脚注5) TN Vyal BはTN-Internationalの商標である。

脚注6) kobesh EPRは当社の商標である。

脚注7) 燃料が原子炉内でどの程度核分裂反応(燃焼)を起こしたかをあらわす物理量。

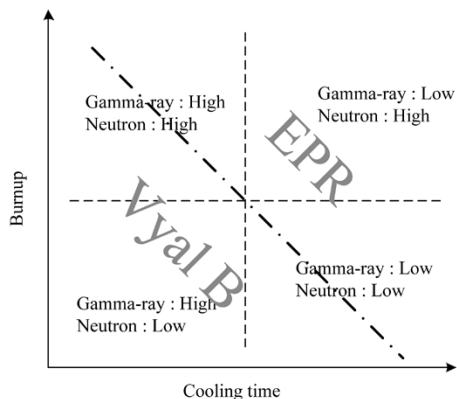


図9 線源強度の組合せと中性子遮蔽材の概念図

Fig. 9 Conceptual image of neutron shielding materials depend on source intensity combination

る中性子遮蔽材を模式的に表現した概念図を図9に示す。この図で示すように、これら2種類の中性子遮蔽材の特徴を考慮してうまく使い分けることにより、異なる燃料仕様に対して容器本体の構造を大きく変更することなく柔軟性のある多様な容器設計が可能となる。

むすび = TN24をはじめとした長期にわたる鍛造タイプ容器の開発、設計および製造経験をベースとしてTK-26型輸送貯蔵兼用容器を開発した。この容器には新たに開発したほう素添加アルミニウム合金押出材を用いたコンパクトなバスケット設計を採用しており、PWR燃料を26体収納できる。さらに、中性子遮蔽材としてVyal BあるいはEPRを採用することにより、様々な燃料仕様に対応した容器設計が可能である。

参考文献

- 1) 谷内廣明ほか. R&D神戸製鋼技報. 1995, Vol.53, No.3, p. 2-6.
- 2) F. Shigeyoshi et al. Behaviour of the Contents of the Spent Fuel Package during the 9 m Vertical Drop Test with Lid side Downwards. Proceedings of 17th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Material (PATRAM). 2013. (DVD).
- 3) J. Shimojo et al. Development of Borated Aluminum Material for Basket of Transport/Storage Casks. Proceedings of 15th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Material (PATRAM). 2007. (DVD).
- 4) 日本機械学会. JSME S FA1-2007 使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格(2007年版). 2008.
- 5) J. Shimojo et al. Development of Extruded Borated Aluminum Material for Basket of Transport/Storage Casks. Proceedings of 16th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Material (PATRAM). 2010. (DVD).
- 6) J. Shimojo et al. Drop test experimental results of 1/3 scale model for TK type transport and storage cask. Proceedings of 17th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Material (PATRAM). 2013. (DVD).
- 7) N. Kageyama et al. Drop Test Analysis of 1/3 Scale TK Type Transport and Storage Cask. Proceedings of 17th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Material (PATRAM). 2013. (DVD).
- 8) A. Oishi et al. Evaluation of Neutron Shielding Materials, TN Vyal BTM And Kobesh EPRTM Resin for Interim Storage Casks. Proceedings of 17th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Material (PATRAM). 2013. (DVD).
- 9) H. Taniuch et al. Development of TK-26, new generation transport and storage cask for PWR spent fuels. Proceedings of 17th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Material (PATRAM). 2013. (DVD).