

(解説)

福島第一原子力発電所向け乾式貯蔵キャスクの製作と貯蔵実績

Manufacturing of Dry Storage Casks for Storing Spent Fuel and their use at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station



伊藤賢司*¹
Kenji ITO



赤松博史*¹
Hiroshi AKAMATSU



新谷智彦*¹ (工博)
Dr. Toshihiko SHINYA

A basic policy of adopting a closed nuclear fuel cycle was formulated in the Framework for Nuclear Energy Policy (2005), and the spent fuels discharged from nuclear power plants will be stored until reprocessing in the recycling plant. Storing spent fuels in Dry Storage Casks (DSC) is one of several methods of interim storage, and Japan has more than 15 years' experience. The potential safety of DSC was spotlighted after the Great East Japan Earthquake because DSC doesn't need an electric power supply during storage and can be cooled by natural air circulation. This report introduces the outline of the process of manufacturing DSC and the experience of using them for storage in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station.

ま え が き = 原子力発電所から発生する使用済燃料は、再処理または直接処分のいずれかの処置が行われるが、世界各国においてその国の政策にしたがった処置の方針が決められている。エネルギー資源の乏しい我が国では、2005年10月に策定された原子力政策大綱¹⁾において、「使用済燃料を再処理し、回収されるプルトニウム、ウラン等を有効利用する核燃料サイクルの確立を国の基本方針」とし、また、「使用済燃料は、当面は、利用可能になる再処理能力の範囲で再処理を行うこととし、これを超えて発生するものは中間貯蔵する」としている。

本稿では、我が国における使用済燃料の中間貯蔵の現状と、当社が福島第一原子力発電所向けに製作・納入した乾式貯蔵キャスクの概要、製作および貯蔵実績について紹介する。

1. 我が国における使用済燃料の中間貯蔵の現状

使用済燃料の貯蔵については、世界各国で種々の貯蔵方式が開発・実用化されている。我が国では、原子力発電所の敷地内貯蔵施設において、水プールおよび金属キャスク貯蔵方式が実用化されている。水プールおよび金属キャスク貯蔵方式の特徴は以下のとおりである。

(1) 水プール貯蔵方式

水プール貯蔵方式は、使用済燃料をプール水中に設置されたラック（金属製の枠組み）に収納して貯蔵する方式である。プール水により使用済燃料の崩壊熱を除去するとともに、使用済燃料からの放射線を遮へいしている。この貯蔵方式は除熱性能に優れているため、原子力発電所等における大容量の使用済燃料や原子炉から取り

出して間もない発熱量の高い使用済燃料の貯蔵に適している。

(2) 金属キャスク貯蔵方式

金属キャスク貯蔵方式は、使用済燃料を衝撃や火災などに耐え得る金属製の乾式貯蔵キャスクに収納して貯蔵する方式であり、2章で述べるように除熱、密封、遮へいおよび臨界防止という乾式貯蔵キャスクとしての4つの基本的安全機能を有している。必要な時期に比較的容易に増設できることから、初期投資の抑制および投資計画の容易さ等のメリットがある。また、外部からの電源供給に依存せず、自然換気で冷却できる金属キャスク貯蔵方式の安全性が、東日本大震災以降特に注目されている。

我が国では、1995年より東京電力福島第一原子力発電所において、また2001年からは日本原子力発電東海第二発電所において乾式貯蔵キャスクによる使用済燃料の貯蔵が開始されている。福島第一原子力発電所における2000年および2005年の調査では、金属ガスカートなどの密封性および使用済燃料被覆管の健全性が確認されている。

2. 乾式貯蔵キャスクの概要

2.1 設計

乾式貯蔵キャスクは、以下に示す除熱、遮へい、密封および臨界防止の安全機能を有する。また、これらの機能を維持するために必要な構造強度を有する設計となっている。

①除熱機能：使用済燃料の崩壊熱を適切に除去する。

*¹ 機械事業部門 産業機械事業部 機器本部 機器工場

- ②密封機能：使用済燃料が内包する放射性物質を適切に閉じ込める。
- ③遮へい機能：使用済燃料の放射線を適切に遮へいする。
- ④臨界防止機能：使用済燃料が臨界に達することを防止する。
- ⑤構造強度：除熱機能、密封機能、遮へい機能、臨界防止機能を維持するために必要な構造強度を有する。

2.2 構造

当社が福島第一原子力発電所向けに製作した乾式貯蔵キャスクは、中型用と大型用の2つのタイプがあり、それぞれ37体、52体の使用済燃料を装填できる仕様である。乾式貯蔵キャスクの外観を図1に、その構造を図2に示す。

本乾式貯蔵キャスクは、本体および蓋部と、内容物であるバスケットの3つの主要部から構成されている。以下に、これらの構造について示す。

(1) 本体

低合金鋼製である厚肉円筒状の胴と円板状の底板は、



図1 乾式貯蔵キャスク
Fig.1 Dry storage cask

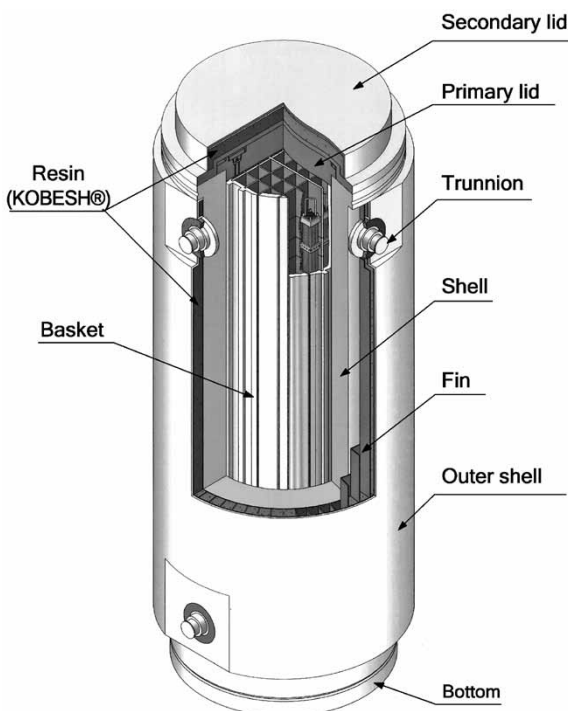


図2 乾式貯蔵キャスク構造
Fig.2 Structure of dry storage cask

溶接接合することによって内外圧に耐えるよう耐圧容器として設計しており、またガンマ線の遮へい機能を有している。胴の外側には炭素鋼製の外筒を溶接で固定しており、熱伝導を良くするための銅製のフィンと、中性子遮へいのためのシリコンレジンと、胴と外筒の間に取り付けられている。

容器の取り扱いおよび貯蔵時固縛のため、胴の上部（開口部側）に2対、下部（底板側）に1対のステンレス鋼製のトラニオンを本体（胴）にボルトで取り付けている。

(2) 蓋部

蓋部は一次蓋と二次蓋で構成している。一次蓋は低合金鋼製であり、ボルトで本体上部（開口部側）端面に取り付けている。この一次蓋は内外圧に耐えるよう耐圧容器として設計しており、またガンマ線の遮へい機能を有している。本体と一次蓋の接合部には二重構造の金属ガスケットを設け、本体内部の密封性を確保している。この二重構造のガスケットの中間部に検知孔を設け、蓋ガスケット部の気密漏えい検査が容易に実施できるよう設計している。また、一次蓋には取り扱い時の排水、排気等に使用されるオリフィスを設けている。

二次蓋はステンレス鋼製で、上側にレジンが充填されており、ボルトで本体上部（開口部側）端面に取り付ける。一次蓋と同様に、本体と二次蓋の接合部には二重構造の金属ガスケットを設け、一次蓋と二次蓋間の密封性を確保している。二次蓋には圧力センサとヘリウム充填用バルブを設け、一次蓋と二次蓋の空間に充填したヘリウムガスの圧力変動を検知することでキャスクの密封性を監視できるよう設計している。

(3) バスケット

バスケットは溶接のない機械的接合で形成している。本体内部に設置し、乾式貯蔵キャスク（本体）内に収納される個々の燃料集合体を所定の位置に配置することでそれらの相対位置を確保するためのものである。ポロンを添加したアルミニウム合金製のパネル状板を多段積みした構造となっており、乾式貯蔵キャスク内部の全長にわたって矩（く）形の燃料集合体挿入区画を構成している。ポロンには使用済燃料から出る中性子を吸収する性質があり、使用済燃料が臨界に達するのを防止することが期待される。

2.3 製作

2.3.1 主要部材

当社の乾式貯蔵キャスクに使用した主要部材は以下のとおりである。

① 胴、底板、トラニオン、一次蓋および二次蓋

胴、底板および一次蓋は低合金鋼製の鍛造品、トラニオンおよび二次蓋はステンレス鋼製の鍛造品である。いずれの部材も鍛造プレスでそれぞれの概略形状まで鍛造し、所定の形状に機械加工して作る。

② 外筒

炭素鋼板を所定の寸法に切断し、曲げ加工により2分割半円状に成型して作る。

③ フィン

銅板を所定の寸法に切断し、曲げ加工によりL形状に成型して作る。

④ レジン

自社開発の中性子遮へい材（KOBESH[®]注）を使用している。

⑤ バスケットプレート

自社開発のボロン添加アルミニウム合金鋼の圧延板を使用しており、この部材を所定の寸法に切断して作る。

2.3.2 製作方法

乾式貯蔵キャスクの製作手順を図3に、製作方法の概要を以下に示す。

(1) 本体

まず、胴と底板を溶接接合し、次にそれらの内外面に各種部品を溶接で取り付けた後、溶接後熱処理を実施して機械加工により所定の寸法に仕上げる。溶接部の健全性を確認する検査として放射線透過試験および磁粉探傷試験を行う。さらに、キャスクが所定の内圧に耐えることを確認するために、キャスク内部に水压を加える「耐圧検査」を行う。

2分割半円状の外筒は、フィンを取り付けた後、胴の外面に巻きつけて溶接により固定する。胴板、外筒およびフィンに囲まれた領域にはレジンを充填する。

トラニオンはボルトで本体に取り付け、トラニオンに所定の荷重を与えた後に有意な変形がないことを確認する「吊上げ荷重検査」を行う。

本体の内・外表面には防食のための溶射を実施し、外表面にはさらに、溶射被膜の上に塗装を実施する。

(2) 一次蓋

まず、一次蓋鍛造品のガスケットシート面およびオリフィス部にオーバーレイ溶接を実施する。次に検知孔用の部品を溶接で取り付けた後、溶接後熱処理を実施し、機械加工により所定の寸法に仕上げる。溶接部の健全性を確認する検査として液体浸透探傷試験を行う。さらに、本体に取り付けて耐圧検査を行う。

一次蓋の内・外表面には防食のための溶射を実施し、外表面にはさらに、溶射被膜の上に塗装を実施する。

(3) 二次蓋

二次蓋鍛造品に各種部品を溶接で取り付けた後、レジンで充填する。続いてカバーを溶接で取り付け、機械加工により所定の寸法に仕上げる。溶接部の健全性を確認する検査として液体浸透探傷試験を行う。

(4) バスケット

表面に陽極酸化処理を施したパネル状の板を組み合わせて格子状枠を作る。この格子状枠は、各段の格子目が合うように多段積みし、各段の外周端部付近の交差部に沿うように配置した連結部材によってバスケット全体を組み立てる。

(5) 組み立ておよび試験検査

各部品は、製作が完了した段階で外観検査と寸法検査を行い、異常がないことを確認した後、組み立てる。組み立てた後、キャスク内部に使用済燃料を模擬したヒータを挿入して除熱機能を確認する「伝熱検査」や、一次蓋および二次蓋の密封機能を確認する「気密漏えい検査」等、本乾式貯蔵キャスクが設計仕様を満足するように製作できていることを確認するための検査や、キャスク取り扱いに支障がないことを確認する「取扱性能試験」等の各種試験検査を行う。

3. 乾式貯蔵キャスクの貯蔵実績

3.1 長期貯蔵における健全性

当社が製作・納入した乾式貯蔵キャスク9基（中型用4基、大型用5基）は、福島第一原子力発電所において1995年から貯蔵が続けられている。貯蔵開始から5年が経過した2000年、および10年が経過した2005年に開封調査が行われ、その健全性が以下のとおり確認された。

(1) 収納物の健全性

内部ガスのサンプリングを行った結果、クリプトンガスは検出されず、燃料被覆管の破損がないことが確認さ

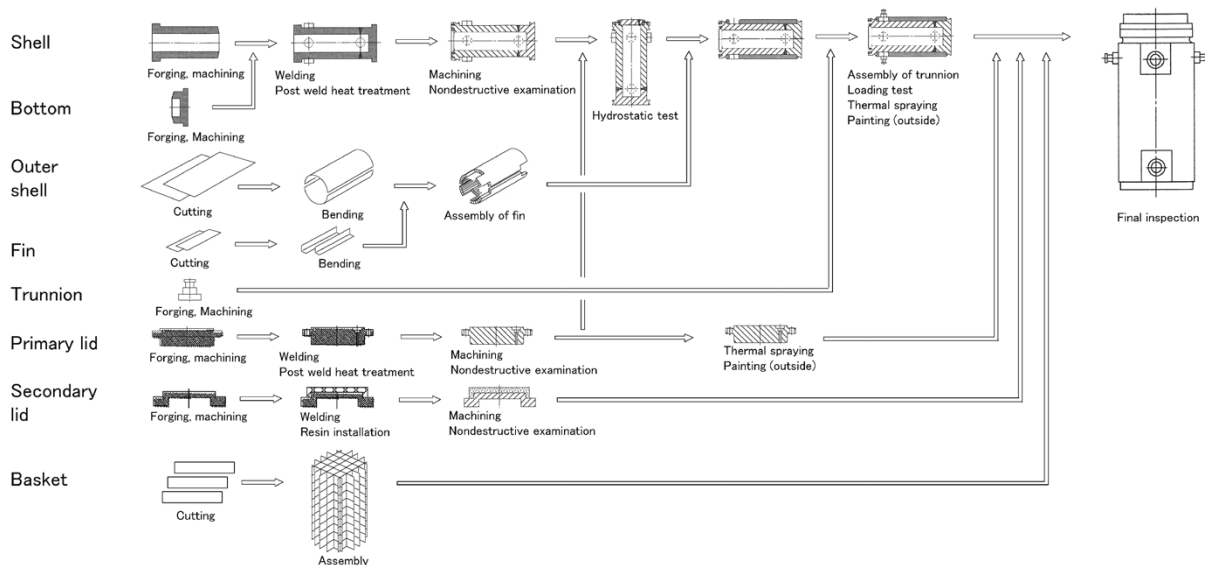


図3 乾式貯蔵キャスクの製作手順
Fig. 3 Manufacturing process of dry storage cask

脚注) KOBESHは当社の登録商標（日本での登録商標はkobesh）である。

れた。また、目視確認の結果、燃料集合体の外観に異常がないことが確認された。

(2) 密封機能の確保

一次蓋の気密漏えい確認を行った結果、密封機能が確保されていることが確認された。また、金属ガスケットおよびガスケットシート面についても異常がないことが確認された。

3.2 東日本大震災の影響

3.2.1 乾式貯蔵キャスク保管建屋の状況

東京電力株式会社より、東日本大震災後の福島第一原子力発電所内乾式貯蔵キャスク保管建屋（以下、保管建屋という）の状況が報告された²⁾。東日本大震災が発生した2011年3月11日時点で、保管建屋には当社が納入した乾式貯蔵キャスク9基（使用済燃料408体）が貯蔵されていたが、地震で発生した津波によって保管建屋内部には大量の海水や砂、瓦礫（れき）等が流れ込み、乾式貯蔵キャスクは一時的に海水中に完全に水没した。しかしながら、乾式貯蔵キャスク外面には瓦礫等が付着していたものの、ボルトにより固定されていた元々の位置からは移動しておらず、外観からは健全性に関する問題は確認されなかった。東日本大震災後の保管建屋内の状況を図4に示す。

3.2.2 乾式貯蔵キャスクの点検結果

保管建屋内に貯蔵されていた乾式貯蔵キャスク9基について、東日本大震災後の点検結果が東京電力株式会社より報告された³⁾。密封機能、臨界防止機能、除熱機能、遮へい機能および燃料の健全性確認の結果、全てにおいて問題がないことが以下のとおり確認された。

(1) 密封機能

(a) 一次蓋および二次蓋の気密漏えい確認結果

一次蓋と二次蓋それぞれに対し開放前の状態にて気密漏えい確認を行った結果、漏えい率が基準値以下であった。

(b) 一次蓋と二次蓋の蓋間圧力確認結果

二次蓋の開放前の状態にて一次蓋と二次蓋の蓋間圧力の確認を行った結果、残存圧力が基準値以上であった。

(c) 一次蓋および二次蓋金属ガスケットの外観確認結果

一次蓋を開放後に一次蓋金属ガスケットの外観の確認を行った結果、傷・割れ等の異常はなかった（1基目の

み確認）。一方、二次蓋金属ガスケットは、海水の浸入により外周部に腐食（白色化）が見られたが、ガスケットを貫通する腐食の箇所はなく、乾式貯蔵キャスク内部と外部環境が隔てられていたことが確認された。

(2) 臨界防止機能・燃料健全性

(a) バスケットの外観確認結果

一次蓋開放後にバスケット上部の外観の確認を行った結果、変形・損傷等の異常はなかった（1基目のみ確認）。

(b) 燃料集合体の外観確認結果

代表的に3体の燃料をバスケットから抜き取って外観（4面）の確認を行った結果、変形・損傷等の異常はなかった（1基目のみ確認）。

(c) 内部ガスサンプリング結果

キャスク内部のガスをクリプトンモニターで確認した結果、モニターに有意な変化がなく、貯蔵燃料の被覆管が健全であることが確認された。

(d) 中性子線量当量率の測定結果

キャスク近傍における中性子線量当量率に異常はなく、臨界防止機能に問題がないことが確認された。

(3) 除熱機能・遮へい機能

キャスクの表面温度および線量当量率に異常はなく、除熱機能・遮へい機能に問題がないことが確認された。

(4) 二次蓋および容器本体の非破壊検査結果

二次蓋の密封部外周フランジ面に白色化が確認されたことから、白色化部に応力腐食割れ（Stress Corrosion Cracking, 以下SCCという）の発生が懸念された。このため、二次蓋および容器本体の二次蓋シート面に対して浸透探傷試験を行った結果、SCCの発生がないことが確認された。

3.3 キャスク仮保管設備での保管

東日本大震災で発生した津波の影響により、福島第一原子力発電所の保管建屋は継続的な使用が困難な状況となった。このため、保管中の9基の乾式貯蔵キャスクは発電所構内に設置した乾式貯蔵キャスク仮保管設備（以下、仮保管設備という）に移送された。

また、東日本大震災で被害を受けた原子力建屋内の使用済燃料プールに貯蔵されている燃料を使用済燃料共用プール（以下、共用プールという）へ移送するため、共用プールのスペースを確保する必要があった。そこで、共用プールに貯蔵されていた使用済燃料は、当社が新たに納入した11基の乾式貯蔵キャスクに装填され、仮保管設備へ移送された。

仮保管設備では、震災前の保管建屋と同様に、乾式貯蔵キャスクを搭載した貯蔵用のキャスク支持架台は固定ボルトにより固定されている。また、乾式貯蔵キャスク1基ごとをコンクリートモジュールで覆っている。なお、仮保管設備は、当社が既に納入した20基（既設9基+新設11基）を含む最大50基の乾式貯蔵キャスクの保管が可能となっている。

むすび= 当社はこれまで、福島第一原子力発電所に20基の乾式貯蔵キャスクを納入してきた。そのうちの9基は15年以上の貯蔵実績があり、東日本大震災により発生し



図4 東日本大震災後の保管建屋内
Fig. 4 Storage area after the 2011 Tohoku Earthquake

た津波に見舞われたものの、その健全性が立証された。乾式貯蔵キャスクの需要は今後も増加すると予想され、当社は今後も乾式貯蔵キャスクの製作を続けることで原発事故収束および我が国の原子力政策の一端を担っていく。

参 考 文 献

- 1) 原子力委員会. 原子力政策大綱. 平成17年10月11日, p.11, 38.
- 2) 東京電力株式会社. 福島原子力事故調査報告書(添付9-9). 平成24年6月20日.
- 3) 東京電力株式会社. 福島第一原子力発電所 既設乾式貯蔵キャスクの点検報告. 平成25年5月31日.