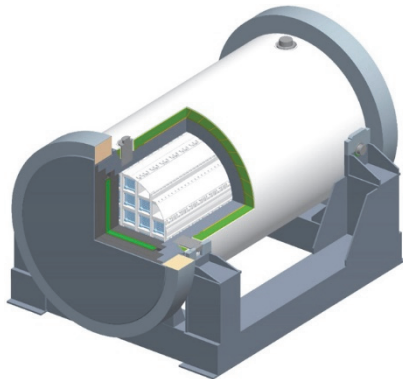


# 使用済燃料乾式貯蔵キャスクの高収納化及び安全性向上

## Higher Storage Capacity and Improved Safety of Spent Fuel Dry Storage Cask



三菱重工業株式会社  
原子力セグメント 機器設計部  
(営業窓口: 軽水炉課)

安全が確認された原子力発電所の再稼働の進展や運転開始から相当期間を経た原子力発電所の廃炉に伴い、使用済燃料が多数発生することから、使用済燃料の貯蔵が重要課題となっており、発電所構内、または中間貯蔵施設向けに安全性の高い輸送・貯蔵兼用キャスク(乾式キャスク)による乾式貯蔵の工事計画が推進されている。三菱重工業株式会社は使用済燃料貯蔵の課題解決に貢献すべく乾式キャスクの開発を行っている。本報では、型式認証を取得したMSF-24P型及びMSF-28P型キャスクの概要、高収納化及び安全性向上への取組みについて紹介する。

### 1. 乾式キャスクに求められる要件と製品ラインナップ

三菱重工業株式会社(以下、当社)の乾式キャスク(MSF キャスクーMSF:Mitsubishi Spent Fuel)は、国内の原子力発電所から発生する使用済燃料を安全かつ経済的に輸送及び中間貯蔵するために開発したものである。MSF キャスクは輸送要件(核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則)及び貯蔵要件(サイト固有の設計条件)に適合するよう設計されている。前者の要件として9m落下試験や800℃×30分の火災試験等が、後者の要件として地震や津波漂流物等の自然災害に起因する事象があり、これら要件に対して乾式キャスクの基本的安全機能(未臨界機能、除熱機能、遮蔽機能、閉じ込め機能)が維持される。

また、原子力施設に保管されている使用済燃料を乾式貯蔵するニーズに応えるべく、当社は様々なラインナップを取り揃えている(表1)。

表1 MSF キャスクラインナップ(仕様)

型式 <sup>(注1)</sup>	MSF-21P	MSF-24P	MSF-28P	MSF-32P	MSF-52B	MSF-76B
収納燃料	14×14PWR 17×17PWR	15×15PWR 17×17PWR	15×15PWR 17×17PWR	14×14PWR	8×8BWR	8×8BWR
収納体数	21	24	28	32	52	76
冷却年数(年)	≥15	≥15	≥20	≥15	≥12	≥22
U-235濃縮度(%)	4.9(14×14) 4.2(17×17)	4.1(15×15) 4.2(17×17)	4.1(15×15) 4.2(17×17)	4.2(14×14)	3.7(8×8)	3.7(8×8)
最高燃焼度(GWd/t)	55(14×14) 48(17×17)	48(15×15) 48(17×17)	48(15×15) 48(17×17)	48(14×14)	50(8×8)	50(8×8)
発熱量(kW)	13.9	15.8	15.7	14.8	13.7	14.2
重量(ton) <sup>(注2)</sup>	117/131*	118/134*	117/135*	117/136*	116/132*	119/135*
寸法(m) <sup>(注2)</sup>	Φ3.6×6.8*	Φ3.6×6.8*	Φ3.6×6.8*	Φ3.6×6.8*	Φ3.6×6.9*	Φ3.6×6.8*
型式証明/型式指定の取得状況 <sup>(注3)</sup>	◎ 縦置き	◎ 横置き/縦置き	○ 横置き/縦置き	—	◎ 縦置き	○ 横置き

(注1) MSF-XXB/P Mitsubishi Spent Fuel Cask の略称。(XX:収納体数 B/P:燃料型式)

(注2) \*は輸送用緩衝体を含む重量/寸法を示す

(注3) ◎:型式証明/型式指定を取得, ○:型式証明のみ取得(型式指定取得は計画中)

発電所構外における乾式貯蔵施設向けとしてMSF-52B型、及びMSF-21P型について型式証明/型式指定を取得し、発電所構内における乾式貯蔵施設向けに、MSF-24P型について型式証明/型式指定を取得している。また、燃料収納数を増加(高収納化)させたMSF-28P型及びMSF-76B型を開発し、2023年に型式証明を取得している。

## 2. 横置き貯蔵方式の導入

国内では、乾式キャスクは耐震性を有する乾式貯蔵建屋内に縦置き貯蔵する計画が一般的であるものの、乾式キャスクが地震時に転倒しないように頑健な基礎が必要であること、乾式キャスクの取扱エリアを含む貯蔵建屋を建設するための敷地面積が必要であることなど、発電所構内にて設置可能な敷地が限られるといった課題がある。乾式キャスクは輸送要件(9m落下、耐火試験等)を満足するように設計されており、衝撃に対する頑健性を有している。また、2019年に“原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド”の中で、輸送荷姿(緩衝体を取り付けた状態)による横置き貯蔵方式が整備されたことから、横置き貯蔵による乾式貯蔵が可能となった。この貯蔵方式は乾式キャスクを基礎等に固定せずとも、乾式キャスクの安全機能が維持可能であり、貯蔵施設の基礎及び貯蔵建屋が不要であることから発電所構内にて敷地の制約条件が少なく、かつ、安全性の高い乾式貯蔵に早期に移行できる方式である。MSF-24P型及びMSF-28P型は、この横置き貯蔵方式についての型式証明を取得(MSF-24P型は型式指定も取得)している。また、当社は、遮蔽機能を有するコンクリートパネル製の格納設備の中に乾式キャスクを1基ずつ横置き貯蔵する乾式貯蔵施設(図1)について設計しており、幅広い貯蔵方式をラインナップしている。

横置き貯蔵方式で使用する緩衝体については、長期貯蔵による熱または放射線等の経年劣化を考慮する必要があり、この経年劣化による性能低下がない金属材料を用いた貯蔵緩衝体を開発している。この緩衝体を乾式キャスクへ取り付けることで、長期貯蔵中に想定される事象(地震、落下など)に対して乾式キャスクの安全性を維持することが可能である。貯蔵用緩衝体については、金属製多孔体を用いた緩衝体を設計し(材料は経年劣化がない、かつ、エネルギー吸収効率の良い(延性が大きい)アルミ合金を採用)、圧縮試験によりそのエネルギー吸収特性を評価及び考察するとともに、1/10スケールの金属製緩衝体を装着したキャスクモックアップの落下試験により緩衝体の機能を満足することを実証した。また、落下試験結果を用いて解析手法の妥当性を検証し、その解析手法によって実機体系の落下解析を行い、金属緩衝体の緩衝性能が十分であることを確認した(図2)。

この横置き貯蔵方式については関西電力株式会社高浜発電所にて発電所構内貯蔵に関わる設置変更許可を申請し現在審査中である。

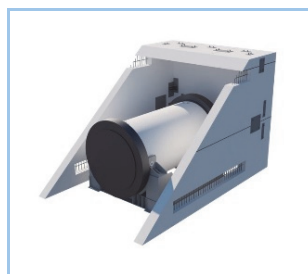


図1 乾式キャスク  
横置き貯蔵方式



図2 貯蔵用緩衝体の開発

## 3. 使用済燃料の高収納化

更なる使用済燃料の高収納化を目指し、MSF-28P型及びMSF-76B型を設計開発、2023年に型式証明を取得している。以下MSF-28P型について製品紹介する。

### 3.1 MSF-28P 型の概要

MSF-28P 型の仕様を表 1 に、鳥瞰図を図 3 に示す。MSF-28P 型は MSF-24P 型の基本構造を基にした設計であるが、MSF-24P 型からの主な改良点は、収納燃料配置と遮蔽設計の 2 点である。MSF-24P 型は上下左右対称な燃料配置であるが、MSF-28P 型は上下非対称(図 3)な燃料配置とし燃料非収納部のスペースを小さくすること、かつ、3.2 節に示す遮蔽設計の合理化により、重量及び寸法並びに安全機能(未臨界機能, 除熱機能, 遮蔽機能, 閉じ込め機能)を MSF-24P 型と同等に維持したまま、燃料収納数を 4 体増加させることを可能にした。

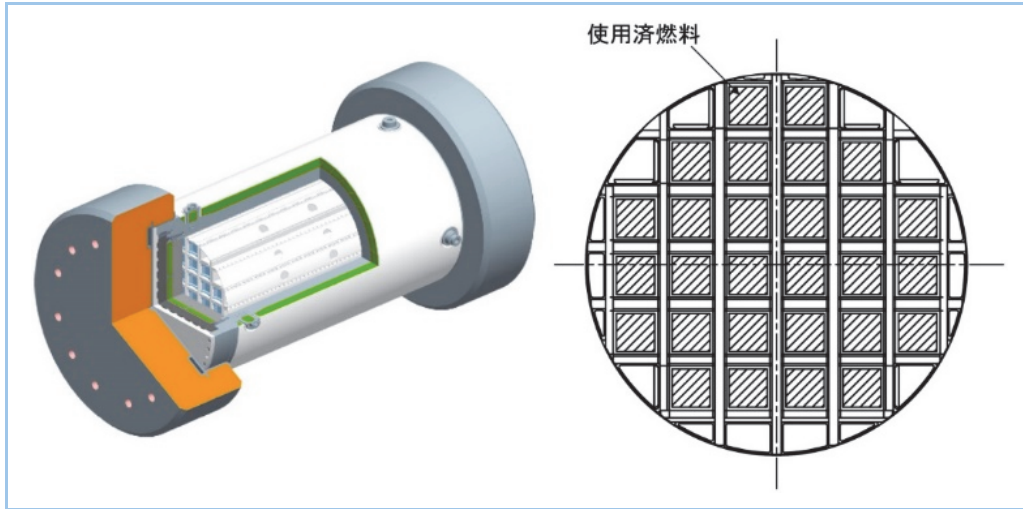


図3 MSF-28P 型の鳥瞰図及び燃料配置図

### 3.2 遮蔽設計

MSF キャスクは、使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽能力を有するよう設計している。具体的には、MSF キャスク表面の線量当量率が  $2\text{mSv/h}$  以下及び表面から  $1\text{m}$  離れた位置における線量当量率が  $100\ \mu\text{Sv/h}$  以下となるように炭素鋼(胴, 蓋)やレジン(樹脂)で構成される遮蔽体を配置している。遮蔽体は重量物となるが、MSF キャスクの取扱いの観点からできるだけ重量を低減することが望ましい。MSF-28P 型は上下非対称な燃料配置とすることで燃料収納数増加を目指しており、遮蔽設計では、3 次元で複雑な幾何形状を取り扱い、精緻な評価結果を得ることができる 3 次元モンテカルロ輸送計算コードを採用し、非対称の燃料配置をモデル化し設計した。3 次元モンテカルロ輸送計算コードを用いた MSF-28P 型に使用済燃料を収納した場合のキャスク周辺の線量当量率分布を図 4 に示す。キャスク表面及び表面から  $1\text{m}$  離れた位置の線量当量率が基準値以下となることを確認でき、MSF-24P 型と同程度の外形寸法及び重量で、高収納化を実現することができた。

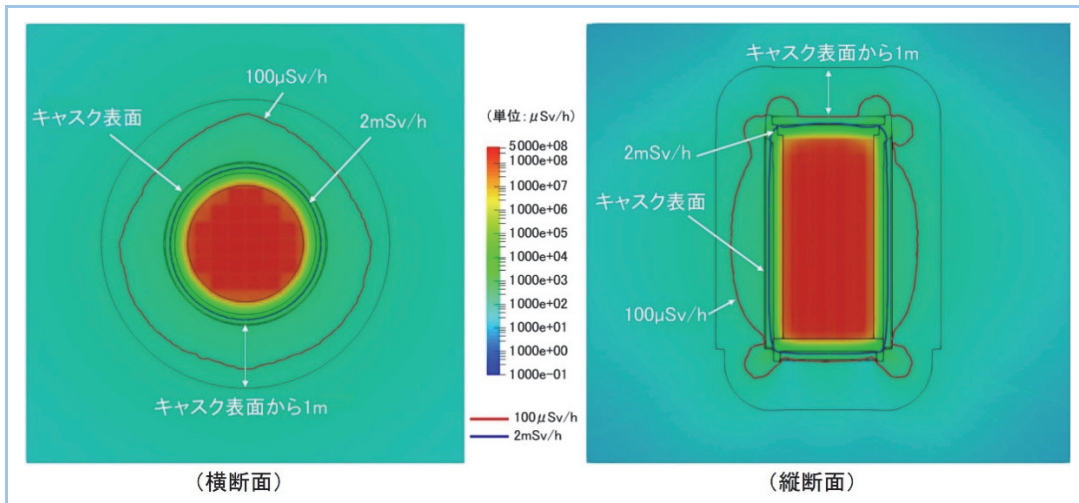


図4 MSF-28P 型周辺の線量当量率分布

## 4. 今後の展開

当社はこれまで取り組んできた材料開発, 安全評価技術, 安全性実証を MSF キャスクに集積しており, 安全性・品質・高収納の要求に対応した乾式キャスクの設計及び製造が可能である。また, 乾式キャスクを貯蔵する乾式貯蔵施設については, 従来の縦置き貯蔵方式の他に乾式貯蔵施設の早期実現が可能な横置き貯蔵方式についても取り組んでおり, 要求される安全性能を確保しつつ合理的な施設設計と施工を行っている。引き続き, 原子力プラントメーカーとして設計, 調達, 建設まで一貫して実施できる総合力を発揮し使用済燃料乾式貯蔵の推進に貢献していく。