

(技術資料)

# 使用済燃料中間貯蔵施設

## Interim Storage Facility for Spent Fuel



白谷 誠\*<sup>1</sup>  
Makoto SHIRATANI



浜田英克\*<sup>2</sup>  
Hidekatsu HAMADA

The spent fuel generated from the operation of a nuclear power plant is to be treated in the reprocessing plant in Rokkasho, Aomori. At present, spent fuel is stored in the nuclear power plant until it is reprocessed. However the amount of spent fuel generated exceeds the capacity of the reprocessing plant. Hence an additional spent fuel storage facility is needed for the nuclear fuel cycle. The spent fuel interim storage facility is the first institution in Japan that stores spent fuel outside of the nuclear power plant site. Our company has received an order for internal equipment for this facility. This paper introduces an overview of the interim storage facility for spent fuel.

ま え が き = 原子力発電所の運転に伴って発生する使用済燃料は、操業に向けて建設が進められている青森県六ヶ所村の再処理工場にて再処理されることとなっている。しかしながら、使用済燃料の発生量が再処理工場での処理量を上回っているため、原子力発電所内でのこれまでの貯蔵に加え、発電所外において使用済燃料を再処理されるまでの間、中間的に貯蔵する施設が必要となっている。

リサイクル燃料貯蔵(株)は、東京電力(株)及び日本原子力発電(株)の各発電所から発生する使用済燃料を金属キャスクを用いて貯蔵する事業を行う会社であり、青森県むつ市にリサイクル燃料備蓄センターの設置を進めている。同センターは発電所以外の敷地で使用済燃料を貯蔵する日本初の施設となる。

当社は、2009年に同センターにおける使用済燃料貯蔵建屋の内装設備を受注し、現在までに設計、製作、据付、試運転を実施している。

### 1. 使用済燃料の貯蔵方式

使用済燃料の貯蔵方式としてはプール方式とキャスク方式がある。プール方式は、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。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する方式である。このプール方式は国内外の原子力発電所において運転実績があるが、敷地外での中間貯蔵施設で適用する場合、冷却水系統の設置やそれらの非常用電源が必要となり、建設ならびに運転コストが高くなる。

一方、キャスク方式は使用済燃料を金属キャスクに収納して貯蔵する方式であり、発電所から中間貯蔵施設までの輸送及びその後の貯蔵を同じ金属キャスクで行うこ

とができる。また、金属キャスク自身が遮へい機能及び除熱機能を有していることから冷却用の水も必要なく、プール方式に比べて簡便な貯蔵方式である。また、冷却に必要な水と電源が不要なことから、東日本大震災における福島第一原子力発電所の事故を受けてその信頼性に注目が高まっている貯蔵方式である。

### 2. 施設概要

リサイクル燃料備蓄センター内に設置された使用済燃料貯蔵建屋（図1）は、使用済燃料をキャスク方式にて貯蔵する。建屋規模は幅60m、長さ130m、高さ30mである。使用済燃料の貯蔵容量はウラン重量換算で3,000トン、金属キャスクの基数にして288基の貯蔵が可能となっている。建屋は、金属キャスクを受入れる受入れエリア、貯蔵を行う貯蔵エリア、及びユーティリティー設備を設置する付帯エリアにて構成されている。

発電所から金属キャスクに収納されて輸送されてきた使用済燃料は輸送トレーラにて使用済燃料貯蔵建屋の受入れエリアに運び込まれ、受入れ区域天井クレーンによ

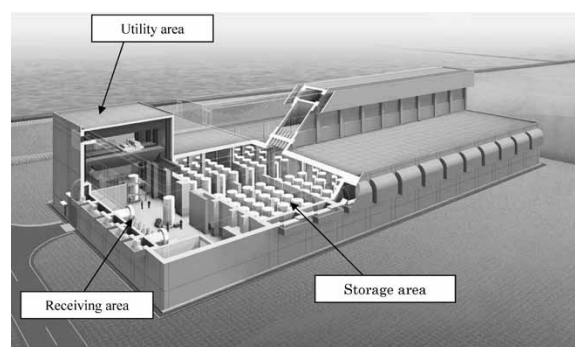


図1 リサイクル燃料備蓄センター使用済燃料貯蔵建屋<sup>1)</sup>  
Fig. 1 Interim storage facility for spent fuel in recyclable fuel storage center<sup>1)</sup>

\*<sup>1</sup> エンジニアリング事業部門 原子力・CWD本部 原子力プロジェクト部 \*<sup>2</sup> エンジニアリング事業部門 プロジェクトサポートセンター 計電装システム部

って輸送トレーラから仮置架台に横置きされる。つづいてたて起こし架台に移送され、金属キャスク上下部に設置された輸送用の緩衝体を取り外されて受入れ区域天井クレーンによって貯蔵架台に載せられる。ここからの金属キャスクのハンドリングは受入れ区域天井クレーンからエア駆動式の搬送台車となる。貯蔵架台へ載せられた金属キャスクは搬送台車により検査架台へ搬送され、貯蔵監視に必要な計器類の取り付けを行い、貯蔵エリアに移送されて所定の位置で床面に固縛して貯蔵される。

この施設に要求される基本的安全機能は「除熱機能」、「密封機能」、「臨界防止機能」、及び「遮へい機能」の4つである。これら4つの安全機能は金属キャスクが自己完結的に有しているが、除熱機能及び遮へい機能は建屋側が機能の一部を担っている。

建屋は、金属キャスクの除熱機能を阻害しないよう、金属キャスクからの崩壊熱を除去する必要がある。そのための除熱機能として、自然換気による除熱を行っている。すなわち、建屋の給気口から空気を取り入れて、金属キャスクに収納した使用済燃料の崩壊熱が金属キャスクの表面からその空気に伝達される。暖められた空気は上昇し、建屋中央に設置されたセンタータワーの排気口から建屋外へ排気される。

また、建屋は、金属キャスクからの放射線に対して十分な厚みを有するコンクリート製の壁や天井等で遮へい機能を確保している。さらに、金属キャスクの除熱のために設けられた給気口は遮へい性能向上のためラビリス構造とし、排気口にはコンクリート製の遮へいルーバを設置している。

### 3. 設備仕様

使用済燃料貯蔵建屋に貯蔵される金属キャスクは4種類である。金属キャスクは代表的なもので直径が約2.5m、長さが約5.5m、重量は約130トンの重量物である。以下に、それら重量物をハンドリングする設備について示す。

#### 3.1 受入れ区域天井クレーン

受入れエリア上部に設置される受入れ区域天井クレーンは、搬入された金属キャスクの輸送トレーラからの荷降ろし、仮置架台またはたて起こし架台への移送、及びたて起こし架台上での金属キャスクのたて起こしに使用される設備である。また、金属キャスクの搬出時にも使用される。

金属キャスク本体を取り扱う主巻の定格荷重は160tで、緩衝体を取り扱う補巻の定格荷重は20tである。主巻、補巻、走行、横行の駆動装置はインバータ方式としていずれも低速、高速運転が可能となっている。

運転は床上からの無線操作にて行うが、クレーンゲータ下に設けられた運転室からの操作もできるようになっており、無線操作器が故障しても運転室の操作で金属キャスクを安全に取り扱うことができる。さらに、金属キャスクを安全に取り扱うために以下のインタロックが考慮された設計となっている。

- ・仮置架台に設置された金属キャスクに吊荷を誤って

落下させて損傷を与えることを防止するため、仮置架台への進入を制限した衝突防止の進入禁止エリアを設ける。

- ・搬送中に金属キャスクを落下・損傷させることを防止するため、吊上げ高さは、コンクリート床面を搬送中は4m、衝撃吸収材設置面を搬送中は2mに制限する。

これらのインタロックの走行及び横行の移動制限は荷重計測器及び走行用レゾルバ、または横行用レーザ距離計にて実現し、吊上げ高さ制限は荷重計測器及び巻上げのエンコーダにて実現している。またこれらのインタロックは、大きさの異なる4種類の金属キャスクに対応できるように設計している。

受入れ区域天井クレーンは金属キャスクを取り扱うため、耐震Bクラスの強度を有している。耐震設計ではクレーン本体の構造強度の検討に加え、クレーン本体が地震により浮き上がり、走行レールから脱線して落下しないように設計した。クレーン本体の浮き上がり量を求めるに当たっては、クレーン本体、クレーンガード、及び走行レールをはり要素でモデル化し(図2)、走行レールから地震波を入力した時の時刻歴応答解析を汎用有限要素法解析コードABAQUSを用いて行った。なお、最も浮き上がりが大きくなる時の条件、すなわち吊荷の有無やトロリの位置(中央、端部)はケーススタディによって決定し、評価した。図3に入力した地震波及び浮き上がり量の結果を示す。浮き上がり量は約10mm程度とな

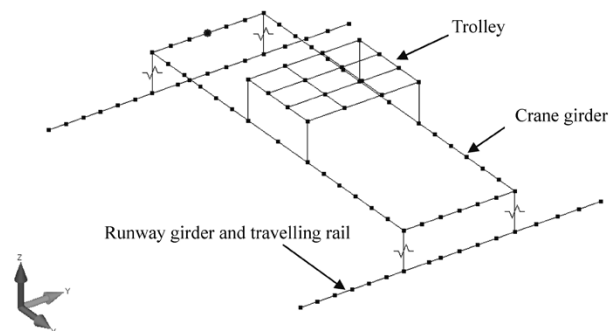


図2 受入れ区域天井クレーンの耐震解析モデル  
Fig.2 Seismic analysis model for overhead crane

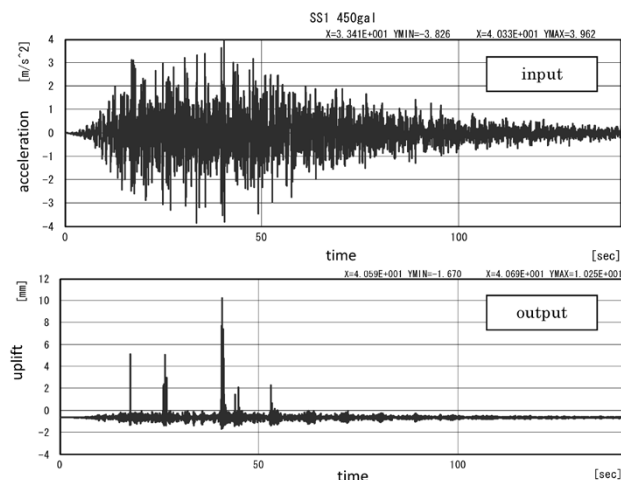


図3 浮き上がり評価結果  
Fig.3 Result of seismic analysis

っている。その浮き上がり量に対してクレーンガーダ両端に脱線防止ラグ（図4）を取り付けてクレーン本体が地震による浮き上がりにて落下しないようにしている。

### 3.2 金属キャスク取扱吊具

金属キャスク取扱吊具には垂直吊具と水平吊具がある。図5に示す垂直吊具は金属キャスクをたて起こして貯蔵架台へ設置するために使用される。アーム部は主アームと補アームによる4点吊りができる構造となっており、主アームが取付不良を起こした時にも補アームが保持する二重化の構造としている。また、吊具と受入れ区域天井クレーンの取り付け部も、クレーンフックとの取付不良を考慮してクレーンフックのシーブ軸に安全板を取り付けて吊具を保持する機構を備えている。さらに、主アーム、補アーム及び安全板は、圧縮空気を使用したエアシリンダによって遠隔操作でアームが開閉できる機構となっている。この他の特徴として、大きさの異なる4種類の金属キャスクを取扱えるようにアームの吊幅が変えられる構造となっている。

水平吊具は、金属キャスクを輸送トレーラからの荷降ろしや、仮置架台あるいはたて起こし架台への移動の際に水平吊り状態にてハンドリングするために使用される。垂直吊具と同様、受入れ区域天井クレーンの取付不良を考慮してクレーンフックのシーブ軸に安全板を取り付けて吊具を保持する機構を備えている。また、大きさの異なる4種類の金属キャスクを取扱えるように吊幅が変えられる構造となっている。

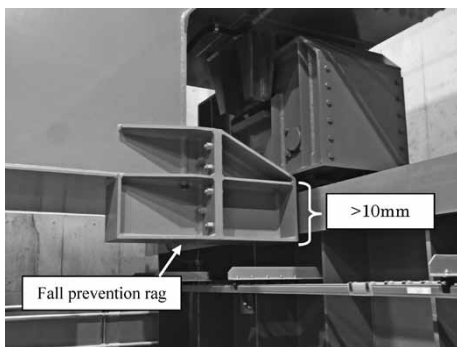


図4 脱線防止ラグ

Fig. 4 Fall prevention rag for overhead crane

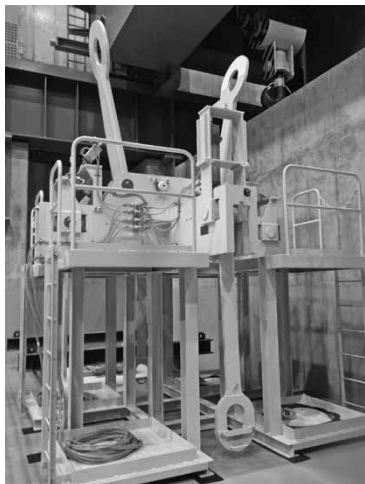


図5 垂直吊具

Fig. 5 Handling frame for removing cask

### 3.3 仮置架台

仮置架台は、搬入した金属キャスクを貯蔵するまでの間、一次的に金属キャスクを仮置きするための架台である（図6）。仮置架台上では金属キャスクは横置きに設置される。大きさの異なる4種類の金属キャスクを仮置きできるように、架台の脚部構造は金属キャスクの径方向及び長手方向に可変となっている。金属キャスクを輸送するために必要な架台は国内でも多数の実績があるが、対象とする金属キャスク専属の架台となっており、このようにサイズの異なる4種類の金属キャスクに応じて脚部が可変できる架台は国内にはなく、本設備の特徴となっている。

### 3.4 たて起こし架台

たて起こし架台は、横置き状態の金属キャスクを垂直状態にたて起こすための架台である（図7）。また、搬出時には垂直状態の金属キャスクをよこ倒しするためにも使用される。仮置架台同様、4種類の金属キャスクに対応するために架台の脚部構造は金属キャスクの径方向及び長手方向に可変となっている。また、たて起こし架台の下部には3.5節で述べる衝撃吸収材を設置し、たて起こし時に金属キャスクが転倒しても損傷しない構造としている。

### 3.5 衝撃吸収材

衝撃吸収材は、金属キャスクをたて起こす際に落下・転倒して損傷するのを防ぐ目的でたて起こし架台の下部に布設される。金属キャスクが転倒する時の転倒エネルギーを吸収し、金属キャスクに作用する衝撃力を低減させるように設計している。衝撃吸収材は木材で構成されており、金属キャスクの転倒エネルギーを木材のひずみエネルギーで吸収する構造となっている。なお、木



図6 仮置架台

Fig. 6 Temporary table for cask

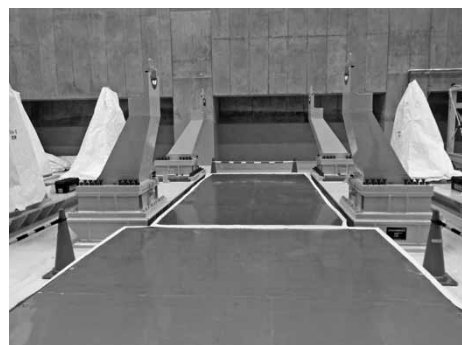


図7 たて起こし架台

Fig. 7 Raising table for cask

材単独では腐食あるいは火災等が考えられることからステンレス製の缶体で覆う構造としている。

使用する木材は金属キャスクの緩衝体で使用実績のあるバルサ材である。バルサ材は密度に応じて材料強度が異なることから、使用する密度範囲を選定して、その密度範囲での応力-ひずみ曲線を基に転倒評価を行った。金属キャスクと衝撃吸収材を三次元ソリッド要素にてモデル化し(図8)、汎用有限要素法解析コードLS-DYNAを用いて評価を行った。バルサ材の応力特性は公開された文献データ<sup>2)</sup>に基づいた。金属キャスク転倒による衝撃吸収材の変形履歴結果を図9に示す。衝撃吸収材の高さは1,000mmであるのに対して貫入深さが516mmとなっており、金属キャスクの転倒エネルギーを十分に吸収できることが分かる。

### 3.6 検査架台

図10に示す検査架台は、金属キャスクの貯蔵前検査、貯蔵中検査、搬出前検査、あるいは貯蔵期間中の金属キ

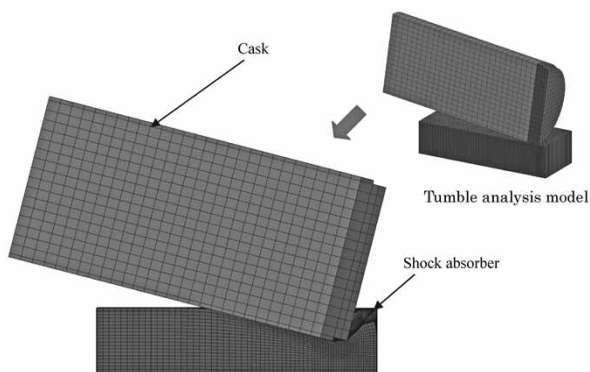


図8 衝撃吸収材の転倒評価結果  
Fig. 8 Result of tumble analysis for shock absorber

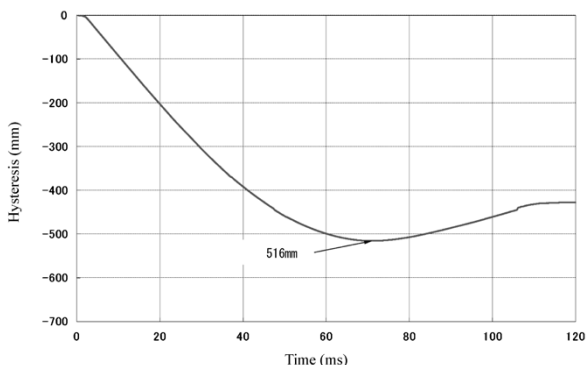


図9 衝撃吸収材の転倒評価における変形時刻歴  
Fig. 9 Deformation hysteresis of shock absorber



図10 検査架台  
Fig.10 Deck frame for testing

ャスクの修復作業等を行うために設置された架台である。検査架台は上部歩廊と下部歩廊で構成され、金属キャスクをたて置き状態で受入れる。高さの異なる4種類の金属キャスクに対応するために、上部歩廊は電動機で800mm程度昇降させることができる。また、エア駆動の搬送台車にたて置きに載せられた金属キャスクを受入れるため、上部歩廊及び下部歩廊の前面が開閉する構造となっている。金属キャスクを受入れる時は歩廊を開にし、受入れた後は歩廊を閉にして作業を行う。

### 3.7 貯蔵架台固縛用埋込金物

貯蔵架台固縛用埋込金物は、金属キャスクを積載した貯蔵架台を貯蔵エリアの床面にボルトを介して固定するための埋込金物であり、図11に示すようにメネジが切られたボス部を床面に埋め込んで設置している。なお、一つの金属キャスクに対して10本のボルトで固定される。

さらに、貯蔵中に金属キャスクが地震によって転倒しないように、埋込金物のボス部に対してアンカーボルトを接続することにより、地震時の引抜力に耐えうる構造としている。

埋込金物は、金属キャスクを積載した貯蔵架台と10本のボルトで取り合うことから、現地での取り付け精度に注意を要した。そこで、工場段階でボス部10個を1基分として鋼材でつなぐことにより、据付工事を容易にした。ボス部と鋼材との固定は溶接ではなく、熱によるひずみが生じにくい冷やし嵌(ば)めを行うことで精度確保の工夫を行った。

### 3.8 監視設備

監視設備は、金属キャスクの蓋間圧力、金属キャスクの表面温度、貯蔵建屋の給排気温度、貯蔵建屋内及び周辺監視区域境界付近の外部放射線線量率、機器の運転状態及び健全性などを監視する設備である。

これらの計測信号を貯蔵建屋内の監視盤室に集約して監視するとともに事務建屋の執務スペースにもデータを伝送しており、通常時は事務建屋で監視する。なお、本設備は、情報漏洩(えい)の防止やワーム/ウイルスの脅威からシステムを保護する観点から、システム以外の他のコンピュータやインターネットなどのコンピュータネットワークと接続しないスタンドアロン方式としている。

監視設備は、PC機器と監視制御データ表示システム

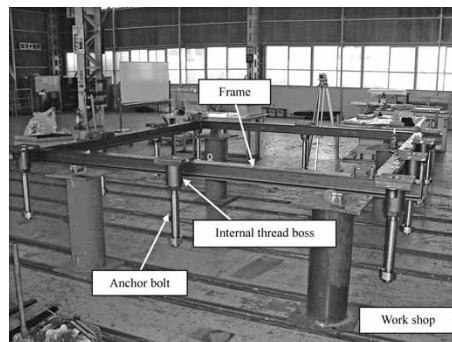


図11 貯蔵架台固縛用埋込金物  
Fig.11 Fixing hardware for storage table

SCADAのソフトウェアを使用したPCベースの監視制御システム及びデータ収集用のサーバにて構成している。

データ収集用のサーバは、システム構成を二重化して冗長性を持たせ、システムを停止することなく稼働させることが可能となっている。また、1秒周期で収集されるデータは装置内に1カ月間保存できると同時に、運転員の操作により外部記録媒体に出力することが可能となっている。

#### 4. 設備の操作性確認

本施設では3章にて述べてきた設備を用いて金属キャスクを受入れて貯蔵を行うことから、取り扱う金属キャスクを模擬した実規模のキャスクを使用して試運転を行うことにより、設備の操作性を確認した。なお、試運転は以下の観点で実施した。

- ・模擬キャスクを施設に受入れた時の受入れ区域天井クレーン及び水平吊具を使用した吊上げ確認及びハンドリングができることの確認
- ・模擬キャスクが仮置架台及びたて起こし架台に適切に置けることの確認
- ・たて起こし架台上での受入れ区域天井クレーン及び垂直吊具を使用したたて起こし作業ができることの確認 (図12)
- ・搬送台車に乗せられた金属キャスクが検査架台にて受入れができることの確認
- ・金属キャスクと貯蔵架台固縛用埋込金物とのボルトを介した固縛作業ができることの確認

上記の観点での試運転を行った結果、問題なく金属キャスクを受入れて、貯蔵できることを確認した。



図12 たて起こし作業状況  
Fig.12 Cask raising task

むすび＝当社は2009年に使用済燃料貯蔵建屋の内装設備を受注以来、許認可業務、設備の設計、製作、据付、試運転を進めてきた。こうした業務を経験する中で培ってきた様々な技術や知見をベースに、本案件を通して金属キャスクを使用した使用済燃料の中間貯蔵事業に貢献することができた。当社は、今後も需要が見込まれている中間貯蔵施設に取り組んでいく所存である。

#### 参 考 文 献

- 1) リサイクル燃料貯蔵㈱. 事業概要ホームページ.  
<http://www.rfSCO.co.jp/company/business.html>.  
(参照 2013-12-09).
- 2) 白井孝治ほか. 緩衝材用木材の圧潰特性評価－温度(80℃以下)とひずみ速度の影響－. 電力中央研究所報告 研究報告：N08074. 2009, p.32.