

### (33) 高速飛来物の垂直衝突荷重に対する金属キャスクの漏えい特性

Horizontal impact test concerning metal cask subjected to missile

白井孝治\*, 亘 真澄\*\*, 川口昇平\*\*\*, 南波宏介\*\*\*\*

Koji SHIRAI, Masumi WATARU, Shohei KAWAGUCHI and Kosuke NAMBA

- \* 工博 (財) 電力中央研究所 地球工学研究所 上席研究員 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)
- \*\* 工修 (財) 電力中央研究所 地球工学研究所 上席研究員 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)
- \*\*\* 工修 (財) 電力中央研究所 地球工学研究所 主任研究員 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)
- \*\*\*\* 工修 (株) ドーコン 交通事業本部 技師 (〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央 1-5-4-1)

キーワード: 金属キャスク, 金属ガスケット, 高速飛来物, 密封性能, 経年変化

Key Words: (Metal Cask, Metal Gasket, Missile Impact, Sealing Performance, Aging Effect)

#### 1. はじめに

2001 年に米国で発生した同時多発テロ以降, 欧米を中心に重要な原子力施設に対する航空機衝突に対する安全性評価が実施されている. シビアアクシデントとして, 使用済燃料を一時的に貯蔵する中間貯蔵施設に民間航空機が衝突した場合を想定し, 貯蔵施設内の貯蔵容器(金属キャスク)に外部から衝撃荷重が付与された場合の密封性能に及ぼす影響を評価しておくことが重要である<sup>1)2)</sup>. 図-1 に, 金属キャスクの概要を示す. 金属キャスクの密封機能は, キャスク胴体部と蓋部の間には金属ガスケットを設置し, 金属ガスケットを挟み込むことで内部に密封空間を構築することにより担保される.

本論文では, 使用済燃料の中間貯蔵施設への民間航空機の衝突により, 航空機エンジンが施設内に侵入し, 実物大金属キャスク上面に垂直方向から高速飛来物(質量 300kg, 直径 50cm)が衝突した場合を想定した衝突試験に対する漏えい特性について検討を加えた. まず, 実物大金属キャスクの 1/10 縮尺蓋部模型と, 実物大線径を有する二重メガネ型アルミ製金属ガスケットを用いて, 金属ガスケットの荷重-復元力特性を求め, He ガスの漏えいが発生するガスケットの復元変位を求め, 衝突試験で発生した蓋の口開き変位との比較を行い, 衝突荷重作用時に喪失する内圧の変化を評価した. さらに, 金属ガスケットの熱劣化促進試験を行い, 経年変化が漏えい特性に及ぼす影響を評価した.

#### 2. 高速飛来物垂直衝突試験<sup>2)</sup>

##### 2.1 試験条件

貯蔵施設に対する航空機落下を想定した場合の金属キャスク密封性能に関する実験的評価として, 金属キャスク蓋部に高速飛来物を鉛直方向から衝突させる高速飛来物垂直衝突試験を実施した.

図-2 に, 高速飛来物垂直衝突試験の概要を示す. 試験では, 推進薬の燃焼によりランチャー上の高速飛来物を飛翔させ, 横向きに設置された実物大蓋部モデルに対し, 垂直方向から二次蓋中央部に衝突させ, 衝撃荷重を載荷した.

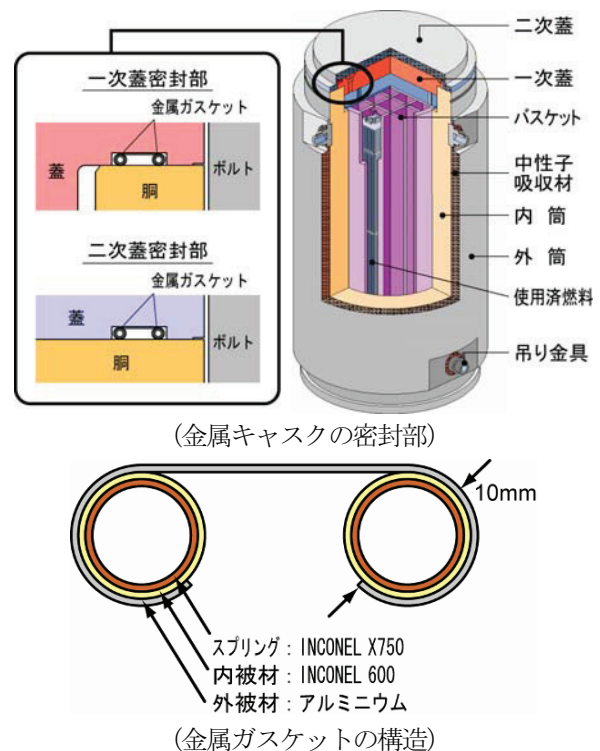


図 1 金属キャスクの概要

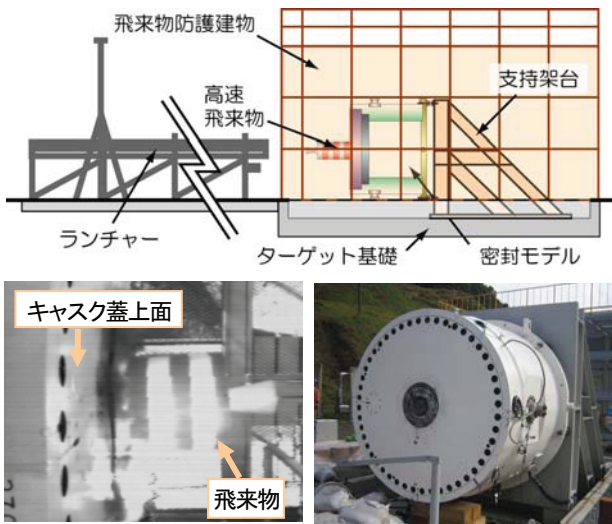


図-2 高速飛来物垂直衝突試験の概要

図-3に、試験に使用した実物大密封モデル試験体の形状・寸法を示す。試験体は、実物大金属キャスクの上部を1/3長さで切断して製作した。蓋構造は二枚の蓋を持ち、蓋部と胴部の間にアルミ被覆複列金属ガスケット（断面径：一次蓋φ5.6mm、二次蓋φ10mm）を挟み込むことで、所定の密封性能を確保する。

衝突試験では、航空機エンジンを2/5に縮尺した鋼製飛来物（直径50cm、質量300kg）を用いた。飛来物の前方部には緩衝材を組み込んだ半柔構造とし、所定の衝突速度（66m/s）で衝突した際に、航空機エンジン（衝突速度60m/s）が衝突した場合に金属キャスクに与える損傷と等価となるように設定した。

図-4に、測定項目を示す。試験では一次蓋と二次蓋間（以下、蓋間）にHeガスを306kPa（ゲージ圧）まで加圧充填し、一次蓋、二次蓋ガスケット部のHe漏えい率および蓋間圧力等を測定した。

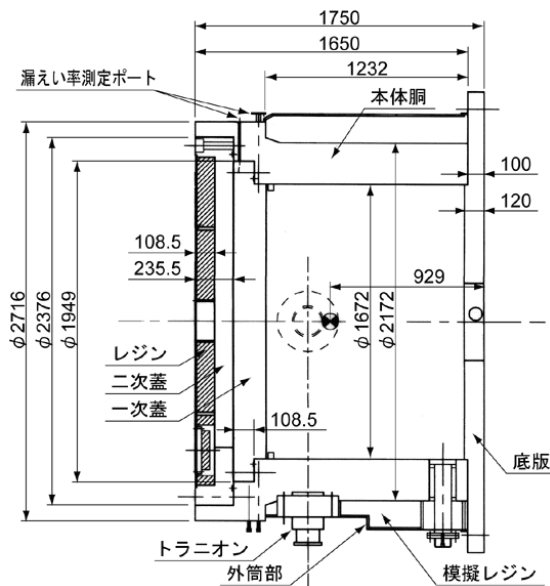


図-3 実物大密封モデル試験体の形状・寸法

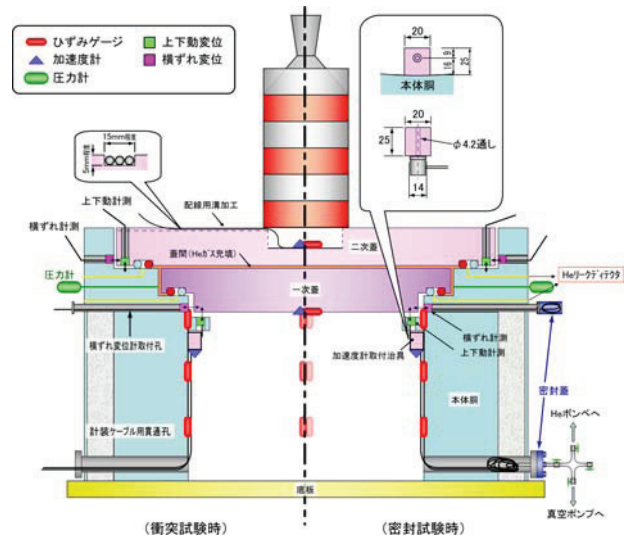


図-4 垂直衝突試験時の測定項目

## 2.2 試験結果

図-5に、一次蓋および二次蓋で測定された漏えい率や二次蓋のボルトの応力、蓋の変位の時刻歴を示す。

一次蓋や二次蓋の蓋締付ボルトに塑性変形は発生していない。一方、二次蓋の漏えい率は、衝突直後に発生する口開き変位により計測器の検知レベル（ $1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$ ）を超過し、計測器が緊急停止したため、計測器を交換し、再測定するまでの間は計測されていない。しかしながら、衝突荷重の载荷終了後は口開き変位が初期の値に復元しており、試験から3時間経過した再計測の結果、二次蓋ガスケットの漏えい率は  $1 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$  以下の値を保持する結果となった。蓋間圧力には衝突による一次蓋と二次蓋の曲げ振動に起因する蓋間の体積変化に伴う変動が発生した。なお、瞬間的な二次蓋からの漏えいにより、軽微な蓋間の圧力変化（初期値305kPaから8kPaの低下）が発生したものの、一次蓋ガスケット部の漏えい率は、衝突後も  $1.0 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$  オーダーの値を保持しており、金属キャスク内部の負圧が直ちに損なわれることはないことが判明した。

## 3. 金属ガスケットの残存弾性復元変位<sup>3)</sup>

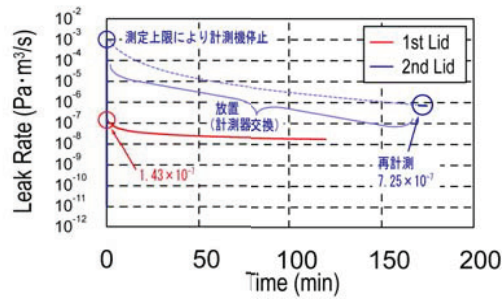
### 3.1 試験方法

アルミ製ガスケットの1/10縮尺模型を用いて、加熱促進劣化（190℃・85時間）の有無をパラメータとした復元力特性試験を行い、ガスケットの圧縮変位と線荷重の関係性を求めた。なお、加熱促進条件は、実際の金属キャスクによる貯蔵時の金属ガスケット部の温度低下（初期温度120℃）と貯蔵期間（60年）を考慮して設定した。

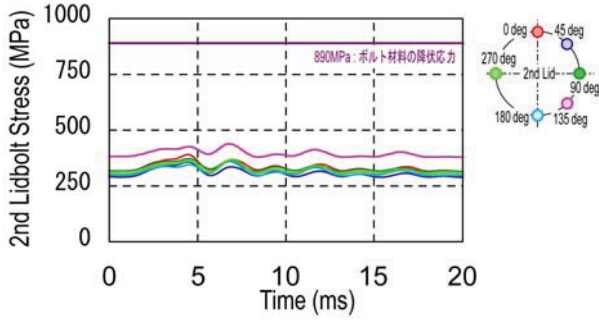
表-1に、金属ガスケットの仕様を示す。また、図-6に、残存弾性復元変位測定用試験体の概要を示す。2枚

表-1 金属ガスケットの仕様

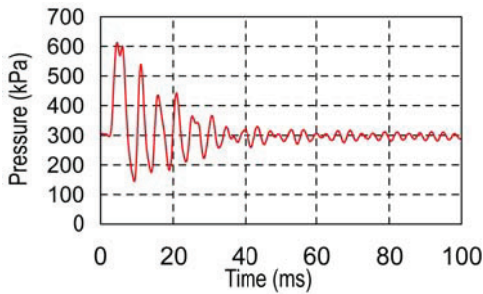
品名	ヘリコフレックス2連シール (二重メガネ型)
断面径	φ 10mm
設計圧縮量	1.1mm
設計線荷重	340N/mm
被覆材	アルミニウム (A1050-0材)
内被材	Inconel 600
スプリング	Nimonic90
内径	171mm
外径	219mm



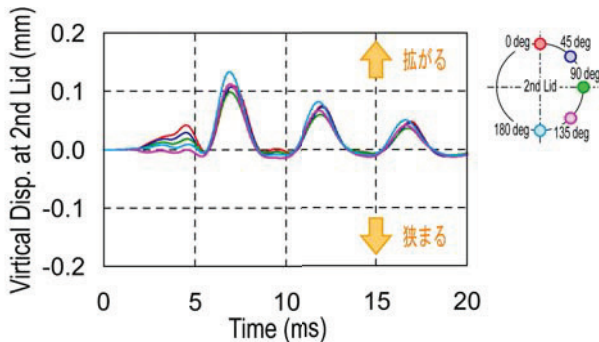
(ヘリウム漏えい率)



(二次蓋締付けボルト応力)



(蓋間圧力)



(二次蓋上下動変位)

図-5 垂直衝突試験時の測定結果

のフランジに金属ガスケットを装着し、ボルトで締め付ける構造となっており、片側のフランジにガスケット溝とキャビティを設ける。ガスケット溝には He リーク測定用のディテクタポートを、キャビティには He 充填ポートを設け、ガスケット部温度測定用に熱電対挿入口を設けている。荷重方法については、まず、変位制御で上部フランジを面タッチするまで下降させ、ガスケットに所定の圧縮変形を与え、一定荷重・一定温度条件下で保持した後、除荷を行った。

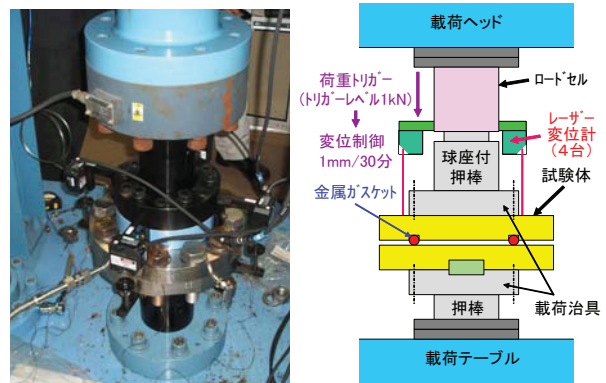


図-6 残存弾性復元変位測定用試験体の概要

### 3.2 試験結果

図-7に、常温下における荷重から除荷過程までの復元力曲線を示す。金属ガスケットの圧縮・復元サイクルは、圧縮曲線が徐々に平坦になる特徴があり、復元曲線はスプリングや内外被材のヒステリシス効果と永久変形により急激に荷重が下がる特徴がある。なお、図中の縦軸の線荷重は、試験時に測定される荷重値をガスケット2本の合計周長  $1225\text{mm} = (209 + 181) \times \pi$  で除し、単線単位長さあたりの荷重に換算したものである。本試験で使用した金属ガスケットの面タッチに必要な線荷重は  $350\text{N/mm}$  であり、設計線荷重  $340\text{N/mm}$  を満足している。圧縮変位については、金属ガスケット自身のなじみ(内被材と外被材、あるいは内被材とスプリング間のすきま等)が存在するため、荷重載荷時の立ち上がりが明瞭でない。本試験での圧縮量と永久変形の算出においては、荷重載荷時の立ち上がりと除荷時の勾配を直線近似して得られる変位軸との切片から算出した。その結果、面タッチに必要な圧縮量は  $1.0\text{mm}$ 、永久変形は  $0.84\text{mm}$  であり、残存弾性復元変位(以下、復元変位)は  $0.16\text{mm}$  となる。なお、除荷時に  $10^8\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{sec}$  以上の漏えいが発生する線荷重のレベルは  $8.6\sim 10\text{N/mm}$  であり、復元変位を喪失する直前まで良好な漏えい性能を示すことがわかる。

一方、 $190^\circ\text{C}\cdot 85$  時間で加熱劣化促進した場合、加熱後の残留線荷重は  $196\text{N/mm}$  であり、外被材の応力緩和効

果により、約55%まで線荷重が低下している。除荷時に $10^{-8}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{sec}$ 以上の漏えいが発生する線荷重のレベルは4.2~4.4N/mmであり、弾性復元変位を喪失する直前まで良好な漏えい性能を示すものの、面タッチに必要な圧縮量は0.96mm、永久変形は0.82mmであり、弾性復元変位は0.14mmであり、熱劣化による経年変化の影響を受けていないガスケットに比べ約10%低下しており、実機の評価においてはこれら経年変化の影響を適切に考慮する必要がある。

図-8に、垂直試験に対する試験解析結果より、ガスケット設置位置における口開き変位を推定した結果<sup>2)</sup>を示す。飛来物衝突直後に、二次蓋において復元変位0.16mmを超える口開き変位が複数回発生しており、瞬間的な漏えいを引き起こした要因と推定される。

#### 4. まとめ

使用済燃料の中間貯蔵施設におけるシビアアクシデントとして、民間航空機の衝突により航空機エンジンが施設内に侵入した場合を想定し、貯蔵施設内部の金属キャスクの密封性に与える影響を実験的に評価した。

以下に本研究により得られた知見を示す。

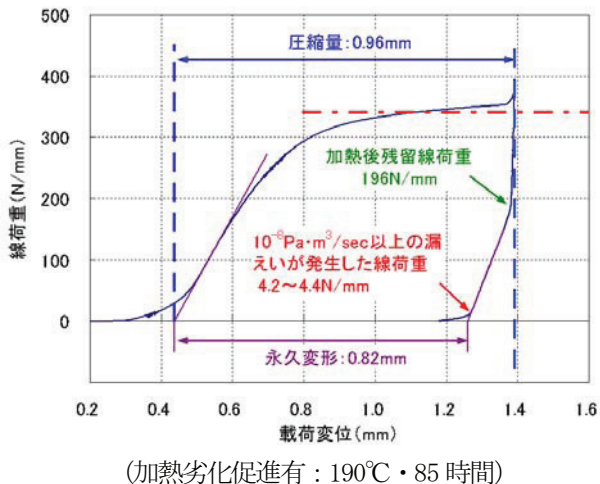
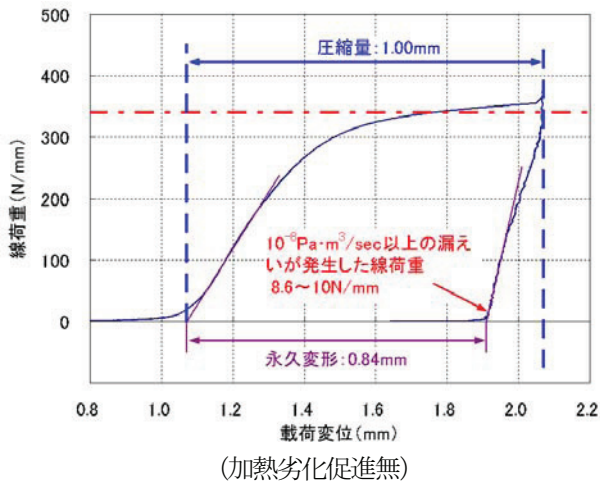


図-7 荷重から除荷過程までの荷重-変形曲線

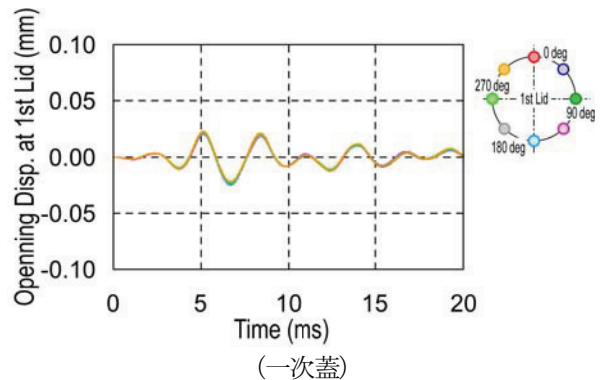
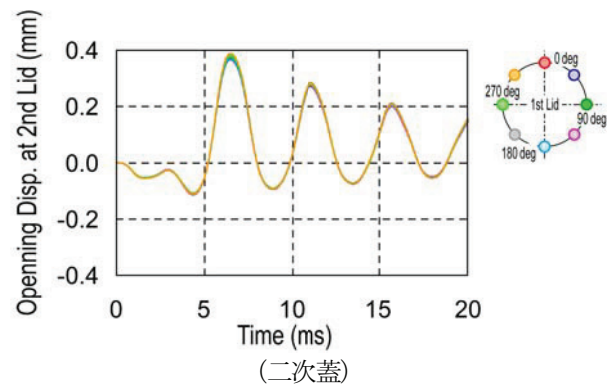


図-8 ガスケット位置での口開き変位の推定結果

- 1) 実物大金属キャスク上面への垂直方向からの高速飛来物衝突試験に対する漏えい特性を評価した結果、瞬間的な二次蓋からの漏えいにより、軽微な蓋間の圧力変化が発生したものの、一次蓋からの漏えいはなく、直ちに金属キャスク内部の負圧維持に影響を及ぼすことはないことが確認された。
- 2) 実物大金属キャスクの1/10縮尺蓋部模型と、実物大線径を有する二重メガネ型アルミ製金属ガスケットを用いて実施した金属ガスケットの荷重-復元力特性試験結果より、Heガスの漏えい発生限界となる復元変位、ならびに熱劣化に起因する経年変化による応力緩和の影響を明らかにした。さらに、衝突試験で発生した蓋の口開き変位との比較を行い、衝突荷重作用時に喪失する内圧の変化と復元変位の関係を明らかにした。

(本研究は、経済産業省 原子力安全・保安院からの受託研究として実施したものである。)

#### 参考文献

- 1) 南波宏介他：航空機エンジンの水平衝突荷重に対する金属キャスクの密封性能評価，土木学会論文集 A Vol. 66 No. 2, 177-193, 2010. 4.
- 2) 南波宏介他：航空機エンジンの垂直衝突荷重に対する金属キャスクの密封性能評価日本原子力学会和文論文誌, Vol. 9, No. 2, p. 183・198 (2010)
- 3) 白井孝治他：実物大金属キャスク蓋部モデルを用いた長期密封性能試験 (2) 実物大金属ガスケットの寿命評価，原子力学会 2010年秋の大会, K34