

(35) 金属キャスクへの高速飛来物水平衝突試験

Horizontal impact test concerning metal cask subjected to missile

南波宏介*, 白井孝治**, 三枝利有***

Kosuke NAMBA, Koji SHIRAI and Toshiari SAEGUSA

*工修 (財) 電力中央研究所 地球工学研究所 研究員 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

**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)

***工博 (財) 電力中央研究所 地球工学研究所 研究参事 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

キーワード: 金属キャスク, 航空機衝突, 衝突試験, 密封性能

Key Words: (Metal Cask, Aircraft Crash, Impact Test, Sealing Performance)

1. はじめに

米国やドイツなどの諸外国では, 重要な原子力施設に関して航空機衝突に対する安全性評価が活発に報告されている¹⁾⁴⁾. しかしながら, それらの報告では, その想定条件や評価手法は明らかにされていない.

我が国においても想定される外部人為事象のシビアアクシデントとして, 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, 把握しておくことが重要である.

以上より, 金属キャスクの衝撃荷重負荷時の密封性能を評価することを目的に, 密封性能に関する解析的評価, 高速飛来物水平衝突試験による実験的評価を実施した. 本報では, これらの評価に関する概要と結果について報告する.

2. 金属キャスク密封性能の解析的評価

2.1 金属キャスクの構造

貯蔵容器として選定されている金属キャスクは使用済燃料集合体同士を仕切るバスケットを内部に収納し, 二枚の蓋部により内部を密封する構造である. 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, ガスケットを挟み込むことで密封空間を構築する構造である. 使用するガスケットは中心のコイルスプリングの弾性復元力と軟質金属製外被材の密着性を組み合わせることで耐熱性, 密封性を高めた構造となっている.

2.2 想定事象

想定される外部人為事象のシビアアクシデントとし

て, 貯蔵施設に民間航空機が衝突した場合を想定する. 対象航空機は, 海外で主要な評価対象とされているボーイング747型旅客機とし, 対象飛来物は, 旅客機のうち剛性の最も高いジェットエンジンとした. ジェットエンジンの諸元については, ボーイング747型旅客機に搭載実績があり, かつ比較的公開情報の多いGE製エンジンとした. 図-1に, GE製CF6-80C2型ターボファンエンジンの構造図⁵⁾(直径約2.7m, 長さ約4.3m, 重量約4.4ton)を示す. 貯蔵施設に航空機エンジンが衝突することにより, 金属キャスクが受ける影響を評価するためには, 航空機エンジンの貯蔵施設への衝突速度および金属キャスクへの衝突速度の設定が必要である. 本研究では, 貯蔵施設への衝突速度をIAEAの航空輸送要件相当の航空速度90m/sとし, 壁厚85cm程度の貯蔵施設に衝突するものと仮定した. この場合の破壊現象を, 既往の貫通限界評価式および残留速度評価式を用いて評価すると, 航空機エンジンは施設の外壁を貫通し, 60m/sの残留速度を有して, 貯蔵施設内に侵入することが予測され, 施設内の金属キャスクに衝突する可能性がある.

2.3 エンジン部の荷重時間曲線の算出

2.2で仮定した衝突速度60m/sを有する航空機エンジ

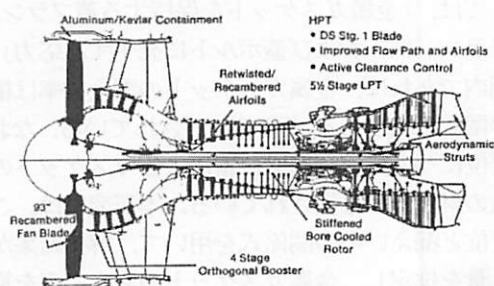


図-1 対象とした航空機エンジン⁵⁾

ンが金属キャスクに衝突した場合に、金属キャスクが受ける荷重時間曲線の算定を行った。

荷重時間曲線は、エンジン部が衝突速度 60m/s で剛体壁に衝突する際に剛体壁に発生する荷重から算定することとし、保守的に評価した。解析モデルの諸元は公開文献⁴⁾を目測にて設定し、解析に使用する物性値も公開文献に準じた。解析には、衝撃解析コード LS-DYNA を用いた。図-2 に、エンジンの解析モデル図と衝突速度が 60m/s における荷重時間曲線を示す。エンジン部が衝突した際に発生する荷重分布を見ると、衝突直後から 14msec までにエンジン中央部にあるコーン状のノーズの座屈やシャフトの塑性化によるピークが複数発生しており、14msec 以降は、後方部の機器（ブレードから燃焼室等）へ伝達する抵抗力による荷重が発生している。得られた荷重時間曲線を力積が等価な階段状の形状に簡素化し、キャスク密封部の評価に使用する設定荷重を決定した。なお、図中には、ドイツの Wieser 等⁴⁾が設定した荷重時間曲線（Wieser モデル）をあわせて示す。荷重時間曲線の包絡形状やピーク値は異なっているものの、荷重時間曲線の積分値はほぼ同程度であることが確認されている。

2.4 金属キャスクの衝撃応答解析

設定した荷重時間曲線を用いて標準的な金属キャスク⁶⁾の密封性能評価を解析的に実施した。

評価は設定荷重の載荷方向を変化させた 2 ケースについて実施した。載荷方向は、蓋部垂直方向からの垂直荷重と、蓋部水平方向からの水平荷重の 2 ケースである。図-3 に、垂直荷重条件の解析モデルを示す。解析モデルは、キャスクの対称性を考慮して 1/2 面对称モデルとし、一次蓋と二次蓋間の圧力、一次蓋および二次蓋の金属ガスケットの反力、蓋ボルトの初期締付け力に相当する荷重を考慮した。なお、垂直衝突解析モデルは荷重を垂直方向にて受けることより、胴体を切り離した構造とし、底部に鉄製の底板を固定したモデルとして簡略化を図っている。解析には衝撃解析コード LS-DYNA を用いた。

(1) 評価条件

金属ガスケットの密封健全性評価に係わる技術要件⁷⁾は、(独)原子力安全基盤機構において整理されつつあり、落下・転倒事象のような衝撃荷重による瞬時の変位に対しては、「金属ガスケットを保持する蓋フランジ部、本体フランジ部、および蓋ボルトに発生する応力」が弾性範囲内であれば、金属ガスケットの漏えい率は横ずれ変位の関数で表される(図-4⁶⁾)とされている。なお、横ずれ変位については、衝撃荷重によるガスケットの応答変位量の累積値が推奨されている。本研究では、この横ずれ変位と漏えい率の関係式を用いて、解析結果から蓋横ずれ量を推定し、金属ガスケットの漏えい率を算出した。

(2) 解析結果

垂直荷重条件における二次蓋については、ガスケットを保持する蓋フランジ部と本体フランジ部における Mises 応力は降伏応力を超過しており、二次蓋の密封性能は喪失する可能性がある。一方、垂直荷重条件における一次蓋、水平荷重条件における一次蓋、二次蓋では、金属ガスケットを保持する蓋フランジ部、本体フランジ部および蓋ボルトにおける Mises 応力は弾性範囲内であることから、横ずれ変位(延べ量)からの漏えい率の推定が可能である。評価可能な蓋部に関して横ずれ変位から漏えい率を推定すると、いずれの場合も蓋部の横ずれ変位(延べ量)は 2mm 程度であることから、推定漏えい率は $1.0 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 程度であった。

以上より、侵入速度 60m/s を有するエンジン部が施設内に侵入した後に、金属キャスクに衝突する、過酷な事象を想定した場合においても、金属キャスクは密封堅牢

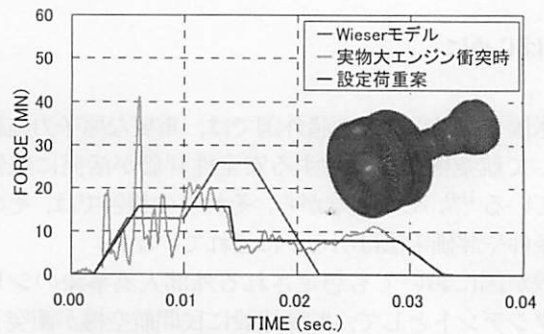


図-2 衝突速度 60m/s の荷重時間曲線

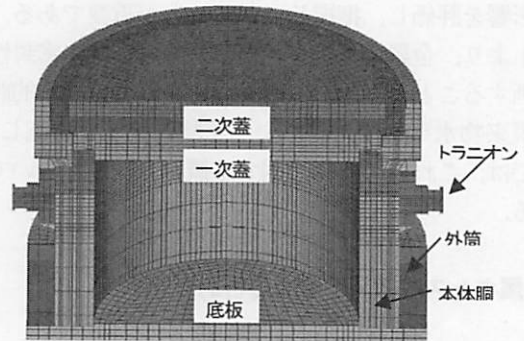


図-3 垂直荷重時解析モデル

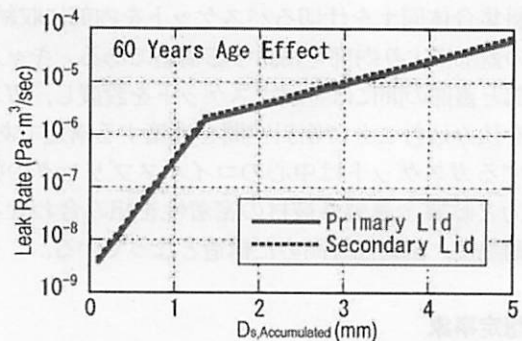


図-4 蓋の横ずれ量と推定漏えい率の関係

表-1 相似則換算率一覧

	定義	次元	換算率 (=m/p)	衝突試験換算率 (s=5/2)
長さ	l	L	$L_m/L_p = 1/S$	$L_m/L_p = 2/5$
質量	$m = \rho l^3$	M	$m_m/m_p = 1/S^3$	$m_m/m_p = 8/125$
時間	t	T	$T_m/T_p = 1/S$	$T_m/T_p = 2/5$
密度	$\rho = m/l^3$	ML^{-3}	$\rho_m/\rho_p = 1$	$\rho_m/\rho_p = 1$
速度	$v = l/t$	LT^{-1}	$v_m/v_p = 1$	$v_m/v_p = 1$
加速度	$\alpha = v/t$	LT^{-2}	$\alpha_m/\alpha_p = S$	$\alpha_m/\alpha_p = 5/2$
力	$F = m\alpha$	MLT^{-2}	$F_m/F_p = 1/S^2$	$F_m/F_p = 4/25$
運動量	$I = mv$	MLT^{-1}	$I_m/I_p = 1/S^3$	$I_m/I_p = 8/125$
応力・圧力	$P = F/l^2$	$ML^{-1}T^{-2}$	$P_m/P_p = 1$	$P_m/P_p = 1$
エネルギー	$E = mv^2/2$	ML^2T^{-2}	$E_m/E_p = 1/S^3$	$E_m/E_p = 8/125$
漏えい率	$Q = P l^3/t$	ML^2T^{-3}	$Q_m/Q_p = 1/S^2$	$Q_m/Q_p = 4/25$

* m: model (縮尺モデル)

* p: prototype (現寸モデル)

性を維持し続け、放射性物質の漏えいが発生する可能性は極めて小さいものと判断される。

3. 高速飛来物水平衝突試験

3.1 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、金属キャスクに高速飛来物を水平方向から衝突させる高速飛来物水平衝突試験を実施した。

図-5 に高速飛来物水平衝突試験概略図を示す。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、キャスク胴部上方に衝突させる。試験の測定項目は、図-6 に示す衝突時のキャスク蓋部の横ずれ変位、ガスケット間ヘリウム漏えい率、蓋部締付ボルト応力等である。

想定事象では、金属キャスクに対して航空機エンジン部が衝突することとしていたが、実規模大の航空機エンジン部を金属キャスクに衝突させることは現実には困難である。そこで、衝突試験では、相似則に則った衝突試験を実施することとした。相似則は長さの相似比を2/5、剛性、速度の相似比を1とし、その他のパラメータを次元解析により決定した。表-1に相似則換算率一覧を示す。

試験に使用した金属キャスクは一枚蓋構造の2/5縮尺金属キャスクであり、蓋部と本体部の間に複列アルミ被覆金属ガスケット(線径6.1mm)を挟み込み、所定の密封性能を確保している。試験では貯蔵時の収納物からの崩壊熱による経年変化を模擬することを目的に、ガスケットを装着後、キャスク蓋部に対し、加熱装置を用いて熱負荷を与えた。

衝突する高速飛来物は断面径500mm、重量316kgの鋼製飛来物である。飛来物の前方部には緩衝材を組み込むことで、衝突時に想定する荷重および力積が金属キャスクに入力されるように調整し、飛来物を製作した。

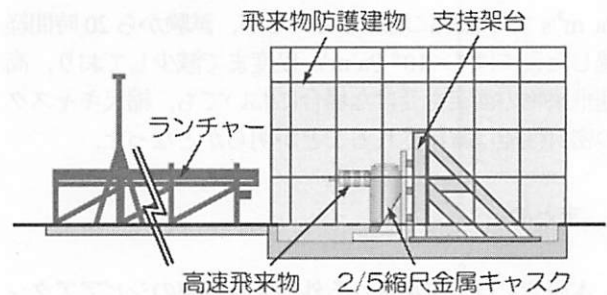


図-5 高速飛来物水平衝突試験概略図

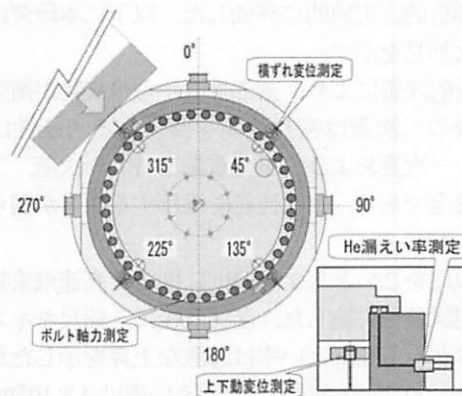


図-6 試験測定箇所

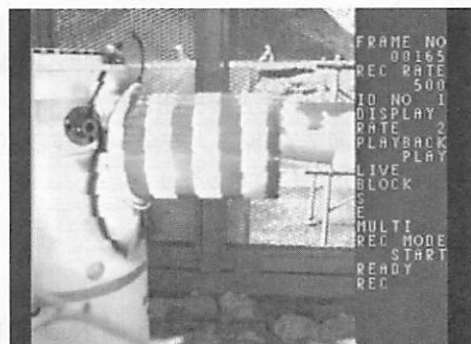


図-7 縮尺キャスクと高速飛来物の衝突状況

3.2 試験結果

図-7に縮尺キャスクと高速飛来物の衝突状況を、図-8に試験後の縮尺キャスク衝突位置における損傷状況を示す。飛来物は試験条件の通り、キャスク上部に水平に衝突している。また、試験後の金属キャスク衝突位置では、キャスク表面の外筒部に一部剥離が見られるが、キャスク全体に大きな損傷は見られなかった。図-9に、試験時に測定した蓋部横ずれ変位を示す。横ずれ変位は、衝突位置である315°と衝突位置と対角位置にあたる135°において、狭まる方向の横ずれ変位が発生し、45°、225°位置に広がる方向の横ずれ変位が発生していることから、衝突直後にオーバル変形が発生したものと考えられる。また、衝突直後においても蓋部ボルトの発生応力は降伏応力に比べて十分に小さいことが確認されており、蓋部の口開きは発生していない。図-10に、試験時に測定したガスケット間のヘリウム漏えい率を示す。ガスケット間のヘリウム漏えい率は衝突直後に 4×10^6 Pa \cdot m³/sまで急激に増加しているが、試験から20時間経過した後は 1×10^6 Pa \cdot m³/s程度まで減少しており、高速飛来物の衝突を受けた場合においても、縮尺キャスクの密封性能は維持されることが明らかとなった。

4. まとめ

本研究では、想定される外部人為事象のシビアアクシデントとして、貯蔵施設に民間航空機が衝突した場合を想定し、貯蔵施設内部の金属キャスクの密封性に与える影響を解析的、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。

- 1) 解析的評価により、蓋部垂直から飛来物が衝突した場合の二次蓋は密封性能を喪失する可能性はあるが、一次蓋および水平荷重加時の一次蓋、二次蓋は健全であり、密封性能を維持することが明らかとなった。
- 2) 相似比を2/5とした相似則に則った高速飛来物水平衝突試験を実施した。衝突直後に、縮尺キャスクのガスケット間漏えい率は急激な上昇を示したが、その後、20時間経過後には漏えい率は 1×10^6 Pa \cdot m³/s程度まで低下していることから、キャスクの密封堅牢性は維持されていることが確認された。

以上のことから、貯蔵施設に民間航空機が衝突した場合を想定しても、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。

(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) E.h.mult Josef Eibl, "Airplane Impact on Nuclear Power plants", SMiRT 17, Paper # J03-6, Prague, Czech Republic,

Aug., 2003

- 2) J.D. Riera, R. Rios, and I. Iturrioz, "Determination of the Load-carrying Capacity of a Reinforced Concrete Shell Subjected to Impact Loading", SMiRT 17, Paper # J04-4, Prague, Czech Republic, Aug., 2003
- 3) B. Droste, H. Volzke, G. Wieser and L. Qiao, "Safety margins of spent fuel transport and storage casks considering aircraft crash impacts," RAMTRANS, Vol. 13, No. 3-4, pp. 313-316, 2002
- 4) Gunter Wieser, et al., "Safety analysis of casks under extreme impact conditions", PATRAM 2004, Germany
- 5) Aviation Week & Space Technology, Jan., 2000
- 6) 影山他, 電中研報告 N06005, 2006.12.
- 7) 平成 17 年度 JNES 規格基準部セミナー『使用済燃料中間貯蔵施設に関する取り組み』, JNES-SS-0519, 2006.1



図-8 試験後縮尺キャスクの損傷状況

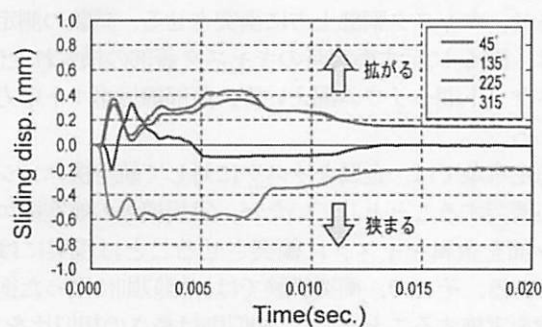


図-9 蓋部横ずれ変位の測定結果

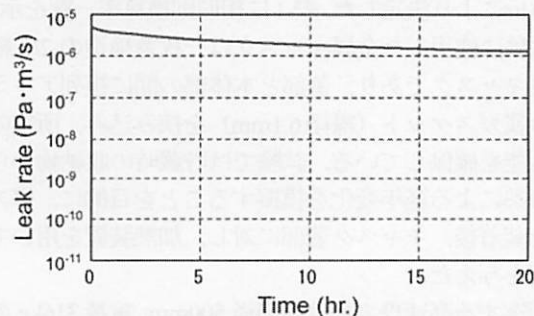


図-10 ヘリウム漏えい率の測定結果