

ひずみ基準を用いた竜巻飛来物に対する金属キャスクの耐衝撃性評価

Evaluation of Structural Integrity of Metal Cask due to impact of Tornado Missile with Strain-Based Criteria

白井 孝治*, 南波 宏介**
Koji Shirai, Kosuke Namba

* 工博, 研究参事, 電力中央研究所 原子力リスク研究センター(〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1)

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

Key Words: Tornado Missile, Metal Cask, Triaxiality Factor, Strain-base Criteria

キーワード: 竜巻飛来物, 金属キャスク, 応力多軸度係数, ひずみ制限基準

1. はじめに

我が国では, 原子力発電所から発生する使用済燃料を, 再処理するまでの間, 安全に貯蔵・管理するため, 使用済燃料中間貯蔵施設の事業開始を準備中である¹⁾. 使用済燃料の貯蔵においては, 堅牢な金属製の容器(以下, キャスク)が用いられる計画であり, これらキャスクについては, 輸送事故を想定した剛な衝突面への9m落下や鋼棒への1m落下試験が要求されている²⁾. 一方, 原子力規制委員会は, 平成25年6月に原子力発電所の竜巻影響評価ガイド³⁾(以下, 竜巻影響評価ガイド)を定め, 事業者に対し竜巻影響評価と竜巻防護対策の実施を求めており, キャスクに対しても, 竜巻飛来物が衝突した際の構造健全性及び密封性評価が要求される可能性がある.

竜巻影響評価ガイドでは, 代表的な竜巻飛来物として鋼製材(寸法は長さ4.2m×幅0.3m×奥行0.2m, 質量は135kg)が例示されており, 鋼製材の最大水平速度は51m/sに達することが想定されており, 衝突エネルギーは176kJとなる. このような大規模な衝突エネルギーを有する竜巻飛来物が, 飛来物断面を衝突面とした衝突姿勢を想定した場合, 局所的な大変形が生じることになる.

既往の研究⁴⁾によれば, このような局所的な変形に対する評価においては, ひずみ制限を考慮した破壊基準の適用が有効である. 一般に, キャスクの構造評価においては, 応力基準をベースとした設計が採用されているが, 竜巻飛来物や航空機衝突のように局所的に大規模な衝突エネルギーが作用する問題においては, ひずみ制限に基づく設計が合理的である. 日本機械学会(JSME)は, 竜巻飛来物の構造強度評価に関するガイドライン⁵⁾(以下, JSMEガイドライン)を制定し, 局所的な損傷を評価するための応力多軸度係数に基づくひずみ制限による破壊基準(以下, ひずみ基準)を提案している.

本論文では, 衝撃解析コードLS-DYNAを用いた数値解析により, JSMEや米国機械学会(ASME)のひずみ基準に基づき, 鋼製材相当の竜巻飛来物が鉛直方向から鍛造タイプのキャスク蓋部に衝突した際の損傷評価結果について述べる. さらに, キャスクに要求される鋼棒上への1m落下試験(以下, 1m落下要件)時の損傷性状と比較した結果について述べる.

2. ひずみ制限による破壊基準

ASMEコードSection IIIの付属書⁶⁾においては, 放射性物質輸送貯蔵兼用容器を対象とし, エネルギー入力に対するひずみ基準として, 一軸試験で得られた延性塑性ひずみを被衝突体に生じる応力多軸度係数(TF: Triaxiality Factor)で除した値とし, 以下の式を提示している.

$$[TF \cdot \varepsilon_{eq}^p]_{avg} \leq 0.67 \cdot \varepsilon_{uniform} \quad (1)$$

$$[TF \cdot \varepsilon_{eq}^p]_{max} \leq [\varepsilon_{uniform} + 0.25(\varepsilon_{fracture} - \varepsilon_{uniform})] \quad (2)$$

ε_{eq}^p : 相当塑性ひずみ

$\varepsilon_{uniform}$: 一軸引張試験で得られる引張強さひずみ

$\varepsilon_{fracture}$: 一軸引張試験で得られる破断ひずみ

式(1)は, 評価位置断面における平均局所相当塑性ひずみの制限値であり, 式(2)は, 評価位置断面における最大局所相当塑性ひずみの制限値である. なお, ASMEコードでは, 式(1)と式(2)の適用はステンレス鋼に限定している.

また, TFは, 式(3)で表される.

$$TF = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_e} \quad (3)$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: 主応力 (MPa)

σ_e : ミーゼス相当応力 (MPa)

TFは多軸応力場での延性低下の影響を示す係数であり、等2軸引張では2、平面ひずみ引張では $\sqrt{3}$ 、単軸引張では1となる。圧縮応力状態では負の値となるが、ASMEコードでは、TFが1.0を下回る場合には、TFを1.0とすることを推奨している。

キャスクの鋼製部材は炭素鋼であるため、JSMEガイドラインを参照し、 $\epsilon_{uniform}$ として式(4)で示される m_2 値（引張強さにおける真ひずみ）を採用する。

$$m_2 = 0.60 \left(1 - \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{uts}}\right) \quad (\text{炭素鋼})$$

$$m_2 = 0.75 \left(1 - \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{uts}}\right) \quad (\text{ステンレス鋼}) \quad (4)$$

R : 降伏比 = σ_{ys}/σ_{uts}

σ_{ys} : JSME 材料規格 2016 年度版⁷⁾ 第1章 表6で規定する設計降伏点 (MPa)

σ_{uts} : JSME 材料規格 2016 年度版⁷⁾ 第1章 表7で規定する設計引張強さ (MPa)

一方、 $\epsilon_{fracture}$ については、炭素鋼については一般化された値は整備されていないため、本論文では保守的な評価を行うため、 $\epsilon_{uniform}$ と同一の値として式(2)の第2項を無視することとした。

3. 衝撃応答解析

3.1 評価条件

図-1 に、竜巻飛来物の衝突と 1m 落下要件における評価条件を示す。対象とするキャスクは、BWR 使用済燃料用の二重蓋方式の金属製容器（直径約 2.4m×高さ約 5.3m、質量約 110ton）である。竜巻飛来物については、竜巻飛来物が衝突した際に竜巻飛来物自身の変形による吸収エネルギーが無視できる剛な飛来物とするため、鋼製材相当剛飛来物の諸元は、寸法は長さ 1.1m×幅 0.3m×奥行 0.2m、板厚 16mm、質量は 135kg とした。衝突姿勢については、鉛直方向からキャスク蓋部中央に衝突する

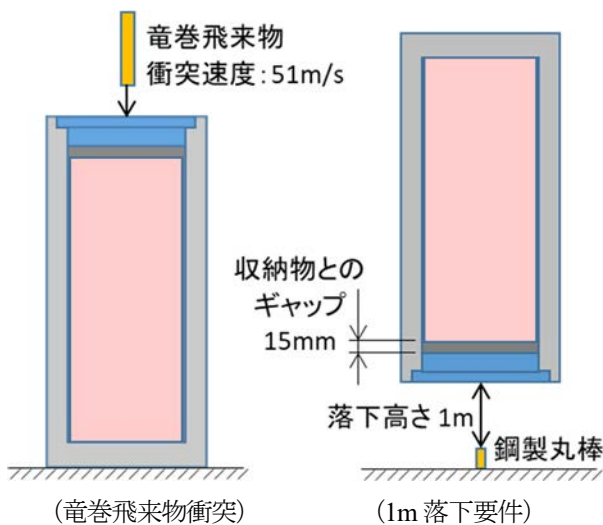


図-1 評価条件

場合（衝突速度 51m/s）を想定した。一方、1m 落下要件においても、キャスクの蓋部からの垂直落下姿勢とし、直径 15cm×高さ 30cm の鋼棒上に 1m 高さから自由落下して衝突する場合（衝突速度 4.4m/s）を想定した。

3.2 解析モデル

(1) キャスク

図-2 と表-1 に、キャスクの解析モデルと解析諸元を示す。解析モデルは、キャスクの対称性を考慮して 1/2 面对称モデルとした。また、竜巻飛来物の衝突評価においては、キャスクの底部を完全固定とした。

解析対象キャスクは、本体胴部、一次蓋、二次蓋、蓋締付ボルトで構成され、材料として炭素鋼またはステンレス鋼が使用されている。また、本体胴と一次蓋には、中性子遮へい用の樹脂材（レジン）が充填されており、本体胴部外筒のみシェル要素でモデル化し、その他の部材はソリッド要素でモデル化した。なお、キャスク内部に収納されている使用済燃料と燃料の収納位置を保持するバスケット（以下、収納物）は、等価な円柱体とした。

表-2 に、蓋ボルト密封部の解析条件を示す。キャスクの密封性能は、本体フランジと二重の蓋の溝部に設置

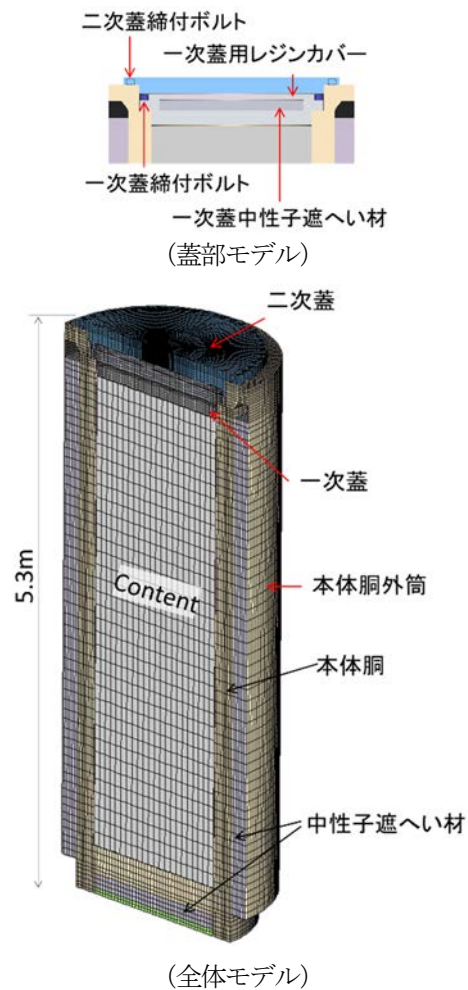


図-2 キャスクの解析モデル

する金属ガスケットにより担保されるため、一次蓋と二次蓋の蓋ボルト密封部モデルとして、金属ガスケットの反発力と蓋ボルトの締付力を考慮した。本体胴と蓋間の摩擦係数は0.6⁸⁾とし、それ以外の接触部における摩擦係数は0.52⁹⁾とした。

表-1 キャスクの解析諸元

部位	寸法	質量
本体胴	内径 1552 mm, 胴厚 223 mm	72.4 ton
本体外筒	外径 2408 mm, 厚さ 15 mm	
一次蓋	外径 1776 mm, 厚さ 294 mm	3.8 ton
二次蓋	外径 2088 mm, 厚さ 163mm	3.7 ton
収納物	外径 1543	30.8 ton

表-2 蓋ボルト密封部の解析条件

部位	一次蓋	二次蓋
ガスケット径	1598 mm	1860 mm
ガスケット反力	858 kN/mm	858 kN/mm
蓋ボルト締付力	353 kN	181 kN

(2) 竜巻飛来物と鋼棒

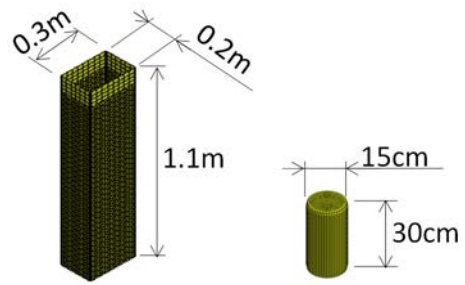
図-3 と表-3 に、竜巻飛来物と鋼棒の解析モデルを示す。竜巻飛来物の解析モデルは、前述したように、竜巻ガイドラインに示される鋼製材と同一の断面形状を有する板厚 16mm, 長さ 1.1m の鋼製材相当の剛飛来物とした。また、鋼棒については、IAEA の定める輸送規則の要件²⁾を参照し、直径 15cm, 長さ 30cm の鋼製丸棒とした。

表-4 キャスクと竜巻飛来物、および鋼棒に用いた材料特性 (常温)^{9), 11-14)}

部位	材料	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (MPa)	密度 (ton/m ³)	ポアソン比 (-)	破断ひずみ (-)
キャスク本体・二次蓋	JSME-N4 GLF1	207	414	202000	7.85	0.3	0.300
一次蓋	SUSF304	205	480	195000	7.93	0.3	0.429
中性子遮へい材用一次蓋カバー	SUS304	205	520	195000	7.93	0.3	0.454
中性子遮へい材	レジン	54.43	163.30	7350	1.60	0.268	0.1078
一次蓋・二次蓋ボルト	SNB23-3	890	1000	191000	7.85	0.3	0.066
本体外筒	SGV480	-	-	202000	7.85	0.3	-
収納物	SGV480	-	-	94000	3.67	0.3	-
竜巻飛来物・鋼棒	SN490B	325	490	205000	7.86	0.3	0.184

表-5 中性子遮へい材の材料特性 (常温)⁸⁾

応力 (MPa)	54.43	85.0	100.0	111.0	117.75	122.50	126.0	163.30	163.30
ひずみ (-)	0	0.0014	0.0039	0.0079	0.0120	0.0168	0.0229	0.1078	0.7778



(鋼製材相当剛飛来物) (鋼製丸棒)
図-3 竜巻飛来物と鋼棒の解析モデル

表-3 竜巻飛来物と鋼棒の解析諸元

部位	竜巻飛来物	鋼棒
形状	幅 0.3 m×奥行 0.2 m 長さ 1.1 m, 板厚 16 mm 質量 135 kg	直径 15 cm 長さ 30 cm
本体外筒	135 kg	42 kg
衝突速度	51 m/s (竜巻飛来物)	4.4 m/s (キャスク)

(3) 材料特性

表-4 と表-5 に、キャスクと竜巻飛来物、および鋼棒に用いた材料特性を示す。本体外筒と収納物については弾性材料、中性子遮へい材については多直線近似の応力-ひずみ関係⁸⁾、これら以外の材料についてはトリリニアアの応力-ひずみ関係とした。なお、材料の温度依存性は無視した。

表-6 に、材料に適用した動的強度倍率を示す。ひずみ速度依存性については、NEI のガイド¹⁰⁾を参照し、中性子遮へい材を除く材料について、ひずみ速度 10^4 /s から 10^2 /s の区間で設定し、ひずみ速度 10^4 /s の動的強度倍率を 1.0 とし、 10^2 /s の動的強度倍率の値として表-6 の値を設定した。

表-6 ひずみ速度 10^2 /s における動的強度倍率

材 料	降伏強度	引張強度
炭素鋼	1.29	1.1
ステンレス鋼	1.18	1.0

4. 衝撃応答解析結果

4.1 竜巻飛来物の衝突によるキャスクの衝撃応答

図-4 に、二次蓋表面と本体胴部フランジ面の相当塑性ひずみ分布、ならびに竜巻飛来物の速度と蓋部の開口変位の時刻歴波形を示す。竜巻飛来物は、キャスク蓋部に衝突後 0.9 ms でリバウンドしている。

竜巻飛来物が衝突したキャスク蓋部中央付近に変形が集中しており、二次蓋表面の最大相当塑性ひずみは 0.17 % である。二次蓋設置位置における本体フランジ面の一部に 0.016 % の最大相当塑性ひずみが発生しているが、一次蓋のフランジ部には塑性ひずみは発生していな

い。一方、開口変位については、飛来物衝突後 0.4 ms における二次蓋の最大変位応答は 0.54 mm であり、その後も蓋の自由振動による変位応答が発生しているが、一次蓋の開口変位はほぼ無視できる応答となることがわかる。さらに、一次蓋および二次蓋の締付ボルトの軸力も弾性範囲内であり、径方向のずれ変位も発生していない。これらの結果より、竜巻飛来物の衝突によるキャスク密封部（一次蓋）に発生する変形は小さく、キャスクの密封性能は維持される。

4.2 1m 落下要件時のキャスクの落下応答

図-5 に、1m 落下要件時の二次蓋衝突面と本体胴部フランジ面の相当塑性ひずみ分布、ならびに竜巻飛来物の速度と蓋部の開口変位の時刻歴波形を示す。キャスクは、鋼棒へ衝突後 43 ms でリバウンドしている。

キャスク蓋部と鋼棒との衝突面外周部に変形が集中しており、二次蓋表面の最大相当塑性ひずみは 25.6 % であり、竜巻飛来物の衝突に比べ、非常に大きな塑性ひずみが発生している。開口変位については、二次蓋の最大変位応答は 0.05 mm であり、リバウンド後にゼロとなっており、残留開口変位はみられない。一方、一次蓋の開口変位については、収納物との相互作用により、衝突後 15 から 52 ms の間に、0.4 から 0.5 mm のピーク開口変位が複数回発生しているものの、残留開口変位は発生していない。また、径方向のずれ変位も発生しておらず、

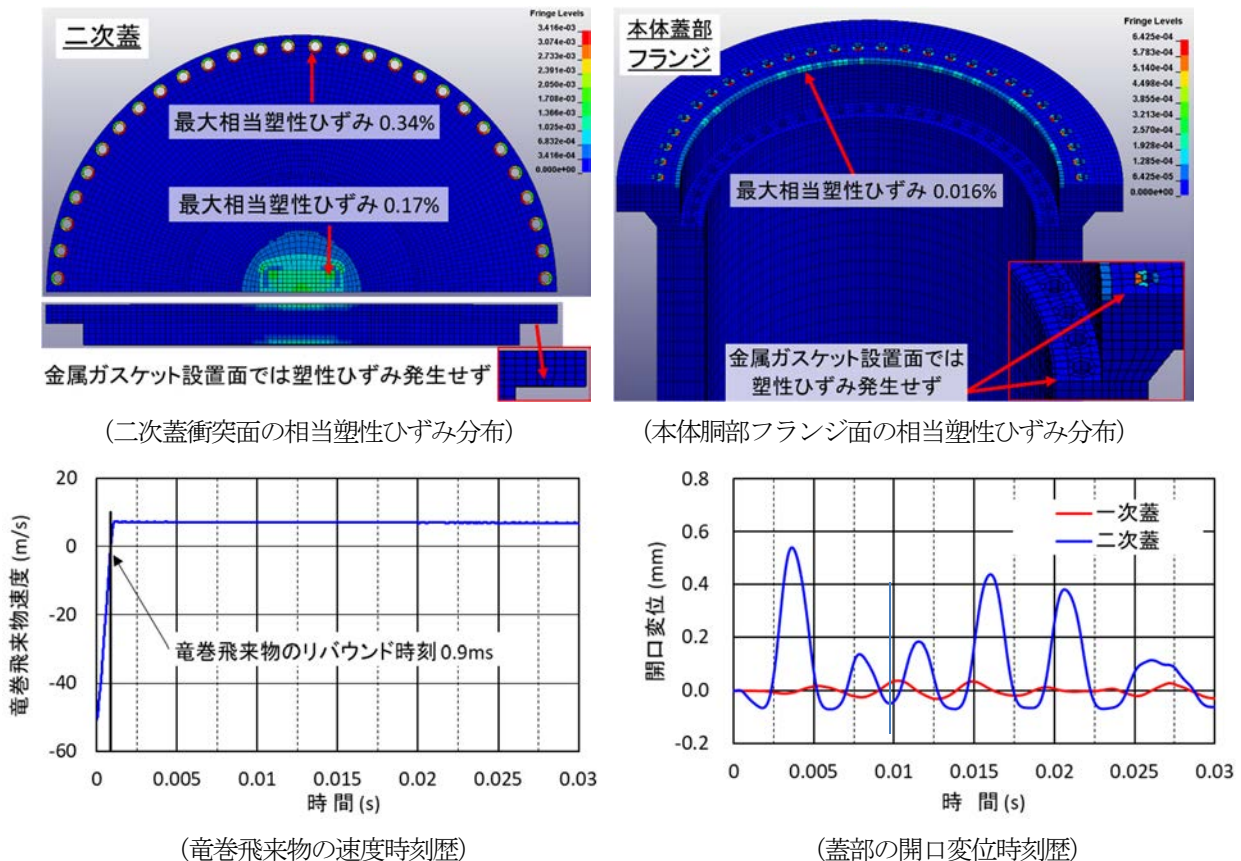


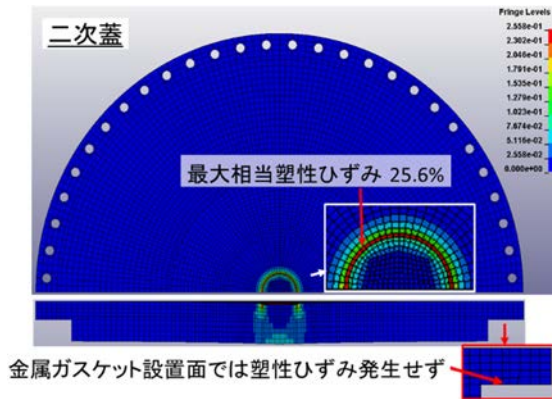
図-4 竜巻飛来物の衝突によるキャスクの衝撃応答 (衝突速度: 51 m/s)

一次蓋の蓋ボルト，ガスケット装着面においても塑性ひずみは発生していない。これらの結果より，1m 落下要件の衝撃力によりキャスク密封部（一次蓋）に発生する変形は小さく，キャスクの密封性能は維持される。

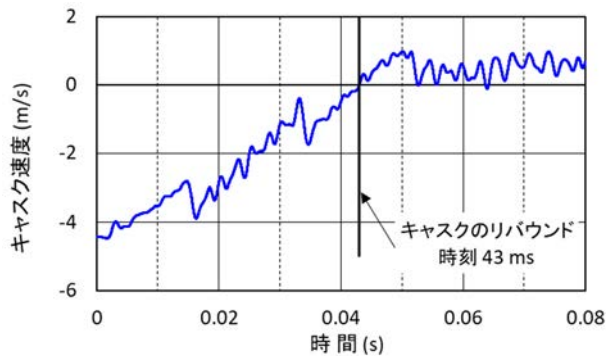
図-6 に，二次蓋と鋼棒との衝突面で最大相当塑性ひずみが発生した蓋の板厚方向の TF 値，ならびに TF と相当塑性ひずみの積 $TF \cdot \epsilon_{eq}^p$ の値の時刻歴波形を示す。なお， $[TF \cdot \epsilon_{eq}^p]_{average}$ と $[TF \cdot \epsilon_{eq}^p]_{max}$ は評価断面要素の $TF \cdot \epsilon_{eq}^p$ の平均値と最大値であり，図-6 の縦軸は二次蓋の $\epsilon_{uniform}$ で除して無次元化した値である。リバウンド後の TF 値の時刻歴によれば，二次蓋表面近傍を除き，

圧縮応力と引張応力が混在する多軸応力分布となっており，TF 値は 1.0 の値を下回っているが， $TF \cdot \epsilon_{eq}^p$ の算出時には $TF=1.0$ とした。

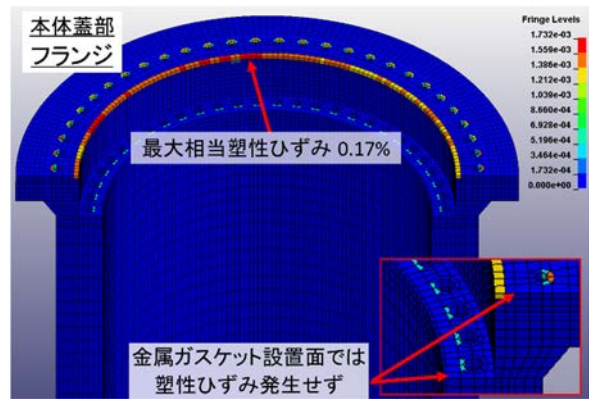
$TF \cdot \epsilon_{eq}^p$ の時刻歴波形結果より，リバウンド後の $[TF \cdot \epsilon_{eq}^p]_{average}$ (図中の黒破線) は 0.30 であり，式(1)で定義される制限値 0.67 を下回る。一方， $[TF \cdot \epsilon_{eq}^p]_{max}$ (図中の赤破線) は 0.85 であり，式(2)で定義される制限値 1.0 を下回っており，評価断面における破断はなく，板厚方向の損傷は表面付近の局所的な領域にとどまることが判る。



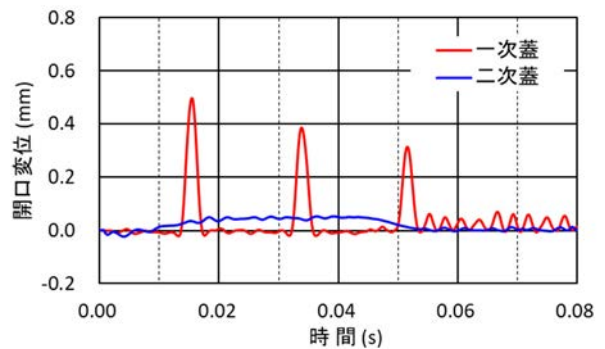
(二次蓋表面の相当塑性ひずみ分布)



(キャスクの速度時刻歴)

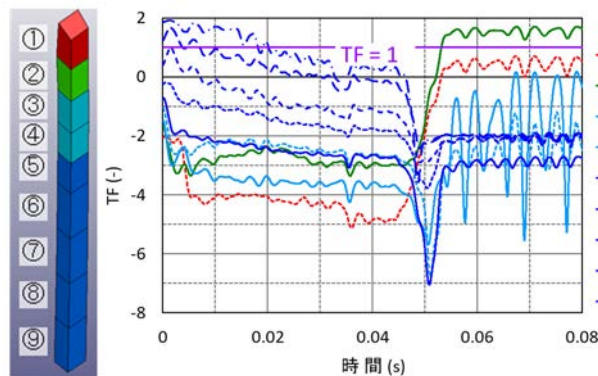


(本体胴部フランジ面の相当塑性ひずみ分布)



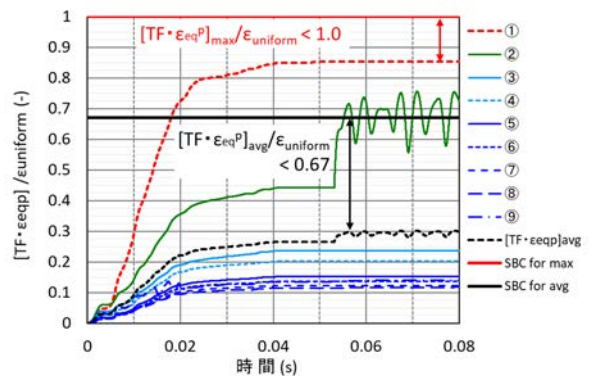
(蓋部の開口変位時刻歴)

図-5 1m 落下要件時のキャスクの衝撃応答 (衝突速度：4.4 m/s)



(板厚方向要素)

(各要素の TF)



(正規化した $[TF \cdot \epsilon_{eq}^p]_{avg}$ と $[TF \cdot \epsilon_{eq}^p]_{max}$)

図-6 板厚方向の TF ならびに TF と相当塑性ひずみの積 $TF \cdot \epsilon_{eq}^p$ の時刻歴波形 (二次蓋と鋼棒との衝突部)

5. まとめ

竜巻飛来物に対するキャスクの健全性を評価するため、鋼製材相当の剛な竜巻飛来物がキャスク二次蓋部中央に鉛直方向から衝突した場合と、IAEAの輸送規則で要求される鋼棒上へのキャスク蓋部からの1m落下要件を想定し、衝撃解析コードLS-DYNAを用いた数値解析により損傷評価を実施した。その結果、竜巻飛来物による損傷は、鋼棒上への1m落下要件の損傷に包含されることを示した。

さらに、JSMEの竜巻ガイドラインやASMEの多軸応力下における延性低下を考慮したひずみ基準に基づき、1m落下時の衝突断面における破断評価を実施した。その結果、多軸応力を考慮した一軸等価塑性ひずみの平均値および最大値は、いずれもひずみ制限値を下回ることを示した。これにより、鋼棒上への1m落下時のキャスクの損傷は、二次蓋表面の局所的な領域にとどまり、密封性能も健全であることを示した。

謝辞

衝撃応答解析におきましては、WDB(株)宇田川 敏子様、日立造船(株)坂本裕子様にご多大なご助力を賜りました。ここに、厚くお礼申し上げます。

参考文献

1) リサイクル燃料貯蔵株式会社(RFS)ホームページ, “リサイクル燃料備蓄センターの貯蔵計画について”, 平成30年1月30日.

- 2) Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials, IAEA Safety Requirements No. TS-R-1
- 3) 原子力規制委員会, “原子力発電所の竜巻影響評価ガイド”, 平成25年6月19日, 原規技発第13061911号.
- 4) 坂本裕子, 白井孝治, 宇田川敏子, 近藤俊介, “竜巻飛来物に対する防護ネットの評価手法と対策工法の提案”, 電中研報告, N15004, H26年3月.
- 5) 日本機械学会, 発電用原子力設備規格, 竜巻飛来物の衝撃荷重による構造物の構造健全性評価手法ガイドライン), JSME SNX6-2019
- 6) The American Society of Mechanical Engineers, “ASME Boiler & Pressure Vessel Code”, Appendices of Section III, Division 3, 2013
- 7) 日本機械学会, 発電用原子力設備規格, 材料規格(2016年版), JSME S NJ1-2016
- 8) 南波宏介, 白井孝治, 三枝利有, “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, 66巻第2号, p.177-193, 2010年4月.
- 9) 日本機械学会, “機械工学便覧”, 2014年.
- 10) Nuclear Energy Institute, “Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs”, NEI 07-13, Revision 8P.
- 11) 日本機械学会, 伝熱工学資料, 改訂第5版, 2009年.
- 12) 日本規格協会, JISハンドブック, 鉄鋼I, 2010年.
- 13) 日本規格協会, JISハンドブック, 鉄鋼II, 2010年.
- 14) 日本建築学会, 鋼構造設計規準—許容応力度設計法—, 2005年.