

落下衝撃を受ける放射性物質輸送容器の健全性評価

Integrity of transport cask subjected to Impactload

伊藤千浩, 大沼博志

Chihiro Ito, Hirosho Ohnuma

工博 (財) 電力中央研究所 上席研究員 (〒277-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

工博 北海道大学教授 工学部 (〒060-0813 札幌市北区北 12 条西 8 丁目)

キーワード: 落下衝撃、放射性廃棄物、キャスク

(drop test, radioactive material, cask)

1. はじめに

放射性物質を運搬する輸送物には IAEA (国際原子力機関) 輸送規則およびそれを基にした国内規則により、輸送中の事故などを想定した厳しい要件が課せられている。電力中央研究所では、これまでにこのような放射性物質輸送物の安全性に関する実証試験を行ってきた。本報告では、実証試験の一環として最近実施した、使用済燃料 (原子力発電所で燃やされた後の燃料) 輸送物の落下試験および解析結果について述べるものである⁽¹⁾。なお、この本試験は、平成 6~10 年度に科学技術庁からの受託研究として実施したものである。

2. 輸送規則に定められた試験

実証試験では、IAEA および我が国の輸送規則^{(2), (3)}に定められた試験に対して、輸送物の健全性が維持されることを実物大の試験体を用いた試験より明らかにする。以下に規則に定められている試験の概要を示す。

○一般の試験条件下の試験 (通常の輸送状態)

- a. 環境伝熱試験: 試験体を 38°C の環境下に 1 週間置く。

- b. 自由落下試験: 試験体を 0.3m 高さから、剛床上に落下させる。

○特別の試験条件下の試験 (輸送中の事故を想定)

- a. 落下試験 I: 試験体を 9m 高さから剛床上に落下させる。
- b. 落下試験 II: 試験体を 1m 高さから剛床上に鉛直に固定した鋼棒上に落下させる。
- c. 耐火試験: 試験体を 800°C の環境下に 30 分置く。
- d. 浸漬試験: 試験体を深さ 10m 相当の水中に 8 時間浸漬させる。

○使用済燃料を収納した核燃料輸送物に係る試験

- a. 浸漬試験: 試験体を深さ 200m 相当の水中に 1 時間浸漬させる。

これらの試験を経たあと、密封性能や遮へい性能が所定の性能を維持していることを確認する。

3. 試験体の仕様

試験では使用済燃料を輸送する我が国の代表的な大型輸送物 NFT-14P 型を対象として実施した。本輸送物は、PWR 使用済燃料 (44,000MWD/tU 以下、630 日以上冷却) を 14 体収納することができる。試験体の主な仕様は以下のとおりである。

3.1 試験用輸送物の諸元

- ①全長×最大外径：6250mm×φ2600mm
- ②最大重量： 約115トン

3.2 模擬収納物の仕様

模擬収納物は、重量、外郭寸法、発熱量、発熱領域について実物の使用済燃料を模擬したものである。

- ①重量：最大約700kgf/1体
- ③数量：14体
- ②発熱量：最大4kW/1体（電気ヒーターによる）

輸送物の全体図を図-1に示す。

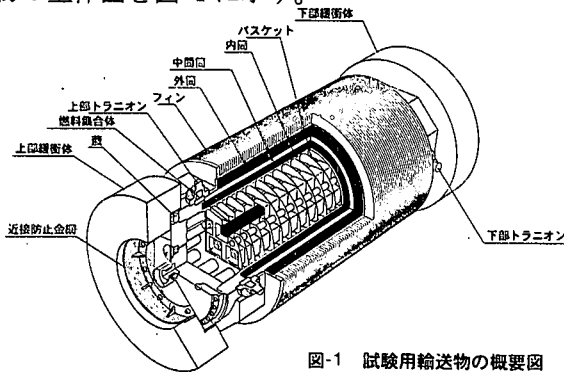


図-1 試験用輸送物の概要図

3.3 概要

輸送物は、底のついた内筒、中間筒、外筒およびボルト締め蓋により構成され、内筒と中間筒の間にはガンマ線遮へい体として鉛を、中間筒と外筒の間には中性子遮へい体としてレジンを充填している。また、外筒外周には落下衝撃エネルギーを吸収する機能を有した放熱用のフィンが設置されている。その他、落下時のエネルギーを吸収する目的で輸送容器の上部、下部に木製の緩衝体を取り付けられている。容器内部は使用済燃料からの発熱の除去を容易にし、中性子遮へい効果を向上させるため純水（キャビティ内水）が充填されている。

試験体は実物大で、試験上必要な部分的な加工の他は、基本的に実際の輸送物と同じ仕様を有する。

4. 落下試験結果

4.1 自由落下試験

(1) 試験方法

0.3mの高さから試験体を水平姿勢で剛床上に落下させた。水平姿勢は他の姿勢に比べ大きな加速度が発生すること、この後に引き続き重ね合わせを考慮して行う落下試験Iにおいて、水平姿勢での緩衝機能としてフィンで落下エネルギーを吸収するという新たな構造となっていることにより選定した。

落下試験時には試験体に発生するひずみ、加速度の時間的変化を測定し、試験後、試験体の変形状態を観察し記録した。また、密封性能を確認するため落下試験の前後に、蓋シール部、加圧弁部について真空放置法による密封試験を実施した。

(2) 試験結果および考察

落下により試験体は両端に取り付けられた緩衝体のみが接地し、その部分に変形が生じた。本体に発生した最大応力は中間筒の180°側（下側）の軸方向に生じ54MPaであった。この値は降伏応力230MPa（160℃時）に比べ小さく、弾性範囲内にある。また、バスケットに発生した最大応力も47MPaと降伏応力228MPaに比べ小さい。

緩衝体（外径φ2600、内径φ1300）の衝突部には上部、下部緩衝体ともに径方向に15mm（変形率2.3%）の変形がみられたが、緩衝体以外の部位については目視上変形はみられなかった。

(3) 評価

落下衝撃により生じた応力は弾性範囲内にあり、試験前後で漏洩率に変化はなく（表-1参照）、輸送規則に定められた基準値〔2.10E-1 Pa・m³/s〕を満足し、本輸送物が健全であることを確認した。

4.2 落下試験I

(1) 試験方法

試験体を容器にとって最も厳しい姿勢である水平状態で9m高さより剛床上に落下させた。

(2) 試験結果および考察

落下により輸送容器は両端に取り付けられた緩衝体および本体胴部外周のフィンが接地し変形が生じ

た。本体に発生した最大応力は内筒 180° 側の周方向に生じ 278MPa であった。この値は、引張強さ 413MPa に比べ小さい値となっている。また、バスケットに発生した最大応力も 178MPa と降伏応力 228MPa に比べ小さい。

図-2 に落下試験後のフィンの変形状態を示す。各フィンの変形モードは複雑であるが径方向の変形量はほぼ一様で平均で 99mm であった。また、緩衝体の変形量は上部・下部緩衝体とも 150mm であった。

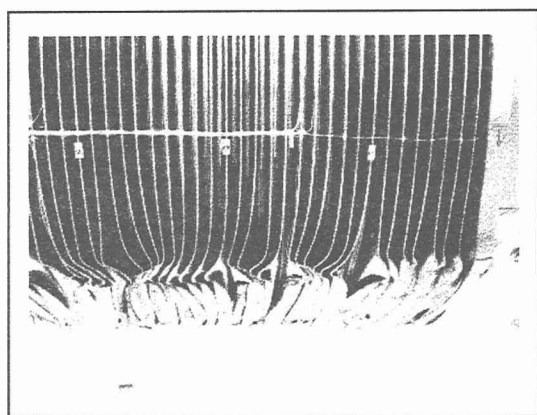


図-2 試験後のフィンの変形状況

(3) 評価

落下衝撃により生じた応力は引張強さ以内にあり、また試験前後で密封部の漏洩率に変化はなく（表-1 参照）、基準値 $[5.17E2 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}]$ を満たし、本試験体が 9m 高さからの落下衝撃に対しても健全であることが示された。

4.3 落下試験 II

(1) 試験方法

落下試験 I に続き、水平姿勢で試験体中央部を、鉛直に固定した直径 150mm の鋼棒上 1m の高さから、落下、衝突させた。

(2) 試験結果および考察

鋼棒は、フィン、外筒（板厚：20mm）および中性子遮へい体（168mm）を押抜き、中間筒に達していた。鋼棒の軸方向変形量は平均で 38mm であった。最大応力は本体 180° 側（衝突側）の衝突部近傍内筒周方向

に生じ 134MPa であり、他の部位に発生したひずみは極めて小さく変形は鋼棒との衝突部に集中していた。最大応力 134MPa は引張強さ 413MPa に比べ小さい値である。

(3) 評価

落下衝撃により生じた応力は引張強さ以内にありまた試験前後で密封部の漏洩率に変化はなく（表-1 参照）、かつ基準値 $[5.17E2 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}]$ を満たし、本試験体が健全であることが示された。

表-1 密封試験結果（試験前後の漏洩率）

試験	計測箇所	計測時期	漏洩率 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)
落下試験 I	蓋シール部	試験前	3.49E-5
		試験後	5.05E-5
	加圧弁部	試験前	5.88E-6
		試験後	6.14E-6
落下試験 I	蓋シール部	試験前	5.05E-5
		試験後	5.04E-5
	加圧弁部	試験前	6.14E-6
		試験後	6.13E-6
落下試験 II	蓋シール部	試験前	5.04E-5
		試験後	5.85E-5
	加圧弁部	試験前	6.13E-6
		試験後	5.66E-6

5. 試験解析

5.1 解析コード・モデル

ここでは、落下試験 I に対する解析について述べる。解析では有限要素法衝撃計算コード LS-DYNA を用いた。図-3 に解析モデルを示すとともに、以下にモデルの概要を示す。

(1) 輸送容器

- ーキャスクの形状、落下姿勢より 1/2 面对称モデルとした。
- ー出来るだけ実物に沿ったモデルとした。
- ー容器本体、緩衝体はソリッド要素、放熱フィンはシェル要素を用いてモデル化した。
- ー輸送容器・緩衝体と被衝突体の接触部はリバウンド・滑りが再現できる機能を持つ要素（接触要素）を適用した。

(2) 収納物

—バスケット、燃料集合体はこれらの重量と同じ重さをもつ円柱体として、ソリッド要素にてモデル化した。

—本体容器内にある水については本体および収納物に質量を付加することでモデル化した。

(3) 被衝突体

—剛体要素を適用した。

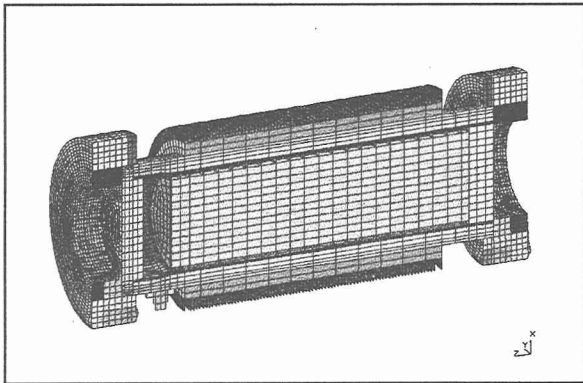


図-3 解析モデル

5.3 解析結果と考察

図-4 に試験結果と解析結果の応答の比較例として加速度応答履歴を示し、表-2 に発生したひずみの最大値、フィンおよび緩衝体の変形量について両解析結果の比較のまとめを示す。

解析結果において、落下エネルギーを吸収する緩衝体およびフィンの変形量は、試験結果に対し小さ

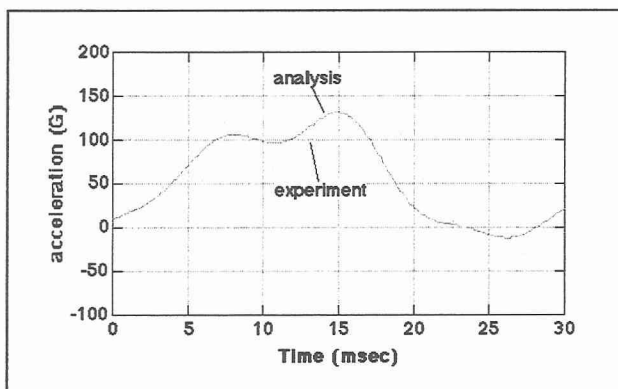


図-4 解析結果と試験結果の比較 -加速度-

い値となり、その結果、発生加速度の最大値は、解析結果の方が大きくなっている。また、ひずみの値については、解析結果は試験結果に対し大きな値を与え、安全側の結果となっている。

このようなことから、落下試験に対する構造評価に、衝撃解析コード LS-DYNA を用いた解析手法が適用できることが確認された。

表-2 解析結果と試験結果の比較

項目	部位	解析結果	試験結果
ひずみ ($\times 10^{-6}$)	本体中央断面 0° 内筒周	1280	767
	本体中央断面 90° 内筒周	-998	-781
	本体中央断面 180° 内筒周	1850	1765
フィン変形量 (mm)		85	99
緩衝体 変形量 (mm)	上部緩衝体	136	150
	下部緩衝体	135	150

6. おわりに

実物とほぼ同様の放射性物質輸送物試験体を用いて輸送規則に定められた試験を実施した。その結果、発生した応力は基準値を下回り、また、試験前後の密封性能にも変化がなく、輸送物が健全であることを確認した。

また、試験に対し衝撃解析コード LS-DYNA を用いた試験解析を実施し、試験結果との比較から解析手法の適用性を確認した。

参考文献

- (1) 小松他、電力中央研究所研究報告 「高燃焼度使用済燃料輸送物の規則適合試験と評価手法の提案」、研究報告：U98010、平成10年10月
- (2) Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material; IAEA Safety Standards, Safety Series No. 6, 1985
- (3) 核燃料物質の工場又は事業所の外における運搬に関する規則、昭和53年12月28日、総理府令第57号