

[寄稿]

衝突事故の衝撃から積み荷を守れ！「核燃料輸送トラック NFST」

衝突エネルギー吸収装置を装備した核燃料輸送トラックNFST<Nuclear Fuel Safety Transporter>

山中 旭(元・三菱自動車), 関根 康史(福山大学)

1. はじめに

トラック(貨物自動車)は「荷物を運ぶ」ために作られた自動車である. なお,トラックが「荷物を運ぶ」にあたっては,「荷主の要求に応じた運び方」で「荷物を運ぶ」ことが要求される. 例えば, 雨に濡れても構わないような荷物は「屋根の無い荷箱」のトラックで運んでも構わないが, 雨に濡れたら困るような荷物は「屋根付きの荷室」を有したトラックで運ぶことが要求される. 同様に, コンテナ船やコンテナ列車と連携するトラックには, 船舶や鉄道と同じ規格のコンテナを運搬できる車体が要求され, 生鮮食品を運搬するトラックには, 冷蔵機能もしくは冷凍機能を有した荷室が要求される(図1).



(a) 屋根の無い荷箱のトラック



(b) 屋根付き荷室のトラック



(c) 海上コンテナ運搬用トレーラー



(d) 冷蔵機能付き荷室のトラック

図1 様々なトラックに装備される様々な荷室

すなわち、トラックは運搬する「様々な荷物の種類」に応じ、「それぞれに適した荷室」を有していなければならない自動車である。このため、国内外において路上を走行するトラックの種類は非常に多い。なお、「積み荷」の中には、運搬中の振動や衝撃によって、その品質が変質および低下してしまう物も存在する。原子力発電所が使用する核燃料も、その一つである。本稿では、衝突時に核燃料のような危険物積荷を保護する機能を有するトラック、すなわち、高衝突エネルギー吸収システム装備トラック(Nuclear Fuel Safety Transporter, 以下NFSTと表記)について紹介する。



図2 NFST(核燃料輸送容器を積載していない状態)

2. NFSTとは

NFSTは、原子力発電所で使用する核燃料を安全に輸送するため、1980年に開発されたトラックである⁽¹⁾⁽²⁾。1970年代の中東地域の政情不安定に端を発した石油の輸入危機により、「石油に代わるエネルギー」として、かつて、原子力発電が着目された時代があった。しかしながら、1970年代や1980年代の当時であっても、核燃料が「安全ではない燃料」であることに変わりはない。そして、非常に高価な燃料でもある。(後述する“核燃料輸送用特殊容器”1本に収納される核燃料の価格は、1980年代当時の価格で約1億円もする。)その上、核燃料は、衝突事故等が発生した場合、その「衝撃」によって品質が損傷しまう。このため、核燃料を輸送するトラックの荷箱には、『 $59\text{m/s}^2[6\text{G}] \sim 108\text{m/s}^2[11\text{G}]$ の衝撃に耐え、また、複雑な衝撃にも損傷を受けないように設計すること』が定められている。すなわち、NFSTには、衝突時に $59\text{m/s}^2[6\text{G}]$ 以上の衝撃が核燃料に加わらないように設計することが要求される。

図2にNFST(核燃料輸送容器を積載していない状態)を示す。フロントバンパーが、大きく前方に突き出た独特のデザインが、このトラックが『核燃料のような特別なモノを輸送するトラックであること』を特徴付けている。この「大きく前方に突き出たフロントバンパー(フロントエネルギー吸収システム)」は、衝突事故発生時に際して、トラックの乗員を含め、積み荷である核燃料を保護するためのものであり、図3に示したように、“穴の開いた角錐”4本によって支えられている。また、荷箱と“核燃料輸送用特殊容器”の間にも、同じく“穴の開いた角錐(積載物エネルギー吸収システム)”(図4)が配置さ

れ、衝撃に弱い核燃料の保護を担っている。なお、NFSTでは図5に示したように、フロントバンパーと荷箱の前部、荷箱の後部に各4本、合計で12本の“穴の開いた角錐”を配置し、衝突事故時には、これらに衝撃エネルギーを吸収させることで、積み荷である核燃料の保護を図っている。さらに、車体の後端部には、エネルギー吸収リアバンパーを装備、乗用車からの追突を受けた際にも、乗用車が荷箱の下に潜り込むことを防ぐようにしている。

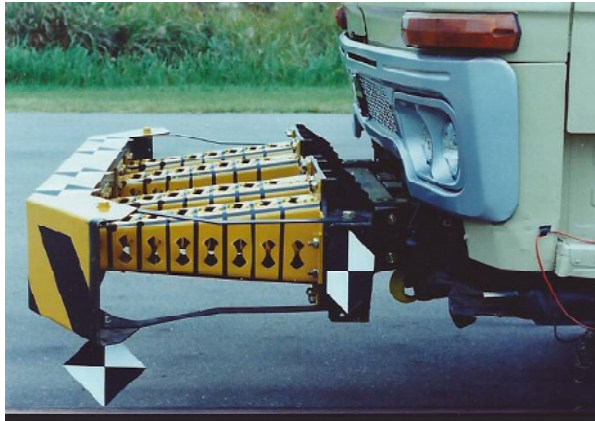


図3 NFSTのフロントバンパー
(フロントエネルギー吸収システム)

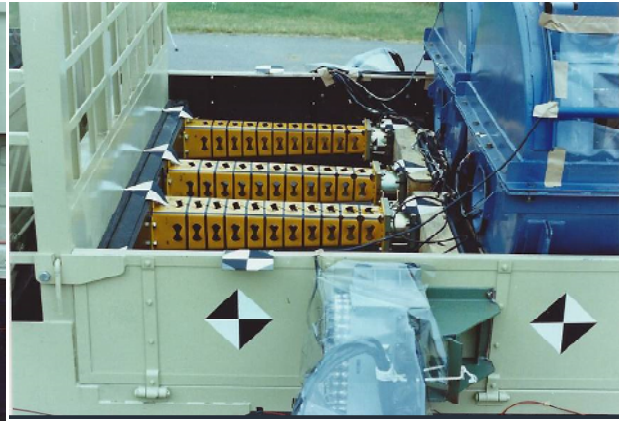


図4 積載物エネルギー吸収システム

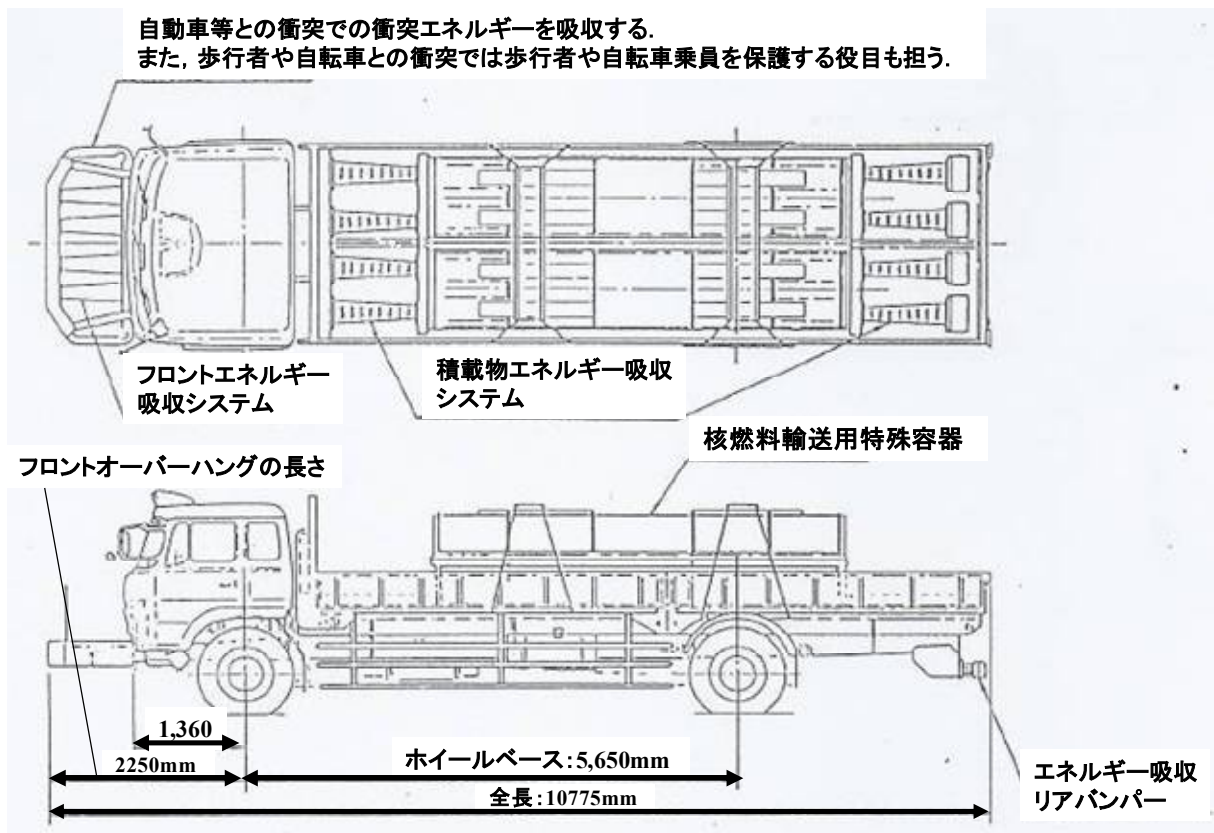
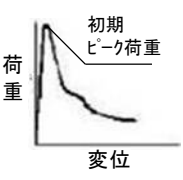
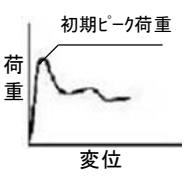
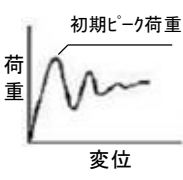
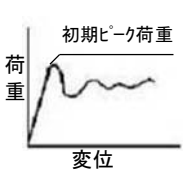
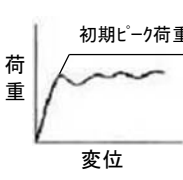


図5 NFSTの概要図

なお、NFSTが衝撃エネルギーを吸収させるために装備している“穴の開いた角錐”は、図6に示した5種類の部材について衝撃エネルギーの吸収特性を比較する実験を行った結果、最も衝撃エネルギー吸収特性が良かったことから、この部材をNFSTに装備させることとした部材である⁽³⁾。また、NFSTが積載する核燃料輸送容器は、図7に示したような形状の容器であり、NFSTは、この核燃料輸送容器を1台当たり4個積載することができる。

形状	1. コの字フレーム	2. 角柱(A) 溶接はがれ フランジの付いた角柱	3. 角柱(B) フランジの無い角柱	4. 角錐(A) 側面だけ穴を開けた角錐	5. 角錐(B) 側面+コーナー部に穴を開けた角錐
荷重変位特性					
特徴	変形モード 不安定	変形モード 不安定	変形モード やや不安定	変形モード 安定	変形モード 安定
初期ピーク荷重	大	中	中	中	小

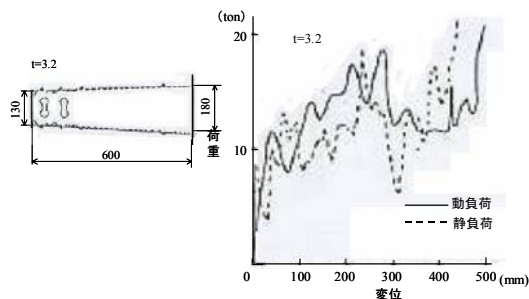
(a) NFSTの衝突エネルギー吸収部材の候補とした5種類の部材



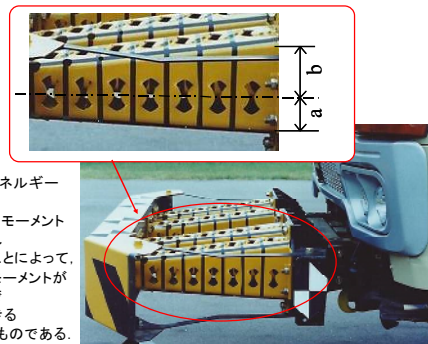
(b) 動負荷(落錘)試験
(3m/s~10m/sでの動的な負荷を加えた)



(d) 衝突試験用台車
(ピッチモーメントの影響を見るために使用した)



(c) 動負荷(落錘)試験と静負荷試験の比較
(「5. 角錐(B)」の「荷重-変位」特性)



NFSTの衝突エネルギー吸収部材は、衝突時のピッチモーメントの影響を考慮し「 $a < b$ 」とすることによって、車体にピッチモーメントが加わった状態で適正に座屈できるように設計したものである。

(e) ピッチモーメントの影響を考慮した衝突エネルギー吸収システム

図6 NFSTに装備した衝突エネルギー吸収部材の決定
(候補とした5種類の部材に動負荷試験と静負荷試験を行い「5. 角錐(B)」に決定した.)



図7 NFSTが積載する核燃料輸送容器

3. NFSTの衝突安全性能

NFSTについては、この車両が有する前章で述べた衝突安全装備の効果を確認するため、トラック同士での正面衝突を想定した30km/hで固定バリアへの衝突試験、および乗用車から追突される試験が実施された。本章では、これらの衝突試験の概要について述べる。

30km/hでの固定バリアへの衝突における車体の変形状況を図8.に示す。安全装備の無い、従来型のトラックでは、衝突時に運転室(キャブ)の後部が大きく変形し、荷箱も前方に移動する(キャブと荷箱の間隔が狭くなる)。これに対し、NFSTではフロントバンパー(フロントエネルギー吸収システム)が潰れることによって、衝突エネルギーが吸収されるので、キャブの変形は小さい。(NFSTと従来型の大型トラックとの主要諸元は表1を参照。)フロントバンパーおよび荷箱の前部に配置した積載物エネルギー吸収システムの変形状況を図9.に示す。フロントバンパーと積載物エネルギー吸収システムが共に潰れることによって、衝突エネルギーが効果的に吸収されていることがわかる。以上より、NFSTの「積載物の保護」および「乗員保護」に関する次のような評価を得た。

(1) 固定バリアへの衝突試験での積載物の保護性能

図9のNFSTのフロントバンパーおよび積載物エネルギー吸収システムの変形量を計測した結果を表2に示す。30km/hでの固定バリアへの衝突により、フロントバンパーは425mm 変形し、積載物エネルギー吸収システムは760mm 変形した。NFSTでは、これらの分だけ、衝突エネルギーが吸収されることになる。NFSTが固定バリアに衝突した際のバリア発生荷重の時間変化を図10に示す。最大発生荷重は従来型の大型トラックの最大発生荷重の約1/2となっている。核燃料にかかる衝撃を図11に示す。核燃料に加わる衝撃は、 54m/s^2 [5.5G]となった。これは、核燃料の品質保全目標値 59m/s^2 [6G]を下回る値である。すなわち、NFSTは、その目的である衝突時における積載物<核燃料>の品質を十分に保護できるトラックであることが衝突試験によって確認出来た。

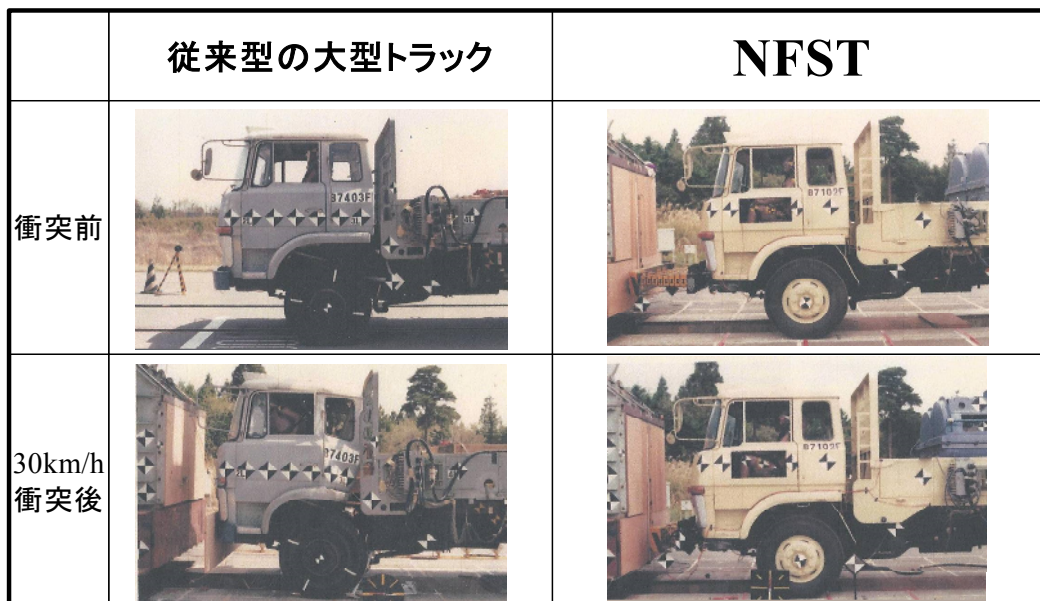


図8 30km/hでの固定バリアへの衝突試験でのトラック前部(キャブ周辺)の変形状況

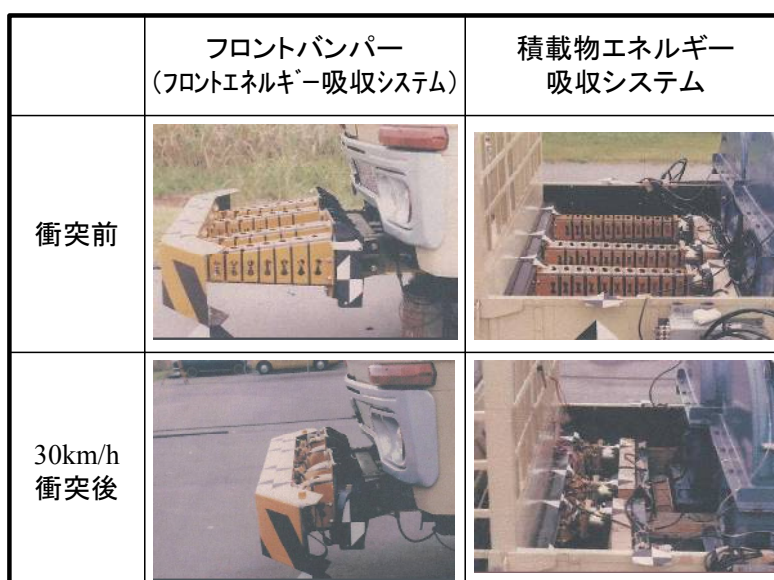


図9 フロントバンパーおよび荷箱の前部の積載物エネルギー吸収システムの変形状況

表1 NFSTと従来型の大型トラックとの主要諸元

	従来型の大型トラック	NFST	差
フロントオーバーハング (mm)	1400	2250	850
全長 (mm)	9925	10775	850
車両本体のみの重量 (kg)	7233	8742	1509
積載物 (kg)	5703	5731	28
車両総重量 (kg)	12936	14473	1537

表2 フロントバンパーおよび積載物エネルギー吸収システムの変形量

	フロントバンパー (フロントエネルギー吸収システム)	積載物エネルギー 吸収システム
変形量(mm)	425	760

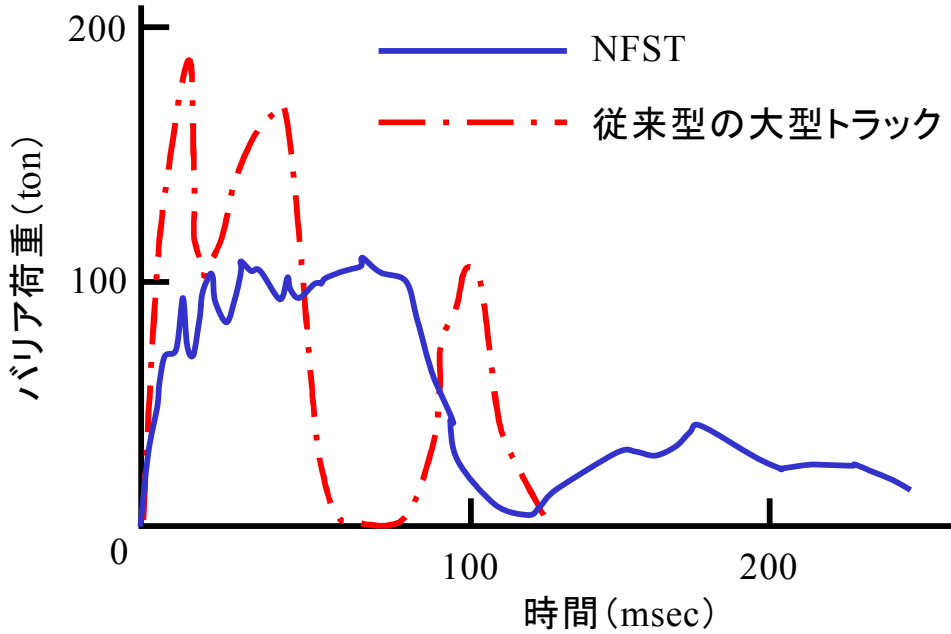


図10 固定バリア衝突試験でのバリア発生荷重の時間変化

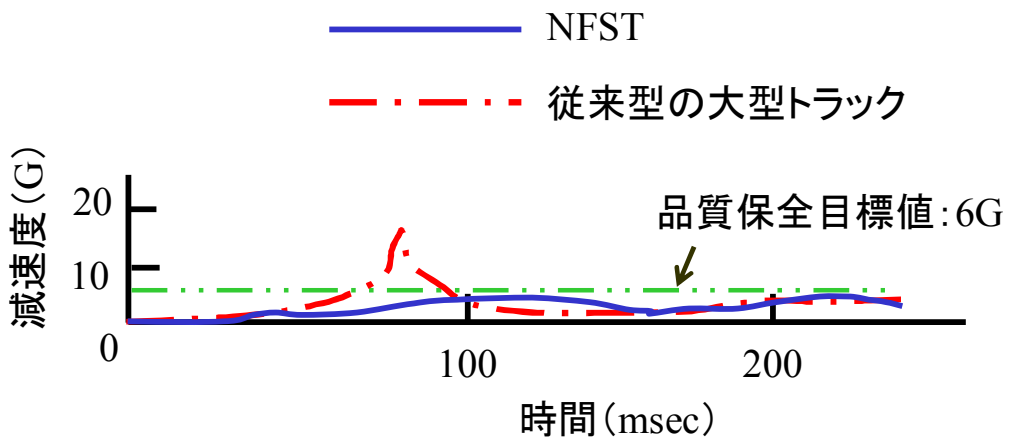


図11 核燃料にかかる衝撃（減速度(G)）の時間変化

なお、図10および図11より、従来型の大型トラックでは、最大バリア発生荷重が大きく、核燃料に加わる衝撃が、核燃料の品質保全目標値 59m/s^2 [6G]を上回ることも確認できる。 59m/s^2 [6G]を上回る衝撃が、核燃料輸送容器に加わることになるので、容器内の核燃料は容器の内壁に激突することになる。したがって、積載した核燃料の品質は損なわれる。

(2) 固定バリアへの衝突試験での乗員保護性能

表3にNFSTと従来型の大型トラックそれぞれのキャブ変形量とキャブ大減速度を示す。NFSTのキャブ変形量は0mm, 最大減速度19Gと低いながら、従来型の大型トラックではキャブ変形量は114mm, 最大減速度41Gと大きい。すなわち、NFSTでは従来型の大型トラックに比べ、キャブ内の乗員を保護出来ている。

表3 フロントバンパーおよび積載物エネルギー吸収システムの変形量

	従来型の大型トラック	NFST
キャブ変形量 (mm)	114	0
キャブ最大減速度 (G)	41	19



図12 NFSTのエネルギー吸収リアバンパー

(3) セダン型乗用車から追突された際の衝突安全性能

NFSTには、乗用車からの追突を受けた際にも、乗用車が荷箱の下に潜り込むことを防ぐためのエネルギー吸収リアバンパーも装備されている(図12)。本稿では、セダン型乗用車をNFSTおよび従来型の大型トラックに追突させる衝突試験についても述べる。図13に追突試験の結果を示す。






	30km/h	50km/h	80km/h
従来型の 大型トラック			—
	潜り込み量 1702mm	潜り込み量 3000mm	—
NFST			
	潜り込み量 256mm	潜り込み量 284mm	潜り込み量 1510mm

図13 セダン型乗用車をトラック後部に追突させる試験の結果

(i) 衝突速度 30km/h での追突の場合、

従来型の大型トラックへの追突では、セダン型乗用車はルーフの前部までがトラック荷箱の下に潜り込んだ(潜り込み量 1702mm)が、NFSTへの追突の場合、エネルギー吸収リアバンパーがあるのでセダン型乗用車のトラック荷箱の下に潜り込み量は極めて小さい(潜り込み量 256mm)。

(ii) 追突速度 50km/h での追突の場合

従来型の大型トラックへの追突では、セダン型乗用車はルーフの後端までがトラックの荷箱の下に潜り込んでしまう(潜り込み量 3000mm)。このため、乗員空間は前席、後席共に大きく損壊している。一方、NFSTへの追突では、30km/hでの追突の場合と同様に、エネルギー吸収リアバンパーによって潜り込みが防止されるので、セダン型乗用車の乗員空間の損壊はほとんど無い(潜り込み量 284mm)。なお、被追突側のNFSTについても、この追突による車体損傷は少なく、フレームの状態も良好であったことから、フレームの若干の修理とバンパの交換だけで、引き続き別の衝突試験に利用することができた。

(iii) 追突速度 80km/h での追突の場合

NFSTのみ追突速度 80km/hでの追突試験を実施した。なお、NFSTとセダン型乗用車の車両重量の比(追突側セダン型乗用車:被追突側NFST)は、1:15と非常に大きいため、追突速度 80km/hの追突においても、被追突側のNFSTの損傷は比較的少ない。一方、追突側セダン型乗用車は、追突速度 80km/hと高速度での衝突のため、NFSTのエネルギー吸収リアバンパーを用いても、

トラック荷箱の下に潜り込んだ(潜り込み量 1510mm)。しかしながら、その潜り込み量 1510mm は、従来型の大型トラックへの 30km/h での追突での潜り込み量 1702mm に比べて約 200mm も小さい。すなわち、NFST のエネルギー吸収リアバンパーは、セダン型乗用車からの追突に際し、かなり効果の高い安全装備と評価することができる。

以上、「固定バリアへの衝突試験」および「セダン型乗用車からの追突試験」の結果から、NFST は、トラック同士の正面衝突をはじめ、乗用車からの追突も含めた衝突事故において、積み荷である核燃料の品質を落とすことなく、保護することができる「核燃料を輸送すること」に相応しいトラックであると言える。

4. 結 言

本稿で紹介したNFSTに装備させたエネルギー吸収システムは、“穴の開いた角錐”という、比較的簡便な構造の部材であり、かつ軽量でエネルギー吸収量も大きく、安価で破損時の交換時間も非常に短い。こういった簡便な構造な部材を上手く活かすことで、核燃料のような衝撃により品質が変化してしまうような扱いの難しい積み荷を安全に輸送するトラックを開発することが可能となる。なお、乗用車がトラックに追突した際にトラックの荷箱への潜り込みを防止し、事故による被害を低減するエネルギー吸収リアバンパーは、1977年6月より市場に出荷されている安全装備である。

本稿で述べたNFSTは、1980年より実用化を進め、1986年までに25台が生産された核燃料の輸送に適したトラックである。なお、顧客である電力事業者に納車されたNFSTは、毎年100,000km 以上の距離を、無事故で走行し続けたと伝えられている。NFSTは、「危険」な核燃料を「安全」に運搬するために誕生したトラックであった。このトラックが活躍した期間は決して長くはなかったが、記憶の片隅に留めたい貴重なトラックである。(図14に30km/hでの固定バリアへの衝突における従来型の大型トラックとNFSTの車体全体の変形状況を示す。)





	従来型の大型トラック	NFST
衝突前		
30km/h 衝突後		

図14 30km/hでの固定バリアへの衝突における車体全体の変形状況

謝 辞

本稿で紹介したNFSTは、三菱原子燃料(株)の要請によって研究開発された核燃料輸送を目的としたトラックである。そして、NFSTの研究開発に当たっては、核燃料サイクル関連輸送の安全評価研究を科学技術庁((現)文部科学省)委託研究委員会の委員として、三菱自動車工業(株)が大型トラックの衝突実験および解析評価を実施した。このような経緯から、NFSTの開発に際し、三菱原子燃料 関義辰氏、同社 佐藤元重氏には、核燃料の扱いに関する様々なご助言をいただき、深く感謝致します。また、NFSTの安全性の評価を行うにあたり、数々の協力をいただいた(株)三菱総合研究所 須賀雅夫氏に深く感謝致します。

参考文献

- (1) Akira Yamanaka, Motoshige Sato, Naofumi Nagaike, Toshio Nishida, The Research and Development of Nuclear Fuel Safety Transporter and it's Evaluation, 21th FISITA in Beigrade(1986), pp.311-318.
- (2) Naofumi Nagaike, Masao Suga, Motoshige Sato, Akira Yamanaka, The Research and Development of Safety Transporter for Dangerous Goods and it's Evaluation, 26th FISITA in Praha(1996).
- (3) 山中旭, 衝突エネルギー吸収システムの研究開発, 運転者の視認性改善と衝突安全性の向上による大型自動車の総合的な安全性の研究, 早稲田大学博士論文, 乙第2404号(2013), pp.84-98.



図15 NFST(核燃料輸送容器を積載した状態)

日本機械学会技術と社会部門ニュースレター: <http://www.jsme.or.jp/tsd/news/index.html>

日本機械学会

技術と社会部門ニュースレターNo.46

(C)著作権:2022 一般社団法人日本機械学会 技術と社会部門