

ウラン新燃料、原材料のトラック輸送に関わる
苛酷事故想定時の安全性解析
(受託研究)

Safety Analysis for Severe Accidents Anticipated during
Truck Transport of Uranium Fresh Fuel and Raw Material
(Contract Research)

(編)野村 靖* 高橋 聡* 奥野 浩

(Eds.) Yasushi NOMURA*, Satoshi TAKAHASHI* and Hiroshi OKUNO

安全研究センター
核燃料サイクル施設安全評価研究グループ

Fuel Cycle Facility Safety Research Group
Nuclear Safety Research Center

March 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

ウラン新燃料、原材料のトラック輸送に関わる苛酷事故想定時の安全性解析
(受託研究)

日本原子力研究開発機構安全研究センター原子力エネルギー関連施設安全評価研究ユニット
(編) 野村 靖*1・高橋 聡*2・奥野 浩

(2008年1月11日受理)

近い将来、我が国において、核燃料サイクル施設間の新燃料の輸送が増大すると予想される。旧日本原子力研究所では、それら輸送に関する一般国民の不安感の解消に役立てるため、2001年から2004年までの4年計画で輸送安全性に関わる実証解析を経済産業省から受託して実施した。すなわち、実際の輸送ルート、及び過去の事故・事象記録を調査して、高架道からの落下、開放空間での石油満載タンクローリーとの衝突による火災、トンネル内での2トントラックとの衝突による火災に関する3種類の事故シナリオを策定し、汎用有限要素法計算コードLS-DYNA及びABAQUSを用いて衝撃解析、熱安全性解析を実施した。また、これらの結果に基づいた輸送容器の損傷時の臨界安全性解析について、連続エネルギーモンテカルロ法計算コードMVPを用いて行った。これらにより、輸送中に想定される過酷事故においても輸送容器は健全性を保ち、放射性物質が漏洩せず、公衆及び環境に影響を及ぼさないことを示した。

本報告書は、経済産業省受託「再処理施設等安全性実証解析等（核燃料物質輸送容器安全性実証解析等）」の成果を使用して取りまとめたものである。

原子力科学研究所（駐在）：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

*1 退職

*2 日本原燃株式会社

Safety Analysis for Severe Accidents Anticipated during
Truck Transport of Uranium Fresh Fuel and Raw Material
(Contract Research)

(Eds.) Yasushi NOMURA*¹, Satoshi TAKAHASHI*² and Hiroshi OKUNO

Nuclear Facility Safety Research Unit
Nuclear Safety Research Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 11, 2008)

It is expected in the near future that more and more fresh nuclear fuel would be transported among nuclear fuel cycle facilities. Accordingly, safety demonstration analyses were conducted at the former Japan Atomic Energy Research Institute under contract with the Ministry of Economic, Trade and Industry of Japan from 2001 to 2004 for the purpose of assuaging public jitters concerning the transport. Consequently, the current transport routes and the past accident/incident records were surveyed, three accident scenarios, namely, a fall from an overpass, an open fire after collision with an oil tank trailer, a fire caused by collision with 2-ton truck inside a tunnel were set up. Mechanical damages and thermal failures were analyzed by using the general-purpose finite element codes LS-DYNA and ABAQUS. In addition, criticality safety analyses were performed by using the continuous energy Monte Carlo code MVP for the transport casks damaged in reference to the previous mechanical and thermal analyses. Thus, the integrity of packaging against leakage of radioactive material was shown in the case of severe accidents anticipated to occur during transportation without any harmful effect to the public and environment.

Keywords: Uranium Fresh Fuel, Raw Material, Uranium Dioxide, Uranium Hexa-Fluoride, Overland Transport, Truck Transport, Sever Accident, Postulated Accident Scenario, Fall Impact Analysis, Thermal Safety Analysis, Criticality Analysis

This work was carried out by JAERI under an entrustment from the Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan.

*1 retired

*2 Japan Nuclear Fuel Limited

目 次

1. 序言	1
2. 核燃料物質等輸送物の輸送中の事故に関するデータの調査	3
2.1 事故データの収集および調査結果の検討	3
2.2 事故時安全性解析に関する調査	6
2.3 輸送安全管理情報に関する調査	6
3. 核燃料物質等輸送物の陸上輸送における苛酷事故シナリオの策定	9
3.1 対象輸送容器の選定	9
3.2 苛酷事故シナリオの策定	11
3.3 輸送物の安全性評価方法	28
4. 濃縮六ふつ化ウラン輸送物の安全性解析	33
4.1 輸送物の概要と安全性評価基準	33
4.2 高架道よりの落下事故に係る落下衝撃解析	36
4.3 タンクローリーとの衝突による火災事故に係る熱安全性解析	55
4.4 トンネル内での衝突による火災事故に係る熱安全性解析	65
4.5 苛酷事故想定時の臨界安全性解析	72
5. 二酸化ウラン粉末輸送物の安全性解析	93
5.1 輸送物の概要と安全性評価基準	93
5.2 高架道よりの落下事故に係る落下衝撃解析	96
5.3 タンクローリーとの衝突による火災事故に係る熱安全性解析	105
5.4 トンネル内での衝突による火災事故に係る熱安全性解析	107
5.5 苛酷事故想定時の臨界安全性解析	114
6. PWR 新燃料集合体輸送物の安全性解析	130
6.1 輸送物の概要と安全性評価基準	130
6.2 高架道よりの落下事故に係る落下衝撃解析	133
6.3 タンクローリーとの衝突による火災事故に係る熱安全性解析	150
6.4 トンネル内での衝突による火災事故に係る熱安全性解析	159
6.5 苛酷事故想定時の臨界安全性解析	165
7. BWR 新燃料集合体輸送物の安全性解析	183
7.1 輸送物の概要と安全性評価基準	183
7.2 高架道よりの落下事故に係る落下衝撃解析	185
7.3 タンクローリーとの衝突による火災事故に係る熱安全性解析	200
7.4 トンネル内の衝突による火災事故に係る熱安全性解析	207
7.5 苛酷事故想定時の臨界安全性解析	213
8. まとめ	235
8.1 核燃料物質等輸送物の選定	235
8.2 事故シナリオの策定	235
8.3 核燃料物質等輸送物に関わる落下衝撃・熱安全性解析	236
8.4 苛酷事故想定時の臨界安全性解析	244
8.5 全体まとめ	248
付録 1 海外における核燃料物質等の輸送中の事故報告例	254
付録 2 国内で輸送されている核燃料物質および容器の一覧表	264
付録 3 自動車道路等での一般車両の重大な事故事例	265

Contents

1. Prologue	1
2. Data Survey on Accidents During Transport of Packages of Nuclear Fuel Materials	3
2.1 Review of Collection and Survey Results on Accident Data	3
2.2 Survey on Safety Analyses for Transport Accidents	6
2.3 Survey on Information of Transport Safety Control	6
3. Set up of Severe Accident Scenario for Overland Transport of Nuclear Fuel Materials	9
3.1 Selection of Object Transport Casks	9
3.2 Set up of Severe Accident Scenarios	11
3.3 Safety Evaluation Method for Transport Packages	28
4. Safety Analysis for Packages of Enriched Uranium Hexa-fluoride	33
4.1 Outline of Packages and Safety Evaluation Criteria	33
4.2 Impact Analyses for Fall Accident from Overpass	36
4.3 Thermal Safety Analyses for Fire Accident by Open Air Collision with A Tank Trailer	55
4.4 Thermal Safety Analyses for Fire Accident by Inside Tunnel Collision	65
4.5 Criticality Safety Analyses for Assumed Severe Accidents	72
5. Safety Analyses for Packages of Uranium Di-Oxide	93
5.1 Outline of Packages and Safety Evaluation Criteria	93
5.2 Impact Analyses for Fall Accident from Overpass	96
5.3 Thermal Safety Analyses for Fire Accident by Open Air Collision with A Tank Trailer	105
5.4 Thermal Safety Analyses for Fire Accident by Inside Tunnel Collision	107
5.5 Criticality Safety Analyses for Assumed Severe Accidents	114
6. Safety Analysis for Packages of PWR Fresh Fuel Assembly	130
6.1 Outline of Packages and Safety Evaluation Criteria	130
6.2 Impact Analyses for Fall Accident from Overpass	133
6.3 Thermal Safety Analyses for Fire Accident by Open Air Collision with A Tank Trailer	150
6.4 Thermal Safety Analyses for Fire Accident by Inside Tunnel Collision	159
6.5 Criticality Safety Analyses for Assumed Severe Accidents	165
7. Safety Analysis for Packages of BWR Fresh Fuel Assembly	183
7.1 Outline of Packages and Safety Evaluation Criteria	183
7.2 Impact Analyses for Fall Accident from Overpass	185
7.3 Thermal Safety Analyses for Fire Accident by Open Air Collision with A Tank Trailer	200
7.4 Thermal Safety Analyses for Fire Accident by Inside Tunnel Collision	207
7.5 Criticality Safety Analyses for Assumed Severe Accidents	213
8. Summary	235
8.1 Selection of Object Nuclear Fresh Fuel Transport Packages	235
8.2 Set-up of Accident Scenarios	235
8.3 Fall Impact and Thermal Safety Analyses for Nuclear Fuel Transport Packages	236
8.4 Criticality Safety Analyses for Assumed Severe Accidents	244
8.5 Through-out Summary	248
Appendix 1 Examples of Accident Reports of Nuclear Fuel Transport Overseas	254
Appendix 2 Lists of Nuclear Fuel and Packaging for Domestic Transports	264
Appendix 3 Examples of Serious Accidents of General Vehicle on Highways	265

1. 序言

今後、核燃料サイクル事業の進展に伴い、輸送物の多様化、核燃料物質等の輸送量の増大が予想される。日本原子力研究所（以下、原研）においては、これらの輸送に関する一般国民の不安感の解消に役立てるため、経済産業省からの受託事業として平成13年度から4年計画で、核燃料物質等の輸送容器について安全解析コードを用いて、国内において想定され得る苛酷事故時の安全解析を行うことにより、輸送の安全性を検証することとした。すなわち、国内での核燃料物質輸送の大部分を占めているウラン新燃料および原材料に係る輸送について、収納物の種類、輸送頻度、輸送経路等を勘案して、対象となる輸送物（輸送容器）を選定し、国内において想定され得る苛酷事故時における輸送容器の安全性について実証解析を行った。

当該輸送物は、A型核分裂性輸送物であるので、国際原子力機関(IAEA)放射性物質安全輸送規則を取り込んだ規則（昭和五十三年総理府令第五十七号）¹⁾および告示（平成二年科学技術庁告示第五号）²⁾により規定された「一般の試験条件」すなわち1.2mの自由落下試験および積み重ね試験、引き続いて行われる「特別の試験条件」すなわち9mの自由落下試験等の機械的試験、800°C30分の耐火試験および0.9mの水浸漬試験の後において臨界に達しないことが要求される。これらの規則の要件を満たす限り、輸送中の事故条件に対しても十分安全性が確保されているものと考えられるが、実データに基づく苛酷事故シナリオによる熱・構造に係る解析を行い、引き続いて苛酷事故時の変形、部材焼失等を参照した臨界安全性解析を行って、それらの解析結果を関連文献記載値と比較することにより事故時の安全性を確認した。

本報告においては、第2章で事故データの収集および検討、安全性解析方法と安全管理情報の調査、第3章で解析対象輸送物の選定、規制の現状と苛酷事故シナリオの策定、第4章から第7章までに、4種類（二酸化ウラン粉末、六ふつ化ウラン、PWR新燃料集合体、BWR新燃料集合体を収納）の輸送容器のそれぞれについて、輸送物の概要と、選定した輸送物に対する落下衝撃・熱安全性解析およびそれらの結果を踏まえた臨界安全性解析を行った結果を述べる。

これらの作業の検討に加わった、輸送容器安全性専門部会（部会長：有富正憲 東京工業大学教授）の構成員を表1.1に示す。

表 1.1 輸送容器安全性専門部会構成員

氏名	所属	備考
有富 正憲	東京工業大学	
秋山 秀夫	元原燃輸送	平成14年度
池沢 芳夫	放射線計測協会	平成14年度
伊藤大一郎	三井造船(株)	平成15-16年度
伊藤 千浩	電力中央研究所	
奥野 浩	日本原子力研究所	平成14-16年度
柄澤 清紀	日本原子力研究所	平成13-14年度
北尾 幸市	日本原子力研究所	平成13-14年度
小岩井太一	エヌ・エフ・ティ・エス(株)	平成14年度
清水 春雄	(株)グローバル・ニュークリア・フュエルジャパン	平成15-16年度
高橋 聡	日本原子力研究所	平成15-16年度
手塚 庸一	三菱マテリアル(株)	平成14年度
中込 良廣	京都大学	
中島 健	神戸大学	
乃村 一郎	原子燃料工業(株)	平成15-16年度
野村 靖	日本原子力研究所	
広瀬 誠	原燃輸送(株)	平成15-16年度
藤根 幸雄	日本原子力研究所	平成13-14年度
三好 慶典	日本原子力研究所	平成15-16年度
宗像 雅広	日本原子力研究所	平成13-14年度
山田 賢仁	日本原子力研究所	平成15-16年度
渡邊 浩二	日本原子力研究所	平成15-16年度

1章 参考文献

- 1) 核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則(昭和五十三年総理府令第五十七号)。
- 2) 核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目等を定める告示(平成2年科学技術庁告示第五号)。

2. 核燃料物質等輸送物の輸送中の事故に関するデータの調査

2.1 事故データの収集および調査結果の検討

2.1.1 事故データ収集

表 2.1 に示す公開報告書およびデータベースを検索し事故データを収集した。また、国内の事例については関連文献からも引用した。

表 2.1 調査・検索した報告書およびデータベース

名称	実施機関	収集期間
放射性物質事故報告(Radioactive Material Incident Report: RMIR)データベース	サンディア国立研究所(SNL) (www.sandia.gov/tp/rmir.html)	1971-2002
事故・故障情報 (Incident Information Network system: IINET)データベース	原子力安全技術センター (www.n-iinet.ne.jp)	1952-2002
放射性物質の輸送物および輸送に関する国際シンポジウム(PATRAM)	核物質管理学会 (Institute of Nuclear Materials Management)	1974-2004
国際原子力情報システム(INIS)	国際原子力機関(IAEA)	1970-2002
放射性物質輸送事象データベース (Radioactive Materials Transport Event Database: RAMTED)	英国放射線防護庁 (National Radiological Protection Board: NRPB)	1958-2001
危険物事故情報データベース(HAZMAT) Class70 (放射性物質に関する事故)	アメリカ運輸省(USDOT) (http://hazmat.dot.gov/spills.html)	2000-2003
放射性物質の輸送に関わる事故故障 (Accidents and incidents involving the transport of radioactive materials (UK))	イギリス運輸省(DfT) (http://www.dft.gov.uk)	2000
輸送中の事象・事故の告知：最終報告書 (Notification of Incidents/Accidents during Transport : Final Report)	欧州委員会(EC) (http://europa.eu.int)	1999-2000

原研では、輸送事故情報データベース(Package Accident Information: PAI)を開発して、上記の事故・事象データを収納し、許可制で関係者の利用に供することとした。これらのほか、平成 14 年度には、国際原子力機関 IAEA が実施する「放射性物質輸送事故のデータベース(a database on EVents during TRAnsport of radioactive Materials: EVTRAM)」の編集に関わる国際協力作業に参加したが、現時点では EVTRAM が開発段階にあり、公開不可のため PAI データベースには対象外とした。

2.1.2 調査結果の検討

関連文献等から引用した国内の放射性物質を含めた輸送事故例を表 2.2 に示す。事故は主として追突事故である。放射性物質の事故で輸送物を道路面へ落下させる事故があったが、

事故による損傷程度は 1 章に述べた「一般の試験条件」の範囲である。最後尾のマイクロバスの伴走車が、輸送隊を追い越そうとした大型トラックに追突されたが、核燃料積載車は前方 100m にあり損傷を受けることなく無事であったという事例がある。

RMIR データベース等に収録された海外の代表的輸送事故例を表 2.3 に示す(付録 1「海外における核燃料物質等の輸送中の事故報告例」参照)。イエローケーキの漏出事故 3 件の内表 2.3 に示した 2 件は、衝突・横転事故により輸送物である多数のドラムが下積みとなったドラムへ圧縮荷重を及ぼし、圧潰(クラッシュ)が生じたと考えられる。多数の容器を積載する輸送物の場合には、かかる損傷形態が生じる可能性がある。また、濃縮ウラン酸化物粉末を輸送中のトラックが踏み切りで鉄道列車と衝突した事故例は、国内での輸送ルートでは考えられない。公道上での使用済燃料輸送物およびアウトバーンでの RI 輸送物の事故例は、衝突あるいは衝突を避けようとした輸送車の輸送物が車両から放り出されたものである。これら事故例のように、事故時に受ける衝撃の程度が大きいと輸送物が輸送車両から離脱することも考えられる。

表 2.3 記載の火災事例では火災時間の長い場合がある。すなわち、新燃料集合体の事故事例では、大量の可燃性燃料を積載していたこと、また国内の輸送条件である隊列輸送では考えられないが、意図的に自然鎮火まで放置されたことによる。セシウム-137 を用いた密度計の輸送に関わる事故事例では、タンクローリーとの衝突による大規模火災のため、地元消防団では消火剤等の資材不足で対応できず、軍の消防隊の出動を要請したりして鎮火に手間取った。

以上により、核燃料物質等に関わる輸送事故に関しては下記のようにまとめられる。

- ・ 六ふつ化ウラン、新燃料、および使用済燃料の輸送の場合には、放射性物質の漏洩・汚染はない。
- ・ ウラン鉱石、イエローケーキ、および低レベル廃棄物の輸送の場合には、放射性物質による汚染・飛散・漏洩事故が生じているが、被ばく等の重大な事故には至っていない。

表 2.2 国内の核燃料および放射性物質の輸送事故例

事故発生日	収納物	概要
1989/9/7 ¹⁾	核燃料	サービスエリア内での核燃料輸送隊同士の車両接触事故。
1989/3/13 ²⁾	コバルト 60	放射性物質の塊 6 個をそれぞれ鉛容器に入れ、さらに鉄製容器に格納し固定用木枠にてトラック輸送していた。道路上の停止中の小型トラックに追突し、コンクリート路上に放射性物質 1 個が落下したが環境放射能には異状なし。
1977/7/23 ¹⁾	新燃料集合体	英国からの輸入ウラン燃料を 11t トラックで運送中、3 両目と 4 両目が追突し、トラックの前後部が小破したが、積載された核燃料には異状なし。運転手むち打ち症。

表 2.3 海外の核燃料および放射性物質に関わる代表的輸送事故例

事故発生日	収納物	発生場所	概要
1994.4.6 ^{③*}	⁹⁹ Mo	ドイツ	3 個の放射性物質輸送物 (B 型 (U)) を積載した車がタンクローリー車と衝突した。アウトバーンの反対車線に投げ出された輸送物は、対向車と衝突し、損傷したが健全性は保持された。
1991.12.16 ^{③*}	新燃料集合体	マサチューセッツ州	輸送トラック/トレーラーが乗用車を避けようとして、ガードレールに 3 度衝突し、引火して輸送車全体が火に包まれた。火災は 3 時間後に可燃物を燃え尽くして鎮火。トラックには約 800L の液体燃料が搭載されていた。新燃料集合体輸送物からの放射性物質漏洩は無かった。
1985.8.27 ^③	濃縮ウラン酸化物粉末	ノースダコタ州	ドラム 53 個を輸送中のトラック/トレーラーが列車と衝突して、破損した 30 個のドラムから濃縮ウラン酸化物粉末を 150 フィート×50 フィートの範囲に撒き散らした。
1979.3.22 ^{③*}	イエローケーキ	カンサス州	55 ガロンドラムを輸送中のトラック/トレーラーが横転した。トレーラーの格納庫の屋根から 51 個のドラムが投げ出され、22 個のドラムの蓋が損傷し、43782 ポンドのイエローケーキのうち、1800 ポンドが漏出した。
1977.9.27 ^{③*}	イエローケーキ	コロラド州	輸送トラック/トレーラーが馬 3 頭と衝突し横転。29 個の 55 ガロンドラムの蓋が開き、12000 ポンドのイエローケーキが漏出。このうち、5000 ポンドがトレーラー中に、残り 7000 ポンドが 3000~4000 (フィート) ² の周辺地域に撒き散らされた。
1976.12.10 ^{③*}	セシウム-137	カナダ	40kL のガソリン積載車が自動車との衝突を避けて、停車中の放射性物質輸送トラックと衝突した。トラックのキャブのタンク左前方を損傷し、ガソリンが漏れ引火した。衝突した 2 台、近傍の 2 台の車両およびレストランが燃えた。火災は最大 90 分継続した後鎮火し、輸送物 (密度計) 表面の γ 線量率は最大 3rem/h であった。
1971.12.8 ^{③*}	使用済燃料集合体	テネシー州	輸送トラックが他の車との正面衝突を避けようとして道路から飛び出し、横転した。運転手は死亡。使用済燃料容器は溝に投げ出され、外側断熱材に若干の損傷が生じたが、収納物に異常なし。

(* : 詳細については付録 1 参照)

以上の結果より、B(M)型、B(U)型および核分裂性輸送物にあつては、規則により非降伏衝撃面への9m落下等の特別の試験条件が課せられており、このような試験条件においても健全性を維持することが要求されているため、かかる実際の事故に遭遇しても漏洩・汚染は生じていないこと、一方、特別の試験条件での健全性が要求されていないイエローケーキ等の輸送物では、事故により漏洩が生じ得ることを示す。従って、過去に起きた事故事例の調査では、規則に定められた特別の試験条件を課せられた輸送物にあつては、試験によって受ける損傷の程度は、実際の事故により輸送物が受けるものを十分包含していることが分かる。なお、規則では非降伏衝撃面への9m落下衝撃試験と800℃30分の火災試験の重畳を課しているが、実際の事故データから、このような厳しい条件の重畳が実現するとは考えられない。

2.2 事故時安全性解析に関する調査

輸送中の事故に係る安全性解析に関しては、以下に示す文献調査を行った。

- (1) 米国における使用済燃料輸送時の事故時の安全性を包括的な視点に立って評価した「公道および鉄道における過酷な事故条件に対する輸送容器の応答 (NUREG/CR-4829: Shipping Container Response to Severe Highway and Railway Accident Conditions)」の内容を調査した。
- (2) 電力中央研究所では、これまで放射性物質等の輸送容器の熱・構造安全性に関する試験および解析が広範囲にわたり実施されてきた。これらに関する研究報告の中から11件を取りあげ、試験内容・結果、解析手法および使用された解析コードを検討した。
- (3) 放射性物質輸送に関わる国際会議 PATRAM2001 (2001年9月に米国で開催)、および PATRAM2004 (2004年9月にドイツで開催) 出席し、輸送中の事故時安全性解析に関連する情報を収集調査した。

解析コードに関しては、以上述べたような安全性解析関係報告書、PATRAM等国際会議における発表論文、輸送容器の許認可に関わる安全解析書の主要な記載内容を調べると、構造解析ではLS-DYNAが、熱解析ではABAQUSが実績を有することがわかった。そこで、本報告における安全性解析においては、許認可における容器設計者の解析にも用いられ、規則の試験条件の範囲で試験データとの比較により計算精度の妥当性が示されている、これらの有限要素法解析コードを採用することとした。

2.3 輸送安全管理情報に関する調査

2003年7月7日より7月11日までにオーストリア国ウィーンにおいてIAEA主催の「放射性物質輸送の安全に関する国際会議」に出席し、放射性物質の輸送の安全性等について各国からの発表と議論の内容を調査した。ここでは、放射性物質の輸送容器の設計と輸送の安全管理に係る各国の経験と実施状況について、またIAEA輸送規則の安全要件の妥当性についてまとめる。

(1) 放射性物質の輸送容器の設計と輸送の安全管理に係る実施状況

IAEA 輸送規則は、核燃料サイクル物質、医療および産業用線源、天然に存在する放射性物質に関わる輸送物の設計および安全輸送の実施のための基礎となっている。核燃料サイクルおよび非核燃料サイクル両方の放射性物質に対する輸送は、長年世界中で安全に実施されており、発電、産業および医療の発展にとって必須である。これを維持するためには、関係者間の綿密な協力を実現すること、公衆の要求事項を適切に理解すること、輸送規則の国際間の調和を図ることが必要である。また、世界的に見ると、大量の六ふつ化ウラン(UF₆)と二酸化ウラン(UO₂)等核燃料の原材料の輸送が行われており、これらから製造した新燃料の輸送は原子力発電所の運転計画等の円滑な実施に重要で、これらを実現するためには規制当局とのコミュニケーションが特に必須である。

各国において、それぞれの輸送事情により異なる仕様の輸送容器の設計が行われ当局の承認を受けて実用に供されているが、いずれも IAEA 輸送規則あるいはそれらを取り入れた国内規則に従って設計されており、燃料サイクル、輸送船、再処理、高レベル廃棄物輸送、輸送規則の試験条件の技術的安全性や輸送規則の妥当性について今後、公衆に対して説明を適切に行うことが必要である。

我が国では、UF₆、UO₂、新燃料集合体、使用済燃料、放射性廃棄物に関わる核燃料物質等の陸上又は海上輸送が実施されている。輸送の安全確保をより確実にするために、輸送に先立ち輸送物の密封性、遮へい性等の確認を行っている。核分裂性輸送物等の陸上輸送においては、輸送隊列を編成し安全を確保するとともに、隊列には、輸送責任者の他、放射線管理の専門家等が同行している。使用済燃料や高レベル廃棄物の海上輸送には、IMO の INF コードの技術基準に適合するよう二重船殻構造の専用船が使用される。

(2) IAEA 輸送規則における安全要件の妥当性

キャスク設計の本来の目的は規則要件を満足することに留まるのではなく、輸送中のあらゆる事故に耐え安全を確立することであり、そのために考慮しなければならないことが多数ある。輸送物の安全性を確保する手続きを確立するためには、リスク評価の結果を応用することも有用である。このリスク評価の結果からも IAEA 規則における安全要件が正当であることが示されている。このためには、いくつかの試験が実施され、その結果が新たなキャスク設計へ反映されてきた。

米国 NRC による使用済燃料輸送のための輸送容器の性能評価では、米国で起きた道路の落橋や鉄道の脱線事故の状況をもとに使用済燃料を積載したトラック又は貨車がこれらの事故に巻き込まれた場合の考察、評価が行われた。何れの事故においても 9m 落下試験や 800°C 30 分の耐火試験条件のほうが厳しいとの判断が得られた。さらに米国では公衆に対する輸送の信頼を得るため Package Performance Study が実施中である。これは使用済燃料キャスクを用いた苛酷事故を模擬した実験を行いその挙動を明らかにするもので、現在試験条件等の計画を立案中である。この実証試験計画では、フルスケールの試験容器を用いる試験が計画されている。これは、これらの事故シナリオに対するキャスクの健全性を実証し、IAEA 規則(TS-R-1)の国内規則への

取り入れを容易にするために行う。これによりキャスクの強度がどこまで耐えられるかを知ることは規則手続きの簡略化に役立つ。また、フルスケールモデルを試験用キャスクに用いることは、事故模擬試験により現実的な結果を得るために行い、PA 上の観点からも望ましい。このような試験を IAEA 規則の見直しプロセスのなかで行えば正当性が得られる。既に行われた模擬試験により、輸送物内部の放射性物質は容器に損傷があったとしても漏洩しないことが予想されている。

2章 参考文献

- 1) 松岡理, 核燃料輸送の安全性評価, 日刊工業新聞社, p.102(1996).
- 2) 青木成文, 放射性物質輸送のすべて, 日刊工業新聞社, p.221(1990).
- 3) RMIRデータベース, (www.sandia.gov/tp/rmir.html).

3. 核燃料物質等輸送物の陸上輸送における苛酷事故シナリオの策定

3.1 対象輸送容器の選定

国内で輸送されている核燃料物質およびその容器の一覧を付録 2 に示す。これから陸上輸送される代表的な核燃料物質として濃縮六ふつ化ウラン、二酸化ウラン粉末、PWR および BWR 用新燃料集合体を取り上げることとする。

濃縮六ふつ化ウラン輸送物の保護容器については、弁（バルブ）および保護治具（VPD）の装着されているタイプと、取り扱い性を考慮して VPD を使用しない設計となっている新規のタイプがある^{1・2}。安全性解析の対象としては、今後より長期的な使用が見込まれる、新規のタイプが妥当であると判断され、VPD を使用しない新規保護容器を選定することとした。容器モデルの設定に際しては、図 3.1-1 に示すような MST-30 型輸送容器の仕様等を参照した。

二酸化ウラン粉末の容器として、新規開発され今後主として使用されることになる方形の外容器に円筒形の内容器が入ったタイプの容器、すなわち、図 3.1-2 に示すような NPC 型容器³を選定した。また容器モデルの設定に際して、安全性解析用に同容器の仕様等を参照した。

PWR 用新燃料集合体輸送容器としては、MFC-1 型または NFI-V 型輸送容器がある^{4,5}。容器モデルの設定に際しては、図 3.1-3 に示すような NFI-V 型輸送容器の仕様等を参照した。

BWR 用新燃料集合体輸送容器としては、NT-IV 型あるいは RAJ-II 型輸送容器がある³。容器モデルの設定に際しては、図 3.1-4 に示すような RAJ-II 型輸送容器の仕様等を参照した。



図 3.1-1 濃縮六ふつ化ウラン輸送容器（MST-30 型）の概観

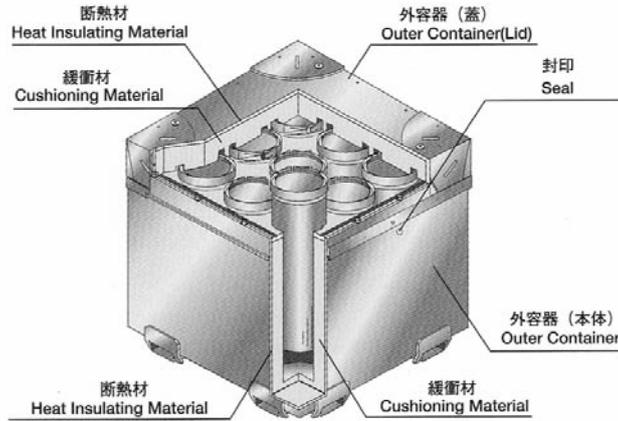


図 3.1-2 二酸化ウラン粉末輸送容器 (NPC 型) の概観

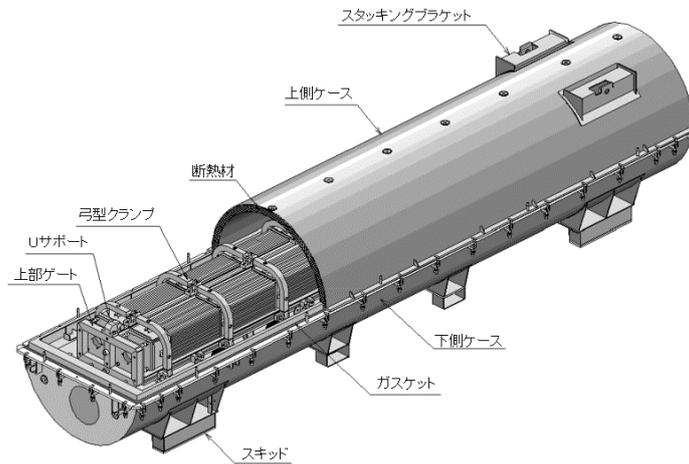


図 3.1-3 PWR 用新燃料集合体輸送容器 (NFI-V 型) の概観

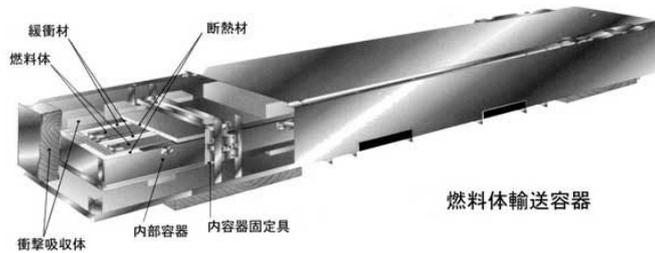


図 3.1-4 BWR 新燃料集合体輸送容器 (RAJ-II 型) の概観

3.2 苛酷事故シナリオの策定

3.2.1 規制の現状

事故シナリオを策定するにあたり、輸送時の事故に対する設計上の基準を確認する。国内規則にもその内容が取り入れられている IAEA 放射性物質安全輸送規則⁶⁾は、核分裂性輸送物について、輸送時に万が一事故に遭遇した場合においても未臨界が維持されるように、技術基準として、「特別の試験条件」（輸送中の事故条件に耐え得る能力を実証するための試験）を課し、試験後の輸送物が未臨界であることを要求している。また、ウラン新燃料および原材料に係わる輸送物は、規則では A 型核分裂性輸送物に該当するため、容器の密封性は安全上要求されないが、設計上の要目として事故時にも密封性が担保される。

(1) IAEA 輸送規則に規定された「特別の試験条件」

「特別の試験条件」として下記が規定されている。

- 1) 機械的試験と耐火試験をこの順序で行い、累積効果を受ける。
- 2) 機械的試験は、落下試験Ⅰの 9m 自由落下試験と落下試験Ⅱの貫通試験があり、輸送物の重量等により落下試験Ⅰに代えて落下試験Ⅲの 500kg 重量物の 9m 高さからの試験体への落下試験が課せられる（重量が 500kg を超える輸送物は落下試験Ⅲの対象とはならない）。その試験順序は、耐火試験で最大の損傷を生じさせるようにする。
- 3) 9m 落下試験では、試験体に最大の損傷を与えるように、衝撃面は非降伏で、試験体は最も損傷を受けやすい姿勢を取るようにする。
- 4) 貫通試験では試験体は、直径 15cm 高さ 20cm の丸鋼棒上に 1m 高さから最大の損傷が生じるように落下させる。
- 5) 耐火試験での試験体の初期条件として、38℃の雰囲気温度で太陽輻射の入熱と放射性物質発熱の平衡状態における温度分布を取る。
- 6) 耐火試験では、火炎輻射率として少なくとも 0.9、平均温度として少なくとも 800℃の十分静的な雰囲気条件下の炭化水素系燃料／空気の火災での熱流束、あるいはこれと等価な熱流束を生じさせる熱環境下において、試験体を火炎が包み込み、表面吸収係数 0.8 または規定された火災に曝された場合に輸送物が有すると示され得る表面吸収係数の値で、試験体を 30 分間維持させる。
- 7) 試験体の内部で温度が一様に下がり、あるいはまた初期状態に到達しつつあることが確認できるまで十分な時間にわたって、38℃の雰囲気温度で、かつ太陽輻射入熱および放射性物質の発熱の条件下で試験体を維持する。
- 8) 耐火試験中および試験後において、試験体は人為的に冷却されてはならない。また試験体の材料のどのような燃焼も、自然のまま放置されなければならない。
- 9) 水浸漬試験では試験体は、最大の影響を受ける姿勢で少なくとも 8 時間、また、少なくとも 15m の水頭下で浸漬されなければならない。

(2) 「特別の試験条件」内容の説明

1996年改定のIAEA放射性物質安全輸送規則に関する助言文書TS-G-1.1(ST-2)⁷⁾は、「特別の試験条件」の目的および条件の厳しさの内容に関して下記の説明を行っている。

- 1) 規則に規定された「特別の試験条件」は、2つの目的を達成するために開発された。第1に、この試験条件が、非常に苛酷な事故（必ずしも全ての想定される事故である必要は無い）に遭遇した場合に輸送物に生じる損傷と等価な損傷を生じさせるものとして考えられること。第2に、設計の工学的基礎データを提供できるように、規定された内容が十分に明瞭で定量的に記述されていること。
- 2) 1961年版規則の規定は、「起こり得る最大の事故」の影響から、輸送物の中身を保持し、従って公衆の健康を防護するという原則に基づいていた。しかし、この規定では国により事故レベルの定義が異なるため国際的に一義的な規格・基準を与えないので、一国で承認された設計が国際的承認を得ることが困難であり、現在の規則には、「起こり得る最大の事故」の語句は用いられていない。現在では、事故は統計的性質を有するものであるとの認識の基に、規則の要件が定められている。輸送物試験の主たる目的は、国際的承認、一様性および再現性が得られることにあり、試験は、どこの国においても直ちに再現されるように考えられている。試験条件は、輸送物の受ける損傷に関して苛酷な事故を模擬するように意図されている。これらの試験条件は、輸送物の中身が放射性物質であるか否かに拘わらず、記録されている事故の大部分で生じた損傷の程度を超える損傷を輸送物に生じるであろう。
- 3) 機械的試験と引き続く耐火試験の目的は、輸送物が苛酷な事故に巻き込まれた場合に生じるであろう損傷と等価な損傷を輸送物に与えることである。試験の種類と順序は、実際の輸送事故で輸送物が遭遇する状況に対応しており、機械的衝撃を受けた後に熱的環境に曝される。この場合、同一の供試体を用いて、最大の熱的損傷を受けるように機械的損傷が与えられるようにする。
- 4) 1964年版規則では、B(U)型あるいはB(M)型輸送物に対する機械的試験要件が、「起こりうる最大の事故」の要件に代わって導入された。B(U)型およびB(M)型輸送物はあらゆる輸送形態で輸送されるので、試験要件は、広範囲な事故形態を考慮に入れて輸送物に苛酷な動的荷重の負荷がかかるように決められた。事故の機械的影響は、衝撃、圧潰および貫通の3種類に分類された。試験要件の条件値は、その当時の事故解析から直接導かれたものではないが、その後の解析により、これらの数値が、非常に苛酷な輸送事故条件を代表するものであることが明らかにされてきた^{8~13)}。
- 5) 落下試験Iでは、9mの落下高さから非降伏衝撃面に向けて最も損傷を受けやすい姿勢で落下させるという組み合わせが、落下エネルギーの大半が輸送物の構造で吸収される（輸送物に大きな変形(損傷)が生じる）条件を作り出している。実際の事故では、衝撃を受ける相手側の地面または車両が大部分の衝撃エネルギーを吸収するので、「特別の試験条件」による損傷と等価な損傷を実現させるためには、規定された高さより

高い位置から落下させなければならない^{11~13)}。

- 6) この場合、引き続き耐火試験を考慮して、放射性物質の密封性、遮蔽性能および核分裂性物質の未臨界性に関わる保守側の評価を与えるような、輸送物に最大の損傷を生じさせる姿勢を衝撃面に対して取ることが要求される。
- 7) 米国での研究により、規定された耐火試験は火災に係わる輸送事故における大部分の条件を包含することを示している^{8~10, 14~17)}。
- 8) 耐火試験としては、液化炭化水素のプール火災が指定されており、液体、固体あるいは気体状の可燃性物質の火災による損傷影響を包含するように意図されている。液化石油ガス(LPG)、液化自然ガス(LNG)および液化水素等の燃料によるプール火災は、一般には30分も継続しないので、かかる燃料による火災の継続時間は規定された試験に包含される。液状石油製品は陸上あるいは海上で頻繁に輸送されており、事故が起これば引き続いて火災が生じるものと思われる。輸送物の周囲に流れ出る燃焼流体は狭い範囲に留まるので、規則では、より苛酷な条件が規定されている。
- 9) 火炎温度の800°Cと放射率0.9は、プール火災の時間・空間に関する平均的条件である。局所的にはこの条件の組み合わせを超えた条件が実現するであろう。規則で規定された条件は、火災条件として実際にはあり得ない苛酷な結果をもたらす。
- 10) 石油による大規模火災の継続時間は、こぼれ出る燃料の量と消火能力に依存する。液体燃料は大量に輸送される。しかし、プールを形成するためには、輸送物周囲の一定の面積に、一定時間に燃料を流入させなければならない。一般には一つのタンクの内容物全部が、このように流出することはない。多くはタンクの中に留まり、あるいは輸送物付近へ流れる途中で消耗するであろう。火災はタンクからタンクへ移るので、輸送物周囲に流れ出た燃料が燃えるにしても、他のタンクの内容物はより離れたところで燃えるであろう。生命に別段関係を及ぼさない場合、火災は、自然鎮火まで放置されることが多い。したがって、記録されている継続時間については、(放置された場合もあり)よく検討されるべきである。30分の継続時間は、これらの要因を考慮して選ばれており、実際には、輸送物がそのような大量の燃料の燃焼による火災に遭遇し、かつ熱的に最悪の幾何学的条件に置かれることは稀にしか起こらない。長く継続する火災は、輸送物が地面に置かれたり、あるいは車両構造物で遮蔽されたりして、輸送物への有効な熱入力を低減させる幾何学的条件との組み合わせでしか起こり得ず、それが起こったとしてもその確率は低い。

上記より、「特別の試験条件」は、機械的試験、耐火試験および水浸漬試験を、それぞれの試験において最も厳しい条件を組み合わせ、この順序で課すことにより、実際における苛酷な事故により生じ得ると予想される損傷以上のものを輸送物に生じさせると考えられる。具体的には以下に示すような重疊的損傷の効果を生じさせる。

- ・機械的試験では、密封境界近傍が衝撃面に衝突するように行われる。

- ・耐火試験においては、機械的試験により生じた密封境界近傍の損傷部（断熱材減損部）の変形が最も大きく、その部分への耐熱影響が厳しく評価される。
- ・水浸漬試験による密封性評価においては、上記により高温に晒らされた密封境界のシーリング部材等の熱的損傷、およびその水密健全性が厳しく評価される。

3.2.2 遭遇し得る事故形態の検討

ここでは、輸送車が事業所間の輸送において遭遇し得る事故形態について検討する。このため輸送ルートの特徴を把握し、そこを通過する一般車両の事故例をリストアップし、さらに核燃料の輸送においては、交通事故の回避のための対策として隊列輸送方法が取られていることを考慮する。

(1) 輸送ルートの検討

濃縮六ふつ化ウラン、二酸化ウラン粉末については、通常、海上輸送用コンテナつきで、また、PWR、BWR 新燃料集合体については衝撃吸収装置つきでトレーラーに積載され、一般幹線道路、自動車専用道路および高速自動車国道により陸送される。これらの輸送ルートにおいて、自動車専用道路および高速自動車国道からなる高規格幹線道路が、大きな割合を占める。自動車専用道路の構造は、図 3.2-1 に一例を示す¹⁸⁾ように、平成 13 年度首都高速における調査結果を参照すると、全長 273.9km の大部分が高架部であり、一部にはトンネルもある。一方、高速自動車国道の構造は、山岳部の高架橋およびトンネルを除けば盛り土部分が多い。これら高速道路等は、基本的には一方向 2 車線（走行車線と追い越し車線）であり、その制限速度は、自動車専用道路では最高 80km/h であり、高速自動車国道では 100km/h である。これらの道路では、通常、車両がトンネル坑口、支柱等の障害物へ衝突する事故を防止するため、ガードレール等の設備が設置されて高速走行に伴う苛酷事故の抑制が図られている。ただし、例外的に対面交通の部分があり、対面する車両との接触あるいは衝突事故が考えられるが、米国のサンディア国立研究所で行われた模擬輸送容器を積載したトレーラーを、約 100km/h で 690 トンのコンクリート壁に激突させた実験の結果を参照すると(http://www.sandia.gov/tp/SAFE_RAM/SEVERITY.HTM)、車両同士が正面衝突しても輸送容器への影響は少ないものと考えられる。

(2) 一般車両の事故例の検討

自動車専用道路での事故例を検討するため、首都高速での平成 13 年の事故形態別発生状況（図 3.2-2）¹⁸⁾を参考にすると、事故総数 14137 件中、追突が約 6607 件（46.7%）と多く、次いで施設との接触、車両との接触であり、重大な事故になり得る横転・転覆事故は 142 件（1.0%）、火災事故は 46 件（0.3%）であった。専用道路でかつ一方向通行のため、一般道路で多発する交差点での正面衝突、側面衝突、あるいは踏切での事故は無い。なお、トンネルの開口部での火災事故は 1 件あったが、トンネル内部での火災事故はなかった。

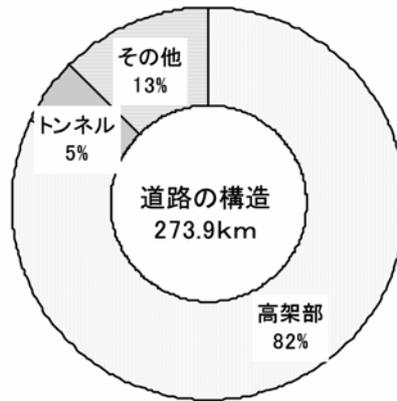


図 3.2-1 自動車専用道路での構造割合

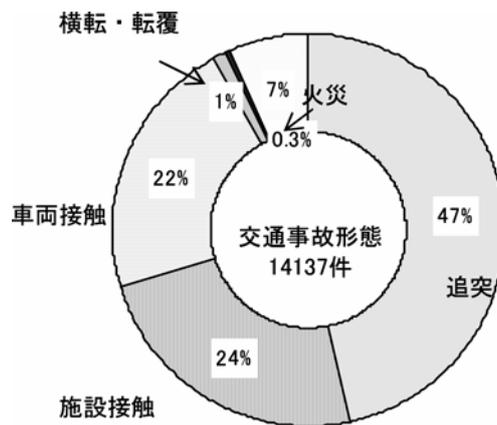


図 3.2-2 自動車専用道路での事故形態

規則で報告が義務つけられている自動車事故として一般道路における転落、転覆、火災および踏切での列車との衝突に関わる近年の重大な事故例（消防庁、損害保険会社、および新聞社等が報告している事故）の中で、自動車専用道路および高速自動車国道での事故形態に応じた事故例を、海外での事故例を含めて付録 3 に示す。これらをまとめると、輸送物に機械的あるいは熱的損傷を与える可能性のある事故として、次のような特徴が導かれる。

- ・ 道路事情を反映し高架部からの転落・落下，高速運転のため大規模な玉突き等がある。
- ・ 熱的損傷を与える火災事故の発生原因の多くは，エンジントラブル等が関係し，大半の事故においては1台のみの焼損に止まっている。
- ・ 大規模火災は，玉突き事故により生じている。
- ・ 燃料を積載した大型タンクローリーの高速道路等での横転事故もたびたび報告されているが，火災事故には至っていない。
- ・ 火災発生場所がトンネルの場合，比較的長時間の火災事例ならびに稀ではあるが大規模火災が生じている。

これらの観察による事故の特徴を事故形態ごとに整理すると，表 3.2-1 に示すようになる。

表 3.2-1 輸送物に損傷を与える可能性のある自動車事故の形態とその特徴

事故形態	事故の特徴
玉突き・衝突	停止・減速車両が大型車両間で狭圧。降雨，降雪等時の大規模玉突き事故。あるいは，対面走行車の割り込みによる正面衝突。
自動車道高架部からの転落・落下	カーブ等で曲がりきれず衝突，落下。 車両全体の転落あるいは転覆等により輸送物のみの落下。
道路への落下後衝突	側壁等に衝突，転覆等で輸送物を道路上に落下。 落下物が後続車あるいは反対車線走行車と衝突。
火災	大半は車両1台のみの火災。 対面交通の部分で正面衝突による火災発生。 玉突き衝突等で3台以上の焼損もあり。 タンクローリー車の転覆事故発生ただし未引火。 トンネル中での火災では鎮火時間の長い例あり。 稀ではあるが過去に，トンネル内で多数の車両の類焼事故あり。

(3) 隊列輸送

輸送物は事故の回避のため隊列輸送される。輸送車両は走行車線を制限速度以下で走行し，かつしかるべき車間距離を保持する。また，通常 100m 程離れて後方警備車両があり，隊列より後方の一般車両に停止措置を講じることができる。車間距離の維持等の措置により，停車・減速時において，走行車線で隊列輸送車両以外の車両により引き起こされる玉突き事故に輸送物積載車両が巻き込まれる事故，および追い抜き車線を走行する車両に高速で追突される事故の発生は，殆ど考えられない。従って隊列輸送の場合には，少なくとも自動車専用道路等での特徴的な玉突き事故に伴う大事故は回避されるものと判断される。しかし，追い抜き車線を走行する車両，あるいは対面交通部分を走行する車両が，居眠り運転やパンク等の何らかの原因で制御不能となり隊列へ進入し，輸送車に対して妨害を引き起こすことが考えられ，その場合には，輸送車の類損事故が可能性として考えられ得る。

3.2.3 事故形態の絞込み

想定され得る種々の事故形態に対して苛酷度を概略見積もり、「特別の試験条件」を構成する機械的試験または耐火試験の条件に明らかに包含されると判断される場合には、検討対象から除外する。また事故発生の可能性を検討し、輸送物の運搬において想定され得ないと判断される事故形態も除外し、事故シナリオ策定のための事故形態を絞り込む。

(1) 機械的損傷に係わる事故形態

機械的損傷に関して事故の苛酷度を評価するパラメータは、衝撃時の衝撃面に垂直方向の速度、衝撃面の固さおよび衝撃姿勢（密封境界等最弱部への衝突）である¹⁹⁾。付録1に記載されている海外における核燃料物質等の輸送中の事故報告、海外での安全性解析報告書¹⁹⁾の概要、および付録3にリストアップされている自動車道路等での一般車両の重大な事故事例を参照して、表3.2-2に示すように、機械的損傷に係わる事故形態について我が国における輸送ルートも検討して事故発生の可能性および事故の苛酷度を評価した。

表 3.2-2 機械的損傷に係わる事故形態の絞込み

事故形態	事故発生の可能性	事故の苛酷度	解析対象
玉突きによる狭圧	なし	停止・減速車両が大型車両間で狭圧される以外は軽微。	
輸送車の高架からの転落（含輸送物落下）	あり	事故の苛酷度は主として衝撃速度（高さ）と衝撃面の固さに依存し、組み合わせ条件は多数。	○
支柱等固定物への衝突	一般幹線道路のみ	制限速度 50km/h 以下での衝突であり「特別の試験条件」で十分包含されている。	
輸送車の道路からの飛び出し	あり	輸送車転落（輸送物落下）と同じ。	○
転覆等による輸送物の放り出し・衝突	あり	走行中道路への落下は一般の試験条件の範囲。他車両との衝突は非固定で衝撃は緩和される。	
圧潰（クラッシュ）	あり	特別の試験条件での落下試験ⅠまたはⅢで十分包含されている。	
対面交通での正面衝突	あり	最高速度制限のため衝撃は少ない。	

自動車専用道路等の高規格幹線道路内での代表的な衝突事故である追突事故は、停車時の狭圧以外は事故の苛酷度は小さい。追突事故時の輸送物の損傷程度は衝突した車両の速度差に依存する²⁰⁾ため、走行中の追突では損傷は小さく、輸送車が停止中あるいは減速時に高速車により追突される場合に損傷が大きくなる（重大な自動車事故例での大半は、さらに前方に停車中の車両があり自車が狭圧される条件を伴う。しかし、隊列輸送では玉突きは前節に述べたように防止されるものと考えられ、これらの事故発生は回避される）。従って、事故シナリオ作成の検討対象となり得るものは、落下事故のみであることがわかる。

そこで国内での落下事故例を付録3に記載した一般車両の事故事例により改めて検討すると、高速道路出口での事故例として、13m下の側道へのトレーラーの落下、および9m下の市道への軽油積載大型タンクローリーの落下がある。これらは出口での減速が不十分であるためカーブを曲がりきれなかったことによると推定でき、指定速度を遵守する隊列輸送下では、かかる事故の発生は考えられない。また、トラックが側壁に衝突した後に荷台から矢板打ち機が離脱して16m下の道路へ落下、あるいは、タンクローリーが防護壁や分離帯への接触後に路肩から20m下への落下した事故例も、高速時に急ブレーキを掛けハンドルを回したことによる制御不能の結果と考えられ、車間距離・制限速度の遵守の隊列輸送下では考えられない事故である。しかし、前述したような走行妨害による事故発生の可能性が考えられ、発生した場合の事故の苛酷性から、落下事故を事故シナリオ策定のための事故形態として設定する。

(2) 熱的損傷に係わる事故形態

熱的損傷に関して事故の苛酷度を評価するパラメータは、火災の継続時間、火炎温度および火災の部位（密封境界等最弱部が火炎に曝される等）である¹⁹⁾。付録1に記載されている海外における核燃料物質等の輸送中の事故報告、海外での安全性解析報告書¹⁹⁾、および付録3にリストアップされている自動車道路等での一般車両の重大な事故事例を参照して、熱的損傷に係わる事故形態について我が国における輸送ルートも検討して、表3.2-3に示すように事故発生の可能性および事故の苛酷度を評価した。

表 3.2-3 熱的損傷に係わる事故形態の絞込み

事故形態	事故発生の可能性	事故の苛酷度	解析対象
開放空間での一般車両の追突後の火災	あり	消火作業が容易、可燃物も少なく火災時間は短い、特別の試験条件で十分包含される。	
玉突き狭圧後の火災	なし	多重玉突きで狭圧の場合、損傷も重畳される	
開放空間でのタンクローリーとの衝突による火災	あり	大規模火災となり、火炎温度も高く火災時間が長くなり得る場合がある。	○
トンネル内で一般車両による追突、あるいは対面交通での正面衝突後の火災	あり	消火作業が容易でなく、火災時間が長くなり得る場合がある。また放熱速度が大きく火炎温度が高くなる場合がある。	○
トンネル内で大規模火災に巻き込まれる	あり	火炎温度も高くなり、火災時間が長く、鎮火まで1日以上経過する場合がある。	○

火災時間は、消防隊の活動ばかりでなく、火災規模および火災環境に依存する。トンネル内での消火は困難なため、結果として長時間になる場合がある。また、トンネル内火災で

は放熱速度が大きくなること²¹⁾が指摘されており、火炎温度が、開放空間より高くなる場合²²⁾も考えられる。従って、事故シナリオ策定のためには、表 3.2-3 に示すような大量の可燃物を有するタンクローリーとの開放空間での道路上での衝突による大規模火災に加えて、トンネル内での事故発生による火災を考えることとする。特に、後者においては、輸送車両自身が衝突して火災事故を生じる場合と、大規模火災に巻き込まれる場合が考えられる。

(3) 機械的損傷と熱的損傷の重畳の可能性

火災事故の原因として、昭和 59 年から平成 5 年までのトンネル火災事故調査²³⁾によれば、146 件中 25 件が壁面あるいは他の車両との衝突・接触に伴い発生した火花の燃料等への引火による。事故の詳細は不明であるが、衝突・接触等車両の損傷を伴う事例は火災事故の中でも少ないことは認められる。また、米国輸送省連邦公道管理局(BMCS: Bureau of Motor Carrier Safety)による 1973 年から 1983 年まで公道を通行中の自動車の事故事例を調査した結果¹⁹⁾では、トラック輸送中の全事故の発生確率 $6.4 \times 10^{-6}/\text{mile}$ (1 マイルあたり事故の発生確率) に対して、他の車両あるいは路上の障害物との衝突事故は 74% であり、残りの 26% は衝突を伴わない道路からの転落などの事故であり、これらに火災が伴う事故は高々約 1% であると報告されている。

機械的損傷を受けた後の熱的損傷を重畳して被る事故形態は、停止・減速車両が大型車両間で狭圧される多重玉突きに伴う火災事例が考えられるが、核燃料の輸送におけるような隊列輸送条件では、かかる狭圧を伴う玉突き事故が起こるとは想定しにくい。さらに、火災発生を伴う玉突き事故あるいは走行時の衝突による追突が生じたとしても、その場合の輸送物への損傷は軽微と判断される。車両の壁面等への接触においては衝撃面と垂直方向の衝撃速度成分が小さく、追突におけるよりも軽微な損傷を受けることとなる。これらの事故による輸送物の損傷程度は、限定された報告ではあるが以下の例からも裏付けられる。

- a) 工業技術研究所が実施した試験において、停車中の 9t 輸送車に 9t トラックが 70km/h で突っ込んだ場合、輸送車の横転が生じないことが報告されている²⁴⁾。
- b) 米国の新燃料輸送車の火災事例²⁵⁾において、側壁との衝突ではキャビンのみに損傷を生じ、トレーラーからの輸送物の落下はなかった。

一方、輸送物への衝撃が大きい落下事故等を考えると、輸送物と車両は別々に離散し、燃料タンクを保持する車両が火災を発生することはあっても、損傷した輸送物は離れた位置にあって火災からの熱的影響が及ぶことは少ないと考えられる。また、衝突あるいは転落と火災の重畳事故においては、機械的衝撃が大きいほど火災の継続時間が短いという統計解析の結果が報告されている。

以上述べた事故事例の調査および考察により、核燃料物質等の輸送においては、速度遵守・車間保持の隊列輸送で行われるため接触や衝突が生じても火災を引き起こす確率は低く、仮に起きたとしても衝突による輸送物への機械的損傷は軽微なものと判断され、機械的損傷と熱的損傷の重畳は事故シナリオ作成のために考慮する必要はないと判断される。

3.2.4 苛酷事故シナリオの策定とその条件設定

3.2.4.1 事故シナリオの策定

前節までに、核燃料物質の輸送ばかりでなく一般の自動車運行に係わる過去に発生した事件事例の調査、実際に遭遇し得る事故形態の検討、および苛酷な事故形態の絞り込みを行った。その結果、輸送時の安全性を解析コードにより検証するための苛酷事故シナリオとして、次項のように策定する。

- 1) (高架道よりの落下事故シナリオ) 輸送物が、高さ 18m の高架道路からコンクリートまたはアスファルト舗装面へ落下する。
- 2) (開放空間での火災事故シナリオ) 輸送車が大量の可燃物を有するタンクローリーと接触または追突により火災発生を引き起こし、輸送物が火炎温度 800℃、火災時間が 90 分となる。
- 3) (トンネル内での火災事故シナリオ) 換気装置のないトンネル内で換気が殆ど無い時に、2 トンのトラックと衝突して火災を生じ、火災が 2 時間継続する。

以上の他、トンネル内での類焼事故シナリオとして、トンネル内で大規模火災が隊列輸送の前方に発生している現場に遭遇する状況も考えられるが、輸送車は直ちに火源から充分に離れて停車するため、そこでの温度は引火点以下になることが予想される（実際に解析を行い確認している）。従って火災事故シナリオとしては、上記の 2) および 3) のみを考慮する。また、上記の事故シナリオにおける解析ではコンテナがある場合でもその存在を無視した安全側の仮定を採用する。すなわち、落下事故では輸送物の単独落下、火災事故ではトレーラー上に輸送物が直接置かれて火災に巻き込まれるものと仮定する。

3.2.4.2 事故シナリオに係る条件設定

IAEA TS-G-1.1⁶⁾に記載されているように、IAEA 規則の「特別の試験条件」に定める 9m からの自由落下高さ、800℃の火炎温度と火災継続時間の 30 分などの条件は、過去に実際におきた事故の条件を十分に包含することが示されてきた。本報告における安全性解析のための輸送物の苛酷事故シナリオを策定する際にも、事故発生の統計的性質を認識した上で危険物等だけでなく一般車両での事故例も含めたより大きい母集団の中で、最も厳しい過去の苛酷事故例を参照し、それに科学的知見を加えた上で事故条件を設定する。

1) 輸送物単体の高架よりの落下事故シナリオに係る条件設定

落下事故による輸送物の損傷程度に影響を及ぼす支配的要因は前述したように衝撃速度、衝撃面固さおよびその落下姿勢である。NUREG/CR-4829¹⁹⁾に記載されている米国の落下事故データは 1970～1983 年までの古いデータであるが、自動車道路網がより先行して整備されていた米国での事例として現在の国内における事例を想定する場合に参考となる。報告された 31 件の落下事故中、出典が米国政府関連報告書および関連会誌等明記された信頼

性のあるものに限ると 23 件になり，これらの累積分布を図 3.2-3 に示す。落下高さ 30 フィート（約 9m）以下の事例が 15 件と約 2/3 を占める。この中で最大の損傷を与えた事故例は，橋を飛び越えて落下し，地面に衝突した事故である。

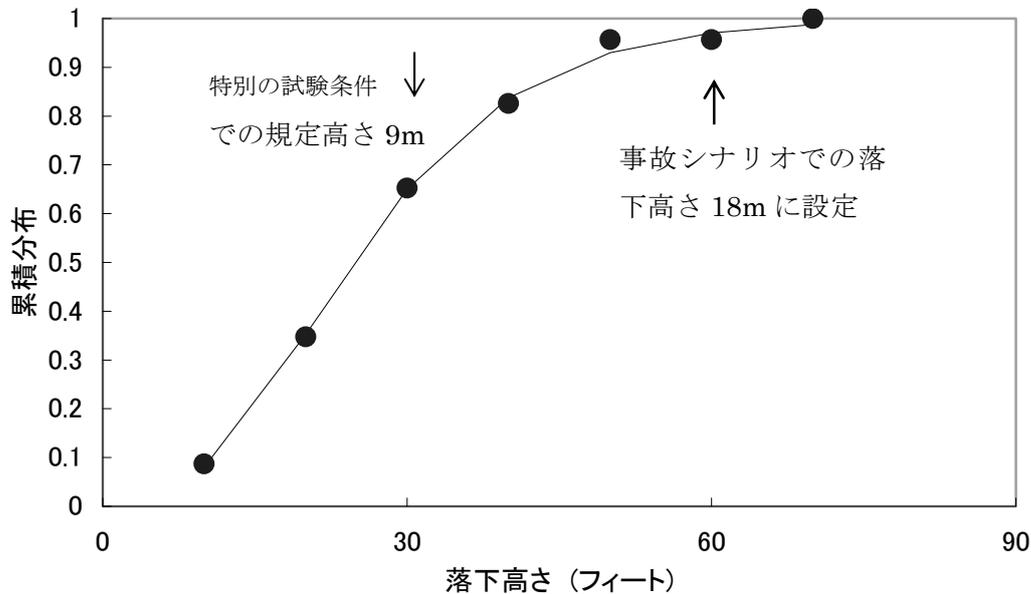


図 3.2-3 米国での車両落下事故例

そこで，事故シナリオに係る条件として都市高架部からの落下を想定し，国内の事例および米国の事例を参照して，落下高さと衝撃面の組み合わせを設定する。すなわち，図 3.2-3 に示すように大部分の事故を網羅できるものとして，落下高さを「特別の試験条件」で規定された高さの 2 倍の 18m とする。また，衝撃面を都市部の地面の代表として道路舗装面とし，舗装は一般道路を想定してコンクリートとアスファルトの 2 種類の舗装を考慮し，その衝撃に対する特性は過度に保守的な値でなく平均的な代表値とする。すなわち，コンクリート舗装面については，路盤を含め，舗装設計による大型車交通量による区分として 1000 台/日/1 方向の B 交通グレードの規定を考慮する²⁶⁾。落下姿勢は，規則に規定されているような最も損傷を受けやすい姿勢を採ることとして，垂直落下，コーナー落下および水平落下姿勢の 3 種類を基本的に設定する。表 3.2-4 に落下事故シナリオに係る基本的な条件設定を示す。

表 3.2-4 高架道よりの落下事故シナリオの基本的条件設定

	設定条件
落下高さ (衝撃速度)	18m (67.6km/h)
衝撃面	コンクリート舗装面, アスファルト舗装面
落下姿勢	垂直落下, コーナー落下および水平落下

ここで、規則で規定される「特別の試験条件」の落下高さ 9m より 2 倍高く 18m に設定することは、一見過大な条件設定となるように見えるが、本事故シナリオではコンクリートあるいはアスファルト降伏面への落下衝撃による機械的損傷のみに対して未臨界性が評価されること、一方、「特別の試験条件」では衝撃面が非降伏面のため輸送物に損傷を生じさせ易く、かつ機械的試験後に耐火試験等を行った結果の未臨界性が評価されることから、必ずしも表 3.2.4 に示す条件が「特別の試験条件」より厳しくなるわけではない。

2) 開放空間での火災事故シナリオに係る条件設定

大量の可燃物積載車両との衝突により火災が生じ消火活動が実施された事例として、カナダの RI 事故例²⁷⁾ (付録 1 参照) が報告されており、この事故情報を参考として開放空間でのタンクローリーとの衝突による火災事故に係る燃焼条件を表 3.2-5 に示すように設定する。

表 3.2-5 タンクローリーとの衝突による火災事故に係る燃焼条件の算出

	燃焼条件
積載物	軽油
積載量	16kL
燃焼速度 ²⁸⁾	0.0443 kg/m ² /s
密度	0.83 g/cm ³
発熱量 ²⁹⁾	46MJ/kg
燃焼面	直径 7m (38.47m ²)
放熱速度	78.4MW (=0.0443×46×38.47)
火炎高さ	10.8m
燃焼継続可能時間	7792 秒 (=16×830×46÷78.4)

火炎の大きさは十分輸送物を包み込める寸法に設定する。火災時に火源上に形成される連続火炎領域では常時火炎が存在し、火炎部の温度に関して McCaffrey の実験式によれば

797K(524°C)の温度上昇が得られる³⁰⁾。この値は、無風の開放空間でのメタンを主成分とする天然ガスやメタノールを用いた実験により得られたものであり、火源の寸法には比較的依存しないとされている。本解析用の火災事故シナリオ策定においては、「特別の試験条件」の火災の温度条件を参照し、McCaffreyの実験値を包含する火炎部の温度を800°Cに設定する。火災継続時間は、事故例²⁷⁾を参照して90分とする（火災継続時間は可燃物量と消防隊の活動に依存し、カナダのRI事故報告書によれば、大規模火災のため地元消防では消火剤等の資材不足で対応できず、軍の消防の出動を要請等鎮火に手間取ったことが記載されている）。なお、この90分の時間は、積載可燃物の大規模火災継続可能時間に関する下記推算値と比較しても大略妥当な時間設定である。

- ・ 新燃料に関する試験で、規定の30分のプール火災試験（5m×11.5mの面積使用）を行うため、灯油7kLを燃やした例³¹⁾がある。16kLの灯油積載タンクローリーが事故に関係し、上記報告と同一面積の火災であれば約69分の火災となる。
- ・ 表3.2-5の燃焼条件に示すように燃焼面を7m直径とすれば放熱速度約78.4MWの大規模火災であり、継続時間は約130分となる（大規模火災の代表として使用される100MWの場合には約102分となる）。

TS-G-1.1⁶⁾に記載されているように実際の事故における火炎は移動し、上記事故に遭遇したRI輸送物の温度履歴調査結果では、輸送物は550°Cに75分曝された損傷と等価な損傷であり、その損傷程度は「特別の試験条件」の耐火試験に規定された800°C30分の条件の損傷より小さいと評価されている²⁷⁾。したがって、特定の輸送物が常時800°Cの温度で90分曝されることは、統計的には実際に起こり得る事故の大部分を包含できることになる。以上を踏まえた開放空間での火災事故シナリオの基本的な条件設定を表3.2-6に示す。

表 3.2-6 開放空間での火災事故シナリオの基本的な条件設定

		設定条件
火災前の条件		一般の試験での定常状態の温度
火災条件	火炎温度	800°C一定
	火継続時間	90分
	火炎位置	火炎が輸送物を包み込む
火災後の冷却条件		一般の試験での環境

上に示すように、「特別の試験条件」の規定に比べ、同一温度で火災時間のみ大きくすることは一見過大な条件と見えるが、「特別の試験条件」は、最初に9m落下試験において最弱部となる密封境界を下部として衝突面に衝撃させ、断熱材が減損した後に耐火試験を課す条件であり、上記の機械的損傷のない状態での火災事故の想定では、同一輸送物であっても評価対象の断熱材の厚さが異なる。

3) トンネル内での衝突による火災事故シナリオに係る条件設定

トンネルの寸法、換気条件、最小曲率等の諸元を、一例として首都圏でのトンネルおよび東名高速道路の代表的トンネルについて表 3.2-7 に示す。これらは、一方通行で 2 車線以上あり、また、可燃物積載輸送車の通行できない水底トンネル³²⁾が多い。長いトンネルでは換気装置があり、進行方向と垂直方向に換気される横流方式と、進行方向に空気が流れる縦流方式とがある。日本道路公団の高速自動車国道では、1.5km 以上のトンネルにおいて換気装置が設置されている。縦流方式では、火災時にも進行方向に 2m/s の換気が確保され、事故車により停車させられた車両への熱流遡上の阻止が図られている。なお、換気装置がない場合でも、自然風速が 2.5m/s～-2.5m/s の範囲で、車両のピストン効果で自然換気されると考えられる。表 3.2-8 に、過去に自動車運行に係る火災事故を生じたトンネルの設備、消火活動について報告された内容を示す。これらのトンネル設備、過去の火災事故記録を参考として、トンネル内での火災事故シナリオに係る基本的条件を以下に示すように設定する。

- ・ (換気速度) 前述したように、換気速度が少ないほど火災部近傍の熱が蓄積され、厳しい条件となることが予想される³³⁾。そこで、2 トントラックとの衝突事故は換気装置のないトンネルで発生するものとし、冷却は自然対流によるものとする。一方、放熱速度に対応した酸素の供給が必要である。表 3.2-9 に化学量論的に必要な空気供給量の算出結果を示す。これによれば、燃焼に必要な空気量と若干の巻き込み空気量を考慮すると、自然対流の場合でも 0.2m/s 程度の換気速度が保たれるものと考えられる。従って、事故シナリオとしては、自然対流あるいは換気速度 0.2m/s を設定する。
- ・ (トンネル寸法) トンネルの横断面については、同一燃焼条件でも蓄熱の点で横断面積の小さい方が厳しいので表 3.2-8 記載の実際のトンネル寸法データを参考として、幅 10m、高さ 5m と設定する(横断面の形状はドーム状であるが、解析の便宜上、直方体とモデル化する)。トンネル長さに関しては、輸送物自体に関わる火災を考えているので、輸送物の火災時の温度上昇は壁面からの輻射に関係するのみであることを考慮して 100m 程度を設定すれば充分であり、ここでは 120m とする。
- ・ (燃焼面積) 衝突による火災として、衝突相手の車両は最も通行頻度が高いと考えられる 2t トラック³⁴⁾とし、これと輸送車が衝突して炎上するものと仮定する。燃焼面積は、これら車両が並列した場合の幅と、車両の長さを用いて算出し、長さ 4.8m×幅 4.5m 相当とする。ただし、火炎が輸送物全体を包み込めるように解析対象モデルの違いによる燃焼面積の変化も許容する。可燃物量の算定根拠は、表 3.2-10 に示すように、輸送車の燃料タンクは 200L 仕様であるが実際の使用において変更されている可能性があり、ここでは安全側に 400L と見積もって算出し、可燃物量を 38.7GJ 相当と設定する。
- ・ (火災継続時間) 火災継続時間は、火災規模自体は大きくはないが煙がトンネル内を充満し鎮火までの時間が長いトンネル火災の典型として、山陽道の郷分トンネルでの事故例を参考として、鎮火までの時間を 2 時間とする。

- ・（放熱速度パターン）バスのトンネル火災試験で、最初の10～20分で最高温度に到達し、その後温度が急激に低下し、火災開始から150分で消火に至った例³⁵⁾を参照して図3.2-4に示すように、最初の10分を最大放熱速度34MWが継続し、その後鎮火までの110分は、残りの可燃物が2.8MW一定で放熱したとする。鎮火後の冷却条件については、火災時と同じ換気速度下で、トンネル天井壁面および道路面からの輻射を考慮して設定する。

表 3.2-7 首都圏および東名自動車道路のトンネルの寸法・設備諸元

路線名	名称	幅 (m)	高さ (m)	長さ (m)	最小 曲率 (m)	見通し 距離 (m)	換気方式	換気 速度 (m/s)	水底 トンネル
都心環状線	汐留			270			縦流	2	
	飯倉			106			自然換気		
	霞が関			780			半横流		
	北の丸			160			自然換気		
	千代田			1, 900			横流		該当
1号羽田線	羽田	8.6	4.9	300	約280		縦流	2	該当
3号渋谷線	青山			98			自然換気		
4号新宿線	赤坂			520			自然換気		
	信濃町			110			自然換気		
八重洲線	八重洲			1, 400			横流		該当
湾岸線 (東京)	東京港			1, 325			横流		該当
	空港北			1, 353			縦流	2	該当
	空港南			250			自然換気		
1号横羽線	東横浜			107			自然換気		
	桜木町	9.8	5.9	339			縦流	2	該当
	花園			206			自然換気		
	花園橋	8	5.3	470			縦流	2	
2号三ツ沢線	三ツ沢	10.4	5.4	358	約230	95	縦流	2	
	南軽井沢			138	直線	138	自然換気		
湾岸線 (横浜)	多摩川			2, 170			縦流	2	該当
	川崎航路			1, 954			縦流	2	該当
	並木	12.6	7.3	590	約290	106	縦流	2	
横浜横須賀 道路	能見堂	14.7	5.6	325	直線	325	自然換気		
	長浜	10.8	7.6	642	1050	205	自然換気		
	円海山	10.2	6.5	395	621	157	自然換気		
	東逗子	11.8	7.5	348	1000	200	自然換気		
東名高速	日本坂	12.6	7.6	2, 371	1000	200	縦流	2	
	都夫良野	10.34	6.87	1, 689	1000	200	縦流	2	

表 3.2-8 火災事故を生じたトンネルの設備および消火状況

トンネル名	事故原因	全長(m)	車線	防火・消火設備	換気設備	消火活動	対応
日本坂	玉突き衝突 類焼	2045	一方向 2車線	通報器, 消火器, 給水栓, 水噴霧設備	半横流式	スプリンクラー作動したが効果なし 3日間放置	耐火ケーブルへの切り替え(縦流換気に変更)
水越	可燃物積載車エンジン発火, 13台立ち往生	2370	対面通行片側 1車線	通報器, 消火器	横流式	通報後97分で鎮火 ガス発生多	
郷分	2両焼損, 後方で玉突き衝突 25台立ち往生	869	一方向 2車線	通報器, 消火器, 給水栓,	なし	給水栓を利用, 通報後124分で鎮火	
空港北	追突 2両焼損	1353	一方向 3車線	通報器, 消火器, 給水栓, 水噴霧設備	縦流方式	通報後86分で鎮火	
鈴鹿	エンジンから出火	246				消防隊40分で到着, 熱煙で5時間後鎮火	消火・警報設備の基準策定
境	追突 11台類焼	459	一方向 2車線		なし		水槽, 消火栓設置
平山	反対車線トラックと正面衝突, 2台炎上	2500	片側1車線対面交通			約30分後に鎮火	
ホランド(米)	可燃物引火爆発 9台焼損	2783 (河底)	一方向	通報器, 消火器	あり		可燃物積載車両通行禁止, スプリンクラー設置
モンブラン(仏)	エンジンから出火 33台類焼	11600	対面通行片側 1車線	消火器100mおき	両出口に設備有り	有毒ガスを排気できず, 放置車が妨害	換気システムの強化
サンゴッタルド(瑞)	衝突 約100台類焼	16300					
カルデコット(米)	タンクローリーが接触事故, 6台焼損	1027	一方向 2車線		天井に排気設備	火災時間162分, 換気設備作動せず	

表 3.2-9 燃焼に必要な空気量の算出

	設定・計算内容
燃料の化学構造	正ヘプタンと仮定 C_7H_{16} (分子量 100g)
燃料 1 モルに必要な空気の化学量論的モル数	$11 (O_2 + 3.76N_2) = 52.36$
同空気の巻き込みモル数	$n (O_2 + 3.76N_2)$
燃料 1 k g 当たりのモル数	10 (=1000÷100)
燃料 1 k g 当たりの空気モル数	523.6 (=10×52.36)
燃料 1 k g 当たりの空気体積	$11.73Nm^3/kg (=523.6 \times 22.4 \div 1000)$
想定される放熱速度	34MW
発熱量	46MJ/kg
燃焼速度	$0.739kg/s (=34 \div 46)$
上記燃焼に必要な空気量	$8.7Nm^3/s (=11.73 \times 0.739)$
トンネル断面積	50 m ²
燃焼に必要な空気供給速度	$0.174m/s (=8.7 \div 50)$

表 3.2-10 可燃物量の算出

		設定・計算内容
輸送車	燃料 (軽油 400L)	15.3GJ (=400×0.83×46MJ)
	ボンネット部	6.2GJ
	小計	21.5GJ
2tトラック ²⁶⁾	積載物	10.96GJ
	ボンネット	6.2GJ
	小計	17.2GJ
	合計	38.7GJ

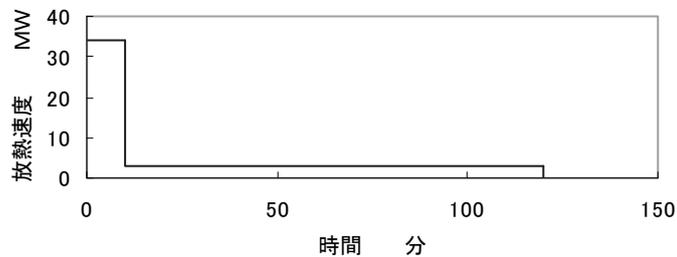


図 3.2-4 放熱速度パターン

以上述べたような内容に基づき、トンネル内での火災事故シナリオの基本的な条件設定を表 3.2-11 に示す。

表 3.2-11 トンネル内での火災事故シナリオの基本的な条件設定

		設定条件
火災前の条件		38°C (一般の試験条件での定常状態の温度)
トンネル	トンネル寸法	幅 10m×高さ 5m×長さ 120m
	換気速度	0.2m/s あるいは自然対流
火災	燃焼面積	長さ 4.8m×幅 4.5m
	可燃物量	38.7GJ
	火災継続時間	120 分
	最大放熱速度	34MW (=17MW×2)
	放熱速度パターン	図 3.2-4 参照
火災後の冷却条件		一般の試験での環境

3.3 輸送物の安全性評価方法

輸送物の安全性は、これまでに述べたような以下に示す手順を踏まえて評価することとする。

- (1) 評価対象の輸送容器は、法令で定められた基準を満足し、実際に使用されている標準的な輸送容器の仕様等を参考として、その構造、構成を模擬する。
- (2) 過去の事象事例、現状の当該輸送物の輸送ルートおよび隊列輸送等を考慮した事故シナリオを策定し、それらに係る基本的条件設定に従った安全性評価を行うこととする。
- (3) 安全解析コードは、許認可に使用された実績のあるものを用いる。すなわち、構造解析については LS-DYNA Ver.960³⁶⁾、熱解析については、ABAQUS6.2³⁷⁾を用いる。
- (4) 実際に使用されている輸送物の原型試験と同一条件で解析を行い、その結果を比較することにより、安全性解析に用いる解析モデルおよび解析手法の妥当性を確認する。

策定した事故シナリオにより想定される事故条件においても輸送物の安全性が保たれることの確認は、関連文献の記載値等を参考とした制限値を基に、輸送物の落下あるいは火災に関わる落下衝撃解析、熱安全性解析およびそれらの解析結果を踏まえた臨界安全性解析の結果と比較することによって行う。具体的には、図 3.3 に示すように、策定した事故シナリオに基づく高架道からの落下、一般公道上での火災遭遇に対して輸送物の安全性解析を行い、落下衝撃解析に関しては強度部材の相当塑性ひずみ等を算出して部材の破断ひずみ値と比較し、熱安全性解析に関しては密封に関わる装置の最高温度を評価し熱的使用上限温度と比較して各部材の健全性を評価し、輸送物の設計上要求されている核燃料物質の閉じ込め性が確保されていることを確認する。さらに、落下衝撃解析による輸送容器内部

の構造材や内容器の変形・変位，および熱安全性解析による中性子減速材等の焼失の程度について保守側にモデル化した臨界解析を行い，最も厳しい条件の組み合わせにおいても輸送物の未臨界性が確保されることを，中性子実効増倍率の算出値と一般に容認されている臨界安全性基準値 0.95 と比較することによって確認する。

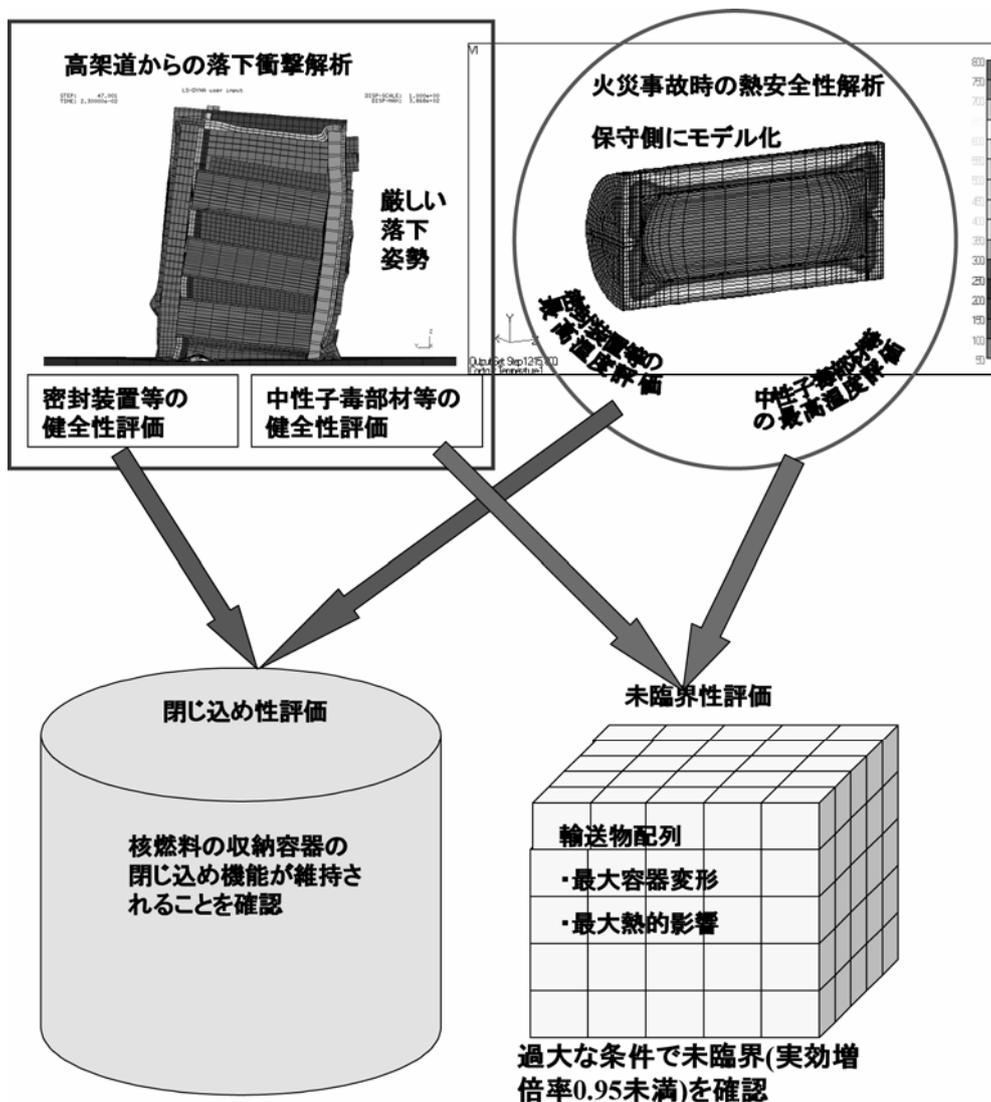


図 3.3 事故シナリオに基づく核燃料輸送物の安全性評価の流れ

3章 参考文献

- 1) T. Miyazawa, Y. Tezuka, A. Shimoda, H. Takahashi, M. Aritomi: Development of 'MST-30' Packaging for Enriched Uranium Hexafluoride, RAMTRANS, Vol.12, p.225,(2001).
- 2) V.Roubertie: COG-OP-30B: A New COGEMA Overpack for Type 30B Cylinder, RAMTRANS, vol.11, p.85 (2000).
- 3) 「GNF Global Nuclear Fuel」, 株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン会社パンフレット.
- 4) 「安全輸送をモットーとする NFTS」, 株式会社エヌ・エフ・テイ・エス会社パンフレット.
- 5) 「原子燃料の輸送について」, 原子燃料工業株式会社(NFI)パンフレット.
- 6) IAEA 安全基準シリーズ No.ST-1, 放射性物質安全輸送規則, 1996 年版解説, 原子力安全技術センター(2000).
- 7) Advisory Material for the regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, IAEA Safety Standards Series No.TS-G-1.1(ST-2),(2002).
- 8) R.K.Clarke, J.T.Foley, W.F.Hartman, and D.W.Larson : Severities of Transportation Accidents,Rep. SLA74-0001(1976).
- 9) A.W.Dennis, J.T.Foley, W.F.Hartman, and D.W.Larson : Severities of Transportation Accidents Involving Large Packages,Rep. SLA74-0001(1976).
- 10) J.D.McClure: An Analysis of the Qualification Criteria for Small Radioactive Material Shipping Package,Rep. SAND76-0708(1977).
- 11) J.D.McClure, J.D.Yoshimura, R.B.Pope, R.M.Jefferson, R.D.Seagren, L.B.Shappert: Relative response of type B packagings to regulatory and other impact test environments, 6th International symposium on packaging and transportation of radioactive materials, pp.555-558(1980).
- 12) R.A.Blythe, P.J.Holt, and J.C.Miles: A Study of the Influence of Target Material on Impact Damage, 7th International symposium on packaging and transportation of radioactive materials, p.894(1983).
- 13) K.A.Gablin, R.M.Jefferson, R.B.Pope, M.G.Vigil, B.J.Joseph, and J.D.Yoshimura: Non-shielded Transport Package Impact Response to Unyielding and Semi-yielding Surfaces, 7th International symposium on packaging and transportation of radioactive materials, p.902 (1983).
- 14) J.D.McClure: The Probability of Spent Fuel Transportation Accidents, Rep. Sand80-1721(1981).
- 15) E.L.Wilmot, J.D.McClure, and R.E.Luna: Report on a Workshop on Transportation

- Accident Scenarios Involving Spent Fuel, Rep. SAND80-2012(1981).
- 16) R.B.Pope, J.D.Yoshimura, J.E.Hamann, and D.E.Klein: An Assessment of Accident Thermal Testing and Analysis Procedures for Radioactive Materials Shipping Package, ASME Paper 80-HT-38(1980).
 - 17) R.M.Jefferson and J.D.McClure: Non-shielded Transport Package Impact Response to Unyielding and Semi-yielding Surfaces, 7th International symposium on packaging and transportation of radioactive materials, p.1633 (1983).
 - 18) 首都高速道路公団ガイド (<http://www.mex.go.jp/profile/mexguide/mexguide4.pdf>).
 - 19) L.E.Fischer, C.K.Chou, M.A.Gerhard, C.Y.Kimura, R.W.Martin, R.W.Mensing, M.E.Mount, M.C.Witte: Shipping container response to severe highway and railway accident conditions, NUREG/CR-4829 (1987).
 - 20) A.W.Dennis: Predicted Occurrence Rate of Sever Transportation Accidents Involving Large Casks, 5th International symposium on packaging and transportation of radioactive materials, p.909 (1978).
 - 21) K.Satoh and S.Miyazaki:A Numerical Study of Large Fires in Tunnels, Report of Fire Research Institute of Japan, No.68, p.19 (1989).
 - 22) O.Mégret and O.Vauquelin:A Model to Evaluate Tunnel Fire Characteristics, Fire Saf. J., Vol.34, p.393 (2000).
 - 23) 火災便覧, 第3版, 日本火災学会編, 共立出版社, p.636 (1997).
 - 24) W.Suga and T.Sasaki: Experimental study on transportation safety of package in side collision of heavy duty truck, 9th international symposium on packaging and transportation of radioactive materials, p.1702 (1989).
 - 25) R.W.Carlson, I.I.Fischer : A Highway Accident Involving Unirradiated Nuclear Fuel in Springfield, Massachusetts, on December 16, 1991,NUREG/CR-5892 (1992).
 - 26) 土木工学ハンドブック第4版, 技法堂出版, p.1507 (1989).
 - 27) J.J.McLellan, M.C.White, and W.R.Taylor: Damage and thermal exposure of a radioactive material package in an accident and gasoline fire. , 5th symposium on packaging and transportation of radioactive materials, Las Vegas, 1978, pp. 615-622.
 - 28) J.A.Koski, M.Arvisol, J.G.Bobbe, S.D.Wix, J.K.Cole, G.F.Hohnstreiter, S.D.Wix, D.E.Been, and M.P.Keane: Experimental ship fire measurements with simulated radioactive cargo, 12th international conference on the packaging and transportation of radioactive materials Paris (France), p.799 (1998).
 - 29) 辻正一, 燃焼機器工学, 日刊工業新聞社 (1971) .
 - 30) 火災便覧, 第3版, 日本火災学会編, 共立出版社, p.131 (1997) .
 - 31) M.Aritomi, O.Sugawa, and M.Suga: Certification test for safety of new fuel

- transport package (fire test), *International-Journal-of-Radioactive-Materials-Transport*. v. 5(2-4), pp.169-175 (1994).
- 32) 各国の地下施設防災・安全に関する現状調査: トンネルと地下, 28 卷 12 号, p.1057 (1997).
- 33) 岡泰輔, 桑名秀明: 道路トンネルの火災安全 道路トンネルの火災にかかわる潜在的危険性, 火災, Vol.48, No.5, p.11 (1998).
- 34) 栗岡均: 道路トンネルの火災安全トンネル火災事故と今後の課題, 火災, Vol.48, No.5, p.5 (1998).
- 35) E.Richter: *Temperaturausbreitung bei Tunnelbraenden: Auswirkungen auf den baulichen Brandschutz*, vfdb, Vol.45, No.1, p.18 (1996).
- 36) LS-DYNA, Version950, 使用の手引き, 日本総合研究所(2000).
- 37) ABAQUS/Standard User's Manual, Version 5.7, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. (1999).

4. 濃縮六ふつ化ウラン輸送物の安全性解析

4.1 輸送物の概要と安全性評価基準

4.1.1 MST-30 型輸送物の概要

MST-30 型輸送物は、図 4.1-1 に示すような円筒形状の MST-30 型保護容器と、濃縮六ふつ化ウラン (UF₆とも記す) を収納する 30B シリンダーからなる。保護容器は、円筒状外殻および内殻、ステップジョイント、シリンダースカート受け金具、外殻と内殻の間に充填した緩衝材および断熱材からなり、シリンダーは、弁および閉止栓を有する構造である。

主要項目は以下に示すとおりである¹⁾。

- a) 収納物 濃縮度 5%以下の六ふつ化ウラン
- b) 輸送物の種類 A 型核分裂性輸送物
- c) 輸送指数 0.5
- d) 輸送制限個数 無限個
- e) 輸送物の最大総重量 約 4170kg
- f) 収納物の最大総重量 約 2277kg
- g) 輸送容器 (保護容器) の外寸法 (長さ×幅×高さ) 約 2.4m×約 1.3m×約 1.4m
- h) 輸送容器の主要材質

保護容器外殻および内殻 (ステンレス鋼), 断熱材 (フェノリックフォーム), 緩衝材あるいは支持材 (ウレタンフォーム), シリンダー (ASTM-A516 鋼)

解析用モデルは、MST-30 型輸送物の安全解析書に基づいて、可能な限りこれを模倣作成するものとする。

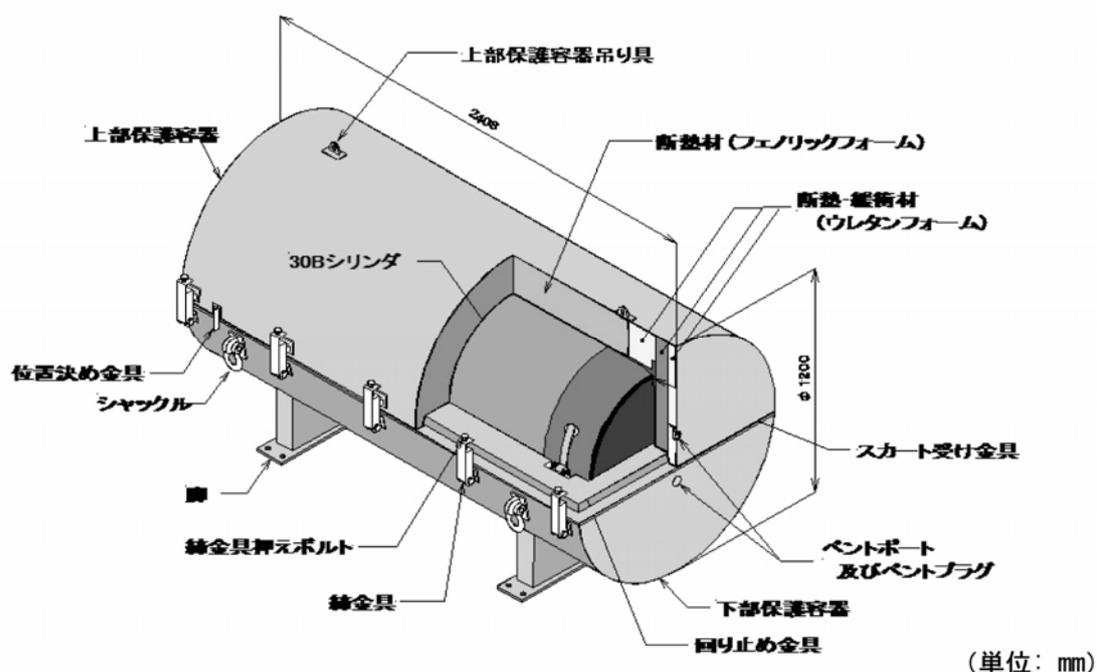


図 4.1-1 MST30 型輸送物の概要

4.1.2 安全性評価基準とその確認方法

第1章序言で述べたように、当該輸送物は、A型核分裂性輸送物として規則に定められた「一般の試験条件」および引き続き「特別の試験条件」を課した後において臨界に達しないことが要求される。また、当該輸送物は、濃縮六ふつ化ウランであるため2.76MPaの内圧の水圧試験および1.2mの自由落下試験において収納物の漏れ、散逸のないことが要求される。さらに、当該輸送物は核分裂性であるため、水の浸入を防止する特別の仕組みが組み込まれている^{2, 3)}。また、収納物は濃縮六ふつ化ウランであるため、「特別の試験条件」での弁の密封機能維持が要求される。これらの規則の要件を満たす限り、輸送中の事故に対しても十分安全性が確保されていると考えられるが、本章では、第3章で策定した苛酷事故シナリオによる落下衝撃および熱安全性に係る解析を行い、その結果を用いて表4.1-1に掲げる評価基準を満足することを確認する。すなわち、落下衝撃の影響によるシリンダーの変形がひずみ許容範囲にあり、密封装置である弁が保護容器と接触せず、また火災の熱的影響による弁の密封機能の喪失がないことを、解析値と関連文献記載値を比較して確認する。また、落下衝撃による保護容器の変形等あるいは熱的影響による部材焼失等の程度を考慮した臨界安全性解析を行い、輸送物の孤立系あるいは配列系のいずれの体系においても中性子実効増倍率が、一般に受け入れられている基準値の0.95以下であり、未臨界性を維持できることを示す。

なお、輸送物に対する落下衝撃解析あるいは熱安全性解析のモデルおよび解析方法の妥当性、ならびに解析精度は、当該輸送容器のSAR（安全解析書）¹⁾に記載された「特別の試験条件」における原型試験結果と解析結果を比較し、解析結果が原型試験を概略再現していることにより確認する。

表 4.1-1 MST-30 型輸送物の事故時に適合すべき要件および評価基準

適合すべき要件	評価基準	確認方法
閉じ込め性	<ul style="list-style-type: none"> シリンダー（弁を含む）耐圧部分が健全であり、シリンダー内に水が浸入しないこと。 	落下衝撃解析により、 <ul style="list-style-type: none"> シリンダー耐圧部の相当塑性ひずみが17%以下であること*、あるいは弁が他の部材と接触のないこと。 熱安全性解析により、 <ul style="list-style-type: none"> シリンダー内部の加熱された六ふつ化ウランの蒸気圧がシリンダー水圧試験圧力 2.76MPa (400psi)⁴⁾を超えないこと**。 熔融し液体状となった六ふつ化ウランがシリンダーを充填しないこと***。 弁取り付け部がはんだ固相線温度 183℃を超えないこと****。
未臨界性	<ul style="list-style-type: none"> 保護容器、内部の断熱材および緩衝材、シリンダーの形状等が臨界となるモデル形状を逸脱しないこと。 	臨界安全性解析により、 <ul style="list-style-type: none"> 落下衝撃解析による保護容器の変形、熱安全性解析による断熱材および緩衝材の焼失の程度を考慮して、孤立系および配列系の臨界解析を行い、中性子増倍率が0.95未満であること。

* :シリンダー破断の有無を評価するため、評価項目を相当塑性ひずみとし、その限界値をシリンダー構成材料 A516grade70 の破断伸びである 17%とする。

** : UF₆が 2.76MPa の蒸気圧を示す温度は約 197.5℃であり、UF₆の液相表面温度がこの温度を超えないことで確認する。

*** : 安全解析書では「収納物は設計温度 250° F(121℃)を超えないこと」となっている。六ふつ化ウランの熱膨張が大きく、過度に昇温されるとシリンダーを完全に充填し液圧が生じ、シリンダー破損を生じる。そこで、シリンダーに関する ANSI の規格では、この液圧破損を防止するため、収納物の設計最高温度が約 121℃ (250° F) とされている。設計では、収納物である UF₆が所定重量充填されているとき、この温度において UF₆液相はシリンダー内容積の 95%となり、5%の裕度を保持させている⁴⁾。この設計の基礎条件に基づき、事故シナリオ時の収納物固/液相の体積を評価し、実際の余裕度を確認することとする。

**** : 弁構成部材のパッキングおよびガスケットの使用限界温度は、はんだ熔融温度よりも十分に高く、はんだが熔融しなければ健全性が確保される。

4.2 高架道よりの落下事故に係る落下衝撃解析

4.2.1 解析モデルおよび解析方法

4.2.1.1 解析モデル

(1) 解析の構成

本解析は、輸送物と衝撃面（舗装された地盤）をそれぞれ3次元でモデル化し、図4.2-1に示すような弁側を最下部とした18m高さからの垂直落下、図4.2-2に示すような弁側を最下部とした18m高さからのコーナー落下、および図4.2-3に示すような18m高さからの水平落下をモデルとして設定した。コーナー落下においては輸送物の重心を衝撃面の落下点垂直上方に位置させ、衝突により最大の変形を与えるようにした。この場合、衝撃面と輸送物の間ではリバウンドを可能とした。

(2) 輸送物のモデル化

輸送物のモデルの概観を図4.2-4および図4.2-5に示す。保護容器上部と下部は締め金具で剛接されたモデルとした。弁は外形を六角柱で近似し、剛体としてモデル化した。シリンダーと内殻との間のパッドは最重要項目である垂直落下の解析においてその影響は小さいので省略した。

(3) 衝撃面のモデル化

衝撃面のモデルとしては、コンクリート舗装とアスファルト舗装の2種類を考慮した。コンクリート舗装については、衝突物が固い円柱状の場合にはコンクリート層がせん断により円錐状に破壊すること^{5,7)}が報告されており、コンクリートの耐衝撃性評価においても、せん断破壊を考慮する必要性が指摘されている⁸⁾。しかし、本輸送物のように内部に緩衝材があり、コーナーあるいは水平落下のように衝突により衝撃面との接触面が時間と共に変化する場合、上記剛体円柱モデルの適用は不適切である。そこで、舗装面のモデル化のために、コンクリートは降伏はするが破壊は生じないものと仮定した。コンクリート層の破壊を考慮すると、輸送物がコンクリート層を貫通し、その下の地盤が局所的に変形する⁹⁾。しかし、コンクリート層が破壊しないと仮定すると、輸送物はコンクリート層より以下の層に対して均一な力を作用させるので、輸送物の変形に対しては厳しい評価になると考えられる。

コンクリート舗装とアスファルト舗装のモデルは、赤松が用いたモデル¹⁰⁾を用いる。舗装設計は交通量を考慮して行われ、交通量B区分のコンクリート舗装では、コンクリート厚さは25cmであり、路盤の地盤反力係数 K_{30} は 20kgf/cm^3 である¹¹⁾。赤松のコンクリート舗装モデルでは、 K_{30} は 30kgf/cm^3 以上になり上記区分の値の1.5倍以上となり、解析モデルとして安全側の設定となる¹²⁾。

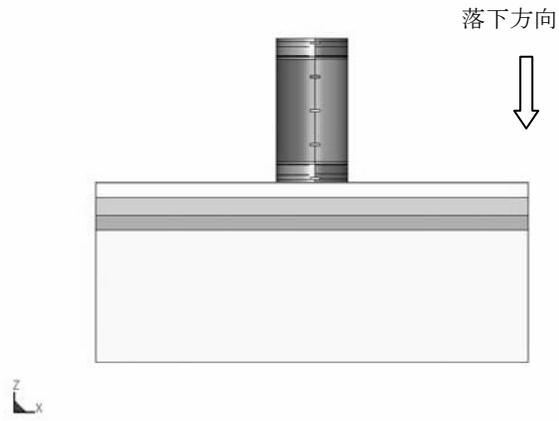


图 4.2-1 垂直落下

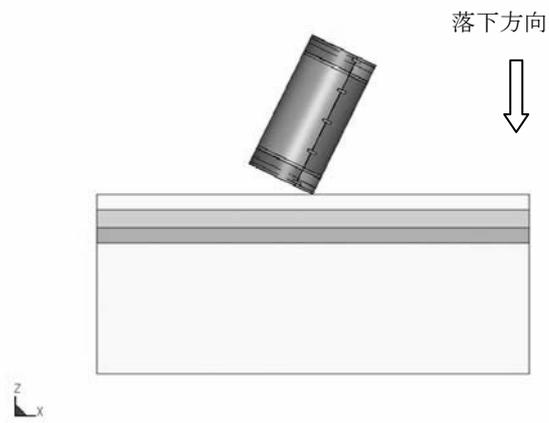


图 4.2-2 コーナー落下

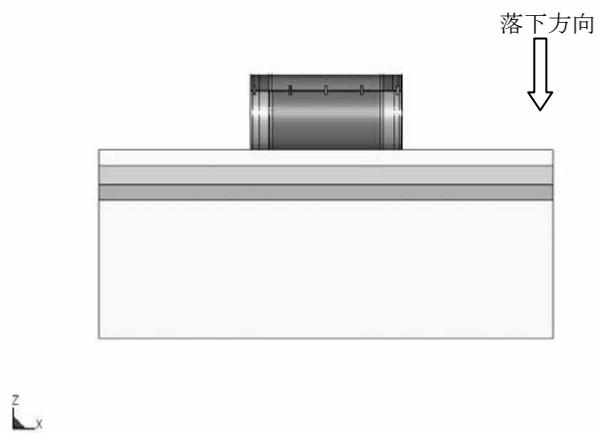


图 4.2-3 水平落下

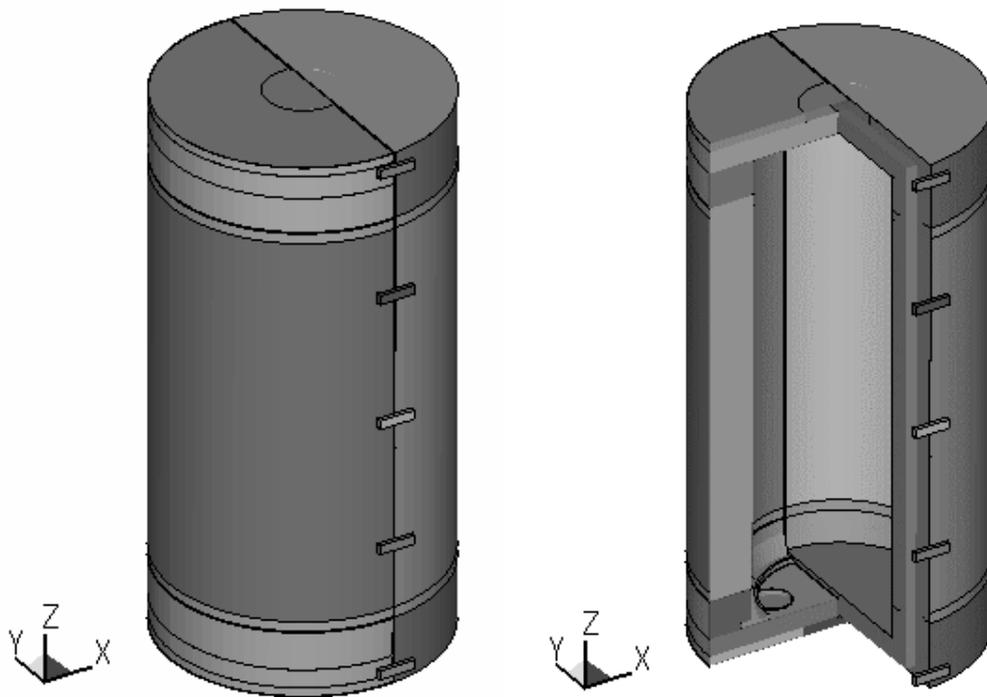


図 4.2-4 MST-30 型保護容器モデルの概観図

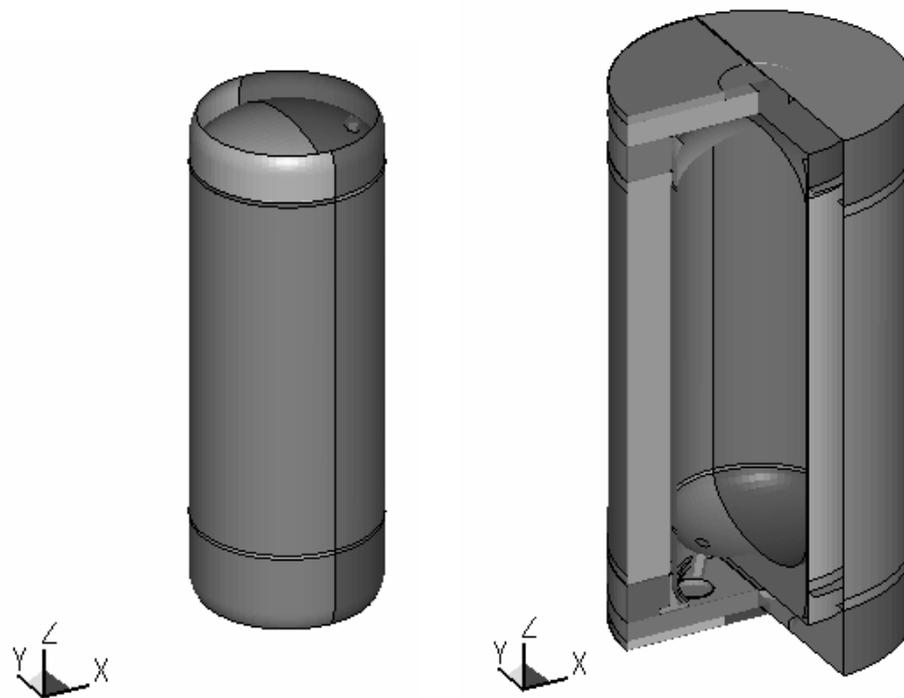


図 4.2-5 30B シリンダーモデルの概観図

4.2.1.2 解析手法と解析条件

(1) 解析コード

解析には、第3章で述べたように有限要素法衝撃解析コード LS-DYNA Ver.960 を使用した。

(2) 材料データ

緩衝材（支持材）であるポリウレタンフォームⅠ，Ⅱ，Ⅲ，および断熱材であるフェノリックフォームの計算に用いた圧縮特性を図4.2-6に示す。ポアソン比については、密度326kg/m³のウレタンフォームに関する圧縮試験報告¹³⁾によると、ポアソン比が限りなく小さいことから、緩衝材および断熱材についてもポアソン比をゼロと仮定する。ポアソン比がゼロとなるため、構成式として非連成の直交独立（異方性）モデルが使用できる。LS-DYNA コード内蔵の材料モデルでは、独立気泡をモデル化した材料モデル(MAT53, MAT_CLOSED_CELL_FOAM)の使用も可能であり、その設定係数が文献¹⁴⁾では体積充填率をパラメータにして定式化されている。しかし、この設定係数は約82kg/m³の低密度タイプのウレタンフォームに基づいて検討されたものであり、本輸送物の約340kg/m³のポリウレタンフォームに適用して圧縮試験結果を再現させることは困難であると判断した。そこでポアソン比をゼロとした構成式である LS-DYNA コード内蔵の材料モデル (MAT57, MAT_LOW_DENSITY_FOAM) を使用し、負荷時の荷重-ひずみ関係が試験データを再現することを確認した。また、除荷時のヒステリシス効果を大きく設定し¹⁵⁾、容器の塑性的変形を模擬できるようにした。なお、図4.2-6において、試験データに加えて高ひずみ領域で接触計算の安定化を目的としてエクストラポイントを追加設定した¹⁵⁾。弾性率は、表4.2-1に示すような応力-ひずみ曲線の初期勾配から決定したものをを用いた。

保護容器の SUS304 ステンレス鋼およびシリンダーの ASTM A-516 grade70 については、等方弾塑性の構成式を用い、表4.2-1に示す値を計算に用いた。降伏応力のひずみ速度依存性を次式¹³⁾で考慮した。

$$\sigma_{yd} / \sigma_{ys} = 1 + (\dot{\epsilon} / c)^{1/p}$$

σ_{yd} , σ_{ys} : 動的および静的降伏応力

$\dot{\epsilon}$: ひずみ速度

c , p : 定数

ここで、定数 c , p は文献データ¹⁷⁾を参照して、SUS304 ステンレス鋼に対して $p=7500$, $c=4.3$ ¹⁶⁾とし、ASTM A-516 grade70 に対しては $p=100$, $c=6.0$ とした。

衝撃面である舗装面材料の物性値を表4.2-2および表4.2-3に示す。アスファルト舗装部材では、アスファルト層の弾性率の温度依存性が大きいですが、ここでは年間の雰囲気の平均的な条件として20°Cの値を用いた¹⁰⁾。コンクリート舗装部材の圧縮強度については、共通試験で測定値が27.4~33.7 MPaとの報告¹⁸⁾があり、赤松の使用した値は設計的な値と判断され、本解析ではコンクリートスラブの LS-DYNA による衝撃解析で採用されている値

27.6 Mpa¹⁹⁾を使用した。圧力 P と主ひずみ ε との関係式は、コンクリートについては次式²⁰⁾による。

$$P = 3.93 \times 10^4 \varepsilon - 4.85 \times 10^6 \varepsilon^2 + 2.41 \times 10^8 \varepsilon^3$$

アスファルト並びに路盤、路床の圧力とひずみは次式による⁵⁾。

$$e = -\ln(1 - P/K)$$

e : 体積ひずみ, P : 圧力, K : 体積弾性率

降伏条件はコンクリートおよびアスファルトでは Von-Mises, 路盤および路床では Mohr-Coulomb を用いた。LS-DYNA での物性モデル (MAT5, MAT_SOIL_AND_FOAM) によるモデルの降伏条件は, Drucker-Prager 降伏条件のパラメータである α , κ と関係付けられている¹⁵⁾。本報告では, 次式²¹⁾を用いてこれらパラメータを Mohr-Coulomb のパラメータである粘着強度 c および内部摩擦角 ϕ を関連付けた。

$$\alpha = 2 \sin(\phi) / \sqrt{3(3 + \sin(\phi))}$$

$$\kappa = 6c \times \cos(\phi) / \sqrt{3(3 + \sin(\phi))}$$

(3) 要素分割

輸送物についての要素分割を図 4.2-7 から図 4.2-10 に示す。緩衝材, 断熱材およびシリンダースカート受け金具は 1 点積分ソリッド要素で, その他は 1 点積分シェル要素で表した。輸送物の有限要素モデルの要素数は 74526, 節点数は 88178 である。

コンクリート舗装面の有限要素分割図を図 4.2-11 に示す。節点数は 70015, 要素数は 64152 である。衝撃面を除く外面では応力波の無反射条件を定義した。剛体変位を抑えるために底面の垂直方向は固定し四隅の点を完全拘束した。アスファルト舗装面の要素分割を図 4.2-12 に示す。節点数は 70015, 要素数は 64152 である。衝撃面寸法およびその要素分割については, 1/2 モデルを用いて輸送物の変形・ひずみに及ぼすこれらの影響について検討し, 次のように設定した。

- ・ 衝撃面の長さは, 落下する輸送物の 3 倍と 4.17 倍についてサーベイ解析し, 輸送物の変形量・ひずみに有意な差が生じない。そこで 3 倍の寸法を採用した。
- ・ 最小要素体積が 4.7×10^5 , 8.5×10^5 , および $2.5 \times 10^6 \text{ mm}^3$ のモデルで比較すると, 最小要素体積が大きい $2.5 \times 10^6 \text{ mm}^3$ では地盤の変形が少なく輸送物に大きな変形を生じさせるが, 最小要素体積が小さい 4.7×10^5 と $8.5 \times 10^5 \text{ mm}^3$ とでは輸送物に生じる変形量の解析結果に有意な差が認められない。そこで最小要素体積を $4.7 \times 10^5 \text{ mm}^3$ 近傍(衝撃面での面積は同一で, 高さ方向に寸法が若干異なる)とするモデルを用いた。

表 4.2-1 輸送物内部材の材料物性値

	弾性率 GPa	ポアソン比 -	降伏応力 Mpa	硬化係数 MPa
緩衝材（支持材）Ⅰ，Ⅲ	0.236	0	-	-
緩衝材（支持材）Ⅱ	0.332	0	-	-
断熱材	0.0018	0	-	-
SUS304	206	0.3	205*	2250**
ASTM A-516	206	0.3	326.8***	2060

* : SAR¹⁾による ** : 文献²⁾による *** : ミルシートによる

表 4.2-2 コンクリート舗装部材の材料物性値

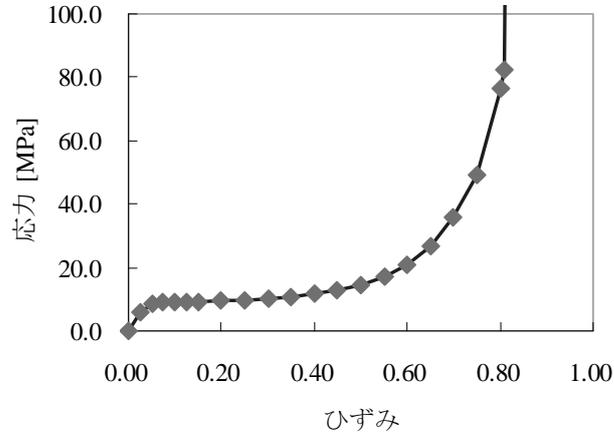
		コンクリート	路盤	路床 N*値=10	路床 N*値=50
深さ	mm	0~250	250~550	550~800	800~3000
弾性率	MPa	2.26E+04	9.81E+02	2.75E+01	1.37E+02
密度	kg/m ³	2300	1990	1900	2100
体積弾性率	MPa	1.13E+04	5.45E+02	1.83E+01	9.15E+01
粘着力 c	MPa	-	2.07E-02	2.07E-02	2.07E-02
摩擦角 φ	deg	-	50	29.1	46.6
圧縮強さ	MPa	2.76E+01	-	-	-

* : 標準貫入試験の N 値を示し、N が大きいほど緻密な路床となる。

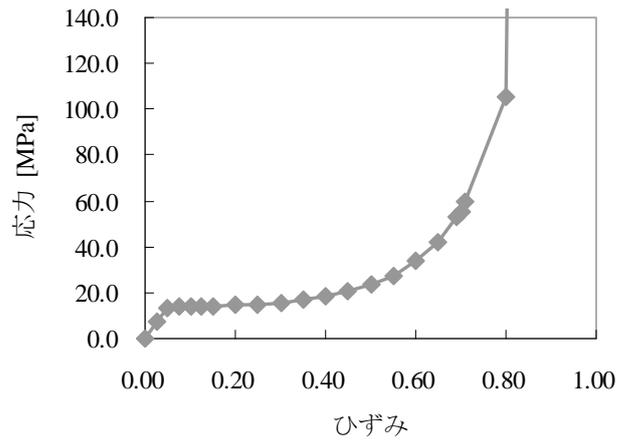
表 4.2-3 アスファルト舗装部材の材料物性値

		アスファルト	上層路盤	下層路盤	路床 N 値=10	路床 N 値=50
深さ	mm	0~170	170~320	320~620	620~820	800~3000
弾性率	Mpa	1.16E+03	9.81E+02	7.85E+02	2.75E+01	1.37E+02
密度	kg/m ³	2120	1990	1990	1900	2100
体積弾性率	Mpa	1.28E+03	5.45E+02	4.35E+02	1.83E+01	9.15E+01
ポアソン比	-	0.35	0.2	0.2	0.25	0.25
粘着力 c	Mpa	-	2.07E-02	2.07E-02	2.07E-02	2.07E-02
摩擦角 φ	Degree	-	50	50	29.1	46.6
引張強さ	Mpa	4.41E+00	-	-	-	-

支持材 I, III の応力-ひずみ関係



支持材 II の応力-ひずみ関係



断熱材の応力-ひずみ関係

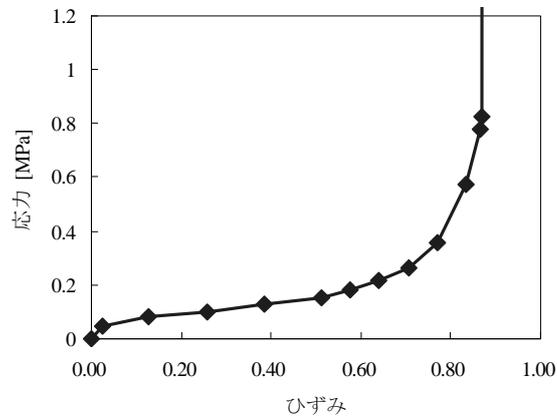


図 4. 2-6 緩衝材および断熱材の圧縮特性 (ひずみは工学単位)

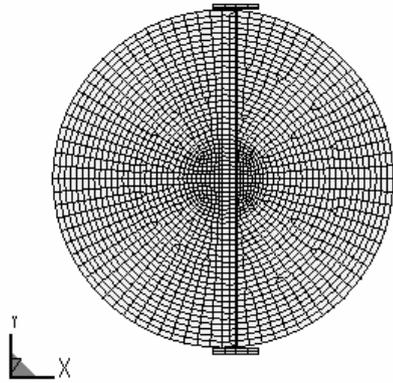


図 4.2-7 輸送物端面の要素分割

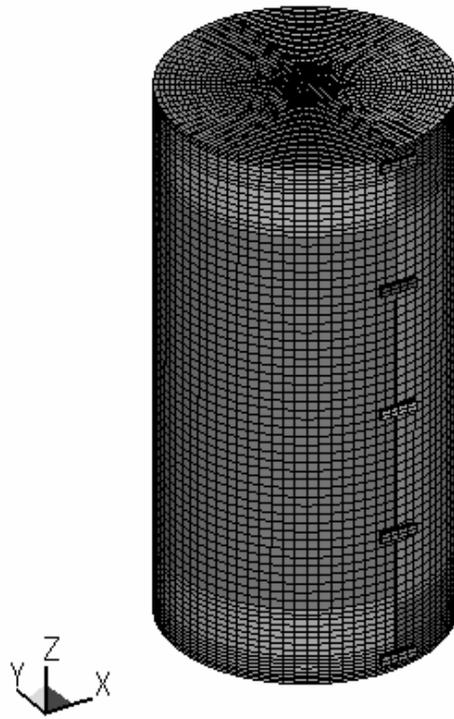


図 4.2-8 輸送物概観の要素分割

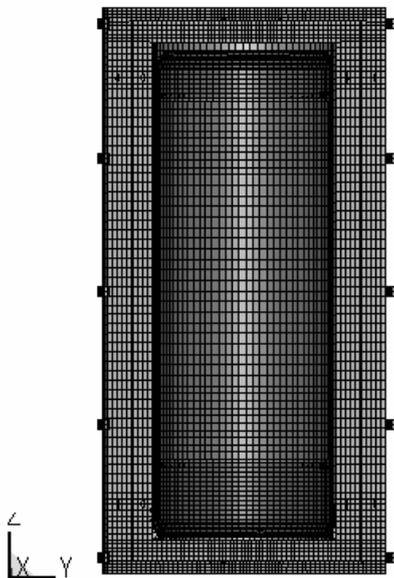


図 4.2-9 保護容器断面の要素分割

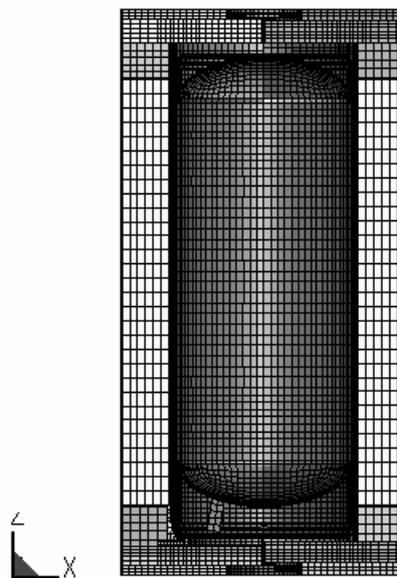


図 4.2-10 シリンダー収納断面の要素分割

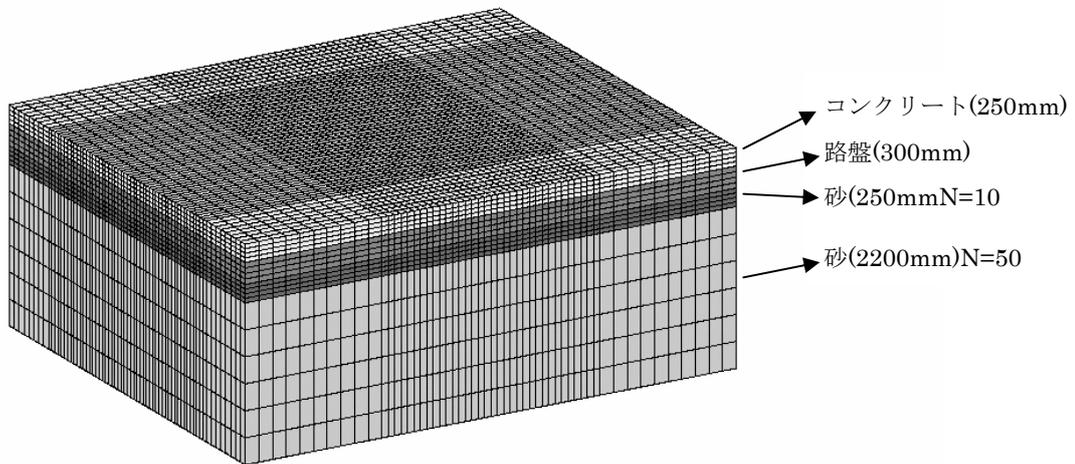


図 4.2-11 コンクリート舗装面の要素分割

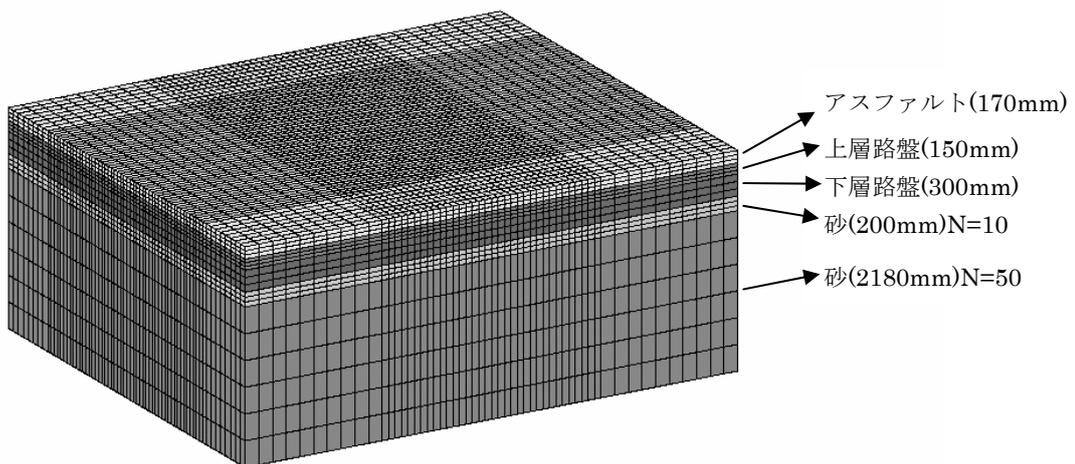


図 4.2-12 アスファルト舗装面の要素分割

(4) その他の計算条件の設定

解析では、輸送物節点に 18m 落下高さから定まる衝突時速度を与えた。リバウンドし、輸送物の所定位置の変位量差が一定となる時点まで解析を行った。輸送物の重量は安全解析書のそれと一致させた。保護容器について重量不足分はSUS304の部材密度で調整した。収納物の重量は落下姿勢ごとに表 4.2-4 に示すように特定領域のシリンダー密度を調整した。加速度およびひずみの出力に際しては、原型試験において 320Hz のローパスフィルターが使用されていたので、同様に波形処理した。また、全ての接触面で摩擦係数 0.3 を仮定した。

表 4.2-4 各解析における収納物重量調整方法

落下姿勢	調整部位
垂直落下弁側	弁側鏡面で調整
水平落下	シリンダー下半分を調整
コーナー落下	シリンダー部を均等に重量調整

(5) 解析モデルおよび解析精度の確認

SAR²⁾には「特別の試験条件」での機械的試験結果（0.3m 落下・1.2m 落下・9m 落下の順序での原型試験）が記載されている。そこで、本解析で使用する輸送物モデルについて、「特別の試験条件」の落下試験 I に規定された 9m からの非降伏面への落下解析を行い、原型試験結果と比較することにより解析精度を評価する。落下姿勢は、本解析と同様に、弁を下部側とする垂直落下、コーナーおよび水平落下である。比較するパラメータは、保護容器表面での変形量（落下方向の寸法減少量）およびシリンダー表面の加速度とひずみであるが、弁の接触の有無に係わる弁先端と内殻等の距離の比較を最重要評価項目とし、全体の変形を保護容器外殻の変形量で確認する。

上記解析の詳細については省略するが、垂直落下については加速度、保護容器変形量は共に原型試験結果をほぼ再現した。コーナー落下では、加速度はほぼ再現したが保護容器変形量は落下後の回転のためか試験結果より過小評価となった。水平落下については保護容器変形が過大で、一方シリンダー胴部ひずみが過小となった。また、弁の接触の有無に係わる弁先端と内殻等の距離は確保された。従って、解析結果は原型試験結果を概略再現していると判断され、輸送物についての解析モデルおよび解析方法の妥当性ならびに解析精度が確認された。

4.2.2 解析結果およびその評価

4.2.2.1 舗装面への落下衝撃解析

ここでは、コンクリート舗装面への落下解析を行った結果について述べる。アスファルト舗装面への落下解析についても同様な結果が得られている。

(イ) 垂直落下に対する解析結果

(1) 弁と他部材との接触

図 4.2-13 に弁と内殻端板ポケットの相対距離をモニターする節点を示す。図 4.2-14 に弁と内殻端板ポケットの相対距離の時刻歴を示す。これから、弁と内殻端板ポケット底板は接触がなく、最近接の時点でも 46.7mm の間隔が保持されている。

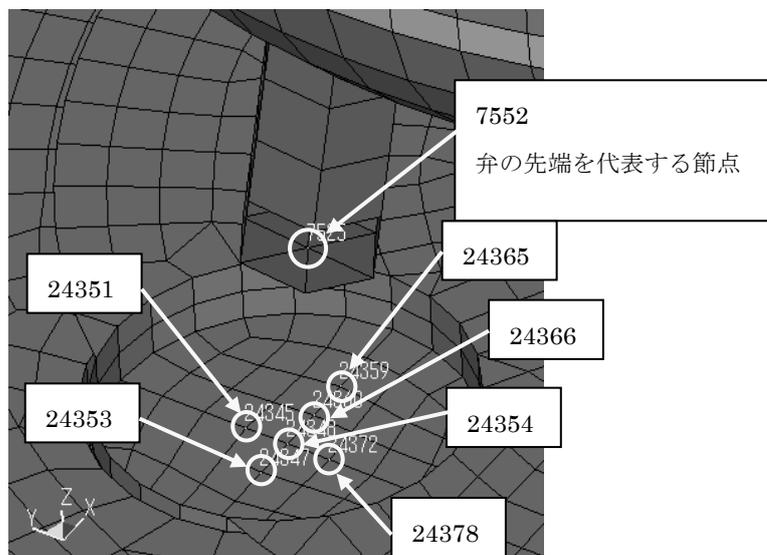


図 4.2-13 垂直落下時に弁と内殻端板ポケットとの相対距離の測定を行う節点

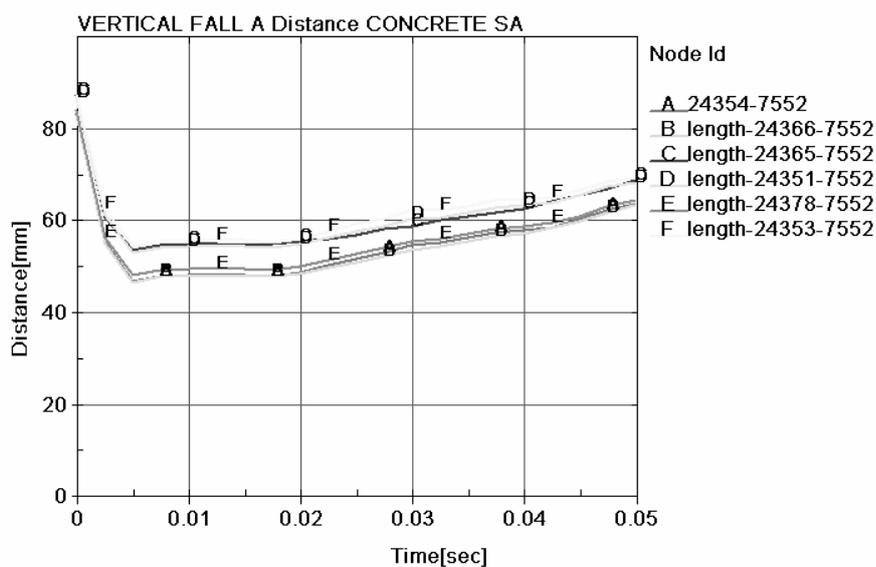


図 4.2-14 垂直落下時の弁と内殻端板ポケットとの相対距離

(2) シリンダーのひずみ

相当塑性ひずみ分布の解析では、スカート受け金具の接触によるシリンダースカート端部の半円に大きなひずみが生じる結果となった。耐圧部の相当塑性ひずみは、1.6%以下であった。なお、弁側鏡面部のひずみの最大値は、半径方向で0.0024となった。

(3) 保護容器外殻の変形

保護容器外殻の変形は、図 4.2-15 に示す上下 2 組の節点を用い、その節点間の相対距離の平均値として算出した。この平均相対距離すなわち変形量の時刻歴を図 4.2-16 に示す。これを見ると、変形量は、輸送物が衝撃面に衝突後 0.0075 秒において最大となり、その値は約 20.6mm となる。なお、0.03 秒以降の最終的変形量は約 17.5mm であった。保護容器の最大変形時刻 0.0075 秒における変形を図 4.2-17 および図 4.2-18 に示す。

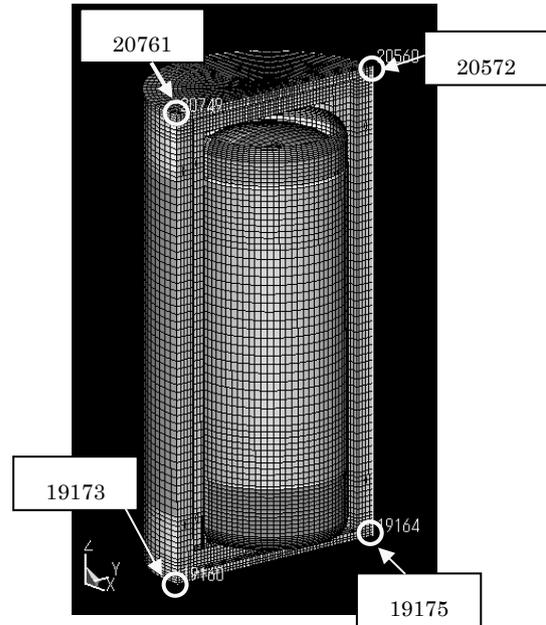


図 4.2-15 垂直落下時の変形を測定する節点

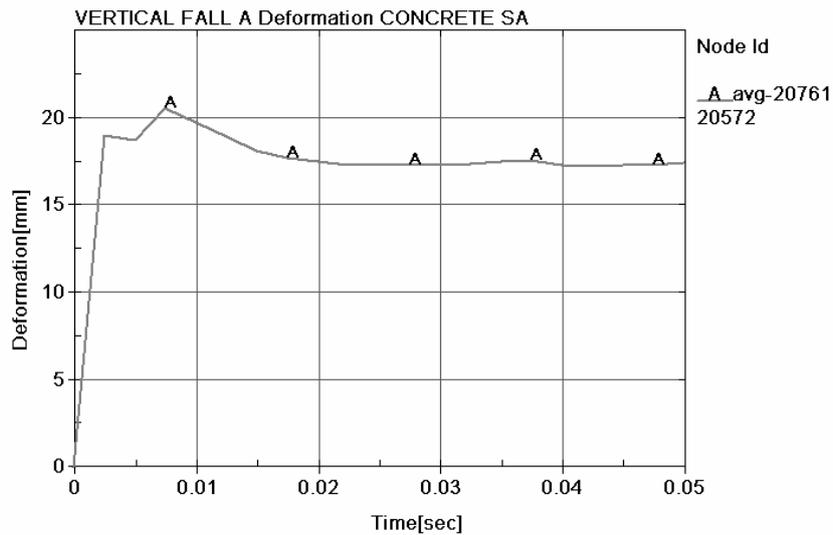


図 4.2-16 垂直落下時の保護容器外殻変形の時刻歴

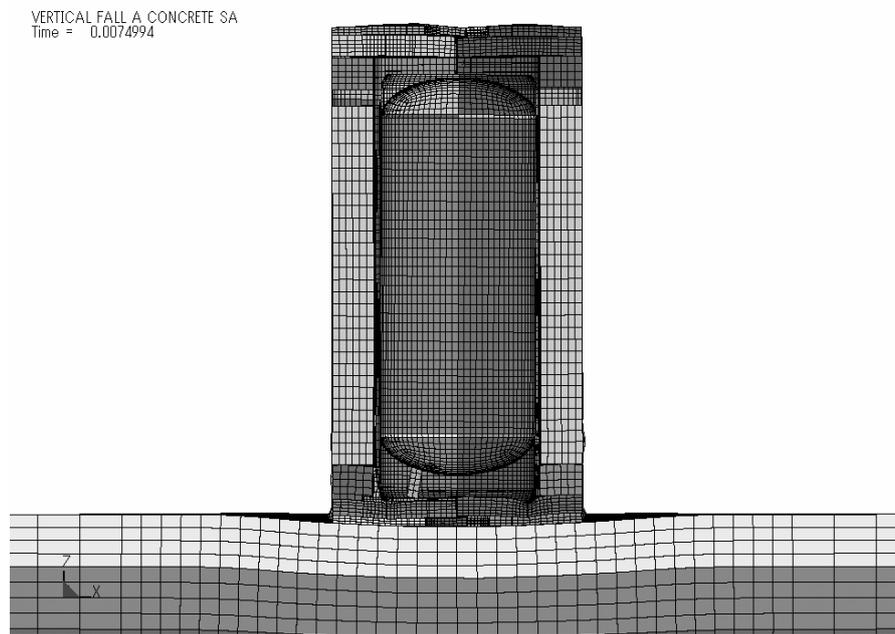


図 4.2-17 垂直落下時の保護容器の最大変形時刻における変形図

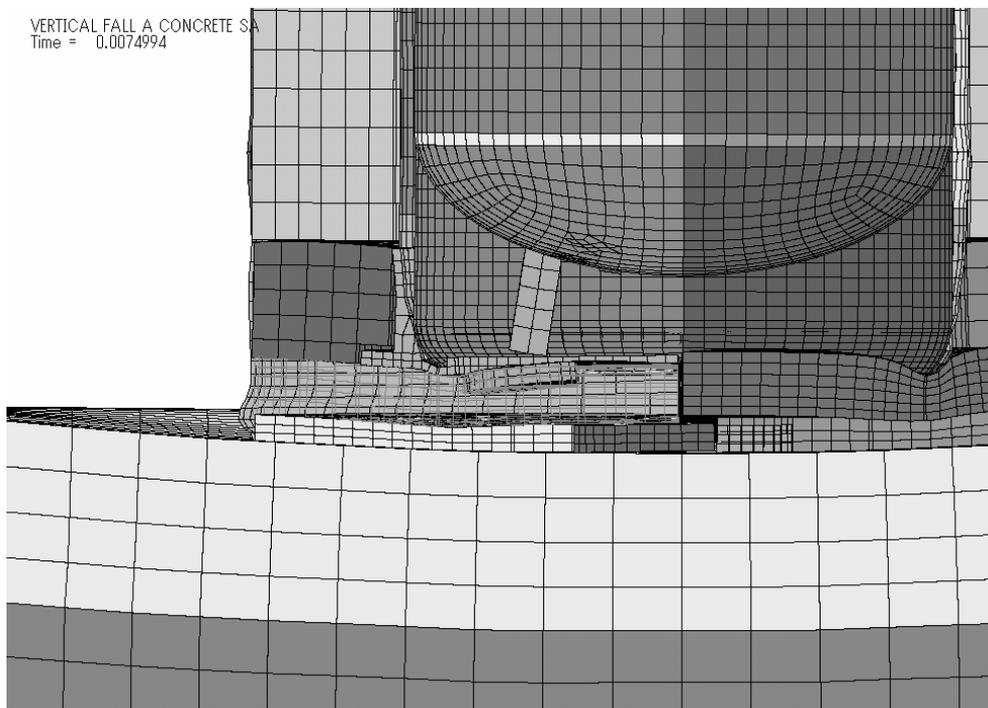


図 4.2-18 垂直落下時の保護容器の最大変形時刻における変形拡大図

(ロ) コーナー落下に対する解析結果

(1) 弁と内殻端板との接触の有無

図 4.2-19 に弁と内殻端板ポケットの相対距離をモニターする節点を示す。弁の先端は先端部中央の節点 7552 で代表した。図 4.2-20 に弁と内殻端板ポケットとの相対距離の時刻歴を示す。これによると、弁と内殻端板ポケット底板とは接触がなく、最近接の部位、時点でも 65.6mm の間隔が保持されている。

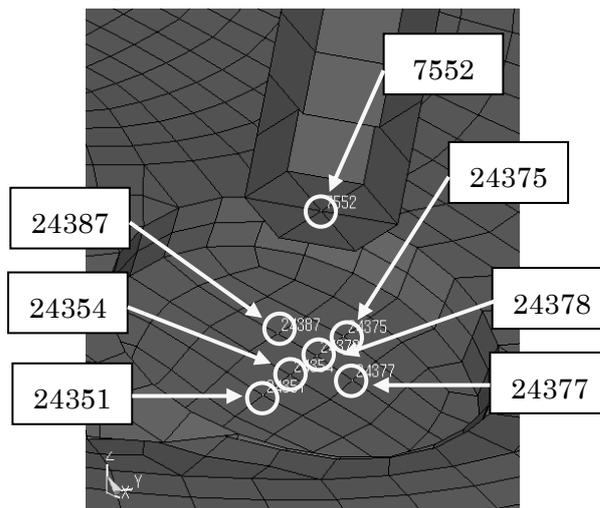


図 4.2-19 コーナー落下時の弁と内殻の相対距離を測定する節点

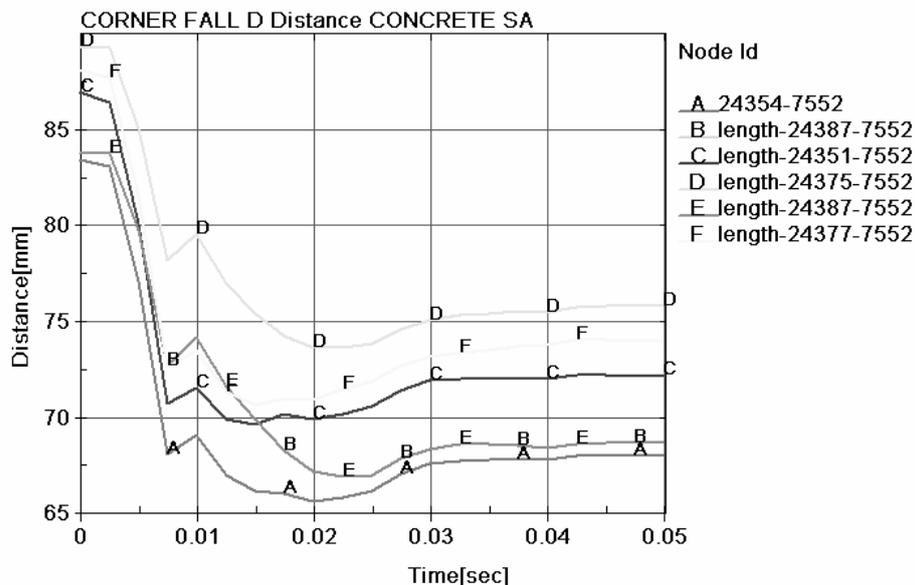


図 4.2-20 コーナー落下時の弁と内殻ポケット間の相対距離の時刻歴

(2) 加速度および保護容器外殻の変形

加速度の最大値は 239G であった。保護容器外殻の変形は、図 4.2-21 の a および b とし
て求め、その最大値は a=109 [mm], b=214 [mm] となった。これらの値は「特別の試験条
件」を適用した解析結果より大きかった。保護容器の最大変形時刻 0.04 秒における変形状
況を図 4.2-22 に示す。

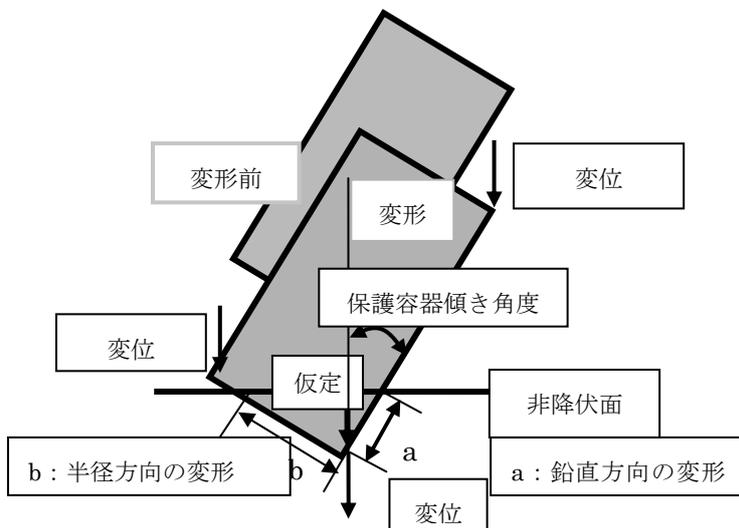


図 4.2-21 コーナー落下時保護容器変形算出方法

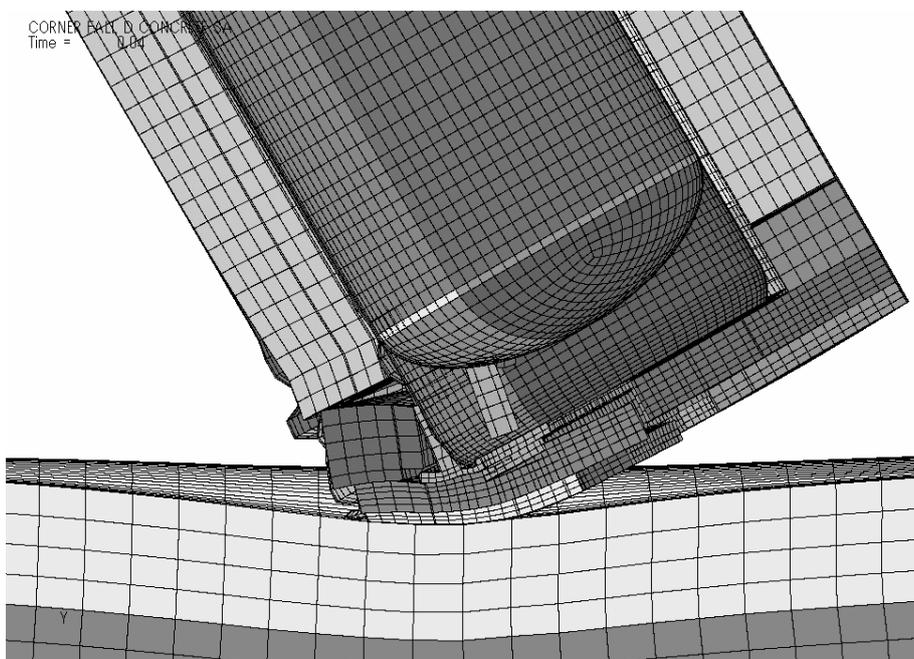


図 4.2-22 コーナー落下時の保護容器の最大変形時刻における変形拡大図

(ハ) 水平落下に対する解析結果

(1) 弁と他部材との接触

図 4.2-23 に弁と内殻端板ポケットの相対距離をモニターする節点を示す。弁の先端は先端部中央の節点 7552 で代表した。図 4.2-24 に弁と内殻端板ポケットとの相対距離の時刻歴を示す。これから、弁と内殻端板ポケット底板は接触がなく、最近接の部位、時点でも 78.5mm の間隔が保持されている。なお、弁とスカートとの接触もない。

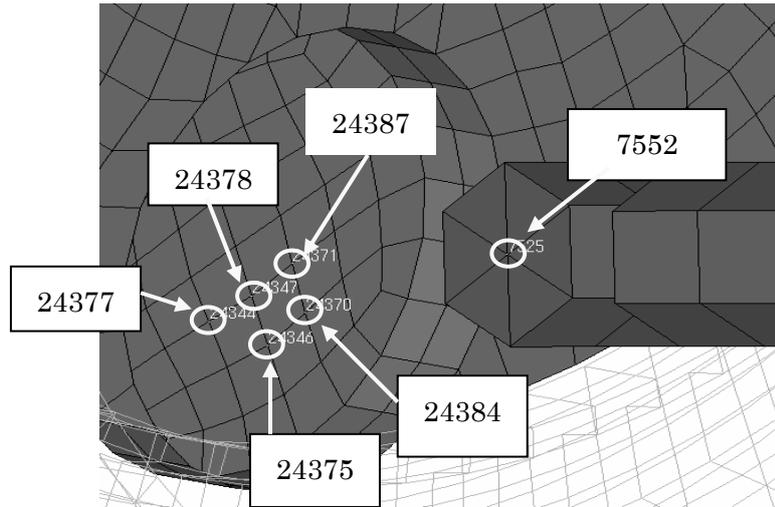


図 4.2-23 水平落下時の弁と内殻の相対距離を測定する節点

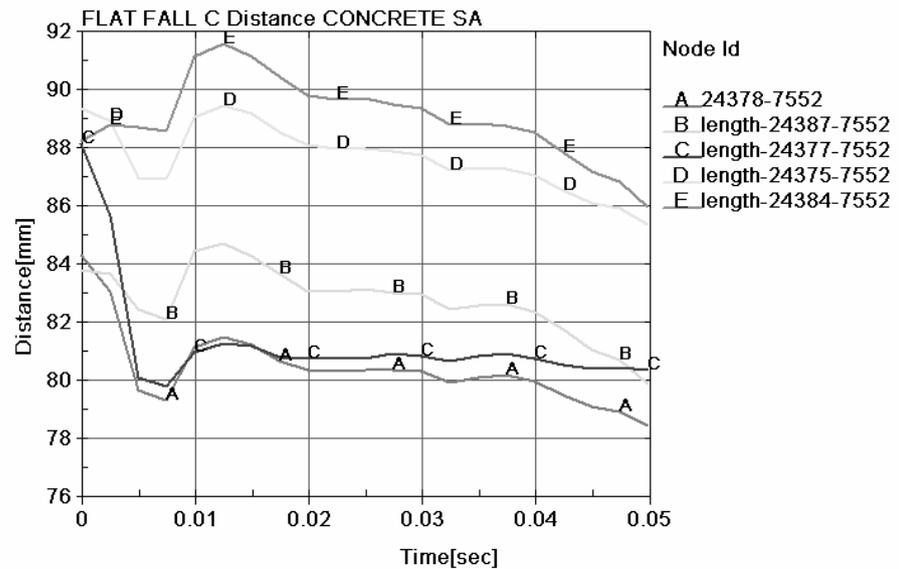


図 4.2-24 水平落下時の弁と内殻ポケット間の相対距離の時刻歴

(2) シリンダーのひずみ

ひずみが最も大きくなる下部側の相当塑性ひずみ分布の解析では、スカート部に相対的に大きなひずみが発生したが、耐圧部の相当塑性ひずみは小さく 0.58%以下の結果となった。

(3) 保護容器外殻の変形

保護容器外殻の変形量は、図 4.2-25 に示す上下の節点を用いて、その節点間相対距離として算出し、その時刻歴の解析結果を図 4.2-26 に示す。これより、変形量の最大値は、輸送物衝突後 0.0125 秒において約 67.5mm であり、最終的には約 29.8mm の変形となる。保護容器の最大変形時刻 0.0125 秒における変形状況を図 4.2-27 に示す。

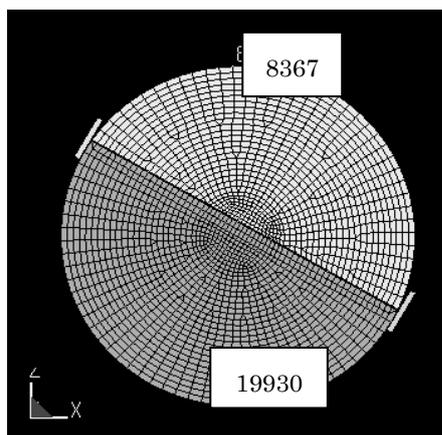


図 4.2-25 水平落下時の保護容器の変形を測定する節点

なお、胴部弁側下方のひずみの最大値は軸方向で 0.002 であり、胴部中央の加速度の最大値は 593G となり、「特別の試験条件」における解析結果より大きかった。

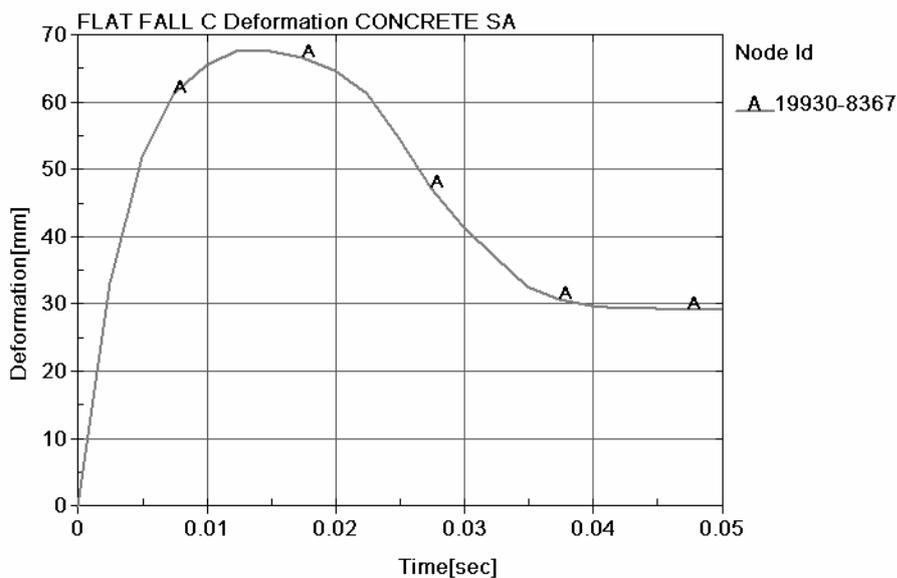


図 4.2-26 水平落下時の保護容器変形量の時刻歴

FLAT FALL C CONCRETE SA
Time = 0.012499

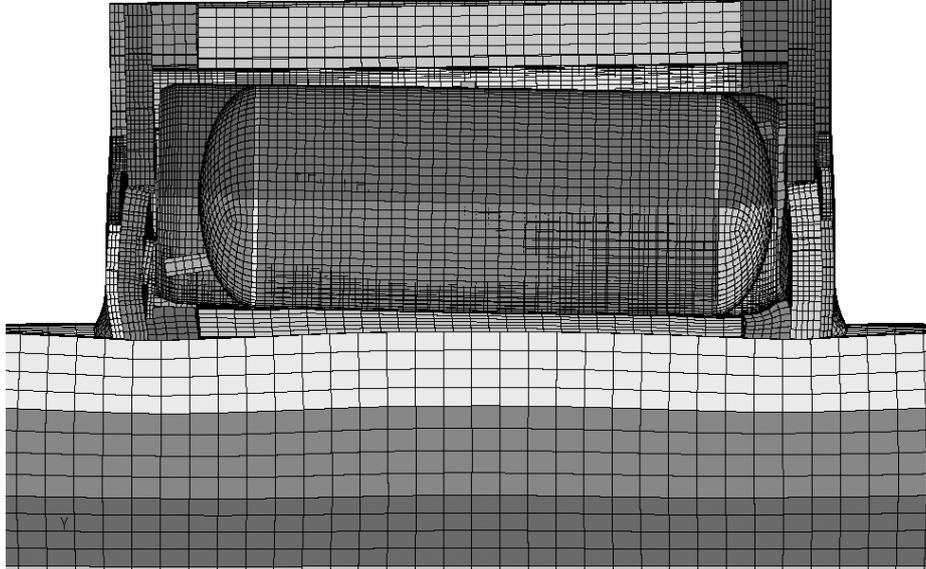


図 4.2-27 水平落下時の保護容器の最大変形時刻における変形状況

4.2.2.2 解析結果の評価

事故シナリオに基づき、18m 高さから、コンクリート舗装面およびアスファルト舗装面への、弁を下部側とする垂直落下、コーナー落下および水平落下時における解析結果をまとめて、表 4.2-5～表 4.2-7 に示す。これから、密封境界および耐圧部の健全性を以下のよう

- 密封境界としての弁の健全性は、弁と他部材の接触の有無で判定される。このため、「特別の試験条件」に対する解析と同様に、弁と他部材の距離または弁表面の接触反力を解析した結果では、想定した全ての落下姿勢において接触がなく、弁と内殻等との距離が十分あり余裕のあることが確認された。
- 耐圧部の健全性の評価部位は、垂直落下にあつてはシリンダーの鏡面であり、水平落下においては胴部である。垂直落下におけるシリンダーの鏡面の相当塑性ひずみが最も大きい解析結果となるが、コンクリート舗装面への垂直落下の場合で 1.6%以下、アスファルト舗装面への垂直落下の場合で 0.85%以下であり、構成材料の ASTM A-516 の破断伸びである 17%に比べ十分小さいことが確認された。

表 4.2-5 MST-30 型輸送物垂直落下に関する解析結果

項目	「特別の試験条件」*	コンクリート舗装	アスファルト舗装
鏡面部最大加速度	462 [G]	436 [G]	432 [G]
鏡面部最大ひずみ	半径方向 +0.0026 円周方向 +0.0014	半径方向 +0.0024 円周方向 +0.0010	半径方向 +0.0024 円周方向 +0.0010
弁の接触反力	反力なし	反力なし	反力なし
弁と内殻の最短距離	43 [mm]	46.7 [mm]	47.7 [mm]
保護容器変形	最大 17.4 [mm]	最大 20.6 [mm]	最大 10.4 [mm]
シリンダー耐圧部の相当塑性ひずみ	—	1.6%	0.85%

* : 参考値

表 4.2-6 MST-30 型輸送物コーナー落下に関する解析結果

項目	「特別の試験条件」*	コンクリート舗装	アスファルト舗装
胴部最大加速度	176 [G]	239 [G]	198 [G]
弁の接触反力	反力なし	反力なし	反力なし
弁と内殻の最短距離	67 [mm]	65.6 [mm]	68.6 [mm]
保護容器最大変形	軸方向 82.0 [mm] 半径方向 168 [mm]	軸方向 109 [mm] 半径方向 214 [mm]	軸方向 84.3 [mm] 半径方向 165 [mm]
シリンダー耐圧部の相当塑性ひずみ	—	—	—

* : 参考値

表 4.2-7 MST-30 型輸送物水平落下に関する解析結果

項目	「特別の試験条件」*	コンクリート舗装	アスファルト舗装
胴部最大加速度	490 [G]	593 [G]	575 [G]
胴部軸方向最大ひずみ	+0.0017	+0.0020	+0.0014
弁の接触反力	反力なし	反力なし	反力なし
弁と内殻の最短距離	83 [mm]	78.5 [mm]	80.0 [mm]
閉止栓の接触反力	反力なし	反力なし	反力なし
保護容器最大変形	66 [mm]	67.5 [mm]	32.4 [mm]
シリンダー耐圧部の相当塑性ひずみ	—	0.58%	0.18%

* : 参考値

4.3 タンクローリーとの衝突による火災事故に係る熱安全性解析

4.3.1 解析モデルおよび解析方法

4.3.1.1 解析モデル

輸送物を保護容器とシリンダーおよび UF₆ 収納物からなる構造とし、以下に記す点に留意して、図 4.3-1 および図 4.3-2 に示すような 3 次元モデルを用いた。

- ・ 輸送物軸方向の垂直断面の対称性から 1/2 モデルとした。
- ・ 計算時間の短縮化のため、精度に影響が生じない範囲で、保護容器、シリンダー形状を簡略化した。
- ・ シリンダーは弁および閉止栓を有する。これら部材の最高到達温度を評価できるように、弁については円筒状のソリッド要素で、閉止栓についてはシェル要素でモデル化した。
- ・ 保護容器は、外殻、内殻、ステップジョイント部およびシリンダースカート受け金具で構成される金属製殻とその内部に位置する緩衝材（支持材Ⅰ、ⅡおよびⅢ、ポリウレタンフォーム）および断熱材（フェノリックフォーム）で構成されるものとした。
- ・ 収納物である濃縮 UF₆ はシリンダーに規定重量満たされているとした。
- ・ シリンダー内は濃縮 UF₆ の固相／液相部とガス相からなり、温度上昇による固相/液相部のガス相と接する表面の上昇^{23~25)}を考慮した。
- ・ 初期状態では濃縮 UF₆ は固相でシリンダー下部に存在する²⁶⁾とし、シリンダー内濃縮 UF₆ のガス相は飽和蒸気圧での熱物性を有すると仮定した。
- ・ ステップジョイント部は、ステンレス部が内殻と外殻を接続することでモデル化した。

輸送物表面（保護容器外殻）と外部環境の間で、熱放射、自然対流熱伝達および太陽輻射熱を考え、保護容器内殻とシリンダーの間も同様に放射、自然対流熱伝達を考えた。

4.3.1.2 解析手順

解析手順は、設定された事故シナリオ条件により以下のとおりとする。

ステップ 1：輸送物が 38℃ 雰囲気下で所定の太陽輻射熱を受けた時の輸送物内部温度分布に関わる定常伝熱の解析。

ステップ 2：ステップ 1 で求められた輸送物内部の温度分布を初期条件とし、輸送物が 800℃ の雰囲気下に 90 分間、曝されたときの非定常伝熱の解析。

ステップ 3：ステップ 2 の終了時の輸送物内部温度分布を初期条件として、38℃ 雰囲気下で太陽輻射熱を受けながら冷却される非定常伝熱の解析。

4.3.1.3 解析手法と解析条件

(1) 解析コード

伝熱解析には、第 3 章で述べた汎用有限要素法解析コード ABAQUS6.2 を使用する。

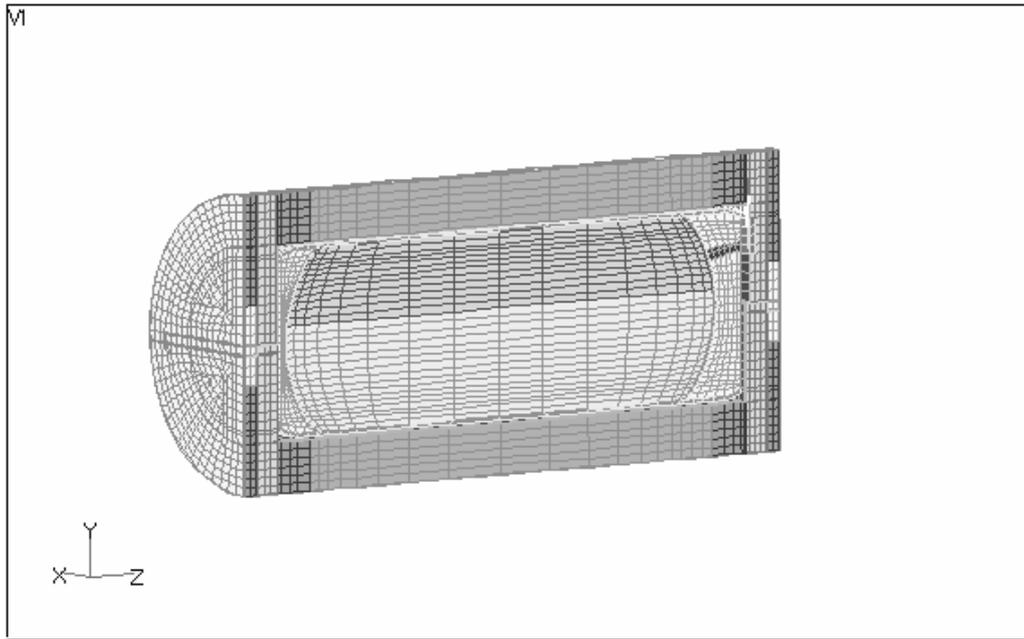


図 4.3-1 MST-30 型輸送物の全体に関わる解析モデル

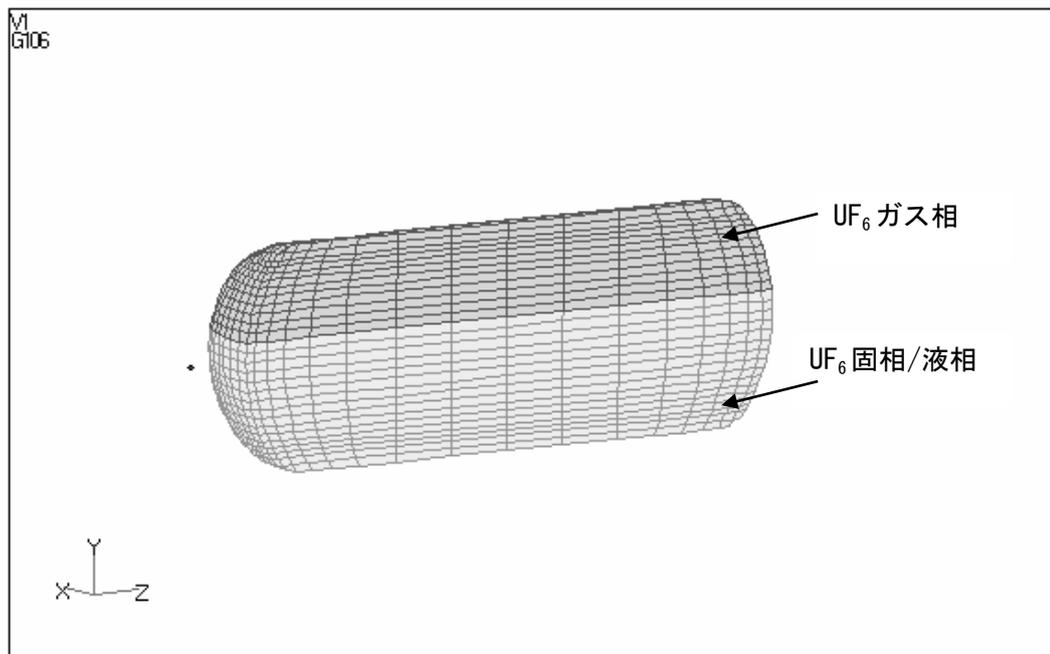


図 4.3-2 MST-30 型輸送物の収納物に関わる解析モデル

(2) 材料物性

計算に使用した輸送物の材料物性は以下のとおりである。

保護容器外殻/内殻のステンレス板、シリンダーの鋼およびフォームの物性値は SAR¹⁾に示された表 4.3-1～表 4.3-3 を用いた。内殻およびシリンダー間の空気の物性値を表 4.3-4 に示す。

濃縮 UF₆については、固相/液相の熱伝導度が Duret²⁷⁾による外、R.Dewitt の報告²⁸⁾による。濃縮 UF₆固相/液相の熱物性を表 4.3-5 に示す。ここで、液相密度および比熱は次式によった。

$$\text{液相密度: } \rho \text{ (g/cc)} = 3.630 - 5.805 \times 10^{-3}(t - t_f) - 1.36 \times 10^{-5}(t - t_f)^2$$

$$t: \text{温度}(\text{°C}), t_f: 64.052\text{°C}$$

$$\text{固相比熱: } C_p \text{ (cal/(mol} \cdot \text{deg))} = 12.34 + 92.23 \times 10^{-3} \times T$$

$$T: \text{温度 (K)}$$

$$\text{液相比熱: } C_p \text{ (cal/(mol} \cdot \text{deg))} = 18.0855 + 0.126985 \times T - 1.3476307 \times 10^{-4} \times T^2$$

$$T: \text{温度 (K)}$$

濃縮 UF₆の溶融温度は実測値 64.052°Cを 64.1°Cとし、計算上急激な潜熱の設定は不安定になるため±1°Cの範囲を設けた。潜熱は 19163J/mol から換算した。溶融温度・潜熱を表 4.3-6 に示す。

シリンダー上部は固相又は液相との平衡蒸気相が存在し、この蒸気層は固相/液相表面の温度と同一でその温度の平衡蒸気圧を有すると考えられる。平衡蒸気相の比熱、熱伝導度の温度依存性は、温度—平衡蒸気圧関係に基づくが、ここでは固相/液相温度に関係せず、蒸気相の温度依存性とみなして計算した。UF₆蒸気相の熱物性を表 4.3-7 に示す。ここで、各物性値は次式によった。

- ・ 温度(°C)範囲 0°C < t < 64°C の UF₆ 蒸気の平衡蒸気圧 :

$$\text{Log}_{10}P(\text{mmHg}) = 6.38353 + 0.0075377 \times t - 942.76/(t + 183.416)$$

- ・ 温度(°C)範囲 64°C < t < 116°C の UF₆ 蒸気 UF₆ 蒸気の平衡蒸気圧 :

$$\text{Log}_{10}P(\text{mmHg}) = 6.99464 - 1126.288/(t + 221.963)$$

- ・ 温度(°C)範囲 116°C < t < 臨界温度の UF₆ 蒸気の平衡蒸気圧 :

$$\text{Log}_{10}P(\text{mmHg}) = 7.69069 - 1683.165/(t + 302.148)$$

- ・ UF₆ 蒸気の密度 : $\rho \text{ (g/cc)} = 4.291 \times P/T$, P : 圧力 bar, T : 温度 K

- ・ UF₆ 蒸気の比熱 : $C_p \text{ (cal/(mol} \cdot \text{deg))} = 32.43 + 7.936 \times 10^{-3} \times T - 32.068 \times 10^4/T^2$

- ・ UF₆ 蒸気の熱伝導度 : $K \text{ (cal/cm, s, °C)} = 1.46(1 + 0.0042 \times t)10^{-5}$, t : 温度°C

表 4.3-1 ステンレス板の物性値¹⁾

温度 K	密度 kg/m ³	比熱 J/kg/K	熱伝導度 W/m
300	7640	499	16.0
400	↓	511	16.5
600	↓	556	19.0
800	↓	620	22.5
1000	↓	644	22.7

表 4.3-2 鋼の物性値¹⁾

温度 K	密度 kg/m ³	比熱 J/kg/K	熱伝導度 W/m
300	7710	473	51.6
500	↓	529	47.8
600	↓	690	38.2

表 4.3-3 フォームの物性値¹⁾

	温度 ℃	密度 kg/m ³	比熱 J/kg/K	熱伝導度 W/m
ウレタンフォーム I, III	25	340	1350	0.122
	257 以上	85	↓	↓
ウレタンフォーム II	25	450	1350	0.136
	257 以上	112.5	↓	↓
フェノリックフォーム	20	100		0.09
	60	↓	1047	
	100	↓	1130	
	150	↓	1256	
	200	↓	1298	
	550	↓		0.18
	600	↓		0.35
	802	↓	702	↓

表 4.3-4 空気の熱物性値²⁹⁾

温度 (K)	密度 (kg/m ³)	比熱 C _p (J/kg・K)	熱伝導率 λ (W/m K)	粘性係数 $\eta \times 10^5$ (Pa・s)
280	1.2606	1007	0.0246	1.76
300	1.1763	1007	0.0261	1.86
400	0.8818	1015	0.0331	2.33
500	0.7053	1031	0.0395	2.72
600	0.5878	1052	0.0456	3.08
800	0.4408	1099	0.0569	3.72
1000	0.3527	1142	0.0672	4.31
1200	0.2939	1175	0.0759	4.85
1500	0.2351	1212	0.0870	5.61

表 4.3-5 UF₆ 固相/液相の熱物性

温度 (°C)	密度 kg/m ³	比熱 J/kg/K	熱伝導度 W/m
20		466.0	0.41
20.7	5090	466.8	
25	5060	471.5	
40		487.9	
55		504.2	3.00
60		509.7	
62.5	4870	512.4	
63.1	4866	513.1	
65.1	3624	539.9	
72	3583	542.8	4.00
80	3534	545.9	
100	3404	552.8	
115.9	3292	557.3	
116.1	3291	557.4	
140	3111	562.7	
160	2948	565.8	
200	2589	568.1	

表 4.3-6 UF₆の溶融温度・潜熱

潜熱	54526J/kg
溶融(固化)温度	63.1°C～65.1°C

表 4.3-7 UF₆蒸気の熱物性（平衡蒸気相）

温度 °C	蒸気圧 Mpa	密度 kg/m ³	定積比熱 C _v ≡C _p -R J/kg/K	熱伝導度 K W/m
20	0.010	1.51	343.4	0.00663
40	0.038	5.21	350.7	0.00714
60	0.120	15.41	357.0	0.00765
63.9	0.147	18.76	358.1	0.00775
64.1	0.150	19.11	358.2	0.00776
80	0.242	29.41	362.5	0.00817
100	0.413	47.46	367.5	0.00868
115.9	0.603	66.50	371.1	0.00909
116.1	0.610	67.28	371.1	0.00909
140	1.007	104.60	376.0	0.00971
160	1.472	145.80	379.8	0.01022
200	2.870	260.32	386.6	0.01125

(3) 要素分割

保護容器（外殻，内殻，ステップジョイント部，スカート受け金具，ポリウレタンフォーム（支持材Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ），フェノリックフォーム）およびシリンダー（濃縮 UF₆，胴板，鏡板，スカート，弁，盲栓）は，3次元熱伝導要素にてモデル化した。シリンダー弁は，有限要素モデルの中心線上にモデル化した。スカートと鏡面部で囲まれる空気層は，3次元ソリッド熱伝導要素にてモデル化し，空洞輻射を考慮した。保護容器内殻とシリンダー外表面間および上記空気層の間のギャップ層には対流および輻射伝熱を考慮した。これらの解析に用いた要素数および接点数は，約 35000 要素および約 31800 節点である。

(4) 初期条件および境界条件

ステップ 1～ステップ 3 の初期条件および境界条件を表 4.3-8～表 4.3-10 に示す。これらは SAR¹⁾および関連文献³⁰⁾に準拠するが，一部過度に安全側と見なされる条件については見直し，3次元解析に対して明示されていない箇所については新たに設定した。シリンダー内部の解析条件は文献^{23～26, 31)}等を参照し，表 4.3-11 に示すように設定した。

表 4.3-8 ステップ 1 の解析条件

初期条件	境界条件	
	保護容器外表面	シリンダー表面と保護容器内殻表面
全ての部位で 38℃	<ul style="list-style-type: none"> 環境 (38℃) への輻射 輻射率 保護容器外表面 : 0.5 周囲 : 1.0 自然対流による放熱 $Nu=0.13(Pr \cdot Gr)^{1/3}$ 太陽輻射による入熱** 保護容器外殻円筒部 : 400W/m² 保護容器外殻端面 : 200W/m² 	<ul style="list-style-type: none"> 空気層を介した熱伝導 水平円筒部 Nu 数 1.6 を考慮* 垂直部 Nu 数 1.1 を考慮 輻射率 保護容器内殻表面 : 1.0 シリンダー表面 : 1.0

* : 文献 30)を参照, ** : 太陽輻射が 12 時間/日なので上記入熱に 1/2 を乗じ, かつ輻射率を乗じて入熱とする。

表 4.3-9 ステップ 2 の解析条件

初期条件	境界条件	
	保護容器外表面	シリンダー表面と保護容器内殻表面
ステップ 1 の温度分布	温度 800℃の雰囲気において <ul style="list-style-type: none"> 対流 熱伝達率 : 10W/(m²K) 輻射 輻射率 火炎 : 0.9 保護容器外表面 : 0.8 	<ul style="list-style-type: none"> フェノリックフォーム分解ガスによるフェノリックフォームに接した保護容器内殻への熱伝達 考慮期間 : 火災開始から所定時間*** 分解ガス温度 : 100℃* 熱伝達率 : 100W/(m²K) * 輻射 輻射率 保護容器内殻表面 : 1.0 シリンダー表面 : 1.0 シリンダーへの対流 水平円筒部 Nu 数 1.6 を考慮* 垂直部 Nu 数 1.1 を考慮**

*** : フェノリックフォーム分解ガスが保護容器内殻へ熱伝達している時間については, この分解ガスが生成する条件を考慮し, 内殻が分解ガス温度より高くなる場合はこの熱伝達を終了させるものとした。実際には考慮する面の温度が 95℃~105℃で熱伝達係数を 100~0 に変化させた。

表 4.3-10 ステップ 3 の解析条件

初期条件	境界条件	
	保護容器外表面	シリンダー表面と保護容器内殻表面
ステップ 2 の温度分布	・ ステップ 1 と同じ	・ ステップ 1 と同じ

表 4.3-11 シリンダー内の解析条件

箇所	解析条件
シリンダー内面/ UF ₆ のガス相	<ul style="list-style-type: none"> ・ UF₆ の固/液相表面への輻射 輻射率 シリンダー内面 : 0.92 ・ UF₆ のガス相への伝導
シリンダー内面/ UF ₆ の固/液相	<ul style="list-style-type: none"> ・ UF₆ の固/液相への伝導
UF ₆ のガス相 / UF ₆ の固/液相	<ul style="list-style-type: none"> ・ シリンダー内面からの輻射 輻射率 UF₆ の固/液相 : 1.0 ・ UF₆ のガス相からの伝導

(5) 解析方法

固体濃縮 UF₆ が加熱され、液体状態に変化するとき膨張するため、シリンダー容器に強度上影響を及ぼす可能性がある (表 4.3-5 の密度参照)。本解析では安全性評価上重要なこの濃縮 UF₆ の昇温による熱膨張を考慮した。解析方法は以下のとおりである²³⁾。

初期状態で、濃縮 UF₆ が固相モデルで表される。温度が上昇するので、濃縮 UF₆ は一部溶融し膨張する。初期状態からの濃縮 UF₆ の膨張分の体積 ΔV を算出し、この ΔV があらかじめ定めた膨張層の体積 (シリンダーの約 5%) を超えると、固/液相の濃縮 UF₆ として ΔV に相当する新しい層を体積 V に加えてモデル形状を更新する。

濃縮 UF₆ の全質量の保存条件から、濃縮 UF₆ の質量変化分 ΔM と体積 ΔV は次式で決定される。

$$\Delta M = M_{\text{tot}} - M_v$$

$$\Delta V = \Delta M / \rho_{\text{Tglob}}$$

ここで、M_{tot} : 濃縮 UF₆ の初期質量 (ガスを含む)、M_v は体積 V の質量、

ρ_{Tglob} : UF₆ 全体の平均温度 T_{glob} における濃縮 UF₆ の密度である。

ただし、形状モデル更新後の温度は更新前の温度を引き継ぐものとした。ただし、自由表面となる箇所の温度は更新前の自由表面温度を参照するものとし、シリンダー内部の空洞輻射等の境界条件も更新するものとした。

(6) 解析精度の評価

本解析モデルを本輸送物の安全解析書に記載された「特別の試験条件」における耐火試験（以下原型試験と略す）に適用して解析し、その熱的応答性を試験結果¹⁾と比較した。結果の一例として、シリンダー温度参照位置での温度履歴を原型試験と比較して図 4.3-3 に示す。解析結果は試験結果をほぼ再現しており、ここで用いられる輸送物解析モデルおよび解析手法の妥当性が示された。

4.3.2 解析結果およびその評価

太陽輻射による定常状態、火災開始から 90 分後（火災終了時）、および火災開始から 270 分後までの温度分布の解析結果では、濃縮 UF₆ の温度はシリンダー上部側のシリンダー接触部で高温になり、かつ中央部が端部より高い傾向が認められた。濃縮 UF₆ の固/液相表面の温度分布において最も温度が高くなるのは、中央断面のシリンダーに接した自由表面となる箇所である。

4.3.2.1 シリンダー部分への影響について

収納物である濃縮 UF₆ のシリンダーに接した固/液相表面の代表位置の温度履歴を図 4.3-4 に示す。これらの温度は全て節点の温度で示した。これから、最高到達温度は 89.2°C であり、濃縮 UF₆ 蒸気圧に関わる限界温度 197.5°C 以下となるため、その蒸気圧は水圧試験以下となることが確認された。また、収納物の体積は定常状態時で内容積の約 63.9%、であり、終了時で約 66.1%であった。従って、液相はシリンダーを充填せず、液圧は発生しないことが確認された。

次に、密封境界である弁および閉止栓先端の温度履歴を図 4.3-5 に示す。最高到達温度は弁先端で 92.7°C、閉止栓で 65.8°C であった。従って、はんだ固相線に関わる限界温度 183°C 以下であり、シリンダーの閉じ込め性が確認された。

4.3.2.2 断熱材および緩衝材への影響について

火災発生後 90 分間は、輸送物は 800°C の高温雰囲気曝されるため、保護容器内部のフェノリックフォーム断熱材、および下端部支持構造材として用いられているウレタンフォーム緩衝材も高温となる。輸送物内部温度分布解析結果から、断熱材最高到達温度は約 750°C、緩衝材最高到達温度は約 650°C と評価される。これらの最高温度到達部位は、容器周辺部に近く、外部からの入熱の影響を最も受けやすい個所に位置しているため、SAR¹⁾記載の特別の試験条件（800°C、30 分）後の容器内部の写真を見ても分かるように、フェノリックフォームおよびウレタンフォームは共に炭化が激しく進み、原形を留めていないほどである。

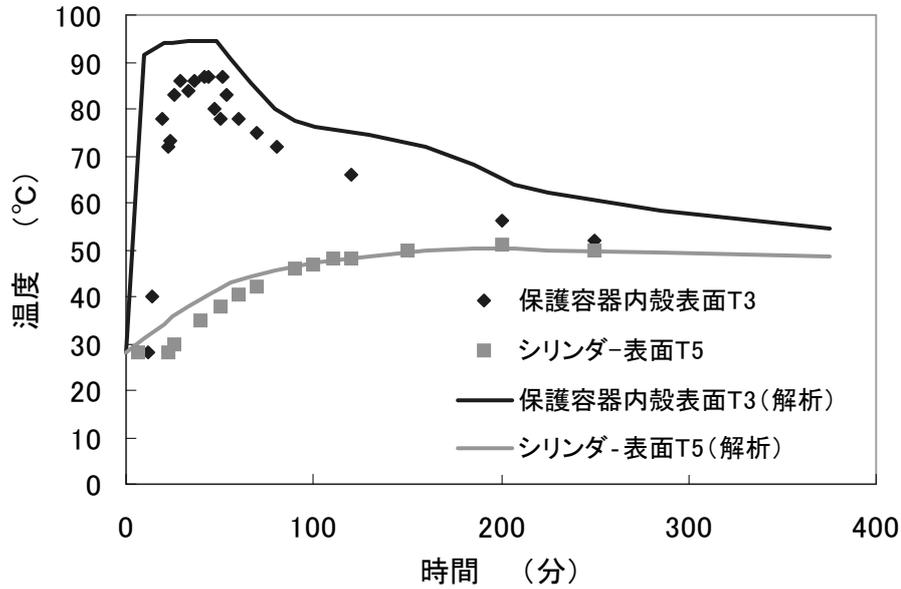


図 4.3-3 保護容器内殻表面及びシリンダ-外表面の温度履歴に関する原型試験と解析の比較

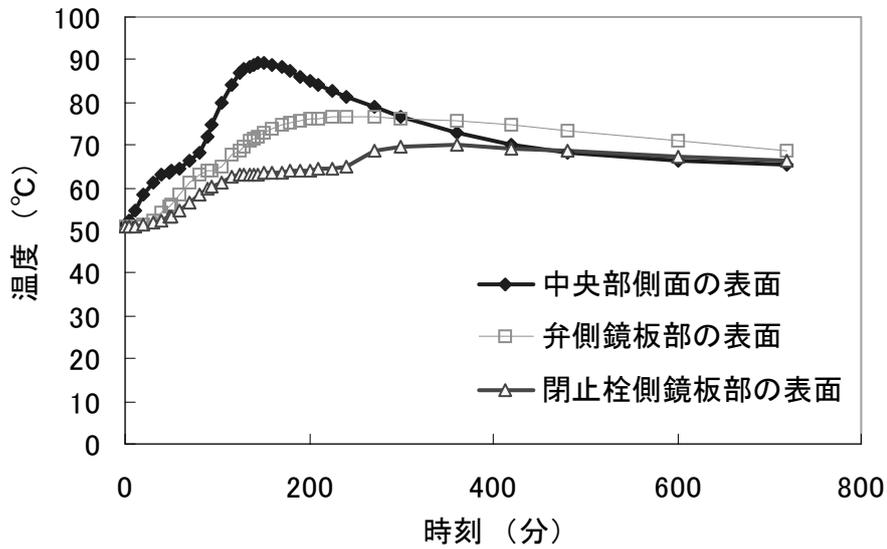


図 4.3-4 収納物各部位の温度履歴

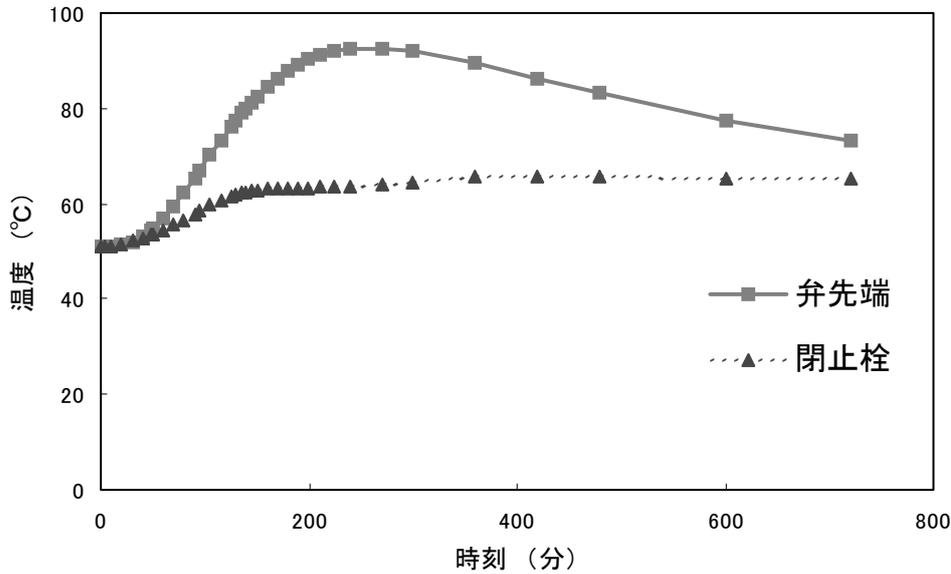


図 4.3-5 弁先端および閉止栓の温度履歴

4.4 トンネル内での衝突による火災事故に係る熱安全性解析

4.4.1 解析モデルおよび解析方法

4.4.1.1 解析モデル

(1) トンネル全体モデル

トンネル側壁，天井部，道路，トンネル内部空間（空気とする）および輸送物を図 4.4-1 に示すように 3次元でモデル化した。すなわち，トンネル形状寸法は，幅 10m，高さ 5m，長さ 104.8m の直方体として，その中央部に火災領域として長さ 4.8m，幅 4.5m，高さ 5m の領域で入熱を与えるようにした。ただし計算モデルは，この 1/2 の長さ，幅の領域で定義した。トンネル壁，天井部および道路は，厚さ 0.6m のコンクリートとした。輸送物は単体で，中央部の道路面より 0.8m 浮上して配置し，その管軸がトンネル長手方向（輸送方向）と平行になるようにした。自然対流による冷却を仮定したことで長手方向および幅方向は対称となり，1/4 モデルとした。

所定の入熱条件で加熱された空気がトンネル内で移動^{32~34)}し，トンネル出口で給排気される状況を解析し，さらに輸送物表面の温度を評価した。その際，トンネル天井，道路面および輸送物表面の輻射を考慮した。

(2) 輸送物モデル

輸送物の管軸方向の中央部円周断面をモデル化する。なお，垂直な直径が対称面となるので 1/2 半円を解析する。

4.4.1.2 解析手順

解析の手順は、設定された事故シナリオにより以下のとおりとする。

ステップ1：輸送物モデルによる、輸送物温度分布に関わる定常伝熱の解析。

ステップ2：トンネル全体モデルによる、ステップ1で求められた輸送物温度分布、外気およびトンネル内温度を26.9°C（300K）を初期条件とし、換気速度ゼロで、図3.2-4に示した放熱速度パターンに従う2時間にわたる火災時熱流動の解析。

ステップ3：トンネル全体モデルによる、2時間後の火災終了時から、入熱ゼロの条件で輸送物表面温度が充分冷却されるまでの熱流動の解析。

ステップ4：輸送物モデルによる、ステップ1で求められた輸送物内部温度分布を初期条件とし、ステップ2、3で求められた輸送物外表面温度履歴を輸送物表面に与えた輸送物内部温度分布の解析。

4.4.1.3 解析手法および解析条件

熱流動解析では、汎用流体解析コード FLUENT Version 6.0 を使用した。輸送物モデルを含めたトンネル全体モデルの要素分割状況を図4.4-2に示す。要素形状は6面体の非構造格子で、要素数は37908である。

- トンネル内の流れは、空気の動粘度を $15.83 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 、空間寸法を5mとし、速度0.2m/sと仮定すると、レイノルズ数 $Re = (0.2) \times (5.0) / (15.83 \times 10^{-6}) = \text{約 } 63000$ となり、乱流領域 ($Re > 2300$) と見積もれる。そこで、乱流効果を考慮するため、 k （乱れの運動エネルギー）- ϵ （粘性エネルギー消散率）乱流モデルを採用した。
- 境界条件として、流入・流出部をゲージ圧力ゼロの圧力流出境界と設定した。トンネル壁、天井部、道路のコンクリート層外面は断熱条件とする。
- トンネルの外気および初期温度は300Kとする。火炎部への単位体積 ($5\text{m} \times 4.8\text{m} \times 4.5\text{m} = 108\text{m}^3$) 当たりの入熱量は、第3章事故シナリオ設定における放熱速度パターンを参照して、火災開始からの10分間およびその後の110分間において、 $0.315 \text{MW}/\text{m}^3$ ($34 \text{MW}/108\text{m}^3$) および $0.026 \text{MW}/\text{m}^3$ ($2.8 \text{MW}/108\text{m}^3$) とする。なお、実際にはすす等が生成し不完全燃焼となるが、本解析では可燃物は全て燃焼するものと仮定する。従って、過大な熱を発生させたより厳しい評価を行うこととなる。
- 熱流動解析に用いる熱物性値として、トンネル壁、天井部および道路面の熱輻射率を表4.4-1に、また、コンクリートの密度、比熱、熱伝導率を表4.4-2に示す。トンネル内の気体を空気とし、その熱物性値として表4.3-4に示した値を用いる。また、気体中の化学反応による熱発生は考慮せず、気体の輻射率は温度に依存するとして、低温側では輻射の効果は小さいので、表4.4-3に示すように400°C以下では吸収係数を0に設定した。ここで火炎の吸収係数は、液体燃料の場合0.4～2.6、プラスチック系可燃物の場合1.3～2.6とされており、これらを参考に1.5と設定した。

トンネルモデル中の輸送物モデルについては、図 4.4-3 に示すように、保護容器と収納物とからなるようにモデル化した。保護容器の部分は、ステンレスの殻とフェノリックフォームから構成されるとして、熱伝導度、比熱、密度について、表 4.4-4 に示すような半径方向の物性を平均化した等価物性値を用いた。また同表には収納物である濃縮 UF₆ の熱物性値も掲げてあるが、密度については UF₆ がシリンダー内に充填されていると仮定して、熱容量が一致するように調整した。

輸送物内部温度分布の解析には、汎用有限要素法解析コードである ABAQUS Version 6.2 を使用した。輸送物モデルの要素分割を図 4.4-4 に示す。節点数は 1059、要素数は 1011 であった。輸送物内部の部材の熱物性値および輻射率等の境界条件は 4.3 節のタンクローリ火災の熱解析で用いたものと同じであり、濃縮 UF₆ の体積膨張を考慮した。なお、異なる点は輸送物の定常状態の算出に用いる表 4.3-8 において、太陽輻射による入熱の計算における保護容器外表面輻射率を 0.6 としたこと、および表 4.3-9 においてフェノリックフォーム分解ガスによる内殻への熱伝達作用時間を火災継続時間に合わせた 120 分と設定したことである。

表 4.4-1 輻射率²⁹⁾

	輻射率 ϵ
トンネル天井	0.6
道路面	0.6

表 4.4-2 コンクリートの熱物性値²⁹⁾

温度 K	密度 Kg/m ³	比熱 J/kgK	熱伝導率 W/mK
293	2370	900	1.2
600		930	0.8
1000		1630	1.0

表 4.4-3 吸収係数³⁵⁾

温度 K	吸収係数 k m ² /m ³
280	0
673	0
773	1.5
3000	1.5

表 4.4-4 輸送物等価熱物性値

	温度 ℃	密度 kg/m ³	比熱 J/kg/K	熱伝導度 W/m
保護容器	20	317.5	666.6	0.093
	60	↓	↓	-
	100	↓	↓	-
	150	↓	↓	-
	200	↓	↓	-
	550	↓	↓	0.185
	600	↓	↓	0.360
	802	↓	↓	↓
収納物		3300	471.5	0.41

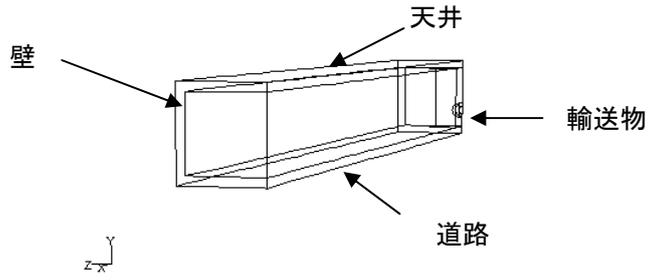


図 4.4-1 トンネル全体計算モデル

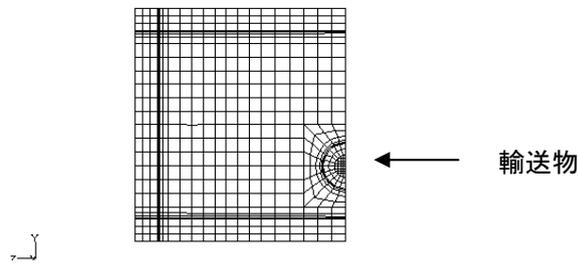


図 4.4-2 トンネル全体モデル断面の要素分割

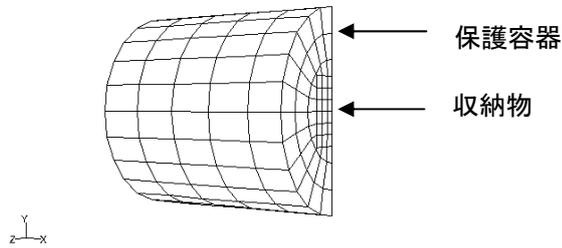


図 4.4-3 トンネル全体解析における輸送物モデル

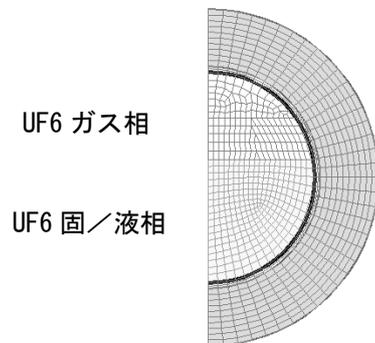


図 4.4-4 輸送物内部温度分布解析における輸送物モデル

4.4.2 解析結果およびその評価

4.4.2.1 トンネル全体モデルによる解析結果

輸送物の太陽輻射による定常状態の温度は 54.6°Cで、輸送物内部で一定であった。この値を全体モデルの輸送物部分の温度初期条件に入力した。

トンネル長手方向断面の温度分布解析結果によると、高温の熱流体はトンネル上部にあり、火炎部の中央上面で最も高い温度を示す。火災開始から 10 分後における熱流体の最高温度は約 1140°C (1413.6K) となり、120 分後のそれは 162.5°C (435.6K) である。トンネル内で大型車両の火災試験を実際に行った場合、最高温度が 1000°Cと報告されている³⁶⁾ので本解析結果はより高温の結果を与えることになる。入熱がなくなる火災開始から約 130 分以降では、輸送物の表面から若干内部で最も高い温度となり、表面温度が約 36°C (308.8K) まで低下し、外気がトンネル壁および輸送物表面で暖められて生じる対流が認められる。図 4.4-5 に火災開始から 10 分後における輸送物表面の円周方向の温度分布を示す。これから、輸送物の高温領域は中央近辺の最上部および最下部である。

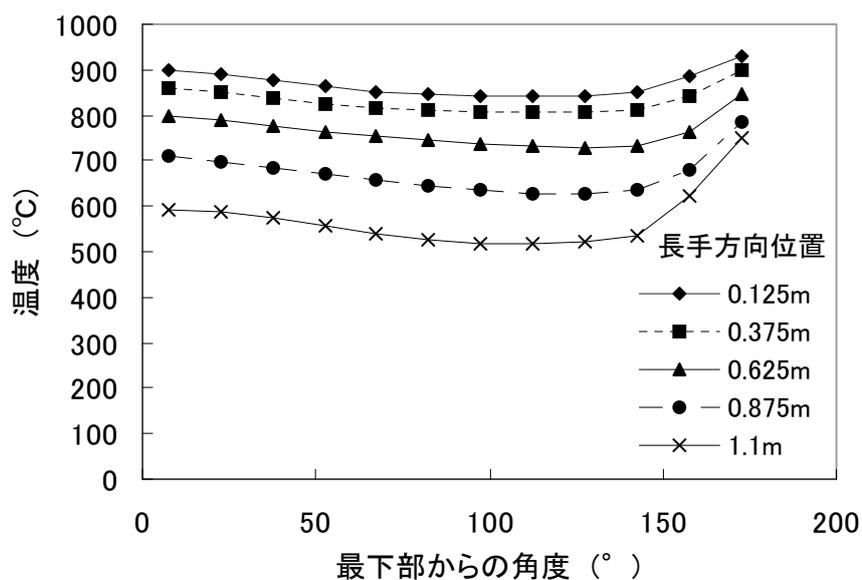


図 4.4-5 火災開始から 10 分後の輸送物表面の円周方向温度分布

4.4.2.2 輸送物内部の解析結果およびその評価

輸送物内温度分布の解析結果では、火災開始から 10 分後では、外周温度は上下が側面より高温になる。この輸送物内部温度分布から、断熱材最高到達温度は約 928°C、緩衝材最高到達温度は約 828°C と評価される。火災開始から 120 分後では、保護容器上部で最高温度は 141°C となる。また、シリンダー上部の濃縮 UF₆ ガス相が、シリンダー下部の濃縮 UF₆ 固/液相より高温になり、シリンダー内面に接した自由液面部の濃縮 UF₆ の温度が融解温度 64.1°C を上まわっている。150 分後では、濃縮 UF₆ のシリンダーに接した部分の融解の進行が認められる。

輸送物内部の保護容器内殻上部および下部、シリンダー上部および下部に加えてシリンダー内面に接した自由液面部の濃縮 UF₆ における温度履歴を図 4.4-6 に示す。これから耐圧部であるシリンダーの上部での最高到達温度は 84.0°C、濃縮 UF₆ の最高到達温度は 66.8°C である。これらの温度は、水圧試験結果から決まる限界温度 197.5°C 以下であり、シリンダーの健全性が確認される。また、濃縮 UF₆ 固/液相の火災初期の体積は内容積の約 64.1% で、解析終了時には約 65.1% となる。従って、濃縮 UF₆ 液相は、火災の全期間においてシリンダーを満たすことはなく、シリンダーを液圧で破壊させることはない。さらに、密封境界である弁、閉止栓の健全性については、弁および閉止栓の最高到達温度をシリンダーの最高到達温度 84°C で評価することとすれば、密封境界のシール部のはんだの融点(固相線温度) 183°C を超えることはなく、密封性は維持される。

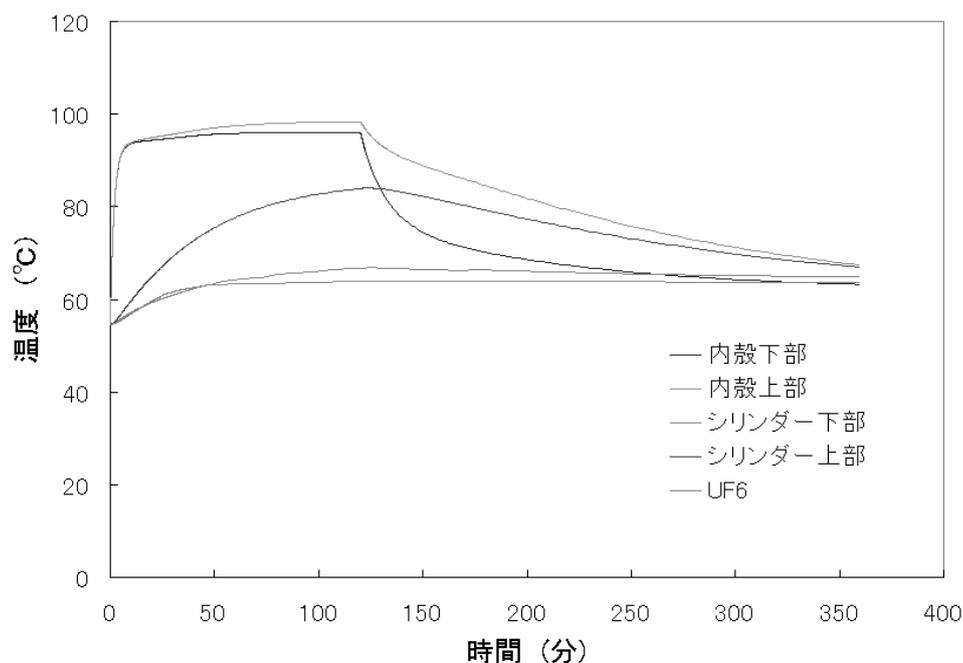


図 4.4-6 輸送物内部の各部位の温度履歴

4.5 苛酷事故想定時の臨界安全性解析

4.5.1 解析モデルおよび解析方法

4.5.1.1 落下衝撃解析および熱安全性解析の結果に基づく未臨界性評価前提条件

(1) 落下衝撃解析の結果の要約

4.2 節に記載されているように、衝撃面（コンクリート舗装とアスファルト舗装）に対してシリンダー弁位置を最下部にした 18m 高さからの垂直、コーナーおよび水平の姿勢での落下条件により落下衝撃解析を実施している。結果を表 4.5-1 に示す。

表 4.5-1 各落下姿勢に対する輸送物寸法等の最大変形

落下姿勢	落下高さ (m)	保護容器の最大変形(mm)		シリンダーの相当塑性歪	
		対コンク リート面	対アスファ ルト面	対コンク リート面	対アスファ ルト面
垂直落下	18	20.6	10.4	1.6%	0.85%
コーナー落下	18	109 (軸) 214 (径)	84.3 (軸) 165 (径)	-	-
水平落下	18	67.5	32.5	0.58%	0.18%

(2) 熱安全性解析の結果の要約

4.3 節、4.4 節に記載されているように、タンクローリーとの衝突による火災事故シナリオの、38℃雰囲気下を初期条件として 90 分間 800℃の雰囲気下に曝された後自然冷却する条件での熱安全性解析、また、トンネル内での衝突による火災事故シナリオの、換気装置のないトンネル内での 120 分間の火炎に曝された後自然冷却する条件での熱安全性解析を実施した結果の主要部分を表 4.5-2 に示す。

表 4.5-2 輸送物構造材最高到達温度

解析事象	構造材評価温度(℃)			
	断熱材	緩衝材	シリンダー弁	シール部
タンクローリー衝突による火災事故	750	650	92.7	92.7
トンネル内での衝突による火災事故	928	828	84	84

(3) 未臨界性評価前提条件

MST-30 型輸送物について実施した落下衝撃解析および熱安全性解析結果を整理し、臨界安全性を評価するための前提条件を表 4.5-3 に示すように設定する。

表 4.5-3 未臨界性評価前提事項

対象事象	未臨界性評価前提事項*	
	減速材制限	配置制限・吸収材制限
落下事故	<ul style="list-style-type: none"> 外容器の変形による水浸入有り。 シリンダー弁および閉止栓の他部材との接触なしによるシリンダー内への水浸入無し。 	<ul style="list-style-type: none"> シリンダー周辺の断熱材（中性子吸収材・減速材）の厚さ減少。
火災事故	<ul style="list-style-type: none"> 外容器周辺部の高温による密閉不可。 シリンダー弁および閉止栓温度の熱的制限値未満による水浸入無し。 	<ul style="list-style-type: none"> 断熱材（中性子吸収材・減速材）、緩衝材は焼失。

*：上記未臨界性評価前提事項は SAR と同様であるが、外容器変形量および焼失体積の程度に差異がある。

4.5.1.2 輸送物のモデル化および計算条件

(1) 輸送物のモデル化

輸送物の形状モデルは3次元で対称的なモデルとする。

① 保護容器とシリンダー

シリンダー本体は炭素鋼製であり、外径 762mm、全長 2070mm、胴板厚 12.7mm、スカート板厚 15.9mm である。なお、シリンダーは「ANSI N14.1 6.10 30B Cylinder」で規定されたものを用いている。

保護容器は上部保護容器と下部保護容器との 2 つ割りの横置円筒形でそれぞれ外殻と内殻の二重構造となっており、外殻は、全長 2408mm、全高 1354mm で円筒部の外径が 1200mm であり、内殻は全長 2096mm である。内・外殻はステンレス鋼製で、外殻円筒部および内殻円筒部の板厚は 3mm、外殻端板および内殻端板の板厚は 6mm である。内・外殻間の両端部には落下時の衝撃吸収を目的としたウレタンフォーム製の支持材Ⅰ、支持材Ⅱおよび支持材Ⅲが挿入されている。また、残りの円筒胴部には断熱材としてフェノリックフォームが発泡充填されている。

安全解析書に基づき、下記のように単純化する。

- ・シリンダースカート、保護容器吊り具、締金具およびボルト、脚などの構造材は安全側の評価とするために無視する。
- ・構造解析、熱解析によればシリンダーの密封性は保持される。
- ・支持材Ⅰ・Ⅲ(0.37g/cm³)、Ⅱ(0.48g/cm³)は安全側の評価とするために、低密度側の一種類の緩衝材とする。
- ・シリンダースカート部の空隙は、モデルを単純化するために支持材で占められている

とする。

- ・ シリンダー形状は燃料領域を包絡する直円筒とし、直円筒の長さは製作許容差を考慮した最大長さとし、直円筒部の板厚は全て **12mm** とする。
- ・ 六ふつ化ウラン（以下、 UF_6 とする）の純度は **99.5%** とし、シリンダー中の水素濃度を安全側に評価するため不純物を全てフッ化水素とする。
- ・ 配列系の解析は **MST-30** 型輸送物の輸送制限個数（無限個）より無限配列とする。

② 中性子吸収体

保護容器に使用されている断熱材のフェノリックフォームは中性子吸収材となるホウ素を含有（約 **1wt%**）している。断熱材としての厚さは **200mm** としている。

③ 中性子減速材

シリンダーの密封性は保持されるものとして、シリンダー内には浸水しないものとする。緩衝材のウレタンフォームおよび断熱材のフェノリックフォームは各計算条件において最適な厚さをサーベイするものとする。

④ 反射条件等

孤立系の解析モデルでは、保護容器付属の構造材等は無視し、保護容器の外側には反射体として、厚さ **30cm** の水の層があるものと仮定する。また、配列系の解析モデルでは、保護容器を包含する直方体境界外側に全反射条件を採用し、輸送物の無限配列を仮定する。

MST-30 型輸送物実設計形状と解析モデルの比較を図 **4.5-1** に示す。

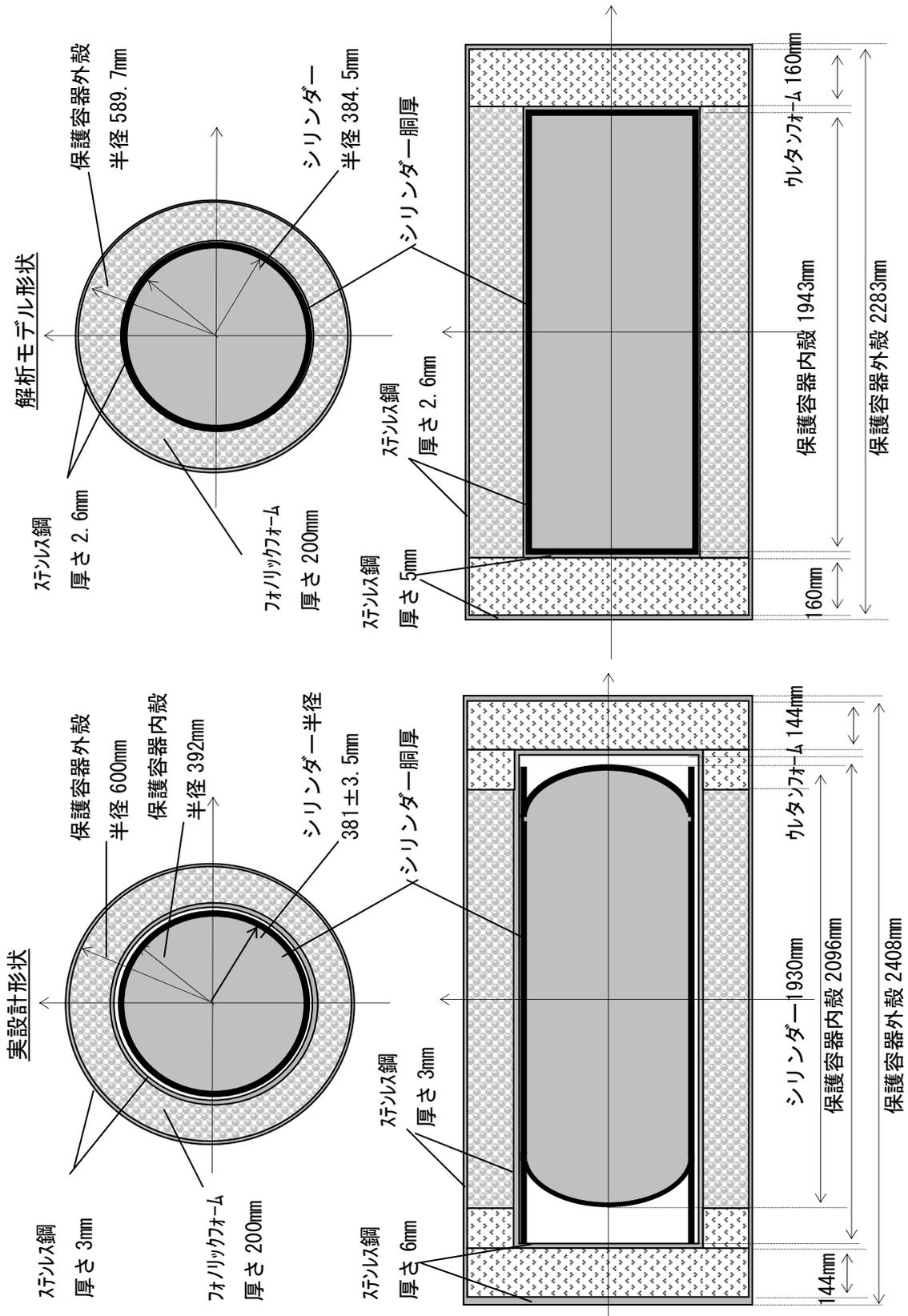


図 4.5-1 MST-30 型輸送物実設計形状と解析モデルの比較

(2) 計算方法と計算条件

輸送物を3次元でモデル化し、解析には連続エネルギーモンテカルロ解析コード MVP を使用する。解析手法の妥当性の確認は、MST-30 型輸送物安全解析書に記載されている孤立系の臨界解析結果(SCALE)と当該条件での解析結果(MVP)との比較により行う。また、ライブラリの違いを含む計算コード間の解析結果の差異が許容範囲であることを確認する。

臨界計算に使用した MVP コードの計算ヒストリ数は、300 万（発生中性子数：5000 個／世代，計算世代数：650，スキップ世代数：50）以上とし，計算結果の標準偏差は 0.06% 以下を収束判定条件とした。

(3) 濃縮六ふつ化ウラン UF₆ と構造材の組成

シリンダーに収納される濃縮六ふつ化ウラン UF₆ の仕様を表 4.5-5 に示す。ウラン濃縮度を最大値 5.0wt% とする。また，²³⁸U 以外の中性子吸収効果のあるウラン同位体の存在を無視する。収納物である UF₆ のウランに対する水素原子との比(H/U 原子比)を 0.088 以下に制限する。この H/U 原子比は収納される UF₆ の純度が 99.5% 以上で，残余の 0.5% が全てフッ化水素であるという仮定に基づいている。シリンダーの UF₆ は，充填された状態を正確にモデル化する。UF₆ は，常温では白色の固体であり，その密度は 5.09g/cm³(20°C) であり，固体・気体の三重点は 64.1°C である。三重点における液体の密度は 3.65g/cm³(64.1°C) である。

表 4.5-5 濃縮六ふつ化ウランの仕様

全質量[kg UF ₆]	U 組成* ; U-232/234/235/236/238[wt%]	密度[g/cm ³]	HF 含有率 [wt%]
2277	1×10 ⁻⁸ /0.05/5.0/0.025/94.925	5.09	0.5 以下

* : ASTM C787-90³⁷⁾の濃縮用再処理六フッ化ウランの仕様値より

計算に使用する MST-30 型輸送物の物性値は安全解析書および公開文献の臨界安全ハンドブック³⁸⁾・理科年表³⁹⁾等による。なお，原子量データ等は「核データセンターホームページ」⁴⁰⁾のデータベースを使用する。物性値を表 4.5-4 に示す。

断熱材のフェノリックフォームはホウ素を約 1wt% 含有とし，¹⁰B の含有率は天然の組成比(18.43wt%)⁴⁰⁾，物質密度は 0.1g/cm³⁴¹⁾と設定する。

緩衝材のウレタンフォーム密度は 0.34g/cm³⁴¹⁾として設定する。

表 4.5-4 濃縮六ふつ化ウラン以外の物質の組成データ

材質	密度(g/cm ³)	核種	組成(wt%)
ステンレス鋼	7.9 ^{*1}	Fe	68.595 ^{*1}
		C	0.08 ^{*1}
		Cr	19.00 ^{*1}
		Mn	2.00 ^{*1}
		Ni	9.25 ^{*1}
		Si	1.00 ^{*1}
炭素鋼	7.84 ^{*2}	C	0.30 ^{*3}
		Fe	99.70 ^{*3}
フェノリックフォーム	0.10 ^{*4}	H	4.0 ^{*5}
		B	1.0 ^{*5}
		C	40.0 ^{*5}
		N	0.0 ^{*5}
		O	35.0 ^{*5}
		Si	1.0 ^{*5}
ウレタンフォーム	0.34 ^{*4}	H	6.00 ^{*5}
		C	50.00 ^{*5}
		N	4.00 ^{*5}
		O	14.00 ^{*5}
水	1.0	H	11.19
		O	88.81

*1：臨界安全ハンドブック³⁸⁾

*2：「ガンマ線遮蔽設計ハンドブック」⁴²⁾

*3：ASTM A516⁴³⁾，不純物は無視

*4：NRC 公開 MST-30 SAR (Docket71-3057)Table2-3，NRC⁴¹⁾

*5：元素分析測定結果より保守的に設定。¹⁰Bは存在比18.43%として計算。

4.5.2 落下衝撃解析結果に基づく臨界解析

(1) 解析条件

落下衝撃解析結果から，保護容器が径方向または軸方向に一律変形して，保護容器の密封性が維持できなくなるものと仮定する。但し，収納物の密封性維持に係る弁が健全であること，並びに耐圧部材であるシリンダーが健全であることから，シリンダー内の水浸入は考慮しない。従って，保護容器内側とシリンダー外側の空隙中の水密度を0.0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0(g/cm³)と変化させて解析する。

① 孤立系臨界解析条件

a. 核燃料形状

シリンダーの形状および密閉性は維持されるため，UF₆の体積に応じてUF₆領域寸法が変化する。図4.5-2にUF₆の形状の違いによる解析モデルを示す。通常は空間が上部に存在するためUF₆は部分円筒形状の蒲鉾型となり，UF₆の密度により径方向高さXが変化する。シリンダー内の空間は真空と仮定する。UF₆形状が円環状または円柱状になる場合も考慮することとし，この場合にはUF₆の密度により半径YあるいはZが変化する。

b. 水平落下損傷時の輸送容器変形

水平落下衝撃解析結果より，保護容器の径方向最大変形量として約 30mm の結果が得られている。臨界解析では，その結果を包絡する径方向一律に 50mm まで保護容器半径従って断熱材厚さが減少するとし，断熱材もこれに従って厚さが最大 50mm まで減少するものとする。なお，保護容器の軸方向の変形は，孤立系解析では臨界解析上の影響が無視できると考えられ，解析モデルにも考慮しない。図 4.5-3 に保護容器半径をパラメータとした解析モデルを示す。また，断熱材の厚さ減少に伴う密度変化は考慮しない。

以上により，輸送物落下衝撃時の孤立系解析では，固体の核燃料状態に対する解析結果が最も臨界上厳しくなるため，固体状態の核燃料形状，保護容器の変形深さおよび断熱材厚さをパラメータに取り，表 4.5-6 に示すようにパラメータ範囲を設定する。

表 4.5-6 落下衝撃損傷時の孤立系臨界解析用のパラメータ

核燃料状態	核燃料形状 (mm)	保護容器半径方向の変形深さ (mm)	断熱材厚さ (mm)
固体	円柱 (半径 272) 円環 (内半径 510) 蒲鉾形状 (高さ 393)	0.0 (通常時) 50 (最大変形時)	200 (通常時) 150 (最大変形時)

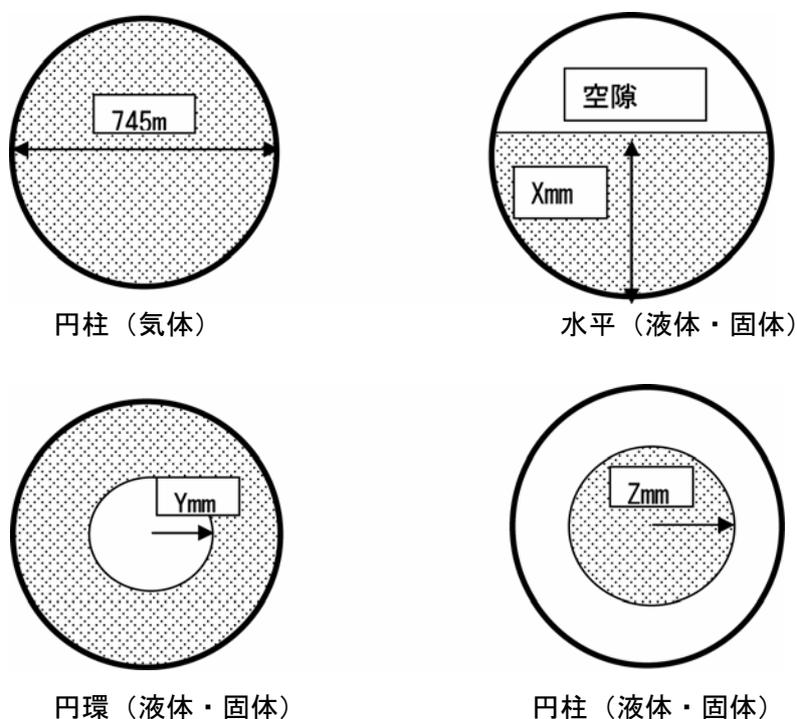


図 4.5-2 シリンダー内燃料領域計算モデル
(網掛け領域は六ふつ化ウランを示す)

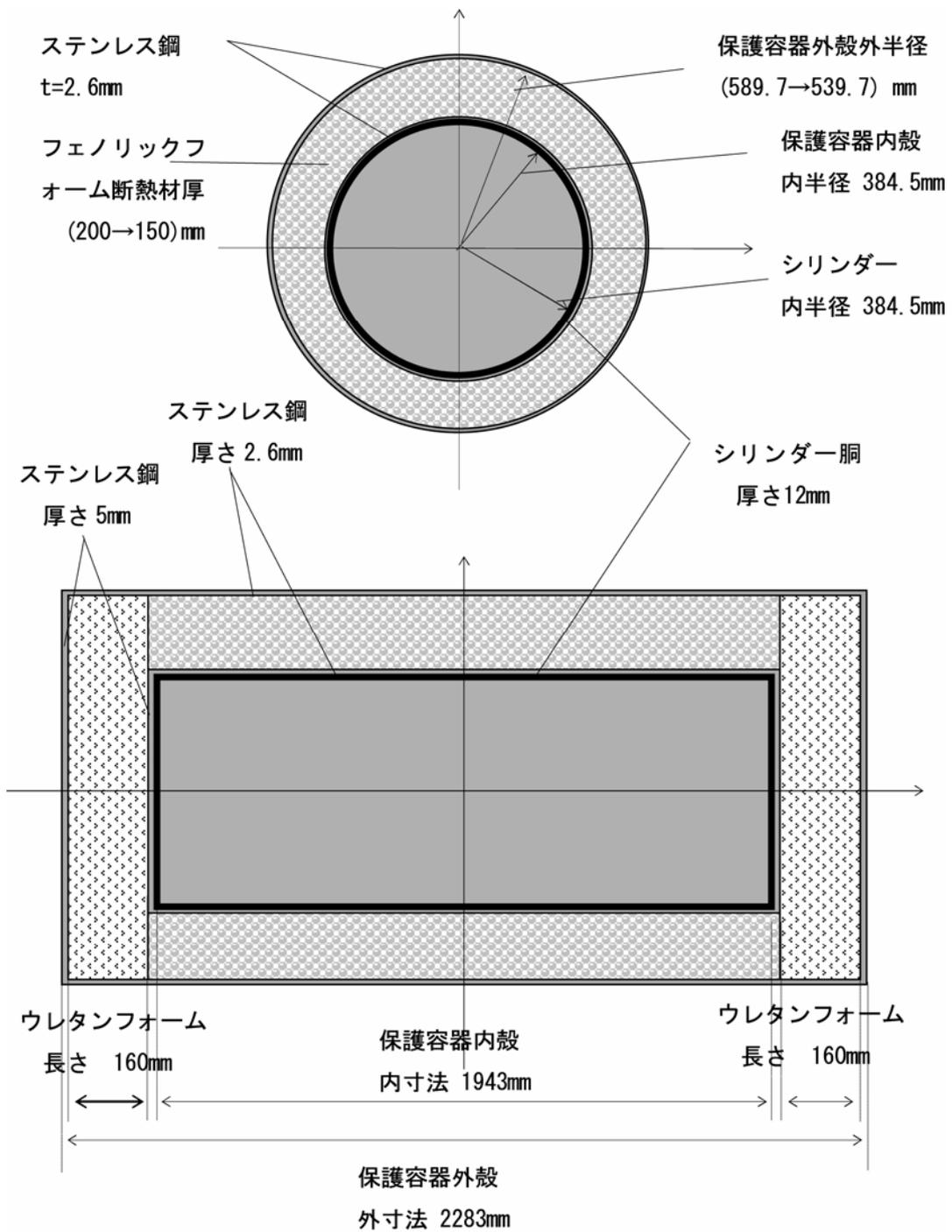


図 4.5-3 衝撃損傷時の保護容器外殻外半径をパラメータとした孤立系臨界解析モデル

② 配列系臨界解析条件

a. 核燃料形状

孤立系解析の場合と同様な UF₆ の形状の違いによる解析モデルを考える (図 4.5-2 参照)。

b. 水平落下損傷時の輸送容器変形

水平落下衝撃解析結果より, 保護容器の径方向最大変化量として約 30mm の結果が得られている。臨界解析では, その結果を包絡するように径方向一律に 50mm まで保護容器半径が減少することを仮定し, 断熱材もこれに従って厚さが最大 50mm まで減少するものとする。図 4.5-4 に輸送容器の断熱材厚さをパラメータとした解析モデルを示す。なお, 断熱材の厚さ減少に伴う密度変化は考慮しない。また配列系の解析モデルとしては, 図 4.5-4 に示すように直方体境界は全反射条件 (無限配列) とする。

c. 垂直落下損傷時の輸送容器変形

垂直落下事故時衝撃解析結果より, 保護器端部の最大変化量として約 20mm の結果が得られている。臨界解析では, その結果を包絡するように軸方向最大 50mm まで減少するものとする。図 4.5-5 に輸送容器の保護容器軸方向の緩衝材厚さをパラメータとした解析モデルを示す。また, 図 4.5-5 に示すように直方体外部境界を全反射条件とする。

d. 輸送物面間距離[0mm-50mm]

輸送物の保護容器間の面間距離をパラメータとして 0 と最大 50mm で設定する。

以上により, 配列系解析では, 固体の核燃料状態に対する臨界解析結果が最も厳しい値を与えるため, 固体の核燃料形状に対する, 保護容器の変形深さ (断熱材厚さ), 緩衝材厚さおよび保護容器間の面間距離をパラメータとして表 4.5-7 に示すように設定する。

表 4.5-7 落下衝撃損傷時の配列系臨界解析用のパラメータ

核燃料状態	核燃料形状 (mm)	保護容器変形深さ (mm)	断熱材厚さ (mm)	緩衝材厚さ (mm)	保護容器間の面間距離 (mm)
固体	円柱 (半径 272) 円環 (内半径 510) 蒲鉾形状 (高さ 393)	径方向 0.0 (通常) 50 (最大)	左欄に対応 200 (通常) 150 (最小)		0.0 50
		軸方向 0.0 (通常) 50 (最小)		軸方向 160 (通常) 110 (最小)	

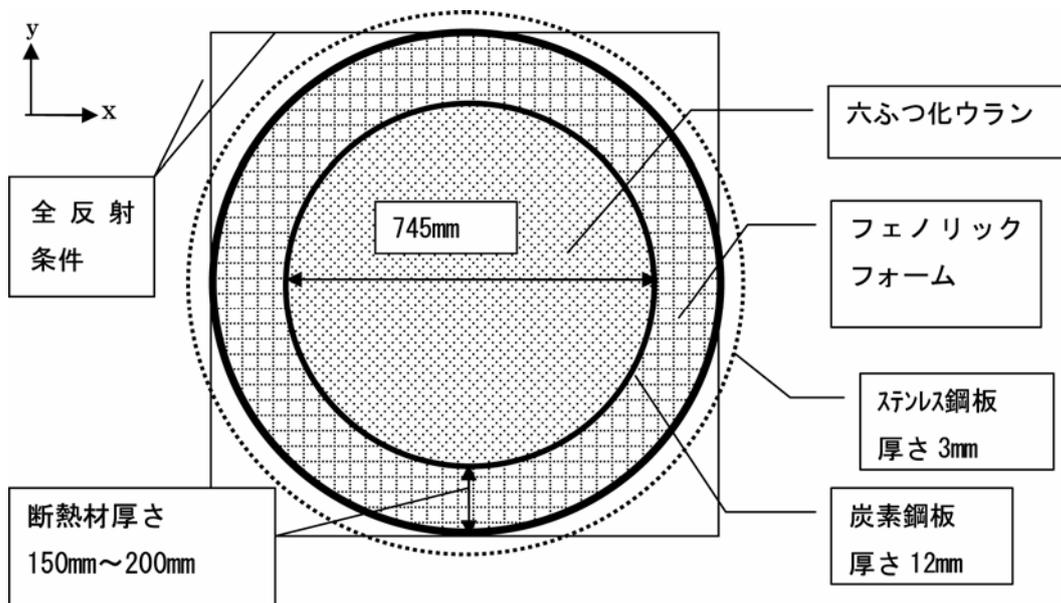


図 4.5-4 衝撃損傷時の径方向の断熱材厚さをパラメータとした配列系臨界解析モデル

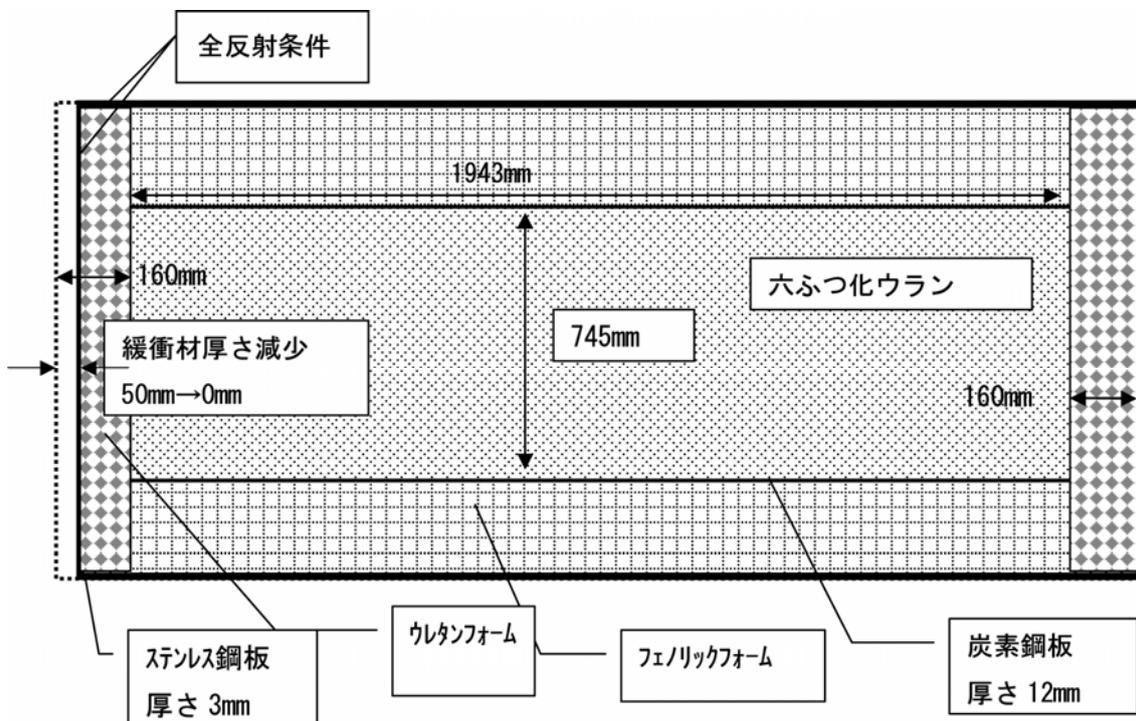


図 4.5-5 衝撃損傷時の軸方向緩衝材厚さをパラメータとした配列系臨界解析モデル

(2) 孤立系臨界解析結果

保護容器変形深さを横軸にとった計算結果を図 4.5-6 に示す。これから，落下衝撃に関わる輸送物の孤立系臨界解析においては，MST-30 型輸送物は空隙中の水密度を 1.0g/cm^3 に近づけると中性子増倍率が高くなる傾向を持っている。保護容器変形深さ 50mm（断熱材厚さ 150mm），水密度 1.0g/cm^3 ， UF_6 固体円柱状態における中性子増倍率計算値が最大となり，これに標準偏差の 3 倍を加えると 0.395 が求められる。

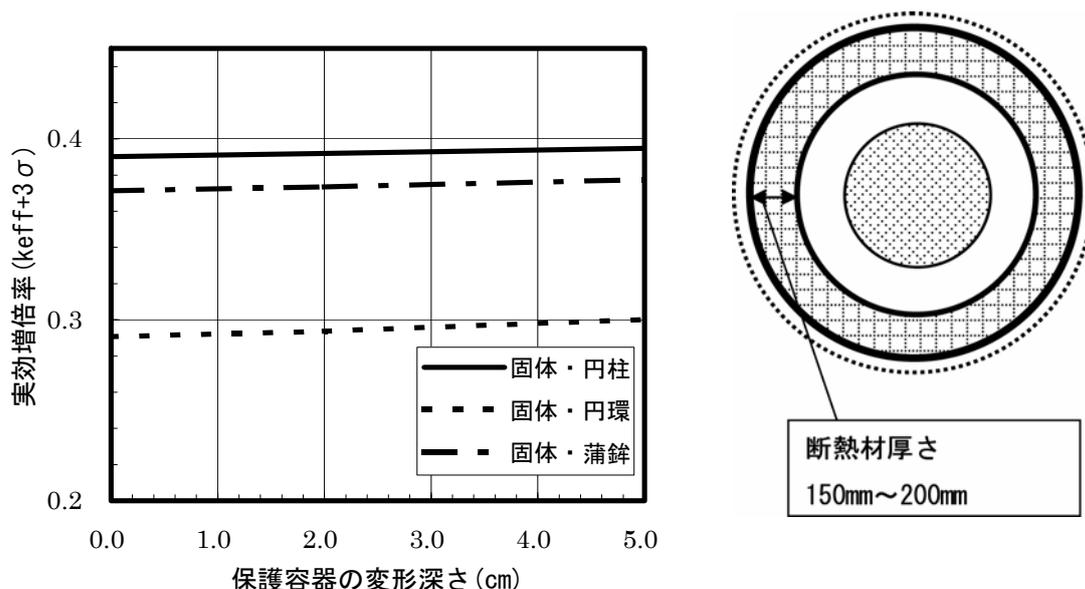


図 4.5-6 衝撃損傷時保護容器変形深さに対する孤立系臨界計算結果
（保護容器内部空隙中の水密度 1.0g/cm^3 ）

(3) 配列系臨界解析結果

落下衝撃に関わる輸送物配列系臨界解析においては，MST-30 型輸送物は空隙中の水密度の低いほど，輸送物同士の相互作用により中性子増倍率が高くなる傾向を持っている。また， UF_6 形状に関しては，保護容器変形には依存せずに固体の蒲針形状になると中性子増倍率が高くなる。さらに，輸送物面間距離に関しては，面間距離が減少するほど中性子実効増倍率計算値が増加することがわかった。保護容器面間距離 0mm で保護容器変形深さを横軸にとった計算結果を図 4.5-7 に示すように，保護容器変形深さ 50mm（断熱材厚さ 150mm），水密度 0g/cm^3 ， UF_6 固体状態・蒲針形状での中性子実効増倍率が最大となり，これに標準偏差の 3 倍を加えると 0.534 が求められる。

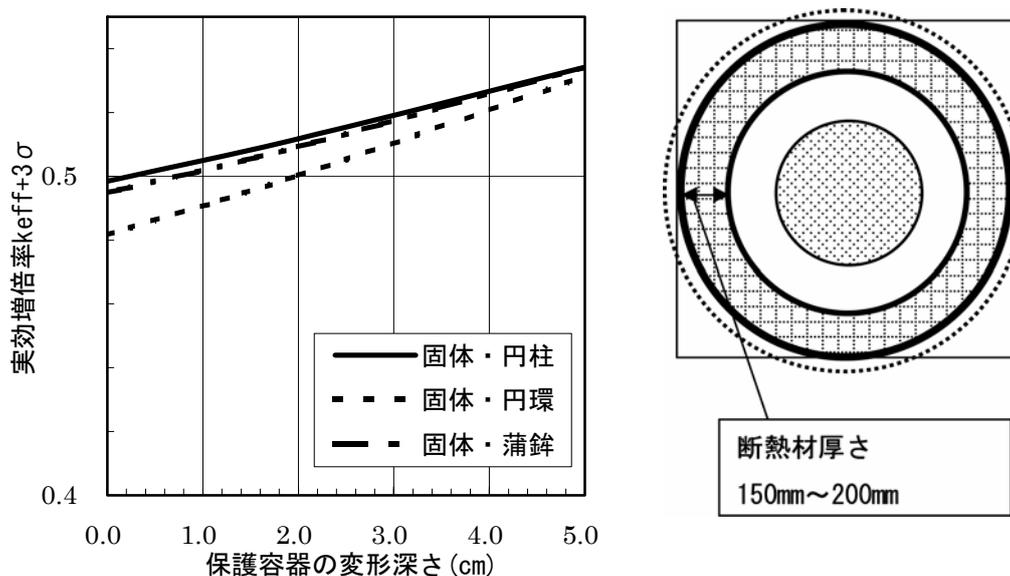


図 4.5-7 衝撃損傷時保護容器変形深さに対する配列系臨界計算結果
(保護容器内部空隙中の水密度 0.0g/cm³)

4.5.3 熱安全性解析結果に基づく臨界解析

(1) 解析条件

熱安全性解析結果から、保護容器の緩衝材および断熱材が熱変質を起こし一部焼失する。従って、断熱材中の中性子吸収材も機能喪失する。また、シリンダー内部の UF₆ は温度により気体、液体、固体の状態が異なり、それに対応して体積も変化する。但し、シリンダー内部の UF₆ は耐圧限界温度 (197.5°C) 以下であり、また密封境界である弁等がハンダの融点 (183°C) を超えないことから、シリンダー内部への水浸入は考慮しない。従って、保護容器内側とシリンダー外側の空隙中の水密度を 0.0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0(g/cm³) と変化させて解析する。

① 孤立系臨界解析条件

a. 核燃料形状

UF₆ の温度による形状の違いによる解析モデルは図 4.5-2 に示した通りである。ただし、熱安全性解析に基づく臨界解析では、UF₆ の固体状態ばかりでなく、液体あるいは気体状態における密度変化も考慮する。

b. 熱損傷時の断熱材厚さ [200mm-0mm] および緩衝材厚さ [160mm-0mm]

熱安全性解析結果を参照して、火災による熱影響で保護容器内のフェノリックフォーム断熱材 (通常時 200mm 厚さ) およびポリウレタン緩衝材 (通常時 160mm 厚さ) が外周

部より 0mm まで一様に焼失してゆくものと仮定する。緩衝材の厚さは通常時 160mm あるので、断熱材の厚さが 40mm 以下に焼失する場合の緩衝材厚さは 0mm 一定とする。図 4.5-8 に輸送容器の断熱材および緩衝材厚さをパラメータとした解析モデルを示す。

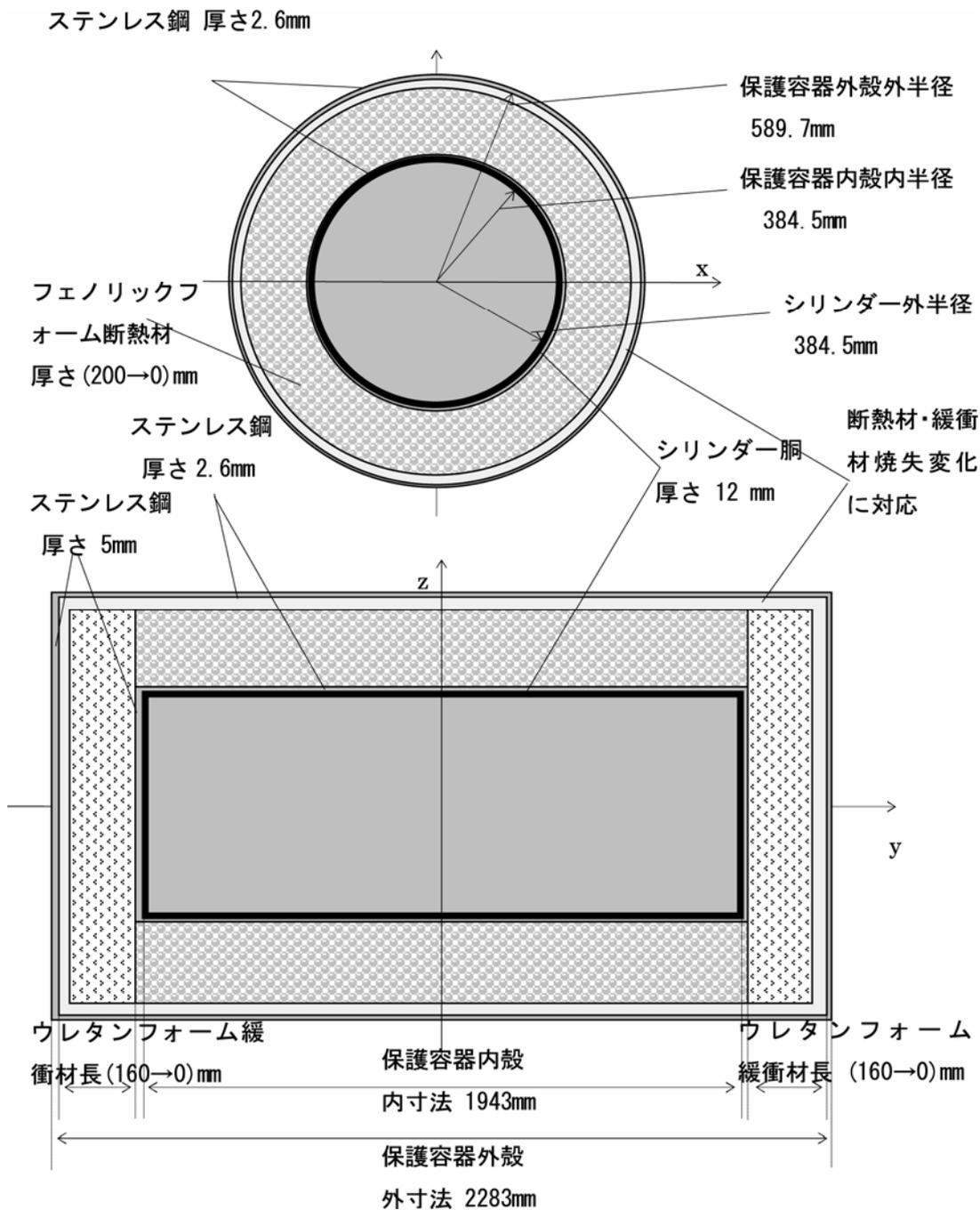


図 4.5-8 熱損傷時の断熱材厚さおよび緩衝材厚さをパラメータとした孤立系臨界解析モデル

以上により、熱損傷時孤立系解析では、 UF_6 の気体、液体、固体の核燃料状態に対する核燃料形状、断熱材および緩衝材厚さをパラメータに取り、表 4.5-8 に示すようにパラメータ範囲を設定する。

表 4.5-8 火災事故時の孤立系解析パラメータ

核燃料状態	核燃料形状 (mm)	断熱材厚さ (mm)	緩衝材厚さ (mm)
気体	円柱 (半径 373)	200 (標準) 0 (最小)	160 (標準) 0 (最小)
液体	蒲鉾形状 (高さ 520)		
固体	円柱 (半径 272) 円環 (内半径 510) 蒲鉾形状 (高さ 393)		

② 配列系解析条件

a. 核物質密度と核燃料形状

孤立系解析の場合と同様な UF_6 の形状の違いによる解析モデルを図 4.5-2 に示す。

b. 熱損傷時の断熱材厚さ [200mm-0mm]

熱安全性解析結果を参照して、火災による熱影響で保護容器内のフェノリックフォーム断熱材 (通常時 200mm 厚さ) およびポリウレタン緩衝材 (通常時 160mm 厚さ) が外周部より 0mm まで一様に焼失してゆくものと仮定する。緩衝材の厚さは通常時 160mm あるので、断熱材の厚さが 40mm 以下に焼失する場合の緩衝材厚さは 0mm 一定とする。図 4.5-9 に輸送容器の断熱材および緩衝材厚さをパラメータとした解析モデルを示す。

c. 輸送物面間距離 [0mm-50mm]

輸送物の保護容器間の面間距離をパラメータとして 0 と最大 50mm で設定する。

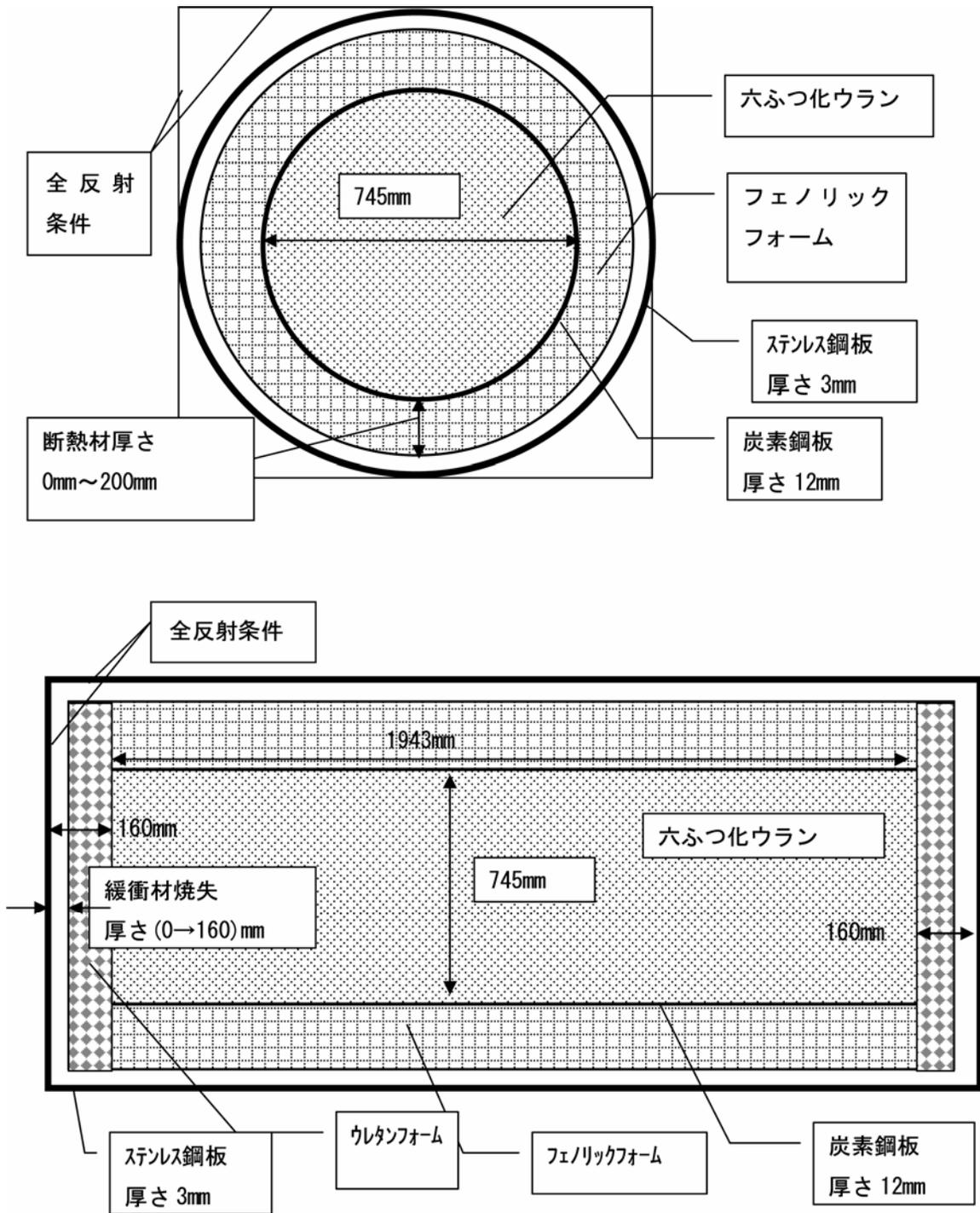


図 4.5-9 熱損傷時の断熱材厚さおよび緩衝材厚さをパラメータとした
配列系臨界解析モデル

以上により、熱損傷時配列系解析では、 UF_6 の気体、液体、固体の核燃料状態に対する核燃料形状、断熱材および緩衝材厚さおよび保護容器間の面間距離をパラメータに取り、表 4.5-9 に示すようにパラメータ範囲を設定する。

表 4.5-9 火災事故時の配列系解析パラメータ

核燃料状態	核燃料形状 (mm)	断熱材厚さ (mm)	緩衝材厚さ (mm)	保護容器同士面間距離(mm)
気体	円柱 (半径 373)	200 (標準) 30 (最適) 0 (最小)	160 (標準) 0 (最適) 0 (最小)	0.0 50
液体	蒲鉾形状 (高さ 520)			
固体	円柱 (半径 272) 円環 (内半径 510) 蒲鉾形状 (高さ 393)			

(2) 孤立系臨界解析結果

輸送物火災事故条件の孤立系臨界解析において、MST-30 型輸送物の中性子実効増倍率は、空隙中の水密度を $1.0g/cm^3$ に近づけると高くなる傾向がある。また、空隙中水密度の大きさに拘らず UF_6 が固体・円柱状で実効増倍率は最大となり、さらに、 UF_6 状態・形状の如何に拘らず断熱材および緩衝材全焼失において実効増倍率が最大となる。全てのパラメータ範囲における最大の中性子実効増倍率は、図 4.5-10 に示すように UF_6 円柱形状、輸送容器断熱材および緩衝材厚さ 0mm、空隙中水密度 $1.0g/cm^3$ において、標準偏差の 3 倍をとった 0.453 が求められる。

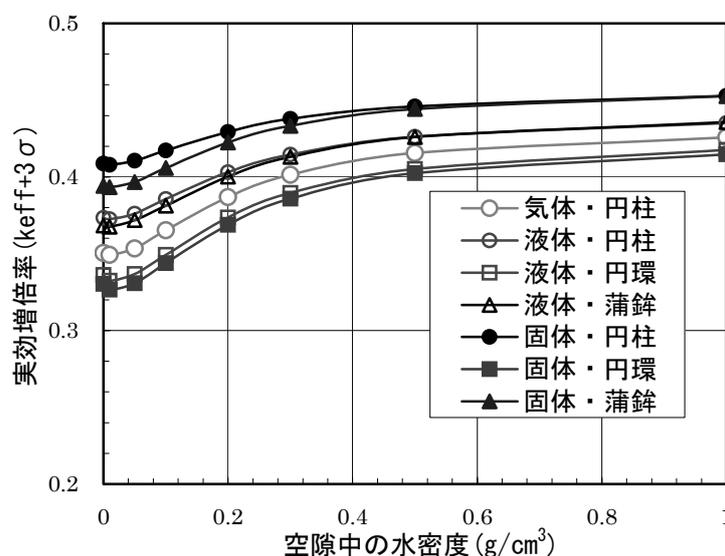


図 4.5-10 熱損傷時輸送容器空隙中水密度に対する孤立系臨界計算結果 (断熱材焼失仮定)

(3) 配列系解析結果

輸送物火災事故条件の配列系解析においては、MST-30型輸送物の空隙中の水密度が低い体系での相互作用の増加により中性子増倍率計算値が高くなる傾向を持っており、水密度 0.01g/cm^3 でピーク値を取る。また、この中性子実効増倍率は、断熱材および緩衝材の厚さに依存せず UF_6 の固体状態・円環形状でピーク値をとり、一方、 UF_6 の状態および形状に依存せず図 4.5-11 に示すように断熱材および緩衝材厚さが 30mm のときにピーク値をとることが確認される。さらに、輸送物間の面間距離については、面間距離が大きい方が中性子実効増倍率が低く算出される。全てのパラメータ範囲にわたる最大の中性子実効増倍率は、図 4.5-12 に示すように、輸送物面間距離 0mm 、輸送容器断熱材厚さ 0mm 、水密度 0.01g/cm^3 、 UF_6 固体状態・円環形状において、標準偏差の 3 倍を加えた 0.739 が求められる。

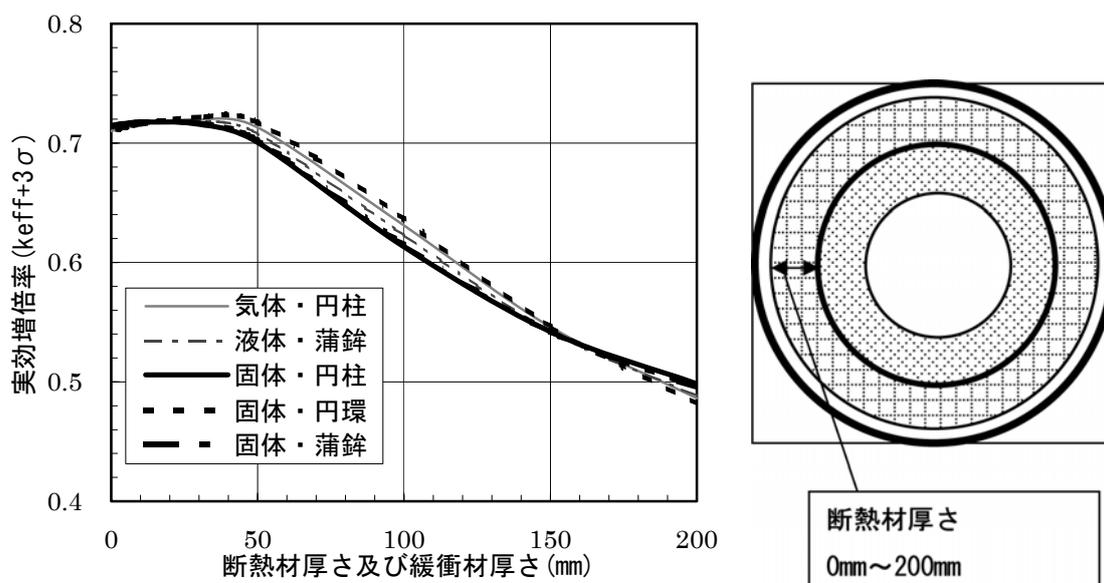


図 4.5-11 熱損傷時輸送容器断熱材厚さに対する配列系臨界計算結果
(保護容器内部空隙中水密度 0.0g/cm^3)

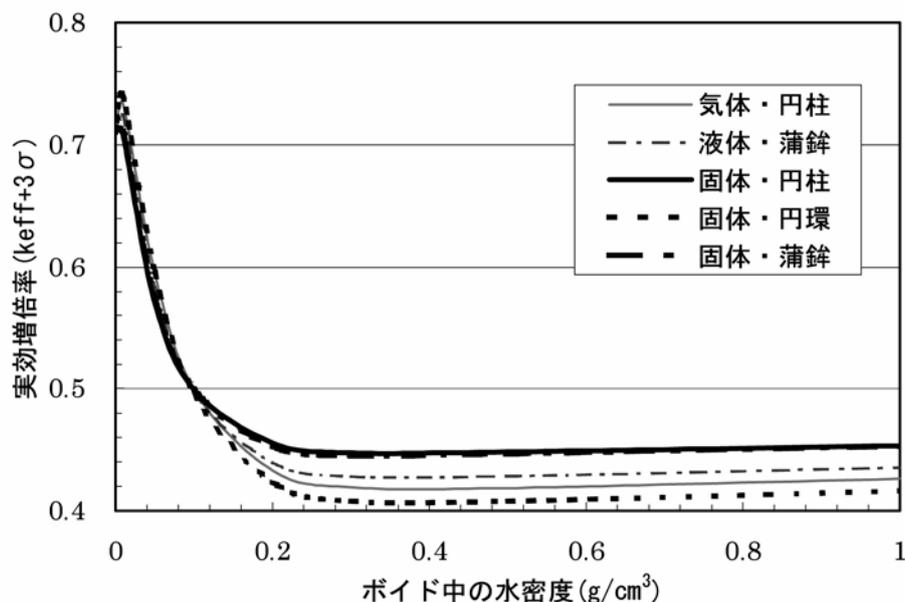


図 4.5-12 輸送容器空隙中水密度に対する配列系実効増倍率計算結果
(断熱材焼失仮定)

4.5.4 臨界安全性解析結果の評価

MST-30 型輸送物は保護容器内部を断熱材および緩衝材で充填させた設計であるため、落下衝撃よりも火災の熱による影響が輸送物の臨界安全評価上重要となる。すなわち、中性子吸収材はシリンダー周りの断熱材に添加されているため、この断熱材焼失より輸送物は臨界安全の観点から非安全側の状態となる。

落下事故シナリオについては、4.2 節に述べた構造解析結果を超える形状寸法変化およびシリンダー内水浸入無しを前提条件とした臨界解析を行い、最大の中性子実効増倍率として、輸送容器変形深さ 50mm、水密度 0 g/cm³、UF₆ 固体状態・蒲鉾形状での輸送物の配列系において標準偏差の 3 倍を加えた 0.534 が得られ、臨界安全基準値の 0.95 以下であるため未臨界性が維持できる。

火災事故シナリオについて、4.3 節および 4.4 節に述べた熱解析結果を超える断熱材・緩衝材焼失を前提条件とした臨界解析を行い、最大の中性子実効増倍率として、配列系の輸送物面間距離 0mm、輸送容器断熱材厚さ 0mm、水密度 0.01g/cm³、UF₆ 固体状態・円環形状において、標準偏差の 3 倍を加えた 0.739 が得られ、臨界安全基準値の 0.95 以下であるため未臨界性が維持できる。

以上述べたように、第 3 章で設定した苛酷事故シナリオに対する落下衝撃解析および熱安全性解析結果に基づく臨界解析を行い、いずれの事故条件に対しても十分な安全裕度を持った未臨界性が確保されることを確認した。

4章 参考文献

- 1) U.S. Nuclear Regulatory Commission: Safety Analysis Report for the Model MST-30 Protective Shipping Package for 30 inch UF₆ Cylinders, Revision 1, Sep 2001, Docket 71-3057.
- 2) R.L.Newvahner and W.A.Pryor: A Nuclear Criticality Safety Assessment of the Loss of Moderation Control in 2-1/2 and 10-ton Cylinders Containing Enriched UF₆, Conf 9110117, p.115(1991).
- 3) B.L. Broadhead : Criticality Safety Review of 2-1/2-, 10-, and 14-ton UF₆ Cylinders, Conf 910993-9 (1991).
- 4) ANSI N14.1-1990, Uranium Hexafluoride-Packaging for Transport.
- 5) A. Gonzales: Target effects on package response: An experimental and analytical evaluation, SAND--86-2275.
- 6) A. Gonzales: Comparison of the IAEA unyielding surface to various yielding targets, SAND--86-2802 (SAND862802).
- 7) 伊藤千浩, 大沼博志, 白井孝治: 電力中央研究所研究報告, 飛来物の衝突に対するコンクリート構造物の耐衝撃設計手法, U24(1991).
- 8) 安藤智啓, 岸徳光, 三上浩, 松岡健一, せん断補強筋を有しない RC 梁の重錘落下衝撃挙動に関する実験的研究, 第 5 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム, 土木学会構造工学委員会, 衝撃実験・解析法の標準化に関する研究小委員会, p.315(2000).
- 9) J.L.Sprung et al: Reexamination of Spent Fuel Shipment Risk Estimates, NUREG/CR-6672(2000).
- 10) H.Akamatsu, H.Taniuchi, T.Fujimoto, M.Ouchi: Behaviour of a package dropped onto yielding and unyielding, International Journal of Radioactive Materials Transport v. 8 (3-4), pp. 293-297 (1997).
- 11) 土木工学ハンドブック第 4 版, 技法堂出版, p.1507 (1989).
- 12) 平成 13 年度経済産業省, 「再処理施設等安全性実証解析等 (核燃料物質等輸送容器安全性実証解析等)」.
- 13) W.Y.Lu, J.S. Korellis, K.L. Lee and R.Grishaber: Hydrostatic and Uniaxial Behavior of a High Density Polyurethane Foam (FR-3720) at Various Temperatures, SAND93-8227 (1993).
- 14) M.K.Neilsen, R.D.Krieg, H.L.Schreyer: A Constitutive Theory for Rigid Polyurethane Foam, SAND-92-2487C (1993).
- 15) LS-DYNA, Version950, 使用の手引き, 日本総合研究所 (2000).
- 16) JAERI-M88-193 衝撃計算用材料データ (3/5) 第 3 編: ステンレス鋼, 幾島毅, (1988). SUS304 の材料番号 2022.

- 17) JAERI-M88-192 衝撃計算用材料データ (2/5) 第2編：構造用鋼，幾島毅，(1988).
材料番号 1010.
- 18) 委員会経過報告，第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム，土木学会構造工学委員会，衝撃実験・解析法の標準化に関する研究小委員会，p.315(2000).
- 19) 牛島忠史，大沼博志，出雲建司，白井孝治，LS-DYNAを用いた鉄筋コンクリートスラブの衝撃応答解析，第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム，土木学会構造工学委員会，衝撃実験・解析法の標準化に関する研究小委員会，p.17(2000).
- 20) 大沼博志，青柳征夫：三軸圧縮応力を受けるコンクリートの応力-ひずみ曲線の非線形挙動とその解析，電力中央研究所報告，研究報告 384006(S59).
- 21) 「地盤の三次元弾塑性有限要素解析」，田中忠次他共著，丸善株式会社.
- 22) H.J. Rack and G.A. Knorovsky: An Assessment of Stress-Strain Data Suitable for Finite-Element Elastic-Plastic Analysis of Shipping Containers, SAND77-1872 (1978).
- 23) E. Pinton, G. Sert, J.Saroul, B.Duret, G.Berthoud, M.Wataru, K.Shirai: Modeling of the Behaviour of a UF6 Package in a Fire-DIBONA CODE-Description and Validation, RAMTRANS,10, pp.161-182 (1999).
- 24) 亘真澄，五味義雄，山川秀次，津旨大輔：外部加熱を受ける容器内部でのUF6の伝熱特性，電力中央研究所研究報告，U95013 (1995).
- 25) M.Suzuki, Y.Okuma, S.Ikou, K.Shimizu, T.Akiyama, and Y.Yato: An Experimental Study on Heat Transfer of A UF6-Filled Vessel, CONF-880558(1988).
- 26) B.Duret and J.M.Seiler: 2D Modelling of a UF6 Container in a Fire, 10th International symposium on packaging and transportation of radioactive materials, p.847 (1992).
- 27) B.Duret and J.C.Bonnard : Behavior of UF6 Package in Fire-Comparison of Calculations with Fire Experiment, 7th International symposium on packaging and transportation of radioactive materials, p.747 (1983).
- 28) R.DeWitt, Uranium Hexa-fluoride: A Survey of the Physico-Chemical Properties, GAT-280 (1960).
- 29) 伝熱工学資料改訂第4版，社団法人日本機械学会.
- 30) 宮沢隆：東京工大博士論文「濃縮六ふつ化ウランの輸送容器の安全性に関する研究」(2002).
- 31) 五味義雄，山川秀次，加藤治，小林精一：天然六ふつ化ウラン輸送容器の健全性評価基礎試験，電力中央研究所研究報告，U90015 (1990).
- 32) 川端信義，王謙，八木弘：第二東名・名神高速道路トンネル火災時の避難環境に関するシミュレーションによる検討，空気調和・衛生工学会論文集，No74, p.101 (1999).
- 33) 川端信義，王謙，佐々木啓彰，内藤祐輔：トンネル内火災時に発生する熱気流の挙動

- に関する数値シミュレーション, 日本機械学会論文集(B編), 65巻634号, p.1870 (1999).
- 34) K.Satoh and S.Miyazaki: A Numerical Study of Large Fires in Tunnels, Report of Fire Research Institute of Japan, No.68, p.19 (1989).
 - 35) 鋼構造耐火設計指針, 社団法人日本建築学会.
 - 36) E.Richter: Temperatur-ausbreitung bei Tunnelbraenden :Auswirkungen auf den baulichen Brandschutz, vfdb,Vol.45, No.1, p.18 (1996).
 - 37) 1999 ANNUAL BOOK of ASTM STANDARDS, volume 12.01 Nuclear Energy(1).
 - 38) 臨界安全ハンドブック第2版, JAERI 1340, 日本原子力研究所燃料施設安全性研究委員会臨界安全性専門部会臨界安全性実験データ検討ワーキンググループ (1999).
 - 39) 理科年表 1999年版, 丸善, IUPAC 原子量および同位体存在委員会, Pure and Applied Chemistry 70, (1998) , p.217.
 - 40) 核データセンターホームページ
(http://www.ndc.tokai.jaeri.go.jp/NuC/index_J.html).
 - 41) Mitsubishi Materials Corporation, "SAFETY ANALYSIS REPORT FOR THE MODEL MST-30 PROTECTIVE SHIPPING PACKAGE FOR 30-INCH UF6 CYLINDERS," Docket71-3057(MST30_R0), January 2001.
 - 42) ガンマ線遮蔽設計ハンドブック, (社)日本原子力学会 (1988.1) .
 - 43) 1999 ANNUAL BOOK of ASTM STANDARDS, volume 01.04.

5. 二酸化ウラン粉末輸送物の安全性解析

5.1 輸送物の概要と安全性評価基準

5.1.1 NPC型輸送物の概要

NPC 型輸送物は外観が立方体形状の外容器と内部に含まれる円筒形の 9 個の内容器からなる。輸送容器の概略は、図 5.1-1 から図 5.1-3 に示す。主要項目は以下のとおりである¹⁾。

- a) 収納物 濃縮度 5%以下の二酸化ウラン粉末
- b) 輸送物の種類 A 型核分裂性輸送物
- c) 輸送指数 最大 0.7
- d) 輸送制限個数 75 個
- e) 輸送物の最大総重量 約 1302kg
- f) 収納物の最大総重量 約 540kg
- g) 輸送容器の外寸法（長さ×幅×高さ） 約 114cm×約 114cm×約 112cm
- h) 輸送容器の主要材質（一部公開制限あり）
 外容器（ステンレス鋼），断熱材，緩衝材
 内容器（ステンレス鋼），中性子減速材，中性子吸収材

解析用モデルは、NPC 型輸送物の安全解析書に基づいて、可能な限りこれを模擬して作成するものとする。

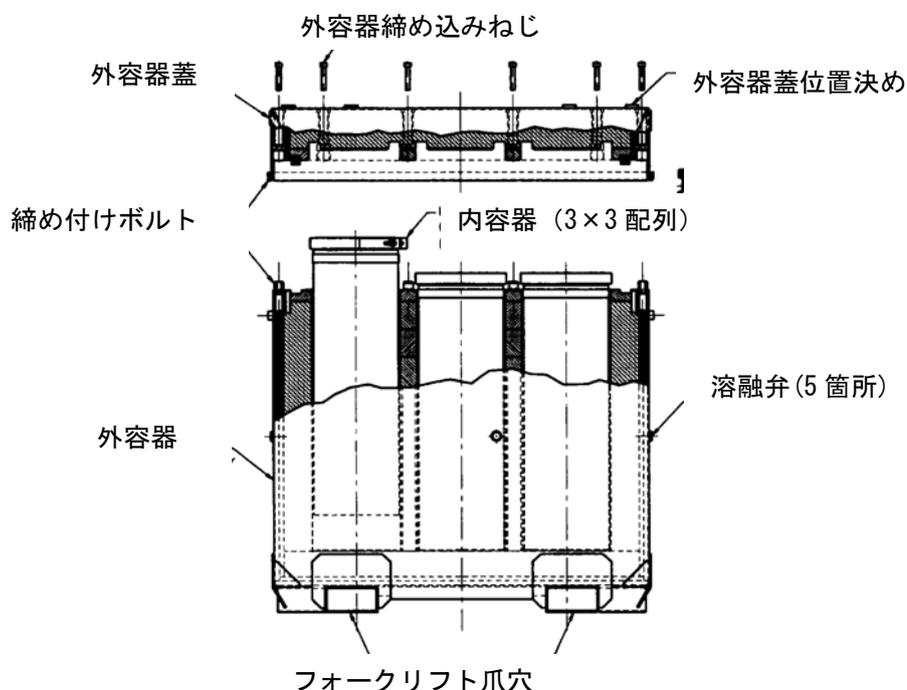


図 5.1-1 NPC 型輸送物の全体概要

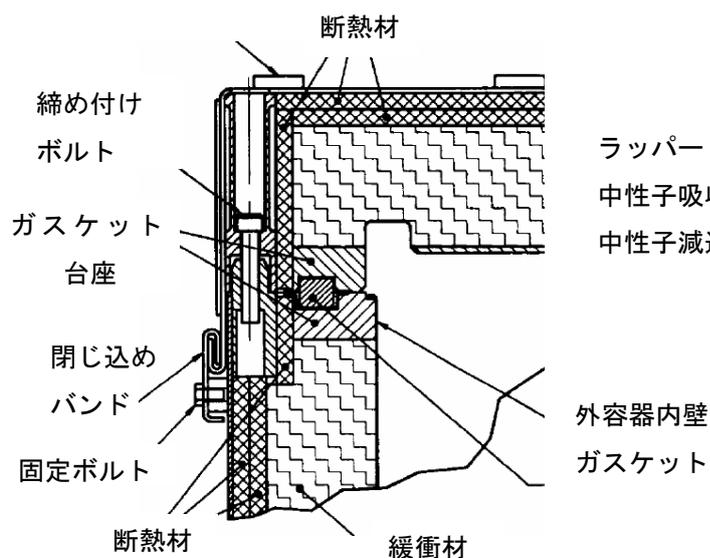


図 5.1-2 NPC 型輸送物の周辺閉じ込め部

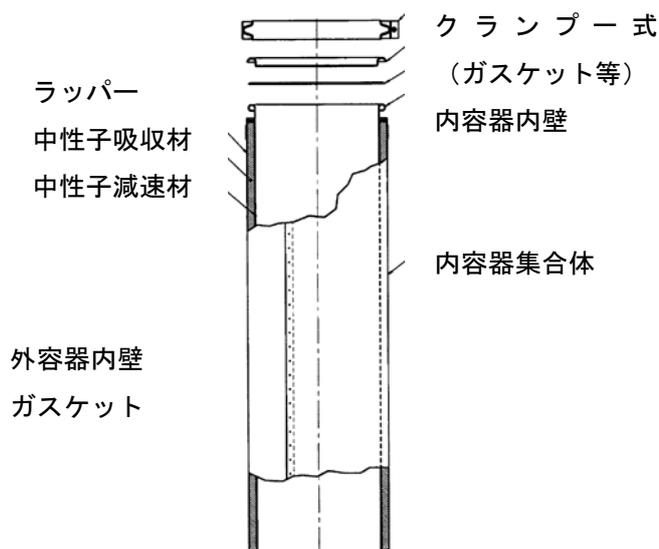


図 5.1-3 内容器の構成材料

5.1.2 安全性評価基準とその確認方法

第 1 章序言で述べたように、当該輸送物は A 型核分裂性輸送物として規則に定められた「一般の試験条件」および引き続き「特別の試験条件」を課した後において臨界に達しないことが要求される。また、当該輸送物は未照射の二酸化ウラン粉末を内容器に収納するため、内容器蓋部の密封機能確保は規則の安全上の要求事項ではないが、これが維持されるように設計される。従って、本輸送物は、これらの規則・設計の要件を満たして製作される限り、輸送中の事故条件に対しても密封性あるいは未臨界性が確保されるものと考えられるが、本章では、第 3 章で策定した苛酷事故シナリオによる落下衝撃および熱安全性に係る解析を行い、その結果を用いて表 5.1-1 に掲げる評価事項を満足することを確認する。すなわち、落下衝撃による内容器の変形がひずみ許容範囲にあり、また火災の熱的影響による内容器蓋部のガスケットの密封機能が維持されることを、解析値と関連文献記載値を比較して確認する。また、落下衝撃による外容器および内容器の変形、内容器中心間距離の変化等、また、熱的影響による緩衝材等の部材焼失等の程度を考慮した臨界安全性解析を行い、輸送物の孤立系あるいは配列系のいずれの配置においても中性子増倍率が一般に受け入れられている基準値の 0.95 以下であり、未臨界性を維持できることを示す。

なお、輸送物に対する落下衝撃解析あるいは熱安全性解析のモデルおよび解析方法の妥当性、ならびに解析精度は、当該輸送容器の安全解析書に記載された「特別の試験条件」における原型試験結果と解析結果を比較し、解析結果が原型試験を概略再現していることにより確認することとする。

表 5.1-1 NPC 型輸送物の事故時に適合すべき要件および評価基準

適合すべき要件	評価基準	確認方法
閉じ込め性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 内容物のひずみが破断するほど過度に大きくならないこと。 ・ 内容物蓋部のガスケット到達温度が耐熱温度以下となること。 ・ 外容器内側，内容物外側の緩衝材到達温度が耐熱温度以下となること。 	落下衝撃解析により， <ul style="list-style-type: none"> ・ 内容物の相当塑性ひずみが 40%以下であること*。 熱安全性解析により， <ul style="list-style-type: none"> ・ 内容物蓋部ガスケットの最高到達温度が，その使用上限温度 150℃以下であること**。 ・ 中性子減速材の最高到達温度が，その融解温度 145℃以下であること**。 また，中性子吸収材の温度が，その融解温度 321℃以下であること。 ・ 緩衝材の最高到達温度が。その耐熱温度 300℃以下であること。
未臨界性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 内容物形状寸法，内容物間隔，緩衝材，中性子減速材および吸収材の形状寸法等が臨界となるモデル形状を逸脱しないこと。 	臨界安全性解析により， <ul style="list-style-type: none"> ・ 落下衝撃解析による外容器および内容物の変形，熱安全性解析による断熱材および緩衝材の焼失の程度を考慮して，孤立系および配列系の臨界解析を行い，中性子増倍率が 0.95 未満であること。

* : 内容物破断の有無を評価するため，評価項目を相当塑性ひずみとし，その限界値を内容物構成材料 SUS304 ステンレス鋼の破断伸びである 40%とする。

** : 安全解析書の記載による。

5.2 高架道よりの落下事故に係る落下衝撃解析

5.2.1 解析モデルおよび解析方法

5.2.1.1 解析モデル

(1) 解析の構成

本解析は、輸送物と衝撃面をそれぞれ 3 次元でモデル化し、図 5.2-1 に示すような 18m 高さからの蓋部コーナー落下を解析モデルとして設定した。また、図 5.2-2 に示すような本体エッジを 18m 高さから衝撃面に衝突させるエッジ落下も解析モデルとして設定した。この場合、輸送物の重心を衝撃面の落下点垂直上方に位置させ、回転を与えずに衝突で最大の変形を与えるようにした。また、衝撃面と輸送物の間ではリバウンドを可能とした。

(2) 輸送物のモデル化

外容器の外殻、底板、蓋、蓋の補強部、フォークリフトの爪の挿入口は、シェル要素でモデル化した。緩衝材および断熱材は、すべてソリッド要素でモデル化した。内容器のステンレス板の部分は、シェル要素でモデル化し、それ以外はソリッド要素でモデル化した。収納物については、ソリッド要素でモデル化し、重量のみ考慮した。外容器と蓋を接続するボルトについては、ソリッド要素でモデル化した。

(3) 衝撃面のモデル化

第 4 章の濃縮六ふつ化ウラン輸送物の落下衝撃解析において述べたものと同様に、コンクリート舗装およびアスファルト舗装面をモデル化した。

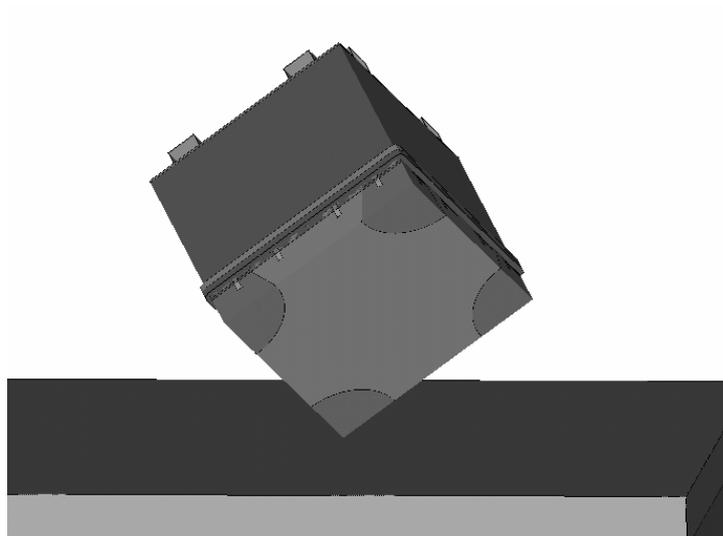


図 5.2-1 蓋部コーナー落下解析モデル

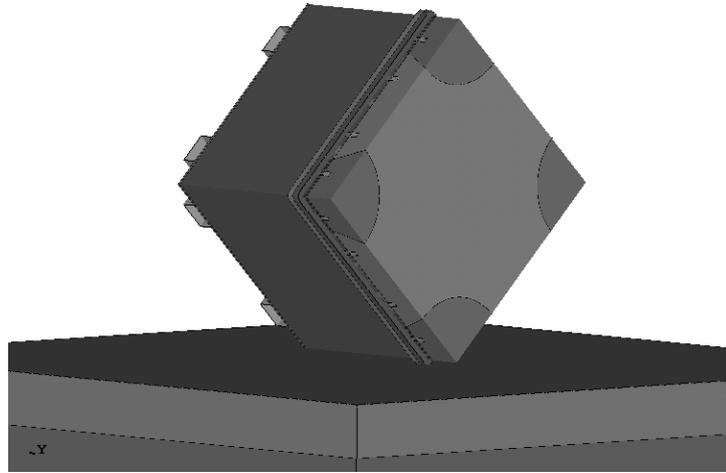


図 5.2-2 輸送物エッジ落下解析モデル

5.2.1.2 解析手法と解析条件

(1) 解析コード

解析には、第 3 章で述べたように、有限要素法衝撃解析コード LS-DYNA Ver.960 を使用した。

(2) 材料データ

輸送物部材の物性値は安全解析書によった。コンクリートおよびアスファルトの衝撃面の物性値は、第 4 章における解析と同様に設定し、表 4.2-2 および表 4.2-3 に示す値を用いた。

(3) 要素分割

作成した解析モデルの有限要素分割（外観）を図 5.2-3 に示す。外容器の寸法は、長さ、幅ともに 1137mm で、高さはフォーク挿入口を含み 1122mm である。このモデルの重心位置は、蓋部中央から高さ方向に 518.8mm である。

縦断面要素分割図を図 5.2-4 に、縦断面要素分割図の左側に記載した位置における横断面要素形状分割図 A, B を図 5.2-5 および図 5.2-6 に示す。立体要素の要素タイプは、選択的減積分を考慮した 8 点積分要素を用いるため、計算時間は非常に長くなるが、数値の安定性は他の要素タイプに比べて保証されている。今回解析モデルとして用いた容器本体の有限要素モデルの要素数は 94, 766 (内シェル要素 31, 725)、節点数は 107, 325 である。

コンクリート舗装面およびアスファルト舗装面の有限要素分割は、第 4 章におけるものと同様に行った。ただし、コンクリート舗装面の節点数は 5625、要素数は 4608 であり、アスファルト舗装面の節点数は 6875、要素数は 576 である。衝撃面を除く外面では応力波の無反射条件を定義した。また、剛体変位を抑えるために底面の四隅の点を拘束した。

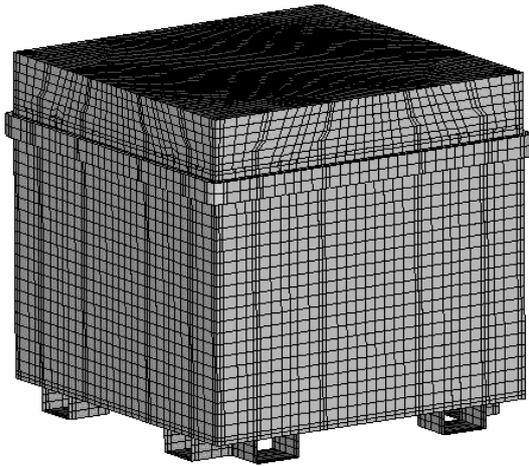


図 5.2-3 輸送物外観有限要素分割

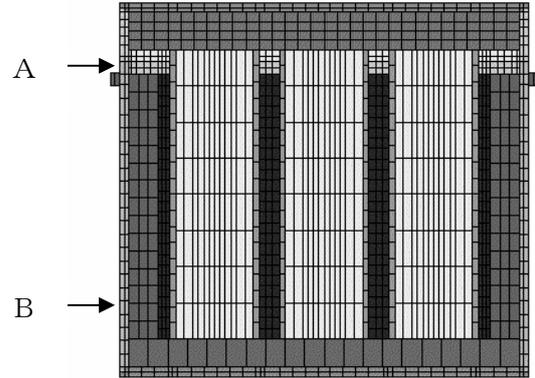


図 5.2-4 縦断面有限要素分割

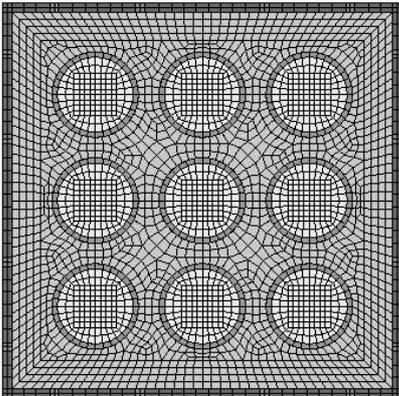


図 5.2-5 横断面 A 要素分割

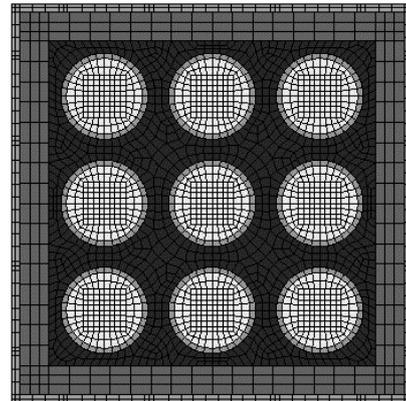


図 5.2-6 横断面 B 要素分割

(4) その他の計算条件の設定

解析では、輸送物節点に 18m 落下高さから定まる衝突時速度を与えた。内容物がリバウンドし、輸送物の内容器間隔が最も狭くなる時点まで解析を行った。なお、要素が極端に変形し、計算上負の体積を示す等により収束性が低下して計算が中断される場合には、その原因となった要素を除去した後リスタートした。

なお、上記の解析モデルおよび解析方法の妥当性については、安全解析書に記載の「特別の試験条件」による9mから非降伏面への落下試験結果と、同一条件での衝撃解析結果を比較することにより解析精度を確認した。

5.2.2 解析結果およびその評価

5.2.2.1 舗装面への落下衝撃解析

ここでは、コンクリート舗装面への落下解析を行った結果について述べる。アスファルト舗装面への落下解析についても同様な結果が得られている。図5.2-7に予想される輸送物側面落下時の衝撃による内容器間隔等の変化（縮小）を概念的に示す。これと解析で対象としたコーナー落下およびエッジ落下とは状況が多少異なるが、凡その状況は把握できるものと思われる。

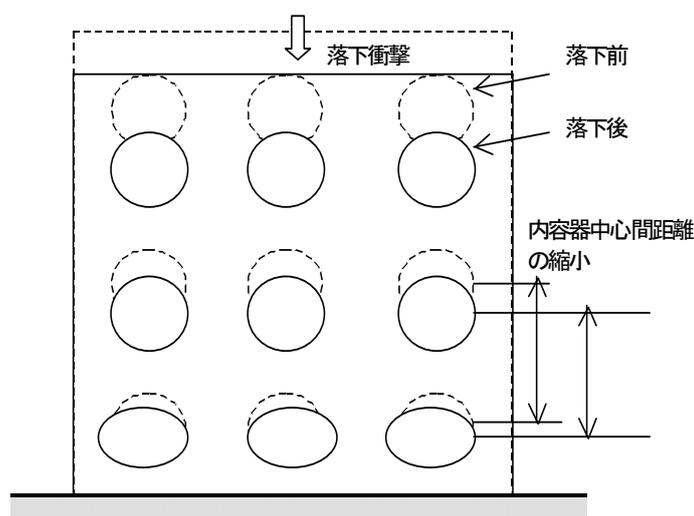


図 5.2-7 側面落下時の衝撃による内容器間隔変化予想

(イ) 蓋部コーナー落下に対する解析結果

18m高さからのコーナー落下の場合について、輸送物の落下変形後の外観を図5.2-8に示す。外容器の変形および内容器間隔の変形状況を図5.2-9および図5.2-10に示す。また、図5.2-11に示すように、衝撃面に最近接する内容器のみが蓋の直下の部分で大きな変形を示し、その相当塑性ひずみは22.2%であった。

内容器中心間距離の変化（縮小）量は、図5.2-12に最大値を示すように33~45msecで殆ど変わらない。そこで、最終変形に達したものと判断される35msecにおいて、内容器蓋部および底部の配置を重ねた図5.2-13に示すように、内容器中心間距離の変化量の最大は、蓋部側で31.5mmであった。

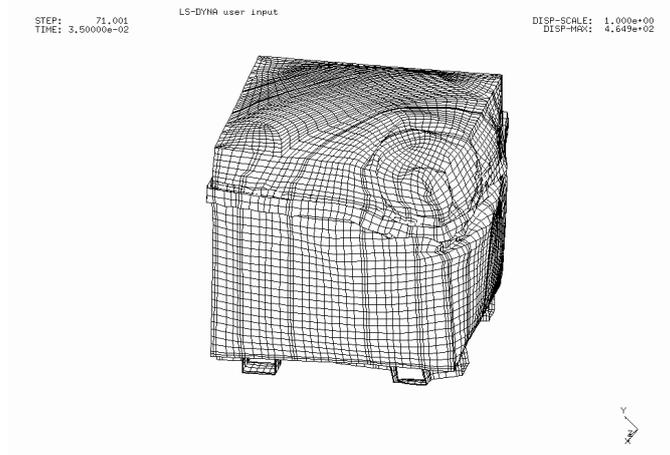


図 5.2-8 コーナー落下時の変形後の外観

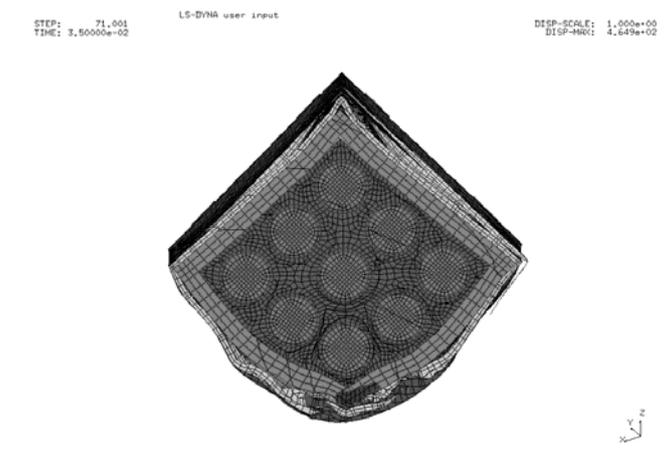


図 5.2-9 コーナー落下時の外容器の変形および内容器間隔の変形状況(1)

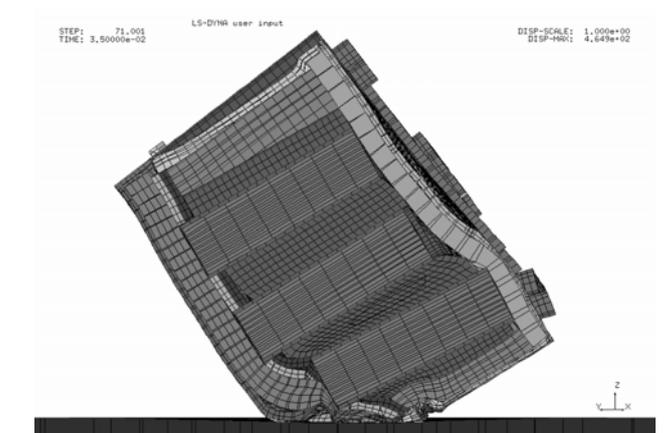


図 5.2-10 コーナー落下時の外容器の変形および内容器間隔の変形状況(2)

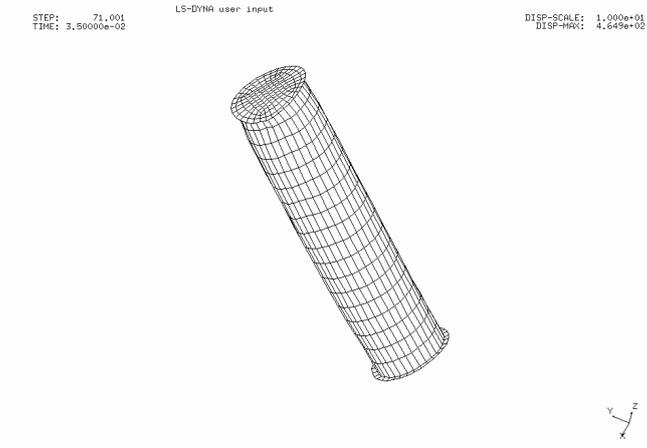


図 5.2-11 コーナー落下時の衝撃面近傍内容器の変形

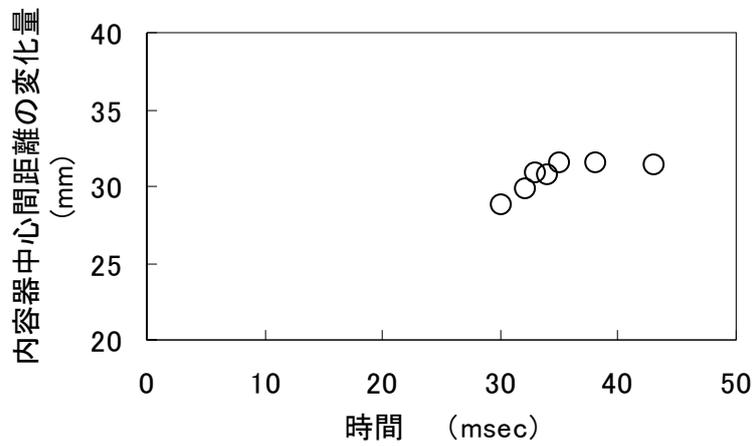


図 5.2-12 コーナー落下時の最大内容器中心間距離変化量の時刻歴



図 5.2-13 コーナー落下時の変形後の内容器蓋部および底部の配置

(ロ) エッジ落下

18m高さからのエッジ落下の場合について、輸送物の落下変形後の外観を図 5.2-14 に示す。外容器の変形および内容器間隔の変形状況を図 5.2-15 および図 5.2-16 に示す。また、図 5.2-17 に示すように、衝撃面に最近接する内容器のみが蓋の直ぐ下の部分で大きな変形を示し、その相当塑性ひずみは 7.5%であった。

内容器中心間距離の変化（縮小）量は、解析結果を見ると、23~30msec で殆ど変わらない。そこで、最終変形到達時刻と判断される 23msec において、内容器蓋部および底部の配置を重ねた図 5.2-18 に示すように、内容器中心間距離の変化量の最大は、底部側で 47.9 mmであった。

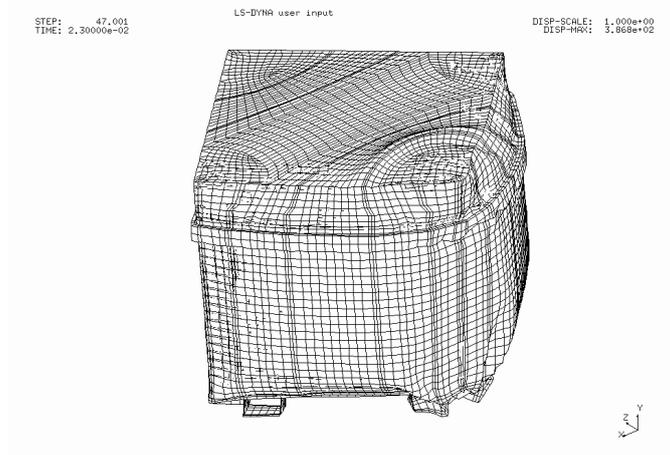


図 5.2-14 エッジ落下時の変形後の外観

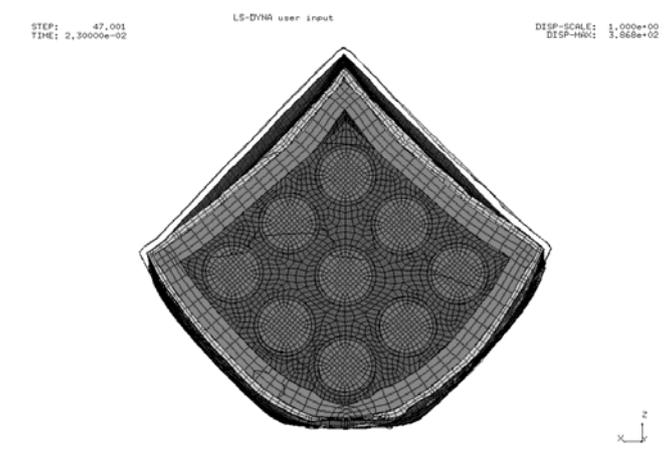


図 5.2-15 エッジ落下時の外容器および内容器の変形状況(1)

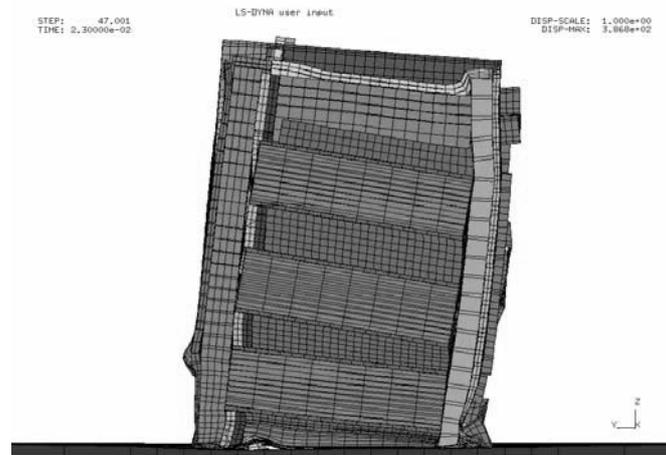


図 5.2-16 エッジ落下時の外容器および内容器の変形状況 (2)

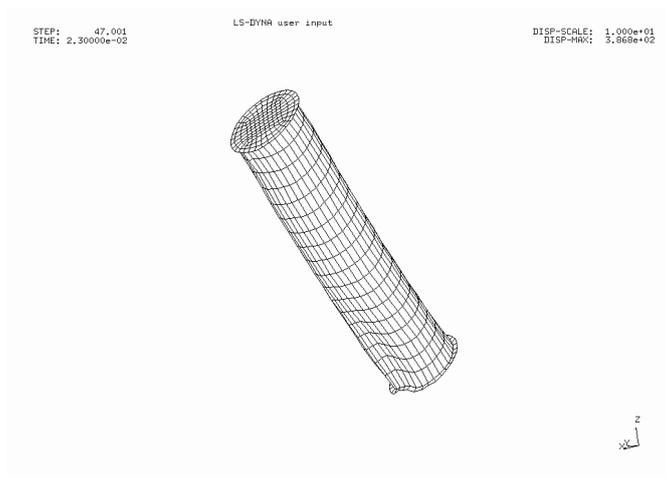


図 5.2-17 エッジ落下時の衝撃面近傍内容器の変形

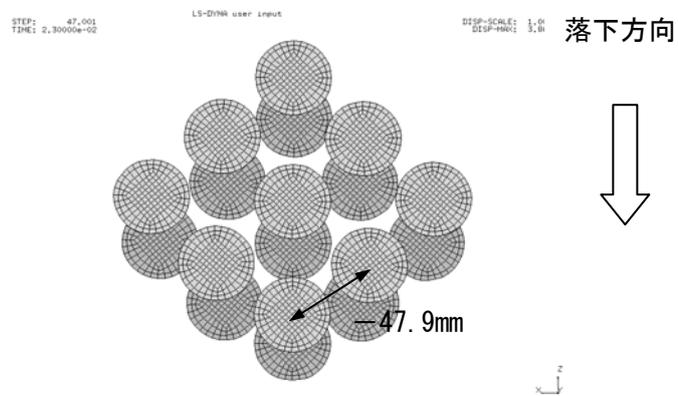


図 5.2-18 エッジ落下時の内容器蓋部および底部の配置の変化

5.2.2.2 解析結果およびその評価

コンクリートおよびアスファルト舗装面への 18m コーナーおよびエッジ落下時の内容器中心間距離の変化量および相当塑性ひずみの解析結果を表 5.2-1 に比較して示す。これから、落下事故に際して、収納物の閉じ込めに係わる内容器の過度の変形、また未臨界性に係わる内容器間隔の過度の減少、および中性子減速材・吸収材の損傷の有無を、落下衝撃解析により評価すれば、以下のようにまとめられる。

- ・ 収納物の閉じ込め安全性に関して、アスファルト衝撃面に対するコーナー落下の場合に最近接内容器の相当塑性ひずみの解析結果が最大 25.8% と大きな変形を示した。この内容器は、その材料の破断ひずみが 40% なので、この解析結果によると破損を免れているが、その蓋部密封性は保たれなくなる可能性がある。しかし、蓋部は、落下時の解析変形図に認められるように、圧縮された緩衝材で周囲を保持されており、蓋部の大きな開口は考えられない。また収納物（二酸化ウラン粉末）はプラスチック製の袋に入れられており、緩衝材で周囲を保持された蓋部からはみ出すことも考えられないので、収納物の閉じ込め安全性は確保されているものと考えられる。
- ・ 内容器胴部に位置する中性子減速材・吸収材は、解析変形図で認められるような緩衝材で周囲を囲まれ保持されていることから、内容器から脱落せずに所定の位置を保つ。従って、中性子減速材・吸収材の健全性は維持されていると考えられる。一方、衝撃面最近接の内容器中心間距離は、コンクリート面に対するエッジ落下の場合に最大約 47.9mm 縮まる。この変形は、全ての内容器間隔が等間隔で縮まったものというよりも、内容器相互の近接した部分は解析変形図に認められるように落下点近傍に限られている。

表 5.2-1 内容器中心間距離の変化量および最大相当塑性ひずみに及ぼす落下高さの影響

落下姿勢	落下高さ (m)	中心間距離の変化量 (mm)		最大相当塑性ひずみ (%)	
		コンクリート	アスファルト	コンクリート	アスファルト
コーナー落下	18	31.5	30.4	22.2	25.8
エッジ落下	18	47.9	46.1	7.5	9.1

5.3 タンクローリーとの衝突による火災事故に係る熱安全性解析

5.3.1 解析モデルおよび解析方法

5.3.1.1 解析モデル

輸送物を2次元で図5.3-1に示すようにモデル化した。外容器中央縦断面を考慮し、外容器、内容器形状をある程度簡略化している。輸送物の熱伝達形態は、同図に示すように、輸送物表面での熱放射、自然対流熱伝達および太陽輻射熱を考える。

5.3.1.2 解析手順

解析手順は、設定された事故シナリオ条件により以下のとおりとする。

ステップ1：輸送物が38℃雰囲気下で所定の太陽輻射熱を受けた時の輸送物内部温度分布に関わる定常伝熱の解析。

ステップ2：ステップ1で求められた輸送物内部の温度分布を初期条件とし、輸送物が800℃の雰囲気下に90分間、曝されたときの非定常伝熱の解析。

ステップ3：ステップ2の終了時の輸送物内部温度分布を初期条件として、38℃雰囲気下で太陽輻射熱を受けながら冷却される非定常伝熱の解析。

5.3.1.3 解析手法と解析条件

解析コードには、第3章で述べたように汎用有限要素法によるABAQUS6.2を使用した。要素分割を図5.3-2に示す。節点数は4004、要素数は3786である。

計算に使用した輸送物の材料物性および自然対流熱伝達係数は安全解析書による。

5.3.2 解析結果およびその評価

外周に接する内容器上部蓋部の緩衝材との接触位置は、輸送物内部温度分布から判断して最も昇温の大きい箇所であるが、この部分の温度履歴を図5.3-3に示す。これから周辺蓋部の最高到達温度は110℃(383K)以下であり、内部構造材のうちで最も熔融温度の低い中性子減速材あるいは吸収材の温度は、20℃程高目に評価しても、中性子減速材の熔融温度の145℃(418K)以下で、また中性子吸収材の熔融温度は321℃であるので、中性子減速材・吸収材の熱的健全性が確保される。また、内容器蓋部ガスケットの使用上限温度は150℃であるので、同様にガスケットの熱的健全性が確かめられ、収納物の閉じ込め性が確保される。

輸送容器内部の温度分布の解析結果によると、火災終了時に輸送物上面および側面外周は火炎温度800℃(1073.15K)に達し、外容器内側に隣接する緩衝材の温度も一部ではあるが耐熱温度300℃を超える。このとき、断熱材の最高到達温度は約800℃、緩衝材の最高到達温度は約612℃と推定される。火災終了後も数時間にわたって高温を維持することから、緩衝材の一部は熔融するものと考えられる。外周部の熱は順次内部に伝達され、内部の温度が均一化されていき、火災終了6時間後には輸送物内部の最高温度は約100℃程度になる。

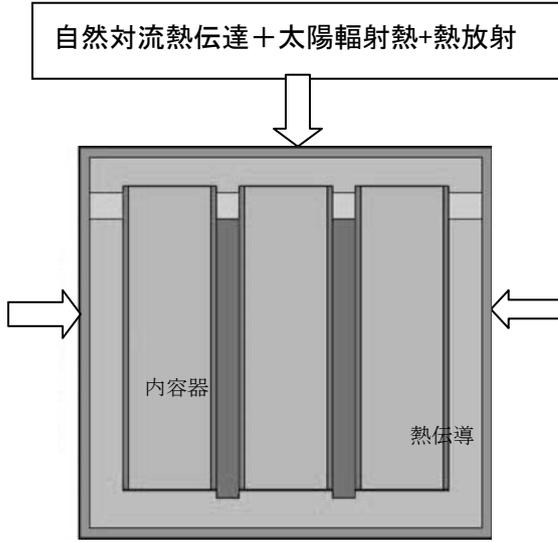


図 5.3-1 二酸化ウラン粉末輸送物解析モデル

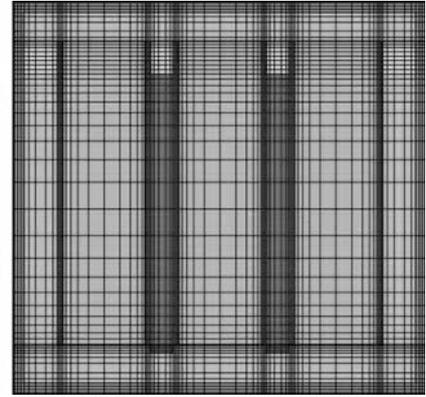


図 5.3-2 要素分割

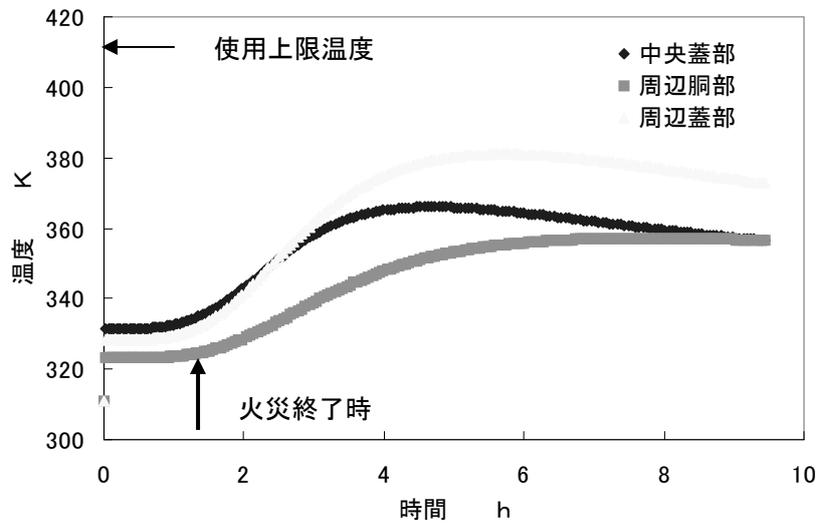


図 5.3-3 内容器近傍の温度履歴

5.4. トンネル内での衝突による火災事故に係る熱安全性解析

5.4.1 解析モデルおよび解析方法

5.4.1.1 解析モデル

(1) トンネル全体モデル

2次元で解析することとし、トンネル長手方向中央断面のトンネル壁、天井部、道路、トンネル内部空間および輸送物を図 5.4-1 に示すようにモデル化した。トンネルは火炎部とその上流側に 25m、下流側に 50mの空間で設定した。トンネルの長さは輸送物への周囲からの輻射効果のみを考慮すればよいので片側 25mで十分である。トンネル壁、天井部、道路のコンクリート厚さは 0.6mとした。道路もコンクリートとする。換気は図 5.4-1 において左から右に 0.2m/s の速度で生じるとした。輸送物の位置は、換気の効果およびトレーラー荷台を考慮して火炎中心から 0.6m風下で道路面より 0.8mとした。また、図 5.4-1 に示すように、中央に火炎部、両側は空気とし、空気/火炎部境界、トンネル天井および道路面で構成される空洞輻射を考慮した。

消火後は、火炎部が消失し、中央部も空気とモデル化した。このとき、トンネル天井、道路面および輸送物表面で構成される空洞輻射を考慮した。

(2) 輸送物モデル

解析モデルおよび要素分割はタンクローリー火災のモデル(図 5.3-1 および図 5.3-2 参照)と同一である。

5.4.1.2 解析手順

解析手順は、設定された事故シナリオにより以下のとおりとする。

ステップ 1：輸送物モデルによる、輸送物温度分布に関わる定常伝熱の解析。

ステップ 2：トンネル全体モデルによる、ステップ 1 で求められた輸送物温度分布を初期条件とし、0.2m/s の換気速度で図 3.2-4 に示した放熱速度パターンに従う 2 時間にわたる火災時熱流動の解析。

ステップ 3：トンネル全体モデルによる、2 時間後の火災終了時から、入熱 0 の条件で輸送物表面温度が十分に冷却されるまでの熱流動の解析。

ステップ 4：輸送物モデルによる、ステップ 1 で求められた輸送物内部温度分布を初期条件とし、ステップ 2, 3 で求められた輸送物外表面温度履歴を、輸送物表面に与えた輸送物内部温度分布の解析

5.4.1.3 解析手法と解析条件

解析には汎用有限要素法解析コード ABAQUS 6.2 を使用した。要素分割を図 5.4-2 および図 5.4-3 に示す。節点数 1327、要素数は 1252 である。空気および火炎部(図 5.4-1 参照)については強制対流要素を用い、輸送物、天井および道路についてソリッド要素を用いる。

全体モデルの計算に使用するコンクリートおよび空気の熱物性には、「伝熱工学資料改訂第4版」²⁾を参照し、表 5.4-1～表 5.4-3 に示す値を用いる。

表 5.4-1 コンクリートの熱物性値

温度 T (K)	密度 ρ (kg/m ³)	比熱 C _p (J/kg・K)	熱伝導率 λ (W/m K)
293	2400	900	1.2
600	2370	930	0.8
1000	2280	1630	1.0

表 5.4-2 空気の熱物性値

温度 (K)	密度 (kg/m ³)	比熱 C _p (J/kg・K)	熱伝導率 λ (W/m K)
280	1.2606	1007	0.02461
300	1.1763	1007	0.02614
320	1.1026	1008	0.02759
340	1.0376	1009	0.029
360	0.9799	1011	0.03039
380	0.9282	1012	0.03173
400	0.8818	1015	0.03305
420	0.8398	1017	0.03437
440	0.8016	1020	0.03568
460	0.7667	1023	0.03697
480	0.7347	1027	0.03825
500	0.7053	1031	0.03951
550	0.6412	1041	0.0426
600	0.5878	1052	0.0456
650	0.5425	1064	0.0484
700	0.5038	1076	0.0513
800	0.4408	1099	0.0569
900	0.3918	1122	0.0625
1000	0.3527	1142	0.0672
1100	0.3206	1160	0.0717
1200	0.2939	1175	0.0759
1500	0.2351	1212	0.087

表 5.4-3 輻射率

	輻射率 ϵ
火炎 (k=1.5)	1.0
トンネル天井	0.6
道路面	0.6
輸送物表面	0.5

- ・ 火炎部の熱伝導度については、単位面積当たりの放熱量が十分大きければ、火炎は乱流拡散火炎状態で火炎部の火源直上温度は高さによらず一定となることから、火炎部温度を均一にする条件として空気の 10^7 倍の熱伝導度を設定した³⁾。
- ・ 火炎部の輻射率の導出⁴⁾のためには、火炎および燃焼生成物として煤 (C) や極性分子 (CO_2 , H_2O) を含み、これらが熱放射源となることを考慮する。火炎表面から射出される熱流束は次式で表される。

$$E = (1 - e^{-kL}) \sigma T^4 \quad (\text{W/m}^2)$$

k : 火炎の吸収係数 (m^2/m^3)

L : 平均行路長 (m)

σ : ステファン・ボルツマン定数 5.67×10^{-8} ($\text{W/m}^2\text{K}^4$)

T : 温度 (K)

固体表面からの射出熱流束は

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (\text{W/m}^2)$$

ε : 輻射率 (—)

であるから、火炎塊からの熱放射を輻射率 $1 - e^{-kL}$ の固体面からの熱放射と置き換えてよいことになる。吸収係数 k は火炎塊の単位体積に含まれるすすと極性分子の見付面積を表わす光学的特性値で、火炎塊の組成および温度に依存して一概に言えないが、液体燃料の火炎の場合 0.4~2.6, プラスチック系可燃物の火炎では 1.3~2.6 程度である。

平均行路長 L は火炎のアスペクト比が 8 以内であれば、

$$L = (3.4 \sim 3.6) V_f / A_f$$

V_f : 火炎体積 A_f : 火炎表面積

により計算しても大きな誤差はない。そこで、検討対象火炎部の輻射率を求めると、吸収係数 $k = 0.4$ (m^2/m^3) の時、 $\varepsilon = 0.73$, $k = 1.3$ (m^2/m^3) で $\varepsilon = 0.99$, $k = 2.6$ (m^2/m^3) で輻射率が $\varepsilon = 1.00$ となる。

- ・ 空気には対流効果を考慮して、後述する Nu 数を乗じた熱伝導度を用いた。 Nu 数の設定方法は以下のとおりである。熱伝達係数 α , 代表寸法 d , および熱伝導度 λ を用いて Nu 数が定義される ($Nu \equiv (\alpha d) / \lambda$)。管内を流れる流体と管内壁との強制対流熱伝達での Nu は次式¹⁾で評価される。

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/3}$$

Nu : Nusselt 数 (—)

Re : Reynolds 数 (—)

Pr : Prandtl 数 (—)

これから、トンネル断面サイズ (5m×10m) から求めた相当直径 6.67m を用いて、トンネル内換気流 (入口流入条件: 20°C, 0.2m/s) に対応した Re 数は 88057 および Nu 数は 186 となる。ここでは Nu 数として 200 を使用した。

- ・ 全体モデルにおける輸送物の熱伝導度，比熱，および密度に関して，外周部要素（図 5.3-1 参照）については，外容器のステンレス板，断熱材の物性値に厚さを考慮した等価値を用いた。また，その輻射率は，輸送物モデルの外容器の値を用いた。

境界条件として，外気およびトンネル内の温度 300K とし，トンネル天井および道路コンクリート層とその外部では断熱条件とする。輸送物内部初期温度分布は前項のタンクローリーによる火災事故時熱安全性解析と同じである。

火炎部(5m×4.8m×4.5m=108m³)への単位体積当たりの入熱量は，図 3.2-4 に示した放熱速度パターンに従い，火災開始からの 10 分間およびその後の 110 分間のそれぞれは，34MW/108m³，2.8MW/108m³ である。なお，実際にはすす等が生成し不完全燃焼となるが，本解析では可燃物は全て燃焼すると仮定した。従って，過大な熱を発生させたより厳しい評価を行うこととなる。

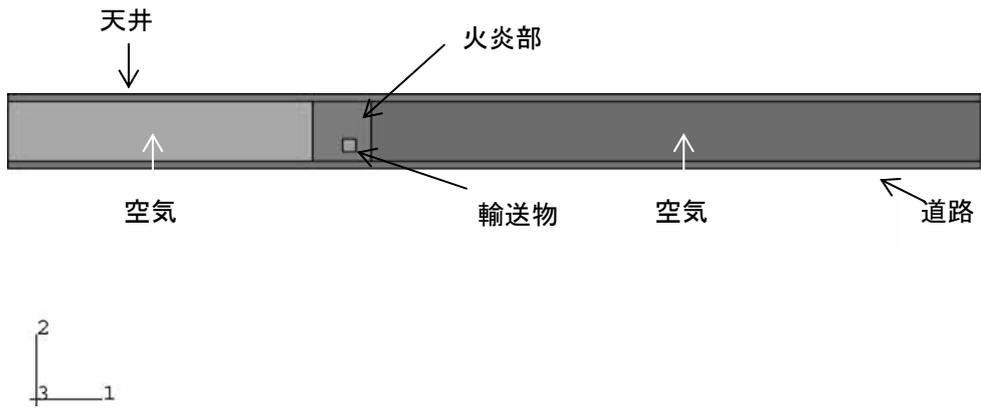


図 5.4-1 トンネル全体モデル



図 5.4-2 トンネル全体モデル要素分割

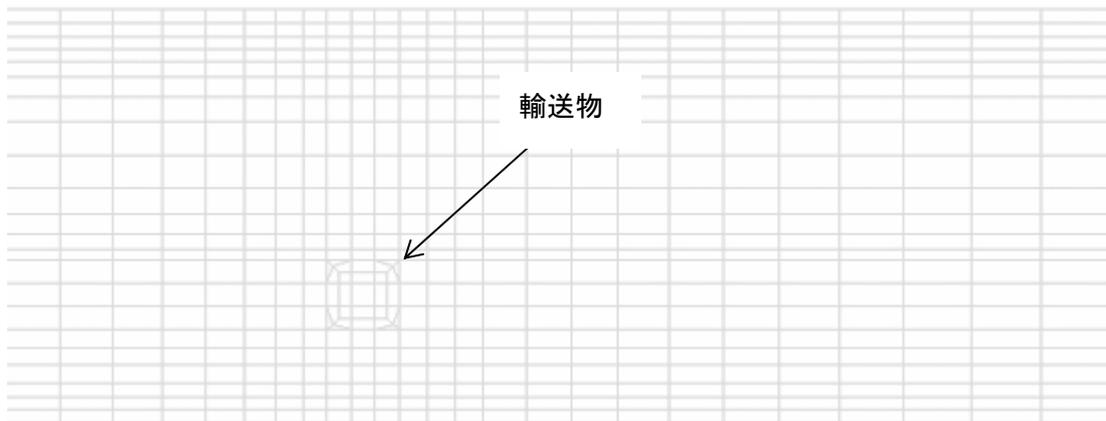


図 5.4-3 火炎部要素分割の拡大図

5.4.2 解析結果およびその評価

5.4.2.1 トンネル全体モデルでの解析結果

トンネル内温度分布の解析結果では、火災開始 10 分後の最高温度は 1101°C (1374K) であり、開始 2 時間後の火災終了時の最高温度は 471°C (747K) であった。火炎部は均一な温度を示し、換気により火炎部からトンネル外部に向けて熱流が移行している。火災終了 2 時間後は天井、道路面および輸送物の下流側に冷却遅延が認められる。トンネル内の最高温度 1101°C はプール火災試験温度の平均値 800°C に比べて高いが、換気速度を小さく設定したことで空気の巻き込み量が少ないことによるためと考えられる。

5.4.2.2 輸送物内部の熱安全性解析結果および解析結果の評価

開始 2 時間後の火災終了時における内部の昇温の程度は緩慢である。火災終了後では、下流側外周側面がより高温となるため、内部においても下流側がより高くなる。火災終了 6 時間後、伝導により輸送物内部の温度の均一化が進行し最高温度は 100°C 以下となる。

トンネル全体モデルによるトンネル内各部代表箇所、および輸送物モデルによる輸送物内代表箇所の温度履歴を、それぞれ図 5.4.4 および図 5.4.5 に示す。これから内容器蓋部端の到達温度が最も高く、約 105°C (378K) であり、内部構造材のうちで最も熔融温度の低い中性子減速材および吸収材の最高到達温度は、それよりも約 20°C 高めと推定される。従って、中性子減速材の熔融温度の 145°C (418K)、あるいは中性子吸収材の熔融温度 321°C 以下であるので、中性子減速材・吸収材の熱的健全性が確保される。

また、断熱材、緩衝材 A の最高到達温度は、それぞれ約 925°C、および約 404°C と評価され、輸送物内部の断熱材あるいは緩衝材の一部は焼失するものと思われる。ただし、火災終了時にも外容器内側の緩衝材温度は、その耐熱温度 300°C より低く、内容器周辺の緩衝材による支持構造性が確保される。また、内容器蓋部ガスケットの使用上限温度は 150°C であるので、同様に、ガスケットの熱的健全性が確かめられ、収納物の閉じ込め性が確保される。

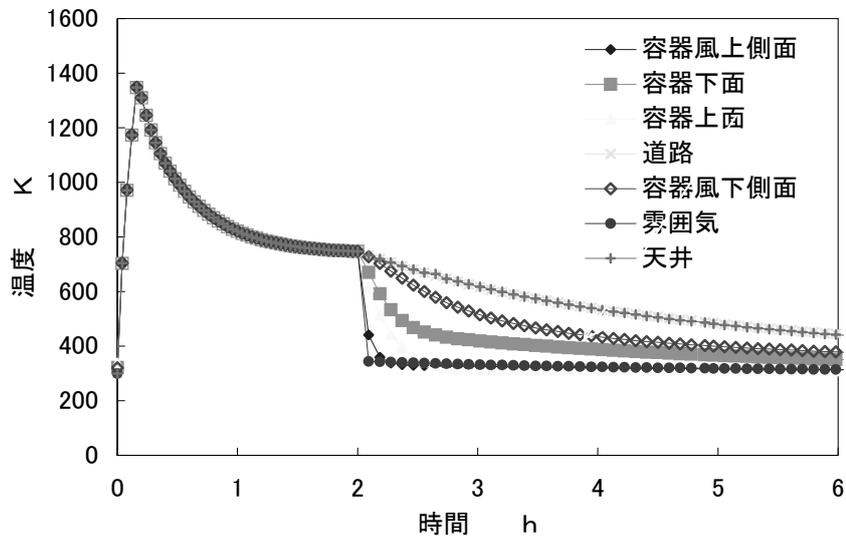


図 5.4-4 全体モデルによるトンネル内各部温度(K)履歴

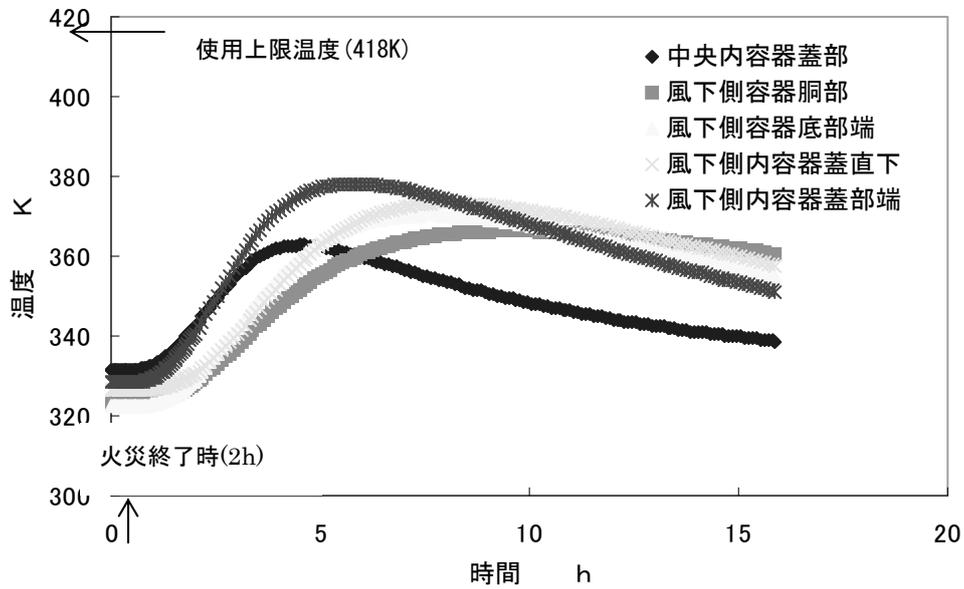


図 5.4-5 輸送物モデルによる輸送物内各部温度(K)履歴

5.5 苛酷事故想定時の臨界安全性解析

5.5.1 解析モデルおよび解析方法

5.5.1.1 落下衝撃解析および熱安全性解析の結果に基づく未臨界性評価前提条件

(1) 落下衝撃解析の結果の要約

5.2 節に記載されているように、輸送容器蓋部コーナーあるいはエッジを下側にしてコンクリート舗装面あるいはアスファルト舗装面に向けて、18m 高さから落下・衝突させる条件により構造解析を実施している。解析結果の要約を表 5.5-1 に示す。

表 5.5-1 各落下姿勢に対する内容物の最大変位および変形

落下姿勢	落下高さ (m)	中心間距離の変化量(mm)		内容物の相当塑性ひずみ	
		対コンクリート面	対アスファルト面	対コンクリート面	対アスファルト面
コーナー落下	18	31.5	30.4	22.2%	25.8%
エッジ落下	18	47.9	46.1	7.5%	9.1%

(2) 熱安全性解析の結果の要約

5.3 節に記載されているように、タンクローリーとの衝突による火災事故シナリオの、38℃雰囲気下を初期条件として 90 分間 800℃の雰囲気下に曝された後自然冷却する条件での熱安全性解析、また、トンネル内での衝突による火災事故シナリオの、換気装置のないトンネル内での 120 分間の火炎に曝された後自然冷却する条件での熱安全性解析を実施している。解析結果の要約を表 5.5-2 に示す。

表 5.5-2 輸送物構造材最高到達温度

解析事象	構造材解析温度(℃)			
	断熱材	緩衝材	中性子減速材	中性子吸収材
タンクローリー衝突による火災事故	800	612	130	130
トンネルでの衝突による火災事故	925	404	125	125

(3) 未臨界性評価前提条件

5.3 節のタンクローリーとの衝突による火災事故シナリオによる熱安全性解析では、解析モデル上、外周部の緩衝材等が焼失し、内容物が外容器外壁に接近する場合を考慮していない。火災試験結果と実証解析結果との差異をバイアスとして約 20℃を解析結果に加算すると、内容物最高到達温度は 130℃と評価される。従って、内容物の移動を考慮すると、安全解析書記載の中性子減速材の耐熱温度（125～132℃）を超える恐れがあり、中性子減速材が溶化・流失することがないとしても、軟化が生じるため物質密度は低下する。そこで、臨界安全解析の条件として内容物外周部に巻いてある中性子減速材が一部喪失することを考慮する。

NPC 型輸送物について実施した落下衝撃解析および熱安全性解析結果を整理し、臨界安全性を評価するための前提条件を表 5.5-3 に示すように設定する。

表 5.5-3 未臨界性評価前提事項

対象事象	未臨界性評価前提事項*	
	減速材制限	配置制限・吸収材制限
落下事故	<ul style="list-style-type: none"> 外容器の変形による外容器内水浸入有り。 内容器蓋部の変形による内容器内水浸入有り。 収納袋内水浸入無し。 	<ul style="list-style-type: none"> 内容器中心間距離の変位有り。 内容器周辺の中性子吸収材・減速材は形状維持。
火災事故	<ul style="list-style-type: none"> 外容器周辺部の高温による密閉不可。 内容器ガスケット温度の熱的制限値未満による水浸入無し。 	<ul style="list-style-type: none"> 内容器中心間距離は熱的影響を受けず変化無し。 断熱材、緩衝材は焼失。内容器周囲の中性子吸収材・減速材は溶化するものの消失無し**

* : 上記未臨界性評価前提事項は SAR と同様であるが、距離の変化および焼失体積の程度に差異がある。

** : 火災事故条件において、輸送容器外殻に近接した内容器の中性子減速材が軟化温度に達し、体積膨張で中性子減速材の一部が消失した状態のサーベイも実施する。

5.5.1.2 輸送物のモデル化および計算条件

(1) 輸送物のモデル化

輸送物の形状モデルは 3次元で、対称的なモデルとする。

① 外容器と内容器

本輸送容器はステンレス鋼製の内容器 9 個および外容器 1 個から構成されている。内容器の構成は、図 5.1-3 に示すように薄肉ステンレス鋼板を胴部側版とし、それと底板を溶接した基本形状に、その円筒の周囲に中性子吸収材である中性子吸収板、減速材として高密度樹脂を巻き、さらに最外周を保護するために薄肉ステンレス鋼板を巻いたものである。内容器 9 個と外容器外殻板の間には、火災時に収納物への熱の流入を緩和するための断熱材および緩衝材 A, B, C, D が充填されている。

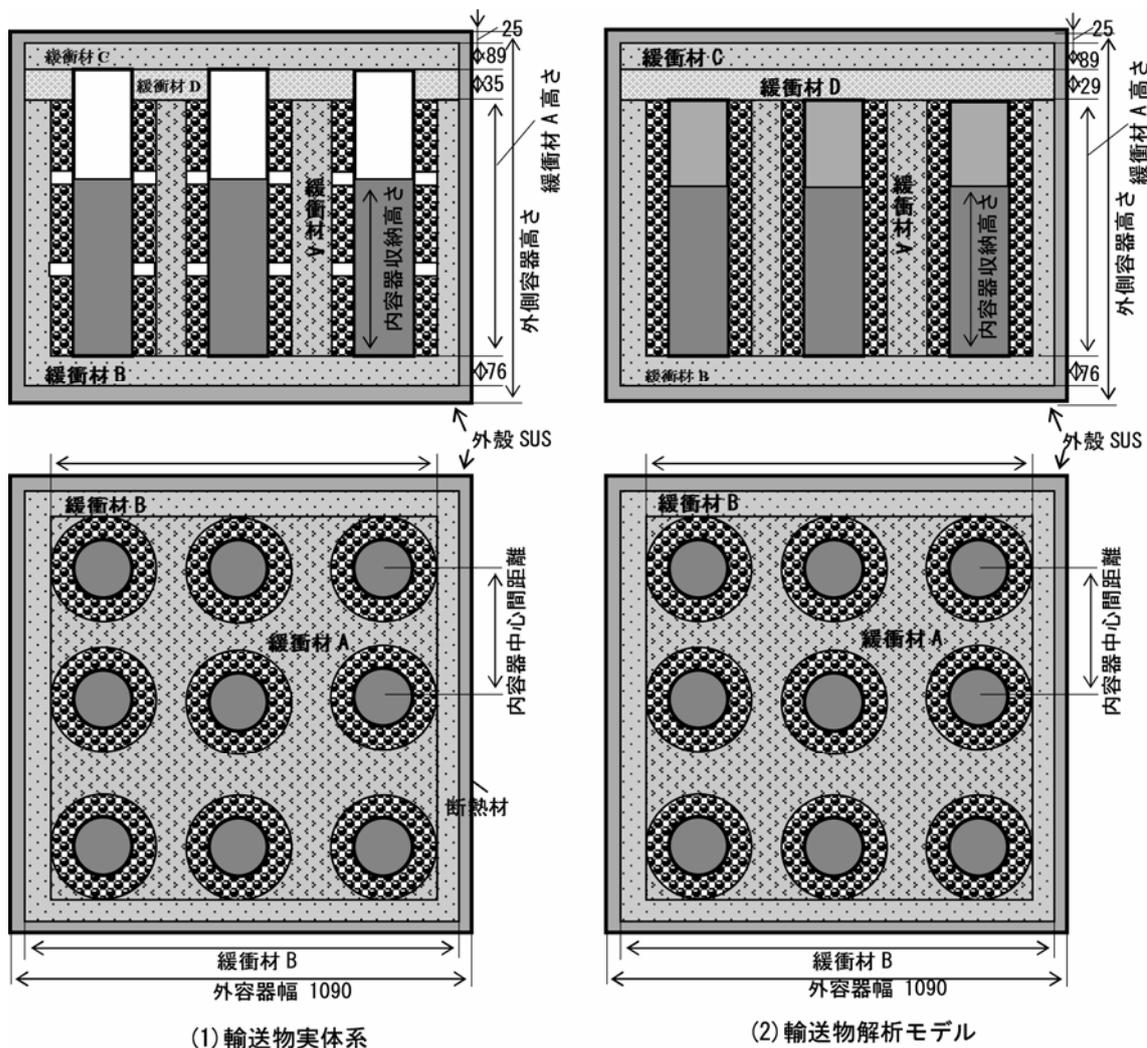
ここで、安全解析書に基づき、下記のように単純化してモデル化する。

- ・ コーナー補強材、締め付けリングおよびボルト、フォークリフト用角材などの構造材は安全側の評価とするために無視する。
- ・ 断熱材はすべて安全側の評価とするために無視する。
- ・ 緩衝材 A(0.1g/cm³)~D(0.6g/cm³)は安全側の評価とするために、低密度側の一種類の緩

衝材(0.1g/cm³)とする。

- ・緩衝材 D の領域で、内容器内上部の空隙はモデルを単純化するために緩衝材 D で占められているとする。
- ・輸送物孤立系および配列系の解析を行うこととし、配列系は 5 行×5 列×6 段の 150 個すなわち NPC 型輸送物の輸送制限個数 (75 個) の 2 倍を超える個数に設定する。

輸送物実設計形状寸法と輸送物解析モデルの概要の比較を図 5.5-1 に示す。



単位 : mm

図 5.5-1 輸送物実体系と解析モデルの比較

② 中性子吸収材

遮蔽板として内容器の周囲に厚さ 0.381mm の中性子吸収材板を巻いてモデル化する。

③ 中性子減速材

中性子減速材の密度は、安全側の評価とするため標準値 (0.94g/cm³~0.98g/cm³) の最小値よりさらに 0.02 g/cm³ 余裕を持った値(0.92 g/cm³)に設定する。緩衝材 A から D までの密度は、低密度側の 0.10 g/cm³ 一定に設定する。

④ 反射条件等

孤立系および配列系において、外容器の外側には反射体として、厚さ 30cm の水の層があるものとする。なお、外容器付属の構造材等は無視する。

(2) 計算方法と計算条件

輸送物を 3 次元でモデル化し、臨界解析には連続エネルギーモンテカルロ計算コード MVP を使用する。モンテカルロ計算の中性子ヒストリ数は、300 万 (発生中性子数 : 5000 個 / 世代, 計算世代数 : 650, スキップ世代数 : 50) 以上とし、計算結果の標準偏差は 0.06% 以下を収束判定条件とした。

(3) 二酸化ウラン(UO₂)粉末と構造材の組成

輸送容器に収納される UO₂ 粉末の仕様を表 5.5-4 に示す。

表 5.5-4 UO₂ 粉末仕様

全質量[kgUO ₂]	U 組成* ; U-232/234/235/236/238[wt%]	密度[g/cm ³]	含水率[wt%]
540	1×10 ⁻⁸ /0.05/5.0/0.025/94.925	4.5 以下	5 以下

* : ASTM C787-90⁵⁾の濃縮用再処理六フッ化ウランの仕様値より

UO₂ 粉末以外の NPC 型輸送物構成材料の核種組成等データは、安全解析書および臨界安全ハンドブック⁶⁾・理科年表⁷⁾等の公開文献による。なお、原子量データ等は「核データセンターホームページ」⁸⁾のデータベースを使用する。これらのデータを表 5.5-5 に示す。

表 5.5-5 UO₂ 粉末以外の材料物質の核種組成データ

材質	密度(g/cm ³)	核種	組成(wt%)
ステンレス鋼	7.9 ^{*1}	Fe	68.595 ^{*1}
		C	0.08 ^{*1}
		Cr	19.00 ^{*1}
		Mn	2.00 ^{*1}
		Ni	9.25 ^{*1}
		Si	1.00 ^{*1}
中性子吸収材	8.65 ^{*2}	Cd	95.0
中性子減速材	0.92 ^{*3}	C	85.63
		H	14.37
緩衝材	0.10	C	50.0 ^{*4}
		O	14.0 ^{*4}
		N	4.0 ^{*4}
		H	6.0 ^{*4}
水	1.0	H	11.19
		O	88.81

*1：臨界安全ハンドブック⁶⁾

*2：理論値 8.65 の 95%，NUREG/CR-5661⁹⁾

*3：JIS K6748 第 3 種¹⁰⁾，中性子減速材の値を保守的に設定

*4：元素分析試験結果より，保守的に設定

5.5.2 落下衝撃解析結果に基づく臨界解析

(1) 臨界解析条件

落下衝撃解析結果を参考として、内容物の面間距離が変化し、外容器が変形して外容器および内容物の閉じ込めが維持できなくなると仮定する。但し、 UO_2 粉末はプラスチック製収納袋で密閉されているため、袋内への水浸入は考慮しない。従って、外容器内側とプラスチック製収納袋外側の空隙中の水密度を 0.0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0(g/cm^3) と変化させて解析する。

① 孤立系臨界解析条件

a. UO_2 粉末の含水率

UO_2 粉末の含水率の最高を表 5.5-4 の仕様に従い、5wt%とする。

b. 核燃料形状

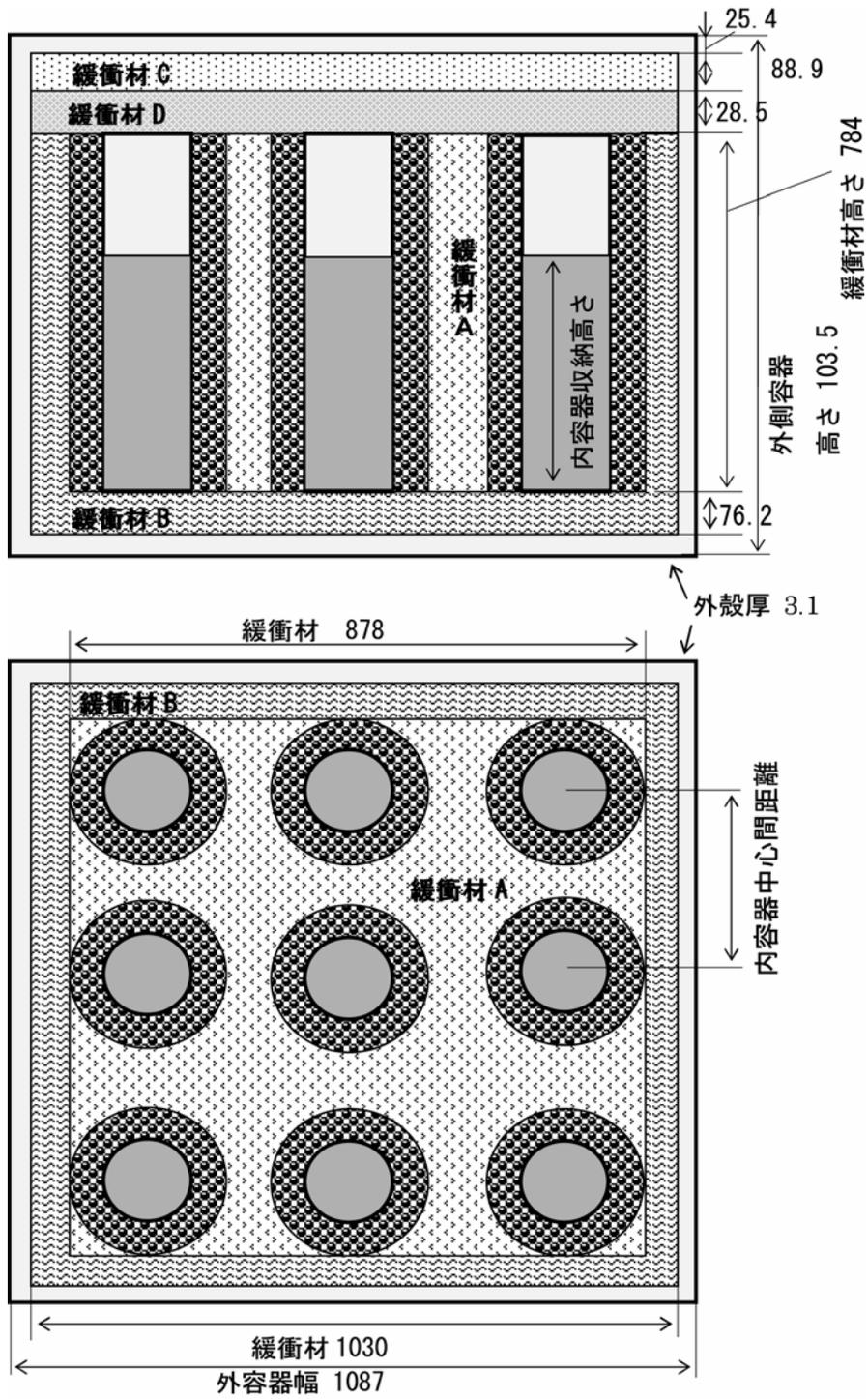
内容物内径は維持されるため、 UO_2 粉末の密度に対応して内容物収納高さが変化する。内容物 9 缶に均等に分配されるとして最大装荷量を 9 等分し、最大含水率 5wt%のときに UO_2 粉末密度をパラメータとした UO_2 粉末収納高さを表 5.5-6 に示す。

表 5.5-6 UO_2 粉末の密度に対する収納量および高さ

含水率(wt%)	UO_2 粉末密度 ($\text{g-UO}_2/\text{cm}^3$)	UO_2 粉末の内 容器収納高さ (mm)	UO_2 粉末の収納 量 ($\text{kg-UO}_2/\text{内容器}$)
5.0 (最大含水率)	2.0	776	540/9 (最大装荷量)
	2.5	621	
	3.0	517	
	3.5	443	
	4.0	388	
	4.5	345	

c. エッジ落下損傷時の輸送容器内容物の中心間距離[305mm-259mm]

エッジ落下衝撃解析結果より、内容物中心間距離の最大変化量として 48mm の結果が得られている。臨界解析では、中心間距離として最小の 259mm (面間距離 0mm) まで変化するとし、解析モデルとしては保守側に内容物 9 缶が均等に中心によると仮定する。図 5.5-2 に輸送容器の内容物中心間距離をパラメータとした解析モデルを示す。



単位 : mm

図 5.5-2 NPC 型輸送物落下衝撃損傷時の内容器中心間距離

をパラメータにした孤立系臨界解析モデル

② 配列系臨界解析条件

UO₂ 粉末の含水率，核燃料形状，損傷時内容器中心間距離については，孤立系臨界解析条件と同様とする。輸送物面間距離については輸送物外容器間の面間距離をパラメータとして最大 50mm で設定する。

以上から，本解析では孤立系解析ケースと配列系解析ケースに対して，UO₂ 粉末密度，含水率，内容器中心間距離，外容器面間距離（配列系のみ）のパラメータとし，表 5.5-7 および表 5.5-8 に示すように設定した。

表 5.5-7 落下衝撃損傷時の孤立系臨界解析用のパラメータ

UO ₂ 粉末密度 (g/cm ³)	含水率 (%)	内容器中心間距離 (mm)
2.0 (最小)	0.0 (最小)	259 (最小)
4.5 (最大)	5.0 (最大)	305 (標準)

表 5.5-8 落下衝撃損傷時の配列系臨界解析用のパラメータ

UO ₂ 粉末 密度(g/cm ³)	含水率 (wt%)	内容器中心間 距離(mm)	外容器面間距離 (mm)
2.0 (最小)	0.0 (最小)	259 (最小)	0
4.5 (最大)	5.0 (最大)	305 (標準)	50

(2) 孤立系臨界解析結果

酸化ウラン (UO₂) 粉末密度 (内容器収納高さ) をパラメータとした臨界計算結果を図 5.5-3 に示し，内容器の中心間距離をパラメータとした計算結果を図 5.5-4 に示す。これらから，NPC 型輸送物落下衝撃に対する孤立系臨界解析においては，輸送容器内部の空隙中の水密度を 1.0g/cm³ に近づけると中性子実効増倍率が高くなる傾向がある。その他のパラメータの影響を考慮した解析結果をまとめると，UO₂ 粉末密度 4.5g/cm³，含水率 5.0wt%，内容器中心間距離 259mm，水没 (空隙中の水密度 1.0g/cm³) において，中性子実効増倍率の標準偏差の 3 倍を加えた最大値 0.442 が算出される。

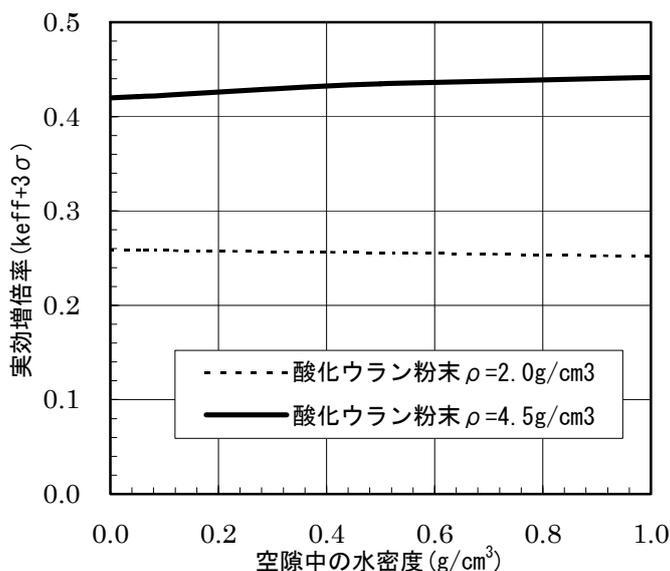


図 5.5-3 酸化ウラン粉末密度をパラメータとした孤立系臨界計算結果
(含水率 5%, 落下衝撃による内容器中心間距離 259mm)

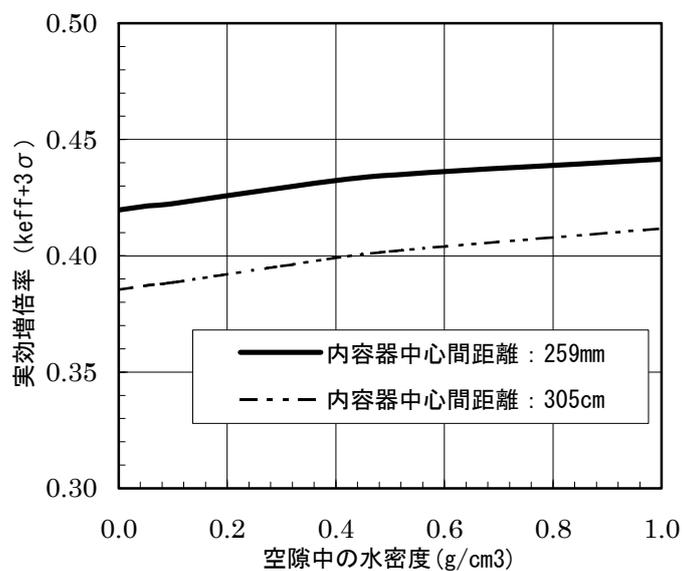


図 5.5-4 落下衝撃による内容器中心間距離をパラメータとした孤立系の
臨界計算結果 (酸化ウラン粉末密度 4.5 g/cm^3 , 含水率 5wt%)

(3) 配列系臨界解析結果

UO₂ 粉末密度 (内容器収納高さ) をパラメータとした計算結果を図 5.5-5 に示し, 内容器の中心間距離をパラメータとした計算結果を図 5.5-6 に示す。これらから, NPC 型輸送物落下衝撃に対する配列系臨界解析においては, 輸送物内外の空隙中の水密度が 1.0 g/cm^3 に

近い体系での相互作用の効果により中性子増倍率が低く算出される傾向がある。また、輸送物面間距離をパラメータとした計算結果を図 5.5-7 に示す。その他のパラメータの影響を考慮した解析結果をまとめると、輸送物面間距離 0mm, 酸化ウラン (UO₂) 粉末密度 4.5g/cm³, 含水率 5.0wt%, 内容器中心間距離 259mm, 空隙中の水密度 0g/cm³において中性子増倍率の標準偏差の 3 倍を加えた最大値 0.469 が算出される。

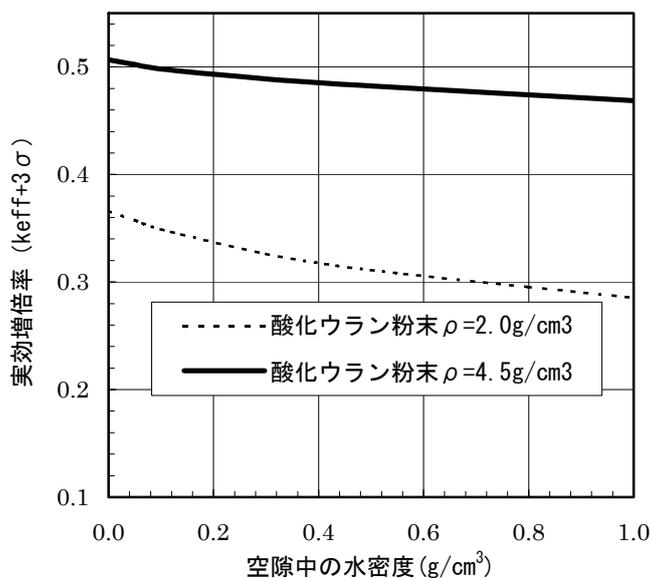


図 5.5-5 酸化ウラン粉末密度をパラメータとした配列系臨界計算結果 (含水率 5%, 落下衝撃による内容器中心間距離 259mm)

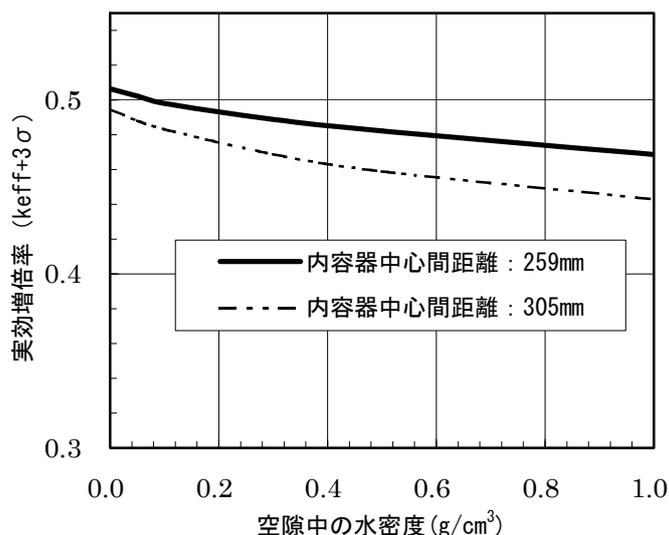


図 5.5-6 落下衝撃による内容器中心間距離をパラメータとした配列系臨界計算結果 (酸化ウラン粉末密度 4.5g/cm³, 含水率 5wt%)

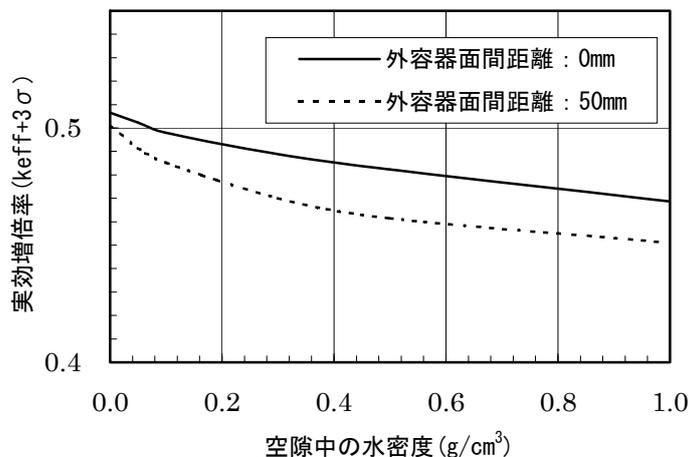


図 5.5-7 落下衝撃による外容器面間距離をパラメータとした配列系臨界計算の結果（内容器中心間距離 295mm, UO₂ 粉末密度 4.5g/cm³, 含水率 5wt%）

5.5.3 熱安全性解析結果に基づく臨界解析

(1) 解析条件

火災事故による熱影響を考慮するため、図 5.5-1 に示す緩衝材 B, 緩衝材 C および緩衝材 D の厚さ 76mm が焼失すると仮定し、緩衝材 A および内容器周囲に巻かれた中性子吸収材が部分的に無くなると仮定する。また内容器内への水浸入は無いものとする。外容器内側と内容器外側の空際中の水密度を 0.0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0(g/cm³)と変化させる。

孤立系あるいは配列系の臨界計算条件として、UO₂ 粉末の含水率、核燃料形状については、前節と同様とする。また、輸送容器外周の緩衝材の焼失に伴い、内容器周囲に巻いてある中性子減速材が熱影響により 1 部喪失したと仮定する。また、配列系の臨界解析では、輸送物外容器の面間距離をパラメータとして最大 50mm で設定する。

以上により、本解析では孤立系解析ケースと配列系解析ケースに対して、UO₂ 粉末密度、中性子減速材、中性子吸収材、外容器面間距離（配列系のみ）のパラメータを表 5.5-9 および表 5.5-10 に示すように設定する。

表 5.5-9 火災による熱損傷を受けた輸送物の孤立系臨界解析用のパラメータ

UO ₂ 粉末密度 (g/cm ³)	含水率 (%)	中性子減速材焼失の有無
2.0 (最小)	0.0 (最小)	初期条件 (標準)
4.5 (最大)	5.0 (最大)	外周側部分喪失*
		外周内容器 8 体分喪失

* : 外容器内面と向き合っている内容器外面側が喪失する。

表 5.5-10 火災による熱損傷を受けた輸送物の配列系臨界解析用のパラメータ

UO ₂ 粉末密度 (g/cm ³)	含水率 (%)	中性子減速材焼失程度	外容器面間距離(mm)
2.0 (最小)	0.0 (最小)	初期条件 (標準)	0
4.5 (最大)	5.0 (最大)	外周側部分喪失* 外周内容器 8 体分喪失	50

* : 外容器内面と向き合っている内容器外面側が喪失する。

(2) 孤立系臨界解析結果

NPC 型輸送物が火災による熱的影響を受けたときの孤立系臨界解析において、中性子減速材焼失無しで酸化ウラン (UO₂) 粉末密度 (内容器収納高さ) をパラメータとした計算結果を図 5.5-8 に示し、UO₂ 粉末密度 4.5g/cm³ で内容器周囲に巻いた中性子減速材焼失程度をパラメータとした計算結果を図 5.5-9 に示す。その他のパラメータの影響を考慮した解析結果をまとめると、UO₂ 粉末密度 4.5g/cm³、含水率 5.0wt%、空隙中水密度 0.5g/cm³、中性子減速材 8 体分喪失において中性子増倍率の標準偏差の 3 倍を加えた最大値 0.431 が算出される。

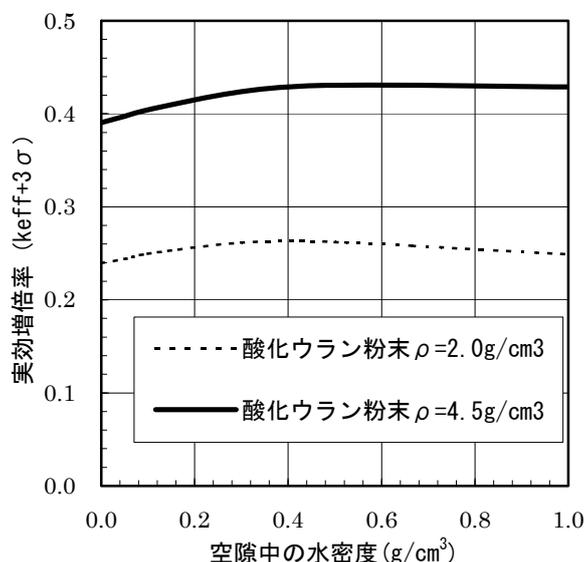


図 5.5-8 酸化ウラン粉末密度をパラメータとした孤立系臨界計算結果 (含水率 5%, 落下衝撃による内容器中心間距離 259mm)

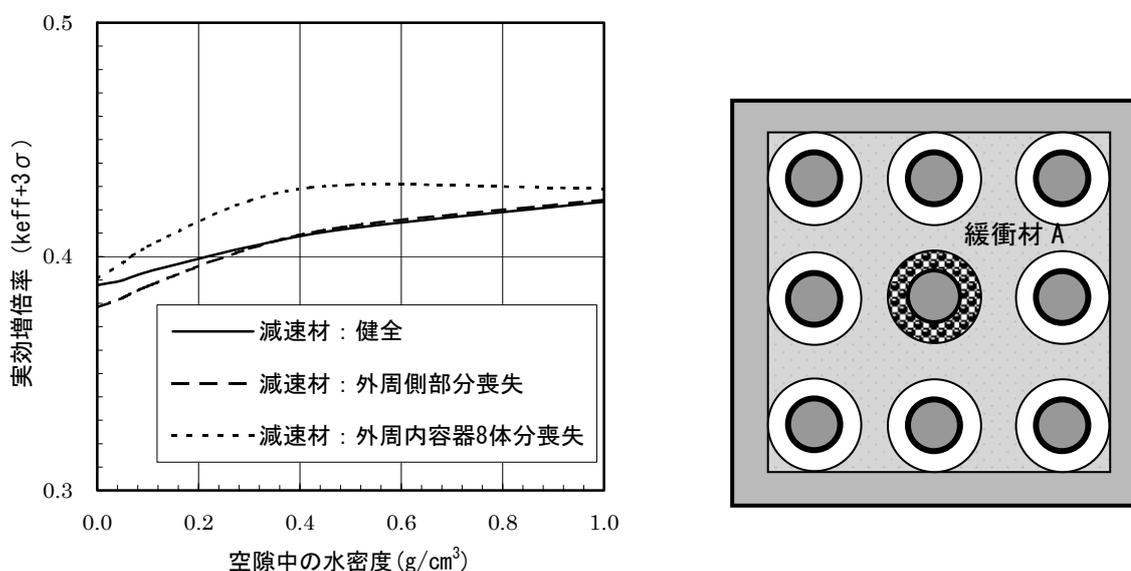


図 5.5-9 火災時熱影響による中性子減速材焼失程度をパラメータとした孤立系の臨界計算結果 (UO₂ 粉末密度 4.5g/cm³, 含水率 5wt%)

(3) 配列系臨界解析結果

UO₂ 粉末密度 (内容器収納高さ) をパラメータとした計算結果を図 5.5-10 に示し, 中性子減速材焼失程度をパラメータとした計算結果を図 5.5-11 に示す。これらから, 火災による熱的影響を考慮した NPC 型輸送物の配列系臨界解析においては, 輸送物内部の水密度の少ない体系での相互作用増加により中性子実効増倍率が高くなる傾向を持っている。また, 外容器面間距離をパラメータとした計算結果を図 5.5-12 に示す。これから, 外容器面間距離を大きくすると中性子実効増倍率は低下している。

その他のパラメータの影響を考慮した解析結果をまとめると, 酸化ウラン (UO₂) 粉末密度 4.5g/cm³, 含水率 5.0wt%, 中性子減速材 8 体分喪失, 空際中の水密度 0g/cm³, 外容器面間距離 0mm において中性子実効増倍率の標準偏差の 3 倍を加えた最大値 0.748 が算出される。

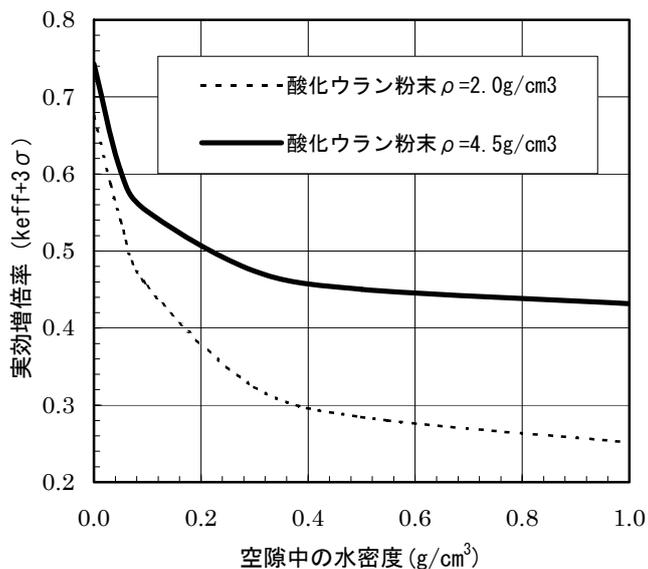


図 5.5-10 酸化ウラン粉末密度をパラメータとした配列系臨界計算結果
(含水率 5%, 中性子減速材焼失無し, 外容器面間距離 0mm)

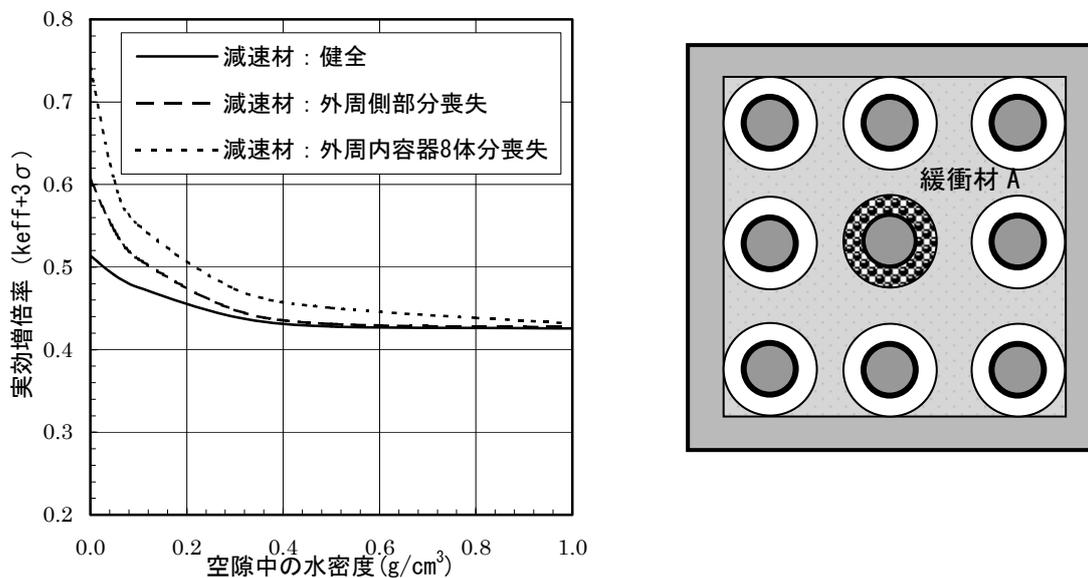


図 5.5-11 火災時熱影響による中性子減速材焼失程度をパラメータとした配列系の臨界計算結果 (酸化ウラン粉末密度 4.5 g/cm^3 , 含水率 5wt%, 外容器面間距離 0mm)

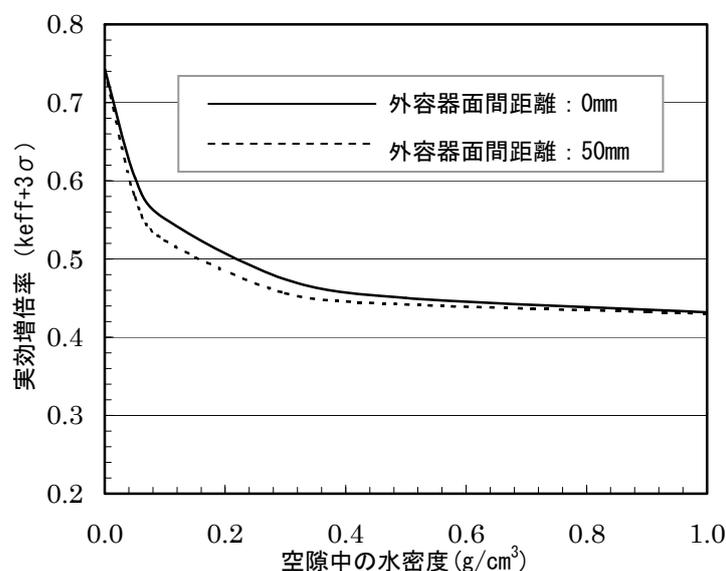


図 5.5-12 外容器面間距離をパラメータとした配列系の臨界計算結果
(UO_2 粉末密度 4.5g/cm^3 , 含水率 5wt%, 中性子減速材焼失無し)

5.5.4 臨界安全性解析結果の評価

NPC 型輸送物は輸送容器内を緩衝材で充填させた設計であるため、落下衝撃より火災の熱による影響が輸送物の臨界安全評価上重要となる。すなわち、中性子吸収材は周囲にある厚い緩衝材により守られているため、落下衝撃による影響は無いものと考えてよいが、中性子減速材に関しては耐熱温度を超えた火災時の熱的影響による部分喪失が考えられる。この中性子減速材の焼失より輸送物は臨界安全の観点から非安全側の状態となる。

落下事故シナリオについては、5.2 節に述べた構造解析結果を超える外容器および内容器の変形、さらに内容器内水浸入無しを前提条件とした臨界解析を行い、最大の中性子実効増倍率として、 UO_2 粉末密度 4.5g/cm^3 , 含水率 5.0wt%, 内容器中心間距離 259mm, 空隙中の水密度 0g/cm^3 の配列系臨界計算において、標準偏差の 3 倍を加えた 0.469 が得られ、臨界安全基準値の 0.95 以下であるため未臨界性が維持できる。

火災事故シナリオについて、5.3 節および 5.4 節に述べた熱解析結果を超える断熱材・緩衝材の焼失、さらに内容器内水浸入無しを前提条件とした臨界解析を行い、最大の中性子実効増倍率として、 UO_2 粉末密度 4.5g/cm^3 , 含水率 5.0wt%, 中性子減速材 8 体分喪失, 空隙中の水密度 0g/cm^3 , 外容器面間距離 0mm の配列系臨界計算において、標準偏差の 3 倍を加えた 0.748 が得られ、臨界安全基準値の 0.95 以下であるため未臨界性が維持できる。

以上述べたように、第 3 章で設定した苛酷事故シナリオに対する落下衝撃解析および熱安全性解析結果に基づく臨界解析を行い、いずれの事故条件に対しても十分な安全裕度を持った未臨界性が確保されることを確認した。

5章 参考文献

- 1) U.S. Nuclear Regulatory Commission: Safety Analysis Report of the Global Nuclear Fuel (GNF) New Powder Container, Model No. NPC (Patent #6, 166,391), Revision 2, January 2001, Docket 71-9294.
- 2) 伝熱工学資料改訂第4版, 社団法人日本機械学会.
- 3) 渡部直人, 高野裕: 放射性物質輸送の確率論的安全評価(その2) - 輸送 PSA の概念構築とリスクカーブ作成, 電力中央研究所報告 U97008(1997).
- 4) 鋼構造耐火設計指針, 社団法人日本建築学会.
- 5) 1999 ANNUAL BOOK of ASTM STANDARDS, volume 12.01 Nuclear Energy(1).
- 6) 臨界安全ハンドブック第2版, JAERI 1340, 日本原子力研究所燃料施設安全性研究委員会臨界安全性専門部会臨界安全性実験データ検討ワーキンググループ (1999).
- 7) 理科年表 1999年版, 丸善, IUPAC 原子量および同位体存在委員会, Pure and Applied Chemistry 70(1998), p.217.
- 8) 核データセンターホームページ (http://www.ndc.tokai.jaeri.go.jp/NuC/index_J.html).
- 9) H.R.Dyer, C.V.Parks, "Recommendations for Preparing the Criticality Safety Evaluation of Transportation Packages," NUREG/CR-5661, ORNL/TM-11936, (1997).
- 10) JIS ハンドブック, 日本規格協会(1995).

6. PWR新燃料集合体輸送物の安全性解析

6.1 輸送物の概要と安全性評価基準

6.1.1 NFI-V型輸送物の概要

NFI-V型輸送物は、上側ケース、下側ケースおよび内部構造物から構成される輸送容器と、内部構造物として、中性子吸収材の支持板（サポートプレート）により支持される2体の燃料集合体を保持するストロングバック、ストロングバックを支えるショックマウントフレームおよびショックマウントフレームを弾性的に支持するショックマウントから構成されている。輸送容器の概略を図6.1-1および図6.1-2に示す。

上側ケースおよび下側ケースは外筒と内筒の二重構造からなり外筒と内筒間の断熱材部分にはリブを入れて補強されている。上側ケース上部にはクレーンにより移動する際に用いるスタッキングブラケットが、両端部にはステンレス鋼製パイプを層状に構成した緩衝体が内部に取付けられている。上側ケースと下側ケースは、フランジにガスケットを介してロッドボルトによって固定され、密閉される。

ストロングバックはT溝バーおよび角型鋼材を溶接して製作したスケルトンに中性子吸収材がねじで固定され、燃料集合体固縛用の弓型クランプが取付けられたものであり、チャンネルを角型に組み溶接の上製作されたショックマウントフレームにボルトで固定されている。その両端には収納物である燃料集合体の前後方向の移動を防止するため上部ゲートおよび下部ゲートが取付けられている。

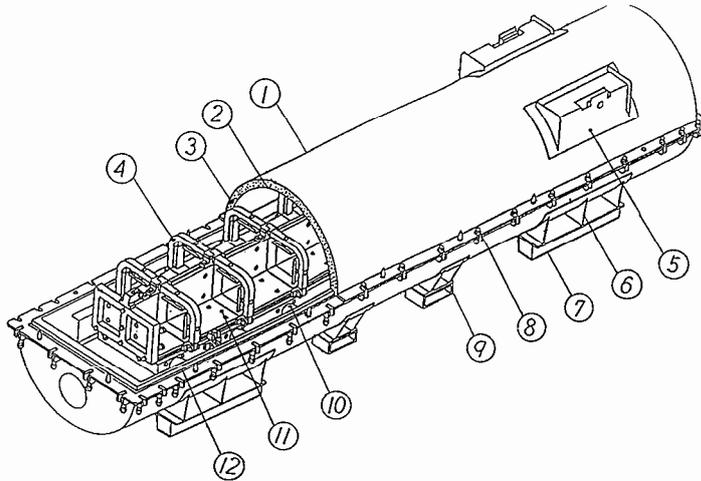
弓型クランプはT溝バーにT溝ボルトを介して固定されているため、このボルトを緩めることで、燃料集合体の支持格子位置に合わせて移動することができる。これらの部材は、ブチルゴム製のショックマウントにより下側ケースに懸架される。

主要項目は以下のとおりである。

- a) 収納物 未照射の最大濃縮度 5.0%の二酸化ウラン（ガドリニア入りを含む）燃料集合体
- b) 輸送物の種類 A型核分裂性輸送物
- c) 輸送指数 1.0
- d) 輸送制限個数 無限個
- e) 輸送物の最大総重量 3800kg以下
- f) 収納物の最大総重量 約1090kg-UO₂
- g) 輸送容器の外寸法（長さ×幅×高さ）約5.18m×約1.12m×約1.14m
- h) 輸送容器の主要材質

上側／下側ケース、ストロングバック、ショックマウントフレーム（以上ステンレス鋼）
断熱材（セラミックファイバー）、ショックマウント、ガスケット（以上合成ゴム）

解析用モデルは、NFI-V型輸送物の安全解析書に基づき可能な限り模擬するものとする。



名称	材質
① 外筒	SUS304
② 内筒	SUS304
③ 断熱材	セラミックファイバー
④ 弓型クランプ	SUS304(角パイプ)
⑤ スタッキングブラケット	SUS304
⑥ 脚	SUS304
⑦ スキッド	ウレタンゴム
⑧ ロッドボルト	クロムモリブデン鋼 (ナットはSUS310S)
⑨ リフトガイド	SUS304
⑩ ショックマウント	ブチルゴム
⑪ サポートプレート	SUS304(吸収材入)
⑫ ガasket	シリコンゴム

図 6.1-1 輸送容器概観図

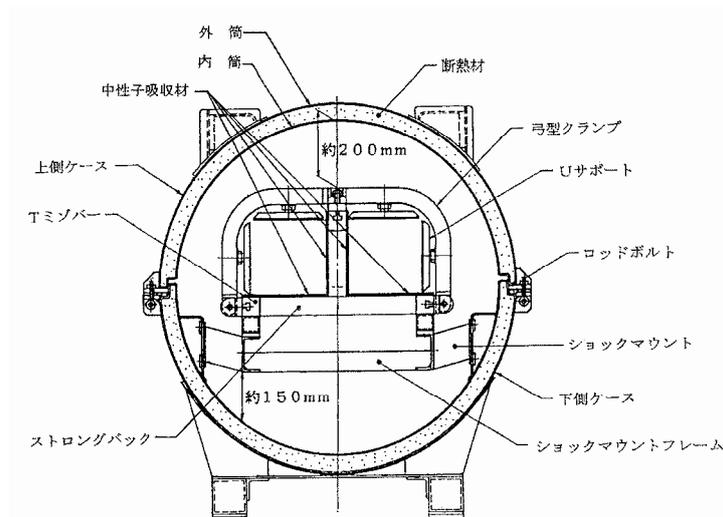


図 6.1-2 輸送容器断面図

6.1.2 安全性評価基準とその確認方法

第1章序言で述べたように、当該輸送物はA型核分裂性輸送物として規則に定められた「一般の試験条件」および引き続いた「特別の試験条件」の後において臨界に達しないことが要求される。また、当該輸送物は未照射の UO_2 燃料集合体を収納するため、燃料被覆管の密封機能確保は規則の安全上の要求事項ではないが、密封機能が維持されるように設計されている。従って、本輸送物は、これらの規則・設計の要件を満たして製作される限り、輸送中の事故条件に対しても密封性あるいは未臨界性が確保されるものと考えられるが、本章では、第3章で策定した苛酷事故シナリオによる落下衝撃あるいは熱安全性に係る解析を行い、その結果を用いて表6.1-1に掲げる評価事項を満足することを確認する。すなわち、落下衝撃による燃料集合体、輸送容器本体、内部構造物の変形が許容範囲にあり、また、火災時の熱的影響による被覆管の温度上昇が許容温度以下にあることを、解析結果と関連文献記載値を比較して確認する。さらに、落下衝撃による構造部材の変形等、また火災時の熱的影響による部材焼失等を考慮した臨界安全性解析を行い、輸送物の孤立系あるいは配列系のいずれの配置においても中性子増倍率が一般に受け入れられている基準値の0.95以下であり、未臨界性を維持できることを示す。

なお、輸送物に対する落下衝撃解析あるいは熱安全性解析のモデルおよび解析方法の妥当性、ならびに解析精度は、当該輸送容器の安全解析書に記載された「特別の試験条件」における原型試験結果と解析結果を比較し、解析結果が原型試験を概略再現していることにより確認することとする。

表 6.1-1 NFI-V型輸送物の事故時に適合すべき要件および評価基準

適合すべき要件	評価基準	確認方法
閉じ込め性	・燃料棒被覆管が破損しないこと。	・落下衝撃解析により輸送容器内部構造材が著しく破断せず、燃料集合体保持機能が維持されること。 ・熱安全性解析により、被覆管表面温度が570℃以下であること*。
未臨界性	・集合体、ストロングバック等の構造材および中性子吸収材等の形状が、臨界となるモデル形状を逸脱しないこと。	燃料集合体、輸送容器、構造材、中性子吸収材等について、落下衝撃解析による最大変形を包絡する解析モデルで評価し、中性子増倍率が0.95未満であること。

*：新燃料輸送容器の安全性実証試験¹⁾における、ヘリウムリークテストの結果から570℃以下での燃料棒の健全性の確認が報告されている。

6.2 高架道よりの落下事故に係る落下衝撃解析

6.2.1 解析モデルおよび解析方法

6.2.1.1 解析モデル

(1) 解析の構成

本解析は、輸送物と衝撃面をそれぞれ3次元でモデル化し、図6.2-1から図6.2-3に示すような18m高さからの燃料集合体の下部ノズル側を下側とした垂直落下、上側ケースを下側とした水平落下、および輸送容器のフランジ部を直撃するコーナー落下の3種類を解析モデルとして設定した。なお、衝撃面と輸送物の間ではリバウンドを可能とした。

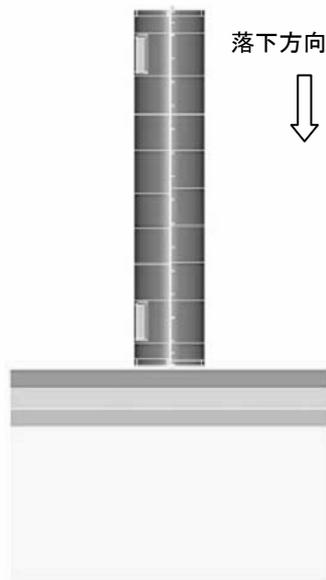


図 6.2-1 垂直落下

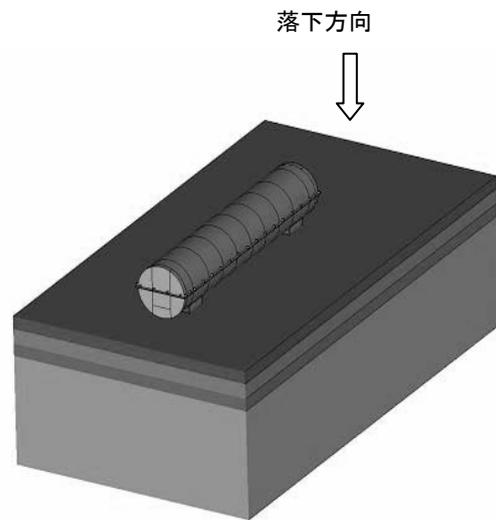


図 6.2-2 水平落下

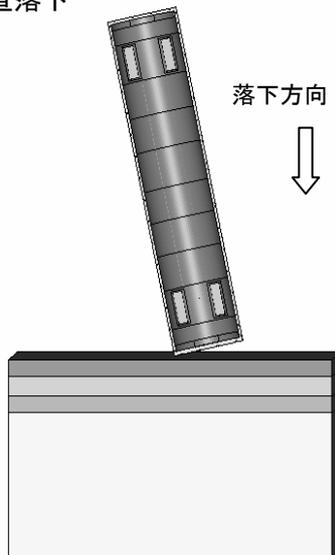


図 6.2-3 コーナー落下

(2) 輸送物のモデル化

上側ケースおよび下側ケースのモデル化に当たっては、溶接部を含めたこれらの構造を、シェル要素にて模擬する。また、外筒と内筒の中空部にある断熱材は強度部材としては無視する。モデルの概要を図 6.2-4 に示す。

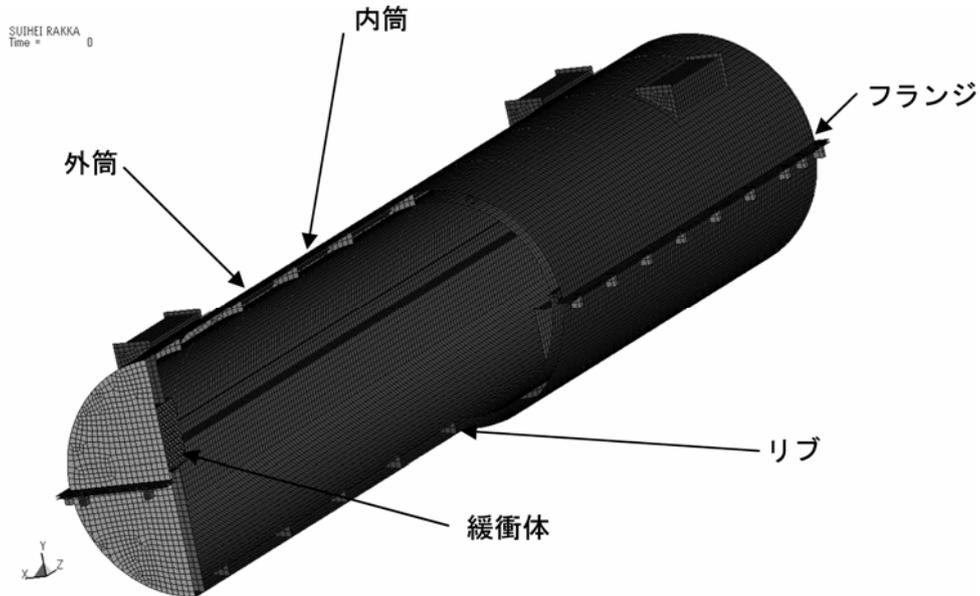


図 6.2-4 NFI-V 型輸送物の輸送容器上側ケースおよび下側ケースの解析モデル

内部構造物は、図 6.2-5 に示すように、溶接部および固定用ボルトを含めて、中実部材についてはソリッド要素、中空部材についてはシェル要素でモデル化する。2 体の燃料集合体のそれぞれについては、最大重量の 17×17 薄肉型が収納されているとする。また、垂直ならびにコーナー落下衝撃解析では、17×17 燃料集合体全体の長手方向の剛性が等価となるようソリッド要素でモデル化し、水平落下衝撃解析では 17×17 燃料集合体全体の断面方向の曲げ剛性が等価となるようソリッド要素でモデル化する。このようにして、輸送物全体の落下衝撃解析にあつては、輸送物にかかる荷重のみでなく、燃料集合体のたわみ等による輸送容器内面と燃料集合体間の衝撃の応答も模擬できるようにする。

(3) 衝撃面のモデル化

NFI-V 型輸送物の落下衝撃面については、第 4 章の濃縮六ふつ化ウラン輸送物の落下衝撃解析において述べたものと同様に、コンクリート舗装およびアスファルト舗装をモデル化した。

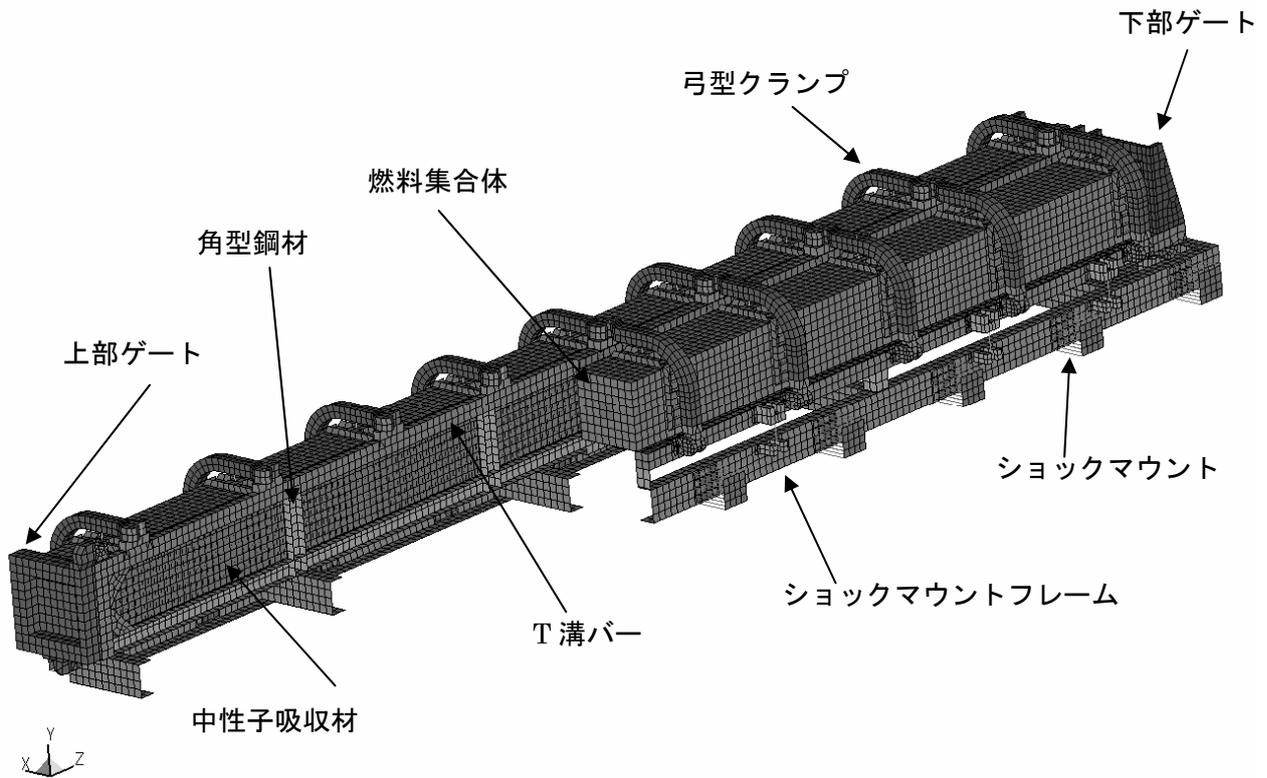


図 6.2-5 NFI-V 型輸送物の輸送容器(内部構造物および収納物)の概要

6.2.1.2 解析手法と解析条件

(1) 解析コード

解析には、第 3 章で述べたように、有限要素法衝撃解析コード LS-DYNA Ver.960 を使用した。

(2) 材料データ

輸送容器のステンレス鋼，衝撃面であるアスファルトおよびコンクリート舗装面の物性値は、第 4 章と同様に表 4.2-1，表 4.2-2 および表 4.2-3 に示す値を用いた。

(3) 要素分割

輸送物についての要素分割を図 6.2-6 から図 6.2-9 に示す。輸送物の有限要素モデルの要素数は 130519，節点数は 153079 である。

コンクリートおよびアスファルト舗装面の寸法およびその有限要素分割は、第 4 章で述べたものと同様にした。

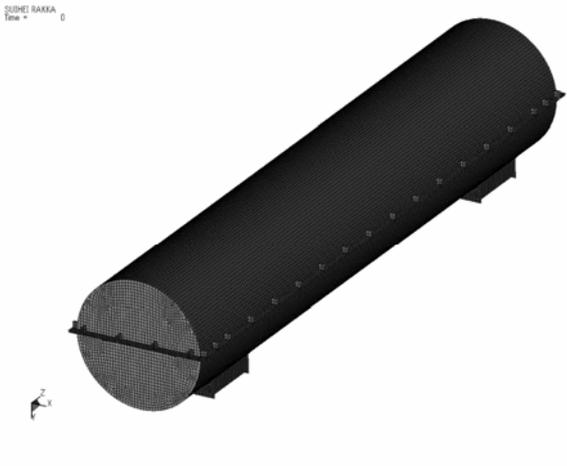


図 6.2-6 輸送物概観有限要素分割

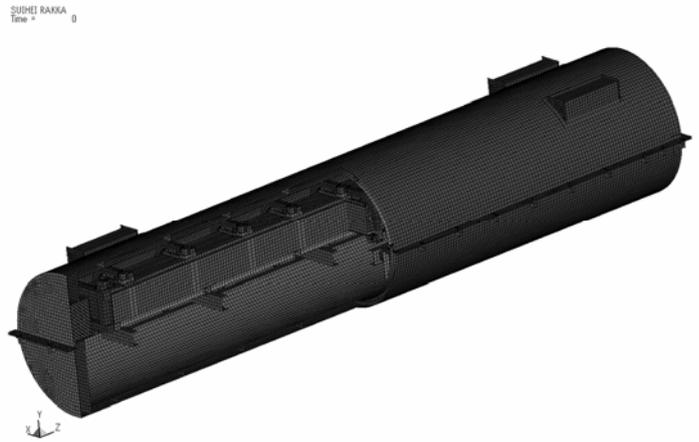


図 6.2-7 一部断面有限要素分割

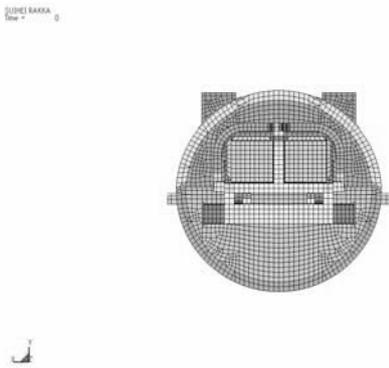


図 6.2-8 輸送物横断面要素分割

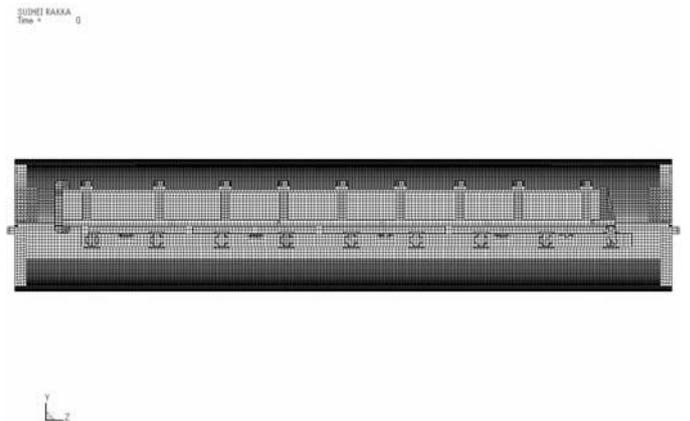


図 6.2-9 輸送物縦断面要素分割

(4) その他の計算条件の設定

解析では、輸送物を構成する全ての節点に 18m 落下高さから定まる衝突時速度を与えた。輸送物の重量は安全解析書のそれと一致させた。また、全ての接触面で摩擦係数として同種金属間の一般的な値である 0.3 を仮定した。

なお、上記の解析モデルおよび解析方法の妥当性については、安全解析書に記載の「特別の試験条件」による 9m から非降伏面への落下試験結果と、同一条件での衝撃解析結果を比較することにより解析精度を確認した。

6.2.2 解析結果およびその評価

6.2.2.1 舗装面への落下衝撃解析

ここでは、コンクリート舗装面への落下解析を行った結果について述べる。アスファルト舗装面への落下解析についても同様な結果が得られている。

(イ) 垂直落下に対する解析結果

(1) 輸送容器の変形

NFI-V 型輸送物の燃料集合体の下部ノズル側を下側とする垂直落下時の解析結果における変形挙動を図 6.2-10 に示す。また、輸送容器の長手方向変形の時間変化を図 6.2-11 に示す。図 6.2-11 では、図中 A, B, C, D, a, および b の各位置における NFI-V 型輸送物の輸送容器の長手方向の変形量の時間変化を示しており、+側が拡張、一側が収縮となっている。この結果、コンクリート舗装面への垂直落下時には輸送容器の径方向中心部 (a および b) では最終的には 5mm 程度の拡張側の塑性変形となり、外周部 (A, B, C, および D) では殆ど塑性変形しない結果となった。

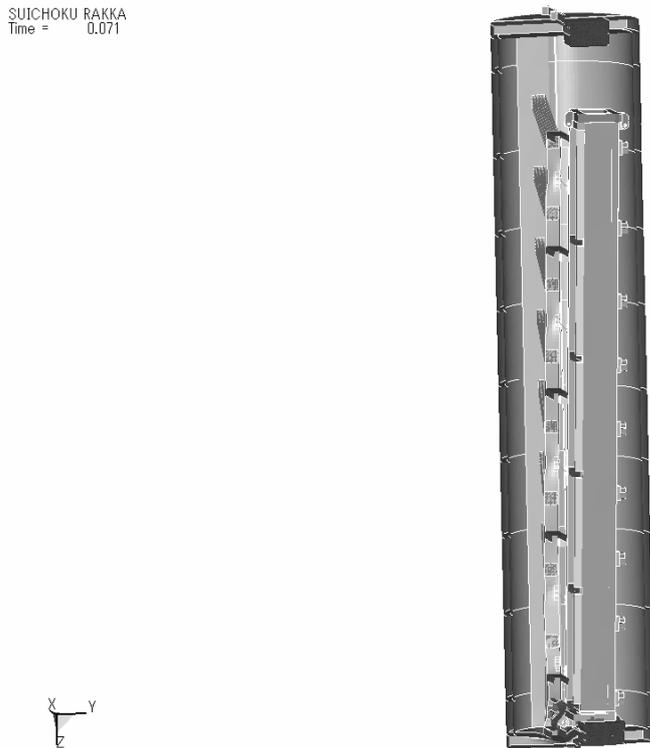


図 6.2-10 垂直落下時の輸送物変形挙動

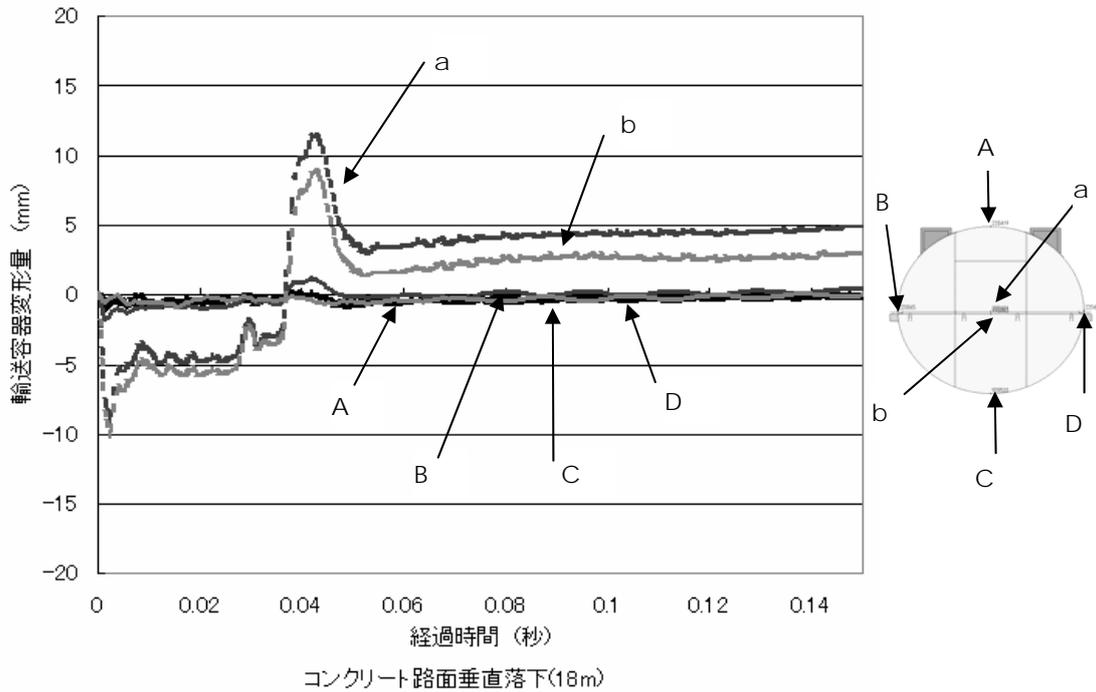


図 6.2-11 垂直落下時の輸送容器長手方向相対変形量
(拡張する変形を+側，収縮する変形を-側とする)

これから，基本的に輸送物の落下衝撃はコンクリート舗装面により吸収されているものと考えられ，9m 高さから非降伏面への落下時に見られるような輸送容器の全長に亘っての変形はないものと思われる。ただし，輸送容器の落下面の変形挙動に着目すると，径方向中心部と外周部で剛性に差があり，径方向中心部は外周部に比べて剛性が低い（外周部では，輸送容器円筒部による支持が期待できる）ことから，

- ・ 落下直後はコンクリート舗装面の抵抗を受ける形で径方向中心部には，外周部に比べて大きな収縮側の変形が起こった。
- ・ 内部構造物が輸送容器端面に衝突した際に，輸送容器端面では落下衝撃エネルギーを吸収し切れないで，拡張する側に変形したが，このときの変形量は，径方向中心部と外周部の剛性の差に応じて，径方向中心部の拡張変形量が外周部の拡張変形量に比べて大きくなった。

輸送容器に発生する相当塑性ひずみの分布の解析結果によると、5%を上回る相当塑性ひずみは、落下時にコンクリート舗装面を直撃する輸送容器外筒の端面およびフランジ部、ならびに内部構造物が直撃する内筒の端面部分に集中して発生している。次に、5%を上回る相当塑性ひずみが発生している落下面側に着目すると、10%を超えるような相当塑性ひずみは主として内部構造物が直撃する輸送容器端面の内筒側において発生しており、外筒側ではフランジ部のコーナーに近い部分にのみ発生しており、最大相当塑性ひずみは、下側ケース端面にある外筒と内筒の間のリブにおいて約 30%であった。これらは、ステンレス鋼の破断ひずみ (40%) を下回っており、外筒およびフランジ部の破断等は生じないものと考えられる。

次に、輸送容器の上側ケースと下側ケースはロッドボルトにより結合されており、ロッドボルトの破断の可能性について評価するため、衝撃落下時に発生する応力について確認した。その結果、ロッドボルトの応力は引張応力が支配的となり、引張応力の計算結果を図 6.2-12 に示す。これにより、ロッドボルトには最大で 0.15MPa 程度の応力が発生しており、SCM432 鋼の引張強さ 932MPa に比べ十分に小さいことから、ロッドボルトが破断する可能性はないものと考えられる。

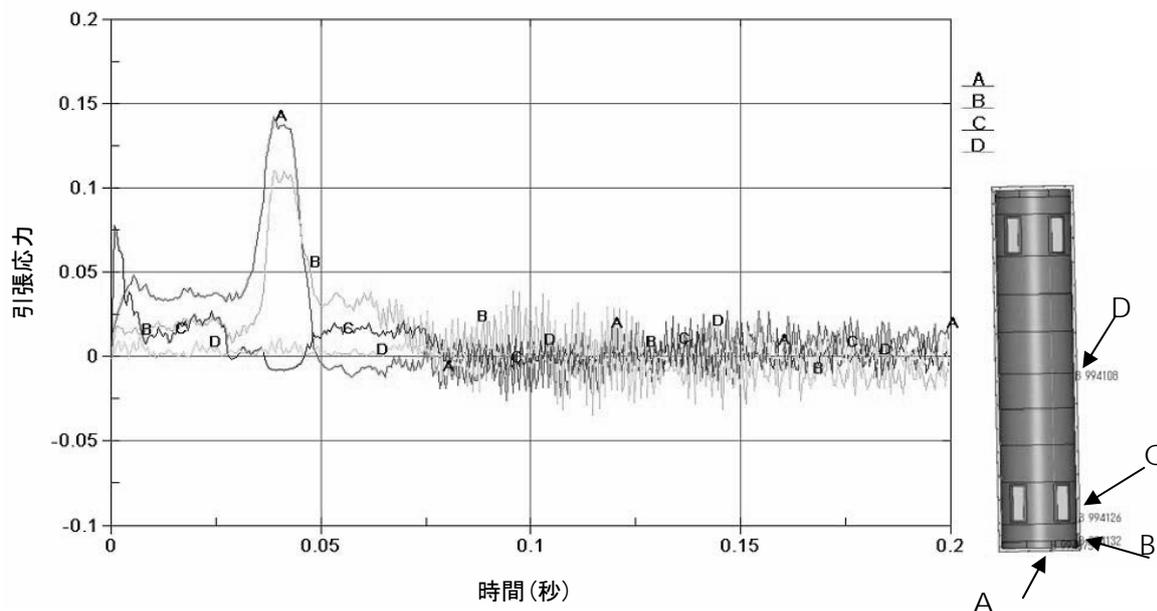


図 6.2-12 垂直落下時のロッドボルトに発生する引張応力

(2) 燃料集合体に発生する加速度

燃料集合体に発生する加速度を図 6.2-13 に示すように、収納物である燃料集合体の加速度は最大でも 89G (B 部) となった。従って、輸送物安全解析書に記載されている、9m 垂直落下試験結果(200G)に比べて十分に小さく、苛酷事故として想定した 18m 高さからのコンクリート舗装面への垂直落下では、燃料集合体に与える影響は小さいものと考えられる。

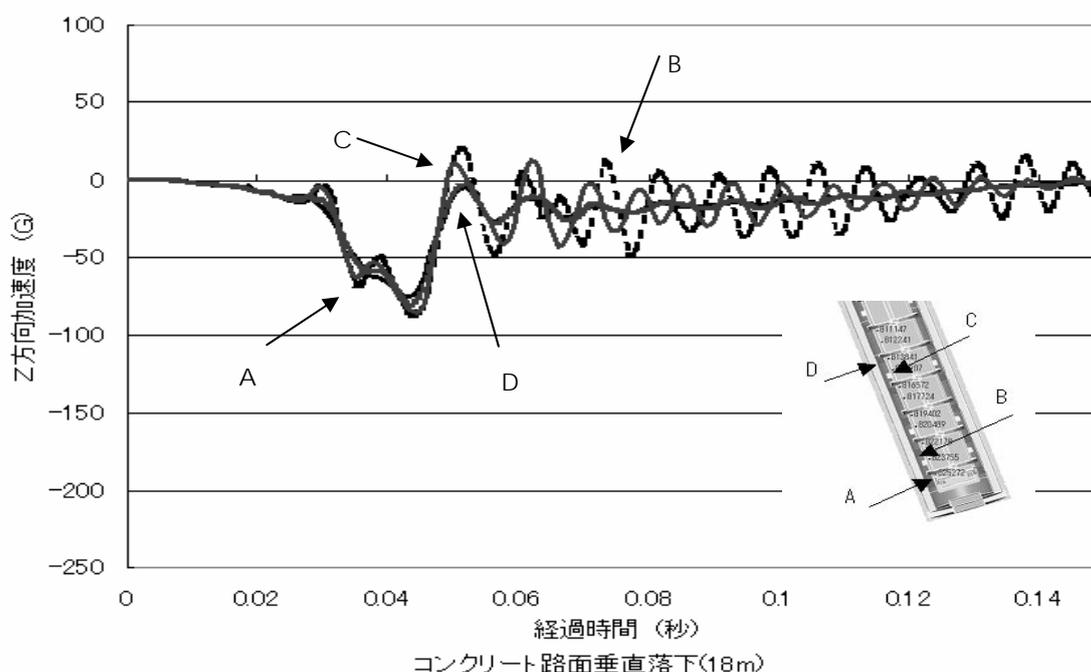


図 6.2-13 垂直落下時の燃料集合体に発生する加速度時間変化

(3) 燃料集合体保持機構の健全性

ショックマウントフレームとストロングバックおよび弓型クランプに発生する相当塑性ひずみの分布を解析結果から調べると、ショックマウントフレームには最大 31%の相当塑性ひずみが生じ、ストロングバックでは最大 18%の相当塑性ひずみが生じる。これらは、いずれもステンレス鋼の相当破断ひずみ (40%) を下回っており、コンクリート舗装面への 18m 垂直落下時に破断等の可能性はないものと考えられる。また、弓型クランプに発生する相当塑性ひずみは、高々0.3%程度となり、燃料集合体保持機構が喪失する可能性はないものと判断される。また、ストロングバックの上部および下部ゲートに発生する相当塑性ひずみも 3%を超えることはなく、中性子吸収材がストロングバックから離脱する可能性もないものと判断される。

(ロ) 水平落下に対する解析結果

(1) 輸送容器の変形

NFI-V 型輸送物の水平落下時の解析による変形挙動を図 6.2-14 に示す。

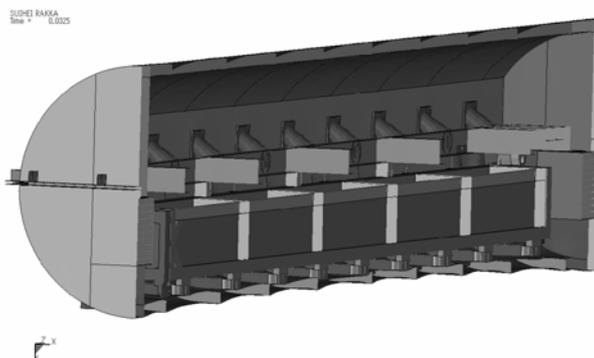
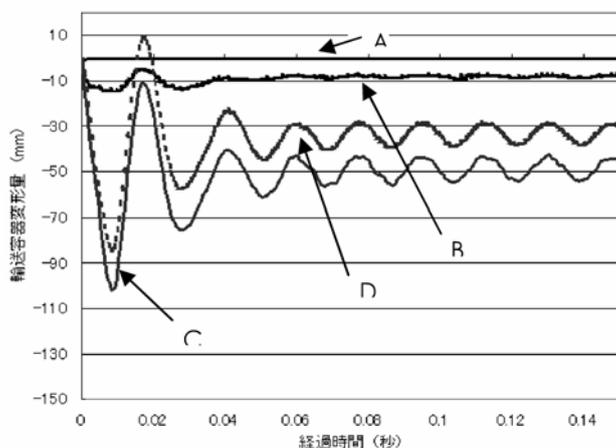


図 6.2-14 水平落下時の輸送物の変形挙動

輸送容器の径方向変形の解析による時間変化を図 6.2-15 に示す。この結果、水平落下時には、輸送容器の長手方向中央部 (C 部) では、落下直後には衝撃により最大約 100mm の収縮側変形となり、最終的には 50mm 程度の収縮側の塑性変形となる。また、輸送容器端部 (A 部) は、殆ど塑性変形しない。



(拡張する変形を+側, 収縮する変形を-側とする)

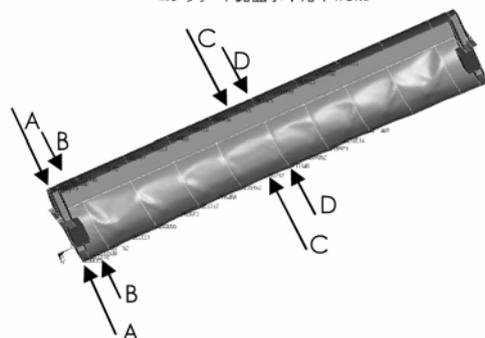


図 6.2-15 水平落下時の輸送容器の径方向相対変形量

これから、輸送容器長手方向中央部では、落下衝撃により輸送容器の落下面となる上側ケースが収縮する方向に変形するが、その後、内部構造物の落下に伴い輸送容器の非落下面側となる下側ケースが膨らむことで相対的に拡張側の変形となる。ただし、下側ケースの変形は弾性変形の範囲内であり、最終的には上側ケースの収縮側の変形が輸送容器長手方向中央部における塑性変形量となる。また、輸送容器端面部においては剛性が高いため、落下衝撃を受けても変形はしないと考えられる。

輸送容器に発生する相当塑性ひずみの分布の解析結果によると、コンクリート舗装面への水平落下時に輸送容器の外筒では 10%程度、フランジ部では 2%程度の相当塑性ひずみが発生しており、これらの値はステンレス鋼の相当破断ひずみ 40%にくらべ小さいことから、水平落下時の衝突面となる上側ケース外筒およびフランジ部が破断する可能性はないものと考えられる。

また、輸送容器の上側ケースと下側ケースはロッドボルトにより結合されており、図 6.2-16 の解析結果に示すように、ロッドボルトの最大の引張応力は 0.15MPa を上回らず、SCM432 鋼の引張強さ 932MPa に比べ十分に小さいことから、ロッドボルトが破断に至る可能性はないものと考えられる。

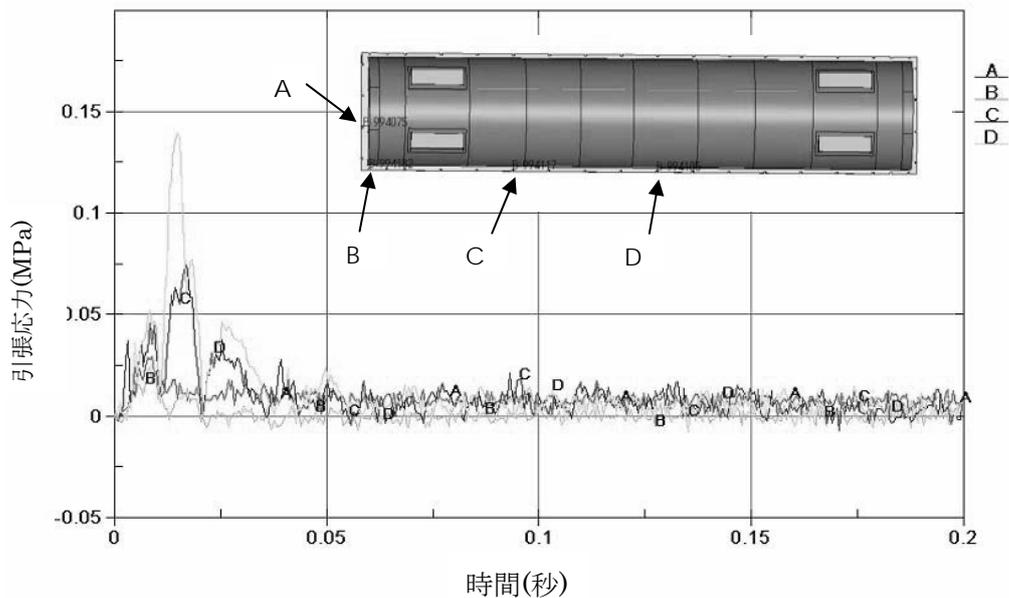


図 6.2-16 水平落下時によるロッドボルトに発生する引張応力

以上により、コンクリート舗装面への 18m 高さからの水平落下解析では、外筒もしくは上側ケースと下側ケースの接合部に開口部が生じることはないものと考えられる。

(2) 燃料集合体の変位および加速度

収納物である燃料集合体の変位の状態を図 6.2-17 に示す。燃料集合体は落下時に中性子吸収材を保持しているストロングバックから離れる方向に変位するが、落下時の衝撃を受けても弓型クランプが破断することなく、燃料集合体と中性子吸収材との距離は、最大でも 2mm 程度であることがわかる。

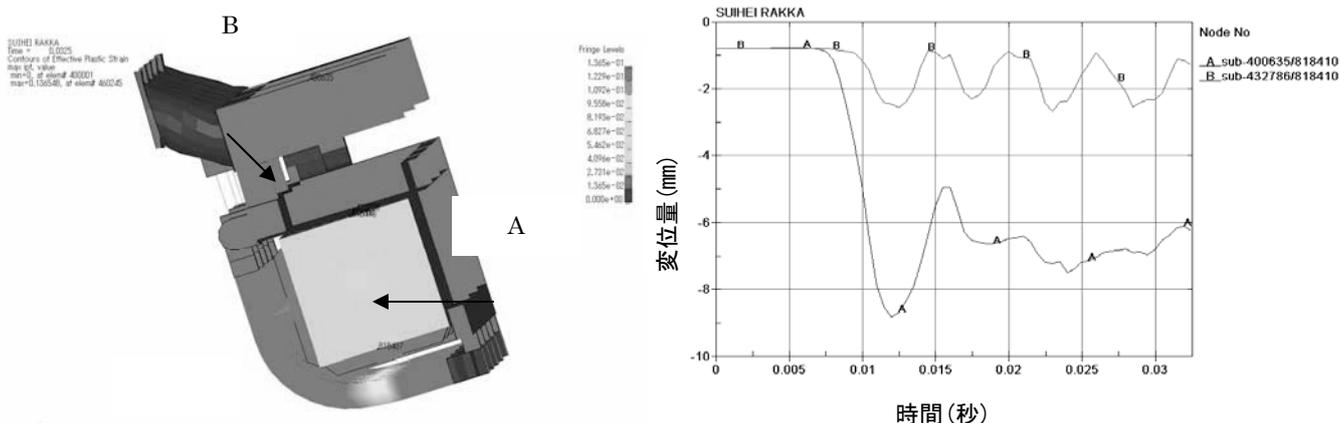


図 6.2-17 水平落下時の燃料集合体の変位挙動

燃料集合体に発生する加速度の時間変化を図 6.2-18 に示す。この結果、燃料集合体の加速度は最大でも 206G (A 部) 程度であり、安全解析書に記載されている原型試験で発生する加速度と同等であることから、18m 高さからのコンクリート舗装面への水平落下にあっても、過大な加速度が燃料集合体に発生し、損傷する可能性はないといえる。

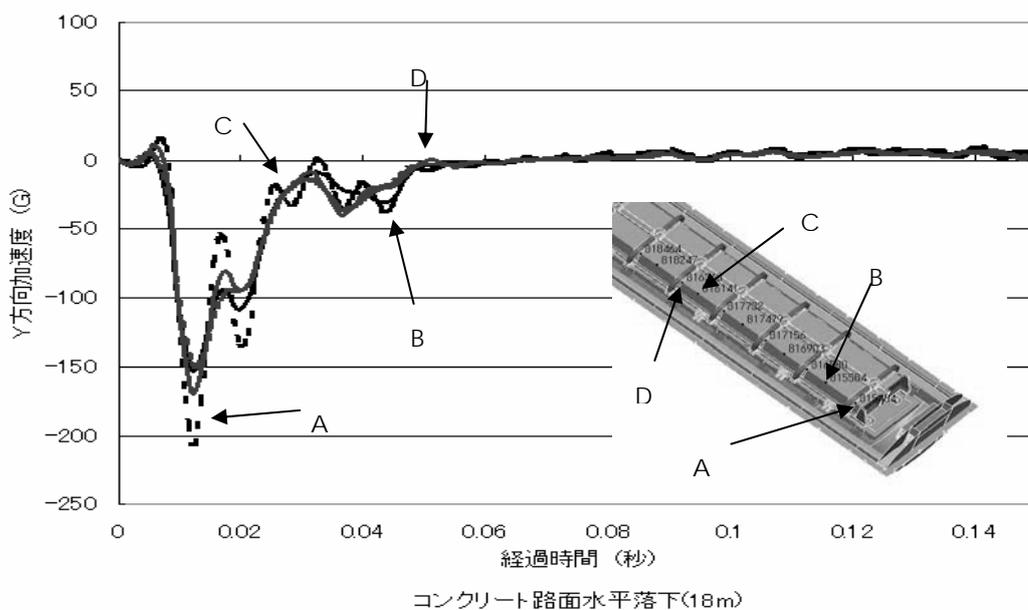


図 6.2-18 水平落下時の燃料集合体に発生する加速度時間変化

(3) 燃料集合体保持機構の健全性

ショックマウントフレームとストロングバックに発生する相当塑性ひずみの分布の解析結果によると、ショックマウントフレームには最大 29%の相当塑性ひずみが生じ、ストロングバックでは最大 7%の相当塑性ひずみが生じている。これらの値は、いずれもステンレス鋼の相当破断ひずみ（40%）を下回っており、コンクリート舗装面への 18m 水平落下時に破断等の可能性はないものと考えられる。また、弓型クランプに発生する相当塑性ひずみは、U サポートの支持部近傍で 7%程度となり、燃料集合体保持機構が喪失する可能性はないものと判断される。また、ストロングバックの上部および下部ゲートに発生する相当塑性ひずみは 0.3%を超えることはなく、中性子吸収材がストロングバックから離脱する可能性もないものと判断される。

(ハ) コーナー落下に対する解析結果

コーナー落下の方向としては、フランジがコンクリート地盤に直撃するようにし、接地点の鉛直上に輸送物の重心が来るものとした。

(1) 輸送容器の変形

コーナー落下時における NFI-V 型輸送物の変形挙動を図 6.2-19 に示す。



図 6.2-19 コーナー落下時の輸送容器の変形挙動

輸送容器の長手方向変形の時間変化を図 6.2-20 に示す。

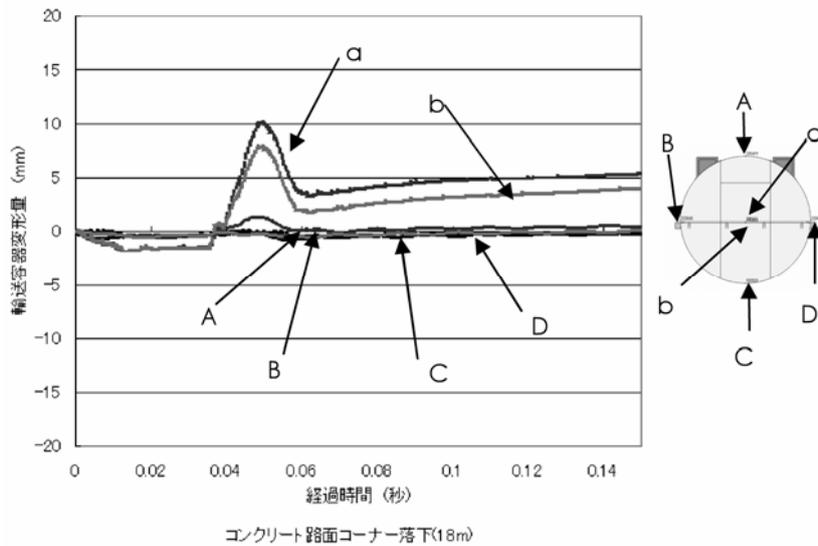


図 6.2-20 コーナー落下時の輸送容器の長手方向相対変形量
(拡張する変形を+側，収縮する変形を-側とする)

この結果から、コンクリート舗装面へのコーナー落下時には垂直落下時と同様に輸送容器の径方向中心部（a および b 部）では最終的には 5mm 程度の拡張側の塑性変形となり、外周部（A, B, C, および D 部）では殆ど塑性変形していない。

輸送容器に発生する相当塑性ひずみの分布の解析結果によれば、5%を上回る相当塑性ひずみは、落下時にコンクリート舗装面を直撃する輸送容器外筒の端面およびフランジ部並びに内部構造物が直撃する内筒の端面部分に集中して発生している。当該部分の相当塑性ひずみの分布について確認すると、10%を超えるような相当塑性ひずみは主として内部構造物が直撃する輸送容器端面の内筒側において発生しており、外筒側では発生していない。最大相当塑性ひずみは内部構造物の直撃を受ける緩衝体の端部で 49%であった。

以上により、コンクリート舗装面へのコーナー落下時に輸送容器外筒およびフランジ部には最大でも 4%を超えない程度の相当塑性ひずみしか発生していないことから、コーナー落下時に外筒に破断による開口部が生じることはないものと考えられる。

また、輸送容器の上側ケースと下側ケースはロッドボルトにより結合されており、ロッドボルトの破断の可能性について評価するため、衝撃落下時に発生する応力について確認すると、ロッドボルトの応力は引張応力が支配的となり、図 6.2-21 に示す引張応力の計算結果をみると、ロッドボルトには最大でも 0.15MPa を上回ることはなく、SCM432 鋼の引張強さ 932MPa に比べ十分に小さいことから、ロッドボルトが破断に至る可能性はないものと考えられる。

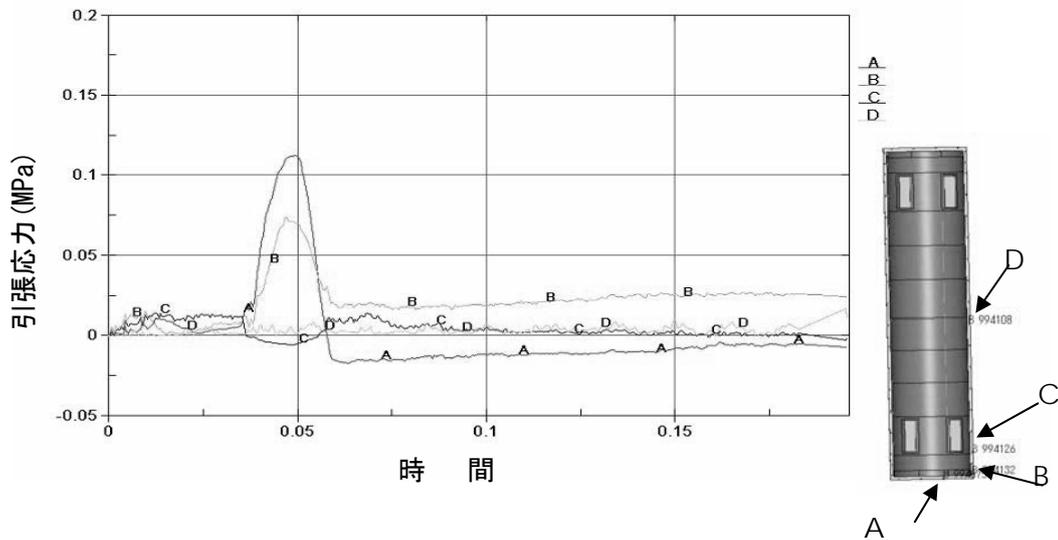


図 6.2-21 コーナー落下時のロッドボルトの引張応力

(2) 燃料集合体の変位および加速度

収納物である燃料集合体に発生する加速度を図 6.2-22 に示す。これによれば、燃料集合体の加速度は最大でも Y 方向で 89G(B), Z 方向で 78G(B)となり、過大な加速度により燃料集合体が損傷する可能性はないといえる。

(3) 燃料集合体保持機構の健全性

ショックマウントフレームとストロングバックおよび弓型クランプに発生する相当塑性ひずみの分布の解析結果によると、ショックマウントフレームには最大 47%の相当塑性ひずみが生じ、ストロングバックでは最大 21%の相当塑性ひずみが生じる。ショックマウントフレームではステンレス鋼の相当破断ひずみ(40%)を上回っており、コンクリート舗装面への 18m コーナー落下時に破断等の可能性がある。一方、ストロングバックではステンレス鋼の相当破断ひずみを下回っており、破断の可能性はないものと考えられる。また、弓型クランプに発生する相当塑性ひずみは高々3%程度となり燃料集合体保持機構が損傷を受けることはない判断される。また、ストロングバックの上部および下部ゲートに発生する相当塑性ひずみも 3%を超えることはなく、中性子吸収材がストロングバックから離脱する可能性もないものと判断される。

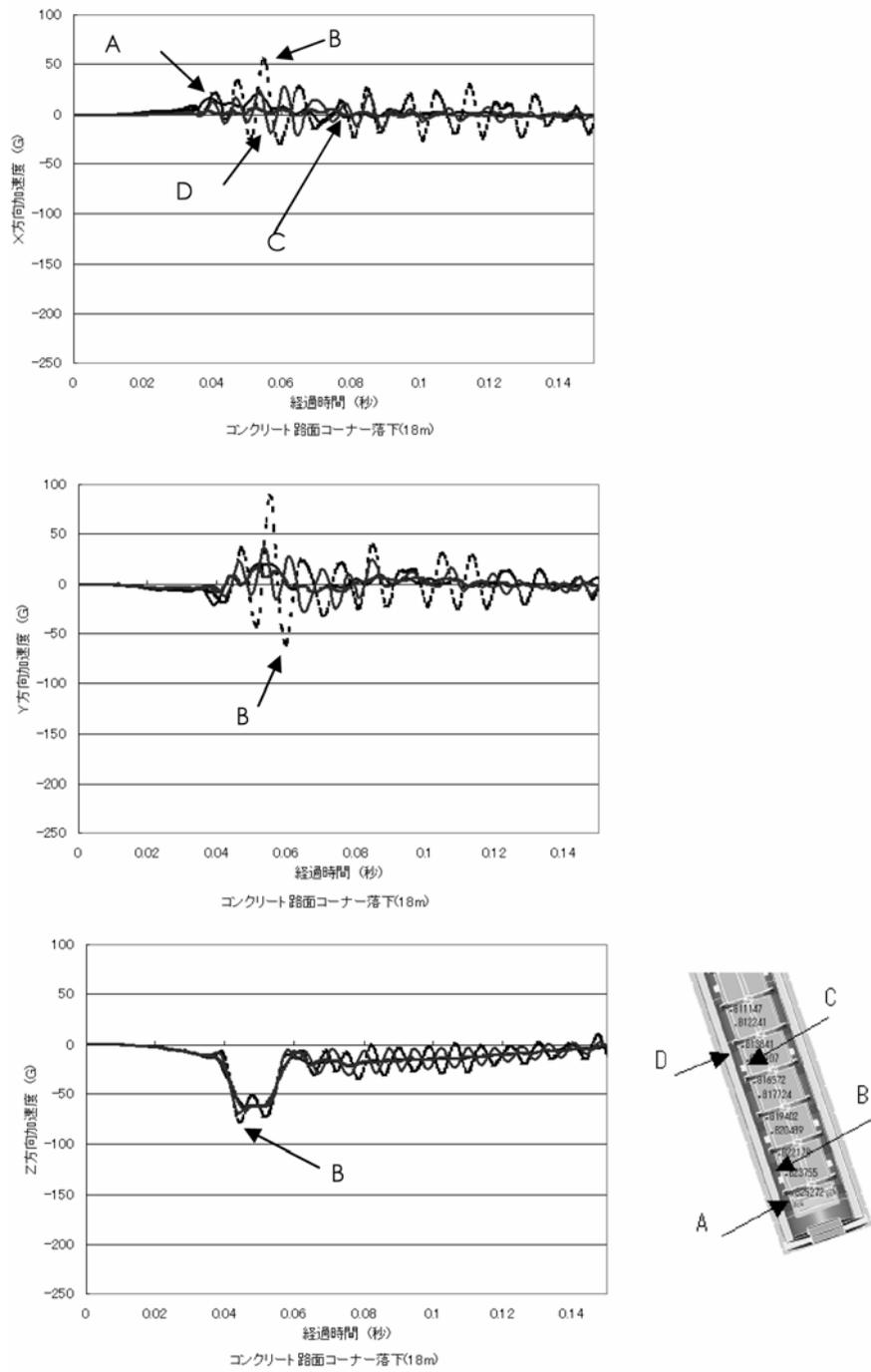


図 6.2-22 コーナー落下時の燃料集合体に発生する加速度時間変化

6.2.3 解析結果の評価

18m からの苛酷事故を想定したコンクリートおよびアスファルト舗装面への落下衝撃解析の結果をまとめて表 6.2-1 および表 6.2-2 に示す。

これらを以下に集約する。

- 垂直落下あるいはコーナー落下時には、外周部には殆ど塑性変形が認められないが、比較的剛性が低い径方向中心部では最終的に 5mm 程度の拡張側の塑性変形が生じている。基本的に輸送物の落下衝撃はコンクリートあるいはアスファルト舗装面により吸収されると考えられ、規則で要求される 9m 高さから非降伏面への垂直落下試験時に見られるような輸送容器全長に亘っての長手方向均一な変形（約 35mm）は認められず、変形量も少ない。また、水平落下時には、長手方向中央部において落下直後の衝撃により最大 100mm の収縮側変形が起き、最終的には約 50mm 程度の収縮側の塑性変形となる。この場合は、9m 高さから非降伏面への水平落下試験の結果の約 40mm と同程度となる。
- いずれの落下姿勢であっても、輸送容器の外筒およびフランジ部に発生する相当塑性ひずみは、最大値で約 10% および約 20% であり、素材のステンレス鋼の破断ひずみ(40%)を上回ることなく、また、フランジ部を結合しているロッドボルトにも過大な応力が発生しないことから、落下時に開口部を生じさせることはない。
- いずれの落下姿勢であっても、弓型クランプおよびストロングバックの上部・下部ゲートには 10% を超える相当塑性ひずみの発生は見られないことから、燃料集合体の保持機能および中性子吸収材の位置保持機能は健全に保たれると考えられる。
- 垂直もしくはコーナー落下姿勢の場合には、ショックマウントフレームに相当破断ひずみを上回る相当塑性ひずみが発生する可能性があることから、これらのケースでは、ショックマウントフレームの破断あるいはショックマウントフレームとストロングバックを結合するロックピンが切断し、ストロングバックが輸送容器内の所定の位置に保持されない可能性がある。
- 水平落下姿勢では、中性子吸収材と燃料集合体が離れる距離は概ね 2mm 以内となっている。
- 燃料集合体に発生する加速度は、コンクリート舗装面およびアスファルト舗装面をターゲットとして 18m 高さから落下した場合、いずれの落下姿勢であっても規則で規定されている 9m 高さからの非降伏面への落下時に発生する加速度より小さい。

以上から、コンクリート舗装面あるいはアスファルト舗装面への 18m 高さからの落下衝撃により、輸送容器が破壊され収納された核燃料物質が環境に放出されることはないという解析結果が得られた。

表 6.2-1 コンクリート舗装面に対する解析結果のまとめ

		垂直落下	水平落下	コーナー落下
輸送容器最終変形量		+5mm (中央部軸) +1mm (外周部軸) 6	-50mm* (長手方向中央部径)	+5mm (中央部軸) -1mm (外周部軸)
燃料集合体最大加速度		89G (最下部スパン中央)	206G (最下部スパン中央)	89G-断面方向 78G-長手方向 (最下部スパン中央)
最大相当塑性ひずみ	輸送容器	30% (端面リブ) 20% (フランジ部) 10% (外筒端面)	16% (周方向リブ) 2% (フランジ部) 10% (外筒側面)	49% (緩衝体) 4% (フランジ部) 4% (外筒端面)
	ショックマウント フレーム	31% (最下部ロッド近傍)	29% (最下部ロッド近傍)	50% (最下部ロッド近傍)
	ストロングバック	18% (弓型クランプ付根)	8% (弓型クランプ, U サポート支持部)	21% (弓型クランプ付根)
	弓型クランプ	0.3%	8%	3%
	上部・下部ゲート	3%	0.3%	3%

* : 落下直後の最大変形量は約 100mm, () 内は発生場所を示す。

表 6.2-2 アスファルト舗装面に対する解析結果のまとめ

		垂直落下	水平落下	コーナー落下
輸送容器最終変形量		+4mm (中央部軸) +1mm (外周部軸)	-60mm** (長手方向中央部径)	+4mm (中央部軸) -1mm (外周部軸)
集合体最大加速度		82G (最下部スパン中央)	168G (最下部スパン中央)	43G-断面方向 74G-長手方向 (最下部スパン中央)
最大相当塑性ひずみ	輸送容器	25% (端面リブ) 20% (フランジ部) 10% (外筒端面)	16% (周方向リブ) 2% (フランジ部) 1% (外筒側面)	47% (緩衝体) 5% (フランジ部) 5% (外筒端面)
	ショックマウント フレーム	40% (最下部ロッド近傍)	25% (最下部ロッド近傍)	48% (最下部ロッド近傍)
	ストロングバック	20% (ストロングバック 脚)	10% (弓型クランプ付根)	21% (ストロングバック 脚)
	弓型クランプ	0.3%	7%	2%
	上部・下部ゲート	3%	0.3%	3%

** : 落下直後の最大変形量は約 110mm, () 内は発生場所を示す。

6.3 タンクローリーとの衝突による火災事故に係る熱安全性解析

6.3.1 解析モデルおよび解析方法

6.3.1.1 解析モデル

輸送物を輸送容器と PWR 新燃料集合体収納物からなる構造とし、以下の点に留意して 3 次元でモデル化した。図 6.3-1 の(1)から(4)までに 3 次元モデルの要素分割図を示す。

- ・ 輸送物軸方向の垂直断面の対称性から 3 次元モデルを、輸送物中央断面および軸方向垂直断面を対称面とした 1/4 全体モデル（以下、1/4 モデル）とし、計算時間の短縮化のため、精度に影響が生じない範囲で、容器、収納物のある程度簡略化すると共に、計算では、中央部と端部に着目して計算を実施した。
- ・ 輸送容器外殻は円筒形状であり、外筒、内筒、フランジで構成される金属部分と、外筒および内筒の中間に位置する断熱材から構成されるものとした。
- ・ フランジ部はステンレス製であり、外筒と内筒を接続するようにモデル化した。
- ・ 輸送容器外殻以外の構造は、サポートプレート（中性子吸収材）、ストロングバック、弓型クランプ、ショックマウントフレームからなり、質量が保存されるように形状を簡略化した。なお、ショックマウントはモデル作成には考慮しなかった。
- ・ 燃料集合体は、被覆管、ペレットおよび燃料棒間の空気を考慮して均質化した。
- ・ 空気層は 3 次元ソリッド熱伝導要素にてモデル化し、空洞輻射を考慮した。
- ・ 輸送容器外表面と外部環境の間で、熱放射（太陽輻射熱および火炎）、自然対流熱伝達を考慮し、輸送容器内筒と燃料集合体の間も同様に熱放射、自然対流熱伝達を考慮した。

6.3.1.2 解析手順

解析手順は、設定された事故シナリオ条件により以下のとおりとする。

ステップ 1：輸送物が 38℃雰囲気下で所定の太陽輻射熱を受けた時の輸送物内部温度分布に関わる定常伝熱の解析。

ステップ 2：ステップ 1 で求められた輸送物内部の温度分布を初期条件とし、輸送物が 800℃の雰囲気下に 90 分間、曝されたときの非定常伝熱の解析。

ステップ 3：ステップ 2 の終了時の輸送物内部温度分布を初期条件として、38℃雰囲気下で太陽輻射熱を受けながら冷却される非定常伝熱の解析。

6.3.1.3 解析方法と解析条件

(1) 解析コード

解析には、第 3 章で述べたように、汎用有限要素法解析コード ABAQUS6.2 を使用した。

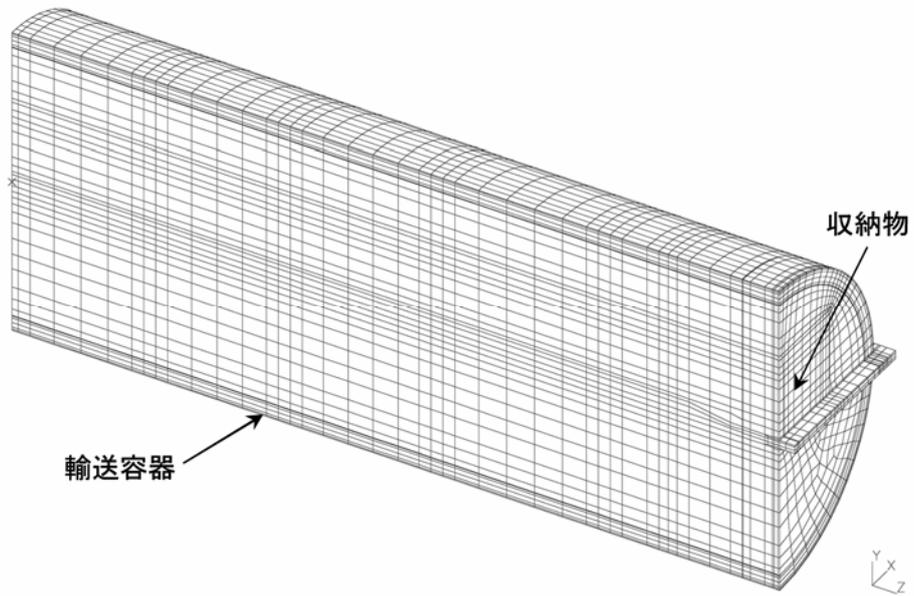


図 6.3-1(1) 輸送物全体の3次元解析モデル要素分割

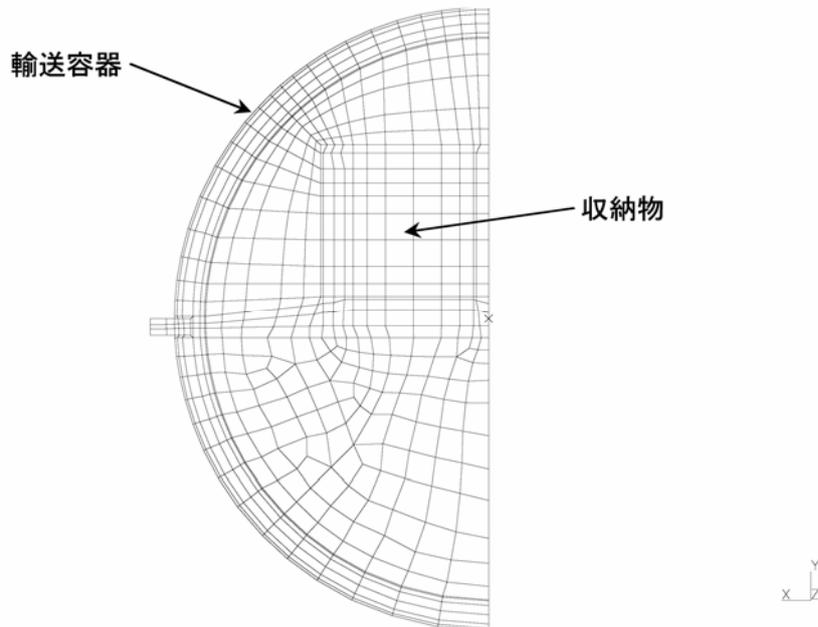


図 6.3-1(2) 対象断面の3次元解析モデル要素分割

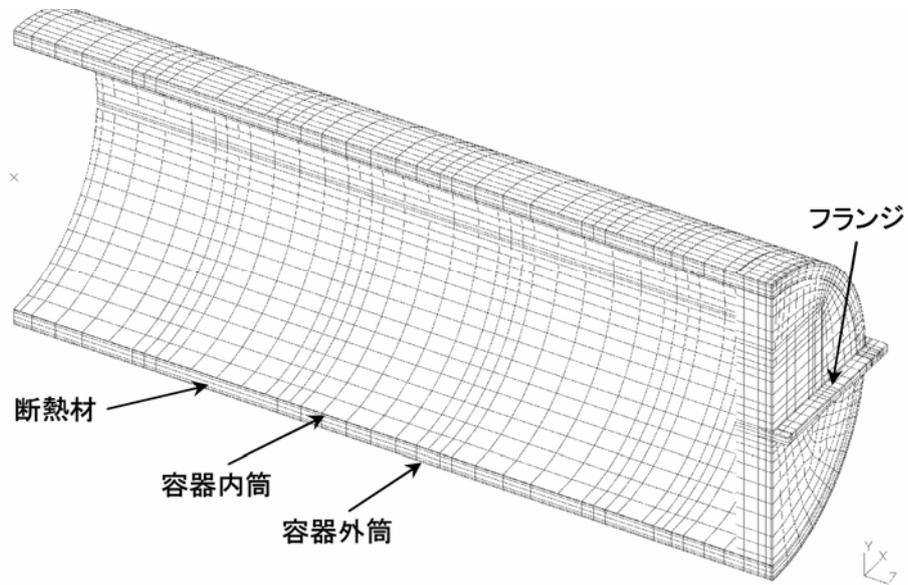


図 6. 3-1 (3) 輸送容器外殻の 3 次元解析モデル要素分割

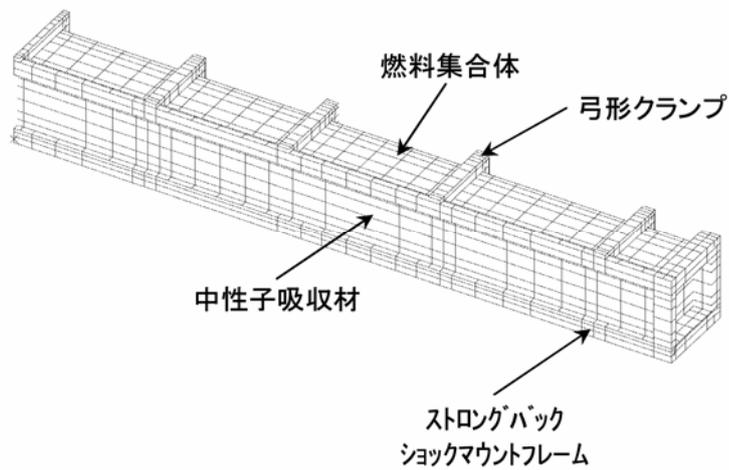


図 6. 3-1 (4) 燃料集合体および容器構造材の 3 次元解析モデル要素分割

(2) 材料物性

計算に使用した輸送物の材料物性値は以下のとおりである。

輸送容器外筒／内筒／ストロングバック／弓型クランプ／ショックマウントフレームのステンレス鋼の物性値を表 6.3-1 に、中性子吸収材の物性値を表 6.3-2 に示す。輸送容器内部の金属部分については、ストロングバックの下部中心部材および弓型クランプの一部が中空であることを考慮し、等価物性値として、ストロングバック下部中心部材の密度を 2880kg/m^3 、断面内熱伝導率を $0.043\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、長手方向熱伝導率を $5.86\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ とし、弓形クランプの密度を 6209kg/m^3 、径方向熱伝導率を $0.043\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、長手方向熱伝導率を $5.88\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ とした。

なお、ショックマウントフレームはストロングバックの小断面の脚を介してストロングバックと接触しており、部材形状も溝型で重量的にも小さく、燃料集合体との直接的な接触は無いことから、計算の対象外とした。

輸送容器外筒/内筒間の断熱材の物性値は、表 6.3-3 に、輸送容器内筒および燃料集合体間の空気の物性値を表 6.3-4 にそれぞれ示した。なお、本解析では、輸送容器を密封容器として扱わないことから、容器内における空気の圧力変化は考慮せず、密度は温度にのみ依存するものとした。

燃料集合体については、新燃料輸送容器の安全性実証試験¹⁾に基づき均質化し、長方形の均質燃料体とした。本実証解析で対象とした燃料集合体は、核燃料重量が最大である 17×17 型の PWR 用新燃料集合体とし、燃料集合体の均質化は、燃料棒および空気の面積比を用いて以下のように等価物性を決定した。均質化した物性値を表 6.3-5 に示した。

本実証解析で対象とした燃料集合体の被覆管内径を $d_1 = 0.82\text{cm}$ 、被覆管外径を $d_2 = 0.95\text{cm}$ 、集合体断面を $21.4 \times 21.4 = 457.96\text{cm}^2$ とすると、均質化燃料部、 UO_2 、被覆管、空気の断面積および面積比は、

	断面積(cm^2)	面積比
均質化燃料部	: $21.4 \times 21.4 = 457.96$	1.0000
UO_2	: $\pi/4 \times 0.82^2 \times 17 \times 17 = 152.62$	0.3333
被覆管	: $\pi/4 \times (0.95^2 - 0.82^2) \times 17 \times 17 = 52.23$	0.1140
空気	: 253.11	0.5527

となる。この面積比と、 UO_2 、被覆管および空気のそれぞれの密度を用いて等価密度 d を求めると

$$d = 10.96 \times 0.3333 + 6.55 \times 0.1140 + 9.16 \times 10^{-4} \times 0.5527 = 4400\text{kg/m}^3$$

となる。また、等価比熱 C_p は、次式から求めることができる。

$$C_p = (a \times b + c \times d + e \times f) / g$$

a : 燃料の比熱 (J/kg)

b : 均質化燃料部の単位体積あたりの燃料重量(kg/m^3)

- c : 被覆管の比熱 (J/kg)
- d : 均質化燃料部の単位体積あたりの被覆管重量 (kg/m³)
- e : 空気の比熱 (J/kg)
- f : 均質化燃料部の単位体積あたりの空気重量 (kg/m³)
- g : 等価密度 (kg/m³)

ここで、単位体積当たりの各々の重量は参考資料⁵⁾の値を参照して、上式により等価比熱 Cp を求めると

$$C_p = (264 \times 3.24 + 326 \times 0.661 + 1010 \times 5.53 \times 10^{-4}) / 4.40 = 243.25 \text{ (J/kg K)}$$

となる。

径方向の等価熱伝導率 λ_p の算出は、燃料集合体各部の外径および熱伝導率を用いて次式から求めることができる。

$$\lambda_p = d^2 / (d_1 / \lambda_f + (d_2 - d_1) / \lambda_c)$$

λ_f : 燃料伝導率 (W/(m·K))
 λ_c : 被覆材伝導率 (W/(m·K))

上式から径方向の等価熱伝導率を求めると

$$\lambda_p = 0.95 \times 10^{-2} / (0.82 \times 10^{-2} / 7.05 + 0.11 \times 10^{-2} / 42.9) = 8.01 \text{ W/(m·K)}$$

となり、燃料棒占有長 Δr_p および空気占有長 Δr_a は次式により求める。

$$\Delta r_p = 17 \times 0.95 \times 10^{-2} = 0.1615 \text{ m}$$

$$\Delta r_a = 21.4 \times 10^{-2} - 0.1615 = 0.0525 \text{ m}$$

これらから、等価熱伝導率 λ が次式により求まる。

$$\lambda = 21.4 \times 10^{-2} / (\Delta r_p / 8.01 + \Delta r_a / 0.0316) = 1.28 \times 10^{-1} \text{ W/(m·K)}$$

また、長手方向の等価熱伝導率 λ は、燃料集合体各部の断面積および熱伝導率を用いて次式から求めた。

$$\lambda = (A_f \cdot \lambda_f + A_c \cdot \lambda_c + A_a \cdot \lambda_a) / (A_f + A_c + A_a)$$

A_f : 燃料の占有断面積 (m²)
 A_c : 燃料被覆管の占有断面積 (m²)
 A_a : 空気の占有断面積 (m²)
 λ_f : 燃料の熱伝導率 (W/(m·K))
 λ_c : 燃料被覆管の熱伝導率 (W/(m·K))
 λ_a : 空気の熱伝導率 (W/(m·K))

上式から、長手方向等の熱伝導率： λ を求めると

$$\lambda = (0.3333 \times 7.05 + 0.1140 \times 42.9 + 0.5527 \times 0.0316) / (0.3333 + 0.1140 + 0.5527) = 7.28 \text{ W/(m·K)}$$

となる。

表 6.3-1 ステンレス鋼の物性値²⁾

温度 K	密度 kg/m ³	比熱 J/(kg·K)	熱伝導度 W/(m·K)
300	7920	499	16.0
1000	7640	644	25.7

表 6.3-2 ボロン入りステンレス鋼の物性値³⁾

温度 K	密度 kg/m ³	比熱 J/(kg·K)	熱伝導度 W/(m·K)
280	7800	502	45.4
1000	↓	↓	↓

表 6.3-3 断熱材の物性値(カタログ値)

温度 K	密度 kg/m ³	比熱 J/(kg·K)	熱伝導度 W/(m·K)
280	130	1047	0.070
400	↓	↓	0.070
600	↓	↓	0.116
800	↓	↓	0.174
1000	↓	↓	0.244

表 6.3-4 空気の熱物性値²⁾

温度 K	密度 kg/m ³	比熱 J/(kg·K)	熱伝導率 W/(m·K)
280	1.2606	1007	0.0246
300	1.1763	1007	0.0261
400	0.8818	1015	0.0331
500	0.7053	1031	0.0395
600	0.5878	1052	0.0456
800	0.4408	1099	0.0569
1000	0.3527	1142	0.0672
1200	0.2939	1175	0.0759
1500	0.2351	1212	0.0870

表 6.3-5 燃料集合体の熱物性値

温度 K	密度 kg/m ³	比熱 J/(kg·K)	熱伝導率(径方向) W/(m·K)	熱伝導率(長手方向) W/(m·K)
280	4400	243	0.128	7.28
1000	4400	243	0.128	7.28

(3) 初期条件および境界条件

ステップ1～ステップ3の初期条件および境界条件を表6.3-6～表6.3-8に示す。これらは安全解析書等に準拠するが、一部過度に安全側と見なされる条件については見直し、3次元解析に対して明示されていない箇所については新たに設定した。

表 6.3-6 ステップ1の解析条件

初期条件	境界条件	
	輸送容器外筒表面	収納物、構造材および輸送容器内筒表面
全ての部位で 38℃	<ul style="list-style-type: none"> ・ 環境 (38℃) への輻射 輻射率 輸送容器外表面 : 0.45 周囲 : 1.0 ・ 自然対流による放熱 $Nu=0.13(Pr \cdot Gr)^{1/3}$ ・ 太陽輻射による入熱* 輸送容器外筒円筒部 : 400W/m² 輸送容器外筒端面 : 200W/m² 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 空気層を介した熱伝導 空気の熱伝導に対する数(Nu) 1.0, 138 を考慮 ・ 輻射 輻射率 輸送容器内筒表面 : 1.0 収容物表面 : 1.0

*: 太陽輻射による入熱の計算では太陽輻射が 12 時間/日であることを考慮し上記入熱に 1/2 を乗じ、かつ輸送容器輻射率を乗じて入熱とする。

表 6.3-7 ステップ2の解析条件

初期条件	境界条件	
	輸送容器外筒表面	収納物、構造材および輸送容器内筒表面
ステップ1の 温度分布	温度 800℃の雰囲気において <ul style="list-style-type: none"> ・ 対流 熱伝達率 : 10W/(m²·K) ・ 輻射 輻射率 火炎 : 0.9 輸送容器外表面 : 0.8 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ステップ1と同じ

表 6.3-8 ステップ3の解析条件

初期条件	境界条件	
	輸送容器外筒表面	収納物、構造材および輸送容器内筒表面
ステップ2の 温度分布	<ul style="list-style-type: none"> ・ ステップ1と同じ 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ステップ1と同じ

(4) 解析精度の評価

本解析モデルを、本解析対象輸送物の安全解析書に記載されている耐火試験結果に適用し、解析モデルの熱的応答性を試験結果と比較することで、解析モデルの解析精度を確認する。ここでは、詳細については省略するが、解析結果は試験結果をほぼ再現しており、ここで用いられる輸送物の解析モデルおよび解析手法の妥当性が示された。

6.3.2 解析結果およびその評価

初期条件としての太陽輻射による定常状態の温度分布は、解析の結果、ほぼ均一となり、その温度は約 50.4℃であった。

図 6.3-2(1)および(2)に輸送物中央部および端部における容器フランジ、容器内筒(代表点)での温度履歴と、燃料集合体外表面温度が最も高い位置での温度履歴の解析結果をそれぞれ示す。収納物である燃料集合体における外表面の最高温度は、輸送物中央部よりも輸送物端部での温度が高い結果となり、中央部で 407℃、端部で 454℃であった。従って、密封境界である燃料被覆管の温度は、454℃以下になるものと評価され、被覆管の気密性を確保できる温度 570℃以下であることから、その健全性が確認された。

その他の構造材として断熱材(セラミックファイバー)およびサポートプレート(中性子吸収材を含む SUS304)の最高到達温度は、それぞれ 680℃および 430℃と推定され、これら部材の熱的健全性は維持される。また、ショックマウント(合成ゴム)領域温度は、530℃と評価され、火災時にはその燃料集合体保持機能は失われるものと考えられる。

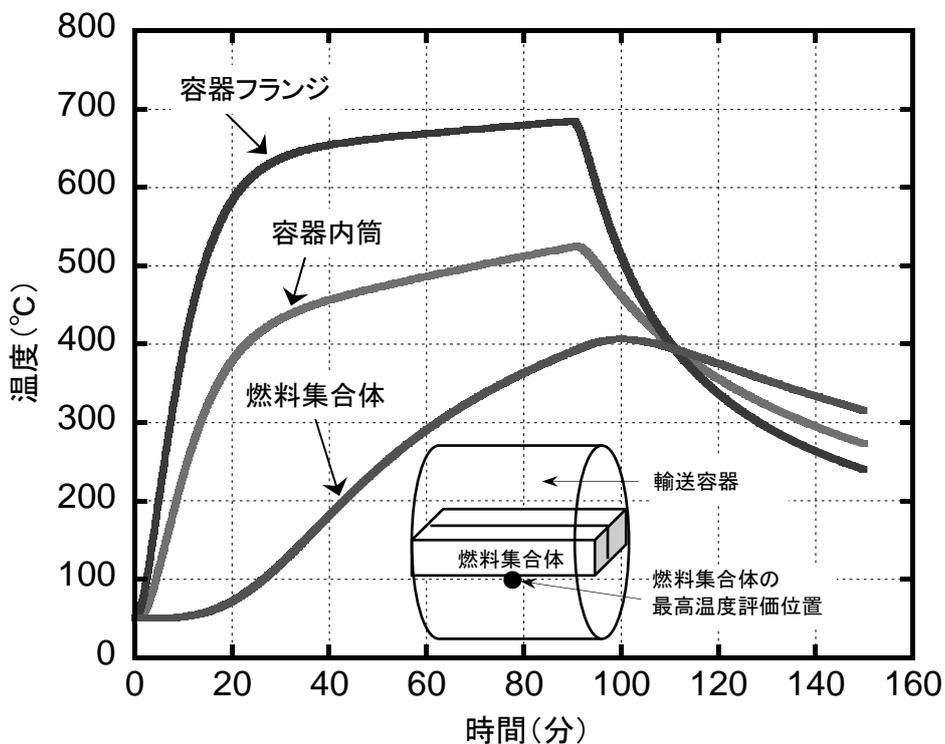


図 6.3-2(1) タンクローリーとの衝突火災熱安全性解析における輸送物中央部温度履歴

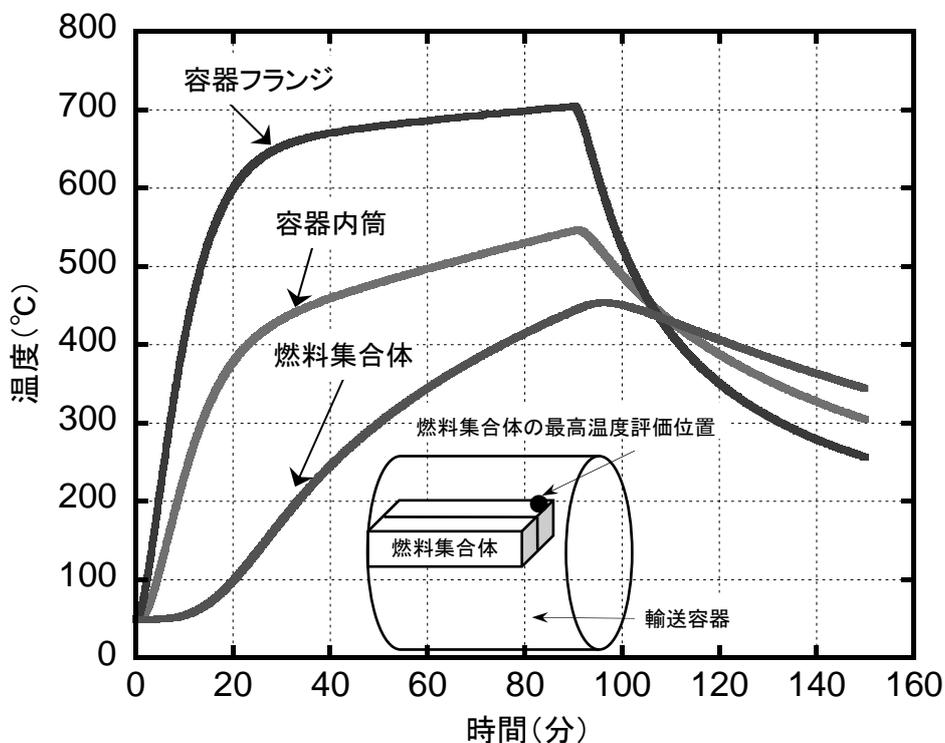


図 6.3-2(2) タンクローリーとの衝突火災熱安全性解析における輸送物端部温度履歴

6.4 トンネル内での衝突による火災事故に係る熱安全性解析

6.4.1 解析モデルおよび解析方法

6.4.1.1 解析モデル

(1) トンネル全体モデル

輸送物は単体で道路中央に位置し，その管軸が輸送方向でトンネル長手方向と平行であり，輸送物の下端が道路面より 0.8m として，3次元で解析した。自然対流としたことで長手方向および幅方向は対称となり，1/4 モデルとした。トンネル壁（天井部），道路，トンネル内部空間（空気とする）および輸送物を図 6.4-1 および図 6.4-2 に示すようにモデル化した。

トンネルは幅 10m，高さ 5m，長さ 120m として，その中央部の 7.0m 長さ，幅 3.1m，高さ 5m を火災部領域として定義し，入熱を与えた（計算では長さおよび幅はこの 1/2 長さの領域で実施した）。トンネル壁および道路は，厚さ 0.6m のコンクリートとした。

所定の入熱条件で加熱された空気のトンネル内での移動^{4)~6)}およびトンネル出口での出入りを解析し，輸送物表面の温度を評価した。その際，トンネル天井，道路面および輸送物表面の輻射を考慮した。

(2) 輸送物モデル

輸送物の長手方向の中央部円周断面をモデル化する。なお，垂直な直径が対称面となるので 1/2 半円を解析する。

6.4.1.2 解析手順

解析の手順は，設定された事故シナリオ条件に基づき以下のとおりにした。ただし，輸送物内部の初期温度分布は，6.3 節のタンクローリーとの衝突による火災事故時熱安全性解析において求められた輸送物内部定常初期温度分布を用いる。

- ・ステップ 1：トンネル全体モデルによる，輸送物内部初期温度を 60℃，外気およびトンネル内温度を 26.9℃(300K)の初期温度分布条件とし，換気速度ゼロで，図 3.2-4 に示した放熱速度パターンに従う 2 時間にわたる火災時熱流動の解析。
- ・ステップ 2：トンネル全体モデルによる，2 時間後の火災終了時から，入熱ゼロの条件で輸送物表面温度が充分冷却されるまでの熱流動の解析
- ・ステップ 3：輸送物モデルによる，輸送物内部初期温度 60℃，ステップ 1，2 で求められた輸送物外表面温度履歴を輸送物表面に与えた輸送物内部温度分布の解析。

6.4.1.3 解析手法と解析条件

トンネル内熱流体の解析では、汎用流体解析コード FLUENT Version 6.0 を使用した。モデルの要素分割状況を図 6.4-3 および図 6.4-4 に示す。要素形状は 6 面体の非構造格子であり、要素数は 161343 とした。

トンネル内の流れは、空気の動粘度を $15.83 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 、空間寸法を 5m とし、速度 0.2m/s と仮定すると、レイノルズ数 $Re = (0.2) \times (5.0) / (15.83 \times 10^{-6}) = \text{約 } 63000$ となり、乱流領域 ($Re > 2300$) と見積もれる。そこで、この乱流効果を考慮するため、 k (乱れの運動エネルギー) - ϵ (粘性エネルギー消散率) 乱流モデルを採用した。

計算に用いた物性値を表 6.4-1～表 6.4-5 に示す。

- ・ 輸送物については、輸送容器と収納物からなるモデルとし、輸送容器の部分は、熱伝導度、比熱、密度についてステンレスの殻と断熱材（セラミックファイバー）から構成されるとして、半径方向の物性を平均化した等価物性値を用いた。また収納物については燃料棒集合体、ショックマウントフレーム、ストロングバック、弓形クランプ、中性子吸収材をモデル化して、熱容量を合わせるため密度、比熱を調整した。輸送物の軸に垂直な断面の収納物の熱伝導率には燃料棒集合体の等価熱伝導率を、軸方向の熱伝導率には燃料棒の等価熱伝導率を用いた（表 6.4-1 参照）。
- ・ 輸送容器内外表面、収納物表面、トンネル天井および道路面等の輻射率は、関係資料記載値を参考とした（表 6.4-2 参照）。
- ・ トンネル内での化学反応は考慮せず、トンネル内の気体を空気として、気体中の熱放射源の計算をしないこととした。そこで、気体の輻射率は温度に依存するとして、高温側では、火炎の吸収係数は一般に液体燃料の場合 0.4～2.6、プラスチック系可燃物の場合 1.3～2.6 とされていることから、これらを参考に 1.5 とし、低温側では、輻射の効果は小さいことから、400℃以下では吸収係数を 0 に設定した（表 6.4-3 参照）。
- ・ コンクリートの熱物性値は、第 4 章の解析に用いたものと同様とした（表 6.4-4 参照）。
- ・ 空気の熱物性値は、第 4 章の解析に用いたものと同様とした（表 6.4-5 参照）。

境界条件として、流入・流出部をゲージ圧力ゼロの圧力流出境界と設定し、コンクリート層外面は断熱とした。トンネルの外気および初期温度は 300K とし、火炎部（火炎領域長さ 7m×幅 3.1m×高さ 5.0m=108.5m³）への単位体積当たりの入熱量は、図 3.2-4 に示した放熱速度パターンから、火災開始からの 10 分間およびその後の 110 分間の値をそれぞれ 34MW/(108.5m³)、2.8MW/(108.5m³)とした。ここで、火炎領域長さは輸送物の半分長程度に取り、入熱密度を大きくした。なお、実際の燃焼では、すす等が生じるため不完全燃焼となるが、本解析では、可燃物は全て燃焼するものとした安全側の評価となるようにした。

また、上記の熱流動解析で得られた輸送物表面温度の解析結果を、タンクローリーとの衝突による熱安全性解析で用いた 3 次元モデル（図 6.3-1 参照）に基づいた 2 次元モデルに与えて、汎用有限要素法解析コード ABAQUS 6.2 による輸送物内部の詳細温度分布解析を行った。

表 6.4-1 輸送物等価熱物性値

	温度 ℃	密度 kg/m ³	比熱 J/(kg·K)	熱伝導度 W/(m·K)
輸送容器	0	1174	556.9	0.015
	400	↓	↓	0.078
	600	↓	↓	0.130
	800	↓	↓	0.195
	1000	↓	↓	0.273
収納物 軸方向 軸垂直面		3461	347.5	16.3
				0.128

表 6.4-2 輻射率

	輻射率 ε
輸送容器外面	0.8
輸送容器内面	1.0
収容物	1.0
トンネル天井	0.6 ²⁾
道路面	0.6 ²⁾

表 6.4-3 吸収係数⁷⁾

温度 K	吸収係数 k m ² /m ³
280	0
673	0
773	1.5
3000	1.5

表 6.4-4 コンクリートの熱物性値²⁾

温度 K	密度 kg/m ³	比熱 J/(kg·K)	熱伝導率 W/(m·K)
293		900	1.2
600	2370	930	0.8
1000		1630	1.0

表 6.4-5 空気の熱物性値²⁾

温度 K	密度* kg/m ³	比熱 J/(kg·K)	熱伝導率 W/(m·K)	粘性係数 × 10 ⁻⁵ (Pa·s)
280	1.2606	1007	0.0246	1.76
300	1.1763	1007	0.0261	1.86
400	0.8818	1015	0.0331	2.33
500	0.7053	1031	0.0395	2.72
600	0.5878	1052	0.0456	3.08
800	0.4408	1099	0.0569	3.72
1000	0.3527	1142	0.0672	4.31
1200	0.2939	1175	0.0759	4.85
1500	0.2351	1212	0.0870	5.61

*：上記密度は汎用有限要素法熱解析での使用値。熱流動解析では理想気体の状態方程式から得られる値を使用。両者の差は0.1%未満である。

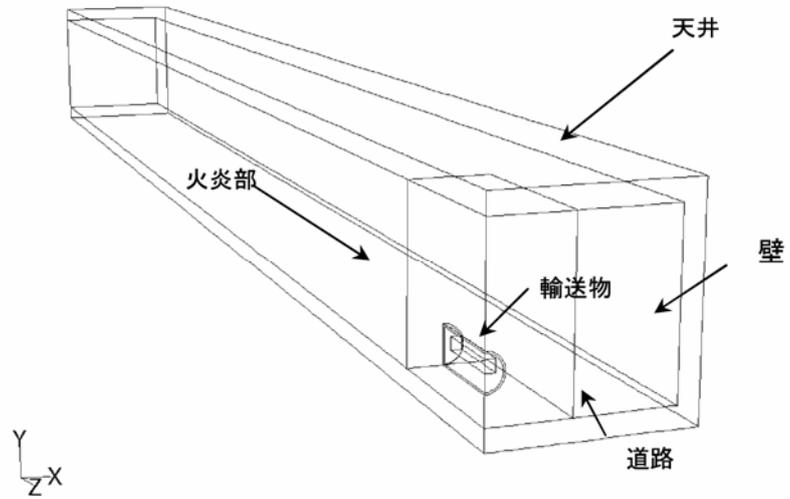


図 6.4-1 トンネル全体モデル形状

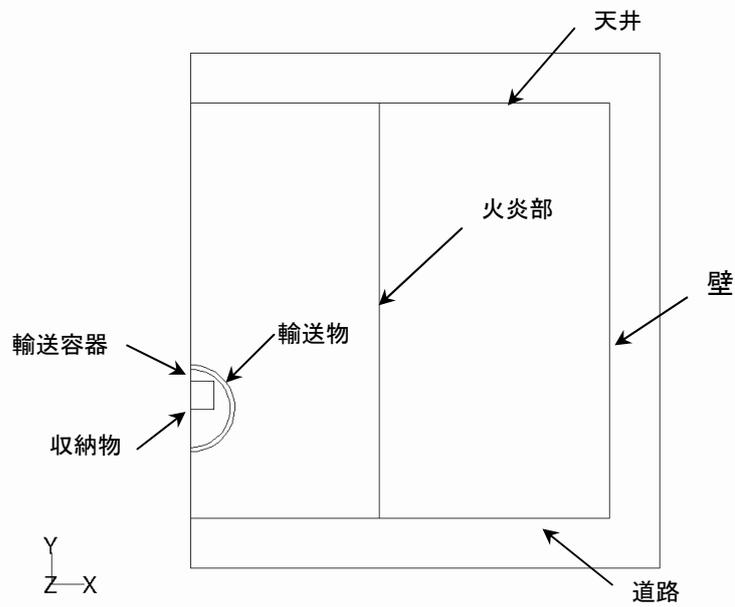


図 6.4-2 トンネル全体モデル断面形状

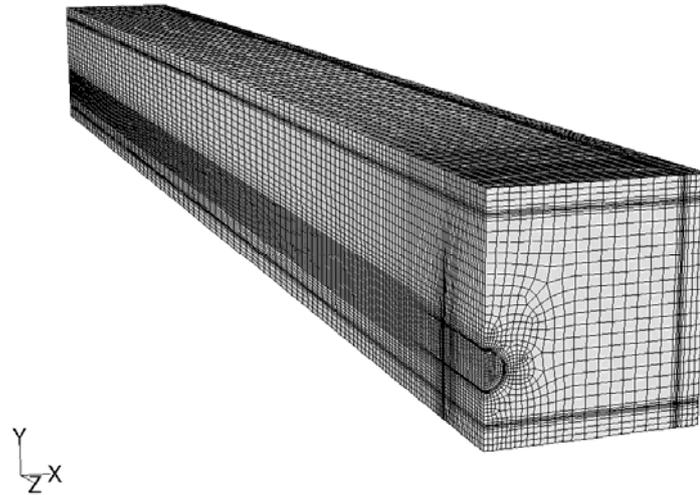


図 6.4-3 トンネル全体モデルの要素分割図

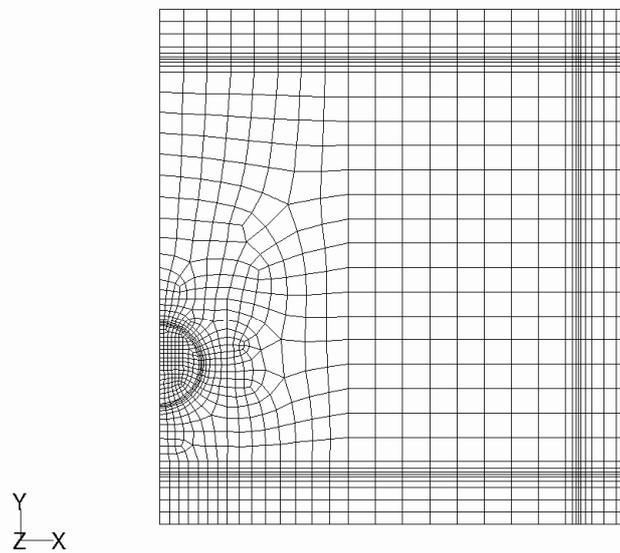


図 6.4-4 全体モデル（輸送物位置）断面の要素分割状況

6.4.2 解析結果およびその評価

(1) トンネル全体モデルの解析結果

トンネル内熱流動解析結果では、高温の熱流体の流れは上部にあり、火災部の中央上面で最も高い温度を示す。火災開始から 10 分後における熱流体の最高温度は、約 1052°C (1325K) で 120 分後の最高温度は約 150°C (423K) であった。入熱がなくなった火災開始から約 130 分後では、輸送物の表面から若干内部で最も高い温度となり、表面温度が約 70°C (343K) まで低下し、外気がトンネル壁および輸送物表面で暖められて生じる対流が認められた。輸送物表面の温度分布の解析結果では、輸送物の高温領域は、中央円周断面から長手方向に 0.7m位置の最下部であった。

(2) 輸送物内部の温度分布解析結果およびその評価

図 6.4-5 に輸送物内部の代表箇所の温度履歴を示す。火災開始から 10 分後では、容器外周は上部の温度が高くなり、内部の昇温は小さかった。また、火災開始から 120 分後では、内筒内表面温度は 91°C となり、上部コーナ一部での温度が 93°C となった。密封境界である燃料被覆管の健全性については、内筒内表面に面した燃料集合体の表層部の最高到達温度は 109°C であり、PWR 燃料棒被覆管の気密性を確保できる温度 570°C 以下であることから、その健全性が確認された。

また、その他の構造材として断熱材（セラミックファイバー）、ショックマウント（ブチルゴム）、中性子吸収材は、最高到達温度がそれぞれ、585°C、352°C および 118°C と推定され、ショックマウントを除く部材の熱的健全性は確保される。

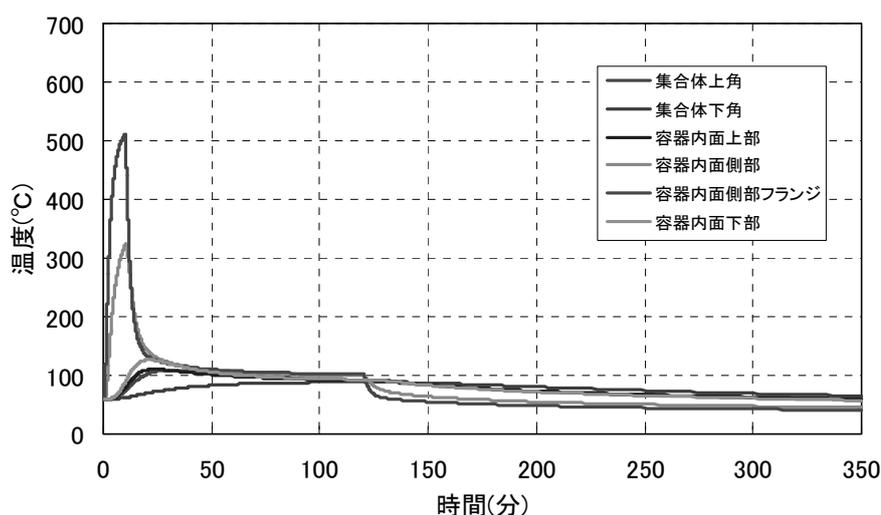


図 6.4-5 輸送物内部の各部の温度履歴

6.5 苛酷事故想定時の臨界安全性解析

6.5.1 解析モデルおよび解析方法

6.5.1.1 落下衝撃解析および熱安全性解析の結果に基づく未臨界性評価前提条件

(1) 落下衝撃解析の結果の要約

6.2 節に記載されているように、コンクリート舗装面あるいはアスファルト舗装面に対して 18m 高さから、燃料集合体の下部ノズル側が直撃するようにした垂直落下、上側ケースが直撃するようにした水平落下、および輸送容器のフランジ部が直撃するようにしたコーナー落下を苛酷な事故として設定し、落下衝撃解析を実施している。解析結果の要約を表 6.5-1 に示す。

表 6.5-1 各落下姿勢に対する輸送容器部材の最大変形

落下姿勢	落下高さ(m)	輸送容器の最終変形量(mm)		ストロングバックの相当塑性ひずみ	
		対コンクリート面	対アスファルト面	対コンクリート面	対アスファルト面
垂直落下	18	+5	+4	18%	20%
水平落下	18	-50	-60*	8%	10%
コーナー落下	18	+5	+4	21%	21%

*：落下直後の最大変形量は約 110mm，マイナス符号は収縮側を示す。

(2) 熱安全性解析の結果の要約

6.3 節に記載されているように、タンクローリーとの衝突による火災事故シナリオの、38℃雰囲気下を初期条件として 90 分間 800℃の雰囲気下に曝された後自然冷却する条件での熱安全性解析、また、トンネル内での衝突による火災事故シナリオの、換気装置のないトンネル内での 120 分間の火炎に曝された後自然冷却する条件での熱安全性解析を実施した結果の要約を表 6.5-2 に示す。

表 6.5-2 輸送物構造材最高到達温度

解析事象	構造材解析温度(℃)			
	断熱材	ショックマウント	サポートプレート (中性子吸収材)	被覆管
タンクローリーによる火災事故	680	530	430	454
トンネルでの衝突による火災事故	585	352	118	109

(3) 未臨界性評価前提条件

NFI-V 型輸送物について落下衝撃解析および熱安全性解析結果を基に、臨界安全性を評価するための前提条件を表 6.5-3 に示すように設定する。

表 6.5-3 未臨界性評価前提事項

対象事象	未臨界性評価前提事項*	
	減速材制限	配置制限・吸収材制限
落下事故	<ul style="list-style-type: none"> ・ 輸送容器の変形による水浸入有り。 ・ 燃料棒被覆管は破損せず、内部へ水浸入無し。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ショックマウントは塑性変形等により集合体位置の固定不可。 ・ ストロングバックは弾性変形の範囲にあり集合体保持機能を維持。 ・ サポートプレート(中性子吸収材)は弾性変形の範囲にあり機能維持。
火災事故	<ul style="list-style-type: none"> ・ 輸送容器周辺部の高温による密閉不可。 ・ 燃料棒被覆管表面温度は熱的制限値未満のため被覆管内部へ水浸入無し。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ショックマウントは焼失し、集合体位置の固定不可。

*：上記未臨界性評価前提事項は SAR と同様であるが、輸送容器変形量および焼失体積の程度に差異がある。

6.5.1.2 輸送物のモデル化および計算条件

(1) 輸送物のモデル化

輸送物の形状は3次元で対称的なモデルとする。

① 輸送容器

輸送容器は円筒形状であり、主要強度部材はステンレス鋼製で、内部に2体のPWR燃料集合体を収納することができる。輸送容器の外側ケースを構成する外筒には厚さ4mm（端面のみ6mm）のSUS304板、内筒には厚さ2mmのSUS304板を使用している。外筒と内筒間の中空部分にはアルミナ断熱材を充填したうえでリブを入れて補強する構造であるが、外筒および内筒を一体化したSUS304製の板で置き換えて安全側に単純化し、板厚が側面で6mm、端面で8mmとモデル設定する。その他、安全解析書に基づき、下記のように単純化する。

- ・ 緩衝体、バルブカバーおよびボルト、スタッキングブランケット、スキッドなどの構造材は安全側の評価とするために無視する。
- ・ 2つの燃料集合体を隔てるストロングバックは角型鋼材で製作されたスケルトンにサポートプレート（中性子吸収材）を固定した構造となっているため、その構造材厚さを加えた通常時の燃料集合体の面間距離は59mm以上確保されるものとする。
- ・ 輸送容器には水平落下により外筒上側ケースに約60mmの変形を生じる解析結果となっており、従って集合体と輸送容器外側までの距離は50mm以上確保されるものとする。これは安全解析書の取り扱いと同様に、外筒の板厚4mm、内筒の板厚2mm、弓型

クランプの角パイプ 40mm およびUサポートの板厚 4mm を考慮したものである。

NFI-V型輸送物全体解析モデルを図 6.5-1 に示す。

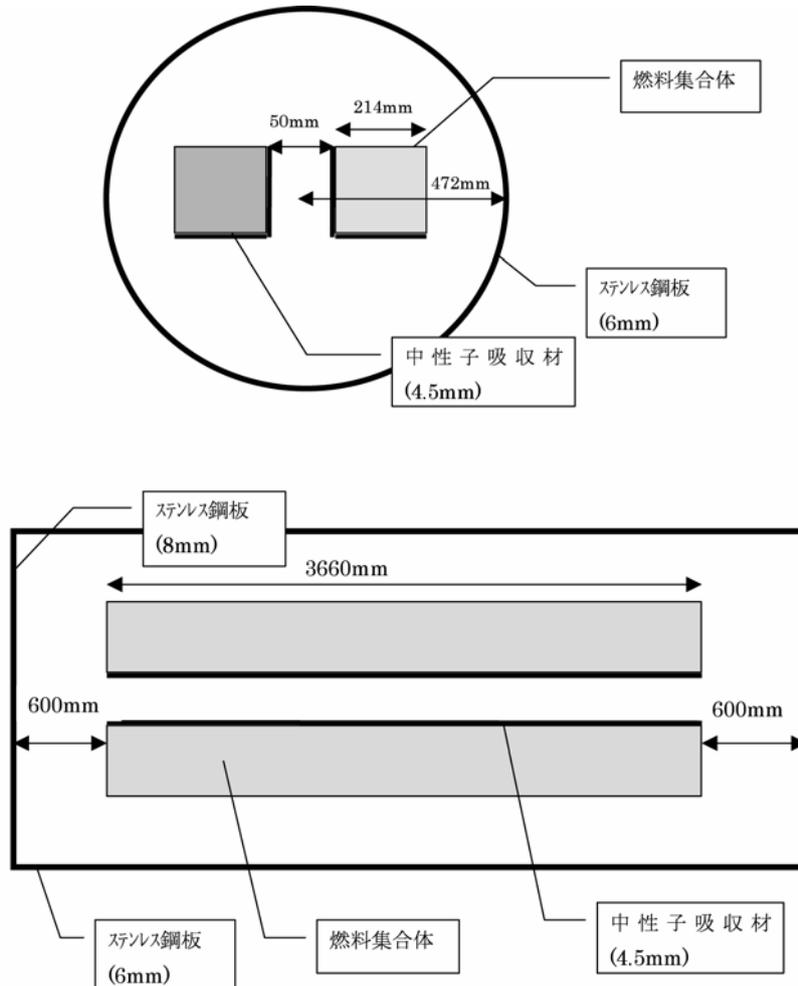


図 6.5-1 NFI-V型輸送物解析モデル

② PWR 用燃料集合体

PWR 燃料集合体の種類は、燃料棒本数が 179 本の 14×14 (7 支持格子) 型、同 14×14 (8 支持格子) 型、204 本の 15×15 型、264 本の 17×17 (9 支持格子) 型の 4 種類がある。ここでは、内蔵されている核燃料が最大であり落下解析の対象ともなった 17×17 薄肉型燃料集合体を臨界解析の対象とする。燃料集合体の主要な構成要素の数量および構成材料の最大重量・主要寸法は表 6.5-4 に示す通りである。

表 6.5-4 燃料集合体仕様

項目	燃料集合体
燃料組成	濃縮度 5wt%以下の UO ₂
焼結体直径	8.19mm
焼結体密度	97%TD 以下*
燃料有効長	3.66m
被覆管組成	ジルカロイ-4
被覆管肉厚	0.57mm
被覆管外径	9.50mm
制御棒案内シブル本数	24 本
制御棒案内シブル外径	12.2mm
制御棒案内シブル肉厚	0.41mm
計装用案内管本数	1 本
支持格子	9 個
燃料棒本数	264 本
燃料棒配列	17×17 正方格子
燃料棒ピッチ	12.6mm

* : 100%理論密度は 10.96g/cm³

ここで、安全解析書の取り扱いと同様に、燃料集合体モデルを下記のように単純化して考える。

- ・ 上部ノズル，下部ノズル，支持格子およびコイルスプリング，端栓などの構造材は安全側の評価とするために無視する。
- ・ 燃料有効長内の焼結ペレットのみでモデル化し，ペレットのデッシュ，チャンファーなどの空隙は安全側の評価とするために無視する。

以上のように単純化した燃料集合体の形状の 3 次元対称モデルを図 6.5-2 に示す。

③ 中性子吸収材（サポートプレート）

本輸送容器には各集合体の二面に接して中性子吸収材が 4 枚置かれている。吸収材としての厚さは 4.5mm，¹⁰B の含有率は天然の組成比(18.43wt%⁸⁾)と設定する。

④ 減速材

容器は完全に水没するとして，容器内は水密度を変化させ最適減速条件で計算する。但し，燃料棒被覆管は破損しないものとして，燃料棒被覆管内には水無しとする。

⑤ 反射条件等

孤立系の解析では，容器の外側には反射体として，厚さ 30cm の水の層があるものとする。なお容器付設のスタッキングブラケット等の構造材等は無視する。また，配列系の解析で

は NFI-V 型輸送物の許可された輸送制限個数が無限個であることから無限配列を仮定する。

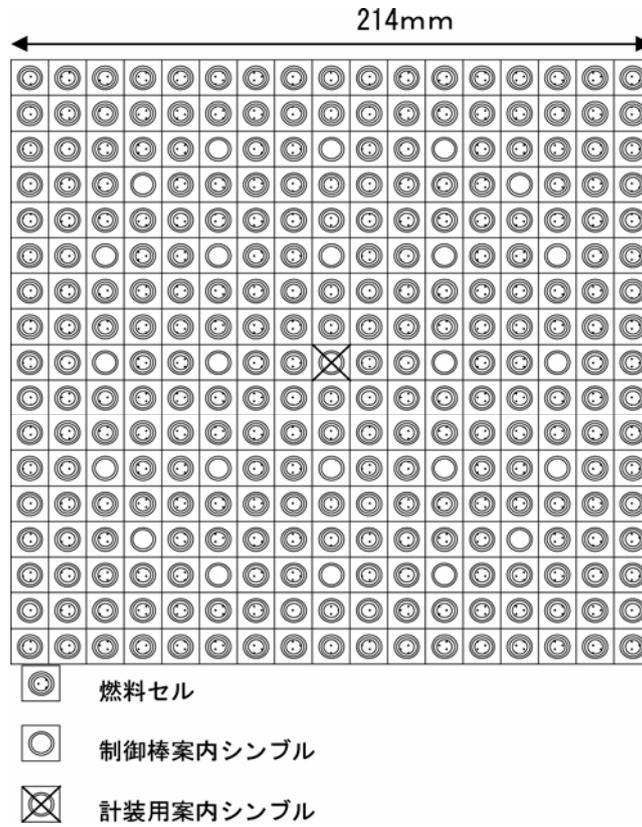


図 6.5-2(1) 17×17 燃料集合体の横断面モデル

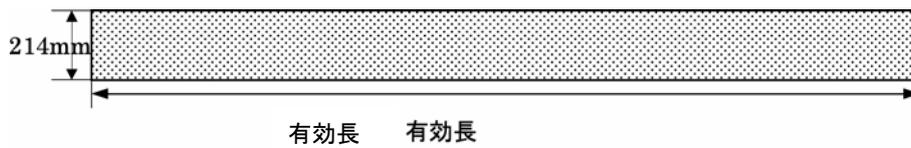


図 6.5-2(2) 17×17 燃料集合体の縦断面モデル

(2) 計算方法と計算条件

輸送物を3次元でモデル化し、解析には連続エネルギーモンテカルロ計算コード MVP を使用する。臨界計算に使用した MVP コードの計算ヒストリ数は、300 万（発生中性子数：5000 個/世代，計算世代数：650，スキップ世代数：50）以上とし、計算結果の標準偏差は 0.06% 以下を収束判定条件とした。

(3) 核燃料物質と構造材の組成

NFI-V 型輸送容器には、濃縮度 5wt% 以下の PWR 用新燃料集合体が収納される。濃縮ウランには反応度を低下させる ^{234}U が含まれるが、解析においては安全側に全て ^{238}U として計算する。また、二酸化ウラン焼結体には、ガドリニアを含有する焼結体もあるが、解析においては安全側に無視する。焼結体の含水率は安全側に 100ppm を仮定する。

輸送物の構造材の物性値は安全解析書および公開文献の臨界安全ハンドブック⁹⁾・理科年表¹⁰⁾等による。なお、原子量データ等は「核データセンターホームページ」⁸⁾のデータベースを使用する。これらの物性値を表 6.5-5 に示す。

表 6.5-5 NFI-V 型輸送容器の構造材物質の物性値および組成データ

材質	密度(g/cm ³)	核種	組成(wt%)
ステンレス鋼	7.9 ^{*1}	Fe	68.595 ^{*1}
		C	0.08 ^{*1}
		Cr	19.00 ^{*1}
		Mn	2.00 ^{*1}
		Ni	9.25 ^{*1}
		Si	1.00 ^{*1}
ジルカロイ-4	6.56	Zr	98.24 ^{*2}
中性子吸収材	7.76 ^{*3}	B	1.00 ^{*4}
		Fe	70.50 ^{*4}
		Cr	19.00 ^{*4}
		Ni	9.50 ^{*4}
水	1.0	H	11.19
		O	88.81

*1：臨界安全ハンドブック

*2：JISH4751¹¹⁾，Zr の組成は ZrTN804D の化学成分の平均値。他の成分は安全側に無視した。

*3：BÖHLER 社カタログ & ASTM A887 304B³⁾

*4：安全側に C，Si，Mn，P，S は無視し，Ni，Cr の組成比は ASTM A887 Table-1 中最大と最小の平均とし残りを Fe とする。¹⁰B は存在比 18.43% として計算。

6.5.2 落下衝撃解析結果に基づく臨界解析

(1) 臨界解析条件

落下衝撃解析結果では、ショックマウントが破損し、ストロングバックの位置が固定されなくなる。また、輸送容器が径方向または長手方向に一律変形して、容器の閉じ込めが維持できなくなる。但し、燃料集合体の変形は最小限度に抑制され、燃料棒の密封性は維持されるため、被覆管内の水浸入は考慮しない。従って、容器内側と燃料棒外側の空隙中の水密度を 0.0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0(g/cm³)と変化させて解析する。

① 孤立系臨界解析条件

a. 中性子吸収材と燃料集合体の距離（水平上部方向）[0mm-10mm]

上側ケース下向き水平落下衝撃解析結果を参照して、燃料集合体の浮き上り移動を仮定する。図 6.5-3 に中性子吸収材と燃料集合体の距離をパラメータとした解析モデルを示す。パラメータ変化の最大値は、衝撃解析結果の約 2mm の 5 倍の 10mm とする。

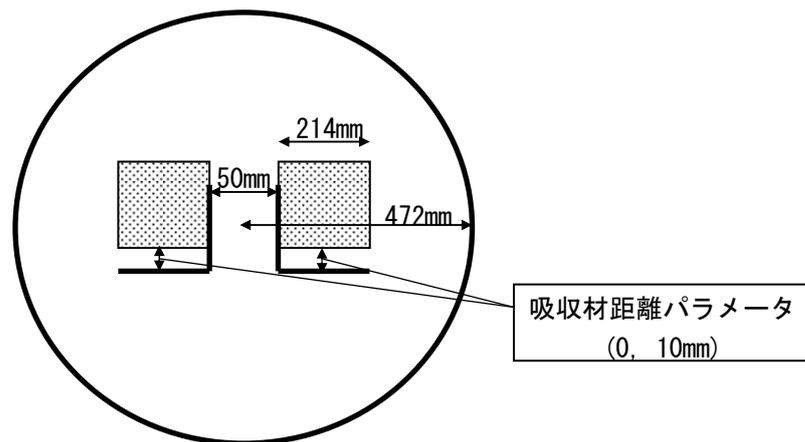


図 6.5-3 中性子吸収材と集合体の距離をパラメータとした孤立系臨界解析モデル

b. 水平方向一様な容器変形深さ[0mm-265mm]

水平落下衝撃解析結果として輸送容器の落下直後の最大変形量が約 110mm となったことを受けて、上側ケース高さが軸方向一様に 265mm まで減少すると仮定する。図 6.5-4 に輸送容器の容器変形深さをパラメータとした解析モデルを示す。

c. 輸送容器外面と燃料集合体の面間距離[50mm-365mm]

水平落下衝撃解析の結果から、ショックマウントが損傷し、輸送容器外面と燃料集合体の距離が変化するものとする。図 6.5-4 に上記の容器変形深さのパラメータ変化に対応した容器外面-燃料集合体面間距離のパラメータ変化を設定した解析モデルを示す。ここで、容器と燃料集合体の間には構造材があるため、面間距離が 50mm 以下にはならない

ものと仮定する。

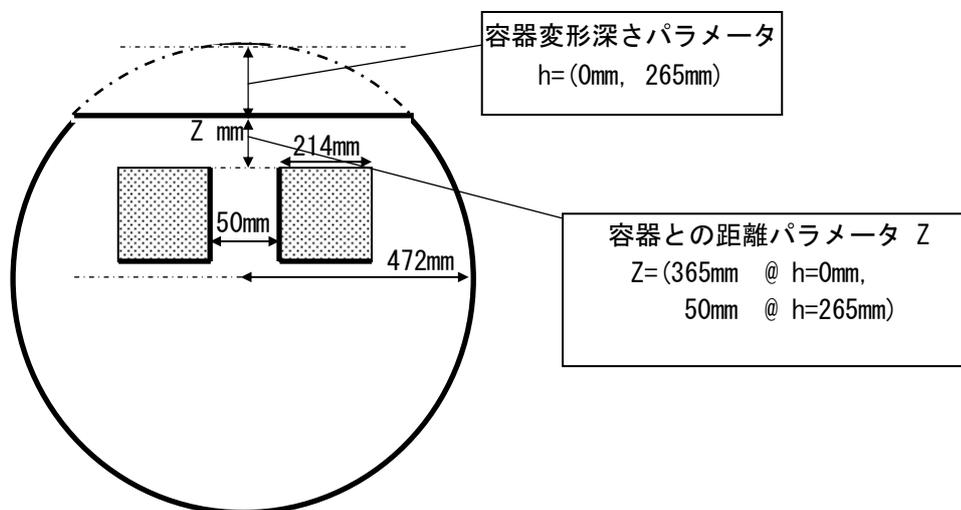


図 6.5-4 容器変形深さおよび容器と燃料集合体の面間距離をパラメータとした孤立系臨界解析モデル

以上により、表 6.5-6 に示すような中性子吸収材と燃料集合体との距離、容器変形深さおよび容器と燃料集合体距離のパラメータを組み合わせに対して孤立系臨界解析を行う。

表 6.5-6 落下衝撃損傷時の孤立系臨界解析パラメータ

中性子吸収材と燃料集合体の距離(mm)	容器変形深さ(mm)	容器と燃料集合体の距離(mm)
0 (標準)	0 (標準)	365 (標準)
10 (水平上下方向最大)	265 (最大)	50 (最小)

② 配列系臨界解析条件

a. 中性子吸収材と燃料集合体の距離 (水平上部方向および左右方向 ; [0mm-10mm])

上側ケース下向き水平落下衝撃解析結果を参照し、燃料集合体が水平断面内で上下／左右方向および斜め方向に、任意方向の変位の組み合わせで移動すると仮定する。図 6.5-5 に燃料集合体が左右方向に移動した場合の中性子吸収材との距離をパラメータとした解析モデルを例として示す。このときのパラメータの最大値は、衝撃解析結果の約 2mm の 5 倍を取った 10mm とする。

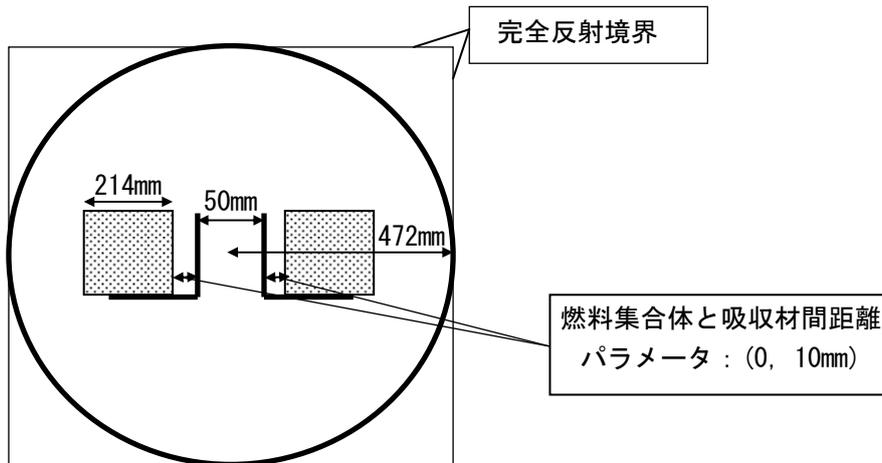


図 6.5-5 中性子吸収材と燃料集合体の左右方向変位距離をパラメータとした配列系臨界解析モデル

b. 水平方向一様な容器変形深さ[0mm-265mm]

水平落下衝撃解析結果より、輸送容器の最大変化量として約 110mm の結果が得られている。ここでは、その結果を包絡するような 265mm までの上側ケース高さの減少を考慮する。図 6.5-6 に輸送容器の容器変形深さをパラメータとした解析モデルを示す。

c. 輸送容器外面と燃料集合体の面間距離[50mm-365mm]

水平落下衝撃解析結果より、ショックマウントが損傷すると仮定した。図 6.5-6 に上記の輸送容器の変形深さパラメータに対応した容器外面-燃料集合体面間距離をパラメータとした解析モデルを示す。容器と燃料集合体の間には構造材が設置されているため、面間距離が 50mm 以下にはならないものと仮定する。そのため、図 6.5-6 に示すような変形深さに応じた容器と燃料集合体の距離を設定する。

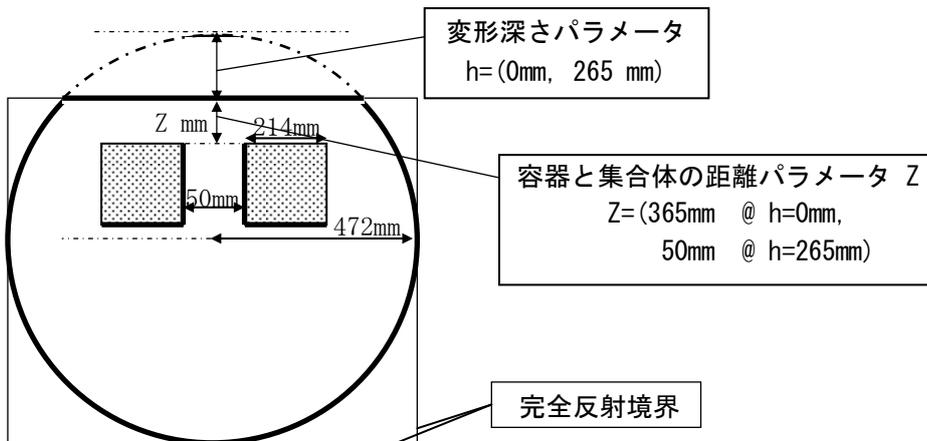


図 6.5-6 容器変形深さおよび容器と燃料集合体の面間距離をパラメータとした配列系臨界解析モデル

さらに輸送物相互の容器面間距離をパラメータとして最大 50mm で設定し、表 6.5-7 に示すような中性子吸収材と燃料集合体との距離、容器の変形深さ、容器と燃料集合体の距離および輸送物面間距離のパラメータに対して配列系臨界解析を行った。

表 6.5-7 落下衝撃損傷時の配列系臨界解析パラメータ

中性子吸収材と燃料集合体の距離(mm)	容器変形深さ(mm)	容器と燃料集合体の距離(mm)	輸送物面間距離(mm)
0 (標準) 10 (水平上下方向最大) 10 (水平左右方向最大)	0 (標準) 265 (最大)	365 (標準) 50 (最小)	0 50

(2) 孤立系臨界解析結果

容器変形深さおよび中性子吸収材と燃料集合体の距離をパラメータとした中性子実効増倍率計算結果の 1 例を図 6.5-7 に示す。また、中性子吸収材と燃料集合体面間距離をパラメータとした計算結果の 1 例を図 6.5-8 に示す。これらから、NFI-V 型輸送物落下衝撃に対する孤立系臨界解析においては、輸送容器内部の空隙中の水密度を 1.0g/cm³ に近づけると中性子増倍率が高くなる傾向がある。その他のパラメータの影響を考慮した解析結果をまとめると中性子吸収材と燃料集合体との距離が最大の 10mm、輸送容器変形深さが最大の 265mm、容器と燃料集合体の距離が最小の 50mm において、容器内の空隙中の水密度 1.0g/cm³ で中性子実効増倍率の最大値 0.911 が算出されることが分かる。

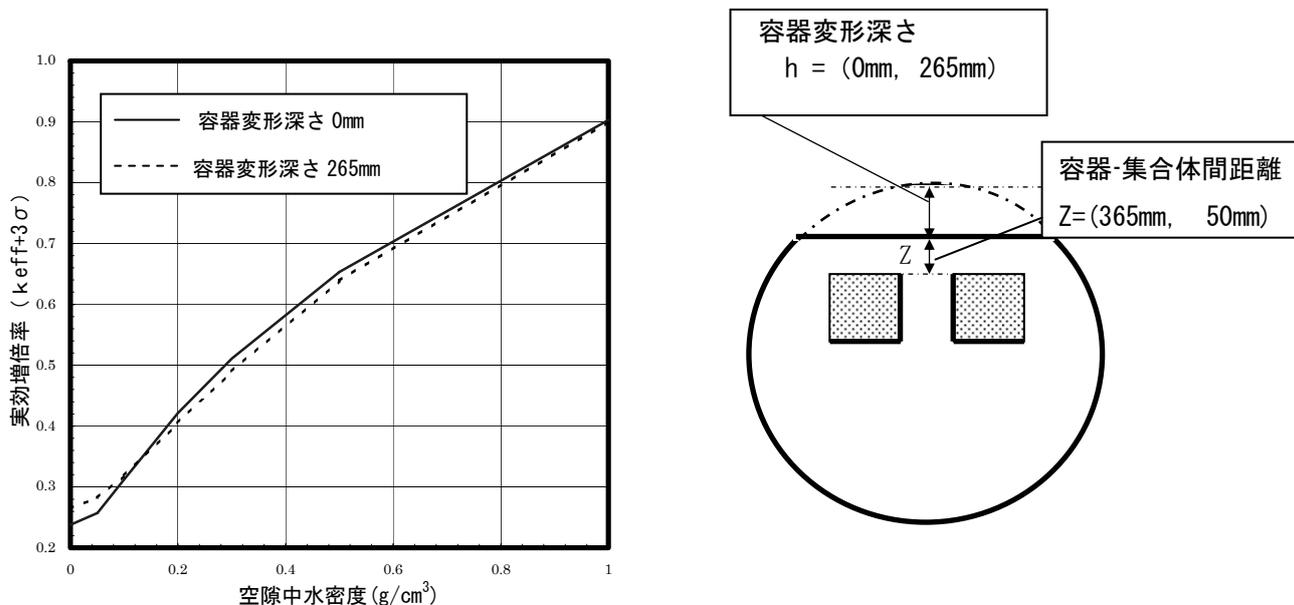


図 6.5-7 落下衝撃による輸送容器変形深さ h および容器と燃料集合体間の距離 Z をパラメータとした孤立系臨界解析結果 (Z=50mm)

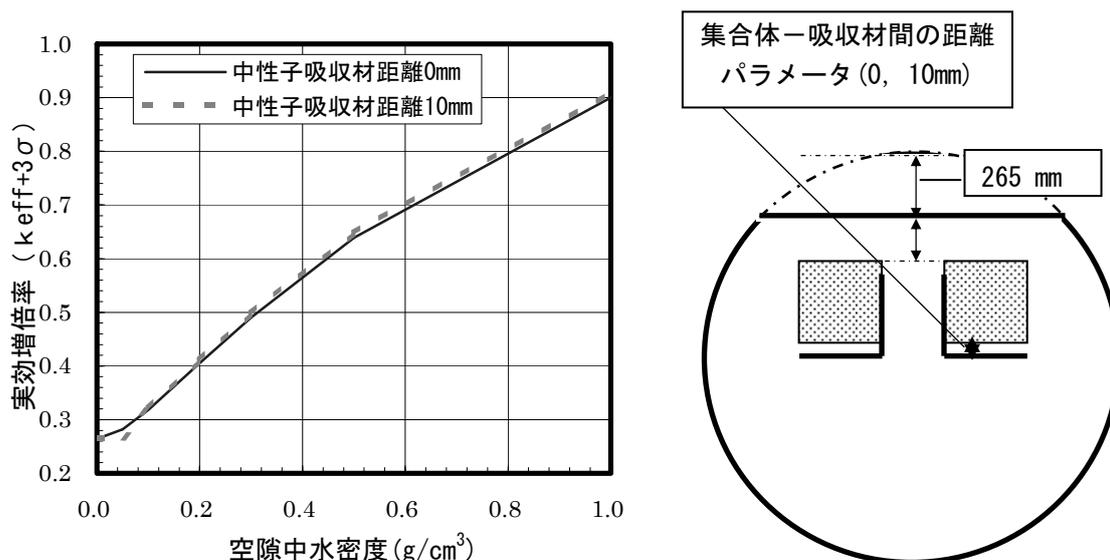


図 6.5-8 落下衝撃による中性子吸収材と燃料集合体間の距離をパラメータとした孤立系臨界解析結果 (ただし変形深さ 265mm)

(3) 配列系臨界解析結果

容器変形深さおよび中性子吸収材と燃料集合体の距離をパラメータとした中性子実効増倍率計算結果の 1 例を図 6.5-9 に示す。これから、NFI-V 型輸送物落下衝撃に対する配列系臨界解析においては、輸送容器内部の空隙中の水密度を $1.0g/cm^3$ に近づけると中性子増倍率が高くなる傾向を持っている。

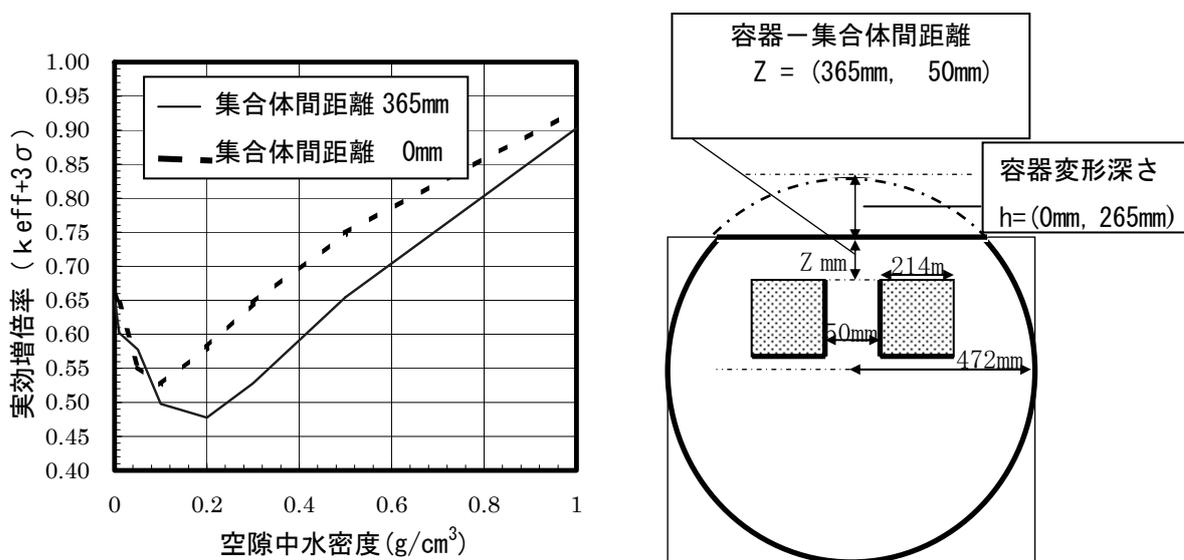


図 6.5-9 落下衝撃による輸送容器変形深さ h および容器と燃料集合体間の距離 Z をパラメータとした配列系臨界解析結果 ($Z=50mm$)

また、中性子吸収材と燃料集合体との距離をパラメータとした臨界計算結果の 1 例を図 6.5-10 に、輸送物面間距離をパラメータとした臨界計算結果の 1 例を図 6.5-11 に示す。

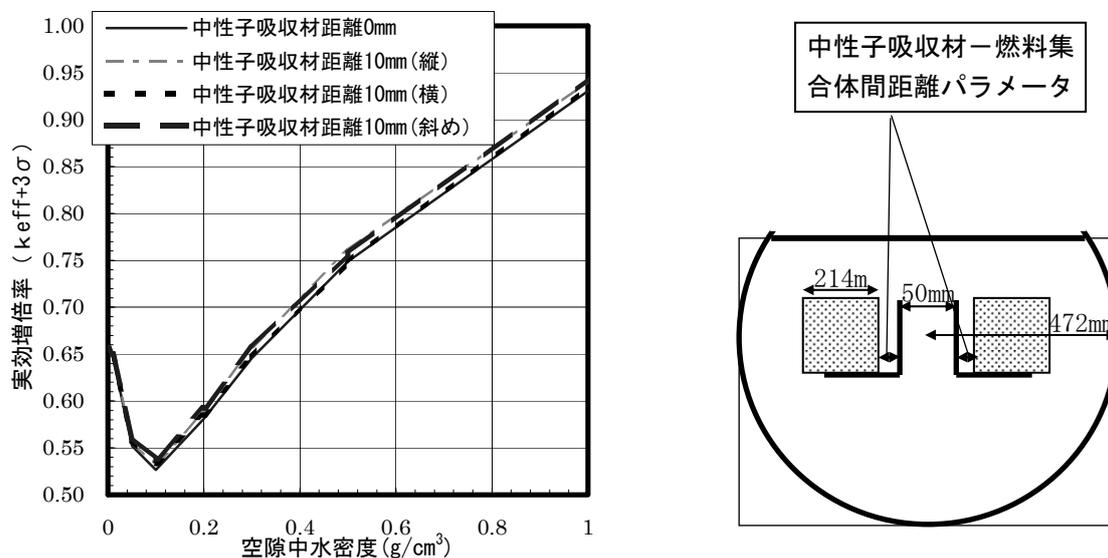


図 6.5-10 落下衝撃による中性子吸収材と燃料集合体間の距離をパラメータとした配列系臨界解析結果（容器変形深さ 265mm）

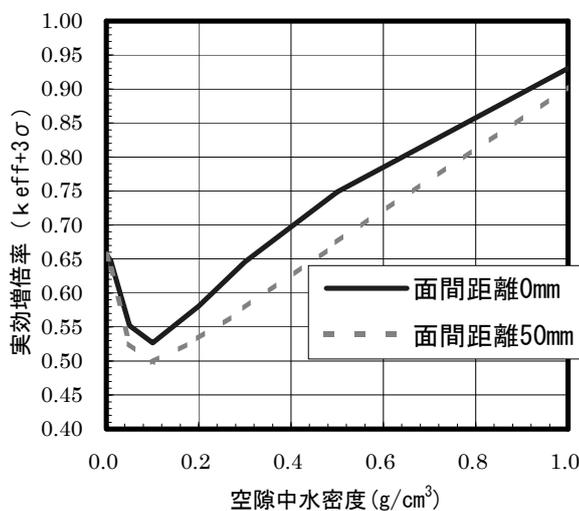


図 6.5-11 落下衝撃による輸送物面間距離をパラメータとした配列系臨界解析結果（容器変形深さ 265mm）

これらの解析結果をまとめると、落下衝撃により損傷した輸送物の配列系においては、中性子吸収材と燃料集合体との距離が最大の 10mm、輸送容器変形深さが最大の 265mm、容器外面と燃料集合体の距離が最小の 50mm、輸送物面間距離が 0mm において、容器内の空隙中の水密度 1.0g/cm³ で中性子実効増倍率の最大値 0.944 が算出される。

6.5.3 熱安全性解析結果に基づく臨界解析

(1) 解析条件

熱安全性解析結果では、容器の O リングが焼失し、容器の閉じ込めが維持できないとする。但し、中性子吸収材の最高温度は、熱的限界を超えないため、中性子吸収材の機能は維持される。従って、容器内側と燃料棒外側の空隙中の水密度を 0.0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0(g/cm³)と変化させて解析する。

孤立系あるいは配列系の臨界解析条件として、熱安全性解析結果を参照してショックマウントが焼失することを仮定した。図 6.5-12 および図 6.5-13 に輸送容器径断面における容器外面と燃料集合体の距離をパラメータとした孤立系臨界解析モデルを示す。容器と燃料集合体の間には構造材が設置されているため、径断面の縦方向燃料集合体距離パラメータの最小値は 68mm, 最大値は 365mm, 横方向燃料集合体距離パラメータの最小値は 50mm, 最大値は 228mm とする。

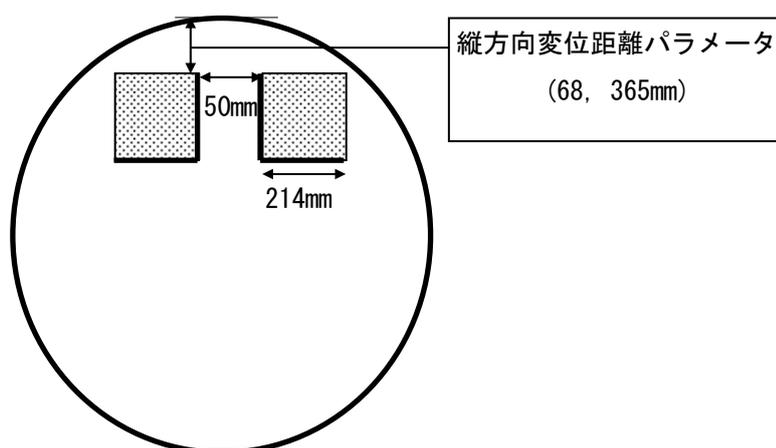


図 6.5-12 熱損傷による縦方向集合体変位距離をパラメータとした孤立系臨界解析モデル

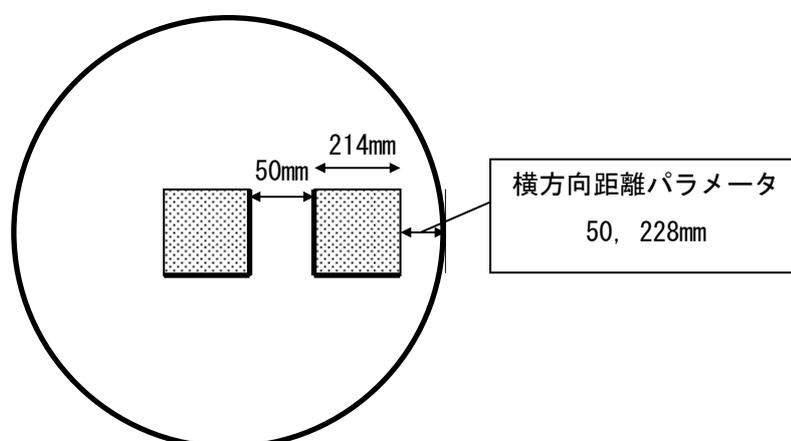


図 6.5-13 熱損傷による横方向集合体変位距離をパラメータとした孤立系臨界解析モデル

配列系臨界解析においては、輸送容器周りは完全反射条件とし、輸送物相互の面間距離の最大を 50mm に設定する。また、輸送容器の長手方向の燃料集合体変位も考慮し、図 6.5-14 に示すようにパラメータ範囲を設定する。

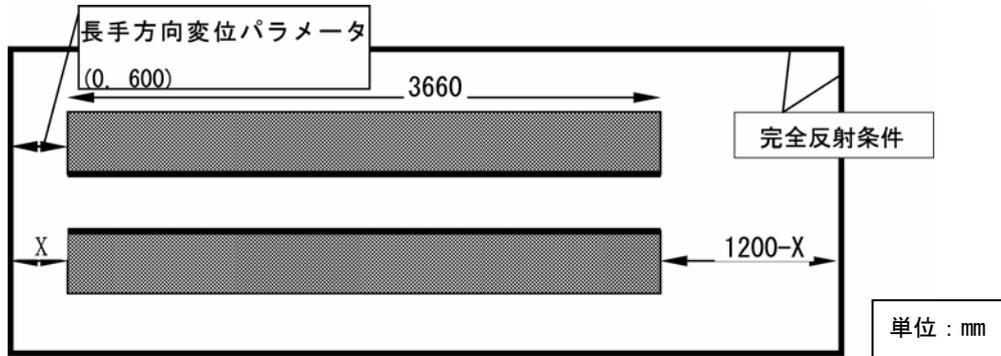


図 6.5-14 熱損傷による長手方向集合体変位距離をパラメータとした配列系臨界解析モデル

以上により、孤立系および配列系に対して輸送容器外面と燃料集合体との距離、輸送物面間距離（配列系のみ）のパラメータを表 6.5-8 および表 6.5-9 のように設定した。

表 6.5-8 熱損傷時の孤立系臨界解析パラメータ

径断面の容器外面と燃料集合体の距離(mm)	
縦方向	横方向
68 (最小)	68 (最小)
365 (標準)	228 (標準)

表 6.5-9 熱損傷時の配列系臨界解析パラメータ

容器外面と燃料集合体面間距離(mm)		輸送物面間距離(mm)
径断面 縦方向	68 (最小) 365 (標準)	0 50
径断面 横方向	68 (最小) 228 (標準)	
長手 方向	0 (最小) 600 (標準)	

(2) 孤立系臨界解析結果

燃料集合体をサポートする中性子吸収材のプレート間の距離を最大の 50mm とし、燃料集合体側面と容器外面までの径断面縦方向および横方向距離をパラメータとした臨界計算結果の 1 例として、反応度的により厳しい縦方向の変位に対する計算結果を図 6.5-15 に示す。これから、NFI-V 型輸送物の火災による熱的損傷を考慮した孤立系臨界解析においては、新燃料集合体輸送物は空隙中の水密度を 1.0g/cm³ に近づけると中性子増倍率が高くなる傾向があり、空隙中水密度 1.0g/cm³ において、中性子実効増倍率は最大で 0.903 程度に算出される。

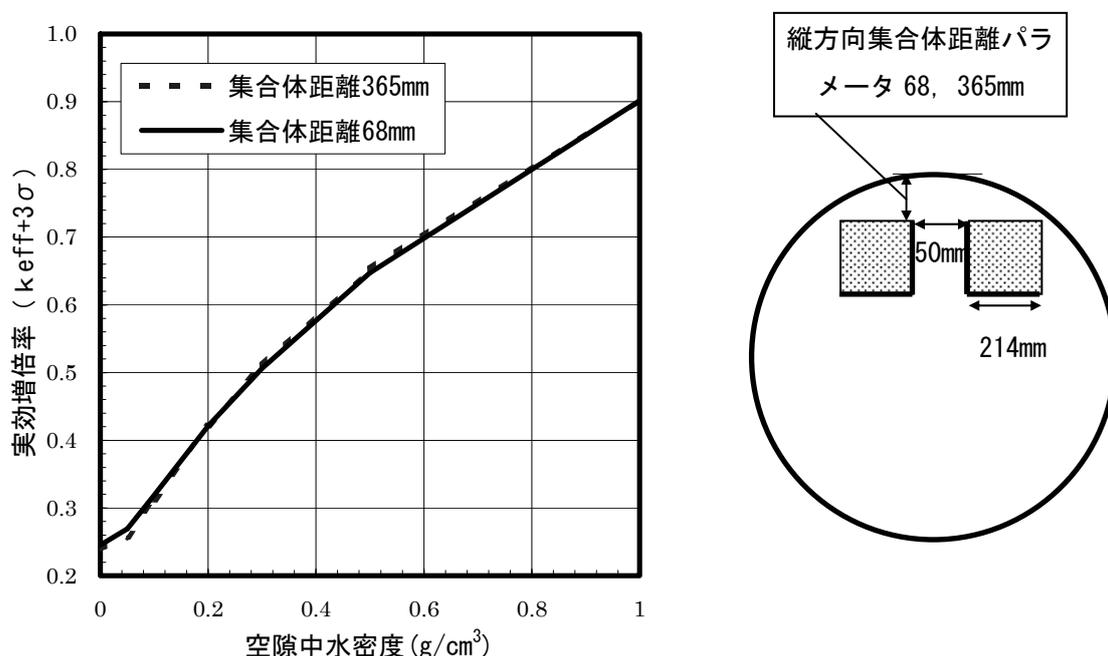


図 6.5-15 熱損傷による輸送容器径断面の縦方向の燃料集合体の距離をパラメータにした孤立系臨界解析結果

(3) 配列系臨界解析結果

燃料集合体側面と輸送容器外面までの径断面における縦方向および横方向距離をパラメータとした臨界解析を行った計算結果の 1 例を図 6.5-16 に示す。これを見ると NFI-V 型輸送物の火災による熱損傷を考慮した配列系臨界解析においては、新燃料集合体輸送物は空隙中の水密度を 1.0g/cm³ に近づけると中性子増倍率が高くなる傾向がある。また、長手方向の燃料集合体変位パラメータに対する計算結果の 1 例を図 6.5-17 に示す。さらに、輸送物面間距離をパラメータにした計算結果の 1 例を図 6.5-18 に示す。これらから、径断面における燃料集合体の輸送容器外面までの距離が最小(68mm)、輸送物面間距離が最小(0mm)において中性子実効増倍率は、最大の 0.910 程度に算出される。

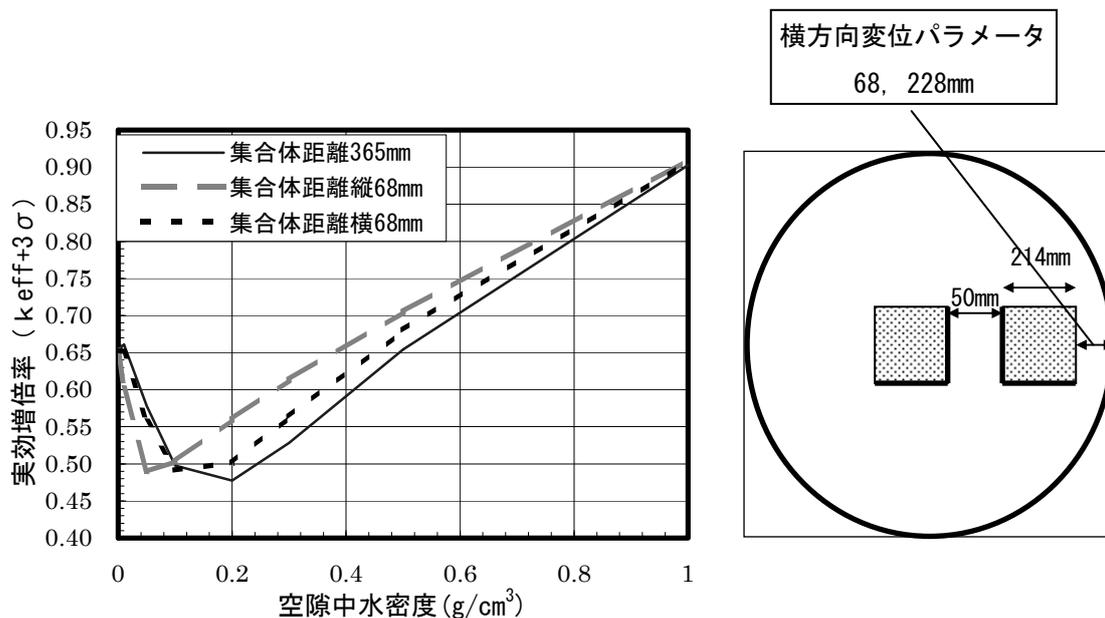


図 6.5-16 熱損傷による径断面燃料集合体変位距離パラメータに対する配列系臨界解析結果（燃料集合体長手方向変位 0mm）

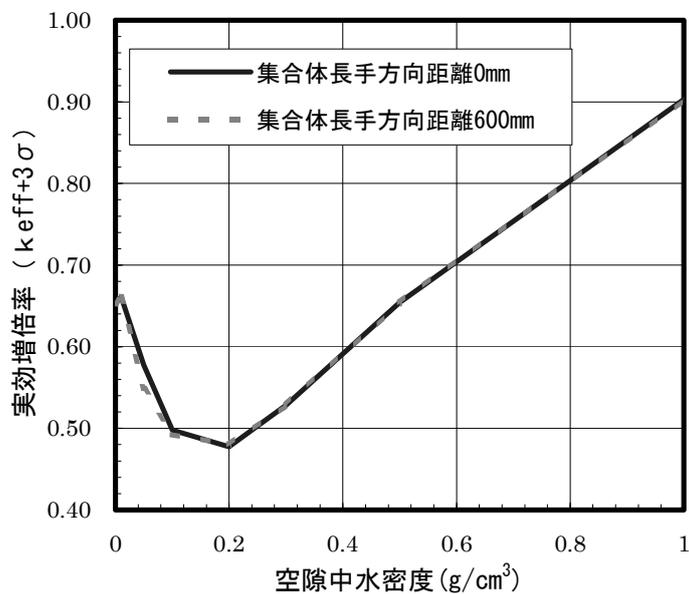


図 6.5-17 熱損傷による燃料集合体長手方向変位距離パラメータに対する配列系臨界解析結果（燃料集合体径方向変位 0mm）

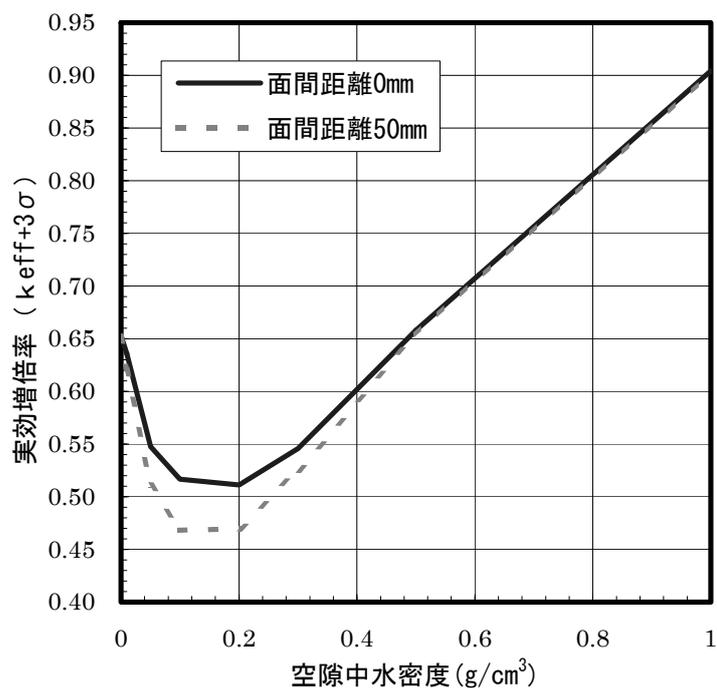


図 6.5-18 熱損傷による輸送物面間距離パラメータに対する配列系
臨界解析結果（燃料集合体径方向変位／長手方向変位 0mm）

6.5.4 臨界安全性解析結果の評価

NFI-V 型輸送物の輸送容器内部の PWR 新燃料集合体は、サポートプレート、ストロングバックやショックマウント等の内部構造物で中空に支持されている設計であり、落下衝撃の影響により輸送容器は比較的容易に変形し、燃料集合体の変位は大きい。一方、火災時の熱的影響に対しては、燃料集合体および支持構造物の温度は比較的低温度を維持できるため、中性子吸収材については健全性を維持し、燃料被覆管の閉じ込め機能も確保される。従って、熱的影響よりも落下衝撃の影響に対する臨界安全解析が輸送物の安全性を実証する上で重要となる。

6.2 節に示した落下衝撃解析結果によると、水平落下姿勢による衝撃に対しても弓型クランプは健全性を保ち、U サポートも破損まで至らない。また、より厳しい条件の垂直落下でも燃料集合体保持機能は健全である。従って、これら落下衝撃解析の結果を参考とし、これを超える輸送容器形状寸法変化および燃料集合体変位をパラメータとし、輸送容器内部の空隙中水密度を変化させた臨界安全解析を行い、最大の中性子実効増倍率を求め、基準値の 0.95 以下であることを確認した。この結果、これら輸送中の落下事故を想定しても NFI-V 型輸送物の未臨界性の確保が可能であるという結論が得られた。

6章 参考文献

- 1) 平成4年度「新燃料輸送容器の安全性実証試験」事業成果報告書, 平成5年3月, 株式会社三菱総合研究所.
- 2) 伝熱工学資料改訂第4版 社団法人日本機械学会.
- 3) ASTM A887 304B, BÖHLER NEUTRONIT A976 (SHEET AND PLATE FOR NUCLEAR ENGINEERING).
- 1) 川端信義, 王謙, 八木弘: 第二東名・名神高速道路トンネル火災時の避難環境に関するシミュレーションによる検討, 空気調和・衛生工学会論文集, No74, p.101 (1999).
- 2) 川端信義, 王謙, 佐々木啓彰, 内藤祐輔: トンネル内火災時に発生する熱気流の挙動に関する数値シミュレーション, 日本機械学会論文集(B編), 65巻634号, p.1870 (1999).
- 3) K.Satoh and S.Miyazaki : A Numerical Study of Large Fires in Tunnels, Report of Fire Research Institute of Japan, No.68, p.19 (1989).
- 4) 鋼構造耐火設計指針 社団法人日本建築学.
- 5) 核データセンターホームページ (http://wwwwnc.tokai.jaeri.go.jp/NuC/index_J.html) .
- 6) 臨界安全ハンドブック第2版, JAERI 1340, 日本原子力研究所燃料施設安全性研究委員会臨界安全性専門部会臨界安全性実験データ検討ワーキンググループ (1999).
- 7) 理科年表 1999年版, 丸善, IUPAC 原子量および同位体存在委員会, Pure and Applied Chemistry 70(1998), p.217.
- 8) JIS ハンドブック, 日本規格協会(1995).

7. BWR新燃料集合体輸送物の安全性解析

7.1 輸送物の概要と安全性評価基準

7.1.1 RAJ-II型輸送物の概要

RAJ-II型輸送物は、図 7.1-1 に示すように外容器、内容器、内部構造物および 2 体の BWR 用新燃料集合体収納物から構成されている。内容器は二重壁構造となっており、収納物への熱的な安全確保のため、二重壁内にアルミナ断熱材が充填されている。内容器は固定具で外容器に固定され、内部には 2 体の燃料集合体が平行に配置して収納されており、輸送時の振動を吸収するために楕円形インサートが各スペーサ間に配置され、これにより各燃料棒が相互に固定されている。外容器内側の上下面および両側面にはペーパーハニカムが配置され、長手方向にはバルサ材が配され、輸送時の衝撃を吸収する構造となっている。

主要項目は以下のとおりである。

a) 収納物

未照射の最大濃縮度 5.0%以下の二酸化ウラン（ガドリニア入りを含む）燃料集合体

b) 輸送物の種類 A 型核分裂性輸送物

c) 輸送指数 0.4

d) 輸送制限個数 200 個（配列制限なし）

e) 輸送物の最大総重量 1490kg

f) 収納物の最大総重量 200 kg-UO₂×2 以下

g) 輸送容器の外寸法（長さ×幅×高さ） 約 5.07m×約 0.73m×約 0.74m

h) 輸送容器の主要材質

外容器 ステンレス鋼，バルサ，ペーパーハニカム，天然ゴム

内容器 ステンレス鋼，アルミナ，発泡ポリエチレン，天然ゴム

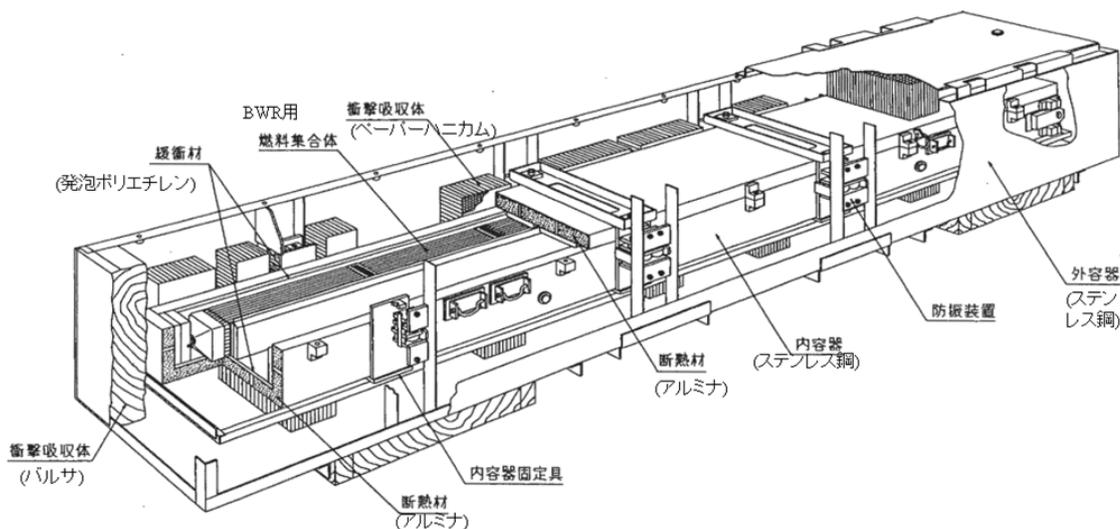


図 7.1-1 輸送物概略図

7.1.2 安全性評価基準とその確認方法

第1章序言で述べたように、当該輸送物はA型核分裂性輸送物として規則に定められた「一般の試験条件」および引き続いた「特別の試験条件」の後において臨界に達しないことが要求される。また、当該輸送物は、未照射のUO₂燃料集合体を収納するため、燃料被覆管の密封機能確保は規則の安全上の要求事項ではないが、密封機能が維持されるように設計されている。従って、本輸送物は、これらの規則・設計の要件を満たして製作される限り、輸送中の事故条件に対しても密封性あるいは未臨界性が確保されるものと考えられるが、本章では、第3章で策定した苛酷事故シナリオによる落下衝撃あるいは熱安全性に係る解析を行い、その結果を用いて表7.1-1に掲げる事項を満足することを確認する。すなわち、燃料集合体、輸送容器本体、内部構造物の落下衝撃による変形が許容範囲にあり、また、火災時の熱的影響による被覆管の温度上昇が許容温度以下にあることを、解析結果と関連文献記載値を比較して確認する。また、落下衝撃による構造部材の変形等、また火災時の熱的影響による部材焼失等を考慮した臨界安全性解析を行い、輸送物の孤立系あるいは配列系のいずれの配置においても中性子増倍率が0.95以下であることを示す。

輸送物に対する落下衝撃解析あるいは熱安全性解析のモデルおよび解析方法の妥当性、ならびに解析精度は、当該輸送容器の安全解析書に記載された「特別の試験条件」における原型試験結果と解析結果を比較し、解析結果が原型試験を概略再現していることにより確認することとする。

表 7.1-1 RAJ-II型模擬輸送物の事故時に適合すべき要件および評価基準

適合すべき要件	評価基準	確認方法
閉じ込め性	・燃料棒被覆管が破損しないこと。	・熱解析により、被覆管表面温度が800℃以下であること*。
未臨界性	・燃料棒被覆管内に水が浸入しないこと。 ・集合体、内容器の構造材および断熱材等の形状が、臨界となるモデル形状を逸脱しないこと。	集合体、輸送容器、構造材について、構造解析により得られた最大変形を包絡する解析モデルで評価して中性子増倍率が0.95未満であること。

*：新燃料輸送容器の安全性実証試験¹⁾ ²⁾ 報告においては、ヘリウムリークテストの結果から800℃以下での燃料棒の健全性が確認されている。

7.2 高架道よりの落下事故に係る落下衝撃解析

7.2.1 解析モデルおよび解析方法

7.2.1.1 解析モデル

(1) 解析の構成

本解析は、輸送容器と衝撃面の舗装された地盤をそれぞれ3次元でモデル化し、図7.2-1に示すように18m高さから衝撃面に衝突する垂直落下、水平落下およびコーナー落下を苛酷事故として設定した。なお、衝撃面と輸送容器の間にはリバウンドを可能なようにモデル化した。

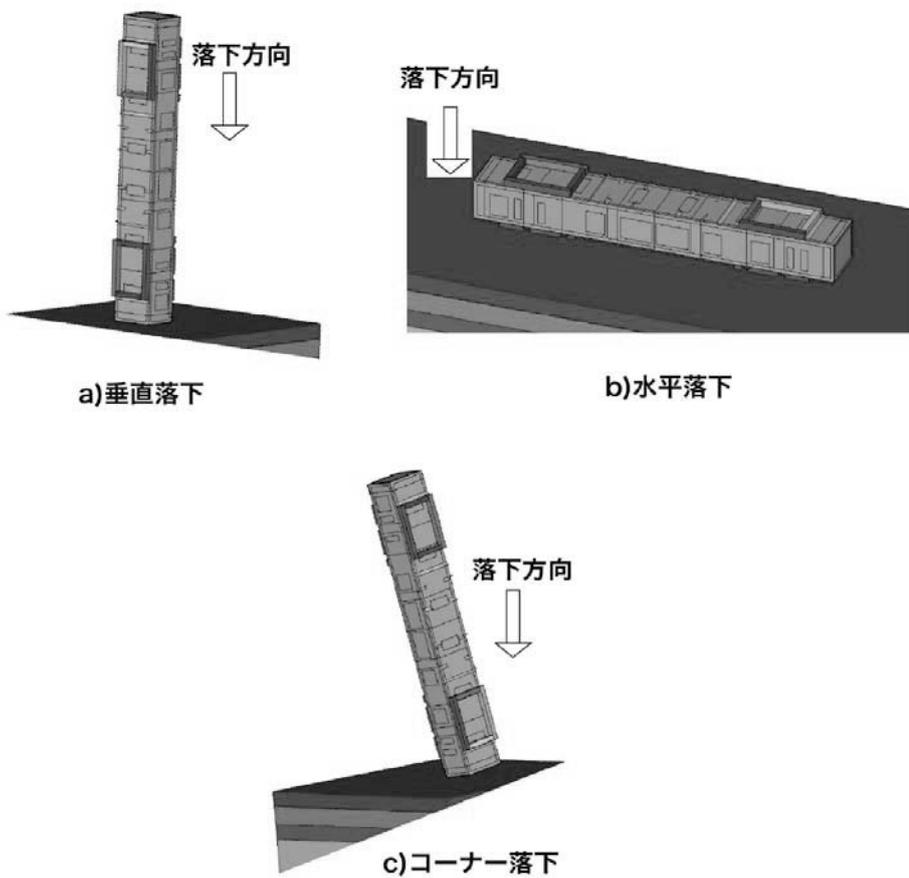


図 7.2-1 解析のため仮定した3種類の落下姿勢

(2) 輸送容器のモデル化

モデル化に当たっては、溶接部を含めたこれらの構造を、外容器および内容器についてはシェル要素にて模擬し、バルサ材およびペーパーハニカムについてはソリッド要素でモデル化する。また、内容器の内面にある緩衝材は強度部材としては考慮しない。燃料集合体については、燃料棒間隔を保持するスペーサに加えて楕形インサートが配されていることから、燃料集合体の重量を模擬するソリッド要素でモデル化する。

(3) 衝撃面のモデル化

第 4 章の濃縮六ふつ化ウラン輸送物の落下衝撃解析において述べたものと同様に、コンクリート舗装およびコンクリート舗装をモデル化する。

7.2.1.2 解析方法と解析条件

(1) 解析コード

解析には第 3 章で述べたように有限要素法衝撃解析コード LS-DYNA Ver.960 を使用した。

(2) 材料データ

輸送容器のステンレス鋼、衝撃面のアスファルトおよびコンクリート舗装面の物性値、降伏条件等は、第 4 章で用いられたものと同様とした。

(3) 要素分割

輸送物の有限要素モデルの要素数は 230772、節点数は 283205 である。コンクリートおよびアスファルト舗装面の寸法およびその有限要素分割は第 4 章で述べたものと同様にした。

(4) その他の計算条件の設定

その他の計算条件として、輸送容器を構成する全ての節点に 18m 落下高さから定められる衝突時速度を与えた。輸送容器の重量は安全解析書のそれと一致させた。また、全ての接触面で、摩擦係数は同種金属間の一般的な値である 0.3 を与えた。

なお、上記の解析モデルおよび解析方法の妥当性については、安全解析書に記載の「特別の試験条件」による 9m から非降伏面への落下試験結果と、同一条件での衝撃解析結果を比較することにより解析精度を確認した。

7.2.2 解析結果とその評価

7.2.2.1 舗装面への落下衝撃解析

ここでは、コンクリート舗装面への落下解析を行った結果について述べる。アスファルト舗装面への落下解析についても同様な結果が得られている。

(イ) 垂直落下に対する解析結果

(1) 輸送容器の変形

RAJ-II型輸送物の燃料集合体の下部タイプレート側がコンクリート地盤に直撃するように18m高さから垂直落下させたときの解析による外容器および内容器の変形を、それぞれ図7.2-2および図7.2-3に示す。これらの変形挙動を見ると、外容器および内容器には特に異常な変形が発生していない。

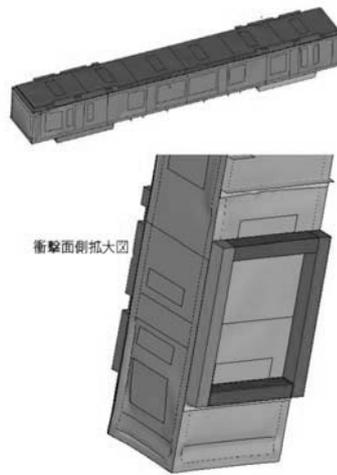


図 7.2-2 垂直落下時の外容器の変形

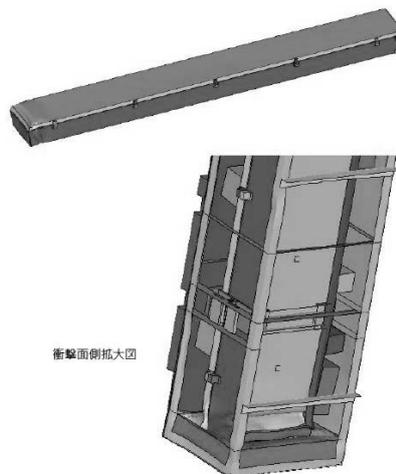


図 7.2-3 垂直落下時の内容器の変形

18m 高さからコンクリート舗装面への垂直落下時の RAJ-II 型輸送物に生じる変形量の時間変化を図 7.2-4 に示す。変形量は、同図中に示す輸送容器の外容器断面の 4 隅 (A B C D) と内容器断面の 4 隅 (a b c d) の長手方向の両端面および中央部における間の距離の変化を取って示した。これから、外容器の変形は、大部分が衝撃面側すなわち輸送容器中央部から下部タイプレート側での変形であり、長手方向に一様に 12mm 縮んでいる。一方、内容器の変形は、外容器におけると同様に大部分が衝撃面側であるが、最大 61mm の変形が底面部分 (b および c 点) に偏っており、上蓋部分 (a および d 点) では最大 29mm である。

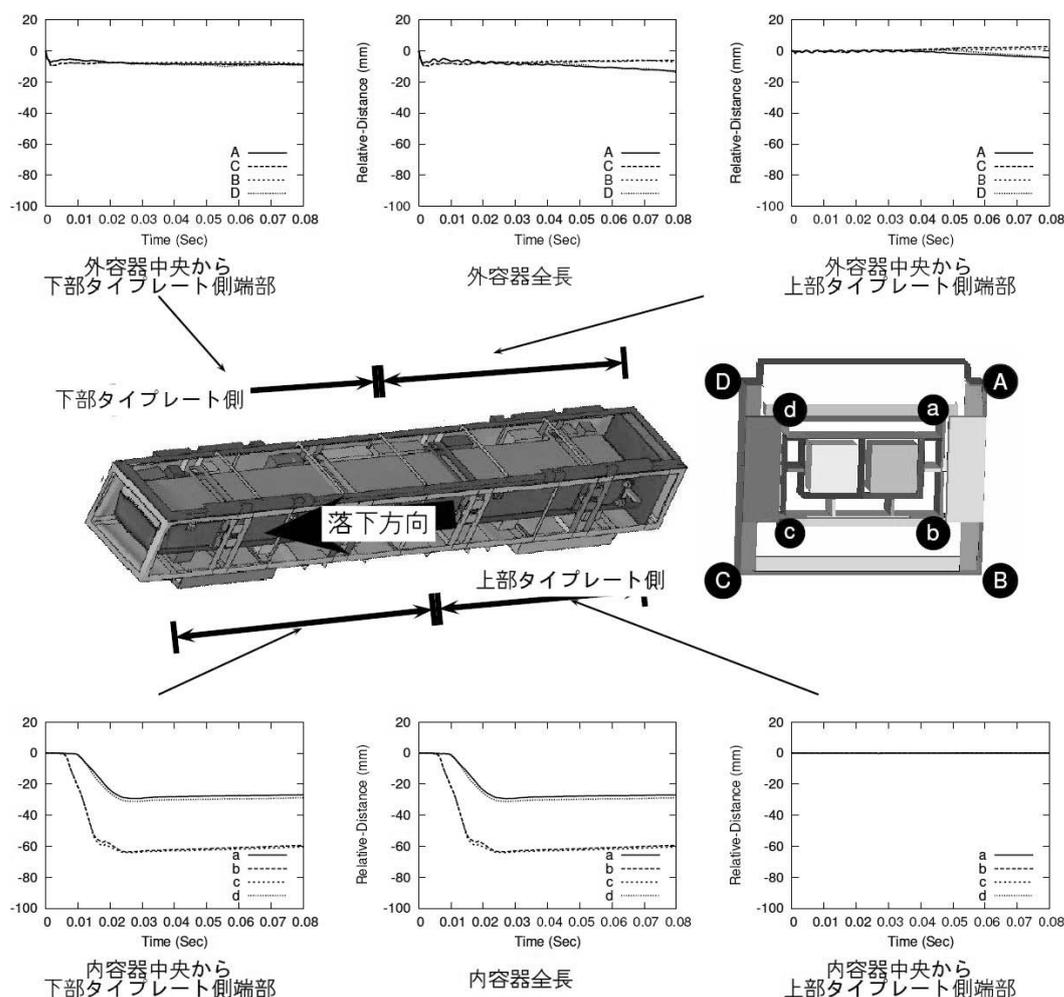


図 7.2-4 垂直落下時の輸送容器の長手方向の変形量時間変化

垂直落下時の RAJ-II 型輸送物の外容器に発生する相当塑性ひずみ分布の解析結果では、30%を上回る相当塑性ひずみは外容器の角部分に数箇所発生しているのみであり、内容器では最大でも 10%の塑性ひずみが発生している。この値は、ステンレス鋼の相当破断ひずみ (40%)を下回っており、コンクリート舗装面への 18m 高さからの垂直落下時に内容器に開口部を生じさせることは無いものと考えられる。

(2) 輸送容器に発生する加速度

18m 高さからコンクリート舗装面への垂直落下時の内容器に発生する加速度を、中央部近傍の3ヶ所における時間変化として図 7.2-5 に示す。これから、内容器上蓋側（図中”ad”）で 96G から 108G，側面側（図中”cd”および”ab”）で 96G から 104G，底面側（図中”bc”）で 104G から 108G の最大加速度範囲となり、各評価点において多少のばらつきが生じているが、波形はほぼ同等と判断される。これらの最大加速度は、安全解析書記載の 9m 垂直落下試験時の値よりも小さく、燃料集合体に与える影響は少ないものと考えられる。

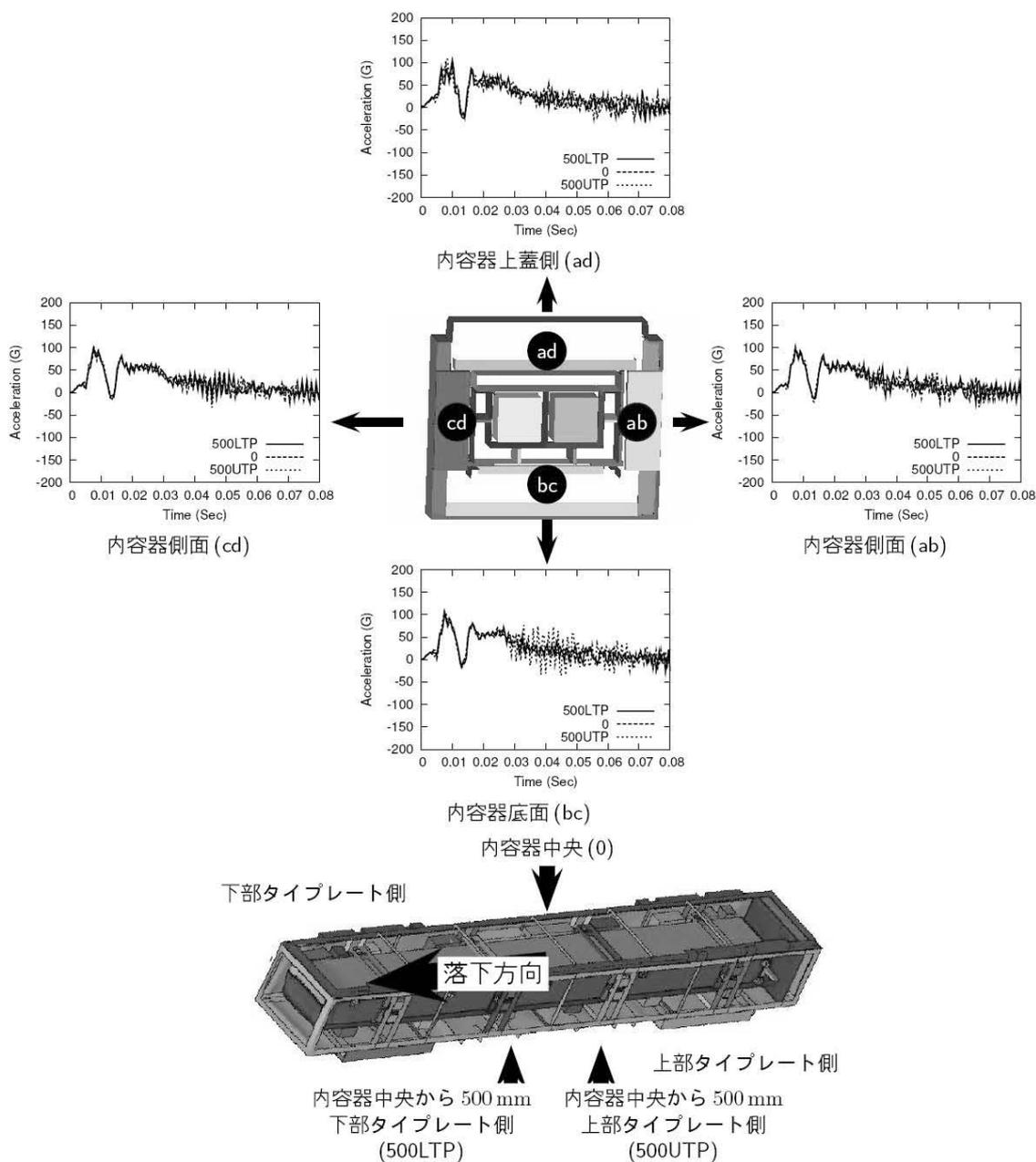


図 7.2-5 垂直落下時の内容器に発生する長手方向加速度時間変化

(ロ) 水平落下に対する解析結果

(1) 輸送容器の変形

輸送容器上蓋がコンクリート地盤に直撃するように水平に落下させたときの、外容器および内容器の変形をそれぞれ図 7.2-6 および図 7.2-7 に示す。これらの変形挙動を見ると、18m 高さからのコンクリート舗装面への水平落下による衝撃に対して、外容器および内容器には、特に異常な変形が認められない。



図 7.2-6 水平落下時の外容器の変形

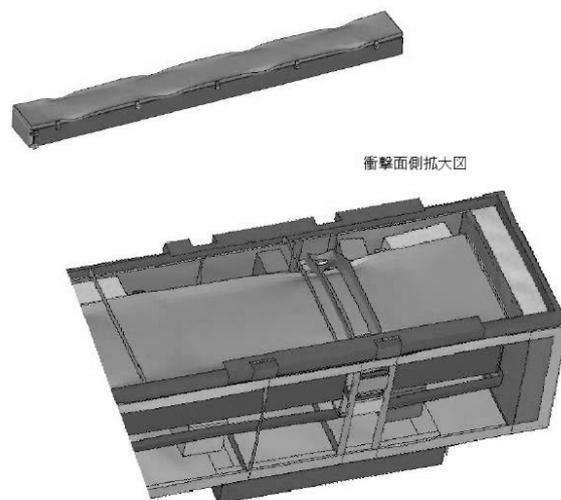


図 7.2-7 水平落下時の内容器の変形

RAJ-II型輸送物の18m高さからコンクリート舗装面への水平落下時の外容器および内容器の変形量の時間変化を図7.2-8に示す。変形量としては、図中に示すような中央、上部タイプレート側1500mm位置および上部タイプレート側端部の3箇所において、外容器断面4隅(A, B, C, D)と内容器断面の4隅(a, b, c, d)、およびそれらの隅点を結ぶ辺の中央(外容器ではAB, BC, CD, AD, 内容器ではab, bc, cd, ad)の高さ方向にある2点間の距離で示す。その結果、長手方向中央における外容器のAD点とBC点の間、内容器のad点とbc点の間で変形量が最大となる。これらの変形量には弾性変形による振動が見られるため、塑性変形としては変形量が概ね収束している0.03秒以降の変形量を平均すれば、外容器の最大塑性変形量は38mmとなり、内容器ではこれが29mmと評価される。また、外容器の長手方向上部タイプレート側端部では、全く変形が見られない。一方、内容器の長手方向上部タイプレート側端部では全断面にわたって20mm膨らむ結果となっている。

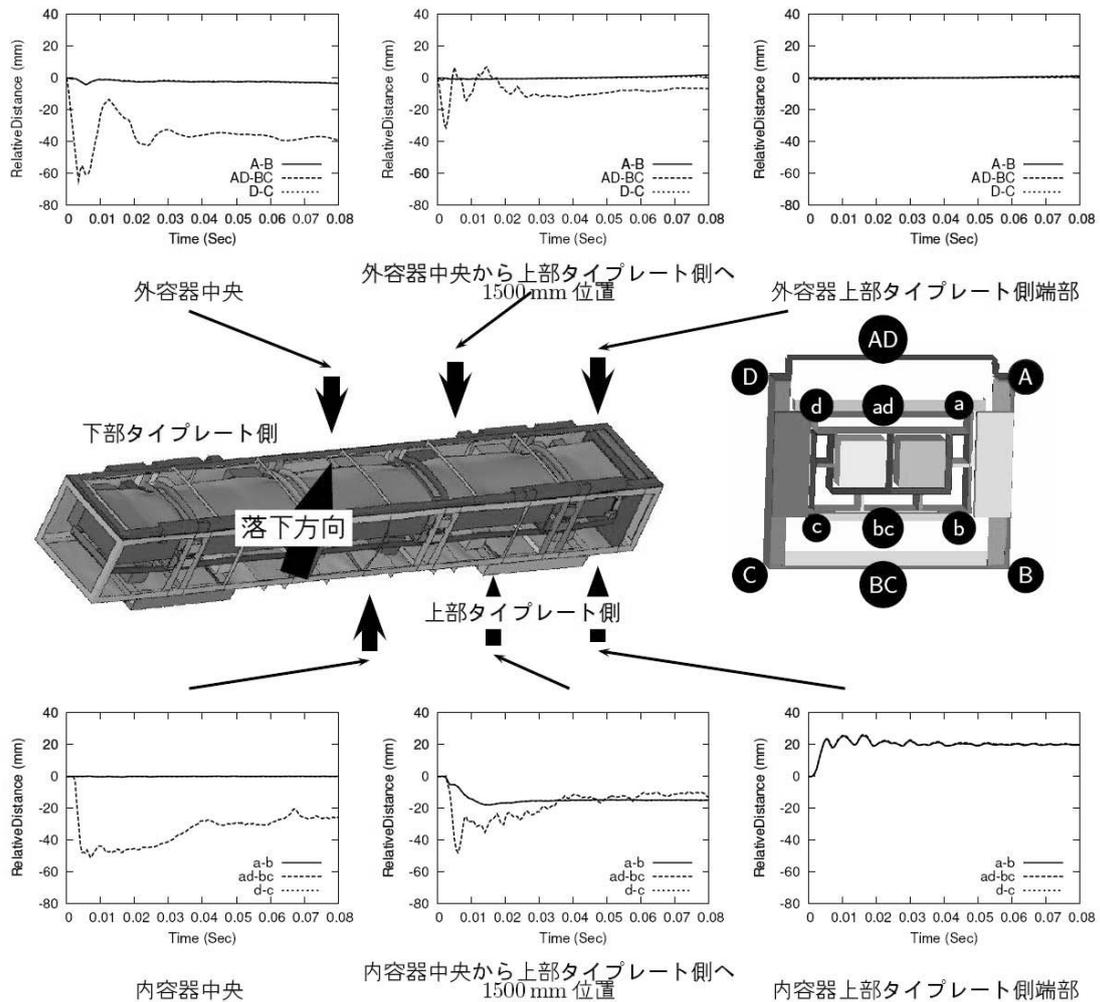


図 7.2-8 水平落下時の外容器および内容器の変形量時間変化

18m 水平落下時の外容器と内容器に発生する相当ひずみの解析結果では、相当塑性ひずみが 30%を超える部位は外容器の角部に集中して現れており、内容器では最大の相当塑性ひずみでも 10%程度となっていることが分かる。この値は、ステンレス鋼の相当破断ひずみ（40%）を下回っており、コンクリート舗装面への 18m 高さからの水平落下時に内容器に開口部を生じさせることは無いものと考えられる。

図 7.2-9 に外容器外面と内容器内面間距離の変化量の時間変化を示す。これを見ると、上蓋側（図中の AD 点と h 点の間）では当初 220mm（図では相対変化量 0mm）有ったものが、外容器の変形と内容器の位置移動の相対的变化により、最終的には最大約 90mm 縮まる。また、底面側（図中の f 点と BC 点の間）では当初 227mm 有ったものが、最終的には最大約 58mm 縮まる。

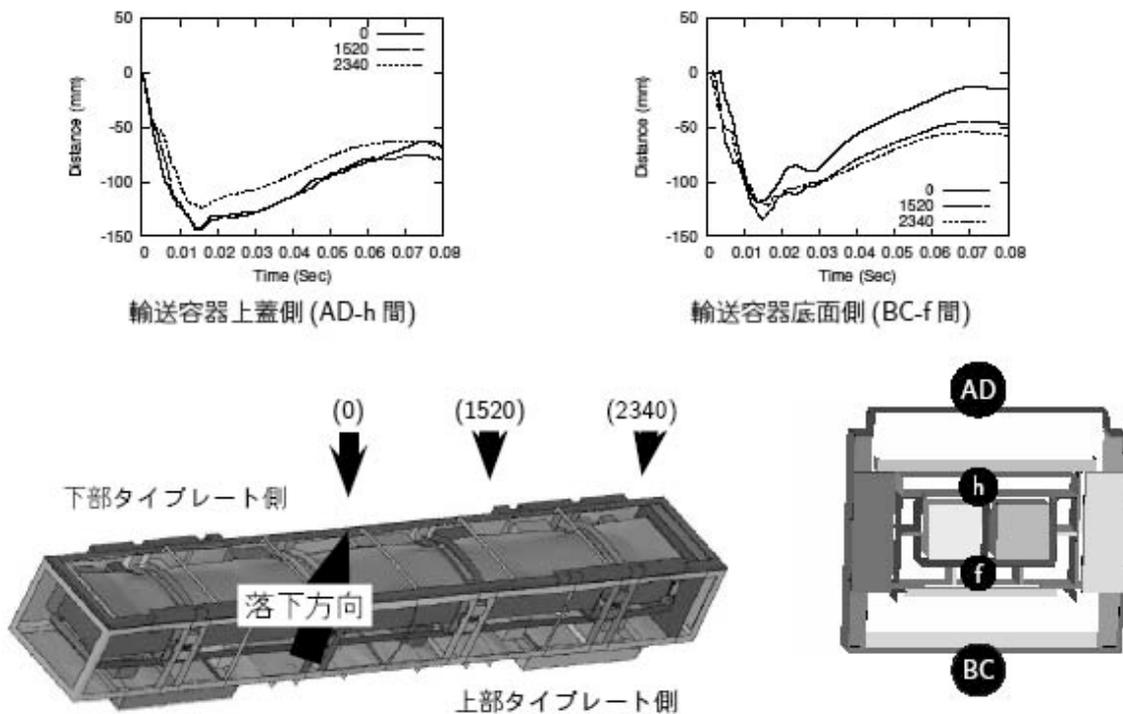


図 7.2-9 水平落下時の輸送容器内部の落下方向相対変形量

(2) 輸送容器に発生する加速度

図 7.2-10 に、18m 高さからコンクリート舗装面への水平落下時の内容器に発生する加速度の時間変化を示す。これを見ると、内容器の最大加速度は、側面側で 384G から 411G、底面側で 221G から 699G の値が発生している。ここで、底面側の加速度については落下時の衝撃ばかりでなく底板の上下方向の振動も加わっていると考えられるため、内容器の加速度としては落下方向に平行な側面側の値を取ることが妥当であろう。このようにした内容器の最大加速度は 411G となる。この値は、輸送容器安全解析書記載の 9m 水平落下試験時の 304G に比べて大きくなるが、解析精度の検証で行った 9m 高さからの非降伏面への垂直落下解析結果（側面側で 411G）と同等であることから、苛酷事故シナリオとして想定した 18m 高さからのコンクリート舗装面への水平落下においては燃料集合体に与える影響は、9m 高さからの剛体面への水平落下時におけると同等あるいは少ないものと考えられる。

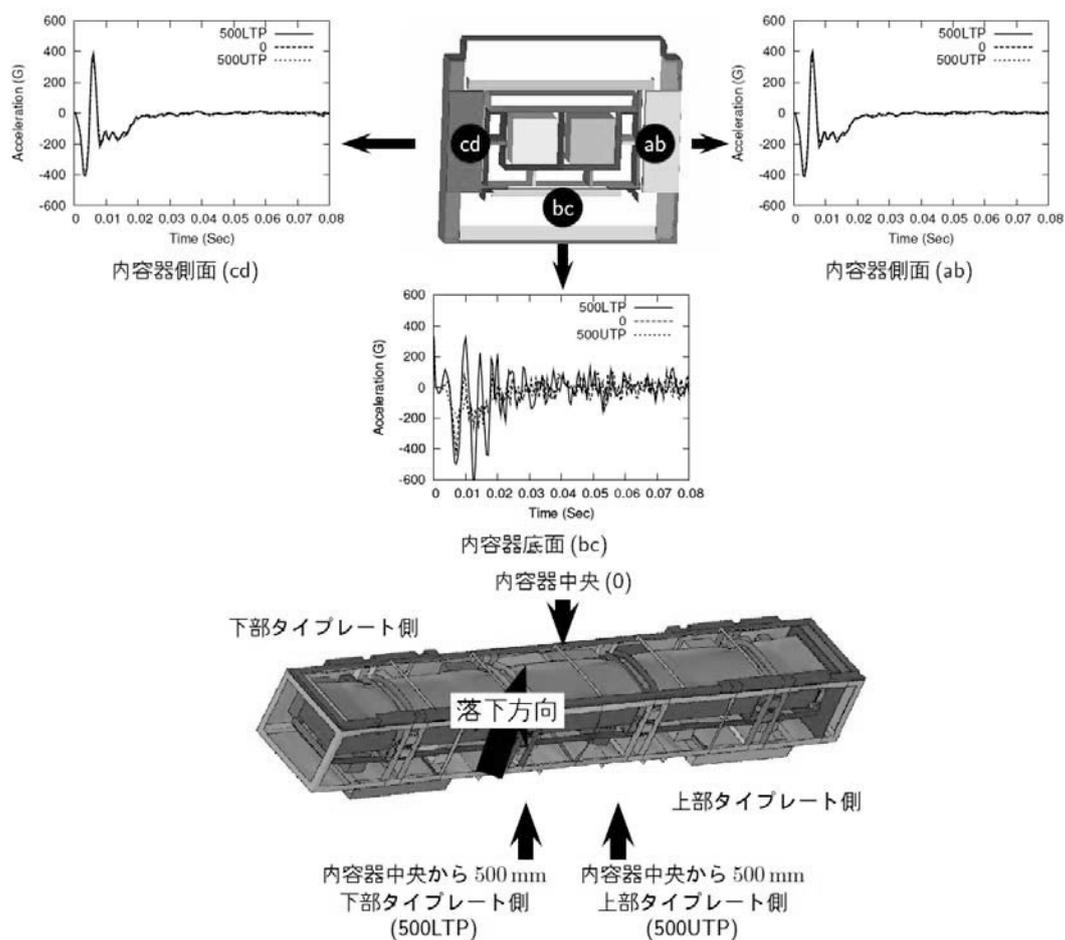


図 7.2-10 水平落下時の内容器に発生する加速度時間変化

(ハ) コーナー落下

(1) 輸送容器の変形

輸送容器上蓋側コーナーがコンクリート地盤を直撃し、かつ、接地点の鉛直線上に輸送容器の重心がくるようにさせたコーナー落下解析による、外容器および内容器の変形挙動をそれぞれ図 7.2-11 および図 7.2-12 に示す。これらの図を見ると、18m 高さからのコンクリート舗装面へのコーナー落下時には輸送容器に外容器、内容器およびそれらの断面を見ても異常な変形の発生は認められない。

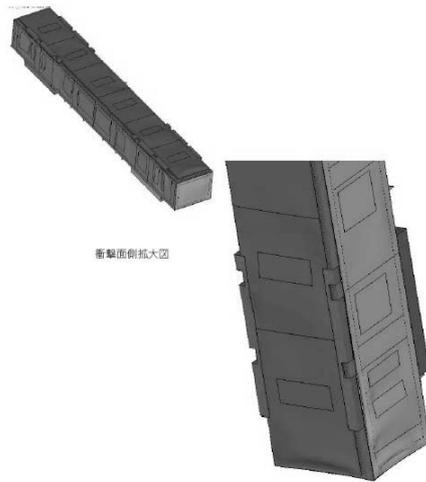


図 7.2-11 コーナー落下時の外容器の変形挙動

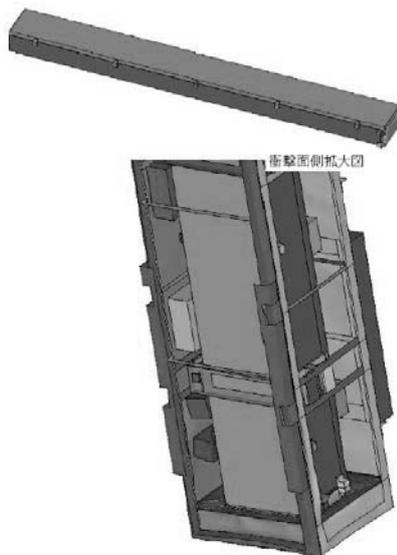


図 7.2-12 コーナー落下時の内容器の変形挙動

次に、18m 高さからコンクリート舗装面へコーナー落下時の外容器および内容器それぞれにおける、長手方向の変形量の時間変化を図 7.2-13 にそれぞれ示す。

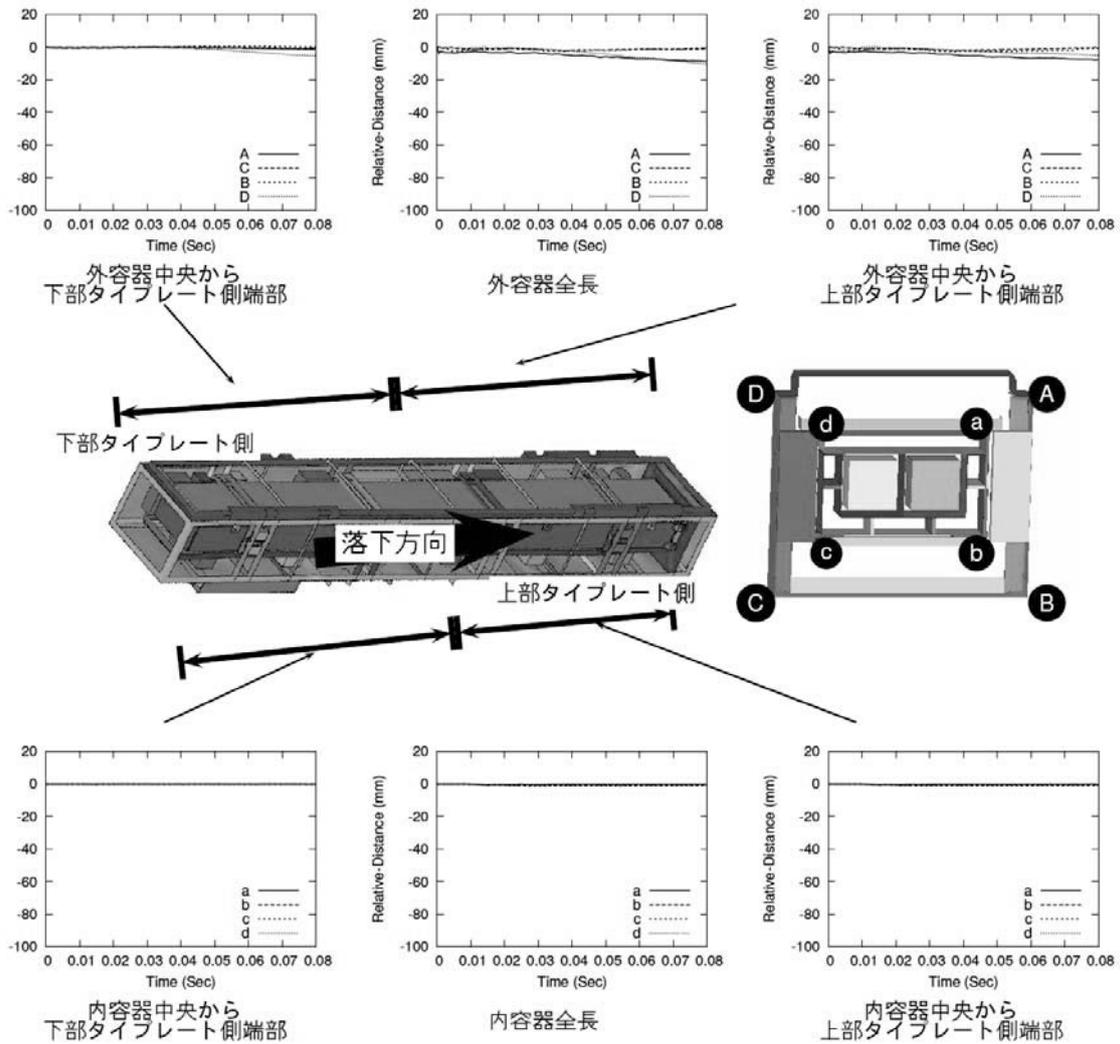


図 7.2-13 コーナー落下時の輸送容器長手方向の変形量の時間変化

図 7.2-13 を見ると、コンクリート舗装面への 18m コーナー落下時の長手方向の落下衝撃面側で最大 7mm 縮んでいる。横方向および高さ方向についても同様に調べると、横方向では殆ど変化が無く、高さ方向では最大 21mm 膨らむ。

図 7.2-14 に外容器外面と内容器内面間距離の変化量の時間変化を示す。これを見ると、上蓋側（図中の AD 点と h 点の間）では当初 220mm（図では相対変化量 0mm）有ったものが、外容器の変形と内容器の位置移動の相対的变化により、最終的には最大約 36mm 拡がることとなる。また、底面側（図中の f 点と BC 点の間）では当初 227mm 有ったものが、最終的には最大約 14mm 縮まることとなる。

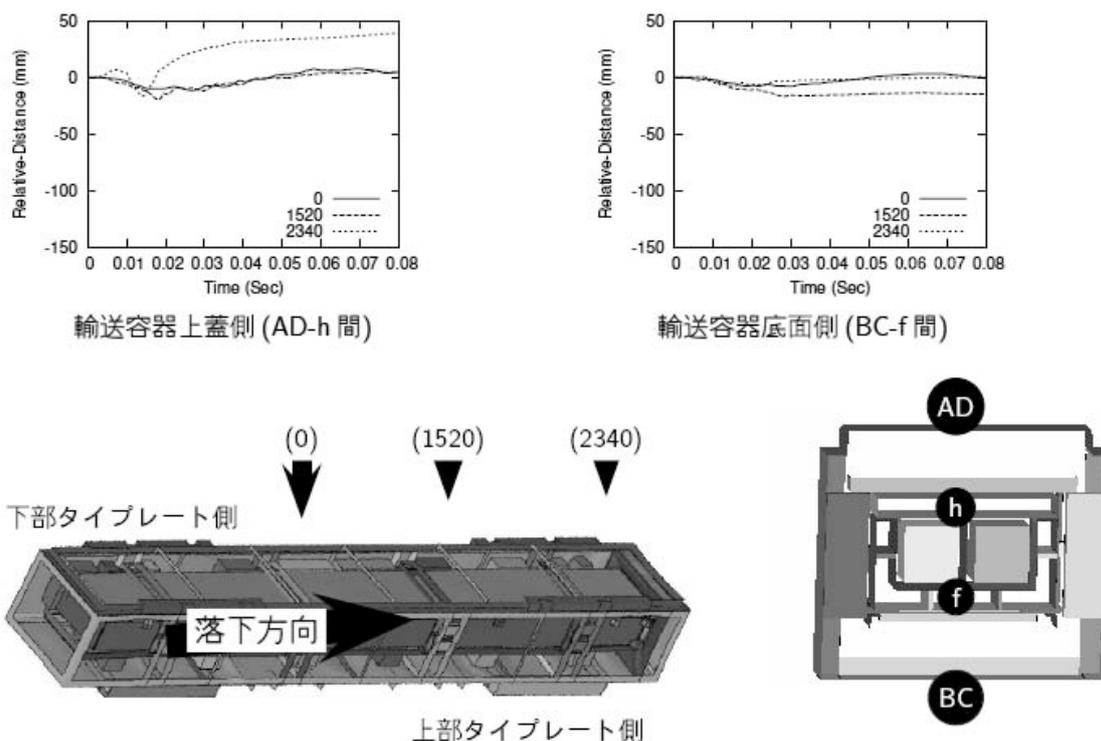


図 7.2-14 コーナー落下時の外容器外面と内容器内面の間の距離の時間的变化

18m コーナー落下時の外容器と内容器に発生する相当ひずみの分布の解析結果から、相当塑性ひずみが 30%を超える部位は外容器の角部に集中して現れており、内容器では最大の相当塑性ひずみでも 10%程度となっている。この値は、ステンレス鋼の相当破断ひずみ（40%）を下回っており、コンクリート舗装面への 18m 高さからの水平落下時に内容器に開口部を生じさせることは無いものと考えられる。

(2) 輸送容器に発生する加速度

18m 高さからコンクリート舗装面へのコーナー落下時の内容器長手方向に発生する加速度の時間変化を図 7.2-15 に示す。

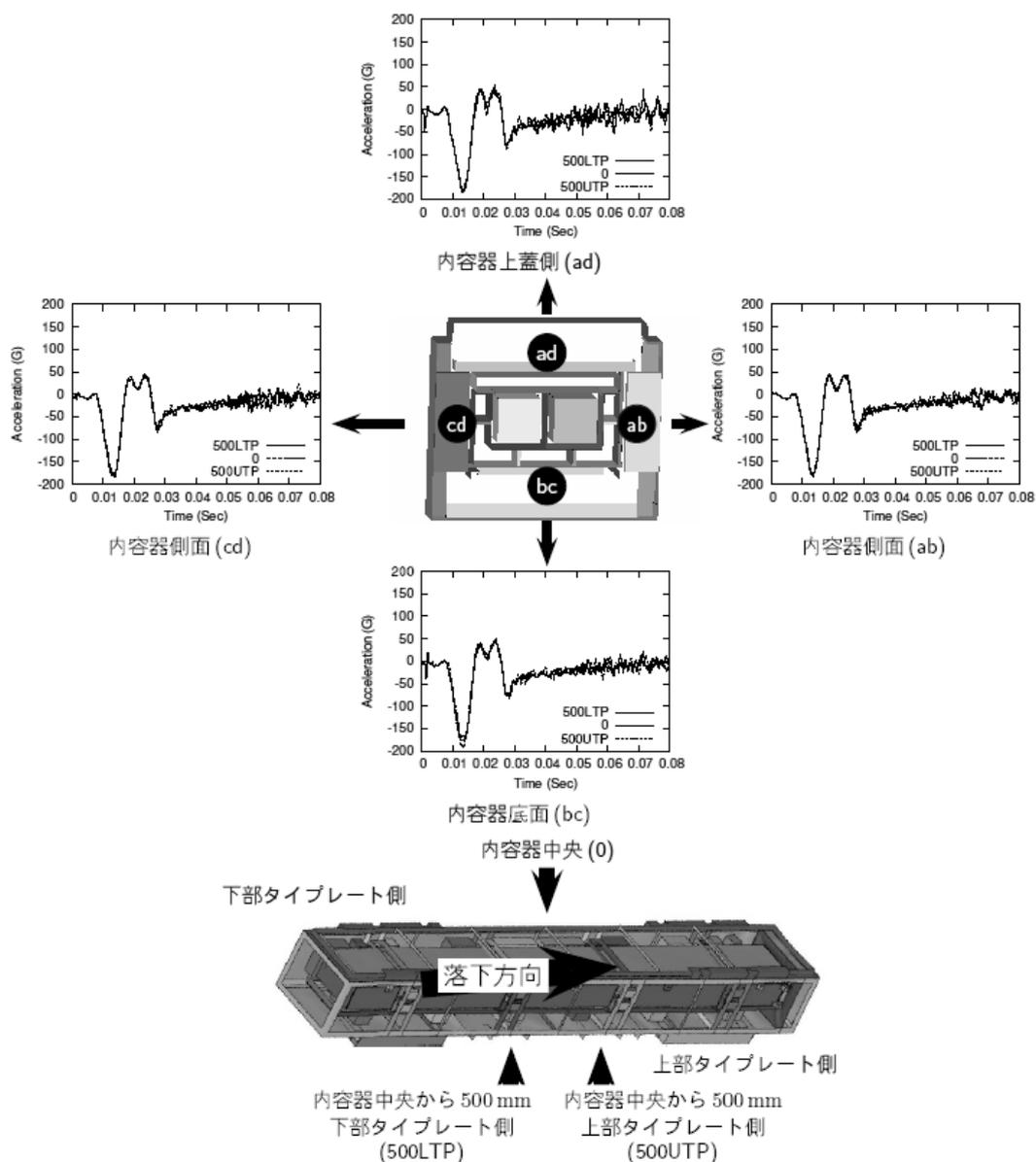


図 7.2-15 コーナー落下時の内容器断面の長手方向に生じる加速度の時間変化

これを見ると、内容器の長手方向に生じる加速度は、中央部近辺の3ヶ所の上蓋側で181Gから184G、側面側で179Gから185G、底面側で170Gから191Gとなり、多少のばらつきは有るが波形はほぼ同等である(最大加速度は、上部タイプレート側500mmで191G)。

この値は、解析精度の検証で行った 9m 高さからの非降伏衝撃面への垂直落下解析結果の 167G と比較すると 15%程度高めであるが、安全解析書記載の 9m 垂直落下試験での 194G に比較すると同等な結果が得られている。しかるに、18m 高さから非降伏衝撃面へ燃料棒が直接落下させた解析において、運動エネルギーが全てジルカロイ製被覆管に圧縮応力として作用した場合であっても、その値は 474Mpa であり、ジルカロイの許容応力 482Mpa より 2%低いことが確かめられているので、RAJ-II 型輸送物の 18m 高さからのコンクリート舗装面へのコーナー落下を想定しても燃料棒が破損する可能性はないと考えられる。

次に、横方向および高さ方向の加速度の時間変化を同様に調べると、最大加速度は 165G 程度であり、非降伏衝撃面への 9m 水平落下試験での 304G、および解析精度の検証における 9m 高さからの非降伏衝撃面への水平落下解析結果と比較して同等あるいは小さい値であるので、18m 高さからのコンクリート舗装面へのコーナー落下による断面方向の力が燃料集合体に与える影響は、9m 高さから非降伏衝撃面への水平落下におけるよりも小さいと考えられる。

7.2.2.2 解析結果の評価

18m からの落下事故を想定したコンクリートおよびアスファルト舗装面への落下衝撃解析の結果をまとめて表 7.2-1 および表 7.2-2 に示す。

これらを以下に集約する。

- (1) いずれの落下姿勢であっても、内容容器に発生する相当塑性ひずみがステンレス鋼の相当破断ひずみを上回らないことから、内容容器に開口部を生じさせることはない。
- (2) 垂直および水平の落下姿勢では、内容容器に発生する加速度が、規則で規定されている 9m 高さからの非降伏衝撃面への落下時に発生する加速度よりも小さい。また、コーナー落下姿勢では、長手方向の加速度が 9m 高さからの非降伏衝撃面への落下時に発生する加速度を上回るけれども、燃料棒の被覆管の破断エネルギーを上回ることではない。
- (3) 外容器は、垂直落下姿勢では長手方向に 15mm 程度縮まり、水平落下姿勢では高さ方向に 40mm 程度縮まる。また、外容器外面と内容容器内面の距離は、最も近接したときには落下衝撃により 100mm 程度縮まる。

以上から、コンクリート舗装面あるいはアスファルト舗装面への 18m 高さからの落下衝撃により、輸送容器が破壊され内容容器に収納された核燃料物質が環境に放出されることはないという解析結果が得られた。

表 7.2-1 コンクリート舗装面に対する落下衝撃解析結果のまとめ

評価項目		垂直落下	水平落下	コーナー落下
外容器変形量 (長手方向)		12 mm	—	7 mm
外容器変形量 (高さ方向)		—	38 mm (長手方向中央部)	21 mm(膨れ) (落下面側 1/4 位置)
外容器外壁-内容器内面 間の近接量 (上蓋側)		—	90 mm	4 mm(膨れ)
内容器中央部 最大加速度	(長手方向)	108 G	—	191 G
	(高さ方向)	—	411 G	165 G
	(横方向)	—	—	74 G
外容器最大 相当塑性ひずみ		40% 超	40% 超	40% 超
内容器最大 相当塑性ひずみ		30% 以下	30% 以下	30% 以下

表 7.2-2 アスファルト舗装面に対する落下衝撃解析結果のまとめ

評価項目		垂直落下	水平落下	コーナー落下
外容器変形量 (長手方向)		13 mm	—	9 mm
外容器変形量 (高さ方向)		—	38 mm (長手方向中央部)	6 mm(膨れ) (落下面側 1/4 位置)
外容器外壁-内容器内面 間の近接量 (上蓋側)		—	96 mm	18 mm(膨れ)
内容器中央部 最大加速度	(長手方向)	76 G	—	140 G
	(高さ方向)	—	311 G	110 G
	(横方向)	—	—	66 G
外容器最大 相当塑性ひずみ		40% 超	40% 超	40% 超
内容器最大 相当塑性ひずみ		30% 以下	30% 以下	30% 以下

7.3 タンクローリーとの衝突による火災事故に係る熱安全性解析

7.3.1 解析モデルおよび解析方法

7.3.1.1 解析モデル

輸送物を外容器，内容器，内部構造物および BWR 燃料集合体収納物からなる構造とし，以下の点に留意して 3 次元でモデル化した。図 7.3-1 の(1)および(2)に，3 次元モデルの輸送物中央部および端部の要素分割図を示す。

- ・ 輸送物軸方向の垂直断面の対称性から，輸送物中央部を対称とした 1/4 モデル（以下，1/4 モデル）とし，計算時間の短縮化のため，精度に影響が生じない範囲で，容器，収納物のある程度簡略化するとともに，計算では中央部と端部に着目して計算を実施した。
- ・ 輸送容器は，外容器，内容器，内容器固定具，内容器内部仕切板で構成される金属部分と，内容器の外表面および内表面の内部に位置する断熱材とした。また，内容器の蓋部は内容器の外表面および内表面を接続するフランジとした。構造が複雑である内容器固定具は，モデル化にあたり，質量が保存されるようにして形状を簡略化した。
- ・ 輸送容器内部構造物のペーパーハニカムおよび木材については，部分的に配置され比較的軽量でもあることから燃焼してもその発熱量が小さいと考えられ，また，燃料集合体との直接的な接触は無いため，これらの領域を動かない空気として簡略にモデル化した。
- ・ 燃料集合体は，被覆管，ペレット，ヘリウムおよび燃料棒間の空気を考慮して均質化し，均質な長方形の燃料モデルとすると共に，燃料モデルの端部に被覆管のみの部分およびタイプレートを考慮した金属部分を設定した。また，燃料モデルの位置は，保守的に燃料モデルの側面と内容器が接触するものとした。
- ・ 空気層については，3 次元ソリッド熱伝導要素にてモデル化し，空洞輻射を考慮した。
- ・ 外容器の外表面と外部環境の間で，熱放射（太陽輻射熱および火災），自然対流熱伝達を考慮し，内容器と燃料集合体の間においては熱放射を考慮した。

7.3.1.2 解析手順

解析手順は，設定された事故シナリオ条件により以下のとおりとする。

ステップ 1：輸送物が 38°C 雰囲気下で所定の太陽輻射熱を受けた時の輸送物内部温度分布に関わる定常伝熱の解析。

ステップ 2：ステップ 1 で求められた輸送物内部の温度分布を初期条件とし，輸送物が 800°C の雰囲気下に 90 分間，曝されたときの非定常伝熱の解析。

ステップ 3：ステップ 2 の終了時の輸送物内部温度分布を初期条件として，38°C 雰囲気下で太陽輻射熱を受けながら冷却される非定常伝熱の解析。

7.3.1.3 解析方法と解析条件

(1) 解析コード

伝熱解析には，第 3 章で述べた汎用有限要素法解析コード ABAQUS6.2 を使用する。

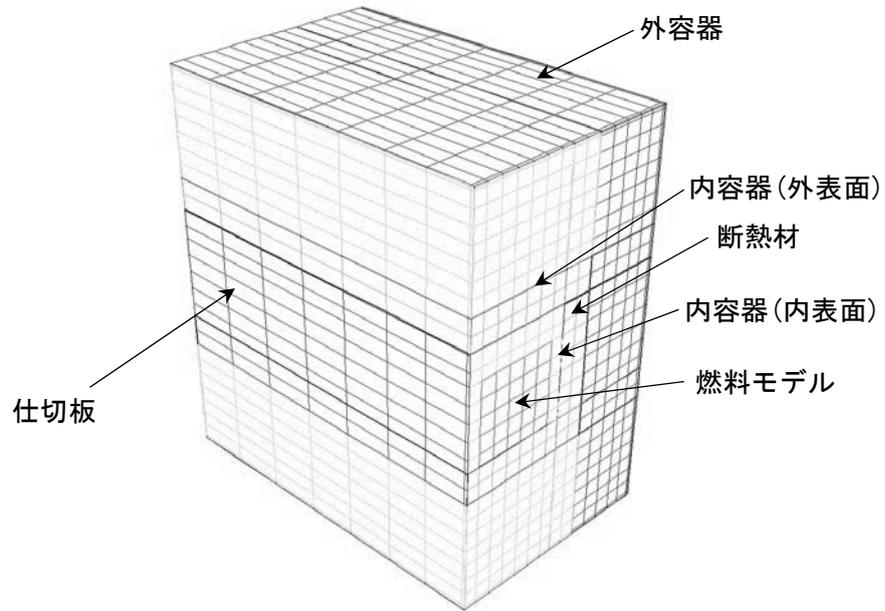


図 7.3-1(1) 輸送物中央部 3次元解析モデル要素分割図

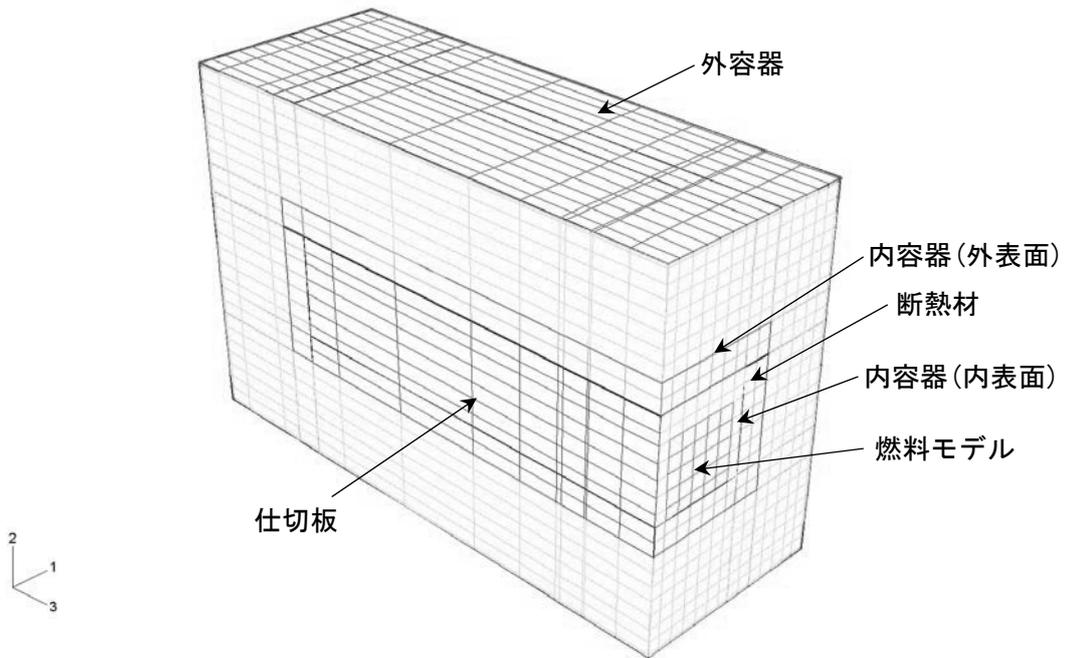


図 7.3-1(2) 輸送物端部 3次元解析モデル要素分割図

(2) 材料物性

計算に使用した輸送物の材料物性は以下のとおりである。

外容器，内容器外表面，内容器内表面，内容器固定具および内容器内仕切板の材質のステンレス鋼の物性値を表 7.3-1 に示す。

内容器の外表面および内表面の内部に位置する断熱材の物性値を表 7.3-2 に，外容器，内容器内部および燃料集合体間の空気の物性値を表 7.3-3 にそれぞれ示した。なお，本解析では，輸送容器を密封容器として扱わないことから，容器内における空気の圧力変化は考慮せず，密度は温度にのみ依存するものとした。

本解析で対象とした BWR 用新燃料集合体の均質化では，燃料集合体の形状がウォーターロッド，短尺燃料棒等が含まれる複雑な形状であることから，燃料モデルの等価物性を燃料集合体の構成材（ペレット，被覆管，空気およびヘリウム）の体積に基づいて，長方形の燃料モデルとして以下のように決定した。均質化した等価物性を表 7.3-4 に示した。

燃料モデルの等価物性は，燃料集合体を構成する，ペレット，被覆管，空気およびヘリウムの体積および重量に基づき，密度(kg/m^3)，比熱($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)，熱伝導率($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)を決定した。密度の均質化は，構成材の体積比を用い，比熱の均質化では構成材の重量比を用いてそれぞれ決定した。また，等価熱伝導率の均質化では，燃料棒および燃料棒間空気を考慮して，長手方向と径方向にそれぞれの値を設定した。

長手方向の等価熱伝導率では，並列モデルとして，燃料棒中のペレットおよび被覆管における連続的な熱伝導を模擬するために，構成材の体積を断面積比に換算して以下の式より算出した。

$$\begin{aligned} \text{長手方向の等価熱伝導率} &= (\text{ペレットの熱伝導率} \times \text{ペレットの体積比}) \\ &+ (\text{被覆管の熱伝導率} \times \text{被覆管の体積比}) \\ &+ (\text{空気の熱伝導率} \times \text{空気の体積比}) \\ &+ (\text{ヘリウムの熱伝導率} \times \text{ヘリウムの体積比}) \end{aligned}$$

また，径方向（断面）の等価熱伝導率では，直列モデルとして燃料棒間の空気の影響を考慮し，各構成材の体積を燃料集合体長で除することにより，それぞれの断面積を求め，それぞれの断面を正方形と仮定して各辺の長さを求め，以下の式より算出した。なお，径方向（断面）の等価熱伝導率については，輻射効果（発熱側が高温）を考慮して，低温域においても保守的な値となるように，高温域(800°C)での値を採用して一定とした。

$$\text{径方向熱伝導率} : \lambda = L / (L_f / \lambda_f + L_c / \lambda_c + L_a / \lambda_a + L_H / \lambda_H)$$

L = 各構成材長さの合計 (m)

L_f = ペレットの長さ (m)

- L_c = 被覆管の長さ (m)
 L_a = 空気の長さ (m)
 L_H = ヘリウムの長さ (m)
 λ_f = ペレットの熱伝導率 (W/m·K)
 λ_c = 被覆管の熱伝導率 (W/m·K)
 λ_a = 空気の熱伝導率 (W/m·K)
 λ_H = ヘリウムの熱伝導率 (W/m·K)

表 7.3-1 ステンレス鋼の物性値³⁾

温度 K	密度 kg/m ³	比熱 J/(kg·K)	熱伝導度 W/(m·K)
300	7920	499	16.0
1000	7640	644	25.7

表 7.3-2 断熱材の物性値 (カタログ値)

温度 K	密度 kg/m ³	比熱 J/(kg·K)	熱伝導度 W/(m·K)
300	260	1000	0.16
1000	260	1000	0.16

表 7.3-3 空気の熱物性値³⁾

温度 K	密度 kg/m ³	比熱 J/(kg·K)	熱伝導率 W/(m·K)
280	1.2606	1007	0.0246
300	1.1763	1007	0.0261
400	0.8818	1015	0.0331
500	0.7053	1031	0.0395
600	0.5878	1052	0.0456
800	0.4408	1099	0.0569
1000	0.3527	1142	0.0672
1200	0.2939	1175	0.0759
1500	0.2351	1212	0.0870

表 7.3-4 燃料集合体の等価物性値

温度 K	密度 kg/m ³	比熱 J/(kg·K)	熱伝導率 (径方向) W/(m·K)	熱伝導率 (長手方向) W/(m·K)
300	3363	255	0.134	2.88
1000	3363	255	0.134	1.93

(3) 初期条件および境界条件

ステップ1～ステップ3の初期条件および境界条件を表7.3-5～表7.3-7に示す。これらは安全解析書等に準拠するが、一部の過度に安全側と見なされる条件については見直し、3次元解析に対して明示されていない箇所については新たに設定した。

表 7.3-5 ステップ1の解析条件

初期条件	境界条件	
	外容器外表面	内容器, 構造材および収納物
全ての部位で 38℃	<ul style="list-style-type: none"> ・環境 (38℃) への輻射 輻射率 外容器外表面 : 0.3 周囲 : 1.0 ・自然対流による放熱 $Nu=0.13(Pr \cdot Gr)^{1/3}$ ・太陽輻射による入熱* 外容器外表面 (上部) : 400 W/m² 外容器外表面 (側面) : 100 W/m² 	<ul style="list-style-type: none"> ・輻射 輻射率 外容器内表面 : 0.6 内容器外表面 : 0.6 内容器内表面 : 0.2 収納物表面 : 0.1

* : 太陽輻射による入熱の計算では太陽輻射が12時間/日であることを考慮し、入熱に1/2を乗じ、かつ輸送容器輻射率を乗じて入熱とする。

表 7.3-6 ステップ2の解析条件

初期条件	境界条件	
	外容器外表面	内容器, 構造材および収納物
ステップ1での 温度分布	温度 800℃の雰囲気において <ul style="list-style-type: none"> ・対流 熱伝達率 : 10W/(m²・K) ・輻射 輻射率 外容器外表面 : 0.7 	ステップ1と同じ。

表 7.3-7 ステップ3の解析条件

初期条件	境界条件	
	外容器外表面	内容器, 構造材および収納物
ステップ2での 温度分布	ステップ1と同じ。	ステップ1と同じ。

(4) 解析精度の評価

本解析モデルを、本解析対象輸送物の安全解析書に記載されている耐火試験結果に適用し、解析モデルの熱的応答性を試験結果と比較することで、解析モデルの解析精度を確認する。ここでは、詳細については省略するが、解析結果は試験結果をほぼ再現しており、ここで用いられる輸送物の解析モデルおよび解析手法の妥当性が示された。

7.3.2 解析結果とその評価

初期条件としての太陽輻射による定常状態の温度分布は、解析の結果、ほぼ均一となり、各部位において約 75°C 近傍であった。

図 7.3-4(1)および(2)に輸送物中央部と端部における内容器外表面、内容器内表面および燃料集合体外表面の温度履歴を示した。燃料集合体外表面温度では、輸送物中央部と端部における燃料集合体外表面温度が最も高い位置での温度履歴をそれぞれ示した。図中にも示すように、燃料集合体の位置を保守的に内容器内面と接触しているものと仮定したため、燃料集合体外表面の温度分布は、内容器内面と接触している面で最も温度が高い結果となった。これにより、収納物である燃料集合体における外表面の最高温度は、輸送物端部よりも輸送物中央部での温度が高い結果となり、中央部で 478°C、端部で 423°C であった。従って、密封境界である燃料被覆管の温度は、478°C 以下になるものと評価され、被覆管の気密性を確保できる温度の 800°C 以下であることから、その健全性が確認された。

なお、外容器内面、内容器外面の最高温度は、輸送物中央部および輸送物端部のいずれにおいても約 800°C となり、これら部材の周辺に位置する断熱材、緩衝材およびガスケットの温度も同程度の温度になるものと評価される。

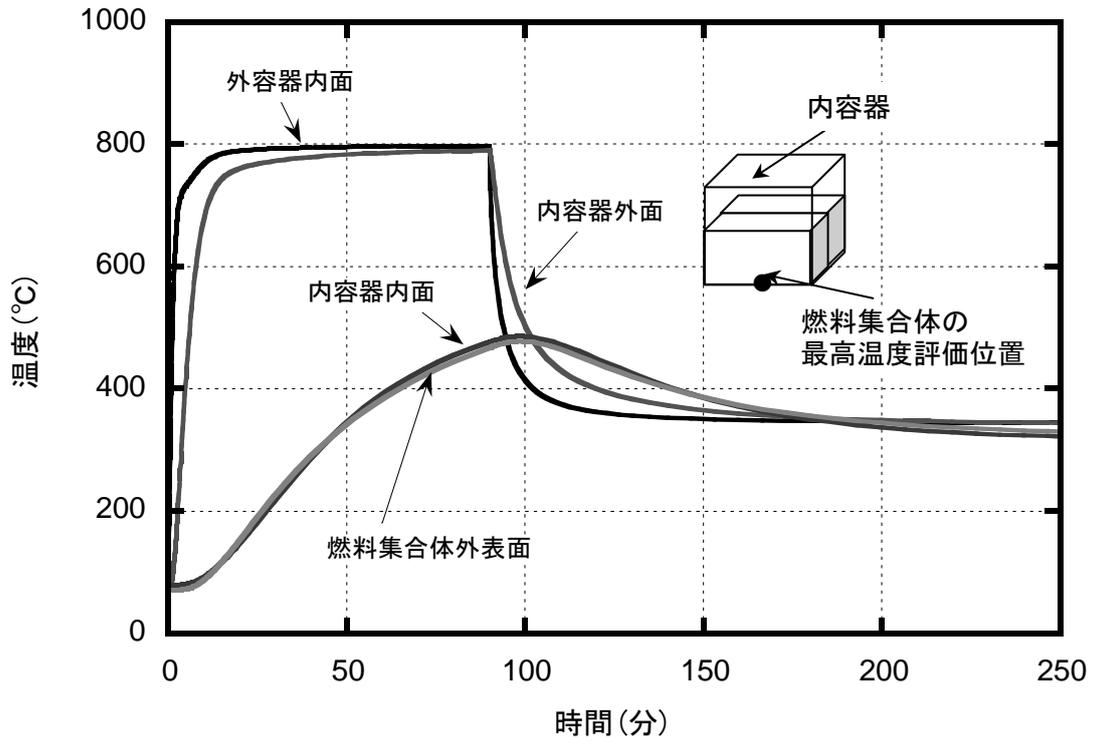


図 7.3-4(1) 火災事故時熱安全性解析における輸送物中央部温度分布の経時変化

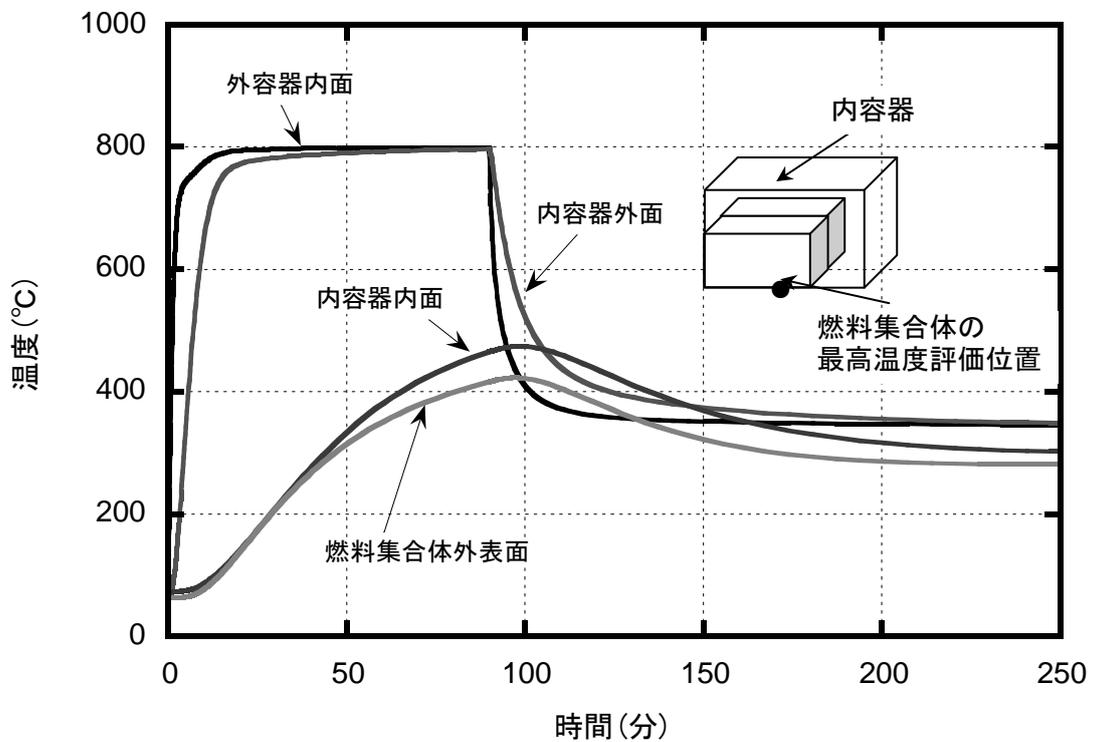


図 7.3-4(2) 火災事故時熱安全性解析における輸送物端部温度分布の経時変化

7.4 トンネル内の衝突による火災事故に係る熱安全性解析

7.4.1 解析モデルおよび解析方法

7.4.1.1 解析モデル

(1) 解析の概要

輸送物のトンネル内での衝突による熱安全性解析は次のステップで行った。

- a) トンネル全体モデルで輸送物外周の温度履歴を求めた。この計算には熱流動解析コードを用い、火災に伴う自然対流を考慮した。初期条件として換気速度をゼロとし、事故はトンネル中央部で生じるとした。
- b) 上記で求めた温度履歴を輸送物の境界条件として、汎用有限要素法解析コードにより輸送物内部構成物の温度履歴を求めた。

(2) トンネル全体モデル

輸送物は、単体で道路中央に位置し、その管軸が輸送方向でトンネル長手方向と平行で、輸送物の下端が道路面より 0.8m とした。3次元で解析することとし、長手方向および幅方向は対称となることから、1/4 モデルを採用した。トンネル壁（天井部）、道路、トンネル内部空間（空気とする）および輸送物を図 7.4-1 および図 7.4-2 に示すようにモデル化した。

トンネルは幅 10m、高さ 5m、長さ 120m とし、その中央に長さ 7.0m、幅 3.1m、高さ 5.0m を火災部として入熱を与える領域を定義した（計算では長さおよび幅はこの 1/2 の領域で実施）。トンネル壁および道路は、厚さ 0.6m のコンクリートとした。

所定の入熱条件で加熱された空気のトンネル内での移動^{4)~7)} およびトンネル出口での出入りを解析し、輸送物表面の温度を評価した。その際、トンネル天井、道路面および輸送物表面の輻射を考慮した。

(3) 輸送物モデル

輸送物の長手方向の中央部矩形断面をモデル化する。なお、垂直な仕切り板が対称面となるので 1/4 方形を解析する。

7.4.1.2 解析手順

解析の手順は、設定された事故シナリオ条件に基づき以下のとおりにする。ただし、輸送物内部の初期温度分布は、7.3 節のタンクローリーとの衝突による火災事故時熱安全性解析において求められた輸送物内部定常初期温度分布を用いる。

- ・ステップ 1：トンネル全体モデルによる、輸送物内部初期温度を 60℃、外気およびトンネル内温度を 26.9℃(300K)の初期温度分布条件とし、換気速度ゼロで、図 3.2-4 に示した放熱速度パターンに従う 2 時間にわたる火災時熱流動の解析。
- ・ステップ 2：トンネル全体モデルによる、2 時間後の火災終了時から、入熱ゼロの条件で輸送物表面温度が充分冷却されるまでの熱流動の解析

- ・ステップ 3：輸送物モデルによる，輸送物内部初期温度 60℃，ステップ 1，2 で求められた輸送物外表面温度履歴を輸送物表面に与えた輸送物内部温度分布の解析。

7.4.1.3 解析手法と解析条件

トンネル内熱流動の解析では，汎用流体解析コード FLUENT Version 6.0 を使用した。モデルの要素分割状況を図 7.4-3 および図 7.4-4 に示す。要素形状は，6 面体の非構造格子で要素数は，205936 とした。

トンネル内の流れは，空気の動粘度を $15.83 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ ，空間寸法を 5m とし，速度 0.2m/s と仮定すると，レイノルズ数 $Re = (0.2) \times (5.0) / (15.83 \times 10^{-6}) = \text{約 } 63000$ となり，乱流領域 ($Re > 2300$) と見積もれる。そこで，乱流効果を考慮するため， k (乱れの運動エネルギー) - ϵ (粘性エネルギー消散率) 乱流モデルを採用した。

計算に用いた物性値を表 7.4-1～表 7.4-5 に示す。

- ・ 輸送物については，外容器と収納物 (内容器 + 燃料棒集合体) とからなるモデルとし，外容器は，熱伝導度，比熱，密度について構成材であるステンレスの物性値 (表 7.3-1 参照) を用いた。また収納物については熱容量を合わせるため，構成材 (ステンレス，断熱材，燃料集合体) の構成比率，密度，比熱から求めた等価密度，等価比熱を使用した (表 7.4-1)。熱伝導率には外容器の温度が高めになるように，空気の熱伝導率を用いた。
- ・ その他の物性値等については，第 6 章に述べたものと同様に考えて，表 7.4-2 から表 7.4-5 に示す値を用いた。

境界条件として，流入・流出部をゲージ圧力ゼロの圧力流出境界と設定し，コンクリート層外面は断熱とした。トンネルの外気および初期温度は 26.9℃(300K) とし，火炎部 (火炎領域長さ 7.0m × 幅 3.1m × 高さ 5.0m = 108.5m³) への単位体積当たりの入熱量は，図 3.2-4 に示した放熱速度パターンから，火災開始からの 10 分間およびその後の 110 分間の値は，それぞれ 34MW/(108.5m³)，2.8MW/(108.5m³) である。

また，上記の熱流動解析で得られた輸送物表面温度の解析結果を，タンクローリーとの衝突による熱安全性解析で用いた 3 次元モデルに基づいた 2 次元モデルを用いて，汎用有限要素法解析コード ABAQUS 6.3 による輸送物内部の詳細温度分布評価を実施する。

表 7.4-1 輸送物等価熱物性値

	温度 K	密度 kg/m ³	比熱 J/(kg·K)	熱伝導度* W/(m·K)
輸送容器 (外容器)	293	7920	499	16.0
	400		511	16.5
	600		556	19.0
	800		620	22.5
	1000		644	25.7
収納物 (内容物, 集合体)	293	924	477	0.0256
	400		488	0.0331
	600		522	0.0456
	800		554	0.0569
	1000		567	0.0672
	1200		569	0.0759

* : 収納物熱伝導度には空気の熱伝導度を使用。

表 7.4-2 輻射率

	輻射率 ε
輸送容器外面	0.8
輸送容器内面	1.0
収容物	1.0
トンネル天井	0.6 ¹⁾
道路面	0.6 ¹⁾

表 7.4-3 吸収係数⁷⁾

温度 K	吸収係数 k m ² /m ³
280	0
673	0
773	1.5
3000	1.5

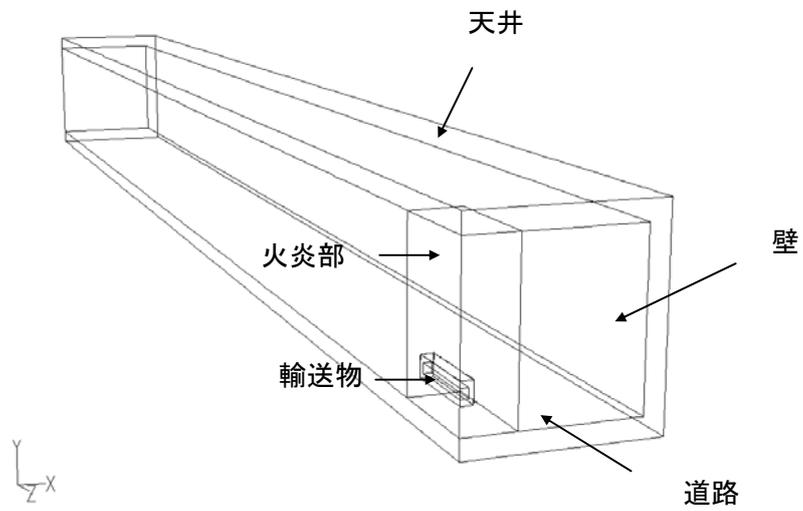
表 7.4-4 コンクリートの熱物性値³⁾

温度 K	密度 kg/m ³	比熱 J/(kg·K)	熱伝導率 W/(m·K)
293	2370	900	1.2
600		930	0.8
1000		1630	1.0

表 7.4-5 空気の熱物性値³⁾

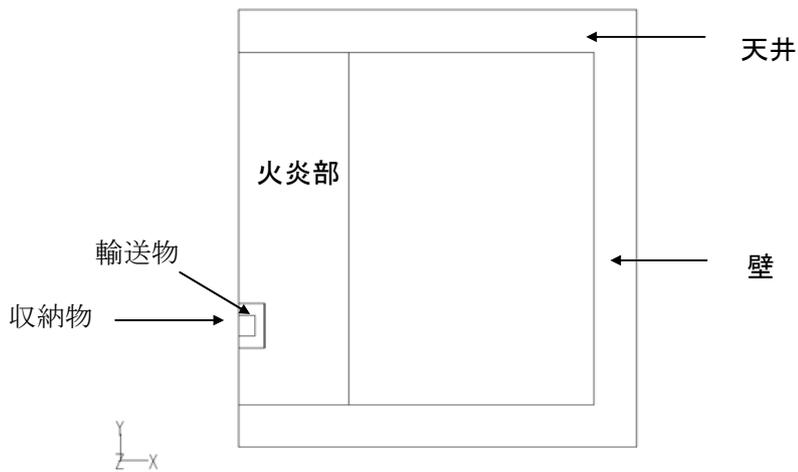
温度 K	密度** kg/m ³	比熱 J/(kg·K)	熱伝導率 W/(m·K)	粘性係数 × 10 ⁻⁵ (Pa·s)
280	1.2606	1007	0.0246	1.76
300	1.1763	1007	0.0261	1.86
400	0.8818	1015	0.0331	2.33
500	0.7053	1031	0.0395	2.72
600	0.5878	1052	0.0456	3.08
800	0.4408	1099	0.0569	3.72
1000	0.3527	1142	0.0672	4.31
1200	0.2939	1175	0.0759	4.85
1500	0.2351	1212	0.0870	5.61

** : 上記密度は汎用有限要素法熱解析での使用値。熱流動解析では理想気体の状態方程式から得られる値を使用。両者の差は0.1%未満である。



Grid (Time=0.0000e+00) FLUENT 6.1 (3d, segregated, ske, unsteady)

図 7.4-1 トンネル全体モデル形状



Grid (Time=0.0000e+00) FLUENT 6.1 (3d, segregated, ske, unsteady)

図 7.4-2 トンネル全体モデル断面形状

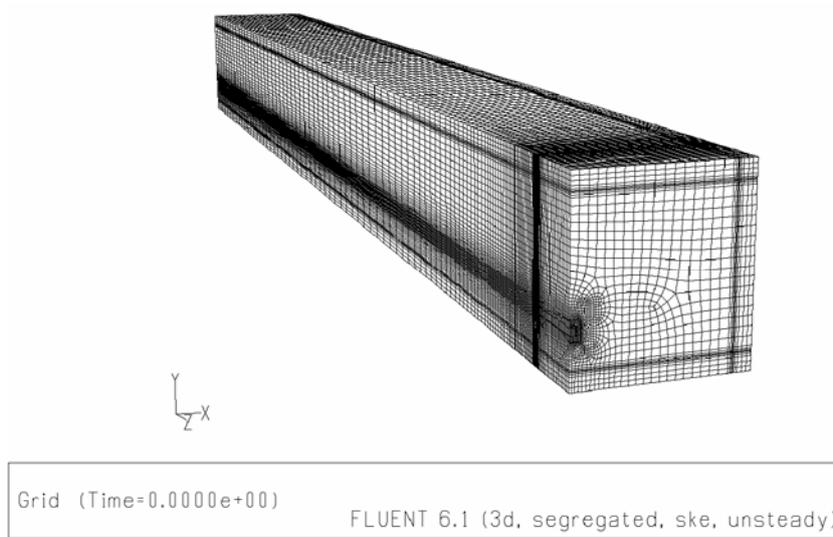


図 7.4-3 トンネル全体モデルの要素分割図

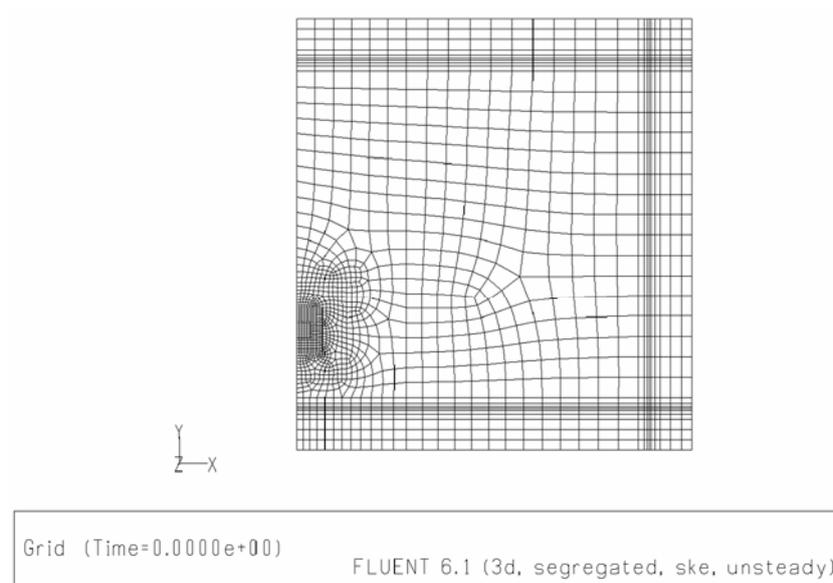


図 7.4-4 全体モデル（輸送物位置）断面の要素分割状況

7.4.2 解析結果とその評価

(1) トンネル全体モデルの解析結果

トンネル内熱流動解析結果では、高温の熱流体の流れは上部にあり、火炎部の中央上面で最も高い温度を示した。火災開始から 10 分後における熱流体の最高温度は、約 1051°C (1324K) で 120 分後の最高温度は約 167°C (440K) であった。入熱がなくなった火災開始から約 130 分後では、輸送物の表面から若干内部で最も高い温度となり、表面温度が約 82°C (355K) まで低下し、外気がトンネル壁および輸送物表面で暖められて生じる対流が認められた。輸送物の高温領域は、中央円周断面から長手方向に 0.77m 位置の最上部であった。

(2) 輸送物内部の温度分布解析結果およびその評価

図 7.4-5 に輸送物内部の代表箇所の温度履歴を示す。火災開始から 10 分後では、容器外周は上部の温度が高くなり、内部の昇温は小さい。火災開始から 120 分後では、内容器内面上部の最高温度は 142°C であり、燃料集合体は容器内面に面した表層部の温度が高く、最高到達温度が 169°C、下部コーナー部での温度が 138°C となった。また、外容器内面、内容器外面の最高温度は、それぞれ 627°C および 430°C となり、これら部材の周辺に位置する断熱材、緩衝材およびガスケットの温度もそれぞれに対応した同程度の温度となる。密封境界である燃料被覆管の健全性については、トンネル熱安全性解析での最高到達温度は 169°C であり、被覆管の気密性を確保できる温度 800°C 以下であることから、その健全性を確認した。

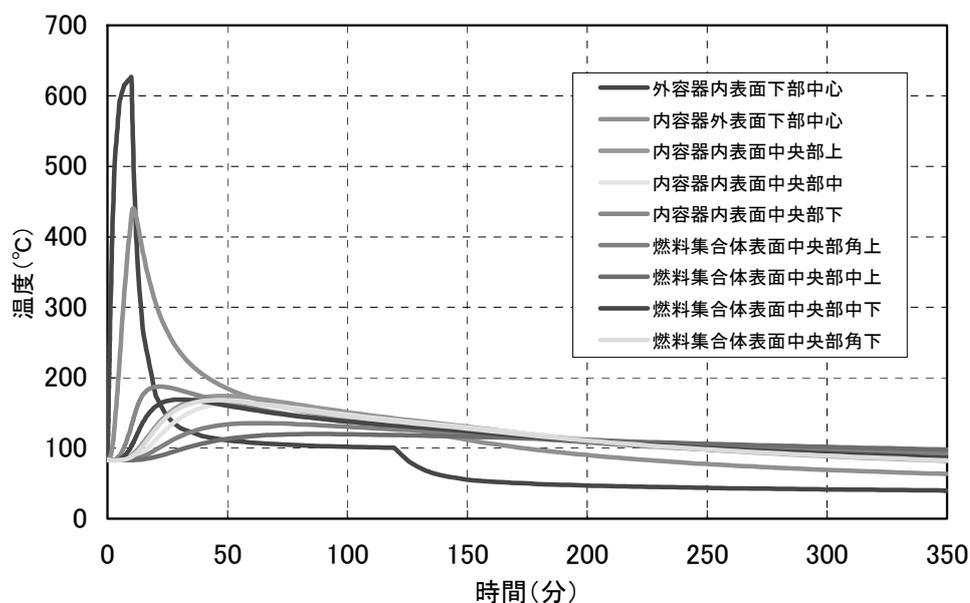


図 7.4-5 RAJ- II 型輸送物の各部の温度履歴

7.5 苛酷事故想定時の臨界安全性解析

7.5.1 解析モデルおよび解析方法

7.5.1.1 落下衝撃解析および熱安全性解析の結果に基づく未臨界性評価前提条件

(1) 落下衝撃解析の結果の要約

7.2 節に記載されているように、コンクリート舗装面あるいはアスファルト舗装面に対して 18m 高さから、燃料集合体の下部タイププレート側が直撃するようにした垂直落下、上蓋が直撃するようにした水平落下、および上蓋側コーナーが直撃するようにしたコーナー落下の条件で、落下衝撃解析を実施した。解析結果の要約を表 7.5-1 に示す。

表 7.5-1 輸送物寸法等の変化量対落下高さ

落下姿勢	落下高さ (m)	外容器の最大変化量 (mm)		内容器支持部材の相当塑性ひずみ	
		対コンクリート面	対アスファルト面	対コンクリート面	対アスファルト面
垂直落下	18	-12	-13	30%以下	30%以下
水平落下	18	-38*	-38	30%以下	30%以下**
コーナー落下	18	-7 +21(膨れ)	-9	30%以下	30%以下

*：落下による衝撃を受けた直後の最大変形量は約-70mm，マイナス符号は縮小側を示す。

**：外容器外壁と内容器内面間の最近接変位距離は約-90mm。

(2) 熱安全性解析の結果の要約

7.3 節に記載されているように、タンクローリーとの衝突による火災事故シナリオの、38℃雰囲気下を初期条件として 90 分間 800℃の雰囲気下に曝された後自然冷却する条件での熱安全性解析、また、トンネル内での衝突による火災事故シナリオの、換気装置のないトンネル内での 120 分間の火炎に曝された後自然冷却する条件での熱安全性解析を実施した結果の要約を表 7.5-2 に示す。

表 7.5-2 内容器構造材最高到達温度

解析事象	構造材評価温度(℃)			
	断熱材	緩衝材	ガスケット	被覆管
タンクローリーによる火災事故	800	800	800	478
トンネルでの衝突による火災事故	430	627	627	169

(3) 未臨界性評価前提条件

RAJ-II型輸送物について落下衝撃解析および熱安全性解析結果を基に、臨界安全性を評価するための前提条件を表 7.5-3 に示すように設定する。

表 7.5-3 未臨界性評価前提事項

対象事象	未臨界性評価前提事項*	
	減速材制限	配置制限
落下事故	<ul style="list-style-type: none"> 外容器の変形による水浸入有り。 内容器およびガスクケットの変形による水浸入有り。 	<ul style="list-style-type: none"> 内容器支持部材変形による内容器位置変化有り。
火災事故	<ul style="list-style-type: none"> 内・外容器周辺部の高温による密閉不可。 内容器断熱材領域温度は熱的制限値未満のため水浸入無し。 内容器緩衝材（減速材）の高温による溶化。 	<ul style="list-style-type: none"> 内容器緩衝材溶化による集合体位置変化有り。

*：上記未臨界性評価前提事項は SAR と同様であるが、外容器変形量および構造材焼失体積の程度に差異がある。

7.5.1.2 輸送物のモデル化および計算条件

(1) 輸送物のモデル化

輸送物の形状は3次元で、標準状態は対称的なモデルとする。

① 外容器と内容器

外容器本体は、ステンレス鋼製の本体アングル(L50×50×4t)枠組に、ステンレス鋼製厚さ2.0mmの端板および側板を付けた構造である。外容器本体の内側には、落下時等の衝撃を緩和するため、両端面に厚さ150mmのバルサ製の衝撃吸収体、および蓋面、底面、側面にペーパーハニカム製の衝撃吸収体が付けられている。これら構造材に囲まれた内容器本体はステンレス鋼製の二重壁構造で、外殻、内殻およびアルミナ断熱材が主要構成材料である。外殻は厚さ1.5mmのステンレス鋼板を曲げ加工により溝形とし、内容器本体の底面および側面を形成している。内殻は厚さ1.0mmのステンレス鋼板を曲げ加工により溝形に成型したものに厚さ2.0mmのステンレス鋼板の中仕切板を溶接により一体化し、外殻に付けられている。内殻内側の燃料集合体収納面には発泡ポリエチレン製の緩衝材が付けられている。アルミナ断熱材は、厚さ50mmのものを外殻と内壁間に充填している。

その他の構造材等の仕様は、安全解析書等に基づいて考慮し、輸送物全体を下記のように単純化してモデル化する。

- 燃料集合体の梱包材料である楕円形インサートは所定の位置に最大64個装着されるが、

燃料有効長に均一な厚さの板状のポリエチレンが存在するものとする。但し、熱的負荷条件では楕形インサートおよび内容物の緩衝材は全て溶化し、燃料有効長に均一な厚さでポリエチレンが燃料棒に巻き付くものとする。

- ・輸送容器については、その構成部材のうち吊金具、締付ブロック、固定金具、ボルト類、バルサおよびペーパーハニカムは安全側の評価とするために無視する。
- ・輸送容器には水平落下により外容器に約 40mm、外容器外壁と内容物内面間の近接距離は最大約 90mm の変位を生じるが、ロックボルトの破断はなく内容物支持板の変形で収まったとする。
- ・配列系の解析は RAJ- II 型輸送物の輸送制限個数（200 個）の 2 倍を超える個数に設定する。評価上厳しい配列として、2 行×14 列×16 段の 448 個とする。

RAJ- II 型輸送物実体系と解析モデルの比較を図 7.5-1 に示す。

② BWR 用新燃料集合体

燃料集合体の主要な構成要素の数量および構成材料の最大重量・主要寸法は表 7.5-4 の通りである。なお、燃料集合体の種類は、燃料棒 60 本の 8×8-4（ウォーターロッド 1 本）型、74 本の 9×9-7（ウォーターロッド 2 本）型の 2 種類がある。

表 7.5-4 燃料集合体仕様

項目	燃料集合体
燃料組成	濃縮度 5wt%以下の UO ₂
焼結体直径	9.6mm
焼結体密度	97%TD 以下*
燃料有効長	3710mm（部分長 2160mm）
被覆管組成	ジルカロイ-2（Zr 内張）
被覆管肉厚	0.71mm（Zr 内張 0.1mm）
被覆管外径	11.2mm
ウォーターロッド本数	2 本
ウォーターロッド外径	24.9mm
スペーサ	7 個
燃料棒本数	74 本（内部分長 8 本）
燃料棒配列	9×9 正方格子
全体質量[kgUO ₂]	200 以下
燃料棒ピッチ	14mm

*：100%理論密度は 10.96g/cm³

対象の燃料集合体は表 7.5-4 に示す通り、落下解析を実施した、内蔵されている核燃料が最大である 9×9-7 型燃料集合体である。

集合体の形状モデルも 3 次元で、対称的なモデルとする。安全解析書に基づき、下記のように単純化する。モデル図の概要を図 7.5-2 に示す。

- ・ 燃料集合体を構成する部材のうち、ペレットおよび被覆管のみを考慮する。ウォーターロッド，上部タイププレート，下部タイププレート，スペーサ等の部材は安全側の評価とするために無視する。
- ・ 全ての燃料棒には最高濃縮度 5.0wt%の二酸化ウランペレットが装荷されていると仮定し，ガドリニア入り燃料棒は0本とする。また，短尺燃料棒は長尺のものに置き換えてモデル化する。
- ・ 燃料有効長内の焼結ペレットのみでモデル化し，ペレットのチャンファーなどの空隙は安全側の評価とするために無視する。
- ・ 計算モデル作成のために，燃料集合体寸法は輸送物が落下衝撃あるいは熱的影響を受けても変わらないと仮定する。

③ 中性子吸収体

設置されていない。

④ 減速材

内容器内に緩衝材として設置されているプラスチック材料（発泡ポリエチレン，ポリエチレン袋，楕形インサート）を考慮する。燃料棒間の楕形インサートは図 7.5-2 に示すように，上下併せて 1.9mm の厚さで有効長内の燃料棒セルにあると仮定する。

⑤ 反射条件等

孤立系および有限配列系において，外容器の外側には反射体として，厚さ 30cm の水の層があるものとする。なお，外容器付属の構造材等は無視する。

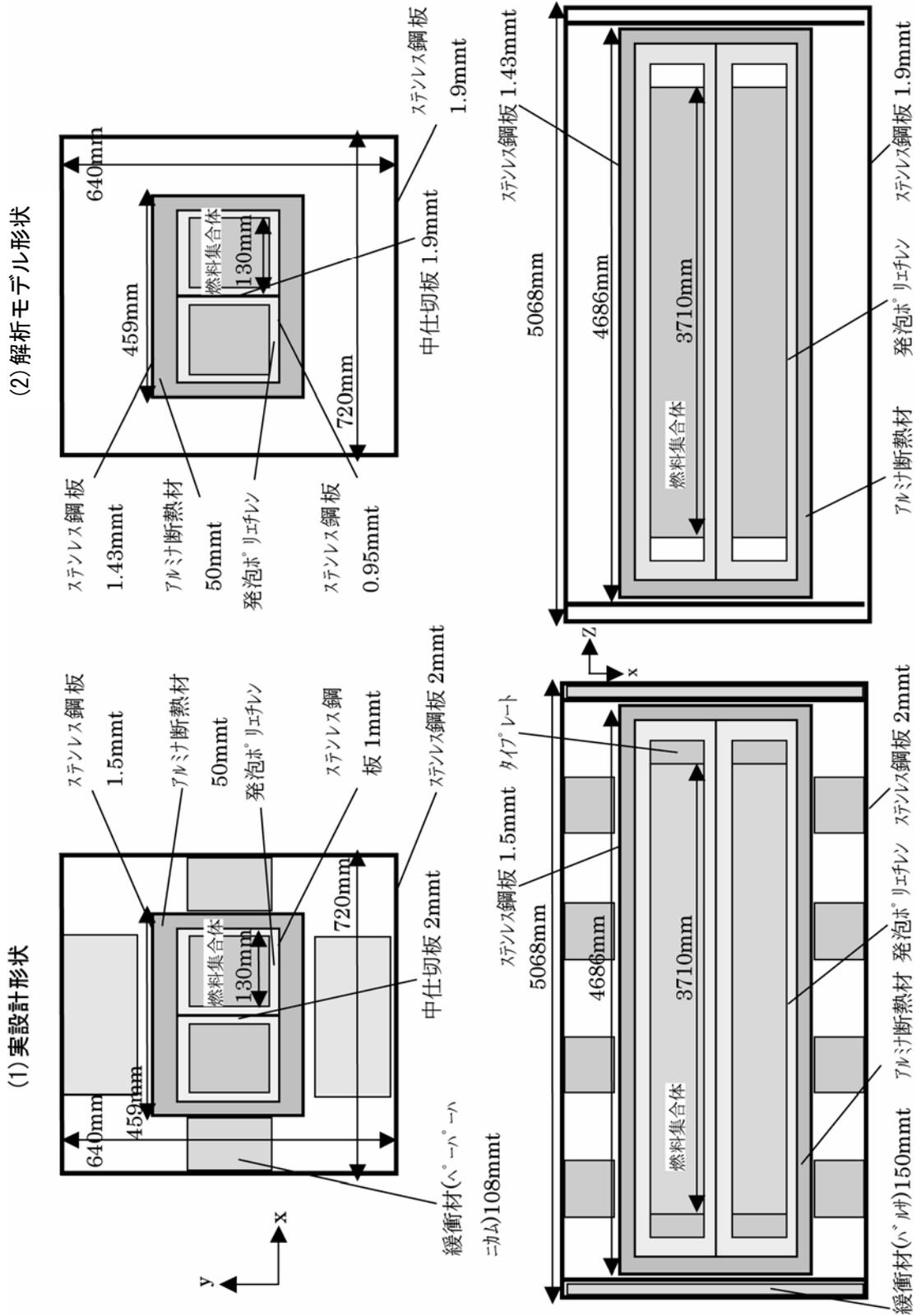


図 7.5-1 RAJ-II 型輸送物実体系と解析モデルの比較

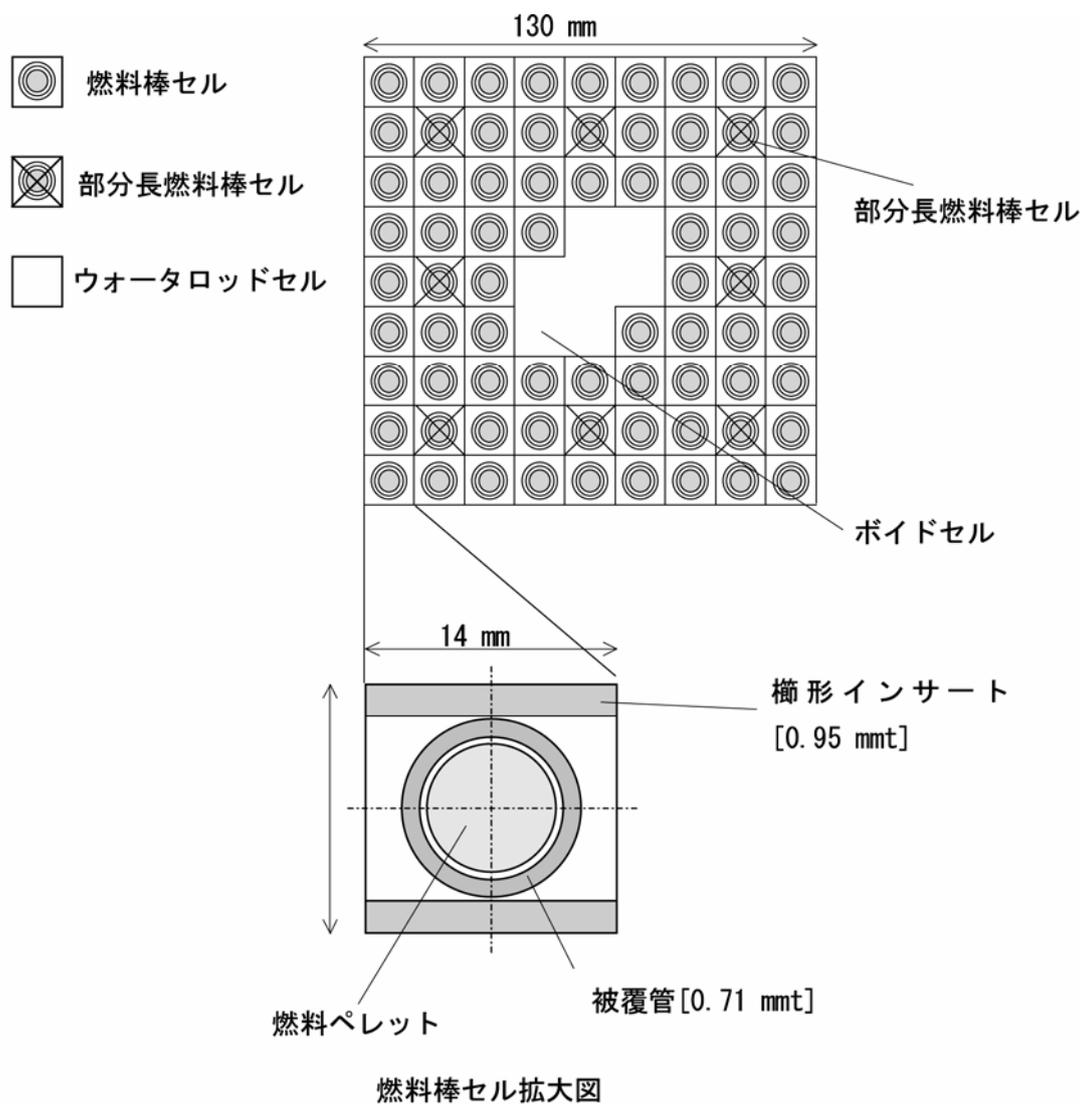


図 7.5-2 9×9-7 燃料集合体解析モデル

(2) 計算方法と計算条件

輸送物を3次元でモデル化し、解析には連続エネルギーモンテカルロ解析コード MVP を使用する。臨界計算に使用した MVP コードの計算ヒストリ数は、300万(発生中性子数:5000個/世代, 計算世代数:650, スキップ世代数:50)以上とし、計算結果の標準偏差は0.06%以下を収束判定条件とした。

(3) 核燃料物質と構造材の組成

本輸送物の収納物は濃縮度5wt%以下のBWR用新燃料集合体である。濃縮ウランには反応度を低下させる²³⁴Uが含まれるが、解析においては安全側に全て²³⁸Uとして計算する。また、二酸化ウラン焼結体には、ガドリニアを含有する焼結体もあるが、解析においては安全側に無視する。焼結体の含水率は安全側に100ppmを仮定する。

計算に使用するRAJ-II型輸送物構造材の物性値等は安全解析書および公開文献の臨界安全ハンドブック⁽⁸⁾・理科年表⁽⁹⁾等による。なお、原子量データ等は「核データセンターホームページ」⁽¹⁰⁾のデータベースを使用する。物性値および組成を表7.5-5に示す。

表 7.5-5 RAJ-II型輸送物構造材物質の物性値および組成データ

材質	密度(g/cm ³)	核種	組成(wt%)
ステンレス鋼	7.9 ^{*1}	Fe	68.595 ^{*1}
		C	0.08 ^{*1}
		Cr	19.00 ^{*1}
		Mn	2.00 ^{*1}
		Ni	9.25 ^{*1}
		Si	1.00 ^{*1}
ジルカロイ-2	6.55	Zr	98.26 ^{*2}
発泡ポリエチレン	0.076 ^{*3}	C	85.63
		H	14.37
高密度ポリエチレン	0.92 ^{*4}	C	85.63
		H	14.37
アルミナ断熱材	0.22 ^{*5}	Al	33.8
		Si	16.9
		O	49.3
水	1.0	H	11.19
		O	88.81

*1: 臨界安全ハンドブック⁽⁸⁾

*2: JIS H4751⁽¹¹⁾, Zrの組成はZrTN802Dの化学成分の平均値

*3: JIS K6767⁽¹¹⁾, 発泡ポリエチレン試験方法で規定される見かけ密度の最大

*4: JIS K6748⁽¹¹⁾, 第3種 高密度ポリエチレンの値を保守的に設定

*5: ノミナル値の0.25(g/cm³)±12%より

7.5.2 落下衝撃解析結果に基づく臨界解析

(1) 臨界解析条件

落下衝撃解析結果では、外容器ステンレス鋼板が変形し、外容器が水平方向または長手方向に一様に変形して外容器および内容器の閉じ込めが維持できなくなる。また、水平落下時には内容器支持部材が破損して内容器の位置が固定されなくなり、外容器内壁に接触することもあるものとする。但し、燃料棒の密閉性は維持されているため、被覆管内の水浸入は考慮しない。従って、外容器および内容器内側と燃料棒外側の空隙中の水密度を 0.0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0(g/cm³)と変化させて解析する。

① 孤立系解析モデル

a. 水平落下時の一様な外容器の変形深さ[0mm-100mm]

上蓋下向きの水平落下衝撃解析より、外容器の上蓋面の最終変形量として約 40mm 縮小の結果が得られているが、臨界解析ではその結果を包絡するように一様に 100mm まで外容器高さが減少すると仮定する。図 7.5-3 に、内容器および燃料集合体は定位置のままで、外容器変形深さをパラメータとした孤立系臨界解析モデルを示す。

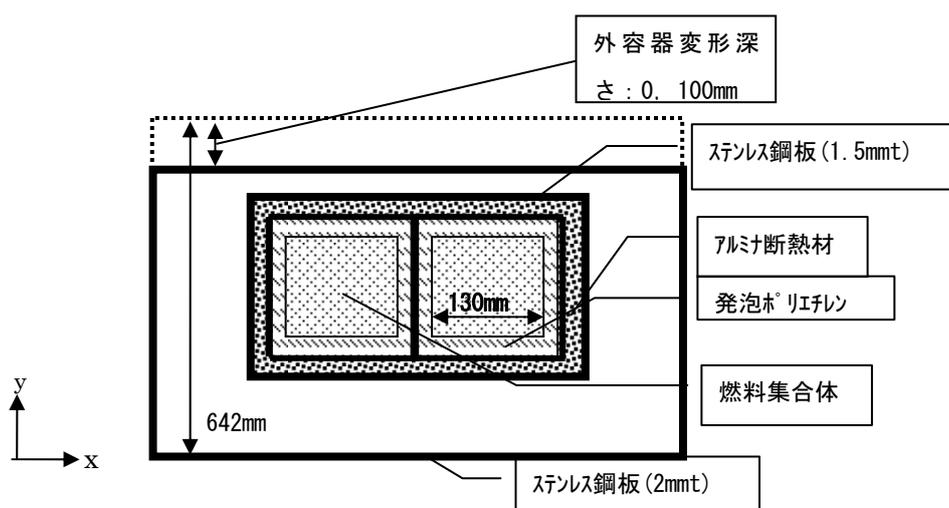


図 7.5-3 外容器変形深さをパラメータとした孤立系臨界解析モデル

b. 外容器と内容器の面間距離[0mm-174mm]

上蓋下向きの水平落下衝撃解析より、外容器と内容器内殻の距離は、最小でも約 90mm 確保される結果が得られている。臨界解析では内容器保持金具破損を仮定し、内容器寸法変形なしで外容器と内容器が接触するまでを仮定した。外容器と内容器側面の間には構造材が設置されているため、内容器保持金具が破損した場合でも上下方向にしか内容器が移動しないものとする。従って、図 7.5-4 の解析モデルに示すように、上記の外容器変形深さに対応した外容器と内容器の距離をパラメータとして設定する。

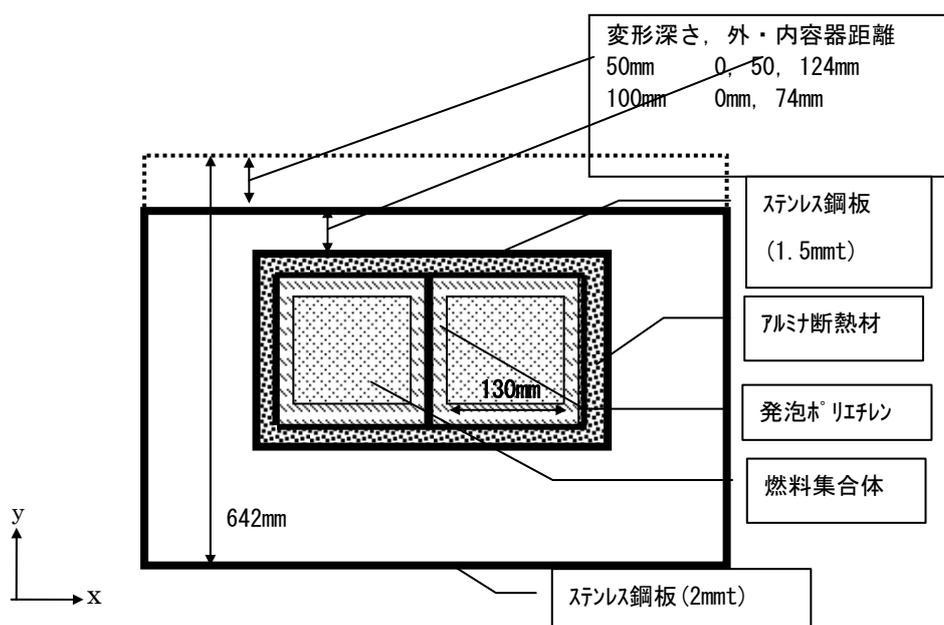


図 7.5-4 外容器と内容器の距離をパラメータとした孤立系臨界解析モデル

以上により，表 7.5-6 に示すような外容器変形深さおよび外容器と内容器間の距離をパラメータとした孤立系臨界解析を行う。

表 7.5-6 落下衝撃損傷時の孤立系臨界解析パラメータ

外容器変形深さ(mm)	外容器と内容器の距離(mm)
0 (標準)	174 (標準)
100 (最大)	0 (最小)

② 配列系解析モデル

a. 水平落下時の一様な外容器の変形深さ[0mm-100mm]

上蓋下向きの水平落下衝撃解析より，外容器の最終変形量として約 40mm 縮小の結果が得られている。臨界解析ではその結果を包絡するように一様に 100mm まで外容器高さが減少すると仮定する。図 7.5-5 に内容器および燃料集合体は定位置のまま，外容器の変形深さをパラメータとした解析モデルを示す。配列条件としては，図 7.5-5 を x-y 軸の断面図とすると長手方向 z 軸に輸送物を 2 個並べ，x 軸方向に 14 個並べ，y 軸方向に 16 段積み上げた配列モデルを仮定する。

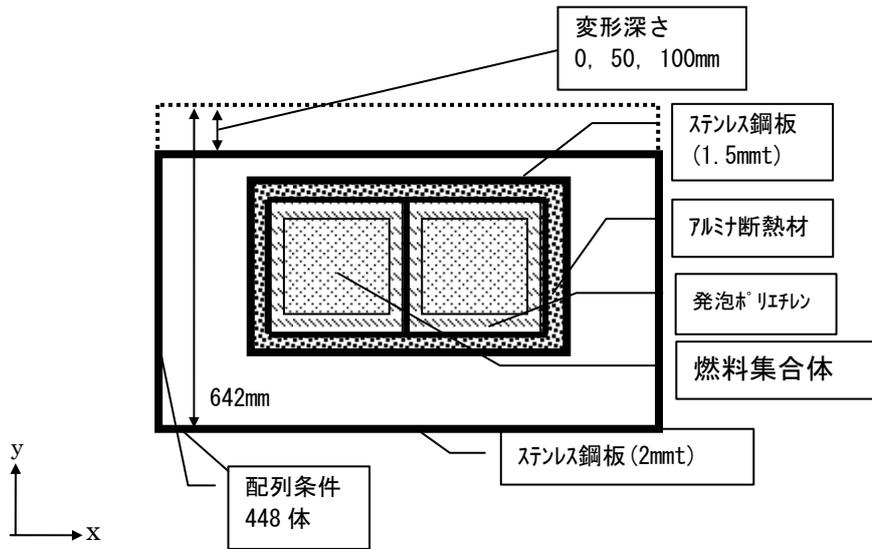


図 7.5-5 外容器変形深さをパラメータとした配列系臨界解析モデル

b. 外容器と内容器の面間距離[0mm-174mm]

上蓋下向きの水平落下衝撃解析結果より、内容器保持金具破損を仮定し、外容器と内容器が接触すると仮定した。また、外容器と内容器側面の間には構造材が設置されているため、上下方向にしか内容器が移動しないものとする。従って、図 7.5-6 の解析モデルに示すように、上記 a. の外容器変形深さの変化に対応した外容器と内容器の距離をパラメータとして設定する。配列条件は上記 a.と同様に設定する。

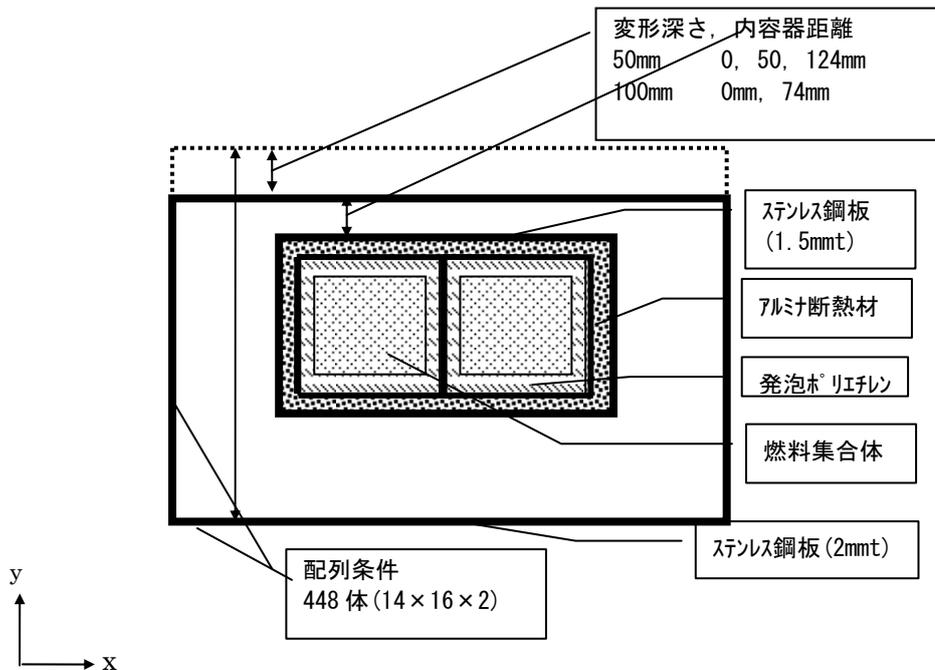


図 7.5-6 外容器と内容器の径方向変位距離をパラメータとした配列系臨界解析モデル

c. 輸送物面間距離[0mm-50mm]

輸送物容器相互間の面間距離をパラメータとして最大 50mm で設定する。

以上により、表 7.5-8 に示したような輸送容器の変形深さ、外容器と内容物の距離および輸送物面間距離のパラメータとした配列系臨界解析を行う。

表 7.5-8 落下衝撃損傷時の配列系臨界解析パラメータ

輸送容器変形深さ (mm)	外容器と内容物の距離 (mm)	輸送物配列の外容器面間距離(mm)
0 (標準)	174 (標準)	0
100 (最大)	0 (最小)	50

(2) 孤立系臨界解析結果

外容器変形深さをパラメータとした中性子実効増倍率計算結果を図 7.5-7 に示す。これから RAJ-II 型輸送物落下衝撃損傷時の孤立系臨界解析においては、新燃料集合体輸送物は空隙中の水密度を 1.0g/cm^3 に近づけると中性子増倍率が高くなる傾向を持っている。また、外容器損傷面と内容物上面までの距離をパラメータとした中性子実効増倍率計算結果を図 7.5-8 に示す。これらの図に示すように、燃料集合体位置は変化せずに、外容器変形深さ 0mm、外容器と内容物の面間距離 174mm (内容物定位置) において、空隙中の水密度が 1.0g/cm^3 のときに中性子実効増倍率の最大値 0.66 が算出される。

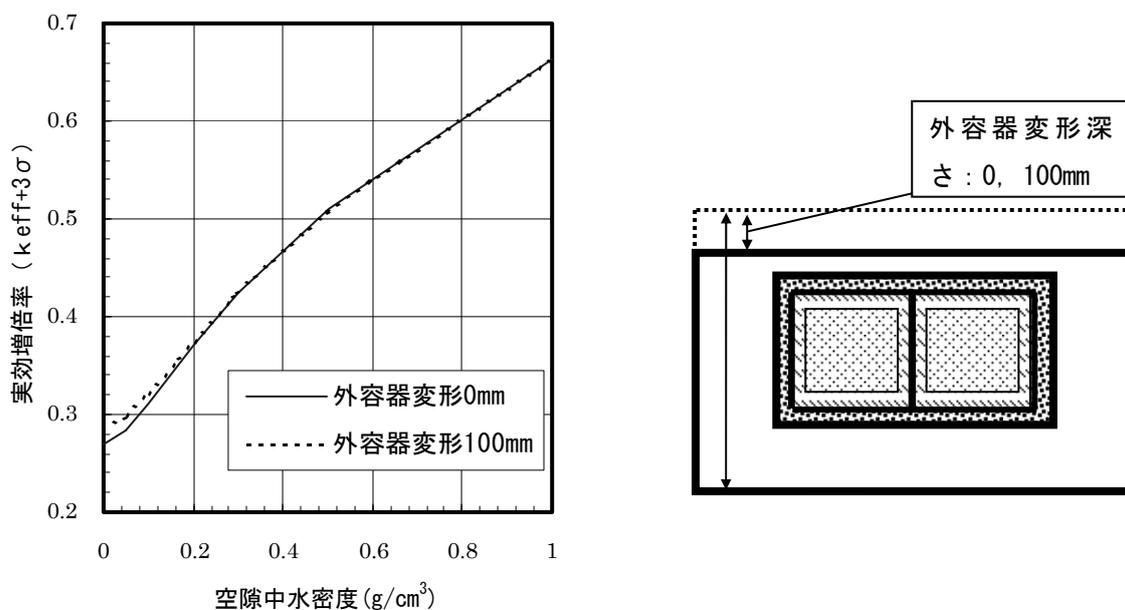


図 7.5-7 落下衝撃による外容器変形深さをパラメータとした孤立系臨界解析結果

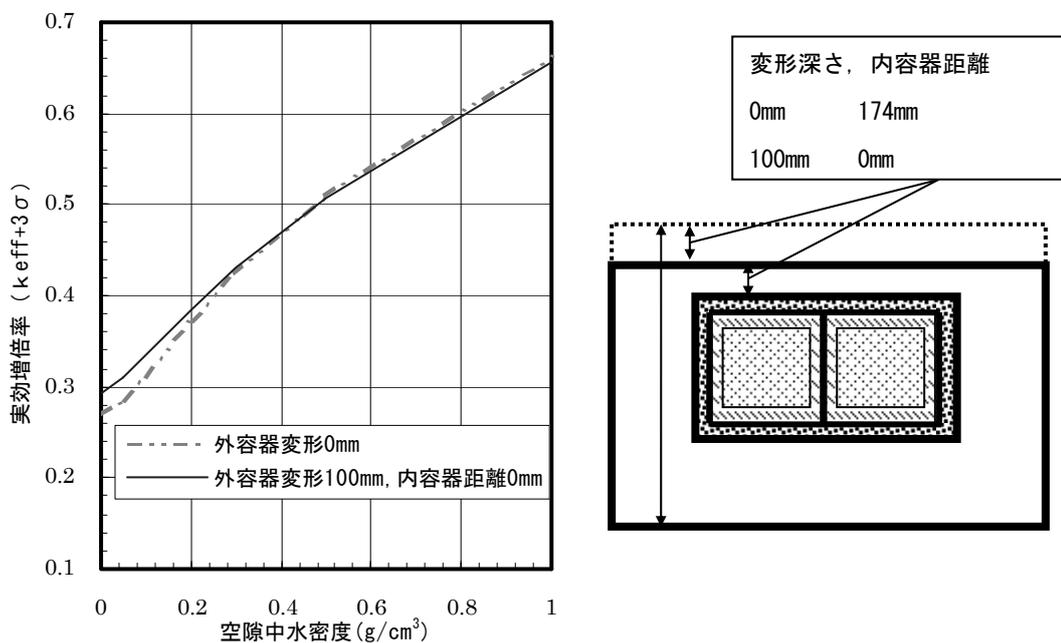


図 7.5-8 落下衝撃による外容器変形深さ, および内容器と外容器の距離をパラメータとした孤立系臨界解析結果

(3) 配列系臨界解析結果

輸送容器変形深さをパラメータとした計算結果を図 7.5-9 に示す。これから, 輸送物落下衝撃損傷時の BWR 新燃料集合体輸送物配列系臨界解析においては, 空隙中水密度が 0.3g/cm^3 近辺で中性子増倍率が極小値を持つ傾向がある。

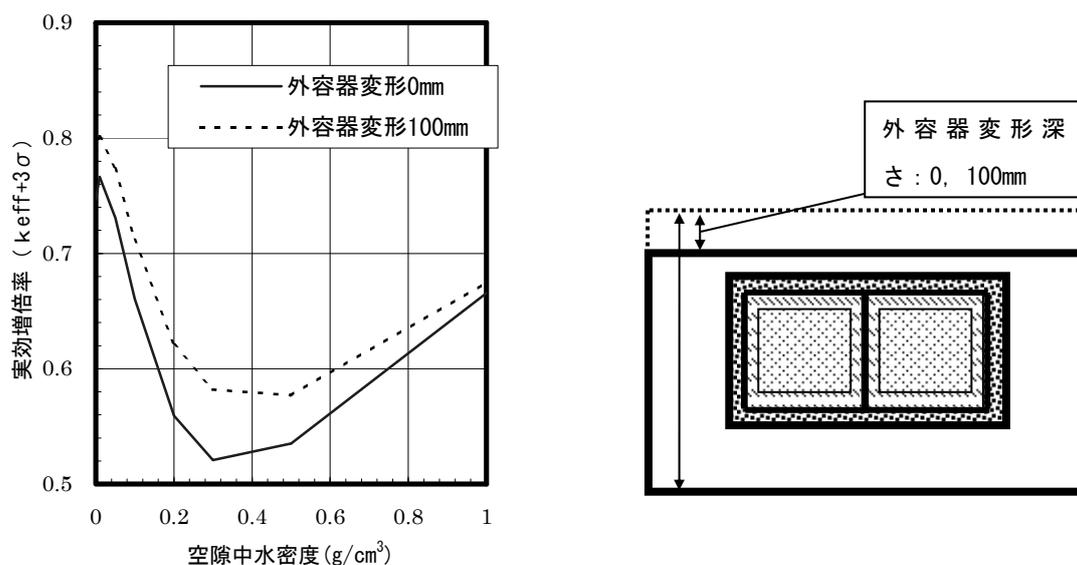


図 7.5-9 落下衝撃による外容器変形深さをパラメータとした配列系臨界解析結果

また、内容器上面と外容器損傷面までの距離をパラメータとした計算結果を図 7.5-10 に、輸送物面間距離をパラメータとした計算結果を図 7.5-11 に示す。これらから、外容器変形深さ 100mm, 内容器距離 0mm, 輸送物面間距離 0mm において、空隙中の水密度 0.01g/cm^3 としたときに、最大の中性子実効増倍率 0.80 が算出される。

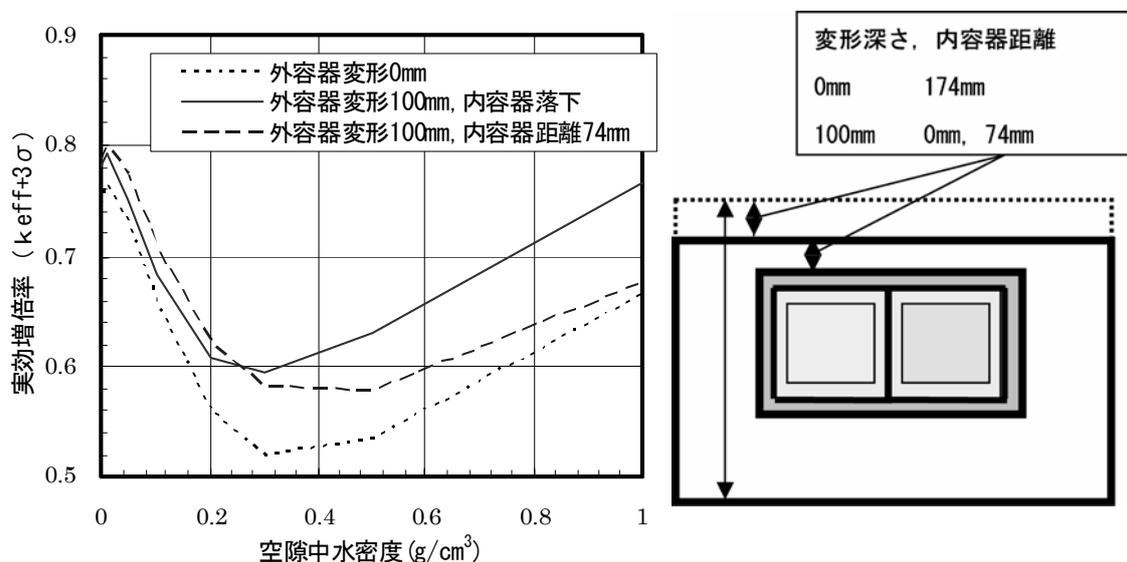


図 7.5-10 落下衝撃による外容器変形深さおよび外容器と内容器の距離をパラメータとした配列系臨界解析結果

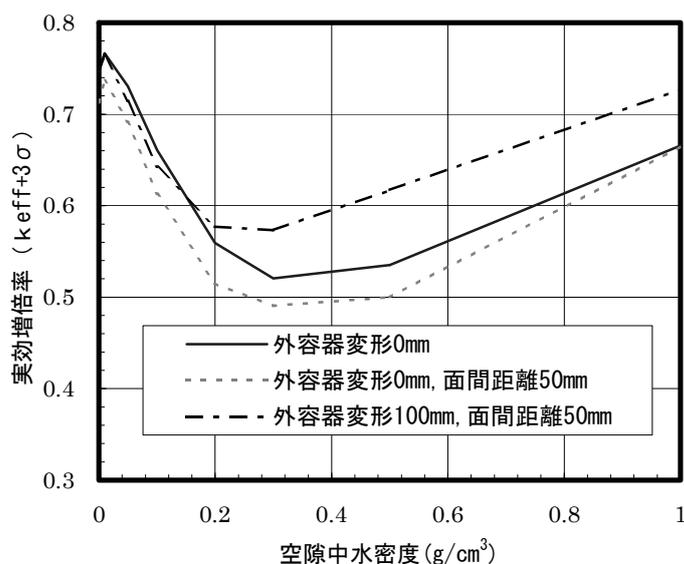


図 7.5-11 落下衝撃による外容器変形深さおよび輸送物面間距離をパラメータとした配列系臨界解析結果

7.5.3 熱安全性解析結果に基づく臨界解析

(1) 解析条件

熱安全性解析結果を参照して、外容器本体内側の緩衝材と外容器および内容器のガスケットが焼失し、容器の閉じ込めが維持できないとする。ただし、アルミナ断熱材は維持され、燃料棒の密封性は維持される。また、内容器内の緩衝材（ポリエチレン材料）は、焼失、気体、液体、あるいは固化状態（図 7.5-12 参照：冷却中に燃料被覆管の周囲に固化）になるものと仮定する。外容器内側および内容器内側と燃料棒外側の空隙中の水密度を 0.0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0(g/cm³)と変化させて解析する。外容器内側の緩衝材は焼失するものとする。

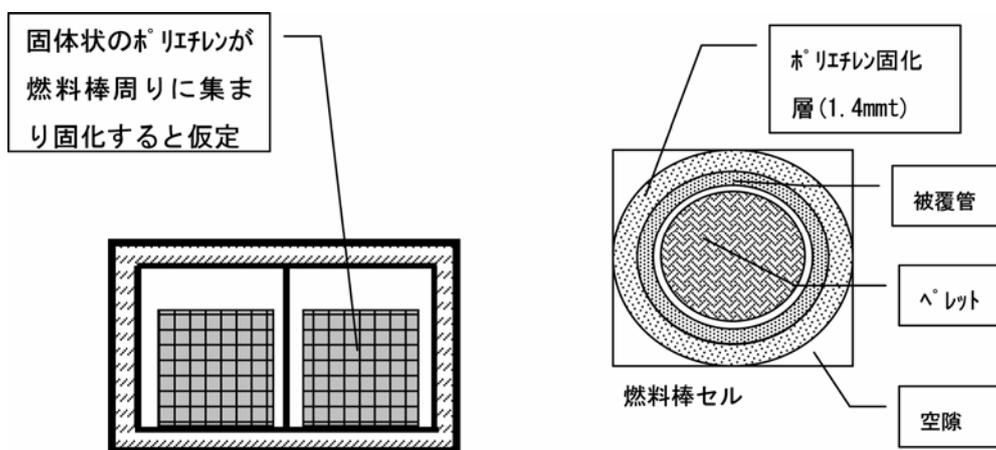


図 7.5-12 熱影響による緩衝材固化状態解析モデル

① 孤立系解析モデル

a. 燃料集合体位置変位[縦-26-0mm, 横 0-+23mm]

図 7.5-13 に内容器内の燃料集合体の変位をパラメータとした孤立系臨界解析モデルを示す。燃料集合体位置変位のパラメータ範囲は縦変位が-26mm, 横変位が+23mm である。

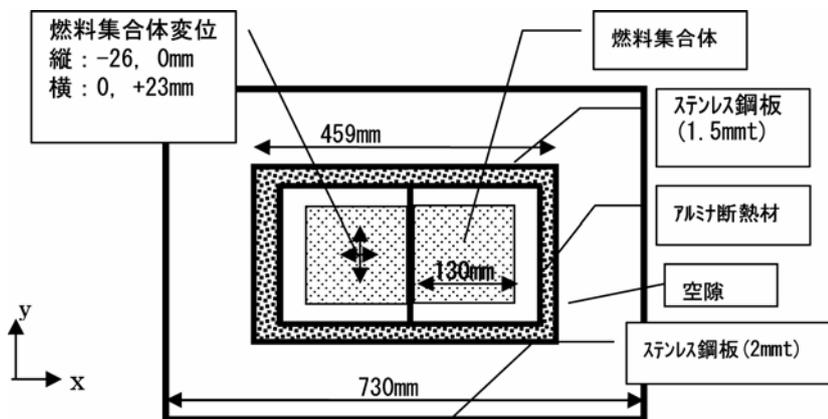


図 7.5-13 熱影響による燃料集合体変位をパラメータとした孤立系臨界解析モデル

b. 内容器内の緩衝材の状態[焼失, 気体, 液体, 固化]

内容器内の緩衝材の状態を, 焼失して内容器内にポリエチレンがない状態に加えて, 図 7.5-14, -15, -16 に示すように, 内容器内の空隙中にポリエチレンが気体状に均一に存在する状態, 同様に液化した状態 (燃料集合体あたり燃料棒 2 列分の 18 本までポリエチレンの液体に浸かると仮定), 固化して燃料棒周りに集まった状態を仮定する。

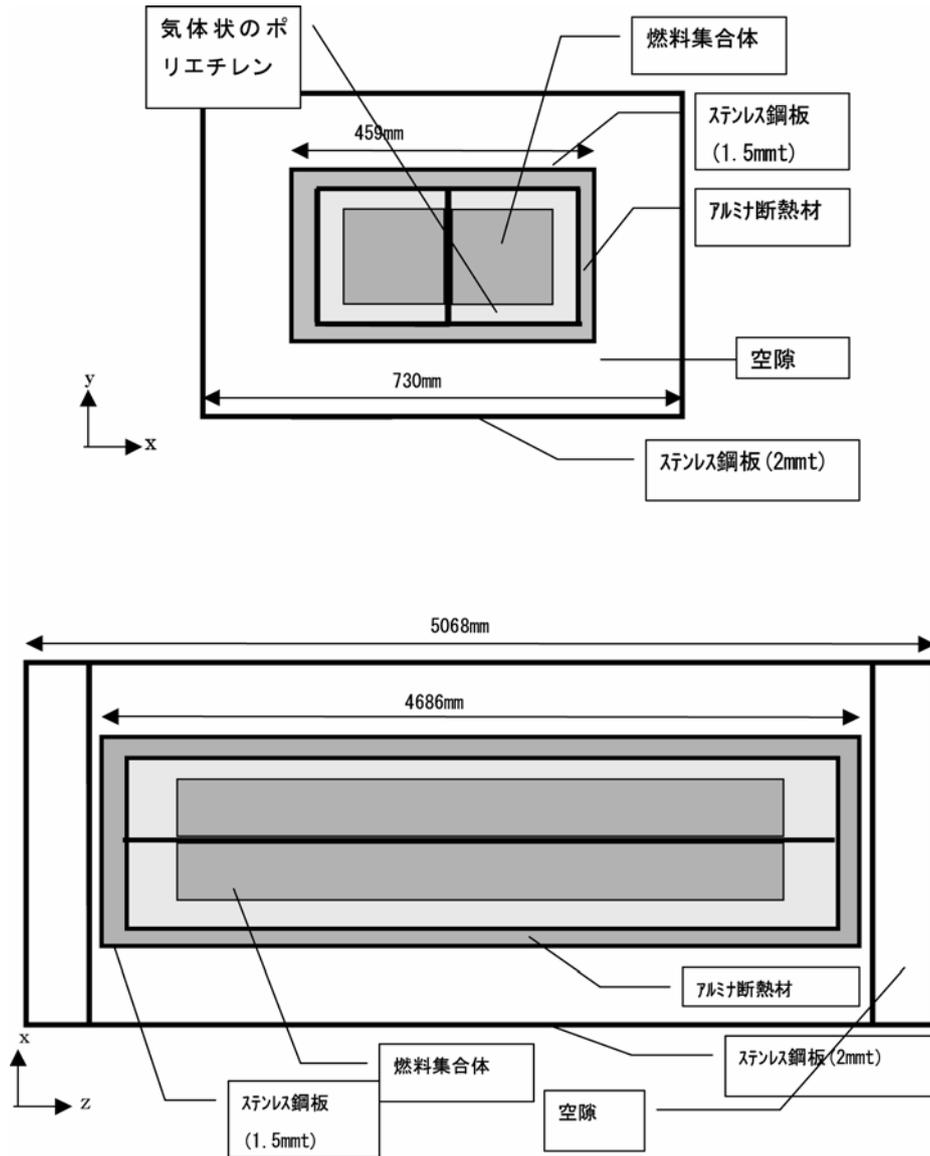


図 7.5-14 熱影響による緩衝材気体状態の孤立系臨界解析モデル

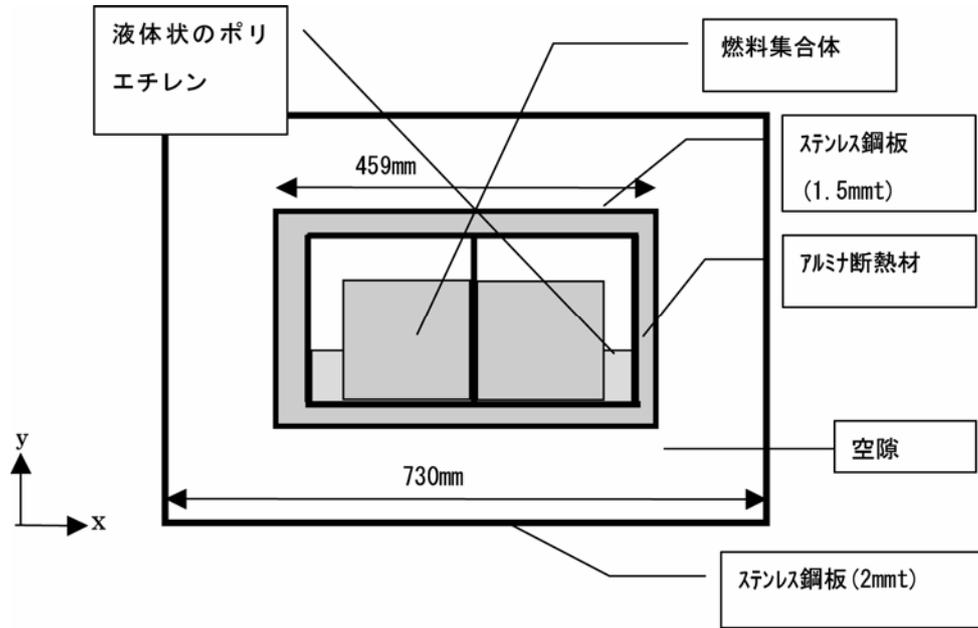


図 7.5-15 熱影響による緩衝材液体状態の孤立系臨界解析モデル

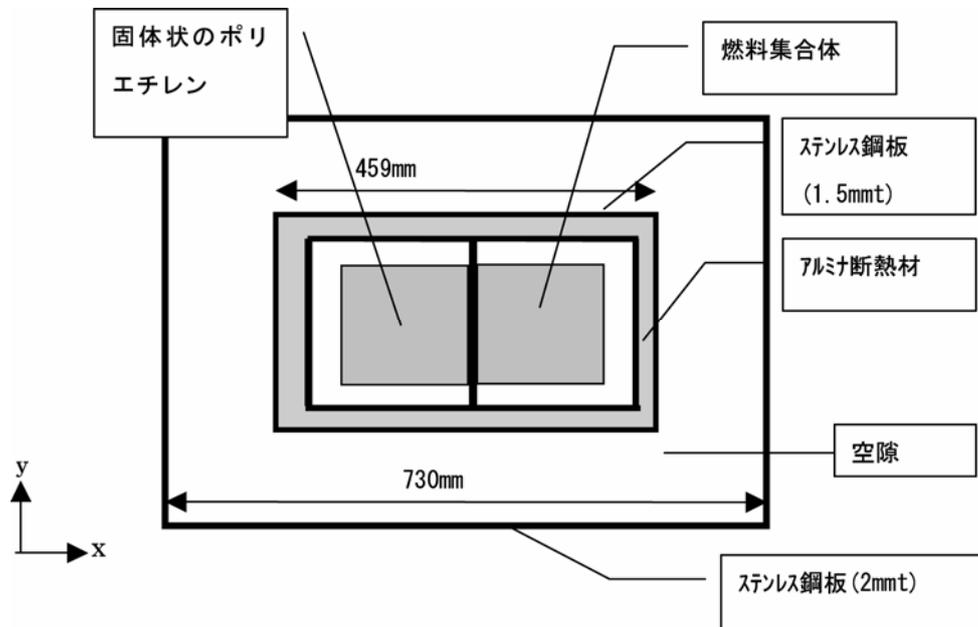


図 7.5-16 熱影響による緩衝材固体状態の孤立系臨界解析モデル

以上により、表 7.5-9 に示すような内容器燃料集合体位置変位および内容器内部緩衝材の状態変化をパラメータとした孤立系臨界解析を行う。

表 7.5-9 火災時の孤立系臨界解析パラメータ

内容器燃料集合体位置変位(mm)		内容器内部緩衝材の状態変化
-26(縦) 0.0	+23(横) 0.0	焼失 気体 液体 固化

② 配列系解析モデル

a. 燃料集合体位置変位[縦-26-0mm, 横±23mm]

図 7.5-17 に内容器内部の燃料集合体の変位をパラメータとした解析モデルを示す。燃料集合体位置変位のパラメータの最大範囲は縦変位が-26mm, 横変位が±23mm である。

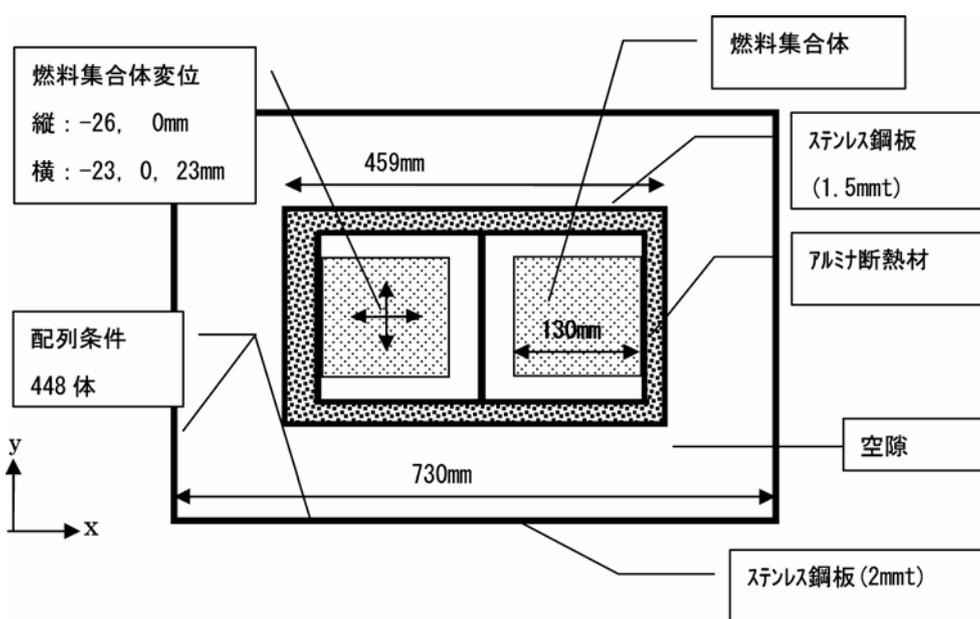


図 7.5-17 熱影響による燃料集合体変位をパラメータとした配列系臨界解析モデル

b. 内容器内の緩衝材の状態[焼失, 気体, 液体, 固化]

図 7.5-18 に内容器の緩衝材が液体となった状態の解析モデルを示す。この場合、燃料集合体あたり燃料棒 2 列分の 18 本までポリエチレンの液体に浸かると仮定した。その他、緩衝材が焼失する場合（内容器内にポリエチレン無し）、気体の場合（内容器内の空隙中にポリエチレンが均質の密度で存在）、固化する場合（図 7.5-12 参照）を仮定する。

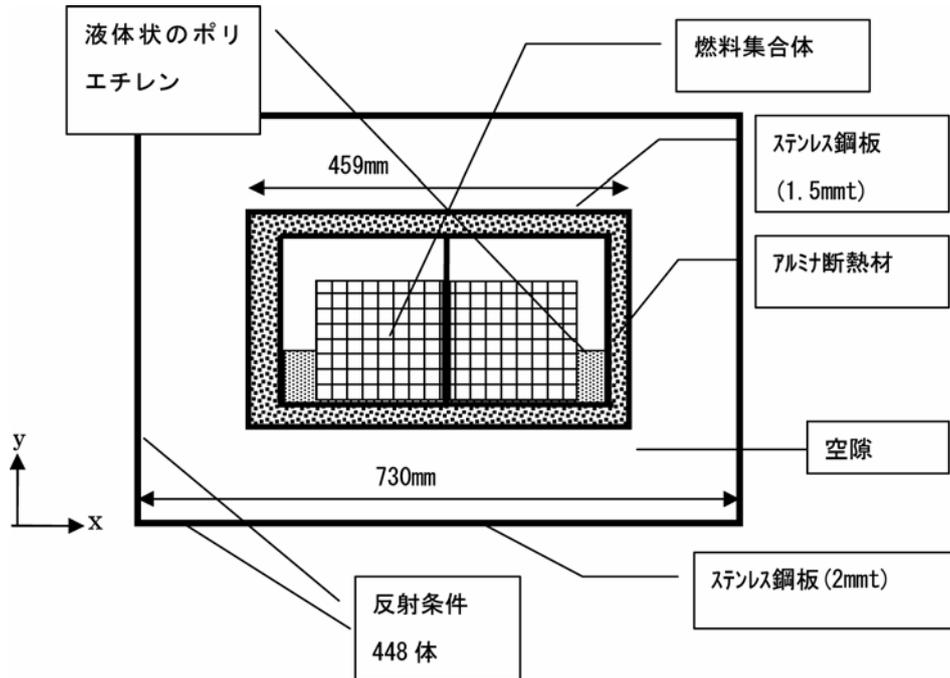


図 7.5-18 熱影響による緩衝材液体状態を仮定した配列系臨界解析モデル

c. 輸送物面間距離[0mm-50mm]

輸送物の容器間の面間距離をパラメータとして最大 50mm で設定する。

以上により、表 7.5-10 に示すような内容器内の燃料集合体位置変位、内容器内部の緩衝材の状態変化、輸送物面間距離をパラメータした配列系臨界解析を行った。

表 7.5-10 火災時の孤立系臨界解析パラメータ

内容器内燃料集合体位置 変位距離(mm)		緩衝材の状態	輸送物面間 距離(mm)
-26(縦)	-23 (横)	焼失 気体 液体 固化	0.0 50
0.0	0.0		
	23 (横)		

(2) 孤立系臨界解析結果

RAJ-II型輸送物の熱損傷を考慮した孤立系臨界解析においては、緩衝材の熱影響による状態変化をパラメータとした図 7.5-19（緩衝材の液体状態では集合体位置が落下）の結果に示すように、空隙中の水密度が 1.0g/cm^3 に近づくと中性子増倍率が高くなる。また、水密度 1.0g/cm^3 において、内容器内部の燃料集合体変位をパラメータとした図 7.5-20 の臨界解析結果に示すように、集合体近接状態において中性子増倍率が高くなる。これらから、内容器内部のポリエチレン緩衝材が固化し、燃料集合体が仕切板を介して最も接近する状態で、空隙中水密度が 1.0g/cm^3 のときに最大の中性子増倍率 0.81 が算出される。

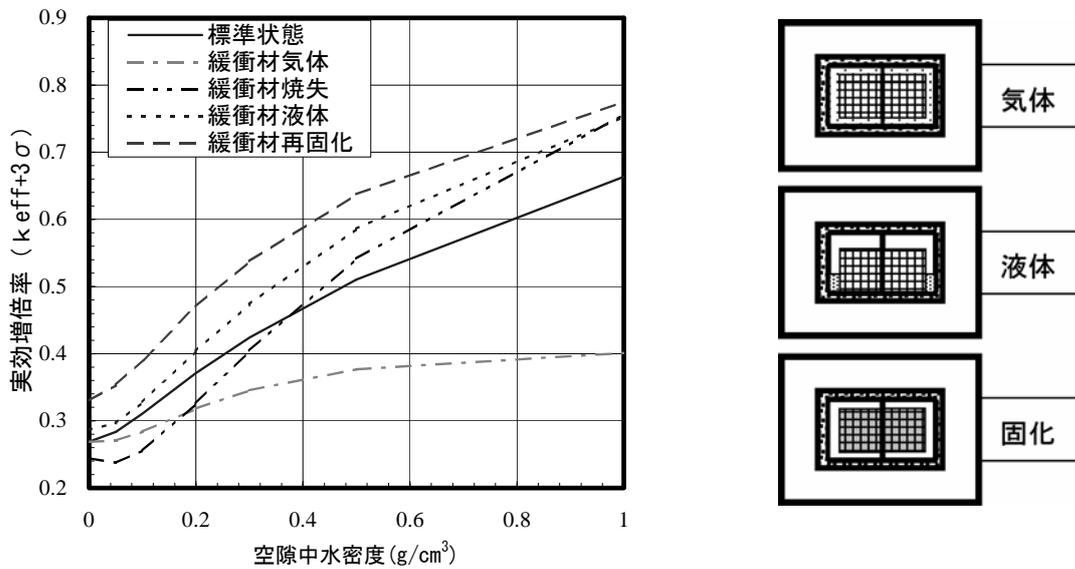


図 7.5-19 熱影響による緩衝材状態をパラメータとした孤立系臨界解析結果

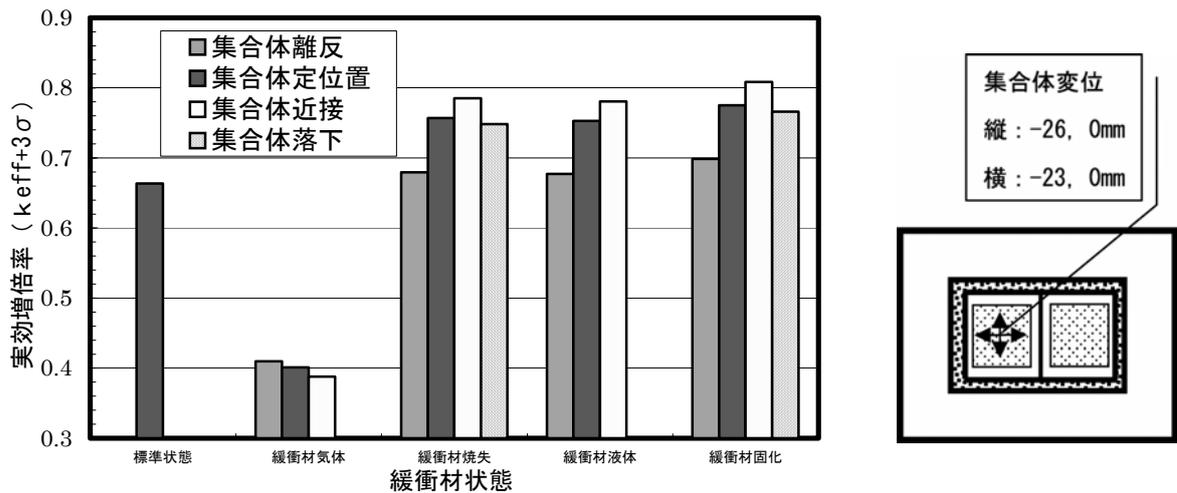


図 7.5-20 熱影響による燃料集合体縦横方向変位をパラメータとした孤立系臨界解析結果（水密度 1.0g/cm^3 ）

(3) 配列系臨界解析結果

RAJ-II型輸送物の熱損傷を考慮した配列系臨界解析においては、緩衝材の状態変化および集合体変位をパラメータとした臨界解析結果の図 7.5-21 に示すように、緩衝材が気体となる場合を除いて空隙中の水密度が約 0.3g/cm^3 において中性子増倍率が極小となる傾向を持っている。また、最も実効増倍率が大きくなる空隙中の水密度 0.01g/cm^3 において、燃料集合体位置変位をパラメータとする臨界計算結果を図 7.5-22 に示す。これらは、輸送物面間距離を 0mm とした計算結果である。これらから、ポリエチレン緩衝材が固化し、燃料集合体が近接した配置において最大の中性子増倍率 0.86 が算出される。

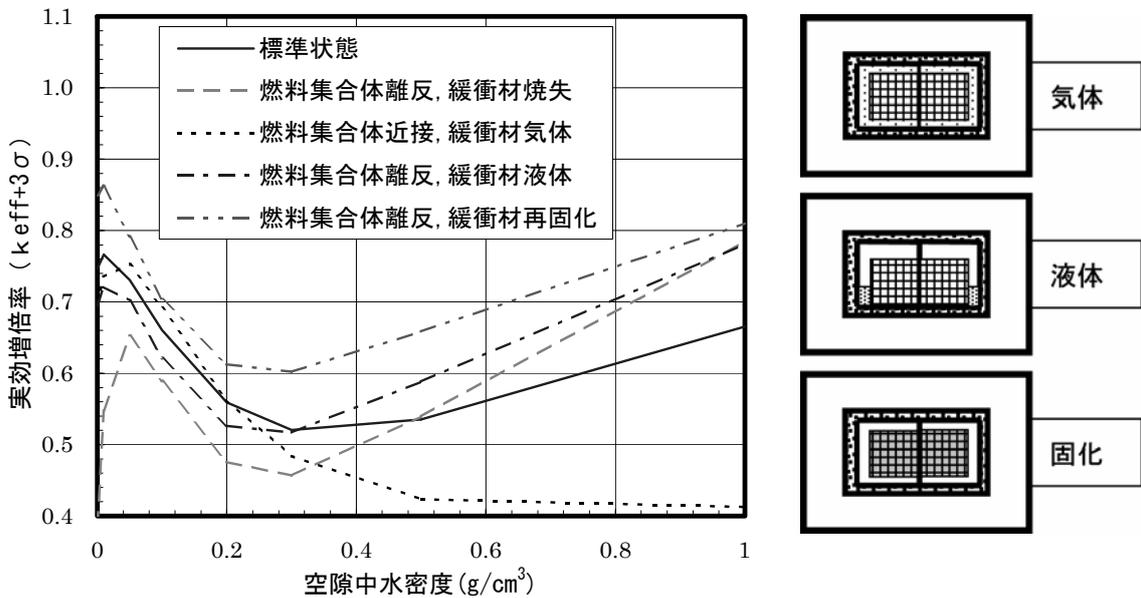


図 7.5-21 熱影響による緩衝材状態および集合体位置変位をパラメータとした配列系臨界解析結果

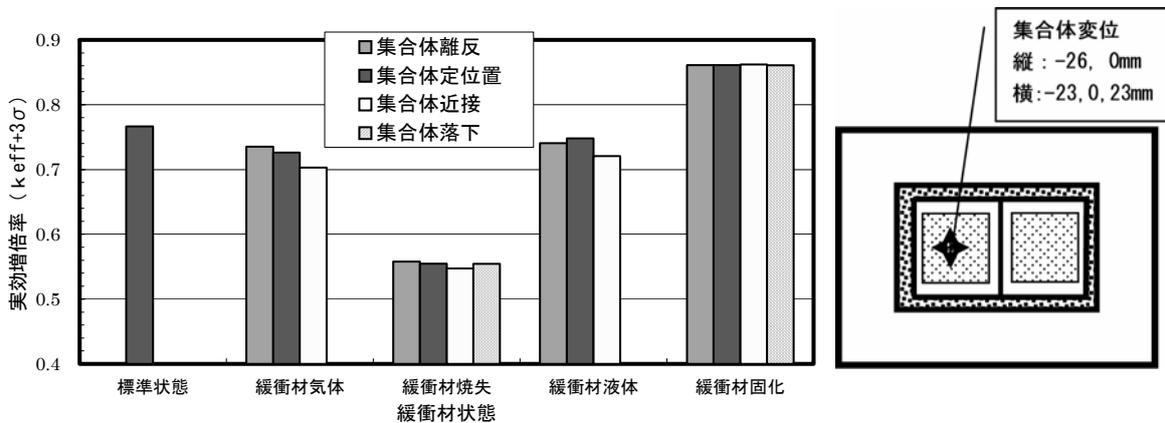


図 7.5-22 熱影響による集合体縦横方向位置変位をパラメータとした配列系臨界解析結果 (空隙中水密度 0.01g/cm^3)

次に輸送物面間距離を 50mm に変更した計算結果を図 7.5-21 の面間距離 0mm の計算結果と比較したものを、図 7.5-23 に示す。これから、面間距離 50mm とすると中性子実効増倍率は、面間距離 0mm とした場合に較べて低くなっている。

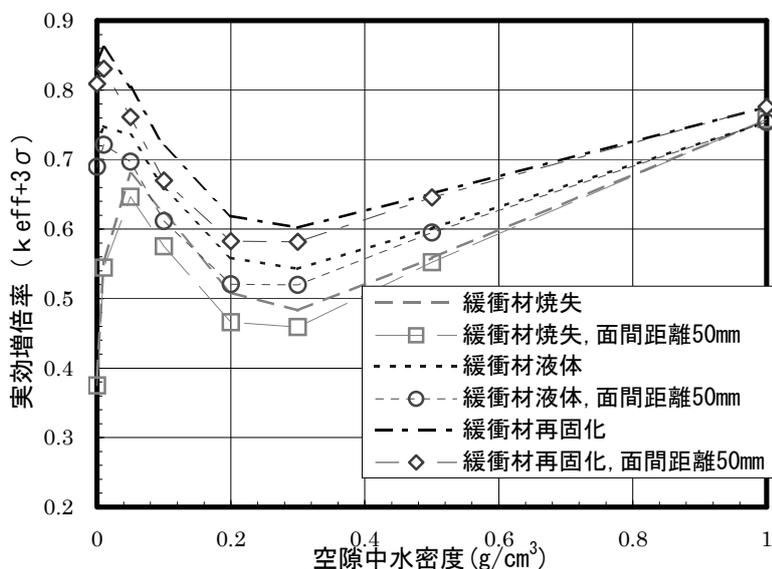


図 7.5-23 熱影響による輸送物面間距離を変化させた配列系臨界計算結果の比較（燃料集合体標準位置）

7.5.4 臨界安全性解析結果の評価

RAJ-II 型輸送物は輸送容器の内部の大部分を緩衝材で充填させた設計であるため、落下事故による輸送容器の変形は少なく、むしろ火災事故による緩衝材焼失等の影響が輸送物の臨界安全性を実証する上で重要となる。燃料集合体用緩衝材の楕型インサートは減速材となるため、通常時でも実効増倍率は高く評価される。しかし、これらの事故条件においてさえも内容器内に燃料集合体は健全に保持され、被覆管の閉じ込め機能も維持される。

落下事故シナリオに対して、7.2 節の落下衝撃解析の結果、垂直落下および水平落下の厳しい姿勢に対しても内容器の変形は少なく、輸送物の孤立系および配列系の配置について、未臨界性評価基準に対する十分な安全裕度を確認できた。

火災事故シナリオに対して、7.3 節 7.4 節の熱安全性解析の結果、外容器内水浸入および内容器内緩衝材の最適配置という厳しい条件の輸送物孤立系および配列系に関わる臨界安全解析結果では、中性子実効増倍率が十分に 0.95 以下であることを確認した。この結果、これら輸送中の事故を想定しても、RAJ-II 型輸送物の未臨界性の確保が可能であるという結論が得られた。

7章 参考文献

- 1) 平成3年度「新燃料輸送容器の安全性実証試験」事業成果報告書, 平成4年3月, 株式会社三菱総合研究所.
- 2) 平成4年度「新燃料輸送容器の安全性実証試験」事業成果報告書, 平成5年3月, 株式会社三菱総合研究所.
- 3) 伝熱工学資料改訂第4版 社団法人日本機械学会.
- 4) 川端信義, 王謙, 八木弘: 第二東名・名神高速道路トンネル火災時の避難環境に関するシミュレーションによる検討, 空気調和・衛生工学会論文集, No74, p.101(1999).
- 5) 川端信義, 王謙, 佐々木啓彰, 内藤祐輔: トンネル内火災時に発生する熱気流の挙動に関する数値シミュレーション, 日本機械学会論文集(B編), 65巻634号, p.1870(1999).
- 6) K.Satoh and S.Miyazaki : A Numerical Study of Large Fires in Tunnels, Report of Fire Research Institute of Japan, No.68, p.19 (1989).
- 7) 鋼構造耐火設計指針 社団法人日本建築学.
- 8) 臨界安全ハンドブック第2版, JAERI 1340, 日本原子力研究所燃料施設安全性研究委員会臨界安全性専門部会臨界安全性実験データ検討ワーキンググループ (1999).
- 9) 理科年表 1999年版, 丸善, IUPAC 原子量および同位体存在委員会, Pure and Applied Chemistry 70(1998), p.217.
- 10) 核データセンターホームページ(http://www.ndc.tokai.jaeri.go.jp/NuC/index_J.html).
- 11) JIS ハンドブック, 日本規格協会 (1995).

8. まとめ

ウラン新燃料および原材料に係る輸送は、国内での核燃料物質輸送の大部分を占めている。そこで、収納物の種類、輸送頻度、輸送経路等を勘案した上で主要な輸送物（輸送容器）を選定し、過去に国内外で発生した苛酷度の高い輸送事故のデータを調査・吟味した上で、輸送物に重大な影響を与える可能性のある苛酷事故シナリオを策定し、それに基づいて、許認可に使用された実績のある高い計算コードを用いた落下衝撃・熱・臨界安全性の解析を行った。これらの結果により、輸送中に万が一想定される事故事象に対して十分な安全裕度が確保されていることを示した。

8.1 核燃料物質等輸送物の選定

国内で陸上輸送される代表的な核燃料物質として、濃縮六ふつ化ウラン、二酸化ウラン粉末、PWR および BWR 用新燃料集合体が挙げられる。解析対象の輸送物・輸送容器には、新たに開発され、今後長期的な使用が見込まれるとして、

- ・ 濃縮六ふつ化ウラン（UF₆）に対しては MST-30 型輸送容器、
- ・ 二酸化ウラン（UO₂）粉末に対しては NPC 型輸送容器、
- ・ PWR 用新燃料集合体に対しては NFI-V 型輸送容器、
- ・ BWR 用新燃料集合体に対しては RAJ-II 型輸送容器

を選定した。解析用モデル作成に際しては、当該輸送物に係る安全解析書記載内容を参考とし、できる限りこれを模擬することとした。

8.2 事故シナリオの策定

事故データの調査では、国内での 2,3 件ある放射性物質輸送中の事故は追突によるものであり、輸送物を道路面へ落下させる事故があったが、輸送物への損傷程度は一般の試験条件の範囲であった。また、海外の例として米国サンディア国立研究所がまとめた RMIR データベースによると、六ふつ化ウラン、新燃料および使用済燃料の輸送に関して、放射性物質の汚染あるいは漏洩が生じた事故例はない。ウラン鉱石、イエローケーキ等の輸送に関しては、汚染・飛散あるいは漏洩事故が生じているが、被ばく等の重大な事故に至った例はない。さらに、一般車両が巻き込まれた重大な事故事例を調査し、核燃料物質等輸送車が一般道路上を運行中に事故に遭遇する可能性について検討した。その結果、事故形態としては追突あるいは接触によるものが大部分を占めるが、核燃料物質等を輸送する場合には通常隊列輸送が組まれて行われるため、これら事故原因による輸送物への影響が甚大となる危険性は極めて少ないことが分かった。従って、苛酷な機械的損傷を伴う事故形態としては、高架道路を走行する輸送車が何らかの原因で路面を踏み外し高架下へ転落する事故が考えられる。

輸送中に火災が発生、あるいは衝突等により火災に巻き込まれる事故の発生割合は少な

いが、石油を満載したタンクローリーとの衝突による事故形態が可能性のある重大なものと考えられる。また、トンネル内部で火災事故が発生した場合には、日本坂トンネルでの事故事例からも分かるように、発生した熱の逃げ場がなく高温となる可能性がある。

以上述べたような事故事例の調査・検討により、輸送物の安全性を計算コードで実証するために、苛酷な負荷条件となる可能性がある次の3種類の事故シナリオを策定した。

- a) 落下事故シナリオとして、輸送物が、高さ 18m の高架道路からコンクリートまたはアスファルト舗装面へ落下する。
- b) 開放空間での火災事故シナリオとして、輸送車が大量の可燃物を有するタンクローリーと接触または追突により火災発生を引き起こし、輸送物が火炎温度 800℃、火災時間が 90 分となる。
- c) トンネル内での火災事故シナリオとして、換気装置のないトンネル内で輸送車が 2 トンのトラックと衝突して火災を生じ火災継続時間が 2 時間となる。

8.3 核燃料物質等輸送物に関わる落下衝撃・熱安全性解析

8.3.1 MST-30 型輸送物に関わる落下衝撃・熱安全性解析

落下事故シナリオに基づき、18m 高さから総重量 4170kg の MST-30 型輸送物の、コンクリート舗装面およびアスファルト舗装面への、シリンダー弁を下部側とする垂直落下、コーナー落下および水平落下時における衝撃解析を行った。その結果として、

- ・ 密封境界としての弁の健全性は、弁と他部材との接触の有無で判定される。このため、弁と他部材の距離、または弁表面の接触反力を解析した結果は、「特別の試験条件」に対する解析と同様に、想定した全ての落下姿勢において、接触がなく、内殻等との間の距離が十分あり余裕のあることが確認された。
- ・ 耐圧部の健全性の評価部位は、垂直落下にあつてはシリンダーの鏡面であり、水平落下においては胴部である。ここで本解析では、舗装面の種類に拘らず、垂直落下時のシリンダー鏡面半径方向のひずみが最も大きく、拡張側の値 0.0024 が得られた。この値は、輸送規則に規定されている非降伏面への 9m 垂直落下試験の結果における同一部位・方向でのひずみ 0.0026 よりも僅かに小さい。なお、本解析におけるコンクリート舗装面への水平落下時のシリンダー胴部軸方向のひずみは拡張側の 0.0020 となり、対応する落下試験での結果の 0.0017 を若干上回っている。
- ・ 耐圧部に発生する相当塑性ひずみについては、垂直落下におけるシリンダーの鏡面において最も大きい解析結果を与え、コンクリート舗装面への垂直落下に対して最大 1.6%、アスファルト舗装面への垂直落下に対して最大 0.85%と解析された。これらの結果は、シリンダー構成材料の ASTM A-516 の破断伸びである 17%に比べ十分小さく、耐圧部の健全性が確認された。

また、開放空間での火災事故シナリオに基づき熱安全性解析結果では、

- ・ 火災発生後 90 分間、輸送物は 800°C の高温雰囲気曝されるため、保護容器内部のフェノリックフォーム断熱材、および下端部支持構造材として用いられるウレタンフォーム緩衝材も高温となる。輸送物内部温度分布解析結果から、断熱材最高到達温度は約 750°C、緩衝材最高到達温度は約 650°C と評価される。これらのフェノリックフォームおよびウレタンフォームは、容器周辺部に近く位置しているため外部からの入熱の影響を最も受けやすく炭化により焼失が進むものと考えられる。
- ・ 保護容器内面とシリンダー外面の間には厚い断熱材あるいは緩衝材が隙間なく充填されている構造であり、径方向の伝熱量は比較的少なく、収納物である濃縮 UF₆ がシリンダー内面に接する固/液相表面の最高到達温度は 89.2°C と解析される。この温度は、濃縮 UF₆ 蒸気圧に関わる限界温度 197.5°C 以下であるため、その蒸気圧は水圧試験以下となることが確認される。また、濃縮 UF₆ の液相体積は定常状態時で内容積の約 63.9%、であり、加熱終了時で約 66.1% である。従って、液相はシリンダーを充填せず、液圧は発生しない。
- ・ 密封境界である弁および閉止栓先端の最高到達温度は、弁先端で 92.7°C、閉止栓で 65.8°C と解析され、はんだ固相線に関わる限界温度 183°C 以下のため、シリンダーの閉じ込め性が確認される。

さらに、トンネル内での火災事故シナリオに基づく熱安全性解析結果では、

- ・ トンネル長手方向断面の温度分布の解析結果によると、高温の熱流体はトンネル上部にあり、火災部の中央上面で最も高い温度を示す。最大放熱速度が保たれる火災開始から 10 分後における熱流体の最高温度は約 1140°C (1413.6K) となり、それ以降の放熱速度が激減する 120 分後の熱流体温度は最高で 162.5°C (435.6K) である。放熱がなくなる火災開始から約 130 分以降では、輸送物の表面から若干内部が最も高い温度となり、表面温度が約 36°C (308.8K) まで低下し、外気がトンネル壁および輸送物表面で暖められて生じる対流が認められる。
- ・ トンネル内での火災においては、換気による熱除去が充分に行われなことから開放空間における火災と較べて火災開始から 10 分間という短期間ではあるが、保護容器外表面温度が最も高くなり、輸送物内温度分布の解析結果によると、保護容器外殻に接した断熱材の最高到達温度は約 928°C、緩衝材の最高到達温度は約 828°C と評価される。また、保護容器内殻上部および下部、シリンダー上部および下部に加えてシリンダー内面に接した自由液面部の濃縮 UF₆ における温度履歴の解析結果によると、耐圧部であるシリンダー上部での最高到達温度は 84.0°C、濃縮 UF₆ の最高到達温度は 66.8°C である。これらの温度は、水圧試験結果から決まる限界温度 197.5°C 以下であり、シリンダーの健全性が確認される。また、濃縮 UF₆ 固/液相の火災初期の体積は内容積の約 64.1% で、解析終了時には約 65.1% となる。従って、濃縮 UF₆ 液相は、火災の全期間においてシリンダーを満たすことはなく、シリンダーを液圧で破壊させることはない。

- ・ 密封境界である弁，閉止栓の健全性については，弁および閉止栓の最高到達温度をシリンダーの最高到達温度 84°Cで評価することとすれば，密封境界のシール部のはんだの融点（固相線温度）183°Cを超えることはないため，密封性は維持される。

8.3.2 NPC型輸送物に関わる落下衝撃・熱安全性解析

落下事故シナリオに基づく，18m 高さから総重量 1302kg の NPC 型輸送物の，コンクリート舗装面およびアスファルト舗装面への，蓋部のコーナー落下および本体のエッジ落下における衝撃解析を行った。その結果は，

- ・ 収納物の閉じ込め安全性に関して，輸送物のアスファルト衝撃面に対するコーナー落下の場合に，最近接内容器の相当塑性ひずみが，最大で 25.8%と大きな変形の解析結果を示した。この内容器は，その材料（ステンレス鋼）の破断ひずみが 40%なので，この解析結果によっても破損を免れているが，内容器蓋部の密封性は保たれなくなる可能性がある。しかし，蓋部は，圧縮された緩衝材で周囲を保持されており，蓋部の大きな開口は考えられない。また収納物（UO₂粉末）はポリエチレン製の袋に入れられて内容器内に収納されており，緩衝体で周囲を保持された蓋部からはみ出すことも考えられないので，収納物の閉じ込め安全性は確保されているものと考えられる。
- ・ 衝撃面に最近接の領域にある内容器中心間距離は，コンクリート面に対するエッジ落下の場合に最大の約 47.9mm縮まる。安全解析書記載の非降伏面への 9m 落下解析による内容器中心間距離の変化量範囲（<25.4mm）より大きい。この変形量は，全ての 9 個の内容器間隔が等間隔で縮まったものというよりも，落下点近傍の内容器相互の近接した領域に限られている。
- ・ 円筒形状の内容器胴部の周囲に層状に巻かれた中性子減速材および吸収材は，緩衝材で周囲を囲まれ保持されていることから，内容器から脱落せずに所定の位置を保つ。従って，落下事故シナリオによっても，中性子減速材および吸収材の機能は維持されていると考えられる。

また，開放空間での火災事故シナリオに基づく熱安全性解析結果では，

- ・ 内容器上蓋部は，緩衝材を介して外周に接する位置にあり，輸送物内部温度分布から判断して最も昇温の急激な箇所であるが，厚い断熱材および緩衝材の存在による伝熱の阻害により最高到達温度は 110°C(383K)以下である。また，内部構造材の中で最も熔融温度の低い中性子減速材（ポリエチレン）の温度は，内容器上蓋よりも 20°C程高目に評価しても熔融温度の 145°C(418K)以下である。また，中性子吸収材（カドミウム）の温度も中性子減速材温度と同程度であり，熔融温度の 321°C以下であるので，中性子吸収材および減速材の健全性が確保される。また，内容器蓋部ガスケットの温度も同程度と考えられ，使用上限温度の 150°C以下なので，ガスケットの健全性が確かめられ，従って，内容器収納物の密封性が確保される。

- ・ 800°C・90分の火災終了時に輸送物上面および側面外周は、輸送容器内部の温度分布の解析結果によると、火災温度 800°C (1073.15K) に達し、外容器内側に隣接する緩衝材の温度も一部ではあるが耐熱温度 300°C を超える。このとき、断熱材の最高到達温度は約 800°C、緩衝材の最高到達温度は約 612°C と推定される。火災終了後も数時間にわたって高温を維持することから、緩衝材の一部は熔融するものと考えられる。外周部の熱は順次内部に伝達され、内部の温度が均一化されていき、火災終了 6 時間後には輸送物内部の最高温度は約 100°C 程度になる。

さらに、トンネル内での火災事故シナリオに基づく熱安全性解析結果では、

- ・ トンネル内温度分布の解析結果では、最大放熱速度が保たれる火災開始 10 分後の高温の熱流体の最高温度は 1101°C (1374K) であり、それ以降の放熱速度が激減する開始 2 時間後の火災終了時の熱流体最高温度は 471°C (747K) である。火災部は均一な温度を示し、換気により火災部からトンネル外部に向けて熱流が移行している。火災終了 2 時間後は天井、道路面および輸送物の下流側に冷却遅延が認められる。
- ・ 開始 2 時間後の火災終了までの輸送物内部の昇温の程度は緩慢である。火災終了後では、下流側外周側面がより高温となるため、内部においても下流側がより高くなる。火災終了 6 時間後、伝熱により輸送物内部の温度の均一化が進行し、最高温度は 100°C 以下となる。内容器蓋部端の到達温度が内容器の部位で最も高く、約 105°C (378K) であり、内部構造材のうちで最も熔融温度の低い中性子減速材および吸収材の最高到達温度は、それよりも約 20°C 高めと推定される。従って、中性子減速材の熔融温度の 145°C (418K)、あるいは中性子吸収材の熔融温度 321°C 以下であるので、中性子減速材・吸収材の健全性が確保される。また、内容器蓋部ガスケットの温度も中性子減速材あるいは吸収材と同程度になると考えられ、その使用上限温度 150°C 以下なので、ガスケットの健全性が確かめられ、収納物の内容器への密封性が確保される。
- ・ 外容器内側に接する断熱材、緩衝材の最高到達温度は、それぞれ約 925°C、および約 404°C と評価され、断熱材到達温度は開放空間での火災事故シナリオにおけるよりも高い。いずれにしても、輸送物内部の断熱材あるいは緩衝材の一部は焼失するものと思われる。ただし、火災終了時にも外容器内側の緩衝材温度は、耐熱温度の 300°C より低く、内容器周辺の緩衝材による支持構造的性が確保される。

8.3.3 NFI-V 型輸送物に関わる落下衝撃・熱安全性解析

落下事故シナリオに基づく、18m 高さから最大総重量 3800kg の NFI-V 型輸送物の、コンクリート舗装面およびアスファルト舗装面への、PWR 燃料集合体の下部ノズル側を下側とする垂直落下、上側ケースを下側とした水平落下、および輸送容器のフランジ部を直撃するコーナー落下における衝撃解析を行った。その結果は、

- ・ 垂直落下あるいはコーナー落下時には、外周部には殆ど塑性変形が認められないが、比

較的に剛性が低い径方向中心部では最終的に 5mm 程度の拡張側の塑性変形が生じている。輸送物の落下衝撃エネルギーは、基本的にコンクリートあるいはアスファルト舗装面により吸収されると考えられ、規則で要求される 9m 高さから非降伏面への垂直落下試験時に見られるような輸送容器全長に亘っての長手方向均一な変形（約 35mm）は認められず、変形量も少ない。また、水平落下時には、長手方向中央部において落下直後の衝撃により最大 100mm の収縮側変形が起き、最終的には約 50mm 程度の収縮側の塑性変形となる。この場合は、9m 高さから非降伏面への水平落下試験の結果の約 40mm となる。

- いずれの落下姿勢であっても、輸送容器の外筒およびフランジ部に発生する相当塑性ひずみは、最大値で約 10%および約 20%であり、素材のステンレス鋼の破断ひずみ(40%)を上回ることなく、また、フランジ部を結合しているロッドボルトにも過大な応力が発生しないことから、落下時に開口部を生じさせることはない。
- また、いずれの落下姿勢であっても、弓型クランプおよびストロングバックの上部・下部ゲートには 10%を超える相当塑性ひずみの発生は見られないことから、燃料集合体の保持機能および中性子吸収材の位置保持機能は保たれると考えられる。
- 垂直もしくはコーナー落下姿勢の場合には、ショックマウントフレームに破断ひずみを上回る相当塑性ひずみが発生する可能性があることから、ショックマウントフレームの破断あるいはショックマウントフレームとストロングバックを結合するロックピンが切断し、ストロングバックが輸送容器内の所定の位置に保持されない可能性がある。
- 燃料集合体に発生する加速度は、コンクリート舗装面およびアスファルト舗装面をターゲットとする 18m 高さからの落下の場合、いずれの落下姿勢であっても規則で規定されている 9m 高さからの非降伏面への落下時に発生する加速度より小さく、燃料集合体の健全性は維持される。

また、開放空間での火災事故シナリオに基づく熱安全性解析結果では、

- 収納物である PWR 燃料集合体外表面の最高温度は、輸送物中央部よりも輸送物端部での温度が高い結果となり、中央部で 407°C、端部で 454°Cである。従って、密封境界である燃料被覆管の温度は、454°C以下になるものと評価され、PWR 燃料棒被覆管の気密性を確保できる温度 570°C以下であることから、その健全性が確認される。
- その他の構造材として外筒と内筒間に充填された断熱材（セラミックファイバー）およびサポートプレート（中性子吸収材を含む SUS304）の最高到達温度は、それぞれ 680°C および 430°Cと推定され、これら部材の熱的制限温度以下であり、これら部材の健全性が確保される。また、ショックマウント（合成ゴム）領域温度は、530°Cと評価され、火災時にはその燃料集合体保持機能は失われるものと考えられる。

さらに、トンネル内での火災事故シナリオに基づく熱安全性解析結果では、

- ・ トンネル内熱流動解析結果では、高温の熱流体の流れは上部にあり、火炎部の中央上面で最も高い温度を示す。最大放熱速度が保たれる火災開始から 10 分後における熱流体の最高温度は、約 1052°C (1325K) であり、それ以降の放熱速度が激減する 2 時間後の最高温度は約 150°C (423K) である。入熱がなくなった火災開始から約 130 分後では、輸送物の表面から若干内部で最も高い温度となり、表面温度が約 70°C (343K) まで低下し、外気がトンネル壁および輸送物表面で暖められて生じる対流が認められる。
- ・ 輸送物内代表箇所の温度履歴の解析結果によると、火災開始から 10 分後では、容器上部外周の温度が高くなり、内部の昇温は少ない。また、火災開始から 120 分後では、内筒内表面温度は 91°C となり、上部コーナー部での温度が 93°C となる。密封境界である燃料被覆管の健全性については、内筒内表面に面した燃料集合体の表層部の最高到達温度は 109°C であり、PWR 燃料棒被覆管の気密性を確保できる温度 570°C 以下であることから、その健全性が確認される。
- ・ その他の構造材として断熱材(セラミックファイバー)、ショックマウント(合成ゴム)、中性子吸収材は、最高到達温度がそれぞれ、585°C、352°C および 118°C と推定され、ショックマウントはその機能を維持できないが、その他の部材の健全性は確保される。

8.3.4 RAJ-II 型輸送物に関わる落下衝撃・熱安全性解析

落下事故シナリオに基づく、18m 高さから最大総重量 1490kg の RAJ-II 型輸送物の、コンクリート舗装面およびアスファルト舗装面への、BWR 燃料集合体下部タイプレートを下側とする垂直落下、輸送容器上蓋を下側とする水平落下、および輸送容器上蓋側コーナーの接地点の鉛直線上に輸送容器の重心がくるようなコーナー落下において衝撃解析を行った。その結果は、

- ・ 外容器は、垂直落下姿勢では長手方向に 12mm ないし 13mm 程度縮まり、水平落下姿勢では中央部径方向に 38mm 程度縮まる。一方、9m 高さから非降伏面への垂直落下試験の結果は、長手方向均一に 40mm 縮み、水平落下試験の結果は、中央部径方向に約 20mm 縮んでいる。
- ・ 外容器外面と内容器内面の距離は、18m 水平落下衝撃解析により最も近接したときには 100mm 程度縮まる。
- ・ 外容器に発生する相当塑性ひずみは、端部角部分の数箇所において約 40% (ステンレス鋼の破断ひずみに相当) を超えており、外容器では落下衝撃により開口する可能性がある。
- ・ 内容器に発生する相当塑性ひずみは、いずれの落下姿勢であっても 30% 以下であり、ステンレス鋼の破断ひずみを上回らないことから、内容器に開口部を生じさせることはない。
- ・ 垂直および水平の落下姿勢では、内容器に発生する加速度が、規則で規定されている安全解析書記載の 9m 高さからの非降伏衝撃面への落下時に発生する加速度よりも小さい。

また、コーナー落下姿勢では、長手方向の加速度が 9m 高さからの非降伏衝撃面への落下時に発生する加速度を上回るけれども、燃料棒の被覆管の破断エネルギーを上回ることはなく、被覆管は健全性を保つ。

また、開放空間での火災事故シナリオに基づく熱安全性解析結果では、

- 燃料集合体の位置を保守的に内容器内面と接触していると仮定したため、燃料集合体外表面の温度分布は、内容器内面と接触している面で最も温度が高い結果となった。これにより、収納物である燃料集合体外表面の最高温度は、輸送物端部よりも輸送物中央部での温度が高い結果となり、中央部で 478℃、端部で 423℃であった。従って、密封境界である燃料被覆管の最高温度は 478℃以下になるものと評価され、BWR 燃料棒被覆管の気密性を確保できる温度の 800℃以下であることから、その健全性が確認される。
- 外容器内面、内容器外面の最高温度は、輸送物中央部および輸送物端部のいずれにおいても約 800℃となり、これら部材の周辺に位置する断熱材、緩衝材およびガスケットの温度も同程度の温度になり、緩衝材やガスケット等はその機能を失うものと評価される。

さらに、トンネル内での火災事故シナリオに基づく熱安全性解析結果では、

- トンネル内熱流動解析結果では、高温の熱流体の流れは上部にあり、火災部の中央上面で最も高い温度を示した。最大放熱速度が保たれる火災開始から 10 分後における熱流体の最高温度は、約 1051℃ (1324K) であり、それ以降の放熱速度が激減する 120 分後の最高温度は約 167℃ (440K) である。入熱がなくなった火災開始から約 130 分後では、輸送物の表面から若干内部で最も高い温度となり、表面温度が約 82℃ (355K) まで低下し、外気がトンネル壁および輸送物表面で暖められて生じる対流が認められる。輸送物の高温領域は、中央円周断面から長手方向に 0.77m 位置の最上部である。
- 輸送物内代表箇所の温度履歴の解析結果では、火災開始から 10 分後に容器外周上部の温度が高くなり、内部の昇温は少ない。火災開始から 120 分後では、内容器内面上部の最高温度は 142℃であり、燃料集合体は容器内面に面した表層部の温度が高く、最高到達温度が 169℃、下部コーナー部での温度が 138℃となる。従って、燃料被覆管の最高到達温度は 169℃と評価され、BWR 燃料棒被覆管の気密性を確保できる温度 800℃以下であることから、その健全性が確認される。また、外容器内面、内容器外面の最高温度は、それぞれ 627℃および 430℃となり、これら部材の周辺に位置する断熱材、緩衝材およびガスケットの温度もそれぞれに対応した同程度の温度となる。

8.3.5 落下衝撃・熱安全性解析結果のまとめ

- 落下衝撃解析結果に関しては、基本的には輸送物の重量の大きい MST-30 型輸送物（最大総重量約 4170kg）あるいは NFI-V 型輸送物（最大総重量約 3800kg）に対して、落下衝撃エネルギーの大部分はコンクリートあるいはアスファルト衝突面によって吸収

され、輸送容器の変形量や相当塑性ひずみの発生量は比較的小さい。一方、NPC 型輸送物（最大総重量約 1302kg）あるいは RAJ-II 型輸送物(最大総重量 1490kg)は輸送物の重量が小さく、衝突面に吸収される衝撃エネルギーが限定され、輸送容器の変形量や相当塑性ひずみの発生量が多い。RAJ-II 型輸送容器の外筒端面の数箇所において相当塑性ひずみの発生量がステンレス鋼の破断ひずみを超えているのに、NFI-V 型輸送容器の外筒にはそのような解析結果が得られていない。

- ・ 輸送規則で規定されている 9m 高さからの非降伏面への落下試験と比較して、本解析における 18m 高さからのコンクリートあるいはアスファルト衝突面への落下衝撃による変形量の解析結果は、概ね同等かそれより低い値を与える。これは、実際のコンクリートあるいはアスファルト面が衝撃に対して降伏することによりエネルギーの一部を吸収できるからであると思われる。ただし、NPC 型輸送物の場合には、安全解析書記載の非降伏面への 9m 落下解析による内容器中心間距離変化量の範囲(<25.4mm)と比較して、本解析ではコンクリート面への 18m エッジ落下に対する変化量 47.9mm が得られている。これは、同輸送物の総重量が比較的少ないため、落下衝撃エネルギーの大半が輸送物自体で吸収されたものと考えられる。
- ・ 熱安全性解析に関しては、開放空間におけるタンクローリーとの衝突による火災事故のシナリオでは輸送容器を包む火炎の温度が 800℃一定で 90 分間保持されるのに対して、トンネル内での火災事故シナリオでは放熱速度パターンが最初の 10 分間のみで最大であり以降は 120 分まで低いレベルで与えられる。輸送容器外面に接した断熱材や緩衝材の到達温度は、この火災事故のシナリオの違いと断熱材配置等の違いにより変化する。いずれの火災事故シナリオにおいても、これらの断熱材や緩衝材の一部が部材の耐熱温度を超える温度になるため焼損することが考えられる。
- ・ 外容器は、高い表面温度のためガasket等の焼損により密閉性を喪失するものと思われる。一方、核燃料物質を収納した内筒等の密封容器あるいは燃料被覆管は、輸送容器の外面から離れた中心部に位置するためその温度上昇は比較的緩慢であり、その最高到達温度は部材の健全性を保証する温度以下となり、その密封性が維持される。
- ・ いずれの火災事故シナリオにおいても、燃料被覆管あるいは内筒等の密封容器の温度は、輸送容器外面が 800℃一定で 90 分間維持される開放空間での火災事故シナリオにより、この加熱期間中に温度上昇が単調かつ緩慢に継続し、輸送規則に規定される 800℃一定で 30 分間維持の耐火試験による到達温度を大幅に超過するが、それでも燃料の密封容器や被覆管の健全性を保証できる温度を超えることはない。MST-30 型輸送物あるいは NPC 型輸送物においては外筒内側に断熱材あるいは緩衝材が密に充填されており内筒への伝熱を阻害するため、内筒あるいはシリンダーの温度上昇は緩慢であり、最高到達温度も比較的に低く保たれる。

8.4 苛酷事故想定時の臨界安全性解析

8.4.1 MST-30 型輸送物に関わる臨界安全性解析

8.3.1 節に述べた MST-30 型輸送物に関わる落下衝撃解析および熱安全性解析の結果を参照して、当該輸送物の臨界安全性を評価するための前提条件を次に示すように設定した。

- ・ 落下衝撃による保護容器の変形および損傷のため、外部からの水浸入を考慮する。ただし、シリンダーおよび閉止栓は他の部材との接触は認められないため、シリンダー内部への水浸入は考えない。さらに、保護容器の変形に伴うシリンダー周辺の断熱材（中性子吸収材および減速材としての機能もある）の厚さ減少を考慮する。
- ・ 火災時の熱影響として輸送物周辺の高温により保護容器の密閉性は維持できないが、シリンダーおよび閉止栓の構造材温度は熱的制限値未満のためシリンダー内部への水浸入は考慮しない。さらに、シリンダー周辺の断熱材は焼失するものとする。

落下衝撃解析結果に基づく臨界解析の結果は、

- ・ 孤立系臨界解析においては、MST-30 型輸送物は保護容器内部の空隙中の水密度を 1.0g/cm^3 に近づけると中性子増倍率が高くなる傾向を持っている。その他のパラメータの影響を考慮すると、保護容器変形深さ 50mm (断熱材厚さ 150mm)、水密度 1.0g/cm^3 、 UF_6 固体円柱状態において、中性子増倍率計算値が最大となり、標準偏差の 3 倍を加えた 0.395 が求められる。
- ・ 配列系臨界解析においては、MST-30 型輸送物は保護容器内部の空隙中の水密度が低いほど、輸送物同士の相互作用により中性子増倍率が高くなる傾向を持っている。また、 UF_6 形状に関しては、固体の蒲鉾形状になると中性子増倍率が高くなる。さらに、輸送物面間距離に関しては、面間距離が減少するほど中性子実効増倍率計算値が増加する。結局、保護容器変形深さ 50mm (断熱材厚さ 150mm)、水密度 0 g/cm^3 、 UF_6 固体状態・蒲鉾形状、輸送物面間距離 0mm において、中性子実効増倍率が最大となり、標準偏差の 3 倍を加えた 0.534 が求められる。

また、熱安全性解析結果に基づく臨界解析の結果は、

- ・ 孤立系臨界解析において、MST-30 型輸送物の中性子実効増倍率は、保護容器内部の空隙中の水密度を 1.0g/cm^3 に近づけると高くなる傾向がある。また、 UF_6 が固体・円柱状態で、また、断熱材および緩衝材全焼失において実効増倍率計算値が最大となる。結局、 UF_6 円柱形状、保護容器断熱材および緩衝材厚さ 0mm 、空隙中水密度 1.0g/cm^3 において、中性子実効増倍率が最大となり、標準偏差の 3 倍を加えた 0.453 が求められる。
- ・ 配列系解析においては、MST-30 型輸送物の空隙中の水密度が低い体系での相互作用の増加により中性子増倍率計算値が高くなる傾向を持っており、水密度 0.01g/cm^3 でピーク値をとる。また、この中性子実効増倍率は、 UF_6 の固体状態・円環形状でピーク値をとる。さらに、輸送物間の面間距離が少ないほど中性子実効増倍率が高く算出される。

結局、輸送物面間距離 0mm、輸送容器断熱材厚さ 0mm、水密度 0.01g/cm^3 、 UF_6 固体状態・円環形状において、中性子実効増倍率が最大となり、標準偏差の 3 倍を加えた 0.739 が求められる。

8.4.2 NPC型輸送物に関わる臨界安全性解析

8.3.2 節に述べた NPC 型輸送物に関わる落下衝撃解析および熱安全性解析の結果を参照して、当該輸送物の臨界安全性を評価するための前提条件を次に示すように設定した。

- ・ 落下衝撃による外容器の変形および損傷のため、外部からの水浸入を考慮する。また、内容器蓋部の変形により密封性維持が困難なことから内容器内部へ水が浸入すると仮定する。ただし、 UO_2 粉末はプラスチック製の収納袋に入れられて内容器内に保持されることから、袋内部への水浸入は考慮しない。さらに、落下衝撃による内容器中心間距離は変化するが、内容器周辺の中性子吸収材および減速材は維持されるものとする。
- ・ 火災時の熱影響として輸送物周辺の高温により外容器の密閉性は維持できないが、内容器ガasketの温度は熱的制限値未満のため内容器内部への水浸入は考慮しない。落下衝撃による影響と異なり火災時の熱的影響による内容器中心間距離の変化は考えない。さらに内容器周辺の緩衝材は焼失するが、内容器周囲に巻かれた中性子吸収材は健全性を維持し、中性子減速材は一部が溶化するものの焼失しないものとする。

落下衝撃解析結果に基づく臨界解析の結果は、

- ・ 孤立系臨界解析においては、輸送容器内部の空隙中の水密度を 1.0g/cm^3 に近づけると中性子実効増倍率が高くなる傾向を持っている。 UO_2 粉末密度 4.5g/cm^3 、含水率 5.0wt%、内容器中心間距離 259mm、水没（空隙中の水密度 1.0g/cm^3 ）において、中性子実効増倍率の標準偏差の 3 倍を加えた最大値の 0.442 が算出される。
- ・ 配列系臨界解析においては、輸送物内外の空隙中の水密度が 0g/cm^3 に近い体系での相互作用の効果により中性子増倍率が高く算出される傾向がある。輸送物面間距離 0mm、 UO_2 粉末密度 4.5g/cm^3 、含水率 5.0wt%、内容器中心間距離 259mm、空隙中の水密度 0g/cm^3 において中性子増倍率の標準偏差の 3 倍を加えた最大値 0.469 が算出される。

また、熱安全性解析結果に基づく臨界解析の結果は、

- ・ 孤立系臨界解析においては、 UO_2 粉末密度 4.5g/cm^3 、含水率 5.0wt%、空隙中水密度 0.5g/cm^3 、中性子減速材 8 体分喪失において、中性子増倍率の標準偏差の 3 倍を加えた最大値 0.431 が算出される。
- ・ 配列系臨界解析においては、輸送物内部の水密度の少ない体系での相互作用増加により中性子実効増倍率が高くなる傾向を持っている。また、外容器面間距離を考慮すると中性子実効増倍率は低下している。 UO_2 粉末密度 4.5g/cm^3 、含水率 5.0wt%、中性子減速材 8 体分喪失、空隙中の水密度 0g/cm^3 、外容器面間距離 0mm において中性子実効増倍

率の標準偏差の3倍を加えた最大値0.748が算出される。

8.4.3 NFI-V型輸送物に関わる臨界安全性解析

8.3.3節に述べたNFI-V型輸送物に関わる落下衝撃解析および熱安全性解析の結果を参照して、当該輸送物の臨界安全性を評価するための前提条件を次に示すように設定した。

- ・ 落下衝撃による輸送容器の変形および損傷のため、外部からの水浸入を考慮する。ただし、燃料棒被覆管は健全性を保つため、管内部への水浸入はないものとする。また、ショックマウントの塑性変形のため燃料集合体位置の固定されなくなるが、ストロングバックは弾性変形の範囲にあり集合体保持機能は維持される。さらに、サポートプレートは弾性変形の範囲にあり、その中性子吸収材機能は維持される。
- ・ 火災時の熱影響として輸送容器周辺部の高温により密封性は維持できないが、燃料棒被覆管温度は熱的制限値未満であり内部への水浸入はないものとする。また、ショックマウントは焼失して燃料集合体の位置の固定はされない。

落下衝撃解析結果に基づく臨界解析の結果は、

- ・ 孤立系臨界解析においては、輸送容器内部の空隙中の水密度を 1.0g/cm^3 に近づけると中性子増倍率が高くなる傾向を持っている。中性子吸収材と燃料集合体との距離が最大の10mm、輸送容器変形深さが最大の265mm、容器と燃料集合体の距離が最小の50mmにおいて、容器内の空隙中の水密度 1.0g/cm^3 において、中性子実効増倍率の標準偏差の3倍を加えた最大値0.911が求められる。
- ・ 輸送物の配列系においては、輸送容器内部の空隙中の水密度を 1.0g/cm^3 に近づけると中性子増倍率が高くなる傾向を持っている。中性子吸収材と燃料集合体との距離が最大の10mm、輸送容器変形深さが最大の265mm、容器外面と燃料集合体の距離が最小の50mm、輸送物面間距離が0mmにおいて、容器内の空隙中の水密度 1.0g/cm^3 において、中性子実効増倍率の標準偏差の3倍を加えた最大値0.944が求められる。

また、熱安全性解析に基づく臨界解析の結果は、

- ・ 孤立系臨界解析においては、輸送容器内部の空隙中の水密度を 1.0g/cm^3 に近づけると中性子増倍率が高くなる傾向を持っている。燃料集合体位置は定位置のまま、空隙中水密度 1.0g/cm^3 において中性子実効増倍率は標準偏差の3倍を加えた最大値の0.903が求められる。
- ・ 配列系臨界解析においては、新燃料集合体輸送物は空隙中の水密度を 1.0g/cm^3 に近づけると中性子増倍率が高くなる傾向を持っている。径断面における燃料集合体の輸送容器外面までの距離が最小(68mm)、輸送物面間距離が最小(0mm)において中性子実効増倍率は標準偏差の3倍を加えた最大の0.910が求められる。

8.4.4 RAJ-II型輸送物に関わる臨界安全性解析

8.3.4 節に述べた RAJ-II型輸送物に関わる落下衝撃解析および熱安全性解析の結果を参照して、当該輸送物の臨界安全性を評価するための前提条件を次に示すように設定した。

- ・ 落下衝撃による外容器および内容器の変形・損傷により、外部からの水浸入を考慮する。ただし、内容器及の受ける損傷は僅かであり、断熱材領域への水浸入は無いものとする。また、内容器支持部材の変形による内容器の配置の変化を考慮する。燃料棒被覆管への影響は少なく、密封性は維持されるものとする。
- ・ 火災時の熱影響として外容器および内容器周辺部の高温により密封性は破れ、内部への水浸入を考慮する。ただし、内容器断熱材領域への水浸入は考慮しない。内容器内部の緩衝材（中性子減速材）は高温により溶化するものと仮定し、これにより燃料集合体配置も変化すると仮定する。また、燃料部被覆管の健全性は維持され、水浸入はない。

落下衝撃解析結果に基づく臨界解析の結果は、

- ・ 孤立系臨界解析においては、新燃料集合体輸送物は空隙中の水密度を 1.0g/cm^3 に近づけると中性子増倍率が高くなる傾向を持っている。燃料集合体位置は定位置のまま、外容器変形深さ 0mm 、外容器と内容器の面間距離 174mm 、空隙中の水密度が 1.0g/cm^3 において、中性子実効増倍率の標準偏差の3倍を加えた最大値 0.66 が求められる。
- ・ 輸送物落下衝撃損傷時の配列系臨界解析においては、新燃料集合体輸送物は配列系の場合水密度が低くなると中性子増倍率が高くなる傾向を持っている。外容器変形深さ 100mm 、内容器距離 0mm 、輸送物面間距離 0mm 、空隙中の水密度 0.01g/cm^3 において、中性子実効増倍率の標準偏差の3倍を加えた最大値 0.80 が求められる。

また、熱安全性解析に基づく臨界解析の結果は、

- ・ 孤立系臨界解析においては、新燃料集合体輸送物は空隙中の水密度を 1.0g/cm^3 に近づけると中性子増倍率が高くなる傾向を持っている。内容器内部のポリエチレン緩衝材が固化して燃料被覆管周りに付着し、燃料集合体が仕切板を介して最も接近する状態で、空隙中水密度が 1.0g/cm^3 において、中性子実効増倍率の標準偏差の3倍を加えた最大値 0.81 が求められる。
- ・ 配列系臨界解析においては、緩衝材が気体となる場合を除いて空隙中の水密度が約 0.3g/cm^3 において中性子増倍率が極小となる傾向を持っている。ポリエチレン緩衝材が固化し、燃料集合体が近接した配置で、水密度 0.01g/cm^3 、輸送物面間距離 0mm において、中性子実効増倍率の標準偏差の3倍を加えた最大値 0.86 が求められる。

8.4.5 臨界安全性解析結果のまとめ

核燃料物質等輸送物の輸送中に想定される落下あるいは火災事故時の臨界安全性は、輸送物の構造によって解析結果が異なる。すなわち、外容器内部を断熱材および緩衝材で充

填させウラン原料を収納する内容を支持する構造設計を採用した MST-30 型, NPC 型, あるいは RAJ-II 型輸送物の場合には, 落下衝撃による部材の変形を考慮するよりも火災時の熱的影響による断熱材・緩衝材, 中性子吸収材や減速材の焼失を考慮する方が臨界安全上厳しい評価を与える。一方, 外容器内側には比較的中空で燃料集合体を保持する構造設計を採用した NFI-V 型輸送物の場合には, 落下衝撃を受けたときの輸送容器の変形あるいは燃料集合体の位置移動により輸送物全体の反応度が高まることがある。

いずれの事故シナリオにおいても, 輸送物の種類に拘らず, 落下衝撃あるいは火災時の熱影響により外容器の密封性は保証されないため, 臨界安全評価上輸送容器内部の空隙中の水浸入を仮定しなければならない(ただし, 核燃料が収納されている容器あるいは被覆管内への水浸入は落下衝撃・熱安全性解析結果により考慮しなくてよい)。臨界解析は 8.4 節に述べたように, 輸送物単体の周りに十分な水反射体の層を巻いた孤立系の解析体系と, 輸送物を安全解析書記載の輸送制限個数だけ配列した配列系の解析体系に分けて行ったが, 配列系では一般に空隙中の水密度が低いほど相互干渉効果が強くなり, 孤立系よりも中性子増倍率が高く算出されるが, 共存する中性子吸収材・減速材との相互作用により複雑に変化する。各輸送物に対する臨界安全解析により得られた最大の中性子実効増倍率は次の通りである。

- ・ MST-30 型輸送物の中性子実効増倍率としては, 火災時の熱影響を考慮した配列系臨界解析により求められる 0.739 が最大となる。
- ・ NPC 型輸送物の中性子実効増倍率としては, 火災時の熱影響を考慮した配列系臨界解析による最大値 0.748 が求められる。
- ・ NFI-V 型輸送物の中性子実効増倍率としては, 落下衝撃による輸送容器の変形および損傷を考慮した配列系臨界解析による最大値 0.944 が求められる。
- ・ RAJ-II 型輸送物の中性子実効増倍率としては, 火災時の熱影響を考慮した配列系臨界解析による最大値 0.86 が求められる。

以上述べたように, 本解析で対象とした核燃料物質等輸送物に対する輸送中の落下および火災に関わる事故シナリオに対しては, いずれの組み合わせにおいても中性子実効増倍率が臨界安全基準値の 0.95 以下であり, 臨界安全性が確保される。

8.5 全体まとめ

以下に, 輸送物の種類毎に, 落下衝撃, 熱安全性解析結果, それらの結果を踏まえた臨界安全性解析の結果をまとめる。

(1) MST-30 型輸送物では, 濃縮六ふつ化ウランを 30B シリンダーに充填し, これを断熱材および緩衝材とともに保護容器内部に収納させた構造であり, シリンダー耐圧部に対する落下衝撃の影響が緩和される。すなわち, 密封境界としての弁の健全性は, 弁と他部材との

距離、または弁表面の接触反力を解析した結果、想定した全ての落下姿勢において、弁と内殻等との間の距離が十分確保され、接触の避けられることが確認された。また、コンクリート舗装面への垂直落下におけるシリンダー鏡面の相当塑性ひずみは、他の部位におけるよりも最大の約 1.6%と解析されたが、構成材料の ASTM A-516 の破断伸びである 17% に比べ十分小さいことから耐圧部の健全性が確認された。

火災影響に関しては、タンクローリーとの衝突による火災発生後 90 分間は、輸送物は 800°C の高温雰囲気曝されるため、保護容器内部のフェノリックフォーム断熱材、および下端部支持構造材として用いられるウレタンフォーム緩衝材も高温となる。これらの部位は、容器周辺部に近く、外部からの入熱の影響を最も受けやすい個所に位置しているため、フェノリックフォームおよびウレタンフォームは炭化により焼失が進む。また、収納物である濃縮 UF₆ のシリンダーに接した固/液相表面での最高到達温度は 89.2°C であり、濃縮 UF₆ 蒸気圧に関わる限界温度 197.5°C 以下となるため、その蒸気圧は水圧試験以下となることが確認された。また、収納物の体積は定常状態時で内容積の約 63.9%、であり、火災終了時で約 66.1%であった。従って、液相はシリンダーを充填せず、液圧は発生しないことが確認された。さらに、密封境界である弁および閉止栓先端の最高到達温度は、弁先端で 92.7°C、閉止栓で 65.8°C であり、はんだ固相線に関わる限界温度 183°C 以下のため、シリンダーの密封性が維持される。

臨界安全性評価のためには、火災時の熱影響としてシリンダー周辺の断熱材は焼失し、保護容器周辺部の高温により密閉性は維持できないものと仮定すると、この空隙部への水侵入を考慮する必要がある。また、配列系において臨界安全評価上厳しい評価を与える。ただし、シリンダーおよび閉止栓の構造材温度は、熱的制限値未満のためシリンダー内部への水侵入は考慮しない。従って、MST-30 型輸送物の配列系臨界解析においては、空隙中の水密度が低い体系での相互作用の増加により中性子増倍率計算値が高くなる傾向を持っており、水密度 0.01g/cm³、輸送物面間距離 0mm、UF₆ 固体状態・円環形状において、最大の中性子実効増倍率 0.739 が得られた。

(2) NPC 型輸送物では、二酸化ウラン粉末を収納した円筒状の容器を 3×3 配列に並べ、立方形状の外容器内に緩衝材とともに格納した構造を有する。アスファルト衝撃面に対する 18m コーナー落下の場合に、最近接容器の相当塑性ひずみの解析結果が 25.8% と大きな変形となり、内容器間で最大であった。この内容器は、その材料の破断ひずみが 40% なので、この解析結果によると破損を免れているが、その蓋部密封性は保たれなくなると考えられる。しかし、蓋部は、圧縮された緩衝材で周囲を保持されており、蓋部の大きな開口は考えられない。また収納物の二酸化ウラン粉末はポリエチレン製の袋に入れられており、緩衝体で周囲を保持された蓋部からはみ出すことも考えられないので、収納物の閉じ込め安全性は確保されているものと考えられる。また、内容器胴部に巻かれている中性子減速材および吸収材は、緩衝材で周囲を囲まれ保持されているため、内容器から脱落せず

に所定の位置に維持されていると考えられる。一方、衝撃面最近接の内容容器中心間距離は、エッジ落下の場合に最大で約 47.9mm 縮まる。この変形は、全ての内容容器間隔が等間隔で縮まったものというよりも、落下点近傍の内容容器相互の近接した部分に限られている。

開放空間での火災事故シナリオによれば、外周に接する内容容器上部蓋部の緩衝材との接触位置の最高到達温度は 110°C(383K)以下であり、内部構造材で最も熔融温度の低い中性子減速材の温度は、20°C程高目に評価しても熔融温度の 145°C(418K)以下である。また、中性子吸収材の温度も中性子減速材温度と同程度であり、熔融温度の 321°C以下であるので、中性子減速材・吸収材の健全性が確保される。また、内容容器蓋部ガスケットの使用上限温度は熱的使用限界以下の 150°Cなので、ガスケットの健全性が確かめられ、従って、内容容器収納物の密封性が確保される。一方、火災終了時に輸送物上面および側面外周は火炎温度 800°C (1073.15K) に達し、外容器内側に隣接する緩衝材の温度も一部ではあるが耐熱温度 300°C を超えたため、緩衝材の一部は熔融するものと考えられる。

臨界安全評価のためには、火災時の熱影響として外容器周辺部の高温により密閉性は維持できないが、内容容器ガスケットの温度は熱的制限値未満のため内容容器内部への水浸入は考慮しない。さらに、シリンダー周辺の断熱材は焼失するものと仮定する。断熱材および緩衝材は焼失するが、内容容器周囲に巻かれた中性子吸収材および減速材は溶化するものの全部は焼失しない。このような前提条件での配列系臨界解析においては、輸送物内部の空隙中水密度の少ない体系での相互作用増加により中性子実効増倍率が高くなる傾向を持っており、UO₂ 粉末密度 4.5g/cm³、含水率 5.0wt%、中性子減速材 8 体分喪失、空隙中の水密度 0g/cm³、外容器面間距離 0mm において、本輸送物最大の中性子実効増倍率 0.748 が算出される。

(3) NFI-V 型輸送物は、円筒形状の輸送容器内部の PWR 新燃料集合体が、サポートプレート、ストロングバックやゴム製のショックマウント等の内部構造物で中空に支持されている構造であり、落下事故時には輸送容器は比較的容易に変形することにより衝撃を吸収できるようになっている。いずれの落下姿勢であっても、弓型クランプおよびストロングバックの上部・下部ゲートには 10% を超える相当塑性ひずみの発生は見られないことから、燃料集合体の保持機能および中性子吸収材の位置保持機能は健全に保たれると考えられる。また、輸送容器の外筒およびフランジ部に発生する相当塑性ひずみがステンレス鋼の破断ひずみを上回ることなく、また、フランジ部を結合しているロッドボルトにも過大な応力が発生しないことから、落下時に開口部を生じさせることはない。ただし、垂直もしくはコーナー落下姿勢の場合には、ショックマウントフレームに破断ひずみを上回る相当塑性ひずみが発生する可能性があることから、ショックマウントフレームの破断あるいはショックマウントフレームとストロングバックを結合するロックピンが切断し、ストロングバックが輸送容器内の所定の位置に保持されない可能性があるとともに、損傷を受けることは少ないものの衝撃を受けたときの燃料集合体の変位は大きい。

タンクローリーとの衝突で発生する火災による熱影響に対しては、燃料集合体および支持構造物の温度は輸送容器内部が中空となっていることにより比較的低温度を維持できるため、燃料集合体のサポートプレートともなっている中性子吸収材については、安全機能が維持され、燃料被覆管の閉じ込め機能も十分に発揮される。すなわち、燃料集合体外表面の最高温度は、中央部で 407°C、端部で 454°C であり、燃料被覆管の気密性を確保できる温度 570°C 以下であることから、その健全性が確認された。その他の構造材として断熱材(セラミックファイバー) およびサポートプレート(中性子吸収材を含む SUS304) の最高到達温度は、それぞれ 680°C および 430°C と推定され、これら部材の熱的制限温度以下であり、これらの部材の健全性が維持される。

水平落下衝撃による輸送容器の変形および損傷が比較的大きく、臨界安全性評価のためには、火災による熱影響を考慮するよりも反応度的に厳しい結果が得られる。臨界安全評価のための前提条件として、落下衝撃による輸送容器の変形により外部からの水浸入を考慮する。ただし、燃料棒被覆管は健全性を保つため管内部への水浸入はないものとする。また、ショックマウントの塑性変形のため燃料集合体位置は固定されなくなるが、ストロングバックは弾性変形の範囲にあり集合体保持機能は維持される。さらに、サポートプレートは弾性変形の範囲にあり、その中性子吸収材機能は維持される。このような前提条件での輸送物の配列系臨界解析では、輸送容器内部の空隙中の水密度を 1.0g/cm³ に近づけると中性子増倍率が高くなる傾向を持っており、中性子吸収材と燃料集合体との距離 10mm、輸送容器変形深さ 265mm、容器外面と燃料集合体の距離 50mm、輸送物面間距離 0mm、空隙中の水密度 1.0g/cm³ において、最大の中性子実効増倍率 0.944 が得られた。

(4) RAJ-II 型輸送物は、BWR 新燃料集合体が内容器内部に緩衝材によって位置固定され、この内容器が外容器の内部に安定に緩衝材で保持された構造である。本輸送物の 18m 落下衝撃に対する変形は、他の輸送物の場合よりも比較的大きく、外容器は落下衝撃によって密封性の維持は不可能となるが、いずれの落下姿勢であっても、内容器に発生する相当塑性ひずみがステンレス鋼の破断ひずみを上回らないことから、内容器に開口部を生じさせることはない。また、コーナー落下姿勢では、長手方向の加速度が安全解析書記載の 9m 高さからの非降伏衝撃面への落下時に発生する加速度を上回るけれども、燃料棒の被覆管の破断エネルギーを上回ることではない。

タンクローリーとの衝突で発生する火災による熱影響に対しては、燃料集合体の位置を保守的に内容器内面と接触していると仮定して解析したため、燃料集合体外表面の温度分布は、内容器内面と接触している面で最も温度が高い結果となった。収納物である燃料集合体における外表面の最高温度は、輸送物端部よりも輸送物中央部での温度が高い結果となり、中央部で 478°C、端部で 423°C であった。従って、密封境界である燃料被覆管の温度は、478°C 以下になるものと評価され、被覆管の気密性を確保できる温度の 800°C 以下であることから、その健全性が確認された。また、外容器内面、内容器外面の最高温度は、輸

送物中央部および輸送物端部のいずれにおいても約 800℃となり、これら部材の周辺に位置する断熱材、緩衝材およびガasketの温度も同程度の温度になるものと評価される。

上に述べたように本輸送物では落下衝撃による輸送容器の変形および損傷の程度は比較的大きいですが、むしろ火災時の熱発生による緩衝材焼失や中性子減速材の溶失等の影響が輸送物の臨界安全性を評価する上で重要となる。火災時の熱影響として外容器周辺部および内容器ガasketの高温により密閉性は維持できずに輸送容器内部への水浸入を考慮する。ただし、内容器断熱材の温度は熱的制限値以下であることから内容器断熱材領域への水浸入は考慮しない。内容器緩衝材（中性子減速材）は高温により溶化するものと仮定し、これにより燃料集合体配置も変化すると仮定する。このような前提条件のもとで、本輸送物の配列系臨界解析においては、空隙中の水密度が約 0.3g/cm^3 で中性子増倍率が極小となる傾向を持っており、ポリエチレン緩衝材が燃料棒周りに固化し、燃料集合体が近接した配置で、空隙中の水密度 0.01g/cm^3 、輸送物面間距離 0mm において、本輸送物最大の中性子実効増倍率 0.86 が求められる。

以上により、本解析結果は、次のようにまとめられる。

- ・ コンクリートあるいはアスファルト衝突面に対する 18m 落下衝撃解析の結果は、発生する衝撃エネルギーの大部分が衝突面によって吸収され、輸送規則で規定される非降伏面への 9m 落下試験の結果と比較して、輸送容器に発生する塑性変形の量は同程度かあるいはそれ以下となる。輸送容器内側に支持された核燃料物質を直接収納する内容器あるいは被覆管については、衝撃が緩和され、破損することなく密封性が維持される。この場合、輸送物の重量が大きいほど、垂直落下における衝突面に付与される衝撃エネルギーの割合が大きく、反対に輸送物の重量が小さいほど輸送物自体が変形することにより吸収されるエネルギーの割合が大きい。
- ・ 火災事故による熱影響に対しては、開放空間におけるタンクローリーとの衝突によるシナリオでの解析結果が、トンネル内におけるシナリオでの解析結果より厳しくなり、輸送容器外筒に近接する断熱材あるいは緩衝材への熱影響により、部材の焼失等も考えられる。しかし、内容器あるいは被覆管等の到達温度は、その健全性を保証する温度以下であり、密封性が維持される。
- ・ 各輸送物の構造の違いにより、事故シナリオごとの臨界安全性の評価結果が異なる。すなわち、輸送容器内部が緩衝材あるいは断熱材、または中性子減速材で構成された輸送物の場合には、火災による各部材の焼失を考慮した臨界安全性の評価が厳しくなる。一方、輸送容器内部が比較的空洞の構造である輸送物の場合には、落下衝撃による外容器の変形および内容器あるいは燃料集合体の位置変位を考慮した臨界安全性評価の結果が厳しくなる。これら輸送物の臨界解析において、輸送物単体を扱う孤立系解析よりも、安全解析書記載の輸送物積載個数だけ配列させた配列系解析の方が、輸送物間の相互干渉効果による反応度上昇が著しく、最も高い中性子実効増倍率が得られる。

- 本報告の安全性解析で対象としたウラン新燃料および原材料の輸送物の中では、NFI-V型輸送物の中性子実効増倍率が最も高く算出される。すなわち、落下衝撃による輸送容器の変形および損傷を考慮した配列系臨界解析による最大値 0.944 が求められる。しかし、この場合でも臨界安全基準値の 0.95 以下となり、臨界安全性が確保される。

最後に本報告書をまとめるに当たり、輸送容器安全性専門部会の構成員など多くの方々のご助言とご協力を頂いた。ここに記すことにより感謝の意を顕すこととしたい。

付録 1 海外における核燃料物質等の輸送中の事故報告例

核燃料物質等の輸送事故情報データ 1

事故概要	タイトル	エセーサ空港でのイエローケーキ事故				
	検索 No		検索分類	核燃料物質	更新日	
	事故発生年月日	1987/1/12	事故発生国名		アルゼンチン	
	輸送形態	航空	事故分類		輸送時	
	事故のタイプ	落下	事故に伴う事象		漏出	
	被ばく者数		被ばくによる死者数			
	事故による負傷者数		事故による死者数			
	運送者（国名）					
	事故発生場所	国際エセーサ空港				
	発送者（国名）					
	受取者（国名）					
	収納物分類	イエローケーキ		収納物名称		
	輸送物分類	L		輸送容器型式		ドラム
	総輸送容器数	38	損傷し漏洩した数	11	損傷のみの数	
		<p>事故は、ブエノスアイレス市の 35km 南に位置する国際エセーサ（Ezeiza）空港の補助滑走路の乗降ホーム N4 で生じた。カナダ向けのイエローケーキをボーイング 747T-100 に積み込んでいた時、突然積荷昇降機の機械的ロックの破損が生じた。昇降機のロック位置の事前確認が正確でなかった。200L ドラム 38 個が地面から 6m 高さの昇降機から滑り落ちた。2 段で積載されていたので、下段の 19 個が損傷を受け、約 200m² にイエローケーキが散乱した。風が強く風下 100m まで散乱した。原子力エネルギー委員会と連邦消防隊からの専門家が招集され、事故現場を測定し、漏出程度を評価した。そして、空港の業務を継続させて、損傷したドラムおよび周辺にポリエチレンシートで覆った。下段のドラムの内、8 個は無傷で、7 個は蓋が開き、4 個は相当に損傷していた。約 200kg 程度が漏出していた。7 個のドラムは再使用され貯蔵所に送付された。損傷した 4 個のドラムはプラスチック袋に入れられ、空港の南 12km のエセーサ原子力センターに送付された。散乱したものはドラム又は袋に入れて貯蔵所に送付された。現場は水を散布し、飛散を防止して、散乱物をウォータージェットで 1 箇所を集め吸引機で回収した。</p>				
措置	事故に際して空港の全ての業務を一時停止して専門家を待つこととした。					
文献	Rodriguez, -C. E. ; Puntarulo, -L. J. ; Ganibano, -J. A. : The yellow cake accident at the Ezeiza Airport. , The 9th international symposium on the packaging and transportation of radioactive materials. Proceedings: Volume 1. [1989]. 492 p. p. 261-265.					

核燃料物質等の輸送事故情報データ 2

事故概要	タイトル	アウトバーンでの放射性物質輸送物事故				
	検索 No		検索分類	医療用	更新日	
	事故発生年月日	1994.4.6	事故発生国名		ドイツ	
	輸送形態	道路	事故分類		輸送時	
	事故のタイプ	衝突, 落下	事故に伴う事象		異状なし	
	被ばく者数		被ばくによる死者数			
	事故による負傷者数		事故による死者数			
	運送者 (国名)					
	事故発生場所	ビュルツブルグ近傍, フランクフルトとニュルンベルグ間のアウトバーン A3				
	発送者 (国名)					
	受取者 (国名)					
	収納物分類	医療用, 空容器, その他	収納物名称	⁹⁹ Mo		
	輸送物分類	B, A	輸送容器型式	D80288, D80367		
総輸送容器数	3	損傷し漏洩した数		損傷のみの数	3	
	<p>放射性物質の 3 個の輸送物を積載した車がローリー車と衝突した。振り動かされた 3 個の輸送物は車から投げ出され損傷を受けた。</p> <p>D80288 (B 型 (U)) と A 型はアウトバーンの反対車線に投げ出された。車が B 型 (U) に突っ込み, 損傷させた。輸送物の健全性は保持された。</p> <p>A 型輸送物は外側が捲れたが, 内側容器 (ブリキ缶) は衝撃吸収材で保護されていた。車からの数回の衝撃の後, D80288 輸送物は, 総重量約 90kg の ⁹⁹Mo を有して, 事故を起した車線で損傷を受けた状態であった。収納物を取り除いて検査した結果, 損傷は取っ手部と底部に生じていた。劣化ウラン遮蔽物で囲まれていた放射性収納物の密封性は異状なかった。底板と胴部の溶接線が道路との衝突ではがれ, 100mm 長さ 50mm 幅でギャップが見られた。僅かな量の耐熱材 (石膏) が出た。</p>					
措置						
文献	Droste, -B.; Masslowski, -J. -P. : Accident with packages for RAM on a German autobahn. International-Journal-of-Radioactive-Materials-Transport. (1995). v. 6(4). p. 271-272.					

核燃料物質等の輸送事故情報データ 3

事故概要	タイトル	放射性物質輸送物の衝突・火災事故				
	検索 No		検索分類	産業用	更新日	
	事故発生年月日	1976.12.10	事故発生国名		カナダ	
	輸送形態	道路	事故分類		輸送時	
	事故のタイプ	衝突, 火災	事故に伴う事象		漏洩	
	被ばく者数		被ばくによる死者数			
	事故による負傷者数		事故による死者数			
	運送者 (国名)					
	事故発生場所	ケベック州ラテリエ (Laterriere)				
	発送者 (国名)					
	受取者 (国名)					
	収納物分類	放射線源		収納物名称	セシウム-137	
	輸送物分類		輸送容器型式			
	総輸送容器数		損傷し漏洩した数		損傷のみの数	
	<p>ケベック州ラテリエ (Laterriere) で, 40kL のガソリン積載車が自動車との衝突を避けて, 折れ曲がり, 停車中の放射性物質輸送トラックと衝突した。トラックのキャブがタンク左前方を損傷し, ガソリンが漏れ引火した。衝突した 2 台, 近傍の 2 台の車両およびレストランが燃えた。火災後, 調査官がトレーラーの残骸から 1 個の装置に放射性物質のマークを発見した。装置表面で最大 3rem/h であった。装置はカナダ原子力エネルギーに検査のため送られた。</p> <p>装置はセシウム-137 の 209mCi を含有する密度計であった。火災は 2:30 に発生し, 地元消防では機材不足で消火できず, 近傍の軍の消防隊が 3:35 に到着し, 4:00 に鎮火した。火災は最大 90 分であるが, 装置が実際に熱に曝されていた時間は 75 分以下であった。線源中の当初 48kg あった鉛の内 45kg が消失し, 酸化鉛 (LITHARGE,MASSICOT) が生成し。ブロンズは残存していた。これから 486°C以上で 930°C以下の温度に曝されていたと推定された。輸送物の損傷程度から, 計算より平均的には 550°Cに 75 分晒され, 800°Cでは 21 分に相当すると推定され, 規定条件より熱損傷は小さいと評価された。</p>					
措置						
文献	McLellan, -J. J., White, -M. C., and Taylor, -W. R. : Damage and thermal exposure of a radioactive material package in an accident and gasoline fire. , 5th symposium on packaging and transportation of radioactive materials. Las Vegas, 1978. p. 615-622.					

核燃料物質等の輸送事故情報データ 4

事故概要	タイトル	鉄道による濃縮六ふつ化ウラン輸送物の重大事故				
	検索 No		検索分類	核燃料物質	更新日	
	事故発生年月日	1970.11	事故発生国名		ドイツ	
	輸送形態	鉄道	事故分類		輸送時	
	事故のタイプ	脱線	事故に伴う事象		異常なし	
	被ばく者数		被ばくによる死者数			
	事故による負傷者数		事故による死者数			
	運送者（国名）					
	事故発生場所	アスハウゼン（Ashausen）				
	発送者（国名）					
	受取者（国名）					
	収納物分類	六ふつ化ウラン	収納物名称		六ふつ化ウラン	
	輸送物分類	A	輸送容器型式		30B	
	総輸送容器数	2	損傷し漏出した数		損傷のみの数	2
	<p>各 2t の濃縮六ふつ化ウランを含む輸送物 2 個は、貨車 11 両編成で、機関車のすぐ後の貨車に積載されていた。40km/h で走行すべきカーブを 100km/h で走行したことが、11 両全てを脱線させた原因である。2 個の輸送物は貨車から落ちて損傷した。No72 輸送物は線路に落ち、傾斜を転がり、牧草地でとまった。僅かに局所的な変形が認められた。No62 輸送物は線路に落ちた後 40m に渡ってレール上を滑った。外面が 800cm²（表面の 0.8%）の範囲で深さ 10cm 開口した。断熱材の部分的消失が認められた。</p> <p>落下試験後容器外面のギャップが生じる。このギャップが大きいと（5cm 以上、表面積で 3～4%）、耐火試験で内容器の温度は制限温度を超えることが、これまでの試験で確認されている。上記事故ではかかる程度には至らなかった。</p>					
措置						
文献	Schulz-Forberg, -B. : Severe railway-accident with UF sub 6 packagings., Proceedings of the 4th international symposium on packaging and transportation of radioactive materials. 1974. p. 1041-1050.					

核燃料物質等の輸送事故情報データ 5

事故 概要	タイトル	天延ウラン濃縮物（イエローケーキ）の輸送事故				
	検索 No	7101281	検索分類	核燃料物質	更新日	
	事故発生年月日	1977.9.27	事故発生国名		アメリカ	
	輸送形態	道路	事故分類		輸送時	
	事故のタイプ	衝突	事故に伴う事象		漏出	
	被ばく者数		被ばくによる死者数			
	事故による負傷者数		事故による死者数			
	運送者（国名）	LEE WAY MOTOR FRIGHT INC（米）				
	事故発生場所	コロラド州スプリングフィールド北 15 マイル				
	発送者（国名）	エクソン鉱石（米）				
	受取者（国名）	KREE-MCGEE CHEMICAL（米）				
	収納物分類	イエローケーキ	収納物名称	イエローケーキ		
	輸送物分類	S	輸送容器型式	ドラム		
総輸送容器数	50	損傷し漏出した数	29	損傷のみの数	2	
	<p>馬 3 頭と衝突し横転。29 個の蓋が開き、12000lb のイエローケーキが漏出。このうち、5000lb がトレーラー中に、残り 7000lb が 3000～4000ft² の周辺地域に撒き散らされた。容器はゲージ 18 の板を使用した規則 40 の 55 ガロンドラムであり、800lb のイエローケーキを入れていた。本容器の圧縮試験では約 2-3/4 インチで座屈し開口する。その時の荷重は 21000lb であり、それまでの概略吸収エネルギーは 24200in-lb であった。この変形が動的に生じたとすれば、容器が単独で 8.7mph の速度で衝突した時の圧潰エネルギーに相当する。衝突時トラックの速度はもっと大きいので、この変形は積み重なったドラムの自重による静的変形と見なされる。</p>					
措置	プラスチックシートが敷かれ、10/10 に清掃・除洗が完了。					
文献	J.D.Colton, R.E.Emerson : Study of The Mechanics of A Transportation Accident Involving Natural Uranium , NUREG/CR—0558 (1979)					

核燃料物質等の輸送事故情報データ 6

事故概要	タイトル	カンサス州ウィチタでのイエローケーキ輸送物の事故				
	検索 No	9081762	検索分類	核燃料物質	更新日	
	事故発生年月日	1979.3.22	事故発生国名		アメリカ	
	輸送形態	道路	事故分類		輸送時	
	事故のタイプ	横転	事故に伴う事象		漏出	
	被ばく者数		被ばくによる死者数			
	事故による負傷者数		事故による死者数			
	運送者（国名）	SALT CREEK FRIGHTWAYS				
	事故発生場所	I-235,ウィチタ				
	発送者（国名）	PETROMICS CO				
	受取者（国名）	KREE-MCGEE CHEMICAL				
	収納物分類	イエローケーキ	収納物名称	イエローケーキ		
	輸送物分類	S	輸送容器型式	ドラム		
	総輸送容器数	54	損傷し漏出した数	24	損傷のみの数	0
	55 ガロン容器で輸送中のトラック／トレーラーが走行車線から外れて路肩に入り戻ろうとして横転した。トレーラーの屋根から 51 個のドラムが投げ出され、22 個のドラムの蓋が損傷し、43782lb 運送中、1800lb が漏出した。					
措置	雨が降ったいたので、飛散防止のため、シートが掛けられた。					
文献	H.R.Borchert : Uranium Yellow Cake Accident-Wichita,Kansas,CONF-860932, p39-42(1987). A.W.Grella : A REVIW OF SELECTED NUCLEAR EVENT CASE HISTORIES,CONF-830528,p958(1983).					

核燃料物質等の輸送事故情報データ 7

事故概要	タイトル	新燃料輸送物の火災事故				
	検索 No	TTC0292	検索分類	核燃料物質	更新日	
	事故発生年月日	1991.12.16	事故発生国名		アメリカ	
	輸送形態	道路	事故分類		輸送時	
	事故のタイプ	衝突, 火災	事故に伴う事象		異常なし	
	被ばく者数		被ばくによる死者数			
	事故による負傷者数		事故による死者数			
	運送者 (国名)	MCGIL TRUCKING				
	事故発生場所	マサチューセッツ州スプリングフィールド, I-91				
	発送者 (国名)	GE (米)				
	受取者 (国名)	バーモントヤンキー原発				
	収納物分類	新燃料		収納物名称	新燃料, BWR	
	輸送物分類	A		輸送容器型式	USA/4396	
	総輸送容器数	12	損傷し漏出した数		損傷のみの数	12
措置						
文献	R.W.Carlson, I.I.Fischer : A Highway Accident Involving Unirradiated Nuclear Fuel in Springfield, Massachusetts, on December 16, 1991, NUREG/CR-5892 (1992)					

核燃料物質等の輸送事故情報データ 8

事故概要	タイトル	テネシー州クリントンでの使用済燃料輸送物の事故				
	検索 No	1120173	検索分類	核燃料物質	更新日	
	事故発生年月日	1971.12.8	事故発生国名		アメリカ	
	輸送形態	道路	事故分類		輸送時	
	事故のタイプ	転落	事故に伴う事象		異常なし	
	被ばく者数		被ばくによる死者数			
	事故による負傷者数		事故による死者数			1名
	運送者（国名）	KILLION MOTOR				
	事故発生場所	テネシー州クリントン西 2.3 マイル				
	発送者（国名）	GULF ENERGY & ENVIOROMENT				
	受取者（国名）	OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY				
	収納物分類	使用済燃料		収納物名称	使用済燃料	
	輸送物分類	B		輸送容器型式	HNPF	
	総輸送容器数	1	損傷し漏出した数	0	損傷のみの数	1
	輸送トラックが他の車との正面衝突を避けようとして道路から飛び出し、横転した。運転手は死亡。使用済燃料容器は溝に投げ出され、地中約 3 フィートめり込んだ。外側断熱材が外表面の 80% で裂けた。収納物に異常なし。					
措置						
文献	J.M.Chandler : The PEACH BOTTOM SPENT FUEL ELEMENT SHIPPING CASK ACCIDENT DECEMBER 8,1971, ORNL-TM-3844(1972).					

核燃料物質等の輸送事故情報データ 9

事故概要	タイトル	カナダでの放射性物質輸送車の衝突事故				
	検索 No		検索分類	医療用	更新日	
	事故発生年月日	1994.3.22	事故発生国名		カナダ	
	輸送形態	道路	事故分類		輸送時	
	事故のタイプ	衝突, 落下	事故に伴う事象		異状なし	
	被ばく者数		被ばくによる死者数			
	事故による負傷者数		事故による死者数			
	運送者 (国名)	カナダ原子力エネルギー会社 (AECL)				
	事故発生場所	公道 17 でチョークリバーから 15km 地点				
	発送者 (国名)	AECL				
	受取者 (国名)					
	収納物分類		収納物名称	^{99}Mo , ^{133}Xe , ^{153}Sm		
	輸送物分類	B(M),B(U)		輸送容器型式	F279, F334/F278, F271	
	総輸送容器数	3	損傷し漏洩した数		損傷のみの数	3
	<p>放射性物質の 3 個の輸送物を積載した 5 トン車が鋼板を輸送中のトレーラー車と衝突した。輸送車は進行と反対方向に 50m 引きずられ、転倒し、溝で停止し、大破した。F334 の保護容器は変形したが、断熱材に損傷もなく、内部の F278 容器に損傷はなかった。F279 容器は若干傷が付き、容器を固定する支柱が僅かに曲がった。車両への固定は維持され、漏れはなかった。</p> <p>F271 は外部が変形し火災防護部品に軽度の損傷を生じたが、車両に固定されており、漏れはなかった。</p>					
措置						
文献	F. Keeling and L. E. G. Dunn: An Accident Involving Radioactive Materials, Canada 1994 March, Canadian Nuclear Society, 16 th Annual Meeting, Vol.2 (1995).					

核燃料物質等の輸送事故情報データ 10

事故概要	タイトル	サウスカロライナ州ヒルダでの空の使用済燃料輸送容器の事故				
	検索 No		検索分類	医療用	更新日	
	事故発生年月日	1982.11.3	事故発生国名		米国	
	輸送形態	道路	事故分類		輸送時	
	事故のタイプ	衝突, 落下	事故に伴う事象		異状なし	
	被ばく者数		被ばくによる死者数			
	事故による負傷者数		事故による死者数			
	運送者 (国名)					
	事故発生場所	ヒルダ近傍の州道 70 と 304 の交差点				
	発送者 (国名)					
	受取者 (国名)					
	収納物分類	空容器		収納物名称		
	輸送物分類		輸送容器型式		B3-1	
	総輸送容器数	2	損傷し漏洩した数		損傷のみの数	2
	<p>低レベル廃棄物用容器 2 個を積んだトレーラートラックに交差点で車が側面から衝突した。トラックは廃棄物処理場からユニオンカーバイドの工場へ戻る途中であった。空容器は重量約 9.3 トンであった。トラックはバランスを失って容器をトレーラーから落下させ、転倒し、運転手は死亡した。しかし容器には顕著な変形は認められず、漏洩も生じなかった。</p>					
措置						
文献	M. K. Kong, C. E. Walter, and H. H. Woo : Mechanical Analysis of a Transportation Accident Involving Empty Shipping Gask for Radioactive Materials Near Hilda, South Carolina, in November 1982, NUREG/CR3452 (1983).					

付録2 国内で輸送されている核燃料物質および容器の一覧表

用途	型式	分類	輸送区間	主な輸送形態	容器重量	陸上輸送距離の長短
天然六フッ化	48Y	A	転換工場から濃縮施設	陸上輸送	2.6t	○
	48Y-IDTC	A		海上輸送		
濃縮六フッ化	21PF-1	AF	濃縮施設から転換工場	陸上輸送	1.7t	○
	MST-30	AF		海上輸送	総重量4t	
再生六フッ化	RU-1 (21PF-1B)	B(M)			1.7t	○
二酸化ウラン	NPC	AF	転換工場から燃料加工工場	陸上輸送	753kg	○
	TNF-XI	AF		海上輸送	652kg	
	BU-J	AF				
	BU-M	AF				
	BU-7	AF				
	DOT-6M	AF				
回収ウラン	UOX/C(F)	AF	再処理工場から転換工場	陸上輸送	総重量1.3t	○
酸化プルトニウム	PUCON-II	B(M)				
	TN6-5	B(M)				
	P-3S	B(M)				
新燃料	MFC-1 (PWR)	AF	燃料加工工場から発電所	陸上輸送	3t	○
	NFI-V (PWR)	AF			2.4t	
	NT-IV (BWR)	AF			1.1t	
	NFC-1 (PWR)	AF				
	RAI-II (BWR)	AF			930kg	
MOX新燃料	EXCELLOX-4	B(M)	海外加工工場から発電所	陸上輸送 海上輸送	88.6t	×
	TN-12B	B(M)			103t, 104t	
	TN-12P	B(M)			106.9t	
	TN-9121	B(M)			640kg	
	MONJI-F	B(M)	JNC東海から発電所		○	
使用済燃料	TK-69(設)	B(M)	発電所から再処理工場	陸上輸送 海上輸送	109.7t	×
	MSF-69B(設)	B(M)			109.1t	
	TN17	B(M)			総重量76t	
	TN-12B	B(M)			95.4t	
	EXCELLOX3B	B(M)			70.7t	
	NFT-10P	B(M)			74.5t	
	NFT-12B	B(M)			68.1t	
	NFT-22B	B(M)				
	NFT-32B	B(M)			総重量106t	
	NFT-14P	B(M)			102t	
	NFT-38B	B(M)				
	HZ-75T	B(M)			74t	
	NH-25	B(M)				
	JSM-87Y-18.5T	B(M)			18.2t	
低レベル廃棄物	IP-2	IP	発電所から廃棄物管理施設	陸上輸送 海上輸送		○*
ガラス固化	TN28VT	B(M)	海外加工工場から廃棄物管理施設	陸上輸送 海上輸送	98t, 102t	×
	BNFL3320	B(M)			101.9t	

注：○長距離あり (* 実態は海上輸送)，×はまなし，(設)設計承認のみ

付録 3 自動車道路等での一般車両の重大な事故事例

発生日時	事故形態	発生場所	概要	出典
2004/7/27	衝突事故	岐阜県 群上市	東海北陸自動車道の平山トンネル北側出入口付近で、右前輪がパンク破裂して対向車線にはみ出した普通トラックが乗用車と正面衝突し2台とも炎上して、約30分後に鎮火した。この事故で全7人死亡。	2
2001/11/28	追突事故	大阪府 吹田市	大阪中央環状線で軽乗用車に乗用車が追突、避けようとしたタンクローリーが急ブレーキをかけ横転、さらにタンクローリーにワゴン車が衝突した。タンクローリーに積んであった引火性の工業用アルコール約50リットルが路面に漏れ出したため消防が砂をまいて処理した。4時間通行止め。負傷者2人。	1
2001/11/26	追突事故	愛知県 名古屋市	交差点で信号待ちの大型トラックにタンクローリーが追突した。ローリーのタンク前部が破損し、ガソリン約4kリットル(ドラム缶約20本分)流出した。片側2車線を通行止めにし化学消防車など18台が出動し回収作業を行った。消防署員3人がガソリンで軽いやけどを負う。	1
2001/7/24	追突事故	埼玉県 羽生市	東北道上り線で大型トラックが大型タンクローリーに追突して中央分離帯を越え、下り線の乗用車とトラックに衝突した。タンクローリー横転し、液化酸素少量漏洩した。死者1名、負傷者3名。	1
2000/12/26	追突事故	福井県 福井市	北陸自動車道上り線で、ワゴン車が道路左側の鉄柱に衝突、後続の大型トラックが追突した。当時、雪により速度制限されていた。死者2名、負傷者3名。	1
2000/12/21	横転事故	三重県 津市	伊勢自動車道下り線で、タンクローリー(6トン)が中央分離帯を越え上り線に飛び出し横転した。積載の重油約千リットルが道路からのり面に流出。死者1名。	1
2000/12/21	追突事故	福島県 いわき市	磐越自動車道の落石防護柵工事現場付近で、片側交互通行の信号待ちをしていたタンクローリーに大型トラックが追突し、前の乗用車など計8台が次々と玉突き衝突。死者1名、負傷者11名。	1

発生日時	事故タイプ	発生場所	概要	出典
2000/10/24	横転事故	東京都港区	首都高環状線内回りで、24t 大型トレーラーが左に横転、横を走行中の乗用車下敷き大破。死亡 1 名。	1
2000/9/8	追突事故	静岡県 由比町	東名高速下り線の近接する 4 か所で大型トラックや乗用車など車両 18 台関連の多重追突事故が発生し、1 名死亡、4 名重軽傷。降り始めの雨で路面が滑りやすくなっていたこともあり、連鎖的な事故が起こったと見られている。	1
2000/9/2	追突事故	東京都 江戸川区	首都高速湾岸線西行きで渋滞により停車していた乗用車数台に後続車が追突し、トラックなど 9 台が絡む玉突き事故。負傷者 18 名。	1
2000/8/31	追突事故	東京都 品川区	首都高速湾岸線東京港トンネルで 4 t トラック、ワゴン車、観光バスなど計 6 台が玉突き衝突。4 人乗りワゴン車がバスとトラックに挟まれ大破、2 人死亡。負傷者 5 名。	1
2000/8/21	追突事故	東京都 品川区	首都高湾岸線東京港トンネル内で高速バスが渋滞の最後尾の大型トレーラーに追突、トレーラーも前のトラックに衝突。バス乗客 21 名軽傷。	1
2000/3/1	衝突事故	神奈川県 横浜市 鶴見区	首都高速横羽線下り線生麦ジャンクション近くでトラックが乗用車に衝突し、さらに後続の車が次々に追突計 8 台の玉突き事故となった。死者 3 名、負傷者 4 名。	1
2001/11/28	追突事故	大阪府 吹田市	大阪中央環状線で軽乗用車に乗用車が追突、避けようとしたタンクローリーが急ブレーキをかけ横転、さらにタンクローリーにワゴン車が衝突した。タンクローリーに積んであった引火性の工業用アルコール約 50 リットルが路面に漏れ出したため消防が砂をまいて処理した。4 時間通行止め。負傷者 2 人。	1

発生日時	事故タイプ	発生場所	概要	出典
2001/11/26	追突事故	愛知県 名古屋市	交差点で信号待ちの大型トラックにタンクローリーが追突した。ローリーのタンク前部が破損し、ガソリン約 4k リットル(ドラム缶約 20 本分)流出した。片側 2 車線を通行止めにし化学消防車など 18 台が出動し回収作業を行った。消防署員 3 人がガソリンで軽いやけどを負う。	1
2001/7/24	追突事故	埼玉県 羽生市	東北道上り線で大型トラックが大型タンクローリーに追突して中央分離帯を越え、下り線の乗用車とトラックに衝突した。タンクローリー横転し、液化酸素少量漏洩した。死者 1 名、負傷者 3 名。	1
2000/1/23	追突事故	兵庫県 宝塚市	中国道上り線宝塚東トンネル出口付近で、自動車や大型トレーラーが絡む事故発生。その直後後方トンネル内で十数台の車が次々に追突。合計自動車 18 台の衝突事故。負傷者 7 名。	1
1999/12/28	追突事故	静岡県 榛原市	東名高速道路上り線で大型トラックが停止中の大型トラックに追突するなど計 4 台が関連する玉突き事故。	3
1999/12/25	追突事故	静岡県 由比町	東名高速上り線で大型トラックの左後輪が脱輪して急停車、トラック 2 台が相次ぎ追突。この事故で渋滞中、列最後尾乗用車に大型トラック追突など。	3
1999/12/21	衝突事故	新潟県 糸魚川市	北陸道下り線岩木トンネル出口付近でスリップし走行車線に停車した乗用車にトラックやスキー観光バス、トレーラーなど 7 台が衝突。	3
1999/12/12	追突事故	岩手. 安代	吹雪で路面が凍結していた東北自動車道上り線で高速路線バスに大型トラックが追突。さらにトラックや乗用車など約 30 台が次々に追突。負傷者 4 名。	1
1999/10/25	衝突事故	滋賀県 大津市	名神高速道路上り線で車線をふさぐように落ちていた鉄骨にトラックや普通乗用車など 5 台が次々に乗り上げる。大型トラックが大破。	3
1999/10/7	衝突事故	姫路市	山陽自動車道の増井山トンネル上り線でトラックが左側壁に衝突、横転したところに大型トラックが追突。	3

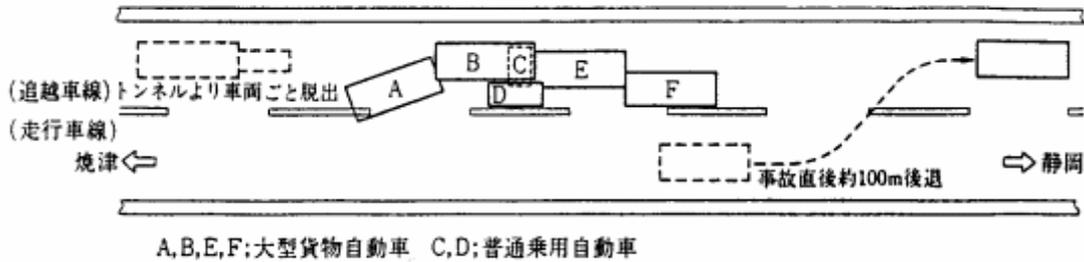
発生日時	事故タイプ	発生場所	概要	出典
1999/4/2	追突事故	東京都 大田区	首都高湾岸線で渋滞により停車中の車にトラックが追突。計 5 台が玉突き衝突。	3
2002/11/23	転落事故	北海道	大型バスと乗用車が衝突し、大型バスが跨線橋（高さ 8.5m）より JR 函館本線路上へ転落した。死者 1 名負傷 47 名。	4
2001/9/15	転落事故	滋賀県 彦根市	名神高速道路下り線で乗用車が道路左側のガードレールを突き破り約 10m 下の雑木林に転落、大破した。死者 3 名、負傷者 1 名。	1
2001/5/21	転落事故	埼玉県 三郷市	常磐自動車道三郷 JCT から出口側道で、大型トレーラー（20t）が側壁を破り、13m 下の別の側道に転落、横転した。死亡 1 名。積荷散乱。	2
2001/2/24	衝突（落下） 事故	名古屋市 北区	名古屋高速道路楠 JC 付近下り線で、パワーショベル積載大型トラックが側壁に衝突。パワーショベル先端の矢板打ち機（3t）が外れ、16m 下の国道 302 号に落下。矢板打ち機は歩道橋上で止まった。重体 1 名。	2
2001/10/2	衝突（落下） 事故	名古屋市 昭和区	名古屋高速都心環状線で、大型トラックが防音壁に衝突。防音壁が破損し、壁の一部と積荷の金属屑が 15m 下の市道に落下。軽傷 2 名。	2
2001/5/22	横転（落下） 事故	東京都 世田谷区	首都高速 3 号線上り線で普通トラックが横転し、積荷の角材（10m, 10 センチ角）が散乱。10 数本が約 10m 下の国道 246 号に落下し、タクシー等を直撃。	2
2000/9/7	衝突（落下） 事故	東京都 足立区	首都高速川口線下り車線で走行中の大型トラックが側壁に衝突し、幅 3m, 高約 1m のコンクリート製側壁と上部アルミ製防壁が 13m 下の都道に落下した。負傷者 1 名。	1
2000/7/18	横転（落下） 事故	埼玉県 東松山市	関越道上り車線で陸上自衛隊の不発弾処理隊のトラックがダンプカーに接触するなどして横転し、積んでいた不発弾 7 本が散乱した。信管は抜かれており爆発の恐れはなかったが、最大 10km の渋滞が発生した。負傷者 1 名。	1

発生日時	事故タイプ	発生場所	概要	出典
2000/2/7	衝突（落下）事故	東京都港区	首都高4号上り線で20tトレーラーが中央分離帯に衝突、積んでいた材木約1,800本が下り車線上などに散乱。乗用車など5台巻き込まれる。負傷者3名。	1
2000/10/16	転落事故	石川県加賀市	北陸自動車道で大型タンクローリー（劇物の塩化メチル積み）が、道路左側コンクリート防護壁や中央分離帯に接触後、路肩から20m下の林へ転落。塩化メチルは漏れなかった。負傷者2名。	1
2000/10/7	転落事故	茨城県水戸市	常磐道水戸インター出口の急な下りの右カーブで、大型タンクローリーが約9m下の市道に転落。積んでいた軽油約2キロリットル流出。死者1名。	1
2000/10/6	衝突（落下）事故	奈良県天理市	名阪国道の約9km続く急坂終点付近で大型トラックが中央分離帯に激突。荷台から鉄板が対向車線に落下し、観光バスが乗り上げて前部を大破。負傷者15名。	1
1981/3	衝突・転落事故	カリフォルニア	サンフランシスコ湾I-80陸橋上で、トラクター／トレーラーが前方で方向を変えた小型トラックに衝突し、コンクリート障害物に衝突し、それを越えて、地上の砂利面に64フィート（19.2m）落下し、大破。	7
2002/8/10	火災事故	三重県鈴鹿市	東名阪自動車道下り線で、渋滞中の車両に大型トレーラーが追突、大型トレーラーを含む大型トラック2台等計7台が玉突き衝突し、4台が炎上して5名が死亡。	4
2001/8/9	火災事故	石川県松任市	北陸自動車下り線でガードレールに接触し停車した乗用車に大型トラックが追突し、乗用車が大破し、炎上。死亡2名。	2
2000/10/7	火災事故	熊本県植木町	九州自動車道下り線で乗用車がトラックに追突し双方とも横転。乗用車は炎上。死亡1名負傷3名。	2
2000/9/7	火災事故	山梨県富士吉田市	中央道下り線河口湖インター付近でトラックが6人乗り乗用車に追突。乗用車は、中央分離帯に衝突し炎上した。死者2名、負傷者4名。	1
1999/12/28	火災事故	三重県亀山市	東名阪自動車道上り線で非常駐車帯に停車の大型トラックが後退して走行車線に入り後ろから来たトラックに衝突。2台とも炎上。	3

発生日時	事故タイプ	発生場所	概要	出典
1999/12/15	横転事故	東京都中央区	首都高速環状線内回り京橋ランプ付近で、走行中の14kLの灯油を積載したタンクローリーが横転し、道路を塞いだ。火災の発生はなし、灯油50L流出。	4
1999/9/18	火災事故	静岡県 大井川	東名高速道でトラックがオートバイに追突。乗用車など計6台がからむ事故。トラック炎上。	3
1999/6/27	衝突事故	群馬県松井田	上信越道下り線で10tトラックが側壁に衝突、大破。燃料の軽油が路上に流出し通行止め。	3
1999/1/30	火災事故	東京都八王子市	八王子バイパスで大型トラックと乗用車など4台が衝突。乗用車炎上、3人焼死。	3
1993/12/10	火災事故	福島県黒磯市	東北自動車道上り線で普通トラックがガードレールに衝突し横転し、後続車が玉突き事故で、衝突の火花で引火。死亡3名（事故死含む）、負傷5名。	5
1993/11/1	火災事故	愛知県小牧市	小牧JC付近で、下り線の普通貨物自動車の後続の大型貨物自動車と接触し、はずみで中央分離帯に乗り上げ炎上。危険物積載物が漏れ引火。貨物自動車2台と後続のバスが焼損。	5
1992/3/20	火災事故	静岡県由比町	東名道路下り線で4tトラックが乗用車に追突し、さらに前方の乗用車4台が玉突き事故。6台が焼損。死亡4名（事故死含む）、負傷3名。	5
1991/9/11	火災事故		名神道路で大型トレーラーと大型トラックが接触し、後続の車5台が追突し、後続のワゴン車から出火。4台が焼損。死亡4名（事故死含む）。	5
1987/3/10	火災事故	仙台市	東北自動車道下り線仙台IC付近で、タンクローリーと大型トラックが接触事故を起し、後続のワゴン車が停車しこのワゴン車に大型トラックが追突し発火。13台が焼損。死亡1名、負傷7名。	5
1999/6/8	火災事故	オーストラリア・ニューサウスウェールズ	ディーゼル油やガソリン積みのタンクローリーが橋に衝突、炎上。Yowaka川に38000リットル漏洩。	3

発生日時	事故タイプ	発生場所	概要	出典
2003/1/18	トンネル火災	岐阜県 下呂町	大型ダンプカーと大型タンクローリーが国道 41 号の緩いカーブのコンクリートシェルター内で衝突。タンクローリーはガソリン約 1 万リットルを積んでいた。2 台はダンプカー側の車線で炎上し、焼けただけ、ほとんど車の形がなくなっていた。大型タンクローリーの後方には、乗用車 1 台が走っていたが、事故に気づき、ブレーキをかけたため難を逃れた。	11
2001/11/19	トンネル火災	群馬県 新治村	関越自動車道下り線関越トンネル内で、乗用車に大型トラックが追突し、乗用車が炎上。死亡 1 名、負傷 1 名。2 時間通行止め。通報から 40 分で鎮火。	2
2001/11/7	トンネル火災	山口市	山陽自動車道下り線黒河内山トンネル（長さ 2.7 キロ）内で、大型トラックが舗装工事中の車に接触し、壁面に衝突して炎上。死亡 3 名重体 1 名。30 分後消火。約 3 時間半通行止め。通報から 35 分で鎮火。	2
2001/5/7	トンネル火災	神奈川県 川崎市	東京湾アクアライン下り線の海底トンネル内で故障のため路肩に停車していた軽ワゴン車のエンジン部分から出火・炎上。	1
2000/11/10	トンネル火災	神奈川県 山北町	国道 246 号浅間山（せんげんやま）トンネルで、トラックなど車 7 台玉突き追突し、1 台炎上。死者 1 名、負傷者 4 名。通報から 55 分で鎮火。	1
2000/4/28	トンネル火災	東京都 大田区	首都高速湾岸線東行き空港北トンネル内、徐行中の乗用車に 4t トラックが 100km/h で追突し、炎上。焼損 2 両。死亡 1 名負傷 3 名。	4
2000/3/9	トンネル火災	大阪府 千早赤阪村	国道 309 号水越トンネルでトラックが側壁に衝突・出火、積み荷のプラスチック製ハンガーなど燃え有毒ガス発生。走行中の人や消防隊員煙吸い中毒。負傷者 18 名。（トンネル内で 13 台立ち往生）	1 4
2000/3/4	トンネル火災	広島県 福山市	山陽道上り線郷分トンネル内 3 カ所で大型バスや乗用車など 25 台が相次いで衝突し 2 台炎上した。5 日昼に通行止め解除となる。死者 1 名、負傷者 27 名。	1 4

発生日時	事故タイプ	発生場所	概要	出典
1999/12/28	トンネル火災	岡山県 倉敷市	山陽道下り線二子トンネル内で乗用車や大型トラックなど計 5 台が衝突。乗用車が炎上。約 5 時間半通行止め。	3
1988/9/17	トンネル火災	広島県 吉和村	中国自動車道境トンネル上り線西側坑口より 200m で停車中した車両を発見した大型貨物自動車事故回避措置をとったところ後続車が次々に追突し炎上。事故現場から 100m に停車した大型貨物自動車も延焼。11 両が焼損。死亡 5 名負傷 5 名。	5
1979/7/11	トンネル火災	静岡県 焼津市	東名高速道路日本坂トンネル下り線西口（出口）付近で大型トラック 4 台、乗用車 2 台の玉突き事故で発火。後続車に延焼拡大 189 台が焼損。死亡 7 名（追突死 2 名）。トンネル一部破損。	5 9 10
1967/3	トンネル火災	滋賀/三重県 境	国道 1 号鈴鹿トンネルで、可燃物積載トラックのエンジンから出火、火災車と反対側に停車した車両等 13 台が焼損。死傷者なし。	6
2001/10/24	トンネル火災	スイス	サン・ゴットアルド・トンネル（全長 16.3 キロ）でトラック同士が衝突し、炎上。関係車両約 100 台、死亡 11 名、行方不明 128 名。	2
1999/3/24	トンネル火災	フランス	フランス/イタリア国境モンブラン自動車トンネル内で、小麦粉やバターを積載したトラックが運搬中に火災発生。焼損車両 33 台。死亡 41 名負傷 27 名。	3
1993/5/29	トンネル火災	オーストリア	タウエルン。高速道路トンネル内で塗料を積んだトラックと乗用車が衝突、玉突き、数台が爆発炎上。	3
1982/4/7	トンネル火災	カリフォルニア州	カルデコット北トンネルで、ガソリン 33KL 積載車両が事故車に接触横転し火災発生。死亡 7 名 6 台焼損（事故後トンネルに入った後続車両が累焼）。	6 7 8
1949/5	トンネル火災	ニューヨーク市	ホランドトンネルで二硫化炭素入りドラム積載トレーラーが走行中二硫化炭素に引火し爆発し、前後を進行中のトラック 9 台が全焼。	6



参考図 日本坂トンネル事故現場⁹⁾

付録3 出典

- 1) 事故災害データベース：交通事故：損害保険料率算出機構, 2002/05/更新
(www.nlir.or.jp/contents/database/index.html).
- 2) 毎日新聞 ウェブ (www.mainichi.co.jp/).
- 3) 災害・事故年鑑 平成12年版, 災害情報センター, 丸善, CD(2000).
- 4) 消防庁災害情報 www.fdma.go.jp/html/infor/index.html, 2003.2.12 現在.
- 5) 火災便覧, 第3版, 日本火災学会編, 共立出版社 (1997).
- 6) 消防科学総合センター, 大深度地下における危険性物品の規制等のあり方に係る調査検討報告書, 1995.3 追加資料.
- 7) L.E.Fischer, C.K.Chou, M.A.Gerhard, C.Y.Kimura, R.W.Martin, R.W.Mensing, M.E.Mount, M.C.Witte: Shipping container response to severe highway and railway accident conditions, NUREG/CR-4829 (1987).
- 8) D.W.Larson, R.T.Reese, and E.L.Wilmot: The Caldecott Tunnel fire Thermal Environments: Regulatory Considerations and Probabilities, SAND-82-1949C.
- 9) 窪津義弘, 吉田光雄: 日本坂トンネル車両火災事故とその復旧, 高速道路と自動車, 第22巻12号, p.36 (1979).
- 10) 河村忠孝: 日本坂トンネル内の車両火災事故とその復旧, セメント・コンクリート, No.439, p.108 (1983).
- 11) アサヒコム(www.asahi.com/national/update/0118/035.html).

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
電界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質質量)の濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ² ・kg ² ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ² ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ² ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ² ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
吸収線量, 質量エネルギー分与, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作る際のいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 実際には、使用する際には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を併せて用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg ² ・s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg ² ・s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ² ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ² ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ² ・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
放射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s ² ・A
吸収線量	グレイ 毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ² ・m ⁻² ・kg ² ・s ⁻³ =m ² ・kg ² ・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg ² ・s ⁻³ =kg ² ・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
リットル	l, L	1l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1海里=1852m
ノット		1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バイン	b	1b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G ≡ 10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe ≡ (1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≡ 10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb =1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal =1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	IX unit	1 IX unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	f	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	metric carat	1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ = 1μm=10 ⁻⁶ m

