

研究施設等廃棄物の角型容器を使用した 廃棄体の受入基準の検討

－落下による衝撃により飛散又は漏えいする放射性物質の量が
極めて少ないこと－

Study on Waste Acceptance Criteria for Waste Packages Destined
for Near Surface Disposal Containing Radioactive Waste from Research,
Industrial and Medical Facilities

－ Minimization of the Amounts of Scattering Radionuclides Caused
by Dropping Impact －

仲田 久和 岡田 翔太 天澤 弘也 坂井 章浩

Hisakazu NAKATA, Shota OKADA, Hiroya AMAZAWA and Akihiro SAKAI

バックエンド統括本部
埋設事業センター

Radioactive Wastes Disposal Center
Decommissioning and Radioactive Waste Management Head Office

January 2024

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人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。
本レポートはクリエイティブ・コモンズ 表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。
本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の
条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）
より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under
the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section,
JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan

E-mail: ird-support@jaea.go.jp

研究施設等廃棄物の角型容器を使用した廃棄体の受入基準の検討

— 落下による衝撃により飛散又は漏えいする放射性物質の量が極めて少ないこと —

日本原子力研究開発機構 バックエンド統括本部 埋設事業センター

仲田 久和、岡田 翔太*、天澤 弘也、坂井 章浩

(2023 年 9 月 29 日受理)

日本原子力研究開発機構(原子力機構)が設置を計画している浅地中埋設処分施設(ピット処分及びトレンチ処分)に埋設する廃棄体は、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律の核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則に規定された技術基準に適合していることが求められる。同技術基準では、令和元年の核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則の改正において、「廃棄物埋設地に定置するまでの間に想定される最大の高さからの落下による衝撃により飛散又は漏えいする放射性物質の量が極めて少ないこと。」が新たに規定された。このため、事業者は、廃棄体が落下した際に、廃棄体から飛散及び漏えいする放射性物質の量を評価することにより、同技術基準への適合性を示すことが必要となる。

本報告書では、原子力機構が設置を計画している埋設施設のうち、ピット埋設施設に埋設する廃棄体を対象とした。廃棄体の種類は、鋼製角型容器に金属廃棄物を収納しモルタルで固型化した形態の廃棄体で、これをモデル化して、埋設するまでの間に想定される最大の高さ(8m)から落下させるシミュレーション解析を行い、落下時の飛散率を評価した。

この評価結果に基づき、角型容器を使用した廃棄体の製作方法やその受入基準に係る留意事項を検討した。

本報告書は、株式会社富士テクニカルリサーチが国立研究開発法人日本原子力研究開発機構との契約により実施した業務成果に基づくものである。

旧本部事務所:〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-49

*青森県へ出向中

Study on Waste Acceptance Criteria for Waste Packages Destined for Near Surface Disposal
Containing Radioactive Waste from Research, Industrial and Medical Facilities
-Minimization of the Amounts of Scattering Radionuclides Caused by Dropping Impact-

Hisakazu NAKATA, Shota OKADA*, Hiroya AMAZAWA and Akihiro SAKAI

Radioactive Wastes Disposal Center
Decommissioning and Radioactive Waste Management Head Office
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 29, 2023)

Radioactive waste packages, which Japan Atomic Energy Agency (JAEA) plans to dispose of, must meet the technical criteria specified by the Order of Nuclear Regulation Authority. One criteria is newly specified in 2019 such that it shall be impact resistant performance so as to be few in quantity of radionuclides released from the waste package in case of dropping from the maximum height assumed in the disposal process. Then, JAEA needs to prove the compliance of the waste package with the technical criteria by estimating the leakage of radionuclides.

In this report, the amounts of scattering materials inside two waste packages caused by dropping impact from 8m height was estimated by numerical analysis, providing the ratio of the amounts of scattering materials to the weight of the waste package. The analysis objects were 1m³ cube container-filled and solidified waste package containing metal waste, which are expected to emplace into a vault-type disposal facility.

Some considerations relating to the production method of the waste package using 1m³ cubic container and its waste acceptance criteria are provided on the basis of the drop analysis in this report.

Keywords: Container Type Waste Package, Release Ratio

This work was based on the study performed by Fuji Technical Research Inc. under contract with the Japan Atomic Energy Agency.

* On loan to Aomori Prefectural Government

目次

1. はじめに	1
2. 角型容器を使用した廃棄体の落下時の飛散率の評価方法	2
2.1 モルタル充填角型廃棄体に使用する鋼製角型容器仕様	3
2.2 モルタル充填角型廃棄体の内容物	3
3. 落下解析	4
3.1 落下解析に使用するプログラム	4
3.2 解析モデル	4
3.3 落下解析の解析条件	5
3.4 解析結果及び飛散率の評価結果	6
4. 角型容器を使用した廃棄体の製作方法・受入基準の検討に係る留意事項	9
5. まとめ	10
参考文献	10

Contents

1. Introduction	1
2. Estimation method of release ratio for waste package using 1m ³ cubic containers	2
2.1 Specification of the 1m ³ cubic containers	3
2.2 Contents of the 1m ³ cubic containers	3
3. Drop analysis	4
3.1 Computer code	4
3.2 Analysis model	4
3.3 Conditions of drop analysis	5
3.4 Analysis results and estimation of release ratio	6
4. Considerations for the production method of the waste package using 1m ³ cubic containers and its waste acceptance criteria	9
5. Summary	10
References	10

図表リスト

表 1	解析に使用した鋼製角型容器の寸法等	11
表 2	S-I 容器構成部品と材料物性	12
表 3	S-III 容器構成部品と材料物性	13
表 4	鋼製角型容器内に収納した金属配管	14
表 5	鋼製角型容器内に収納した配管の材料物性	14
表 6	鋼製角型容器内に充填したセメントモルタルの材料物性	14
表 7	セメントモルタルの破断特性に係る物性値	15
図 1	S-I 容器	16
図 2	S-III 容器	17
図 3	モルタル充填角型廃棄体の内容物の模式図	18
図 4	S-I 容器モルタル充填角型廃棄体のモデル	19
図 5	S-III 容器モルタル充填角型廃棄体のモデル	20
図 6	S-I 容器モルタル充填角型廃棄体の内容物のモデル	21
図 7	S-III 容器モルタル充填角型廃棄体の内容物のモデル	21
図 8	セメントモルタルの応力-ひずみ曲線	22
図 9	S-I 容器モルタル充填角型廃棄体の落下姿勢 (左:全体、右:内容物のみ表示)	22
図 10	S-III 容器モルタル充填角型廃棄体の落下姿勢 (左:全体、右:内容物のみ表示)	22
図 11	セメントモルタルの角型容器外への漏出量の評価の手順	23
図 12	S-I 容器モルタル充填角型廃棄体の各時間の変形	24
図 13	S-I 容器モルタル充填角型廃棄体の変形部	25
図 14	S-I 容器モルタル充填角型廃棄体の変形部のひずみ分布	25
図 15	S-I 容器モルタル充填角型廃棄体のボルトの位置図及びボルト荷重履歴	26
図 16	S-I 容器モルタル充填角型廃棄体の内部の破断したセメント要素の分布	27
図 17	S-I 容器モルタル充填角型廃棄体の容器外に漏出したセメント要素	27
図 18	S-III 容器モルタル充填角型廃棄体の落下時の変形	28
図 19	S-III 容器モルタル充填角型廃棄体の変形部	29
図 20	S-III 容器モルタル充填角型廃棄体の変形部のひずみ分布	29
図 21	S-III 容器モルタル充填角型廃棄体のバンドの締付ボルトの位置図及び 締結ボルトの荷重履歴	30
図 22	S-III 容器モルタル充填角型廃棄体の内部の破断したセメント要素の分布	31
図 23	S-III 容器モルタル充填角型廃棄体の容器外に漏出したセメント要素	31

1. はじめに

日本原子力研究開発機構(以下、「原子力機構」という。)は、原子力機構法に基づき、原子力機構及び国内の研究施設等から発生する低レベル放射性廃棄物(以下、「研究施設等廃棄物」という。)の埋設処分事業の実施主体と位置づけられている。これを受けて原子力機構は、当面、平成 60 年度(令和 30 年度)までに発生が見込まれていた研究施設等廃棄物であって、ピット処分及びトレンチ処分が可能なもの(平成 20 年「埋設処分業務の実施に関する基本方針」の策定時)を対象として埋設事業を進める計画である。

現行の核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律においては、研究施設等廃棄物の埋設処分にあって、埋設しようとする廃棄体一体毎に、核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則に定める技術基準に適合していることを規制当局の確認を受けることが規定されている。この廃棄体の技術基準の一つに、「廃棄物埋設地に定置するまでの間に想定される最大の高さからの落下による衝撃により飛散又は漏えいする放射性物質の量が極めて少ないこと。」(事業規則第八条第二項第七号)が令和元年に新たに規定された。

また、原子力規制庁による令和元年10月2日付け「ピット処分及びトレンチ処分に係る規則等の改正及び改正案に対する意見募集の結果について」¹⁾において、同規定の「極めて少ない」を判断する目安として、具体的な漏えい率等の数値については、廃棄体に含まれる放射性物質の種類や放射能濃度を踏まえて、事業者が廃棄物受入基準(WAC: Waste Acceptance Criteria)に定めるものであるが、例えば米国の例²⁾(NRC の規制指針)では、 10^{-5} (10万分の1)という飛散率(“The fractional release rates used to estimate the amounts of radionuclides released in the form of respirable particulates for the postulated accidents”)が用いられている旨の回答がされている。

このため、原子力機構における埋設を計画している廃棄体が落下した場合の飛散率の数値を検討した。ここで、飛散率とは、廃棄体の落下時に容器外に飛散及び漏えいする放射能量と、廃棄体の総放射能量の比とする。この飛散率を所定の値以下とすることで、放射性物質の飛散及び漏えいに伴う、放射線業務従事者の吸入摂取による内部被ばくを低減することを目的とする。

本報告書では、原子力機構が設置を計画している埋設施設のうち、ピット埋設施設に埋設する廃棄体を対象とした。廃棄体の種類は、鋼製角型容器に金属廃棄物を収納しセメントモルタルで固型化した形態の廃棄体をモデル化して、埋設するまでの間に想定される最大の高さ(8m)から落下させる解析を行い、落下時の廃棄体の飛散率を評価した。

この評価結果に基づき、所定の飛散率以下となるような廃棄体の製作方法やその受入基準に係る留意する事項をまとめた。

2. 角型容器を使用した廃棄体の落下時の飛散率の評価方法

廃棄体の技術基準である「廃棄物埋設地に定置するまでの間に想定される最大の高さからの落下による衝撃により飛散又は漏えいする放射性物質の量が極めて少ないこと。」について、解析を用いて落下時の飛散率として評価する。

本報告書では、「2.1 モルタル充填角型廃棄体に使用する鋼製角型容器仕様」で示した鋼製角型容器に金属製の配管を収納しセメントモルタルで固型化した廃棄体である「モルタル充填角型廃棄体」を対象に解析を行う。

また、飛散率は、廃棄体の落下時に鋼製角型容器外に飛散及び漏えいする放射エネルギーと廃棄体の総放射エネルギーの比とするが、落下時の廃棄体の損傷状況や、その開口部から飛散及び漏えいする放射エネルギーを解析により評価することは難しいため、以下の前提条件の下に評価する。

(1) 鋼製角型容器からの飛散及び漏えいする量

廃棄体が落下し床に衝突すると、落下時の衝撃によって損傷した廃棄体の内容物の一部が、損傷した容器の開口部から放出され、それに含まれる放射エネルギーが飛散及び漏えいする。開口部が小さければ飛散及び漏えいする放射エネルギーは少ない。

しかし、本検討ではモルタル充填角型廃棄体内の内容物の一部が衝撃によって破壊し、破壊した部分がそのまま容器外に全量放出されるものと保守的に仮定し、鋼製角型容器によって内容物の容器外への飛散及び漏えいが抑制されることはないものとする。

(2) モルタル充填角型廃棄体の放射能分布

モルタル充填角型廃棄体の内容物の放射能の分布は均一とは限らないが、本検討では計算の簡略化を図るため均一と仮定する。これにより、廃棄体内の内容物の損傷した部分の重量が、落下時に鋼製角型容器外に飛散及び漏えいする放射エネルギーに比例する。

(3) 飛散率の評価方法

モルタル充填角型廃棄体の落下時の飛散率は以下の式で計算する。ここで、廃棄体の落下時に鋼製角型容器外に飛散及び漏えいする放射エネルギーは、上記 (1) 及び (2) の前提条件により、モルタル充填角型廃棄体内の内容物のうち破壊した部分の重量 (kg) に等しいとしている。

$$\text{飛散率} = \frac{\text{モルタル充填角型廃棄体内の内容物のうち破壊した部分の重量 (kg)} \times \text{粉塵の発生割合}}{\text{モルタル充填角型廃棄体の総重量 (kg)}}$$

これらにより、「3. 落下解析」では、モルタル充填角型廃棄体内の内容物のうち、落下による衝撃で破壊した固型化部の重量を評価する。

上記式中における粉塵の発生割合は、既往のトレンチ処分の埋設事業許可申請³⁾において、誤操作によりコンクリートガラが落下する事象の評価で用いられている値である 1×10^{-4} とする。

この値は、DOE-HDBK-3010-94⁴⁾に記載されている Nonmetallic or Composite Solid, Free-Fall Spill and Impaction Stress の以下の計算式を用いて算出されている。

$$\begin{aligned} \text{粉塵の発生割合 (浮遊放出分率} \times \text{呼吸分率 1.0)} &= \text{相関係数の経験値 (cm}^3/\text{g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}^2) \\ &\times \text{廃棄物密度 (g/cm}^3) \times \text{重力加速度 (cm/s}^2) \times \text{落下高さ (cm)} \end{aligned}$$

ここで、既往の例³⁾では以下の数値で算出している。

相関係数の経験値: $2 \times 10^{-11} [\text{cm}^3/\text{g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}^2]$

廃棄物密度: $2.3 [\text{g/cm}^3]$

重力加速度: $980 [\text{cm/s}^2]$

落下高さ: $10 [\text{m}]$

本評価では、鋼製角型容器内がセメントモルタルで充填固化しており、落下によって主にセメントモルタルが破壊し、粉塵が発生すると想定され、既往の例と廃棄物の性状、粉塵の発生過程が類似しているため引用した。

2.1 モルタル充填角型廃棄体に使用する鋼製角型容器仕様

対象とする鋼製角型容器は、本体、蓋及び吊り上げ用の治具からなり、容器本体には補強材が溶接にて取り付けられている。現在、モルタル充填角型廃棄体用の容器として検討している鋼製角型容器は2種類であり、それぞれ「S-I容器」、「S-III容器」である。

S-I容器の形状を図1に示す。S-I容器は、原子力科学研究所、大洗研究所、青森研究開発センターで使用されている。蓋と本体はM12のボルト32本で締め付けられている。

S-III容器の形状を図2に示す。S-III容器は、原子力科学研究所及び新型転換炉原型炉ふげんで使用されている。蓋と本体はSPHC製で4個のバンドとバンド間をM10の締め付けボルト4本で締め付けられている。

2種類の容器の主な寸法等仕様を表1に示す。

2.2 モルタル充填角型廃棄体の内容物

モルタル充填角型廃棄体中には、金属製の配管を隙間なく配置し、セメントモルタル（既存の充填固化体における受入基準の設定に係る試験⁵⁾で用いたものと同等）で充填することを想定した。また、モルタル充填角型廃棄体内には、モルタルを充填しない上部空隙として、容器の内容積に対して10%の空隙を設けるものとする。モルタル充填角型廃棄体の内容物の模式図を図3に示す。

3.落下解析

3.1 落下解析に使用するプログラム

本解析は、解析対象物の寸法等を設定して 3D モデルを作成し、材料組成、落下高さ、落下角度等の解析条件の設定には HyperMesh を使用した。また、落下解析をするために有限要素モデルの汎用構造解析コード LS-DYNA R11.1.0 を用いた。

3.2 解析モデル

3.2.1 S-I 容器モルタル充填角型廃棄体の解析モデル

S-I 容器モルタル充填角型廃棄体の解析モデルを図 4 に示す。モデルは、主に容器本体、蓋、補強材、締結ボルトから構成されており、締結ボルトははり要素に、それ以外はシェル要素とした。

S-I 容器モルタル充填角型廃棄体の解析モデルの構成部品とその材料物性を表 2 に示す。材料の応力-ひずみモデルは二直線近似塑性としている。材料物性値は、現存の原子力機構で購入した鋼製角型容器での解析としたため、ミルシート値等を採用している。今後の鋼製角型容器の標準化の検討に際しては JIS 規格値とすることも検討する必要がある。

なお、容器本体と蓋間のパッキン、吊り上げフックはモデル化していない。締付ボルトに初期張力は考慮していない。

3.2.2 S-III 容器モルタル充填角型廃棄体の解析モデル

S-III 容器モルタル充填角型廃棄体の解析モデルを図 5 に示す。モデルは、主に容器本体、蓋、補強材、締結バンド、ボルト・ナットから構成されており、バンド締付ボルトははり要素に、それ以外はシェル要素とした。

S-III 容器モルタル充填角型廃棄体の解析モデルの構成部品とその材料物性を表 3 に示す。材料の応力-ひずみモデルは二直線近似塑性としている。材料物性値は、現存の原子力機構で購入した鋼製角型容器での解析とするためミルシート値等を採用している。今後の鋼製角型容器の標準化の検討に際しては JIS 規格値とすることも検討する必要がある。

なお、吊り上げフックはモデル化していない。締付ボルトに初期張力は、締付トルクを $24.5\text{N}\cdot\text{m}$ とした。

3.2.3 モルタル充填角型廃棄体の内容物

モルタル充填角型廃棄体内の内容物のモデルを図 6 及び図 7 に示す。「2.2 モルタル充填角型廃棄体の内容物」で概略を述べたように、金属製の配管を容器内に収納し、セメントモルタルで満たされている。

3.2.3.1 金属配管

容器には金属配管を配置した。金属配管の寸法、収納本数を表 4 に、材料物性を表 5 に示す。モデルでは、シェル要素とした。

3.2.3.2 セメントモルタルの充填部

本解析では、セメントモルタルで充填されている部分と鋼製角型容器の上蓋までの内部空間（上部空

隙部)を10%とした。セメントモルタルの充填部はソリッド要素でモデル化した。

セメントモルタルの充填材の材料物性を表6に示す。また、セメントモルタル充填部の応力-ひずみ曲線は、土木学会によるコンクリート標準示方書⁶⁾を参考に以下の式(1)で設定した。なお、本解析で用いるコンクリートの一軸圧縮強度は、既存の200リットルドラム缶を使用した充填固化体における受入基準の設定に係る試験結果⁵⁾から得られた70MPaとした。

セメントモルタルの破断特性に係る物性値を表7に、体積ひずみと応力の変化を図8に示す。

$$\sigma'_c = k_1 f'_{cd} \times \frac{\varepsilon'_c}{0.002} \times \left(2 - \frac{\varepsilon'_c}{0.002} \right) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

- σ'_c : 応力[N/mm²]
- k_1 : 強度の低減係数[-] (=1-0.003 f'_{cd} ≦0.85)
- f'_{cd} : コンクリートの設計一軸圧縮強度[MPa]
- ε'_c : 体積ひずみ[-] (= (1-2 μ) × ε , (μ : ポアソン比、 ε : 一軸ひずみ)

3.2.3.3 接触条件

鋼製角型容器とセメントモルタルの充填部の摩擦係数は、圧着力の大きさや表面の粗さで変わり幅があると考えられる。既往の文献⁷⁾によると概ね0.3~0.8程度とあることを参考とし0.5とした。また、セメントモルタルと配管は固着しているものとして、接点結合条件とし摩擦係数を設定していない。容器部品間(容器本体と蓋など)の摩擦係数は、鋼と鋼の動摩擦係数⁸⁾として0.3とした。

3.3 落下解析の解析条件

3.3.1 落下高さ

これまでに、研究施設等廃棄物の埋設施設としてピット埋設施設の概念設計⁹⁾をしており、この施設に定置するまでの間に想定される最大の高さを設定した。

ピット埋設施設の側壁は6.9mであること、クレーンでのモルタル充填角型廃棄体の吊り上げ作業を考慮し、想定される最大の高さは8mとした。実際の解析においては、エネルギー保存則により算出できる衝突直前の速度を以下の式(2)により設定した。

$$\begin{aligned} M \times g \times h &= 1/2 \times M \times v^2 \\ \therefore v &= \sqrt{2gh} \dots\dots\dots (2) \\ &= 12.53 \text{ m/s} \end{aligned}$$

ここで、

- M: モルタル充填角型廃棄体の総重量[kg]
- v: 衝突直前の同廃棄体の速度[m/s]
- g: 重力加速度(=9.807)[m/s²]
- h: 落下高さ(=8)[m]

3.3.2 落下姿勢

モルタル充填角型廃棄体の落下姿勢は、内容物の飛散及び漏えいのしやすさを考慮して蓋面が底面となり、かつ強度が弱い容器と蓋の結合部が地盤に接触するように 45° の角度を設けた。また、衝撃によるセメントモルタルの破壊が配管の軸に沿って進展する向きでの落下を想定した(図 9 及び図 10)。

3.3.3 落下地盤

落下地盤は、地盤の変形によって落下衝撃を緩和させないため、衝撃による変形が生じない剛体の床として設定した。

3.3.4 角型容器の外部へ飛散及び漏えいしたセメントモルタルの漏出量

廃棄体は落下時の衝撃によって、その容器が変形、開口する。また、容器内のモルタルの一部が表 7 に示す破断基準に達する。その後は、個別要素法により、破断基準に達した各要素の運動を追跡する。各ソリッド要素は、剛体壁①に衝突後、破断基準に達すると自動的にサイズ調整された DES 要素 (Discrete Element Sphere) に変換し、鋼製角型容器の開口部から飛散及び漏えいする。その DES 要素の全重量を角型容器からの漏出量とする。解析上は、図 11 に示すように剛体壁を 2 つ設定し、それぞれ以下の条件により剛体壁①と②の間にある要素の重量から漏出量を評価した。

剛体壁①：廃棄体を衝突させる剛体壁で、破断基準に達した DES 要素は通過させる設定

剛体壁②：破断基準に達した DES 要素は通過させない設定

ただし、この漏出量は、剛性床に 1 回衝突した直後の漏出量である。実際は、2 回目の衝突などによってより多くの破壊したセメントモルタルが容器外部に飛散及び漏えいする可能性がある。このため、この漏出量は、飛散率の評価に用いずに、「2. 角型容器を使用した廃棄体の落下時の飛散率の評価方法」の(3) 飛散率の評価方法で示した飛散率の評価値 (角型容器内の破断基準に達したソリッド要素の重量と粉塵の発生割合の積を分子として評価した飛散率)の保守性を示すための参考値とした。

3.4 解析結果及び飛散率の評価結果

S-I 容器、S-III 容器を使用したモルタル充填角型廃棄体の解析結果及び飛散率の計算結果を以下に示す。

3.4.1 S-I 容器を使用したモルタル充填角型廃棄体

(1) 角型容器の変形

S-I 容器を使用したモルタル充填角型廃棄体の落下解析が終了するまでの (衝突から 0.025 秒後)、角型容器の変形を図 12 に示す。蓋が完全に開く挙動とはならなかったが、蓋と容器の間が開口している。図 13 では、角型容器の変形量は、衝突した蓋の部分が 7cm 程度変形した。衝突面周囲のひずみ分布を図 14 に示す。

(2) 締結ボルトに発生する荷重

角型容器の締結ボルトに発生する軸方向荷重の履歴を図 15 に示す。図に示す横の位置(衝突面の側面)のボルトは全て 0.005 秒の近辺で発生応力が引張応力を超え荷重が 0 となっている。また、図 12 に角型容器の蓋が浮き上がるように変形していることを考慮すると、ボルトは破断したと考えられる。下(衝突面)及び上(衝突面の向かいの面)のボルトは一部大きな荷重が掛かるものもあるが、破断には至っていない。なお、横の位置(衝突面の側面)のボルトは、引張強さから算出される破断荷重は $58,810\text{N}$ ($=520\text{MPa} \times \pi \times 6^2$ (破断応力 $\times$ ボルト断面積))であり、破断荷重以下での破断に見えるが、実際にはせん断方向の荷重もあり、最大主応力としては、破断基準を超えたと考えられる。

(3) 破壊したセメントモルタルの量及び飛散率

角型容器内のセメントモルタルで固型化した部分のうち、衝突によって、破壊基準(発生圧力 $\geq$ 破断応力(55.3MPa))に達したセメント要素を図 16 に示す。セメントモルタルの固型化部が破壊する範囲は、衝突部の近傍に限られる。破壊基準に達したソリッド要素の質量を集計すると、破壊した部分の重量は 18kg であった。

また、S・I 容器を使用したモルタル充填角型廃棄体の全重量は 3,629kg である。これらにより、「2. 角型容器を使用した廃棄体の落下時の飛散率の評価方法」の(3)飛散率の評価方法に基づいて計算を行うと、飛散率は、鋼製角型容器内で破断基準に達したソリッド要素の重量と粉塵の発生割合³⁾の積を分子とし、モルタル充填角型廃棄体の総重量を分母とした比として、 $18\text{kg} \times 1 \times 10^{-4} \div 3,629\text{kg} \div 1 \times 10^{-6}$ 程度となり、 10^{-5} 以下の桁となる。

(4) 角型容器の開口部から外部に飛散及び漏えいしたセメントモルタルの漏出量

廃棄体の落下解析が終了した時点(衝突から 0.025 秒後)において、S・I 容器モルタル充填角型廃棄体の開口部から容器の外部に飛散及び漏えいしたセメントモルタルの漏出量(図 17 参照)は、1g であった。

この漏出量は、剛性床に 1 回衝突した直後の漏出量である。衝突面に対して側面のボルトが全て破断し、蓋が大きく変形していることから、2 回目の衝突によって開口部がさらに広がり、より多くの破壊したセメントモルタルが外部に飛散及び漏えいする可能性がある。このため、漏出量(1g)は、飛散率の評価に用いずに、3.4.1(3)項で示した飛散率の評価値(1×10^{-6} 程度、18kg のソリッド要素が破断)の保守性を示すための参考値とした。

3.4.2 S・III容器を使用したモルタル充填角型廃棄体

(1) 角型容器の変形

S・III容器を使用したモルタル充填角型廃棄体の落下解析が終了するまでの(衝突から 0.025 秒後)、角型容器の変形を図 18 及び図 19 に示す。蓋が完全に開く挙動となった。衝突面周囲のひずみ分布を図 20 に示す。

(2) バンドの締結ボルトに発生する荷重

S・III容器のバンドの締結ボルトに発生する軸方向荷重履歴を図 21 に示す。下(衝突面)の

締結ボルトは落下により変形が起きる箇所である。衝突面以外にある締結ボルトは、締付力が効き続けているが、図 18 よりバンドは角型容器から脱落している。衝突面以外にある締結ボルトは、引張強さから算出される破断荷重は 31,400N ($=400\text{MPa} \times \pi \times 5^2$ (破断応力×ボルト断面積)) であり、それを超える荷重は締結ボルトに作用していない。

(3) 破壊したセメントモルタルの量及び飛散率

角型容器内のセメントモルタルで固型化した部分のうち、衝突によって、破壊基準（発生圧力 $\geq$ 破断圧力（55.3MPa））に達したセメント要素を図 22 に示す。セメントモルタルの固型化部が破壊する範囲は、衝突部の近傍に限られる。破壊基準に達したソリッド要素の質量を集計すると、その結果、破壊した部分の重量は 52kg であった。

また、S-Ⅲ容器を使用したモルタル充填角型廃棄体の全重量は 4,935kg である。これらにより、「2. 角型容器を使用した廃棄体の落下時の飛散率の評価方法」の(3)飛散率の評価方法に基づいて計算を行うと、飛散率は、鋼製角型容器内で破断基準に達したソリッド要素の重量と粉塵の発生割合³⁾の積を分子とし、モルタル充填角型廃棄体の総重量を分母とした比として、 $52\text{kg} \times 1 \times 10^{-4} \div 4,935\text{kg} \simeq 1 \times 10^{-6}$ 程度となり、 10^{-5} 以下の桁となる。

(4) 角型容器の外部に飛散及び漏えいしたセメントモルタルの漏出量

廃棄体の落下解析が終了した時点（衝突から 0.025 秒後）において、S-Ⅲ容器を使用したモルタル充填角型廃棄体の開口部から容器の外部に飛散及び漏えいしたセメントモルタルの漏出量（図 23 参照）は、115g であった。

この漏出量は、剛性床に 1 回衝突した直後の漏出量である。衝突によって蓋は外れているので、2 回目の衝突によって開口部がさらに広がり、より多くの破壊したセメントモルタルが外部に飛散及び漏えいする可能性がある。このため、漏出量（115g）は、飛散率の評価に用いずに、3.4.2(3)項で示した飛散率の評価値（ 1×10^{-6} 程度、52kg のソリッド要素が破壊）の保守性を示すための参考値とした。

4.角型容器を使用した廃棄体の製作方法・受入基準の検討に係る留意事項

本解析は、鋼製角型容器に金属廃棄物を収納しセメントモルタルで固型化した形態の廃棄体を8m 高さから落下させる条件で実施した。その解析結果を基に、廃棄体の落下時の放射性物質の飛散及び漏えいに関する技術基準を満たすために、角型容器を使用した廃棄体の製作方法・受入基準の検討に係る留意事項を以下に述べる。

- ・本解析のモデルでは、1 回の衝突時の廃棄体からの飛散率を評価した。落下高さは 8m と高いため、実際に廃棄体を落下させた場合には、衝突は複数回となる可能性がある。また、角型容器の隅角部が衝突するように落下させると容器の損傷はより大きくなると考えられる。このため、角型容器の構造によって飛散率を低減させるよりも、飛散率の低減は固型化によってなされることが合理的と考えられる。
- ・本解析のモデルでは、角型容器内の金属廃棄物（配管）内に、一軸圧縮強度が 70MPa のセメントモルタル充填材で満たされた状態としている。充填材は、200 リットルドラム缶の充填固化体で設定したセメントモルタルの配合⁵⁾として解析条件としたが、角型容器の収納する廃棄物は 200 リットルドラム缶に収納する廃棄物よりも寸法が大きく、充填性の悪い形状の廃棄物が含まれることが想定され、それに対しても十分に充填が可能な流動性をもつ充填材の配合が求められる。
- ・本解析の結果を、実際に模擬廃棄体を作製し落下試験を行うことで確認することは容易ではないため、今回、目標とした飛散率の基準値 (1×10^{-5}) を固型化のみで担保するのではなく、廃棄体の落下時の放射線業務従事者の被ばく線量の評価も行って、規制基準への適合性を示すことが考えられる。
- ・廃棄体の受入基準としては、適切な固型化がなされていること（固型化材料、固型化方法、放射性廃棄物の分別、容器への収納の手順）や廃棄体の総重量となると考えられる。
- ・本モデル以外の容器を使用して廃棄体を製作する場合は、別途、解析や試験が必要となる。

5. まとめ

廃棄体の技術基準である「廃棄物埋設地に定置するまでの間に想定される最大の高さからの落下による衝撃により飛散又は漏えいする放射性物質の量が極めて少ないこと。」について、解析を用いて落下時の飛散率を評価した。その結果、放射性廃棄物が収納された鋼製角型容器にセメントモルタルを充填した廃棄体は、S-I 容器及び S-III 容器を使用した場合であっても、原子力機構が設置を計画しているピット埋設施設で想定される最大高さ（8m）からの落下時の飛散率は 10^{-5} のオーダーとなる見通しはあると考えられる。

ただし、落下高さが高く、角型容器の構造のみで飛散率を担保することは高価となると考えられるため、固型化にその役割を期待する方向となる。固型化については、200 リットルドラム缶の充填固化体で設定したセメントモルタルの配合⁵⁾としたが、角型容器のようにより大きな容積においても適切に充填されることの確認は課題になると考えられる。このため、適切な固型化を行うことと、廃棄体の落下時の放射線業務従事者の被ばく線量の評価結果を合わせて落下時の飛散率が十分に低いことを示していくことが肝要と考えられた。

参考文献

- 1) 原子力規制委員会，“ピット処分及びトレンチ処分に係る規則等の改正及び改正案に対する意見募集の結果について”，(2019).
- 2) U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Final Programmatic Environmental Impact Statement related to decontamination and disposal of radioactive wastes resulting from March 28, 1979, accident Three Mile Island Nuclear Station, Unit 2”, NUREG-0683, (1981).
- 3) 日本原電株式会社，“東海低レベル放射性廃棄物埋設事業所第二種廃棄物埋設事業許可申請第2種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則第9条(異常時の放射線障害の防止等)への適合性について，平成30年5月,48p.
- 4) U.S. Department of Energy: Airborne Release Fractions/Rates and Respirable Fractions for Nonreactor Nuclear Facilities, DOE-HDBK-3010-94, DOE HANDBOOK (1994).
- 5) 仲田久和他，“研究施設等廃棄物浅地中処分施設における廃棄体の受入基準の設定；有害な空気が残らないこと及び一体となるような充填”，JAEA-Technology 2016-001, 2016, 112p.
- 6) 土木学会：“2012年制定コンクリート標準示方書 設計編”(2012).
- 7) 松沢晃一他，“鋼材とセメント系材料の摩擦性状に関する実験的研究”，コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, (2008).
- 8) Kurte Gieck, Reiner Gieck【著】/太田博【訳】：“工学公式ポケットブック第2版”(2009).
- 9) 天澤弘也他，“研究施設等廃棄物浅池中処分施設の概念設計”，JAEA-Technology 2012-031(2012),338p.

表 1 解析に使用した鋼製角型容器の寸法等

容器名称	外寸 [mm]	板厚 (本体)	主要材料
S - I 容器	W1,160 × L1,300 × H1,131	6mm	SS400
S -Ⅲ容器	W1,470 × L1,385 × H1,170	2.3mm	SPHC

S - I 容器の本体隅角部は直角に折り曲げ加工が加えられている。

S -Ⅲ容器の本体隅角部は曲率半径 80mm の加工が加えられている。

表 2 S・I 容器構成部品と材料物性

部品	材質	板厚[mm]	質量密度 [ton/mm ³]	ヤング率 [N/mm ²]	ポアソン比 [-]	引張強さ [N/mm ²]	降伏点 (耐力) [N/mm ²]	伸び率 [%]
本体	SS400	6.0	7.85×10 ⁻⁹	205,000	0.3	405	277	36
本体補強材		3.2						
本体フランジ		8.0						
ベース部 L 鋼		5.0						
ベース部 C 鋼 (t1)		5.0						
ベース部 C 鋼 (t2)		7.5						
ベース部		9.0						
蓋		6.0						
蓋フランジ		8.0						
蓋 C 鋼 (t1)		5.0						
蓋 C 鋼 (t2)		7.5						
締結ボルト	SUS304	φ12.0*	7.93×10 ⁻⁹	205,000	0.3	520	205	40
配管		3.5						

材料定数の出典

- ・SS400 及び SUS304 のヤング率、ポアソン比：JAEA-Technology 2012-015, 蓋式しゃへい容器の健全性評価, 2012, 29p.
- ・SS400 の引張強さ、降伏点、伸び率：「検査証明書 発行日 2016 年 11 月 17 日 規格 JIS G3101 証明番号 D06367」新日鐵住金株式会社
- ・SUS304 の質量密度、ヤング率、ポアソン比、引張強さ、降伏点、伸び率：JIS G 4303 ステンレス鋼棒

(*)：計算の簡略化のため有効断面積は使用しなかった。

表 3 S・III 容器構成部品と材料物性

部品	材質	板厚[mm]	質量密度 [ton/mm ³]	ヤング率 [N/mm ²]	ポアソン比 [-]	引張強さ [N/mm ²]	降伏点 (耐力) [N/mm ²]	伸び率 [%]
本体	SPHC	2.3	7.85×10 ⁻⁹	205,000	0.3	335	203	46
本体枠		3.2						
ベース部 (段積み固定治具)		2.3						
ベース部(脚)		50.0						
ベース部補強材		15.0						
蓋本体		2.3						
蓋(枠)		4.5						
バンド本体		4.5				376	203	44
バンドブラケット		4.0						
バンド締付ボルト	SS400	φ10.0*	7.85×10 ⁻⁹	205,000	0.3	400	215	36
配管	SUS304	3.5	7.93×10 ⁻⁹	205,000	0.3	520	205	40

材料定数の出典

- ・ 本体、蓋等の SPHC の引張強さ、降伏点、伸び率：「検査証明書 発行日 2019 年 5 月 28 日 規格 JIS G3131 製鋼番号 SB54515」 鐵商株式会社
- ・ バンド等の SPHC の引張強さ、降伏点、伸び率：「検査証明書 発行日 2020 年 5 月 26 日 規格 JIS G3131 証明書番号 4B77R0」
JFE スチール株式会社
- ・ バンド締付ボルトの SS400 の引張強さ、降伏点：発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2005 年版) (第 1 編 軽水炉規格) JSME S NC1-2005
付録材料図表 Part5 表 7 ボルト材の各温度における許容引張応力 S (MPa)
- ・ SUS304 の質量密度、引張強さ、降伏点、伸び率：JIS G 4303, ステンレス鋼棒
- ・ SS400 及び SUS304 のヤング率、ポアソン比：JAEA-Technology 2012-015, 蓋式しゃべい容器の健全性評価, 2012, 29p.

(*)：計算の簡略化のため有効断面積は使用しなかった。

表 4 鋼製角型容器内に収納した金属配管

角型容器名称	外径 ϕ ×厚さ t×長さ L 寸法 [mm]	収納本数 [本]
S-I 容器	$\phi 76.3 \times t3.5 \times L1,000$	156
S-III 容器	$\phi 76.3 \times t3.5 \times L1,250$ $\phi 76.3 \times t3.5 \times L1,170$	154 22※

※S-III 容器の本体隅角部は曲率半径 80mm の加工であるため、その分配管を短くした。

表 5 鋼製角型容器内に収納した配管の材料物性

材質	板厚 [mm]	質量密度 [ton/mm ³]	ヤング率 [N/mm ²]	ポアソン比 [-]	引張強さ [N/mm ²]	降伏点 [N/mm ²]	伸び率 [%]
SUS304	3.5	7.93×10^{-9}	205,000	0.3	520	205	40

材料定数の出典

- ・質量密度、引張強さ、降伏点、伸び率：JIS G 4303, ステンレス鋼棒
- ・ヤング率、ポアソン比：JAEA-Technology 2012-015, 蓋式しゃへい容器の健全性評価, 2012, 29p.

表 6 鋼製角型容器内に充填したセメントモルタルの材料物性

質量密度 [ton/mm ³]	ヤング率 [N/mm ²]	ポアソン比 [-]	引張強度 [N/mm ²]	破断応力 [N/mm ²]	せん断係数 [N/mm ²]	圧縮強度 [N/mm ²]
2.27×10^{-9}	33,480	0.2	3.9	55.3 (表 7 参照)	13,950	70

材料定数の算出方法及び出典

- ・ヤング率は、建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2009 の式から評価した。

$$\text{ヤング率} = 3.55 \times 10^4 \times (\gamma/2.4)^2 \times (\sigma_B/60)^{1/3} \quad (\text{N/mm}^2)$$

γ : コンクリートの単位容積質量 (t/m³)

σ_B : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

ここで、JAEA-Technology 2016-001 より γ : コンクリートの単位容積質量 (t/m³) は 2.27 t/m^3 、 σ_B : 圧縮強度は、70MPa (N/mm²) とした。

- ・コンクリートの引張強度は、2012 年制定コンクリート標準示方書 設計編 土木学会の式から求めた。

$$f_{tk} = 0.23 f_{ck}^{2/3} \quad \text{単位 (N/mm}^2\text{)}$$

f_{tk} コンクリートの引張強度

f_{ck} 圧縮強度の特性値 (設計基準強度)

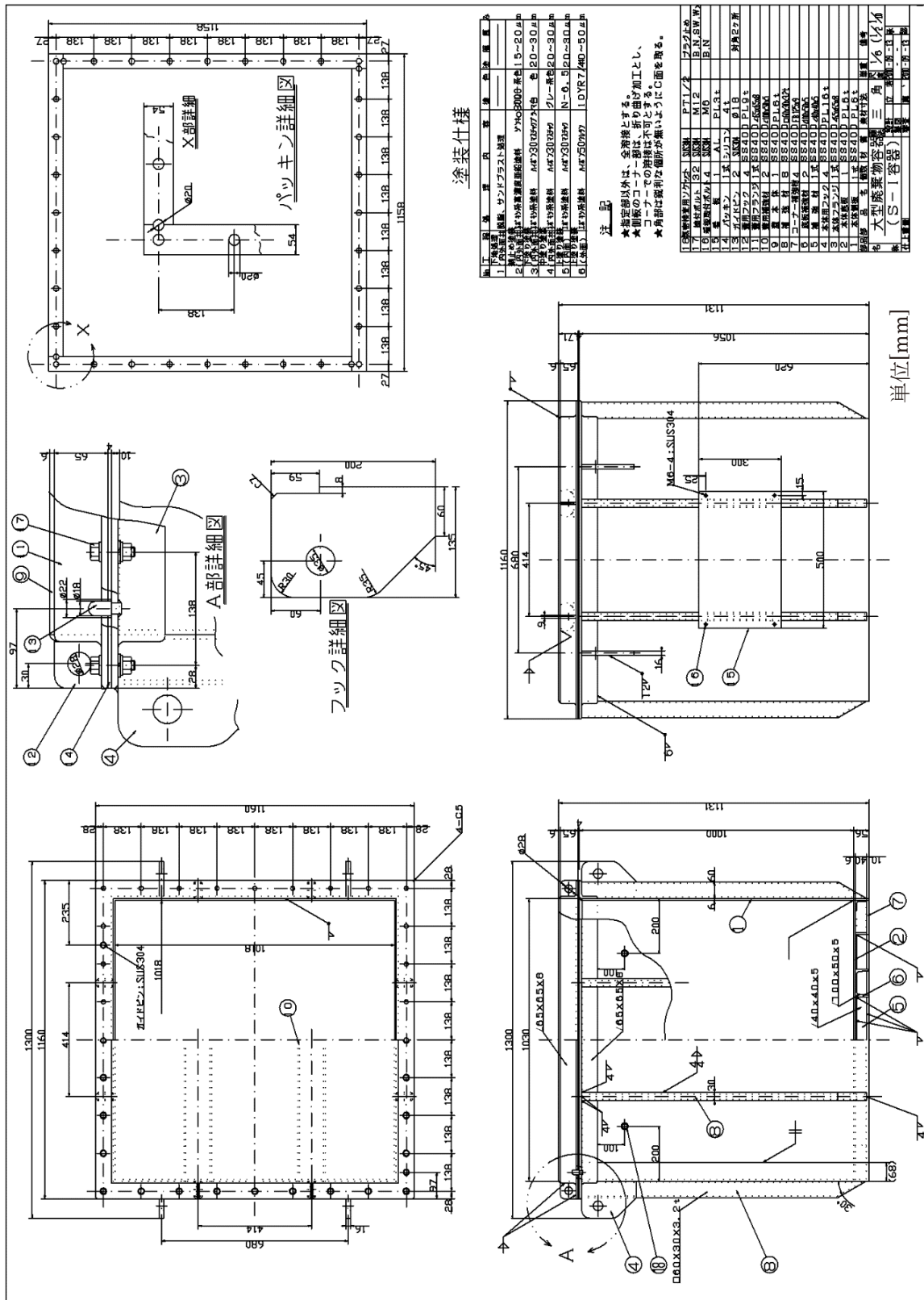
ここで、設計基準強度は、JAEA-Technology 2016-001 より 70MPa とした。

- ・ポアソン比：2012 年制定コンクリート標準示方書 設計編 土木学会
- ・せん断係数は、工学公式ポケットブック第 2 版より、 $G = E/2 (1 + \mu)$ より求めた。

E : ヤング率 (ここでは、33,480[N/mm²])、 μ : ポアソン比 (ここでは、0.2)

表 7 セメントモルタルの破断特性に係る物性値

項目	設定値
設計圧縮強度 f'_{cd} [N/mm ²]	70
強度の低減係数 k_1 [-]	0.79
降伏応力 $k_1 \cdot f'_{cd}$ (降伏点) [N/mm ²]	55.3



器
長
I
S
I
☒

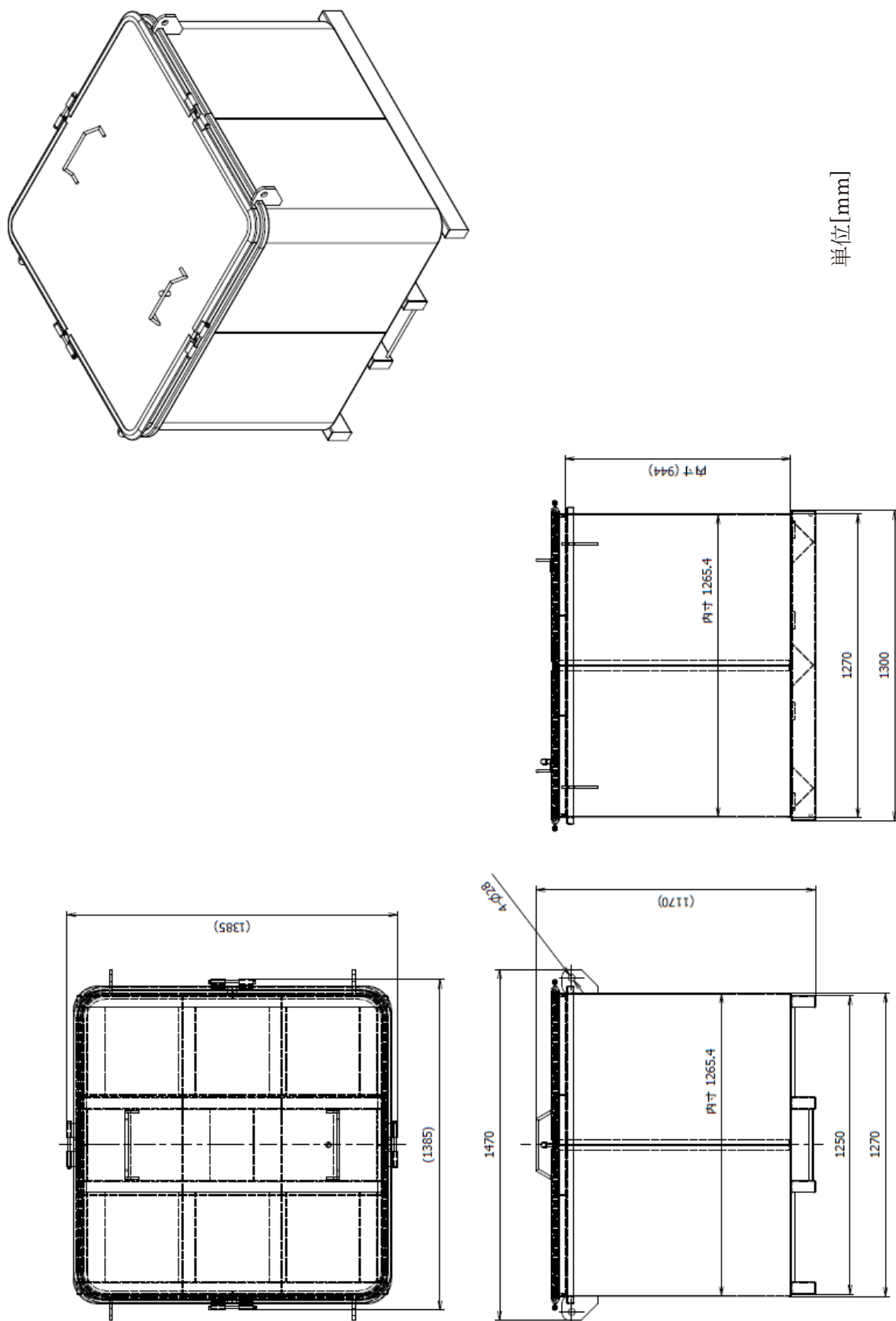


図 2 S-III 容器

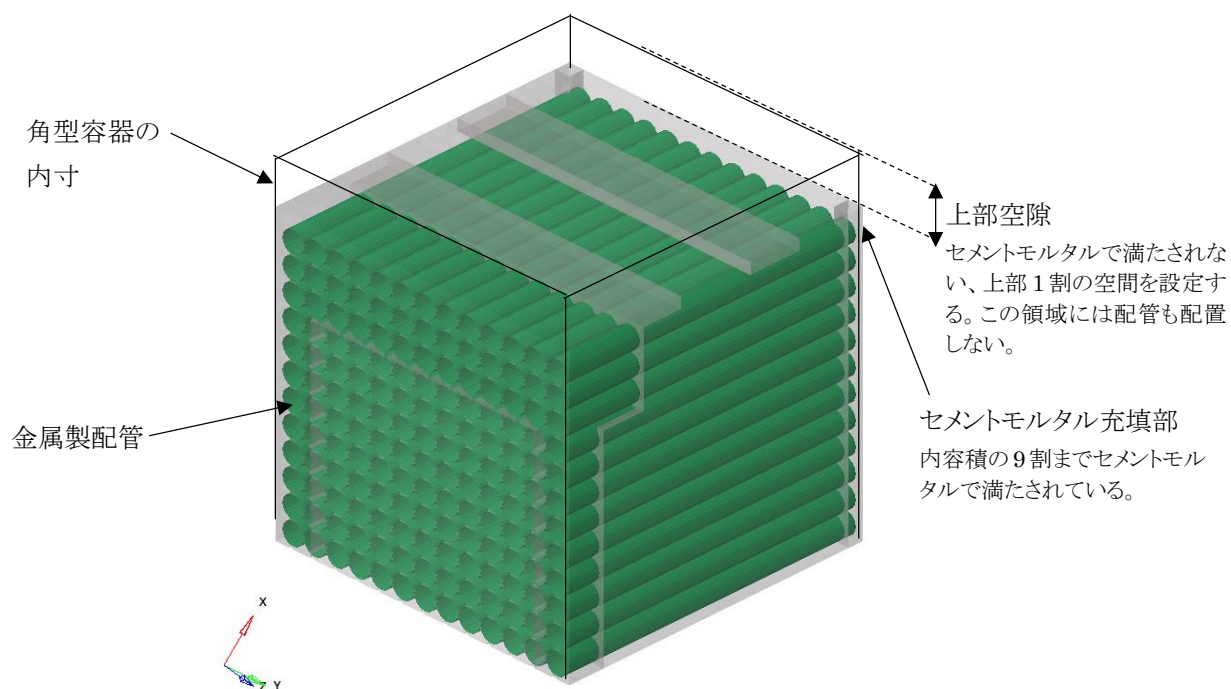


図-3 モルタル充填角型廃棄体の内容物の模式図

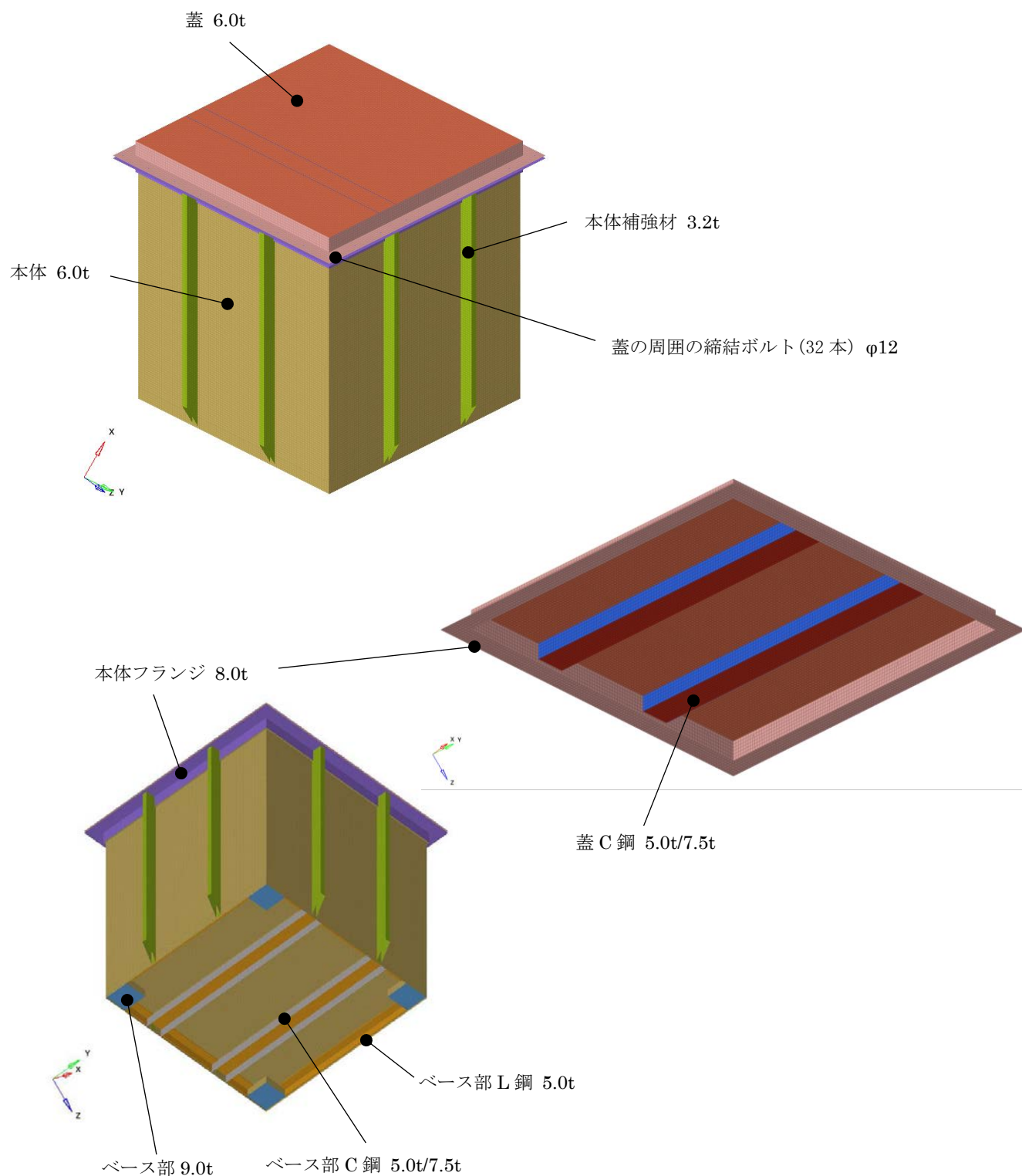


図 4 S-I 容器モルタル充填角型廃棄体のモデル

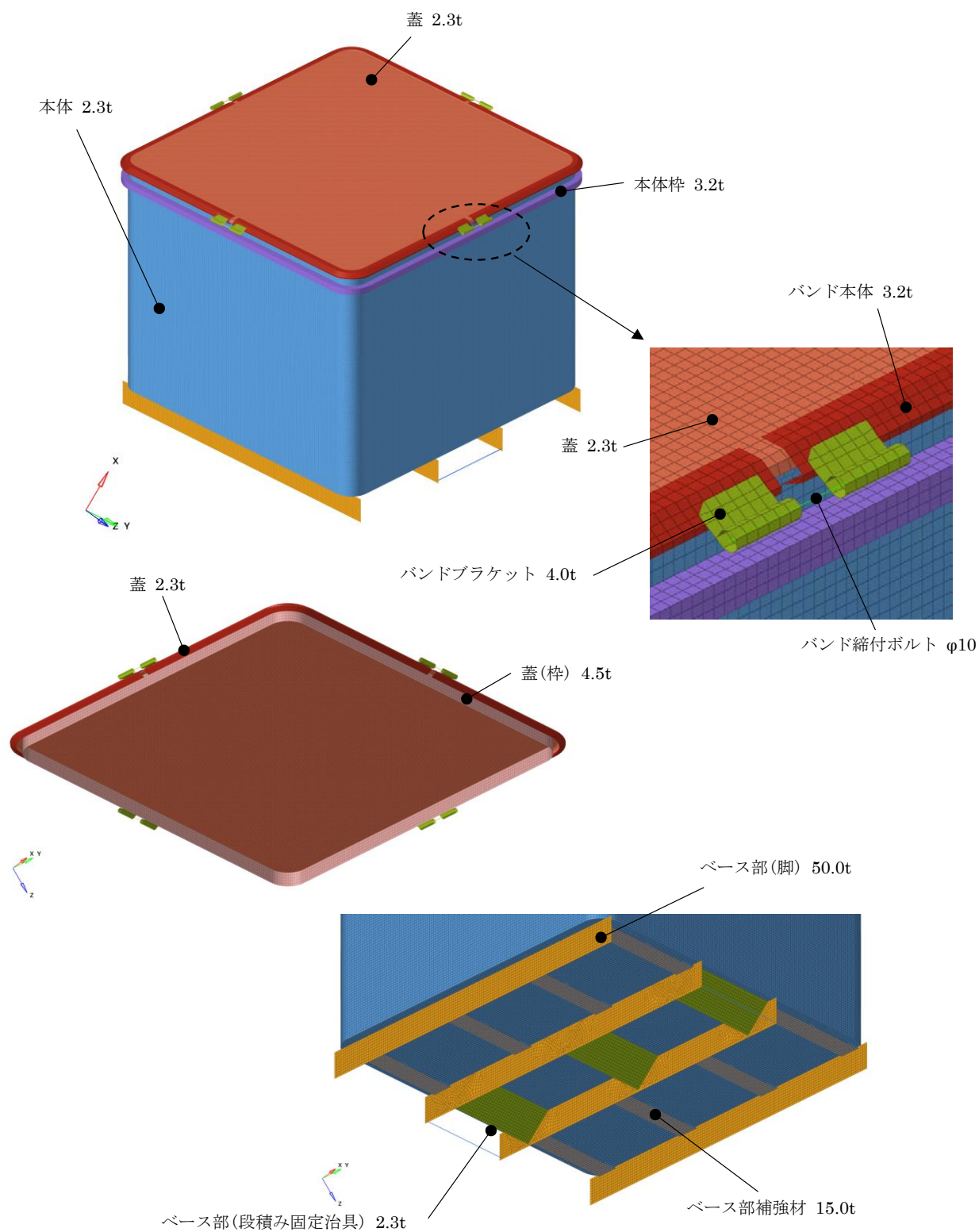


図5 S・Ⅲ容器モルタル充填角型廃棄体のモデル

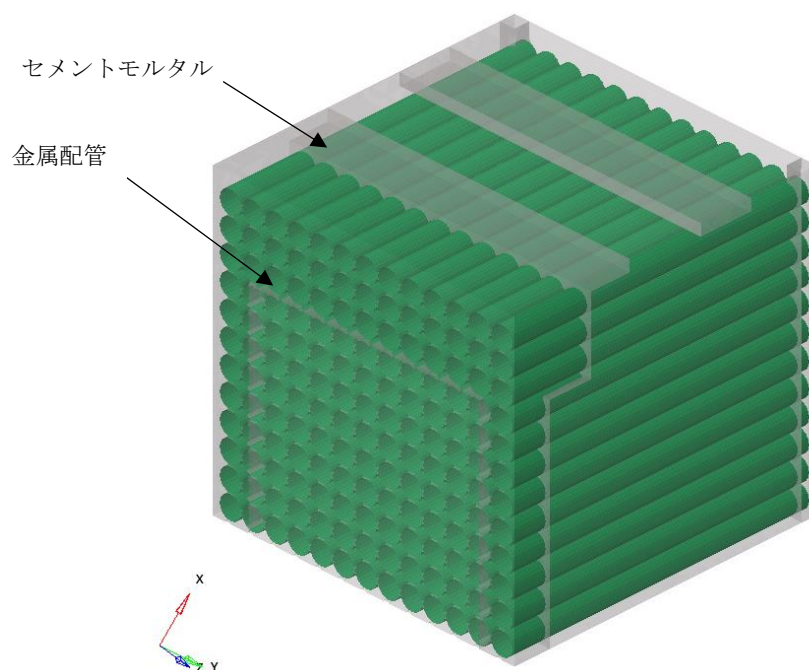


図 6 S-I 容器モルタル充填角型廃棄体の内容物のモデル

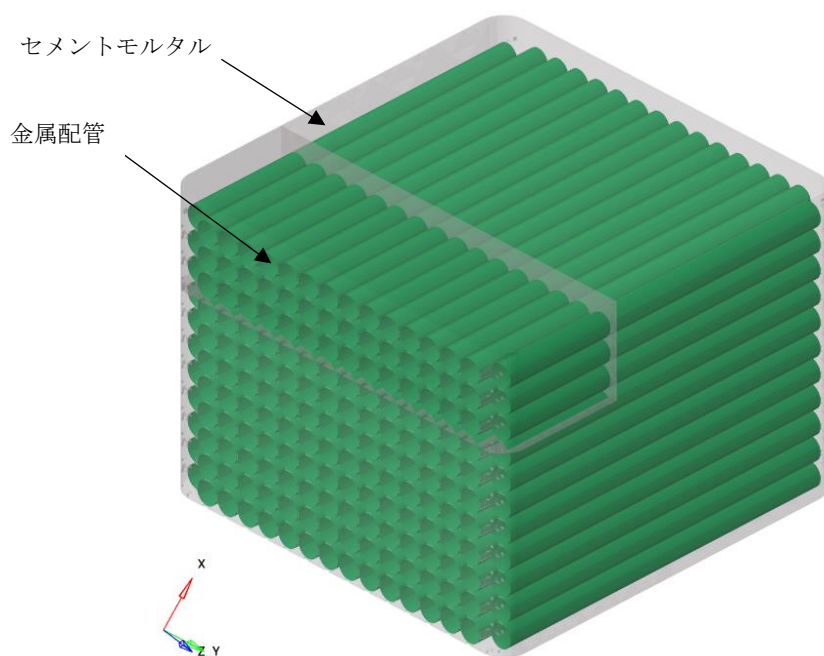


図 7 S-III 容器モルタル充填角型廃棄体の内容物のモデル

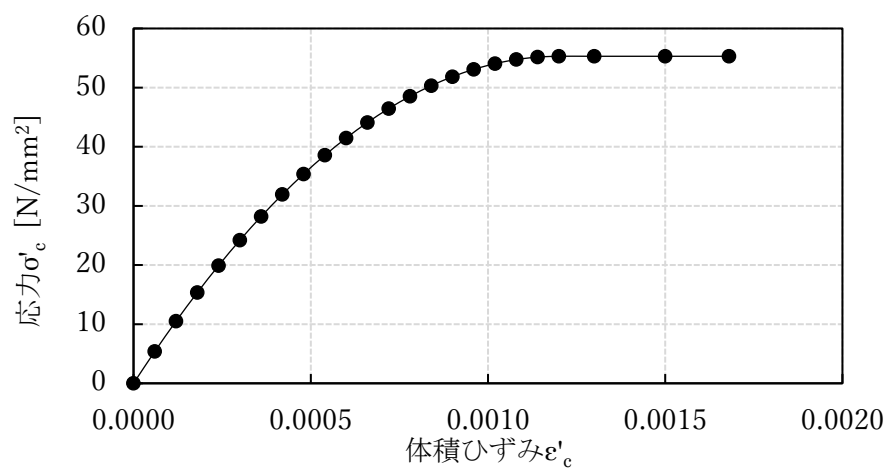


図 8 セメントモルタルの応力-ひずみ曲線

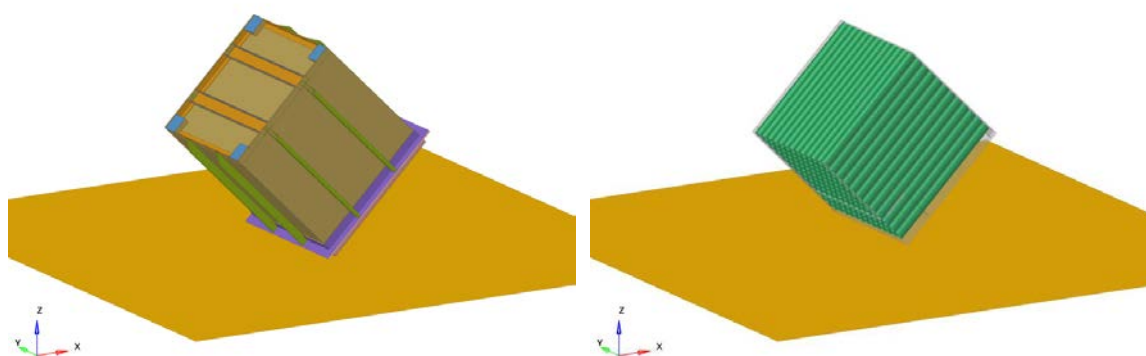


図 9 S-I 容器モルタル充填角型廃棄体の落下姿勢（左：全体、右：内容物のみ表示）

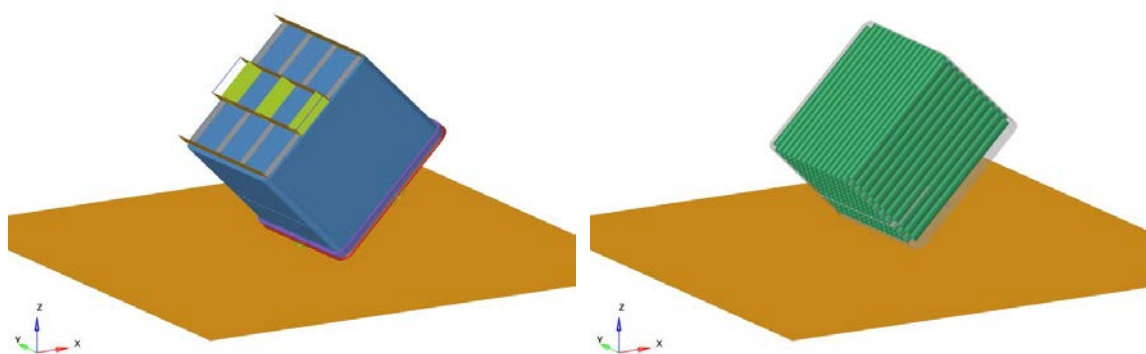
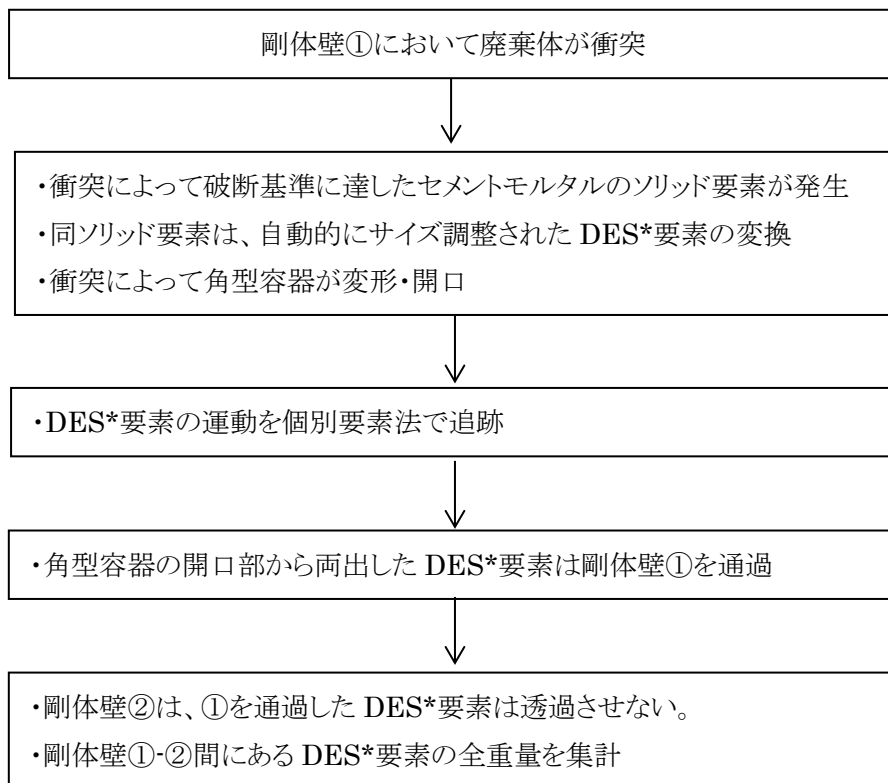
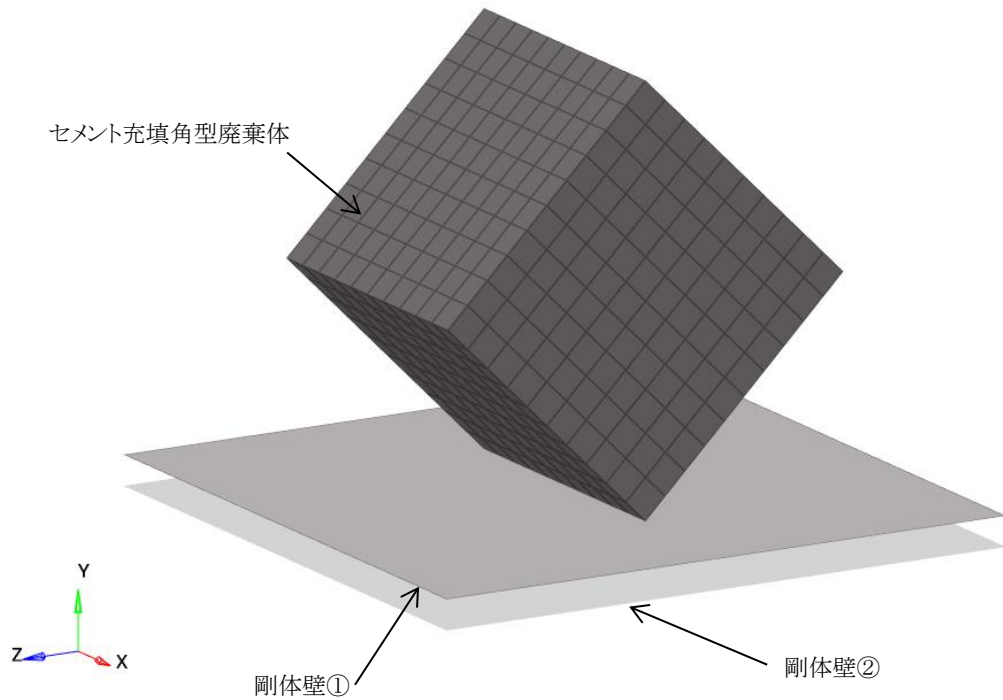


図 10 S-III 容器モルタル充填角型廃棄体の落下姿勢（左：全体、右：内容物のみ表示）



(*) Discrete Element Sphere

図 11 セメントモルタルの角型容器外への漏出量の評価の手順

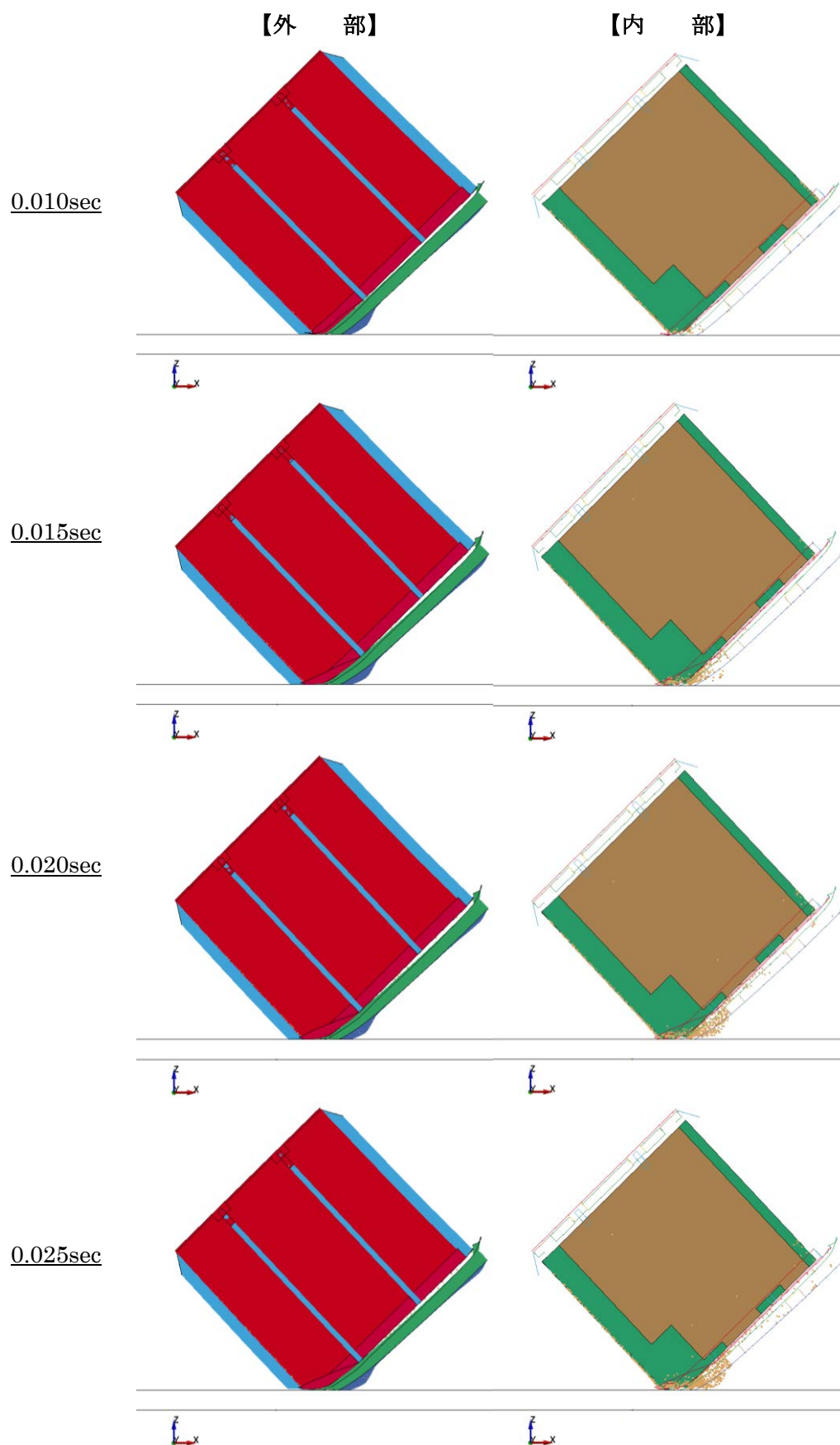


図 12 S-I 容器モルタル充填角型廃棄体の各時間の変形

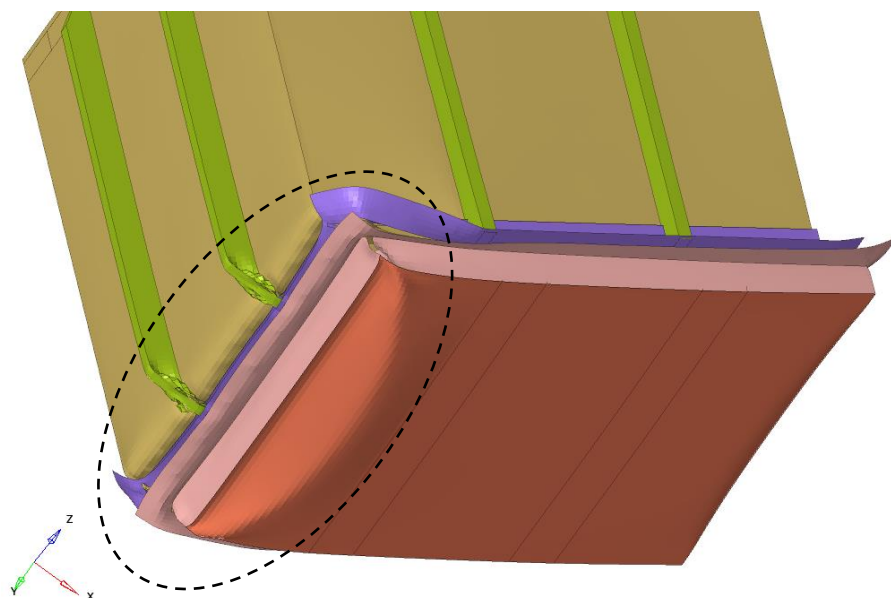


図 13 S-I 容器モルタル充填角型廃棄体の変形部

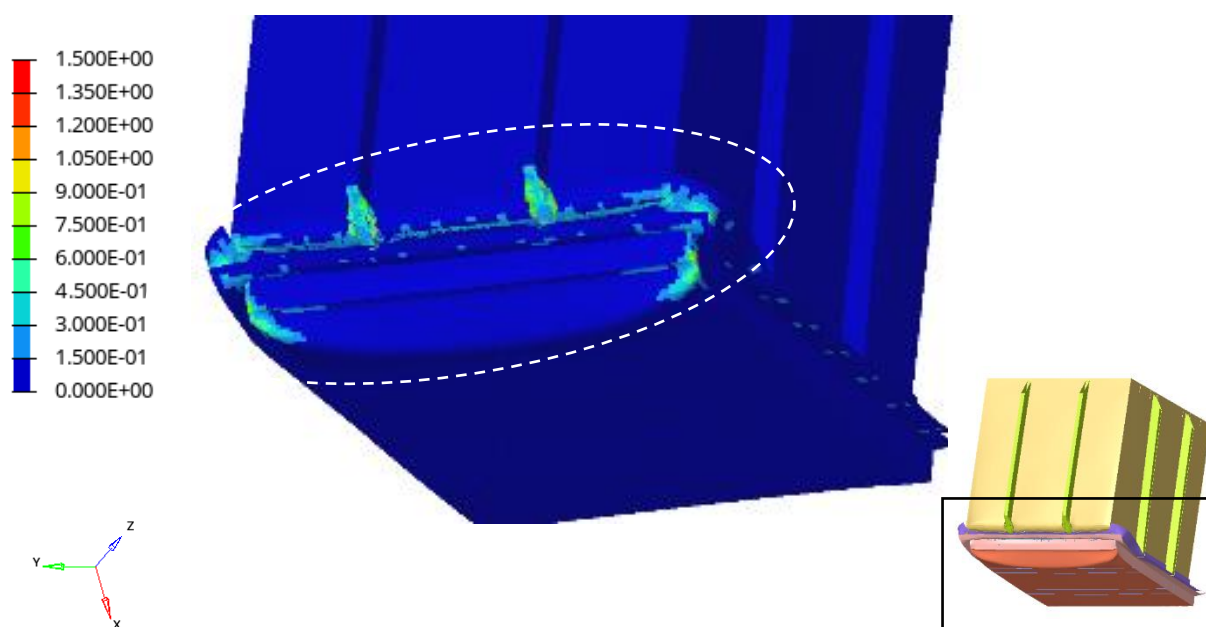
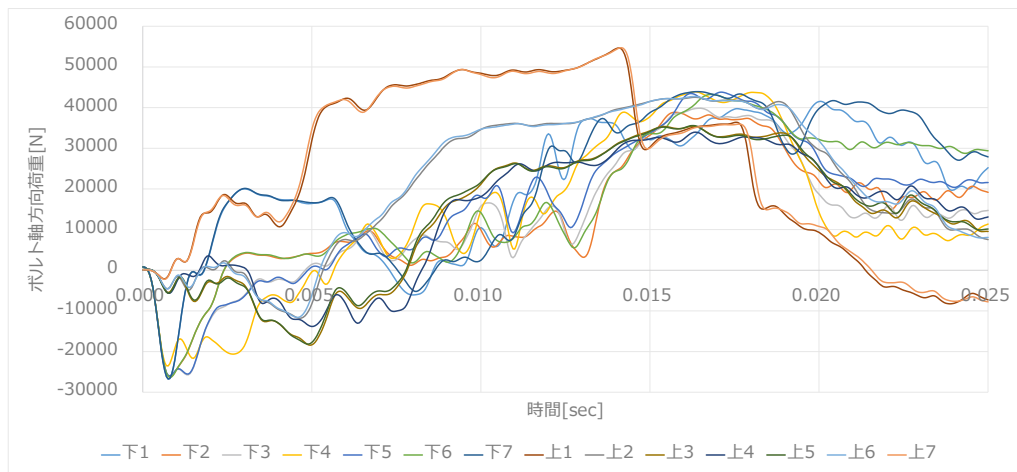
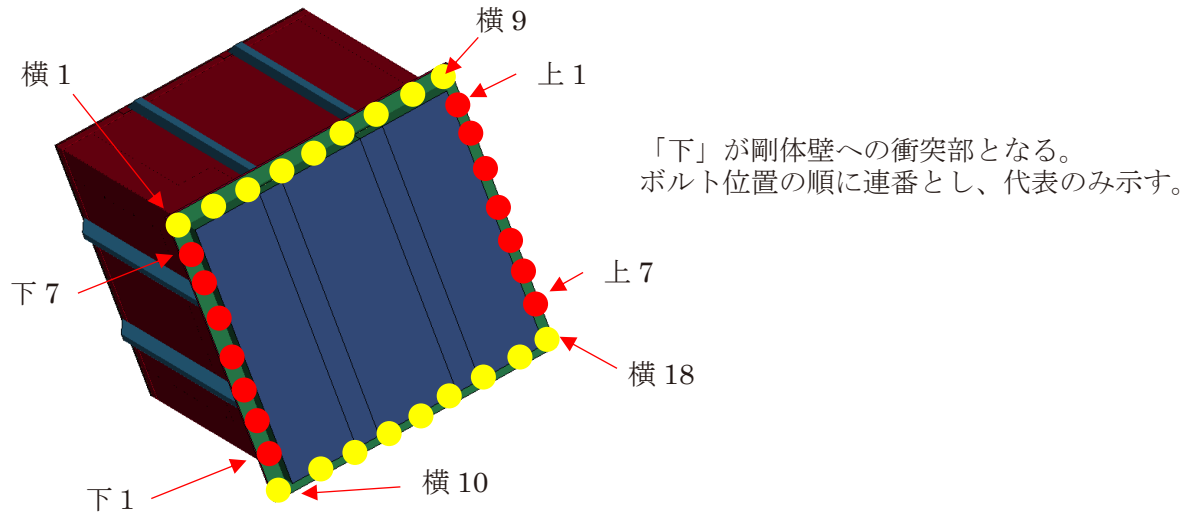
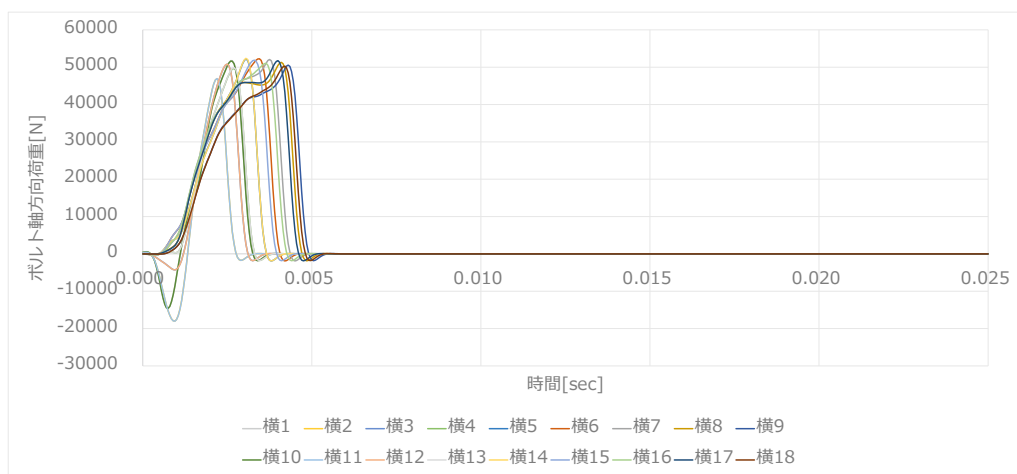


図 14 S-I 容器モルタル充填角型廃棄体の変形部のひずみ分布



(下(衝突面)と上(衝突面の向かい側の面)は軸方向荷重が 0 とならず破断しない)



(横(衝突面の側面)は軸方向荷重が 0 となり破断した)

図 15 S-I 容器モルタル充填角型廃棄体のボルト位置図及びボルト荷重履歴

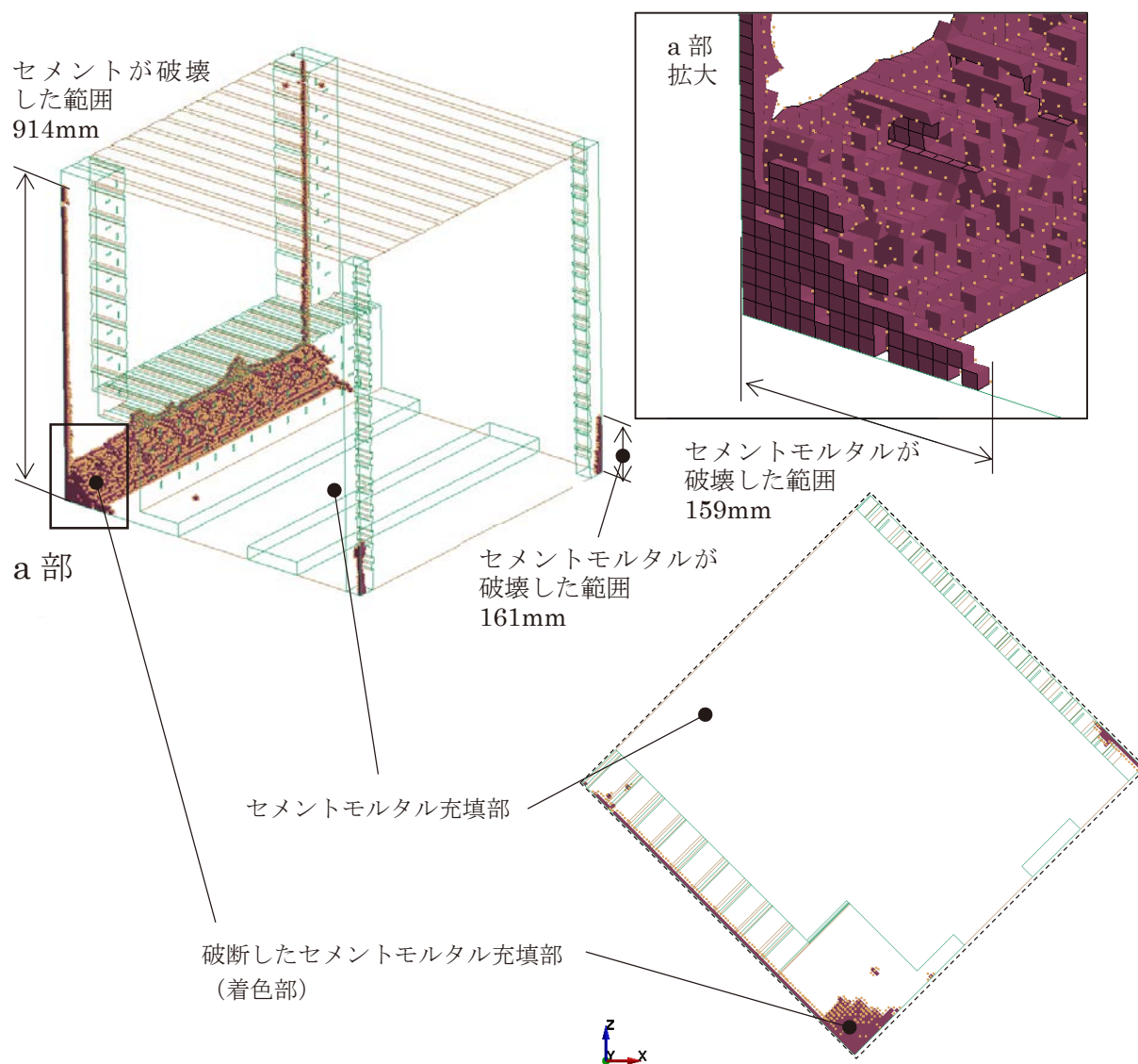


図 16 S-I 容器モルタル充填角型廃棄体の内部の破断したセメント要素の分布

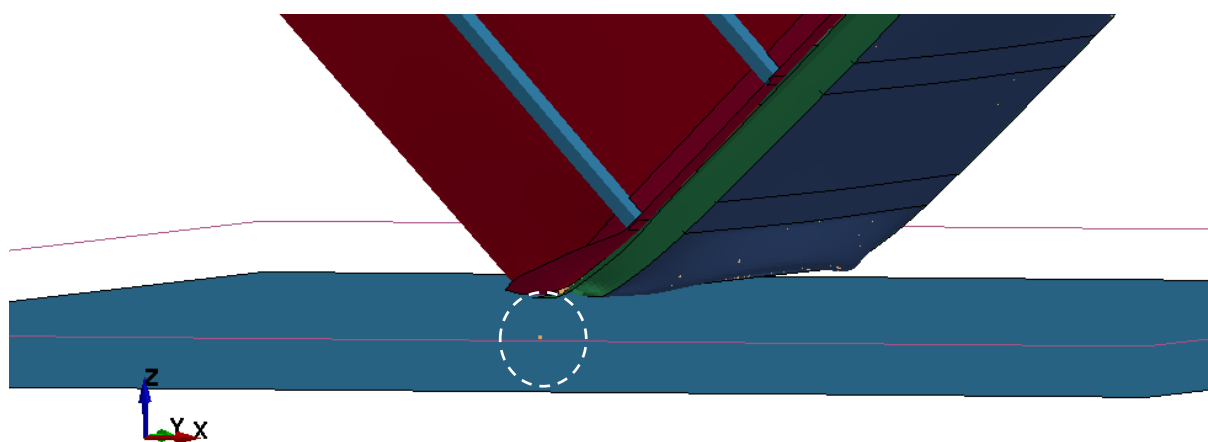


図 17 S-I 容器モルタル充填角型廃棄体の容器外に漏出したセメント要素

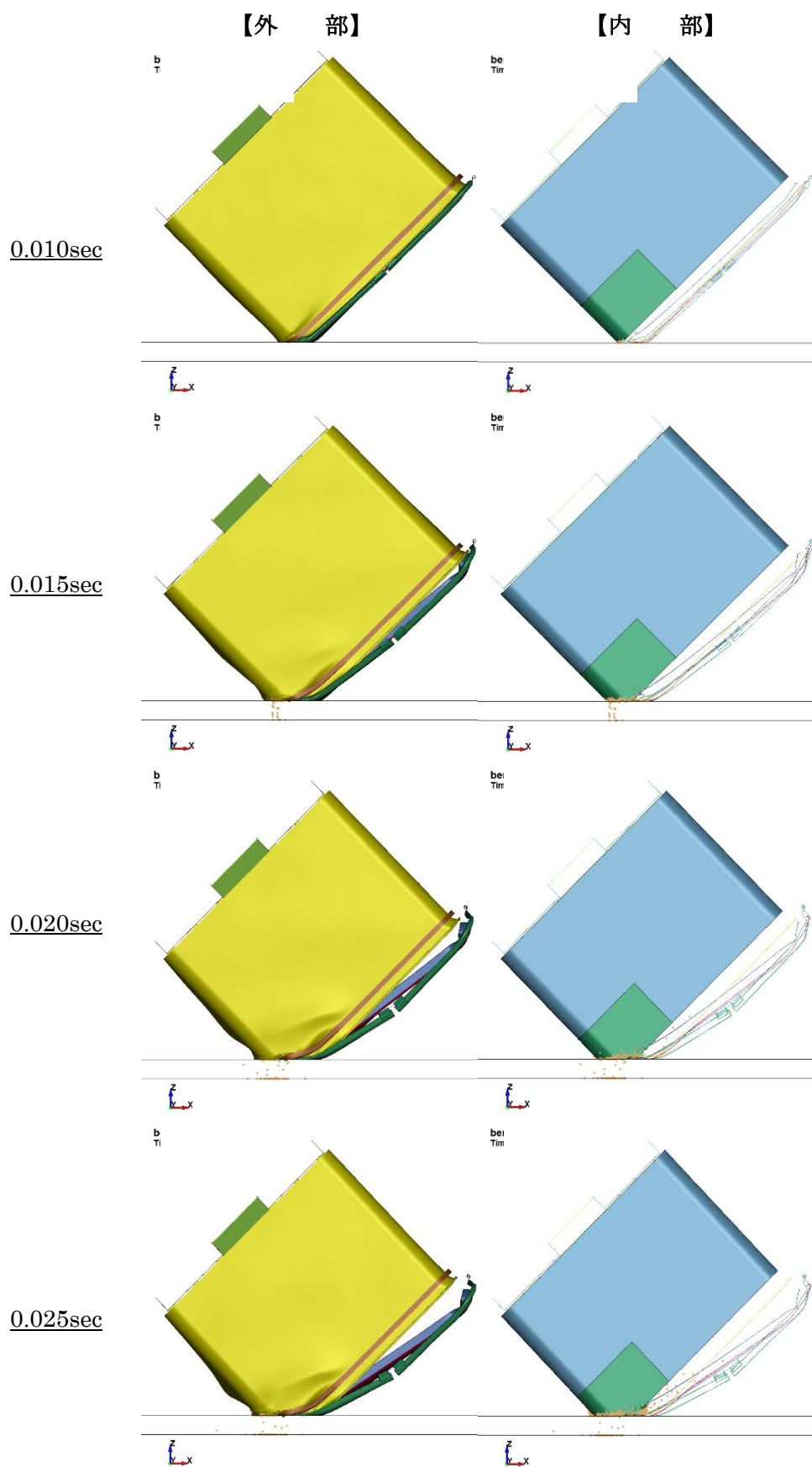


図 18 S-III容器モルタル充填角型廃棄体の落下時の変形

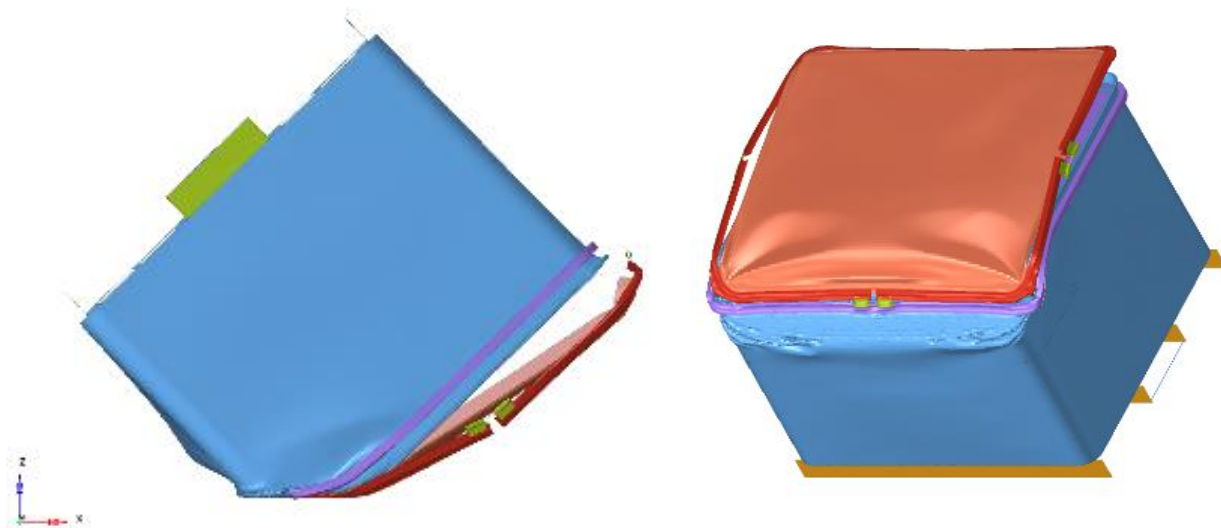


図 19 S-Ⅲ容器モルタル充填角型廃棄体の変形部

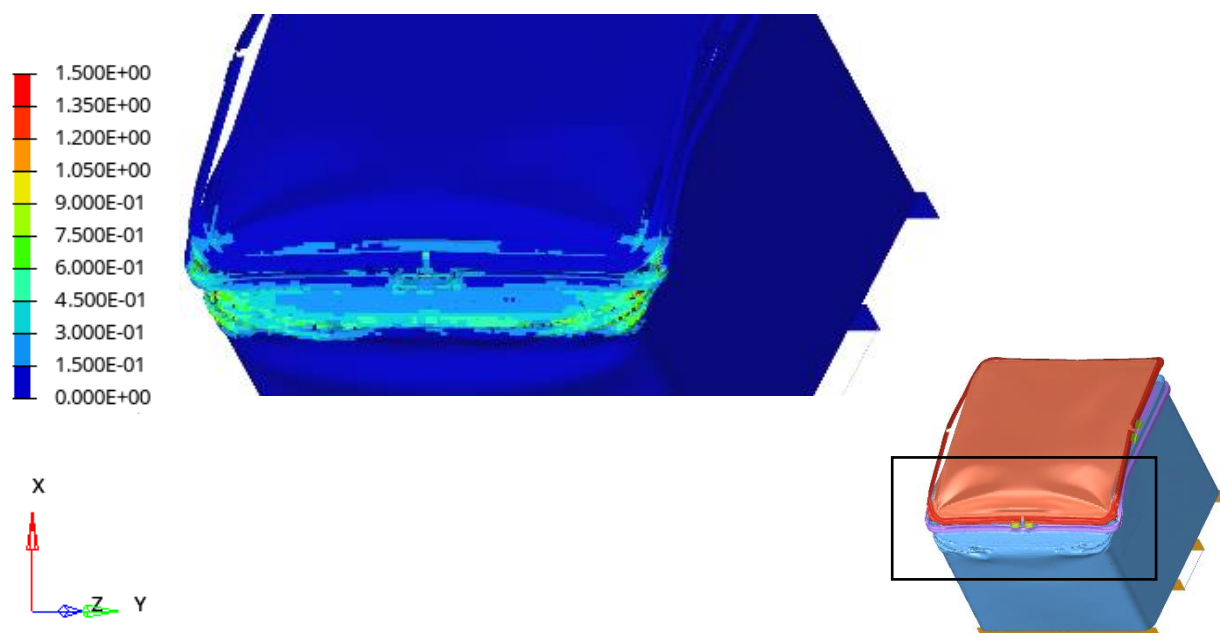


図 20 S-Ⅲ容器モルタル充填角型廃棄体の変形部のひずみ分布

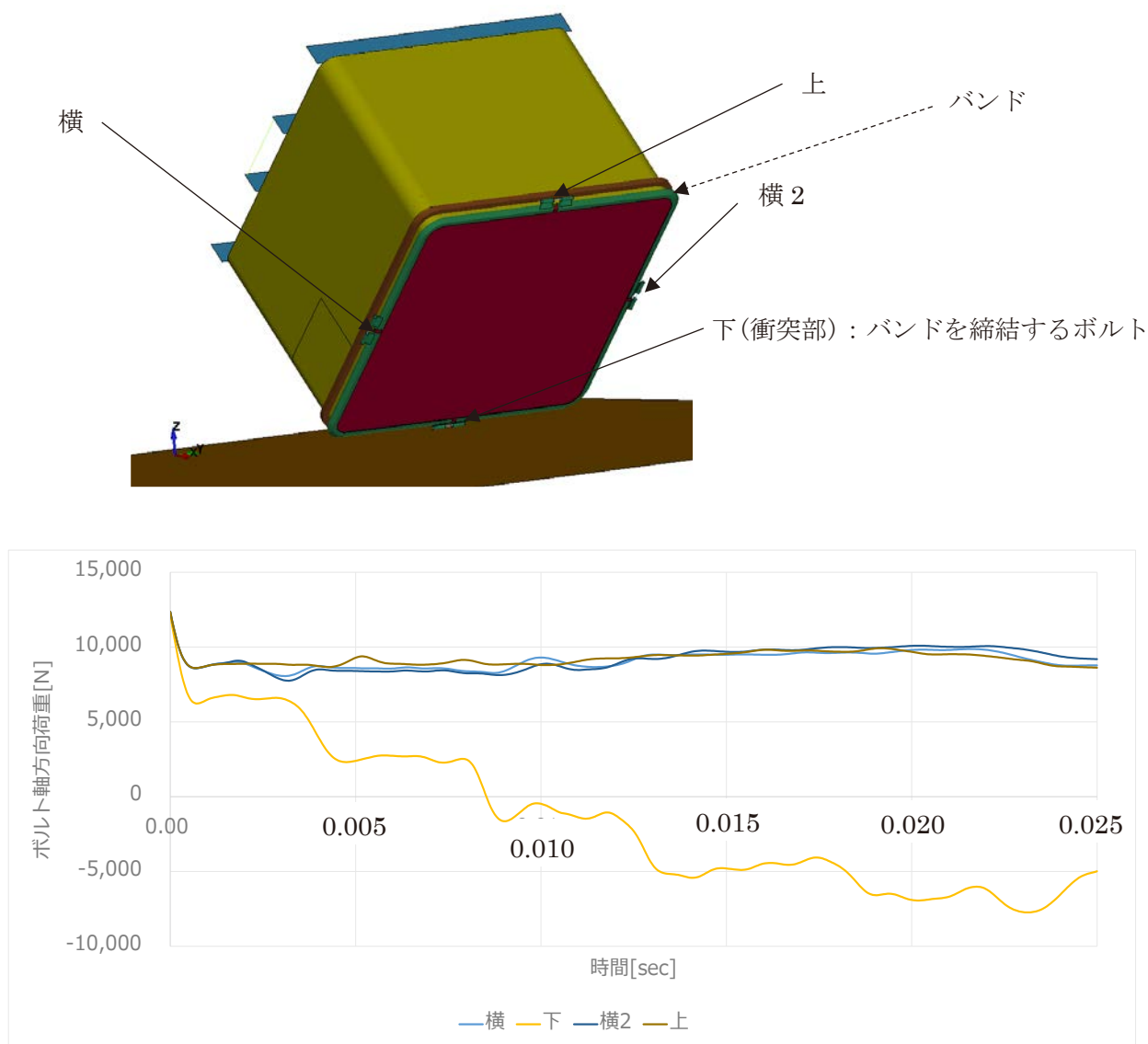


図 21 S-III容器モルタル充填角型廃棄体のバンドの締結ボルト位置図及び
締結ボルトの荷重履歴

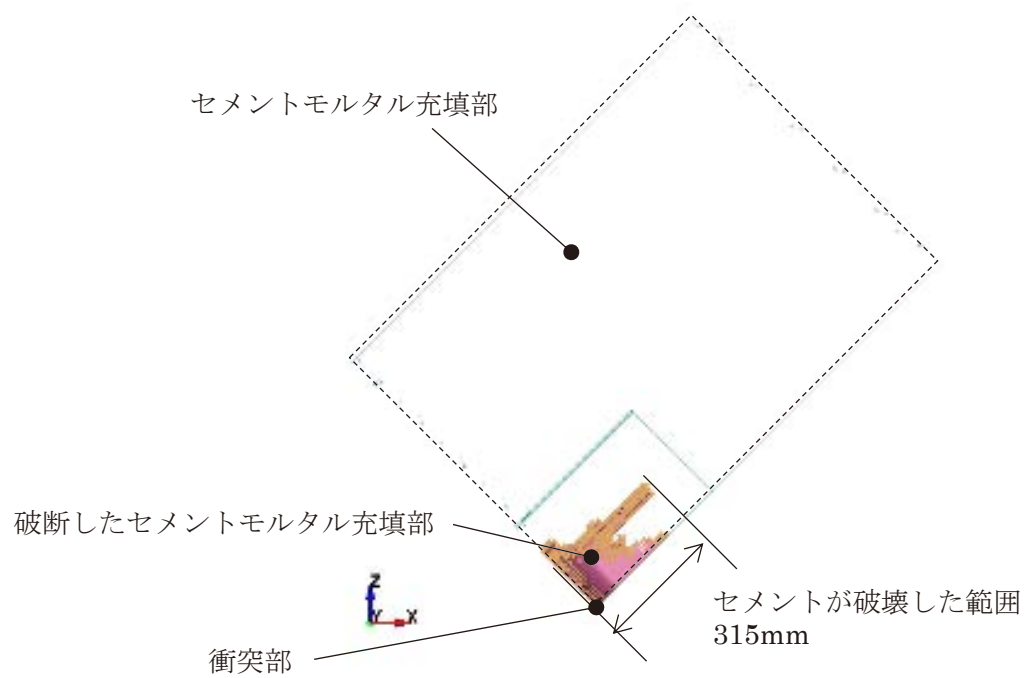


図 22 S・Ⅲ容器モルタル充填角型廃棄体の内部の破断したセメント要素の分布

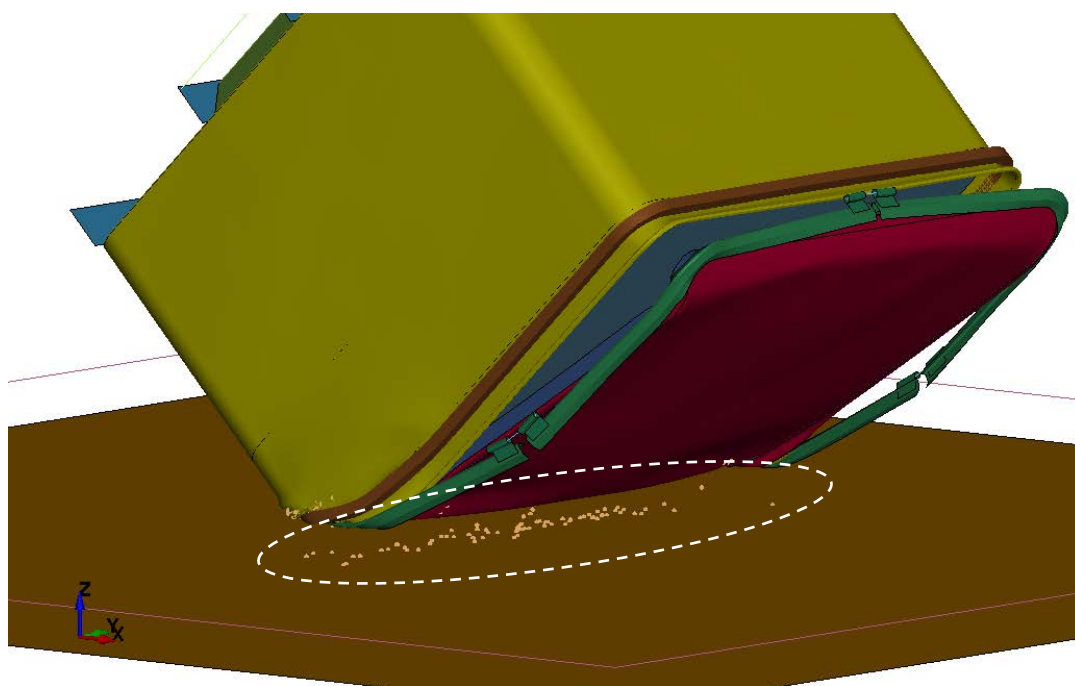


図 23 S・Ⅲ容器モルタル充填角型廃棄体の容器外に漏出したセメント要素

This is a blank page.

