JAEA-Technology
2012-015

蓋式しゃへい容器の健全性評価

Integrity Evaluation of Removable Lid Type Shielded Container

上坂 貴洋　小澤 政千代　松本 潤子　遠藤 誠之
木下 淳一　鈴木 武　鈴木 久雄　森下 悟
坂本 裕

Takahiro UESAKA, Masachiyo KOZAWA, Junko MATSUMOTO, Masayuki ENDO
Junichi KINOSHITA, Takeshi SUZUKI, Hisao SUZUKI, Satoru MORISHITA
and Yu SAKAMOTO

東海研究開発センター
原子力科学研究所
バックエンド技術部

Department of Decommissioning and Waste Management
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center

June 2012

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは独立行政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）
より発信されています。

独立行政法人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
〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2012

JAEA-Technology 2012-015

蓋式しゃへい容器の健全性評価

日本原子力研究開発機構東海研究開発センター
原子力科学研究所 バックエンド技術部

上坂　貴洋、小澤　政千代、松本　潤子+、遠藤　誠之、木下　淳一、
鈴木　武、鈴木　久雄、森下　悟、坂本　裕

（2012年3月22日受理）

日本原子力研究開発機構　原子力科学研究所　第２廃棄物処理棟の固体廃棄物処理設備・Ⅱでは、放射線量の高い固体廃棄物の圧縮減容処理と遮へい容器への収納作業を行っている。従来は、圧縮減容した廃棄物を封入容器に収納し、必要に応じて補充しゃへい体を付加したコンクリートを内巻した 200L のドラム缶または 1m³ のコンクリート製容器（以下、しゃへい容器という。）に収納した上で、上部にコンクリートを注入してきた。

放射線量が高い廃棄物に対して今後策定される埋設処分用の廃棄体の技術基準に適合させるための対応が可能となるよう、しゃへい容器に収納した固体廃棄物を容易に取り出せる構造とする蓋方式のしゃへい容器への変更が求められたため、落下解析、しゃへい性能評価を行うとともに、設計・製作した試作品による落下試験を実施し、新たに使用する蓋式しゃへい容器の健全性を確認した。

原子力科学研究所：〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4
+保安管理部

JAEA-Technology 2012-015

Integrity Evaluation of Removable Lid Type Shielded Container

Takahiro UESAKA, Masachiyo KOZAWA, Junko MATSUMOTO+, Masayuki ENDO,
Junichi KINOSHITA, Takeshi SUZUKI, Hisao SUZUKI,
Satoru MORISHITA and Yu SAKAMOTO

Department of Decommissioning and Waste Management
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 22, 2012)

In Nuclear Science Research Institute of Japan Atomic Energy Agency, intermediate-level solid radioactive wastes in steel cans are compacted at Waste Treatment Building No.2. Compacted wastes are canned in stainless steel cans and then put in 200-liter concrete-lined drums or cubic meter concrete containers, which are shielded with lead or iron materials as necessary. Finally those shielded containers are filled with concrete.

In order to respond to the technical standards of disposal for intermediate level wastes which will be established in the near future by the Japanese government, the modification of waste packages was requested to retrieve canned wastes easily from shielded containers and removable lid type shielded containers were developed. To demonstrate their integrity, evaluation of close bolt on drop analysis, evaluation of shielding performance and drop test with prototype containers were carried out .

Keywords: Radioactive Solid Waste, Removable Lid Type Shielded Container, Drop Analysis, Evaluation of Shielding, Drop Test

---

+Department of Operational Safety Administration

目　次

1　はじめに …… 1
2　全体スケジュール …… 2
3　許認可対応 …… 2
4　評価方法 …… 2
4.1　落下解析による蓋閉めボルトと封入容器の評価方法 …… 2
4.1.1　蓋式コンクリート容器解析モデル …… 2
4.1.2　材料定数 …… 3
4.2　しゃへい性能の評価 …… 3
4.3　落下試験による評価 …… 4
4.3.1　蓋式しゃへい容器の試作 …… 4
4.3.2　蓋式しゃへい容器の落下試験条件 …… 4
4.3.3　落下試験の合格基準 …… 5
5　評価結果 …… 5
5.1　落下解析による蓋閉めボルトの評価結果 …… 5
5.2　落下解析による封入容器の評価結果 …… 5
5.3　しゃへい性能の評価結果 …… 5
5.4　蓋式しゃへい容器の落下試験結果 …… 6
5.4.1　蓋式コンクリート容器の落下試験結果 …… 6
5.4.2　蓋式コンクリート内巻ドラム缶の落下試験結果 …… 6
6　蓋式しゃへい容器の使用に伴う既存設備の整備 …… 6
7　まとめ …… 6
参考文献 …… 7

Contents

1 Introduction ····· 1
2 Overall schedule ····· 2
3 Renewal procedures for licensing ····· 2
4 Evaluation method ····· 2
4.1 Evaluation method of bolt and stainless can on drop analysis ····· 2
4.1.1 Analysis model of removable lid type shielded container ····· 2
4.1.2 Material model ····· 3
4.2 Evaluation method of shielding performance ····· 3
4.3 Evaluation method of drop test ····· 4
4.3.1 Manufactured removable lid type shielded container ····· 4
4.3.2 Conditions of drop test ····· 4
4.3.3 Acceptance standard of drop test ····· 5
5 Evaluation results ····· 5
5.1 Analysis results of bolt on drop analysis ····· 5
5.2 Analysis results of stainless can on drop analysis ····· 5
5.3 Calculation results of shielding performance ····· 5
5.4 Results of drop test ····· 6
5.4.1 Results of lid type concrete container ····· 6
5.4.2 Results of lid type concrete-lined drum ····· 6
6 Modification of existing facility by sift to removbale lid type shielding container ····· 6
7 Summary ····· 6
References ····· 7

表 目 次

表 4.1 蓋式コンクリート容器の重量構成 8
表 4.1.2(1) SS400（蓋閉めボルト）の材料定数 8
表 4.1.2(2) 鉛（補充しゃへい体）の材料定数 9
表 4.1.2(3) SUS304（封入容器胴部）の材料定数 9
表 4.1.2(4) SUS304（封入容器天地板）の材料定数 9
表 4.1.2(5) SUS430（封入容器吸着板）の材料定数 10
表 4.1.2(6) SD295A（蓋式コンクリート容器鉄筋）の材料定数 10
表 4.1.2(7) SR235-9（蓋式コンクリート容器鉄筋）の材料定数 10
表 4.1.2(8) SR235-22（蓋式コンクリート容器鉄筋）の材料定数 11
表 4.1.2(9) コンクリート（蓋式コンクリート容器）の材料定数 11
表 4.1.2(10) コンクリート（衝突床部）の材料定数 11
表 4.1.2(11) SD295A（衝突床部鉄筋）の材料定数 12
表 4.1.2(12) SD345（衝突床部鉄筋）の材料定数 12
表 4.1.2(13) 材料定数の出典 13
表 4.3.1(1) 蓋式コンクリート容器仕様 14
表 4.3.1(2) 蓋式コンクリート内巻ドラム缶仕様 14
表 4.3.2(1) 蓋式コンクリート容器の重量構成 15
表 4.3.2(2) 蓋式コンクリート内巻ドラム缶の重量構成 15
表 5.3 しゃへい能力の比較 15

図 写真　目 次

図 1.1 固体廃棄物処理設備・Ⅱ 16
図 1.2 コンクリート注入式しゃへい容器と蓋式しゃへい容器 17
図 2.1 全体スケジュール 18
図 4.1 蓋式コンクリート容器モデル（横視点） 18
図 4.2.1 コンクリート注入方式コンクリート内巻ドラム缶と蓋式コンクリート内巻ドラム缶のしゃへい計算モデル 19
図 4.2.2 コンクリート注入方式コンクリート容器と蓋式コンクリート容器のしゃへい計算モデル 20
図 4.3.1(1) 蓋式コンクリート容器の配筋図 21
図 4.3.1(2) 蓋式コンクリート内巻ドラム缶の配筋図 22
図 5.1(1) ボルトの相当塑性ひずみ分布（ボルト 6 本ケース） 23
図 5.1(2) ボルトの相当塑性ひずみ分布（ボルト 12 本ケース） 23
図 5.2(1) 相当塑性ひずみ分布（封入容器胴部、ボルト 6 本ケース） 24
図 5.2(2) 相当塑性ひずみ分布（封入容器胴部、ボルト 12 本ケース） 24
図 5.2(3) 相当塑性ひずみ分布（封入容器蓋、ボルト 6 本ケース） 25
図 5.2(4) 相当塑性ひずみ分布（封入容器蓋、ボルト 12 本ケース） 25
図 5.2(5) 相当塑性ひずみ分布（封入容器底、ボルト 6 本ケース） 26
図 5.2(6) 相当塑性ひずみ分布（封入容器底、ボルト 12 本ケース） 26
写真 1 蓋式コンクリート容器の落下試験 27
写真 2 蓋式コンクリート内巻ドラム缶の落下試験 27
写真 3 落下試験後の蓋式コンクリート容器 28
写真 4 落下試験後の蓋式コンクリート容器内の封入容器 28
写真 5 落下試験後の蓋式コンクリート内巻ドラム缶 29
写真 6 落下試験後の蓋式コンクリート内巻ドラム缶内の封入容器 29

1　はじめに

日本原子力研究開発機構原子力科学研究所の第２廃棄物処理棟は、原子力科学研究所内で試験研究の際に発生する比較的放射能レベルの高い固体廃棄物を減容処理し、保管廃棄及び海洋投棄の基準を満足する保管体を作成する目的で設計・建設され、昭和 56 年から供用運転を開始した。上記目的を達成するため、第 2 廃棄物処理棟に搬入された固体廃棄物は、以下の手順で処理されてきた。本処理方法により、これまでに 2300 体（平成 23 年 3 月現在）の保管体を作成してきた。

①固体廃棄物処理設備・Ⅱ（図 1.1）のセル内で容器ごと圧縮処理した後、圧縮処理された他の廃棄物と一緒にステンレス製の封入容器へ封入する。

②封入後の容器は、放射能測定及び線量測定の後、放射能レベルに応じて、しゃへい性能を有したコンクリート容器又はコンクリート内巻ドラム缶（以下、「しゃへい容器」という）に収納する。その際、必要に応じて、鉛又は鉄製の補充しゃへい体が付加される。

③しゃへい容器の上部空隙にコンクリートを注入する。

しかしながら、平成 6 年 2 月、放射性廃棄物の海洋投棄を禁止したロンドン条約の改正が発効したことを受け、我が国においても海洋投棄を禁止することとし、事業所外廃棄規則と障害防止施行規則から海洋投棄関係の条項が削除された。海洋投棄の禁止により、平成 6 年 6 月に策定された国の原子力長期計画で、RI・研究所等廃棄物の処理処分の早急な検討がうたわれた。これを受け、平成 7 年 9 月、原子力バックエンド対策専門部会に「RI・研究所等廃棄物分科会」が設置された。同分科会は、平成 10 年 1 月、「RI・研究所等廃棄物の処理処分の基本的考え方について（案）」を取りまとめた。同年 2 月、原子力委員会は、報告書案を審議し了承した（以下「専門部会報告書」という。）。

専門部会報告書において、研究所等廃棄物の大部分を占める現行の政令濃度上限値以下の低レベル放射性廃棄物について、想定される処分形態（コンクリートピット処分、素堀り処分等）が明確化された。一方、現行の政令濃度上限値を超える低レベル放射性廃棄物及びα核種の放射能濃度が約 1GBq/t を超える放射性廃棄物（以下「高β・γ固体廃棄物」という。）については、「今後検討される当該廃棄物の管理の考え方に準じることとする。」とし、廃棄物の固型化の方法、処分用容器等処分用廃棄体の要件及び処分形態は今後の検討に委ねられた。

このため、今後設定される廃棄体の要件に柔軟に対応できるよう、コンクリートを注入し、封入して保管している高 β・γ 固体廃棄物の管理方法を見直すこととなり、旧日本原子力研究所本部、東海研究所及び大洗研究所による高 β・γ 固体廃棄物管理方法見直し検討会が設置され、見直し検討が行われた。その結果、今後、研究施設等廃棄物の埋設処分に関する技術基準が整備され、パッケージ体から廃棄物を取り出し、分別、試料採取等の必要が生じる可能性を考慮し、固体廃棄物処理設備・Ⅱにおける処理の過程において、従来から実施してきたコンクリートを注入しパッケージ体とする方法のほか、「蓋式しゃへい容器」を用いてしゃへい蓋により廃棄物を封じる方法を追加することとした。（図 1.2）

蓋式しゃへい容器は、リフティングマグネットにより遠隔操作で蓋が開閉できる構造とし、落下解析及びしゃへい性能評価を行い設計した。また、設計試作した蓋式しゃへい容器に対して落下試験を行い、健全性を確認した。

2　全体スケジュール

蓋式しゃへい容器の導入に係る全体スケジュールを図 2.1 に示す。

3　許認可対応

蓋式しゃへい容器の使用を追加するため、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（第 26 条第 1 項）の規定により、2008 年 7 月 11 日付けで原子炉設置変更許可申請（20 原機（科保）054）を行い、1 次審査、2 次審査及び原子力安全委員会の現地調査を経て 2009 年 3 月 11 日に許可（20 諸文科科第 2058 号）された。

審査では、本報告書の第 4 章及び第 5 章に記載した蓋式しゃへい容器の落下解析の妥当性が審議の対象となった。

4　評価方法

蓋式しゃへい容器の評価について、以下の通り実施した。

4.1　落下解析による蓋閉めボルトと封入容器の評価方法

保管廃棄施設で保管されている蓋式しゃへい容器が最大高所からの落下を想定し、蓋閉めボルトの破断の有無と封入容器の健全性について解析評価を実施した。なお、落下解析は、蓋式しゃへい容器のうち、重量の重い蓋式コンクリート容器を対象に実施した。解析では、蓋式コンクリート容器のしゃへい蓋が M16 のボルト 12 本又は 6 本で締められている 2 ケースの解析モデルを対象に、ボルトの破断の有無について解析を行った。その解析結果からボルトが破断に至らない本数と太さを評価した。また、封入容器についても上記 2 つのケースに対する解析を行い、健全性を評価した。解析には汎用衝撃解析コード ANSYS　AUTODYN[1)]を用いた。

4.1.1 蓋式コンクリート容器解析モデル

図 4.1 に蓋式コンクリート容器の解析モデルを示す。蓋式コンクリート容器の鉄筋コンクリート部、しゃへい蓋に注入されているコンクリート部及び封入容器の収納物には 6 面体ソリッド要素を、しゃへい蓋の側面及び下面並びに封入容器にはシェル要素を、鉄筋及びボルトにはビーム要素をそれぞれ用いてモデル化した。

全ての鉄筋はブロック本体に結合条件で接続した。また、鉄筋同士にも結合条件を適用した。蓋式コンクリート容器本体、しゃへい蓋、鉛製の補充しゃへい体、封入容器の間には、それぞれ接触境界条件を適用した。この条件により、補充しゃへい体と封入容器は、落下時に蓋式コンクリート容器内面やしゃへい蓋底面に衝突し、衝撃力を発生させることになる。

蓋式コンクリート容器本体としゃへい蓋は 12 本あるいは 6 本の M16 ボルトの両端に結合条件を適用し接続した。また、ボルトは等角度配置とした。

あらかじめ実施した予備解析の結果、衝突点直近位置にボルトが配置された場合に最もひずみが大きくなることが判明した。このため、より厳しい解析条件となるように、衝突点直近にボルトがある条件とし、重量は最大質量、蓋式コンクリート容器の落下角度は 135°、容器を吊るための吊具を装着する吊部（凹み）が鉄筋コンクリート床に衝突する姿勢とし、解析した。落下高さは、4.3.2 での検討結果に基づき、保管廃棄施設内で 3 段積保管されている蓋式コンクリート容

器の最上部から落下することを想定し、2.85m とした。蓋式コンクリート容器の各部の重量構成については図面寸法と材料の密度をもとに算出設定した。封入容器重量については、これまで製作してきた封入容器の重量を調査したところ最大で 95kg であったため､保守的に 100kg とした。蓋式コンクリート容器の重量構成を表 4.1 に示す。

4.1.2 材料定数

解析に用いた各材料の定数は以下のとおりである。

(1) SS400（蓋閉めボルト）（表 4.1.2（1））
(2) 鉛（補充しゃへい体）（表 4.1.2（2））
(3) SUS304（封入容器胴部）（表 4.1.2（3））
(4) SUS304（封入容器天地板）（表 4.1.2（4））
(5) SUS430（封入容器吸着板）（表 4.1.2（5））
(6) SD295A（蓋式コンクリート容器鉄筋）（表 4.1.2（6））
(7) SR235-9（蓋式コンクリート容器鉄筋）（表 4.1.2（7））
(8) SR235-22（蓋式コンクリート容器鉄筋）（表 4.1.2（8））
(9) コンクリート（蓋式コンクリート容器）（表 4.1.2（9））
(10) コンクリート（衝突床部）（表 4.1.2（10））
(11) SD295A（衝突床部鉄筋）（表 4.1.2（11））
(12) SD345（衝突床部鉄筋）（表 4.1.2（12））

材料定数の出典を表 4.1.2（13）に示す。

4.2 しゃへい性能の評価

従来のコンクリート注入式しゃへい容器と新規の蓋式しゃへい容器は、側面部及び底部の構成する材料と寸法が同一であるので、しゃへい能力は同等である。一方、上部については、従来のしゃへい容器は注入したコンクリートのみで構成されているのに対し、蓋式しゃへい容器のしゃへい蓋はコンクリート、鉄及び鉛で構成されており、しゃへい能力に相違がある。

このため、コンクリート注入式しゃへい容器及び蓋式しゃへい容器の上面についてそれぞれしゃへい計算を行い、その結果を比較することで、蓋式しゃへい容器のしゃへい能力がコンクリート注入式の容器に比べ劣っていないかを評価した。計算点は両方の容器とも容器表面から 10mm の位置とし、しゃへい計算コード QAD-CGGP2 を用いて線量当量率を計算した。なお、計算は、収納する廃棄物の線源強度を ^{60}Co：1.0×10^{10}Bq、廃棄物形状を円柱体積線源(φ35cm×H50cm 封入容器寸法)とし、これを補充しゃへい体（Pb:T45mm）に納め、さらにコンクリート容器(φ106cm×H106cm)又はコンクリート内巻ドラム缶(φ56.8cm×H88cm)にそれぞれ収納した状態をモデル化して行った（図 4.2.1、図 4.2.2)。なお、しゃへい蓋を構成する鉄材（T6mm）については、保守的に存在しないものとし、コンクリートで構成した蓋としてモデル化した。

4.3　落下試験による評価

4.3.1 蓋式しゃへい容器の試作

落下試験用に、蓋式コンクリート容器及び蓋式コンクリート内巻ドラム缶をそれぞれ 1 体試作した。蓋式コンクリート容器と蓋式コンクリート内巻ドラム缶の配筋図及び仕様を、それぞれ、図 4.3.1(1)及び表 4.3.1(1)と図 4.3.1(2)及び表 4.3.1(2)に示す。なお、コンクリート強度に関しては、コンクリート注入式のしゃへい容器の強度（4 週圧縮強度で 29.4N/mm^2 以上）と同じとした。

蓋式コンクリート容器及び蓋式コンクリート内巻ドラム缶に収納する封入容器については、これまで製作してきた封入容器の重量を調査したところ最大で 95kg であったため、模擬廃棄物として砂と鉛ブロックを入れて、封入容器を含めた重量を 100kg とした。これを補充しゃへい体（鉛製）に内挿した上で蓋式コンクリート容器に収納した。蓋式コンクリート容器及び蓋式コンクリート内巻ドラム缶の重量構成を表 4.3.2(1) 及び表 4.3.2(2)に示す。なお、実際の廃棄物処理工程上では、封入容器は廃棄物の収納後に封入装置によりシーミング加工されるが、落下試験では、模擬廃棄物を収納後に封入容器の蓋を溶接して封入した。

4.3.2 蓋式しゃへい容器の落下試験条件

蓋式しゃへい容器が落下する状況は、運搬作業中の落下と保管廃棄施設内で積み重ねられた容器が地震により上部から落下するという 2 つのケースが考えられる。

このうち、運搬中の落下に関しては、原子力科学研究所核燃料物質等周辺監視区域内運搬規則により、運搬中の車両の速度は 20km/h に制限されていること、積載された容器は荷台に強固に固定されること、また、輸送ルートは平坦な状態に舗装されていることから、運搬途中の落下は起こらないものと考える。なお、仮に輸送中に落下したとしても、原子力科学研究所内に橋はなく、運搬中の高所落下は起こり得ない。一方、運搬車両への容器の積み下ろし作業を行う際の落下事故が考えられるが、この場合の落下高さは、運搬車両の荷台高さが 1.4m であるので、1.5m 程度と考えられる。

保管廃棄施設内での落下については、蓋式コンクリート容器は 3 段積みで保管されるので、最上段の高さは 2.85m となる。一方、蓋式コンクリート内巻ドラム缶は 4 段積みで保管され、最上段の高さは 3.24m となる。

以上の検討に基づき、保管廃棄施設内での落下の方が厳しい落下条件となることから、蓋式コンクリート容器については 2.85m の高さから（写真 1）、蓋式コンクリート内巻ドラム缶は 3.24m の高さから（写真 2）、それぞれ落下試験を実施することとした。

蓋式コンクリート容器及び蓋式コンクリート内巻ドラム缶に収納する封入容器については、これまで製作してきた封入容器の重量を調査したところ最大で 95kg であったため、模擬廃棄物として砂と鉛ブロックを入れて、封入容器を含めた重量を 100kg とした。これを補充しゃへい体（鉛製）に内挿した上で蓋式コンクリート容器に収納した。なお、実際の廃棄物処理工程上では、封入容器は廃棄物の収納後に封入装置によりシーミング加工されるが、落下試験では、模擬廃棄物を収納後に封入容器の蓋を溶接して封入した。落下姿勢は、容器上面を下側に向けコーナー落下とした。また、床面は鉄筋コンクリート 30cm の床上に厚さ 22mm の鋼板を敷いた状態で実施することとした。

4.3.3 落下試験の合格基準

合格基準は、①蓋式しゃへい容器の蓋が脱落しないこと、②蓋式しゃへい容器に収納した封入容器から模擬廃棄物が散逸しないこと、③しゃへい欠損となるような割れ及び欠けが発生しないこと、とした。

5　評価結果

5.1　落下解析による蓋閉めボルトの評価結果

蓋式コンクリート容器の蓋閉めボルトがM16ボルト6本締めのケースと12本締めのケースでの蓋閉めボルトの解析結果を、それぞれ、図5.1(1)及び図5.1(2)に示す。ボルトが6本の場合、最大変形は衝突位置に近いボルトに発生し、塑性ひずみの最大値は23.3%であった。ボルト材料であるSS400の破断ひずみは24.7%であることから、本ボルトは破断する可能性が高い。一方、ボルトが12本のケースでは、最大塑性ひずみは8.1%であり、破断するまでには十分な余裕がある。従って、締付ボルトが12本であれば、蓋閉めボルトの健全性は保たれると判断する。

以上の結果から、落下試験用試作品はM16ボルト12本で製作することとした。なお、落下解析を行っていない蓋式コンクリート内巻ドラム缶についても同様に、M16ボルト12本で製作することとした。

5.2　落下解析による封入容器の評価結果

蓋式コンクリート容器の蓋閉めボルトがM16ボルト6本締めのケースと12本締めのケースでの相当塑性ひずみの解析結果を、封入容器胴部については図5.2(1)及び図5.2(2)に、封入容器蓋については図5.2(3)及び図5.2(4)に、また、封入容器底については図5.2(5)及び図5.2(6)にそれぞれ示す。

封入容器胴部の最大塑性ひずみは、6本締めのケースと12本締めのケースで、それぞれ、2.7%と2.0%であった。これらの値は、構成材のSUS304の破断ひずみ（41.9%）に比較して十分小さいことから、封入容器の健全性は保たれるものと判断する。

封入容器蓋については、6本締めのケースと12本締めのケースで、それぞれ、最大16.3%と最大22.9%の塑性ひずみが生じている。しかしながら、最大塑性ひずみが発生しているのは両ケースともフランジ箇所であり、蓋本体部分の塑性ひずみは両ケースとも約 4%であり、蓋が破れることはないと判断する。

同様に、封入容器底部についても、フランジ部を除けば、最大塑性ひずみは、6 本締めのケースと12本締めのケースで、それぞれ、約3%と約4%であるので、底部の健全性は保たれると判断する。

以上の結果から、封入容器については、M16ボルト6本締め及び12本締めのいずれの場合でも、健全性は保たれるものと判断する。

5.3　しゃへい性能の評価結果

表5.3に示した線量当量率の計算結果から、蓋式しゃへい容器は、コンクリート注入式のしゃへい容器に比べ、しゃへい能力が向上している結果となった。

なお、この計算は、作業者が最も接近すると考えられる表面から 10mm の位置を計算点としたが、計算点を表面としても算出値はほとんど変わらず、しゃへい蓋付保管体（コンクリート容器）の上面で、10mm 離れたときの値が 34.3 μSv/h、表面での値は、35.4 μSv/h である。

5.4　蓋式しゃへい容器の落下試験結果

5.4.1 蓋式コンクリート容器の落下試験結果

蓋式コンクリート容器の落下試験の結果、蓋が脱落することはなく、ボルトが破断、変形することもなかった。衝突部においては若干のコンクリート剥離はあるものの、本体内部に亀裂は生じず、しゃへい性能を損なう程の損傷はなかった（写真 3)。内部に収めた封入容器に関しても、模擬廃棄物が散逸することはなかった（写真 4)。

落下試験の結果､蓋式コンクリート容器の落下時における健全性は保たれることが実証された。

5.4.2 蓋式コンクリート内巻ドラム缶の落下試験結果

蓋式コンクリート内巻ドラム缶も同様に、蓋が脱落することはなく、しゃへい性能を損なう損傷はなかった（写真 5)。内部に収めた封入容器に関しても、蓋式コンクリート内巻ドラム缶の封入容器から模擬廃棄物が散逸することはなかった（写真 6)。

落下試験の結果、蓋式コンクリート内巻ドラム缶についても落下時における健全性は保たれることが実証された。

6　蓋式しゃへい容器の使用に伴う既存設備の整備

蓋式しゃへい容器への変更に伴い、固体廃棄物処理設備・Ⅱのリフティングマグネット(リフマグ)吊上げ能力（150kg）を 350kg に向上させる必要があり、リフマグの更新工事を行った。なお、更新工事終了後、リフマグの吊上げ実証試験を行い、蓋式コンクリート容器及び蓋式コンクリート内巻ドラム缶とも良好に開閉することを確認した。

7　まとめ

蓋式しゃへい容器を導入するため､2008 年度から 2010 年度に､容器設計のための落下解析（蓋閉めボルトと封入容器の健全性の評価）及びしゃへい性能評価、蓋式しゃへい容器の試作及び落下試験による蓋式しゃへい容器の健全性評価並びに許認可対応を行った。また、蓋式しゃへい容器への変更に伴い、既存設備のリフマグの吊上げ能力強化が必要となったため、リフマグの更新工事を行い、操作性の確認等実証試験を行った。

以上の結果、蓋式しゃへい容器の健全性及び取扱いに問題がないことが確認された。このことをもって、将来の埋設処分に柔軟に対応するため、2011 年度から、蓋式しゃへい容器による廃棄物管理へ移行した。

参考文献

1)（財）原子力発電技術機構　原子力安全解析所,「平成7年度核燃料施設安全解析コード整備コンクリート構造物の衝撃破壊挙動の解析成果報告書」, 平成8年3月
（財）原子力発電技術機構　原子力安全解析所,「平成8年度核燃料施設安全解析コード整備コンクリート構造物の衝撃破壊挙動の解析成果報告書」, 平成9年3月
（独）原子力安全基盤機構,「平成15年度核燃料施設安全解析コード改良整備コンクリート構造物の衝撃破壊挙動の解析に係るコード整備に関する報告書」, 平成16年7月
（独）原子力安全基盤機構,「核燃料施設安全解析コード改良整備コンクリート構造物の衝撃破壊挙動の解析に係るコード整備に関する報告書」, 平成17年9月
（独）原子力安全基盤機構,「コンクリート構造物の衝撃破壊挙動の解析に係るコード整備に関する報告書」, 平成18年7月

表 4.1 蓋式コンクリート容器の重量構成

蓋式コンクリート容器本体	2100kg
補充しゃへい体(Pb)	450 kg
封入容器 (胴部、天地板：SUS304 リフマグ用吸着板：SUS430)	100 kg（収納廃棄物：86kg）
しゃへい蓋 (SS400+コンクリート)	294 kg
合計	2944 kg

表 4.1.2(1) SS400（蓋閉めボルト）の材料定数

定数名	数値／モデル	出典
密度(g/m3)	8.04	1
状態方程式	線形	―
ヤング率(GPa)	205	2
ポアソン比(―)	0.3	2
構成関係	バイリニア型等方硬化則	―
降伏応力(MPa)	287	1
破断応力(MPa)	456	1
破断ひずみ(―)	0.247	1

表 4.1.2(2) 鉛（補充しゃへい体）の材料定数

定数名	数値／モデル	出典
密度(g/m3)	11.337	3
状態方程式	線形	—
ヤング率(GPa)	17.2	3
ポアソン比(—)	0.44	3
構成関係	バイリニア型等方硬化則	—
降伏応力(MPa)	1.7	3
破断応力(MPa)	13.24	3
破断ひずみ(—)	0.27	3

表 4.1.2(3) SUS304（封入容器胴部）の材料定数

定数名	数値／モデル	出典
密度(g/m3)	8.0	4
状態方程式	線形	—
ヤング率(GPa)	205	2
ポアソン比(—)	0.3	2
構成関係	バイリニア型等方硬化則	—
降伏応力(MPa)	303	5
破断応力(MPa)	649	5
破断ひずみ(—)	0.419	5

表 4.1.2(4) SUS304（封入容器天地板）の材料定数

定数名	数値／モデル	出典
密度(g/m3)	8.0	4
状態方程式	線形	—
ヤング率(GPa)	205	2
ポアソン比(—)	0.3	2
構成関係	バイリニア型等方硬化則	—
降伏応力(MPa)	317	6
破断応力(MPa)	662	6
破断ひずみ(—)	0.425	6

表 4.1.2(5) SUS430（封入容器吸着板）の材料定数

定数名	数値／モデル	出典
密度(g/m3)	7.702	8
状態方程式	線形	—
ヤング率(GPa)	205	2
ポアソン比(—)	0.3	2
構成関係	バイリニア型等方硬化則	—
降伏応力(MPa)	312	7
破断応力(MPa)	508	7
破断ひずみ(—)	0.27	7

表 4.1.2(6) SD295A（蓋式コンクリート容器鉄筋）の材料定数

定数名	数値／モデル	出典
密度(g/m3)	7.8	4
状態方程式	線形	—
ヤング率(GPa)	205	2
ポアソン比(—)	0.3	2
構成関係	バイリニア型等方硬化則	—
降伏応力(MPa)	347.5	8
破断応力(MPa)	502.5	8
破断ひずみ(—)	0.231	8

表 4.1.2(7) SR235-9（蓋式コンクリート容器鉄筋）の材料定数

定数名	数値／モデル	出典
密度(g/m3)	7.8	4
状態方程式	線形	—
ヤング率(GPa)	202	2
ポアソン比(—)	0.3	2
構成関係	バイリニア型等方硬化則	—
降伏応力(MPa)	330	9
破断応力(MPa)	463.5	9
破断ひずみ(—)	0.304	9

表 4.1.2(8) SR235-22（蓋式コンクリート容器鉄筋）の材料定数

定数名	数値／モデル	出典
密度(g/m3)	7.8	4
状態方程式	線形	—
ヤング率(GPa)	205	2
ポアソン比(—)	0.3	2
構成関係	バイリニア型等方硬化則	—
降伏応力(MPa)	301	10
破断応力(MPa)	429.5	10
破断ひずみ(—)	0.255	10

表 4.1.2(9) コンクリート（蓋式コンクリート容器）の材料定数

定数名	数値／モデル	出典
密度(g/m3)	2.36	11
状態方程式	線形	—
ヤング率(GPa)	29.8	12
ポアソン比(—)	0.2	12
圧縮強度(MPa)	36.1	11
引張強度(MPa)	2.51	12
構成関係(—)	ドラッカー＝プラガー	13、14
圧力　＃1(MPa)	-10.4	
圧力　＃2(MPa)	45.05	
降伏応力＃1 (MPa)	0.0	
降伏応力＃2 (MPa)	118.8	
破壊則(—)	なし	—

表 4.1.2(10) コンクリート（衝突床部）の材料定数

定数名	数値／モデル	出典
密度(g/m3)	2.35	15
状態方程式	線形	—
ヤング率(GPa)	29.8	12
ポアソン比(—)	0.2	12
圧縮強度(MPa)	26.5	16
引張強度(MPa)	2.21	12
構成関係(—)	ドラッカー＝プラガー	13、14
圧力　＃1(MPa)	-8.59	
圧力　＃2(MPa)	31.45	
降伏応力＃1 (MPa)	0.0	
降伏応力＃2 (MPa)	82.8	
スポール破壊則 (MPa)	-6.0	17

表 4.1.2(11) SD295A（衝突床部鉄筋）の材料定数

定数名	数値／モデル	出典
密度(g/m3)	7.8	4
状態方程式	線形	—
ヤング率(GPa)	205	2
ポアソン比(—)	0.3	2
構成関係	バイリニア型等方硬化則	—
降伏応力(MPa)	295.0	18
破断応力(MPa)	440.0	18
破断ひずみ(—)	0.148	18

表 4.1.2(12) SD345（衝突床部鉄筋）の材料定数

定数名	数値／モデル	出典
密度(g/m3)	7.8	4
状態方程式	線形	—
ヤング率(GPa)	205	2
ポアソン比(—)	0.3	2
構成関係	バイリニア型等方硬化則	—
降伏応力(MPa)	345.0	18
破断応力(MPa)	490.0	18
破断ひずみ(—)	0.165	18

表 4.1.2(13) 材料定数の出典

1	過去に納品した検査成績書 「鋼材検査証明書　発行日：2008年3月19日　規格：JIS G3101 SS400　証明書番号：08H1202283」新日本製鉄株式会社
2	「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説」P.6, 日本建築学会.
3	「鉛ハンドブック　改訂版」日本鉛亜鉛需要研究会　平成4年3月1日
4	「理科年表」第76冊, 丸善, 平成15年.
5	過去に納品した検査成績書 「検査証明書　発行日：2007年3月26日　規格：JIS G4305（2005）　証明書番号：07031164001」日本金属工業株式会社
6	過去に納品した検査成績書 「検査証明書　発行日：2007年8月20日　　規格：JIS G4305（2005）　証明書番号：07081063501」日本金属工業株式会社
7	過去に納品した検査成績書 「鋼材検査証明書　発行日：2006年5月10日　　規格：JIS G4304 SUS430-99　証明書番号：8979」新日鐵住金ステンレス株式会社
8	過去に納品した検査成績書 「棒鋼検査証明書　発行日：2008年3月22日　　規格：JIS G3112 SD295A　証明書番号：118-43523-1」北越メタル株式会社
9	過去に納品した検査成績書 「棒鋼検査証明書　発行日：2007年12月11日　　規格：JIS G3112 SR235　証明書番号：032-10490-1」北越メタル株式会社
10	過去に納品した検査成績書 「鋼材検査証明書　発行日：2007年2月1日　　規格：JIS G3112 SR235　証明書番号：6A62371-0」供英製鋼株式会社
11	過去に納品した検査成績書 「コンクリート試験報告書　試験年月日：2008年5月28日」小河原セメント工業株式会社
12	「平成8年制定　コンクリート標準示方書　設計編」土木学会.
13	Itoh, M. et. al, Numerical study on impulsive local damage of reinforced concrete structures by a sophisticated constitutive and failure model, *Int. Conf. on Structures Under Shock and Impact*, Cambridge Univ., UK, 2000.
14	Chen, W.F. and Saleeb, A.F., Constitutive Equations for Engineering Materials, p485, Elsevier.
15	「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説」P.8, 日本建築学会.
16	「普通コンクリート設計基準強度」
17	「平成8年度　核燃料施設安全解析コード整備　コンクリート構造物の衝撃破壊挙動の解析　成果報告書」（財）原子力発電技術機構, 平成9年3月.
18	「JISハンドブック　鉄鋼Ⅱ」日本規格協会編　規格：JISG3112:2004　鉄筋コンクリート用棒鋼

表 4.3.1(1) 蓋式コンクリート容器仕様

1.コンクリート仕様
・セメント：JIS R5210 ポルトランドセメント
・粗骨材：20mm 以下
・細骨材：5mm 以下
・スランプ：10±2cm
・水、セメント比：50±5%
・比重：2.25 以上
・4 週圧縮強度：29.4N/mm^2（300kg/cm^2）以上
2.鉄筋仕様
・JIS G3112 鉄筋コンクリート用鉄鋼
丸　　鋼：SR-235
異型鉄筋：SD-295A
・JIS G3101 一般構造用圧延鋼材
鋼　　板：SS400
・加工した鉄筋組み立て接合は、溶接とする。

表 4.3.1(2) 蓋式コンクリート内巻ドラム缶仕様

1.コンクリート仕様
・セメント：JIS R5210 ポルトランドセメント
・粗骨材：15mm 以下
・細骨材：5mm 以下
・スランプ：10±2cm
・水、セメント比：50±5%
・比重：2.25 以上
・4 週圧縮強度：29.4N/mm^2（300kg/cm^2）以上
2.鉄筋仕様
・JIS G3112 鉄筋コンクリート用鉄鋼
丸　　鋼：SR-235
・JIS G3101 一般構造用圧延鋼材
鋼　　板：SS400
・加工した鉄筋組み立て接合は、溶接とする。
3.ドラム缶仕様
・JIS Z1600H 級オープンドラム
・容量：200L

表 4.3.2(1) 蓋式コンクリート容器の重量構成

名称	重量（kg）
蓋式コンクリート容器本体	2092
蓋式コンクリート容器しゃへい蓋	123
補充しゃへい体本体（鉛製）	460
補充しゃへい体しゃへい蓋（鉛製）	166
封入容器（内容物：鉛ブロック、砂）	100
合計重量	2941

表 4.3.2(2) 蓋式コンクリート内巻ドラム缶の重量構成

名称	重量（kg）
蓋式コンクリート内巻ドラム缶本体 （天蓋含む）	215
蓋式コンクリート内巻ドラム缶しゃへい蓋	63
補充しゃへい体本体（鉛製）	459
補充しゃへい体しゃへい蓋（鉛製）	107
封入容器（内容物：鉛ブロック、砂）	100
合計重量	944

表 5.3 しゃへい能力の比較

容器		コンクリート容器		コンクリート内巻ドラム缶	
		従来のコンクリート容器	蓋式コンクリート容器	従来のコンクリート内巻ドラム缶	蓋式コンクリート内巻ドラム缶
計算箇所	上 面	8.31×10^{2}	3.43×10	1.50×10^{3}	2.47×10^{2}
	側 面	6.03×10	6.03×10	1.79×10^{3}	1.79×10^{3}
	底 面	3.71×10	3.71×10	1.6×10^{3}	1.67×10^{3}

(単位：μSv/h)

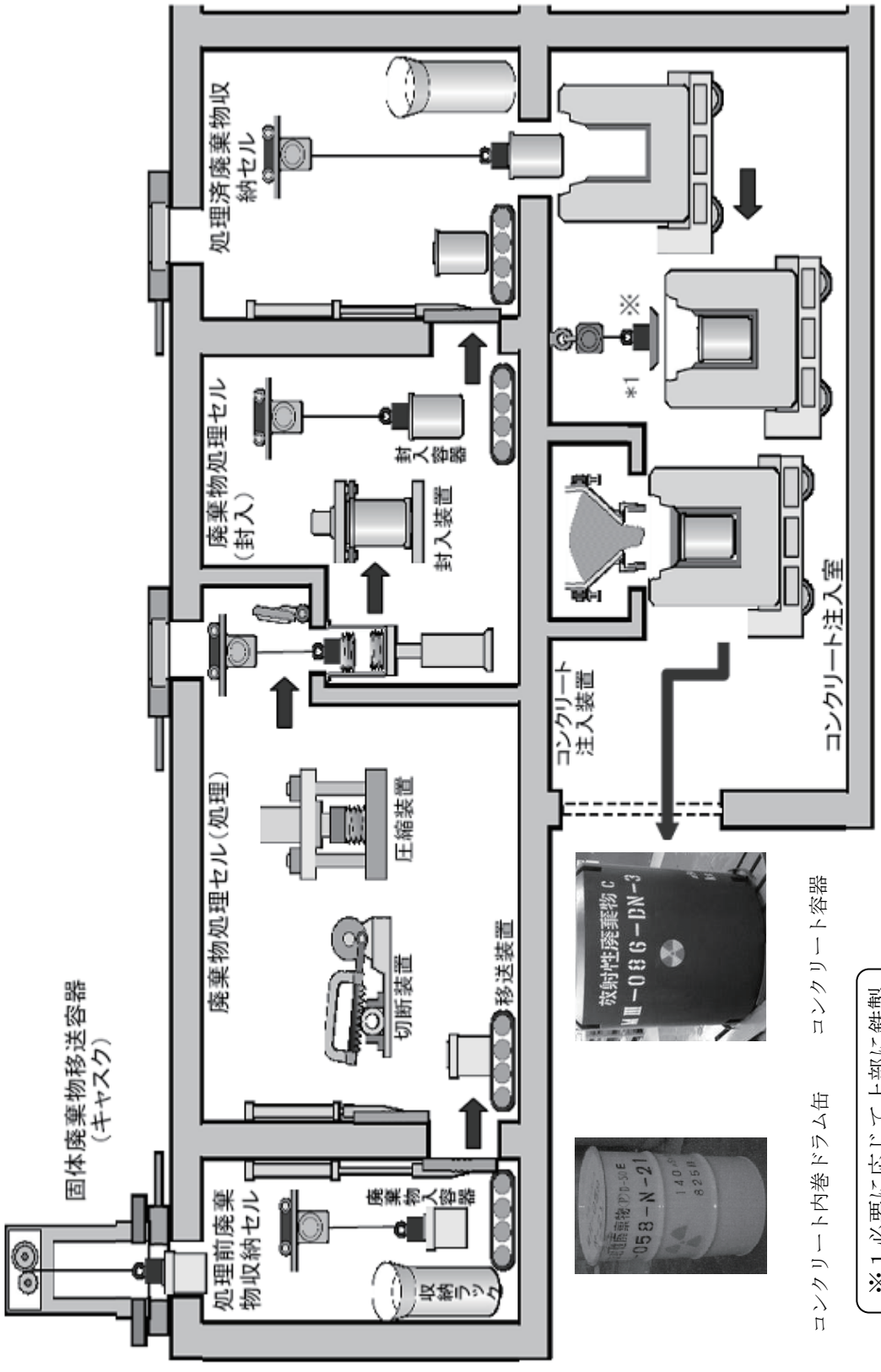

図 1.1 固体廃棄物処理設備・II

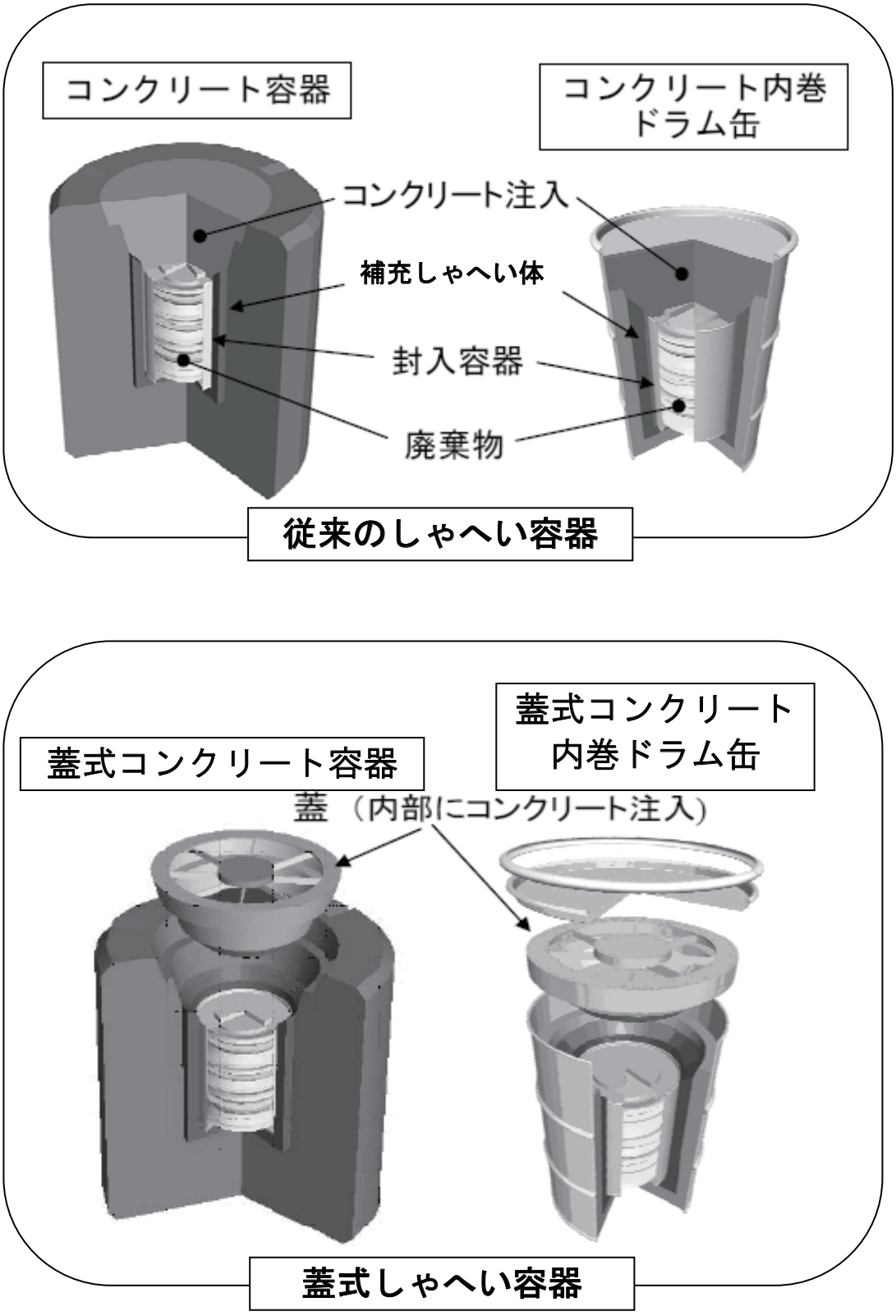

図 1.2 コンクリート注入式しゃへい容器と蓋式しゃへい容器

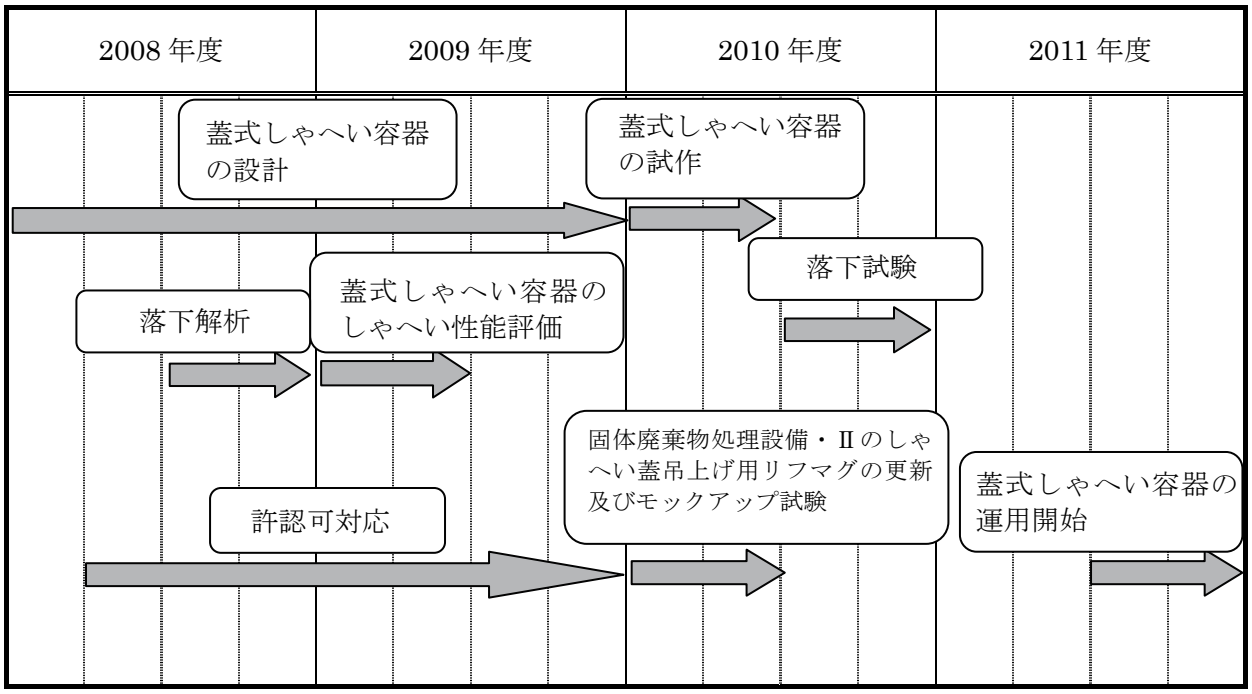

図 2.1 全体スケジュール

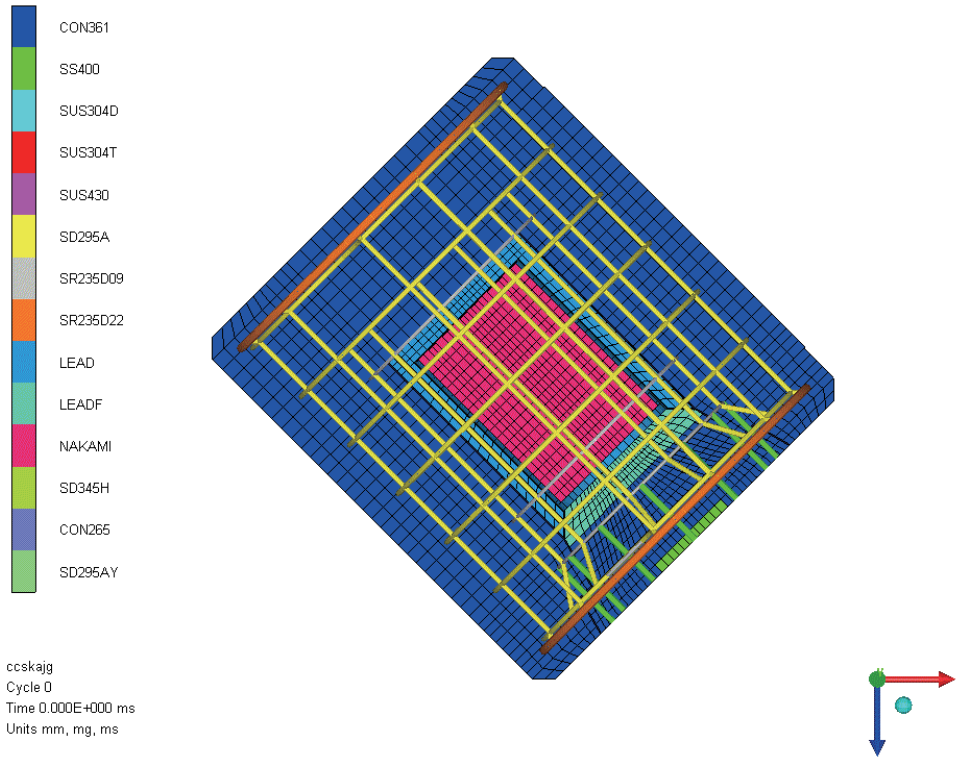

図 4.1 蓋式コンクリート容器モデル（横視点）

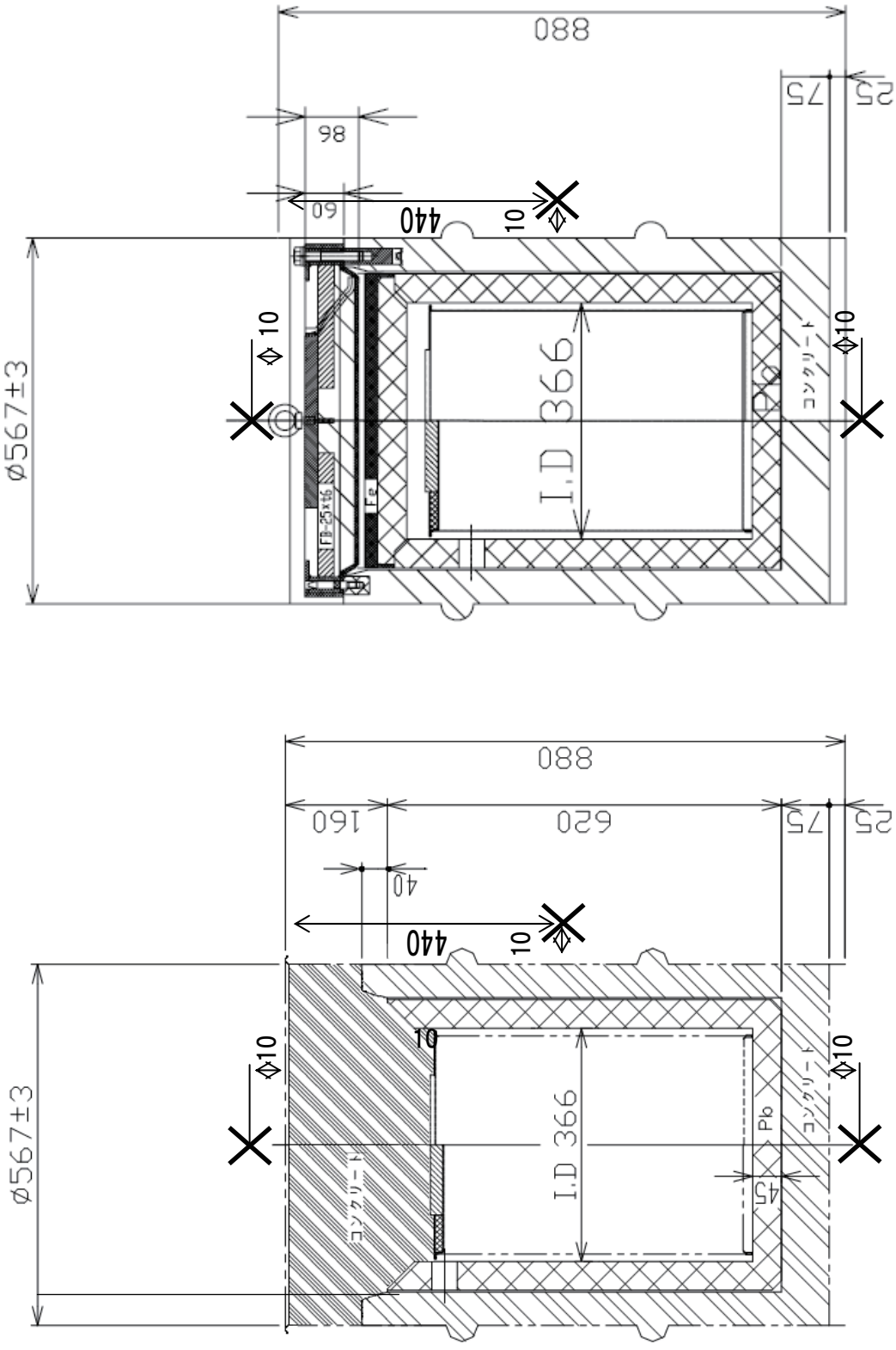

図 4.2.1 コンクリート注入方式コンクリート内巻ドラム缶と蓋式コンクリート内巻ドラム缶のしゃへい計算モデル

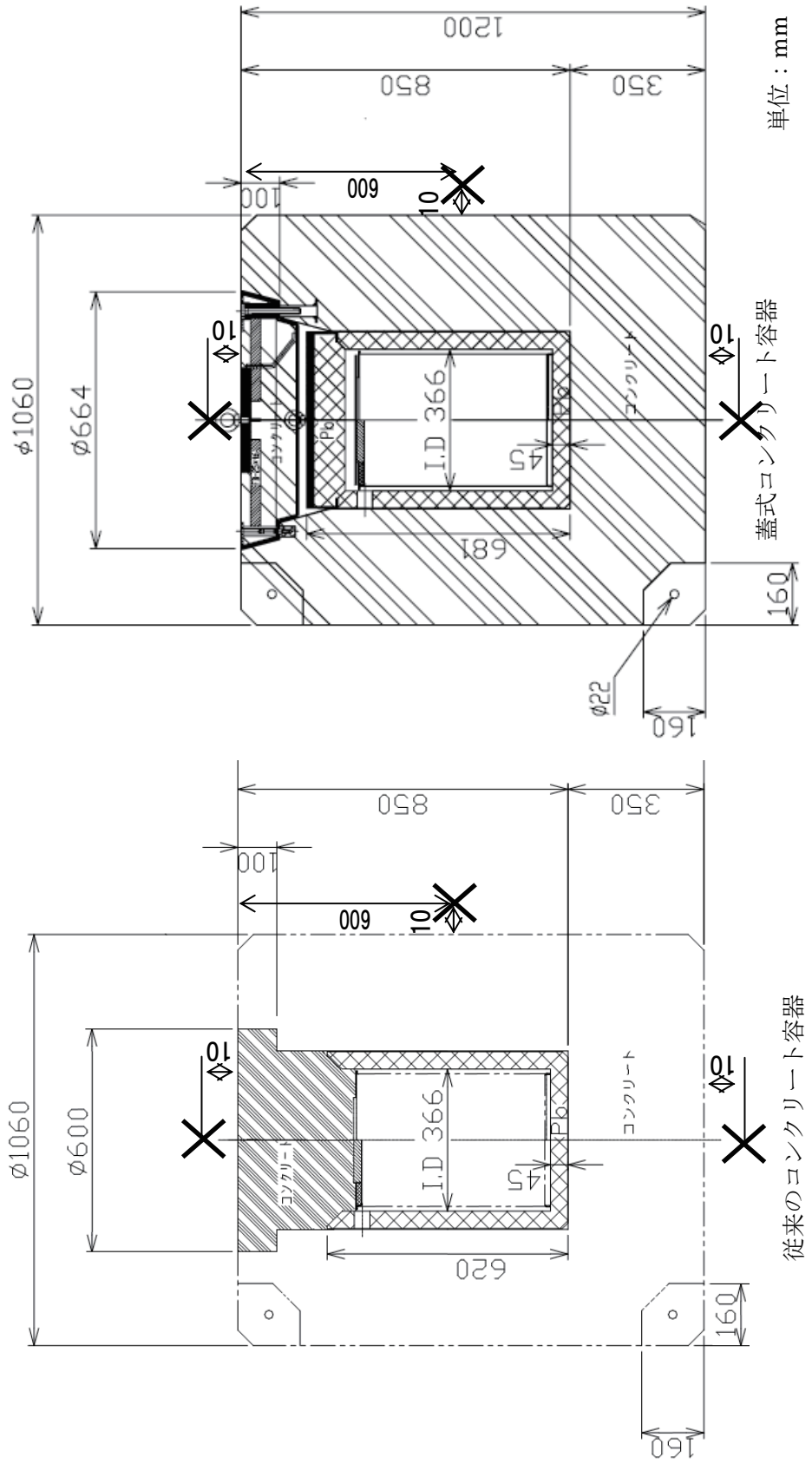

図 4.2.2 コンクリート注入方式コンクリート容器と蓋式コンクリート容器のしゃへい計算モデル

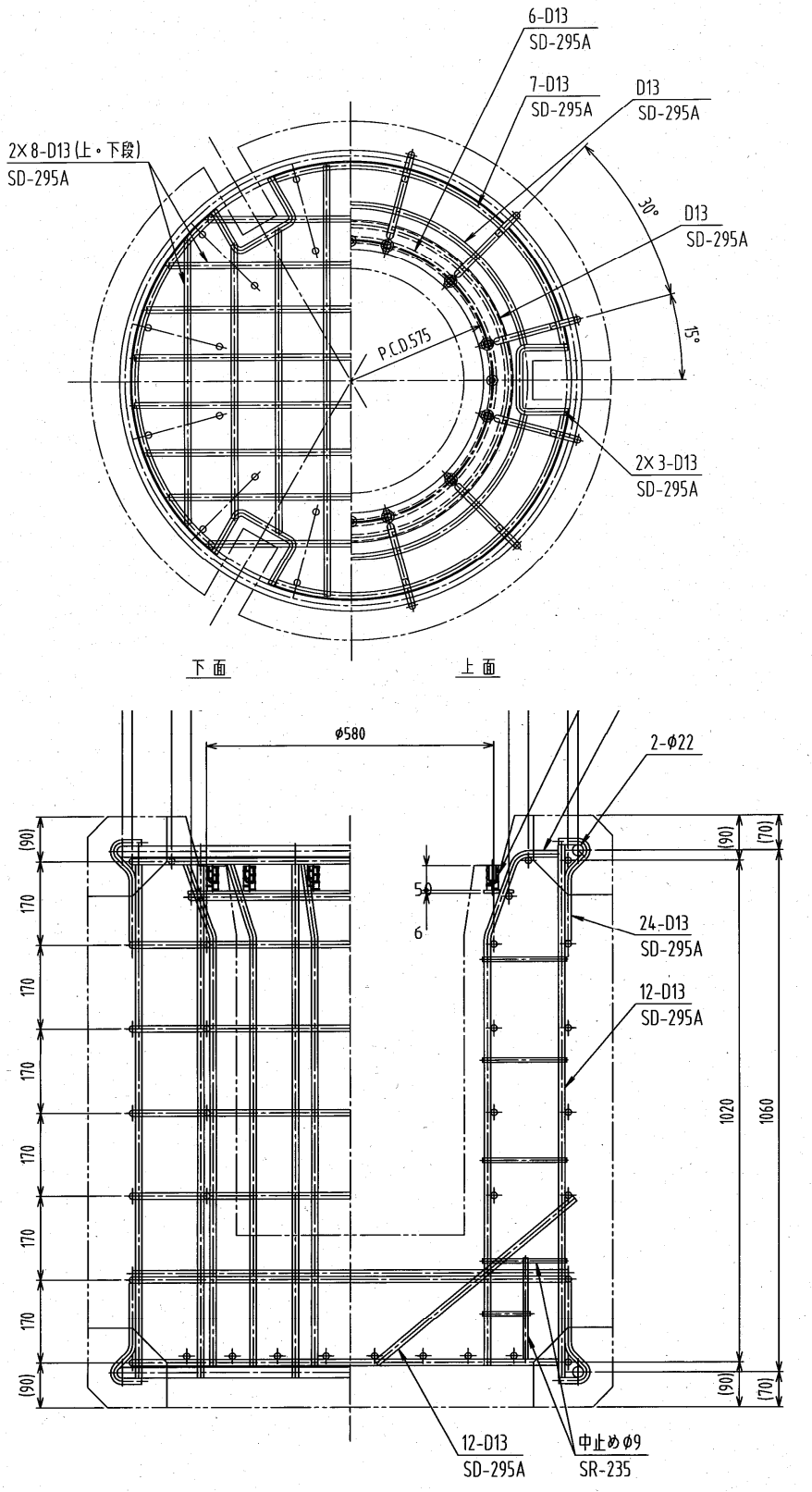

図 4.3.1(1) 蓋式コンクリート容器の配筋図

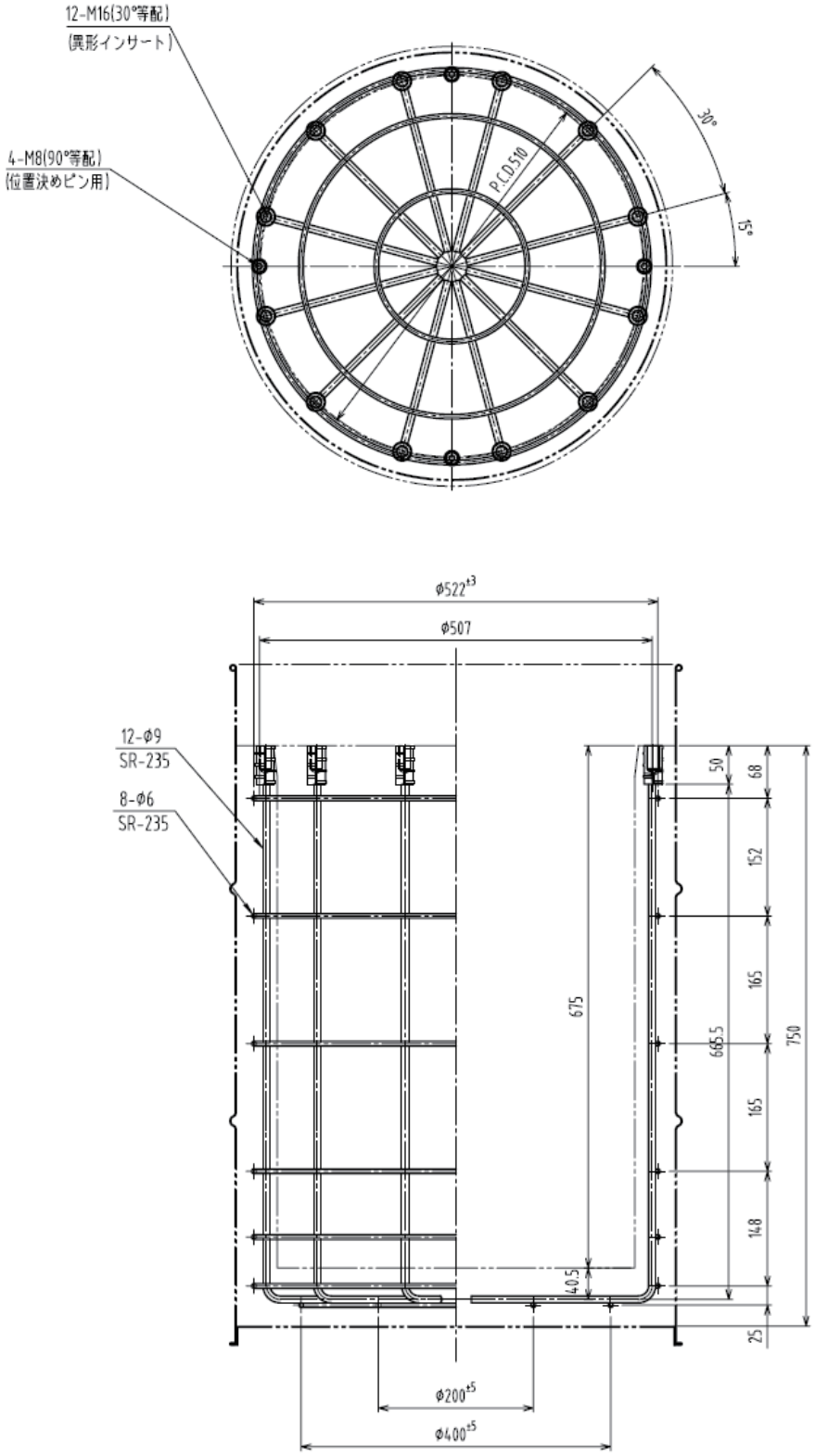

図 4.3.1(2) 蓋式コンクリート内巻ドラム缶の配筋図

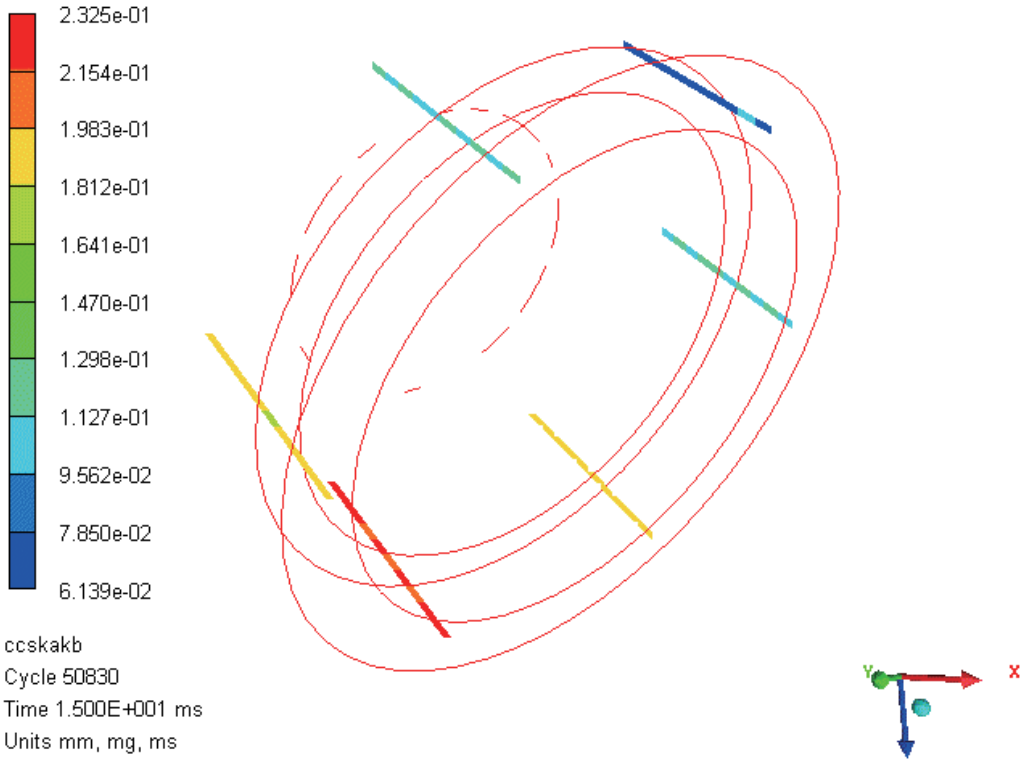

図 5.1(1) ボルトの相当塑性ひずみ分布（ボルト 6 本ケース）

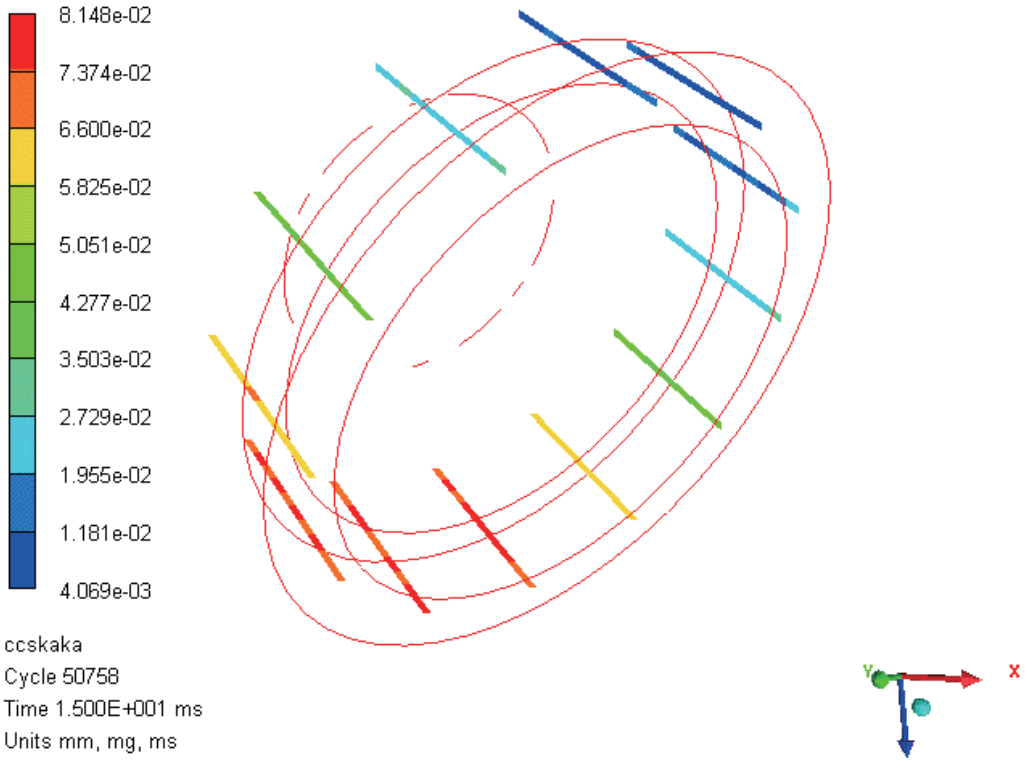

図 5.1(2) ボルトの相当塑性ひずみ分布（ボルト 12 本ケース）

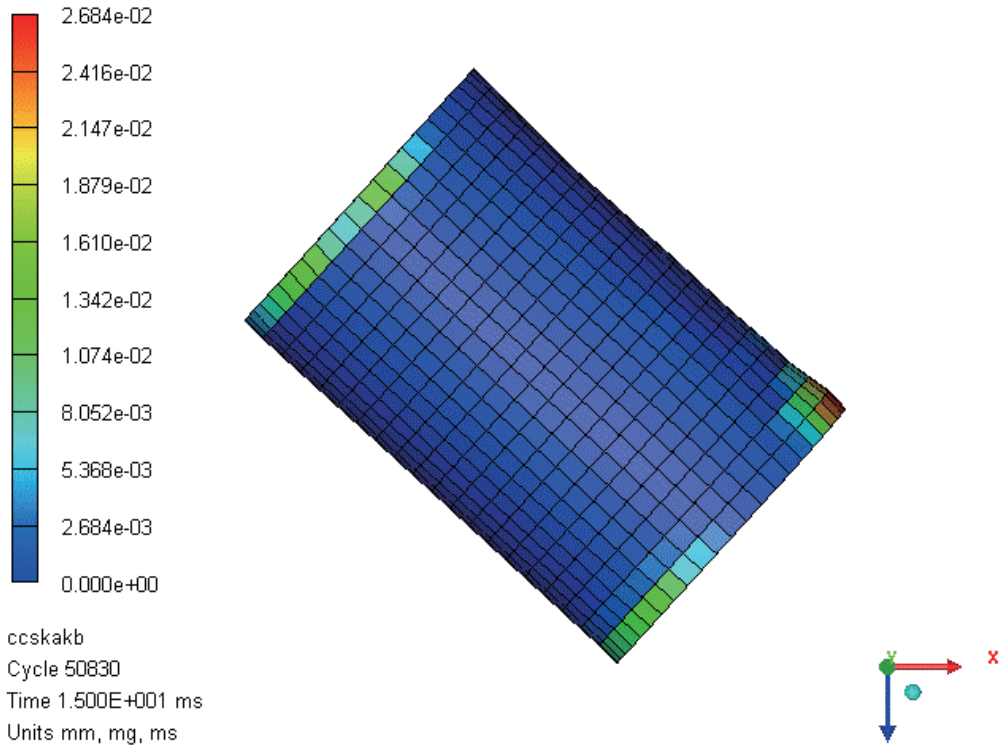

図 5.2(1) 相当塑性ひずみ分布（封入容器胴部、ボルト 6 本ケース）

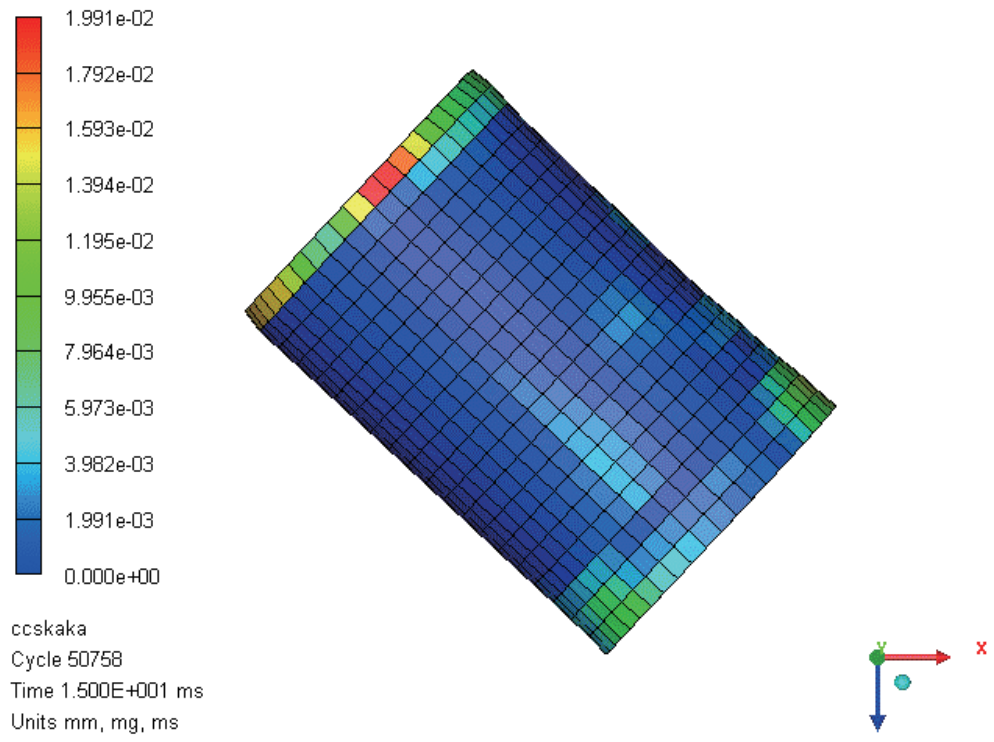

図 5.2(2) 相当塑性ひずみ分布（封入容器胴部、ボルト 12 本ケース）

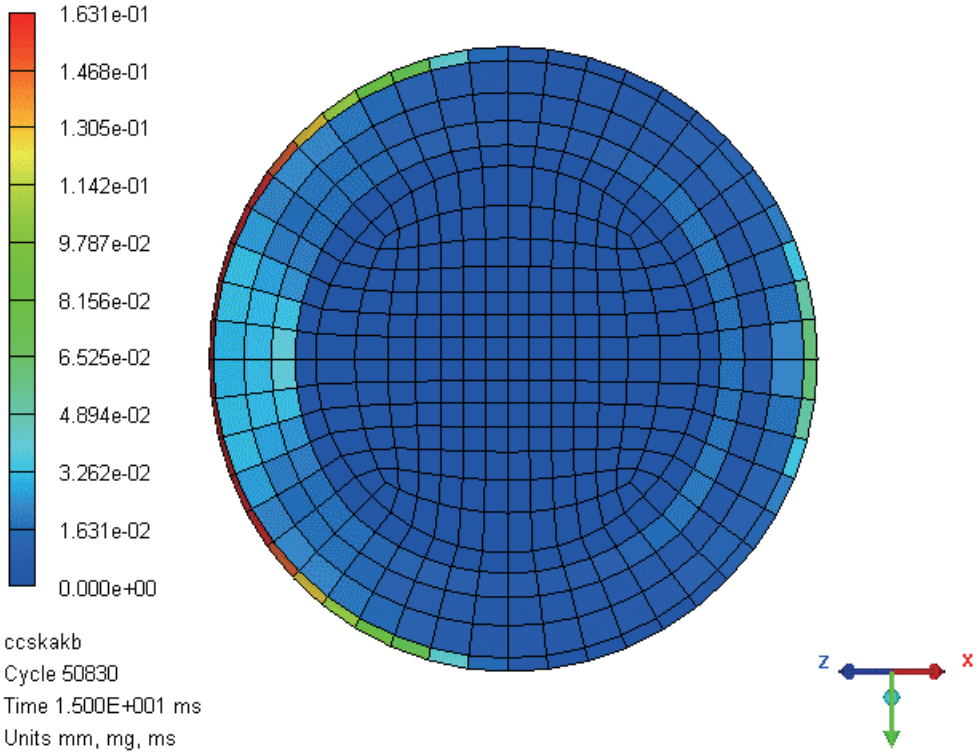

図 5.2(3) 相当塑性ひずみ分布（封入容器蓋、ボルト 6 本ケース）

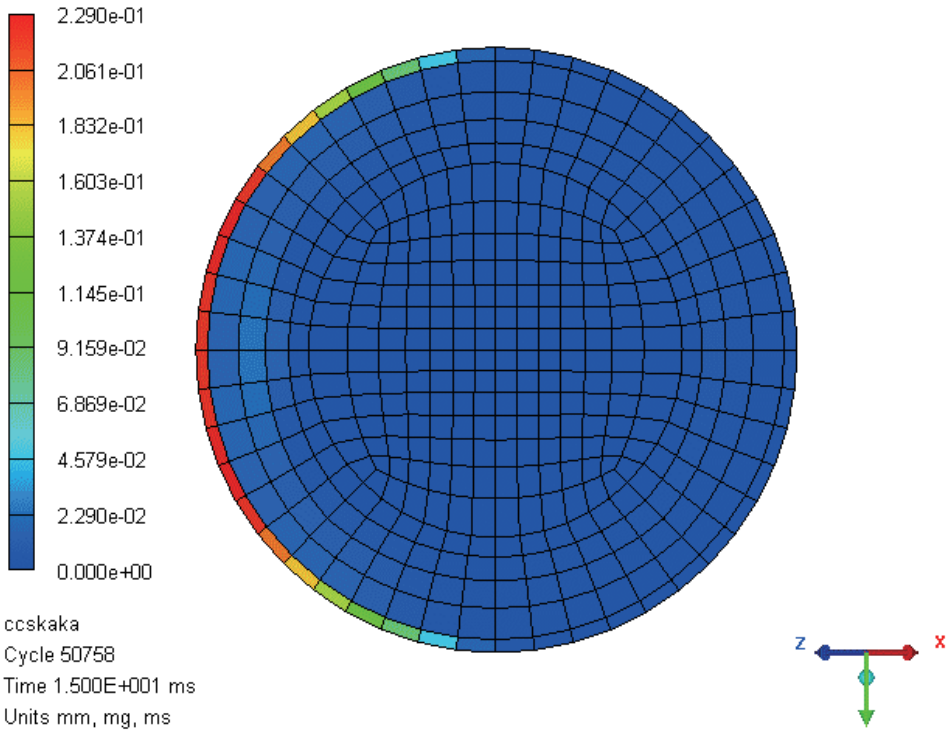

図 5.2(4) 相当塑性ひずみ分布（封入容器蓋、ボルト 12 本ケース）

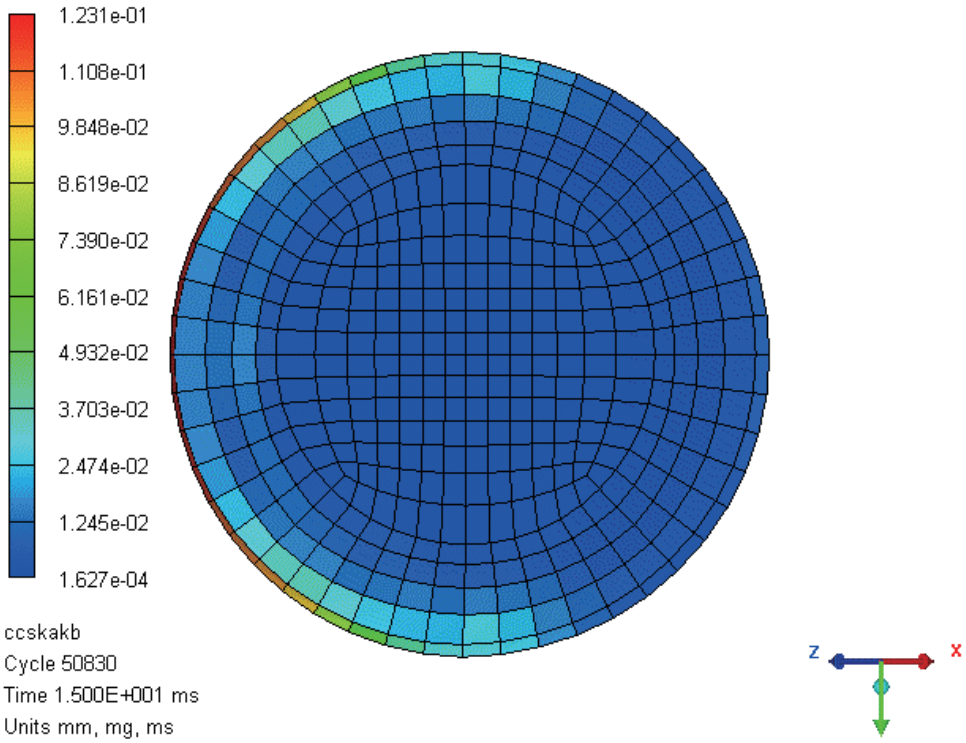

図 5.2(5) 相当塑性ひずみ分布（封入容器底、ボルト 6 本ケース）

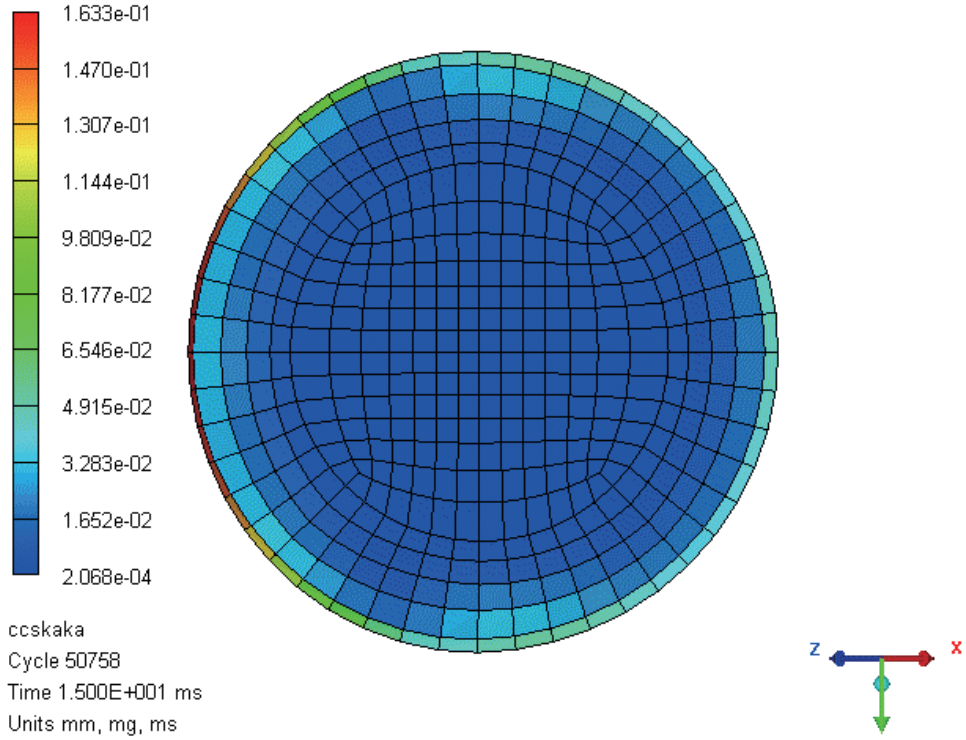

図 5.2(6) 相当塑性ひずみ分布（封入容器底、ボルト 12 本ケース）

写真 1 蓋式コンクリート容器の落下試験

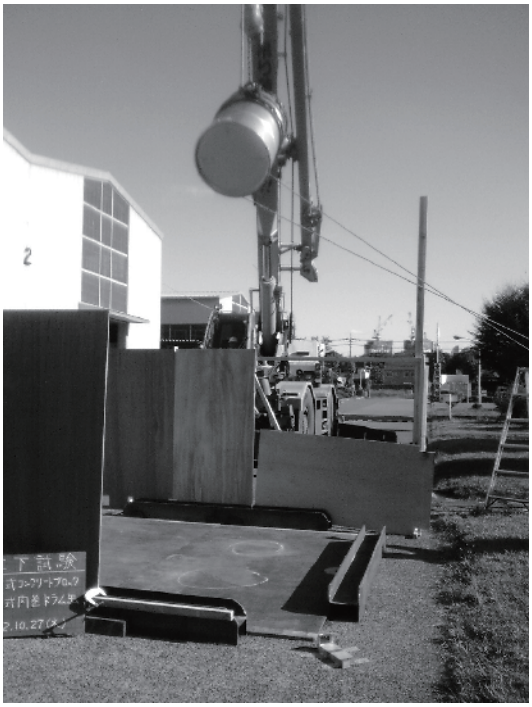

写真 2 蓋式コンクリート内巻ドラム缶の落下試験

写真 3 落下試験後の蓋式コンクリート容器

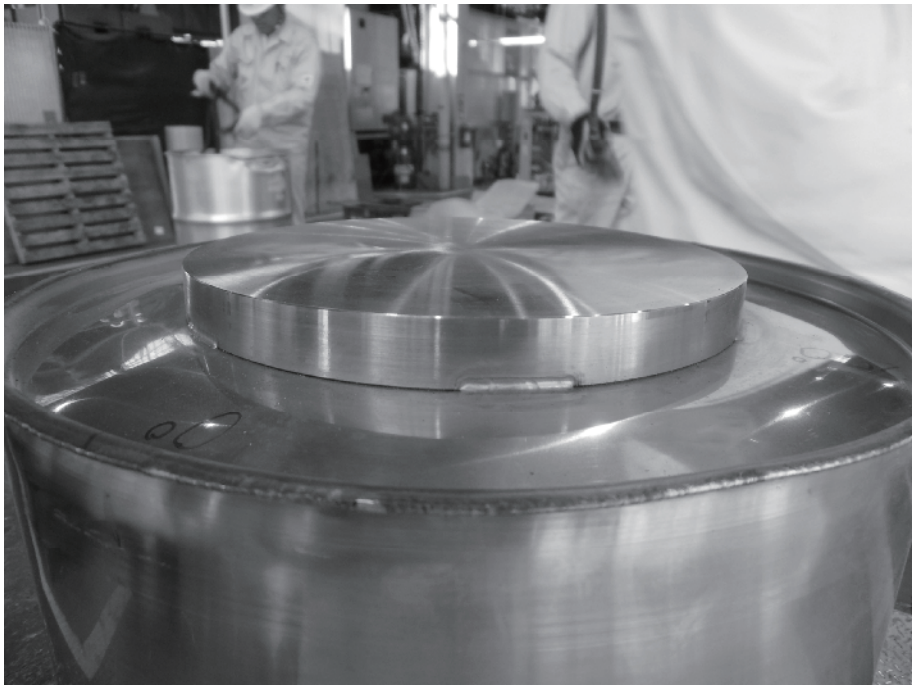

写真 4 落下試験後の蓋式コンクリート容器内の封入容器

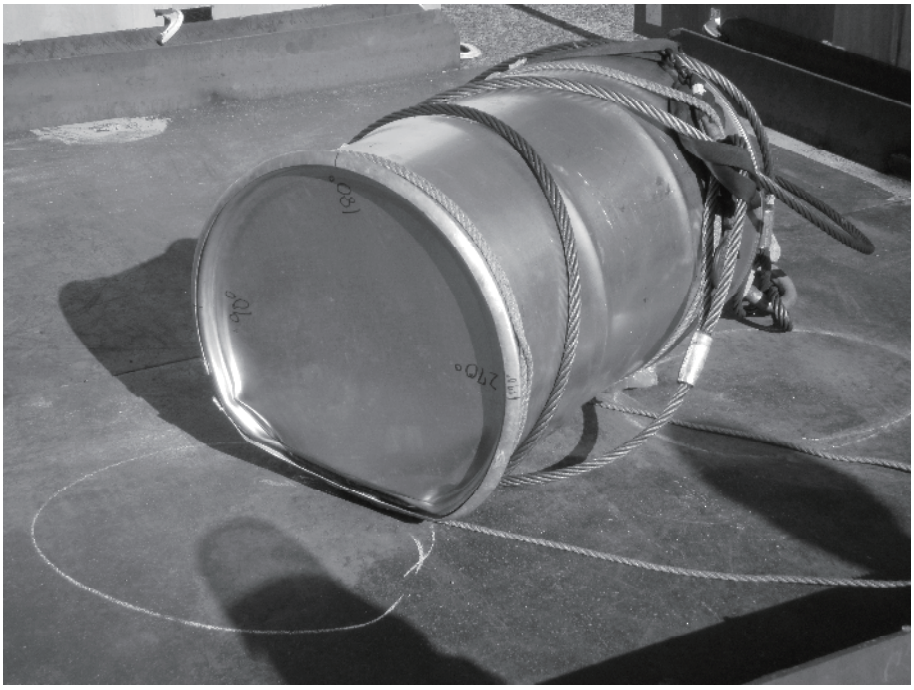

写真 5 落下試験後の蓋式コンクリート内巻ドラム缶

写真 6 落下試験後の蓋式コンクリート内巻ドラム缶内の封入容器

This is a blank page.

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	立法メートル	m^3
速さ，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
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
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
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度(a)，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率(b)	（数字の） 1	1
比透磁率(b)	（数字の） 1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表される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(b)	rad	1 (b)	m/m
立体角	ステラジアン(b)	sr(c)	1 (b)	m^2/m^2
周波数	ヘルツ(d)	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		m kg s^{-2}
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	m^{-1} kg s^{-2}
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	m^2 kg s^{-2}
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	m^2 kg s^{-3}
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	m^2 kg 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 s^{-3} A^{-2}
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	m^2 kg s^{-2} A^{-1}
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	kg s^{-2} A^{-1}
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m^2 kg s^{-2} A^{-2}
セルシウス温度	セルシウス度(e)	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	m^{-2} cd
放射性核種の放射能(f)	ベクレル(d)	Bq		s^{-1}
吸収線量，比エネルギー分与，カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m^2 s^{-2}
線量当量，周辺線量当量，方向性線量当量，個人線量当量	シーベルト(g)	Sv	J/kg	m^2 s^{-2}
酸素活性	カタール	kat		s^{-1} mol

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号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である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含む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
粘度	パスカル秒	Pa s	m^{-1} kg s^{-1}
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m^2 kg s^{-2}
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s^{-2}
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m^{-1} s^{-1}=s^{-1}
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	m 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 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 s^{-2} K^{-1}
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m^2 s^{-2} K^{-1}
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m^2 s^{-2}
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg 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 s^{-2}
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s^{-3} A^{-1}
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	m^{-3} sA
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m^{-2} sA
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m^{-2} sA
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 kg s^{-2} A^{-2}
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m^2 kg s^{-2} mol^{-1}
モルエントロピー，モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	kg^{-1} sA
吸収線量率	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^4 m^{-2} kg s^{-3}=m^2 kg 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 s^{-3}=kg s^{-3}
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	m^{-3} s^{-1} mol

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６．SIに属さないが、SIと併用される単位

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=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L，l	$1L=11=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3$ kg

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、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 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	$1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	$1\ Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m$
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	$1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
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	$1\ St=1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	$1\ sb=1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	Gal	$1\ Gal=1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx=1G\ cm^2=10^{-8}Wb$
ガウス	G	$1\ G=1Mx\ cm^{-2}=10^{-4}T$
エルステッド(c)	Oe	1 Oe ≙ $(10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R=2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$
ガンマ	γ	$1\ γ=1\ nT=10\text{-}9T$
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー） 4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	$1\ μ=1μm=10^{-6}m$

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています