



研究用原子炉の JRF-90Y-950K 型 核燃料輸送物の臨界解析

—棒上傾斜落下時の変形量を想定—

Criticality Analyses of the JRF-90Y-950K Package for Research Reactors
- Under Consideration of Deformation for Oblique Drops onto a Bar -

荒木 正明 加藤 友章 新居 昌至

Masaaki ARAKI, Tomoaki KATO and Masaji ARAI

東海研究開発センター
原子力科学研究所
研究炉加速器管理部

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center

June 2010

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, 2010

研究用原子炉の JRF-90Y-950K 型核燃料輸送物の臨界解析 —棒上傾斜落下時の変形量を想定—

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 研究炉加速器管理部
荒木 正明、加藤 友章、新居 昌至

(2010年3月31日 受理)

研究用原子炉 JRR-3 は、低濃縮ウランシリコンアルミニウム分散型合金を使用した軽水減速軽水冷却のプール型研究炉である。この燃料の輸送容器の仏国ライセンスの取得にあたり、棒上傾斜落下により輸送物の変形が生じても臨界安全性が保たれることを、仏国の審査当局から要求された。このため、JRR-3、JRR-4 及び JMTR の新燃料を輸送するための JRF-90Y-950K 型核燃料輸送物について臨界解析を実施した。解析の結果、棒上傾斜落下試験時の変形を考慮しても、臨界安全性は確保されることを確認した。

**Criticality Analyses of the JRF-90Y-950K Package for Research Reactors
- Under Consideration of Deformation for Oblique Drops onto a Bar -**

Masaaki ARAKI, Tomoaki KATO and Masaji ARAI

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator

Nuclear Science Research Institute

Tokai Research and Development Center

Japan Atomic Energy Agency

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 31, 2010)

Research reactor JRR-3 is a light water moderated and cooled pool type research reactor using low enriched uranium-silicon-aluminum-dispersion-type fuel. French Competent Authority (FCA) required that the criticality safety of the JRF-90Y-950K package is maintained even if it is deformed under oblique drops onto a bar. Criticality analyses of the JRF-90Y-950K package were carried out for the transport of JRR-3, JRR-4 or JMTR fuel. The results show that criticality safety is kept even if it is deformed under oblique drops onto a bar.

Keywords: Criticality Analysis, JRF-90Y-950K, Oblique Drop onto a Bar

目 次

1. 緒言 -----	1
2. JRF-90Y-950K 型核燃料輸送物の概要 -----	1
3. 解析手法 -----	2
3.1 概要 -----	2
3.2 計算コード -----	2
3.3 解析対象の燃料要素 -----	2
3.4 燃料要素の解析モデル -----	3
3.5 燃料要素の梱包 -----	3
3.6 輸送容器へ装荷する燃料体数 -----	3
3.7 輸送物の解析モデル -----	3
3.8 輸送物の配列 -----	4
3.9 水密度 -----	4
3.10 解析で使用する各領域の組成 -----	4
4. 解析結果 -----	5
4.1 ポリエチレン袋内部の水密度による k_{eff} への影響 -----	5
4.2 ポリエチレン袋外部の水密度による k_{eff} への影響 -----	5
4.3 ポリエチレン袋の位置による k_{eff} への影響 -----	5
5. 結言 -----	6
謝辞 -----	6
参考文献 -----	7
付録 A 外運搬規則に定める技術上の基準 -----	26
付録 B 棒上傾斜落下による変形を考慮しない臨界解析結果 -----	29

Contents

1. Introduction -----	1
2. General Description of JRF-90Y-950K package -----	1
3. Analysis Methods -----	2
3.1 Introduction -----	2
3.2 Calculation code -----	2
3.3 Fuel element used in the analysis -----	2
3.4 Analysis model of fuel element -----	3
3.5 Packing of fuel element -----	3
3.6 The number of fuel element loaded to the packaging -----	3
3.7 Analysis model of package -----	3
3.8 Array of package -----	4
3.9 Water density -----	4
3.10 Composition of each region used in the analysis -----	4
4. Result of analysis -----	5
4.1 Influence of water density inside of polyethylene bag on k_{eff} -----	5
4.2 Influence on of water density outside of polyethylene bag k_{eff} -----	5
4.3 Influence of the location polyethylene bag on k_{eff} -----	5
5. Conclusion -----	6
Acknowledgements -----	6
Reference -----	7
Appendix A The technical standards prescribed by the ordinance of shipment of nuclear fuel material outside of the factory -----	26
Appendix B Result of analysis without the deformation under an oblique drop -----	29

1. 緒言

JRR-3 は、燃料に低濃縮ウランシリコンアルミニウム分散型合金を用いた、最高熱出力約 20MW の軽水減速軽水冷却スイミングプール型研究用原子炉である。燃料要素は、標準型燃料要素とフォロワ型燃料要素の二種類があり、仏国又は米国の燃料加工会社で製作し、JRF-90Y-950K 型核燃料輸送容器に収納し JRR-3 まで輸送している。輸送には、燃料が通過する国のライセンスが必要となるため、日本、仏国及び米国の輸送ライセンスを取得している。

JRF-90Y-950K 型核燃料輸送物について、2007 年 12 月 12 日付けで仏国のライセンスを取得したが、その際に、仏国審査当局から次回のライセンス取得までに回答すべき三つの要求事項に関する書簡を受け取った。一つ目は、棒上 1m から斜めに落下した場合の機械的影響についての検討及び落下による輸送物の変形を考慮した臨界解析を実施することである。二つ目は、JRF-90Y-950K 型核燃料輸送物に使用されている緩衝材の IAEA 輸送規則(2005 年版、TS-R-1、以下同じ。) で要求される最低温度及び最高温度における機械的物性を示すことである。三つ目が、同規則で要求される最高温度における 9m 落下試験時の輸送物の機械的挙動に関するものである。

仏国審査当局からの一つ目の要求事項である棒上傾斜落下に関して回答するためには、当該落下における変形量を想定した臨界解析を行うことが必要である。本報告書は、JRF-90Y-950K 型核燃料輸送物の仏国ライセンス取得のために実施し、仏国審査当局に回答した臨界解析の結果について述べたものである。なお、仏国審査当局からの三つの要求事項について回答を行い、2010 年 2 月 8 日付けで仏国ライセンスを取得した。

2. JRF-90Y-950K 型核燃料輸送物の概要

本輸送容器は、原子力科学研究所の JRR-3 及び JRR-4 並びに大洗研究開発センターの JMTR に装荷する新燃料要素を、燃料加工会社の工場から各々の原子炉施設まで輸送するためのものである。なお、日本及び米国のライセンスでは大洗研究開発センター JMTRC で低照射された燃料の輸送についても含まれているが、仏国との間で輸送はしないため、JMTRC 燃料については本報告に含めない。

本輸送物の概念図を Fig.2.1 に、主要諸元を Table.2.1 に、燃料要素の主要な仕様を Table.2.2 に示す。

本輸送容器に収納する燃料には、低濃縮ウラン燃料 (LEU 燃料)、中濃縮ウラン燃料 (MEU 燃料) 及び高濃縮ウラン燃料 (HEU 燃料) があり、一つの輸送容器に 8 体まで収納するものとする。

燃料芯材は、HEU 燃料ではウランアルミニウム合金、MEU 燃料ではウランアルミニウム分散型合金、LEU 燃料ではウランアルミニウム分散型合金又はウランシリコンアルミニウム分散型合金である。燃料要素は、ポリウレタンフォーム等の緩衝材で包装し、ポリエチレン等の有機高分子化合物等の袋に入れ、輸送容器の燃料バスケットに収納される。その際、燃料要素の上部及び下部にシリコーンゴム製のスペーサを挿入し、輸送時の衝撃を吸収すると

ともに、長さを調整し燃料要素を固定する。

3. 解析手法

3.1 概要

臨界解析は、本輸送物が「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」（以下「外運搬規則」という。）及び「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」（以下「外運搬告示」という。）に基づき、BU型核分裂性輸送物としての技術上の基準に適合することを示すために行う。

なお、外運搬規則及び外運搬告示に規定される外運搬に関する技術上の基準は、IAEA 輸送規則を取り入れているため、同基準に適合していることと IAEA 輸送規則を満足していることは同等である。

外運搬規則では、核分裂性物質に係る核燃料輸送物の技術上の基準として、次のいずれの場合にも臨界に達しないことが規定されている。

- ①通常輸送時の孤立系
- ②核分裂性輸送物に係る一般の試験条件下の孤立系
- ③核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下の孤立系
- ④核分裂性輸送物に係る一般の試験条件下の配列系、かつ、輸送制限個数の 5 倍に相当する個数を積載した場合
- ⑤核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下の配列系、かつ、輸送制限個数の 2 倍に相当する個数を積載した場合

本臨界解析では、上記を全て包含する条件として、核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下の配列系、かつ、輸送制限個数の 5 倍の個数を積載した場合を設定し、その場合でも臨界に達しないことを示す。未臨界性は、実効増倍率 k_{eff} が 0.95 を超えないことをもって確認する。

なお、本臨界解析で考慮する棒上 1m 高さからの斜め落下は、核分裂性輸送物に係る特別の試験条件のうちの一つである。

3.2 計算コード

本解析においては、JRF-90Y-950K 型核燃料輸送物設計変更承認申請書（平成 14 年 1 月 15 日申請、平成 14 年 2 月 25 日承認。以下同じ。）における臨界解析で使用しているものと同じの計算コードを使用して仏国審査当局へ説明をする必要があることから、SCALE コードシステムに含まれる 3 次元モンテカルロ法臨界解析コード KENO V.a^[1]を使用した。

3.3 解析対象の燃料要素

Table.2.2 に示すとおり、本輸送容器で輸送される燃料要素のうち、燃料要素 1 体あたりの U-235 含有量が最大のものは「JRR-3 標準型燃料要素」である。したがって、解析対象は JRR-3 標準型燃料要素とした。

JRR-3 標準型燃料要素は 21 枚の燃料板から構成されている。標準型燃料要素及びフオロワ型燃料要素共に、燃料板両側の側板に可燃性吸収体（カドミウムワイヤ）が組み込まれている。燃料要素及び燃料板の主要仕様を Table.3.1 に、燃料要素外観を Fig.3.1 に示す。

3.4 燃料要素の解析モデル

燃料要素の解析モデルの断面を Fig.3.2 に示す。JRR-3 標準型燃料要素には、可燃性毒物としてカドミウムワイヤが組み込まれているが、本解析では、カドミウムワイヤの存在を無視し、臨界計算上における安全側の解析とした。また、軸方向に関しては、燃料芯材の高さ分だけモデル化し、燃料板の上下端、ハンドル、ノズル等は安全側の解析として水に置換した。

3.5 燃料要素の梱包

燃料要素は、ポリスチレンシート又はポリウレタンフォームで梱包した後、ポリエチレン袋に収納する。ポリスチレンシート又はポリウレタンフォームの領域の厚さは、平均値の 2mm とした。また、ポリエチレン袋の領域の厚さは、ポリエチレン袋の厚さの最大値である 1mm とした。最大値を採用する理由は、ポリエチレンは水素密度が水よりも大きく、かつ、各燃料要素は減速不足で設計されているため、ポリエチレン領域を大きくした方が安全側の解析となるからである。ポリエチレン袋が燃料バスケット側に押し広げられた状態を模擬した計算モデルを Fig.3.3 に、ポリエチレン袋が燃料要素に密着した状態を模擬した計算モデルを Fig.3.4 に示す。

また、ポリスチレン及びポリウレタンの水素密度は水のそれに比べて少ないため、ポリスチレンシート又はポリウレタンフォームを水（水密度 = 1g/cm^3 に固定）に置換することにより臨界計算上の安全側の解析とした。

3.6 輸送容器へ装荷する燃料体数

本輸送容器は 1 輸送容器で 10 体の燃料要素の輸送が可能であるが、仏国からの輸送の場合、1 輸送容器あたり最大 8 体まで装荷するものとし、輸送容器内の燃料配置は中心部に 2 箇所の空隙を持たせる配置とする。なお、この 2 箇所のスペースには、中性子吸収材等は入れず、空隙のまま輸送を実施する。これは、JRF-90Y-950K 型核燃料輸送物設計変更承認申請書において収納物以外のものは入れないことになっているためである。

3.7 輸送物の解析モデル

本解析では、輸送容器の内部及び外部の空隙に水が侵入してくるものとし、孤立系及び配列系並びに通常輸送時（非損傷系）、核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件下（損傷系）についていずれが厳しいかを検討し、最も厳しい状態で解析を行う。

孤立系では 1 個、配列系では複数の核燃料輸送物を考慮するので、条件が厳しいのは配列系である。次に、配列系において、核分裂性輸送物に係る一般の試験条件と特別の試験条件では、特別の試験条件の方が輸送容器の変形量が大きく、配列間の距離が小さくなるため、中性子相互作用が大きく条件が厳しい。さらに、配列の個数は、輸送制限個数の 5 倍（一般

の試験条件)又は2倍(特別の試験条件)の配列を考慮することになっており、5倍の方が厳しい条件となる。

以上のことから、核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下の核燃料輸送物を輸送制限個数の5倍の個数配列し、評価することとした。

また、本解析では、仏国審査当局からの要求事項である棒上傾斜落下に対する検討のため、想定される輸送容器の最大限の損傷として、衝突面の内容器が一様に変形しバスケットに密着した場合を仮定した。このとき、燃料バスケットは変形せず燃料要素の形状は維持され燃料要素の間隔は変化しない。さらに、解析条件を厳しくするため、外容器、緩衝材及び断熱材は喪失したものとし、変形した内容器の配列を考えた。

解析を実施する輸送物のモデルを Fig.3.5 に示す。内容器は浸水するものとして、水密度 $0 \sim 1\text{g/cm}^3$ まで変化させ解析した。また、内容器内での中性子吸収を小さく見積もるため、内容器胴及び燃料バスケットの角形パイプ以外の構造物は無視した。

3.8 輸送物の配列

輸送物の配列は、輸送制限個数を12個とし、Fig.3.6 から Fig.3.8 に示すように30個の輸送物を2段積みとした60個の有限配列とした(パターン1～3)。パターン2及びパターン3の垂直方向のモデルは、パターン1と同じである。

輸送物の上部蓋厚さ及び下部蓋厚さは、それぞれ5.5cm、3.5cmとした。燃料要素の軸方向の位置に関しては、燃料芯材が内容器の中心部(容器上蓋及び底板から27.15cm)に位置するものとした。輸送物の周囲は、厚さ20cmの水による反射効果を考慮した。

燃料要素収納時には、燃料要素の上下端それぞれにシリコンゴムのスペーサを挿入するため、通常輸送時及び落下時に燃料要素が軸方向に移動することはない。

3.9 水密度

水密度については、ポリエチレン袋の内側とポリエチレン袋の外側とで別々のパラメータとして解析を実施した。ポリエチレン袋の内側は、燃料板間及び燃料要素周囲の領域を含み、ポリエチレン袋の外側は、輸送容器中心部の2箇所の空隙、内容器内部及び内容器外部を含む。なお、ポリスチレン及びポリウレタンシートは3.5で述べたように水密度 1g/cm^3 に固定した。

3.10 解析で使用する各領域の組成

解析で使用する各領域の組成は、JRF-90Y-950K型核燃料輸送物設計変更承認申請書記載値と同一とした。内容器、内蓋及び底板の組成を Table.3.2 に、燃料要素の組成を Table.3.3 に示す。ポリエチレン袋の組成は、実際の梱包で使用される低密度ポリエチレンシート(密度: $0.92[\text{g/cm}^3]$)を想定した。組成を Table.3.4 に示す。水領域については、水密度をパラメータとして解析を行った。水密度は、JRF-90Y-950K型核燃料輸送物設計変更承認申請書を参考に、0.00、0.01、0.02、0.10、0.20、0.40、0.60、0.80、 1.00g/cm^3 とした。各水密度に対する組成を Table.3.5 に示す。

4. 解析結果

4.1 ポリエチレン袋内部の水密度による k_{eff} への影響

ポリエチレン袋内部の水密度による影響を調べるために、ポリエチレン袋外部の水密度を 0g/cm^3 又は 1g/cm^3 で固定しポリエチレン袋内部の水密度を変化させる下記の2ケースについて解析を行った。

解析ケース1：

ポリスチレン又はポリウレタンシート 水置換 1g/cm^3 固定

ポリエチレン袋内部 水密度 $0\sim 1\text{g/cm}^3$ 変化

ポリエチレン袋外部 水密度 0g/cm^3 固定

(燃料要素の梱包状態は、Fig.3.3 の状態)

解析ケース2：

ポリスチレン又はポリウレタンシート 水置換 1g/cm^3 固定

ポリエチレン袋内部 水密度 $0\sim 1\text{g/cm}^3$ 変化

ポリエチレン袋外部 水密度 1g/cm^3 固定

(燃料要素の梱包状態は、Fig.3.3 の状態)

解析結果を Table.4.1(1)～Table.4.2(3)に示す。解析ケース1ではパターン1のポリエチレン袋内部の水密度が 1g/cm^3 のとき、解析ケース2ではパターン2のポリエチレン袋内部の水密度が 1g/cm^3 のとき、 $k_{\text{eff}} + 3\sigma$ は最大となった。したがって、ポリエチレン外部の水密度によらずポリエチレン袋内部の水密度が 1g/cm^3 のとき $k_{\text{eff}} + 3\sigma$ は最大となる。

4.2 ポリエチレン袋外部の水密度による k_{eff} への影響

前述のとおり、ポリエチレン袋内部の水密度が 1g/cm^3 のとき解析上厳しい結果となることが明らかになった。次に、ポリエチレン袋外部の水密度による影響を調べるために、ポリエチレン袋内部の水密度を 1g/cm^3 で固定しポリエチレン袋外部の水密度を変化させる下記のケースについて解析を行った。

解析ケース3：

ポリスチレン又はポリウレタンシート 水置換 1g/cm^3 固定

ポリエチレン袋内部 水密度 1g/cm^3 固定

ポリエチレン袋外部 水密度 $0\sim 1\text{g/cm}^3$ 変化

(燃料要素の梱包状態は、Fig.3.3 の状態)

解析結果を Table.4.3(1)～(3)に示す。パターン1のポリエチレン袋外部の水密度が 0g/cm^3 のとき $k_{\text{eff}} + 3\sigma$ は最大となった。

4.3 ポリエチレン袋の位置による k_{eff} への影響

ポリエチレン袋の位置による影響を調べるために、ポリエチレン袋が燃料バスケット側に

押し広げられた状態を模擬した計算モデルとして解析を実施した。4.1 に示すようにポリエチレン袋内部の水密度が 1g/cm^3 のとき $k_{\text{eff}} + 3\sigma$ は最大となることから、ポリエチレン内部の水密度は 1g/cm^3 に固定した。

解析ケース 4 :

ポリスチレン及びポリウレタンシート 水置換 1g/cm^3 固定

ポリエチレン袋内部 水密度 1g/cm^3 固定

ポリエチレン袋外部 水密度 $0\sim 1\text{g/cm}^3$ 変化

(燃料要素の梱包状態は、Fig.3.4 の状態)

解析結果を Table.4.4(1)~(3)に示す。パターン 1 のポリエチレン袋外部の水密度が 0g/cm^3 のとき $k_{\text{eff}} + 3\sigma$ は最大となった。

5. 結言

本報告書では、1m 高さからの棒上傾斜落下による JRF-90Y-950K 型核燃料輸送物について最大限想定し得る変形を考慮した臨界解析を実施した。解析では、燃料要素を梱包するポリエチレン袋内部及び外部の水密度（すなわち水素密度）の影響並びにポリエチレン袋の位置の影響を考慮した。その結果、実効増倍率は最大でも

$$k_{\text{eff}} + 3\sigma = 0.936 < 0.95$$

であることが確かめられた。したがって、棒上傾斜落下時の変形量を考慮した場合においても臨界安全性を確保できる。

今回の臨界解析では、輸送容器あたりの燃料要素の収納数が 8 体であり、日本及び米国のライセンスの 10 体に比べて少ないため、今後、10 体収納の場合の核分裂性輸送物に係る一般及び特別の試験条件における解析を行うことを検討したい。

謝 辞

本臨界解析にあたっては、トランスニュークリア株式会社の高橋伸一氏、戸栗大輔氏には多くの技術的な助言を頂いた。ここに深謝の意を表します。また、研究炉加速器管理部山下清信部長、JRR-3 管理課寺門義文課長には本報告書作成中励ましの言葉を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] L.M. Petrie and N.F. Landers: "KENO V.a: An Improved Monte Carlo Criticality Program with Supergrouping", NUREG/CR-0200Rev.6 (ORNL/NUREG/CSD-2/R6), Vol2, Section F11 (2000).

Table.2.1 JRF-90Y-950K 型核燃料輸送物の主要諸元

輸送物の種類	BU 型核分裂性輸送物
輸送制限個数	12
輸送制限配列	任意
輸送指数	1.9
臨界安全指数	4.2
輸送物の重量	950kg 以下
輸送容器の外径	840mm
輸送容器の高さ	1,800mm
主要材質 本体	ステンレス鋼、バルサ材、 硬質ポリウレタンフォーム
外容器蓋	ステンレス鋼、バルサ材、 硬質ポリウレタンフォーム
内容器蓋	ステンレス鋼、シリコンゴム
燃料バスケット	ステンレス鋼、シリコンゴム

Table.2.2 燃料要素の仕様

原子炉	JRR-3		JRR-4			JMTR		
	JRR-3 標準型 燃料要素	JRR-3 フォロウ 型燃料要素	JRR-4B 型 燃料要素	JRR-4L 型 燃料要素	JRR-4 燃料要素	JMTR 標準燃料要素	JMTR 燃料フォロウ	
形式	板状燃料							
装荷数(体/容器)	8 以下							
種類	LEU 燃料		HEU 燃料	LEU 燃料	LEU 燃料	MEU 燃料	LEU 燃料	
	濃縮度(wt%)		93.3	19.95	19.95	46.0	19.95	
	U-235 含有量(g/体)		170	230	210	320	425	280
	U 含有量(g/体)		183	1177	1075	728	2174	1433
放射能の量(GBq/容器)	29.8							
材質	ウランシリコン アルミニウム 分散型合金		ウラン アルミニウム 合金	ウラン アルミニウム 分散型合金	ウランシリコン アルミニウム 分散型合金	ウラン アルミニウム 分散型合金	ウランシリコン アルミニウム 分散型合金	
	アルミニウム合金							
	アルミニウム合金							
	カドミウム							
燃料重量	9.2	6.0	6.3	7.9	6.5	7.6	5.8	

Table.3.1 JRR-3 標準型燃料要素及び燃料板の主要仕様

燃料要素	全長 (mm)	1150
	断面 法 (mm)	76.2×76.2
燃料板	全長 (mm)	770
	幅 (mm)	71.4
	厚さ (mm)	1.27
	被 材の厚さ (mm)	0.38
	重量 (g/枚)	279
	U-235 量 (g/枚)	23.1
	芯材長さ (mm)	750
	芯材幅 (mm)	62.0
	芯材厚さ (mm)	0.51

Table.3.2 内容器、内蓋、底板の原子個数密度組成

(atoms/barn-cm)

核種	内容器、内蓋、底板
Cr	1.727×10^{-2}
Mn	1.721×10^{-3}
Fe	5.905×10^{-2}
Ni	7.449×10^{-3}

Table.3.3 燃料要素の原子個数密度組成

(atoms/barn-cm)

核種	燃料芯材	被 材、側板
Al	3.0820×10^{-2}	5.9922×10^{-2}
Fe		1.3387×10^{-4}
^{235}U	2.4952×10^{-3}	
^{238}U	9.8853×10^{-3}	

Table.3.4 ポリエチレンの原子個数密度組成

(atoms/barn-cm)

核種	Polyethylene
C	3.950×10^{-2}
H	7.900×10^{-2}

Table.3.5 各水密度の原子個数密度組成

(atoms/barn-cm)

水密度 [g/cm ³]	H	O
0.00	0	0
0.01	6.686×10^{-4}	3.343×10^{-4}
0.02	1.337×10^{-3}	6.686×10^{-4}
0.10	6.686×10^{-3}	3.343×10^{-3}
0.20	1.337×10^{-2}	6.686×10^{-3}
0.40	2.674×10^{-2}	1.337×10^{-2}
0.60	4.012×10^{-2}	2.006×10^{-2}
0.80	5.349×10^{-2}	2.674×10^{-2}
1.00	6.686×10^{-2}	3.343×10^{-2}

Table.4.1(1) 解析ケース 1 の結果 (パターン 1)

ポリエチレン 内部の水密度 [g/cm ³]	ポリエチレン 外部の水密度 [g/cm ³]	k_{eff}	σ	$k_{\text{eff}} + 3 \sigma$
0.00	<u>0.00</u>	0.490	0.001	0.494
0.01		0.501	0.001	0.505
0.02		0.513	0.001	0.518
0.10		0.588	0.001	0.592
0.20		0.663	0.001	0.668
0.40		0.768	0.002	0.774
0.60		0.842	0.002	0.846
0.80		0.890	0.002	0.896
<u>1.00</u>		0.924	0.002	<u>0.929</u>

Table.4.1(2) 解析ケース 1 の結果 (パターン 2)

ポリエチレン 内部の水密度 [g/cm ³]	ポリエチレン 外部の水密度 [g/cm ³]	k _{eff}	σ	k _{eff} +3 σ
0.00	0.00	0.482	0.001	0.486
0.01		0.493	0.001	0.498
0.02		0.507	0.001	0.512
0.10		0.581	0.001	0.585
0.20		0.657	0.001	0.661
0.40		0.764	0.002	0.769
0.60		0.837	0.002	0.843
0.80		0.888	0.002	0.893
1.00		0.924	0.001	0.928

Table.4.1(3) 解析ケース 1 の結果 (パターン 3)

ポリエチレン 内部の水密度 [g/cm ³]	ポリエチレン 外部の水密度 [g/cm ³]	k _{eff}	σ	k _{eff} +3 σ
0.00	0.00	0.464	0.001	0.468
0.01		0.472	0.001	0.476
0.02		0.484	0.001	0.488
0.10		0.561	0.001	0.565
0.20		0.632	0.001	0.636
0.40		0.742	0.002	0.747
0.60		0.816	0.002	0.821
0.80		0.870	0.002	0.875
1.00		0.908	0.002	0.913

Table.4.2(1) 解析ケース 2 の結果 (パターン 1)

ポリエチレン 内部の水密度 [g/cm ³]	ポリエチレン 外部の水密度 [g/cm ³]	k _{eff}	σ	k _{eff} +3 σ
0.00	1.00	0.428	0.001	0.432
0.01		0.428	0.001	0.432
0.02		0.433	0.001	0.437
0.10		0.448	0.001	0.452
0.20		0.473	0.002	0.478
0.40		0.521	0.001	0.526
0.60		0.570	0.002	0.574
0.80		0.612	0.002	0.618
1.00		0.661	0.002	0.666

Table.4.2(2) 解析ケース 2 の結果 (パターン 2)

ポリエチレン 内部の水密度 [g/cm ³]	ポリエチレン 外部の水密度 [g/cm ³]	k _{eff}	σ	k _{eff} +3 σ
0.00	<u>1.00</u>	0.442	0.001	0.446
0.01		0.443	0.001	0.448
0.02		0.446	0.001	0.451
0.10		0.473	0.002	0.478
0.20		0.498	0.001	0.502
0.40		0.564	0.002	0.570
0.60		0.624	0.001	0.628
0.80		0.677	0.002	0.683
<u>1.00</u>		0.722	0.002	<u>0.728</u>

Table.4.2(3) 解析ケース 2 の結果 (パターン 3)

ポリエチレン 内部の水密度 [g/cm ³]	ポリエチレン 外部の水密度 [g/cm ³]	k _{eff}	σ	k _{eff} +3 σ
0.00	1.00	0.425	0.001	0.428
0.01		0.427	0.001	0.431
0.02		0.431	0.001	0.435
0.10		0.448	0.001	0.452
0.20		0.471	0.002	0.476
0.40		0.521	0.002	0.526
0.60		0.570	0.002	0.575
0.80		0.616	0.001	0.621
1.00		0.659	0.001	0.664

Table.4.3(1) 解析ケース 3 の結果 (パターン 1)

ポリエチレン 内部の水密度 [g/cm ³]	ポリエチレン 外部の水密度 [g/cm ³]	k _{eff}	σ	k _{eff} +3 σ
<u>1.00</u>	<u>0.00</u>	0.924	0.002	<u>0.929</u>
	0.01	0.915	0.002	0.920
	0.02	0.913	0.002	0.919
	0.10	0.870	0.001	0.874
	0.20	0.832	0.002	0.839
	0.40	0.770	0.002	0.775
	0.60	0.722	0.001	0.726
	0.80	0.686	0.002	0.691
	1.00	0.661	0.002	0.666

Table.4.3(2) 解析ケース 3 の結果 (パターン 2)

ポリエチレン 内部の水密度 [g/cm ³]	ポリエチレン 外部の水密度 [g/cm ³]	k _{eff}	σ	k _{eff} +3 σ
1.00	0.00	0.924	0.001	0.928
	0.01	0.918	0.002	0.923
	0.02	0.912	0.001	0.917
	0.10	0.871	0.002	0.876
	0.20	0.839	0.002	0.844
	0.40	0.794	0.001	0.798
	0.60	0.762	0.002	0.767
	0.80	0.737	0.002	0.742
	1.00	0.722	0.002	0.728

Table.4.3(3) 解析ケース 3 の結果 (パターン 3)

ポリエチレン 内部の水密度 [g/cm ³]	ポリエチレン 外部の水密度 [g/cm ³]	k _{eff}	σ	k _{eff} +3 σ
1.00	0.00	0.908	0.002	0.913
	0.01	0.901	0.002	0.906
	0.02	0.890	0.002	0.896
	0.10	0.852	0.002	0.858
	0.20	0.808	0.001	0.813
	0.40	0.748	0.002	0.753
	0.60	0.710	0.002	0.716
	0.80	0.679	0.002	0.685
	1.00	0.659	0.001	0.664

Table.4.4(1) 解析ケース 4 の結果 (パターン 1)

ポリエチレン 内部の水密度 [g/cm ³]	ポリエチレン 外部の水密度 [g/cm ³]	k _{eff}	σ	k _{eff} +3 σ
<u>1.00</u>	<u>0.00</u>	0.932	0.001	<u>0.936</u>
	0.01	0.930	0.001	0.935
	0.02	0.917	0.001	0.922
	0.10	0.876	0.002	0.881
	0.20	0.838	0.002	0.843
	0.40	0.771	0.002	0.776
	0.60	0.718	0.002	0.724
	0.80	0.680	0.002	0.686
	1.00	0.655	0.001	0.660

Table.4.4(2) 解析ケース 4 の結果 (パターン 2)

ポリエチレン 内部の水密度 [g/cm ³]	ポリエチレン 外部の水密度 [g/cm ³]	k _{eff}	σ	k _{eff} +3 σ
1.00	0.00	0.931	0.001	0.935
	0.01	0.926	0.002	0.932
	0.02	0.916	0.002	0.921
	0.10	0.875	0.002	0.880
	0.20	0.841	0.002	0.846
	0.40	0.788	0.002	0.794
	0.60	0.757	0.002	0.762
	0.80	0.733	0.002	0.739
	1.00	0.723	0.002	0.729

Table.4.4(3) 解析ケース 4 の結果 (パターン 3)

ポリエチレン 内部の水密度 [g/cm ³]	ポリエチレン 外部の水密度 [g/cm ³]	k _{eff}	σ	k _{eff} +3σ
1.00	0.00	0.907	0.002	0.913
	0.01	0.905	0.002	0.912
	0.02	0.896	0.001	0.901
	0.10	0.846	0.001	0.851
	0.20	0.804	0.002	0.809
	0.40	0.745	0.002	0.750
	0.60	0.703	0.002	0.708
	0.80	0.676	0.002	0.680
	1.00	0.658	0.001	0.663

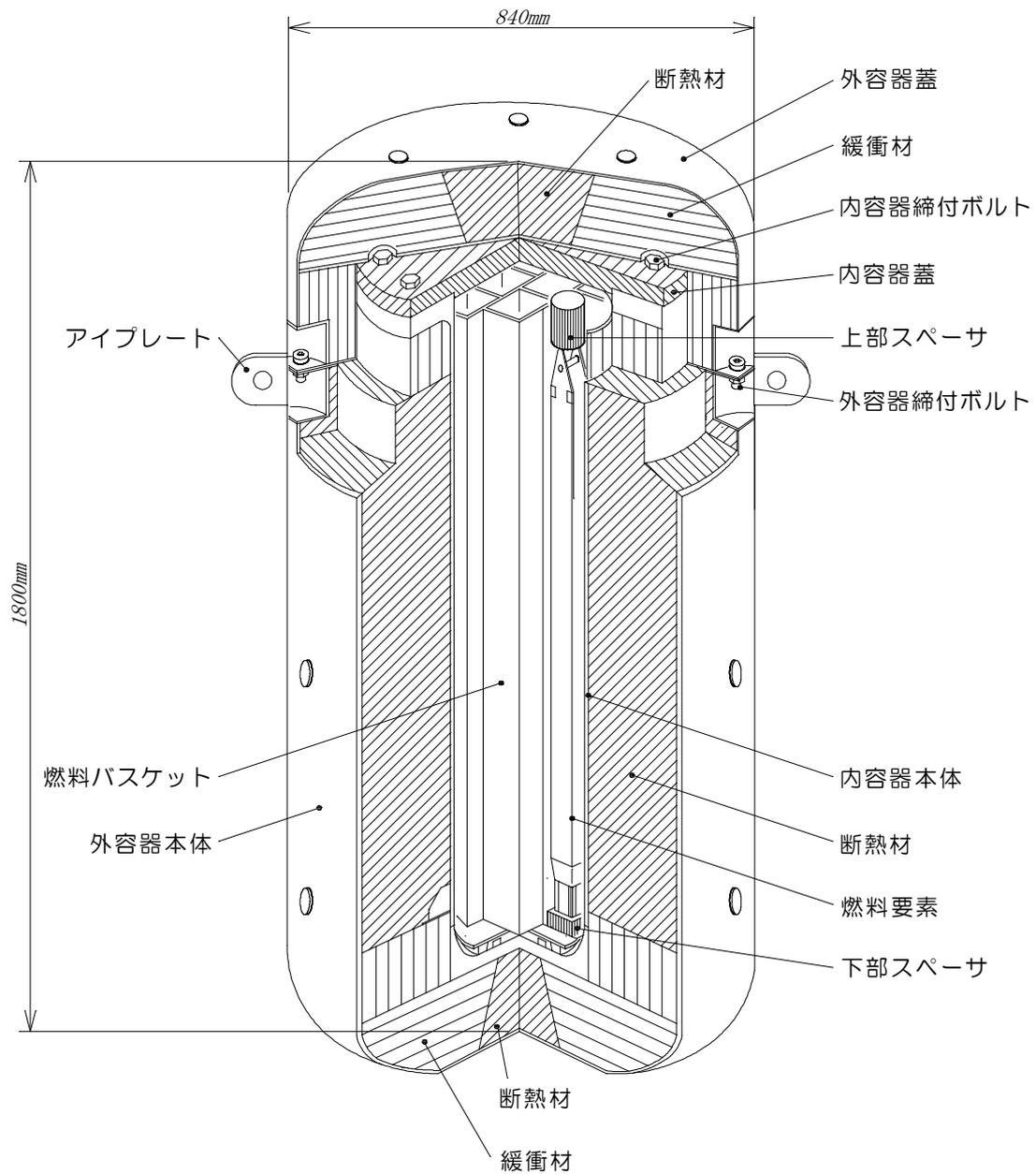
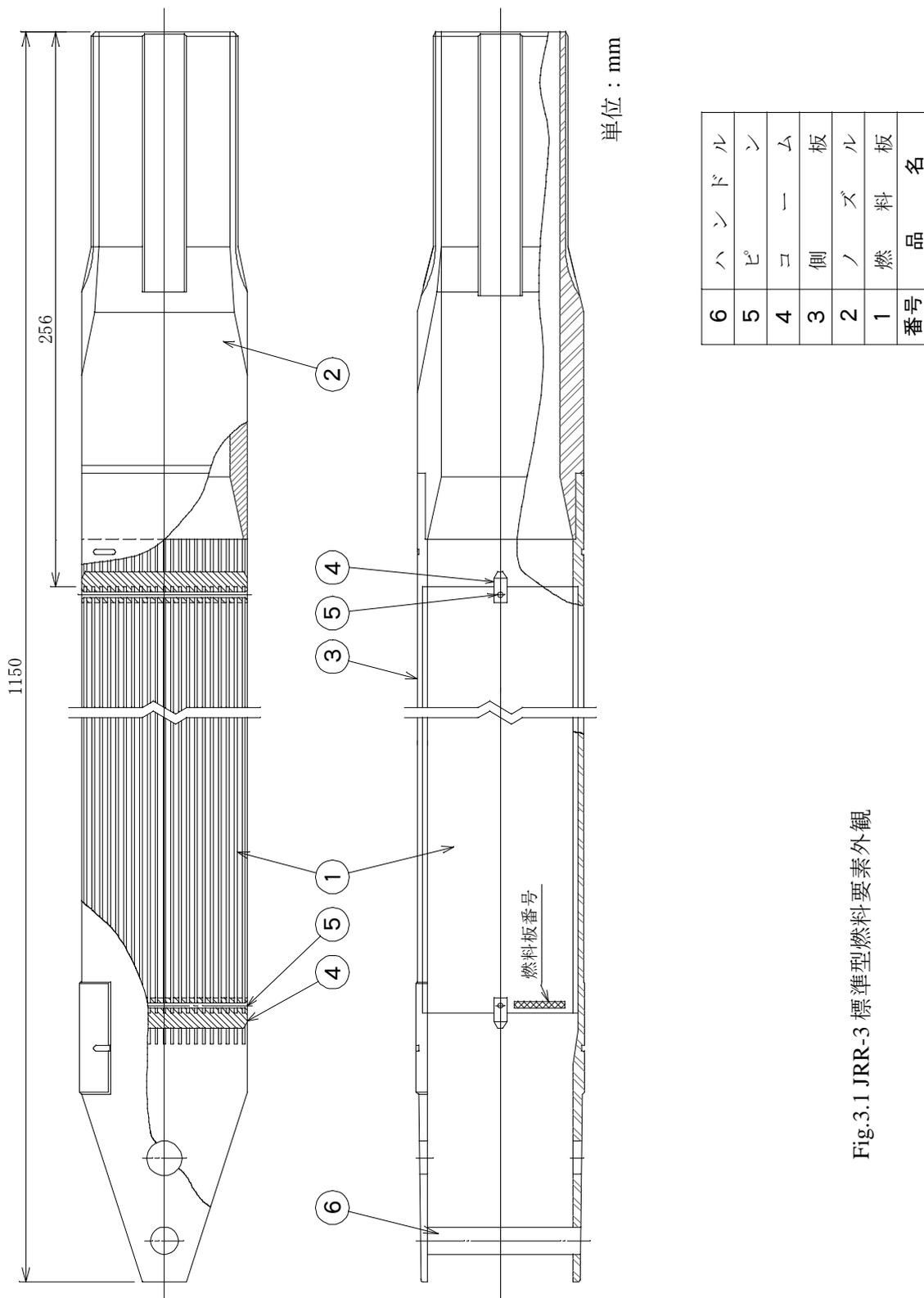


Fig.2.1 JRF-90Y-950K 型輸送物の概念図



番号	品名
6	ハンドル
5	ピコ
4	コーム
3	側板
2	ノズル
1	燃料板

Fig.3.1 JRR-3 標準型燃料要素外観

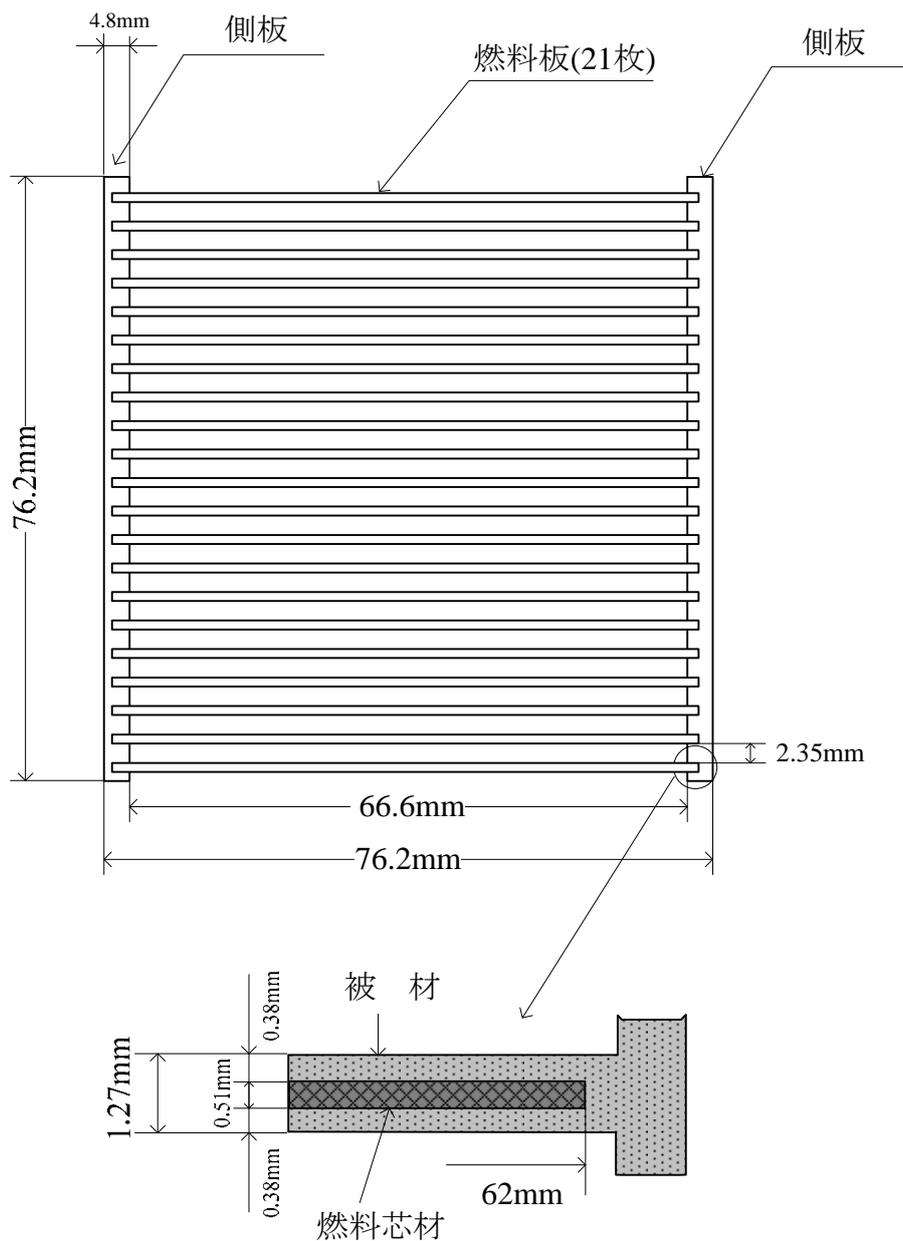


Fig.3.2 燃料要素解析モデル (断面)

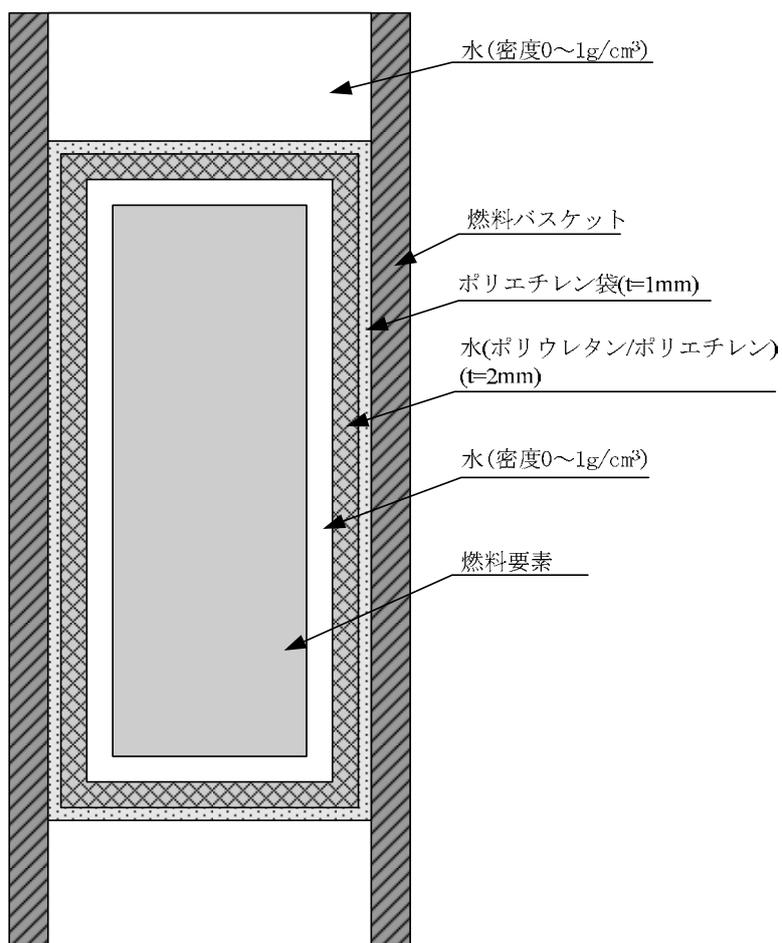
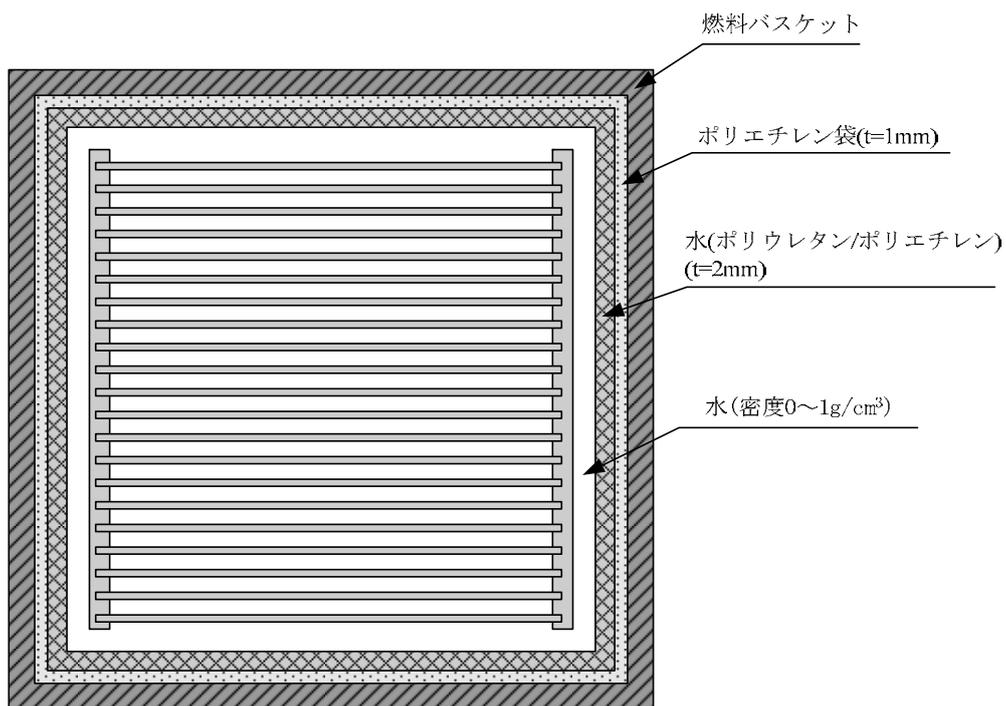


Fig.3.3 燃料要素の梱包状態（梱包材が燃料バスケットに押し広げられた状態）

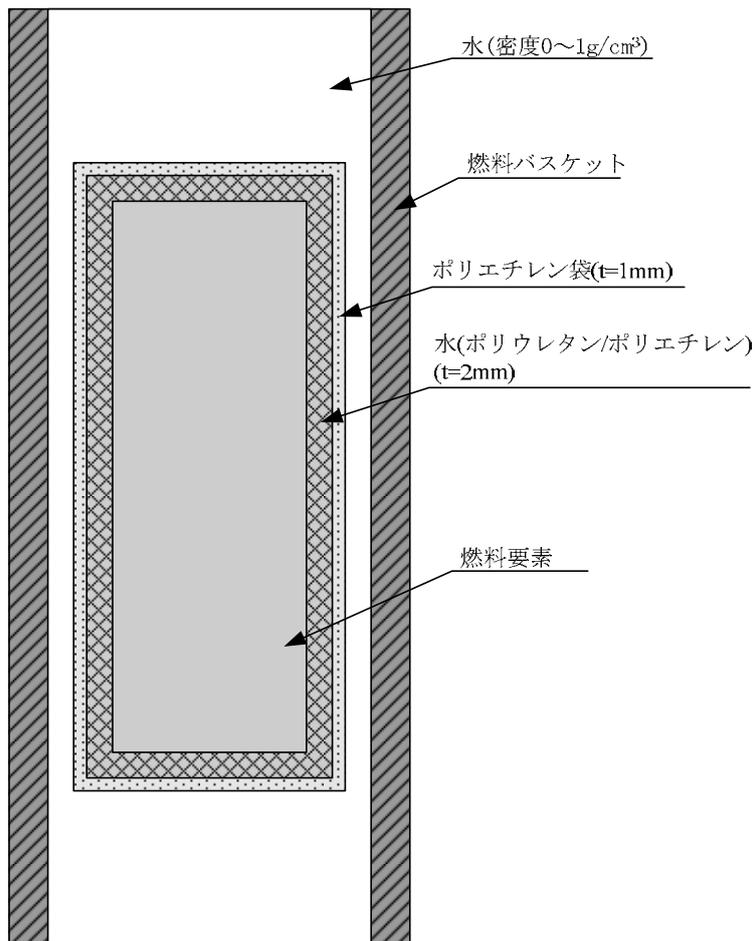
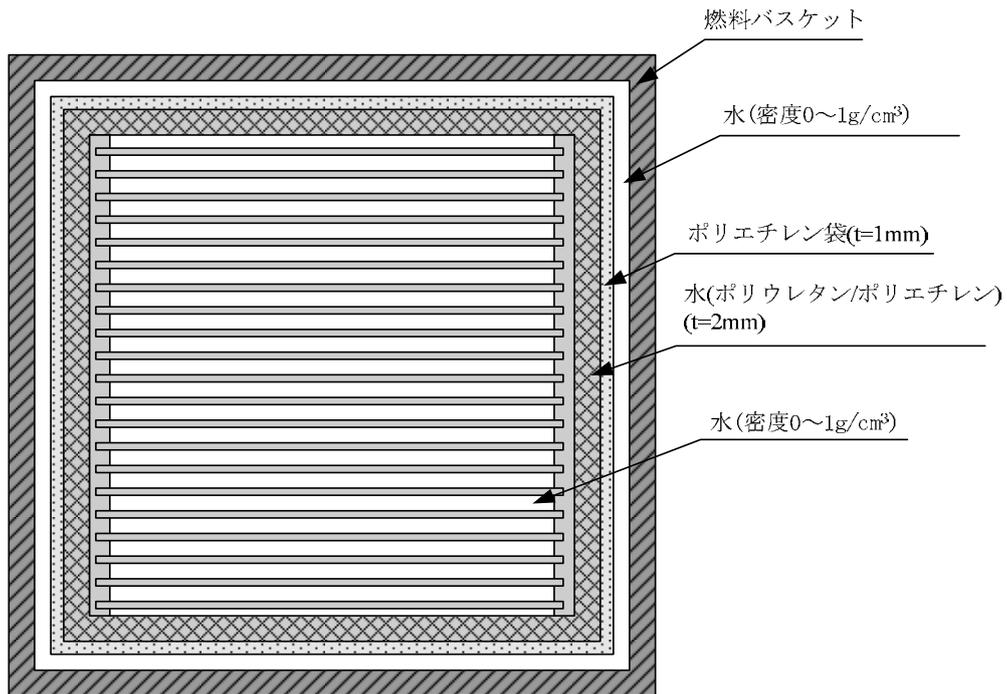
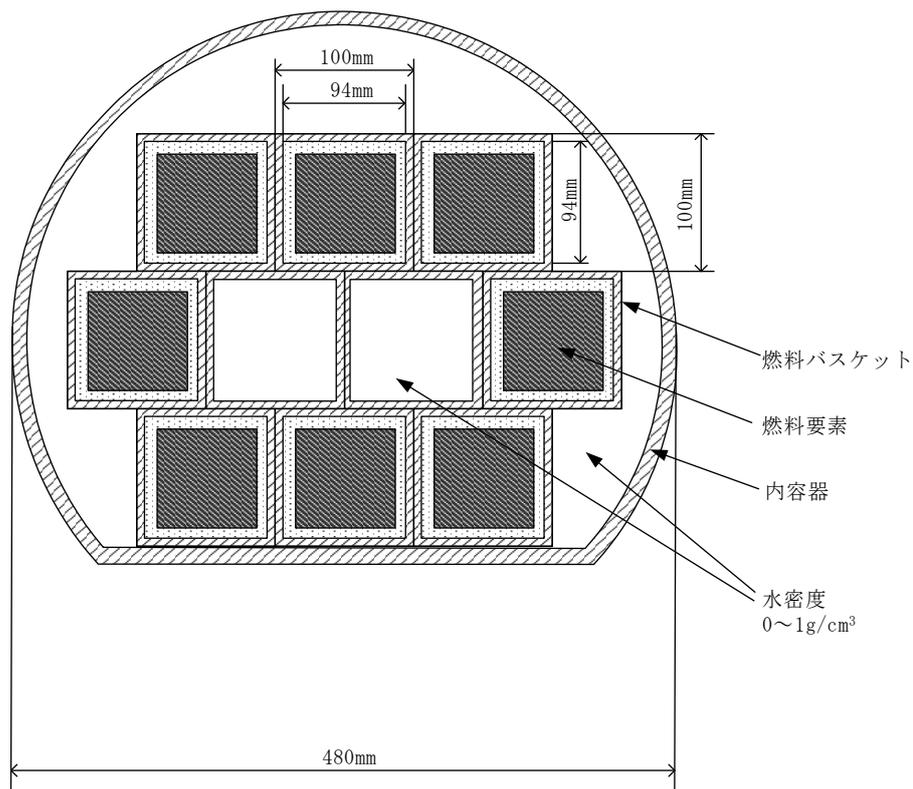
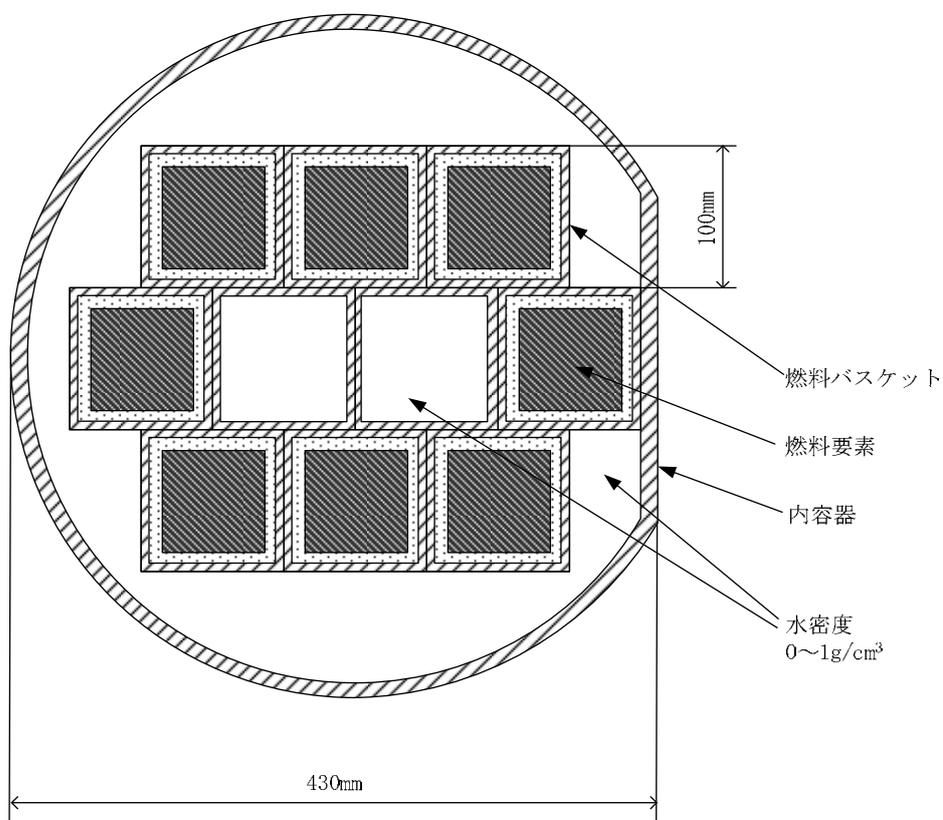


Fig.3.4 燃料要素の梱包状態 (梱包材が燃料要素に密着した状態)

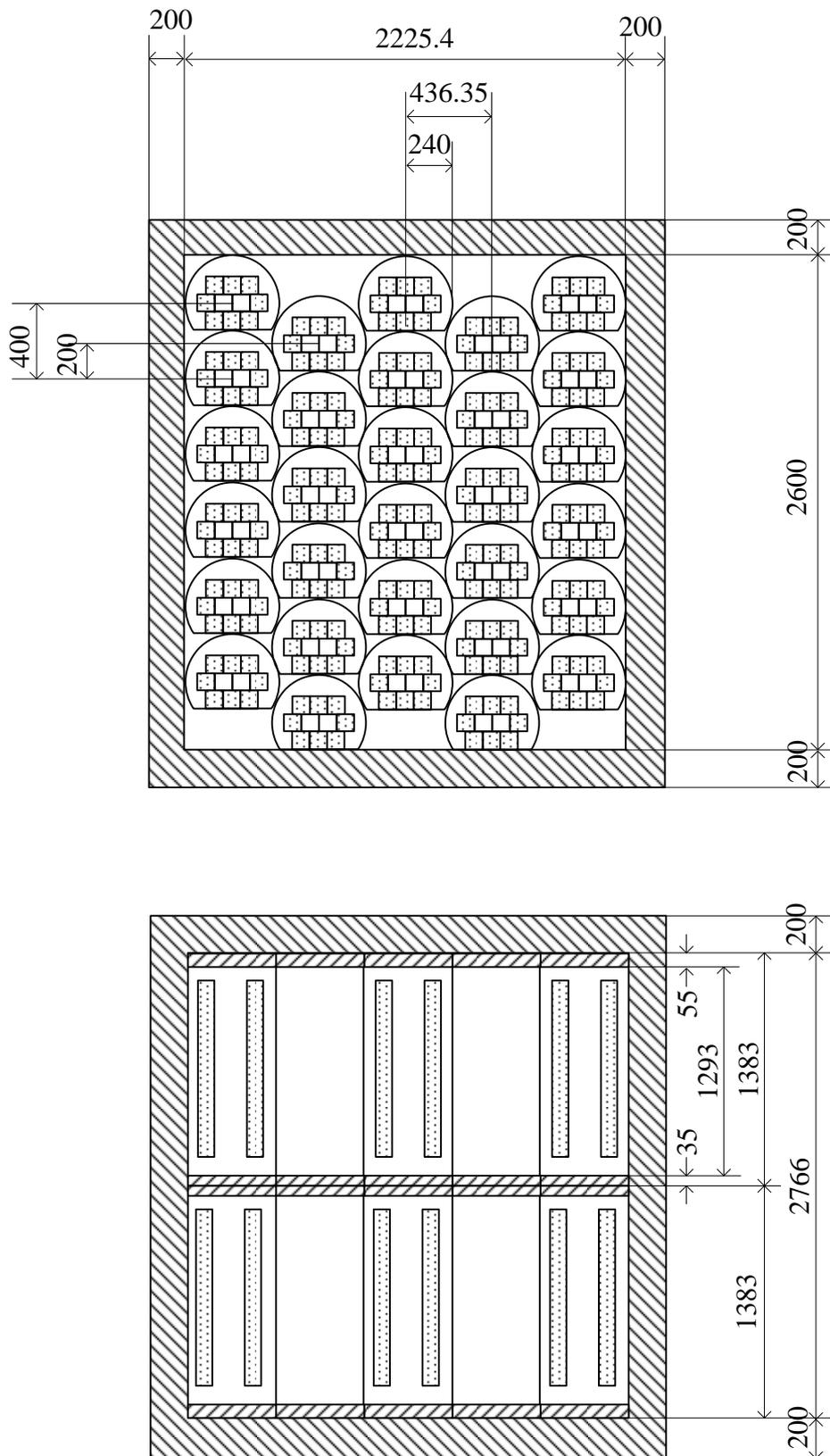


変形量：大



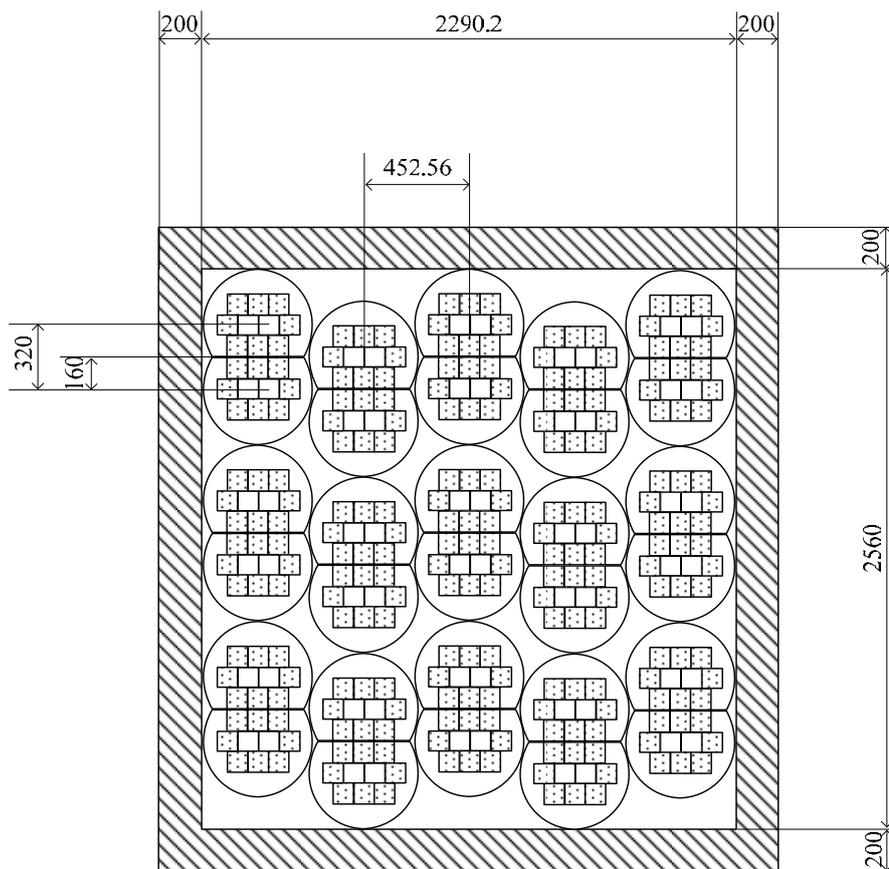
変形量：小

Fig.3.5 衝突面が変形した輸送物



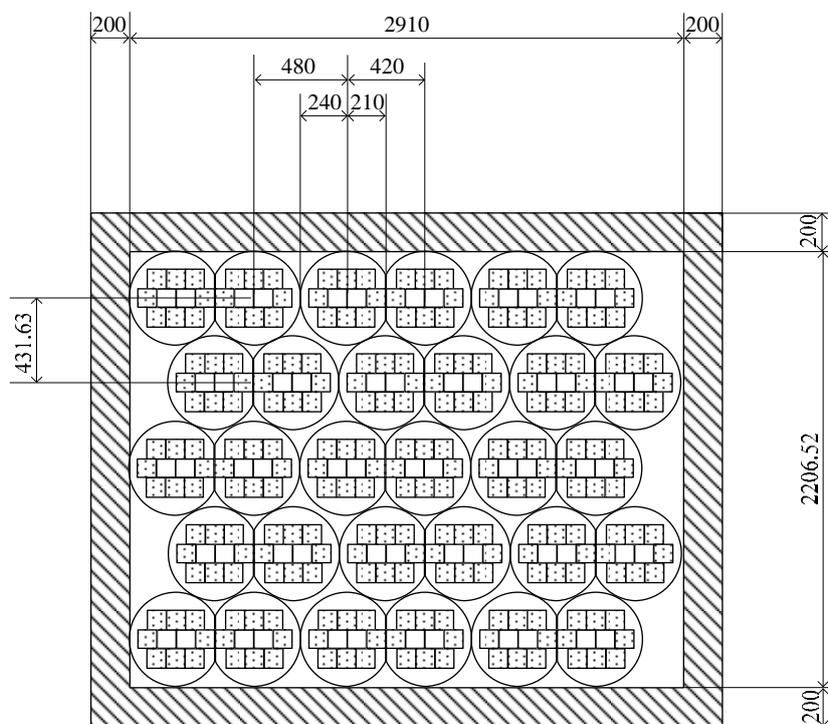
単位 : mm

Fig.3.6 解析モデル (パターン1)



単位 : mm

Fig.3.7 解析モデル (パターン 2)



単位 : mm

Fig.3.8 解析モデル (パターン 3)

付録 A 外運搬規則に定める技術上の基準

外運搬規則に定める技術上の基準の内、臨界に関するものを以下に説明する。

(臨界)

外運搬規則第 11 条第 2 号では、次の五つの条件でも臨界に達しないことが規定されている。

- ① 孤立系の条件の下に置くこととした場合
- ② 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件の下に置いたものを孤立系の条件の下に置くこととした場合
- ③ 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件の下に置いたものを孤立系の条件の下に置くこととした場合
- ④ 当該核分裂性輸送物と同一であって核分裂性輸送物に係る一般の試験条件の下に置いたものを、配列系の条件の下で、かつ、当該核分裂性輸送物相互の間が最大の中性子増倍率になるような状態で、当該核分裂性輸送物の輸送制限個数の 5 倍に相当する個数積載することとした場合
- ⑤ 当該核分裂性輸送物と同一であって核分裂性輸送物に係る特別の試験条件の下に置いたものを、配列系の条件の下で、かつ、当該核分裂性輸送物相互の間が最大の中性子増倍率になるような状態で、当該核分裂性輸送物の輸送制限個数の 5 倍に相当する個数積載することとした場合

(核分裂性輸送物に係る孤立系の条件)

孤立系の条件は、外運搬告示第 25 条に次のとおり規定されている。

- ① 核分裂性輸送物の中を水で満たすこと
- ② 収納される核燃料物質等は中性子増倍率が最大となる配置及び減速状態にすること
- ③ 密封装置の周囲に置かれた厚さ 20cm の水による中性子の反射があること

(核分裂性輸送物に係る配列系の条件)

配列系の条件は、外運搬告示第 27 条に、任意に配列した核分裂性輸送物の周囲に置かれた厚さ 20cm の水による中性子の反射があることと規定されている。

(核分裂性輸送物に係る一般の試験条件)

核分裂性輸送物に係る一般の試験条件は、外運搬告示第 24 条に次のとおり規定されている。

- ① 50mm/h の雨量に相当する水を 1 時間 き付けること
- ② その重量が、5,000kg 未満のものにあつては 1.2m の高さから、5,000kg 以上 15,000kg 未満のものにあつては 0.9m の高さから、15,000kg 以上のものにあつては 0.3m の高さから、それぞれ、最大の破損を及ぼすように落下させること (JRF-90Y-950K 型核燃料輸送物は 950kg であるから 1.2m の高さから落下させる)
- ③ その重量の 5 倍に相当する荷重又は 直投影面積に 13kPa を乗じて得た値に相当する加

重のうち、いずれか大きいものを 24 時間加えること

- ④ 重量が 6kg であり、直径が 3.2cm の容易に破損しない棒であって、その先端が半球形のものを 1m の高さから当該核分裂性輸送物の最も弱い部分に落下させること

(核分裂性輸送物に係る特別の試験条件)

核分裂性輸送物に係る特別の試験条件は、外運搬告示第 26 条に次の二つの条件のうち、最大の破損を受ける条件の下に置くことと規定されている。

① 次の条件の下に順次置くこと

イ 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件の下に置くこと

ロ ハの条件の下で核燃料輸送物が最大の破損を受けるような順序で次に掲げる条件の下に順次置くこと

(1) 9m の高さから落下させること

(2) 垂直に固定した直径が 15cm であり、長さが 20cm の軟鋼丸棒であって、その上面が滑らかな水面であるものに 1m の高さから落下させること

ハ 次の条件の下に順次置くこと

(1) 38℃の条件の下に表面温度が一定になるまで置いた後、800℃で、かつ、平均値が最小で 0.9 の放射率を有する火 の放射熱の条件下に 30 分間置くこと

(2) 38℃の条件下で外運搬告示別記第 4 第 1 号に定める放射熱及び設計上最大となる内部発熱を付加しつつ冷却すること

ニ 深さ 0.9m の水中に 8 時間浸 させること

② 次の条件の下に順次置くこと

イ 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件の下に置くこと

ロ 深さ 15m の水中に 8 時間浸 させること

JRF-90Y-950K 型核燃料輸送物は①の条件が最大の破損を受ける条件となる。

仏国審査当局の要求事項である棒上 1m から斜めに落下した場合とは、①のロ(2)に示す条件のことである。

(輸送制限個数)

輸送制限個数は、外運搬告示第 11 条に、一箇所（集合積載した当該核分裂性輸送物が、他のどの核燃料輸送物とも 6m 以上離れている状態）に集合積載する核分裂性輸送物の個数の限度として定められる数と規定されている。

(臨界安全指数)

臨界安全指数は、次の N_1 と N_2 のうち、小さい方の数で 50 を除した値として規定される。

① 核分裂性輸送物に係る一般の試験条件下で、ある輸送制限個数 N_1 を仮定し、その 5 倍の個数を積載しても臨界にならないような N_1

② 核分裂性輸送物に係る特別の試験条件下で、ある輸送制限個数 N_2 を仮定し、その 2 倍

の個数を積載しても臨界にならないような N_2

本臨界解析では、 N_1 、 N_2 とも 12 としているため、臨界安全指数は 50 を 12 で除した 4.2 となる。

付録 B 棒上傾斜落下による変形を考慮しない臨界解析結果

棒上傾斜落下による変形を考慮しない場合の臨界解析結果を以下に示す。

1. 解析条件

1.1 解析対象の燃料要素

本輸送容器で輸送される燃料要素のうち、燃料要素 1 体あたりの U-235 含有量が最大なもの「JRR-3 標準型燃料要素」である。したがって、解析対象は JRR-3 標準型燃料要素とした。

1.2 燃料要素の解析モデル、梱包、輸送容器へ装荷する燃料体数

燃料要素の解析モデル、梱包状態、輸送容器へ装荷する燃料体数は、本文で述べたものと同一とした。

1.3 輸送物の解析モデル

JRF-90Y-950K 型核燃料輸送物設計変更承認申請書によれば、本輸送物は、核分裂性輸送物に係る一般の試験条件下及び特別の試験条件下において、外容器、緩衝材及び断熱材が一部変形するものの、燃料要素及び内容容器は破損しない。そこで、解析モデルでは、両方の試験条件を満足するように、変形が想定される外容器、緩衝材及び断熱材は存在しないものとした。その場合、配列を構成した際に輸送容器間の距離が減少するため、臨界計算上の安全側の解析となる。輸送容器計算体系を Fig.B.1 に示す。

内容容器は浸水するものとして、水密度 $0\sim 1\text{g/cm}^3$ まで変化させ解析した。また、内容容器内での中性子吸収を小さく見積もるため、内容容器胴及び燃料バスケットの角形パイプ以外の構造物は無視した。

1.4 輸送物の配列

輸送物容器の配列は、Fig.B.2 に示すように 30 個の輸送物を 2 段積みとした有限配列の最密配列とした。輸送物の上部蓋厚さ及び下部蓋厚さは、それぞれ 5.5cm、3.5cm とした。燃料要素の軸方向の位置に関しては、燃料芯材が中心部（容器上蓋及び又は底板から 27.15cm）に位置するものとした。輸送物の周囲は、厚さ 20cm の水による反射効果を考慮した。

燃料要素収納時には、燃料要素の上下端それぞれにシリコンゴムのスペーサを挿入するため、燃料要素が軸方向に移動することはない。

1.5 水密度、各領域の組成

水密度及び解析で使用する各領域の組成は、本文で述べたものと同一とした。

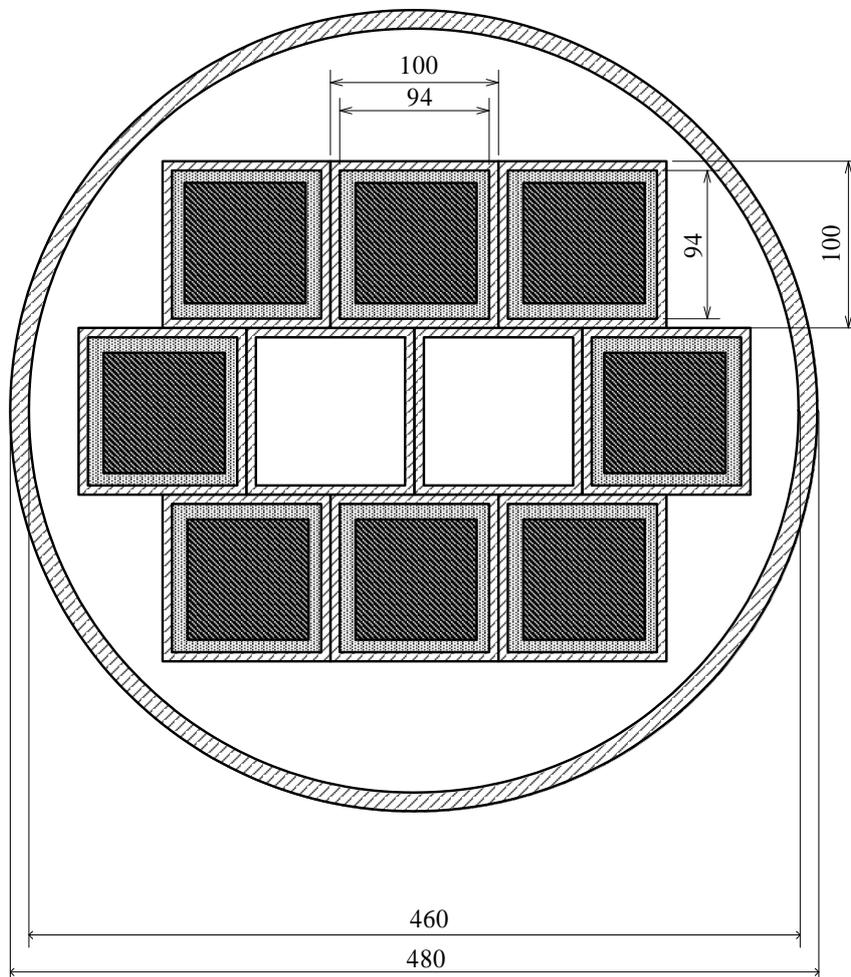


Fig.B.1 輸送物の解析モデル

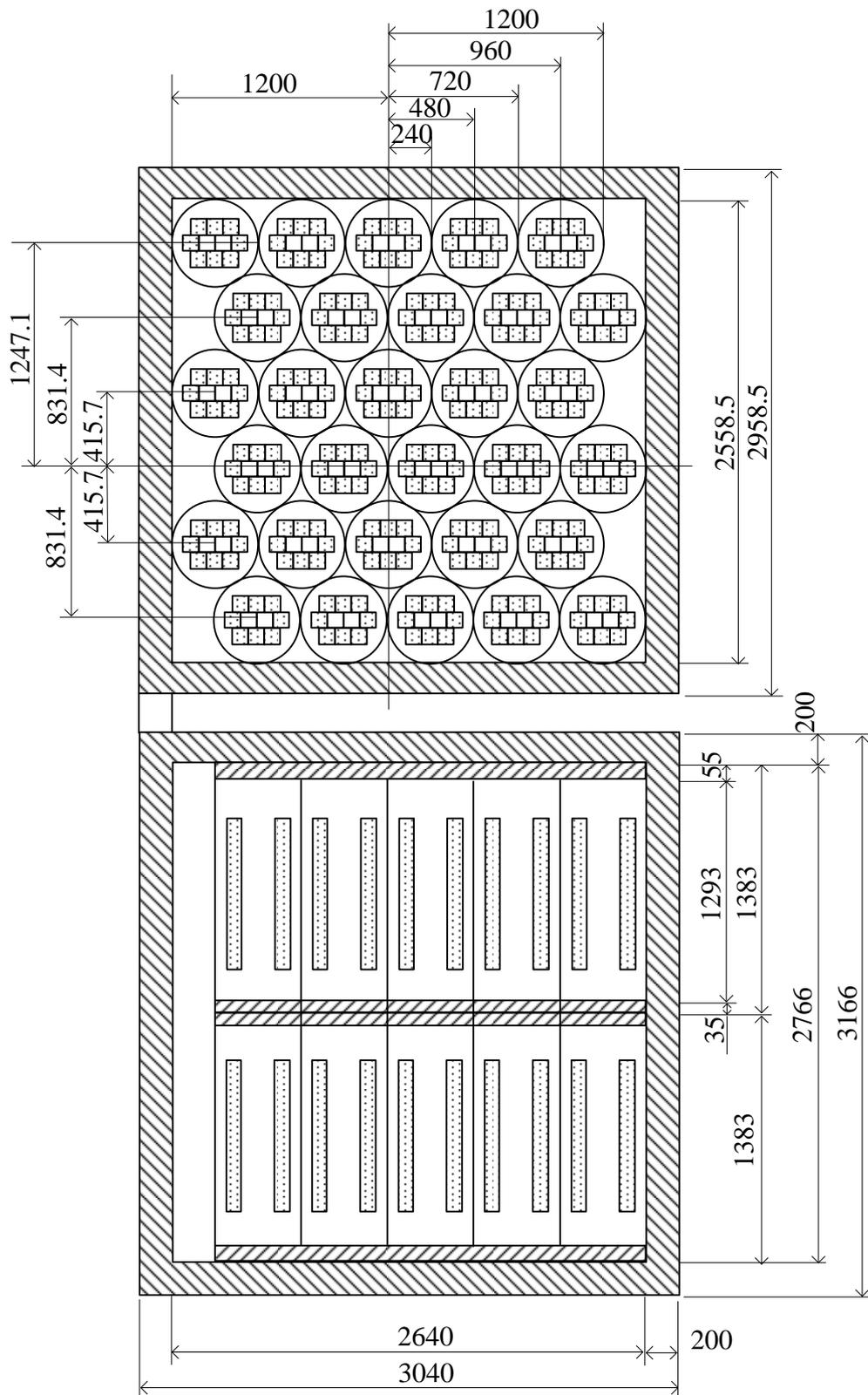


Fig.B.2 輸送物の配列

2. 解析結果

2.1 ポリエチレン袋内部の水密度による影響

ポリエチレン袋内部の水密度による影響を調べるために、ポリエチレン袋外部の水密度を $0\text{g}/\text{cm}^3$ 又は $1\text{g}/\text{cm}^3$ で固定しポリエチレン袋内部の水密度を変化させる下記の2ケースについて解析を行った。

解析ケース1：

ポリスチレン又はポリウレタンシート 水置換 $1\text{g}/\text{cm}^3$ 固定

ポリエチレン袋内部 水密度 $0\sim 1\text{g}/\text{cm}^3$ 変化

ポリエチレン袋外部 水密度 $0\text{g}/\text{cm}^3$ 固定

解析ケース2：

ポリスチレン又はポリウレタンシート 水置換 $1\text{g}/\text{cm}^3$ 固定

ポリエチレン袋内部 水密度 $0\sim 1\text{g}/\text{cm}^3$ 変化

ポリエチレン袋外部 水密度 $1\text{g}/\text{cm}^3$ 固定

解析結果を Table.B.1 及び Table.B.2 に示す。解析ケース1ではポリエチレン袋内部の水密度が $1\text{g}/\text{cm}^3$ のとき、解析ケース2ではポリエチレン袋内部の水密度が $1\text{g}/\text{cm}^3$ のとき、 $k_{\text{eff}}+3\sigma$ は最大となった。したがって、ポリエチレン袋内部の水密度が $1\text{g}/\text{cm}^3$ のとき $k_{\text{eff}}+3\sigma$ は最大となった。

Table.B.1 解析ケース1の結果

ポリエチレン 内部の水密度 [g/cm ³]	ポリエチレン 外部の水密度 [g/cm ³]	k_{eff}	σ	$k_{\text{eff}}+3\sigma$
0.00	<u>0.00</u>	0.454	0.004	0.465
0.01		0.464	0.004	0.475
0.02		0.477	0.003	0.486
0.10		0.554	0.004	0.566
0.20		0.626	0.004	0.640
0.40		0.735	0.005	0.749
0.60		0.809	0.005	0.826
0.80		0.876	0.005	0.890
<u>1.00</u>		0.908	0.004	<u>0.921</u>

Table.B.2 解析ケース 2 の結果

ポリエチレン 内部の水密度 [g/cm ³]	ポリエチレン 外部の水密度 [g/cm ³]	k _{eff}	σ	k _{eff} +3σ
0.00	<u>1.00</u>	0.416	0.004	0.426
0.01		0.419	0.004	0.431
0.02		0.416	0.003	0.425
0.10		0.429	0.003	0.439
0.20		0.456	0.004	0.467
0.40		0.505	0.004	0.516
0.60		0.554	0.005	0.569
0.80		0.596	0.005	0.612
<u>1.00</u>		0.637	0.004	<u>0.649</u>

2.2 ポリエチレン袋外部の水密度による影響

前述のとおり、ポリエチレン袋内部の水密度が 1g/cm³ のとき解析上厳しい結果となることが明らかになった。次に、ポリエチレン袋外部の水密度による影響を調べるために、ポリエチレン袋内部の水密度を 1g/cm³ で固定しポリエチレン袋外部の水密度を変化させる下記のケースについて解析を行った。

解析ケース 3 :

ポリスチレン又はポリウレタンシート 水置換 1g/cm³ 固定

ポリエチレン袋内部 水密度 1g/cm³ 固定

ポリエチレン袋外部 水密度 0~1g/cm³ 変化

解析結果を Table.B.3 に示す。ポリエチレン袋外部の水密度が 0g/cm³ のとき k_{eff}+3σ は最大となった。

Table.B.3 解析ケース 3 の結果

ポリエチレン 内部の水密度 [g/cm ³]	ポリエチレン 外部の水密度 [g/cm ³]	k _{eff}	σ	k _{eff} +3σ
<u>1.00</u>	<u>0.00</u>	0.908	0.004	<u>0.921</u>
	0.01	0.898	0.005	0.913
	0.02	0.889	0.004	0.901
	0.10	0.839	0.005	0.853
	0.20	0.800	0.005	0.813
	0.40	0.725	0.006	0.741
	0.60	0.699	0.005	0.713
	0.80	0.663	0.004	0.674
	1.00	0.637	0.004	0.649

2.3 ポリエチレン袋の位置による影響

ポリエチレン袋の位置による影響を調べるために、ポリエチレン袋が燃料板側に押し広げられた状態を模擬した計算モデルとして解析を実施した。

解析ケース 4 :

ポリスチレン及びポリウレタンシート 水置換 1g/cm³ 固定

ポリエチレン袋内部 水密度 1g/cm³ 固定

ポリエチレン袋外部 水密度 0~1g/cm³ 変化

解析結果を Table.B.4 に示す。ポリエチレン袋外部の水密度が 0g/cm³ のとき k_{eff}+3σ は最大となった。

Table.B.4 解析ケース4の結果

ポリエチレン 内部の水密度 [g/cm ³]	ポリエチレン 外部の水密度 [g/cm ³]	k _{eff}	σ	k _{eff} +3σ
<u>1.00</u>	<u>0.00</u>	0.905	0.005	<u>0.922</u>
	0.01	0.894	0.005	0.908
	0.02	0.894	0.005	0.908
	0.10	0.835	0.005	0.850
	0.20	0.797	0.004	0.809
	0.40	0.735	0.004	0.748
	0.60	0.687	0.006	0.705
	0.80	0.654	0.005	0.668
	1.00	0.639	0.006	0.657

2.4 結論

実効増倍率は最大でも

$$k_{\text{eff}+3\sigma} = 0.922 < 0.95$$

であり、いかなる場合においても臨界となることはない。

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
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	キログラム毎立方メートル	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
比透磁率 ^(b)	(数字の)	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	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	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)	°C		K
光照度	ルーメン	lm		cd sr ^(c)
放射線量	ルクス	lx		lm/m ²
放射線当量, 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
酸素活性化	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、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
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ³ kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ³ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎平方メートル	J/m ²	m kg s ⁻³ A ⁻¹
表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線当量	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 s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	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
	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 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm 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)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻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)×10 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 ⁵ Pa
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
バイン	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 ⁻⁴ cd m ⁻²
ファ	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガラ	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 /4π)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=3.7×10 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
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 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	1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ) 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

