

資料 1

2021年7月28日

説明資料

## 輸送容器①の設計承認申請に関する説明資料

(イ)章 核燃料輸送物の説明

(イ)－A. 目的及び条件

本輸送容器は、国立大学法人京都大学の複合原子力科学研究所に設置されている京都大学研究用原子炉（KUR）の新燃料要素 [REDACTED] [REDACTED] を内外の加工事業者の工場からそれぞれKUR [REDACTED] を目的とするものである [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

なお、本輸送容器は、 [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED]、次章以降で示す解析の対象としている。

本輸送容器の概念図を (イ)－第A.1図に示す。

(1) 輸送容器の型名 [REDACTED]

(2) 輸送物の種類

(a) BU型核分裂性輸送物

(3) 輸送制限個数

(4) 輸送制限配列

(5) 輸送指数

(6) 臨界安全指数

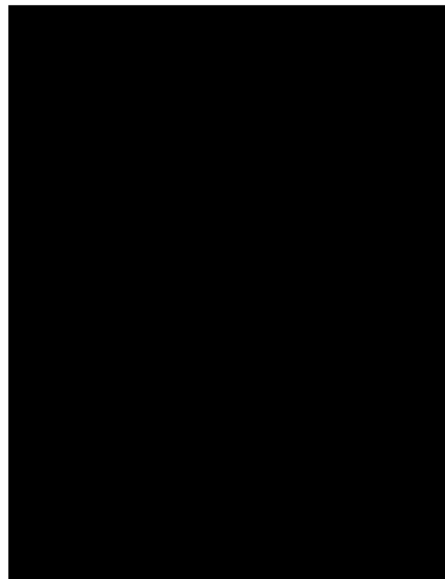
(7) 輸送物の重量

(8) 輸送容器の外形寸法

(a) 外 径

(b) 高 さ

(9) 輸送容器の重量



(イ) - 第 A.1 表 輸送容器に収納する核燃料物質等の仕様

項目		仕様	
種類		[Redacted]	
性状			
型式			
寸法 (mm)			
重量 (g 以下)			
輸送物 1 基あたりの仕様	収納数 (以下)		
	<sup>235</sup> U 重量 (kg 以下)		
	ウラン濃縮度 (wt% 以下)		
	放射能の量 (Bq 以下)		
	主要核種の放射能の量 (Bq 以下)		<sup>235</sup> U
	発熱量 (W 以下)		
燃焼度 (%)			
冷却日数 (日以上) ※1			

※1 : 2021年4月時点

(イ) - 第 D. 4 表 収納物の燃料要素仕様

分類	燃料バスケット
	種類
形式	
全装荷数 (■/容器)	
種類	
核的仕様	U-235 濃縮度 (wt%)
	U-235 含有量 (g/■)
	U-含有量 (g/■)
燃焼度 (%)	
発熱量 (w/容器)	
冷却日数 (日)	
放射能の量 (GBq/容器)	
材質	燃料芯材
	被覆材
	側板, 取付板等
	可燃性吸収体
形状	燃料断面形状
	参照図
燃料重量 (g/■)	

### 3. 密封解析

密封解析では、上記 1.、2. の条件と発送前検査における気密漏えい試験合格基準に基づいて、一般及び特別の試験条件における放射性物質の漏えい率を評価し、基準値を満足することを示している。

### 4. 遮蔽解析

遮蔽解析では、上記 1.、2. の条件を考慮して、通常の輸送、一般及び特別の試験条件における輸送物表面あるいは表面から 1m離れた位置の線量当量率を評価し、基準値を満足することを示している。

### 5. 臨界解析

臨界解析では、上記 1. の結果より核分裂性輸送物に係る一般の試験条件において、臨界評価に影響するような構造物の変形等が生じないことを示し、通常輸送時における輸送物、孤立系における輸送物並びに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ける孤立系及び配列系輸送物のいずれの場合にも未臨界であることを示している。

### 6. 核燃料輸送物の経年変化の考慮

核燃料輸送物に対する経年変化について考慮し、輸送物の主要材料が経年変化によって上記の解析に影響を与えないことを示している。

### 7. 規則及び告示に対する適合性の評価

以上の結果及びイ章の核燃料輸送物の説明を総合して、本輸送物の設計が規則及び告示に定める技術基準に適合していることを示している。

以下、ロ章A～Gに各解析、評価の詳細を示す。

#### A. 4. 6 圧 力

輸送容器の外気圧が 60kPa に減少した場合、輸送容器が健全であり密封性が保持されることを解析する。なお、輸送物構成部品の最低温度は-40℃、最高温度は 65℃として解析を行う。

外気圧が 60kPa まで降下したとき、内容器には

$$P_2 = P_0 - P_a = \text{[REDACTED]} \quad [\text{MPa}]$$

の内圧が作用することになる。

ここで、

$$P_0 ; \text{内容器初期内圧 (大気圧)} \quad P_0 \text{ [REDACTED]} \quad [\text{MPa}]$$

$$P_a ; \text{圧力降下後の外気圧} \quad P_a \text{ [REDACTED]} \quad [\text{MPa}]$$

応力評価については A. 5. 1. 3 「応力計算」において、容器に作用する内圧を [REDACTED]

[REDACTED] a としているため、本項では差圧の合計である

$$P = P_1 + P_2 = \text{[REDACTED]} \quad [\text{MPa}]$$

の内圧が作用するものとして解析する。

応力評価位置及び解析方法は、A. 5. 1. 3 項と同様に行い、その応力評価結果を (ロ) - 第 A. 10 表に示す。

ゆえに、

$k_1$ ;	補強材のばね定数	$k_1$
$k_2$ ;	バルサ材のばね定数	$k_2$
$k_3$ ;	外容器胴板のばね定数	$k_3$
$k_4$ ;	ターンバックルのばね定数	$k_4$

より、

\_\_\_\_\_ [kg/mm]

したがって、固有振動数は下記の値となる。

$f_0 =$  \_\_\_\_\_ [Hz]

この固有振動数 \_\_\_\_\_ は、車両輸送時及び船舶輸送時に受ける振動数域 0～50[Hz]の範囲外である。よって、共振することはない。また、運搬中に予想される振動数の 0～50[Hz]程度であり、固有振動数に比べ開きがあることから、入力される励振力が増幅されることはない。したがって、運搬中に予想される本体発生加速度は、一般の試験条件の自由落下等に十分包含されることから輸送物に亀裂、破損が生じることはない。

## (2) 燃料バスケット

燃料バスケットは、内容器内にスペーサを介して支持されており、外部からの振動を直接受けることは無い。

また、燃料要素等も上下を \_\_\_\_\_ のスペーサで保持されており、振動を受けない。

## (3) 評 価

本輸送容器の固有振動数は、積載車両等によって生ずる振動数に比べ大きいため共振することはない。したがって、内容器蓋締付ボルト及びその他の締付部が輸送中に緩むことは無く、密封性が損なわれることはない。

また、燃料バスケット及び燃料要素は、内容器内面にゴムを介して保持されており、輸送中の振動により健全性が損なわれることはない。

## A.5 一般の試験条件

本輸送物はBU型核分裂性輸送物である。したがって、規則に定められた一般の試験条件は、次のとおりである。

### (1) 水吹き付け試験

(1)の試験に引き続いて次の条件の下に置く。

### (2) 自由落下試験

### (3) 積み重ね試験

### (4) 貫通試験

(1)～(4)の試験に引き続いて次の条件の下に置く。

### (5) 周囲温度が-40℃から38℃までの環境に一週間放置。

本項においては、上述の試験条件下での本輸送物へ与える影響について解析し、その解析結果が一般の試験条件の設計基準を満足することを示す。

## A.5.1 熱的試験

### A.5.1.1 温度及び圧力の要約

本項では、一般の試験条件下における設計・解析に使用する温度及び圧力の要約を記述する。

#### (1) 設計温度

(p)－B.4.2 最高温度で評価した結果、輸送物は■■■■まで温度が上昇する（最低温度は■■■■）。したがって、一般の試験条件下における設計温度は、(p)－第A.11表に示すように内容器及び外容器とも、安全側■■■■になるものとして評価する。

(p)－第A.11表 一般の試験条件下における設計温度

No	部 位	設計温度 (°C)
1	燃 料 要 素	■■■■
2	燃料バスケット	
3	内 容 器 本 体	
4	内 容 器 蓋	
5	外 容 器	



#### A. 5. 1. 4 許容応力との比較

(□)－A. 5. 1. 3 項の各解析項目に対する応力評価結果をまとめて(□)－第 A. 13 表に示す。

この表から分かるように、個々の荷重が単独あるいは重畳作用しても設計基準値に対する余裕率は、正である。なお、周囲の温度が $-40^{\circ}\text{C}$ から $38^{\circ}\text{C}$ に変化した場合においても、熱膨張、熱応力に対して影響はない。

したがって、一般の試験条件下（熱的試験）において、本輸送物の健全性は維持される。

また、本輸送物の使用回数を 500 回\*とした場合の許容繰返し数に対する余裕率は、(□)－第 A. 13 表に示すように正である。よって荷重の繰返しにより本輸送物の健全性が損なわれることはない。

---

\* 使用回数 $N=8$  回/年 $\times 30$  年 $\times$  余裕度 $\approx 500$  回

#### B. 4. 6 結果の要約及びその評価

一般の試験条件下における熱解析の結果に基づく評価は、以下に示す通りであり、構造強度及び密封性能に悪影響を与えないことを確認した。なお、すでに上述のとおり、輸送物の構成部品の最低温度は■■■■、最高温度は■■■■として、評価を実施した。

##### (1) 輸送物表面温度

本輸送物の表面温度は■■■■であり、許容基準温度 85°Cを超えない。

##### (2) 構造強度

構造強度上問題となる最大内圧、熱応力及び最高温度について以下に述べる。最大内圧については、容器内の内圧上昇が■■■■となり、設計圧力■■■■以下である。したがって構造強度に影響を与えない。熱応力については、(ロ)章の A. 5. 1 項で述べたように構造強度に悪影響を与えることはない。

最高温度については、本輸送物の構造材において、先に述べた■■■■の最高温度で溶融するものはなく、各部とも十分な強度を有する。

##### (3) 密封性能

密封性能上問題となる密封境界の内容器蓋Oリングの温度、変形及び最大内圧について以下に述べる。


密封境界である内容器蓋Oリングの温度は、■■■■となる。この値は、■■■■Oリングの通常使用温度範囲(■■■■)内であり劣化することはない。

変形については、密封境界に影響を与えるようなものは発生しない。

### (3) 溶接部

内容器本体のフランジ、胴及び底板の溶接は(参)－Aで述べる方法にしたがって施行される。溶接部は製作中に適切な非破壊検査を行い、その健全性を確認し、さらに、耐圧検査を行い漏えいのないことを確認する。

### C.2.4 蓋

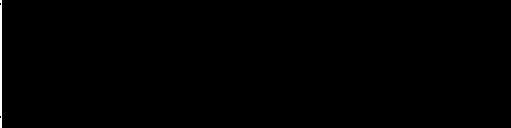
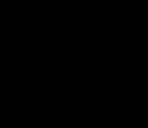
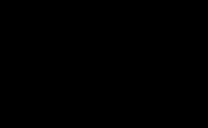
内容器蓋には(□)－第 C.1 図に示す通り  Oリングが取付けられている。

また、内容器蓋は一般及び特別の試験条件下においても十分耐え得る強度を備え、かつ、密封性を保持できる構造となっている。

内容器蓋は、輸送容器の密封性を保つため、(□)－第 C.3 表に示す内容器蓋締付けボルトにより適正なトルクで締付ける。

なお、外圧が 60 [kPa]まで低下した場合であっても、A.5.1 で示したとおり、内容器蓋の口開き量は O リングの初期締め付け代を下回る。

(□)－第 C.3 表 内容器蓋締付けボルト

名 称	サイズ	本 数	締付けトルク (N・m)
内容器蓋締付けボルト			

(2) 低照射された燃料要素装荷時

低照射された収納物には [ ] 及び [ ]  
がある。これらのうち [ ] のウラン量、燃焼度及び冷却日数のい  
ずれも [ ] に包含されることから [ ]  
におけるガンマ線源強度を代表ケースとして評価する。

(a) ウランからの同位体によるガンマ線源

収納物に含まれるウラン同位体は、主に  $^{234}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$ 、 $^{236}\text{U}$ 、 $^{238}\text{U}$  等であり、そ  
れらのガンマ線放出率を (p) - 第 D. 6 表<sup>(1)</sup> に示す。

放射能が最も高い [ ] 料を混合して輸送する収納物  
の 1 体相当 (以下「混合燃料要素」という) のガンマ線源強度を (p) - 第 D. 7 表に示  
す。そのガンマ線源強度は、次式で求めた。

$$S_E = C \cdot W \cdot R_E$$

ここで  $S_E$  : エネルギー E のガンマ線源強度 (Photons/s)

$C$  : 比放射能 (Bq/g) : (p) - 第 D. 8 表<sup>(2)</sup> に示す。

$W$  : ウラン同位体の重量 (g)

$R_E$  : エネルギー E のガンマ線放出割合 (photons/decay)

ウラン同位体の重量は以下に示す方法で保守的に算定した。

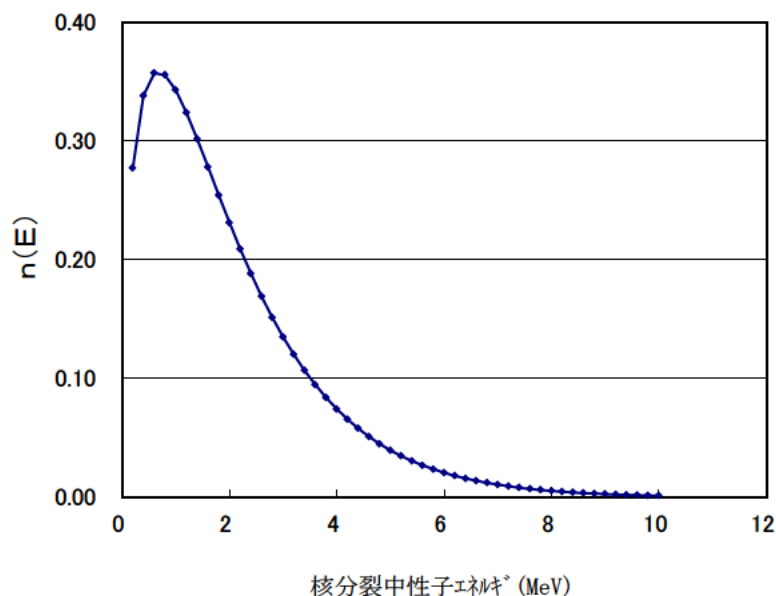
(i)  $^{235}\text{U}$  量 : 燃料の最大  $^{235}\text{U}$  含有量

(ii)  $^{238}\text{U}$  量 :  $^{234}\text{U}$  量及び  $^{236}\text{U}$  量をゼロとし、(i) で求めた  $^{235}\text{U}$  量と濃縮度の公  
差の下限を用いて  $^{238}\text{U}$  量を求めた。

(iii)  $^{234}\text{U}$ 、 $^{236}\text{U}$  量 :  $^{234}\text{U}$  及び  $^{236}\text{U}$  量は、燃料製作時に決定されるので、重量の  
制限値は定められていない。このため過去のミルシート等から最大重量比を選  
出し、それらを保守的に切り上げた重量比を用いて、 $^{234}\text{U}$  及び  $^{236}\text{U}$  の重量を  
算出した。また、この際に必要なウラン全量は (i) で求めた  $^{235}\text{U}$  量と (ii)  
で求めた  $^{238}\text{U}$  量の合計である。なお、計算に用いた  $^{234}\text{U}$  及び  $^{236}\text{U}$  の重量比を  
(p) - 第 D. 9 表に示す。

計算に用いた燃料要素 1 体あたりのウラン同位体の重量を (p) - 第 D. 10 表に  
示す。

本計算では安全側に実効増倍率を [redacted] として、中性子源強度に中性子の増倍効果を [redacted] を考慮する。



(a) 第 D. 1 図 核分裂中性子のエネルギスペクトル

(2) 低照射された燃料要素装荷時

ガンマ線源強度と同様に [redacted] を代表ケースとして評価を実施した。

中性子源として考慮する必要があるのはウラン等の自発核分裂による中性子の放出である。それらの同位体の自発核分裂放出率を (a) 第 D. 13 表<sup>(3)</sup> に示す。

(a) 第 D. 13 表 ウラン等同位元素の自発核分裂放出率

ウラン同位体	<sup>234</sup> U	<sup>235</sup> U	<sup>236</sup> U	<sup>238</sup> U
[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]

放射能の一番高い混合燃料要素 1 体当りの中性子源強度が最大となる。その値は [redacted] である。その自発核分裂による中性子源強度は D. 2. 3(1) と同様の手法で算出した。

(ロ)－E．臨界解析

E.1 概 要

核分裂性輸送物に係る一般の試験条件及び特別の試験条件下における緩衝体及び断熱材の変形等を考慮し、解析モデルとして、緩衝材及び断熱材を無視した最も厳しい状態となる損傷配列系について、未臨界性を3次元モンテカルロ法を用いて行った。

本輸送容器には、21種類の燃料要素が収納される。本輸送容器1基に収納する要素数は [REDACTED] である。また、 [REDACTED]

本解析では、 [REDACTED] を除く10種類の燃料要素を収納した場合について臨界解析を行う。 [REDACTED] 素に比べて、燃料要素1体当たりの<sup>235</sup>Uの含有量が同じかあるいは少ないため、輸送容器収納時の実効増倍率は小さくなるので評価対象外とする。

また、 [REDACTED]、臨界解析を行う。

なお [REDACTED] については濃縮度の違う [REDACTED] 種類の燃料 [REDACTED] を混載して輸送する場合もある。したがって、ここで [REDACTED] のみを [REDACTED] 収納した場合に加えて混載の一例として [REDACTED] を収納した場合について、未臨界性を確認するものとする。

本解析に用いた内容容器内の燃料要素配列モデルを(ロ)－第E.3図( )に示す。内容容器は浸水するものとして、内容容器の内部及び外部の空隙は全て密度 $1.00\text{g/cm}^3$ の水で満たされているものとした。内容容器内での中性子吸収を小さく見積るために、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て水で置き換えた。

( )は濃縮度の違う( )種類の燃料を混載する場合もあるため、その一例となる混載を考慮した臨界解析モデルを(ロ)－第E.4図に示す。

解析対象である9種類の燃料要素の解析モデルを(ロ)－第E.5図から(ロ)－第E.14図に示す。( )については、( )で燃料芯材の組成が異なる以外は、同一のモデルとした。燃料要素の上部及び下部構造物は無視して、燃料部分が無限の長さを持つものとした。( )

( )については、( )と同一の構造であるとして、 $^{235}\text{U}$ の量を多く見積るようにした( )、燃料部分と被覆材の( )燃料バスケットの角形パイプ中全体に均等に広がった場合を想定して解析を行った。( )については、角形パイプの縦方向、( )は横方向に燃料を均等配置した。( )

### E.3.2 臨界解析モデル各領域の原子個数密度

計算に使用した輸送容器各領域の原子個数を(ロ)－第E.5表に示す。また、燃料要素各部の原子個数密度を(ロ)－第E.6表に示す。 $^{235}\text{U}$ 濃縮度は公差の最大値として、安全側に実効増倍率を計算するようにした。

上下方向モデルは、

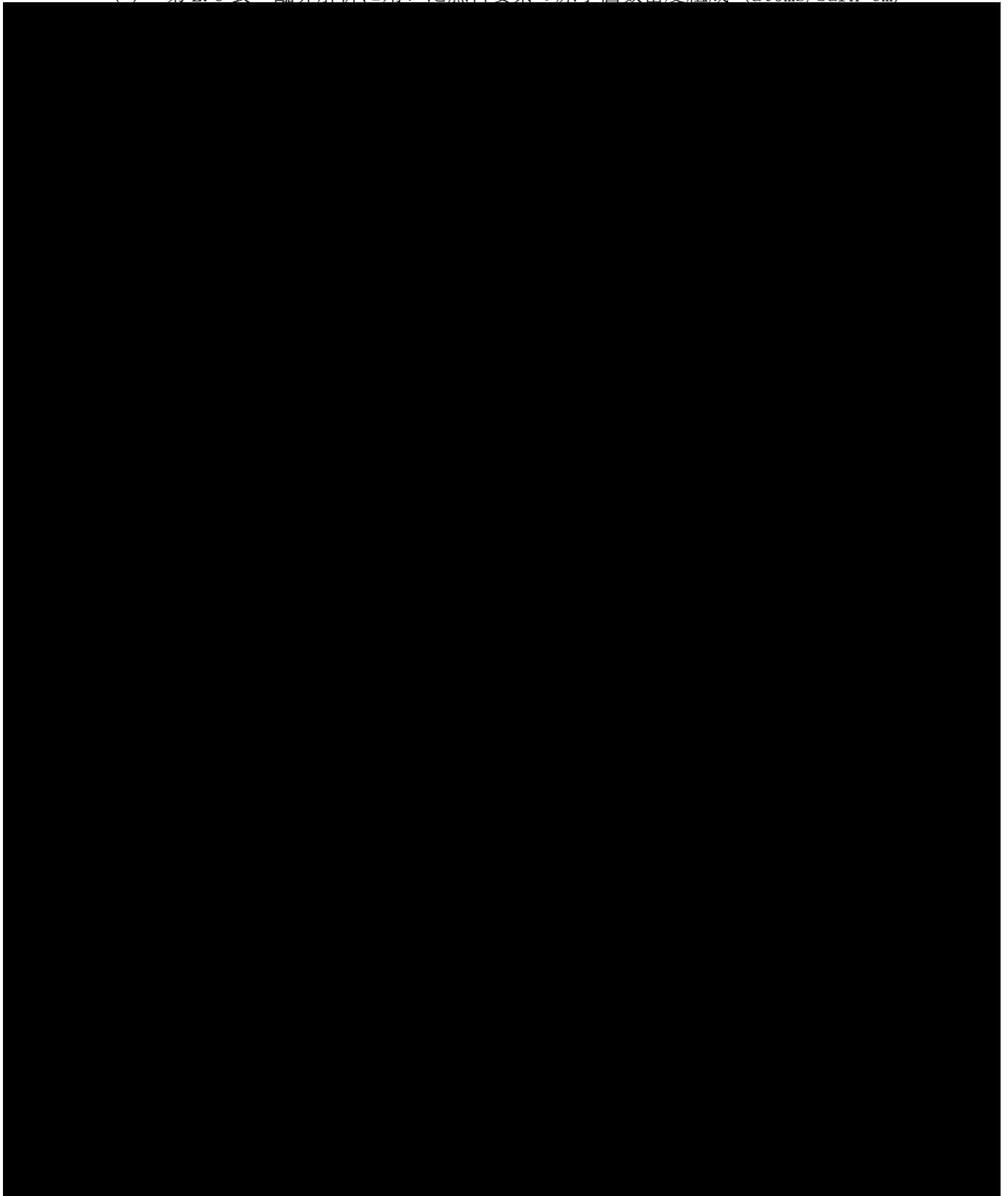
、上下とも反射境界（完全反射）とした。

計算時には、金属スペーサーは使用していない。S

(ロ) 第 E. 2 図 輸送容器臨界計算モデル



(ロ) - 第 E. 6 表 臨界解析に用いた燃料要素の原子個数密度組成 (atoms/barn-cm)



#### E. 4.4 計算結果

未臨界性評価は、E. 3.1 項に示すように最も厳しい損傷配列系を解析対象とする。

冠水時の損傷配列における実効増倍率の計算結果は(ロ) - 第 E. 8 表に示すとおりである。

最大の実効増倍率を示すのは輸送容器 1 基に [redacted] 場合で、その実効増倍率は、 $keff \pm \sigma =$  [redacted] であり、このときの 99%信頼区間での実効増倍率は、 $keff + 3\sigma =$  [redacted] であり、基準値 0.95 を十分下回っており、未臨界である。

[redacted] 場合が最も実効増倍率が高く、 $keff \pm \sigma$  [redacted] であり、このときの 99%信頼区間での実効増倍率は、 $keff + 3\sigma$  [redacted] であり、基準値 0.95 を十分下回っており、未臨界である。

[redacted] が最も実効増倍率が高く、 $keff \pm \sigma$  [redacted] であり、このときの 99%信頼区間での実効増倍率は、 $keff + 3\sigma$  [redacted] であり、基準値 0.95 を十分下回っており、未臨界である。

[redacted] 場合において解析し、その実効増倍率は、 $keff \pm \sigma =$  [redacted] であり、このときの 99%信頼区間での実効増倍率は、 $keff + 3\sigma =$  [redacted] であり、基準値 0.95 を十分下回っており、未臨界である。

さらに、内容器内部及び輸送物の間を満たす水の密度が  $1.00\text{g/cm}^3$  から  $0.00\text{g/cm}^3$  まで変化した場合における実効増倍率への影響を、最大水密度  $1.00\text{g/cm}^3$  での実効増倍率が最も大きい [redacted] について評価した結果、最も実効増倍率が大きくなるのは水密度  $0.02\text{g/cm}^3$  のときであるが、そのときでも  $keff + 3\sigma$  [redacted] であり、本輸送物は未臨界である。

加えて [redacted]、内容器内部及び輸送物の間を満たす水の密度が  $1.00\text{g/cm}^3$  から  $0.00\text{g/cm}^3$  まで変化した場合における実効増倍率への影響を、最大水密度  $1.00\text{g/cm}^3$  での実効増倍率が最も大きい [redacted] について評価した結果、最も実効増倍率が大きくなるのは水密度  $0.001\text{g/cm}^3$  のときであるが、そのときでも  $keff + 3\sigma$  [redacted] であり、本輸送物は未臨界である。なお、角型パイプ内を水の密度が  $1.00\text{g/cm}^3$  で計算した方が実効増倍率が高いため、この結果を示している。

また、[redacted] バスケット内部及び輸送物の間を満たす水の密度が  $1.00\text{g/cm}^3$  から  $0.00\text{g/cm}^3$  まで変化した場合における実効増倍率への影響を評価した結果、最も実効増倍率が大きくなるのは上記と同じバスケット内部と輸送物間

両方の水密度  $1.00 \text{ g/cm}^3$  のときであるが、そのときでも  $k_{\text{eff}} + 3\sigma =$  [ ] であり、本輸送物は未臨界である。

なお [ ] については濃縮度の違う [ ] を混載して輸送する場合もあり、混載した場合、 $^{235}\text{U}$  の装荷量は [ ] のみ収納した場合の装荷量よりも少なく、実効増倍率 [ ] のみ収納した場合よりも小さくなる。

(口) - 第 E. 8 表 冠水時臨界計算結果

燃料要素の名称	燃料芯材	$^{235}\text{U}^{*1}$ 濃縮度 (wt%)	$^{235}\text{U}^{*1}$ 重量 (g/体)	収納*2 体数	$k_{\text{eff}} \pm 1 \sigma$	$k_{\text{eff}} + 3 \sigma$
---------	------	---------------------------------------	--------------------------------------	------------	-------------------------------	-----------------------------

