

Doc. No. MA035A-RC-D01 Rev.1

2020年11月25日

日立造船株式会社

補足説明資料 1-6

Hitz-B52 型の遮蔽設計に関する説明資料

## 目 次

1. 設計方針-----	1
2. 遮蔽設計-----	2

別紙 1 Hitz-B52 型の遮蔽解析条件

別紙 2 ピーキングファクタについて

別紙 3 放射化線源について

別紙 4 線量当量率を評価する際に使用した線量当量率換算係数について

別紙 5 二次元輸送計算コード DOT3.5 の妥当性

別紙 6 解析モデル全体に対する線量当量率の等値線図

別紙 7 DLC-23/CASK ライブラリを使用した妥当性とライブラリ変更による  
遮蔽解析結果への影響

1

## 1. 設計方針

Hitz-B52 型を用いる使用済燃料貯蔵施設は、遮蔽機能を確保するために「使用済燃料貯蔵施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（平成 30 年 6 月 8 日施行）」の第四条に示されている以下の要求事項を満足するように設計される。

- ・使用済燃料貯蔵施設は、当該使用済燃料貯蔵施設からの直接線及びスカイシャイン線による事業所周辺の線量を十分に低減できるよう、遮蔽その他適切な措置を講じたものでなければならない。
- ・使用済燃料貯蔵施設は、放射線障害を防止する必要がある場合には、管理区域その他事業所内の人が立ち入る場所における線量を低減できるよう、遮蔽その他適切な措置を講じたものでなければならない。

上記の通り、Hitz-B52 型は、一般公衆及び放射線業務従事者等に対して放射線被ばく上の影響を及ぼすことのないよう遮蔽することが要求されており、使用済燃料からの放射線をガンマ線遮蔽材及び中性子遮蔽材により遮蔽する設計としている。

また、Hitz-B52 型は、事業所外運搬に使用する輸送容器の機能を持つ金属製の乾式キャスクであるため、「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（平成 30 年 6 月 8 日施行）」の第五条に示されている以下の要求事項を満足するように設計される。

- ・表面における最大線量当量率が二ミリシーベルト毎時を超えないこと。
- ・表面から一メートル離れた位置における最大線量当量率が百マイクロシーベルト毎時を超えないこと。

## 2. 遮蔽設計

### (1) 遮蔽構造

Hitz-B52型の主要部位における構成部材と遮蔽解析に使用する密度及び元素組成を表 1 に示す。

Hitz-B52型は、以下の遮蔽構造を有する設計としている。

- a. ガンマ線遮蔽と中性子遮蔽の機能を有する。
- b. ガンマ線遮蔽材は、金属キャスク本体（胴、底板、外筒）及び蓋部の炭素鋼等で構成する。
- c. 中性子遮蔽材は、水素を多く含有する樹脂（以下「レジン」という。）で構成する。

表 1 Hitz-B52 型の主要部位における構成部材と遮蔽解析に使用する密度及び元素組成 (1/2)

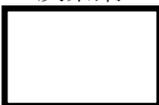
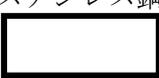
部位	構成部材	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	元素組成 (重量%)	備考
胴	炭素鋼 	7.83	Fe : 100.0	密度：日本機械学会 伝熱工学資料 <sup>(1)</sup> 改訂第 4 版記載値 (7850kg/m <sup>3</sup> ) を保守的に設定した値 組成：微量元素無視
外筒				
底板				
二次蓋				
一次蓋	オーステナイト系 ステンレス鋼 	7.90	Fe : 72.0 Cr : 19.0 Ni : 9.0	密度：日本機械学会 伝熱工学資料 <sup>(1)</sup> 改訂第 4 版記載値 (7920kg/m <sup>3</sup> ) を保守的に設定した値 組成：JIS G4304 : 2012 Cr、Ni : 中央値 Fe : 残り (他の微量元素無視)
トランニオン	析出硬化系 ステンレス鋼 	7.70	Fe : 76.0 Cr : 16.0 Ni : 4.0 Cu : 4.0	密度：JIS G4304 : 2012 記載値 (7.78 g/cm <sup>3</sup> ) を保守的に設定した値 組成：JIS G4304 : 2012 Cr、Ni、Cu : 中央値 Fe : 残り (他の微量元素無視)

表 1 Hitz-B52 型の主要部位における構成部材と遮蔽解析に使用する密度及び元素組成 (2/2)

部位	構成部材	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	元素組成 (重量%)	備考
バスケット	炭素鋼 □	7.83	Fe : 100.0	密度 : 日本機械学会 伝熱工学資料 <sup>(1)</sup> 改訂第 4 版記載値 (7850kg/m <sup>3</sup> ) を保守的に設定した値 組成 : 微量元素無視
	オーステナイト系 ステンレス鋼 □	7.90	Fe : 72.0 Cr : 19.0 Ni : 9.0	密度 : 日本機械学会 伝熱工学資料 <sup>(1)</sup> 改訂第 4 版記載値 (7920kg/m <sup>3</sup> ) を保守的に設定した値 組成 : JIS G4304 : 2012 Cr、Ni : 中央値 Fe : 残り (他の微量元素無視)
	ほう素添加アルミ ニウム合金 □	□	□	密度 : 要求値 組成 : 要求値
伝熱部材	アルミニウム合金 □	2.71 ※1	Al : 100.0	密度 : アルミニウムハンドブック <sup>(2)</sup> 組成 : 微量元素無視
中性子遮蔽材	レジン □	□	□	密度 : □ g/cm <sup>3</sup> の下限値 組成 : メーカー標準組成
伝熱フィン	銅 □	8.88 ※1	Cu : 100.0	密度 : 日本機械学会 伝熱工学資料 <sup>(1)</sup> 改訂第 4 版より 組成 : 微量元素無視

注記※1 : 遮蔽解析上主要となる材料以外の部材に関しては、文献記載値を用いている。

注記※2 : ただし、B<sub>4</sub>C 及び H については含有量の下限値とする。

B<sub>4</sub>C 含有量 : 0.0155 g/cm<sup>3</sup> 以上、H 含有量 : 0.086 g/cm<sup>3</sup> 以上

## (2) 遮蔽解析

遮蔽解析においては、以下に示す通り線源条件を設定し、金属キャスクの表面及び表面から 1m 離れた位置における線量当量率を求め、それぞれ 2mSv/h (2000 $\mu$ Sv/h) 以下及び 100 $\mu$ Sv/h 以下となる事を確認する。遮蔽解析フローを図 1 に示す。解析条件については、別紙 1 に示す。

### a. 線源条件

使用済燃料の線源強度計算条件を表 2、収納配置条件を図 2 に示す。使用済燃料の線源強度は、収納する使用済燃料の種類、燃焼度、濃縮度、冷却期間等を設定し、燃焼計算コード ORIGEN2 を使用して求める。また、使用済燃料の平均燃焼度に対する軸方向の燃焼度の比を反映した燃焼度分布（以下「ピーキングファクタ」という。）を考慮する。ピーキングファクタについては別紙 2 に記述する。使用済燃料の構造材については、照射期間、中性子束、冷却期間等を条件として、放射化計算式を用いて線源強度を求める。

### b. 線源強度計算方法

使用済燃料の線源強度は、「燃料有効部のガンマ線」、「燃料有効部の中性子」、「燃料集合体及びチャンネルボックスの構造材放射化ガンマ線」に分けて、以下のように計算する。

#### ・燃料有効部からのガンマ線

燃料有効部のガンマ線源は、核分裂生成物及びアクチノイドによるものである。

ガンマ線源強度の計算は、燃焼計算コード ORIGEN2 を用いて実施する。

計算においては使用済燃料のピーキングファクタを考慮する。

#### ・燃料有効部からの中性子

燃料中には中性子源となる超ウラン元素が生成される。これらの核種から中性子が生成する反応は、自発核分裂及び( $\alpha$ , n)反応である。

一次中性子源強度の計算は、燃焼計算コード ORIGEN2 を用いて実施する。計算においては使用済燃料のピーキングファクタを考慮する。

体系の増倍効果を考慮した全中性子源強度は次式により求める。

$$N_s = N_0 / (1 - k_{\text{eff}})$$

ここで、

$N_s$  : 全中性子源強度

$N_0$  : 一次中性子源強度

$k_{\text{eff}}$  : 使用済燃料貯蔵時における実効増倍率

上記の中性子源強度のうち大部分は、 $^{244}\text{Cm}$  の自発核分裂線源及び増倍による  $^{235}\text{U}$  及び  $^{239}\text{Pu}$  の核分裂線源であり、 $(\alpha, n)$  反応による線源はわずかである。そこで、計算に用いる線源のエネルギースペクトルは、線源強度に支配的な核分裂線源のうち最もスペクトルが硬い  $^{239}\text{Pu}$  の核分裂スペクトルとする。

・燃料集合体構造材及びチャンネルボックス構造材からの放射化ガンマ線

燃料集合体構造材の放射化によるガンマ線源のうち、金属キャスク外部の線量当量率に寄与するものは、構造材中に含まれる  $^{59}\text{Co}$  の  $(n, \gamma)$  反応により生じる  $^{60}\text{Co}$  が大部分であり、構造材の  $^{59}\text{Co}$  含有量に従い、次式に基づいて  $^{60}\text{Co}$  への放射化量を計算する。

$$A = N_0 \times \sigma \times \phi \times \{1 - \exp(-\lambda \times T_1)\} \times \exp(-\lambda \times T_2)$$

ここで、

- A : 放射化核種 ( $^{60}\text{Co}$ ) の放射能 (Bq)
- $N_0$  : ターゲット核種 ( $^{59}\text{Co}$ ) の個数 (atoms)
- $\sigma$  : 2200m/s の中性子による  $^{59}\text{Co}$  反応断面積 ( $\text{cm}^2$ )
- $\phi$  : 炉内照射熱中性子束 ( $\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ )
- $\lambda$  :  $^{60}\text{Co}$  の崩壊定数 (1/日)
- $T_1$  : 照射期間 (日)
- $T_2$  : 冷却期間 (日)

線源計算にあたり、燃料集合体上下の構造材部のガンマ線源強度は、上部タイププレート部のハンドル部及びグリッド部並びに上部プレナム部並びに下部タイププレート部の4領域に分けて求め、チャンネルボックスも別に考慮する。

金属キャスク 1 基当たりのガンマ線及び中性子の線源強度計算結果を表 3 に示す。

### c. 線量当量率評価方法

Hitz-B52 型の線量当量率は、Hitz-B52 型の実形状を軸方向断面で二次元モデル化し、前 a 項に従って算出した線源強度に基づき、二次元輸送計算コード DOT3.5 (DLC-23/CASK ライブラリ) を使用して求める。

金属キャスク表面から線量当量率の評価位置である 1m の位置までの評価にはレイエフェクトを平準化するため、DOT3.5 の補助コードである SPACETRAN-III を用いる。

Hitz-B52 型のモデル化の概要を図 3 に示す。遮蔽解析の保守性を表 4、遮蔽解析における不確かさの考慮を表 5 に示す。

## 3. 参考文献

- (1) 日本機械学会、「伝熱工学資料改訂第 4 版」(1986 年 10 月)
- (2) 日本アルミニウム協会、「アルミニウムハンドブック第 7 版」(2007 年 1 月)

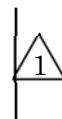


表 2 使用済燃料の線源強度計算条件

項目			新型 8×8 燃料	新型 8×8 ジルコニウム ライナ燃料	高燃焼度 8×8 燃料
最高燃焼度	(MWd/t)		40,000	40,000	50,000
平均燃焼度	(MWd/t)		35,000	38,000	43,000
比出力	(MW/t)		25.3	25.3	26
照射 期間 (日)	使用済燃料 集合体	最高燃焼度	1,582	1,582	1,924
		平均燃焼度	1,384	1,502	1,654
	チャンネルボックス	[ ]			
濃縮度	(wt%)		2.7	2.9	3.3
冷却期間	(年)		25	18	15
ウラン重量	(kg)		176	178	175※1

注記※1：2種類存在する使用済燃料のうち、遮蔽解析では質量が 270kg（ウラン重量としては 175kg）のものを遮蔽解析上の対象とした。

1

表 3 金属キャスク 1 基当たりのガンマ線及び中性子の線源強度

項目	新型 8×8 燃料	新型 8×8 ジルコニウム ライナ燃料	高燃焼度 8×8 燃料
最高燃焼度 (MWd/t)	40,000	40,000	50,000
平均燃焼度 (MWd/t)	35,000	38,000	43,000
濃縮度 (wt%)	2.7	2.9	3.3
冷却期間 (年)	25	18	15
燃料有効部のガンマ線の線源強度※1 (photons/s)	$4.860 \times 10^{16}$	$5.981 \times 10^{16}$	$7.585 \times 10^{16}$
燃料集合体構造材の放射化によるガンマ線の線源強度 ( $^{60}\text{Co}$ : Bq)	$3.744 \times 10^{13}$	$8.545 \times 10^{13}$	$1.669 \times 10^{14}$
燃料有効部の中性子の線源強度※2 (n/s)	$1.165 \times 10^{10}$	$1.350 \times 10^{10}$	$2.389 \times 10^{10}$

注記※1： ORIGEN2 のエネルギー群スペクトルから DLC23 形式のエネルギー群スペクトルに振り分けた線源強度を示す。

注記※2： 中性子実効増倍率の効果を検討した値である。

表 4 遮蔽解析の保守性

項目	内容
対象燃料	<ul style="list-style-type: none"> <li>・遮蔽解析を実施するにあたり、設計燃料は冷却期間が最も短く、燃焼度が最も高く、全線源強度が最も高くなる高燃焼度 8×8 燃料を対象として、他のケースを包絡するような設定とした。</li> </ul>
線源強度	<ul style="list-style-type: none"> <li>・中央部に最高燃焼度燃料、外周部に平均燃焼度燃料を配置している（図 2 参照）。</li> <li>・ピーキングファクターを考慮している。</li> </ul>
モデル化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・チャンネルボックスは放射化線源強度のみ考慮し、構造材としての遮蔽効果は無視している。</li> </ul>
劣化評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>・中性子遮蔽材（レジン）の経年劣化評価試験結果等の知見を踏まえて、加熱に伴う熱分解による中性子遮蔽材の質量減損について、設計評価期間（60 年間）中に減損する量を考慮している（別紙 1-3 項参照）。</li> <li>・中性子遮蔽材について上記減損分を考慮した原子個数密度を線量当量率計算に用いている。</li> </ul>

1

表 5 遮蔽解析における不確かさの考慮

項目	内容
寸法公差	<ul style="list-style-type: none"> <li>解析モデルの各種寸法は公称値でモデル化し、板厚公差等の影響を考え、設計公差より設定した密度補正係数を原子個数密度に乗じて考慮している。</li> </ul>
材料密度	<ul style="list-style-type: none"> <li><u>日本機械学会 伝熱工学資料等に記載された密度を保守的に設定し（表 1 参照）、公差を考慮した密度の補正を行い、原子個数密度を評価している。</u></li> </ul>

1

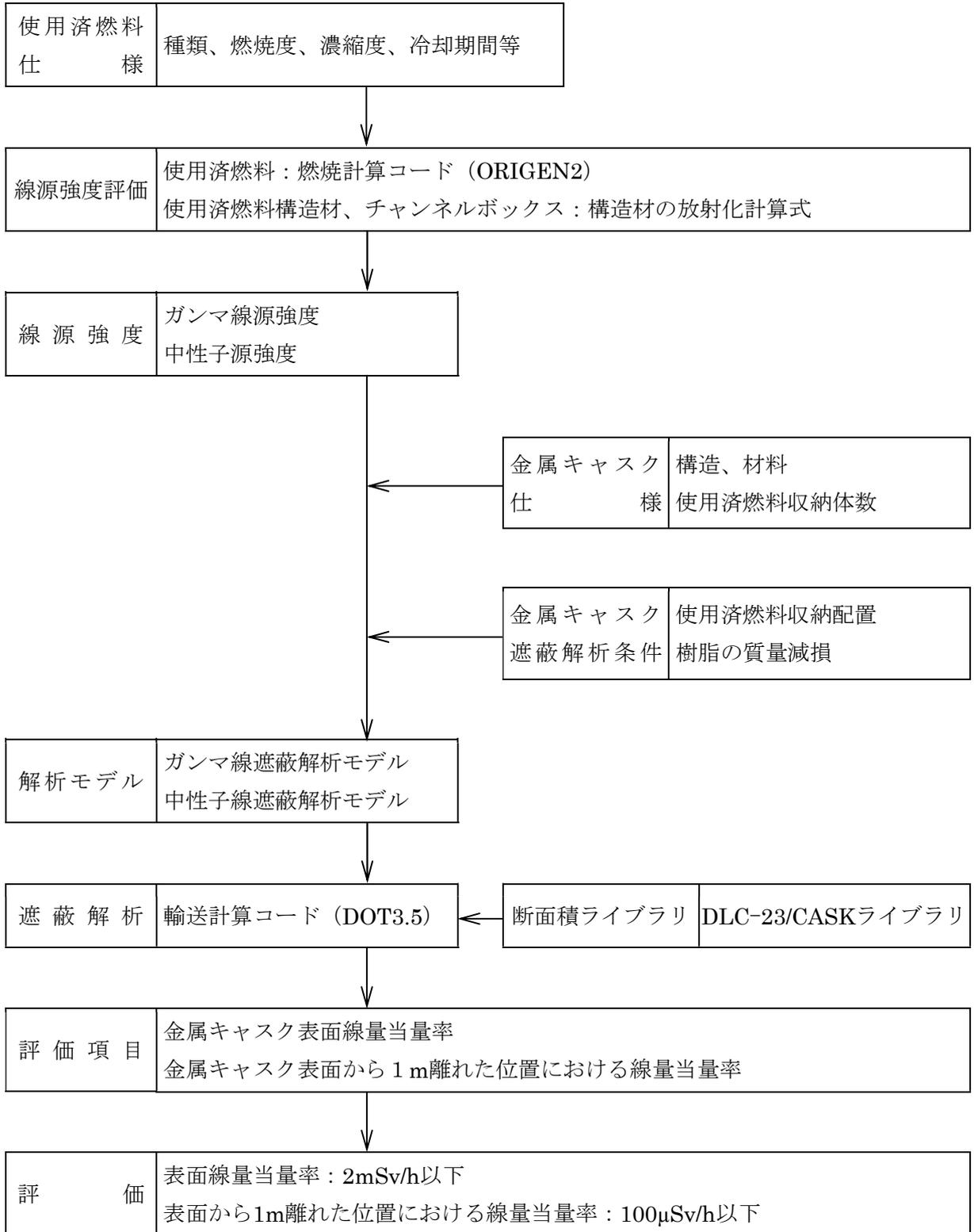


図 1 遮蔽解析フロー図

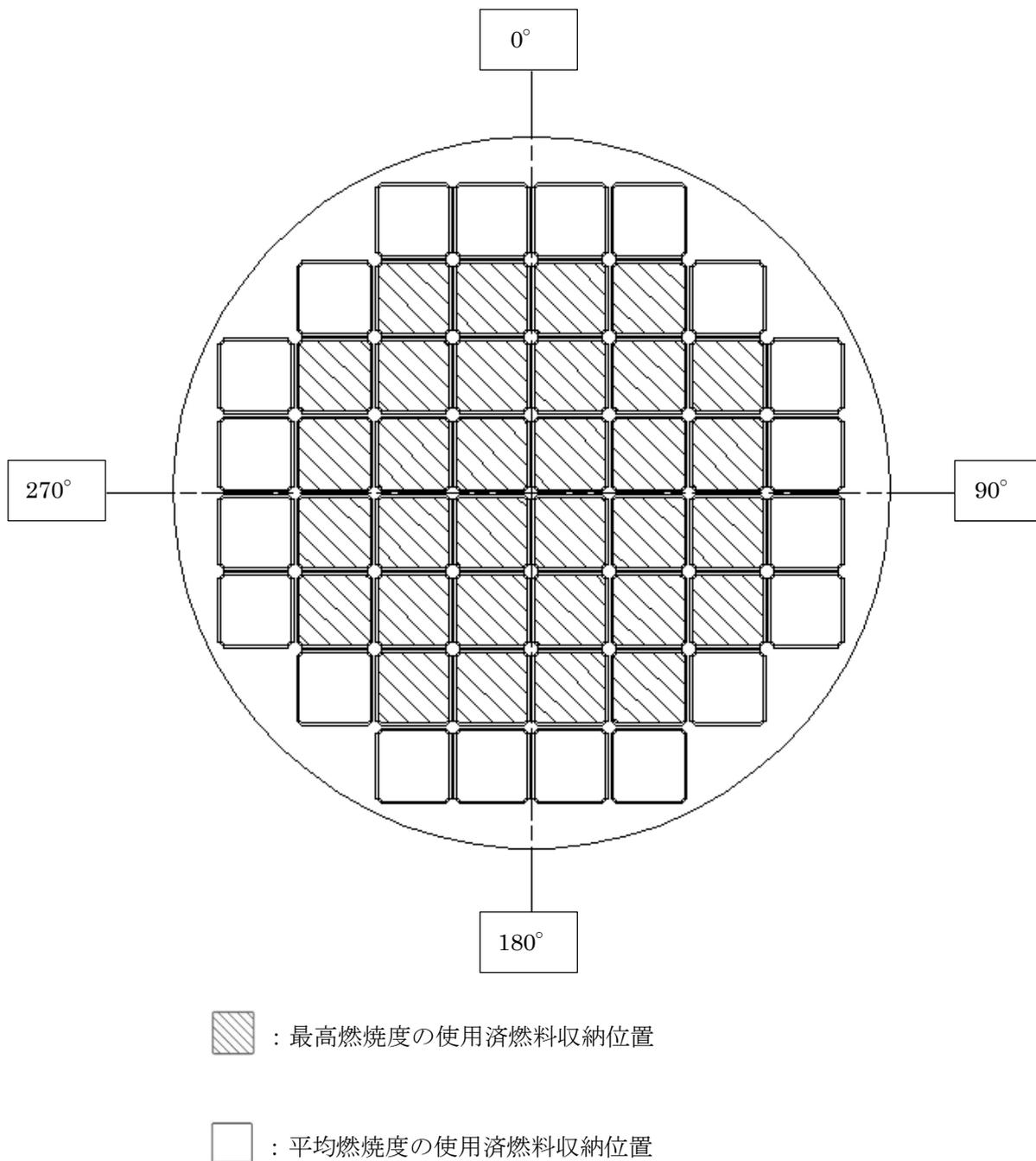


図 2 遮蔽解析における使用済燃料の収納位置条件

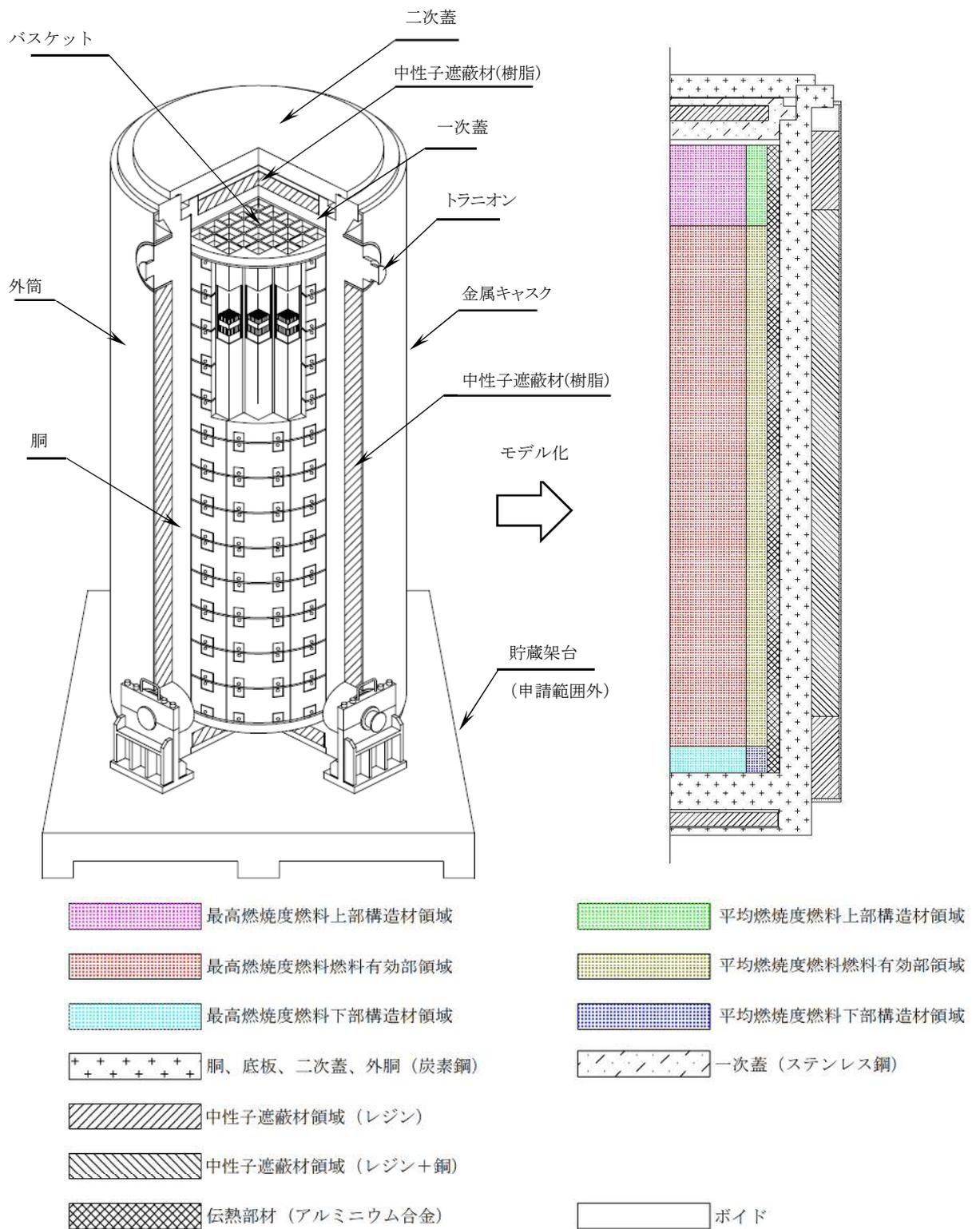


図3 Hit-B52型のモデル化の概要

### (3) 遮蔽解析結果

金属キャスク表面及び表面から 1m 離れた位置における最大線量当量率を表 6 に、評価方向毎の最大線量当量率を与える位置を図 4 に示す。

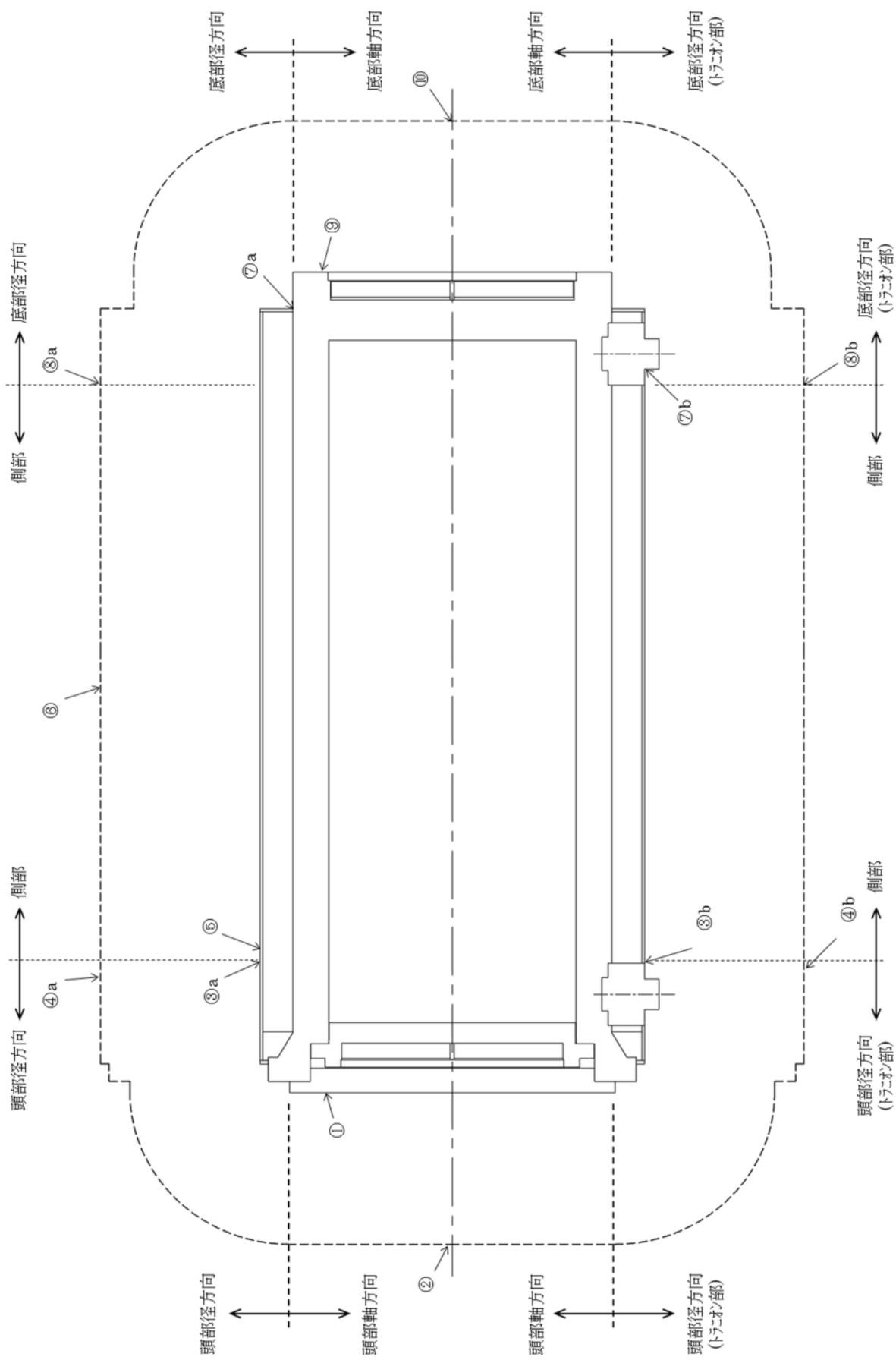
遮蔽解析結果から、金属キャスク表面及び表面から 1m 離れた位置における線量当量率は、それぞれ 2mSv/h (2000 $\mu$ Sv/h) 以下及び 100 $\mu$ Sv/h 以下となることを確認した。

表 6 線量当量率評価結果

(単位：μSv/h)

評価点			頭部			側部	底部		
			軸方向	径方向	径方向 (トランニオン部)		軸方向	径方向	径方向 (トランニオン部)
			①	③a	③b		⑤	⑨	⑦a
表面	ガンマ線	燃料有効部	<0.1	6.4	5.3	7.9	<0.1	<u>0.3</u>	4.0
		構造材放射化	0.3	241.2	116.5	242.4	0.6	<u>2.0</u>	2.9
		二次ガンマ	0.3	5.9	4.6	6.3	0.9	<u>6.5</u>	6.2
	中性子		71.2	2.0	49.0	2.3	139.5	<u>853.7</u>	346.5
	合計		71.9	255.5	175.4	258.9	141.1	<u>862.5</u>	359.6
評価点			②	④a	④b	⑥	⑩	⑧a	⑧b
表面から 1m	ガンマ線	燃料有効部	<0.1	10.7	12.7	44.4	0.1	<u>20.2</u>	18.1
		構造材放射化	2.1	29.7	8.6	2.4	13.0	<u>0.5</u>	2.1
		二次ガンマ	<0.1	4.7	5.2	16.6	1.3	<u>6.9</u>	7.0
	中性子		14.5	8.5	9.5	14.0	22.5	<u>14.4</u>	11.6
	合計		16.8	53.6	36.0	77.4	36.9	<u>42.0</u>	38.8

注記：“<0.1”の値は、“=0.1”として合計値に含めた。



注記：図中の丸数字は各評価点での最大線量当量率位置を示しており、評価結果を表5に示す。

図4 線量当量率評価位置

## Hitz-B52 型の遮蔽解析条件

## 1. 使用済燃料の線源強度について

使用済燃料の線源強度は、「燃料有効部からのガンマ線」、「燃料有効部からの中性子」、「燃料集合体及びチャンネルボックスの構造材放射化ガンマ線」に分けて計算する。

金属キャスク 1 基当たりの使用済燃料の線源強度計算条件及び計算結果を本文中の表 2 及び表 3 に示す。当該表の結果より、遮蔽解析に用いる使用済燃料の代表仕様は、各使用済燃料の線源強度を包絡する高燃焼度 8×8 燃料とした。

燃料有効部のガンマ線のエネルギー毎の線源強度を別紙 1-1 表に示す。遮蔽解析に用いる中性子線源のエネルギースペクトルは、線源強度に支配的な核分裂線源のうち最もスペクトルが硬い  $^{239}\text{Pu}$  の核分裂スペクトルとする。解析に用いる中性子線源スペクトルを別紙 1-2 表に示す。

別紙 1-1 表 燃料有効部のガンマ線の線源強度比較

(金属キャスク 1 基当たり)

エネルギー群数	平均エネルギー (MeV)	燃料有効部のガンマ線の線源強度 (photons/s)		
		新型 8×8 燃料	新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料	高燃焼度 8×8 燃料
1	9.00	4.915×10 <sup>6</sup>	5.705×10 <sup>6</sup>	1.012×10 <sup>7</sup>
2	7.25	2.936×10 <sup>7</sup>	3.407×10 <sup>7</sup>	6.040×10 <sup>7</sup>
3	5.75	1.652×10 <sup>8</sup>	1.917×10 <sup>8</sup>	3.398×10 <sup>8</sup>
4	4.50	1.953×10 <sup>8</sup>	2.267×10 <sup>8</sup>	4.017×10 <sup>8</sup>
5	3.50	8.219×10 <sup>8</sup>	9.842×10 <sup>8</sup>	1.948×10 <sup>9</sup>
6	2.75	5.725×10 <sup>9</sup>	6.394×10 <sup>9</sup>	1.075×10 <sup>10</sup>
7	2.25	1.825×10 <sup>9</sup>	4.005×10 <sup>9</sup>	2.122×10 <sup>10</sup>
8	1.83	1.028×10 <sup>13</sup>	1.725×10 <sup>13</sup>	2.516×10 <sup>13</sup>
9	1.50	1.437×10 <sup>14</sup>	2.497×10 <sup>14</sup>	3.745×10 <sup>14</sup>
10	1.17	3.433×10 <sup>14</sup>	5.974×10 <sup>14</sup>	8.968×10 <sup>14</sup>
11	0.90	3.237×10 <sup>14</sup>	6.401×10 <sup>14</sup>	1.161×10 <sup>15</sup>
12	0.70	9.098×10 <sup>15</sup>	1.109×10 <sup>16</sup>	1.415×10 <sup>16</sup>
13	0.50	1.880×10 <sup>16</sup>	2.259×10 <sup>16</sup>	2.837×10 <sup>16</sup>
14	0.35	3.858×10 <sup>14</sup>	4.920×10 <sup>14</sup>	6.276×10 <sup>14</sup>
15	0.25	7.957×10 <sup>14</sup>	1.000×10 <sup>15</sup>	1.253×10 <sup>15</sup>
16	0.15	1.789×10 <sup>15</sup>	2.390×10 <sup>15</sup>	3.117×10 <sup>15</sup>
17	0.08	3.709×10 <sup>15</sup>	4.517×10 <sup>15</sup>	5.577×10 <sup>15</sup>
18	0.03	1.320×10 <sup>16</sup>	1.623×10 <sup>16</sup>	2.029×10 <sup>16</sup>
合計		4.860×10 <sup>16</sup>	5.981×10 <sup>16</sup>	7.585×10 <sup>16</sup>

注記: ORIGIN2 のエネルギー群スペクトルから DLC-23 ライブラリのエネルギー群スペクトルに振り分けた線源強度を示す。

1

別紙 1-2 表 中性子線源スペクトル

エネルギー 群数	上限エネルギー (eV)	スペクトル※1
1	$1.492 \times 10^7$	$5.72 \times 10^{-4}$
2	$1.220 \times 10^7$	$2.02 \times 10^{-3}$
3	$1.000 \times 10^7$	$6.07 \times 10^{-3}$
4	$8.180 \times 10^6$	$2.00 \times 10^{-2}$
5	$6.360 \times 10^6$	$4.12 \times 10^{-2}$
6	$4.960 \times 10^6$	$5.27 \times 10^{-2}$
7	$4.060 \times 10^6$	$1.10 \times 10^{-1}$
8	$3.010 \times 10^6$	$8.74 \times 10^{-2}$
9	$2.460 \times 10^6$	$2.28 \times 10^{-2}$
10	$2.350 \times 10^6$	$1.15 \times 10^{-1}$
11	$1.830 \times 10^6$	$2.07 \times 10^{-1}$
12	$1.110 \times 10^6$	$1.89 \times 10^{-1}$
13	$5.500 \times 10^5$	$1.31 \times 10^{-1}$
14	$1.110 \times 10^5$	$1.59 \times 10^{-2}$
15	$3.350 \times 10^3$	$8.12 \times 10^{-5}$
16	$5.830 \times 10^2$	$5.89 \times 10^{-6}$
17	$1.010 \times 10^2$	$3.89 \times 10^{-7}$
18	$2.900 \times 10^1$	$5.53 \times 10^{-8}$
19	$1.070 \times 10^1$	$1.33 \times 10^{-8}$
20	$3.060 \times 10^0$	$1.88 \times 10^{-9}$
21	$1.120 \times 10^0$	$4.19 \times 10^{-10}$
22	$4.140 \times 10^{-1}$	$1.20 \times 10^{-10}$

注記※1： $^{239}\text{Pu}$  の核分裂スペクトルを DLC-23 ライブラリの中性子 22 群構造に振り分けたものである。

## 2. 遮蔽解析のモデル化について

遮蔽解析では、従来の使用済燃料輸送キャスクの遮蔽解析で実績のある二次元輸送計算コード DOT3.5 により、R-Z 体系の有限円筒モデルで評価している。ただし、有限円筒モデルでは直接モデル化できない使用済燃料、バスケット、トラニオン等は構造上の特徴を考慮して、均質化あるいは線束の引継ぎによって評価している。なお、本体モデルは、キャスク中央付近で二分割している。

### (1) 燃料領域

燃料領域（線源領域）については、使用済燃料とバスケットを均質化したモデルとしている。別紙 1-1 図に示す通り、中央部に最高燃焼度燃料を、外周部に平均燃焼度燃料を収納しており、実形状と同等となるように、それぞれの燃料領域の断面積と等価な面積を持つ二重円（円筒）にモデル化している。最高燃焼度燃料領域と平均燃焼度燃料領域の面積は、その収納体数の比より求めている。

### (2) バスケット外周部

燃料領域より外側のバスケット部は、バスケット外側領域の面積から等価半径を設定している。

### (3) 側部中性子遮蔽材領域

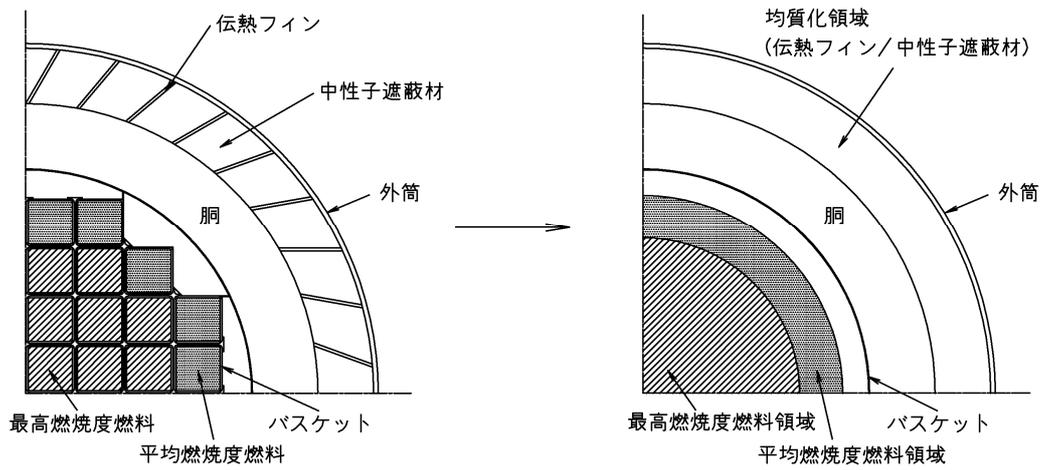
伝熱フィンが配置されている側部中性子遮蔽材領域では、中性子遮蔽材と伝熱フィンを周方向に均質化している。

### (4) トラニオン部の評価方法

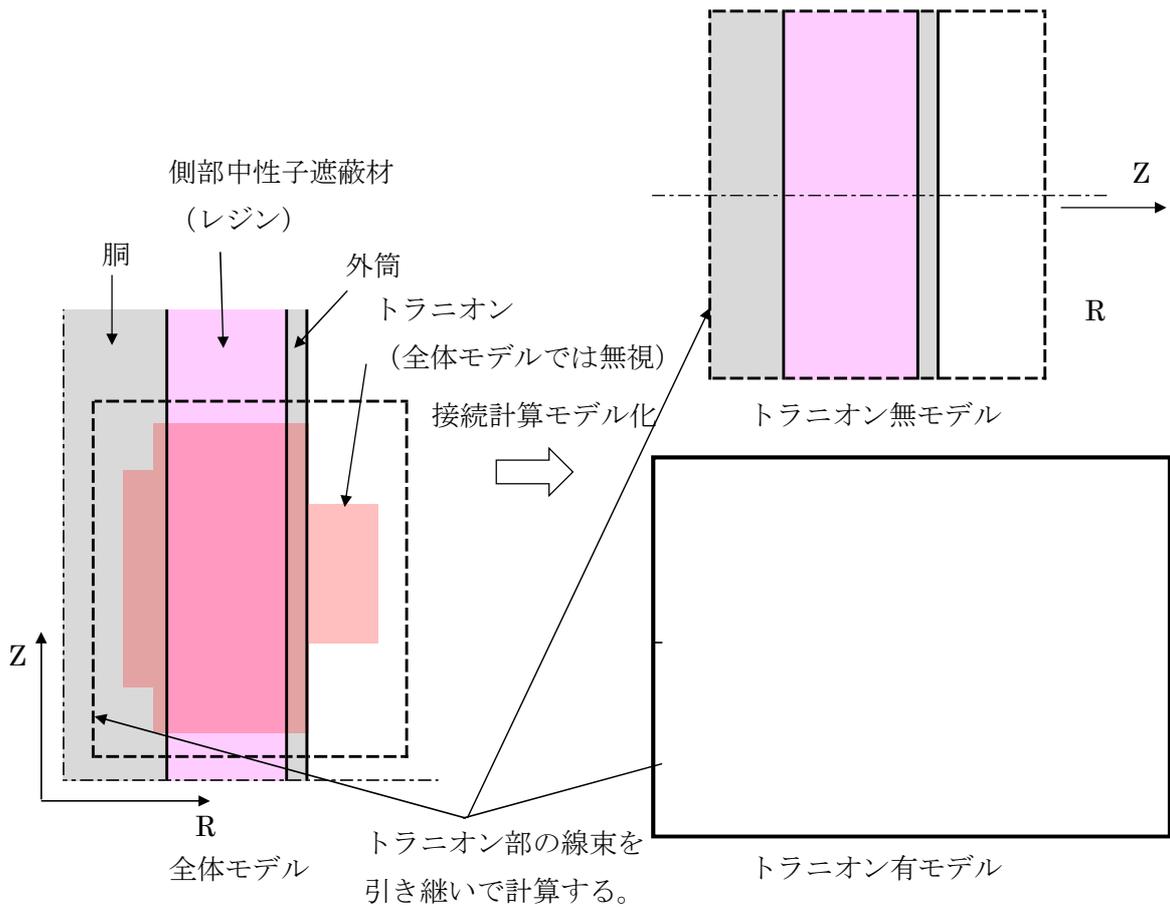
トラニオン部については、実形状を模擬して別途モデル化し、DOT3.5 を用いて評価している。上部トラニオンに関して、2 種類それぞれの形状についてモデル化している。下部トラニオンに関しては 2 種類ある形状（下部トラニオン（90° - 270° 側）、下部トラニオン（0° - 180° 側））について、別紙 1-3 図のようにモデル化し、遮蔽解析上保守的な評価をしている。

トラニオンを無視した本体モデルにて得られた各部付近の線束を、別途モデル化したトラニオン R-Z 軸対称モデル（トラニオン有/無モデル）に引き継いでいる。トラニオン部の線束引継ぎ範囲を別紙 1-2 図（2/2）に示す。トラニオン部の表面から 1m 地点での線量当量率は、トラニオン部を別途モデル化した計算を行い、本体モデルに対するトラニオンの有無による影響を評価している。本体モデルの結果より燃料有効部側の高い線束を引き継いだ保守的な計算により、トラニオン部表面の線量当量率についてはトラニオン有モデルの線量当量率で評価している。また、トラニオン部の表面から 1m 離れた位置における線量当量率については、本体モデルの結果を下式のように補正することで評価している。

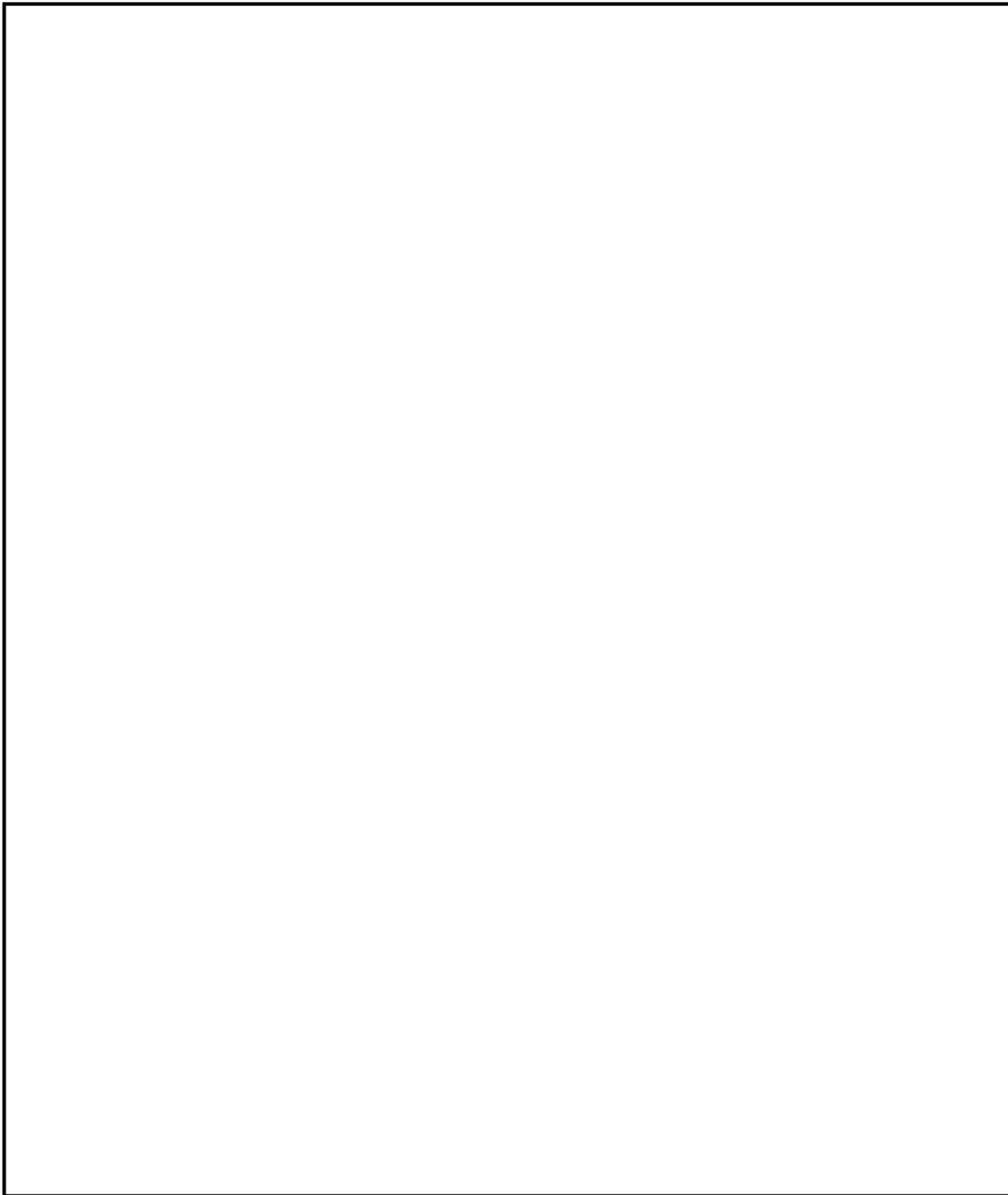
$$\text{トラニオン部の線量当量率} = \frac{(\text{本体モデルの線量当量率}) + \{(\text{トラニオン有モデルの線量当量率}) - (\text{トラニオン無モデルの線量当量率})\}}{2}$$



別紙 1-1 図 キャスク中央断面の実形状と解析モデル

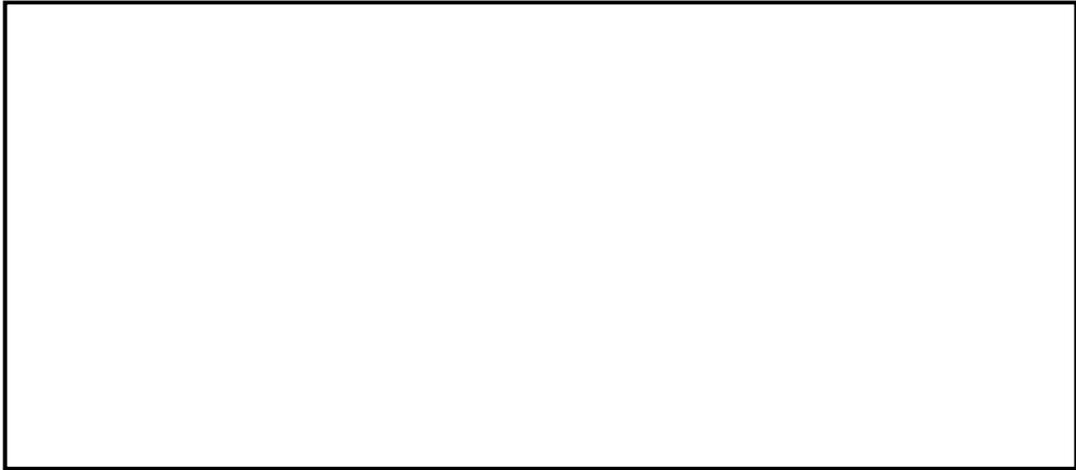


別紙 1-2 図 トランニオン部線束引き継ぎの概略図(1/2)

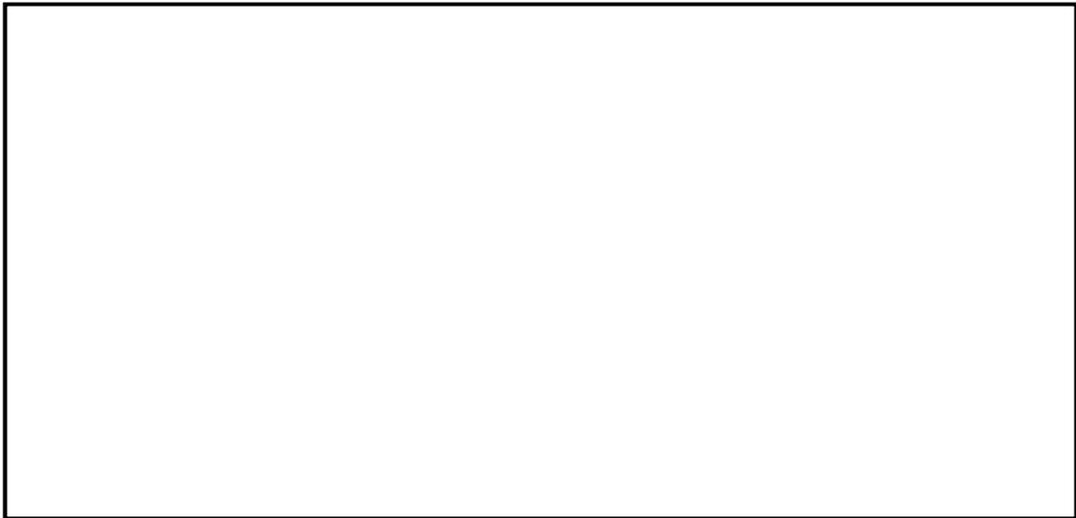


1

別紙 1-2 図 (2/2) トラニオン部線束引き継ぎの概略図



上部トラニオン (90° - 270° 側) 設計図及びモデル図



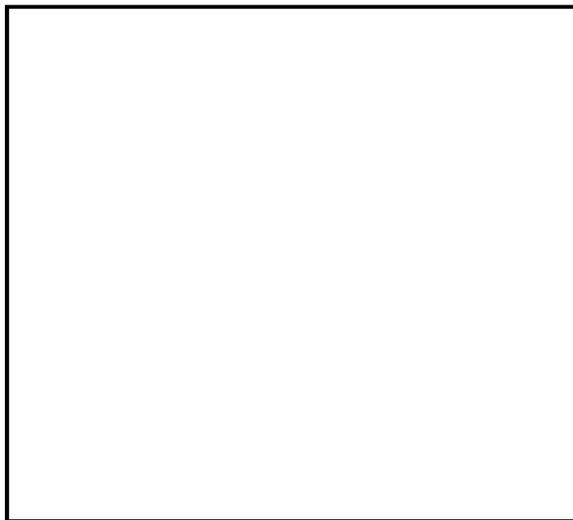
上部トラニオン (0° - 180° 側) 設計図及びモデル図

1

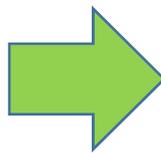
別紙 1-3 図 (1/2) 上部トラニオンのモデル化



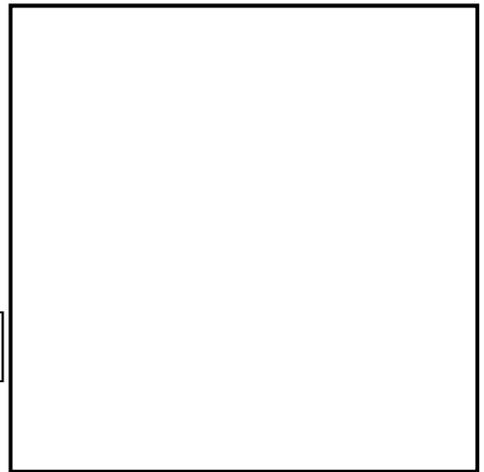
下部トラニオン (90° - 270° 側) 設計図



下部トラニオン (0° - 180° 側) 設計図



モデルを統一



- ① レジン部は 90° - 270° 側の形状   に統一してモデル化することにより、保守的な評価としている。
- ② トラニオン先端部の形状を 0° - 180° 側の形状に統一してモデル化している。

別紙 1-3 図 (2/2) 下部トラニオンのモデル化に際する考え方

## 3. 貯蔵期間中の遮蔽性能の低下について

Hitz-B52 型の貯蔵期間中に受ける放射線による遮蔽材の特性変化は無い。

ただし、中性子遮蔽材であるレジンに関しては、設計貯蔵期間中の熱による質量減損を考慮している。

中性子遮蔽材であるレジンの長期使用による質量減損評価においては、閉鎖系のエポキシ系レジンに対する劣化パラメータによる評価式を用いた。なお、レジンの質量減損分は  $H_2O$  が抜けるものと仮定した考慮を行っている。

$$\Delta w = 5.69 \times 10^{-4} \times E_p - 18.7^{*1}$$

$\Delta w$  : 中性子遮蔽材の質量減損率 (%)

$E_p$  : 劣化パラメータ =  $T \times (77.6 + \ln t)$

$T$  : 中性子遮蔽材の最高温度 (K)

$t$  : 中性子遮蔽材の加熱時間 (h)

注記※1: NUPEC 報告書 (平成 14 年度「リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 (金属キャスク貯蔵技術確証試験)」) の評価式を 95%信頼性確度で再評価している。NUPEC 報告では、開放系 (試験片を挿入する高温槽内のガスを乾燥空気と定期的に置換。空気雰囲気、大気圧。)、閉鎖系 (試験片を挿入する個別容器に細径管を設置し、放出ガスを系外に放出。放出ガス雰囲気 (初期は空気)、大気圧。)、密閉系 (試験片を密封容器に封入。放出ガス雰囲気 (初期は空気)、圧力はガス放出に伴い上昇。) の 3 体系でそれぞれ試験を実施しており、重量減損率は密閉系 < 閉鎖系 < 開放系の順となる結果が得られている。Hitz-B52 型に使用する中性子遮蔽材の使用環境は密閉系と考えられるが、貯蔵期間中の圧力監視は義務付けられておらず、密閉環境を保証できないため、保守的に閉鎖系を選択している。

1

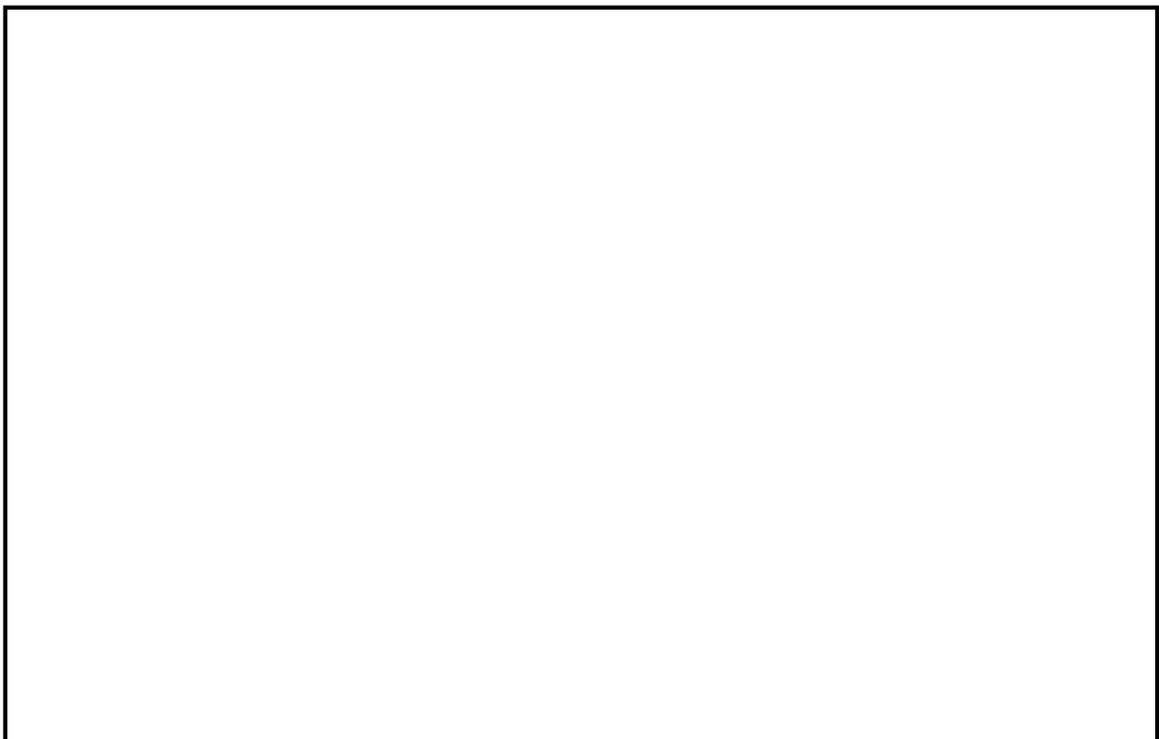
## ピーキングファクタについて

Hitz-B52型に収納する使用済燃料の線源強度を算出する際に用いるピーキングファクタは、Hitz-B52型が収納対象とする使用済燃料の軸方向の燃焼度を想定して設定したものである。別紙 2-1 表に収納対象とする使用済燃料のピーキングファクタを示す。

別紙 2-1 表に示すピーキングファクタは、Hitz-B52型に収納する使用済燃料の前提条件であり、収納する使用済燃料の軸方向燃焼度が本ピーキングファクタに包絡される事は、事業許可申請において別途確認されるものとする。なお、包絡されない使用済燃料に関しては、Hitz-B52型の収納対象外とする。

別紙 2-1 表 使用済燃料のピーキングファクタ

燃料種類	新型 8×8 燃料		新型 8×8 ジルコニウムライナ 燃料		高燃焼度 8×8 燃料	
	燃焼度 (MWd/t)	35,000	40,000	38,000	40,000	43,000
冷却期間 (年)	25		18		15	



注記 1 : ノードは燃料有効部を軸方向に  したものである。

別紙 2-2

内は商業機密のため、非公開とします。

## 放射化線源について

構造材放射化線源核種を検討するにあたり、構造材 (SUS304) に含まれる元素として量的に有意であると考えられるのは、C、Si、Cr、Mn、P、S、Fe、Co、Ni、Mo である。これらの元素が中性子を吸収して生成される放射性物質はほとんどが短寿命であり、半減期が 100 日を超えるものは、 $^{32}\text{Si}$ 、 $^{53}\text{Mn}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{55}\text{Fe}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{59}\text{Ni}$ 、 $^{63}\text{Ni}$ 、 $^{93}\text{Mo}$  である。さらにガンマ線源となるのは別紙 3-1 表に示すとおり、 $^{54}\text{Mn}$  及び  $^{60}\text{Co}$  である。

別紙 3-1 表 長寿命放射化核種の半減期と放出ガンマ線エネルギー

核種	半減期	放出ガンマ線エネルギー (MeV)
$^{32}\text{Si}$	650y	no $\gamma$
$^{53}\text{Mn}$	$3.7 \times 10^6\text{y}$	no $\gamma$
$^{54}\text{Mn}$	312d	0.835
$^{55}\text{Fe}$	2.7y	no $\gamma$
$^{60}\text{Co}$	5.271y	1.173、1.332
$^{59}\text{Ni}$	$7.5 \times 10^4\text{y}$	no $\gamma$
$^{63}\text{Ni}$	100y	no $\gamma$
$^{93}\text{Mo}$	$3 \times 10^3\text{y}$	no $\gamma$

※各値は「Table of Isotope 7th Edition」<sup>1)</sup>より抜粋。

## 1. ORIGEN2 による評価

前項により放射化線源として有意な核種は  $^{54}\text{Mn}$  及び  $^{60}\text{Co}$  の 2 核種と考えられる。

本項では ORIGEN2 による構造材の炉内照射計算を実施し、当該 2 核種の 15 年冷却後の線源強度を比較することで対象とする放射化線源核種を決定する。主要構造材の組成及び重量を別紙 3-2 表に示す。

$^{54}\text{Mn}$  の生成反応は  $^{54}\text{Fe} (n,p) ^{54}\text{Mn}$ 、 $^{60}\text{Co}$  の生成反応は  $^{59}\text{Co} (n,\gamma) ^{60}\text{Co}$  である。

構造材を構成する主な材料はステンレス鋼及びインコネルであるが、いずれも Fe、Cr、Ni を主要元素として含有する材料であるので、重量が多いステンレス鋼を代表材料として考えることとした。

別紙 3-2 表 主要構造材の組成及び重量

材質	構造材 重量 (g/体)	元素組成 (wt%)			
		Cr	Fe	Ni	Zr
ステンレス鋼 (SUS304) <sup>2)</sup>		約 19	約 68	約 9	0
ジルカロイ (ジルカロイ-2) <sup>3)</sup>		約 0.1	約 0.14	約 0.06	約 99.7
インコネル (インコネル 600) <sup>4)</sup>		約 16	約 8	約 77	0

ORIGEN2 による構造材の炉内照射計算を実施するにあたり、入力条件として必要な構造材の組成（別紙 3-2 表に記載した元素以外で、不純物として含まれる元素を考慮している）及びそれらの重量を別紙 3-3 表、ガンマ線の線源強度計算結果の比較を別紙 3-4 表に示す。別紙 3-4 表より、15 年冷却後のガンマ線の線源強度は  $^{54}\text{Mn}$  が  $^{60}\text{Co}$  の約  $4.3 \times 10^{-6}$  倍程度と十分小さく、また放出するガンマ線のエネルギーも  $^{60}\text{Co}$  と比較して小さいため、キャスク体系では  $^{54}\text{Mn}$  を考慮する必要はなく、放射化線源としては  $^{60}\text{Co}$  のみを対象とする。

なお、別紙 3-1 表～別紙 3-4 表に記載する値は  $^{60}\text{Co}$  とその他の核種の生成量を比較するための ORIGEN2 による構造材の炉内照射計算用に設定したものであり、遮蔽解析に使用する値ではない。

別紙 3-3 表 ステンレス鋼 (SUS304) の組成<sup>2)</sup>及び重量

元素	原子番号	重量 (g/体)	%
C	6		
Si	14		
Mn	25		
P	15		
S	16		
Ni	28		
Cr	24		
Fe	26		
Co	27		

※5) 中央値

※7) 上限値

※8) 残り

※9) 設計値

別紙 3-4 表 ガンマ線の線源強度計算結果の比較

核種	ガンマ線の線源強度 (TBq)	
	照射直後	15年冷却
<sup>54</sup> Mn	9.76E+00	5.15E-05
<sup>60</sup> Co	8.67E+01	1.21E+01

## 2. 参考文献

- 1) Michael C., and Virginia S. (1978) *Table of Isotopes 7<sup>th</sup> Edition*, John Wiley & Sons.
- 2) 日本工業規格、「JIS G4303 : 2012 ステンレス鋼棒」
- 3) (公社) 日本金属学会、「金属便覧 日本金属学会編 改訂第 6 版」(平成 12 年 5 月)
- 4) (株) オーム社、「新版 原子力ハンドブック」(平成元年 3 月)

線量当量率を評価する際に使用した線量当量率換算係数について

1. 線量当量率換算係数について

1cm 線量当量率への換算係数については、ICRP Publ.74<sup>1)</sup> に基づいて求められた原子力学会標準<sup>2)</sup>の記載値を用いている。DLC-23/CASK ライブラリのエネルギー群構造に対応する中性子及びガンマ線の線量当量率換算係数を別紙 4-1 表及び別紙 4-2 表に示す。

2. 参考文献

- (1) ICRP Publication 74, "外部放射線に対する放射線防護に用いるための換算係数", (社)日本アイソトープ協会, 丸善(株), 201,222(1998).
- (2) (社)日本原子力学会, "使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計および検査基準 : 2013"

別紙 4-1 表 中性子の線量当量率換算係数(1cm 線量当量率)

エネルギー 群数	上限エネルギー [eV]	線量当量率換算係数 [( $\mu\text{Sv/h}$ )/( $\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )]
1	1.492E+07	1.81E+00
2	1.220E+07	1.64E+00
3	1.000E+07	1.51E+00
4	8.180E+06	1.46E+00
5	6.360E+06	1.45E+00
6	4.960E+06	1.46E+00
7	4.060E+06	1.48E+00
8	3.010E+06	1.49E+00
9	2.460E+06	1.50E+00
10	2.350E+06	1.51E+00
11	1.830E+06	1.53E+00
12	1.110E+06	1.40E+00
13	5.500E+05	8.08E-01
14	1.110E+05	9.80E-02
15	3.350E+03	2.82E-02
16	5.830E+02	3.16E-02
17	1.010E+02	3.55E-02
18	2.900E+01	3.86E-02
19	1.070E+01	4.27E-02
20	3.060E+00	4.66E-02
21	1.120E+00	4.85E-02
22	4.140E-01	4.14E-02

別紙 4-2 表 ガンマ線の線量当量率換算係数(1cm 線量当量率)

エネルギー 群数	上限エネルギー [eV]	線量当量率換算係数 [( $\mu\text{Sv/h}$ )/( $\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )]
1	1.000E+07	8.48E-02
2	8.000E+06	7.24E-02
3	6.500E+06	6.12E-02
4	5.000E+06	5.19E-02
5	4.000E+06	4.43E-02
6	3.000E+06	3.80E-02
7	2.500E+06	3.33E-02
8	2.000E+06	2.90E-02
9	1.660E+06	2.52E-02
10	1.330E+06	2.10E-02
11	1.000E+06	1.74E-02
12	8.000E+05	1.41E-02
13	6.000E+05	1.05E-02
14	4.000E+05	7.56E-03
15	3.000E+05	5.41E-03
16	2.000E+05	3.23E-03
17	1.000E+05	1.92E-03
18	5.000E+04	2.63E-03

## 二次元輸送計算コード DOT3.5 の妥当性

## (1) DOT3.5 の概要

Hitz-B52 型の遮蔽計算に使用している計算コードは、原子力施設の遮蔽計算に広く用いられている DOT3.5 であり、輸送キャスクや貯蔵キャスクの遮蔽解析において豊富な実績がある。

## (2) 機能

DOT3.5 は、遮蔽計算に際して以下の機能を有する。

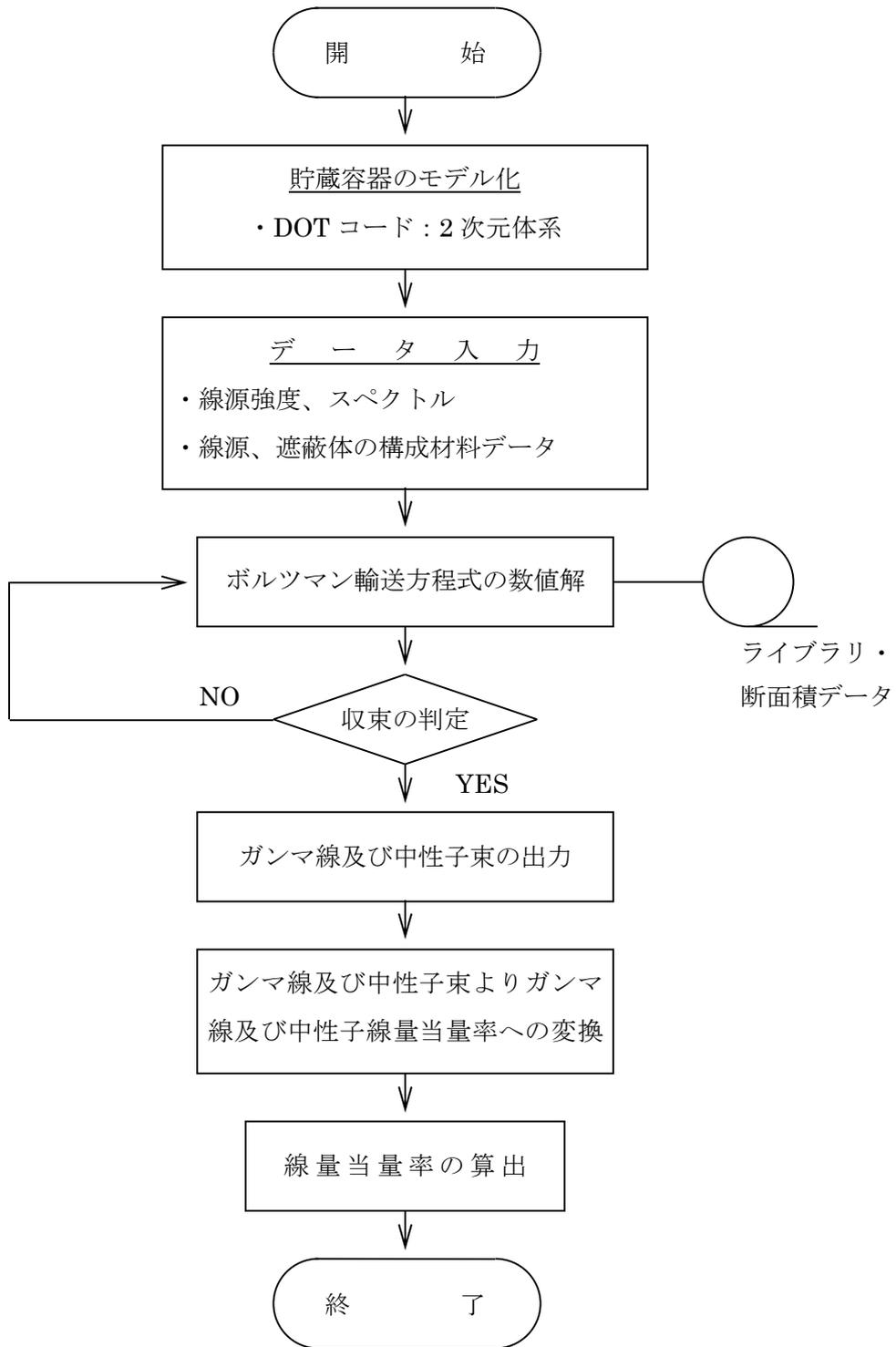
- ① ガンマ線や中性子に対するボルツマン輸送方程式を解くことによる数値解法であり、放射線の挙動を追跡するのに重要な非等方性が表現できる。
- ② DOT3.5 は、2次元の体系を扱うことができる。

## (3) 解析フロー

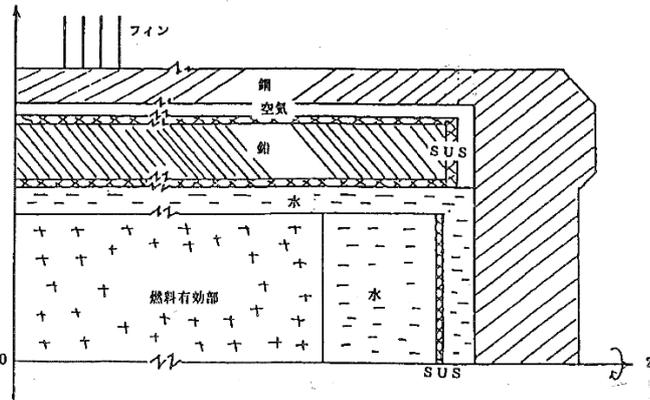
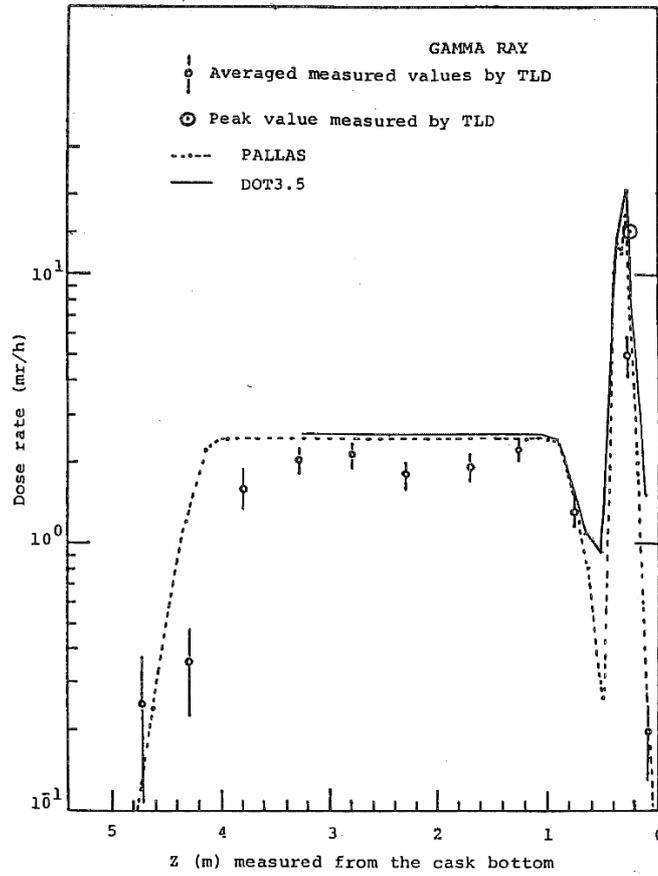
DOT3.5 の解析フローを別紙 5-1 図に示す。

## (4) 使用実績及び検証

ガンマ線及び中性子について、DOT3.5 で解析した使用済燃料輸送キャスクの解析事例とその測定値を別紙 5-2 図及び別紙 5-3 図に示す。これらの実測値は概ね解析値よりも低い値を示しており、DOT3.5 を使用することの妥当性を表している。



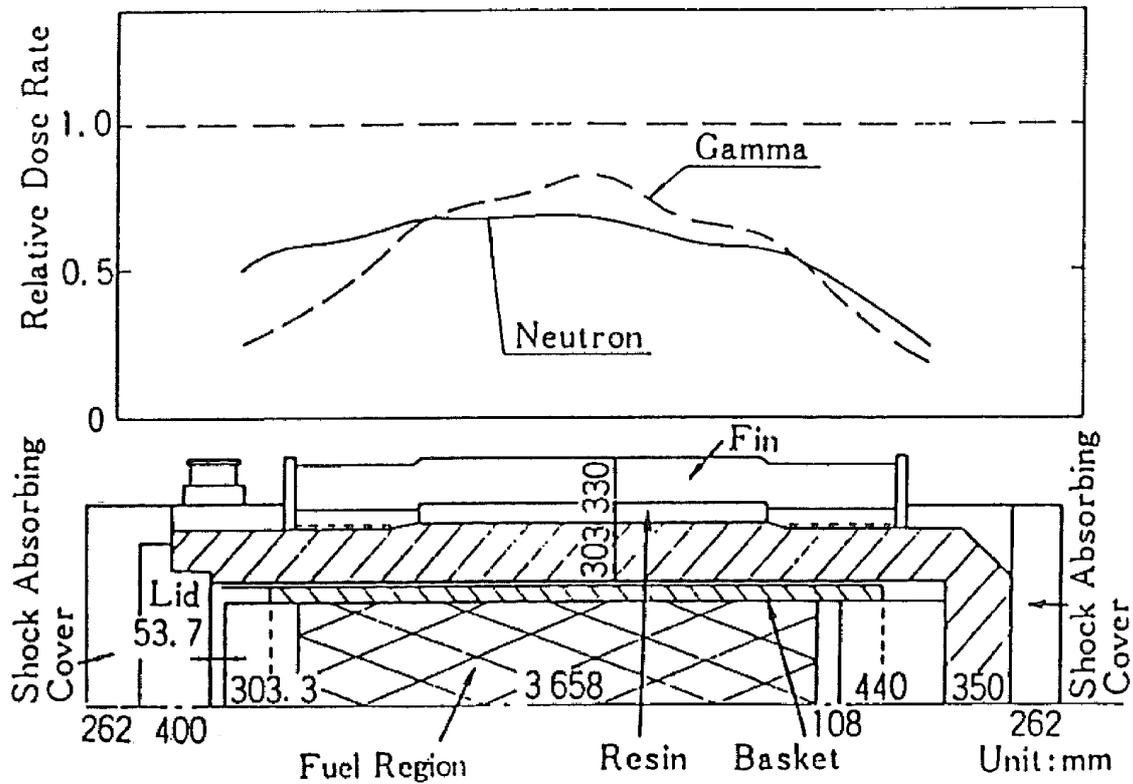
別紙 5-1 図 DOT3.5 の解析フロー図



EXCELLOX 型輸送物の容器表面でのガンマ線量当量率

(第 13 基準研究部会「使用済燃料の安全輸送に関する調査研究報告書」昭和 54 年 3 月、日本造船研究協会<sup>(7)</sup>の PALLAS コード検証例に DOT コード解析結果を追記したものである。)

別紙 5-2 図 DOT3.5 によるガンマ線の線量当量率に関する検証例



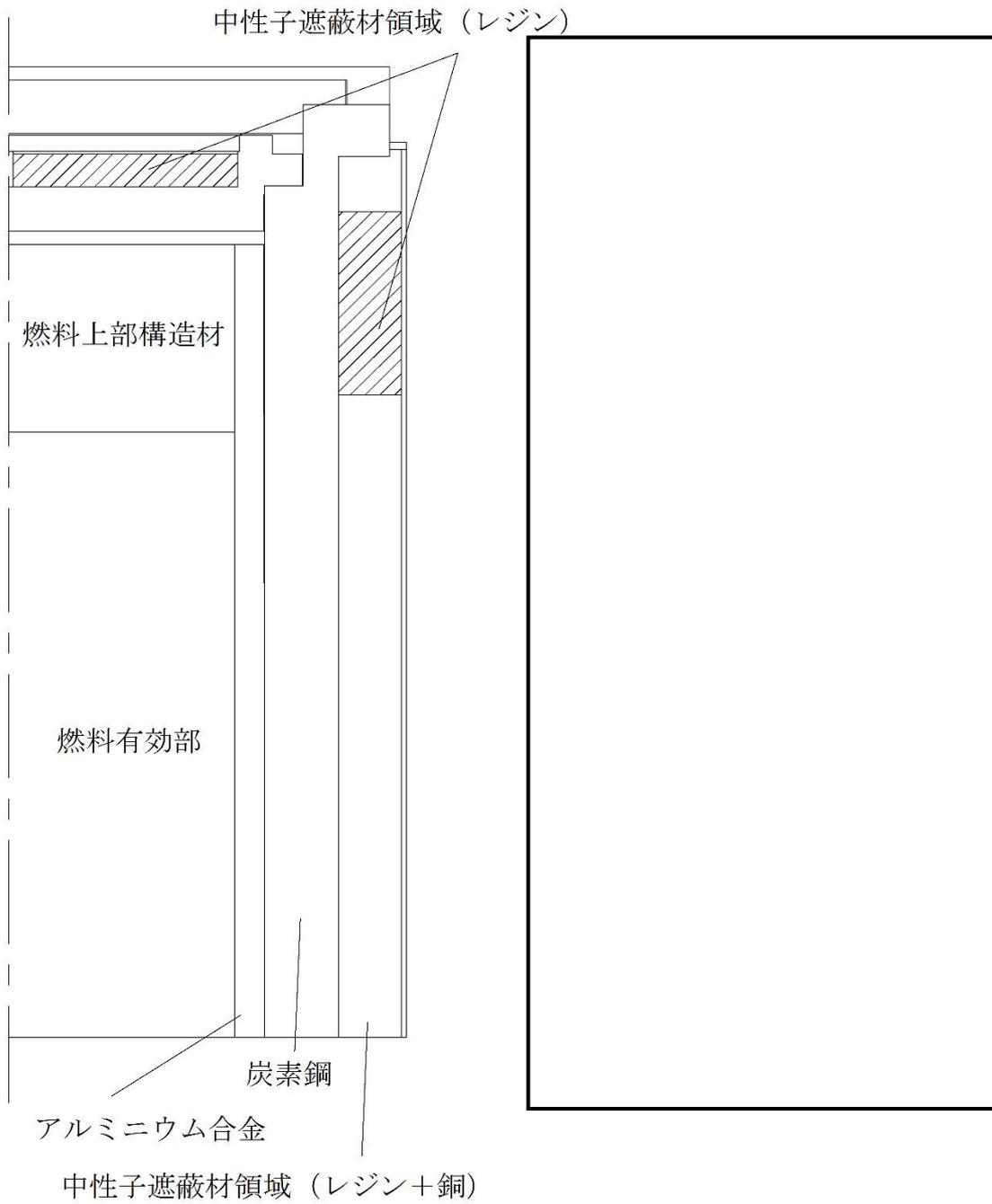
注) 中性子を DOT、二次ガンマ線を ANISN (一次元輸送コードで計算方法上の差はない)、燃料有効部のガンマ線を QAD の各コードで解析した結果である。

出典: 「中性子遮蔽設計ハンドブック」、(社)日本原子力学会、1993 年 4 月

別紙 5-3 図 DOT3.5 による中性子の線量当量率に関する検証例

解析モデル全体に対する線量当量率の等値線図

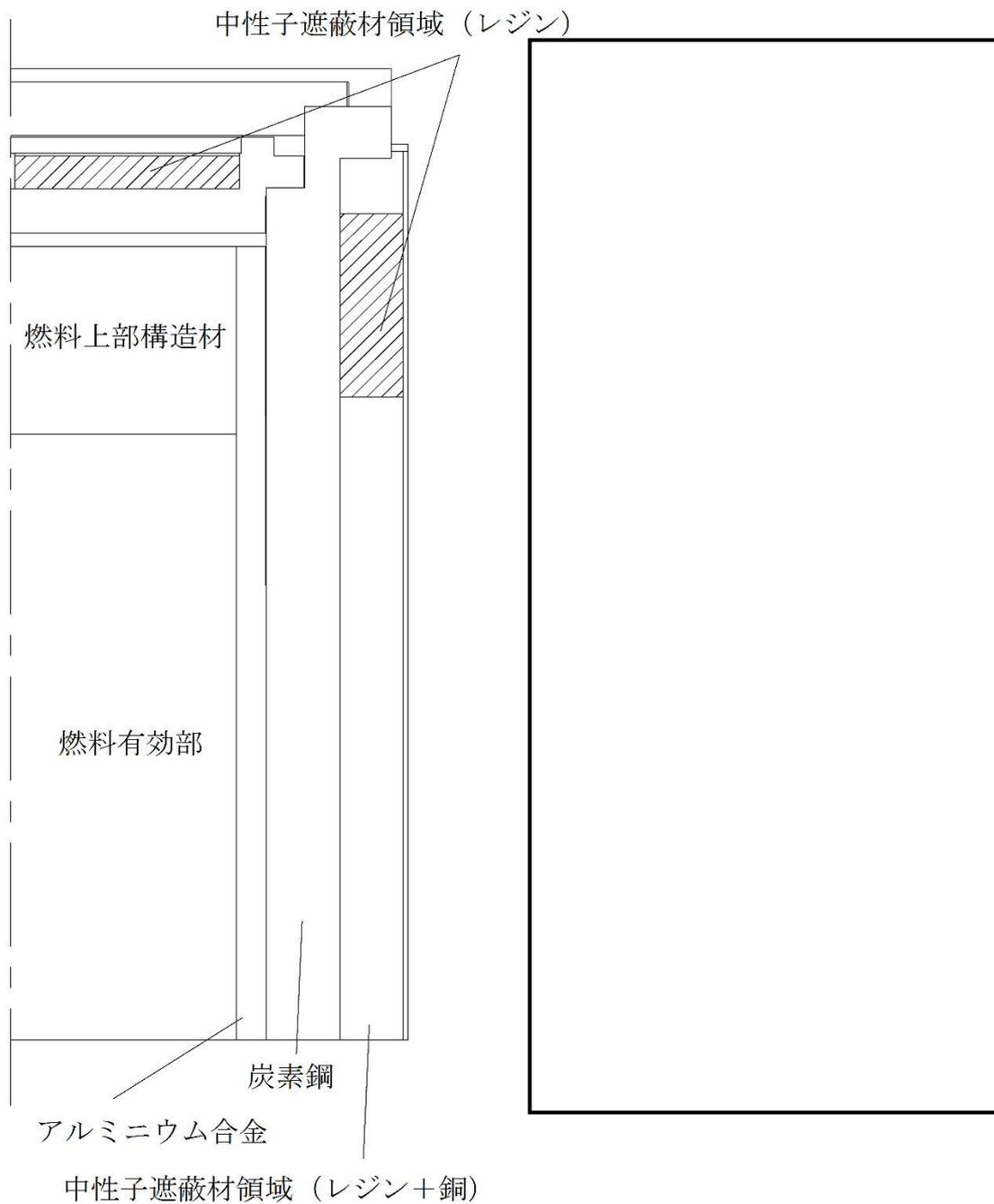
本文の表 6 に示す各評価方向における線種毎の線量当量率の等値線図を別紙 6-1 図  
~別紙 6-16 図に示す。



別紙 6-1 図 表面の線量当量率等値線図 (上部モデル/燃料有効部ガンマ線)  
(単位  $\mu\text{Sv/h}$ )

別紙 6-2

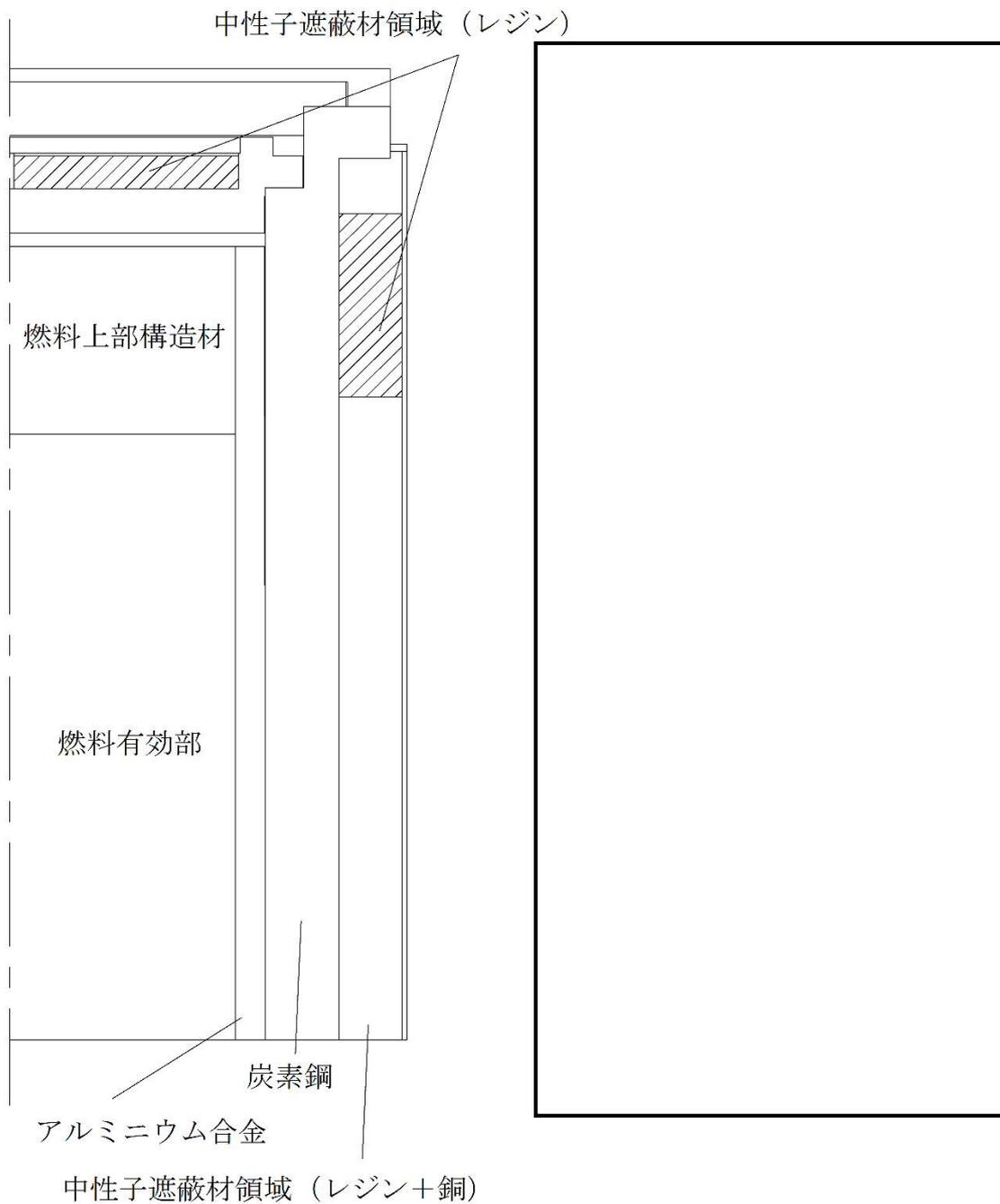
□ 内は商業機密のため、非公開とします。



別紙 6-2 図 表面の線量当量率等値線図 (上部モデル/構造材放射化ガンマ線)  
(単位  $\mu\text{Sv/h}$ )

別紙 6-3

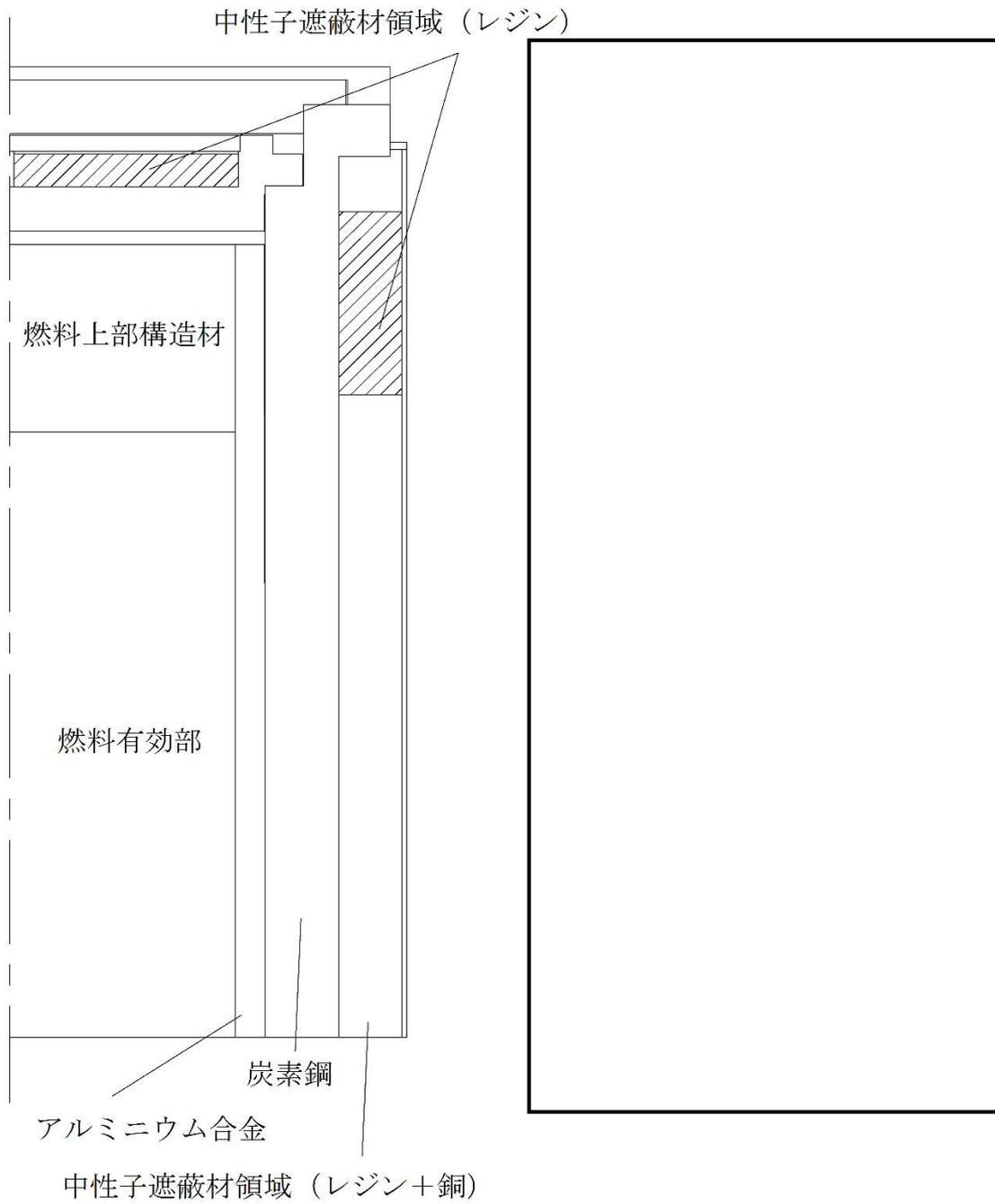
□ 内は商業機密のため、非公開とします。



別紙 6-3 図 表面の線量当量率等値線図 (上部モデル/二次ガンマ線)  
(単位  $\mu\text{Sv/h}$ )

別紙 6-4

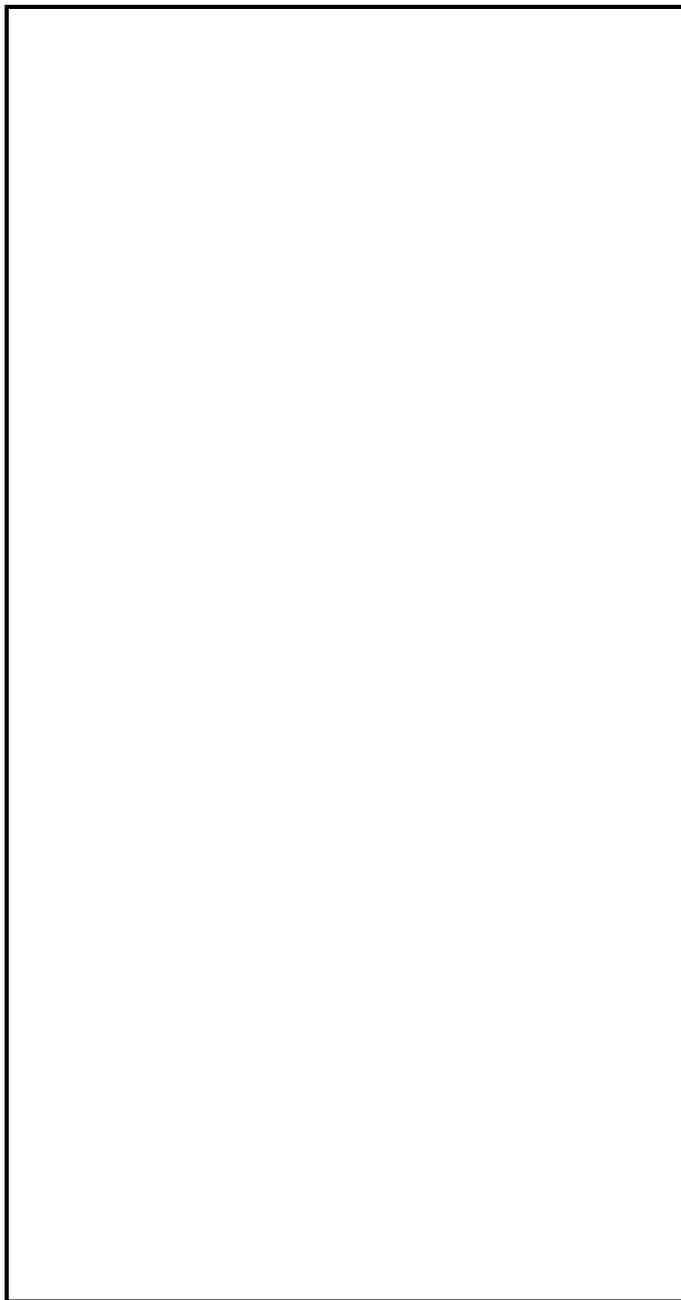
内は商業機密のため、非公開とします。



別紙 6-4 図 表面の線量当量率等値線図 (上部モデル/中性子)  
(単位  $\mu\text{Sv/h}$ )

別紙 6-5

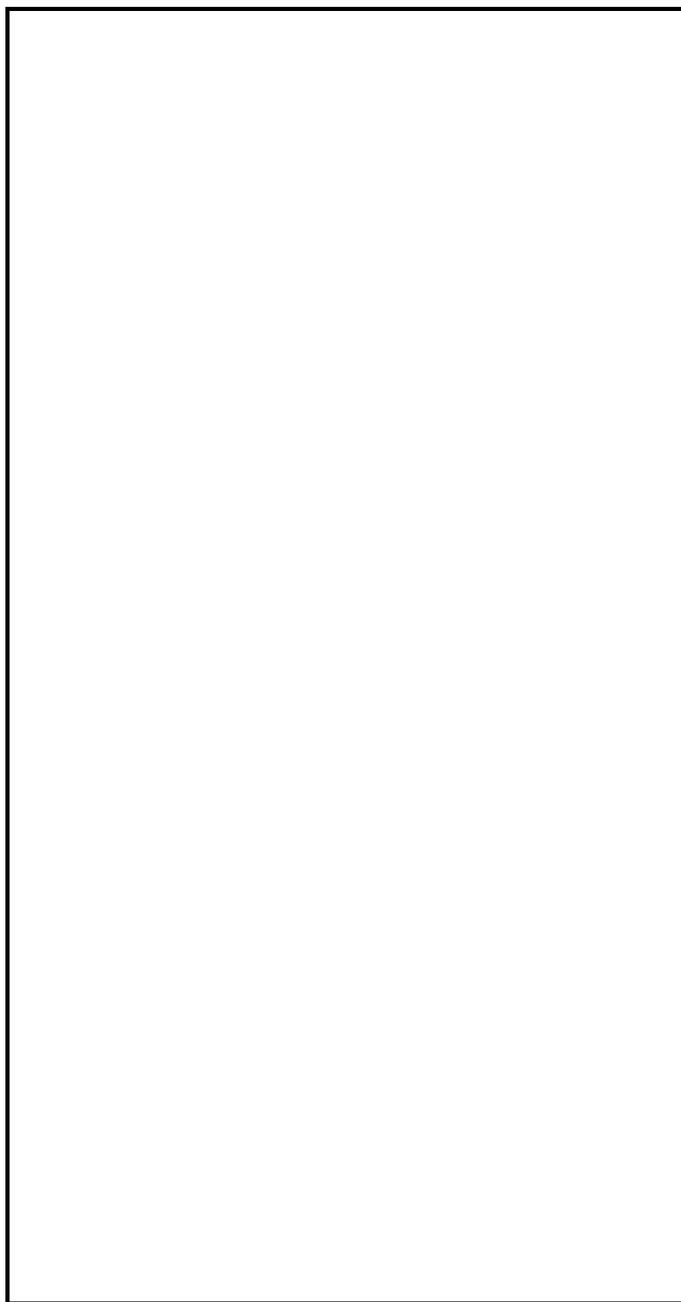
□ 内は商業機密のため、非公開とします。



別紙 6-5 図 表面の線量当量率等値線図（上部トランニオン部/燃料有効部ガンマ線）  
（単位  $\mu\text{Sv/h}$ ）

別紙 6-6

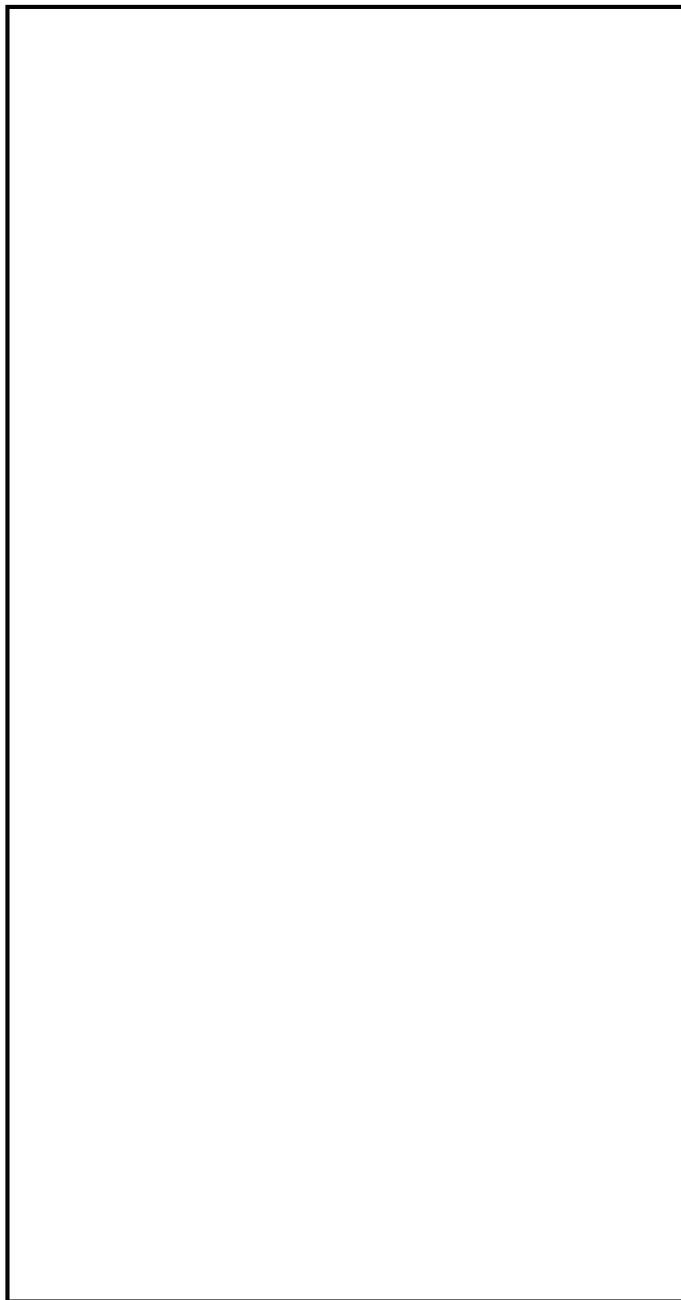
内は商業機密のため、非公開とします。



別紙 6-6 図 表面の線量当量率等値線図（上部トランニオン部/構造材放射化ガンマ線）  
（単位  $\mu\text{Sv/h}$ ）

別紙 6-7

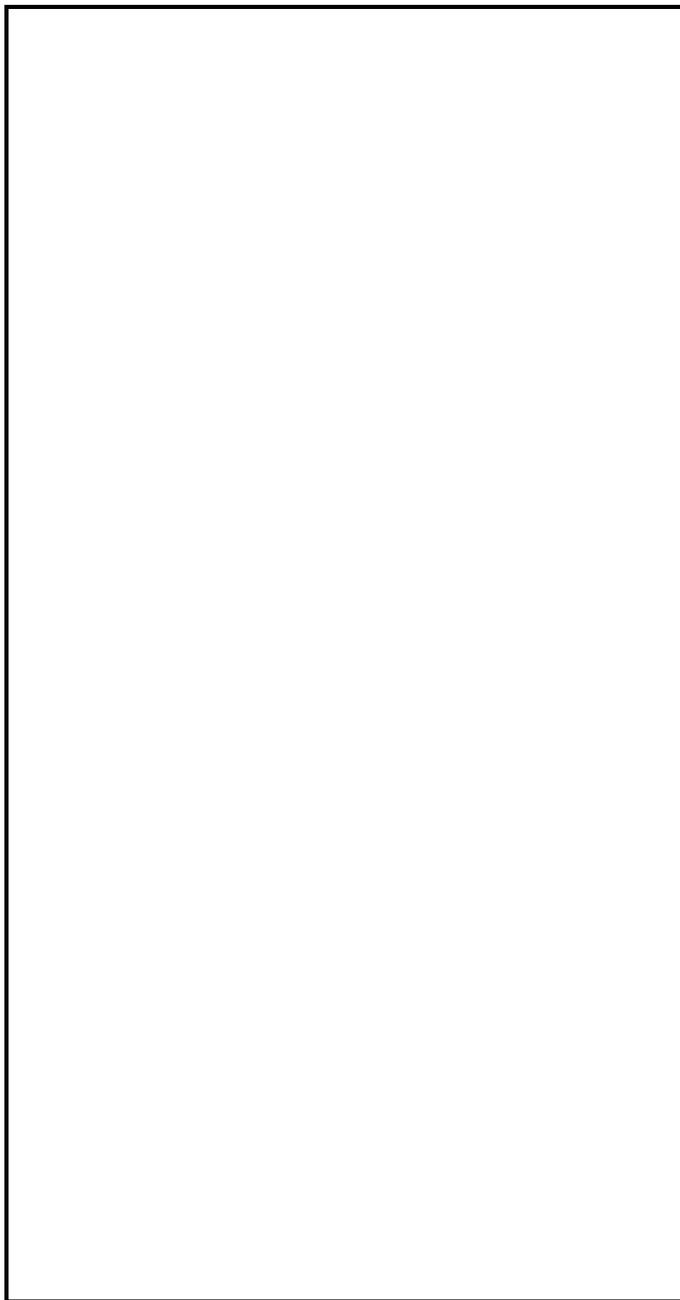
内は商業機密のため、非公開とします。



別紙 6-7 図 表面の線量当量率等値線図（上部トラニオン部/二次ガンマ線）  
（単位  $\mu\text{Sv/h}$ ）

別紙 6-8

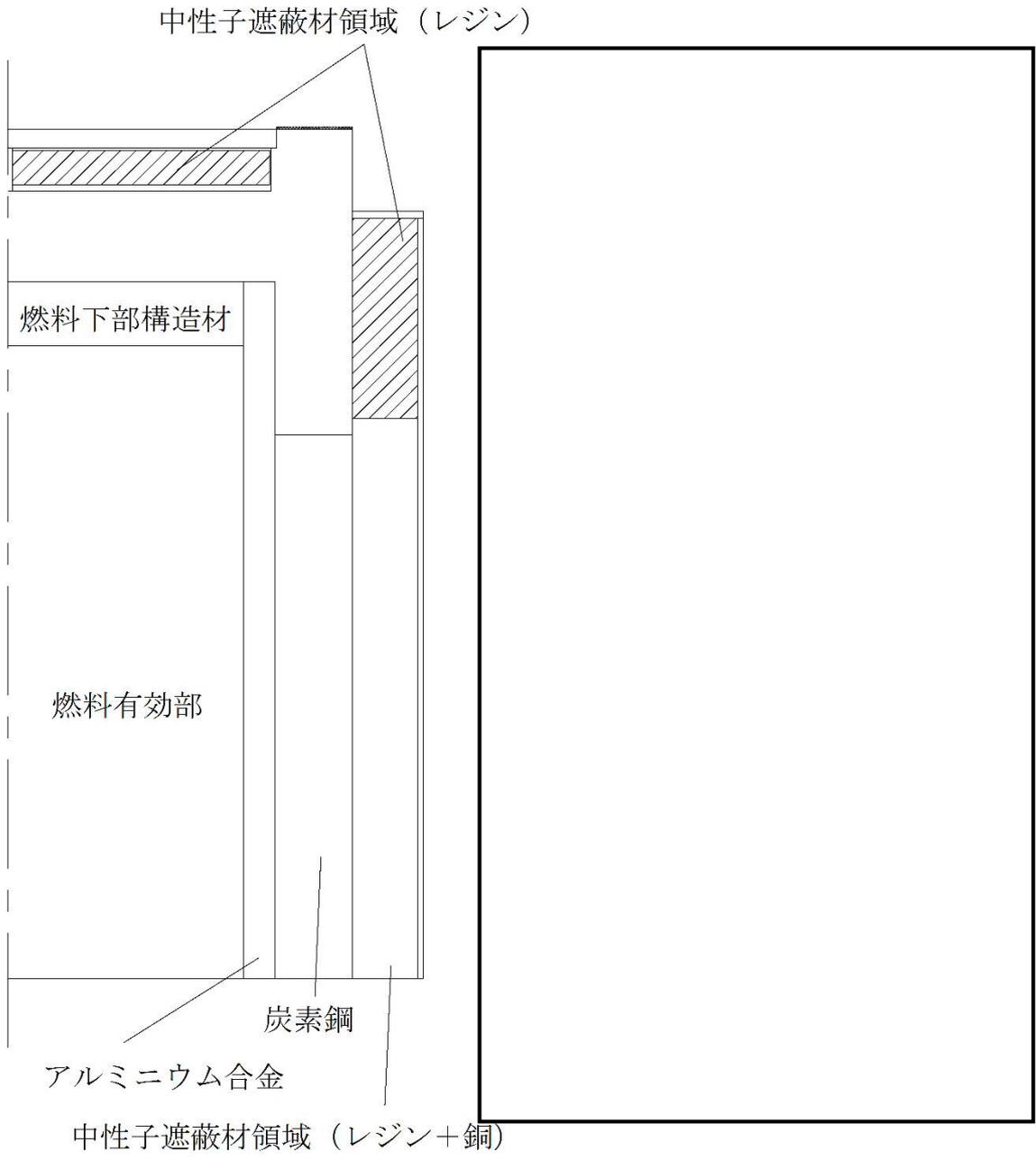
内は商業機密のため、非公開とします。



別紙 6-8 図 表面の線量当量率等値線図（上部トラニオン部/中性子）  
（単位  $\mu\text{Sv/h}$ ）

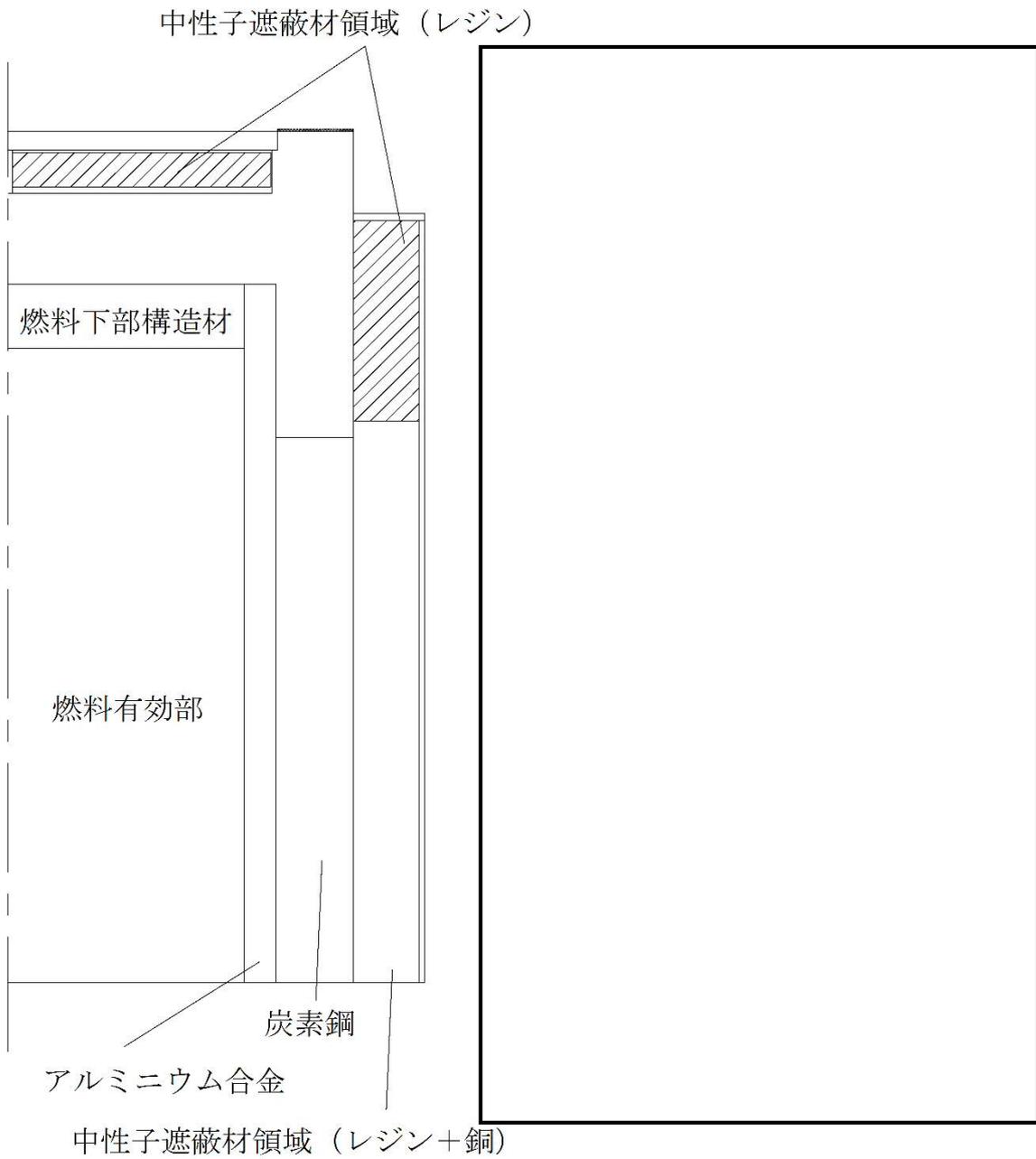
別紙 6-9

内は商業機密のため、非公開とします。

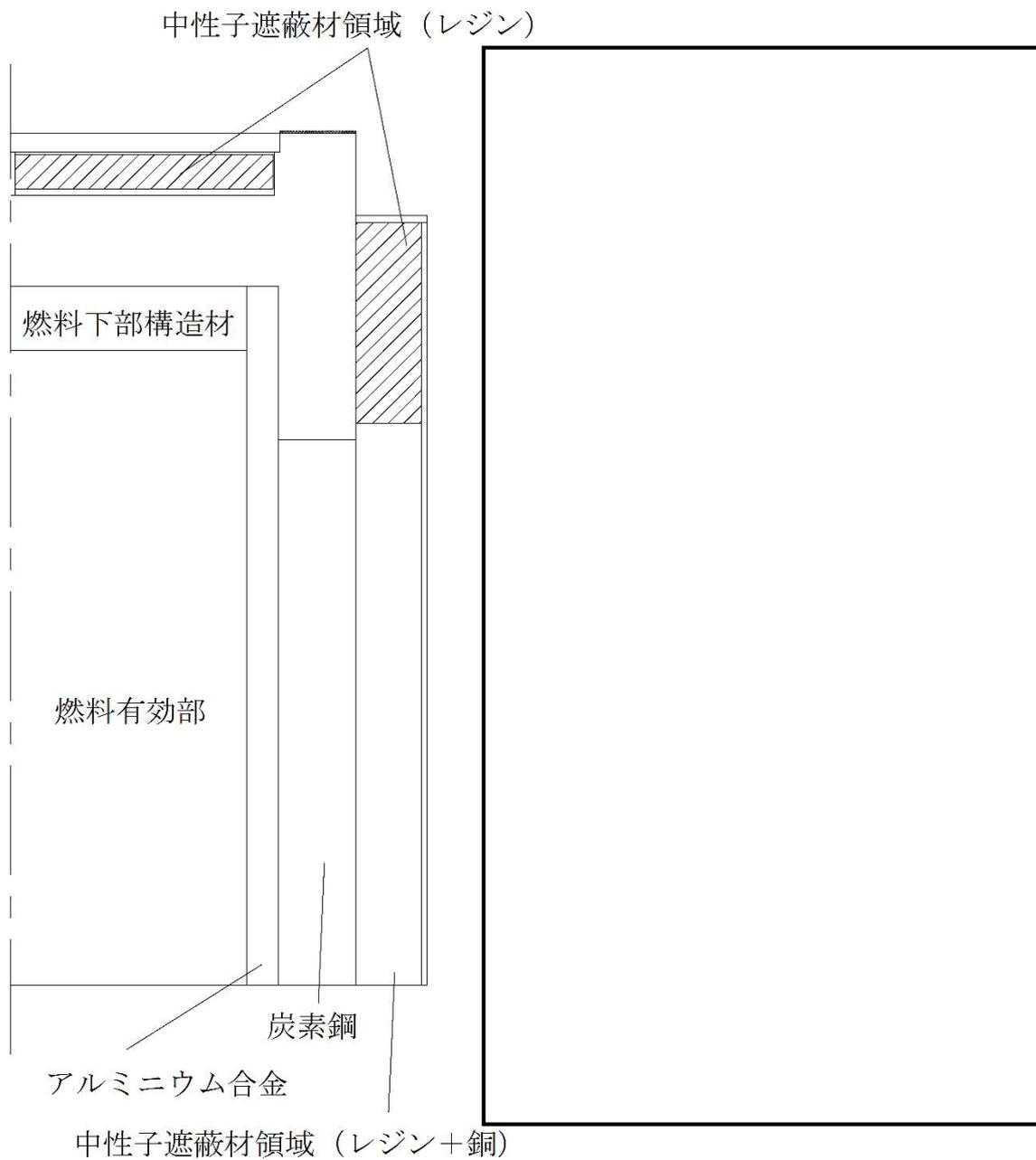


別紙 6-9 図 表面の線量当量率等値線図 (下部モデル/燃料有効部ガンマ線)  
(単位  $\mu\text{Sv/h}$ )

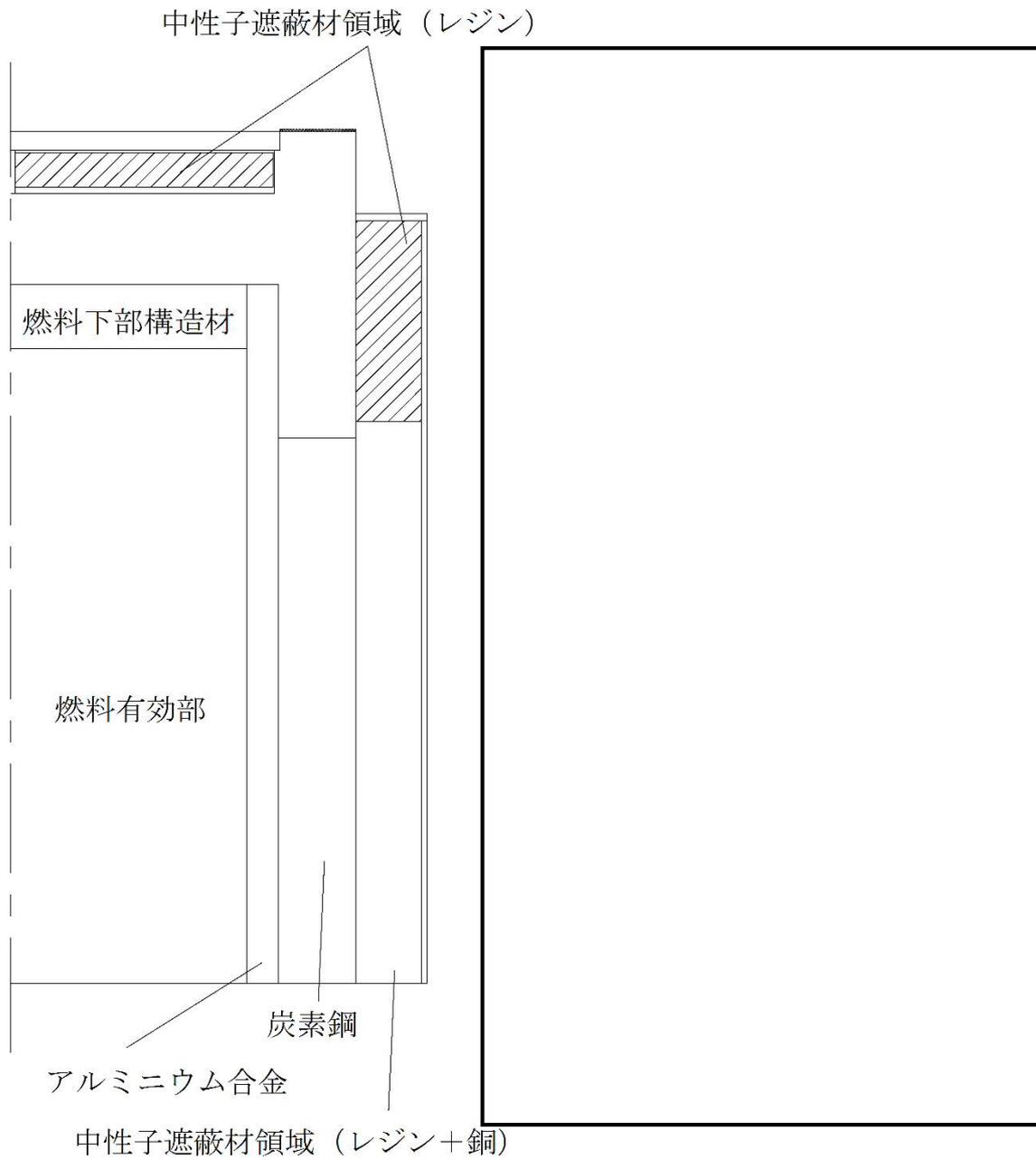
別紙 6-10 内は商業機密のため、非公開とします。



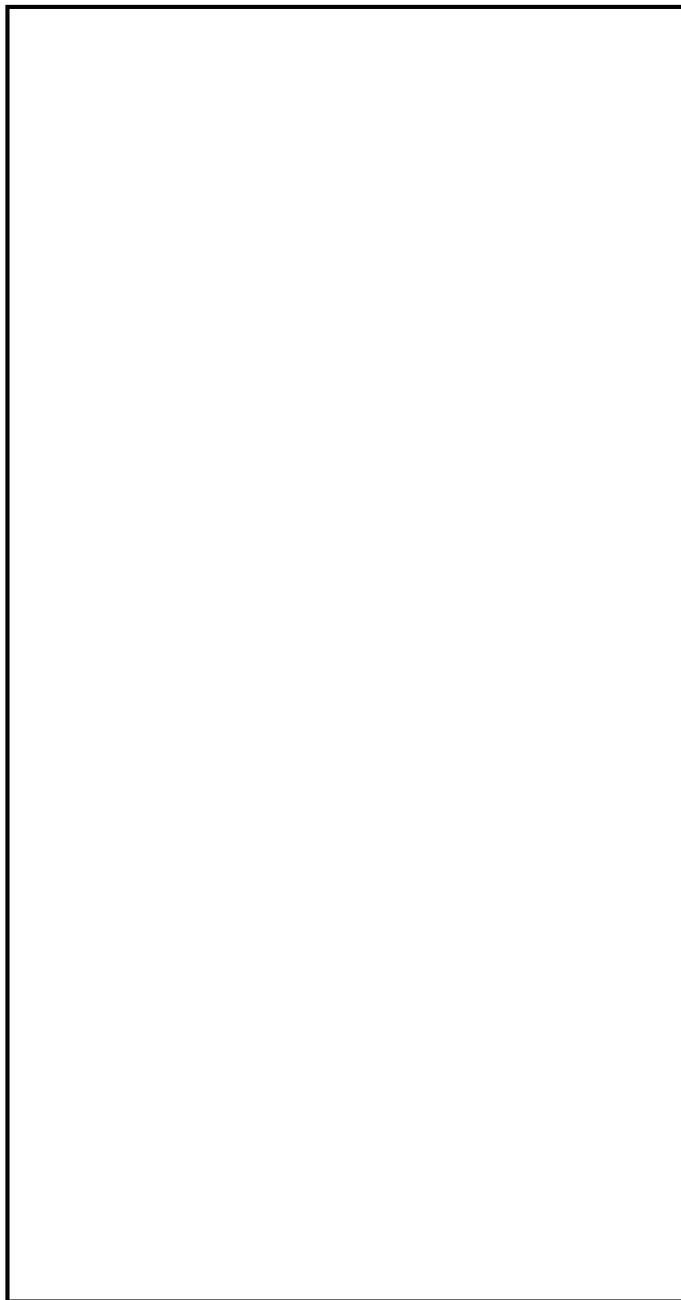
別紙 6-10 図 表面の線量当量率等値線図 (下部モデル/構造材放射化ガンマ線)  
(単位  $\mu\text{Sv/h}$ )



別紙 6-11 図 表面の線量当量率等値線図 (下部モデル/二次ガンマ線)  
(単位  $\mu\text{Sv/h}$ )



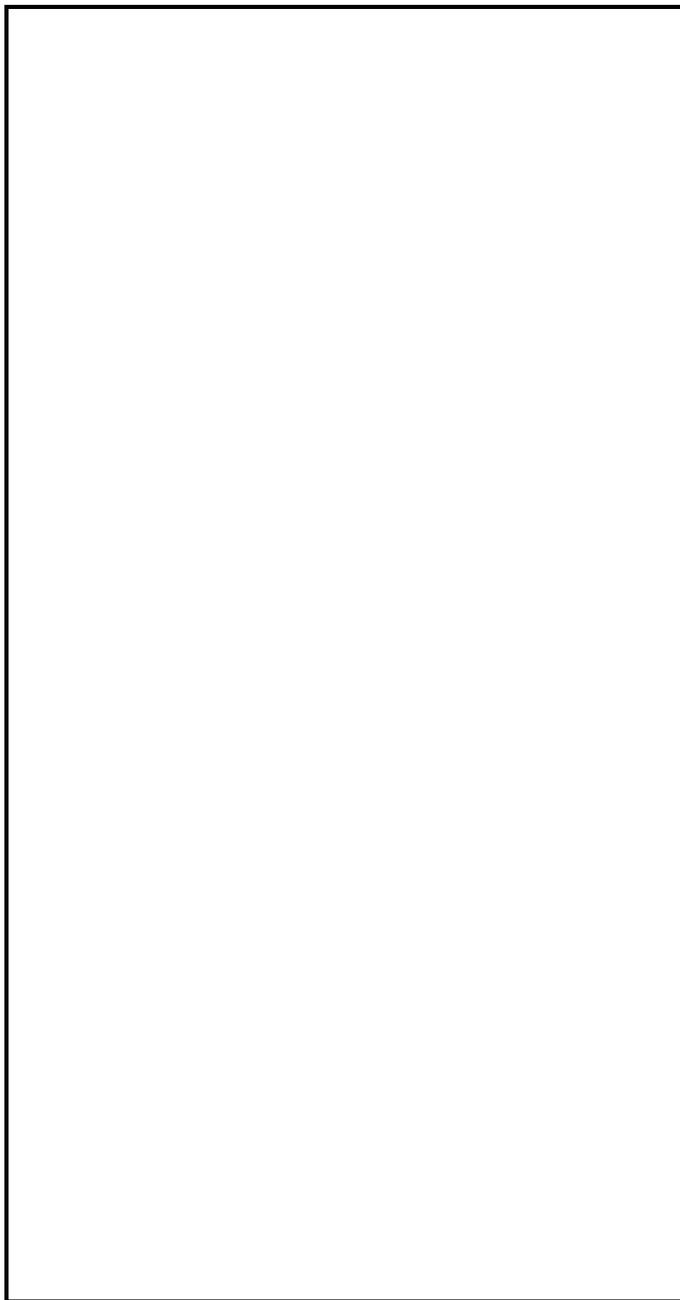
別紙 6-12 図 表面の線量当量率等値線図 (下部モデル/中性子)  
(単位  $\mu\text{Sv/h}$ )



別紙 6-13 図 表面の線量当量率等値線図（下部トランニオン部/燃料有効部ガンマ線）  
（単位  $\mu\text{Sv/h}$ ）

別紙 6-14

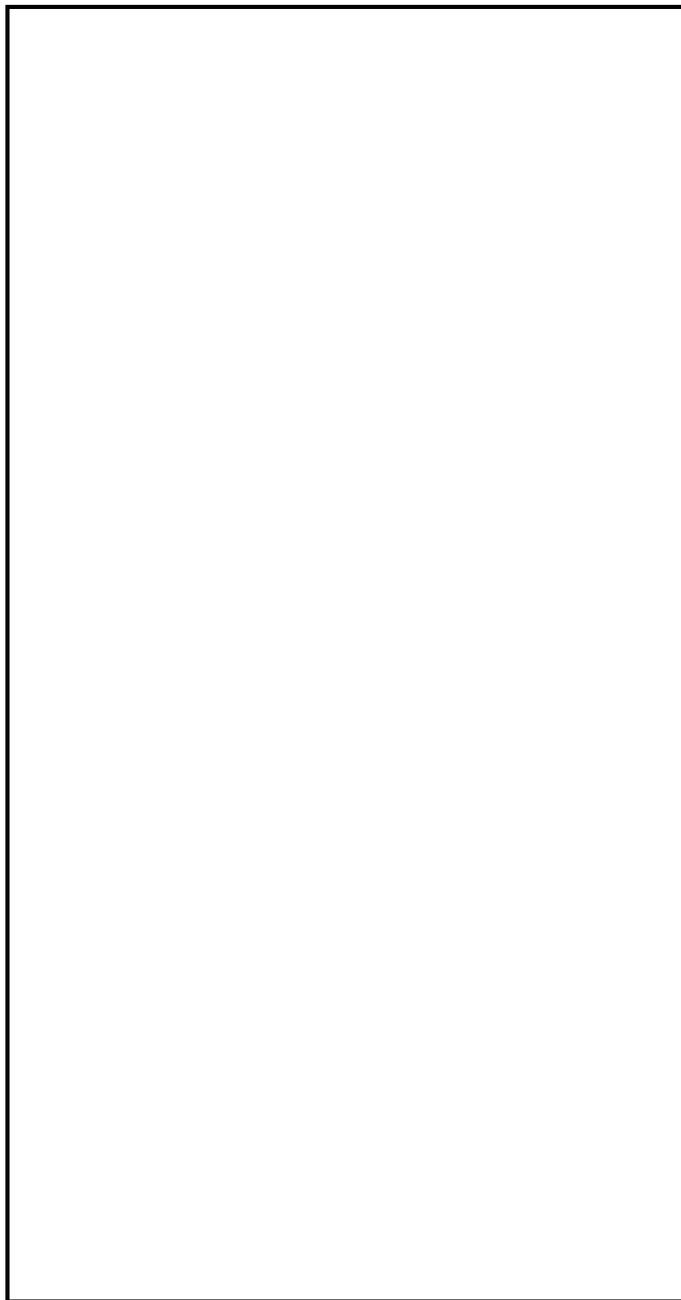
内は商業機密のため、非公開とします。



別紙 6-14 図 表面の線量当量率等値線図（下部トランニオン部/構造材放射化ガンマ線）  
（単位  $\mu\text{Sv/h}$ ）

別紙 6-15

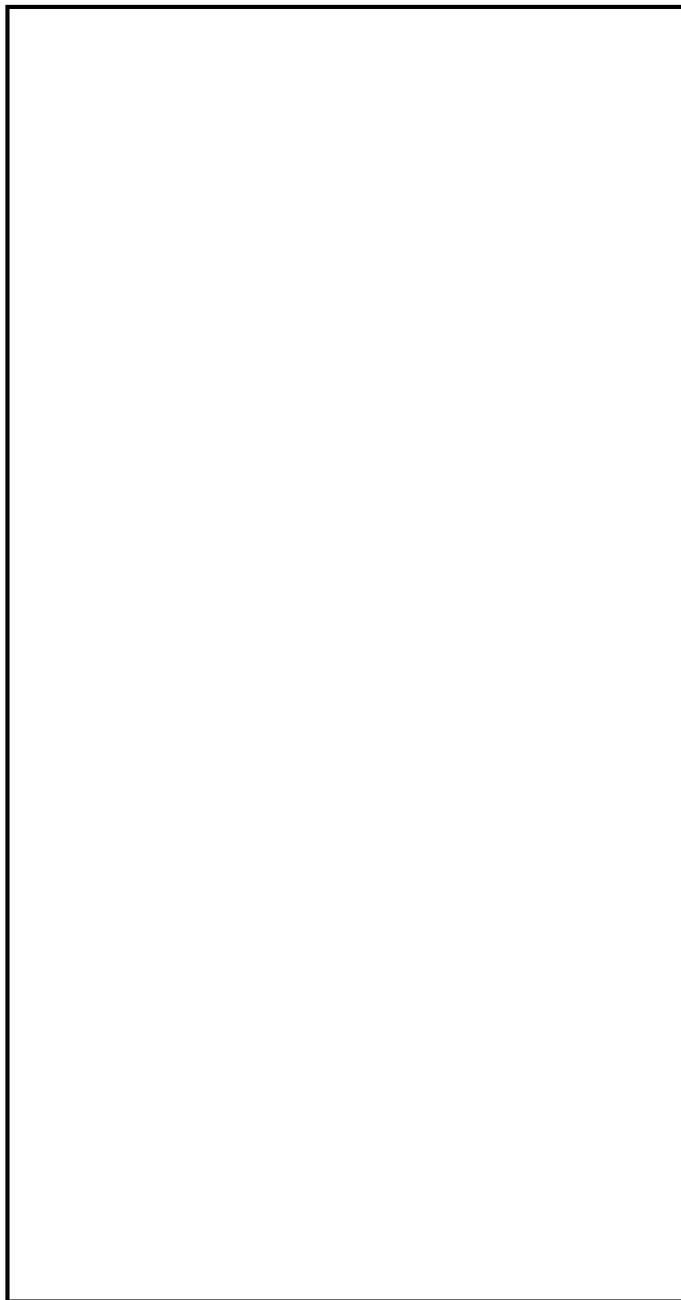
内は商業機密のため、非公開とします。



別紙 6-15 図 表面の線量当量率等値線図（下部トランニオン部/二次ガンマ線）  
（単位  $\mu\text{Sv/h}$ ）

別紙 6-16

内は商業機密のため、非公開とします。



別紙 6-16 図 表面の線量当量率等値線図（下部トランニオン部/中性子）  
（単位  $\mu\text{Sv/h}$ ）

別紙 6-17



内は商業機密のため、非公開とします。

## DLC-23/CASK ライブラリを使用した妥当性とライブラリ変更による 遮蔽解析結果への影響

Hitz-B52 型の遮蔽解析は、二次元輸送計算コード DOT3.5 を用いて実施しており、断面積ライブラリは DLC-23/CASK ライブラリを用いている。

DLC-23/CASK ライブラリを使用した妥当性確認に関しては、2019 年 1 月 23 日説明資料「使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器等の設計の型式証明申請（Hitz-B52 型）質問管理票に対する回答（遮蔽関連）（その 2）」の質問番号 63 に対する回答において、本文中で引用している解析事例では本ライブラリを使用していることから、当該妥当性は確認されている。一方で、DLC-23/CASK ライブラリは、輸送容器等の許認可申請において多くの使用実績があるが、鉄の単層透過時に中性子線量当量率を過小評価することが報告されていることから、自己共鳴遮蔽因子が用意されている断面積ライブラリとして、JENDL-3.3 に基づく MATXSLIB-J33 ライブラリを使用して遮蔽解析を実施し、ライブラリの違いによる影響評価をおこなった。

### 1. 遮蔽解析条件

DLC-23/CASK ライブラリを使用した場合の評価（以下「評価 A」という。）条件と MATXSLIB-J33 ライブラリを使用した場合の評価（以下「評価 B」という。）条件の比較を別紙 7-1 表に示す。ライブラリ以外の計算条件は同一とした。

### 2. 遮蔽解析結果

両ライブラリをそれぞれ用いた場合の線量当量率評価結果を別紙 7-2 表に、評価方向毎の最大線量当量率を与える位置を別紙 7-1 図に示す。評価 B において、中性子の増加影響により補足説明資料 1-6 表 6 の記載値を上回る箇所が存在するものの、金属キャスク表面及び表面から 1m 離れた位置における線量当量率が、それぞれ 2mSv/h（2000 $\mu$ Sv/h）以下及び 100 $\mu$ Sv/h 以下となることを確認した。

### 3. ライブラリ変更による遮蔽解析結果への影響

ライブラリが線量当量率に与える影響を評価するため、両ライブラリによる中性子線量当量率の比が最も大きい位置、胴部中央及び最大線量当量率を与える位置を代表として、評価 A と評価 B の線量当量率を比較した。

## (1) 中性子の比較

中性子の胴部中央における半径方向線量当量率分布を別紙 7-2 図に、線源スペクトルを別紙 7-3 図に、線量当量率換算係数を別紙 7-4 図に示す。また、胴部中央半径方向の主要部と最大線量当量率を与える位置における中性子束の比較を別紙 7-5 図に示す。

両ライブラリによる中性子線量当量率の比が最も大きい位置⑨、最大線量当量率を与える位置⑦a において、別紙 7-2 表に示すとおり、ライブラリ変更による中性子の鉄の単層透過影響を受けているが、金属キャスク表面及び表面から 1m 離れた位置における線量当量率が、それぞれ 2mSv/h (2000 $\mu$ Sv/h) 以下及び 100 $\mu$ Sv/h 以下となることを確認した。また、胴部中央に関して、別紙 7-2 図に示すように、燃料領域、胴部炭素鋼領域においてもライブラリ変更による影響が生じているため、以下のとおり考察する。

### (a) 燃料領域

燃料領域内での線量当量率に着目すると、別紙 7-2 図より評価 B は評価 A の [ ] となる。線量当量率のピークとなる [ ] のエネルギー帯で、評価 B は評価 A の [ ] となっている。別紙 7-5 図の④について、当該エネルギー帯の中性子束を比較すると(別紙 7-6 図参照)、評価 B は評価 A を下回っており、両ライブラリ間の線量当量率差が生じた要因と考えられる。また、これらよりエネルギーの低い領域における差異に関しては、線量当量率換算係数が小さくなる(別紙 7-4 図参照)ため、影響は微小であるといえる。

### (b) 胴部炭素鋼領域

胴部の炭素鋼透過時では DLC-23/CASK ライブラリによる減衰効果が大きく、胴部への入射時の線量当量率に関して、評価 B は評価 A の [ ] であったが、透過後は [ ] と逆転している(別紙 7-2 図参照)。この差異は、別紙 7-5 図の③と⑤の比較からも分かるように、[ ] の線量当量率への寄与が大きい範囲における中性子束について評価 B の方が高く、鉄透過時に共鳴領域の自己遮蔽因子を考慮していない断面積で計算することによる過小評価の結果によるものと考えられる。

## (2) 燃料有効部ガンマ線の比較

胴部中央における半径方向の燃料有効部ガンマ線線量当量率の比較を別紙 7-7 図に示す。別紙 7-7 図に示すように、ライブラリ変更による影響は軽微であり、評価 A を用いても問題は無い。

別紙 7-2

[ ] 内は商業機密のため、非公開とします。

以上により、MATXSLIB-J33 ライブラリによる影響評価を考慮しても、金属キャスク表面及び表面から 1m 離れた位置における線量当量率が基準値以内に収まっていることを確認できたことから、Hitz-B52 型の遮蔽解析は妥当であると考ええる。

別紙 7-1 表 ライブラリの評価条件比較

断面積ライブラリ		DLC-23/CASK	MATXSLIB-J33
エネルギー	中性子	22 群	175 群
群構造	ガンマ線	18 群	42 群
中性子スペクトル		$^{239}\text{Pu}$ の核分裂スペクトルを DLC-23/CASK の 22 群構造に振り分けたものを使用。	$^{239}\text{Pu}$ の核分裂スペクトルを VITAMIN-J 形式の 175 群構造に振り分けたものを使用。
ガンマ線線源強度		ORIGEN2 のエネルギースペクトルを DLC-23/CASK の 18 群構造に振り分けたものを使用。	ORIGEN2 のエネルギースペクトルを VITAMIN-J 形式の 42 群構造に振り分けたものを使用。
1cm 線量当量率への換算係数		AESJ-SC-F006:2013 <sup>*1</sup> に記載する値を使用。	ICRP Pub.74 の換算係数を中性子 175 群構造、ガンマ線 42 群構造に振り分けて使用。

注記※1：「使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準：2013」

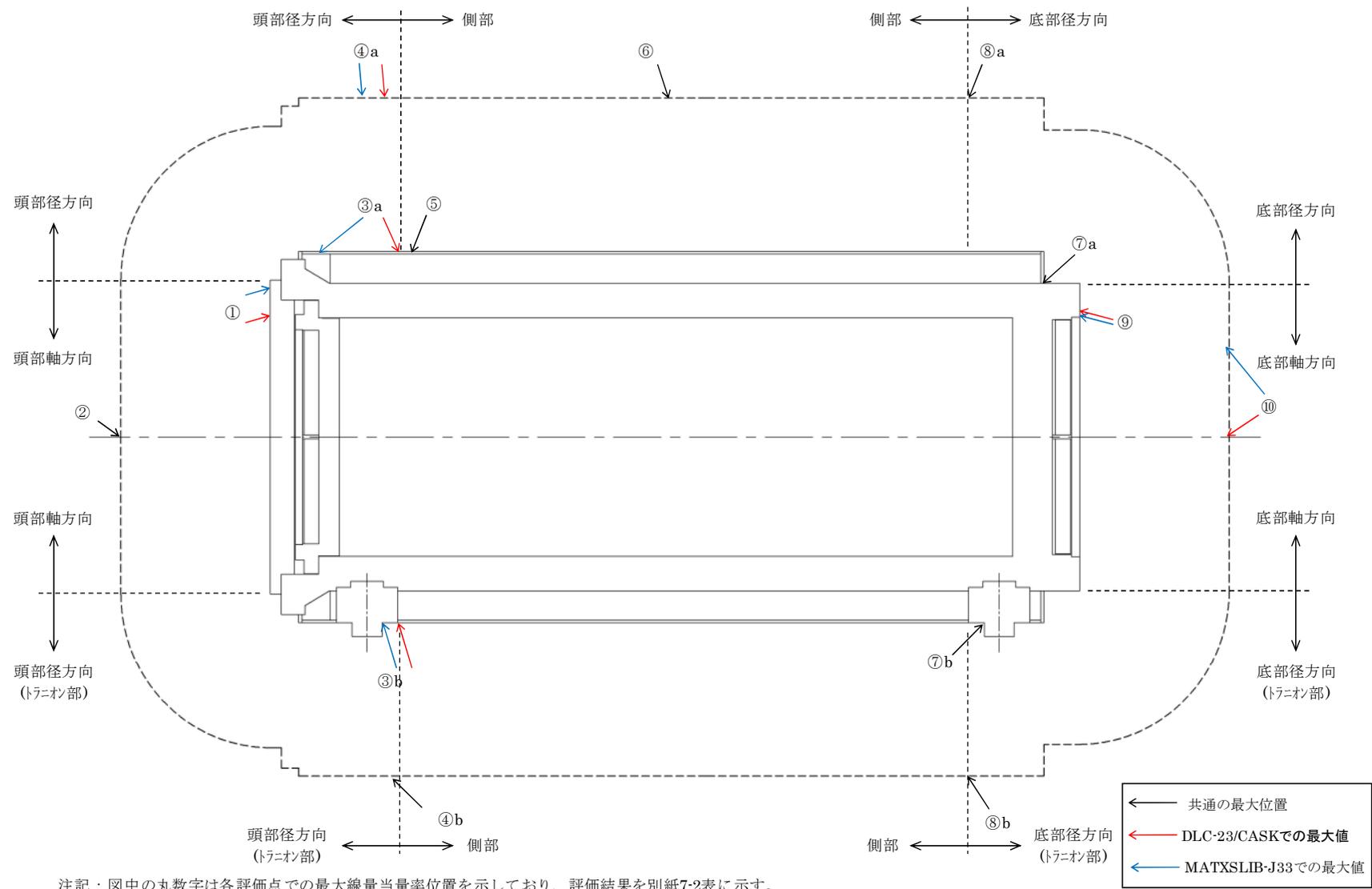
別紙 7-2 表 線量当量率評価結果の比較

(単位 :  $\mu\text{Sv/h}$ )

評価点		頭部						側部		底部						
		軸方向		径方向		径方向 (トランニオン部)				軸方向		径方向		径方向 (トランニオン部)		
		①		③a		③b				⑤		⑨		⑦a		⑦b
ライブラリ		A	B <sup>*2</sup>	A	B <sup>*2</sup>	A	B <sup>*2</sup>	A	B	A	B <sup>*2</sup>	A	B	A	B	
表面	ガンマ線	燃料有効部	<0.1	<0.1 (<0.1)	6.4	4.4 (<0.1)	5.3	3.7 (0.3)	7.9	5.5	<0.1	<0.1 (<0.1)	0.5	0.4	4.0	2.8
		構造材放射化	0.3	0.2 (<0.1)	241.2	184.6 (18.4)	116.5	88.6 (14.6)	242.4	185.9	0.6	0.4 (0.3)	2.2	1.5	2.9	2.0
		二次ガンマ	0.3	0.4 (0.4)	5.9	9.1 (3.3)	4.6	7.1 (5.1)	6.3	9.7	0.9	1.6 (1.5)	5.1	10.6	6.2	10.5
	中性子	71.2	117.2 (121.0)	2.0	2.1 (234.3)	49.0	118.3 (270.0)	2.3	2.4	139.5	437.9 (438.4)	758.7	1548.5	346.5	692.8	
	合計	71.9	117.9 (121.6)	255.5	200.2 (256.1)	175.4	217.7 (290.0)	258.9	203.5	141.1	440.0 (440.3)	766.5	1561.0	359.6	708.1	
評価点		②		④a		④b		⑥		⑩		⑧a		⑧b		
ライブラリ		A	B	A	B <sup>*2</sup>	A	B	A	B	A	B <sup>*2</sup>	A	B	A	B	
表面から 1m	ガンマ線	燃料有効部	<0.1	<0.1	10.7	7.7 (5.8)	12.7	9.3	44.4	32.9	0.1	0.1 (<0.1)	21.9	16.1	18.1	16.1
		構造材放射化	2.1	1.4	29.7	22.2 (24.6)	8.6	20.3	2.4	1.7	13.0	9.3 (6.2)	4.1	3.1	2.1	3.1
		二次ガンマ	<0.1	0.1	4.7	6.6 (5.5)	5.2	7.4	16.6	22.3	1.3	2.1 (1.7)	7.3	10.0	7.0	10.0
	中性子	14.5	26.1	8.5	11.6 (13.0)	9.5	9.9	14.0	16.2	22.5	54.9 (59.4)	6.6	8.8	11.6	8.7	
	合計	16.8	27.7	53.6	48.1 (48.9)	36.0	46.9	77.4	73.1	36.9	66.4 (67.4)	39.9	38.0	38.8	37.9	

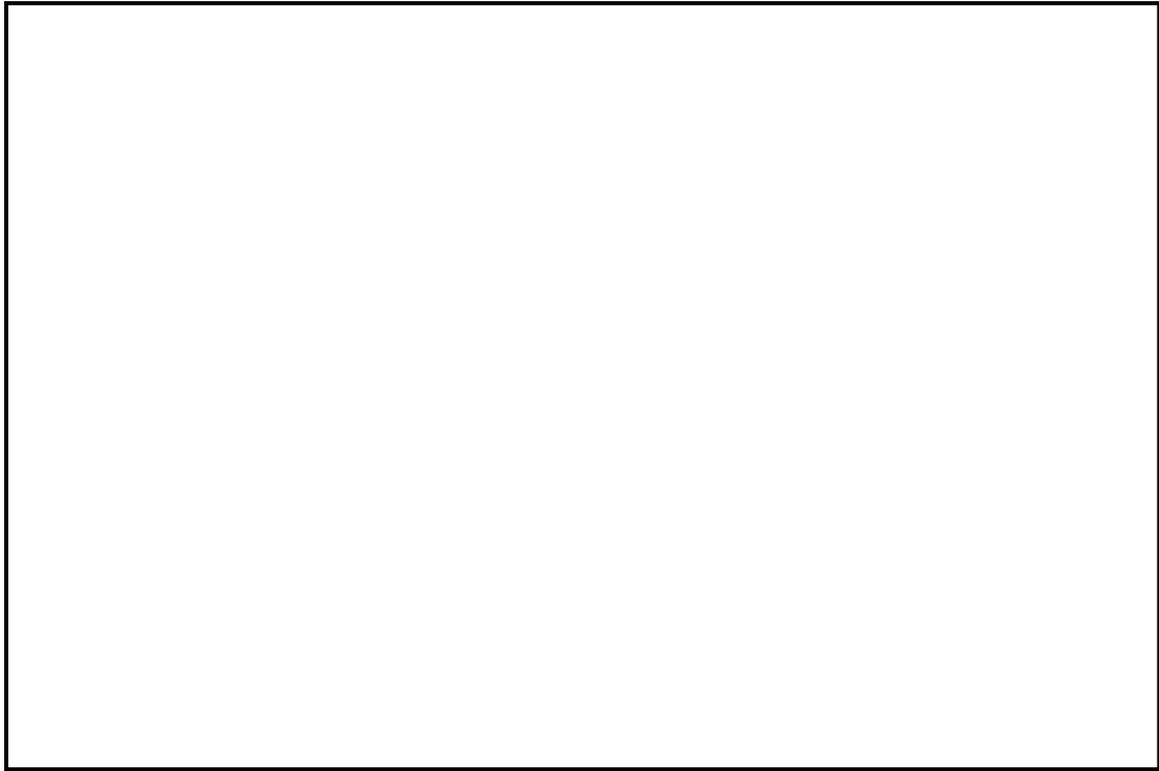
注記※1 : “&lt;0.1”の値は、“=0.1”として合計値に含めた。

注記※2 : ライブラリ A を DLC-23/CASK ライブラリ、ライブラリ B を MATXSLIB-J33 ライブラリとする。A と B で最大値を与える位置が異なっており（別紙 7-1 図参照）、括弧内に B での最大値を与える評価位置における計算結果を示す。



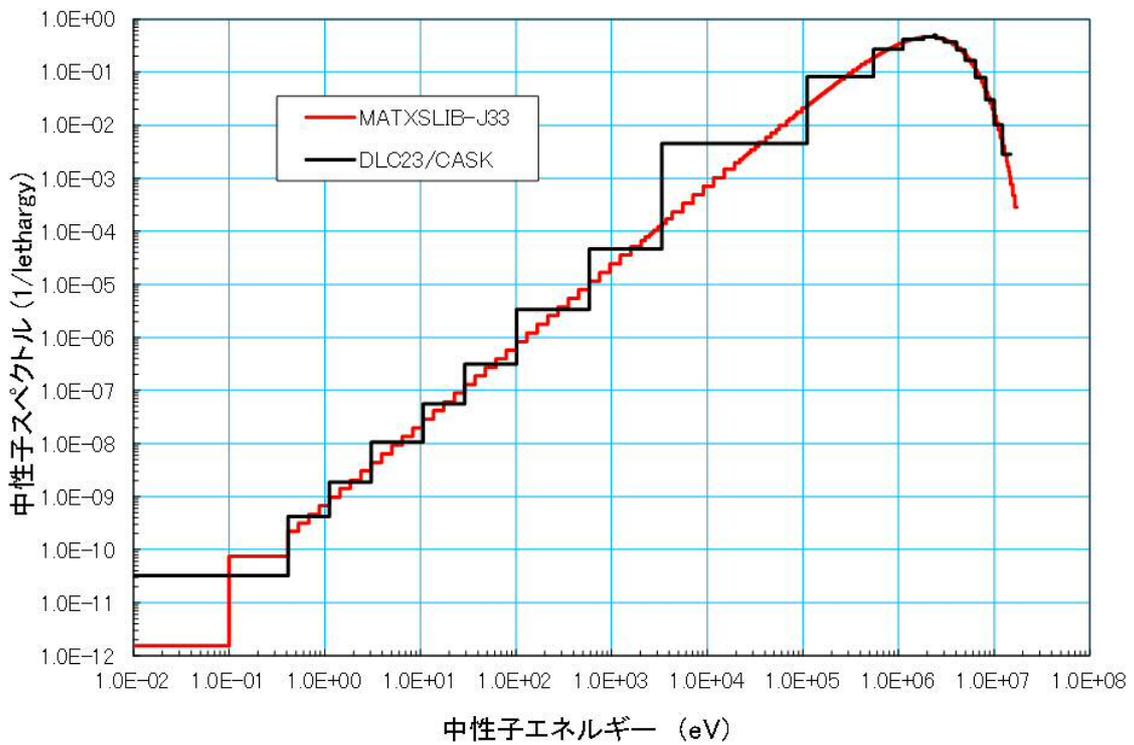
別紙 7-1 図 線量当量率の最大位置

別紙 7-5



別紙 7-2 図 胴部中央における半径方向の中性子線量当量率の比較

中性子Pu-239核分裂スペクトルの比較

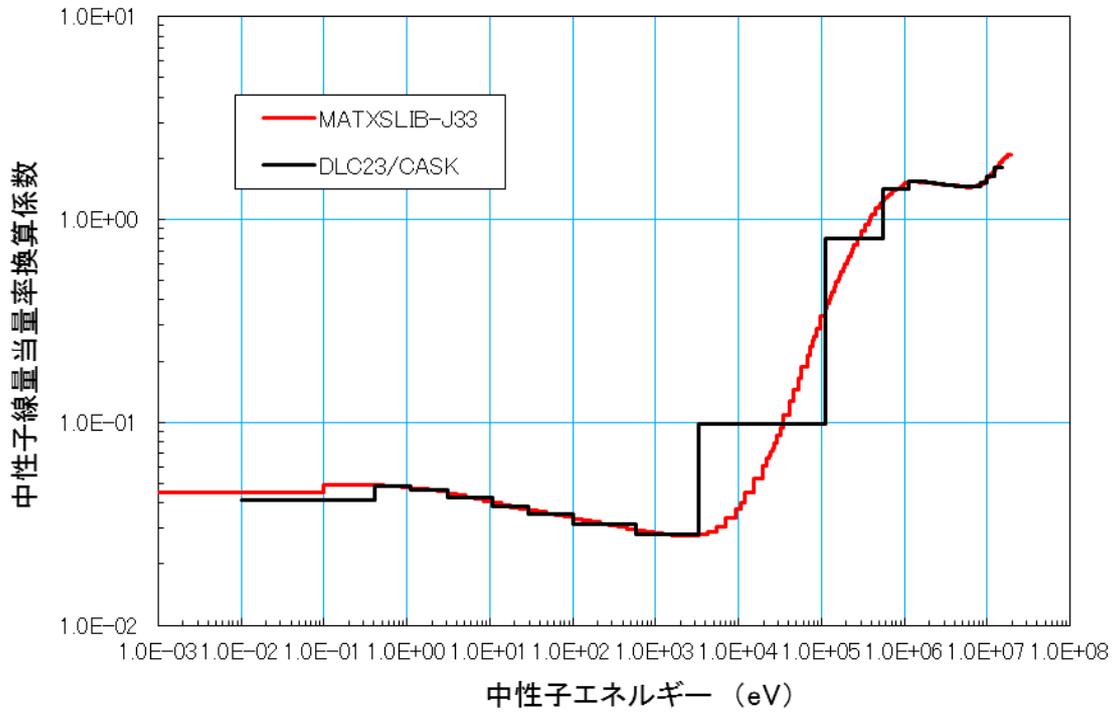


別紙 7-3 図 中性子 Pu-239 核分裂スペクトルの比較

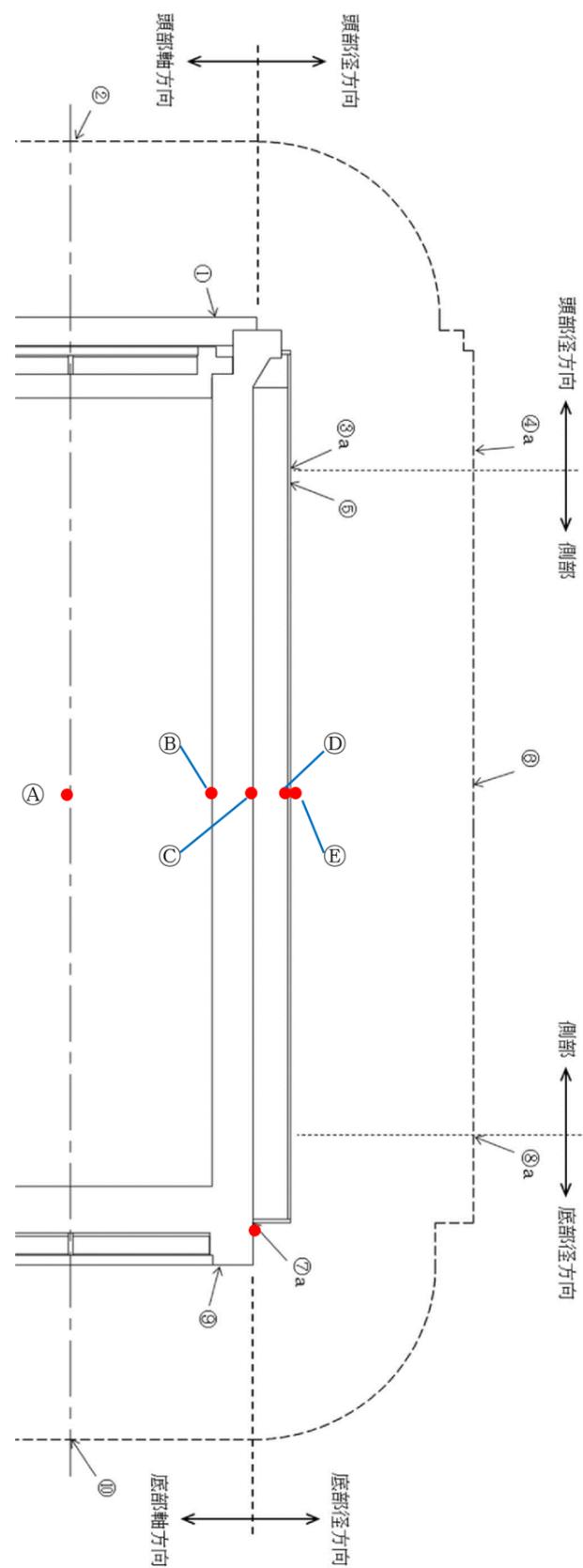
別紙 7-6

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

中性子線量当量率換算係数の比較



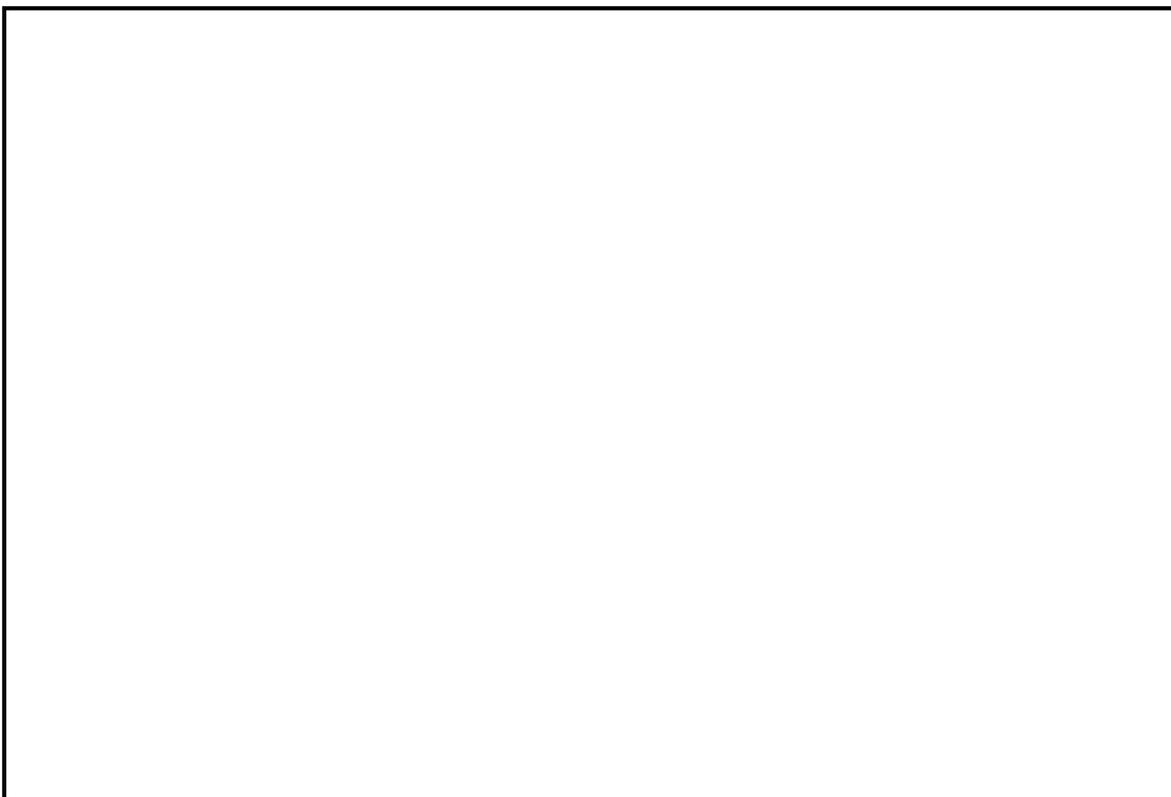
別紙 7-4 図 中性子線量当量率換算係数の比較



別紙 7-5 図 胴部中央半径方向の主要部と最大線量当量率を与える位置における中性子束の比較



別紙 7-6 図 燃料領域中心部における中性子のエネルギー毎の中性子束の比較



別紙 7-7 図 胴部中央における半径方向の燃料有効部ガンマ線線量当量率の比較

別紙 7-9



内は商業機密のため、非公開とします。

Doc. No. MA035A-RC-D02-2 Rev.2

2020年11月25日

日立造船株式会社

使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器等の設計の型式証明申請（Hitz-B52型）

質問管理票に対する回答（遮蔽関連）（その2）

番号	項目	質問日	コメント内容
48	遮蔽	2018/11/2	<p>【補足説明資料 1-6 Hitz-B52 型の遮蔽設計に関する説明資料】(Doc.No.MA035A-RC-D01 Rev.0) (平成 30 年 11 月 2 日説明資料)</p> <p>・ P.2 表 1 「Hitz-B52 型の主要部位の構成部材」について、解析に使用した基本的なデータ等については、別紙等に示すこと。</p>
58	遮蔽	2018/11/2	<p>【補足説明資料 1-6 Hitz-B52 型の遮蔽設計に関する説明資料】(Doc.No.MA035A-RC-D01 Rev.0) (平成 30 年 11 月 2 日説明資料)</p> <p>・ P.7 表 5 「材料密度」において、「原子力学会標準」とあるが、引用元を確認して、出典元を記載すること。</p>

(回答) -2019/4/17 済

遮蔽解析に使用する主要部材の密度及び元素組成に関して、補足説明資料 1-6 2. (1) を、次のように訂正 (アンダーライン部) するものとする。

## 2. 遮蔽設計

### (1) 遮蔽構造

Hitz-B52 型の主要部位における構成部材と遮蔽解析に使用する密度及び元素組成を表 1 に示す。

Hitz-B52 型は、以下の遮蔽構造を有する設計としている。

- a. ガンマ線遮蔽と中性子遮蔽の機能を有する。
- b. ガンマ線遮蔽材は、金属キャスク本体 (胴、底板、外筒) 及び蓋部の炭素鋼等で構成する。
- c. 中性子遮蔽材は、水素を多く含有する樹脂 (以下「レジン」という。) で構成する。

表 1 Hitz-B52 型の主要部位の構成部材

1

表 1 Hitz-B52 型の主要部位における構成部材と遮蔽解析に使用する密度及び元素組成 (1/2)

部位	構成部材	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	元素組成 (重量%)	備考
胴	炭素鋼 	7.83	Fe : 100.0	密度 : 日本機械学会 伝熱工学資料 <sup>(1)</sup> 改訂第 4 版記載値 (7850kg/m <sup>3</sup> ) を保守的に設定した値 組成 : 微量元素無視
外筒				
底板				
二次蓋				
一次蓋	オーステナイト系 ステンレス鋼 	7.90	Fe : 72.0 Cr : 19.0 Ni : 9.0	密度 : 日本機械学会 伝熱工学資料 <sup>(1)</sup> 改訂第 4 版記載値 (7920kg/m <sup>3</sup> ) を保守的に設定した値 組成 : JIS G4304 : 2012 Cr、Ni : 中央値 Fe : 残り (他の微量元素無視)
トラニオン	析出硬化系 ステンレス鋼 	7.70	Fe : 76.0 Cr : 16.0 Ni : 4.0 Cu : 4.0	密度 : JIS G4304 : 2012 記載値 (7.78 g/cm <sup>3</sup> ) を保守的に設定した値 組成 : JIS G4304 : 2012 Cr、Ni、Cu : 中央値 Fe : 残り (他の微量元素無視)

表 1 Hitz-B52 型の主要部位の構成部材



表 1 Hitz-B52 型の主要部位における構成部材と遮蔽解析に使用する密度及び元素組成 (2/2)

部位	構成部材	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	元素組成 (重量%)	備考
バスケット	炭素鋼 <input type="text"/>	7.83	Fe : 100.0	密度 : 日本機械学会 伝熱工学資料 <sup>(1)</sup> 改訂第 4 版記載値 (7850kg/m <sup>3</sup> ) を保守的に設定した値 組成 : 微量元素無視
	オーステナイト系 ステンレス鋼 <input type="text"/>	7.90	Fe : 72.0 Cr : 19.0 Ni : 9.0	密度 : 日本機械学会 伝熱工学資料 <sup>(1)</sup> 改訂第 4 版記載値 (7920kg/m <sup>3</sup> ) を保守的に設定した値 組成 : JIS G4304 : 2012 Cr、Ni : 中央値 Fe : 残り (他の微量元素無視)
	ほう素添加アルミ ニウム合金 <input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	密度 : メーカー仕様要求値 組成 : メーカー仕様要求値
伝熱部材	アルミニウム合金 <input type="text"/>	2.71 ※1	Al : 100.0	密度 : アルミニウムハンドブック <sup>(2)</sup> 組成 : 微量元素無視
中性子遮蔽材	レジン <input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	密度 : <input type="text"/> g/cm <sup>3</sup> の下限値  組成 : メーカー標準組成
伝熱フィン	銅 <input type="text"/>	8.88 ※1	Cu : 100.0	密度 : 日本機械学会 伝熱工学資料 <sup>(1)</sup> 改訂第 4 版より 組成 : 微量元素無視

注記※1 : 遮蔽解析上主要となる材料以外の部材に関しては、文献記載値を用いている。

注記※2 : ただし、B<sub>4</sub>C 及び H については含有量の下限値とする。

B<sub>4</sub>C 含有量 : 0.0155 g/cm<sup>3</sup> 以上、H 含有量 : 0.086 g/cm<sup>3</sup> 以上

以上に基づき、補足説明資料 1-6 の P.7 に示す表 5 中の「材料密度」の項目を、次のように訂正（アンダーライン部）するものとする。

表 5 遮蔽解析における不確かさの考慮	
材料密度	<ul style="list-style-type: none"> <li>・<del>原子力学会標準**+日本機械学会 伝熱工学資料等に記載された最低保証密度や、公差を考慮した密度の補正等、各材料毎に最小密度を考慮して、密度を保守的に設定し（表 1 参照）、公差を考慮した密度の補正を行い、原子個数密度を評価している。</del></li> </ul>
<p>注記※1：<del>「使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準：2013(AESJ-SC-F006:2013)」の遮蔽計算における材料物性値から引用。</del></p>	

1

また、補足説明資料 1-6 に 3.として参考文献の項目を以下のとおり追加する。

<p>3. 参考文献</p> <p>(1) 日本機械学会、「伝熱工学資料改訂第 4 版」（1986 年 10 月）</p> <p>(2) 日本アルミニウム協会、「アルミニウムハンドブック第 7 版」（2007 年 1 月）</p>
---

番号	項目	質問日	コメント内容
49	遮蔽	2018/11/2	<p>【補足説明資料 1-6 Hitz-B52 型の遮蔽設計に関する説明資料】(Doc.No.MA035A-RC-D01 Rev.0) (平成 30 年 11 月 2 日説明資料)</p> <p>・P.3 2. (2) b. 線源強度計算方法 において、「～体系の増倍効果を考慮した～」と記載しているが、使用済燃料貯蔵時における実効増倍率をどのように評価し、得られた結果を遮蔽解析にどのように用いて評価したかわかるように丁寧に説明すること。</p>

(回答)

体系の増倍効果を考慮した全中性子源強度は次式により求めた。

$$N_s = N_0 / (1 - k_{\text{eff}})$$

ここで、

$N_s$  : 全中性子源強度

$N_0$  : 一次中性子源強度

$k_{\text{eff}}$  : 使用済燃料貯蔵時における実効増倍率 (0.3)

臨界計算で示したように、Hitz-B52 型はいかなる場合でも未臨界であり、乾式体系における実効増倍率は 0.36 である。遮蔽設計においては、平均燃焼度 (43GWd/t) まで燃焼後の使用済燃料中の核分裂生成物及びアクチニドの蓄積を考慮して、貯蔵時における実効増倍率を用いた。

核分裂生成物及びアクチニドの生成量は、燃焼計算コード ORIGEN2 を用いて求めた。考慮した核分裂生成物及びアクチニド核種の種類は、参考文献<sup>(1)</sup>に基づき表 49-1 に示すものとした。これらの核種の量に基づき、乾式体系における臨界計算と同一の手法で実効増倍率を算出した。その結果、実効増倍率の値は 3 $\sigma$ を加えて 0.22 程度となったが、遮蔽計算においてはこの値を切り上げて 0.3 とした。解析に用いた中性子源強度を表 49-2 として以下に示す。

ここで、ORIGEN2 に入力する照射条件は実際の照射条件ではなく、線源強度を保守的に評価するため比出力を一定とした連続照射条件としている。一方で、このようにして求めた使用済燃料の核種組成を用いて中性子実効増倍率を評価すると、実際の燃料を収納した場合よりも実効増倍率を過小評価する可能性がある。そのため、ORIGEN2 で求めた組成を用いた実効増倍率について、次のように組成の違いによる影響を確認した。

### (1) 核分裂生成物の影響

燃焼後の組成から核分裂生成物を無視した場合を計算した結果を表 49-3 に示す。

表 49-3 に示すように、核分裂生成物による貯蔵状態における実効増倍率への影響は見られない。

### (2) アクチニドの影響

表 49-1 のアクチニド核種のうち  $^{238}\text{U}$  を除く核種について、それぞれを無視した場合の実効増倍率を評価し、核種ごとの実効増倍率に与える影響を確認した。結果を表 49-4 に示す。 $^{235}\text{U}$  及び  $^{239}\text{Pu}$  を無視した場合に実効増倍率は大きく減少することから、貯蔵状態における実効増倍率に影響する主要な核種は  $^{235}\text{U}$  及び  $^{239}\text{Pu}$  である。

ORIGEN2 で燃焼後組成を求める場合、使用するライブラリと実際の燃料の仕様が近いほど信頼できる。本実効増倍率評価に際しては、ORIGEN2 付属のオリジナルライブラリである BWR-U を使用しているが、比較のため、評価対象としている高燃焼度 8×8 燃料を想定し JENDL-3.3 に基づいて作成されたライブラリ BS240J33 を使用した場合のアクチニド核種組成を求めた。比較した結果を表 49-5 に示す。 $^{235}\text{U}$  及び  $^{239}\text{Pu}$  に着目すると、BWR-U を使用した場合の方が BS240J33 を使用した場合と比較して  $^{235}\text{U}$  を 5%程度少なく、 $^{239}\text{Pu}$  を 5%程度多く評価している。

ここで、仮に BWR-U を使用した場合の燃料組成から核分裂生成物を無視し、 $^{235}\text{U}$  及び  $^{239}\text{Pu}$  を 30%程度多く設定した組成条件とした場合、実効増倍率は 0.24 程度 ( $\sigma < 0.001$ ) となり、遮蔽計算における実効増倍率とした 0.3 に対して十分小さいことを確認した。

以上より、貯蔵状態における実効増倍率に対する核分裂生成物の影響は少なく、また、主要なアクチニド核種を多く見積もった場合においても実効増倍率は 0.3 を十分下回ることから、使用済燃料貯蔵時における実効増倍率を 0.3 とすることは十分保守的な設定である。

#### 参考文献

- (1) T.L.Sanders, R.M.Westfall, R.H.Jones, " Feasibility and incentives for the consideration of spent fuel operating histories in the criticality analysis of spent fuel shipping casks" ,*Sandia Report*, Sand 87-0151 UC-71,Sandia National Lab., (1987).

表 49-1 実効増倍率算出時に考慮した核分裂生成物及びアクチノイド核種

	評価核種
核分裂生成物	$^{99}\text{Tc}$ 、 $^{103}\text{Rh}$ 、 $^{131}\text{Xe}$ 、 $^{133}\text{Cs}$ 、 $^{143}\text{Nd}$ $^{145}\text{Nd}$ 、 $^{147}\text{Pm}$ 、 $^{147}\text{Sm}$ 、 $^{149}\text{Sm}$ 、 $^{151}\text{Sm}$ $^{152}\text{Sm}$ 、 $^{153}\text{Eu}$ 、 $^{155}\text{Gd}$
アクチノイド	$^{235}\text{U}$ 、 $^{236}\text{U}$ 、 $^{238}\text{U}$ $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{240}\text{Pu}$ 、 $^{241}\text{Pu}$ 、 $^{242}\text{Pu}$

表 49-2 高燃焼度 8×8 燃料の中性子源強度

金属キャスク 1 基当たり		高燃焼度 8×8 燃料
一次中性子源強度 $N_0$ (n/s)	( $\alpha$ , n) 反応	$2.285 \times 10^8$
	自発核分裂	$1.650 \times 10^{10}$
	計	$1.672 \times 10^{10}$
使用済燃料貯蔵時における 実効増倍率 $k_{\text{eff}}$		0.3
全中性子源強度 $N_s$ (n/s)		$2.389 \times 10^{10}$

表 49-3 核分裂生成物組成の実効増倍率への影響

燃焼度	核分裂生成物	実効増倍率	
		$k_{\text{eff}}$	$\sigma$
43 GWd/t	考慮	0.213	< 0.001
	無視	0.214	< 0.001

注：高燃焼度 8×8 燃料（初期濃縮度 3.6wt%）を対象とした。

表 49-4 アクチニド核種の実効増倍率への影響  
(燃焼度 43 GWd/t、核分裂生成物を無視)

2

無視する アクチニド核種	実効増倍率		$\Delta k_{\text{eff}}$
	$k_{\text{eff}}$	$\sigma$	
なし	0.214	< 0.001	(基準)
$^{235}\text{U}$	0.177	< 0.001	-0.037
$^{236}\text{U}$	0.214	< 0.001	$\pm 0.000$
$^{239}\text{Pu}$	0.176	< 0.001	-0.038
$^{240}\text{Pu}$	0.212	< 0.001	-0.002
$^{241}\text{Pu}$	0.207	< 0.001	-0.007
$^{242}\text{Pu}$	0.214	< 0.001	$\pm 0.000$

注：高燃焼度 8×8 燃料（初期濃縮度 3.6wt%）を対象とした。

表 49-5 ORIGEN2 によるアクチニド核種組成とライブラリの影響  
(BWR-U と BS240J33 の比較)

核種	核種組成 (g-atom/MTU)		(A) / (B)
	(A) BWR-U	(B) BS240J33	
$^{235}\text{U}$	$2.323 \times 10^1$	$2.443 \times 10^1$	0.95
$^{236}\text{U}$	$2.017 \times 10^1$	$2.020 \times 10^1$	1.00
$^{238}\text{U}$	$3.927 \times 10^3$	$3.928 \times 10^3$	1.00
$^{239}\text{Pu}$	$2.063 \times 10^1$	$1.962 \times 10^1$	1.05
$^{240}\text{Pu}$	$1.064 \times 10^1$	$1.075 \times 10^1$	0.99
$^{241}\text{Pu}$	$2.974 \times 10^0$	$2.660 \times 10^0$	1.12
$^{242}\text{Pu}$	$2.932 \times 10^0$	$3.081 \times 10^0$	0.95

注：高燃焼度 8×8 燃料（初期濃縮度 3.6wt%）を対象とし、燃焼度 43GWd/t、冷却期間 15 年とした場合。

番号	項目	質問日	コメント内容
63	遮蔽	2018/11/2	<p>【補足説明資料 1-6 Hitz-B52 型の遮蔽設計に関する説明資料】(Doc.No.MA035A-RC-D01 Rev.0) (平成 30 年 11 月 2 日説明資料)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・二次元輸送計算コード DOT3.5 の妥当性について資料を追加すること。</li> </ul>

(回答) -2019/1/23 済

以下の内容を別紙 5 として追加する。

(1) DOT3.5 の概要

Hitz-B52 型の遮蔽計算に使用している計算コードは、原子力施設の遮蔽計算に広く用いられている DOT3.5 であり、輸送キャスクや貯蔵キャスクの遮蔽解析において豊富な実績がある。

(2) 機能

DOT3.5 は、遮蔽計算に際して以下の機能を有する。

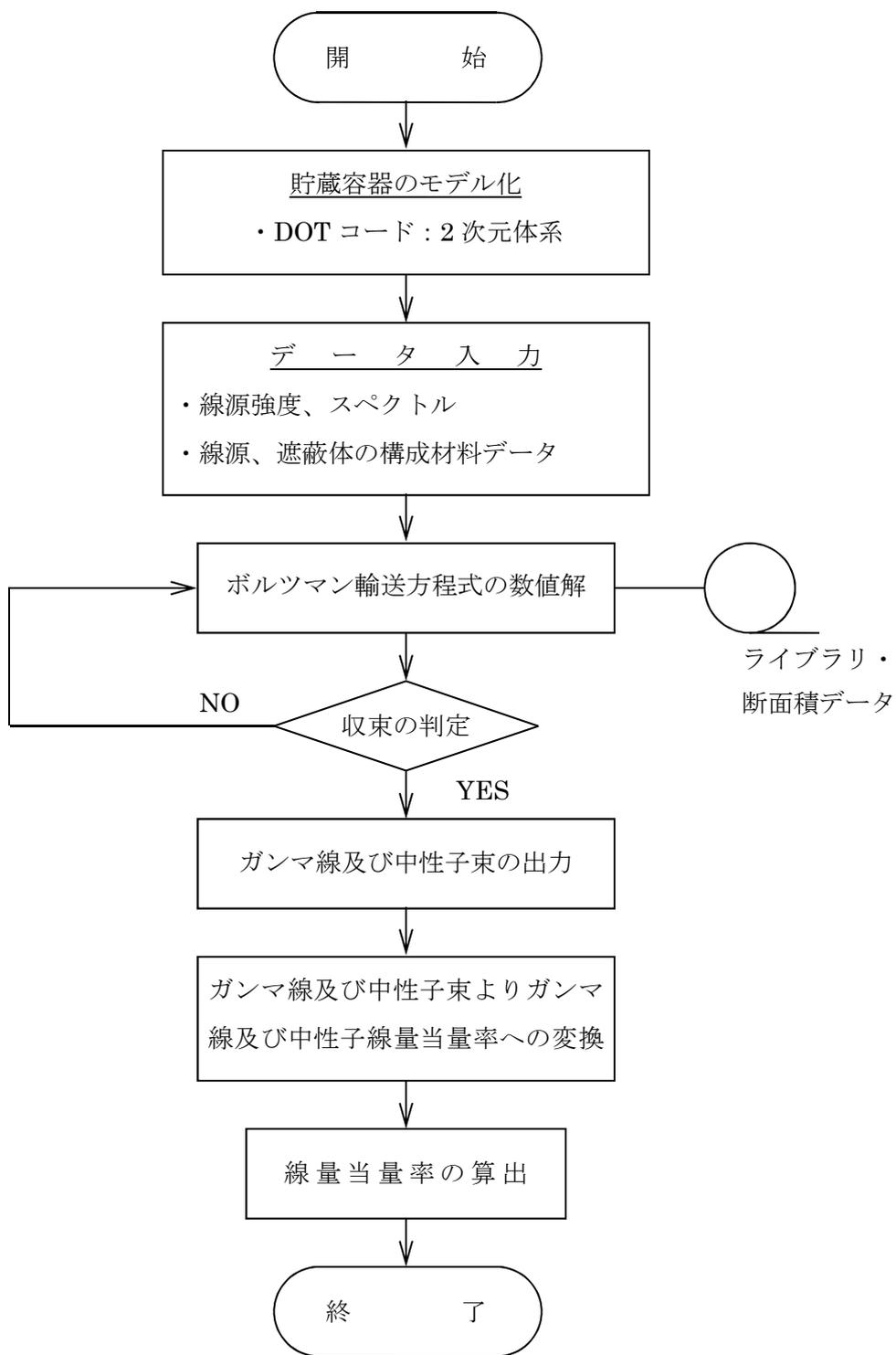
- ① ガンマ線や中性子に対するボルツマン輸送方程式を解くことによる数値解法であり、放射線の挙動を追跡するのに重要な非等方性が表現できる。
- ② DOT3.5 は、2次元の体系を扱うことができる。

(3) 解析フロー

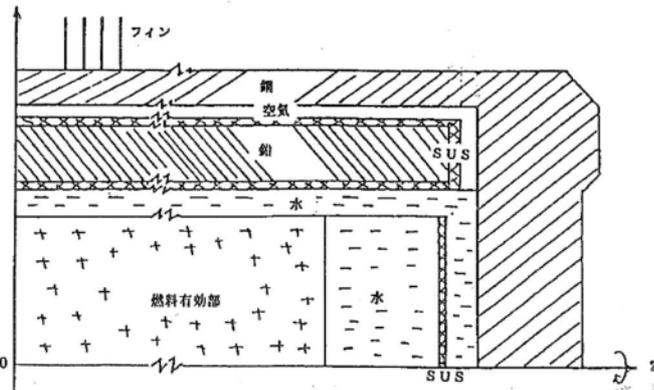
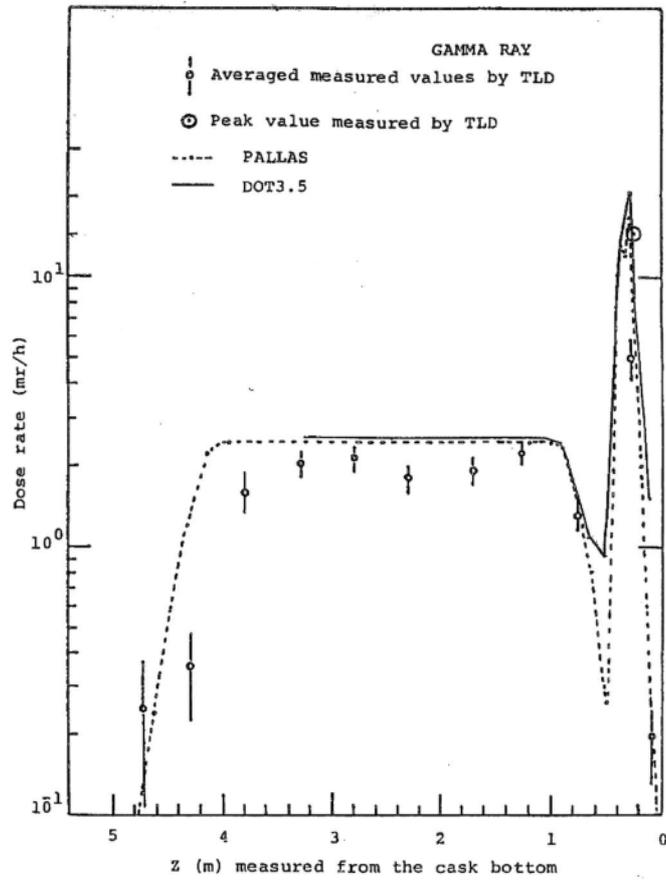
DOT3.5 の解析フローを別紙 5-1 図に示す。

(4) 使用実績及び検証

ガンマ線及び中性子について、DOT3.5 で解析した使用済燃料輸送キャスクの解析事例とその測定値を別紙 5-2 図及び別紙 5-3 図に示す。これらの実測値は概ね解析値よりも低い値を示しており、DOT3.5 を使用することの妥当性を表している。

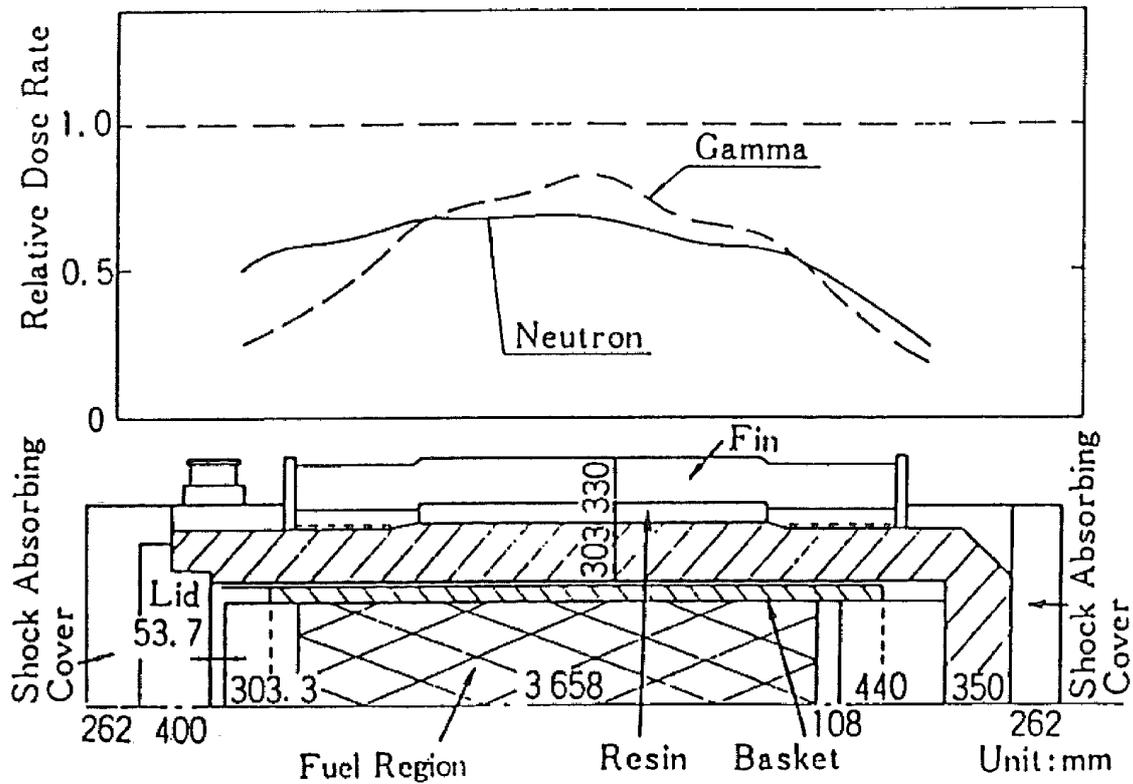


別紙 5-1 図 DOT3.5 の解析フロー図



(第 13 基準研究部会「使用済燃料の安全輸送に関する調査研究報告書」昭和 54 年 3 月、日本造船研究協会 の PALLAS コード検証例に DOT コード解析結果を追記したものである。)

別紙 5-2 図 DOT3.5 によるガンマ線の線量当量率に関する検証例



注) 中性子を DOT、二次ガンマ線を ANISN (一次元輸送コードで計算方法上の差はない)、燃料有効部のガンマ線を QAD の各コードで解析した結果である。

出典: 「中性子遮蔽設計ハンドブック」、(社)日本原子力学会、1993年4月

別紙 5-3 図 DOT3.5 による中性子の線量当量率に関する検証例

Doc. No. MA035A-RC-D02-4 Rev.1

2020年11月25日

日立造船株式会社

使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器等の設計の型式証明申請（Hitz-B52型）

質問管理票に対する回答（遮蔽関連）（その4）

番号	項目	質問日	コメント内容
56	遮蔽	2018/11/2	<p>【補足説明資料 1-6 Hitz-B52 型の遮蔽設計に関する説明資料】(Doc.No.MA035A-RC-D01 Rev.0) (平成 30 年 11 月 2 日説明資料)</p> <p>・P.6 表 4 において、「線源強度」について、ピーキングファクターの設定根拠及び保守性を丁寧に説明すること。</p>
69	遮蔽	2018/11/2	<p>【補足説明資料 1-6 Hitz-B52 型の遮蔽設計に関する説明資料】(Doc.No.MA035A-RC-D01 Rev.0) (平成 30 年 11 月 2 日説明資料)</p> <p>・別紙 2-1 ピーキングファクターの定義及び設定根拠並びに収納する使用済燃料が本ピーキングファクターに包絡されることの事業許可申請時の確認方法を説明すること。</p>

(回答) - 2019/7/31 済

1. ピーキングファクターの設定について

金属キャスクの遮蔽機能を評価するための入力条件は、収納される使用済燃料の線源強度であり、これは主に使用済燃料の燃焼度と冷却年数によって決まる。ピーキングファクター（以下「PF」という）は、軸方向の局所的な燃焼度の集合体平均の燃焼度に対する比を表わすものであり、PF の軸方向分布は燃料固有の特性値ではなく、当該使用済燃料の炉内での運転条件によって異なる。したがって、Hitz-B52 型の PF については、貯蔵対象となる燃料が装荷された国内代表プラントを対象として、当該プラントの燃焼度の高い燃料及び PF の大きい燃料の PF を上回るように設定されたものを用いており、線源強度算出にあたって設定している使用済燃料の軸方向各ノードの燃焼度は、実際に収納する燃料の軸方向燃焼度分布よりも高い想定となり、線源強度は保守的な値となる。

図 56-1 に Hitz-B52 型の PF 軸方向分布を示す。なお、本条件における軸方向燃焼度分布に包絡されない使用済燃料は収納対象としないものとする。

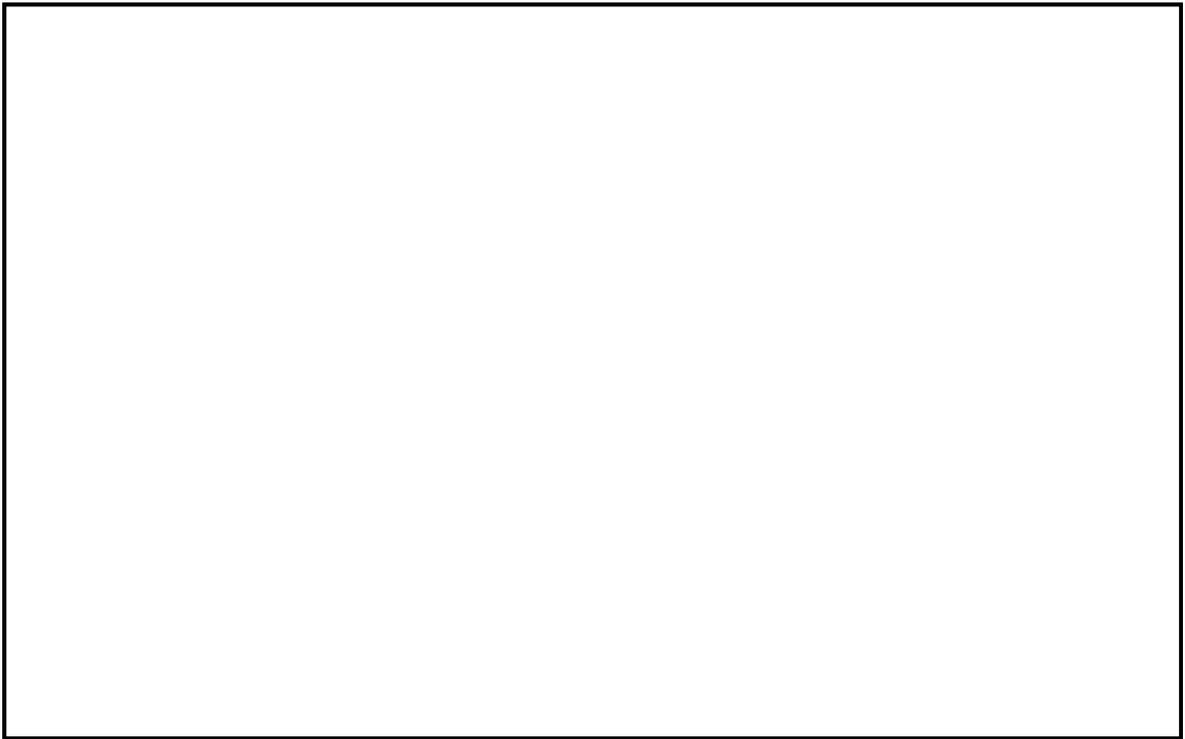


図 56-1 Hitz-B52 型の PF 軸方向分布

## 2. 燃料の配置に関する線源強度の保守性について

線源強度に関する遮蔽解析の保守性としては、第1項に示したPFの設定の保守性に加え、配置に関しても以下に述べるとおり保守的な設定としている。

遮蔽解析では図56-2に示すように、キャスク中央部に最高燃焼度の燃料を、周辺部に平均燃焼度の燃料を配置する条件としている。実際には、キャスクに収納する使用済燃料の燃焼度は、収納される燃料52体の平均で平均燃焼度以下とし、平均燃焼度を超える燃料でも最高燃焼度以下と制限している。

つまり、キャスクに収納される燃料の平均を平均燃焼度以下とするため、例えば周辺部全体に平均燃焼度の燃料が収納される場合、中央部すべてに最高燃焼度燃料を収納することはできず、少なくとも一部には平均燃焼度を下回る燃料が収納されることとなる。また、中央部に最高燃焼度燃料が配置される場合は、周辺部には平均燃焼度を下回る燃料が収納されることとなる。

したがって、線源強度算出に当たって仮定した図56-2に示す配置での燃焼度は、実際に収納される配置での燃焼度を上回っており、保守側の設定となる。

## 3. 貯蔵事業者が確認すべき事項について

図56-2に示す収納位置条件で使用済燃料を収納する場合、収納対象となる使用済燃料の使用条件及び軸方向燃焼度分布を確認する必要がある。使用済燃料の仕様について表56-1に示し、使用済燃料のPFを表56-2に示す。

高燃焼度8×8燃料を収納する場合の確認のフローを図56-3に、その他の燃料を収納する場合の確認のフローを図56-4に示す。

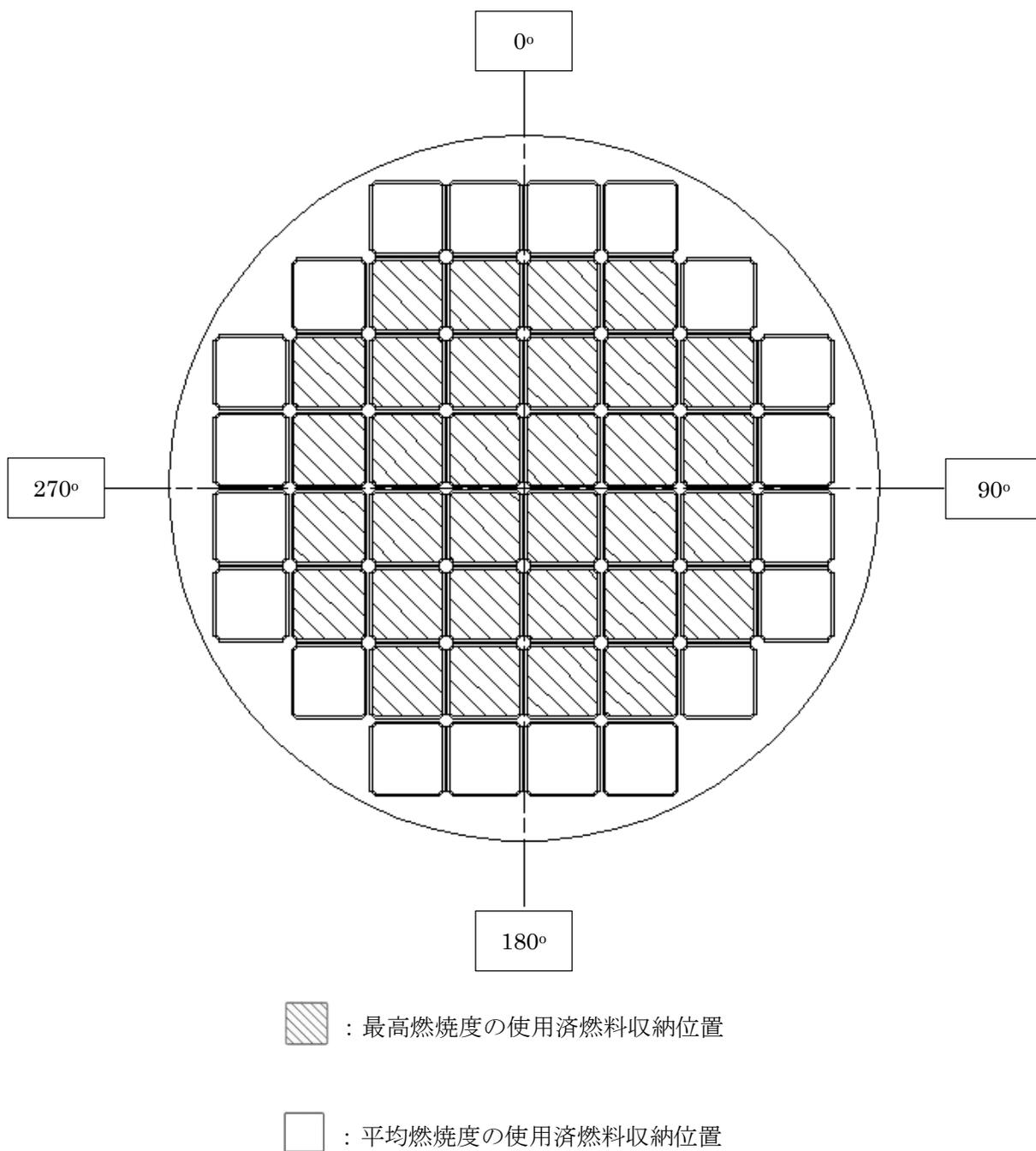


図 56-2 遮蔽解析における使用済燃料の収納位置条件  
 (高燃焼度 8×8 燃料のみを収納する場合) (注)  
 (注) 他の燃料は収納条件を指定しない。

表 56-1 使用済燃料の仕様

項 目		仕 様		
使用済燃料の種類		新型 8×8 燃料	新型 8×8 ジルコニウムライナ 燃料	高燃焼度 8×8 燃料
形 状	集 合 体 幅	約 134 mm	約 134 mm	約 134 mm
	全 長	約 4,470 mm 又は 約 4,350 mm	約 4,470 mm	約 4,470 mm 又は 約 4,350 mm
質 量		約 270 kg	約 270 kg	約 270 kg 又は 約 260 kg
燃料 集合体 1 体 の仕 様	初期濃縮度	3.00 wt% 以下	3.10 wt% 以下	3.60 wt% 以下
	※1 最 高 燃 焼 度	40,000 MWd/t 以下	40,000 MWd/t 以下	50,000 MWd/t 以下
	冷 却 期 間	25 年 以上	18 年 以上	15 年 以上
金属 キャ スク 1 基 当 た り の 仕 様	収 納 体 数	52 体	52 体	52 体
	※2 平 均 燃 焼 度	35,000 MWd/t 以下	38,000 MWd/t 以下	43,000 MWd/t 以下
	崩 壊 熱 量	8.4 kW 以下	10.6kW 以下	12.8 kW 以下

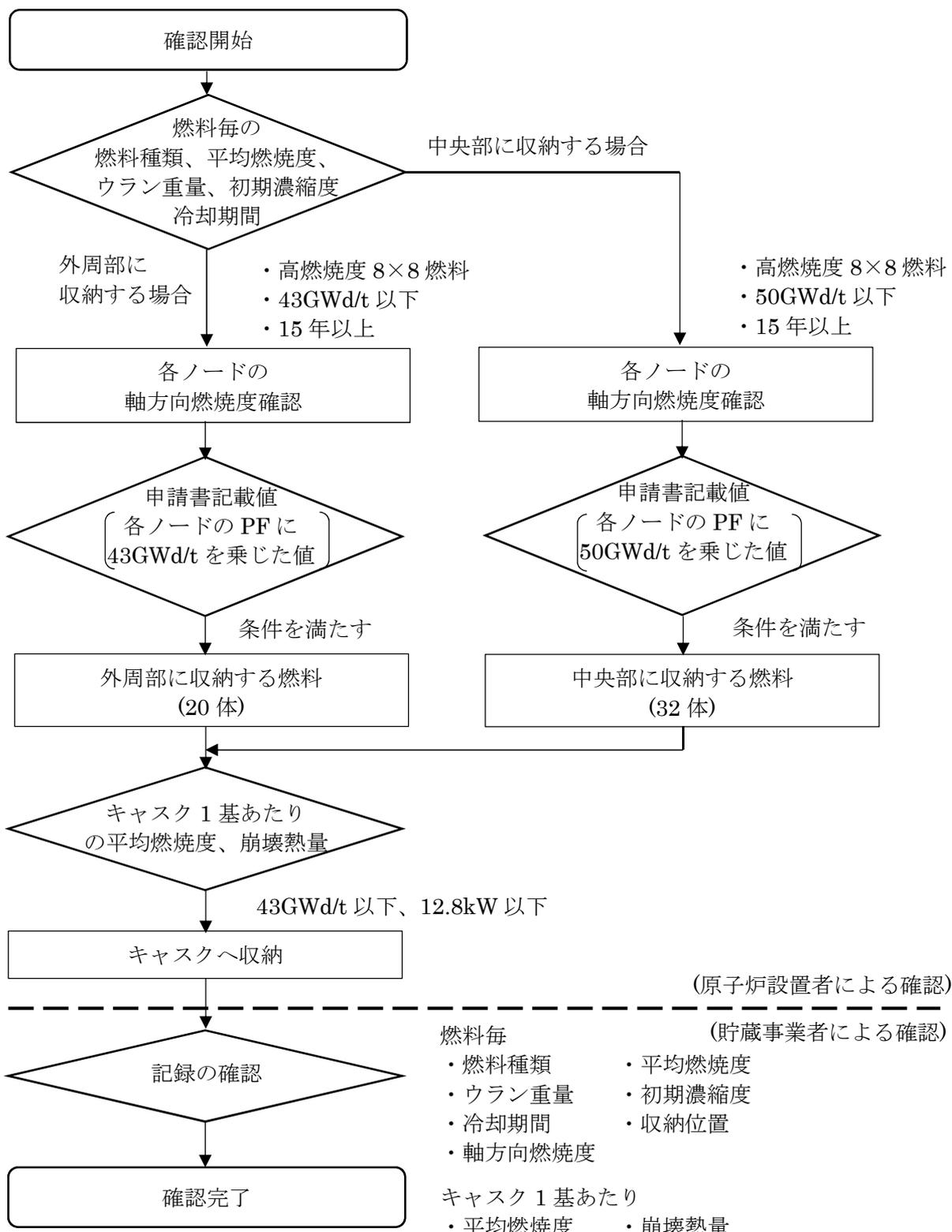
注記※1：最高燃焼度とは、収納する燃料集合体 1 体の燃焼度の最大値を示す。

注記※2：平均燃焼度とは、収納する全燃料集合体に対する燃焼度の平均値を示す。

表 56-2 使用済燃料の PF

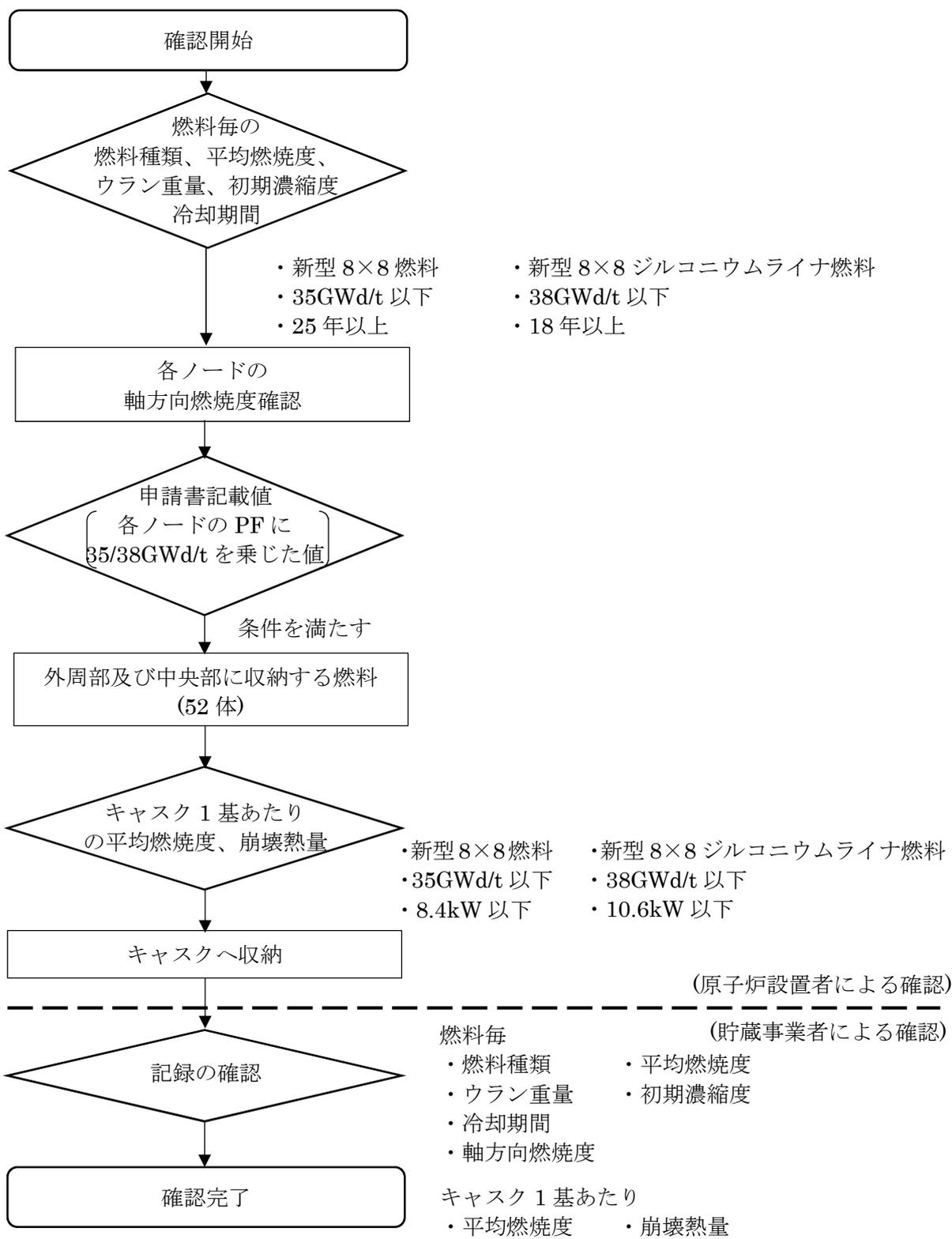
項 目	新型 8×8 燃料	新型 8×8 ジルコニウム ライナ燃料	高燃焼度 8×8 燃料
<p style="text-align: center;">(上部)</p> <p>ピーキングファクター ※1</p> <p style="text-align: center;">(下部)</p>			

注記※1：ノードは燃料有効部を軸方向に  したものである。



注記※1：上記フローにおいていずれの収納条件も満たせない燃料は収納対象外とする。

図 56-3 高燃焼度 8×8 燃料を収納する場合の貯蔵事業者の確認フロー



注記※1：上記フローにおいていずれの収納条件も満たさない燃料は収納対象外とする。

図 56-4 新型 8×8 燃料または新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料を収納する場合の貯蔵事業者の確認フロー

番号	項目	質問日	コメント内容
59	遮蔽	2018/11/2	<p>【補足説明資料 1-6 Hitz-B52 型の遮蔽設計に関する説明資料】(Doc.No.MA035A-RC-D01 Rev.0) (平成 30 年 11 月 2 日説明資料)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ P.10 図 3 において、頭部及び底部中性子遮蔽材部にモデル図には示されていない均質化領域、支持構造物、貫通孔の存在等がある場合は詳細を示し、評価手法及び評価結果に与える影響を説明すること。</li> </ul>
105	遮蔽	2019/8/9	<p>【No.59 関連】【補足説明資料 1-6 Hitz-B52 型の遮蔽設計に関する説明資料】(Doc.No. MA035A-RC-D01 Rev.0) (平成 30 年 11 月 2 日説明資料)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 添付書類・特定容器などの安全設計に関する説明書の P1-28 の第 1-6 図に記載のある一次蓋貫通孔は中性子遮蔽材を貫通していないのか説明すること。また、貫通孔がステンレス部のみである場合も含めて、通常時は貫通孔内が金属部材等で塞がれているのか説明すること。</li> </ul>
106	遮蔽	2019/8/9	<p>【No.59 関連】【補足説明資料 1-6 Hitz-B52 型の遮蔽設計に関する説明資料】(Doc.No. MA035A-RC-D01 Rev.0) (平成 30 年 11 月 2 日説明資料)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 質問管理票に対する回答（遮蔽関連）（その 4）の P10 の図 59-1 の一次蓋レジンは容器中心軸に対して左右対称となっていないが、構造の詳細を示した上で遮蔽評価での取り扱い方法を説明すること。</li> </ul>

1

(回答)

補足説明資料 1-6 の P.10 図 3 中の Hitz-B52 型のモデル化の概要図に示す一次蓋レジン部及び底部レジン部に均質化領域、支持構造物及び貫通孔は存在しないが、局所的に中性子遮蔽材が欠損するような部材（以下「支柱」という。）とバルブ部の存在による中性子遮蔽材（以下「一次蓋レジン」という。）の欠損に関しては、遮蔽解析のモデル化において以下のように考慮している。

1

## 1. 支柱の影響に関して

△1

図 59-1 に示すように、支柱は一次蓋レジン部及び底部レジン部を貫通するように配置されており、材質は一次蓋レジン部に配置されているものがオーステナイト系ステンレス鋼 [ ]、底部レジン部に配置されているものが炭素鋼 [ ] である。解析モデルにおいては、支柱と同材質の箇所を一体化してモデル化しており(図 59-2)、当該箇所のレジンが欠損する形となっている。別紙 6-1 図~別紙 6-4 図及び別紙 6-9 図~別紙 6-12 図(2019年4月17日説明資料「使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器等の設計の型式証明申請(Hitz-B52型) 質問管理票に対する回答(遮蔽関連)(その3)」)に示すように、当該部近傍の線量当量率は、中性子遮蔽材の欠損(ガンマ線遮蔽材の増加)の影響を受けているが、金属キャスク表面における線量当量率への影響は見受けられず、その影響は微小である。また、金属キャスク表面及び表面から1m離れた位置における最大線量当量率はそれぞれ2mSv/h(2000μSv/h)以下及び100μSv/h以下となっており、欠損を考慮しても、そのサイズは小さいため、遮蔽解析の評価結果に大きな影響を及ぼすことはない。

## 2. バルブ部の存在による中性子遮蔽材の欠損の影響に関して

「添付書類-特定容器などの安全設計に関する説明書」の P1-28 第 1-6 図に記載のとおり、Hitz-B52 型の一次蓋にはドレン・ベント用のバルブが設けられており、実際には一次蓋レジンはその部を避けるように配置される(図 105-1)。遮蔽解析上の一次蓋レジンのモデルは図 105-1 の青線で囲む円形状に設定している。バルブ部の存在による一次蓋レジンの局所的な欠損の影響を評価するため、赤線で囲む円形状の一次蓋レジンとバルブ部による一次蓋の貫通孔について、通常時はバルブカバーで閉じられるため、当該部位による一次蓋を介した容器内部からの常時貫通は無いものとしてモデル化(図 105-2)した。補足説明資料 1-6 Hitz-B52 型の遮蔽設計に関する説明資料(Doc. No. MA035A-RC-D01) 表 6 記載値の計算に使用したモデルをモデル A、本検討モデルをモデル B とする。頭部軸方向において、それぞれの結果での最大線量当量率を与える位置を図 105-3 に示す。

△1

モデル B は中性子遮蔽材の欠損及びガンマ線遮蔽体の欠損を全周に渡って考慮した保守的なモデルであるが、表 105-1 に示すとおり、基準値以内に収まっている。実際の欠損は局所的である点を踏まえると、その影響は小さいといえる。

以上により、Hitz-B52 型の遮蔽設計では、「補足説明資料 1-6 Hitz-B52 型の遮蔽設計に関する説明資料」(Doc.No.MA035A-RC-D01) の P.10 図 3 に示すモデルによる遮蔽解析評価で問題は無い。

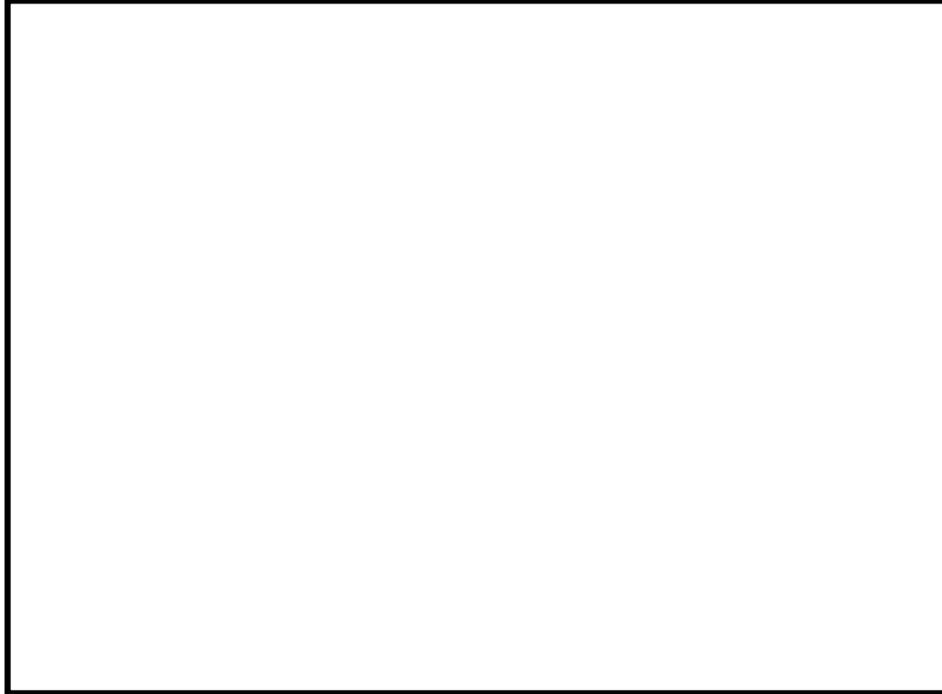


図 59-1 Hitz-B52 型の一次蓋レジジン部と底部レジジン部周辺の概略図  
(上：本体上部側、下：本体下部側)

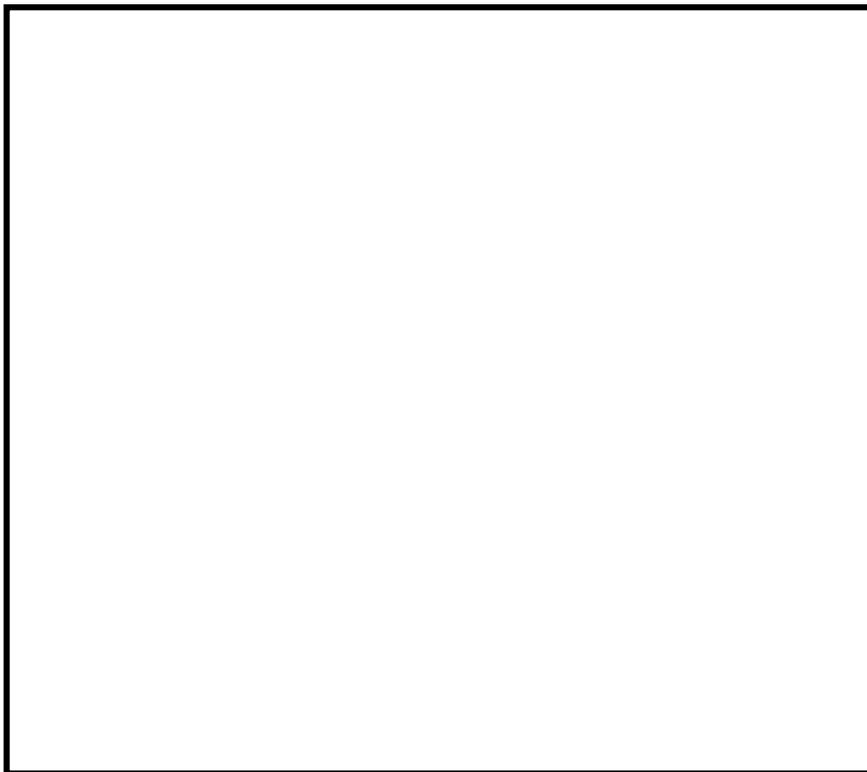


図 59-2 Hitz-B52 型の一次蓋レジジン部と底部レジジン部周辺のモデル図  
(上：本体上部側、下：本体下部側)

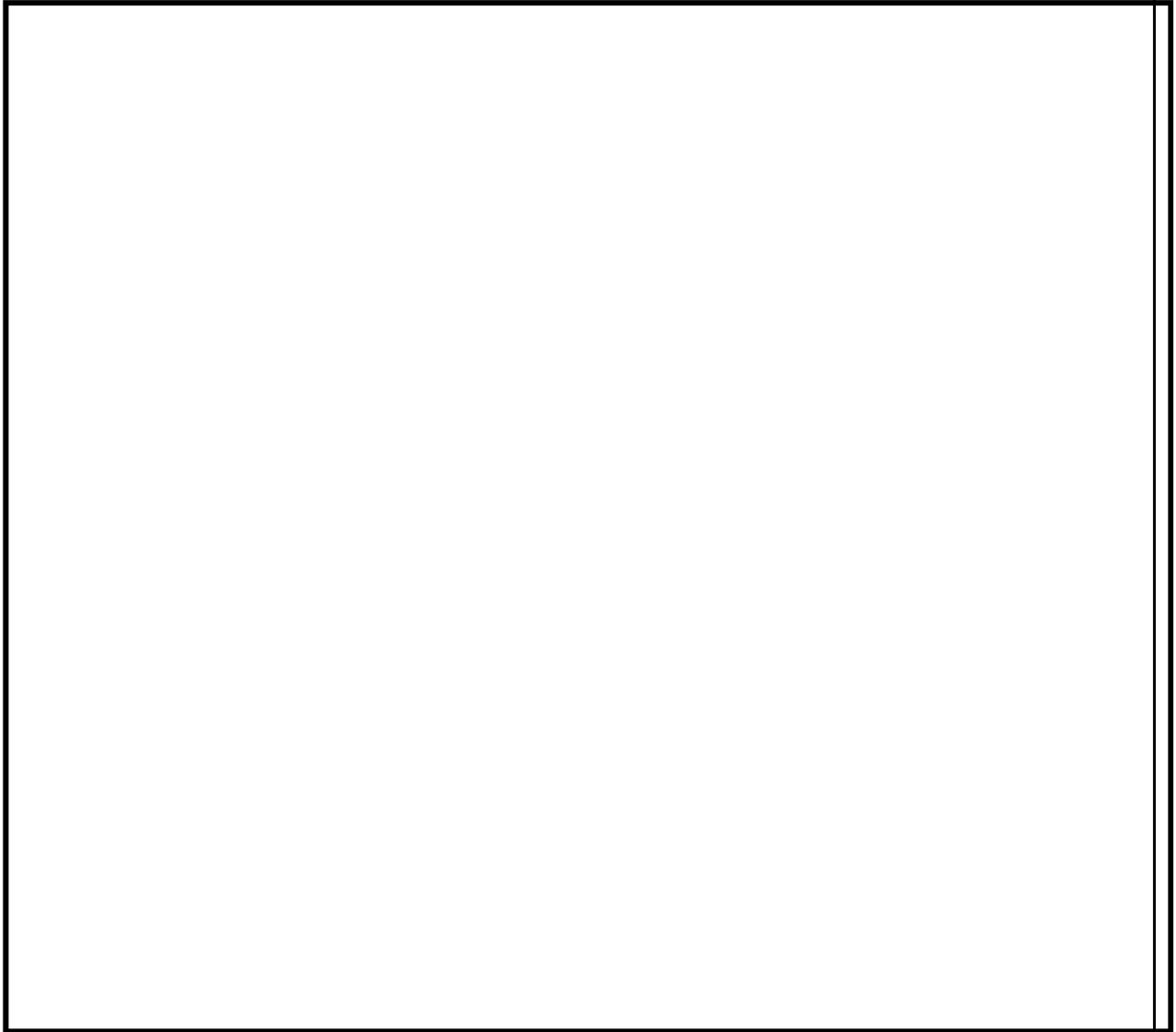


図 105-1 Hitz-B52 型の一次蓋レジンとバルブの位置関係

1



図 105-2 一次蓋周辺のモデル図比較

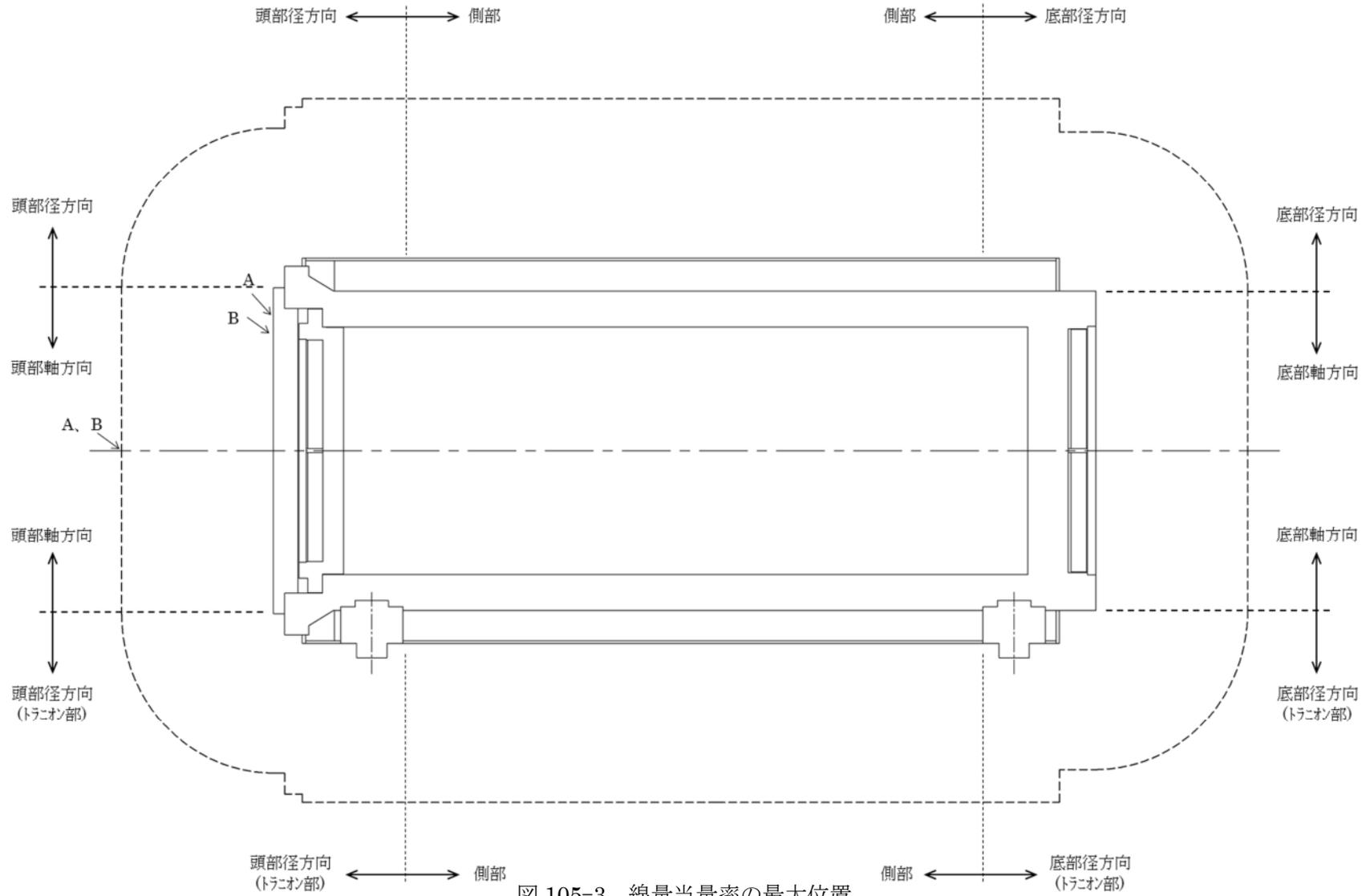


表 105-1 線量当量率評価結果の比較 (単位：μSv/h)

評価点		頭部 軸方向		
対象		モデル A	モデル B	
表面	ガンマ線	燃料有効部	<0.1	<0.1
		構造材放射化	0.3	4.3
		二次ガンマ	0.3	0.6
	中性子		71.2	156.9
	合計		71.9	161.9
	基準値		2000	
表面から 1m	ガンマ線	燃料有効部	<0.1	<0.1
		構造材放射化	2.1	2.3
		二次ガンマ	<0.1	0.2
	中性子		14.5	33.5
	合計		16.8	36.1
	基準値		100	

△1

番号	項目	質問日	コメント内容
64	遮蔽	2018/11/2	<p>【補足説明資料 1-6 Hitz-B52 型の遮蔽設計に関する説明資料】(Doc.No.MA035A-RC-D01 Rev.0) (平成 30 年 11 月 2 日説明資料)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・別紙 1-4 2. (4) において、「本体モデルの計算結果にその差異を考慮して～」とあるが、どのような計算をして、得られた結果をどのように評価したのか具体的に説明すること。</li> </ul>
66	遮蔽	2018/11/2	<p>【補足説明資料 1-6 Hitz-B52 型の遮蔽設計に関する説明資料】(Doc.No.MA035A-RC-D01 Rev.0) (平成 30 年 11 月 2 日説明資料)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・別紙 1-5 別紙 1-2 図において、トラニオンモデル図と設計に基づくトラニオン図との比較によるモデル化の妥当性、線束の引き継ぎ方法（引き継ぎ位置の図示、引き継ぎ後の線源設定方法等）、線量当量率コンター図を用いたトラニオン部の評価結果等を説明し、引き継ぎ計算によるトラニオン部の評価結果の妥当性を示すこと。</li> </ul>
107	遮蔽	2019/8/9	<p>【No.66 関連】【補足説明資料 1-6 Hitz-B52 型の遮蔽設計に関する説明資料】(Doc.No. MA035A-RC-D01 Rev.0) (平成 30 年 11 月 2 日説明資料)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・2 種類の上部トラニオンの実形及び対応するモデル図も示すこと。</li> </ul>
108	遮蔽	2019/8/9	<p>【No.66 関連】【補足説明資料 1-6 Hitz-B52 型の遮蔽設計に関する説明資料】(Doc.No. MA035A-RC-D01 Rev.0) (平成 30 年 11 月 2 日説明資料)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・線束の引継ぎ時における、トラニオンモデルでの線源角度分布の設定方法を説明すること。</li> </ul>

1

番号	項目	質問日	コメント内容
109	遮蔽	2019/8/9	<p>【No.66 関連】【補足説明資料 1-6 Hitz-B52 型の遮蔽設計に関する説明資料】(Doc.No. MA035A-RC-D01 Rev.0) (平成 30 年 11 月 2 日説明資料)</p> <p>・ 質問管理票に対する回答 (遮蔽関連) (その 4) の P15～18 の図 66-1～66-4 において、上部トラニオンモデルは 2 種類のモデルが混在しているが、質問管理票に対する回答 (遮蔽関連) (その 3) の P6～9 の別紙 6-5 図～6-8 図では空洞部が存在する形状のみとなっている。これらの図の掲載方針を明確にすること。</p>

1

(回答)

1. トラニオン部の評価方法

遮蔽評価を実施する際に二次元計算コードを使用しているため、金属キャスク本体のモデル化において、R-Z 円柱体系の周方向に位置するトラニオンは模擬できない。そのため、トラニオン部を別途モデル化した計算を行い、本体モデルに対するトラニオンの有無による影響を評価している。本体モデルの結果より燃料有効部側の高い線束を引き継いだ保守的な計算により (本回答第 3 項参照)、トラニオン部表面の線量当量率についてはトラニオン有モデルの線量当量率で評価している。トラニオン部のモデル化に際する線源角度分布の設定に関しては以下の手順で実施している。

- ① 本体モデル、トラニオンモデルともに角度分点数を [ ] と設定。
- ② 各線束接続位置において、本体モデルの Angular Flux [ ] をトラニオンモデルでの座標系に合致するように変換する(90 度回転させた場合の近接点に読み替える)。
- ③ 変換した Angular Flux をトラニオンモデルの境界線源として設定する。

1

また、トラニオン部の表面から 1m 離れた位置における線量当量率については、本体モデルの結果を下式のように補正することで評価している。

$$\begin{aligned} \text{トラニオン部の線量当量率} = & \\ & (\text{本体モデルの線量当量率}) + \\ & \{(\text{トラニオン有モデルの線量当量率}) - (\text{トラニオン無モデルの線量当量率})\} \end{aligned}$$

2. トラニオンのモデル図と設計図との比較によるモデル化の妥当性について、

上部トラニオンに関して、2種類それぞれの形状についてモデル化している(別紙1-3図(1/2))。下部トラニオンに関しては2種類ある形状(下部トラニオン(90° -270°側)、下部トラニオン(0° -180°側))について別紙1-3図(2/2)のようにモデル化し、遮蔽解析上保守的な評価をしている。

1



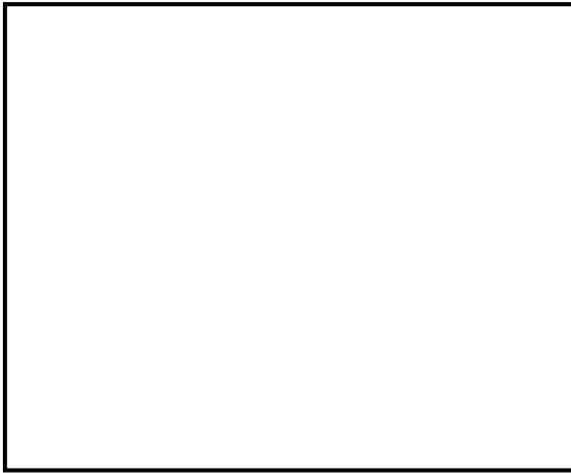
上部トラニオン(90° -270°側)設計図及びモデル図

1

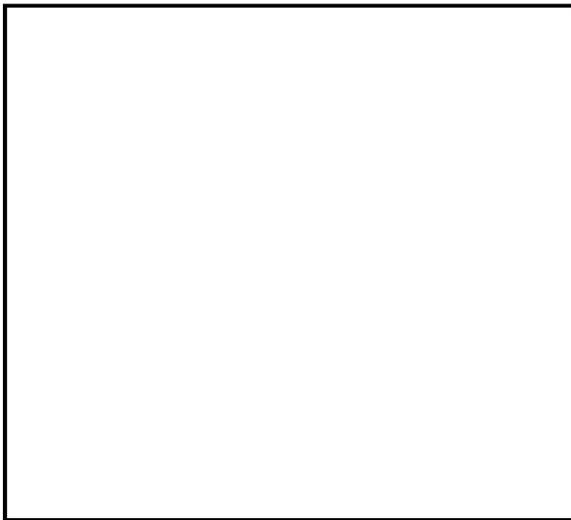


上部トラニオン(0° -180°側)設計図及びモデル図

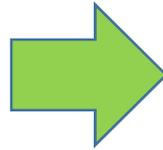
別紙1-3図(1/2) 上部トラニオンのモデル化



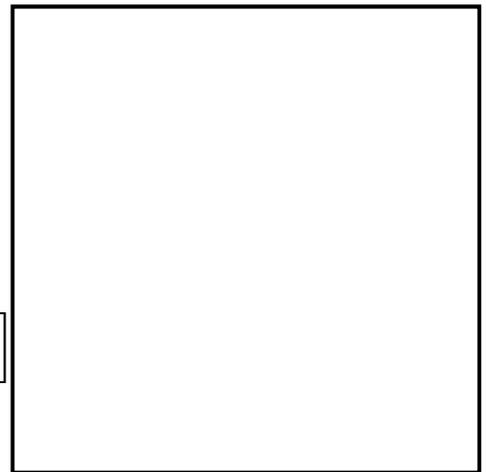
下部トラニオン (90° - 270° 側) 設計図



下部トラニオン (0° - 180° 側) 設計図



モデルを統一



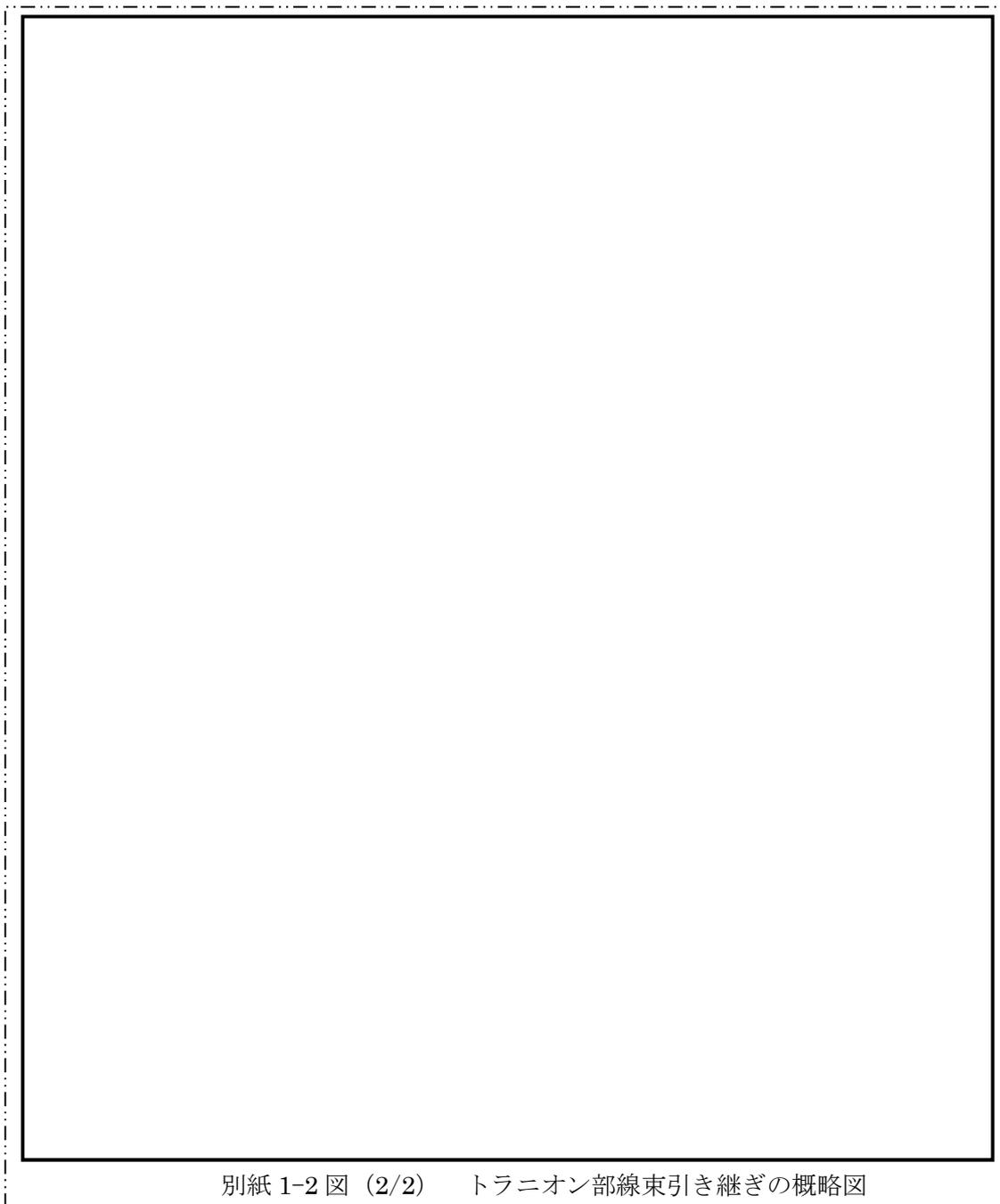
- ① レジン部は 90° - 270° 側の形状   に統一してモデル化することにより、保守的な評価としている。
- ② トラニオン先端部の形状を 0° - 180° 側の形状に統一してモデル化している。

別紙 1-3 図 (2/2) 下部トラニオンのモデル化に際する考え方

### 3. 線束の引継ぎ

#### (1) 線束の引継ぎ方法

トラニオン部の線束引継ぎ位置を別紙 1-2 図 (2/2) に示す。本体モデルの評価結果から、上部及び下部トラニオンそれぞれに対し、図中の赤線部並びに青線部に示す燃料有効部側の線束をそれぞれ全周に分布させることで、遮蔽解析上保守的な評価としている。



以上に基づき、別紙 1-4 2. (4) の「トラニオン部の評価方法」の項目を、次のように訂正（アンダーライン部）するものとする。

#### (4) トラニオン部の評価方法

トラニオン部については、実形状を模擬して別途モデル化し、DOT3.5 を用いて評価している。上部トラニオンに関して、2 種類それぞれの形状についてモデル化している。下部トラニオンに関しては 2 種類ある形状（下部トラニオン（90° -270° 側）、下部トラニオン（0° -180° 側））について、同形状にモデル化し、別紙 1-3 図のようにモデル化し、遮蔽解析上保守的な評価をしている。

トラニオンを無視した本体モデルにて得られた各部付近の線束を、別途モデル化したトラニオン R-Z 軸対称モデル（トラニオン有/無モデル）に引き継いでいる。概略図 トラニオン部の線束引継ぎ範囲を別紙 1-2 図（2/2）に示す。トラニオン部の表面から 1m 地点での線量当量率は、有モデルと無モデルの計算結果より線種毎の計算結果の差を求め、本体モデルの計算結果にその差異を考慮して評価している。トラニオン部を別途モデル化した計算を行い、本体モデルに対するトラニオンの有無による影響を評価している。本体モデルの結果より燃料有効部側の高い線束を引き継いだ保守的な計算により、トラニオン部表面の線量当量率についてはトラニオン有モデルの線量当量率で評価している。また、トラニオン部の表面から 1m 離れた位置における線量当量率については、本体モデルの結果を下式のように補正することで評価している。

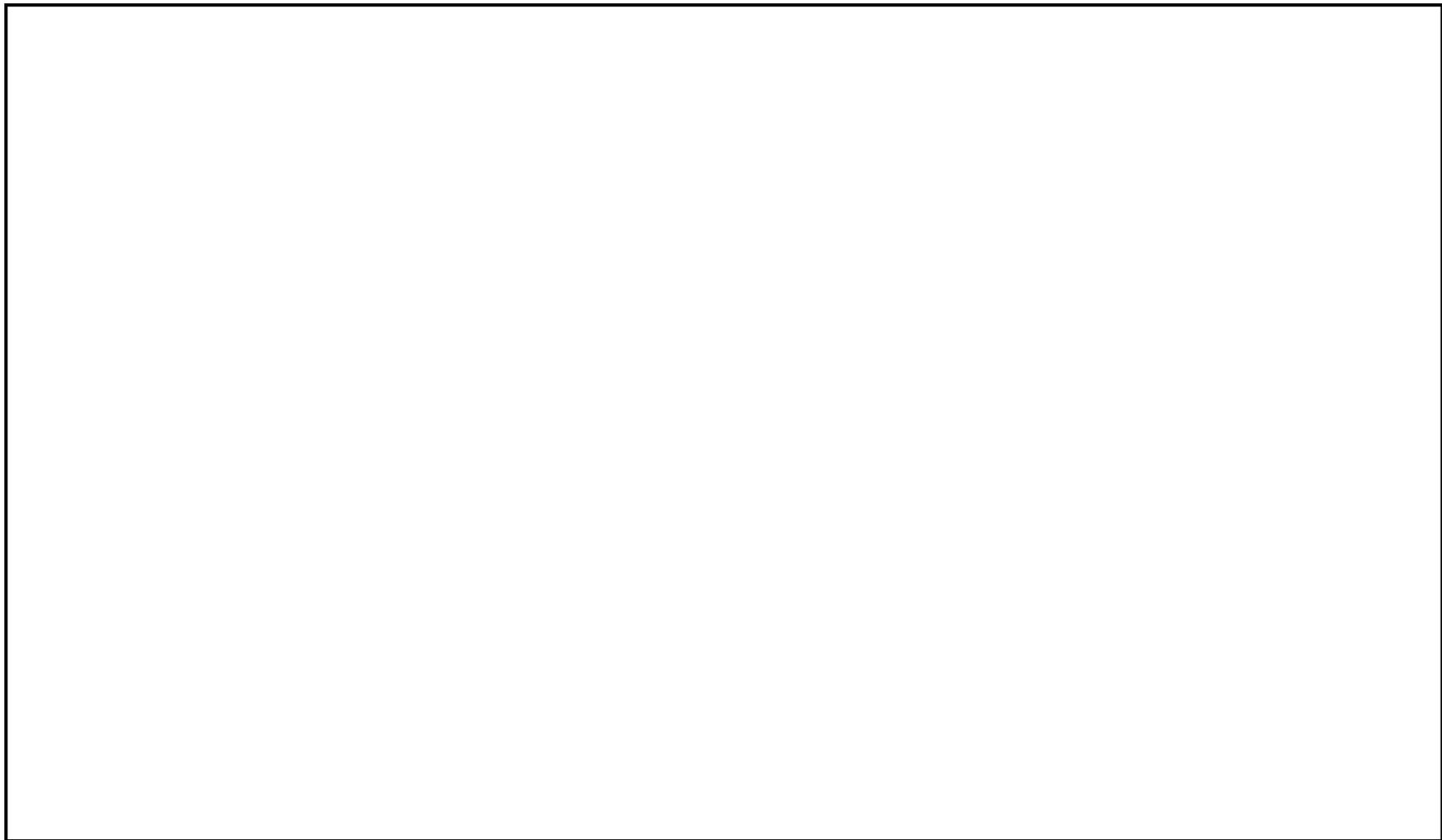
$$\begin{aligned} \text{トラニオン部の線量当量率} = & \\ & \text{(本体モデルの線量当量率)} + \\ & \frac{\{(\text{トラニオン有モデルの線量当量率}) - (\text{トラニオン無モデルの線量当量率})\}}{1} \end{aligned}$$

#### (2) トラニオン部評価方法の妥当性について

本体モデルからトラニオンモデルに引き継いだ線束の妥当性を確認するため、本体モデル及び上下部トラニオンモデルにおける線種毎の線量当量率分布の比較を図 66-1 ~ 図 66-8 として示す。なお、上部トラニオンについては 2 種類ある形状それぞれの結果を示している。前項で述べたとおり、燃料有効部側の線束をトラニオン全周に分布させることで引き継いだ線束は保守側の評価となっており、引き継ぐ境界における線量当量率は上下部トラニオンモデルともに本体モデルと同等であり、引き継いだ線束は妥当であると考えられる。

#### 4. まとめ

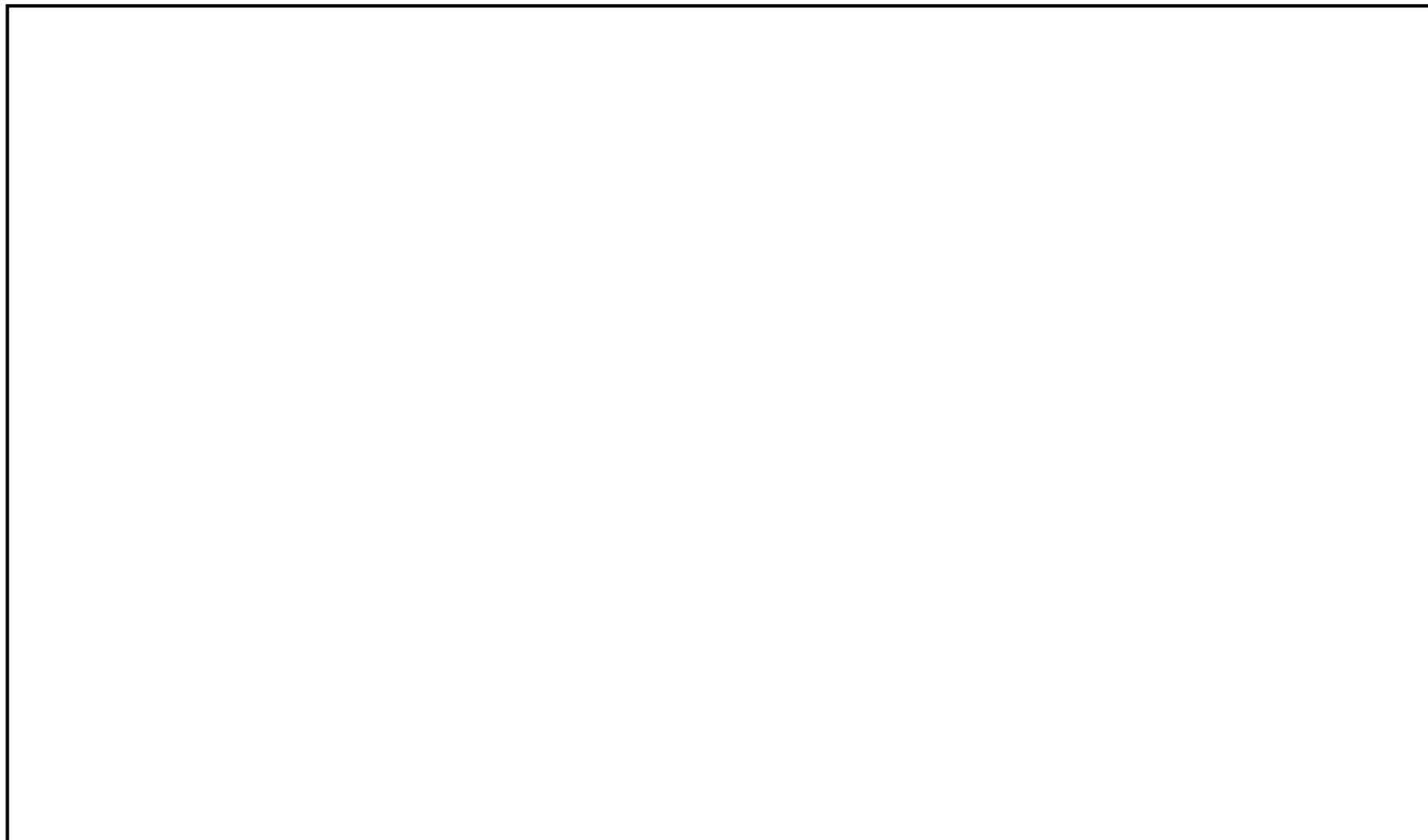
以上により、トラニオンのモデル化方法、当該モデルへの線束引継ぎ及び評価方法の妥当性が確認できたことから、Hitz-B52 型の遮蔽設計に用いた引き継ぎ計算手法によるトラニオン部の評価は妥当であるといえる。



△  
1

図 66-1 表面の燃料有効部ガンマ線線量当量率線図

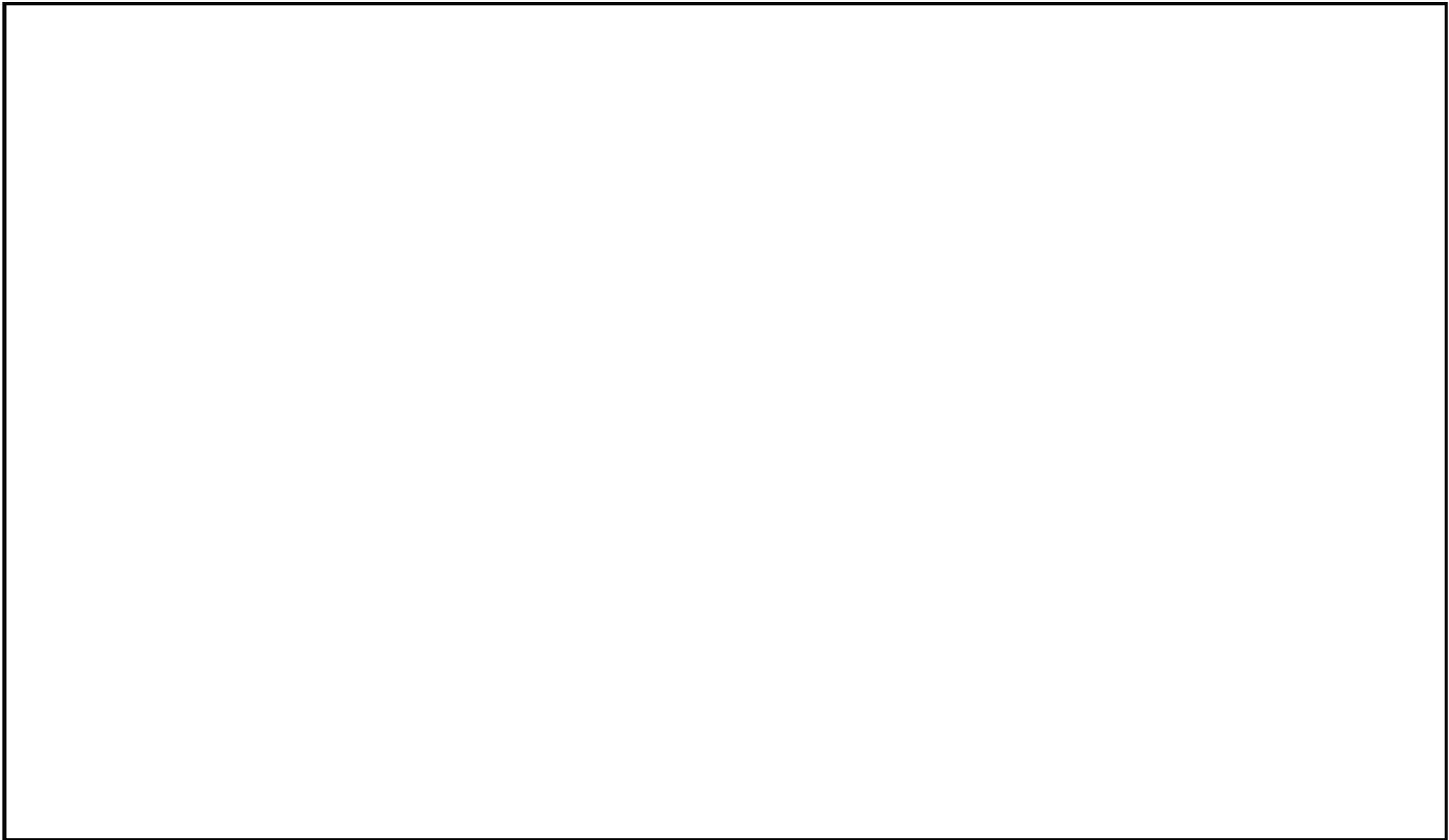
(左：本体モデル / 中央：上部トラニオンモデル (0° -180° 側) / 右：上部トラニオンモデル (90° -270° 側)) (単位  $\mu\text{Sv/h}$ )



△1

図 66-2 表面の構造材放射化ガンマ線線量当量率線図

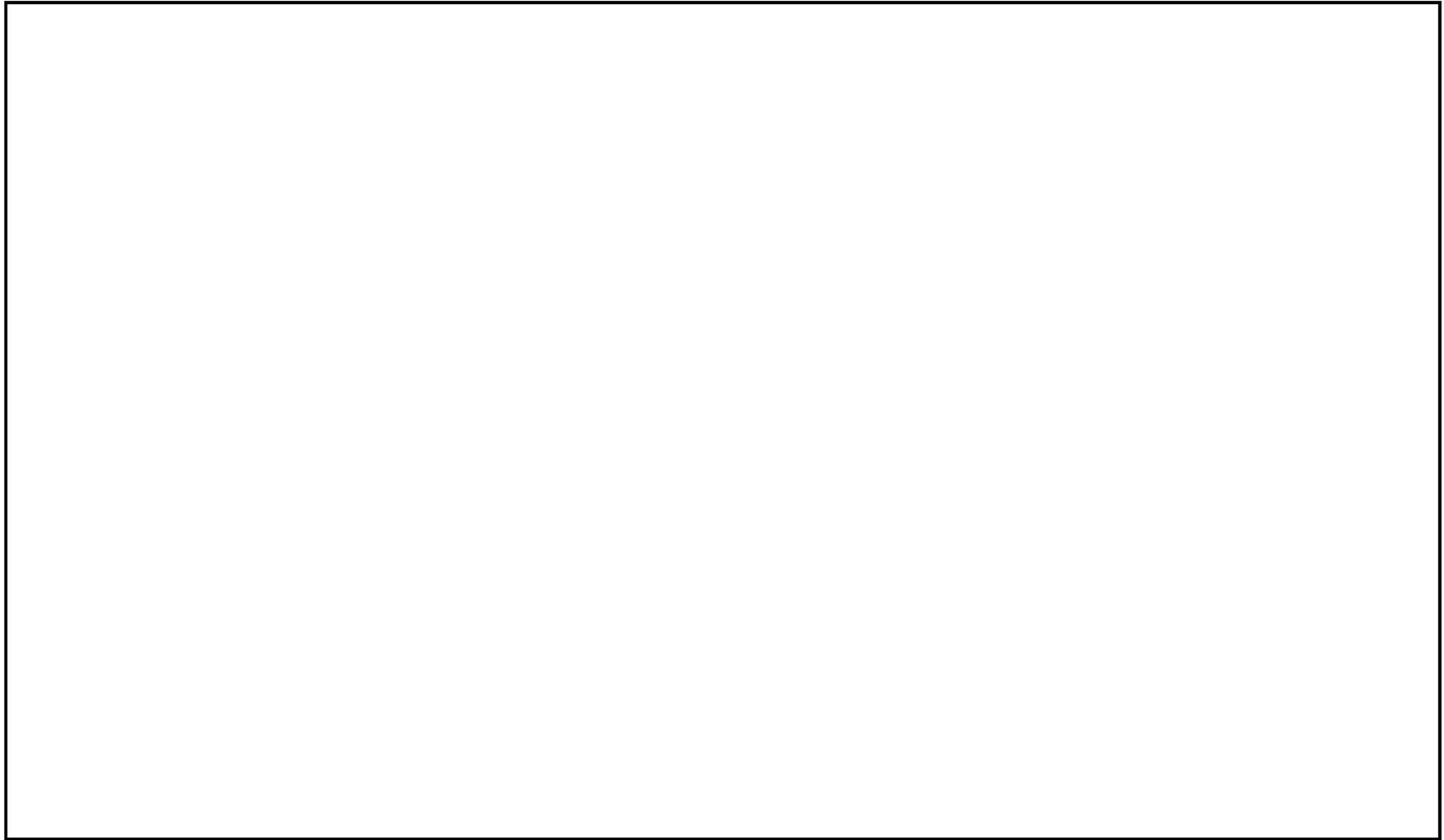
(左：本体モデル / 中央：上部トランニオンモデル (0° -180° 側) / 右：上部トランニオンモデル (90° -270° 側)) (単位  $\mu\text{Sv/h}$ )



△1

図 66-3 表面の二次ガンマ線線量当量率線図

(左：本体モデル / 中央：上部トランニオンモデル (0° -180° 側) / 右：上部トランニオンモデル (90° -270° 側)) (単位  $\mu\text{Sv/h}$ )



1

図 66-4 表面の中性子線量当量率線図

(左：本体モデル / 中央：上部トランニオンモデル (0° -180° 側) / 右：上部トランニオンモデル (90° -270° 側)) (単位  $\mu\text{Sv/h}$ )

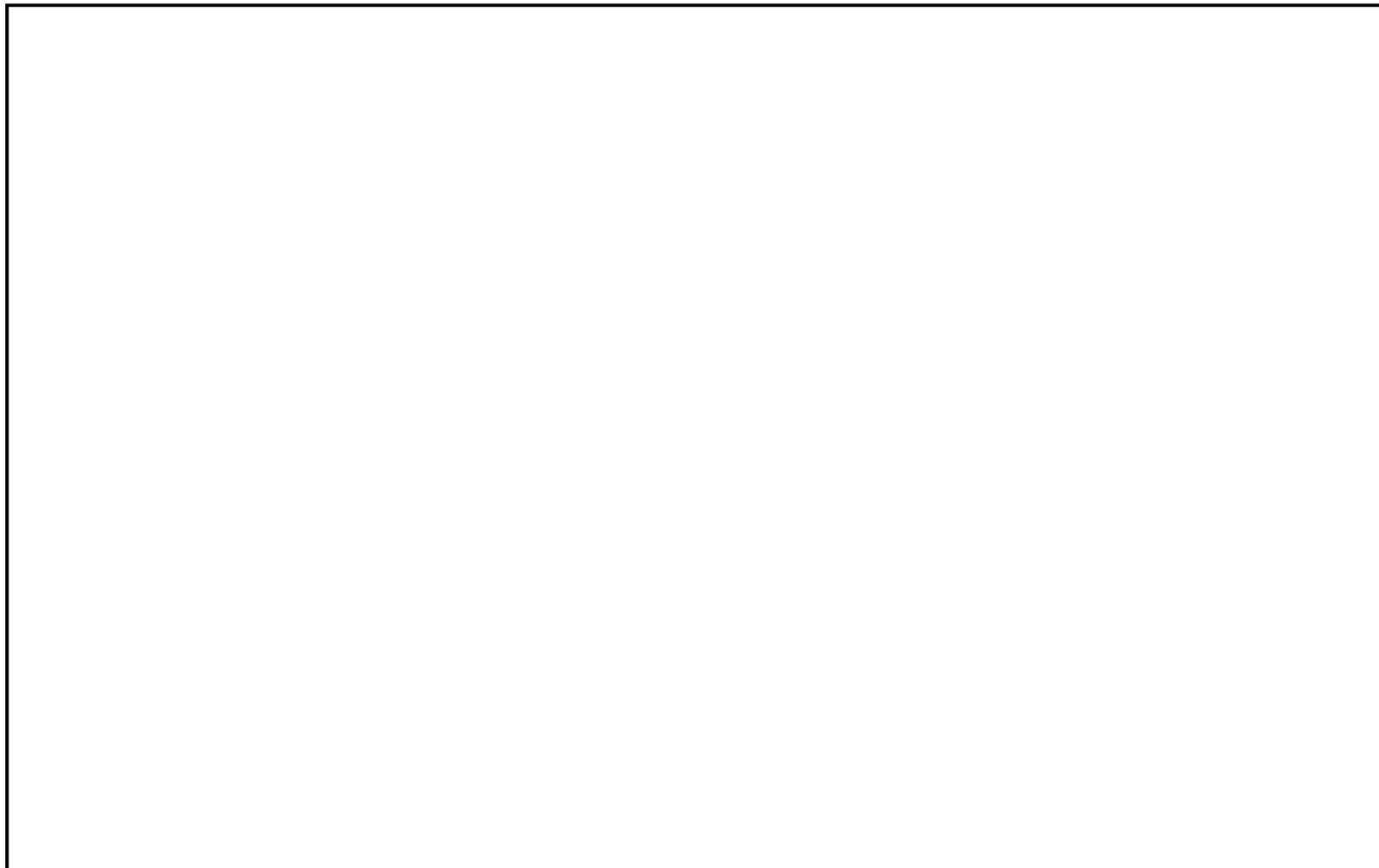


図 66-5 表面の燃料有効部ガンマ線線量当量率線図  
(左：本体モデル / 右：下部トラニオンモデル) (単位  $\mu\text{Sv/h}$ )



図 66-6 表面の構造材放射化ガンマ線線量当量率線図  
(左：本体モデル / 右：下部トラニオンモデル) (単位  $\mu\text{Sv/h}$ )



図 66-7 表面の二次ガンマ線線量当量率線図  
(左：本体モデル / 右：下部トラニオンモデル) (単位  $\mu\text{Sv/h}$ )

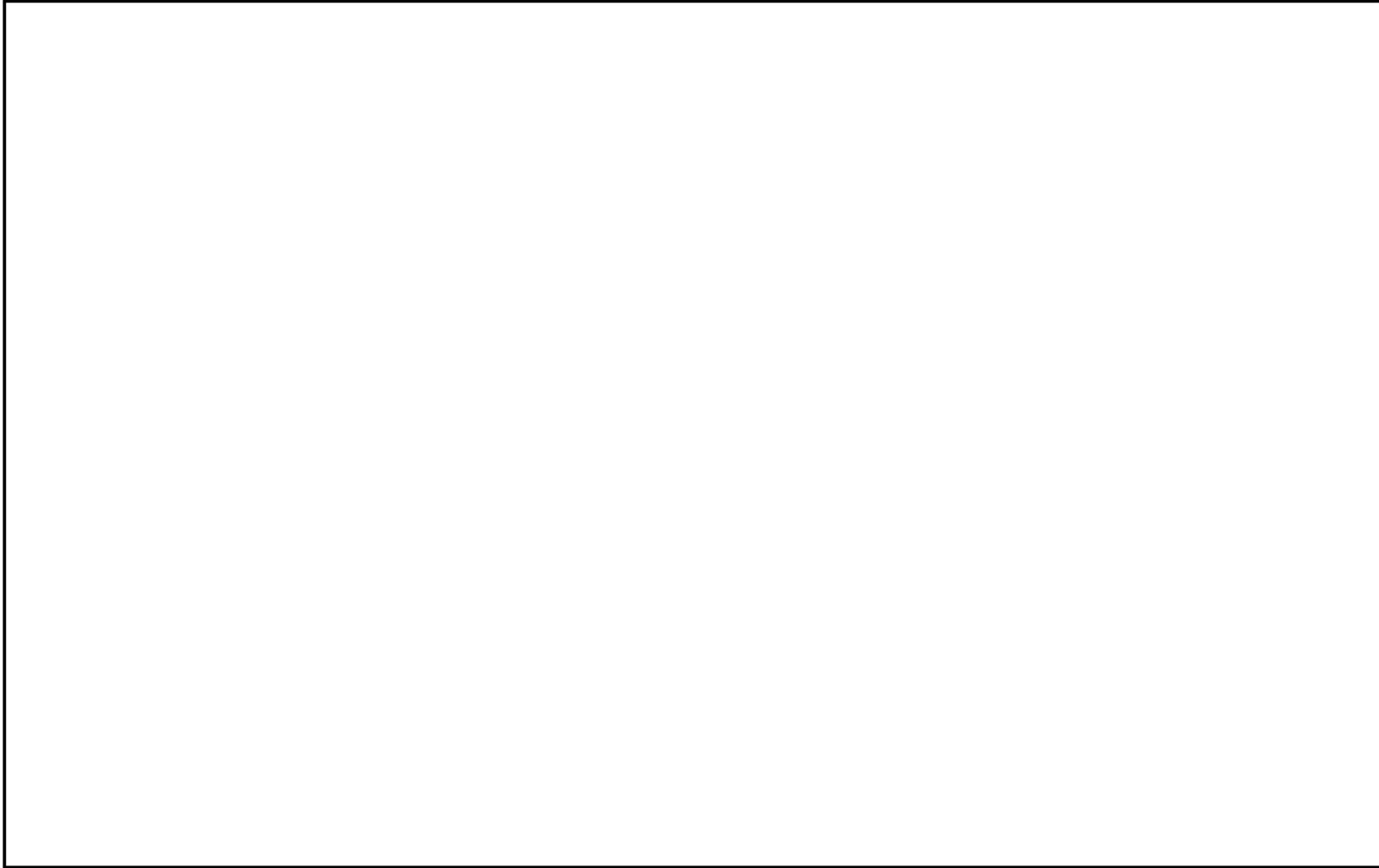


図 66-8 表面の中性子線量当量率線図  
(左：本体モデル / 右：下部トラニオンモデル) (単位  $\mu\text{Sv/h}$ )

番号	項目	質問日	コメント内容
52	遮蔽	2018/11/2	<p>【補足説明資料 1-6 Hitz-B52 型の遮蔽設計に関する説明資料】(Doc.No.MA035A-RC-D01 Rev.0) (平成 30 年 11 月 2 日説明資料)</p> <p>・ P. 4 2. (2) c. 線量当量率評価方法について、DLC-23/CASK ライブラリを使用した妥当性を説明すること。</p> <p>また、当該ライブラリは特に中性子による鉄の単層透過を評価する際に誤差が増大することが指摘されているが、本遮蔽解析における影響及び評価結果の妥当性を説明すること。</p>
番号	項目	質問日	コメント内容
110	遮蔽	2019/8/9	<p>【No.52 関連】【補足説明資料 1-6 Hitz-B52 型の遮蔽設計に関する説明資料】(Doc.No. MA035A-RC-D01 Rev.0) (平成 30 年 11 月 2 日説明資料)</p> <p>・ 鉄の単層透過に対する評価精度に係るコメントであるので、質問管理票に対する回答 (遮蔽関連) (その 4) の P10 の 3. ライブラリ変更による遮蔽解析結果への影響は、鉄の単層透過に関係する評価位置のうち、⑦a 最大線量当量率を与える位置⑨両ライブラリによる中性子線量率の比が最も大きい位置等を主軸として説明し、検討を深めるためにライブラリによる影響が小さい⑤側部中央を比較対象とするのが適切ではないか。</p>
番号	項目	質問日	コメント内容
111	遮蔽	2019/8/9	<p>【No.52 関連】【補足説明資料 1-6 Hitz-B52 型の遮蔽設計に関する説明資料】(Doc.No. MA035A-RC-D01 Rev.0) (平成 30 年 11 月 2 日説明資料)</p> <p>・ 質問管理票に対する回答 (遮蔽関連) (その 4) の P25 の「MATXSLIB-J33 ライブラリによる影響評価を考慮しても、…線量当量率が基準値以内に収まっていることを確認できたことから、DLC-23/CASK ライブラリによる Hitz-B52 型の遮蔽解析は妥当であると考え。」との記載について、MATXSLIB-J33 による評価結果の方がより信頼性が高いのであれば、Hitz-B52 型の遮蔽性能は確認できたことになるが、一方で DLC-23/CASK による解析では一部の過小評価が定量的に示されたことになるので、それを妥当というのは適切なのか、考えを示すこと。</p>

△  
1

(回答)

以下の内容を別紙 7 として追加する。

Hitz-B52 型の遮蔽解析は、二次元輸送計算コード DOT3.5 を用いて実施しており、断面積ライブラリは DLC-23/CASK ライブラリを用いている。

DLC-23/CASK ライブラリを使用した妥当性確認に関しては、2019 年 1 月 23 日説明資料「使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器等の設計の型式証明申請 (Hitz-B52 型) 質問管理票に対する回答 (遮蔽関連) (その 2)」の質問番号 63 に対する回答において、本文中で引用している解析事例では本ライブラリを使用していることから、当該妥当性は確認されている。一方で、DLC-23/CASK ライブラリは、輸送容器等の許認可申請において多くの使用実績があるが、鉄の単層透過時に中性子線量当量率を過小評価することが報告されていることから、自己共鳴遮蔽因子が用意されている断面積ライブラリとして、JENDL-3.3 に基づく MATXSLIB-J33 ライブラリを使用して遮蔽解析を実施し、ライブラリの違いによる影響評価をおこなった。

#### 1. 遮蔽解析条件

DLC-23/CASK ライブラリを使用した場合の評価 (以下「評価 A」という。) 条件と MATXSLIB-J33 ライブラリを使用した場合の評価 (以下「評価 B」という。) 条件の比較を別紙 7-1 表に示す。ライブラリ以外の計算条件は同一とした。

#### 2. 遮蔽解析結果

両ライブラリをそれぞれ用いた場合の線量当量率評価結果を別紙 7-2 表に、評価方向毎の最大線量当量率を与える位置を別紙 7-1 図に示す。評価 B において、中性子の増加影響により補足説明資料 1-6 表 6 の記載値を上回る箇所が存在するものの、金属キャスク表面及び表面から 1m 離れた位置における線量当量率が、それぞれ 2mSv/h (2000 $\mu$ Sv/h) 以下及び 100 $\mu$ Sv/h 以下となることを確認した。

#### 3. ライブラリ変更による遮蔽解析結果への影響

ライブラリが線量当量率に与える影響を評価するため、両ライブラリによる中性子線量当量率の比が最も大きい位置、胴部中央及び最大線量当量率を与える位置を代表として、評価 A と評価 B の線量当量率減衰分布を比較した。

1

## (1) 中性子の比較

中性子の胴部中央における半径方向線量当量率分布を別紙 7-2 図に、線源スペクトルを別紙 7-3 図に、線量当量率換算係数を別紙 7-4 図に示す。また、胴部中央半径方向の主要部と最大線量当量率を与える位置における中性子束の比較を別紙 7-5 図に示す。

両ライブラリによる中性子線量当量率の比が最も大きい位置⑨、最大線量当量率を与える位置⑦a において、別紙 7-2 表に示すとおり、ライブラリ変更による中性子の鉄の単層透過影響を受けているが、金属キャスク表面及び表面から 1m 離れた位置における線量当量率が、それぞれ 2mSv/h (2000μSv/h) 以下及び 100μSv/h 以下となることを確認した。また、胴部中央に関して、別紙 7-2 図に示すように、燃料領域、胴部炭素鋼領域においてもライブラリ変更による影響が生じているため、以下のとおり考察する。

1

### (a) 燃料領域

燃料領域内での線量当量率に着目すると、別紙 7-2 図より評価 B は評価 A の [ ] となる。線量当量率のピークとなる [ ] のエネルギー帯で、評価 B は評価 A の [ ] となっている。別紙 7-5 図の④について、当該エネルギー帯の中性子束を比較すると（別紙 7-6 図参照）、評価 B は評価 A を下回っており、両ライブラリ間の線量当量率差が生じた要因と考えられる。また、これらよりエネルギーの低い領域における差異に関しては、線量当量率換算係数が小さくなる（別紙 7-4 図参照）ため、影響は微小であるといえる。

### (b) 胴部炭素鋼領域

胴部の炭素鋼透過時では DLC-23/CASK ライブラリによる減衰効果が大きく、胴部への入射時の線量当量率に関して、評価 B は評価 A の [ ] であったが、透過後は [ ] と逆転している（別紙 7-2 図参照）。この差異は、別紙 7-5 図の⑧と⑨の比較からも分かるように、[ ] の線量当量率への寄与が大きい範囲における中性子束について評価 B の方が高く、鉄透過時に共鳴領域の自己遮蔽因子を考慮していない断面積で計算することによる過小評価の結果によるものと考えられる。

同様に、最大線量当量率を与える位置 (⑦a) においてもライブラリ変更による影響を受けているが、別紙 7-2 表に示すとおり、金属キャスク表面及び表面から 1m 離れた位置における線量当量率がそれぞれ 2mSv/h (2000μSv/h) 以下及び 100μSv/h 以下となることを確認した。

1

(2) 燃料有効部ガンマ線の比較

胴部中央における半径方向の燃料有効部ガンマ線線量当量率の比較を別紙 7-7 図に示す。別紙 7-7 図に示すように、ライブラリ変更による影響は軽微であり、評価 A を用いても問題は無い。

以上により、MATXSLIB-J33 ライブラリによる影響評価を考慮しても、金属キャスク表面及び表面から 1m 離れた位置における線量当量率が基準値以内に収まっていることを確認できたことから、~~DLC-23/CASK~~ ライブラリによる ~~Hitz-B52~~ 型の遮蔽解析は妥当であると考えられる。

1

別紙 7-1 表 ライブラリの評価条件比較

断面積ライブラリ		DLC-23/CASK	MATXSLIB-J33
エネルギー 群構造	中性子	22 群	175 群
	ガンマ線	18 群	42 群
中性子スペクトル		$^{239}\text{Pu}$ の核分裂スペクトルを DLC-23/CASK の 22 群構造に振り分けたものを使用。	$^{239}\text{Pu}$ の核分裂スペクトルを VITAMIN-J 形式の 175 群構造に振り分けたものを使用。
ガンマ線線源強度		ORIGEN2 のエネルギースペクトルを DLC-23/CASK の 18 群構造に振り分けたものを使用。	ORIGEN2 のエネルギースペクトルを VITAMIN-J 形式の 42 群構造に振り分けたものを使用。
1cm 線量当量率への換算係数		AESJ-SC-F006:2013 <sup>*1</sup> に記載する値を使用。	ICRP Pub.74 の換算係数を中性子 175 群構造、ガンマ線 42 群構造に振り分けて使用。

注記※1：「使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準：2013」

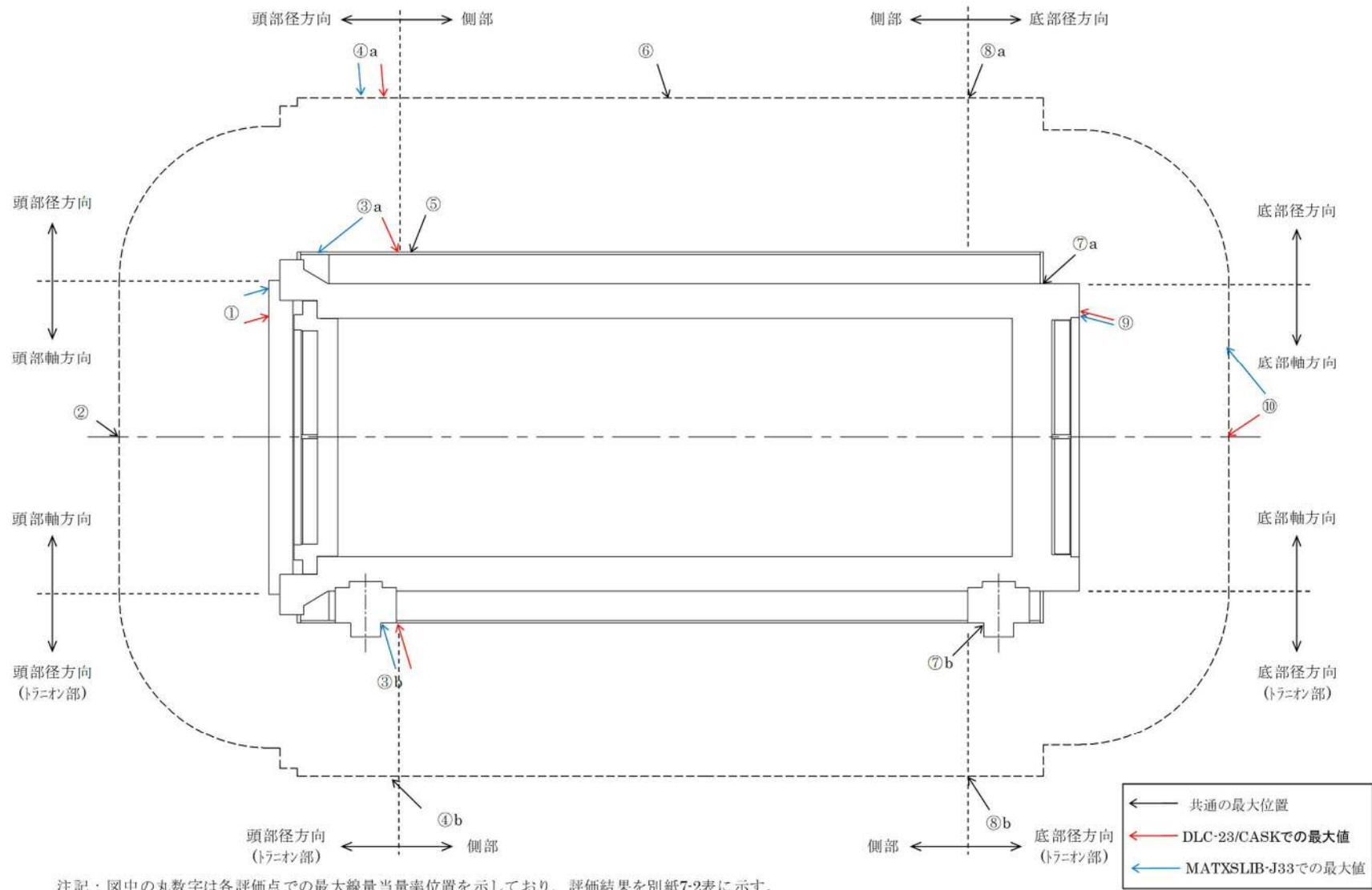
別紙 7-2 表 線量当量率評価結果の比較

(単位 :  $\mu\text{Sv/h}$ )

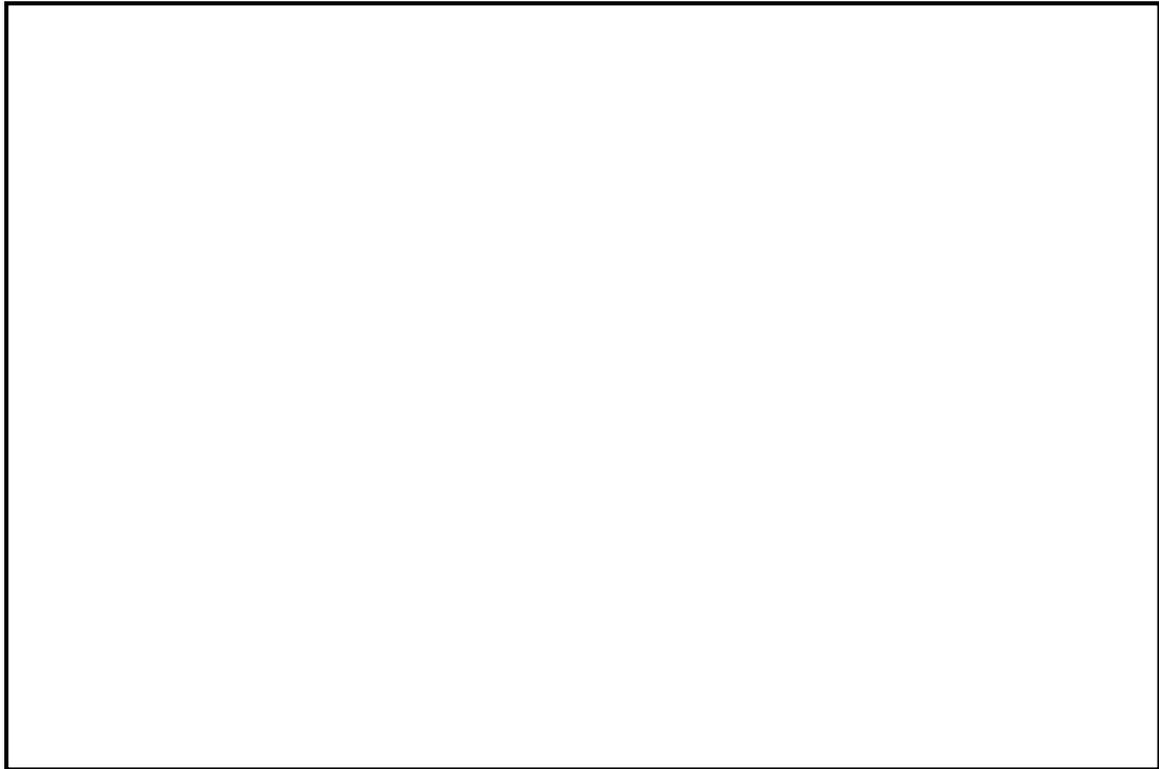
評価点		頭部						側部		底部						
		軸方向		径方向		径方向 (トランニオン部)				軸方向		径方向		径方向 (トランニオン部)		
		①		③a		③b				⑤		⑨		⑦a		⑦b
ライブラリ		A	B <sup>*2</sup>	A	B <sup>*2</sup>	A	B <sup>*2</sup>	A	B	A	B <sup>*2</sup>	A	B	A	B	
表面	ガンマ線	燃料有効部	<0.1	<0.1 (<0.1)	6.4	4.4 (<0.1)	5.3	3.7 (0.3)	7.9	5.5	<0.1	<0.1 (<0.1)	0.5	0.4	4.0	2.8
		構造材放射化	0.3	0.2 (<0.1)	241.2	184.6 (18.4)	116.5	88.6 (14.6)	242.4	185.9	0.6	0.4 (0.3)	2.2	1.5	2.9	2.0
		二次ガンマ	0.3	0.4 (0.4)	5.9	9.1 (3.3)	4.6	7.1 (5.1)	6.3	9.7	0.9	1.6 (1.5)	5.1	10.6	6.2	10.5
	中性子	71.2	117.2 (121.0)	2.0	2.1 (234.3)	49.0	118.3 (270.0)	2.3	2.4	139.5	437.9 (438.4)	758.7	1548.5	346.5	692.8	
	合計	71.9	117.9 (121.6)	255.5	200.2 (256.1)	175.4	217.7 (290.0)	258.9	203.5	141.1	440.0 (440.3)	766.5	1561.0	359.6	708.1	
評価点		②		④a		④b		⑥		⑩		⑧a		⑧b		
ライブラリ		A	B	A	B <sup>*2</sup>	A	B	A	B	A	B <sup>*2</sup>	A	B	A	B	
表面から 1m	ガンマ線	燃料有効部	<0.1	<0.1	10.7	7.7 (5.8)	12.7	9.3	44.4	32.9	0.1	0.1 (<0.1)	21.9	16.1	18.1	16.1
		構造材放射化	2.1	1.4	29.7	22.2 (24.6)	8.6	20.3	2.4	1.7	13.0	9.3 (6.2)	4.1	3.1	2.1	3.1
		二次ガンマ	<0.1	0.1	4.7	6.6 (5.5)	5.2	7.4	16.6	22.3	1.3	2.1 (1.7)	7.3	10.0	7.0	10.0
	中性子	14.5	26.1	8.5	11.6 (13.0)	9.5	9.9	14.0	16.2	22.5	54.9 (59.4)	6.6	8.8	11.6	8.7	
	合計	16.8	27.7	53.6	48.1 (48.9)	36.0	46.9	77.4	73.1	36.9	66.4 (67.4)	39.9	38.0	38.8	37.9	

注記※1 : “&lt;0.1”の値は、“=0.1”として合計値に含めた。

注記※2 : ライブラリ A を DLC-23/CASK ライブラリ、ライブラリ B を MATXSLIB-J33 ライブラリとする。A と B で最大値を与える位置が異なっており (別紙 7-1 図参照)、括弧内に B での最大値を与える評価位置における計算結果を示す。

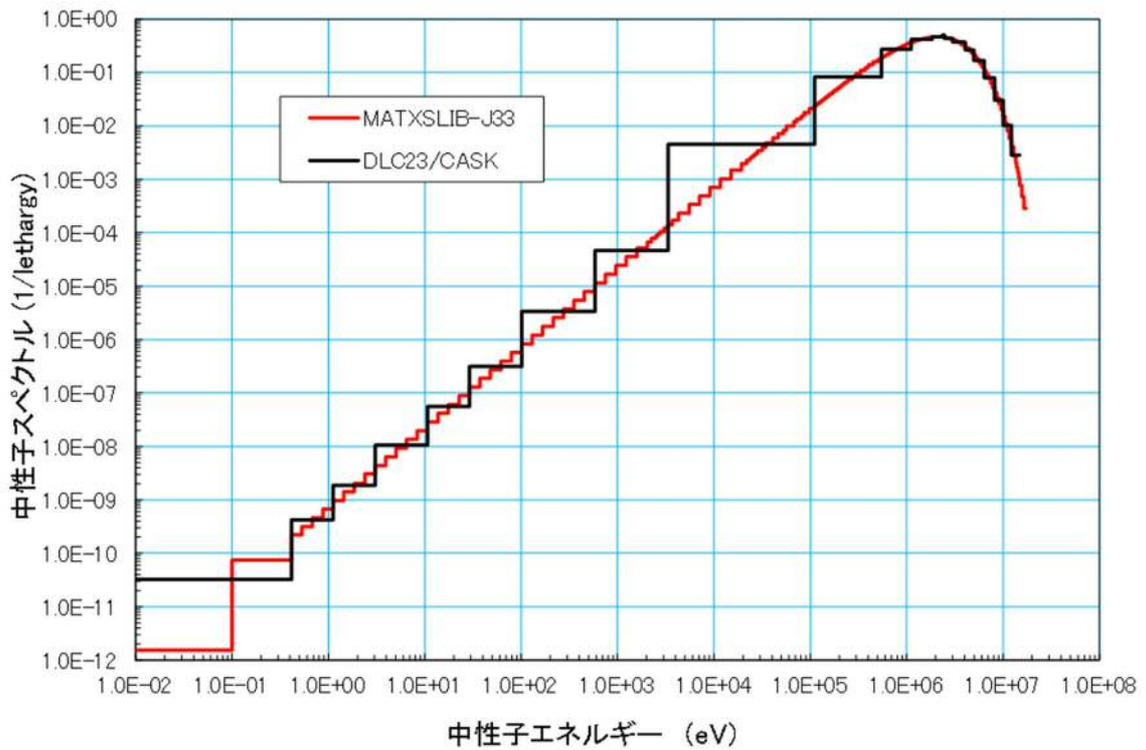


別紙 7-1 図 線量当量率の最大位置



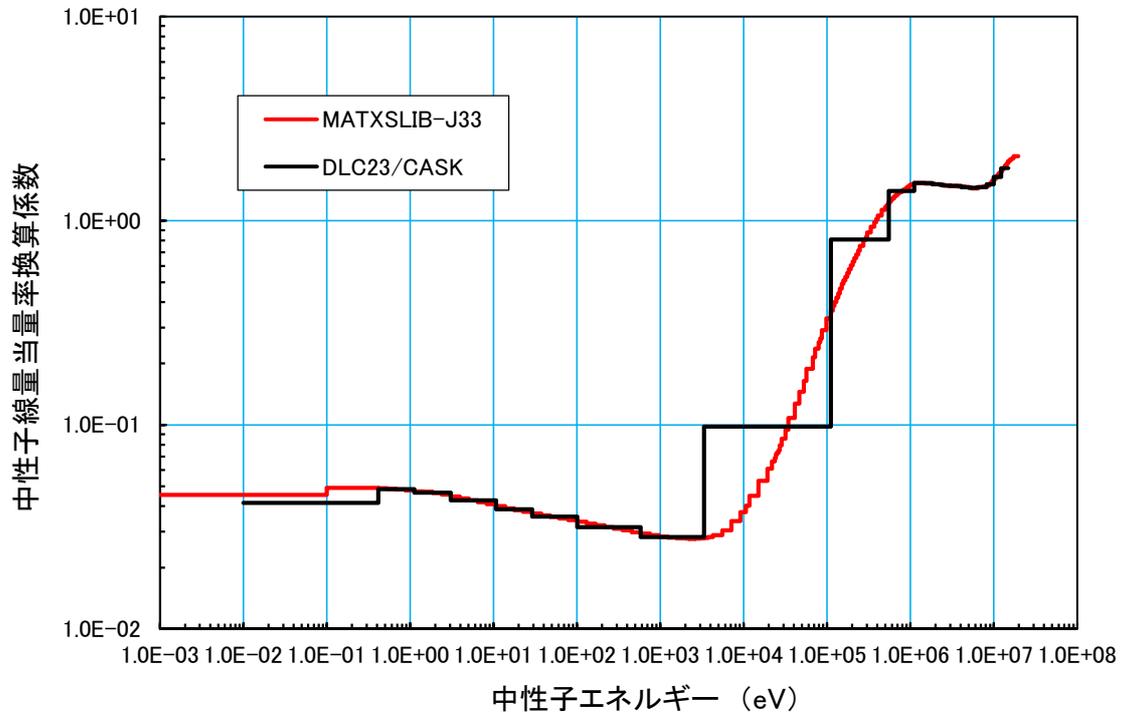
別紙 7-2 図 胴部中央における半径方向の中性子線量当量率の比較

中性子Pu-239核分裂スペクトルの比較

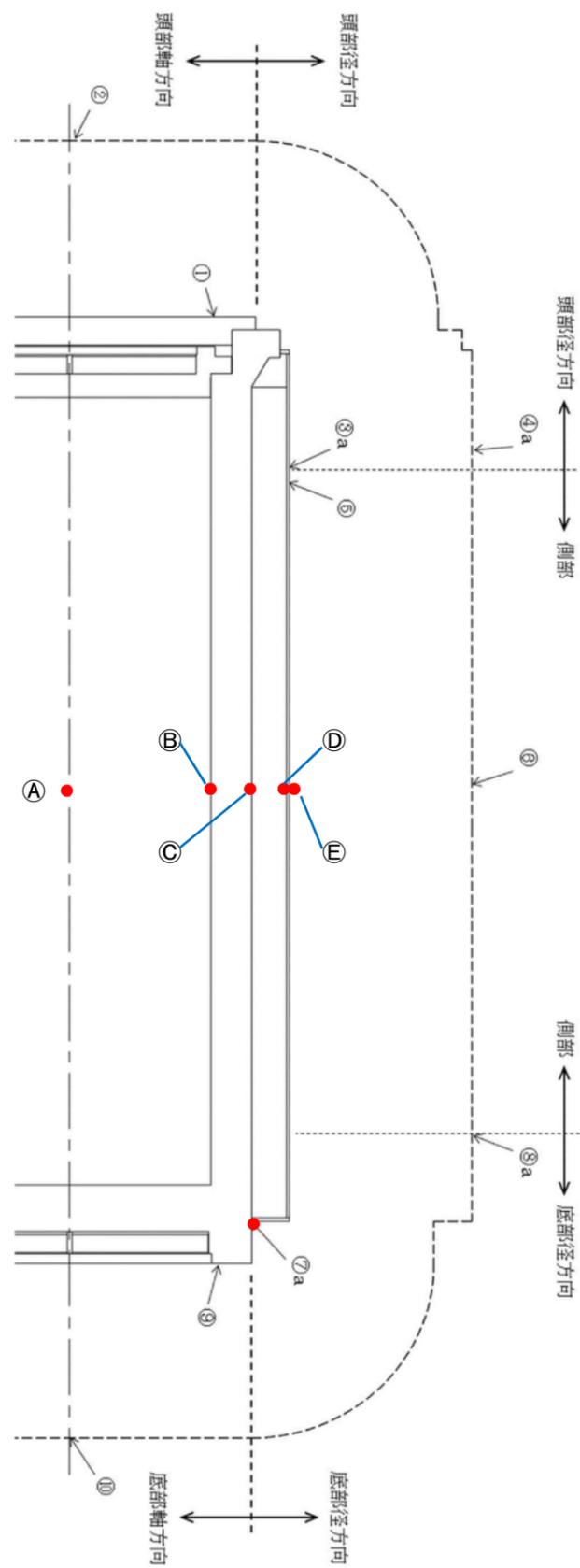


別紙 7-3 図 中性子 Pu-239 核分裂スペクトルの比較

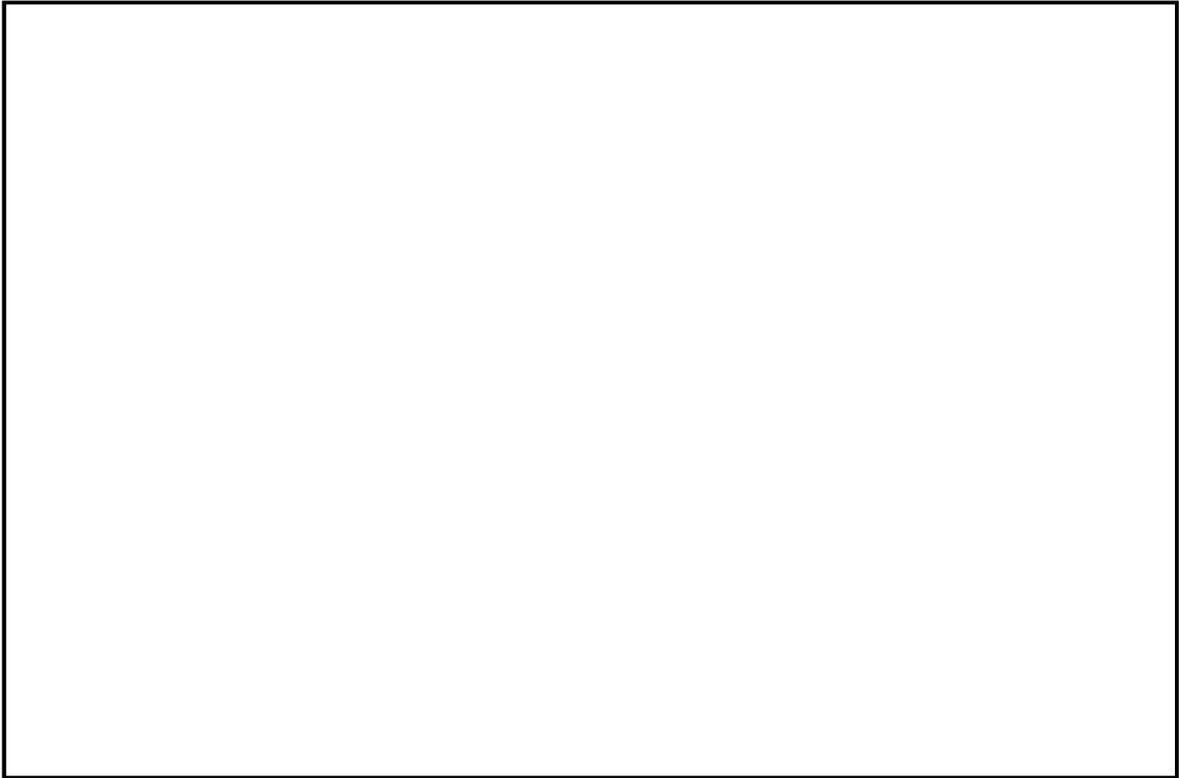
中性子線量当量率換算係数の比較



別紙 7-4 図 中性子線量当量率換算係数の比較



別紙 7-5 図 胴部中央半径方向の主要部と最大線量当量率を与える位置における中性子束の比較



別紙 7-6 図 燃料領域中心部における中性子のエネルギー毎の中性子束の比較



別紙 7-7 図 胴部中央における半径方向の燃料有効部ガンマ線線量当量率の比較

Doc. No. MA035A-RC-D02-5 Rev.0

2020年11月25日

日立造船株式会社

使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器等の設計の型式証明申請（Hitz-B52型）

質問管理票に対する回答（遮蔽関連）（その5）

番号	項目	質問日	コメント内容
60	遮蔽	2018/11/2	<p>【補足説明資料 1-6 Hitz-B52 型の遮蔽設計に関する説明資料】(Doc.No.MA035A-RC-D01 Rev.0) (平成 30 年 11 月 2 日説明資料)</p> <p>・P.13 図 4 トラニオン近傍の線量当量率について、トラニオンのために中性子遮蔽材が不足しているにもかかわらず、トラニオンがない場合の評価位置⑦a での値を超えないことを説明すること。</p>

(回答)

Hitz-B52 型の遮蔽評価では二次元計算コードを使用しているため、金属キャスク本体のモデル化において、R-Z 円柱体系の周方向に位置するトラニオンは模擬できず、トラニオンが存在する場合のトラニオン近傍における線量当量率への影響を評価することが難しい。そのため、Hitz-B52 型の遮蔽評価モデル（以下「モデル A」という。）とは別に、トラニオンが全周にわたって存在する R-Z 軸対称モデル（以下「モデル B」という。）を用いた遮蔽解析を別途実施し、対象位置においてトラニオンが存在する場合のトラニオン近傍における線量当量率への影響を評価した。

モデル B による線量当量率評価結果を表 60-1 に、各モデル図を図 60-1 に、最大線量当量率を与える位置を図 60-2 に、各モデルの中性子線量当量率の等値線図比較を図 60-3～図 60-4 に示す。表 60-1 より、モデル B における対象評価位置（⑦a-1）とモデル A の対象評価位置（⑦a）の結果を比較すると、モデル B の線量当量率が上回る結果となっている。これはトラニオンを全周にわたり存在させることで、中性子遮蔽材であるレジンが減少したことによる中性子線量当量率の上昇が主な要因と考えられるが、表面及び表面から 1m 離れた位置における線量当量率の基準値である 2mSv/h（2000 $\mu$ Sv/h）及び 100 $\mu$ Sv/h と比較すると、その上昇幅は微小である。

モデル B は中性子の遮蔽の観点から保守的なモデルであり、かつ、モデル B における対象評価位置⑦a-1 は局所的に線量当量率が大きくなる箇所であるが、より保守的な値を記載するため、「補足説明資料 1-6 Hitz-B52 型の遮蔽設計に関する説明資料」の表 6 を、次のように訂正（アンダーライン部）するものとする。

表 6 線量当量率評価結果

(単位：μSv/h)

評価点		頭部			側部	底部			
		軸方向	径方向	径方向 (トランニオン部)		軸方向	径方向	径方向 (トランニオン部)	
		①	③a	③b		⑤	⑨	⑦a	⑦b
表面	ガンマ線	燃料有効部	<0.1	6.4	5.3	7.9	<0.1	<u>0.3</u>	4.0
		構造材放射化	0.3	241.2	116.5	242.4	0.6	<u>2.0</u>	2.9
		二次ガンマ	0.3	5.9	4.6	6.3	0.9	<u>6.5</u>	6.2
	中性子		71.2	2.0	49.0	2.3	139.5	<u>853.7</u>	346.5
	合計		71.9	255.5	175.4	258.9	141.1	<u>862.5</u>	359.6
評価点		②	④a	④b	⑥	⑩	⑧a	⑧b	
表面から 1m	ガンマ線	燃料有効部	<0.1	10.7	12.7	44.4	0.1	<u>20.2</u>	18.1
		構造材放射化	2.1	29.7	8.6	2.4	13.0	<u>0.5</u>	2.1
		二次ガンマ	<0.1	4.7	5.2	16.6	1.3	<u>6.9</u>	7.0
	中性子		14.5	8.5	9.5	14.0	22.5	<u>14.4</u>	11.6
	合計		16.8	53.6	36.0	77.4	36.9	<u>42.0</u>	38.8

注記：“<0.1”の値は、“=0.1”として合計値に含めた。

表 60-1 底部径方向の線量当量率評価結果 (単位:  $\mu\text{Sv/h}$ )

評価点			モデル A の最大線量当量率	モデル B の最大線量当量率
			⑦a	⑦a-1
表面	ガンマ線	燃料有効部	0.5	0.3
		構造材放射化	2.2	2.0
		二次ガンマ	5.1	6.5
	中性子		758.7	853.7
	合計		766.5	862.5
評価点			⑧a	⑧a-1
表面から 1m	ガンマ線	燃料有効部	21.9	20.2
		構造材放射化	4.1	0.5
		二次ガンマ	7.3	6.9
	中性子		6.6	14.4
	合計		39.9	42.0



図 60-1 モデル図

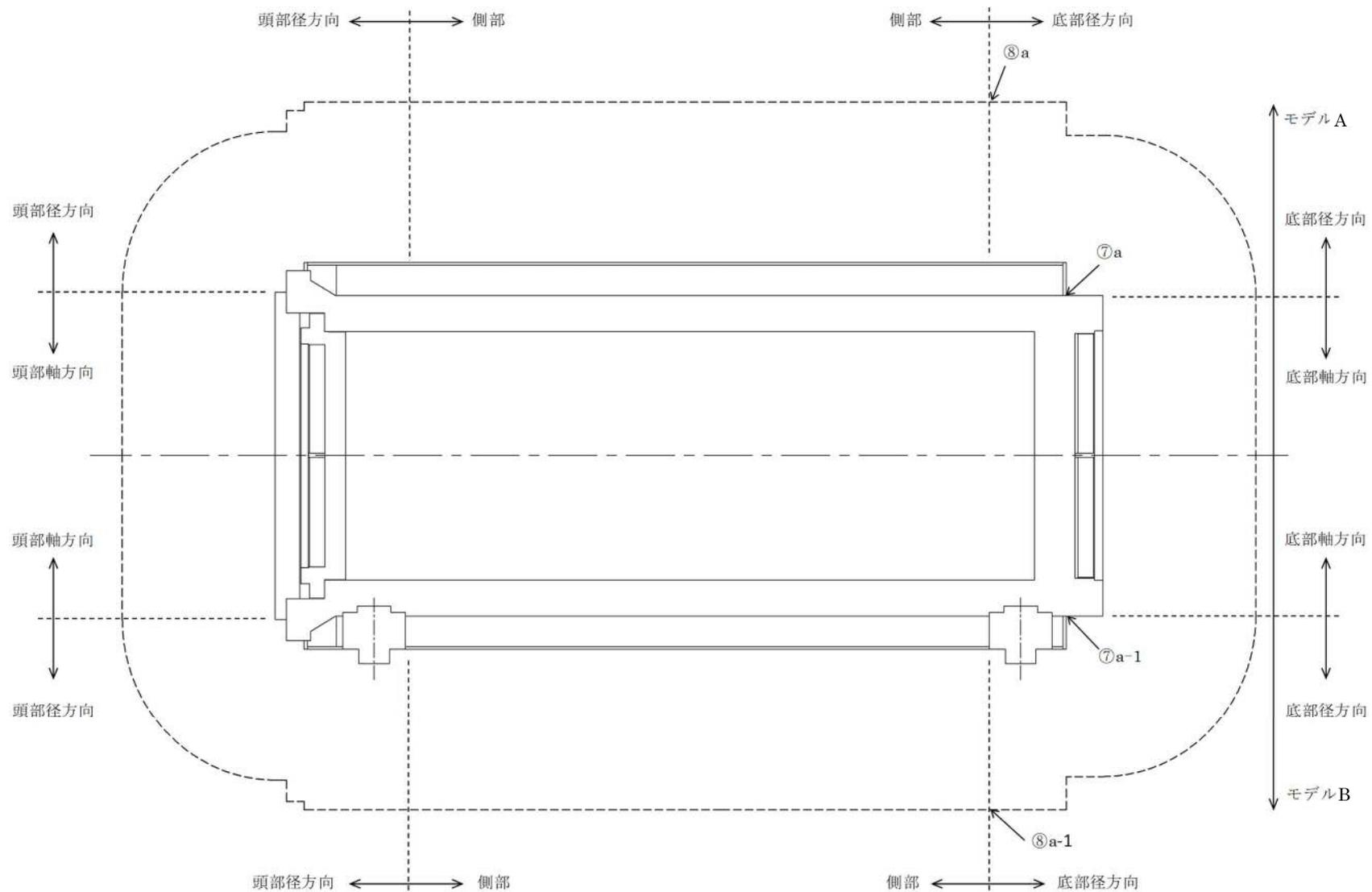


図 60-2 線量当量率の最大位置

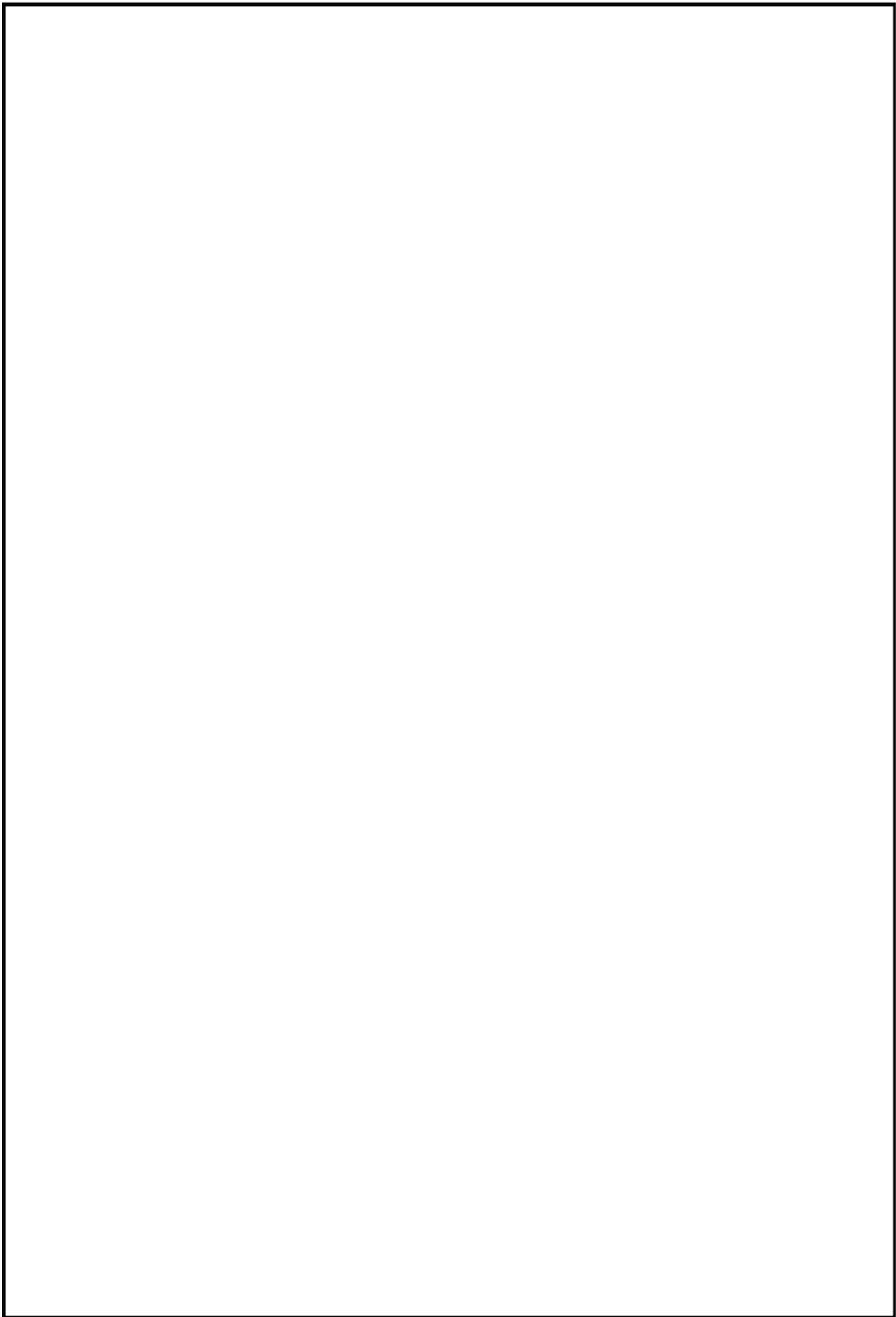


図 60-3 表面の中性子線量当量率等値線図 (モデル A)  
(単位  $\mu\text{Sv/h}$ )

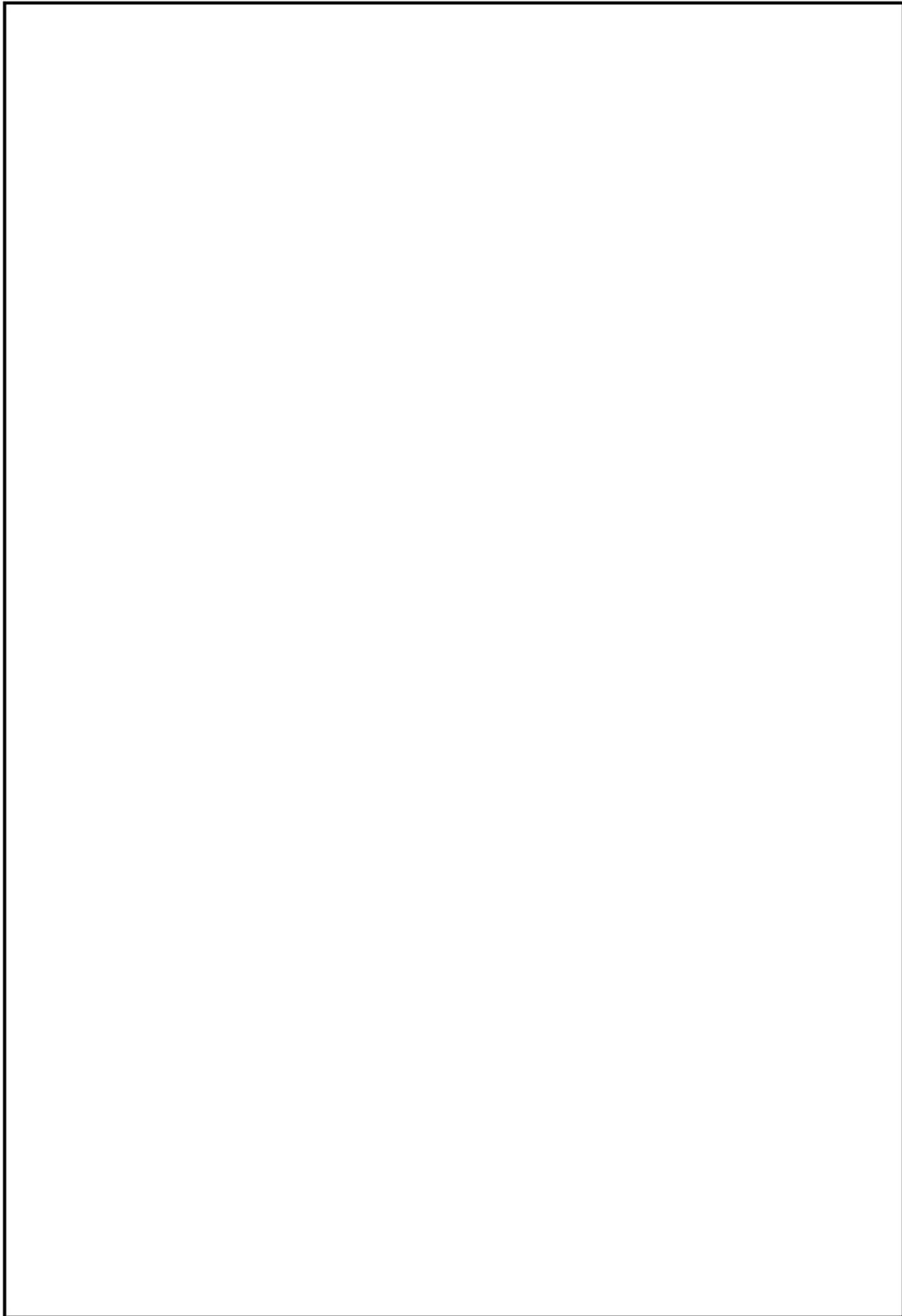


図 60-4 表面の中性子線量当量率等値線図 (モデル B)  
(単位  $\mu\text{Sv/h}$ )

番号	項目	質問日	コメント内容
61	遮蔽	2018/11/2	<p>【補足説明資料 1-6 Hitz-B52 型の遮蔽設計に関する説明資料】(Doc.No.MA035A-RC-D01 Rev.0) (平成 30 年 11 月 2 日説明資料)</p> <p>・ P.13 図 4 において、頭部径方向表面の線量当量率の評価値及び最大値を示す場所は、DLC23/CASK ライブラリが持つ誤差の影響を特に大きく受けている可能性があるため、影響を確認して説明すること。</p>

(回答)

頭部径方向表面における DLC-23/CASK ライブラリを使用した場合の評価（以下「評価 A」という。）結果と MATXSLIB-J33 ライブラリを使用した場合の評価（以下「評価 B」という。）結果に着目すると、図 61-1 の赤枠内に示すとおり、評価 A と評価 B で線量当量率の最大値をとる位置が異なった。表 61-1 に当該位置における線量当量率評価結果の比較を示す。図 61-1 での赤矢印部が評価 A での最大位置、青矢印部が評価 B での最大位置である。本表を見ると、赤矢印部において構造材放射化ガンマ線の影響により、当該位置における表面の線量当量率は評価 A が評価 B を上回っているが、青矢印部では逆転している。これは鉄透過時に共鳴領域の自己遮蔽因子を考慮していない断面積で計算することによる影響と考えられるが、本影響を考慮しても金属キャスク表面における線量当量率が基準値以内に収まっている。

表 61-1 線量当量率評価結果の比較 (単位 :  $\mu\text{Sv/h}$ )

評価点			頭部径方向			
			③a (赤矢印部)		③a (青矢印部)	
			評価 A	評価 B	評価 A	評価 B
表面	ガンマ線	燃料有効部	6.4	4.4	<0.1	<0.1
		構造材放射化	241.2	184.6	25.7	18.4
		二次ガンマ	5.9	9.1	1.8	3.3
	中性子		2.0	2.1	146.8	234.3
	合計		255.5	200.2	174.4	256.1
	基準値		2000			

注記：“<0.1”の値は、“=0.1”として合計値に含めた。

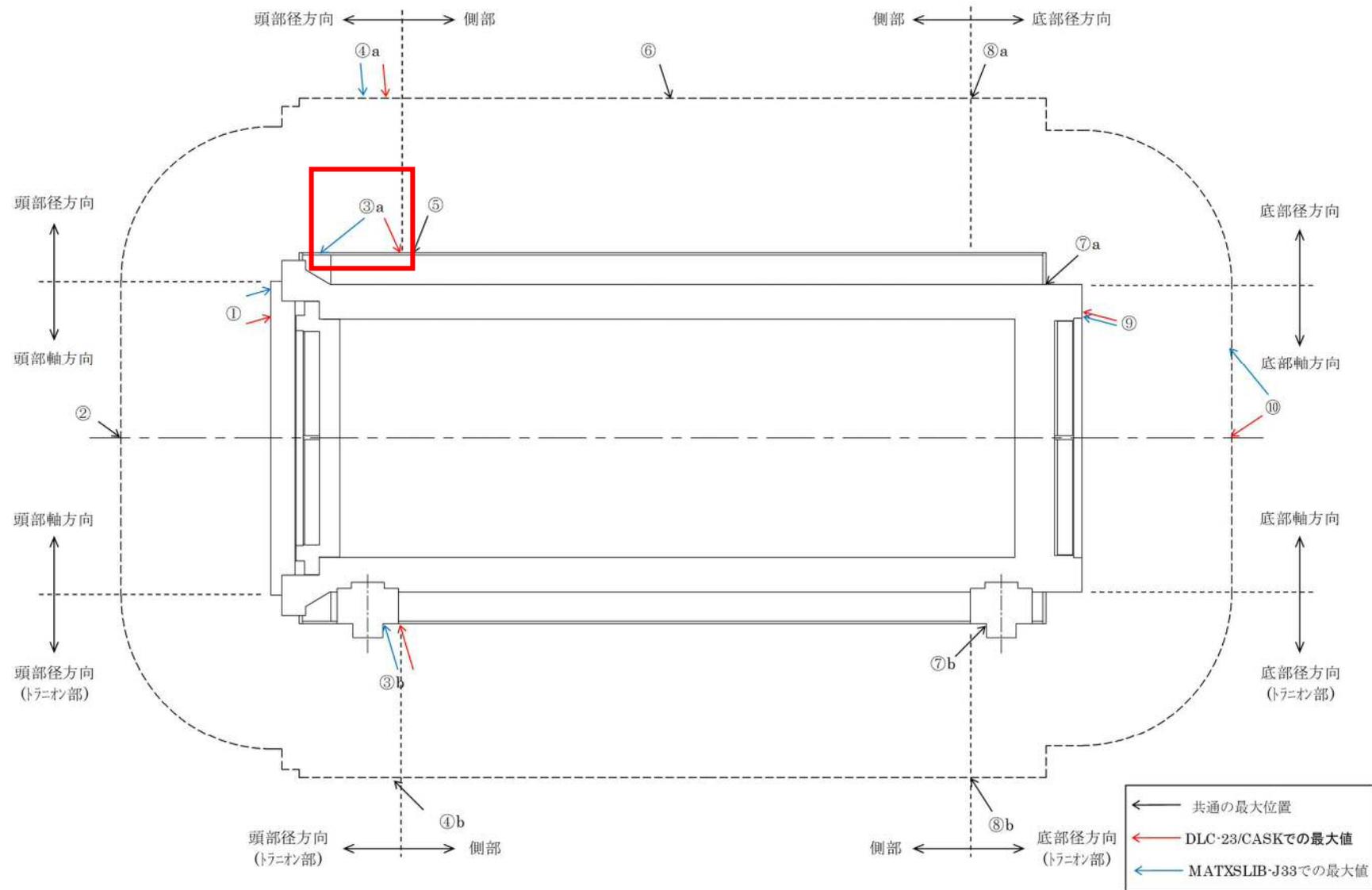


図 61-1 線量当量率の最大位置

番号	項目	質問日	コメント内容
65	遮蔽	2018/11/2	<p>【補足説明資料 1-6 Hitz-B52 型の遮蔽設計に関する説明資料】(Doc.No.MA035A-RC-D01 Rev.0) (平成 30 年 11 月 2 日説明資料)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・別紙 1-5 別紙 1-1 図において、燃料/バスケット領域及び伝熱フィン/中性子遮蔽材領域を均質化した解析モデルを構築した際の考え方、均質化の影響及び保守性の考え方等を丁寧に説明し、均質化モデルの妥当性を示すこと。</li> </ul>

(回答)

1. 遮蔽解析モデルにおける均質化の考え方

Hitz-B52 型の遮蔽解析は 2 次元輸送コードである DOT3.5 を用いて実施する都合上、解析モデルは R-Z 軸対称モデルとなるため、表 65-1 に示す部位を均質化してモデル化を実施している。また、バスケット外側領域の密度は、最も板厚が小さくなる場合の材料の重量を領域全体に与えることで、遮蔽解析上保守的な値としている。

表 65-1 Hitz-B52 型の遮蔽解析モデル均質化領域

均質化領域	均質化する部位	備考
燃料領域及びバスケット外側領域	燃料集合体 バスケット	<ul style="list-style-type: none"> <li>・径方向の領域分割は、最高燃焼度燃料領域、平均燃焼度燃料領域及びバスケット外側領域に分割して設定している。最高燃焼度燃料領域と平均燃焼度燃料領域の面積はそれぞれの収納体数の比により算出する。</li> <li>・バスケット最外周までの各領域境界の等価半径を設定し、円筒形状にモデル化している (図 65-1)。</li> <li>・軸方向の領域分割は、燃料集合体及びバスケットの部位毎に分割して設定している (表 65-2)。</li> </ul>
中性子遮蔽材領域	伝熱フィン 中性子遮蔽材	側部中性子遮蔽材及び伝熱フィンを周方向に均質化し、これを側部中性子遮蔽材均質化領域とした。

表 65-2 燃料集合体及びバスケットの軸方向均質化部位

	部位
燃料集合体	ハンドル部
	上部グリッド部
	上部プレナムスプリング部
	燃料有効部
	下部タイプレート部
バスケット	上板、上部フランジプレート
	コンパートメント、スペーサー、 中性子吸収材
	底板、下部フランジプレート

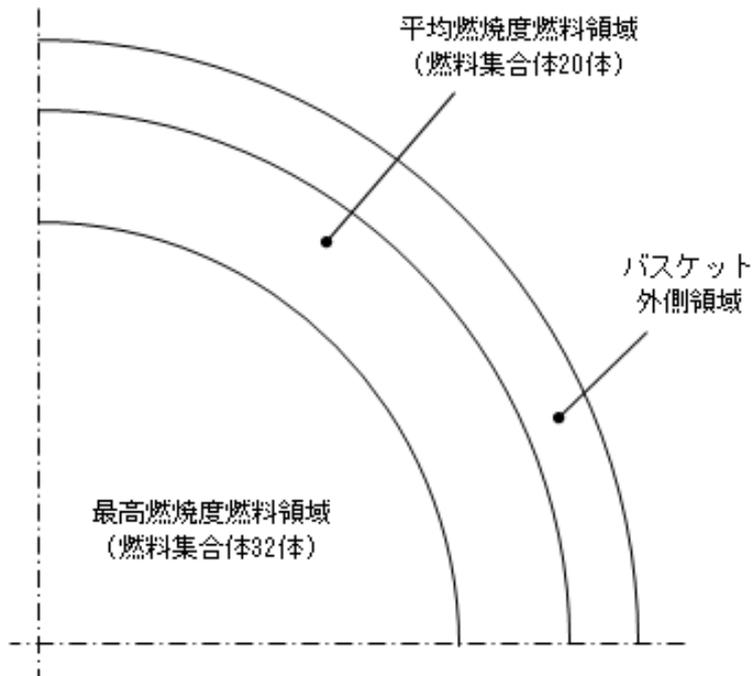


図 65-1 バスケット均質化領域の径方向体系

## 2. 均質化による遮蔽解析結果への影響

均質化による影響を検討するため、図 65-2 に示すキャスク中央部断面 X-Y モデルを用いて線量当量率を評価した。実形状を模擬したモデルをモデル X-Y、Hitz-B52 型の遮蔽解析で用いた R-Z 軸対称モデルをモデル R-Z とする。

各モデルを用いた線量当量率計算結果を図 65-3~図 65-6 に示す。各線種でモデル R-Z がモデル X-Y の線量当量率を上回っており、燃料/バスケット領域及び伝熱フィン/中性子遮蔽材領域の均質化が保守的な評価となることを示しているため、Hitz-B52 型の遮蔽解析で用いた均質化モデルの考え方は妥当であるといえる。

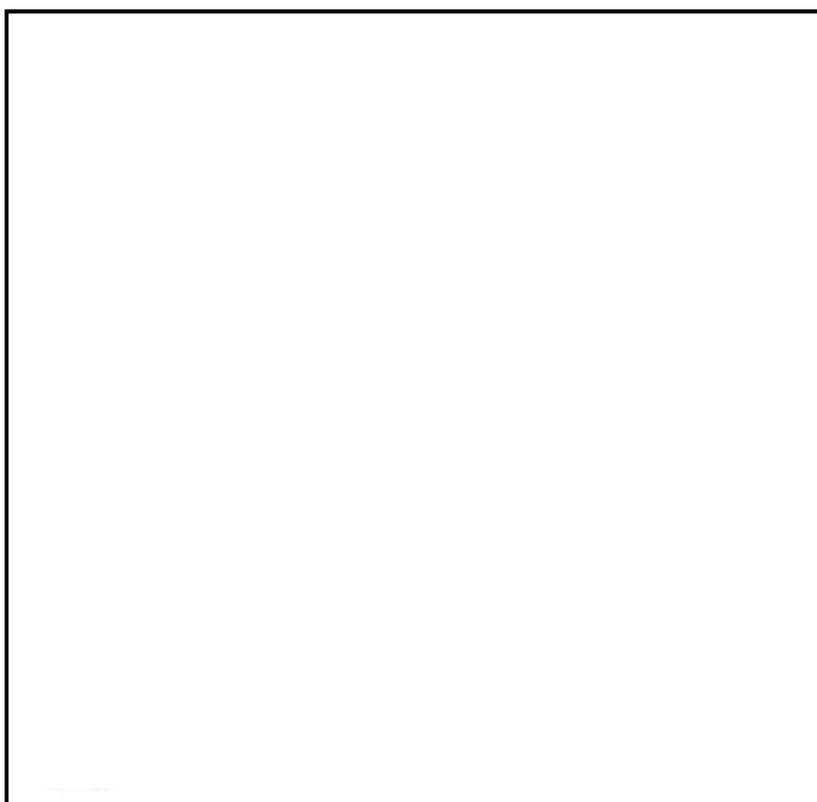


図 65-2 キャスク中央部断面 X-Y モデル

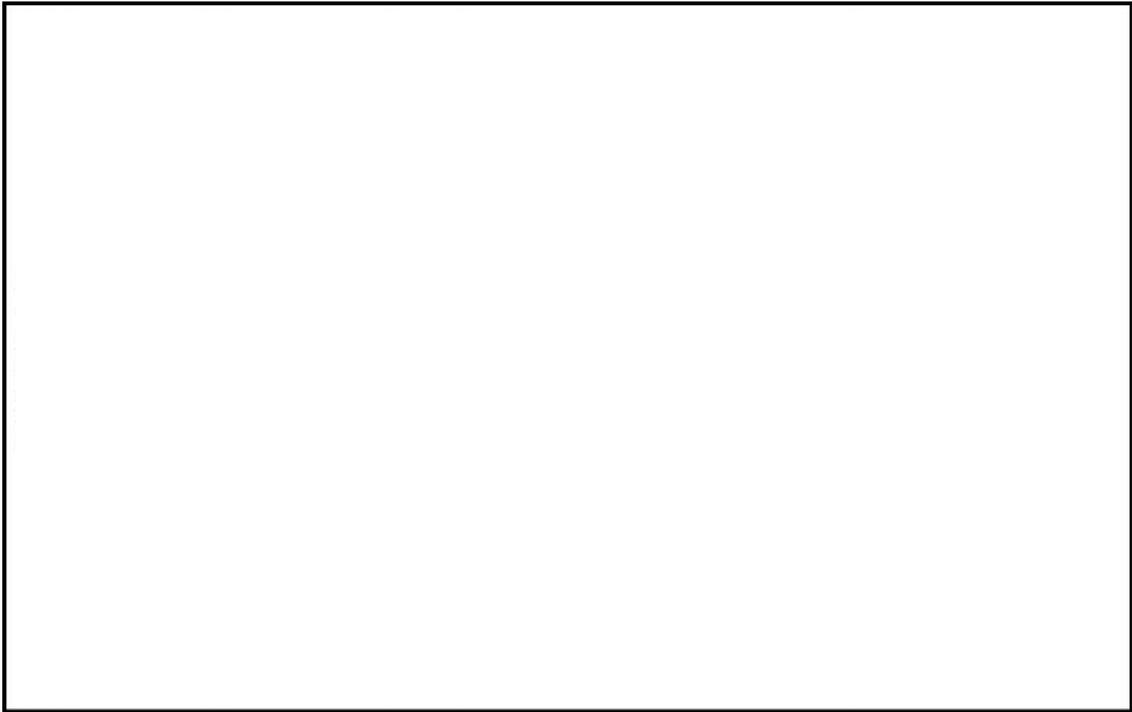


図 65-3 キャスク表面における線量当量率分布比較（中性子）

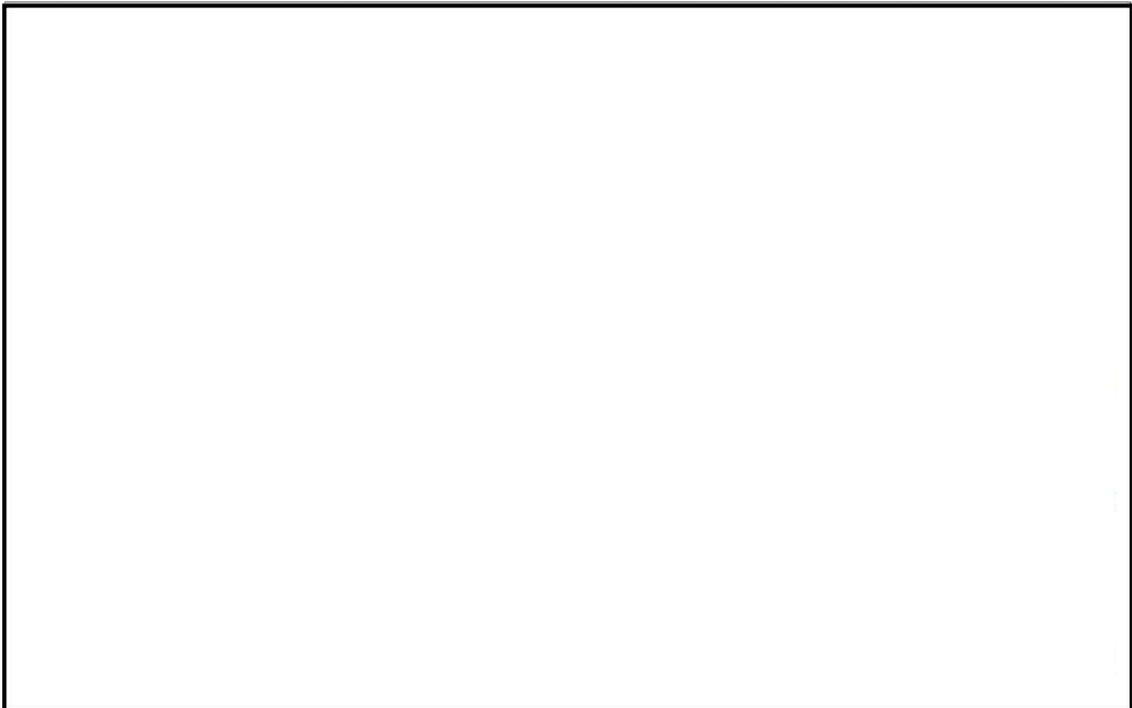


図 65-4 キャスク表面における線量当量率分布比較（燃料有効部ガンマ線）



図 65-5 キャスク表面における線量当量率分布比較 (2次ガンマ)

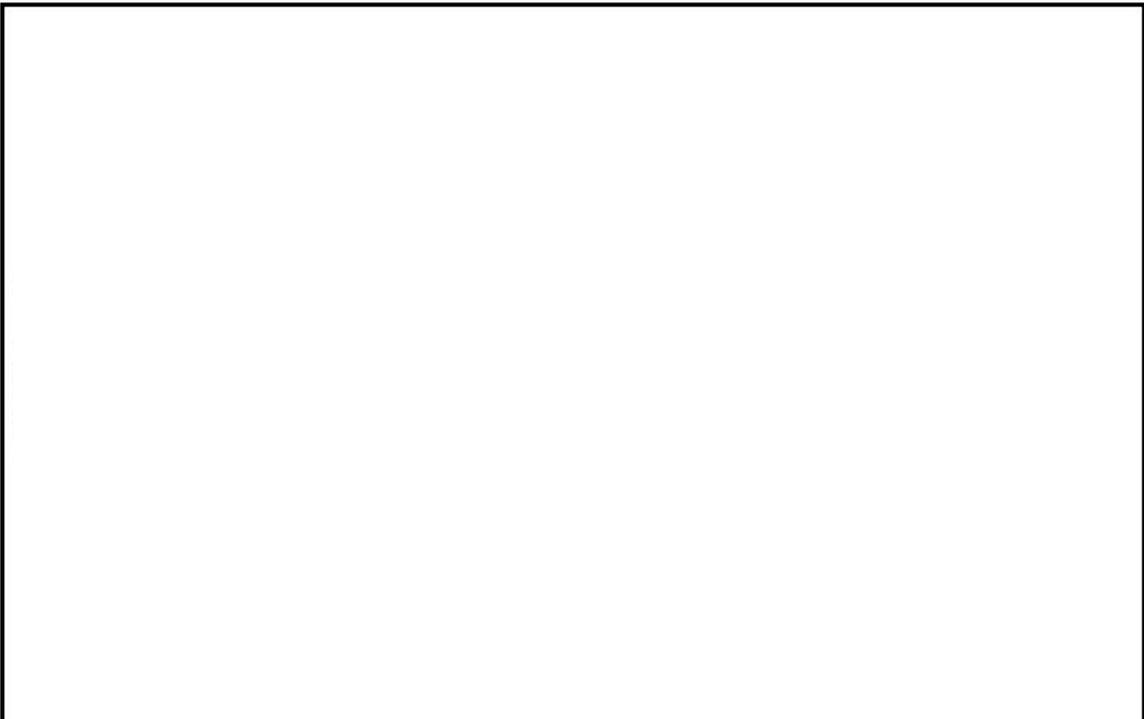


図 65-6 キャスク表面における線量当量率分布比較 (合計)