

Doc No. 18-180-I-001-012 Rev.0

2021年4月28日

トランスニュークリア株式会社

補足説明資料 1-2

TK-26 型の遮蔽設計に関する説明資料

本資料のうち、枠囲いの内容は、商業機密等に属しますので公開できません。

目 次

1. 設計方針	1
2. 遮蔽機能に関する構造及び評価.....	2
別紙 1 TK-26 型の遮蔽解析条件	
別紙 2 燃焼計算コード ORIGEN2 を用いることの妥当性	
別紙 3 三次元モンテカルロコード MCNP の計算条件	

1. 設計方針

TK-26 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（平成二十五年原子力規制委員会規則第二十四号）」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。

上記のとおり、TK-26 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、使用済燃料集合体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、TK-26 型は輸送用キャスクを兼ねているため、「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（昭和五十三年総理府令第五十七号）」に示されている以下の要求事項を満足するように設計している。

- ・ 表面における最大線量当量率が 2mSv/h を超えないこと。
- ・ 表面から 1m 離れた位置における最大線量当量率が $100\ \mu\text{Sv/h}$ を超えないこと。

2. 遮蔽機能に関する構造及び評価

(1) 遮蔽機能に関する構造

TK-26 型の主要な構成部材を第 1 表に示す。

TK-26 型は、以下の遮蔽構造となるような設計としている。

- 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（胴及び外筒）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レジンで構成する。

(2) 遮蔽解析

遮蔽解析においては、以下に示すとおり線源条件を設定し TK-26 型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 以下及び 100 μ Sv/h 以下となることを確認する。

遮蔽解析のフローを第 1 図に示す。また、対象とする使用済燃料集合体及びバーナブルポイズン集合体の線源強度計算条件を第 2 表に示す。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、冷却期間等を条件に燃焼計算コード ORIGEN2（別紙 2 参照）を使用して求める。また、使用済燃料集合体平均燃焼度に対する軸方向の燃焼度の比を包含する燃焼度分布（以下「ピーキングファクター」という。第 2 表、及び第 2 図参照。）を考慮した線源強度を設定する。

使用済燃料集合体の構造材については、照射期間、中性子束、冷却期間等を条件に放射化計算式を用いて線源強度を求める。なお、後述の「b. 線量当量率評価」では、線源強度評価の結果（別紙 1 参照）より、線源強度の最も高い 17×17 燃料 48,000MWd/t 型（A 型）を対象として線量当量率評価を実施する。

b. 線量当量率評価

TK-26 型の実形状を三次元でモデル化し、「a. 線源条件」で示した線源強度に基づき、三次元モンテカルロコード MCNP5（別紙 3 参照）を使用して線量当量率を求める。

線束から線量当量率への変換係数は、ICRP Pub. 74 の 1cm 線量当量率変換係数に基づく値を用いる。

TK-26 型の遮蔽解析モデル化の概要を第 3 図に示す。線量当量率の評価に当たっては、第 4 図に示す使用済燃料集合体の燃焼度に応じた収納位置を考慮する。また、

設計貯蔵期間中における TK-26 型の中性子遮蔽材の熱による遮蔽性能の低下を考慮する。遮蔽解析の保守性について第 3 表に示す。

(3) 遮蔽解析結果

TK-26 型の表面及び表面から 1m 離れた位置における、各評価方向の最大線当量率となる位置を第 5 図に示し、対応する線量当量率を第 4 表に示す。また、第 4 表に対応する各評価点における線量当量率の分布図を第 6 図～第 11 図に示す。

以上より、TK-26 型の表面及び表面から 1m 離れた位置における線量当量率は、それぞれ 2mSv/h 及び 100 μ Sv/h 以下となることを確認した。

第 1 表 TK-26 型の主要な構成部材

部位	構成部材
胴	炭素鋼
中性子遮蔽材	レジン (エチレンプロピレン系ゴム)
伝熱フィン	銅
外筒	炭素鋼
一次蓋	炭素鋼
二次蓋	炭素鋼
バスケット格子材	ほう素添加アルミニウム合金

第2表 使用済燃料集合体及びバーナブルポイズン集合体の線源強度計算条件(その1)

項目			17×17 燃料 48,000MWd/t 型		15×15 燃料 48,000MWd/t 型	
			A 型	B 型	A 型	B 型
最高燃焼度 (MWd/t) (注1)			48,000		47,000	
平均燃焼度 (MWd/t) (注2)			44,000		43,000	
比出力 (MW/t)						
照射 期間 (日)	使用済燃料 集合体	最高燃焼度				
		平均燃焼度				
バーナブルポイズン集合体						
濃縮度 (wt%)						
冷却期間 (年)			15	20	15	20
ウラン質量 (kg)						
(上部)						
(下部)						

(注1) 最高燃焼度とは、収納する使用済燃料集合体1体の燃焼度の最大値を示す。

(注2) 平均燃焼度とは、収納する全使用済燃料集合体に対する燃焼度の平均値を示す。

(注3) ノードは燃料有効部を軸方向に 分割したものである。

第2表 使用済燃料集合体及びバーナブルポイズン集合体の線源強度計算条件(その2)^(注1)

項目			17×17 燃料 39,000MWd/t 型		15×15 燃料 39,000MWd/t 型	
			A 型	B 型	A 型	B 型
最高燃焼度(MWd/t) ^(注2)			39,000		39,000	
平均燃焼度(MWd/t) ^(注3)			— ^(注4)		— ^(注4)	
照射 期間 (日)	使用済燃料 集合体	最高燃焼度				
		平均燃焼度				
	バーナブルポイズン集合体					
濃縮度(wt%)						
冷却期間(年)			20		20	

(注1) その他の条件は第2表と同じである。

(注2) 最高燃焼度とは、収納する使用済燃料集合体1体の燃焼度の最大値を示す。

(注3) 平均燃焼度とは、収納する全使用済燃料集合体に対する燃焼度の平均値を示す。

(注4) 39,000MWd/t型には平均燃焼度を設定しない。

第3表 遮蔽解析の保守性

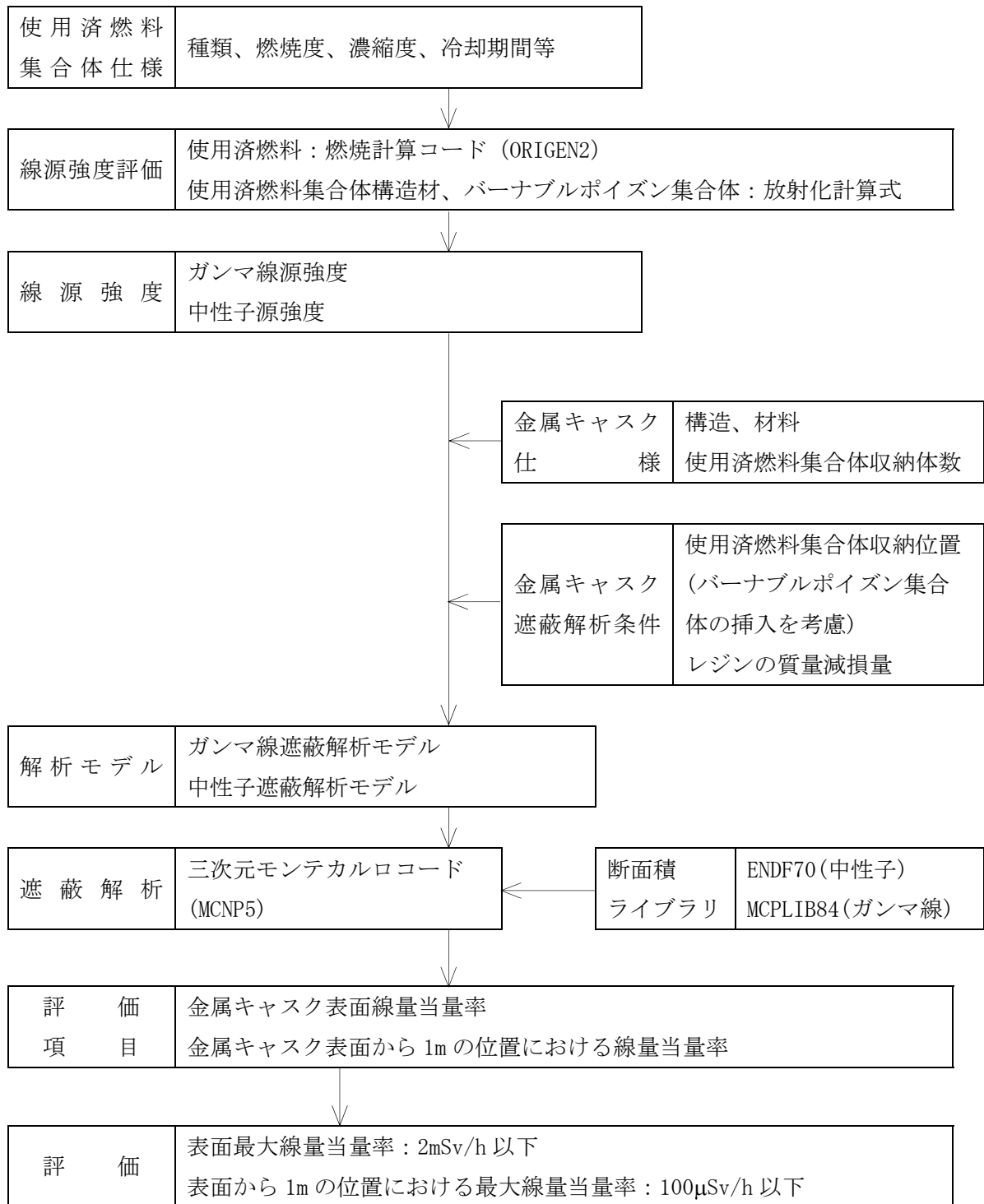
項目	内容
線源強度	<ul style="list-style-type: none"> ・中央部全領域に最高燃焼度燃料、外周部に平均燃焼度燃料を配置しており（第4図参照）、総線源強度として平均燃焼度燃料をすべて収納した場合の線源強度を上回る。 ・ピーキングファクターを設定している。
使用済燃料集合体の軸方向位置	<p>貯蔵時は使用済燃料集合体が容器内の底に接し、一次蓋－使用済燃料集合体間は接していないが、使用済燃料集合体が一次蓋に接した状態として、線源である使用済燃料集合体から評価点までの距離が近い保守的なモデルとしている。</p>
モデル化	<p>バーナブルポイズン集合体は、放射化線源強度のみ考慮し、構造材としての遮蔽効果は無視している。</p>
レジンの劣化	<p>除熱解析により算定された温度を基に、設計貯蔵期間中における熱によるレジンの質量減損を考慮している。</p>
寸法公差	<p>解析モデルの各種寸法は公称値でモデル化するが、各構成部材の公差を密度係数（最小寸法を公称寸法で除したもの）で考慮している。</p>
材料密度	<p>最小密度を使用して原子個数密度を設定している。</p>

第4表 線量当量率^(注)

(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 方向)		径方向	径方向 (トランニオン 方向)	軸方向
			①	③a	③b		⑤	⑦a	⑦b
表面	ガンマ線	燃料有効部	0.3	0.3	0.1	80.2	2.6	2.6	8.1
		構造材放射化	2.4	2.2	0.8	16.5	8.7	6.0	40.9
		二次ガンマ線	1.8	3.2	2.0	33.5	7.9	7.2	9.0
	中性子		694.2	515.8	486.6	42.4	1177.1	1104.1	128.4
	合計		698.7	521.5	489.5	172.6	<u>1196.3</u>	1119.9	186.4
評価点			②	④a	④b	⑥	⑧a	⑧b	⑩
表面から1m離れた位置	ガンマ線	燃料有効部	0.5	0.3	0.3	32.2	6.5	4.3	8.4
		構造材放射化	5.3	3.6	3.3	7.5	9.0	6.0	38.9
		二次ガンマ線	2.2	1.8	1.7	13.8	3.1	3.9	4.7
	中性子		73.9	73.6	73.8	16.7	56.2	61.2	21.8
	合計		<u>81.9</u>	79.3	79.1	70.2	74.8	75.4	73.8

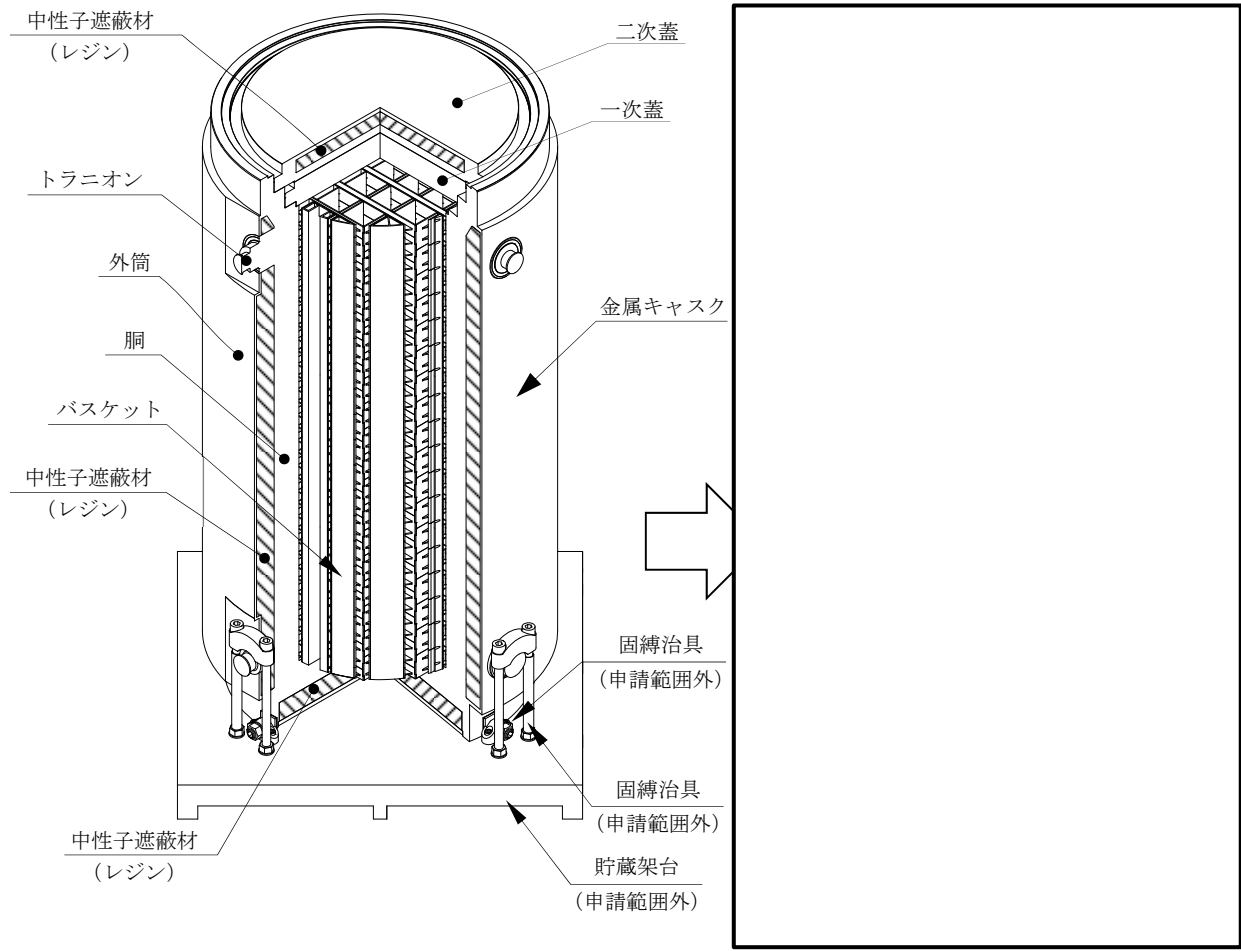
(注) 下線で示す値は、表面及び表面から1m離れた位置における線量当量率の最大値である。



第 1 図 遮蔽解析フロー図



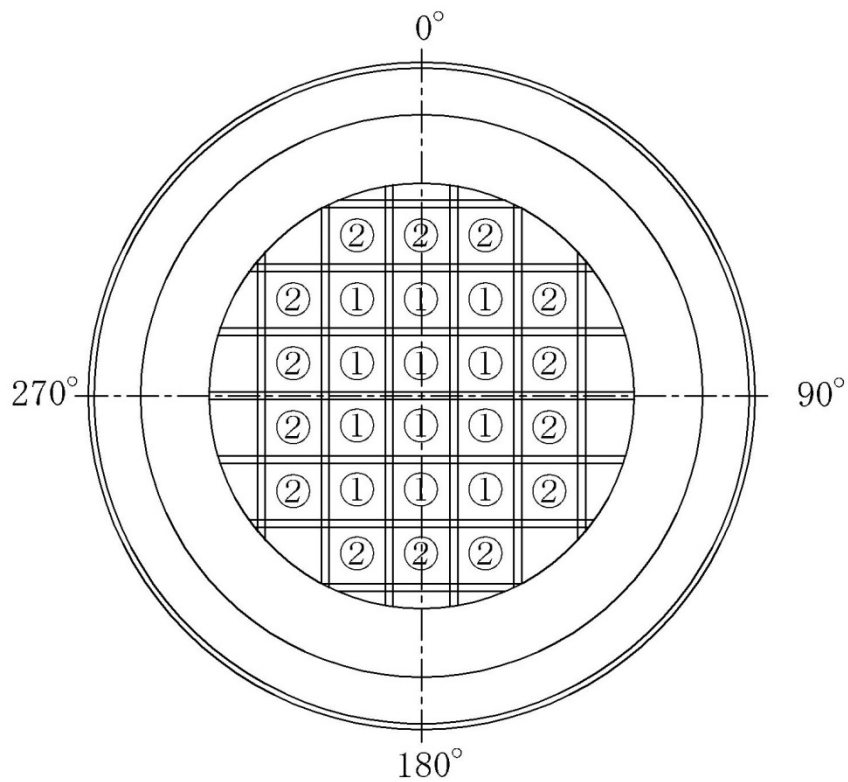
第2図 ピーキングファクターの設定



[実形状]

[三次元モデル化]

第3図 TK-26型の遮蔽解析モデル化の概要

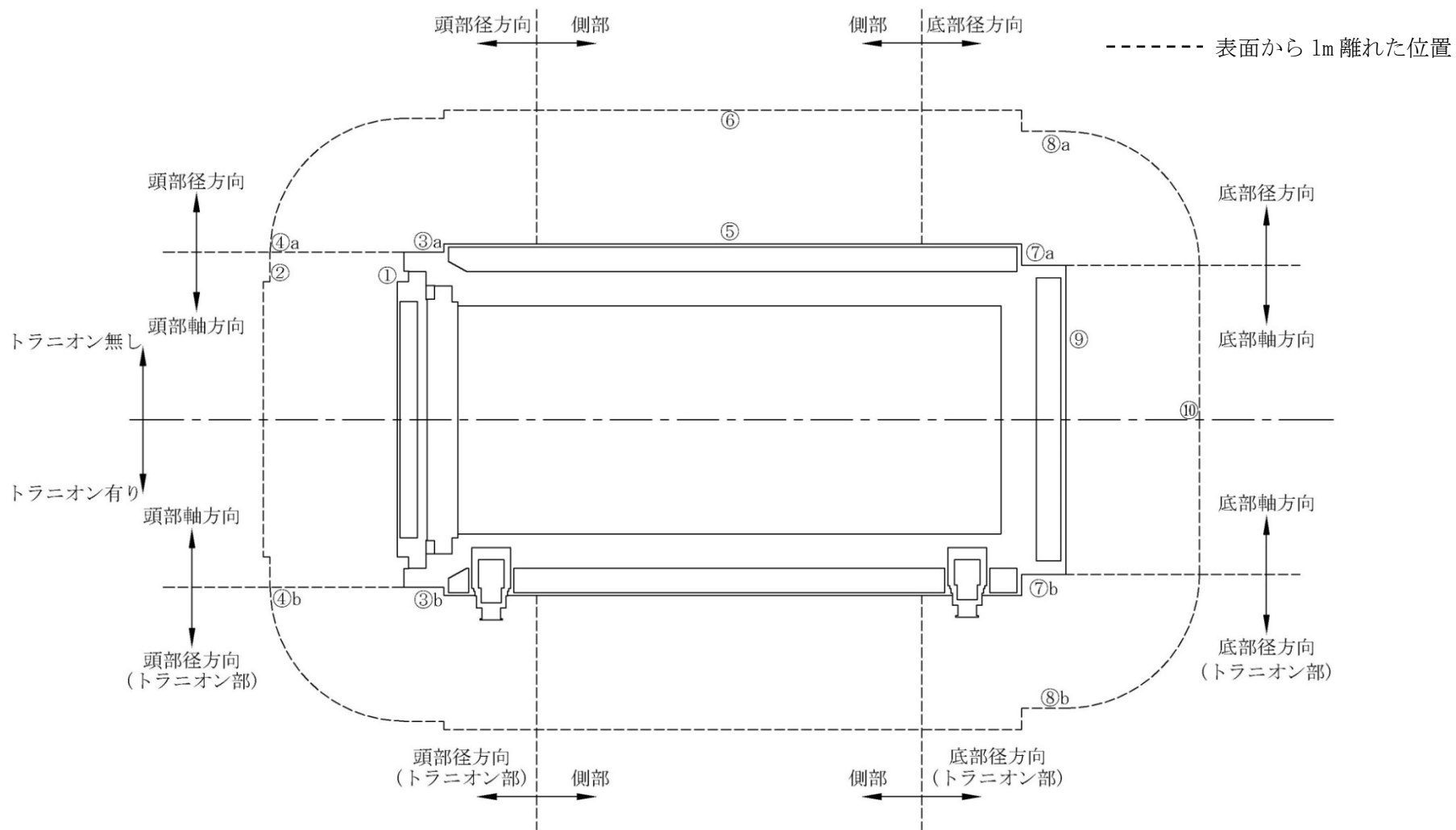


①：最高燃焼度の使用済燃料集合体の収納位置（12 体）



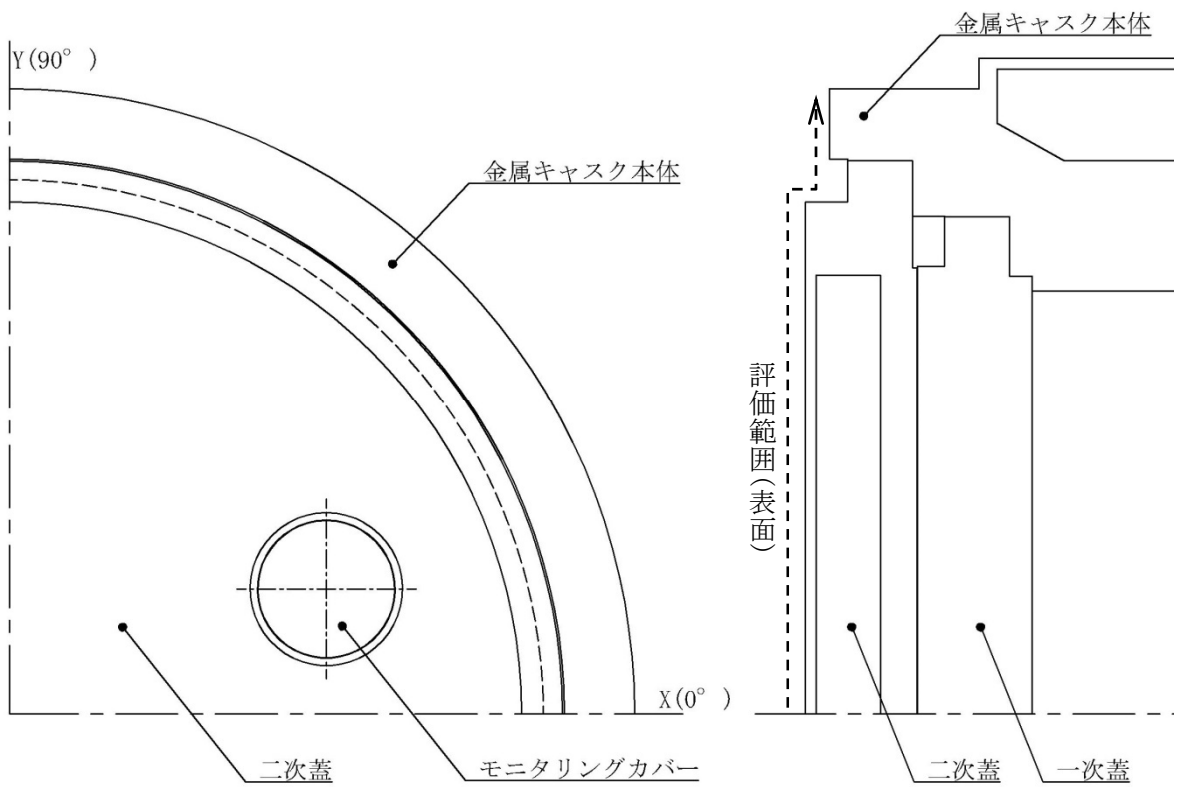
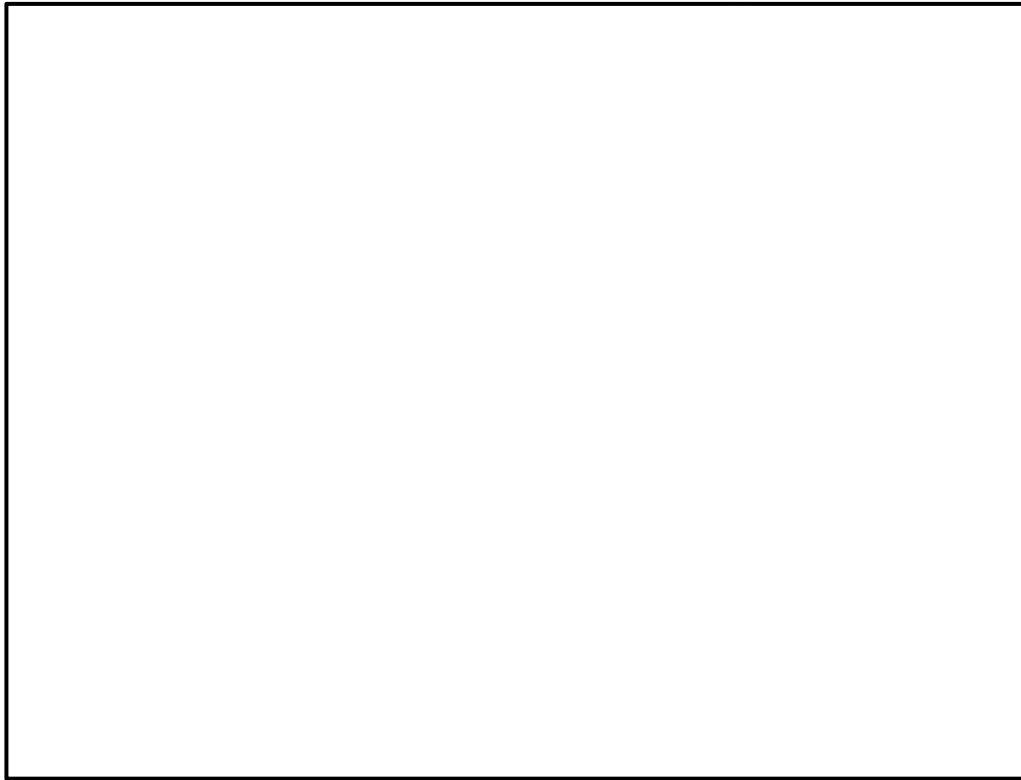
②：平均燃焼度の使用済燃料集合体の収納位置（14 体）

第 4 図 TK-26 型の使用済燃料集合体の収納位置条件（遮蔽解析モデル）

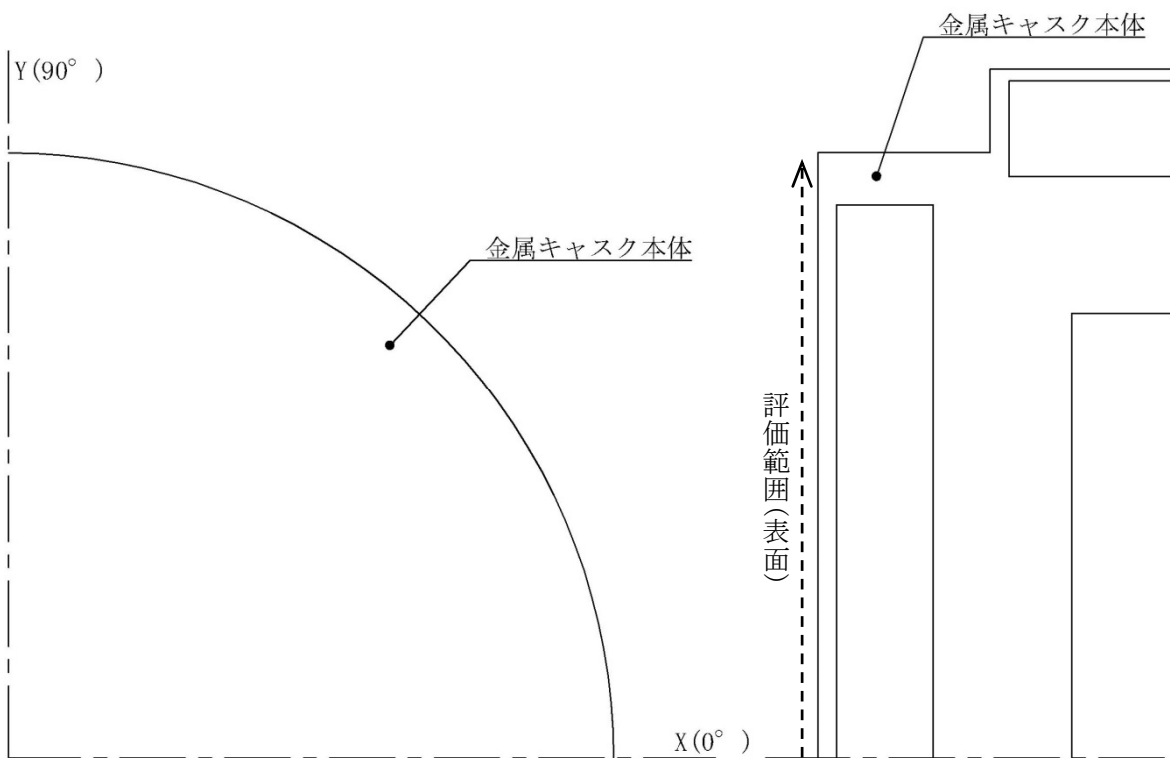
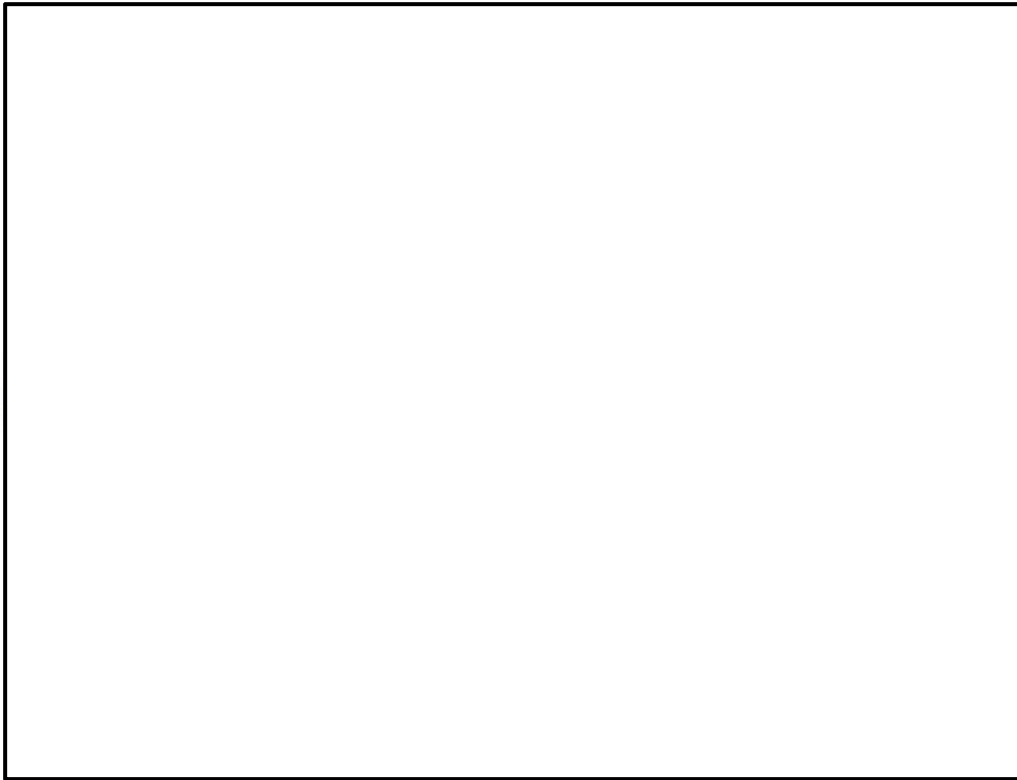


注：①～⑩は各評価方向の最大線量当量率位置を示しており、その評価結果を第5表に示す。

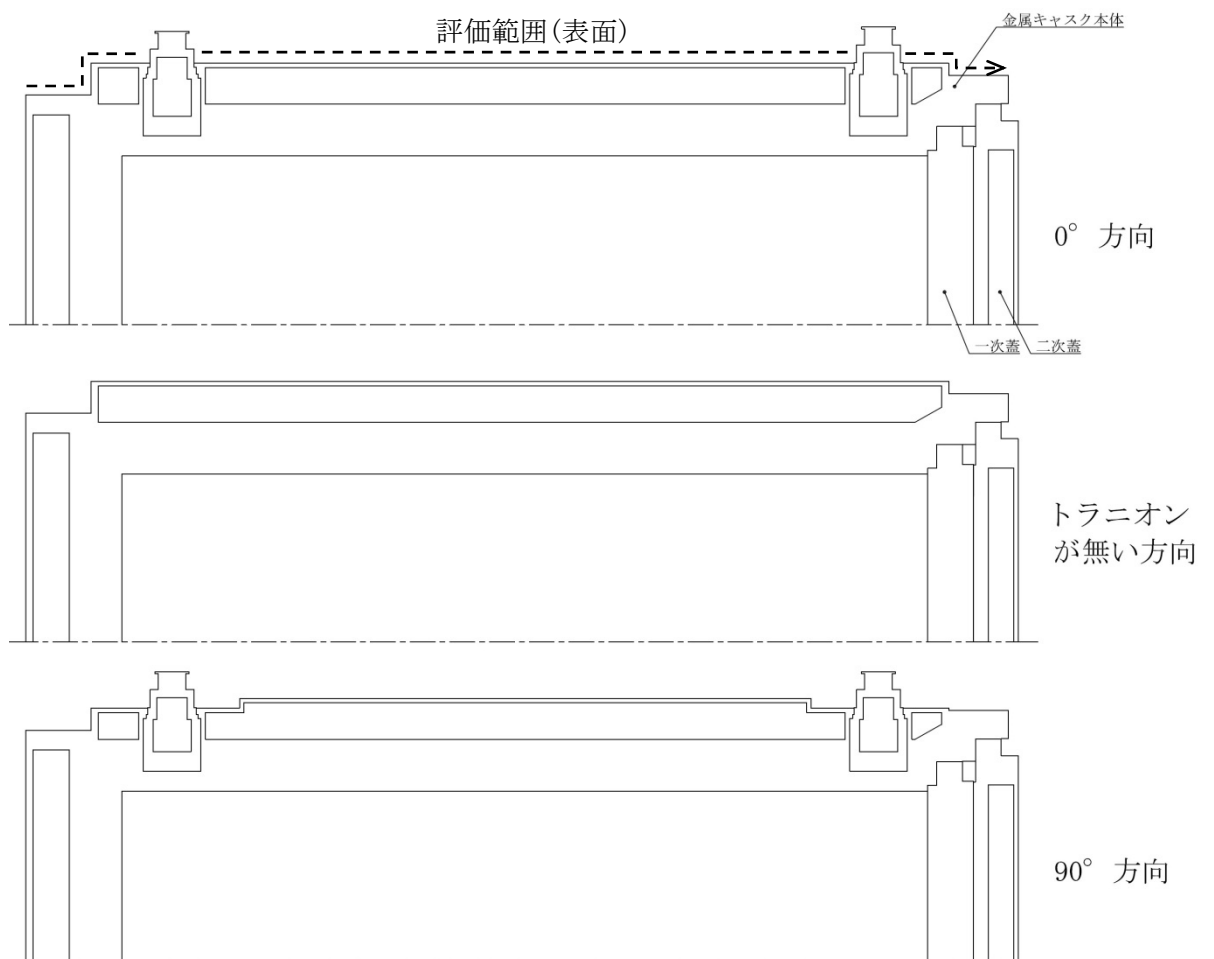
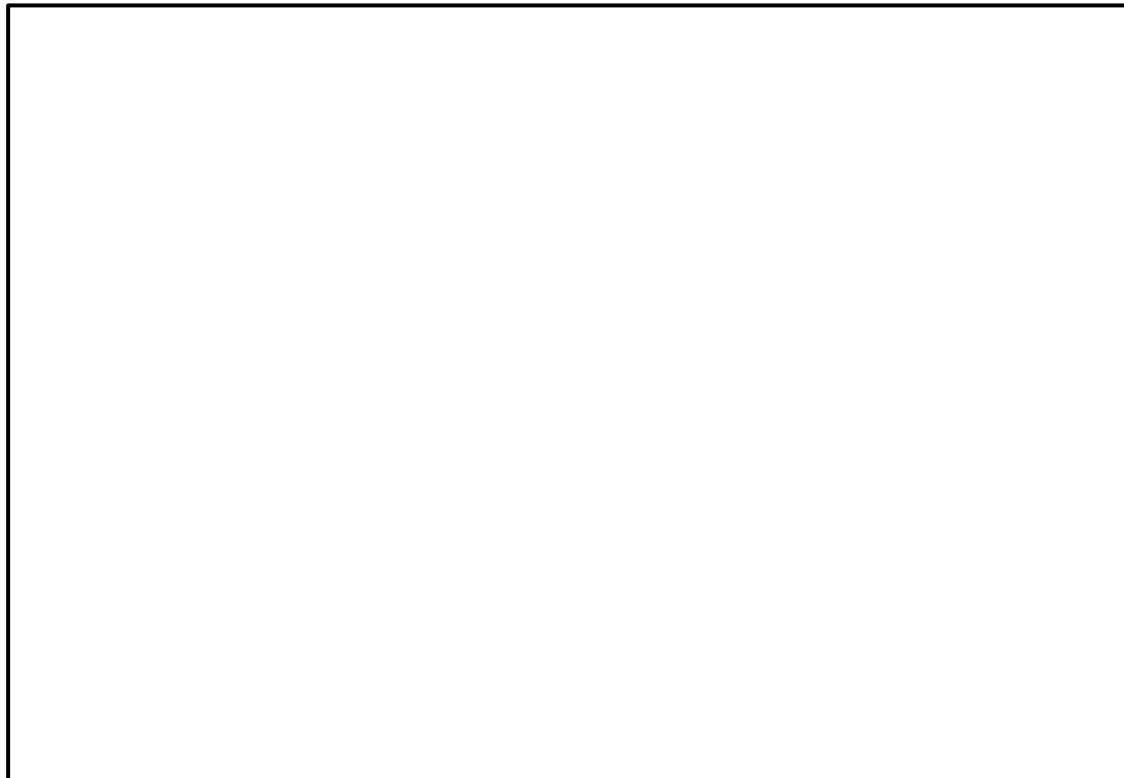
第5図 線量当量率評価位置



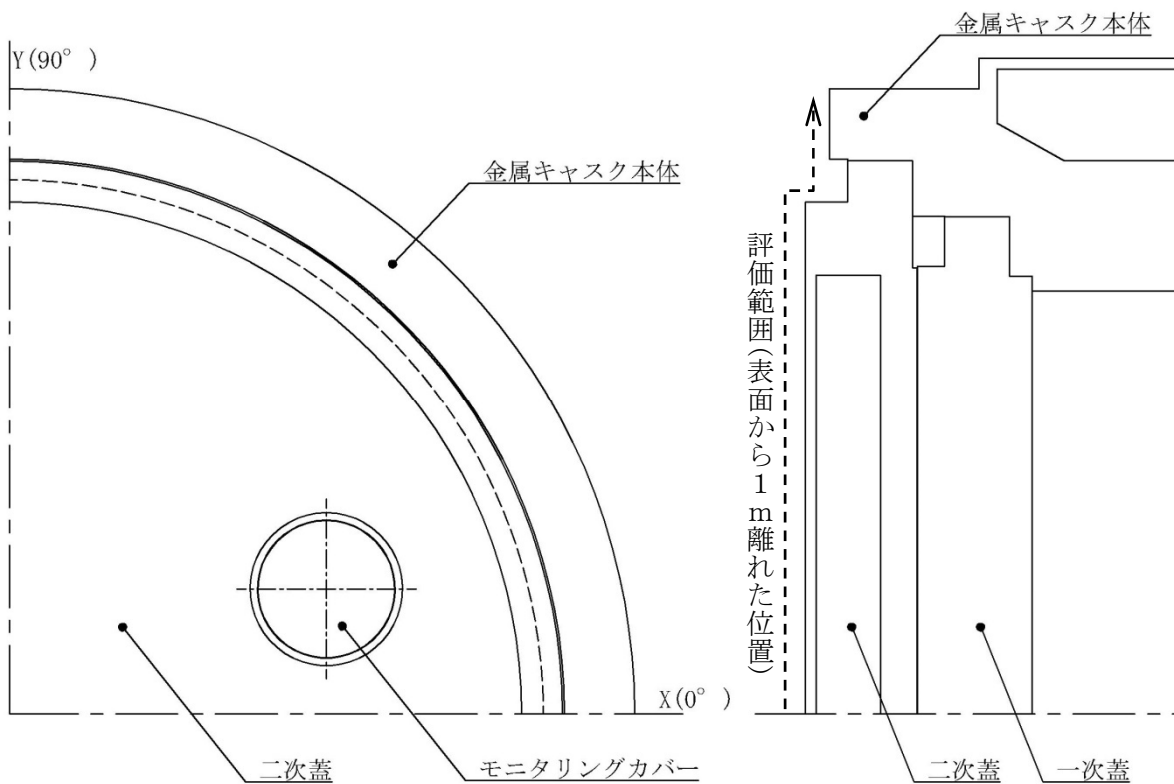
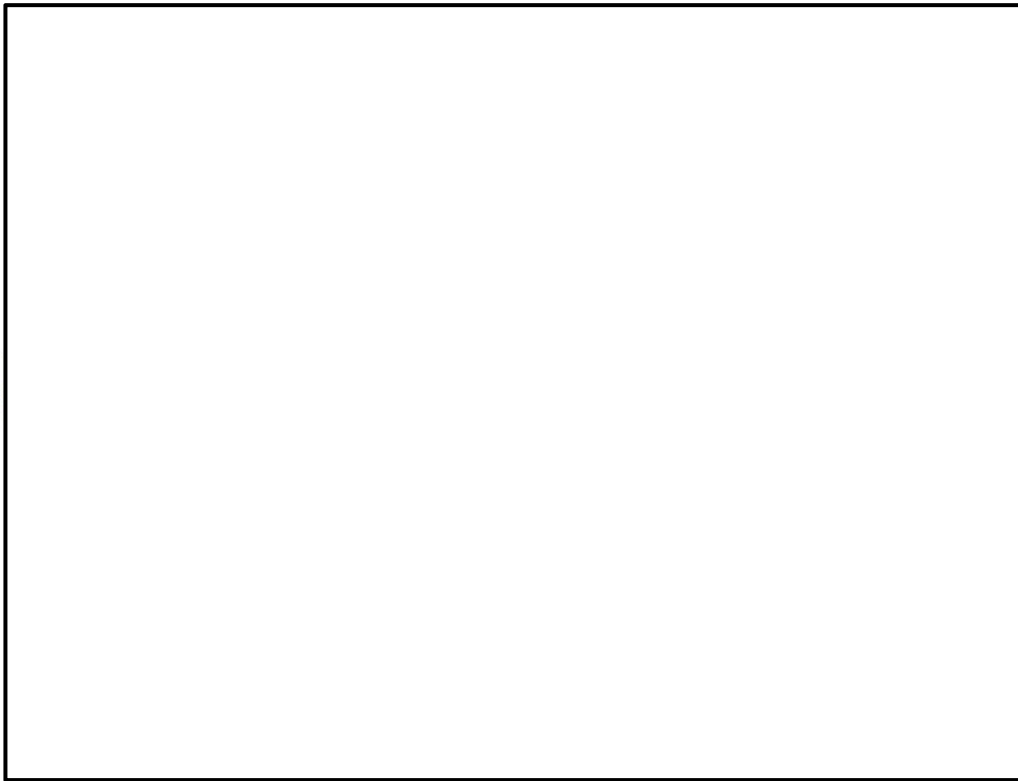
第6図 表面の線量当量率分布 (頭部軸方向)



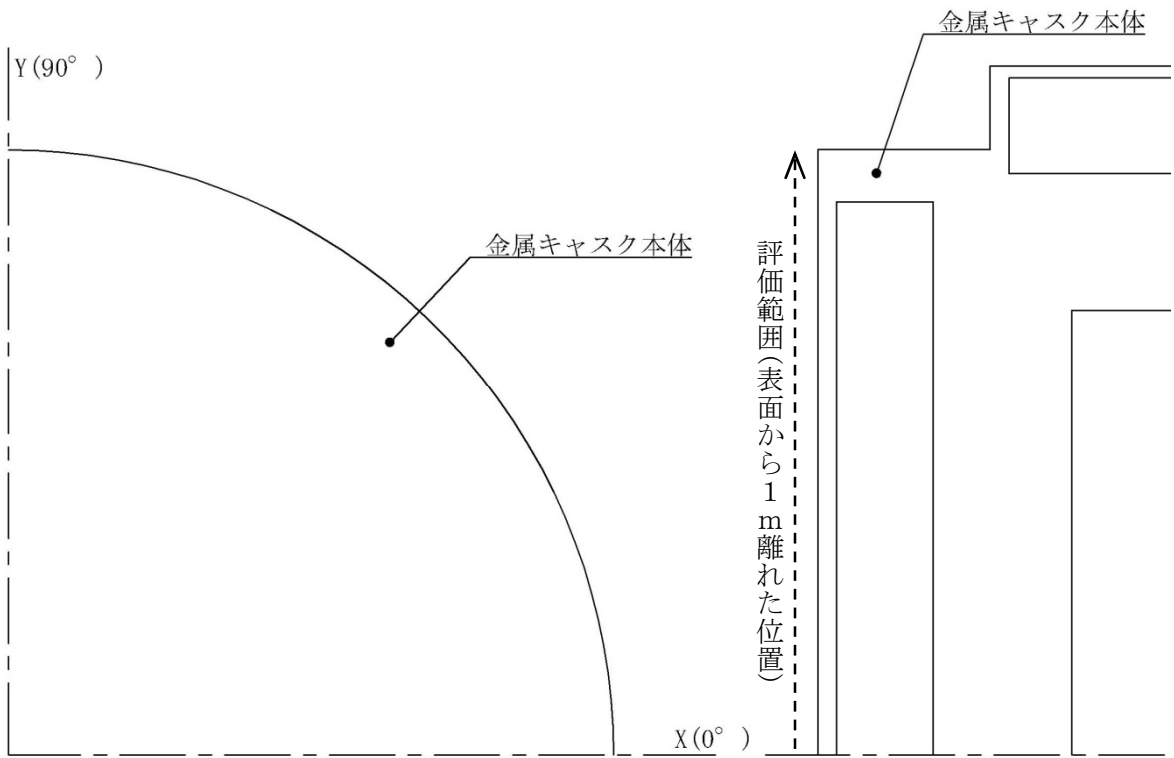
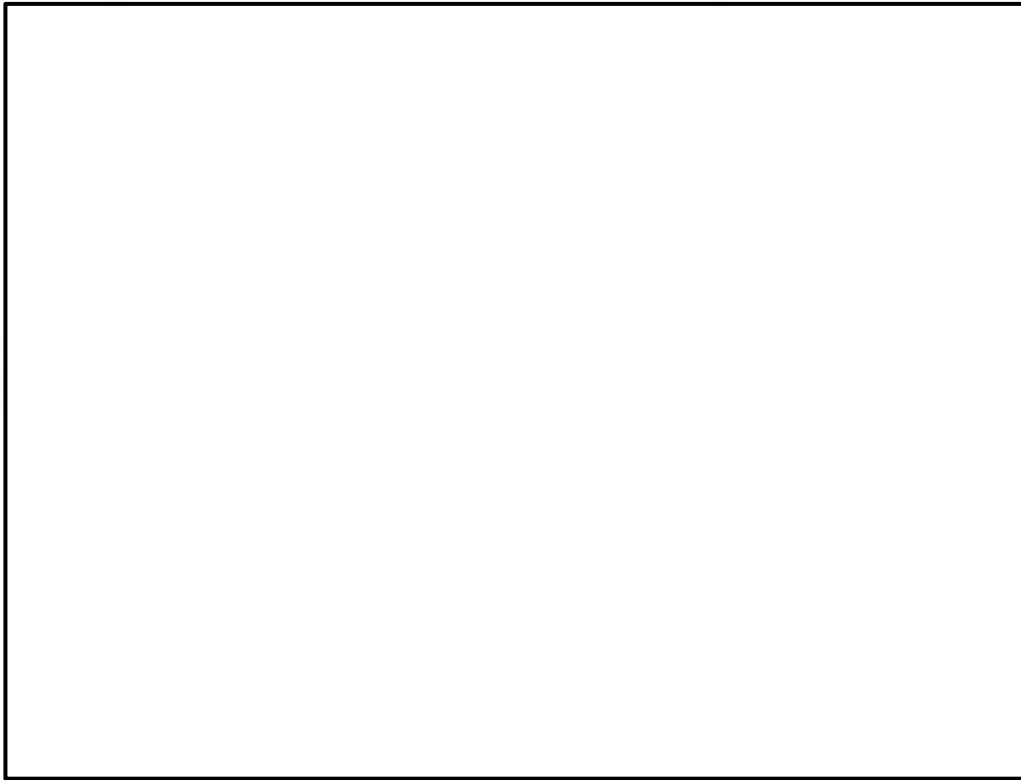
第7図 表面の線量当量率分布（底部軸方向）



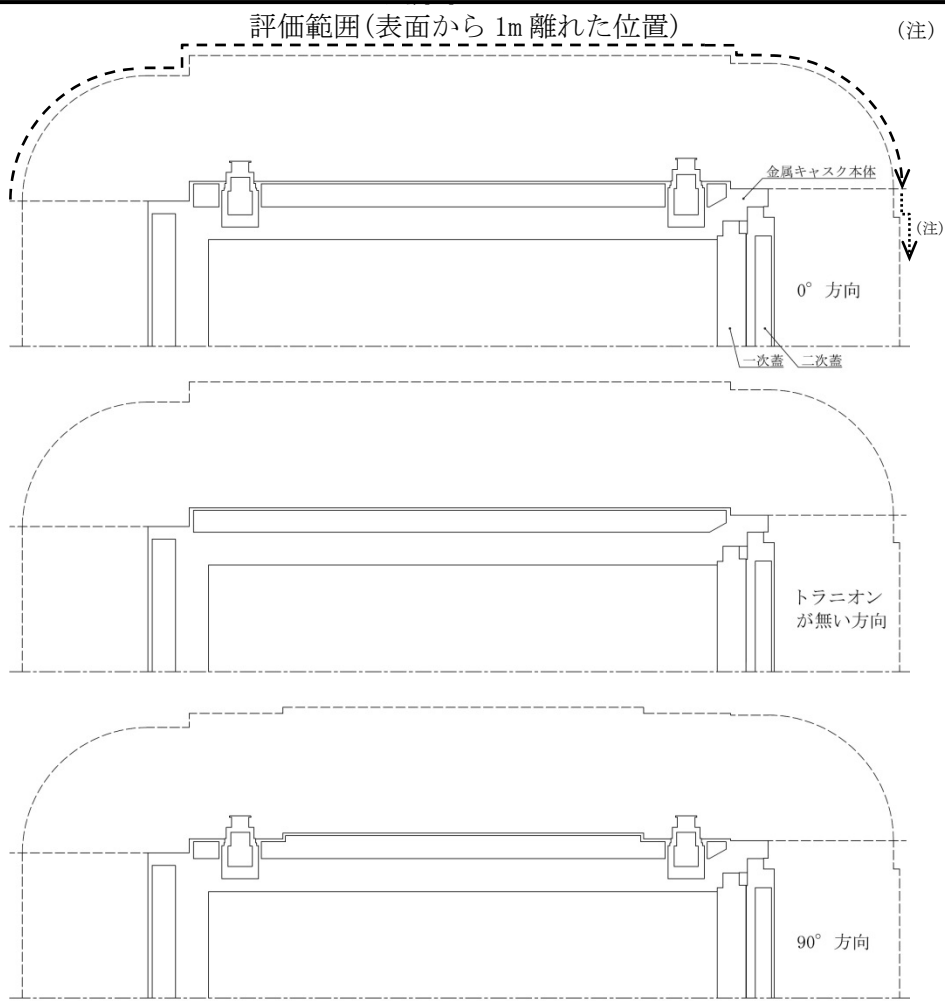
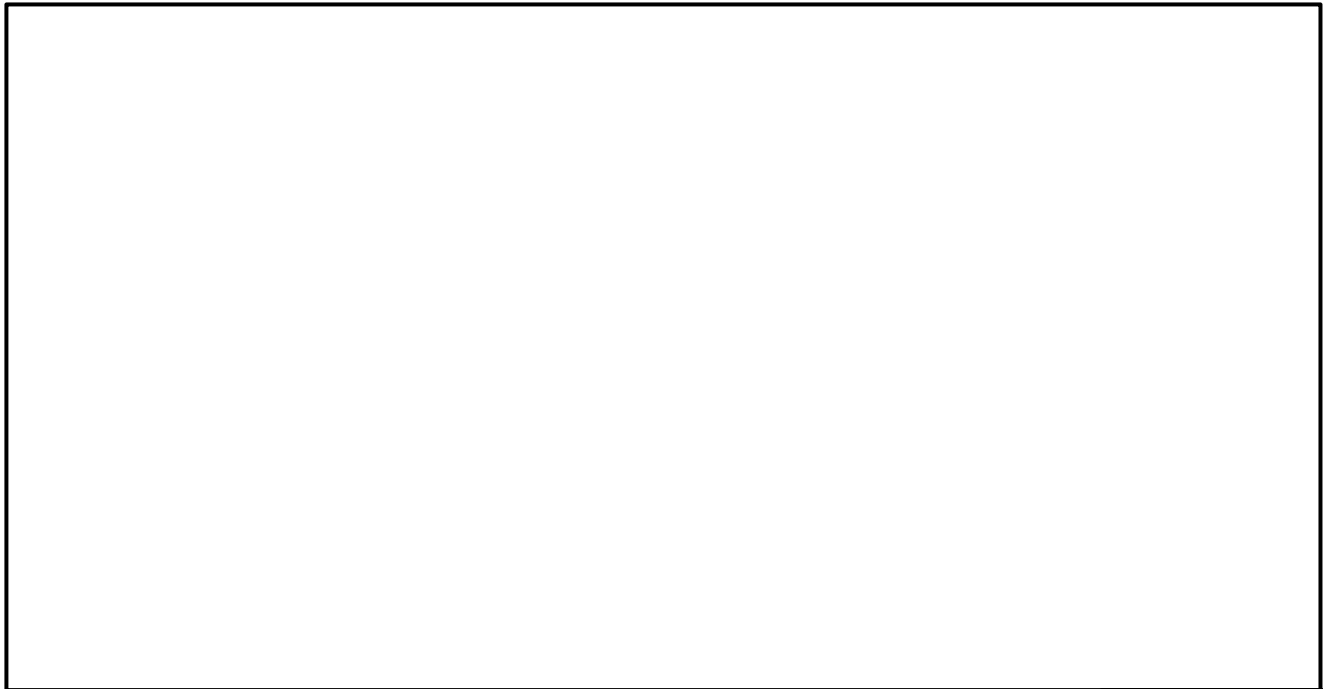
第 8 図 表面の線量当量率分布 (側部方向)



第9図 表面から1m離れた位置の線量当量率分布(頭部軸方向)



第10図 表面から1m離れた位置の線量当量率分布(底部軸方向)



第 11 図 表面から 1m 離れた位置の線量当量率分布 (側部方向)

TK-26 型の遮蔽解析条件

1. 使用済燃料集合体の線源強度について

使用済燃料集合体の線源強度について、「燃料有効部からのガンマ線及び中性子」、「使用済燃料集合体構造材及びバーナブルポイズン集合体からの放射化ガンマ線」に分けて計算する。

使用済燃料集合体及びバーナブルポイズン集合体の線源強度の計算方法及び条件を別紙 1-1 表、別紙 1-2 表、及び別紙 1-3 表に示す。また、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を別紙 1-4 表及び別紙 1-5 表に示す。別紙 1-4 表及び別紙 1-5 表から、線源強度の最も高い 17×17 燃料 48,000Mwd/t 型 (A 型) を対象に遮蔽解析を実施した。

遮蔽解析に用いた 17×17 燃料 48,000Mwd/t 型 (A 型) について、燃料有効部のガンマ線の各エネルギー群の線源強度を別紙 1-6 表に示す。

上記の中性子源強度のうち大部分は、 ^{244}Cm の自発核分裂線源と増倍による ^{235}U 、 ^{239}Pu の核分裂線源であり、 (α, 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}Pu の核分裂スペクトルとする。エネルギースペクトルは、以下に示すとおり、 ^{239}Pu 核分裂スペクトルを Watt 型連続分布エネルギースペクトルで入力した。

$$\text{Watt 型連続分布スペクトル} \quad : p(E) = C \cdot \exp(-E/a) \cdot \sinh(bE)^{1/2}$$

$$^{239}\text{Pu 中性子スペクトル定数} \quad : a = 0.966\text{MeV}, b = 2.842\text{MeV}^{-1}$$

別紙 1-1 表 使用済燃料集合体及びバーナブルポイズン集合体の
線源強度の計算方法及び条件

項目	計算方法	計算条件
燃料有効部 からのガン マ線及び中 性子	燃 焼 計 算 コ ー ド ORIGEN2 を用い、ガン マ線及び中性子源強度 を計算。使用済燃料集 合体のピーキングファ クターを考慮。また、 中性子については実効 増倍率を考慮。	燃 料 条 件 : 別紙 1-2 表参照 解 析 コ ー ド : ORIGEN2 (別紙 2 参照) ラ イ ブ ラ リ : PWRU50 ライブラリ
使用済燃料 集合体構造 材及びバー ナブルポイ ズン集合体 からの放射 化ガンマ線	使用済燃料集合体構造 材及びバーナブルポイ ズン集合体の ^{59}Co 含有 量に従い、放射化計算 式に基づき ^{59}Co から ^{60}Co への放射化量を計 算。	放射化計算式 $A = N_0 \cdot \sigma \cdot \phi \cdot \{1 - \exp(-\lambda \cdot T_1)\} \cdot \exp(-\lambda \cdot T_2)$ A : 放射化核種(^{60}Co)の放射能[Bq] N ₀ : ターゲット核種(^{59}Co)の個数[atoms] σ : 2200m/s の中性子による ^{59}Co 反応断面積[cm ²] ϕ : 炉内照射熱中性子束[n/(cm ² ・s)] λ : ^{60}Co の崩壊定数[1/日] T ₁ : 照射期間[日] (別紙 1-2 表参照) T ₂ : 冷却期間[日] (別紙 1-2 表参照)

別紙 1-2 表 使用済燃料集合体及びバーナブルポイズン集合体の線源強度計算条件(その 1)

項目			17×17 燃料 48,000MWd/t 型		15×15 燃料 48,000MWd/t 型	
			A 型	B 型	A 型	B 型
最高燃焼度 (MWd/t) (注 1)			48,000		47,000	
平均燃焼度 (MWd/t) (注 2)			44,000		43,000	
比出力 (MW/t)						
照射 期間 (日)	使用済燃料 集合体	最高燃焼度				
		平均燃焼度				
バーナブルポイズン集合体						
濃縮度 (wt%)						
冷却期間 (年)			15	20	15	20
ウラン質量 (kg)						
(上部)						
(下部)						

(注 1) 最高燃焼度とは、収納する使用済燃料集合体 1 体の燃焼度の最大値を示す。

(注 2) 平均燃焼度とは、収納する全使用済燃料集合体に対する燃焼度の平均値を示す。

(注 3) ノードは燃料有効部を軸方向に 分割したものである。

別紙 1-3 表 使用済燃料集合体及びバーナブルポイズン集合体の線源強度計算条件(その 2) (注 1)

項目			17×17 燃料 39,000MWd/t 型		15×15 燃料 39,000MWd/t 型	
			A 型	B 型	A 型	B 型
最高燃焼度 (MWd/t) (注 2)			39,000		39,000	
平均燃焼度 (MWd/t) (注 3)			— (注 4)		— (注 4)	
照射 期間 (日)	使用済燃料 集合体	最高燃焼度				
		平均燃焼度				
	バーナブルポイズン集合体					
濃縮度 (wt%)						
冷却期間 (年)			20		20	

(注 1) その他の条件は別紙 1-2 表と同じである。

(注 2) 最高燃焼度とは、収納する使用済燃料集合体 1 体の燃焼度の最大値を示す。

(注 3) 平均燃焼度とは、収納する全使用済燃料集合体に対する燃焼度の平均値を示す。

(注 4) 39,000MWd/t 型には平均燃焼度を設定しない。

別紙 1-4 表 ガンマ線及び中性子の線源強度 (その 1)

項目			17×17 燃料 48,000MWd/t 型		15×15 燃料 48,000MWd/t 型	
			A 型	B 型	A 型	B 型
最高燃焼度となる 使用済燃料集合体 1 体当たり	ガンマ線	燃料有効部 (photons/s)				
		構造材放射化 (⁶⁰ Co:Bq) (注 1)				
中性子	燃料有効部 (n/s) (注 2)					
平均燃焼度となる 使用済燃料集合体 1 体当たり	ガンマ線	燃料有効部 (photons/s)				
		構造材放射化 (⁶⁰ Co:Bq)				
中性子	燃料有効部 (n/s) (注 2)					
金属キャスク 1 基当たり	ガンマ線	燃料有効部 (photons/s)				
		構造材放射化 (⁶⁰ Co:Bq) (注 1)				
中性子	燃料有効部 (n/s) (注 2)					

(注 1) バーナブルポイズン集合体の放射化線源を考慮した値である。

(注 2) 中性子増倍の効果を考慮した値である。

別紙 1-5 表 ガンマ線及び中性子の線源強度 (その 2)

項 目			17×17 燃料 39,000MWd/t 型		15×15 燃料 39,000MWd/t 型	
			A 型	B 型	A 型	B 型
最高燃焼度となる 使用済燃料集合体 1 体当たり	ガンマ線	燃料有効部 (photons/s)				
		構造材放射化 (⁶⁰ Co:Bq) (注 1)				
中性子	燃料有効部 (n/s) (注 2)					
平均燃焼度となる 使用済燃料集合体 1 体当たり	ガンマ線	燃料有効部 (photons/s)				
		構造材放射化 (⁶⁰ Co:Bq) (注 1)				
中性子	燃料有効部 (n/s) (注 2)					
金属キャスク 1 基当たり	ガンマ線	燃料有効部 (photons/s)				
		構造材放射化 (⁶⁰ Co:Bq) (注 1)				
中性子	燃料有効部 (n/s) (注 2)					

(注 1) バーナブルポイズン集合体の放射化線源を考慮した値である。なお、39,000MWd/t 型の最高燃焼度となる使用済燃料集合体については、平均燃焼度以下の使用済燃料集合体の収納位置にもバーナブルポイズン集合体を挿入しない状態で収納されることから、バーナブルポイズン集合体を挿入していない状態の線源強度を括弧内に示す。

(注 2) 中性子増倍の効果を考慮した値である。

(注 3) 39,000MWd/t 型には平均燃焼度を設定しない。

別紙 1-6 表 燃料有効部のガンマ線の各エネルギー群の線源強度
 (17×17 燃料 48,000MWd/t 型 (A 型) 、金属キャスク 1 基当たり)

エネルギー 群数	上限エネルギー (MeV)	線源強度 (photons/s)
1	0.02	
2	0.03	
3	0.045	
4	0.07	
5	0.1	
6	0.15	
7	0.3	
8	0.45	
9	0.7	
10	1.0	
11	1.5	
12	2.0	
13	2.5	
14	3.0	
15	4.0	
16	6.0	
17	8.0	
18	11.0	
合計		

2. 貯蔵期間中の遮蔽性能の低下について

TK-26 型の設計貯蔵期間中に受ける放射線の照射脆化等による遮蔽材の特性変化はない。ただし、中性子遮蔽材であるレジンについては、設計貯蔵期間中の熱劣化に伴う質量減損を考慮している。

なお、レジンの質量減損は、劣化パラメータにより次式で表される。

$$\Delta W = 6.18 \times 10^{-4} \times E_p^{-5.99} \quad (\text{注1})$$

ここで、

- ΔW : レジンの質量減損率 (%)
- E_p : 劣化パラメータ = $T \times (C + \ln(t))$
- T : レジン温度 (K)
- t : レジン加熱時間 (h)
- C : 定数=17

設計貯蔵期間中の温度の低下を考慮すると、設計貯蔵期間経過時までのレジンの質量減損率は となる。これに余裕を加えて の減損があるとして評価している。

(注1) A. Oishi, J. Shimojo, H. Taniuchi, "Evaluation of Neutron Shielding Materials, TN VYAL B™ and KOBESH EPR™ Resin for Interim Storage Casks" Proceedings of the 17th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 2013, August 18-23, 2013, San Francisco, CA, USA, (2013).

燃焼計算コード ORIGEN2 を用いることの妥当性

燃焼計算コード ORIGEN2 は、原子燃料施設の線源強度計算及び崩壊熱計算に広く使用されており、使用済燃料輸送キャスクの線源強度計算及び崩壊熱計算等に豊富な実績がある。

ORIGEN2 の計算結果と ANS 標準崩壊熱の比較を別紙 2-1 図に示す。ORIGEN2 の崩壊熱は、ANS 標準崩壊熱と比較して、15 年以上（TK-26 型に収納される使用済燃料集合体の冷却期間）の年数に対して高めの値となっている。この理由は、ANS 標準崩壊熱は ^{99}Tc を考慮していないためである。したがって、ORIGEN2 の解析結果より ^{99}Tc を除いた崩壊熱を比較するとよい一致を示している。よって、ORIGEN2 を使用済燃料輸送キャスクの線源強度計算及び崩壊熱計算に適用することは妥当である。

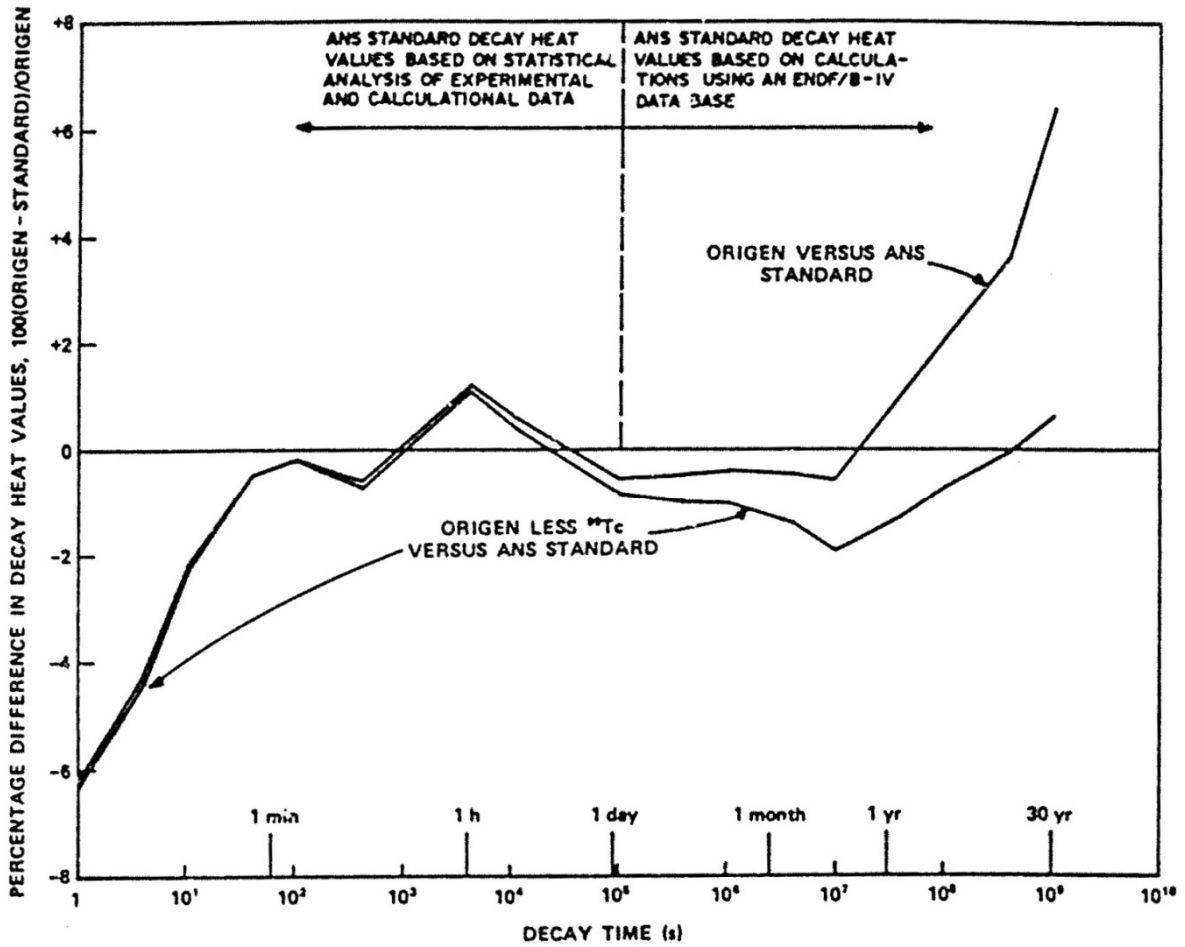


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for 10^{13} -s irradiation of ^{235}U .

別紙 2-1 図 ORIGEN2 コードの検証例 (注1)

(注1) A. G. Croff, "ORIGEN2: A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristics of Nuclear Materials", Nuclear Technology, Vol. 62, P. 335-P. 352, (1983)

三次元モンテカルロコード MCNP5 の計算条件

遮蔽計算にはガンマ線、中性子共に三次元モンテカルロコードである MCNP5 コードを使用した。この解析コードは、米国のロスアラモス国立研究所で開発された解析コードであり、米国では許認可解析コードとして使用されている等、金属キャスクを含む遮蔽解析に多数の使用実績がある。また、国内の輸送キャスクの遮蔽解析でも用いられており、設計承認取得の実績がある。

TK-26 型の計算条件を別紙 3-1 表に示す。

分散低減法には、計算モデルを直接セル分割する方法ではなく、仮想的に分割したメッシュ (Super imposed mesh) を計算モデル上に重ね合わせるように設定し、これらの各メッシュに対してウェイト・ウィンドウ (Weight Window) パラメータを設定する方法を採用した。

解析は以下のステップで行った。

- ① 金属キャスク表面付近及び表面から 1m の領域にメッシュ状に分割した検出器 (FMESH) を設定し、金属キャスク周囲の線量当量率のサーベイ計算を実施
- ② 上記①で線量当量率が最大となる箇所に、再度面検出器 (半径 5cm 若しくは 10cm の円) を設定して最大線量当量率の計算を実施

線量当量率変換係数は、ICRP Pub. 74 に記載されている線量当量率への変換係数を用いた。

別紙 3-1 表 計算条件

項目		条件
計算方法		三次元計算
解析コード		MCNP5
解析手法		モンテカルロ法
断面積ライブラリ		ENDF70(中性子) MCPLIB84(ガンマ線) (連続エネルギー)
線源のエネルギー スペクトル	燃料有効部 ガンマ線	ORIGEN2 の 18 群構造のスペクトル
	構造材放射化 ガンマ線	1.17MeV と 1.33MeV を 1:1
	中性子	²³⁹ Pu の核分裂スペクトル (連続エネルギーWatt 型)
評価方法		面検出器：半径 5cm 若しくは 10cm の円 (側面中央等の解析モデルの変化が少ない評価点では半径 10cm の面検出器、トランニオン近傍等比較的变化が大きい評価点では半径 5cm の面検出器を用いた。)
分散低減法		ウェイト・ウィンドウ法、線源バイアス法
相対標準偏差		相対標準偏差はマニュアルの判定基準である 10%以下とした。