

2020年7月7日提出版

廃棄物埋設施設における
許可基準規則への適合性について

第四条 地震による損傷の防止
(2号廃棄物埋設施設)

2020年7月

日本原燃株式会社

目 次

1. 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則 第四条及びその解釈	1
2. 廃棄物埋設施設の安全機能について	2
3. 設計対象設備	2
4. 耐震設計	3
5. 埋設を行う廃棄体の数量の変更による埋設設備への影響	3

参考資料1 覆土の安全機能喪失時の評価

参考資料2 埋設設備の遮蔽機能喪失時の評価

1. 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則 第四条及びその解釈

第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則
(地震による損傷の防止) 第四条 安全機能を有する施設は、地震力に十分に耐えることができない。 2 前項の地震力は、地震の発生によって生ずるおそれがある安全機能を有する施設の安全機能の喪失に起因する放射線による公衆への影響の程度に応じて算定しなければならない。

第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈
第4条 (地震による損傷の防止) 1 第1項に規定する「地震力に十分に耐える」とは、ある地震力に対して施設全体としておおむね弾性範囲の設計がなされることをいう。この場合、上記の「弾性範囲の設計」とは、施設を弾性体とみなして応力解析を行い、施設各部の応力を許容限界以下に留めることをいう。また、この場合、上記の「許容限界」とは、必ずしも厳密な弾性限界ではなく、局部的に弾性限界を超える場合を容認しつつも施設全体としておおむね弾性範囲に留まり得ることをいう。 2 第2項に規定する「地震の発生によって生ずるおそれがある安全機能を有する施設の安全機能の喪失に起因する放射線による公衆への影響の程度」とは、地震により発生するおそれがある安全機能を有する施設の安全機能の喪失（地震に伴って発生するおそれがある津波及び周辺斜面の崩壊等による安全機能の喪失を含む。）及びそれに続く放射線による公衆への影響を防止する観点から、各施設の安全機能が喪失した場合の影響の相対的な程度（以下「耐震重要度」という。）をいう。安全機能を有する施設は、耐震重要度に応じて、以下に掲げるクラスに分類するものとする。 一 Bクラス 自ら放射性物質を内蔵している施設若しくは当該施設に直接関係しておりその機能喪失により放射性物質を外部に拡散する可能性のある施設又は地震に伴って発生するおそれがある津波による安全機能の喪失を防止するために必要となる施設であって、その破損により公衆に与える放射線の影響が事業規則第1条の2第2項第9号に規定する「周辺監視区域」外における年間の線量限度に比べ十分小さいものでないものをいう。 二 Cクラス 安全機能を有する施設のうち、Bクラスに属する施設以外の一般産業施設又は公共施設と同等の安全性が要求される施設をいう。 3 第1項に規定する「地震力に十分に耐えること」を満たすために、安全機能を有する施設の耐震設計に当たっては、以下の方針によること。 一 静的地震力に対しておおむね弾性状態に留まる範囲で耐えること。 二 廃棄物埋設地と廃棄物埋設地の附属施設のうち建物・構築物については、常時作用している荷重及び操業中に作用する荷重と静的地震力を組み合わせ、その結果発生する応力に対して、建築基準法等の安全上適切と認められる規格及び基準による許容応力度を許容限界とすること。

第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈

- 三 廃棄物埋設地の附属施設のうち機器・配管系については、作業中の荷重と静的地震力を組み合わせ、その結果発生する応力に対して、応答が全体的におおむね弾性状態に留まること。
- 4 第2項に規定する「地震力」の算定に当たっては、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」（原規技発第1306193号（平成25年6月19日原子力規制委員会決定））（以下「実用炉設置許可基準解釈」という。）別記2第4条第4項の方法を準用すること。

2. 廃棄物埋設施設の安全機能について

安全機能については、第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（以下「許可基準規則」という。）第二条第2項第一号に「安全機能とは、廃棄物埋設施設の安全性を確保するために必要な機能であって、その機能の喪失により公衆又は従事者に放射線障害を及ぼすおそれがあるものをいう。」とある。

したがって、許可基準規則第二条第2項第一号を考慮し、安全機能を「放射性物質の漏出を防止する機能」（以下「漏出防止機能」という。）、「移行抑制機能^{*1}」、「遮蔽機能」とし、その機能の維持期間及び考え方を第1表にまとめる。

第1表 ピット処分における安全機能

安全機能	廃止措置の開始前		廃止措置の開始後
	放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了まで	覆土完了から廃止措置の開始まで	
放射性物質の漏出を防止する機能	○	-	-
移行抑制機能	-	○	△
遮蔽機能	○	○	△

○：安全機能を維持する
 △：必要な安全機能を期待できるように設計する
 -：考慮しない

*1：本資料では、放射性物質の漏出を低減する機能及び生活環境への移行を抑制する機能を「移行抑制機能」という。

ここで、廃棄物埋設施設のうち安全機能を有する設備は、埋設設備、排水・監視設備のうちポーラスコンクリート層及び覆土である。

3. 設計対象設備

変更対象設備である覆土について、地震の影響を考慮する。

なお、埋設設備については、埋設を行う廃棄体の数量の変更を行っているが、廃棄物埋設地における廃棄体の最大埋設能力に変更はなく、埋設設備の設計に変更がなく耐震構造の変更はない。また、埋設する廃棄体の表面線量当量率及び総放射線量に変更はなく、埋設を行う廃棄体の数量の変更に伴う放射線による公衆への影響はない。

これらから、埋設を行う廃棄体の数量の変更に伴う埋設設備の耐震構造に変更はない。

4. 耐震設計

覆土は、おおむね弾性範囲で設計される構造部材ではなく、変形を許容した土質系材料であり、耐震重要度の設定及び耐震設計は不要とする。

また、覆土は、安定した地盤の一部を掘り込んだ箇所に設置しているため、地すべりといった地震による損傷は想定されない。

ただし、地震による損傷として液状化が想定されるため、液状化し難い材料を用いて適切な管理方法で施工することにより、液状化抵抗性のある設計とする。

覆土の安全機能は、移行抑制機能及び遮蔽機能であるが、以下のとおりこれらの安全機能が喪失した場合に公衆に及ぼす影響は十分に小さいものである。

覆土の移行抑制機能について低透水性及び収着性が喪失した場合に公衆に及ぼす影響を評価した結果は約 $3.1 \mu\text{Sv/y}$ である。また、覆土の遮蔽機能が喪失した場合に公衆に及ぼす影響については、覆土完了後は埋設設備による遮蔽を期待しないことから、覆土のない覆土前の状態で埋設設備の遮蔽機能の喪失を想定した場合の評価（第2表）に包含される。覆土の安全機能喪失時の評価について参考資料1に埋設設備の遮蔽機能喪失時の評価について参考資料2に示す。

第2表 埋設設備の遮蔽機能喪失時の評価結果

想定する事象		線量評価結果 (mSv/y)
外部への放射線の放出	埋設設備 1 基*1	1.1×10^{-2}
	廃棄物埋設地全体*2	3.3×10^{-2}

*1 各埋設設備の中で放射性物質の減衰なしで最大の線量となる埋設設備での評価結果

*2 放射性物質の減衰を考慮した評価結果

5. 埋設を行う廃棄体の数量の変更による埋設設備への影響

埋設を行う廃棄体の数量を変更し、廃棄体数量が 7,360 本増加しているが、廃棄物埋設地における廃棄体の最大埋設能力の変更はなく、埋設設備の設計を変更していないことから埋設設備の構造の変更はない。また、埋設を行う廃棄体の数量の変更を行っているが、廃棄体の表面線量当量率に変更はなく、埋設実績を踏まえて総放射線量を変更していないことから、埋設を行う廃棄体の数量の変更に伴う放射線による公衆への影響はない。

これらから、埋設を行う廃棄体の数量の変更に伴う埋設設備の耐震構造に変更はない。

覆土の安全機能喪失時の評価

目次

1. 覆土の安全機能喪失時の評価	1
(1) 移行抑制機能	1
(2) 遮蔽機能	1
(3) 線量評価	1

1. 覆土の安全機能喪失時の評価

覆土の安全機能は、移行抑制機能及び遮蔽機能であり、その機能の喪失により公衆に及ぼす影響を評価した結果を含め考え方を以下に示す。

(1) 移行抑制機能

移行抑制機能は、低透水性と収着性により構成される。

ここで、低透水性は、変形に対する追従性及び液状化に対する抵抗性を有する設計とすることで、地震による損傷を防止し、機能を維持できる設計としている。

覆土は、安定した地盤の一部を掘り込んだ箇所に設置していることから、安全機能に有意な影響をあたえる変形は発生しない。

覆土の液状化については、液状化し難い材料を用いて適切な管理方法で施工することにより、液状化抵抗性のある設計とする。

また、収着性は、放射性物質とバリア材料との相互作用によるものである。そのため、収着性は覆土が存在する限り喪失はしない。収着性を期待する難透水性覆土及び上部覆土は、安定した地盤の一部を掘り込んだ箇所に設置していることから、地震により覆土は全損することはない。

(2) 遮蔽機能

遮蔽機能を期待する難透水性覆土及び下部覆土は上部覆土に覆われていることから、外部からの衝撃による破損は生じ難い。また、破損した場合でも、難透水性覆土及び下部覆土は上部覆土に覆われていることから、遮蔽機能への影響は限定的である。

(3) 線量評価

覆土完了時点から覆土の低透水性及び収着性が同時に喪失し、放射性物質の漏えいが生じるケースについて評価した。評価は、「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号（廃止措置の開始後の評価）4.(2)(v) d. その他」で行ったバリア機能の一部が喪失した場合を仮定した線量評価のうち人工バリアの低透水性を喪失したケースを基に、収着性も同時に喪失するものとした。

覆土の低透水性及び収着性が同時に喪失した場合の公衆の受ける影響を評価した結果は、覆土完了から廃止措置の開始までの期間を含めても、最大線量は約 $3.1 \mu\text{Sv/y}$ である。

覆土の遮蔽機能が喪失した場合に公衆に及ぼす影響については、覆土完了後は埋設設備による遮蔽を期待しないことから、覆土のない覆土前の状態で埋設設備の遮蔽機能の喪失を想定した場合の評価に包含される。

埋設設備の遮蔽機能喪失時の評価

目次

1. はじめに	1
2. 埋設設備の遮蔽機能喪失時の評価	1
(1) 評価の方針	1
(2) 遮蔽機能喪失時に想定される事象	1
(3) 埋設設備の遮蔽機能喪失時の評価	1
(4) 公衆の放射線被ばくの程度	2
3. 参考文献	3

参考資料 2-1 埋設設備の遮蔽機能喪失時の外部被ばく線量評価(詳細)

1. はじめに

埋設設備の安全機能のうち遮蔽機能の喪失を仮定した際の公衆への影響の程度について評価する。

2. 埋設設備の遮蔽機能喪失時の評価

(1) 評価の方針

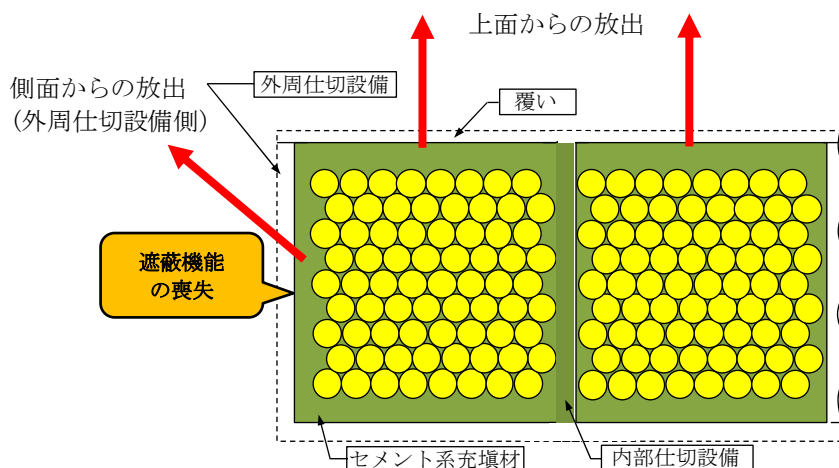
埋設設備が有する安全機能のうち遮蔽機能が喪失する際に想定される事象について、公衆の放射線被ばくの程度を評価する。

埋設設備は、遮蔽機能が1基ごとに独立していることから、埋設設備1基ごとに評価する。また、廃棄物埋設地には埋設設備を16基設置することから、廃棄物埋設地全体についても評価する。

ここで、埋設設備は、覆土完了後においては、遮蔽機能を期待するものではないことから、覆土前の状態で評価する。また、遮蔽機能を有する全ての設備を設置した状態から、遮蔽機能が喪失した状態で評価する。

(2) 遮蔽機能喪失時に想定される事象

埋設設備が損傷し、遮蔽機能が喪失する際に想定される事象は、外部への放射線の放出である。そこで、埋設設備外周部の外周仕切設備及び覆いが損傷し、遮蔽機能が喪失することによる、外部への放射線の放出を想定する。想定事象の概念図を第1図に示す。



第1図 想定事象の概念図

(3) 埋設設備の遮蔽機能喪失時の評価

(i) 外部への放射線の放出

埋設設備の遮蔽機能が喪失した際の、放射線による公衆の外部被ばくを評価する。

a. 外部被ばく評価に用いる線源の設定

埋設設備に定置した廃棄体を線源とし、廃棄体がセメント系充填材により固型化された状態を考慮する。線量の計算は廃棄体の表面線量当量率に基づき行う。2号廃棄物埋設地では廃棄体の定置が進んでいることから、評価に用いる廃棄体の表面線量当量率は2020年5月末時点の実績を踏まえて設定する。廃棄体の定置が完了した埋設設備の評価に用いる廃棄体の表面線量当量率は、埋設された廃棄体の表面線量当量率の平均に余裕をもった0.05mSv/hとする。今後廃棄体を定置する埋設設備の評価に用いる廃棄体の表面線量当量率は、全て実績

の最大である表面線量当量率 2mSv/h の廃棄体が定置されるものとして設定する。定置が完了した廃棄体の表面線量当量率の実績について参考資料 2-1-1 に示す。放射線を放出する放射性物質は、廃棄体に含まれる放射性物質のうちガンマ線エネルギーが高く、初期の放射エネルギーが多い Co-60 とする。

なお、廃棄体に含まれる Cl-36 の影響は、Co-60 の影響に包含される。

また、廃棄物埋設地全体での線量を評価する場合には、評価時点を全ての埋設設備の覆い設置が完了した時点とする。ここで、廃棄物埋設施設の埋設実績及び予定埋設数量を参考とし、定置完了からの期間が Co-60 の半減期である約 5 年以上となる埋設設備については、廃棄体に含まれる放射性物質の減衰を考慮する。

b. 評価条件の設定

公衆の外部被ばく線量は、線源の状態を考慮して、埋設設備の外周仕切設備及び覆いが有する遮蔽機能が喪失することを仮定して評価する。埋設設備の遮蔽機能は、土嚢等の設置によって一時的な回復が可能であり、東北地方太平洋沖地震のインフラの復旧事例⁽¹⁾を参考に主要な港湾や道路は 0.5 ヶ月程度で復旧すると想定し、重機等を確保することで 1 ヶ月で応急処置が可能であるとする。

なお、事象発生後より人手による施工も含め 2 ヶ月で応急処置が可能であると考えことから、線量の評価期間を 2 ヶ月とする。

c. 線量評価

線量評価は、敷地境界外で最大の被ばくを与える地点を線量の計算地点とし、そこに居住する人を対象に行う。

放射線は、廃棄体から放出されるガンマ線とし、廃棄物埋設地では、直接ガンマ線は周囲の地形により遮蔽されることから、スカイシャインガンマ線について評価する。

スカイシャインガンマ線による線量の計算には次元輸送計算コード (ANISN)⁽²⁾ 及び一回散乱計算コード (G33)⁽³⁾ を組み合わせたものを用いる。

これらの計算コードにより、線量の計算地点における線束密度を算出し、ICRP Pub. 74⁽⁴⁾ の換算係数を用いて空気吸収線量を算出後、線量を計算する。

なお、廃棄体表面の線量当量率から等価線源を求める計算は次元輸送計算コード (ANISN)⁽²⁾ を用いる。

外部被ばく線量評価の詳細を参考資料 2-1 に示す。

(4) 公衆の放射線被ばくの程度

公衆の放射線被ばくの評価結果を第 1 表に示す。

第 1 表 公衆の放射線被ばくの評価結果

想定する事象		線量評価結果 (mSv/y)
外部への放射線の放出	埋設設備 1 基 ^{*1}	約 1.1×10^{-2}
	廃棄物埋設地全体 ^{*2}	約 3.3×10^{-2}

*1 各埋設設備の中で放射性物質の減衰なしで最大の線量となる埋設設備での評価結果

*2 放射性物質の減衰を考慮した評価結果

埋設設備の遮蔽機能の喪失を想定し、公衆への影響を評価した結果、公衆の受ける線量は、周辺監視区域外における年間の線量限度である 1mSv に比べ十分に小さいものである。

3. 参考文献

- (1) 中央防災会議東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会：東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告 参考図表集、平成 23 年 9 月 28 日、内閣府
- (2) Ward W. Engle, Jr (1967) : A USERS MANUAL FOR ANISN A One Dimensional Discrete Ordinates Transport Code With Anisotropic Scattering, K-1693
- (3) Yukio SAKAMOTO and Shun-ichi TANAKA (1990) : QAD-CGGP2 AND G33-GP2: REVISED VERSIONS OF QAD-CGGP AND G33-GP (CODES WITH THE CONVERSION FACTORS FROM EXPOSURE TO AMBIENT AND MAXIMUM DOSE EQUIVALENTS), JAERI-M 90-110
- (4) International Commission on Radiological Protection (1996) : Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation, ICRP Publication 74

埋設設備の遮蔽機能喪失時の
外部被ばく線量評価(詳細)

目 次

1. はじめに	1
2. 埋設設備の遮蔽機能喪失時の外部被ばく線量評価の方針	1
3. 評価条件の設定	1
(1) 計算コード	1
(2) 物性値	1
(3) 線量の計算地点	2
(4) 評価対象とする埋設設備の設定	2
(5) 評価を行うガンマ線	3
4. スカイシャングamma線による線量の算出	4

参考資料 2-1-1 定置が完了した廃棄体の表面線量当量率の実績について

参考資料 2-1-2 廃棄体の放射能濃度の設定について

参考資料 2-1-3 スカイシャイン線量率の計算方法について

参考資料 2-1-4 断面積ライブラリ DLC-23 について

参考資料 2-1-5 線源面積の設定

参考資料 2-1-6 線量への影響について

参考資料 2-1-7 線量評価結果

参考資料 2-1-8 計算コードの概要について

1. はじめに

埋設設備の遮蔽機能喪失時の外部被ばく線量評価について説明する。

2. 埋設設備の遮蔽機能喪失時の外部被ばく線量評価の方針

外部被ばく線量評価は、廃棄物埋設施設周辺で最大の被ばくを与える地点に居住する人を対象とし、評価を行う放射線は、廃棄体から放出されるガンマ線とする。

廃棄物埋設地の評価では、直接ガンマ線が周囲の地形により遮蔽されることから、スカイシャインガンマ線を対象とする。

また、埋設設備の遮蔽機能喪失時の外部被ばく線量評価においては、埋設設備に定置した廃棄体をセメント系充填材で充填したものを線源として設定する。ここで、線源の設定においては、含まれる廃棄体の表面線量当量率、セメント系充填材による影響等を考慮する。

評価は埋設設備 1 基ごとに行い、廃棄物埋設地には埋設設備を 16 基設置することから、廃棄物埋設地全体についても評価する。また、線量の評価期間は 2 ヶ月とする。

なお、以下では、実効線量として評価している値は「線量」、実測が可能な値は「線量当量」と表記する。

3. 評価条件の設定

(1) 計算コード

他施設等において使用実績が十分にあり、信頼性があるコードを用いることとし、スカイシャインガンマ線による線量の計算には一次元輸送計算コード (ANISN) 及び一回散乱計算コード (G33-GP2R) を組み合わせたものを用いる。

(2) 物性値

評価に用いる物性値は第 1 表に示すとおりとする。

第 1 表 評価に用いる物性値(1/2)

水 (密度 1,500kg/m ³)	元素	組成比(%)	密度(kg/m ³)
	H	11.19	1.679×10 ²
	O	88.81	1.332×10 ³

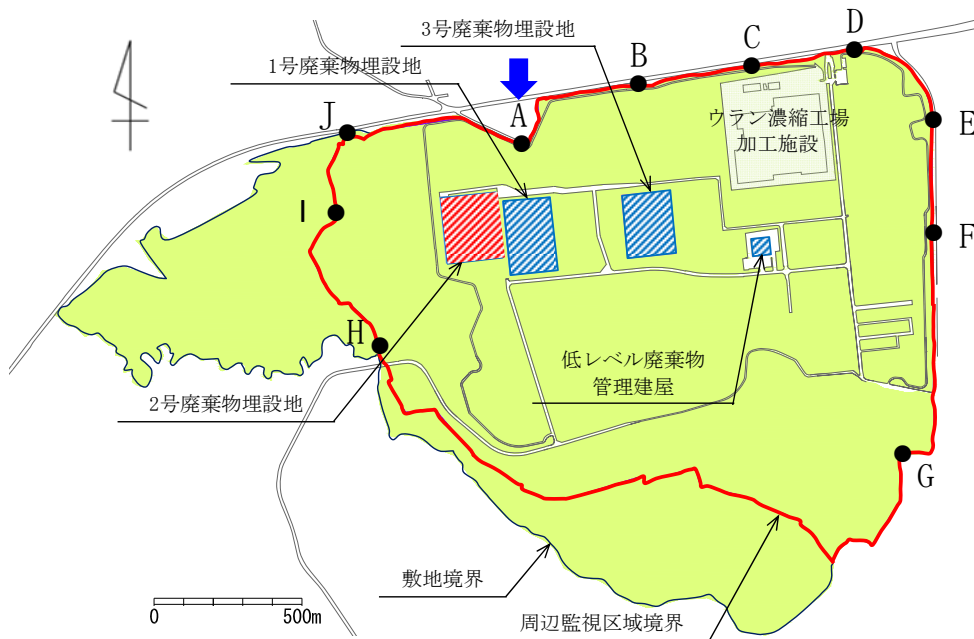
充填材 (モルタル) (密度 1,600kg/m ³)	元素	組成比(%)	密度(kg/m ³)
	H	0.416	6.656×10 ⁰
	O	50.74	8.118×10 ²
	Mg	0.1150	1.840×10 ⁰
	Al	0.4460	7.136×10 ⁰
	Si	38.61	6.177×10 ²
	S	0.07	1.120×10 ⁰
	Ca	6.869	1.099×10 ²
	Fe	2.738	4.381×10 ¹

第1表 評価に用いる物性値 (2/2)

空気 (密度 1.205kg/m ³)	元素	組成比(%)	密度(kg/m ³)
	H	0.001000	1.205×10 ⁻⁵
	C	0.01255	1.513×10 ⁻⁴
	N	75.47	9.093×10 ⁻¹
	O	23.23	2.799×10 ⁻¹

(3) 線量の計算地点

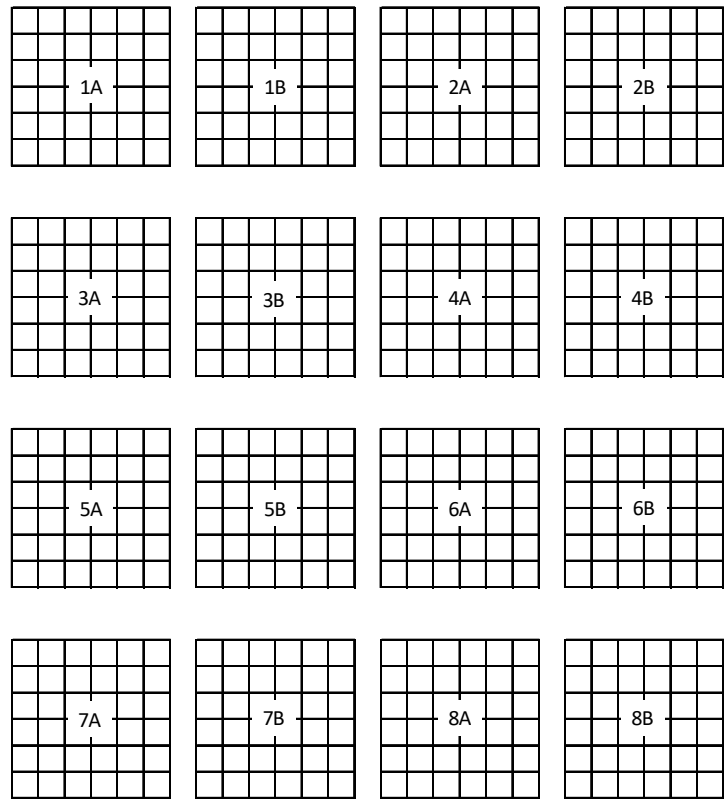
線量の計算地点は、2号廃棄物埋設地との距離が最短となる地点であるAとする。線量の計算地点を第1図に示す。



第1図 線量の計算地点

(4) 評価対象とする埋設設備の設定

第2図に示すように、2号廃棄物埋設地に設置する全ての埋設設備を対象とし、埋設設備1基ごとに評価する。

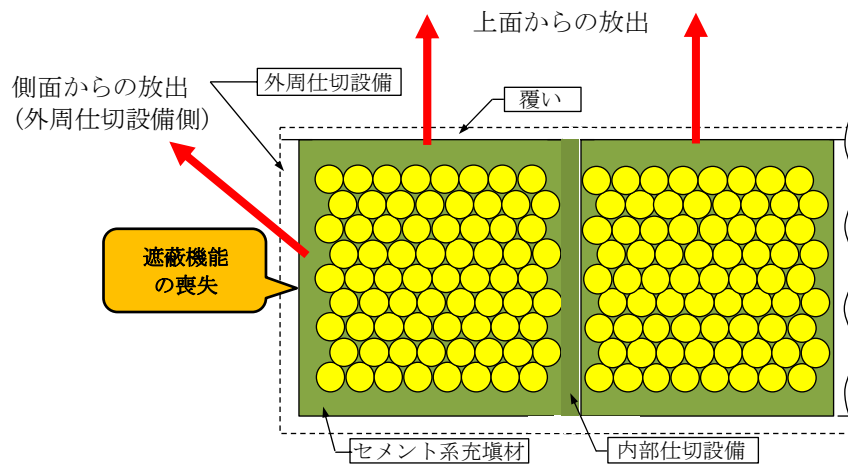


第2図 評価対象とする埋設設備

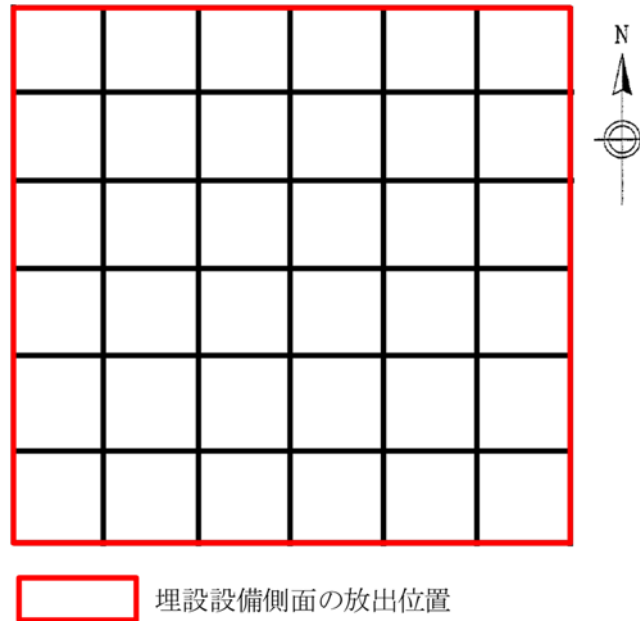
(5) 評価を行うガンマ線

遮蔽機能の喪失を想定し、第3図に示すように、埋設設備上面及び側面から放出されるスカイシャインガンマ線について評価する。

ここで、埋設設備側面から放出されるスカイシャインガンマ線の放出位置は第4図のとおりである。



第3図 評価するスカイシャインガンマ線の放出位置



第4図 埋設設備側面から放出されるスカイシャインガンマ線の放出位置

4. スカイシャインガンマ線による線量の算出

スカイシャインガンマ線による線量の算出について、ここでは各埋設設備の中で最大の線量となる第8群B埋設設備での線量の算出を示す。

線源は埋設設備に定置した廃棄体をセメント系充填材で固型化したものとし、ガンマ線を放出する放射性物質は廃棄体に含まれる放射性物質のうち、ガンマ線のエネルギーが高く、初期の放射エネルギーが多いCo-60（ガンマ線のエネルギー1.25MeV、放出率200%）で代表する。

線源に含まれる廃棄体の表面線量当量率は、参考資料2-1-1に示す埋設実績を踏まえて設定する。

2020年5月末時点で第6群B埋設設備まで定置が完了しており、埋設された廃棄体の表面線量当量率の群ごとの平均は0.03mSv/h～0.04mSv/hである。また、埋設された廃棄体の表面線量当量率の最大は2mSv/hである。これらから、定置が完了している埋設設備については、実績の平均に余裕をもった表面線量当量率0.05mSv/hの廃棄体が埋設されているものとする。また、今後廃棄体を定置する埋設設備については、全て実績の最大である表面線量当量率2mSv/hの廃棄体が定置されるものとして設定する。

スカイシャイン線量の算出では、まず、代表区画位置（埋設設備の北東端の区画）からの放射能濃度が一様な状態での線量率を算出し、セメント系充填材の影響（参考資料2-1-6参照）を加味する。ここで、上面及び側面から放出される放射線について、セメント系充填材40cmを考慮する。

放射能濃度が一様な状態での線量率は、単位面積、単位放射能濃度当たりのスカイシャイン線量率（参考資料2-1-3参照）に、廃棄体の放射能濃度（参考資料2-1-2参照）及び1区画の線源面積（参考資料2-1-5参照）を乗ずることによって算出する。

1区画からのスカイシャイン線量率の算出結果を第2表に示す。

第2表 1区画からのスカイシャイン線量率

放出位置	放出方向	単位面積、単位放射能濃度 当たりのスカイシャイン 線量率 ($(\mu\text{Sv/h})/(\text{Bq}/\text{cm}^3)(\text{cm}^2)$)	最上段に定置 する廃棄体の 放射能濃度 (Bq/cm^3)	1区画の 線源面積 (m^2)	セメント系 充填材の影響 (-)	1区画からの スカイシャイン線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	
側面	上面	4.36×10^{-12}	5.80×10^3	29.15	1.90×10^{-2}	1.40×10^{-4}	
	北	1.13×10^{-11}		24.38		3.03×10^{-4}	
		東		5.23×10^{-12}		25.30	1.46×10^{-4}
		南		4.79×10^{-13}		24.38	1.29×10^{-5}
		西		8.67×10^{-13}		25.30	2.42×10^{-5}

上面から放出されるスカイシャイン線の線量は、1区画からのスカイシャイン線量率に、線量の評価期間2ヶ月（1,460時間）及び区画数を乗じて算出する。

側面から放出されるスカイシャイン線の線量は、1区画からのスカイシャイン線量率に、放出される放射線の放出角が周囲の地形等によって制限される影響（参考資料 2-1-6 参照）、線量の評価期間2ヶ月（1,460時間）及び区画数を乗じて算出する。ここで、区画数について、側面からの放出については、北面及び南面について6区画、東面及び西面について6区画となる。

埋設設備から放出されるスカイシャイン線の線量は、上面及び側面から放出されるスカイシャイン線の線量を合計して算出する。

外部被ばく線量評価結果を第3表に示す。また、同様の方法により算出した各埋設設備の線量評価結果を参考資料 2-1-7 に示す。

第3表 外部被ばく線量評価結果

放出位置	放出方向	1区画からの スカイシャイン線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	廃棄物埋設地の 地形等の影響 (-)	線量の 評価期間 (h)	区画数	線量 (μSv)	
側面	上面	1.40×10^{-4}	-	1,460	36	7.4	
	北	3.03×10^{-4}	0.685		6	1.8	
		東	1.46×10^{-4}		0.988	6	1.3
		南	1.29×10^{-5}		0.893	6	0.1
		西	2.42×10^{-5}		0.556	6	0.1
	合計						約 11

定置が完了した廃棄体の表面線量当量率の実績について

2号埋設設備に定置が完了した廃棄体の表面線量当量率の実績を第1表に示す。

2020年5月末時点で第6群B埋設設備まで定置が完了しており、埋設された廃棄体の表面線量当量率の群ごとの平均は0.03mSv/h～0.04mSv/hである。

また、埋設された廃棄体の表面線量当量率の最大は2mSv/hである。

第1表 定置が完了した廃棄体の表面線量当量率の実績

埋設設備群	平均値(mSv/h)	最大値(mSv/h)
第1群	0.04	2.0
第2群	0.04	1.9
第3群	0.03	1.9
第4群	0.04	2.0
第5群	0.04	2.0
第6群	0.03	2.0
第7群	定置完了前	定置完了前
第8群	定置完了前	定置完了前
全体	0.04	2.0

廃棄体の放射能濃度の設定について

廃棄体の放射能濃度は以下のとおり算出する。算出方法は、まず、放射能濃度を仮設定し、その放射能濃度から線量当量率を計算コードにより算出する。その後、廃棄体の表面線量当量率と計算コードにより算出した線量当量率の比を仮設定した放射能濃度に乗ずることによって廃棄体の放射能濃度を算出する。このとき、放射能濃度を安全側とするために、線量計算に使用する2種類の計算コード(QAD、ANISN)について整理を行い、放射能濃度が大きくなるANISNの線量当量率を用いる。

$$\text{廃棄体の放射能濃度 (Bq/cm}^3\text{)} = \text{仮設定した放射能濃度 (Bq/cm}^3\text{)} \times \frac{\text{廃棄体の表面線量当量率 (mSv/h)}}{\text{計算コードにより算出した線量当量率 (mSv/h)}}$$

計算コードとしては、線量計算に用いるQAD又はANISNがあり、どちらも、放射能濃度から線量当量率を算出するものである。QADは、コードそのものが持つ保守性により、線量当量率を安全側(値が大きい側)に算出する。したがって、QADにより算出した線量当量率から放射能濃度を設定する場合、廃棄体の放射能濃度を小さく評価することになり、公衆の被ばく線量評価においては、非安全側の結果となる。

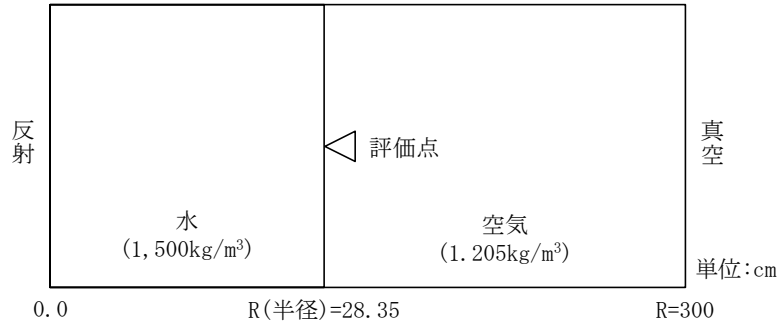
そのため、廃棄体の放射能濃度の設定ではANISNを用いる。ANISNは、一次元形状のみを取り扱うことができるコードであるため、無限形状としてモデル化を行うが、廃棄体の実形状と比較すると、線量当量率は大きな値となる。計算コードにより算出した線量当量率が大きな値となる場合、廃棄体の放射能濃度は小さくなるため、非安全側の結果となる。

そこで、3次元形状で廃棄体と無限円柱をモデル化し、QADを用いて線量当量率を算出し、両モデルでの線量当量率の比をANISNで算出した線量当量率に乗じて補正を行い、補正した線量当量率より放射能濃度を設定する。

1. ANISNによる算出

ANISNの計算モデルは、廃棄体の径方向をモデル化した無限円柱形状とし、線源物質は水(密度1,500kg/m³)、ガンマ線を放出する放射性物質はCo-60とし、断面積ライブラリはDLC-23Fを用いた。計算モデルを第1図に示す。また、DLC-23Fを用いる妥当性を参考資料2-1-4に示す。

線源の放射能濃度を1Bq/cm³とした場合の線量当量率を算出した結果、 3.50×10^{-4} mSv/hとなる。

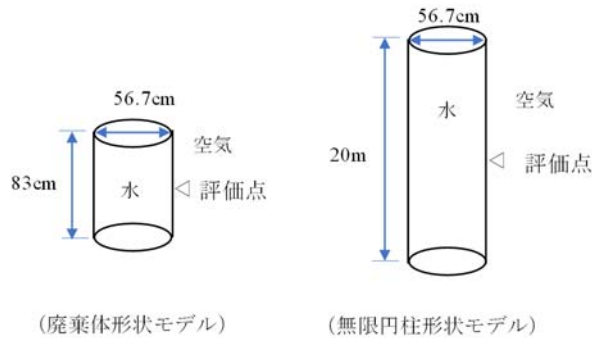


第1図 ANISN 計算モデル

2. QAD による補正

ANISN により算出した線量当量率は無限円柱形状モデルでの結果である。そこで、3次元形状のモデル化が可能な QAD により、廃棄体形状を考慮した高さ 83cm のモデルと無限円柱を模擬した高さ 20m のモデルによる線量当量率の比を求めて、ANISN で算出した線量当量率を補正する。

計算条件は、ANISN での計算と同様に線源物質を水（密度 $1,500\text{kg/m}^3$ ）、ガンマ線を放出する放射性物質は Co-60 とした。計算モデルを第2図に示す。



第2図 QAD による計算モデル

QAD による両モデルの計算結果を第1表に示す。廃棄体形状モデルで算出した線量当量率と無限円柱形状モデルで算出した線量当量率の比は 0.989 となる。

第1表 廃棄体形状と無限円柱形状との比較結果

	①廃棄体形状	②無限円柱形状	比(①/②)
1Bq/cm ³ での線量当量率(mSv/h)	4.35×10^{-4}	4.40×10^{-4}	0.989

3. 廃棄体の放射能濃度の設定

廃棄体の放射能濃度の設定で用いる 1Bq/cm^3 での線量当量率は、ANISN で算出した $3.50 \times 10^{-4}\text{mSv/h}$ に QAD で求めた比である 0.989 を乗じて、 $3.46 \times 10^{-4}\text{mSv/h}$ とする。

この値を用いて、外部被ばく評価に用いる廃棄体の放射能濃度を求める。外部被ばく評価に用いる廃棄体の表面線量当量率 2mSv/h 及び 0.05mSv/h における放射能濃度は第2表に示すとおりとなる。

以上より、放射能濃度をより大きく算出ができていると考えることから、外部被ばく線量評価に用いる放射能濃度の設定として妥当である。

第2表 外部被ばく線量評価に用いる放射能濃度

廃棄体の表面線量当量率 (mSv/h)	2	0.05
表面線量当量率と等価な Co-60 の放射能濃度 (Bq/cm ³)	5.80×10^3	1.45×10^2

スカイシャイン線量率の計算方法について

一次元輸送計算コード ANISN とガンマ線一回散乱計算コード G33 による廃棄物埋設地からのスカイシャイン線量率の計算方法について説明する。

1. 計算方法

(1) 計算コード及び断面積ライブラリ

スカイシャイン線量率の計算は、区画内廃棄体線源表面又は遮蔽体外側表面を結合点として、ANISN と G33 を組み合わせて実施する。計算方法の概要は以下のとおり。

① ANISN により線源表面における単位放射能濃度当たりの角度別ガンマ線束を計算

② G33 により各線量の計算地点における単位放射能濃度及び単位面積当たりの線量率を計算

また、ANISN による角度別ガンマ線束の計算に用いる角度分点数と散乱成分のルジャンドル展開次数は、角度分点数 32 でルジャンドル展開次数 3 (P_3S_{32}) とする。

ANISN での断面積ライブラリは DLC-23F を用いている。DLC-23F を用いる妥当性を参考資料 2-1-4 に示す。

(2) 計算モデル

計算は、ANISN と G33 を組み合わせて実施する。

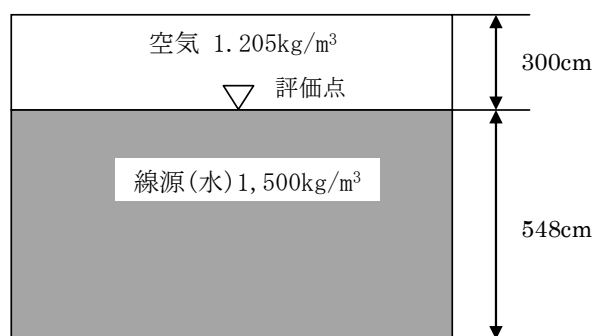
(i) ANISN

区画内の廃棄体線源表面におけるガンマ線の角度束を、ANISN により計算するに当たっては、線源体が矩形で均一な拡がりをもっていることから、線源形状を無限平板とし、線源厚さは上面方向と側面方向を共通に取り扱うため、線源となる埋設設備 1 区画の最大寸法である 548cm とする。角度別ガンマ線束の計算モデルを第 1 図に示す。

ここで、側面方向についても、放出面を無限平板として、計算を実施する。

なお、均一な線源として設定していることから、上面方向と側面方向と異なるものの、上面と側面の角度束分布は等しくなる。

また、側面を放出面とした場合、放射能濃度の分布が不均一となるが、ガンマ線束の強度は放射能濃度に比例することから、ガンマ線束の分布は、放射能濃度によらず同じ割合となる。



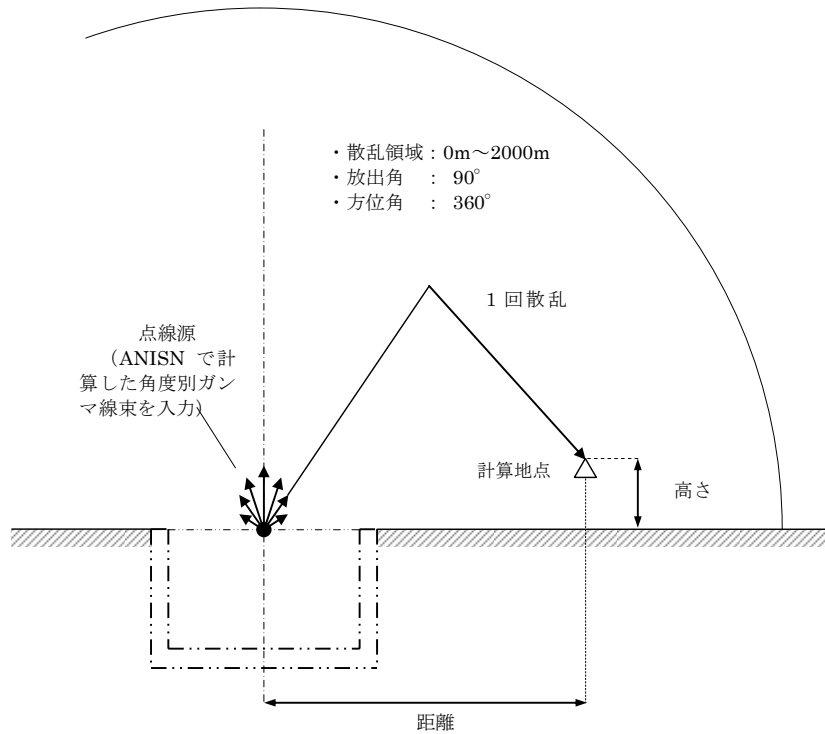
第 1 図 ANISN による角度別ガンマ線束の計算モデル

(ii) G33

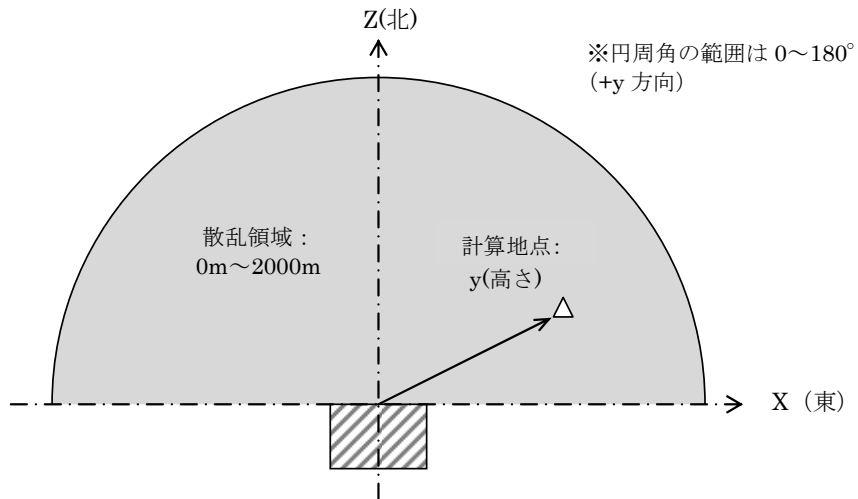
区画上面から大気中に放出されるガンマ線によるスカイシャイン線量の計算モデルを第2図に示す。ANISN で求めた角度別のガンマ線束を放出する点線源を各区画上面の中央に置き、ガンマ線の放出角は 90° 、空気の散乱領域は半径2,000mの半球とする。

区画側面から大気中に放出されるガンマ線によるスカイシャイン線量の計算モデルを、第3図に示す。ANISN で求めた角度別のガンマ線束を放出する点線源を各区画側面の上辺中央に置き、ガンマ線の放出角は 90° 、空気の散乱領域は半径2,000mの1/4球とする。

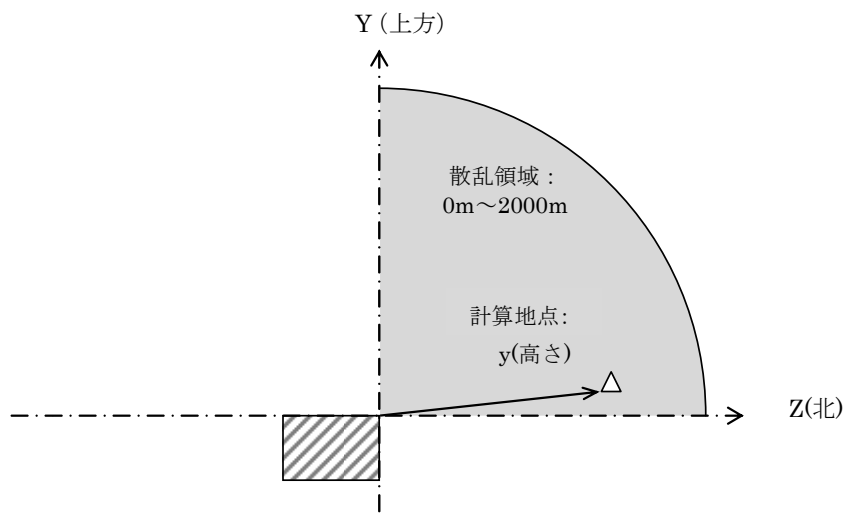
線量の計算地点の水平座標（線源を原点とし、区画側面と直交する座標系）は、線源位置を区画の上面中央とし、線量の計算地点の方向を考慮して計算した値を1m単位で切り捨てた値とする。線源の標高は、埋設設備群ごとの底面の標高に区画の高さ（区画全高－セメント系充填材厚さ－ポーラスコンクリート層厚さ－天板厚さ）を加えた値とする。



第2図 G33による1回散乱線の計算モデル（上面放出）



【平面図】



【側面図】

第3図 G33による1回散乱線の計算モデル（北側面放出の場合）

2. 計算結果

1. の計算方法により、各埋設設備からの単位面積、単位放射能濃度当たりのスカイシャイン線量を算出すると第1表に示すとおりとなる。

第1表 単位面積、単位放射能濃度当たりのスカイシャイン線量率((Sv/h)/(Bq/cm³)(cm²))

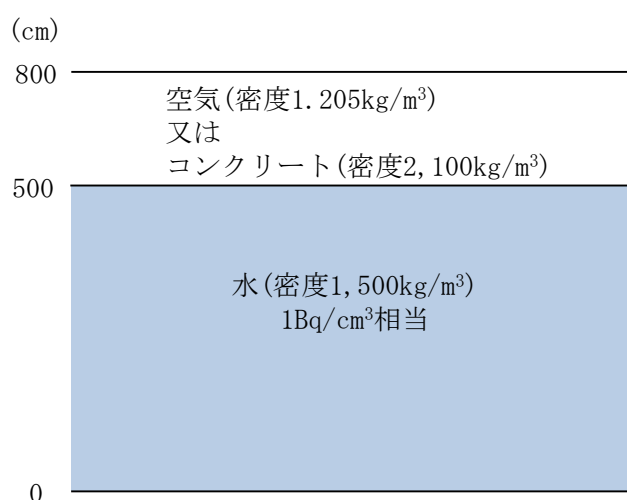
埋設設備群 (北側から第1群)		上面	北面	東面	南面	西面
第1群	A	5.62×10^{-12}	8.99×10^{-12}	1.28×10^{-11}	9.57×10^{-13}	7.45×10^{-13}
	B	8.37×10^{-12}	1.45×10^{-11}	1.72×10^{-11}	1.40×10^{-12}	1.24×10^{-12}
第2群	A	1.22×10^{-11}	2.18×10^{-11}	2.17×10^{-11}	2.00×10^{-12}	2.02×10^{-12}
	B	1.75×10^{-11}	3.71×10^{-11}	2.58×10^{-11}	2.79×10^{-12}	3.28×10^{-12}
第3群	A	4.15×10^{-12}	8.74×10^{-12}	8.89×10^{-12}	6.04×10^{-13}	5.44×10^{-13}
	B	5.89×10^{-12}	1.15×10^{-11}	1.14×10^{-11}	8.52×10^{-13}	8.73×10^{-13}
第4群	A	8.10×10^{-12}	1.84×10^{-11}	1.33×10^{-11}	1.16×10^{-12}	1.36×10^{-12}
	B	1.09×10^{-11}	2.37×10^{-11}	1.63×10^{-11}	1.54×10^{-12}	2.10×10^{-12}
第5群	A	3.00×10^{-12}	6.41×10^{-12}	6.31×10^{-12}	3.77×10^{-13}	3.88×10^{-13}
	B	4.08×10^{-12}	9.40×10^{-12}	7.45×10^{-12}	5.14×10^{-13}	6.01×10^{-13}
第6群	A	5.37×10^{-12}	1.22×10^{-11}	8.41×10^{-12}	6.75×10^{-13}	9.05×10^{-13}
	B	6.86×10^{-12}	1.86×10^{-11}	8.71×10^{-12}	8.57×10^{-13}	1.35×10^{-12}
第7群	A	2.13×10^{-12}	5.14×10^{-12}	4.35×10^{-12}	2.32×10^{-13}	2.71×10^{-13}
	B	2.79×10^{-12}	6.91×10^{-12}	4.83×10^{-12}	3.06×10^{-13}	4.07×10^{-13}
第8群	A	3.54×10^{-12}	8.84×10^{-12}	5.61×10^{-12}	3.89×10^{-13}	5.97×10^{-13}
	B	4.36×10^{-12}	1.13×10^{-11}	5.23×10^{-12}	4.79×10^{-13}	8.67×10^{-13}

断面積ライブラリ DLC-23 について

断面積ライブラリ DLC-23 については、断面積ライブラリによる遮蔽評価結果への影響比較（平成 29 年 12 月 18 日 原子力規制庁 核燃料廃棄物研究部門 第 29 回技術情報検討会資料）により非保守的な計算結果が得られる可能性が指摘されている。そのため、今回の線量計算において、DLC-23 を使用することの妥当性について説明する。

1. 評価方法

スカイシャインガンマ線の評価と同様のモデルを設定し、ANISN (DLC-23) とモンテカルロ輸送計算コード(MCNP)で算出した線量率を比較した。線源を水（密度 $1,500\text{kg/m}^3$ ）とし、媒体を空気（密度 1.205kg/m^3 ）とコンクリート（密度 $2,100\text{kg/m}^3$ ）として、線量率分布を算出した。評価モデルを第 1 図に示す。

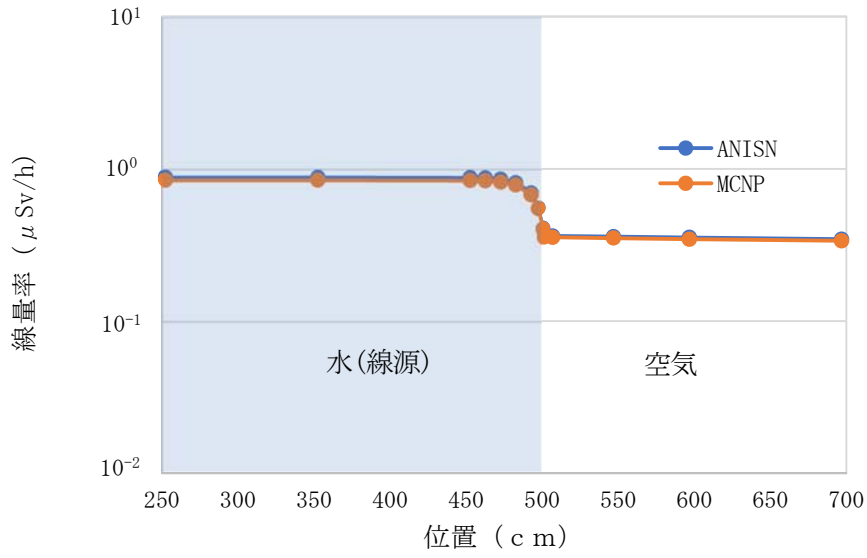


第 1 図 ANISN(DLC-23) と MCNP の比較計算モデル

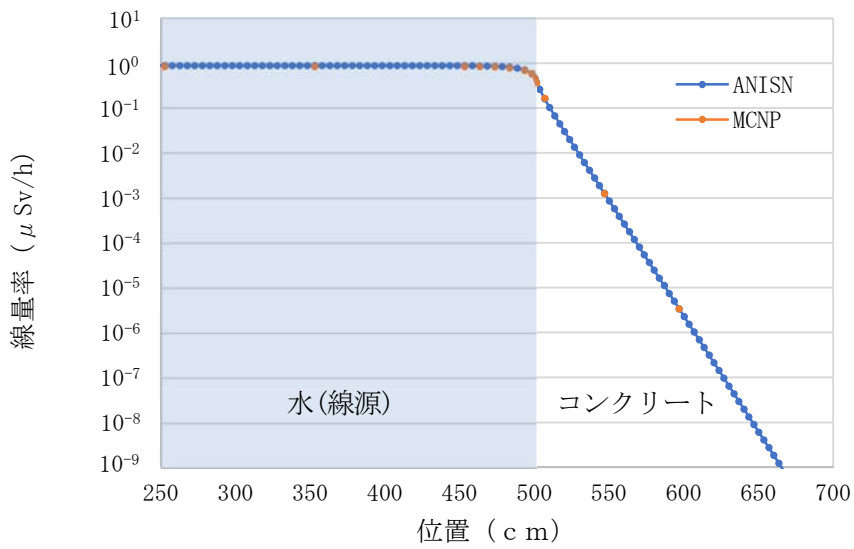
2. 評価結果

評価結果を第 2 図及び第 3 図に示す。

線量率分布について、ANISN (DLC-23) と MCNP を比較した結果、差異は、最大で空気の場合で約 5%、コンクリートの場合約 4%であり、DLC-23 を使用することは妥当であると評価する。



第2図 ANISN と MCNP の線量率分布 (線源+空気)



第3図 ANISN と MCNP の線量率分布 (線源+コンクリート)

線源面積の設定

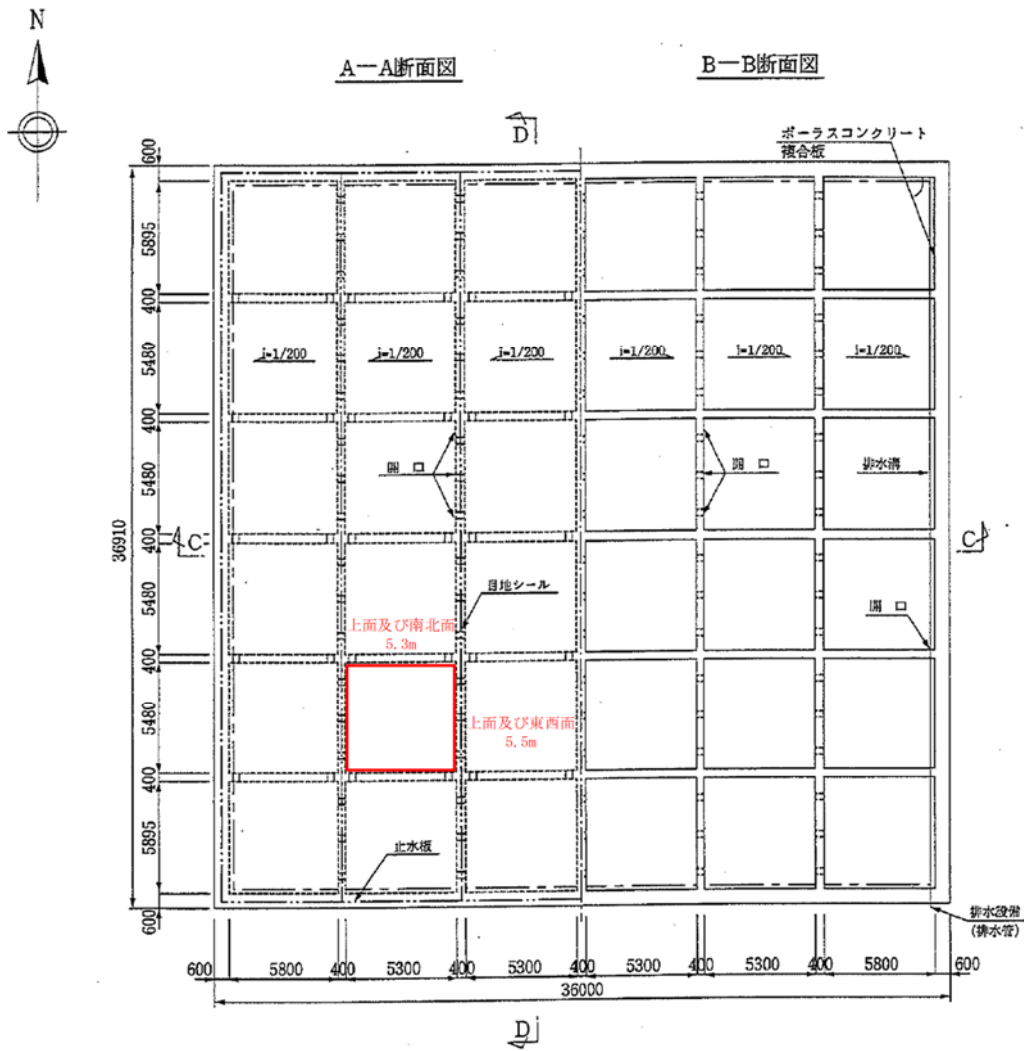
外部被ばく線量評価での線源面積は第1表のとおり設定する。

線源面積の設定に用いる2号埋設設備の構造図を第1図に示す。

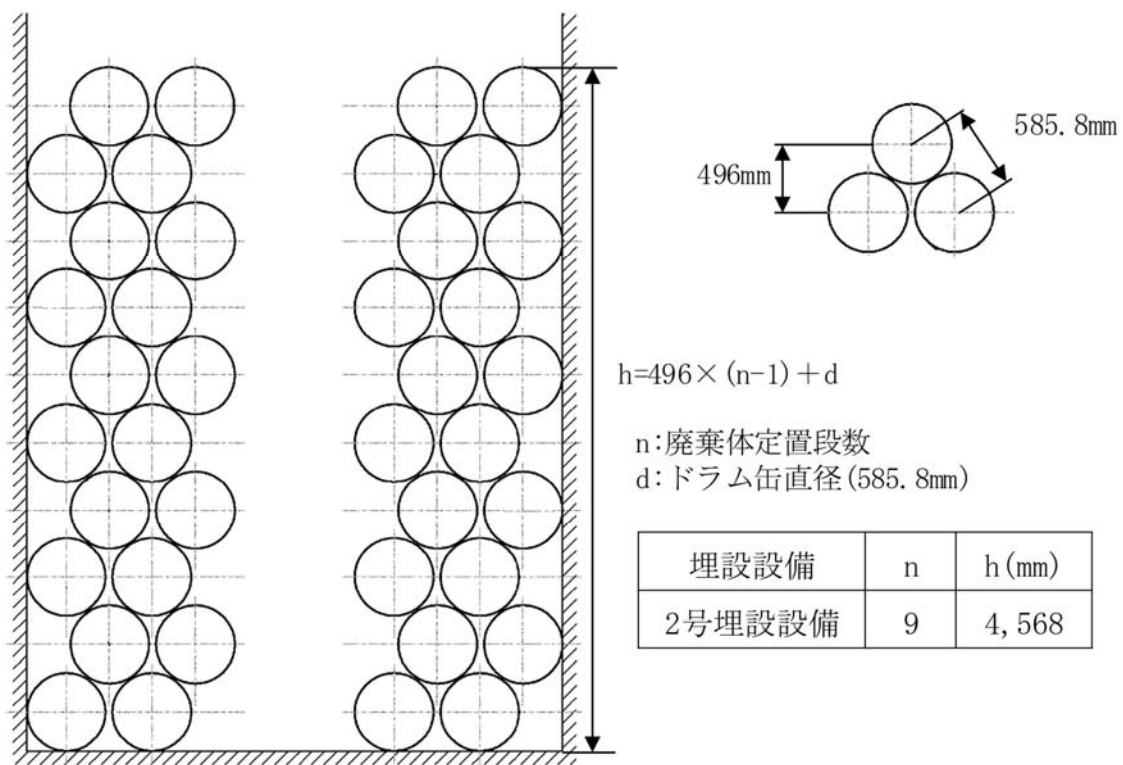
上面の面積は区画の開口面積から設定する。また、南北面及び東西面の面積は、区画開口部の寸法と第2図に示す定置時の廃棄体高さから設定する。

第1表 線源面積

上面	29.15m ² (=5.3m×5.5m)
南北面	24.38m ² (=5.3m×4.6m)
東西面	25.30m ² (=5.5m×4.6m)



第1図 2号埋設設備の構造図



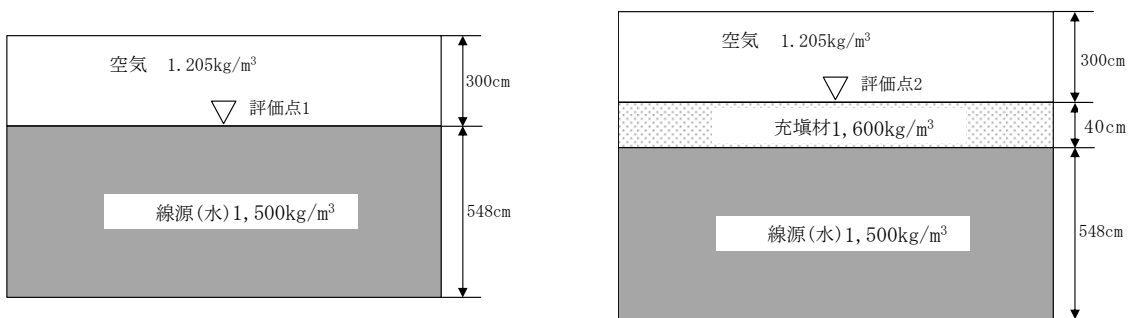
第2図 定置時の廃棄体高さ

線量への影響について

ここでは、被ばく線量評価における、セメント系充填材の影響、廃棄物埋設地の地形等の影響を評価する。

1. セメント系充填材の影響

埋設設備においてスカイシャインガンマ線を評価する際の ANISN による角度別ガンマ線束は廃棄体のみで計算している。そこで、ANISN により第 1 図に示す計算モデルにて、セメント系充填材の有無による線量率の比を算出すると、上面方向及び側面方向について、 1.90×10^{-2} となる。



$$(\text{セメント系充填材の影響}) = (\text{評価点 2 の線量率}) \div (\text{評価点 1 の線量率})$$

第 1 図 セメント系充填材の影響の計算モデル

2. 廃棄物埋設地の地形等の影響

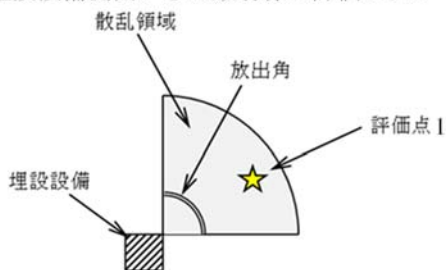
側面から放出されるスカイシャインガンマ線による線量は、周囲の地形等により放出角が制限されるため、その影響を考慮する。

具体的には、第 2 図に示すように、側面から放出する放射線の放出角を水平 0° から上方 90° まで考慮するモデルと、放出角が制限された状態を考慮するモデルでの線量率の比を算出する。

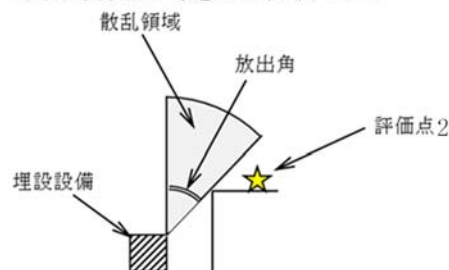
放出角の制限において、側面からの放出は、第 3 図に示すように、廃棄物埋設地は北から南方向に傾斜があること及び埋設設備の周囲は方位別に状況が異なることから、方位別に評価する。

地形等の影響の算出結果を第 1 表に示す。

・埋設設備側面からの放射線の評価モデル

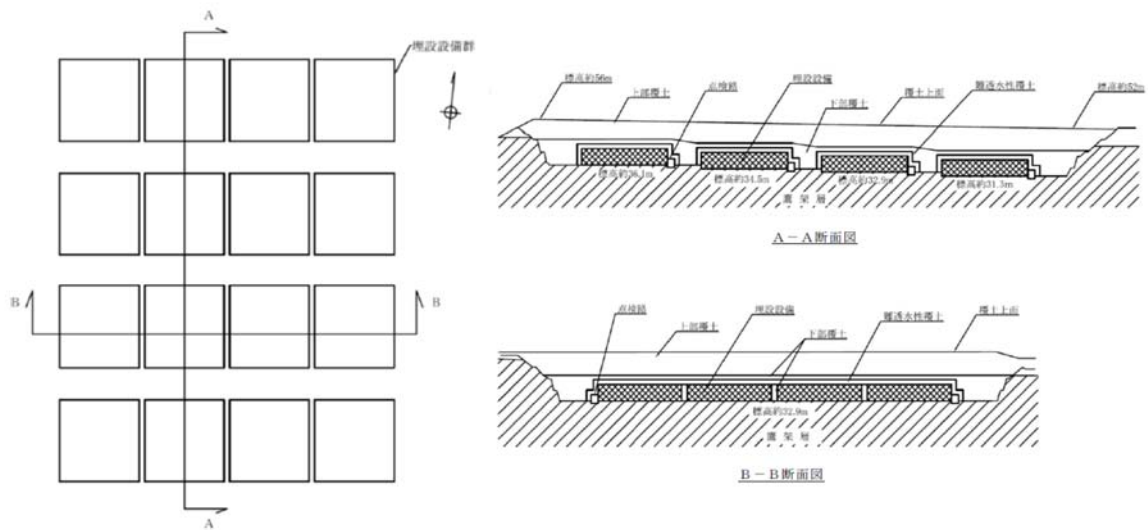


・放出角制限を考慮した評価モデル



$$\text{埋設地の地形等の影響} = \text{評価点 2 の線量率} \div \text{評価点 1 の線量率}$$

第 2 図 廃棄物埋設地の地形等の影響の計算モデル



第3図 廃棄物埋設地の傾斜（2号廃棄物埋設地）

第1表 廃棄物埋設地の地形等の影響

埋設設備群 (北側から第1群)		北側	東側	南側	西側
第1群	A	0.685	0.556	1.000	0.979
	B	0.685	0.556	1.000	0.556
第2群	A	0.685	0.556	1.000	0.556
	B	0.685	0.988	1.000	0.556
第3群	A	0.685	0.556	1.000	0.979
	B	0.685	0.556	1.000	0.556
第4群	A	0.685	0.556	1.000	0.556
	B	0.685	0.988	1.000	0.556
第5群	A	0.685	0.556	1.000	0.979
	B	0.685	0.556	1.000	0.556
第6群	A	0.685	0.556	1.000	0.556
	B	0.685	0.988	1.000	0.556
第7群	A	0.685	0.556	0.893	0.979
	B	0.685	0.556	0.893	0.556
第8群	A	0.685	0.556	0.893	0.556
	B	0.685	0.988	0.893	0.556

線量評価結果

埋設設備は、安全機能が1基ごとに独立していることから、埋設設備1基ごとに評価を行う。また、廃棄物埋設地には埋設設備を40基設置することから、廃棄物埋設地全体についても評価する。

廃棄物埋設地全体での線量を評価する場合には、評価時点を全ての埋設設備の覆い設置が完了した時点とする。ここで、1号埋設設備の埋設実績及び埋設予定数量より、第1表に示すように、群ごとに、廃棄体定置完了時点から評価時点までの期間に応じて、廃棄体に含まれる放射性物質の減衰として、評価対象核種であるCo-60（半減期約5年）の減衰を考慮する。

線量評価結果を第2表に示す。

第1表 廃棄体定置完了から評価時点までの期間及び放射性物質の減衰

	廃棄体定置完了から 評価時点までの期間 (年)	放射性物質の減衰
第1群	20	3半減期分
第2群	17	3半減期分
第3群	13	2半減期分
第4群	11	2半減期分
第5群	8	1半減期分
第6群	<5	考慮しない
第7群	<5	考慮しない
第8群	<5	考慮しない

第2表 線量評価結果(1/2)

埋設設備		埋設設備ごとの線量 (μ Sv)	放射性物質の減衰係数 (-)	廃棄物埋設地全体の線量 (μ Sv)
第1群	A	3.3×10^{-1}	1.3×10^{-1}	4.1×10^{-2}
	B	4.8×10^{-1}		6.0×10^{-2}
第2群	A	6.9×10^{-1}	1.3×10^{-1}	8.7×10^{-2}
	B	1.1×10^0		1.3×10^{-1}
第3群	A	2.5×10^{-1}	2.5×10^{-1}	6.2×10^{-2}
	B	3.4×10^{-1}		8.5×10^{-2}
第4群	A	4.7×10^{-1}	2.5×10^{-1}	1.2×10^{-1}
	B	6.7×10^{-1}		1.7×10^{-1}
第5群	A	1.8×10^{-1}	5.0×10^{-1}	8.9×10^{-2}
	B	2.4×10^{-1}		1.2×10^{-1}

第2表 線量評価結果 (2/2)

埋設設備		埋設設備ごとの線量 (μSv)	放射性物質の減衰係数 (-)	廃棄物埋設地全体の線量 (μSv)
第6群	A	3.1×10^{-1}	考慮しない	3.1×10^{-1}
	B	4.3×10^{-1}		4.3×10^{-1}
第7群	A	5.1×10^0	考慮しない	5.1×10^0
	B	6.6×10^0		6.6×10^0
第8群	A	8.3×10^0	考慮しない	8.3×10^0
	B	1.1×10^1		1.1×10^1
			合計	約 33

計算コードの概要について

1. 被ばく評価に使用する計算コード

コード名	概要
QAD-CGGP2R (Ver. 1.04)	<p>米国ロスアラモス国立研究所で開発されたガンマ線の物質透過を計算するための点減衰核積分法計算機コード「QAD」をベースとし、旧日本原子力研究所が ICRP1990 年勧告の国内関連法令・規則への取入れに合わせて、実効線量率等を計算できるように改良した最新バージョンである。</p> <p>線源及び遮蔽体を直方体、円筒、球などの三次元形状で模擬した計算体系でガンマ線の実効線量率及び空気カーマ率等を計算することができる。</p> <p>ベンチマーク実験による検証*1が実施されており、普通コンクリートを透過する線量率の保守的な評価が実施できる妥当な計算コードであることを確認している。</p> <p>*1「JAERI-M 86-060 再処理施設の放射線遮蔽安全ガイド資料」、日本原子力研究所(1986)</p>
ANISN (ANISN-ORNL)	<p>米国オークリッジ国立研究所で開発された一次元ボルツマン輸送方程式を離散角度(Sn)法に基づいて数値計算により解くコードである。</p> <p>線源及び遮蔽体を無限平板、無限円柱及び球の一次元形状で模擬した計算体系でガンマ線及び中性子の放射線束を計算することができる。</p> <p>別計算コード「DOT(二次元Sn法)」による検証*2が実施されており、固体廃棄物保管庫天井から漏れいするガンマ線束の計算結果が両者よく一致していることを確認している。</p> <p>*2「原子炉施設からのスカイシャイン線量評価手引」、財団法人原子力安全研究協会(昭和54年3月)</p>
G33-GP2R (Ver. 1.0)	<p>米国ロスアラモス国立研究所で開発されたガンマ線多群散乱計算プログラム「G33」をベースとし、旧日本原子力研究所が ICRP1990 年勧告の国内関連法令・規則への取入れに合わせて、実効線量率等を計算できるように改良したバージョンである。</p> <p>点線源からの1回散乱ガンマ線による実効線量率及び空気カーマ率等を計算することができる。スカイシャイン野外実験による検証*3が実施されており、線源の上部に遮蔽がない計算形状でスカイシャイン線量の計算値と実測値がよく一致するが、天井遮蔽があるケースでは、計算値は過小評価となる。この原因は、G33コードが天井透過中の散乱成分を考慮していないためであり、これを考慮するため、天井遮蔽までをANISNで計算することを推奨している。今回の評価においては、この手法を採用している。</p> <p>*3「ガンマ線遮蔽設計ハンドブック」、社団法人日本原子力学会(1988年1月)</p>

2. 結果の検証等に使用する計算コード

コード名	概要
MCNP5 (Ver1.6)	<p>米国ロスアラモス国立研究所で開発されたボルツマン輸送方程式をモンテカルロ法で解く中性子、ガンマ線及び中性子とガンマ線の結合系を対象とする汎用の連続エネルギーモンテカルロ輸送計算コードである。</p> <p>幾何形状は、主に面で区切られたセルによって構成される。セルは、平面及び二次局面を示す陰関数の値の正負で空間を区切ることにより定義され、設定の自由度が大きく、通常の遮蔽計算に使用される形状程度であれば、そのままモデル化が可能なこと、粒子の輸送計算に使用される断面積はポイントワイズ断面積データを使用するため、群構造に起因する誤差が発生しない等の特徴がある。</p> <p>米国では、使用済燃料貯蔵施設の審査指針である NUREG-1567 において、遮蔽解析ツールとして記載されている。</p> <p>我が国においても使用済燃料貯蔵施設において許認可実績も有している。</p> <p>計算に使用する断面積ライブラリはユーザーがコードに付属しているライブラリから任意に選択が可能であり、今回の検証に使用したライブラリは、コード付属の ENDF/B-VI ベースの最新ライブラリである。</p>