

一般的環境条件でのコンクリートピット施設における 硝酸塩埋設処分量に関する予備的評価

Preliminary Estimation of the Limitation of the Amount of Nitrate
in Concrete Pit Facilities

原 弘典 天澤 弘也 坂井 章浩 仲田 久和
坂本 義昭

Hironori HARA, Hiroya AMAZAWA, Akihiro SAKAI, Hisakazu NAKATA
and Yoshiaki SAKAMOTO

埋設事業推進センター

Low-level Radioactive Waste Disposal Project Center

June 2012

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2012

一般的環境条件でのコンクリートピット施設における硝酸塩埋設処分量に関する予備的評価

日本原子力研究開発機構 埋設事業推進センター

原 弘典^{*}、天澤 弘也、坂井 章浩、仲田 久和、坂本 義昭

(2012年3月15日受理)

(独)日本原子力研究開発機構が計画している研究施設等廃棄物の浅地中埋設処分施設では、再処理施設から発生する低放射性濃縮廃液固化体を埋設処分対象の一部としている。この廃棄体には、高濃度の硝酸塩が含まれることが想定されているため、これらの硝酸塩含有廃棄体をコンクリートピット施設で埋設処分した場合、廃棄体中にある易溶性の硝酸塩が地下水中に溶け出し、環境中へ流出することが懸念されている。

本報告書は、我が国の一般的な自然環境条件下にコンクリートピット施設を設置した場合に対し、地下水または近接する河川・湖沼等の環境中に流出する硝酸性窒素濃度を地下水移流拡散解析により試算したものである。また、環境条件の影響として、表層土壌の透水係数等が流出する硝酸性窒素濃度に及ぼす影響について検討を行った。

これらの検討結果から、環境基本法に定められる環境基準値に則った埋設処分を実施するため、硝酸塩含有廃棄体を1万本と仮定した時のコンクリートピット施設に埋設処分可能な硝酸イオン量を求めた。

Preliminary Estimation of the Limitation of the Amount of Nitrate in Concrete Pit Facilities

Hironori HARA[✽], Hiroya AMAZAWA, Akihiro SAKAI, Hisakazu NAKATA
and Yoshiaki SAKAMOTO

Low-level Radioactive Waste Disposal Project Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 15 ,2012)

Low level radioactive wastes including high concentrated nitrate will be generated from tokai reprocessing plant of JAEA. These wastes will be disposed of in concrete pit facilities which are planned by Low-level Radioactive Waste Disposal Project Center, JAEA. From the viewpoint of environmental impact of easily soluble nitrate ion in groundwater, the safety assessment for the concrete pit type disposal facilities in which the wastes including high concentrated nitrate will be disposed of should be studied.

In this study, the nitrate ion concentration in groundwater, lakes and streams near the concrete pit type disposal facilities under general environment conditions in Japan were simulated by analysis of advective-diffusion. In addition, the impact of surface layers permeability ,etc on the nitrate ion concentration in environment was studied.

By these results, the limitation of amount of nitrate ion in the waste packages was estimated by the environmental standards determined in The Basic Environment Law , assuming that 10,000 waste packages including high concentrated nitrate will be disposed in the concrete pit type disposal facilities.

Keywords: Disposal Facility, Nitrate Ion, Analysis of Advective-Diffusion

✽Collaborating Engineer

目 次

1. はじめに.....	1
2. 検討方法.....	2
3. 検討条件.....	3
3.1. コンクリートピット施設の条件	3
3.2. 環境基準.....	3
3.3. 廃棄体条件	4
3.4. 検討ケース	4
3.5. 環境中硝酸性窒素濃度	5
4. 検討結果.....	8
4.1. 河川・湖沼の硝酸性窒素濃度.....	8
4.2. 地下水中の硝酸性窒素濃度	8
4.3. 環境条件の影響.....	9
4.4. 硝酸イオンの埋設処分可能量.....	12
5. まとめ	13
参考文献.....	14

Contents

1. Introduction 1

2. Outline of Simulation Procedure..... 2

3. Simulation Conditions 3

 3.1. Concrete Pits 3

 3.2. Environmental Standards 3

 3.3. Wastes Package..... 4

 3.4. Calculation Cases 4

 3.5. Calculation of Nitrate Nitrogen Concentrations in General Environment 5

4. Results..... 8

 4.1. Nitrate-Nitrogen Concentrations in Lakes,Rivers and Streams..... 8

 4.2. Nitrate-Nitrogen Concentrations in the Groundwater..... 8

 4.3. Environment Impact..... 9

 4.4. Disposal Volume of Nitrate Ion 12

5. Conclusion..... 13

References 14

表 目 次

表 1	計算条件.....	15
表 2	検討ケース.....	16
表 3	河川・湖沼などへの硝酸性窒素の最大フラックス($\text{g/m}^2\cdot\text{y}$).....	17
表 4	河川・湖沼などの硝酸性窒素の最大濃度(mg/l).....	18
表 5	地下水中の硝酸性窒素の最大フラックス($\text{g/m}^2\cdot\text{y}$).....	19
表 6	地下水中の硝酸性窒素の最大濃度(mg/l).....	20
表 7	硝酸性窒素の最大濃度(mg/l).....	21
表 8	埋設可能な硝酸イオン(NO_3^-)の総量(t).....	22
表 9	廃棄体一本あたりの硝酸イオン(NO_3^-)埋設可能量 (kg/本).....	23

図 目 次

図 1	環境中への移行の概念図.....	24
図 2	コンクリートピット施設の配置図.....	25
図 3	計算モデル体系図.....	25
図 4	河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case1-1)	26
図 5	河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case1-2)	26
図 6	河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case1-3)	27
図 7	河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case1-4)	27
図 8	河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case2-1)	28
図 9	河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case2-2)	28
図 10	河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case2-3)	29
図 11	河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case2-4)	29
図 12	河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case3-1)	30
図 13	河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case3-2)	30
図 14	河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case3-3)	31
図 15	河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case3-4)	31
図 16	河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case4-1)	32
図 17	河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case4-2)	32
図 18	河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case4-3)	33
図 19	河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case4-4)	33
図 20	地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case1-1)	34
図 21	地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case1-2)	34
図 22	地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case1-3)	35

図 23	地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case1-4)	35
図 24	地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case2-1)	36
図 25	地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case2-2)	36
図 26	地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case2-3)	37
図 27	地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case2-4)	37
図 28	地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case3-1)	38
図 29	地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case3-2)	38
図 30	地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case3-3)	39
図 31	地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case3-4)	39
図 32	地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case4-1)	40
図 33	地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case4-2)	40
図 34	地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case4-3)	41
図 35	地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case4-4)	41
図 36	土壌の透水係数と硝酸性窒素濃度 (河川・湖沼などー希釈水量: 1E+8m ³ /y)	42
図 37	土壌の透水係数と硝酸性窒素濃度 (河川・湖沼などー希釈水量: 3E+7m ³ /y)	42
図 38	土壌の透水係数と硝酸性窒素濃度 (河川・湖沼などー希釈水量: 2E+5m ³ /y)	43
図 39	土壌の透水係数と硝酸性窒素濃度 (河川・湖沼などー希釈水量: 2E+4m ³ /y)	43
図 40	土壌の透水係数と硝酸性窒素濃度 (地下水ー希釈水量は透水係数に応じた値)	44
図 41	コンクリートピット施設の透水係数の違いによる環境中の硝酸性窒素濃度の影響度	44
図 42	配置条件の違いによる環境中硝酸性窒素濃度の影響度	45
図 43	濃度分布図 (分散配置) Case1-2 0~100 年後	46
図 44	濃度分布図 (分散配置) Case1-2 200~500 年後	47
図 45	濃度分布図 (集中配置) Case3-2 0~100 年後	48
図 46	濃度分布図 (集中配置) Case3-2 200~500 年後	49

1. はじめに

(独) 日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）埋設事業推進センターでは、改正原子力機構法（平成 20 年法律第 51 号）に基づき、原子力機構及び国内の研究施設などから発生する低レベルの放射性廃棄物（研究施設等廃棄物）の浅地中埋設処分を計画している。浅地中埋設処分の対象となる研究施設等廃棄物の中には、原子力機構の東海研究開発センター 核燃料サイクル工学研究所の低放射性廃棄物処理技術開発施設から発生する低放射性濃縮廃液を固化した高濃度の硝酸塩を含有する廃棄体が含まれており、この廃棄体は、コンクリートピット施設に埋設処分することが想定されている。この場合、将来的にはコンクリートピット施設の劣化によって、廃棄体中の硝酸塩から硝酸イオンがコンクリートピット施設の間隙中に溶け出し、地下水の流れを通じて、コンクリートピット施設の周辺環境中の地下水の硝酸性窒素濃度を増加させることが懸念されている。

原子力安全委員会で決定された「第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方」¹⁾では、「非放射性的有害物質そのものの環境影響については、本審査指針で評価を要求するものではないが、必要に応じて国あるいはその他の関連する機関が定める規定に準じて別途考慮されなければならない。」とされており、研究施設等廃棄物の処分に当たっても化学物質による環境汚染に配慮した対応が求められている。一方、環境基本法では、人の健康及び生活環境の保全のうえで維持されることが望ましい基準として、大気、水、土壌などの環境中に含まれる化学物質の含有量について環境基準を定めることとされており、環境省告示²⁾において、公共用水域と地下水の水質汚濁の基準として硝酸性窒素濃度や亜硝酸性窒素濃度について規定している。このような放射性廃棄物に含まれる有害化学物質に関する検討は、すでに実施されているものもあるが³⁾、研究施設等廃棄物処分施設の施設条件や立地条件などを踏まえた上での埋設量に関する検討はまだ行われていない状況にある。

以上のような背景を踏まえ、本検討では、研究施設等廃棄物浅地中埋設処分施設の概念設計に供する前提条件の調査及び設定（以下、概念検討書）⁴⁾に基づき地下水移流拡散解析を実施し、研究施設等廃棄物の埋設処分施設から地下水中に流出する硝酸イオンの環境への影響評価として、環境中へ流出した場合の硝酸性窒素濃度を求めた。また、地下水移流拡散解析の結果から環境中へ移行後の硝酸性窒素濃度と環境基準値を比較することにより、種々の条件下で廃棄体中に含有することができる硝酸イオン量を推定した。

2. 検討方法

コンクリートピット施設に埋設された廃棄体中の硝酸塩は容易に水に溶けやすい性質であることから、施設に地下水が流入した場合、硝酸イオンとなって地下水中に溶け出すこととなる。地下水に溶け出した硝酸イオンは、地下水の流動によってコンクリートピット施設から流出し、最終的には河川、湖沼などの公共水域や井戸などに流出することになる(図1)。河川、湖沼などの公共水域や地下水では、環境基本法に基づき水質汚濁に関する環境基準として硝酸性窒素濃度が定められており、コンクリートピット施設に埋設処分を行う硝酸塩の量は、河川などへの流出した場合を考慮し、環境中の硝酸性窒素濃度が環境基準を超えないように埋設量を制限した処分を行うことが必要となる。

また、硝酸イオンの濃度は、それぞれの環境中へ流出する過程において、周囲の地下水との混合希釈や土壌への吸着、移流過程における分散などによって薄まることとなる。したがって、環境基準に配慮した上で合理的な硝酸塩の埋設量を設定するためには、流出過程における希釈や拡散の程度を定量的に評価することが重要となる。本検討は、このような流出過程における硝酸イオンの希釈拡散を定量的に評価するために、有限要素法による地下水移流拡散解析を行った。

地下水移流拡散解析には、原子力機構で開発された地下水流動評価コード Mig2DF⁵⁾を使用した。本コードは、飽和・不飽和浸透流解析によって流動場を解析し、その結果から地下水移流拡散解析により、地下水中の化学物質の濃度の解析を行うことができるものである。本コードを使用し、地下水移流拡散解析によりコンクリートピット施設から流出した硝酸イオンの濃度解析を行い、環境基準と対比するために河川・湖沼などや地下水中の硝酸性窒素濃度に換算した。最後に、求めた硝酸性窒素濃度と硝酸性窒素の環境基準と対比することで硝酸塩含有廃棄体に埋設可能な硝酸イオン量を求めた。

3. 検討条件

廃棄体中に含まれる硝酸イオンの地下水移流拡散解析を行うにあたって、自然環境条件、施設条件などの設定を行った。概念検討書に基づきこれらの条件を一般的な環境条件下でコンクリートピット施設を設置する設定とした^{4),6)}。ただし、硝酸イオンの実効拡散係数などの概念検討書で設定されていないパラメータなどもあることからこれらの値については余裕深度処分施設における硝酸イオンの移流拡散解析を実施している TRU 廃棄物処分技術検討書（以下、TRU 検討書）⁷⁾や国内でのコンクリート施設の先行事例である六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センター 事業許可申請書（以下、日本原燃六ヶ所申請書）⁸⁾などを参考にパラメータを設定した。実効拡散係数などの計算条件を表 1 に示した。

3.1. コンクリートピット施設の条件

図 2 に示すようにコンクリートピット施設は 200 l ドラム缶約 22 万本を埋設対象とし、1 基の大きさは約 36m(幅)×40m(長さ)×7m(高さ)である。これらを格子状に 2×9 に配置して計 18 基を設置することが想定されている⁶⁾。地下水の流動方向は、保守側の条件とするため河川などへの総フラックスが最大となるようにコンクリートピット施設の配置に対して短軸方向に流れているものとした。

また、放射線防護の観点からコンクリートピット施設から事業所境界まで離隔を取ることとなっていることから河川・湖沼などの評価点までの距離を 100 m とし、コンクリートピット施設は透水性の低い岩盤中に設置され、コンクリートピット施設の周囲（側部及び上部）は、厚さ 2 m のベントナイト混合土で覆われるものとした。さらに、ベントナイト混合土の周囲を原地盤と同程度の透水性を持つ土で覆土するものとした⁶⁾。

以上の条件を踏まえ、計算モデルを図 3 に示すように断面 2 次元モデルで作成した。

3.2. 環境基準

環境基本法では、人の健康を保護し、生活環境を保全するうえで維持されることが望ましい基準として環境基準を定めることとしている。環境基準として、昭和 46 年 12 月 28 日 環境庁告示第 59 号「水質汚濁に係る環境基準について」及び平成 9 年 3 月 13 日 環境庁告示第 10 号「地下水の水質汚濁に係る環境基準について」において、公共用水域と地下水の水質汚濁に係る環境基準を定めている。これらの環境基準のひとつに、硝酸性窒素濃度の環境基準がある。本検討では、上記の告示に基づき硝酸性窒素の環境基準を 10(mg/l)とした。

3.3. 廃棄体条件

環境基準を満足するような廃棄体中の硝酸イオン(NO_3)量を推定するために、コンクリートピット施設の間隙中に含まれる平均硝酸イオン濃度を $10,000(\text{mg/l})$ と仮定し、地下水移流拡散解析を実施した。平均硝酸イオン濃度を $10,000(\text{mg/l})$ とした場合の計算モデル上の初期の硝酸イオン含有量は以下の通りである。

$$\begin{aligned} \text{コンクリートピット施設の間隙中に含まれる平均硝酸イオン濃度} &: 10,000(\text{mg/l}) \\ \text{コンクリートピット施設の容量} &: 36\text{m} \times 40\text{m} \times 7\text{m} \times 18 \text{基} = 181,440(\text{m}^3) \\ \text{コンクリートピット施設の間隙率} &: 0.35 \\ \text{コンクリートピット施設中の硝酸イオン含有量} &: 10,000 \times 181,440 \times 0.35 \\ &= 6.35\text{E}+8(\text{mg}) \\ &= 635(\text{t}) \end{aligned}$$

環境基準を満足する硝酸イオンの埋設量は、以下の式に示すように上記の値に環境基準値と解析によって得られた環境中の硝酸性窒素濃度の比をかけることによって求めた。

埋設可能な硝酸イオン量：

$$W_{\text{NO}_3} = 635(\text{t}) \times (\text{環境基準値}) / (\text{硝酸性窒素最大濃度}) \dots\dots\dots(\text{式 1})$$

3.4. 検討ケース

本検討では、我が国の一般的な環境条件を設定して硝酸イオンの移行評価を行ったが、実際の地下水移行のパラメータとなる透水係数や動水勾配は地質条件や地形条件などに基つき一定の分布をしている。このため、これらの環境条件の組み合わせを設定して各パラメータの影響について検討を行った。表 2 に示すように、検討ケースは、コンクリートピット施設と土壌の透水係数をパラメータとし、硝酸塩含有廃棄体の定置方法を分散配置と集中配置の 2 パターン設定した。各パラメータの設定理由を以下に示した。

3.4.1 コンクリートピット施設の透水係数の設定

コンクリートピット施設の透水係数については、鉄筋などの腐食に伴うひび割れが発生し透水係数が増大することが懸念されている⁹⁾。しかしながら、実際のコンクリートピット施設におけるひび割れの発生の程度やそれに伴う透水係数の変化量を見積もることは、地中内応力や地中の化学的条件などによって異なると考えられるため、立地場所が決定されていない現時点では難しい。また、技術的にひび割れの進行速度を想定することは容易ではなく、埋設後、どの時点でひび割れによる透水係数の変化が生じどのような過程を経

て終局状態に至るかを推測することは困難である。

したがって、本検討では、コンクリートピット施設が終局的な状態に至る過程は考慮せず、上記の先行検討事例を参考に砂程度まで劣化した状態を初期状態とした透水係数を設定した(1E-5(m/s))。その上で、コンクリートピット施設の透水係数を設定し、最も硝酸性窒素濃度が高くなった時点で評価することとした。また、コンクリートピット施設の透水係数の感度を確認するため、コンクリートピット施設の透水係数に 1E-7(m/s)を設定した計算も実施し比較を行った。

3.4.2 地盤の透水係数の設定

コンクリートピット施設は、放射性物質の地下水移行抑制の観点から低透水性の地層に埋設することを計画しており、1E-7(m/s)の岩盤層に埋設する設計としている⁶⁾。しかし、地盤の透水係数は、土の粒度分布や性状によって異なり、特に表層の地盤は地形条件などによって大きく異なることになると考えられる。本検討では、コンクリートピット施設を1E-7(m/s)の岩盤中に設置することとし、土壌層の透水係数を 1E-3(m/s)～1E-6(m/s)の範囲で設定することとした。

3.4.3 硝酸塩含有廃棄体の配置

硝酸塩含有廃棄体は、配置条件によって施設内の硝酸イオンの濃度分布が異なることになり、環境中に流出した場合の濃度も異なることになる。したがって、配置条件の違いによる影響を検討するため、特定区画に集中的に硝酸塩含有廃棄体を定置した場合と分散させて定置した場合とを比較することとした。分散配置は、コンクリートピット施設全体に硝酸塩含有廃棄体が均等に定置されることとし、集中配置は、コンクリートピット施設全体の4分の1の区画(下流側ピットの中央部)に硝酸塩含有廃棄体が集中的に定置されることとした。なお、奥行き方向は一様の条件とした。

3.5. 環境中硝酸性窒素濃度

環境中に流出した硝酸イオン濃度は、流出先の希釈水量によって大きく異なることになる。河川水などによる希釈を考慮し、環境中の硝酸性窒素濃度を以下の式より求めた。

$$\text{環境中硝酸イオン濃度 } C_r = \frac{C_s \times Q_s + C_g \times Q_g}{Q_r} \dots\dots\dots(\text{式 2})$$

$$\text{環境中硝酸性窒素濃度 } C_{r'} = C_r \times 0.2259^{*1} \dots\dots\dots(\text{式 3})$$

*1 告示 2)に記載されている硝酸イオン濃度から硝酸性窒素濃度への換算係数。

ただし、

C_s : 土壌層中の硝酸イオン濃度(mg/l)

Q_s : 土壌層から浸出水量(m^3/s)

$$Q_s = V_s \times A_s$$

V_s : 土壌層の流速(m/s)

$$V_s = k_s \times \frac{I}{100}$$

k_s : 土壌の透水係数(m/s)

A_s : 土壌層からの浸出面の評価上の面積(m^2)

$$A_s = 10m \times 40m \times 9 \text{ 基} = 3,600m^2$$

C_g : 岩盤層中の硝酸イオン濃度(mg/l)

Q_g : 岩盤層から浸出水量(m^3/s)

$$Q_g = V_g \times A_g$$

V_g : 岩盤層の流速(m/s)

$$V_g = k_g \times \frac{I}{100}$$

k_g : 岩盤の透水係数(m/s)

A_g : 岩盤層からの浸出面の評価上の面積(m^2)

$$A_g = 20m \times 40m \times 9 \text{ 基} = 7,200m^2$$

I : 動水勾配

$$I = 3\%$$

Q_r : 希釈水量

河川 : $1E+8$ (m^3/y)⁷⁾

湖沼・沢水 : 日本原然六ヶ所申請書⁸⁾より、保守側に丸め、 $3E+7(m^3/y)$ 、 $2E+5(m^3/y)$ 、 $2E+4(m^3/y)$ とする。

地下水 : コンクリートピット施設から流出する地下水の流量は、 $Q = Q_s + Q_g$ とする。

これに、主な原子炉施設におけるクリアランスレベルについて¹⁰⁾より混合割合を 0.33^{*2} として、希釈水量とする。

したがって、地下水中の希釈水量は、 $(Q_s + Q_g) / 0.33$ より、土壌層の透水係数に応じて、

※2 コンクリートピットから流出した地下水がすべて一箇所に集まってくるとは限らないが、計算上はすべて一箇所に集水されるとした数値を示した。井戸による地下水利用を考えた場合、揚水によって周辺の地下水も集めることになることから、希釈水量を求めるには井戸とコンクリートピットの平面的な配置や揚水による影響範囲を考慮する必要がある。つまり、コンクリートピットから直接流出した地下水以外にどの程度周囲の地下水の集水ことになるかを見積る必要があるが、本検討では、立地場所が未確定であるため、この影響範囲を含めた希釈水量をクリアランスレベルの考え方を元に設定することとした。

$k_s = 1\text{E-}4(\text{m/s})$ の時、 $1.0\text{E}+06 (\text{m}^3/\text{y})$

$k_s = 1\text{E-}6(\text{m/s})$ の時、 $1.2\text{E}+04 (\text{m}^3/\text{y})$

とする。

また、式1を環境への硝酸イオンのフラックスに書き直すと次の通り

$$\text{環境中硝酸イオン濃度 } C_r = \frac{F_g \times A_g + F_s \times A_s}{Q_r} \dots\dots\dots(\text{式 4})$$

ただし、

$$\text{土壌からのフラックス } F_s = C_s \times V_s$$

$$\text{岩盤からのフラックス } F_g = C_g \times V_g$$

A_g 、 A_s は浸出面に対して一定であるので、硝酸性窒素濃度は、フラックスに比例し、希釈水量に反比例することになる。

4. 検討結果

4.1. 河川・湖沼の硝酸性窒素濃度

河川・湖沼へ流出した場合の硝酸性窒素濃度を求めた。河川・湖沼水の評価にあたって、コンクリートピット施設から事業所境界まで少なくとも 100m 程度の離隔を取ることから、河川・湖沼までの移行距離を 100m と設定した。

図 4～図 19 にケース毎の硝酸性窒素フラックスの経時変化図を示した。また、表 3 に河川・湖沼への硝酸性窒素の最大フラックスを表 4 に河川・湖沼での硝酸性窒素の最大濃度をそれぞれまとめた。表 3、表 4 の数値は、それぞれ経時変化図（図 4～図 19）で硝酸性窒素濃度が最大値を示した時の値であり、硝酸性窒素濃度は、硝酸性窒素フラックスと 3.5. で示した希釈水量から求めた。なお、地下水流量よりも河川流量が小さくなることは、実際には生じないと考えられることから結果を記載していない。

経時変化図から硝酸性窒素フラックスは、土壌層の最大値が岩盤層の最大値より数オーダー高くなっており土壌層の硝酸性窒素フラックスが支配的になっている。また、パラメータによって大きく変動幅があるが、硝酸性窒素フラックスは流出開始から数十年～数百年経過後に最大値を示した。

4.2. 地下水中の硝酸性窒素濃度

コンクリートピット施設から岩盤へ浸出した硝酸性窒素の一部は、側部覆土を通じて土壌層に移行することになる。硝酸性窒素のフラックスは側部覆土の下流端部付近で最大となるため、地下水中の硝酸性窒素濃度の評価点を側部覆土の下流端部付近のコンクリートピット施設から下流側 20m 地点とした。

図 20～図 35 に、ケース毎に地下水中の硝酸性窒素フラックスの経時変化図を示した。また、地下水中の硝酸性窒素の最大フラックスを表 5 に、地下水中の硝酸性窒素の最大濃度を表 6 にそれぞれ示した。表中の硝酸性窒素のフラックスおよび濃度は、4.1.と同様に各経時変化図で最大となった時の数値を示した。

硝酸性窒素フラックスは、4.1.の河川・湖沼などの場合と同様に土壌層が支配的であるが、河川・湖沼などの場合と比較して、岩盤中のフラックスが相対的に高くなっている。また、地下水の場合は、硝酸イオンの移行距離が河川・湖沼などの場合より短いため、土壌層の硝酸性窒素フラックスと岩盤層の硝酸性窒素のフラックスのピーク時期が近くなり、硝酸性窒素濃度が高くなる傾向にある。

4.3. 環境条件の影響

地下水移流拡散解析の結果から、土壌の透水係数などの各パラメータの影響について考察した。

4.3.1 土壌の透水性の影響

土壌の透水係数が環境中の硝酸性窒素濃度に与える影響は、河川・湖沼などの硝酸性窒素濃度を考える場合と地下水中の硝酸性窒素濃度を考える場合とでその与える影響が異なることになる。

河川・湖沼などの硝酸性窒素濃度を考える場合、硝酸性窒素フラックスが少ないほうが硝酸性窒素濃度は低くなり、河川・湖沼などの環境への影響が少なくなる。したがって、河川・湖沼などの硝酸性窒素濃度は、土壌の透水係数が小さければ小さいほど少なくなる。一方、地下水中の硝酸性窒素濃度を考える場合はこれとは逆になる。地下水中の硝酸性窒素濃度は、土壌の透水係数が低いと周辺の地下水の流量が少なくなることから希釈水量が少なくなり、より高くなる傾向にある。

今回の検討でも、図 36～図 39 に示すように土壌層の透水係数をパラメータとした時、河川・湖沼などの硝酸性窒素濃度は、土壌の透水係数が大きくなるに連れて増加傾向を示しており、土壌の透水係数が $1E-4(m/s)$ の時にピークを示している。一方、地下水中の硝酸性窒素濃度は、図 40 に示すように土壌の透水係数が小さくなるほど硝酸性窒素濃度が大きくなる傾向を示している。

また、地下水中の硝酸性窒素濃度は、土壌の透水係数が $1E-5(m/s)$ 以上ではほぼ土壌の透水係数と直線の関係にあり、この傾きは、両対数軸上でほぼ-1 となっている。これは、透水係数と反比例の関係にあることを示しており、3.5.の(式 4)に示したように硝酸性窒素濃度は希釈水量と反比例の関係にあることを考慮すると、土壌の透水係数が $1E-5(m/s)$ 以上では地下水中の硝酸性窒素濃度はほぼ地下水中の希釈水量により決まっていることがわかる。

なお、土壌の透水係数が $1E-6(m/s)$ の場合では、透水係数と硝酸性窒素濃度の直線から外れてくることから、土壌の透水係数が $1E-6(m/s)$ まで小さくなると、希釈水量が減るために相対的に硝酸性窒素フラックスの影響が大きくなることを示しており、土壌の透水係数は、その値に応じてパラメータの影響を評価する必要があることが分かる。

また、通常地下水中の硝酸性窒素濃度の方が河川・湖沼の硝酸性窒素濃度より高くなることを考慮すると土壌の透水係数が硝酸性窒素濃度に与える影響としては、希釈水量としての影響が顕著であり、地下水の流量を適切に把握し希釈水量を評価することが硝酸性窒素濃度を推定するにあたって重要であると考えられる。このため、具体的な埋設

処分場での評価に際しては、地盤の透水係数の確認と地下水の流量把握を行い、それに
応じて環境中への硝酸性窒素フラックスの増加と環境中の硝酸性窒素濃度について評
価することが重要であると考えられる。

4.3.2 コンクリート施設の透水性の影響

コンクリートピット施設の透水係数が大きくなれば、コンクリートピット施設中の流
量が増えることになり、コンクリートピット施設から流出する硝酸性窒素のフラックス
も増加する。つまり、コンクリートピット施設の透水係数が増加すると環境中の硝酸性
窒素濃度が高くなると考えられる。一方、4.3.1 で述べたように環境中の硝酸性窒素濃度
は土壌層の透水係数によっても異なる。このためコンクリートピット施設の透水係数の
影響を評価するため、コンクリートピット施設の透水係数が $1E-7(m/s)$ の場合と
 $1E-5(m/s)$ の場合の硝酸性窒素濃度の比を影響度とし図 41 に影響度と土壌層の透水係数
との関係を示した。

図 41 から土壌の透水係数が大きくなるとコンクリートピット施設の透水係数の影響
度は大きくなる傾向にあることがわかる。これは上に書いたようにコンクリートピッ
ト施設の透水係数が大きくなったことによって、コンクリートピット施設からの流出量
が増加し硝酸性窒素濃度の増加に寄与したものであり、コンクリートピット施設の透水
係数の影響度は土壌の透水係数が $1E-4(m/s)$ と $1E-3(m/s)$ の時ではほぼ同じ値になり最
大で約 2 倍程度である。

ダルシー則からコンクリートピット施設内の流量はコンクリートピット施設の透水
係数に比例することになるから単純な比例計算ではコンクリートピット施設の透水係
数が 2 桁異なれば流量も 2 桁程度増加することになる。したがって、硝酸性窒素のフラ
ックスもそれに応じて増加することになるはずであるが、実際には表 3、表 5 に見られ
るようにコンクリートピット施設の透水係数の影響度は 2 倍程度に収まる。これは、コ
ンクリートピット施設の周囲が低透水性のベントナイト混合土と岩盤で覆われている
ことによって、コンクリートピット施設からの流出量が少なくなっていることによるも
のである。ベントナイト混合土と岩盤層は、地下水の移流による放射性物質の環境中へ
の移行を抑制するためのものであり、硝酸イオンの移流に対しても効果的に機能してい
る。また、コンクリートピット施設の透水係数の増加の影響はこれらによってかなり少
なくなることがわかる。

また、表 4、表 6 から土壌の透水係数が大きく希釈水量が多くなると環境中の硝酸性
窒素濃度は十分に小さくなることを考慮すると、コンクリートピット施設の透水係数が
大きくなることによる硝酸イオンの移流量の増加は環境中の硝酸性窒素濃度にあまり

影響しないと考えられる。

4.3.3 配置条件の違いによる影響

硝酸塩含有廃棄体の配置条件の違いによる影響を確認するため、集中配置条件での環境中の硝酸性窒素濃度と分散配置条件での環境中の硝酸性窒素濃度の比をとり配置条件の影響度とし図 42 に示した。また、図 43～図 46 に配置条件毎の濃度分布図を示した。初期条件として与えた配置条件の違いによるコンクリートピット施設中の硝酸イオン濃度の比は 4 であるが、図 42 の環境中の硝酸性窒素濃度の比は 1 に近づいている。これから初期の硝酸イオンの濃度の偏りは環境中に流出した時点では小さくなることがわかる。

この理由のひとつとして、コンクリートピット施設からの流出に数十年かかるため、その間にコンクリートピット施設中の初期の濃度勾配によりコンクリートピット施設全体に拡散し、結果的に配置条件の違いによる影響が小さくなることがある。拡散は濃度勾配によって決まるため濃度に偏りがあるほど拡散は速くなる。このため移流による流出が十分に遅ければコンクリートピット施設内での拡散によって、コンクリートピット施設の外へ流出するまでに硝酸イオンはある程度コンクリートピット施設内に拡散し薄まることになる。次に、ベントナイト混合土中は、低透水性であるため岩盤中や土壌中に比べて拡散による影響が大きい。したがって、2 つのコンクリートピット施設に廃棄体を分散させて配置させたとしても硝酸イオンの拡散領域が広がるため、結果的に濃度勾配の違いによる拡散速度の増加と打ち消し合うことになり土壌層の硝酸性窒素フラックスにはあまり影響しなくなる。また、表 3、表 5 の解析結果を見ても配置条件の違いが土壌層の硝酸性窒素フラックスにあまり大きく影響していないことが確認できる。

以上のような理由から、移流による流出が十分に遅ければ、コンクリートピット施設の配置条件による初期の硝酸イオン濃度の偏りは、環境中に流出した時点である程度打ち消されることになる。ただし、図 42 に示すように土壌の透水係数が $1E-6(m/s)$ の時には地下水中の硝酸性窒素濃度の比は大きい。土壌の透水係数が $1E-6(m/s)$ の時に地下水中の硝酸性窒素濃度の比が他の条件に比べて大きくなるのは、岩盤中の硝酸性窒素フラックスが影響している。表 5 を見ると土壌中の硝酸性窒素フラックスは、配置条件の違いがほとんど影響していないが、岩盤中の硝酸性窒素フラックスは集中配置条件の方が 2 倍程度大きくなっており配置条件の違いが影響している。環境中の硝酸性窒素濃度は、岩盤中の硝酸性窒素フラックスより土壌の硝酸性窒素フラックスと希釈水量に影響される割合が大きいことから、配置条件の違いが環境中の硝酸性窒素の濃度にあまり影響

しない結果となっているが岩盤中の硝酸性窒素フラックスが増加することには注意が必要である。なお、土壌の透水係数が $1E-6(m/s)$ の時は地下水中の希釈水量も少ないこともあり硝酸性窒素濃度が高くなる傾向にあることから、配置条件が硝酸性窒素濃度へ与える影響を考慮し、廃棄体が極端に偏った配置にしないように計画的な廃棄体の定置を行うことが望まれる。

4.4. 硝酸イオンの埋設処分可能量

環境基準に定められる硝酸性窒素濃度を満足するような硝酸イオンの埋設可能量を示す。表 7 に硝酸性窒素最大濃度、表 8 に埋設可能な硝酸イオンの総量、表 9 に硝酸塩含有廃棄体を 1 万本とした場合の 1 本あたりの硝酸イオン含有量を条件毎に算出して取りまとめた。コンクリートピット施設から流出する硝酸性窒素の濃度は、環境条件や地下水の移行先、地下水の利用状況など実際のサイトの状況によって異なる。特に希釈水量による影響が大きい。表 8 には、地下水の浸出先と硝酸イオンの埋設量との関係を整理したが、ある程度の流量がある河川 ($1E+8 \text{ m}^3/y$) であれば、硝酸イオンの総量で 60 万 t から 300 万 t となるが、沢水の中流程度 ($2E+5 \text{ m}^3/y$) の流量とすれば約 5,000t、沢水の上流部程度 ($2E+4 \text{ m}^3/y$) とすれば 500t 程度となる。また、希釈水量が少ない条件としてコンクリートピット施設の近傍で地下水が利用される条件を想定した場合、硝酸塩含有廃棄体を分散配置するとしてもコンクリートピット施設に埋設可能な硝酸イオンの総量は約 210t となる。この時、硝酸を含む廃棄体が 1 万本あたりでは、埋設可能な 1 本当たりの硝酸イオン量は、21kg/本になる。

5. まとめ

本検討は、我が国の一般的な環境条件下において、コンクリートピット施設での硝酸塩含有廃棄体の埋設処分量を推定することを目的として実施したものである。

その結果、環境中の硝酸性窒素濃度は、透水係数が小さい岩盤中へコンクリートピット施設を設置する場合には、上部の表層土壌の透水係数に大きく影響されることを明らかにした。また、硝酸の埋設可能量は地下水の利用状況や環境条件に依存するが、特に河川や地下水による希釈水量による影響が大きいことがわかった。

なお、今回の検討はあくまでも一般的な環境条件での暫定的な検討結果であり、実際の処分施設では、地盤条件や地下水流量、地下水の流動方向などを調査し、サイト条件に応じた検討結果に基づき安全性を確認することが必要である。

参考文献

- 1) 原子力安全委員会 放射性廃棄物・廃止措置専門部会；“第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方”,(平成 22 年 8 月 5 日).
- 2) 環境庁告示第 59 号；“水質汚濁に係る環境基準について”,(昭和 46 年 12 月 28 日).
- 3) 黒木亮一郎他；“放射性廃棄物に含まれる有害物質等に関する検討”,JAEA-Research 2007-082 (2008).
- 4) 天澤弘也他；“研究施設等廃棄物浅地中埋設処分施設の概念設計に供する前提条件の調査及び設定”,JAEA-Technology 2010-043(2010).
- 5) H.Kimura;“The MIG2DF Computer Code User's Manual”, JAERI-M 92-115,(1992).
- 6) 原子力分野の研究開発に関する委員会 研究施設等廃棄物作業部会；“原子力分野の研究開発に関する委員会 研究施設等廃棄物作業部会（第 9 回）（資料 1） 「埋設処分業務の実施に関する計画」に基づく業務の実施状況について”,(平成 24 年 2 月 14 日).
- 7) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構；“TRU 廃棄物処分技術検討書 –第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ-”,JNC TY1400 2005-013(2005 年 9 月).
- 8) 日本原燃株式会社；“六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センター 廃棄物埋設事業変更許可申請書”,(平成 9 年 1 月).
- 9) 原子力安全基盤機構；“代表的な安全評価シナリオの解析例の再解析について”,(平成 20 年 9 月 24 日).
- 10) 原子力安全委員会；“主な原子炉施設におけるクリアランスレベルについて”,(平成 11 年 3 月 17 日).

表 1 計算条件

項目		数値	単位	設定根拠
地下水位		GL-4	m	概念検討書より設定
土壌層厚		14	m	
岩盤の透水係数		1.0E-7	m/s	
表層覆土の透水係数		土壌と同じ	m/s	
側部覆土の透水係数		1.0E-6	m/s	設計条件
実効拡散 係数	コンクリートピット 施設	8.0E-10	m ² /s	TRU 検討書の数値より設定。
	ベントナイト混合土	3.0E-10		
	岩盤	1.2E-9		
ベントナイト混合土の透水係数		1.0E-9	m/s	設定値は、日本原燃六ヶ所申請書より、ヨウ素の分配係数を設定。ヨウ素の分配係数とした理由は、TRU 検討書で硝酸塩プルームの評価にヨウ素の分配係数を利用しているため。
分配係数	コンクリートピット 施設	0	m ³ /kg	
	ベントナイト混合土	0		
	土壌	1.0E-4		
	岩盤	3.0E-4		
分散長	縦分散長	10	m	移行距離 100m より設定 (TRU 検討書より、縦分散長は移行距離の 1/10。横分散長は縦分散長の 1/10)
	横分散長	1.0	m	

表 2 検討ケース

	透水係数 (m/s)		定置方法
	土壌	コンクリートピット施設	
Case1-1	1.0E-03	1.0E-05	分散配置
Case1-2	1.0E-04		
Case1-3	1.0E-05		
Case1-4	1.0E-06		
Case2-1	1.0E-03	1.0E-07	
Case2-2	1.0E-04		
Case2-3	1.0E-05		
Case2-4	1.0E-06		
Case3-1	1.0E-03	1.0E-05	集中配置
Case3-2	1.0E-04		
Case3-3	1.0E-05		
Case3-4	1.0E-06		
Case4-1	1.0E-03	1.0E-07	
Case4-2	1.0E-04		
Case4-3	1.0E-05		
Case4-4	1.0E-06		

表 3 河川・湖沼などへの硝酸性窒素の最大フラックス(g/m²・y)

	透水係数(m/s)		定置条件	硝酸性窒素の最大フラックス (g/m ² ・y)	
	土壌	コンクリート ピット施設		土壌	岩盤
Case1-1	1.0E-03	1.0E-05	分散配置	218	3
Case1-2	1.0E-04			262	3
Case1-3	1.0E-05			194	3
Case1-4	1.0E-06			57	5
Case2-1	1.0E-03	1.0E-07		101	2
Case2-2	1.0E-04			122	2
Case2-3	1.0E-05			107	3
Case2-4	1.0E-06			44	4
Case3-1	1.0E-03	1.0E-05	集中配置	230	4
Case3-2	1.0E-04			276	4
Case3-3	1.0E-05			217	4
Case3-4	1.0E-06			63	6
Case4-1	1.0E-03	1.0E-07		103	4
Case4-2	1.0E-04			124	4
Case4-3	1.0E-05			111	4
Case4-4	1.0E-06			51	6

表 4 河川・湖沼などの硝酸性窒素の最大濃度(mg/l)

希釈水量 (m ³ /y)	河川・湖沼などの硝酸性窒素最大濃度(mg/l)			
	1.0E+08	3.0E+07	2.0E+05 ^{※1}	2.0E+04 ^{※1}
Case1-1	7.8E-03	2.6E-02	—	—
Case1-2	9.4E-03	3.1E-02	—	—
Case1-3	7.0E-03	2.3E-02	3.5E+00	—
Case1-4	2.2E-03	7.3E-03	1.1E+00	1.1E+01
Case2-1	3.6E-03	1.2E-02	—	—
Case2-2	4.4E-03	1.5E-02	—	—
Case2-3	3.9E-03	1.3E-02	1.9E+00	—
Case2-4	1.7E-03	5.8E-03	8.7E-01	8.7E+00
Case3-1	8.3E-03	2.8E-02	—	—
Case3-2	9.9E-03	3.3E-02	—	—
Case3-3	7.8E-03	2.6E-02	3.9E+00	—
Case3-4	2.4E-03	8.0E-03	1.2E+00	1.2E+01
Case4-1	3.7E-03	1.2E-02	—	—
Case4-2	4.5E-03	1.5E-02	—	—
Case4-3	4.0E-03	1.3E-02	2.0E+00	—
Case4-4	2.0E-03	6.7E-03	1.0E+00	1.0E+01

※1 河川流量が地下水の流量より小さい場合は結果を省略した。

表 5 地下水中の硝酸性窒素の最大フラックス(g/m²・y)

	透水係数(m/s)		定置条件	硝酸性窒素の最大フラックス (g/m ² ・y)	
	土壌	コンクリート ピット施設		土壌	岩盤
Case1-1	1.0E-03	1.0E-05	分散配置	211	13
Case1-2	1.0E-04			248	13
Case1-3	1.0E-05			199	14
Case1-4	1.0E-06			67	18
Case2-1	1.0E-03	1.0E-07		98	9
Case2-2	1.0E-04			115	9
Case2-3	1.0E-05			105	10
Case2-4	1.0E-06			49	13
Case3-1	1.0E-03	1.0E-05	集中配置	219	25
Case3-2	1.0E-04			249	25
Case3-3	1.0E-05			215	26
Case3-4	1.0E-06			88	32
Case4-1	1.0E-03	1.0E-07		97	19
Case4-2	1.0E-04			111	19
Case4-3	1.0E-05			102	20
Case4-4	1.0E-06			57	26

表 6 地下水中の硝酸性窒素の最大濃度(mg/l)

	透水係数(m/s)		希釈水量 (m ³ /y)	地下水中濃度 (mg/l)
	土壌	コンクリート ピット施設		
Case1-1	1.0E-03	1.0E-05	1.02E+07	7.6E-02
Case1-2	1.0E-04		1.02E+06	8.9E-01
Case1-3	1.0E-05		1.04E+05	7.4E+00
Case1-4	1.0E-06		1.23E+04	3.0E+01
Case2-1	1.0E-03	1.0E-07	1.02E+07	3.8E-02
Case2-2	1.0E-04		1.02E+06	4.4E-01
Case2-3	1.0E-05		1.04E+05	4.1E+00
Case2-4	1.0E-06		1.23E+04	2.2E+01
Case3-1	1.0E-03	1.0E-05	1.02E+07	8.1E-02
Case3-2	1.0E-04		1.02E+06	9.2E-01
Case3-3	1.0E-05		1.04E+05	8.3E+00
Case3-4	1.0E-06		1.23E+04	4.4E+01
Case4-1	1.0E-03	1.0E-07	1.02E+07	4.4E-02
Case4-2	1.0E-04		1.02E+06	4.8E-01
Case4-3	1.0E-05		1.04E+05	4.6E+00
Case4-4	1.0E-06		1.23E+04	3.2E+01

表 7 硝酸性窒素の最大濃度 (mg/l)

透水係数(m/s)		設置条件	評価地点												
			河川・湖沼など (希釈水量 m³/y)				地下水 (希釈水量 m³/y)								
			1.0E+08	3.0E+07	2.0E+05	2.0E+04	1.0E+06	1.0E+06	1.02E+06	1.04E+05	1.23E+04				
Case1-1	1.0E-03	定置条件	1.0E-05	7.8E-03	2.6E-02	-	-	7.6E-02	-	-	-	-	-	-	
Case1-2	1.0E-04			9.4E-03	3.1E-02	-	-	-	-	8.9E-01	-	-	-	-	-
Case1-3	1.0E-05			7.0E-03	2.3E-02	3.5E+00	-	-	-	-	-	7.4E+00	-	-	-
Case1-4	1.0E-06			2.2E-03	7.3E-03	1.1E+00	1.1E+01	-	-	-	-	-	-	3.0E+01	-
Case2-1	1.0E-03	分散配置	1.0E-07	3.6E-03	1.2E-02	-	-	3.8E-02	-	-	-	-	-	-	
Case2-2	1.0E-04			4.4E-03	1.5E-02	-	-	-	-	4.4E-01	-	-	-	-	
Case2-3	1.0E-05			3.9E-03	1.3E-02	1.9E+00	-	-	-	-	-	4.1E+00	-	-	
Case2-4	1.0E-06			1.7E-03	5.8E-03	8.7E-01	8.7E+00	-	-	-	-	-	-	2.2E+01	
Case3-1	1.0E-03	集中配置	1.0E-05	8.3E-03	2.8E-02	-	-	8.1E-02	-	-	-	-	-		
Case3-2	1.0E-04			9.9E-03	3.3E-02	-	-	-	-	9.2E-01	-	-	-	-	
Case3-3	1.0E-05			7.8E-03	2.6E-02	3.9E+00	-	-	-	-	-	8.3E+00	-	-	
Case3-4	1.0E-06			2.4E-03	8.0E-03	1.2E+00	1.2E+01	-	-	-	-	-	-	4.4E+01	
Case4-1	1.0E-03		1.0E-07	3.7E-03	1.2E-02	-	-	4.4E-02	-	-	-	-	-		
Case4-2	1.0E-04			4.5E-03	1.5E-02	-	-	-	-	4.8E-01	-	-	-	-	
Case4-3	1.0E-05			4.0E-03	1.3E-02	2.0E+00	-	-	-	-	4.6E+00	-	-	-	
Case4-4	1.0E-06			2.0E-03	6.7E-03	1.0E+00	1.0E+01	-	-	-	-	-	-	3.2E+01	

※1 河川流量が地下水の流量より小さい場合は結果を省略した。

表 8 埋設可能な硝酸イオン(NO₃⁻)の総量(t)

	透水係数(m/s)		定置条件	評価地点													
	土壌	コンクリート ピット施設		河川・湖沼など(希釈水量 m ³ /y)						地下水(希釈水量 m ³ /y)							
				1.0E+08	3.0E+07	2.0E+05	2.0E+05	2.0E+05	2.0E+04	1.0E+06	1.0E+06	1.02E+06	1.04E+05	1.23E+04			
Case1-1	1.0E-03		分散配置	8.1E+05	2.4E+05	-	-	8.4E+04	-	-	-	-	-	-	-	-	
Case1-2	1.0E-04	1.0E-05		6.7E+05	2.0E+05	-	-	-	-	7.1E+03	-	-	-	-	-	-	-
Case1-3	1.0E-05			9.1E+05	2.7E+05	1.8E+03	-	-	-	-	-	-	8.6E+02	-	-	-	-
Case1-4	1.0E-06			2.9E+06	8.7E+05	5.8E+03	5.8E+02	-	-	-	-	-	-	-	-	2.1E+02	-
Case2-1	1.0E-03			1.7E+06	5.2E+05	-	-	-	1.7E+05	-	-	-	-	-	-	-	-
Case2-2	1.0E-04	1.0E-07		1.4E+06	4.3E+05	-	-	-	-	1.4E+04	-	-	-	-	-	-	-
Case2-3	1.0E-05			1.6E+06	4.9E+05	3.3E+03	-	-	-	-	-	1.5E+03	-	-	-	-	-
Case2-4	1.0E-06			3.6E+06	1.1E+06	7.3E+03	7.3E+02	-	-	-	-	-	-	-	-	2.9E+02	-
Case3-1	1.0E-03			7.7E+05	2.3E+05	-	-	-	7.8E+04	-	-	-	-	-	-	-	-
Case3-2	1.0E-04	1.0E-05		6.4E+05	1.9E+05	-	-	-	-	6.9E+03	-	-	-	-	-	-	-
Case3-3	1.0E-05			8.1E+05	2.4E+05	1.6E+03	-	-	-	-	-	-	7.6E+02	-	-	-	-
Case3-4	1.0E-06			2.7E+06	8.0E+05	5.3E+03	5.3E+02	-	-	-	-	-	-	-	-	1.4E+02	-
Case4-1	1.0E-03			1.7E+06	5.1E+05	-	-	-	1.5E+05	-	-	-	-	-	-	-	-
Case4-2	1.0E-04	1.0E-07		1.4E+06	4.3E+05	-	-	-	-	1.3E+04	-	-	-	-	-	-	-
Case4-3	1.0E-05			1.6E+06	4.8E+05	3.2E+03	-	-	-	-	-	1.4E+03	-	-	-	-	-
Case4-4	1.0E-06			3.2E+06	9.5E+05	6.3E+03	6.3E+02	-	-	-	-	-	-	-	-	2.0E+02	-

※1 河川流量が地下水の流量より小さい場合は結果を省略した。

表 9 廃棄体一本あたりの硝酸イオン(NO₃)埋設可能性 (kg/本)

	透水係数(m/s)		定置条件	評価地点												
	土壌	コンクリート ピット施設		河川・湖沼など(希釈水量 m ³ /y)					地下水(希釈水量 m ³ /y)							
				1.0E+08	3.0E+07	2.0E+05	2.0E+04	1.0E+06	1.0E+06	1.0E+06	1.0E+06	1.0E+06	1.0E+06			
Case1-1	1.0E-03		分散配置	80,954	24,286	-	-	8,386	-	-	-	-	-	-	-	
Case1-2	1.0E-04	1.0E-05		67,275	20,182	-	-	-	713	-	-	-	-	-	-	-
Case1-3	1.0E-05			90,642	27,193	181	-	-	-	-	-	86	-	-	-	-
Case1-4	1.0E-06			289,234	86,770	578	58	-	-	-	-	-	-	-	21	-
Case2-1	1.0E-03				173,989	52,197	-	-	16,720	-	-	-	-	-	-	-
Case2-2	1.0E-04	1.0E-07		144,585	43,376	-	-	-	-	1,442	-	-	-	-	-	-
Case2-3	1.0E-05			164,062	49,219	328	-	-	-	-	-	155	-	-	-	-
Case2-4	1.0E-06			363,465	109,040	727	73	-	-	-	-	-	-	-	29	-
Case3-1	1.0E-03				76,567	22,970	-	-	7,792	-	-	-	-	-	-	-
Case3-2	1.0E-04	1.0E-05		63,953	19,186	-	-	-	-	691	-	-	-	-	-	-
Case3-3	1.0E-05			81,264	24,379	163	-	-	-	-	-	76	-	-	-	-
Case3-4	1.0E-06			265,603	79,681	531	53	-	-	-	-	-	-	-	14	-
Case4-1	1.0E-03				170,505	51,152	-	-	14,590	-	-	-	-	-	-	-
Case4-2	1.0E-04	1.0E-07		141,706	42,512	-	-	-	-	1,317	-	-	-	-	-	-
Case4-3	1.0E-05			158,677	47,603	317	-	-	-	-	-	138	-	-	-	-
Case4-4	1.0E-06			316,703	95,011	633	63	-	-	-	-	-	-	-	20	-

※1 硝酸を含有する廃棄体数量を1万本とした。 ※2 河川流量が地下水の流量より小さい場合は結果を省略した。

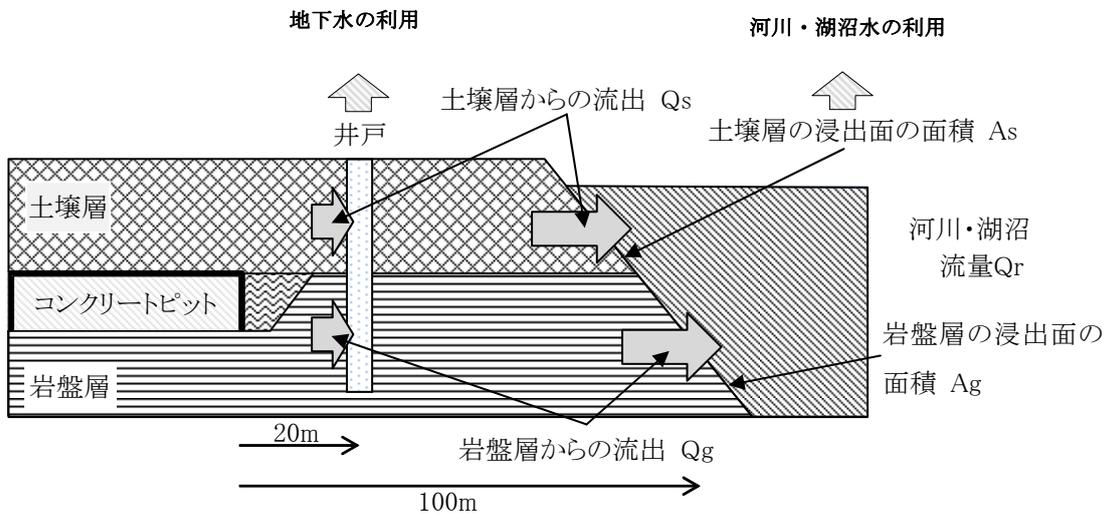


図1 環境中への移行の概念図

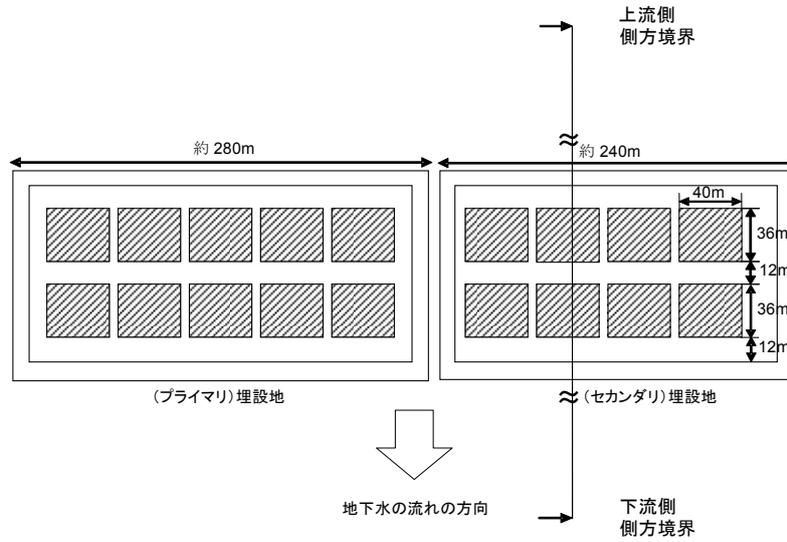


図 2 コンクリートピット施設の配置図

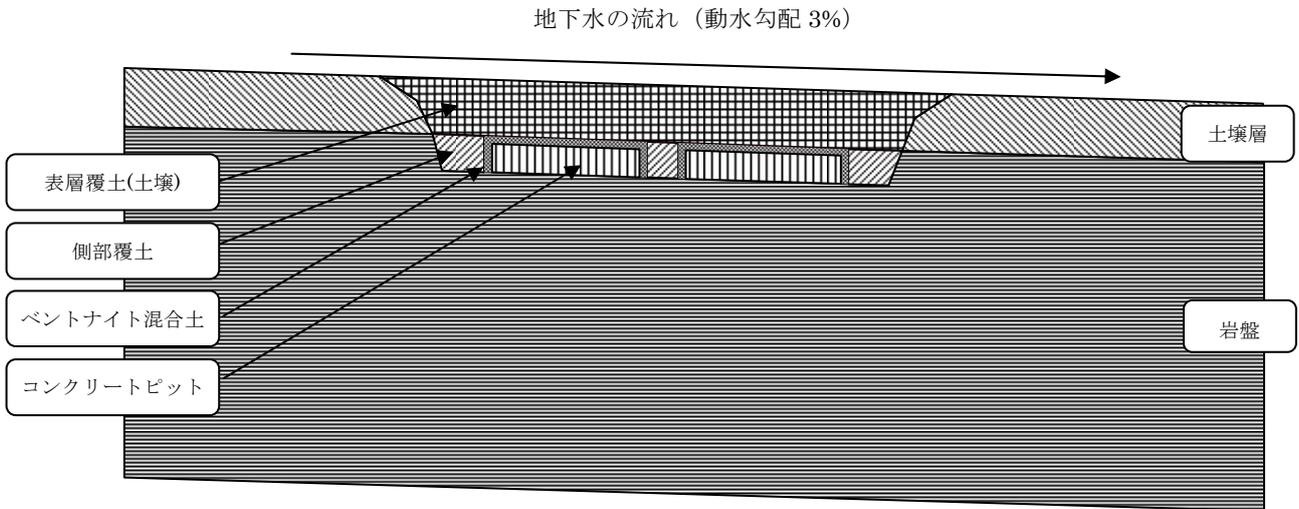
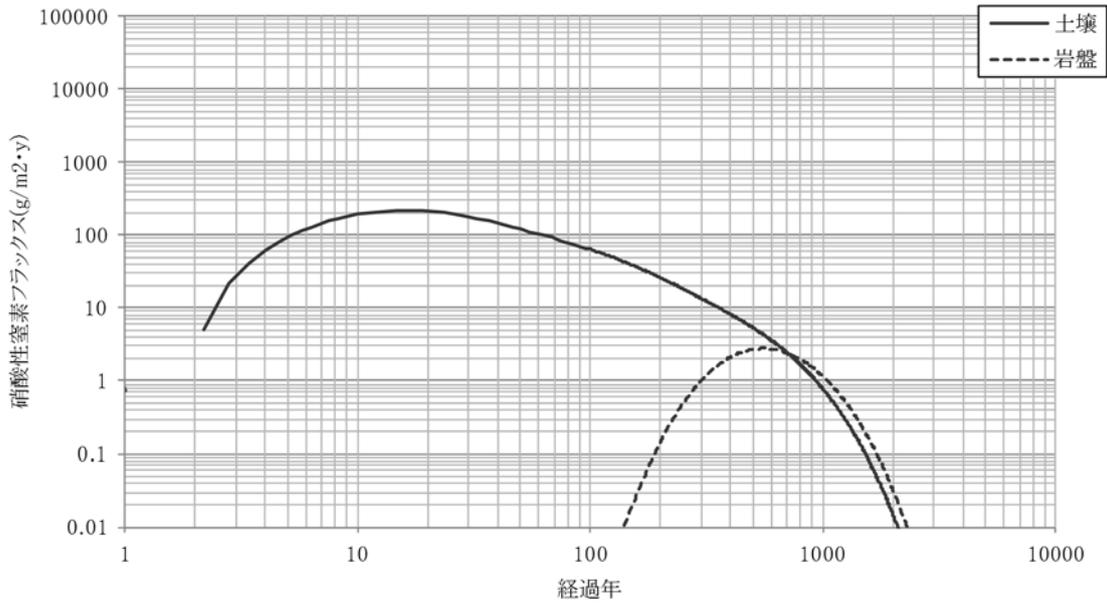
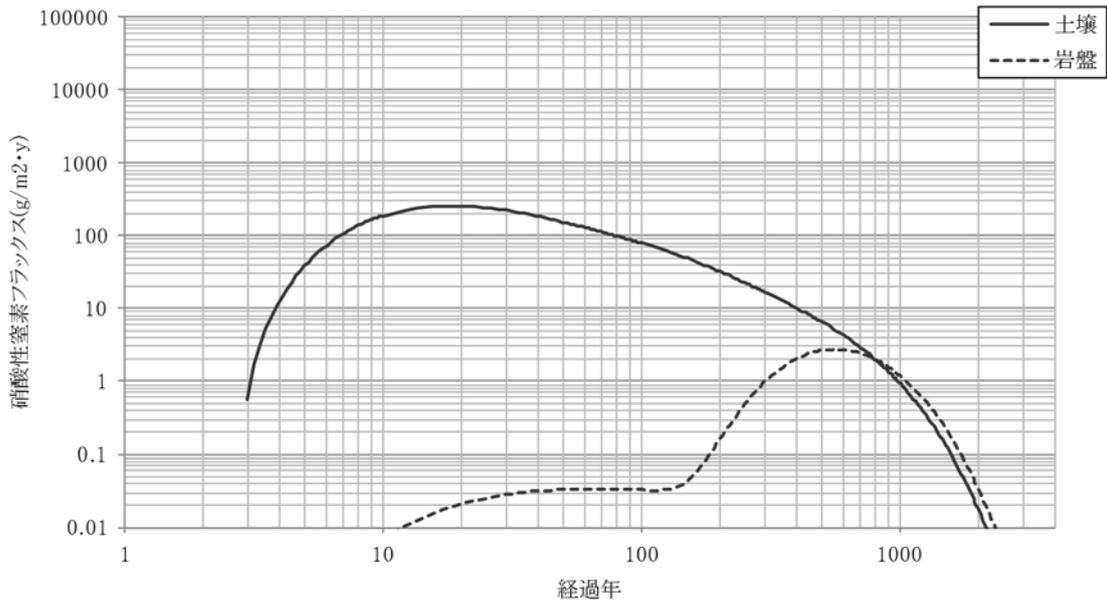


図 3 計算モデル体系図



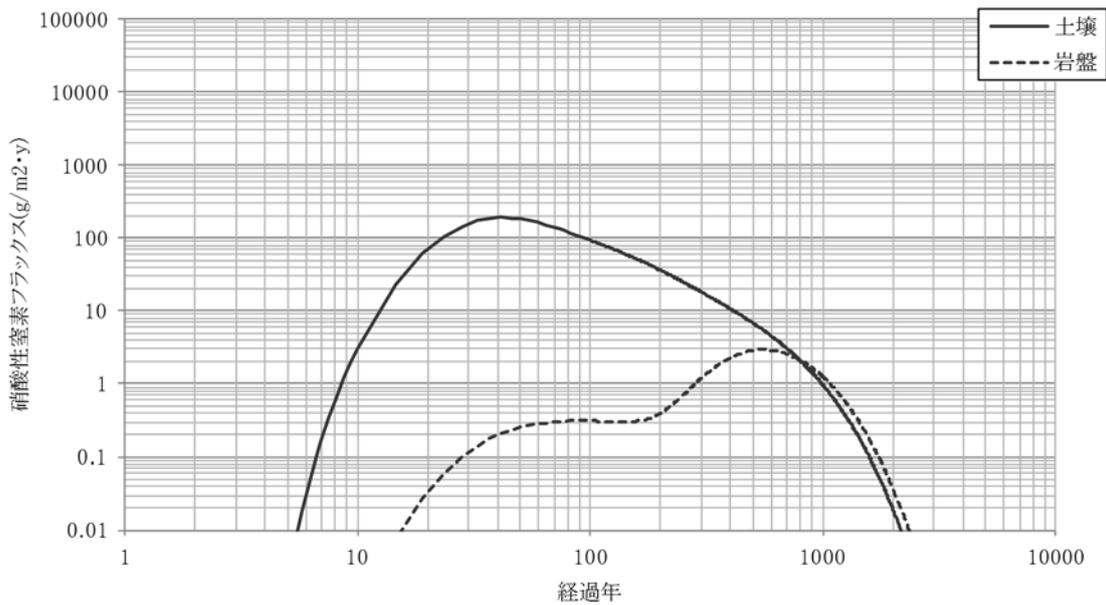
土壌: $1.0E-03$ (m/s) コンクリートピット施設: $1.0E-05$ (m/s) 分散配置

図4 河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case1-1)



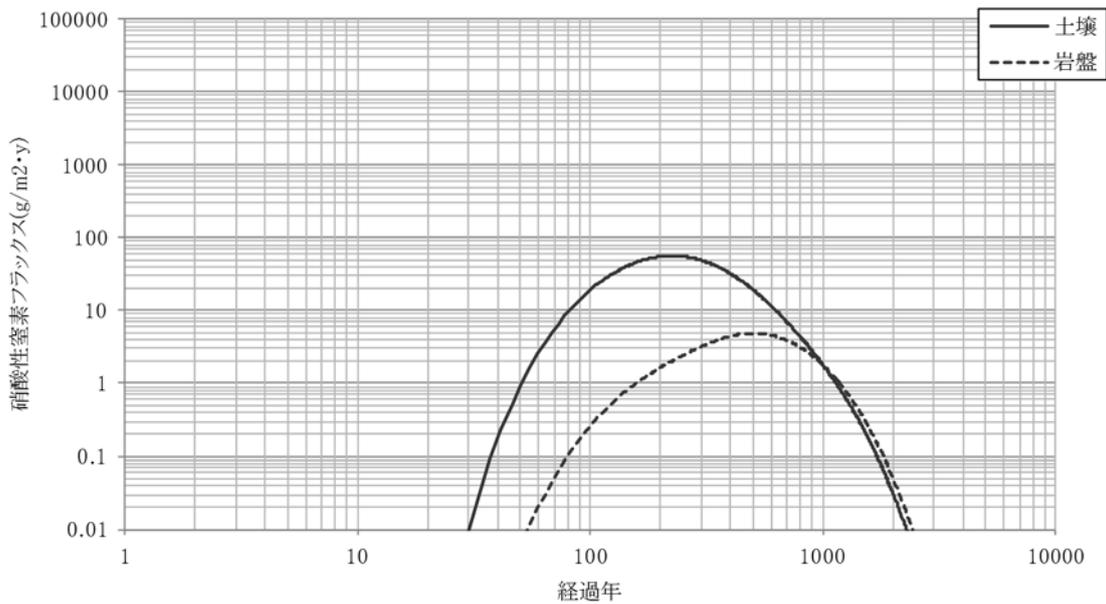
土壌: $1.0E-04$ (m/s) コンクリートピット施設: $1.0E-05$ (m/s) 分散配置

図5 河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case1-2)



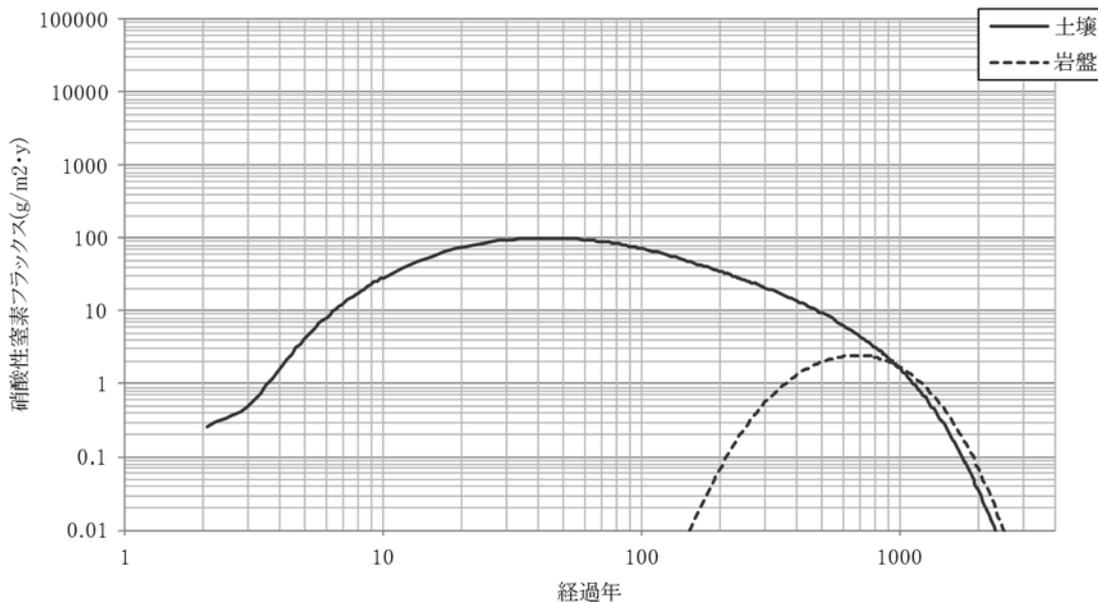
土壌:1.0E-05(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-05(m/s) 分散配置

図 6 河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case1-3)



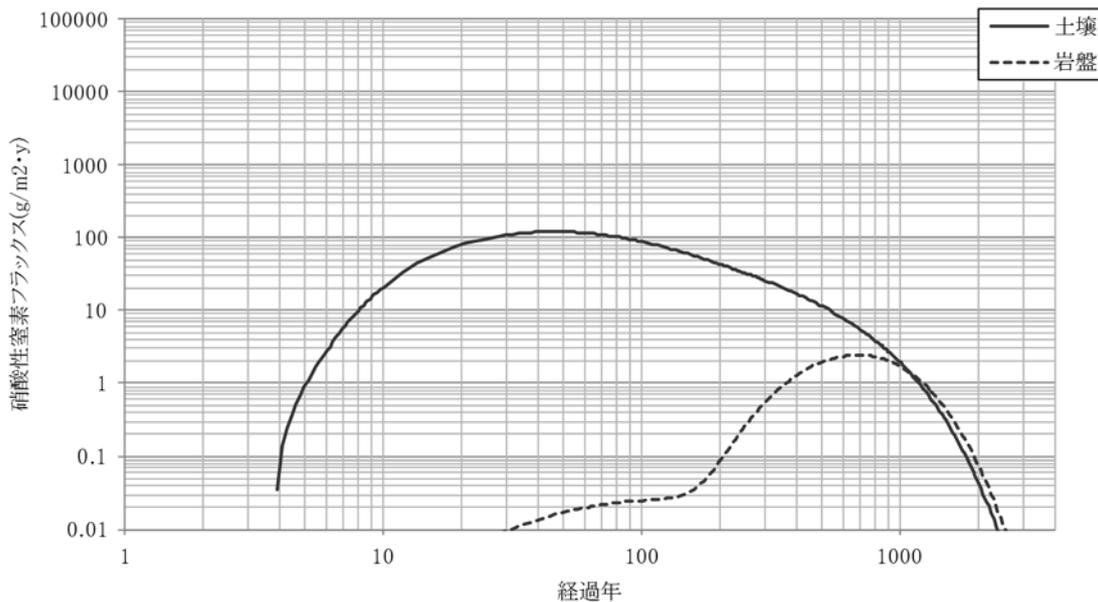
土壌:1.0E-06(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-05(m/s) 分散配置

図 7 河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case1-4)



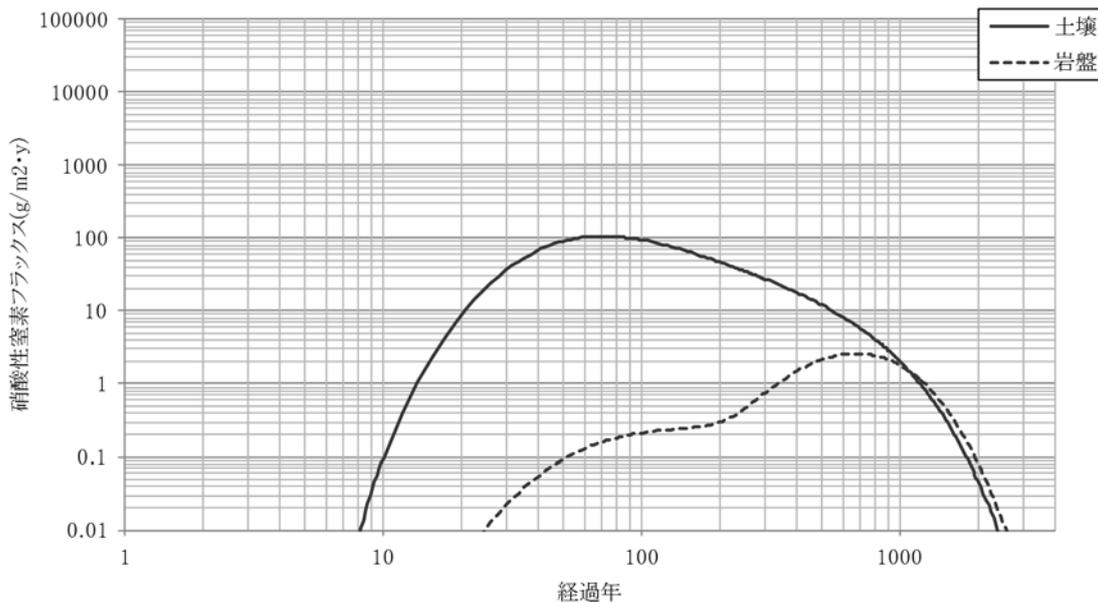
土壤:1.0E-03(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-07(m/s) 分散配置

図8 河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case2-1)



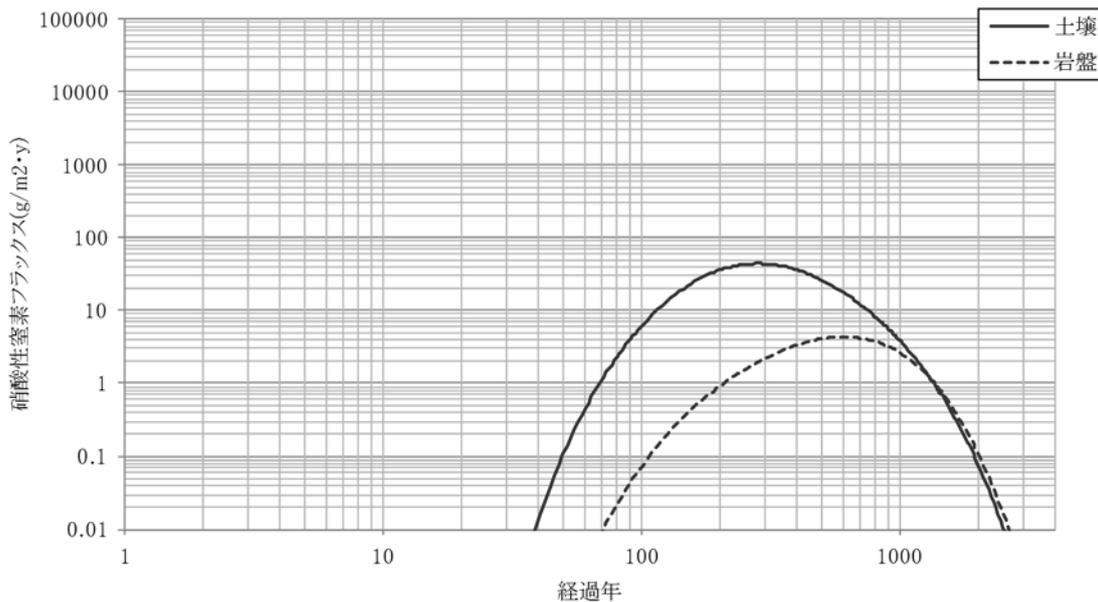
土壤:1.0E-04(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-07(m/s) 分散配置

図9 河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case2-2)



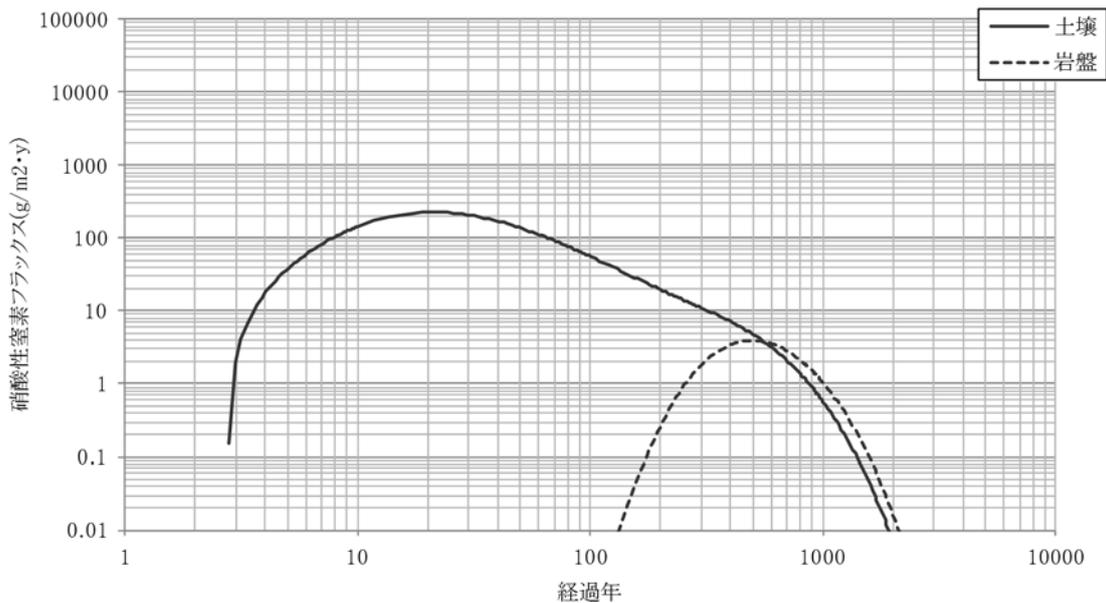
土壌:1.0E-05(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-07(m/s) 分散配置

図 10 河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case2-3)



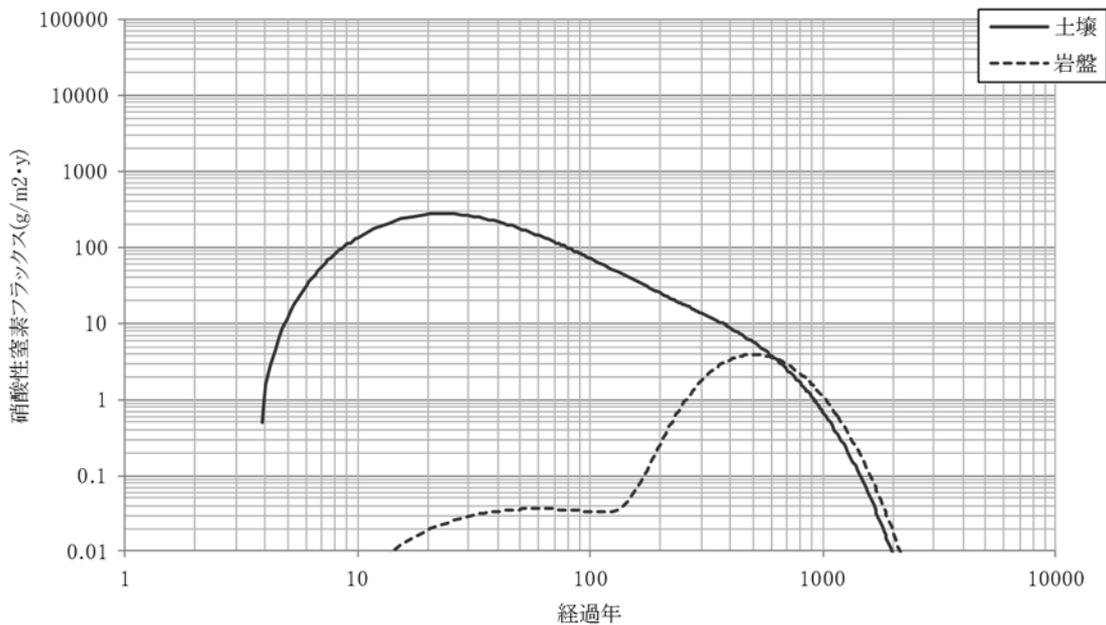
土壌:1.0E-06(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-07(m/s) 分散配置

図 11 河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case2-4)



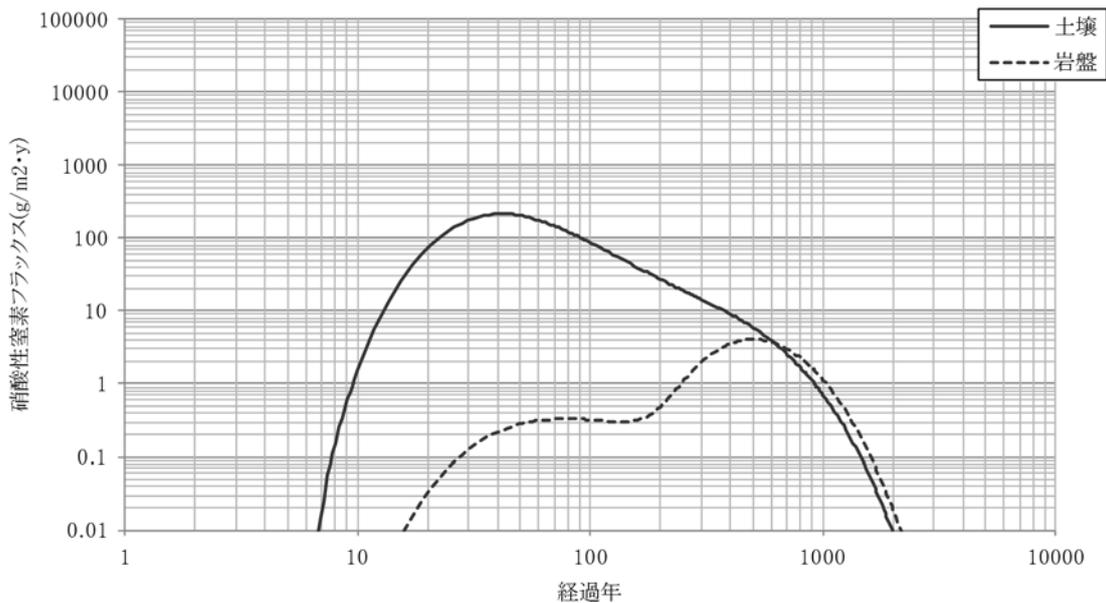
土壤:1.0E-03(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-05(m/s) 集中配置

図 12 河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case3-1)



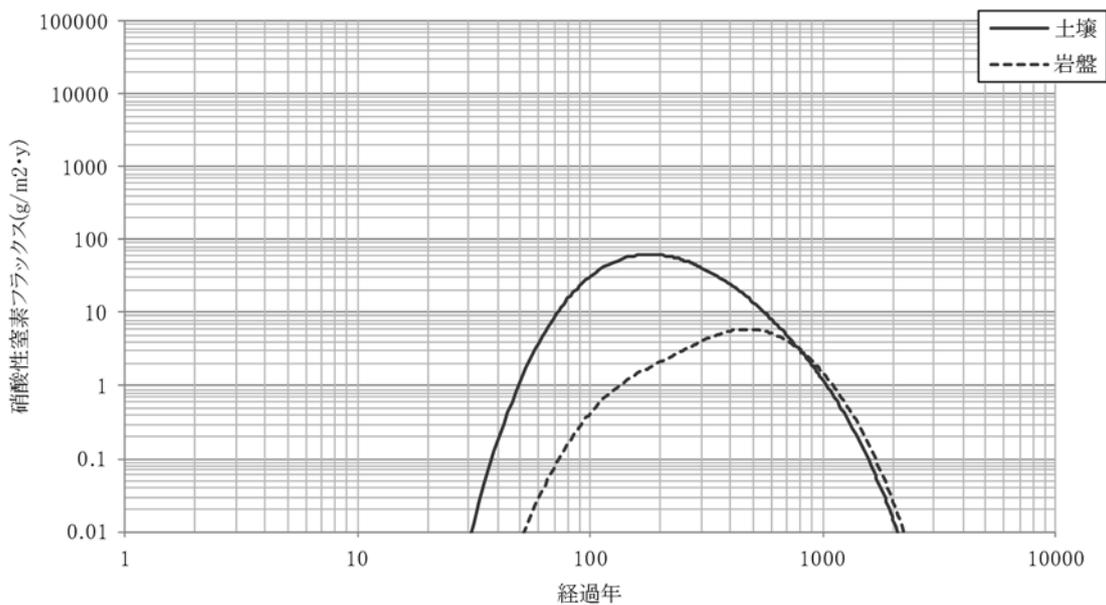
土壤:1.0E-04(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-05(m/s) 集中配置

図 13 河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case3-2)



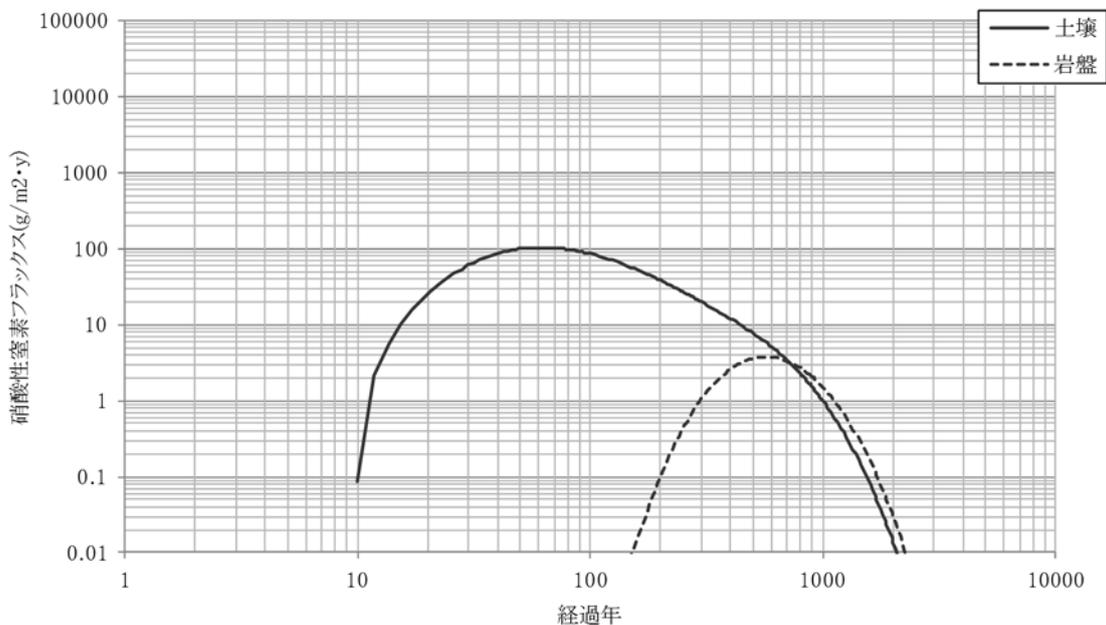
土壌:1.0E-05(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-05(m/s) 集中配置

図 14 河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case3-3)



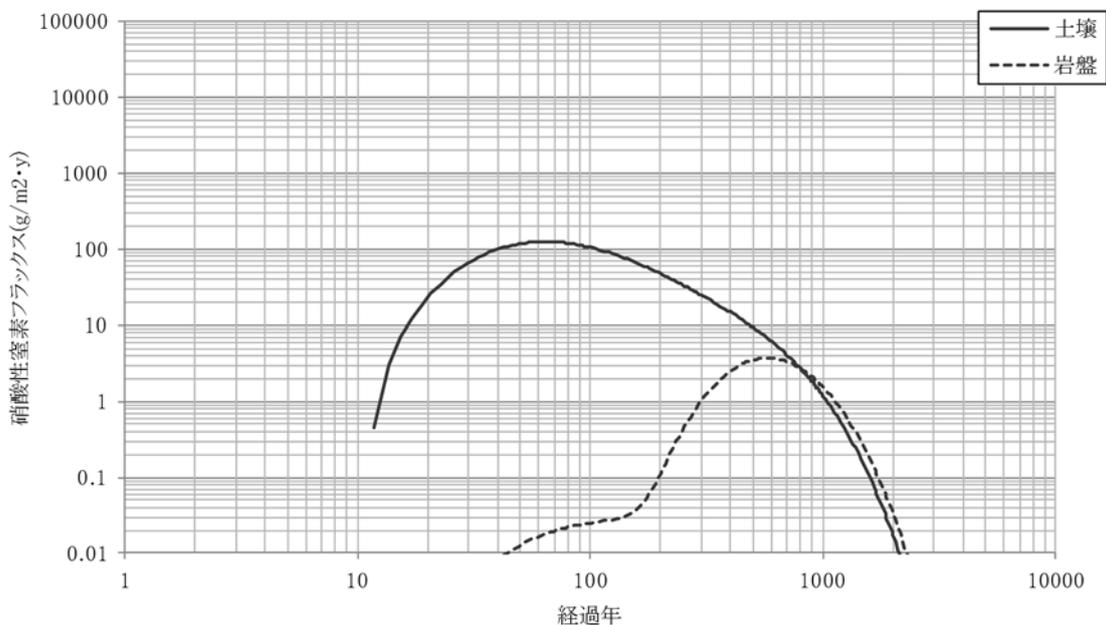
土壌:1.0E-06(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-05(m/s) 集中配置

図 15 河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case3-4)



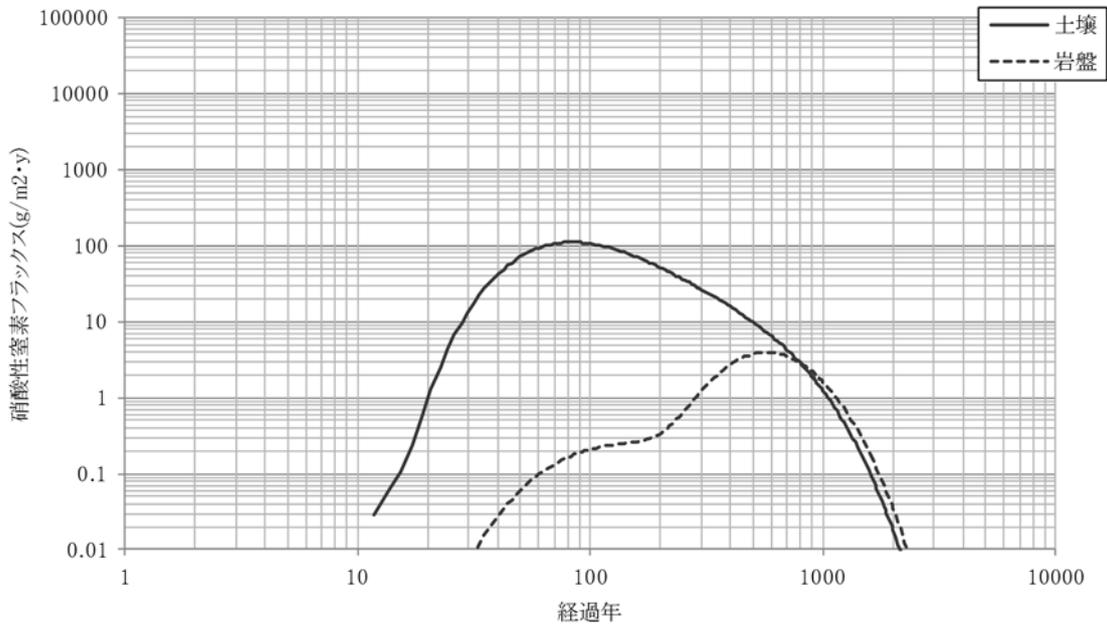
土壌:1.0E-03(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-07(m/s) 集中配置

図 16 河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case4-1)



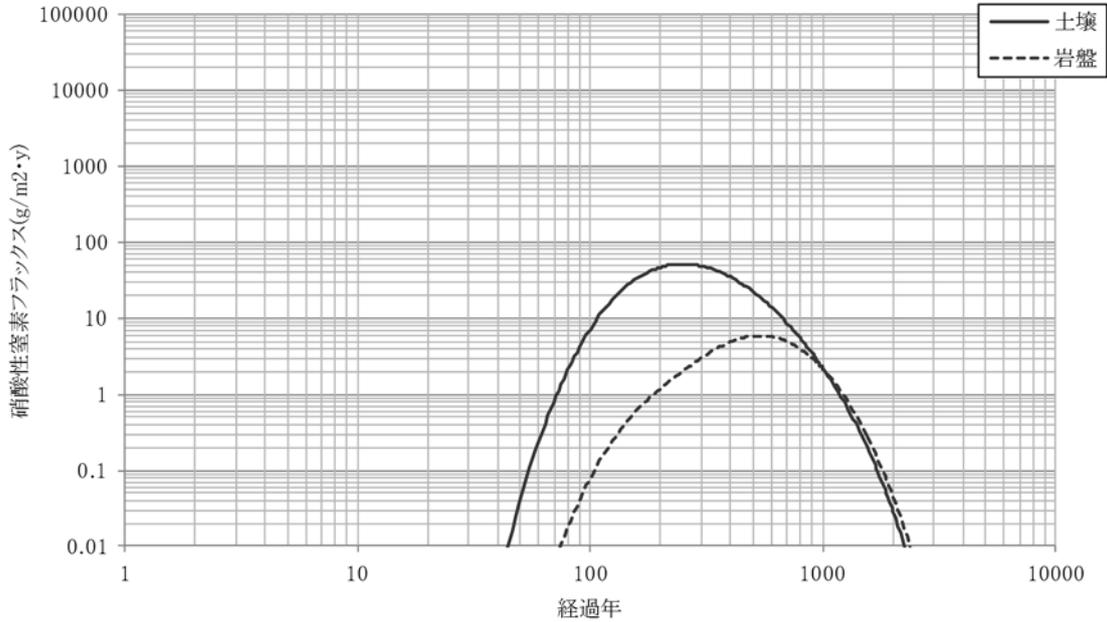
土壌:1.0E-04(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-07(m/s) 集中配置

図 17 河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case4-2)



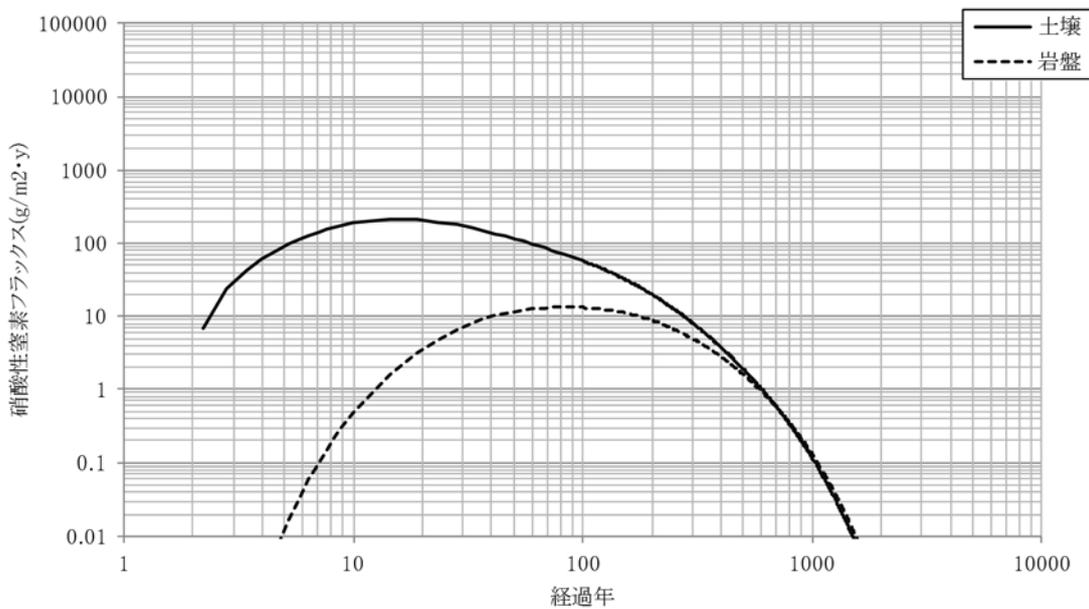
土壌:1.0E-05(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-07(m/s) 集中配置

図 18 河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case4-3)



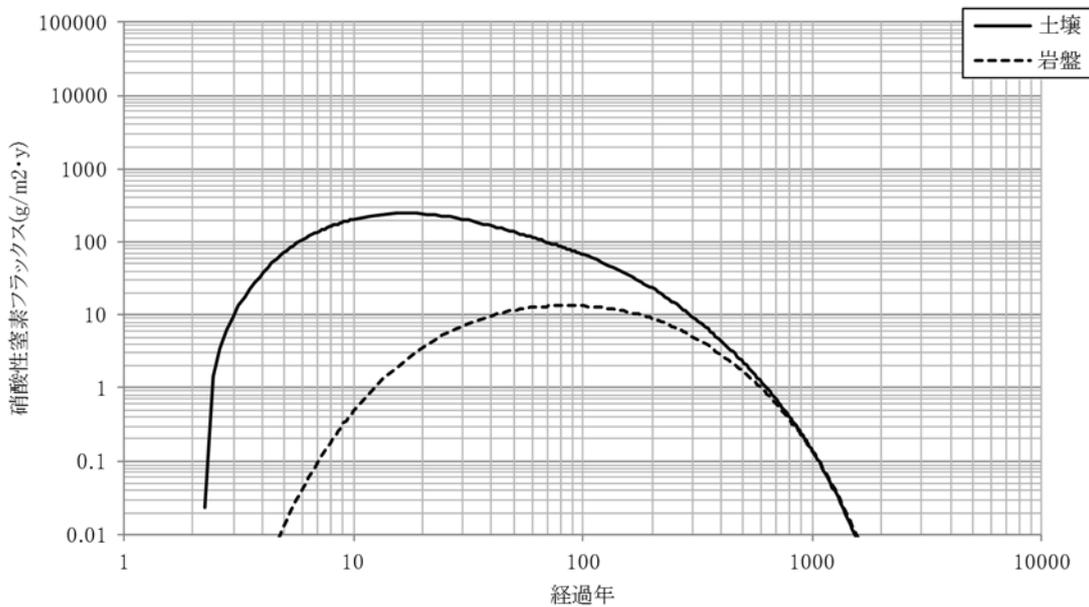
土壌:1.0E-06(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-07(m/s) 集中配置

図 19 河川・湖沼などへの硝酸性窒素フラックス (Case4-4)



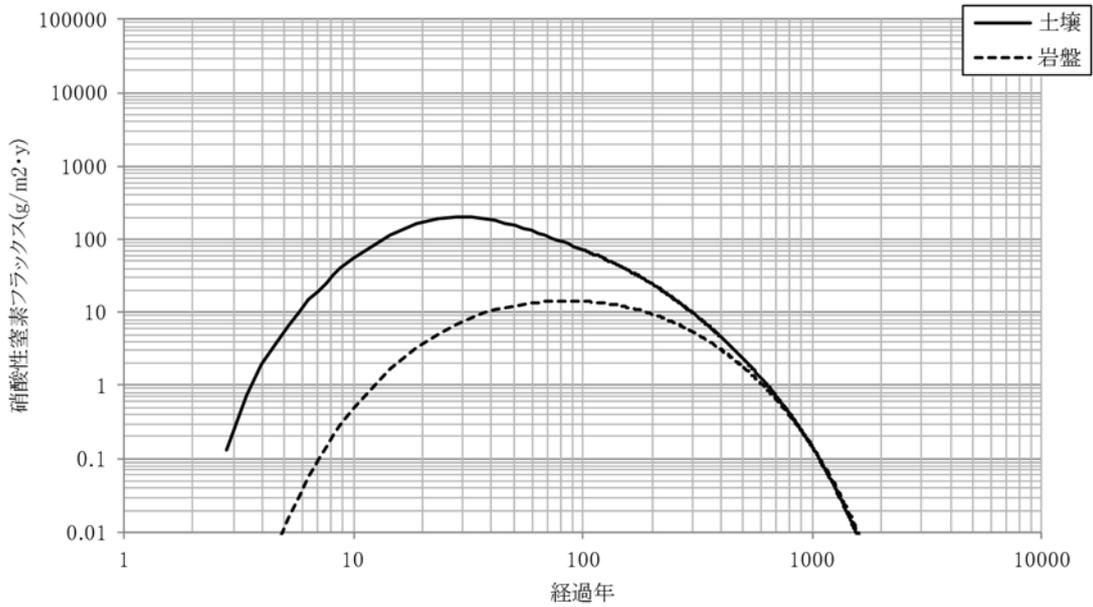
土壌:1.0E-03(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-05(m/s) 分散配置

図 20 地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case1-1)



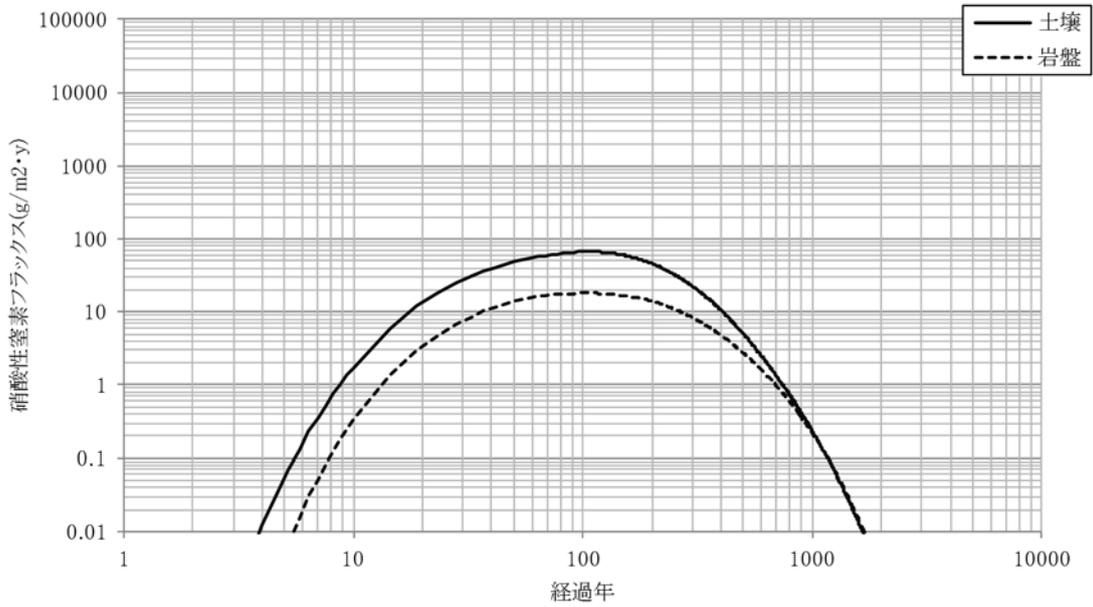
土壌:1.0E-04(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-05(m/s) 分散配置

図 21 地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case1-2)



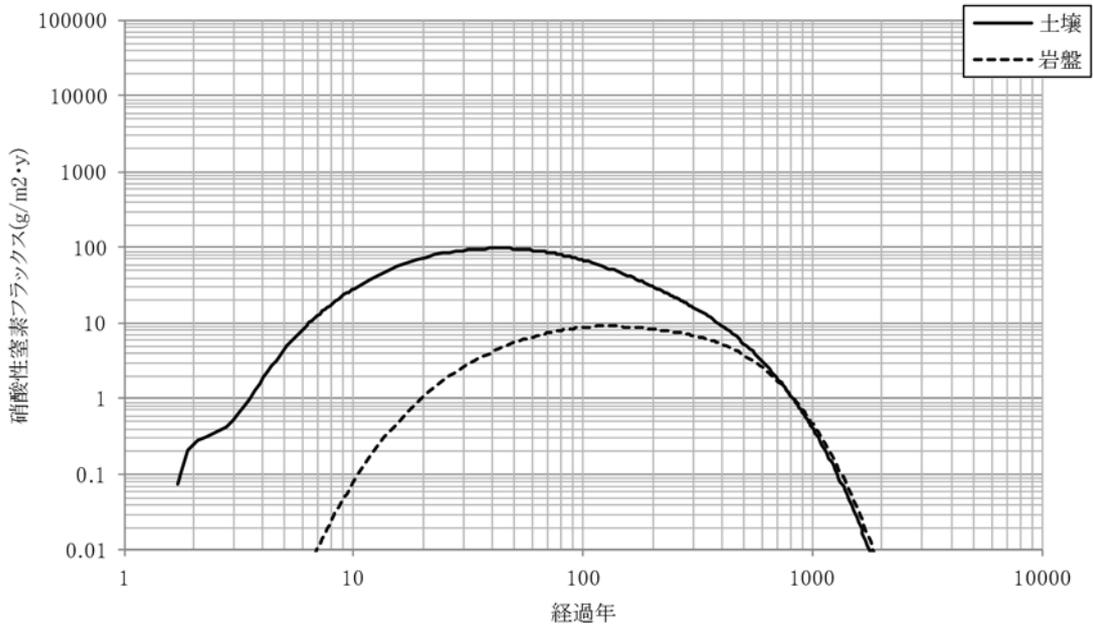
土壌:1.0E-05(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-05(m/s) 分散配置

図 22 地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case1-3)



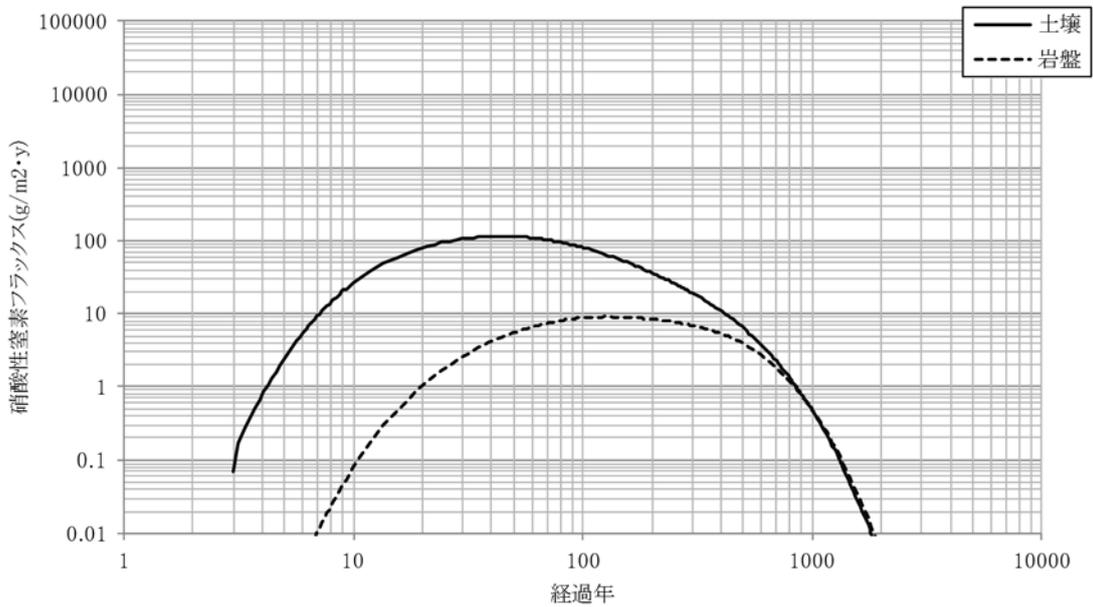
土壌:1.0E-06(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-05(m/s) 分散配置

図 23 地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case1-4)



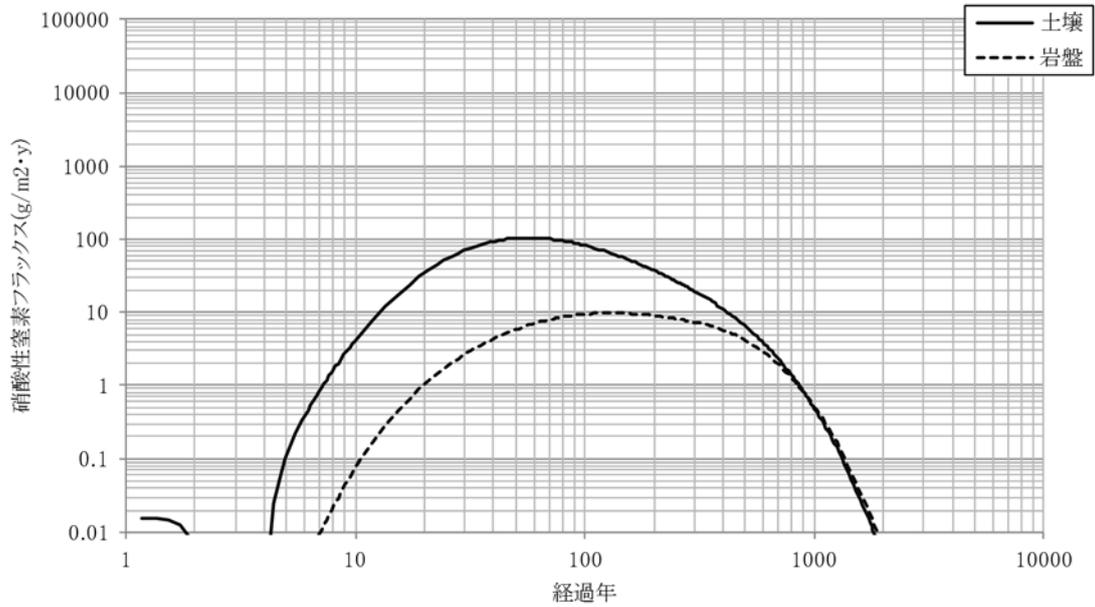
土壤:1.0E-03(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-07(m/s) 分散配置

図 24 地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case2-1)



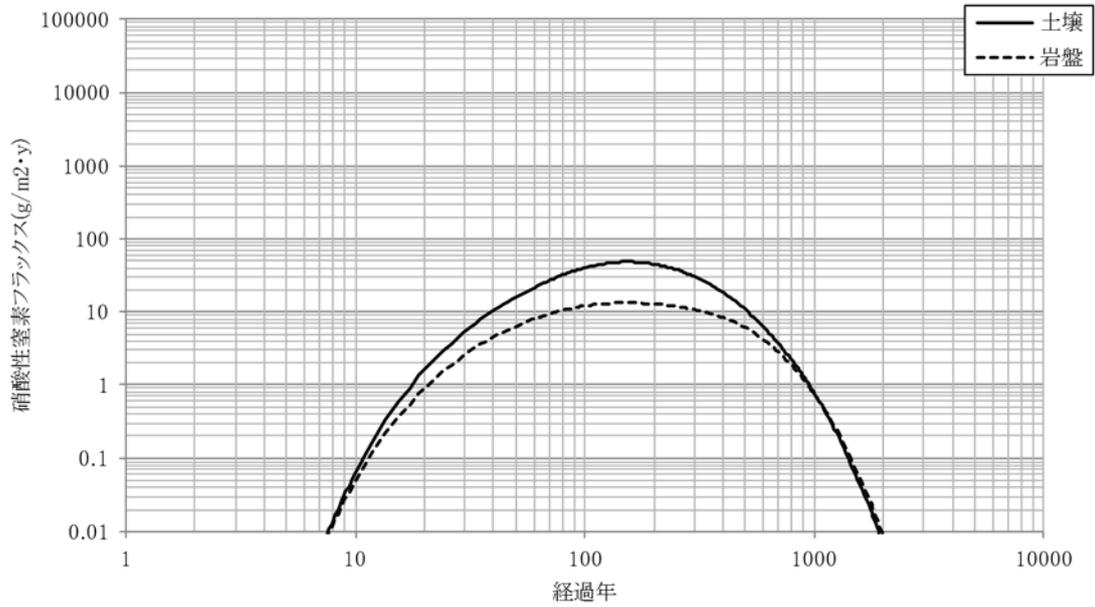
土壤:1.0E-04(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-07(m/s) 分散配置

図 25 地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case2-2)



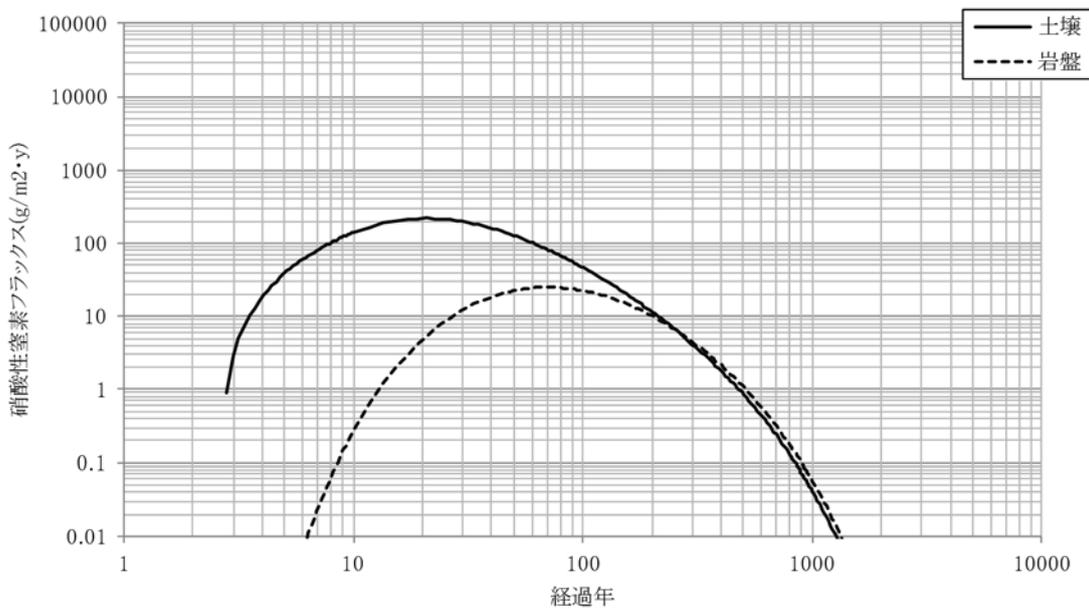
土壌:1.0E-05(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-07(m/s) 分散配置

図 26 地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case2-3)



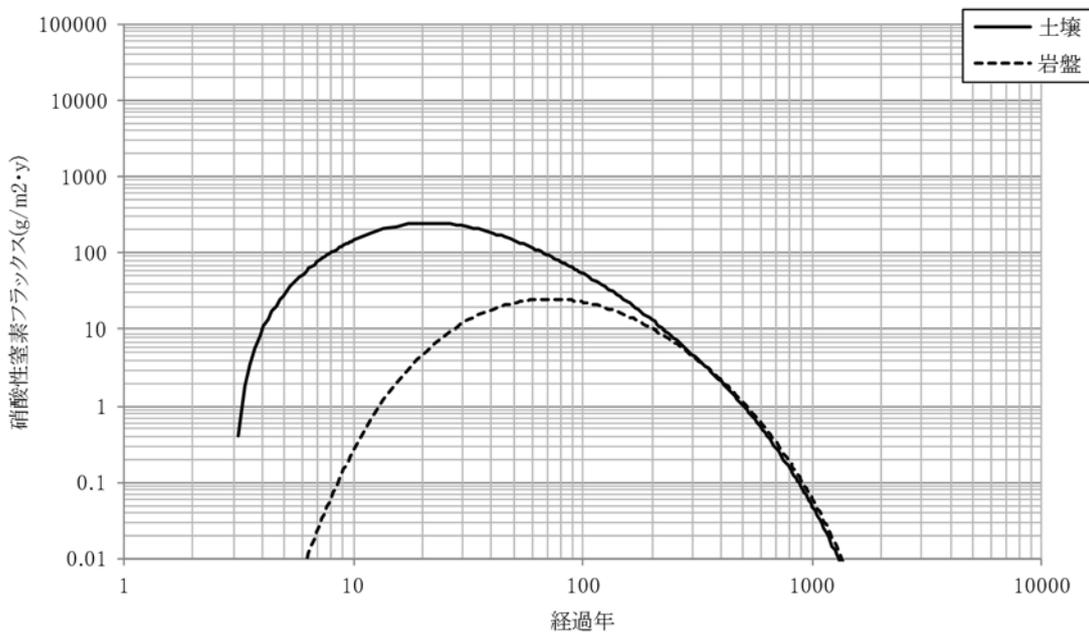
土壌:1.0E-06(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-07(m/s) 分散配置

図 27 地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case2-4)



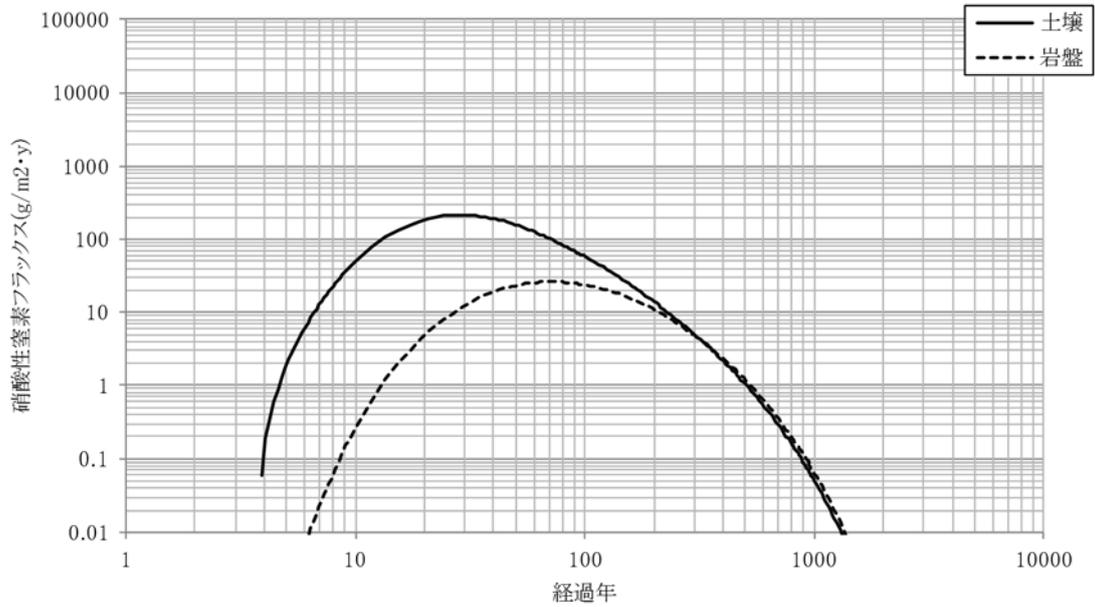
土壌:1.0E-03(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-05(m/s) 集中配置

図 28 地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case3-1)



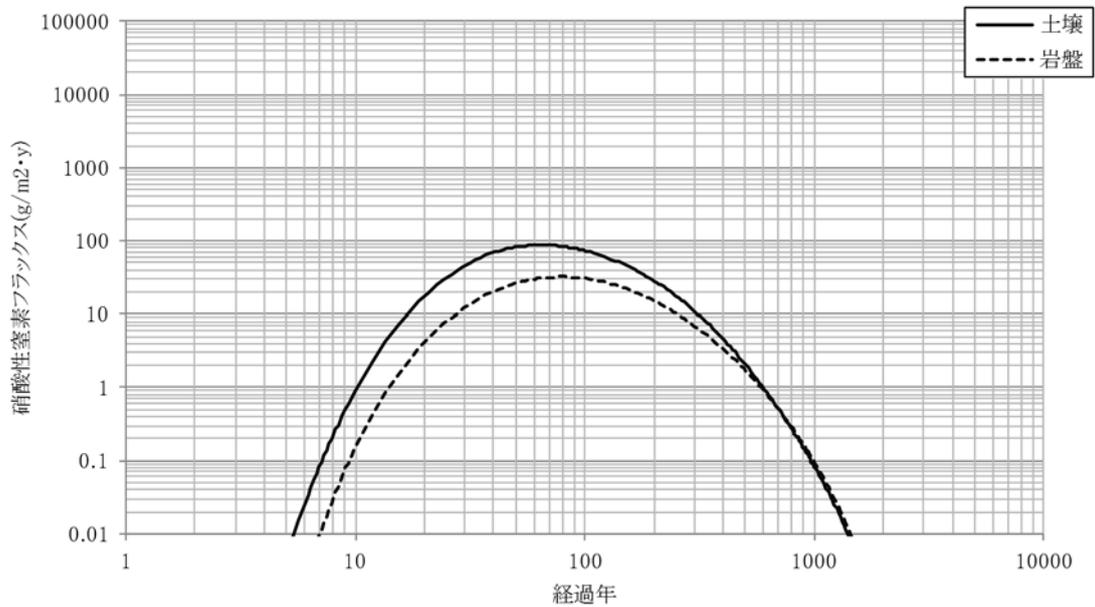
土壌:1.0E-04(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-05(m/s) 集中配置

図 29 地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case3-2)



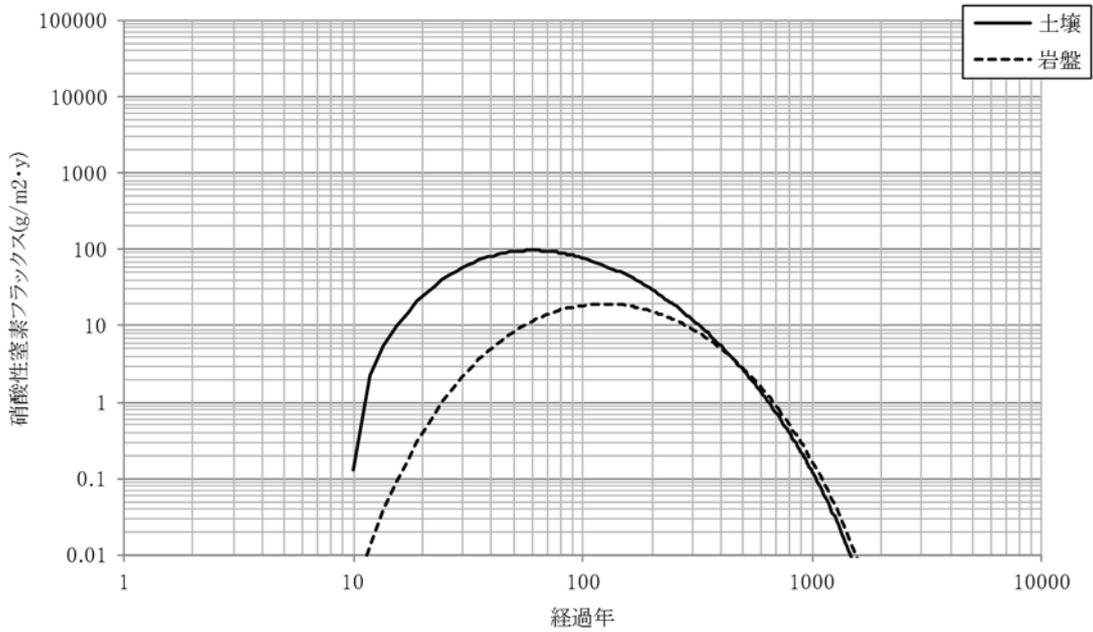
土壌:1.0E-05(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-05(m/s) 集中配置

図 30 地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case3-3)



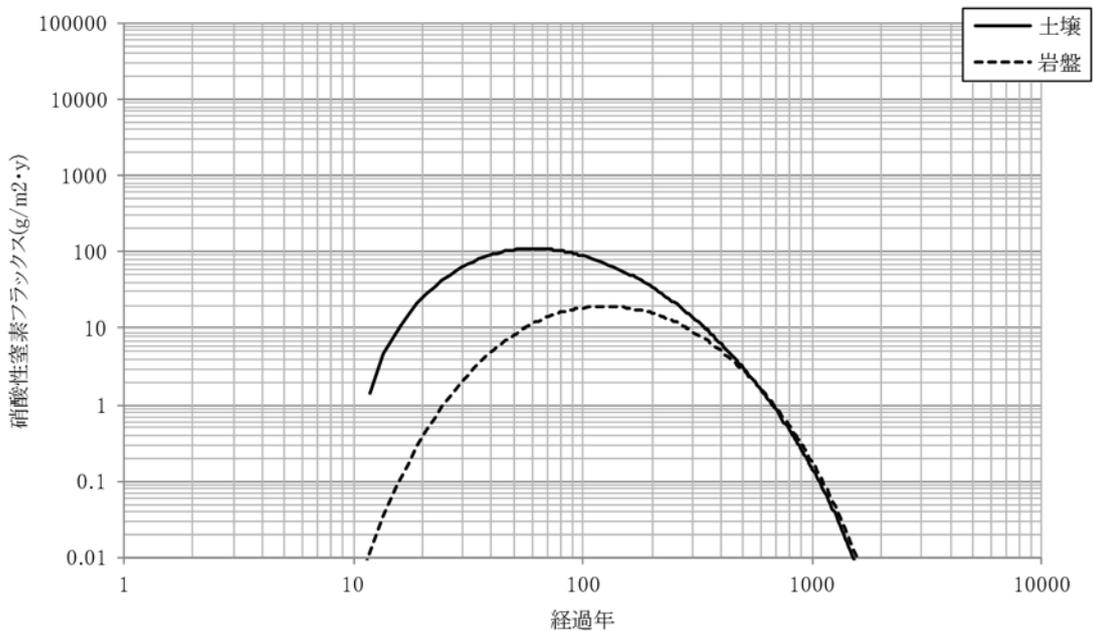
土壌:1.0E-06(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-05(m/s) 集中配置

図 31 地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case3-4)



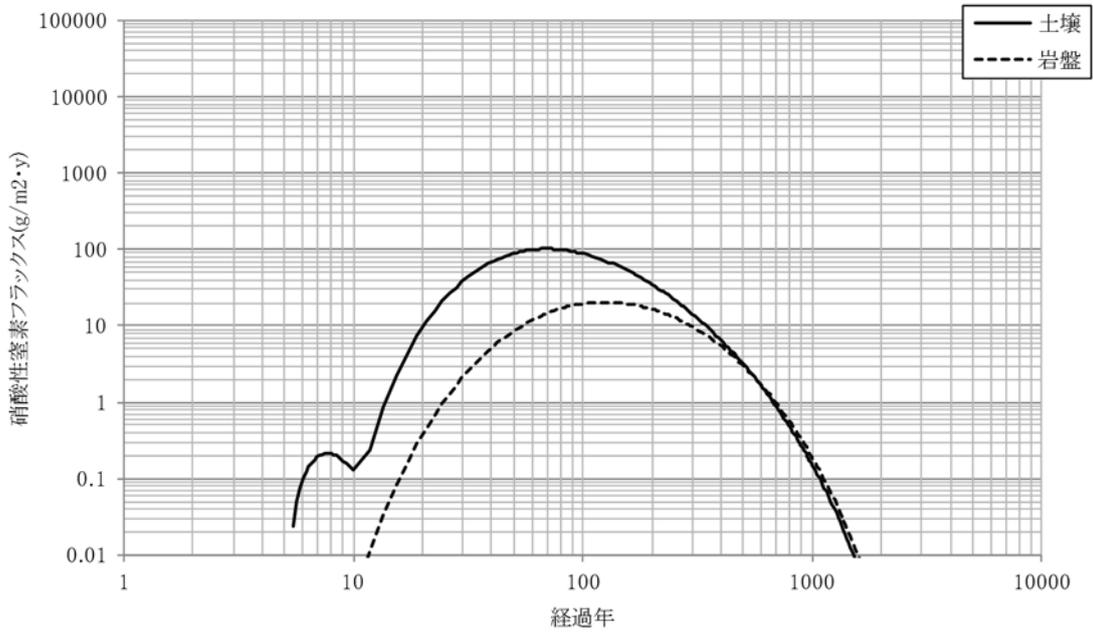
土壌:1.0E-03(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-07(m/s) 集中配置

図 32 地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case4-1)



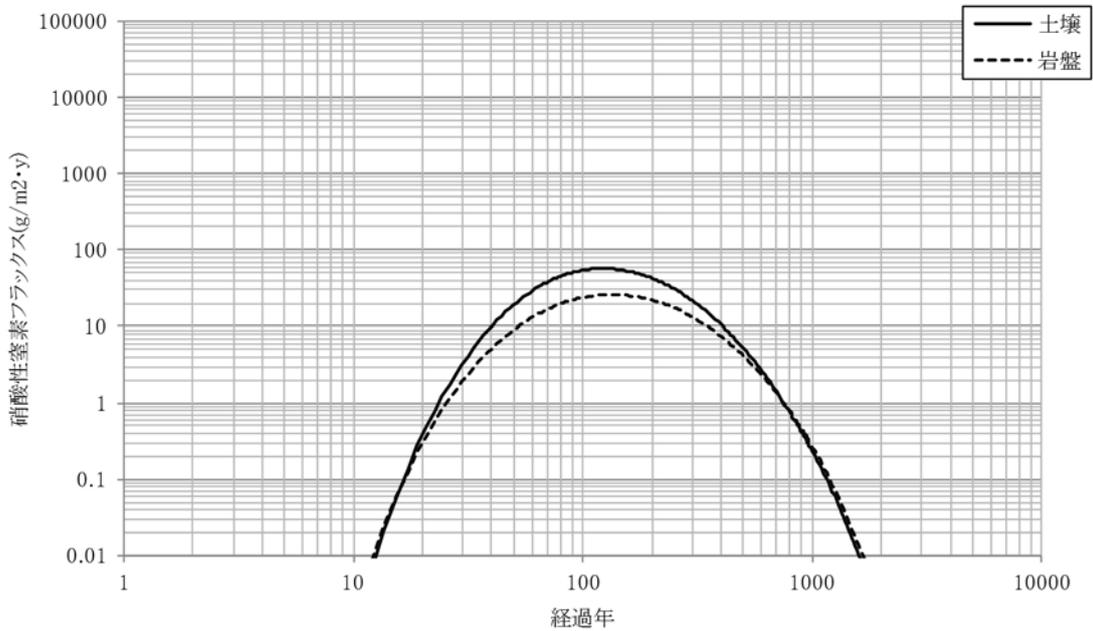
土壌:1.0E-04(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-07(m/s) 集中配置

図 33 地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case4-2)



土壤:1.0E-05(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-07(m/s) 集中配置

図 34 地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case4-3)



土壤:1.0E-06(m/s) コンクリートピット施設:1.0E-07(m/s) 集中配置

図 35 地下水中の硝酸性窒素フラックス (Case4-4)

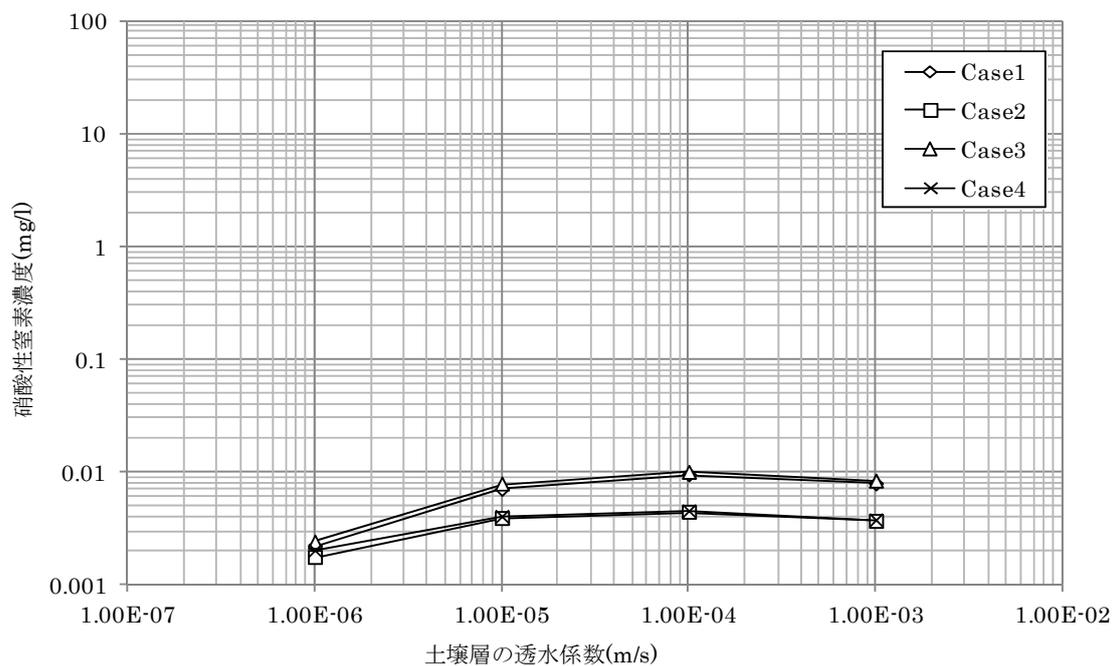


図 36 土壌の透水係数と硝酸性窒素濃度 (河川・湖沼などー希釈水量 : 1E+8m³/y)

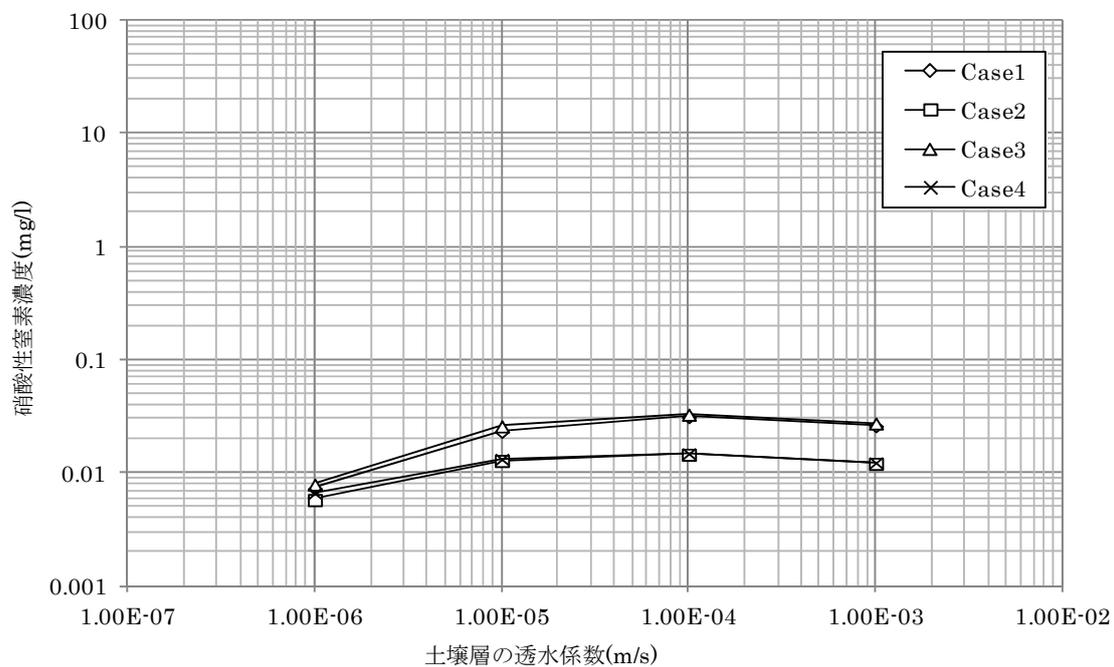


図 37 土壌の透水係数と硝酸性窒素濃度 (河川・湖沼などー希釈水量 : 3E+7m³/y)

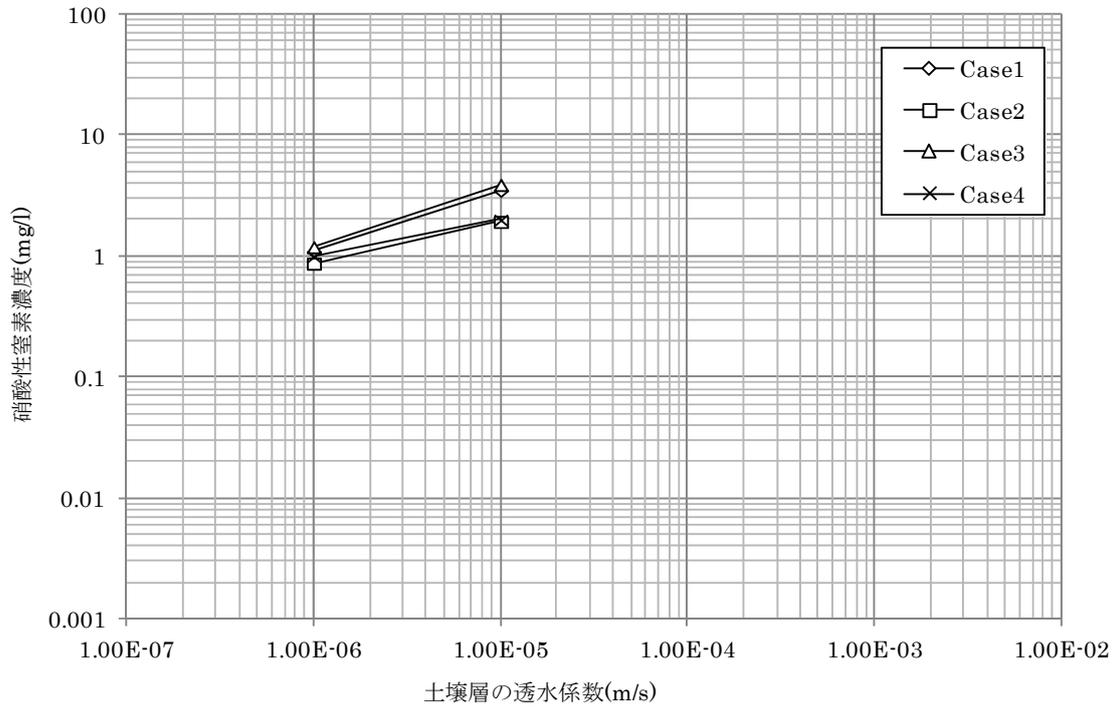


図 38 土壌の透水性係数と硝酸性窒素濃度（河川・湖沼など一希積水量： $2E+5m^3/y$ ）

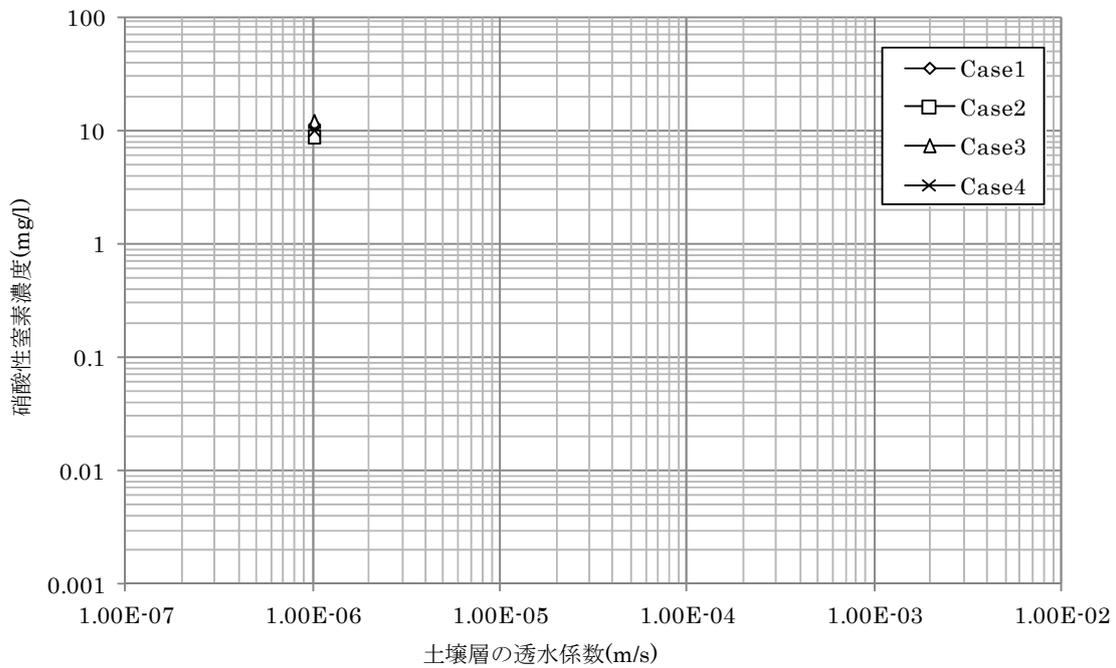


図 39 土壌の透水性係数と硝酸性窒素濃度（河川・湖沼など一希積水量： $2E+4m^3/y$ ）

※環境中の流量が地下水流量より少なくなる場合はプロットしていない。

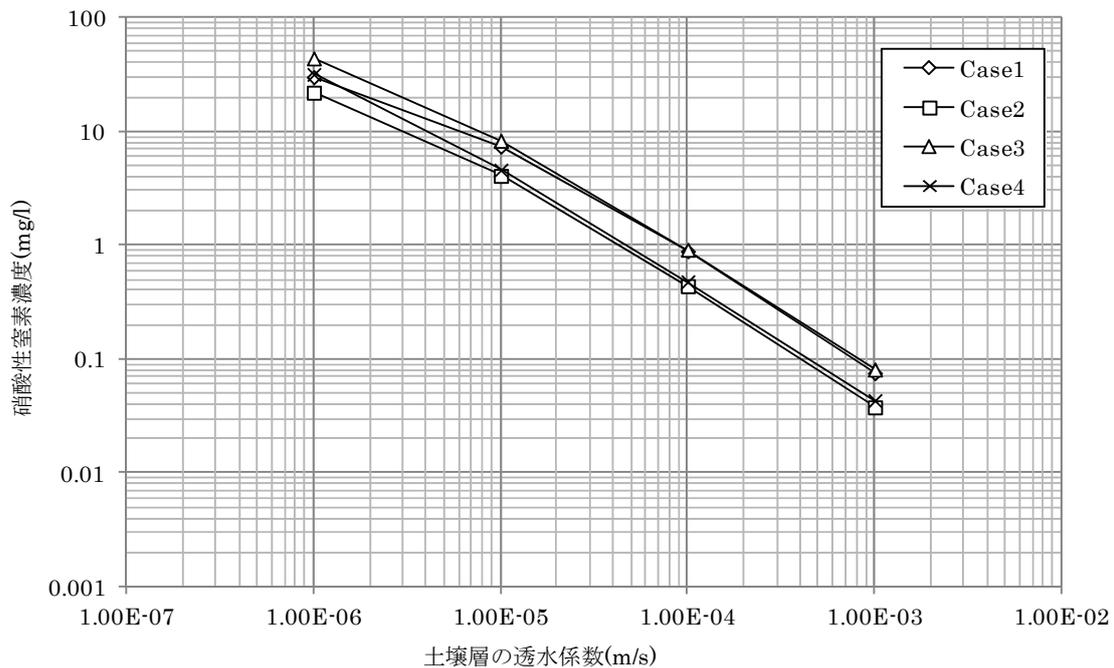


図 40 土壌の透水性係数と硝酸性窒素濃度（地下水－希釈水量は透水性係数に応じた値）

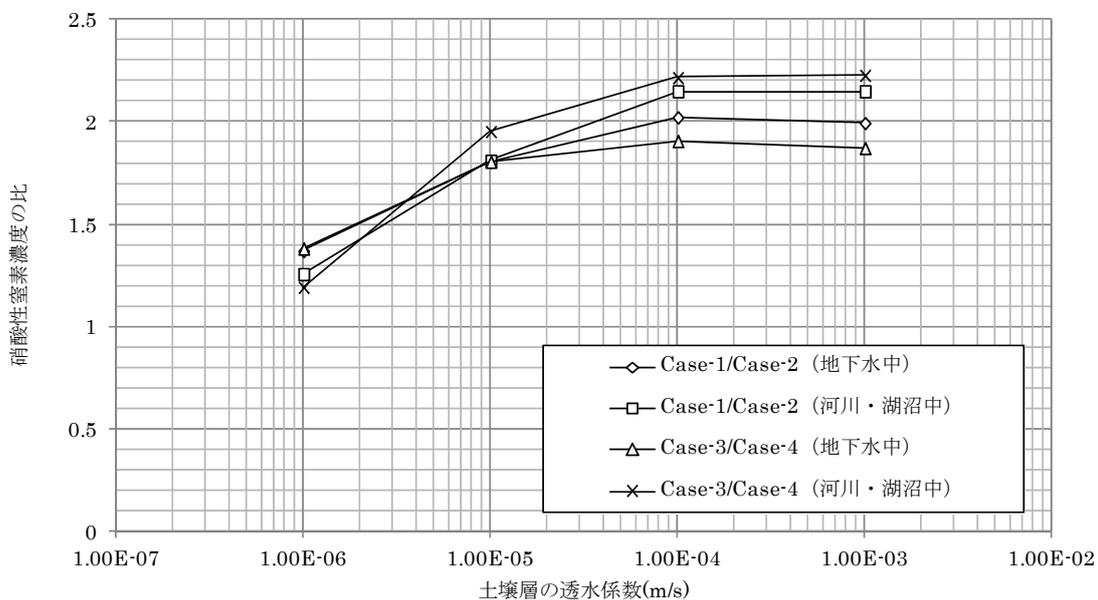


図 41 コンクリートピット施設の透水性係数の違いによる環境中の硝酸性窒素濃度の影響度

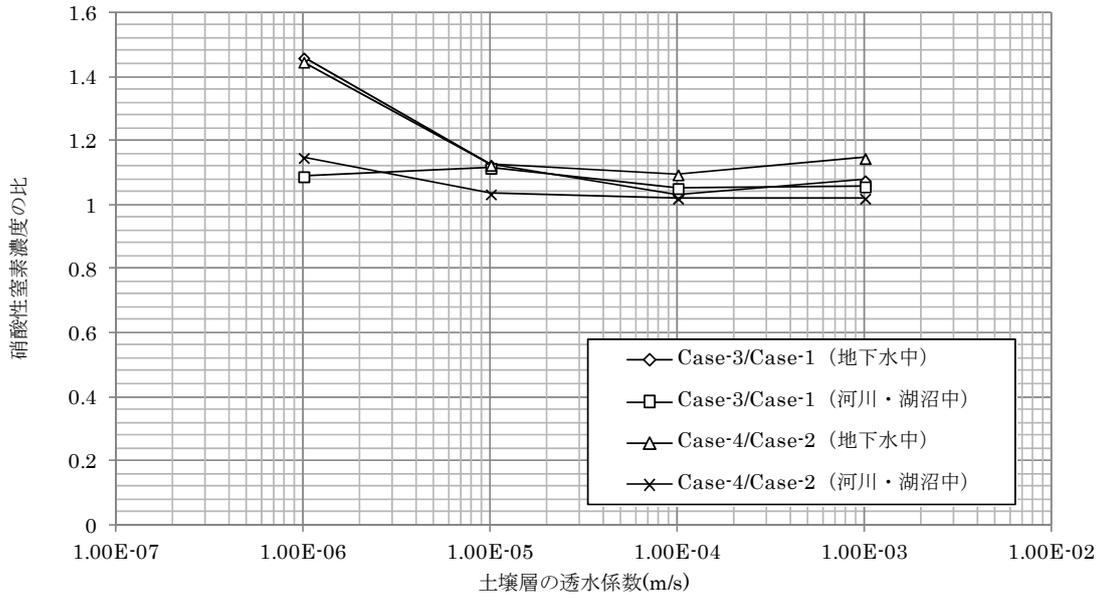
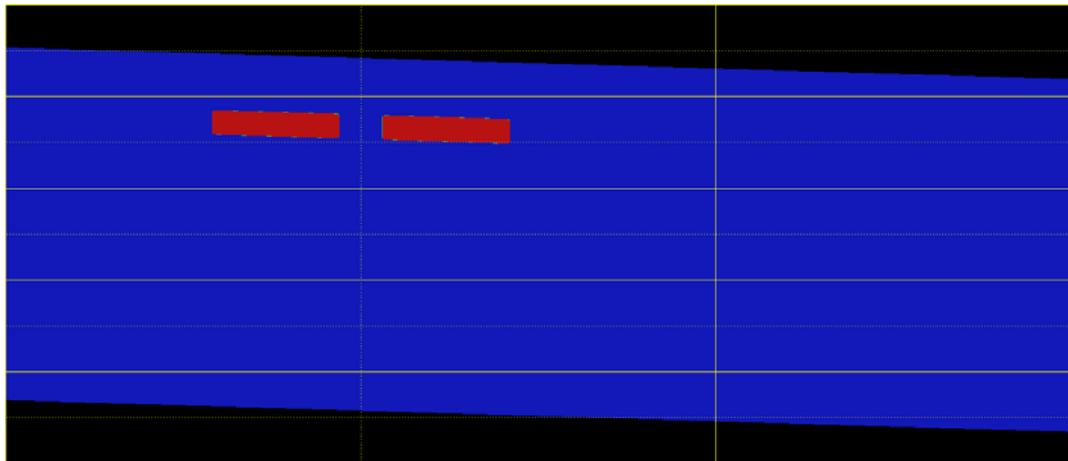
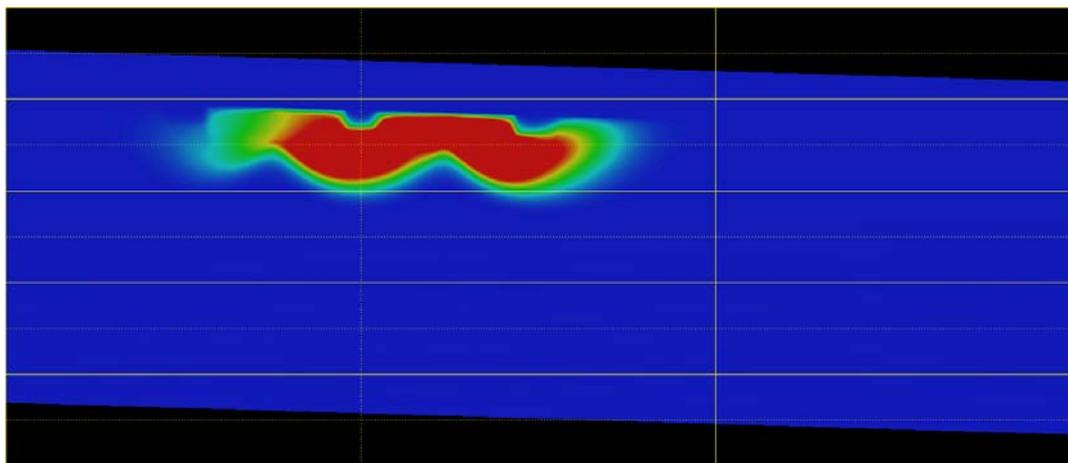


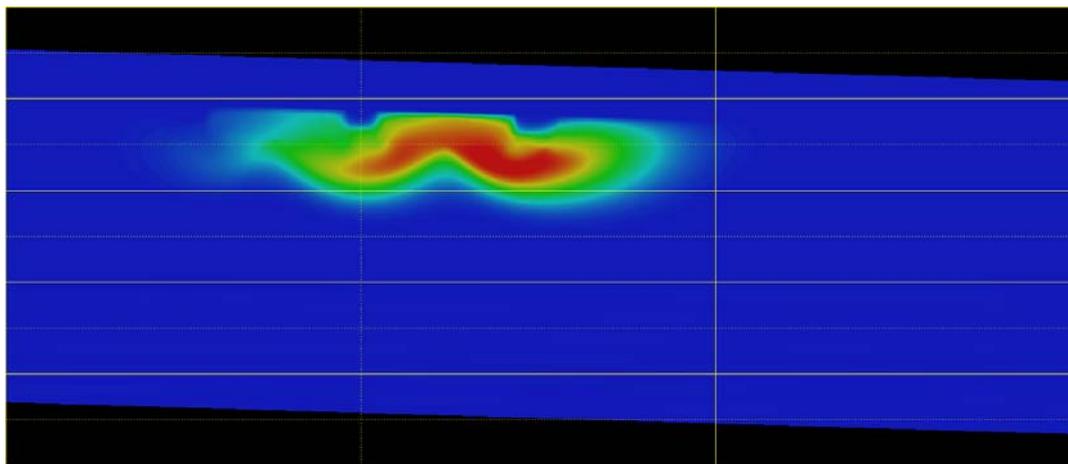
図 42 配置条件の違いによる環境中硝酸性窒素濃度の影響度



0 年後



50 年後



100 年後

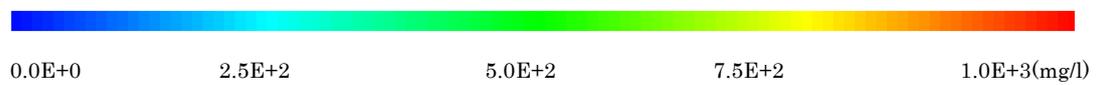
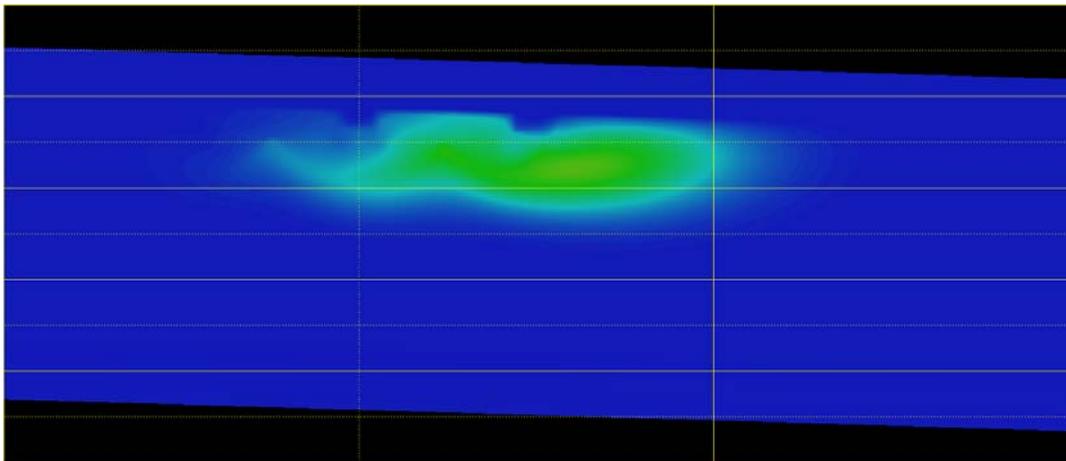
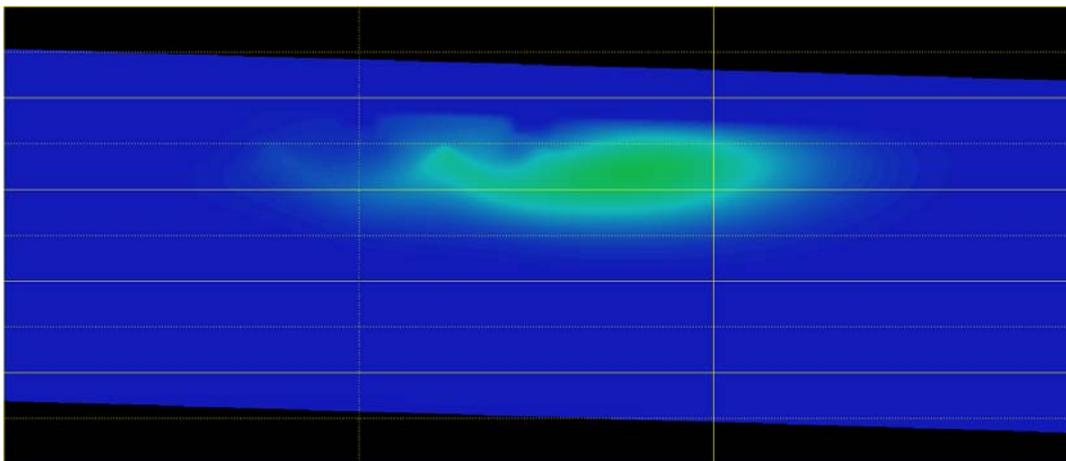


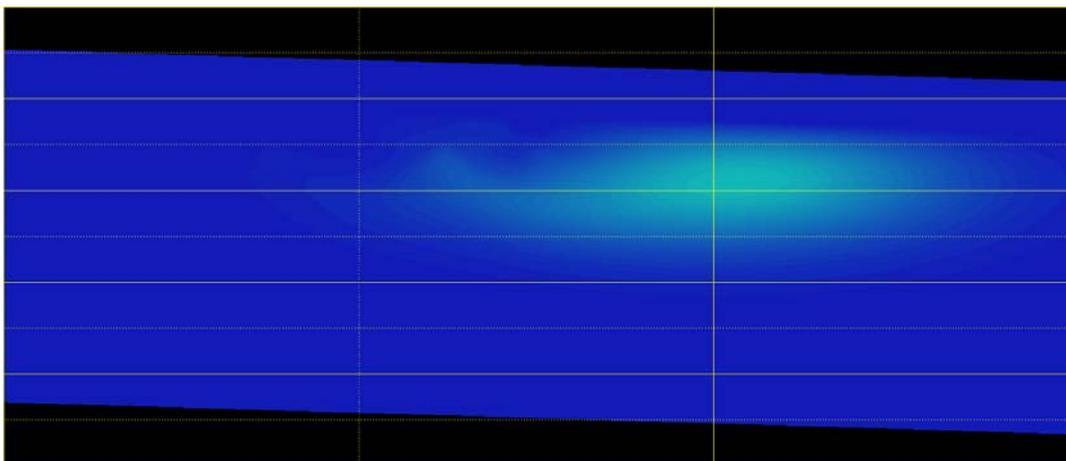
図 43 濃度分布図 (分散配置) Case1-2 0~100 年後



200 年後



300 年後



500 年後

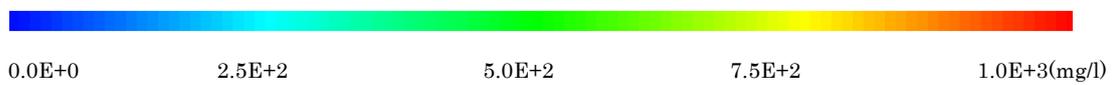
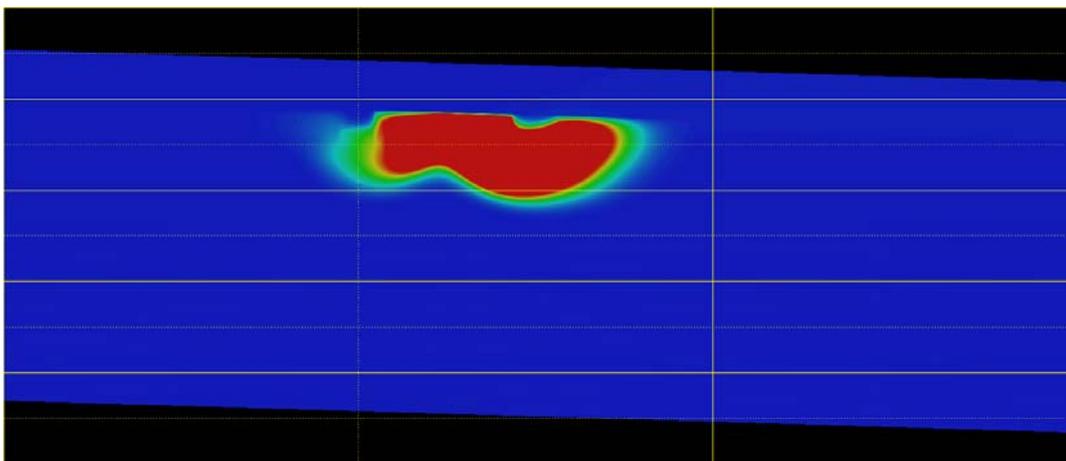


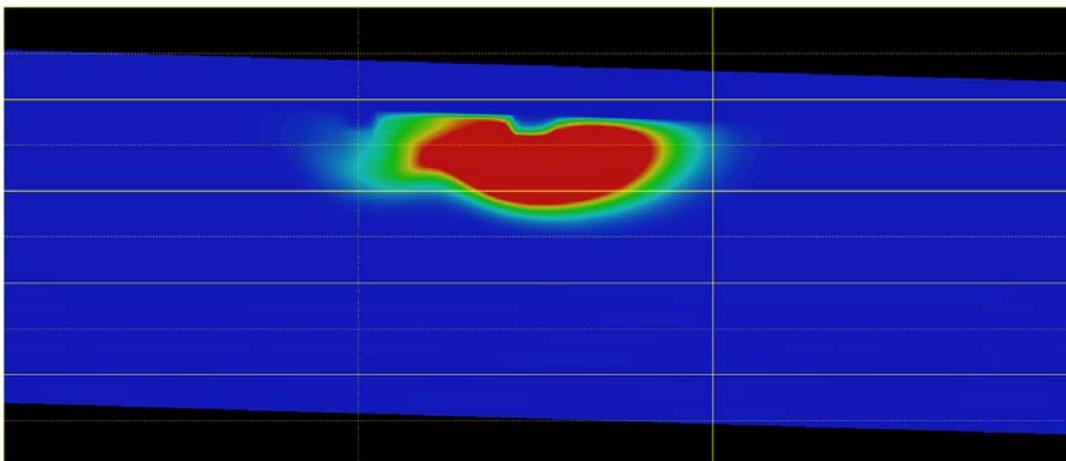
図 44 濃度分布図 (分散配置) Case1-2 200~500 年後



0年後



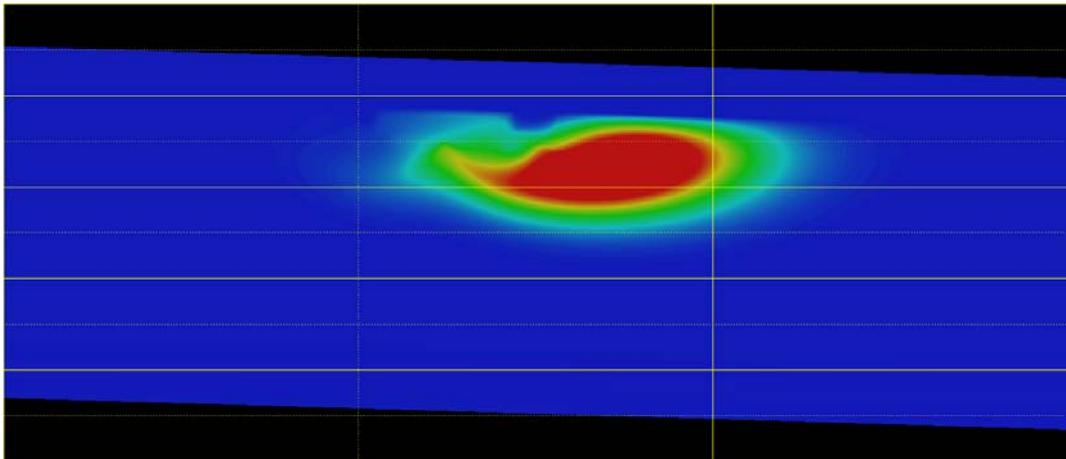
50年後



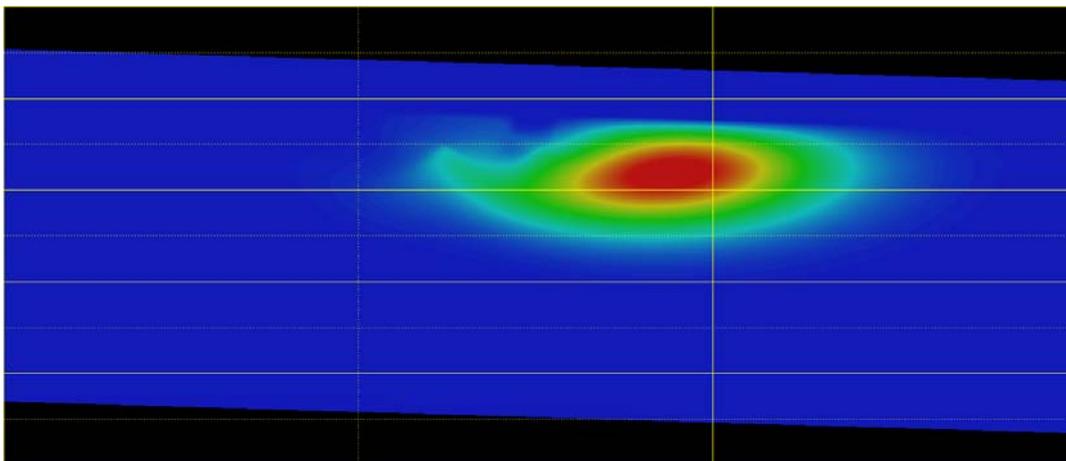
100年後



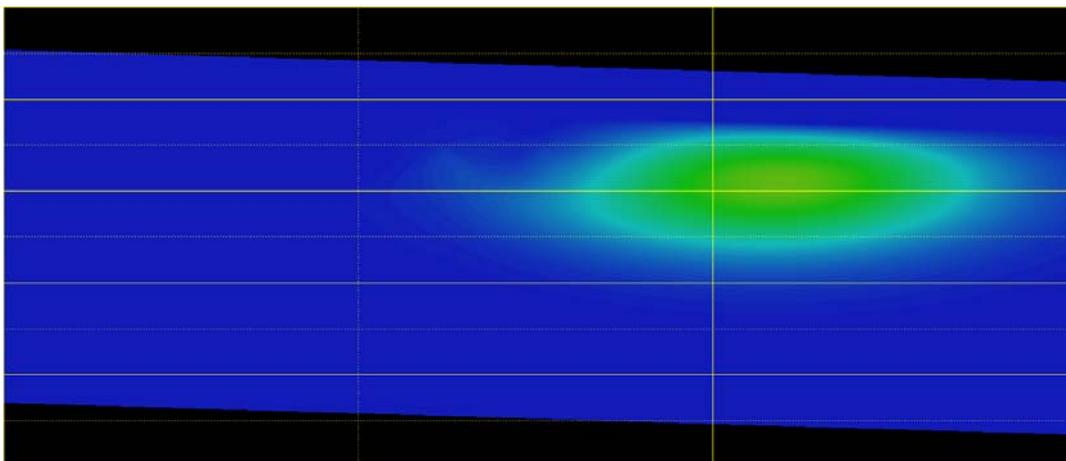
図 45 濃度分布図 (集中配置) Case3-2 0~100 年後



200 年後



300 年後



500 年後

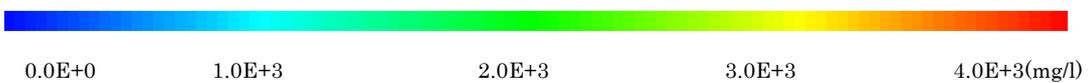


図 46 濃度分布図 (集中配置) Case3-2 200~500 年後

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質	モル	mol
光	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	数メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz	1	s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束密度	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm		cd sr ^(c)
放射線核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみに使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CF-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘着力	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エントロピー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電表面積	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ³ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベ	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1G cm ² =10 ⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≡ (10 ⁷ /4π)A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≡」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	fm	1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

