

余裕深度処分における硝酸塩による環境への影響評価と
廃棄体層の間隙率及び硝酸イオンの分配係数の
違いによる感度

Environmental Impact of Nitrate Nitrogen in Sub-surface Disposal System
on Surface Water and Sensitivity Analysis of Distribution Coefficient of Nitrate Ion
and Porosity of Waste Layer on the Environmental Safety Assessments

中村 康雄 中谷 隆良

Yasuo NAKAMURA and Takayoshi NAKATANI

バックエンド研究開発部門
廃棄物対策・埋設事業統括部

Radioactive Waste Management and Disposal Project Department
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

March 2015

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 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒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
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration 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

余裕深度処分における硝酸塩による環境への影響評価と
廃棄体層の間隙率及び硝酸イオンの分配係数の違いによる感度

日本原子力研究開発機構
バックエンド研究開発部門 廃棄物対策・埋設事業統括部
中村 康雄^{*}、中谷 隆良

(2014年12月15日受理)

日本原子力研究開発機構の余裕深度処分対象廃棄物のうち、再処理施設から発生するアスファルト固化体には硝酸塩が含まれており、このような廃棄体を余裕深度処分する場合、放射性物質のみならず、地下水への溶解性の高い硝酸塩も放射性物質と同様に長期的には地下水移行により、地表水への環境影響が懸念される。この硝酸塩は非放射性的の物質で、硝酸イオン(NO_3^-)を持つ塩であり、環境基本法第十六条の規定で示されている水質の汚濁に関わる環境基準で定められた水質基準で規制対象となる物質（硝酸性及び亜硝酸性窒素）である。

こうした有害物質の扱いについては、「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、原子力安全委員会）」では、“なお、非放射性的の有害物質そのものの環境影響については、本基本的考え方で評価を要求するものではないが、必要に応じ国あるいはその他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”とされている。

このため、本報告では、余裕深度処分施設から硝酸塩が硝酸イオンとして地下水とともに生活圏へ移行した場合の地表水中の硝酸性窒素濃度について計算し、地表水 $1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{y}$ 以上の河川において環境基準を満足することが分かった。

また、多重バリアで構成される処分システムにおいて、廃棄体層の間隙率及び移行経路上の分配係数の違いによる影響についても評価を行い、天然バリアにおける分配係数が評価点における硝酸性窒素濃度に感度があることが分かった。

Environmental Impact of Nitrate Nitrogen in Sub-surface Disposal System on Surface Water and
Sensitivity Analysis of Distribution Coefficient of Nitrate Ion and Porosity of Waste Layer on the
Environmental Safety Assessments

Yasuo NAKAMURA[※] and Takayoshi NAKATANI

Radioactive Waste Management and Disposal Project Department
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 15,2014)

Sodium nitrate is included in bituminized waste generating from the reprocessing plant of spent fuel, which is disposed of in sub-surface disposal facility. Because the sodium nitrate is soluble material in surface water, it is a concern impact on surface water. Such as non-radioactive materials are not strictly regulated by “the Law for the Regulations of Nuclear Source Material, Nuclear Fuel Material and Reactors”, but should be considered by related laws and regulations according to former basic policy.

The valuation of the environmental impact of the nitrate nitrogen on general sub-surface disposal system was carried out by “The Basic Environment Law”. As a results, the concentration of nitrate nitrogen in river water whose annual quantity of water is rather than $1 \times 10^5 \text{m}^3/\text{y}$ was below the regulated value at the small scale surface waters as evaluation point.

Sensitivity analysis of the environmental safety assessments was also carried out for distribution coefficient of nitrate ion on the some materials in the migration pathway and porosity of the waste layer in disposal system.

Keywords: Sub-surface Disposal, Sodium Nitrate, Environmental Impact

※ Collaborating Engineer

目次

1. はじめに.....	1
2. 余裕深度処分対象廃棄物中の硝酸塩の地表水への影響評価.....	2
2.1 地表水の水質基準.....	2
2.2 地表水への影響評価.....	4
2.2.1 処分施設の概要.....	4
2.2.2 処分施設の条件.....	5
2.2.3 評価ツール.....	7
2.2.4 計算結果.....	9
3. 硝酸性窒素濃度を与える廃棄体層の間隙率と各バリアの分配係数の感度.....	10
3.1 廃棄体層の間隙率.....	10
3.1.1 廃棄体層の間隙率の調査と設定.....	10
3.1.2 廃棄体層中の間隙水量と硝酸塩の最大溶解量.....	10
3.2 硝酸イオンの分配係数とバリア材料毎の硝酸性窒素濃度の関係.....	11
3.2.1 硝酸イオンの分配係数の調査と設定.....	11
3.2.2 計算結果.....	12
3.3 処分システムにおける分配係数と地表水における硝酸性窒素濃度の関係.....	15
3.3.1 計算条件.....	15
3.3.2 計算結果.....	15
4. まとめ.....	17
参考文献.....	18

Contents

1. Introduction	1
2. Environmental impact of nitrate nitrogen in sub-surface disposal system on surface water	2
2.1 Environmental quality standards for water pollution	2
2.2 Sensitivity analysis for annual quantity of river water	4
2.2.1 System components of disposal facility	4
2.2.2 Parameter	5
2.2.3 Outline of assessment tool	7
2.2.4 Assessment result	9
3. Sensitivity analysis of distribution coefficient of nitrate ion and porosity of waste layer on the environmental safety assessments	10
3.1 Sensitivity analysis of porosity of waste layer	10
3.1.1 Parameter	10
3.1.2 Assessment result	10
3.2 Sensitivity analysis of distribution coefficient of nitrate ion on concrete and host rock	11
3.2.1 Parameter	11
3.2.2 Assessment result	12
3.3 Sensitivity analysis of distribution coefficient of nitrate ion on disposal system	15
3.3.1 Set of data	15
3.3.2 Assessment result	15
4. Summary	17
References	18

1. はじめに

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）の再処理施設から発生するアスファルト固化体には硝酸塩が含まれており、このような廃棄体を余裕深度処分する場合、放射性物質のみならず、硝酸塩も放射性物質と同様に地表水へ長期的には移行することが想定される。

再処理施設から発生する放射性廃棄物の処分方法については、「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－(以下、TRU 第2次レポート)¹⁾」に放射能レベルに応じてピット処分、余裕深度処分及び地層処分することが想定されている。このうち余裕深度処分対象の廃棄体中の硝酸塩は1,550 tであることが示されている。

この硝酸塩は非放射性物質で、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」の対象外物質であるが、環境基本法第十六条の規定で示す水質汚濁に関わる環境基準で定められた水質基準では規制対象となる物質（硝酸性及び亜硝酸性窒素）である。こうした有害物質について、「第二種廃棄物埋設事業に関する安全審査の基本的考え方(平成22年8月、原子力安全委員会)」では既存の関係規則類に準じて別途考慮しなければならない旨が示されている。

その上で、余裕深度処分対象廃棄物に含まれる硝酸塩が、処分された後、施設に浸入する地下水へ溶解し、硝酸イオンとなって施設から地下水とともに地表水に移行すると想定し、その影響を評価したものである。

本検討には、原子力機構が開発した余裕深度処分を対象とした地下水シナリオ評価ツール(以下、評価ツール)²⁾を基にして、地表水の硝酸性窒素濃度を計算した。

なお、本検討で採用する処分施設の形状や規模、施設周辺岩盤の水理特性、さらに長期的なその状態変化などの条件は、「日本原子力学会標準 余裕深度処分の安全評価手法：2008（以下、学会標準）³⁾」に示されたものを用いた。

2. 余裕深度処分対象廃棄物中の硝酸塩の地表水への影響評価

2.1 地表水の水質基準

日本における環境保全に関する法令は、環境基本法によって基本理念が定められ、この理念のもと体系づけられおり、環境保全上の支障を防止、あるいは環境影響評価の推進などを環境保全の基本的施策とし、個別法が制定されている(図 1)⁴⁾。これら法令のうち、余裕深度処分への準用が考えられる法令は、環境基本法に示された基本理念である「現在及び将来の世代の人間が健全で恵み豊かな環境の恵沢を享受するとともに人類の存続の基盤である環境が将来にわたって維持されるように適切に行われなければならない。(法 第三条)」に基づき、環境保全上の支障を未然に防止する観点から具体的施策として規定されている、「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」、「土壤汚染対策法」、「水質汚濁防止法」等が挙げられる。

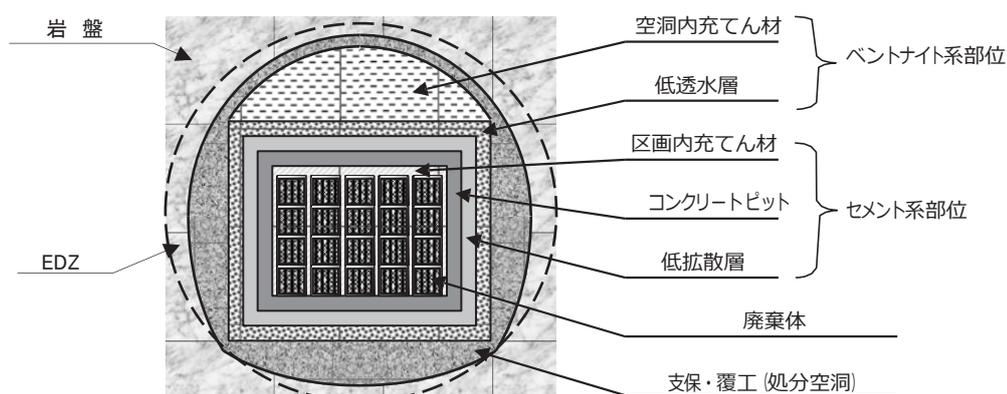
また、環境基本法第十六条に、「大気の汚染、水質の汚濁、土壤の汚染及び騒音に係る環境上の条件について、それぞれ、人の健康を保護し、及び生活環境を保全する上で維持されることが望ましい基準を定めるものとする。」ことが示されており、水質についての具体的な基準は「水質汚濁に係る環境基準について(環境庁告示第 59 号)」によって定められている。本検討では、評価の対象が硝酸塩中の硝酸性窒素(硝酸イオン)であることから、水質汚濁に係る基準の“硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素については 10mg/l 以下”を評価の基準とした。

2.2 地表水への影響評価

2.2.1 処分施設の概要

処分施設の設置位置条件及び処分システム^{注1)}については、「余裕深度処分の管理期間終了後における安全評価に関する考え方、平成 22 年 4 月 1 日、原子力安全委員会了承(以下、安全評価に関する考え方)⁵⁾」に基づく処分空洞内部の概念を踏まえて、以下の通り想定した。

- ①一般的な地下利用が行われない、放射性核種の移行抑制機能の高い地下数十 m 以深に埋設するという処分概念に基づき、深度 50m 以深に処分施設が設置される。
- ②岩盤は 1 種類とし、処分施設と岩盤の境界には掘削影響領域 (Excavation Disturbed Zone. 以下、「EDZ」) がある。
- ③図 2 に処分空洞内部の概念図を示す。廃棄体はコンクリートピット中に定置され、セメント系材料が充填される。
- ④コンクリートピットの外側に、拡散抑制効果を期待する低拡散層を設置する。
- ⑤処分施設に浸入する地下水量を低減させるため、低拡散層の周囲にベントナイトを用いた低透水層を設置する。



「余裕深度処分の管理期間終了後における安全評価に関する考え方」(原子力安全委員会)
(<http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/shinsashishin/pdf/3/ho100401.pdf>)⁵⁾より引用、加筆

図 2 処分空洞内部の概念図

人工バリアには廃棄体の区画内充填材、コンクリートピット及び低拡散層を構成するセメント系部位とその外側において施設内への地下水浸透の抑制効果を期待するベントナイト系部位とからなる。さらに、人工バリアの外側には岩盤からなる天然バリアがあり、これらからなる多重バリアによって、廃棄物からの放射性核種の移行を抑制する。

^{注1)}処分システム：人工バリア（処分施設において、処分空洞の外部に放射性核種が漏出しないような機能を有する部位）と天然バリア（処分施設周辺の岩盤）によって放射性廃棄物の生活環境への影響を防止するための仕組み。

2.2.2 処分施設の条件

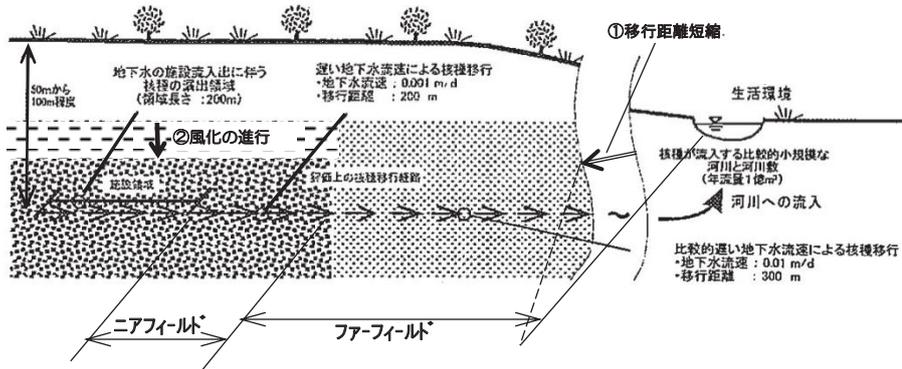
廃棄体層内の硝酸塩は、処分施設に浸入する地下水に溶解することで硝酸イオンとナトリウムイオンになる。硝酸イオンは、核種移行と同様に、地下水とともに、人工バリア及び天然バリア内を移行し、地表水に流入するものとした。そのため、環境への影響については、地表水中の硝酸性窒素濃度として評価するものとした。

(1) 廃棄体層及び人工バリア領域

余裕深度処分では地表から深さ 50m 以深に設置された処分坑道に廃棄物を埋設処分することが前提となっている。学会標準³⁾では、廃棄体層の形状を、幅 10m、高さ 10m、長さ 100m としており、図 2 ではコンクリートピットの内側部分に当たる。その外周をセメント系及びベントナイト系部位で構築された人工バリアが設置されているものとしている。本検討では、人工バリアの形状についても学会標準³⁾に従った。

(2) 天然バリア領域

図 3 に処分システム全体の概念図を示す。ここで天然バリア領域（ニアフィールド、ファーフィールド）について学会標準³⁾では、“①隆起・侵食による放射性核種の移行距離の短縮、②隆起・侵食による施設近傍岩盤の風化”の 2 点について長期的に影響を与える変動要因とし、表 1 に示すように岩盤（天然バリア領域の水理特性、移行距離が経時変化することを示している。



「低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準について(第3次中間報告)」(原子力安全委員会) (<http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/anzen/shidai/genan2000/genan064/siryo34.html>)⁶⁾

より引用、加筆

- ニアフィールド: 施設近傍岩盤。学会標準³⁾では埋設施設から 200m の範囲を指す。透水係数、地下水流速が岩盤の風化に伴って経時変化する領域。距離は 200m で固定。
- ファーフィールド: 施設近傍以外の岩盤。学会標準³⁾では埋設施設から 200m 以上の範囲を指す。隆起・侵食によって、その距離が減じる領域。

図 3 処分システム全体の概念

学会標準³⁾が示す水理特性のうち、透水係数と地下水実流速、さらに移行距離が経時変化するとしており、これらを本検討の計算に反映するため、使用した評価ツールでは移行距離を 500m に固定し、これを移行するのに必要な時間を経時変化させることで対応した。

以上、人工バリア及び天然バリアの形状、水理特性など評価パラメータを表 2 に示す。

表 1 学会標準³⁾における岩盤（天然バリア領域）の水利特性

施設近傍の岩盤(ニアフィールド)									
パラメータ	初期	1 万年後	2.5 万年後	4 万年後	10 万年度	25 万年度	40 万年度	100 万年度	
移行距離(m)	200	→							
透水係数(m/s)	1×10^{-8}	→					1×10^{-7}	→	
地下水実流速(m/y) [*]	0.1	→					1	→	
施設近傍以外の岩盤(ファーフィールド)									
パラメータ	初期	1 万年後	2.5 万年後	4 万年後	10 万年後	25 万年後	40 万年後	100 万年後	
移行距離(m)	300	→				150	30	→	

※地下水実流速：この表ではニアフィールドに適応するパラメータとしているが、学会標準³⁾ではこの流速について、ニアフィールド、ファーフィールドの両方に適応するものか、どちらか一方に適応するかは明示されていない。このため、本検討ではニアフィールドとファーフィールドともに同一の地下水流速であるとして扱った。

表 2 廃棄体層など諸元 *は学会標準³⁾の設定値

比較項目・パラメータ		単位	設定値				
媒体の特性	間隙率	廃棄体層	-	0.35*			
		コンクリートピット	-	0.20*			
		低拡散層	-	0.20*			
		ベントナイト層	-	0.40*			
		天然バリア(岩盤)	-	0.47*			
	岩盤他の透水特性	施設浸入水量(経時変化)	変化時期 m ³ /y	初期* 1.8×10^{-2} *	1 万後* 6.0×10^{-2} *	6 万年後* 1.5×10^{-1} *	10 万年後* 1.8×10^{-1} *
	地下水流速等から求めた天然バリア 500mの移行時間(経時変化)	変化時期 y	初期 1.1×10^4	4 万後 8.8×10^3	15 万年後 5.2×10^3	40 万年後 4.0×10^3	
形状	廃棄体層の長さ		m	100*			
	廃棄体層の高さ		m	10*			
	廃棄体層の幅		m	10*			
	コンクリートピットの厚さ		m	0.5*			
	低拡散層の厚さ		m	0.5*			
	ベントナイト層の厚さ		m	1*			
	EDZ の厚さ		m	2*			
	岩盤の幅		m	100*			
	岩盤の高さ		m	15*			
移行距離		m	500				

(3) インベントリ

本検討の対象は原子力機構の再処理施設から発生するアスファルト固化体に含まれる硝酸塩で、主に硝酸ナトリウム^{注2)} (NaNO_3 : 分子量 84.99) である。ここでは TRU 第 2 次レポート¹⁾で示された余裕深度処分対象の廃棄体に含まれる硝酸塩として 1,550 t をインベントリとした。

廃棄体体積は、原子力機構分として

$$13,296 \text{ (本)} \times 0.2 \text{ (m}^3\text{/本)} = 2,659.2 \text{ m}^3$$

であり、民間発生分の 468 m³ を加えても、廃棄体層の体積 10,000 m³ に対して、廃棄体の純体積では、定置には十分な余裕がある。一方で、ドラム缶形状 (円筒形状) であることを考えると、配置効率により実際に必要な容積が変動することから、厳密な設定には今後検討が必要である。本検討では、設定の 1 坑道に均等に配置すると仮定した。

硝酸塩は、常温では固体で、水溶性で熱水ほど良く溶ける化合物である。保守的な評価として、廃棄体層から移行する硝酸塩が最大となり、移行経路及び地表水系への放出地点でも硝酸性窒素濃度が高くなるように、硝酸塩の全量が瞬時放出を前提とした。

(4) 分配係数

廃棄体層及び人工バリアを構成するセメントとベントナイト、さらに天然バリアの岩盤の分配係数は、硝酸イオンが陰イオンであることから収着能は発現しにくいと考えられており⁷⁾、0.0 m³/kg に設定した。

(5) 河川流量

地下水とともに移行する硝酸イオンは、地表水に流入することを想定した。河川流量について、学会標準³⁾では地表水への放射性核種の移行経路として、「一般的と考えられる被ばく経路」として、 $1 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{y}$ の河川、湖沼など、「可能性が低いと考えられる被ばく経路」として $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{y}$ の河川または湖沼など、「可能性が極めて低いと考えられる被ばく経路」として $1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{y}$ 未満の河川などを挙げ、整理している。本検討ではこれを参考に、河川流量は $1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{y}$ 、 $1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ 、 $1 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{y}$ 、及び $1 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{y}$ の 4 ケースとした。

2.2.3 評価ツール

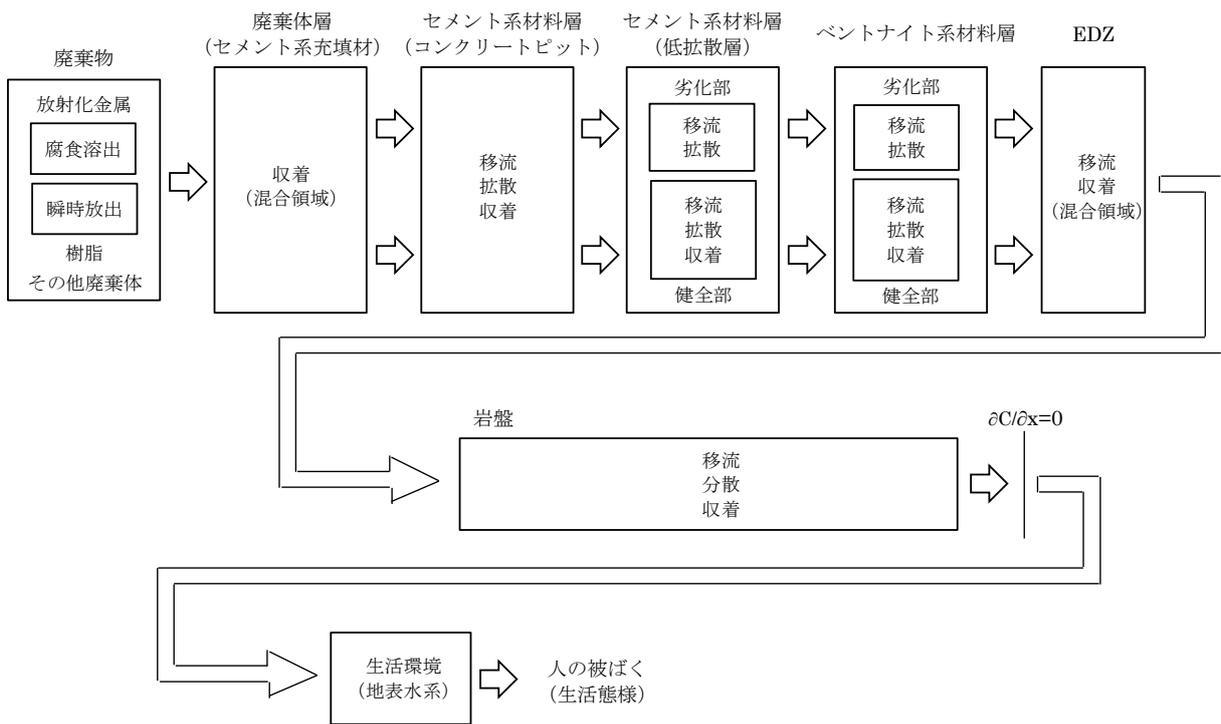
本検討で使用した評価ツールは、原子力機構が地下水シナリオ評価ツール²⁾として作成した評価ツールである。地下水シナリオ評価ツールは、一次元移流分散方程式をベースとした核種移行解析が可能で、人工バリア (廃棄体層、コンクリートピット、低拡散層、ベントナイト系材料層)、天然バリア (岩盤) 及び生活環境の複数の物理的・化学的特性の異なる領域を連結し、各領域の特性に応じた水理特性や核種移行、被ばく線量評価に係るパラメータなどを設定し、計算するツールである。地下水シナリオ評価ツール²⁾の考え方について以下に示す (図 4)。

注2)硝酸ナトリウム:再処理法として主流の PUREX 法では、特別な処理工程を設けない限り、廃液には硝酸塩(主に NaNO_3)が含まれるとされている(TRU 第 2 次レポート¹⁾)。この検討では、硝酸塩の総量を硝酸ナトリウムとして換算した。

評価ツールは処分システムの各バリア材のバリア性能に基づき、それらの性能を反映した物質移行が計算される設定となっている。各バリア材に想定したバリア性能を以下に示す。

- ① 廃棄体層には、廃棄物を収納した廃棄体と廃棄体の周囲に充填されたセメント系材料（充填モルタル）が存在する。充填モルタルには収着機能を考慮する。
- ② コンクリートピットにはセメント系材料に対する収着機能を考慮する。
- ③ 低拡散層には低い拡散係数による移行する物質の拡散抑制効果を想定する。ただし、打継などの潜在的界面への外力の作用などにより、貫通ひび割れが発生し卓越した移行経路となる可能性を考慮し、健全な部分と局所的に劣化した部分の二つの領域を設定する。健全部にはセメント系材料に対する収着機能を考慮するが、劣化部には充填物はないものとし収着機能は考慮しない。
- ④ ベントナイト系材料層には、低い透水係数により、物質移行が拡散に支配される程度まで施設への浸入水量の抑制効果を期待する。また、収着機能を考慮する。
- ⑤ 岩盤は割れ目の少ない多孔質媒体を想定し、収着機能を考慮する。

なお、本検討においては処分システムを移行した硝酸塩は全て河川等の地表水へ放出されるとし、地表水の硝酸性窒素濃度(mg/l)を計算した。



※本検討では、自由水中の分子拡散係数に各バリアの間隙率を乗じ、実効拡散係数として設定した。また、低拡散層とベントナイト系材料層の物質移行は収着機能を想定する健全部のみとし、劣化部は考慮しないこととした。

図 4 地下水シナリオ評価ツール概念図²⁾

2.2.4 計算結果

図 5 に河川水量別の河川水中の硝酸性窒素濃度の経時変化曲線を示す。ここでは、河川の流量を $1 \times 10^5 \text{m}^3/\text{y}$ 、 $1 \times 10^6 \text{m}^3/\text{y}$ 、 $1 \times 10^7 \text{m}^3/\text{y}$ 及び $1 \times 10^8 \text{m}^3/\text{y}$ とした。

図 5 に示すように、想定した規模の河川では環境基本法の水質基準を満足していることが分かった。また、地表水の硝酸性窒素濃度と河川流量の関係から、河川水量が $4 \times 10^4 \text{m}^3/\text{y}$ 以上の河川において、環境基本法が示す水質基準については満足すると考えられる。

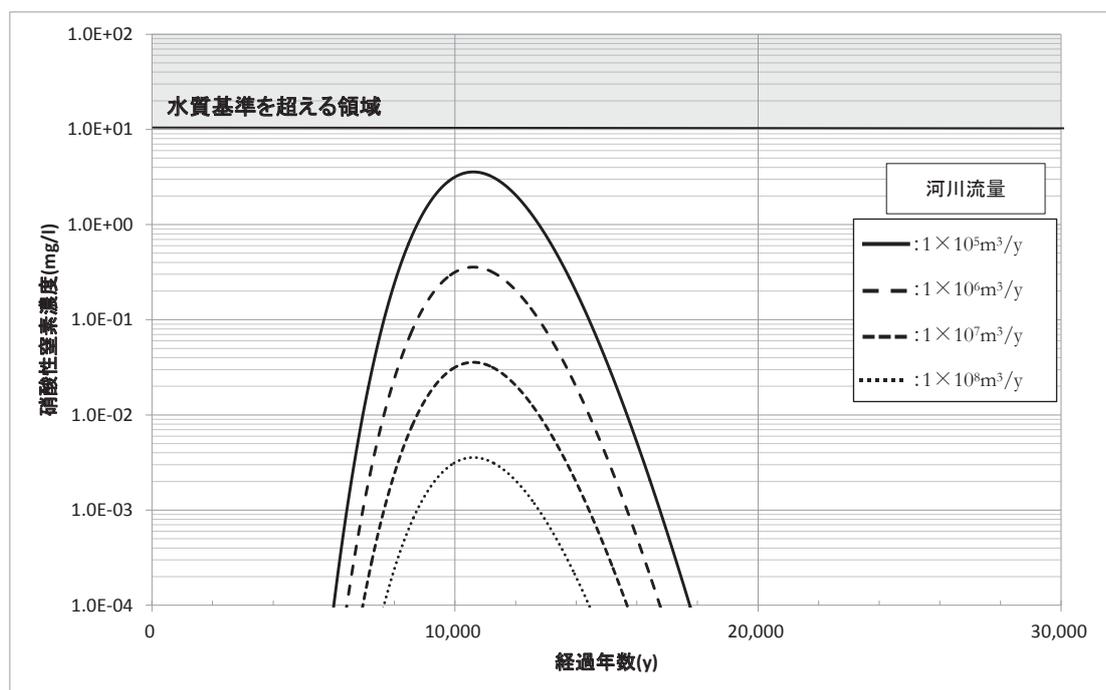


図 5 河川流量別の硝酸性窒素濃度の経時変化曲線

3. 硝酸性窒素濃度に与える廃棄体層の間隙率と各バリアの分配係数の感度

3.1 廃棄体層の間隙率

3.1.1 廃棄体層の間隙率の調査と設定

本検討では、1坑道の廃棄体層にアスファルト固化体の全量を定置し、含まれる硝酸塩は放射性物質の被ばく評価と同様に瞬時放出を前提として、地表水中の硝酸性窒素濃度を計算した。硝酸塩は水に易溶性ではあるが、硝酸塩と間隙水量からは瞬時放出は過飽和状態となっている可能性もある。そのため、廃棄体層の間隙率と硝酸塩の溶解量の関係を調査した。

廃棄体層の間隙率について学会標準³⁾では0.35としている。一方、原子力安全基盤機構の余裕深度処分に関する調査報告書⁸⁾では、被ばく線量評価の入力パラメータとして廃棄体層の間隙率は0.20としている。また、モルタルの最小間隙率は3~5%となる室内実験での研究例⁹⁾がある。

廃棄体層の間隙率は、学会標準³⁾を上限とし、下限はモルタルの最小間隙率を考慮して、0.05~0.35の範囲を想定した。

3.1.2 廃棄体層中の間隙水量と硝酸塩の最大溶解量

廃棄体層の大きさは、学会標準³⁾では幅10.0m、高さ10.0m、長さは100mとなっており、この全体積中の間隙率とその間隙を満たす地下水の体積を間隙水量として表3に示す。また、表中の硝酸塩最大溶解量は、各間隙水量に対する硝酸ナトリウムの25°Cにおける溶解度91.4g/100gH₂O¹⁰⁾での硝酸塩の最大溶解量を示す。

既述したように、本検討の設定では、1坑道あたりに定置される硝酸塩は1.55×10⁶kgである。この条件では、廃棄体層の間隙率が0.2以上であれば定置される硝酸塩は、全量の瞬時放出は可能であり、設定した廃棄体層間隙率(0.35)において瞬時放出とした設定は妥当であることが判明した。

表3 100m坑道1施設における廃棄体層の間隙率と間隙水量及び硝酸塩最大溶解量

(学会標準³⁾の埋設施設規模にて算定)

間隙率	間隙水量 (m ³)	硝酸塩最大溶解量(kg)
0.05	500	4.58×10 ⁵
0.10	1,000	9.17×10 ⁵
0.15	1,500	1.38×10 ⁶
0.20	2,000	1.83×10 ⁶
0.25	2,500	2.29×10 ⁶
0.30	3,000	2.75×10 ⁶
0.35	3,500	3.21×10 ⁶

3.2 硝酸イオンの分配係数とバリア材料毎の硝酸性窒素濃度の関係

3.2.1 硝酸イオンの分配係数の調査と設定

通常、岩石や土粒子表面は、中性から弱アルカリ性の地下水条件において負の電荷を帯びており、陰イオンの硝酸イオンの吸着能は発現しにくいと考えられている⁸⁾。しかし、TRU 第2次レポート¹⁾では陰イオンのヨウ素のセメント及び岩盤（花崗岩）の分配係数として、それぞれ $0.125 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$ 、 $0.1 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$ を設定している。また、農業・食品産業技術総合研究機構（九州沖縄農業研究センター）では、九州地方に分布する火山灰土壌に対する硝酸塩の分配係数の実測値を報告¹¹⁾している（表4）。ここでは、これらの既往研究成果を参考に分配係数を設定した。

表4 硝酸塩の分配係数に関する研究例¹¹⁾

土壌	分配係数($\times 10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$)
黒ボク	0.85
アカホヤ	4.79
黄色土	0.74
暗赤色土	0.70

(分配係数は平衡濃度が 1mmol/l の値を用いた。)

(1) セメント系材料の分配係数

TRU 第2次レポート¹⁾では、セメント系材料に対し陰イオンであるヨウ素の分配係数を $0.125 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$ とし、さらに硝酸塩プルームの評価において、硝酸イオンのセメント系材料に対する分配係数にヨウ素の分配係数を採用している。したがって、本検討ではセメント系材料に対する硝酸イオンの分配係数は $0.125 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$ を包絡する $0.0 \sim 0.5 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$ の範囲として設定し、セメント系材料からなるバリアでの硝酸性窒素最大濃度の低減率、最大濃度出現時刻の遅延率を求め、感度解析とした。

(2) 岩盤の分配係数

岩盤に対する硝酸イオンの分配係数は、TRU 第2次レポート¹⁾では岩盤の陰イオンのヨウ素の分配係数として $0.1 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$ とし、さらに硝酸塩プルームの評価においてもヨウ素の分配係数を採用している。また、硝酸塩の火山灰土の分配係数について、 $0.7 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$ とする報告¹²⁾があることから、分配係数は、 $0.0 \sim 1.0 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$ の範囲を設定した。

以上の調査結果をもとに、分配係数はバリア別に表5に示す範囲を仮定し、硝酸性窒素濃度に対する分配係数の感度解析を行った。

表 5 分配係数の設定範囲の一覧

バリア		主要材料	分配係数の設定 ($\times 10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$)
人工バリア	廃棄体層	セメント	0.0、0.125、0.5
	コンクリートピット		
	低拡散層		
	低透水層	ベントナイト	0.0
天然バリア	岩盤	—	0.0、0.1、0.5、1.0

なお、ベントナイトについては、TRU 第 2 次レポート¹⁾において、陰イオンのヨウ素の分配係数を $0.0 \text{m}^3/\text{kg}$ としていることから、本検討における硝酸イオンの分配係数も $0.0 \text{m}^3/\text{kg}$ として、感度解析の対象外とした。

3.2.2 計算結果

(1) 人工バリア領域（セメント系材料）

図 6 は、セメント系材料に対する硝酸イオンの分配係数と各人工バリアから外側のバリアへ移行する地下水中の硝酸性窒素濃度の低減率の関係を示す。低減率は、分配係数が $0.0 \text{m}^3/\text{kg}$ の時の硝酸性窒素最大濃度に対する比とした。図に示すように、セメント系材料からなる廃棄体層、コンクリートピット層及び低拡散層では、濃度の低減率はコンクリートピット層と低拡散層がほぼ同じになるが、廃棄体層では低減はやや少なくなった。

図 7 は、セメント系材料に対する硝酸イオンの分配係数と各人工バリアから外側のバリアへ移行する地下水中の硝酸性窒素最大濃度の出現時刻の遅延率の関係を示す。遅延率は、分配係数が $0.0 \text{m}^3/\text{kg}$ の時の最大濃度時刻に対する各バリアでの最大濃度出現時刻の比とした。図に示すように、コンクリートピット層と低拡散層では遅延効果が発生したが、廃棄体層では遅延効果は見られなかった。

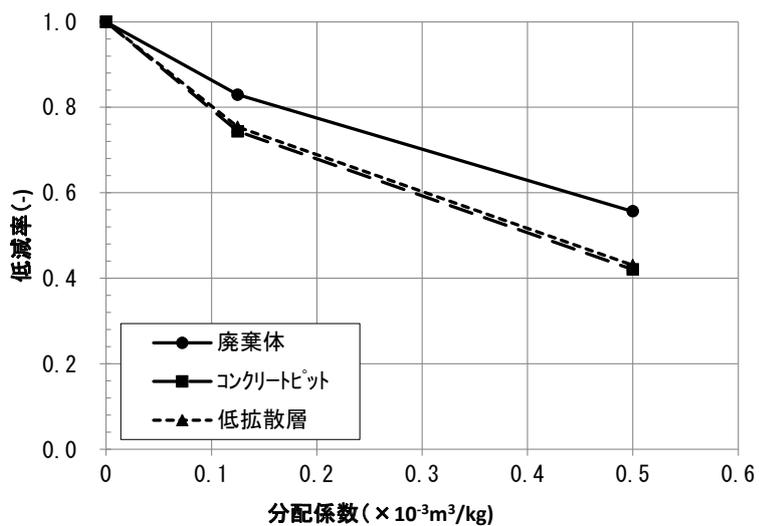


図 6 セメント系材料に対する硝酸イオンの分配係数と硝酸性窒素濃度低減率の関係

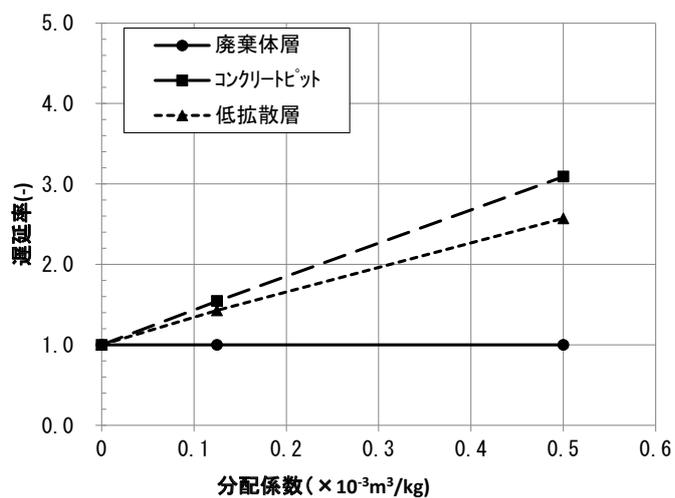


図 7 セメント系材料に対する硝酸イオンの分配係数と最大濃度出現時刻の遅延率の関係

(2) 天然バリア領域

図 8 は、天然バリア領域の分配係数を $0.0 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $0.1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $0.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ に設定した場合の地表水の硝酸性窒素濃度変化曲線を示す。また、表 6 に分配係数と地表水の硝酸性窒素最大濃度とその出現時刻をまとめた。

図 8 及び表 6 に示すように、硝酸性窒素最大濃度は分配係数が大きいほど小さく、最大濃度出現時刻は遅くなった。

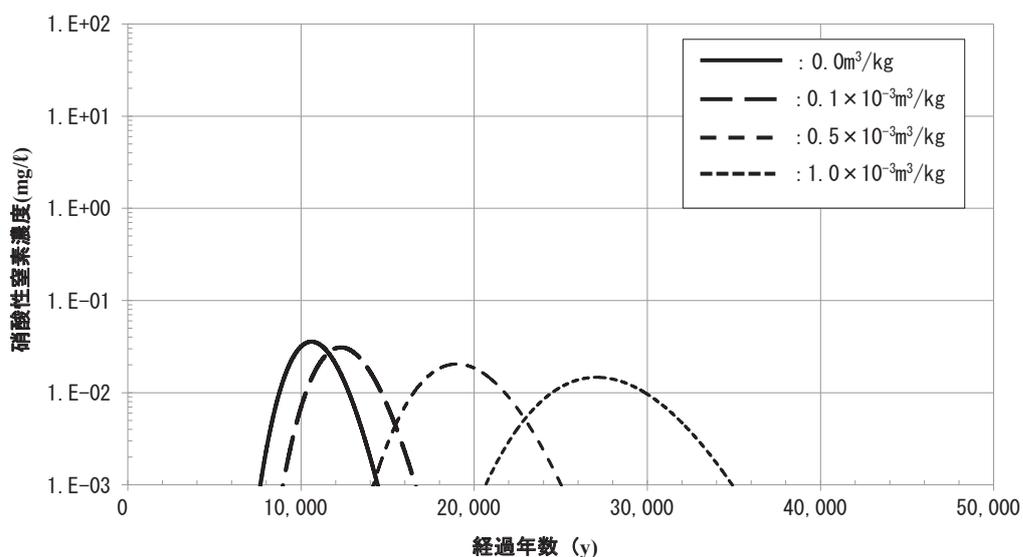


図 8 岩盤の分配係数を考慮した場合の地表水の硝酸性窒素濃度の経時変化曲線

表 6 地表水の硝酸性窒素濃度の一覧

分配係数 ($\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$)	地表水の硝酸性 窒素最大濃度 (mg/l)	最大濃度 出現時刻 (y)
0.0	3.57×10^{-2}	10,598
0.1	3.10×10^{-2}	12,306
0.5	2.05×10^{-2}	18,986
1.0	1.47×10^{-2}	27,050

3.3 処分システムにおける分配係数と地表水における硝酸性窒素濃度の関係

3.3.1 計算条件

人工バリア、天然バリアのそれぞれに分配係数を設定し、地表水中の硝酸性窒素濃度に対する分配係数の感度解析を行い、多重バリアの中で分配係数の感度について調査した。

計算条件は、処分施設などの規模、処分場所周辺の地盤モデル、水理特性、地盤モデル、基本条件などは前節までに設定したパラメータとし、分配係数は以下の値とした(表 7)。

表 7 分配係数一覧

ケース	人工バリア領域		天然バリア領域	備考
	セメント系部位	バントナイト系部位	岩盤	
ケース 1	0.0	0.0	0.0	2章の計算ケース
ケース 2	0.125	0.0	0.1	参考文献 ¹⁾ の分配係数
ケース 3	0.5	0.0	1.0	
ケース 4	0.5	0.0	0.0	
ケース 5	0.0	0.0	1.0	

単位 $\times 10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$

ケース 1 では人工バリア領域及び天然バリア領域の両方で期待しない設定の計算ケースである。ケース 2 では、セメント系部位と岩盤について TRU 第 2 次レポート¹⁾のヨウ素の分配係数とするケースである。ケース 3 は、3.2 の感度解析の中で設定した人工バリア領域、天然バリア領域での分配係数の最大値を想定した計算ケースである。ケース 4 は人工バリア領域のみ分配係数の最大値を想定した計算ケース、ケース 5 は天然バリア領域のみに分配係数の最大値を想定した計算ケースである。ケース 4、5 は分配係数を設定するバリアの違いによる影響を比較するための計算ケースである。

地表水の硝酸性窒素濃度は、処分施設から硝酸イオンとして 500m の天然バリアを移行し、地表水に到達するという経路を想定し計算した。また、地表水は河川水量 $1 \times 10^7 \text{m}^3/\text{y}$ の河川を想定した。

3.3.2 計算結果

計算結果の硝酸性窒素濃度の経時変化曲線を図 9、硝酸性窒素最大濃度と最大濃度出現時刻を表 8 に示す。

図 9 及び表 8 に示すように、地表水における硝酸性窒素濃度は、 $0.015 \sim 0.036 \text{mg/l}$ となった。この最大濃度出現時刻は、ケース 1 または 2 では 1 万～1.2 万年後となったが、分配係数を最大値としたケースでは 2.7 万年後となっており、分配係数によって最大濃度出現時刻に遅延がみられた。また、ケース 4 は人工バリア領域のみに $0.5 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$ の分配係数を仮定したケースでは、地表水の硝酸性窒素濃度の経時変化曲線はケース 1 とほぼ一致し、最大濃度及び最大濃度出現時刻もケース 1 と有意な差は見られなかった。同様に、ケース 5 は天然バリア領域のみに $1.0 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$

の分配係数を仮定したケースでは、地表水の硝酸性窒素濃度の経時変化曲線はケース3とほぼ一致し、最大濃度及び最大濃度出現時刻もケース3と有意な差は見られなかった。これらのことから、地表水の硝酸性窒素濃度に対する人工バリア領域での分配係数に対する感度は低く、天然バリア領域での分配係数に対する感度が高いことが分かった。

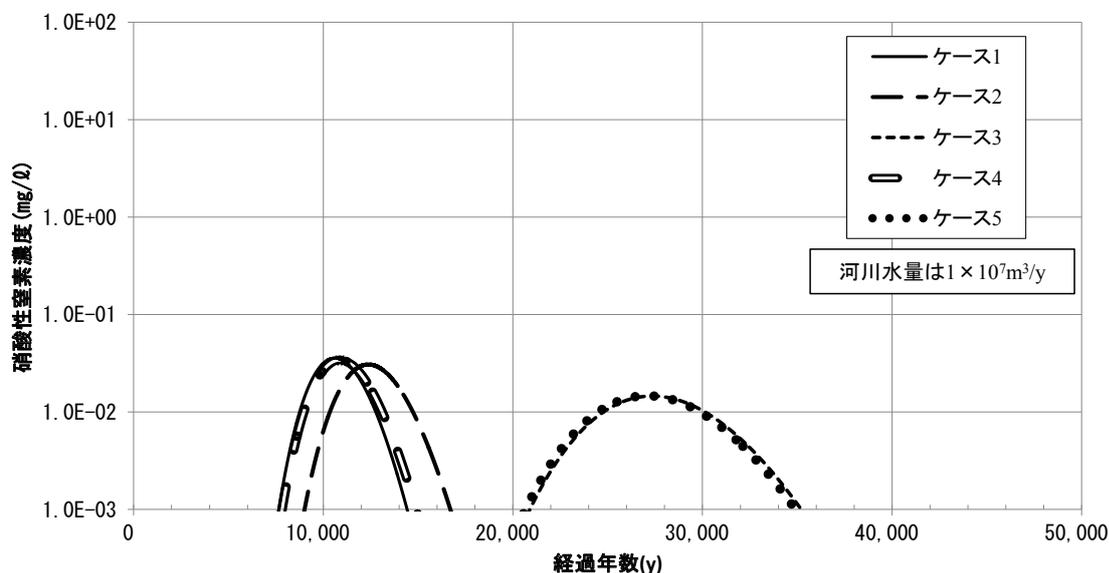


図 9 地表水中の硝酸性窒素濃度の経時変化曲線

表 8 地表水の硝酸性窒素濃度結果一覧

ケース	硝酸性窒素濃度		備考
	最大濃度(mg/l)	最大濃度出現時	
ケース 1	3.57×10^{-2}	10,598	2章の計算ケース
ケース 2	3.08×10^{-2}	12,370	参考文献 ¹⁾ の分配係数
ケース 3	1.46×10^{-2}	27,340	
ケース 4	3.41×10^{-2}	10,864	
ケース 5	1.47×10^{-2}	27,050	

4. まとめ

本件は、原子力機構が余裕深度処分対象としている廃棄物のうち、再処理施設から発生するアスファルト固化体に含まれる硝酸塩について、処分施設閉鎖後における環境影響評価の一環として、学会標準³⁾に示された条件のもとで地表水中の硝酸性窒素濃度を評価したものである。その結果、設定した規模の地表水における硝酸性窒素濃度は、いずれも環境基本法の水質基準を満足する結果となった。

また、本検討では、アスファルト固化体中の硝酸塩が地下水に溶解し、移行する過程について、定置する硝酸塩全量が廃棄体層の間隙水中に瞬時放出され、廃棄体層中で硝酸性窒素濃度が最大になることを想定した計算を実施した。これについて、学会標準³⁾などで設定している廃棄体層の間隙率では、アスファルト固化体中の硝酸塩は間隙水に全量溶解できる環境であり、評価上の扱いとして瞬時放出が適当であることが分かった。

さらに、埋設施設から地表に湧出するまでの経路において、経路上の固相収着の効果について、分配係数をパラメータとして、感度解析を行った。その結果、地表水での硝酸性窒素濃度への感度は人工バリア領域の分配係数は低く、天然バリア（岩盤）領域の分配係数は高いことが分かった。

一方、本検討では硝酸イオンの還元雰囲気天然バリアでの微生物分解を考慮していない。これは微生物の活性状態によって地下水中の硝酸イオン濃度の低減幅に差が生じると考えられるためである。このため、硝酸イオンの微生物分解に期待しない状態での移行を想定し、地表水の硝酸性窒素濃度で環境影響を評価することが保守的であると考えた。しかし、地表近くでの微生物分解は、牧野ほか(1997)¹²⁾などの研究成果などがあり、こうした研究成果を反映させ、評価ツールの改良や諸条件設定などを行うことで、より現実的な評価が可能になるものと考えられる。

参考文献

1. 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, FEPC TRU-TR2-2005-02, 556p.
2. 酒谷圭一, 菅谷敏克, 中谷隆良, 船橋英之, GoldSim による余裕深度処分を対象とした地下水シナリオ評価ツールの作成, JAEA-Data/Code 2013-015, 2013, 63p.
3. 日本原子力学会, 日本原子力学会標準 余裕深度処分の安全評価手法 : 2008, AESJ-SC-F0123:2008, 2008, 156p.
4. 環境省総合環境政策局環境計画課, 公害防止計画制度に係る参考資料, 2009.
5. 原子力安全委員会, 余裕深度処分の管理期間終了後における安全評価に関する考え方, 22 安委第 24 号, 2010, 90p, <http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/shinsashishin/pdf/3/ho100401.pdf>.
6. 原子力安全委員会, 低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準について (第 3 次中間報告), 2000, 135p, <http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/anzen/shidai/genan2000/genan064/siryos34.html>.
7. 山本定博, ハイドロタルサイト様鉱物の硝酸イオン吸着特性と土壌の硝酸保肥能改善効果, <http://www.pref.tottori.lg.jp/secure/317363/H17ToridaiYamamoto.pdf>.
8. 原子力安全基盤機構, 平成 19 年度放射性廃棄物処分に関する調査 (余裕深度処分に関する調査) 報告書, 08 基廃報-0002, 2008, 185p.
9. 渡辺暁央, 五十嵐心一, 川村満紀, 鉱物質混和材を混入したセメントペーストおよびモルタルの毛細管空隙構造の特徴を力学特性, コンクリート工学年次論文集, vol.24, 1, 2002, pp.483-488.
10. 長倉三郎, 井口洋夫, 江沢洋, 岩村秀, 佐藤文隆, 久保亮五, 岩波理化学辞典 第 5 版, 1998, 1872p.
11. 鹿児島農開セ大隅支場・環境研究室, 鹿児島県の主な畑土壌における硝酸態窒素の吸着特性, 農業・食品産業技術総合研究機構, 九州沖縄農業研究センター, 平成 19 年度九州沖縄農業研究成果情報, http://www.naro.affrc.go.jp/org/karc/seika/kyushu_seika/2007/2007327.html (参照 2014-12-01).
12. 牧野明寛, 武田信荘, 土壌中の物質移動 —物質の地中移行に関する要因と評価モデルの検討—, PNC TN8420 97-006, 1997, 129p.

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
物質の量	モル	mol
光度	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	立法メートル	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	毎メートル	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	キログラム毎立方メートル	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
比透磁率 ^(b)	(数字の)	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
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz	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
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s
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
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	Vs
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
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)
放射線量	グレイ	Gy	J/kg
放射性核種の放射能 ^(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
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
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 (CI-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
粘力のモーメント	ニュートンメートル	N m
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m
角速度	ラジアン毎秒	rad/s
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K
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)
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²
誘電率	ファラド毎メートル	F/m
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol
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)
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr
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)
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³

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	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=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	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=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=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベール	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
エルグ	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 =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /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=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=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	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

