

地層処分人工バリアの設定値に関する考察 (3) 緩衝材の厚さ

大江俊昭*1 大滝裕也*1 若杉圭一郎*2

地層処分における緩衝材の必要厚さを評価した。我が国での地層処分の技術的可能性を論じた報告では、緩衝材の厚さを決める因子はオーバーパックの腐食膨張により発生する応力を緩衝する能力であり、オーバーパックが0.19m厚の場合に緩衝材厚さは0.7m必要であった。一方、これまでの著者らの検討でオーバーパックを0.11mに減肉できる可能性があるため、それにともない力学的健全性が確保できるか否かを再評価した。その結果、緩衝材の厚さが0.5mであっても応力緩衝性が維持され、オーバーパックの力学的健全性が確保できることがわかった。人工バリア設定値に対する一連の再評価によって、ガラス固化体の溶解寿命の延伸、オーバーパックおよび緩衝材の厚さ低減の可能性が示された。さらに、再設定した人工バリアに対して核種移行解析を行っても、人工バリアからの核種の放出速度に著しい増加は認められなかった。

Keywords: 緩衝材, 応力緩衝性, 核種放出速度, 地層処分

The report estimates the thickness of the buffer material utilized in the geologic disposal. The overall safety report on the geologic disposal in Japan showed the thickness is 0.7m because of the buffering capability of mechanical stress arising due to volume expansion during the corrosion of the 0.19m thick overpack. The overpack thickness was possibly reduced to 0.11m according to our previous study and this reduction lowers the necessary thickness of the buffer material as 0.5m. Even though the reduction was encountered, the mechanical stability of overpack was maintained. Series of the design study of the engineered barrier components had been carried out so far. As results the longer corrosion life of the vitrified waste and thinner overpack and buffer material had been informed. No drastic increase of the nuclide release rates out of the engineered barrier for some important nuclides was observed by nuclide migration analysis even when the re-estimated settings were assumed.

Keywords: Buffer material, Stress buffering capability, Nuclide release rates, Geologic disposal

1 はじめに

筆者らは、技術的観点から我が国において地層処分が実現可能か否かを論じた報告書(以下第2次取りまとめ)[1]に記載された人工バリアの設定に対して、①ガラス固化体の溶解寿命延伸の可能性[2]、②オーバーパック厚さの軽減の可能性[3]について検討してきた。①はガラス固化体の長期的な溶解速度が温度と表面積に依存し、時間の経過とともに崩壊熱が下がることによって温度が低下すること、溶解によってガラス固化体の表面積が減少することの2つの効果を考えると、第2次取りまとめで評価した結果よりも長い溶解寿命が期待できることを示している。また、②は地下水の放射線分解によって生成する酸化性化学種の生成速度を計算する評価式を見直すことで、オーバーパックに求められる必要遮へい厚さを低減できることを示している。これらの可能性を考慮すると、同じ人工バリアの構成要素である緩衝材に関する設定についても検討の余地があると考えられる。

第2次取りまとめにおいて、緩衝材に関する設計因子としては10項目を挙げ、これらのうち応力緩衝性が決定因子となって緩衝材厚さが0.7mと設定されている。一方、著者らの検討に従いオーバーパック厚さが変わると、応力緩衝性にも影響が及び、緩衝材の厚さも見直される可能性がある。そこで、第2次取りまとめに記載の方法およびデータを踏襲しながら、緩衝材厚さを再評価した。また、人工バリア設定値の再設定が核種保持機能にどのような影響を

与えるかを核種移行解析によって明らかにした。

2 緩衝材厚さの再設定

2.1 応力緩衝性

これまでの検討で、遮へい性能の観点からオーバーパック胴体部の厚さを0.11mに低減できる可能性を示したので、ここでは減肉があってもオーバーパックの力学的健全性が確保できるかどうかを評価した。そのために緩衝材からの圧密反力を求めた。この圧密反力は、オーバーパックの腐食膨張に伴って発生する力が緩衝材に作用して緩衝材は圧密を受け、その結果として発生する力である。これが反力としてオーバーパックに作用することになる。解析のための式、力学データはすべて第2次取りまとめの手順を記載した資料[4]にしたがい、第2次取りまとめと同様にオーバーパックに対して1000年間の隔離機能を設定し、1000年間の腐食によって生ずる体積膨張による応力を求めた。オーバーパックには圧密反力の他に静水圧と岩盤のクリープ変形(母岩が軟岩の場合)による力を合わせた荷重が負荷されるので、これらに対して力学的に健全なオーバーパックの厚さを確認した。

硬岩および軟岩を母岩とする場合について、Fig. 1に胴体部の、Fig. 2に蓋部のそれぞれ必要な厚さを示す。なお、この厚さは腐食代0.04mをあらかじめ足し込んだ必要厚さである。図から、両岩種ともに緩衝材厚さが0.3mを超えると力学的に必要なオーバーパック厚さはほぼ一定になることがわかる。また、前述の遮へい機能上の必要厚さである胴体部厚さ0.11mに対しては0.4m以上の緩衝材厚さがあれば力学的には健全であると考えられる。一方、蓋部については胴体部と同じ厚さでは力学的健全性を保てず、0.15mに設定する必要がある。

上述の資料[4]では緩衝材の厚さを0.4~0.7mの範囲で設

Studies of the setting of engineered barrier configuration utilized in geologic disposal (3) Buffer Material Thickness by Toshiaki OHE (ohe@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp), Yuya OHTAKI, Keiichiro WAKASUGI.

*1 東海大学

Tokai University

〒259-1292 神奈川県平塚市北金目4-1-4

*2 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター

Japan Atomic Energy Agency Horonobe Underground Research Center

〒098-3224 北海道天塩郡幌延町字北進432番地2

(Received 16 January 2017; accepted 23 March 2017)

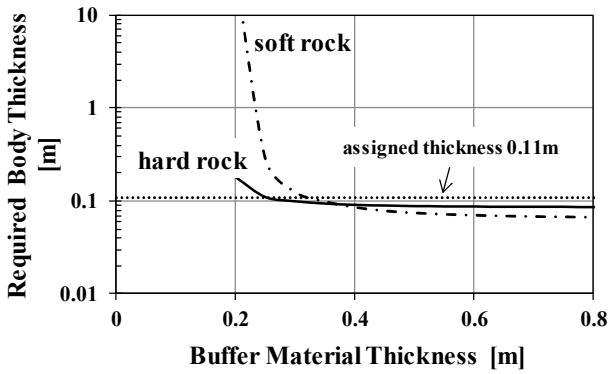


Fig. 1 Overpack body thickness to endure mechanical stress and corrosion

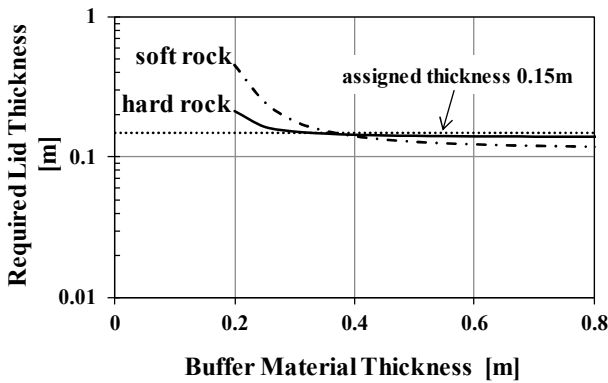


Fig. 2 Overpack lid thickness to endure mechanical stress and corrosion

定することを提唱しているのので、緩衝材厚さが 0.4m 以上あれば、緩衝材の応力緩衝性によって圧密反力が急激に増加することはないと考えられ、ここではやや余裕を見込んで 0.5m を緩衝材の厚さとした。

2.2 他の設計因子

上記であげた緩衝材の設計因子のうち自己シール性とコロイドろ過性は緩衝材の密度が制約条件であり、厚さは関与しない。また、各々の因子が要求する密度は、第2次取りまとめに従えば、前者が 1.4Mg m⁻³ 以上、後者が 1.0Mg m⁻³ 以上である。これらをもとに、第2次取りまとめでは乾燥密度 1.6Mg m⁻³ としており、本検討においてもこの数値を用いた。

3 人工バリアの再設定に伴う核種移行挙動の変化

これまで検討してきた①ガラス固化体溶解寿命の見直し、②オーバーパック厚さの再設定に加え、今回評価した③緩衝材厚さの再設定に伴って人工バリアの設計寸法が変わることになるので、最終的な形状の人工バリア中での核種移行挙動がどのような影響を受けるかを評価した。

3.1 解析体系

人工バリア中の核種移行挙動は円筒一次元体系の拡散方程式によって解析した。また、解析対象の人工バリアの体

系を、第2次取りまとめにしたがって Fig. 3 のように設定し、緩衝材とオーバーパックの高さを同じにとった。解析体系を円筒1次元に簡素化しているため、緩衝材の高さ H は、第2次取りまとめと同様に、緩衝材に核種が供給されるオーバーパックの全外表面積をもとに仮想的な高さとして式(1)で与えた。本検討の例では、オーバーパックの実高さはガラス固化体の高さ 1.35m にオーバーパック蓋部の厚さ 0.15m と底部の厚さ（蓋部と同じ）を加えた 1.65m であり、仮想高さは 1.98 m となる。

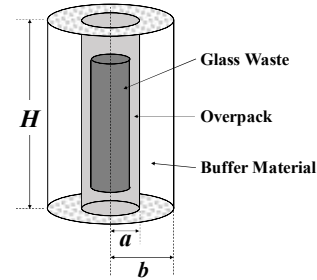


Fig. 3 Simplified configuration of engineered barrier

$$H = \frac{2\pi \cdot a^2 + 2\pi \cdot a \cdot H_{ovp}}{2\pi \cdot a} = a + H_{ovp} \quad (1)$$

H : オーバーパック（緩衝材）の仮想高さ [m]

H_{ovp} : オーバーパックの実高さ [m]

a : オーバーパックの外側半径 [m]

3.2 定性的評価

核種移行解析に先立って、拡散方程式の定常解から、緩衝材の厚さを変えた場合の核種放出速度の定性的な傾向を把握した。定常解の境界条件は、難溶性核種の場合には入口濃度が一定、可溶性核種の場合は入口速度が一定、の各々の条件が適用できる。

出口境界条件は Fig. 4 に示すように、第2次取りまとめにしたがって、緩衝材周囲の掘削影響領域を流れる地下水によって核種が瞬時に混合希釈されるとする mixing cell モデルを採用して式(2)のように設定した。このモデルが現実の体系に適合しているかどうかは議論の余地があるが、本検討では第2次取りまとめとの相互比較が狙いのため、これ以上立ち入った議論はしない。

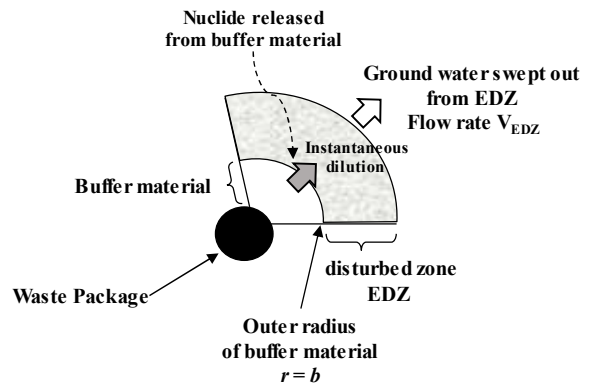


Fig. 4 Nuclide discharged into disturbed zone and swept out

$$F_b = -D_e \frac{\partial C}{\partial r} \Big|_{r=b} = K \cdot C \Big|_{r=b} \quad (2)$$

$$K = V_{EDZ} / (2\pi \cdot b \cdot H)$$

F_b : 出口の核種拡散放出フラックス [Bq m² s⁻¹]

D_e : 核種の実効拡散係数 [m² s⁻¹]

V_{EDZ} : 掘削影響領域の流量 [m³ s⁻¹]

b : 緩衝材の外側半径 [m]

3.2.1 掘削影響領域の流量

第2次取りまとめでは掘削影響領域の流量 V_{EDZ} が緩衝材厚さ 0.7m, オーバーパック厚さ 0.19m の場合の1点しか与えられていないので, 流量を緩衝材の外側半径をパラメータとして得ておく必要がある. ここでは, 人工バリア近傍の定常地下水流動場を表す円筒2次元の定常解[5]を基に掘削影響領域の流量を概算した.

緩衝材の透水係数は周辺岩盤のそれよりも格段に小さいと考えられるから, 緩衝材を不透水層と仮定すれば, 掘削影響領域を流れる地下水流量は式(3)から得られる. ただし, この式は多孔質媒体を前提としているので, 掘削影響領域のような亀裂性媒体に適用するうえで, 第2次取りまとめと同じ条件において同等の地下水流動が再現できることを確認して妥当性を判断することとした.

$$Q_d = 4 \cdot U_D \cdot d \frac{\alpha(S^2 - 1)}{\alpha(S^2 - 1) + (S^2 + 1)} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{k_1}{k_2}, \quad S = \frac{d}{b}$$

Q_d : 緩衝材単位高さ当たりの流量 [m³ m⁻¹ s⁻¹]

U_D : 周辺岩盤中のダルシー流速 [m s⁻¹]

k_1, k_2 : 多孔質に近似した媒体の透水係数 [m s⁻¹]

(1: 掘削影響領域, 2: 周辺岩盤)

d : 掘削影響領域の外側半径 [m]

評価に用いたデータを, 第2次取りまとめ記載のもの(H12 Report)と本検討(This work)のものとを比較し Table 1 に示す.

第2次取りまとめにしたがって, 動水勾配を 0.01, 母岩

Table 1 Parameter values used in the flow rate calculation

Parameters		Symbols	Unit	H12 Report	This work
Undisturbed Darcy velocity		U_D	m s ⁻¹	1 × 10 ⁻¹²	
Hydraulic conductivity	Disturbed zone	k_1	m s ⁻¹	1 × 10 ⁻⁹	
	Host rock	k_2	m s ⁻¹	1 × 10 ⁻¹⁰	
Outer radius	Glass Waste	-	m	0.22	0.22
	Overpack	a	m	0.41	0.33
	Buffer material	b	m	1.11	0.83
	Disturbed zone	d	m	1.61	1.33

の透水係数を 1 × 10⁻¹⁰ m s⁻¹, 掘削影響領域のそれを周辺岩盤の 10 倍ととり, 掘削影響領域の厚さを 0.5m とした. ただし, This work と記述したものではオーバーパックの厚さをこれまでに検討した値に変更した.

緩衝材の高さを前述の 1.98m, オーバーパック厚さを 0.11m とし, 緩衝材厚さをパラメータとして掘削影響領域中の流量を求めた結果を Fig. 5 に示す. 図中の破線の領域は, Fig.1 からわかるように, オーバーパック厚さが 0.11m では力学的健全性を保てない領域であり, ここでは対象外である.

式(3)の適用性を確認するため, 第2次取りまとめと同じオーバーパック厚さ (0.19m) と緩衝材厚さ (0.7m) にした場合の流量を求めると約 2 × 10⁻¹¹ m³ s⁻¹ (図中の H12 dimension) となり, 第2次取りまとめ記載の 3 × 10⁻¹¹ m³ s⁻¹ と同等の値であったことから, 概略の評価に式(3)を用いることは妥当と判断した. また, 緩衝材の厚さを 0.7m から 0.5m に変えると, 定性的には流量が小さくなると考えられる. 一方, 核種放出速度の観点からは, 後述する定常解からも推測できるように, 放出速度は掘削影響領域の流量に比例するため, 第2次取りまとめの設定のまま流量を高めにして解析を行うことは保守的な結果を導くと考えられる. また, 適用式が多孔質媒体を前提としていることを考慮し, 以降の解析では, 掘削影響領域の流量は第2次取りまとめに記載の数値のままとした.

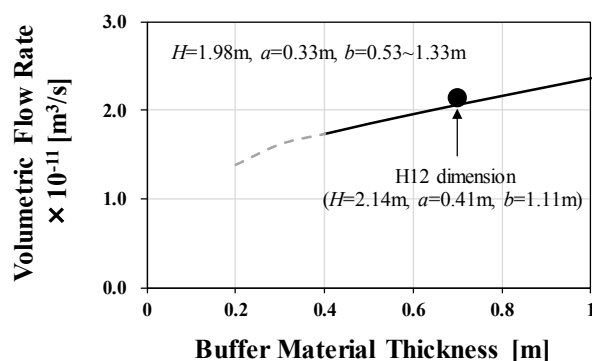


Fig. 5 Volumetric flow rate passing through engineered disturbed zone

3.2.2 定常解

まず, 1次元円筒体系の定常解を用いて緩衝材中核種移行挙動の定性的な評価を行った. 簡単のため放射性壊変は無視した. 可溶性核種に対する定常解は式(4)のように単純であり[6], 核種放出速度は緩衝材の厚さに依存しない.

$$R_{b,con} = R_0 \quad (4)$$

$R_{b,con}$: 固体1体当たりの可溶性核種放出速度 [Bq s⁻¹]

R_0 : 固体からの核種溶出速度 [Bq s⁻¹]

一方, 式(1)の境界条件に対する難溶性核種の拡散方程式の定常解は式(5)のようになる[7]. この式では, 寸法の見直しによる違いは内径と外径の比 a/b の対数としてあらわれるため, 緩衝材の厚さが増えようとも a/b の値が極端に大きな数値, つまり過大な緩衝材厚さにならない限り, 緩衝材

からの核種放出速度はあまり変化しないことがわかる。

$$R_{b,sol} = 2\pi \cdot b \cdot H \cdot C_0 \cdot D_e \frac{\frac{K}{D_e}}{1 + \frac{K}{D_e} \cdot b \cdot \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (5)$$

$R_{b,sol}$: 固化体 1 体当たりの難溶性核種放出速度 [Bq s⁻¹]
 C_0 : 難溶性核種の溶解度 [Bq m⁻³]

さらに、本検討の設定範囲内では $1 \gg K/D_e \cdot b \cdot \ln(b/a)$ ので、次の近似式が成り立つ。

$$R_{b,sol} \approx 2\pi \cdot b \cdot H \cdot C_0 \cdot K = C_0 \cdot V_{EDZ} \quad (6)$$

以上から、緩衝材からの核種放出速度に関しては、可溶性核種および難溶性核種どちらも緩衝材の厚さの変化による影響は少ないと予想される。

3.3 詳細解析

3.3.1 解析方法

これまでの検討結果に従い人工バリアの寸法を再設定した場合に、核種移行挙動にどの程度の影響があらわれるかを数値解法により詳細解析した。解析には汎用解析コードの GoldSim[8]を用い、解析データは、破損したガラス固化体の粒径分布をべき乗則で表現したべき乗分布モデルで評価すること、見直しをした寸法を用いることを除いては、すべて第 2 次取りまとめに記載のものと同じとした。ここで、べき乗分布モデルを用いたのは、ガラス固化体の寿命延伸の影響を明示的に見るためで、これまでの検討から、Fig. 6 に示すように、第 2 次取りまとめの値のおよそ 10 倍の溶解寿命になる可能性が示されている[2]。

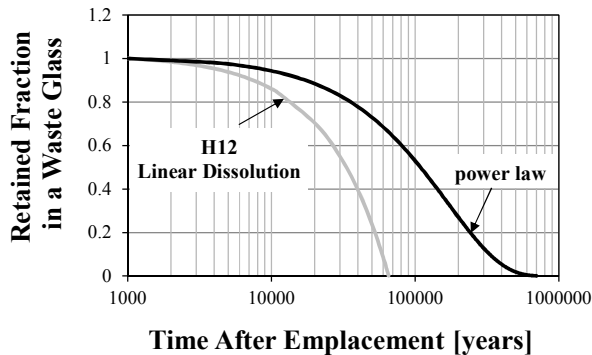


Fig. 6 Glass dissolution behavior speculated by the power law model and the linear dissolution model

人工バリアからの核種放出速度に着目して、安全評価上重要な長半減期核種である ⁷⁹Se (半減期 6.5 万年、32.7 万年との報告があるが[9]、ここでは第 2 次取りまとめと同じとした。)、⁹⁹Tc (21.3 万年)、¹²⁶Sn (10 万年)、¹³⁵Cs (230 万年)、²³⁷Np (214 万年) の 5 核種を評価対象とした。また、解析を単純化するため、²³⁷Np の崩壊系列は考慮せず単独核種として扱った。なお、親核種 ²⁴¹Am などの崩壊系列を考慮した場合と比較しても結果に大きな相違がないことは予め確認済みである。

3.3.2 解析結果

解析結果を Fig. 7 に示す。図中の実線は本検討による設定を行ったもの、破線は第 2 次取りまとめの設定をそのまま用いたものである。

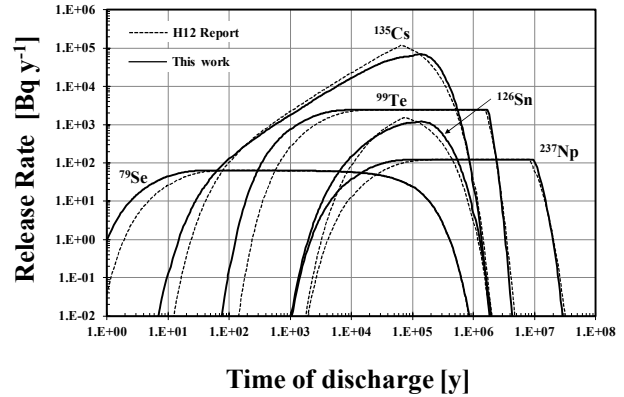


Fig. 7 Nuclide release rates from buffer material with and without changing the dimensions and lifetime

図から、緩衝材を薄くした場合には、緩衝材層からの核種の放出速度の立ち上がり若干早くなるが、最大放出速度を見ると、難溶性核種は式(5)に示す定常解からわかるように、厚みの増減は核種の放出速度にほとんど影響しない。また、可溶性核種では、式(4)からわかるように、ガラス固化体の寿命延伸による固化体からの核種供給速度の減少が働き、核種の最大放出速度は低下する。このように、詳細解析の結果は定常解から得られる定性的判断と整合的であり、今回の見直しにしたがった設定においても、人工バリアからの核種放出速度の最大値は難溶性核種、可溶性核種どちらも増加しないことが判る。

4 まとめ

我が国での地層処分の技術的可能性を論じた報告では、緩衝材の厚さを決める因子はオーバーパックの腐食膨張により発生する応力を緩衝する能力であり、第 2 次取りまとめでは、オーバーパックが 0.19m 厚の場合には緩衝材厚さが 0.4~0.7m であればよいことが示され、保守的に 0.7m と設定されている。一方、筆者らのこれまでの検討でオーバーパックを減肉できる可能性があるため、それに伴って緩衝材の圧密反力を求め直すと、同様に、緩衝材厚 0.4m 以上であればオーバーパックの力学的安定性を維持できることがわかった。そこで、余裕を見込んで緩衝材厚を 0.5m と設定した。また、人工バリア設定値に対する一連の再評価によって、ガラス固化体の溶解寿命の延伸、オーバーパックおよび緩衝材の厚さ低減の可能性が示された。さらに、再設定した人工バリアに対して、第 2 次取りまとめと同様の手法で評価する限り、核種移行解析を行っても人工バリアからの核種の放出速度に著しい増加は認められなかった。第 2 次取りまとめは地層処分の成立性を述べた報告であり、処分場設計の最適化を意図したのではないので、随所に安全側の設定が施されている。それに対して、本検討は簡易的な評価ではあるが、第 2 次取りまとめで示された

人工バリアの設計について見直し可能な点があることを示した。

我が国においては、人工バリアの設計に関して総合的に取り組んだ事例はきわめて少なく、最適化の余地が残されていることは否めない。第2次取りまとめのようなサイトジェネリックな評価の時代から約18年を経て処分場の立地選定、建設へとプロセスが具体的に進展することを考えると、施工性やコストなど、安全性以外の評価因子を加えながら、安全性を損なうことなく、かつ実効的な人工バリアを設計することは時代の要請であろう。そのためには、新たな情報を取り込みながら設計、評価のプロセスを繰り返し行うことが重要である。

謝辞

神戸大学の飯塚敦教授には、緩衝材の力学計算についてご教示いただいた。ここに感謝いたします。

参考文献

- [1] 核燃料サイクル開発機構: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次第2次取りまとめ, 平成11年.
- [2] 大江俊昭, 若杉圭一郎: 地層処分人工バリアの設定値に関する考察 (1) ガラス固化体の溶解寿命, 原子力バックエンド研究, Vol.24-1, pp.27-32, (2017).
- [3] 大江俊昭, 大滝裕也, 高橋裕太, 助川篤彦: 地層処分人工バリアの設定値に関する考察 (2) 炭素鋼オーバーパックスの厚み, 原子力バックエンド研究, Vol.24-1, pp.33-38, (2017).
- [4] 杉野弘幸, 藤田朝雄, 谷口航, 長谷川宏, 岩佐健吾: 緩衝材設計の考え方, 核燃料サイクル開発機構研究報告, JNC TN8400 99-096, (1999).
- [5] Kang, Chul-Hyung: Mass Transfer and Transport of radionuclides through Backfill in a Geologic Nuclear Waste Repository, Doctor Dissertation, University of California at Berkeley, (1989).
- [6] Carslow, H. S., and Jaeger, J. C.: Conduction of Heat in Solids 2nd Ed., pp190, Oxford, (1959).
- [7] Crank, J.: Mathematics of Diffusion 2nd Ed., pp70, Oxford, (1975).
- [8] Panik., M., Vladimir, N.: GOLDSIM Models of Long-term Radiation Impact of Conditionally Cleared Radioactive Material, Progress in Nuclear Energy, **67**, 88-97, (2013).
- [9] Jörg, G., Bühneemann, R., Hollas, S., Kivel, N., Kossert, K., Van Winckel, S., Lierse V. Gostomski, Ch.: Preparation of Radiochemically Pure ⁷⁹Se and Highly Precise Determination of Its Half-life, Applied Radiation and Isotopes, **68**, 2339-2351, (2010).

