

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の厚み

大江俊昭*1 大滝裕也*1 高橋裕太*1 助川篤彦*2

我が国における地層処分の技術的実現可能性を論じた報告書に記載された炭素鋼オーバーパック厚さの決定方法について、その決定要因となった遮へい性に関して、評価の条件、設定数値、評価式の検討を行った。その結果、報告書記載値よりも0.08m減肉できる可能性が示唆された。オーバーパックは廃棄体全体の重量の約90%を占め、本来の廃棄すべきものとは異なる資源である。厚さの低減によって、重量物を定置する際の困難さ、腐食膨張による体積ひずみの蓄積、などのマイナス要因を緩和できると考えられる。

Keywords: 炭素鋼オーバーパック, 人工バリア, 地層処分

The thickness of overpack used in the high-level radioactive waste disposal is evaluated. The feasibility report on the geologic disposal in Japan suggested the very thick overpack because of the radiation shielding requirement. The overpack is not an essential material of waste package but has about 90% of the total weight of the waste package. Assumptions, data, and equation cited in the report are thus re-examined and the results indicate the dimension possibly reduced is 0.08m in thickness. This reduction is favorable to minimize several disadvantages such as the difficulty of handling during emplacement and the mechanical stress arising due to volume expansion during iron corrosion.

Keywords: carbon steel overpack, engineered barrier, geologic disposal

1 はじめに

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）によれば[1]、炭素鋼製のオーバーパックは胴体厚さが0.19mあり、重量は1体当たり約5.5tに達する。本来の廃棄物であるガラス固化体の重量は約400kgであるから、その10倍以上の重量を持つ非汚染物が一緒に廃棄されることになる。

第2次取りまとめでは、廃棄物を隔離するために必要なオーバーパックの厚みを決定する要因として次の3つを挙げている。すなわち、①耐圧性、②遮へい性、③耐食性である。そして、②の遮へい性が決定因子となってオーバーパックの厚さが設定されている。しかし、厚みを設定する際に引用した計算式には、過大評価を導く可能性のある点が幾つかあると考えられる。

オーバーパックの仕様は、上述の様に、核種隔離というプラスの機能を発揮させることを第一優先として安全側の設定がなされている。もちろん、十分な厚みを確保することは廃棄物を隔離する上で必要なことではあるが、このような重量物を処分することは、同時に、定置する際の困難さ、腐食膨張による体積ひずみの蓄積、などのマイナス要因も併せ持つことになる。そのようなプラスとマイナスの両者に目を向けて、オーバーパックの最適な厚みを決めることが重要であり、設定方法を吟味することは最適設計に向けた一助となると考えられる。ここでは、決定因子となった②の遮へい性に関して、その設定方法を吟味した。

2 最適設計に向けた検討点

Studies of the setting of engineered barrier configuration utilized in geologic disposal (2) Carbon steel overpack thickness by Toshiaki OHE (ohe@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp), Yuya OHTAKI, Yuta TAKAHASHI, Atsuhiko SUKEGAWA

*1 東海大学

Tokai University

〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 4-1-1

*2 量子科学技術研究開発機構

National Institute for Quantum and Radiological Science and Technology

〒311-0193 茨城県那珂市向山 801-1

(Received 5 December 2016; accepted 28 March 2017)

第2次取りまとめでは、オーバーパックの腐食を、坑道掘削時の持ち込み酸素によるもの、還元雰囲気での水の還元反応によるもの、 γ 線の放射線分解によって生成する酸化性物質（過酸化水素など）による酸化反応によるもの、の3つに分類し、放射線分解生成物によるものが厚みの決定要因となっている。第2次取りまとめが参照したMarshらの論文[2]（以下参考文献）では、拡散媒体中の間隙水が γ 線で放射線分解されることによって生成する酸化性化学種（以下化学種）のオーバーパック表面への供給速度を拡散フラックスから求め、化学種が瞬時に腐食反応に消費されるとして、拡散フラックスを直ちにカソード電流密度に変換し、不働態保持電流密度以下に抑制するようオーバーパックの肉厚を算定する、という手順を展開している。そこには、最適設計の観点から検討できる点があるので、それを以下に述べる。なお、不働態保持電流密度以下に抑制する意味は、不均一腐食を排除し、均一腐食だけで耐食性を評価できるようにすることにある。

2.1 酸化性化学種の拡散方程式

オーバーパック/間隙水界面での化学種の供給速度を定式化するための拡散方程式は式(1)である。ここでは、線源強度の時間減衰は考慮せず、強度一定としている。しかし、処分直後は放射能の減衰が大きいのでこれを考慮するのが現実的である。これが第一の検討点である。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\varepsilon \cdot E_0 \cdot G}{100 \cdot N_A} \cdot e^{-\mu x} \quad (1)$$

c : 酸化性化学種の濃度 [mol m⁻³]

t : 時間 [s]

x : 距離 [m]

D_a : 酸化性化学種の見かけの拡散係数 [m² s⁻¹]

ε : 間隙率

E_0 : 緩衝材表面での吸収線量率 [Gy s⁻¹]

G : 放射線分解のG値 [molecules eV⁻¹]

N_A : アボガドロ数 [molecules mol⁻¹]

μ : γ 線の減弱係数 [m⁻¹]

2.2 緩衝材中の線量分布

式(1)において、緩衝材中の吸収線量の分布を示す項である $e^{-\mu x}$ の係数 μ に、コリメートした細いビーム線源を想定した線減弱係数を用いることは実際的ではない。実際の形状を考慮して吸収線量率の分布を求め、そこから実効的な値を決める必要がある。しかし、第2次取りまとめでは吸収線量率の分布から減弱係数を求めておらず、参考文献の値をそのまま使っている。これが第二の検討点である。

2.3 オーバーパック表面での拡散供給フラックス

これを導出するには、与拡散方程式の境界条件が規定されていないなければならない。参考文献では、 $x=0$ において濃度ゼロが与えられている。これは、オーバーパック表面で生成した化学種がすべて瞬時に腐食に消費されるとの仮定に相当する。界面での濃度をゼロと置くことで、計算上は界面での最大供給フラックスが得られる。しかし、フラックスの導出に半無限媒体に対する解析解[3]の定常解を用いたため化学種の供給フラックスは式(2)のようになり、放射能の減衰を評価する時間項がないために、供給フラックスが過大評価されることになる。ここが、第三の検討点である。

$$D_e \left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{\varepsilon \cdot E_0 \cdot G}{100 \cdot N_A} \cdot \frac{1}{\mu \cdot D_a} \quad (2)$$

D_e : 酸化性化学種の実効拡散係数 [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]

2.4 カソード電流密度への換算

化学種の界面での最大供給フラックスを電流密度に換算するには次式を用いる。ここで、フラックス項にマイナスの符号がつかないのは、緩衝材から界面に向かう化学種のフラックスを正とするためである。(電流値を正と表記することができる)

$$i_c = n \cdot F_a \cdot D_e \left. \frac{dc}{dx} \right|_{x=0} \quad (3)$$

i_c : カソード電流密度 [A m^{-2}]

F_a : ファラデー定数 [96485 C mol^{-1}]

n : 酸化性核種の (平均的) 価数 (2 と仮定)

3 物性値等の選定

検討を行う前に、物性値、境界条件について吟味する。

3.1 線減弱係数

参考文献での拡散媒体は海洋底質土 (間隙率 10%) であり、その線減弱係数である 6.25 m^{-1} が第2次取りまとめではそのまま使われている。一方、緩衝材 (30wt% ケイ砂混合ベントナイト) の線減弱係数を化学組成[4]および元素ごとの質量減弱係数[5]から推算すると、後述する平均の γ 線エネルギー 0.575 MeV に対して、水で飽和した緩衝材については 9.23 m^{-1} と、参考文献の値よりも大きい値が得られた。これはケイ砂混合によって γ 線の吸収が大きい Si を多量に含むためである。

3.2 拡散媒体長

参考文献では 30m 長の海洋堆積物を半無限媒体で置き換え、それに対する定常解析解を用いている。しかし、第2次取りまとめにある 0.7 m という緩衝材厚さと、上述の線減弱係数の大きさを考えると無限媒体を想定するよりも媒体長を緩衝材厚さ L と有限に採ることが現実的である。

3.3 境界条件

内側境界条件はゼロ濃度、外側境界条件は、参考文献では無限遠方 $x=\infty$ でゼロ濃度であるが、前述のように有限長とするので、緩衝材の外側の掘削影響領域を流れる地下水で物質が希釈される条件を採用した。これは、第2次取りまとめの中で、緩衝材中での核種の移行挙動を算定するとき用いた条件である。

3.4 放射線分解 G 値

参考文献は海洋堆積物を対象としているので、海水組成を仮定して放射線分解生成物である OH, H_2O_2 , HO_2 の G 値を求め、それを平均した代表値 (価数 2 に換算) を 2.13 分子 eV^{-1} と設定している。一方、大江ら[6]は緩衝材の間隙水組成を用いて、放射線分解の G 値を報告している。これを基に、参考文献と同様の平均化を行うと G 値は 2.07 となり、本検討ではこの値を用いる。

4 再評価

4.1 線源強度の減衰

ORIGEN2[7]を用い、第2次取りまとめと同等の条件[8]を設定して γ 線のエネルギー分布を求めた。18 群のエネルギーに対する経時変化を Fig. 1 に示す。

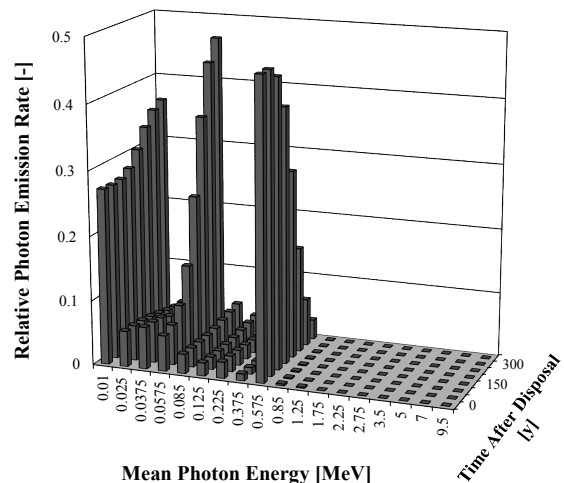


Fig. 1 Photon spectrum emitted from the waste glass calculated by ORIGEN2

処分開始後から 150 年程度は平均エネルギー 0.575 MeV の γ 線が卓越し、その後は低エネルギーの γ 線が優位となり、放射線分解の影響が徐々に緩和される方向に進む。このこ

とから、解析を単純化するため、0.575MeVの γ 線に着目して固化体1体あたりの γ 線放出速度を、処分開始後から350年まで最小二乗法で指数関数に近似すると、ガラス固化体の線源強度の見かけの半減期として30.5年が得られる。

4.2 線量率評価

4.2.1 緩衝材表面

Fig. 1の γ 線エネルギースペクトルの中から処分開始時点のものを用い、MCNP[9]によって緩衝材表面での照射線量率を評価した。固化体、キャニスタ、オーバーパック、緩衝材組成等の計算条件は第2次取りまとめに準拠した報告[10]に記載のものを使用した。Fig. 2に結果を示すが、第2次取りまとめと同等の結果が得られることを確認した。

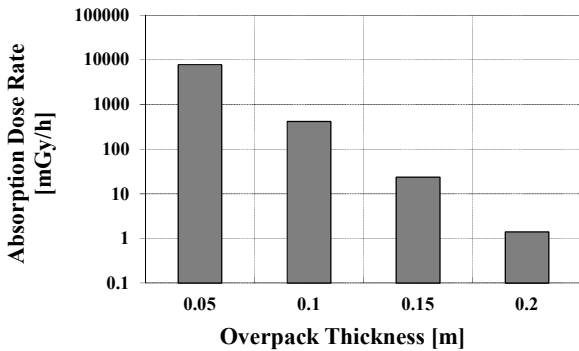


Fig. 2 Absorption dose rates at the overpack outer surface calculated by MCNP

4.2.2 線量率分布

上述の様に、計算条件の妥当性を確認できたので、それを用いてQAD[11]で緩衝材中の照射線量率の分布を求め、式(1)中の見かけ減弱係数 μ を決定した。緩衝材の厚さはオーバーパックの腐食膨張圧を緩和することから決められるので、オーバーパックの厚さに依存して変化するが、ここでは、簡単のため、緩衝材の厚さは0.7mで一定とした。その結果、吸収線量率は指数関数的に減少し、オーバーパックの厚さに拘らずその減衰傾向はほぼ同じであった。得られた減衰曲線を指数関数にフィッティングして見かけの減弱係数 μ を求めた結果をTable 1に示す。

Table 1 Apparent gamma-ray attenuation coefficient of buffer material

Overpack thickness [m]	Apparent attenuation coefficient μ [m^{-1}]
0.05	21.3
0.10	20.4
0.15	19.2
0.20	18.0
0.25	17.1

オーバーパック厚さが0.05~0.25mの範囲で、緩衝材の見かけ減弱係数の平均は $19m^{-1}$ であり、元素組成から求めた線減弱係数の2.1倍である。これから、緩衝材の表面近

傍で照射線量率は急激に低下し、緩衝材が無限に化学種を供給する媒体であるとするのは現実的ではないと考えられる。

4.3 緩衝材表面でのカソード電流密度

緩衝材表面での γ 線による化学種の発生速度を求めた。その際、平均エネルギー0.575MeVの単色 γ 線として扱い、解析を単純化した。

4.3.1 時間減衰の効果

線源強度の時間減衰の効果のみを明らかにするため、緩衝材内での γ 線強度が一定で、化学種が一様に生成するものと考え、概略の解析時間範囲を求めた。

評価には、媒体領域が $-L < x < L$ で、指数関数 $e^{-\lambda t}$ にしたがって減衰しながら媒体内では一様に発熱し、両端の境界条件が温度ゼロ、に対する直交1次元体系の熱伝導方程式の解析解[12]を適用した。この解は $x=0$ を中心に左右対称なので、解析解を中心から折り曲げるように重ねると、 $x=0$ で濃度勾配がゼロになり、境界反射条件と同じになる。 $x=L$ が緩衝材入口、 $x=0$ が緩衝材出口である。解としては式(4)にあるように、単に与解析解を2倍すればよい。この式を適用すると化学種は緩衝材層に留まったままで体系外には散逸しないため、生成する化学種量を過大評価する。

$$c = 2 \frac{D_a \cdot A_0}{\lambda \cdot K} \cdot F_1 \cdot e^{-\lambda t} + 2 \frac{4D_a \cdot A_0}{\pi \cdot \lambda \cdot K} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \exp\left[-\frac{D_a(2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2}\right] \cdot \cos\left(\frac{(2n+1)\pi x}{2L}\right)}{(2n+1) \left\{1 - \frac{D_a(2n+1)^2 \pi^2}{4\lambda L^2}\right\}} \quad (4)$$

- c : 化学種濃度 [$mol\ m^{-3}$]
- A_0 : 単位断面あたり発生速度 [$mol\ m^{-2}\ s^{-1}$]
- D_a : 拡散係数 [$m^2\ s^{-1}$]
- λ : 壊変定数 [s^{-1}]
- n : 正の整数
- L : 緩衝材厚さ [m]
- ε : 間隙率

$$F_1 = \cos\left(x \sqrt{\frac{\lambda}{D_a}}\right) / \cos\left(L \sqrt{\frac{\lambda}{D_a}}\right) - 1, \quad K = \varepsilon \cdot D_a$$

この式から境界 $x=L$ でのフラックスを求め、さらに、カソード電流密度に換算した。ただし、経時変化が判れば十分なので、絶対値ではなく相対値で表わした。なお、第2次取りまとめでは化学種の緩衝材への収着現象は考慮していないので、式中の見かけの拡散係数 D_a は実効拡散係数 D_e と同じ値を用いた。

$$\frac{i}{n \cdot F_a} \cdot \frac{\lambda}{2A_0} = \sqrt{\frac{\lambda}{D_a}} \cdot \tan\left(L \sqrt{\frac{\lambda}{D_a}}\right) \cdot e^{-\lambda t} + \frac{2}{L} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\left\{1 - \frac{D_a(2n+1)^2 \pi^2}{4\lambda L^2}\right\}} \cdot \exp\left[-\frac{D_a(2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2}\right] \quad (5)$$

上記式に所定の数値を代入すれば、Fig. 3に示すカソード電流密度の経時変化が得られる。この図から、線源強度の

減衰で 200 年以内にカソード電流密度の値はゼロと見なせるレベルに低減することがわかる。すなわち、線源強度を一定とした定常状態を仮定することは、生成するカソード電流密度を過大評価することを意味している。

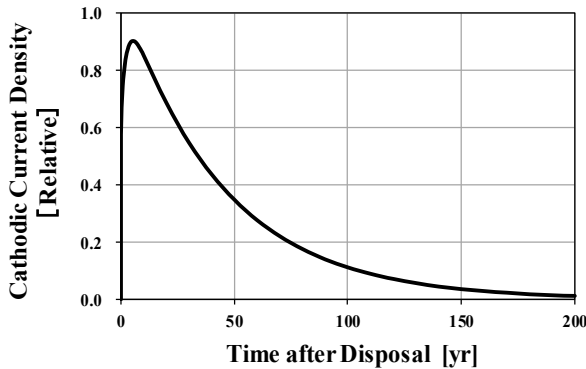


Fig. 3 Time change of the relative cathodic current density due to oxidants generated by gamma radiolysis

4.3.2 数値解

線源強度の時間減衰、緩衝材内での距離による減弱、反応による化学種の消費の 3 つの効果を同時に考慮して、次の円筒体系 1 次元の拡散方程式を、陽的有限差分法を用いて数値的に解いた。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_a \left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right) - k^* \cdot c + \frac{\varepsilon \cdot E_0 \cdot G}{100 \cdot N_A} \cdot e^{-\lambda t} \cdot e^{-\mu(r-R_a)} \quad (6)$$

R_a : 緩衝材の内径 [m]

ここで、 $e^{-\lambda t}$ は見かけの壊変定数を λ として線源強度の時間減衰を表す項である。また、 k^* は化学種の反応による消費速度定数であり、1 次反応速度式を仮定した。

オーバーパックと緩衝材との界面の位置は、オーバーパックの腐食減肉と共に移動するので、厳密には移動境界を考慮する必要がある。また、界面の移動と腐食による体積膨張によって緩衝材の密度も変化するはずである。しかし、上述した簡易的な評価から、たかだか数 100 年間を考慮すれば良いと考えられるので、その間の減肉量は僅か（後述するが、持ち込み酸素による腐食速度は $1 \times 10^{-5} \text{ m y}^{-1}$ のオーダー）であるので、移動境界と密度の変化は考慮しない。

本検討の体系は中空円筒であるので、半径 r を $P = \ln(r)$ とおいて式(6)を変数変換[13]した後、有限差分法によって離散化して数値的に濃度 c を解いた。また、カソード電流密度は入口フラックスを差分によりもとめ、式(3)より算定した。

4.3.3 カソード電流密度の経時変化

今回見直しを行った数値を除いて、解析に必要な物性値は第 2 次取りまとめと同じ値を使い、緩衝材表面での吸収線量率を 1000mGy/h として解析した結果を Fig. 4 に示す。図から、化学反応による化学種の消費を無視して $k^*=0$ とした場合でも、カソード電流密度は最高で $2 \times 10^{-4} \text{ A m}^{-2}$ であり、不動態保持電流密度を超える期間は処分開始後初期の 90 年間程度で、腐食寿命に設定している 1000 年間の大部分の時間は、それを上回らないことがわかる。

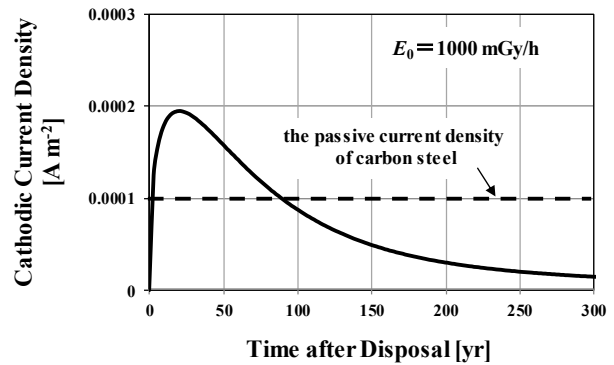


Fig. 4 Time change of cathodic current density calculated by the finite difference method

4.3.4 反応を考慮した場合

上記の解析では、化学種の反応による消費を考慮していない ($k^*=0$) ので、速度定数 k^* の値をパラメータとして、反応の影響について感度解析を行った。その結果、Fig. 5 に示すように反応の影響は非常に大きく、 $k^*=0.3 \text{ y}^{-1}$ よりも大きければカソード電流密度は常に不動態保持電流密度を下回ることがわかる。

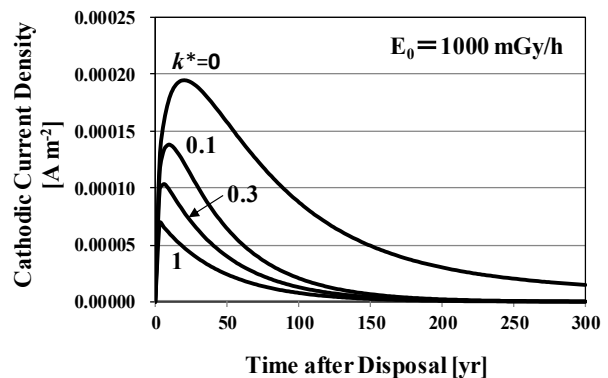


Fig. 5 Cathodic current density under various reaction rate constants k^*

なお、この反応については、例えば、ベントナイト中に含まれるパイライトによる還元反応などが考えられるが[14]、情報不足のため、ここでは $k^*=0$ のままとし、解析結果はカソード電流密度の最大値を捉えていると解釈することにする。反応については検討の余地が残された課題である。

4.4 オーバーパックの厚さ

第 2 次取りまとめでは「局部腐食の進展を防止するために放射線遮へいに必要な厚さは 13cm 以上」と記載されているが、①線源強度の時間減衰の効果、②緩衝材中の γ 線強度の減弱挙動の見直し、③有限媒体中での非定常拡散方程式の適用など、第 2 次取りまとめでは取り扱っていない点を考慮すると、表面での吸収線量率が 1000mGy/h の場合、Fig. 4 からわかるように、不動態保持電流密度を超える期間は 90 年以内であり、腐食寿命の目標期間 1000 年の大部分は不動態保持電流密度を超えないという結果が得られる。

また、④放射線分解によって生成する化学種が緩衝材との反応によって消費する効果を考慮すると、さらに厚さが減少する可能性も考えられる。

4.4.1 制限超過年数

緩衝材の表面吸収線量率 E_0 をパラメータとして、Fig. 4 と同様の結果を求め、不動態保持電流密度を超過する期間を求めると Fig. 6 のようになり、 E_0 が 512 mGy h^{-1} 以下であれば、どの時間に対しても不動態保持電流密度を超えることはない。

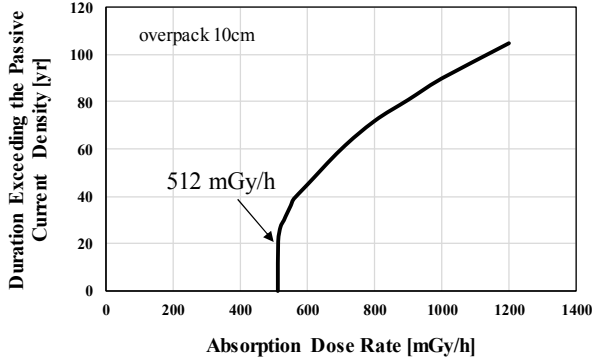


Fig. 6 Duration exceeding the passive current density under different absorption dose rate

MCNP の解析結果 Fig. 2 から、この線量率 512 mGy h^{-1} 以下に抑制することが可能なオーバーパックスの厚さは 0.10 m あればよいので、ここでは、余裕を見込んで 0.11 m の厚さとした。

4.4.2 酸素による腐食との同時進行

第 2 次取りまとめでは、持ち込み酸素による腐食が瞬時に起こるとの仮定で腐食量を算出し、それをオーバーパックスの厚さから差し引いて、腐食後の厚さを基準に遮へい性を検討している。しかし、持ち込み酸素による腐食が同時に進行するから、オーバーパックスの厚さが減少し、その分緩衝材の吸収線量率が増加する影響を時系列的に扱う必要がある。

オーバーパックス厚さ減少による吸収線量率の増加は次式から求められる。ここでも、QAD を用いて、緩衝材の場合と同様に厚さ 0.11 m のオーバーパックスに対する見かけの減弱係数を求め 55 m^{-1} とした。

$$\frac{dE}{dx} = -\mu_{ovp} \cdot E \quad (7)$$

μ_{ovp} : オーバーパックスの見かけ減弱係数 [m^{-1}]

簡単のため、酸素による腐食速度が一定 (X_0) とすると、オーバーパックス厚さ x の経時変化は、

$$\frac{dx}{dt} = -X_0 \quad (8)$$

X_0 : 酸素による腐食速度 [m y^{-1}]

すなわち、(7)式と(8)式より、

$$\frac{dE}{dt} = \mu_{ovp} \cdot X_0 \cdot E \quad (9)$$

吸収線量率の時間変化を招く要因には、放射性壊変もあ

るので、

$$\frac{dE}{dt} = \mu_{ovp} \cdot X_0 - \lambda \cdot E = -(\lambda - \mu_{ovp} \cdot X_0)E \quad (10)$$

すなわち、見かけ上、腐食減肉による影響は線源強度の半減期の増加として扱うことが出来る。

処分時の酸素による腐食速度を見積もることは容易ではないが、土中に長時間埋設された水道鉄管あるいはガス管の調査から得られた最大腐食深さの帰帰式[15,16]を用いて評価を試みると、前者の式からは、

$$X = 1.64 \times 10^{-4} \times t^{-0.6} \quad (11)$$

また、後者の式からは

$$X = 1.5 \times 10^{-5} \quad (12)$$

の腐食速度式 (単位: m y^{-1}) が各々得られる。これから、数 100 年の時間を考えても $\lambda \gg \mu_{ovp} \cdot X_0$ となり、腐食による減肉よりも線源強度の減衰の方が速いので、オーバーパックスの初期厚さが 0.11 m であれば、持ち込み酸素による不均一腐食の減肉があっても、放射線分解については不動態保持電流密度以下に抑制するだけの厚みが残っていることになる。つまり、第 2 次取りまとめのように、安全側に遮へい厚さにあらかじめ腐食代を上乘せしなくても、遮へい上の必要厚さが確保できる可能性があるということになる。

フランスの例では、オーバーパックスの腐食挙動として、第 2 次取りまとめと同様に、最初に持ち込み酸素による腐食を、その後には、水の放射線分解生成物による腐食と水の還元反応による腐食を考慮しているが、遮へい厚さを最初に確保するのではなく、両者を合わせた均一腐食速度 ($3 \sim 5 \mu\text{m y}^{-1}$, 数年後には $1 \mu\text{m y}^{-1}$ に低下) を設定して、4000 年の寿命をもつ厚みを算定している[17]。このことは、同じ腐食現象を考慮しながらも、最終的な厚さの設定方法には異なる考え方があることを示しており、オーバーパックス厚さの最適設計を行う上では、この点も十分留意すべきであろう。

5 まとめ

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に記載されたオーバーパックス厚さ決定方法について、決定要因となった遮へい性に関して、評価の前提条件、設定数値、評価式の検討を行った。その結果、報告書に記載のオーバーパックスの厚さが過大評価されている可能性が示唆された。これらを考慮して再評価すると、オーバーパックスの必要厚さは 0.11 m となり、第 2 次取りまとめよりも遮へい厚さ 0.04 m (第 2 次取りまとめでは 0.02 m の余裕を見込んで安全側に 0.15 m と設定) と腐食代 0.04 m , 合わせて 0.08 m 分を減肉する結果となった。これにより重量は 5.5 t から 3 t に軽減される。

本検討は、第 2 次取りまとめで述べられた前提のもとでも設定数値、評価式等を再検討することで、設計最適化の余地がある事を示すのが目的である。一方、第 2 次取りまとめにおいて前提とされた条件の中にも検討の余地があるものも残されている。例えば、水分飽和を前提に腐食挙動

を評価しているが、再冠水に至るまでの不飽和状態の継続状況によっては、腐食速度の設定そのものを見直す可能性もある。つまり、設計の最適化に向けては、常に最新の知見と照らし合わせ、一部に合理的な保守性を担保しながら、改良を繰り返すことが重要である。

オーバーパックは廃棄体全体の重量の約90%を占め、本来の廃棄すべきものとは異なる資源である。厚さの削減によって、重量物を定置する際の困難さ、腐食膨張による体積ひずみの蓄積、などのマイナス要因を少しでも緩和できると考えられ、今回の検討が、オーバーパック厚さの最適設計の際の一助になると思われる。

謝辞

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターの田辺博三氏には諸外国のオーバーパック設計に関する考え方についてご教示頂いた。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次取りまとめ, 平成11年11月(1999).
- [2] Marsh, G.P., Harker, A.H., and Taylor, K.J.: Corrosion of Carbon Steel Nuclear Waste Containers in Marine Sediment, *Corrosion*, **45**(7), 579-589 (1989).
- [3] Carslaw, H.S., and Jaeger, J.C.: *Conduction of Heat in Solids 2nd Ed.*, p79, Oxford (1959).
- [4] 伊藤雅和, 他: ベントナイトの鉱物組成分析, PNC TN8430 93-003 (1993).
- [5] Hubbell, J. H. and Seltzer, S. M.: *Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest*, Radiation and Biomolecular Physics Division, PML, NIST. <<http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/index.cfm>> (2016/12/02 アクセス).
- [6] 大江俊昭, 安俊弘, 池田孝夫, 他: 高レベル放射性廃棄物地層処分システムの初期過渡状態の解析, *日本原子力学会誌*, **35**(5), 420-437 (1993).
- [7] Ludwig, S.B. and Renier, J.P.: *Standard - and -extended Bump PWR and BWR Reactor Models for ORIGEN2 Computer Code*, Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-11018 (1989).
- [8] 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次取りまとめ, 分冊1, III-5, 平成11年11月(1999).
- [9] MCNP6 Development Team: *MCNP6 User's Manual Version 1.0*, Los Alamos National Laboratory, LA-CP-13-00634, Rev. 0 (2013).
- [10] コンピュータソフト開発株式会社, HLW ガラス固化体周辺の放射線場の解析, JNC TJ1400 2003-03 (2002).
- [11] Sakamoto, Y. and Tanaka, S.: *QAD-CGGP2 AND G33-GP2: Revised Versions of QAD-CCP and G33-GP (Codes with the Conversion Factors from Exposure to Ambient and Maximum Dose Equivalents)*", JAERI-M 90-110, Japan Atomic Energy Research Institute (1990).
- [12] Carslaw, H.S., and Jaeger, J.C.: *Conduction of Heat in Solids 2nd Ed.*, p132, Oxford (1959).
- [13] G.D.スミス, 藤川洋一郎訳: 電算機による偏微分方程式の解法, p48, サイエンス社, 昭和46年(1971).
- [14] 日本原子力研究開発機構: 処分システム化学影響評価高度化開発, 地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連平成19年度報告書, 平成20年3月(2008).
- [15] 腐食防食協会編, 防食技術便覧: 411, 日刊工業新聞社(1986).
- [16] 玉田明宏, 平林清照, 亀井玄人, 井上邦博: 金属製オーバーパックのナチュララアナログ研究, 第38回腐食防食討論会講演要旨集, 197-200 (1991).
- [17] ANDRA(French National Radioactive Waste Management Agency): *Dossier 2005 Argile-Tome Architecture and management of a geological repository* (2005).