環境リスクを踏まえた回収水銀の保管方法に関する研究

九州大学大学院工学府　学生会員　○高取　佑
九州大学大学院工学研究員　正会員　高橋　史武
ﾌｪﾛｰ会員　島岡　隆行

１．背景

水銀の使用量を削減する動きが活発化している。国連環境計画（UNEP）は，残された課題として，余剰水銀や廃棄物等から取り出された回収水銀の長期安全保管を挙げている。長期保管に関しては保管場所や期間等，検討項目が多く残されているが，保管の際の水銀の形態は化学的に安定である硫黄化合物（HgS）が望ましいとの見解で一致している。また，硫黄化合物へと水銀を安定化処理するまでの暫定保管の必要性に関しても議論が進んでいる。本研究では，地上における水銀の暫定保管施設の内外で想定される水銀の流出モデルを構築し，暫定水銀の保管施設内外での人の曝露量と健康リスクの評価を行った。

２．目的

本研究では，回収水銀（金属水銀）を安定化処理するまでの暫定保管施設において環境リスクが最も大きくなる状況，すなわち保管容器から水銀が漏れ出して施設内に流出するシナリオを想定する。保管施設内で正常な機械換気が行われていると仮定した場合には必要最低換気量を，機械換気がなく外部への自然拡散に頼る場合には拡散に必要な施設壁面の開口断面積を計算した。また，施設外に関しては，施設から排出された水銀が大気中で酸化されながら移流拡散により広がっていくシナリオモデルを構築し，流出水銀が周辺環境に及ぼす健康リスクを計算した。

3. モデルの構築及び結果の考察

3.1 想定する保管施設内曝露モデル

想定する暫定保管施設は底面積 25[m^2]，高さ 5[m]の総容積 125[m^3]とした。壁の厚さは 10[cm]に固定し，本研究ではこの施設内において保管容器から 1 [kg]の水銀が流出した状況を仮定した。施設内における液体水銀の蒸発速度は温度の関数として与えられるが，本研究では**図１**における室温 20～40[℃]で与えられる蒸発速度 0.525～3.316[$\mu g/m^2/day$]の範囲[1]で条件設定を行った。また，保管容器から流出した液体水銀は，水銀の表面張力から球体の水滴として存在しているとした。労働安全衛生法により作業環境中の水銀蒸気の許容濃度は，作業評価基準で 25[$\mu g/m^3$]と定められており，この基準を基に，以下に示す２つのシナリオについてリスク評価を行った。

3.1.1 機械換気を行う場合

機械換気を行う際，換気量に加えて保管容器から漏れ出した水銀の蒸発速度（室内温度の関数）やその被表面積などによって健康リスクは変化する。**図２**には，設定したシナリオ下での蒸発水銀が許容濃度内に収まるときの室内温度，被表面積，換気量の関係を示す。**図２**中に記された領域は，施設内の人間に対して健康リスクが発生する範囲を示している。

3.1.2 自然拡散の場合

機械換気を行わない場合，施設内の蒸発水銀は自然拡散により外部へ放出されるが，**図３**に示すように拡散量を定める断面積の大きさ如何で，作業する人間に健康リスクが発生する。機械換気の場合と同様，施設内の人間が健康リスクを被るまでの時間を計算した。なお蒸発水銀の拡散係数は，文献値[2]より 1.32×10^{-5}[m^2/s]とした。

3.1.3 保管施設内における曝露モデルの結果および考察

室内温度 25[℃]の条件下において半径 10[mm]の水銀球体が総量 1[kg]曝露したと仮定したとき，施設内の水銀濃度が許容値を超えるまでに要する

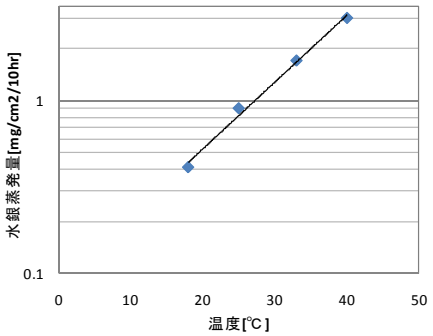

図１　水銀蒸発量と温度の関係

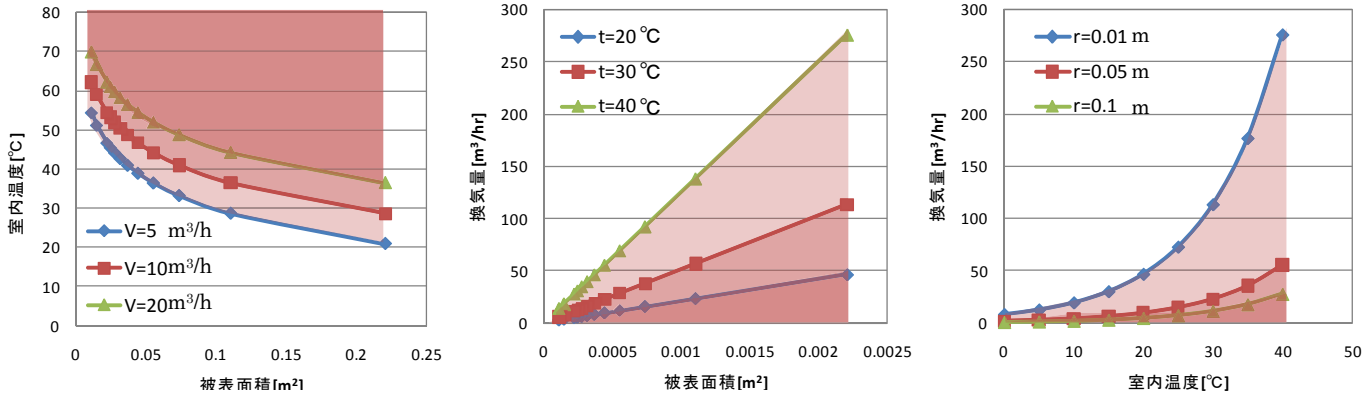

図２　室内温度ｔ・被表面積Ｓ(半径ｒ)・換気量Ｖの関係（機械換気時）

時間は機械換気の場合で 649[s]，自然拡散の場合で 621[s]と計算された。ただし，保管施設における水銀の保管期間は改定建築基準法によると概ね 50 年程度と考えられており，少なくとも 50 年間は許容濃度を超えることのない換気量とすべきである。しかし，今回の結果は，ほとんどの状況下で水銀が曝露後即時に許容濃度を超え人間に健康被害を及ぼすということを示唆しているため，安全保管のためには**図 2** に示す様に，室内温度と換気量を正しく設定する必要がある。室内温度は水銀の蒸発速度を左右し，温度が低いほどリスク回避に繋がる。**図 2** 中央のグラフや**図 3** より，各室内温度において一定以上の換気量，または自然拡散のための断面積を設けておけばリスク回避することができることが分かる。しかし，改定建築基準法による換気量は 62.5[m^3/hr]と算出されるため，水銀を安全に保管するためには法で定められた換気量を保つ必要があるということを示唆している。

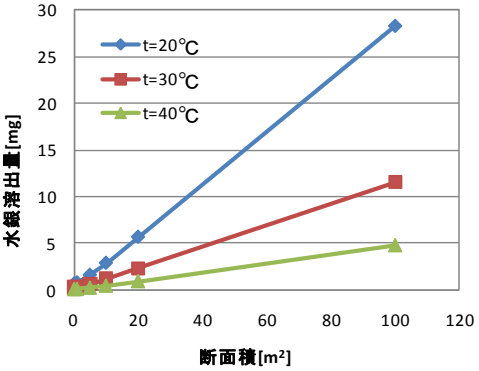

図 3　水銀溶出量と断面積の関係

3.2 想定する保管施設外曝露モデル

保管施設外へ蒸発水銀が流出した場合のモデルを構築した。施設から流出した金属水銀の一部は大気中のオゾンによって酸化されつつ土壌沈着するものとした。また，水銀の曝露経路で最も大きな割合を占める魚類からの摂取に着目し，土壌に沈着した水銀は河川を通り海・湖沼の水域へ到達するものとした。最終的に魚類の生物濃縮を経て人が摂取するシナリオにおける，水銀を摂取した人間の健康リスク評価を行った。

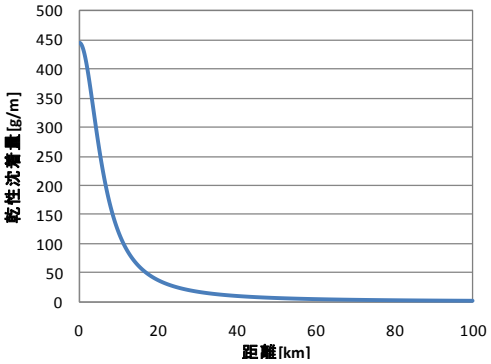

図 4　金属水銀の乾性沈着量と距離の関係

3.2.1 モデル概説

保管施設から流出した水銀の拡散挙動は，弱風時のパフ式に従うものとし，式内のパラメータは文献値[3]を用いた。風速，および有効排出高はそれぞれ 0.1[m/s]，10[m]とした。大気中のオゾンによる酸化反応は金属水銀の酸化速度係数とオゾン濃度に依る。オゾン濃度は反応前後で 30[ppb]で一定とし，酸化速度係数は文献値[4]より 3.0×10^{-20}[cm^3/mol/s]とした。また，酸化された水銀は即時に粒子状水銀になると仮定し，その沈着速度は 0.1[cm/s]とした[5]。土壌に沈着した金属水銀および粒子状水銀は流域面積 3813[km^2]の河川まで到達し，その後海・湖沼に到達するものとした。ただし，流域面積は日本の主要河川の平均値を用いた[6]。最終的に海・湖沼で魚類による生物濃縮を受け，それらを摂取することで人が被るリスクを計算した。なお，土壌沈着後から，水銀のメチル化を含めて人の水銀摂取に至るまでの各種挙動については，文献[7]を参照した。

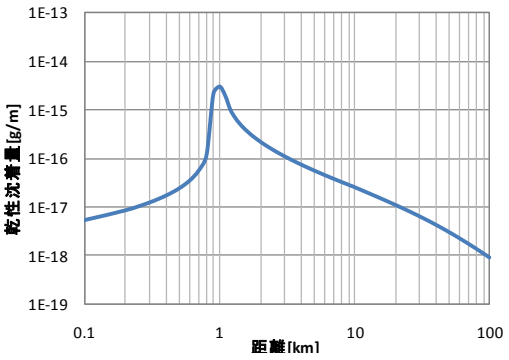

図 5　酸化水銀の乾性沈着量と距離の関係

3.2.2　保管施設外曝露モデルの計算結果・考察

施設内で流出して飽和濃度 20[mg/m^3]に達した水銀が基準換気量 62.5[m^3/hr]にて排出されたと仮定した場合の水銀排出量 1.25[g/hr]で計算を行ったところ，酸化水銀が土壌沈着後に河川，水域を経て人間に健康被害を及ぼすまでの時間は 40029 年となった。地上保管は概ね数十年の単位で利用が見込まれるため，施設内水銀の外部拡散による健康リスクは極めて小さいと考えられる。

4　まとめ

保管施設内外における水銀曝露モデルを構築し，人への健康リスクの観点から評価を行った。施設内で曝露するケースに関しては，水銀が曝露した後極めて早く健康被害が発生する可能性を示唆することとなり，安全保管のためには適切な室内温度や必要充分な換気量，自然拡散の為の充分な断面積などが求められることが分かった。保管施設外に流出するシナリオにおいては土壌沈着後 40029 年で健康被害が発生する計算となった。地上の保管施設に求められる保管期間は長くても 100 年間であるため，安定化処理されるまでの保管中における健康リスクは極めて小さいと考えられる。

【参考文献】1) 矢島澄策： 安全工学(1968)　2)M.T.Scholtz *et al*： Modeling of mercury emissions from background soils, The Science of the Total Environment, Vol.304, pp185-207(2003)　3)浮遊粒子状物質対策検討会: 浮遊粒子状物質汚染予測マニュアル,東洋館出版（1999）4)Shia.R.L *et al*： Global simulation of atmospheric mercury concentration and deposition fluxes, J. Geophys. Res., Vol.104, pp23747-23760（1998）5) 津崎昌東　他： 微量物質の多経路暴露評価モデルの開発（1），電力中央研究所調査報告，V07004（2008）6) 文部科学省監修： 理科年表 ，丸善出版（2003）7) 高取佑 他：環境リスクを踏まえた回収水銀の長期保管材に求められる拡散係数に関する検討，平成 20 年度土木学会西部支部（2009）