

地盤中の蒸発過程の評価

関西大学環境都市工学部

学生会員 ○劉 冰

関西大学環境都市工学部

正会員 小林 晃

株式会社安藤・間

正会員 塚田 泰博

株式会社安藤・間

正会員 千々松 正和

1. はじめに

福島第一原発事故後、再処理してガラス固化体を処分するのではなく、燃料棒を直接処分する概念の検討が始まった。直接処分の場合、廃棄体の体積が大きくなることに加え、発熱量も大きくなるので、緩衝材の温度が100℃以上になることが想定されている。100℃以上になると、地下水が蒸発し、それによる水圧の変化、有効応力の変化が処分に影響を及ぼす可能性がある。このような状況が処分場内の安全性、安定性に及ぼす影響も検討することが必要である。本論では、熱・水・応力の連成解析で蒸発挙動を予測する手法について紹介する。

2. 蒸発による相変化のモデル化

水の相変化を同定するためには、水(液体)の状態、水と水蒸気の混合状態、水蒸気(気体)の状態に相変化する際の境界の明確化が必要である。各相間の変化を数式で表しているものに、Mercer and Faust(1975)の流体圧力とエンタルピーを未知数とする手法がある。

流体圧力とエンタルピーを未知数とする手法では、図1の蒸気線図(流体圧力とエンタルピー関係のダイアグラム)を用いることにより、流体の相状態を判別する。

同図中の上に凸の太線は相変化が発生する際の境界線であり、エンタルピーが小さい領域①と領域②の境界線は、水(液相)から水と水蒸気の混合状態(気液二相状態)へ遷移する際の境界を示している。一方、エンタルピーが大きい領域③と領域②の境界線は、水と水蒸気の混合状態(気液二相状態)から水蒸気(気相)に変化する際の境界を示している。

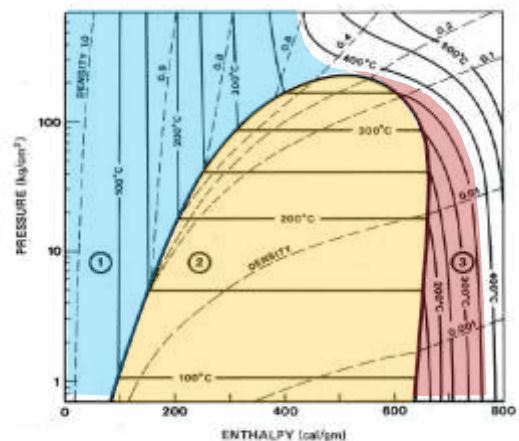


Fig. 5.2. Pressure-enthalpy diagram for water and steam with thermodynamic regions: (1) compressed water; (2) two-phase steam and water; and (3) superheated steam [adapted from Mercer and Faust (1975), and White *et al.* (1971)].

図1 蒸気線図(流体圧力とエンタルピーの関係)

境界線内の領域②が、水と水蒸気が混合した二相状態を示している。また、同図は横軸にエンタルピー、縦軸に流体圧力を取った平面座標系で整理されたものであるが、図中には等温線が描かれており、流体圧力 p 、エンタルピー h および温度 T により表現されている。

領域①の圧縮水の密度 ρ^l は次式により小さくなり、圧力が上昇する。

$$\rho^l = \begin{cases} 0.98988 + 4.0089 \times 10^{-4} p - 4.0049 \times 10^{-5} h + 2.6661/h \\ \quad + 5.4628 \times 10^{-7} ph - 1.2996 \times 10^{-7} h^2 & h > 200 \text{ の場合} \\ 1 & h \leq 200 \text{ の場合} \end{cases} \quad (1)$$

有限要素法を用いて解くことにより、各支配方程式の未知数である節点変位 u_i 、全水頭 h および温度 T を得ることができる。得られた全水頭および温度を用いることにより、エンタルピーを算出する。各要素のエンタルピー h は、次式を用いて各時間ステップごとの各要素のエネルギー増分と圧力増分の和により求める。

$$h = E + p / \rho_w \quad (2)$$

ここに、 E は単位質量当たりの熱量、 p は圧力であり、 ρ_w は水の密度である。

キーワード 熱・水・力連成解析 地下水 蒸発現象

連絡先 〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35 関西大学環境都市工学部 TEL 06-6368-1922

3. 例題解析

解析モデルは、図 2 に示す様に放射線廃棄物の処分孔周辺を想定した、長さ 25m、幅 1mの水平方向の 1 次元モデルである。

【処分孔周辺の概念図】

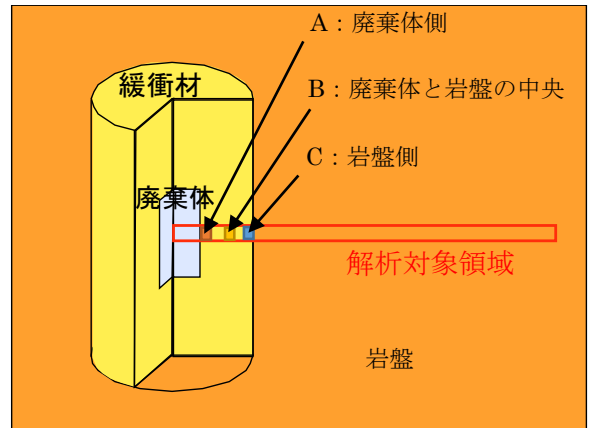


図 2 解析モデル図

- 初期条件
 - ・ 圧力水頭：岩盤 300m，緩衝材-356.54m，温度：15℃
- 境界条件
 - ・ 変位境界：廃棄体および岩盤の端面は，全方向変位拘束、その他の節点はスライド条件
 - ・ 水頭境界：岩盤の端面の水頭を 300 m に固定
 - ・ 温度境界：廃棄体内の節点の温度固定 (10000 日目に 15℃から上昇を開始し，12850 日に 300℃まで温度上昇，その直後から下降し，15700 日目に 15℃まで温度低下) その他の境界は 15℃で固定

4. 解析結果

図 3～ 5 は代表的な時刻による緩衝材中の圧力 p ，液相密度 ρ^l とエンタルピー h の分布を示している。図中の日時に廃棄体の温度を示している。左端は廃棄体，右側は岩盤である。これらを見ると，温度が 300℃に達したときに，緩衝材の中央で両側より圧力が大きく，温度の上昇に伴い，エンタルピーは全体的に上昇し、液相密度は下がっている。解析結果によると，最も廃棄体に近い要素だけが蒸発し，二相流の状態であり、他の要素は圧縮水の状態である。圧縮水の状態から二相流に移るためには，その場所のエンタルピーが上昇し，液相密度が下がることにより，圧力が下降し，エンタルピーがさらに上昇することが必要である。

参考文献

Mercer, J. M. and Faust, C. R. : “Simulation of water- and vapour-dominated hypothermal reservoirs”, Paper SPE 5520, presented at the 50th Annual Fall Meeting of the Soc. Pet. Eng. AIME, Dallas, Texas, 1975.

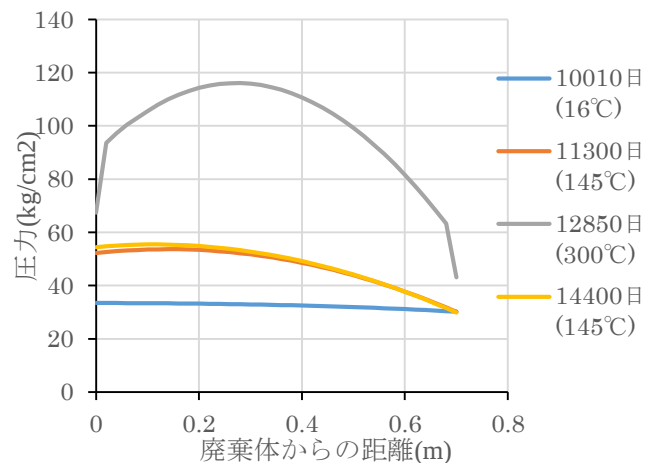


図 3 水の圧力の分布図

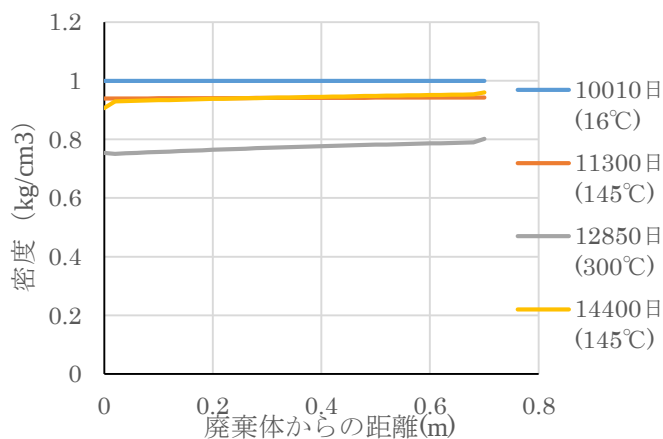


図 4 液相密度の分布図

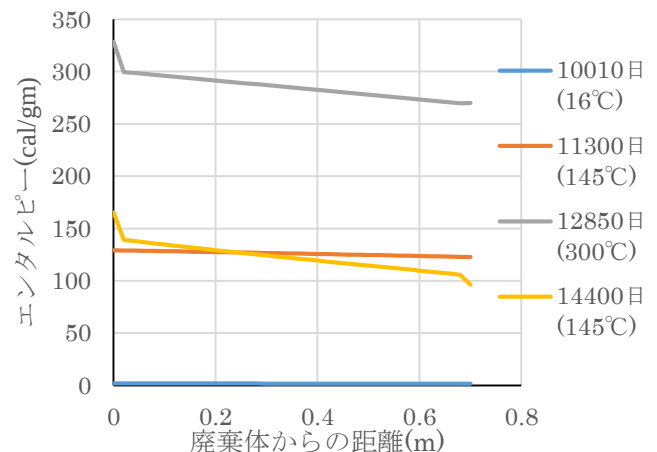


図 5 エンタルピーの分布図