

COMSOL Multiphysics による放射性廃棄物処分を 対象とした熱-水連成解析

小坂部和也ⁱ 篠崎明ⁱⁱ 宮本裕平ⁱⁱⁱ 宇野隼平^{iv}

Thermal-Hydraulic Analysis for Safe Geological Disposal of Radioactive Waste Using COMSOL Multiphysics

Kazuya OSAKABE Akira SHINOZAKI Yuhei MIYAMOTO Shumpei UNO

原子力発電により発生する放射性廃棄物の処分は、様々な技術開発が行われている段階にある。放射性廃棄物に起因する化学反応や熱の発生、地下水の流動や構造物の変形等、複数の物理現象を考慮する必要があり、加えて、数万年という長期に渡って放射性物質を閉じ込めた場合の挙動を類推する上で、コンピュータシミュレーションの活用は有効である。本稿では、放射性廃棄物の地層処分を念頭に置いた COMSOL Multiphysics®を用いた熱-水連成解析事例を紹介する。

(キーワード): 放射性廃棄物, マルチフィジックス, 輸送, 拡散

1 はじめに

原子力発電により発生する放射性廃棄物の処分については、様々な技術開発が行われている段階にあるが、放射能レベルが比較的高い「高レベル放射性廃棄物」と、放射能レベルは比較的低いものの半減期が長い「TRU 廃棄物」について、地層処分と呼ばれる、地下 300m 以深の岩盤に埋設する手法が採られる予定である。数万年という長期に渡って放射性物質を閉じ込める必要があるが、当然ながらこれを実験によって前もって模擬することは不可能であるため、コンピュータシミュレーション等による数値解析を通じて現象を類推することは必要不可欠である。

地層処分の評価においては、熱の伝達、水の流動、構造の変形、化学反応の現象が相互に影響しあうという非常に難しい状態を取り扱う必要がある。COMSOL Multiphysics は複数の物理現象の相互作用を考慮した連成解析を前提として開発された汎用工学ソフトウェアであり、ここでは地層処分の評価を

念頭に置いて、COMSOL Multiphysics を用いた解析事例を紹介する。

2 放射性廃棄物と地層処分

原子力発電の燃料であるウランは、採掘された後、精錬、濃縮、加工等が行われて発電に使用される。使用済の燃料は再処理工場でウランとプルトニウムが混合した MOX 燃料に加工される。これらの過程で発生し、再利用が困難なもののうち、放射性物質を含むものを一般的に放射性廃棄物と呼ぶ。

放射性廃棄物の種類と処分方法を表 1 に示す。放射性廃棄物は、「低レベル放射性廃棄物」と「高レベル放射性廃棄物」の 2 つに大きく分けられる。また、処分方法は表 2 に示すように、「トレンチ処分」、「ピット処分」、「中深度処分」、「地層処分」が検討されている。

現状では、地層処分の対象となるのは、比較的強い放射線を発生する高レベル放射性廃棄物と、放射線

ⁱ サイエンスソリューション部 デジタルエンジニアリングチーム 課長

ⁱⁱ サイエンスソリューション部 デジタルエンジニアリングチーム チーフコンサルタント 博士 (工学)

ⁱⁱⁱ サイエンスソリューション部 デジタルエンジニアリングチーム コンサルタント 博士 (理学)

^{iv} サイエンスソリューション部 業務推進チーム チーフコンサルタント 博士 (理学)

は比較的弱いものの半減期の長い TRU 廃棄物である。人工的な複数の防護壁（人工バリア）と地質環境（天然バリア）を組み合わせ、数万年という長期に渡って放射性物質を閉じ込めるという考えに基づき、地層処分においては、放射性廃棄物を厚い金属製容器や放射性物質の移動を遅くする特殊な粘土等で囲んで、地下 300m 以深の安定した岩盤に埋設するという手法が採られる予定である。

地下深くにおいて、放射性廃棄物が自然現象の影響を受ける可能性がある主な要因としては、火山活動、断層活動、地下水流動等が挙げられる。様々な調査からそれらの影響の範囲を限定しやすくなると考えられるが、放射性物質がどのような挙動をするか、地層処分を実施する前に十分な検討が必要である。

表 1 放射性廃棄物の種類と処分方法¹⁾

発生場所	廃棄物の種類	廃棄物の例	処分方法の例
原子力発電所	低レベル廃棄物	放射能レベルの極めて低い廃棄物	コンクリート、金属等 トレンチ処分
		放射能レベルの比較的低い廃棄物	紙、布、廃液、金属等 ピット処分
		放射能レベルの比較的高い廃棄物	使用済制御棒、原子炉内の構造物 中深度処分（余裕深度処分）
ウラン濃縮工場	ウラン放射性廃棄物	紙、布、廃液、金属等	トレンチ処分、ピット処分
ウラン燃料加工工場			中深度処分（余裕深度処分） 地層処分（場合によっては）
MOX燃料加工工場	超ウラン元素を含む廃棄物（TRU廃棄物）	紙、布、廃液、金属等	ピット処分 中深度処分（余裕深度処分） 地層処分
再処理工場	高レベル放射性廃棄物	使用済燃料の再処理で発生する廃液	地層処分

表 2 処分方法の例¹⁾

分類	内容
トレンチ処分	コンクリートピット等の人工バリア（人工的な防護壁）を設けず、地下50m未満に廃棄物を入れて、覆土する。
ピット処分	地下50m未満にコンクリートの箱（ピット）を設置し、その中に廃棄物を入れてモルタル等で固めて、覆土する。
中深度処分	地下70mより深い地中に、コンクリートでトンネル型やサイロ型の建造物を造り、その中に廃棄物を入れて、廃棄物の周りを放射性物質の移動を遅くする特殊な粘土で締め固める等して埋め戻す。
地層処分	地下300mより深い、安定した岩盤の中に、厚い金属製容器等に廃棄物を入れて、放射性物質の移動を遅くする特殊な粘土で締め固める等して埋め戻す。

3 地層処分で考慮する物理現象

地層処分において、放射性廃棄物は金属製容器、特

殊な粘土、セメント系材料等によって囲われて埋め戻され、場合によっては地下水に晒される可能性がある。特殊な粘土は放射性物質を吸着するとともに、吸水すると膨張して地下水を通じにくくする性質を有し、放射性物質を閉じ込めるという点で非常に有効な材料である。しかし、セメント系材料と化学反応を起こして変質すると、吸水時に膨張しにくくなる可能性がある。また、一般的に地盤は土骨格、水、空気から構成され、荷重を受け持つものは土骨格と水であるが、土骨格が受け持つ荷重が小さくなると変形しやすくなる。このように、様々な材料が相互に影響を及ぼすため、その影響を評価する必要があり、図 1 に示すように、地層処分の分野では、熱の伝達（Thermal）、水の流動（Hydraulic）、構造の変形（Mechanical）、化学反応（Chemical）の 4 つの物理現象が対象となる。

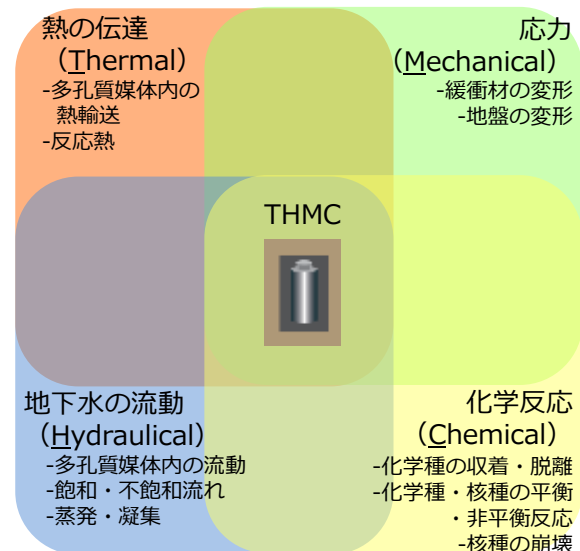


図 1 放射性廃棄物処分の評価で考慮する主な物理現象

4 COMSOL Multiphysics の特長

COMSOL Multiphysics は複数の物理現象（マルチフィジックス）の相互作用を考慮した連成解析を前提として開発された汎用工学ソフトウェアであり、流体、構造、電磁場、伝熱、対流・拡散、化学反応、音響等の様々な物理現象を考慮することができる。

COMSOL Multiphysics は、形状作成、メッシュ生成、条件設定、結果処理の他、一部の物理現象を解くための基本機能を実装した基本モジュールと、専門機能に特化したオプションモジュールを組み合わせ使用することができる。また、複数の物理現象の相互作

用を考慮した解析，すなわち連成解析を行うことができる。

図 2、図 3 はそれぞれダルシー則に基づく水の流動と、線形弾性体を仮定した構造に関する設定画面である。これに加えて、図 4 のように水の流動と構造の 2 つの物理現象を連成させるという設定を容易に行うことができる。



図 2 水の流動に関する設定画面



図 3 構造に関する設定画面

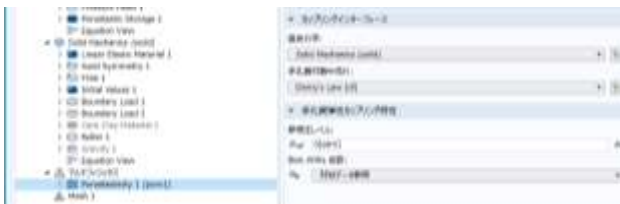


図 4 水の流動と構造の連成に関する設定画面

5 COMSOL Multiphysics による熱-水連成解析

COMSOL Multiphysics を用いて、SKB の解析事例²⁾を参考とした熱-水連成解析を行った。SKB はスウェーデンの放射性廃棄物処分の実施主体である。参考とした解析事例は、地層処分に関連する技術開発の 1 つとして、SKB が緩衝材内の水分量の移行を評価することを目的として、それを模擬した試験と対応させて実施されたものである。

解析モデルの模式図を図 5 に示す。解析上は軸対称モデルを用いることとする。SKB による試験においては、円筒状の半径方向の内側に砂、外側に緩衝材を配置し、砂中にヒーターを設置することで、放射性物質による発熱を模擬した。また、砂と緩衝材の間、及び緩衝材の外側にはギャップがあり、また鉛直方向の上下については、砂及び緩衝材は断熱材により挟まれる構造となり、半径方向の外周部には温度一

定の水を流すことで温度を制御した境界を設定した。

本解析では、以下に示す Richards 方程式に基づく水の輸送、熱伝導方程式に基づく熱輸送、拡散方程式に基づく濃度差による蒸気の輸送を考慮した。

水の輸送：Richards 方程式

$$\frac{c_m}{g} \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \left(\frac{-\rho_w k}{\mu} \nabla p \right) = Q_m \quad (1)$$

p : 圧力 [Pa]

ρ_w : 水の密度 [kg/m³]

Q_m : 蒸発・凝縮によるソース項 [kg/m³/s]

c_m : 比水分容量 [-]

k : 透過率 [m²]

熱の輸送：熱伝導方程式

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla (\lambda \nabla T) = Q \quad (2)$$

T : 温度 [K]

ρ : 密度 [kg/m³]

Q : 熱源 [W/m³]

C_p : 定圧比熱 [J/kg/K]

λ : 熱伝導率 [W/m/K]

蒸気の輸送：拡散方程式

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla (-D \nabla c) = -\frac{Q_m}{M_{H_2O}} \quad (3)$$

c : 蒸気のコル濃度 [mol/m³]

D : 蒸気の拡散係数 [m²/s]

Q_m : 蒸発・凝縮によるソース項 [kg/m³/s]

M_{H_2O} : 水のモル質量 [kg/mol]

蒸気の拡散については、以下の Akesson の式を用いた。この式は COMSOL Multiphysics のデフォルトの機能には入っていないものの、図 6 に示すユーザー定義の機能を用いることで、本解析に適用した。このように、COMSOL Multiphysics ではユーザーが個別に式や値を容易に設定することができる。

蒸気の拡散係数：Akesson の式

$$D = \epsilon_p (1 - S_e) \frac{5.9 \times 10^{-9} T^{2.3}}{P_g} \quad (4)$$

ϵ_p : 空隙率 [-]
 S_e : 飽和度 [-]
 T : 温度 [K]
 P_g : 気体の全圧 [Pa]

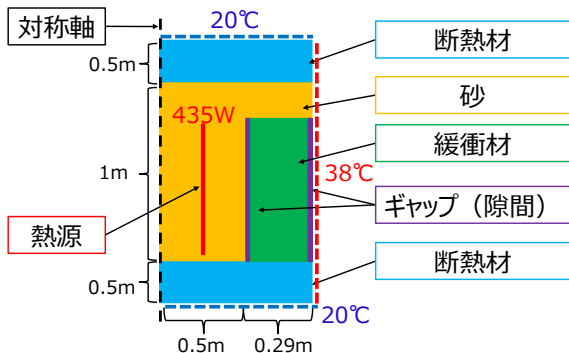


図5 解析モデルの模式図



図6 蒸気の輸送に関する設定画面

温度の推移を図7に示す。また、水及び蒸気の体積に対する蒸気の体積である飽和度の推移を図8に示す。ヒーター近傍の温度は10日程度で80°Cに達する。鉛直方向については、砂及び緩衝材は断熱材により挟まれており、また半径方向の外周部には温度境界が設定されているため、30日以降の温度分布は大きく変化しない。一方、緩衝材の飽和度は120日頃から低下する傾向を示した。SKBの解析事例と同等の結果を得ることができた。

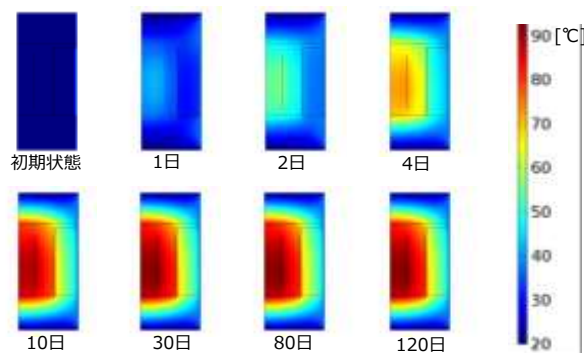


図7 温度の推移

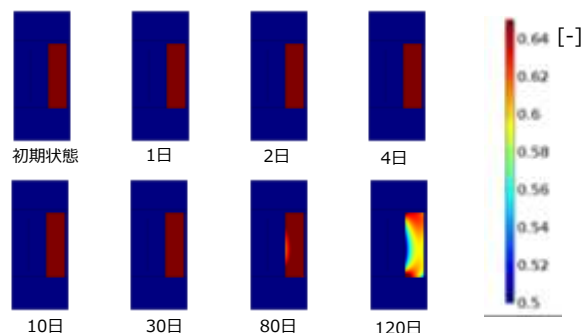


図8 飽和度の推移

6 おわりに

複数の物理現象の相互作用を考慮した連成解析を前提として開発された汎用工学ソフトウェアである、COMSOL Multiphysics を用いて、SKBの事例を参考として熱-水連成解析を行い、地層処分における緩衝材内の水分量の移行を評価した。

弊社は地層処分を含め、マルチフィジックスの問題に対してCOMSOL Multiphysicsの適用性の検討し、研究開発の支援を継続していく。

引用文献

- 1) 例えば https://chisoushobun.jp/pdf/anzen_a4.pdf. Accessed: 2019年6月17日
- 2) Tests and simulations of THM processes relevant for the buffer installation, SKB P-14-22, March 2014.

COMSOL, COMSOL Multiphysics, COMSOL Desktop, および LiveLink は、COMSOL AB 社の商標です。