# カ学ー化学連成数値モデルによるベレア砂岩 透水性経時変化の再現解析

伊藤 文1\*・安原 英明1・木下 尚樹1・高橋 学2

<sup>1</sup>愛媛大学大学院 理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番) <sup>2</sup>(独) 産業技術総合研究所 (〒305-0046 茨城県つくば市東1丁目1-1) \*E-mail: itoh.aya.09@cee.ehime-u.ac.jp

放射性廃棄物の処分地である地下深部では、圧力および温度レベルが共に高く、そのような環境下では 鉱物の溶解・沈殿等の化学作用が卓越し、その結果、岩盤の透水特性にも大きな影響を及ぼすと想定され る.そのため、対象となる岩盤の透水特性を詳細に把握する必要がある.本研究では、ベレア砂岩を対象 とし、既存の力学ー化学連成数値モデルを改良し、改良後のモデルを用いて透水試験の再現解析を実施す ることによりモデルの妥当性を検討した.従来のモデルでは自由表面溶解の支配パラメータである平衡定 数の評価が不十分であったため、PHREEQCを用いてより精確な値に修正した.また透水特性変化に関し ては、絶対透過率での評価を可能とした.

Key Words : Berea sandstone , rock permeability , mineral dissolution

## 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分や二酸化炭素の地中 貯留では、対象となる岩盤の透水特性を詳細に把握する<br /> ことは必要不可欠である.処分空洞近傍では廃棄体から の発熱により岩石構成鉱物の溶解や沈殿等の化学現象が 顕著であり、その結果、岩盤の力学・水理学特性に大き な影響を及ぼすことが予想される.しかし、その影響を 精度よく評価することは容易ではない. 現在までに、拘 東圧を作用させない条件下で熱水や塩水に岩石材料を湿 潤させ、水理学および力学特性の経時変化を長期にわた り観察した研究があるが、それらはいずれも拘束圧を作 用させていないため、地下深部の圧力環境を再現できて いない.また、経時変化のメカニズムを物理的なモデル で定量化しておらず、想定される物理現象を定性的に考 察しているに過ぎない. Yasuhara et al.<sup>1)2)</sup>やYasuhara and Elsworth<sup>3</sup>, 安原ら<sup>4</sup>は, 単一鉱物で構成される岩盤不連 続面の透水挙動の経時変化を予測評価するモデルや、 複 数の鉱物で構成される花崗岩不連続面の透水挙動を表現 できるモデルを構築し、その有用性を確認している.し かし、従来のモデルでは不連続面接触部における圧力溶 解現象を十分に考慮できておらず、溶解現象に関して平 衡から遠く離れた状態であると仮定し解析を行っている. そこで本研究では、接触部で発生する溶解現象を考慮し、 より精度の高い解析を行えるようモデルの改良を実施し、 改良後のモデルを用いて岩石の透水挙動を評価する.対 象とする岩石はベレア砂岩である.また,地下深部の温 度・圧力環境を再現した条件で実施している等方圧保 持・透水試験の再現解析を実施し、モデルの妥当性を検 討する.透水試験の境界条件は,温度および拘束圧を 20~90 ℃,7.5~15.0 MPaとする.

# 2. 圧力溶解を考慮した概念モデル

#### (1) 圧力溶解現象<sup>5)</sup>

本節では, 圧力溶解現象についての概要を述べる.

図-1に示すように、多孔質岩石に圧力、温度を作用させた場合、岩石構成粒子間の接触面で応力が集中し、粒子表面が溶解する.溶解された物質は、接触面から分子拡散作用により粒子間の間隙内へと移動する.間隙水内物質が過飽和に至れば、最終的に間隙表面で再沈殿が発生する.つまり圧力溶解現象は、1)不連続面内接触アスペリティ間の接触面における溶解現象(interfacial dissolution),2)接触境界面から間隙への溶解物質の拡散(interfacial diffusion),3)間隙自由表面での沈殿現象(reprecipitation)の一連のプロセスからなる.これら溶解・拡散・沈殿現象は互いに干渉し合っているため、3つの



現象のうち最も遅いプロセスが全体の挙動を支配するこ とが知られている.つまり,間隙率の小さな領域では, 粒子の自由表面積が小さいため沈殿現象が発生しにくく 圧力溶解の影響が非常に小さいと考えられる.一方,不 連続面などの間隙が大きな領域では,圧力溶解の影響を 強く受けることが,ほぼ純粋な単一鉱物で構成される不 連続面の透水試験より確認されており,複数の鉱物で構 成される不連続面でも同様の影響が想定される.

#### (2) 概念モデル

前節で述べたように圧力溶解現象は、岩石構成粒子間の接触面における溶解現象、溶解物質の拡散、粒子自由表面への再沈殿の3つのプロセスから成る.この一連の 微視的プロセスを代表要素として定量的に評価すること により巨視的な圧縮挙動(間隙率あるいは透水性変化)を表現することが可能である.そこで、非静水圧、非平衡状態における熱力学を考慮することにより、溶解・拡散・沈殿の一連の現象を、質量フラックスを用いてそれ ぞれ式(1)~(3)で定義している<sup>5</sup>.

不連続面内アスペリティ接触部における溶解は,接触 部と自由表面での化学ポテンシャルの差から溶解質量フ ラックスを定義する.また,接触面から間隙内への溶解 物質の分子拡散現象を記述する拡散質量フラックスは, フィックの第一法則を用いて,接触面積を考慮した積分 を行うことにより導いている.間隙内における溶質の沈 殿は,対象となる溶質の溶解度と間隙内濃度の差に着目 し,生成する二次鉱物の沈殿速度定数を用いて沈殿質量 フラックスとして定義している<sup>9</sup>.

$$\dot{M}_{diss}^{PS} = \frac{3V_m^2(\sigma_a - \sigma_c)k_+\rho_g A_c}{RT}$$
(1)

$$\dot{M}_{diff} = 8\pi\omega D_b \left( C_{\rm int} - C_{pore} \right) \tag{2}$$

$$\dot{M}_{prec} = k_{-}A_{pore}\rho_{g}V_{m}\left(\left(\frac{C_{pore}}{C_{eq}}\right)^{p} - 1\right)^{q}$$
(3)

ここで、 $\dot{M}_{diss}^{PS}$ : 圧力溶解質量フラックス、 $\dot{M}_{diff}$ : 拡 散質量フラックス、 $\dot{M}_{prec}$ : 沈殿質量フラックス、  $V_m$ : モル体積、 $\sigma_a$ : 接触部応力、 $\sigma_c$ : 臨界応力、  $k_{+/-}$ :溶解/沈殿速度定数、 $\rho_g$ : 粒子固体密度、 $A_c$ :接 触部面積、R: 気体定数、T: 絶対温度、 $\omega$ : 接触面 での拡散膜厚 $D_b$ : 分子拡散係数、 $d_c$ : 粒子間接触部直 径、 $(C_{int})_{x=c}$ : 接触面内物質濃度、 $(C_{pore})_{x=dc/2}$ : 間隙 内物質濃度、 $A_{pore}$ : 不連続面内自由表面積、 $C_{eq}$ : 溶 解度である.

式(1)~(3)内の溶解・沈殿速度定数,分子拡散係数は, 鉱物あるいは溶解イオン固有のパラメータである.これ は,溶解・拡散・沈殿現象を最も大きく左右する重要な パラメータであり,Anheniusタイプの関数で表される<sup>®</sup>. つまり,圧力溶解速度は温度上昇とともに指数関数的に 増大することになる.

不連続面間隙内の物質濃度が溶解度よりも小さい場合, 自由表面溶解が発生する.本研究では,自由表面溶解フ ラックスを次式で定義する<sup>9</sup>.

$$\dot{M}_{diss}^{FF} = k_{+}A_{pore}\rho_{g}V_{m}\left(1 - \left(\frac{C_{pore}}{C_{eq}}\right)^{m}\right)^{n}$$
(4)

ここで、 $Q_i$ : イオン活量積、 $K_i$ : 平衡定数である.また、式(4)内のイオン活量積および平衡定数は、自由表面溶解に関わる重要なパラメータであり、作用温度、鉱物元素濃度、電荷数に大きく依存し、次式のように表される<sup>6-8</sup>.

$$Q_i = \Pi a_i \tag{5}$$

$$K_{i} = \alpha_{1} + \alpha_{2}T + \frac{\alpha_{3}}{T} + \alpha_{4}T^{2} + \alpha_{5}T^{3} + \alpha_{6}T^{4} + \alpha_{7}T^{5} + \alpha_{8}T^{6} + \alpha_{9}T^{7} + \alpha_{10}T^{8} + \alpha_{11}T^{9}$$
(6)

イオン活量積を算出するために必要な化学反応式は文 献<sup>7-9)</sup>から獲得した.既存の解析モデル<sup>5)</sup>では自由表面溶 解の寄与度による透水性経時変化を評価することが不可 能であった.そのため本研究では、地球化学解析コード (PHREEQC<sup>10)</sup>)を用いて、各鉱物(石英,正長石,曹 長石,灰長石)に対する平衡定数を温度の関数に変換し た.その後,様々な温度に対する物質濃度の値から温度 と平衡定数の関係を、多項式近似することで解析に用い

#### (3) 解析手順

本節では、解析手順について説明する.式(1)~(4)を 連続的に解くためには粒子間接触部および間隙内の物質 濃度経時変化を求める必要がある.接触部および間隙内 物質濃度は、接触部における物質の溶解・拡散速度、間 隙内の溶解(あるいは沈殿)速度に支配されるため、す べての影響を包括的に考慮し、評価しなければならない. そこで、図-2に示すように、節点(1)~(4)を粒子間接触部 境界、間隙内、粒子自由表面境界に配置し、間隙体積を 2要素に等分割した.そして、各々の要素が拡散および 溶解(あるいは沈殿)のみに支配されると仮定し、接触 部および間隙内物質濃度変化を次式で定義する<sup>5</sup>.

ここで、 $q_i$ ,  $C_i(i=1,2,3)$ : 節点iでの質量フラックスお よび物質濃度、 $V_p$ : 間隙体積である. 図-2より明らか なように、閉鎖系では、 $q_1 = dM_{diss}/dt$ ,  $q_2 = q_3 = 0$ ,  $C_1 = C_{int}$ ,  $C_2 = C_{pore}$ ,  $C_3 = C_{eq}$ であることから、式(7), (8)を統合することにより次式で表される<sup>5</sup>.

$$\begin{cases} \dot{M}_{diss} \\ 0 \\ 0 \end{cases}_{\tau} = \begin{bmatrix} D_{1} & -D_{1} & 0 \\ -D_{1} & D_{1} + D_{2} & -D_{2} \\ 0 & -D_{2} & D_{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{int} \\ C_{pore} \\ C_{eq} \end{bmatrix}_{\tau}$$

$$+ \frac{1}{4} \begin{bmatrix} V_{p} & 0 & 0 \\ 0 & 2V_{p} & 0 \\ 0 & 0 & V_{p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{C}_{int} \\ \dot{C}_{pore} \\ 0 \end{bmatrix}_{\tau}$$

$$(9)$$

ここで,

$$D_1 = 8\pi\omega D_b , \quad D_2 = k_A_{pore} \rho_g V_m C_{eq}$$
(10)

さらに,

$$\tau = t + \Delta t , \quad C_{\tau} = 1/\Delta t (C_t + \Delta t - C_t)$$
(11)



図-2 解析モデルにおける要素分割法

とすると、最終的に接触部および間隙内物質濃度の経時変化は、次式で表される<sup>12</sup>.

$$\begin{cases} C_{\text{int}} \\ C_{pore} \end{cases}_{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} D_1 + V_p / 4\Delta t & -D_1 \\ -D_1 & D_1 + D_2 + V_p / 2\Delta t \end{bmatrix}^{-1} \\ \begin{bmatrix} \dot{M}_{diss} \\ D_2 C_{eq} \end{bmatrix}_{t+\Delta t} + \frac{1}{4\Delta t} \begin{bmatrix} V_p & 0 \\ 0 & 2V_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{\text{int}} \\ C_{pore} \end{bmatrix}_t \end{bmatrix}$$
(12)

閉鎖系において,接触部溶解,拡散,自由表面溶解・ 沈殿量は式(1)~(4)によって算出される.その結果,接 触部における粒子間貫入(圧縮)および自由表面溶解・沈 殿作用により,粒子の幾何学形状および間隙体積が変化 する.つまり,粒子体積 $V_s$ および接触面における溶解, 拡散により欠稜される物質の体積 $V_{rem}$ は時間の経過とと もに変化し,それらは以下の式で表される<sup>12</sup>.

$$V_{s} = -\frac{\pi}{3}d^{3} + \pi d_{z}\left(\frac{d^{2}}{4} - \frac{d_{z}^{2}}{12}\right) + \pi d_{0}\left(\frac{d^{2}}{2} - \frac{d_{0}^{2}}{6}\right)$$
(13)  
$$= \frac{\pi}{6}d_{0}^{3} - \frac{1}{\rho_{g}}\Sigma\left(\left(\dot{M}_{diff} - \dot{M}_{prec}\right)\Delta t\right)$$
$$V_{rem} = \frac{\pi}{8}\left(\frac{d_{z}^{3}}{3} - d_{o}^{2}d_{z} + \frac{2}{3}d_{0}^{3}\right)$$
$$= \frac{1}{\rho_{g}}\Sigma\left(\dot{M}_{diff}\Delta t\right)$$
(14)

ここで、 $d_z$ :代表要素高さ、 $d_0$ :初期粒子直径である.上式より、時間tにおける粒子直径dおよび要素高さ $d_z$ を算出することができる.その結果、間隙率は次式で評価される<sup>12</sup>.

$$\varphi = 1 - \frac{Vs}{d_0^2 d_z} \tag{15}$$

また, 圧力溶解現象により代表要素の最大断面積<sub>A</sub>, お よび接触面積<sub>d</sub>, も変化するため, その影響は次式によ り求める<sup>12</sup>.

$$A_{c} = \frac{\pi}{4}d^{2} - d^{2}\arccos\left(\frac{d_{0}}{d}\right) + d_{0}\sqrt{d^{2} - d_{0}^{2}} \qquad (16)$$

$$d_{c} = \sqrt{d_{0}^{2} - d_{z}^{2}} + (d - d_{0})$$
(17)

更新された $A_c$ より、接触部に作用する応力 $\sigma_a$ は次式により再評価される<sup>12</sup>.

$$\sigma_{eff} A_{t}^{\prime} = \sigma_{a} A_{c}^{\prime}$$

$$\rightarrow \sigma_{a} = \frac{\sigma_{eff}}{R}$$
(18)

また,変化後の間隙体積を用いることにより,新たな 接触部および間隙内の物質濃度が式(12)により算出され = る.この手順を各時間ステップで繰り返すことにより, 応力,温度条件に依存する間隙率,物質濃度の経時変化 <sup>-</sup> を評価することが可能となる.

圧力溶解現象による透水性変化を定量評価するため, Kozeny-Carman<sup>11)</sup>式を用いて透過率を評価する.既存の解 析モデルでは透過率の経時変化を初期値に比した正規化 透過率を用いて評価していたが<sup>50</sup>,本研究では式(19)によ り絶対透過率を算出する.

$$K_{r}(t) = \frac{1}{5S_{v}^{2}} \frac{\varphi(t)^{3}}{(1-\varphi(t))^{2}}$$
(19)

ここで、 $K_i$ :透過率、 $\varphi_i$ :間隙率である.

本解析モデルは、微視的な代表要素の挙動を巨視的な ものへとアップスケールすることから、対象領域は等 方・均質で、骨格粒子は均一粒径であると仮定する.ま た、本モデルは応力による骨格粒子の変形や破壊は考慮 しておらず、サブクリティカル亀裂進展のような、より 力学的なクリープ現象も考えていない.つまり、実際の 変形挙動を過小評価している可能性もあるが、ここでは 一次近似的に圧力溶解の影響のみに着目し、透水性経時 変化および間隙内の物質濃度を評価する.

## 3. 解析モデルの妥当性の検討

#### (1) 等方圧保持·透水試験

本章では,前章で構築した解析モデルを用いて,等方 圧保持・透水試験結果の再現解析を試み,改良後の解析 モデルの妥当性を検証する.

実験に使用した岩石は米国オハイオ州産のベレア砂岩 であり、石英分に富んだ粘土鉱物の少ない岩石である. 透水試験では図-3に示すベレア砂岩供試体(直径30mm,



図-3 透水試験に使用したベレア砂岩供試体

表-1 各供試体の境界条件

供試体	岩種	亀裂	温度 [℃]	拘束圧 [MPa]
B-42		無	20	7.5
B-43	ベレア	無	20	15.0
B-44	砂岩	無	90	15.0
B-45		無	90	7.5

高さ60 mm)を用いる.また,温度および拘束圧を長期 間制御可能な実験用岩石三軸圧力セル(協和技研製プロ トタイプ)を使用し,拘束圧7.5~15.0 MPa,温度20~90 ℃ 条件で実験を実施している.等方圧保持試験の境界条件 をまとめたものを表-1に示す.

続いて、等方圧保持状態で実施されている透水試験に ついて述べる.透水試験では、実験開始を0日目とし100 日目までは5日毎に透水試験を実施し、100日目以降は、 10日毎に透水試験を実施している.透水試験は、シリン ジポンプ(TELEDYNE ISCO社製、500D型)を用いて透 水差圧350 kPaの条件において、5秒間隔で流量を計測し、 定常状態に落ち着くまで約15分間実施している.この時 使用した透過水は超純水である.

#### (2) 解析結果と透水試験結果の比較

透水試験の再現解析を実施する際,拘束圧,透水差圧, 温度条件は実験と等しい値を用いて実施する.解析では, 石英(SiO<sub>2</sub>)90%,正長石(KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)5%,斜長石のエ ンドメンバーである曹長石(NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)2.5%,灰長石 (CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>)2.5%の5種類の鉱物で構成された岩石と仮 定して計算を実施する.溶解物質については,Si,Al, K,Ca,Naについて評価を行う.

透過率の経時変化を図-4に示す.図-4より,150 MPa, 20℃(B-43),7.5 MPa,90℃(B-45),150 MPa,90℃(B-44) 条件では実験結果を概ね再現することが出来ている.し かし,7.5 MPa,20℃(B-42)条件では初期値も含めて全体 的に実験結果を約1/3過小評価する結果となった.拘束 圧変化に着目すると,20℃条件では透過率が減少した 後,実験結果では300日程度から増加に転じているが,



図-5 溶解物質濃度の経時変化

解析結果では7.5 MPaでは3000日程度,15.0 MPaでは5000 日程度で増加に転じている.一方,90 ℃条件では透過 率が減少した後,実験結果では220~230日程度で増加に 転じているが,解析結果では7.5 MPaでは1500日程度, 15.0 MPaでは3000日程度で増加に転じており,解析結果 は20 ℃,90 ℃条件ともに透過率減少後,再度増加する という傾向を再現することが出来ている.そのタイミン グは実験結果より約10数倍遅い.解析では粒子間の接触 部および自由表面,2種類の溶解現象を考慮しており, 解析開始当初は接触部での溶解が卓越しているために透 過率が減少するが,接触部に作用する応力が臨界応力に 達すると,その後は自由表面溶解のみ生じる.このこと により透過率が減少から増加に転じると考えられる.

また, 20 ℃と90 ℃の解析結果を比較すると7.5 MPa, 15.0 MPaともに増加に転じるタイミングが早くなってい る.これは,温度上昇に起因して鉱物の溶解性が高くな り,接触部溶解および自由表面溶解が加速するためであ ると考えられる.

最後に、供試体として用いるベレア砂岩の構成要素の 中で相対的に濃度の高いSi濃度の再現解析結果を図-5に 示す.図-5より、解析結果と透水試験結果の差は1オー ダー以内に収まっており、概ね精度よく再現できている ことが確認できる.

# 4. まとめ

本研究では、圧力溶解現象を考慮した既存の解析モ デルの改良を実施し、改良後のモデルを用いて応力・温 度の作用によるベレア砂岩の透水性を評価することによ り、モデルの妥当性を検討した. 鉱物溶解に関連するパ ラメータである平衡定数を変更することにより、自由表 面溶解の寄与度による透水性経時変化の評価を可能とし た. また,透水性についても絶対透過率での評価を実施 している. 改良後の解析モデルを用いた再現解析の結果, 透水試験結果で得られている透過率の初期値および増加 現象について表現することが可能となった. また, 圧力 溶解現象によって間隙中に溶解した物質濃度についても 透水試験結果を概ね精度よく再現することが可能となっ た. しかしながら、本解析モデルは、代表要素に対して ある応力・温度条件下の化学作用による透水特性の変化 を予測評価しているに過ぎず、実際の処分坑道周辺に存 在する岩石の水理学特性を長期にわたり予測するために は熱-水-応力-化学の影響を連成して全体評価しなけれ ばならない. そのため、さらなるモデルの改良が必要で ある.

謝辞:本研究は,原子力安全・保安院「平成23年度核燃料サイクル施設安全対策技術調査(放射性廃棄物処分安 全技術調査等のうち地層処分に係る地質評価手法等の整 備)」として実施した.ここに記して謝意を表する.

#### 参考文献

- Yasuhara, H., Elsworth D. and Polak, A.: The evolution of permeability in a natural fracture: The significant role of pressure solution, *J. Geophys. Res.*, Vol.109, No. B3, doi: 10.1029/2003JB002663, 2004.
- Yasuhara, H., Elsworth, D., Polak, A., Liu, J., Grader, A. and Halleck, P.: Spontaneous permeability switching in fractures in carbonate: Lumped parameter representation of mechanically-and chemically-mediated dissolution, *Trans. Porous Media.*, Vol.65, pp.385-409, 2006.
- Yasuhara, H., Elsworth, D. : A numerical model simulating reactive transport and evolution of fracture permeability, *J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, Vol.30, pp.1039-1062, 2006.
- 安原英明,木下尚樹, Dae Sung LEE, 中島伸一郎, 岸田 潔: 力学―化学連成概念モデルによる花崗岩不連続面 の透水・物質輸送経時解析, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.1, pp.41-52, 2009.
- 5) Yasuhara, H., Kinoshita, N., Ohfuji, H., Sung, Dae Sung Lee and Nakashima, S. : Temporal alteration of fracture permeability in granite under hydrothermal consitions and its interpretation by coupled chemo-mechanical model. *Appl. Geochem.*, Vol.26, pp.2074-2088, 2011.
- Revil, A. : Pervasive pressure solution transfer in a quartz sand, J. Geophys. Res., Vol.106, pp.8665-8686, 2001.

- S Amórsson Stefán, Sigurdsson Sven, Svavarsson, Hördur. : The chemistry of geothermal waters in Iceland. I. Calculation of aqueous speciation from 0° to 370°C, *Geochim. Cosmochim. Act.*, vol.46, Issue 9, pp.1513-1532, 1982.
- Holland, TJB, and Powell, R, : An internally-consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest. *J. Metamorph. Geol.*, 16, pp.309-344, 1998.
- Andri Stefánsson : Dissolution of primary minerals of basalt in natural waters: I. Calculation of mineral solubilities from 0°C to 350°C, *Chem. Geol.*, Vol.172, Issues 3-4, 15 February 2001, Pages 225-250.
- 10) D.L.Parkhurst and C.A.J.Appelo, "User's guide to PHREEQC (Version2)-A computer program for speciation, batch-reaction, onedimensional transport, and inversegeochemical calculations", U. S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report, pp.99-4529, 2003.
- Bear, J. : Dynamics of Fluids in Porous Media, p.166, Dover Publications, Inc, 1972.
- 安原英明,木下尚樹,操上広志,中島伸一郎,岸田潔:温度・応 力に依存する化学溶解・沈殿現象を考慮した珪質岩石の透 水性経時評価,土木学会論文集 C, Vol.63, No.4, pp.1091-1100, 2007.

# PREDICTIONS OF PERMEABILITY IN BEREA SANDSTONE VIA COUPLED CHEMO-MECHANICAL CONCEPTUAL MODEL

# Aya ITO, Hideaki YASUHARA, Naoki KINOSHITA and Manabu TAKAHASHI

A chemo-mechanical conceptual model is improved to follow the evolution of permeability in Berea sandstone. In this research, the existing conceptual model is modified, and using the improved model, the permeability of rock in Berea sandstone is evaluated. The permeability experiments carried out under the simulated deep subsurface conditions of the temperature and pressure are replicated to examine the validity of the improved model. Predictions of rock permeability and element concentrations utilizing the improved model show a relatively good agreement with the experimental measurements.