

## 論文の内容の要旨

論文題目 原位置試験および数値解析による地下深部割れ目系岩盤内気液二相流動特性の研究

氏名 末永 弘

地下を利用した貯蔵・隔離技術として、石油・液化石油ガス(LPG)・液化天然ガス(LNG)のエネルギー地下貯蔵、圧縮空気貯蔵(CAES)、放射性廃棄物地層処分、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)地中貯留が挙げられる。エネルギー地下貯蔵や CAES では、割れ目を含む硬岩中に貯蔵された水よりも密度の小さい流体(気体)の漏洩を防止するため水封方式、すなわち地下水圧による気体の上方への移行を防止する方法が適用されることが多く、貯蔵施設の長期安全性の評価のためには、万一気体が漏洩(漏気)した場合の岩盤内における地下水と気体の挙動を的確に把握する必要がある。また、放射性廃棄物地層処分、CO<sub>2</sub> 地中貯留の長期安全性を検討するためにも、対象となる岩盤内における気液二相流動の適切な予測・評価が重要となる。

しかしながら、これまで室内実験や理論的・数値解析による検討は実施されてきたものの、実際の地下岩盤のスケールにおける気体漏洩を含めた気液二相流動の試験事例は存在せず、数値解析による評価の妥当性は必ずしも明らかではなかった。

そこで、本研究では、地下深部割れ目系岩盤に掘削した試験空洞において、岩盤内への高圧気体の漏洩を含めた気液二相流動に関する原位置試験である、水封式 CAES 実証試験を実施しデータを取得するとともに、取得データの分析、およびそれを利用した三次元数値解析により、試験結果を再現する原位置スケールの岩盤内気液二相流動特性の同定を行った。本研究の内容は以下のようにまとめられる。

### (1) 地下深部岩盤空洞における原位置試験

地下 450m、地下水位下 180m に掘削された径約 3m、長さ約 50m の横坑を対象に、空洞内部および岩盤内に計測システムを設置し、原位置試験を実施した。試験としては、周辺間隙水圧と釣り合う空洞内圧を求める基準圧測定、空洞内圧を低下し空洞に湧水を生じさせる透水試験、空洞内圧を上昇し漏気を生じさせる透気試験を複数回行った。また、空洞ならびに周辺ボーリング孔における地質観察から、割れ目の卓越方向、割れ目密度・連続性を調査した。

### (2) 原位置試験取得データの分析

原位置試験で得られたデータから、空洞容積、湧水・漏気量の時間変化をそれぞれ算出した。また、空洞から岩盤への気体侵入時における置換圧、岩盤を均質

多孔質媒体と仮定した時の平均絶対浸透率・間隙率を推定した。さらに、地質調査結果および漏気時の周辺岩盤内における圧力分布から、試験地の岩盤は鉛直方向の絶対浸透率が水平方向より大きな異方性をもつ媒体であると推定した。

### (3) 数値解析による気液二相流動特性の同定

空洞を含む岩盤を均質異方性多孔質媒体と仮定し、気液二相流動に関する数値解析を実施した。その結果、原位置試験における湧水・漏気挙動を再現するためには、以下が必要であることが明らかとなった。

- 岩盤の絶対浸透率は鉛直方向が水平方向の 100 倍程度の異方性を持つこと。
- 気液二相流動特性として、水飽和率( $S_w$ )の 1.0 から 0.02 程度の低下により急増する気相相対浸透率( $k_{rg}$ )の形状を与えること。
- 毛管圧( $P_c$ )と液相相対浸透率( $k_{rw}$ )の形状に関しては、 $S_w$ の 1.0 から 0.02 程度の低下により急増する  $P_c$ と緩やかに減少する  $k_{rw}$ の組み合わせか、緩やかに増加する  $P_c$ と急減する  $k_{rw}$ の組み合わせを与えること。

またこれらの形状は、空洞周辺の格子分割長、絶対浸透率の異方性の程度、不動水飽和率( $S_{wir}$ )の値を変化させた場合でもほとんど変化しないことが明らかとなった。

この気液二相流動特性の形状の組み合わせは、 $S_w$ のわずかな変化の範囲で同定したものであるが、地下岩盤における気液二相流動解析で使われる一般的な気液二相流動特性の形状、すなわち緩やかに増加する  $P_c$ 、下に凸の  $k_{rg}$ 、 $k_{rw}$ といった形状とは大きく異なり、これまで十分認識されてこなかったものと考えられる。

### (4) 同定した気液二相流動特性の形状に関する検討

同定した気液二相流動特性の形状の適切性、物理的解釈について検討を行うため、既往研究調査、割れ目内気体浸透に関する概念の考察および現象の定量的解釈のための数値実験を行った。

- 既往研究において、割れ目系岩盤を対象とした実験・数値解析では、一般的な形状(緩やかに増加する  $P_c$ 、下に凸の  $k_{rg}$ 、 $k_{rw}$ )が用いられている事例がほとんどであり、本研究で同定した  $P_c$ 、 $k_{rg}$ 、 $k_{rw}$  に類似した形状を用いた事例は少数であった。
- 地質調査および置換圧  $P_d \cdot P_c$ と割れ目開口幅の関係に基づく考察から、割れ目系岩盤における高圧気体漏洩の浸透モデルとして、開口幅の大きい割れ目とこれを連結する開口幅の小さい箇所(ボトルネック)を持つ割れ目のネットワークを考え、このボトルネックのため急増する  $P_c$ により液体のカウンターフローが抑制される一方、大きい  $S_w$ で気体が流動するため  $k_{rg}$ が急増

する概念モデルを示した。

- 同定した気液二相流動特性を用いた数値実験の結果,  $S_w$  の 1.0 からの低下で急増する  $P_c$  により液体のカウンターフローが抑制されることが明らかとなった。
- 気液二相流動特性の形状を検討した結果,  $S_{wir}$  が 0.5 程度,  $P_c$  はわずかな  $S_w$  の低下で急増し, その後緩やかな増大に転ずる形状,  $k_{rg}$  は上に凸の形状,  $k_{rw}$  は  $S_{wir}$  で 0 となる下に凸の形状の組み合わせが推奨されるものと考えられた。
- この気液二相流動特性の組み合わせを用いると, 一般的な気液二相流動特性を用いた時と比べて漏気挙動の数値解析結果に大きな差異が見出された。

地下岩盤における気液二相流動に関する数値解析では, 研究者・技術者はこれまで一般的な形状を与えて実行していた事例がほとんどであったと考えられる。これに対して, 本研究で見出された気液二相流動特性の形状の組み合わせは, 高压気体の漏洩現象に関する原位置試験とこれを再現する数値解析によって初めて示されたものであり, 岩石を用いた室内試験で得られるスケールとは異なる, 原位置スケールの気液二相流動特性を表すものと考えられる。

したがって今後, 水封式地下エネルギー貯蔵, CAES, 放射性廃棄物処分, CO<sub>2</sub> 地中貯留等の長期安全性評価において考慮されることが望まれる。

以上