

中国西昌天然ガス田における 3km 深井注水誘発地震

Earthquakes Induced by Water Injection at ~3 km Depth within the Rongchang Gas Field, Chongqing, China

雷 興林 [1]

Xinglin Lei[1]

[1] 産総研・地圏資源環境

[1] GSJ, AIST

<http://staff.aist.go.jp/xinglin-lei/>

流体の地下深部注入はいくつかの分野で科学的に若しくは産業アプリケーションとして利用されている。例えば、(1) 水圧破碎 (hydrofracture) 法による地殻の応力の測定; 2) 高温岩盤 (Hot-Dry-Rock) に水を注入する CO₂ フリーのエネルギーの生産; 3) 石油・天然ガスの二次回収 (Secondary Recovery); 4) CO₂ 及び他の産業廃液の地層処理。大半の現場では、場合により高い圧入圧にもかかわらず顕著な誘発地震活動が観測されなかったが、注水と関連した誘発地震活動も多く報告されている。マグニチュード 5 を超えた災害性誘発地震の例も幾つがあった。間隙圧 (の増加分) が地下深部へ拡散し、岩盤や断層の破壊強度 (応力の限界値) が下がり、その結果として地殻の応力が限界値を超え岩盤が破壊すること或いは断層が滑ること地震が生じるとい説が注水誘発地震の成因とされている。

中国四川盆地の西南部に多数の天然ガス田が分布している。そのガス田の一つである隆昌ガス田において、1988年から天然ガス生産過程でできた廃水を深度 3km の井戸にポンプ圧 2.9MPa 以下で断続的圧入した。2001 年まで、総量 100 万トンの水が注入された。この地域は相対的に安定していて、歴史上災害地震の記録がないだけでなく、有感地震 (この辺では M3 から有感) も少ないといわれている。しかし、注入操作開始直後から微小地震が多発し始めた。1993-1994 年に M4 から M4.2 の地震数回、1995 年に M4.5、1997 年 8 月 13 日に M5.2 の地震が続々発生し、最大マグニチュードを次々に更新した。2006 年まで、M5 級は 2 回、M4 級は 14 回、M3 級は 100 回以上発生し、地表の地震計で計 3 万 2 千以上の地震を記録した。これらの地震の時系列について、統計的な手法を用いて詳しく調べた。まず、注入レートと地震の発生が連動していることが確認された (Figure. 1)。さらに、ETAS (Epidemic-Type Aftershock Sequence) モデリング手法を駆使し、注水により誘発 (外部トリガー) した地震と地震自身によりセルフトリガーした地震 (大森則に従う“余震”活動) それぞれの割合を統計的に割り出すことを試みた。その結果によると、注水初期段階ではセルフトリガーがメインであったが、後半では外部トリガーが支配的な要素となった。注水による隙圧の拡散と地震 (非地震性滑りを含む) はそのまわりの応力場を変え、既存断層の CFS (Coulomb Failure Stress) に変化 (CFS) を与える。例えば、1MPa の間隙圧の増加で、あらゆる方向の断層に約 +0.5MPa の CFF (断層の摩擦係数が 0.5 とすれば) を付加することになる。これは断層の破壊強度が約 0.5MPa 低下することと等しい。自然界特に内陸断層の場合では 0.5MPa の応力の蓄積には数十年、数百年かかるかもしれない。地下注水は本来なら遠い将来に来るはずの地震を前々倒して誘発してしまうポテンシャルがあると考えられる。

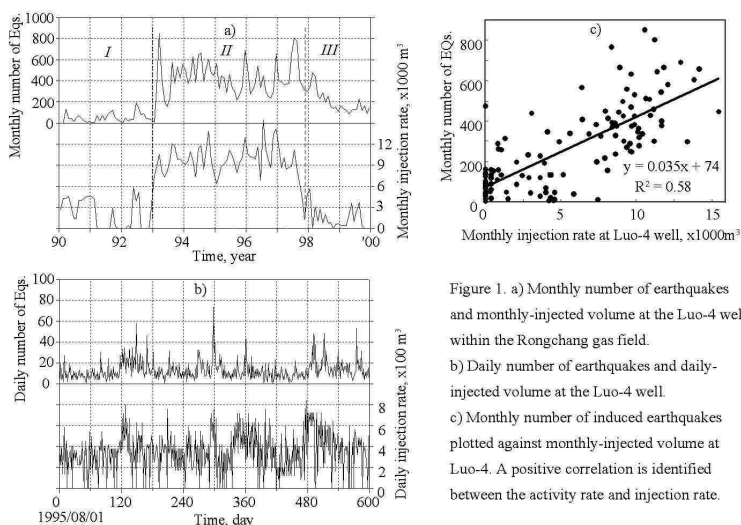


Figure 1. a) Monthly number of earthquakes and monthly-injected volume at the Luo-4 well within the Rongchang gas field. b) Daily number of earthquakes and daily-injected volume at the Luo-4 well. c) Monthly number of induced earthquakes plotted against monthly-injected volume at Luo-4. A positive correlation is identified between the activity rate and injection rate.