

放射年代測定法を用いた地熱系の長期変動解析

水垣桂子¹

Keiko Mizugaki (2004) Analyses for long-term changes of geothermal systems using radiometric dating. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 55(11/12), p.431 - 438, 5 figs.

Abstract: In order to evaluate effects of geothermal anomalies at high-level radioactive wastes disposal sites, information on long-term development and possible future activity of geothermal systems are needed. The only method to measure the time in the geothermal history is radiometric dating resetted by geothermal heat, such as electron spin resonance (ESR) and thermoluminescence (TL) methods.

Previous studies reported historical shift of surface manifestations for some kilometers in 0.1 m.y. by TL dating, and repose intervals of 0.4 m.y. by TL dating and 0.01 - 0.02 m.y. by ESR daing. Unfortunately, we have no more quantitative information on long-term geothermal activity because reports and researchers are insufficient. Further systematic studies on radiometric dating in present and past geothermal fields are needed to make guidelines for radioactive wastes disposal siting.

Keywords: dating, electron spin resonance(ESR), thermoluminescence(TL), geothermal system, thermal history

要 旨

放射性廃棄物の地層処分地点選定に際して、地熱活動の影響を評価するためには地熱活動の長期的な時間・空間スケールを知ることが必要である。その手段としては地熱地域に普遍的に産する物質を対象とし地熱系程度の温度で確実にリセットされる放射年代測定法、すなわち電子スピン共鳴(ESR)法及び熱ルミネッセンス(TL)法が適している。地熱活動の移動速度を測定した例としてTL法による数 km/10 万年という数値があり、また再活動間隔としてTL法で約40万年、ESR法で1~2万年の測定例がある。しかしこのような研究例はまだ少ないので、一般的な指針を示すためには系統的な年代測定をなるべく多く実施し地熱系の変動解析例を増やすことが急務である。

1. はじめに

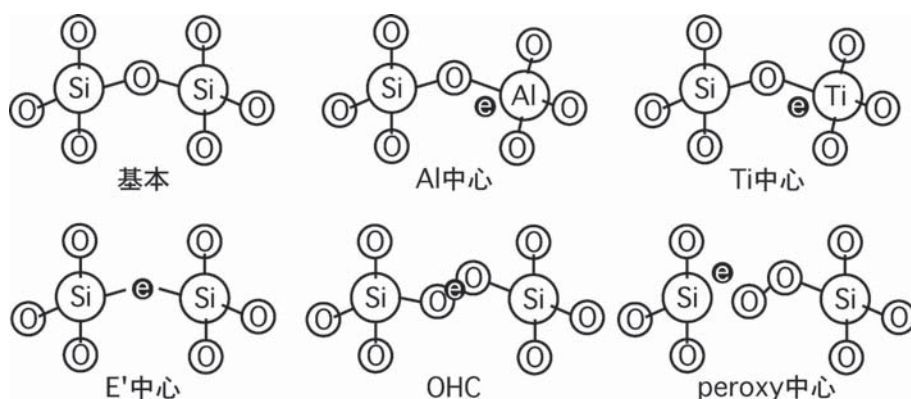
放射性廃棄物の地層処分場選定に際して、活火山や現在の地熱活動地を避けることは当然であるが、プレート沈み込み境界に位置し火山活動や地熱活動の活発な日本において、活火山や地熱活動地からどの程度離せばよいのであろうか。それを知るためには火山活動・地熱活動の長期的な時間・空間スケールを知ることが必要である。原子力発電所の立地についてはMcBirney and Godoy (2003) に述べられているが、廃棄物地層処分場の立地についても同様のことが言える。火山活動に関しては防災の面もあることから研究は比

較的進んでいるが、地熱活動に関しては研究者が少ないこともあって研究例は極めて少ない。

地熱活動の長期変動のタイムスケールを解析するには、地熱地域に普遍的に産する物質を対象とし地熱系程度の温度で確実にリセットされる放射年代測定法が適している。基本的に加熱過程及び高温の定常状態では開放系であるため、年代測定が可能なのは冷却過程のみであるが、冷却年代の空間的分布から地熱系の移動・冷却時間や再活動履歴などを解析することができる。このような解析は熱水鉱床についても行われているが、主に K-Ar 法が用いられるため分解能が十分ではなく、また鉱床探査においては時間の重要度は比較的低いためあまり詳細な解析は行われて来なかった。一方、地熱探査においては時間が非常に重要な情報であるため、利用対象となる地熱系や関係する火山噴出物の年代(1 万年~数十万年)が測定できかつ地熱地帯に普遍的に産出する物質(石英など)を利用できる年代測定法として、熱ルミネッセンス(thermoluminescence = TL)法及び電子スピン共鳴(electron spin resonance = ESR または electron paramagnetic resonance = EPR)法による年代測定及び変動解析が少数ながら行われてきた。TL 年代測定法は 1953 年に、ESR 年代測定法は 1967 年に提唱されたもので(兼岡, 1998)、地熱分野への応用としては Takashima (1979) が初めて TL 法による変質年代測定を行い、また Ikeya (1983) が初めて地熱変質岩の ESR を測定した。

TL 法と ESR 法は原理的には同じ現象を利用した年代測定法であるが、その測定方法が異なる。物質に放

¹地圏資源環境研究部門 (Institute for Geo-Resources and Environment, GSJ)



第1図 石英 (SiO_2)のESR年代測定に用いられる結晶格子欠陥とトラップされた電子(Rink, 1997及びIkeya, 1993による).

Fig. 1 Lattice defects and trapped electrons in quartz crystal used for ESR dating (after Rink, 1997 and Ikeya, 1993).

射線が当たると物質内の電子（または正孔）を弾き飛ばし、飛ばされた電子は結晶格子欠陥などにトラップされると安定的に存在するが、加熱や強い応力によってトラップから解放される。通常自然環境では岩石内の放射性元素や宇宙から来る微弱な放射線が存在するため、結晶格子（欠陥）が生成された時、または一度加熱されて冷却を開始した時を起点として、物質内のトラップに電子が蓄積される。トラップされた電子の数は被爆線量に比例するので、これを計数することにより物質の被爆線量を測定し、1年あたりの放射線量で割ると年代値を算出することができる。トラップされた電子の計数法として、電子が特定の波長の電磁波を吸収してスピンを反転させる現象を利用するのがESR法、試料を加熱して電子をトラップから解放した際に余剰エネルギーを光として放出する現象を利用するのがTL法である。TL法とESR法の最大の違いは電子をトラップから解放するか否かにあり、TL法は解放後の電子が発する光を検出するため元のトラップを特定することが難しい。対してESR法は電子を解放しないのでトラップの種類を識別でき、このことから年代測定に不適なもの除外したり、トラップの種類によって解放温度が異なることを利用して温度履歴を解析することが可能である。また同一試料を何度でも測定することができるため繰り返し測定によりランダム誤差を低減することが可能である。

TL法・ESR法による放射年代測定は比較的歴史が浅く、研究者も少ないことから測定例は多くない。地熱系への応用については高島・水垣(2004)が簡潔なレビューを行ったが、本稿では温度条件の研究例やその後の成果も加えて、更に詳しく総括する。ESR法とTL法の原理について詳細は池谷(1981a, 1984a)を参照されたい。なお、このほか最近では光励起ルミネッセンス (optically stimulated luminescence = OSL) とい

うTLに類似した方法も開発されているが、まだ実用段階には至っていない。

2. これまでの研究例

2.1 温度条件の研究例

上に述べたとおり地熱系の年代測定において年代値の出発点は冷却開始時または鉱物の析出時である。ESR法・TL法とも、地熱に関してこれまでに実用化されたと言ってよい測定対象物質はシリカ (SiO_2)のみであり、これには地熱水から直接析出したもの（温泉沈殿物や岩石の割目を充填する脈）、地熱水と岩石との反応により岩石内に生成された2次鉱物のほか、地熱変質を被った火成岩中の石英斑晶も利用できる。ここではトラップの種類ごとに温度条件を決定できるESR法について述べる。

石英から検出されるESR信号（スペクトル上で電磁波の吸収を示すピークを信号という）にはAl中心（Siを置換するAlに捕獲された正孔）による信号と、Ti中心（Siを置換するTiに捕獲された電子）による信号、同様にSiを置換する不純物のGe中心信号、Oの抜け穴に捕獲された電子によるE'中心信号、逆にOが1個余分にある場所に捕獲された電子・正孔によるOHC (oxygen hole center), peroxy中心信号などがある(第1図)。適用年代幅は試料の特性や自然放射線量にもよるため一概に言えないが、一般的には若い側の限界（検出限界）は1万年弱（水垣, 2001）、古い側の限界（トラップ電子密度の飽和）は200~300万年程度（池谷, 1981b）と考えられている。年代値のリセット温度（トラップ電子がすべて解放される温度で、同位体年代測定法における閉鎖温度に相当する）はこれまで主に加熱実験によって見積もられてきたが、正確にはリセット条件は温度と時間の関数であり、低温でも長時間継

続すればリセットされる(Ikeya, 1983).

Miyakawa and Tanaka (1985)は花崗岩から抽出した石英について加熱実験を行った結果, Ge 中心信号は 320 °C で 10 秒, OHC 信号は 360 °C で 10 秒で消滅した. このことから 80 °C の温度条件では Ge 中心信号の寿命は 10 年, OHC 信号の寿命は 1000 年のオーダーと試算された.

Shimokawa and Imai (1987)は東北地方八幡平周辺に分布する玉川溶結凝灰岩から地熱変質した試料としていない試料を計 7 個を採取して石英斑晶の ESR 年代測定を行い, 他手法による年代値と比較した. その結果, 変質した試料では Ge 中心年代・OHC 年代・フィッシュントラック年代は未変質試料とほぼ一致し, Al 中心年代と TL 年代はいずれもこれより若くなった. このことから Al 中心年代と TL 年代だけが地熱により若返ったと考えられ, Ge 中心や OHC が影響されず Al 中心信号強度だけがゼロになる条件として 50 ~ 60 °C の温度が千年~一万年のオーダーで継続したと見積もられた.

森藤ほか (1989)は九州各地から珪化変質岩 3 個, 温泉沈殿物 (SiO₂) 1 個, 石英脈 1 個を採取して ESR 年代測定を行った結果, 変質岩では E' 中心・Ge 中心・OHC, 沈殿物では E' 中心・OHC, 石英脈では OHC が検出された. 変質岩では 3 試料とも E' 中心年代 << OHC 年代 < Ge 中心年代の関係があり, 加熱実験の結果 E' 中心は熱的安定性が低い (比較的低温でゼロになる) ため, 格子欠陥によるリセット温度の違いを利用して温度履歴の解析ができる可能性が指摘された. 一方, 水垣 (2001) 及び水垣・宝田 (2003) は未変質の火山噴出物の石英斑晶を系統的に測定し, この場合は急冷されて年代差は出ないはずであるにもかかわらず Al 中心年代と Ti 中心年代に系統的なずれが認められることを報告した. このことから, リセット温度の違いを利用した温度履歴解析にはまだ解決すべき問題がある.

Toyoda and Ikeya (1991)は花崗岩から抽出した石英について加熱実験を行った. 温度を変えて各 15 分間加熱した結果, Al 中心信号強度は 220 °C で減り始め 380 °C でほぼ消滅, Ti 中心信号強度は 170 °C で減り始め 260 °C でほぼ消滅した. また, 何通りかの温度で時間による信号強度の減少を測定した結果, Al・Ti 中心とも信号強度の逆数が時間に比例した. これに基づいて冷却率が 1 °C/千年の場合の閉鎖温度は Al 中心で 149 °C, Ti 中心で 82 °C と試算された. なお, 石英中のトラップ電子は加熱されなければ 100 万年以上安定に存在することも示された.

Toyoda and Ikeya (1994)は溶岩から抽出した石英斑晶について温度を変えて各 15 分間加熱した結果, Al 中心信号強度は 200 °C 以上で単調に減少したのに対し, Ti 中心信号強度の減少曲線は 2 段になり, 温度安定性

の高い成分と低い成分があることを明らかにした. この実験結果に基づいて, 60 °C の環境が 1 万年続けば, Al 中心信号強度は 50 ~ 80%, Ti 中心信号の不安定成分の強度は 40 ~ 60% 減少すると試算された.

このように ESR 年代のリセット温度-時間条件は試算段階であり, 互いに矛盾する結果や系統的なずれが報告されている. 試料によって特性が異なる可能性もあるので, 今後の系統的な研究が必要である.

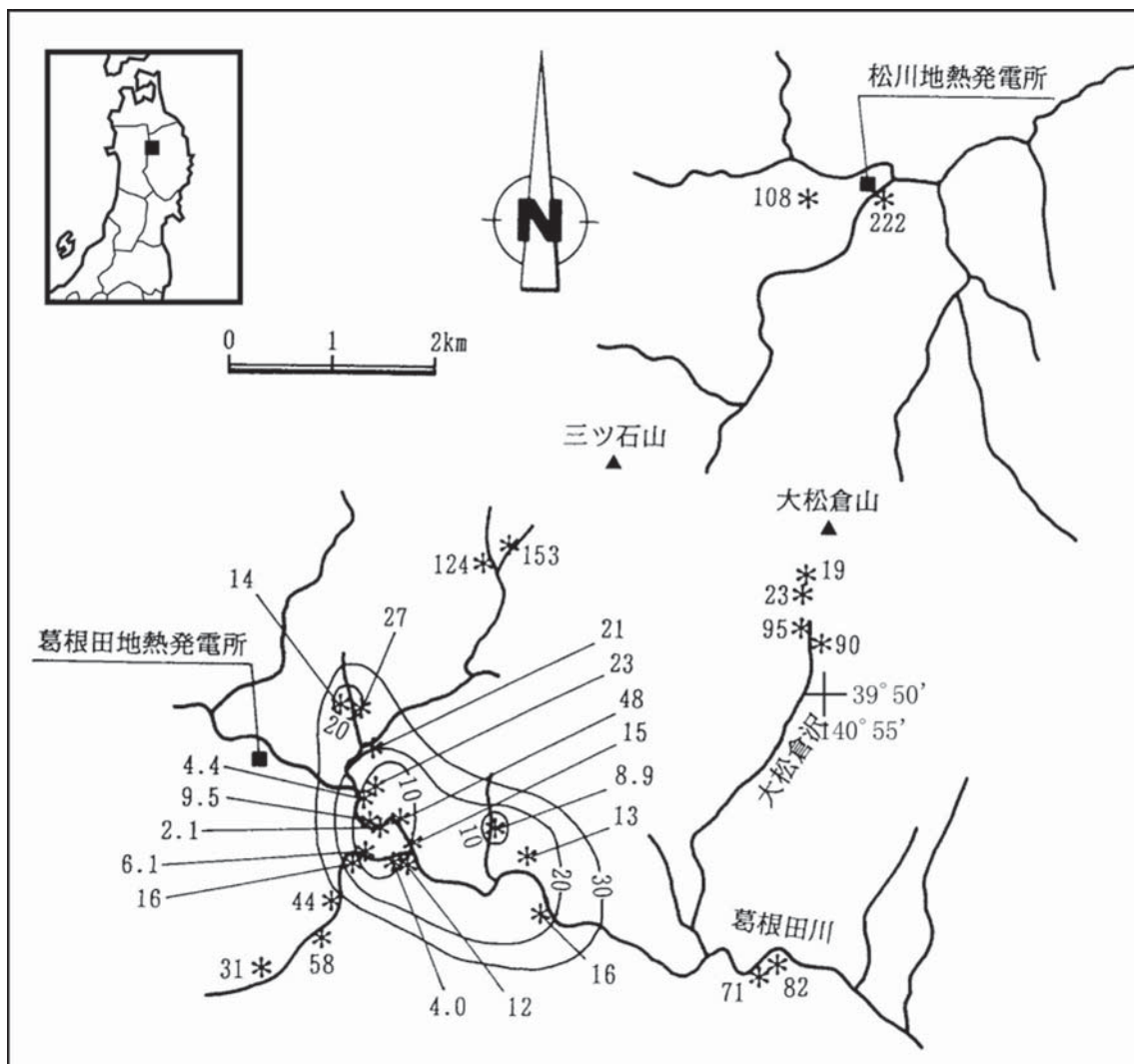
2.2 TL法による地熱系の変動解析例

高島ほか (1987)は岩手県葛根田-松川地域の地熱変質岩 30 個から抽出した石英について TL 年代測定を実施し, 地熱地帯中央部が最も若く周辺部ほど古い帯状配列を示すことを明らかにした (第 2 図). しかしその帯状配列が, 熱水活動が周辺から中央部へ向かって収斂したことを示すのか, あるいは熱水活動は中央部だけで周辺部ほど温度が低かったことを示すのか, どちらなのか決定することはできない. またこの帯状配列の外側の変質岩は 100 万年~70 万年という古い年代値を示す (しかし原岩の年代よりは若返っている) ことから, 100 万年~70 万年前の古い熱水活動と 30 万年以新しい新しい熱水活動の少なくとも 2 回が識別された.

Takashima and Reyes (1990)はフィリピンの地熱地域の変質岩 11 試料から石英または長石を抽出して TL 年代測定を実施し, 熱水活動が 10 万年単位で熱源から遠ざかる方向に移動していることを明らかにした (第 3 図). 移動速度は km/10 万年のオーダーである.

2.3 ESR法による地熱系の変動解析例

Mizugaki (2002)は秋田県皆瀬川の河床露頭から石英脈を多数採取して ESR 測定を行い, 35 個について Al 中心年代を算出した. そのうち 34 個は 1 万年~3 万年とばらつくが, 採取地点などによる系統性はなく (第 4 図), 現地ではほとんどの脈が繋がっていて同時期の形成とみられるため, ばらつきをランダム誤差とみなすと平均年代 1.8 万年, 標準偏差 0.6 万年となる. このことから, この石英脈群全体の冷却に要した時間はばらつきの範囲内, すなわち長くても 1~2 万年以内と推定できる. 年代値がばらつく原因としては周辺の岩石や石英脈内部の元素分布の不均一が大きいと考えられる. 一部では他の石英脈や周辺の岩石の破片の隙間を埋めるように析出した石英があり, 少なくとも 2 回の熱水活動があったことを示す. 35 個のうち 1 個はこの新期の石英中に取り込まれた古い石英脈で, 年代値はほとんどゼロであったことから新期熱水活動の熱によりリセットされたと考えられる. またこのことは, 熱水系の冷却期間が ESR 年代測定法の検出限界 (この試料については 5000 年程度) 以下の短期間である可能性を示している.

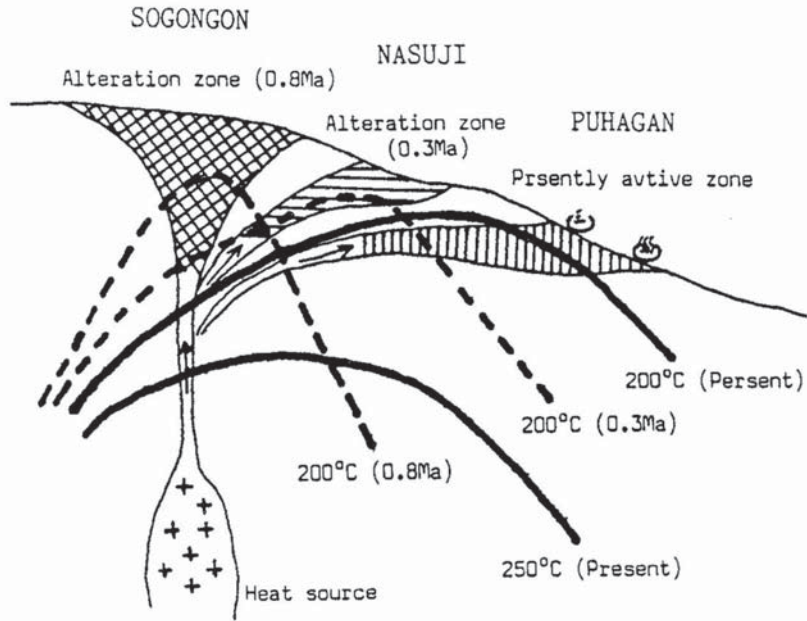


第2図 岩手県葛根田-松川地域の地熱変質岩のTL年代値分布 (高島ほか, 1987のFig.2及びFig.4を編集・簡略化). 単位は万年.

Fig. 2 Distribution of TL ages (in 10 ka) obtained from geothermally altered rocks in the Kakkonda - Matsukawa field, Iwate Prefecture (modified from Takashima *et al.*, 1987, Figs.2 and 4).

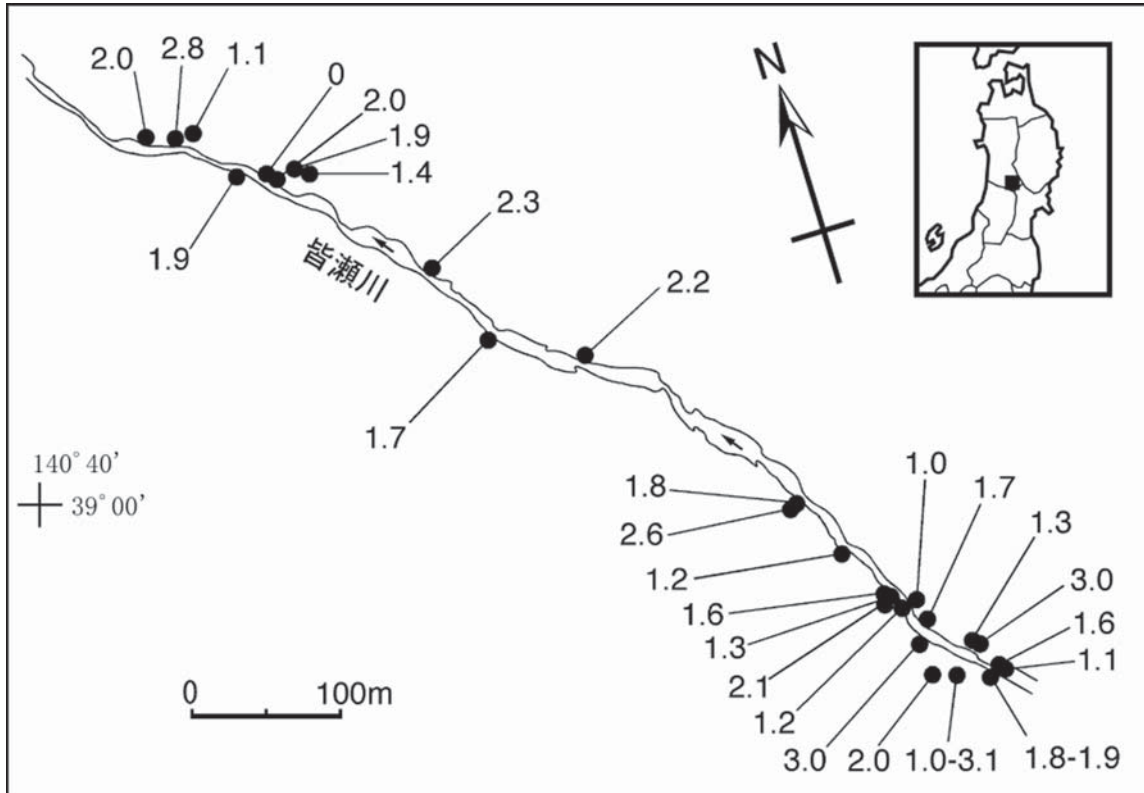
水垣 (2003, 2004)は、現在の地熱活動地である秋田県湯沢市川原毛地域の変質岩を系統的に採取してESR測定を行った(第5図)。この地域は硫気孔群を中心に白色珪化変質帯が広がり、沢底には温泉が湧出する。珪化変質帯の原岩は約600万年～400万年(伊藤ほか, 1989)の礫質凝灰岩であり、斑晶も多量に含まれているので、石英斑晶だけを抽出して測定することが可能であり、また全岩試料を測定すれば石英のほか珪化変質により生成されたamorphous silicaの信号も検出できると考えられる。石英斑晶の測定結果は、噴気地点や温泉の近傍で採取した7試料でAl中心信号・Ti中心信号のいずれも検出限界(本地域の試料では3万年程度)以下であった。ガンマ線を照射すると両信号とも増大するので、石英斑晶にAlやTiが含まれないわけではない。これは実際に地熱活動によってESR年代値が

リセットされていることを初めて実証したものである。周辺部の2試料では1.5万年、4.8万年の年代値が得られたが、原岩の年代と比較すると明らかに地熱活動によって若返っている。また全岩試料では、現在高温である中央部でもperoxy中心信号が検出されたが、照射線量応答が不規則で年代値は算出できないものが多かった。Ikeya (1993;Fig.9.7)によれば、peroxy中心信号は加熱によって一旦増加したのち減少するという温度特性を示し、またAl中心信号が消滅する400℃以上でもゼロにはならない。このことから地熱地域においては、Al中心年代がゼロである地点でperoxy中心信号が検出された場合、peroxy中心信号は地熱によって増大した可能性があるため、peroxy中心信号強度から年代値を算出するのは妥当でない。しかし逆にこのことを利用して温度-時間履歴を解析できる可能性がある。



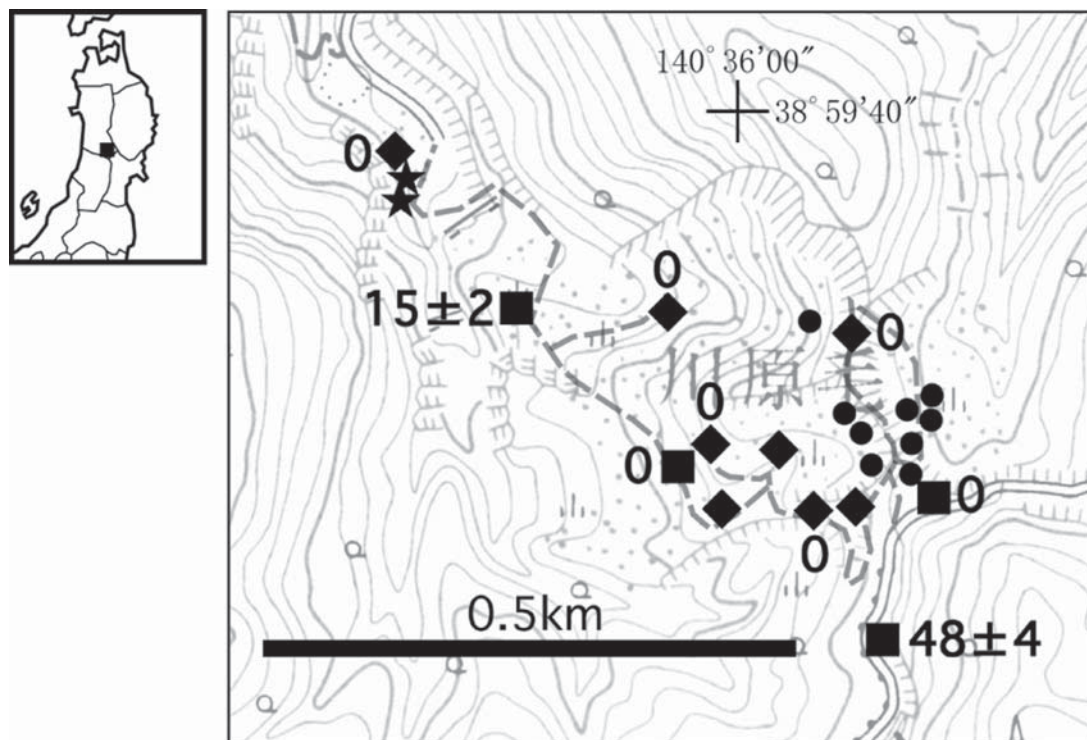
第3図 フィリピンの地熱地域のTL年代値分布に基づく地熱活動域移動の概念図 (Takashima and Reyes, 1990).

Fig. 3 A schematic model showing migration of hydrothermal activity based on TL ages, the Palipinon geothermal area, Philippines (Takashima and Reyes, 1990).



第4図 秋田県皆瀬村の石英脈群のESR (Al中心) 年代値分布 (Mizugaki, 2002を簡略化). 単位は万年.

Fig. 4 Distribution of ESR age (in 10 ka) calculated from Al center signal intensity of quartz veins, Minase Village, Akita Prefecture (modified from Mizugaki, 2002).



第5図 秋田県湯沢市川原毛の変質岩のESR測定結果(水垣, 2004による)。**●**:噴気地点, **★**:温泉湧出地点, **◆**: peroxy 中心信号検出地点, **■**: 石英斑晶のみ測定 (peroxy 中心信号未確認) 地点, 数字: AI 中心年代値 (千年; 0 は検出限界以下)。国土地理院発行 1:25,000 地形図「秋ノ宮」を使用。

Fig. 5 ESR ages of geothermally altered rock in the Kawarage field, Yuzawa City, Akita Prefecture (after Mizugaki, 2004). **●**: fumarole, **★**: hot spring, **◆**: sample yielding peroxy center signal, **■**: sample measured only for quartz phenocrysts, numbers: age (ka) calculated from AI center signal intensity of quartz phenocryst.

例えば第5図において左上隅の地点では、AI中心信号は検出限界以下でperoxy中心信号が検出されている。この付近の河床には温泉が湧出しており、新エネルギー総合開発機構(1985)によれば本地域の温泉温度は90℃前後である。本地点でのAI中心信号がこの温泉活動によってリセットされていると仮定して池谷(1984b)の図2にあてはめると、温度が90℃で一定の場合AI中心信号は数千年でゼロとなり、これが継続時間の最小値となる。この試料の加熱実験を行ってperoxy中心信号の温度特性を明らかにすることにより、現在の泉温(地温)と一致するか、温度が変化したかどうかを検証することが可能と思われる。

3. まとめと今後の課題

本研究の最終目標は、放射性廃棄物の地層処分地点選定に際して、現在の地熱活動地から何km離せばよいか、過去の地熱活動地は何年たったなら再活動のおそれ無しと判断してよいか、その基準を示すことにある。Takashima and Reyes (1990)のように地熱活動の移動速度・距離を見積もるのが最も良い基準となり、この場合のkm/10万年の移動速度は超長期的影響として無

視できない数値である。また高島ほか(1987)及びMizugaki(2002)では同一地域での再活動が報告されているが、その時間間隔はかなり異なる。現在のところこのような研究例は他にないので、一般的な結論を出すことはできない。したがって、現在及び過去の地熱活動地についてこのような系統的な年代測定をなるべく多く実施し、地熱系の変動解析例を増やすことが急務である。年代測定手法としてはTL法よりもESR法に利点が多い。しかしESR法においてもトラップの種類毎の温度特性はまだ確定しておらず、試料によって異なる可能性もあるので、年代測定試料そのものの加熱実験により温度特性を明らかにする必要がある。2.3で述べたようにperoxy中心とAI中心との温度特性の違いを利用して温度-時間履歴を解析できる可能性があり、また他手法(流体包有物など)によって独立に古地温を推定できればなお良い。温度が一定の場合は継続時間の最小値、冷却途上の場合は冷却率及び期間が求められる可能性がある。しかしトラップの種類によるリセット温度の違いを利用した温度履歴解析については、急冷された火山岩試料で系統的なずれが認められているため、なお慎重な検討が必要である。また、石英脈の場合は岩石内部での元素分布の不均一性が大

きな問題と思われ、この点について今後の詳細な研究が必要である。

文 献

- 池谷元伺 (1981a) 概論: ESR年代測定法. 月刊地球, **3**, 468-477.
- 池谷元伺 (1981b) ESR法の対象と注意事項. 月刊地球, **3**, 524-528.
- Ikeya, M. (1983) ESR Studies of Geothermal Boring Cores at Hachobara Power Station. *Jap. Jour. Appl. Phys.*, **22**, L763-L765.
- 池谷元伺 (1984a) 概論: 続・ESR年代測定法. 月刊地球, **6**, 212-217.
- 池谷元伺 (1984b) 地熱: ESRによる地熱熱源評価. 月刊地球, **6**, 263-267.
- Ikeya, M. (1993) *New applications of electron spin resonance*. World Scientific Publ., Singapore, 500p.
- 伊藤谷生・歌田 実・奥山俊一 (1989) 東北日本脊梁地域に分布する中新世後期～鮮新世のカルデラ群について. 地質学論集, **32**, 409-429.
- 兼岡一郎 (1998) 年代測定概論. 東大出版会, 東京, 315p.
- McBirney, A. and Godoy, A. (2003) Notes on the IAEA guidelines for assessing volcanic hazards at nuclear facilities. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **126**, 1-9.
- Miyakawa, K. and Tanaka, K. (1985) An ESR study on the geothermal histories of the Kurobe, Central Japan. In Ikeya, M. and Miki, T. eds., *ESR Dating and Dosimetry*, Ionics, Tokyo, 165-173.
- 水垣桂子 (2001) 火砕流堆積物とその2次堆積物のESR年代. 日本地熱学会平成13年度学術講演会, B45.
- Mizugaki, K. (2002) ESR dating of quartz veins: cooling time of a hydrothermal system. *Advances in ESR Applications*, **18** (Proc. International Symposium on New Prospects of ESR Dosimetry and Dating), 181-186.
- 水垣桂子 (2003) 川原毛変質帯のESR年代. 日本地熱学会平成15年度学術講演会, P14.
- 水垣桂子 (2004) 現在の地熱活動によるESR年代のリセット. 第21会ESR応用計測研究会 (ESR応用計測, 26-27).
- 水垣桂子・宝田晋治 (2003) 八甲田第1期・第2期火砕流堆積物のESR年代. 日本地質学会第110年学術大会, P-139.
- 森藤本行・田口幸洋・林 正雄 (1989) 地熱変質石英のESR年代測定. 日本地熱学会誌, **11**, 21-30.
- Rink, W. J. (1997) Electron spin resonance (ESR) dating and ESR applications in Quaternary science and archaeometry. *Rad. Meas.*, **27**, 975-1025.
- Shimokawa, K. and Imai, N. (1987) Simultaneous determination of alteration and eruption ages of volcanic rocks by electron spin resonance. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **51**, 115-119.
- 新エネルギー総合開発機構 (1985) 地熱開発促進調査報告書, No.7, 湯沢雄勝地域, 814p.
- Takashima, I. (1979) Preliminary study on the determination of alteration age by a thermoluminescence method. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **30**, 285-295.
- 高島 勲・本多朔郎・和田 哲 (1987) 八幡平葛根田一大松倉沢及び周辺地域の地熱活動史と熱水系—熱ルミネッセンス法による変質岩の年代測定の地熱探査への応用. 日本地熱学会誌, **9**, 43-55.
- Takashima, I. and Reyes, A. G. (1990) Alteration and TL age of the Palimpinon Geothermal Area, Negros Island, Southern Philippines. *J. Geotherm. Res. Soc. Japan*, **12**, 315-325.
- 高島 勲・水垣桂子 (2004) 火山噴火予知と地熱探査. 放射線と産業, **101**, 25-31.
- Toyoda, S. and Ikeya, M. (1991) Thermal stabilities of paramagnetic defect and impurity centers in quartz: basis for ESR dating of thermal history. *Geochem. J.*, **25**, 437-445.
- Toyoda, S. and Ikeya, M. (1994) ESR dating of quartz with stable component of impurity centers. *Quat. Geochron. (Quat. Sci. Rev.)*, **13**, 625-628.

付録: 引用文献以外の参考文献一覧

- Aitken, M. J. (1985) Thermoluminescence dating. Academic Press, London, 359p.
- Clozel, B., Komuro, K., Nakashima, S., Nagano, T., Masaki, N. and Hayashi, H. (1992) ESR and cathodoluminescence studies of radiation defects in clays and quartz from some uranium deposits. *Rep. Res. Inst. Natural Res., Mining Col., Akita Univ.*, **57**, 25-55.
- Grün, R. (1989) Electron spin resonance (ESR) dating. *Quat. Int.*, **1**, 65-109.
- Hayashi, M., Shinno, I., Taguchi, S. and Sugihara, S. (1990) ESR signals of zircon irradiated by thermal neutrons and gamma-rays. *Jour. Mineral. Petrool. Econo. Geol.*, **85**, 27-33.
- 池谷元伺 (1987) ESR (電子スピン共鳴) 年代測定. アイオニクス, 東京, 210p.

- Imai, N. and Shimokawa, K. (1985) Dating of volcanic ash by electron spin resonance using aluminum and titanium centers in plagioclase. In Ikeya, M. and Miki, T. eds., *ESR Dating and Dosimetry*, Ionics, Tokyo, 187-190.
- Jonas, M. (1997) Concepts and methods of ESR dating. *Rad. Meas.*, **27**, 943-973.
- Taguchi, S., Harayama, M. and Hayashi, M. (1985) ESR signal of zircon and geologic age. In Ikeya, M. and Miki, T. eds., *ESR Dating and Dosimetry*, Ionics, Tokyo, 191-196.
- Takashima, I. (1991) Problems and use of alteration age dating in geothermal exploration. *Rep. Res. Inst. Natural Resources, Min. Coll. Akita Univ.*, **56**, 115-125.
- Takashima, I. (1995) Thermal history of the Akinomiya-Oyasu geothermal field, northeast Japan. *Proc. World Geotherm. Cong.*, 1995, **2**, 1067-1070.
- 高島勲・座間勉・本多朔郎・佐藤琢哉 (1988) 秋田県小安・秋の宮地熱地域の変質岩および火山岩のTL年代. 日本地熱学会誌, **10**, 142.
- 高塚英男・高島 勲 (1992) 岩手県松川地域における変質帯とTL年代. 日本地熱学会誌, **14**, 148.
- Toyoda, S. and Ikeya, M. (1991a) ESR dating of quartz and plagioclase from volcanic ashes using E_1' , Al and Ti centers. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, **18**, 179-184.
- Toyoda, S., Goff, F., Ikeda, S. and Ikeya, M. (1995) ESR dating of quartz phenocrysts in the El Cajete and Battleship Rock Members of Valles Rhyolite, Valles Caldera, New Mexico. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **67**, 29-40.
- Tsuchiya, N., Suzuki, T. and Nakatsuka, K. (2000) Thermoluminescence as a new research tool for the evaluation of geothermal activity of the Kakkonda geothermal system, northeast Japan. *Geothermics*, **29**, 27-50.
- Yokoyama, Y., Falgueres, C. and Quaegebeur, J. P. (1985) ESR dating of sediment baked by lava flows: comparison of paleo-doses for Al and Ti centers. In Ikeya, M. and Miki, T. eds., *ESR Dating and Dosimetry*, Ionics, Tokyo, 197-204.

(受付：2004年10月1日；受理：2004年12月16日)