

一軸圧縮過程の花崗岩から放出されるラドン濃度の変動

加藤 完* 池田喜代治* 楠瀬勤一郎* 西沢 修**

KATOH, Kan, IKEDA, Kiyoji, KUSUNOSE, Kinichiro and NISHIZAWA, Osamu (1984) An experimental study of radon (^{222}Rn and ^{220}Rn) emanated from granite specimens under uniaxial compression. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 35 (1), p. 1-11.

Abstract: Radon emanated from granite specimens under uniaxial compression was investigated to understand the mechanisms of the high radon concentration in the soil gas around active faults and the changes in radon concentration in the groundwater and soil gas near epicenter before or after seismic events.

The granite specimens containing much radioactive minerals as easily detectable by a scintillation counter showed a remarkable increase in radon emission after ultimate fracture. A granite specimen being sliced into six blocks, having twice area as that of the original one, emanated radon about one and half times as much as the original one. These suggest the reason why radon concentrations in the soil gas on active faults, shear zones and landslip zones are always higher than those from other sites.

The increase of radon concentration occurred simultaneously with generating micro-fracture in the granite specimen and maximum radon concentration was obtained after ultimate fracture. Comparison the standard radiation curves calculated for various ratios of ^{222}Rn (3.83 day half life) and ^{220}Rn (52 second half life) with those of radon emanated from the granite specimens suggest that the most of radon may consist of ^{220}Rn .

The increase of radon concentration in the groundwater and soil gas on active faults has been expected as an earthquake precursor, because it might be caused by the increase of stress which is responsible for microfracture. However; it is likely that the half life of ^{220}Rn is too short to use the isotope as an earthquake precursor. This experiment is limited for confirming the increase of ^{222}Rn which is expected as an earthquake precursor, because it is needed for two weeks that ^{222}Rn reaches to the radioactive equilibrium more than 90%.

1. はじめに

地震前後に、震源周辺地域の地下水中或は土壌中のラドン濃度が変化することが、HATSUDA(1954)を始めとして多数報告されており、現在地震予知の一手法として地下水中のラドンの観測が実施されている。また、活断層近傍においては、土壌ガス中のラドン濃度が周辺部より高いことが¹⁾ 初田ほか(1942)を始めとして多数報告されており、活断層探査の一手法として調査研究が行われている。

しかしながら、このようなラドン濃度の時間的・空間的な変化の発生機構については明らかでない。そこで、これらの発生機構を明らかにすることを目的として岩石試

料を用いて一軸圧縮試験を行い、圧縮過程で岩石試料から放出されるラドン濃度の変動を測定した。(ほぼ同様な実験が北京地震隊水化学組(1977)、翟光佛(1980)、HOLUB *et al.*(1981)によって行われているほか、それらに加えて、一軸圧縮試験前および一軸圧縮試験による全破壊後の岩石試料から放出されるラドン濃度の測定を行い、両者の比較を行った。試料は本邦産の花崗岩を用いた。これらの実験結果を基に、地震前後における震源断層近傍でのラドン濃度変化、また、活断層・破砕帯および地這り近傍での土壌ガス中のラドン濃度異常の発生機構について考察を行った。

2. 実験

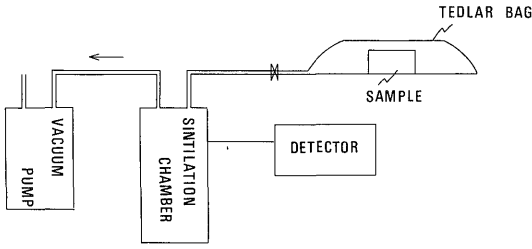
2.1 岩石試料

実験に使用した岩石試料は新潟県の小川花崗岩・岐阜県の園戸と津橋で採取した土岐花崗岩、および茨城県の

* 環境地質部

** 地殻熱部

1) 著者らの調査した六甲衝上断層は「日本の活断層」の山田断層にあたるので活断層とした。



第1図 破壊前および破壊後の花崗岩試料から放出されるα線測定装置一覽

A block diagram of the experimental system to detect α radiation emanated from a granite specimen before and after the fracture, a sinterillation counter and a vacuum pump were used.

稲田花崗岩である。ウラン釷産出地付近の露頭からサンプリングした小川花崗岩と土岐花崗岩は、放射性鉱物含有量が多く、放出されるラドン濃度変化が大きいと期待される。これらの花崗岩のウランおよびトリウムの分析値を第1表に示す。岩石試料は円柱形(直径5×長さ10 cm)に成形して使用した。

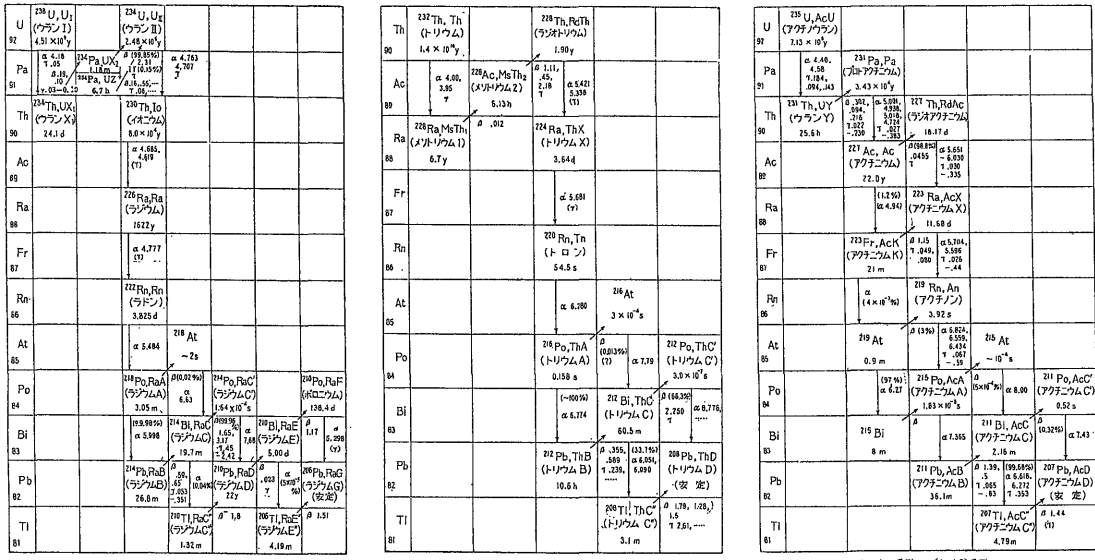
2.2 岩石試料から放出されるラドンの測定方法

各岩石試料はテドラバック中に2 lの空気と共に密封し、ラドン²²²Rnの半減期(3.83日)の4倍以上の時間にあたる16日間以上放置して、93%以上の放射平衡を保たせた。一軸圧縮試験前および全破壊後の岩石試料から放出されるラドン濃度の測定は第1図に示すようにテドラバックの端からテフロンパイプでラドン測定装置(アロ

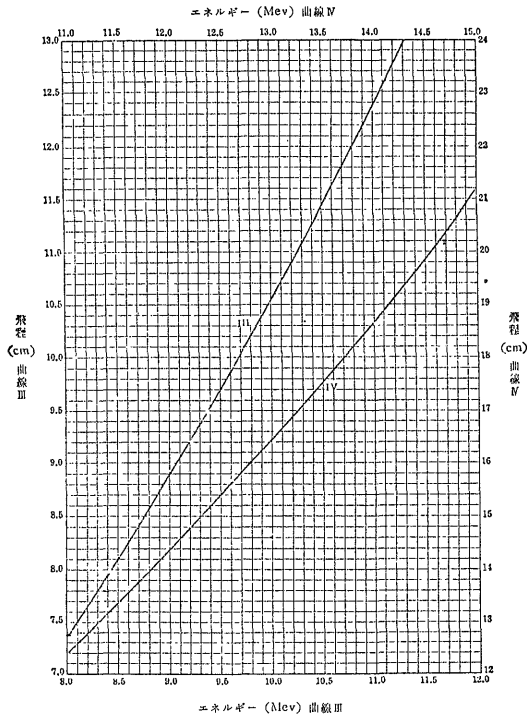
第1表 花崗岩試料の産地、ウランおよびトリウム含有量
A list of the location, uranium and thorium content of each granite specimens.

Name of Granite	Location	U Content	Th Content
Kogawa	Kurokawa, Niigata	7.5 ppm	29 ppm
Inada	Kasama, Ibaraki	1.9	13
Toki (Sonodo)	Toki, Gifu	4.1	24
Toki (Tsubashi)	Toki, Gifu	2.3	18

分析者: 望月常一



第2図 放射壊変系列図 (木村, 1960)
Radioactive decay series.

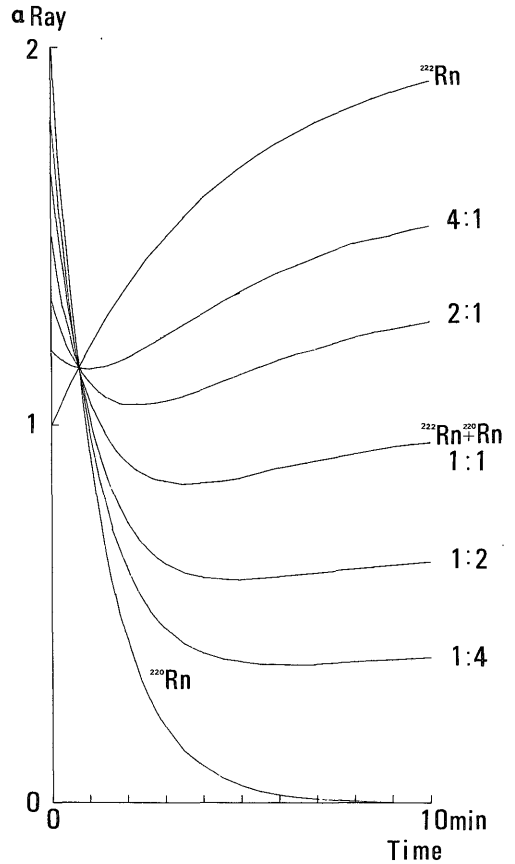


第3図 α粒子の空気中における飛程とエネルギーとの関係(木村, 1960)

Relation of range in the air and energy of α particle.

カ製 NW-201)に接続して行った。テドラバックおよびテフロンパイプを用いた理由は、これらがラドンを透過・吸着することが少ない材質であることによる(池田ほか, 1982)。ラドン測定装置はシンチレーションチェンバ、一定時間の計数値を表示する計測部、および真空ポンプより構成されている。シンチレーションチェンバ(容量2l)には、真空ポンプにより真空度 400 mmHg まで減圧したのち、テドラバック中の一定量(2l)の空気を採取する。この空気中のラドンから放射されるα線を検出し、一分毎のα線強度の計数値からラドン濃度を求める(池田未発表)。

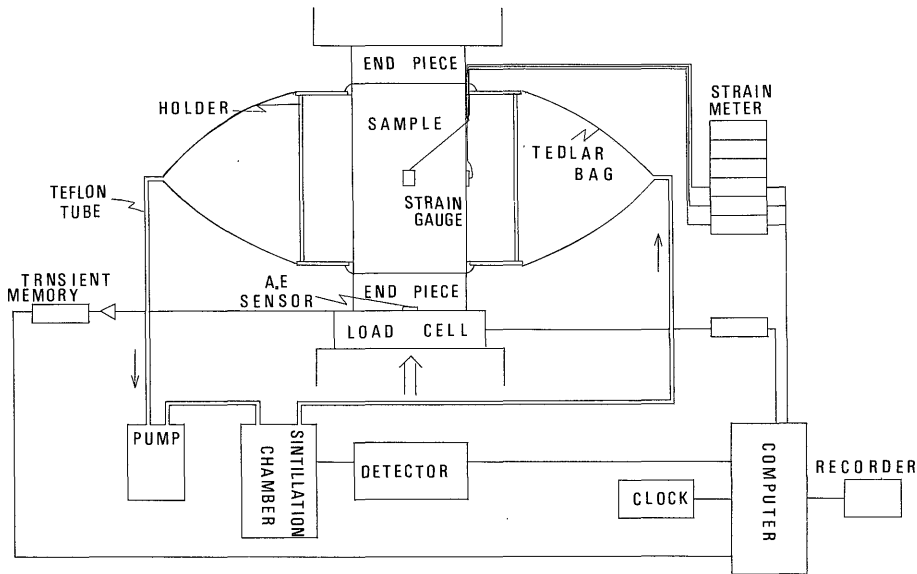
岩石試料から放射されるα線は第2図に示すように、ウラン・トリウム・アクチニウムの三つの放射壊変系列から生ずる。それぞれのα線の空気中における飛程とエネルギーとの関係は第3図のとおりである。α線の最大エネルギーはトリウム C' ^{212}Po の 8.78 MeV で、その空気中での飛程は約 8.6 cm であるため、本実験では岩石試料から放射されるα線はシンチレーションチェンバにとどかず、気体であるラドンから放射されるα線のみが測定される。



第4図 ラドンとトリウムが混在する場合のα線放射標準曲線

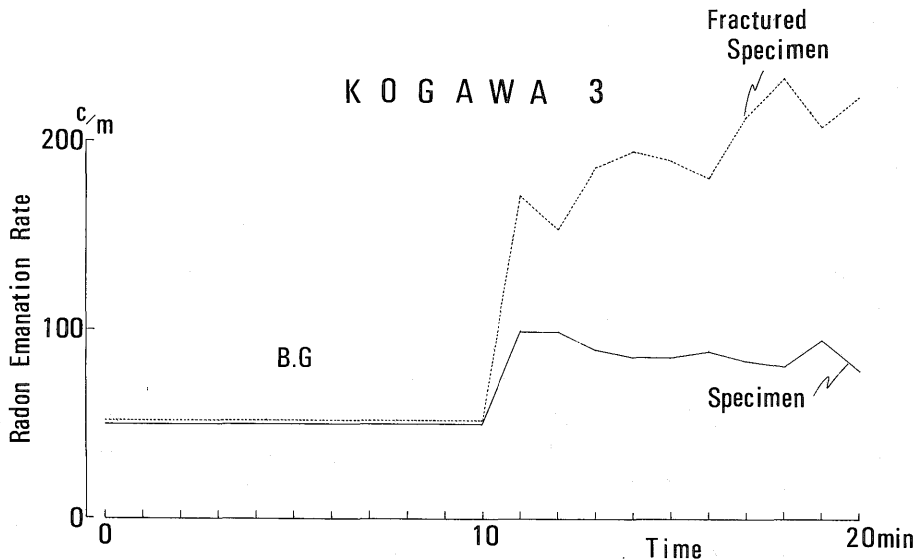
Standard α ray variation curves emanated from radon (^{222}Rn), thoron (^{220}Rn) and the proportion of radon and thoron.

また、ラドンはウラン系列のラドン ^{222}Rn (半減期 3.83 日)、トリウム系列のトリウム ^{220}Rn (半減期 52 秒)、およびアクチニウム系列のアクチニウム ^{210}Rn (半減期 4 秒)の三つの同位体が存在する(理科年表, 1983)。しかし、自然界におけるアクチニウムの存在は無視できるほど少ないので、前二者のみを考慮すればよい。ラドン ^{222}Rn とトリウム ^{220}Rn が混在する場合について、ラドン ^{222}Rn とその娘核種ラジウム A ^{218}Po ・ラジウム C' ^{214}Po 、トリウム ^{220}Rn とその娘核種トリウム A ^{216}Po を考慮して求めたα線放射標準曲線を第4図に示した。この図を用いて、岩石試料から放出されるラドン濃度曲線の形状から、ラドン ^{222}Rn とトリウム ^{220}Rn のおよその割合が求められる。岩石試料中に含まれるウランおよびトリウム系列の放射壊変系列は平衡に達しているとみなされるので、ラドン ^{222}Rn とトリウム ^{220}Rn の割合はウランとトリウム含有量



第5図 一軸圧縮過程の花崗岩試料から放射される α 線, A.E, 応力および歪測定装置一覽図

A block diagram of the experimental system under uniaxial compression: α ray emanated from a granite specimen is detected by a scintillation counter, A.E generated by microfracture in a granite specimen is monitored by A.E sensor attached to an end piece and stress and strain data is recorded by a computer system.



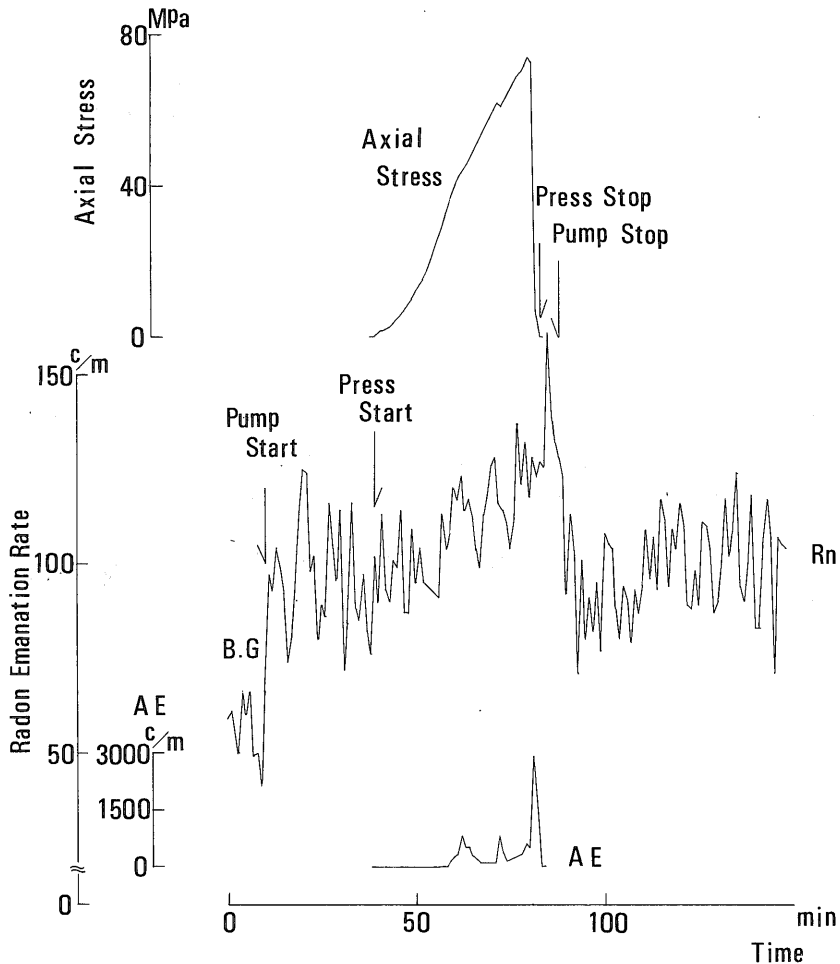
第6図 破壊前および破壊後の小川 No. 3 花崗岩試料から放出されるラドン濃度
Radon emanation curves for Kogawa No. 3 granite specimen before and after the fracture.

の比を示すことにもなる。

2.3 一軸圧縮過程の岩石試料から放出されるラドンの測定方法

岩石試料は3カ所にストレインゲージを取り付け、エンドピースの接する面を除いてテドラバックで密封される。テドラバック中の空気はテドラバックの両端に接続

したテフロンパイプを経由して、循環ポンプ(吸引流量2.5 l/min)、シンチレーションチェンバを通して、テドラバックにもどる閉じた循環システム内にある。循環システム内の空気中のラドン濃度は、ラドンから放射される α 線の計測値から求める。エンドピース内にはAE(微小破壊音)センサーを取り付ける。岩石破壊実験装置



第7図 一軸圧縮過程の小川 No. 3 花崗岩試料から放出されるラドン濃度, A.E および応力変化
Changes of radon concentration, A.E rate and stress for Kogawa No. 3 granite specimen under uniaxial compression.

は、楠瀬ほか(1982)および西沢ほか(1982)とほぼ同じである。5秒毎の α 線とAEの計測値および応力と歪み値はコンピューターを経由して記録紙に記録される(第5図)。

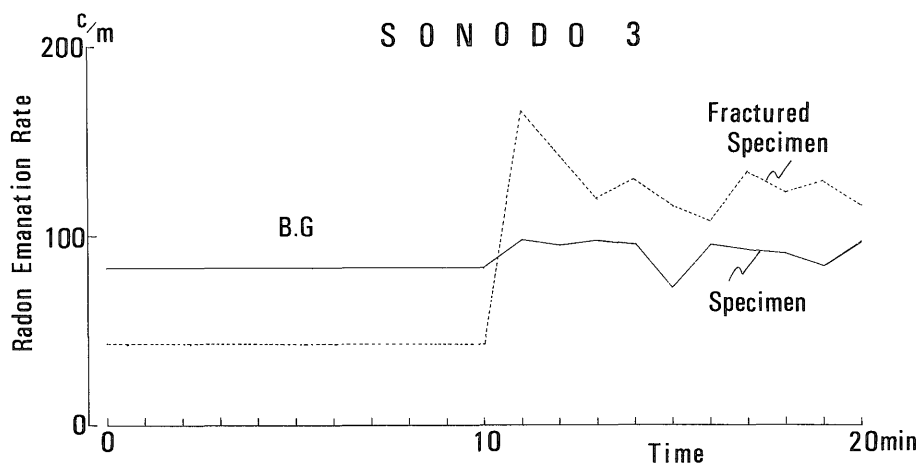
3. 結果と考察

3.1 小川花崗岩

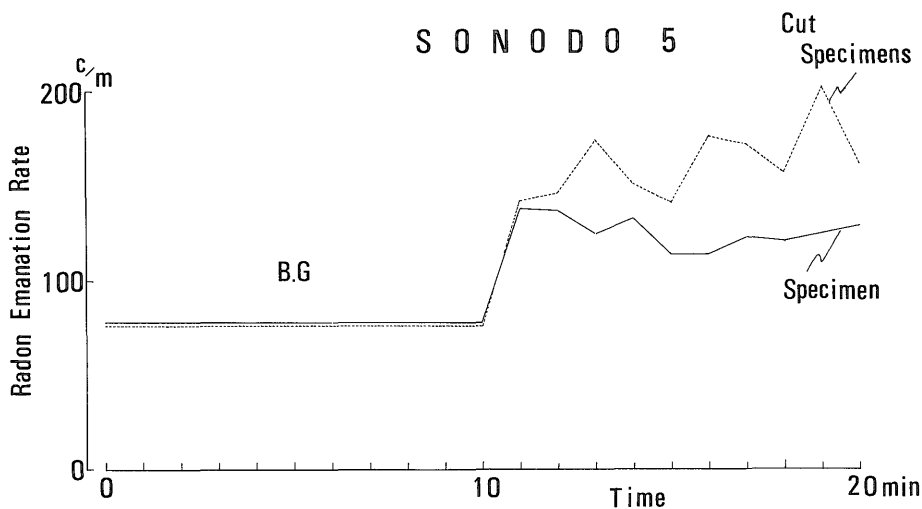
一軸圧縮試験前の小川花崗岩から放出されるラドン濃度は、真空ポンプでテドラバック中の空気を吸引すると同時に、シンチレーションチェンバのバックグラウンド値の約2倍に増加し、その後はほぼ一定値を示した(第6図)。一軸圧縮試験によって全破壊された小川花崗岩から放出されるラドン濃度は、第6図に示すように、破壊前

に比べて2倍以上に増加した。両者のラドン濃度曲線の形状と第4図の比較から、小川花崗岩から放出されるラドンはラドン ^{222}Rn とトロン ^{220}Rn である。

一軸圧縮過程における小川花崗岩から放出されるラドン濃度は、循環ポンプの運転開始と同時に、シンチレーションチェンバのバックグラウンド値より約2倍増加した(第7図)。一軸圧縮試験機による加圧後応力26 MPaまでの間は、ラドン濃度は減少気味に推移した。この減少の原因はHOLUB *et al.* (1981)が指摘しているように、既存クラックが加圧によってふさがれるためと考えられる。応力41および62 MPaで部分破壊が生じると共に、AE数も増加し、ラドン濃度もそれに対応して増加した。応力74 MPaで全破壊が生じた後、ラドン濃度は最高



第8図 破壊前および破壊後の園戸 No. 3 花崗岩試料から放出されるラドン濃度
Radon emanation curves for Sonodo No. 3 granite specimen before and after the fracture.



第9図 破壊前の園戸 No. 5 花崗岩試料とそれを6箇に切断した試料から放出されるラドン濃度
Radon emanation curves for Sonodo No. 5 granite specimen and for six blocks sliced from the original one.

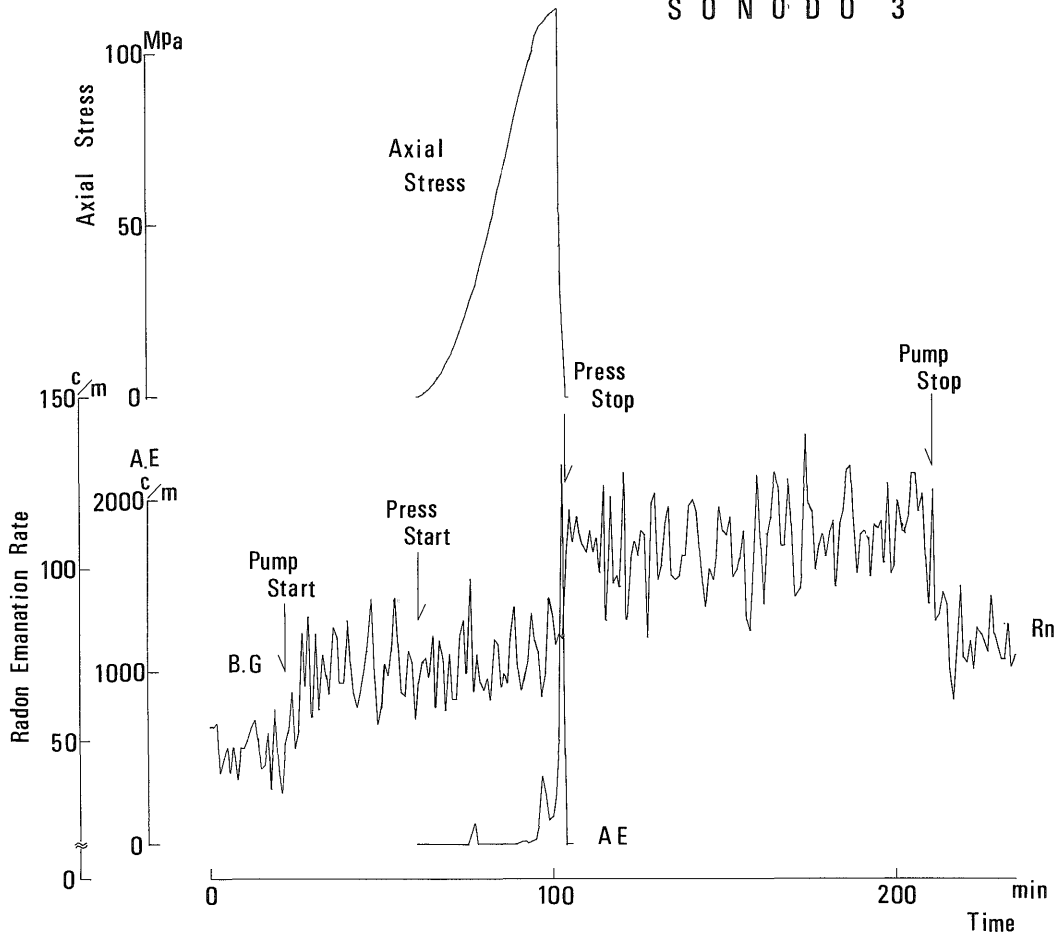
値を示した。循環ポンプ停止後は急速に減少し、加圧前の値に戻った。循環ポンプ停止後のシンチレーションチェンバは閉じた系であるので、一軸圧縮試験の部分或は全破壊後のラドン濃度の増加は、そのラドン曲線の形状と第4図の α 線放射標準曲線との比較から、主としてトリウム系列のトロン ^{220}Rn が放出されたためである。ウラン系列のラドン ^{222}Rn はその娘核種と放射平衡に達するまで時間を必要とする。

3.2 土岐花崗岩(園戸)

一軸圧縮試験前の土岐花崗岩から放出されるラドン濃度は、バックグラウンド値に比べて少し増加し、その後はほぼ一定値を示した(第8図)。全破壊後の土岐花崗岩

から放出されるラドン濃度は、第8図で示されるように、破壊前のそれに比べて大きく増加した。両者のラドン濃度曲線の形状と第4図の比較から、土岐花崗岩から放出されるラドンはラドン ^{222}Rn とトロン ^{220}Rn である。なお、第8図で破壊前と破壊後のバックグラウンド値が異なるのは、シンチレーションチェンバが2箇あり、各チェンバのバックグラウンド値が異なるためである。

また、同一ブロックから作成した土岐花崗岩を、2ℓの空気と共にテドラバックに入れ放出されるラドン濃度の測定を行った。次にそれを6箇に切断し表面積を約2倍に増加させて、同じく2ℓの空気と共にテドラバックに入れ、放出されるラドン濃度の測定を行った(第9図)。



第10図 一軸圧縮過程の園戸 No. 3 花崗岩試料から放出されるラドン濃度, A.E および応力変化
Changes of radon concentration, A.E rate and stress for Sonodo No. 3 granite specimen under uniaxial compression.

その結果、後者のラドン濃度は前者のそれに比べて約1.5倍増加した。このことは、ラドン濃度はラドンを放出する岩石試料の表面積に関係することを示唆している。また、両者のラドン濃度曲線の形状は殆んど同じであり、第8図のそれとも殆んど同じである。

一軸圧縮過程における土岐花崗岩から放出されるラドン濃度は、循環ポンプの運転開始と同時にシンチレーションチェンバのバックグラウンド値より増加した(第10図)。加圧開始後もラドン濃度はほぼ一定に推移した。応力30および105 MPaでAE数の増加と共に、ラドン濃度は増加気味に推移した。応力113 MPaで全破壊が生じた後最高値を示した。循環ポンプ停止後、ラドン濃度は急速に減少し、加圧前の値に戻った。一軸圧縮試験の全破壊後のラドン濃度の増加は、その曲線の形状から主としてトリウム系列のトロン²²⁰Rnが放出されるた

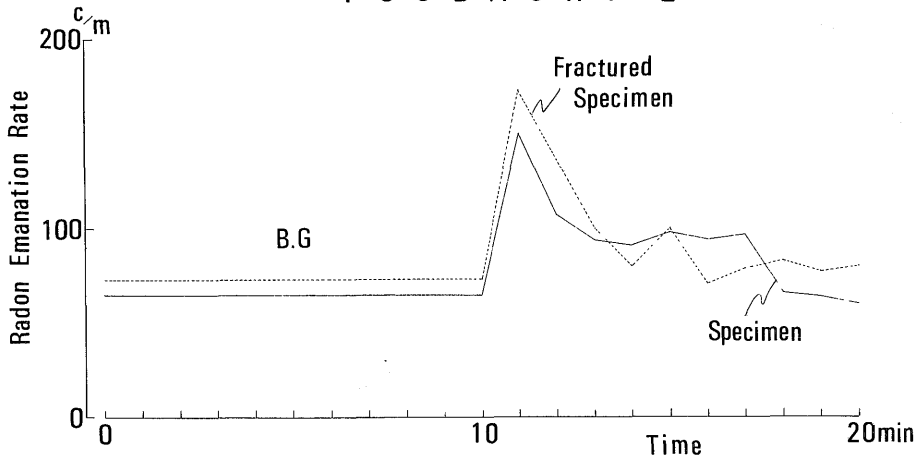
めである。

3.3 土岐花崗岩 (津橋)

一軸圧縮試験前の土岐花崗岩から放出されるラドン濃度は、バックグラウンド値より急速に増加し、次に急速に減少するが、その値はバックグラウンドより高い(第11図)。全破壊後の土岐花崗岩から放出されるラドン濃度は、第11図で示されるように破壊前のそれに比べて若干増加した。両者のラドン濃度曲線の形状と第4図の比較から、土岐花崗岩から放出されるラドンはトロン²²⁰Rnが多いことがわかる。

一軸圧縮過程における土岐花崗岩から放出されるラドン濃度は、循環ポンプの運転開始と同時に、シンチレーションチェンバのバックグラウンド値より2倍以上増加した(第12図)。加圧開始後のラドン濃度は減少気味に推移した。応力26 MPaで部分破壊が生じると共に、AE

T S U B A S H I 2



第11図 破壊前および破壊後の津橋 No. 2 花崗岩試料から放出されるラドン濃度
Radon emanation curves for Tsubashi No. 2 granite specimen before and after the fracture.

数も増加し、ラドン濃度もそれに対応して増加した。応力 39 M Pa で全破壊が生じた後、ラドン濃度は最高値を示した。なお全破壊の割れ目は岩石試料の加圧面に達し、ラドンが系外に流出する恐れがあるため、応力 17 M Pa に加圧した状態を保たせた。ラドン濃度はその間ほぼ一定に推移し、循環ポンプ停止後急速に減少し、ほとんど循環ポンプ運転開始前の値に戻った。一軸圧縮試験の部分或は全破壊後のラドン濃度の増加は、その曲線の形状から、主としてトリウム系列のトロン ^{220}Rn が放出されるためである。

3.4 稲田花崗岩

一軸圧縮試験前の稲田花崗岩から放出されるラドン濃度は、シンチレーションチェンバのバックグラウンド値と変わらない値を示した(第13図)。全破壊後の稲田花崗岩から放出されるラドン濃度は、第13図に示すように、破壊によって岩石中のクラック面積が増加したにもかかわらず、シンチレーションチェンバのバックグラウンドと変わらない値を示した。

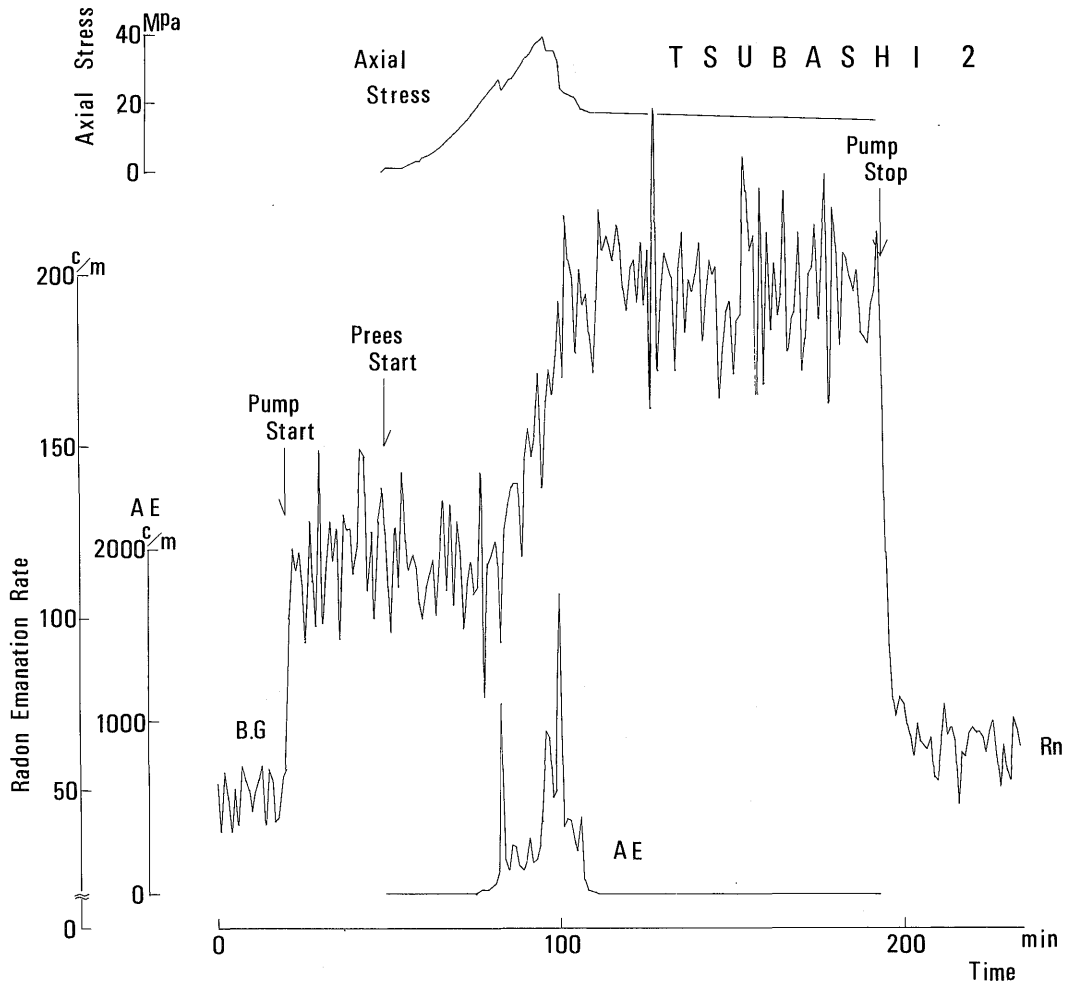
一軸圧縮過程における稲田花崗岩から放出されるラドン濃度は、循環ポンプ運転開始後にもシンチレーションチェンバのバックグラウンドと変わらない値を示した(第14図)。加圧開始後、応力 50 M Pa から AE 数が増加し、応力 160 M Pa で全破壊が生じたが、ラドン濃度は全破壊後ただ 1 回(1 分間)標準偏差値の 3 倍以上増加した以外、顕著な変化は認められなかった。このように稲田花崗岩のラドン放出量が破壊前と破壊後で大きな変化がみられないことは、この花崗岩は第 1 表に示したように放射性鉍物含有量が少ないためラドン放出量が少な

く、シンチレーションチェンバのバックグラウンド値を越える変化が生じなかったためと考えられる。

4. ま と め

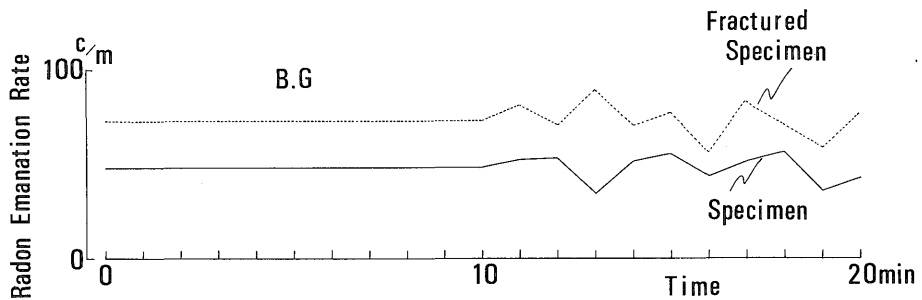
本邦産の花崗岩を試料として一軸圧縮過程における、岩石試料から放出されるラドン濃度の測定を行った。その結果、ラドン放出のパターンには二種類のタイプがある。すなわち、①ラドン濃度は部分破壊が始まると同時に増加し、全破壊後に最高値を示す岩石試料、②全破壊後もラドン放出量が少なく、シンチレーションチェンバのバックグラウンドを越える変化を生じない岩石試料である。両者の違いは第 1 表に示すように放射性鉍物含有量の差に起因する。

もし活断層近傍で応力の集中が生じると①の岩石試料における部分破壊後のラドン濃度増加に相当する一活断層近傍でのラドン濃度増加という地震の前兆現象が期待される。そして、岩石試料における全破壊後のラドン濃度増加に相当する一活断層近傍での地震後のラドン濃度増加という現象が説明できる。また、②の岩石試料は放射性鉍物含有量が少ないためラドン放出量は少ない。しかしながら、自然界では一軸圧縮実験に比べてその体積は極めて大きく、放射性鉍物含有量が少なくてもその量のためラドン放出量が増幅され、シンチレーションチェンバのバックグラウンド値を越える同様な変化が期待される。なお、本実験は時間を短くとったため、部分破壊および全破壊後に増加するラドン濃度は、ほとんどがトリウム系列のトロン ^{220}Rn である。自然界では、応力の加圧される速度は遅いと予想されるので、部分破

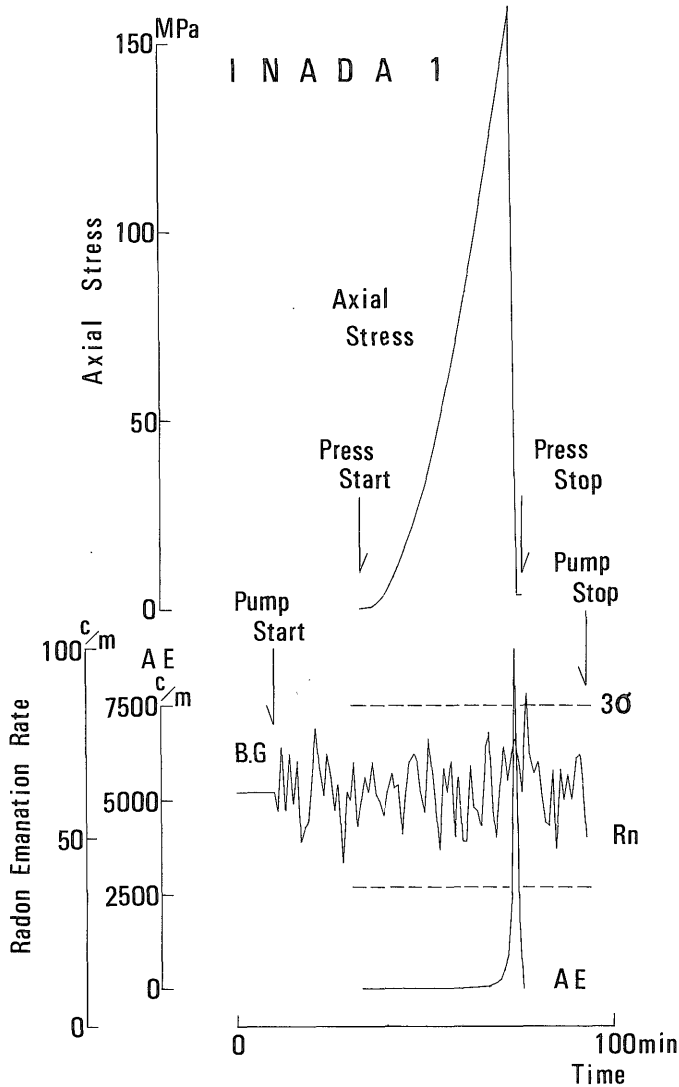


第12図 一軸圧縮過程の津橋 No. 2 花崗岩試料から放出されるラドン濃度, A.E および応力変化
Changes of radon concentration, A.E rate and stress for Tsubashi No. 2 granite specimen under uniaxial compression.

I N A D A 1



第13図 破壊前および破壊後の稲田 No. 1 花崗岩試料から放出されるラドン濃度
Radon emanation curves for Inada No. 1 granite specimen before and after the fracture.



第14図 一軸圧縮過程の稲田 No. 1 花崗岩試料から放出されるラドン濃度, A.E および応力の変化
Changes of radon concentration, A.E rate and stress for Inada No. 1 granite specimen under uniaxial compression.

壊後に増加するウラン系列のラドン ^{222}Rn が供給されることが十分に考えられる。

同じ花崗岩を試料として、一軸圧縮試験前と全破壊後の岩石試料から放出されるラドン濃度の測定結果から、シンチレーションチェンバのバックグラウンド値を越える放射性鉱物を多く含有する岩石試料においては、すべての場合に全破壊後のラドン濃度が、破壊前のそれに比べて増加することが認められた。そして両者のラドン濃度曲線の形状はほとんど同じであり、これからラドン ^{222}Rn とトリウム ^{220}Rn のおおよその割合を求めることが可能である。また、岩石試料から放出されるラドン濃度

について、成形試料(直径5cm×長さ10cm)と、それを6箇に切断し表面積を約2倍にしたものについて、放出されるラドン濃度の測定を行った結果、後者は前者に比べて増加し、ラドン濃度はラドンを放出する岩石試料の表面積に関係することが明らかになった。これらの測定結果から、活断層・破碎帯・地入り地帯等で土壤ガス中のラドン濃度が、周辺部より高いことの説明が可能である。

なお、本研究は予備実験的な段階であり、時間を長くとした実験を行う必要がある。

謝 辞

この研究を行うにあたり、岩石試料の提供と共に、花崗岩中の放射性鉱物について有益な助言を頂いた地質調査所石原舜三・坂巻幸雄および金谷弘各技官に、また、ラドンおよびトロン α 線放射標準曲線について教示を頂いた同所吉川清志技官に厚く感謝します。

文 献

- 初田甚一郎・松澤 明・亀井 清(1942) 地下空気の放射能に現われた地下構造の反映. 京都大学理学部地質学鉱物学教室, 学術報告, voll, p. 1-6.
- HATSUDA, Z (1953) Radon content and its change in soil air near the ground surface. *Memoirs of college of science University Kyoto*, Series, XX, no. 4, p. 285-306.
- 池田喜代治・加藤 完・楠瀬勤一郎・西沢 修 (1982) 岩石破壊とラドン濃度に関する実験. 第19回理工学における同位元素研究発表会要旨集, p. 114.
- 木村健二郎(1960) 放射線データブック. 地人書館,

p. 70-75, p. 132-135.

- 楠瀬勤一郎・西沢 修・小内 薫(1982) 一軸圧縮下の岩石中に観測されたAE空白域. 地震2, vol. 35, p. 91-102.
- 翟光佛・石錫忠(1980) 岩石標本受圧時気と放射気量的実験結果. 地震学報, vol. 2, p. 198-204.
- 西沢 修・楠瀬勤一郎・柳谷 俊・小口深志・江原昭次(1982) 大島花崗岩におけるクリープ時のAE発生の確率過程と震源の空間分布. 地震2, vol. 35, p. 117-132.
- 北京市地震隊水化学組(1977) 岩石破裂と気含量変化関係の実験研究. 地球物理学報, vol. 20, p. 277-282.
- HOLUB, R. F. and BRADY, B. T. (1980) The effect of stress on radon emanation from rock. *Journal of Geophysical Research*, vol. 86, p. 1776-1784.
- 東京天文台 (1983) 理科年表(1983)崩壊系列図. p. 560.

(受付: 1983年6月7日; 受理: 1983年9月9日)