JNC TJ6622 97-001
~~PNC PJ6622 97-001~~

~~社内資料~~

本資料は 99 年 9 月 20 日付けで登録区分
変更する。
人形峠環境技術センター
環境保全技術開発部　管理課

地下水中の原位置ラドン測定手法に関する研究

（動力炉・核燃料開発事業団　委託研究成果報告書）

1997年3月

岐阜大学教育学部
田　阪　茂　樹

目　次

要旨と Abstract ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1

1．　序論 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3
1・1　ラドン観測について ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3
1・2　地下水中の原位置ラドン検出器の必要性について ・・・・・・・・・・・ 4

2．　原位置水中ラドン検出器 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5
2・1　ラドン検出器について ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5
2・2　ＰＩＮフォトダイオードのα線検出原理 ・・・・・・・・・・・・・・・ 5
2・3　原位置水中ラドン検出器 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 7
2・4　機能性ガス分離膜 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１０
2・5　原位置水中ラドン検出器の防水について ・・・・・・・・・・・・・・・１１

3．　小型ラドンデータロガーの製作 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１３
3・1　小型ラドンデータロガーの概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１３
3・2　小型ラドンデータロガーの操作方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・１５
3・3　小型ラドンデータロガーの消費電力 ・・・・・・・・・・・・・・・・・１７

4．岐阜大学水道水中のラドン測定 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１８
4・1　目的と方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１８
4・2　測定結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１９
4・3　ラドン濃度の校正係数 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２０

5．　地下水中の原位置ラドン濃度測定 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２１
5・1　実験目的 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２１
5・2　実験方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２１
5・3　実験結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２６
5・4　実験データ解析 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・３０

6．　まとめと今後の課題 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・３６

7．　引用文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・３８

JNC TJ6622 97-001
~~PNC PJ6622 97-001~~

地下水中の原位置ラドン測定手法に関する研究

登録区分
'01.9.20
変更表示

岐阜大学教育学部
田阪　茂樹

要　旨

地下水中のラドンの挙動解析をするために，地下水中の原位置ラドン測定装置の開発とその実用試験を行った．本測定装置は検出部とデータロガー部から構成されている。検出部は直径６０mm，長さ３００mmで，数１０mの試錐孔に直接投入することができ，ラドンガスは開口部に装着されている機能性ガス分離膜を通過して検出部に導入され，ＰＩＮフォトダイオードを用いて静電捕集法で検出される．またデータロガー部は商用交流電源のない屋外でも，自動車用鉛蓄電池４個で約６０日間の連続観測が可能で，観測終了後は押しボタンスイッチでパソコンにラドンデータを転送することができる．本装置の実用試験が，平成８年１２月１７日から動力炉・核燃料開発事業団人形峠事業所夜次露天採堀場跡地のNo.１７とNo.１８モニタリング試錐孔を用いて実施された．No.１７は平成９年１月２９日で終了して，No.１８は約８ヶ月間にわたり現在も継続されている．これらの観測結果から次のような観測事実が判明した．

（１）平成８年１２月１７日から平成９年３月３１日の観測期間では冠雪と雪解けによる水中ラドン濃度の変動が顕著である．約２０m離れたNo.１８とNo.１７試錐孔の，冠雪による水中ラドン濃度の変化の様子は大きく異なることが判明した．冠雪によってNo.１８試錐孔では水中ラドン濃度は約１０倍の５０(Bq/l)に急激に増加し，No.１７試錐孔では水中ラドン濃度は約１０分の１の０．０６(Bq/l) まで減少した．

（２）平成９年４月１日から平成９年７月２１日の観測期間では，水中ラドン濃度は^{222}Ｒｎの崩壊曲線に従って減衰する時期と，降雨によって急に増加する時期が繰り返し観測された．No.１８試錐孔においては，平成９年５月２１日，５月２７日，６月６日，６月２８日，７月８日の降雨による水中ラドン濃度のはっきりした増加が５例観測された．そのうち，平成９年６月２８日と７月８日の降雨において，日雨量によるラドン濃度増加率を求めてみると，約１５ [(Bq/m^3) /mm] と測定された．

Studies on the in-suit method of the radon measurement in the underground water

Shigeki Tasaka

Faculty of Education, Gifu University

Abstract

The in-suit radon measurment system was developed for the continuous monitoring in the groundwater radon concentration of the deep well. This system is consist of an underwater radon detector and a small-sized radon data logger. The underwater radon detector, with 60mm diameter and 300mm long, was put into the deep well at the depth of a couple of meter. Amicroporous flat sheet membran is attached to the window of the bottom. The membran of polypropylene with the hydrophobic properties is pass through only the gas dissolved in the underground water. A PIN photodiode, an alpha particle detector, installed inside a detector attracts radon daughters when charged electrostatically. Alpha particle are separated from each other in according to the energy level. New logger has made it possible to analysis and save the radon data. Alpha particle count data from radon daughters are automatically integrated over preset time intervals and the energy regions. We can get the 60 days continuous data logging at 60min sampling frequency at any well with the four carbatteries. The observed radon data was sent to PC by a push-button switch in logger at the end of experiment after two months. We have measured the continuous data of the groundwater radon concentration in the two monitoring wells, No.17 and No.18, at the NINGYO-TOGE WORKS, PNC. The observation in the No.17 well was operated during the period between 25, Dec. 1996 and 29, Jan. 1997. The observation in the No.18 well has been continuing now, during eight months from 17, dec. 1996. The main experimental results are as follows.

(1) The groundwater radon concentration was changed by the snowfall and snowmelt. The clear discrepancy of the concentration between the No.18 and No.17 of two wells at apart of 20m was observed. The concentration of No.18 well was increased to be 50 (Bq/l) , by ten times higher than that before snowfall. That of No.17 well was decreased to be 0.06 (Bq/l) , by ten per cent before snowfall.

(2) The groundwater radon concentration of No.18 well was suddenly increased by rain fall, and decreased in according to ^{222}Rn decay curve. Five clear samples were observed at 21-May, 27-May, 6-Jun, 28-Jun and 8-July-1997. The increase rate of the radon concentration for rainfall was estimated to be about 15 [(Bq/m^3) /mm] at 28-Jun and 8-July.

１．序論

１・１　ラドン観測について

ラドンは２０世紀初頭に発見されたウラン･ラジウム系列の放射性希ガスである．最近になって，様々な目的でラドン及びその娘核種の観測が実施されるようになってきた．ラドン^{222}Ｒｎは半減期３．８日で，水に溶けやすく，かつ水中での拡散速度が低いので地下水とともに移動する．この性質を地震発生のダイラタンシーモデル等と関連させて地震予知に役立てようと，地下水中ラドンの恒常的観測による研究も進められている（Wakita et al., 1980）．阪神大震災で大きな被害の出た兵庫県西宮市の井戸で，地震前に地下水のラドン濃度が急激に上昇して，通常の十倍以上にも達していたことが，われわれの開発した水中ラドン検出器を用いて観測された（Igarashi et al., 1995）．

また，宇宙線物理学の研究分野では，スーパーカミオカンデのような太陽ニュートリノの観測を目的とした大型水チェレンコフ検出器において，純水中に溶けているラドンによるバックグランドが大きな問題になっている．そこで水中ラドンを観測しその除去に役立てるために，ラドン濃度の検出限界値が０．０１ Bq/m^{3}の超高感度の水中ラドン検出器の開発が行われ，現在スーパーカミオカンデ装置内に設置され，純水中のラドン濃度のリアルタイム連続観測を行っている（根本 他，1997）．

気象学的には気団やエーロゾルの動きを調べるため，ラドンをトレーサーとして利用しようという研究が行われており（Pereira, 1988），新しく開発された超高感度ラドン検出器は，第３７次南極地域観測において南極大陸の大気中の０．０１ Bq/m^{3}程度の極低ラドン濃度の観測を行っている．保健物理の分野でも，住居環境中おいて，エーロゾルに付着しているラドン娘核種を吸い込んだ人体への影響調査などに関連してラドン濃度の測定が行われている（黒澤，1991）．また，ラドンの特性を利用した水循環機構や地下水の流動解析にも応用されている（小前，1995）．

このようにラドン観測の目的が多様化し，計測の機会が増え，私たちの身近な生活環境や屋外などいろいろな条件下でラドンを観測するためには，大型の設備を必要としない小型で安価なラドン計測システムが必要になっている．現在使用されている計測システムは消費電力が数ワット以上必要であり，蓄電池での長期のラドン観測には不向きである。そこで本研究では，持ち運びが容易で比較的手軽にラドンの観測ができる小型ラドンデータロガーの開発を行った．

１・２　地下水中の原位置ラドン検出器の必要性について

様々な場所においてラドン観測が進められている中で，動力炉・核燃料開発事業団人形峠事業所（以下動燃人形峠事業所）でも，捨石堆積場からの周辺への影響についてウラン，ラジウム，ラドン等の挙動調査を実施してきている．これは，昭和６３年に動燃人形峠事業所による探鉱活動に伴う捨石から発生した，ラジウム，ラドンが地下水中に溶解して，地下水流動にともなって方面川流域に流入して，下流の居住地区に影響を与えているのではないかと社会問題化したためである．

現在，動燃人形峠事業所では，大気中のラドン観測，及び水中のラドン測定を行っている．この水中ラドン測定は年に数回，現地で水をサンプリングして事業所に持ち帰り液体シンチレーション法で測定するものである (古田 , 1997).

本研究では原位置で１年以上の長期間の連続観測を目的をして，動燃人形峠事業所夜次露天採堀場跡地にある１８ヵ所のモニタリング試錐孔のうちの２ヵ所を利用して，地下水中のラドン観測を行った．これらの試錐孔は口径が約６５mmから１００mmで深さが１０mから３０mであり，ここへ直接投入可能な直径６０mm，長さ３００mmの原位置水中ラドン検出器の開発を行った．

本研究ではいままで別々に開発を行ってきた，小型ラドンデータロガーと水中ラドン検出器を組み合わせることにより，原位置水中ラドン測定装置の製作が可能となった．この原位置水中ラドン測定装置の開発は地質調査所地震地質部変動解析研究室の高橋誠氏と共同で行われた．

２．原位置水中ラドン検出器

２・１　ラドン検出器について

平成４年に，ＰＩＮフォトダイオード（ＰＤ）を用いた静電捕集型のラドン検出器が開発された（田阪 他, 1992）．この検出器は，ラドン^{222}Ｒｎの娘核種^{218}Ｐｏ（ＲａＡ），^{214}Ｐｏ（ＲａＣ’）が崩壊するときに放出するα線のエネルギーを，ＰＤで捕えて，そのとき生成した電子を増幅器で電圧に変換して測定するというものである．第１図にウラン崩壊系列図を示す．

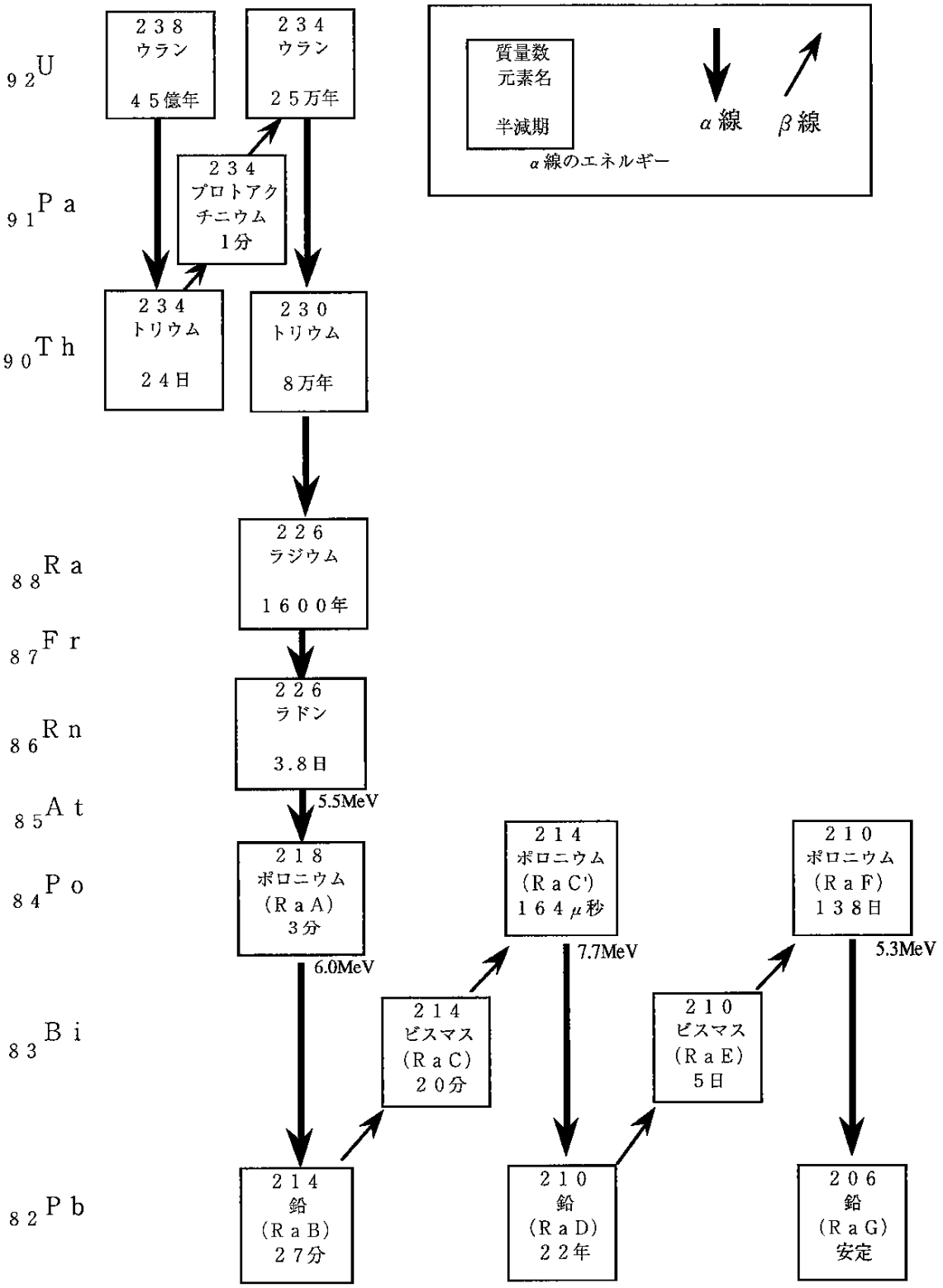
また，平成６年に水中ラドン検出器が開発された（田阪 他, 1994）．この検出器は，上記のラドン検出器と，水を通さずラドンガスを透過することができる機能性ガス分離膜を組み合わせたものである．この検出器を水中に沈めることによって，水中のラドン濃度を測定することができる．本研究ではこのタイプの水中ラドン検出器の小型化の改良を行った．

２・２　ＰＩＮフォトダイオードのα線検出原理

自然放射性元素であるラドン^{222}Ｒｎは３．８日の半減期で放射線を出しながら娘核種へ壊変していく．静電捕集法を利用した上記のラドン検出器では，ＰＤ検出器の表面と容器の間に－１２０Ｖの電位差をかけて，正に帯電しているラドン娘核種をＰＤの表面に捕集する．そして，そこで放出されるα線をエネルギー分解能４０（ｋeV）の高精度で測定している．

ＰＤとは、ＰＮ接合型半導体のｐ層とｎ層の間にｉ（ｉｎｔｒｉｎｓｉｃ）層が存在するものである．ＰＮ接合型半導体において，ｐ層とｎ層との接合部では，電子・正孔対が生成され，この接合部には，キャリヤー（電子または正孔）の欠乏した空乏層と呼ばれる層ができる．ＰＤでは，ｐ層とｎ層の間のｉ層で電子・正孔対が生成される．ＰＮ接合型半導体との違いはこの電子･正孔対の発生領域が低不純物としている点である．ｉ層にはキャリヤーが存在しない，つまりｉ層が存在することにより，空乏層の領域は広がる．このＰＤに外部から，ｐ側に負の，ｎ側に正の逆バイアス電圧をかけることにより，キャリヤーはさらに移動し空乏層はさらに大きくなる．この空乏層はキャリヤーがほとんど存在しないため高い低抗の領域となり，電圧はほぼこの部分にかかることに

〈ウラン系列〉



第1図　ウラン崩壊系列の図

なる．

ＰＤの表面に捕集されたラドン娘核種が放出したα粒子が，この空乏層に入射した場合，飛跡の近くではα粒子の持つエネルギーによって空乏層中の原子間の結合の電子は電離され，電子の跡に正孔が生ずる．つまり，キャリヤーが生成され，α粒子の持つエネルギーはこれに使われる．１個のキャリヤーを生成するために必要なエネルギーは半導体の種類によって決まっている。(ここで使用されるシリコン半導体はその値が３．６ｅＶである。) これは，α粒子のエネルギーに比例した個数の電子・正孔が得られるということである．そして逆バイアス電圧による電界により，電子と正孔それぞれが逆方向に引き寄せられる．電子は前置増幅回路に入力されてその数に比例した電圧値の信号パルスに変換された後，測定される．

２・３　原位置水中ラドン検出器

今回製作したのは，従来のラドン検出器に機能性ガス分離膜を取り付け，水中に沈めた状態で水中ラドン濃度を測定することができるような水没型の小型水中ラドン検出器である．また，動燃人形峠事業所において地下水のラドン観測をするにあたって次のような条件を満たした検出器でなければいけない．

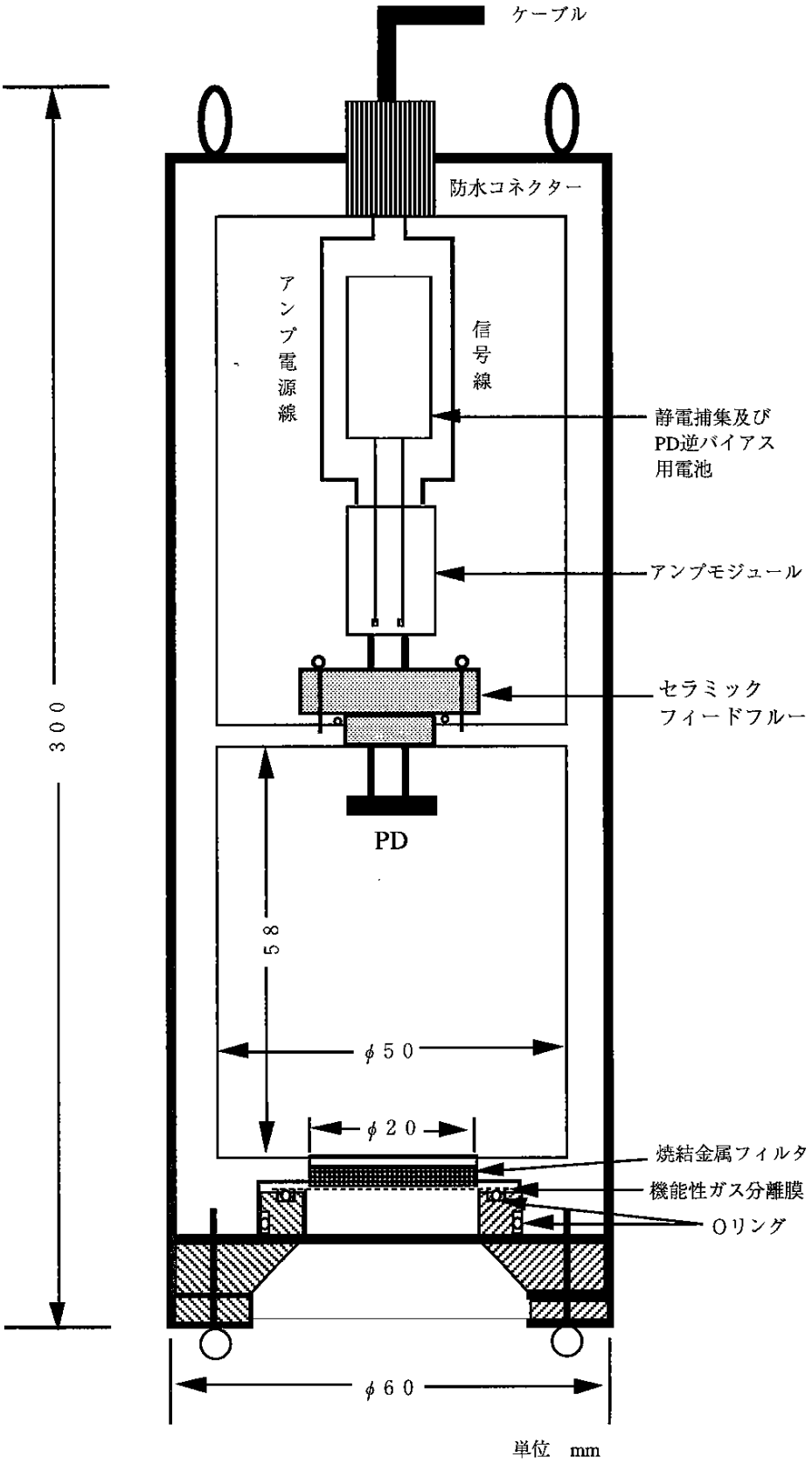
（１）ＡＣ電源等の設備の整っていない屋外で測定ができる．

（２）一ヵ月以上の長期間にわたって自動車用鉛蓄電池を使って連続測定ができる．

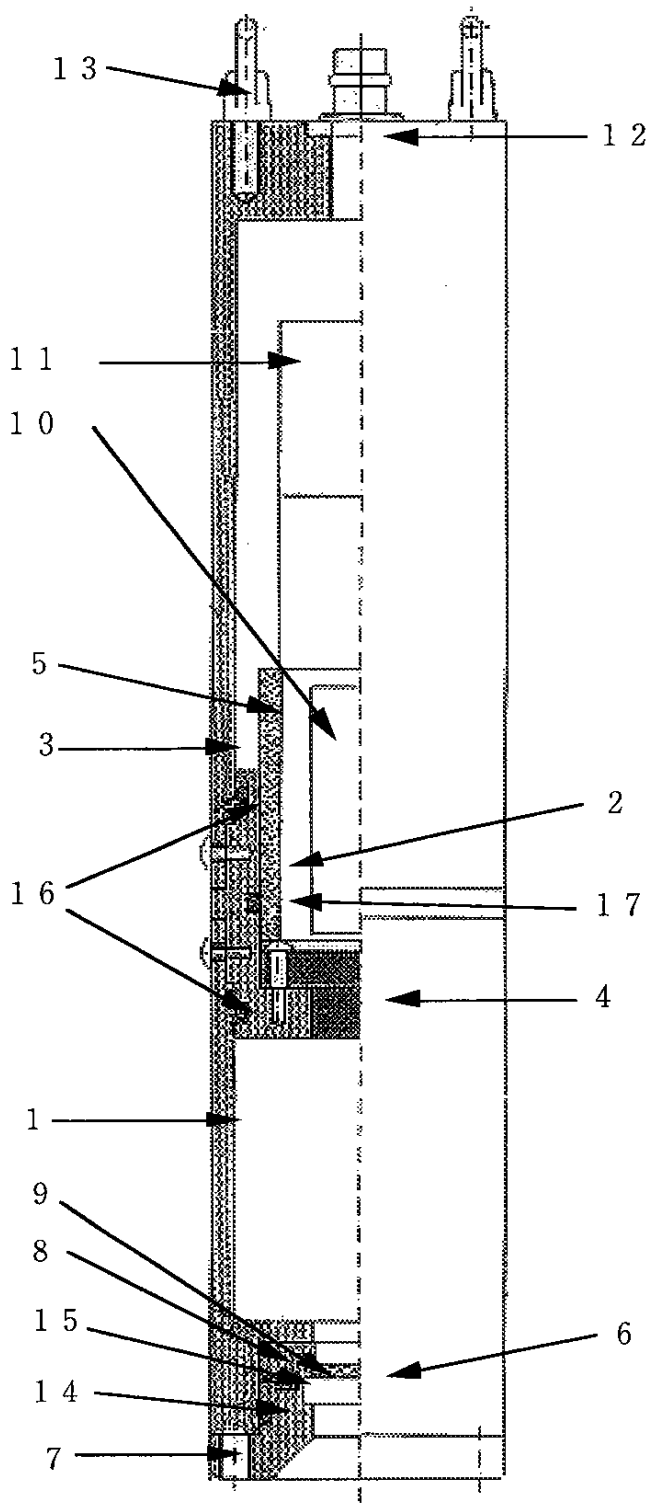
（３）持ち運びが容易にでき，口径６５ mmの井戸に投入可能である．

検出器は，ステンレス容器，ＰＤ，アンプモジュール，焼結金属フィルタ，防水コネクタ，機能性ガス分離膜，ケーブルリールより成る．また，ＰＤは浜松フォトニクス(株) 製の，パシベーション付ベアーチップタイプの型番「Ｓ３５９０－０６」である．検出面積は９×９ mm，厚さ５００μｍのものを使用した．容器の検出部の容積は１１６ｍｌ，容器の開口部の面積は２．７ｃｍ^2，静電捕集電圧は－１２０Ｖである．ケーブルリールは深井戸に沈めるため１６０ｍの長さがある．第２図に深井戸用小型水中ラドン検出器の概略図を示す．第３図はその設計図である．

この水中ラドン検出器は深井戸内の地下水に沈めるため，水圧がかかることになる．さらに長期にわたって水没させるため，長期間機能膜に負担をかけ続けることになり，膜が損傷する恐れがある．これらによる機能性分離膜の損傷，および水漏れを防ぐために，焼結金属フィルタのサポート板を用いて補強した．焼結金属というのは，金属



第2図　小型水中ラドン検出器の概略図



番号	名称
1	本体ａ
2	本体ｂ
3	本体ｃ
4	センサホルダ
5	アンプカバー
6	焼結金属フィルタ
7	フタ
8	フィルタ押さえ
9	防水フィルム
10	ラドンセンサアンプ
11	積層形乾電池　120V
12	水中コネクタ
13	アイボルトM
14	Oリング　G-40
15	Oリング　G-45
16	Oリング　G-45
17	Oリング　G-35

第３図　小型水中ラドン検出器の設計図

粉末を圧縮成形し，溶融点以下の温度で焼固めたものである．網の目のようになっており，ラドンガスが通過する．今回使用した材質はステンレスである．焼結金属の規格表を第１表に示す．

成分	ＳＵＳ　３１６
焼結体密度	４.３～５.０　(g/cm3)
空隙率	３７～４３　(%)
使用温度	－２５０～５５０　(℃)
熱膨張係数	1.6×10^{-5}
抗張力	３～１０　(kgf/m)
ろ過精度	１００　(μm)
寸法	１８Φ×３t　(mm)

第１表　焼結金属フィルターの規格表

２・４　機能性ガス分離膜

開口部には，水は通さずガスは通すという特性から，機能性ガス分離膜として，ヘキスト・インターナショナル東京（株）の「セルガード」というポリプロピレン製のフィルムを用いた．この「セルガード」には様々なグレードがあるが，ここではＮｏ．２４００というものを使用した．第２表に「セルガード」Ｎｏ．２４００の規格表を示す．第４図は「セルガード」の顕微鏡写真である．

Properties	「CELGARD」2400
Film Thickness	25 (μm)
Density	0.56 (g/cm3)
Maximum Hole Diameter	0.125×0.05 (μm)
Total Surface Area	50 (m2/g)
Critical Surface Tension	35 (dyne/cm)
Water Initiation	40 (Kgf/cm2)
Tensile Strength (mechnical direction)	1055 (Kgf/cm2)
Tensile Strength (vertical direction)	84 (Kgf/cm2)

第２表　機能性ガス分離膜「セルガード」Ｎｏ．２４００の規格表

第４図 「セルガード」の顕微鏡写真

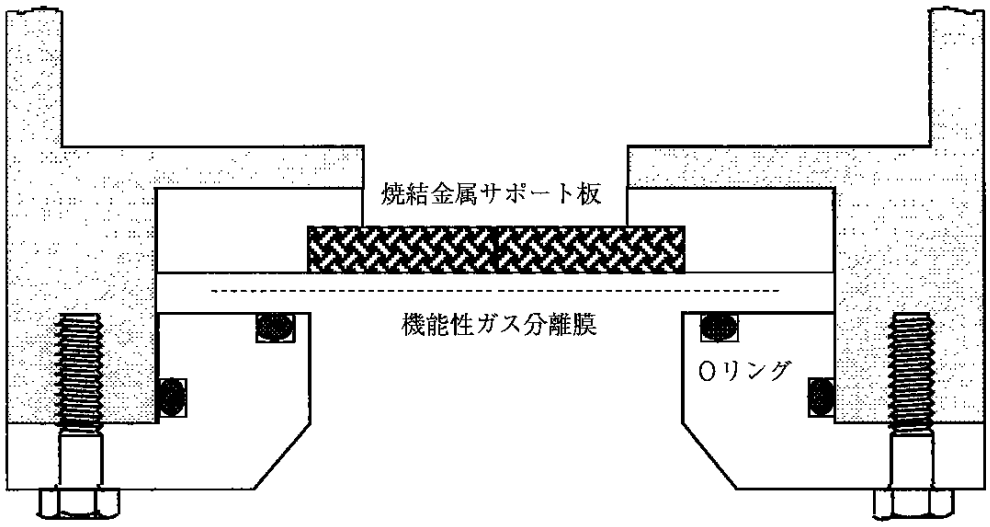
「セルガード」はガスの透過に対しては極めて敏感で，非常に小さい圧力下でも透過できることがわかっている．また，「セルガード」の臨界表面張力は３５（ｄｙｎｅ／ｃｍ）で，水の表面張力７２．８（ｄｙｎｅ／ｃｍ）の方が大きい．このためこの膜は水を通さない．

検出器を水中に沈めていくと水圧が高くなり，膜を隔てて容器内の気体圧と水圧との間に圧力差が生じる．この膜を水は透過できないので，水との圧力差に伴い検出器内の気体との間で蒸気圧に不平衡が生ずることになる．この結果，水中に溶解している気体分子（ラドンガス）は膜を透過して検出器に入り込み，平衡を保つために必要なある時間の後，膜を隔てた両者の圧力が等しくなる．つまり，水中において気体平衡の状態が成立すると考えられる．一定の圧力において水中に溶解している^{222}Ｒｎと，気体として存在する^{222}Ｒｎの比は一定であるから，この方法で水中のラドン濃度の変化に応じた測定ができるといえる．

2・5　原位置水中ラドン検出器の防水について

この深井戸用水中ラドン検出器は長時間地下水中に沈めて連続測定する.その際,開口部のあたりから水漏れがおこると,徐々に入ってきた水が機能膜を覆ってしまうため,水中のラドン濃度を正確に測定することができない．また，コネクタ部分からの水漏れがおこるとアンプなどの電気部分の故障の原因になる．従って，検出器の防水は測定に関して非常に重要である。

開口部の防水については，機能膜に「セルガード」を使用し，焼結金属のサポート板とOリングの間に機能膜をはさみ，蓋で押さえこんで固定した．コネクタ部分については水中コネクタを使用し完全に防水できている．第5図に小型水中ラドン検出器の開口部の防水についての概略図を示す.



第5図　小型水中ラドン検出器開口部の防水についての概略図

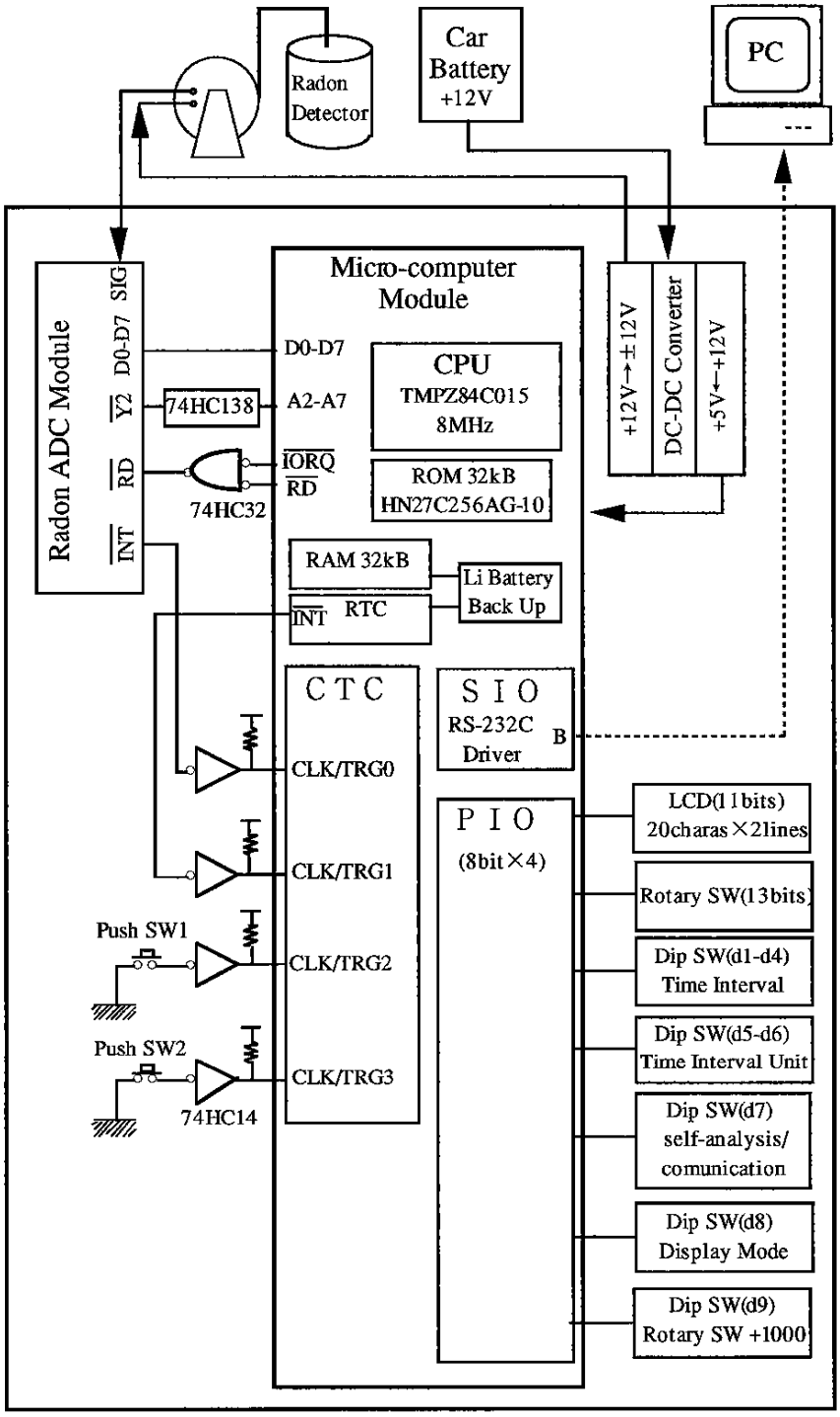
3． 小型ラドンデータロガーの製作

3・1 小型ラドンデータロガーの概要

従来のラドン計測システムでは，商用電源などの設備の整った場所でしか測定できない．平成8年に小型ラドンデータロガーが開発され，設備の整っていない屋外などいろいろな場所でのラドン観測が可能になった（田阪 他,1996）．このシステムは従来のシステムを簡略化し，低消費電力で動かせる．よって，電源を自動車用鉛蓄電池（１２Ｖ）より供給することができる．今回はこの小型ラドンデータロガーを、イビデン産業（株）で製品化し使用した．その規格表を第3表に示す．また，小型ラドンデータロガーのブロックダイアグラムを第6図に示す．

Analog Input	1channel, 50Ω impedance acceptable input voltage: 0～+1.24V peak voltage detect input signal risetime: 150 ns～5 μs
ADC resolution Frequency ADC trigger Interrupt signal	8bits maximum 10kHz internal trigger mode threshold setting: 10mV～600mV $\overline{\text{INT}}$ signal output
Sampling interval Recording memory	adjustable interval:1/16s～150min 28.8kB RAM for maximum 1,440 sampling with a push switch to dump the data for PC
Display Display switch	LCD(20 char.×2 lines) rotary switch: check the past data of 1,440 sampling display mode: ^{218}Po and ^{214}Po count mode or concentration mode
Supply voltage DC-DC converter Power consumption	+12V with the car battery +12V→+5V,+12V→±12V, efficiency 60% +5V・26mA +12V・13mA, -12V・10mA(amplifier for radon detector)
Size Weight	55(H)×220(W)×160(D)mm 800g

第3表　小型ラドンデータロガーの規格表



第６図　小型ラドンデータロガーのブロックダイアグラム

この小型ラドンデータロガーは，ラドン検出器によって変換された電圧パルスをラドン測定用８ビットＡＤ変換モジュールが受け，ピークホルダー回路，コンパレータ回路を通し、遅延一発パルス発生回路を使ってＡＤ変換する．ラドン信号の測定，データ処理，記憶を行い，測定終了時にデータをパソコンに送るというシステムになっている．

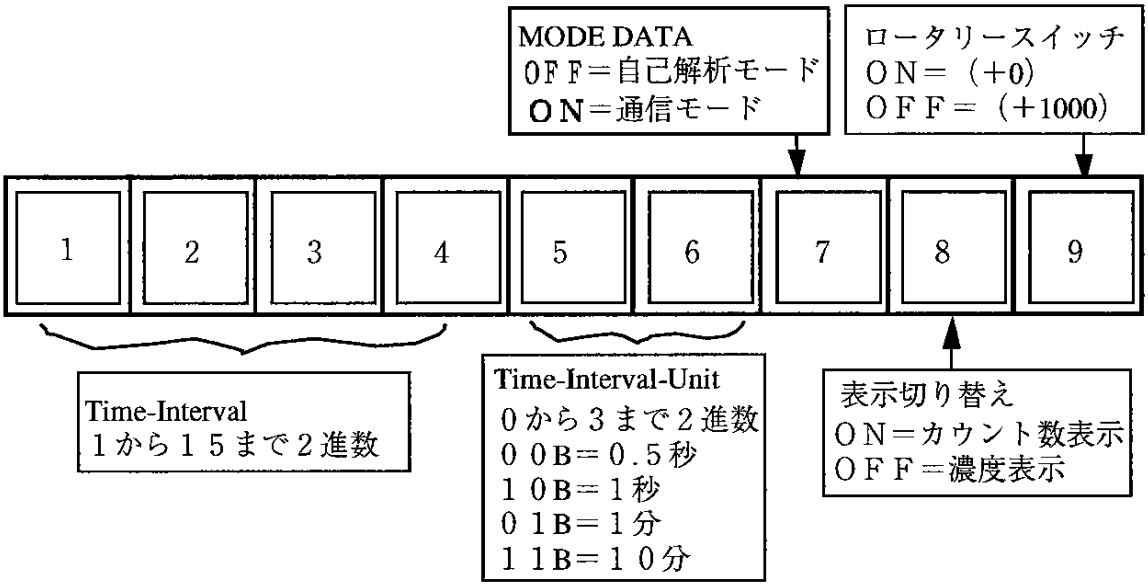
小型ラドンデータロガーの外形サイズは，５５（H）×２００（W）×１６０（D）mmであり，内部のマザーボードには，テレフォンカードの大きさのマイコンモジュール，ラドン測定用ＡＤ変換モジュールと２個のＤＣ－ＤＣコンバーターが装備されている．また，液晶表示，ディップスイッチ，ロータリースイッチ，押ボタンスイッチ，通信用コネクター，ラドン検出器用の電源コネクターと信号入力コネクターが装備されている．

３・２　小型ラドンデータロガーの操作方法

ロガーのレアーパネルには，「ｄ１からｄ９」の９個のディップスイッチがある．これらのスイッチについて説明する．第７図にはディップスイッチの設定図を示す．

（１）測定時間インターバルの設定

ディップスイッチ「ｄ１からｄ６」を用いる．最初に「ｄ５とｄ６」でインターバル基本単位を決める．例えば，１０分単位だと２進数表記法で１１Ｂとなる．ここで「１」＝ＯＦＦ，「０」＝ＯＮである．次に，「ｄ１からｄ４」でインターバル定数を決める．こ



第７図　ディップスイッチの設定方法

の定数にインターバル基本単位を掛けた値が，実際の測定時間インターバルとなる．例えば，３０分の測定時間インターバルだと，１１００１１B（2進数）となる．最長の測定時間インターバルは１５０分で１１１１１１Bである．また，最小の測定時間インターバルは０．５秒で１００００００Bとなる．

（2）「自己解析」モードと「通信」モードの設定

両者の切り替えをディップスイッチ「ｄ７」でおこなう.OFFにすると「自己解析」モード，ＯＦＦにすると「通信」モードになる．「自己解析」モードにおけるデータ取得は，測定継続中にパソコンを接続し，パソコン上でデータ受信プログラム「ＡＳＣＩＩ１．ＥＸＥ」を動作させておく．そして，レアーパネルの黄色の押しボタンスイッチ(Push SW1)を押すと，ＲＡＭに記憶されていた１４４０回分のデーターがパソコンに転送される．[通信] モードのときは，常にロガーとパソコンは接続しておき，パソコン上で動作している「ＵＭＥ０.ＥＸＥ」がロガーへコマンドを発信して，データを受信する．今回の研究では「自己解析」モードでロガーを使用した．

（3）表示切り替え設定

ディップスイッチ「ｄ８」で表示切り替えを行う．ＯＮにするとカウント表示，ＯＦＦにすると濃度表示になる．

（4）過去のデータ表示

ＰＩＯに接続されたフロントパネルのロータリースイッチと緑色の押しボタンスイッチ(Push SW2)によって，メモリに記憶されている過去のデータを液晶表示に呼び出して見ることができる．３桁のロータリースイッチで呼び出したいデータが現在から何回前のものであるかをセットし，押しボタンスイッチを押すと過去のデータを見ることができる．過去のデータは液晶表示に日付の前に‘Ｐ’をつけて表示される．ロータリースイッチは３桁までしかないが，記憶されるデータは１４４０回分あるので，ロータリースイッチだけでは１０００回以前のデータを見ることができない．そこで，ディップスイッチ「ｄ９」を使って千の位を表わすことにした．ON‘にするとセットしたロータリースイッチの値に「１０００」を加算することになる．

小型ラドンデータロガーが動作中でも，表示切り替え設定ディップスイッチ「ｄ８」とロータリースイッチの加算値設定ディップスイッチ「ｄ９」は，自由に変更することができる．

３・３　小型ラドンデータロガーの消費電力

ＣＰＵ「ＴＭＰＺ８４Ｃ０１５」にはＲＵＮ・ＩＤＬＥ１・ＩＤＬＥ２・ＳＴＯＰの４種類のホールトモードがあり，ホールトモード設定レジスタによってこれらの内いずれかの動作モードを選択することができる．今回使用したＩＤＬＥ２では，ホールト中は内臓ＣＴＣのみ動作してクロックは外部に供給される．ＩＤＬＥ２モードを設定することにより消費電流をＲＵＮモードの半分以下に低減することができた．シリアルポートチャンネルＢには，シャットダウンモードを備えたＲＳ－２３２Ｃドライバが接続されており，このＩＣをシャットダウンモードに設定することにより，消費電流をおよそ４ｍＡ減らすことができた．

自動車用バッテリーを使っての観測で問題になるのは，どの程度の期間連続して計測できるかということである．今回は１２Ｖ×３８Ａｈの容量のものを使用した．この小型ラドンデータロガー（「自己解析」モード）の消費電力を測定すると第４表のようになる．システムはマイコンモジュール，ＡＤ変換モジュール，ＤＣ－ＤＣコンバータからなる．

自動車用バッテリーの電力量は４５６Ｗｈなので，第４表の消費電力で計算すると観測継続期間は約２３日である．今回の実験では，バッテリーを４個並列につなぐことにより観測継続期間を約２ヵ月まで延長させた．

	電流（mA）	電圧（V）	電力（mW）
システム	３４.１	１２	４０９.２
アンプモジュール	３５.２	１２	４２２.４
計	６９.３	１２	８３１.６

第４表　小型ラドンデータロガーの消費電力

４．岐阜大学水道水中のラドン測定

４・１　目的と方法

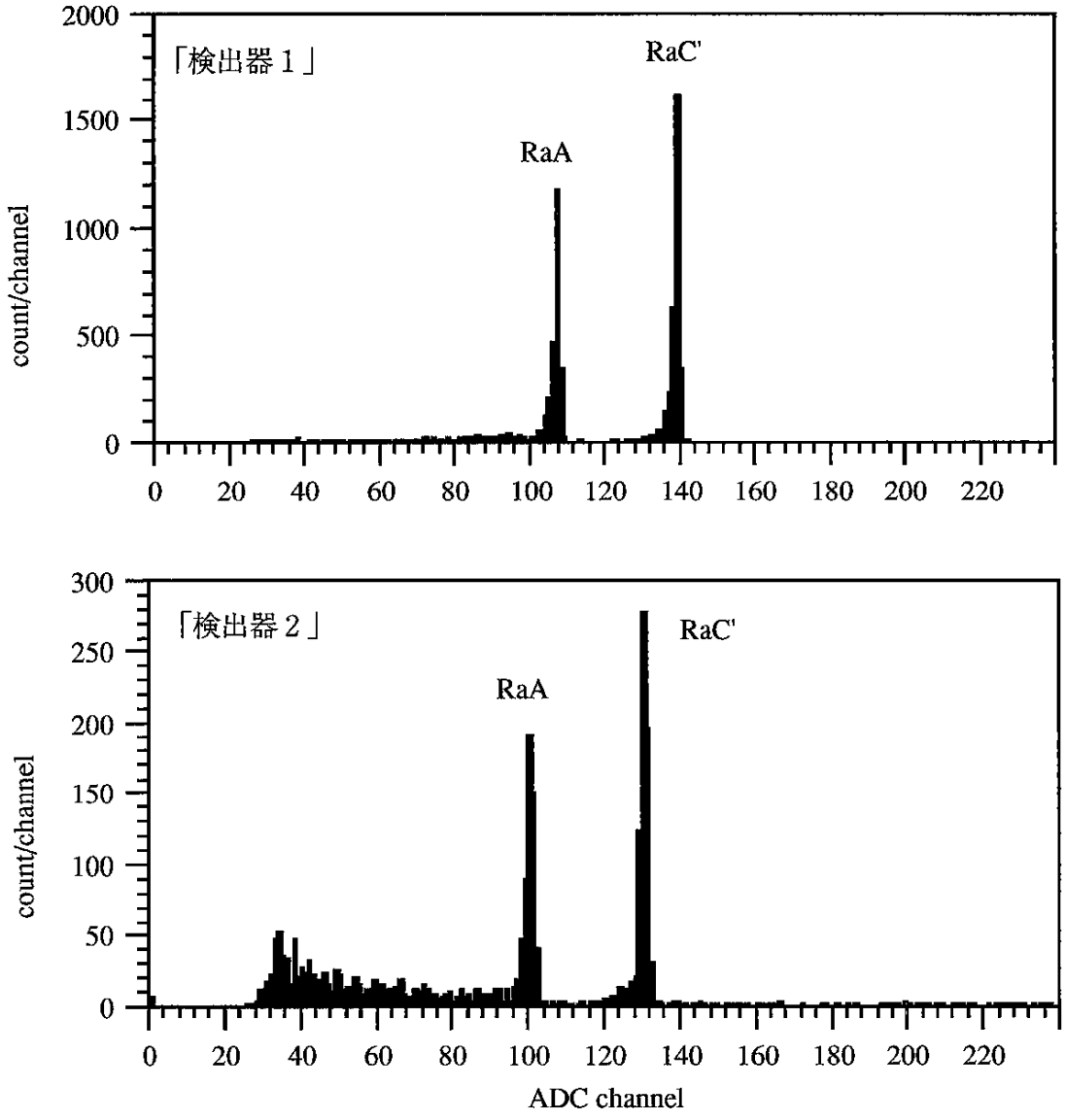
ラドン娘核種の放出するα線のエネルギー値は，それぞれのα壊変に固有のものであり，その信号の電圧に比例して決まったチャンネルにピークとして見ることができる．それぞれの娘核種によるピークが現われるチャンネルを測定し，あらかじめラドンデータロガー中のプログラムに設定しておくことにより娘核種の弁別をすることができる．

ここではウラン系列の^{222}Ｒｎの娘核種が放出するα線のエネルギーを測定し，０から２５５のチャンネルを，Ｒａ０，Ｒａ１，Ｒａ２，Ｒａ３，Ｒａ４の５個の数値で分割した．Ｒａ０からＲａ１までのカウント数を積算した数値がバックグラウンド，同様にＲａ１からＲａ２，Ｒａ２からＲａ３，Ｒａ３からＲａ４までの積算値をそれぞれのラドン娘核種によるカウント数ｒ２，ｒ３，ｒ４とする．ウラン系列ではｒ２，ｒ３がＲａＡ，ＲａＣ’の個数である．これらの値とラドン濃度校正係数からラドン濃度が求められてメモリーに記憶される．分割の数値は以下に示すような測定より決定した．

製作した２台の小型水中ラドン検出器「検出器１」と「検出器２」を岐阜大学の水道水中に沈めて，水中のラドン測定を行った．２台の水中ラドン検出器は同一の水槽中に同じ水深６２ｃｍの所に沈めてあり，水温，水深共に同じ条件で測定を行っている．水槽には水道水が流れこみオーバーフローしている．水温は１８．５±１．０（℃）で多少変動し，流量は一定で約１４．３（ｌ／分）である．水槽の大きさは８０ｃｍ×１２０ｃｍ×９４ｃｍで９０２（ｌ）である．水槽には水中ラドン検出器とともに水温センサーが入っている．前節で述べた「通信」モードの設定を用いて，１０分間ごとにカウント数の測定を行った．平成８年１２月１０日から１２日までの期間で得られた電圧パルス分布より，Ｒａ０，Ｒａ１，Ｒａ２，Ｒａ３，Ｒａ４のチャンネル数値を決定した．

４・２　測定結果

第８図は小型水中ラドン検出器「検出器１」と「検出器２」による電圧パルス分布である．　α線による２つのピークがみられる.これらのピークの左側の形は，ＰＤ表面の厚さ約２０００ÅのＳｉO_2膜と，ｐ層の不感帯のためである。左から順に，　ＲａＡのα線（6.00MeV），ＲａＣ'のα線（7.69MeV）によるものである．これは水中の^{222}Ｒｎを観測していることを確認するものである．



第８図　小型水中ラドン検出器「検出器１」と「検出器２」からの電圧パルス分布

4・3　ラドン濃度と校正係数

水中のラドン濃度を求めるには，ラドンデータロガーから得られる^{222}Ｒｎの娘核種によるα線のカウント数を何らかの方法で濃度に直さなければならない．その１つの方法として，液体シンチレーション法により求めたラドン濃度と，検出器のカウント数からラドン濃度校正係数を求める．今回はこの方法で，製作した小型水中ラドン検出器「検出器１」と「検出器２」の濃度校正係数を求めた．ただし，「検出器２」については２・３節で述べた焼結金属のサポート板の替わりに真鍮製の穴あき板（開口率47.9%）を用いた．液体シンチレーション法による水中ラドン濃度の測定については，動燃人形峠事業所安全管理課に測定を依頼した．

液体シンチレーション法による結果，平成８年１２月１４日１１時に採水した岐阜大学の水道中のラドン濃度Ｑは

$$Q = 9.30 \pm 0.26 \ (\mathrm{Bq/l})$$

であった．また，「検出器１」における平成８年１２月１３日から１２月１４日の平均カウント数C_1（平均水温16.8℃）と「検出器２」の１２月１１日の平均カウント数C_2（平均水温16.6℃）は，それぞれ

$$C_1 = 136.9 \pm 11.3 \ (\mathrm{RaC'/h})$$

$$C_2 = 34.2 \pm 5.5 \ (\mathrm{RaC'/h})$$

であった．「検出器２」については１２月１１日で実験を終了しているが，「検出器１」のカウント数は１２月１１日から１２月１４日の期間でほとんど変動がないので「検出器２」についても上記のＱの値を用いることにした．これらの値からラドン濃度校正係数ｆを求めると

$f_1 = C_1/Q = 14.7 \pm 1.3$ [(RaC'/h) / (Bq/l)]　---「検出器１」は焼結金属板使用

$f_2 = C_2/Q = 3.6 \pm 0.8$ [(RaC'/h) / (Bq/l)]　---「検出器２」は穴あき板使用

となった．

5．　地下水中の原位置ラドン濃度測定

5・1　実験目的

動燃人形峠事業所では，平成６年度から７年度にかけて方面地区の土壌，地下水採取を行うとともに，放射能濃度の測定を行い，捨石からの放射性核種の影響範囲を推定するとともに研究課題の抽出を行った．その結果，平成８年度は土壌・岩石中および地下水中の放射性核種（特にラドン）を解析する装置・解析手法の研究を実施することになった．そのうち岐阜大学では，地下水中のラドンを測定する装置の開発を行うこととなった．特に，年間数回の地下水サンプリングによる液体シンチレーション法にかわって，モニタリング試錐孔などでの原位置ラドン測定手法の開発を行うことを目的とする．

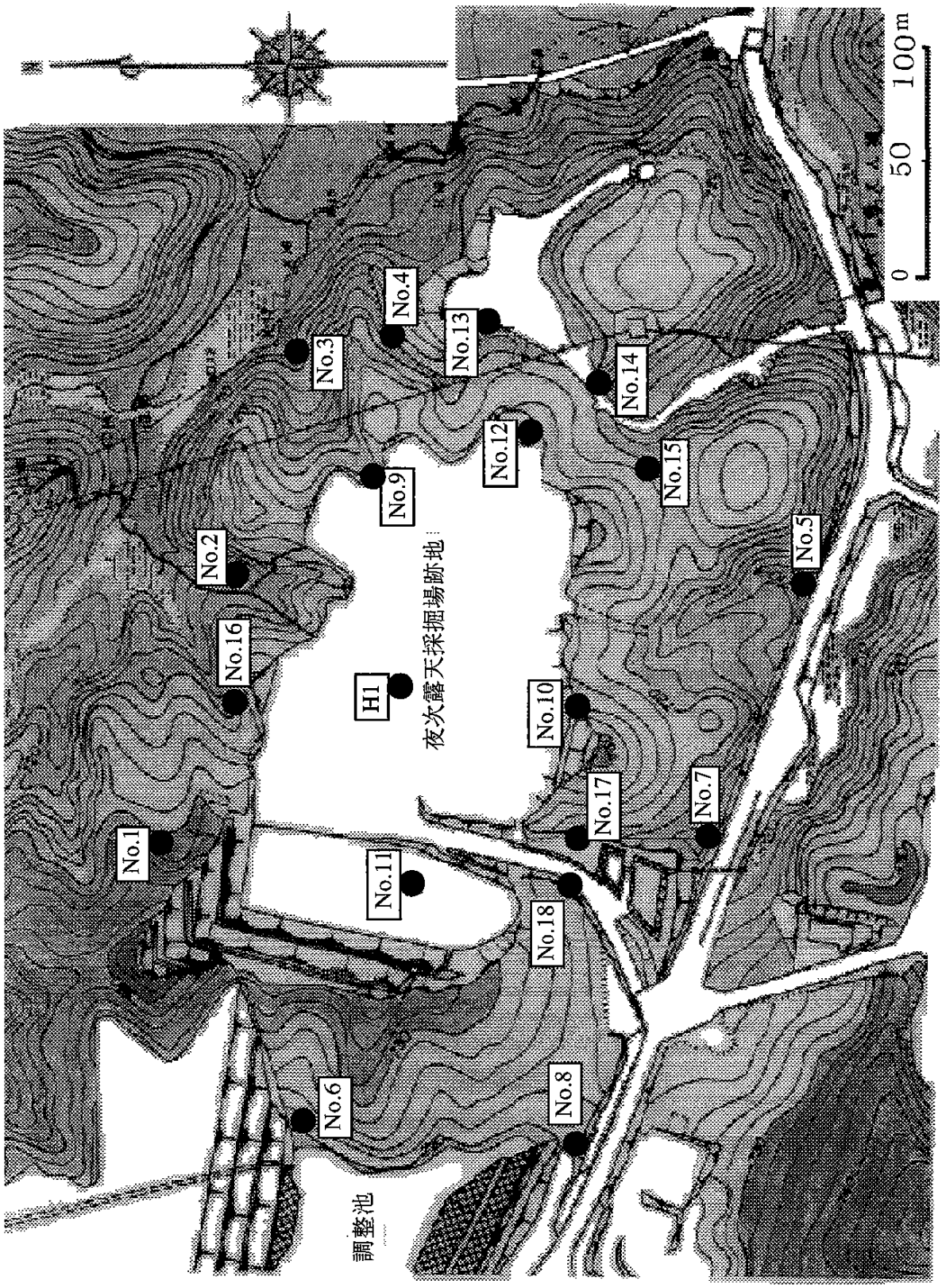
5・2　実験方法

（1）実験場所の決定

動燃人形峠事業所内には夜次露天採堀場跡地があり，この跡地の周辺には１８本のモニタリング試錐孔がある．第９図は夜次露天採堀場跡地のモニタリング試錐孔の配置図である．図にはＮｏ．１からＮｏ．１８までのモニタリング試錐孔の場所が記入してあり，このうちＮｏ．１７とＮｏ．１８を今回の実験の実施地点に決定した．その理由は道路に近く積雪時のアクセスが容易なこと，すぐ近くに揚水ポンプの小屋があり，もしＡＣ電源が必要なときは利用できることである．またＮｏ．１０のみ原位置水位測定を実施している．第５表には夜次露天採堀場跡地周辺のＮｏ．１０，Ｎｏ．１８とＮｏ．１７のモニタリング試錐孔の概要を示す．この表の水位データは平成８年５月１４日の測定値である．

孔名番号	標高 (m)	孔径 (mm)	掘進長 (m)	塩ビ孔明管	水位 (m)	掘削年度
No.10	725.077	65	30	有り	5.56	昭和58年
No.18	720.502	75	10	有り	1.80	平成元年
No.17	719.976	75	25	有り	2.06	平成元年

第５表　夜次露天採堀場跡地周辺のNo.10，No.18，No.17モニタリング試錐孔概要



第９図　動燃人形峠事業所内の夜次露天採掘場跡地試錐孔配置図.

モニタリング試錐孔 No.17 と No.18 で実験を実施

（2）水中ラドン検出器の設置

岐阜大学で試験した２台の小型水中ラドン検出器を動燃人形峠事業所夜次露天採掘場跡地周辺の２ヵ所のＮｏ．１７とＮｏ．１８のモニタリング試錐孔の水深約１ｍに沈めて水中ラドン濃度についての観測を行った．２台の小型水中ラドン検出器は小型ラドンデータロガーに接続され，ラドンの娘核種が放出するα線のカウント数を測定した．検出器設置当初の実験内容を第６表に示す．

「検出器１」は掘進長１０ｍのＮｏ．１８のモニタリング試錐孔に設置した．その実験装置設置の概略図を第１０図に示す．電源は自動車用バッテリー４個を並列接続して使用した．「検出器１」は平成８年１２月１７日から約８カ月経過して，現在も連続観測を継続中である．

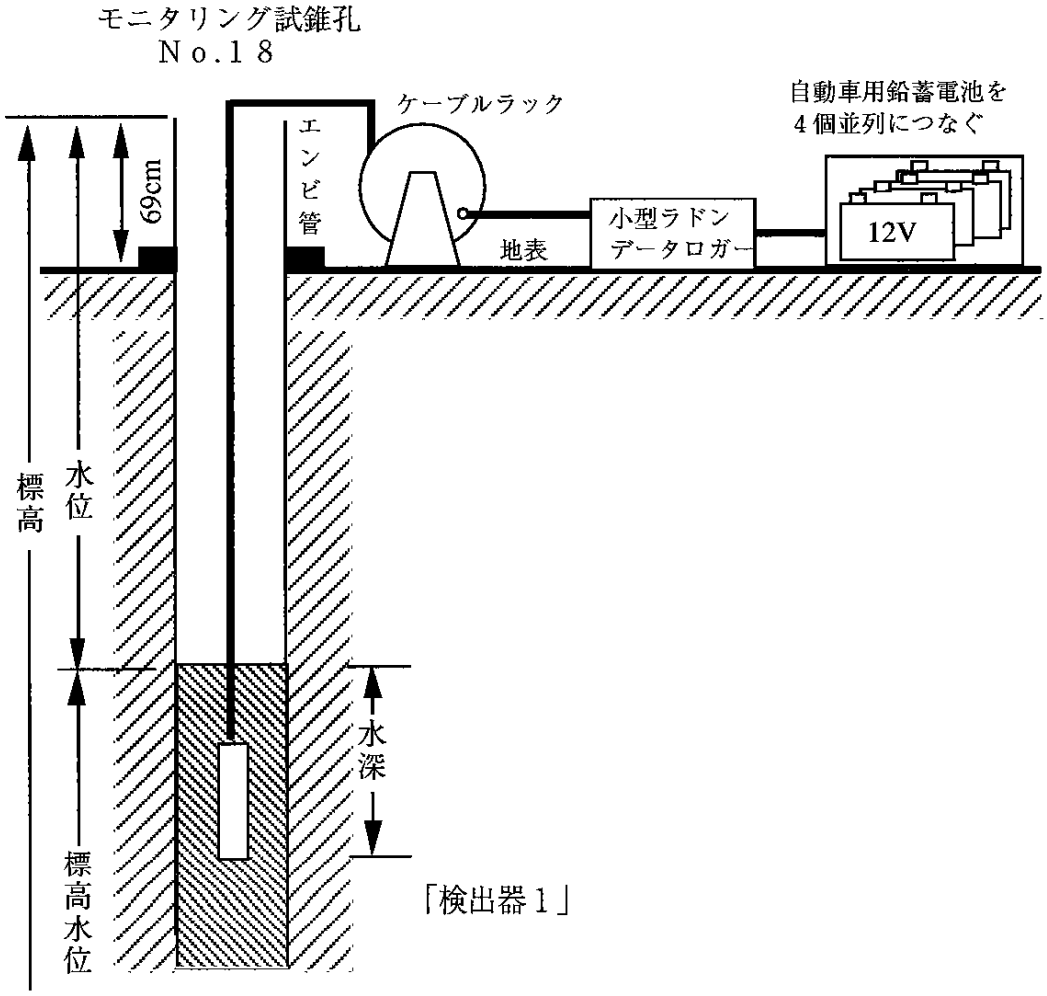
「検出器２」は掘進長２５ｍのＮｏ．１７のモニタリング試錐孔に設置した，その概略図を第１１図に示す．この検出器は平成８年１２月２５日から平成９年１月２９日までの３６日間で観測を終了した．電源はＡＣ電源を利用し，ＡＣアダプターで直流電源１２Ｖを小型ラドンデータロガーに供給した．「検出器１」，「検出器２」ともにサポート板として焼結金属板を用いた．

両方とも小型ラドンデータロガーのディップスイッチは０１１０１１０００Ｂと設定した．これは測定時間インターバルは６０分，自己解析モード，カウント数表示，ロータリースイッチの加算値「０」を意味する．

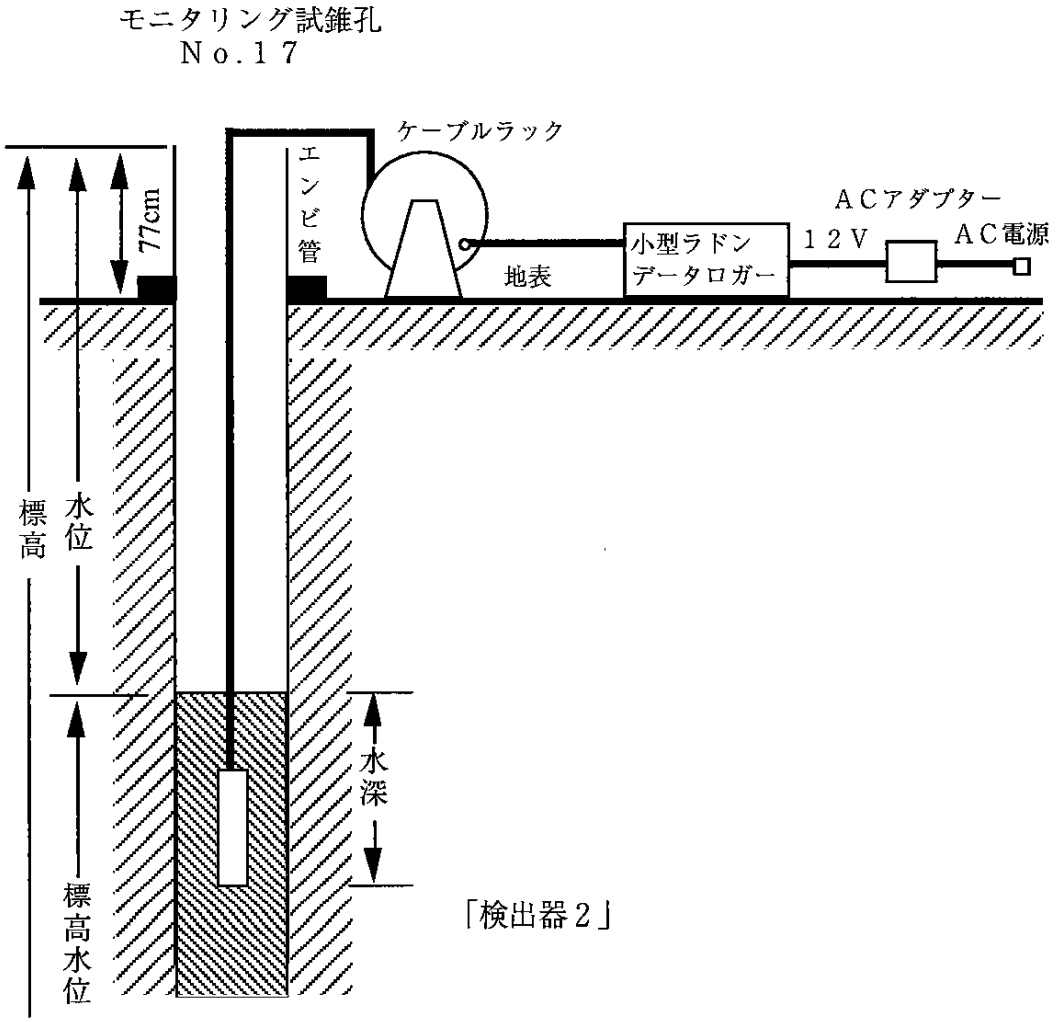
ここで水位は試錐孔から突き出ている塩ビ管のてっぺんから水面までの距離である．また，水深は試錐孔の水面から沈めた検出器の開口部までの距離である．

検出器番号	孔名番号	観測期間	計測システム	水位(m)	水深(m)
「検出器１」 セルガード 焼結金属板 使用	No.18	平成8年12月18日 ～平成9年8月1日 8ヶ月間 観測継続中	小型ラドン データロガー 自己解析モード 自動車用鉛蓄電池	1.68	1.00
「検出器２」 セルガード 焼結金属板 使用	No.17	平成8年12月25日 ～平成9年1月29日 36日間で 観測終了	小型ラドン データロガー 自己解析モード ＡＣアダプター	1.93	1.00

第６表　動燃人形峠事業所内での２台の小型水中ラドン検出器設置状況



第１０図　動燃人形峠事業所内のＮｏ．１８モニタリング試錐孔に沈めた「検出器１」
実験装置の設置概略



第１１図　動燃人形峠事業所内のＮｏ．１７モニタリング試錐孔に沈めた「検出器２」
実験装置の設置概略

（3）実験データの取得

ラドン娘核種ＲａＡとＲａＣ’のカウント数データは，６０日間は上書きなしで，ラドンデータロガーのメモリーに記憶されている．今までに平成９年１月３０日，３月２６日，５月２７日，７月２２日の合計４回，電源の自動車用バッテリー４個を交換し，約６０日間の測定データをパソコンに転送した．

通常は１週間に１度，ロータリースイッチ，押しボタンスイッチ，液晶表示によって，午前８時，９時，１０時のカウント数データを読み取った．これらのデータから水中ラドン検出器の動作を確認した．

５・３　実験結果

（1）ラドン娘核種ＲａＣ’のカウント数

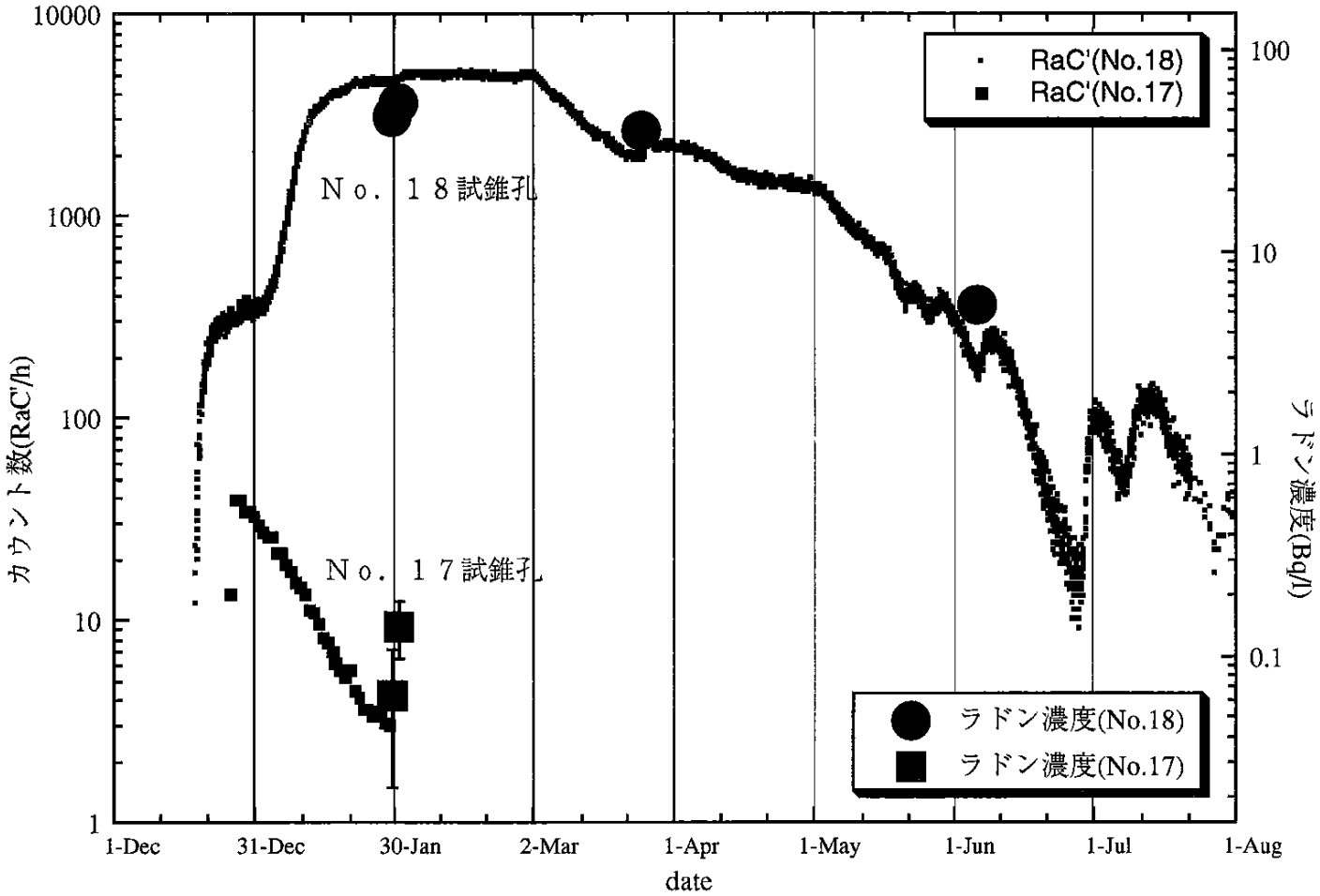
ラドン娘核種ＲａＣ’のカウント数の変動を第１２図に示す．縦軸は１時間当たりのＲａＣ’カウント数である．Ｎｏ．１８モニタリング試錐孔水中ラドン検出器では平成８年１２月１８日から平成８年７月２２日までの２１８日間について結果を示す．Ｎｏ．１７モニタリング試錐孔では平成８年１２月２５日から平成９年１月２９日までの３６日間について示した．

（2）液体シンチレーション法によるラドン濃度

Ｎｏ．１８モニタリング試錐孔では平成９年１月３０日，１月３１日，３月２５日，６月６日の４回，Ｎｏ．１７モニタリング試錐孔では平成９年１月３０日，１月３１日の２回，水をサンプリングして持ち帰り，動燃人形峠事業所安全管理課に測定を依頼して，液体シンチレーション法で水中ラドン濃度を測定した．第７表は液体シンチレーション法の測定結果である．測定値を第１２図にラドン娘核種ＲａＣ’のカウント数といっしょに図示した．

（3）試錐孔水位・水温

Ｎｏ．１８モニタリング試錐孔では平成８年１２月１７日，平成９年１月１７日，１月３０日，３月２５日，４月２１日，４月２２日，４月２３日，６月６日の合計８回，Ｎｏ．１７モニタリング試錐孔では平成８年１２月１７日，平成９年１月１７日，１月３０



第１２図　ラドン娘核種ＲａＣ'のカウント数の変動. Ｎｏ．１８試錐孔では平成８年１２月１８日から２１８日間. Ｎｏ．１７試錐孔では平成８年１２月２５日から３６日間. 大きな円は液体シンチレーション法の測定結果

日の３回，水位を測定し，水をサンプリングして水温を計った．水位は塩ビ管の上の端から水面までの距離である．第８表は水位・水温の測定結果である．Ｎｏ．１０試錐孔では原位置水位連続測定している．平成８年１２月１日から７月２４日までの水位データを，Ｎｏ．１８の９回の水位データといっしょに第１３図に示した．

（４）気象データ

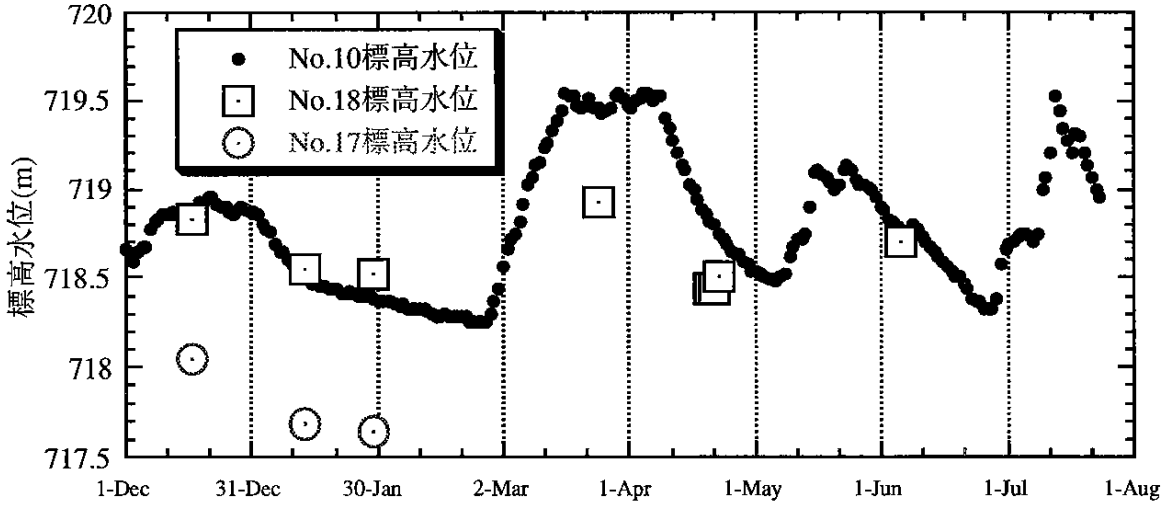
第１４図は積雪・日雨量の気象データである．積雪は１２月始めに若干あり，平成９年１月４日頃から積もり初めて，２月２４日以降雪解けが始まり，３月２６日に無くなっている．この間，日平均気温は１月２日から２月２３日までほとんど０（℃）以下であった．また，日雨量は６月２８日に１４２（mm），７月７日から７月１３日の１週間に合計３１６（mm）を記録した．

液体ｼﾝﾁﾚｰｼｮﾝ法 測定日	30-Jan -1997	31-Jan -1997	25-Mar -1997	6-Jun -1997
ラドン濃度 (Bq/l) No.18試錐孔	46 ±0.47	54 ±0.49	40 ±0.44	5.40 ±0.17
ラドン濃度 (Bq/l) No.17試錐孔	0.060 ±0.042	0.140 ±0.044		

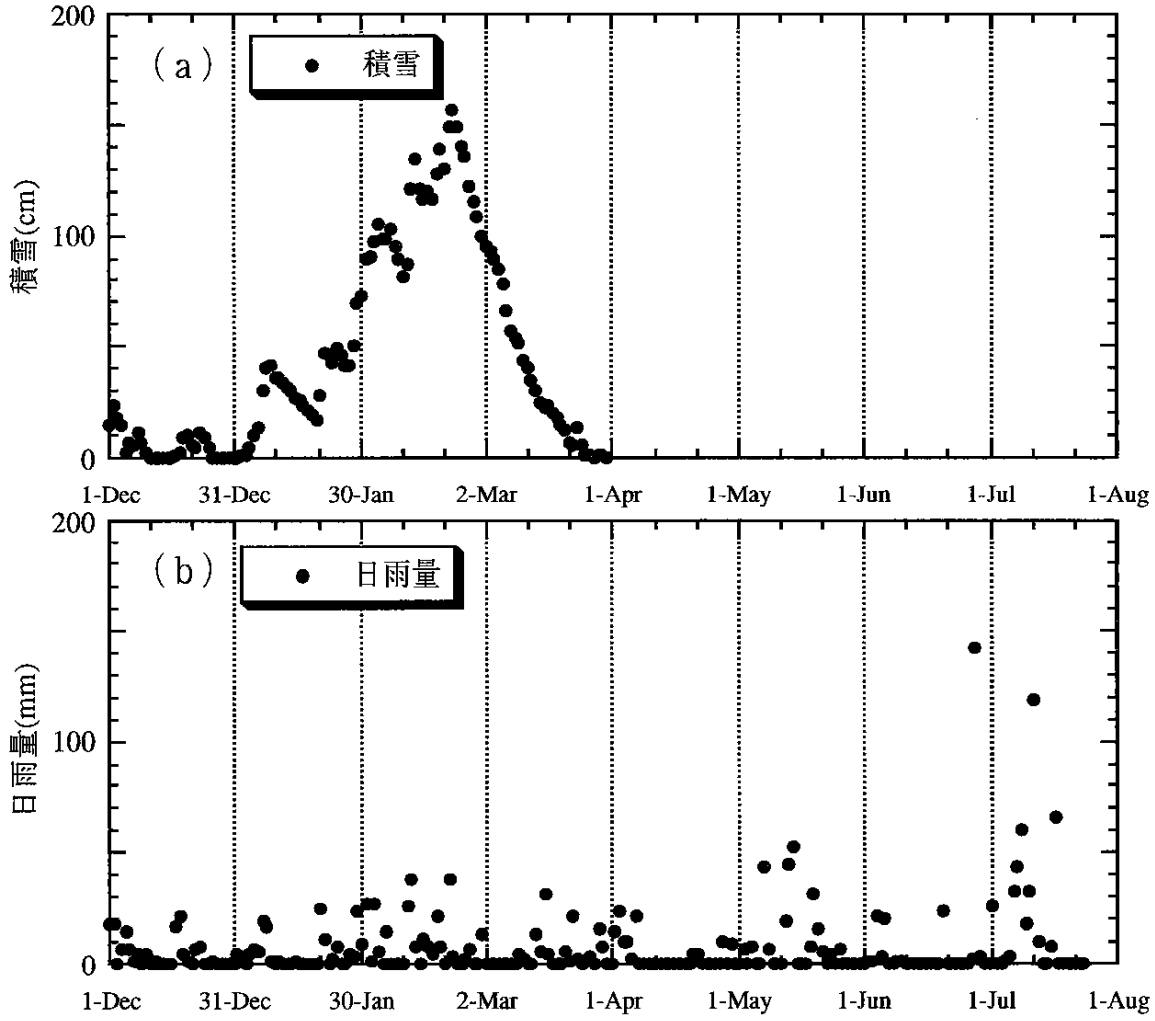
第７表　動燃人形峠事業所内のNo.18，No.17試錐孔液体シンチレーション法水中ラドン濃度測定結果

測定日 試錐孔名	17-Dec -1996	17-Jan -1997	30-Jan -1997	25-Mar -1997	21-Apr -1997	22-Apr -1997	23-Apr -1997	6-Jun -1997
水位(m) 水温(℃) No.18	1.68	1.96	1.98 6.6	1.57 7.1	2.06 8.3	2.06 8.3	2.00 8.4	1.80 12.3
水位(m) 水温(℃) No.17	1.93 11.2	2.30	2.34 7.2					

第８表　動燃人形峠事業所内のNo.18，No.17試錐孔における水位・水温の測定結果



第１３図　動燃人形峠事業所内の No.10,No.18,No.17 試錐孔標高水位測定結果



第１４図　動燃人形峠事業所における（a）積雪,（b）日雨量の気象データ

５・４　実験データの解析

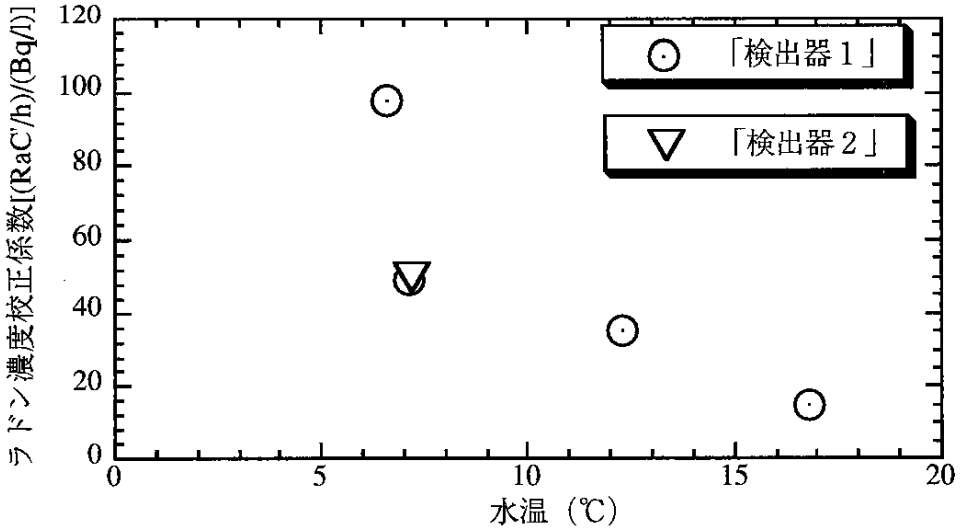
（１）水中ラドン検出器のラドン濃度校正

Ｎｏ．１８モニタリング試錐孔では平成９年１月３０日，１月３１日，３月２５日，６月６日の４回，Ｎｏ．１７モニタリング試錐孔では平成９年１月３０日，１月３１日の２回水をサンプリングして，動燃人形峠事業所安全管理課に依頼して，液体シンチレーション法で水中ラドン濃度を測定した．第９表はＮｏ．１８モニタリング試錐孔に沈めた「検出器１」のラドン濃度校正係数 [(RaC'/h) / (Bq/l)] の測定結果である．右端の列だけは岐阜大学の水道水での測定結果である．この表で１月３１日の水温は測定していない．「検出器２」のラドン濃度校正係数については，１月３０日の測定のみである．岐阜大学での測定結果はサポート板として真鍮の穴あき板を用いたので参考データとした．

第１５図にはラドン濃度校正係数と水温の相関を示す．「検出器１」では４点，「検出器

液体ｼﾝﾁﾚｰｼｮﾝ法 測定日	30-Jan -1997	31-Jan -1997	25-Mar -1997	6-Jun -1997	14-Dec -1996
ラドン濃度 (Bq/l)	46±0.47	54±0.49	40±0.44	5.40±0.17	9.30±0.26
ｶｳﾝﾄ数(RaC'/h)	4486	4761	1972	187	137
水温(℃)	6.6		7.1	12.3	16.8
ﾗﾄﾞﾝ濃度校正係数 [(RaC'/h)/(Bq/l)]	98	88	49	35	15

第９表　Ｎｏ．１８モニタリング試錐孔に沈めた「検出器１」のラドン濃度校正係数



第１５図　ラドン濃度校正係数と水温の相関関係図

２」では１点のみである．１月３０日の測定点では２台の検出器の測定結果は誤差の範囲内で一致した．水温が6.6から16.8（℃）に上昇したとき，校正係数は98から15 [(RaC'/h) / (Bq/l)] に減少している．このことは水中ラドン検出器の検出効率は水温に依存することを意味している．

今後の課題として，より広い水温範囲での精密な校正実験を実施することが必要である．また，今回の実験ではＮｏ．１８モニタリング試錐孔での水温は連続測定を行っていない．カウント数から正確な水中ラドン濃度を求めるためには，ラドン検出器とともに水温センサーによる水温の原位置連続測定が必要不可欠である．そのためには，ラドンデータロガーに水温・水位などの環境要素を測定するためのＡＤ変換器を増設する改良を行わなければならない．

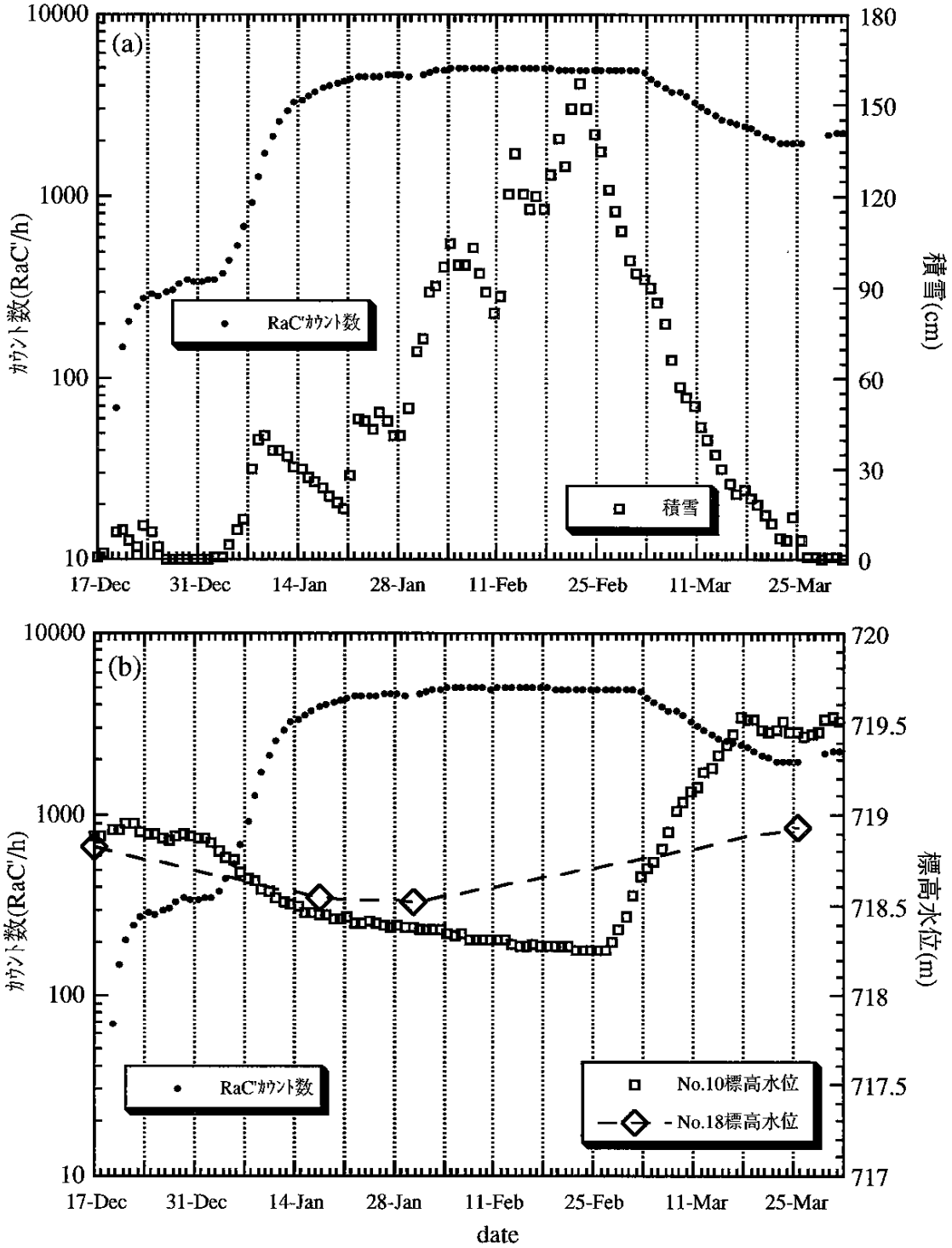
（２）冠雪・融雪・標高水位と水中ラドン濃度の関係

（観測期間平成８年１２月１７日から平成９年３月３１日）

本研究では水温の原位置連続測定データがないので，カウント数から正確な水中ラドン濃度に直せない．この節ではＮｏ．１８試錐孔のラドン娘核種ＲａＣ’のカウント数と冠雪・融雪の関係を調べることにする．実験期間内では平成９年１月４日に初冠雪があり，２月２２日まで積雪がどんどん増加して最大157（ｃｍ）となり，それ以降融雪が始まり，３月２８日頃には完全に雪が溶けて無くなっている．Ｎｏ．１８試錐孔の標高水位はこの期間で４回測定され，またＮｏ．１０試錐孔では原位置連続測定が行われた．前述した第５表と第９図から，Ｎｏ．１８とＮｏ．１０試錐孔は標高差4.58（m）で，約78（m）離れている．Ｎｏ．１８とＮｏ．１７は標高差0.53（m）で，約20（m）離れている．Ｎｏ．１０，Ｎｏ．１８，Ｎｏ．１７試錐孔の掘進長はそれぞれ30, 10, 25 (m) である．

第１６（ａ）図はＲａＣ’のカウント数と積雪の相関図であり，第１６（ｂ）図はＲａＣ’のカウント数とＮｏ．１０，Ｎｏ．１８試錐孔標高水位の相関図である．第１６（ａ）図からわかるように１月４日の初冠雪とともにカウント数は急に増加を初めて約12倍になって，１月２１日から３月２日の約６週間にわたってカウント数はほぼ4500から5000 (RaC'/h) で安定している．２月２３日の融雪開始後は，３月３日頃から急激にカウント数は減少している．

第１６（ｂ）図でＮｏ．１８試錐孔標高水位については，残念ながら１月３０日から３



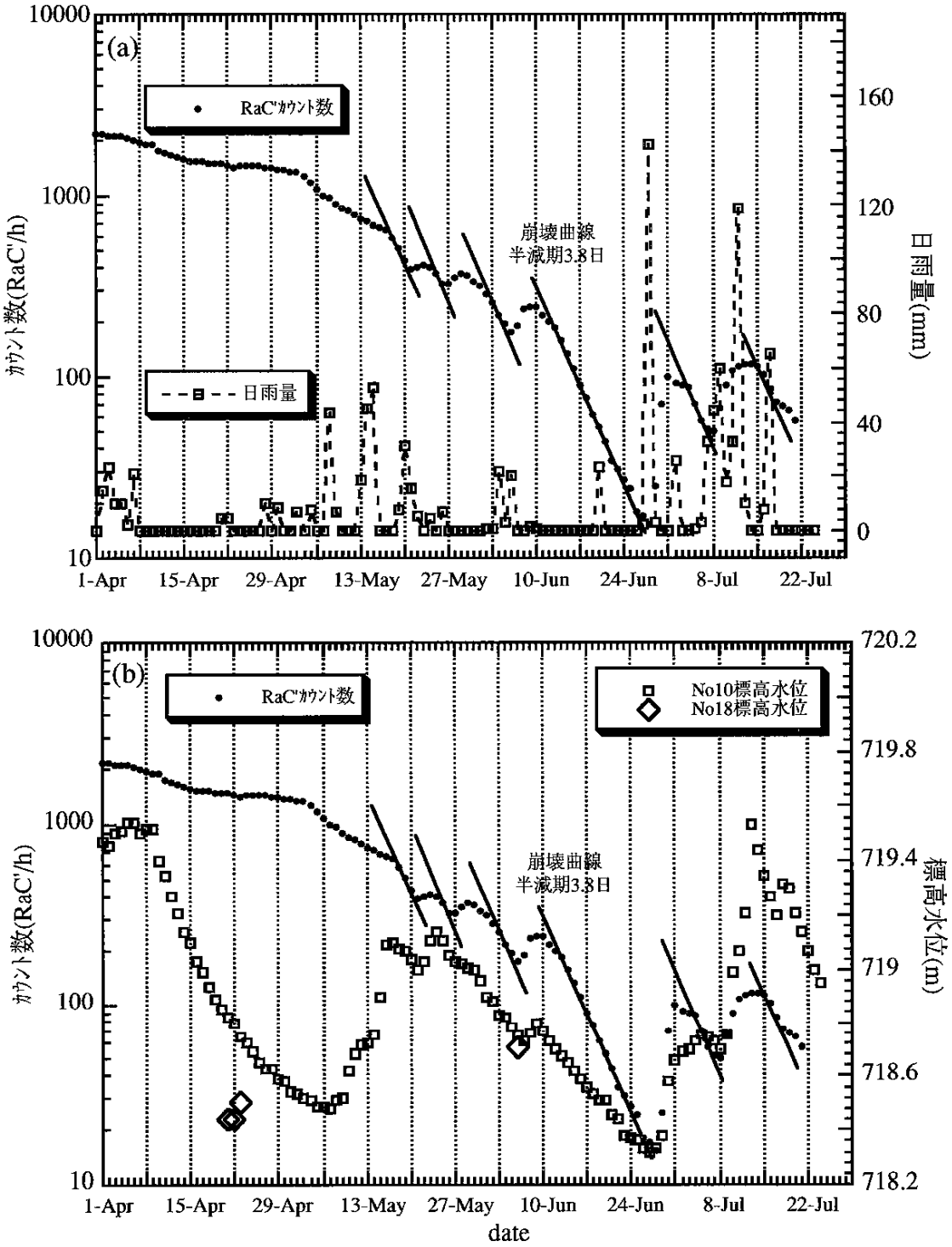
第１６図　平成８年１２月１７日から平成９年３月３１日の観測期間における，Ｎｏ．１８試錐孔のラドン娘核種ＲａＣ’カウント数と（ａ）積雪，（ｂ）標高水位の相関図.

月２５日の期間内の水位データが無いので，観測期間内の4点の測定点を直線で結んだ．この図でＮｏ．１８とＮｏ．１０の両試錐孔の標高水位データを比較すると，非常に興味あることは，平成９年１月１４日頃から３月２日の約７週間にわたって，Ｎｏ．１８試錐孔標高水位がＮｏ．１０試錐孔標高水位を最大0.5 (m) くらい上回っていると推定されることである．前述の第１３図から見ても，平成８年１２月から平成９年８月の全観測期間内でも，この７週間のみこのような逆転現象が生じていると思われる．この期間はＲａＣ’のカウント数が4500から5000 (RaC'/h) で安定して，ラドン濃度が約50 (Bq/l)の高い濃度レベルの時期にも重なっている．３月２日以降融雪と水位上昇ににともなって，ＲａＣ’のカウント数は減少を始めている．

一方，Ｎｏ．１７試錐孔のＲａＣ’のカウント数は第１２図からわかるように１月４日の初冠雪とともにカウント数は急に減少を初めて約10分の1と低下し，１月３０日のラドン濃度は約0.06 (Bq/l) の低い濃度レベルとなっている．第１３図より，平成９年１月の期間，Ｎｏ．１７とＮｏ．１０の標高水位を比較すると，水位差約0.85 (m) を保ったままである．このことはＮｏ．１８試錐孔と比べて，ラドン濃度，標高水位ともに非常に対照的である．

約２０ｍしか離れていないＮｏ．１８とＮｏ．１７試錐孔のラドン濃度，標高水位が積雪にともなって，このように異なった時系列データの変化の様子を示している原因はどこにあるのであろうか．Ｎｏ．１８試錐孔の掘進長は10 (m) で，Ｎｏ．１７とＮｏ．１０の25 (m)，30 (m) と比較して浅いことが原因かもしれない．平成８年度夜次露天採掘場跡地の真ん中に地質調査のために掘進長30(m)のＨ１試錐孔を新たにボーリングした．このＨ１試錐孔の柱状図を見ると，深度-30 (m) から-7.7 (m) までは基盤となる花崗岩であり，-7.7 (m) から-2.9 (m) までに黄色状の捨石鉱石があり，特に花崗岩との境界面の深度-7.7 (m) から-7.8 (m) に花崗岩層の約2.5倍の表面線量率0.26 (μ Gy/h) の粘土状沈殿層があることがわかっている．

以上のことからＮｏ．１８試錐孔では，積雪によって，平成９年１月１４日頃から３月２日の約７週間にわたり，動水勾配および地下水流動の様子が大きく変化して，深度-5 (m) から-8 (m) 近傍のラドン源が水中ラドン濃度の増加に影響した可能性があるであろう．



第１７図　平成９年４月１日から平成９年７月２１日の観測期間における，Ｎｏ．１８試錐孔のラドン娘核種ＲａＣ’カウント数と（ａ）日雨量，（ｂ）標高水位の相関図.

（3）日雨量・標高水位と水中ラドン濃度の関係

(観測期間平成９年４月１日から平成９年７月２１日)

この観測期間の特徴は連続したＲａＣ’のカウント数の減衰と,降雨による一時的なカウント数の増加である．第１７（ａ）図はＲａＣ’のカウント数と日雨量の相関図であり，第１７（ｂ）図はＲａＣ’のカウント数とＮｏ．１０，Ｎｏ．１８試錐孔標高水位の相関図である．

これらの図でカウント数データに沿って書き入れた６本の直線は,半減期３．８日のラドンの崩壊曲線である．特に平成９年６月１２日から６月２８日の期間はほとんど雨量もなく，ＲａＣ’のカウント数の減衰は^{222}Ｒｎの崩壊曲線に非常に良く一致した．この事実は水中ラドン検出器が確実にラドンを捉えていることを証明するものである．またこの時期は雨量が無い限り，新たにラドンを供給する要因が無いことを意味する．

第１７（ａ）図で平成９年５月２１日，５月２７日，６月６日，６月２８日，７月８日の５点のカウント数の増加が観測されている．必ずこれらの日付の当日か前日に降雨が記録されている．これら５点以外の５月８日，５月１４日，７月１７日の３点の降雨時については明確なカウント数の増加は見られないが,カウント数の減衰率の低下があり，今後詳しい解析とより多くのデータを集める必要があるであろう．

第１７（ｂ）図では，２点のＮｏ．１８試錐孔標高水位はＮｏ．１０より低い．また（ａ）図の降雨にともなってＮｏ．１０試錐孔標高水位が高くなっていることがわかる．５月２１日，５月２７日，６月６日，６月２８日，７月８日の５点のカウント数の増加時期にともなって，Ｎｏ．１０試錐孔標高水位が高くなっていることもわかる．

代表点として６月２８日について降雨量によるラドン濃度増加率を求める．６月２８日のカウント数は極小値 15.5 (RaC'/h) を示し，降雨量は前後３日間で 147.5 (mm) を記録した．カウント数は急に増加して７月１日に極大値 99.1 (RaC'/h) を示した．これらの値から降雨量によるラドン濃度増加率は約 16 [(Bq/m^3) /mm] となる．この計算では第９表のラドン濃度校正係数 35 [(RaC'/h) / (Bq/l)] を用いた．７月８日についても同様な方法で計算してみると，降雨量によるラドン濃度増加率は約 14 [(Bq/m^3) /mm] となった．

６．　まとめと今後の課題

６・１　まとめ

地下水中のラドンの挙動解析をするために，地下水中の原位置ラドン測定装置の開発とその実用試験を行った．本測定装置は水中ラドン検出部とデータロガー部から構成されている。検出部は直径６０ｍｍ，長さ３００ｍｍで，深さ数１０ｍの試錐孔に直接投入することができ，ラドンガスは開口部に装着されている機能性ガス分離膜を通過して検出部に導入され，ＰＩＮフォトダイオードを用いてラドン娘核種を静電捕集法で検出する．またラドンデータロガー部は商用交流電源のない屋外でも，自動車用鉛蓄電池４個で約６０日間の連続観測ができ，観測終了後は押しボタンスイッチでパソコンにラドンデータを転送することができる．

本装置の実用試験が，平成８年１２月１８日から動燃人形峠事業所内の夜次露天採掘場跡地のNo.１７とNo.１８試錐孔を用いて実施された．No.１７は平成９年１月３１日で終了して，No.１８は約８ヶ月間にわたり現在も継続されている．

また同時にＮｏ．１８モニタリング試錐孔では４回，Ｎｏ．１７モニタリング試錐孔では２回，水をサンプリングして，動燃人形峠事業所安全管理課に測定を依頼して，液体シンチレーション法で水中ラドン濃度を測定した．

Ｎｏ．１８モニタリング試錐孔では合計８回，Ｎｏ．１７モニタリング試錐孔では３回，水位を測定し，水をサンプリングして水温を計った．Ｎｏ．１０試錐孔では以前から原位置水位連続測定を実施しているので，そのデータを使用した．

これらの観測データから次の（１）と（２）の観測事実が判明した．

（１）　平成８年１２月１７日から平成９年３月３１日の観測期間では冠雪と雪解けによる水中ラドン濃度の変動が顕著である．約２０ｍ離れたNo.１８とNo.１７試錐孔の，冠雪による水中ラドン濃度の変化の様子は大きく異なることが判明した．No.１８試錐孔では水中ラドン濃度は約１０倍の５０(Bq/l)に急激に増加し，No.１７試錐孔では水中ラドン濃度は約１０分の１の０．０６(Bq/l) に大きく減少した．

（２）　平成９年４月１日から平成９年７月２１日の観測期間では水中ラドン濃度は^{222}Ｒｎの崩壊曲線に従って減衰する時期と，降雨によって急に増加する時期が繰り返し観測された．No.１８試錐孔においては，降雨による水中ラドン濃

度のはっきりした増加が５例観測された．そのうち，平成９年６月２８日と７月８日の降雨において，日雨量によるラドン濃度増加率を求めてみると，約１５ [(Bq/m^3) /mm] と測定された．

６・２　今後の課題

開発された地下水中原位置ラドン測定装置は，動燃人形峠事業所夜次露天採掘場跡地内のNo.１８試錐孔の水深約１ｍに設置され，約８ヵ月の実用試験で，ラドンの水中での挙動解析に対する十分な成果を提供することが実証された．

今回の実用試験で明らかになり，今後さらに詳しく観測したり，測定装置の改良を行う必要がある点は次の１），２），３）の項目である．

１）本装置を夜次露天採掘場跡地の既設の１８本の試錐孔に順次設置して，本格的な水中ラドン挙動解析と地下水流動解析を目的とした連続観測を実施することが望まれる．

２）水中ラドン検出器の検出効率の水温依存性について，より広い水温範囲で精密な校正実験を実施することが必要である．

３）モニタリング試錐孔には水中ラドン検出器と同時に，水温計、水位計を設置することが重要であり，そのためにはラドンデータロガーに水温・水位などを測定するためのＡＤ変換器を増設することが必要であろう．

７．引用文献

Igarashi,G., Saeki,S., Takahata, N.,Sumikawa,K., Tasaka,S., Sasakai,Y.,Takahashi,M. and Sano,Y.: Ground water radon anomaly before the Kobe Eearthquake in Japan, Science, 269,60-61(1995)

Pereira,B. et al. : ^{222}Rn in the Antarctic Peninsula during 1986, Rad. Prot. Dosimetry, 24, 85-88(1988)

Wakita,H., Nakamura,Y., Notsu,K., Noguchi,M. and Asada,T. : Radon anomaly: A possible precursor of the 1978 Izu-Oshima-kinkai earthquake, Science, 207, 882-883(1980)

小前隆美:ラドンの水循環解析への応用, Radioisotopes, 44, 715-724(1995)

黒澤龍平: 住居環境中のラドン濃度の測定, Radioisotopes, 40, 373-382(1991)

田阪茂樹, 佐々木嘉三 : 岐阜県神岡鉱山における地下水中のラドン濃度の観測(1), 地震, 第２輯, 45, 1-9(1992)

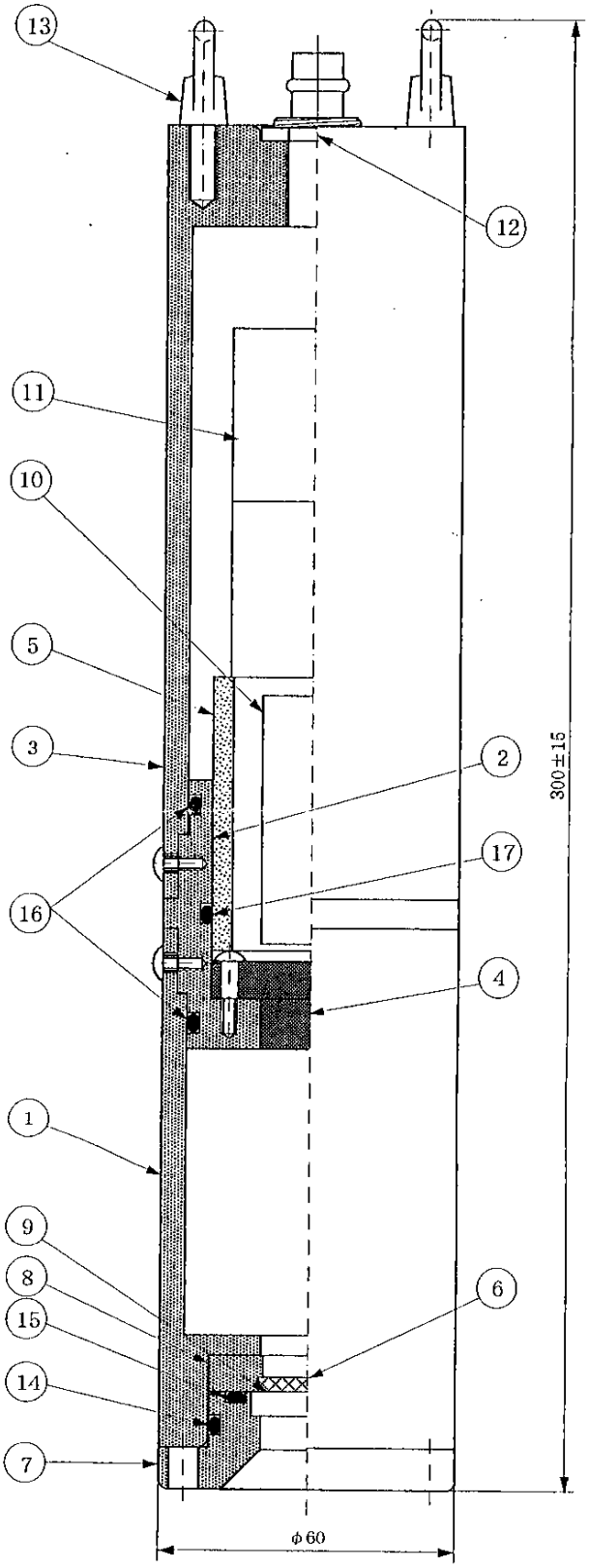
田阪茂樹, 佐々木嘉三, 岡澤裕子, 中川雅人: 水中のラドン検出器の開発, Radioisotopes, 43, 125-133(1994)

田阪茂樹, 佐々木嘉三: 小型ラドンデータロガーの開発, Radioisotopes, 45,741-752(1996)

根本真智子, 田阪茂樹, 堀秀充, 奥村公宏, 梶田隆章, 竹内康雄: 静電捕集型超高感度空気用ラドン検出器の開発, Radioisotopes, 46, 710-719(1997)

古田定昭: 人形峠周辺における水中ラドン濃度,「天然水中ラドン」専門研究会報告書（１９９６年１２月１２日-１３日）,編集:福井正美,堀内公子,京都大学原子炉実験所 KUR REPORT(KURRI-KR-6), 37-42(1997)

添付書類
原位置水中ラドン検出器の設計図



番号	名称	個数	材質
17	Oリング　G−40	1	バイトン
16	Oリング　G−45	2	バイトン
15	Oリング　G−25	1	バイトン
14	Oリング　G−35	1	バイトン
13	アイボルトM6	2	SUS
12	水中コネクタ	1	
11	積層形乾電池　120V	1	
10	ラドンセンサアンプ	1	
9	防水フィルム	1	ポリプロピレン
8	フィルタ押さえ	1	Bs
7	フタ	1	Bs
6	焼結金属フィルタ	1	SUS
5	アンプカバー	1	風デルリン
4	センサホルダ	1	セラミック
3	本体c	1	Bs
2	本体b	1	Bs
1	本体a	1	Bs

株式会社　離合社	承認		調査	製図	尺度	×	×	1996年3月11日 全　葉中第　葉
機械名	ラドン計		図名	総体図		図番	C−95287−b	