

最終報告書

平成 24 年 9 月 27 日

山梨大学名誉教授

鈴木 嘉彦



概要

実証実験から推測される現場での通電と水の状況

1. 明野最終処分場において漏水検知システムが作動した時の「電流の位相が電圧の位相より遅れる」通電（以下「明野型通電」と略記）は、静電気力により荷電物質が遮水シートを通り抜けることにより発現したものと考えられる。
2. 現場において遮水シートへの荷重がさらに増大すると電極同士が直接接触するに至るが、明野型通電は直接接触にいたる二段階前の大きさの荷重による通電として発現したものと考えられる。明野型通電が観測されるときでも、測定電圧が印加されていない時は、上下電極間の孔に水が充填される状況にはならない、つまり漏水にはなっていない。

実証実験で得られた重要な知見

1. 銅板電極を用いた予備実験の結果：実験装置の大きさの関係で、現場の完全な形での再現は不可能である。つまり、浸出水と雨水による遮水シートに対する等価的な電極としての機能は、本実証実験では再現できない。
2. 孔があいた遮水シートを用いた実験（昨年の実験で上下の電極に大きな荷重をかけて孔が開いたシートを遮水シートとして利用した実験）

前提：上下の不織布に浸出水と雨水が十分含まれ、荷重は全体に均一にかける。

結果：6通りの通電パターンが発現した。荷重および印加電圧の大きさにより、通電パターン1から4が観測された。荷重が増大するとパターン5の電極同士の直接接触に至った。電極同士が直接接触し孔が開いた直後に、無荷重に戻した状態で直流であるパターン6が発現した。

なお本実証実験では明野型通電の様相は再現されなかった。

- ・パターン1：絶縁状態（図6）
- ・パターン2：遮水シートが電気抵抗として機能し通電する場合（図7）
- ・パターン3：遮水シートの孔に水が充填し、水が抵抗と容量の機能を有する場合（図8，図9）
- ・パターン4：電極間の孔を水が充填し、水の電気抵抗により通電する場合（図10，図11）
- ・パターン5：測定電極同士が直接接触して通電する場合（図12）
- ・パターン6：非線形現象として直流電流が流れる場合（図13）

7月25日実施の実証実験の結果と導かれる結論

1. 実験方法

・図1に示されるように遮水シートの上下に不織布を配置し、上の不織布には現場と同じ浸出水を、下の不織布には雨水を十分含ませる。実験は現場の等価電気回路である図2を想定して遮水シートの等価インピーダンスを測定することを目的に実施する。具体的な実証実験は、図3に示される通り、遮水シートの上下に直交するように電極を配置する。下側の電極の一方の端子を開放し、他方に可変周波数の電源を接続して接地する。上側の電極は一方の端子を開放し、他方の端子に 1Ω の抵抗を直列に接続し、接地する。（ 1Ω の抵抗は測定電極および測定ケーブル全体の抵抗分である。）測定電流が大きくなった場合は、 1Ω の抵抗を 100Ω に交換して実験を行う。

・アムスラーを用いて遮水シートを挟んだ上下電極全体に荷重をかける。注意すべきことは、安全管理委員会が昨年実施した電極の交差する付近への集中的な荷重のかけ方ではなく、現地の状況に近くなるよう、遮水シートに均一に力が加えられるような荷重方法を採用していることである。広い面積で均一に荷重を加えるのは容易ではないが、可能な限り広い面積での均一加重による実験を行う。

・電源電圧は、 1V もしくは 5V 、周波数 ω は 80Hz とする。

・上側の測定電極の電流値を測定するため、上側の測定電極に直列に挿入された 1Ω の抵抗の端子電圧と電源電圧をオシロスコープで計測し、電流値だけでなく、電源電圧波形と電流波形の位相差を計測する。必要に応じて抵抗の値を 100Ω とする。

実験1：遮水シートの電気的特性を測定するための銅板電極を用いた予備実験

アムスラーを用いて遮水シートを挟んだ上下におよそ 40cm 四方の平板電極を配置し、上下の電極の全体に荷重をかける。電源電圧を 5V とし、加重の変化に対する電流値を測定する。

実験2：昨年度の実験で通電を確認した損傷がある遮水シートを用いた通電実験

電極の上下には不織布を配置し、図1に示す実際の処分場と同じ構成とする。上側の不織布には現場で採取した浸出水を、水がしたたる程度に十分含ませる。下側の不織布には事前に採取しておいた雨水を現場と同程度含ませる。実験1の結果から、新しい遮水シートを用いた実験では現場を再現することは不可能であることが明確になった。このため新しい遮水シートを用いるのではなく、安全管理委員会が昨年実施し、大きな荷重により電極同士が直接接触することにより通電が観測された遮水シートを利用し、通電特性を測定する。つまり、電極同士の直接接触により孔が開いた遮水シートを利用し、荷重および印加電圧を変化させて通電の様相を測定する。

2. 実験結果

2.1 実験1の結果

・図4、図5に示される通り、オシロスコープでは測定できない微弱電流であった。つまり、現場で測定されている電流より一桁ないし二桁低い電流値しか測定できなかった。

実験 1 の結果から導かれる結論

・現場では不織布中の水により形成される平行平板電極の半径は最大で 4m となっている可能性がある。しかし実証実験では 1 辺 40 cm 程度の正方形の大きさまでしか設置できない。つまり電極の面積で計算すると本実験装置は現場の 100 分の 1 以下の広さである。この結果、本実験装置では完全な形では現場を再現できないことを意味する。よって、損傷のない遮水シートに荷重を加える過程では、現場を再現することはできないことが明らかとなった。

2. 2 実験 2 の結果

オシロスコープによる測定結果から、通電には少なくとも 6 つのパターンが存在することが実証された。6 つのパターンは以下の通りである。まず荷重が増大するもしくは印加電圧が増大することにより、パターン 1 からパターン 4 のような様相の通電が発現する。さらに荷重が増大するとパターン 5 のように、電極同士が直接接触する。パターン 6 は電極同士が直接接触し孔が開いた直後に、無荷重に戻した状況で発現する特殊な通電パターンである。なお実証実験では明野型通電の様相は再現されなかった。

・パターン 1 : 絶縁状態 (図 6) : 荷重 5 kN、印加電圧 1V、負荷抵抗 1Ω で電流値が 50 μA 以下であり絶縁状態と考えられる。

・パターン 2 : 遮水シートが電気抵抗として機能し通電する場合 (図 7) : 荷重 10 kN、印加電圧 1V、負荷抵抗 1Ω で振幅が 0.25mA 程度の微弱の電流が流れる。電源電圧と測定電流はほぼ同位相 (電圧波形の山と電流波形の山がほぼ一致している) 場合。

・パターン 3 : 遮水シートの孔を水が充填し、水が抵抗と容量の両方の機能を有する場合 (図 8, 図 9) : 荷重 15 kN もしくは荷重 20 kN、印加電圧 1V、負荷抵抗 1Ω で振幅 40mA 程度の電流が流れ、電流の位相は電圧の位相より進んでいる (電圧波形の山より電流波形の山が前 (左側) にある) 場合。

・パターン 4 : 電極間の孔を水が充填し、水の電気抵抗により通電する場合 (図 10, 図 11) : 荷重 5 kN、印加電圧 5V、負荷抵抗 1Ω で 200mA 程度、荷重 10 kN、負荷抵抗 100Ω で 60mA 程度の電流が流れ、電圧と電流はほぼ同位相の場合。

・パターン 5 : 測定電極同士が直接接触して通電する場合 (図 12) : 荷重 30 kN、印加電圧 5V、負荷抵抗 100Ω で測定電極同士が直接接触して電流が流れる (電流値と挿入抵抗の積が印加電圧と一致し、遮水シートの抵抗が 0 となる) 場合。

・パターン 6 : 非線形現象として直流電流が流れる場合 (図 13) : 荷重 0 kN、印加電圧 5V、負荷抵抗 100Ω で、交流電圧を印加しているにもかかわらず直流電流が流れる場合。

2. 3 現場の測定データと実証データから導かれる結果

参考資料 4 に示される通り、異常が検知される前の平成 22 年 10 月 2 日 (土) の午前 9 時における測定データにおいては、電流の位相は電圧の位相に対して進んでいる (異相分の数値がプラス)。これに対して、参考資料 1、2 に示される通り、異常が検知された平成 22 年 10 月 2 日 (土) の午後 5 時以降においては、位相が逆転し、電流の位相が電圧の位相よりも遅れている (異相分の数値がマイナス)。この現象が明野型通電である。

実証実験 1 から明らかのように、異常が検知される前の現場の、広い面積を持つ電極による電流

の様相は再現できない。つまり、異常が検知される前の遮水シートの電氣的なキャパシタンス電流は再現できない。このため遮水シートの電氣的特性により電流の位相が電圧の位相より進んでいる状況は再現できず、パターン 2 のように遮水シートが電流の位相と電圧の位相が同相である電氣的抵抗として発現している。

また、明野型通電の特徴である、電流の位相が電圧の位相よりも遅れる様相についても実証実験のオシロスコープのデータからは観測されていない。つまり、実証実験で観測された 6 つの通電パターンには明野型通電の様相は含まれていない。

しかし、パターン 6 が発現していること、および、図 17 に模式的に描かれているように、浸出水が電極間に充填するパターンが存在することから、図 16 もしくは図 19 のような形で、浸出水が荷電物質となり、静電氣力によって遮水シートを通り抜けることは十分考えられる。この場合の通電様相は、以下の考察で「理論的」に示すとおり、電流の位相が電圧の位相より遅れる明野型通電である。このことから、本実証で観測されたパターン 2 とパターン 3 の間の大きさの荷重において、明野型通電が出現する可能性がある。ただし、明野型通電は、下記の理論的考察から明らかなように、浸出水が物質として孔を通り抜ける状態であり、通り抜ける量が多くなると、水が電極間に充填してしまう。このため、観測するのが難しいと考えられる。なお、明野最終処分場の漏水検知システムを技術的に提供している坂田電機によると、全国の漏水検知システムで異常が検知された際、明野型通電が観測されるのは、全体の 10-20%ということである。このことから、明野型通電の実験による再現は難しいことが分かる。しかし、遮水シートに含まれる水量、荷重の大きさ、印加電圧の大きさなどの組み合わせにより、発現することも確かである、といえる。

3. 考察

3. 1 実験を実施するにあたって立てた仮説

7月25日に実施された実証実験は以下の仮説を検証するために行われた。

- ・遮水シートの上下の電極および不織布に荷重がかかっており、不織布に含まれる水の量が変化すると、測定電極の周りの電氣的特性を変化させる。
- ・不織布中の水の量が増大すると、電極の周りに遮水シートを挟んで平行平板電極が形成される。この結果、電極の広さ、電極間の距離により、遮水シートの抵抗、キャパシタンスの値が変化する。
- ・不織布中の水の量が増大すると、測定電極間の抵抗値が変化する。
- ・降雨、もしくは散水、また水の排水や蒸発により上側の不織布の浸出水の量が時間とともに変化する。
- ・遮水シートの下側の不織布には施工時点での雨水がたまっており、これが隣り合った電極間の抵抗として機能している。
- ・異常発生箇所の斜め上方で前日まで盛土が行われるとともに、散水が行われた。散水の結果、適当の時間が経過した後、水の浸透により遮水シートの上側の不織布の浸出水が増量した。その結果、大きな平行平板電極が形成されるようになり、相当に広い面積の電極が構成され、大きな値のキャパシタが形成された。この結果電極間に電荷が蓄えられる状況となった。
- ・遮水シートの上下の電極が交差する部分で、何らかの原因により遮水シートがごく薄くなる様な変形が起こった。(このシートが薄くなる変形が、異常検知時点で発生したものか、以前から何らかの原因で薄くなっていたのかは確認できない。)

・シートが局所的に薄くなった部分では、遮水シートの上の浸出水と下の雨水により、シートの上下に電極が構成され、局所的に電界の強さが非常に大きい部分が生み出された。

・相当に広くなった平行平板電極部分で、浸出水の量がさらに増大すると、遮水シートの上側の浸出水が自由に移動できるような状態となる。平板電極で生成された荷電物質（水）が、局所的に電界の強さが非常に大きくなった箇所で、静電気力をうけて遮水シートを通り抜け、遮水シートの固有な抵抗とは別の抵抗分として機能する。

・結果的に、荷電物質が遮水シートを通り抜けることにより、異常電流が検知される。ただし、印加電圧が加えられていない時は、静電気力が働かないため、遮水シートの間を荷電物質（水）は流れないと考えられる。

3. 2 実証実験の結果の考察

前節に示した仮説と本実験結果との関係を考察する。

3. 2. 1 パターン 1 と 2

実証実験において観測されたパターン 1（図 6）とパターン 2（図 7）の電流は、荷重が少なく印加電圧も低い状況で発現している。パターン 1 は図 14 に模式的に示される通り、荷重が小さいため電極間に空隙が多く絶縁状態を表しているものである。またパターン 2 は図 15 に模式的に示される通り、荷重が絶縁状態より増大することにより、上下の測定電極間の周りに比較的大きな水による電極ができることにより、遮水シートが絶縁状態から電氣的抵抗として機能する状況となり発現する電流と考えることができる。

3. 2. 2 パターン 3 と 4

パターン 1 と 2 の印加電圧を変化させず、荷重だけを大きくしていくと図 8、図 9 のパターン 3 が発現する。また、パターン 1 もしくはパターン 2 と同じ荷重で、それぞれ印加電圧だけを大きくすると、図 10 もしくは図 11 のようなパターン 4 の様相が発現する。パターン 3 と 4 は、パターン 2 より流れる電流が二桁以上大きくなっている。これは図 17 に模式的に示されるように、電極間と孔に浸出水が充填されている状態で、遮水シートに替わり、水を媒体とした通電が発現していると考えられる。

パターン 3 は電流の位相が電圧の位相より進んでいる。これに対してパターン 4 は電流と電圧の位相がほぼ一致している。これらの違いは、電極間の距離が関係している。パターン 3 では、荷重が大きくなっているため電極間の距離が短くなり、水の抵抗だけでなく、水自身の誘電率によりキャパシタとしての機能が発現している結果と考えられる。パターン 4 では荷重が小さく電極間の距離が長いので主として抵抗として機能している。

図 7 のパターン 2 と図 11 のパターン 4 から重要な結果が導かれる。図 7 と図 11 の実験はいずれも荷重 10 kN での観測結果である。この 10 kN は明野の最終処分場で漏水検知システムが異常を検知したときの廃棄物による荷重とほぼ同じ大きさと考えられる。明野の現場では測定電圧は 5 V であった。図 11 では現場とは異なり、抵抗 100 Ω が挿入されている。挿入抵抗が 100 Ω でなく、現場と同じ約 1 Ω であるとする、360 mA 流れることになる。つまり現場の直流計の測定限界を超える大きな電流が流れる。これに対して、印加電圧は 1 V ではパターン 2 が発現する。つまり印加電圧が 1 V においては荷重 10 kN でも、遮水シートの孔を水が充填するような状況にはならないことを意味している。最終処分場の現場では、漏水検知のための測定時以外では電極間に電圧は印加されてい

ない。つまり測定時以外では、印加電圧は0 Vである。よって、現場では5 Vの測定が行われていないときは、遮水シートの孔が水が充填していない。つまり測定時以外では「漏水の状態ではなかった」と判断できる。

電極間に水が充填して発現する通電パターンは、本実験のように小さな孔で起きるだけではない。何らかの原因で大きな孔が開き漏水する場合も水が充填している。つまり、最終処分場における一般的に「漏水」として位置づけられる通電パターンはこのパターン4である。

3. 2. 3 パターン5

パターン3もしくは4より、さらに荷重を大きくする（本実験では30 k N）と電極同士が直接接触する。この結果、電極間の抵抗値がゼロとなり、測定ケーブルと電極自身の抵抗によって決まる最大電流が流れる。

直接接触が起こった時の荷重の大きさは30 k Nであるが、本実験では40 cm四方の広さの中心部分に荷重がかけられている。この荷重は不織布を通して遮水シートに加えているが、遮水シートと不織布の間に配置された金属である測定電極に荷重の多くが集中してかかることになる。この電極への荷重集中の割合については、本実験では確認できない。このため電極同士が直接接触したとき、上下の電極に具体的にどの程度の荷重がかかっていたのかは明確でない。参考として、昨年実施された原因究明調査結果（参考資料5）を引用すると、埋め立て完了時の荷重に対して約29倍から約60倍がかかったとき電極同士の直接接触が起こっている。このことから最終処分場においては、自然の状態での廃棄物による荷重では、電極同士が直接接触するパターン5は発現しない、と考えることができる。

3. 2. 4 パターン6と静電気力による通電

パターン6は通常は観測されるような波形ではない。つまり、交流電圧をかけているにもかかわらず直流電流が観測されている。このパターン6が発現した理由と、本実験で実証できなかった明野型通電は深い関係がある。これまで明野型通電である「進み位相が遅れ位相に逆転する」現象についての明確な分析はおこなわれていなかった。そこで明野型通電が、静電気力によって生じる通電として発現可能であることを明確にする。

明野最終処分場では、平常時図2の等価回路から明らかなように、測定される電流は電源電圧の位相よりも進む。これに対して、異常が検知された時には、参考資料1から明らかとなり、明野型通電となった（参考資料1, 2, 4において、異相分の符号がプラスの場合が電流の位相が電圧の位相より進んでいる場合であり、符号がマイナスの場合は位相が遅れている明野型通電の場合である）。

位相の逆転を説明することが可能なのが、仮説において説明した「静電気力によって生まれる通電」の形態で、具体的には「荷電物質が遮水シートを通り抜ける」ことによって発現すると考えられる通電パターンである。この通電の様相は、浸出水の状況を考慮すると、実証実験におけるパターン2とパターン3、4の間の荷重で、しかも限られた孔の大きさのもとで発現するパターンと考えられる。

参考資料4から明野最終処分場で、異常が検知される前の、遮水シートの上下の電極間の電圧Vと遮水シートを流れる電流Iは、図2の等価回路の中の遮水シートの等価インピーダンスZにかかる電圧Vと流れる電流Iである。よって等価アドミタンスYを用いて表現すると

$$(1) \quad I = YV = (1/R + j\omega C)V$$

となり、Iの位相はVの位相よりも進む（式(1)において $j\omega C$ の係数がプラスが位相が進んでいることを意味する）。ただしRは等価抵抗、Cは等価キャパシタンスである。

実証実験においては、最終処分場の様な広い面積の電極を配置できないため、キャパシタンスが小さい値となり、抵抗成分だけが機能しているため、パターン 2 のように、位相の進みは観測されていない。電流の位相が電圧の位相より進んでいるというのは、交流の波形でみると、図 8, 図 9 にみられるように電圧波形の山のピークより電流波形の山のピークが前（左側）にある場合である。

これに対して、参考資料 1 から明らかなように、明野の最終処分場で異常が検知された時点では、電流の位相が電圧よりも遅れている。これは図 2 の等価回路における等価アドミタンス Y のような回路では説明できない結果である。

電流の位相が電圧の位相より遅れるような現象は、図 16 に示すとおり、静電気力によって生み出される荷電物質に働く力学的な力 F によって生まれる荷電物質の運動の結果として説明可能である。

荷電物質に働く静電気力 F は

$$\text{静電気力 (F)} = \text{電荷 (Q)} \times \text{電界強度 (E)}$$

である。ここで電界強度 E は電極が平行平板であると仮定すると

$$E = V_E \div d$$

で与えられる。ただし、 V_E は電極間の電圧、 d は上下の電極間の距離である。

この静電気力によって生まれる質量 M の荷電物質の運動方程式は

$$(2) \quad M \frac{dV_m}{dt} + R V_m = F$$

ここで、 V_m は荷電物質の力学的な意味での移動速度、 R は力学的な抵抗、 F は前述の静電気力である。また荷電物質の移動によって生み出される電流 I は

$$(3) \quad I \cong Q \cdot V_m$$

で与えられると考えることができる。

ここで注意する必要があるのは静電気力が働く電荷 Q である。静電気力によって移動可能となる電荷 Q は、大別して二通りの生成が考えられる。

一つは静電気力が働く場の近傍から浸出水によって供給される場合で、この場合、 Q は V_E とは独立した値となると考えられる。もう一つの場合は、静電気力そのものによって直接電荷 Q が生成される場合である。この場合は電荷 Q は V_E に依存する。

はじめに第一の V_E とは独立に電荷 Q が供給される場合を考える。運動方程式は

$$(4) \quad M \frac{dV_m}{dt} + R V_m = Q \cdot \frac{V_E}{d}$$

となる。 M 、 R 、 Q が定数とすると、線形定係数の微分方程式であり、線形定係数システムの固有関数 $e^{j\omega t}$ により、定常解析すると、 V_m は

$$(j \omega M + R) V_m = Q \cdot \frac{V_E}{d}$$

$$(5) \quad V_m = Q \cdot \frac{V_E}{d} / (j \omega M + R)$$

で与えられる。よって電流 I は

$$(6) \quad I \cong Q \cdot V_m = Q^2 \cdot \frac{V_E}{d} / (j \omega M + R)$$

$$= Q \cdot 2 \frac{R - j \omega M}{R^2 + \omega^2 M^2} \cdot \frac{V_E}{d}$$

となり、電流 I の位相は電圧 V_E に対して遅れる ($j \omega M$ の係数がマイナス) ことになる。

ここで注目すべき点は、平常時の式 (1) で示される電流 I は電圧 V_E に対して位相が進んでいる ($j \omega C$ の係数がプラス) のに対して、式 (6) で示される電流 I は位相が遅れる点である。

つまり実証実験においては観測されていないが、静電気力によって荷電物質が力学的な抵抗のある場を移動すると、これによって流れる電流の位相は電圧の位相よりも遅れることになる。この結果から、明野の最終処分場の現場で異常が検知された時点での、明野型通電の様相は、静電気力により荷電物質の遮水シートを通り抜けることによって引き起こされた通電パターンと考えることができる。

本実験は、およそ一年前に行われた実験において大きな荷重をかけ上下電極が直接接触することによってできた孔が存在する遮水シートを用いて実験を行った。このため、孔の位置に関しては、本実験で遮水シートの上下に配置された測定用電極の交差する位置と、昨年の実験で開いた孔の位置は一致していない。つまり、もっとも電界の強さが大きくなり電荷を供給すると考えられる場所と、荷電物質が遮水シートを通り抜ける孔の開いた場所が一致していない。よって荷電物質の生成場所と静電気力が働く場が異なり、電荷 Q が電圧 V_E 独立であるという前述の条件を満足する中で実験が行われ

たとえられる。しかし、実証実験の結果からは、明野型通電のパターンは観測されなかった。このパターンは、遮水シートの孔を通して荷電物質 (水) が個別の物質として通り抜ける状態で発現するものあり、荷重や静電気力がこの状況より少し大きくなると水が電極間に充填してしまう。このため、このパターンを再現することは簡単でない。荷重を厳密に変化することができない実証実験では、再現できなかった要因はここにあると考えられる。明野最終処分場の漏水検知システムを担当している坂田電機によると、「漏水検知時点で、明野型通電が発現するのは、全体の 10-20%」ということである。このように発現の確率が低い現象であることから、今回の実験で実証できなかったと考えられる。しかし、上記考察からも明らかなように、図 17 のように、電極間の孔に水が充填する前に、図 16 の様な状態が存在し、電流の位相が電圧の位相よりも遅れる通電パターンが発現することは十分考えられる。

電荷 Q の生成の形態のもう一つの場合、つまり静電気力が働いている場で電荷が生成される場合はさらに複雑な通電の様相が考えられる。静電気力が働く場と電荷 Q が生成される場が共通している場合、 Q は

$$Q \cong C \cdot V_E$$

で与えられる。ここで C は電極間の容量である。この場合、静電気力 F は

$$(7) \quad F \cong C \cdot \frac{V_E^2}{d}$$

となる。つまり、静電気力 F は電圧 V_E の二乗に比例する。

電源電圧 V_E が正弦波であると考えたと

$$V_E = V_0 \cdot \cos \omega t$$

として、 V_E^2 は

$$(8) \quad V_E^2 = \frac{1}{2} V_0^2 (1 + \cos 2\omega t) \geq 0$$

となる。この結果、静電気力 F は電源電圧の振幅の二乗 V_0^2 に比例する正の値を持った力となる。

この場合は、電圧波形として、直流分が存在するだけでなく、第二次高調波である $\cos 2\omega t$ が発生する。

パターン 6 は、荷電物質を生成する場と、静電気力が働く場が一致していることにより発現したと考えられる。パターン 6 が発現したのは、遮水シートに対して荷重を 30 kN まで増大させ、電極同士が直接接触したパターン 5 が発現した直後である。つまり、パターン 1 から 4 までの通電に関わった孔とは別に、電極同士が直接接触することにより、新たに孔が作られた直後、荷重を 0 kN に戻した状況での通電の様相である。この状況は、遮水シートに手を加えていないので、新たに開いた孔の位置は上下の電極が交差する位置と一致していると考えられる。つまりパターン 6 が発現している状況は、荷電物質が生成されている場所と静電気力が直接影響する場所とが一致していると考えることができる。よって静電気力 F は式 (7) のような恒に正の値をもった力として作用していると考えられる。

さらにパターン 6 においては、荷重は 0 kN の無荷重なので、遮水シートにほとんど荷重がかかっていない。よって電極間に空隙が存在する。この状態で 5 V の電圧が電極間に印加されると、電極が交差する付近の、+ と - のイオンを含んだ水が、静電気力によって引き裂かれ、荷電物質が生成される。さらに引き裂かれて誕生した荷電物質は、空隙中を移動することにより静電気力により加速され、運動エネルギーを持つ。

一方遮水シートは、パターン 6 の直前に、電極同士が直接接触し孔が開く状況になっていた。このため、荷重がほぼゼロの状態に戻されたものの、遮水シートには小さい孔が残っていたと考えられる。この小さな孔は一定以上の力と運動エネルギーを持っている物質だけを一定量だけ通過させる機能を保持しており、これらの条件を満足する荷電物質が一定量この孔を通り抜けることによりパターン 6 の様に直流電流として観測されることができると考えることができる。

式 (8) から、静電気力は直流成分の他、第二次高調波を含むと考えられる。今回の実証実験では、高調波成分が直接影響する電流は観測されていない。しかし、実験条件を変える、たとえば孔の大きさが少し大きくなることによって、高調波の影響が観測される可能性がある。

静電気力が電圧の二乗に比例するという性質は、現場で観測されたデータである参考資料 2, 3 と整合する。参考資料 2 は異常検出時に電源電圧 5 V で観測された結果である。これに対して参考資料 3 は同じ時点で、電圧を 1 V に下げての観測結果である。電圧 5 V に対する測定結果と 1 V に対する測定結果は、対象が線形であれば、電流は電圧の大きさに比例するはずである。つまり、5 V に対して 1 V では電流値が 5 分の 1 に下がるはずである。ところが参考資料 2 に対して参考資料 3 の値は、測定限界を超えた場所では比較できないが、計測データが残っているたとえば (D21, U20) では 5 V の場合 13.42 に対して 1 V では 0.41 であり、(D23, U22) では 5 V で 18.05 に対して 1 V では 0.47 である。その比率はいずれも 25 分の 1 以下である。このことから、現場で計測されたデータから、異常が検知された時点での現象は、電圧に比例する線形現象ではなく、電圧の二乗に比例する非線形現象と解釈する方が適当と言える。現場の観測では、電圧波形や電流波形そのものは記録されてい

いため、明野型通電パターンの正確な議論は不可能である。しかし、残されたデータからは、前述した静電気力により荷電物質が遮水シートを通り抜けたことによる通電の可能性が高いと言える。この意味からも、異常が検知された場合は電源電圧と電流の波形をオシロスコープで観察することが大きな意味を持つてくると言える。

さらに高調波の発生の問題もあるが、これ以上のさらなる分析は本報告書の目的を越えると考えられるので、ここではこのような高調波の発生の可能性を記述するにとどめておく。

3. 3 仮説の検証結果と結論

「明野の最終処分場で漏水検知システムが作動した要因は、静電気力により遮水シートを荷電物質が通り抜けることによる通電」という仮説を実証できる実験結果は得られなかった。検知システムが作動した時点で観測された明野型通電の様相が実験では再現しなかったためである。実験によってでは、実証できていないが、明野型通電パターンが現場で観測されていること、理論的に発現の可能性が示されること、パターン 6 という特殊な通電パターンが静電気力により説明できること、現場の観測データから異常検知時点では電圧の二乗に比例するようなデータが存在することから、以下を本報告の結論とする。

漏水検知システムが明野型通電として異常を検知したのは

- ・何らかの要因で「遮水シートには漏水には至らない程度の大きさの孔が開いていた」、
- ・遮水シートへの荷重が増大し、不織布に含まれる浸出水が増加した時点で「静電気力により遮水シートの孔を荷電物質が通り抜け通電した」、ことによる。

また、

- ・安全管理委員会が通電要因とした「電極同士の直接接触」が要因ではない
 - ・異常が検知された当時、遮水シートでの漏水は起こっていなかった
- ことが実証されているので、これらをあわせて考察の結論とする。

追記：「電気回路上アースされている測定線が陽極として働くことはない」について

本実証実験とは直接には関わらないが、2011 年 10 月 7 日に山梨大学坂野斎助教から提出された疑問の一つである「電気回路上アースされている測定線が陽極として働くことはない」について簡単に説明する。坂野斎助教の指摘通り、測定電極が接地されていると、通常はゼロ電位であるから陽極として機能することはない。しかし、明野最終処分場における漏水検知システムでは、測定用電圧源から測定用の電流計の間には遮水シート以外には抵抗が接続されていない。この結果、測定電極自身および接続ケーブルの抵抗が回路の抵抗で、合計しても $1\ \Omega$ 程度である。このため、漏水検知時のように遮水シートのインピーダンスが小さくなると、電源電圧が $5\ \text{V}$ であっても電流計の測定限界 $40\ \text{mA}$ を大幅に超えるような大きな電流が流れる。また、測定ケーブルの抵抗に比較すると測定電極の抵抗が一桁小さいため、遮水シートの上側の測定電極の電圧は電源電圧の半分くらいの大きさとなる。この結果、測定電極が他の電極に対する電圧源（陽極）として働く。さらに上側の測定電極の間には浸出水が満ちており、この浸出水が抵抗として機能するので、他の測定電極との間に電流が流れる。この電流が検知システムで観測されたものとなっている。

以上のような測定電極間の通電を抑制するために、漏水検知システムで異常が検知された場合には電源電圧と測定ケーブルの間に適当な保護抵抗（ $150\ \Omega$ 程度）を挿入することが望まれる。保護抵抗

を電圧電源とケーブルの間に挿入することにより、上側の接地された測定電極の電圧はほぼ0 Vになり、他の測定電極の電圧源として機能することはほとんどなくなる。さらに、保護抵抗の端子電圧と電源電圧をオシロスコープで観測することにより、電圧と電流の位相関係を確認でき、通電の様相を明確にすることができる。なお、保護抵抗をあらかじめ挿入しておく、漏水検知機能の感度を低下させる可能性がある。

4. 結論

実証実験の結果と考察から導かれる結論は以下である。

結論 1：通電要因と現場の状況

1. 漏水検知システムにおける異常検知作動の遠因は「遮水シートに漏水には至らない程度の大きさの孔が開いていた」ことにある。
2. 遮水シートに孔が存在する場合、上下の不織布に含まれる水の量、遮水シートへの荷重の大きさ、および測定電極への印加電圧の大きさによって、漏水検知システムが異常を検知する。
3. 通電のパターンは少なくとも、実験で確認された6通りのパターンと、現場で観測された明野型通電パターンの7つ存在する。
4. 明野型通電パターンは、荷重により測定電極が直接接触するに至る二段階前の状況として発現したものであり、電極間と遮水シートの孔に水が充填する一段階前の状況で、静電気力により荷電物質（水）が遮水シートの孔を通り抜けることによって通電したものと考えられる。
5. 実証実験図7の、荷重10 kN、印加電圧1V、負荷抵抗1Ωでは、遮水シートの孔を通した水による通電は起こっていないこと、および、異常が検知された時点の明野型通電パターンは水が電極間を充填する一段階前であることから、異常検知時点では「漏水は起こっていなかった」と結論される。

結論 2：漏水検知システムの機能と異常検知時の対応

1. 現場の漏水検知システムは「遮水シートに漏水には至らない程度の大きさの孔が開いていた」ことを明らかにできるような通電の状況に関する情報を提供している。その意味で検知システムとしての機能を果たしていた。
2. 異常が検知されて以降の対応においては、漏水検知システムが提供する情報の活用および分析が十分ではなかった。特に測定用電圧が交流であるにもかかわらず、交流回路としての考察が行われなかった。
3. 今後漏水検知システムが異常を検知した場合、以下の措置により、通電の様相を確認して、対応することが考えられる。
 - ・測定用電圧源とケーブルの間に保護抵抗（150Ω程度）を挿入し、通電電流を抑制する。また保護抵抗の端子電圧と測定用電圧電源をオシロスコープで観察する。振幅および位相関係から、異常が発生した状況における通電パターンを観測し、遮水シートの孔、不織布の水などがどのような状況となっているか明確にし

たうえて、それぞれにふさわしい対応をする。

参考

実証実験で得られたその他重要な知見

- ・現場で発生していると考えられる、広い面積での浸出水と雨水による通常の状態の完全な形での再現は不可能であること

参考資料

参考資料 1：平成 22 年 10 月 2 日（土）17 時 00 分定時測定（5V 測定）、および同相分&異相分

参考資料 2：平成 22 年 10 月 4 日（月）9 時 00 分定時測定（5V 測定）、および同相分&異相分

参考資料 3：平成 22 年 10 月 4 日（月）19 時 45 分定時測定（1V 測定）

参考資料 4：平成 22 年 10 月 2 日（土）9 時 00 分定時測定（5V 測定）、および同相分&異相分

参考資料 5：漏水検知システムによる異常検知に関する原因究明調査結果（データ整理版）