

遮水シート異常検知箇所における通電要因分析のための実験

平成 24 年 7 月 25 日

山梨大学名誉教授 鈴木 嘉彦

概要

実証実験実施の前提

・異常電流検知の要因

安全管理委員会が結論した「測定電極の直接接触によって測定回路に電流が流れた」という推測は成り立たない。つまり、異常検知の要因は電極同士の直接接触によるものではない。

漏水検知システムについて

・異常は検知できたので、漏水検知システムとしての機能は果たした。しかし異常検知時において、電流計の測定限界を超えた電流が流れ、正確な値を測定できなかった。このため、異常発生要因分析が十分行えなかった。

・測定電流に関して、80Hzの交流電圧源を使用しているにもかかわらず、電源電圧と同相分だけに注目し、90度異相分についての検証が不十分であった。このため、安全管理委員会が誤った結論を導く結果となった。

これまでの分析、実証実験で検討・検証が行われなかった事項

1. 交流回路であるにもかかわらず、等価回路の分析において、アドミッタンス（インピーダンス）の内、コンダクタンス（抵抗）だけに注目し、サセプタンス（リアクタンス）について考察しなかった点。
2. 実証実験において、上下の不織布に含まれる浸出水、雨水に関して、十分な検討がされなかった点。特に実証実験において、下の不織布に雨水を含ませていなかった点。
3. 実証実験において電圧5V80Hzの電圧源と直列に50Ωの抵抗を挿入し、上側の測定電極にも50Ωの抵抗を直列に挿入して実験を行った。このため、現場の遮水シートの上下の電極の電位差に比較して相当に低い電位差で通電実験を行ったことになる。このため現場の電氣的な状況とは相当に異なった結果が測定されていると考えられる。
4. 異常検知前の測定電流の分布データにおいて検出される、場所による電流値の違いの特性について考察されなかった点。
5. 異常が検出された時点で、特別な加重が加えられていないにもかかわらず、異常が発生した要因について考察されていない点。
6. はじめの異常検知から、40時間後の異常状態の測定電流の結果に関して、場所によって大きな変化が現れているのに対して、考察がされていない点。
7. 異常検知の状態では、測定のための電圧源の印加電圧を5Vから1Vに変更した際、測定電流に電圧依存性と言える現象が現れているが、この点に関しての考察が行われていない点。

本実験を実施するにあたっての仮説：想定している異常電流通電要因

- ・遮水シートの上下の電極および不織布に荷重がかかり、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気的特性を変化させる。
- ・不織布中の水の量が增大すると、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增大すると、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。今回の異常発生時においては、前日までに実施された盛土により荷重が増大し、さらに盛土とともに、散水が行われた。(盛土により加重が増大したとともに散水された水が時間の経過とともに浸出水となり、異常発生箇所付近の浸出水の量が增大し、キャパシタの値が増大したと考えられる。)
- ・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。)
- ・シートが局部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、局部的に電界の強さが非常に大きい部分が生み出された。
- ・相当に広が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、局部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、遮水シートの間を水は流れないと考えられる。
- ・以上の仮説を採用すると、前述した「これまでの分析、実験で十分な検討がなされなかった事項」の4, 5, 6, 7の未検討項目に関して、どのような電気的な特性の変化により、これらの現象が起こったのかについて、すべて説明することができる。

実証実験の方法

- ・図2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。)
- ・遮水シートと同じ大きさの40cm四方の銅板電極を用意し、遮水シートの上下にこの銅板電極を

配置し、荷重を変化させ、電源電圧を印加して電流を測定し、遮水シートの基本的な電気的特性を測定する。これにより、加重の大きさに対して、平行平板電極が存在する場合の誘電率、体積抵抗率、シートの厚さの変化を推定する。

- ・電源電圧は、5Vと1Vで実験する。周波数 ω は、80Hzだけでなく、できるだけ低い周波数と2倍以上の周波数での特性を測定する。

- ・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1 Ω 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。

- ・荷重の大きさを変化させながら、与えられた上側の不織布の浸出水と下側の不織布の雨水の量のそれぞれにおいて、電源電圧と電流の関係を、上記の方法で測定する。

- ・実験に採用する遮水シートは未使用のもの、前回の実験で孔は開いていないが一部が局部的に薄くなっているもの、の両シートを使って実証実験する。

実証実験では確実に再現不可能な部分

- ・不織布中の水により形成される平行平板電極の半径は現場では最大で4mとなっている可能性がある。しかし実証実験では1辺40cm程度の正方形の大きさまでしか再現できない。これは電極の面積で計算すると100分の1程度であり、この結果キャパシタンス値も100分の1程度、つまり電化の量も100分の1程度しか再現できないことを意味する。この程度の大きさのキャパシタンスで、仮説が検証できるだけの荷電物質を供給できるかどうか疑問である。予備実験において実施する40cm四方の銅板電極を用いた実験の結果から、現場をどの程度再現していることになるか判断可能と思われる。

- ・異常が発生する以前に遮水シートの一部がごく薄くなる塑性変形が起こっていた、と考えられるが、この塑性変形の程度を再現することは困難である。

遮水シート異常検知箇所における通電要因分析のための実験

1 目的

廃棄物最終処分場の遮水シートの漏水を検知するために設置されたシステムにおいて、遮水シートの上下に設置された測定電極に漏水に相当する電流が検知される事象が発生した。検知システムが作動し、漏水が発生したと推定される付近を検証した結果、漏水検知システムの作動において想定しているような漏水要因となる孔は検出されなかった。このため、検知システムにおいて検出された上下測定電極間の通電の要因を明確にすることが本実験の主たる目的である。

2 本実証実験実施に至る経緯

漏水検知システムにおける測定電極は、図 1 に模擬的に示されているとおり直線的に配置されている。遮水シートの下側の直線電極の一方は接地され、他方は開放状態となっている。漏水を検知するために電極間の電流を測定する場合は、接地されている端子と測定電極の間に 5V80Hz の電圧電源を挿入する。これに対して遮水シートの上側の測定電極は、下側の直線的な測定電極と相対的には直交するように直線的に配置されている。その一方の端子は接地され、他方の端子は開放されている。測定においては接地端子と測定電極の間に電流計を挿入して、電流値を計測する。

各測定電極の遮水シートと反対側には不織布が置かれている。つまり上側の測定電極の上、下側の測定電極の下、それぞれに不織布が配置されている。

上下測定電極間には遮水シートがあり、通常は電氣的に絶縁状態である。万一遮水シートの一部に水が流れ出るような大きさの孔が開くと、遮水シートの上側の浸出水が下側に流れ、上側と下側の測定電極間に抵抗回路が形成される。その結果、測定時において上下の測定電極間に電流が流れる。この測定電流の値の大きさを測定することにより、遮水シートの漏水が起こったかどうか判定することができる。

2010年10月2日、この漏水検知システムが作動し、上下電極間に漏水に相当する電流が検知された。遮水シートに孔が開き、漏水した結果、漏水検知システムが作動したと予想されたため、損傷したと予想される場所の近傍で廃棄物を除去して直接確認したところ、顕著な孔を確認することができず、顕著な漏水も確認できなかった。

このため漏水検知システムの誤作動の可能性を含め、検知システム作動の原因を明確にする必要が生じた。安全管理委員会は、この予想されていなかった作動の原因について分析した。その結果、漏水するような孔が開いて漏水検知システムが作動したのではなく、何らかの原因で上下の電極間に大きな荷重がかかり、遮水シートが損傷し、上下の電極が直接接触するような状況が生じた。この結果、漏水検知システムが作動した。つまり、測定電極の直接接触により、検知システムが作動したという結論を得るに至った。

この報告に対し、電気回路の観点から疑問が投げかけられ、漏水検知システム作動の原因を改めて分析することになった。本実験は、これまでの測定データおよび実証実験などの結果を活用した上で、漏水検知システム作動の原因を明確にするためのものである。

3. 通電に影響を与える要因

3. 1 既存の測定データから導かれる結果

原因究明のための実験に先立ち、センターに残されている検知システム作動時前後の測定電流を分析することにより、導かれる結果について検討した。その結果、安全管理委員会が結論した「測定電極の直接接触によって測定回路に電流が流れた」という推測は、成り立たないことが明確になった。

漏水検知システムの作動を電氣的に考察する場合、等価回路を想定する。具体的には、異常を検知した電極間では概略の表現として図 2 に示されるような遮水シートを挟んでの電氣的等価回路を想定することができる。この等価回路において、遮水シートの上下の測定電極が直接接触した仮定すると、遮水シートの上下でのインピーダンスはゼロ、つまり抵抗がゼロで短絡されたことになりキャパシタは機能しないことになる。そのため、測定回路は純抵抗回路となる。

純抵抗回路になったとすると、測定回路に流れる電流は、5V80Hz の測定用電圧源と同相とならなければならない。ところが、漏水検知時点において残されている測定電流値のデータはその結果となっていない。電流値は、電流計の測定限界を超える値のため、正確な値は分からないが、電圧源と同相の成分だけでなく、90 度位相が異なった電流成分も測定限界を超えるほど大きく検出されている。この結果、安全管理委員会が結論づけた、上下の測定電極が直接接触した、という推測は成り立たず、電気回路としては、抵抗とキャパシタが並列に存在する等価回路として作動していたと推測できる。

安全管理委員会の報告書の結論とは異なる現象が起こっていたことが明確になったことを受け、改めて上下の測定電極間の等価的な抵抗とキャパシタの並列回路がどのような要因により形成されるのかを推測することが必要となる。

3. 2 通電パターン

遮水シートを挟んで上下の測定電極に電流が流れる場合、電極同士の直接接触以外の通電要因を拾い上げると以下のような通電パターンが考えられる。

- ① 遮水シートに自然の状態で水が通るような穴が開き、そこに侵出水が入り電流が流れる。
- ② 遮水シートに自然の状態で空気が通るような穴が開き、そこに空気が入り誘電体となって交流電流が流れる。
- ③ 孔は開いていないが、遮水シートの抵抗を介して電流が流れる。
- ④ 孔は開いていないが、遮水シートが誘電体として作用し交流電流が流れる。
- ⑤ 遮水シートが薄くなり誘電体として機能するだけでなく、遮水シートの上下の電極間の静電気力によって絶縁破壊と同様に、薄い膜を荷電物質が通り抜けて電流が流れる。
- ⑥ 局所的に③、④、⑤の組み合わせで電流が流れる。

これら通電パターン之内、本件の場合、現場での実証実験において明確にされたとおり、遮水シートは負圧試験（ -6.7kPa ）では損傷が確認されていない。このことから自然の状態で水や空気が通るような穴は開いていないと判断する。ただし、これまでの実証実験で確認されているように、ある程度大きな負圧試験や本文で想定するような静電気力によって空気や荷電物質が通り抜ける様な孔は開くと考える。よって、①と②は考察の対象とはせず、③から⑥の通電要因に関して実証実験を通して確認することとする。

3. 3 不織布中の浸出水と雨水

電極間の通電のパターンとは独立した通電要因として、遮水シートの上側の不織布に含まれる浸出水および下側の不織布に含まれる雨水が考えられる。不織布に含まれる浸出水と雨水および通電との関係に関しては、安全委員会の分析では触れられていない。

本考察対象の最終処分場においては、上側の不織布に含まれる浸出水は、現場での降雨量や廃棄物搬入時の処理の一環としての散水により増量し、排水および蒸発により減量し、時々刻々変化すると考えられる。下側の不織布に含まれる雨水は施工時の雨が影響しているものと考えられるが、施行終了後は原理的には水が侵入することはないので、変化はしないと考えられる。

本考察の対象とする4つの通電パターンのいずれに対しても、不織布に含まれる水の量は、測定電流に大きな影響を与える。つまり、遮水シートの上側と下側の不織布に浸出水もしくは雨水が相当量含まれると、不織布は抵抗として機能し、電流が流れる状態となりうる。つまり、上側の不織布では浸出水により測定電極と不織布の間、下側の不織布では雨水により測定電極と不織布の間が電氣的に接続されているように機能し、測定電極の近傍が平板電極（厳密には平板抵抗）と等価の機能を持つと考えられる。平板電極の広さと上下間の厚さは遮水シートの抵抗値、キャパシタンス値に直接影響するので通電電流に直接影響すると考えられる。また電極間の抵抗値についても大きな影響を与えると考えられる。

3. 4 電極間インピーダンスと仮想平板電極

測定電極は遮水シートの上下に不織布と遮水シートに挟まれる形で直線状に配置されている。また広い範囲の漏水を検知できるようにするため各電極は4m間隔で平行に配置されている。また上側の直線電極と下側の直線電極は遮水シートを挟んで直交するように配置されている。

非測定時は、電極の一方の端子は開放され、他方は接地されている。具体的に測定をする上側と下側の電極が決まると、下側の電極の接地端子と電極の間に5V80Hzの電圧源を挿入し、上側の接地側の端子と電極の間に電流計を挿入し、漏水検出電流を測定する。具体的な電圧源と電流計の挿入は自動的に行われている。

下側の測定電極間の距離4mである。漏水がなければ不織布は不良導体と考えられる。しかし、実際には施工時の雨水等により下側の不織布は相当の雨水を含んでいると想像される。このため、下側の電極間には漏水検知における検知電流に影響するようなインピーダンス（抵抗）が存在すると考えられる。ただし、下側の不織布には検知システムが完成した以降は漏水が起これば水が流れ込むことはないため、測定電極間のインピーダンスはほとんど変化していないと考えられる。

上側の測定電極の間隔も4mである。電極間のインピーダンスは不織布に含まれる浸出水の影響を受ける。上側の電極間のインピーダンスは下側の場合とは異なり、その変動が大きいと予想される。上側では、廃棄物搬入に際しての散水および降雨により浸出水が増量し、排水や蒸発により減量し、不織布に含まれる水量は時々刻々変化していると考えられる。

不織布中の水分量は電極間のインピーダンスを変化させるだけでなく、個別の電極の近傍における電氣的な特性にも影響を与える。つまり測定電極に電圧を印加すると、その近傍において不織布が平板電極もしくは平板抵抗として機能する可能性がある。先述した通電パターン③、④、⑤、⑥においては、平板電極の広さは遮水シートの抵抗値やキャパシタンス値に直接影響すると考えられる。

3. 5 遮水シートへの荷重

漏水検知システムが作動した当時、遮水シートには相当の荷重がかかっていたと予想される。遮水シートへの荷重は、シートの厚さに影響を与えるだけでなく、遮水シートの上下の不織布への荷重ともなっている。不織布への荷重は、不織布の厚さを変化させ、この結果、不織布中の浸出水や雨水の密度に影響する。結果的に、測定電極の周りの等価的な平板電極の抵抗値に影響を与えられらる。

4. 残されている漏水検知システム作動時の測定電流から導かれる結果および予想

漏水検知システムが作動した当時の測定電流の一部が現在も保存されている。これらの残されている生の測定データから、作動時におけるいくつかの現象の要因もしくは特徴を明確にできる。

- ① 2. 実験実施に至る経緯、においても記述したとおり、参考資料 1、2*¹から明らかなように、漏水検知として作動した時点での、漏水が発生したと予想される場所における測定電流の値から明確になることがある。残されている測定電流の結果は限られた範囲のものだけであるが、問題となる異常検知箇所における測定電流値が残されている。この測定電流値データによると、電圧と同相の電流値も 90 度位相差がある電流値も、いずれも測定電流計の測定限界を超えて計測されている。このため、それぞれの電流値を正確に知ることはできないが、電極同士が直接接触して流れる場合には、測定電流は電圧源と同相の成分だけになるはずであるから、電極同士が直接接触して起こる現象とは異なる現象が起こっていることが確認できる。

* 1 : 漏水検知システムが異常発生時前後に測定した電流値データで現在まで残されているもの本文末尾に一括掲載 以下の参考資料も同様

- ② 参考資料 2 と 3 によると、測定のための印加電圧が 5V の場合と 1V の場合の測定電流の結果から、異常検出時点における等価回路の等価インピーダンスが電圧依存性を持っていることが読み取れる。つまり印加電圧 1V の場合の電流値が 5V の場合の電流値の 1/5 より遙かに小さな値となっている。通常は抵抗値とキャパシタンス値は印加電圧にはほとんど依存しないと考えられる。このため、異常検出時においては、通電電流は通常考えられるような抵抗とキャパシタを介して流れる電流とは異なり、電圧依存性を持った電氣的要因で電流値が決まっていると推測される。
- ③ 参照資料 1 と 2 によると、最初の異常検出時点と 40 時間後の異常時点では、異常発生箇所から 30m 程度離れた測定電極の電流値が大きく変化している。この測定結果から、はじめに異常が検出されて以降 40 時間の間に、上側の当該測定電極間のインピーダンスが大きく変化したと推測される。
- ④ 参考資料 4 によると、漏水検知システムが作動する 8 時間前の時点で、遮水シートの等価的な抵抗とキャパシタンスの値は場所により異なっている。しかし、ほとんどの場所で、測定電流の電圧同相分より 90 度異相分の方がおよそ一桁大きな値を示している。このことから平常時には遮水シートのインピーダンスの抵抗分よりリアクタンス分の方が一桁程度小さい、と推測される。アドミッタンスで表現すると、コンダクタンス分よりサセプタンス分が一桁程度大きい、と考えられる。
- ⑤ 参考資料 4 によると、異常発生以前の最終処分場の中の、低地もしくは浸出水が集まりやすいと考えられる場所において相対的に測定電流値が大きな値を示していると考えられる。

- ⑥ 参考資料1と4から、異常検知時点前後の異常発生箇所から離れた場所で、電流値の変化が場所の高低差によって異なっていると考えられる。つまり異常発生箇所より高い場所の電流値が早い時間に大きくなり、低い方が後になって電流値が大きくなる傾向ある。
- ⑦ 参考資料1によると、異常を発生した箇所の電流値は測定限界を超えているため直接考察できないが、そこから10m程度離れた測定電極での電流値から、異常検知時点では電源電圧と同相の電流値と90度異相分の電流値では、大小関係が参考資料4の、平常時とは逆転し、同相成分の方が6-7倍程度大きくなっている。このため、異常時には、平常時において考えられる遮水シートの抵抗とは異なる要因の、抵抗相当分が生み出されていると推測される。
- ⑧ 以上の考察から、本漏水検知システムは漏水の検知という当初の目的に対しては、その機能を果たしたと考えられる。しかし、異常検知時における測定電流値が、電流計の測定限界を超える結果となり、要因分析に必要な正確な電流値を知ることができないことが明確となった。併せて電圧源として5V80Hzという交流電源を採用しているにもかかわらず、漏水検知の判断に採用している電流は電圧と同相分だけであった。このため、安全管理委員会で「通電の要因は上下の電極が直接接触したため」である、と誤った結論を導く結果となった。

5. 検証のために実施された過去の実験から導かれる知見と確認すべき事項

安全管理委員会は漏水検知システム作動の要因を明確にするため、いくつかの実証実験を行っている。それらの結果から、明確になっていることを整理する。

- ① 現場の漏水検知システムが作動した遮水シートに対して負圧（ -6.7 kPa ）試験を行った。しかし負圧試験の観点からの損傷は確認されなかった。
- ② 遮水シートに安全ピンで孔を開けた場合、負圧試験で損傷が確認された。
- ③ 埋立地の漏水検知時点での予想原因箇所付近での廃棄物および盛り土はおおよそ3.72mで、加重は 65.4 kN/m^2 =約 0.65 kg/cm^2 と推定される。
- ④ 現場の遮水シートと同じシートを用いて上下に電極を配置し、上下電極の交点付近に集中的に機械的な荷重をかけて通電実験を行った。通電が起こる場合の加重は、前述の廃棄物による加重の何倍かの大きさであった。しかしこの実験では、下の測定電極には電圧電源と直列に $50\ \Omega$ の抵抗を、上の測定電極にも直列に $50\ \Omega$ の抵抗を挿入している。このため、通電状態において、遮水シートの上下の測定電極間の電位差は5Vより遙かに低い電位差となっていたと考えられる。このため現場の再現にはなっていない状況での実験が行われていたことになる。
- ⑤ 以上がこれまでの実証実験によって導かれた結果である。本考察では、3.3で考察したとおり、上下の不織布に含まれる浸出水と雨水が重要な役割を果たすと判断している。以前の実証実験では、上側の不織布は浸出水を含んでいるが下側の不織布には雨水が含まれていない。このため、不織布に含まれる水の条件を変更し、現場と同様な条件の下での実験が必要となる。
- ⑥ 測定電極に直列に挿入する抵抗は、 $1\ \Omega$ とする。
- ⑦ 加重のかけ方は、以前のは電極の交点付近に集中的にかけているが、今回は現場とできるだけ近い状況で実験を行うことを目的とし、できるだけ均一に広い範囲で荷重をかけるものとする。
- ⑧ 併せて3.4で考察したとおり、電極間のインピーダンスが大きな影響を与える。特に測定対象となる電極の隣の電極の一方の端子は接地されているため、電極間のインピーダンスに特定の形で影響を与えていると考えられる。これを実験で再現したいが、現場での電極間の距離は4mあり、

実証実験でそれを再現することはできない。この電極間の配置に関しては、上下に一本ずつの電極を配置した以前と同様な電極配置での実験で、本考察の内容が確認できない場合は、上下に2本ずつの電極を配置して実証実験を行う必要があるかもしれない。

- ⑨ なお以前の実証実験において通電が確認されたシートにおいては、シートが薄くなりへそ様にシワが集まった部分が形成されているため、これらの部分の電気的な特性を本実験で利用し、要因分析できる可能性がある。このため、以前の実験で作られたこれらのシートを使った実験を行う。

6. 平常時および異常時における電気的特性

3. および4. の考察から、漏水検知システムにおける平常時と異常時の現象を等価回路として記述する。

- ① 損傷がない遮水シートの場合、上側の電極と下側の電極が互いに平行平板電極の関係にあると仮定すると、電極間の抵抗 R とキャパシタンス C はそれぞれ以下で与えられる。

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \quad , \quad R = \rho \frac{d}{S} \quad (1)$$

ただし、 S は平行平板の面積、 d は平行平板間の距離である。また、 ϵ は遮水シートの誘電率、 ρ は体積抵抗率である。

本考察では、遮水シートの上側と下側の測定電極とその周りの不織布に含まれる浸出水と雨水によって仮想的に平行平板電極が形成されると考えているが、厳密な意味で平行平板電極となっているわけではない。しかし、平常時および異常時における電気的な現象を説明する上で、平行平板電極として機能すると想定して等価回路を導出することは、これまで確認されている現象を大局的に把握する上で意味があると考えられる。

これらの関係に関して、予備実験において平行平板の銅板電極を用いて、確認する。

- ② 遮水シートのキャパシタンス C と抵抗 R が式(1)で与えられると仮定すると図2に示された遮水シートの等価インピーダンス Z および等価アドミッタンス Y は次式で与えられる。

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C} \quad , \quad Y = \frac{1}{R} + j\omega C \quad (2)$$

アドミッタンス Y の実部(コンダクタンス G)と虚部(サセプタンス B)の比 B/G は式(1)を仮定すると、

$$\frac{B}{G} = \omega C R = \omega \epsilon \rho \quad (3)$$

となる。これより、 B/G は平板電極の形状に依存せず、周波数 ω と誘電率 ϵ 、体積抵抗率 ρ にのみ依存することになる。この関係については残されている測定電流データ並びに実証実験において、測定電流データによりある程度確認できると考えられる。

- ③ 残されているわずかな測定電流値のデータでは B/G は8から10程度の値である。遮水シートの誘電率 ϵ も正確には分かっていないが、文献等から

$$\epsilon = 1.7 \times 10^{-11} \text{ (F/m)}$$

程度であると仮定すると $\omega = 80$ であるから

$$\rho = 8/80/\epsilon = 5.8 \times 10^9 \text{ (}\Omega \cdot \text{m)}$$

となる。この値は前回の実証実験において提示された体積抵抗率とは 2 桁ほど値が違っているが絶縁体としての機能を備えていると考えられる。

④ 資料 4 の測定電流の結果から、異常を引き起こしたと考えられる場所から離れた処分場の底部付近では、異常検出時点より以前に何らかの原因で遮水シートが、設置時の厚さ 1.5mm よりも薄くなっていたと考えられる。以下その根拠について説明する。ただし、この予測は測定電極と不織布により平行平板電極が形成されているという前提に基づいたものである。

平常時の測定電流を調べると、場所によってばらつきがあり、場所によって一桁程度の違いがある。電流値の多いところで、電圧同相分が数百 μA で 90 度異相分が数千 μA である。この事実から、測定電極自身の抵抗による電圧降下は数千 μV (数 mV) に過ぎないと考えられる。つまり測定電源電圧 5 V が、そのまま式 (2) で与えられるアドミッタンスの端子電圧となっていると考えられる。よって異常発生場所の平常時における測定電流から、異常発生直前の平板電極の広さ S を推定できる。

電源と同相の抵抗による電流 I_r は

$$\begin{aligned} I_r &= V/R = V \cdot S / (\rho \cdot d) = 5 / \rho \cdot (S/d) = 4 \times 10^{-5} \\ S/d &= 4 \times 10^{-5} \times 5.8 \times 10^9 / 5 \\ &= 4.6 \times 10^4 \\ S &= 4.6 \times 10^4 / d \end{aligned}$$

遮水シートは厚さ $d=1.5\text{mm}$ なので、この値が変化していないとすると

$$S = 4.6 \times 10^4 / (1.5 \times 10^{-3}) = 30.6 \text{ (m}^2\text{)}$$

つまり、上下の電極が交差する中心部分から半径 3.1 m の平行平板電極が形成されていると仮定すると、この程度の抵抗電流が流れることになる。

電源と 90 度位相差を持ったキャパシタ電流は

$$I_c = \omega CV = 80 \cdot C \cdot 5 = 3.2 \times 10^{-4}$$

よってキャパシタンス C は $C = 8 \times 10^{-7}$

と求められる。

同様にして最終処分場の一番低い部分と思われる場所における電流 I_r から

$$I_r = 1.5 \times 10^{-4}$$

として同様な計算を行うと、 $S=114.7 \text{ (m}^2\text{)}$ となり、半径 6.0 m の平行平板電極が形成されていることになる。

この半径 6.0 m は原理的に発生し得ない値である。つまり、測定電極間の距離は 4 m で、当該電極で測定していない場合は片方の端子が接地されている。このため、測定電極の電氣的な影響は、4 m 離れた隣の電極までである。このため、半径 6 m の平行平板電極は存在し得ない。

この矛盾は、遮水シートの厚さが初期状態の 1.5 mm のまま変化していない、と想定したことにより生まれた矛盾であるか、もしくは体積抵抗率 ρ が想定値より小さいために現れた、と考えられる。現場では遮水シートの厚さは廃棄物の加重を受け弾性変形し、厚みが減少していると考えられる。この値については電氣的な考察からは結論を得ることができないのが、実証実験において加重の変化と電流値の関係を確認することから、検証可能と考えられる。

⑤ 平常時点での測定電流の結果から、電極が交差する付近での電氣的な作動状況が想定できた。

次に異常が検知された時点での通電の状況を想定する。

まず異常発生時の B/G について、残されている電流値の測定データから計算すると、②において説

明したように平常時においては

$$B/G \text{ (平常時)} \approx 1.0$$

であるのに対して、異常時には

$$B/G \text{ (異常時)} \approx 0.2$$

となっている。つまり、異常時には、前述したように遮水シートの抵抗を介しての電流とは異なった要因による電流が流れていると推測される。

3.2の通電パターンにおいて6分類したが、上述したように、①から④はすでに考察済みである。残された⑤に基づいて異常時の通電現象を考察する。

通電パターン⑤は、遮水シートが薄くなり誘電体として機能するだけでなく、遮水シートの上下の電極間の静電気力によって絶縁破壊と同様に、薄い膜を荷電物質が通り抜けて電流が流れる、という想定である。負圧試験が遮水シートの上下の空気の圧力差により、空気が移動することによって孔が開いていることを判定するのに対して、遮水シートの上下の可動な帯電物質が、静電気力によって遮水シートを通り抜けることを想定している。

この想定における重要なポイントは、上下の帯電物質が静電気力を受け自由に移動できる状態にあることである。たとえば上下の平行平板電極が金属の導体のような場合、静電気力が働いても具体的には電流は流れない。つまり本文で考察している対象は、不織布に含まれる浸出水や雨水が静電気力を受けて薄くなったシートの部分を移動できる状況になっているか否かに関わる問題となる。これに関しては上側の不織布に含まれる浸出水の量に依存すると考えられる。これを確認するため、実証実験に際しては、下の不織布に雨水を含ませ、上の不織布に含まれる浸出水の量を変化させることによって、異常現象が起こるかどうかが確認する。なお、実証実験では電流計を直接挿入するのではなく、図3に示したとおり、測定電極や測定ケーブルの等価抵抗の端子電圧をオシロスコープで測定することにより、電流値を測定するだけでなく、電圧電源との位相差も測定できるようにする。現場で異常が検知された場合も、電圧源に直列に挿入された抵抗の端子電圧と電源電圧をオシロスコープで確認すれば、異常現象時にどのような状況になっているのかを観察することができる。

7. 確認すべき事項

以上の考察から、漏水検知システムが作動した要因を明確にするため、漏水検知時点での残された電流値測定データおよび検証のためにすでに実施された実験の結果からでは確認できない電気的な特性について、本実証実験で確認する。

はじめに予備的な実験として、遮水シートの加重の大きさの変化に対する誘電率、体積抵抗率、シートの厚さ、の変化を推定する。このため、遮水シートの上下にできるだけ広い平行平板電極を用意し、平行平板電極によって決まる抵抗とキャパシタの値を推定する。

本実験で明確にしなければならない最重要課題は、漏水検知システム作動時における上下電極間に挟まれた遮水シートの電気的な働きである。平常時には、残された電流データから、電源電圧と同相成分は90度異相成分の10分の1程度である。これが漏水検知時には、逆転している。この電流成分の振幅の逆転現象の原因は、平常時には遮水シートの抵抗とキャパシタンスの値で電流値が決まるのに対して、異常時には、局部的に薄くなった遮水シート付近においてその近傍での静電気力により、移動できる荷電物質が遮水シートを通り抜け、絶縁破壊に相当する通電現象を引き起こるこ

とによる、と想定している。これらを実証実験により確認することが最重要課題となる。

遮水シートに加わっている加重が変化しないのに、場所により、また時間変化によって、測定電流値が変化することが測定されている。これらの要因は、電極間の電圧の変化、電極間の抵抗と容量の変化、移動可能な荷電物質の量の変化、が要因と推定される。

これら要因の中で、最終処分場で発生していると考えられる変化は、抵抗と容量の変化と移動可能な荷電物質の発生である。式(1)で示したとおり、容量Cは電極が平行平板と考えると、電極の広さSに比例し、電極間の距離dに反比例する。ここで、電極の広さは不織布に含まれる浸出水および雨水の量と加重に依存すると考えられる。電極間の距離は遮水シートを含めた上下電極にかかる加重に依存する。

これらの中で不織布に含まれる浸出水の量は、異常検知時点より前の降雨や散水が徐々に浸透して、測定電極付近に到達した段階で顕著に変化する。この不織布中の浸出水の含水量の増大が平板電極の広さを増大させ、結果的に容量を大きくし、静電気力も大きくなる。さらに、含水量の増大は、電極の中に可動な荷電物質を作り出すことができる。これらの一連の変化の結果、静電気力により、絶縁破壊と同様な現象を引き起こした、と想定することができる。この一連の変化により、現場で測定されているすべての現象を統一的に説明できる。

この仮説を確認するためには、不織布に含まれる浸出水の含水量が、平行平板電極の広さに影響を与えていることを確認することが必要である。

実験では以下を確認する。

- ・はじめに平常時での現象を確認する。上下の不織布への加重を一定にし、下側の不織布に含まれる雨水の量を変化させず、上側の不織布に含まれる浸出水の量を変化させることにより、平常時における測定電流値の変化から、上側の不織布の含水量が抵抗と容量の大きさに影響することを確認する。
- ・併せて、平常時においてはコンダクタンスGとサセプタンスBの間には式(3)の関係が成立しているかどうか確認する。
- ・これらの関係を確認するため、印加電圧の周波数 ω を変化させながら電流の同相成分と90度異相成分の大きさを測定することにより、GとBの値の変化を確認する。

異常検知の状態を再現することは容易ではない。異常が起こった付近の遮水シートは、異常現象が現れるより前に損傷したのか、加重が変化しないが静電気力により異常が誘発されたのかについても明確ではない。遮水シートに残されているへそ様のシマが集まった圧縮跡は、異常値が発生する以前の加重によって作られたものであると考えることもできるが、本考察で導いたとおり、絶縁破壊のような静電気力による通電が原因で作られた損傷とも考えられる、さらに両者が複合的に関係して生まれたとも考えられるからである。このためあらかじめ異常発生したシートの損傷状態を再現することが難しい。本実験では、電極の交差点付近に集中的に加重を加えるのではなく、均一に加重を加えながら現場でかかっていたと思われる廃棄物の重さによる程度の加重で、異常現象が発生するかどうか、まず確認する。異常が発生しなかった場合は、加重を増大させながら異常が起こるまで実験を続ける。

併せて、以前の安全委員会が行った通電実験において、へそ様のシマが集まった圧縮跡の発生するのは、最終処分場の現場で考えられる加重の数倍の大きさの加重においてであることが確認されている。しかし、その実験においては、下側の不織布には雨水が含まれていないこと、加重は電極同士が交差する付近に集中的にかけられていること、から今回の実験で確認すべき前提条件とは異なった条件である。下側の不織布に雨水を含ませることによって、以前の実証実験とどの程度通電に変化が起

こるかを確認する。

そのため、新しい遮水シートを用いた実験においては下側の不織布には雨水を含ませ、加重は電極に集中させずに全体にかけて実験を行う必要がある。また、以前の実験で通電が確認されたシートの損傷付近を利用して、絶縁破壊と同様な通電現象が確認できるのか、実験する。なお、印加電圧は5Vと1Vの両方で実施する必要がある。5Vで異常値が検出される場合、印加電圧を下げ同様の実験を行い、電流値に電圧依存性があるのかを確認する。また異常値検出において周波数 ω が大きいと静電気力による荷電物質の移動に影響を与える可能性がある。これについても実験で確認することができる。

以上の実証実験を行っても、本考察において採用した仮説が検証できないことが考えられる。その要因は、二つ考えられる。一つは平行平板電極の大きさの問題であり、もう一つは隣り合った電極同士の影響の問題である。現場では隣り合った測定電極は4mの間隔で配置されている。つまり最大半径4m程度の平行平板電極が形成できる可能性がある。これに対して本実験では広さ40cm程度の広がりでの実験となる。また、電極間のインピーダンスに関しては、電極にかかる電圧は、隣の電極が接地されていることから不織布の抵抗を介して、隣の電極にも電流を流すことになる。電源電極への印加により、隣の電極に電流が流れる場合は、電極間のインピーダンス（抵抗）が平板抵抗として機能していると考えられる。この結果、広い面積の平行平板電極が形成されると考えられる。ところが本実験では、4m間隔の電極による等価的な平板抵抗を再現することはできない。

もし、前述の確認事項が遮水シートの上下に一本ずつ電極を配置したのでは確認できない場合、不織布とそこに含まれる水によって形成されると考えられる平行平板電極の広さが十分確保できないためと考えられる。この場合には、上下に各二本の電極を用意し、一本の電極を接地することによって、電極同士の影響に関してもできるだけ現地に近い状況を作って、異常現象の発生を確認する必要がある。

以上のとおり、今回の実証実験では、前回の実験で行った上下に一本の電極を直交配置しての実験だけでなく、必要であれば、図3に示されるようにできるだけ広い面積に加重できる装置を利用し、遮水シートの上下には測定電極をそれぞれ2本配置して実験を行う必要がある。

8. 実証実験の方法と確認すべき事項

(1) 遮水シートの載荷方法と電極

① 遮水シートの電気的特性を測定するための予備実験

アムスラー（写真1：類似品）を用いて遮水シートを挟んだ上下に平板電極を配置し、上限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。

② アムスラー（写真1：類似品）を用いて遮水シートを挟んだ上下電極全体に荷重を与える（写真2：この写真では実験方法を判りやすくするために不織布は撮影していない）。ここで注意すべきことは、安全管理委員会が昨年実施した電力の交点付近への集中的な加重のかけ方では、現地の現象を再現できない可能性が高いことである。つまり、上下電極間の通電には、遮水シートの上下に配置されている不織布に含まれる水の量が影響していると考えられる。このため、不織布全体への加重が必要となる。広い面積での加重の実験は容易ではないが、可能な限り広い面積での加重実験を行う。

- ③ 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場合、水を含ませる場合、水を含ませない場合、の 3 通りを用意して実験を行う。時間的に余裕があれば含水量を変化させて実験を行う。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。現場と同程度の雨水量が明確でない場合は、何通りかで実験する。
- ④ 上下の電極は互いに直交するように配置する。前回の実験と同様、上下に各一本の電極をたがいに直交するように配置して、実験する。
- ⑤ もし③の実験で本仮説が確認できない場合は、現場にできる限り近い状況を再現するため、図 3 のように上側に 2 本、下側に 2 本の電極を配置する。それぞれの電極の一方は開放、他方は接地する。下側の 2 本の電極の内、1 本の電極の接地端子と電極の間に電圧源を挿入する。下側の電極の内、1 本の電極の接地端子と電極の間に電流計を挿入する。実際の測定においてはケーブルの抵抗と等価な抵抗の電圧を測定する。
- ⑥ 遮水シートは新しいものを用いて実験するだけでなく、可能であれば、前回の実証実験でへそ様のシマが集まった場所が存在するシートを利用し、測定電極の交差部分にへそ様のシマの部分がくるように配置する。アムスラーは載荷重を徐々に増大および減少させ、遮水シートの変形の過程^{*1}が再現できるように制御可能な機種を選定する。

* 1 : 「無負荷状態」→「載荷により電極交点部の遮水シートが徐々に薄くなる」
→「電極交点部で遮水シート損傷」

(2) 遮水シートの電気的特性の測定方法

- ① 予備実験では、電源電圧と等価抵抗の電圧波形を計測する。
- ② 上側の測定電極に現場の測定ケーブルならびに測定電極と等価な抵抗 1Ω を直列接続した後接地する。測定用の電圧源は、現地と同様発信器とパワーアンプで構成する。発信器は現地では 80Hz で作動しているが、本実験では 5, 40, 80, 160, 320Hz の各周波数で実験する。
- ③ 電圧源の印加電圧は 5V の場合と 1V の場合の二通りで実施する。
- ④ 測定電極の電流値は、電流計で測定するのではなく、図 3 に示されている様に上側の測定電極に直列に接続されている 1Ω の等価抵抗の電圧を電圧電源の電圧波形と併せてオシロスコープで表示し、電流値だけでなく電源電圧の波形と電流波形の位相差についても計測する。
- ⑤ 図 3 の実証実験で、本仮説が検証できない場合には、水によって形成される平行平板電極の大きさが不足している可能性が高いので、図 4 に示される実験装置のように上下に 2 本ずつの電極を配置して実験を行う。上記と同様な手順で実験を行う。

(3) 測定電流から確認する事項

- ① 平板電極を用いた実験から、遮水シートの加重の大きさに対する、誘電率、体積抵抗率、遮水シートの厚さ、を推定する。
- ② 8. 実証実験の方法と確認すべき事項 で説明した確認事項を、加重の大きさ、不織布に含まれる水の量、印加電圧、周波数、を変化させて得られる定電流から推定する。

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



写真 1



写真 2 (a)



写真 2 (b)

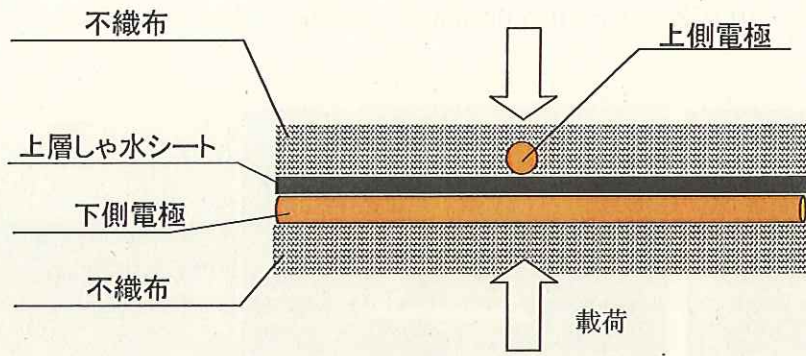


図1

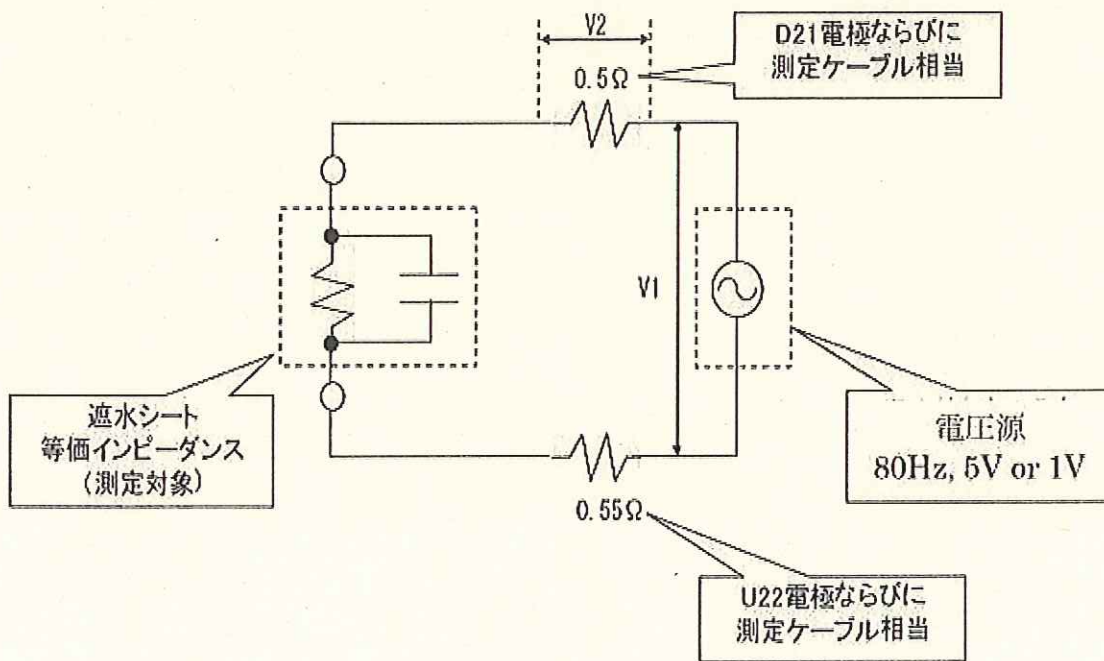


図2 漏水検知システムの漏水検知電極の等価回路

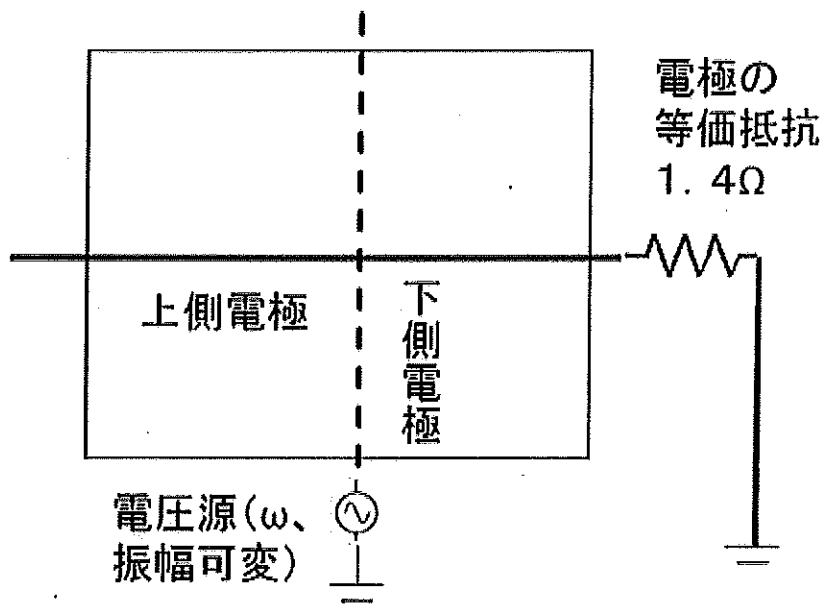


図3 実証実験における測定電極と遮水シートの関係

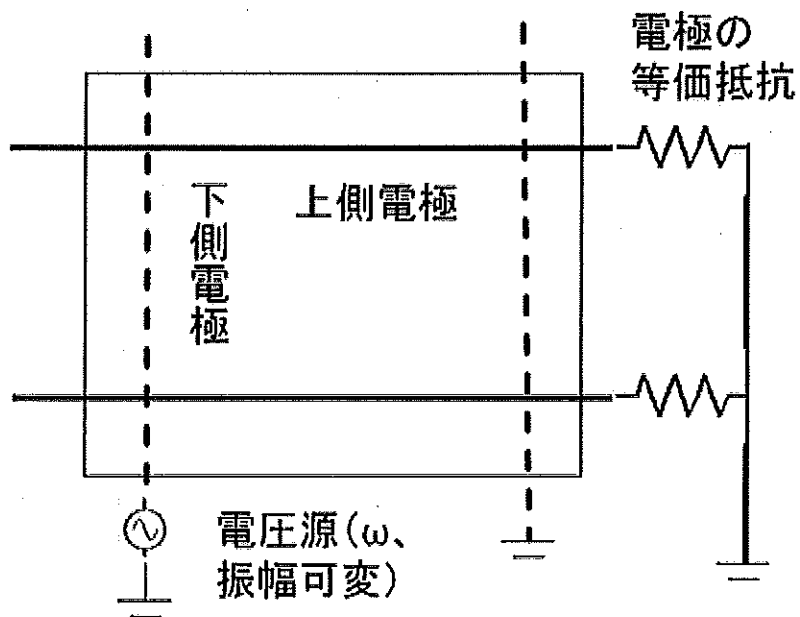


図4 図3の実験で検証できない場合追加実証実験において実施する測定電極と遮水シートの関係

100

100

100