

廃炉のための地盤環境学

Environmental Geo-technics for Decommissioning of Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant

鈴木 誠 (すずき まこと)
千葉工業大学 教授

竹内 真司 (たけうち しんじ)
日本大学 教授

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所（以下、1F）の廃炉に向けては、汚染水の処理が重要な課題の一つである。このためには、汚染水が地盤中のどこを、どの程度の速度で流れているのかを適切に把握することが重要である。さらに現場での調査と数値解析などを組み合わせることにより、汚染水の長期挙動の予測が可能となる。物質の移行特性を明らかにするために原位置トレーサー試験が行われるが、十分な回収率を得ることが困難なことや解析結果が観測結果を十分には再現できないなど課題も多い。この原因の一つとして、トレーサー試験を行う地質環境が事前に十分に理解されていないことが挙げられる。すなわち、目的に応じた試験区間の設定、物質移行として優位な水みちの抽出、それらの透水性や連続性などをトレーサー試験の前に可能な限り把握しておくことが重要である。さらにトレーサー試験を適切に実施するためのノウハウを蓄積しておくことは、今後長期にわたる廃炉事業に貢献する人材を育成する上でも必要不可欠である。しかし、このような試験を作業時間や作業環境などの制限がある1Fの敷地内で実施することは現実的ではない。このため、我々は1Fから離れた場所で帯水層の存在が確認されている地点において事前の地質環境を把握するための調査とトレーサー試験を平成27（2015）年度より実施してきた。本稿ではこれまでに実施してきた室内試験及び原位置でのポーリング調査及びトレーサー試験の結果とその過程で得られたノウハウなどについて紹介する。

2. 土中の地下水・物質の移動

2.1 土中の地下水流動

地下水は土中を流れるため、その流速を測定することは難しい。一般的には、単位時間の通過流量 q を断面積 A で除した見かけの流速 v を用いて、 $v=q/A$ のようになる。ダルシーの法則を用いれば、この流速は透水係数と動水勾配を掛けたものとして、 $v=KI$ と表現される。

しかし、この断面中には土粒子が詰まっており、水の流れることができるのは間隙だけとなる。しかも、独立して存在する間隙では水が通らず、連続した状態の間隙の割合が重要となる。そのため、このような流速を定義する間隙は有効間隙率 n_e と呼ばれている。一般に土の間隙率 n より小さいと考えられているが、これを直接

に測定することは不可能である。さらに、間隙は直線的に繋がっておらず、屈曲しながら土粒子間を流れるため、単に2地点間の到達時間を測定しても本当の流速は測定できない。このような状況ではあるが、現在は単位断面積を間隙の割合だけにして計算した流速を実流速 v' と呼んでいる。見かけの流速 v を有効間隙率 n_e で除した $v'=v/n_e$ と同じとなる。

もう1つ厄介なことは、先ほど述べたように、地下水は土中をまっすぐ進むとは限らないということである。そのため、2地点間に流れる地下水は早いものから遅いものまでばらつきを有することになる。

2.2 土中の物質移動

土中の放射性汚染物質などは土粒子に吸着するものもあるが、地下水や地下水中の微粒子に付着して運ばれるものもある。地下水の流れが複雑であることはすでに述べたが、運ばれるものはこの地下水により移動するため、この状況を把握する必要がある。トレーサー試験はこの目的で行われる試験であるが、流動状況を評価することが難しい。地下水中の物質は、ブラウン運動により拡散するほか、土粒子間の水みちが複雑なため、見かけ上流方向やその直角方向に分散する。そのため、物質の移動は、濃度が一定で移動する部分を移流現象と、濃度が低下しながら広がる部分を分散現象として扱っており、一般的に先ほどの拡散は分散に含めて考えている¹⁾。

下記に一次元の移流分散方程式を示す。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v' \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $C(x, t)$ を物質濃度、 v' を間隙水の実流速、 D を分散係数とする。これを、有限要素法や差分法などで解くことになる。

3. トレーサー試験

3.1 室内試験

地下水中の物質移動を検討するため、試験水槽内の幅100 cm、奥行き60 cm、高さ50 cmの土層を用いてトレーサー試験を実施した²⁾。試験水槽は水位調整タンクによって、土層に人工的に水位差を与えることが可能である。試験水槽内土層は珪砂5号を用い、間隙率約40%となるように突き固めた。そこに、図1に示すように投入孔と観測孔を配置し、各孔に設置してある電気伝導率計でトレーサー剤の移行を測定した。トレーサー剤は、塩分濃度約3.5%となるように塩水にエタノールを

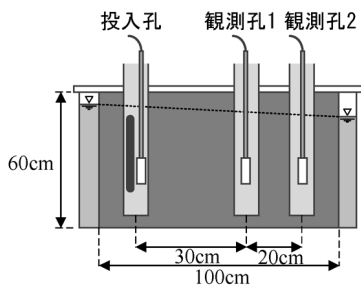


図-1 電気伝導率計設置位置図

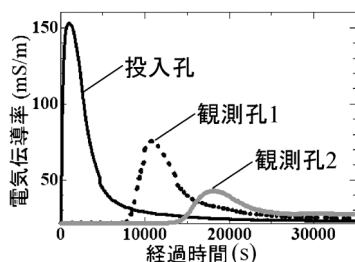


図-2 電気伝導率の経時変化 (水位差4.81 cm)

混合し、比重1.00になるように調整した混合液を使用した。投入方法は、孔内の容積増加を防ぎ、瞬間的に地下水と置換する有効な方法としてトレーサーを注入した水風船をストレーナー内で破裂させた。この観測はいくつか水位差を変化させて実施し、図-2は水位差4.81 cmにおける測定結果である。ダルシー流速と電気伝導率の立ち上がりから算定した実流速から算出される有効間隙率は33%となり、間隙率30~40%の砂層における一般値30%と同程度となった³⁾。

3.2 現場試験

(1) 調査概要

試験場所は、東京都世田谷区の日本大学文理学部百周年記念館の敷地内である (図-3)。調査は、初年度の調査結果に基づく課題を次年度の調査によって明らかにしていくという、繰り返しアプローチ⁴⁾を採用した。

平成28 (2016) 年度の調査では、既存資料に基づき、現場周辺の地下水流動方向を予想し、想定された流向に平行に2孔のボーリング孔掘削 (コア掘削) を実施し、電気検層、フローメーター検層、流向流速測定、水理試験などを実施した。また平成29 (2017) 年度は、28年度の調査で明らかとなった流向に平行に3孔のボーリング孔を掘削 (ノンコア掘削) し、前年度特定された帯水層を対象に流向流速測定、水理試験、予備的なトレーサー試験などを実施した。さらに平成30 (2018) 年度は、前年度の結果に基づいて帯水層中の水みちを明らかにするための温度検層を実施した。これまでに掘削した5孔のボーリング孔の位置を図-3に示す。以下に繰り返しアプローチに基づく各年度の主な成果を示す。

(2) 調査結果

平成28年度：初年度の調査では、敷地造成時のボーリング調査データや既存文献⁵⁾などに基づいて、調査地点周辺の地下水流動方向を西から東あるいは西北西から東南東方向と推定し、この方向にほぼ平行な2孔のボー

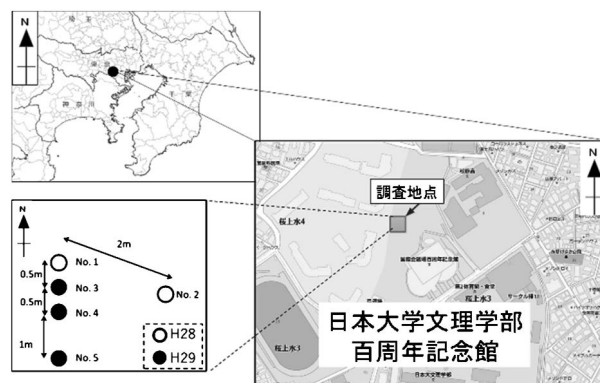


図-3 調査位置とボーリング配置

(白抜きは平成28年度、黒丸は平成29年度の掘削孔)

リング孔 (図-3のNo. 1孔、No. 2孔) をコア掘削し、地質層序を確認した。2孔での電気検層の結果、GL-10~-12.5 mの砂礫層とその下位のGL-15~-16 mの細砂礫層での比抵抗値が周辺の地層に比べて高い値を示した。この結果から、両層が優位な帯水層となり得ると判断し、ストレーナーを設置した。さらに、No. 1孔を対象に実施したフローメーター検層 (電磁式) の結果、両地層からの総流入量のうち、90%以上が上位の砂礫層からの流入であった。このことから砂礫層が最も優位な帯水層と判断した。流向流速測定は、No. 1孔の砂礫層及び細砂礫層を対象に自然状態 (測定中にボーリング孔内の地下水を変動させない状態) で複数回実施した。その結果、いずれの地層においても $2 \sim 5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ の速度で、概ね南方に流動する結果が得られた。また両区間を対象とした透水試験では、上位の砂礫層が約 $1.5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 、下位の細砂礫層では約 $5.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ の透水係数が得られた。以上の結果に基づいて、トレーサー試験の対象層はより透水係数が高い上位の砂礫層とした。平成29年度：平成28年度の流向測定結果に基づいて、No. 1孔から南方向に3孔 (No. 3~5) を直線的に掘削した。このうち、No. 3孔では砂礫層において、流向流速測定を実施した。なお、No. 3~5孔ではトレーサー試験時に使用するトレーサー剤の下降流を考慮して、ストレーナーはトレーサー剤の投入孔 (No. 1) よりも50 cm深部に設置した。流向流速測定の結果、南南東方向に $1.2 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ の流速を示した。平成28年度の流向流速測定結果と異なる値を得た理由として、当該測定区間に散在する握り拳大の礫の影響が考えられる。また、揚水試験はNo. 5孔の砂礫層を揚水区間として一定流量で揚水を行い、No. 1孔、No. 3孔、No. 4孔における水位変化を測定した。その結果、透水係数は約 $1.5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ の値を得た。

平成30年度：平成29年度に実施したトレーサー試験の結果、砂礫層内における不均質な流れが推定されたことから、この砂礫層内の優位な水みちを検出するために温度検層を実施した。温度検層は、図-3のNo. 1孔、No. 3孔、No. 4孔で実施した。使用した検層器は約1 mのヒーターに温度センサーを等間隔で5箇所設置し

たものである⁶⁾。これを試験井戸に挿入し、ヒーターを30分加熱し、昇温過程とその後の降温過程の温度変化を測定した。また、水みちの検出位置を明確化するために、No. 5孔で揚水を実施した場合としない場合で比較した。なお、測定は温度センサーの各区間をスポンジパッカーで仕切らない場合と仕切った場合で実施した。この結果、深部の区間において明瞭な温度低下傾向が確認され、パッカーありの場合では、この傾向が顕著であることが確認された⁷⁾。したがって、トレーサー試験においてはパッカー設置が有効であることが判明した。

トレーサー試験の方法は揚水孔 (No. 5) から一定量 (20 L/min) で揚水し、投入孔 (No. 1) からトレーサー剤を投入する放射状収束試験を実施した。井戸断面図を図-4に示す。対象とした試験区間は事前の水理試験において、透水係数が 10^{-4} m/s程度の透水性が良好であった砂礫層とし、投入孔のGL-11 m ~ -12 m, 観測孔 (No. 3, No. 4) 及び揚水孔のGL-11.5 m ~ -12.5 mに開孔率30%のストレーナーを設置した。各孔のストレーナーの区間に電気伝導率計を複数個設置し、室内試験と同様の方法でトレーサー剤の移行を測定した。現場試験では、比較的均質な砂礫層を対象としたが、ストレーナーの1 mの幅の中でも水みちが存在することが示唆された。そこで、孔内の上下流の影響をなくすため、投入孔上部と各孔の測定区間をパッカーによって区切ることにした⁸⁾。

試験結果の一部を紹介する。観測孔1 (No. 3) はストレーナー下端から17 cm, 37 cm, 57 cm, 77 cm, 97 cmで測定し、観測孔2 (No. 4) には水みちを考慮してストレーナー下端から26 cm, 46 cm, 66 cm, 86 cm, 106 cm付近にパッカーを設置した。図-5に観測孔1の電気伝導率の経時変化を示す。図の横軸は経過時間、縦軸は観測孔の電気伝導率である。ストレーナー下端から37 cmのみで反応が確認された。電気伝導率の変化曲線が正規分布に類似したことから、この深度でのトレーサー剤の顕著な到達が推測された。

これらの結果を踏まえて、数値解析を実施した⁹⁾。解析モデルは、平面二次元モデルを用いて、図-6のように揚水孔を中心に半径2.5 m, 中心角 15° の扇形状のモデルとして作成した。メッシュは数値分散の影響を抑えるため、流動方向のペクレ数が2以下となるように、縦

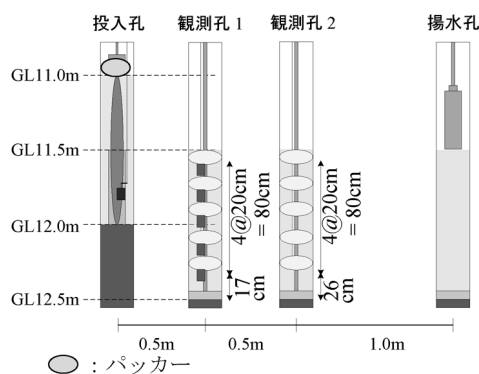


図-4 試験井戸断面図

方向を0.3 cm 間隔, 横方向を0.4 cm 間隔で分割した。

縦及び横分散長の値は、地盤内の有効間隙率と同様に試験結果の経時変化を再現するよう設定した。境界条件は、揚水孔壁に揚水時の孔内水位, 外周部は定常井戸理論の式から投入孔と観測孔の水位が揚水時の水位となるように水頭を固定した。計算方法は、時間刻みをクラン数が1以下となるように時間間隔を1.0秒で設定し、投入孔に試験時の電気伝導率の初期値を1.0として与え、計算された変化に試験結果の投入孔部分の最大電気伝導率を掛け、電気伝導率の変化で試験結果と比較した。表-1に移流分散パラメータの値を示す。

図-7は、電気伝導率計を観測孔1のストレーナー下端から37 cm, 観測孔2のストレーナー下端から26

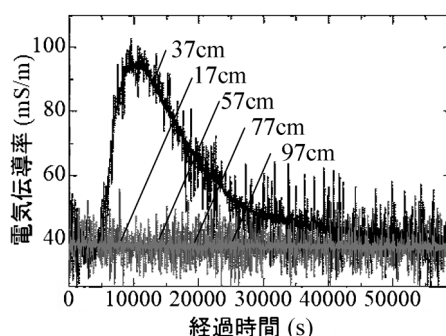


図-5 電気伝導率の経時変化 (観測孔1)

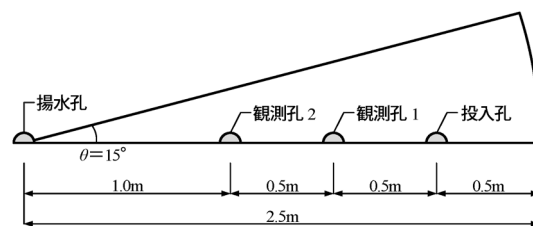
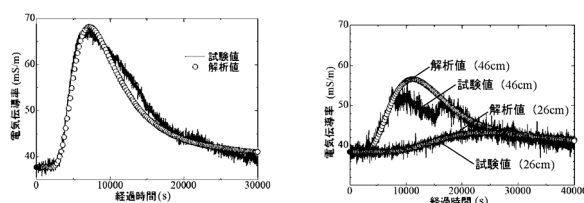


図-6 解析モデル概要図

表-1 解析に用いた移流分散パラメータ

対象深度	観測孔1 37cm	観測孔2 26cm	観測孔2 46cm
有効間隙率	30%	80%	30%
縦分散長	2.0×10^{-2} m	9.0×10^{-2} m	9.0×10^{-2} m
横分散長	4.0×10^{-3} m	9.0×10^{-3} m	9.0×10^{-3} m



(a) 観測孔1の37cm (b) 観測孔2の26cmと46cm

図-7 試験と解析の経時変化の比較

cm と46 cm にて測定した際の試験結果と解析結果の経時変化を比較した図である。解析値は、ピーク時の値を合わせるために、投入量を100%とした時に対して、投入量を観測孔1の37 cm と観測孔2の46 cm は15%、観測孔2の26 cm は7%に調整した際の値を示している。

2つのグラフより、投入量を調整する手法を用いることで、試験結果を概ね再現することができた。また、観測孔1への到達量が15%であるのに対し、観測孔2の総到達量は22%となったことから、投入孔から観測孔1を通過せずに観測孔2へ到達する水みちが存在することが推測された。解析より得られた各測定深度における有効間隙率の値は、砂礫層における一般値15~20%³⁾と比較すると、観測孔1の37 cm と観測孔2の46 cm で1.5~2.0倍、観測孔2の26 cm で4.0~5.0倍程度一般値よりも大きな値となった。これより、対象層における水みちは直線的ではなく、土粒子間の屈曲や大きく回り込むようにして直線距離よりも数倍程度長い水みちであると考えられる。

4. おわりに

地盤中の物質移動挙動を明らかにするため、室内及び原位置でのトレーサー試験を数値解析と組み合わせて実施した。また、原位置試験では試験対象層としての帯水層やその透水性を把握する調査、さらには帯水層内の水みちの位置を推定するための調査を実施した。原位置において帯水層とそこでの地下水の流向を適切に把握する上で、既存情報調査、初期段階のボーリング孔を用いた調査、その結果に基づく課題の抽出と次段階の調査計画の立案と実施を繰り返す方法（繰り返しアプローチ⁴⁾）は合理的に地質環境を明らかにする有効な手法であることが確認された。また、原位置の地質環境を適切に把握したうえで実施したトレーサー試験結果は、数値解析により適切に再現することができた。

個別の調査解析上のノウハウとしては、原位置での試験を実施する上で、帯水層内を複数のパッカーで仕切ることが確認された。

このように適切に原位置の地質環境を把握した上でトレーサー試験を実施し、よく再現された数値解析結果から取得された物質移行のパラメータを用いることで、対象地盤における物質移行挙動を適切に予測することが可能となると考えられる。実際の1Fサイトでは、比較的厚い帯水層が分布することが報告されており、今回の原位置試験とは異なる地質環境であることが容易に予想さ

れる。しかし、繰り返しアプローチにより段階的に地質環境を把握し、優れた水みちをその連続性ととも明らかにした上で、トレーサー試験を実施することで、原位置の物質移行挙動を明らかにすることが可能となり、将来の汚染水の広がりを適切に予測した上で、合理的な廃炉を達成することが期待される。

試験対象とした砂礫層は、不均質性の観点では最も把握が困難な地質環境の一つと位置付けることができる。ここでの不均質性をより適切に把握することができれば、その手法を1Fでのトレーサー試験に適用することが可能と考えられる。今後は、この砂礫層でのトレーサー試験をより適切に実施するためのパッカー配置や検層手法などについて改良等を重ね、さらなるノウハウの蓄積と人材育成の機会の場を提供していく予定である。また、得られたノウハウに基づいて、今後の1Fでのトレーサー試験を想定した調査プログラムを検討する予定である。

最後に、現場試験や数値解析に協力していただいた㈱アサノ大成基礎エンジニアリングの後藤和幸氏と㈱ダイヤコンサルタントの菱谷智幸氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 日本地下水学会：地下水のシミュレーション，第2章地下水流動の数学モデル，技報堂出版，p. 66, 2010.
- 2) 大瀧修平ほか：室内試験を用いた物質移行の数値解析による検討，第54回地盤工学研究発表会，2019.
- 3) 土木学会編：水理公式集，昭和46年改訂版，pp. 365~366, 1974.
- 4) 三枝博光ほか：超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第1段階）研究成果報告書，JAEA-Research 2007-043, 2007.
- 5) 竹内真司・戸嶋優太：日本大学文理学部周辺の地下水流動に関する検討，日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要，Vol. 52, pp. 31~50, 2017.
- 6) 後藤和幸ほか：不均質な堆積層中の水みちを探索する温度検層装置の開発，地盤工学会誌，Vol. 67, No. 7, pp. 32~33, 2019.
- 7) 竹内真司・鈴木 誠・後藤和幸・齋藤裕己・大瀧修平：トレーサー試験のための水理地質構造の把握～水みち検層結果を中心に～，日本地下水学会，秋季講演会講演予稿，pp. 136~139, 2018.
- 8) 能美大希・齋藤裕己・大瀧修平・鈴木 誠・竹内真司・田岸宏孝：原位置トレーサー試験における孔内の上下流の影響評価，第54回地盤工学研究発表会，D-04 0409, pp. 817~818, 2019.
- 9) 齋藤裕己・大瀧修平・能美大希・鈴木 誠・菱谷智幸：移流分散解析を用いた原位置トレーサー試験の評価手法の一考察，第54回地盤工学研究発表会，D-04 0410, pp. 819~820, 2019.

(原稿受理 2019.6.24)