

地下利用における処分場の事前検知の可能性[†]

生瀬博之^{††} 橋本秀爾^{††} 山本正史^{††} 松村勝秀^{††}

現行の政令濃度上限値を超える低レベル放射性廃棄物（高 $\beta\gamma$ 廃棄物）は核種濃度が高いことから、やや深い地下領域に処分された後においても、廃棄物と人間との直接接触を避ける必要がある。そこで、直接接触が回避され得ることを示すため、管理期間終了後において、地下利用（人間侵入）が計画された際にも処分施設の存在が検知される可能性について、地下利用にともなう事前調査事項をもとに、処分場発見までのプロセスを勘案し、3つの段階に分けて検討した。

検討は現状技術を基本として行ったが、検討の結果、第1段階の「記録（記憶）による検知」、第2段階の「地表からの物理探査による検知」、および第3段階の「施工中管理における検知」のいずれかの段階、または2つ以上の段階の組合せで検知され、処分場に侵入するような地下利用が計画された場合でも、結果として廃棄体との直接接触を回避し得ることが導出された。

Keywords: 高 $\beta\gamma$ 廃棄物、地下利用、物理探査、シミュレーション

As high-beta-gamma-LLW (low-alpha-ILW) has high nuclide concentration, it is necessary for safe disposal to avoid direct human contact to the waste.

This report describes whether the existence of high-beta-gamma-LLW repository can be detected or not, if underground space utilization is planned at the area of the closed repository in the relatively deep space in the future.

Based on survey items prior to utilization in relatively deep areas, the possibility of anomaly finding is considered in three stages on present technologies. For these three stages are as follows :

- (1) by records (or in mind),
- (2) by geophysical prospecting, and
- (3) by construction control.

As the result, one can reveal the existence of the repository in one or some stage(s), that is, one can avoid the direct human contact to the disposed waste, even if he plans to utilize a underground repository space.

Keywords : high-beta-gamma LLW, utilization of underground space, geophysical prospecting, simulation

1はじめに

現行の政令濃度上限値を超える低レベル放射性廃棄物（以下、『高 $\beta\gamma$ 廃棄物』と略す）の処分においては、安全確保上、現行の低レベル放射性廃棄物（以下、『現行 LLW』と略す）処分の政令上限値を設定する際に想定した処分跡地に住居等を建設するシナリオ等廃棄体に人間が直接接触するような事象を避ける必要があり、原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会の報告[1]では、人間が廃棄体に直接接触する可能性が十分小さくなると考えられる処分深度として、「例えば 50~100m 程度」の地下に処分する概念を想定している。

本報告は、LLW の 1 分類である高 $\beta\gamma$ 廃棄物処分場の管理期間終了後に、高 $\beta\gamma$ 廃棄物処分施設に達するような大規模な地下利用が計画された場合でも、事前に用いる種々の調査により処分施設が認知され、廃棄体への直接接触が回避される可能性について検討した成果である。高 $\beta\gamma$ 廃棄物処分場の管理期間は数百年程度と想定されるため、管理期間終了後は相当の技術進歩が期待され、処分場検知の可能性も高まる予想されるが、ここでは、現状の技術レベルを基本として検討をすすめた。

なお、本資料は、原子力学会 バックエンド部会 第15回夏期セミナーで経過を報告した内容に、さらに検討

を重ねて得られた成果の概要である。

2 地下利用形態

検討に先立ち、地下利用の実態を整理した。現状は、文献[2,3]に整理されている。平地部での一般的な人が地下利用する領域は、地質に関係なく地下数 m~十数 m、最大でも高々 30m 程度の範囲であり、公共的な上下水道や共同溝等の構築物、あるいは高層建築物の基礎についてもおおむね数十 m の範囲であるが、山岳部でのトンネルや平地部での深井戸は地下 1000m 以上に及ぶ。

一方、ここ 30 年程度の地下利用の経緯 Fig.1 に示す。Fig.1 では、年代の経過とともに深い領域の地下利用がなされる傾向があり、さらに深い領域の地下利用が進む可能性も十分想定される。また、将来における地下利用は、臨時大深度地下利用調査会の報告[4]も参考になる。

3 地下利用に際しての事前調査事項

高 $\beta\gamma$ 廃棄物の処分想定深度の一例として、例えば地表下 50~100m 程度が想定されるが、一般的な個人の地下利用はともかく、2 章の地下利用の実態等から、当該深度において廃棄体に直接接触するような公共的構築物の建設（大規模地下利用）が将来的に起こる可能性は否定できない。しかし、この領域の深度に地下構築物を建設するにあたっては、設計・施工に係る情報を得るために、各種の調査が行われる。文献[2,5]等をもとに、主要な調査とし

[†] Possibility of detecting a high-beta-gamma LLW repository prior to underground space utilization, by Hiroyuki Ikuse (ikuse@rwmc.or.jp), Shuji Hashimoto, Masafumi Yamamoto and Katsuhide Matsumura

^{††} (財)原子力環境整備センター Radioactive Waste Management Center
〒105-0001 港区虎ノ門 2-8-10 第 15 森ビル

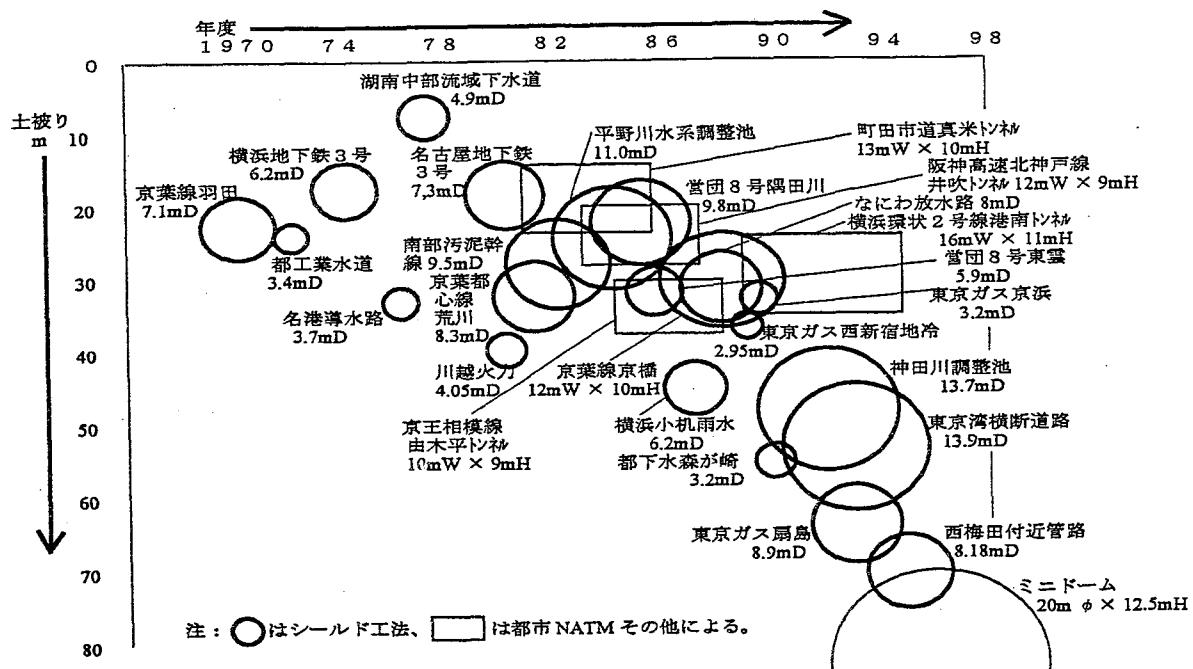


Fig.1 Utilization of Underground Space in Recent Decades

て以下の5項目に整理した。

- ① 立地条件調査：対象地域の土地利用、物件の状況および工事用地の状況等に関する調査
 - ② 支障物件調査：地下構築物の建設によって影響を受け
る恐れのある諸物件あるいは支障となる諸物件の現況の調査（資料調査と現地調査からなる。）
 - ③ 地盤調査：種々の視点から実施する地盤に対する調査
(初期調査や本調査、詳細調査に分類される。)
 - ④ 施工管理調査：建設・施工中の地盤等の挙動を観察・
計測し、当初計画を見直しながら工事を進める（情報化施工）ための調査
 - ⑤ 環境保全調査：周辺環境への影響が予想される現象に
対する調査

これらの調査を進める段階で、処分場が検知される可能性について以下で検討した。

4 処分場発見のプロセス

地下数十m(GL-50~100m)程度の領域の地下利用形態には

- ・石油地下備蓄基地等の三次元的な広がりの構築物の建設
 - ・山岳トンネルや都市トンネル等の線状構築物の建設が想定できるが、ここでは、3章で整理した事前調査項目の内容を踏まえ、管理期間終了後に高 β γ廃棄物処分場の存在するような地下深度領域に大規模地下構築物の建設を計画した場合に、処分場が認知されるまでのプロセスを勘案し以下の3種類(stage)の調査項目に再

整理した.

- ① 記録調査：立地条件調査、支障物件調査、および地盤資料調査
 - ② 地盤調査：地表からの物理探査、ボーリング孔による調査
 - ③ 施工管理調査：施工段階（建設段階）の調査等

これらの各 stage で、処分場の検知に到るプロセスをフローとして Fig.2 に示す。例えば、第 1 の stage の記録調査では、中央カラムの「記録の照会」という実施事項により、異常を感じたら右カラムの「詳細情報の取得」という適切な処置により、処分場検知に到るプロセスが想定される。第 2 stage の「地盤調査」や、第 3 stage の「施工管理調査」においても、同様に、異常な状況を察知することにより、「詳細調査」を経て処分場の検知に到るプロセスが想定できる。

そこで、以下、各 stage (上記①～③、Fig.2 の左カラム)において、高 β _y廃棄物処分場が異常物として認知される可能性について検討した。

5 記録調査の stage における検知

既に制度化されている LLW および極低レベル放射性廃棄物（以下、「VLLW」と言う。）の埋設事業においては、記録の一部は数十年～数百年の管理期間の後（事業の廃止時）に指定機関に引き渡すことが規定されており[6]、LLW や VLLW の埋設事業の許認可に係る資料は、管理期間の終了後においても国において永久に保存されることとなっている。

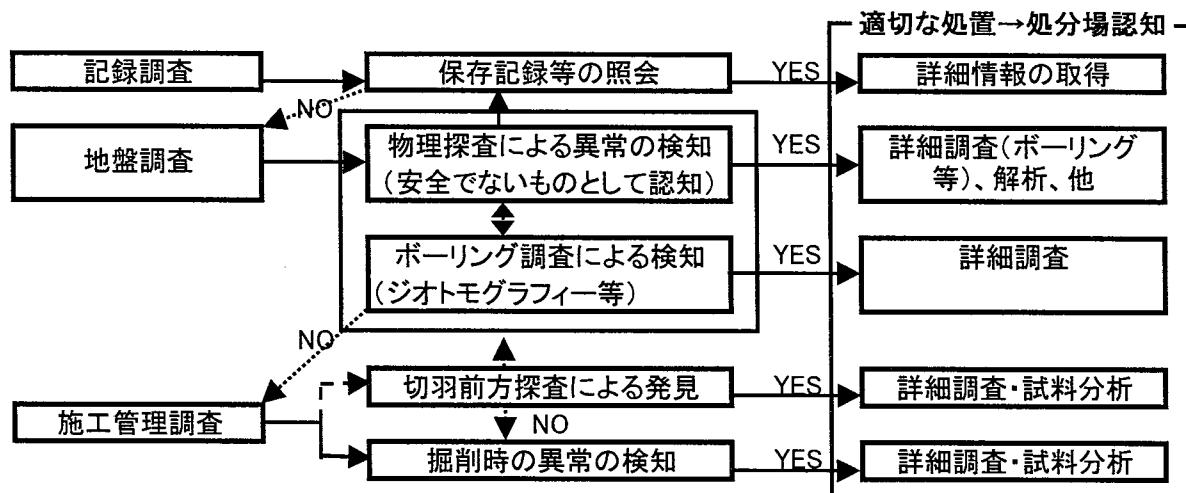


Fig.2 Process Flow for Detection of Existence of High-Beta-Gamma LLW Repository

また、諸外国の事例[7,8]や建設省が進めている「建設CALS/ECアクションプログラム」の根幹となるベースにGIS（地理情報システム：地中の構築物マップのデータベース化システム）[9]が据えられたことを踏まえると、各省庁から適宜適切な情報を適切なタイミングでアクセスできるシステム構築が可能と考えられ、処分場情報も当該システムに入力されることが十分期待できる。

さらに、地盤調査のうちの「資料による調査」の段階においても、地質資料のうちの地盤図は既に一部が独自にデータベース化されており、将来的には他の機関等からの種々のデータを織り込んでデータベース化されることが期待できることから、民間からも適切な情報を適切なタイミングでアクセスできる環境が整備され得るものと考えられる。

以上より、最初の「記録調査」の stage で、処分場の存在の記録に到達し、検知できる可能性は非常に大きいと考えられる。

6 地盤調査などによる検知

6.1 代表的な物理探査手法

まず、地表から行う地盤調査（物理探査）に対して、使用頻度の高い探査法を抽出する。

地表から行う物理探査手法には種々のものが存在するが、実際に物理探査を利用している技術者に対するアンケート結果（主に利用している探査手法）、各種物理探査手法をシステムティックに組み合わせた事例、および地下構築物建設に対する適用事例等 [10-12]を踏まえると、弾性波探査（地震探査）、電気探査および電磁探査の3つが代表的な物理探査技術として抽出される。

なお、わずかでも何らかの処分場情報がある場合には、重力探査や放射能探査を実施することも考えられるが、記録調査により処分場の存在が検知できず、処分場情報

は皆無という前提条件としているため、弾性波探査、電気・電磁探査を代表的探査手法として抽出した。

6.2 模擬処分場の物理探査シミュレーション

6.2.1 計算条件等

ここでは、第2 stage における検討の1つとして、物理探査により得られる測定結果によって処分場の存在（または地層内の異常）を認知できるかどうかを検討するため、想定される利用形態、処分施設形態や設置深度、および施設を設置する地層条件や地質条件を想定し、(1)項で抽出した物理探査方法による処分場近傍の探査のシミュレーションを実施した。

高 $\beta\gamma$ 廃棄物処分施設は、GL-100mにトンネル型施設4本を設置するものと仮定し、その深度における地下利用の際に実施すると想定される物理探査方法は、各探査手法のうち下記に示すものを採用することとした[13-15]。

- ① 弹性波探査（反射法）
- ② 電気探査（二次元比抵抗探査）
- ③ 電磁探査（CSAMT法）

また、処分施設条件として、処分坑道周囲の岩盤はロックボルトで補強し、内部から吹付コンクリートで覆い、さらに、ペントナイト混合土等を1m施した内側にコンクリートピットを設置し、廃棄物の周囲（空隙）はモルタルによって充てんすることを仮定した。一方、岩盤については、第四系に覆われた新第三系の堆積岩（砂岩、凝灰岩等）が分布するものと仮定した。

6.2.2 弹性波探査によるシミュレーション

弾性波探査は、人工的に発生させた地震波を用いて地下の構造を推定する方法の総称で、「反射法」は地層境界や地層構造の異なる境界面を反射して地表に戻ることを利用するものである。なお、その他に、異なる境界面で屈折して地盤を伝わる状況を観測する「屈折法」も多用されている[15]。

弾性波探査のシミュレーションに際して設定した条件を Table 1 に、解析モデルを Fig.3(a)に示す。シミュレーション（想定した処分場に弾性波探査を行ったものとして得られると考えられる測定値）をデータ処理した結果を Fig.3(b)に示すが、図において処分坑道の上下面がイメージされており、専門家がこれをきちんと解釈することにより地層の不連続性等の異常を認識し、次の調査に移行する前に異常な領域を詳細に調査するものと推定される。

6.2.3 電気探査によるシミュレーション

電気探査法は、地中に定常電流場を発生させる時、地表での電位分布が地盤内部の比抵抗（導電率の逆数）によって決まることを利用して、地下の比抵抗構造を把握する手法である。なお、比抵抗は、岩質、風化・変質の程度、粘土鉱物・導電性鉱物の含有量、媒体の含水量等種々の要因に影響される[15]。

Table 1 Simulation condition for seismic prospecting

項目		設定値
P 波 速度 (Vp)	地表付近	1.0 km/s
	GL-100m 程度まで	2.5 km/s
	GL-100m 程度以深	2.5 km/s
	処分坑道	4.0 km/s
密度 (ρ)	地表付近	1.75 g/cm ³
	GL-100m 程度まで	1.80 g/cm ³
	GL-100m 程度以深	1.90 g/cm ³
	処分坑道	2.4 g/cm ³

シミュレーションのモデルとしては、先の弾性波探査における条件と同様に、トンネル型施設が GL-100 m に 4 本存在するものとし、岩盤については、GL-10m までは表土や風化岩（比抵抗値=100 Ω·m）とし、GL-10 m 以深は新第

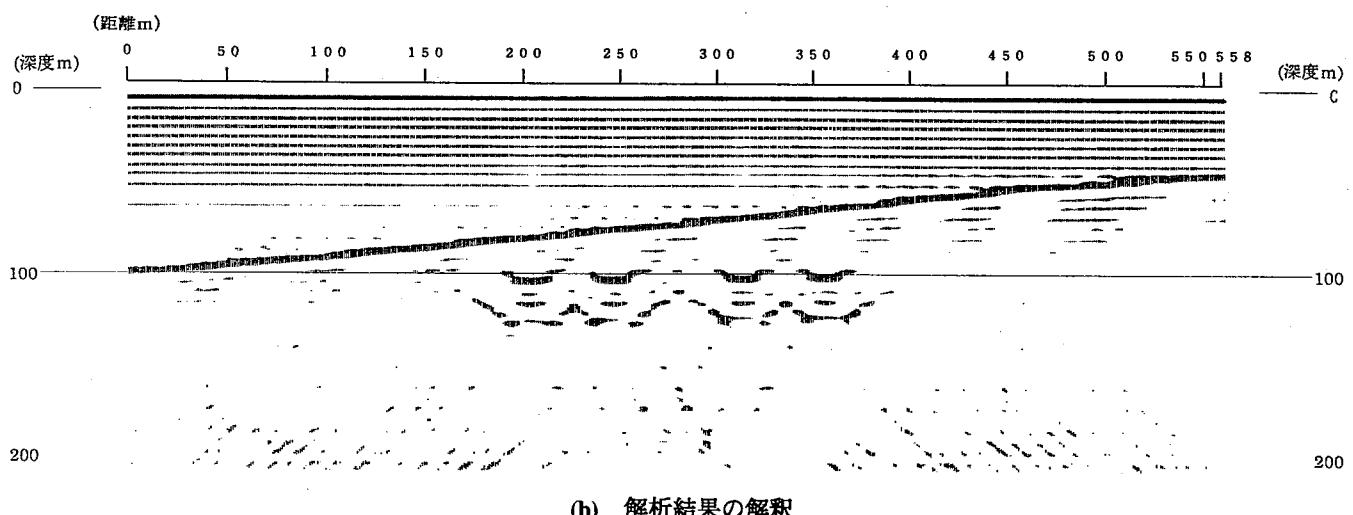
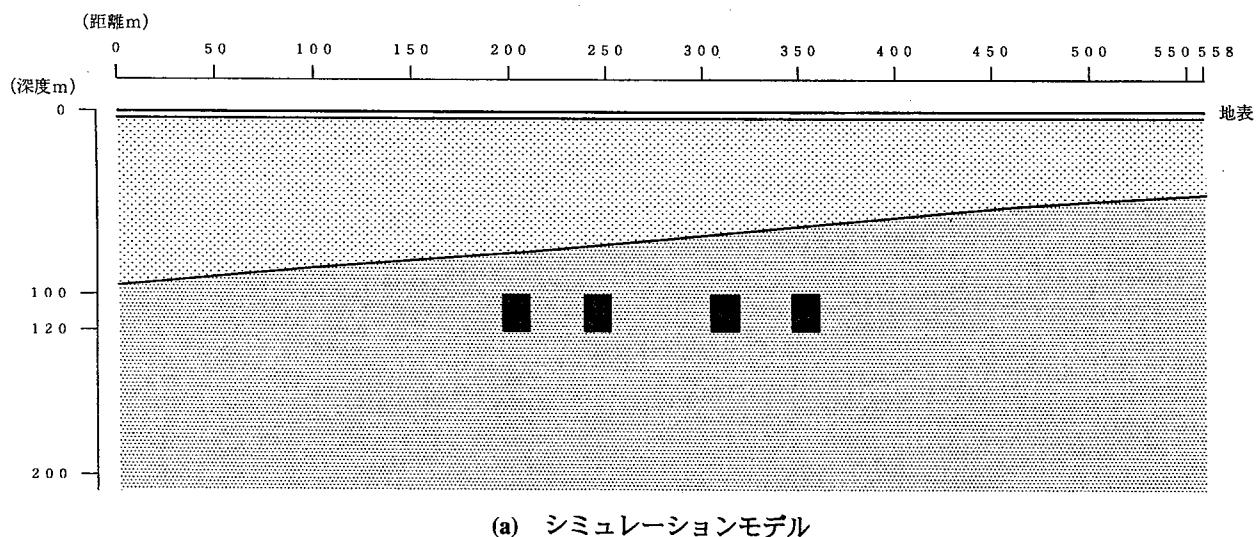


Fig.3 Simulation model and result of analysis for seismic prospecting

三系の堆積岩である砂岩や凝灰岩等（比抵抗値=50 $\Omega \cdot m$ ）が一様に分布しているものとした（Fig.4 参照）。

処分坑道内部と外側の岩盤とはベントナイト混合土や吹付けコンクリートによって仕切られており、処分場管理期間終了後の地下水の流入状況を勘案すると比抵抗値は様々な値をとることが想定されることから、本シミュレーションにおいては、処分坑道の比抵抗値を1~10,000 $\Omega \cdot m$ の範囲で変動させ、パラメータスタディを行うこととした。

処分坑道が存在しない場合のシミュレーション結果を Fig.5(a)に示し、パラメータスタディのうち処分坑道の比抵抗値を1 $\Omega \cdot m$ （処分施設に地下水が流入した後を想定）および10,000 $\Omega \cdot m$ （地下水流入前を想定）の結果を、各々 Fig.5(b)および(c)に示す。これらはいずれも、現在汎用されている2極（ポール・ポール）電極配置によるものであるが、定性的に考察できるように、データ処理した地層内の比抵抗の違いを別の色で表現している。Fig.5(b)（比抵抗=1 $\Omega \cdot m$ ：地下水流入後を想定）の場合は処分場が存在しない他の地下領域と明らかに異なることから、岩盤内の異常の可能性を懸念して詳細調査に進むと考えられるが、Fig.5(c)（比抵抗=10,000 $\Omega \cdot m$ ：地下水流入前を想定）では異常を認知できない可能性が大きい。

一方、同じ電気探査でもダイボル・ダイボル電極配置によるシミュレーション結果を Fig.6(b)に示す（処分坑道のない条件の結果は Fig.6(a)に示す）。これらは、Fig.5に示す2極（ポール・ポール）電極配置と同モデル、同条件で試算したものであるが、Fig.6の(a)と(b)は明らかに異なる状況の解析結果であることが認識され得る。これより、ダイボル・ダイボル電極配置が近い将来に汎用化が期待されていることを踏まえると、電気探査により調査を行う場合も、地層内に異常を認知して詳細調査を実施するものと考えられる。

6.2.4 電磁探査によるシミュレーション

電磁探査手法は、電気探査と同じく、地盤の比抵抗分布を把握することにより地下構造を推定する手法であるが、電気探査では直流電流を用いるのに対し、電磁探査では時間変動する電磁場（CSAMT法は人工信号源）を用いる[15]。

本シミュレーションでは、モデルや岩盤条件を前項の電気探査シミュレーションと同一とし、処分坑道の比抵抗値を1 $\Omega \cdot m$ および10,000 $\Omega \cdot m$ の2通りに設定して検討した。

処分坑道の比抵抗値を1 $\Omega \cdot m$ とした場合の結果を Fig.7に示す。ここでも定性的に検討することから解析で得られた異なる比抵抗を、異なる色で表示している。GL-100mに処分施設を想定したことを踏まえると、GL-100m付近の地層で、専門家は明らかに通常と異なる状況である可能性を認知できる。また、10,000 $\Omega \cdot m$ のシミュ

レーションにおいても認知され得る結果が得られており、その結果から詳細調査の必要性を認識するものと考えられる。

6.2.5 サイロ型処分施設に対する検討

諸外国等の処分施設の事例を踏まえると、高圧廃棄物処分施設として円筒型のサイロ型施設も想定される。そこで、予め地下構築物の形状や周辺の地質環境が把握されているミニドーム（20 m ϕ × 12.5 mH、頂部の深さは地上から70 m）に対して、弾性波探査法および電気探査法のシミュレーションを概略実施した。その結果、サイロに頂上からアクセスする縦坑が存在する場合等、処分場（サイロ）を異常物として把握できる可能性が低いケース等への対応の課題が残されるが、おおむね異常が認識され、詳細調査に進むものと考えられる。

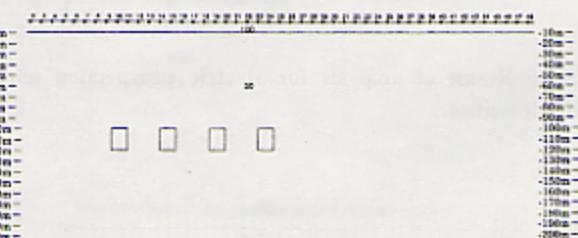


Fig.4 Simulation model for electric prospecting (resistivity method)

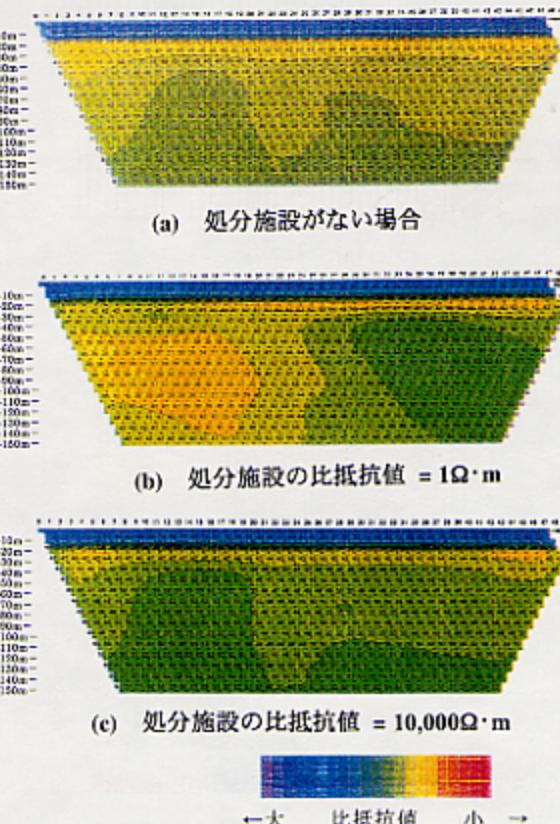


Fig.5 Result of analysis for electric prospecting (pole-pole method)

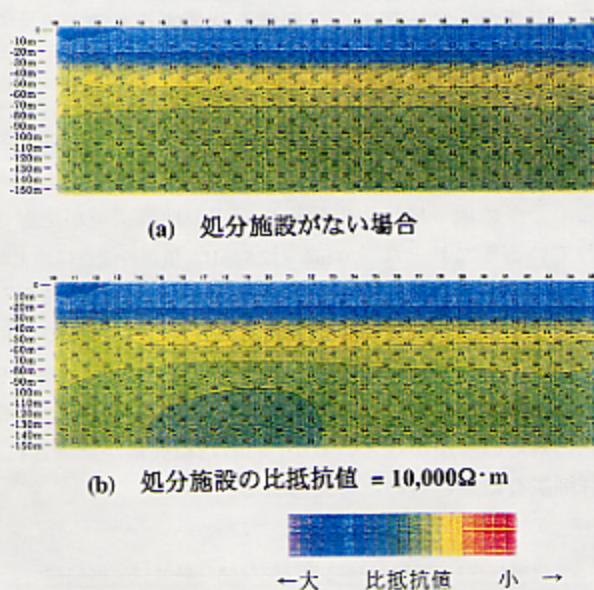


Fig.6 Result of analysis for electric prospecting (dipole-dipole method)

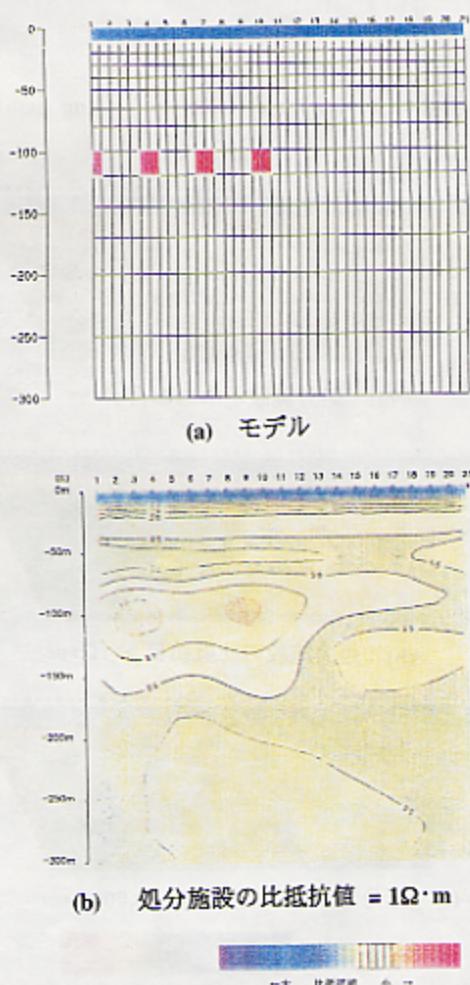


Fig.7 Result of analysis for electromagnetic prospecting (CSAMT method, 1 Ω·m)

6.3 ポーリング孔を利用した地盤調査による検知

さらに調査段階が進むと地中の地盤調査に移るが、ポーリング孔等を利用して実施する探査（検層等）に加えて地表部にもある装置を設置して測定する探査がある（ジオトモグラフィー等）。後者の探査法については、ポーリング孔内を利用してすることにより地層の連続的な情報を得ることができる等の利点があるが、探査方法は 6.2 で記載した内容と大きく異なるものではなく、また、前者については、周辺の地層状況を直接計測するものであることから、得られる結果は物理探査と同様あるいはより詳細なものである。

すなわち、ポーリング孔を利用した場合の探査の方が多少なりとも詳細な地層情報を入手できることを踏まえると、(2)節までの検討結果を外挿することが可能と考えられ、処分場自体の認知にまでは到らなくとも、地層内の異常は認知できるものと推定できる。

7 施工中管理における検知

地盤調査等の事前調査に引き続い施工段階に入り、施工管理がなされる。ここでは、地下石油備蓄等の 3 次元的構築物の建設においても地下トンネルの掘削を初期に行うものと考える。

地下でのトンネル施工では、事前調査（地盤調査）等の状況に応じて、作業員の安全確保の観点から切羽前方探査を行う場合もある。切羽前方探査は、地質条件や探査対象等を踏まえて種々の技術が使用されており、物理探査を応用したものや先進ボーリングを利用したもの等がある。前者（物理探査技術の応用）は 6.2 の検討結果を外挿できることから、調査段階で異常を認知できる。さらに、後者（先進ボーリングの利用）や施工段階に入ったとしても、処分施設形態によっては作業坑道が先に発見されること、処分場の建設時に設置するロックボルトやアースアンカーまたは坑道外面の覆工コンクリートの存在に気づくこと、さらにはバリア材として設置することが予想されるペントナイト（ペントナイト混合土）等の周辺岩盤と明らかに異なる物性の材質に突き当たること、等により異常事態が認識され、詳細調査が行われて適切な措置がなされると考えられる。

8 処分場検知の可能性等

8.1 異常の検知の可能性

既に操業管理が終了した高 β 廃棄物の処分場近隣（地下 50~100 m 程度の深度）に大規模な地下構築物の建設を計画した場合に、その処分場の存在を認知できるかについて検討した。その結果、現状の技術レベルを想定した場合でも、地下構築物の建設においては廃棄体に到達する

までには種々の stage が存在し、各 stage での認知できる可能性がある程度大きいことから、1つまたは2つ以上の stage で処分場の存在（異常な地層の存在）を認知できる可能性は非常に大きいと結論づけることができる。

なお、将来への技術開発力を期待すれば、処分場の認知の可能性はさらに高まることが予想される。

8.2 今後の課題

今後、論理の裏付けや論理展開を強固にしていくために、解決していくべき課題として、例えば以下が挙げられる。

- ① 各物理探査方法のシミュレーションの実証
- ② ケーススタディによる異常検知の物理探査技術の改良の方向性を踏まえた検討
- ③ 物理探査により検知されやすい施設条件の検討
- ④ 異常認知から処分場跡地の認知するまでのロジック構築

これらの課題以外にも、「計画される構築物の種類による処分場発見プロセスの妥当性」や「地下埋設物のデータベースの一元化」、さらには、「処分場の存在を認知しやすい処分場設計の検討」等も課題として挙げられる。

謝辞

本報告は、通商産業省資源エネルギー庁から受託している「平成10年度放射性廃棄物処分基準調査（放射性廃棄物処分高度化システム確証試験）」内で、小島圭二東大名誉教授を主査とする宮川彰彦（（財）エンジニアリング振興協会）、楠建一郎（（財）電力中央研究所）、矢島壯一（（社）全国地質調査業協会連合会）、岡本明夫（日本地下石油備蓄株式会社）の各氏からなる検討委員会において審議いただいた成果での概要である。なお、成果は報告書にとりまとめ、既に公開している[16]。

ここに、本報告に対する委員および関係各位の精力的な協力に感謝するとともに、検討の場を提供していただいた通商産業省に感謝したい。

参考文献

- [1] 原子力委員会 原子力バックエンド対策専門部会：現行の政令濃度上限値を超える低レベル放射性廃棄物処分の基本的考え方について、平成10年10月16日(1998).
- [2] (財)エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター ガイドブック研究会 編集：『地下空間』利用ガイドブック、清文社、東京、pp.199-212(1994).
- [3] 坂本義昭 他：TRU 廃棄物処分場への人間侵入の観点から見た地下構築物深度分布調査、原子力学会誌、38(6), pp10-15 (1996).
- [4] 臨時大深度地下利用調査会：臨時大深度地下利用調査会答申、平成10年5月27日(1998).
- [5] 土木学会岩盤力学委員会 編集：大規模地下空洞の情報化施工、社団法人土木学会、東京、pp.39-53(1996).
- [6] 核燃料物質または核燃料物質によって汚染された物の廃棄物埋設の事業に関する規則、総理府令第1号、昭和63年1月13日（最新改正：総理府令第39号 平成8年7月12日）.
- [7] Groenfors J.: Urban Underground Planning, IFHP International Conference, Stockholm-Helsinki, September 12-16 (1990).
- [8] (財)石油産業活性化センター：石油パイプラインの信頼性に関する海外調査報告書（石油製品流通効率化事業），PEC-95P20 (1996).
- [9] 地理情報システム(GIS) 関係省庁連絡会議：「長期計画」の推進状況に関する中間とりまとめ、平成10年3月30日(1998).
- [10] 岡本明夫：地下石油備蓄岩盤タンクの水封評価－慈・菊間・串木野基地について－、学位論文 (1988).
- [11] (社)地盤工学会 物理探査技術の地盤工学への利用に関する研究委員会：物理探査技術の地盤工学への利用に関する研究 平成9年3月31日(1997).
- [12] 小島圭二 他：小特集 最新の物理探査技術の地盤工学への適用、土と基礎、45(9), 1-35 (1997).
- [13] 地盤調査ハンドブック編集委員会：地盤調査ハンドブック、株式会社建設専業調査会、東京、pp.265-292(1995).
- [14] 物理探査学会 編集：図解 物理探査、物理探査学会、東京、pp.3-18, 53-76 (1989).
- [15] 土質調査法改訂編集委員会：地盤調査法、社団法人地盤工学会、東京、pp.71-81 (1995).
- [16] (財)原子力環境整備センター：地下利用と処分場の検知（シミュレーション等による処分場検知の可能性），平成10年9月 (1998).