

## フランスの放射性廃棄物地層処分場における無線モニタリング概念の構築

高村尚\*1 奥津一夫\*1 Jean-Louis Gaussen\*2 新保弘\*2

フランスでは長寿命核種を含む放射性廃棄物の処分に関して、政府により「リバーシビリティ」の必要性が示されている。フランスにおける放射性廃棄物処分の事業実施主体である ANDRA はリバーシビリティをステップワイズな処分場およびそのマネージメントにより具現化しようとしている。リバーシビリティを実現する上で、モニタリングは重要な役割を果たす。しかしながら、モニタリングにより処分場の長期健全性が損なわれることは許されない。

本研究では、処分場の構成要素の性能を低下させることなく、リバーシブル処分場におけるモニタリングを実現するため、データ通信用等のケーブルを使用しない無線モニタリングの概念を構築し、処分場内における無線データ通信に関する技術的な実現可能性をモデル実験を通じて検討した。

**Keywords :** 地中無線データ通信, 地層処分, リバーシビリティ, モニタリング, 低周波電磁波

In France, reversibility is recommended as an important philosophy for the long lived radioactive waste disposal by the government. ANDRA has been establishing the concept of reversible repository and its step-wise management. Monitoring is considered to play an important role so as to realize the step-wise management. However, it never be allowed that the monitoring system deteriorate the performance of the barrier of the repository. In this report, the concept of the wireless monitoring system, which contributes to monitoring in the reversible repository without any disturbance of the barrier, is presented. Its technical feasibility is also described on the basis of the experimental study.

**Keywords :** wireless transmission, geological disposal, reversibility, monitoring, very low frequency electromagnetic wave

### 1 はじめに

フランスは国内総発電量の約 80%を原子力発電で供給する原子力大国である。また、核燃料サイクルを国策としている点でも日本と関係が深い。

フランスでは領土内で発生する長寿命の中高レベル放射性廃棄物の取り扱いに関して、1991年12月30日に制定された法律[1]（放射性廃棄物管理研究法；以下、バタイユ法）により、分離・変換処理、長期地表貯蔵および地層処分の3通りの管理方法を15年間にわたって並行して検討し、その結果を2006年に政府が議会で提出し、放射性廃棄物の取り扱いに関する最善策を議論することになっている。

地層処分に関する研究開発は ANDRA（フランス放射性廃棄物管理機関）が担当している。フランス政府はバタイユ法により ANDRA に対しリバーシビリティ（可逆性）を考慮する、あるいは考慮しない地層処分の実現可能性を検討するように要求している。

ANDRA は、地層処分におけるリバーシビリティを実現する上で、モニタリングが重要な役割を果たすものと考えている[2]。しかしながら、モニタリング機器を処分場内に設置すること（特にバリアを貫通するケーブルを設置すること）により処分場の長期健全性が損なわれることは許されない[3]。

A study on the wireless transmission monitoring for the geological disposal repository in France by Hisashi Takamura (takamura@kajima.com), Kazuo Okutsu, Jean-Louis Gaussen, Hiroshi Shimbo

\*1 鹿島建設株式会社 土木設計本部 Kajima Corporation Civil Engineering Design Division 〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30

\*2 ANDRA Parc de la Croix Blanche-1/7, rue Jean-Monnet-92298 Chatenay-Melabry Cedex, France

本論文ではフランスにおける地層処分に関して、処分場の性能を低下させることなく廃棄体近傍のモニタリングを可能にする無線モニタリングの概念を構築し、処分場内における無線データ通信の実現可能性についてモデル実験を通じて検討する。

### 2 フランスの地層処分の概要

#### 2.1 放射性廃棄物

フランスにおける放射性廃棄物とその処分方法を Table 1 に示す。放射性廃棄物の主な発生者はフランス電力公社（EDF）、核燃料公社（COGEMA）およびフランス原子力庁（CEA）であり、3者で総廃棄物量の92%を占める。残りの8%は領土内の1100の病院、大学、研究所などが発生源である。放射性廃棄物は放射線量により極低レベル、低レベル、中レベルおよび高レベルの4種類に分類され、さらに半減期の長短により処分方法が区分けされている。バ

Table 1 Classification of the radioactive wastes

Category	Short lived waste Main nuclide half life < 30 years	Long lived waste Main nuclide half life > 30 years
Very low level	Operating (surface disposal)	
Low level	Operating (surface disposal)	Being considered (radium bearing and graphite waste)
	Being considered (tritiated waste)	
Intermediate level B waste		
High level C and CU waste	Being considered within the framework of 1991 Waste Act	

タイユ法が対象としている廃棄物は中レベルのうち半減期が30年以上の放射性廃棄物（以下、B廃棄物）と高レベルに区分される放射性廃棄物（高レベル放射性廃棄物（以下、C廃棄物）と使用済み燃料（以下、CU廃棄物））である。

## 2.2 処分概念

ANDRA は地層処分の成立性に関するレポート（ドラフト版は2005年6月に公表[4]）を2005年末までに国に提出するための研究を行うべく、軟岩サイトとしてフランス東部にムーズ・オートマルヌ地下研究所（以下、ビュール地下研究所）を建設し試験・研究を実施している。花崗岩サイトについては、軟岩同様にサイト選定作業を行ってきたが、残念ながら地下研究所の建設を認められるまでには至っておらず、国内の既往の知見やスウェーデン、スイス、カナダなどの地下研究所で得られた知見をベースにした検討が進められている。

Fig.1 はビュール地下研究所で特性調査を進めている粘土質岩を対象とした処分場概念である。地下処分施設は深度500m、大きさ4~5km程度のエリアにCおよびCU廃棄物処分セル群とB廃棄物処分坑道群からなる。

CおよびCU廃棄物は炭素鋼製の1次パッケージに封入され（以下、CおよびCU廃棄体）、水平に建設された処分セルに定置される。処分セルの構成は以下のとおりである（Fig.2）。

- メタルライナー；鋼製の坑壁支保材/内径約2.5~3.5m、厚さ40mm程度、長さ40m程度
- 緩衝材；メタルライナー内部に設置されるベントナイト系バリア/厚さ80cm程度、ベントナイトMX80相当、乾燥密度1.8Mg/m<sup>3</sup>
- メタルスリーブ；緩衝材内部に設置される廃棄体定置スペースを確保するための鋼製チューブ/内径0.6~1.5m程度/厚さ25mm程度
- メタルプラグ；作業時の遮蔽用鋼製プラグ/厚さ約35cm
- ベントナイトプラグ；セル閉鎖時にメタルプラグとサービス坑道間のメタルスリーブを撤去しメタルプラグ前面に設置される核種閉じ込め用のシーリング材/緩衝材と同仕様、長さ3m程度
- コンクリートプラグ；ベントナイトプラグ前面に設置される強度プラグ/長さ5m程度

C廃棄体処分セルに関しては緩衝材を敷設しない処分概念も検討している。

B廃棄物は約2m<sup>3</sup>のコンクリート製の容器に格納され（以下、B廃棄体）、内径10m程度の処分坑道に定置される。処分坑道はコンクリートプラグで閉鎖され、処分坑道とメイン坑道を接続するサービス坑道はベントナイトプ

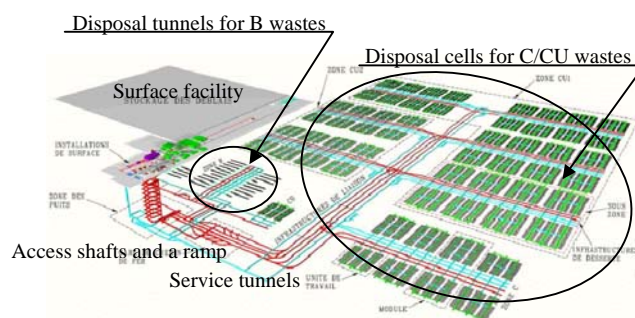
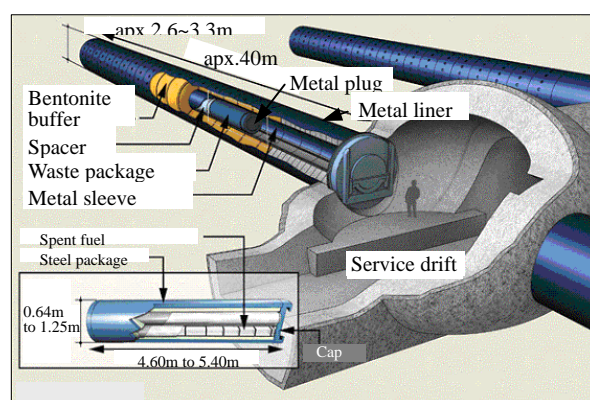
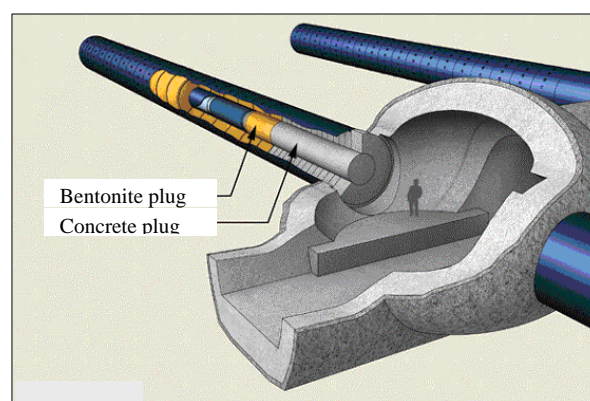


Fig.1 Layout of repository



(a) Before sealing



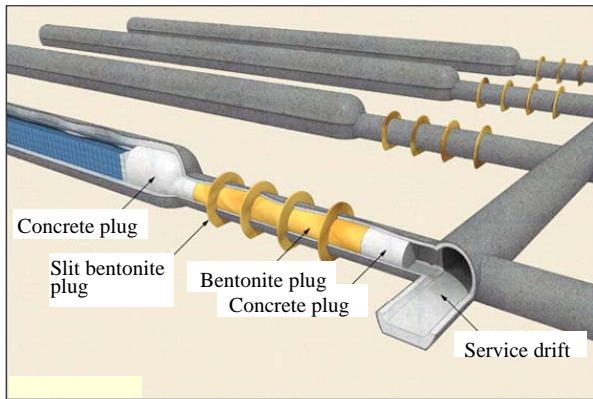
(b) After sealing

Fig.2 Horizontal disposal cell for C/CU wastes

ラグによりシーリングされる（Fig.3）。

## 2.3 リバーシビリティ

バタイユ法および1998年の地層処分に関する政府決定によりANDRAはリバーシビリティを考慮した地層処分（リバーシブル処分場）を検討している。ANDRAはリバーシビリティを「次の世代に、放射性廃棄物をどのように取り扱うかの自由な選択権を委ねることを目的としたフレキシブルかつステップワイズな処分マネジメント」と定義づけ、次の5つのステージからなる処分プロセスにもとづく地層処分の実現性を検討している[5]（Fig.4）。



**Fig.3 Disposal tunnel for B wastes (After sealing)**

- Stage1 ; 処分セル内への廃棄体の定置完了. 処分セルを  
操業プラグ (メタルプラグ) で仮閉鎖.  
Stage2 ; 処分セルをベントナイトプラグとコンクリート  
プラグで閉鎖.  
Stage3 ; サービス坑道を閉鎖.  
Stage4 ; メイン坑道を閉鎖.  
Stage5 ; アクセス斜坑, 立坑を閉鎖.

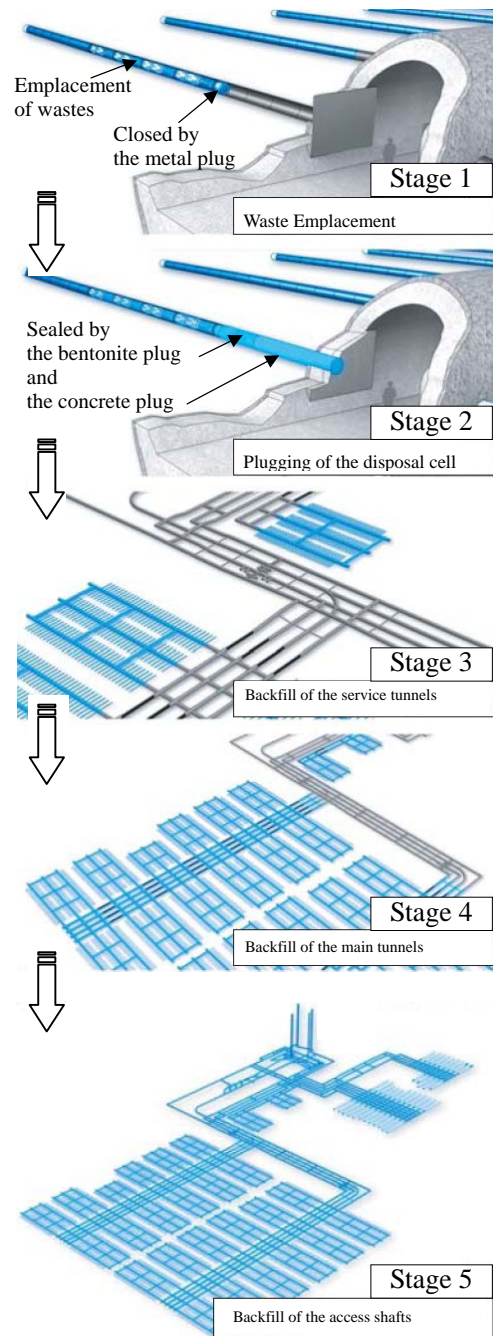
それぞれのステージの期間や, あるステージを次のステージに進めるか, 維持するか, あるいは前のステージに戻るかの判断は, 次の世代が決定する. ある時点における科学・技術的知見には限界があることを謙虚に認識しつつ, 一方で事業の進展とともに確実に増えていく知見や情報を意思決定者に常に透明性をもって提供していくオープンなマネジメントである. 廃棄体の再取り出し性は最初の2つのステージ (廃棄体の定置およびセルの閉鎖) で強く要求されている. ここで重要なことは, 各ステージにおける可逆性は常に確保するものの, ステージが進むにつれ, リバーシビリティレベル (前のステージへの戻りやすさ) を積極的に下げていく点である. ステージを進めるということは意思決定者が地層処分への自信を深めていくことでもあるからである.

### 3 リバーシビリティを支援するモニタリング

マネジメントの意思決定者は処分場の挙動に関する個別現象解析結果やサイトの状況に関するデータ, 建設, 操業時の品質管理記録などにもとづきマネジメントの選択をすることになる. そのとき, モニタリングは処分場の挙動に関する情報を意思決定者に提供するという重要な役割を果たす.

#### 3.1 モニタリングの目的および原則

リバーシビリティを支援するためのモニタリングの目的は次のとおりである.



**Fig.4 Process of reversibility management after the completion of a disposal panel (illustration corresponding to type C/CU)**

- 意思決定者がマネジメントの選択 (ステージの維持, 前進, あるいは後退) をするために必要な, 処分システムの状態を的確に示す主要な現象 (処分場の様々な場所および時間における熱, 水理, 力学, 放射線) に関する情報・知見の提供
- 処分場挙動に関する既往の知見およびモデル解析結果と, 原位置における最新データとの比較
- 処分場に関する意思決定者の理解と自信の増進
- 処分場のメンテナンスと廃棄体再取り出しの観点からの施設状況の把握

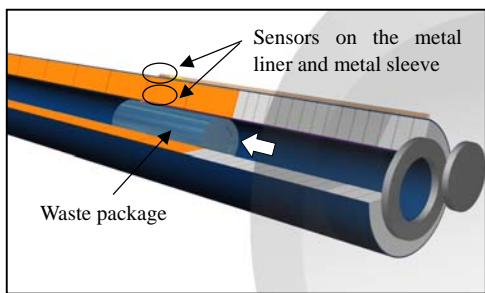


Fig.5 Emplacement of waste

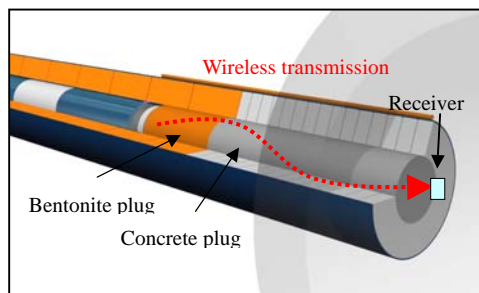


Fig.8 Sealed by concrete plug

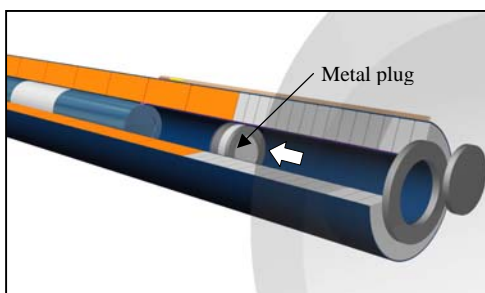


Fig.6 Installation of the metal plug

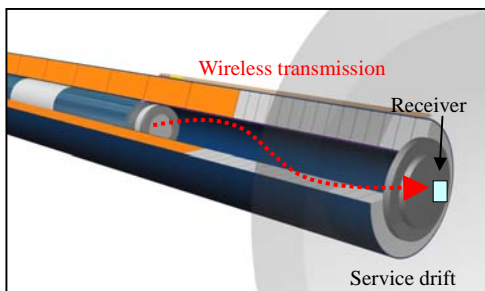


Fig.7 Installation of the metal plug

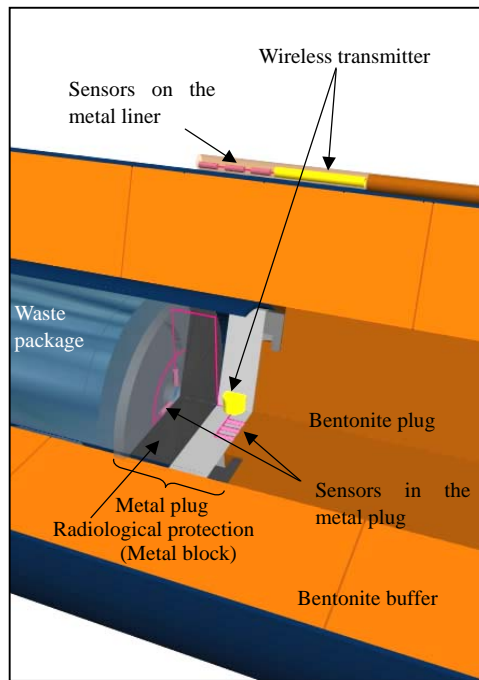


Fig.9 Layout of sensors

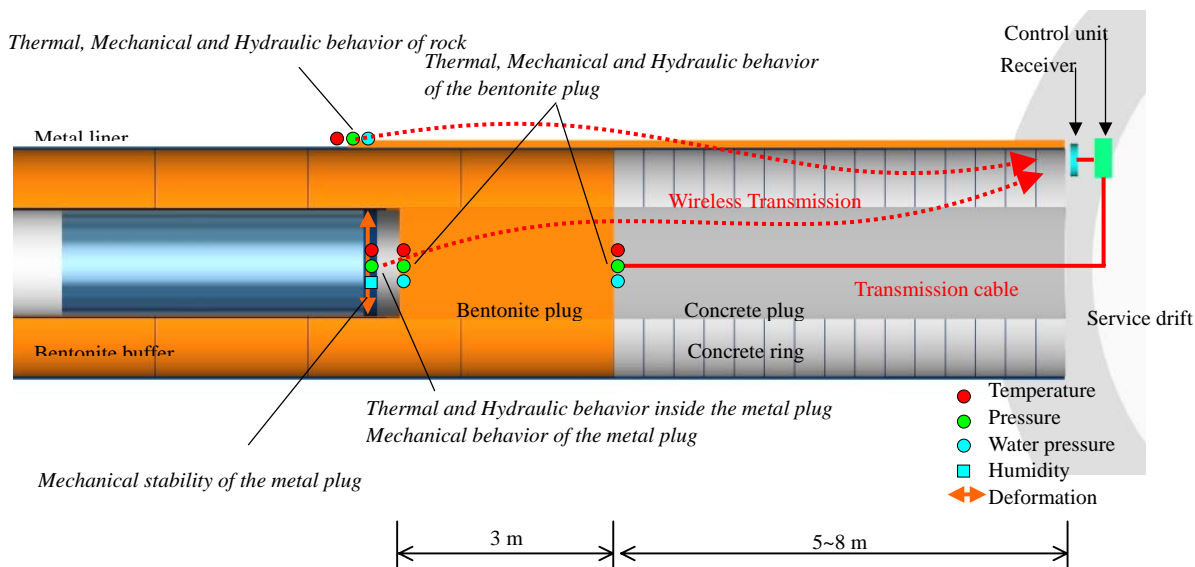


Fig.10 Monitoring concept (stage 2)

また、モニタリングを処分場内で実施する際の原則は以下のとおりである。

- ① モニタリングに必要な機器は処分場のいかなる構成要素の性能も低下させてはいけない
- ② モニタリング機器の設置と撤去は容易にできるものでなければならない
- ③ モニタリング機器がリバーシビリティレベルを低下させるものであってはいけない
- ④ モニタリングパラメータは信頼性が高くシンプルなものでなければならない

### 3.2 廃棄体近傍のモニタリング

著者らは、上記の目的と原則を満足する処分場全体および処分事業全期間にわたるモニタリング計画とシステムを検討している。

その中で、廃棄体近傍における温度、湿度、および圧力を直接モニタリングすることは意思決定者が処分場挙動を把握する上で極めて有効である。いずれのパラメータも測定値を評価するために、特別な解析などを必要としないシンプルで直接的に処分場挙動（熱、水理、力学）を示すパラメータであるからである。しかしながら、例えば C および CU 廃棄体の近傍、すなわちメタルスリーブ内の各パラメータを従来の技術でモニタリングする場合、核種を閉じ込めるための主要なバリアである緩衝材中に通信ケーブルを敷設する必要がある。緩衝材中のケーブルは長期的に核種の選択的移行経路になる恐れがある[3]ため、これらのモニタリングの実現には新しいシステムが必要である。

### 3.3 無線モニタリングシステム的前提条件

本研究の目的は、緩衝材やベントナイトプラグをはじめとする処分場構成要素の性能を低下させる恐れのある通信ケーブルを使用することなく、B 廃棄体処分坑道内や C および CU 廃棄体処分セルのメタルスリーブ内におけるモニタリングデータをサービス坑道に伝送する「無線モニタリングシステム」の概念を構築し、その実現可能性を示すことである。

ここで、本研究の前提条件は、先述のモニタリングの原則にもとづき以下のとおり設定した。

- A. 無線モニタリングシステムは既に設定されている処分場構成要素の仕様を変更させるものであってはならない（原則①に対応）。
- B. 無線モニタリングシステムの定置には廃棄体およびメタルプラグ等の定置用ハンドリング装置を使用し、かつ同様の定置プロセスで定置できるものとする（原則②に対応）。
- C. 無線モニタリングシステムの存在がリバーシビリティレベルを低下させるものであってはならない（原則③に対応）。

- D. モニタリングパラメータは、温度、湿度、圧力、変形（Fig.10 参照）等とする（原則④に対応）。

### 3.4 無線モニタリングシステム概念

無線モニタリングシステム（本論文では C および CU 廃棄体処分セルを対象としたステージ 2 までのシステムを説明する）の定置プロセスと概念を Fig.5～Fig.10 に示す。

処分プロセスのステージ 1 で、まず処分セル内に廃棄体を定置する（Fig.5）。最終廃棄体の定置完了後、短期的放射線遮蔽用のメタルプラグを設置する（Fig.6）。モニタリング機器はメタルプラグ内に集約し（メタルスリーブ上に設置するセンサは除く）、メタルプラグの設置完了後にモニタリングを開始する（Fig.7）。得られたデータはサービス坑道内の受信機に無線送信する。このときの通信距離は 10m 程度である。ステージ 2 では、メタルプラグとサービス坑道の間にあるメタルスリーブを撤去しベントナイトプラグとコンクリートプラグを設置する（Fig.8）。モニタリングはこれらの作業に影響を与えることなく継続する。

メタルプラグには遮蔽用のメタルブロックをはさんで廃棄体側とベントナイトプラグ側にセンサを配置し、メタルスリーブ内（廃棄体近傍）およびベントナイトプラグの挙動をモニタリングする。ベントナイトプラグ側にそれらのセンサのデータを無線送信する送信機を搭載する（Fig.9）。モニタリング機器は全てメタルプラグ内に搭載されているため、既に設定されている処分場構成要素の仕様には変更点はない（前提条件 A に対応）。また、モニタリング機器の設置のために新しいハンドリング装置は必要ない（前提条件 B に対応）。さらに、廃棄体回収のためのハンドリングプロセスにも変更がないためリバーシビリティレベルは維持される（前提条件 C に対応）。Fig.10 にステージ 2 における無線モニタリングの概念と主なモニタリングパラメータを示す。

## 4 地中無線通信技術

### 4.1 地中無線通信装置

空气中などで一般に使用されている電波を用いた無線通信技術は、土中あるいは岩盤中では電波の減衰が大きいため地下での通信手段としては不向きである。そこで、本研究では上述の無線モニタリング概念を実現するため、地下でも比較的減衰の少ない低周波電磁波を用いた通信技術に注目した。この通信技術は日本における海底埋め立て土木工事における地盤沈下測定等で実績があるもの[6]で、これまでに、著者らはスウェーデンのエスポ島にある SKB（スウェーデンにおける放射性廃棄物処分の実施主体）の地下研究所（Äspö HRL）等における原位置試験を通じて、岩盤中における無線通信性能を評価・確認している[7, 8]。通信装置の外観を Fig.11、基本仕様を Table 2 に示す。



Fig.11 Underground wireless transmission system

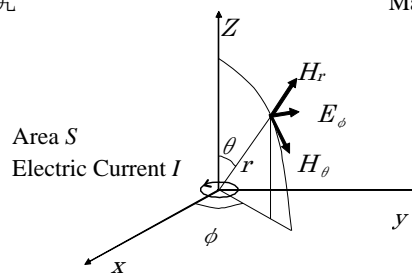


Fig.12 Electromagnetic Field Emission of Loop Antenna

Table 2 Specification of existing wireless system

Transmission distance	apx.100 m (in crystalline rock)
Transmission period	max.20 years (4 measures/day, 1 transmission/week)
Battery	Lithium battery
Carrier frequency	1.2~1.6kHz
Communication velocity	75bps
Channels for sensors	19ch
Heat resistance	50°C guaranteed

Effects of the repository components to the transmission performance

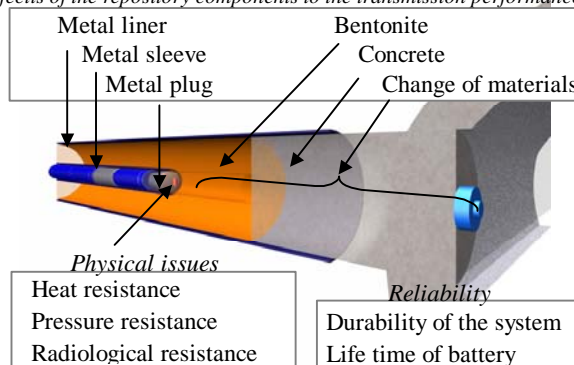


Fig.13 Issues regarding CU disposal cell

4.2 通信理論

データのキャリア電磁波は送信コイルにより発生させる。その電磁波の均質媒体中における伝播特性は、面積 S の微小ループに角速度  $\omega$ 、波長  $\lambda$  の電流  $I$  が流れるときの距離  $r$  におけるループ電流近傍電磁界(電界  $E_\phi$ , 磁界  $H_r, H_\theta$ , Fig.11) を示す次式で表現できる[9, 10, 11].

$$E_\phi = -j \frac{Z_0(SI)}{\lambda^2 r^2} \sin \theta e^{j(\omega t - 2\pi / \lambda)} \quad (1)$$

$$H_r = \frac{(SI)}{2\pi r^3} \cos \theta e^{j(\omega t - 2\pi / \lambda)} \quad (2)$$

$$H_\theta = \frac{(SI)}{4\pi r^3} \sin \theta e^{j(\omega t - 2\pi / \lambda)} \quad (3)$$

4.3 適用する際の課題

Fig.10 に示したモニタリング概念の課題については、データの取得・評価解釈方法等種々考えられるが、本論文では無線データ通信に関する課題に注目する。上記の地中無線通信装置を Fig.10 のモニタリング概念に適用するに当たり検討すべき課題を Fig.13 にまとめる。

電磁界は誘電率、導電率や透磁率の高い媒質に大きくゆがめられる。C および CU 廃棄体処分セルには高導電かつ高透磁性材料である鋼製部材等が多く存在する。通信性能を評価するためには処分セルの各構成要素が電磁界に与える影響を評価する必要がある。また、機器に高温(最高温度 100°C程度)、高圧(保守的に 10MPa 程度)および

高放射線(遮蔽ブロックの外側で 1.9  $\mu$  Sv/h) 環境下での耐用性を付与することも必要である。さらに、数 10 年間の使用に供する機器の信頼性と電力の供給能力を向上させる必要がある。

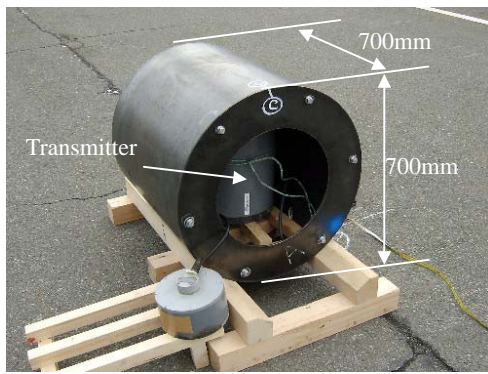
5 実現可能性に関する実験的検討

本研究では、上記の課題のうち通信性能に関する課題に対する技術的検討を行った。均質媒体中の無線通信理論は 4.2 に示したとおりである。しかしながら、一般に、不均質媒体中、特に電磁障害要素が多く存在する環境において、アンテナの極近傍における電磁界を数値解析のみで精度良く評価することは容易ではなく、その評価のためには実験を行い、得られたデータにもとづく検討が必要である[12].

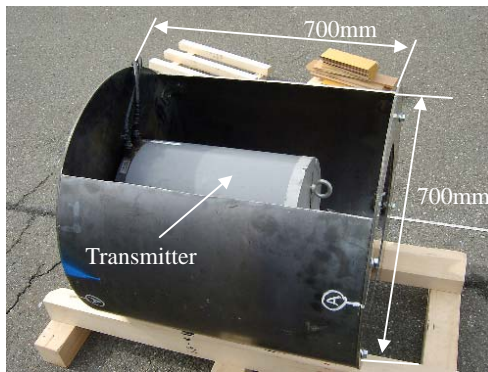
そこで本研究では、通信性能に与える影響が大きいと考えられる次の 3 つの項目に関する実験を実施し、無線モニタリングの実現可能性を示すための知見を得ることとした。

- メタルプラグの存在や形状が通信性能に与える影響の把握
- メタルスリーブおよびメタルライナーの存在や形状が通信性能に与える影響の把握
- 閉鎖のための充填物質(緩衝材、ベントナイトプラグ等)が通信性能に与える影響の把握

なお、使用する電磁波の周波数は事前の予備実験により 1.2kHz とした。



(a) Type A



(b) Type B

Fig.14 Metal plug



Fig.15 Metal tube

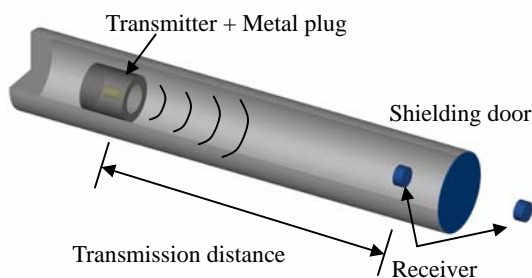


Fig.16 Image of the test about the metal components

Fig.14およびFig.15に実験で使用したメタルプラグと鋼管(メタルスリーブとメタルライナーを模擬)の例を示す。メタルプラグのタイプ A (Fig.14 (a)) は送信機のまわり全てを鋼製材料で覆ったもの、タイプ B (Fig.14 (b)) は上下を開放したものである。実験では、送信機を内蔵したメタルプラグを直径が 900mm および 1200mm の鋼管内に設置し、送信方向等をパラメータとしつつ通信試験を行い、電磁波の伝播がそれらの鋼製材料からどのような影響を受けるのかを確認した (Fig.16)。

Fig.17 はメタルプラグ (タイプ A) の中に送信機を送信コイル軸が鉛直になるように設置し、それを鋼管の横断面中央に置いた時の通信距離と受信電圧に関する実験結果である。受信電圧は受信地点の電磁界強度に比例するため、通信距離と受信電圧の大きさの関係を測定することにより送信機・受信機間の電磁波伝播特性を把握することができる。Fig.17 にはメタルプラグと鋼管を使用しない場合の結果も比較のため示した。電磁界強度は、通信距離に応じて低下するが、その低下の度合いは鋼管内の方が大きく、メタルプラグや鋼管の存在が電磁波の伝播に影響を与えていることがわかる。その影響の程度は鋼管径が小さいほど大きい。

また、鋼管内の電磁界強度が通信距離に応じて上下しているのは、今回使用した鋼管が短い鋼管をつなぎ合わせて作ったものであり、そのジョイントの電磁的性質の不連続な部分に磁界が集中したからであると考えられる。

Fig.18 はメタルプラグ (タイプ B) の中に送信機を送信コイル軸が水平あるいは鉛直になるように設置し、それを鋼管の横断面中央に置いた時の通信距離と受信電圧に関する実験結果である。それぞれの試験条件は、Fig.19 に対応している。送信コイル軸の向き等違いにより電磁波伝播特性が異なることがわかるが、これは鋼材上に発生する誘導電流の大きさに関係していると考えられる (Fig.19)。

送信コイル軸を水平(鋼管軸方向)に設置した場合には、鋼管上に大きな誘導電流が流れやすくなり送信エネルギーが熱として消費されることで電磁波の減衰が大きくなる (Fig.19(a))。これに対し送信コイル軸を鉛直にすると、メタルプラグ上の誘導電流は大きくなるものの、鋼管上に誘導電流が流れにくくなるため結果として水平の場合よりも電磁波の減衰の程度が小さくなる (Fig.19(b))。

ところで、送信コイル軸を鉛直にした場合においてメタルプラグに誘導電流を遮断するような絶縁部分を施すと、鋼管に加えメタルプラグ上に発生する誘導電流も抑制することができ (Fig.19(c))、電磁波伝播特性が向上する。

このように、メタルプラグや鋼管は通信性能に影響を与えるものの、その影響の度合いはそれぞれの形状や送信方向等を適切に組み合わせることにより低減できることが明らかとなった。

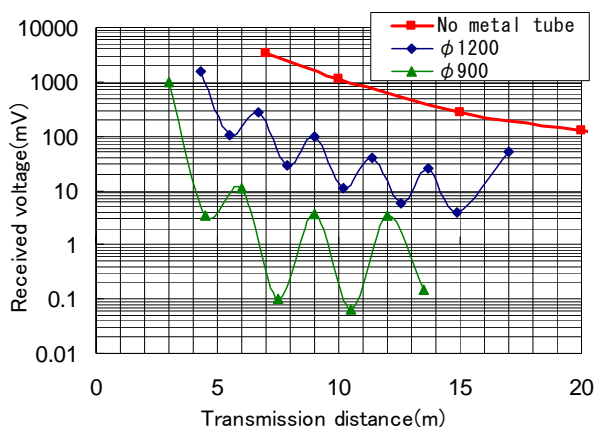


Fig.17 Effect of the diameter of metal tube

なお、Fig.17 および Fig.18 では、電磁波の伝播特性に注目したが、現実的な観点では通信が可能か否かが重要である。無線通信は受信電圧が受信地点に存在している電磁ノイズよりも大きい場合に可能となる。今回の試験では電磁ノイズが0.01mV程度であったため、通信が可能であった。地下での電磁ノイズはさらに小さいことを考えれば、地下の処分環境下においても通信が可能であるといえる。

ところで、CおよびCU 廃棄体処分セルのスチールライナー内にはステージ1で緩衝材が設置され、ステージ2でベントナイトプラグおよびコンクリートプラグが充填される。これらの材料は含水量の程度に応じた導電性をもつが、これらが高導電材料であるメタルスリーブやメタルライナーと電気的閉回路を形成すると電磁波の電界成分が大きく減衰し、通信性能も大きく低下する恐れがある。そこで、鋼管内部に敷設された充填物質が鋼管とともに電気的閉回路を形成するかどうかを確認する実験を実施した。充填物質の導電率は含水比とその水の導電率に依存するため、実験では充填物質として保守的に含水率の高いベントナイト（クニゲル V1，密度 1.5Mg/m<sup>3</sup>，含水率 30%）および導電率の高い塩水（濃度 0%～約 4%；海水程度）を使用した。なお、ベントナイトの密度は導電率への影響が小さいため、この実験では製作性を容易にするため密度を実際の仕様よりも低く設定した。

実験では、内径 700mm，高さ 700mm の鋼製容器にベントナイトや塩水を充填し、その中に小型の送受信機（周波数 1.2kHz）を設置し通信距離と電磁界強度（受信電圧）を測定した（Fig.20）。

Fig.21 はベントナイトを充填した時の通信性能を示す。ベントナイトを充填した場合の通信性能は充填しない場合とほとんど同じであることがわかる。同様に、高導電体である塩水を充填した場合においても通信性能の低下は見られないことを確認している。これらより、鋼管内に導電率の高い物質が充填された場合の通信性能の低下の要因は鋼管によるものが支配的であり、充填物質の影響は小さいと判断できる。充填物質が鋼管とともに電気的閉回路を形成する可能性は低いと考えられる。

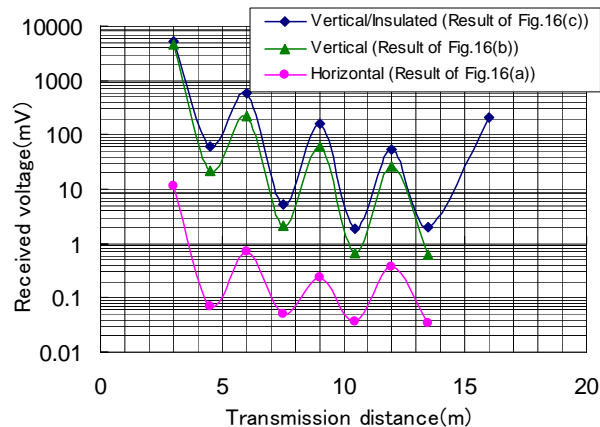


Fig.18 Effect of the shape of metal plug(Type B) and the direction of coil antenna

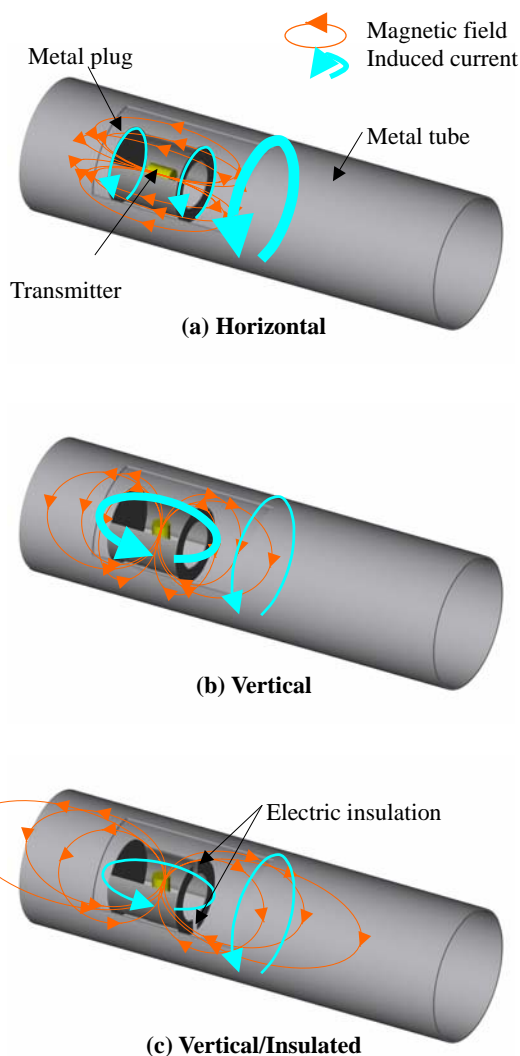


Fig.19 Magnetic field and induction of current in the metal plug (Type B) and metal tube



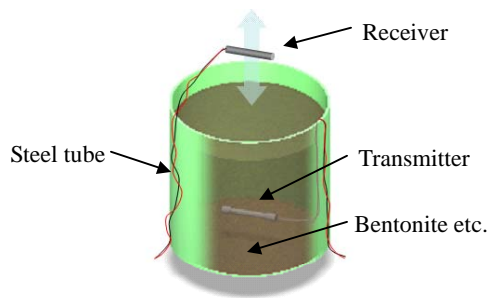


Fig.20 Image of the test about the effect of buffer

## 6 結論

本研究では、フランスにおけるリバーシビリティを考慮した地層処分に関して、処分場の性能を低下させることなく廃棄体近傍のモニタリングを可能にする無線モニタリングの概念を構築した。そして、無線データ通信に関して、室内試験、屋外試験を通じて次の知見を得た。

- ・ メタルプラグおよび鋼管は通信性能に影響を与えるものの、その程度は送信コイルの向きや鋼材に絶縁を施すなどの工夫により低減することができる。
- ・ 緩衝材等、鋼管内に充填される物質は電磁波の減衰に影響を与えない。

なお、通信が可能かどうかという観点では、実験では鋼材等の制約やノイズが大きいという地上の環境下においても通信が成立しており、地下における電磁ノイズが地上よりも小さいことを考えれば地下の処分環境下においても通信が可能であるといえる。

ところで、本論文では緩衝材を敷設するCおよびCU廃棄体処分セル概念における無線モニタリングシステムに関する検討内容を報告したが、著者らはこの他にも緩衝材を敷設しないC廃棄体処分セル概念や、B廃棄体処分坑道概念における無線モニタリングシステムに関する検討も行なっている。なお、本研究では主にリバーシブルマネジメントのステージ2までのモニタリング方法を説明したが、それ以降のモニタリングに関する検討も詳細に行なっている。今後は、本研究で得られた知見をもとに通信装置のプロトタイプを製作し、ビュール地下研究所における実環境を模擬した坑道内での原位置通信試験を通じて無線モニタリングシステムの有効性を実証する予定である。

## 謝辞

筆頭著者は2003年から2005年にかけて原子力環境整備促進・資金管理センターを介してANDRAに駐在しており、本研究はそのANDRA駐在時に実施したものである。本研究の実施にあたり多大なるご協力をいただいた

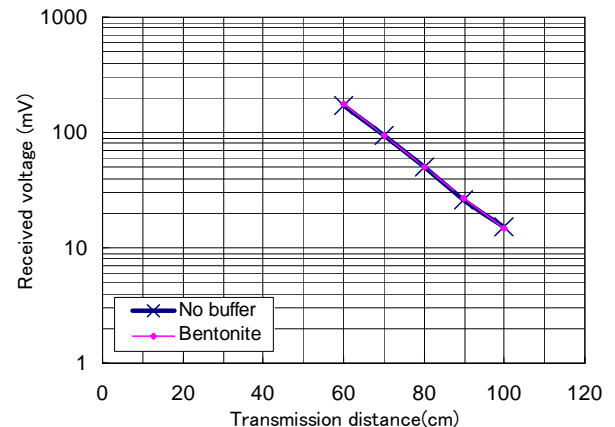


Fig.21 Effect of the bentonite

ANDRA および原子力環境整備促進・資金管理センターの各位に深く感謝する次第である。

## 参考文献

- [1] Loi no. 91-1381: LA LOI SUR LES DECHETS RADIOACTIFS (1991)
- [2] European Commission: Final Report, Thematic Network on the Role of Monitoring in a Phased Approach to Geological Disposal of Radioactive Waste, Contract No. FIKW-CT-2001-20130, European Commission (2003)
- [3] Roland Pusch, Christer Svemar: Cluster Repository Project, WP2 Instruments and Experimental procedures (2003)
- [4] ANDRA: Dossier 2005, Les recherches de l'Andra sur le stockage géologique des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue (2005)
- [5] ANDRA: Dossier 2001, SUR L'AVANCEMENT DES ETUDES & RECHERCHES RELATIVES A LA FAISABILITE D'UN STOCKAGE DE DECHETS A HAUTE ACTIVITE ET A VIE LONGUE EN FORMATION GEOLOGIQUE PROFONDE, 2001
- [6] 遠目塚良一 他：無線による地中通信システムの開発、最新の地盤計測技術に関するシンポジウム発表論文、大阪、平成11年12月8日 (1999)。
- [7] 高尾肇 他：高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリングに係わる計測・伝送技術の検討、土木学会第57回年次学術講演会講演概要集、北海道、平成14年9月25日-27日、pp397-398 (2002)。
- [8] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成14年度高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査報告書ーモニタリング機器技術高度化調査ー、原子力環境整備促進・資金管理センター (2003)。
- [9] 佐藤和紀 他：振動・波動・電磁波入門、産業図書、東京(1995)
- [10] 安達三郎：電磁波工学、コロナ社、東京(1983)

- [11] 吉村公孝 他：地中無線通信技術の放射性廃棄物地層  
処分モニタリングへの適用性検討，物理探査学会第  
109 回学術講演会講演論文集，大阪，平成 15 年 10 月  
14 日-16 日，pp.202-205 (2003).
- [12] 清水康敬 他：最新電磁波の吸収と遮蔽，日経技術図  
書，東京 (1999).