

TRU廃棄物の処分の性能評価における 地球化学的研究課題の抽出と課題解決方策の調査

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2002 年 3 月

三菱マテリアル株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転写する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122(代表)

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2002

TRU 廃棄物の処分の性能評価における地球化学的研究課題の抽出と課題解決方策の調査

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

前川 一彦*

要 旨

研究の主な成果は下記のとおりである。

- (1) TRU 廃棄物の特徴を考慮した場合の地下水水質における着目点を整理した結果、pH、Eh、塩素濃度、 $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} の6項目が挙げられた。
- (2) 地層処分の深度のモデル地下水は、HLW にて設定したモデル地下水にて設定できる可能性が大きいことを明らかにした。
- (3) 浅地中処分、余裕深度処分の深度のモデル地下水を設定するための課題達成の方策として、特定の開発目的を有せず広く全国を網羅しているデータを地形地質を考慮し整理すること、及び、必要に応じて行う現地調査を提示した。
- (4) 浅地中処分、余裕深度処分及び地層処分における TRU 廃棄物処分施設での地下水の化学的変遷に関連する FEP を抽出し、記述した。
- (5) 化学的変遷に対して重要な FEP 間の相互作用として、セメント系材料等の人工バリア材の時間的な劣化による影響等が抽出された。
- (6) 地下水の化学的変遷に関連する課題達成の方策として、ボトムアップ手法による FEP 間の重要な相互作用を整理することが必要であることを提示した。

本報告書は、三菱マテリアル株式会社が、核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

機構担当部課室：東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部

処分材料研究グループ

* 三菱マテリアル株式会社

Research on the issues related to groundwater chemistry relevant to
TRU waste repository.

(Document Prepared by Other Institute, Based on the Contract)

Kazuhiko Maekawa*

Abstract

The main points of this research were ;

- (1) The points of the groundwater chemistry were reported according to the properties of TRU waste. They were pH, Eh, Cl⁻, CO₃²⁻/HCO₃⁻, SO₄²⁻, Mg²⁺.
- (2) The model of groundwater chemistry for geological disposal of TRU waste may be set by the model for HLW.
- (3) The programs to construct the model at the depth of shallow land disposal and intermediate depth disposal were cleared. The measures for constructing the model were presented. The measures were to assemble the chemical data according to the topography and geology and to investigate the groundwater chemistry in the field.
- (4) FEPs related to the chemical evolution of ground water in a shallow land burial, a disposal about 100m depth and a geological disposal for TRU wastes were described.
- (5) Degradation of the cementitious materials with time were highlighted as the important interaction in the FEPs to predicting the chemical evolution around the repository.
- (6) The means of solving the issues related to the chemical evolution of ground water were presented. The method of doing were to set the key interaction in the FEPs in order by bottom-up aproch.

This work performed by Mitsubishi Materials Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison: Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

* Mitsubishi Materials Corporation

目次

1. はじめに	1
1.1 研究目的	1
1.2 実施内容	1
1.2.1 モデル地下水の設定及び研究課題の抽出	1
1.2.2 地下水の化学的変遷に関する FEP 及び研究課題の抽出	2
2. 研究成果	3
2.1 モデル地下水の設定	3
2.1.1 検討内容	3
2.1.2 水質データの収集	5
2.1.3 TRU廃棄物処分におけるモデル地下水の調査・検討	7
(1) 既往データの分析・検討	7
(2) 検討結果の整理	22
2.2 モデル地下水を設定するための研究課題	26
2.2.1 モデル検討にあたっての課題	26
2.2.2 課題達成の方策	28
2.2.3 地下水の水質形成機構に関する予備的考察	31
(1) 大気からの溶存成分、凝結核による降水の形成	32
(2) 降水が地盤を浸透していく過程での岩石／水反応	33
(3) 陽イオン交換	35
(4) 地下水への化石塩水の混入	35
2.3 地下水の化学的変遷に関する重要となる事象の検討	37
2.3.1 目的	37
2.3.2 対象とする処分システム	37
(1) 地層処分施設	37
(2) 余裕深度処分	39
(3) 浅地中処分	40
2.3.3 検討方法	40
2.3.4 FEPの抽出及び整理	41
2.3.5 FEP間の重要な相互作用の同定	54

2.4 地下水の化学的変遷に関する研究課題の抽出及び課題達成方策の検討	57
(1) 検討手法に関連する課題とその方策	57
(2) 人工バリア材の長期的な変化に関連する課題と方策	58
(3) 廃棄物中に含まれる種々の物質による影響	59
2.5 おわりに	60
2.5.1 モデル地下水の設定及び研究課題の抽出	60
2.5.2 地下水の化学的変遷に関する FEP 及び研究課題の抽出	60
謝辞	62
参考文献	63
添付 1	65
添付 2	89
添付 3	105
添付 4	123
添付 5	141

図 目 次

図 2.1-1 検討フロー図.....	4
図 2.1-2 各深度の主要イオンの平均値のヘキサダイヤグラムとモデル地下水の概要.....	9
図 2.1-3 日本全地域の深度別地下水水質 pH ヒストグラム.....	16
図 2.1-4 日本全地域の深度別地下水水質 pH ヒストグラム（「用水、観測井、温泉」 および「ガス井」）.....	17
図 2.1-5 日本全地域の深度別地下水水質 Cl ヒストグラム.....	18
図 2.1-6 日本全地域の深度別地下水水質 T-CO ₃ ヒストグラム.....	19
図 2.1-7 日本全地域の深度別地下水水質 SO ₄ ヒストグラム.....	20
図 2.1-8 日本全地域の深度別地下水水質 Mg ヒストグラム	21
図 2.1-9 スクリーニング後の実測値及び各モデル地下水の Cl 濃度と Mg 濃度	24
図 2.2-1 循環性地下水の水質形成概念図	32
図 2.3-1 廃棄体グループ毎の処分施設概念の基本構成.....	38
図 2.3-2 提案された余裕深度処分の処分概念	39
図 2.3-3 低レベル放射性廃棄物埋設施設の概念図.....	40
図 2.3-4 FEP の記載例(1/4).....	50

表目次

表 2.1-1	Dialog データベース検索結果	6
表 2.1-2	5 タイプのモデル地下水の水質	23
表 2.1-3	300m 以深の分析値と HLW において設定されたモデル地下水の比較	23
表 2.1-4	GL-0m～-50m 及び GL-50m～-150m の分析値と HLW において設定され たモデル地下水の比較.....	25
表 2.2-1	過マンガン酸カリウム消費量と深度別の傾向	27
表 2.2-2	降水の溶存成分	33
表 2.3-1	TRU 処分概念検討書にて抽出された FEP リスト	47
表 2.3-2	各領域における水化学への影響が考えられる FEP リスト	48
表 2.3-3	本検討で検討対象とした FEP リスト	49

1. はじめに

1.1 研究目的

放射性廃棄物の処分においては、通常、放射性核種は地下水に溶け、地下水とともに移行する地下水シナリオにしたがって評価されている。この放射性核種の移行特性は地下水の化学的性質に大きく支配されることから、地下水の化学的性質の評価が、性質の時空間的変遷も含め、放射性廃棄物処分におけるバリアシステムの性能評価研究において重要な研究課題となっている。

これまで、高レベル放射性廃棄物の処分において日本の地下水の類型化と人工バリアとの相互作用等による時空間的変遷が検討されている。これらの情報をもとに TRU 廃棄物処分概念検討書で TRU 廃棄物の地層処分における地下水の設定と変遷の検討がなされた。しかしながら、有機物、硝酸塩、金属等を含む TRU 廃棄物の多様性と高レベル放射性廃棄物の処分とは異なる、高 pH 条件をもたらしセメント系材料を多用する人工バリア構成等から高レベル放射性廃棄物と同等レベルの詳細さで検討されているわけではなく、仮定をおいて評価している事項もある。

そこで、本研究では、高レベル放射性廃棄物の処分での地球化学的知見と TRU 廃棄物処分概念検討書における地球化学的な事項の整理を踏まえ、TRU 廃棄物の処分の性能評価における地球化学的研究課題の抽出と課題解決方策の調査を行う。

1.2 実施内容

1.2.1 モデル地下水の設定及び研究課題の抽出

高レベル放射性廃棄物処分及び低レベル処分における地球化学的な研究並びに既往の地球化学的研究を参考に、ジェネリックに浅地中処分、余裕深度処分及び地層処分におけるモデル地下水の設定について調査・検討する。それぞれの処分方法に対応する処分深度としては、浅地中処分は GL-5～-20m、余裕深度処分は GL-50～-100m 程度、地層処分は GL-300m 以深を想定する。また、地層処分については TRU 廃棄物を対象とすることにより高レベル放射性廃棄物の場合と異なるか否かについての検討をスタートポイントとし、TRU 廃棄物の特徴を考慮した地下水水質における着目点を踏まえた検討とする。具体的な検討に際しては、サイクル機構殿が HLW 処分分野でまとめられました地下水水質データをご提示いただき、それをベースとして新たなデータを調査した上で

検討を行う。

さらに、ジェネリックに浅地中処分、余裕深度処分及び地層処分におけるモデル地下水を設定するために必要な研究課題を抽出する。

1.2.2 地下水の化学的変遷に関する FEP 及び研究課題の抽出

浅地中処分、余裕深度処分及び地層処分における地下水の化学的変遷に関して、関連する特徴、事象及び過程（FEP）を抽出、記述し、FEP 間の重要な相互作用の同定を行う。FEP を検討する際の処分システムとしては、浅地中処分、余裕深度処分、地層処分共通に、地層、セメント系材料（構造材）、ベントナイト系材料（地下水抑制）、セメント系材料（操業、遮へい、定置）、金属系材料（容器、廃棄物）が存在するものとする。場合によっては構成要素が省略されることがあるが、FEP としては 1 種類とし、構成要素の相違や、廃棄物と深度の違いは、重要な相互作用の同定の段階で考慮し、影響を検討する。具体的な検討に際しては、上記で示した処分システムと同等な処分システムを対象として検討が行われている、「TRU 廃棄物処分概念検討書」及びその一部として検討が行われた「電力共通研究 TRU 廃棄物処分における安全評価手法に関する研究 平成 9 年度 最終報告書」（非公開）及びそれ以降に検討が実施された「電力共通研究 TRU 廃棄物における安全評価シナリオの体系化に関する研究 平成 11 年度 最終報告書」（非公開）にて示されている FEP をサイクル機構殿より開示いただき、それをベースに処分深度の相違などによる影響を検討する事とする。

さらに、TRU 廃棄物処分における地下水変遷における研究課題を抽出し、その研究課題達成の方策について調査する。

2. 研究成果

2.1 モデル地下水の設定

2.1.1 検討内容

図 2.1-1に検討フロー図を示す。ここでは、まず、データの分析値の信頼性を確保するために、イオンバランス等の確認を行い、データの選択を行った。選択したデータに対して、ヘキサダイアグラムあるいはヒストグラムによって水質の特性を把握し、特に深度 EL-300m 以深に対して、HLW で設定されているモデル地下水との比較を行った。以上の作業を通じ、最終的に TRU のためのモデル地下水を設定するための課題等を提示した。

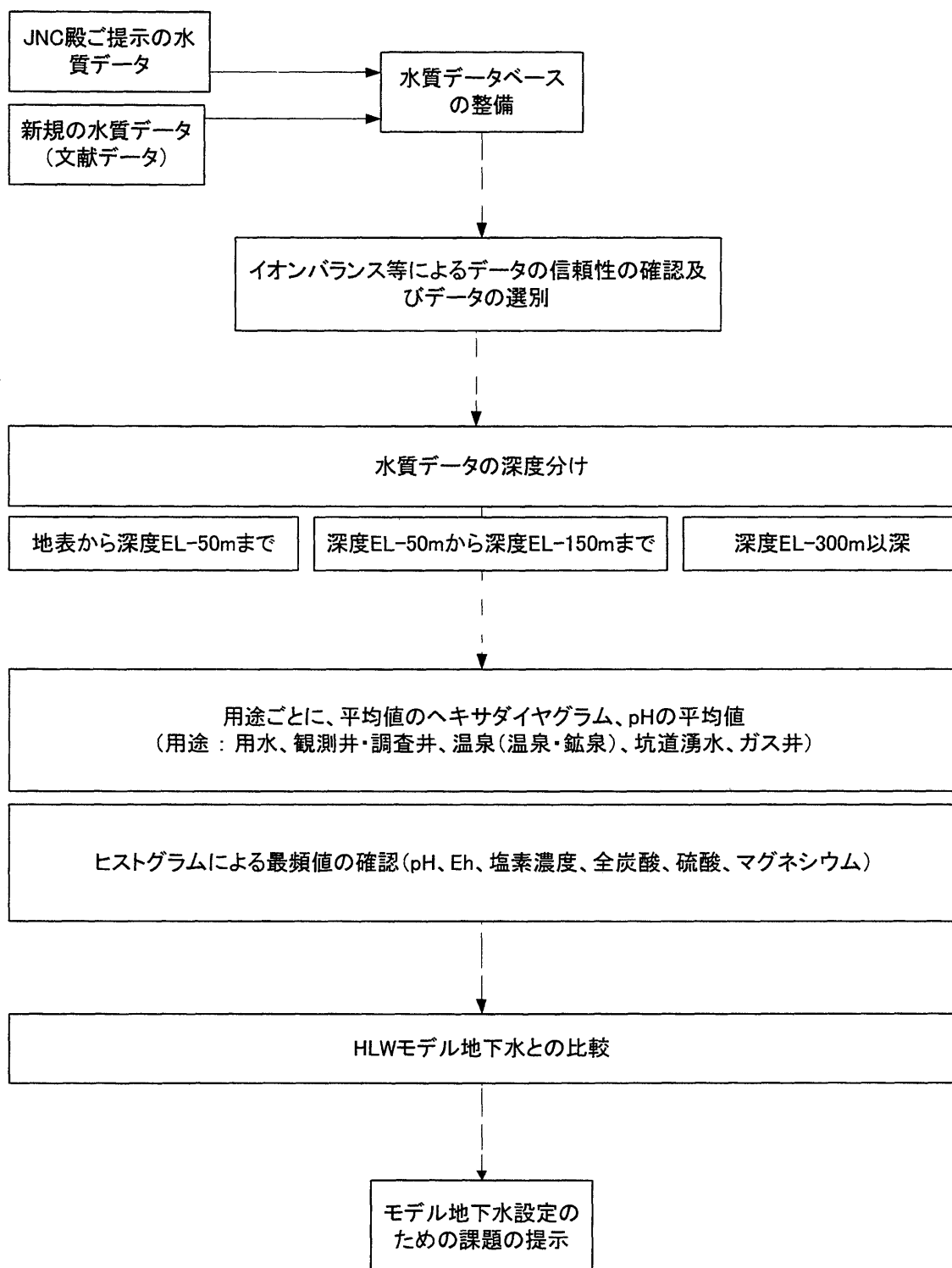


図 2.1-1 検討フロー図

2.1.2 水質データの収集

まず、データの信頼性が十分に確保されていると考えられるデータとして、電力中央研究所報告 U95044 (1996) に記載されたデータを選択した。本データは、比較的品質の良い浅層の地下水の事例として、検討作業に加えた。

また、検討作業には加えなかったが、水質データの存在等に関する調査の一環として行なった作業と、明らかになった事項を以下に示す。

まず、手持ち資料およびそれらの孫引きにより、以下に示す文献が収集された。これらの文献の詳細なリストは巻末に示す。調査対象とした文献は、JNC 殿が既往データを取りまとめた平成 2 年以降の発行のものとした。

- ・月刊 地球 Vol.23、No.12 (2001)
- ・地下水学会誌 Vol.43、No.4 (2001)
- ・地下水学会誌 Vol.43、No.3(2001)
- ・地下水学会誌 Vol.43、No.1 (2001)
- ・地下水水質年表 第 14 回 平成 10 年(1998)
- ・電力中央研究所報告 U95044 (1996)
- ・地質ニュース、No.466(1993)
- ・地熱エネルギー、No.62(1993)
- ・地下水学会誌、Vol.35、No.3(1993)
- ・地質ニュース、No.464(1993)

これらの文献には総計 583 点の地下水の水質データが収録されており、2 点の海底湧水データ (月刊 地球 ; 2001) も含まれている。なお、データ数 583 点のうち 433 点は地下水水質年表 (建設省河川局編 ; 1998) に網羅されている。

さらに、世界最大の商用データベースである DIALOG を利用して以下の分野から groundwater & chemistry をキーワードとして国内発行分を検索した。検索の対象分野としたのは以下のとおりである。

水質科学 (Water and Aquatic Science)

地質学 (Geology)

地球科学 (Geoscience)

原子力科学 (Nuclear Science)

検索の結果、表 2.1-1に示すように 422 編の文献が抽出された。これらの中から利用に耐えうるデータの有無を吟味するには膨大な時間を要すると考えられる。

表 2.1-1 Dialog データベース検索結果

検索条件：GROUNDWATER AND CHEMISTRY AND CP=JAPAN	
ヒット文献数	データベース名及び対象年代
7 編	INSPEC_1969-2002/Jan W4
3 編	NTIS_1964-2002/Mar W1
317 編	JICST-EPlus_1985-2002/Jan W2
53 編	Energy SciTec_1974-2001/Sep B2
23 編	GeoRef_1785-2002/Jan B2
5 編	GEOBASE(TM)_1980-2002/Jan
15 編	GEOBASE(TM)_1980-2002/Jan

2.1.3 T R U 廃棄物処分におけるモデル地下水の調査・検討

(1) 既往データの分析・検討

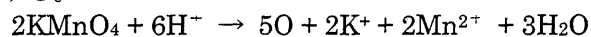
提示いただいた地下水の水質データに、比較的品质が良い浅層のデータとして電力中央研究所報告 U95044 (1996) に記載されたデータを加え、地下水の水質データの深度別整理を行った。まず、整理に際して、以下の前提条件を設けて作業を行った。

- ① 深度区分を 0～50m(以浅)、50～150m(以浅)、そして 300m 以深とした。この区分は、浅地中処分として GL-5m～20m、余裕深度処分として GL-50～100m 程度、地層処分として GL-300m 以深を想定した（「1.2 実施内容」参照）ことに対応し、各処分深度の水質を把握するために適当と考え、設定した。
- ② データの採水深度の上限と下限が明記されているものを採用し、中心深度を深度区分のための値とした。
- ③ 主要成分のイオンバランスを±5%以内のデータのみ採用した。
- ④ $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ データは、両方のデータの和を採用した。
- ⑤ 有機物の汚染の指標となる場合がある KMnO_4 消費量¹に関して 10mg/l 以下のものを採用した。

深度データが明記されているデータ数は 832 点であり、それらのデータを検討の対

¹ 一般的に地下水や河川水等の有機物量を定量する場合に実施される化学的な手法の一つとして、過マンガン酸カリウム (KMnO_4) の消費量がある。この方法は、有機物汚濁による水質汚濁の指標の 1 つである COD を求める 1 手法である。COD (Chemical oxygen demand) とは、酸化剤を用いて一定の条件で試料水を処理した場合に消費される酸化剤の量を求め、それに対応する酸素の量に換算して表したもの (mgO_2/L) であり、試料水中に被酸化性物質がどの程度存在するかを示すものである。酸化される物質は有機物、 NO_2^- 、 Fe^{2+} 、硫化物などであるが、特殊な水を除くと有機物が主要であるので、COD を有機物量の相対的な尺度とすることが多い。

過マンガン酸カリウム (KMnO_4) の酸性の溶液は次式のように反応し、強い酸化力を示し、有機物等を酸化する。



上記の式のように、過マンガン酸カリウム 2 分子が 5 個の酸素原子を使う。

測定手順としては、過マンガン酸カリウム (KMnO_4) を試料に滴下しつつ、試料の酸化還元電位を ORP 電極などで測定し、その変曲点をもって終点とする方法や、試料水を硫酸酸性として煮沸後に蔭酸カリウムを加えてから過マンガン酸カリウムを滴下して発色をもって終点とするなど、多くのやりかたが存在する。最終的には、消費された過マンガン酸カリウムの量を、対応する酸素の量に換算する。

象に採用した。まず、それらのデータに対して、各深度の主要イオンの平均値のヘキサダイアグラムを作成し、水質の概要の把握を試みた。この際、採水試料を用途別に区分し、用途別ごとに平均値をとり、ヘキサダイアグラムを作成した。図 2.1-2にこれらの図を示す。これらの図によると、用途別ごとにかなり水質に違いがあることが分かる。また、GL-300m 以深のデータについて、HLW のモデル地下水と比較すると、ガス井は海水系高 pH 型、用水及び観測井・調査井は降水系高 pH 型に類似の主要イオン構成であることが分かる。ただし、これらのヘキサダイアグラムは分析値の平均値であるので、突出した分析値によって、平均値が最頻値からずれている可能性等は存在するため、概略の傾向の把握までが可能な検討範囲と考えられる。

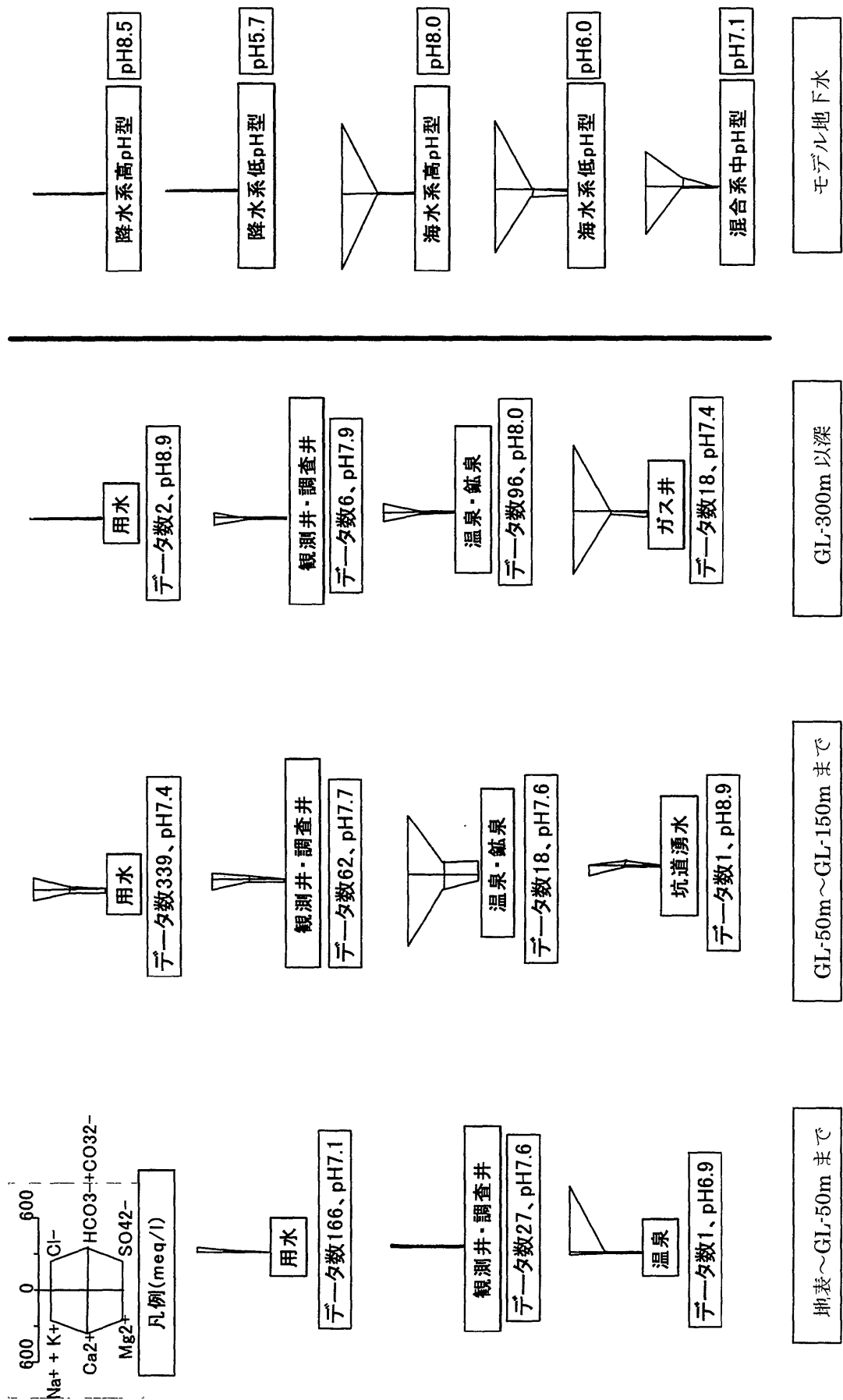


図 2.1-2 各深度の主要イオンの平均値のへキサダイアグラムとモデル地下水の概要

次にヒストグラムによって、主に最頻値に着目し、水質の特性の把握を試みた。ここの検討は、TRU 放射性廃棄物処分の特徴を考慮し着目する分析項目を選択した点及び地下水試料の用途別の採取区分を追跡可能とした点において、主に降水あるいは海水を出発として岩石との反応を考慮しモデル地下水を作成、検討している「第2次取りまとめ」（核燃料サイクル開発機構、1999）と異なる。ここでは、TRU 廃棄物処分の地下水化学に関する特質を考慮し、6つの水質項目に限ってヒストグラムの作成を行なった。整理の対象とした水質項目は、pH、Eh、塩素濃度、 $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 、 SO_4^{2-} 及び Mg^{2+} の6項目であり、これらの項目に絞った理由は以下に記述する。

放射性廃棄物処分の長期的な放射線学的な安全性を評価するために行われる性能評価では、通常、放射性核種は地下水に溶け、地下水とともに移行する地下水シナリオにしたがって評価される。その放射性核種の移行過程には、さまざまな事象が関連し、それらの多くについては地下水の化学的性質に大きく支配される。そのため、地下水の化学的性質の評価が、性質の時間的・空間的な変化も含めて、放射性廃棄物処分におけるバリアシステムの性能評価において重要となる。

本研究で対象とするサイトを特定しないジェネリックな評価においては、地下水の化学的性質として大きな幅を持ったものが想定される。そこで、このようなジェネリックな場を対象とした地下水の化学的性質については、性能評価パラメータに有為な影響を与えると考えられる成分に着目して類型化して設定することが高レベル放射性廃棄物の処分にて行われている。例えば、高レベル放射性廃棄物の処分においては、評価上重要である MA 核種の溶解度や分配係数等の評価パラメータに対して、核種の存在形態（スペシエーション）が大きな影響を与えることに着目し、核種の存在形態を支配する地下水の化学的性質の主なものとして pH、Eh、炭酸濃度等に対して地下水の類型化が行われている（核燃料サイクル開発機構、1999）。

ここで、TRU 廃棄物処分の場合について考えると、

- ・ 評価上重要となる放射性核種は、I-129、C-14 や Cl-36 等の FP、AP 核種である。
- ・ 処分施設においてセメント系材料が多量に使用される。
- ・ ハル・エンドピース等金属廃棄物が存在し、金属の腐食に伴い核種が漏出する浸出率モデルを使用している。

- ・ 廃棄物の種類が多様であり、さまざまな物質（塩類や有機物等）が廃棄物中に存在することが考慮されている。

等、高レベル放射性廃棄物処分と比べて違いがある。

これらの TRU 廃棄物処分における特徴を考慮した地下水の類型化の考え方のポイントを以下に整理する。

まず、高レベル放射性廃棄物の場合と同様に、重要核種の存在形態に影響を与えるものが考えられるが、I-129 等の核種は地下水中に含まれる成分との錯体の形成などがないため、このような観点からの類型化は性能評価上重要性を持たない。さらに、I、C、Cl などの元素について考えると、これらの元素は一般に地下水中に存在する成分であり、安定同位体として存在するそれらの元素の量は評価において影響を及ぼすことが考えられる。例えば、固相への核種の吸着特性において線形吸着が成り立たない状態では、安定同位体と I-129 等の放射性核種との存在比に応じて核種の吸着性能が減少することになる。

次に、TRU 廃棄物処分においてはセメント系材料が多量に使用され、処分施設近傍の地下水はほぼこのセメント系材料の影響により支配されと考えられる。このため、セメント系材料の地下水との反応による変質に起因して地下水の化学特性が時間的・空間的に変化することが TRU 廃棄物処分においては特に特徴的であり、性能評価への影響も大きい。このため、セメント系材料の変質に対して影響を及ぼす地下水成分という観点は地下水の類型化において重要なものとなると考えられる。

また、TRU 廃棄物の多様性に関連して廃棄物中に含まれる金属の腐食に影響を及ぼすものや、有機物の分解等に影響を及ぼすものに関しても TRU 廃棄物処分の性能評価においては注意する必要があるものとなる。

以上より、TRU 廃棄物処分の性能評価において考慮する地下水の化学的性質に関しては、どの現象に対する影響を評価するかにより、その類型化の着目点が異なる。本検討ではこれらのいくつかある着目点のなかで、TRU 廃棄物処分において特徴として、セメント系材料が多量に使用されること、廃棄物の形態が多様（金属廃棄物、アスファルト固化体、セメント固型化固化体など）であることに着目し、地下水水質の観点で、セメント系材料の変質に影響の大きなもの、金属の腐食に影響の大きなもの、アスファルトなどの有機物の分解を促進するものを考える。具体的な成分としてみると、以下のものが挙げられる。

- ・ セメント系材料の変質 : pH、 $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 濃度、 SO_4^{2-} 濃度、 (Mg^{2+})
- ・ 金属の腐食 : pH、Eh、塩素濃度、 $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 濃度、微生物濃度
- ・ 有機物の分解 : pH、微生物濃度

セメント系材料は地下水の組成によって、間隙水の pH の変化等異なる場合がある (例えば Burner, 1992)。したがって、地下水の特性を表現する基本的な項目である pH をセメント系材料に変質を与える項目として取り上げた。また、炭酸を含む環境にセメント系材料が接していると中性化が生じ (岡田他編, 1981)、周囲の pH に関する環境が変化する。さらに、 SO_4^{2-} についてはセメント系材料を浸食することによって、強度あるいは耐浸出性の低下が起こり得る (例えば、Atkinson and Hearne, 1990)。さらに、Gjølrv(1971)では、ノルウェー工科大学で行われた 30 年間にわたる海水中における耐久試験の結果、コンクリート中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が減少し、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ が増加したことが確認されている。したがって、ここでは、セメント系材料の変質に影響を及ぼす項目として、 Mg^{2+} 濃度を取り上げた。

金属の腐食に影響を与える項目としては、一般的に腐食等に影響を与えると考えられる項目を選択した。この際、「第 2 次取りまとめ」(核燃料サイクル開発機構, 1999) のオーバーパック材料の腐食評価において取り上げられている内容を参照した。

有機物の分解に影響を与える項目としては、一般的に地下水の組成としての pH 及び微生物を項目として取り上げた。

これらのなかで、pH 及び塩素濃度に関しては、HLW での検討においても着目されているものであり、共通して取り上げていく意義があると考えられる。また、微生物濃度に関しては非常にサイトスペシフィックであり、データなどもほとんど存在しないと考えられるため、検討の対象からは外した。本検討では微生物以外の項目である、セメント系材料の変質に対して影響を及ぼす $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 濃度、 SO_4^{2-} 濃度、及び、 Mg^{2+} を検討の対象とした。さらに、金属の腐食等の事象に影響が大きい Eh についてもデータ数等の確認を含めて検討を行なった。

水質項目別でのデータ数は、

pH : 832、Eh : 10、塩素濃度 : 832、 $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$: 828、

SO_4^{2-} : 819、 Mg^{2+} : 832

となっている。

次に各水質の項目別に、3つの深度区分における値のヒストグラムを図 2.1-3～図

2.1-8に示す。なお、Ehについては採用データが10点と少ないことから作図を省略した。これらのヒストグラムの作成においては、各深度区分の中での採水された地下水の用途を色分けして表示している。用途分類は以下のとおりである。

用水、ガス井、観測井・調査井、温泉・鉱泉、坑道湧水

この用途別の色分けによって、3つの深度区分における用途の傾向が0～150mと300m以深とで大きく異なることが判明した。すなわち、0～150mではデータの大半を用水が占めているが、300m以深ではガス井および温泉・鉱泉が大半を占めている。データの検討に際しては、この深度区分に対する用途の傾向に留意する必要があると考えられる。

図 2.1-3に深度別のpHのヒストグラムを示す。

まず深度別の傾向について見ると、0～50m、50～150mの深度区分では7程度の中性付近にデータが集中しているが、300m以深では8程度のアルカリ側に最頻値がある。0～50m(以浅)では最大頻度の次の頻度を示すpHが6.5～7.0の酸性側に位置しているが、50～150m(以浅)はpH7.5～8.0のアルカリ側に位置している。300m以深では最頻値の次の頻度は7.5～8.0の中性側に位置している。また、300m以深においては50～150m(以浅)よりもさらにアルカリ性側のデータの出現頻度が増加している傾向が認められる。

次に用途による分布傾向を見ると、0～150mの中性付近(6～8程度の範囲)では、用水と観測井・調査井の占める比が変化に乏しいが、300m以深においては、7～8ではガス井と温泉・鉱泉の占める比があまり変わらないが、8を境にそれよりもアルカリ性側では温泉・鉱泉の占める比が大きくなる傾向が認められる。

図 2.1-4に「用水、観測井・調査井、温泉・鉱泉」のグループと「ガス井」のグループに分けたpHのヒストグラムを示す。0～150mではガス井のデータが存在しないので、「用水、観測井・調査井、温泉・鉱泉」のグループのみ示した。「用水、観測井・調査井、温泉・鉱泉」のグループでは最頻値が8.0～8.5のアルカリ側に位置しているが、「ガス井」のグループでは7.0～7.5の中性付近に最頻値が位置している。

図 2.1-5に深度別の塩素濃度のヒストグラムを示す。図 2.1-5の上段の3つのヒストグラムは、データ中の最大値を横軸の基準値として示したもので、最大頻度が最も低濃度の領域に位置することがわかる。このため、上段の横軸の1/10をフルスケールとしたヒストグラムを、それぞれの深度区分の下段に示した。

まず深度別の傾向について見る。上段のヒストグラムを見ると、いずれの深度区分においても 1000mg/l 以下の低濃度の領域にデータが集中している。下段のヒストグラムを見ると、いずれの深度区分においても 100mg/l 以下の低濃度領域にデータが集中しており、特に 150m 以深において、その集中は顕著であるが、300m 以深では 100mg/l 以上の濃度範囲のデータも分布が認められ、相対的には 100mg/l 以下の集中の程度は低い。

次に用途による分布傾向を見ると、0～150m では、用水と観測井・調査井の占める比が変化に乏しいが、300m 以深においては、2000mg/l 程度以下の領域で温泉・鉱泉の占める比が高いが、それよりも高濃度側ではガス井の占める比が大きくなる傾向が認められる。

図 2.1-6に深度別の $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ のヒストグラムを示す。図 2.1-6の上段の3つのヒストグラムは、データ中の最大値を横軸の基準値として示したもので、最大頻度が最も低濃度の領域に位置することがわかる。このため、上段の横軸の 1/10 をフルスケールとしたヒストグラムを、それぞれの深度区分の下段に示した。

まず深度別の傾向について見る。上段のヒストグラムを見ると、150m 位浅では 300mg/l 以下に集中して分布しており、1200mg/l 以上の高濃度データは認められない。300m 以深でも最頻値は 300mg/l 以下にあるが、1500mg/l 付近まで分布が認められる。下段のヒストグラムを見ると、150m 位浅では 30～90mg/l に集中して分布しているが、300m 以深では 50～300mg/l の濃度範囲のデータの頻度に大きな差異は認められず、比較的ブロードなピーク形状を示している。

次に用途による分布傾向を見ると、0～150m では、用水と観測井・調査井の占める比が変化に乏しいが、300m 以深においては、温泉・鉱泉の占める比が高く、ガス井は 1500mg/l 以下の領域に分布している。

図 2.1-7に深度別の SO_4^{2-} のヒストグラムを示す。図 2.1-7の上段の3つのヒストグラムは、データ中の最大値を横軸の基準値として示したもので、最大頻度が最も低濃度の領域に位置することがわかる。このため、上段の横軸の 1/10 をフルスケールとしたヒストグラムを、それぞれの深度区分の下段に示した。

まず深度別の傾向について見る。上段のヒストグラムを見ると、いずれの深度区分においても 200mg/l 以下の低濃度の領域にデータが集中しており 200mg/l 以上の高濃度データは極めて少ないが、300m 以深においては $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ と同様、高濃度側の

データも分布が認められる。下段のヒストグラムを見ると、いずれの深度区分においても 0~20mg/l に最大頻度ピークが認められるが、300m 以深では 20mg/l 以上のデータも 150m 以浅に比べて多く認められる。

次に用途による分布傾向を見ると、0~150m では、用水と観測井・調査井の占める比が変化に乏しいが、300m 以深においては、20mg/l 以上の領域のほとんどを温泉・鉱泉が占める傾向が認められる。

図 2.1-8 に深度別の Mg^{2+} のヒストグラムを示す。図 2.1-8 の上段の 3 つのヒストグラムは、データ中の最大値を横軸の基準値として示したもので、最大頻度が最も低濃度の領域に位置することがわかる。このため、上段の横軸の 1/10 をフルスケールとしたヒストグラムを、それぞれの深度区分の下段に示した。

まず深度別の傾向について見る。上段のヒストグラムを見ると、いずれの深度区分においても 100mg/l 以下の低濃度の領域にデータが集中しており 100mg/l 以上の高濃度データは極めて少ないが、300m 以深においては CO_3^{2-}/HCO_3^- と同様、高濃度側のデータも分布が認められる。下段のヒストグラムを見ると、いずれの深度区分においても 0~10mg/l に最大頻度ピークが認められるが、300m 以深では 10mg/l 以上のデータも 150m 以浅に比べて多く認められる。

次に用途による分布傾向を見ると、0~150m では、用水と観測井・調査井の占める比が変化に乏しいが、300m 以深においては、100mg/l 以上の領域ではガス井がの占める割合が大きくなる傾向が認められる。

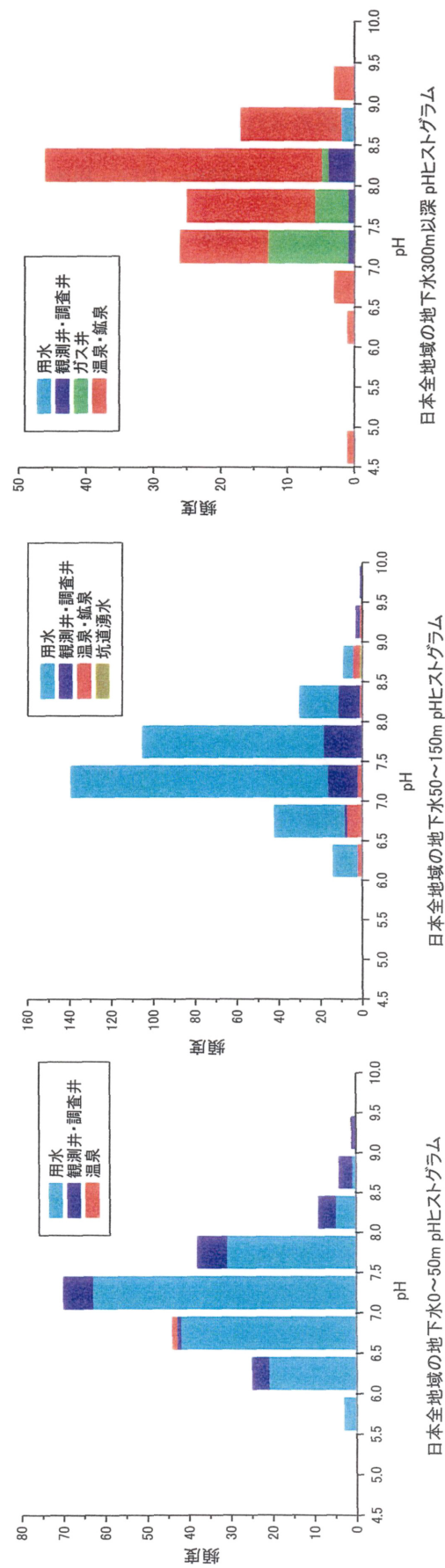


図 2.1-3 日本全地域の深度別地下水水質 pH ヒストグラム

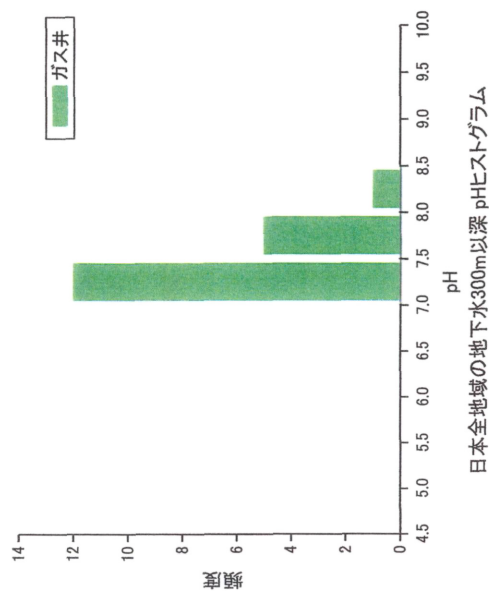
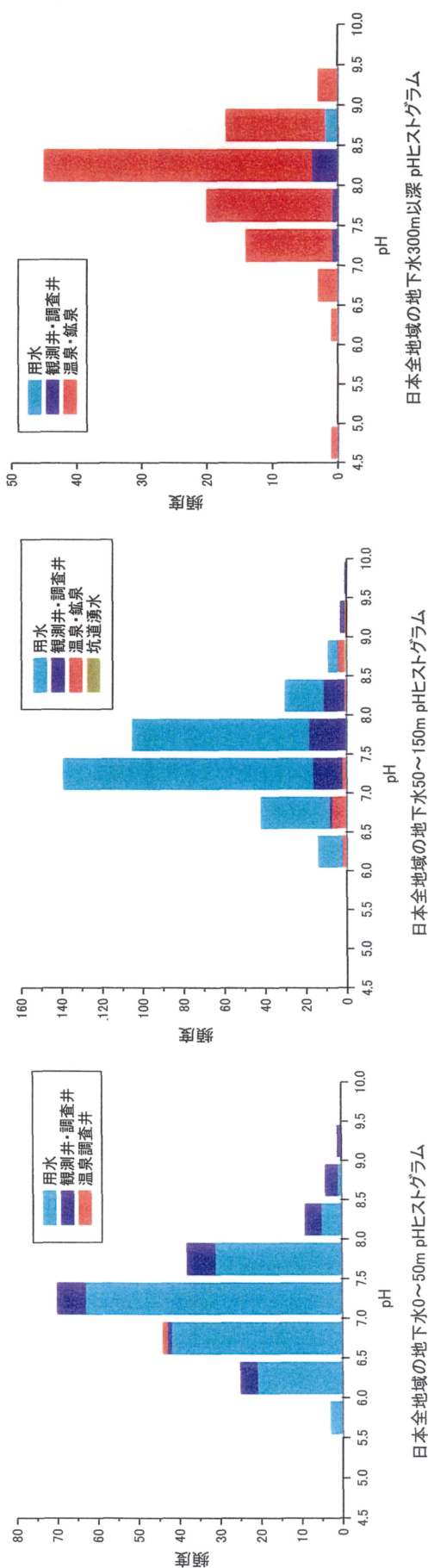


図 2.1-4 日本全地域の深度別地下水水質 pH ヒストグラム (「用水、観測井、温泉」および「ガス井」)

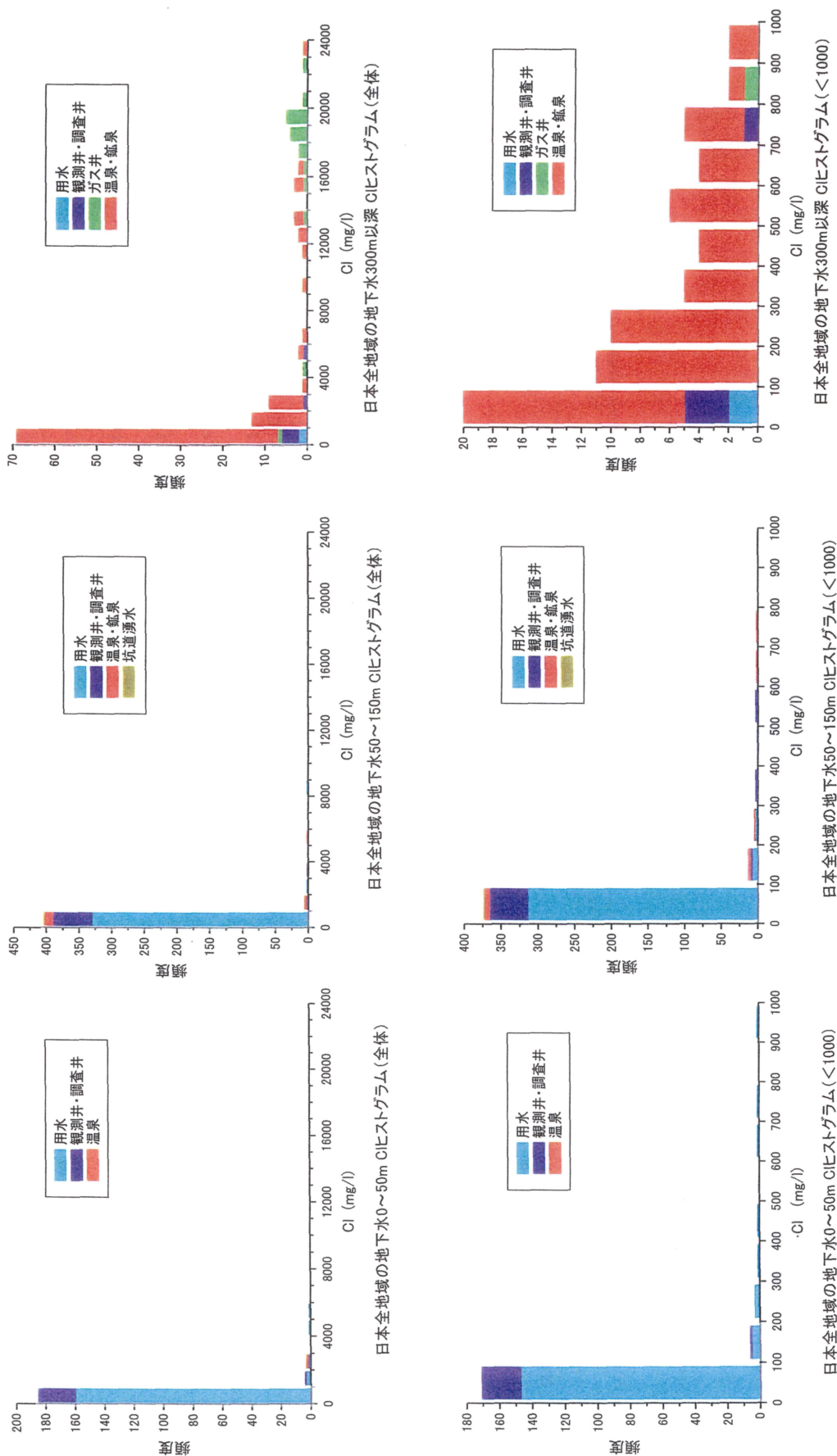
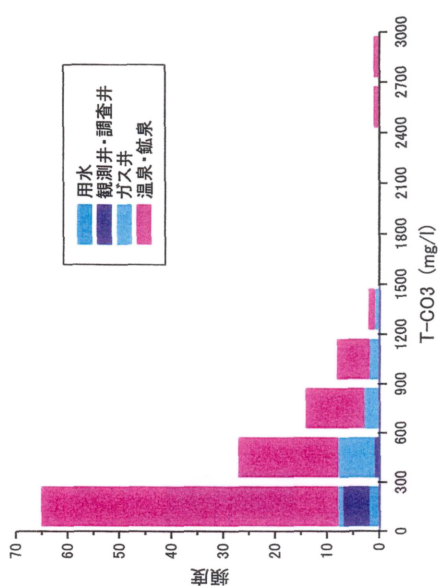
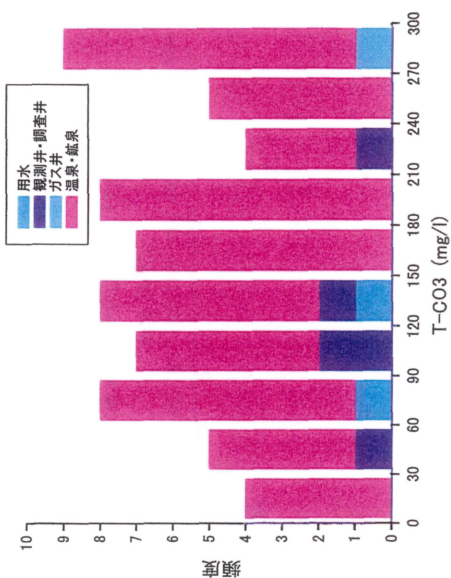


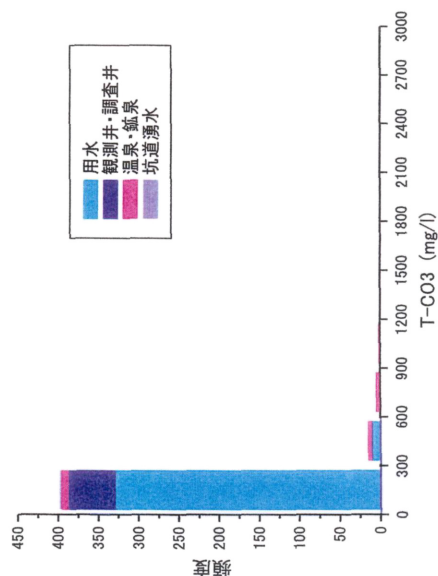
図 2.1-5 日本全地域の深度別地下水水質 Cl ヒストグラム



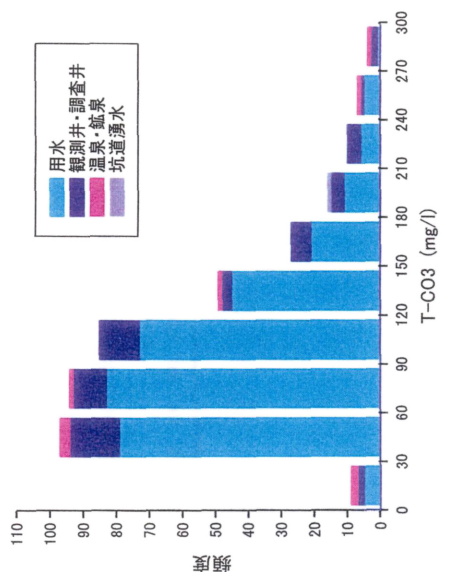
日本全地域の地下水300m以深 T-CO3ヒストグラム (全体)



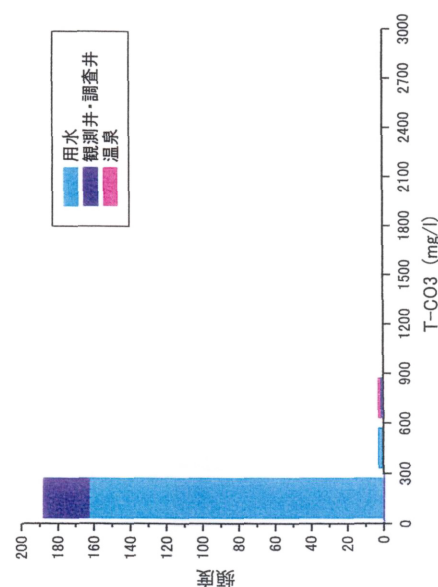
日本全地域の地下水300m以深 T-CO3ヒストグラム (<300)



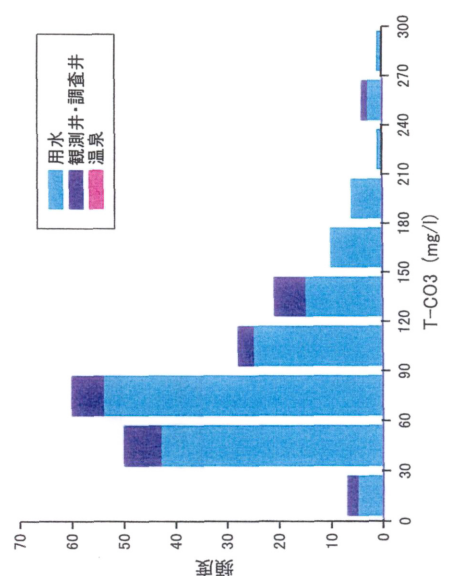
日本全地域の地下水50～150m T-CO3ヒストグラム (全体)



日本全地域の地下水50～150m T-CO3ヒストグラム (<300)

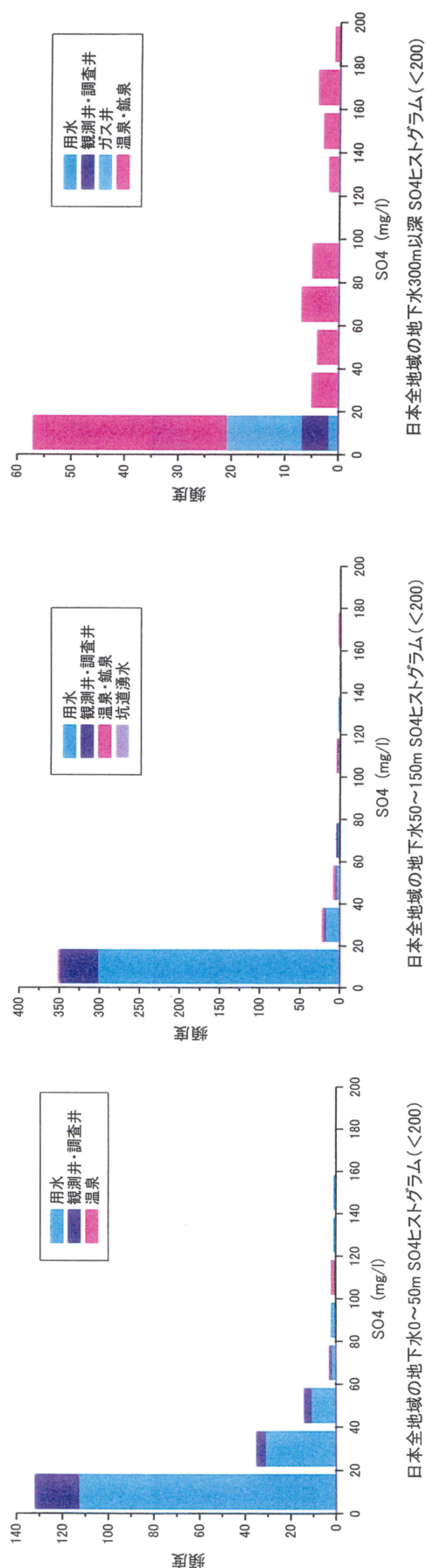
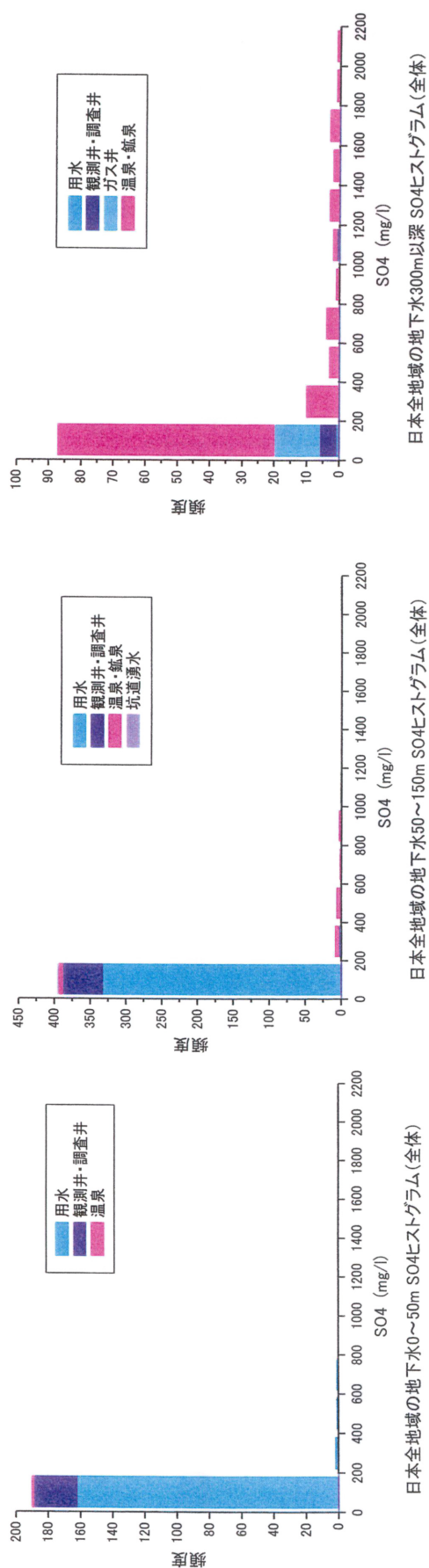


日本全地域の地下水0～50m T-CO3ヒストグラム (全体)



日本全地域の地下水0～50m T-CO3ヒストグラム (<300)

図 2.1-6 日本全地域の深度別地下水水質 T-CO₃ ヒストグラム

図 2.1-7 日本全地域の深度別地下水水質 SO_4 ヒストグラム

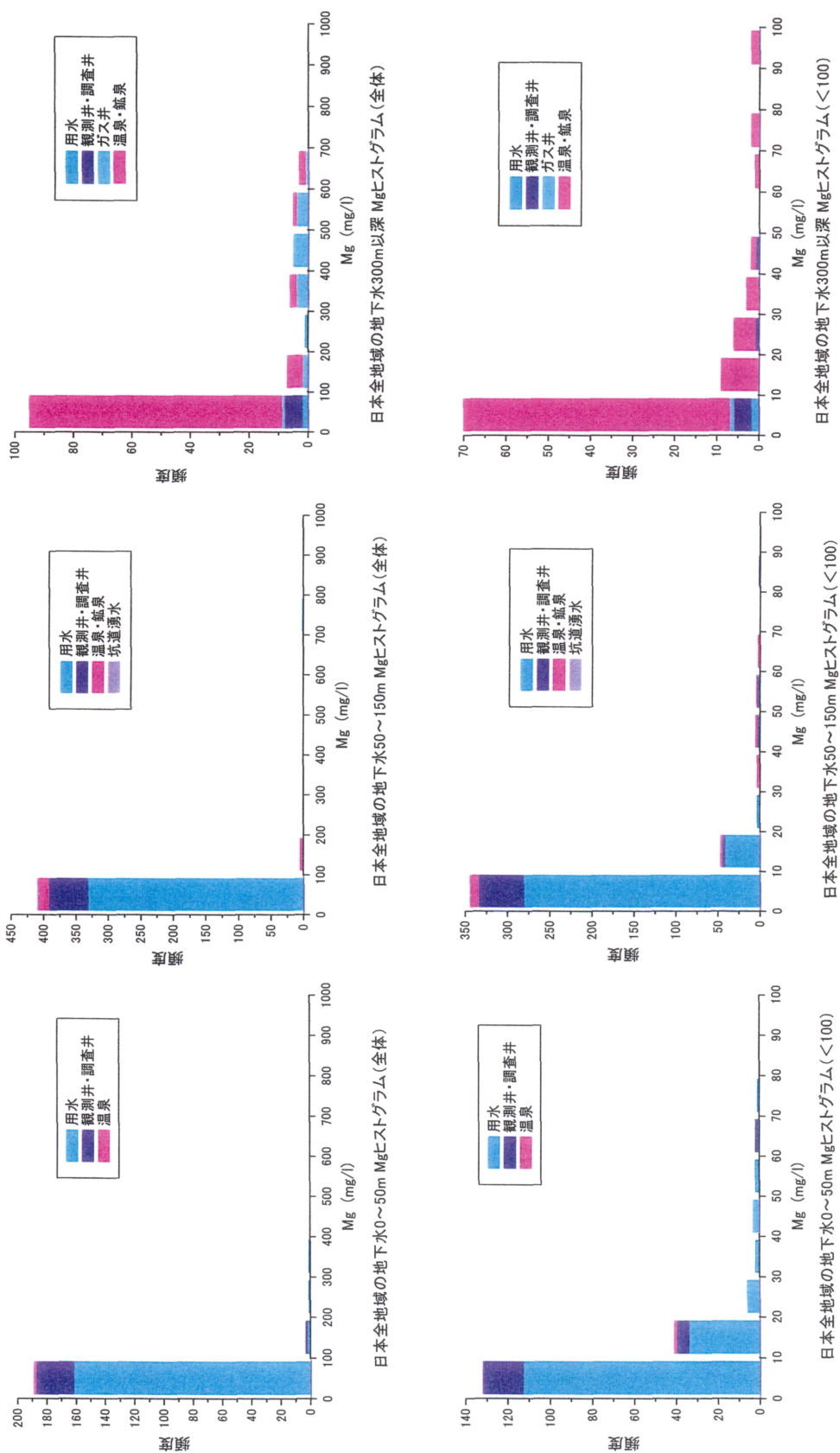


図 2.1-8 日本全地域の深度別地下水水質 Mg ヒストグラム

(2) 検討結果の整理

JNC TN8400 99-030 に示された、高レベル放射性廃棄物処分においてタイプ分けされたモデル地下水の水質設定値を表 2.1-2 に示す。この表での地下水は地下 500～1000m といった地下深部を対象に設定されたものであり、今回の検討における深度範囲のうち、150m 以浅とは深度領域が異なっている。

まず、300m 以深のデータと表 2.1-2 との比較を試みる。比較を行った表を表 2.1-3 に示す。この表において、pH についてみると、今回のデータのうちのガス井では 7～8 にデータが多く、用水や観測井・調査井ではデータ数は少ないが 8～9 にデータが多い。ガス井の水が塩素濃度が高いことを併せて考えると、海水系高 pH 型の値に近く、用水や観測井・調査井の水が降水系高 pH 型に近いように思われる。温泉・鉱泉に関しては、その pH は広く分布 (pH4.5～9.5) し、やや特殊な環境での地下水試料という位置づけは否めない。したがって、ここでは検討の対象から外し、以下の検討は、用水、観測井・調査井及びガス井に関して行うこととする。塩素濃度、 $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 及び SO_4^{2-} について比較を行うと、大局的には 300m 以深においては、

用水や観測井・調査井の水・・・・・・降水系高 pH 型 (FRHP)

ガス井の水・・・・・・海水系高 pH 型 (SRHP)

という対応関係が認められる。さらに、ガス井の Mg^{2+} について比較を行うと、今回整理したデータは 300～600mg/l を中心に幅広く分布しており、一方、海水系高 pH 型 (SRHP) の Mg^{2+} の濃度は 6.05 mg/l である。海水系高 pH 型 (SRHP) は水質の形成を考慮して海水を出発として地化学計算にて求めた水質であり (JNC TN8400 99-030)、一方、今回の最頻値の整理は実測値にのみ基づいていることにより、この違いが発生している。図 2.1-9 によれば、計算値である海水系高 pH 型 (SRHP) は塩素濃度が高く Mg 濃度は低い、塩素濃度が高い実測値の Mg 濃度は 500ppm の付近に多く分布しつつ、Mg 濃度が低い実測値も存在し、今回の実測値の整理結果とモデル地下水の関係を良く表していると考えられる。 Mg^{2+} 濃度に関しては実測値の分布範囲がやや広いが、 Mg^{2+} 濃度に限らず個々の水質項目において分布の幅は存在しつつ、モデル地下水はその分布の幅の中に位置している。したがって、ガス井のデータも HLW のモデル地下水にてモデル化は可能と考えられる。よって、300m 以深の地下水の水質設定については、モデル地下水の FRHP と SRHP で代表させることが可能であろうと推測される。

表 2.1-2 5 タイプのモデル地下水の水質

水の種類	降水系高pH型		降水系低pH型		海水系高pH型		海水系低pH型		混合系中pH型	
略称	FRHP		FRLP		SRHP		SRLP		MRNP	
水温(°C)	25		25		25		25		25	
pH	8.46		5.70		7.95		5.96		7.07	
Eh(mV)	-281		-156		-303		-159		-244	
pe	-4.76		-2.65		-5.14		-2.69		-4.14	
	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l
Na ⁺	81.55	3.55	79.86	3.47	14185	616.99	11495	499.99	7110	309.25
K ⁺	2.41	0.06	2.34	0.06	416	10.64	426	10.91	3123	79.86
Ca ²⁺	4.39	0.22	4.29	0.21	13.38	0.67	1106	55.20	18.13	0.90
Mg ²⁺	1.22	0.10	1.22	0.10	6.05	0.50	503	41.39	8	0.67
陽イオン合計	—	3.93	—	3.85	—	628.80	—	607.49	—	390.68
Cl ⁻	0.52	0.01	3.63	0.10	20901	589.58	20901	589.58	10450	294.79
HCO ₃ ⁻	209.99	3.44	229.76	3.77	723.0	11.85	845	13.85	4967	81.40
CO ₃ ²⁻	3.45	0.11	0.01	0.00	7.50	0.25	0.09	0.00	6.87	0.23
SO ₄ ²⁻	10.38	0.22	0.00	0.00	3.03	0.06	21.4	0.44	1.4	0.03
陰イオン合計	—	3.79	—	3.87	—	601.74	—	603.88	—	376.45
SiO ₂	19.42	—	19.40	—	17.36	—	17.40	—	17.60	—

(*) JNC TN8400 99-030 より数値を引用し表として整理した。

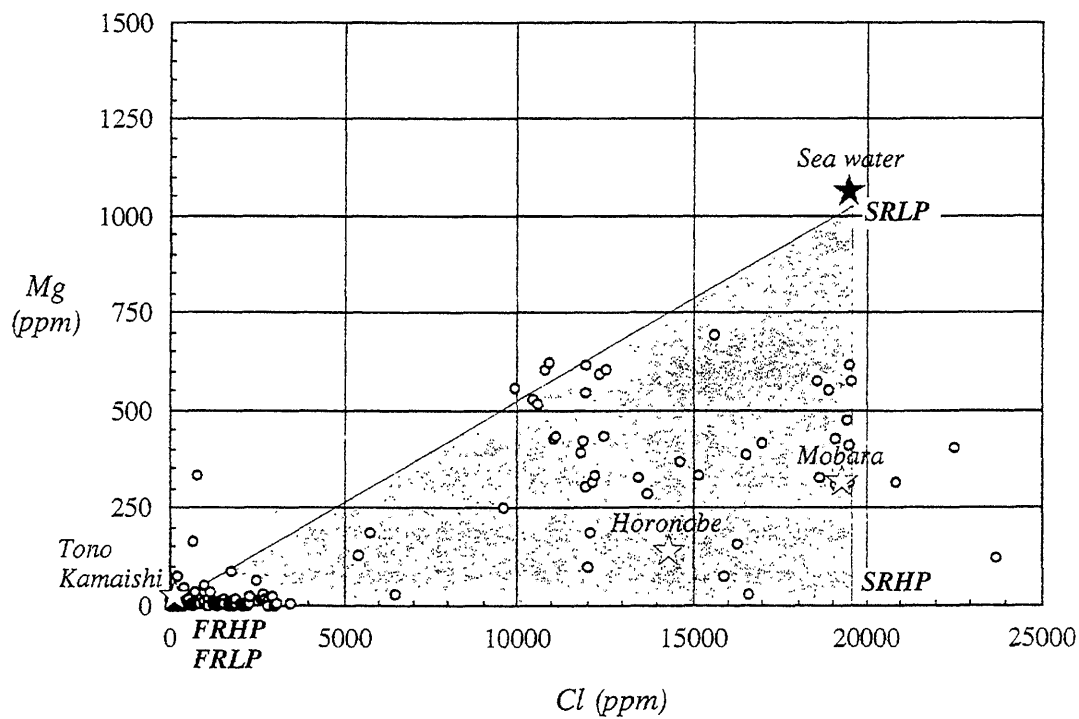
表 2.1-3 300m 以深の分析値と HLW において設定されたモデル地下水の比較

分析項目 (*)3	海水系高 pH 型 (SRHP)	降水系高 pH 型 (FRHP)	300m 以深(*)1	
			ガス井	用水、観測井・調査井
pH	7.95	8.46	7～8	8～9
Cl ⁻	20901mg/l	0.52mg/l	19000～20000mg/l	0～100mg/l
CO ₃ ²⁻ /HCO ₃ ⁻ (*)2	730.5 mg/l	213.44 mg/l	300～600mg/l	0～300mg/l
SO ₄ ²⁻	3.03 mg/l	10.38 mg/l	0～20mg/l	0～20mg/l
Mg ²⁺	6.05 mg/l	1.22 mg/l	0～700mg/l	0～10mg/l

(*)1 ヒストグラムから読み取った最頻値の範囲を各分析値ごとに示している。

(*)2 CO₃²⁻及び HCO₃⁻の分析値 (mg/l) の和である。

(*)3 TRU 廃棄物処分の特徴を考慮し、選択した。



(*) JNC TN8400 99-030 より引用

図 2.1-9 スクリーニング後の実測値及び各モデル地下水の Cl 濃度と Mg 濃度

一方、150m 以浅については、温泉・鉱泉及び坑道湧水のデータ数が非常に限られているため、データ数が豊富な用水及び観測井・調査井に関して、水質の傾向を把握する。今回検討した水質項目と、降水系高 pH 型 (FRHP) 及び降水系低 pH 型 (FRLP) の水質項目を比較した表を表 2.1-4 に示す。同表において、塩素濃度、 SO_4^{2-} と Mg^{2+} についてみると、FRHP あるいは FRLP と同程度の濃度範囲にあるが、pH や $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ についてはヒストグラム上の最頻値と FRHP あるいは FRLP とは合わない。この 150m 以浅については、HLW において設定したモデル地下水とは別途に、モデル地下水の検討を行う必要があると考えられる。

表 2.1-4 GL-0m～-50m 及び GL-50m～-150m の分析値と HLW において設定されたモデル地下水の比較

分析項目(*3)	降水系高 pH 型 (FRHP)	降水系低 pH 型 (FRLP)	用水、観測井・調査井(*1)	
			GL0m～-50m	GL-50～-150m
pH	8.46	5.70	7～8	7～8
Cl^-	0.52mg/l	3.63mg/l	0～100mg/l	0～100mg/l
$\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ (*2)	213.44mg/l	229.77mg/l	30～150mg/l	30～150mg/l
SO_4^{2-}	10.38mg/l	0.00mg/l	0～20mg/l	0～20mg/l
Mg^{2+}	1.22mg/l	1.22mg/l	0～10mg/l	0～10mg/l

(*1) ヒストグラムから読み取った最頻値の範囲を各分析値ごとに示している。

(*2) CO_3^{2-} 及び HCO_3^- の分析値 (mg/l) の和である。

(*3) TRU 廃棄物処分の特徴を考慮し、選択した。

2.2 モデル地下水を設定するための研究課題

2.2.1 モデル検討にあたっての課題

深度 150m 以浅の水質については、HLW のモデル地下水とは対応しない結果が得られた。本検討では、深度のみに着眼してデータの整理を行ったため、特に浅部の地下水に関しては、帯水層の性状が考慮されていない。地下浅部での採水試料には未固結の堆積層から採水した事例や、地域的な特異性を反映している地下水が数多く存在すると想定される。

したがって、地下浅部のモデル地下水の検討にあたっては、地質との関係や地理的な特性をも考慮した検討が必要となる。また、0～50m と 50～150m の地下水の水質における本質的な相違の有無を検討し、50m での区分の必要性についても検討が必要である。

一方、モデル地下水の検討に際しての攪乱要因として、人為的な水質への影響が挙げられる。人為的な水質への影響としては、

- ① 酸性雨の効果
- ② 農薬散布による成分の変化
- ③ 過剰揚水による塩水化
- ④ 開削による酸化
- ⑤ 汚水等による有機物質の増加
- ⑥ 天然には存在しない成分の付加（狭義の地下水汚染）

などがある。

これらについては、水質に対する影響の程度に差はあるが、一般的には、たとえばイオンバランスの検討の際に人為的に付加された成分により見かけイオンバランスが悪くなっているなど、地下水の水質を評価する際には配慮する必要がある。また、地下浅部ほど人為的な影響を強く被っていると考えられ、TRU 処分自体への影響程度の把握が必要となる場合も想定される。

今回検討に用いたデータ（提示いただいた水質データ及び電力中央研究所報告 U95044(1996)のデータ）を対象とし、汚染の指標とされる場合もある過マンガン酸カリウム消費量の深度別の傾向を表 2.2-1に示す。ここでは、もともと炭化水素などとして地下水試料中に有機物が多く含まれ、そのために過マンガン酸カリウムの消費量が多くなる場合があると考えられるガス井のデータと区分した場合も示した。ガス井以外のデ

ータを整理した結果では、GL0～-50m では過マンガン酸カリウム消費量が 10mg/l を超える割合は 13.4%、GL-50～-150m では 19.5%、300m 以深では 0.03%であり、これらの数値は、余裕深度処分及び浅地中処分に相当する深度で比較的汚染があり得る状況を示している可能性が考えられる。

表 2.2-1 過マンガン酸カリウム消費量と深度別の傾向

深度区分	用途区分	過マンガン酸カリウム消費量が 10mg/l 以上の試料数/総数	
		用途区分無し	ガス井及びそれ以外を区分
GL0～-50m	用水	91 / 679 (13.4%)	86/674 (12.3%)
	観測井・調査井		
	温泉・鉱泉		
	ガス井		5/5 (100%)
GL-50～-150m	用水	262 / 1346 (19.5%)	250/1317 (18.9%)
	観測井・調査井		
	温泉・鉱泉		
	ガス井		12/29 (41.4%)
GL-300m 以深	用水	79 / 316 (25.0%)	4/131 (0.03%)
	観測井・調査井		
	温泉・鉱泉		
	ガス井		75/185 (40.5%)

(*) 検討の対象としたデータのうち、深度に関する情報が存在するデータを総数とし、過マンガン酸カリウム消費量に関する実測値が無い試料も総数としてカウントしている。

2.2.2 課題達成の方策

浅部地下水についての課題に対しては、

- ①既往データの適用性の検討と新規データの収集
- ②既往および新規データによる地域的検討
- ③現地における実態把握調査

が望まれる。

①既往データの適用性の検討と新規データの収集

今回の検討に利用した水質データの多くは地下水の開発・利用を目的として分析されたものであり、特に採用データの大多数を占める「用水」は、飲料用や工業用のものであると考えられる。すなわち、それらの用途に合致した水質であるものがほとんどであるといえる。「温泉・鉱泉」にいたっては、水温や温泉法に定められた成分などに依存する特異性を有しているものと考えられる。このように、現有のデータは開発の意図があり、純粋な意味で一般性を有する地下水の水質を把握する目的には合わない可能性がある。すなわち、観測井・調査井や坑道湧水などを除くと、水利目的を有するデータがほとんどであり、TRU モデル地下水を検討する目的に照らすと、開発を意図しない地下水の水質データの収集・整理・検討が必要となる。

特定の開発目的を有しない地下水の水質データで、かつ、比較的組織的に収集されているものとしては、旧建設省（現国土交通省）河川局の「地下水水質年表」が挙げられる。これは、2章で紹介したように、平成10年度版で433箇所の観測所のデータが記録されており、採水深度も数m～211mと広範囲となっている。河川局発行のため、各観測所は河川流系で整理されており、現在のところ比較的人口の多い平野部に多く設けられている。データセットとしては、位置、ストレーナ深度、採水時期、採水方法が明記され、分析項目についても液性や主要成分を満足するものが多く、その他に環境基準に関係する成分も分析されていることが多い。ただし、観測地点の標高はせいぜい200mまでで、ほとんどが平野部に位置し、山岳地のデータは認め難いこと、また、対象帯水層も第四紀層を主体とした未固結層が多いといった欠点がある。

②既往および新規データによる地域的検討

水質モデルの検討に際しては、例えば、次章で述べるような地下水の水質形成機構に照らして、帯水層の地質（岩石／水反応）および帯水層の水文循環における位置づけを考慮した検討が不可欠である。そこで、水質データの取得された地点を深度だけでなく地形および地質により区分し、水文循環の観点から分類を試みる。具体的には、以下の作業が想定される。

- ・ 既往の水質データおよび今後収集する水質データを地形と地質により分類する。
- ・ 地形は水文循環の観点から区分を行う。
- ・ 分類されたデータに海岸からの距離情報を付加する。
- ・ トリリニアダイアグラムにプロットし、地形区分、地質区分および海岸からの距離などで分布傾向を検討する。
- ・ 必要に応じて深度区分を変えて同様の検討を行う。

これらの作業により、モデル地下水設定の可否を検討する。ただし、文献データは地域的に偏りがあり、また、必ずしも計測地点が明確で無いデータもあるため、地形区分によっては検討に足る量のデータが得られない可能性が懸念される。また、文献データは前述したように水資源開発目的である場合が多く、「一般的」な地下水でない可能性もある。これらの問題を解決するには、最終的には次に述べるような、現地における地下水水質分布の実測が望まれる。

③現地における実態把握調査

現地調査は、最低次に掲げた2つの場所および目的で実施されることが望ましい。

- ・ 前節で設定した地形区分のなかで、TRU 処分候補地となりうる地形・地質条件にもかかわらず、利用に耐えうる文献データに乏しい箇所において実測データを得る。
- ・ 前節で設定した地形区分のなかで、比較的データそろってある程度のモデル化が可能と判断された箇所における実証データを得る。

具体的な作業項目としては、

- ・ ボーリングの掘削（帯水層の地質構成の確認）
- ・ ボーリングコアを利用した微化石分析あるいは年代測定（帯水層の履歴の把握）
- ・ ボーリング孔を利用した水理試験（水圧分布、透水係数の測定、帯水層の区分）

- ・ボーリング孔からの地下水の採水（パッカーで区間を遮蔽し多深度で採水）
- ・採水試料の同位体分析、水質分析（地下水の起源、水質の把握）

などである。また、必要に応じて孔内検層や地下水年代の測定も行う。

これらの調査結果から、調査地点の水質分布の特性を水文循環から想定される水質形成機構の観点から整理し、文献調査から得られた結果と比較する。これらの作業を経て、水質パターンの妥当性あるいは不確定要因の抽出を行い、モデル地下水の検討を行う。

2.2.3 地下水の水質形成機構に関する予備的考察

地下水の水質形成機構は水文循環の観点からとらえる必要がある。すなわち地下水は、大気中の成分や微細な粒子（凝結核）を取り込んだ降水が地下に浸透し、土壌・岩石中に含まれる様々な成分と反応して形成され则认为られる（図 2.2-1）。したがって地下水には大気や土壌・岩石との反応により生じた成分等が含まれている。

また、河川水あるいは湖沼水が、河床あるいは湖沼から地下に涵養し地下水の水質形成に寄与する場合が考えられる。あるいは、海岸付近においては、塩水の侵入により、地下水の塩水化が進行する場合がある。これらの作用が地下水の水質形成に与える影響は充分に考慮していく必要があるが、本章では、河川水、湖沼水あるいは海水の混合による水質の形成は取り上げず、水質に関する予備的な考察として、降水が徐々に地下に浸透していき、水質が形成される際に考えられる反応を整理して示しておくこととする。

以下に水質形成に寄与している諸作用を大きく以下の3項目に分けて記述する。

- ① 大気からの溶存成分、凝結核による降水の形成
- ② 降水が地盤を浸透していく過程での岩石／水反応
- ③ 陽イオン交換

さらに、地下水の水質組成変化に関わる化石塩水の混入についても記述する。

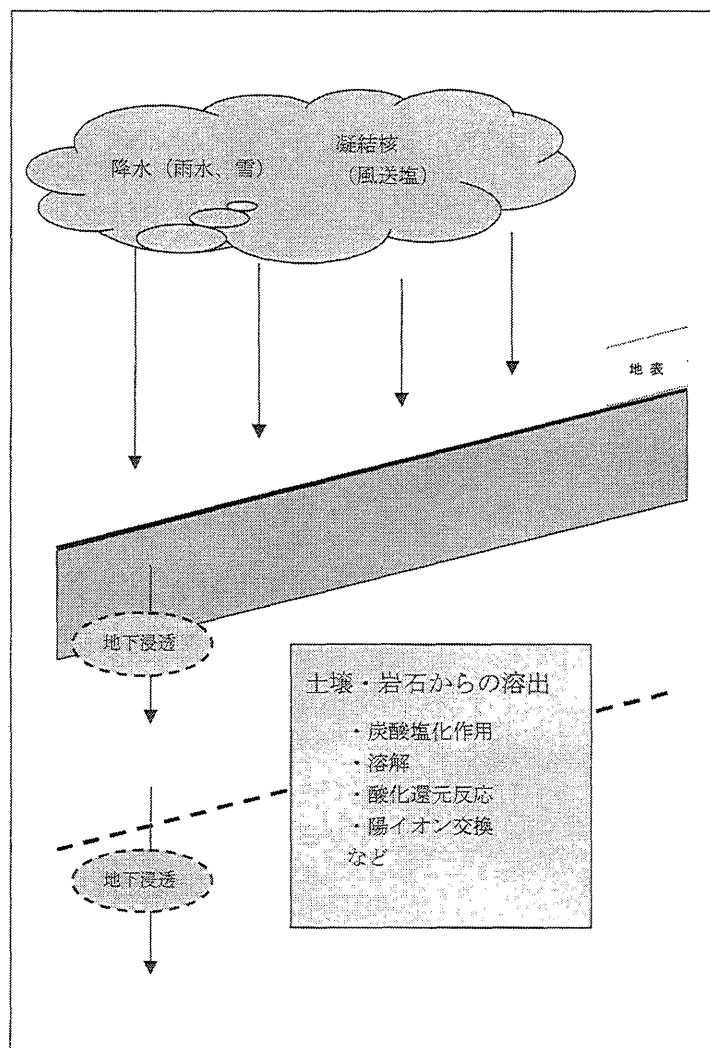


図 2.2-1 循環性地下水の水質形成概念図

(1) 大気からの溶存成分、凝結核による降水の形成

降水には水蒸気の凝結時に微細な粒子（凝結核）が必要であり、その粒子の成分の地域性が降水の溶存成分に影響を与えている。たとえば海水の飛沫による風送塩は Na^+ 、 Cl^- などの成分の、化石燃料の燃焼生成物（ SO_x 、 NO_x ）は SO_4^{2-} 、 NO_3^- の供給源となっている。表 2.2-2 に八丈島、大阪の降水の溶存成分を示す。海に囲まれている八丈島の降水は Na^+ および Cl^- などに富み、工業生産活動の活発な大阪の降水は化石燃料の燃焼に起因する SO_4^{2-} が高濃度となっている。

大気の成分は、 N_2 (78.08%)、 O_2 (20.95%)、 Ar (0.93%)、 CO_2 (0.03%) であり、降水はこれらのガスも溶かし込んでいる。このうち、 N_2 、 Ar は反応性はないが、 O_2

は酸化作用、CO₂は炭酸塩化作用によって後述する岩石/水反応の主要因となっている。

表 2.2-2 降水の溶存成分

成 分	八丈島	大 阪	日 本 ¹⁾
Na ⁺	3.58	1.44	1.1
K ⁺	0.14	0.48	0.26
Ca ²⁺	0.21	4.17	0.97
Mg ²⁺	0.45	0.46	0.36
Cl ⁻	6.39	4.52	1.1
SO ₄ ²⁻	1.19	10.92	4.5

1):角皆(1972)による

(mg/l)

(2) 降水が地盤を浸透していく過程での岩石／水反応

岩石／水反応は様々な化学反応により生じるが、大きく分けて以下の3つに大別される。

①炭酸塩化作用

②溶解

③酸化還元反応

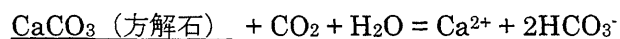
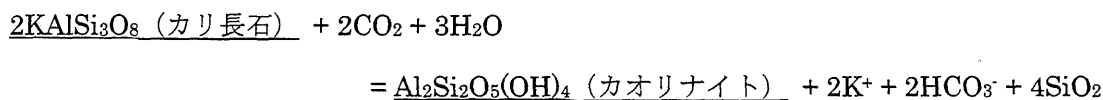
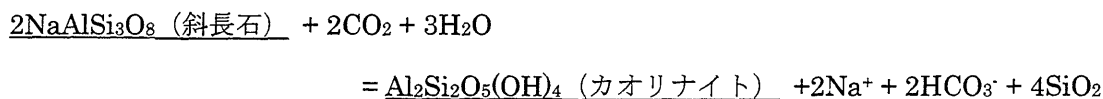
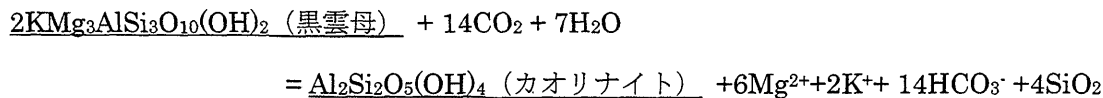
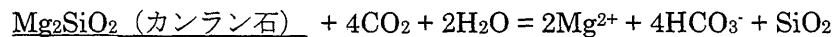
特に土壌・岩石の主要造岩鉱物がケイ酸塩、またはアルミノケイ酸塩であることから、土壌・岩石からの成分溶出の主体は炭酸塩化作用である。

①炭酸塩化作用

大気（CO₂含有量：0.03%）および土壌ガス（CO₂含有量：5～7%）によるCO₂供給を受けた地下水は、土壌・岩石の構成鉱物と加水分解などにより反応し、この過程で、地下水中にはNa⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻、SiO₂などが溶出する炭酸塩化作用に関わる主要な化学反応を次式に示す。

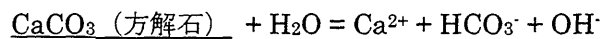
土壌・岩石との接触時間が長いほど、これらの反応が進み、地下水中の成分は増加する。一般的に地下深部の水ほど、岩石と接触時間が長いため、溶存成分は多いことになる。

ただし、後述のイオン交換によって陽イオンの存在量は変化する。



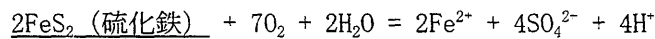
②溶解

地下水が土壌・岩石を構成する鉱物と接触すると、それらの鉱物は次式のように溶解し、地下水中に Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 OH^- 、 SiO_2 などが溶出する。土壌・岩石との接触時間が長いほど、溶解反応が進み、地下水中の成分は増加する。一般的には地下深部の水ほど土壌・岩石と接触時間が長いため、溶存成分は多いことになる。ただし、これらの反応は鉱物の溶解度に依存し、溶解は地下水の水質形成への寄与は小さい。



③酸化還元反応

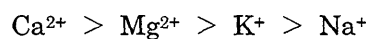
硫化鉄 (FeS_2) を含む岩石が O_2 を含む地下水と接触すると、次式のような酸化反応が起こり O_2 が消費され、地下水中に H^+ 、 SO_4^{2-} 、 Fe^{2+} 等が溶出する。また土壌中の有機物も微生物の活動による酸化反応によって O_2 を消費する。



地下水中の O_2 は硫化鉄の酸化や有機物の分解によって消費されるため、地下水は還元性環境におかれるようになる。地下水が還元性環境になると、鉄の可溶化（土壌・岩盤中の Fe^{3+} が Fe^{2+} になり溶け出す）、硝酸還元反応（ NO_3^- が N_2 となる）がおこる。さらに還元性環境が進むと硫酸還元反応（ SO_4^{2-} が H_2S になる）がおこる。したがって地下水中には Fe^{2+} が付加され、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} は減少、または消失する。

(3) 陽イオン交換

粘土鉱物は粒子表面の負の電荷を介して、土壌・地層中で陽イオンの吸着・交換反応に関わっている。特にモンモリロナイトの陽イオンを吸着する能力は非常に大きい。また主要陽イオンについて、粘土鉱物により保持される傾向の強弱をみると、2 価のものは 1 価のものよりも強く保持される傾向が認められている。主要陽イオンの保持される強さは



である。

したがって、一般的には地下水が粘土鉱物を含む土壌・岩石と接触した場合、粘土鉱物による陽イオンの保持される傾向の強弱の関係より陽イオン交換がおこり、地下水中の陽イオンの量比種類が変化し、最終的には地下水中の Na^+ が相対的に増加する。

(4) 地下水への化石塩水の混入

一般に化石塩水は岩石中に永く閉鎖された水、または岩石の生成当時からそこに存在していた水であり、大気と接触しなかった水と考えられている。起源としては、火山性温泉、海水であり、溶存成分として Cl^- が多く含まれる傾向にある。しかし火山性温泉を起源とした化石塩水の事例はあまり報告されていない。

特に海水起源のものを化石海水と呼んでおり、地下水への化石塩水の混入を考えた場合、地下水に混入したものは化石海水である場合が多い。化石海水の組成は一概には言えず、杉崎（1963）によると、海水と比べて、 Ca^{2+} が増加している型と Na^+ が増加している型の 2 つに大別され、この要因として地質時代、粘土鉱物、有機物が考えられ、特に粘土鉱物、有機物を重視している。また、 Mg^{2+} は全ての事例で海水と比べ

て減少することが注目されている。この化石海水が地下水に混入した場合、相対的に Cl⁻や Na⁺、または Ca²⁺が多く含まれる傾向が認められている。

2.3 地下水の化学的変遷に関する重要となる事象の検討

浅地中処分、余裕深度処分及び地層処分にける地下水の化学的変遷に関して、関連する特徴、事象及び過程（F E P）を抽出、記述し、F E P間の重要な相互作用の同定を行った。

2.3.1 目的

TRU 廃棄物は含まれる放射性核種濃度が比較的高いものから低いものまで広範囲に分布していることから、放射性濃度等により適切に区分し、その区分に応じた合理的な処分方法の検討が行われてきた。これらの検討では、対象の廃棄物を、現行の浅地中のコンクリートピット処分、地下利用に余裕を持った深度への処分、及び地層処分に区分して処分を行う方法を基本とした検討を行っている。このため、TRU 廃棄物処分では、処分深度や処分施設概念などが複数存在する。また、廃棄物として有機物、硝酸塩等の塩類、金属等を含むものが多種多様に発生する。そこで、本検討ではこれら TRU 廃棄物処分としての特徴を反映した、TRU 廃棄物処分施設における地下水の化学的変遷に関する検討をより詳細に進めていく上で必要となる研究課題を明確にすることを目的とする。

2.3.2 対象とする処分システム

TRU 廃棄物を処分する処分施設概念としては、地層処分に関しては「TRU 廃棄物処分概念検討書」に示されているが、他の余裕深度処分及び浅地中処分に関しては TRU 廃棄物を対象とした処分施設概念は示されていない。そこで、これらの処分深度における処分施設概念としては、浅地中処分に関しては発電所廃棄物を対象として既に処分が行われている六ヶ所埋設センターでのコンクリートピット処分施設概念を、余裕深度処分に関してはバックエンド専門部会報告書にて提案されている処分施設概念を想定することとする。

以下に、各処分施設概念についてまとめる。

(1) 地層処分施設

TRU 廃棄物は先に示したように、対象となる廃棄物の性状（核種インベントリや含有物質の種類等）が多岐にわたっていることから、地層処分対象となる廃棄物内においてさらその廃棄物性状に応じて廃棄体をグループ化して合理的な処分概念の構築が

なされている。廃棄体をグループ化した結果、以下に示すように地層処分される TRU 廃棄物を処分する施設概念としては緩衝材を設置する施設と、設置しない施設の大きく分けて 2 つのものが考えられている。ただし、坑道内に構造躯体を設置し、その中に廃棄体を定置し充填材を充填することは共通である。

- グループ 1、2 は、半減期が長く、地下水とともに移行しやすい核種を含むため人工バリアを強化することによって核種の閉じ込め性を高める必要がある。そのため、廃棄体定置後の空隙を充填材で充填するとともに、周囲に緩衝材を設けるとされている。
- グループ 3、4 は半減期が長く、地下水とともに移行しやすい核種を含まないため、充填材を充填するものの、周囲に緩衝材を設けない構成とされている。

これら 2 つの処分施設概念の基本構成を図 2.3-1 に示す。

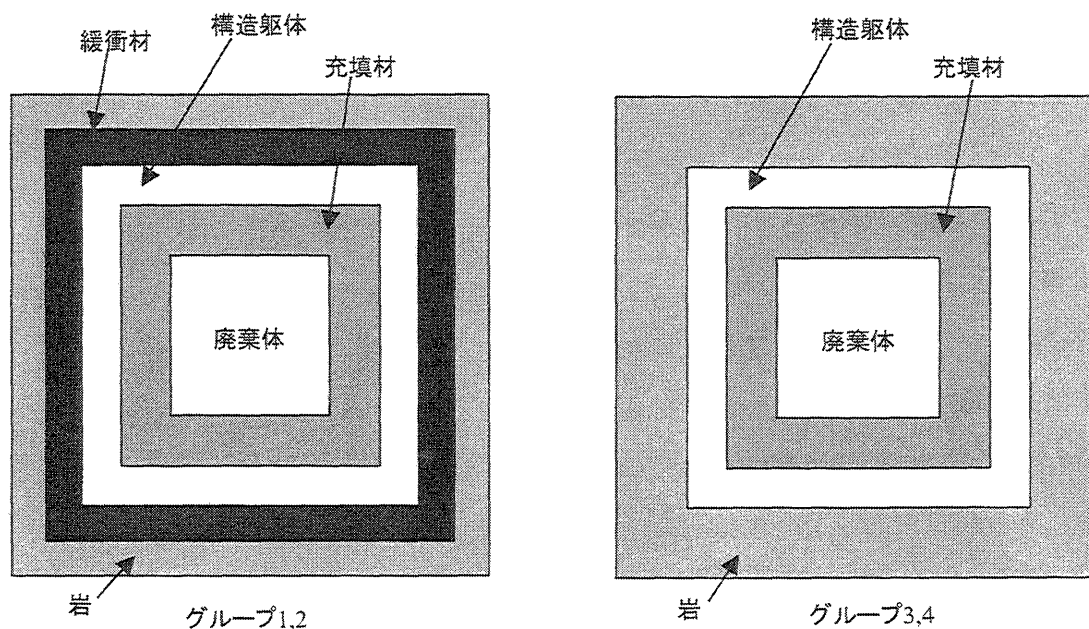


図 2.3-1 廃棄体グループ毎の処分施設概念の基本構成

(2) 余裕深度処分

余裕深度処分としては、現行の低レベル放射性廃棄物が処分されているコンクリートピットと同等以上の放射性核種閉じ込め機能を持った施設を、放射性核種の移行抑制機能の高い地中で、人間活動によって人間が廃棄物に接触する可能性が十分小さいと考えられる地下数十m程度へ設置する方法が示された。この方策に従い、海外の処分施設の例を参考に作成された処分施設の概念を図 2.3-2に示す。

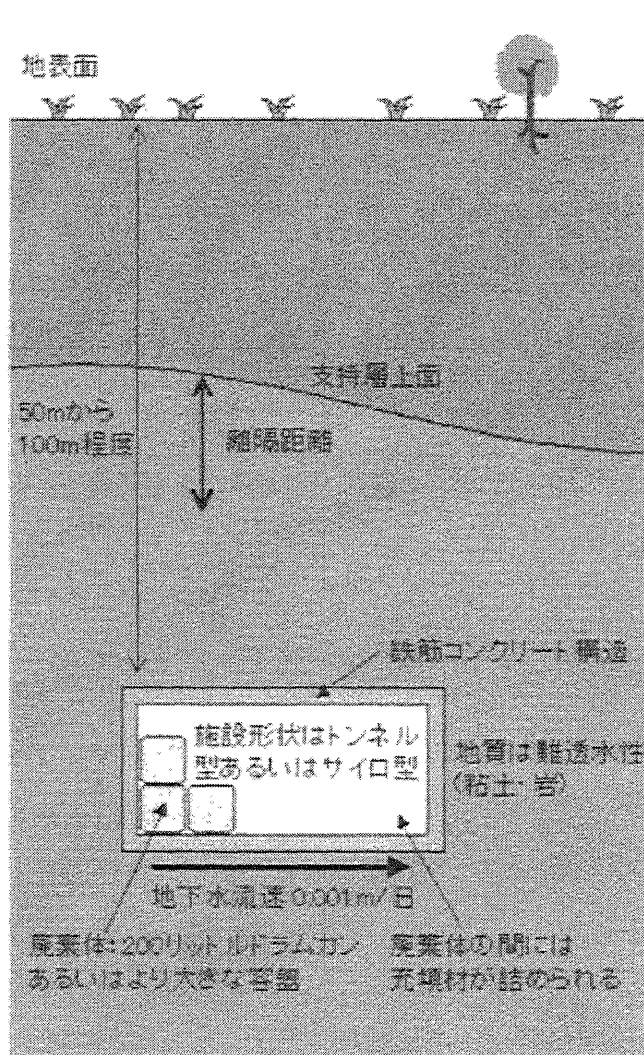


図 2.3-2 提案された余裕深度処分の処分概念

(3) 浅地中処分

浅地中処分としては、浅地中にコンクリートピット等の人工構築物を設けて、廃棄物を安定な形態で収納した廃棄体(ドラム缶等)としてピット内に定置し、その後、定置が完了すると、その空隙をセメント系の充填材で埋め、さらに覆土で埋め戻すことになっている。埋設施設の概念図を図 2.3-3に示す。

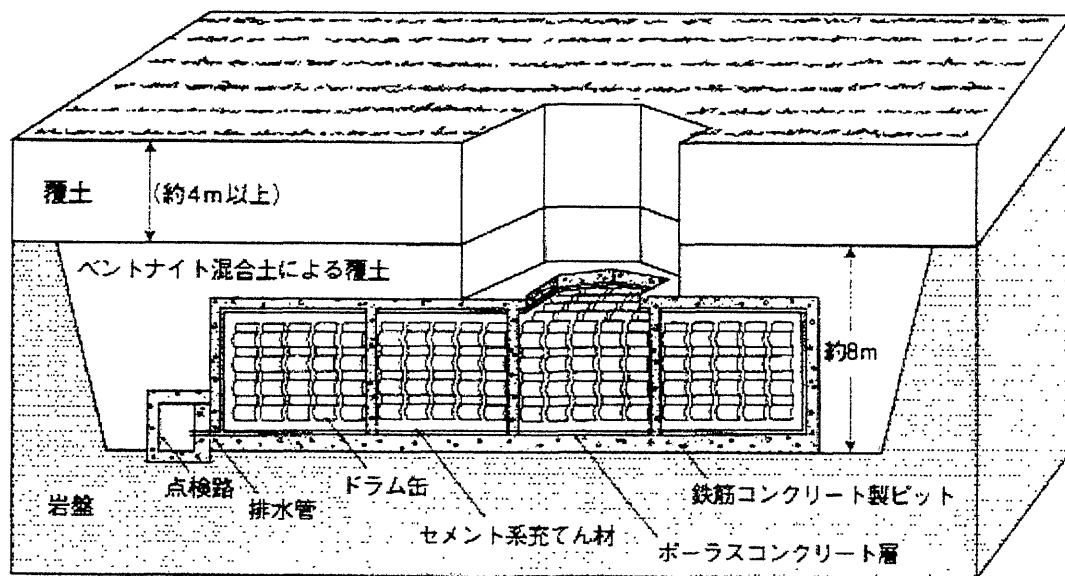


図 2.3-3 低レベル放射性廃棄物埋設施設の概念図

2.3.3 検討方法

TRU 廃棄物処分としての特徴を反映した、TRU 廃棄物処分施設での地下水の化学的変遷に関する研究課題を明確にする検討としては、化学的変遷に関連する特徴、事象及び過程 (FEP) を抽出の上、記述し、FEP 間の重要な相互作用を同定する。

まず、FEP の抽出において検討対象とする処分システムの設定が必要である。TRU 廃棄物の処分システムは上記でまとめたように、浅地中処分、余裕深度処分、地層処分ともに構造躯体を設けその中に廃棄体を定置後、充填材で充填することは同様である。余裕深度処分に関しては緩衝材を設けない処分施設概念が示されてはいるが、施設周囲の地質条件に応じては施設への地下水浸入を抑制するために、ベントナイト系材料による緩衝材を設置することは十分想定される。そこで、FEP を検討する際の処分システム

としては、浅地中処分、余裕深度処分、地層処分に関して共通に、以下の構成要素が存在すると想定する。

- 地層
- セメント系材料（構造材）
- ベントナイト系材料（地下水抑制）
- セメント系材料（操業、遮へい、定置）
- 金属系材料

本検討では、これらの構成要素を有する処分システムと同等な処分システムを対象とした「TRU 廃棄物処分概念検討書」の一部として検討がおこなわれた「電力共通研究 TRU 廃棄物処分における安全評価手法に関する研究 平成 9 年度 最終報告書」（非公開）及びそれ以降に検討が実施された「電力共通研究 TRU 廃棄物における安全評価シナリオの体系化に関する研究 平成 11 年度 最終報告書」（非公開）にて示されている FEP リスト、FEP 辞書等をベースとして検討を行う。ただし、FEP としては処分深度ごとなどで場合わけした数種類の物を作成するのではなく、1 種類とし、処分深度などの違いに起因する影響などについては FEP 中に特記事項として記述することとする。

2.3.4 FEP の抽出及び整理

検討のベースとなる「TRU 廃棄物処分概念検討書」及び関連する電力共通研究において抽出されている FEP リスト（多重バリアシステム内部に関する内部 FEP）を表 2.3-1 に示す。全部で 128 個の FEP が抽出されている。上記で示した内部 FEP 以外に、地殻変動などのようにシステム外部の要因に関するものとして、外部 FEP も 37 個抽出されている。しかし、本検討で目的としている TRU 廃棄物処分施設における地下水の化学的変遷に関しては、多重バリアシステム内部で生じる事象が重要であると考えられるため、ここでの検討はまず内部 FEP を対象として実施することとした。

まず、FEP の抽出としてここで示されている FEP に対して、地下水の化学的変遷に直接関係する【水化学】FEP に着目し、それぞれの領域における【水化学】FEP に影響を及ぼすリンクが存在する FEP を抽出した。抽出された FEP をすべての FEP リストにおいて網掛けで表示したものを表 2.3-2 に示す。全部で 68 個の FEP が抽出されて

いる。

抽出された FEP は領域により若干異なっている。これは、ベースとなる FEP リスト及び【水化学】FEP に影響を及ぼすものとして抽出された FEP リストにおいて、FEP としてあげられているものの詳細度が大きく異なっており、個々の FEP が意味する内容の範囲が広いものと非常に限定されているものが混在していることに起因すると考えられる。

抽出された FEP は大きくわけて以下のものと考えることができる。

- 水化学
- 温度影響
- 物質移行
- 領域に含まれる材料の劣化
- ガス影響
- 微生物による影響
- 有機物による影響
- 放射線分解による影響

そこで、本検討では FEP の意味する内容のレベルをそろえるために、表 2.3-2 で抽出された FEP のいくつかを統合して検討を行うこととした。最終的に本検討で検討対象とした FEP リストを表 2.3-3 に示す。

FEP の記述に関しては、上記で抽出された FEP を対象として実施することとした。しかし、それぞれの FEP に関してすべての内容を網羅的に記述することは困難であるため、ここでは、「水化学環境への影響」に関連する記述のみを整理することとした。また、各 FEP で考慮する事象に関しては、地下水の化学的変遷への影響という観点から、【水化学】FEP については、“他の FEP から受ける影響”について、他の FEP については“【水化学】FEP に与える影響”についてのみ記述することとした。

ただし、TRU 廃棄物処分の性能評価に対する水化学環境の検討としては、最終的には核種移行パラメータへの影響を検討し、線量評価への影響の程度から水化学環境に影響を及ぼす種々の要因の重要性を確認する必要がある。このためには、核種移行パラメー

タに関連するそれぞれの FEP において、【水化学】FEP に起因して生じる影響のプロセスを整理し、そのプロセスによる影響の程度を把握する必要がある。本検討では、上記水化学環境から核種移行パラメータへの影響を生じるプロセスの同定は行わずに、【水化学】FEP に影響を受けると考えられる核種移行パラメータを記すこととした。

記述した FEP の記載例を一例として「FW11：廃棄体での水化学」に関して図 2.3-4 に示した。

上記記載例を対象として、各 FEP について記載した事項について示す。

「説明」：当該 FEP に関して、水化学環境の変遷に関連すると考えられる知見や情報について過去の研究例等を参考に記載した。

「評価すべき事象」：当該 FEP において、水化学環境の変遷を検討する上で考慮する必要がある項目を記載した。ここでの記載に関しては、例示した【水化学】FEP については上記で記したように“他の FEP から受ける影響”を対象として記載し、他の FEP については“【水化学】FEP に与える影響”を対象として記載した。

「浅地中処分における特記事項」：当該 FEP にて、コンクリートピット処分等の浅地中処分では特別に取扱われる可能性のある事象について記載した。

「余裕深度処分における特記事項」：当該 FEP にて、余裕深度処分では特別に取扱われる可能性のある事象について記載した。

「地層処分における特記事項」：当該 FEP において、地層処分では特別に取扱われる可能性のある事象について記載した。

「影響をうける核種移行パラメータ」：水化学環境により影響をうけると考えられる核種移行パラメータを記載した。（【水化学】FEP のみ）

「参考文献」：引用した参考文献を記載した。

記述した FEP を添付に示す。

TRU 廃棄物は先に示したように、廃棄物中に含まれる放射能濃度が幅広く分布することから、浅地中処分から地層処分まで廃棄物の性状に応じた処分が検討されており、このような処分深度の違いに起因する影響については FEP 中に特記事項として記述して

いる。FEP 中に処分深度の違いによる特記事項として記述されている内容としては、温度影響の考慮の有無に関するものと、不飽和層の取扱に関するものが挙げられる。

ここでは、上記に挙げた以外の事項について、地層処分に対して余裕深度処分及び浅地中処分などのより処分深度が浅い場合に生じる影響について整理する。

原子力バックエンド対策専門部会における報告書「我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価」（平成12年10月11日）によると、地層処分施設の処分深度として想定されている深さ（地下三百から千 m 程度）の地下深部の地質環境としての特徴は以下のものが挙げられる。

- 地質環境の長期安定性
- 低地下水流速
- 還元環境

余裕深度処分及び浅地中処分の場合には、上記の地層処分の場合に想定される地質環境としての特徴が異なると考えられる。上記で整理・記述した FEP におけるそれらの地質環境としての特徴の相違についてどの様に対処したかをそれぞれ示す。

まず、「地質環境の長期安定性」に関しては、地層処分施設においては、急激かつ局所的な現象として①地震・断層活動、②火山・火成活動を、緩慢かつ広域的な現象として③隆起・沈降・侵食、④気候・海水準変動を対象として検討が行われている。これらの事象は外部 FEP により取扱われるため本検討では対象とはしていないが、仮に、外部 FEP も含めた検討を行った場合での取扱として示した。まず、急激かつ局所的な現象に関しては、それらにより重大な影響が及ばない安定な地域が存在することが示されていることから、そのような地域を選ぶことによりそれらの影響を回避する事は可能であるとされている。このことは、仮に余裕深度処分及び浅地中処分として考えた場合もジェネリックな評価としては同等と考えることができるため、FEP における検討において特別な取扱は必要ないと考えられる。また、緩慢かつ広域的な現象に関しては、将来にわたっての変動量などが推定可能であることから、個々の地域で予想される影響を評価することで適切に対処をはかることができるものとされている。これに関しても、仮に余

裕深度処分及び浅地中処分として考えた場合は、処分深度の違いにより将来にわたっての変動量等は異なるが地層処分と同等の考え方により対処可能と考えられるため、FEPにおける検討において特別な取扱は必要ないと考えられる。

次に、「低地下水流速」に関しては、一般に地下深部では動水勾配や透水性が低く、人工バリア中に浸透する地下水の量や速度が小さいと考えられる。一方、余裕深度処分及び浅地中処分では、地下深部に比べ一般に同土卯勾配や透水性が高くなることから岩盤中の地下水流速は速くなると考えられる。しかし、人工バリア中に浸透する地下水の量や速度に関しては、低透水性のベントナイト系緩衝材が処分施設周囲に設置されることからこれらに関しては地層処分と同様に小さいと考えることができる。このため、処分深度による相異点としては、処分施設周囲の地下水流動が問題となるが、これに関しては【ニアフィールド母岩での水理・物質移行】FEPにより、それぞれの処分深度における特徴を踏まえて取扱われる内容であり、特定の処分深度において特別な取扱は必要のない事項であると考えた。

「還元環境」に関しては、一般に地下深部の地下水は岩石中に含まれる鉱物や有機物などとの反応により、中性から弱アルカリ性で還元状態である。深度による酸化還元環境の変化については、千木良（1995）によって、酸化的な領域と還元的な領域の境界の位置を推測した例がある。対象とした範囲は、第四紀更新世の灰爪層の地表から深度50m程度までである。そこでは、黄鉄鉱の酸化が発生している領域を酸化的な領域と還元的な領域の境界線として捉えており、その境界線の位地は地表から数10m程度の深さであったとしている。また、深度百数十mで強還元状態になることが、堆積岩における数少ない実測値から示されるとしている（核燃料サイクル開発機構、1999、分冊Ⅰ、Ⅲ-79）。したがって、堆積岩においては、百数十m以深程度の強還元的な環境から地表へかけて、酸化的な領域になることが考えられる。このことから、余裕深度処分及び浅地中処分においては、地下水の化学環境として必ずしも還元環境ということではなく、酸化性の環境であることも考えられる。しかし、FEP等の検討においてはこのような化学環境の違いは、【ニアフィールド母岩での水化学】FEPにより、それぞれの処分深度及び処分環境における特徴を踏まえて取扱われる内容であり、特定の処分深度において特別な取扱は必要のない事項であると考えた。また、酸化性環境との関連するが、余裕

深度処分及び浅地中処分では、周辺岩盤が風化を受けた場合も考えられる。ただし、これに関しても【ニアフィールド母岩の特性】FEPにより、周辺環境の特徴を踏まえて取扱われる内容であり、特定の処分深度において特別な取扱は必要のない事項であると考えた。

ただし、これは水化学環境の変遷に関する FEP 等の検討に際しての考えであり、データ取得という観点からは、現状地層処分施設を主な対象として還元環境を想定してデータ取得が行われているが、先に示したように、余裕深度処分及び浅地中処分においては、酸化性環境となる場合も想定されることから、これらの処分施設を対象としたものとしては特別にデータ取得の必要性が生じるものも存在すると考えられる。

表 2.3-1 TRU 処分概念検討書にて抽出された FEP リスト

廃棄体		充填材		構造躯体		緩衝材		ニアフイールド母岩	
FW01	からの核種の移行と放出	FM01	からの核種の移行と放出	FS01	からの核種の移行と放出	FB01	からの核種の移行と放出	FN01	からの核種の移行と放出
FW02	での沈殿・溶解	FM02	での沈殿・溶解	FS02	での沈殿・溶解	FB02	での沈殿・溶解	FN02	での沈殿・溶解
FW03	での吸着	FM03	での吸着	FS03	での吸着	FB03	での吸着	FN03	での吸着
FW04	での拡散	FM04	での拡散	FS04	での拡散	FB04	での拡散	FN04	での拡散
FW05	での核種の崩壊と蓄積	FM05	での核種の崩壊と蓄積	FS05	での核種の崩壊と蓄積	FB05	での核種の崩壊と蓄積	FN05	での核種の崩壊と蓄積
		FM06	でのマトリクス拡散	FS06	でのマトリクス拡散			FN06	でのマトリクス拡散
		FM07	での陰イオン排除	FS07	での陰イオン排除	FB07	での陰イオン排除	FN07	での陰イオン排除
						FB08	での分散	FN08	での分散
						FB09	でのふりい効果		
FW10	核種インベントリの変化								
FW11	でのガス発生	FM11	でのガス発生	FS11	でのガス発生	FB11	でのガス発生	FN11	でのガス発生
FW12	でのガス圧(バルク)	FM12	でのガス圧(バルク)	FS12	でのガス圧(バルク)	FB12	でのガス圧(バルク)	FN12	でのガス圧(バルク)
FW13	でのガスフローと移行	FM13	でのガスフローと移行	FS13	でのガスフローと移行	FB13	でのガスフローと移行	FN13	でのガスフローと移行
FW21	での水の流れ	FM21	での水の流れ	FS21	での水の流れ	FB21	での水の流れ	FN21	での水の流れ
		FM22	での再冠水	FS22	での再冠水	FB22	での再冠水	FN22	での再冠水
								FN23	での卓越流路
FW31	での応力	FM31	での応力	FS31	での応力	FB31	での応力	FN31	での応力
				FS32	人工バリア材の熱による膨張	FB32	の膨張	FN33	での掘削の影響
								FN34	でのクリープ
								FN35	陥没
FW41	での水化学	FM41	での水化学	FS41	での水化学	FB41	での水化学	FN41	での水化学
FW42	での電気ポテンシャルの勾配	FM42	での電気ポテンシャルの勾配	FS42	での電気ポテンシャルの勾配	FB42	での電気ポテンシャルの勾配	FN42	での電気ポテンシャルの勾配
		FM43	でのレドックスフロント	FS43	でのレドックスフロント	FB43	でのレドックスフロント	FN43	でのレドックスフロント
								FN44	での核種の再濃縮
		FM51	での特性	FS51	での特性	FB51	での特性	FN51	での特性
FW52	容器の特性の変化	FM52	での劣化	FS52	での劣化	FB52	での劣化/変質	FN52	支保、グラウトの劣化
FW53	金属(廃棄物)の劣化	FM53	での鉄筋の劣化	FS53	での鉄筋の劣化			FN53	シャフト、坑道のシールの劣化
FW54	有機物(廃棄物)の劣化							FN54	での移行経路の変質・風化
FW55	無機物(廃棄物)の劣化								
FW56	セメントマトリクスの特性の変化								
FW57	ヒュームマトリクスの特性の変化								
FW61	での温度	FM61	での温度	FS61	での温度	FB61	での温度	FN61	での温度
FW62	での放射線分解	FM62	での放射線分解	FS62	での放射線分解	FB62	での放射線分解	FN62	での放射線分解
FW63	での微生物活動	FM63	での微生物活動	FS63	での微生物活動	FB63	での微生物活動	FN63	での微生物活動
FW64	でのコロイドの発生と移行	FM64	でのコロイドの発生と移行	FS64	でのコロイドの発生と移行	FB64	でのコロイドの発生と移行	FN64	でのコロイドの発生と移行
FW65	への放射線損傷	FM65	への放射線損傷	FS65	への放射線損傷	FB65	への放射線損傷		

表 2.3-2 各領域における水化学への影響が考えられる FEP リスト

廃棄体	充填材	構造躯体	緩衝材	ニアファイバード母岩
FW01 一からの核種の移行と放出	FS01 一からの核種の移行と放出	FB01 一からの核種の移行と放出	FN01 一からの核種の移行と放出	
FW02 一での沈殿・溶解	FS02 一での沈殿・溶解	FB02 一での沈殿・溶解	FN02 一での沈殿・溶解	
FW03 一での吸着	FS03 一での吸着	FB03 一での吸着	FN03 一での吸着	
FW04 一での拡散	FS04 一での拡散	FB04 一での拡散	FN04 一での拡散	
FW05 一での核種の崩壊と蓄積	FS05 一での核種の崩壊と蓄積	FB05 一での核種の崩壊と蓄積	FN05 一での核種の崩壊と蓄積	
	FS06 一でのマトリクス拡散		FN06 一でのマトリクス拡散	
	FS07 一での陰イオン排除		FN07 一での陰イオン排除	
			FN08 一での分散	
			FN09 一でのふりい効果	
FW10 核種インベントリの変化				
FW11 一でのガス発生	FS11 一でのガス発生	FB11 一でのガス発生	FN11 一でのガス発生	
FW12 一でのガス圧(バルク)	FS12 一でのガス圧(バルク)	FB12 一でのガス圧(バルク)	FN12 一でのガス圧(バルク)	
FW13 一でのガスフローと移行	FS13 一でのガスフローと移行	FB13 一でのガスフローと移行	FN13 一でのガスフローと移行	
FW21 一での水の流れ	FS21 一での水の流れ	FB21 一での水の流れ	FN21 一での水の流れ	
	FS22 一での再蒸水	FB22 一での再蒸水	FN22 一での再蒸水	
			FN23 一での卓越流路	
FW31 一での応力	FS31 一での応力	FB31 一での応力	FN31 一での応力	
	FS32 人Lバリア材の熱による膨張	FB32 一の膨張	FN33 一での掘削の影響	
			FN34 一のクリープ	
			FN35 陥没	
FW41 一での水化学	FS41 一での水化学	FB41 一での水化学	FN41 一での水化学	
FW42 一での重炭酸イオンの分配	FS42 一での重炭酸イオンの分配	FB42 一での重炭酸イオンの分配	FN42 一での重炭酸イオンの分配	
FW43 一でのレドックスフロント	FS43 一でのレドックスフロント	FB43 一でのレドックスフロント	FN43 一でのレドックスフロント	
			FN44 一での核種の再濃縮	
	FS51 一の特性	FB51 一の特性	FN51 一の特性	
FW52 容器の特性の変化	FS52 一の劣化	FB52 一の劣化	FN52 一の劣化	
FW53 金属(腐食物)の劣化	FS53 一での鉄筋の劣化	FB53 一での鉄筋の劣化	FN53 シャフト・坑道のシールの劣化	
FW54 有機物(腐食物)の劣化			FN54 一での移行経路の変質・風化	
FW55 無機物(腐食物)の劣化				
FW56 放射性核種の特性の変化				
FW57 放射性核種の特性の変化				
FW61 一での温度	FS61 一での温度	FB61 一での温度	FN61 一での温度	
FW62 一での放射線分解	FS62 一での放射線分解	FB62 一での放射線分解	FN62 一での放射線分解	
FW63 一での微生物活動	FS63 一での微生物活動	FB63 一での微生物活動	FN63 一での微生物活動	
FW64 一でのコロイドの発生と移行	FS64 一でのコロイドの発生と移行	FB64 一でのコロイドの発生と移行	FN64 一でのコロイドの発生と移行	
FW65 一への放射線損傷	FS65 一への放射線損傷	FB65 一への放射線損傷	FN65 一への放射線損傷	

表 2.3-3 本検討で検討対象とした FEP リスト

廃棄体		充填材		構造躯体		緩衝材		ニアファイナルド母岩	
FW11	廃棄体での水化学	FM11	充填材での水化学	FS11	構造躯体での水化学	FB11	緩衝材での水化学	FN11	ニアファイナルド母岩での水化学
FW21	廃棄体の温度	FM21	充填材の温度	FS21	構造躯体の温度	FB21	緩衝材の温度	FN21	ニアファイナルド母岩の温度
FW31	廃棄体での水理・物質移行	FM31	充填材での水理・物質移行	FS31	構造躯体での水理・物質移行	FB31	緩衝材での水理・物質移行	FN31	ニアファイナルド母岩での水理・物質移行
		FM41	充填材の特性	FS41	構造躯体の特性	FB41	緩衝材の特性	FN41	ニアファイナルド母岩の特性
FW42	廃棄体容器の特性							FN42	埋め戻し材の特性
FW43	廃棄物(金属)の特性							FN43	支保、ブラダ、グラウトの特性
FW44	廃棄物(有機物)の特性								
FW45	廃棄物(無機物)の特性								
FW46	セメントマトリクスの特性								
FW47	ビチューメンマトリクスの特性								
FW51	廃棄体でのガス	FM51	充填材でのガス	FS51	構造躯体でのガス	FB51	緩衝材でのガス	FN51	ニアファイナルド母岩でのガス
FW61	廃棄体での微生物	FM61	充填材での微生物	FS61	構造躯体での微生物	FB61	緩衝材での微生物	FN61	ニアファイナルド母岩での微生物
FW71	廃棄体での有機物	FM71	充填材での有機物	FS71	構造躯体での有機物	FB71	緩衝材での有機物	FN71	ニアファイナルド母岩での有機物
FW81	廃棄体での核種の崩壊・生成	FM81	充填材での核種の崩壊・生成	FS81	構造躯体での核種の崩壊・生成	FB81	緩衝材での核種の崩壊・生成	FN81	ニアファイナルド母岩での核種の崩壊・生成

FEP ID **FW11** FEP 名称 **廃棄体での水化学**

定義

廃棄体間隙水の性状(pH、Eh、イオン強度、共存イオン濃度等)とその挙動。

説明

セメント変遷

1. 廃棄体中のセメント成分は地下水へ溶解し、地下水中のイオンと反応することにより経時的に変質していく。セメント間隙水の水化学は、セメントの溶解実験に基づくモデル化がいくつか行われている(R.Berner 1987, F.P.Glasser et al. 1988, A. Atkinson et al. 1989)。これらのモデルは取り扱うセメントの種類やセメントの2次鉱物の設定に違いがあるが、CSHが存在する期間においてはおおむね一致を示している。

2. 既往の研究では、セメント鉱物の劣化モデルとして、他のモデルとの比較検討が行われているAtkinsonモデル(A. Atkinson et al. 1989, 1991)を用いて、緩衝材におけるイオン交換反応と不純物のカルサイトの溶解も考慮した物質移行・化学反応連成解析によるモデル化が行われている(TRU共同作業チーム、平成12年)。

セメントの溶解による化学環境維持期間は以下の三領域が設定され、核種移行に関わるパラメータの設定の目安とされている。

RegionI : ごく初期においては、セメント中に含まれるNaとKイオンの影響で、pH=13.2程度の高pH領域

RegionII : portlanditeが存在する期間は、間隙水中のCaイオン濃度により決定されるpH=12.5の期間

RegionIII : portlanditeが消失した後は、CSHの溶解が間隙水中のpHを支配する。これ以降の領域をRegionIIIとする(TRU共同作業チーム、平成12年)。

還元性雰囲気と酸化性雰囲気

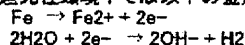
3. 容器や廃棄物中の鋼材の腐食が進行する。再冠水直後は、施設内部に残存している酸素により酸化される。しかし、酸素は極初期に消費され、鋼材の腐食生成物(Fe(OH)₂やFe₃O₄)により、間隙水は還元性となる。

4. 廃棄体中の放射線により、水が放射線分解されることにより、酸化種が生成され、酸化性雰囲気を形成する可能性がある。

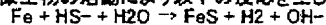
5. 鋼材の腐食生成物により、間隙水は還元環境に維持されることが期待される(TRU共同作業チーム、平成12年)。

ガス

6. 還元性環境下では以下の金属腐食反応が進行し、水素が発生する。

**微生物**

7. 微生物の活動により以下の反応を生じ、間隙水組成に影響を受ける。



しかし、地層処分環境で、微生物活動による極端な腐食の起こる可能性は小さいという報告がある(動態事業団 1992)。

8. 微生物活動により、上記の反応の他に酸化還元反応、コロイド、ガス、キレート剤の生成があり得る。また、嫌気性環境では、アンモニアと硝酸が酸化される反応があり得る(TRU共同作業チーム、平成12年)。pH=12-13では、微生物の活動は見られなかったという報告がある一方、Macariniのナチュラルアナログ研究(Nagra 1992)の中では、pHではなく利用できる栄養分の量によって微生物活動が制限されているという報告もある。

有機物

9. コンクリート関係で使用されている混和剤は目的にあわせて適切に使用すれば、コンクリートの耐久性及び作業性を改善させる(船戸 1991)。混和剤は界面活性剤としての機能を有しており、放射性核種と錯形成能のある官能基を含んでおり、核種の溶解度や、分配係数への影響がある(Ebert et al. 1991, Cooper(ed) 1988, M.H. Bradbury & F.A. Sarott 1995, Greenfield et al. 1997)。

10. 廃棄体には、紙、布、ポリ製品、ゴム、及び固化マトリクスとしてのビチューメン、セメント中の混和剤が有機物として含まれる。これらの有機物は、錯形成することにより、核種の分配係数と溶解度に影響する。有機物の種類と間隙水中濃度により、影響の大きさが決定する(TRU共同作業チーム、平成12年)。

1/4 ページ

図 2.3-4 FEP の記載例(1/4)

評価すべき事象

1. 温度によって安定度定数、溶解度積等の熱力学データは変化することから、温度によって間隙水性状は変化することとなる。一方、間隙水のpH、イオン強度等によって熱伝導率のような物理定数が変化することが考えられるため、水化学によって温度も影響を受けることとなる。【温度影響】
2. 間隙水中の溶存成分は人工バリア内を移動する(拡散または移流・分散)ことにより、その空間分布を変化させる。【水理・物質移行による影響】
3. 深部地下水は一般に還元性雰囲気にあると考えられるが、再冠水時には、坑道掘削時に導入された酸素の影響によって過渡的に酸化性雰囲気が形成される可能性がある。【水理・物質移行による影響】
4. 水の放射線分解で生成される酸化種によって局所的に酸化性雰囲気が形成される可能性がある。
これについては、鉄の酸化速度をパラメータとして、水の放射線分解によって生じる酸化種の影響を評価した結果、鉄の酸化が遅い場合でも、数百年でEhがマイナスとなり、長期的に酸化性雰囲気が保たれることはないという報告がある(TRU共同作業チーム、平成12年)。【核種の崩壊・生成による影響】
5. 人工バリア材として用いられる材料は、処分環境下において必ずしも熱力学的に安定なものではなく、金属や有機物のように比較的早期に分解・腐食したり、セメントやベントナイトのようにより長期的に緩慢に変質する。このような人工バリア材特性の変化を伴う現象は、間隙水性状によって影響を受けるとともに、新たな溶存成分の導入となって間隙水性状に影響を及ぼす。【種々の材料の特性による影響】
6. 廃棄体中のセメント成分は地下水へ溶解し、地下水中のイオンと反応することにより経時的に変質していく。セメントの変質は実験値に基づくモデル化がいくつか行われている(R. Berner 1987, F. P. Glasser et al. 1988, A. Atkinson et al. 1989)。これらのモデルは取り扱うセメントの種類やセメントの2次鉱物の設定に違いがあるが、CSHが存在する期間においてはおおむねよい一致を示している。【セメントマトリクスの特性による影響】
7. 廃棄体には、炭素鋼、ジルカロイ合金、ステンレス合金等の金属が含まれる。腐食に伴いガスの生成があり得る。鋼材の腐食生成物は体積が増加、間隙水を還元性に緩衝する。酸素が供給される環境において、塩化物イオンが存在すると鉄の腐食が加速される(船戸 1991)。【廃棄体容器の特性、廃棄物(金属)の特性による影響】
8. 廃棄体中には、金属や有機物が存在しており、金属腐食や微生物活動などによりガスが発生する。発生したガスが充填材中に移行する。気液平衡による間隙水性状とガスとの相互影響がある。【ガスによる影響】
9. 好気性環境では、硫酸塩生成菌や硝化菌の活動により酸が生成し、鋼材やセメント成分の溶解・劣化を引き起こす。処分場は早期に酸素が消費されるため、これらの微生物の影響は小さいであろう(S. Stroos-Gascoyne 1989)。また、pH=12-13程度の高pH環境では微生物の活動は見られないという報告がある(TRU共同作業チーム、平成12年)。【微生物による影響】
10. TRU廃棄物中の紙、布、ポリ製品、ゴム、及び固化マトリクスとしてのビチューメンは間隙水中で有機物を形成する。セメント中の混和剤も有機物である。間隙水性状が有機物の分解に影響を及ぼす一方、有機物が溶存することで間隙水中のTOC、炭酸濃度等が影響を受ける。【有機物による影響、廃棄物(有機物)の特性による影響】
11. セメント成分の影響により、間隙水が長期間高pH環境となる。極初期にはセメント中の遊離アルカリによりpH=13以上になり(TRU共同作業チーム、平成12年)、その後はportlanditeが存在する期間はpH=12.5程度の期間が継続する(A. Atkinson et al. 1989)。高pH環境により、核種の溶解度、分配係数、緩衝材の変質挙動、微生物の活動が影響を受ける。高pH環境は、鋼材の腐食の抑制条件となる。【セメントマトリクスの特性による影響】
12. TRU廃棄物中には硝酸塩を大量に含む廃棄体が存在しており、空隙水中の硝酸イオン濃度が硝酸ナトリウムの溶解度に相当する高濃度になる可能性がある。硝酸塩の影響を定量的に把握することは現状困難である(TRU共同作業チーム、平成12年)。【廃棄物(無機物)の特性による影響】

2/4 ページ

図 2.3-4 FEP の記載例(2/4)

浅地中処分における特記事項

【温度影響】

・浅地中処分対象となるTRU廃棄物には発熱性廃棄物は含まれていない。また、浅地中処分の対象となる深度では地温による影響も無いと考えられる。

【水理・物質移行による影響】

・地下水面より上部の処分施設となった通気層処分の可能性がある。

余裕深度処分における特記事項

【温度影響】

・余裕深度処分対象となるTRU廃棄物には発熱性廃棄物は含まれていない。また、余裕深度処分の対象となる深度では地温による影響も無いと考えられる。

【水理・物質移行による影響】

・通気層処分の可能性は少ないと考えられる。

地層処分における特記事項

【温度影響】

・地層処分の対象となるTRU廃棄物には発熱性のハル・エンドピースがあり、廃棄物の発熱による温度上昇の影響が考えられる。
・地層処分の場合、処分深度が数100m以深となることから、地温自体の上昇による影響が考えられる。

【水理・物質移行による影響】

・通気層処分の可能性はない。

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

<溶解度>

・溶存成分との錯体の形成やpH、Eh等により核種の存在形態が変化し、核種の溶解度が影響を受ける。

<分配係数>

・溶存成分との錯体の形成やpH、Eh等により核種の存在形態が変化し、核種の分配係数が影響を受ける。

・地下水との接触により吸着固相の変質が生じ、分配係数が影響を受ける。また、吸着固相の変化は接触する地下水成分により影響を受ける。

<空隙率>

・地下水との接触により固相の変質が生じ、その結果、空隙率の変化が生じる。

<透水係数>

・地下水との接触により生じる空隙率の変化や、金属の腐食等に起因するひび割れの発生により透水係数が影響を受ける。空隙率の変化や金属の腐食などは地下水成分により影響を受ける。

<拡散係数>

・核種の存在形態により拡散係数は変化する。核種の存在形態は地下水環境により影響を受ける。

・地下水との接触により生じる空隙率の変化により拡散係数は変化する。空隙率の変化は地下水成分により影響を受ける。

<密度>

・地下水との接触による固相の変質により、密度の変化が生じる。

参考文献

・動燃事業団：高レベル放射性廃棄物地層処分開発の技術報告書、(1992)

・TRU共同作業チーム(平成12年)：“TRU廃棄物処分概念検討書”

・R.Berner：“Modeling porewater chemistry in hydrated portland cement”，Materials Research Society, 112,pp.3-12, (1987)

・F.P.Glasser et al.：“Modeling approach to the prediction of equilibrium phase distribution in slag-cement blends and their solubility properties”，Materials Research Society,1988,pp.319-330,1988

・A.Atkinson et al. DOE/RW/89/0251989

・A.Atkinson et al.：“Thermodynamic modelling and aqueous chemistry in the CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O system”，Materials Research Society,212,pp.395-402, (1991)

・船戸、田代：コンクリートの耐久性と化学の基礎 セメント新聞社、(1991)

3/4 ページ

図 2.3-4 FEP の記載例(3/4)

- S.Stroes-Gascoyne: AECL-9574, (1989)
- Ebert et al.: "The effects of organics in SFR on sorption coefficients", SKB progress Report SKB/SFR 91-01, (1991)
- Cooper(ed): "The Nirex Safety Assessment Research Programme", Annual Report for 1987/88, (1988)
- M.H.Bradbury & F.A.Sarott: "Sorption databases for the Cementitious Near Field of a L/ILW Repository for Performance Assessment", PSI Bericht Nr.95-06, (1995)
- Greenfield et al.: "The effect of cement additives on radionuclides solubilities", Draft paper for poster presented at Migration'97, Sendai, Japan, (1997)
- Nagra: "A natural analogue study of the Maqarin hyperalkaline ground waters. I. Source term description and thermodynamic database testing", Nagra technical report 91-10, (1992)

4/4 ページ

図 2.3-4 FEP の記載例(4/4)

2.3.5 FEP間の重要な相互作用の同定

「TRU 廃棄物処分概念検討書」及び関連する電力共通研究において検討が行われた FEP リスト、FEP 辞書等を出発点として TRU 廃棄物処分施設における地下水の化学的変遷に関連する FEP を浅地中処分、余裕深度処分及び地層処分を対象として抽出、記述した。その結果を踏まえ、TRU 廃棄物処分における水化学環境への影響として重要な相互作用と判断されるものを以下に整理する。

まず、本検討で整理した FEP に関連する相互作用については、FEP の抽出にて抽出されなかった FEP に関連する相互作用に対してはすべて水化学環境への影響と言う観点から重要度が高い物となる。例えば、TRU 廃棄物処分システムの挙動を記述する全体の FEP リストでは当然挙げられる「応力」FEP からの影響について考えると、厳密に言えば応力に応じた圧力変化により、間隙水の水化学環境は影響を受けると考えられるがその影響は非常に小さいことから FEP 自体の抽出で棄却されている。

次に、今回の検討にて抽出された FEP 内での地下水の化学的変遷への影響を検討する上での重要性を考える。ここで、重要な相互作用を同定するためには、FEP 等を用いたボトムアップ手法では、それぞれの相互作用による地下水組成への影響からさらに、性能評価を行う上で使用される性能評価パラメータへの影響まで含めた過程を、FEP 等の検討から明らかとし、示された相互作用について試験や影響解析等の手法によりその影響の程度を定量的に示し、その相互作用の重要性を判断する材料として用意する必要がある。しかし、現状それらの判断材料が得られていないことから、このようなボトムアップ手法による重要な相互作用の同定は困難である。そこで、ここでは、既存の研究成果等を参考として、トップダウン的に、核種移行評価上考慮されている TRU 廃棄物処分において特有な事象に着目し、その事象に関連するものの重要性が高いと考え、重要な相互作用を抽出・整理することとした。

TRU 廃棄物処分の性能評価において考慮されている特徴的な事象としては、以下のものが挙げられる。

① 人工バリア材料の長期的な変化

処分の安全評価のタイムスケールからいえば溶解が生じ、水化学環境を変化さ

せる、セメント系材料等による化学環境の時間的な変化に関連する相互作用。

② 廃棄物中に含まれる硝酸塩等による影響

再処理施設の操業に伴って発生する硝酸塩を含む廃棄物等に起因する、硝酸塩等の易溶性の塩類による影響に関連する相互作用。

①の人工バリア材料の長期的な変化という観点に対して関連する相互作用としては、FEP の整理結果から主に以下のものが抽出される。

抽出された相互作用の特徴としては、主に、間隙水中の溶存成分が人工バリア内を移動する（拡散または移流・分散）ことによって、その空間分布を変化させることに関連する【水理・物質移行】FEP からの相互作用と、人工バリア材として用いられる材料が、処分環境下において必ずしも熱力学的に安定なものではなく、金属や有機物のように比較的早期に分解・腐食することや、セメントやベントナイトのようにより長期的に緩慢に変質することになどの人工バリア材特性の変化を伴う現象に関連する【種々の材料の特性】FEP からの相互作用が挙げられる。

【水理・物質移行】FEP ⇒ 【水化学】FEP

【セメントマトリックスの特性】FEP ⇒ 【水化学】FEP

【充填材の特性】FEP ⇒ 【水化学】FEP

【構造躯体の特性】FEP ⇒ 【水化学】FEP

【緩衝材の特性】FEP ⇒ 【水化学】FEP

【ニアフィールド母岩の特性】FEP ⇒ 【水化学】FEP

【支保、プラグ、グラウトの特性】FEP ⇒ 【水化学】FEP

【埋め戻し材の特性】FEP ⇒ 【水化学】FEP

②の廃棄物中に含まれる硝酸塩等による影響という観点に対して関連する相互作用としては、以下のものが抽出される。

抽出された相互作用の特徴としては、上記①と同様に、間隙水中の溶存成分が人工バリア内を移動する（拡散または移流・分散）ことによって、その空間分布を変化させることに関連する【水理・物質移行】FEP からの相互作用が挙げられる。また、TRU 廃棄物中には硝酸塩を大量に含む廃棄体が存在しており、空隙水中の硝酸イオン濃度が硝酸ナトリウムの溶解度に相当する高濃度になる可能性が指摘される【廃棄物（無機物）の特性】FEP からの相互作用が挙げられる。

【水理・物質移行】FEP ⇒ 【水化学】FEP

【廃棄物（無機物）の特性】FEP ⇒ 【水化学】FEP

2.4 地下水の化学的変遷に関する研究課題の抽出及び課題達成方策の検討

上記で、TRU 廃棄物処分施設における地下水の化学的変遷について、FEP の抽出、記述等の検討を実施した。その結果として示された TRU 廃棄物処分施設における地下水の化学的変遷の検討を行う上で重要となる FEP 間の相互作用に対して、必要とされる研究課題を抽出し、その研究課題達成の方策について検討を行った。

地下水の化学的変遷において重要となる FEP 間の相互作用として抽出された以下の 2 点は、これまで実施されている TRU 廃棄物に関する検討において、TRU 廃棄物に特有でかつ性能評価上のインパクトも大きいものとしてトップダウン的に抽出されている研究課題であり、現在、精力的に研究が行われているものである。

- 人工バリア材の長期的な変化に関連する課題
- 廃棄物中に含まれる種々の物質による影響に関連する課題

これらの課題については、重要度も高く長期の研究開発が必要なものでもあり、今後ともさらなる研究開発が必要であると考えられる。

一方、検討の網羅性の観点からは、FEP 等を用いたボトムアップ手法による検討にしても、性能評価パラメータに対する影響まで考慮した検討を行い、性能評価に影響を生じる FEP 間の相互作用の抽出に関しても重大な漏れが無いことを確認していくことが必要であると考えられる。また、類型化された処分環境を対象として検討を行うことにより、重要度の高い課題の中で特に性能評価上の影響が大きく、現状の知見やデータ等が不十分なものを明確にする事により、必要な研究開発の絞りこみが行える可能性もある。

そこで、今後の研究課題としては、既に検討が進められている上記 2 つの課題に加え、まず FEP 等を用いたボトムアップ手法による検討を進めることが必要である。

(1) 検討手法に関連する課題とその方策

FEP 等を用いたボトムアップ手法による、地下水の化学的変遷の検討に際して重要となる FEP 間の相互作用を同定するためには、前節の検討において記述したように、

【水化学】FEP から最終的な TRU 廃棄物処分における性能評価を行う際に使用され

る“性能評価パラメータ”に対する影響までのプロセスを FEP 等で明らかとし、その過程に含まれる相互作用について影響の程度を定量的に評価することが必要とされる。

このためには、以下のような検討が必要であると考えられる。

- ・ 核種移行パラメータに関連した FEP の抽出整理。
- ・ 【水化学】FEP からそれらの核種移行パラメータに関連した FEP にいたるプロセスを記述できる FEP の整理。
- ・ 核種移行パラメータに関連した FEP に対して水化学環境の変化に起因して生じる影響の程度を、試験研究及びモデル解析等により評価する。

これらの検討を通して、水化学の変遷において性能評価上大きな影響を与える相互作用を、類型化した処分環境を対象に整理することにより、以下に示す重要な研究課題において必要な研究開発の絞込みもしくは優先順位に関しての検討が必要である。

(2) 人工バリア材の長期的な変化に関連する課題と方策

人工バリア材との反応により定まる化学環境の評価としては、そのプロセスが緩慢であることから対象となる評価期間は長期にわたる。このため、これについての検討は、生じる現象を適切にモデル化し、吟味されたデータをそれに入力することで長期評価を実施することが基本となる。TRU レポートなどにおいては既存のモデルを適用して、セメント系材料及びベントナイト系材料における長期的な変遷に関するモデル検討が行われている。しかし、例えばセメント系材料の 2 次鉱物の設定やセメント系材料とベントナイト系材料との相互作用については未だ不明な点が多い。

これら人工バリア材の長期的な変化に関連する課題については、既に研究開発が実施されているものではあるが、上記ボトムアップ手法による検討結果等を踏まえて、さらに必要に応じて以下に示すような検討を実施する事が必要であると考えられる。

人工バリア材との長期的な反応により形成される水化学環境の評価の信頼性向上には、長期劣化試験やナチュラルアナログ研究などから、実際の処分環境下で生成すると考えられる 2 次鉱物の確認などを行い、変質反応の反応経路の同定、及び反応の熱

力学データ取得が必要である。また、長期的な変遷に応じた物性値（透水係数や拡散係数等）の変化に関する知見を充実し、物質移行・化学反応の連成解析等で人工バリアの長期的な変遷に応じてさらに物性の変化も取り込んだ劣化予測解析などにより、長期的な化学環境の変化に関する予測精度の向上を図ることが必要である。

(3) 廃棄物中に含まれる種々の物質による影響

TRU 廃棄物はその対象となる廃棄物が多種多様であり、その中には硝酸塩等の可溶性の塩類を多量に含むものがある。また、地層処分施設を対象として検討が進められた TRU レポート等では検討対象とはならなかったが、再処理過程で使用する有機溶媒等を含む廃棄物も存在する。これらの廃棄物中に含まれる種々の物質によって、人工バリア材の変質が影響を受け、ひいては地下水の化学的変遷が影響を受けることが懸念される。現状これらの物質による影響について、生じる変質反応の同定や変質の進展を評価する上で必要となる物性値の変化等のデータは十分蓄積されてはいない。

これら廃棄物中に含まれる種々の物質による影響に関連する課題については、既に硝酸塩に関しては研究開発が実施されているが、上記ボトムアップ手法による検討結果等を踏まえて、さらに必要に応じて以下に示すような検討を実施する事が必要であると考えられる。

これらの廃棄物中に含まれる種々の物質による影響を評価するためには、処分環境で生じる変質反応の反応経路の同定及びその反応の熱力学データの取得を行う必要がある。また、反応の進展に伴う経時的な化学環境の変遷を評価する上で、変質後の透水係数や拡散係数等の物性データの取得が必要である。

2.5 おわりに

本研究では、大きく区分して以下の2項目に関して、今後の研究課題の抽出を実施し、必要に応じて、それらの研究課題の解決の方策を提示した。

- ・ モデル地下水の設定及び研究課題の抽出
- ・ 地下水の化学的変遷に関する FEP 及び研究課題の抽出

ここでは、上記の2項目について、研究成果の概要等を示すこととする。

2.5.1 モデル地下水の設定及び研究課題の抽出

貸与いただいた水質データの電力中央研究所報告のデータを加えて、深度別に地下水の水質の検討を行った。検討の結果、深度 300m 以深においては JNC 殿の設定した FRHP および SRHP とほぼ同等の水質で代表されることが明らかとなった。しかしながら深度 150m 以浅では重炭酸カルシウム型を示す水質や重炭酸ナトリウム型でも pH の最頻値が JNC 殿のモデル地下水と乖離しているものが多い。

今後の課題として、浅部地下水の水質のモデル検討には、既往資料に加え新規に地下水データを収集し、これらを水文循環の観点から区分した地形区分と地質との関係で整理し、水質のパターン化を試みることを望まれる。また、現地調査により、文献データを補完するとともに文献により区分された地下水パターンの実証を行うことが望まれる。

2.5.2 地下水の化学的変遷に関する FEP 及び研究課題の抽出

TRU 廃棄物の処分に関して、浅地中処分、余裕深度処分及び地層処分における地下水の化学的変遷に関連する特徴、事象及び過程 (FEP) を抽出し、記述及び整理を行った。その整理結果及び既存の研究成果等より TRU 廃棄物処分において地下水の化学的変遷に関連して重要となる FEP 間の相互作用を整理した。その結果、セメント系材料等の人工バリア材との反応及び廃棄物中に含まれる硝酸塩等による影響が地下水の化学的変遷を評価する上で重要なものとしてあげられた。

今後の課題としては、TRU 廃棄物処分の核種移行評価パラメータに対して地下水の化学的変遷が影響を及ぼすプロセスを同定し、最終的な核種移行評価結果に対して影響の大きい相互作用を明らかにすることが必要である。また、人工バリア材との反応及び廃棄物中に含まれる硝酸塩等により定まる地下水の化学的変遷に対して、人工バリア材の

変質反応の同定や変質による材料特性（透水係数や空隙率等）に関するデータの蓄積を行い、化学的変遷に関する評価の信頼性の向上を図ることが必要である。

謝辞

本研究において、地下水の化学的変遷に関連する重要事象を検討する際に、電力共通研究「TRU 廃棄物処分における安全評価手法に関する研究（H 7～H 9）」及び電力共通研究「TRU 廃棄物処分における安全評価シナリオの体系化に関する研究（H10～H11）」の成果の一部を利用した。上記電力共通研究の成果の利用をご許可くださった電力共通研究参加会社の北海道電力（株）、東北電力（株）、東京電力（株）、中部電力（株）、北陸電力（株）、関西電力（株）、中国電力（株）、四国電力（株）、九州電力（株）、日本原子力発電（株）、日本原燃（株）の各社殿に深く感謝いたします。

参考文献

- 岡田 濟，六車ひろし編：「改訂新版コンクリート工学ハンドブック」，朝倉書店，
pp.591(1981)
- 核燃料サイクル開発機構：「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信
頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-」，JNC TN1400 99-020(1999)
- 核燃料サイクル開発機構：「Groundwater Evolution Modeling for the Second Progress
Performance Assessment (PA) Report」，JNC TN8400 99-030(1999)
- 角皆 静男：雨水の分析，講談社，pp.14(1972)
- 共同作業チーム（核燃料サイクル開発機構、電気事業連合会）：「TRU 廃棄物処分概念
検討書」，JNC TY1400 2000-001(2000)
- 原子力委員会 原子力バックエンド対策専門部会：「わが国における高レベル放射性廃
棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価」，（平成12年10月）
- 建設省河川局（編）：「地下水水質年表」，第14回 平成10年，240p(1998)
- 島野安雄，永井 茂：「日本水紀行(4) 甲信越地域の名水」，地質ニュース，No. 466，
pp. 42～52(1993)
- 島野安雄，永井 茂：「日本水紀行(3) 関東地方の名水」，地質ニュース，No.464，pp.42
～52(1993)
- 杉崎隆一：「地下水の起源と由来—その化学的な考察—」，用水と排水，v.5，No.11，
pp.877～889(1963)
- 鈴木秀和，田瀬貞雄：「名水を訪ねて(52) 浅間山麓の名水」，地下水学会誌，Vol. 43，
No. 1，pp. 43～49 (2001)
- 高村弘毅，河野 忠：「名水を訪ねて(23) —大野盆地の湧水群—御清水」，地下水学会
誌，vol. 35、No. 3，pp. 255～262(1993)
- 田中智浩，徳永朋祥，浅井和見，三枝博光：「沿岸海底からの淡水性湧水の採水」，月
刊 地球，Vol. 23，No. 12，pp. 857～862 (2001)
- 千木良雅弘：風化と崩壊，近未来社，pp. 1～204(1995)
- 鶴巻道二：「温泉今昔物語その 15 有馬温泉」，地熱エネルギー，No. 62，pp. 33～
49(1993)
- 島野安雄，小野寺真一：「名水を訪ねて(55) 鳥取県の名水」，地下水学会誌，Vol. 43，
No. 4，pp. 353～364 (2001)

鳥野安雄, 肥田 登: “名水を訪ねて(54)秋田県の名水ー力水・出壺・竜の頭湧水などー”, 地下水学会誌, Vol. 43, No. 3, pp. 215~227 (2001)

馬原保典, 河西 基, 垣内弘幸, 五十嵐敏文, 佐伯昭義: 地球化学的手法を用いた地下水流動調査法の提案ー六ヶ所サイトにおける地下水流動特性の把握ー, 電力中央研究所報告 U95044, 33p (1996)

Alan Atkinson and John A. Hearne: "Mechanistic Model for the Durability of Concrete Barriers Exposed to Sulphate-Bearing Groundwaters", Scientific Basis for Nuclear Waste Management XIII, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol.176, pp.149~156(1990)

Gj ø rv, O.E.: "Long-Time Durability of Concrete in Seawater", ACI Journal, pp.60~67(1971)

U. R. Berner: "Evolution of Pore Water Chemistry During Degradation of Cement in a Radioactive Waste Repository Environment", Waste Management, Vol.12, pp.201~219(1992)

添付 1

記述した廃棄体領域に関する FEP

FEP ID FW11 FEP 名称 廃棄体での水化学

定義

廃棄体間隙水の性状 (pH、Eh、イオン強度、共存イオン濃度等) とその挙動。

説明

セメント変遷

1. 廃棄体中のセメント成分は地下水へ溶解し、地下水中のイオンと反応することにより経時的に変質していく。セメント間隙水の水化学は、セメントの溶解実験に基づくモデル化がいくつか行われている(R.Berner 1987, F.P.Glasser et al. 1988, A. Atkinson et al. 1989)。これらのモデルは取り扱うセメントの種類やセメントの2次鉱物の設定に違いがあるが、CSHが存在する期間においてはおおむねよい一致を示している。

2. 既往の研究では、セメント鉱物の劣化モデルとして、他のモデルとの比較検討が行われているAtkinsonモデル(A. Atkinson et al. 1989, 1991)を用いて、緩衝材におけるイオン交換反応と不純物のカルサイトの溶解も考慮した物質移行・化学反応連成解析によるモデル化が行われている(TRU共同作業チーム、平成12年)。

セメントの溶解による化学環境維持期間は以下の三領域が設定され、核種移行に関わるパラメータの設定の目安とされている。

RegionI : ごく初期においては、セメント中に含まれるNaとKイオンの影響で、pH=13.2程度の高pH領域

RegionII : portlanditeが存在する期間は、間隙水中のCaイオン濃度により決定されるpH=12.5の期間

RegionIII : portlanditeが溶失した後は、CSHの溶解が空隙水中のpHを支配する。これ以降の領域をRegionIIIとする(TRU共同作業チーム、平成12年)。

還元性雰囲気と酸性雰囲気

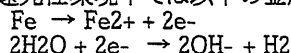
3. 容器や廃棄物中の鋼材の腐食が進行する。再冠水直後は、施設内部に残存している酸素により酸化される。しかし、酸素は極初期に消費され、鋼材の腐食生成物(Fe(OH)₂やFe₃O₄)により、間隙水は還元性となる。

4. 廃棄体中の放射線により、水が放射線分解されることにより、酸化種が生成され、酸化性雰囲気を形成する可能性がある。

5. 鋼材の腐食生成物により、間隙水は還元環境に維持されることが期待される(TRU共同作業チーム、平成12年)。

ガス

6. 還元性環境下では以下の金属腐食反応が進行し、水素が発生する。



微生物

7. 微生物の活動により以下の反応を生じ、間隙水組成が影響を受ける。



しかし、地層処分環境で、微生物活動による極端な腐食の起こる可能性は小さいという報告がある(動燃事業団 1992)

8. 微生物活動により、上記の反応の他に酸化還元反応、コロイド、ガス、キレート剤の生成があり得る。また、嫌気性環境では、アンモニアと硝酸が酸化される反応があり得る(TRU共同作業チーム、平成12年)。pH=12-13では、微生物の活動は見られなかったという報告がある一方、Maqarinのナチュラルアナログ研究(Nagra 1992)の中では、pHではなく利用できる栄養分の量によって微生物活動が制限されているという報告もある。

有機物

9. コンクリート関係で使用されている混和剤は目的にあわせて適切に使用すれば、コンクリートの耐久性及び作業性を改善させる(船戸 1991)。混和剤は界面活性剤としての機能を有しており、放射性核種と錯形成能のある官能基を含んでおり、核種の溶解度や、分配係数への影響がある(Ebert et al. 1991, Cooper(ed) 1988, M.H. Bradbury & F.A. Sarott 1995, Greenfield et al. 1997)。

10. 廃棄体には、紙、布、ポリ製品、ゴム、及び固化マトリクスとしてのビチューメン、セメント中の混和剤が有機物として含まれる。これらの有機物は、錯形成することにより、核種の分配係数と溶解度に影響する。有機物の種類と間隙水中濃度により、影響の大きさが決定する(TRU共同作業チーム、平成12年)。

評価すべき事象

1. 温度によって安定度定数、溶解度積等の熱力学データは変化することから、温度によって間隙水性状は変化することとなる。一方、間隙水の pH、イオン強度等によって熱伝導率のような物理定数が変化することが考えられるため、水化学によって温度も影響を受けることとなる。【温度影響】
2. 間隙水中の溶存成分は人工バリア内を移動する（拡散または移流・分散）ことによって、その空間分布を変化させる。【水理・物質移行による影響】
3. 深部地下水は一般に還元性雰囲気にあると考えられるが、再冠水時には、坑道掘削時に導入された酸素の影響によって過渡的に酸化性雰囲気が形成される可能性がある。【水理・物質移行による影響】
4. 水の放射線分解で生成される酸化種によって局所的に酸化性雰囲気が形成される可能性がある。
これについては、鉄の酸化速度をパラメータとして、水の放射線分解によって生じる酸化種の影響を評価した結果、鉄の酸化が遅い場合でも、数百年で EIt がマイナスとなり、長期的に酸化性雰囲気が保たれることはないという報告がある（TRU 共同作業チーム、平成12年）。核種の崩壊・生成による影響】
5. 人工バリア材として用いられる材料は、処分環境下において必ずしも熱力学的に安定なものではなく、金属や有機物のように比較的早期に分解・腐食したり、セメントやペントナイトのようにより長期的に緩慢に変質する。このような人工バリア材特性の変化を伴う現象は、間隙水性状によって影響を受けるとともに、新たな溶存成分の導入によって間隙水性状に影響を及ぼす。種々の材料の特性による影響】
6. 廃棄体中のセメント成分は地下水へ溶解し、地下水中のイオンと反応することにより経時的に変質していく。セメントの変質は実験値に基づくモデル化がいくつか行われている（R. Berner 1987, F.P. Glasser et al. 1988, A. Atkinson et al. 1989）。これらのモデルは取り扱うセメントの種類やセメントの 2 次鉱物の設定に違いがあるが、CSH が存在する期間においてはおおむねよい一致を示している。セメントマトリックスの特性による影響】
7. 廃棄体には、炭素鋼、ジルカロイ合金、ステンレス合金等の金属が含まれる。腐食に伴いガスの生成があり得る。鋼材の腐食生成物は体積が増加、間隙水を還元性に緩衝する。酸素が供給される環境において、塩化物イオンが存在すると鉄の腐食が加速される（船戸 1991）。【廃棄体容器の特性、廃棄物（金属）の特性による影響】
8. 廃棄体中には、金属や有機物が存在しており、金属腐食や微生物活動などによりガスが発生する。発生したガスが充填材中に移行する。気液平衡による間隙水性状とガスとの相互影響がある。【ガスによる影響】
9. 好気性環境では、硫酸塩生成菌や硝化菌の活動により酸が生成し、鋼材やセメント成分の溶解・劣化を引き起こす。処分場は早期に酸素が消費されるため、これらの微生物の影響は小さいであろう（S. Stroes-Gascoyne 1989）。
また、pH=12-13 程度の高 pH 環境では微生物の活動は見られないという報告がある（TRU 共同作業チーム、平成12年）。【微生物による影響】
10. TRU 廃棄物中の紙、布、ポリ製品、ゴム、及び固化マトリックスとしてのビチューメンは間隙水中で有機錯体を形成する。セメント中の混和剤も有機物である。間隙水性状が有機物の分解に影響を及ぼす一方、有機物が溶存することで間隙水中の TOC、炭酸濃度等が影響を受ける。【有機物による影響、廃棄物（有機物）の特性による影響】
11. セメント成分の影響により、間隙水が長期間高 pH 環境となる。極初期にはセメント中の遊離アルカリにより pH=13 以上になり（TRU 共同作業チーム、平成12年）、その後は portlandite が存在する期間は pH=12.5 程度の期間が継続する（A. Atkinson et al. 1989）。高 pH 環境により、核種の溶解度、分配係数、緩衝材の変質挙動、微生物の活動が影響を受ける。高 pH 環境は、鋼材の腐食の抑制条件となる。セメントマトリックスの特性による影響】
12. TRU 廃棄物中には硝酸塩を大量に含む廃棄体が存在しており、空隙水中の硝酸イオン濃度が硝酸ナトリウムの溶解度に相当する高濃度になる可能性がある。硝酸塩の影響を定量的に把握することは現状困難である（TRU 共同作業チーム、平成12年）。【廃棄物（無機物）の特性による影響】

浅地中処分における特記事項

温度影響

浅地中処分対象となるTRU廃棄物には発熱性廃棄物は含まれていない。また、浅地中処分の対象となる深度では地温による影響も無いと考えられる。

水理・物質移行による影響

地下水面より上部の処分施設となった通気層処分の可能性がある。

余裕深度処分における特記事項

温度影響

余裕深度処分対象となるTRU廃棄物には発熱性廃棄物は含まれていない。また、余裕深度処分の対象となる深度では地温による影響も無いと考えられる。

水理・物質移行による影響

通気層処分の可能性は少ないと考えられる。

地層処分における特記事項

温度影響

地層処分の対象となるTRU廃棄物には発熱性のハル・エンドピースがあり、廃棄物の発熱による温度上昇の影響が考えられる。

地層処分の場合、処分深度が数100m以深となることから、地温自体の上昇による影響が考えられる。

水理・物質移行による影響

通気層処分の可能性はない。

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

<溶解度>

溶存成分との錯体の形成やpH、Eh等により核種の存在形態が変化し、核種の溶解度が影響を受ける。

<分配係数>

溶存成分との錯体の形成やpH、Eh等により核種の存在形態が変化し、核種の分配係数が影響を受ける。

地下水との接触により吸着固相の変質が生じ、分配係数が影響を受ける。また、吸着固相の変化は接触する地下水成分により影響を受ける。

<空隙率>

地下水との接触により固相の変質が生じ、その結果、空隙率の変化が生じる。

<透水係数>

地下水との接触により生じる空隙率の変化や、金属の腐食等に起因するひび割れの発生により透水係数が影響を受ける。空隙率の変化や金属の腐食などは地下水成分により影響を受ける。

<拡散係数>

核種の存在形態により拡散係数は変化する。核種の存在形態は地下水環境により影響を受ける。

地下水との接触により生じる空隙率の変化により拡散係数は変化する。空隙率の変化は地下水成分により影響を受ける。

<密度>

地下水との接触による固相の変質により、密度の変化が生じる。

参考文献

- ・動燃事業団「高レベル放射性廃棄物地層処分開発の技術報告書」,(1992)
- ・TRU共同作業チーム(平成12年)「TRU廃棄物処分概念検討書」
- ・R.Berner : "Modeling porewater chemistry in hydrated portland cement", Materials Reserch Society, 112, pp.3-12., (1987)
- ・F.P.Glasser et al. : "Modeling approach to the prediction of equilibrium phase distribution in slag-cement blends and their solubility properties", Materials Reserch Society, 1988, pp.319-330, 1988
- ・A. Atkinson et al. DOE/RW/89/0251989
- ・A. Atkinson et al. : "Thermodynamic modelling and aqueous chemistry in the CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O system", Materials Reserch Society, 212, pp.395-402, (1991)
- ・船戸、田代 : コンクリートの耐久性と化学の基礎 セメント新聞社, (1991)

S.Stroes-Gascoyne :AECL-9574, (1989)
Ebert et al. : "The effects of organics in SFR on sorption coefficients", SKB progress Report SKB/SFR 91-01, (1991)
Cooper(ed) : "The Nirex Safety Assessment Reserch Programme", Annual Report for 1987/88, (1988)
M.H.Bradbury & F.A.Sarott : " Sorption databasees for the Cementitious Near Field of a L/ILW Repository for Performance Assessment", PSI Bericht Nr.95-06, (1995)
Greenfield et al. : "The effect of cement additives on radionuclides solubilities", Draft paper for poster presented at Migration'97, Sendai, Japan, (1997)
Nagra : " A natural analogue study of the Maqarin hyperalkaline ground waters.I.Source term description and thermodynamic database testing", Nagra technical report 91-10, (1992)

FEP ID **FW21** **FEP 名称** **廃棄体の温度**

定義

1. 廃棄体領域の温度、あるいは温度変化による水化学への影響

説明

1. 廃棄体の温度を規定する最大の要因は、廃棄体の発熱である。廃棄体の発熱は、核種の崩壊により生じる。TRU廃棄物のうち、有意な発熱を伴うものは、ハル・エンドピースである。
2. 第二の要因としては境界領域（ニアフィールド母岩）の温度（地熱）である。
3. 廃棄体の温度は、廃棄体、充填材、構造躯体、緩衝材、境界領域の熱的な相互作用によって決まる。
4. 温度は、鉱物-水反応や成分溶出といった化学反応に影響すると考えられる。

評価すべき事象

1. 平衡定数 (6gK) は、温度の影響を受けると考えられる。

浅地中処分における特記事項

浅地中処分対象となるTRU廃棄物には発熱性廃棄体は含まれていない。また、浅地中処分の対象となる深度では地温による影響も無いと考えられる。

余裕深度処分における特記事項

余裕深度処分対象となるTRU廃棄物には発熱性廃棄物は含まれていない。また、余裕深度処分の対象となる深度では地温による影響も無いと考えられる。

地層処分における特記事項

地層処分の対象となるTRU廃棄物には発熱性のハル・エンドピースがあり、廃棄物の発熱による温度上昇の影響が考えられる。
地層処分の場合、処分深度が数100m以深となることから、地温自体の上昇による影響が考えられる。

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

FEP ID **FW31** **FEP 名称** **廃棄体での水理 物質移行**

定義

廃棄体領域での水の流れ及び物質の移動による水化学への影響

説明

1. 廃棄体部における水理は、廃棄体領域に含まれる廃棄体容器、廃棄物自身及び廃棄物を固形化しているマトリックス（セメントやビチューメンなど）の水理学的な特性と周囲の水理条件によって決定される。
2. 緩衝材が健全である期間内は廃棄体における物質移行は拡散により支配されると考えられる。
3. 廃棄体部に含まれる廃棄体容器やセメントマトリックス等は地下水との反応などにより変質し、透水係数などの特性が変化することが考えられる。この変質による特性の変化を定量的に予測することは現状困難である。このため、廃棄体部が砂程度の状態になっていることを想定して、透水係数等を設定し評価した例がある（日本原燃1990,TRU共同作業チーム 平成12年）。
4. 廃棄体における対流等の水理現象は、溶存成分の移動を生じ、溶質濃度を変化させ、その水化学組成を変化させる可能性がある。
5. 廃棄体における水の移動量はその水中の溶質成分の移動量を変化させる。
6. 水の移動は廃棄体内部のガスの移動の原因となる。また、水の移動の結果として間隙水圧が変わりガスの溶解量が変化する。
7. 廃棄体の空隙率、透水係数およびそれらの経時的変化が、廃棄体の水理場に影響する。
8. 水理場の経時的な変化は間隙水中の溶質成分の移動量の変化を生じ、結果として水化学環境の経時的な変化に影響を与える。

評価すべき事象

1. 廃棄物を固形化しているセメントマトリックスは、長期的には廃棄体領域における物質移行によりセメント成分の溶出による劣化が起こる。その結果、廃棄体領域での水化学環境が影響を受ける。
2. 再冠水により、セメントや鋼材の劣化速度、機構が決定する。また、飽和度の変化に伴い水化学環境が影響を受ける。
3. 地下水の移動に伴い間隙水中に存在する溶存成分の他の領域との移動が生じる。その結果、廃棄体領域での水化学環境が影響を受ける。

浅地中処分における特記事項

地下水面より上部となる処分施設となった通気層処分の可能性がある。

余裕深度処分における特記事項

通気層処分の可能性は少ないと考えられる。

地層処分における特記事項

通気層処分の可能性はない。

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

・日本原燃産業株式会社 六ヶ所低レベル放射性廃棄物貯蔵センター 廃棄物埋設事業許可申請書、(1990)
・TRU共同作業チーム(平成12年)、“TRU廃棄物処分概念検討書”

FEP ID FW42 **FEP 名称** 廃棄体容器の特性

定義

廃棄体容器の形状寸法、素材、化学的特性などによる水化学環境への影響

説明

1. 廃棄体容器の腐食による遊離酸素の消費により、処分場環境の酸化還元状態は還元状態になる (Nagra, 1994)。
2. 金属が腐食することにより生成される腐食生成物は、鉄の様々な酸化物／水酸化物であり、これらの化合物は、溶液中に存在する他の金属イオンに吸着して共沈することが知られている。 (SKB, 1995)。

評価すべき事象

1. 金属材料が強度、機密性を損なうような特性変化を生じさせる現象としては、腐食が最も重要である。処分場内の pH、Eh、溶存イオン種等の化学的雰囲気とその経時変化によって、金属は様々な反応で腐食を起こす可能性がある。また、また、初期の酸素が存在する環境における金属腐食により、処分場環境は還元状態に変遷する (Nagra, 1994) 等の水化学環境への影響が考えられる。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

- (Nagra 1994) Report on the Long-Term Safety of the L/ILW Repository at the Wellenberg Site, NAGRA Technical Report No.94-06.
 (SKB 1995) Prestudy of final disposal of long-lived low and intermediate level waste, SKB Technical Report 95-03

FEP ID **FW43** FEP 名称 **廃棄物 (金属) の特性**

定義

金属廃棄物の化学的特性による水化学環境への影響

説明

1. 金属廃棄物は主にジルカロイ、炭素鋼、ステンレス鋼等である。
2. 金属廃棄物は酸素が存在する環境では酸素を消費して、地下水を還元雰囲気に変遷させる。
3. 還元環境下では嫌気性腐食がおこり、腐食生成物を生成する。
4. 金属成分の腐食により、処分場環境の酸化還元状態は還元状態になる (Nagra, 1994)。

評価すべき事象

1. 金属材料が強度、機密性を損なうような特性変化を生じさせる現象としては、腐食が最も重要である。処分場内の pH、Eh、溶存イオン種等の化学的雰囲気とその経時変化によって、金属は様々な反応で腐食を起こす可能性がある。また、また、初期の酸素が存在する環境における金属腐食により、処分場環境は還元状態に変遷する (Nagra, 1994) 等の水化学環境への影響が考えられる。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

Nagra (1994) Report on the Long-Term Safety of the L/ILW Repository at the Wellenberg Site, NAGRA Technical Report No.94-06.

FEP ID **FW44** **FEP 名称** **廃棄物 有機物) の特性**

定義

廃棄物 有機物) の化学的特性による水化学環境への影響

説明

1. 廃棄体に含まれる有機物は、セルロース 紙、布)、ゴム、ポリ製品等である。
2. セルロースはアルカリ性の環境下では不安定であり、水溶性の低分子量の化合物へと劣化すると考えられる (Van Loon L R, et al., 1997)。
3. 有機物の劣化により酸性の生成物、例えば、二酸化炭素や低分子量の有機酸等が生成され、埋め戻し材のアルカリ性を中性化する傾向がある (NIREX, 1997)。
4. 微生物分解あるいは放射線分解により、メタンや二酸化炭素が生成される可能性がある。

評価すべき事象

1. 有機物あるいはその分解生成物が存在することによって、間隙水性状 特に、TOC、炭酸濃度等、カーボンに関する性状) が変化する。
2. 主に木材や紙といったセルロース材の微生物分解により、メタンや二酸化炭素が生成される可能性がある (NIREX, 1997 b)。
3. 有機物は放射線により分解する。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

NIREX (1997) NIREX 97: An assessment of the post-closure performance of a deep waste repository at Sellafield - Volume 3: The groundwater pathway -, NIREX SCIENCE REPORT S/97/012
 Van Loon L R, Glaus M A, Stallone S, Laube A (1997) Sorption of Isosaccharinic Acid, a Cellulose Degradation Product, on Cement, Environ Sci Technol, Vol.31, No.4, p.1243-1245.

NIREX (1997) NIREX 97:An assessment of the post-closure performance of a deep waste repository at Sellafield - overview -, NIREX SCIENCE REPORT S/97/012

FEP ID FW45 FEP 名称 廃棄物 無機物) の特性

定義

廃棄物 無機物) の化学的特性による水化学環境への影響

説明

1. 廃棄物 無機物) とは、金属、有機物以外の無機物を主成分とする廃棄物を指す。
2. 還元環境中では、硝酸などの酸素酸基は熱力学的に不安定となり低温では生物 (バクテリア) の助けを借りて、また熱水中など高温では2価の鉄や有機物などによって化学的に安定な窒素などに還元されていく (脱窒素反応) ことが知られている (TRU共同作業チーム 平成12年)。
3. セメントにより維持される高pH環境下では、硝酸還元反応により生成した NH_4^+ は $\text{NH}_3(\text{aq})$ で主に存在する。 (TRU共同作業チーム 平成12年)

評価すべき事象

1. 無機廃棄物は、地下水との接触により溶解することが考えられる。考慮すべき廃棄物として硝酸塩が挙げられる。硝酸塩が溶解することにより、硝酸イオンが地下水中に放出される。硝酸イオンは、微生物活動を主因とした酸化還元反応により、窒素分子 (N_2)、アンモニウムイオン (NH_4^+) に分解される可能性がある。セメントにより維持される高pH環境下では、 NH_4^+ は $\text{NH}_3(\text{aq})$ で主に存在する。 (TRU共同作業チーム 平成12年)

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

TRU共同作業チーム(平成12年),"TRU廃棄物処分概念検討書"

FEP ID FW46 FEP 名称 セメントマトリクス特性

定義

セメントマトリクスの化学的特性による水化学環境への影響

説明

1. セメントモルタルは、セメント、水、砂を基本材料として製作される。また、作業性や耐久性の向上を目的としてAE混和剤や減水剤が使用されるのが一般的である。この混和剤は、多種市販されているが有機系のものが多い。また、水和熱を抑えるためや長期強度を増進する目的でフライアッシュや高炉スラグなどの混和材を用いることも通常よく行われる行為である。
2. ポルトランドセメントと水との水和反応により生成する水和物のうちトバモライトと呼ばれる珪酸カルシウム水和物と水酸化カルシウムが最も多い。 C_3S+C_2S の量がセメント重量の75%の場合、水酸化カルシウムの生成量は約40%となる。このほか、アルミン酸カルシウム水和物・カルシウム・サルホ・アルミネート水和物などの多くの水和物ができる。樋口他, 1983)
3. セメント中にシリカを多量に含むフライアッシュ、高炉スラグ、シリカフュームなどのポゾラン材料を添加した場合、それ自体は可溶性のシリカが、これまた可溶性の水酸化カルシウムとポゾラン反応を起こし、溶けにくいC-S-Hゲルを生成する(荒井, 1991)。
4. 廃棄体中のセメント鉱物は地下水との化学反応によりゆっくりと溶解、劣化する。セメント空隙水の重要な特性であるpHは、反応の進展にともない徐々に低下する。これは、セメント鉱物中のCaとSiの溶出が非調和的であり、前者が後者よりも溶脱しやすいことに起因する。
5. セメントの存在により、pH及びバイオン強度は高くなると予想される (SKB, 1995)。
6. セメントが長期間、炭酸を含む環境に接すると中性化が生じ(岡田ほか, 1981)、間隙水のpHが低下する(田中ほか, 1997)。

評価すべき事象

1. セメント水和物のうち水酸化カルシウムは易溶性であり、セメントマトリクス中を地下水が通過することにより、地下水中に溶解することが考えられる。さらに、短期的には難溶性と言うことも可能なCSHゲルといった水和物も超長期的には溶解してしまう可能性もある。また、温度は、セメント水和物の溶出過程において影響を与えると考えられる。海水系地下水に含まれる硫酸塩 $MgSO_4$ は、 $Ca(OH)_2$ との反応により $Mg(OH)_2$ と石こうを生じ、さらにはエドリンガイトを生成する。また塩化物 $MgCl_2$ は、 $Ca(OH)_2$ との反応により $Mg(OH)_2$ と $CaCl_2$ を生成する。生成する石こうや $CaCl_2$ は、可溶性である。日本コンクリート工学協会, 1996)
2. セメント成分の影響により、間隙水が長期間高pH環境となる。極初期にはセメント中の遊離アルカリによりpH=13以上になり(TRU共同作業チーム、平成12年)、その後はportlanditeが存在する期間はpH=12.5程度の期間が継続する(A. Atkinson et al. 1989)。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

- ・田中知ほか (1997) :放射性廃棄物処分システムにおいてセメントに期待される役割, 日本原子力学会誌, Vol.39, No.12
- ・岡田済, 六車ひろし編 (1981) 改訂新版コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, 591
- ・SKB (1995) Prestudy of final disposal of long-lived low and intermediate level waste, SKB Technical Report 95-03
- ・樋口芳朗, 村田二郎, 小林春夫(1983) :コンクリート工学(I)施工, 彰国社
- ・荒井康夫(1991) :セメントの材料化学, 大日本図書, pp214-215
- ・日本コンクリート工学協会(1996) :コンクリート便覧 第二版
- ・TRU共同作業チーム(平成12年), "TRU廃棄物処分概念検討書"
- ・A. Atkinson et al. DOE/RW/89/0251989

FEP ID **FW47** **FEP 名称** **ビチューメンマトリクス特性**

定義

廃棄体の固化材として使用されるビチューメンマトリクスの化学的特性による水化学環境に対する影響

説明

1. ビチューメンとは、天然に岩石、土壌、堆積物等の中にある有機物のうち、炭化水素類またはそれらの非金属誘導体等の混合物で、主成分は複雑な炭化水素であるが、一般に硫黄、窒素、酸素などの化合物を含む。
2. 石油アスファルトはアスファルト基原油を常圧蒸留および真空蒸留し、釜残油として得られる。これをストレートアスファルトと呼ぶ。ストレートアスファルトを加熱し空気を吹き込んで酸化重合させたものをブローンアスファルトという。
3. 微生物活動により、ビチューメンマトリクスが分解され、特性が変化する可能性がある。バクテリアはビチューメン廃棄物から放出される水溶性の炭素及びビチューメンマトリクス中の炭素を酸化させる。また、液相中に放出されたNO₃⁻により、硝酸塩還元バクテリアの成長が促進される (Jacquot F. et al., 1997)。

評価すべき事象

2. ビチューメンの酸化によりCO₂ガスが生成され、嫌気性微生物のNO₃還元によりN₂ガスが生成する。さらに、液相中に放出されたNO₃⁻により、硝酸塩還元バクテリアの成長が促進される (Jacquot F. et al., 1997)。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

Jacquot F, Libert M F, Besnainou B, Romero M A (1997) In vitro evaluation of microbial effects on bitumen waste form, Microbial Degradation Processes in Radioactive Waste Repository and in Nuclear Fuel Storage Areas, 275-283

FEP ID

FW51

FEP 名称

廃棄体でのガス

定義

TRU廃棄体におけるガスの生成・移行による水化学環境への影響

説明

1. TRU廃棄体におけるガス発生機構としては金属の腐食、有機物の微生物分解、水の放射線分解があげられる。(TRU共同作業チーム、平成12年)
2. ガス発生によるバリア機能への影響として、ガス発生に係る反応による溶存化学物質の消費と生成による水化学の変化等が考えられる。(TRU共同作業チーム、平成12年)
3. 放射線分解によるガス発生
放射線分解によるガスの発生は他の機構と比較して微小である。(Nagra,1986 ; NIREX,1988 ; Norris,1997 ; SKB,1995)
4. 廃棄物に含まれる様々な有機成分が微生物によって分解され、ガスが発生する。有機物は微生物に炭素源として利用され、様々な無機成分（分子酸素、硝酸、硫酸塩または炭酸塩）は酸化剤として利用される可能性がある (M.Wiborgh,et al., 1995)。

評価すべき事象

・ガスが発生することにより、ガス成分組成及び水中の溶解量が変化し、間隙水の水化学組成が変化する。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

- ・TRU共同作業チーム(平成12年),"TRU廃棄物処分概念検討書"
 ・Nagra, NTB 85-17 (1986)
 ・NIREX, NSS/G104 (1988)
 ・S.Norris, et, al, An Assessment of the Post-closure Performance of Deep Waste Repository at Sellafield, Overview, S/97/012 (1997)
 ・SKB, Prestudy of final disposal of long-lived low and intermediate level waste. TR 95-03 (1995).

Marie Wiborgh, et al. (1995) Prestudy of final disposal of long-lived low and intermediate level waste, SKB Technical Report 95-03.

FEP ID

FW61

FEP 名称

廃棄体での微生物

定義

廃棄体領域における微生物活動による水化学環境への影響

説明

1. 飽和炭化水素含有量の多いピチューメンの分解は何種類かの微生物により分解されることが分かっている。飽和炭化水素や飽和炭化水素の含有量が少ないピチューメンは微生物の活動によってかなり酸化するが、芳香族炭化水素含有量の多いピチューメンは微生物分解されにくい。(K.Pedersen and F.Karlsson,1995)

2. 好気性及び嫌気性でのピチューメンの微生物分解試験はスウェーデンのSFRで行われた。このときのCO₂発生速度は0.6~1.5 μmol/m mg(bitumen)であった。試験で得られた分解速度を外挿することによって、1000年間で分解されるピチューメンは好気性で25~70%、嫌気性で0.3~0.8%であることがわかった。この結果より、処分場が嫌気性であることが重要であり、好気性ではピチューメンは急速に劣化するといえる。(K.Pedersen and F.Karlsson,1995)

3. 処分場内には栄養分が少ないため、微生物が活動するのは栄養分とエネルギー源が集中している処分場表面である。(S.Stroes-Gascoyne, and J.M.West,1994)

4. 微生物が活動することによって、還元反応が起こったり、CO₂、硫化物、酸、キレートが生成する。

これらの生成物によって、pHやEhが変化し、核種の溶解度などが変化し、結果的に核種の移行を促進、あるいは抑制することとなる。これらの効果は、深度が浅く、栄養分の多い環境下では起こりうる。(S.Stroes-Gascoyne, and J.M.West,1994)

5. 微生物による炭素を含む有機物の分解により、二酸化炭素(CO₂)やメタン(CH₄)のようなガスが発生する。(Marshall et al.,1996)

評価すべき事象

1. 硫酸塩還元菌による酸化種の生成、酸化還元反応の加速など、微生物の活動に起因した水化学環境への影響の可能性がある。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

- K.Pedersen and F.Karlsson : "Investigations of subterranean microorganisms: Their importance for performance assessment of radioactive waste disposal", SKB 95-10, (June 1995)
- S.Stroes-Gascoyne, and J.M.West : "MICROBIAL ISSUES PERTAINING TO THE CANADIAN CONCEPT FOR THE DISPOSAL OF NUCLEAR FUEL WASTE", AECL-10808 (1994)
- Marsha I. et al. : "Methane Production Rates from Natural Organics in Glacial Lake Clay and Granitic Groundwater", AECL-11510, (May 1996)

FEP ID **FW71** **FEP 名称** **廃棄体での有機物**

定義

廃棄体領域に含まれる有機物の形態や挙動による水化学環境に対する影響

説明

1. 廃棄体に含まれる有機物は、廃棄物としての有機物（紙、布、ポリ製品、ゴム等）と固化マトリクスとしてのアスファルトであり、廃棄体グループ 3 及び 4 に属する廃棄体に含まれる（TRU 共同作業チーム、平成 12 年）。
2. 潜在的な影響を有する有機物として挙げられるものは、機器類のパッキンとして使用されるフッ素ゴム・エポキシクロロヒドリンゴム、民間再処理操業廃棄物のうち極低レベル可燃性廃棄物に含まれる可燃焼却後の未燃成分（セルロース）、動燃再処理操業廃棄物のうちプロセス濃縮廃液のアスファルト固化体、及び COGEMA からの返還低レベル廃棄物固化体のうちのアスファルトがある。また、セメント系材料を施工する場合、その流動性を高めるために用いられる有機系の減水剤がある（TRU 共同作業チーム、平成 12 年）。
3. セメント系材料を施工する場合には、その流動性を高めるために減水剤が用いられる。減水剤の種類は大別すると
 - ・リグニンスルホン酸系
 - ・ナフタレンスルホン酸系
 - ・メラニン樹脂スルホン酸系
 - ・ポリカルボン酸系
 になり、いずれも有機物である。
4. セルロースはアルカリ環境で分解しやすく、カルボン酸等が生成するが、近年の研究では、イノサッカリン酸が錯生成の観点では最も重要な分解生成物であることが判明しつつある。
5. イノサッカリン酸（ISA）は弱酸であり、高アルカリ環境ではほぼ完全に電離して ISA-イオンとして存在する。ISA-イオンは Ca^{2+} と反応して沈殿する（Whistler, R.L. and BeMiller, J.N., 1963）。

$$\text{Ca}(\text{ISA})_2 = \text{Ca}^{2+} + 2\text{ISA}^- \quad K_s = -6.22 \pm 0.03$$
6. 上記塩の溶解平衡で決まる ISA 濃度は、セメント間隙水では 0.05～0.1M であり、遊離 ISA 濃度への沈殿生成の影響はない（TRU 共同作業チーム、平成 12 年）。
7. 有機物の劣化により酸性の生成物、例えば、二酸化炭素や低分子量の有機酸等が生成され、埋め戻し材のアルカリ性を中性化する傾向がある（NIREX, 1997）。
8. 微生物分解あるいは放射線分解により、メタンや二酸化炭素が生成される可能性がある。

評価すべき事象

1. 有機物あるいはその分解生成物が存在することによって、間隙水性状（特に、TOC、炭酸濃度等、カーボンに関する性状）が変化する。
2. 主に木材や紙といったセルロース材の微生物分解により、メタンや二酸化炭素が生成される可能性がある（NIREX, 1997 b）。
3. 有機物は放射線により分解する。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

・TRU共同作業チーム(平成12年),"TRU廃棄物処分概念検討書"
・Whistler,R.L. and BeMiller,J.N.(1963)," α -D-Isosaccharino-1,4-lactone: Action of Lime Water on Lactose, In Methods in Carbohydrate Chemistry", Vol.II, Reactions of Carbohydrates
・NIREX (1997) NIREX 97:An assessment of the post-closure performance of a deep waste repository at Sellafield - Volume 3:The groundwater pathway -, NIREX SCIENCE REPORT S/97/012
・NIREX (1997 b) NIREX 97:An assessment of the post-closure performance of a deep waste repository at Sellafield - overview -, NIREX SCIENCE REPORT S/97/012

FEP ID	FW81	FEP 名称	廃棄体での核種の崩壊・生成
---------------	------	---------------	---------------

定義

廃棄体中での放射性核種の崩壊に際して放出される放射線による水化学環境に対する影響

説明

1. 放射線分解において、水素と酸化種が等量ずつ生成するが、処分環境の温度条件下においては水素は相対的に反応が鈍く、さらに酸素などの酸化種よりも高い拡散性を有している (Ross, 1989)。この水素が気体として或いは水に溶けて拡散することにより、過酸化水素などの酸化種よりも早く失われることが想定され、正味の酸化性雰囲気が生じる (Christensen, et al., 1982)。
2. 地下水に溶存している窒素や二酸化炭素の放射線分解についても、pHを大きく減少させる結果となる (McVay, et al., 1981)。
3. 長期的には、処分場条件は地下水によって運ばれる酸化種と、 γ 線による放射線分解によって生成する酸化種によって規定される (AECL, 1994)。
4. α 線による放射線分解で生成する水素は化学的に不活性でニアフィールドから直ちに喪失し、酸素は反応的である (Nagra, 1994)。
5. TRUレポートにおける検討によると、処分場閉鎖直後は酸化性雰囲気であるが、1E+7年後には地下水と同程度のEhにまで低下するという結果を得た。これは、還元性地下水の流入による還元種の供給量が、水の放射線分解による酸化種の生成量を上回ることによる。TRU共同作業チーム、平成12年)。

評価すべき事象

1. 放射線分解による酸化種の生成により、水化学が変化する。

浅地中処分における特記事項**余裕深度処分における特記事項****地層処分における特記事項****水化学環境により影響を受ける評価パラメータ****参考文献**

- *Ross B.(ed.) (1989) Methods of Calculating the Post-closure Performance of High-level Waste Repositories, Prepared by Disposal Safety, Inc. for Pacific Northwest Laboratory under Contract DE-AC06-76RLO 1830 with U.S. Department of Energy, PNL-6608 UC-510.
- *Christensen H, Bjergbakke E (1982) Radiolysis of Groundwater from HLW Stored in Spent Fuel, KBS TR 82-18.
- *McVay G L, Pederson L R (1981) Effect of Gamma Radiation on Glass Leaching, J. Am. Ceramic Soc., 64, pp.154-158.
- *TRU共同作業チーム(平成12年),"TRU廃棄物処分概念検討書"
- *AECL (1994) The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste: The Vault Model for Postclosure Assessment, AECL-10714,COG-93-4.
- *Nagra (1994) Kristallin-I Safety Assessment Report NTB TR 93-22)

添付 2

記述した充填材領域に関する FEP

FEP ID FM11 **FEP 名称** 充填材での水化学

定義

充填材間隙水の性状 (pH、Eh、イオン強度、共存イオン濃度等) とその挙動。

説明

セメント変遷

1. 充填材中のセメント成分は地下水へ溶解し、地下水中のイオンと反応することにより経時的に変質していく。セメント間隙水の水化学は、セメントの溶解実験に基づくモデル化がいくつか行われている(R.Berner 1987, F.P.Glasser et al. 1988, A. Atkinson et al. 1989)。これらのモデルは取り扱いセメントの種類やセメントの2次鉱物の設定に違いがあるが、CSHが存在する期間においてはおおむねよい一致を示している。

2. コンクリート関係で使用されている混和剤は目的にあわせて適切に使用すれば、コンクリートの耐久性及び作業性を改善させる(船戸 1991)。混和剤は界面活性剤としての機能を有しており、放射性核種と錯形成能のある官能基を含んでおり、核種の溶解度や、分配係数への影響がある(Ebert et al. 1991, Cooper(ed) 1988, M.H. Bradbury & F.A. Sarott 1995, Greenfield et al. 1997)。

3. 充填材としては、現地発生ズリ、セメント系材料が考えられるが、現段階ではセメント系材料が採用される可能性が高く、普通ポルトランドセメントを使用したモルタルが候補として上がっている(TRU共同作業チーム 1997)。

セメント系材料は、用途によってポルトランドセメント、混合セメント、特殊セメントに分類できる。セメントの組成、化学的安定性の異なる様々なセメントがあり(コンクリート便覧 1996)、間隙水化学にも影響する。

ベントナイトの変質への影響が小さい低pHセメントが開発されている。

4. 既往の研究では、セメント鉱物の劣化モデルとして、他のモデルとの比較検討が行われているAtkinsonモデル(A. Atkinson et al. 1989, 1991)を用いて、緩衝材におけるイオン交換反応と不純物のカルサイトの溶解も考慮した物質移行・化学反応連成解析によるモデル化が行われている(TRU共同作業チーム 1997)。

セメントの溶解による化学環境維持期間は以下の三領域が設定され、核種移行に関わるパラメータの設定の目安とされている。

RegionI : ごく初期においては、セメント中に含まれるNaとKイオンの影響で、pH=13.2程度の高pH領域

RegionII : portlanditeが存在する期間は、間隙水中のCaイオン濃度により決定されるpH=12.5の期間

RegionIII : portlanditeが溶失した後は、CSHの溶解が空隙水中のpHを支配する。これ以降の領域をRegionIIIとする(TRU共同作業チーム 1997)。

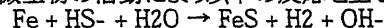
還元性雰囲気と酸化性雰囲気

5. 充填材中の放射線により、水が放射線分解されることにより、酸化種が生成され、酸化性雰囲気を形成する可能性がある。

微生物

6. 微生物活動により、上記の反応の他に酸化還元反応、ガス発生、コロイド、ガス、キレート剤の生成があり得る。また、嫌気性環境では、アンモニアと硝酸が酸化される反応があり得る(TRU共同作業チーム 1997)。

7. 微生物の活動により以下の反応を生じ、間隙水組成が影響を受ける。



しかし、地層処分の環境で、微生物活動による極端な腐食の起こる可能性は小さいという報告がある(動燃事業団 1992)

8. 微生物活動により、上記の反応の他に酸化還元反応、コロイド、ガス、キレート剤の生成があり得る。また、嫌気性環境では、アンモニアと硝酸が酸化される反応があり得る(TRU共同作業チーム 1997)。pH=12-13では、微生物の活動は見られなかったという報告がある一方、Maqarinのナチュラルアナログ研究(Nagra 1992)の中では、pHではなく利用できる栄養分の量によって微生物活動が制限されているという報告もある。

評価すべき事象

1. 温度によって安定度定数、溶解度積等の熱力学データは変化することから、温度によって間隙水性状は変化することとなる。一方、間隙水のpH、イオン強度等によって熱伝導率のような物理定数が変化することが考えられるため、水化学によって温度も影響を受けることとなる。【温度影響】

2. 間隙水中の溶存成分は人工バリア内を移動する。拡散または移流（分散）ことによって、その空間分布を変化させる。【水理・物質移動による影響】

3. 深部地下水は一般に還元性雰囲気にあると考えられるが、再冠水時には、坑道掘削時に導入された酸素の影響によって過渡的に酸化性雰囲気が形成される可能性がある。【水理・物質移動による影響】

4. 水の放射線分解で生成される酸化種によって局所的に酸化性雰囲気が形成される可能性がある。これについては、鉄の酸化速度をパラメータとして、水の放射線分解によって生じる酸化種の影響を評価した結果、鉄の酸化が遅い場合でも、数百年でEhがマイナスとなり、長期的に酸化性雰囲気が保たれることはないという報告がある（TRU共同作業チーム 1997）。【核種の崩壊・生成による影響】

5. 人工バリア材として用いられる材料は、処分環境下において必ずしも熱力学的に安定なものではなく、金属や有機物のように比較的早期に分解・腐食したり、セメントやベントナイトのように長期的に緩慢に変質する。このような人工バリア材特性の変化を伴う現象は、間隙水性状によって影響を受けるとともに、新たな溶存成分の導入となって間隙水性状に影響を及ぼす。【種々の材料の特性による影響】

6. 充填材中のセメント成分は地下水へ溶解し、地下水中のイオンと反応することにより経時的に変質していく。セメントの変質は実験値に基づくモデル化がいくつか行われている（R. Berner 1987, F. P. Glasser et al. 1988, A. Atkinson et al. 1989）。これらのモデルは取り扱うセメントの種類やセメントの2次鉱物の設定に違いがあるが、CSHが存在する期間においてはおおむねよい一致を示している。【充填材の特性による影響】

7. 充填材中には、有機物が存在しており、微生物活動などによりガスが発生する。発生したガスが構造躯体中に移行する。気液平衡による間隙水性状とガスとの相互影響がある。【ガスによる影響】

8. 好気性環境では、硫酸塩生成菌や硝化菌の活動により酸が生成し、鋼材やセメント成分の溶解・劣化を引き起こす。処分場は早期に酸素が消費されるため、これらの微生物の影響は小さいであろう（S. Stroes-Gascoyne 1989）。微生物活動によりガスが発生する。また、pH=12-13程度の高pH環境では微生物の活動は見られないという報告がある（TRU共同作業チーム 1997）。【微生物による影響】

9. セメント中の混和剤も有機物である。間隙水性状が有機物の分解に影響を及ぼす一方、有機物が溶存することで間隙水中のTOC、炭酸濃度等が影響を受ける。【有機物による影響】

10. セメント成分の影響により、間隙水が長期間高pH環境となる。極初期にはセメント中の遊離アルカリによりpH=13以上になり（TRU共同作業チーム 1997）、その後はportlanditeが存在する期間はpH=12.5程度の期間が継続する（A. Atkinson et al. 1989）。高pH環境により、核種の溶解度、分配係数、緩衝材の変質挙動、微生物の活動が影響を受ける。【充填材の特性による影響】

11. TRU廃棄物中には硝酸塩を大量に含む廃棄物が存在しており、空隙水中の硝酸イオン濃度が硝酸ナトリウムの溶解度に相当する高濃度になる可能性がある。硝酸塩の影響を定量的に把握することは現状困難である（TRU共同作業チーム 1997）。【廃棄体での水化学による影響】

浅地中処分における特記事項

温度影響

浅地中処分対象となるTRU廃棄物には発熱性廃棄物は含まれていない。また、浅地中処分の対象となる深度では地温による影響も無いと考えられる。

水理・物質移行による影響

地下水面より上部の処分施設となった通気層処分の可能性がある。

余裕深度処分における特記事項

温度影響

余裕深度処分対象となるTRU廃棄物には発熱性廃棄物は含まれていない。また、余裕深度処分の対象となる深度では地温による影響も無いと考えられる。

水理・物質移行による影響

通気層処分の可能性は少ないと考えられる。

地層処分における特記事項

【温度影響】

・地層処分の対象となるTRU廃棄物には発熱性のハル・エンドピースがあり、廃棄物の発熱による温度上昇の影響が考えられる。

・地層処分の場合、処分深度が数100m以深となることから、地温自体の上昇による影響が考えられる。

【水理・物質移行による影響】

・通気層処分の可能性はない。

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

<溶解度>

・溶存成分との錯体の形成やpH、Eh等により核種の存在形態が変化し、核種の溶解度が影響を受ける。

<分配係数>

・溶存成分との錯体の形成やpH、Eh等により核種の存在形態が変化し、核種の分配係数が影響を受ける。

・地下水との接触により吸着固相の変質が生じ、分配係数が影響を受ける。また、吸着固相の変化は接触する地下水成分により影響を受ける。

<空隙率>

・地下水との接触により固相の変質が生じ、その結果、空隙率の変化が生じる。

<透水係数>

・地下水との接触により生じる空隙率の変化や、金属の腐食等に起因するひび割れの発生により透水係数が影響を受ける。空隙率の変化や金属の腐食などは地下水成分により影響を受ける。

<拡散係数>

・核種の存在形態により拡散係数は変化する。核種の存在形態は地下水環境により影響を受ける。

・地下水との接触により生じる空隙率の変化により拡散係数は変化する。空隙率の変化は地下水成分により影響を受ける。

<密度>

・地下水との接触による固相の変質により、密度の変化が生じる。

参考文献

- ・動燃事業団「高レベル放射性廃棄物地層処分開発の技術報告書」(1992)
- ・TRU共同作業チーム(平成12年)「TRU廃棄物処分概念検討書」
- ・R.Berner: "Modeling porewater chemistry in hydrated portland cement", Materials Reserch Society.112,pp.3-12., (1987)
- ・F.P.Glasser et al.: "Modeling approach to the prediction of equilibrium phase distribution in slag-cement blends and their solubility properties", Materials Reserch Society.1988,pp.319-330, (1988)
- ・A.Atkinson et al. DOE/RW/89/0251989
- ・A.Atkinson et al.: "Thermodynamic modelling and aqueous chemistry in the CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O system", Materials Reserch Society.212,pp.395-402, (1991)
- ・船戸、田代:「コンクリートの耐久性と化学の基礎」セメント新聞社, (1991)
- ・コンクリート便覧 第二版: コンクリート工学協会, (1996)
- ・S.Stroes-Gascoyne: AECL-9574, (1989)
- ・Ebert et al.: "The effects of organics in SFR on sorption coefficients", SKB progress Report SKB/SFR 91-01, (1991)
- ・Cooper(ed): "The Nirex Safety Assessment Reserch Programme", Annual Report for 1987/88, 1988
- ・M.H.Bradbury & F.A.Sarott: "Sorption databasees for the Cementitious Near Field of a L/ILW Repository for Performance Assessment", PSI Bericht Nr.95-06, 1995
- ・Greenfield et al.: "The effect of cement additives on radionuclides solubilities", Draft paper for poster presented at Migration'97, Sendai, Japan, (1997)
- ・Nagra: "A natural analogue study of the Maqarin hyperalkaline ground waters.I.Source term description and thermodynamic database testing", Nagra technical report 91-10, (1992)

FEP ID FM21 **FEP 名称** 充填材の温度

定義

1. 充填材領域の温度、あるいは温度変化による水化学への影響

説明

1. 充填材の温度を規定する最大の要因は、廃棄体の発熱である。
2. 第二の要因としては境界領域（ニアフィールド母岩）の温度（地熱）である。
3. 充填材の温度は、廃棄体、充填材、構造躯体、緩衝材、境界領域の熱的な相互作用によって決まる。
4. 充填材の温度は、セメント系材料の多くの性質（機械的、物理／化学的、核種移行など）に影響を及ぼすことが想定される。
7. 温度は、鉱物－水反応や成分溶出といった化学反応に影響すると考えられる。

評価すべき事象

1. 平衡定数 (lgK) は、温度の影響を受けると考えられる。

浅地中処分における特記事項

浅地中処分対象となるTRU廃棄物には発熱性廃棄体は含まれていない。また、浅地中処分の対象となる深度では地温による影響も無いと考えられる。

余裕深度処分における特記事項

余裕深度処分対象となるTRU廃棄物には発熱性廃棄物は含まれていない。また、余裕深度処分の対象となる深度では地温による影響も無いと考えられる。

地層処分における特記事項

地層処分の対象となるTRU廃棄物には発熱性のハル・エンドピースがあり、廃棄物の発熱による温度上昇の影響が考えられる。
地層処分の場合、処分深度が数100m以深となることから、地温自体の上昇による影響が考えられる。

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

FEP ID

FM31

FEP 名称

充填材での水理 物質移行

定義

充填材領域での水の流れ及び物質の移動による水化学への影響

説明

1. 充填材での水理は、充填材の水理学的な特性と周囲の水理条件によって決定される。
2. 緩衝材が健全である期間内は充填材における物質移行は拡散により支配されると考えられる。
3. 充填材として用いられるセメントリックス等は地下水との反応などにより変質し、透水係数などの特性が変化することが考えられる。この変質による特性の変化を定量的に予測することは現状困難である。このため、廃棄体部が砂程度の透水係数になっていることを想定して、透水係数等を設定し評価した例がある（日本原燃1990,TRU共同作業チーム 平成12年）。
4. 充填材における対流等の水理現象は、溶存成分の移動を生じ、溶質濃度を変化させ、その水化学組成を変化させる可能性がある。
5. 充填材における水の移動量はその水中の溶質成分の移動量を変化させる。
6. 水の移動は廃棄体内部のガスの移動の原因となる。また、水の移動の結果として間隙水圧が変わりガスの溶解量が変化する。
7. 隣接部との地下水交換により、充填材の水理は隣接部の水理に相互に影響を与え得る。
8. 充填材の空隙率、透水係数およびそれらの経時的変化が、充填材の水理場に影響する。
9. 水理場の経時的な変化は間隙水中の溶質成分の移動量の変化を生じ、結果として水化学環境の経時的な変化に影響を与える。

評価すべき事象

1. セメント系充填材は、長期的にはセメント成分の溶出による劣化が起こる。その結果、充填材領域での水化学環境が影響を受ける。
2. 再冠水により、セメントや鋼材の劣化速度、機構が決定する。また、飽和度の変化に伴い水化学環境が影響を受ける。
3. 地下水の移動に伴い間隙水中に存在する溶存成分の他の領域との移動が生じる。その結果、充填材領域での水化学環境が影響を受ける。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

- ・日本原燃株式会社六ヶ所低レベル放射性廃棄物貯蔵センター 廃棄物埋設事業許可申請書 (1990)
- ・TRU共同作業チーム, "TRU廃棄物処分概念検討書 案) (平成 9年度版)"

FEP ID

FM41

FEP 名称

充填材の特性

定義

充填材の特性による水化学環境への影響

説明

1. セメントモルタルは、セメント、水、砂を基本材料として製作される。また、作業性や耐久性の向上を目的としてAE混和剤や減水剤が使用されるのが一般的である。この混和剤は、多種市販されているが有機系のものが多い。また、水和熱を抑えるためや長期強度を増進する目的でフライアッシュや高炉スラグなどの混和材を用いることも通常よく行われる行為である。
2. ポルトランドセメントと水との水和反応により生成する水和物のうちトバモライトと呼ばれる珪酸カルシウム水和物と水酸化カルシウムが最も多い。 C_3S+C_2S の量がセメント重量の75%の場合、水酸化カルシウムの生成量は約40%となる。このほか、アルミン酸カルシウム水和物・カルシウム・サルホ・アルミネート水和物などの多くの水和物ができる。樋口他、1983)
3. セメント中にシリカを多量に含むフライアッシュ、高炉スラグ、シリカフュームなどのポゾラン材料を添加した場合、それ自体は可溶性のシリカが、これまた可溶性の水酸化カルシウムとポゾラン反応を起こし、溶けにくいC-S-Hゲルを生成する（荒井、1991）。
4. 充填材中のセメント鉱物は地下水との化学反応によりゆっくりと溶解、劣化する。セメント空隙水の重要な特性であるpHは、反応の進展にともない徐々に低下する。これは、セメント鉱物中のCaとSiの溶出が非調和的であり、前者が後者よりも溶脱しやすいことに起因する。
5. セメントの存在により、pH及びイオン強度は高くなると予想される（\$KB, 1995）。
6. セメントが長期間、炭酸を含む環境に接すると中性化が生じ（岡田ほか、1981）、間隙水のpHが低下する（田中ほか、1997）。

評価すべき事象

1. セメント水和物のうち水酸化カルシウムは易溶性であり、セメントマトリクス中を地下水が通過することにより、地下水中に溶解することが考えられる。さらに、短期的には難溶性と言うことも可能なCSHゲルといった水和物も超長期的には溶解してしまう可能性もある。また、温度は、セメント水和物の溶出過程において影響を与えると考えられる。海水系地下水に含まれる硫酸塩 $MgSO_4$ は、 $Ca(OH)_2$ との反応により $Mg(OH)_2$ と石膏を生じ、さらにはエドリンガイトを生成する。また塩化物 $MgCl_2$ は、 $Ca(OH)_2$ との反応により $Mg(OH)_2$ と $CaCl_2$ を生成する。生成する石膏や $CaCl_2$ は、可溶性である。（日本コンクリート工学協会、1996）
2. セメント成分の影響により、間隙水が長期間高pH環境となる。極初期にはセメント中の遊離アルカリによりpH=13以上になり（TRU共同作業チーム、平成12年）、その後はportlanditeが存在する期間はpH=12.5程度の期間が継続する（A. Atkinson et al. 1989）。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

- ・田中知ほか (1997) :放射性廃棄物処分システムにおいてセメントに期待される役割, 日本原子力学会誌, Vol.39, No.12
- ・岡田済, 六車ひろし編 (1981) 改訂新版コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, 591
- ・SKB (1995) Prestudy of final disposal of long-lived low and intermediate level waste, SKB Technical Report 95-03
- ・樋口芳朗, 村田二郎, 小林春夫(1983) :コンクリート工学(I)施工, 彰国社
- ・荒井康夫(1991) :セメントの材料化学, 大日本図書, pp214-215
- ・日本コンクリート工学協会(1996) :コンクリート便覧 第二版
- ・TRU共同作業チーム(平成12年), "TRU廃棄物処分概念検討書"
- ・A. Atkinson et al. DOE/RW/89/0251989

FEP ID

FM51

FEP 名称

充填材でのガス

定義

廃棄体及び構造躯体からの移行または充填材で発生したガスによる水化学環境への影響

説明

1. TRU廃棄体におけるガス発生機構としては金属の腐食、有機物の微生物分解、水の放射線分解があげられる。(TRU共同作業チーム、平成12年)
2. ガス発生によるバリア機能への影響として、ガス発生に係る反応による溶存化学物質の消費と生成による水化学の変化等が考えられる。(TRU共同作業チーム、平成12年)
3. 放射線分解によるガス発生
放射線分解によるガスの発生は他の機構と比較して微小である。(Nagra,1986 ; NIREX,1988 ; Norris,1997 ; SKB,1995)
4. 廃棄物に含まれる様々な有機成分が微生物によって分解され、ガスが発生する。有機物は微生物に炭素源として利用され、様々な無機成分 分子酸素、硝酸、硫酸塩または炭酸塩)は酸化剤として利用される可能性がある (M.Wiborgh,et al., 1995)。

評価すべき事象

1. ガスが発生することにより、ガス成分組成及び水中の溶解量が変化し、間隙水の水化学組成が変化する。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

- ・TRU共同作業チーム(平成12年),"TRU廃棄物処分概念検討書"
- ・Nagra, NTB 85-17 (1986)
- ・NIREX, NSS/G104 (1988)
- ・S.Norris, et, al., An Assessment of the Post-closure Performance of Deep Waste Repository at Sellafield, Overview, S/97/012 (1997)
- ・SKB, Prestudy of final disposal of long-lived low and intermediate level wastwe. TR 95-03 (1995).

Marie Wiborgh, et al. (1995) Prestudy of final disposal of long-lived low and intermediate level waste, SKB Technical Report 95-03.

FEP ID FM61 **FEP 名称** 充填材での微生物

定義

充填材領域における微生物活動による水化学環境への影響

説明

1. 微生物が活動することによって、還元反応が起こったり、CO₂、硫化物、酸、キレートが生成する。
これらの生成物によって、pHやEhが変化し、核種の溶解度などが変化し、結果的に核種の移行を促進、あるいは抑制することとなる。これらの効果は、深度が浅く、栄養分の多い環境下では起こりうる。(S.Stroes-Gascoyne, and J.M.West,1994)
2. 不飽和状態では、鉄酸化細菌、イオウ酸化細菌等の好気性細菌が、飽和段階では、硫酸塩還元菌等の嫌気性細菌が活性となり得る。核燃料サイクル開発機構, 1999)

評価すべき事象

1. 硫酸塩還元菌による酸化種の生成、酸化還元反応の加速など、微生物の活動に起因した水化学環境への影響の可能性がある。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

S.Stroes-Gascoyne, and J.M.West(1994) "MICROBIAL ISSUES PERTAINING TO THE CANADIAN CONCEPT FOR THE DISPOSAL OF NUCLEAR FUEL WASTE", AECL-10808
核燃料サイクル開発機構 地層処分研究開発第2次取りまとめ, (1999)

FEP ID FM71 **FEP 名称** 充填材での有機物

定義

充填材領域に含まれる有機物の形態や挙動による水化学環境に対する影響

説明

1. 充填材はセメント系材料から構成されていると想定すると、当該領域で考慮すべき有機物は、隣接する領域からの物質移動によって流入する有機物か、あるいはセメント系材料の施工に用いられる減水剤である。
2. セメント系材料を施工する場合には、その流動性を高めるために減水剤が用いられる。減水剤の種類は大別すると
 - ・リグニンスルホン酸系
 - ・ナフタレンスルホン酸系
 - ・メラニン樹脂スルホン酸系
 - ・ポリカルボン酸系
 になり、いずれも有機物である。
3. セルロースはアルカリ環境で分解しやすく、カルボン酸等が生成するが、近年の研究では、イソサッカリン酸が錯生成の観点では最も重要な分解生成物であることが判明しつつある。
4. イソサッカリン酸 (ISA) は弱酸であり、高アルカリ環境ではほぼ完全に電離してISA-イオンとして存在する。ISA-イオンはCa²⁺と反応して沈殿する (Whistler, R.L. and BeMiller, J.N., 1963)。

$$\text{Ca}(\text{ISA})_2 = \text{Ca}^{2+} + 2\text{ISA}^- \quad K_s = -6.22 \pm 0.03$$
5. 上記塩の溶解平衡で決まるISA濃度は、セメント間隙水では0.05～0.1Mであり、遊離ISA濃度への沈殿生成の影響はない (TRU共同作業チーム, 平成12年)。
6. 有機物の劣化により酸性の生成物、例えば、二酸化炭素や低分子量の有機酸等が生成され、埋め戻し材のアルカリ性を中性化する傾向がある (NIREX, 1997)。
7. 微生物分解あるいは放射線分解により、メタンや二酸化炭素が生成される可能性がある。

評価すべき事象

1. 有機物あるいはその分解生成物が存在することによって、間隙水性状 (特に、TOC、炭酸濃度等、カーボンに関する性状) が変化する。
2. 主に木材や紙といったセルロース材の微生物分解により、メタンや二酸化炭素が生成される可能性がある (NIREX, 1997)。
3. 有機物は放射線により分解する。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

[Redacted]

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

[Redacted]

参考文献

・TRU共同作業チーム(平成12年),"TRU廃棄物処分概念検討書"
Whistler,R.L. and BeMiller,J.N.(1963)," α -D-Isosaccharino-1,4-lactone: Action of
Lime Water on Lactose, In Methods in Carbohydrate Chemistry", Vol.II, Reactions of
Carbohydrates
NIREX (1997) NIREX 97:An assessment of the post-closure performance of a deep
waste repository at Sellafield - Volume 3:The groundwater pathway -, NIREX
SCIENCE REPORT S/97/012
NIREX (1997 b) NIREX 97:An assessment of the post-closure performance of a deep
waste repository at Sellafield - overview -, NIREX SCIENCE REPORT S/97/012

FEP ID FM81 **FEP 名称** 充填材での核種の崩壊・生成

定義

充填材中での放射性核種の崩壊に際して放出される放射線による水化学環境に対する影響

説明

1. 放射性核種の壊変により、放射線分解が起こることが考えられる。
2. 放射線分解において、水素と酸化種が等量ずつ生成するが、処分環境の温度条件下においては水素は相対的に反応が鈍く、さらに酸素などの酸化種よりも高い拡散性を有している (Ross, 1989)。この水素が気体として或いは水に溶けて拡散することにより、過酸化水素などの酸化種よりも速く失われることが想定され、正味の酸化性雰囲気が生じる (Christensen, et al., 1982)。
3. 地下水に溶存している窒素や二酸化炭素の放射線分解についても、pHを大きく減少させる結果となる (McVay, et al., 1981)。
4. TRUレポートにおける検討によると、処分場閉鎖直後は酸化性雰囲気であるが、1E+7年後には地下水と同程度のEhにまで低下するという結果を得た。これは、還元性地下水の流入による還元種の供給量が、水の放射線分解による酸化種の生成量を上回ることによる。TRU共同作業チーム、平成12年)。
5. 長期的には、処分場条件は地下水によって運ばれる酸化種と、 γ 線による放射線分解によって生成する酸化種によって規定される (AECL, 1994)。
6. α 線による放射線分解で生成する水素は化学的に不活性でニアフィールドから直ちに喪失し、酸素は反応的である (Nagra, 1994)。

評価すべき事象

1. 放射線分解による酸化種の生成により、水化学が変化する。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

- Ross B.(ed.) (1989) Methods of Calculating the Post-closure Performance of High-level Waste Repositories, Prepared by Disposal Safety, Inc. for Pacific Northwest Laboratory under Constant DE-AC06-76RLO 1830 with U.S. Department of Energy, PNL-6608 UC-510.
- Christensen H, Bjergbakke E (1982) Radiolysis of Groundwater from HLW Stored in Spent Fuel, KBS TR 82-18.
- McVay G L, Pederson L R (1981) Effect of Gamma Radiation on Glass Leaching, J. Am. Ceramic Soc., 64, pp.154-158.
- TRU共同作業チーム(平成12年), "TRU廃棄物処分概念検討書"
- AECL (1994) The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste: The Vault Model for Postclosure Assessment, AECL-10714, COG-93-4.
- Nagra (1994) Kristallin-I Safety Assessment Report NTB TR 93-22)

添付 3

記述した構造躯体領域に関する FEP

FEP ID **FS11** FEP 名称 **構造躯体での水化学**

定義

構造躯体間隙水の性状 (pH、Eh、イオン強度、共存イオン濃度等) とその挙動。

説明

セメント変遷

1. 構造躯体中のセメント成分は地下水へ溶解し、地下水中のイオンと反応することにより経時的に変質していく。セメント間隙水の水化学は、セメントの溶解実験に基づくモデル化がいくつか行われている(R. Berner 1987, F.P. Glasser et al. 1988, A. Atkinson et al. 1989)。これらのモデルは取り扱うセメントの種類やセメントの2次鉱物の設定に違いがあるが、CSHが存在する期間においてはおおむねよい一致を示している。

2. コンクリート関係で使用されている混和剤は目的にあわせて適切に使用すれば、コンクリートの耐久性及び作業性を改善させる(船戸 1991)。混和剤は界面活性剤としての機能を有しており、放射性核種と錯形成能のある官能基を含んでおり、核種の溶解度や、分配係数への影響がある(Ebert et al. 1991, Cooper(ed) 1988, M.H. Bradbury & F.A. Sarott 1995, Greenfield et al. 1997)。

3. セメント系材料は、用途によってポルトランドセメント、混合セメント、特殊セメントに分類できる。セメントの組成、化学的安定性の異なる様々なセメントがあり(コンクリート便覧 1996)、間隙水化学にも影響する。

ベントナイトの変質への影響が小さい低pHセメントが開発されている。

4. 既往の研究では、セメント鉱物の劣化モデルとして、他のモデルとの比較検討が行われているAtkinsonモデル(A. Atkinson et al. 1989, 1991)を用いて、緩衝材におけるイオン交換反応と不純物のカルサイトの溶解も考慮した物質移行・化学反応連成解析によるモデル化が行われている(TRU共同作業チーム 1997)。

セメントの溶解による化学環境維持期間は以下の三領域が設定され、核種移行に関わるパラメータの設定の目安とされている。

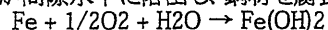
RegionI : ごく初期においては、セメント中に含まれるNaとKイオンの影響で、pH=13.2程度の高pH領域

RegionII : portlanditeが存在する期間は、間隙水中のCaイオン濃度により決定されるpH=12.5の期間

RegionIII : portlanditeが溶失した後は、CSHの溶解が空隙水中のpHを支配する。これ以降の領域をRegionIIIとする(TRU共同作業チーム 1997)。

還元性雰囲気と酸化性雰囲気

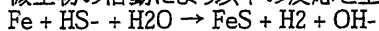
5. 構造躯体が鋼材であった場合、鋼材と緩衝材の境界部分において、鋼材の腐食が進行する。再冠水直後は、緩衝材中の酸素・間隙及びベントナイト表面に吸着されている)が間隙水中に溶出し、鋼材を腐食する(J.P. Simpson 1986)。その反応は、



である。しかし、酸素は極初期に消費され、鋼材の腐食生成物(Fe(OH)₂やFe₃O₄)により、間隙水は還元性となる。

6. 鋼材の腐食生成物により、間隙水は還元環境に維持されることが期待される(TRU共同作業チーム 1997)。

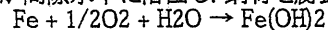
7. 微生物の活動により以下の反応を生じ、間隙水組成が影響を受ける。



しかし、地層処分環境で、微生物活動による極端な腐食の起こる可能性は小さいという報告がある(動燃事業団 1992)

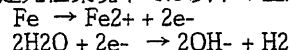
ガス

8. 構造躯体が鋼材であった場合、鋼材と緩衝材の境界部分において、鋼材の腐食が進行する。再冠水直後は、緩衝材中の酸素・間隙及びベントナイト表面に吸着されている)が間隙水中に溶出し、鋼材を腐食する(J.P. Simpson 1986)。その反応は、



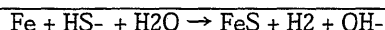
である。しかし、酸素は極初期に消費され、鋼材の腐食生成物(Fe(OH)₂やFe₃O₄)により、間隙水は還元性となる。

9. 還元性環境下では以下の金属腐食反応が進行し、水素が発生する。



微生物

10. 微生物の活動により以下の反応を生じ、間隙水組成が影響を受ける。



しかし、地層処分環境で、微生物活動による極端な腐食の起こる可能性は小さいという報告がある(動燃事業団 1992)

12. 微生物活動により、上記の反応の他に酸化還元反応、コロイド、ガス、キレート剤の生成があり得る。また、嫌気性環境では、アンモニアと硝酸が酸化される反応があり得る(TRU共同作業チーム 1997)。pH=12-13では、微生物の活動は見られなかったという報告がある一方、Maqarinのナチュラルアナログ研究(Nagra 1992)の中では、pHではなく利用できる栄養分の量によって微生物活動が制限されているという報告もある。

評価すべき事象

1. 温度によって安定度定数、溶解度積等の熱力学データは変化することから、温度によって間隙水性状は変化することとなる。一方、間隙水の pH、イオン強度等によって熱伝導率のような物理定数が変化することが考えられるため、水化学によって温度も影響を受けることとなる。【温度影響】

2. 間隙水中の溶存成分は人工バリア内を移動する(拡散または移流・分散)ことによって、その空間分布を変化させる。【物理・物質移行による影響】

3. 深部地下水は一般に還元性雰囲気にあると考えられるが、再冠水時には、坑道掘削時に導入された酸素の影響によって過渡的に酸化性雰囲気が形成される可能性がある。【物理・物質移行による影響】

4. 水の放射線分解で生成される酸化種によって局所的に酸化性雰囲気が形成される可能性がある。これについては、鉄の酸化速度をパラメータとして、水の放射線分解によって生じる酸化種の影響を評価した結果、鉄の酸化が遅い場合でも、数百年で Eh がマイナスとなり、長期的に酸化性雰囲気が保たれることはないという報告がある(TRU共同作業チーム 1997)。核種の崩壊・生成による影響】

5. 人工バリア材として用いられる材料は、処分環境下において必ずしも熱力学的に安定なものではなく、金属や有機物のように比較的早期に分解・腐食したり、セメントやベントナイトのようにより長期的に緩慢に変質する。このような人工バリア材特性の変化を伴う現象は、間隙水性状によって影響を受けるとともに、新たな溶存成分の導入となって間隙水性状に影響を及ぼす。【種々の材料の特性による影響】

6. 構造躯体中のセメント成分は地下水へ溶解し、地下水中のイオンと反応することにより経時的に変質していく。セメントの変質は実験値に基づくモデル化がいくつか行われている(R.Berner 1987, F.P.Glasser et al. 1988, A.Atkinson et al. 1989)。これらのモデルは取り扱うセメントの種類やセメントの2次鉱物の設定に違いがあるが、CSHが存在する期間においてはおおむねよい一致を示している。【構造躯体の特性による影響】

7. 構造躯体中に含まれる鋼材の腐食生成物は、間隙水を還元性に緩衝する。酸素が供給される環境において、塩化物イオンが存在すると鉄筋の腐食が加速される(船戸 1991)。圧縮ベントナイトの存在下では、鉄筋の腐食は全面腐食である可能性が高い。【構造躯体の特性による影響】

8. 構造躯体中には、金属や有機物が存在しており、金属腐食や微生物活動などによりガスが発生する。発生したガスが緩衝材中に移行する。気液平衡による間隙水性状とガスとの相互影響がある。【ガスによる影響】

9. 好気性環境では、硫酸塩生成菌や硝化菌の活動により酸が生成し、鋼材やセメント成分の溶解・劣化を引き起こす。処分場は早期に酸素が消費されるため、これらの微生物の影響は小さいであろう(S.Stroes-Gascoyne 1989)。微生物活動により、ガスが発生する。また、pH=12-13程度の高pH環境では微生物の活動は見られないという報告がある(TRU共同作業チーム 1997)。【微生物による影響】

10. セメント中の混和剤も有機物である。間隙水性状が有機物の分解に影響を及ぼす一方、有機物が溶存することで間隙水中のTOC、炭酸濃度等が影響を受ける。【有機物による影響】

11. セメント成分の影響により、間隙水が長期間高pH環境となる。極初期にはセメント中の遊離アルカリによりpH=13以上になり(TRU共同作業チーム 1997)、その後は portlandite が存在する期間は pH=12.5 程度の期間が継続する(A.Atkinson et al. 1989)。高pH環境により、核種の溶解度、分配係数、緩衝材の変質挙動、微生物の活動が影響を受ける。高pH環境は、鋼材の腐食の抑制条件となる。【構造躯体の特性による影響】

12. TRU廃棄物中には硝酸塩を大量に含む廃棄物が存在しており、空隙水中の硝酸イオン濃度が硝酸ナトリウムの溶解度に相当する高濃度になる可能性がある。硝酸塩の影響を定量的に把握することは現状困難である(TRU共同作業チーム 1997)。充填材の水化学による影響]

浅地中処分における特記事項

【温度影響】
浅地中処分対象となるTRU廃棄物には発熱性廃棄物は含まれていない。また、浅地中処分の対象となる深度では地温による影響も無いと考えられる。
【水理・物質移行による影響】
地下水面より上部の処分施設となった通気層処分の可能性がある。

余裕深度処分における特記事項

【温度影響】
余裕深度処分対象となるTRU廃棄物には発熱性廃棄物は含まれていない。また、余裕深度処分の対象となる深度では地温による影響も無いと考えられる。
【水理・物質移行による影響】
通気層処分の可能性は少ないと考えられる。

地層処分における特記事項

【温度影響】
地層処分の対象となるTRU廃棄物には発熱性のハル・エンドピースがあり、廃棄物の発熱による温度上昇の影響が考えられる。
地層処分の場合、処分深度が数100m以深となることから、地温自体の上昇による影響が考えられる。
【水理・物質移行による影響】
通気層処分の可能性はない。

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

＜溶解度＞
溶存成分との錯体の形成やpH、Eh等により核種の存在形態が変化し、核種の溶解度が影響を受ける。
＜分配係数＞
溶存成分との錯体の形成やpH、Eh等により核種の存在形態が変化し、核種の分配係数が影響を受ける。
地下水との接触により吸着固相の変質が生じ、分配係数が影響を受ける。また、吸着固相の変化は接触する地下水成分により影響を受ける。
＜空隙率＞
地下水との接触により固相の変質が生じ、その結果、空隙率の変化が生じる。
＜透水係数＞
地下水との接触により生じる空隙率の変化や、金属の腐食等に起因するひび割れの発生により透水係数が影響を受ける。空隙率の変化や金属の腐食などは地下水成分により影響を受ける。
＜拡散係数＞
核種の存在形態により拡散係数は変化する。核種の存在形態は地下水環境により影響を受ける。
地下水との接触により生じる空隙率の変化により拡散係数は変化する。空隙率の変化は地下水成分により影響を受ける。
＜密度＞
地下水との接触による固相の変質により、密度の変化が生じる。

参考文献

・J.P.Simpson,P.H.Vallotton : "Experiments on Container Materials for Swiss High-Level Waste Disposal Projects PartIII" Nagra technical report 86-25, (1986)
・動燃事業団 : 高レベル放射性廃棄物地層処分開発の技術報告書, (1992)
・TRU共同作業チーム(平成12年), "TRU廃棄物処分概念検討書"
・R.Berner : "Modeling porewater chemistry in hydrated portland cement", Materials Reserch Society. 112.pp.3-12, (1987)

- F.P.Glasser et al. : "Modeling approach to the prediction of equilibrium phase distribution in slag-cement blends and their solubility properties", Materials Research Society, 1988, pp.319-330, 1988
- A. Atkinson et al. DOE/RW/89/0251989
- A. Atkinson et al. : "Thermodynamic modelling and aqueous chemistry in the CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O system", Materials Research Society, 212, pp.395-402, (1991)
- 船戸、田代 : コンクリートの耐久性と化学の基礎 セメント新聞社, (1991)
- コンクリート便覧 第二版 : コンクリート工学協会, (1996)
- S. Stroes-Gascoyne, AECL-9574, (1989)
- Ebert et al. : "The effects of organics in SFR on sorption coefficients", SKB progress Report SKB/SFR 91-01, (1991)
- Cooper(ed) : "The Nirex Safety Assessment Research Programme", Annual Report for 1987/88, (1988)
- M.H. Bradbury & F.A. Sarott : "Sorption databases for the Cementitious Near Field of a L/ILW Repository for Performance Assessment", PSI Bericht Nr.95-06, (1995)
- Greenfield et al. : "The effect of cement additives on radionuclides solubilities", Draft paper for poster presented at Migration'97, Sendai, Japan, (1997)
- Nagra : "A natural analogue study of the Maqarin hyperalkaline ground waters. I. Source term description and thermodynamic database testing", Nagra technical report 91-10, (1992)

FEP ID FS21 **FEP 名称** 構造躯体の温度

定義

1. 構造躯体領域の温度、あるいは温度変化による水化学への影響

説明

1. 構造躯体の温度を規定する最大の要因は、廃棄体の発熱である。
2. 第二の要因としては境界領域（ニアフィールド母岩）の温度（地熱）である。
3. 構造躯体の温度は、廃棄体、充填材、構造躯体、緩衝材、境界領域の熱的な相互作用によって決まる。
4. 構造躯体の温度は、セメント系材料の多くの性質（機械的、物理／化学的、核種移行など）に影響を及ぼすことが想定される。
5. 温度は、鉱物－水反応や成分溶出といった化学反応に影響すると考えられる。

評価すべき事象

1. 平衡定数 $\log K$ は、温度の影響を受けると考えられる。

浅地中処分における特記事項

浅地中処分対象となるTRU廃棄物には発熱性廃棄体は含まれていない。また、浅地中処分の対象となる深度では地温による影響も無いと考えられる。

余裕深度処分における特記事項

余裕深度処分対象となるTRU廃棄物には発熱性廃棄体は含まれていない。また、余裕深度処分の対象となる深度では地温による影響も無いと考えられる。

地層処分における特記事項

地層処分の対象となるTRU廃棄物には発熱性のハル・エンドピースがあり、廃棄物の発熱による温度上昇の影響が考えられる。
地層処分の場合、処分深度が数100m以深となることから、地温自体の上昇による影響が考えられる。

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

FEP ID FS31 **FEP 名称** 構造躯体での水理・物質移行

定義

構造躯体領域での水の流れ及び物質の移動による水化学への影響

説明

1. 構造躯体での水理は、構造躯体の水理学的な特性と周囲の水理条件によって決定される。
2. 緩衝材が健全である期間内は構造躯体における物質移行は拡散により支配されると考えられる。
3. コンクリートの透水係数については、ひび割れや打ち継ぎ目等の影響が極めて大きいことがわかっている（コンクリート便覧1996）。
4. コンクリートは地下水との反応などにより変質し、透水係数などの特性が変化することが考えられる。この変質による特性の変化を定量的に予測することは現状困難である。このため、構造躯体が砂程度の状態になっていることを想定して、透水係数等を設定し評価した例がある（日本原燃1990,TRU共同作業チーム 平成12年）。
5. 構造躯体における対流等の水理現象は、溶存成分の移動を生じ、溶質濃度を変化させ、その水化学組成を変化させる可能性がある。
6. 構造躯体における水の移動量はその水中の溶質成分の移動量を変化させる。
7. 水の移動は構造躯体内部のガスの移動の原因となる。また、水の移動の結果として間隙水圧が変わりガスの溶解量が変化する。
8. 隣接部との地下水交換により、構造躯体の水理は隣接部の水理に相互に影響を与え得る。
9. 構造躯体の空隙率、透水係数およびそれらの経時的変化が、構造躯体の水理場に影響する。
10. 水理場の経時的な変化は間隙水中の溶質成分の移動量の変化を生じ、結果として水化学環境の経時的な変化に影響を与える。

評価すべき事象

1. 構造躯体に用いられるコンクリートにおいては、長期的にはセメント成分の溶出による劣化が起こる。その結果、構造躯体領域での水化学環境が影響を受ける。
2. 再冠水により、セメントや鋼材の劣化速度、機構が決定する。また、飽和度の変化に伴い水化学環境が影響を受ける。
3. 地下水の移動に伴い間隙水中に存在する溶存成分の他の領域との移動が生じる。その結果、構造躯体領域での水化学環境が影響を受ける。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

[Redacted]

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

[Redacted]

参考文献

- ・日本原燃株式会社六ヶ所低レベル放射性廃棄物貯蔵センター 廃棄物埋設事業許可申請書 (1990)
- ・TRU共同作業チーム, "TRU廃棄物処分概念検討書 案)(平成 9年度版)"
- ・コンクリート便覧 第二版 コンクリート工学協会 (1996)

FEP ID **FS41** FEP 名称 **構造躯体の特性**

定義

構造躯体の特性による水化学環境への影響

説明

1. セメントモルタルは、セメント、水、砂を基本材料として製作される。また、作業性や耐久性の向上を目的としてAE混和剤や減水剤が使用されるのが一般的である。この混和剤は、多種市販されているが有機系のものが多い。また、水和熱を抑えるためや長期強度を増進する目的でフライアッシュや高炉スラグなどの混和材を用いることも通常よく行われる行為である。
2. ポルトランドセメントと水との水和反応により生成する水和物のうちトモライトと呼ばれる珪酸カルシウム水和物と水酸化カルシウムが最も多い。 (C_3S+C_2S) の量がセメント重量の75%の場合、水酸化カルシウムの生成量は約40%となる。このほか、アルミン酸カルシウム水和物・カルシウム・サルホ・アルミネート水和物などの多くの水和物ができる。樋口他、1983)
3. セメント中にシリカを多量に含むフライアッシュ、高炉スラグ、シリカフェームなどのボゾラン材料を添加した場合、それ自体は可溶性のシリカが、これまた可溶性の水酸化カルシウムとボゾラン反応を起こし、溶けにくいC-S-Hゲルを生成する 荒井,1991)。
4. 廃棄体中のセメント鉱物は地下水との化学反応によりゆっくりと溶解 劣化する。セメント空隙水の重要な特性であるpHは、反応の進展にともない徐々に低下する。これは、セメント鉱物中のCaとSiの溶出が非調和的であり、前者が後者よりも溶脱しやすいことに起因する。
5. セメントの存在により、pH及びイオン強度は高くなると予想される \$KB, 1995)。
6. セメントが長期間、炭酸を含む環境に接すると中性化が生じ 岡田ほか, 1981)、間隙水のpHが低下する 田中ほか, 1997)。
7. 鉄筋はコンクリートの高いpH (約12.6)と大気中酸素との作用により不動態化する。大気中二酸化炭素と水との作用によりpHが約9.5を切れば腐食速度は増大する。また、混練に用いる砂に含まれていた、または打設後外表面からしみ込む塩分があれば、pH低下なしで局部腐食が起こる 腐食防食協会)。
8. 鉄筋コンクリート内の金属の酸化により、酸化還元電位は低下する M.Wiborgh et al., 1995)。

評価すべき事象

1. セメント水和物のうち水酸化カルシウムは易溶性であり、セメントマトリクス中を地下水が通過することにより、地下水中に溶解することが考えられる。さらに、短期的には難溶性と言うことも可能なCSHゲルといった水和物も超長期的には溶解してしまう可能性もある。また、温度は、セメント水和物の溶出過程において影響を与えられられる。海水系地下水に含まれる硫酸塩 $MgSO_4$ は、 $Ca(OH)_2$ との反応により $Mg(OH)_2$ と石膏を生じ、さらにはエトリンガイトを生成する。また塩化物 $MgCl_2$ は、 $Ca(OH)_2$ との反応により $Mg(OH)_2$ と $CaCl_2$ を生成する。生成する石膏や $CaCl_2$ は、可溶性である。日本コンクリート工学協会,1996)
2. セメント成分の影響により、間隙水が長期間高pH環境となる。極初期にはセメント中の遊離アルカリによりpH=13以上になり(TRU共同作業チーム、平成12年)、その後はportlanditeが存在する期間はpH=12.5程度の期間が継続する(A.Atkinson et al. 1989)。
3. 鉄筋の腐食により間隙水中の酸化還元電位は影響を受ける。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

- ・田中知ほか (1997) :放射性廃棄物処分システムにおいてセメントに期待される役割, 日本原子力学会誌, Vol.39, No.12
- ・岡田済, 六車ひろし編 (1981) :改訂新版コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, 591
- ・SKB (1995) :Prestudy of final disposal of long-lived low and intermediate level waste, SKB Technical Report 95-03
- ・樋口芳朗, 村田二郎, 小林春夫(1983) :コンクリート工学(I)施工, 彰国社
- ・荒井康夫(1991) :セメントの材料化学, 大日本図書, pp214-215
- ・日本コンクリート工学協会(1996) :コンクリート便覧 第二版
- ・TRU共同作業チーム(平成12年) : "TRU廃棄物処分概念検討書"
- ・A. Atkinson et al. DOE/RW/89/0251989
- ・Marie Wiborgh, et al. (1995) :Prestudy of final disposal of long-lived low and intermediate level waste, SKB Technical Report 95-03.
- ・腐食防食協会編 :金属の腐食 防食Q&A, 丸善株式会社

FEP ID FS51 **FEP 名称** 構造躯体でのガス

定義

廃棄体、充填材及び緩衝材からの移行または構造躯体で発生したガスによる水化学環境への影響

説明

1. TRU廃棄体におけるガス発生機構としては金属の腐食、有機物の微生物分解、水の放射線分解があげられる。(TRU共同作業チーム、平成12年)
2. ガス発生によるバリア機能への影響として、ガス発生に係る反応による溶存化学物質の消費と生成による水化学の変化等が考えられる。(TRU共同作業チーム、平成12年)
3. 放射線分解によるガス発生
放射線分解によるガスの発生は他の機構と比較して微小である。(Nagra,1986 ; NIREX,1988 ; Norris,1997 ; SKB,1995)
4. 廃棄物に含まれる様々な有機成分が微生物によって分解され、ガスが発生する。有機物は微生物に炭素源として利用され、様々な無機成分 分子酸素、硝酸、硫酸塩または炭酸塩は酸化剤として利用される可能性がある (M.Wiborgh,et al., 1995)。

評価すべき事象

1. ガスが発生することにより、ガス成分組成及び水中の溶解量に変化し、間隙水の水化学組成が変化する。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

- TRU共同作業チーム(平成12年),"TRU廃棄物処分概念検討書"
 Nagra, NTB 85-17 (1986)
 NIREX, NSS/G104 (1988)
 S.Norris, et, al., An Assessment of the Post-closure Performance of Deep Waste Repository at Sellafield, Overview, S/97/012 (1997)
 SKB, Prestudy of final disposal of long-lived low and intermediate level waste. TR 95-03 (1995).

Marie Wiborgh, et al. (1995) Prestudy of final disposal of long-lived low and intermediate level waste, SKB Technical Report 95-03.

FEP ID **FS61** **FEP 名称** **構造躯体での微生物**

定義

構造躯体領域における微生物活動による水化学環境への影響

説明

1. 微生物が活動することによって、還元反応が起こったり、CO₂、硫化物、酸、キレートが生成する。
これらの生成物によって、pHやEhが変化し、核種の溶解度などが変化し、結果的に核種の移行を促進、あるいは抑制することとなる。これらの効果は、深度が浅く、栄養分の多い環境下では起こりうる。(S.Stroes-Gascoyne, and J.M.West,1994)
2. 硫酸酸化菌は硫酸を生成し、金属の腐食や核種収着性に影響を及ぼす。硫酸酸化細菌は、酸素の存在で活動する。(S.Stroes-Gascoyne,1989,G.P.Marsh 1986)
2. 不飽和状態では、鉄酸化細菌、イオウ酸化細菌等の好気性細菌が、飽和段階では、硫酸塩還元菌等の嫌気性細菌が活性となり得る。核燃料サイクル開発機構, 1999)

評価すべき事象

1. 硫酸塩還元菌による酸化種の生成、酸化還元反応の加速など、微生物の活動に起因した水化学環境への影響の可能性がある。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

- S.Stroes-Gascoyne, and J.M.West : "MICROBIAL ISSUES PERTAINING TO THE CANADIAN CONCEPT FOR THE DISPOSAL OF NUCLEAR FUEL WASTE", AECL-10808, (1994)
- G.P.Marsh, I.D.Bland et al. : "An Assessment of carbon steel overpacks for radioactive waste disposal", CEC, EUR 10437 EN, (1986)
- S.Stroes-Gascoyne : "THE POTENTIAL FOR MICROBIAL LIFE IN A CANADIAN HIGH-LEVEL NUCLEAR FUEL WASTE DISPOSAL VAULT: A NUTRIENT AND ENERGY SOURCE ANALYSIS", AECL-9574, (December 1989)
- 核燃料サイクル開発機構 地層処分研究開発第2次取りまとめ, (1999)

FEP ID **FS71** FEP 名称 **構造躯体での有機物**

定義

構造躯体に含まれる有機物の形態や挙動による水化学環境に対する影響

説明

1. 充填材はセメント系材料から構成されていると想定すると、当該領域で考慮すべき有機物は、隣接する領域からの物質移動によって流入する有機物か、あるいはセメント系材料の施工に用いられる減水剤である。
2. セメント系材料を施工する場合には、その流動性を高めるために減水剤が用いられる。減水剤の種類は大別すると、
 - ・リグニンスルホン酸系
 - ・ナフタレンスルホン酸系
 - ・メラニン樹脂スルホン酸系
 - ・ポリカルボン酸系
 になり、いずれも有機物である。
3. セルロースはアルカリ環境で分解しやすく、カルボン酸等が生成するが、近年の研究では、イソサッカリン酸が錯生成の観点では最も重要な分解生成物であることが判明しつつある。
4. イソサッカリン酸 (ISA) は弱酸であり、高アルカリ環境ではほぼ完全に電離してISA-イオンとして存在する。ISA-イオンはCa²⁺と反応して沈殿する (Whistler, R.L. and BeMiller, J.N., 1963)。

$$\text{Ca}(\text{ISA})_2 = \text{Ca}^{2+} + 2\text{ISA}^- \quad K_s = -6.22 \pm 0.03$$
5. 上記塩の溶解平衡で決まるISA濃度は、セメント間隙水では0.05～0.1Mであり、遊離ISA濃度への沈殿生成の影響はない (TRU共同作業チーム, 平成12年)。
6. 有機物の劣化により酸性の生成物、例えば、二酸化炭素や低分子量の有機酸等が生成され、間隙水性状を酸性側にシフトさせる傾向がある (NIREX, 1997)。
7. 微生物分解あるいは放射線分解により、メタンや二酸化炭素が生成される可能性がある。

評価すべき事象

1. 有機物あるいはその分解生成物が存在することによって、間隙水性状 (特に、TOC、炭酸濃度等、カーボンに関する性状) が変化する。
2. 主に木材や紙といったセルロース材の微生物分解により、メタンや二酸化炭素が生成される可能性がある (NIREX, 1997 b)。
3. 有機物は放射線により分解する。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項



水化学環境により影響を受ける評価パラメータ



参考文献

・TRU共同作業チーム(平成12年),"TRU廃棄物処分概念検討書"
Whistler,R.L. and BeMiller,J.N.(1963)," α -D-Isosaccharino-1,4-lactone: Action of
Lime Water on Lactose, In Methods in Carbohydrate Chemistry", Vol.II, Reactions of
Carbohydrates
NIREX (1997) NIREX 97:An assessment of the post-closure performance of a deep
waste repository at Sellafield - Volume 3:The groundwater pathway -, NIREX
SCIENCE REPORT S/97/012
NIREX (1997) NIREX 97:An assessment of the post-closure performance of a deep
waste repository at Sellafield - overview -, NIREX SCIENCE REPORT S/97/012

FEP ID

FS81

FEP 名称

構造躯体での核種の崩壊・生成

定義

構造躯体中での放射性核種の崩壊に際して放出される放射線による水化学環境に対する影響

説明

1. 放射性核種の壊変により、放射線分解が起こることが考えられる。
2. 放射線分解において、水素と酸化種が等量ずつ生成するが、処分環境の温度条件下においては水素は相対的に反応が鈍く、さらに酸素などの酸化種よりも高い拡散性を有している (Ross, 1989)。この水素が気体として或いは水に溶けて拡散することにより、過酸化水素などの酸化種よりも速く失われることが想定され、正味の酸化性雰囲気が生じる (Christensen, et al., 1982)。
3. 地下水に溶存している窒素や二酸化炭素の放射線分解についても、pHを大きく減少させる結果となる (McVay, et al., 1981)。
4. TRUレポートにおける検討によると、処分場閉鎖直後は酸化性雰囲気であるが、1E+7年後には地下水と同程度のEhにまで低下するという結果を得た。これは、還元性地下水の流入による還元種の供給量が、水の放射線分解による酸化種の生成量を上回ることによる。TRU共同作業チーム、平成12年)。
5. 長期的には、処分場条件は地下水によって運ばれる酸化種と γ 線による放射線分解によって生成する酸化種によって規定される (AECL, 1994)。
6. α 線による放射線分解で生成する水素は化学的に不活性でニアフィールドから直ちに喪失し、酸素は反応的である (Nagra, 1994)。

評価すべき事象

1. 放射線分解による酸化種の生成により、水化学が変化する。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

Ross B.(ed.) (1989) Methods of Calculating the Post-closure Performance of High-level Waste Repositories, Prepared by Disposal Safety, Inc. for Pacific Northwest Laboratory under Contract DE-AC06-76RLO 1830 with U.S. Department of Energy, PNL-6608 UC-510.

Christensen H, Bjergbakke E (1982) Radiolysis of Groundwater from HLW Stored in Spent Fuel, KBS TR 82-18.

McVay G L, Pederson L R (1981) Effect of Gamma Radiation on Glass Leaching. J. Am. Ceramic Soc., 64, pp.154-158.

TRU共同作業チーム(平成12年),"TRU廃棄物処分概念検討書"

AECL (1994) The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste: The Vault Model for Postclosure Assessment, AECL-10714,COG-93-4.

Nagra (1994) Kristallin-I Safety Assessment Report NTB TR 93-22)

添付 4

記述した緩衝材領域に関する FEP

FEP ID	FB11	FEP 名称	緩衝材での水化学
---------------	-------------	---------------	----------

定義

緩衝材間隙水の性状 (pH、Eh、イオン強度、共存イオン濃度等) とその挙動。

説明**緩衝材の変質**

1. 緩衝材として用いられるベントナイトはNa型モンモリロナイトを約50%含んでおり、カルサイト、石英、長石、沸石、トロマイト、パイライト、雲母などを含む。
2. モンモリロナイトは微細な層状構造を持つケイ酸塩鉱物で(Nagra 1994)、層間に交換性陽イオンを持つ。クニゲルV1はNa型モンモリロナイトであり、相間のNaが他の陽イオンとイオン交換することにより空隙水組成に影響を与える(TRU共同作業チーム 1997)。
3. ベントナイト中に随伴する黄鉄鉱の酸化還元反応により還元状態が維持されることが期待される。黄鉄鉱の酸化は処分場の閉鎖後に起こる酸素消費プロセスのうち支配的なものであり、無酸素状態に戻るまで10-100年の期間を要すると考えられる(Wersin P et al. 1994)。コンクリート層中の鉄筋等からの鉄イオンの供給も還元環境の維持に寄与すると考えられる。
4. 既往の研究では、セメント成分の浸入や不純物のカルサイトの溶解を考慮した物質移行・化学反応連成解析によるモデル化が行われている(TRU共同作業チーム 1997)。
5. 充填材や構造躯体には多量のセメントが用いられる可能性が大きいいため、緩衝材での水化学はセメント成分の浸出による高アルカリ環境によって大きな影響を受ける。高pH環境の長期間の継続は緩衝材の変質を促すといわれている。

還元性雰囲気と酸化性雰囲気

6. ベントナイト中に随伴する黄鉄鉱の酸化還元反応により還元状態が維持されることが期待される。黄鉄鉱の酸化は処分場の閉鎖後に起こる酸素消費プロセスのうち支配的なものであり、無酸素状態に戻るまで10-100年の期間を要すると考えられる(Wersin P et al. 1994)。コンクリート層中の鉄筋等からの鉄イオンの供給も還元環境の維持に寄与すると考えられる。
7. 水の放射線分解によって酸化種が生成され、人工バリア領域が長期にわたって酸化性雰囲気になる可能性がある。しかし、鉄の酸化速度を変化させて、酸化性雰囲気から還元性雰囲気への復帰年数を計算した結果、TRU廃棄物処分施設においては放射線の影響により長期的に酸化性雰囲気が保たれることは無いと考えられる(TRU共同作業チーム 1997)。

評価すべき事象

1. 温度によって安定度定数、溶解度積等の熱力学データは変化することから、温度によって間隙水性状は変化することとなる。一方、間隙水の pH、イオン強度等によって熱伝導率のような物理定数が変化することが考えられるため、水化学によって温度も影響を受けることとなる。【温度による影響】
2. 間隙水中の溶存成分は人工バリア内を移動する（拡散または移流・分散）ことによって、その空間分布を変化させる。【物理・物質移行による影響】
3. 深部地下水は一般に還元性雰囲気にあると考えられるが、再冠水時には、坑道掘削時に導入された酸素の影響によって過渡的に酸化性雰囲気が形成される可能性がある。【物理・物質移行による影響】
4. 水の放射線分解で生成される酸化種によって局所的に酸化性雰囲気が形成される可能性がある。これについては、鉄の酸化速度をパラメータとして、水の放射線分解によって生じる酸化種の影響を評価した結果、鉄の酸化が遅い場合でも、数百年でEhがマイナスとなり、長期的に酸化性雰囲気が保たれることはないという報告がある(TRU共同作業チーム 1997)。【核種の崩壊・生成による影響】
5. 人工バリア材として用いられる材料は、処分環境下において必ずしも熱力学的に安定なものではなく、金属や有機物のように比較的早期に分解・腐食したり、セメントやベントナイトのように長期的に緩慢に変質する。このような人工バリア材特性の変化を伴う現象は、間隙水性状によって影響を受けるとともに、新たな溶存成分の導入によって間隙水性状に影響を及ぼす。【種々の材料の特性による影響】

6. 緩衝材中の主要成分であるベントナイトはCa化、イライト化、ゼオライト化、クロライト化、セメンテーション等の変質を生じる可能性があり、その結果、緩衝材中での水化学環境に影響を及ぼす可能性がある。緩衝材の特性による影響】

7. 緩衝材中には、有機物が存在しており、微生物活動などによりガスが発生する。発生したガスが境界領域中に移行する。気液平衡による間隙水性状とガスとの相互影響がある。【ガスによる影響】

8. セメント成分の影響による高pH、低Eh環境下においては微生物(硫黄酸化細菌、硫酸塩還元菌及びメタン生成細菌)は活動が停止しそうであることが示された。しかし、pHの低下に伴って微生物の活動による酸の生成、酸化還元状態の変化(S.Stroes-Gascoyne 1989)といった水化学に及ぼす影響があり得る(TRU共同作業チーム 1997)。微生物による影響】

9. 緩衝材中にも微量の有機物が存在する一方、隣接する領域との有機物交換によって、緩衝材領域でも有機物が存在しうる。間隙水性状が有機物の分解に影響を及ぼす一方、有機物が溶存することで間隙水中のTOC、炭酸濃度等が影響を受ける。有機物の影響】

10. セメント成分の影響により、緩衝材間隙水中が長期間高pH環境となる。高pH環境により、核種の溶解度、分配係数、緩衝材の変質挙動、微生物の活動が影響を受ける。構造躯体の水化学による影響】

11. TRU廃棄物中には硝酸塩を大量に含む廃棄体が存在しており、空隙水中の硝酸イオン濃度が硝酸ナトリウムの溶解度に相当する高濃度になる可能性がある。構造躯体の水化学による影響】

浅地中処分における特記事項

温度影響】

浅地中処分対象となるTRU廃棄物には発熱性廃棄体は含まれていない。また、浅地中処分の対象となる深度では地温による影響も無いと考えられる。

水理・物質移行による影響】

地下水面より上部の処分施設となった通気層処分の可能性がある。

余裕深度処分における特記事項

温度影響】

余裕深度処分対象となるTRU廃棄物には発熱性廃棄体は含まれていない。また、余裕深度処分の対象となる深度では地温による影響も無いと考えられる。

水理・物質移行による影響】

通気層処分の可能性は少ないと考えられる。

地層処分における特記事項

温度影響】

地層処分の対象となるTRU廃棄物には発熱性のハル・エンドピースがあり、廃棄物の発熱による温度上昇の影響が考えられる。

地層処分の場合、処分深度が数100m以深となることから、地温自体の上昇による影響が考えられる。

水理・物質移行による影響】

通気層処分の可能性はない。

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

<溶解度>

溶存成分との錯体の形成やpH、Eh等により核種の存在形態が変化し、核種の溶解度が影響を受ける。

<分配係数>

溶存成分との錯体の形成やpH、Eh等により核種の存在形態が変化し、核種の分配係数が影響を受ける。

地下水との接触により吸着固相の変質が生じ、分配係数が影響を受ける。また、吸着固相の変化は接触する地下水成分により影響を受ける。

<空隙率>

地下水との接触により固相の変質が生じ、その結果、空隙率の変化が生じる。
<透水係数>
地下水との接触により生じる空隙率の変化により透水係数が影響を受ける。空隙率の変化は地下水成分により影響を受ける。
<拡散係数>
核種の存在形態により拡散係数は変化する。核種の存在形態は地下水環境により影響を受ける。
地下水との接触により生じる空隙率の変化により拡散係数は変化する。空隙率の変化は地下水成分により影響を受ける。
<密度>
地下水との接触による固相の変質により、密度の変化が生じる。

参考文献

・TRU共同作業チーム(平成12年),"TRU廃棄物処分概念検討書"
・Nagra : "Kristallin-1 Safety Assessment Report", Technical report 93-22, (1994)
・Wersin P. et al : "Time evolution of oxygen and redox conditions in a HLW repository"
・SKB Technical report TR 95-13, (1994)
・S.Stroes-Gascovne AECL-9574, (1989)

FEP ID FB21 **FEP 名称** 緩衝材の温度

定義

1. 緩衝材領域の温度、あるいは温度変化による水化学への影響

説明

1. 緩衝材の温度は主に廃棄体にて発生する崩壊熱が充填材、構造躯体を介して到達する事によって上昇し、境界領域を介して発散することにより下降する。
2. また、緩衝材領域の温度は境界領域（ニアフィールド母岩）の温度（地熱）により影響を受ける。
3. 緩衝材の温度は、廃棄体、充填材、構造躯体、緩衝材、境界領域の熱的な相互作用によって決まる。
4. 温度は、鉱物-水反応や成分溶出といった化学反応に影響すると考えられる。

評価すべき事象

1. 平衡定数 (6gK) は、温度の影響を受けると考えられる。

浅地中処分における特記事項

浅地中処分対象となるTRU廃棄物には発熱性廃棄体は含まれていない。また、浅地中処分の対象となる深度では地温による影響も無いと考えられる。

余裕深度処分における特記事項

余裕深度処分対象となるTRU廃棄物には発熱性廃棄物には含まれていない。また、余裕深度処分の対象となる深度では地温による影響も無いと考えられる。

地層処分における特記事項

地層処分の対象となるTRU廃棄物には発熱性のハル・エンドピースがあり、廃棄物の発熱による温度上昇の影響が考えられる。
地層処分の場合、処分深度が数100m以深となることから、地温自体の上昇による影響が考えられる。

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

FEP ID	FB31	FEP 名称	緩衝材での水理・物質移行
---------------	-------------	---------------	--------------

定義

緩衝材領域での水の流れ及び物質の移動による水化学への影響

説明

1. 緩衝材中の水分は、廃棄体定置の時点では、施工を行う上で適切な含水率(不飽和状態)であり、やがて間隙が地下水で満たされた状態(飽和状態)になる。このため、これら両方の状態における水理がある(動燃事業団, 1998)。
2. ベントナイトは高い止水性を有し、緩衝材より内側を拡散支配とする。ベントナイトの透水係数は、乾燥密度が大きくなると小さくなり、乾燥密度 1.8g/cm^3 で $1\text{e-}13\text{m/s}$ オーダーの良好な止水性を有する(動燃事業団1992)。
3. ベントナイトのCa化、イライト化、ゼオライト化、クロライト化、セメンテーション等により透水係数や拡散係数が変化し溶質の移動量が変化する可能性がある。
4. 間隙水のイオン強度が増加すると共に、止水性が低下する(動燃事業団 1996)。
5. 地下水の移動は溶存成分の移動を生じ、溶質濃度を変化させ、その水化学組成を変化させる可能性がある。
6. 地下水流はその水中の溶質成分の移動量を変化させる。
7. 隣接部との地下水交換により、緩衝材の水理は隣接部の水理に相互に影響を与え得る。
8. 通常の緩衝材中の地下水の流れは岩盤中の流れに比べて非常に小さい。
9. 水理場の経時的な変化は間隙水中の溶質成分の移動量の変化を生じ、結果として水化学環境の経時的な変化に影響を与える。

評価すべき事象

1. ベントナイトはイオン交換反応や、鉱物の変化に伴い、Ca化、イライト化、ゼオライト化、クロライト化、セメンテーションといった変質が起こり、止水性や拡散係数が変化する。その結果、緩衝材領域での水化学環境が影響を受ける。
2. 再冠水により、ベントナイトの間隙が飽和し、ベントナイトの膨潤が生じる。また、飽和度の変化に伴い水化学環境が影響を受ける。
3. 地下水の移動に伴い間隙水中に存在する溶存成分の他の領域との移動が生じる。その結果、緩衝材領域での水化学環境が影響を受ける。

浅地中処分における特記事項**余裕深度処分における特記事項****地層処分における特記事項**

[Redacted]

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

[Redacted]

参考文献

・"地層処分開発の現状 H8年度" 動燃事業団(1996)

FEP ID

FB41

FEP 名称

緩衝材の特性

定義

緩衝材の特性による水化学環境への影響

説明

1. ベントナイトはCa化、イライト化、ゼオライト化、クロライト化、セメンテーション等の変質を生じる可能性がある。この変質反応により水化学環境が変化する。
2. ベントナイトの主成分はモンモリロナイト(クニゲルV1の場合で、約50%)で、不純物として石英、長石、カルサイト、沸石、トロマイト、パイライト、雲母等を含む(動燃事業団、平成4年、伊藤ら1994)。
3. モンモリロナイトは微細な層状結晶構造を持つケイ酸塩鉱物で、層間に交換性陽イオンを持つ。この交換性陽イオンがNaの場合、Naモンモリロナイトと呼ばれ、これを主成分とするベントナイトがNaベントナイトである。
4. ベントナイトは地下水との反応により、層間イオンの交換や不純物として含まれる鉱物の溶解反応などにより水化学環境を変化させる。また、モンモリロナイト鉱物の結晶端における酸-塩基反応によっても水化学環境は変化する。(核燃料サイクル開発機構、1999)
5. ベントナイトの変質(Ca化、イライト化、ゼオライト化、クロライト化、セメンテーション)により、緩衝材の見かけ密度、空隙率が変化する可能性がある。

評価すべき事象

1. 緩衝材中の主要成分であるベントナイトは層間イオンの交換によるCa化や鉱物変質によるイライト化、ゼオライト化等の変質を生じる可能性がある。この結果、緩衝材中での水化学環境に影響を及ぼす。
2. 緩衝材中に含まれる随伴鉱物は地下水との接触により鉱物反応を生じ、その結果、緩衝材中での水化学環境に影響を及ぼす。
3. TRU処分施設は多量のセメントを用いるため、セメントと反応した高pHの地下水との接触により緩衝材の変質、特にゼオライト化を加速する。
4. TRU処分施設には、ビチューメン固化体から溶出した硝酸塩等の塩類が多量に存在する。その塩類の存在により、緩衝材の変質等が影響を受ける可能性があり、その結果、水化学環境に影響を及ぼす。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

- ・核燃料サイクル開発機構 地層処分研究開発第2次取りまとめ, (1999)
- ・動燃事業団(平成4年) 高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書, PNC/TN/1410/92-081
- ・伊藤、岡本他(1994) "ベントナイトの鉱物組成分析" 日本原子力学会誌36(11)pp.63-66

FEP ID **FB51** **FEP 名称** **緩衝材でのガス**

定義

構造躯体からの移行又は緩衝材中で発生したガスによる水化学環境への影響

説明

1. TRU廃棄体におけるガス発生機構としては金属の腐食、有機物の微生物分解、水の放射線分解があげられる。(TRU共同作業チーム、平成12年)
2. ガス発生によるバリア機能への影響として、ガス発生に係る反応による溶存化学物質の消費と生成による水化学の変化等が考えられる。(TRU共同作業チーム、平成12年)
3. 放射線分解によるガス発生
放射線分解によるガスの発生は他の機構と比較して微小である。(Nagra,1986 ; NIREX,1988 ; Norris,1997 ; SKB,1995)
4. 廃棄物に含まれる様々な有機成分が微生物によって分解され、ガスが発生する。有機物は微生物に炭素源として利用され、様々な無機成分 分子酸素、硝酸、硫酸塩または炭酸塩)は酸化剤として利用される可能性がある M.Wiborgh,et al, 1995)。
5. ベントナイト中には不純物として硫化物が存在し、硫酸塩還元菌により水素ガスが発生する (動燃事業団,平成4年)。

評価すべき事象

1. ガスが発生することにより、ガス成分組成及び水中の溶解量が変化し、間隙水の水化学組成が変化する。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

TRU共同作業チーム(平成12年),"TRU廃棄物処分概念検討書"
Nagra, NTB 85-17 (1986)
NIREX, NSS/G104 (1988)
S.Norris, et, al., An Assessment of the Post-closure Performance of Deep Waste

Repository at Sellafield, Overview, S/97/012 (1997)
• SKB, Prestudy of final disposal of long-lived low and intermediate level waste. TR 95-03 (1995).
• Marie Wiborgh, et al. (1995) Prestudy of final disposal of long-lived low and intermediate level waste, SKB Technical Report 95-03.
• 動燃事業団(平成 4 年), "高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書", (PNC/TN/1410/92-081)

FEP ID **FB61** **FEP 名称** **緩衝材での微生物**

定義

緩衝材領域における微生物活動による水化学環境への影響

説明

1. 処分場の緩衝材中では環境条件も極端で、栄養分やエネルギーも十分には得られないであろう。(S.Stroes-Gascoyne, and J.M.West,1994)
2. 硫酸化菌によって生成した硫酸や金属酸化物の触媒作用によって、地下水の pH 及び Eh は変化し、核種の溶解度に影響を及ぼす。(S.Stroes-Gascoyne,1989)
3. 微生物が活動することによって、還元反応が起こったり、CO₂、硫化物、酸、キレートが生成する。
これらの生成物によって、pH や Eh が変化し、核種の溶解度などが変化し、結果的に核種の移行を促進、あるいは抑制することとなる。これらの効果は、深度が浅く、栄養分の多い環境下では起こりうる。(S.Stroes-Gascoyne, and J.M.West,1994)
4. 不飽和状態では、鉄酸化細菌、イオウ酸化細菌等の好気性細菌が、飽和段階では、硫酸塩還元菌等の嫌気性細菌が活性となり得る。核燃料サイクル開発機構, 1999)

評価すべき事象

1. 硫酸塩還元菌による酸化種の生成、酸化還元反応の加速など、微生物の活動に起因した水化学環境への影響の可能性がある。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

- S.Stroes-Gascoyne, and J.M.West : "MICROBIAL ISSUES PERTAINING TO THE CANADIAN CONCEPT FOR THE DISPOSAL OF NUCLEAR FUEL WASTE", AECL-10808, (1994)
核燃料サイクル開発機構 地層処分研究開発第 2 次取りまとめ, (1999)
S.Stroes-Gascoyne : "THE POTENTIAL FOR MICROBIAL LIFE IN A CANADIAN HIGH-LEVEL NUCLEAR FUEL WASTE DISPOSAL VAULT: A NUTRIENT AND ENERGY SOURCE ANALYSIS", AECL-9574, (December 1989)

FEP ID **FB71** **FEP 名称** **緩衝材での有機物**

定義

緩衝材領域に含まれる有機物の形態や挙動による水化学環境に対する影響

説明

1. ベントナイトは不純物として微量の有機物を含むが、TRU処分場における緩衝材中の有機物は、そのほとんどが廃棄体起源のものである。
2. 脱塩水にベントナイトを浸漬して、上澄液の TOC (全有機炭素) 濃度を測定したところ、5日後で、30℃、50℃、70℃においてそれぞれ5.7mg/l、6.9mg/l、9.2mg/l検出された。5日後の30℃、70℃の上澄液からは、1.7mg/l、2.8mg/lの酢酸が検出された (福永ほか,1993)。
3. カナダの核燃料廃棄物処分ボールドにおける緩衝材中の天然有機炭素は、既に長期安定性を示しているため、劣化することはないと思われる。緩衝材中の有機炭素は、0.31重量%である (Stores-Gascoyne, S. et al., 1997)。
4. セルロースはアルカリ環境で分解しやすく、カルボン酸等が生成するが、近年の研究では、イソサッカリン酸が錯生成の観点では最も重要な分解生成物であることが判明しつつある。
5. イソサッカリン酸 (ISA) は弱酸であり、高アルカリ環境ではほぼ完全に電離してISA-イオンとして存在する。ISA-イオンはCa²⁺と反応して沈殿する (Whistler, R.L. and BeMiller, J.N., 1963)。

$$\text{Ca}(\text{ISA})_2 = \text{Ca}^{2+} + 2\text{ISA}^- \quad K_s = -6.22 \pm 0.03$$
6. 上記塩の溶解平衡で決まるISA濃度は、セメント間隙水では0.05～0.1Mであり、遊離ISA濃度への沈殿生成の影響はない (TRU共同作業チーム, 平成12年)。
7. 有機物の劣化により酸性の生成物、例えば、二酸化炭素や低分子量の有機酸等が生成され、間隙水性状を酸性側にシフトさせる傾向がある (NIREX, 1997)。
8. 微生物分解あるいは放射線分解により、メタンや二酸化炭素が生成される可能性がある。

評価すべき事象

1. 有機物あるいはその分解生成物が存在することによって、間隙水性状 (特に、TOC、炭酸濃度等、カーボンに関する性状) が変化する。
2. 主に木材や紙といったセルロース材の微生物分解により、メタンや二酸化炭素が生成される可能性がある (NIREX, 1997)。
3. 有機物は放射線により分解する。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

- ・TRU共同作業チーム(平成12年),"TRU廃棄物処分概念検討書"
- ・Whistler,R.L. and BeMiller,J.N.(1963)," α -D-Isosaccharino-1,4-lactone: Action of Lime Water on Lactose, In Methods in Carbohydrate Chemistry", Vol.II, Reactions of Carbohydrates
- ・NIREX (1997) NIREX 97:An assessment of the post-closure performance of a deep waste repository at Sellafield - Volume 3:The groundwater pathway -, NIREX SCIENCE REPORT S/97/012
- ・NIREX (1997) NIREX 97:An assessment of the post-closure performance of a deep waste repository at Sellafield - overview -, NIREX SCIENCE REPORT S/97/012
- ・福永ほか(1993),"硫酸塩還元細菌の極限環境適応能力と腐食関与(放射性廃棄物処分容器の長期健全性評価 8)",腐食防食講演集
- ・Stores-Gascoyne,S. et al.(1997)," Change in Bioavailability of Nutrients (Organic Matter) associated with Clay-Based Buffer Materials as a Result of Heat and Radiation Treatment" .PB Reports

FEP ID **FB81** **FEP 名称** 緩衝材での核種の崩壊・生成

定義

緩衝材中での放射性核種の崩壊に際して放出される放射線による水化学環境に対する影響

説明

1. 放射性核種の壊変により、放射線分解が起こることが考えられる。
2. 放射線分解において、水素と酸化種が等量ずつ生成するが、処分環境の温度条件下においては水素は相対的に反応が鈍く、さらに酸素などの酸化種よりも高い拡散性を有している (Ross, 1989)。この水素が気体として或いは水に溶けて拡散することにより、過酸化水素などの酸化種よりも速く失われることが想定され、正味の酸化性雰囲気が生じる (Christensen, et al., 1982)。
3. 地下水に溶存している窒素や二酸化炭素の放射線分解についても、pHを大きく減少させる結果となる (McVay, et al., 1981)。
4. TRUレポートにおける検討によると、処分場閉鎖直後は酸化性雰囲気であるが、1E+7年後には地下水と同程度のEhにまで低下するという結果を得た。これは、還元性地下水の流入による還元種の供給量が、水の放射線分解による酸化種の生成量を上回ることによる。TRU共同作業チーム、平成12年)。
5. 長期的には、処分場条件は地下水によって運ばれる酸化種と、 γ 線による放射線分解によって生成する酸化種によって規定される (AECL, 1994)。
6. α 線による放射線分解で生成する水素は化学的に不活性でニアフィールドから直ちに喪失し、酸素は反応的である (Nagra, 1994)。

評価すべき事象

1. 放射線分解による酸化種の生成により、水化学が変化する。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

Ross B.(ed.) (1989) Methods of Calculating the Post-closure Performance of High-level Waste Repositories, Prepared by Disposal Safety, Inc. for Pacific Northwest Laboratory under Contract DE-AC06-76RLO 1830 with U.S. Department of Energy, PNL-6608 UC-510.

Christensen H, Bjergbakke E (1982) Radiolysis of Groundwater from HLW Stored in Spent Fuel, KBS TR 82-18.

McVay G L, Pederson L R (1981) Effect of Gamma Radiation on Glass Leaching, J. Am. Ceramic Soc., 64, pp.154-158.

・TRU共同作業チーム(平成12年),"TRU廃棄物処分概念検討書"

・AECL (1994) The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste: The Vault Model for Postclosure Assessment, AECL-10714,COG-93-4.

・Nagra (1994) Kristallin-I Safety Assessment Report NTB TR 93-22)

添付 5

記述したニアフィールド母岩領域に関する FEP

FEP ID **FN11** **FEP 名称** **ニアフィールド母岩での水化学**

定義

ニアフィールド母岩での間隙水の性状 (pH, Eh, イオン強度、共存イオン濃度等) とその挙動。

説明

境界領域と地下水との相互作用

1. 境界領域に浸入する地下水は、ニアフィールド母岩の岩種と、地下水が降水起源であるか海水起源であるかによって大きく異なる。
2. 境界領域は、緩衝材と直接接しており、境界領域に施工される支保、プラグ、及びグラウトには、セメント、鋼材、及びベントナイトが使用される。これらの材料や母岩が、地下水と相互作用して水化学に影響を与える可能性がある。しかし、現時点では、具体的な施工法や材料が決定しているわけではなく、Kristallin-Iにおいてもニアフィールド母岩の地下水化学を定量的に取り扱っていない。

還元雰囲気と酸化性雰囲気

4. 境界領域に浸入する深部地下水は、一般に還元性であると考えられている。表層の酸化性地下水は地層（あるいは土壌）中を移動する間に、一般に溶存酸素は有機物の分解のために消費されて減少し、窒素や水素、メタンは有機物の脱窒素作用により増加する（動燃事業団 1992）。割れ目や断層中は粘土鉱物により充填されているのが普通であり、粘土鉱物と地下水間のイオン交換反応が地下水の還元性の形成に寄与している（Iwatsuki and Yoshida 1998(in press)）。
5. 坑道の掘削に伴い、空気が周辺母岩に侵入し、閉鎖後、間隙水が一時的に酸化性となる可能性がある。酸素は、ベントナイト中の黄鉄鉱や、鋼材の腐食生成物によって消費され、元の還元性地下水に変化する（動燃事業団 1992, Nagra 1994）。

高pH影響

6. TRU廃棄物処分場では、セメント系材料が大量に使用される可能性がある（TRU共同作業チーム 1997）。Northern JordanのMaqarinにおける高pH地下水と岩石（石灰岩）の反応のナチュラアナログ（H.N.Khoury et al. 1992, Nagra 1992）が実施されており、アルカリ-岩反応の2次生成物として、CSHゲルが観察されたこと、微生物活動への影響があること、コロイド生成への寄与があることが報告されている。
7. Sellafieldに存在する鉱物と高pH地下水との反応試験を実施した結果、鉱物の溶解速度の増加が観察された。また、生成する支配的な2次鉱物としてCSHが生成しており、硫酸イオンが存在するとettringiteも観察された。これら実験データから、岩-高pH地下水反応のモデル化が行われている（A.J.Baker et al. 1996）。

評価すべき事象

1. 温度によって安定度定数、溶解度積等の熱力学データは変化することから、温度によって間隙水性状は変化することとなる。一方、間隙水の pH、イオン強度等によって熱伝導率のような物理定数が変化することが考えられるため、水化学によって温度も影響を受けることとなる。【温度による影響】

2. 間隙水中の溶存成分は人工バリア内を移動する（拡散または移流・分散）ことによって、その空間分布を変化させる。【水理・物質移行による影響】

3. 酸化性雰囲気の過渡的・局所的形成

深部地下水は一般に還元性雰囲気にあると考えられるが、再冠水時には、坑道掘削時に導入された酸素の影響によって過渡的に酸化性雰囲気が形成される可能性がある。【水理・物質移行による影響】

4. 水の放射線分解で生成される酸化種によって局所的に酸化性雰囲気が形成される可能性がある。これについては、鉄の酸化速度をパラメータとして、水の放射線分解によって生じる酸化種の影響を評価した結果、鉄の酸化が遅い場合でも、数百年でEhがマイナスとなり、長期的に酸化性雰囲気が保たれることはないという報告がある（TRU共同作業チーム 1997）。核種の崩壊・生成による影響】

5. 人工バリア材として用いられる材料は、処分環境下において必ずしも熱力学的に安定なものではなく、金属や有機物のように比較的早期に分解・腐食したり、セメントやベントナイトのように長期的に緩慢に変質する。このような人工バリア材特性の変化を

伴う現象は、間隙水性状によって影響を受けるとともに、新たな溶存成分の導入によって間隙水性状に影響を及ぼす。種々の材料の特性による影響】

6. 支保、プラグ、グラウト材料としてセメントが用いられるが、長期的にはセメント成分の溶出による劣化が起こる。力学的、化学的強度は期待できなくなり、強度、止水性を喪失する。

その他に、セメント成分の劣化としては、硫酸塩による浸食、中性化（炭酸化）、鉄筋の腐食によるひび割れの発生等がある。支保、プラグ、グラウトの特性による影響】

7. プラグなどに使用されるベントナイトはCa化、イライト化、ゼオライト化、クロライト化、セメンテーション等の変質を生じる可能性があり、その結果、緩衝材中での水化学環境に影響を及ぼす可能性がある。支保、プラグ、グラウトの特性による影響、埋め戻し材の特性による影響】

8. 支保部材として鋼材が用いられるが、鋼材は酸素による腐食、水の還元による腐食、及びバクテリアによる腐食によって腐食し、腐食生成物を生じる。その際、腐食に伴い体積が増加する。支保、プラグ、グラウトの特性による影響】

9. 掘削に伴い、新たな亀裂を生じたり、空隙内に侵入した酸素が鉱物を酸化させる（動燃事業団 1998）。また、セメント成分と岩の反応も考えられる（A.J Baker et al. 1996）。
【エアフィールド母岩の特性】

10. 支保部材の中にはロックボルト、ロックアンカー、鋼製支保鋼、鋼製セグメント等の鋼製材料が考えられており、これらの鋼材の腐食によりガスが発生する可能性がある（動燃事業団 1992）。また、微生物の活動によるガス発生や緩衝材からのガスの移行も考えられる。【ガスによる影響】

11. 好気性環境では、硫酸塩生成菌や硝化菌の活動により酸が生成し、セメント成分の溶解、劣化を引き起こす。処分場は早期に酸素が消費されるため、これらの微生物の影響は小さいであろう（S.Stroes-Gascoyne 1989）。その後は、硫酸塩還元菌等の嫌気性細菌が活動する。また、pH=12-13程度の高pH環境では微生物の活動は見られないという報告がある（TRU共同作業チーム 1997）。しかし、低pHセメントを使用した場合は微生物の活動がより活発である可能性がある。微生物による影響】

12. 間隙水性状が有機物の分解に影響を及ぼす一方、有機物が溶存することで間隙水中のTOC、炭酸濃度等が影響を受ける。有機物による影響】

13. セメント成分の影響により、緩衝材間隙水中が長期間高pH環境となる。高pH環境により、核種の溶解度、分配係数、緩衝材の変質挙動、微生物の活動が影響を受ける。支保、プラグ、グラウトの特性による影響】

14. TRU廃棄物中には硝酸塩を大量に含む廃棄体が存在しており、空隙水中の硝酸イオン濃度が硝酸ナトリウムの溶解度に相当する高濃度になる可能性がある。緩衝材での水化学による影響】

浅地中処分における特記事項

温度影響】

・浅地中処分対象となるTRU廃棄物には発熱性廃棄体は含まれていない。また、浅地中処分の対象となる深度では地温による影響も無いと考えられる。

水理・物質移行による影響】

・地下水面より上部の処分施設となった通気層処分の可能性がある。

余裕深度処分における特記事項

温度影響】

・余裕深度処分対象となるTRU廃棄物には発熱性廃棄体は含まれていない。また、余裕深度処分の対象となる深度では地温による影響も無いと考えられる。

水理・物質移行による影響】

・通気層処分の可能性は少ないと考えられる。

地層処分における特記事項

【温度影響】

地層処分の対象となるTRU廃棄物には発熱性のハル・エンドピースがあり、廃棄物の発熱による温度上昇の影響が考えられる。

地層処分の場合、処分深度が数100m以深となることから、地温自体の上昇による影響が考えられる。

【水理・物質移行による影響】

通気層処分の可能性はない。

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ**<溶解度>**

溶存成分との錯体の形成やpH、Eh等により核種の存在形態が変化し、核種の溶解度が影響を受ける。

<分配係数>

溶存成分との錯体の形成やpH、Eh等により核種の存在形態が変化し、核種の分配係数が影響を受ける。

地下水との接触により吸着固相の変質が生じ、分配係数が影響を受ける。また、吸着固相の変化は接触する地下水成分により影響を受ける。

<空隙率>

地下水との接触により固相の変質が生じ、その結果、空隙率の変化が生じる。

<透水係数>

地下水との接触により生じる空隙率の変化や、金属の腐食等に起因するひび割れの発生により透水係数が影響を受ける。空隙率の変化や金属の腐食などは地下水成分により影響を受ける。

<拡散係数>

核種の存在形態により拡散係数は変化する。核種の存在形態は地下水環境により影響を受ける。

地下水との接触により生じる空隙率の変化により拡散係数は変化する。空隙率の変化は地下水成分により影響を受ける。

<密度>

地下水との接触による固相の変質により、密度の変化が生じる。

参考文献

- Iwatsuki and Yoshida (1998) "Water chemistry and mineralogy of fracture systems in the basement granite in the Tono uranium mine area, Gifu-Prefecture, Central Japan", *Geochemical Journal* (in press)
- Nagra : "Kristallin-I Safety Assessment Report", Technical report 93-22, (1994)
- H.N.Khoury et al. : "A Natural Analogue of High pH Cement Pore Waters From the Maqarin Area of Northern Jordan. I. Introduction to the Site", *Journal of Geochemical Exploration*, 46, pp.133-146, (1992)
- Nagra : "A natural analogue study of the Maqarin hyperalkaline ground waters. I. Source term description and thermodynamic database testing", Nagra technical report 91-10, (1992)
- A.J Baker et al. : "Characterisation of the alkaline disturbed zone around a cementitious repository", *RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL CONFERENCE DOCUMENTATION*, (1996)
- S.Stroes-Gascoyne, AECL-9574, (1989)
- TRU共同作業チーム(平成12年), "TRU廃棄物処分概念検討書"
- 動燃事業団 : 高レベル放射性廃棄物地層処分開発の技術報告書, (1992)

FEP ID **FN21** **FEP 名称** **ニアフィールド母岩の温度**

定義

1. ニアフィールド母岩領域の温度、あるいは温度変化による水化学への影響

説明

1. 境界領域の温度は主に廃棄体にて発生する崩壊熱が充填材、構造躯体、緩衝材を介して到達する事によって上昇し、境界領域外に発散することにより下降する。
2. また、緩衝材領域の温度は境界領域外の温度（地熱）により影響をうける。
3. ニアフィールド母岩の温度は、廃棄体、充填材、構造躯体、緩衝材、境界領域の熱的な相互作用によって決まる。
4. 温度は、鉱物-水反応や成分溶出といった化学反応に影響すると考えられる。

評価すべき事象

1. 平衡定数 (6gK) は、温度の影響を受けると考えられる。

浅地中処分における特記事項

浅地中処分対象となるTRU廃棄物には発熱性廃棄体は含まれていない。また、浅地中処分の対象となる深度では地温による影響も無いと考えられる。

余裕深度処分における特記事項

余裕深度処分対象となるTRU廃棄物には発熱性廃棄物には含まれていない。また、余裕深度処分の対象となる深度では地温による影響も無いと考えられる。

地層処分における特記事項

地層処分の対象となるTRU廃棄物には発熱性のハル・エンドピースがあり、廃棄物の発熱による温度上昇の影響が考えられる。
地層処分の場合、処分深度が数100m以深となることから、地温自体の上昇による影響が考えられる。

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

FEP ID **FN31** **FEP 名称** **ニアフィールド母岩での水理 物質移行**

定義

ニアフィールド母岩での水の流れ及び物質の移動による水化学への影響

説明

1. 境界領域における水理は、境界領域を構成する埋め戻し材、支保、周辺母岩、プラグ及びグラウトの水理学的特性と周囲の水理学的条件によって決まる。
2. 埋め戻し材には、掘削した坑道などの空洞を充填してできる限りもとの状態に戻すことにより、埋め戻した部位が卓越した地下水流路となることを防止する機能が要求される。埋め戻し材の具体的な仕様については不確定な部分も多いが、候補材の一つがベントナイトと砂の混合物であり、この場合ベントナイトを15wt%程度混合すれば透水係数が $1\text{e-}12\text{m/s}$ オーダーとなる（動燃事業団1992）ことが示されている。
3. 支保はコンクリートあるいは鋼材によって構築されるが、これらは長期的には劣化して支保が水みちとなることが懸念されている。このうちコンクリートの透水係数については、ひび割れや打ち継ぎ目等の影響が極めて大きいことがわかっている（コンクリート便覧1996）。
4. 坑道の周辺では、掘削に伴い特性が変化した領域（掘削影響領域、Excavation Damaged Zone: EDZ）が生じる。この領域では一般に透水係数が上昇するものと考えられているが、影響の範囲や程度は岩種や掘削方法等により変化する。
5. 坑道の周辺では操業中に一時的に地下水が流出し不飽和状態が出現するが、これらの領域では坑道の埋め戻し後に再び地下水が浸入して再冠水するものと考えられている。再冠水の前後ではその場で生じる化学反応等が変化する。
6. 地下水流速が十分に低い場合には、物質の移動は拡散支配となるが、周辺母岩においては地下水の移動によって移流による物質の移動が生じると考えられる。その結果、水中の溶質成分の移動量が変化する。

評価すべき事象

1. 造岩鉱物の変質
掘削に伴う発破に伴い、新たな亀裂を生じたり、空隙内に侵入した酸素が鉱物を酸化させる（核燃料サイクル開発機構 1999）。また、セメント成分と岩の反応も考えられる（A.J. Baker et al. 1996）。
2. セメント変質
支保、プラグ、グラウト材料としてセメントが用いられるが、長期的にはセメント成分の溶出による劣化が起こる。その結果、ニアフィールド母岩領域での水化学環境が影響を受ける。
3. ベントナイトの変質
ベントナイトはイオン交換反応や、鉱物の変化に伴い、Ca化、イライト化、ゼオライト化、クロライト化、セメンテーションといった変質が起こり、止水性、拡散性が変化する。その結果、ニアフィールド母岩領域での水化学環境が影響を受ける。
4. 再冠水
再冠水により、セメントや鋼材の劣化速度、機構が決定する。再冠水によってベントナイトの空隙が飽和し、ベントナイトの膨潤が生じる。また、飽和度の変化に伴い水化学環境が影響を受ける。
5. 地下水の移動に伴い空隙水中に存在する溶存成分の他の領域との移動が生じる。その結果、廃棄体領域での水化学環境が影響を受ける。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

高レベル放射性廃棄物地層処分開発の技術報告書、動燃事業団(1992)
核燃料サイクル開発機構 地層処分研究開発第2次取りまとめ, (1999)
A.J Baker et al. : "Characterisation of the alkaline disturbed zone around a
cementitious repository", RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL CONFERENCE
DOCUMENTATION, (1996)
・コンクリート便覧 第二版 コンクリート工学協会, (1996)

FEP ID FN41 FEP 名称 ニアフィールド母岩の特性

定義

ニアフィールド母岩の特性による水化学環境への影響

説明

1. 結晶質岩では、割れ目に沿って酸素の侵入が考えられ、釜石鉱山内での地下水の地下水の原位置モニタリングの結果、坑道壁面から数mまでの影響が見られた。一方、堆積岩では、坑道壁面における鉄酸化物の分布幅から、壁面より数mm程度しか酸化が及んでいないことが観察されている。
2. Northern JordanのMaqarin における高pH地下水と岩石(石灰岩)の反応のナチュラルアナログ(H.N.Khoury et al. 1992, Nagra 1991)が実施されており、アルカリ-岩反応の2次生成物として、CSHゲルが観察されたこと等が報告されている。
3. Sellafieldに存在する鉱物と高pH地下水との反応試験を実施した結果、鉱物の溶解速度の増加が観察された。また、生成する支配的な2次鉱物としてCSHが生成しており、硫酸イオンが存在するとettringiteも観察された。これら実験データから、岩-高pH地下水反応のモデル化が行われている(A.J.Baker et al. 1996)。
4. 岩-高pH地下水の反応生成物により、ニアフィールドの母岩の空隙が減少したり、核種の分配係数が増加する可能性がある(A.J.Baker et al. 1996)。

評価すべき事象

1. 掘削に伴い、新たな亀裂を生じたり、空隙内に侵入した酸素が鉱物を酸化させる(核燃料サイクル開発機構、1999)。また、地下水によるアルカリ塩及びアルカリ土類塩の溶解や、セメント成分と岩の反応も考えられる(A.J. Baker et al. 1996)。
2. セメント系材料に起因する高 pH地下水が母岩領域に達した場合、母岩中に存在する造岩鉱物との鉱物反応及び2次鉱物の生成などが生じる。この結果、ニアフィールド母岩領域での水化学環境が影響を受ける。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

核燃料サイクル開発機構 地層処分研究開発第2次取りまとめ, (1999)
H.N.Khoury et al.(1992) A Natural Analogue of High pH Cement Pore Waters From
the Maqarin Area of Northern Jordan.I.Introduction to the Site, Journal of
Geochemical Exploration,46,pp.133-146
Nagra(1991) A natural analogue study of the Maqarin hyperalkaline ground
waters.I.Source term description and thermodynamic database testing,Nagra technical
report 91-10
A.J Baker et al.(1996) Characterisation of the alkaline disturbed zone around a
cementitious repository,RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL CONFERENCE
DOCUMENTATION

FEP ID FN42 FEP 名称 埋め戻し材の特性

定義

埋め戻し材の特性による水化学環境への影響

説明

1. 埋め戻し材は、一般的に礫や砂にベントナイトを混合した材料の使用が想定されている。
2. ベントナイトはpH緩衝性を有し、不純物として存在するカルサイトの溶解により間隙水を弱アルカリ性に保つ。また、パイライトの溶解により間隙水は還元性となる可能性が高い(動燃事業団 1992)。
3. ベントナイトはCa化、イライト化、ゼオライト化、クロライト化、セメンテーション等の変質を生じる可能性がある。この変質反応により水化学環境が変化する。
4. ベントナイトの主成分はモンモリロナイト(クニゲルV1の場合で、約50%)で、不純物として石英、長石、カルサイト、沸石、トロマイト、パイライト、雲母等を含む(動燃事業団、平成4年、伊藤ら1994)。
5. モンモリロナイトは微細な層状結晶構造を持つケイ酸塩鉱物で、層間に交換性陽イオンを持つ。この交換性陽イオンがNaの場合、Naモンモリロナイトと呼ばれ、これを主成分とするベントナイトがNaベントナイトである。
6. ベントナイトは地下水との反応により、層間イオンの交換や不純物として含まれる鉱物の溶解反応などにより水化学環境を変化させる。また、モンモリロナイト鉱物の結晶端における酸-塩基反応によっても水化学環境は変化する。(核燃料サイクル開発機構、1999)
7. ベントナイトの変質(Ca化、イライト化、ゼオライト化、クロライト化、セメンテーション)により、埋め戻し材の見かけ密度、空隙率が変化する可能性がある。

評価すべき事象

1. 埋め戻し材中の含まれるベントナイトは層間イオンの交換によるCa化や鉱物変質によるイライト化、ゼオライト化等の変質を生じる可能性がある。この結果、埋め戻し材中での水化学環境に影響を及ぼす。
2. 埋め戻し材中に含まれる随伴鉱物は地下水との接触により鉱物反応を生じ、その結果、緩衝材中での水化学環境に影響を及ぼす。
3. TRU処分施設は多量のセメントを用いるため、セメントと反応した高pHの地下水との接触によりベントナイトの変質、特にゼオライト化を加速する。
4. TRU処分施設には、ピチューメン固化体から溶出した硝酸塩等の塩類が多量に存在する。その塩類の存在により、埋め戻し材の変質等が影響を受ける可能性があり、その結果、水化学環境に影響を及ぼす。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

核燃料サイクル開発機構 地層処分研究開発第2次取りまとめ, (1999)
・動燃事業団(平成4年) 高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書,
PNC/TN/1410/92-081
・伊藤、岡本他(1994) "ベントナイトの鉱物組成分析" 日本原子力学会誌36(11)pp.63-66
・動燃事業団(1992) 高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書 (PNC
TN 1410 92-081)

FEP ID **FN43** FEP 名称 **支保、プラグ、グラウトの特性**

定義

支保、プラグ、グラウトの特性による水化学環境への影響

説明

1. 支保工は支保部材で構成され、その材料としては鋼材とセメント系材料が用いられる。支保部材の候補材料として、吹付けコンクリート、ロックボルト、ロックアンカー、鋼製支保工、鋼製セグメント、RCセグメント等があり、支保工はこれらの支保部材を適宜組み合わせる。TRU共同作業チーム、平成12年)
2. プラグとしては、止水性が要求される場合はベントナイト、埋め戻し材の膨潤圧に耐える強度が必要な場合はコンクリート、及び両者を組み合わせた複合材料が検討されている。TRU共同作業チーム、平成12年)
3. グラウトとしては一般には、粘土系、セメント系、水ガラス系材料が候補となる。しかし、セメント系及び水ガラス系材料は、長期健全性及び化学的影響の観点から処分施設への適用は期待できない(動燃事業団 1996)。粘土系材料は止水性や応力緩衝性に優れたベントナイトを主体とした材料が考えられており、スウェーデンのストリーバ鉱山(Borgesson et al, 1991)や釜石鉱山(杉田ら, 1996)で原位置試験が行われている。
4. ポルトランドセメントと水との水和反応により生成する水和物のうちトバモライトと呼ばれる珪酸カルシウム水和物と水酸化カルシウムが最も多い。 (C_3S+C_2S) の量がセメント重量の75%の場合、水酸化カルシウムの生成量は約40%となる。このほか、アルミン酸カルシウム水和物・カルシウム・サルホ・アルミネート水和物などの多くの水和物ができる。樋口他, 1983)
5. 支保、プラグ等を使用されたセメント系材料中のセメント鉱物は地下水との化学反応によりゆっくりと溶解・劣化する。セメント空隙水の重要な特性であるpHは、反応の進展にともない徐々に低下する。これは、セメント鉱物中のCaとSiの溶出が非調和的であり、前者が後者よりも溶脱しやすいことに起因する。
6. セメントの存在により、pH及びバイオン強度は高くなると予想される (SKB, 1995)。
7. セメントが長期間、炭酸を含む環境に接すると中性化が生じ (岡田ほか, 1981)、間隙水のpHが低下する (田中ほか, 1997)。
8. 鉄筋はコンクリートの高いpH (約12.6) と大気中酸素との作用により不動態化する。大気中二酸化炭素と水との作用によりpHが約9.5を切れば腐食速度は増大する。また、混練に用いる砂に含まれていた、または打設後外表面からしみ込む塩分があれば、pH低下なしで局部腐食が起こる (腐食防食協会)。
9. 鉄筋コンクリート内の金属の酸化により、酸化還元電位は低下する (M.Wiborgh et al., 1995)。
10. ベントナイトはCa化、イライト化、ゼオライト化、クロライト化、セメンテーション等の変質を生じる可能性がある。この変質反応により水化学環境が変化する。
11. ベントナイトの主成分はモンモリロナイト(クニゲルV1の場合で、約50%)で、不純物として石英、長石、カルサイト、沸石、トロマイト、パイライト、雲母等を含む (動燃事業団, 平成4年、伊藤ら 1994)。
12. モンモリロナイトは微細な層状結晶構造を持つケイ酸塩鉱物で、層間に交換性陽イオンを持つ。この交換性陽イオンがNaの場合、Naモンモリロナイトと呼ばれ、これを主成分とするベントナイトがNaベントナイトである。
13. ベントナイトは地下水との反応により、層間イオンの交換や不純物として含まれる鉱物の溶解反応などにより水化学環境を変化させる。また、モンモリロナイト鉱物の結晶端における酸・塩基反応によっても水化学環境は変化する。核燃料サイクル開発機構, 1999)

14. ベントナイトの変質 (Ca化、イライト化、ゼオライト化、クロライト化、セメンテーション)により、緩衝材の見かけ密度、空隙率が変化することがある。

評価すべき事象

1. セメント水和物のうち水酸化カルシウムは易溶性であり、セメントマトリクス中を地下水が通過することにより、地下水中に溶解することが考えられる。さらに、短期的には難溶性と言うことも可能なCSHゲルといった水和物も超長期的には溶解してしまう可能性もある。また、温度は、セメント水和物の溶出過程において影響を与えと考えられる。海水系地下水に含まれる硫酸塩 (MgSO_4) は、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ との反応により $\text{Mg}(\text{OH})_2$ と石こうを生じ、さらにはエドリンガイトを生成する。また塩化物 (MgCl_2) は、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ との反応により $\text{Mg}(\text{OH})_2$ と CaCl_2 を生成する。生成する石こうや CaCl_2 は、可溶性である。日本コンクリート工学協会(1996)
2. セメント成分の影響により、間隙水が長期間高pH環境となる。極初期にはセメント中の遊離アルカリにより $\text{pH}=13$ 以上になり(TRU共同作業チーム、平成12年)、その後はportlanditeが存在する期間は $\text{pH}=12.5$ 程度の期間が継続する(A. Atkinson et al. 1989)。
3. 鉄筋の腐食により間隙水中の酸化還元電位は影響を受ける。
4. ベントナイトは層間イオンの交換によるCa化や鉱物変質によるイライト化、ゼオライト化等の変質を生じる可能性がある。この結果、緩衝材中での水化学環境に影響を及ぼす。
5. ベントナイト中に含まれる随伴鉱物は地下水との接触により鉱物反応を生じ、その結果、緩衝材中での水化学環境に影響を及ぼす。
6. TRU処分施設は多量のセメントを用いるため、セメントと反応した高 pHの地下水との接触によりベントナイトの変質、特にゼオライト化を加速する。
7. TRU処分施設には、ピチューメン固化体から溶出した硝酸塩等の塩類が多量に存在する。その塩類の存在により、ベントナイトの変質等が影響を受ける可能性があり、その結果、水化学環境に影響を及ぼす。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

- ・田中知ほか (1997) :放射線廃棄物処分システムにおいてセメントに期待される役割, 日本原子力学会誌, Vol.39, No.12
- ・岡田済, 六車ひろし編 (1981) 改訂新版コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, 591
- ・SKB (1995) :Prestudy of final disposal of long-lived low and intermediate level waste, SKB Technical Report 95-03

樋口芳朗、村田二郎、小林春夫(1983) :コンクリート工学(I)施工、彰国社
荒井康夫(1991) :セメントの材料化学、大日本図書、pp214-215
・日本コンクリート工学協会(1996) :コンクリート便覧 第二版
・TRU共同作業チーム(平成12年)、“TRU廃棄物処分概念検討書”
・A.Atkinson et al. DOE/RW/89/0251989
・Marie Wiborgh,et al. 1995) Prestudy of final disposal of long-lived low and
intermediate level waste, SKB Technical Report 95-03.
・腐食防食協会編 金属の腐食 防食Q&A, 丸善株式会社
・核燃料サイクル開発機構 地層処分研究開発第2次取りまとめ, (1999)
・動燃事業団(平成4年) :高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書,
PNC/TN/1410/92-081
・伊藤、岡本他(1994) :ベントナイトの鉱物組成分析"日本原子力学会誌36(11)pp.63-66
・動燃事業団(1996) 地層処分研究開発の現状 平成8年度)
・Borgesson,L.et al.(1991) Final report of the rock sealing project - Sealing of the near
field rock around disposition holes by use of bentonite grouts, Stripa Project TR91-34
・杉田、藤田(1996) 原位置における粘土グラウト試験、第27回岩盤力学に関するシン
ポジウム、pp.276-280

FEP ID **FN51** **FEP 名称** **ニアフィールド母岩でのガス**

定義

構造躯体、緩衝材等の人工バリアからのガスの移行または埋め戻し材、支保、周辺母岩、プラグ及びグラウトで発生したガスによる水化学環境への影響。

説明

1. TRU廃棄体におけるガス発生機構としては金属の腐食、有機物の微生物分解、水の放射線分解があげられる。(TRU共同作業チーム、平成12年)
2. ガス発生によるバリア機能への影響として、ガス発生に係る反応による溶存化学物質の消費と生成による水化学の変化等が考えられる。(TRU共同作業チーム、平成12年)
3. 放射線分解によるガス発生
放射線分解によるガスの発生は他の機構と比較して微小である。(Nagra,1986 ; NIREX,1988 ; Norris,1997 ; SKB,1995)
4. 廃棄物に含まれる様々な有機成分が微生物によって分解され、ガスが発生する。有機物は微生物に炭素源として利用され、様々な無機成分 分子酸素、硝酸、硫酸塩または炭酸塩)は酸化剤として利用される可能性がある (M.Wiborgh,et al., 1995)。

評価すべき事象

1. ガスが発生することにより、ガス成分組成及び水中の溶解量が変化し、間隙水の水化学組成が変化する。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

- ・TRU共同作業チーム(平成12年),"TRU廃棄物処分概念検討書"
- ・Nagra, NTB 85-17 (1986)
- ・NIREX, NSS/G104 (1988)
- ・S.Norris, et, al., An Assessment of the Post-closure Performance of Deep Waste Repository at Sellafield, Overview, S/97/012 (1997)
- ・SKB, Prestudy of final disposal of long-lived low and intermediate level wastwe. TR 95-03 (1995).

Marie Wiborgh, et al. (1995) Prestudy of final disposal of long-lived low and intermediate level waste, SKB Technical Report 95-03.

FEP ID **FN61** **FEP 名称** **ニアフィールド母岩での微生物**

定義

境界領域における微生物活動による水化学環境への影響

説明

1. 深い部分ではバクテリアも存在することがわかった。メタン・バクテリアや硫酸塩還元バクテリアが発見されている。この環境には栄養素が乏しく、微生物の代謝に利用されると考えられる物質はメタン、水素、有機物、炭酸塩、硫酸塩などである。(SKB91,1993)
2. スウェーデンのFinnsjon区域では、200m-700mの深さの試験孔があり、地下水の分析の結果、微生物の濃度は極めて低い (50mg/m3未満)。(SKB91,1993)
3. 地下水中に存在する有機物は、高々1 ppm程度であるが、硫酸塩還元菌等が存在し得る環境である。(笹本ら, 1996)
4. ニアフィールド母岩の温度は約50℃程度であり、動燃事業団, 1992)、微生物はこの温度で十分生息可能である。
5. 微生物が活動することによって、還元反応が起こったり、CO₂、硫化物、酸、キレートが生成する。
これらの生成物によって、pHやEhが変化し、核種の溶解度などが変化し、結果的に核種の移行を促進、あるいは抑制することとなる。これらの効果は、深度が浅く、栄養分の多い環境下では起こりうる。(S.Stroes-Gascoyne, and J.M.West,1994)
6. 高pH地下水における微生物の活動は、地下水のpHではなく、利用できる栄養分によって制限されている(Nagra 1991)。

評価すべき事象

1. 硫酸塩還元菌による酸化種の生成、酸化還元反応の加速など、微生物の活動に起因した水化学環境への影響の可能性がある。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

S.Stroes-Gascoyne, and J.M.West : "MICROBIAL ISSUES PERTAINING TO THE CANADIAN CONCEPT FOR THE DISPOSAL OF NUCLEAR FUEL WASTE", AECL-10808, (1994)
Final disposal of spent nuclear fuel, Importance of the bedrock for safety- (SKB TR 92-20), 1993
笹本ら, 釜石鉱山における地下水の地球化学的研究(1), (1996)
高レベル放射性廃棄物地層処分開発の技術報告書-平成3年度-, 動燃事業団 (1992)
"A natural analogue study of the Maqarin hyperalkaline ground waters.I.Source term description and thermodynamic database testing", Nagra technical report 91-10, (1991)

FEP ID **FN71** FEP 名称 **ニアフィールド母岩での有機物****定義**

ニアフィールド母岩中に含まれる有機物の形態や挙動による水化学環境に対する影響

説明

2. ニアフィールド母岩 周辺母岩、支保、埋め戻し材、プラグ、グラウト等の材料 セメント系材料、ベントナイト系材料等を考慮すれば、セメント系材料中の減水剤あるいはベントナイト系材料中の不純物としての有機物が検討対象となる。一方、境界領域が天然バリアとの接点となることを考慮すると、天然バリア起源の有機物も検討対象となる。

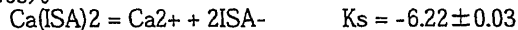
1. ベントナイトは不純物として微量の有機物を含むが、TRU処分場における緩衝材中の有機物は、そのほとんどが廃棄体起源のものである。

2. 脱塩水にベントナイトを浸漬して、上澄液の TOC (全有機炭素) 濃度を測定したところ、5日後で、30℃、50℃、70℃においてそれぞれ5.7mg/l、6.9mg/l、9.2mg/l検出された。5日後の30℃、70℃の上澄液からは、1.7mg/l、2.8mg/lの酢酸が検出された (福永ほか,1993)。

3. カナダの核燃料廃棄物処分ボールドにおける緩衝材中の天然有機炭素は、既に長期安定性を示しているの、劣化することはないと思われる。緩衝材中の有機炭素は、0.31重量%である (Stores-Gascoyne, S. et al., 1997)。

4. セルロースはアルカリ環境で分解しやすく、カルボン酸等が生成するが、近年の研究では、イソサッカリン酸が錯生成の観点では最も重要な分解生成物であることが判明しつつある。

5. イソサッカリン酸 (ISA) は弱酸であり、高アルカリ環境ではほぼ完全に電離してISA-イオンとして存在する。ISA-イオンはCa²⁺と反応して沈殿する (Whistler, R.L. and BeMiller, J.N., 1963)。



6. 上記塩の溶解平衡で決まるISA濃度は、セメント間隙水では0.05～0.1Mであり、遊離ISA濃度への沈殿生成の影響はない (TRU共同作業チーム, 平成12年)。

7. 有機物の劣化により酸性の生成物、例えば、二酸化炭素や低分子量の有機酸等が生成され、間隙水性状を酸性側にシフトさせる傾向がある (NIREX, 1997)。

8. 微生物分解あるいは放射線分解により、メタンや二酸化炭素が生成される可能性がある。

評価すべき事象

1. 有機物あるいはその分解生成物が存在することによって、間隙水性状 (特に、TOC、炭酸濃度等、カーボンに関する性状) が変化する。

2. 主に木材や紙といったセルロース材の微生物分解により、メタンや二酸化炭素が生成される可能性がある (NIREX, 1997 b)。

3. 有機物は放射線により分解する。

浅地中処分における特記事項**余裕深度処分における特記事項**

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

・TRU共同作業チーム(平成12年),"TRU廃棄物処分概念検討書"
・Whistler,R.L. and BeMiller,J.N.(1963)," α -D-Isosaccharino-1,4-lactone: Action of Lime Water on Lactose, In Methods in Carbohydrate Chemistry", Vol.II, Reactions of Carbohydrates
・NIREX (1997) NIREX 97:An assessment of the post-closure performance of a deep waste repository at Sellafield - Volume 3:The groundwater pathway -, NIREX SCIENCE REPORT S/97/012
・NIREX (1997 b) NIREX 97:An assessment of the post-closure performance of a deep waste repository at Sellafield - overview -, NIREX SCIENCE REPORT S/97/012
・福永ほか(1993),"硫酸塩還元細菌の極限環境適応能力と腐食関与(放射性廃棄物処分容器の長期健全性評価 8)",腐食防食講演集
・Stores-Gascoyne,S. et al.(1997),"Change in Bioavailability of Nutrients (Organic Matter) associated with Clay-Based Buffer Materials as a Result of Heat and Radiation Treatment",PB Reports

FEP ID **FN81** **FEP 名称** **ニアフィールド母岩での核種の崩壊 生成**

定義

ニアフィールド母岩領域中での放射性核種の崩壊に際して放出される放射線による水化学環境に対する影響

説明

1. 放射性核種の壊変により、放射線分解が起こることが考えられる。
2. 放射線分解において、水素と酸化種が等量ずつ生成するが、処分環境の温度条件下においては水素は相対的に反応が鈍く、さらに酸素などの酸化種よりも高い拡散性を有している (Ross, 1989)。この水素が気体として或いは水に溶けて拡散することにより、過酸化水素などの酸化種よりも速く失われることが想定され、正味の酸化性雰囲気が生じる (Christensen, et al., 1982)。
3. 地下水に溶存している窒素や二酸化炭素の放射線分解についても、pHを大きく減少させる結果となる (McVay, et al., 1981)。
4. TRUレポートにおける検討によると、処分場閉鎖直後は酸化性雰囲気であるが、 $1E+7$ 年後には地下水と同程度のEhにまで低下するという結果を得た。これは、還元性地下水の流入による還元種の供給量が、水の放射線分解による酸化種の生成量を上回ることによる。TRU共同作業チーム、平成12年)。
5. 長期的には、処分場条件は地下水によって運ばれる酸化種と、 γ 線による放射線分解によって生成する酸化種によって規定される (AECL, 1994)。
6. α 線による放射線分解で生成する水素は化学的に不活性でニアフィールドから直ちに喪失し、酸素は反応的である (Nagra, 1994)。

評価すべき事象

1. 放射線分解による酸化種の生成により、水化学が変化する。

浅地中処分における特記事項

余裕深度処分における特記事項

地層処分における特記事項

水化学環境により影響を受ける評価パラメータ

参考文献

- Ross B.(ed.) 1989) Methods of Calculating the Post-closure Performance of High-level Waste Repositories, Prepared by Disposal Safety, Inc. for Pacific Northwest Laboratory under Contract DE-AC06-76RLO 1830 with U.S. Department of Energy, PNL-6608 UC-510.
- Christensen H, Bjergbakke E 1982) Radiolysis of Groundwater from HLW Stored in Spent Fuel, KBS TR 82-18.
- McVay G L, Pederson L R 1981) Effect of Gamma Radiation on Glass Leaching, J. Am. Ceramic Soc., 64, pp.154-158.
- TRU共同作業チーム(平成12年), "TRU廃棄物処分概念検討書"
- AECL 1994) The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste: The Vault Model for Postclosure Assessment, AECL-10714, COG-93-4.
- Nagra 1994) Kristallin-I Safety Assessment Report NTB TR 93-22)