

高レベル放射性廃棄物の処分に向けての現状

Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste

虎田 真一郎*

Shinichiro Torata

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の処分については、西暦2000年前までに、これまでの地層処分研究開発成果のとりまとめ（平成4年に続く第2次とりまとめ）が行われ、地層処分を我国において実施する上での技術的信頼性が示される。一方、地層処分を事業として実施していくための制度整備の一環として、資金の確保と実施主体設立のための法制度などについても、今後具体化が進もうとしている。

本稿では、このような高レベル放射性廃棄物処分研究開発の動向と、今後の事業化に向けての技術的課題について述べる。

2. 高レベル放射性廃棄物対策のこれまでの経緯

我国では、使用済燃料を再処理し、ウラン、プルトニウムをリサイクルするとともに、これらを回収した後に残る高レベル放射性廃液を、ガラスとともに高温で溶かしてガラス状に固め（ガラス固化）、これを高レベル放射性廃棄物として最終的に人間の生活環境から隔離し、将来の世代にも廃棄物による影響を及ぼさないようにすることを基本的な方策としている。

具体的には、再処理施設においてガラス固化した廃棄物を、冷却のため30年～50年間程度専用の貯蔵施設に貯蔵し、その後地下深い地層中に人工的な安全対策を施した上で処分することとしている。（原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画、平成6年6月、原子力委員会）

高レベル放射性廃棄物の特徴として、放射能は高いが比較的早く減衰する成分と、放射能は低くても数万年という半減期を持ち、長期間にわたり放射性を持ち

続ける成分の両方を含んでいる。その結果、ガラスに溶け込ませて固化したときの高い放射能は、時間とともに減衰し百年以内に数分の一に、千年程度で一万分の一に変化する。このような廃棄物の持つ特性を考慮し、高レベル放射性廃棄物を長期間にわたり人間の生活環境に影響を及ぼさないように隔離する方法として、地下深い地層中に放射性廃棄物を閉じ込める（地層処分）ことが、将来世代に管理の負担を残すことがなく、且つ自国内で処分の責任を果たせることから、各国ともその実施に向けて努力している。

わが国でも、ガラス固化された高レベル放射性廃棄物を地層処分するための研究開発が行われ、現在は平成9年4月の原子力バックエンド対策専門部会報告書「高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発の進め方について」に従って、2000年前までに核燃料サイクル開発機構が、自らの研究成果と関連研究の成果を総合して報告書を公表することになっている。この報告は、平成4年に行った取りまとめに続く第2次とりまとめとして、わが国における地層処分の技術的信頼性等について、国による評価を受けることになっている。また、処分事業を進める上での処分予定地の選定と安全規制のための技術的拠り所を与えるものとなる。

3. 地層処分の概念

地層処分の一般的な概念は、地下深い安定な地層（岩体）を選び、放射性廃棄物自体が地殻変動などによって移動し、直接人間に影響を及ぼすことのないようにし、さらに地下水の存在を想定し、廃棄物に含まれる放射性物質が地下水を介して移動し、地上に運ばれて人間に影響をおよぼさないような人工的な対策と、天然の地層のはたらきにより安全を確保するものである。

この人工的につくられる安全のための障壁を、人工バリアと呼ぶ。人工バリアは、ガラス固化された廃棄物のまわりを取り囲むように、地下水を遮断する次の

* 核燃料サイクル開発機構 経営企画本部事業計画部研究主幹
〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4-4-49

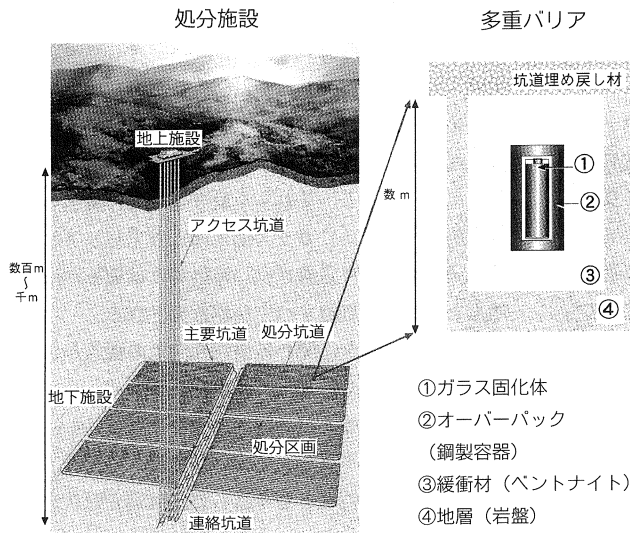


図-1 地層処分の概念

ような多重の層によって成る。

ガラス：ガラスとともに高温で溶かして固めた高レベル放射性廃棄物は、放射性物質がガラスの外に溶出することを抑制する。

オーバーバック：ガラス固化体を包む厚い金属の容器で、深い地層中においても長い間放射性廃棄物を閉じ込めておくことができ、地下水などの影響や強度などを考慮して、材質と構造を選定する。

緩衝材：オーバーバックの周囲を更に囲む粘土質の充填物で、地下水が内部に浸透してくるのを抑制するとともに、ガラスに固めた放射性廃棄物が地下水に溶け出した場合にも、放射性物質を吸着することにより、移動を抑制する。

人工バリアの外側は天然の岩盤など、数百メートルの地層が人間環境との間を隔てている。深い地層中では、地下水の動きは一般的に少なく、還元状態で物質を溶かしにくく、また地層そのものに放射性物質を吸着する性質もあるなど、放射性物質が移動するのを抑制するはたらきがあり、天然バリアと呼ばれる。

従って、仮に放射性物質がこれら多重のバリアを通して移動するとしても、人間環境に到達するまでには極めて長い時間を要する。その間に放射能は安全上問題にならない程度まで減衰し、また希釈されてしまう。

このように、放射性廃棄物を人間環境から隔離し安全確保をはかることが、地層処分の基本概念となる。図-1にその一例を示す。

多重バリア

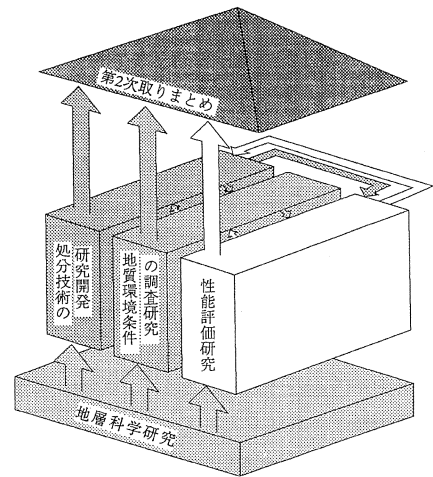


図-2 地層処分研究開発の構成

4. 地層処分の安全性

地層処分の概念に示された、処分システムの機能が期待通りに働き、安全性が確保されることを科学的に示すためには、まず地層処分の観点で地質条件を具体的に把握し、処分場の条件と組み合わせた安全性の評価を行うことが重要となる。このため「地質環境条件の調査研究」として、わが国の地質環境の情報を科学的に詳しく整理するとともに、処分場の設計や人工バリアの技術的検討を行う「処分技術の研究開発」や、将来にわたる処分システムの挙動を解析し、廃棄物中の放射性核種のふるまいと人間環境への影響を評価する「性能評価研究」から成る地層処分研究開発を進めている。

これら関連研究の構成を、図-2に示す。

1) 地質環境条件の調査研究

地下深部の地下水の挙動や岩石の性質、地震・断層や火山活動などの天然現象の特徴とそれらの地質環境への影響などについて、処分技術と性能評価研究に向けた科学的視点で、知見のとりまとめを行っている。そのため、地域、岩種を特定することなく、幅広くわが国の地質条件の特徴を把握し、処分を行う上で着目すべき自然現象の特徴についてその傾向が調査されている。

その結果、わが国における火山活動や断層活動は、過去数十万年程度にわたり、限られた火山地域、活断層帯内で繰り返し起こっていることが示された。また

断層活動によって岩盤が破碎したり、火山活動に伴って地温の上昇や、地下水の水質に変化を生じるなどの影響範囲は、個々の地域で差はあるものの、活断層の影響は数百メートル、火山活動については数十キロメートル程度とみなすことができるとされている。地層処分施設は、これらの影響が及ばないように、影響を受ける領域を回避してサイトを適切に選定し建設される。また、隆起、侵食などについても、過去数十万年程度にわたって、地域ごとにその進行する速度が把握でき、山岳地を除く多くの地域において、十万年間に数十～百メートル程度であることから、処分に必要十分な深さを判断する裏付けとすることができる。

また、わが国も含め、地球規模での気候変動などについても、氷期、間氷期のサイクルが概ね十万年周期で繰り返され、それに伴う気温変化や海面変動の現象についての情報をもとに、それらの影響を考慮した処分システムの設計や予測解析、評価を行うことが可能になっている。

次に、人工バリアを設置する環境特性を規定し、同時に天然バリアとしての機能に大きく関係する、岩盤と地下水の性質についても、わが国における一般の特性の把握を主眼に、関係機関のデータや既存の鉱山などを利用した調査研究から得られた実測データをもとに検討されている。

わが国で岩盤を構成する岩石について、廃棄物を処分した後の性能評価において重要となる、地下水の移動や物質移行の観点での分類評価が行われた。その結果、大きくは亀裂性媒体の結晶質岩と、多孔質媒体の堆積岩に区分され、特に花崗岩と新第三紀の堆積岩が、わが国に広く分布している代表的岩種であるとされた。それらの岩盤の一般的な性質に加え、地下深部地下水が、土壌や岩盤中に存在する鉱物や有機物などとの反応の結果、深さ数十メートルから数百メートルにおいて、低い酸化還元電位をもち酸素の極めて少ない状態にあることが、実測データや、水-岩石の反応試験に基づいて示され、処分システムを構成する各種材料との反応も抑えられると考えられている。

また、地下深部では地表に比べ動水勾配が小さく、上記のようなわが国の代表的岩種における平均的な透水係数から考えて、地下水の動きが極めて遅くなること、例えば東濃地域での地下水中の炭素同位体に着目した、年代測定の結果からも裏付けられている。

2) 地層処分の工学技術

地層処分における工学技術の対象となる施設は、

図-1に示したように、処分施設と坑道および人工バリアが主となる。処分施設は、ガラス固化した廃棄物を受け入れ、オーバーバックに封入した後、地下に搬入するまでの作業を行う地上施設と、これを地下に定置するために建設される地下施設から成り、地下には処分のための坑道と、それらを取り巻いて作業用の主要坑道が設けられる。ガラス固化体と人工バリアは、縦向き又は横向きに定置され、最終的には地下の坑道や地上とをつなぐ坑道すべてが埋め戻される。

地層処分の安全に関わる信頼性向上の観点から現在行っている検討は、人工バリア特にオーバーバックや緩衝材の必要機能と設計要件に関するものが主である。

オーバーバックについては、腐食性、耐圧性、製作/施工性、経済性などを考慮して、材料や形状を裏づけをもとに具体化しつつある。材料については、第1次とりまとめ以降、炭素鋼を中心に検討を行っている。地下深部の還元性の条件を考慮して行った長期の腐食試験から得られる腐食速度データの蓄積と、周辺岩盤の物性にもとづく力学的解析などに基づき、コスト的にも合理的な設計が進められている。また代替材料として、チタン、銅と複合した材料についても、試作等を通じて使用の可能性が検討されている。

緩衝材については、透水性が低く、放射性核種の吸着機能に加え、熱伝導や応力緩衝性、また経済性も考慮してその設計が行われた。粘土の一種であるベントナイトを主要な材料とし、性能の改良や経済性を考慮してケイ砂を混合した材料について、その特性に関する試験を進め、坑道内の原位置での施工性の確認なども行ってきた。さらに、海外との共同研究の一環として、坑道の埋め戻し技術の実証試験も進めており、ベントナイトやコンクリートを用いて深部地下水が坑道を経由して移動しないよう止水するための、プラグと呼ぶ構造の実証試験も、海外の地下の研究施設において行われている。

このように、地層処分の工学技術面においては、わが国にみられるさまざまな地質環境条件、特に岩盤や地下水の物性値の想定される変動幅に対し、人工バリアの必要機能をもとに設計・施工ができる見通しが得られている。

人工バリアに使用する材料特性や、岩盤等周辺地質環境の一般化されたデータに基づいて、人工バリアの構成仕様が例示的に次のように示されている。

炭素鋼オーバーバックの厚さは、腐食代4 cmに放射線の遮蔽と地圧等への耐圧に必要な15 cmを加え19

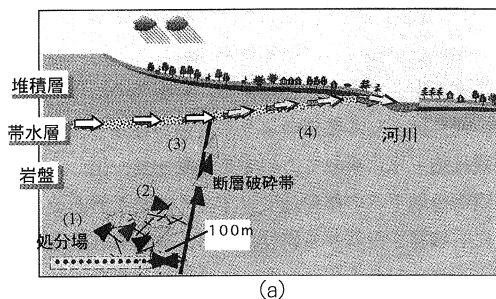
cmとなっている。また緩衝材については、応力緩衝性についての詳細な検討から、70cm以下で力学的機能を満たすことが出来、わが国の幅広い地質環境に対する放射性核種の移行抑制機能を保持することも条件に70cmを標準的な仕様と設定した。これらの値は第一次とりまとめで示したものに比べ、オーバーバック、緩衝材について、それぞれの厚みを約30%低減したものになっている。また、処分施設については、坑道施設の工学的安定性のデータが整備され、施工が可能な処分深度の概略の範囲や工法を示し、熱や力学的な解析に基づき、廃棄物や坑道をコスト面から合理的に配置するための考え方もまとめられつつある。

このように経済的にも合理性をもって、処分技術と人工バリアをはじめとした処分システムの仕様が絞り込まれてきたを受けて、処分のための費用確保や事業制度の検討が、国の法制度整備の動きとなって進められている。総合エネルギー調査会原子力部会の中間報告「高レベル放射性廃棄物処分事業の制度化について」(平成11年3月)に制度の考え方についての部会審議結果が答申されている。この報告の中で、地層処分の工学技術については、今後の研究開発の努力で技術的に一層最適化が可能な条件と、地質環境等への依存性が大きく、実施主体による具体的な処分地の選定を受けて最適化ができる条件があることを見通した上で、処分技術面のコスト試算を行っている。このように、事業実施の段階においても、コスト低減と処分地選定の段階にあわせた技術最適化のための開発が継続される。

3) 地層処分システムの安全評価(性能評価研究)

わが国の地質環境の特徴をふまえた適切な地層処分システムの概念を明確にする過程で、将来にわたって処分された高レベル放射性廃棄物が人間環境に影響を及ぼす可能性について予測し、その影響について解析評価を行っている。予測の方法は、まず地層処分した廃棄物に関連して起こると考えられる種々の現象について、将来のふるまいを時系列的に表していく。これをシナリオと呼び、次のような2つの分類になる。

- ①火山活動などの自然現象や人間活動により、高レベル放射性廃棄物が直接影響を及ぼすシナリオ(接近シナリオ)
 - ②廃棄物から放射性物質が地下水に溶け出して、人間環境に移行して影響を及ぼすシナリオ(地下水シナリオ)
- それぞれのシナリオに含まれる、多くの構成現象に



- (1) 地下水の浸入・オーバーバック破壊後の緩衝材への核種移行
- (2) 岩盤中の核種移行
- (3) 断層破砕帯における核種移行
- (4) 生物圏での核種移行

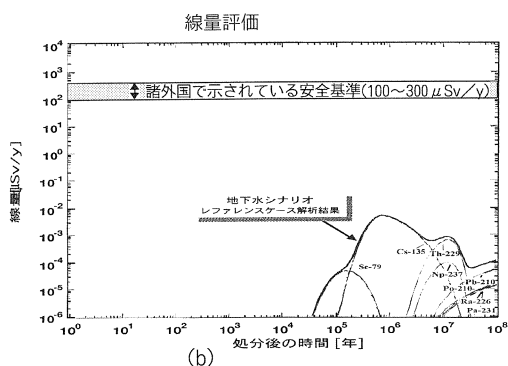


図-3 安全評価のシナリオと評価解析結果の一例

ついて、どの程度の影響があるかを定量的に見積もるため、現象を数式でモデル化し、それに必要な科学的に確かなデータを整備する。地層処分に特有のデータ、例えば地下深部の地下水の科学的特性や元素の溶解度などは、実験室やフィールドでの試験や調査で新たに取得する。

極めて長い時間をかけて進行する、上記のような現象の過程を計算機プログラムを用いて予測解析し、その結果を参考にしてシナリオやモデルの改良、新しいデータの取得などを行って再び解析するということを繰り返す、予測手法の信頼性を向上させていくことになる。

地下水シナリオにおいて想定される過程の一例として、次のような解析が行われる。図-3.(a)にそのモデル概念を示す。

人工バリアに徐々に進入した地下水は、長い間にオーバーバックを腐食し、ガラス固化した廃棄物と接し、放射性的核種を溶出させる。地下水に溶出した核種は、緩衝材中で吸着されながら、徐々に拡散していく。半

減期の比較的短い核種はこの間に減衰するが、さらに半減期の長い核種は、緩衝材を通過して周辺の岩盤に到達するものと想定する。岩盤の中には、地下水の通り道となる亀裂のような間隙が存在しており、核種は地下水に乗ってこの中を移動する。但し、深部岩盤中の地下水の移動速度は小さく、また岩石そのものにも核種を吸着する特性があり、核種の移動速度はゆっくりとしたものになる。この間に、核種の放射能は減衰するとともに、間隙は様々な方向に分散して広がっていくため、次第に希釈されていく。その後断層破碎帯のような、比較的透水性の高い地質構造に達した核種は、地表に近い帯水層に入り、最終的には河川に到達すると考える。河川水は、飲料や灌漑に利用され、これによって人間にとりこまれることになると想定する。このシナリオの一連の過程にそって、人工バリア、天然バリア、生物圏における核種移行を、計算によって解析するモデルを作成し評価を行う。

解析は、それぞれの現象の要素となる物理化学反応

をもとに、溶解、吸着、拡散、輸送や一般的な熱力学データをもち、上記の過程でどれだけの核種がどこまで運ばれるかを予測し、最終的に人間環境における線量評価を行うことになる。第一次とりまとめ以降、このような解析評価の信頼性向上の目的で、保守的な条件を見直し、より現実に即したモデルと、データベースを整備してきている。例えば、ガラスからの溶解挙動および同位元素の共存下での沈殿／溶解を現象に即して扱うとともに、周辺母岩での地下水流れを境界条件として取り込むモデルが開発された。また岩盤中の核種移行解析にあたり、亀裂性媒体について亀裂ネットワークモデルを、一方、亀裂が少なく、固結した粒子間隙内の流れが支配的な堆積岩に対して、不均質連続体モデルを適用して解析評価されている。

このように、それぞれの現象について開発したモデルを統合し、解析データについても信頼性の高いものを用いて、先に述べた核種移行の過程について次のような結果が得られている。

表1 海外主要国での地層処分の取り組みの動向

項目	国	スイス	スウェーデン	フランス	米 国	カナダ	ドイツ	ベルギー
実施主体		NAGRA スイス放射性廃棄物管理組合 (発出事業者等の組合)	SKB (スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社)	ANDRA (放射性廃棄物管理機関)	DOE-OCRWM (米国エネルギー省民間放射性廃棄物管理局)	未定 AECL(原子力公社)が研究面を推進	BfS (ドイツ連邦放射線防護庁)	ONDRAF /NIRAS(ベルギー放射性廃棄物管理機関)
処分する廃棄物形態		ガラス固化体 使用済燃料	使用済燃料	ガラス固化体 使用済燃料	使用済燃料 ガラス固化体	使用済燃料	使用済燃料 ガラス固化体	ガラス固化体
候補地層		花崗岩または堆積岩	花崗岩	花崗岩, 粘土層	凝灰岩	花崗岩	岩塩層	粘土層
処分深度		花崗岩; 約1000m, 堆積岩; 約800m	約500m	400~1000m	約350m	500~1000m	660~900m	180~270m
R&Dの方針と現状		グルムゼル岩盤研究所における研究を継続中。処分候補地について地質環境調査(北部地域; 結晶質岩)。堆積岩地質についても調査計画中。	エスボのHRL(地下研究所)における研究を継続中。サイト選定のための予備的調査中。	1997年10月地下研究施設候補サイトの調査結果に基づく評価で2箇所に絞り今後建設の予定。	特定候補地(ユッカマウンテン)でサイト特性調査を行い適性を評価中。	ホワイトシユル研究所のURL(地下研究所)における研究を継続中。環境影響評価書のレビュー中であり、今後国が方向判断する。	特定候補地(ゴルレーベン)での、岩塩ドームに関する適性調査中。	モル研究所のブーム粘土層におけるR&Dを実施中。
計画に関連する法制度等		原子力法で発作者責任の処分実施を謳う。	原子力活動法、財源法などにより、実施制度を裏付け。	放射性廃棄物管理研究法で、地層処分を3つの将来の選択肢の一つ(他に長期貯蔵、分離・核変換)として2006年に評価の予定	放射性廃棄物政策法および同修正法によって、エネルギー省の実施責任、ユッカマウンテンを候補地とする等を規定。	原子力管理法および連邦政府とオンタリオ州政府間協定によって、推進施策を規定。	原子力法で処分実施に関して政府責任を謳い、また連邦政府とニューダクセン州政府の合意によって実施政策を規定。	原子力法および現業官庁であるONDRAFの政策に基づく。

廃棄物中の主要放射性核種について、1本の廃棄物から移行する現象を解析し、線量当量率を求め処分場規模になった場合の影響を評価する。この計算では、オーバーパックが処分後1000年で閉じ込め機能を失い、放射性核種の地下水への溶出が始まること、また天然バリアによる放射性核種の移行の抑制効果は人工バリアから100mまでに限って考慮しているなど、現実より保守的な仮定をおこなっている。処分後10万年以降に線量のピークがあるが、仮に4万本を1ヶ所に処分し単純に影響を4万倍するという、過度の仮定で試算しても、図-3(b)のように、線量の最大値は、諸外国で提案されている基準(年間0.1~0.3ミリシーベルト)を下回っていることが示された。

このように、わが国の標準的な地質環境条件のもとで、合理的に設計された人工バリアを用いて処分を実施する上での、安全を含めた技術的裏付けを、信頼性をもって示すための研究の成果が、第二次とりまとめとなる予定である。

5. 地層処分の実施に向けた各国の取り組み

高レベル放射性廃棄物の処分については、諸外国でも長年にわたり検討が行われてきている。深い安定な地層に人工的なバリアを設けて地層処分する方法は、現状で選択できる最良の方法として、各国で実施に向けた対応が進んでいると同時に、IAEAなど国際機関によって、国際的にも整合のとれた処分の考え方、基準の整備が検討されている。

各国の地層処分の対象は、使用済燃料自体である場合と、わが国と同様に再処理を経てガラス固化した廃棄物の二通りにわかれ、また処分する地層も各国の特徴を踏まえた選択が行われ、地下研究施設も活用した研究開発が推進されている。

一方、処分事業実施主体や処分場の立地選定についても、わが国より先行して進められている国もあり、早ければ2010年前後に処分を開始する国も出てくると思われる。以上のような各国での地層処分の動向をまとめて、表1に示す。

6. 今後の地層処分研究の進め方と課題について

現在、第2次取りまとめの最終段階にあって、科学的データの裏付けをもった、地層処分システムの性能評価と処分システム設計および工学技術の信頼性の高い成果をまとめるとともに、その成果が広く一般にも普及し、地層処分が理解された上で社会的にも受け入れられることにつながるよう努力がなされている。

2000年頃には実施主体の設立が予定され、その事業を技術的に支援する一方で、国による安全規制のよりどころとなる評価データの信頼度を高め、将来の安全についての予測など、社会との関係も含めた円滑な処分実施への技術面での貢献が望まれると考えられる。具体的な技術項目としては、地質環境の長期安定性と、特性調査技術や処分場の工学技術の検証およびサイト条件に応じた詳細設計手法、また安全評価の高度化などが考えられる。

そのための研究施設として深地層の研究施設を整備し、深い地下環境についてのより実際の情報取得と理解普及をはかるとともに、実際の放射性核種を用いた研究施設の整備と、そこでの信頼性の高いデータ取得を今後行い、く予定である。

参考文献

- (高レベル放射性廃棄物対策の経緯、地層処分の概念)
- PNC TN1410 97-016 地層処分研究開発の概要、動力炉・核燃料開発事業団(1997)
 - JNC TN1410 98-001 高レベル放射性廃棄物の解決に向けて「地層処分研究開発」、核燃料サイクル開発機構(1998)
 - 動燃三十年史 各論第2章6節 放射性廃棄物処理・処分技術の開発、(1998)
- (地層処分の安全性)
- JNC TN1400 99-006 地層処分研究開発第2次取りまとめ第2ドラフト総論レポート、核燃料サイクル開発機構(1999)
- (海外各国の取り組み)
- JNC TN1410 98-002 FACT IV地層処分研究開発、動力炉・核燃料開発事業団(1998)