

中深度処分における断層等に係る要求事項について

人工バリア及び天然バリアの機能、並びに考慮すべき断層等（断層と地すべり面を合わせて「断層等」という。以下同じ。）の影響を整理した上で、断層等に係る要求事項について検討した。なお、「断層」は、断層面に沿ってできる破碎帯を含む。

1. 中深度処分における人工バリア及び天然バリアの機能

(1) 人工バリアの機能

人工バリアは、浸入する地下水を制限する「低透水性」、緻密な空隙構造によって放射性物質の移動を妨げる「低拡散性」等の特性を有する材料が用いられ、廃棄物埋設地^{※1}の外への放射性物質の漏出を防止又は低減する機能を有するものとして設計される（注1）。これらの機能は、断層等の活動により物理的に損傷を受けた場合には、その性能が大きく低下又は機能喪失するおそれがある。また、通常の状態においても、自然劣化により性能が低下していくことが想定される（注2）。

人工バリアの機能に係る規制要求は、後述する天然バリアへの放射性物質の漏出を防止することにより、半減期が数10年程度以下の比較的短い放射性物質（以下「短半減期核種」という。）を廃棄物埋設地の中で減衰させ、生活環境への放射性物質の移動を抑制するため、一定の期間においては、廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を防止することである（注3）。ここで、「一定の期間」は、短半減期核種の多くが減衰する期間及び事業の継続性の観点から、規制期間として埋設の終了^{※2}後300～400年程度までとする。

(2) 天然バリアの機能

天然バリアは、人工バリアの周囲に存在する岩盤等であり、廃棄物埋設地から漏出した一部の放射性物質の地下水を介した生活環境への移動を抑制する機能が期待される（注4）。天然バリアの移動抑制機能に係る性能は、自然劣化によって大きく低下することは通常想定されないため、断層等の活動による物理的な損傷を受けなければ、数万年以上にわたり性能維持を期待することができると考えられる。

2. 考慮すべき断層等の影響

(1) 人工バリアの損傷

人工バリアは傾きや撓みに対する緩衝機能を有することから、断層等の活動により岩盤等に変形が生じたとしても、人工バリア全体が損傷するおそれは小さいと考えられる（注5）。また、埋設の終了後は、廃棄物埋設地の空間が埋め戻されることにより地震力の影響は極めて小さくなる。

※1 放射性廃棄物を埋設する場所（人工バリアを含む）。

※2 廃棄物埋設地の埋め戻しが終了すること。

しかし、断層等の活動により人工バリアを取り巻く岩盤等がずれて変位が生じると、ベントナイト系人工バリアがせん断されることによる透水性の増大、セメント系人工バリアに割れが生じることによる低拡散性の喪失、並びに人工バリアの中に定置されている放射性廃棄物の損傷が生じるおそれがある。

(2) 地下水流動経路の形成による放射性物質の移動の促進等

規模の大きい断層は、活動性にかかわらず、既に地下水流動経路を形成している可能性がある^{※3}。また、規模の大きい断層は、現状で地下水流動経路を形成していない場合であっても、長期的な環境変化や断層活動による岩盤等(天然バリア)の亀裂の発生によって、新たな地下水流動経路となる可能性も考えられる。このため、廃棄物埋設地において規模の大きい断層が存在した場合、地下水流動によって人工バリアの劣化が促進されることや、人工バリアの性能が低下した後において、当該経路を介して生活環境への放射性物質の移動が長期にわたり促進されるおそれがある。

3. 断層等に係る要求事項について

3. 1 避けるべき断層等に係る判断の指標

(1) 人工バリアの損傷を防止する観点

岩盤等の変位に伴う人工バリアの損傷防止の観点からは、避けるべき断層等は、断層の規模(長さを含む)よりも活動性を指標とすることが適当と考えられる。

断層の活動性を指標とした岩盤等の変位に係る基準の例としては、実用発電用原子炉の基準^{※4}がある。当該基準では、「後期更新世以降(約12~13万年前以降)の活動が否定できない^{※5}断層等」として次のものを避けることとしている。

- ・震源として考慮する活断層(以下「震源断層」という。)
- ・地震活動に伴って永久変位が生じる断層^{※6}
- ・支持基盤まで変位及び変形が及ぶ地すべり面

(2) 地下水流動経路を通じた放射性物質の移動の促進等を防止する観点

人工バリアの劣化や生活環境への放射性物質の移動を促進するおそれがある地下水流動経路の形成防止の観点からは、避けるべき断層は規模を指標とすることが適当と考えられる。

ただし、断層の長さについては、例えば、孤立した短い活断層は、地表で認められる活

※3 産業技術総合研究所 深部地質環境研究センター「概要調査の調査・評価項目に関する技術資料—長期変動と地質環境の科学的知見と調査の進め方—」(平成19年3月)では、「再活動の可能性がない場合、または再活動性が不明である場合でも、地表から処分地深度までの連結した規模の大きな断層が存在する部分は、既に地下水系の移行最短経路となっている可能性があるため、安全評価において十分な考慮が必要である。」としている。

※4 他の原子力施設の耐震重要施設やSクラス相当施設に適用されている。

※5 規制基準においては、「その認定に当たって、後期更新世(約12~13万年前)の地形面又は地層が欠如する等、後期更新世以降の活動性が明確に判断できない場合には、中期更新世以降(約40万年前以降)まで遡って地形、地質・地質構造及び応力場等を総合的に検討した上で活動性を評価すること。」としている。

※6 他の断層の活動に伴い変位が生じる断層のことをいう。

断層の長さが断層全体の長さを示しておらず、また文献調査により確認できるものは、主に地表付近の断層であることを踏まえると、一概に長さを指標とすることは適当でない。

3. 2 避けるべき断層等についての考え方

(1) 人工バリアの損傷を防止する観点

上記3. 1 (1) に示す実用発電用原子炉の基準と同様に「後期更新世以降（約12～13万年前以降）の活動が否定できない断層等」を避けることによって、人工バリアの漏出防止機能の維持を要求する規制期間（300～400年程度）において、断層等の活動による人工バリアへの著しい損傷が生じる蓋然性を十分に低減することができると考えられる。

(2) 地下水流動経路を通じた放射性物質の移動の促進等を防止する観点

規模の大きい断層であっても、破碎帯の透水性や連結性によっては、必ずしも地下水流動経路を形成していない場合も考えられるが、地表に現れていない部分の透水性について詳細な調査を行うことは困難と考えられる。従って、2. (2) に示す地下水流動による人工バリアの劣化や地下水流動経路を通じた放射性物質の移動の促進を防止するため、活動性にかかわらず、規模の大きい断層を避けて人工バリアを設置することが適当と考えられる。

また、震源断層については、一般に規模の大きい断層であり、「分岐する断層」の発生等によって岩盤等が損傷を受けている領域（以下「損傷領域」という。）も含めて避けることが適当と考えられる。

(3) 活動性にかかわらず規模の大きい断層を避けることについての補足

3. 1 (2) のとおり、地下水流動経路の形成防止の観点から、避けるべき断層は規模を指標としている。規模の大きい断層に関して、実用発電用原子炉等の原子力施設の操業期間に比べ、極めて長期の自然事象を考慮することとしている高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る研究^{※7}では、第四紀（約258万年前以降）に活動した断層でなくても、地表やその地下に規模の大きな断層が存在する場合は、ずれ破壊が及び得る範囲を考慮する必要があるとしている^{※8}。

この点については、上記(2)のとおり、活動性にかかわらず、規模の大きい断層を避けて人工バリアを設置することを要求することにより、実用発電用原子炉等の原子力施設では考慮する必要のない古い断層が、当該原子力施設の操業期間を大きく超える長期において活動したとしても、その断層が新たな地下水流動経路となり放射性物質の移動を促進すること等を防止する効果を得ることができる。

※7 産業技術総合研究所 深部地質環境研究センター「概要調査の調査・評価項目に関する技術資料—長期変動と地質環境の科学的知見と調査の進め方—」（平成19年3月）では、「将来10万～100万年間を念頭に起こり得る地質及び気候関連事象を評価しなければならない」としている。

※8 産業技術総合研究所 深部地質環境研究センター「概要調査の調査・評価項目に関する技術資料—長期変動と地質環境の科学的知見と調査の進め方—」（平成19年3月）では、「第四紀に活動した断層でなくとも、地表やその地下に規模の大きな断層が存在する場合は、ずれ破壊が及び得る範囲を考慮する必要がある。既存断層の再活動性については、サイト影響考慮事項にしているが、調査の結果、再活動の可能性があると判断された場合は、断層の影響の及ぶ範囲を避けることが必要である。」としている。

3. 3 避けるべき断層等に係る要求事項

上記3. 2に基づき、以下を避けた場所に人工バリアを設置することが適当である。

- (1) 後期更新世以降（約12～13万年前以降）の活動が否定できない断層等として次のもの
 - (a) 震源断層及びその損傷領域
(例えば、震源断層の長さを評価した上で、その長さの100分の1以上離れていることをもって、「損傷領域を避ける」ことを目安とすることが考えられる（注6）。)
 - (b) 地震活動に伴って永久変位が生じる断層
 - (c) 変位が及ぶ地すべり面
- (2) 上記に加え、次のもの
 - (d) 規模の大きい古い断層（(a)及び(b)を除く）
(例えば、廃棄物埋設地で確認される破碎帯の幅や累積の変位量が大きいこと^{※9}を、「規模の大きい」ことを目安とすることが考えられる。)

3. 4 許可段階及び建設段階における対応

断層等の確認に当たっては、下記の点に留意し、許可段階及び許可後の廃棄物埋設地の建設のための掘削時（以下「建設段階」という。）に分けて対応を行うことが適当である。

- ・ 許可段階で細かな断層等を判別するための詳細かつ高密度の掘削調査等を行うことは、新たな地下水流動経路を形成し、天然バリアの移動抑制機能に係る性能を低下させるおそれがある
- ・ 建設段階においては、掘削範囲にある断層等を直接確認し、原位置における観察や物理探査等により、活動性に係る履歴、断層破碎帯等について詳細な調査を行うことが可能となる

(1) 許可段階における対応

避けるべき断層等に係る要求事項については、事業許可に係る審査で確認することとなるが、上記3. 3の(a)の震源断層及びその損傷領域については、以下の点を踏まえて、事業許可申請までに適切な調査が行われた上で、それらを避けた場所に人工バリアが設置される設計となっていることについて確認する。

- ・ 震源断層は、文献調査や地表からの物理探査、地震観測等で確認可能
- ・ 震源断層が敷地周辺に存在しその損傷領域が広範囲に及ぶ場合、当該敷地内に人工バリアを設置することは困難

また、下記(2)のとおり建設段階において上記3. 3の(b)～(d)の断層等が確認された場合は、それらを避けて人工バリアを設置する方針であること及びそれが可能な見込みであることについて、予め事業許可申請書に記載することを求め、事業許可において明確にしておく。

※9 例えば、破碎帯の幅については20～30センチメートル程度を越えていること。累積の変位量については別添に示す廃棄物埋設地の「埋設空洞」の径（20メートル程度）を越えていること。

(2) 建設段階における対応

上記3. 3の(b)～(d)の断層等に関しては、事業許可までの物理探査等の調査では、細かな断層等の判別や破碎帯の幅等の確認が困難であることも考えられるため、建設段階で断層等が確認された場合は詳細に調査を行う必要がある。その上で、避けるべき断層等であると確認された場合には、これらを避けて人工バリアを設置することを求める。

(注1) 人工バリアには、低透水性（浸入する地下水を制限する）、低拡散性（緻密な空隙構造によって放射性物質の移動を妨げる）、膨潤性（地下水を含むことにより鉱物の層間の距離が増加し体積が増加する）、収着性（放射性物質を収着して放射性物質の移動を妨げる）及び閉じ込め性（地下水や放射性物質の移動を遮断する）のうち一つ又は複数の特性を有する材料が用いられる。代表的な人工バリアの材料には、ベントナイト系材料、セメント系材料及び金属材料が用いられることが想定される。このうちベントナイト系人工バリアは、他の人工バリアと岩盤等との間に設置されることによって、力学的及び化学的な緩衝材としての役割も期待される。放射性廃棄物自体が人工バリアとしての機能を有する場合もある。

(注2) 人工バリアが設置される地下環境下における人工バリアの腐食や変質による自然劣化による性能低下は、緩慢な変化であり徐々に進展すると考えられることから、性能が突然に大きく低下又はそれによって機能を喪失することは想定し難い。ただし、人工バリアの機能が局所的に喪失することはあり得る。例えば、金属容器が地下水の浸入を遮断する機能は、仮に腐食により貫通部が形成された場合はその時点で低下又は喪失する。

(注3) 人工バリアには以下の機能が求められる。このうち③の機能維持期間については、公衆の被ばく線量を低減すること等を目的として事業者が行う設計によることから、一概に定めない。

- ①埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から埋設の終了までの間は廃棄物埋設地の限定された区域からの放射性物質の漏出を防止する機能
- ②埋設の終了から廃止措置の開始までの間は廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を防止する機能
- ③廃止措置の開始後は廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を防止又は低減する機能

人工バリアに関して、IAEAの安全基準SSR-5「放射性廃棄物の処分」には以下のように示されている。

【要件8：放射性廃棄物の閉じ込め】

廃棄物に付随する放射性核種の閉じ込めを備えるように、廃棄物形態やパッケージングを含む人工バリアは、設計されなければならない、立地環境が選定されなければならない。閉じ込めは、放射能の減衰が廃棄物によって引き起こされる危険を十分に減じるまで、備えられなければならない。さらに、熱を生じる廃棄物の場合において、廃棄物が処分システムの性能に対して悪影響を与え得る量の熱エネルギーを生じている間、閉じ込めが備えられなければならない。

3.40. 放射性廃棄物を定められた期間にわたり廃棄物形態及びパッケージングへの閉じ

込め、比較的短寿命の放射性核種の大部分が原位置で減衰することを確保しなければならない。低レベル廃棄物の場合、そのような期間は数百年程度 (several hundred years)、高レベル廃棄物の場合は数千年程度 (several thousands years) になるだろう。高レベル廃棄物の場合は、処分システムの外部への放射性核種のいかなる移行も、放射性崩壊により発生した熱が実質的に減少した後にのみ生じるということも確保されなければならない。

(注4) 天然バリアは、埋設された放射性廃棄物及び人工バリアの周囲に存在する岩盤等であり、大きな亀裂や透水性の高い場所がなければ、放射性物質の移動の原因となる地下水の流動が岩盤等の割れ目などに限定されることによって地下水の流速が抑えられる。また、岩盤等への放射性物質の収着によって放射性物質の移動が抑制されることも期待できる。

中深度処分においては、天然バリアと人工バリアの機能が相まって、廃止措置の開始以降における放射性物質の移動を抑制する性能が実行可能な範囲内で最も優れるものとして設定したものであることを要求することとしている。また、自然事象シナリオの評価結果として公衆の線量が線量拘束値 (年間 0.3 ミリシーベルト) を超えないことを要求することとしている (令和2年度第16回原子力規制委員会 (令和2年7月15日) 資料3)。

(注5) 使用が想定される代表的な人工バリアの一つであるベントナイト系人工バリアは、他の人工バリアと岩盤等との間に設置され、力学的な緩衝材としての役割が期待される。このため、岩盤等の傾斜や不等沈下が生じることによって傾きや撓みが生じたとしても、人工バリアの機能に大きな影響を及ぼすことは想定されない。

(注6) 吉田ら(2009) ※10より抜粋

「・・・, このような断層運動に伴う影響範囲に関しては、‘プロセスゾーン’ という考え方がある※11。これは、断層の幅と長さには一定の相関関係が存在するとともに、断層の影響範囲がある程度推測可能であることを示した考え方である。とくに断層と影響幅との関係について、VERMILYNE and SCHOLZはその幅と確認されている断層の長さの関係から、幅 (W) と長さ (L) には、 $W/L \approx 10^{-2}$ の関係があることを述べている。これに関して今回調査の結果から示される、断層運動によって形成された連続性の悪いネットワーク状の割れ目が確認される範囲の断層片側約 200m を、現在確認されている阿寺断層の長さを用いてその相関を示したものが図-7 である。この図上でみる限りにおいては、阿寺断層においても幅と断層の長さには上記の関係があり、阿寺断層系においてもプロセスゾーンという概念が見かけ上、適用できるように思われる。しかしプロセスゾーンという考え方をを用いる場合、 $W/L \approx 10^{-2}$ という関係が断層運動と周辺岩盤のこういった現象を表現したものなのかなどといった、基礎的な部分の検証を行うことが重要と思われる。」

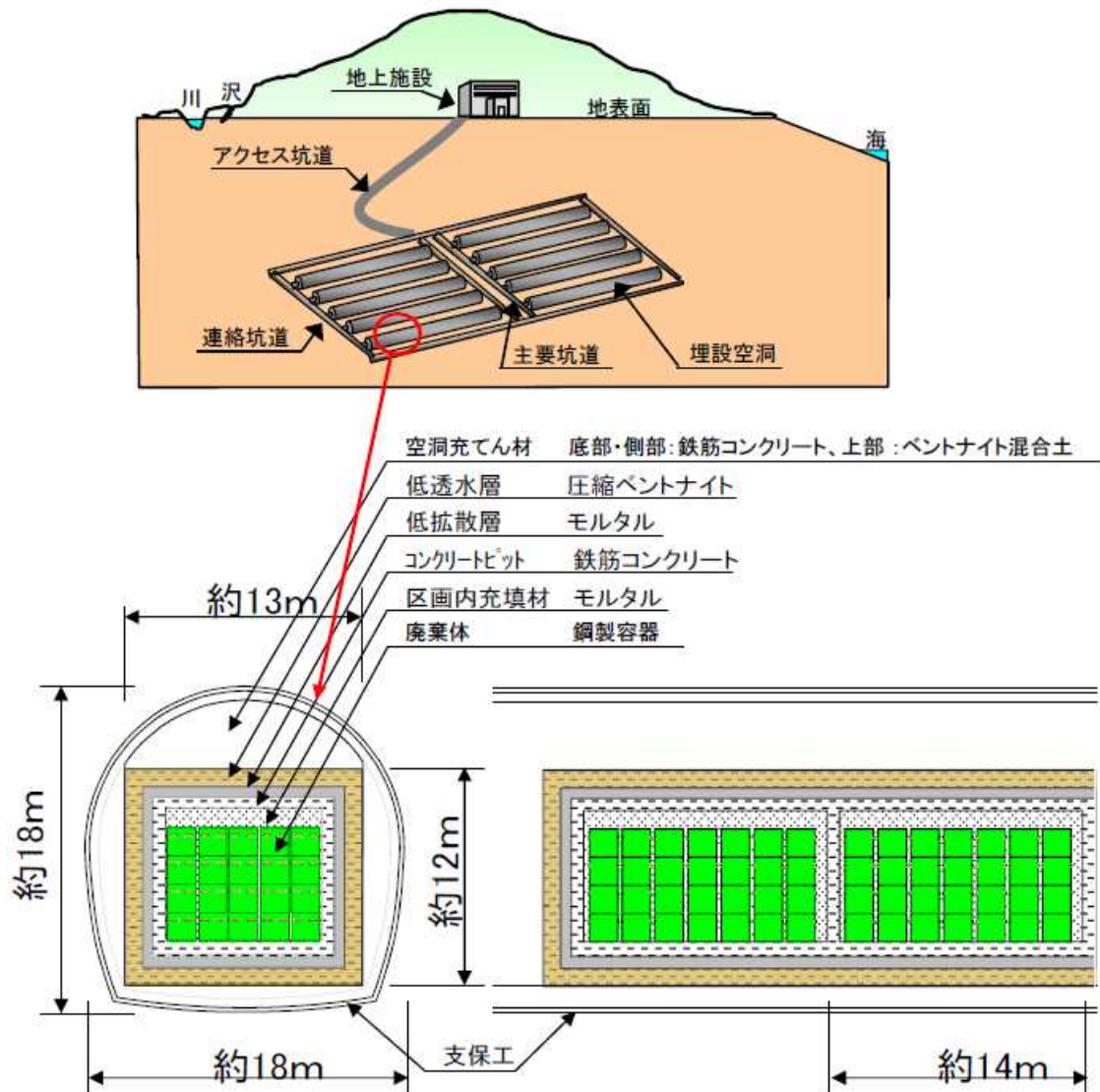
※10 吉田英一, 他「断層周辺に発達する割れ目形態とその特徴—阿寺断層における‘ダメージゾーン’解析の試み—」応用地質, 第50巻, 第1号, p16-28, 2009.

※11 ERMILYNE, J.M. and SCHOLZ, C.H. : The process zone : A micro-structural view of fault growth, Journal of Geophysical Research, Vol. 103, pp. 12223-12237 (1998).

(別添)

中深度処分の廃棄物埋設施設のイメージ

(「廃棄物埋設地」は、放射性廃棄物(廃棄体)を埋設する場所(人工バリアを含む)であり、
下図においては、「埋設空洞」の領域。)



第2回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合(平成27年2月12日)資料2-1
「原子力発電所等の廃止措置及び運転に伴い発生する放射性廃棄物の処分について(電気事業連合会)」
より抜粋