

# 放射性廃棄物地層処分と地質長期未来予測

小出 仁<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

人間活動の高度化と人口増大のため、地球の環境への負担が高まっている。廃棄物は量・質共に加速度的に増加しつつあり、都市生活だけでなく高度産業社会そのものを脅かしている。廃棄物の再利用・再資源化も進められているが、廃棄物を無くすことは不可能であり、増加の速度を遅らせるのがせいぜいであろう。人口が増え、その活動が活発になれば、必然的にエネルギー消費が増大し、化石燃料を使うと二酸化炭素という廃棄物が増え、地球温暖化を招くことになる。二酸化炭素を発生しないエネルギー源の中で、もっとも大きなエネルギー源である原子力でも放射性廃棄物という別種の廃棄物が発生する。新製品ができ、数多い材料が使われると、新しい種類の廃棄物が出る。人間の生活が便利になれば、それにとまって廃棄物が増える。廃棄物を如何に上手に処分して、環境に影響を与えないようにするかが、人類文明の将来を左右すると言っても過言ではない。

廃棄物と言っても多種多様であるが、現在は放射性廃棄物の処分に関する研究がもっとも進んでいる。放射性廃棄物は十分に減衰して、事実上無害になるまで、生活環境から隔離しなければならない。隔離しなければならない期間は、放射性廃棄物の種類によって異なる。高レベル放射性廃棄物を地層処分するには、数千年ないし数万年にわたる長期間の安全性を確かめる必要がある。低レベル放射性廃棄物の場合は、数100年程度の隔離が保証されれば、十分である。また、両者の中間程度の隔離期間を要する放射性廃棄物もある。評価しなければならない期間の長短はあるが、いずれにしても、従来の工学的問題で扱われてきたケースより格段に長期の問題になる(小出, 1990)。長期未来にわたる安全性を確かめるものにするためには、廃棄物の隔離に影響するかも知れない天然現象(第1表)などの未来予測が必要になる。ここでは天然の様々な事象の未来予測をどのように実現するかを述べる。

なお、高レベル放射性廃棄物地層処分の研究に関する

第1表 核種放出シナリオに関わる可能性のある天然事象(及び主な対策)

<ul style="list-style-type: none"> <li>○隕石・すい星の衝突(深く埋設)</li> <li>○侵食による露出(深く埋設)               <ul style="list-style-type: none"> <li>・海水準低下</li> <li>・地殻の隆起</li> <li>・氷河侵食</li> <li>・崩落・地すべり</li> <li>・岩屑流・泥流</li> <li>・火山噴出物の影響</li> <li>・洪水</li> </ul> </li> <li>○地殻変動による破壊 (地殻変動の予測)               <ul style="list-style-type: none"> <li>・マグマ貫入・水蒸気爆発</li> <li>・角礫岩脈・角礫パイプ形成</li> <li>・ダイアピル(岩塩等)</li> <li>・流体圧破壊</li> <li>・開口性割れ目形成</li> <li>・断層破砕帯形成</li> <li>・褶曲・キンクバンド形成</li> <li>・液状化</li> <li>・クリーブ変形</li> <li>・解放割れ目形成</li> <li>・地震動の影響</li> </ul> </li> <li>○岩質変化(変化範囲の予測)               <ul style="list-style-type: none"> <li>・風化</li> <li>・変質</li> <li>・圧密</li> <li>・続成作用</li> <li>・溶脱</li> <li>・水・岩石反応</li> <li>・相変化</li> <li>・微生物</li> <li>・有機物</li> <li>・硫化物</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○地下水による移行 (移行メカニズムの解析)               <ul style="list-style-type: none"> <li>・地下水流の変化</li> <li>・隆起・沈降による水流変化</li> <li>・海水準変動による水流変化</li> <li>・地震による水流変化</li> <li>・気候変化の影響</li> <li>・天水・海水の浸入</li> <li>・塩水の浸入</li> <li>・酸性水の浸入</li> <li>・汚染水の浸入</li> <li>・熱水の浸入</li> <li>・火成活動・地熱</li> <li>・その他の地下水性状変化</li> <li>・ガスの浸入</li> <li>・圧密脱水</li> <li>・クラックによる透水性増加</li> </ul> </li> <li>○未検出欠陥 (非破壊調査技術の開発)               <ul style="list-style-type: none"> <li>・断層・破砕帯</li> <li>・不整合面・岩質不連続面</li> <li>・岩脈</li> <li>・層理・節理</li> <li>・空洞</li> <li>・水路チャンネル</li> <li>・砂層等の透水性地層</li> <li>・異常高圧層・未固結層</li> <li>・風化・変質ゾーン</li> <li>・有用資源</li> <li>・有害な化学成分を持つ岩体・鉱床</li> <li>・ガス・塩水・酸性水ポケット</li> <li>・高温岩体・マグマ溜り</li> </ul> </li> </ul>
---	---

解説及び論文が、地質ニュース439号・440号・448号及び地質調査所月報第42巻第5号・第6/7号に掲載されているので、参照されたい。

1) 地質調査所 環境地質部

## 2. 天然事象の長期未来予測の方法

天然事象の未来予測という、非現実的なことのように感じる人も多いであろうが、実際には天気予報のように、かなり昔から実用化されているものもある。また、地震予知や火山噴火予知のように、組織的な研究が行われつつあるものもある。あまり意識されていないが、日常生活でもある程度の未来予測は常に必要である。今日の天気や道路の混雑度等のさまざまな予測の基に人々は行動している。工学技術も製作物の有用性や耐久性等の予測が必要である。建造物は数十年程度の耐久性が要求され、都市は数百年程度の予測により建設されるべきであろう。

放射性廃棄物の地層処分のための未来予測は、これらの従来への予測より、長期の予測を必要とする。一般に、長期になれば予測の不確実性が増すが、天然事象の場合には、実用的には必ずしも長期予測の方が難かしいとは限らない(第1図)。例えば、地震はほぼ同じ場所で、同程度の規模で、同じような間隔で繰り返し発生する性質があり、また活断層の解析等によっても発生場所や規模を推定できるようになっている。したがって、長期の予測はかなりの精度で可能になっているが、地震が何日後に発生するかというような、短期予知はまだ難かしい。

天然事象は変化が遅く、また、同じような現象が繰り返し発生する場合も多いので、人間の関わる事象より長期予測ははるかに容易である。しかし、一方では、変化が遅くまた稀にしか発生しないために、資料が得難く、研究し難い面もある。このため予測の根拠になるような

良好なデータを得るために大きな努力を要する。

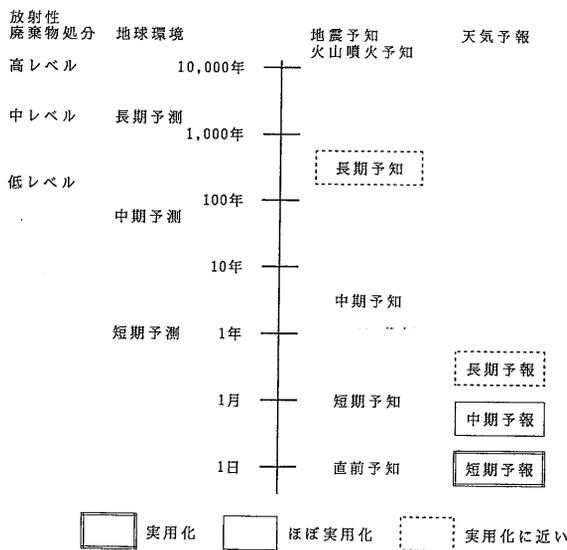
未来予測の方法を形態的に見た場合、①直観的手法、②探索的手法、③規範的手法、の3種がある。直観的予測手法は、いわゆるエキスパート・ジャッジメント(専門家による判断)であるが、その現象の機構が解明されていない場合には、現実的に重要な手法である。探索的手法は因果関係・連続性を手がかりに将来を予測する方法で、天然事象の未来予測の大部分にはこの手法が適用できる。規範的手法は、探索的手法とは逆に、まず目標を設定し、それに到達するための方法を探るので、天然事象の未来予測にはあまり応用できない。しかし、処分地の選定や工学バリア(廃棄物を封入する隔壁)の設計等には、探索的手法と規範的手法を組み合わせて徐々に目標に近づけるフィードバック手法が活用されるようになると思われる。

天然事象の未来予測の具体的な手法としては次のような手法あるいはそのいくつかの組み合わせが必要になるであろう。

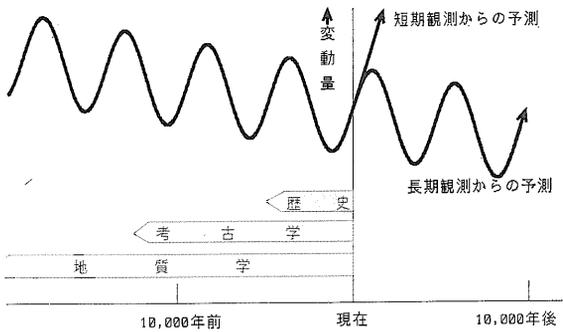
①外挿法による予測：過去の傾向を未来に延長して予測する。探索的予測手法の代表であり、変化が遅く、連続性がある地質現象には特に有効な予測法で、地質未来予測の根幹になると考えられる。このため、現在を含む近い過去の地球史を研究する第四紀学やネオテクトニクスが役立つ(日本第四紀学会, 1987)。この方法を使用するためにはどの程度の期間、現在の傾向が続くかを予測する必要がまずあり、これは他の方法によって定められなければならない。等速度で進行する事象には、単純外挿ができるが、天然事象は断層のずれのようにステップ状に進行するものや、周期的変動を伴うものが多い。これらの事象は、その周期性等の法則を読みとることにより、その傾向を延長して、外挿ができる。周期性のある現象では、観測期間が短いと、傾向を見誤る恐れがある(第2図)。したがって、予測する期間に比較して、十分長い観測期間が必要である。

②類推法による予測：現在問題になっている事象と全部ないし一部が似た事象を、過去のデータから探し出して、それからの類推により未来予測を行う。天気予報や地震予知の方法として考えられているものは、大部分がこの手法といてよい。例えば、地震のドーナツ・パターン(大きな地震の直前に前震が周辺で活発になり中心が空白域になる現象)からの予測は類推法の典型である。天然事象には有効な手段であり、放射性廃棄物地層処分の研究においても、いわゆるナチュラル・アナログ(天然類似物)あるいは考古学的アナログとして安全性確認に重要な手法になっている。

③実験による予測：予測対象と似たような状態を人工



第1図 地球技術における未来予測と観測期間。



第2図 外挿法による予測と観測期間。

的に作って、観測する。近代科学の根幹をなす手法であるが、超長期の予測は困難である。しかし、条件を精密に制御できるので、機構の理解のためには欠くことができない。室内実験、モデル実験、原位置実験があり、それぞれ一長一短があり、それぞれの短所を補い合う必要がある。

④確率統計的予測：現象の生起確率を統計的に求めて、将来の発生確率を予測する。長期未来予測の不確実性を織り込むために安全評価に確率を導入する傾向にある。ただし、天然事象では、確率を決定する基になる良質の統計データが得難いことが問題である。特に、処分地に固有(サイト・スペシフィック)な天然事象の統計データを得るために今後大きな努力を要することになる。

⑤概念モデルによる予測：概念モデルによって未来予測を行う。日本のようなプレート境界に近い地域の地殻変動の未来予測には、プレートテクトニクス・モデル等による予測が重要である。

⑥数値シミュレーション・モデルによる予測：予測対象も完全に同じ過去の現象はないし、実験でも複雑な地下の状況を完全には再現できない。様々な要素がからみあった現象の未来変化を予測するには、コンピューターによる数値実験が欠かせない。力学的安全性の解析や浸透流解析が、地層処分の性能評価のため実施されている。しかしながら、地下の複雑な要素を考慮した三次元不均質媒体の連成解析を行える総合的なシミュレーションは、まだ可能になっていない。今後は、コンピューターのハードおよびソフトの急速な進歩によって、かなりの程度までの解析が可能になるであろうが、実験や類推法による検証が必要である。地層処分のためのモデルの有効性検証のため、大規模な地下実験や総合的なナチュラル・アナログの研究が各国で実施されている。

⑦安全評価モデル：複雑なプロセスや大規模なシステムでは、現象そのものには必ずしも似ていなくても、総合的な発生確率や影響を評価できるようなモデルの構築

が有用である。複合的なプロセスでは現象に忠実なシミュレーションモデルを造ろうとすると、複雑になりすぎて計算時間が膨大になったり、計算精度がかえって悪くなることもある。このような場合、例えば要素毎の発生確率を求め、それらを様々に組み合わせて全体としての発生確率を求める方が正確に評価できることがある。

### 3. 各予測期間の未来予測の特質 (第2表)

#### 3.1. 1000年以内の未来予測

工学で、従来扱われてきた信頼性解析や予測は、長くてもせいぜい100年程度で十分であった。それに比較すると、1000年程度の予測でもかなり長期になる。地層処分では、この程度の時間範囲では、主に工学バリアによって防護することになるので、工学バリアの損傷に至るような事象の予測が中心になる。天然事象では、地下の処分場への影響は少ないとはいえ、多くの人々の地震に対する不安感が強いことを考慮すれば、地震に関する評価がやはり必要であろう。建造物に対して従来使われている河角マップ等の地震動予測図は100年から1000年程度の歴史的地震を資料にして作成しているもので、これを1000年後までの予測に使用することは問題がある。ま

第2表 地層処分に関する未来予測の期間

中期未来予測 100年 ～1,000年	主に工学バリアで封入。 地震の1回発生の周期と同程度。 地殻変動は現在の傾向が続く、 ただし、活断層があっても、必ずしも期間内に地震を発生するとは限らない。 気候変動・地下水流の変化はありうるが、人為的影響の方が大きい。
長期未来予測 1,000年 ～10,000年	高レベル廃棄物地層処分の中心課題 地殻変動は現在の傾向が続くので、 予測可能。 気候変動・地下水状態の変化は人為的効果もあり、単純に外挿できないが、予測できるようになるであろう。
超長期未来予測 10,000年以上	高レベル廃棄物も放射性はかなり低くなる。 直接露出ないしそれに近いような状態にならないことを確認すれば十分であろう。 大きな地殻変動の予測をする。 プレート運動の状態の変化も考慮にできるようになれば、予測可能。

た、地層処分では遠方の大地震の影響は小さいので、むしろ内陸の活断層による地震のほうに注意する必要がある。したがって、内陸の活断層を基にした地震動の予測図(島崎・松田, 1985)が有用である。

氷河期が来るというような大変動は1000年程度では生じないが、ある程度の気候変動や海水準変動はある。したがって、地下水の流動状況の変動もありうる。しかし、この時期は天然事象の変動より、人為的事象の方の影響の方がはるかに大きいと考えられる。

### 3.2. 1000年以上1万年以内の長期未来予測

この期間は、天然事象については、近い過去から現在に至る傾向が、基本的にはそのまま続くと思われよう。したがって、いわゆる第四紀の研究がもっとも有効に活用できる期間である(日本第四紀学会, 1987)。プレート境界や火山フロントの位置は、ほとんど変化しないので、地殻変動、地震分布、火山分布等はほぼ現在の大勢から予測できる。気候変動はかなり大きく、寒冷化し、海面が相当低下する可能性があるが、一方では人為的効果によって温暖化する可能性もある(米倉, 1987)。したがって、地下水の状態はかなり変化する可能性があり、外挿法だけでは予測できない。しかし、様々な予測法を活用すれば、この期間の天然事象はかなりの精度で予測可能になるであろう。

### 3.3. 1万年以上の超長期未来予測

1万年以上の超長期になると、現在の傾向がそのまま続くとは即断できない。したがって、不確実性が大きくなってくる。しかし、1万年以上になれば、高レベル放射性廃棄物も天然のウラン鉱床とあまり変わらない程度まで放射性が低下している。したがって、ごく大きな影響のある天然事象のみの大まかな予測で、安全上十分である。

したがって、プレートテクトニクスに直接関係するような大きな地殻変動の予測を行えばよいと思われる。日本列島周辺で第四紀の間に発達した大きなプレート運動の変化は、プレート境界が北海道中部から日本海東縁に転移したことである(瀬野, 1987)。この変化は約50万年前に終了しているが、数万年あるいは数十万年未来に、これに相当するような変動がある可能性については不明である。しかし、プレート運動の変化は短い時間では発生しえない。上記転移でもおそらく100万年以上の時間を要しているであろう。したがって、プレート運動や応力の精密な観測やプレートモデルの解析によって、この

ような大きな変化の予測は将来可能になるだろう。

## 4. おわりに

高レベル放射性廃棄物地層処分は、長期にわたる安全性評価が必要であり、様々な要因を考慮する必要がある。地層処分では第一に必要な天然事象の長期未来予測の方法について概略を述べた。単一の方法による未来予測は信頼性が低い。複数の方法により未来予測を行って、互いの信頼性を確かめる必要がある。例えば、外挿法により長期の未来予測を行う場合は、他の方法によって予測期間中に傾向の変化がないことを確かめなければならない。天然事象の長期未来予測の方法の開発には、その検証のために長期にわたる研究を要する。高精度の未来予測の実現はきわめて困難な課題であるが、地層処分の安全性評価に限れば、変動範囲の予測が可能な程度の予測ができれば十分である。例えば、材料の強度には本質的にばらつきがあるが、強度の変動範囲は予測できるので、推定値に十分な安全率をかけて建造物などが設計され、実用上支障無く使用されている。予測される変動幅に対して、地層処分システム全体の裕度を評価するためには、そのためのシミュレーション・モデルないし安全性評価モデルを開発する必要がある。しかし、モデルの有効性を可能な限り実証的に確かめるため、原位試験やナチュラル・アナログ研究による検証とモデルの改良が重要である。

## 文 献

- 小出 仁(1990): 高レベル放射性廃棄物地層処分。資源・素材学会誌, 106, 495-499。  
 日本第四紀学会(1987): 百年・千年・万年後の日本の自然と人類, 第四紀研究にもとづく将来予測, 古今書院, 231p。  
 瀬野徹三(1987): 日本付近の新プレート境界と50万年前の変動。科学, 157, 84-93。  
 島崎邦彦, 松田時彦, Wesnousky, S. G. and Scholz, C. H. (1985): 日本の地震危険度マップ(統報), 地震学会講演予稿集, no. 1, 293。  
 米倉伸之(1987): 第四紀の海面変化とその将来予測, 「百年千年万年後の日本の自然と人類」, 古今書院, p. 38-59。

---

KOIDE Hitoshi (1992): Geologic disposal of waste and long-term geologic prediction.

---

<受付: 1991年5月24日>