

真に最終的な廃棄物管理法

非常に深いボーリング孔処分は、 高レベル廃棄物や 核分裂性物質のための 現実的なオプションか？

ニール・チャプマン (Neil Chapman) 著
ファーガス・ギブ (Fergus Gibb) 監訳

原子力計画を持つほとんどの国で、長寿命廃棄物処分のための望ましいオプションとして深地層処分が追求されており、この概念に関する研究開発が30年近く続けられている。一般に深度300～1000mに位置する坑道型処分場に焦点が当てられてきた。処分場の岩石坑道または保管室内の人工バリア・システム中に、調整された廃棄物パッケージが定置される。処分位置は、坑道や保管室本体、またはその壁や床に掘られた浅い（一般に5～10m）立坑であり、立坑内には1つまたは数個のパッケージが収容される。大半の概念では、最終的な閉鎖と密封を行う前に、掘削された空洞が完全に埋め戻される。

深層処分概念の代案も提示されたが、あまり注目されてこなかった。本記事では、一部の種類の長寿命廃棄物のためのオプションとして、地表（または地下空洞）から掘られたボーリング孔または立坑を利用して、従来の処分場深度よりずっと深い数キロ

メートルの位置に処分する可能性を検討する。

非常に深いボーリング孔への関心の理由。各国の処分計画では、非常に深いボーリング孔処分の利点と欠点を検討した結果、設計基準として従来の坑道型処分場に戻るが多かった。しかし、坑道型処分場が常に長期処分のための最善のオプションであるか問うことは、数々の要因から見て有意義である。非常に深いボーリング孔は、例えば下記のような状況において、適切に考慮すべき実行可能な解決策を提供するかもしれない。

- 燃料サイクルによる再利用がなければ、処分する必要のある核分裂性物質（兵器由来を含む）の量は増え続ける。それは容量としては少ないが、核物質防護に関する特殊な問題をもたらす。
- 再処理方式を採用する小規模な原子力計画を持つ国では、比較的少量の高レベル廃棄物（HLW）が発生する。そのような国が、経済的利点のある共用、多国間、または広域的な処分場を選択しない場合、国内の専用処分場の代わりに、深いボーリング孔が経済的に実行可能な代案となるかもし

れない（場合によっては、広域的な共用の深いボーリング孔施設が実行可能な代案になるかもしれない）。

- ボーリング技術と立坑掘下げ技術の進歩によって、3km以上の深度に達する大口径ボーリング孔の掘削が、より容易かつ経済的になりつつある。

さらに、深いボーリング孔には、次のような社会の受容性に関する魅力がある。適切に選ばれた人里離れた場所の安定な地殻で、何千万年にわたって破壊的な自然プロセスの影響を受けずに、廃棄物を隔離する能力を提供する。本記事では、非常に深いボーリング孔の利点および欠点と、このオプションを検討する価値があると思われる状況について論じる。

原子力の黎明期

放射性廃棄物を深い（100m以上）または非常に深い（1km以上）ボーリング孔内に処分する考えは、少なくとも1950年代からあった。原子力の黎明期に、米国とソビエト連邦が液体廃棄物のボーリング孔への注入を始めたが、米国はだいたいにその慣行を中止した。未調整の液体廃棄物またはスラリー（HLW、グラウト、および／またはセメントの混合物）がボーリング孔に注入され、その後ボーリング孔は、密封または施栓される場合とされない場合があった。このような処分は、旧ソ連¹のクラスノヤルスクやトムスクなど、いくつかのサイトで行われた。1つの発展として、母岩温度が固相温度をはるかに超えて上昇するような量と濃度のHLWをボーリング孔に注入する方法が考えられた²。廃棄物の一部またはすべてが部分熔融物または完全な熔融物に取り込まれ、冷却に伴ってガラスまたは結晶質岩として固化する。

大容量の廃棄物を処分する別の方法³として、深さ2～5kmのボーリング孔底部に設けられた「原子力チムニー」に液体廃棄物を注入することが提案された。このチムニーは、断裂が高度に発達した垂直に伸びた領域であり、小規模な核爆発によって作ることができるかもしれない⁴。母岩は、頁岩のような浸透性の低い媒体である。このような深部地下熔融（DUMP）法の研究は、1970年代と80年代初めに米国で盛んであった⁵。

ボーリング孔処分法

液体廃棄物の処分は、短期間でも安全性を実証するのが難しいので、ここでは考えないことにする。しかし長年の間に、固形廃棄物のためのボーリング孔処分法が数多く提案されてきた。それらは一般に

7種類に分類される。

- 原位置熔融。原位置熔融⁶はDUMPに類似するが、廃棄物の封入を伴う。複数の小さな金属製コンテナが、ボーリング孔（または掘削された空洞）の底部に置かれ、母岩の瓦礫によって密封される。やがて、HLWからの熱によって、廃棄物、コンテナ、および瓦礫が融合される。母岩が経験する温度と応力は、前述の液体注入法の場合より低い。

- 深層自己埋没。Logan⁷が提案し、Kascheevほか⁸がモデル化したこの概念では、熱を発生する廃棄物が詰められた重い金属製コンテナが、おそらくは冷却または冷凍状態で、結晶質母岩中の深さ最大2kmのケーシング付きボーリング孔底部に下ろされる。冷却が終わると、周囲岩石が加熱されて熔融し、廃棄物パッケージは重力の影響で徐々に沈下し、廃棄物の熱が完全に消耗すると停止する。予備的な計算⁷によると、10kmを超える深さまで沈下が可能である。しかし、コンテナ表面温度は非常に高くなる（約1800℃）。この方法では、同じボーリング孔に複数の容器を処分できる。

Byalkoほか^{9, 10}が提案した方法では、硫黄で充たされた深さ4kmのボーリング孔の最上部から、HLWが入った多数の小型容器（直径0.2～0.3m）が短い間隔で投入される。容器からの熱によって硫黄が約120℃で溶解し、容器がボーリング孔底部に沈下・蓄積する。蓄積された容器によるさらなる加熱によって、周囲岩石が熔融し、直径数メートルの「液滴状マグマ」が形成される。このマグマは、周囲岩石を熔融する能力がなくなるまで「自己埋没」する。Logan¹¹は、Byalkoの概念を拡張し、例えばフランスのコジェマ社製R7/T7ガラス固化廃棄物のような、当初の概念^{7, 9}より発熱量の小さい廃棄物にも適用できるようにした。

- 低温（封入）ボーリング孔処分。この方法では、廃棄物をスチール、銅、またはチタン製の容器に入れ、ボーリング孔底部に定置してから、孔を密封する。意図するのは、廃棄物を深部に処分することにより、放射性核種が移行して生物圏に戻るまで長い時間がかかり、その間に放射能の十分な減衰および／または希釈が起きるので、危害は無視できる程度になることである。腐食、熱水対流、密封材の劣化などを極力抑えるために、コンテナ内外の温度を約150℃以下に保つ必要があると考えられるので、この方法は通常、ガラス固化やSYNROC固化によって十分に冷却または希釈されたHLW廃棄体について提案されてきた¹²。結晶質岩中でのこの種の処分は、スウェーデンでHLW^{13, 14}および使用済み燃料集合体（ペントナイトに囲まれたチタン製コンテナを使用）¹⁵について詳細に研究された。後者における長期安全性

は、少なくとも KBS-3 の坑道型処分場概念と同等と判定されたが、実証が難しいと思われることから、従来型処分場の方が望ましいと判断された。低温封入ボーリング孔処分のためにほかに検討された母岩として、イタリアなどの粘土¹⁶と米国などの岩塩がある。

- 古い石油・ガス井中の処分。流体の移動に対する石油・ガス貯留層の完全性は、何百万年も保たれてきたものであり、一般に生産活動を経ても保たれている。多くの貯留層は、「長い」ボーリング孔によって探査され、そのボーリング孔には、貯留層準で水平に近い多くの孔が交差する。生産終了後に、そのような井戸は水理学的に安全なサイトを提供し、ガス貯蔵に利用されたり、二酸化炭素隔離のために試用されたりしている。また、放射性廃棄物処分のための利用も提案されている。後者は、厳密には低温定置の特殊な場合に過ぎないが、特に既存のボーリング孔を利用するという点で、別に考えるのが最善である。涸渇した石油・ガス貯留層の水文地質学的隔離能力を放射性廃棄物処分に利用する方法は、Watts¹⁷によって提案された。HLW のセラミック (SYNROC など) ディスクが装荷された薄い金属スリーブが、貯留層中の井戸に沿って縦一列に定置される。個々のコンテナは、井内にセメント接合され、ボーリング孔の残りの部分は密封される。著者らが知るかぎり、このオプションは追求されていない。それはおそらく、現在の最大口径の石油・ガス井でも、廃棄物パッケージの大きさが0.15m 程度に制限されるためであろう。これは、ガラス固化 HLW などの既存のパッケージの直径よりずっと小さい。
- 高温 (封入) ボーリング孔処分。Gibb^{18, 19} は、特製コンテナに収められた熱発生 HLW を、花崗岩質大陸地殻中に掘られた深さ 4 ~ 5km の大口径ボーリング孔の下部に定置することを提案した。放射性崩壊によって廃棄物パッケージが徐々に加熱され、周囲花崗岩中に顕著な大きさの部分溶融域が生じるような温度に達する。それは約850 である²⁰。廃棄物からの発熱が減少するにつれ、溶融物が徐々に冷却して結晶化し、パッケージは固相花崗岩の石棺によって密封される。その周囲には熱変成帯が形成され、すべての断裂は、アニーリングと水和・鉱化作用によって塞がれる。この方法は、廃棄物自体は再固化した母岩に取り込まれず、またパッケージの沈下が起きない点で、他の「深部岩石溶融」法とは異なる。
- 混成型 (封入) ボーリング孔処分。低温 (封入) 処分における難しさの1つは、パッケージ定置域の上位におけるボーリング孔の密封である。粘土、セメント、およびグラウトに基づく従来の密封材

は施工が難しく、予想される高温での耐久性と性能に疑問がある。結晶質岩中の処分における1つの解決策は、前述のように定置域の上位において、熱発生 HLW の入ったコンテナを用いて、母岩の部分溶融と再結晶によって間隔を置いて孔を密封することである。あるいは、電熱によってこれを達成できるかもしれない。このような方法は、現在研究中である²⁰。

- 使用済み密封線源処分。医療、産業、および研究目的で発生する使用済み線源を、中間深度 (最大数百メートル) のボーリング孔で処分する可能性について、研究が盛んになっている。そのような線源は、一般に小容量である。地層処分場の計画を持たない国や地域にとって、中間深度処分は、放射線事故歴がある往々にして問題のある廃棄物を処分するための確実な手段となる。この方法は、国際原子力機関 (IAEA) が評価しており、南アフリカ共和国で試験的評価が行われている。

合理的なオプション

深層自己埋没は、理論的には魅力があるが、端点が拘束されないために信頼性のあるモデル化が難しく、そのため規制機関は許認可を発給しにくい。石油・ガス貯留層中の処分には、2つの主要な短所がある。既存の探鉱ボーリング孔の大きさが通常の廃棄物パッケージに比べて小さいこと (ただし、処分のために今後調整する廃棄物や、臨界の問題がある廃棄物の場合、これは必ずしも問題ではない) と、資源のある地域を利用することである。後者は、おそらくずっと将来の人間活動による干渉の可能性という問題を提起する。現在は涸渇したと思われる貯留層が、新たな可能性を求めて探査されたり、多量の二酸化炭素の処分などの他の目的で開発されたりするかもしれない。拘束的な岩石溶融法は、見込みはあるものの、まだまだ研究段階である。性能について多くの疑問に答えなければならない。また、高温を伴うことは、この概念の受容性にとって障害になるかもしれない²¹。したがって、これまでに論じたさまざまな概念のなかで、現在最も考慮に値するのは低温封入処分である。非常に深いボーリング孔処分の利点と欠点に関する以下の議論では、このモデルを用いる。

処分概念モデル

容器に封入された廃棄物の低温処分概念は、いくつかの形態をとることができる。モデルとして、平均的な地熱流の安定な結晶質基盤岩中に、深さ約4000m のボーリング孔を建設することを考える。そのような基盤岩は、始生代および原生代楕状地や

大規模な花崗岩質貫入岩のように、地表まで広がっているかもしれないし、厚い顕生代堆積物シーケンスに覆われているかもしれない（図1参照）。後者の状況では、中生代以降の泥岩、頁岩、および粘土のようなより若い粘土質堆積物が、基盤岩を水理学的に高度に隔離するという利点が追加される。これにより、基盤岩の水文地質学的状況は、より動的で浅い地下水帯から効果的に切り離される。従来型処分場の安全性評価では、浅い地下水系を理解することが一般に中心問題となる。

本モデルでは、大口径ボーリング孔中の長さ約1000mの処分域を考える。垂直ボーリング孔の場合、最も浅い位置の廃棄物パッケージは、深度約3000mである。このモデルの安全概念は、ほとんどすべて地質学的な天然バリア内の封じ込めに基づいている。これは、母岩中の事実上完全な封じ込めの1種である。この封じ込め概念の要点を以下に記す。

- 乱されていない条件下で、処分域の岩石の空隙・断裂中の流体は、事実上移動しないと予想される。

物質移動は、拡散または移流によってのみ起き、拡散輸送に近い速度になる。間隙流体は塩分濃度が高いと予想され、TDS値が海水に近い地下水から、真の塩水までの範囲にわたる。流体密度が高く、動水勾配が低いことから、流体は水文地質学的に安定で、滞留期間は何百万年にも及ぶことが示唆される。これは、コラ半島（ロシア、12km長）Gravberg-1（スウェーデン、6km長）およびKTB（ドイツ、試験孔4km長、本孔10km長）の大深度地殻ボーリング孔で得られた証拠と調和的である。地下3kmより下位の岩石には、塩分濃度の高い水溶液を包有する多数の断裂帯があるが、透水係数¹³は 10^{-9}ms^{-1} 未満である。KTB試験孔の場合、深度約3.5kmの岩石中の流体は、 10^{-11}ms^{-1} 未満の速度で移流すると見られる。このような塩分を含む深部流体は、異なる地層中に含まれ、互いに物理・化学的に隔離され、地表付近で循環する地下水からも何百万年にわたって隔離されてきたことが、同位体の証拠から示される。

- 処分される廃棄物は、発熱が少ないか、または処

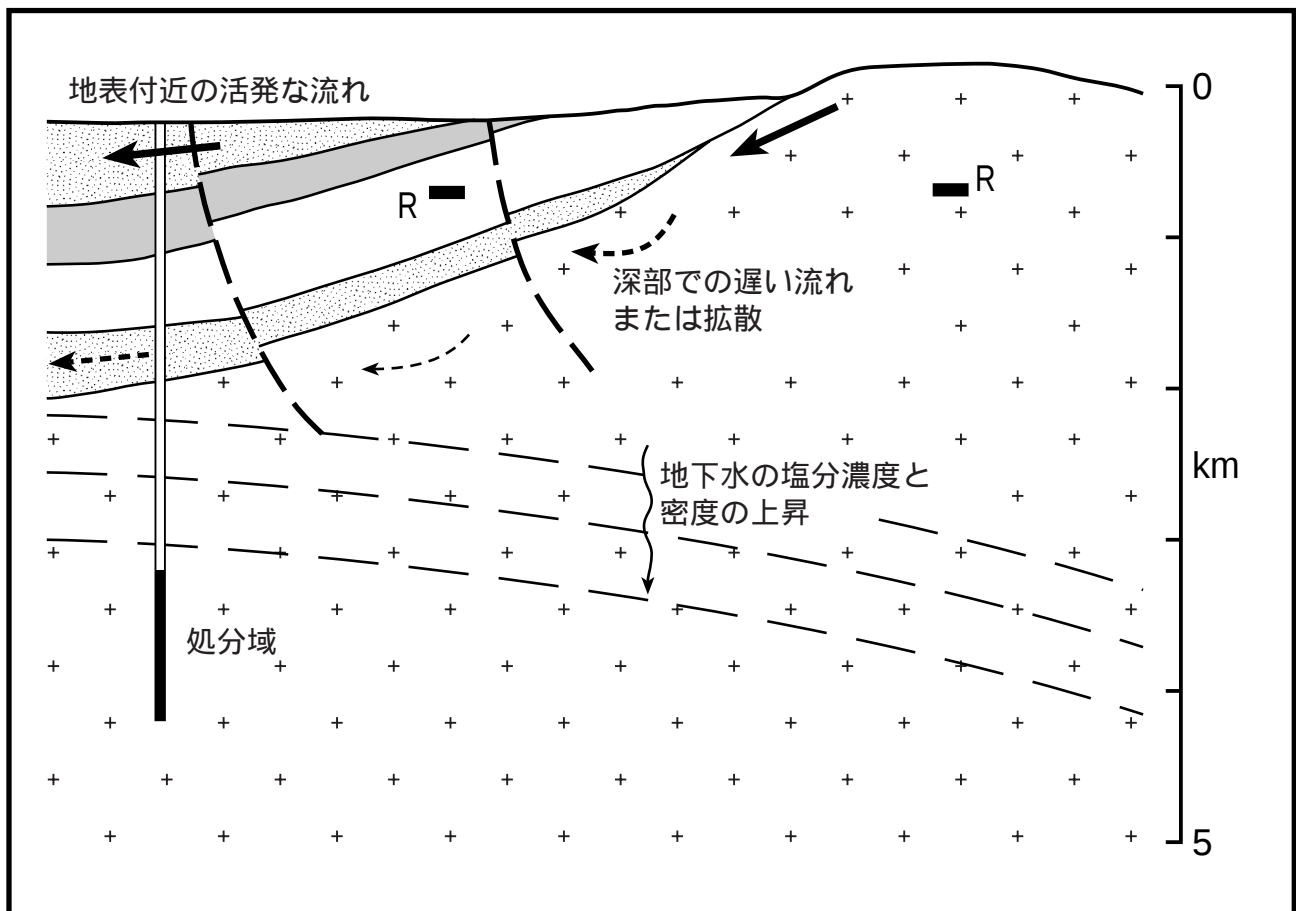


図1．非常に深いボーリング孔処分の概念モデル。このシナリオでは、廃棄物は、ボーリング孔の下部1000m区間の、深い結晶質基盤岩中に定置される。この領域は、地下水流がより活動的である上位の地殻領域とは、水理学的に有効に切り離されている。この深度の岩石中の間隙流体は、停滞し、安定で、密度成層をなし、深部ほど塩分濃度が高い。「R」は、長寿命廃棄物のための従来の坑道型処分場の典型的な深度を表す。

分前に十分冷却されているので、埋設後最初の数百年間（その間に顕著な冷却が起きる）に廃棄物が岩石・流体系に与える熱負荷によって、断裂系内で密度成層系の安定が崩れるほどの流体の対流は起きない。これについて、慎重な評価が必要なのは明らかである。熱負荷は、廃棄物コンテナの間隔によって制御できる。

- 長いボーリング孔密封材システムによって、処分域は、上位の地層および地下水系から隔離される（図2参照）。密封域の長さや設計は、サイトによって大きく異なる。例えば、厚さ1000mの堆積物に覆われた基盤岩を母岩とする場合、基盤岩中の孔の上部2000mを密封することに加え、種々の堆積岩からなる最上部1000mに、おそらくは別の密封を施すことができる。処分孔の最上部数百メートルについては、再侵入による廃棄物回収を事実上不可能にするために、処分後できるだけ

効果的に破壊して、ボーリング孔の正確な位置を隠す。十分に強力な装置を用いて、口径の大きな上部ケーシング区間を、ケーシングシューの上で切断し、引き抜くことができる。ボーリング孔は、崩壊するかまたは埋め戻され、上部数百メートルに存在する岩石の天然の水理学的特性にできるだけ近い状態に復元される。位置を数メートルの範囲内で不明確にし、ボーリング孔の上部数十メートルを破壊するだけで、再侵入が非常に難しくなる。処分場の全般的な位置に関する知識は保たれる。従来型処分場と同様に、処分区域に標識を施して記録する。

廃棄物パッケージは、従来型処分場概念で馴染みの深い人工バリア（オーバーパックと緩衝材）を用いることなく定置できる。廃棄物は、定置を容易にすることのみを目的とする薄肉の金属製コンテナに密封される。対象となる廃棄物によっては、廃棄物

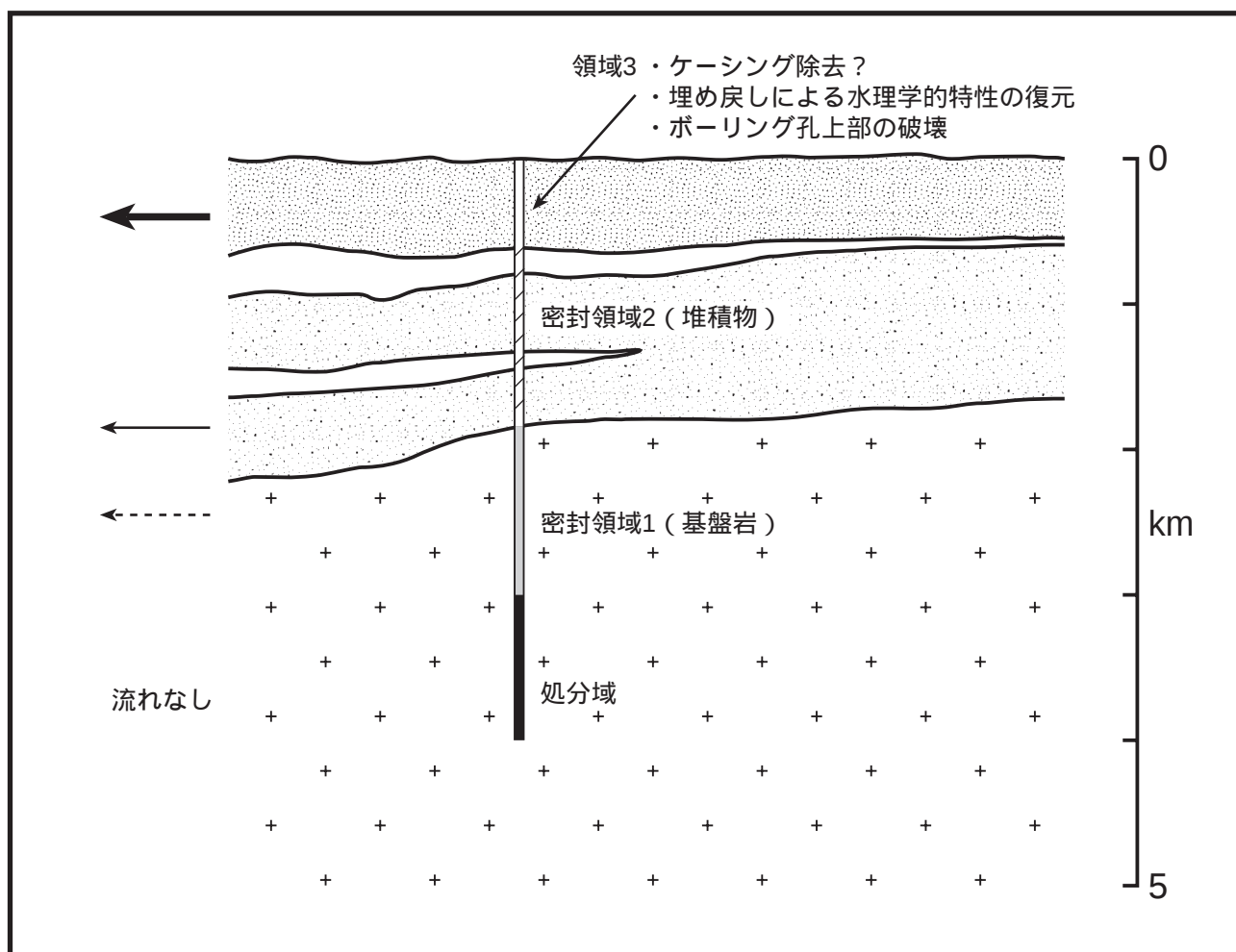


図2．厚い堆積物に覆われる基盤岩中の非常に深いボーリング孔の密封概念。地層によって異なる密封材が使用され、いずれの地層についても複数種類の密封材を使用する余地がある。この概念では、ボーリング孔ケーシングの上部が、ケーシングシューの上で切断されて引き抜かれ、孔が埋め戻される。これによって地層の水理学的特性が復元され、元のボーリング孔が隠れられる。核物質防護の目的で、将来の位置特定と再侵入を妨げるために、ボーリング孔上部は破壊される（詳しくは本文を参照）。左側の矢印は、地下水と間隙流体の相対的な動きを表す。

パッケージを地上で取り扱うために、ボーリング孔サイトに遮へい施設が必要になるかもしれない。ここでは、遠隔操作機器を用いて、パッケージを輸送キャスクからボーリング孔入口に移送する。廃棄物パッケージは、処分域の孔径よりずっと小さい。パッケージには、ボーリング孔内を降下（または押し下げ）しやすいように、単純で柔軟性のある集中型ローラーケージが取り付けられる。このケージは、パッケージとともに孔内に残されるかもしれない。ケージ・システムは、ボーリング孔上部の口径の大きな区間では、堅牢で再使用可能な移送コンテナに入れられ、その中を通して処分区間に下ろされる。

処分域に関する問題点

次のような重要な問題点がある。(a) ボーリング孔の非常に深い処分域は素掘りにすべきか、またそれが可能か。(b) 孔内流体が廃棄物定置手順に与える影響。(c) 定置段階で、力学的負荷が縦に積まれたパッケージに与える影響。

ライニングが施されたボーリング孔は、唯一の実行可能なオプションで、最も管理が容易かもしれない。Harrison²² は、処分空間を充填する孔内流体を排除し、ライニングが施された深い孔内にコンテナを定置する方法を述べた。定置段階で、孔内の流体を排除できるかどうか、検討する必要がある。孔内が乾燥していれば、パッケージ周囲の空所を安定化させるために、細粒碎石または乾燥グラウトを施工して、パッケージ間の充填材およびスペーサーとして機能させることができる。処分域を素掘りにすることを検討する唯一の理由は、処分区間の岩石と劣化したライニングの間の環状帯に沿って、少なくとも上位の密閉区間の底部に至るまで、流体の垂直移動経路が形成される可能性があることである。素掘りの孔では、岩石に対する密封材として、間隔を置いて高密度グラウトを使用できるかもしれない。埋め戻し材の均一性は制御できないが、その安定性は重要な問題になりにくい。埋め戻し材の主要な機能は、連続的な定置を容易にし、廃棄物から岩石への熱伝導を補助することである。処分域の密封後に、その全長にわたって流体が移動することはあり得るが、隔離位置が深く、上位に厚い密封域があることから、総合システム性能における重要な問題にはならないと思われる。

定置段階でのキャニスターの力学的完全性は、問題になるかもしれない。間隔を置いてブリッジプラグを設置し、パッケージの荷重の一部を孔壁に伝達しなければ、長く積み重ねられたパッケージの重量によって、孔底部でキャニスターが破損するかもしれない。ボーリング孔の完成・密封後のコンテナの破壊によって、システムの封じ込め能力が損なわれ

るわけではない。しかし、ブリッジプラグを用いずに、流体が充填された孔に熱放射廃棄物を定置するような場合、作業時に問題が生じるかもしれない。

ボーリング孔を垂直にすべきか。垂直ボーリング孔は、パッケージ定置の容易さという点で最も信頼性がある。それでも、ある場所から扇状に延びる、垂直からやや角度をなす一連の孔を掘ることも実行可能である。その狙いは、同じ地表施設を使用してより多くの廃棄物を定置できるようにし、処分場基盤施設のために必要な面積を最小限にすることである（図3参照）。同じ場所からの掘削角度をわずかに変えるだけで、3kmを超える深部で利用できる岩石領域が格段に増え、小規模な地上サイトから多くの孔を掘ることができる。

代案

これまでに説明したモデルでは、ボーリング孔密封後の封じ込めは、すべて地質環境に頼っている。これについて代案が可能である。深い立坑を建設する技術の出現により、最大3000mの深度における、一体型人工バリア・システムによる大型廃棄物パッケージの定置が考えられるようになった。従来型処分場の設計最適化では、現在、組立式ユニット内の廃棄物コンテナと必須の人工バリア・システムからなる一体型廃棄物パッケージ（IWP）を、直径3mほどの坑道内に定置することが検討されている^{23, 24}。そのようなパッケージは、直径約2m、長さ3m程度かもしれない。

南アフリカ共和国のサウスディープス立坑は、世界で最も深い立坑である（直径9m、深さ3003m）。カナダのキッドクリークは、鉱山の地下1200mの位置から3000mを超える深度まで延びる地下立坑である。採鉱技術によって、さらに深い深度まで掘ることができる。IWPを、サウスディープス立坑と同じくらいの口径の立坑内に定置し、空間を効率的に利用することが可能かもしれない。しかし、深い立坑の場合、大きな廃棄物パッケージの追加重量を考慮する前に、ロープ技術にすでに制約がある（ロープ重量、張力、巻き上げ、破碎などの問題）。Kilbride と Stringer²⁵ は、ライニングと支保工で 사용되는コンクリートと鋼材を、最高温度50℃の大深度で施工することに特に問題を見いださなかったが、深い立坑を稼働させるために冷却空気を供給する必要があった。深部における岩はねなどの他の問題は、主として立坑の運転時より建設時の問題である。この処分概念では、縦に積まれたパッケージの力学的負荷も考慮する必要がある。

IWP 技術は、概念的に、地下水がより動的な浅い（500～1000m）従来型処分場を意図したものである。一体型人工バリア・システムは、2000mを

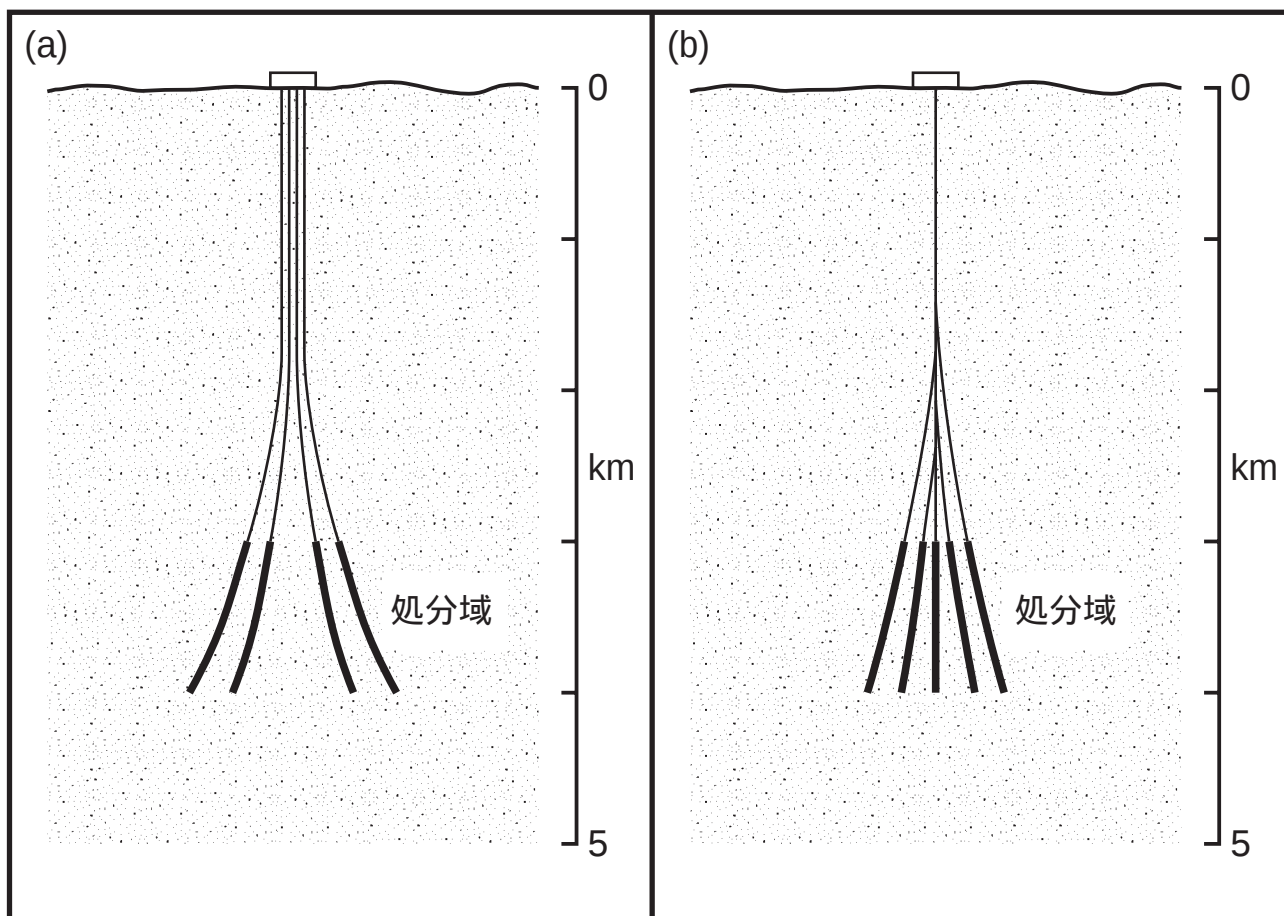


図3．掘削作業に必要な土地面積を最小化するための扇状ボーリング孔配列の2つの概念。左図では、狭い区域内から個々のボーリング孔を掘り、それぞれの向きを逸らせて深部で利用する岩石領域を大きくする。右図では、まず最初のボーリング孔を利用して廃棄物を定置し、処分域を密封する。次に、同じ主孔を利用し、密封領域より十分に上の位置から方向を逸らし、別の岩石領域を利用して廃棄物を処分する。このようにして、主孔を何度も繰り返し利用する。

超える深度での封じ込めに、さほど利点を追加しないと思われる。したがって、IWPを用いた深い大口径立坑処分は、中間的深度（1000～2000m）について考えるのが最適かもしれない。この深度ではまだ、地下水による放射性核種の輸送は安全性評価における重要な要因である。

種類と量

前述のボーリング孔モデルは、小容量の小型廃棄物パッケージに適用するのが最も効果的である。ガラス固化 HLW や、ガラスまたはセラミックを基質とする余剰プルトニウムは、パッケージの大きさと設計を容易に制御できるので、真っ先に考えられる適用対象である。使用済み燃料は、この概念の対象になりにくい。典型的な軽水炉燃料集合体は、より取り扱いが難しい長いパッケージ（例えば 3m）を必要とし、合理的なボーリング孔径では、1パッケージに1体または数体の集合体しか包有できない。

このモデルのために、処分域における概念的なボーリング孔径を0.8m とする。これは、ドイツの

社とスウェーデン核燃料廃棄物管理会社（SKB）の研究²²で検討された孔径と同じである。この寸法であれば、直径約0.5m、長さ1mの薄肉金属パッケージを定置できる。このパッケージには、約0.17m³（約0.5t）の廃棄物が含まれる。公称定置ピッチを2mとし、処分域の長さを1000mとすると、1本のボーリング孔内に約250tの廃棄物を処分できる。これは明らかに、比較的小容量のHLWを伴う処分計画にとってのみ合理的な提案になるであろう。例えば、スイスの処分計画で取り扱うすべてのガラス固化 HLW は、1本または2本のボーリング孔に収まるかもしれないが、英国が現在直面している HLW を処分するには、20本のボーリング孔が必要になるかもしれない。また、日本の計画では、約16,000tのガラス固化 HLW を処分するために、そのようなボーリング孔が60～70本ほど必要になるであろう。

この概念は、少量の核分裂性物質（余剰在庫または兵器解体に伴う物質）の処分にとって最も魅力的かもしれない。なぜならば、廃棄物を実際上回収不

能にできるので、核物質防護問題が事実上解消されるからである。しかし、臨界問題を取り除くために必要な希釈のために、大きな処分容量がやはり必要である。例えば、いずれかの余剰プルトニウムが廃棄物であると宣言されれば（混合酸化物（MOX）燃料としてリサイクルされない）、ガラスまたはセラミック廃棄体に組み込まれることが考えられる。米国の研究では、約3～5wt %のプルトニウム添加が提案された（従来型処分場における核物質防護として、プルトニウム入りガラスまたはセラミックが通常のHLWコンテナに封入されるのであれば、最大12wt %のプルトニウム）。いずれのタイプの廃棄物基質にも、臨界防止のために、既存のホウ素とリチウム（HLWガラス基質の場合）のほかに、ガドリニウムなどの中性子ポイズンが含まれるかもしれない。したがって、当モデルで論じられたパッケージ・サイズでは、固形廃棄物基質中に10～20kg程度のプルトニウムが散在的に含まれるかもしれない。

少量（トン規模）の核分裂性物質の処分のための1つの概念は、そのような物質を含むパッケージを非常に深いボーリング孔の下部区間に定置し、その上位領域をHLWパッケージの処分に利用することである。これによって、核分裂性廃棄物パッケージが確実に回収不能になり、核物質防護要件を満たすために各パッケージを「使用済み燃料規格」に準拠させる必要がなくなる。小型のプルトニウム用コンテナをより大型のHLWパッケージに入れる「キャン・イン・キャニスター」法²⁶は、同じ目的を達成するための別の方法である。

上述の数字はすべて、ボーリング孔とパッケージの寸法に左右されるのが明らかである。直径800mmのボーリング孔を4000mまで掘削するのは、ボーリング技術の拡張となるが、それは数年前にも実行可能と考えられていた²²。適切な最適化研究によって、小さめのボーリング孔径が本当に有効か、大きめのボーリング孔径を実現できるか、また種々のパッケージの大きさと重量に対してどのようなパッケージ操作技術を開発できるかが示されるであろう。

深い立坑の技術は、HLWとおそらくは使用済み燃料の処分に最適である。大口径立坑内の廃棄物を回収不能にするのは無理である。空間的な余裕によって遠隔回収法を展開できるからである。ただし、特に荷重に対するパッケージの力学的完全性を決定できない場合、その実施は非常に難しい。立坑の口径が大きめであれば、IWPの寸法設計に大きな柔軟性が与えられる。同じ深さに複数のIWPを定置する場合、システムの扱いやすさ（重量）と熱的な推移が重要な制約になるであろう（例えば、熱場が

適切であれば、直径9mの立坑内の各処分層に4つ以上のIWPを定置できるかもしれない）。

表

表1は、非常に深いボーリング孔処分の概念モデルの利点をまとめ、諸事項について坑道型処分場と性能を比較したものである。欠点は表2にまとめた。

表中のコメントは、単に問題を示すのが目的であり、その多くは特定の廃棄物、設計、および立地要因に左右されるので、詳細な評価が必要である。

研究開発要件

提案したモデルでは、2つの中心問題を綿密に評価する必要がある。

- 処分システムの性能。特に、処分域とその密封材の熱的および水理学的環境。
- ボーリング孔建設とパッケージ操作の工学的側面。運転段階の安全性の綿密な評価が必要。

閉鎖後の安全性については、システム挙動における影響されやすい要因を特定・概観するために、多くの従来型処分場の安全性研究に適用された標準的な性能評価手法が役立つであろう。密封挙動に大きく依存するのは明らかである。設計基準条件下では、基盤岩処分域からその上位の地層への放出量は何百年にもわたってゼロになると予想されるかもしれない。ずっと浅い深度ではあるが、類似的に水理学的エネルギーの低い成層塩水系における使用済み燃料処分の簡単な安全性評価（安定で乾燥した砂漠環境のために開発されたバンゲア「高度隔離」概念²⁷）ではそのような放出状況が予想され、数百万年後にI-129インベントリーのごく一部のみが放出されるという。この場合と、非常に深いボーリング孔概念の場合、最長寿命の天然放射性核種の系列を除き、廃棄物の放射能はその場で完全に減衰すると予想される。処分場は数十万年後に、非常に深く埋もれたウラン鉱床と同様の特性を持つようになる。

仮に、放射性核種が溶存する流体が、長い密封区間を通して上位の地層に漏洩しても、まだ従来型処分場（地下500～1000mに存在）と同様に機能することは心強い。従来型処分場については、すでに厳格な安全解析が行われており、乱されていない条件下での放射能放出は非常に遅く、無視できる程度であることが示されている。厚い堆積物シーケンスに覆われた基盤岩中の非常に深いボーリング孔処分域は、ボーリング孔内上方への遅い放出があっても、拡散され、上位層中の深部地下水系によって大幅に希釈されるという利点がある。

したがって、安全性能に関する主要な研究開発要件は、処分域周辺岩石の熱的、地球化学的、および水文地質学的推移の分析である。

表 1
非常に深いボーリング孔を用いた廃棄物処分の利点

非常に深いボーリング孔の利点	坑道型処分場との比較
深地層環境における非常に高い隔離能力と、適切に選択された場所における安定な深部塩水系。	利用できる地質および気候条件の組み合わせが限られる。
核拡散防止。廃棄物の回収が非常に困難。定置設備を効果的に破壊することによって、廃棄物への接近をさらに難しくできる。	比較的容易に回収できる（広報の目的で利点となる）
ボーリング孔を放射状に配列することで、作業に必要な土地面積を狭くできる。	岩種によっては、廃石と地上施設のために広い土地面積が必要かもしれない。
深度 3 km を超える好適な環境は多くありそうなので、広範にわたる場所から選択できる。	立地の可能性が限られる。地下水流が少なく、気候変動に影響されないことを示す必要がある。
地表の変化（氷食、侵食、海水準変動）や地震の影響を受けにくい。	サイト環境によっては、性能が地表プロセスに支配されるかもしれない。これは重大な立地問題になり得る。
無資源の環境に立地できるので、遠い将来に不意な侵入が起きる可能性が非常に低い。	知識の保全、好奇心の欠如、および無資源地域での立地に依存する。
隔離能力が高いので、社会に受け入れられやすいかもしれない。	ほとんどの安全立証において、幅広い放出シナリオを評価する必要があるので、社会の受容性に問題がある。
複雑で高価な人工バリアが不要。深度と天然バリアに基づく隔離。	非常に安定で地下水流がゼロという一部のまれな環境を除き、大きくて高価なコンテナ・緩衝材システムが必要である。
モジュール式で閉鎖前作業期間がないため、安価になり得る。	典型的な処分場は、10～100億米ドルを要する。
長期監視の要件がおそらく軽減される。	すべての運転段階と閉鎖後期間における監視が、公衆から要求されると思われる。
処分深度の地質学的条件を特徴づけるのは難しいが、工学および安全性評価のための詳細情報の要求は限られる。	提案された多数の処分場環境の特性調査を行うことは、長く複雑な作業であり、地下特性調査施設も必要になるかもしれない。

これには、深部岩石の特性について入手できるデータの精密な調査が必要である。そのようなデータは、既存および将来の非常に深いボーリング孔から、またはいずれは特定サイトの試錐によって入手する。

2 番目に考えられる研究開発の分野は、工学的問題である。次のような問題を検討する必要がある。

- 正確に位置づけられた直径500mm 以上の非常に深いボーリング孔の掘削、安定確保、および保守。
- 廃棄物の定置および密封作業時の孔内流体の処理。
- 定置段階におけるパッケージの完全性の維持。
- 詰まりの解除を含む、深部におけるパッケージ操作システム。
- 立坑処分のためのローブ技術。
- 深い立坑環境における IWP 定置の管理法。
- ボーリング孔ケーシングの回収とボーリング孔上部の痕跡隠ぺい法。
- 長いボーリング孔区間に適用される密封システム。

最後に、ボーリング孔または立坑処分の経済性を分析する必要がある。少量の廃棄物の場合、この解決策は従来型処分場より安価になると予想される。Gibb¹⁹ は、深さ 4 km の大口径ボーリング孔の掘削コストを、1km あたり100万ポンドと見積もった（コーニッシュ「高温岩体」プロジェクトのデータに基づく）。また Harrison²² は、直径0.8m、深さ4km のボーリング孔の掘削コストを465万ポンドと見積もった。非常に深いおよび長い井戸の掘削技術は、おもに石油・ガス業界で進歩しており、コストが継続的に低下している。建設コストは比較的低いと予想されるが、非常に深いボーリング孔の概念は、工学的な面で相当の研究開発費が必要である。これは、過去数十年の作業が積み重ねられている従来型処分場にとって、かなりの埋没コストとなる。

核分裂性物質の最終処分

前述のように、非常に深いボーリング孔処分は、主として核分裂性物質に、またおそらくは小規模な余剰 HLW に適した、真の廃棄物最終管理策である。この方法が最終的であることは、廃棄物の回収が事実上不可能であることに基づく。これは、従来型処分場における現在の考えとは異なる。最近の概念では、慣例的に、廃棄物定置後の長い開放期間と、閉鎖後に廃棄物を回収する可能性もしくは必要性までもが組み込まれている。回収可能性の考えは、地層処分場の性能に関する公衆の懸念に対応して発達した。非常に深い地層処分の 1 つの利点は、卓越する長期隔離性である。しかし、この利点が公衆に伝わらなければ、回収可能性の問題が残されることになる。

比較的少量の HLW が発生する小規模な原子力計画が、経済的利点のある共用、多国間、または広域的な処分場を選択しない場合、非常に深いボーリン

グ孔処分が魅力的なオプションになるかもしれない。なぜならば、ずっとコストがかかる（一般に10億米ドル以上）と予想される従来の坑道型処分場を国内に建設する必要がないからである。共有処分を採用する小規模計画でも、深いボーリング孔施設は実行可能なオプションとして考えられる。中間深度（数百メートル）のボーリング孔処分は、医療・産業目的で発生するごく小容量の使用済み密封線源の処分のための安全かつ実地的な解決策として、IAEA によってすでに提案されている。これに関連する概念である深い立坑処分は、より浅い深度で実行可能な、より大規模な計画に適しているかもしれない。

主要な結論として、非常に深いボーリング孔処分は、すべての核分裂性物質を発電炉を通して再利用するのが政治的に不可能と判明した場合、核分裂性物質を最終処分するための特に魅力のあるオプションである。その魅力とは、多大な労力や顕著な潜在

表 2
非常に深いボーリング孔を用いた廃棄物処分の欠点

非常に深いボーリング孔の欠点	坑道型処分場との比較
方向づけられた大口径（約 1m）ボーリング孔の掘削技術は十分に発達していない。	地下建設技術は、十分に試行済みである。
隔離能力の信頼性を確立するための性能および安全性評価の実績がない。	安全性は、25年以上にわたって詳しく調べられている。
廃棄物パッケージを大深度の単一ボーリング孔内に繰り返し定置する実際的な経験がない。定置時のパッケージの完全性を保証できない場合、詰まりを解除するのが難しいかもしれない。	放射能のあるパッケージ定置、または本格的規模での放射能のないパッケージ定置の実際的な経験は限られる。工学的実証は、始まったばかりである。
総合性能における支配的要因は、ボーリング孔の密封能力である。	性能は、十分に研究・試験された人工バリア・システムに大きく依存する。
現時点では、おそらく小容量廃棄物（約数百立方メートル）にのみ適する。	現時点では、大容量廃棄物に最適である。
いずれの段階でも、廃棄物を回収する能力がない。縦に積まれた廃棄物パッケージの重量によってパッケージが変形し、取り出しが難しくなると思われる。	いずれの段階でも、比較的容易に廃棄物を回収できる。
深部に長期監視システムを据え付けるのが難しい。	有用なデータを取得できる閉鎖後監視システムを据え付けるのが難しい。深いボーリング孔の場合より難しいかもしれない。
処分深度における高い周囲圧力と温度が、工学的問題になる。深度2000mを超える素掘りの安定なボーリング孔を建設し、定置のために十分な期間にわたって過度の変形を伴わずに孔を開放状態に保つ能力が必要。	高温（および環境によっては顕著な応力異方性）が予想されるが、運転または工学上の顕著な問題にならないはずである。

的リスクなしに、廃棄物が回収不能になるようにボーリング孔を設計できることに派生するものである。核分裂性物質または使用済み燃料のための従来型処分場は、常により多くの防護・監視要件を伴う。

引用文献

1. A. Rybalchenko, "Deep Well Injection of Liquid Radioactive Waste in Russia: Present Situation," Defense Nuclear Waste Disposal in Russia: International Perspective, p. 199, M. J. Stenhouse and V. I. Kirko, Eds., NATO Advanced Studies Institute Series 1: Disarmament Technologies, Vol. 18, Kluwer Academic Publishers (1988).
2. R. D. Klett, "Deep Rock Nuclear Waste Disposal Test: Design and Operation," SAND-74-0042, Sandia National Laboratories (1974).
3. J. J. Cohen, A. E. Lewis, and R. L. Braun, "In Situ Incorporation of Nuclear Waste in Deep Molten Silicate Rock," Nucl. Tech., 13 (1972).
4. L. L. Schwartz, J. J. Cohen, A. E. Lewis, and R. L. Braun, "High-Level Radioactive Waste Isolation by Incorporation in Silicate Rock," IAEA TC-81-5/4, International Atomic Energy Agency (1981).
5. F. E. Heuze, "On the Geochemical Modelling of High-Level Nuclear Waste Disposal by Rock Melting," UCRL-53183, Lawrence Livermore Laboratory (1981).
6. J. A. Angelo, "Nuclear Waste Management by In-Situ Melting," PhD Thesis, University of Arizona (1976).
7. S. E. Logan, "Deep Self Burial of Radioactive Wastes by Rock Melting Capsules," Nucl. Tech., 21, 111 (1974).
8. V. A. Kascheev, A. S. Nikiforov, P. P. Poluektov, and A. S. Polyakov, "Towards a Theory of Self-disposal of High-Level Waste," At. Energ., 73, 215 (1992).
9. A. V. Byalko, O. B. Khavroshkin, and I. M. Khalatnikov, "A Method for Disposal of High-Active Nuclides," Russia Patent 1725667 (1990) (in Russian).
10. A. V. Byalko, "HLW Disposal in Deep Sulfur-filled Boreholes: Start of R&D," Proc. Waste Management'96, Tucson, Arizona (1996).
11. S. E. Logan, "Deeper Geological Disposal: A New Look at Self-burial," Proc. Waste Management'99, Tucson, Arizona (1999).
12. A. E. Ringwood, "Immobilisation of Radioactive Wastes in SYNROC," American Scientist, 70, 201 (1982).
13. C. Juhlin and H. Sandstedt, "Storage of Nuclear Waste in Very Deep Boreholes: Feasibility Study and Assessment of Economic Potential," SKB Technical Report 89-39, SKB, Stockholm (1989).
14. C. Juhlin, "The Very Deep Hole Concept-Geoscientific Appraisal of Conditions at Great Depth," SKB Technical Report 98-05, SKB, Stockholm (1998).
15. L. Birgersson, K. Skagius, M. Wiborgh, and H. Widen, "Project Alternative Systems Study-PASS. Analysis of Performance and Long-term Safety of Repository Concepts," SKB Technical Report 92-43, Stockholm (1992).
16. N. A. Chapman, F. Gera, M. Mitterpergher, and E. Tassoni, "Disposal of Radioactive Waste in Italian Argillaceous Formations," Siting, Design and Construction of Underground Repositories for Radioactive Wastes, p. 571, IAEA, Vienna (1986).
17. T. H. Watts, "Locating and Engineering Hydrologically Secure HLW Repositories," Proc. 3rd European Engineering Geology Conf., 467, Newcastle-upon-Tyne, United Kingdom (1997).
18. F. G. F. Gibb, "High-Temperature, Very Deep, Geological Disposal: A Safer Alternative for High-level Radioactive Waste?" Waste Management, 19, 207 (1999).
19. F. G. F. Gibb, "A New Scheme for the Very Deep Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste," J. Geol. Soc. London, 157, 27 (2000).
20. P. G. Attrill and F. G. F. Gibb, "Partial Melting and Recrystallization of Granite and Their Application to Radioactive Waste Disposal: Part 1-Rationale and Partial Melting," Lithos (2003) (in press).
21. F. G. F. Gibb and P. G. Attrill, "Granite Recrystallization: The Key to the Nuclear Waste Problem?" Geology (2003) (submitted).
22. T. Harrison, "Very Deep Borehole: Deutag's Opinion on Boring, Canister Emplacement and Retrievability," SKB Report R-00-35, SKB, Stockholm (2000).
23. M. J. Apted, "A Modest Proposal: A Robust, Cost Effective Design for High-level Waste Packages," Proc. Symp. Materials Research Society Vol. 506, p. 589, Materials Research Society (1998).
24. M. Toyota and I. G. McKinley, "Optimisation of the Engineered Barrier System for Vitrified HLW-Fabrication and Emplacement Aspects," Proc. 8th Int. High-Level Radioactive Waste Management, p. 648, American Nuclear Society (1998).

25. M. Kilbride and N. Stringer, "Ultra-deep Shaft Construction," *Tunnels & Tunnelling International*, p. 38 (June 2002).
26. N. H. Kuehn, J. R. Brault, D. T. Herman, M. J. Plodinec, M. K. Andrews, J. T. Coughlin, P. Lam, and W. G. Ramsey, "Can-in-Canister Demonstration at DWPF," *Radwaste Magazine* 4, 20 (1997).
27. M. J. Apted, P. A. Smith, and N. A. Chapman, "Engineered Barrier Design Strategy for a High Isolation Repository Site," *Proc. 9th Int. Conf. High-Level Radioactive Waste Management*, Las Vegas, Nevada, American Nuclear Society (2001).
Currently based in Switzerland, Neil Chapman is professor of environmental geology with the Department of Civil and Structural Engineering at

the University of Sheffield, United Kingdom, and works as a consultant with several national and international radioactive waste disposal programs. Fergus Gibb is reader in mineralogy, petrology, and geochemistry with the Immobilisation Science Laboratory (ISL), Department of Engineering Materials, at the University of Sheffield.

現在スイスに在住のニール・チャプマン氏は、英国シェフィールド大学、土木構造学部、環境地質学科の教授であり、いくつかの国内および国際放射性廃棄物処分計画の顧問を務めている。ファーガス・ギブ氏は、シェフィールド大学、材料工学部、固化科学研究所（ISL）で、鉱物学、岩石学、および地球化学の講師を務めている。