カナダにおける核燃料廃棄物処分研究

(京都大学原子炉実験所) 福 井 正 美

カナダでは深層岩石中への核燃料廃棄物処分に伴う人体への長期にわたる影響の評価に関して研究が進められている。地下処分場からの放射性核種漏洩のシナリオは地下水が隔離容器に浸入し、放射性核種を浸出させ、岩石層を経由して地表へ移動するというものである。深成岩体の地下1,000 mに位置する処分場では、廃棄物容器からの漏洩放射能の移行を小さくするため容器周囲に buffer 材が用いられ、そのために溶出やそれを防止する研究開発が進められている。岩石圏に関しては吸着機構や透水係数、亀裂幅とその連続性に関するような水理地質研究が実験室および野外で行われている。生態圏に対しては2つのシナリオ、すなわち、土壌に移行したものは植物もしくはそれを食べる動物による経路、および水生動物や飲料水による人体への被曝経路が考えられている。そして100万年までの期間で、人体が受ける預託線量当量はバックグラウンドによるものに比べて一般的にかなり小さいことが評価されている。将来、必要ならば、用いられているモデルやデータはより現実性のあるものに代えて評価が進められることになる。

I. 概 説

カナダにおける最初の原子力発電所がオンタリオ州に建設されたことから、同州政府が原子力産業に関するイニシアチブを保ってきた。核燃料廃棄物処分計画(Nuclear Fuel Waste Management Program, NFWMP)も1978年6月、オンタリオ州政府とカナダ連邦政府がその永久処分に関する研究を協力して推進することの合意に達したことから始まった^①。この計画は4つの政府機関、(1) Atomic Energy of Canada Limited (AECL), (2) Ontario Hydro (OHD), (3) Energy, Mines and Resources (EMR), (4) Environment Canada (EC) および民間8社、さらに9大学が参加しているが、計画全体の総括は AECL が担っている。そして NFWMP の中でも重要な研究である核燃料廃棄物の不動化と安全処分は AECL が、また使用済燃料の輸送および一時貯蔵に関する研究は OHD がその責任を分担している^②。この計画がナショナルプロジェクトであることから他の州政府の協力も得て推進されていることはもちろんである。

AECL は重水製造や医化学薬品などを生産する分野なども含めた5つの機関から構成され、その1つに研究機関がある。これにはカナダでの原子力研究の先駆的な存在である Chalk River National Laboratory (CRNL) と NFWMP を推進する中核機関であり、設立後20年になる Whiteshell Nuclear Research Establishment (WNRE) がある。以下では、この NFWMP に関する研究計画の概要を解説する。

II. 核廃棄物処分計画

カナダ五大湖北部の地質年代が古いことは従来から知られている。1970年代の初めにはこの楕状地に10億年以上も経てきた Pluton (深成岩体) と称される安定な貫入火成岩がオンタリオ州を中心に1,000個以上あることが明らかにされ、その地質調査が続けられてきた。カナダでは1980年までに約3,000 t 程度の CANDU 使用済燃料が蓄積されているが、使用済燃料そのものを再処理せずに核廃棄物とするか、あるいは再処理後その廃棄物を処分するかの決定は未だなされていない^③。そして最も可能性のある処分方法として、このような2種類の核廃棄物を地下500~1,000 m の深成岩体中へ永久処分することが研究・計画されている^④。

この処分に伴う研究は、地下処分場に浸入した地下水が人工バリアを介して核廃棄物と接触し、放射性物質を地表の生態圏まで輸送することを想定し、人間に及ぼす影響を評価するものであるが、カナダではこのような処分によるすべての影響を評価する目的で、核廃棄物処分場の選定からその建設、処分の実施および処分後にすべての地表施設を撤去するまでを Pre-Closure^⑤、それ以後の地下水による放射能輸送に伴う被曝評価までを Post-Closure^⑥ と分類している。前者では処分場がオンタリオ州のどこかの楕状地に建設されることを想定して特異的でない社会集団および環境を選定し、そこで得られる種々のパラメータ値とその変

Research Program of Nuclear Fuel Waste Management in Canada: Masami FUKUI.

(1983年 10月3日 受理)

動を研究している。

これらの結果は処分場建設から施設撤去までの放射線による被曝評価に加えて、これらの行為に伴う非放射線の危険性およびその実行による社会・経済へのインパクト評価に用いられようとしているが、本稿では誌面も限られていることから Post-Closure についての研究・計画のみを概説する。

Post-Closure に用いられる、数理モデルを主体とした安全性の評価過程には、数多くの未知の問題が含まれていることは周知のとおりである。とりわけモデルのパラメータの決定や種々の現象・機構の解明などが重要と考えられる。そしてこれらの研究はその空間的広がりから一般的に次の3つの領域に分けて考えられている。

- (1) 処分核廃棄物の近傍で Buffer 材や Backfill 材を含む領域
- (2) (1)の人工バリアに対して、自然バリアと考えられる岩石層領域
- (3) 浅層地下帯水層や湖沼、河川などを含む生態圏領域

NFWMPを推進しているWNREでは、(1)を研究するグループとして Fuel Waste Technology Branch (FW-TB) および Geochemistry & Applied Chemistry (GACB) の中の Waste Immobilization Section がある。(2)を対象とする研究部は GACB の中の Geochemistry Section および Applied Geoscience Branch (AGB) であり、(3)は Environmental Research Branch (ERB) および一部の Radiation & Industrial Safety Branch (RISB) の協力も得て研究が進められている。

Ⅲ. 核廃棄物処分研究

1. 処分場 Vault 近傍領域における研究

(1) 使用済燃料廃棄研究

使用済燃料を再処理せずに廃棄する場合、まず UO_2 そのものの溶解が FP や長寿命アクチニドの地下水への移行を規定する1つの機構であることが容易に想定されることから、 UO_2 燃料要素表面の形態学的変化に関する研究が推進されている⁷⁾。例えば、地下深部の処分場周辺は一般に還元性の環境であると考えられているが、Vault 建設に際して地上の酸素が取り込まれることや、放射線の地下水に及ぼす影響(radiolysis)から UO_2 が酸性化環境にさらされる可能性がある。このような環境での UO_2 表面に形成される酸化膜等の変化が XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy) や SEM (Scanning Electron Microscopy) を用いて観察されて

いる⁸⁾。また水の放射線分解により生ずる H_2O_2 , O_2 , OH などのほかに、地下水中の陰イオン CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} などの UO_2 への影響も検討されている。

ヨウ素は化学的特性から、その自然バリアによる遅滞効果が小さく、廃棄物処分評価に際しても被曝線量に大きな比率を占めることが知られているが、 UO_2 の溶解度が 10^{-11} mol/kg 以下では多くの FP やアクチニドはその要素内に封じ込められたままであること、および以前のヨウ素の溶出率が Cs の溶出と比較して1〜2桁過大評価とみなされる実験結果の得られたことが報告されている。さらに100〜150°Cと想定した地下水中での UO_2 溶存状態を熱力学的データを用いて推定する研究や、処分後長時間にわたる評価では γ 線によるよりも α 線による放射線の廃棄物および地下水への影響がより重要であるとして検討が開始された⁹⁾。

使用済燃料を処分するための隔離容器に関しては、放射線量率、温度、毒性などの高い初期の約500年間は隔離能力が持続できるように設計が意図されているが、カナダ植状地の深層地下水では塩分濃度の高いことが明らかになり、現在ステンレス鋼製容器は不適であると判断されている。そして種々の金属(例えばTi)や合金に対する腐食の研究が行われている。Tiは反応性に富む金属であるが、酸化性の水溶液中では Cl^- 濃度が 5,000 $\mu\text{g/g}$ と高くても酸化膜を形成し、150°C の高温条件でも年間 1 μm 程度しか腐食しないことが明らかにされた。他の条件(温度、溶存酸素濃度、pH、粘土鉱物共存下など)でも腐食の生成やその成長機構が電気化学的手法を用いて進められている¹⁰⁾。

以上のほかに、隔離容器のデザイン、機械的強度、金属や合金以外の材料などに関する検討、および処分場を想定した環境での UO_2 の地下水や岩石との相互作用を研究するシミュレーション施設の建設などが行われている。

(2) 再処理廃棄物不固化研究

再処理高レベル廃棄物の固化体として重視されているのはガラスであるが、特にボロシリケート、アルミノシリケートおよびアルカリアルミノシリケートなどについて溶出実験が行われている。ボロシリケートは普通1,050〜1,250°Cで処理されるのに対し、1958〜62年に CRNL で開発された Na ボロシリケートは1,400°Cと、より高温で扱われるため従来あまり関心を集めなかった。しかしながら、最近そのガラス構成材の溶解性が低いことが確認されている。現在 WNRE では10% Na_2O , 11.5% B_2O_3 , 78.5% SiO_2 の重量構成比で耐久性が良好となる結果を得ている。

またアルミノシリケートでも CaO や Al_2O_3 などの固化剤に適したガラス構成成分化を検討中である。さらに、アルミノシリケートガラスでは、溶出した成分が再び表面に吸着されて溶出速度が低下すること、アルカリシリケートガラスでは水中の H_3O^+ と Na がイオン交換されて pH 9.5 以上となるため構成材が溶解し続けるが、これに Al^{3+} や Zn^{2+} を添加することによりその速度が低下すること、などが溶出実験および SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry) でも確認されている。一方、ガラスの構成成分化により相分離が生ずるとその溶出能も増加するので、 X_2O ($\text{X} : \text{Na}, \text{K}$), MO ($\text{M} : \text{Zn}, \text{Mg}, \text{Ca}, \text{Ba}$), B_2O_3 , SiO_2 などの混合比についても最適な材料の開発が行われている^{(9)~(12)}。

以上のような研究には多くの場合、溶出実験が用いられ、そこでは溶解速度をガラスの重量減少や溶液濃度測定から評価しているが、その溶解機構の解明や被曝線量評価に際して source term となる数理モデルの研究も進められている。そして現状ではアクティブな実験は少なく、1983 年秋に建設が終了する WNRE の核燃料廃棄物不動態化研究施設 (ITF: Immobilized Fuel Testing Facility) で計画されているものの基礎的研究が多い。

ガラスよりも耐久性の大きい固化材料に対する研究については、Sphene (CaTiSiO_5) や Perovskite (CaTiO_3) を主体とした天然および人工のセラミックやそのガラス混合物を対象として溶出能、表面変化、放射線損傷、固化体相分離などが、ガラスと同様の手法 (SEM, SIMS など) を用いて検討されている⁽¹³⁾。またトリウム再処理廃棄物のガラス固化研究も行われている。

固化研究のほかには流動層やロートスプレイ法による煅焼法⁽¹⁴⁾、さらに再処理に伴う揮発性物質の分離・回収についても、以下のような研究が進められている。

- (1) モレキュラーシーブ材などを用いた ^{85}Kr 分離のためのクロマトグラフ的研究⁽¹⁵⁾
- (2) トリチウムと ^{14}C の金属結合に関する研究⁽²⁾
- (3) ^{129}I をコロナ放電と光化学的反應により回収する研究⁽¹⁶⁾

(3) 処分場シーリング研究

地下深部に掘削された Vault には、その底面に核廃棄物が配置されるか、もしくは更に下方に掘削した孔中にそれらが廃棄される。この選択は最終的な被曝線量評価や経済性を考慮して決められるが、カナダでは未だその方法の選択については結論が下されていない。いずれの場合にしても廃棄物隔離容器の周辺には

それと直接に接触して埋め込まれる Buffer 材と、その外側には Backfill 材が多重の人工バリアとして計画されている。またボーリング孔や Vault へのアプローチに用いられたシャフトのシールに関する研究も重要であるが、この内の多くは従来の鉱山、石油、その他土木関係に用いられている技術を応用することが可能であるとみなされている。

地下水の接近を防止し、内蔵されている放射性物質の岩石層への輸送を可能な限り低減させる目的の Buffer 材に望ましい特性は、以下のようなものと考えられている。

- (1) 応力集中を分散させ得る弾性を有し、かつ十分な荷重強度があること
- (2) 地下水移動とイオン拡散を少なくするため間隙率を小さくできること
- (3) 内蔵される熱を分散させるため熱伝導性が良好であること
- (4) Vault 内の温度・圧力・水環境で、物理、化学的な安定性を有すること
- (5) 想定される容器破損後に放射性核種の吸着特性が良好であること
- (6) 経済的であること

以上のような特性を有する Buffer 材を開発するために種々の粘土鉱物およびそれらの混合物を対象にして応力・歪特性、膨潤性、熱伝導度測定、透水性および不飽和水分移動測定、粘土鉱物の変質およびイオン交換容量の変化、さらに放射性核種の拡散・吸着実験などが行われており^{(17)~(18)}、また微生物による影響⁽¹⁹⁾も今後の課題として注目されている。

Backfill 材に期待される物理、化学特性も上述した Buffer 材に対するものと類似しているが、これは直接廃棄物容器には接触しないことから温度環境が緩和される。さらに Vault 空間に埋め込まれることから多量の材料が必要となる。これらのことから、経済性を考慮して選択されようとしている。例えば、90% の破碎岩と 10% のベントナイト混合物が考えられている⁽²⁰⁾が、Backfill 材についての重要な研究課題は Buffer 材に比べると、その施工に関するものが多いことから、現時点では砂、礫などを対象にした物理的特性 (密度、コンパクション、粒度分布など)、熱特性、イオン交換容量測定などが McGill 大学や OHD で行われているにすぎない。

施工においては、Vault 上部空間での材料のコンパクション法、作業を安全に行うための最適水分量の決定とその水分管理、膨潤に伴う圧力変化などが問題とな

るが、これらは実際の Vault 環境に近い条件下での試行と経験が必要となる。そこで地下約 300 m に設置される URL (Underground Research Laboratory) での研究が期待されているが、これについては別の機会に述べることにする。

ボーリング孔やシャフトのシールは、Vault から地表までの最短距離と考えられる放射性核種の移行経路を遮断する意味で重要である。この材料にも粘土鉱物が考えられている。これはセメントを主体にしたものでは再結晶化や微生物の影響から、長期にわたる安定性に疑問が残されているためである。粘土鉱物のような天然の材料は、そのものがシール周辺の岩石やその変性物質と化学成分が類似していること、また現場での締め固め試験でもボーリング孔では 10^{-8} cm/s 以下の透水性が得られたこと、および孔壁との粘着性が良好なこと、などがその選択の根拠となっている。

Vault の埋め戻しと同様に、比較的多量の材料を必要とするシャフトのシールにも Backfill 材を用いることが考慮されているが、同時にグラウト技術も検討されている。グラウトによく用いられているのはセメントを主体としたものであるが、ポリエステル、エポキシ樹脂、アルデヒド系樹脂やその他の有機・無機材料にも強度や透水性の優れているものがある。しかし、これらに関してもやはり長期の安定性に疑問が残されているため、例えばコロイド状ベントナイトのスラリーを特殊な技術で亀裂の生じた岩壁フラクチャーへ注入する計画が検討されている。そして、このような工学的研究も URL の建設から閉鎖に至るまでの試験期間中に、実際のフィールド条件下で積み上げられる予定である。

以上第 II-1(1)～(3)項に述べた研究結果は Vault 近傍での熱および物質(放射性核種、水分、塩分など)移動の near-field モデルに用いられる。

2. 岩石圏における研究

この分野を含む研究領域は非常に広範であり、第 II 章に記した WNRE の研究チームのほか、CRNL, EMR および EC など多くの研究がなされている。その主な目的は、深地層への安全な核廃棄物処分場建設のために必要な地層の物理・化学的特性を量的に把握することであり、その内容を大別すれば、(1)地質化学、(2)地質物理学、(3)地質水理学となる。

(1) 地質化学研究

ここでは岩石、地下水および放射性核種の相互作用を解明し、主として実験室スケールでそれらの挙動に関する情報を得てモデル化する研究が進められてい

る⁽²¹⁾。

岩石と地下水の相互作用では、100°C 以下での岩石の地下水による変質⁽²²⁾ (Alteration)、廃棄物固化体に用いられたものと同様の手法による岩石表面化学、岩石亀裂中粘土鉱物の移動と透水係数の変化、処分場建設の影響による地下水化学成分変化の評価などが研究・計画されている。

岩石、地下水および放射性核種の相互作用に関するものでは多くの国々、例えばスウェーデン、USA、UK などの研究が参考にされているが、カナダでも独自の岩石吸着定数 K_a (ml/cm²) の測定が URL, WNRE および CRNL などの地点で採取されたコア岩石片を用いて行われている⁽²³⁾。そして今後も URL 建設や後述する岩石フィールドでの地下水研究に伴うボーリング調査で得られる試料について継続されていく予定である。これらのデータは USA の Battelle PNL で最近設立された ISIRS (International Sorption Information Retrieval System) に報告され、測定法も含めて測定結果の情報交換が行われている^{(24) (25)}。岩石への放射性核種の吸着はオートラジオグラフィーや SEM を用いても検討され、岩石中の希少鉱物(特に Mafic)への選択的吸着現象が報告されている^{(26) (27)}。

このような特異的吸着現象は続いて放射性核種の脱離過程にも着目され、吸着機構の解明や今後の挙動に関する室内実験およびフィールド実験のための基礎的研究として重視されている。処分場近傍での酸化還元化学が未だ不明であることから、吸着実験は温度、地下水成分、酸化還元電位などをパラメータとして制御した条件で行われているが、今後は I, Tc, Np, Pu などの放射性核種を対象とした研究や、 K_a 値の経時変化および岩石変質との関係などに関する研究が重視されている。

岩石亀裂中における放射性核種挙動のモデル化に関する研究は、上述した吸着現象の機構の解明とそのモデル化はもちろんのこと、処分場から生態圏への地下水流況が十分に解明されていない現在、精密には行われ得ないが、実験室スケールでは人工的もしくは自然に亀裂が入った岩石コア試料を用いて、染料や放射性核種(³H₂O, ¹³⁷Cs など)の移行実験が行われている。またヨウ素をトレーサーとした岩石内の拡散実験、Sn, As, Ce などを用いた実験で複数の反応速度定数を用いた吸着モデルが、 K_a モデルよりも吸着・脱離現象をより良くモデル化できるとして、その反応速度定数を求める研究も行われている^{(28) (29)}。

いずれにしても K_a モデルは地下水成分や自然の亀

裂状態が一定であること、着目する溶質成分がトレース量であること、瞬時吸着平衡が成り立つこと、鉱物化(非可逆反応)や沈殿形成現象などが生じないこと、など種々の前提条件が必要であり、改良された、もしくは新しいモデルの開発は今後の課題とされている。特に近年、亀裂ではなく岩石内への放射性核種の拡散による移行の遅滞効果に関するモデルおよび複層亀裂での移行モデルなども提案されているが、非常に多くの研究報告がある(例えば文献⁽³⁰⁾)ので、これに関しても機会があれば別に述べることとする。

この岩石内拡散に関する実験的研究は、最近(1983年6月6～7日)OECD/NEA主催でパリで開催されたワークショップ(Experimental Methodologies in Radionuclide Sorption, 参加国: オーストラリア, ベルギー, カナダ, デンマーク, フィンランド, フランス, 西ドイツ, 日本, オランダ, スウェーデン, スイス, 英国, 米国)においてスウェーデンの Neretnieks からも報告されたが, Cs の岩石内拡散分布測定では実験からくる汚染が問題となっている⁽³¹⁾。

実験室やフィールドでの放射性核種挙動に関する研究は、いずれにしても時間的制約があり、これに対して現存する自然状態での元素の分布を観察し、その分布に至った現象を解明することにより、地質年代に対応する挙動を予測する手段がある。例えば WNRE でも、亀裂岩石表面の変質やもの中の希土類元素の分布の観察、砂岩から流動するUが沈着・濃縮される機構の解明⁽³²⁾、さらに深成岩体中の地下水挙動をUおよびTh 崩壊系列の非平衡性から推定する研究⁽³³⁾などが廃棄物処分に伴う放射性核種移動のアナロジーとして行われている。

(2) 地質物理学

この分野の研究は主としてEMRに属するGSC(Geological Survey of Canada), EPB(Earth Physics Branch)およびCANMET(Canada Center for Metals and Energy Technology)により行われている。その目的は

- (1) 深成火成岩の境界を立体的にマッピングすること
- (2) 深成火成岩中の亀裂や不連続面を確認し、地下水流と関連づけること
- (3) 岩石塊の安定性を定量的に評価することなど⁽³⁴⁾である。

このような研究目的を掲げて、以下のような地質学的調査法や物理探査法および力学的試験法を用い^{(35)~(37)}、調査研究が進められている。

- (i) 火成岩露頭踏査, ボーリングによる試料採取

と岩石の分析およびボーリング孔の音響TV⁽³⁸⁾による調査ならびにこれらのデータ分類と解析

- (ii) 岩石塊境界を調査するための気中磁気測定
- (iii) 亀裂や堆積層を評価するための大気電磁気および地表面電流測定
- (iv) 自然現象の変化を感知するための地磁気測定
- (v) 地質構造を感知するための地表面地震回折波および反射波の測定
- (vi) 亀裂密度や水分および岩石特性などを検討するための鉛直地震波測定
- (vii) 亀裂内水分移動を検討するための地熱分布測定や潮汐モニタリング
- (viii) 岩石塊を評価するための重力分布測定
- (ix) 処分場の長期安定性を検討するための岩石内地震観測

以上の調査法は、主としてフィールドでの岩石特性を検討するためのものであるが、温度や圧力をパラメータとするような特性を検討するためには、以下のような室内実験で得られる、より多くの基本的な情報が必要となる。

- (i) 温度上昇と岩石熱特性およびその岩石中鉱物組成との関係
- (ii) 岩石の力学的特性および関連する水理定数の測定
- (iii) 岩石の空隙構造および微小亀裂の応力・熱特性
- (iv) 岩石磁化率の測定とその岩石変質および亀裂構造との関連

以上のような方法を用いた調査は主として深成岩体を対象としたものであるが、その他に頁岩, 石灰岩, 岩塩および海洋底を対象とした調査⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾も火成岩に代わる処分場設置のための比較研究の目的で行われている。

(3) 地質水理学

この分野の研究は、主としてフィールドを対象にした大きなプロジェクトにより進められているが、その目的は結晶岩中における地下水と放射性核種の移動を決定する法則を見出すことにある。このための調査地としてはRA(Research Area)1～8(5,6を除く)の6個所がオンタリオ州(5個所)とマニトバ州(1個所)に存在する。これらのサイトはEMRやECの地質・水理学者の地理的環境も少し考慮されてはいるが、岩石の種類(花崗岩, ハンレイ岩, 片麻岩など)や亀裂の多少により選定されている。

これらの調査地は最近、調査が認められた個所(East

Bull Lake: RA-7, Overflow Bay: RA-8) や1981年以後使用されていない所 (White Lake: RA-1), さらに前述した URL の建設に伴って行われる予定の場所 (Lac du Bonnet: RA-3) もあるが, Atikokan (RA-4) では周辺の湖面水位変動と浅層地下水位との関連が水文学的に研究され, また, 地下水塩分の鉛直分布や深層地下水位変動観測なども1,000 m 以上のボーリング孔を用いて行われている。RA-7, -8でも今後10年以上にわたってこのような深層地下水とその流れに関する研究が行われる予定である⁽⁴⁴⁾。

RA-2 (CRNL 敷地内)の地質はRA-4が花崗岩, RA-7, -8がハンレイ岩であるのに対して, それらを含んだ変成岩から構成されており亀裂も多い。そこで従来から EC 中の NHRI (National Hydrology Research Institute) が水理学的研究を行なっていたが, この NF-WMP でも関連したものとして以下のような研究が行われている。

- (1) 地下水化学調査: トリチウムやウランなどの濃度および水質とその分布に関する研究
- (2) 水理試験: 揚水試験や水圧パルス試験などによる水平および鉛直方向透水性ならびに亀裂の連続性などの評価
- (3) トレーサー試験: 亀裂岩石中への放射性核種 (^{131}I : 60 mCi, ^{85}Sr : 70 mCi) の注入による分散係数 Ka および亀裂幅などの評価⁽⁴²⁾

以上のような研究のほかに, 世界各国の地下水水質のサーベイ⁽⁴³⁾, カナダ橋状地での1,500 m 深さまでの溶存イオン (Sr , K , Ca , Mg , Na , HCO_3 , Cl , Br , SO_4 など)鉛直分布⁽⁴⁴⁾, さらにフィールド調査資料を用いた多次元の亀裂中地下水流の解析や, 有限要素法を用いた熱・溶質輸送計算とその図形処理などに関する研究も, 大学, コンサルタントなどの協力を得て進められている⁽⁴⁵⁾。

このような水理学的研究は, 対象が岩石層であることから, 自然の地下水状態を乱さないようなボーリング法, 亀裂の隔離法, 地下水のサンプリング法, トレーサーの注入法, 水頭圧測定法などにおいて特殊な技術が要求され, これらの方法についての研究開発も同時に進められている。

3. 生態圏における研究

第Ⅱ-1, -2 節に述べた領域における研究と同様に, ここでも被曝線量計算に直接反映されるデータに関する研究だけではなく, 評価に用いるモデルの限界を把握し, さらに改善するために対象となる現象のモデル化やパラメータの再検討に関する研究が行われている。

生態圏を地圏, 水圏, 大気圏と群別すれば, おおのでは例えば以下のような研究が行われている。

生態地圏では

- (i) 自然環境(特にプレカンブリアンシールド)での岩石, 土壌, 動植物などにおける自然放射能動態調査および動植物生態調査
- (ii) 長期にわたる安全性評価の一環としての土壌生成過程に関する研究
- (iii) U , Tc などを対象とした土壌中および土壌から植物への移行に関する研究⁽⁴⁶⁾
- (iv) 重金属および放射能による植物への複合毒性効果に関する研究⁽⁴⁷⁾
- (v) フードチェーンモデルパラメータの評価とその線量評価法の確立⁽⁴⁸⁾

などである。

生態水圏を対象とした研究は CRNL が主体となっており行っている。例えば

- (i) ^{85}Sr , ^{131}I などをトレーサーとして帯水層に注入したフィールドにおける拡散・吸着に関する研究⁽⁴⁹⁾
- (ii) 20年以上も前に, ^{90}Sr や ^{137}Cs をガラス固化体として帯水層に埋設したフィールドでの固化体溶出率の評価および汚染分布のモデル化の検討に関する研究⁽⁵⁰⁾⁽⁵¹⁾
- (iii) アクチニドや Cs などの帯水層中移動を, 有機物質やコロイドに関連させて評価する研究⁽⁵²⁾
- (iv) ^{137}Cs の湖底堆積物賦存量を実測し, フォールアウト量との差異から流域における物質移動を評価する研究
- (v) 地下水の表面水への流入を, ボーリングやリモートセンシングを用いて評価する研究

などである。

NFWMP では, 地圏, 水圏の経路は現在線量評価の対象となっているが, 大気圏に伴うものは未だ評価されていない。しかし現在, その評価法は研究が進められている。そのパラメータ評価に関して, OHD や大学と共同して研究・計画されているものは

- (i) WNRE の研究炉 (WR-1) を用いた近距離でのトレーサー拡散実験
- (ii) U 鉱滓地域での Rn 濃度を利用した風下濃度評価
- (iii) 遠距離輸送を対象としたものでは, 地表の火山活動や植物花粉などを利用した沈着や浮遊を含む輸送評価

などである。

以上、第Ⅲ-1～3節で得られた地下処分場から生態圏に至る放射性核種の移行に伴う被曝線量評価は、Vault 近傍での移行率を次の岩石圏での input とするように関連づけて SYVAC(System Variability Analysis Code)⁽⁵³⁾により行われているが、これについては一部別に述べた⁽⁵⁴⁾。

Ⅳ. あとがき

核廃棄物深地層処分に伴う被曝線量評価が安全な処分の実行を判定する最も重要な事柄の1つであることは言及するまでもないが、それが地殻の変化をも伴うような非常に長期間にわたる結果の予測を含むものであるのに対し、用いられる評価モデルは比較的簡単なものである。また用いられているパラメータの中にも変動の大きいものや、現時点で実証されていないものも多い。しかしながら、現在進められている研究が評価方法およびその結果に反映され、精度が高められるという方法論については誤りがないと思われる。実験室やフィールドでは容易に得ることのできないパラメータは地球の歴史を顧みてパラメータを推定し、カナダで行われているように、それを一定値としてではなく確率的に取り扱う方向も優れたものと考えられる。

いずれにしても21世紀の原子力利用には欠くことのできない核廃棄物処分の研究・計画が、非常に広範な自然科学および一部社会科学をも含めた分野のものを総合して独自に進められていることはもちろんのこと、セクショナリズムを感じさせない組織の運営などについても、この NFWMP に学ぶ事柄は多い。

本報で紹介・解説したものは NFWMP のすべてではなく、むしろ一部であること、また浅学非才のため正しく内容が伝えられていない個所があれば、諸兄のご指摘を享受するとして、本報がわが国の関連研究者に僅かでも参考になれば幸いである。

— 参考文献 —

- (1) BOULTON, J. (ed.): Management of radioactive fuel wastes; The Canadian Disposal Program, *AECL*-6314, (1978).
- (2) STRATHDEE, G.G., WIKJORD, A.G.: Waste immobilization research for the Canadian Nuclear Waste Management Program, *AECL TR*-148, (1982).
- (3) BIRD, G.W., CAMERON, D.J.: Vault sealing research for the Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program, *AECL TR*-145, (1982).
- (4) LYON, R.B., MEHTA, K.K., ANDRES, T.: Environmental and safety assessment studies for nuclear fuel waste management; Vol. 1 Background, *AECL TR*-127-1, (1981).
- (5) JOHANSEN, K., HARGER, J.R.E., JAMES, R.A.: *ibid.*; Vol. 2 Pre-closure assessment, *AECL TR*-127-2, (1981).
- (6) WUSCHKE, D.M., MEHTA, K.K., DORMUTH, K.W., ANDRES, T., SHERMAN, G.R., ROSINGER, E.L.J., GOODWIN, B.W., REID, J.A.K., LYON, R.B.: *ibid.*; Vol. 3 Post-closure assessment, *AECL TR*-127-3, (1981).
- (7) JOHNSON, L.H.: Mechanisms of fission product and actinide release during irradiated fuel dissolution, in chemistry and geochemistry, Proc. 13th Information Meeting of the Nuclear Fuel Waste Management Program, *AECL TR*-201, p.62 (1982).
- (8) SHOESMITH, D.W., SUNDER, S., BAILEY, M.G., WALLACE, G.J.: Electrochemical and X-ray photoelectron spectroscopic of UO_2 fuel dissolution, *ibid.*, p.57.
- (9) MCKAY, P., NUTTALL, K., MITTON, D.B.: Assessing corrosion of nuclear fuel waste container, *ibid.*, p.67.
- (10) HARVEY, K.B., LITKE, C.D., MANDOLESI, D.C., TAIT, J.C.: The durability of glasses, *ibid.*, p.108.
- (11) TAIT, J.C., HARVEY, K.B., LITKE, C.D., MANDOLESI, D.L.: Surface phenomena and their effects on glass durability, *ibid.*, p.132.
- (12) TAYLOR, P., CAMBELL, A.B., OWEN, D.G.: Phase relationships in borosilicate glass systems, *ibid.*, p.143.
- (13) HAYWARD, P.J., HOCKING, W.H., DOERN, F.E., CECCHETTO, E.V.: Secondary ion mass spectrometry (SIMS) depth profiling studies of sphene-based ceramics and glass ceramics leached in synthetic groundwater, *ibid.*, p.162.
- (14) SRIDHAR, T.S.: Fluidized-bed calcination of ferric nitrate, *AECL Rep. WNRE*-273, (1981).
- (15) SRIDHAR, T.S., RUTHVEN, D.M.: Separation of krypton from N_2 using molecular sieves, *AECL TR*-201, p.195 (1982).
- (16) VIKIS, A.C., TORGERSOEN, D.F.: Abatement of gas-phase radioactive iodine, *ibid.*, p.202.
- (17) GILLHAM, R.W., ROBIN, M.J.L., DYTNYNSHYN, D.J.: Diffusion of strontium-85 in sand-bentonite mixtures, *AECL*-6838, (1982).
- (18) ROBERSON, H.E., LAHANN, R.W.: Smectite to illite conversion rates; Effects of solution chemistry, *Clays Clay Miner.*, 29, 129 (1981).
- (19) MEANS, J.L., HASTINGS, D.: Status report on the importance of natural organic compounds in groundwater as radionuclide-mobilizing agents, Office of Nuclear Waste Isolation Technical Rep., *ONWI*-84, (1979).
- (20) BURGESS, A.S.: Irradiated fuel and immobilized waste vaults: Backfilling system, *AECL TR*-66, (1980).
- (21) SARGENT, F.P.: Applied chemistry and geochemistry research for the Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program, *AECL TR*-149, (1982).
- (22) DENCE, M.R.: Mineral stabilities and rock properties in relation to nuclear waste disposal, *AECL TR*-1, (1979).
- (23) VANDERGRAAF, T.T.: A compilation of sorption

- coefficients for radionuclides on granites and granitic rocks, *AECL TR-120*, (1980).
- ②4 RELYEA, J.F., SERNE, R.J.: Waste Isolation Safety Assessment Program; Controlled Sample Program—Publ. No. 2: Interlaboratory comparison of batch K_d values, *PNL-2872 UC-70*, (1979).
- ②5 HOSTETLER, D.D., SERNE, R.J., BALDWIN, A.J., PETRIE, G.M.: Waste/Rock Interactions Technology Program; Status Report on SIRS—Sorption information retrieval system, *PNL-3528 UC-70*, (1980).
- ②6 VANDERGRAAF, T.T., ABRY, D.R.M., DAVIS, C.E.: The use of autoradiography in determining the distribution of radionuclides sorbed on thin sections of plutonic rocks from the Canadian shield, *Chem. Geol.*, **36**, 39 (1982).
- ②7 VANDERGRAAF, T.T., ABRY, D.R.M.: Radionuclide sorption on drill core material from the Canadian shield, *Nucl. Technol.*, **57**, 399 (1982).
- ②8 WALTON, F.B., MELNYK, T.W., ABRY, R.G., FLEURY, K.: The determination of nuclide—geologic media reaction kinetics using mixing-cell contactors, *Chem. Geol.*, **36**, 155 (1982).
- ②9 WALTON, F.B., MELNYK, T.W., ROSS, J.P.M., SKET, A.M.M.: Determination of radionuclide sorption mechanisms and rates of granitic rock by selective chemical extraction techniques, ACS Conf., Pre-printed Paper, Seattle, Wash., Mar. (1983).
- ③0 TANG, D.H., FRIND, E.O., SADICKY, E.A.: Contaminant transport in fractured porous media; An analytical solution for a single fracture, *AECL TR-132*, (1980).
- ③1 VANDERGRAAF, T.T.: 私 信.
- ③2 CRAMER, J.J.: Effects of rock-water interaction on radionuclide transport, *AECL TR-201*, p. 277 (1982).
- ③3 GASCOYNE, M.: The use of uranium-series disequilibrium, *AECL TR-201*, p. 303 (1982).
- ③4 SOONAWALA, N.M., BROWN, P.A., LAROCQUE, G.: Geology, geophysics and rock properties research for the Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program, *AECL TR-152*, (1982).
- ③5 DENCE, M.R., SCOTT, W.J.: The use of geophysics in the Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program with examples from the Chalk River Research Area, *AECL TR-102*, (1980).
- ③6 HUANG, C., HUNTER, J.A.: A progress report on the seismic downhole survey, *AECL TR-31*, (1980).
- ③7 BRISBIN, W.C.: A gravity profile across the Lac du Bonnet Batholith in Southern Manitoba, *AECL TR-17*, (1979).
- ③8 LAU, J.S.O.: Borehole television survey, in underground rock engineering, *CIM Special*, **22**, 204 (1980).
- ③9 KASZYCKI, C.A., SHILTS, W.W.: Glacial erosion of the Canadian shield—Calculation of average depths, *AECL TR-106*, (1980).
- ④0 SCOTT, J.S.: EMR program for geological disposal of high-level radioactive wastes, in disposal of high-level radioactive waste; the Canadian Geoscience Program, GSC Paper 79-10, (1979).
- ④1 BETCHEN, R.N., PEARSON, R.: Hydrogeological research for the Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program, *AECL TR-151*, (1982).
- ④2 DAVISON, C.C.: Field-scale tracer migration experiments in fractured crystalline rock at CRNL, *AECL TR-201*, p. 325 (1982).
- ④3 JOHNSTON, L.M.: A review of the geochemistry of groundwater in crystalline rocks, *AECL TR-154*, (1982).
- ④4 BOTTOMLEY, D.J., ROSS, J.D., GRAHAM, B.W.: Hydrogeochemistry at the Chalk River Nuclear Laboratories, *AECL TR-201*, p. 42 (1982).
- ④5 PICKENS, J.F., GRISAK, G.E.: Finite element analysis of liquid flow, heat transport and solute transport in a groundwater flow system; Governing equations and model formulation, *AECL TR-81*, (1979).
- ④6 SHEPPARD, M.I.: Radionuclide migration in the soil root zone, in environmental and safety assessment—Proc. 9th Nuclear Fuel Waste Management Information Meeting, *AECL TR-79*, (1981).
- ④7 SHEPPARD, M.I., OLCHOWY, L., MAYOH, K.R.: Uranium, thorium, radium and arsenic concentrations of plants and soils of the pre-cambrian shield; A preliminary study, *AECL TR-159*, (1981).
- ④8 ZACH, R.: LIMCAL; A comprehensive food chain model for predicting radiation exposure to man in long-term nuclear waste management, *AECL-6827*, (1982).
- ④9 PICKENS, F.P., JACKSON, R.E., INCH, K.J., MERRITT, W.F.: Field measurements of distribution coefficients using a radial-injection dual-tracer test, *AECL TR-133*, (1980).
- ⑤0 KILLEY, R.W.D., CHAMP, D.R., MCHUGH, J.O., MARRITT, W.F., COOPER, E.L.: Recent studies of subsurface transport of radionuclides at CRNL, *AECL TR-79*, (1981).
- ⑤1 IVERSON, S.L.: Environmental research for the Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program, *AECL TR-150*, (1982).
- ⑤2 CHAMP, D.R., INCH, K.J., KILLEY, R.W.D., LEE, D.R., SHEPPARD, M.I.: Geochemistry in the biosphere; From the pluton to the plant, *AECL TR-201* p. 340 (1982).
- ⑤3 DORMUTH, K.W., SHERMAN, G.R.: SYVAC—A computer program for assessment of nuclear fuel waste management systems; Incorporating parameter variability, *AECL-6814*, (1981).
- ⑤4 福井正美: カナダ原子力公社ホワイトシエル研究所, 保健物理, 寄稿中.