

話	題
---	---

カナダ原子力公社ホワイトシェル研究所

福井正美^{*1}

(1983年10月4日受理)

Atomic Energy of Canada Limited, Whiteshell Nuclear Research Establishment

Masami FUKUI^{*1}

1. ホワイトシェル研究所の概要

カナダ中央部マニトバ州の州都ウィニペグ市の東北東約110 km に、カナダ原子力公社 (Atomic Energy of Canada Limited; 以後 AECL と記す) の研究機関に属する WNRE (Whiteshell Nuclear Research Establishment) がある。筆者は1983年4月より9月までここに滞在する機会を得た。ここはカナダ中西部における原子力研究に関する中核的な機関であり、関連した物理、化学、生物および工学的研究を行うとともに、この分野の学生や若手研究者の教育にも貢献している。おもな研究は以下のとおりである。

(1) Candu 炉設計と炉安全解析ならびに新型燃料開発とその再処理

(2) 使用済核燃料および再処理廃棄物の隔離処分と安全性評価

(3) 低線量に関する生物・医学的影響

(1)については研究炉(WR-1)をはじめ、冷却材喪失模擬実験施設、水素ガス爆発をシミュレートする原子炉格納庫性能実験施設、使用済燃料解体用ホットセルなどが設置されている。WR-1は1963年に建設が開始され、1965年11月1日に臨界に達したもので今年は20周年にあたる、いわゆるCandu炉であり、出力60 MWt、減速材には99.73%の重水を使用している。燃料は1.3~2.25 Wt%濃縮ウランを用いており、平均バーンアップは360 MWh/kgU、最大熱中性子束はおおよそ $1.5 \times$

$10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ である。また冷却材に石油精製誘導体(ターフェニル混合物)が用いられているのも特色の一つである。照射設備は3系統のニューマが配置されているが、径が2インチ程度と細いので、より多目的の研究に利用するため、スーパーラビットと呼ばれる2倍程度の径のものを設置する工事が現在進められている。WR-1は原子炉本体が地下に設置されていることや緊急注水用ヘッダがスタック上部に併設されている(Photo. 1)ことなどの特色もある。

(2)の研究に関しては原子炉本体およびそれに関連する研究以上に予算および人員を含めて重点がおかれており、その大規模なプロジェクト研究の概要は次節以下で述べることとする。

(3)では放射線の生物学的影響および基礎医学に関連した研究が進められているが、特色ある設備としてはFIG (Field Irradiation Gamma) および ZEUS (Zoological Environment Under Stress) と呼ばれる野外での照射装置が森林の中に設けられている¹⁾ ことである。これらは約1万 Ci の ^{137}Cs を線源として、前者では照射前後の各種作物や森林など植物生態系の変化(生産能力、生育状態、枯死や奇形の発生など)、後者でも野生の小動物の生態変化(繁殖、発育状態、死亡や奇形の発生)の観察および微視的にもDNAの変化とその修復などに関する研究が行われている。

2. WNRE の人員・組織

現在(1983年)、WNREの組織は主として七つの部(Division)から構成され、そのうち四つが研究部(この長はDirectorと呼ばれる)であり、他は管理部、工営部、事務部(これらの長はManagerと呼ばれる)であ

^{*1} 京都大学原子炉実験所; 大阪府泉南郡熊取町野田 (〒590-04)
Research Reactor Institute, Kyoto University;
Noda, Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka.

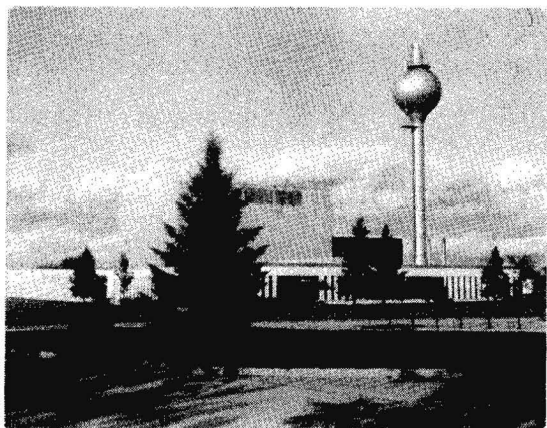


Photo. 1 ホワイトシェル研究所の研究炉(WR-1) 建家およびスタック

る。これらの部、課の名称およびその人員（構成員数およびそのうちの学位取得者数）を掲げると以下のとおりである。

- (1) CMSD (Chemistry & Materials Science Division), [103, 24]
 - 1-1 MSB (Materials Science Branch), (19, 8)
 - 1-2 ASB (Analytical Science Branch), (57, 5)
 - 1-3 RCB (Research Chemistry Branch), (27, 11)
- (2) WMD (Waste Management Division), [103, 22]
 - 2-1 FWTB (Fuel Waste Technology Branch), (19, 4)
 - 2-2 GACB (Geochemistry & Applied Chemistry Branch), (28, 10)
 - 2-3 AGB (Applied Geoscience Branch), (22, 3)
 - 2-4 ESAB (Environmental & Safety Assessment Branch), (25, 4)
 - 2-5 WMPA (Waste Management Public Affairs), (9, 1)
- (3) ASD (Applied Science Division), [128, 25]
 - 3-1 TSB (Technical Services Branch), (30, 0)
 - 3-2 TRB (Thermalhydraulics Branch), (31, 8)
 - 3-3 SAB (System Analysis Branch), (18, 4)
 - 3-4 FRB (Fuel Recycle Branch), (18, 6)
 - 3-5 MMB (Materials & Mechanics Branch), (31, 7)
- (4) HSD (Health & Safety Division), [95, 16]
 - 4-1 ERB (Environmental Research Branch), (35, 7)
 - 4-2 MSB (Medical Services Branch), (4, 1)
 - 4-3 MBB (Medical Biophysics Branch), (30, 7)

4-4 RISB (Radiation & Industrial Safety Branch), (26, 1)

(5) EDOD (Engineering Design & Operations Division), [145, 2]

5-1 DPEB (Design & Project Engineering Branch), (68, 0)

5-2 RTB (Reactor Technology Branch), (21, 2)

5-3 ROB (Reactor Operation Branch), (56, 0)

(以下 Division および Branch 名は上述した略称で記すこととする)。

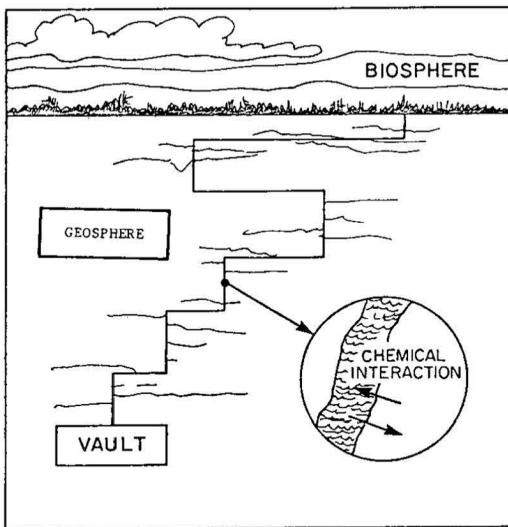
(1)~(4)までの研究部にはおのおの100名程度が所属し、一つの課 (Branch) は平均20~30名である。平常の原子炉運転や放射性廃棄物処理に伴う業務は管理部にあたる EDOD が担当し、研究と管理業務は完全に分離されている。研究部の Branch では研究テーマごとに2~3の Section に分かれており、Section head と Branch head のポストはあるが、これらの研究者を含めて職階は Professional と Technician の二つである。1名の Professional は平均2~3名以上の Technician の協力を得て研究を進めているが、四半期ごとの Progress Report の作成をはじめとして、研究に関する全責任を担っているのはもちろんのことである。すなわち WNRE は Professional 約100名を含む研究部員400名および管理、工営、事務部の600名の総数約1,000余名から構成されている。

3. 核廃棄物地層処分研究

カナダでは Candu 炉による使用済核燃料あるいはその再処理廃棄物を深地層岩石圏に処分することを想定して NFWMP (Nuclear Fuel Waste Management Program) の研究を進めている。これは AECL が主体となり国立研究所や多くの大学、民間会社が協力しているナショナルプロジェクトであり、AECL のなかでもこの研究の中核となっているのが WNRE である。NFWMP の研究の概要については別の機会に譲る²⁾として、ここでは WNRE で行われている一部の特徴あるものについて概説する。

(1) WNRE での NFWMP 研究と協力組織

NFWMP 研究は2(2)、2-1~4に掲げた Branch が主体となって進められている。第1図には処分場から生態圏までの漏洩放射能が移行する模式図³⁾を示すが、FWTB では地下処分場近傍での使用済核燃料の封じ込め方法とその評価、GACB では核廃棄物の固化や長期の安定性評価および、漏洩放射能の挙動特性、AGB では処分場の外側に位置する岩石圏での地質、水理特性などの研究が分担して行われている。また生態圏での研究



第1図 処分場 Vault, 岩石層および生態圏を経由する放射性核種移行の模式図

は WMD ではなく、HSD に属している ERB, MBP および RISB により行われているものが参考・引用されている。WMD の ESAB はこのような処分場から生態圏に至る研究成果を総合し、被曝線量評価に関するモデル化および計算を行っている。しかしながら、直接的に線量評価に反映されない現象でも、その機構を明らかにして理解を深めるのに役立つような基礎的研究（たとえば材料の表面化学など）は重視されている。上述した Branch で行われている領域で、NFWMP 研究に必要とされる項目は概ね含まれているが、それを推進するためには化学を基礎とした研究の支援がとくに要求される。WNRE では HSD の他に、CMSD が分析・測定など化学的な分野で NFWMP 研究に協力している。たとえば、RCB では FWTB や GACB と協力し、核廃棄物処分に関連した化学現象をより深く理解し、形状変化や長期にわたる挙動特性を知るために以下のような項目の研究を行っている⁹⁾。

- i) 種々のガラス固化体や UO_2 の安定性およびそれらの容器材料への影響
- ii) 処分場雰囲気程度の高温下での水溶液、とくに塩分地下水の化学特性
- iii) U, Pu, I, Tc などの分析および熱力学的平衡計算
- iv) アクチニドコロイドの物理、化学的特性
- v) 粘土鉱物の安定性および吸着機構
- vi) オフガス (^{129}I , ^{85}Kr など) の回収研究

また、ASB ではあらゆる分野からの試料の化学分析の要請に対応すべく、他の Branch の約2倍に相当する

50 人以上のスタッフを擁している。その協力内容はたとえば以下のようなものである⁹⁾。

- i) 環境水、鉱水の分析
- ii) 種々の廃棄物固化体を用いた溶出試験溶液の分析
- iii) 廃棄物と固化体の相分離などを含む固体元素分布の分析
- iv) 岩石、鉱物などの元素分析
- v) 照射燃料、廃棄物格納容器などの材料分析
- vi) あらゆる分野からのサンプルの放射能測定

以上のほかに、温度、圧力などが高い深層地での化学種（たとえば溶存酸素や pH など）を *in situ* で測定することが可能な、プローブの開発を含む遠隔測定法の確立などに関する研究を行っている。

このように NFWMP の研究が機能的に行えるような組織が能率的に運営されている印象を受ける。

(2) 燃料不動態化研究施設

処分場近傍における NFWMP 研究は、現時点では非放射性元素を用いた小規模なもの（たとえば固化体溶出試験）が多い。しかしながらこのような基礎的研究をスケールアップした、もしくはアクティブなトレーサー使用を目的とした施設 (IFTF: Immobilized Fuel Testing Facility) が現在建設されており（建家は今秋完成する）、そこで将来行われる研究項目はたとえば以下のようなものである。

高レベル実験ではコンクリート製円筒容器（直径約 2.5 m、高さ約 1.5 m）に照射燃料を含む金属容器、backfill 材、地下水、岩石コアを封じ込め、温度、圧力などをパラメータとして処分環境を想定し以下の研究を行う。

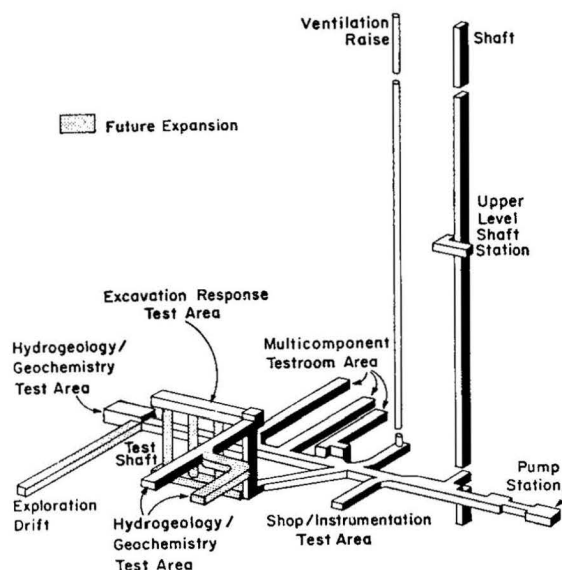
- (i) 高放射線量下での水素吸着および金属の腐蝕を含む特性変化
- (ii) 照射燃料の動態シミュレーション
- (iii) 放射性核種漏洩挙動

この研究はマルチコンポーネントでの実験であり、IFTF には照射燃料の挿入や試験前後のコンポーネントの取扱いのために最新のマニピュレータを有した 10 セルほどのホットケープ、円筒容器取扱い用クレーン、容器除染用セル、画像処理を含む燃料変形試験機、 α 放射能取扱室などが設けられている。

中・低レベルに関する研究についてはスペースがないので省略する。

(3) 地下実験施設

NFWMP 研究には三つの大きいプロジェクトがある。第1は EMR (Energy, Mines and Resources) に所属する GSC (Geological Survey of Canada) や EC



第2図 地下実験施設 (URL) の概念図

(Environmental Canada) に所属する NHRI (National Hydrology Research Institute) などにより行われている6カ所 (オンタリオ州5カ所, マニトバ州1カ所) の岩石層での地質・水理研究であり, 第2は前述した IFTF である。そして第3がここで述べる URL (Underground Research Laboratory) である。URL 建設地は上述した地質・水理研究の一つのサイトとも重複しているが, 実際に地下に処分場を設置することを想定して地下岩石中に実験研究施設が建設されつつある。ここは WNRE にも近い Pinawa の北方約 10 km に位置し, 敷地は AECL が実験研究のためにマニトバ州政府から西暦 2000 年までの 21 年間借用したもので, 核廃棄物は実験に用いないこととされている。その敷地面積は約 400 ヘクタールであり, 第2図に示すような URL は地下約 250~500 m に建設される。この花崗岩層が URL サイトに選定されたのは以下のような理由による。

- i) 実際の処分場に類似した岩石層であること
- ii) 岩石の多くが地表に露出しており, 地表での地質調査が簡単であること
- iii) WNRE に近い地理的環境にあること
- iv) 有用な鉱物資源が少なく, 鉱業活動により地層や水理状態が乱されていないこと
- v) 20 億年以前に形成され, 地震活動の影響が少ないこと

岩石層中の地下研究施設はスウェーデンや USA でも建設が進められているが, これらは鉱業活動が行われた地点であり, 特に深層地下水の水理や水質がこの URL

サイトと異なり, 自然状態ではないと考えられている。

URL では地上で行ったさまざまな研究 (たとえば岩石, 地下水, 放射性核種の相互作用など) を地下環境で実証するとともに, このような施設を建設する過程でしか得られない情報を収集することを目的としている。たとえば,

i) 露頭踏査, ボーリング調査などの地表活動から岩石内亀裂を予測し, URL の建設に伴って, その結果および方法を評価する

ii) トレーサー実験により得られた岩石亀裂内放射性核種の挙動およびモデル化研究を実地層でも行い, その結果を評価する。さらに温度, 圧力, URL 建設に伴う水質変化の挙動特性への影響を検討する

iii) URL 建設に種々の掘削法を用い, また温度変化などによる亀裂の生成を検討する

iv) 核廃棄物容器の周辺に設置する buffer 材の耐熱性および防水性などを検討する

v) backfill 材のコンパクションやシャフトおよびボーリング孔などをシールする技術を検討する, などである。

これらの研究は, 初めは単独に行われ, その後複合させた条件下でも水理・地質などへの影響が検討される予定である。URL でのこれらの研究は西暦 2000 年までに完了され, マニトバ州政府に返還されることになっている。計画の概略は以下のとおりである。

~1983年: サイト地表の地質調査とボーリング調査をおおむね完了し, URL 建設のためのシャフトの掘削および関連研究を開始する

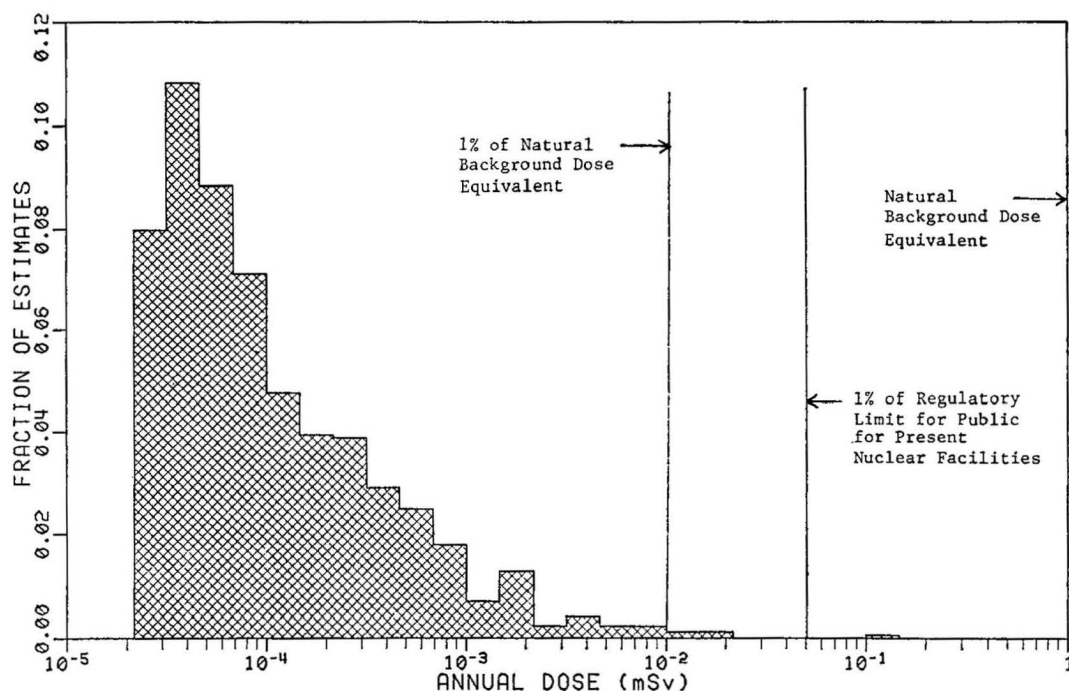
~1986年: URL および設備を設置し, 実験を開始する

~2000年: URL での実験およびシャフト等のシールとその関連研究を完了し, 地表面施設を撤去する。

URL 建設のためのシャフトの掘削は 1983 年開始されたが, 9 月現在の深度は約 15 m であり, 歪計やサーモメーターがその深度に応じて設置され, 岩石の変形が調査されている。

(4) NFWMP での被曝線量評価

以上に述べた NFWMP 研究では第1図に掲げた三つの領域で明らかにされたモデルやパラメータを用いて ESAB が総合的な被曝線量評価を行っている⁶⁾。そのシナリオの概略は, $1.8 \times 10^6 \text{ MW (e) \cdot a}$ の発電量から生ずる $3.5 \times 10^5 \text{ Mg}$ の使用済燃料を隔離容器とともに地下 1,000 m の処分場に埋設することを想定し, この容器の破損, 地下水による UO_2 の溶解とそれに伴う放射性核種の Buffer 材への漏出, さらに岩石圈を經由して生態



第3図 放射性核種移行経路の種々のパラメータ群に対して得られた個人被曝預託線量の頻度分布

圏の湖水および表土層壌を経由する食物連鎖により人体に被曝線量が賦課されるとしたものである。現時点ではこれらの経路に沿う現象の機構が十分に解明されていないものもあり、パラメータも必ずしも精度がよくないものもある。そこで、ここで用いられている SYVAC (System Variability Analysis Code)⁷⁾ では、これらの領域で用いられているパラメータがほぼ一定と考えられるものおよび過去の研究でもその値が大きく変化するものに分類し、後者についてはその変動幅のなかでのパラメータ値の確率分布からモンテカルロ法を用いてランダムに一連のパラメータ群を選んだ場合について被曝線量を計算する手法を採用している。そしてこの計算試行を数千回以上実行し、おのおのについて得られる線量値を第3図に示すようなヒストグラムもしくは累積確率分布として表現している。ここでは用いられているモデルを詳しく解説するスペースがないので、使用されているおもなパラメータのみを掲げると以下のとおりである。

i) 処分場近傍圏

一定値：核廃棄物内蔵量、容器数、拡散および移送に有効な容器断面積、雰囲気気温度、buffer 材厚さ、揮発性 FP の比率、 UO_2 溶解度、buffer 内地下水流量率、核種の崩壊定数など

変動定数：buffer 材有効間隙率および拡散係数、動水勾配、透水係数、容器破損開始時間、buffer 材分配

係数など

ii) 岩石圏

一定値：岩石分配係数

変動定数：地表面までの経路距離

岩石間隙率、透水係数、動水勾配

iii) 生態圏

一定値：雨水浸透率、不飽和土壌含水率、土壌密度、土壌コンパートメント層厚、湖水深度、および土壌作物、陸上動物、飲料水、湖水生物摂取に伴う預託線量当量など

変動定数：地表キャッチメント面積、土壌分配係数、湖水面積、年降水量など

以上のようなパラメータを用いた被曝線量計算は、同様の手法を用いて海洋底処分を想定した場合にも適用され⁸⁾、その結果が比較されている。

3. (1)~(4)に述べた核廃棄物に関する研究および組織に加えて、WMD に属する WMPA の存在にも特色がある。ここでは核廃棄物処分に関する研究や計画内容を一般公衆に理解させるため、テレビ、新聞等マスコミによる報道、パンフレットの作成や公聴会などを利用した普及活動を専門的に行っている。

4. あとがき

保健物理があらゆる放射線から人体を防護することを目的とすると、現存する原子力施設の放射線管理や環

境管理だけではなく、核燃料サイクル過程での放射線に伴う危険性が潜在的にも大きく、また近い将来必ず顕在化する問題が研究対象となるべきことは自明であり、保健物理の担う役割は大きい。ここで言及した核廃棄物の深層地中処分に伴う被曝線量評価もその一つであると考えられるが、その評価に至る個々の研究はわが国でも行われているものの、それらを機能的かつ総合的に進展させるために国公立研究機関、民間、大学などを含めた研究の組織化は今後の課題として残されている。またわが国固有の線量評価を行う場合も地質・水理パラメータなどに関して、非常に広範な知識が必要であり保健物理の被曝線量評価関連研究者は、自らそれらを得ることは困難であるが、生態圏、岩石圏、処分場近傍などでの現象を把握するとともに、モデルの適用性、パラメータの不確定性などを考慮して安全性評価に取り組むべきであろう。

参 考 文 献

- 1) A.M. MARKO (ed.); Biological effects of ionization radiation, AECL-7164 (1981).
- 2) 福井正美; カナダにおける核燃料廃棄物処分研究, 日本原子力学会誌, 寄稿中.
- 3) D.M. WUSCHKE; Assessment submodels, AECL TR-79, p.62 (1981).
- 4) D.F. TORGERSON; Supporting chemistry research, AECL TR-201, p.6 (1982).
- 5) R.B. STEWART; Analytical science support for chemistry and geochemistry research, *ibid.*, p.14 (1982).
- 6) D.M. WUSCHKE *et al.*; Environmental and safety assessment studies for nuclear fuel waste management, Vol. 3, Post-closure assessment, AECL TR-127-3 (1981).
- 7) K.W. DORMUTH and G.R. SHERMAN; SYVAC—A computer program for assessment of nuclear fuel waste management systems: Incorporating parameter variability, AECL-6814 (1981).
- 8) D. M. WUSCHKE, A. M. RICE and P. A. GILLESPIE; Environmental assessment of sub-seabed disposal of nuclear waste: A demonstration probabilistic systems analysis, AECL TR-206 (1983).