

原環センター トピックス

RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT FUNDING AND RESEARCH CENTER TOPICS

2002.9.NO.62

目次

スイス・グリムゼル試験場におけるガス移行挙動試験(その2) - 人工バリアシステムの構築と飽和 -
センターのうごき.....

スイス・グリムゼル試験場におけるガス移行挙動試験(その2) - 人工バリアシステムの構築と飽和 -

1. はじめに

放射性廃棄物の地下処分環境においては、廃棄物やその容器及び構造物中の鉄筋等に使用される金属の腐食、廃棄物中の有機物の化学・微生物分解などにより水素・メタン等の気体(以下ガスと総称)が発生することが、これまでの研究により明らかとなりつつある。これらのガスの発生、移行に関する問題は、ここ10年来、研究対象としてECやOECD/NEAの共同研究に取り上げられている(例:MEGAS¹⁾,EVEGAS²⁾等)。最近では、EUとNEAの共同研究として、処分場で発生するガスに関し、シナリオと評価方法についての現状がまとめられた³⁾。こうした研究において、処分場で発生するガスの安全性への潜在的な影響として、以下のようなものが示されている。

- ・過剰圧力とそれに関連する事象 - ガスの発生速度が、ガスの移行速度より大きい場合は、廃棄体周辺にガスが蓄積し、圧力が上昇する。もし、圧力の上昇により、人工バリアや天然バリアが損傷すれば、放射性核種の移行を早める経路を形成する恐れがある。
- ・³H, ¹⁴C などを含むガス及び水素、メタンなどの可燃性ガスが地表に達する恐れがある。
- ・汚染した地下水の移動への影響 - 蓄積したガス

による水の押し出し、ガス気泡中に地下水が取り込まれた状態での移動及びガスの移行経路の形成と消滅が連続することによる地下水の流動の可能性がある。

- ・ガスと水の界面へ吸着したコロイド、核種がガスと共に移動する可能性がある。

これらの現象を評価するために、信頼性のあるガスの発生量及び移行挙動の評価手法が必要である。ガス移行挙動に関し、いくつかの解析コードが開発され、供試体レベルでの人工的な種々の条件に対する適用性が確認されている。しかし、実施設で存在する可能性がある不均質媒体や界面を含む系への適用性については確認されていない。そこで、ガス発生シナリオにおける多重バリアシステムの性能評価手法の信頼性向上を目指して、地下処分環境を模擬して、原位置に設置した人工バリアシステムと周辺の岩盤(天然バリア)を含む系での実験によるガス移行挙動の評価を計画した。原位置での試験実施のため、スイス放射性廃棄物管理協同組合(Nagra)との間でグリムゼル試験場のフェーズVに関する協定を締結し、平成9年度からグリムゼル試験場を利用したガス移行挙動試験(Gas Migration Test :GMT)を開始した。本試験の第一報として、原環センタートピックス

表-1 ガス移行試験の主な実施内容と今後の予定

年 度	1997(H9)	1998(H10)	1999(H11)	2000(H12)	2001(H13)	2002(H14)	2003(H15)	2004(H16)
1.試験計画の策定	■	■	■					
2.試験位置の選定及び地質調査	■							
3.サイロ空洞掘削と周辺岩盤調査		■	■	■				
4.人工バリアシステムの構築				■	■			
5.人工バリアシステムの飽和					■	■		
6.人工バリアシステムへのガス注入						■	■	
7.人工バリアシステムの解体調査							■	■
8.室内試験		■	■	■	■	■	■	■
9.解析検討		■	■	■	■	■	■	■
10.総合評価								■
11.報告書作成	■	■	■	■	■	■	■	■

表-2 本試験に協力している機関と協力分野

パートナー名	協力分野
Nagra (スイス)	グリムゼル試験場のフェーズVの主催者
ENRESA (スペイン)	室内試験、CODE GRIGHT による解析
BGR (ドイツ)	RockFlow による解析
ANDRA (フランス)	MEHRLIN による解析
GRS (ドイツ)	ガスの採取・分析等
DBE (ドイツ)	光ファイバーによる計測

No.49 (平成 11 年 6 月) で報告した。今回は、その後の経過を含め、試験の状況を報告するものである。

2. ガス移行挙動試験の概要

本試験は、ガスの移行の観点からの、人工バリアシステムと周辺岩盤の機能の評価、原位置条件下での人工バリアシステムと周辺岩盤を通過するガス移行に適用できる解析モデルの評価/検討、ガス移行の観点からの、ガスベントの有無を含めた人工バリアシステムの設計へのデータの取得及び原位置状況下での人工バリアシステムの施工性確認を目的とし、原位置試験（試験位置の選定及び地質調査、サイロ空洞掘削と周辺岩盤調査、人工バリアシステムの構築、飽和、ガス注入、解体調査）、室内試験及び解析検討から構成されている。実施内容と工程を表-1 に示す。なお、本試験は、グリムゼル試験場のフェーズVに参加している機関（パートナー）との解析等の分野での協力の下に進めている（表-2 参照）。

原位置試験として、試験を開始した平成 9 年度には試験施設の設置場所の選定と試験計画を立案し、平成 10 年にアクセス坑道と図-1 に示すように高さ約 4.5m、直径約 4m のサイロ空洞を掘削した。平成 11 年度から平成 12 年度にかけて、サイロ空洞周辺の岩盤の水理的な特性を調査し、その後、サイロ空洞内にコンクリートサイロ、その周囲にベンナイト・砂の混合土からなる充てん材、及び、各種のセンサーを設置した。サイロ上部の空洞を珪砂・れき材で埋め戻した後、平成 13 年 7 月には、コンクリートプラグを構築した（施工手

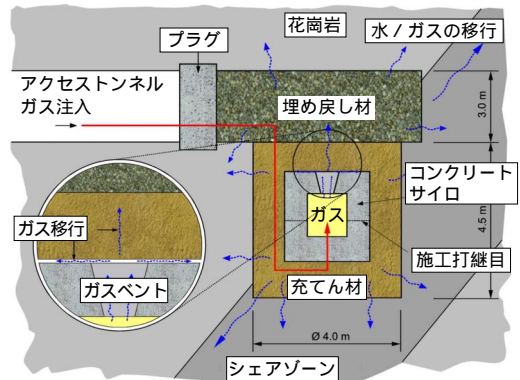


図-1 ガス移行挙動試験 (GMT) の原位置試験概念

順：図-2 参照）。現在、ガス注入の準備段階として、加圧注水による周辺岩盤と人工バリアシステムの人工的な飽和を実施している。^{4) - 7)}

原位置試験を補完するため、室内試験として、人工バリアシステムに用いる材料の選定、解析パラメータ取得、計測に用いる各種センサーの適用性試験等を行なっている。

解析検討として、計画立案のための予測解析を行っている。今後、試験経過の評価・確認及び、事後評価の一連の解析を実施する。これら一連の解析には、ガス移行に関するモデルの適用性評価を考慮し、複数の二相流解析コード (TOUGH2、GETFLOWS、CODE BRIGHT、RockFlow、MEHRLIN) を用い、国内の専門家・国外パートナーと定期的に会議を行い、試験の各段階における解析結果の評価・比較、解析上の課題、解析検討の進め方等について議論を行いながら進めている。

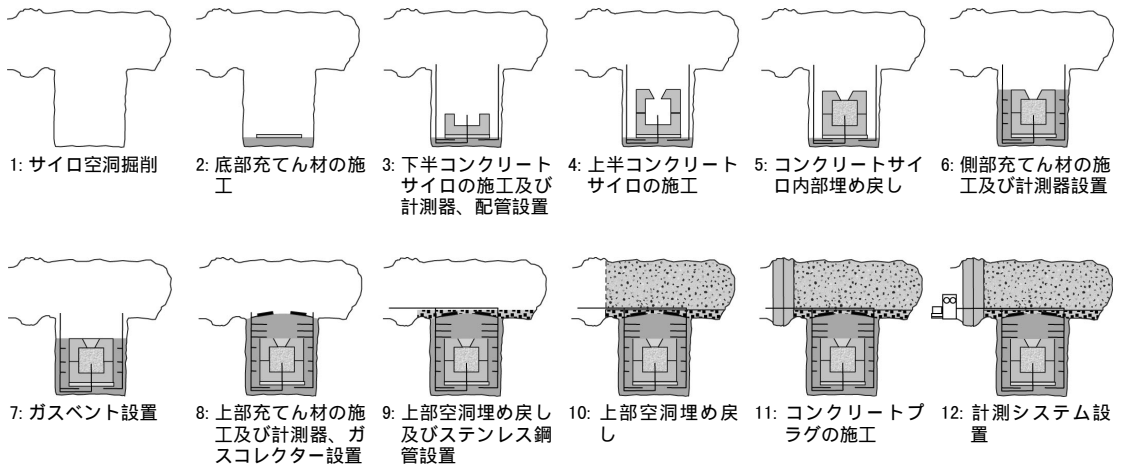


図-2 施工手順

3. 人工バリアシステムの構築

人工バリアシステム構築の計画立案に当たり、現実的な地下環境であること、処分施設の構成要素が網羅されていること（例：コンクリートの打継目）、構築に際し、実機を模擬した施工ができること、解析モデルのもととなる品質を担保できる施工が可能なこと（例：充てん材の密度が極端にばらつかないこと）、ガス移行のデータベースとして十分な点数の計測が可能なこと、人工バリアシステムの本来の性能を評価するため計測機器を過度に設置しないことに留意した。

人工バリアシステムは、高さ 2.5m、直径 2.5m、厚さ 0.5m のコンクリートサイロとその周囲の厚さ 0.75m の充てん材（ベントナイト・砂の混合土）によって構成されている。

コンクリートサイロ及び充てん材の施工について以下に示す。

(1) コンクリートサイロの施工

コンクリートサイロには、ガスの漏出箇所を特定するために打継目と頂版部に高透気性モルタル製（目標透気係数： $1.0 \times 10^{-5} \text{m/sec}$ ）のガスペントを設置した。これら以外の箇所からは、ガスが漏出しないよう温度応力によるひび割れの発生やブリーディング（コンクリート打設後に練混ぜ水の一部が上方に集まる現象）を抑制した施工を行った。打継目は、高圧水による洗浄、湿潤化を行い十分な処理を行なった。さらに、セパレータ（コンクリートの型枠を所定の間隔に保つために用いる金具）をなくすため、型枠を外部支保工により固定した。これらの対処により、要求条件を満足する品質のコンクリートサイロの構築ができた（施工状況：図-3、完成後全景：図-4）。



図-3 コンクリートサイロ施工状況



図-4 コンクリートサイロ全景

(2) 充てん材の施工

充てん材として用いた材料は、ベントナイト（日本産クニミネ工業製クニゲルV1）・砂（スイス産の珪砂）の乾燥重量比を1:4とし、練混ぜ後の含水比を11%としたものである。

締固めには、電動式転圧機を使用した（図-5 参照）。締固めの施工管理は、転圧時間及び撤出し厚と締固め後の層厚により行なった（図-6 参照）。さらに、計測機器設置レベルにおいて、4～5箇所で砂置換法（JIS A 1214）による原位置密度試験を行なった。充てん材の品質管理試験結果の一例を図-7に示す。図に示すように、湿潤密度は1.8～2.0（g/cm³）の範囲にあり、管理基準（湿潤密度 1.75g/cm³以上）を満たしている。これにより、目標品質を十分に満足する人工バリアシステムの原位置状況下での施工性を確認することができた。

上部の充てん材には、ガスの移行経路を可視化させるため、硝酸鉛（Pb(NO₃)₂）を水に溶かして添加した。ガス注入試験の最後に、硫化水素（H₂S）を含む窒素ガスを注入し、硫化鉛で黒

色に発色させ、試験後の解体調査でガスの移行経路を直接観察する予定である。

(3) 計測機器の設置

充てん材及びコンクリートサイロ内に表-3に示す計測器（合計203点）を設置した。このうち、圧力計で、人工バリアシステム内及び岩盤内の間隙圧を測定し、飽和時やガス移行時の間隙圧の変化を計測する。TDR（Time Domain Reflectometry sensor）では、充てん材の含水率を測定し、充てん材の飽和時やガス移行時の飽和度の変化を計測する。また、全応力計では、充てん材の膨潤圧を計測する。ここで、光ファイバーセンサーは、DBEが開発中の測定システムであり、原位置条件下での人工バリア材料中におけるシステムの実証を目的の一つとして、設置している。また、充てん材を透過したガスを直接採取し確認するため、充てん材の上部にステンレス鋼製のガスコレクター（図-8 参照）を設置した。これらの計測器による測定結果を総合的に判断して、人工バリアシステム及び周



図-5 充てん材締固め状況（側壁）



図-6 締固め後の層厚の測定

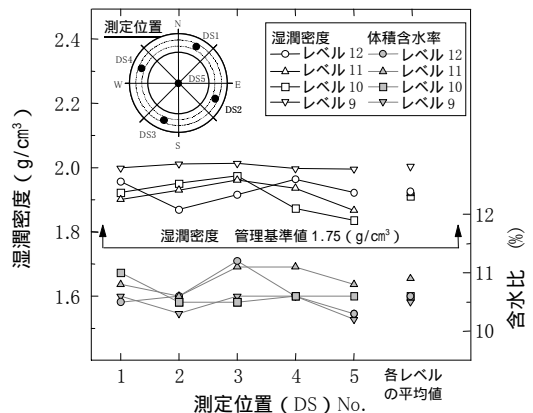


図-7 原位置密度試験結果

表-3 計測器一覧

測定項目	測定機器	場 所	数 量
間隙圧	圧力計	充てん材	81
		サイロ内部	3
		上部空洞	12
温度	温度計	サイロ内部、充てん材	10
相対湿度	湿度計	充てん材	4
全応力	全応力計	充てん材	11
含水率	TDR	充てん材	50
		サイロ表面	12
		コンクリート打継目	8
ガス組成	ガスサンプリングシステム	上部空洞	6
温度	光ファイバーセンサー	上部空洞	2
間隙圧		上部空洞	1
湿度		充てん材	2
全応力		充てん材	1

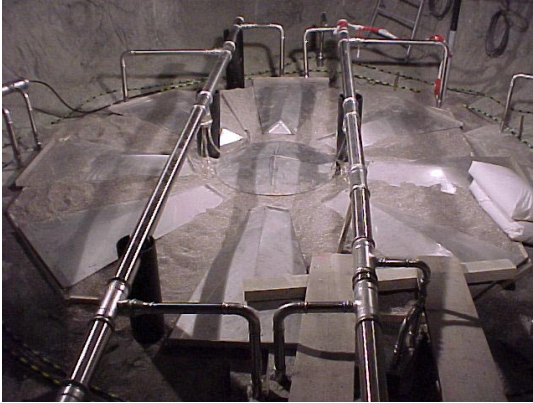


図-8 ガスコレクター及びケーブル等を通したステンレス鋼管配置状況



図-9 測定器設置状況（リング状に整形されたベントナイトによる止水対策）

辺岩盤内の飽和挙動及びガス移行挙動の評価を行なう。

計測のための各種ケーブル及び配管は、ステンレス鋼管を通し外部に引き出している（図-8参照）。この際、ステンレス鋼管の内部及び周囲が水・ガスのみちとなることを防ぐため、ステンレス鋼内部をレジンで固めるとともに、ステンレス鋼管周辺にリング状に整形されたベントナイト等を取り付け止水対策を行なった（図-9参照）。

(4) 得られた成果と課題

人工バリアシステムの構築により得られた成果及び課題を以下に示す。

コンクリートサイロの施工

- ・コンクリートサイロの底盤を打設する際、底部充てん材上に直接打設することができないため、本施工ではビニールシートを敷いたが、実際の処分場を想定した場合、長期的影

響に配慮した何らかの方法が必要である。

充てん材の施工

- ・転圧時間及び撤出し厚と転圧後の層厚によって、施工管理が可能であることが確認された。結果として、室内試験で得られたパラメータ値を解析に適用できた。
- ・外径 4.0m、幅 0.75m、高さ 4.5m の狭い空間において、目標品質を満足する施工が可能であることが確認された。
- ・品質管理として、充てん材の平面的なばらつきを評価するため、締固め直後に各層において密度試験を実施した（合計 50 点以上）。ただし、上部の充てん材の施工により、下部の充てん材の密度が変化している可能性があり、施工後の高さ方向の密度分布については現段階では不明である。これについては、解体調査において明らかにしていく予定である。
- ・岩盤及びコンクリートサイロとの境界付近での充てん材の締固めを今回は手作業で行なった。しかし、実処分場を想定した場合、その規模から手作業では困難と考えられ、施工法等で何らかの対応を考える必要がある。
- ・施工時に周辺岩盤から流入する湧水に対し、底盤に砂利層を設置し集水し、ポンプによって排水した。しかし、実処分場で底盤に充てん材を設置する必要がある場合、長年にわたる岩盤からの湧水に対する処置が必要となる。

4. 室内試験

複数の室内試験によって確認された基礎データに基づいて原位置試験を計画、実施している。また、解析パラメータの取得も室内試験によって行なっている。主な結果を以下に示す。

- ・充てん材料比較試験により、同一の締固め方法で最も高い乾燥密度と低透水性が得られるクニゲルV1を選定した。
 - ・充てん材中のガス移行経路を可視化するため、硫化水素（ガスとして注入）と硝酸鉛（充てん材に混合）の組み合わせを選定した。
 - ・計測機器の人工バリア中での作動状況を確認した。
 - ・原位置を模擬した条件での充てん材の締固め試験により転圧時間及び撤出し厚と締固め後の層厚により施工管理を行なうことを決定した。
 - ・コンクリート配合試験により、日本国内と同様なコンクリート配合がスイスでも可能なことを確認した。
 - ・充てん材の室内土質力学試験により、不飽和特性及び膨潤特性を取得した。
- 今後、原位置における人工バリアシステムの飽和及びガス注入時の挙動評価を行なう際に、室内

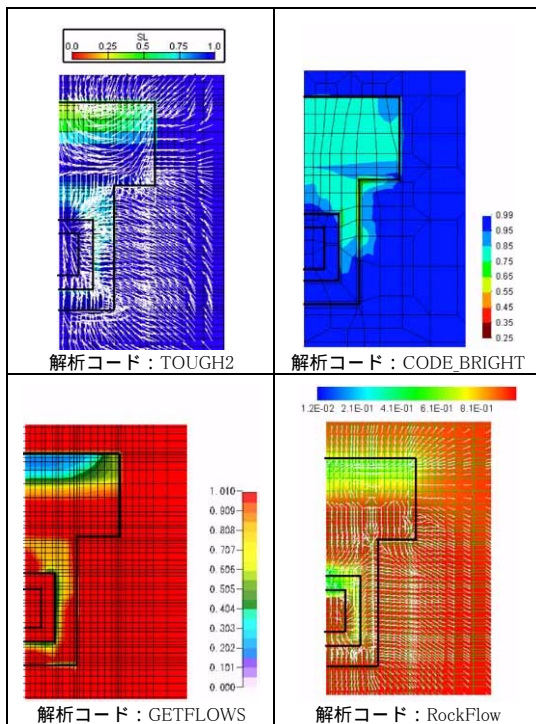


図-10 4種類の解析コードによる飽和挙動予測解析結果の比較

試験によりデータの取得が必要と考えられる項目について、適宜実施していく予定である。

5. 人工バリアシステムの飽和挙動の解析

人工バリアシステムの飽和計画を検討するため、解析検討を行った。

まず、4種類の解析コード（TOUGH2、GETFLOWS、CODE_BRIGHT、RockFlow）を用いて、同一の条件（サイロ上部の空洞から500kPaで加圧注水し、約180日後の結果で比較）で、人工バリアシステム及び周辺岩盤の飽和挙動に関する予測解析を実施した。図-10に示すように、ほぼ同様の結果が得られた。これを受け、人工飽和の詳細な計画検討には、多孔質媒体系の二相流解析コードで最も実績のあるTOUGH2を用いることとした。TOUGH2での解析により、注水方法の違い、飽和に要する時間等の検討を行なった。検討の結果、岩盤からの湧水のみでは、人工バリアシステムの飽和に長時間を必要とするため、サイロ上部の空洞から500kPaで加圧注水することとした。これにより加圧注水後約300日程度でほぼ飽和に達すると予測している。

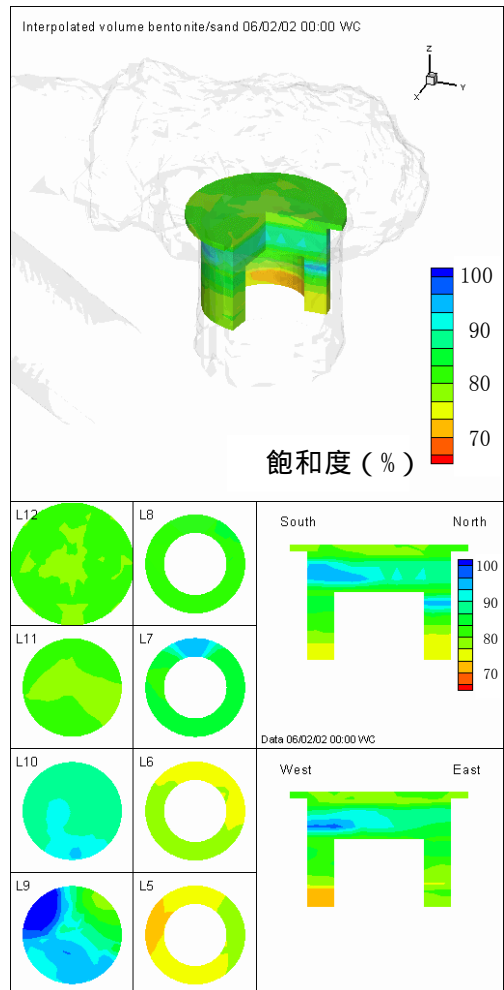


図-11 飽和度分布（加圧注水開始から1ヶ月後）

6. 人工バリアシステムの飽和

平成14年1月に人工バリアシステムを飽和させるために、500kPaで加圧注水を開始した。充てん材施工時に60~70%程度であった飽和度は、加圧注水開始から約30日後には充てん材の上部ではほぼ80%以上になっている（図-11参照）。

ガス移行の主な経路として予想される、充てん材の上半部は当初の計画通り飽和が進んでいるが、下半部については、多少遅れている。これは、中間部の充てん材層の密度が想定以上に大きく、透水性が小さいことが原因であると推定できる。解析と比較し多少遅れているものの、地層処分時間スケールに比べるとその差は無視できると考えられる。

計測結果をもとに、解析との比較を行い、試験の進捗状況の確認を行なうとともに、必要に応じ

て解析パラメータの見直し及び再解析を行い、計画の見直しを行なっている。

7. まとめ

原位置状況下の地下の狭い空間で、人工バリアシステムの施工を実施した。充てん材の不均質性及び充てん材とコンクリートサイロ及び周辺岩盤との境界面について、圧力、飽和度等の計測結果から判断する限りでは品質上の問題ないと予想されるが、ガス注入終了後、人工バリアシステムの解体時に充てん材の品質確認を行なう必要がある。

解析に関して、複数の解析コードで検討を進め、人工バリアシステムの飽和挙動について各コードで同様の結果が得られた。今後、ガス移行に関し予測解析を実施し、各コードの比較、ガス注入計画への反映検討、ガス移行挙動への解析モデルの適用性評価を行なっていく予定である。

今後、平成 14 年度内に人工バリアシステムの飽和段階を終了し、ガス注入を開始する計画である。ガス注入終了後、人工バリアシステムの解体時に充てん材中のガスの移行経路を確認するとともに、充てん材の材料特性、施工の品質及び計測機器の測定精度等の確認を行い、試験データの信頼性を確認した上で、ガス移行の解析評価を行う。これらに基づき、ガス移行挙動とその影響を総合的に評価し、評価手法の適用性を検討する予定である。

参考文献

1. European Commission: EUR16235EN Modelling and

Experiments on GAS migration in repository host rock(MEGAS), 1995

2. European Commission: EUR17557EN European Validation Exercise of GAS migration models through geological media(EVEGAS),1997
3. European Commission-Nuclear Energy Agency: EUR 19122-Gas Migration and Two-Phase Flow through Engineered and Geological Barriers for a Deep Repository for Radioactive Waste, 1999
4. A.Fujiwara, I.Yasutomi, Y.Ando, S.Vomvoris, M.Fukaya, P.Marschall, W.Kickmaier and K.Ando (1998): GMT-Large Scale In-Situ Testing of the Gas Migration Properties of Engineered Barriers, Proc. 5th Int. WS. on Key Issues in Waste Isolation Research, Barcelona.
5. S.Vomvoris, P.Marschall, W.Kickmaier, K.Ando, M.Fukaya, A.Fujiwara and K.Kaku (1998): GMT-A Large Scale In-Situ Test of the Gas Migration Properties of Engineered Barriers, Proc. 22nd Int. Symp. Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXI, MRS'98.
6. S.Vomvoris, A.Fujiwara, K.Ando and K.Kaku (2001): Gas Migration in the Engineered Barrier System: The GMT Large-Scale In-Situ Test in the Grimsel Test Site, Proc. 9th Int. High-Level Radioactive Waste Management Conference ,April 2001
7. K.Ando, A.Fujiwara, S.Tokuyama, T.Adachi, T.Saeki, S.Vomvoris, K.Fukudome, A.Shimmura (2001): TOTAL SYSTEM EVALUATION OF GAS GENERATION AND MIGRATION IN THE RADIOACTIVE WASTE REPOSITORY, GLOBAL2001, September 2001
(安達哲也、安藤賢一、藤原愛)

センターのうごき

第 56 回通常理事会開催

平成 14 年 6 月 14 日（金）開催の第 56 回通常理事会において、「平成 13 年度一般会計に関する事業報告」、「平成 13 年度一般会計に関する決算」、「平成 13 年度資金管理業務に関する事業報告」及び「平成 13 年度資金管理業務に関する決算」について付議し、それぞれ原案のとおり承認されました。

第 11 回評議員会開催

平成 14 年 6 月 21 日（金）開催の第 11 回評議員会において、平成 13 年度一般会計に関する事業報告及び同決算並びに平成 13 年度資金管理業務に関する事業報告及び同決算について報告し、引き続き「監事の選任」について付議、提案のとおり承認されました。

この監事の改選により、同日付をもって次の方が交替されました。

区 分	退 任 者	新 任 者	役 職
監事（非常勤）	西室 泰三	谷口 一郎	(社)日本電機工業会会長

第 4 回積立金運用委員会開催

平成 14 年 7 月 26 日（金）に第 4 回積立金運用委員会（委員長は東京大学大学院教授若杉敬明氏）を開催しました。今回は、平成 13 年度積立金運用実績の報告を行うとともに、「電力債運用について」並びに「預金取引金融機関の選定について」をご審議いただきました。

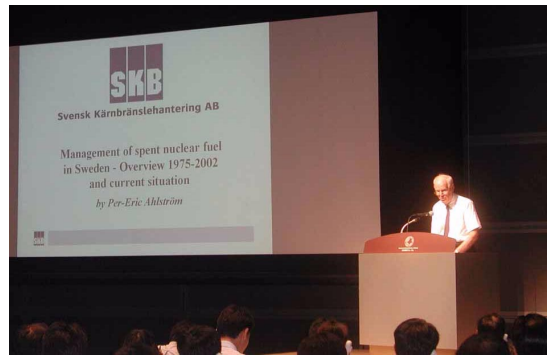
センターのうごき（つづき）

海外機関との情報交換等

下記の機関が来訪し、放射性廃棄物処分に関する情報交換、意見交換を行いました。

- 6月13日： フランス放射性廃棄物管理機構（ANDRA）Gausson 氏他2名
- 6月18日： フランス放射線防護・原子炉安全研究所（IRSN）Besnus 氏他1名
- 6月20日： 米国元原子力規制委員会（NRC）Bernero 氏
- 7月1日： 中国核工業集团公司（CNNC）Delian 氏他3名
- 7月2日： 連邦放射線防護庁（BfS: AkEnd）Arens 氏
ドイツ廃棄物処分施設建設運営会社（DBE）Biurrun 博士
- 8月26日： スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB）Ahlström 氏

このうち、8月26日には、原環センターが行っております海外地層処分関連情報の収集・整備及び情報提供活動の一環として、スウェーデンの実施主体である核燃料・廃棄物管理会社 SKB より Ahlström 氏をお招きして「スウェーデンの地層処分の最新状況」に関する講演会を開催しました。（写真） 国内の官庁、各機関や関連企業より約120名の参加をいただき、スウェーデンの原子力発電に関する概要や、サイト選定手続、今後の研究開発計画などについて講演及び活発な質疑が行われました。なお、原環センターとSKB社とは情報交換包括協定を締結しています。



平成14年度調査研究受託状況

平成14年4月1日以降、平成14年8月末までの間で、次の受託契約が行われました。

委託者	調査研究課題	契約年月日
経済産業省	・低レベル放射性廃棄物安全対策事業	14. 4. 1
	・ウラン廃棄物処理処分システム開発調査	14. 4. 1
	・サイクル廃棄物ウラン高度処理技術開発調査	14. 4. 1
	・処分高度化システム確証試験	14. 4. 1
	・余裕深度処分システム開発	14. 8. 7
	・総合情報調査	14. 4. 1
	・地層処分重要基礎技術研究調査	14. 4. 1
	・地層処分ナチュラル・アナログ情報整備	14. 4. 1
	・高精度物理探査技術高度化調査	14. 4. 1
	・モニタリング機器技術高度化調査	14. 4. 1
	・人工バリア材料照射影響調査	14. 4. 1
	・地球化学バリア有効性確証調査	14. 4. 1
	・遠隔操作技術高度化調査	14. 4. 1
	・廃棄体開発調査	14. 4. 1
	・人工バリア長期性能確証試験	14. 4. 1
	・人工バリア・天然バリアガス移行挙動評価	14. 4. 1
	・ヨウ素固定化技術調査	14. 4. 1
	・安全規制及び安全基準に係る内外の動向調査	14. 7. 3

編集発行

財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

〒105-0001 東京都港区虎ノ門2丁目8番10号 第15森ビル

TEL 03-3504-1081（代表） FAX 03-3504-1297

ホームページ <http://www.rwmc.or.jp/>