JAEA-Research 2008-042



# 深部地質環境の調査解析技術の体系化に関する研究 -平成18年度-(委託研究)

Study on Systemizing Technology on the Investigation and Analysis of Deep Underground Geological Environment, -Japanese Fiscal Year, 2006-(Contract Research)

> 小島 圭二<sup>\*</sup> 大西 有三<sup>\*</sup> 渡辺 邦夫<sup>\*</sup> 西垣 誠<sup>\*</sup> 登坂 博行<sup>\*</sup> 嶋田 純<sup>\*</sup> 青木 謙治<sup>\*</sup> 杤山 修<sup>\*</sup> 吉田 英一<sup>\*</sup> 尾方 伸久 西尾 和久

keiji KOJIMA\*, Yuzo OHNISHI\*, Kunio WATANABE\*, Makoto NISHIGAKI\* Hiroyuki TOSAKA\*, Jun SHIMADA\*, Kenji AOKI\*, Osamu TOCHIYAMA\* Hidekazu YOSHIDA\*, Nobuhisa OGATA and Kazuhisa NISHIO

> 地層処分研究開発部門 結晶質岩工学技術開発グループ

Crystalline Environment Engineering Group Geological Isolation Research and Development Directorate

April 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

# 深部地質環境の調査解析技術の体系化に関する研究-平成18年度-(委託研究)

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット

小島 圭二\*1, 大西 有三\*2, 渡辺 邦夫\*3, 西垣 誠\*4, 登坂 博行\*5, 嶋田 純\*6,

青木 謙治\*7, 杤山 修\*8, 吉田 英一\*9, 尾方 伸久, 西尾 和久\*

#### (2008年2月19日受理)

本研究では、地表から地下深部にいたる地質環境を把握するための調査・解析技術の体系化を 目標に、(1)「第2次取りまとめに基づく深部地質環境の調査・解析技術の実用化にむけた課題 に関する研究」、(2)「調査・解析手法の高度化・体系化に関する研究」を実施して次のような 成果を得た。

(1)に関しては、①処分技術、②安全評価、③地質環境の各分野の課題のうち、具体的な試験・ 計測と解析・分析を実施した。またその成果を踏まえて、それぞれの中間分野の研究課題を抽出 し、各課題の連携の仕方についての検討をおこなってきた。その結果の課題の一つがニアフィー ルドコンセプト(NFC)の再構築である。本年度は、各分野の中間領域に関する要素研究とともに、 NFC 構築の具体的な検討を実施した。

(2)に関しては、日本原子力研究開発機構の調査研究計画の中から抽出された課題に基づき、 調査・解析の高度化・実用化の研究開発の観点から、当研究会のメンバーが実施している基礎的 な要素技術の研究・開発の成果を取り込み、より具体的な現場の技術課題に資する研究を実施し た。さらに、研究・開発について、その成果の評価と実用化への道を議論した。

また、これらの調査研究の進展とあわせて、日本原子力研究開発機構が実施中の超深地層研究 所計画の第2段階の当面の課題に関する意見交換を適時おこなった。

本報告書は、社団法人資源・素材学会が日本原子力研究開発機構との委託研究契約により実施した 研究成果に関するものである。

- 東濃地科学センター(駐在):〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64
- \*1 地圈空間研究所 代表 (東京大学名誉教授)
- \*2 京都大学 教授 \*3 埼玉大学
- 教授 \*4 岡山大学 教授
- \*5 東京大学 准教授
- \*6 熊本大学 教授

- \*7 京都大学 教授 \*8 東北大学 教授 \*9 名古屋大学 准教授
- ※ 技術開発協力員

Study on Systemizing Technology on the Investigation and Analysis of Deep Underground Geological Environment, - Japanese Fiscal Year, 2006 -

(Contract Research)

Keiji KOJIMA<sup>\*1</sup>, Yuzo OHNISHI<sup>\*2</sup>, Kunio WATANABE<sup>\*3</sup>, Makoto NISHIGAKI<sup>\*4</sup>, Hiroyuki TOSAKA<sup>\*5</sup>, Jun SHIMADA<sup>\*6</sup>, Kenji AOKI<sup>\*7</sup>, Osamu TOCHIYAMA<sup>\*8</sup>, Hidekazu YOSHIDA<sup>\*9</sup>, Nobuhisa OGATA and Kazuhisa NISHIO<sup>\*\*</sup>

Tono Geoscientific Research Unit

Geological Isolation Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency

Akeyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received February 19, 2008)

In this year the following studies were carried out with the aim of systemizing the technology on the investigation and analysis to understand deep underground geological environment in relation to the radioactive waste disposal.

- (1) The study on the research and development (R&D) subjects which turned to the practical investigation and analysis of deep underground geological environment.
- (2) The study on the advanced technical basis for the investigation and analysis of deep underground geological environment.

From the studies, the following results were obtained. Regarding (1), the concrete investigation, measurements, numerical analyses and chemical analyses were performed with respect to research subjects ① the repository design and engineering technology, ② the safety assessment and ③ the geological environment. And from the viewpoint of radioactive waste disposal, specific subjects were selected. More over the discussion on the collaborative research program for niche area between each fields ①, ② and ③ was given. One of the important subjects was "redefinition of the near field concept (NFC)". Consequently the specific study on the NFC redefinition was carried out as well as the element research on niche area between the research fields.

On (2), the evaluation of research results and its practical use for the R&D activities were considered based on the fundamental and elemental technology which the study group performed. The practical research programs to characterize the geological environment and engineering technologies, which were applied to the Tono Geoscience Center, were also discussed.

Concurrently opportunities to exchange information and opinions on the 2nd phase (the Shaft Construction Phase) of the MIU (Mizunami Underground Research Laboratory) research program were often opened up in the JAEA.

Keywords: Deep Underground, Geological Environment, Geological Disposal, Underground Research Laboratory, Safety Assessment

This work was performed by the Mining and Materials Processing Institute of Japan under contract with Japan Atomic Energy Agency.

<sup>\*1</sup> Geospace Labo, \*2 Kyoto University, \*3 Saitama University, \*4 Okayama University, \*5 The University of Tokyo, \*6 Kumamoto University, \*7 Kyoto University, \*8 Tohoku University, \*9 Nagoya University, %Collaborating Engineer

# 目 次

はじめに1
1. 第2次取りまとめに基づく深部地質環境の調査・解析技術の実用化に向けた課題に
1.1 処分技術の観点から抽出された深部地質環境の調査・解析技術に関する研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
1.1.1 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
1.1.2       AE 計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
1.1.2.1 はじめに
1.1.2.2 岩石の破壊現象と微小破壊音5
1.1.2.3 個別剛体要素法による解析 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
1.1.2.4 堆積軟岩における AE・・・・・・10
1.1.2.5 現場計測結果に基づく応力変化と AE パラメータの挙動 ・・・・・・・・11
1.1.2.6 粒状体個別剛体要素法を用いた空洞掘削解析 ・・・・・・・・・・・・・・・12
1.1.2.7 岩盤の破壊挙動の分析
1.1.2.8 岩盤の力学-水理学的連成挙動に着目した評価手法の構築 ・・・・・・・・29
1.1.2.9 まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
1.1.2.10 参考文献 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
1.1.3 低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の開発 ・・・・・・・・・・・41
1.1.3.1 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
1.1.3.2 動的注入工法に関する室内実験42
1.1.3.3 グラウト材の注入メカニズムに関する理論的検討 ・・・・・・・・・・・・・44
1.1.3.4 動的注入工法に関する現場実験
1.1.3.5 数値シミュレーションによる最適注入仕様の決定 ・・・・・・・・・・・・53
1.1.3.6 粒状体個別要素法を用いた動的注入におけるグラウト充填機構の検討 55
1.1.3.7 クロスホール透水試験による岩盤の水理地質構造の新しい評価手法と
その検証・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
1.1.3.8 3 次元イメージング手法
$1.1.3.9 \pm 2.0.5.17$
1 1 3 10 参考文献 ······68
$1 1 4 \pm b \dots \dots$
1 2 安全評価の観点で抽出された深部地質環境の調査・解析技術に関する研究・・・・・・・71
1.2.1 はじめに ····································
1.2.1 ほじゃに 1.2.1
1.2.2
1.2.2.1 員际 (1) (1) (元本初と地外永亮) 12
1.2.2.2 成別に完全物の九上 01
1.2.2.0 成別正定来初の定力 1.2.2.1 地
1.2.2.4 地信定方文/ 2 107
1.2.2.9 久土町Ш 1.9.9.6 放射枕處蚕物地層加公車業の検討坐洞
1.2.2.0 成初正元未初地喧だりず未の便討仏仇 120 1.9.2 ーアフィールドコンセプトの再構筑
1.2.0 $- / / / / / / / / / / / / / / / / / / $
1.4.1 ジャス駅 1.3 地質環境の組占で抽出された恋如地質環境の調本・解析は後に関オス研究
1.2.3       ーノノィールトコノビノトの丹博衆       133         1.2.4       参考文献       135         1.3       地質環境の観点で抽出された深部地質環境の調査・解析技術に関する研究       138

	1.	3.1	はじめ	に・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	··· · 138
	1.	3.2	研究課	題 1~3 に関する調査・解析技術の開発の必要性 ・・・・・・・・・・・	··· · 138
	1.	3.3	研究課	題1:活断層を含む断層活動に伴う割れ目形成に関する情報収集と	
	現	場で	の調査手	∈法開発に関する研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	··· · 139
		1.	3.3.1	研究目的 • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	139
		1.	3. 3. 2	これまでの主な実施内容および成果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	139
		1.	3. 3. 3	今年度の調査内容と主な結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	141
		1.	3. 3. 4	〒 ↓ ② 「約12000000000000000000000000000000000000	$\cdots 142$
		1.	3. 3. 5	今年度の調査結果について・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	144
	1.	3.4	研究課	題2:割れ目シーリングのナチュラルアナログに関する研究・・・・・	$\cdots$ $\cdot 144$
		1.	3. 4. 1	研究目的 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	144
		1.	3. 4. 2	今年度実施内容および解析検討結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 144$
	1.	3.5	今後の	予定 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	$\cdots$ 145
	1.	3.6	NF Saf	fety Case 構築に役立つ研究課題の抽出に関する検討(瑞浪超深地層	研
			究所を例	利にした NF コンセプト再構築のための原位置試験に関する検討)・・・・	··· · 145
		1.	3. 6. 1	背景と目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 145$
		1.	3. 6. 2	検討内容・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	146
	1.	3.7	参考文	献	··· · 150
2.		調査	・解析手	≤法の高度化・体系化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	151
2.	1	簡	易型地下	水制御情報化施工システム(SWING-SHAFT)の立坑トンネルへの適用に	三関す
		る	研究・・・・		151
	2.	1.1	はじめ	に ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	151
	2.	1.2	SWING	-SHAFT 法(シリンダー)の構築と改良・・・・・・・・・・・・・・・・	151
	2.	1.3	瑞浪超	深地層研究所における解析 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	154
	2.	1.4	今後の	檢討課題 • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	165
	2.	1.5	参考文	献 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	166
2.	2	岩橋	监浸透流	の3次元特性の調査・解析に関する研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	167
	2.	2.1	研究内	容 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	167
	2.	2.2	ANN, G	A と有限要素法を組み合わせた地下水変動監視システム・・・・・・・・・	167
	2.	2.3	有限要	素法モデルの構築と妥当性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	168
		2.	2.3.1	モデルの構築と地下水解析の問題点・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	168
		2.	2.3.2	地下水滞留時間の解析・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 172$
	2.	2.4	水一岩	石相互作用実験準備・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 175$
	2.	2.5	結論と	今後の課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 175$
	2.	2.6	参考文	献 • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	176
2.	3	超後	散粒ベン	トナイトグラウトに関する研究 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 177$
	2.	3.1	全体研	究計画 • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	··· · 177
		2.	3.1.1	研究目的 • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	$\cdots 177$
		2.	3.1.2	研究項目 • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	
	2.	3.2	超微粒	ベントナイトグラウトの細粒化に関する FS ・・・・・・・・・・・・・・・	··· · 182
		2.	3.2.1	水,エタノールを溶媒とした場合の Na 型ベントナイトの分散状態・・・	182
		2.	3.2.2	Ca 型ベントナイトの分散状態について ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	184
		2.	3.2.3	現状における微粒ベントナイトスラリー作成のフィージビリティスタ	ディ・185
		2.	3.2.4	まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	

2.3.3 ベント	、ナイトグラウトのグラウト材としての適性に関する FS・・・・・・・・・・・・	187
2.3.3.1	概要 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	187
2.3.3.2	液性限界試験 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	189
2.3.3.3	ファンネル粘性試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	193
2.3.4 結論·		196
2.3.5 参考文	て献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	196
2.4 表層水理観	見測データを用いた日吉川流域水循環のモデル化に関する研究 ・・・・・・・	197
2.4.1 はじめ		197
2.4.2 日吉川	流域境界設定の適切性に関する2次元モデルによる検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	197
2. 4. 2. 1	検討の目的 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	197
2.4.2.2		198
2. 4. 2. 3	<ol> <li>2 次元断面モデルの選定</li> </ol>	200
2.4.2.4	地下水理物性の設定	201
2.4.2.5	2次元ケーススタディ・・・・・	201
2.4.2.6	2次元ケーススタディのまとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	205
2.4.3 3次元	モデルによる蒸発散量の影響に関する検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	206
2.4.3.1	平成17 年度の結果と問題点······	206
2.4.3.2	3 次元モアルの解析結果 ······	208
2.4.3.3	3 次元モアル解析結果の考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	210
2.4.4 EEX	)と課題 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	210
2.4.5 参考义		211
2.5 CFC トレー	-サーを用いた地下水の滞留時間推定法の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	212
2.5.1 (LLØ	)に・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	212
2.5.2 UFUS	の起源・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	212
2.5.3 入风中	-のCFUS・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	213
2.5.4 CFCs	による地下小の佈留时间推定 : :::::::::::::::::::::::::::::::::::	210
2.5.5 CFCs	<b>辰皮を変化させる安囚</b> に上て地下水準の時間推定例	210 991
2.5.0 CFCS	による地下小佈留時间推足例	221 999
2.3.7 抹水・		222
2.5.0 わわり	$r \Rightarrow$	220
2.0.9 参与文	CHIX	220
3 実用化に向	けた研究開発課題の提示および調査・解析技術の高度化・体系化の総括 ・・・	228
3.1 研究結果 <i>0</i>		228
3.1.1 基盤技	5術の実用化・高度化の方向のレビュー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	228
3.1.2 課題の	)提示/調査研究と基盤技術実用化への研究開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	228
3. 1. 2. 1	平成18年度 深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する委員会の基	本
	方針	228
3. 1. 2. 2	地質環境の観点から抽出された深部地質環境の調査・解析技術	
	に関する研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	230
3. 1. 2. 3	処分技術の観点から抽出された深部地質環境の調査・解析技術	
-	に関する研究・・・・・・	230
3. 1. 2. 4	安全評価の観点から抽出された深部地質環境の調査・解析技術	
	に関する研究・・・・・	231
3. 1. 2. 5	各分野中間領域の調査研究の連携検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	231

	3.1.	3 珍	霥境安	全評価の地下水シナリオからみた調査・解析技術の高度化・体系化 231
		3.1.	3.1	地下水調査・解析技術の地下水シナリオ FEP の高度化・体系化231
		3.1.	3.2	地下水の基盤技術/要素技術の高度化
		3.1.	3.3	環境安全の地下水技術と建設・操業安全の地下水技術
3.	2 7	研究統	吉果の	取りまとめ及び技術の体系化に関する研究結果の総括 ・・・・・・・・・232
	3.2.	1	「実用	化に向けた研究開発課題の研究の検討」の総括 ・・・・・・・・・・・・・・232
		3.2.	1.1	処分技術
		3.2.	1.2	安全評価
		3.2.	1.3	地質環境
		3.2.	1.4	分野間の連携のまとめ/セーフティーケースからの見直しの試み234
	3.2.	2	「調査	・解析技術の高度化・体系化」の総括
		3.2.	2.1	調査技術の高度化に関する研究開発
		3.2.	2.2	調査・解析技術の高度化・体系化のまとめ
	3.2.	3 💈	参考文	r献······236

Introduction ····	
1. Research in	nvestigation and analysis technique for deep geological environment
based on R	Report H123
1.1 Topics of	the repository design and engineering technology
1.1.1 Intro	duction3
1.1.2 Evalu	nation technique using acoustic emission (AE) of the excavation disturbed zone
(EDZ	Z) in hard fractured rock ······3
1.1.2.1	Introduction3
1.1.2.2	Fracture occurrence and acoustic emission in rocks
1.1.2.3	Analysis based on distinct element method (DEM)7
1.1.2.4	AE in sedimentary rocks
1.1.2.5	Measurements of the stress change and behaviour of AE parameters 11
1.1.2.6	Cavity drilling analysis using granular material distinct element method 12
1.1.2.7	Analysis on fracture behaviour of rocks
1.1.2.8	Method for assessing rock mechanics-hydrology coupling behaviour
1.1.2.9	Summary ····· 36
1.1.2.10	) Reference
1.1.3 Deve	lopment of fracture sealing technology for low permeability rock41
1.1.3.1	Introduction
1.1.3.2	Laboratory experiment on dynamic grouting method
1.1.3.3	Theoretical treatment of the injection mechanism of grouting
1.1.3.4	Field experiment on dynamic grouting method
1.1.3.5	Optimization of the injection specification based on numerical simulations53
1.1.3.6	Grout filling mechanism in dynamic injection using granular material distinct element
	method
1.1.3.7	New assessing and verification method of hydrogeological structures in rocks by
	crosshole permeability test
1.1.3.8	3D Imaging methods
1.1.3.9	Summary
1.1.3.10	0 Reference 68
1.1.4 Conc	lusions 69
1.2 Topics on	the safety assessment 71
1.2.1 Intro	duction
1.2.2 Safet	y case for geological disposal of radioactive waste
1.2.2.1	Resources, energy, waste and global environment
1.2.2.2	Radioactive waste generation
1.2.2.3	Radioactive waste geological disposal
1.2.2.4	Radioactive waste geological disposal system
1.2.2.5	Safety assessment 114
1.2.2.6	Consideration on geological disposal of radioactive waste
1.2.3 Resea	arch on redefinition of the near field concept (NFC)
1.2.4 Refer	rence

1.3 Topics on the geological environment	138
1.3.1 Introduction	····· · 138
1.3.2 Necessity of investigation and analysis technique (research subject 1-3)	····· · 138
1.3.3 Research subject 1 : Data gathering on fracture distribution in active fault and research of	on
in-situ investigation technique	····· · 139
1.3.3.1 Purpose	139
1.3.3.2 Current main topics and result	139
1.3.3.3 Research result for the current year	141
1.3.3.4 Research result and analysis result	142
1.3.3.5 Summary for the current year	144
1.3.4 Research subject 2 : Research on natural analogue of fracture sealing	····· 144
1.3.4.1 Purpose	144
1.3.4.2 Research and analysis results for the current year	144
1.3.5 Schedule for the future	····· · 145
1.3.6 Consideration on practical research topics for redefinition of NFC safety case (In-situ te	est
at Mizunami URL site) ······	····· · 145
1.3.6.1 Purpose	145
1.3.6.2 Consideration	146
1.3.7 Reference ·····	····· 150
2. Study on the advanced technical basis for the investigation and analysis	151
2.1 Application of a simple observational method system (SWING-SHAFT) to the shaft	151
2.1.1 Introduction	151
2.1.2 Development and improvement of SWING-SHAFT method (cylinder)	151
2.1.3 Analysis in the Mizunami URL project	154
2.1.4 Subject for the future	165
2.1.5 Reference	166
2.2 Investigation and analysis of three-dimensional characteristic of rock mass seepage flow	167
2.2.1 Introduction	167
2.2.2 Ground water variation monitoring system that combined ANN, GA methods with the	e finite
element method.	167
2.2.3 Finite element model construction and its validity	168
2.2.3.1 Considerations on model construction and ground water analysis	168
2.2.3.2 Analysis of ground water residence time	172
2.2.4 Preparation for water-rock interaction experiment	175
2.2.5 Conclusion and subject for the future	175
2.2.6 Reference	176
2.3 Ultrafine powder bentonite grout	177
2 3 1 Introduction	177
2.3.1 Research purpose	177
2.3.1.2 Research item	178
2.3.2 FS on grain refining of ultrafine powder bentonite grout	182
2.3.2 1.5 on grain terming of inturnic powder bencome grout	182
2.3.2.1 Dispersion state of the calcium-bentonite	18/
2.3.2.2 Expension state of the calcum-bencome	185
is on maxing of particulates contonice start j	105

2	.3.2.4	Conclusion	187
2.3.3	FS on	applicability of bentonite slurry as a grouting material	···· · 187
2	.3.3.1	Outline	187
2	.3.3.2	Liquid limit test	189
2	.3.3.3	Funnel viscosity test ······	193
2.3.4	Concl	usion	···· · 196
2.3.5	Refer	ence	···· · 196
2.4 Re	search	on modelling of water cycle around the Hiyoshi river catchment area based on th	ne
su	irface w	vater observations	197
2.4.1	Introd	luction	197
2.4.2	2-dim	ensional model the applicability of Hiyoshi river basin boundary site setting	197
2	.4.2.1	Purpose	197
2	.4.2.2	Geographical features of catchment area	198
2	.4.2.3	Choosing the 2 dimension cross-section model	200
2	.4.2.4	Setting of ground water physical properties	201
2	.4.2.5	Case study	201
2	.4.2.6	Summary of case study	205
2.4.3	3-dim	ensional model – Influence of evapotranspiration	206
2	.4.3.1	Result and considerations from 2005 fiscal years	206
2	.4.3.2	Analysis result	208
2	.4.3.3	Summary of model analysis	210
2.4.4	Concl	usion and subject for the future	210
2.4.5	Refer	ence	211
2.5 Me	ethod de	evelopment for estimating ground water residence time using chlorofluoro carbo	n
(CF	FCs) tra	cer	212
2.5.1	Introd	luction	212
2.5.2	Origin	n of CFCs	212
2.5.3	CFCs	in the atmosphere	213
2.5.4	Estim	ation on groundwater residence time by CFCs	215
2.5.5	Factor	rs that influence the CFCs concentration	218
2.5.6	Estim	ation case on ground water residence time by CFCs	221
2.5.7	Water	Sampling and analysis	222
2.5.8	Concl	usion ·····	226
2.5.9	Refer	ence	226
			_
3. Sun	nmary	of systematization of research and development factors and improvement of	of
inve	estigatio	on and analysis technique for practical use	228
3.1. Re	esearch	results	228
3.1.1	Revie	w of practical use of basic technology and improvement	228
3.1.2	Resea	arch and development factors and improvement of investigation and analysi	is
1	techniq	ue for practical use	228
3	.1.2.1	Basic policy of Study on Systemizing the Technology on the Investigation an	ıd
		Analysis of Deep Underground Geological Environment Committee fiscal year	rs -
		2006	228
3	.1.2.2	Geological environment	230

3.1.2.3	Repository design and engineering technology230
3.1.2.4	Safety assessment231
3.1.2.5	Research collaboration on niche area between the research of each field
3.1.3 Impro	ovement and systematization of investigation and analysis technique: groundwater
scena	rio based on environmental safety assessment231
3.1.3.1	Improvement and systematization of groundwater scenario FEP, investigation and
	analysis techniques231
3.1.3.2	Improvement of basic technology/component technology
3.1.3.3	Safety and environmental operation during construction 232
3.2 Summary	of research results on technology systematization
3.2.1 Summ	nary of research and development for practical use232
3.2.1.1	Repository design and engineering technology 233
3.2.1.2	Safety assessment233
3.2.1.3	Geological environment 233
3.2.1.4	Research collaboration /Review based on safety case234
3.2.2 Sum	mary of improvement and systematization of investigation and analysis
1	echnique
3.2.2.1	Research and development for improving investigation technology 234
3.2.2.2	Summary of improvement and systematization of investigation and analysis technique236
3.2.3 Refer	ence

図目次

KK-	1	
弔	1	亘

図 1.1.1	AE 計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術の開発に関するフロー図4
図 1.1.2	三軸圧縮試験結果・・・・・5
図 1.1.3	PFC 解析によるカーブフィッティング (Case-2) 結果・・・・・8
図 1.1.4	応力-ひずみ曲線と亀裂発生分布 (Case-2)8
図 1.1.5	拘束圧を変化させた三軸圧縮試験の結果・・・・・・・・・・・・・・・・9
図 1.1.6	シミュレーションにおいて観測された亀裂の累積発生数・・・・・・・・・9
図 1.1.7	拘束圧による亀裂の発生・進展過程の差異(DEM 解析結果)10
図 1.1.8	堆積軟岩を対象とした高剛性三軸圧縮試験における AE パラメータの挙動
図 1.1.9	H 断面空洞周辺地質図······11
図 1.1.10	H-10 計測線上 3m 地点での計測結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・12
図 1.1.11	解析結果
図 1.1.12	H-10 計測線における亀裂開口量分布
図 1.1.13	H-10 計測線上 3m 地点での応力変化の比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・14
図 1.1.14	H-10 計測線上 3m 地点での計測結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・14
図 1.1.15	岩石一軸圧縮試験における応力-ひずみ関係と亀裂進展のイメージ・・・・・15
図 1.1.16	岩石の載荷過程における AE パラメータと亀裂発生挙動 ・・・・・・・・・16
図 1.1.17	硬岩での破壊形態イメージと破壊包絡線の概念・・・・・・・・・・・・・19
図 1.1.18	高地圧下トンネルでのスポーリング破壊の例・・・・・・・・・・・・・・・・19
図 1.1.19	空洞周辺の地層区分と FEM 解析メッシュ (H 断面)
図 1.1.20	定量化した修正 GSI 評価チャート ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・21
図 1.1.21	AE 計測線の配置と空洞の掘削ステップ(H 断面) ・・・・・・・・・・・・22
図 1.1.22	AE センサーの標準埋設深度・・・・・22
図 1.1.23	(a) H3 測線の応力径路と AE 発生数(Ch1~6: 深度 1.5~6.5m) ······23
図 1.1.23	(b) H3 測線の応力径路と AE 発生数(Ch7~12: 深度 7.5~12.5m) ······23
図 1.1.24	(a) AE 発生数および卓越周波数の経時変化 (Ch1~3 : 深度 1.5~3.5m)
図 1.1.24	(b) AE 発生数および卓越周波数の経時変化 (Ch4~7:深度 4.5~7.5m)
図 1.1.25	天井アーチ部切り拡げ(A3)掘削終了時の壁面近傍での最大主応力分布
	(H3 測線:放水路側肩部) ······25
図 1.1.26	H5 測線深部での応力径路と AE 発生数 (Ch7~12 : 深度 10. 5~20.4 m)
図 1.1.27	H2 測線深部の応力径路と AE 発生数(Ch7~12:深度 7.5~12.5 m)・・・・・26
図 1.1.28	空洞周辺岩盤の応力径路と AE 発生パターン(概念図) ・・・・・・・・・・・27
図 1.1.29	注水試験時における微小地震波の発生・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・29
図 1.1.30	米国ケンタッキー州油田サイトにおける石油生産井の分布・・・・・・33
図 1.1.31	センサーの配置(黒い点)および微小地震波観測結果の分類・・・・・・34
図 1.1.32	微小地震波観測結果(鳥瞰図) ······34
図 1.1.33	微小地震波観測結果による水理学的連続性の判断結果・・・・・・・・・・34
図 1.1.34	注水試験設備の概略図・・・・・・35

図 1.1.35	微小地震波の観測システム・・・・・	$\cdots 35$
図 1.1.36	低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の開発に関するフロ	
	- 図 ······	$\cdots 41$
図 1.1.37	注入圧力の周波数に対する注入流量の改良比(注入材料の粘性の影響) …	$\cdots 43$
図 1.1.38	注入圧力の周波数に対する注入流量の改良比(注入圧力の振幅の影響)…	$\cdots 43$
図 1.1.39	亀裂内部の振動圧の振幅(注入材料の粘性の影響)	$\cdots 43$
図 1.1.40	亀裂内部の振動圧の振幅(注入圧力の振幅の影響)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 43$
図 1.1.41	亀裂内部の振動圧の振幅(注入圧力の周波数の影響)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 44$
図 1.1.42	亀裂内部の振動圧の振幅(注入材料の粘性の影響)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 45$
図 1.1.43	亀裂内部の振動圧の振幅(注入圧力の振幅の影響)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 45$
図 1.1.44	亀裂内部の振動圧の振幅(注入圧力の周波数の影響)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 45$
図 1.1.45	放射状流れのモデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 48$
図 1.1.46	放射状流れモデル(流れの垂直方向からの視点) ・・・・・・・・・・・・	$\cdots 49$
図 1.1.47	ルジオン値と亀裂幅の関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 52$
図 1.1.48	現場実験結果(点)と解析結果(曲線)の比較 w/c=4・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 53$
図 1.1.49	現場実験結果(点)と解析結果(曲線)の比較 w/c=8・・・・・・・・・	$\cdots 53$
図 1.1.50	w/c と総セメント注入量の関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 54$
図 1.1.51	w/c と注入効率の関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 54$
図 1.1.52	w/c と透水性改良範囲の関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 54$
図 1.1.53	セメント粒子の流動モデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 55$
図 1.1.54	室内実験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 56$
図 1.1.55	シミュレーション結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 56$
図 1.1.56	シミュレーションにおけるセメント粒子の充填過程・・・・・・・・・・・	$\cdots 57$
図 1.1.57	振動圧振幅と注入時間の関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 58$
図 1.1.58	振動圧振幅と総セメント注入量の関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 58$
図 1.1.59	振動圧周波数と注入時間の関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 58$
図 1.1.60	振動圧周波数と総セメント注入量の関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 58$
図 1.1.61	振動圧振幅と注入時間の増加度(動的/静的)の関係・・・・・・・・・・	$\cdots 59$
図 1.1.62	振動圧振幅と総セメント注入量の増加度(動的/静的)の関係・・・・・	$\cdots 59$
図 1.1.63	実際の低透水性岩盤の亀裂の顕微鏡写真・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 59$
図 1.1.64	シミュレーションで用いた亀裂モデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 59$
図 1.1.65	開口幅を変化させたときの亀裂モデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 59$
図 1.1.66	亀裂幅と注入時間効率比(動的/静的)の関係・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 60$
図 1.1.67	亀裂幅と総注入量効率比(動的/静的)の関係・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 60$
図 1.1.68	クロスホール透水試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 61$
図 1.1.69	水理学的布置・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 62$
図 1.1.70	幾何学的再構成	$\cdots 63$
図 1.1.71	地理的空間に再配置された点群・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 63$
図 1.1.72	点群の密度とイメージング結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 63$
図 1.1.73	数値実験モデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 64$
図 1.1.74	透水層が水平なモデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 65$
図 1.1.75	透水層が傾斜しているモデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 65$
図 1.1.76	注水孔・観測孔と透水層が交差しないモデル・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 65$
図 1.1.77	透水層が複数存在するモデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 65$
図 1.1.78	現場実験の概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	66

図 1.1.79	現場実験に対する手法の適用結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 66$
図 1.1.80	3 次元イメージング手法 ・・・・・	$\cdots 67$
図 1.1.81	数値実験による手法の妥当性の検証	
	(上段:モデル、下段:イメージング結果) ・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 67$
図 1.2.1	生命の誕生と地球環境の形成・・・・・	$\cdots 73$
図 1.2.2	地球環境の変化と生物の進化・・・・・	$\cdots 74$
図 1.2.3	人類の進化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 75$
図 1.2.4	世界の人口と人類とエネルギーの関わり・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 76$
図 1.2.5	世界のエネルギー消費と二酸化炭素濃度の増加・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 77$
図 1.2.6	放射性廃棄物の発生量・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· · · 80
図 1.2.7	核燃料サイクル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	··· 81
図 1.2.8	ウラン燃料ペレット・・・・・・	$\cdots 82$
図 1.2.9	BWR (左) および PWR (右) の燃料集合体の構造	$\cdots 82$
図 1.2.10	原子炉圧力容器断面図・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	··· 82
図 1.2.11	沸騰水型原子炉(BWR)原子力発電のしくみ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	··· 82
図 1.2.12	加圧水型原子炉(PWR)原子力発電のしくみ ·····	· · · 83
図 1.2.13	使用済燃料再処理の工程・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 84$
図 1.2.14	放射性廃棄物の種類と発生源・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	85
図 1.2.15	放射能レベルの比較的高い発電所廃棄物・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	86
図 1.2.16	再処理工場から発生する TRU 廃棄物・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 87$
図 1.2.17	せん断・溶解工程で発生する TRU 廃棄物 ······	$\cdots 87$
図 1.2.18	廃棄体の形状・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	88
図 1.2.19	高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	89
図 1.2.20	ガラス固化体の放射能・・・・・	91
図 1.2.21	ガラス固化体の貯蔵(日本原燃(株))	91
図 1.2.22	高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)の放射能の時間変化・・・・・	$\cdots 92$
図 1.2.23	放射線の生物影響と修復作用・・・・・	· · · 93
図 1.2.24	ウラン鉱石が有する放射能毒性によって規格化したガラス固化体の毒性・・・	96
図 1.2.25	ハル・エンドピースの放射性物質(α + β γ )濃度、放射能毒性、発熱率	
	·····	$\cdots 97$
図 1.2.26	放射性廃棄物の種類と処分の概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	98
図 1.2.27	様々なレベルの放射性廃棄物の処分方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	99
図 1.2.28	浅地中埋設コンクリートピット処分の仕組み・・・・・・・・・・・・・・・・	· · 100
図 1.2.29	日本原燃(株)低レベル放射性廃棄物埋設センター・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· · 100
図 1.2.30	余裕深度処分の概念図・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· · 101
図 1.2.31	余裕深度処分のための空洞施設断面図・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· · 102
図 1.2.32	余裕深度処分のための本格調査工事状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· · 102
図 1.2.33	カナダのシガーレイクウラン鉱床と地層処分・・・・・・・・・・・・・・・・	· · 104
図 1.2.34	地表と地下の比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· · 104
図 1.2.35	様々な処分方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· · 105
図 1.2.36	日本列島周辺のプレートの位置と第四紀火山帯の分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdot \cdot 107$
図 1.2.37	日本列島周辺の第四紀火山帯と活断層の分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· · 108
図 1.2.38	天然バリアとしての地質環境・・・・・	· · 110
図 1.2.39	高レベル放射性廃棄物地層処分のための多重バリアシステム・・・・・・	$\cdot \cdot 111$

図 1.2.40	TRU 地層処分のための多重バリアシステム ・・・・・・・・・・・・・・・・・112
図 1.2.41	高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)貯蔵施設・・・・・・・・・・・・・112
図 1.2.42	高レベル放射性廃棄物輸送容器・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・113
図 1.2.43	高レベル放射性廃棄物地層処分場の概念図・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・113
図 1.2.44	処分孔竪置き方式の緩衝材定置と処分坑道の埋め戻し作業イメージ図・・・・・113
図 1.2.45	TRU 各廃棄体の処分坑道 ······113
図 1.2.46	TRU 廃棄物地層処分: 軟岩系岩盤中のレイアウト例
図 1.2.47	高レベル廃棄物地層処分の地下水シナリオレファレンスケース・・・・・116
図 1.2.48	地下水シナリオで考慮されているプロセス・・・・・・・・・・・・・116
図 1.2.49	堆積岩と結晶質岩中の放射性物質の移行・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・118
図 1.2.50	第2次取りまとめの安全評価で用いられた計算コードとデータベース・・・・・120
図 1.2.51	ガラス固化体 4 万本の放射能毒性
図 1.2.52	高レベル放射性廃棄物地層処分レファレンスケース解析結果・・・・・121
図 1.2.53	地層処分多重バリアシステムの閉じ込め機能・・・・・・・・・・・・・・・121
図 1.2.54	地層処分対象 TRU 廃棄物の総放射能毒性
図 1.2.55	TRU 廃棄物処分のレファレンスケースの線量評価結果(核種ごと) ・・・・・122
図 1.2.56	高レベル放射性廃棄物地層処分システム総合安全評価結果・・・・・・125
図 1.2.57	レファレンスケース以外の解析結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・125
図 1.2.58	日本の原子力開発と安全規制の枠組み・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・126
図 1.2.59	放射性廃棄物地層処分事業の基本スキーム・・・・・・・・・・・・・・・・128
図 1.2.60	放射性廃棄物地層処分事業の進行状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・128
図 1.2.61	高レベル放射性廃棄物処分費用見積・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・129
図 1.2.62	高レベル放射性廃棄物の地層処分事業のフロー・・・・・・・・・・・・・・130
図 1.2.63	電源三法制度 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
図 1.3.1	阿寺断層近傍地質および調査範囲・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・140
図 1.3.2	阿寺断層直下の断層調査露頭・・・・・140
図 1.3.3	断層調査概念・・・・・・141
図 1.3.4	断層位置図・・・・・・141
図 1.3.5	断層および割れ目分布解析図・・・・・142
図 1.3.6	阿寺断層形成プロセス・・・・・143
図 1.3.7	阿寺断層近傍の割れ目充填鉱物・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・144
図 1.3.8	NF 評価のための Safety Case を構築するに重要と思われる項目(案) ・・・・147
図 1.3.9	瑞浪超深地層研究所における主立坑および換気立坑位置図・・・・・147
図 1.3.10	瑞浪超深地層研究所での主立坑および換気立坑周辺の地質状況・・・・・148
図 1.3.11	主立坑および換気立坑周辺の地質と各予備ステージでの想定される地質
	状況
図 1.3.12	瑞浪超深地層研究所での NF 評価原位置試験研究の考え方(案)・・・・・・・149
第2章	
図 2.1.1	SWING-SHAFT におけるシリンダーボリューム ・・・・・ 152

凶 2. 1. 1	SWING-SHAFI (CDI) O S J S A - A J = -A - A - A - A - A - A - A - A - A -	152
図 2.1.2	シリンダー内の水位低下を合わせコンターとして表示・・・・・・・・・・・	153
図 2.1.3	2本の立坑がある場合のモデル化と計算手順・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	153
図 2.1.4	瑞浪超深地層研究所と観測井戸概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	154
図 2.1.5	平成 17 年度の検討ケース (CASE-1, CASE-2, CASE-3) ·····	155

図 2.1.6	各ケースの比較(掘削時の湧水量と地下水位低下量)156
図 2.1.7	パイロットボーリングのモデル化・・・・・・157
図 2.1.8	CASE-3, CASE-33 の水理定数の設定(CASE-1, 2 は平成 17 年度解析)
図 2.1.9	掘削時に伴う湧水量と地下水位低下(CASE-3) ·······159
図 2.1.10	掘削時に伴う湧水量と地下水位低下(CASE-33) ············160
図 2.1.11	パイロットボーリングによる透水係数と検討ケース・・・・・・・・・・・161
図 2.1.12	パイロットボーリングの掘削中における湧水量と地下水位低下量
	(CASE-4-1)
図 2.1.13	各観測孔水位との対比(CASE-4-1) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・162
図 2.1.14	異方性を考慮したシリンダーボリューム(CASE-4-2) ・・・・・・・・・163
図 2.1.15	パイロットボーリングの掘削中における湧水量と地下水位低下量
	(CASE-4-2)164
図 2.1.16	各観測孔水位との対比(CASE-4-2) ·······················164
図 2.1.17	井戸周辺水位の時間的変化(CASE-4-2) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・165
図 2.2.1	ANN, GA と地下水解析の統合システム ·····168
図 2.2.2	解析領域(数字はm単位)······169
図 2.2.3	解析領域の3次元図・・・・・169
図 2.2.4	要素分割図(10430要素, 11565節点)
図 2.2.5	MSB-1 号 孔内の計測間隙水圧変化 ······170
図 2.2.6	DH-2 号孔の間隙水圧分布(花崗岩中) ······170
図 2.2.7	MSB-1 号孔の間隙水圧分布(実測値) ······170
図 2.2.8	DH-2 号孔の間隙水圧分布(実測値) ······170
図 2.2.9	DH-2 号孔における間隙水圧の回復の計測値と解析値 ······ 171
図 2.2.10	MSB-1 号孔における間隙水圧の回復の計測値と解析値・・・・・・・・・171
⊠ 2. 2. 11	透水係数および貯留係数区分・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・172
⊠ 2. 2. 12	立坑掘削前の水頭および流向分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・173
図 2. 2. 13	立 坊 掘削後の 水頭 および 流向 分布 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
図 2. 2. 14	立坑掘削前のパーティクル軌跡(水平面上に投影)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
図 2. 2. 15	立坑掘削後のパーティクル軌跡(水平面上に投影)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
図 2, 2, 16	宝翰概略図······175
図 2.3.1	処分孔の天然亀裂への注入イメージ図・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・177
⊠ 2. 3. 2	止水プラグ周辺の天然亀裂および EDZ への注入イメージ図・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・177
⊠ 2.3.3	検討フロー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
× 2 3 4	デカンタ型遠心分離装置······178
⊠ 2. 0. 1 ⊠ 2 3 5	$\vec{x} - \nu > \nu$
⊠ 2.0.0 ⊠ 2.3.6	「「「「」」 「「」」 「」」 「」」 「」」 「」」 「」」 「」」 「」」
$\boxtimes 2.0.0$ $\boxtimes 2.3.7$	小正正元(100) 5/4、 / (スパックス/102) 113 給計フロー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
凶 2. 0. 1 図 9 3 Q	10   推   2000   20
区 2. J. U 図 9 2 0	1月17 別不で相加ににつれて、内土見17個の区用) 試驗室における確認(左図・角刑増掛構 士図・田形増掛構工取歴版の徒
四 4. 9. 9	<sup>(1)</sup>
図9210	(11) $SKR Z h \parallel u R^2 T n \tilde{v}_{\tau} A h V R H A H R u H - \dots 100$
$[ \bigtriangleup 2, 0, 10 ]$	SKR ストリッパプロジェカトにおける $\mu$ $\gamma$ $\mu$ $\mu$ $\gamma$ $\mu$ $\mu$ $\gamma$ $\mu$ $\mu$ $\mu$ $\gamma$ $\mu$ $\mu$ $\gamma$ $\mu$ $\gamma$ $\mu$ $\mu$ $\gamma$ $\mu$ $\mu$ $\mu$ $\mu$ $\gamma$ $\mu$ $\mu$ $\mu$ $\gamma$ $\mu$
四 4. 0. 11	$-3\Lambda D / \Lambda + 2 / 2 / \Lambda + 2 + 2 / 1 (CADI) / 2 UD - N/(CADI) / (CADI) / (101)$

凶 2.3.12	AECL の URL における EDZ への注入試験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	$\cdots 181$
図 2.3.13	釜石における電磁波トモグラフィーの例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	••• 181
図 2.3.14	日特建設が実施した AE の利用例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· · · 182
図 2.3.15	2μm以下の微粒成分含有状況(左から,エタノールベントナイト	
	(3%, 5%, 10%) , 水ベントナイト(3%, 5%)) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	··· 182
図 2.3.16	攪拌状態における粒子の分散状態(想定イメージ図)	$\cdots 183$
図 2.3.17	Na 型ベントナイトスラリーの累積粒径分布・・・・・・・・・・・・・・・・	184
図 2.3.18	Na 型ベントナイトスラリーの粒径分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	184
図 2.3.19	Ca 型ベントナイトスラリーの累積粒径分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	··· 185
図 2.3.20	Ca 型ベントナイトスラリーの粒径分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	··· 185
図 2.3.21	ホージュン技研所有の遠心沈降分離機(分離板型セントリフュージ)・・・・	186
図 2.3.22	円錐型デカンター・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	186
図 2.3.23	デカンタ型遠心分離装置の例・・・・・	186
図 2.3.24	ボールミルの例・・・・・	186
図 2.3.25	試験に用いたベントナイト・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	188
図 2.3.26	エタノール濃度と液性限界(浅田氏博士論文より抜粋)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	189
図 2.3.27	手動式液性限界測定装置・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	190
図 2.3.28	液性限界試験の試験状況(左上:供試体準備中,右上:供試体準備完了,	
_	左下:試験実施中,右下:試験終了時)	190
图 2.3.29	液性限界:溶媒の違いによる影響(分散剤無し)	••• 191
図 2.3.30	液性限界:分散剤の違いによる影響(溶媒:蒸留水の場合)・・・・・・・・	••• 191
図 2.3.31	液性限界:分散剤の違いによる影響(溶媒:塩水の場合)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	··· 192
図 2.3.32	液性限界:分散剤の違いによる影響(溶媒:エタノールの場合)	··· 192
図 2.3.33	液性限界:分散剤の違いによる影響(溶媒:炭酸プロピレンの場合)	···· 192
凶 2.3.34	水-ベントナイトスラリーのファンネル粘性(浅田氏博士論文より抜粋)	
<b>— .</b>		· · · 193
图 2.3.35		$\cdots 194$
⊠ 2.3.36	マアンネル粘性の測定状況・・・・・・	194
<ul><li>図 2. 3. 36</li><li>図 2. 3. 37</li></ul>	スペビスパ(11)(0) フェーケーマ(2) マイケーマ(2)(1) ファンネル粘性の測定状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· · · 194 · · · 195
<ul> <li>図 2. 3. 36</li> <li>図 2. 3. 37</li> <li>図 2. 3. 38</li> </ul>	R. E (八九 (市販のラユ ) ( 、 、 ) を使用)     ファンネル粘性の測定状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· · · 194 · · · 195 · · · 195
<ul> <li>2. 3. 36</li> <li>2. 3. 37</li> <li>2. 3. 38</li> <li>2. 3. 39</li> </ul>	R. E (八九 (市販のラユ ) (マイ) を使用)     ファンネル粘性の測定状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· · · 194 · · · 195 · · · 195 · · · 195
<ul> <li>⋈ 2. 3. 36</li> <li>⋈ 2. 3. 37</li> <li>⋈ 2. 3. 38</li> <li>⋈ 2. 3. 39</li> <li>⋈ 2. 3. 40</li> </ul>	<ul> <li>スペンジング、シング、シング、シング、シング、シング、シング、シング、シング、シング、シ</li></ul>	· · · 194 · · · 195 · · · 195 · · · 195 · · · 195 · · · 195
<ul> <li>⋈ 2. 3. 36</li> <li>⋈ 2. 3. 37</li> <li>⋈ 2. 3. 38</li> <li>⋈ 2. 3. 39</li> <li>⋈ 2. 3. 40</li> </ul>	RRE EXAL (111)(00001 9 (マイリーを使用) ファンネル粘性の測定状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· · · 194 · · · 195 · · · 195 · · · 195 · · · 195 · · · 195
<ul> <li>図 2. 3. 36</li> <li>図 2. 3. 37</li> <li>図 2. 3. 38</li> <li>図 2. 3. 39</li> <li>図 2. 3. 40</li> <li>図 2. 4. 1</li> <li>図 2. 4. 2</li> </ul>	(福祉(市販のラユ ) (マイ) を使用) ファンネル粘性の測定状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	<ul> <li> 194</li> <li> 195</li> <li> 195</li> <li> 195</li> <li> 195</li> <li> 197</li> </ul>
$\begin{array}{c} \boxtimes 2. \ 3. \ 36 \\ \boxtimes 2. \ 3. \ 37 \\ \boxtimes 2. \ 3. \ 38 \\ \boxtimes 2. \ 3. \ 39 \\ \boxtimes 2. \ 3. \ 40 \\ \end{array}$ $\begin{array}{c} \boxtimes 2. \ 4. \ 1 \\ \boxtimes 2. \ 4. \ 2 \\ \boxtimes 2. \ 4. \ 4. \ 2 \\ \boxtimes 2. \ 4. \ 4. \ 2 \\ \boxtimes 2. \ 4. \ 4. \ 4. \ 4. \ 4. \ 4. \ 4. \$	<ul> <li>RRE E (八九 (前飯のラユ ) ( 、 、 ) を使用)</li> <li>ファンネル粘性の測定状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</li></ul>	<ul> <li> 194</li> <li> 195</li> <li> 195</li> <li> 195</li> <li> 195</li> <li> 195</li> <li> 197</li> <li> 198</li> </ul>
<ul> <li>図 2. 3. 36</li> <li>図 2. 3. 37</li> <li>図 2. 3. 38</li> <li>図 2. 3. 39</li> <li>図 2. 3. 40</li> <li>図 2. 4. 1</li> <li>図 2. 4. 2</li> <li>図 2. 4. 3</li> <li>図 2. 4. 4</li> </ul>	<ul> <li>株混 と状化(11)取のシューサーマ(イリーを(反用)</li> <li>ファンネル粘性の測定状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</li></ul>	<ul> <li>194</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>197</li> <li>198</li> <li>199</li> <li>100</li> </ul>
$\begin{array}{c} \boxtimes 2. \ 3. \ 36 \\ \boxtimes 2. \ 3. \ 37 \\ \boxtimes 2. \ 3. \ 38 \\ \boxtimes 2. \ 3. \ 39 \\ \boxtimes 2. \ 3. \ 40 \\ \hline \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \$	<ul> <li>RRE せんれ (市販のラユー サーマモ(用)</li> <li>ファンネル粘性の測定状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</li></ul>	<ul> <li> 194</li> <li> 195</li> <li> 195</li> <li> 195</li> <li> 195</li> <li> 195</li> <li> 197</li> <li> 198</li> <li> 199</li> <li> 199</li> <li> 199</li> </ul>
$\begin{array}{c} \fbox{ 2. 3. 36 } \\ \fbox{ 2. 3. 37 } \\ \fbox{ 2. 3. 38 } \\ \fbox{ 2. 3. 39 } \\ \fbox{ 2. 3. 40 } \\ \fbox{ 2. 4. 1 } \\ \fbox{ 2. 4. 2 } \\ \fbox{ 2. 4. 3 } \\ \fbox{ 2. 4. 3 } \\ \fbox{ 2. 4. 5 } \\ \fbox{ 2. 4. 5 } \\ \fbox{ 2. 4. 5 } \end{array}$	<ul> <li>株混せ状況((市販のラユ ) 、(イ) を使用)</li> <li>ファンネル粘性の測定状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</li></ul>	<ul> <li>194</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>197</li> <li>198</li> <li>199</li> <li>199</li> <li>199</li> <li>199</li> </ul>
$\begin{array}{c} \boxed{\mathbb{X}} 2. 3. 36 \\ \hline{\mathbb{X}} 2. 3. 37 \\ \hline{\mathbb{X}} 2. 3. 38 \\ \hline{\mathbb{X}} 2. 3. 39 \\ \hline{\mathbb{X}} 2. 3. 40 \\ \hline{\mathbb{X}} 2. 4. 1 \\ \hline{\mathbb{X}} 2. 4. 2 \\ \hline{\mathbb{X}} 2. 4. 3 \\ \hline{\mathbb{X}} 2. 4. 5 \\ \hline{\mathbb{X}} 2. 4. 6 \\ \hline{\mathbb{X}} 2. 4. 7 \end{array}$	<ul> <li>株混 せ状化 (市販のラユ ・ 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、</li></ul>	<ul> <li> 194</li> <li> 195</li> <li> 195</li> <li> 195</li> <li> 195</li> <li> 195</li> <li> 197</li> <li> 198</li> <li> 199</li> <li> 199</li> <li> 199</li> <li> 199</li> <li> 199</li> <li> 199</li> </ul>
$\begin{array}{c} \boxed{\mathbb{X}} 2. 3. 36 \\ \hline{\mathbb{X}} 2. 3. 37 \\ \hline{\mathbb{X}} 2. 3. 38 \\ \hline{\mathbb{X}} 2. 3. 39 \\ \hline{\mathbb{X}} 2. 3. 40 \\ \hline{\mathbb{X}} 2. 4. 1 \\ \hline{\mathbb{X}} 2. 4. 2 \\ \hline{\mathbb{X}} 2. 4. 3 \\ \hline{\mathbb{X}} 2. 4. 5 \\ \hline{\mathbb{X}} 2. 4. 6 \\ \hline{\mathbb{X}} 2. 4. 7 \\ \hline{\mathbb{X}} 2. 7 \\ $	<ul> <li>株混せ状化(11)取のシューサーマ(オリーマ(因用))</li> <li>ファンネル粘性の測定状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</li></ul>	<ul> <li>194</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>197</li> <li>197</li> <li>198</li> <li>199</li> <li>199</li> <li>199</li> <li>199</li> <li>200</li> <li>200</li> </ul>
$\begin{array}{c} \boxed{\mathbb{X}} 2. 3. 36 \\ \hline[\begin{subarray}{c} 2. 3. 37 \\ \hline[\begin{subarray}{c} 2. 3. 38 \\ \hline[\begin{subarray}{c} 2. 3. 39 \\ \hline[\begin{subarray}{c} 2. 3. 40 \\ \hline[\begin{subarray}{c} 2. 4. 1 \\ \hline[\begin{subarray}{c} 2. 4. 2 \\ \hline[\begin{subarray}{c} 2. 4. 3 \\ \hline[\begin{subarray}{c} 2. 4. 3 \\ \hline[\begin{subarray}{c} 2. 4. 5 \\ \hline[\begin{subarray}{c} 2. 4. 6 \\ \hline[\begin{subarray}{c} 2. 4. 8 \\ \hline[\begin{subarray}{c} 2. 8 \\ \hline[\$	<ul> <li>株混せ状況((市販のラユ ) 、(、) を使用)</li> <li>ファンネル粘性の測定状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</li></ul>	<ul> <li>194</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>197</li> <li>197</li> <li>198</li> <li>199</li> <li>199</li> <li>199</li> <li>199</li> <li>200</li> <li>202</li> <li>202</li> </ul>
$\begin{array}{c} \boxed{\boxtimes} 2.3.36 \\ \hline{\boxtimes} 2.3.37 \\ \hline{\boxtimes} 2.3.38 \\ \hline{\boxtimes} 2.3.39 \\ \hline{\boxtimes} 2.3.40 \\ \hline{\boxtimes} 2.4.1 \\ \hline{\boxtimes} 2.4.2 \\ \hline{\boxtimes} 2.4.2 \\ \hline{\boxtimes} 2.4.3 \\ \hline{\boxtimes} 2.4.5 \\ \hline{\boxtimes} 2.4.6 \\ \hline{\boxtimes} 2.4.7 \\ \hline{\boxtimes} 2.4.8 \\ \hline{\boxtimes} 2.4.9 \\ \hline{\boxtimes} 2.4.10 \\ \hline{\boxtimes} 2.4.9 \\ \hline{\boxtimes} 2.4.10 \\ \hline{\boxtimes} 2.4.1$	<ul> <li>株混じれれ(11)(00001 9 (マイ) 2(0))</li> <li>ファンネル粘性の測定状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</li></ul>	<ul> <li>194</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>197</li> <li>197</li> <li>198</li> <li>199</li> <li>199</li> <li>199</li> <li>199</li> <li>200</li> <li>202</li> <li>202</li> <li>202</li> </ul>
$\begin{array}{c} \boxed{\mathbb{X}} 2. 3. 36 \\ \hline[\begin{subarray}{c} 2. 3. 37 \\ \hline[\begin{subarray}{c} 2. 3. 38 \\ \hline[\begin{subarray}{c} 2. 3. 39 \\ \hline[\begin{subarray}{c} 2. 3. 39 \\ \hline[\begin{subarray}{c} 2. 3. 40 \\ \hline[\begin{subarray}{c} 2. 4. 1 \\ \hline[\begin{subarray}{c} 2. 4. 2 \\ \hline[\begin{subarray}{c} 2. 4. 3 \\ \hline[\begin{subarray}{c} 2. 4. 3 \\ \hline[\begin{subarray}{c} 2. 4. 5 \\ \hline[\begin{subarray}{c} 2. 4. 6 \\ \hline[\begin{subarray}{c} 2. 4. 8 \\ \hline[\begin{subarray}{c} 2. 4. 9 \\ \hline[\begin{subarray}{c} 2. 4. 10 \\ \hline[\be] 2. 10. 10 \\ \hline[\begin{subarray}{c} 2. 10 \\$	<ul> <li>株混ぜ状化(市販のラユ 9 、ママ 9 を (円)</li> <li>ファンネル粘性の測定状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</li></ul>	<ul> <li>194</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>197</li> <li>197</li> <li>198</li> <li>199</li> <li>199</li> <li>199</li> <li>199</li> <li>200</li> <li>202</li> <li>202</li> <li>203</li> <li>203</li> </ul>
$\begin{array}{c} \boxed{\aleph} 2. 3. 36 \\ \hline{\aleph} 2. 3. 37 \\ \hline{\aleph} 2. 3. 38 \\ \hline{\aleph} 2. 3. 39 \\ \hline{\aleph} 2. 3. 40 \\ \hline{\aleph} 2. 4. 1 \\ \hline{\aleph} 2. 4. 2 \\ \hline{\aleph} 2. 4. 2 \\ \hline{\aleph} 2. 4. 3 \\ \hline{\aleph} 2. 4. 5 \\ \hline{\aleph} 2. 4. 5 \\ \hline{\aleph} 2. 4. 6 \\ \hline{\aleph} 2. 4. 7 \\ \hline{\aleph} 2. 4. 8 \\ \hline{\aleph} 2. 4. 9 \\ \hline{\aleph} 2. 4. 10 \\ \hline{\aleph} 2. 4. 10 \\ \hline{\aleph} 2. 4. 11 \\ \hline{\aleph} 2. 4. 10 \\ \hline{\aleph} 2. 4. 11 \\ \end{array}$	<ul> <li>株混ぜ状化(11歳のウシュ 9 くマ 9 を使用)</li> <li>ファンネル粘性の測定状況・・・・・</li> <li>ファンネル粘性測定結果(分散剤:ピロリン酸)・・・・・・</li> <li>ファンネル粘性測定結果(分散剤:トリポリリン酸)・・・・・・</li> <li>ファンネル粘性測定結果(分散剤:ヘキサメタリン酸)・・・・・・</li> <li>平成18年度研究の流れ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</li></ul>	<ul> <li>194</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>195</li> <li>197</li> <li>198</li> <li>199</li> <li>199</li> <li>199</li> <li>199</li> <li>200</li> <li>202</li> <li>202</li> <li>202</li> <li>203</li> <li>203</li> </ul>

図 2.4.13	従来モデルと拡張領域モデルのポテンシャルの違い・・・・・・・・・・204
図 2.4.14	拡張領域モデルで断層がない場合とある場合の違い・・・・・・・・・・・205
図 2.4.15	拡張領域モデルで断層がない場合とある場合の違い・・・・・・・・・・・205
図 2.4.16	平成17年度解析結果から得られた累積水収支・・・・・・・・・・・・・・・206
図 2.4.17	蒸発散効率の違い・・・・・207
図 2.4.18	地下水位観測値と計算値の比較(断層南側, MIU-1, MIU-2, MIU-3) ・・・・・・208
図 2.4.19	地下水位観測値と計算値の比較(断層南側, DH-2, DH-4) ・・・・・・・・・209
図 2.4.20	地下水位観測値と計算値の比較(断層北側)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
図 2.4.21	日吉川流量再現結果・・・・・210
図 2.5.1	北米における大気中の CFCs 濃度長期変動 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
図 2.5.2	北海道(N)および南極(S)における大気中の CFCs 濃度変化・・・・・・214
図 2.5.3	能登半島における大気中の CFCs 濃度週単位変化・・・・・・・・・・・・・214
図 2.5.4	東京都江東区と岩手県綾里における大気中の CFCs 濃度変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
図 2.5.5	ハイデルベルグにおける大気中の CFC12 と CFC11 超過濃度の日変化・・・・・215
図 2.5.6	ドイツのハイデルベルグからアルプスにいたる 4 地点における大気中の
	CFC11, CFC12 ガス濃度の超過確率(%)の変化・・・・・・・・・・・216
図 2.5.7	CFCs 濃度を用いた地下水涵養年代推定の例
図 2.5.8	CFC-11、CFC-12 による地下水涵養年代推定に対する涵養温度の影響219
図 2.5.9	不飽和帯中の CFC-11, CFC-12, SF6 の遅れ時間 ······220
図 2.5.10	CFCs と <sup>3</sup> H による滞留時間推定結果の比較 ·······················221
図 2.5.11	グリーンランドの農村地域における CFC-12 による涵養年代推定結果と
	NO <sub>3</sub> -N 濃度の関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
図 2.5.12	韓国チェジュ島における CFC-12 による涵養年代推定結果と NO <sub>3</sub> -濃度 221
図 2.5.13	Thompson らによる地下水の CFCs 分析前処理ライン・・・・・・222
図 2.5.14	CFCs 分析用の水サンプリングシステムの概要
⊠ 2.5.15	試験サンプリングを実施した熊本県不知火町の試験流域概要・・・・・224
⊠ 2.5.16	CFCs 分析用前処理ライン・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
⊠ 2.5.17	不知火研究地域における地下水中のトリチウム濃度・・・・・・・・・・・・・・・・225
⊠ 2.5.18	トリチウム濃度および炭素 14 濃度を基にした不知火研究地域地下水の
	年齢分布概念図・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・

表1.1.1処分施設の工学技術の体系化に関する課題・3表1.1.2(a)解析用物性値一覧表(弾性係数)20表1.1.2(b)解析用物性値一覧表(強度)21表1.1.3室内実験の条件・42表1.1.4現場実験条件・53表1.1.5シミュレーションにおいて設定した注入圧・54表1.1.6水理学的距離行列・62表1.2.1世界のエネルギー資源確認埋蔵量(2004 年)75表1.2.2各種電力の比較(100万 kWの発電について)75表1.2.3放射性廃棄物の区分と2048 年頃までの発生量・85表1.2.4TRU 各廃棄物の処理方法と2048 年頃までの発生量予測85表1.2.5自然放射線による被ばく(1mSv = 0.001Sv)93表1.2.7高レベル放射性廃棄物と地層処分対象 TRU 廃棄物の放射性物質濃度と発95
表1.1.2(a) 解析用物性値一覧表(弾性係数)20表1.1.2(b) 解析用物性値一覧表(強度)21表1.1.2(b) 解析用物性値一覧表(強度)21表1.1.3 室内実験の条件42表1.1.4 現場実験条件53表1.1.5 シミュレーションにおいて設定した注入圧54表1.1.6 水理学的距離行列62表1.2.1 世界のエネルギー資源確認埋蔵量(2004 年)79表1.2.2 各種電力の比較(100万 kWの発電について)79表1.2.3 放射性廃棄物の区分と2048 年頃までの発生量85表1.2.4 TRU 各廃棄物の処理方法と2048 年頃までの発生量予測89表1.2.5 自然放射線による被ばく(1mSv = 0.001Sv)93表1.2.7 高レベル放射性廃棄物と地層処分対象 TRU 廃棄物の放射性物質濃度と発55
表1.1.2(b) 解析用物性値一覧表(強度)21表1.1.3 室内実験の条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
表1.1.3室内実験の条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
表1.1.4現場実験条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
表1.1.5シミュレーションにおいて設定した注入圧・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
表1.1.6水理学的距離行列・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
表1.2.1 世界のエネルギー資源確認埋蔵量(2004年) ····································
表1.2.1世界のエネルギー資源確認埋蔵量(2004年)75表1.2.2各種電力の比較(100万kWの発電について)75表1.2.3放射性廃棄物の区分と2048年頃までの発生量・85表1.2.4TRU各廃棄物の処理方法と2048年頃までの発生量予測・85表1.2.5自然放射線による被ばく(1mSv = 0.001Sv)95表1.2.6放射性廃棄物の潜在的危険度の指標・95表1.2.7高レベル放射性廃棄物と地層処分対象TRU 廃棄物の放射性物質濃度と発
表 1. 2. 2各種電力の比較(100 万 kW の発電について)75表 1. 2. 3放射性廃棄物の区分と 2048 年頃までの発生量・85表 1. 2. 4TRU 各廃棄物の処理方法と 2048 年頃までの発生量予測・85表 1. 2. 5自然放射線による被ばく(1mSv = 0.001Sv)・95表 1. 2. 6放射性廃棄物の潜在的危険度の指標・95表 1. 2. 7高レベル放射性廃棄物と地層処分対象 TRU 廃棄物の放射性物質濃度と発
表 1. 2.3放射性廃棄物の区分と 2048 年頃までの発生量・・・・・・・・・・・・・・・・・・88表 1. 2.4TRU 各廃棄物の処理方法と 2048 年頃までの発生量予測・・・・・・88表 1. 2.5自然放射線による被ばく (1mSv = 0.001Sv)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
表 1. 2.4TRU 各廃棄物の処理方法と 2048 年頃までの発生量予測 ······ 88表 1. 2.5自然放射線による被ばく (1mSv = 0.001Sv) ······ 93表 1. 2.6放射性廃棄物の潜在的危険度の指標 ····· 95表 1. 2.7高レベル放射性廃棄物と地層処分対象 TRU 廃棄物の放射性物質濃度と発
表 1.2.5 自然放射線による被ばく(1mSv = 0.001Sv) ····································
表 1.2.6 放射性廃棄物の潜在的危険度の指標・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
表 1.2.7 高レベル放射性廃棄物と地層処分対象 TRU 廃棄物の放射性物質濃度と発
熟量····································
表 1.2.8 主な余裕深度処分対象廃棄物の種類・・・・・・・・・・・・・・・・・101
表 1.2.9 事業者による TRU 廃棄物最終処分費用の見積り
表 1.2.10 文献調査地区、概要調査地区に対する電源立地地域対策交付金・・・・・132
表 1.2.11 諸外国の高レベル放射性廃棄物対策の現状・・・・・・・・・・・・・135
表 2.2.1 実測間隙水圧変化に合致するよう推定した透水係数, 貯留係数分布172
表 2.3.1 私度分布測定結果(スーハークレイ)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
表 2.3.2 ベンケルフライト II (ホールミル $(14 時間 粉砕)$ 私 $(25 - 10)$ 185 ま $(12 - 10)$ (ホールミル $(14 - 10)$ ) 私 $(12 - 10)$ (19)
$ \overline{x} 2.3.3 $ 有裂ハントリイト:ハンリルンリース····································
$ \overline{x} 2.3.4 $ モンモリロブイト 泊有重····································
衣 2.3.5 ノアンイル 相性側 足 柿 未・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
書 2 4 1 浸透率お上び閉隙率
- 4、 2・ 1・1 (又2) 子わよ U   則 宗子
表 2 5 1 地下水の CFCs 濃度を変化させる要因・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
表 2.5.2 過剰空気 30cm <sup>3</sup> /kg 涵養温度 30℃という冬件におけろ推定涵養年代に対
する効果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
表 2.5.3 サンプルの諸元と分析結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・224

#### はじめに

本研究は、地表から深部にいたる地質環境を効率的かつ合理的に把握するための調査・解析技術の 体系化を目標に、現状の技術レベルを評価し、研究開発課題の抽出をおこない、各課題の解決に向け た研究開発および調査・解析技術の体系化について検討するものであり、次の(1)、(2)について実施 するものである。

(1)核燃料サイクル開発機構(現:日本原子力研究開発機構)が国に提出した「地層処分研究開発第2次取りまとめ(別名2000年レポート)」<sup>1)</sup>の内容を地質環境,処分技術,安全評価の各観点で評価した結果に基づいて,またその後にまとめられた,「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築(2005年)」<sup>2)</sup>などの報告書を参考にして抽出された深部地質環境の調査・解析技術の実用化に向けた研究開発課題を対象として研究を実施する。

(2) 東濃地科学センターが実施している深地層の科学的研究の成果および研究計画を踏まえ, 広域から局所的なスケールでの浅層・深層地下水の水理・水文,地下水の地球化学・物質移動を効率的かつ 合理的に把握するための調査・解析手法の高度化・体系化について検討するものである。

上記の 2000 年レポート<sup>1)</sup>は、動力炉・核燃料開発事業団/核燃料サイクル開発機構が、およそ 20 年間実施してきた、地層処分に関する研究開発を含めた国内外の現状技術の集大成であり、現状の技 術で地層処分は実現可能、その基盤技術は整ったと評価されている。これに加えて「特定放射性廃棄 物の最終処分に関する法律」<sup>3)</sup>の制定、これに伴う地層処分の実施主体と資金管理センターの設立は、 まさに 21 世紀のはじまりを、地層処分の実現へむけてのキックオフの年とした。

しかしながら、技術面ではこれまでの研究開発は、基盤技術、要素研究に重点がおかれた、どちら かというと、サイトを特定していない段階の一般論であり、事例研究的な色彩が強い。地層処分実現 へ向けて、サイトを特定し、地層処分場を建設/操業するためには、"2000 年レポート"<sup>1)</sup>に集大成さ れた技術をより具体化し、また要素技術を体系化するなど、実用化へ向けた課題は依然として多岐に わたって存在する。また従来、縦糸として分野を分けて実施してきた「地質環境」、「処分技術」、「安 全評価」の間に横糸を通す、中間分野の課題も多い。"知識基盤の構築"<sup>2)</sup>で提唱されている、セーフ ティケースの構築や東濃と幌延で実施中の深地層の研究施設の建設と研究開発には、これらの課題の 解決と、実用的な技術のより一層の進展が期待されている。

これらの状況を踏まえて、(1)「深部地質環境の調査・解析技術の実用化に向けた課題に関する研 究」の「課題グループ」では、昨年度に引き続き、上記の各分野間にまたがる研究開発を視野にいれ て、地層処分の実用技術の重点課題を、分野毎に具体的、事例的に抽出して調査・解析を試みる一方、 それらの成果に基づいて、分野間にまたがる重要な課題の検討を実施し、従来の分野毎の要素技術に 基づいたニアフィールドのコンセプト(NFC)を、長短の時間軸や各分野間の相互作用を重視したコン セプトへと再構築することが重要との見解を得た。

一方,(2)「調査・解析手法の高度化・体系化」を目標とする「調査・解析グループ」では,東濃地 科学センターの調査研究計画(瑞浪超深地層研究所の第2段階計画など)の中から抽出される課題に 基づき,当委員会メンバーが従来より実施している基礎的な要素技術の研究・開発に関連する科学技 術をとりあげ,瑞浪超深地層研究所の建設のデータによる解析も含めて,実用化へ向けた研究開発を 実施した。東濃地科学センターの研究開発も立坑での調査研究という第2段階に入ってきた。本調査・ 研究の成果を反映させて,第2段階の調査研究計画の評価もおこないながら,より具体的・実用的な 調査・解析技術の高度化・体系化を構築していきたい。

## 参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構:「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層 処分研究開発第2次取りまとめ-」,総論レポート, JNC TN1400 99-020, 1999.
  - ・分冊1 わが国の地質環境, JNC TN1400 99-021
  - ・分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022
  - ・分冊3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023
- 2) 「核燃料サイクル開発機構:「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の機構-平 成17年度とりまとめ-」,2005.
  - ・分冊1 深地層の科学的研究, JNC TN1400 2005-014
  - ・分冊2 工学技術の技術開発, JNC TN1400 2005-015
  - ・分冊3 安全評価手法の開発, JNC TN1400 2005-016
- 3) 法律第百十七号:特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律,2000.

(地圈空間研究所 小島圭二)

# 第2次取りまとめに基づく深部地質環境の調査・解析技術の実用化に向けた課題に関する研究

#### 1.1 処分技術の観点から抽出された深部地質環境の調査・解析技術に関する研究

1.1.1 はじめに

本研究では、地層処分の工学技術の分野において、重点的に取り組むべき研究開発課題を抽出した上で(表 1.1.1)、具体的な研究開発を実施してきた。

平成18年度の研究では、具体的なサイト特性を視野に入れたニアフィールドコンセプトの再構築を 目的として、「深部地質環境の調査」および「安全性評価」の両分野との連携・体系化をより具体的に 進めながら、下記2項目の研究開発を実施した。

#### (1) 微小破壊音(AE)計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術の研究

- ① 硬岩における各種 AE パラメータの詳細検討
- ② AE と亀裂進展, EDZ 形成メカニズムに関する研究
- 3 亀裂の力学-水理学的連成挙動に着目した評価手法の構築 (microseismic monitoring) に関する基礎的検討

### (2) 低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の研究

- ① 低透水性岩盤におけるグラウト充填機構についての理論的検討
- ② 堆積軟岩中におけるフラクチャーシーリング技術の開発(動的限界注入圧とその付加方 法に関する検討)
- 多次元尺度構成法を利用した3次元水理モデル構築法のシステム化と統合(fracture sealing and groundwater control)

## 表1.1.1 処分施設の工学技術の体系化に関する課題

処分施設の設計技術の体系化に関する重要研究課題
<u>処分施設の力学的設計体系の確立</u> ■大深度における岩盤の物性・地圧データベースの構築 ■各種解析・設計手法の評価と適用方法の体系化 ■掘削影響領域の特性化手法と解析・評価法の統合 ■立坑の地震時安定性の評価と地下構造物の耐震設計手法の確立
<u>処分施設の水理学的設計体系の確立</u> ■広域・サイトスケール・局所における地下水の流動評価技術の体系化 ■低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の開発 ■建設・操業時の地下水制御法と長期安定性を有する岩盤グラウト技術の開発
<u>調査技術と設計技術の統合と体系化</u> ■調査ボーリング(方向制御ボーリング)技術の高度化 ■力学的・水理学的 MWD・LWD 技術の実用化 ■微小破壊音(AE)による調査・計測,設計,モニタリングシステムの研究 ■新材料・新素材を用いた計測技術の高度化

#### 1.1.2 AE 計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術の開発

#### 1.1.2.1 はじめに

一般に、高地圧下における空洞掘削においては、応力再配分の過程で周辺岩盤内に分布する既存の 微小亀裂の開口・進展および新規亀裂の発生によって、掘削影響領域(Excavation Disturbed Zone: EDZ)が形成される。この掘削影響領域の評価は、高レベル放射性廃棄物地層処分場の設計および性能 評価上の重要な課題の一つとなっている。さらに、合理的な処分施設の設計体系を研究する上で、応 カ評価に基づく空洞設計手法の開発や、空洞掘削時の亀裂の発生・進展を計測により精度良く把握す る手法の開発が重要であり、掘削影響領域の評価を軸とした体系的な研究が極めて重要である。そこ で、本研究においては、第一段階として亀裂の発生・進展挙動ならびに岩盤内の応力変化に対して鋭 敏な反応を示す岩盤破壊音(Acoustic Emission: AE)に着目して掘削影響領域の評価を行うことを試み た。本研究の全体的なフローを図1.1.1に示した。本研究では、まず高地圧下に掘削された岩盤地下 空洞において採取された岩石供試体に対する高剛性三軸圧縮試験(AE 計測を同時に行う)の結果得ら れた応力ーひずみ曲線を個別剛体要素法の解析(PFC 解析)によってシミュレートし、応力経路の各 点で観測される岩石の破壊状況(亀裂の発生・進展状況)とAEパラメータ(発生数・周波数・振幅等) との関係を把握する。この検討結果から応力・破壊現象とAEパラメータの関係を検討し、AE データ による応力変化・破壊過程の評価技術を構築する。本研究の最終的な目標は、この研究成果を基にし て現場計測と空洞掘削解析を総合的に体系化することにより、応力に着目した高地圧下における岩盤 空洞の設計手法を構築することである。

なお、今回は、高地圧下に掘削された岩盤地下空洞で得られている現場計測結果ならびに当該空洞 において採取された岩石供試体に対する高剛性三軸圧縮試験結果の例を用いて AE パラメータと岩盤 ならびに岩石の破壊状況との関連性を検討した。また、これらのうち高剛性三軸圧縮試験結果につい ては、個別剛体要素法による解析を基に詳しい検討を行った。



室内試験による検討

図 1.1.1 AE 計測による掘削影響領域 (EDZ) の評価技術の開発に関するフロー図

#### 1.1.2.2 岩石の破壊現象と微小破壊音

筆者らは、岩石の室内三軸圧縮試験を行い、破壊過程に発生する AE を測定して AE 特性の分析を実施した。室内岩石三軸試験に用いる供試体は、(1)で述べた地下空洞の調査坑で実施されたボーリングのコアより採取された。ここでは、2 つの供試体(Case-1, Case-2) についての試験結果を述べることにする。3 つの供試体に関する試験結果(応力ひずみ曲線)を図 1.1.2 に示す。また、本図には観測された AE の発生数・周波数・m 値についても同時に示している。これより、応力経路の各点において AE の発生に次のような傾向が認められる。



図 1.1.2 三軸圧縮試験結果

- ① 応力が降伏強度に至る前に AE が発生し始める。
- ② AE 発生数は降伏強度に至ると顕著に増加し、ピーク強度に至った直後に最大値をとる。その後、 残留強度に至るまで AE 発生数は減少し、ほとんど発生が認められなくなる。
- ③ AE 周波数についてはピーク強度に達するまで大きな変化が認められないが、ピーク強度に達する と残留強度に至るまで応力の低下とほぼ対応した減少傾向を示す。

なお, AE 発生数および周波数の他にm値を用いて AE 信号の振幅値の変化に注目した検討も行った。 m値とは AE 発生総数と最大振幅値との関係を両対数グラフ上で示し,直線近似したときの勾配である。 岩石試験における AE 波形の振幅値の変化は破壊との関連で次のようなメカニズムを反映している。

- ① 載荷初期の低い応力レベルにおいては、岩石内マイクロクラックなどの初期欠損部の閉合や開口 進展による AE が発生するが、これらは極めて局部的なものであることから、ひずみエネルギー が小さく、発生する AE の振幅値も小さくなる。
- ② 応力レベルが増加すると微小破壊が累積されていき、これらが互いに連結することによって供試体に分離面が形成されて破壊に至る。この破壊時には蓄積された大きな弾性ひずみエネルギーが放出されるので、発生する AE の振幅値も大きくなる (m値が減少する)。
- ③ 破壊後には、破断面の滑動に伴う局所的な微小破壊が発生し、発生する AE の振幅値も小さくなる。 結果として、載荷の初期段階の AE 波形と同様に振幅値が小さなものが卓越することになる (m 値 が増加する)。

ここでは脆性的な破壊挙動を示す Case-1の供試体とやや延性的な破壊挙動を示す Case-2の供試体 を対比しながら, AE パラメータ(AE 発生数・卓越周波数・m値)の挙動について詳しく検討する。

#### (1) AE 発生数

図 1.1.2 を見ると, 脆性的な破壊を示す Case-1 においては, 降伏強度付近から AE が発生し始め, ピーク強度付近において発生数が最大となっている。ピーク強度以降は, ひずみがほとんど増大する ことなく, 急激に応力が低下し, 残留強度に達していることがわかる。残留強度以降については, AE はほとんど発生していない。

やや延性的な破壊を示す Case-2 については、Case-1 と同様にピーク強度前後に AE 発生数が最大と なっているが、ひずみがある程度増大する(1.5%程度)まで緩やかに応力が低下しており、この間に AE が断続的に発生していることがわかる。残留強度以降についてはこちらも Case-1 と同様に AE はほ とんど発生していない。

#### (2) 卓越周波数

図 1.1.2 を見ると, 脆性的な破壊を示す Case-1 については, 載荷開始からピーク強度までは約 400kHz の高周波の AE が卓越するが, その後ピーク強度から残留強度に達する軟化過程において急激 に低周波の AE が卓越し, 残留強度以降も引き続き低周波の AE が卓越している。

やや延性的な破壊を示す Case-2 については,載荷開始直後から徐々に高周波の AE が卓越し始め, その後, Case-1 と同じように軟化過程において低周波の AE が卓越しているが, Case-2 の場合は低周 波の AE が徐々に卓越しており,卓越周波数の平均値は緩やかに低下している。なお,残留強度以降に ついては引き続き低周波の AE が卓越している。

#### (3) m 値

図1.1.2を見ると, 脆性的な破壊を示す Case-1 においては, 降伏強度付近において m 値の低下が始まり, その後残留強度に達するまでは m 値が低いレベルを維持している。その後, 残留強度において 明瞭な m 値の急激な反転が確認され, 載荷前と同じレベルに達している。やや延性的な破壊を示す Case-2 についても, 残留強度付近において m 値の低下が確認された。しかしながら, その後ある程度 ひずみが増大する間にわたり, 低いレベルを維持し続ける。こちらに関しても残留強度付近で明瞭な 反転が確認され, 載荷前のレベルに戻っていることがわかる。

このように,m値に注目することによって,破壊過程における降伏強度点や残留強度点を AE パラメ ータから判定することができる。

以上,破壊過程とAEの挙動の差異について、3つのAEパラメータ(AE発生数・卓越周波数・m値) に着目し分析をおこなった結果,応力経路におけるAEパラメータの挙動について次のような知見を得 た。岩種・破壊過程の差異にかかわらず,降伏強度に達する付近において、まずAEの発生が開始し、 m値の低下が起こる。その後、ピーク強度に達する間に、AE発生数が急増し、m値の低下がいったん 止まる。この段階においては、高周波のAEが卓越している。これは応力集中により岩石の構造が緻密 となり、発生したAEのうち高周波のものであっても遮断されることなく計測されたためであると考え られる。m値の低下に関しては、応力集中状態にある岩石には大規模のエネルギーが蓄積されている ことから、発生するAEの振幅が大規模なものになったためであると考えられる。ピーク強度を超える と、AE発生数は徐々に減少に転じ、低周波のAEが卓越し始める。更に破壊が進行し、残留強度に達 すると、m値が反転し、破壊前のレベルに戻る。これは岩石に破壊面が形成されたことにより集中し た応力が急激に解放されたため、m値が載荷前のレベルへ戻ったものであると考えられる。この段階 において、AEの発生は収束に向かい、AE周波数も低いレベルで推移を続ける。このように、AE発生 数の他に、卓越周波数・m値に着目することで岩石供試体の破壊過程を明瞭に捉えることができ、破 壊現象の進行度合を評価することができる。 次に, 脆性的な破壊を示すような岩石については, ピーク強度直後, ひずみがほとんど増大することなく AE 発生数が急激に減少し, 低周波の AE が急激に卓越する。これは供試体の強度が非常に高く, 蓄積された応力が大規模な破壊面の形成と共に急激に解放され, 供試体の強度が低下しているからであると考えられる。

一方,やや延性的な破壊を示すような岩石については,ピーク強度に達した後,ひずみがある程度 増大するまでAEが発生し続け,周波数についても,低周波のAEが徐々に卓越している。つまり,ひ ずみがある程度増大するまで,供試体内で小規模な破壊が断続的に発生し,その蓄積によって供試体 が強度を失っていると考えられる。

#### 1.1.2.3 個別剛体要素法による解析

ここでは、高剛性三軸圧縮試験の結果、得られた応力-ひずみ曲線を個別剛体要素法の解析(PFC 解析)によってシミュレートし、応力経路の各点で観測される岩石の破壊状況(亀裂の発生・進展状況)とAEパラメータとの関係をさらに詳しく検討する。

ここで、本研究においては、次のような特徴をもつ PFC(Particle Flow Code)と呼ばれる解析コードを用いて個別剛体要素法による解析を実施した。

- ① 粒状体をベースとした個別要素法の解析コードである。
- ② 結合力(ボンド)をもつ円形要素の集合体で各種材料をモデル化する。
- ③ 運動則とカー変位関係則を交互に用いた陽解法により、粒子の位置・接触力等を経時的に算 出することができる。
- ④ 引っ張りまたはせん断応力によって粒子間の結合が切れることで亀裂進展や破壊など不連続
   体挙動のシミュレーションが可能である。

今回実施した解析においては、まず、三軸圧縮試験によって得られた応力-ひずみ関係を個別剛体 要素法(PFC)によってカーブフィッティングできるような粒状体モデルのパラメータの値を設定する。 次に得られたモデルにおける亀裂発生状況(引張亀裂ならびにせん断亀裂の発生状況)と三軸圧縮試 験時に観測された AE 発生状況(AE 発生数・AE 周波数)とを応力経路の各点で比較することによって、 岩石の破壊現象と AE 特性との関係について検討を行う。

図1.1.3にCase-2の実験結果に対してカーブフィッティングをした結果を示す。本図には、応カー ひずみ曲線の他に、三軸圧縮試験の結果として試験前後の供試体のスケッチを、PFC 解析の結果とし て試験前後の粒状体モデルの状況および試験前後のボンドの破断状況を併せて表示している。図を見 ると、比較的高い精度でフィッティングできているものと考えられる。また、亀裂の発生位置も整合 した結果となった。

図 1.1.4 に Case-2 の PFC 解析結果として,引張亀裂ならびにせん断亀裂の累積発生数を示すと同時 に,4 つの段階(①降伏強度・②ピーク強度・③残留強度にそれぞれ到達する点,および④残留強度 到達後にひずみがある程度増大した点)における亀裂発生分布を示す。



図 1.1.4 応カーひずみ曲線と亀裂発生分布 (Case-2)

この解析結果から,先に検討した三軸圧縮試験による AE の発生モードと PFC 解析によってシミュレートされた亀裂の発生モードとを岩石供試体の破壊の各段階において比較して,整理すると次のようになる。

- ① 載荷初期~降伏強度:岩石内にほぼ均質に引張亀裂が生じて AE が発生するが、その発生数は少ない。
- ② 降伏強度~ピーク強度:引張亀裂の発生数が顕著に増加するとともに、せん断亀裂が発生し始める。これに伴って AE の発生数も増加する。また AE 波形の振幅値も徐々に大きなものが卓越するようになる。
- ③ ピーク強度~残留強度:せん断亀裂の発生数が顕著に増加し、全体の亀裂発生数はピーク直後に 最大値をとる。亀裂の発生位置は特定位置に集中し、これらが連結し合うことによって岩石に分 離面が形成される。その後、引張亀裂およびせん断亀裂ともに発生数が徐々に減少する。AEの発 生数は全体の亀裂発生数と対応した傾向を示し、ピーク直後に最大値をとる。AE波形の振幅値は 残留強度付近まで大きなものが卓越し、周波数は応力の低下とほぼ対応した減少傾向を示す。
- ④ 残留強度到達後:残留強度に至った後は、破壊によって形成された分離面周辺にのみ亀裂が発生

するがその発生数は少ない。AE 発生数も同様の傾向を示す。AE 波形の振幅値は再び小さなものが 卓越するようになり、周波数は低いレベルで一定値を呈するようになる。

次に,岩石の破壊過程・AEの挙動に対する拘束圧の影響を検討するために,異なる拘束圧を作用させた三軸圧縮試験を行い,上述と同様の方法で検討を行った。

図 1.1.5 は、ほぼ同一の層準で採取された中粒砂岩の供試体に対して異なる拘束圧(0.5 MPa・6 MPa・ 15 MPa)を作用させた三軸圧縮試験によって得られた応力ーひずみ曲線と AE 発生数(累積)の推移を 示したものである。まず、応力ーひずみ曲線を見ると、拘束圧の増加に伴って、ピーク応力および残 留応力が増加し、ピーク応力から残留応力へ至るまでのネガティブスロープが緩くなっていることが わかる。一方、AE 発生数の推移を見ると、拘束圧が大きい場合(15 MPa)に発生数が高くなっている。



図1.1.5 拘束圧を変化させた三軸圧縮試験の結果

このような応力および AE の挙動と破壊現象との関連性を検討するために, 個別剛体要素法によるシ ミュレーションを行い, 三軸圧縮試験で得られた応力--ひずみ曲線にカーブフィッティングすること で, 亀裂の発生・進展状況を推定した。

図 1.1.6 は、シミュレーションにおいて観測された亀裂累積発生数の推移を(a)全亀裂(引張り亀裂 +せん断亀裂),(b)引張り亀裂,(c)せん断亀裂の別に示したものである。まず、拘束圧が増大するに 従い、供試体内に発生する全亀裂の発生数が増加していることがわかる。また、拘束圧が大きいもの については、特に残留強度以降で多数の亀裂が発生しており、特にせん断亀裂の増加割合が大きい。 このことから、拘束圧が増加すると、広範囲のひずみ領域にわたって破壊が継続され、せん断力によ る破壊が起こりやすくなるものと考えられる。



図1.1.7は、降伏応力やピーク応力といった応力が特徴的な点およびピーク応力以降のひずみ0.2% 毎の点で囲まれた区間における亀裂発生個所を拘束E6MPaの場合と拘束E15MPaについて示したものである。まず、拘束E6MPaの場合については、ピーク応力に達した直後に供試体下部および中央部に明瞭な破壊面が形成され、その後ひずみが増大すると、形成された破壊面周辺部に限りわずかに 亀裂の発生が認められる。一方、拘束E15MPaの場合にも、ピーク応力に達した直後に供試体下部に 明瞭な破壊面が形成されているが、応力は引き続き高い値を維持し、次の破壊面が供試体上部に形成され、その後ひずみがある程度増大した段階において供試体中央部に高角度の破壊面が形成されるといった逐次破壊の傾向が認められる。また、破壊面周辺におけるせん断亀裂の発生が顕著になってい



図 1.1.7 拘束圧による亀裂の発生・進展過程の差異(DEM 解析結果)

以上より、拘束圧が大きくなるほど、供試体内に発生する亀裂が増加する傾向にあり、特にピーク 応力後のせん断亀裂の発生が著しい。これは、拘束圧が大きい場合には、拘束圧が小さい場合と比較 して破壊面が形成された後にも破壊面の摩擦力が大きくなるため、破壊面周辺部により大きなせん断 力が発生しやすく、結果としてせん断破壊が他のインタクトな部分へ進行しやすくなるためと考えら れる。

#### 1.1.2.4 堆積軟岩における AE

AE は、硬岩に対しては、空洞周辺の亀裂の発生・進展挙動ならびに応力変化に関する物理的指標として有効であることが明らかになってきているが、軟岩に対しては、原位置測定の困難さ(AE 発生数が少ない、エネルギーが小さく到達距離が短い等)から計測事例が少なく、AE の物理的指標として有効性が明らかになっていない。そこで、筆者らの研究グループは、幌延で採取された新第三紀堆積軟岩のボーリングコアを用いて高剛性三軸圧縮試験時の AE 測定を行い、新第三紀堆積軟岩の AE 特性(発生数、周波数特性など)を硬質岩系のデータと対比しながら分析した。

その結果,3 つの AE パラメータ(AE 発生数・卓越周波数・m 値)の挙動を捉えることにより,供試体が破壊へと至るまでの応力状態の変化と AE を対応付けすることができ,特に卓越 AE 周波数が応力

変化や破壊現象を鋭敏に捉えていることがわかった(試験結果の一部を図1.1.8に示す)。卓越周波数 は降伏応力からピーク応力に達するまでに低下し始め,残留応力に達するまでには低下が終了し一定 のレベルに落ち着く。この変化はいずれの拘束圧においても顕著に見られた。これは、堆積軟岩のよ うな軟質な岩石においてはもともと AE が減衰しやすく、微小亀裂の形成・進展の影響により特に高周 波の AE がセンサーに到達しなくなったためと考えられる。したがって、このパラメータは堆積軟岩に おいて応力変化の評価に非常に有効であると考えられる。



図1.1.8 堆積軟岩を対象とした高剛性三軸圧縮試験における AE パラメータの挙動

# 1.1.2.5 現場計測結果に基づく応力変化と AE パラメータの挙動

#### (1) 計測地点と現場計測の概要

現実の空洞周辺における応力変化とAEパラメータの挙動の関係を把握するために、東京電力㈱神流 川地下発電所の本体空洞掘削時の計測結果<sup>11</sup>について検討を行った。高さ52 m,幅33 m,長さ216 m のこの空洞は、土被り約500mの大深度に、アーチ部および12層のベンチごとに逐次掘削が進められ た。図1.1.9に示すように、空洞周辺の岩盤は中生代に堆積した泥岩や砂岩などの混在岩(90%以上 がCH級)であり、6つの地質に区分することができる。各地質の岩盤物性(弾性係数、破壊強度等)は、 原位置岩盤試験などから得た。また、空洞周辺の初期地圧の主応力軸は垂直方向から約26°傾いてい る。計測は、空洞掘削に先立って周辺に掘削されたボーリング孔内の多数の地点において行った。そ の項目としてはAE、応力変化、変位、亀裂開口量などがある。今回は空洞H断面の4ベンチ位置に水 平に掘削されたH-10計測線上の空洞壁面から3 mの地点において詳細な検討を行った。



図 1.1.9 H 断面空洞周辺地質図

### (2) AE パラメータの挙動と応力変化・ひずみとの関係

H-10 計測線上3 m 地点における応力変化, ひずみ, AE パラメータの計測結果を図1.1.10 に示す。 これらの関係を,予め行った岩石の三軸圧縮試験における AE パラメータの挙動をふまえて検討した。 まず,アーチ部掘削時には AE の発生は見られず,1ベンチ掘削段階になって発生し始める。この際 応力はやや集中し始めるものの,ひずみはほとんど見られない。2ベンチ,3ベンチ掘削時にかけては AE 発生数の増加,高周波 AE の卓越,m値の低下といった応力集中を示す AE パラメータの変化が確認 できるが,実際極めて高い応力が集中しているのがわかる。4ベンチ,5ベンチ掘削時に AE 発生数は ピークを迎え,卓越周波数は高いレベルを,m値は低いレベルを維持している。これは岩盤にかかる 応力がピーク強度に達し,破壊の直前であることを示している。またこのことはひずみが急激に増大 していることからもわかる。6ベンチ,7ベンチ掘削段階になると,AE 発生の収束,低周波 AE の卓越, m値が急激な増加(反転現象)などから岩盤が破壊に至ったものと考えられる。その後の掘削におい て応力やひずみが一定のレベルを維持していることからもこの地点の岩盤の破壊が終結したことがわ かる。以上のことから,AE の各パラメータの挙動が岩盤の応力変化を精度良く捉えていることが確か められた。



図 1.1.10 H-10 計測線上 3m 地点での計測結果

# 1.1.2.6 粒状体個別剛体要素法を用いた空洞掘削解析

粒状体による個別剛体要素法(DEM)を用いた空洞の逐次掘削シミュレーションを行い、ベンチ掘削の各段階での応力状態や亀裂の発生状況を把握した。また解析結果を計測結果と比較することでその妥当性を確かめ、AEパラメータとの関連性もふまえてEDZの形成および進展の過程について考察を行った。図1.1.11に(a)差応力および(b)微小亀裂の分布を掘削段階ごとに示す。まず1ベンチ、2ベンチ掘削時には掘削ベンチの壁面付近に応力の集中が見られ、応力集中領域において微小亀裂が発生し始める。この段階では引張力による亀裂が卓越している。3ベンチ掘削時には応力集中および微

小亀裂発生の範囲が拡大する。4 ベンチ掘削段階になると応力集中領域が壁面から離れた位置へと移 行し始め、それに伴って微小亀裂がより岩盤深部でも発生するようになる。この際発生する微小亀裂 は地質の境界周辺に集中しており、岩盤の不連続面を中心に破壊面が形成されつつあることがわかる。 つづく5ベンチ掘削時には応力集中領域はさらに岩盤深部へと移行し、壁面近傍において応力が低下 した領域(ゆるみ領域)が形成されている。また、破壊面に沿って比較的規模の大きな微小亀裂が集 中的に発生し、 亀裂が進展していく様子が捉えられている。6 ベンチ掘削完了段階で破壊面における 亀裂の進展はほぼ終結し、さらに深部の地質境界に沿ってせん断力による微小亀裂が新たに発生し始 めるが、その規模は小さなものである。解析により以上のような応力の再配分過程および微小亀裂の 発生・進展過程を把握することができた。次に、解析結果の妥当性を確認する。まず亀裂の状況につ いては、H-10計測線においてボアホールテレビにより観測された亀裂開口量の分布(図1.1.12)と比 較する。観測結果では、3ベンチ掘削時の亀裂発生は壁面近傍のみであり、6ベンチ掘削段階になると 亀裂発生が岩盤深部に及ぶとともに、壁面近傍の亀裂がさらに開口しているが、解析結果がこれと良 く一致した挙動を示していることがわかる。また応力に関しては、H-10計測線上3m地点における変 化量を比較する(図1.1.13)。図中には有限要素法(FEM)を用いたひずみ軟化解析の結果もあわせて 表示してある。実測結果を見ると、3 ベンチ掘削時に応力集中がピークを迎えた後、掘削の進行に伴 って徐々に低下している。解析結果のうち FEM の場合は、応力変化の傾向は捉えているものの、ピー ク時のレベルやその時期および低下時の様子などが実測結果とやや異なっている。一方、本研究で用 いた DEM の場合は、そのような細かな部分まで実測結果と極めて良く一致していることがわかる。こ れは、FEM の場合に比べ個々の要素(粒子)を非常に細かく設定したことで、粒子間に発生する微小 亀裂の影響が逐次反映されたためであると考えられる。以上の比較により、解析結果が十分妥当なも のであったといえる。最後に、各 AE パラメータの物理的意味に基づいて、計測により得られた AE パ ラメータの挙動と解析により得られた破壊現象に関するパラメータの挙動とを比較し(図 1.1.14), 応力変化をふまえて考察を行った。まず(a)のAE発生数と微小亀裂の発生数については、微小亀裂 の発生に伴ってAEが発生するという直接的な関わりがあるため、両者とも応力集中に伴って増加し、 破壊後の応力低下に伴って収束するという傾向がみられた。次に (b) の卓越周波数と空隙率について は、応力が集中する段階で空隙率がやや減少する(岩盤が緻密になる)ため、高周波 AE が卓越するよ うになるが、岩盤が破壊に至ると空隙率が増加するため、高周波 AE が遮断され、結果的に卓越周波数 は低下するという関係が示された。また(c)のm値と微小亀裂の発生時開口量については、岩盤が破 壊に至る過程において,発生する微小亀裂の規模が大きくなるため,振幅の大きな AE が発生する割合 も多くなり、m 値は低下するが、破壊が終結すると微小亀裂の規模は小さくなるため、振幅の大きな AE はほとんど発生せず,m値が急激に増加するという関係が示された。

以上,線上の空洞壁面から3mの地点において詳細な検討を行った結果から,各AEパラメータの挙動が示す物理的意味をより明確にすることができたといえる。



#### 1.1.2.7 岩盤の破壊挙動の分析

ここでは、空洞掘削時の周辺岩盤において発生する破壊現象の進展をより定量的に評価する手法を 構築するため、原位置で計測された AE パラメータの挙動と数値解析による応力変化を詳細に対比する ことにより、岩盤の破壊挙動の分析を行った。

AE パラメータとしては AE 発生数に着目し, FEM により算定した空洞周辺の岩盤要素における応力径路との関連性について, AE 発生および AE 進展の2つの応力レベルと Kaiser<sup>20</sup>らが提唱するスポーリ

ング限界 (spalling limit)の概念を用いて,前項と同様の実際の地下空洞掘削時に計測された原位 置岩盤挙動の分析を行った。

#### (1) 岩石の破壊過程と AE 発生の関係

粒状体による個別剛体要素法 (DEM) を用いた空洞の逐次掘削シミュレーションを行い, ベンチ掘削 の各段階での応力状態や亀裂の発生状況を把握した。また解析結果を計測結果と比較することでその 妥当性を確かめ, AE パラメータとの関連性もふまえて EDZ の形成および進展の過程について考察を行 った。岩盤を構成する岩石は, 微視的に見れば空隙やマイクロクラックなどの潜在的な亀裂を内在す る。これらの潜在的な亀裂は, 岩石がある応力状態に達した際に進展を開始し, その際に AE を発生す る。既往の多数の室内試験による研究事例<sup>3)~10</sup>から, 岩石の破壊過程と AE の発生の関係については, 以下に示す4 つの特徴が確認されている。

- ①応力レベルが, 概ね一軸圧縮強さの 0.3~0.5 倍を超えた段階でマイクロクラック(AE)が発生し 始める<sup>3),4),5),6)</sup>。
- ②供試体に発生するマイクロクラックは、主に最大主応力と平行な方向に形成される。これは、体積ひずみの膨張挙動<sup>7</sup>、顕微鏡による供試体の直接観察<sup>8</sup>および数値解析(例えば、DEM)結果<sup>9</sup>からそれぞれ確認されている。
- ③応力レベルが, 概ね一軸圧縮強さの 0.7~0.8 倍を超えた段階でマイクロクラックが互いに連結し 始める<sup>7),10)</sup>。

④応力レベルがピーク強度に到達した後に、供試体に明確な破断面が形成される。

Martin<sup>6)</sup>は、これらの特徴から、岩石レベルでの応力状態(軸差応力)と亀裂の進展段階の関係を 模式的に整理している。図1.1.15に、岩石一軸圧縮試験における応力--ひずみ関係とその載荷過程に おける亀裂進展のイメージ図を示す。



図 1.1.15 岩石一軸圧縮試験における応カーひずみ関係と亀裂進展のイメージ<sup>6</sup>

ここで、*σ*<sub>cc</sub>は既存亀裂が閉口する応力レベルを示し、*σ*<sub>ci</sub>は岩石内に新規のマイクロクラックが発

生する応力レベル(亀裂発生応力レベル)を示す。 $\sigma_{cd}$ は亀裂同士が連結することによりマクロな亀裂の進展が開始する応力レベル(亀裂進展応力レベル)を示し、最終的にはピーク強度 $\sigma_{c}$ に達して破壊に至る。この一連の載荷過程における岩石からのAEの発生は、まず $\sigma_{ci}$ において開始し、 $\sigma_{cd}$ に到達すると急激に増加し、ピーク強度 $\sigma_{c}$ 付近に到達した時点で最大となっており、載荷過程での亀裂の発生・進展はAEの発生状況と密接に対応している。

ここで示される3段階の応力レベル(亀裂発生応力レベル, 亀裂進展応力レベル, ピーク強度)は, 岩石における微視的な破壊過程の進展を評価する重要な値となる。

亀裂発生応力レベルは、1.1.2.3 で示した DEM による岩石試験のシミュレーション解析において確認された微小な引張亀裂が一様に発生し始める状態を示すものであり、新規の微小な亀裂の発生に伴い AE が発生し始める応力レベル(AE 発生応力レベル)に相当する。また、亀裂進展応力レベルは、 DEM において確認された複数の亀裂の結合に伴うマクロなせん断破壊が生じ始める状態を示すものであり、マクロな亀裂の進展に伴い AE の発生が急増し始める応力レベル(AE 進展応力レベル)に相当する。この AE 進展応力レベルは、岩石材料においてマクロな塑性変形が開始する「降伏応力」に対応する。

#### (2) AE 発生応力レベルと AE 進展応力レベル

1.1.2.3 で示した室内岩石試験結果から、応力状態の変化に伴う岩石材料での AE の発生モードは、 その載荷過程に応じて特徴的に変化することが確認されている(図 1.1.16)。



#### 図 1.1.16 岩石の載荷過程における AE パラメータと亀裂発生挙動

これらの AE 発生モードの変化に対応する規準(しきい値)を設定することができれば、岩盤内の応力状態の変化を AE によって定量的に評価することが可能となる。

Martin<sup>6)</sup>は、三軸応力下でのインタクトな岩石供試体における亀裂発生応力レベル(しきい値)が 次式で定義できることを室内試験により確認している。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (0.4 \pm 0.05) \sigma_c \tag{1.1.1}$$

ここに, σ。は岩石の一軸圧縮強さを示す。

式 (1.1.1)において  $\sigma_{o}$ に掛かる定数について、Cai ら<sup>11)</sup> は、岩石の場合、粒径が大きい場合では 0.4~0.5、小さい場合では 0.5~0.6、節理性岩盤の場合、節理密度が低い場合では 0.4~0.5、高い場合では 0.5~0.6 となることを示している。

この岩石における亀裂発生応力レベルの概念を原位置岩盤に適用する場合、原位置では節理や弱層
などの不連続面が存在するため、岩盤としての力学特性はこれらの影響を大きく受けることになるため、原位置での力学試験や計測データに基づいて適切なしきい値を設定しなければならない。岩盤内の亀裂発生応力レベルを原位置計測データから分析する場合、取り扱う事象が微視的なマイクロクラックの挙動であることから、岩盤変位計などのひずみ量から分析することは困難であり、AE計測結果を用いることが最も的確であると考えられる。

本研究では、図 1.1.15 に示した岩石における亀裂の発生および進展と載荷応力との関係を原位置岩盤に拡張して適用するため、式 (1.1.1)におけるインタクトな岩石の一軸圧縮強さ $\sigma_c$ を不連続面の影響を包含した岩盤としての一軸圧縮強さ $\sigma_{cm}$ に置き換え、以下の式で一般化して検討を進めることとした。

AE (亀裂) 発生応力レベル ( $\sigma_{ci}$ ):

$$\sigma_1 - \sigma_3 = A \ \sigma_{\rm cm} \tag{1.1.2}$$

AE(亀裂)進展応力レベル ( $\sigma_{cd}$ ):

 $\sigma_1 - \sigma_3 = B \sigma_{\rm cm} \tag{1.1.3}$ 

ここに、 $\sigma_{cm}$ は岩盤の一軸圧縮強さを示し、不連続面が全く存在しない場合、この $\sigma_{cm}$ は岩石の一軸圧縮強さと一致することとなる。定数AおよびBは、材料特性の影響を受ける低減係数である。

AE (亀裂) 発生および進展の各応力レベルが,式 (1.1.2)および (1.1.3)のように $\sigma_1 - \sigma_3$ 空間において線形関係で表わされることについては、Kachanov<sup>12)</sup>, Horii and Nemat-Nasser<sup>13)</sup>, Ashby and Hallam<sup>14)</sup> により、マイクロメカニクス理論によって示されている。

ここでの、岩盤としての一軸圧縮強さ σ<sub>cm</sub>および定数 A および B は、対象となる地点毎に設定され るものであり、不均質な地質条件下であれば測点毎に決定する必要がある。そして、これらの定数を 適正かつ普遍的に決定することが、空洞掘削時の計測管理に適用する上で重要となる。

そこで、まず、地下空洞掘削時に原位置での AE 計測を実施した既往の事例を整理し、AE 発生および進展の各応力レベル(式(1.1.2)および(1.1.3))における定数 A および B の範囲について分析を行った。

① カナダ原子力公社(AECL)の地下研究施設(URL)

AECL の URL における試験トンネルは、地下 420 m に位置し、長さ 46 m、内径 3.5 m の坑道であり、掘削線に沿ってラインドリリングを行い、機械掘削により施工された<sup>15)</sup>。URL 付近に分布する花崗岩は、硬質で節理等の不連続面が少なく、原位置岩盤の一軸圧縮強さ $\sigma_{cm}$ は 150~160 MPa 程度と報告されており<sup>16)</sup>、室内試験から求めた岩石の一軸圧縮強さ( $\sigma_{c}$ =224 MPa)の 70%程度となっている。Martin ら<sup>17)</sup>は、応力径路と AE 計測データの対比を行うことで、AECL の URL 地点における AE 発生および進展の各応力レベル式の定数 *A*、*B* の範囲は、*A* = 0.44~0.47、*B* = 0.9~1.0 であると報告している。

② スウェーデン核廃棄物処理会社(SKB)の地下研究施設

SKB の Äspö 硬岩研 (HRL) での試験サイトは地下 420 m に位置し,TBM による機械掘削区間と発破掘 削区間の双方で掘削時の AE 計測が行われた。試験サイト周辺に分布する閃緑岩 (diorite)は、インタ クトな岩石の一軸圧縮強さ  $\sigma_c$ が 195 MPa 程度の硬岩であるが、ある程度節理が発達し、一般的な岩盤 分類指標 (RMR 値<sup>18)</sup>、Q値<sup>18)</sup>、GSI 値<sup>19)</sup>)により評価した場合、ボーリングコアでの平均 RMR 値で 72 程度、平均 Q値で 24 程度の岩盤である。GSI 値については、Cai ら<sup>20)</sup> により 6 カテゴリーに拡張して 定量化された評価チャートを使用した場合,73と評価されている。

Emsley ら<sup>21)</sup> によれば、ÄspöのHRL での亀裂発生応力レベル式におけるA値は0.55と報告している。 これを式(1.2.1)に示されたインタクトな岩石一軸圧縮強さを用いて整理した場合、σ。の係数は0.13 となり、カナダ URL での同係数 0.33 を大きく下回る結果となった。この原因は、AE の発生が開始す る際のメカニズムには、AECL の URL で認められるような引張破壊によるマイクロクラックの発生機構 の他に、後述する壁面近傍の低拘束圧下において発生する破壊機構(スポーリング破壊)が存在する ためと解釈している。これらの解釈については、次節にて述べる。

③ カナダ SNO(Sudbury Neutrino Observatory)空洞

SNO 空洞は、カナダ Creighton 鉱山の地下深部 2,070 m に位置する最大高さ 30.8 m,内径 23 m の樽 型地下空洞である。計測が行われたサイト周辺に分布する細粒の斑レイ岩 (norite) 層は、岩石の一軸 圧縮強さ  $\sigma_c$ が 225 MPa, RMR 値が 61~81 程度、GSI 値が 81 程度の節理性岩盤である<sup>22)</sup>。

AE 計測データに基づき算定した SNO 空洞における *B* 値は, 0.88~1.0 と評価されている<sup>11)</sup>。なお, 当該地点では AE 計測の開始時期が遅かったため, *A* 値は評価されていない。

④ カナダ Creighton 鉱山

SNO 空洞と隣接するニッケル採鉱のための Creighton 鉱山の深部坑道においても、AE 発生および進展応力レベルについて分析を行っている<sup>23)</sup>。Creighton 鉱山の試験サイトの岩盤はSNO 空洞と同様で、 岩石の一軸圧縮強さ $\sigma_{e}$ が 250 MPa, GSI 値が 80~85 程度の節理性岩盤である。

AE 計測データに基づき算定した Creighton 鉱山における A 値は 0.53 程度, B 値は 0.8~1.0 と評価 されている。

以上の原位置計測結果を整理すれば, AE 発生および進展の各応力レベル式と定数の範囲は, 以下の 式で一般化することができる。

AE 発生応力レベル (
$$\sigma_{ci}$$
):  
 $\sigma_1 - \sigma_3 = A \sigma_{cm}$  ( $A = 0.4 \sim 0.6$ ) (1.1.4)

AE 進展応力レベル ( $\sigma_{cd}$ ):

$$\sigma_1 - \sigma_3 = B \ \sigma_{\rm cm} \qquad (B = 0.8 \sim 1.0) \tag{1.1.5}$$

#### (3) スポーリング限界<sup>2)</sup>

Kaiser ら<sup>2)</sup>は、脆性的な破壊挙動を示す硬岩において、低拘束圧条件で圧縮を受けた場合、地質の 不均質性に起因して壁面近傍において最大主応力方向に平行な亀裂が発生し、それらが結合すること による破壊現象(spalling 破壊)が生じる場合があることを報告している。このスポーリング破壊の概 念は、岩石供試体の三軸圧縮試験において不均質性に起因して生じる低拘束圧条件下の割裂破壊 (split failure)<sup>24,25)</sup>と類似した破壊現象である。

図1.1.17に、Kaiserら<sup>2)</sup>が示す硬岩での破壊形態のイメージと破壊包絡線の概念を示す。

これに拠れば、硬岩の場合の破壊形態は、従来のせん断破壊、引張破壊とは別にスポーリング破壊を加えた3つで構成されることを示している。Kaiser ら<sup>2)</sup>は、このスポーリング破壊時の破壊規準(スポーリング限界:spalling limit)について、 $\sigma_1 / \sigma_3$ が一定となる以下の式で一般化できることを原位置での計測結果により確認している。

$$\sigma_1 / \sigma_3 = 10 \sim 20$$
 (1.1.6)

JAEA-Research 2008-042



図 1.1.17 硬岩での破壊形態イメージと破壊包絡線の概念<sup>2)</sup>

上式における  $\sigma_1 / \sigma_3$ の値について, Kaiser ら<sup>20</sup>は,岩盤の不均質性や潜在的な亀裂の発達度によって変化し,節理が発達する岩盤において 10 程度,インタクトな岩盤において 20 程度と報告している。実際のトンネル壁面においてスポーリング破壊が発生している例を,図 1.1.18 に示す。



# 図 1.1.18 高地圧下トンネルでのスポーリング破壊の例<sup>2)</sup>

ここでのスポーリング限界は、低拘束圧条件下の圧縮応力場においてスポーリング破壊が発生し始める応力レベルと対応するものであり、これを超える応力状態となった場合、破壊現象の発生に伴う 顕著な AE が発生することとなる。

本研究で対象としている神流川地点における岩盤も, 脆性的な破壊挙動を示す硬岩に属することから, AE 計測データに基づき岩盤の応力状態を評価する上で, スポーリング限界の概念は AE 発生応力 レベルおよび AE 進展応力レベルと共に重要となる。

本研究では、1.1.2.7(2)で述べたAE発生およびAE進展の各応力レベルにスポーリング限界を加え、 これらに基づく空洞周辺岩盤の応力径路とAEの挙動を対比・分析することとした。

## (4) 原位置 AE 挙動と応力径路の関連性の分析

ここでは、空洞掘削時の周辺岩盤において発生する破壊現象の進展を数値解析により定量的に評価 する手法を構築するため、神流川地点の空洞掘削時に計測された原位置のAE 挙動と数値解析による応 力変化を,AE発生およびAE進展の各応力レベルとスポーリング限界に基づいて対比することにより、 両者の関連性の分析を行った<sup>1)</sup>。

① 応力径路算定のための解析モデル

応力径路を推定するための数値解析モデルは、空洞掘削時の設計および計測管理において実績があるひずみ軟化モデルによる2次元非線形 FEM 逐次掘削解析<sup>26),27)</sup>を採用した。FEM によるシミュレーションに用いた解析コードは、Rocscience Inc. によって開発された Phase<sup>2</sup>を使用した。

AE センサー設置位置での応力径路は、空洞周辺の地層区分と掘削順序および実際に施された支保工 をモデル化した逐次掘削解析により算定し、掘削過程に沿って AE 発生数と共に応力径路上にプロット することで、AE 発生および AE 進展の各応力レベルとスポーリング限界の分析を行った。

解析モデルについては、空洞周辺に分布する岩盤の力学的特性の違いを考慮し、地層を8層に細区 分した不均質モデルとし、さらに放水路側に存在する連続性の高い分離面(レンズ層)を薄層として モデル化した。空洞周辺部の地層区分と解析に使用した解析メッシュを図1.1.19に示す。



図 1.1.19 空洞周辺の地層区分と FEM 解析メッシュ(H 断面)

解析を行った断面は、AE 計測を実施したH断面とした。

岩盤物性値については、室内岩石試験結果と原位置での地山区分を用いて GSI 値により評価した。 地山区分毎の解析用物性値を表 1.1.2(a) (b) に示す。

		笙碼弾性	2半小牛/玄米/	
地民区八		守屾泮正		++
地層区分	431 10	1杀蚁	(理用件作厂)	ホアウン比
		(GPa)	(GPa)	
S1a	<u> </u>	-	30	0. 25
CG1	74	40	60	0. 25
S2	65	24	30	0. 25
CG2	65	24	60	0. 25
FS1	65	24	30	0. 25

表 1.1.2(a) 解析用物性值一覧表 (弾性係数)

地層 区分	691 値	ピーク強度		残留強度		ー軸圧縮 強さ	引張強度
	001 恒	c <sub>p</sub> (MPa)	Φ <sub>p</sub> (°)	c <sub>r</sub> (MPa)	φ <sub>r</sub> (°)	σ <sub>cm</sub> (MPa)	$\sigma_{tm}$ (MPa)
S1a	-	3.4	57	0.5	49	23	0.4
CG1	74	4.1	57.8	0.5	49	28.5	0.6
S2	65	3.7	57.5	0.5	49	25. 2	0.4
CG2	65	3.7	57.5	0.5	49	25. 2	0.6
FS1	65	3. 1	56.4	0.5	49	20. 2	0.2
FS2	65	3.4	57	0.5	49	23	0.4

表 1.1.2(b) 解析用物性值一覧表(強度)

GSI システムは、節理性岩盤を対象とした岩盤評価手法として、Hoek ら<sup>19)</sup> により提案されたもので あり、不連続面により形成される地盤の構造性(Block Size)と不連続面の表面性状(Wall Condition) から GSI 値(Geological Strength Index)を決定し、その GSI 値と岩石の一軸圧縮強さから原位置岩盤 の強度・変形特性を算定するものである。GSI 値は、極めて悪い岩盤からインタクトな岩石までを 0 ~100 の数値指標によって分類するものである。今回検討に使用したものは、オリジナルの GSI 値の 考え方に基づき、Cai ら<sup>20)</sup> によりブロックサイズを 6 カテゴリーに拡張して定量化した評価チャート を使用した。適用した修正 GSI 評価チャートを図 1.1.20 に示す。



図 1.1.20 定量化した修正 GSI 評価チャート<sup>19)</sup>



#### ② 関連性の分析結果

ここでは、神流川地点の地下発電所空洞<sup>1)</sup>における H 断面の放水路側肩部(H3 測線),放水路側側 壁部(H5 測線)および鉄管側肩部(H2 測線)での実測の AE 発生数と解析による応力径路の関連性に ついて分析した結果について述べる。

H 断面における AE 計測線の配置と空洞の掘削ステップを図 1.1.21 に示す。また,天井アーチ部お よび側壁部のそれぞれの AE センサー設置深度を図 1.1.22 に示す。

空洞の掘削は、まず、天井アーチ部の頂設導坑(A1)の掘削を行い、2回のステップに分けて天井ア ーチ部の切り拡げを行い(A2, A3)、その後、1段3m程度のベンチ掘削を12ステップに分けて実施 した(1~12ベンチ)。挙動分析はこれらの掘削ステップ毎に集約した計測データを用い、数値解析も これらの掘削ステップを考慮した逐次掘削解析とした。

a) H3 測線(放水路側肩部)

図1.1.23(a) (b) にH3 測線における AE センサー設置位置での数値解析により算定した応力径路と空 洞掘削時の実測の AE 発生数を示す。AE 発生数については、空洞の掘削ステップ毎に集計し、各深度 での応力径路上にプロットした。ここでの各プロットにおける円の面積は、AE 発生数の大きさを示し ている。主要なポイントでは AE 発生数の値と該当する掘削ステップを記載した。

H3 測線の岩盤は、一軸圧縮強さ $\sigma_{cm}$ = 20.2 MPa 程度の連続性の高い不連続面を含む細粒砂岩層(FS1 層)中に位置している。掘削の進行に伴う AE 発生数の変化に着目すると、図 1.1.23(a)より Ch1~Ch6 (深度 1.5~6.5 m) センサー位置では天井アーチ部切り拡げ(A2)掘削時に、また同図(b)より Ch7(深 度 7.5 m)以深のセンサー位置では同(A3)掘削時にそれぞれ AE が発生し始めており、これらの結果から、H3 測線(細粒砂岩層)での AE 発生応力レベル(式(1.1.4))は $\sigma_1 - \sigma_3 = (0.5 \sim 0.55) \sigma_{cm}$ と設定できる。なお、同図中には $\sigma_1 - \sigma_3 = 0.55 \sigma_{cm}$ とした場合の AE 発生応力レベルのラインを青破線で記載した。

次に, 掘削中に AE 発生数が顕著に増大している Ch1~Ch7 (深度 1.5~7.5 m)のセンサーの AE 発 生数および卓越周波数の経時変化を図 1.1.24(a)(b)に示す。ここでの各プロットにおける円の面積は, AE 発生数の大きさを示している。また,主要なポイントについては, AE 発生数の数値を併記した。



図 1.1.23(b) H3 測線の応力径路と AE 発生数(Ch7~12:深度 7.5~12.5m)

同図より, Ch1~Ch3 (深度 1.5~3.5 m)のセンサーでの AE 発生数および卓越周波数は, 天井アー チ部切り拡げ(A3)掘削時にピークを示し, その後は低下する傾向(図中青破線)を示していることが 確認できる。したがって, これらのセンサー位置での岩盤は, 天井アーチ部切り拡げ(A3)掘削時に破 壊に至ったものと解釈できる。

これらの挙動を図 1.1.23(a) に示す応力径路と対比した場合, Ch1(1.5 m) と Ch2(2.5 m) のセンサー 位置では, 天井アーチ部切り拡げ(A2) 掘削時に AE 進展応力レベルに達し, 同(A3) 掘削時にせん断破壊 あるいはスポーリング破壊に至っていると推察される。また、Ch3(3.5 m)センサー位置では、同(A3) 掘削時にせん断破壊あるいはスポーリング破壊に至っていると推察される。

一方, Ch4~Ch7(深度 4.5~7.5 m)のセンサー位置での卓越周波数は、上昇あるいは一定の傾向を示していることから、当該深度における岩盤は AE 進展応力レベルに達していないものと考えられ、図 1.1.23(a)(b)に示した応力径路が AE 発生応力レベルと AE 進展応力レベルの間に留まっていると解釈できる。

以上の分析結果から、Ch3(3.5 m)のセンサー位置での天井アーチ部切り拡げ(A3) 掘削時の破壊をせん断破壊と仮定すれば、AE 進展応力レベルは $\sigma_1 - \sigma_3 = (0.9 \sim 1.0) \sigma_{cm}$ 、スポーリング破壊と仮定すれば、AT ポーリング限界は $\sigma_1 / \sigma_3 = 5 \sim 10$ と推定される。なお、図 1.1.23 には、AE 進展応力レベルを  $\sigma_1 - \sigma_3 = 0.9 \sigma_{cm}$ 、スポーリング限界を $\sigma_1 / \sigma_3 = 5$ および 10 とした場合のラインを、それぞれ赤実線および紫破線で記載した。



図 1.1.24(a) AE 発生数および卓越周波数の経時変化(Ch1~3:深度 1.5~3.5m)



図 1.1.24(b) AE 発生数および卓越周波数の経時変化(Ch4~7:深度 4.5~7.5m)

次に, 天井アーチ部切り拡げ(A3) 掘削終了時の当該測線近傍での岩盤の破壊現象の進展状況について,同(A3) 掘削終了時に H3 測線近傍ので実施した円錐孔底ひずみ法による絶対応力測定結果を用いて 検証した。絶対応力測定は, 空洞壁面から深度 1.65~10.6 m 区間の 5 点で実施している。

図 1.1.25 に、数値解析により算定した最大主応力と絶対応力測定による実測の最大主応力を示す。 数値解析については、ひずみ軟化モデルによる二次元非線形 FEM(ひずみ軟化解析)と線形弾性 FEM により算定した深度分布を記載した。



図 1.1.25 天井アーチ部切り拡げ(A3) 掘削終了時の壁面近傍での最大主応力分布 (H3 測線: 放水路側肩部)

同図より,原位置での計測応力は,空洞壁面から5m以浅で低下しており,天井アーチ部きり拡げ (A3)掘削終了時には空洞壁面から最大5mまでの範囲において岩盤の破壊が発生し応力再配分が進行 していることが確認できる。この現象は,数値解析による応力分布において,破壊強度を考慮したひ ずみ軟化解析結果が,壁面近傍の3.5m以浅において線形弾性FEMによる解析結果を下回ることと整 合するものである。

以上の分析結果から,H3 測線での AE 発生状況は、その応力径路が AE 発生および AE 進展の各応力 レベルおよびスポーリング限界に到達することによって顕著に変化することが確認され、これらの応 カレベルとスポーリング限界を設定することで応力径路上での AE 発生数の変化を的確に評価できる ことが明らかになった。

なお、神流川地点における細粒砂岩層 (FS1 層) での AE 発生および AE 進展の各応力レベルの定数 A, B はそれぞれ 0.5~0.55, 0.9~1.0 と評価できることから、式 (1.1.4)~ (1.1.5) に示した既往の事 例による変動幅と対応することが確認できた。しかし、スポーリング限界の値については、Kaiser<sup>2)</sup> らの提唱する  $\sigma_1 / \sigma_3 = 10 \sim 20$  よりも小さな値となった。この原因については、神流川地点での H3 測 線での岩盤(一軸圧縮強さで 23 MPa 程度)と Kaiser ら<sup>2)</sup> が対象にした鉱山地点の岩盤(一軸圧縮強 さで 70~100 MPa)との間に、強度や節理の発達度といった地質条件の差があることに起因している ものと解釈できる。

#### b) H5 測線(放水路側側壁部)

次に、H5 測線深部における Ch7~Ch12 (深度 10.5~20.4 m)のセンサー位置での数値解析により算 定した応力径路と空洞掘削時の実測のAE 発生数を図 1.1.26 に示す。H5 測線の壁面から深部の岩盤は、 一軸圧縮強さ  $\sigma_{cm}$ = 23.0 MPa 程度の比較的マッシブな細粒砂岩層 (FS2 層)に位置する。同図から、1 ベ ンチ(B1) 掘削時に、応力径路が AE 発生応力レベル  $\sigma_1 - \sigma_3 = (0.5 \sim 0.55) \sigma_{cm} を超え、AE が発生し始 めることが確認できる。なお、同図中では <math>\sigma_1 - \sigma_3 = 0.51 \sigma_{cm}$  とした場合の AE 発生応力レベルのライ ンを青破線で記載した。このように、壁面から深部のセンサーにおいて AE が発生する場合についても、AE 発生応力レベルを設定することで応力径路上での AE の発生開始を的確に評価できることが明らか になった。



図 1.1.26 H5 測線深部での応力径路と AE 発生数(Ch7~12: 深度 10.5~20.4m)

c) H2 測線(鉄管側肩部)

さらに、スポーリング限界について、その挙動を確認できる例として、H2 測線における Ch7~Ch12 (深度 7.5~12.5 m)のセンサー位置での数値解析により算定した応力径路と空洞掘削時の実測の AE 発生数を図 1.1.27 に示す。



図 1.1.27 H2 測線深部の応力径路と AE 発生数 (Ch7~12: 深度 7.5~12.5m)

H2 測線の壁面から深部の岩盤は、一軸圧縮強さ $\sigma_{cm}$ =28.5 MPa 程度のマッシブな礫岩および粗粒砂 岩層(CG1層)に位置する。

同図中には、 $\sigma_1 - \sigma_3 = 0.45 \sigma_{cm}$ とした場合の AE 発生応力レベルのラインを青破線で記載した。また、スポーリング限界を $\sigma_1 / \sigma_3 = 5$ および 10 のラインも併せて記載した。

同図より, Ch7~Ch9(深度 7.5~9.5 m)のセンサー位置では、応力径路が一旦 AE 発生応力レベル を超え、その後の掘削ステップの進行に伴って再び AE 発生応力レベル以下に低下したにも拘らず継続 的に AE が発生していることが確認できる。

この現象は、低拘束圧下での圧縮応力場での AE の発生を示しており、AE 進展応力レベルによって は説明できないが、スポーリング破壊の発生(スポーリング限界の存在)を仮定すれば応力径路上で の AE 発生数の変化と整合する。すなわち、岩盤の不均質性が局所的な引張亀裂を発生させ、これらの 引張亀裂の発生および進展により継続的な AE が発生したものと解釈できる。

このように、応力径路と AE 発生数の変化の関連性の分析において、スポーリング限界の概念を導入 することで、AE 発生応力レベルのみでは評価困難であった低拘束圧下の圧縮応力場における顕著な AE 発生挙動を解釈できることが確認できた。

これらの関連性の分析を神流川地点での他の測線に対しても実施した結果,空洞掘削時の周辺岩盤 における応力径路は,AEの発生挙動との関連で,図1.1.28に示すような幾つかのパターンに分類で きることが明らかになった。



図 1.1.28 空洞周辺岩盤の応力径路と AE 発生パターン(概念図)

・応力径路 a:最初に AE 発生応力レベルを超え、次に AE 進展応力レベルに達して AE 発生数が急増 し、破壊に至るケース。このうち、破壊はせん断破壊に至る場合(径路 a-1)とスポ ーリング破壊に至る場合(径路 a-2)がある。

・応力径路 b: AE 発生応力レベルを超えた後、スポーリング限界に達して AE 発生数が急増し、破壊 に至るケース。このとき、スポーリング破壊は岩盤の局所的不均質性に起因して発生 するため、スポーリング破壊が発生せず引張破壊に至る場合(径路 b-1)とスポーリ ング破壊に至る場合(径路 b-2)がある。

・応力径路 c:応力径路が AE 発生応力レベルを超えるときに AE の発生は見られるが,応力状態がし きい値以下に低下すると AE の発生も無くなるケース。

・応力径路 d: AE 発生応力レベルを超えていないため、AE の発生は見られないケース。

これにより,空洞周辺岩盤において掘削ステップの進行に伴う AE 発生数の変化は,AE 発生および AE 進展の両応力レベルとスポーリング限界を設定することで,その応力径路上の破壊挙動と関連付け て,定量的かつ明確に解釈できることが明らかになった。

以上の分析結果から、大規模岩盤空洞掘削時の AE 挙動の計測により、岩盤の応力状態を定量的に把握することができる見通しが得られた。これらの AE 挙動と対応する各種応力レベルの概念と岩盤の応力径路の関係は、空洞周辺の破壊現象の進展の予知に対して非常に有用な情報となる。

#### (5) 岩盤の破壊挙動の分析結果のまとめ

本項では、空洞掘削時の周辺岩盤において発生する破壊現象の進展を数値解析により定量的に評価 する手法を構築するため、原位置で計測された AE パラメータの挙動と数値解析による応力変化を対比 することにより、岩盤挙動の詳細な分析を行った。

まず,岩盤の破壊メカニズムに着目し,AE 挙動と岩盤応力の対応を分析した既往の研究事例を整理 し,空洞掘削時の岩盤の破壊現象の進展過程におけるAEの挙動について検討を行った。そして,数値 解析による空洞周辺の岩盤要素における応力径路と実測のAE発生数の変化との関連性を解明するた めに,AE発生およびAE進展の2つの応力レベルとスポーリング限界の概念を用いて,神流川地点で の空洞掘削時の岩盤挙動の分析を行った。

その結果,空洞掘削時の実測のAE発生状況は,その応力径路がAE発生およびAE進展の各応力レベルおよびスポーリング限界に到達することによって顕著に変化することを確認した。特に,AE発生応力レベルのみでは評価困難であった低拘束圧下の圧縮応力場における顕著なAE発生挙動について,スポーリング限界により解釈できることが明らかになった。

空洞掘削時の周辺岩盤における応力径路は, AE の発生との関連で以下に示す幾つかの典型的なパタ ーンに分類できることを確認した。

具体的に要約すると, a) AE 発生応力レベルを超え, 次に AE 進展応力レベルに達して AE 発生数が 急増し破壊に至るケース, b) AE 発生応力レベルを超えた後, スポーリング限界に達して AE 発生数が 急増し,破壊に至るケース, c) 応力径路がAE 発生応力レベルを超えるときにAEの発生は見られるが, 応力状態がしきい値以下に低下すると AE の発生も無くなるケース, d) AE 発生応力レベルを超えてい ないため, AE の発生は見られないケースの4ケースに大別される。

これにより、空洞周辺岩盤において掘削ステップの進行に伴う AE 発生数の変化は、AE 発生および AE 進展の両応力レベルとスポーリング限界を設定することで、その応力径路上の破壊挙動と関連付け て、定量的かつ明確に解釈できることが明らかになった。これらの AE 挙動と対応する各種応力レベル の概念と岩盤の応力径路の関係は、空洞周辺の破壊現象の進展の予知に対して非常に有用な情報とな る。

なお、神流川地点での AE 発生応力レベル (式 (1.1.4)) における定数 *A*は、細粒砂岩層 (FS1 層お よび FS2 層) において 0.5~0.55 程度、AE 進展応力レベル (式 (1.1.5)) における定数 *B*は、細粒砂 岩層 (FS1 層および FS2 層) において 0.9~1.0 程度、スポーリング限界 (式 (1.1.6)) については、  $\sigma_1 / \sigma_3$ が 5~10 の範囲にあることが、空洞掘削時の挙動分析結果より明らかになった。

# 1.1.2.8 岩盤のカ学ー水理学的連成挙動に着目した評価手法の構築

地層中に注水を行うと、注水による岩盤変位および地下水の間隙圧変化によって微小地震波(第二種 P 波である Biot 波)が発生する現象が知られているが、地熱分野においては、この現象を利用して 貯留層の位置を推定する試みがなされている(図 1.1.29)。すなわち、この微小地震波の発生位置を 経時的に観測することで、岩盤における卓越した透水経路の位置・形状およびその透水性を推定する ものである。



図1.1.29 注水試験時における微小地震波の発生

本研究では、この観測技術によって得られるデータに対して、1.1.3.5 で述べる MDS イメージング 手法を適用することによって、従来行われてきた卓越透水経路の水理物性の推定のみならず、サイト スケールにわたる岩盤の水理地質構造モデルを構築する手法を開発することを目的とする。

## (1) 注水による媒体の変位と間隙圧拡散速度

Biot 理論は、多孔質媒体を構成するフレーム部分(骨格:skeleton とよばれる)と、その間の空隙 をそれぞれ別の波が伝わると仮定して、それらの波の伝播挙動を説明しようとするものである。すな わち、飽和した岩盤中に伝達する弾性波は、弾性波の周波数に応じて岩石構成粒子と間隙水の挙動が 異なり、速度と減衰率が変化する<sup>23),29)</sup>。この理論に基づき、Silinら<sup>30)</sup>は、岩盤における注水試験時 に弾性波が発生するメカニズムを詳細に述べている。

骨格部分の変位をuとすると、Newtonの運動法則によって次式が得られる。

$$\rho_b \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \rho_f \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{1}{\beta} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial p}{\partial x}$$
(1.1.7)

 $\rho_{b}$ : 飽和した媒体の全体密度、 $\rho_{f}$ : 流体の密度、p: 流体圧力、 $\beta$ : 弾性係数

一方、Darcy 速度をW,浸透率を $\kappa$ 、流体の粘度を $\eta$ とすると、非定常状態の場合に次式が成り立つ。

$$W + \tau \frac{\partial W}{\partial t} = -\frac{\kappa}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} - \rho_f \frac{\kappa}{\eta} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$
(1.1.8)

このとき、質量保存則から流体と骨格の質量変化を次式で表すことができる。

$$\frac{\partial \rho_{f} \phi}{\partial t} = -\frac{\partial \left(\rho_{f} W + \phi \rho_{f} \frac{\partial u}{\partial t}\right)}{\partial x}$$
(1.1.9)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( \rho \frac{\partial u}{\partial t} \right)$$
(1.1.10)

 $\phi$ :間隙率, $\rho$ :骨格の密度, $\rho_{f}$ :流体の密度

式(1.1.9)における流体の圧縮率を流体の弾性係数 $\beta_f$ を用いて表すとともに、微小項を省略すると、 次式を得る。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \phi \beta_f \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial W}{\partial x} - \phi \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t}$$
(1.1.11)

一方,骨格の密度と粒子の密度の関係 $\rho = (1 - \phi) \rho_s$ を式 (1.1.10) に代入して,微小項を省略すると,次式を得る。

$$-\frac{\partial\phi}{\partial t} + (1-\phi)\frac{1}{\rho_g}\frac{\partial\rho_g}{\partial t} = -(1-\phi)\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t}$$
(1.1.12)

ここで、粒子の圧縮率は、応力および流体圧力の変化量により次式で表され、

$$\frac{1}{\rho_g} d\rho_g = \beta_{gs} d\sigma_x + \beta_{gf} dp \qquad (1.1.13)$$

 $oldsymbol{eta}_{gs}$ :粒子の圧縮率, $oldsymbol{eta}_{gf}$ :流体の圧縮率

これを式(1.1.12)に代入すると,

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = (1 - \phi)\beta_{gf} \frac{\partial p}{\partial t} + (1 - \phi)\left(1 + \frac{\beta_{gs}}{\beta}\right)\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t}$$
(1.1.14)

となり,式(1.1.11)に代入すると,次式を得る。

$$\left(1+(1-\phi)\frac{\beta_{gs}}{\beta}\right)\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + (\phi\beta_f + (1-\phi)\beta_{gf})\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial W}{\partial x}$$
(1.1.15)

さらに、流体および骨格の圧縮率と比較すると、粒子の圧縮率と流体の圧縮率は極めて小さいので、式(1.1.15)は次式のように表すことができる。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + \phi \beta_f \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial W}{\partial x}$$
(1.1.16)

また、小規模の骨格および流体振動を考慮する場合には、流体の Darcy 速度と骨格の表面変形 (Superficial Displacement)の間に

$$W = \frac{\partial w}{\partial t} \tag{1.1.17}$$

の関係があるので、この式を式(1.1.16)に代入して tに対して積分すると次式が得られる。

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{1}{\phi \beta_f} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{\phi \beta_f} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$$
(1.1.18)

式(1.1.17)と式(1.1.18)を式(1.1.7)と式(1.1.8)に代入すると、最終的に次式が得られる。

$$\rho_{b}\frac{\partial^{2} u}{\partial t^{2}} + \rho_{f}\frac{\partial^{2} w}{\partial t^{2}} = \left(\frac{1}{\beta} + \frac{1}{\phi\beta_{f}}\right)\frac{\partial^{2} u}{\partial x^{2}} + \frac{1}{\phi\beta_{f}}\frac{\partial^{2} \omega}{\partial x^{2}}$$
(1.1.19)

$$\rho_f \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \tau \frac{\eta}{\kappa} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{1}{\phi \beta_f} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1}{\phi \beta_f} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\eta}{\kappa} \frac{\partial \omega}{\partial t}$$
(1.1.20)

これらの式(1.1.19)と式(1.1.20)はBiot 方程式と等しい<sup>28),29),31)</sup>。

ここで、媒体の寸法に対して骨格の変位は微小であるため、式(1.1.7)と式(1.1.8)における変位に 対する時間の2階微分およびDarcy 速度の時間微分については省略することができる。

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1}{\beta} \frac{\partial^2 u}{\partial x} \tag{1.1.21}$$

$$W = -\frac{\kappa}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \tag{1.1.22}$$

また,式(1.1.21)をxで積分し,tで微分すると次式を得る。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x} = \beta \frac{\partial p}{\partial t} \tag{1.1.23}$$

式(1.1.22)と式(1.1.23)を式(1.1.15)に代入すると、次式を得る。

$$\phi(\frac{\beta}{\phi} + \beta_f)\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\kappa}{\eta}\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$
(1.1.24)

この方程式は水理試験の解析によく用いられる圧力拡散方程式である<sup>32),33)</sup>。したがって,Biot 波理 論<sup>23),29)</sup>によれば,注水における岩盤の微小変位と共に発生した振動は,間隙圧の拡散速度と関連性 があり,この岩盤の振動に伴って発生する微小地震波の発生時間および発生位置によって,岩盤にお ける卓越した透水経路を推定することが可能であると考えられる。

## (2) Triggering front と水頭拡散率

注水試験によって、岩盤の各所で微小地震波が発生するが、この発生領域は時間とともに拡大していく。この領域の外周面はTriggering Frontと呼ばれ、微小地震波の時空間分布を表す。ここでは、このTriggering Frontの時間的な変化と水頭拡散率との関連性について述べる。

Biot 方程式<sup>28), 29), 31)</sup>によって, 均質媒体における間隙水圧 pの変化は式(1.1.25)によって示される。

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ D_{ij} \frac{\partial}{\partial x} p \right]$$
(1.1.25)

 $D_{ii}$ :水頭拡散率のテンソル成分, $x_i$ :注水点 – 微小地震波観測点間の距離ベクトル

低周波数の波の場合,この方程式は第二種 Biot 波(緩い P 波)に対応し,間隙水圧の減衰を記述する。 均質等方性媒体の場合には,次式のようになる。

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D\Delta p \tag{1.1.26}$$

式(1.1.26)は、水頭拡散率が注水圧力に依存することを示している。Shapiro<sup>65),66),67)</sup>は、Triggering Front を半径 aの球として仮定することにより式(1.1.26)を解き、次式を得た。

$$p(r,t) = p_0 e^{-\omega t} \frac{a}{r} \exp\left[(i-1)(r-a)\sqrt{\frac{\omega}{2D}}\right]$$
(1.1.27)

r:注水点から微小地震波観測位置との距離, @:角速度

Shapiro<sup>65),66),67)</sup>は、定圧注水条件のもとで式(1.1.27)を簡略化し、注水から微小地震波発生までの時空間距離と水頭拡散率との関連性を導いた。

$$r = \sqrt{4\pi Dt} \tag{1.1.28}$$

#### (3) 既往の微小地震波観測例

自然界においては、降雨や洪水により微小地震波が発生することが知られており、たとえば、ダムの貯水水位の上昇に伴う微小地震波の発生により、断層や破砕帯などを把握した例などがある<sup>34)-45)</sup>。 Simpson ら<sup>46)</sup>はこの微小地震波の発生原因を、岩盤の瞬間的な弾性変化によるものと地下水水頭拡散 の遅延現象によるものの二種類に大別したが Macgarr ら<sup>47)</sup>は、これらの微小地震の発生原因は、水圧 変化とともに水頭拡散によるものであると述べている。

注水試験による微小地震波の観測技術は,1966年に Evans が10 MPa の注水圧力によって小規模地 震が発生したことを報告<sup>48)</sup>して以来,海外で実証されてきた。Fletcher ら<sup>49)</sup>は,岩盤において,1-5MPa 程度の間隙水圧の上昇により微小地震波を誘発できると報告した。

また,微小地震波観測は水圧破砕試験に応用されている<sup>50)-55</sup>。微小地震波観測の利点は,一回の注 水試験によって広域範囲にわたる水理地質構造を把握できる点にある。Philipら<sup>56)</sup>は、アメリカのケ ンタッキー州の地層中で注水試験を実施した。石油の生産井分布を図 1.1.30 に、油井におけるセンサ ーの配置を図 1.1.31 に示す。1 kmの範囲にわたって 3,200 回の微小地震を観測し(図 1.1.32)、岩盤 における卓越した透水経路の存在を確認した(図 1.1.33)。Evan ら<sup>57)</sup>は、深度 3kmの箇所で行われた 水圧破砕試験時に、長さ1 km、幅 500 m の範囲にわたる 12,000 回の微小地震を観測し、7 つの卓越透 水経路の走向・傾斜を推定した。

一方, Snoke ら<sup>88)</sup>は微小地震波の水平方向 S 波(SH) と P 波の Polarity, および各弾性波との間の 震幅比率に基づき,水圧破壊によって発生した亀裂の走向と傾斜を計算した。Reasenberg and Oppenheimer<sup>59)</sup>は発生した地震波 S 波(SH) と P 波の Polarity に基づき,亀裂の走向と傾斜を計算す る解析コードを作成した。このコードを用いて,Rutledge and Philips<sup>60)</sup>は,地下 2.7 kmのガス田に おける岩盤割れ目の走向・傾斜分布を把握した。近年では,新たな微小地震波観測システムを用いて P 波や S 波の初動の向きを解析することにより,せん断方向やせん断面の方向を推定することができ る。この解析方法は「断層面解析」(Fault plane solution)と呼ばれ,地殻内の応力状態の推定に広 く利用されている<sup>61)</sup>。これらの研究では,ボーリング孔の間の水理学的連続性を把握できるが,水理 特性を評価することができない。それに対して,Bob Parney<sup>62)</sup>,Zoback<sup>63),64)</sup>は水圧破砕と共に発生し た微小地震波の周方向速度に基づき,不連続性割れ目モデルを作成し,岩盤の透水係数分布を算出す る試みを行っている。

Shapiro ら<sup>60</sup>は、SBRC (Seismicity Based Reservoir Characterization) という Biot 理論<sup>20,20,31)</sup> に基づく貯水層の水理特性の評価手法を開発した。SBRC では、岩盤における注水による誘発した微小 地震波の Triggering Front の伝達は、飽和状態の不均質・異方向性媒体における水頭拡散(間隙水圧 の釈放)過程と一致するという仮説を用いる<sup>60</sup>。この仮説のもとで、ある位置における微小地震波の Triggering Front 到達時間を標準カーブにより分析し、広域範囲にわたる水頭拡散率分布を評価する ものである。Shapiro ら<sup>67)</sup>は、この方法を用いてドイツの KTB 地熱貯留サイト地下 3 km において、幅 1 km の範囲の水頭拡散率を測定した。Audigane ら<sup>68)</sup>は雄勝の地熱貯留層における 3 次元浸透率を測 定した。その結果、最大を示す方向の浸透率が 1.23×10<sup>-15</sup> m<sup>2</sup> となり、現場透水試験による測定した結 果である 1.00×10<sup>-15</sup> m<sup>2</sup> とよい対応を示した。この方法に基づき、Shapiro ら<sup>69),70)</sup>は、不均質および 異方性を考慮した格子ベースの水理地質モデルの逆解析手法を構築した。Rother<sup>71),72)</sup>は、2・3 次元の 不均質岩盤に対して浸透流解析を行い、岩盤における微小破壊の過程をシミュレーションすることで、 この逆解析手法の検証を試みている。



図1.1.30 米国ケンタッキー州油田サイトにおける石油生産井の分布<sup>56)</sup>



図1.1.33 微小地震波観測結果による水理学的連続性の判断結果 50

# (4) 注水・観測設備

先にも述べたように、微小地震波を誘発するためには、岩盤における注水は 10 MPa の定常注水圧力 が必要である。注水試験の設備は三つの部分に大別され、それらは注水制御システム(Injection Control System),水圧増幅システム(Hydraulic pressure amplifier)とパイプおよびパッカー(Pipe and Packer) である(図 1.1.34)。



図 1.1.34 注水試験設備の概略図

一方,微小地震波観測設備は、①サイスミック・モニタリング・システム、②サイスミック収録シ ステム、③ジオフォンの三つの部分に大別される。

ジオフォンのシステムには、観測周波数領域を選択的に抽出することが可能である並列式配置のシ ステムと観測周波数領域がより広い直列式配置のシステムがある。また、微小地震波観測用ジオフォ ンは、従来一方向成分のみしか探知できなかったが、近年では、微小地震波が発生した時に発生点か らの方向、傾斜および距離の三成分を測ることが可能なシステムが開発されている<sup>73</sup>(図 1.1.35)。



図 1.1.35 微小地震波の観測システム<sup>73)</sup>

## 1.1.2.9 まとめ

ニアフィールドにおける EDZ の力学的・水理学的な評価は、処分技術の工学分野のみならず、安全 評価上も極めて重要な項目の一つである。筆者らは従来から、地下発電所空洞など大規模岩盤地下空 洞における掘削影響領域の評価について様々な計測方法によって多角的な検討を実施して来た。ここ 数年来、これらをシステムとして構成することを試みて来たが、大深度、高地圧下の岩盤空洞に対し て、応力再配分現象を直接把握するための「岩盤応力測定」、「岩盤応力変化測定」、応力変化や破壊に 至る過程を間接的に把握するための「AE 計測」、応力再配分過程で発生する岩盤変位挙動を把握する ための「岩盤変位測定」、応力解放や破壊による亀裂開ロ現象に注目した「BTV 測定」、応力履歴を受 けた岩盤材料の物理的性状を把握するための「マイクロサイスミック弾性波速度測定」、「透水・透気 試験」などを統合した計測・評価システムをほぼ確立した<sup>74-79</sup>。

本研究において対象とした「AE 計測」に着目すると、これまでにいくつかの地下発電所の建設において、微小な緩みから比較的大規模な緩みまでの広い範囲の緩みを高精度で検知することが可能であること、その計測結果を応力変化と関連付けることにより、掘削の各段階での掘削影響領域の発生・ 進展挙動を高い精度で評価できることを明らかにして来た<sup>79</sup>。

高レベル放射性廃棄物地層処分場として大深度かつ亀裂の少ない岩盤を対象とした場合,高地圧下 における応力再配分の過程で生じる亀裂の発生・進展のメカニズム,ならびに形成される掘削影響領域 を正確に評価し,設計および性能評価に取り込む体系的な研究が今後一層重要であると考えられる。 さらに,堆積軟岩を対象とした場合には力学的・水理学的挙動の適切な評価のための AE を指標とする 破壊現象および流体の移動現象の解明は極めて重要と考えられる。また,深地層の研究施設での原位 置研究を視野に入れた岩盤の力学-水理学的連成挙動の評価手法に関する研究成果の一端を報告した。

#### 1.1.2.10 参考文献

- 1) 森岡宏之,南 将行,前島俊雄,田坂嘉章,Ming CAI,青木謙治:AE 計測による大規模地下空洞 掘削時の岩盤挙動評価手法に関する基礎的研究,土木学会論文集,No. 791/VI-67, pp. 81-96, 2005.
- Kaiser, P.K., Diederichs, M.S., Martin, C.D., Sharp, J. and Steiner, W.: Underground Works in Hard Rock Tunnelling and Mining, Keynote lecture at GeoEng2000, Melbourne, Australia.
   pp. 841-926, 2000.
- Brace, W.F., Paulding, B. and Scholz, C.: Dilatancy in the fracture of crystalline crocks. J. Geophys. Res., 71(16): pp. 3939-3953, 1966.
- Bieniawski, Z.T.: Mechanism of brittle fracture of rock, Parts I, II and III, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 4(4): pp. 395-430, 1967.
- Holcomb, D. J. and Costin, L. S.: Damage in brittle materials: experimental methods, Proc. 10th U.S. National Congress of Applied Mechanics, Lamb, J. P. (editors), University of Texas at Austin, 1987.
- Martin, C.D. : The strength of massive Lac du Bonnet granite around underground opening, Ph.D. Thesis, University of Manitoba, p. 278, 1993.
- Martin, C. D. and Chandler, N. A.: The progressive fracture of Lac du Bonnet granite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 31: pp. 643-659, 1994.
- 8) Wong, T.F.: Micromechanics of faulting in Westerly granite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci Geomech Abstr., pp. 273-289, 1985.
- 9) Diederichs, M.S.: Stress induced damage accumulation and implications for hard rock

engeneering, NARMS2002, Vol. 1, Univ. of Tronto, pp. 3-12, 2002.

- 10) Lockner, D.A., Byerlee, J.D., Kuksenko, V., Ponomarev, A. and Sidorin, A.: Observation of quasi-static fault growth from acoustic emissions, Fault mechanics and transport properties of rocks, B. Evans & T.-f. Wong (editors), pp. 3-31, 1992.
- 11) Cai, M., Kaiser, P.K., Tasaka, Y., Maejima, T., Morioka, H. and Minami, M.: Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 41(5): pp.833-847, 2004.
- Kachanov, M.L.: A microcrack model of rock inelasticity Part II: propagation of microcracks, Mech Mater, pp. 29-41, 1982.
- Horii, H. and Nemat-Nasser, S.: Compression-induced microcrack growth in brittle solids: axial spritting and shear failure, J Geophys Res, 90(B4):pp.3105-3125, 1985.
- Ashby, M. F. and Hallam, S. D.: The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress states, Acta Metall, 34(3):pp. 497-510, 1986.
- Read, R.S. and Martin, C.D.: Technical Summary of AECL's Mine-by Experiment, Phase 1: Excavation Response. AECL. AECL-11311, COG-95-171, p. 169, 1996.
- 16) Read, R.S., Chandler, N.A. and Dzik, E.J.: In situ strength criteria for tunnel disign in highly stressed rock mass, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 35(3): pp.261-278, 1998.
- Martin, C. D.: Seventeenth Canadian Geotechnical Colloquium: The effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength, Canadian Geotechnical Journal, 34(5): pp. 698-725, 1997.
- 18) E. フック, E. T. ブラウン (小野寺他訳): 岩盤地下空洞の設計と施工, 土木工学社, pp. 14-24, 1985.
- Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden, W.F.: Support of underground excavations in hardrock, AA. Balkema, pp. 84-98, 1995.
- 20) Cai, M., Kaiser, P.K., Uno, H., Tasaka, Y., and Minami, M.: Estimation of rock mass strength and deformation modurus of jointed hard rock masses using GSI system, Int. J Rock Mech. Min. Sci., 41(1): pp.3-19, 2004.
- 21) Emsley, S., Olsson, O., Stenberg, L., Alheid, H.J. and Falls, S.: ZEDEX A study od damage and disturbance from tunnel excavation by blasting and tunnel boring, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SKB), 1997.
- 22) Castro, L., McCreath, D.R. and Oliver, P.: Rockmass damage initiation around the Sudbury Neutrino Observatory Cavern, Proc. 2nd North American Rock Mech. Symposium, 2, pp. 1589-1595, 1996.
- 23) Diederichs, M.S.: Instability of Hard Rock Masses: The role of tensile damage and relaxation, Ph.D. thesis, University of Waterloo, p. 566, 1999.
- 24) Ortlepp, W.D.: Rock Fracture and Rockbursts -An Illustrative Study, Monograph Series M9, South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, 1997.
- 25) Jongpradist, P., Takeuchi, K., Shimura, T., Furuya, Y. and Horii, H.: Analysis of underground cavern considering the failure behavior of soft rock under low confining stress, 第 11 回岩の力学国内シンポジウム講演概要集, 岩の力学連合会, CD-Rom: F01, 2002.
- 26) 前島俊雄, 森岡宏之: 大規模岩盤空洞へのゆるみ領域に着目した情報化設計システムの適用, 土 木学会論文集, No. 742/VI-60, pp. 133-148, 2003.

- 27) 工藤奎吾,小山俊博,鈴木康正:大規模地下空洞支保設計への数値解析の適用について,土木学 会論文集,No. 588/VI-38, pp. 37-49, 1998.
- 28) Biot, M. A.: Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid.I: Low-frequency range. J. Acoust. Soc. Am. 28, pp. 168-178. 1956.
- 29) Biot M. A.: Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid. II: Higher frequency range. J. Acoust. Soc. Am. 28, pp. 179-191. 1956.
- 30) Silin D. B., V. A. Korneev, G. M. Goloshubin, AND T. W., Patzek: A hydrologic view on biot's theory of poroelasticity, Paper LBNL-54459, eScholarship Repository, University of California. 2004.
- 31) Biot, M. A.: Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media, Journal of Applied Physics, 33, pp. 1482-1498. 1962.
- 32) Matthews, C. S. and D. G. Russell: Pressure buildup and flow tests in wells, Monograph Series, Society of Petroleum Engineers, NewYork. 1967.
- 33) Barenblatt, G. I., V. M. Entov, and V. M. Ryzhik: Theory of fluid flows through natural rocks, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 1990.
- 34) Biot, M. A.: Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media, Journal of Applied Physics 33, no. 4, pp.1482-1498. 1962.
- 35) Hiroshi, O., ET, Al.: Microseismicity induced by Heavy rainfall around Flooded vertical ore vein, Pure appl. Geophysics, no. 159, 2002, pp. 91-109.
- 36) Laurence A., J.P. Avouac, M. Flouzat and J. L. Plantet: Fluid-driven seismicity in a stable tectonic context: The Remiremont fault zone, Vosges, France, Geophysical Research letters, Vol. 29. No. 0. 2002.
- 37) Wetmiller, R., J., C. A. Galley and M., Plouffe: Post-closure seismicity at a hard rock mine. In Rockbursts and Seismicity in Mines 93, Balkema Rotterdam, pp. 445-448. 1993.
- 38) Talwani, P.: On the Nature of Reservoir-induced Seismicity, Pure appl. geophys. 150, pp. 473-492. 1997.
- 39) Schwartz D.P., W.B. Joyner, R.S. Stein, R.D. Brown, A.F. McGarr, S.H. Hickman, and W.H. Bakun: Review of seismic-hazard issues associated with the Auburn Dam project, Sierra Nevada foothills, California, U.S. Geological Survey Report, 1996.
- 40) Assumpção, M.; Marza, V.; Barros, L.; Chimpliganond, C.; Soares, J. E.; Carvalho, J.; Caixeta, D.; Amorim, A.; Cabral, E.: Reservoir-induced Seismicity in Brazil, Pure and Applied Geophysics, 159, Issue 1-3, pp.597-617. 2002.
- Chen L. and P. Talwani: Reservoir-induced Seismicity in China, Pure appl. geophys. 153, pp. 133-149. 1998.
- 42) Patil, D. N., Bhosale, V. N.; Guha, S. K.; Powar, K. B.: Reservoir induced seismicity in the vicinity of Lake Bhatsa, Maharashtra, India, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 44, pp. 73-81. 1986.
- Federico, T., Inmaculada Serrano, Jens Havskov, Jose Luis Utrillas and Jose Valero: Induced Seismicity around the Tous New Dam, Geophys. J. Int, No. 160, pp. 144-160. 2005.
- 44) Teanby, N., J-M., Kendall, R. H. Jones and O. Barkved: Stress-induced temporal variations in the seismic anisotropy observed in microseismic data, Geophys. J. Int., Vol. 156, pp. 459-466. 2004.

- 45) Crampin S., T. Volti, S. Chastin, A. Gudmundsson and R. Stef ansson: Indication of high pore-fluid pressures in a seismically-active fault zone, Geophys. J. Int., Vol. 151, F1-F5. 2002.
- Simpson, D. W., W. S., Leith, and C. H., Scholz: Two Types of Reservoir-induced Seismicity, Bull Seismol. Soc. Am. 78, pp. 2025-2040. 1988.
- 47) Mcgarr, A and Simpson, D., A broad look at induced and triggered seismicity. : In Rockburst and Seismicity in Mines (eds Gibowicz, S. J. and Lasocki, S.), Balkema, Rotterdam, pp. 385-396. 1997.
- 48) Evans, D. M.: Man-made Earthquakes in Denver, Geotimes 10, pp. 11-17. 1966.
- 49) Fletcher J. B., and Sykes J. R.: Earthquake Related to Hydraulic Mining and Natual Seismic Activity in Western New York State, J.: Geophys. Res. 82, pp. 3767-3780. 1977.
- 50) Batchelor, A.S., Baris, R., Hearn, K.: Monitoring the effects of hydraulic stimulation by microseismic event location: A case study. 58th Annual Technical Conference, SPE, 12109. 1983.
- 51) Parker, R.H. (Ed.): Hot Dry Rock Geothermal Energy. Phase 2B final report of the Cambon School of Mines Project. Pergamon Press, London. 1989.
- 52) House, L., Keppler, H., Kaieda, H.: Seismic studies of a massive hydraulic fracturing experiment. Trans. Geothermal Resour. Counc. 9, pp. 105-110. 1985.
- 53) Fehler, M., House, L., Kaieda, H.: Determining planes along which earthquakes occur: Method and application to earthquakes accompanying hydraulic fracturing. J. Geophys. Res. 92, pp. 9407-9414. 1987.
- 54) Cornet, F.H., Julien, Ph.: Stress determination from hydraulic test data and focal mechanisms of induced seismicity. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 26, pp. 235-248. 1989.
- 55) Beauce, A., Jones, R.H., Fabriol, H., Hulot, C.: Seismic studies on the HDR site of Soultz-sous-Fore ts during Phase IIa. Rapport BRGM R 36411. 1992.
- 56) Phillips W. S., J. T. Rutledge and L. S. House, M. C. Fehler: Induced Microearthquake Pattern in Hydrocarbon and Geothermal Reservoirs: Six Case Studies, Pure and Applied Geophysics, Vol 159, pp. 345-369. 2002.
- 57) Evan K., F. H, Moriya, H., Nituma, R., H., Jones, W., S., Philip, A., Genter, J., Sausse, R., Jung and R. Baria : Microseismicity and permeability enhancement of hydrogeologic structures during massive fluid injections into granite at 3km depth at Soultz HDR site, Geophys., J., Int., no. 160, pp. 388-412. 2005.
- 58) Snoke, J. A., Munsey, J. W., Eague, A. G., and Bollinger, G. A. : A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV-P amplitude ratio data: Earthquake Notes, 55, p. 15. 1984.
- 59) Reasenberg, P., and Oppenheimer, D.: FPFIT, FPPLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions: U.S. Geol. Surv. Open-File Report, pp. 85-0739. 1985.
- 60) Rutledge, J. T., and W. S. Phillips: Hydraulic stimulation of natural fractures as revealed by induced microearthquakes, Carthage Cotton Valley gas field, east Texas, GEOPHYSICS, Vol. 68, No. 2, pp. 441-452. 2003.

- 61) 応用地質会社株式会社 : サイスミックモニタリングシステム (Engineering Seismic Group Canada 製品) 紹介, 1999.
- 62) Bob Parney: Interpreting seismic fracture indicators under geologic and engineering models, 2004 CESG National Covention, 2004.
- 63) Zoback, M. and Harjes, H.-P.: Injection induced earthquakes and the crustal stress at 9km depth at the KTB deep drilling site, *Journal of Geophysical Research*, 102:18, pp. 477-492, 1997a.
- 64) Zoback, M. D. and Harjes, H.-P., : Injection-induced earthquakes and crustal stress at 9 km depth at the ktb deep drilling site, germany, *Journal of Geophysical Research*, 102, pp. 18477-18491, 1997.
- 65) Shapiro, S. A., Huenges, E., and Borm, G.: Estimating the crust permeability from fluid-injection-induced seismic emission at the KTB site: Geophys. J. Internat., 131, F15-F18, 1997.
- 66) Shapiro, S. A., Royer, J.-J., and Audigane, P.: Estimating the permeability from fluid-injection induced seismic emission in Thimus, (J.-F., Abousleiman, Y., Cheng, A.H.-D., Coussy, O., and Detournay, E., Eds.), Poromechanics: Balkema, pp. 301-305, 1998.
- 67) Shapiro, S. A., Audigane, P., and Royer, J. J.: Large scale in situ permeability tensor of rocks from induced microseismicity: Geophys. J. Int., 137, pp. 207-213, 1999.
- 68) Audigane, P., Jean-Jacques Royerz, and Hideshi Kaieda: Permeability characterization of the Soultz and Ogachi large-scale reservoir using induced microseismicity, Geophysics, Vol. 67, No. 1, pp.204-211, 2002.
- 69) Shapiro, S. A., and M<sup>"</sup>uller, T.: Seismic signatures of permeability in heterogeneous porous media: Geophysics, 64, pp.99-103. 1999.
- 70) Serge A. Shapiro, Elmar Rothert, Volker Rathz, and Jan Rindschwentner: Characterization of fluid transport properties of reservoirs using induced microseismicity, Geophysics, Vol. 67, NO. 1, pp.212-220, 2002.
- 71) Rothert, E. and S. A. Shapiro: Microseismic monitoring of borehole fluid injections: Data modeling and inversion for hydraulic properties of rocks, Geophysics, Vol. 68, No. 2 m, pp. 685-689, 2003.
- 72) Rother, E.: Data modeling and inversion for hydraulic properties of rocks, PHD thesis, Freien Universit at Berlin, 2004.
- 73) Royer, J-J. and Jean-Charles Voillemont: Estimating Heterogeneous Reservoir Permeability from Induced Microseismicity, Symposium FMF6-Mechanisms of Fluid Flow in Metamorphic and Igneous Environments, EUGXI Programme, 9th April, 2001.
- 74) Mori, T., Aoki, K., Morioka, H., Iwano, K., Tanaka, M., Kanagawa, T.: Application of Borehole Seismic and AE monitoring technique to the rock cavern excavation, 10th ISRM Congress, 2003.
- 75) Takayuki MORI, Kenji AOKI: Estimation of joint behavior by monitoring AE and numerical analysis around the rock cavern, 10th ISRM Congress, 2003.
- 76) T. Maejima, H. Morioka, T. Mori and K. Aoki: Evaluation of the loosened zone on excavation of the large underground rock cavern, Proceeding of the International Symposium on Modern Tunneling Science and Technology (IS-KYOTO 2001), 2001.

- 77) Maejima, T., Morioka, H., Mori, T. and Aoki, K: Application of the observational construction technique for large underground cavern excavation, Proceeding of the ISRM Regional Symposium Eurock 2001 Espoo, 2001.
- 78) 前島敏雄,青木謙治他: 神流川地下発電所空洞掘削時の AE 測定による岩盤挙動の評価,第 31 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集,2001.
- 79) K. Aoki, Y. Mito, T. Mori, H. Morioka, T. Maejima: Evaluation of behavior of EDZ around rock cavern by AE measurements and DEM simulation using bonded particle model, ARMS2004, 2004.

## 1.1.3 低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の開発

#### 1.1.3.1 はじめに

高レベル放射性廃棄物の処分施設においては、"第2次取りまとめ"<sup>1)</sup>では、岩盤の湧水を伴う割れ 目を埋め戻し時に粘土グラウト等により処理することにしている。しかしながら、建設中、操業時に、 湧水を伴う割れ目に適切な止水処理を行わないと、サイト全体の地下水流動が著しい影響を受けるた め、深部地下水環境を維持するためのフラクチャーシーリング技術の開発は極めて重要な課題である と考えられる。具体的には、従来のダム建設やトンネル建設などでは透水性改良の対象とされていな かった低透水性の岩盤の微小亀裂についてもシーリングを行い、透水性を改良することが必要となる。 しかしながら、従来のグラウチング工法ではこのような低透水性岩盤の微小亀裂を十分に改良するこ とは困難であり、新たなグラウチング工法の開発が必要である。

このような背景のもと、低透水性岩盤の微小亀裂に対するグラウチング工法として、古くは STRIPA プロジェクト<sup>2)</sup>でも若干の検討が行われた動的注入工法が有用と考えられる。この工法は一定の注入 圧力(定常圧)に振動圧を付加してグラウトを注入する工法である。筆者らの研究グループでは、長 時間にわたってグラウト注入が可能である実用的な動的注入装置の開発、静的注入工法に対する動的 注入工法の優位性の確認、動的注入工法によるグラウト注入メカニズムの解明、対象岩盤に応じた効 果的な注入仕様の決定方法の確立、などの課題に取り組んできた<sup>3)-9)</sup>。本研究では、動的注入メカニ ズムの解明および最適注入条件の検討のため、主として理論面からの検討を行った。研究のフローを 図1.1.36に示す。



図1.1.36 低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の開発に関するフロー図

平成 17 年度の研究では、グラウト材の動的注入メカニズムをグラウト材の①流動メカニズムと② 充填メカニズムの2つに分けて検討を行った。まず①流動メカニズムを明らかにするために、人工亀 裂模型を用いた室内実験および理論的検討を行い、注入パラメータと流体の見かけ粘性の低下に関す る関係を整理した。次に②充填メカニズムを明らかにするために、現場実験および理論的検討を行い、 注入流量の時間変化および注入パラメータとの関係を明らかにすることを試みた。これにより、対象 とする亀裂に対する最適注入パラメータを数値シミュレーションにより決定し、合理的な注入システ ムの構築を行うものである。

#### 1.1.3.2 動的注入工法に関する室内実験

#### (1) 実験装置

動的注入を行った供試体は、流路長は2m,流路幅15 cmの平行平板状の人工亀裂模型である。人 工亀裂模型は、表面を鏡面仕上げした2枚の鋼製ブロックによって構成されており、面間に銅製スペ ーサーを挟み込みことによって亀裂幅を100 µmに設定した。注入口に与える注入圧力は、圧力変換 用シリンダからの定常圧にサーボシリンダからの振動圧を振動装置を介して付与したものである。計 測装置としては、注入圧力と亀裂内圧力の測定を目的として、注入口付近の1箇所と上部鋼製ブロッ クの計7箇所に間隙水圧計を設置し、さらに流出重量を測定する重量秤(ロードセル)を流出口下に 設置した。

## (2) 実験条件

実験条件を表 1.1.3 に示す。注入材料には、粘性を容易に設定できる水溶性セルロースを用いた。 セルロース水溶液の粘性については、15 mPas(超微粒子セメントに分散剤を加えて用いた場合の水-セメント配合比 w/c=1 相当), 2.7 mPas(w/c=2 相当), 1 mPasを基本とした。注入圧力については、 静的注入実験では 1MPa, 動的注入実験では基準圧力 1 MPa に 3 通りの振幅±0.5 MPa, ±0.3 MPa, ± 0.1 MPa を与え、周波数については、0.5 Hz、1 Hz、2 Hz、5 Hz、10 Hz、20 Hz、30 Hz を基本とした。

ケース	動粘性係数	注入圧力	周波数					
	mPas	MPa	Hz					
1	1.0	1.0±0.3	0					
2	2. 7	1.0±0.1	(静的注入)					
3	2. 7	1.0±0.3	0.5, 1.0, 2.0,					
4	2. 7	1.0±0.5	5.0, 10, 20, 30					
5	10. 5	1.0±0.3	(動的注入)					

表 1.1.3 室内実験の条件

#### (3) 実験結果

図 1.1.37 および図 1.1.38 は,注入パラメータ(注入材料の粘性および注入圧力の振幅)毎に,振動圧の付加による注入流量の改良比(動的注入による流量/静的注入による流量)を注入圧力の周波数に対してプロットしたものである。

まず,注入材料の粘性の違いが流動性に与える影響の比較を行った図1.1.37を見ると,注入材料の 粘性が大きいほど注入流量の改良比は大きくなり,流動性が向上すると考えられる。次に,注入圧力 の振幅の違いが流動性に与える影響の比較を行った図1.1.38を見ると,注入圧力の振幅が大きいほど 注入流量の改良比は大きくなり、流動性が向上すると考えられる。さらに、注入圧力の周波数に関しては、0.5 Hz~20 Hz においては、動的注入効果に顕著な違いは認められなかった。



図 1.1.39, 図 1.1.40, 図 1.1.41 は, 注入パラメータ(注入材料の粘性, 注入圧力の振幅, 注入圧力の周波数)毎に, 亀裂内部の振動圧の振幅を注入口からの距離に対してプロットしたものである。

まず,注入材料の粘性の違いが亀裂内部における振動圧の振幅に与える影響の比較を行った図 1.1.39を見ると,注入材料の粘性が小さいほど亀裂内部における振動圧の振幅が大きい,すなわち振 動圧の影響範囲が大きいと考えられる。

同様に,注入圧力の振幅および周波数の違いが亀裂内部における振動圧の振幅に与える影響の比較 を行った図1.1.40および図1.1.41を見ると,注入圧力の振幅が大きいほど,また周波数が小さいほ ど亀裂内部における振動圧の振幅が大きい,すなわち振動圧の影響範囲が大きいと考えられる。





図 1.1.41 亀裂内部の振動圧の振幅(注入圧力の周波数の影響)

# 1.1.3.3 グラウト材の注入メカニズムに関する理論的検討

# (1) 亀裂内におけるグラウト材の流動メカニズム

ここでは、注入材料が平行平板内を流れる圧縮性粘性流体であると仮定して、亀裂内部での圧力の 振幅の変化、ならびに見掛け粘性の変化について理論的に検討する。

開口幅 *b*, 断面積 *A* の平行平板内を圧縮性流体が通過する場合,連続の式と運動方程式は式 (1.1.1) (1.1.2) で与えられる。

$$C\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial t} = 0 \tag{1.1.1}$$

$$L\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + Rq = 0$$
(1.1.2)

但し,

$$C = \frac{gA}{a^2} \tag{1.1.3}$$

$$L = \frac{4}{3gA}$$
(1. 1. 4)

$$R = \frac{32\nu}{gAb^2} \tag{1.1.5}$$

ここで, *p*:注入圧力の振幅, *q*:流量, *t*:時間, *v*:動粘性係数, *a*:音速である。これより,注入口からの距離*x*における振動圧力と流量の振幅はそれぞれ次式によって与えられる。

$$|p(x)| = |p(0)|_{\sqrt{\frac{\cosh(2f(D-x)) - \cosh(2k(D-x))}{\cosh(2fD) - \cosh(2kD)}}}$$
(1.1.6)

$$\left|q(x)\right| = \frac{\left|p(0)\right|}{g\rho_{v}} \sqrt{\frac{\cosh\left(2f\left(D-x\right)\right) - \cosh\left(2k\left(D-x\right)\right)}{\cosh\left(2fD\right) - \cosh\left(2kD\right)}} \tag{1.1.7}$$

但し,

$$f = \frac{CR\omega}{2k} \tag{1.1.8}$$

$$k = \sqrt{\frac{CL\omega^2}{2}} + \sqrt{\frac{C^2L^2\omega^4}{4} + \frac{C^2R^2\omega^4}{4}}$$
(1.1.9)

ここで, ω:振動圧の角速度, D: 亀裂の長さである。

式(1.1.6)から算出した振動圧の振幅分布を注入パラメータごとに整理して,図1.1.42,図1.1.43,図1.1.44に示す。これらの結果は、室内実験結果と整合的な傾向にある。



また,式(1.1.7)によって求められる流量の振幅分布を用いて,せん断ひずみ振幅と呼ばれる量が次 式のように定義される。

$$\gamma_A = \frac{|q(x)|}{A\omega} \frac{2}{b} \tag{1.1.10}$$

せん断ひずみ振幅は流体のみかけの粘性μ'との間には、注入圧力の周波数ごとに次式のような関係を もつことが Börgesson<sup>10</sup>による実験から明らかになっている。

$$\mu' = \alpha \gamma_A^{\ \beta} \tag{1.1.11}$$

但し, α, β: 流体と注入圧力の周波数に依存する値である(α>0, β<0)。式(1.1.7)(1.1.10)(1.1.11) を用いれば,図1.1.37,図1.1.38に示したように,流体の粘性が高く,注入圧力の振幅が大きいほど,動的注入による流量の増加比が大きくなるという結果が得られる。

ここで、流体の振動成分の運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$
(1.1.12)

に振動成分の境界条件

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \left| p(0) \right| \exp(i\omega t) \tag{1.1.13}$$

を代入して解くと、亀裂の中心における流速の振動成分は次式で与えられる。

$$u_{y=0} = real \left[ \frac{|p(0)|\nu}{i\omega^{2}\mu} \left\{ 1 - \frac{1}{\cos\left(\sqrt{-\frac{i\omega^{2}}{\nu}}\frac{b}{2}\right)} \right\} \exp(i\omega t) \right]$$
(1.1.14)

但し, ρ: 流体の密度, μ: 流体の粘性である。せん断ひずみ振幅は式(1.1.14) で求められる流速の最 大値であり, tを変化させてこの値を数値的に求めると,実験において設定した周波数の範囲ではせ ん断ひずみ振幅の大きさがほとんど変化せず,図1.1.37 および図1.1.38 の結果をよく説明すること ができる。

# (2) 亀裂内におけるグラウト材の充填メカニズム(1次元流れ)

グラウト粒子の沈降力およびグラウト材の抵抗力は、それぞれ次式で与えられる。

$$F_{s} = \frac{\pi}{6} d_{p}^{3} \left( \frac{\delta_{p}}{\delta} - 1 \right) \gamma$$
(1.1.15)

$$F_{r} = C_{D} \frac{\pi}{4} d_{p}^{2} \frac{v^{2}}{2g} \gamma$$
(1.1.16)

ここで、 $d_p$ : グラウト粒子の直径、 $\delta_p$ : グラウト粒子の比重、 $\delta$ : グラウト材の比重、 $\gamma$ : グラウト材 の単位体積重量、 $C_p$ : 抗力係数、D: 亀裂の長さである。両者が釣り合うときの速度が沈降速度である ので次式が得られる。

$$v = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{1}{C_D} g d_p \frac{\delta_p - \delta}{\delta}}$$
(1.1.17)

また、そのときの抗力係数(層流)は次式で与えられる。

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}}$$
 (1.1.18)

ただし、Reはレイノルズ数であり、µをグラウト材の粘性係数とすると次式を得る。

$$v = 0.545d_{p}^{2} \frac{1}{\mu} \left( \delta_{p} - \delta \right)$$
 (1.1.19)

この式は、単位時間あたりのグラウトの堆積量(沈降速度に比例する)は、グラウトの粘性と比重、 すなわちグラウトの配合に依存することを示している。

いま,平行平板状の単一亀裂内におけるセメント粒子の堆積を考える。流れ方向の微小長さ区間に おける単位時間の沈降量は,亀裂内の抗力*F*が粒子を拘束すると考えることによりエネルギー保存則 から次式のように表せる。

$$F = \frac{1}{2} (s'(t)\Delta d \ m)u(t)^2$$
(1.1.20)

ここで、s'(t):固有沈降速度、 $\Delta d$ :流れ方向の微小長さ、m:セメント粒子の質量、u(t):平板 と平行な方向の粒子の速度(グラウト材の速度)である。抗力Fは、時間によらず一定値をとること から、

$$F = \frac{1}{2} (s'(0)\Delta d \ m)u(0)^2 \tag{1.1.21}$$

となり、また、単位時間あたりの堆積量 $s(t) \Delta d$ は沈降量に比例し、その時刻までに通過したグラウト材の総流量に反比例すると仮定すると、比例定数cを用いて次式を得る。

$$s(t) = c \frac{s(t)'}{\sum_{t=0}^{t} q(t)}$$
(1.1.22)

但し, s(t)は、単位時間あたりの堆積幅であり、固有堆積速度と呼ぶ。

時刻における亀裂内の流量q(t)と流速u(t)は三乗則からそれぞれ次式で与えられる。

$$q(t) = \frac{gb(t)^3}{12\nu}i$$
(1. 1. 23)

$$u(t) = \frac{q(t)}{b(t)} \tag{1.1.24}$$

ここで、b(t):時刻tにおける亀裂の開口幅、g:重力加速度、v:グラウト材の動粘性係数、i:動水 勾配である。式(1.1.20)(1.1.21)(1.1.22)より、最終的に次式を得る。

$$s(t) = \frac{q(0)u(0)^2}{\sum_{\tau=0}^{t} q(\tau)u(t)^2} s(0)$$
(1.1.25)

この式を

$$b(t+1) = b(t) - s(t)$$
 (1.1.26)

に代入したものをさらに式(1.1.23) (1.1.24) (1.1.25) に代入するとu(t+1), s(t+1)が順々に求められる。この手順をb(t) = 0となるまで繰り返すことで流量の経時変化を求めることが可能となる。

岩盤内に注入されるグラウト材の流量 $q_{RM}(t)$ は、次式のように各亀裂に注入される流量を合計することで求められる。

$$q_{\rm RM}(t) = N \sum \left( f_B(b) q(t|b(0) = b) \right)$$
(1.1.27)

ここで、N: 注入孔と交差する亀裂数、 $f_B(b)$ : 注入孔と交差する亀裂の開口幅分布の確率密度関数である。したがって、岩盤内における各亀裂のb(0)を決定するためには、注入孔と交差する亀裂の開口幅分布が必要となる。概算のため、全ての亀裂幅が同一であると仮定すると、平均開口幅 $b_M$ を用いた次式によって注入流量を算出することができる。

$$q_{RM}(t) = NQ(t|b(0) = b_M)b(t)$$
(1.1.28)

## (3) 亀裂内におけるグラウト材の充填メカニズム(放射状流れ)

(2)で構築した1次元流れの式を,放射状流れに拡張する。まず図 1.1.45 のように,円筒座標系 *X-R-0*軸を設定する。



図 1.1.45 放射状流れのモデル

放射状流れを考える上で,はじめに図 1.1.45 のように、 $\Delta \theta$ の範囲において,浸透距離に応じて亀 裂奥行きを変化させるモデルを考え、それを 360 度積分することで放射状流れをモデル化する。(2) で構築したモデルは、*R* 方向の単一微小区間を考えたものであるので、この微小区間モデルを、単位 時間の浸透距離毎に設定し、各区間のグラウト充填過程を把握し、それぞれを $\theta$ 方向に 360 度積分す ることで、グラウトの空間的な充填挙動を得る。各区間を、区間 $\xi$ ( $\xi$ =1, 2, 3, •••)とする。

① 単位時間t =1における挙動

以後,()内の値を時刻とし,添え字で区間を表す。図1.1.46は図1.1.45を上から見た図である。

図中にある、区間1における<br />
の声向の奥行きしは、

$$L_1 = \sqrt{2R^2 \left(1 - \cos \Delta \theta\right)} \tag{1.1.29}$$

として求まる。ここで、R:ボーリング孔半径である。単位時刻 t=1 における流量 $q_1(1)$ ,流速 $u_1(1)$ , セメント粒子の堆積速度 $s_1(1)$ は、各々

$$q_{1}(1) = \frac{gb_{0}^{3}}{12\nu} \frac{\partial P}{\partial x_{1}} L_{1}$$
(1.1.30)

$$u_1(1) = \frac{q_1(1)}{b_0 L_1} \tag{1.1.31}$$

$$s_{1}(1) = \frac{q_{1}(1)u_{1}(1)^{2}}{\sum_{\tau=1}^{1} q_{1}(\tau)u_{1}(\tau)^{2}}s'$$
(1.1.32)

となる。ここで、 $b_0$ : 亀裂幅である。



図1.1.46 放射状流れモデル(流れの垂直方向からの視点)

単位時間t =2における挙動
 時刻 t=2 における浸透距離をは、

$$x_2 = x_1 + u_1(1) \tag{1.1.33}$$

として得られる。時刻 t =-2 における区間1の開口幅は,式(1.1.26)より

$$b_1(2) = b_0 - s_1(1)\Delta t \tag{1.1.34}$$

と得られることから、単位時刻 t=2 における流量 $q_1(2)$ は、

$$q_{1}(2) = \frac{gb_{1}(2)^{3}}{12\nu} \frac{\partial P}{\partial x_{2}} L_{1}$$
(1.1.35)

流速u1(2), セメント粒子の堆積速度 S1(2) は, 各々

$$u_1(2) = \frac{q_1(2)}{b_1(2)L_1} \tag{1.1.36}$$

$$s_{1}(2) = \frac{q_{1}(1)u_{1}(1)^{2}}{\sum_{\tau=1}^{2} q_{1}(\tau)u_{1}(\tau)^{2}} s'$$
(1.1.37)

と決定される。次に、区間2における奥行きL2については図1.1.46より

$$L_2 = \frac{L_1(\delta + u_1(1))}{\delta}$$
(1.1.38)

ここで、単位時刻 t=2 において、区間1の流量は、区間2の流量と一致することから、

$$q_2(2) = q_1(2) \tag{1.1.39}$$

時刻 t=2における区間 2 の流量 $q_2(2)$ と流速 $u_2(2)$ の関係より、

$$u_2(\xi) = \frac{q_2(2)}{b_0 L_2} \tag{1.1.40}$$

を得て,式(1.1.38) (1.1.39) (1.1.40)より,時刻 t=2における区間2の流速 $u_2(2)$ を決定する。また,式(1.1.39) (1.1.40)より,時刻 t=2における区間2のセメント堆積速度 $s_2(2)$ を求める。

$$s_{2}(2) = \frac{q_{2}(2)u_{2}(2)^{2}}{\sum_{\tau=2}^{2} q_{2}(\tau)u_{2}(\tau)^{2}} s'$$
(1.1.41)

③ 単位時間t=tにおける挙動

以上、同様の計算を繰り返すことにより、単位時刻 t=t における区間 1 の流量 $q_1(t)$ , 流速 $u_1(t)$ , セメント堆積速度 $s_1(t)$ , 開口幅 $b_1(t)$ は、

$$q_{1}(t) = \frac{gb_{1}(t)^{3}}{12\nu} \frac{\partial P}{\partial x_{1}} L_{1}$$
(1.1.42)

$$u_1(t) = \frac{q_1(t)}{b_1(t)L_1} \tag{1.1.43}$$

$$s_{1}(t) = \frac{q_{1}(1)u_{1}(1)^{2}}{\sum_{\tau=1}^{t} q_{1}(\tau)u_{1}(\tau)^{2}} s'$$
(1.1.44)

$$b_1(t) = b_1(t-1) - s_1(t-1)\Delta t$$
(1.1.45)

区間 $\xi$  ( $\xi$ >2)の奥行き,単位時刻 た $\xi$ における流量 $q_{\xi}(\xi)$ ,流速 $u_{\xi}(\xi)$ ,セメント堆積速度 $s_{\xi}(\xi)$ は, 各々

$$L_{\xi} = \frac{L_{1}(\delta + \sum_{k=1}^{\xi} u_{k}(k))}{\delta}$$
(1.1.46)

$$q_{\xi}(\xi) = q_1(\xi) \tag{1.1.47}$$

$$u_{\xi}(\xi) = \frac{q_{\xi}(\xi)}{b_0 L_{\xi}}$$
(1.1.48)

$$s_{\xi}(\xi) = \frac{q_{\xi}(\xi)u_{\xi}(\xi)^{2}}{\sum_{\tau=\xi}^{\xi}q_{\xi}(\tau)u_{\xi}(\tau)^{2}}s'$$
(1.1.49)

単位時刻  $t > \xi$ +1 における流量 $q_{\xi}(t)$ , 流速 $u_{\xi}(t)$ , セメント堆積速度 $s_{\xi}(t)$ は,

$$q_{\xi}(t) = \frac{gb_{\xi}(t)^{3}}{12\nu} \frac{\partial P}{\partial x_{t}} L_{\xi}$$
(1.1.50)

$$u_{\xi}(t) = \frac{q_{\xi}(t)}{b_{\xi}(t)L_{\xi}}$$
(1.1.51)

$$s_{\xi}(t) = \frac{q_{\xi}(\xi)u_{\xi}(\xi)^{2}}{\sum_{\tau=\xi}^{\xi}q_{\xi}(\tau)u_{\xi}(\tau)^{2}}s'$$
(1.1.52)

$$b_{\xi}(t) = b_{\xi}(t-1) - s_{\xi}(t-1)\Delta t \qquad (1.1.53)$$

として決定される。

式(1.1.42) (1.1.50)を $\theta$ 方向に 360 度積分することにより,各区間 $\xi$ における放射状流れの流量  $Q_{\varepsilon}(t)$ を求める。( $\xi$ =1,2,3,...)

$$Q_{\xi}(t) = \sum_{\theta=0}^{360} q_{\xi} \tag{1.1.54}$$

また,式(1.1.45) (1.1.53)より, $b_1(t)=0$ をとる単位時刻 t=tにおける各区間の亀裂の開口幅 $b_{\xi}(t)$ を用いて,最終的な透水性改良範囲分布を得ることが可能である。

## (4) 岩盤への適用

岩盤内においては、亀裂が複数存在するため、現場実験において注入されるグラウト材の流量 $Q_{RM}(t)$ は、次式のように各亀裂に注入される流量を合計することで求められる。

$$Q_{RM}(t) = N \sum (f_R(b)Q_1(t \mid b_0 = b))$$
(1.1.55)

ここで、N:注入孔と交差する亀裂数、 $f_B(b)$ :注入孔と交差する亀裂の開口幅分布の確率密度関数である。したがって、岩盤内における各亀裂 $b_0$ を決定するためには、注入孔と交差する亀裂の開口幅分布が必要となる。概算のため、全ての亀裂幅が同一であると仮定すると、平均亀裂幅 $b_M$ を用いた次式によって注入流量を算出することができる。

$$Q_{RM}(t) = N \sum (f_B(b)Q_1(t \mid b_0 = b_M))$$
(1.1.56)

式(1.1.35)を用いるにあたり、亀裂本数 Nと平均亀裂幅 b<sub>W</sub>が必要となる。以下に亀裂本数・平均亀 裂幅を現場試験によって得られるルジオン値から算出する手順について提案する。

今回対象とするサイトでは、過去に数多くの透水試験が行われている。報告によれば、岩盤の透水 係数は亀裂の本数に支配的に影響されるものと考えられ、透水係数Kと亀裂本数Nの関係が次のよ うに求められている<sup>4</sup>。

$$N = 35.0 + 4.33\log(K) \tag{1.1.57}$$

また、ルジオン試験においてダルシーの法則が成立すると仮定すると、ルジオン値*Lu*と透水係数*K*の関係は、式(1.1.37)の関係で求めることが可能である。

$$K = \frac{Lu}{120000\pi HL} \ln \frac{L}{r}$$
(1.1.58)

以上,式(1.1.57)(1.1.58)より,ルジオン値から亀裂本数を決定する。

一方, 亀裂幅については, 一般に亀裂の透水係数と相関があり, また平行平板を仮定した亀裂の透水係数は3乗則に従うことが知られている。そこで, 得られた透水係数を式(1.1.57)(1.1.58)から決定した亀裂本数で除することにより, 単一亀裂の平均透水係数を算出し, さらに流量の3乗則から逆算して平均的な亀裂幅を求める。

図 1.1.47 はルジオン値と平均的な亀裂幅の関係を表したものである。式(1.1.56)(1.1.57) (1.1.58)より,注入量 $Q_{RM}(t)$ を求め、この各単位時刻の値を用いて、現場の状況を評価する上で重要な注入量の経時変化を表した理論曲線を得る。



図 1.1.47 ルジオン値と亀裂幅の関係
# 1.1.3.4 動的注入工法に関する現場実験

提案した数値解析手法の妥当性を検討するために,原位置で実施した試験結果<sup>20</sup>に対して,本解析 モデルの適用を行った。原位置試験では,中生代白亜紀の新鮮な花崗岩より構成されている岩盤を対 象として静的注入および動的注入を実施した。試験における注入仕様を表 1.1.4 に示す。また,グラ ウト材については,超微粒子セメントを使用し,水セメント比は w/c=4,8 で注入を行った。

図1.1.48, 図1.1.49は、それぞれ w/c=4、8において、静的および動的注入したケースの原位置試験と数値解析結果を比較したものである。図より、数値解析結果は実測値と非常によく対応しており、本モデルの適応性が示されたものと考えられる。



表 1.1.4 現場実験条件

1.1.3.5 数値シミュレーションによる最適注入仕様の決定

現場実験を通した検討により、本研究で提案したグラウトの充填過程モデルの妥当性を検証するこ とができた。ここでは、このモデルを用いて、対象岩盤に応じた最適注入仕様を決定する方法を示す。 手順は以下の通りである。

- ① 対象岩盤のルジオン値より、亀裂本数・平均亀裂幅を推定する。
- ② 注入パラメータより、グラウト充填挙動を支配するパラメータである見かけ粘性および固有堆 積速度を決定する。
- ③ 得られたパラメータを提案したグラウト充填過程モデルに代入してシミュレーションを行うことで、流量および開口幅の経時変化を得る。これより注入仕様の性能の評価指標として次の3つの値を求める。

【セメント総注入量】

亀裂に注入されたセメントの総量

【注入効率】

単位時間あたりの平均セメント注入量

【透水性改良範囲】

亀裂幅が規定値まで改良された範囲

今回,シミュレーションの一例として,注入圧を固定した上で,最適な水セメント配合比を検討したケースを示す。表1.1.5に,設定した注入圧のパラメータを示す。セメント配合比をパラメータとして各亀裂幅の総セメント注入量を求めたものを図1.1.50に,注入効率を求めたものを図1.1.51,透水性改良範囲を求めたものを図1.1.52に示す。これらの図には、参考までに静的注入の場合の予測値も示してある。これらの図より、今回のシミュレーションケースにおいては、水セメント配合比w/c=2,4が最適であるという結果を得ることができる。



表 1.1.5 シミュレーションにおいて設定した注入圧

注入圧力

[MPa]

振動圧周波数

[Hz]

注入方法

亀裂幅

[µm]

図 1.1.50 w/c と総セメント注入量の関係

図 1.1.51 w/c と注入効率の関係



図 1.1.52 w/c と透水性改良範囲の関係

## 1.1.3.6 粒状体個別要素法を用いた動的注入におけるグラウト充填機構の検討

1.1.3.4 においては、充填特性に関するメカニズム(以下、グラウト充填機構)についてマクロな 視点からセメント粒子の充填過程をモデル化することで検討を進めてきたが、微小亀裂に対するグラ ウトの充填状況を詳細に評価するには、よりミクロな視点からの充填過程を検討することが必要であ ると考えられる。ここでは個々のグラウト粒子の流動を直接的にモデル化することができる粒状体個 別要素法を用いたシミュレーションを行うことによって、動的注入におけるグラウト充填過程の検討 を行った。

#### (1) 粒状体個別要素法を用いたセメント粒子の充填過程のモデル化

岩盤内においては、亀裂が複数存在するため、現場実験において注入されるグラウト材の流量  $Q_{RM}(t)$ は、次式のように各亀裂に注入される流量を合計することで求められる。亀裂内の注入流量 の経時変化は、セメント粒子の沈降・堆積による亀裂の開口幅変化によって生じると考えられる。そ こで、1.1.3.2の検討結果を考慮した上で、注入パラメータによって規定される速度分布および体積 力を個々のセメント粒子に与えることで、平行平板状亀裂の微小区間内における粒子の流動を粒状体 個別要素法によりモデル化した。

図1.1.53は作成したセメント粒子の流動モデルである。本研究で対象とするような微小な開口幅を 有する亀裂内ではポアズイユ流れが生じているとみなすことができるので、個々のセメント粒子に対 して水平方向の速度分布*u* を次式で与えた。

$$u = u_c + u_a \tag{1.1.59}$$

但し, u: 流速の定常成分, u; 流速の振動成分は,

$$u_c = \frac{\alpha}{2\mu(h^2 - y^2)}$$
(1.1.60)

$$u_1 = \frac{\alpha'}{2\mu(h^2 - y^2)\sin(2\pi f)t}$$
(1.1.61)

である。ここに、 $\alpha$ : 圧力勾配の定常成分、 $\alpha'$ : 圧力勾配の振動成分、f: 周波数、 $\mu$ : 粘性係数で ある。また、鉛直方向には、粒子の沈降力 $F_s$ および流体の抵抗力 $F_r$ を体積力として与える。このよう な条件の下で、セメント粒子を亀裂の一端のランダムな位置から逐次発生させた。なお、単位時間当 たりのセメントの発生数は、グラウト材の平均流速と配合から決定する。



図 1.1.53 セメント粒子の流動モデル

## (2) 室内実験およびシミュレーション

平行平板状の亀裂モデルに対して静的注入ならびに動的注入を行う室内実験を行うとともに、室内 実験のシミュレーションを行うことで、(1)で作成したセメント粒子の充填過程モデルを用いたシミュ レーションの妥当性を確認する。

室内実験装置は、1.1.3.2 で用いた試験装置である。今回、亀裂幅は 80 µm, 流路長は 2 m, 流路幅 0.16 m と設置した。

実験条件として,注入材料には超微粒子セメントを用いた水セメント配合比 w/c=0.8のグラウト材を使用した。注入圧は静的注入の場合 0.3 MPa とし、動的注入の場合 0.3 MPa に振幅±0.03 MPa,周波数 5 Hz の振動圧を加えた。

図1.1.54 は、室内実験によって得られたセメント注入量の経時曲線である。静的注入と比較して動 的注入による注入量の増加および注入時間の延長が認められる。一方、図1.1.55 は、シミュレーショ ンによって得られたセメント注入量の経時曲線であり、動的注入による注入量の増加および注入時間 の延長の割合が室内実験結果とよく一致している。すなわち、シミュレーションによって得られたミ クロな領域での粒子の充填挙動が室内実験で得られたマクロな領域での粒子の充填挙動とよく一致し ており、充填過程の検討にあたっての、本モデルの適用性が示された。



#### (3) シミュレーションによるグラウト充填機構の検討

提案したセメント粒子の充填過程モデルを用いてシミュレーションを行うことで、注入パラメータ (振動圧の振幅・周波数および水セメント配合比)がグラウト充填過程に与える影響を平行平板状の 亀裂において検討した。

まず,水セメント配合比 w/c=2 において,静的注入・動的注入のシミュレーションを行い,セメント粒子の挙動を比較することで,グラウト充填過程について検討した。注入圧は静的注入の場合 0.3 MPa とし,動的注入の場合 0.3 MPa に振幅±0.03 MPa,周波数 5 Hz の振動圧を加えた。

図 1.1.56 は,静的注入ならびに動的注入の粒子の流動状況を,500 step 毎に記録したものである。 上段が静的注入,下段が動的注入のシミュレーションの状況を表している。静的注入の場合,T=1000 step 前後で目詰まりが生じ,そのまま充填が進行し,T=3500 step で充填が完了する。それに対して, 動的注入の場合,T=1000 step 前後で一旦目詰まりが発生するが,その後目詰まりが解消されている ことが確認できる。その後,再び T=5500 step 前後で目詰まりが生じ,充填が進行し,T=9500 step で充填が完了している。ここで,静的注入の場合と比較して,動的注入では,目詰まりが発生してか ら充填が完了するまでの時間が延長されていることが確認できる。これは,振動圧を付加することに よって,目詰まりが抑制されるためと考えられる。



図 1.1.56 シミュレーションにおけるセメント粒子の充填過程

ここで、動的注入において目詰まりの抑制および解消が生じる要因を、個々の粒子に着目して考察 する。粒子の充填は、粒子が平衡状態(粒子に作用する物体力と抵抗力が釣り合い静止する状態)に 達することによって進行すると考えられる。動的注入では、振動圧を付加することによって、粒子に 作用する物体力が周期的に変化するため、静的注入と比較して平衡状態に達するまでに時間を要し、 目詰まりが抑制されると考えられる。また、動的注入では、振動圧を付加することによって、粒子に 作用する物体力の最大値が静的注入時に比べて大きいため、目詰まりの解消も生じると考えられる。

# (4) グラウトの充填に対する注入パラメータの影響

提案したセメント粒子の充填過程モデルを用いてシミュレーションを行うことで,注入パラメータ (振動圧の振幅・周波数および水セメント配合比)がグラウト充填過程に与える影響を平行平板状の 亀裂において検討した。

本研究では,注入パラメータを変化させた多数のシミュレーションを行うことにより, グラウトの 注入パラメータが充填に与える影響を検討した。以下,その結果を示す。

図1.1.57 に振幅と注入時間の関係を、図1.1.58 に振幅と総注入セメント量の関係を示す。まず、 図1.1.57 から、振動圧の振幅が大きくなるに従って注入時間が延長していることがわかる。また、図 1.1.58 から、振動圧の振幅が大きくなるに従って総注入セメント量が増加していることがわかる。こ れは、振幅が大きくなるに従って動的効果(目詰まりの抑制および解消)が大きくなっているためと 考えられる。

次に、図 1.1.59 に周波数と注入時間の関係を、図 1.1.60 に周波数と総注入セメント量の関係を示 す。図 1.1.59 および図 1.1.60 を見ると、周波数と注入時間・総注入セメント量との間には明白な関 連性を認めることはできないことがわかる。

さらに、図1.1.61 に動的注入による注入時間の増加度(動的注入における注入時間/静的注入にお ける注入時間)を振幅に対してプロットしたものを、図1.1.62 に動的注入によるセメント注入量の増 加度(動的注入における注入時間/静的注入における注入時間)を振幅に対してプロットしたものを 示す。

図 1.1.61 および図 1.1.62 から各振幅において、水セメント配合比の値が小さいほど注入時間およ び総セメント注入量の増加度が大きくなっていることがわかる。これより、水セメント配合比の値が 小さいほど、すなわちグラウト材の粘性が高いほど、動的効果が顕著になると考えられる。





# (5) 亀裂幅とグラウト充填機構の関連性

亀裂幅がグラウト充填過程に与える影響を検討するため,実際の低透水性岩盤の亀裂形状(図 1.1.63)を模して作成した粗度の高い亀裂(図1.1.64)を対象として,亀裂幅を50 μm,80 μm,100 μm と変化させて(図1.1.65)シミュレーションを行った。ここで,水セメント配合比 w/c=1 とした。

図 1.1.66 に動的注入による注入時間の増加度(動的注入における注入時間/静的注入における注入 時間)を亀裂幅に対してプロットしたものを,図1.1.67 に動的注入よるセメント注入量の増加度(動 的注入における注入時間/静的注入における注入時間)を亀裂幅に対してプロットしたものを示す。 図 1.1.66,図1.1.67 から,亀裂幅が小さいほど注入効率比が大きくなっていることがわかる。これ より,亀裂幅が小さいほど,動的効果が顕著になると考えられる。また,このことは,低透水性岩盤 の改良に対する動的注入の優位性を同時に示すものである。



図 1.1.63 実際の低透水性岩盤の亀裂の 顕微鏡写真<sup>11)</sup>



図 1.1.64 シミュレーションで用いた亀裂モデル





# 図 1.1.66 亀裂幅と注入時間効率比 (動的/静的)の関係

# 図 1.1.67 亀裂幅と総注入量効率比 (動的/静的)の関係

## (6) まとめ

本研究では、低透水性岩盤の微小亀裂を対象とするフラクチャーシーリングに有効と考えられる動 的注入工法におけるグラウト充填機構のミクロな視点からの解明を目的として、粒状体個別要素法を 用いたシミュレーションを行い、検討を行った。

以下に動的注入におけるグラウト充填機構について得られた知見を述べる。

- 動的注入における注入時間の延長は、主として局所的な目詰まりの発生の抑制および解消に起因する。
- ② 振幅が大きいほど目詰まりの発生の抑制および解消効果が生じるため、注入時間の延長度合および注入量の増加度合が大きくなる。
- ③ 水セメント配合比の値が小さいほど、目詰まりの発生の抑制および解消効果が顕著になる。
- ④ 亀裂幅が小さいほど、目詰まりの発生の抑制および解消効果が顕著になる。

以上のことから,動的注入を行うことで,より低い透水性を示す岩盤に対しても,より安定した高 濃度のグラウト材を注入できることが示された。

#### 1.1.3.7 クロスホール透水試験による岩盤の水理地質構造の新しい評価手法とその検証

これまでに述べてきたようなフラクチャーシーリングを確実かつ効果的に適用するためには、坑道 周辺岩盤の水理特性に大きく影響する水みちの検知が必要不可欠となる。このような坑道周辺岩盤の 水理学的な調査・試験には、岩盤の巨視的な3次元透水特性を評価することができるクロスホール透 水試験が有効と思われる。

現在までにクロスホール透水試験結果から孔間の水理特性の空間分布を推定するためにいくつかの 逆解析手法が提案されてきた。しかしながら、一般に初期モデルに対する依存性が大きく、より現実 の流れと類似した初期モデルを用いない限り、妥当な再構成結果を得ることが保証されないという問 題点が残されている。また、格子ベースの解析方法では、水みちの形状に関わりなく格子が設定され るため、格子パターンに適合しないような水みちを経由する地下水の解析には適用性が低い。

これらの問題点を踏まえ、本研究においては、クロスホール透水試験結果から、多次元尺度構成法 と空間補間法を利用して、不均質な岩盤の水理学的地質モデルを合理的に構築する方法を新たに提案 した。また、その妥当性ならびに実用性を数値実験および現場実験によって検証した<sup>11)</sup>。

# (1) イメージング手法

岩盤の水理特性を把握するための現場試験のうち,孔間水理試験は,複数のボーリング孔を配置す ることによりボーリング孔間での地下水の変化を直接的に観測できるため,水理特性の空間的な広が りや水理学的な連続性を把握するのに適しており,その代表的な試験方法としてクロスホール透水試 験がある。

クロスホール透水試験(図1.1.68)には注水孔と少なくとも1本の観測孔を用いる。試験の準備段 階においては、注水孔および観測孔の孔内に止水パッカーと間隙水圧計を設置し、ボーリング孔内を 複数の注水区間(pumped interval)または観測区間(observation interval)に分けておく。注水区間に おいて所与の条件で注水を行い、観測区間において水圧の経時変化を観測することによって対象岩盤 の水頭拡散率(透水係数/比貯留係数:圧力水頭の拡散の減衰を支配する定数)を評価する。なお本 研究で提案する手法においては、注水孔においても水圧の経時変化を観測するものとする。

水頭拡散率の算定にあたっては、クロスホール透水試験によって得られた水圧の経時変化の実測値 から得られる実測水頭変化カーブと理論解によるタイプカーブとをマッチングさせ、そのマッチング ポイントの読み取り値から求める。



図 1.1.68 クロスホール透水試験

クロスホール透水試験の観測点の配置は地理的距離が尺度となる現実の地理的空間(Geographical Subspace)におけるデカルト座標系で表される。ここで、水理学的距離が尺度となるような水理学的亜 空間(Hydraulic Subspace)という別の座標系で観測点の配置を表現することを考える。

多次元尺度構成法(Multidimensional Scaling: MDS)はデータ内に潜在するデータ構造を可視的に 解釈することを目的として、データ間の非類似度をあらわす概念である距離行列から多次元空間上で の各データの配置を求める方法である。すなわち類似度が大きいほどデータ間での距離が小さくなる という関係を基にデータの空間配置を求めるものである(Kruskalの方法<sup>12</sup>)。なお、このときの空間 配置のことを布置(Configuration)と呼ぶ。

表1.1.6 は算出した水頭拡散率をもとに作成した水理学的距離行列であり、これに多次元尺度法を 適用することにより、図1.1.69 に示すような水理学的亜空間における観測点の布置を求めることがで きる。

					衣 I.	1.0 八	理子的血	土碓1丁夘	J				
	A1	A2	A3 A4	A5	A6	A7 B	1 B2	B3	B4	B5 B6	B7		
A2	44												
A3	158	44											
A4	794	417	158										
A5	1096	794	417	158									
A6	1514	1096	794	417	44								
A7	2069	1514	1096	794	158	44							
B1	2069	1514	1514	1096	1514	2069	2069						
B2	1514	1514	1096	794	1096	1514	2069	44					
B3	1514	1096	575	302	575	1096	1514	158	44				
B4	1096	794	302	575	302	794	1096	794	417	158			
B5	1514	1096	575	302	575	1096	1514	1096	794	417	158		
B6	2069	1514	1096	794	1096	1514	1514	1514	1096	794	417	44	
B7	2069	2069	1514	1096	1514	1514	2069	2069	1514	1096	794	158	44

表 1.1.6 水理学的距離行列



図 1.1.69 水理学的布置

水理学的亜空間においては距離の等しい任意の2点間の水頭拡散率は等しくなる。そこで、水理学 的亜空間内に均一に点群を設置したとき、この点群は流体の流れにとっての、土壌内における土粒子 のような障害物と等価な意味を持つ。そこで、図1.1.70に示すように観測点の地理学的布置と水理学 的布置の関係に基づいて、これらの点群を地理的空間に再配置することを考える。ここで以下のこと を仮定する。

- ① この2つの空間にまたがる布置を対応付けることができる,無次元の幾何学的な距離が尺度となる幾何学的超空間(Geometric Hyperspace)において点群の再配置を行う。
- ② それぞれの空間での観測点を結んでできる多角形の面積は、幾何学的超空間で等しい値をとる。
- ③ 幾何学的超空間においては多角形の重心の位置が同一となるように配置する。
- ④ 水理学的亜空間から地理的空間の同一点へのベクトルは幾何学的超空間において空間的相関性 を持つ。

この仮定のもとに、均一に設置した点群の地理的空間上での配置を決定することができ、水理学的 亜空間から地理的空間へ変換することができる(図1.1.71)。 空間補間法の中で最も単純かつ明解な方法として逆距離補間(inverse distance weight interpolation: IDW)を挙げることができる。この方法は、推定位置までの距離の逆数のp乗(一般 に *p*=2 がよく用いられる)によって各データに重み付けする(重みの総和を1とする)ものである。 逆距離補間法において、ある任意の位置 x'補間値 Z(x')は次式により算出される。

$$Z(\mathbf{x}') = \sum_{i=1}^{n} w_i Z(\mathbf{x}_i)$$
(1.1.62)

ここで、 $Z(x_i)$ は既存のデータであり、nは既存データの数である。また $w_i$ は重み係数であり、次式で表される。

$$w_i = \frac{h_i^{-p}}{\sum_{j=1}^n h_j^{-p}}$$
(1.1.63)

但し, *h*<sub>i</sub>は位置 x'と x<sub>i</sub>との間のユークリッド距離である。逆距離補間は厳密な補間方法であり,推定 位置で標本値が得られている場合には,解(推定値)はその値と等しくなる。



図 1.1.70 幾何学的再構成

図1.1.71 地理的空間に再配置された点群

地理的空間における点群の密度は岩盤の不透水性の程度を意味すると考えられる。したがって、点 群の密度分布図において密度の低い領域は水みちを表していることになる。なお、空間内の密度を表 現するに際していくつかの手法が考えられるが、例えばラスター形式の表示方法では図 1.1.72 のよう な結果を得る。



# (2) 値実験によるイメージング手法の検証

検証にあたっては、まず水理学的に等方均質な領域内に様々な位置・方向を有する高透水層を配置 させた水理地質構造モデルを用い、クロスホール透水試験を模擬した2次元非定常有限要素法浸透流 解析を行う。次に解析結果を基に、提案した方法によりイメージングし、水理地質構造モデルと比較 することによって手法の妥当性・有効性を検証した。



浸透流解析の手順は以下の通りである。

- ① 解析領域の設定:図1.1.73に示すような解析領域を設定し、クロスホール透水試験を想定した 孔長45mの鉛直な注水孔および観測孔を水平距離で10m離れるように配置する。注水区間および観測区間については1.67m間隔で1孔あたり7箇所設定している
- ② 水理地質構造の設定:透水層の位置・傾斜角が異なる複数の水理地質構造モデルを作成する。このとき、透水層の透水係数を10<sup>-3</sup> cm/s、透水層以外については透水係数を10<sup>-5</sup> cm/s とする。なお、比貯留係数については圧力応答の計算値に大きな影響を与えるものと考えられるが、今回は10<sup>-4</sup> m<sup>-1</sup>と一定値を与える。
- ③ クロスホール透水試験のシミュレーション:作成した水理地質構造モデルに対して2次元非定常 有限要素法浸透流解析を行うことにより、クロスホール透水試験(定流量注水試験)をシミュレ ートする。境界条件としては、解析領域の上下両端を不透水境界とし、左右両端に80 mの全水 頭を与える。これを定常解析することにより領域内各所の水頭の初期条件を設定する。この条件 のもと、注水区間において10 cm<sup>3</sup>/sの定流量を境界条件として与えることで非定常解析を行う。 なお、注水は注水孔における7 つの注水区間から順次行う。

数値実験の結果を図 1.1.74, 図 1.1.75, 図 1.1.76, 図 1.1.77 に示す。これらの図においては, 左 にシミュレーションに用いた水理地質構造モデル,中央に解析の結果得られた水頭拡散率を基に算出 した水理学的布置,右に逆距離補間法による幾何学的再構成で得られたイメージング結果をそれぞれ 示してある。

まず、図1.1.74は、水平な透水層が上部に位置するものから下部に位置するものまでの7つのモデルについて比較したものである。まず、これらの布置について着目すると、7つのいずれの布置においても水理地質構造モデル上にて透水層によって連結される観測点どうしの距離が小さくなっていることがわかる。すなわち、2点間の水理学的な距離が小さいことを表している。また、水理地質構造

モデルとイメージング結果を比較すると、いずれも高精度で水理地質構造を再現していると考えられる。これより、提案した方法によって透水層の位置を適正に再現できることが検証された。

次に図 1.1.75 は、透水層の傾斜が低角度で注水孔ー観測孔間を連結するもの、高角度で注水孔ー観 測孔間を連結するものの2つについて比較したものである。これらの水理学的布置についても、透水 層で連結される観測点間の距離が小さくなっていることが確認できる。イメージング結果に関しては 良好な精度で水理地質構造を再現していると考えられる。これにより、提案した方法によって透水層 の傾斜角度を適正に再現できることが検証された。

図 1.1.76 は、透水層が平行に複数存在するもの、複数存在して X 字状に交差するものの 2 つについ て比較したものである。これらの水理学的布置についても、透水層で連結される観測点どうしの距離 が小さくなっていることが確認できる。イメージング結果をみると、複数の透水層を有するモデルに 対しても高い精度で水理地質構造を再現できることがわかる。

図 1.1.77 は,注水孔よび観測孔と透水層が直接交差しない場合の検討結果を示したものである。こ のようなケースでは,透水層を通る地下水の挙動が明確な観測結果として得られにくいため,観測結 果から水理地質構造を再構成するのは極めて困難である。しかしながら,本図をみると,高透水層が 観測結果に与える小さな影響をも反映した布置が得られているとともに,高透水層の位置が特定でき るイメージング結果が得られることが確認された。



以上の結果から,提案した方法によって各種の水理地質構造を適正に再現できることが判明し,そ の妥当性・有効性が検証されたものと考える。

## (3) 現場実験によるイメージング手法の検証

本手法の実用性を検証するために、地下発電所<sup>13</sup>の調査横坑から削孔した2本のボーリング孔を用いてサイナソイダルクロスホール透水試験を行った。本地点の岩盤は白亜紀砂岩泥岩互層から構成される。図1.1.78は調査横坑から深度25~35mに設定した7つの注水・観測区間の配置を示したものである。横坑壁面の観察やボアホールテレビ観察により、本図に示すような急傾斜した破砕帯の存在が確認されている。なお、注水区間・観測区間とこの破砕帯は直接交差していない。

図 1.1.79 は注水点・観測点の水理学的布置と対象領域のイメージング結果を示している。これは対象領域において高透水層となりうる唯一の地質構造である破砕帯の位置をよく再現している。このことから提案手法が現場において高い適用性をもつことが確認された。



以上,本研究ではクロスホール透水試験による岩盤の水理地質構造の新しい評価手法を提案した。 本手法は観測点間の連結性をあらわす一連の水理データから多次元尺度法と逆距離補間法を用いて水 理特性の空間分布を推定するものであり,主に掘削影響領域周辺の水理挙動を支配する不均質な地下 水の流れを高精度に把握することを目的としている。

本手法の妥当性・有効性を検証するために、高透水層が存在する典型的な水理地質構造モデルをい くつか作成し、数値シミュレーションを行ったところ、提案した方法によって各種の水理地質構造を 適正に再現できることが判明した。また、この手法の現場での実用性を検証するために、現場データ の解釈に適用したところ、高透水層となりうる地質構造とよく一致するイメージング結果をえた。

この方法の特徴は、①不均質岩盤を対象とする推定方法であること、②ベクトルベースの推定方法 であるため、不連続面の交差によって形成される複雑な水みちを推定するのに有利であること、③初 期モデルを必要としないこと(初期モデル依存性がない)、④3次元への拡張が容易であること、⑤極 めて簡易な手法であることなどである。

今後は①イメージング結果と水理物性値との関連付け、②空間補間法の選定などを通した推定精度 の向上、③3次元空間への拡張、を行っていく所存である。

# 1.1.3.8 3次元イメージング手法

多次元尺度構成法および逆距離補間法は3次元に対応した数学的手法であるため、これまでに構築 してきた方法を3次元へ拡張することは容易である。すなわち,図1.1.80に示すように、地理的空間 および水理学的空間を3次元デカルト座標で表現することによって、同様の手順によって水理地質構 造の3次元イメージを得ることが可能である。

図1.1.81は、1.1.3.6項で実施した数値実験と同様な方法で水理構造の3次元のイメージングを行 った結果である。本図をみると、いずれの場合も対応する水理地質構造モデルを高精度に再現できて いることがわかる。



(c) 幾何学的再構成



(d) 地理的空間に再配置された点群

図 1.1.80 3 次元イメージング手法



図1.1.81 数値実験による手法の妥当性の検証(上段:モデル,下段:イメージング結果)

#### 1.1.3.9 まとめ

本研究では,動的注入メカニズムの解明および最適注入条件の検討を行うとともに,この方法を確 実かつ効果的適用するための水理地質構造の新しい評価手法を構築した。

まず,動的注入においては,振動圧の付加によってグラウト材の見掛けの粘性が低下し,流動性が 向上することを示した。また,注入材料の粘性が小さいほど,注入圧力の振幅が大きいほど,そして 注入圧力の周波数が小さいほど,亀裂内部における振動圧の振幅が大きい,すなわち振動圧の影響範 囲が大きいことを明らかにした。さらに,注入材料の粘性が大きいほど,注入圧力の振幅が大きいほ ど,動的注入の静的注入に対する注入流量の増加比が大きくなることについても明らかにした。

次に、このような亀裂内におけるグラウトの充填メカニズムを説明するために、エネルギー保存則 に基づくグラウト堆積厚の計算と3乗則に基づいた流量・流速の計算とを交互に行うことによって亀 裂幅を逐次減少させていく数値解析手法および個別要素法を用いた陽的な数値解析手法を構築した。 これらの数値解析手法を用いて、現場実験のシミュレーションを行ったところ、実測値とよい対応を 示したことから、解析手法の妥当性が示されると同時にグラウトの充填メカニズムが明らかになった。 なお、現場実験の結果は、静的注入と比較して動的注入では初期注入流量が増加し、また総注入時間 も増加することを示しており、これは動的注入によって流動性が向上したため初期注入流量が増加し、 さらに目詰まりの発生が抑制された結果であると考えられる。

一方,クロスホール透水試験による岩盤の水理地質構造の新しい評価手法を提案した。本手法は観 測点間の連結性をあらわす一連の水理データから多次元尺度法と逆距離補間法を用いて水理特性の2 次元あるいは3次元空間分布を推定するものである。2次元および3次元の数値実験および現場実験 によってその妥当性ならびに実用性を検証した。

#### 1.1.3.10 参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構:「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層 処分研究開発第2次取りまとめ-」,総合レポート, JNC TN1400 99-020, 1999.
- R. Pusch, L. Börgesson, A. Fredrikson, I. Markström, M. Erlström, G. Ramqvist, M. Gray, B. Coons: Rock Sealing - Interim Report on the Rock Sealing Project. Stripa Project, Technical Report 88-11. SKB, Stockholm, 1988.
- 3) 脇田伸吾,伊達健介,山本拓治,中村百合子,水戸義忠,青木謙治:動的注入工法に関する室内・ 現場実験とグラウト充填過程モデルを用いた結果の解析,第 33 回岩盤力学に関するシンポジウ ム,2004.
- 4) 青木謙治・水戸義忠,山本真哉:クロスホール透水試験による岩盤の水理地質構造の新しい評価 方法の提案,第33回岩盤力学に関するシンポジウム,2004.
- 5) K. Aoki, Y. Mito, T. Yamamoto, Kensuke Date, Shingo Wakita : An Evaluation of the grout effect by dynamic injection method, 10th ISRM Congress, 2003.
- 6) K. Date, S. Wakita, T. Yamamoto, Y. Nakashima, Y. Hoshino, Y. Mito, K. Aoki: Development of dynamic grouting system, ITA World Tunnelling Congress 2003, 2003.
- K. Aoki, Y. Mito, Y. Kurokawa, T. Yamamoto, K. Date, S. Wakita: Development of dynamic grouting technique for the improvement of low-permeable rock masses, THE 1st UE KYOTO, 2003, 2003.
- 8) 脇田伸吾,伊達健介,山本拓治,黒川義民,水戸義忠,青木謙治:動的注入工法における最適注

入方法に関する基礎的検討,第32回岩盤力学シンポ,2003.

- 9) 山本拓治,白鷺卓,冨田諭,青木謙治:3 次元孔間弾性波トモグラフィによるグラウト効果の評価,第32回岩盤力学シンポジウム,2003.
- 10) Börgesson, L.: Rheological properties of cement and bentonite grouts with special reference to the use of dy-namic injection, International Symposium on Grouting in rock and concrete, Salzburg, Austria, 1993.
- 11) K. Aoki & Y. Mito, T. Mori : New imaging method for hydro-geological structure in rock masses by cross-hole hydraulic test, ARMS2004, 2004.
- J. B. Kruskal: "Nonmetric multidimensional scaling: a numerical method", Psychometrika 29, pp. 115-129, 1964.
- 13)前島敏雄,森岡宏之,森 孝之,青木謙治:神流川地下発電所空洞掘削時の AE 測定による岩盤挙動の評価,第31回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集,2001.

#### 1.1.4 まとめ

深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究のうち,処分技術の観点から実用化に向けた 重要な研究課題のうち,平成18年度は,次の2課題についての研究を実施した。

#### (1) 微小破壊音(AE)計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術の研究

従来から地下発電所および原油岩盤タンクなどの大規模岩盤地下空洞における掘削影響領域の評価 にあたっては、様々な計測方法によって多面的な検討がなされてきた。筆者らの研究グループでは大 深度、高地圧下の地下発電所空洞に対して、応力再配分現象を直接把握するための「岩盤応力測定」、 「岩盤応力変化測定」、応力変化や破壊に至る過程を把握するための「AE 計測」、応力再配分過程で発 生する岩盤変位挙動を把握するための「岩盤変位測定」、応力解放や破壊による亀裂開ロ現象に注目し た「BTV 測定」、応力履歴を受けた岩盤材料の物理的性状を把握するための「微小地震波測定」、「統帥・ 透気試験」などを統合した計測・評価システムの確立に取り組んできた。

特に、本研究において対象とした「AE 計測」に着目すると、これまでにいくつかの地下発電所の建 設において、微小な緩みから比較的大規模な緩みまでの広い範囲の緩みを高精度で検知することが可 能であること、その計測結果を応力変化と関連付けることにより掘削の各段階での掘削影響領域の発 生・進展挙動を高い精度で評価できることが実証されつつある。このような技術的ストックを活用し、 高レベル放射性廃棄物地層処分場が対象とする大深度かつ亀裂の少ない岩盤に対して、高地圧下にお ける応力再配分の過程で生じる亀裂の発生・進展によって形成される掘削影響領域の評価技術研究の 一環として、AE と岩石の破壊機構についての試験および解析を行った。なかでも各種 AE パラメータ の特性を詳細に検討することによって、岩石・岩盤の微小破壊現象の検知が可能となることを明らかに し、処分施設の調査から設計、安全評価のためのモデル構築に至るプロセスを通して地質環境評価の ための重要な指標とすることができることを示した。特に空洞周辺岩盤において掘削ステップの進行 に伴う AE 発生数の変化は、AE 発生および AE 進展の両応力レベルとスポーリング限界を設定すること で、その応力径路上の破壊挙動と関連付けて、定量的かつ明確に解釈できることが明らかになった。 これらの AE 挙動と対応する各種応力レベルの概念と岩盤の応力径路の関係は、空洞周辺の破壊現象の 進展の予知に対して非常に有用な情報となる。さらに、堆積軟岩を対象とした場合には力学的・水理 学的挙動の適切な評価のための AE を指標とする破壊現象および流体の移動現象の解明は極めて重要 と考えられる。今年度は特に、深地層の研究施設での原位置研究を視野に入れ、ニアフィールドコン セプトの再構築のための岩盤の力学-水理学的連成挙動の評価手法に関する研究成果の一部を報告し た。

#### (2) 低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の開発

処分施設の調査・設計から建設・操業段階を通して、サイトの地下水環境を可能な限り安定させる 地下水制御技術としての低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術は重要な工学上の課題で ある。本研究では、動的注入メカニズムの解明および最適注入条件の検討を行うとともに、この方法 を確実かつ効果的適用するための水理地質構造の新しい評価手法を構築した。

まず,動的注入においては,振動圧の付加によってグラウト材の見掛けの粘性が低下し,流動性が 向上することを示した。また,注入材料の粘性が小さいほど,注入圧力の振幅が大きいほど,そして 注入圧力の周波数が小さいほど,亀裂内部における振動圧の振幅が大きい,すなわち振動圧の影響範 囲が大きいことを明らかにした。さらに,注入材料の粘性が大きいほど,注入圧力の振幅が大きいほ ど,動的注入の静的注入に対する注入流量の増加比が大きくなることについても明らかにした。

次に、このような亀裂内におけるグラウトの充填メカニズムを説明するために、エネルギー保存則 に基づくグラウト堆積厚の計算と3乗則に基づいた流量・流速の計算とを交互に行うことによって亀 裂幅を逐次減少させていく数値解析手法および個別要素法を用いた陽的な数値解析手法を構築した。 これらの数値解析手法を用いて、現場実験のシミュレーションを行ったところ、実測値とよい対応を 示したことから、解析手法の妥当性が示されると同時にグラウトの充填メカニズムが明らかになった。 なお、現場実験の結果は、静的注入と比較して動的注入では初期注入流量が増加し、また総注入時間 も増加することを示しており、これは動的注入によって流動性の向上によって初期注入流量が増加し、 さらに目詰まりの発生が抑制された結果であると考えられる。

一方,クロスホール透水試験による岩盤の水理地質構造の新しい評価手法を提案した。本手法は観 測点間の連結性をあらわす一連の水理データから多次元尺度法と逆距離補間法を用いて水理特性の2 次元あるいは3次元空間分布を推定するものである。2次元および3次元の数値実験および現場実験 によってその妥当性ならびに実用性を検証した。

今後は、低透水性岩盤に対する長期耐久性を有する新しいグラウト材に関する材料特性および注入 効果の検討と共に、堆積軟岩中における動的限界注入圧を始めとする注入工法に関する検討を継続す る予定である。さらに、グラウト効果の長期的安定性を評価するために、地質環境調査研究領域およ び性能評価研究領域との連携による具体的なサイトにおける評価システムの構築が重要であると考え られる。

#### (3) 深部地質環境の調査・解析技術の体系化

以上の研究成果は、処分施設の工学技術に関して重要な項目であるが、今後、深部地質環境の調査 ならびに性能評価の両分野との連携、体系化を図るためには、現実的なニアフィールドコンセプトの 再構築を行う必要がある。具体的な進め方としては、例えば瑞浪超深地層研究所計画の第2段階や幌 延深地層研究センターでの立坑を用いた研究計画について個別テーマを、体系的に、サイトレイアウ トから処分施設の設計、安全評価に至る一連の流れの中に再構築するための検討を次年度以降の重要 課題として取り組みたい。

(京都大学 青木謙治)

## 1.2 安全評価の観点で抽出された深部地質環境の調査・解析技術に関する研究

## 1.2.1 はじめに

高レベルおよび TRU 放射性廃棄物の地層処分の研究開発については、核燃料サイクル開発機構(現; 日本原子力研究開発機構)による「第2次取りまとめ」<sup>1)</sup>、原子力発電環境整備機構(NUMO)による「高 レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性」<sup>2)</sup>、「概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠」 <sup>3)</sup> 以降、いくつかの観点から、そのニーズを整理してまとめようとするロードマップの調査・整備が並 行してなされつつある。

- ① 「原子力の重点安全研究計画」原子力安全委員会安全研究専門部会(平成 16 年 7 月)<sup>4)</sup>
- ② 「高レベル放射性廃棄物処分研究開発全体マップ」資源エネルギー庁委託原子力環境整備促進・ 資金管理センター(平成16年3月)<sup>5)</sup>
- ③ 「原子力安全・保安院の安全研究ニーズについて」原子力安全・保安院(平成16年12月)<sup>6</sup>
- ④ 「核燃料サイクルの安全に関する研究ニーズ調査」日本原子力安全基盤機構委託原子力学会(継続調査中)<sup>7)</sup>

またこれらと並行して核燃料サイクル開発機構は、日本原子力研究所(現;日本原子力研究開発機構) との統合を期に、それまでの成果をまとめ新体制での研究開発のための態勢を整えるため、「高レベル 放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築-平成17年度とりまとめ-」(平成17年9月) をとりまとめている<sup>®</sup>。これらの調査研究は、主として研究開発現場において現在行われているテーマ を調査し、ニーズとしてまとめたものであるが、核燃料サイクル開発機構による「平成17年度とりま とめ」<sup>®</sup>では、高レベル放射性廃棄物地層処分の実現のために必要な研究開発について、地層処分シス テムの全体としての安全という観点から整理して課題を考えるべきとの主張により、分冊「地層処分技 術の知識化と管理」においてセーフティケースをその軸とした整理の方向を示している。高レベル放射 性廃棄物地層処分におけるセーフティケースの重要性は近年とくに強く叫ばれており、研究開発課題の ロードマップ作成においてもセーフティケースの観点からの整理が重要との認識がなされるようにな っている。

このように、高レベル放射性廃棄物の地層処分の研究開発については、これまで進められてきた「地 質環境」、「工学技術」、「性能評価」の各分野の成果や目標を横断的に把握して、地層処分システム全体 の性能における個々の課題の重要性を評価する考え方が必要で、この考え方の核としてセーフティケー スの概念が有効であろうという認識が高まりつつある。本「深部地質環境の調査・解析技術の体系化に 関する研究」委員会における「課題グループ」においても、地層処分研究における「地質環境」、「工学 技術」、「性能評価」の各分野の中間領域で研究開発が遅れている重要課題の抽出に努めてきており、同 様の認識を得るにいたっている。「地質環境」、「工学技術」、「性能評価」の各分野の中間領域という観 点から見ると、地層処分の研究・開発には、「環境安全の地下水技術」と「建設・操業安全の地下水技 術」があると考えることも出来る。前者は、放射線安全の「地下水シナリオ」の中枢である、「閉鎖後 の核種の移行と生活圏の放射線安全」に密接に係った技術であり、ファーフィールド (Far field) よ りの技術である。後者は、どちらかというと「構築された処分揚の性能」や「労働災害」に関する技術 であり、どちらかというとニアフィールド (Near field) よりの技術である。前者については、従来か ら地層処分特有の技術として、多岐にわたる研究・開発がなされており、現状の研究・開発の方向は、 地質環境、処分場構築の工学技術、安全評価の各領域の統合へ向けて、中間領域の課題をつめるべき段 階にきている。後者については、既成の実用技術の適用が可能であることから、サイトが特定していな い段階では、検討が進まなかったが、深地層の研究施設(URL)の構築を通じて、深部・長期の工学へ向けて、具体的な高度化が望まれる技術も少なくない。このような背景の下で、「課題グループ」の目標は、それぞれの中間分野で、研究・開発が手薄な穴、共同研究でより明確な方向性が打ち出せるであろう課題を見出すことにある。すなわち、サイト選定/処分場の設計、建設/操業、処分/閉鎖(後)それぞれの段階で、どうしても必要な研究開発の具体的な内容と手法および、それらを実用技術として達成させる共同研究体制等について議論を重ねることを目標としている。このためには、セーフティケースを具体的に構築し、個々の要素の安全を積み重ねた従来の評価では捕らえにくかった相互の要素が連携した、より現実的な安全評価のあり方を考え、これに基づいて議論することが必要となる。特に、サイト選定/処分場の設計、建設/操業、処分/閉鎖(後)については、「環境安全」と「建設・操業安全」の両者を満足すべき技術について議論するために、「ニアフィールド」のコンセプトを再構築することが必要となる。

昨年度の報告では、このような認識の核となっているセーフティケースの概念について定義、目的、 内容について述べた後、わが国における安全規制の方向とセーフティケースの概念の関係に触れ、さら にセーフティーケース概念の適用の具体例として、種々の放射性廃棄物の処分概念とそのセーフティケ ースを比較検討し、処分研究において研究開発が必要とされる課題の抽出を試みた結果について示した。 高レベル放射性廃棄物の地層処分については、現在のところ、「第2次取りまとめ」<sup>1)</sup>、原子力発電環境 整備機構(NMO)による「高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性」<sup>2)</sup>、「概要調査地区選定上の 考慮事項の背景と技術的根拠」<sup>3)</sup>の他、セーフティーケースに相当する文書がなく、様々な専門家、非 専門家が議論の共通の出発点とする拠り所がない。そこで本年度は、ニアフィールドのコンセプトの再 構築と課題の抽出という観点からは回り道となるが、非専門家を対象としたセーフティーケースとして、 噛み砕いた形で放射性廃棄物の地層処分を解説することを試みた。1.2.2節は、非専門家に放射性廃棄 物の地層処分がどのように行われようとしているか、安全はどのように担保されようとしているかを説 明するとしたら、どのようになるかを例として示したものである。

#### 1.2.2 放射性廃棄物地層処分のセーフティーケース

#### 1.2.2.1 資源・エネルギー, 廃棄物と地球環境

#### (1) 地球環境の形成

放射性廃棄物は、原子力エネルギーの利用(原子力発電)に伴って出てくる廃棄物で、この廃棄物を どのように処分しようとしているのかを紹介するのが本節の目的であるが、放射性廃棄物に限らず、最 近では廃棄物が大量に発生して、環境に悪影響を与えており、世界中で問題になっている。放射性廃棄 物について述べる前にまず、エネルギー資源と廃棄物の問題が、世界では今どのように認識されている かということを簡単に紹介しておく。

まず,生物や人間がどのようにしてエネルギーを得て利用してきたかを考えてみる。図1.2.1 は地球 の46億年の歴史において,生物がどのように発生してきたか,生態圏と呼ばれる環境がどのように変 化してきたかを示したものである。宇宙は,約150億年前にビッグバンで誕生したと考えられている。 その直後に存在した元素は,水素,ヘリウム,リチウムなど最も軽いものだけであったが,これらが急 速に膨張する空間のところどころでガス集合体となり,ガスの濃い部分がそれ自身の引力で収縮し,無 数の恒星ができた。恒星の内部では強大な引力により核融合が起こり,より重い鉄までの元素が生まれ た。さらに鉄より重い元素は,恒星が寿命を終えるときに起こる超新星の爆発で生成される。超新星の 爆発により飛び散ったガスやちりが再び集まり、また互いの引力により収縮し、また星を作り始める。 太陽はこのようにしてできたと考えられている。



地球は今から約46億年前に誕生した。太陽のまわりを回っていた岩石,金属,氷のかたまりなどが 引き寄せ合い衝突し、分裂や合体をくり返し原始地球になった。この過程で、地球は放射性元素の崩 壊や超微星体の衝突で高温となり、もっとも重い元素が中心に沈み込み核を形成し、その周辺にほぼ MgFeSi0。の組成のマントルが浮き上がって形成され、外側の地球表面の温度が低下して地殻を形成し た。現在の地球は、半径約6400 kmの球で、内側から内核(固体金属~1200 km)、外核(液体金属~ 2300 km), マントル (固体岩石~2900 km), 地殻 (固体岩石, 数~数+ km) から成っていると推定さ れている。生物の活動するのはこのうちの地殻表面に限られている。ここでは、誕生から1億年ほど の長い時間をかけて厚い原始大気(~10km)が生まれた。大気は雲をつくり雨を降らせ、海となった のである。生物が登場したのは比較的早く、地球ができてから5億年くらい経ったときにすでに発生 していたと考えられている。当時は、酸素は全て他の元素と結合して酸化物となっており遊離の酸素 はなかったため、海の中で発生したバクテリアやらん藻は、海の中で光をもらい、二酸化炭素と水を 有機物と酸素に変換するという光合成にあたる活動をしながら生命活動を営んでいた。つまり生物に よる最初のエネルギーの利用は、太陽からもたらされる光エネルギーを有機化合物のなかに(原子の 結合エネルギーとして)蓄えるという形でなされていた。このような生物活動が長い間続いて酸素が 増えてきた。最初のうちは、海の中に酸素と反応するもの(Fe<sup>2+</sup>イオン)があると、できた酸素が反 応して消費されてしまう(赤鉄鉱 Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>ができる)という時代があり、これが何十億年か続き、酸素と 反応するものが消費され尽くされると海水中の酸素が増えてくる。

そうすると、増えた酸素を使って、光合成で蓄えられた有機物の中のエネルギーを横取りして生きよ うとする酸素呼吸生物が現れてくる。つまり、捕食した有機物を空気中の酸素を使い、酵素を触媒にし て二酸化炭素と水にするという光合成とは逆の反応により、エネルギーを得るのである。この酸素呼吸 生物は最初は単純な真核生物であったようであるが、蓄えられた有機物をより効率的に得るため食物連 鎖が形成されるようになり、多細胞生物への進化が始まる。つまり、光合成をするバクテリアの働きに より環境中の酸素が増加し、この環境の変化に応じて新しい生物種が生まれたのである。このように新 しい生物種の発生や多様化は環境の変化に対応したものであるが、結果的に見ると、環境がそれ以上急激に変化しないように(酸素を消費するように)機能しているとも見ることができる。

こうした進化は最初,海の中で起こっていて,生物は強い紫外線などがある地表に出ていくことは できなかったが,酸素がさらに増えると海水中だけでなく大気中にも酸素が出てきて,成層圏で紫外 線と相互作用をしてオゾン層をつくるようになる。そうすると,紫外線が地表にあたらなくなり,そ のような害を受けずに暮らせるようになるということで,陸上生物が出てきて我々の先祖の世界がで きてきた。

大型多細胞生物が発生してからの約5億年前から後の進化の様子を示したのが図1.2.2である。図 の下側にはマントル対流と地殻の関係を表している。マントルは日常的な時間軸では固体の硬い石で できているが、長い時間で見ると、まるで流体のように振舞うのである。マントルは、物質が集まる ことにより開放される重力エネルギーとウランやトリウムのような放射性元素が崩壊する際に出され る熱エネルギーで熱せられ、ゆっくりとした速度で対流運動をしている。この運動によって、地殻表 面で冷却され硬くなっている大陸やプレートが年間数 cm の速さで動くことになり、地球規模で見ると 南太平洋とアフリカで上昇流があり、ユーラシアで下降流があると考えられている。このような動き は、長い時間軸で地殻の状況を変化させ気候を変化させるので、ある気候に順応するように進化した 生物群は、約1億年の間隔で起こる大きな変化に応じて絶滅し、生物界の再編により新たな進化が始 まる(白亜紀末の大絶滅のみは隕石の衝突が原因であろうといわれている)。



約1億年を時間軸として起こるマントルの対流による地殻状況(大局的 気候)の変化に伴い、生物界の再編(進化)が促された

それぞれの環境における生物の進化は、食物連鎖の中で生き残ろう、生存競争に勝ち残ろうとするが、 その活動が他の種を滅ぼしてしまうほどになると、自らを支えるエネルギー源を失い自らの生存をも脅 かすことになるので、生態環境が食物源を再生する能力を損なうほどには優勢になることはできない。 結果的には、生態環境が全体としてできる限り準定常状態を保つように、それぞれの生物種は大きな意味で共生することになる。

このように、地球環境(生態圏)は、無機的に地球が存在していて、それに順応して生物が進化して 形成されてきたという面と、地球と生物あるいは生態圏と生物との相互作用によって形成されてきたと いう面がある。ジェームス・ラブロック<sup>12</sup>は1970年代初頭、「地球上の生命は地表の状況を常にその時

図1.2.2 地球環境の変化と生物の進化<sup>9),11)</sup>

点における生命の集合にとってふさわしい状況になるよう"積極的に"保持している一つの生き物みた いなものである。これをガイアと呼ぼう」という考えを発表した。一方では「これは"生物"ではない」 といった反論もずいぶんあったようであるが、全体のシステムとして見て、このような相互作用があっ て地球の環境ができてきたということについて、意見は一致しているようである。このような見方は、 人間や生物が生きて活動していく土台として、そこからエネルギー資源を得る源として地球環境を考え る時、特にその再生能力すなわち準定常状態の維持能力について考えることを忘れてはならないことを 我々に教えてくれる。

# (2) 人間活動の歴史的推移とエネルギーとの関わり

図1.2.3に示されているように、人類の祖先の進化には何百万年かの歳月を要し、およそ50万年前 ごろには火や道具を使うようになり、5~4万年前ごろには壁画によると宗教的儀式の実施、道具を使い 装身具をまとうなど、現代の人類に近い行動をとるようになっている。この人類が大きく変化して、農 耕や牧畜などにより文明を築くようになったのは、約1万3千年前頃に最終氷河期が終わり、地球が温 暖化し植物性の食物が豊富になったことと関係しており、定住生活により、より安全な出産と育児が可 能となり人口が増え富の蓄積により、人々は分業により階層化して、政治構造が生まれたと思われる<sup>13</sup>。

				<b>万年</b> 前			
500~400 250	200 170 150	100	50	14~3 5 0			
▲ // → 直立姿勢 体型の大型 脳容量の拡	ホモエレクトゥス 化 大 狩猟から	ホモサピエンス ホモサピエンス (火、素朴な石器) クロマニヨン(洞窟壁画. 「狩猟から農耕へ」 1.3万年前:最終氷ま					
700万年前	う ヒトとチンパンジーの	の分化					
400万年前	直立姿勢	直立姿勢   体型の大型化と脳容量の拡大   ホモ・エレクトゥス:まだ現代人より類人猿に近い   ホモ・サピエンス(素朴な石器、火の利用)					
250万年前	体型の大型化と脳系						
170万年前	ホモ・エレクトゥス: き						
50万年前	ホモ・サピエンス(素						
14~3万年	前 ネアンデルタール人	ネアンデルタール人					
5~4万年前	クロマニヨン人(石器 生物学的、行動学的	クロマニヨン人(石器の進歩、装身具、道具、洞窟壁画、彫像、楽器): 生物学的、行動学的に今の人類と同じ					
1.3万年前	最終氷期の終結、	最終氷期の終結、狩猟採集生活から農耕、家畜、冶金へ					
B.C.11,00 ~A.D.1,50	0 0 人口の密集と複雑が	人口の密集と複雑な政治構造					

図 1.2.3 人類の進化<sup>13)</sup>

このように人間活動は、地球環境すなわち気候により形成される生態圏と密接に関係しながら推移し てきたが、その過程でどのようにしてエネルギー資源を得てきたか、どのくらいのエネルギーを使って きたのかを示したのが図1.2.4 である。最初、人間は道具による自然エネルギー(再生エネルギー)の 利用をしていた。約1万3千年前頃になると、道具を使う他にも農耕や牧畜により、環境に対してより 積極的に働きかけることで、それまでよりも効率的にエネルギーを得ることができるようになり、より 多くの人間がより豊かに暮らせるようになった。紀元前の数多くの文明はこのような背景の下に盛衰し、 大規模な古代遺跡を後代に遺してきたわけであるが、これらの文明が、政治経済体制の変遷を別にして、 文明社会全体として衰退した原因としては、気候の変動による環境の変化に対応できなかったという見 方と、森林乱伐や植生破壊、過放牧、土壌の劣化、鳥獣漁獲類の乱獲などによるとの見方がある。実際 には気候条件により環境の再生能力が限られたところに、後者の人間活動による環境負荷の影響が重な ったものであろうと考えられる<sup>14</sup>。



図 1.2.4 世界の人口と人類とエネルギーの関わり<sup>15),16)</sup>

約200年前の産業革命期になると、エネルギーの獲得や使用量に非常に大きな変化が起こる。それま では生態系の再生能力に依存していたのが、石炭や石油など、何千万年、何億年かけて生物の死骸とし て蓄えられてきた太陽エネルギー(化石エネルギー)を利用して爆発的にエネルギーを使うようになり、 生活も豊かになり人口も急激に増大した。農耕や牧畜は、効果的にエネルギーを投入してより効率的に なり交通手段も発達して、局地的な気候変動による文明の危機は流通により乗り越えることもできるよ うになった。さらに現在では宇宙における元素生成に由来する原子力も使えるようになってきた。原始 人に比べると現代人は100倍くらいのエネルギーを使っており、初期農業人(古代文明など)に比べて も20倍くらいのエネルギーを使っているといわれている。エネルギー資源は、貧困を克服したり、戦 争を避けたり、病気や傷害を癒すなど、豊かな生活を支える非常に大事なものであったわけである。一 方、現代の社会を見てみると、豊かな国や人と貧しい国や人の使っているエネルギーの差は、初期農業 人と現代人の差よりもはるかに大きいものがある(このような問題は南北問題と呼ばれている)。この ような不公平を解消するために、これまで人間社会がとってきた方法は、社会全体として使えるエネル ギーを増やすことにより、より貧しい人も豊かにしようというもので、自由競争の中でそれぞれの国が 国内総生産(GDP)を増やす、経済成長をするというものであった。このようなやり方も近年のすさま じいエネルギー消費の増大を招く結果となっている。

ところが、エネルギー資源は無限にあるわけではなく、環境の再生能力も無限大ではない。当初、生 態系の中でその一員として生きていたときは、それほど大規模なエネルギーの使い方ではなく、地球に 存在する物質を使い、太陽からやってくるエネルギーのみを使っていればよかったわけであった。これ は、例えば山の斜面に住んで、水が上から下に流れていくときに水車を使って、そのエネルギーで生き ているようなものだったのであるが、地下資源である石油や石炭などを使って、さらにたくさんのエネ ルギーを使うようになった。化石資源は、その再生に何千万年、何億年の時間がかかるので、事実上、 人間が使うだけ減っていく非再生エネルギーである。またこれらを燃焼させる行為は、酸素呼吸生物が 体内で有機物を酸化してエネルギーを得るという行為をはるかに急速にかつ大量に行うことになり、廃 棄物として作られた二酸化炭素の量は、植物が光合成により環境を維持再生する能力を超えているし、 もちろん二酸化炭素が海水に溶けて、やがて固体の炭酸カルシウムになって除かれるという無機的な 反応はこれよりもはるかにゆっくりとしか起こらない。このため二酸化炭素が大気中に増え、これが温 室のガラス壁のように、入ってくる光(可視光線)は通すが出て行く熱(赤外線)は通さないという効 果で地球を暖めてしまい、その結果不安定な気候変動や自然災害を招くかもしれないという問題が顕在 化してきた。このように産業革命以後、エネルギーが非常に大量に流れるようになり、資源の枯渇と廃 棄物による地球環境への負荷の両面で問題が出てきた。

図 1.2.5 は世界のエネルギー消費がどのようなエネルギーによってなされているかと、ハワイのマウ ナロア観測所で測定された大気中の二酸化炭素濃度(ppm は百万分の1)の変化を示したものである<sup>16.17)</sup>。 両者の因果関係についてはまだ議論があるが、二酸化炭素濃度の増大が化石燃料の燃焼によりもたらさ れ、これが地球温暖化の原因となる可能性があり、地球温暖化による気候の不安定化は地球全体にとっ て深刻な問題であるため、今後は二酸化炭素の放出を抑制する必要があると考えられている。



先に述べたように、地球の生態系というのは、生物と地球が何千万年、何億年という長い時間をかけて相互作用をしてできてきたもので、実は地球の表面の薄皮のところ、厚さにしてせいぜい 10 km 程度(これは大気の厚さである)のところしか生態系はないといえる。そのようなところに、自由競争によって膨張する人間活動によって廃棄物が急速に大量にもたらされると、今まで生態系で浄化・循環されていたものが、これで賄いきれなくなってしまったのである。その結果、このままでは地球環境が危ないということになってきた。

このような状況の下,日本の提案によって設けられた国際連合の「環境と開発に関する世界委員会」 では、当時の委員長であるノルウェーのブルントラント首相により、「地球の未来を守るために」とい う報告書<sup>18)</sup>が1987年に出され、持続可能な開発(Sustainable Development)の考え方が示された。持 続可能な開発とは、「将来の世代が自分たち自身の欲求を満たす能力を損なうことなく、現在の世代の 欲求を満たすような開発」であるとされている。これを受けて、1992年にブラジルのリオ・デジャネイロで開催された、環境と開発をテーマとする首脳レベルでの国際会議「環境と開発に関する国際連合会議(地球サミット)」では、持続可能な開発を目指すというリオ宣言が採択された。この宣言では、持続可能な開発の原則として、次のような内容が盛り込まれた。

- ① 生態系の維持:自然の能力の不可避な劣化の回避
- ② 世代内の公平:絶対的貧困,貧富の格差の解消
- ③ 世代間の公平:将来世代の開発の可能性の保証

実際には、上記の目標の現実的達成法をめぐって、「持続可能な開発」の解釈には様々なものがある。 ある見方では、成長(growth)とは人間が利用して廃棄するエネルギー資源の総量を増やそうとするもの であるのに対して、発展(development)とはこの量を増やすことなく効率化を図るものであり、エネル ギー資源の総量は限られているため、究極的には人口を減らして再生可能資源のみを持続可能な程度に 利用することを目指すべきであると考えている。またある見方では、非再生資源を使うことにより、よ り豊かな将来が築かれるのだから、発展とは緩やかな成長であると考えている<sup>19)</sup>。この問題は、科学技 術にとどまらず、政治や経済のあり方にも関わる難しい問題であるが、このまま進もうとすれば、エネ ルギー資源の不足、地球環境の劣化に到り、退こうとすれば 65 億の地球人口を支えるにも、発展途上 国の人々の発展を賄うにも手に入るエネルギーの総量が不足し、いずれにしても戦争や貧困、自然災害 が待っているという地球文明の危機を迎えているのが現状なのである。

#### (3) 原子力と放射性廃棄物の選択

これまで地球上で、生物や人間がどのようにエネルギーを得てきたかを説明した。生物が生態系の一 員として、生態系の環境維持回復能力の範囲内で活動しているときは問題なかったのであるが、産業革 命以降の人間の加速度的なエネルギーの消費は、資源の枯渇や廃棄物による環境負荷について配慮しな がら今後の文明活動を行っていく必要があることが分かってきた。我々は現在、再生エネルギーとして、 生物エネルギー(農産物、林産物、海産物、有機廃棄物など)や自然エネルギー(太陽、水力、風力、 地熱など)を、非再生エネルギーとして化石エネルギー(石炭、石油、天然ガス、薪など)や原子力エ ネルギーを使っている。これまでは、これらの入手に必要な経費を経済価値として、何が大量に安く手 に入るかを考えてきたが、今後はこれらの資源の総量やその廃棄物のもたらす環境負荷をも考慮するこ とが必要になってきた。

このような視点からそれぞれのエネルギー資源の特徴を見てみる。まず、それぞれのエネルギー資源 が地球上の手に入るところにどれだけあるのかを非再生エネルギー資源についてまとめたのが、表 1.2.1 である。可採年数というのは、現在の技術や経費で掘り出して現在のペースで消費していけばあ と何年分あるかという見積もりである。これらの算定のもとになるデータは、資源産出国が提供してい るため、より大量に生産したい国は多めに見積もりを出すなどの問題があるし、資源が新たに発見され ることもあるため、数字はあくまで見積もりにすぎない。それでも、化石燃料は、石炭を除いて今世紀 中には枯渇する可能性が高いといえる。ウランは量的には少ないが、化石燃料が化学エネルギーを使う のに対し、原子力では核エネルギーという桁違いに密度の高いエネルギーを使うため、少量の燃料から 大量のエネルギーを得ることができる。それでも現在使われている軽水炉などのように、ウランの中に わずかに含まれるU-235 という同位体(原子のうち陽子数が等しく中性子数が異なるものを同位体と呼 び、陽子数と中性子数の双方について原子を区別する時には核種という用語を使い、元素記号の後に質 量数(陽子数と中性子数の和)をつけて表す)の核分裂を利用するという使い方では、化石燃料と同じ 程度で枯渇してしまう。ただし、現在開発中の高速増殖炉が実用化されると、ウランの大部分を占める U-238 がプルトニウムに変わりこれが核分裂してエネルギーを出すため、2500 年以上もの長い間のエネ ルギーを賄うことができる<sup>20)</sup>。

<b></b>			
	埋蔵量		可採年数
石油	1兆1,886億 バーレル		41 年
天然ガス	180 兆 m³		67 年
石炭	9,091 億 トン		164 年
ウラン	459万 トン	核分裂炉	85 年
		高速増殖炉	約 2,550 年

表 1.2.1 世界のエネルギー資源確認埋蔵量 (2004 年)<sup>20)</sup>

次に、再生可能エネルギーである太陽光や風力はどうであろうか。これらは歴史的には、生物が使い、 化石エネルギーが見出される前には人類が頼っていたエネルギー資源であるが、科学技術の進歩により どのくらい効率的に得られるようになっているのかが問題である。表1.2.2は、原子力による発電と自 然エネルギーによる発電を比較したものである。100万kWの発電量というのはおよそ100万人の電力を 賄うのに使われる電力で、今の原子力発電所は、大体1基100万kWくらいの電力を発生している<sup>20)</sup>。

衣 I. Z. Z ・	谷悝电力の比較		光电に ノいて/ =>	
	建設	費	必要面積	
原子力発電	1基 3000-	億円		
太陽光発電	6~7	兆円	約 67 km²	
		(山	手線の内側一杯)	
風力発電	1兆	円	約 246 km²	

(山手線内側の3.5倍)

表 1.2.2 各種電力の比較(100万 kW の発電について)<sup>21)</sup>

自然エネルギーは、太陽がある限り枯渇することのないエネルギーであるが、残念ながらエネルギ 一密度が低く、必要なエネルギーを得るには広い面積が必要となる。冬の日に部屋を暖めたりその他 の電気を使ったりするには、その部屋よりはるかに広い面積が必要なことはすぐに想像できる。この 面積は1人あたりに直すと、太陽光で20坪、風力で75坪になる。したがって自然エネルギーで賄え るエネルギーにはどうしても限界がある。我が国の見通しとしては2010年頃に、よくて総エネルギー 需要の約3%程度と見積もられている<sup>21</sup>。

次に、エネルギー資源の利用に伴う廃棄物の問題について考える。放射性廃棄物の種類と発生量、危険性については後により詳しく述べるが、図1.2.6 は放射性廃棄物の発生量を化石エネルギーによる火力発電と概略比較したものである。100万 kWの発電所を1年間運転する場合、石油、石炭などの火力で発電すると炭素が燃えて二酸化炭素になり、その他に重金属を含む灰が出てくる。二酸化炭素はもしドライアイスにして固めたとすると、500万トン程度の重さになる。そのほか数十万トンの重金属を含む 灰がある。この二酸化炭素は大気中に放出され、植物が光合成して消費する他は、生態圏のどこかに溜まっている。原子力発電所を同じように運転すると、高レベル廃棄物がガラスで固められた固化体として約30本、重さにして15トンと、低レベル廃棄物が約600トン発生する。一方では"万トン"、他方

では"トン"という単位で示すように量としては桁違いである。トンの代わりに円をつけてみると違い が分かるかもしれない。あるいは1人当たりに直して5トンと15グラムにして比べてみてもよい。



放射性廃棄物は発生エネルギーに比べて圧倒的に少量で、全ての廃棄物が管理下にある

図 1.2.6 放射性廃棄物の発生量(文献<sup>2),20),21)</sup>をもとに作成)

廃棄物は量ではなく、質の問題でどれだけ危ないかが問題だと思う人もたくさんいると思われる。確 かにこれまでは二酸化炭素を大気中に出しても、生態系で希釈が起こり大丈夫だろうと考えられてきた。 しかし世界中の先進国で1人当たり毎年5トンもの二酸化炭素を放出していると、生態系の環境維持回 復能力も追いつかず、これにより地球の大気組成が変化して、温暖化がもたらされ始めているかもしれ ない。二酸化炭素に限らず廃棄物は環境に出てしまってから、それをもう一度回収するということは大 変である。廃棄物が危険なのは、これが環境に出てしまってコントロールできなくなることにより害が もたらされるからである。放射性廃棄物から出てくる放射能も同じであるが、これが我々の住んでいる 環境から隔離され閉じ込められている限りは害をもたらすことはない。今、地球上で問題になっている のは、資源の利用量や廃棄物の量が多くなり過ぎて、地球環境が息切れしているということである。原 子力発電の場合、廃棄物の量としては少量で済むため、これに手間をかけて生態圏から離れた場所に、 長期間隔離し閉じ込めておけば、地球環境に負荷をかけないで済むのではないかと考えられている。原 子力エネルギーの資源であるウランは、宇宙生成の際に形成されたものなので、使ってしまえばなくな ってしまう非再生の枯渇資源である。その意味では究極の意味での持続的開発には結びつかないが、現 在の地球文明の状況を見ると、化石エネルギーの利用を増やして資源枯渇と地球温暖化を迎えることも できず、65億の人々が再生エネルギーのみにより生きていくこともできない。この点で、原子力特に高 速増殖炉による原子力の利用により、今後数千年のエネルギーを賄って、持続的開発が可能な世界への 軟着陸を図ろうというのが、原子力と放射性廃棄物のセットを選択しようという考えなのである。

# 1.2.2.2 放射性廃棄物の発生

## (1) 核燃料サイクル

原子力を使えば、放射性廃棄物が出てくる。図1.2.7 は核燃料サイクルと呼ばれるもので、原子力で 利用されるウラン燃料とその核燃焼廃棄物の流れを示したもので、図中の数字は100万 kW の原子力発 電所を1年間運転するときの物量である。核燃料となるウラン(U)は、もともと地殻中に広く分布し ているが、その中でも数分の1%から数十%程度ウランを含むものがウラン鉱石である。ウランは、鉱 山近くで粉砕された鉱石から、酸やアルカリによって抽出し、焼かれて U<sub>3</sub>0<sub>8</sub> という組成のウラン精鉱 (イ エローケーキ)とされ転換工場に運ばれる<sup>22)</sup>。



(数字は100万k₩の原子力発電所を1年間運転するときの物量)

天然のウランは大部分が U-238(半減期 45億年)から成り,核分裂をしやすい U-235(半減期 7億年) を 0.7% しか含んでいないため,ウランは転換工場で U-235を濃縮するのに便利なように,気体になり やすい 六フッ化ウラン (UF<sub>6</sub>)に転換される。ウラン濃縮工場では,遠心分離機を何台も連続的に使って, 気体の UF<sub>6</sub>が非常に強い遠心力のもとで,U-238とU-235のわずかな重さ(質量)の差により分離され, U-235の濃度が 3~5% になるまで濃縮される。こうして U-235同位体が濃縮された UF<sub>6</sub> は次に,再転換 工場で,原子炉の中で使えるよう高い温度でも安定な UO<sub>2</sub>というセラミックスのペレット(UO<sub>2</sub>粉末を直 径約1 cm,高さ約1 cm の円柱に焼き固め圧縮成型したもの(図 1.2.8)にされ,成形加工工場で,図 1.2.9 に示すように,厚さ 1 nm 弱のジルカロイ(スズ,鉄,ニッケル,クロム等を少量含むジルコニウ ム合金)の円筒サヤ(燃料被覆管)に棒状に納められ(燃料棒),いくつも束にして集合体にされる。 BWR および PWR はそれぞれ,日本で原子力発電に使われている沸騰水型原子炉および加圧水型原子炉の 略称である。図の中の,上部,下部タイプレートやノズル,チャンネルボックスや支持格子などは主と してステンレス鋼でできている。燃料集合体は,図 1.2.10 に示すように原子炉に入れられ,核燃料が 原子炉の中で核反応してエネルギーを出す。U-235 が中性子を捕獲して,2個のより小さな 2 つの原子 (核分裂破片,核分裂生成物)と 2~3 個の中性子に変わる際に,余ったエネルギーが核分裂生成物の 運動エネルギーとなり、これが周囲の水を加熱し、BWRの場合はここで発生した蒸気が、PWRの場合は 熱交換器を通じて発生した蒸気によりタービンが回されて電気となる(図1.2.11,図1.2.12)。



図 1.2.8 ウラン燃料ペレット<sup>23)</sup>



図 1.2.9 BWR (左) および PWR (右) の燃料集合体の構造<sup>20)</sup>



図 1.2.10 原子炉圧力容器断面図<sup>20)</sup>

図 1.2.11 沸騰水型原子炉(BWR)原子力発電のしくみ<sup>20)</sup>



図 1.2.12 加圧水型原子炉(PWR)原子力発電のしくみ<sup>20)</sup>

ここで発生した中性子は、他のU-235 に衝突してさらに核分裂を連鎖的に維持する。またこの中性子がU-238 に当たると、U-238 はU-235 ほどではないが核分裂し、あるいは中性子を捕獲して、さらに放射性崩壊することにより、原子番号の高いプルトニウム(Pu-239、Pu-241)に変化し、これが核分裂してエネルギー生産を助ける。3~4 年間こうした核反応でウラン全体の3~5%強が核分裂したところで、核分裂生成物が多くなりすぎてこれらが中性子と反応してしまうため、それ以上連鎖反応が維持できなくなり、核燃料は使用済燃料として原子炉から取り出される。ただし、この時点でも使用済燃料中には、もともとのU-235 が約1%、U-238 からできた Pu-239 や Pu-241 が約1%含まれているので、これを核分裂生成物や、U-238 が中性子を捕獲してできたその他の超ウラン元素(ウランより原子番号が大きい元素)から分離すると、さらに核燃料として使うことができる。

そこで、この使用済燃料を硝酸に溶かし、溶媒抽出法(水と混ざらない有機溶媒を使用し、ウランや プルトニウムを有機溶媒に溶けやすい化合物にし、核分裂生成物や超ウラン元素と分離する方法)でウ ランとプルトニウムを回収する。これを再処理と呼んでいる。図1.2.13 は再処理の工程を示したもの である。燃料集合体はせん断工程で上下周囲の構造を除いた後、燃料棒を数 cm の長さの断片とする。 この時、のこぎりのような切り方をすると、燃料被覆管(ジルカロイ)の微粉末が多量に発生するため、 せん断法(はさみや包丁のように硬い刃で押し切る方法)を使う。せん断片は、外側がジルカロイ、内 側が二酸化ウラン(U0,)に核分裂生成物や超ウラン核種が3~5%含まれた使用済燃料となっている。 これを硝酸溶液に入れるとジルカロイ被覆管を残して、内側の使用済燃料が溶け出す。分離工程では、 硝酸水溶液に対して、リン酸トリブチル(リン酸のトリブチルエステル(C4L0)。P=0)をドデカン

(CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>10</sub>CH<sub>3</sub>) に溶かした有機溶媒を接触させる。水とこのような有機溶媒は混合しないため,両者 を振り混ぜると有機溶媒に溶けやすいものだけが選択的に水相から有機相に移る。このような分離法を 溶媒抽出法という。この場合には、ウランとプルトニウムのみが有機相に移り、残りの核分裂生成物や 超ウラン元素は水相に残るため、望むウランとプルトニウムを分離して得ることができる。

JAEA-Research 2008-042



図 1.2.13 使用済燃料再処理の工程<sup>24)-27)</sup>

回収されたプルトニウムは、MOX 加工工場で再度ウランと混合し混合酸化物(MOX: Mixed Oxide)燃料とされ、核燃料として再利用される。分離された核分裂生成物や超ウラン元素は、ホウケイ酸ガラスにより固められガラス固化体とされる。これが高レベル放射性廃棄物と呼ばれるものである。また、核燃料サイクルの中のそれぞれの工程で、放射性物質で汚染された材料も発生する。汚染された材料は施設を解体する際にも発生する。これらを総称して低レベル放射性廃棄物と呼んでいる。高レベル放射性廃棄物が核分裂生成物や超ウラン元素そのものをガラスで固化したものであるのに対して、低レベル放射性廃棄物は、これらで汚染した材料ということができる。

## (2) 放射性廃棄物の発生源

図1.2.14,表1.2.3は、放射性廃棄物が、核燃料サイクルに伴って、どのような所からどの程度発 生するかを示したものである。放射性廃棄物は、管理の手を免れることのないように、まずその発生 源に従って分類され管理されている(発生者責任の原則)。原子炉から取り出した使用済燃料を再処理 し、その中の核分裂生成物や超ウラン元素を直接ガラスで固化したものを、高レベル放射性廃棄物と 呼んでおり、その他、放射性物質で汚染された材料を総称して低レベル放射性廃棄物と呼んでいる。 また、原子力発電所の解体やその他の工程に伴って出てくる廃棄物のうち、金属やコンクリートなど、 放射性物質による汚染が実質上無視できるものが大量に発生する。これらは検認といって、慎重にク リアランスレベル以上の汚染のないことを確認した上でリサイクルされる。クリアランスレベルとは、 放射性物質として扱う必要がない物を区分するレベルで、これらが社会に出たとしても一般公衆に 0.01 mSv/年以上の被曝を与えることのないように、放射性核種ごとに決められている。



図 1.2.14 放射性廃棄物の種類と発生源<sup>28)</sup>

廃棄物の種類			廃棄物の例 発生源		廃棄物量	
高レベル放射性廃 棄物			ガラス固化体 再処理施設		約 4.3 万本*1	
低レベ	超 ウ ラン を 含 む 加 廃 棄物	·核種 文射性	ハル、エンドピース、ヨ ウ素吸着フィルター、廃 液	再処理施設、MOX 燃料加工施設	約 71 万本 (約 14 万m <sup>3</sup> )	
ル放射	ウラン廃棄物		消耗品、スラッジ、廃器 材	ウラン濃縮、燃料加 エ施設	約 43 万本 (約 8.5 万m <sup>3</sup> )	
性	発電所 廃棄物	高	制御棒、炉内構造物	原子力発電所		
廃棄物		低	廃液、フィルター、廃器 材等を固形化		約 275 万本 <sup>*2</sup> (約 55 万m <sup>3</sup> )	
125		極低	コンクリート、金属			
	RI•研究所等 廃棄物		実験、医用廃棄物	RI利用施設、研究 所	約 35 万本 (約 7 万m <sup>3</sup> )	
クリ 以下	アランスレ 「の廃棄物	ベル	解体廃棄物の大部分	上記全て		

表 1.2.3 放射性廃棄物の区分と 2048 年頃までの発生量 28)

\*1 海外返還分約 2200 本を含む、\*2 海外返還分約 6.3 万本(約 1.3 万m3)を含む

## (3) 発電所廃棄物, ウラン廃棄物

低レベル放射性廃棄物は、その発生源に従って TRU 廃棄物、ウラン廃棄物、発電所廃棄物、RI・研究 所廃棄物として管理されている<sup>28</sup>。ウラン廃棄物は、ウラン濃縮工場や燃料加工工場で発生するもので、 主としてウランのみを含んでおり、その放射能のみであるためウラン鉱石と危険性はあまり違わないが、 半減期が非常に長いという特徴を考慮する必要がある。発電所廃棄物は、発電所の操業に伴い発生する もので、コンクリートや金属など極めて放射能レベルの低いものから、図1.2.15 に示すような使用済 制御棒やチャンネルボックス、炉内構造物のように、ステンレス鋼が燃料近傍で中性子照射されたもの (この反応で放射性核種に変わることを中性子放射化という)や使用済イオン交換樹脂など,含まれる 核種の半減期は短いが放射能レベルが比較的高いといったものまである。含まれる主要な放射性核種に は、コバルト-60(半減期5.3年)、ニッケル-63(半減期100年)、セシウム-137(半減期30年)、スト ロンチウム-90(半減期29年)、炭素-14(半減期5730年)などがある。



図 1.2.15 放射能レベルの比較的高い発電所廃棄物<sup>29)</sup>

## (4) TRU 廃棄物

TRU 廃棄物は、再処理施設や MOX 燃料加工施設で発生する放射性廃棄物で、高レベル放射性廃棄物以 外の全ての廃棄物である。これらの施設では、原子炉で核燃焼させた燃料を処理するため、核分裂生成 物や超ウラン核種、放射化生成物などにより汚染された材料がいろいろ発生する。ウランを原子炉で核 燃焼すると、U-235 が核分裂して核分裂生成物が生成するほかに、U-238 を出発として中性子捕獲とβ (ベータ)崩壊が繰り返され、より原子番号の大きい核種(超ウラン核種)(TRU は超ウラン:Transuranium の略称)が生成する。このうちの Pu-239 と Pu-241 は核分裂してエネルギーの生産に寄与するが、残り の超ウラン核種は、例えばネプツニウム-237 (半減期 214 万年)、アメリシウム-241 (半減期 432 年)、 アメリシウム-243 (半減期 7370 年)など、一般に長半減期でα (アルファ)放射性であることが多い ため、廃棄物の潜在的危険性に大きな寄与をする。このため再処理施設や MOX 燃料加工工場で発生する 廃棄物を、超ウラン核種を含む放射性廃棄物(TRU 廃棄物)と呼んでいる。これらは、含まれる放射性 核種という点では、高レベル放射性廃棄物と同じであるが、含まれる TRU 核種の量が少なくこれによる 発熱(α線やβ線が物質に当たってその運動エネルギーを与えることによって発生する熱)は、高レベ ル放射性廃棄物(ガラス固化体1体当たり固化時で約2.3 kW)に比べて小さい(約0.06 kW/本)という特徴から,長半減期低発熱放射性廃棄物と呼ばれることもある。



再処理工場から発生する放射性廃棄物

図 1.2.16 再処理工場から発生する TRU 廃棄物<sup>24)-27)</sup>



図 1.2.17 せん断・溶解工程で発生する TRU 廃棄物<sup>24)-27)</sup>

図1.2.16は、再処理工場から発生するTRU廃棄物が、具体的にどのような工程から出てくるかを示 したものである。再処理工場では、原子炉から取り出された燃料集合体が、せん断工程でエンドピース (燃料集合体上下部末片)を切り離した後、燃料棒を数 cm の長さの断片とし、内側の使用済二酸化ウ ラン燃料を硝酸に溶かし出す。この時溶けないで残ったジルカロイ被覆管のことをハルと呼んでいる (図1.2.17)。ハルやエンドピースは、原子炉で核反応が起こっている時に核燃料に密着していたため、 核分裂生成物や超ウラン核種が金属内部にまで強く付着している他、金属中にもともと微量含まれてい た窒素が中性子と反応して生成した炭素-14(β崩壊、半減期5730年)が含まれているTRU廃棄物であ る。ハルやエンドピースは、圧縮して円盤状に押しつぶした後、直径約40 cm 高さ約1.3 m のキャニス タ (図1.2.18)<sup>24)</sup>に収納される。燃料の溶解工程では、核分裂生成物のうち気体になりやすいものもあ り、これらは硝酸に溶けずに排気ガス中に含まれてくる。この中で安全上問題になるのは、ヨウ素の同 位体である(I-131:β崩壊,半減期8日,I-129:β崩壊,半減期1.6×10<sup>7</sup>年)。これらは硝酸銀をゼ オライト,シリカゲルまたはアルミナなどに含ませた吸着剤を通して,外気へ放出されないようにして いる。原子炉の運転中はI-131の放出が問題となるが,これは半減期が短いため,放射性廃棄物として の危険はI-129によりもたらされる。溶解後は,溶液に残っている微粉末などをフィルターや遠心機で 分離して除く(清澄)が,このときのフィルターや残渣もTRU廃棄物となる。廃銀吸着材は,解体して セメントと共にドラム缶に収納される(図1.2.18)<sup>24</sup>。



図 1.2.18 廃棄体の形状<sup>24)</sup>

せん断・溶解から脱硝までで使う硝酸や有機溶媒などは、汚染を取り除き(除染と呼ばれている)で きる限り回収して再利用するが、これら一連の工程からは、放射能レベルは高くはないが、核分裂生 成物や超ウラン核種で汚染した廃液の発生が避けられない。これらのプロセス濃縮廃液は蒸発濃縮し、 アスファルトやセメントなどで固めて固体の廃棄物とし、ドラム缶に収納される。またそれぞれの作 業で使った紙や布、ゴム手袋、金属配管やガラスの廃材なども発生する。これらは可燃物、難燃物、 不燃物に分けてプロセスごとに管理貯蔵されているが、燃焼灰化や溶融などができるものは処理を施 して、セメントなどで固めてドラム缶や角型容器に収納して廃棄物とする(雑固体廃棄物)(図1.2.18)。 雑固体廃棄物はMOX加工工場からも発生する。プロセス濃縮廃液や雑固体廃棄物は、発生場所によっ て放射能レベルが異なっているので、それぞれ別々に分別保管されている。

TRU 廃棄物はその他,返還廃棄物管理施設や,さらには長期的には操業を終了した施設の解体によっても発生する。また,わが国の電力会社は、フランスおよびイギリスの再処理施設(AREVA-NC 社および BNGS 社)に海外再処理を委託しており、この海外再処理により発生する廃棄物もわが国に返還されることになっており、これら返還廃棄物も TRU 廃棄物に含まれる。

以上のように TRU 廃棄物は,減容化後,それぞれの容器に入れられて,放射性物質が出ないように固 定化処理される。これらをまとめたものが表1.2.4で,表中にはそれぞれの発生量も示してある。これ らの廃棄物は含まれる放射能や物理的性状が異なっているので,そのグループにしたがって処分される ことになっている。また,処分される際には,さらに、ドラム缶やキャニスタは、4本単位で廃棄体パ ッケージとよばれる金属の箱に入れ、隙間にセメント等を詰めて容器が動かないように安定化される。
	主な 廃棄物	説明	減容化	固化	容器 発生量	
1	廃銀 吸着材	ガス状の放射性物質を 吸着させた吸着材	解体	セメント など	ドラム缶 318 ㎡ (1600 本)	
2	燃料の 部品	ハル: 燃料被覆管をせん断 した物 エンドピース: 燃料集合体 の端末片	圧縮	円盤状 に押し つぶす	キャニスタ 6,732 ㎡(31 万本)	
3	プロセス 濃縮廃液	使用済燃料を溶解に 使った硝酸の廃液	蒸発 濃縮	アスファ ルトなど	ドラム缶 6,175 ㎡(29 万本)	
4	雑固体 廃棄物	可燃物 (作業で使った紙、 布などの消耗品)	焼却	セメント など	1*= / 5	
		難燃物 (作業で使ったゴム手袋、 ビニールなどの消耗品)	焼却	セメント など	トラム缶 角型容器 13,416 m <sup>3</sup> (110 五本)	
		不燃物(配管や機器部品の 交換による廃材、工具、 ガラスなど)	切断 溶融 圧縮	セメント など	(110 万本)	

表 1.2.4 TRU 各廃棄物の処理方法と 2048 年頃までの発生量予測<sup>24)-27)</sup>

# (5) 高レベル放射性廃棄物

再処理においてウランやプルトニウムと分離された核分裂生成物や超ウラン元素は、使えない燃え かすや灰になったもので、放射能が強いため再利用するのが難しく、今のところ捨てるしか道はない。 この量は、ウラン燃料1トンあたり30kg~50kgに過ぎないのであるが、これを捨てるための方法と しては、図1.2.19のように硝酸溶液とガラス原料を入れ、一緒に高温で溶かしてガラスにして固める。 っまり溶液にしておくと、いろいろなところに広がったりして非常に危険なため、取り扱いやすいよ うにガラスを使って固めるわけである。ホウケイ酸ガラスというガラスを使用し、ステンレスの容器 の中にこのガラスを溶かし込み、高さ約1.3 m、外径約40 cm、重さ約500 kgくらいの固化体ができ る。これが高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)と呼ばれるもので、100万 kW の発電所を1年間運 転すると約30本発生し、日本では2048年頃までに4.3万本発生すると予測されている。高レベル放 射性廃棄物は、含まれる放射能濃度が極めて高く、核燃料サイクルで発生する放射性廃棄物中の放射 能のおよそ98~99%はこの高レベル放射性廃棄物に含まれている。



図 1.2.19 高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)<sup>1),2)</sup>

# (6) 放射性廃棄物のもたらす危険-放射線と放射能-

ここまでの説明で、それでも原子力あるいは放射能は危険だ、それを無視してこんな話をしていてよ いのかと思われた人もいると思う。原子力発電は莫大なエネルギーを扱う。このエネルギーを取り出す には、核分裂連鎖反応を利用する。つまり、核分裂(大きな原子核が中性子を捕獲して2個の原子核に 分かれる反応)の際に発生した中性子がさらに他の原子にあたり、それがまた核分裂して中性子を出す のである。ウランを燃料とする原子炉の中では、U-235 と Pu-239、Pu-241 という核種がこのような核分 裂連鎖反応を維持する(核分裂性物質)原子力発電では、この連鎖反応を制御しているため、勝手に連 鎖反応が進んでしまう(暴走する)ことのないように最新の注意が払われているし、万が一起こったと しても、すぐに止まるように、あるいは外部環境に被害が及ばないよう何重にも安全策が施されている。

放射性廃棄物には、核分裂性物質は問題になるほど含まれていないため、それ自体爆発したりするこ とはなく、危険をもたらすのは放射能だけである。物質(放射性核種)が放射線を出す能力を放射能と いい、ベクレル(Ba)(1秒当たりに崩壊する粒子の数)で表す。原子は、原子核と電子からできており、 原子核は陽子と中性子からできている。我々の周囲にある原子では、陽子と中性子の数が原子核全体と して安定になるようになっているが、原子炉の中で核分裂し、中性子を捕獲して生成した核種は、陽子 と中性子の数のバランスが取れていないため、不安定で時間とともに余った粒子やエネルギーを放出し て安定な原子に変わる(放射性崩壊)。このとき放出される高速の粒子(光子を含む)が放射線(電離 放射線)である。もとの不安定な原子核は時間と共に減っていくが、これがもとの半分になる時間を半 減期という。半減期は原子核の不安定性によって決まるため、周囲の温度や圧力、化学環境などによっ て変えることはできない。原子核から放出される主な放射線には、α線、β線、γ線などがある。α線 はヘリウムの原子核に相当しており、これを放出するともとの核種は原子番号が2、質量数が4だけ減 少する。β線は電子に相当しており、これを放出すると原子核の中の中性子が陽子に変わり、原子番号 が1だけ増加する。一般に、核分裂や中性子捕獲でできる核種は、中性子が過剰な状態にあるため、β 線を出して安定になろうとする傾向にある。また周囲の材料が中性子を捕獲して生成する放射化生成物 は1回のβ崩壊で安定な核種になるのに対して、核分裂生成物は中性子の過剰量が大きいため、次々と β崩壊を繰り返す。半減期も大まかに言って放射化生成物が短く、ついで核分裂生成物がこれより長く、 α崩壊をする超ウラン核種が最も長くなっている。γ線は高いエネルギーの光子 (電磁波) である。我々 の身の回りにある可視光線も同じ光子であるが、このエネルギーが非常に高い状態にあるのがγ線であ る。銃弾や大砲の弾と同様、これらは運動エネルギーが小さければ破壊力は小さいのであるが、高い運 動エネルギー(空気中の分子の100万~1億倍)を持っているため,重くて電荷の高いものほど(α線> β線>γ線の順で)影響力が大きくなる。放射線の量は、物質に吸収される放射線のエネルギー(吸収 線量)をグレイ(Gy)という単位で表し、この線量が与える生物学的効果を考慮した全身に対する被ば く線量(実効線量)をシーベルト(Sv)という単位で表す。

それでは、放射性廃棄物がどの程度の放射能を持っているのであろうか。放射性廃棄物のうちで最も 含まれている放射能の多い高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)について見てみる。ウランを鉱山か ら取り出して、U-235の濃度を3~4%にした低濃縮ウラン燃料を原子炉で燃やすと、核分裂や中性子と の反応(中性子を捕獲して中性子が過剰な核種になり、これが放射性崩壊してより原子番号の大きい核 種になる反応)を通じて放射能を帯びた物質に変わる。その結果、燃焼前の1千万倍の放射能を帯びる ようになってしまう。これはものすごい放射能である。これを、30年くらい経ったところで再処理して ガラス固化する。このときにすでに半減期の短い多くの核種が崩壊して、放射能は最初の1000分の1 程度になっているが、この時の放射能がどの程度かを示したのが図1.2.20である。図には放射線が物 体に当たった時に発生する熱がどの程度かも示している。固化時の熱量は2kW,処分時で500W程度で、 循環する空気によって冷却できる程度であるが、後述するように地層処分する場合には、周囲の岩盤が 熱を通しにくいことにより固化体の周囲だけ温度が高くなる可能性があるため、ある程度の間隔をおい て処分するなどの考慮が必要になる。





ガラス固化体の作製時点では、広島原爆が出した放射能の40倍程度になる。この1本のすぐそばの 表面に人が立ったとすると、1時間で放射線を1500 Sv 受ける。人間は、7Sv 程度受けると100%の人が 死ぬと言われているので、20秒で100%の人が死ぬほどのものすごい放射線がここから出ている。ただ、 放射線は離れれば離れるほど、どんどん減っていく。表面から1 m離れると10から15分の1に、2 m のときは1 mのときの4分の1に、3 mで1 mのときの9分の1に、というようにどんどん減少する。 また、人との間に物質が存在すると、放射線は物質に吸収されて人間には届かない。α線は紙1枚で、 β線は薄い金属板で、y線は水やコンクリートで簡単に止まる。実際、図1.2.21は青森県六ヶ所村に ある日本原燃株式会社の貯蔵管理センターでガラス固化体が貯蔵管理されている写真であるが、作業員 の立っている床が厚さ約2 mのコンクリートで、これにより放射線は完全に遮蔽される。したがって、 このような廃棄物から放射線を出す物質が環境に出てこないことが大事なことになるのである。もしも 環境に出てきて人間の体内に入ったりすると、排泄されるまで人間はその放射性物質から放射線を浴び 続けることになる。

図1.2.22 はガラス固化体の放射能の時間変化を示したもので、極めて長い時間にわたる大きな変化 になるため、縦軸、横軸とも対数軸となっており、この図の場合1目盛りで百倍の変化がある。もとの 放射能は、1000 年経つと1000 分の1 くらいになり、数万年経つと2万分の1 くらいになるが、それで もまだゼロにはならない。このようなガラス固化体は、2048 年頃までに4.3万本も発生する。戦争やテ ロなどのことを考えると、何千年もの間、図1.2.21 のようにして地表で管理していくことには無理が あり、なんとか早めに手を打つ必要がある。まず思い浮かぶ方法は、環境というのは無限で、どこかに 捨てたらどこか我々の目の届かないところに行ってくれるか薄まって危険でなくなるだろう、という方 法で、この考え方を希釈分散と言う。仮に、4万本の放射能を全部日本海に入れて、これがきれいに溶 けて完全に均一になってくれたとすると、日本海というこれだけ大きな海で薄めたとしても、固化時で は1 kg の海水に 570 Bq という濃度になる。これは現在、我々が住んでいる日本の土の中に含まれてい るウランの放射能(25 Bq/kg)よりはるかに多いわけである。



図1.2.22 高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)の放射能の時間変化<sup>1)</sup>

土の中のウランというのは、我々が普段、大地から受けている放射線の責任の大部分を担っているも のであるが、これに比べてはるかに多いわけである。これが問題になるかどうかは別問題として、非常 に多いから、薄めようという考え方はそうはいかない、どこかに捨ててしまって、地球が何とかしてく れるというわけにはいかない、これを何とかしなければならない。

放射線の被曝に対する安全の目標としては、今ある危険性がより高くなるようなことがあってはいけ ないと考え、人間活動に由来する放射線被曝をある限度以下にしようと考えている。放射線は、何も原 子力を使わなくても、もともと自然界にあり、人々はこれを日常浴びている。表1.2.5 はもともと人間 が受けている放射線被曝の世界平均値である。放射線のもとになるのは、宇宙線や原始放射性核種であ る。原始放射性核種は、超新星爆発でできた放射性核種のうち、半減期が非常に長いため、地球の年齢 である 46 億年を経ても放射性崩壊しきれずに地球上に残っている核種で、放射性崩壊によりできた核 種がさらに放射性崩壊をするという形で、崩壊系列を作っているものもある。これらは、大地の中に広 く分布しており、人間はこれらから直接に、あるいは食品を通じて体内に取り込んで被曝している。こ のように人間は自然から平均して約2.4 mSv(ラドン-222 によるものを除くと約1.2 mSv)の放射線被 曝を受けているのであるが、これが何の影響も無いのか、よいのか悪いのか分かっていない。大地を構 成している岩石の種類によって原始放射性核種の含まれている量も違うため、自然放射線による被曝も 地域によって異なるのであるが(高いところでは平均の数倍から10 倍以上も被曝している地域がある が)、統計的な差は見出されていない。しかし、これらの値よりはるかに大きい被曝では明らかに障害 が発生している。図1.2.23 は、放射線による障害の発生するしくみを示したものである。

	土中の放射	年間	実効線量(mSv)	)
被曝源	能濃度 (Bq/kg)	体外被曝	体内被曝	合計
宇宙線		0. 355		0. 355
宇宙線生成核種			0. 015	0. 015
原始放射性核種(半減期)				
K-40(12.8億年)	370	0. 150	0. 180	0. 330
Rb-87(480 億年)			0.006	0.006
U-238 系列(45 億年)	25	0. 100	1. 240*	1.340
Th-232 系列(141 億年)	25	0. 160	0. 180	0. 340
合計(およそ)		~0. 800	~1.600	~2. 400

表 1.2.5 自然放射線による被ばく(1 mSv=0.001 Sv)<sup>31)</sup>

\*Rn-222 → Po-214 によるものが大部分



DNAの損傷はDNA複製ミスと細胞内の反応性環境、毒物、紫外線、放射線などにより、 1日1細胞あたり約100万回発生し、人間はそれを正常に修復して生きている。

図1.2.23 放射線の生物影響と修復作用<sup>32),33),34)</sup>

放射線があたると、生物の細胞の周囲はほとんど水のため、この水が分解される。放射線はエネルギーが高いためこの水の分解が効率的に起こると考えられる。この分解した活性酸素がDNAを壊す。一般にDNAの損傷はDNA複製ミスと細胞内の反応性環境、毒物(酸素)、紫外線などにより、1日1細胞あたりおよそ100万回発生するが、これが癌や老化に直接結びつくわけではなく、様々な機構で生体が治そうとする。1.2.2.1節では、酸素の増加に従ってオゾン層が形成され地表に到達する紫外線が減り、生物が陸上に進出したことを述べた。太古には紫外線が多いため生物は海中で活動していたわけであるが、海中といっても太陽の光の届かない数百メートルより深い所では光合成はできないため、生物は紫外線の影響を受けながら進化してきたといえる。このため、酸素や紫外線によるDNAの損傷については修復機能を備えて進化してきたと考えられる。修復が成功すれば、それで良いのであり、失敗したものはそ

のまま異常 DNA になるかというと、身体に影響がないように細胞自身が自殺して排泄してしまうアポト ーシスという機構もある。これも失敗して異常 DNA になると、異常細胞になるわけである。異常細胞は すぐ癌発生となるかというと、ここでも免疫作用が働いて異常細胞は体外に排除するというシステムが ある。結局、癌が発生するのは修復やアポトーシスの不備によることになる。

したがって非常に高い線量の場合には、修復が間に合わずそのまま障害が発生し(確定的影響)、低 い線量の時は、もともと毒物(酸素)や紫外線によって発生している DNA の損傷をわずかに増やすこと になり、この増加が修復以降の活動に影響を与えれば癌が増加することにつながる(確率的影響)。前 者については、自然放射線の千倍ほどの線量で影響が出る。0.5 Sv (=500 mSv) でリンパ球の減少など がみられ、4Sv で半数の人が死に、7Sv でほぼ全ての人が死に到る。胎児は影響を受けやすく、100mSv で重度の精神知能障害が現れるといわれている。線量が低い場合には、DNA の損傷の数と修復の失敗や 異常 DNA の数,発生する癌細胞の数の間にどのような関係があるのかが問題になる。DNA の損傷の数が ある程度異常になると修復などが追いつかなくなると考えれば、癌をもたらす線量にはしきい値がある ということになり、修復失敗などはすべてもとの損傷の数に比例していると考えると、線量にはしきい 値がないということになる。多くの化学毒物などは一般にしきい値があると考えられているが、放射線 については、どの程度以上の線量を浴びれば癌になる確率がどのくらい高くなるか、あるいはどの程度 以下なら癌が増えることはないのかを見積もるのが困難である。このため、広島や長崎で被爆した人で 老後に癌になった人のデータをもとに、そのまま低い線量でもこれに比例して癌になる人が増えると見 積もっている(低線量被曝に対する直線しきい値なし仮説)。広島や長崎の被爆者のデータは急性被曝 に関するもので、これを長期にわたる少しずつの被曝の影響と同じとするというのは、一時の強風の影 響をもとに毎日のそよかぜの影響を見積もるようなもので、様々な調査結果を見ても比例関係が成り立 つかどうかはわからず、かえって放射線の恐怖をあおるもので、防護のための無駄遣いがされていると して批判が多いものなのであるが、安全のため、自然放射線によるもの以上の被曝を避けようという趣 旨でこのような見積もりがなされている(国際放射線防護委員会 ICRP の勧告)。この見積もりによれば、 毎年1 mSv の線量を浴び続けていれば、老後に癌になる確率が1万分の1程度増える可能性があるとさ れている。人口統計によれば、我々が癌になる確率は毎年400人に1人(400分の1)程度であるので、 人間活動による余分の放射線被曝の限度(線量限度)は毎年1 mSv にしようというのが、放射線防護の 考え方になっている。

したがって、様々な原子力に関係する活動についても、人々がこのような被曝を受けることのないようにすることが目標となる。人々が1mSv/年の線量限度を超える被曝を受けないようにするための、 個々の被曝源や事業所に対する線量の制限値を線量拘束値という。線量拘束値については、非常に低い 濃度の放射能しか含まない物質には、0.01 mSv/年という値が適用されている。一般の人がいろいろな ところから別に放射線を浴びたとしても、1年間に1 mSv以上は浴びないようにしよう、ということで ある。このため、そのへんの机や壁、茶碗とかに放射性物質が混ざっていて、その1つずつが0.01 mSv/ 年の線量を与えるとし、これが100 個あるとすると、1 mSv になる。100 個重なることは確率が低いた め、0.01 mSv/年で良いだろう、そのような値なのである。よって、そのへんにあるコップ、スプーン とか、そういうものに対して0.01 mSv/年というレベルで管理し、これ以上の被ばくを与えるものは放 射性物質として管理するということである。このレベルのことを規制免除レベルと呼んでいる。また発 電所解体の際に発生するコンクリートなど、いったん規制の範囲内にあったものを、このレベル以下で あることを確認してリサイクルし、一般廃棄物とすることをクリアランスと呼んでいる。放射性廃棄物 の処分場に対する線量拘束値については、浅地中処分については処分場全体がもたらす被曝が、規制免 除レベルである 0.01 mSv/年を越えないようにすべきであるとして、管理を解く時点での規制値が設定 されている。

一方,地層処分のように深い地下に頑丈なバリア(放射能が出て行かないようにするための障壁)を 設けて処分する時に、あまり起こりそうもない出来事に対しても処分場全体に対してこの値を超えない ようにするというのは過剰防衛ではないかという議論もある。世界的に見ると、国際放射線防護委員会 (ICRP)は0.3 mSv/年を目安にすべきと勧告している。東京と岐阜県の大地からの線量の差が0.3 mSv/ 年くらいなので、これによって何かが起こるとは考えられない程度の値であり、その程度が妥当だろう、 という意見である。したがって、発生の可能性が高く、一般公衆の放射線被曝の観点から見て最も重要 と考えられる出来事については0.01 mSv/年というレベルを超えないようにし、これに比べてあまり起 こりそうもない出来事については0.3 mSv/年というレベルを超えないようにするというのが、今後の方 向と考えられる。いずれにしても、現在および将来の人々が、少なくともこの程度の線量以上の被曝を 受けないようにしようというのが放射性廃棄物の処分の目標になる。

評価の視点	放射能量 (Bq)	線量(Sv)	放射能毒性(m <sup>3</sup> )		
指標の概要	廃棄物中に 含まれる放 射性物質の 放射能量	地下水移行等により、廃棄体 から人間の生活環境へ放射性 物質が移行した場合の線量 (最大となる線量で評価)	放射性物質が水に溶けて希釈 され、飲用に際して安全であ ると考えられるのに必要な希 釈水の量		
核種毎の濃度		考慮している(核種毎の合計値を算出)			
廃棄体の物理 的、化学的形 態の差異によ る影響	影響を受け ない	影響を受ける(放射性物質が 地下水へ移行する際の漏出量 の計算は、廃棄体の閉じ込め 性能に大きく影響を受ける)	影響を受けない		
人への潜在的 な影響	考慮して いない	考慮している(シナリオに応 じて、経ロ摂取、吸入摂取、 外部被ばくによる人への線量 を計算可能)	経ロ摂取による人への線量を 考慮している(半減期、放射 線種、臓器への吸収、体内へ の滞留時間他を考慮)		
処分場のパラ メータによる 影響	影響を受け ない	影響を受ける(処分場の深度、 地質環境、処分施設の仕様等 の違いにより、影響を受け る)	影響を受けない		
指標の簡便性	簡便	複雑	簡便		

表 1.2.6 放射性廃棄物の潜在的危険度の指標<sup>25)</sup>

表1.2.6には、様々な放射性廃棄物がもたらすかもしれない危険度が示してある。人に対する放射 性物質の危険は、人がこれを呼吸器官や消化器官を通じて体内に取り込むか、生態系で外部から被曝 するかのどちらかによってもたらされる。体内に取り込んだ場合も、どれだけ長い間体内に残留し、 どの程度エネルギーを与えるかによって影響は異なる。この被曝経路のことをどの程度考慮するのか によって、放射性廃棄物の潜在的危険性の評価も変わってくる。

廃棄物中に含まれる放射能(Bq)または放射能濃度(Bq/kg)で表す方法は、簡便であるが含まれる物質の出す放射線やその核種の元素としての化学的性質によって危険度が異なることが考慮できない。

線量(Sv)で評価する方法は、深い地下に処分したとして、放射性物質が地下水によって溶け出し 運ばれて人間の生活環境に移行した場合、人が受けると予想される被ばく線量を計算するという方法 である。この場合には、放射性物質が、どの程度地下水によって溶け出し、どの程度運ばれるかとい う計算の仮定に線量は大きく左右される。

潜在的放射能毒性(radiological toxicity potential, 単位は m<sup>3</sup>)で表す方法は, 前二者の中間

に位置するものである。放射能毒性は、放射性物質を水に溶かしたとき、飲用に際して安全であると 考えられるのに必要な希釈水の量として定義されている。放射性物質がどのような放射線を出すか、 半減期はいくらかといったことは、放射性核種ごとに決まっている。また、体内への取り込みやすさ や残留しやすさは、その核種の属する元素の化学的性質により決まる。したがって、我々が生活して いる環境における水中の濃度については、核種ごとにこれ以下にすべきであるという値を、このよう な知識をもとに決めることができる。具体的には、放射性物質が含まれた水を、生まれてから70歳に なるまで飲料水として飲み続けた時に、平均線量率が1年当たり1 mSv の線量限度になる値として濃 度限度が設定されている。この濃度限度の何倍の濃度の放射性核種が含まれているかを求め、全ての 核種について加え合わせた値が放射能毒性である。放射能毒性を用いる場合には、どのような処分方 法とするかなどの工学的条件には左右されないという利点がある。

放射性廃棄物がもたらすかもしれない危険度を表すのには、これで絶対という方法はないため、こ こに挙げたような指標を場合に応じて用いて危険度を表している。



図 1.2.24 ウラン鉱石が有する放射能毒性によって規格化したガラス固化体の毒性<sup>2)</sup>

図1.2.24 はウラン鉱石が有する放射能毒性によって規格化したガラス固化体の毒性である。長期に わたる毒性は、超ウラン核種などの半減期が長く毒性の高い核種によって全体の毒性も支配されてい るため、図1.2.22 に示した放射能の変化と毒性の変化はほぼ対応していることがわかる。図1.2.25 は、TRU 廃棄物のうちもっとも放射能レベルの高いハル・エンドピースについて、その放射能濃度(放 射性物質濃度)、放射能毒性、発熱量を表したもので、表1.2.7 は高レベル廃棄物、TRU 廃棄物の放射 性物質濃度と発熱量をまとめたものである<sup>24</sup>。



図 1.2.25 ハル・エンドピースの放射性物質(α+βγ)濃度,放射能毒性,発熱率<sup>24)</sup> (HLW: ガラス固化後50年,ハル・エンドピース:廃棄体化後25年)

	単位	高レベル廃棄物	地層処分対象 TRU 廃棄物*
放射性物質濃度	Bq/t	βγ:約1.0×10 <sup>16</sup> α :約1.0×10 <sup>14</sup>	βγ:約1.7×10 <sup>14</sup> α :約4.0×10 <sup>11</sup>
総放射性物質 濃度	Bq	βγ:約2.0×10 <sup>20</sup> α :約2.0×10 <sup>18</sup>	βγ:約1.7×10 <sup>19</sup> α :約3.9×10 <sup>16</sup>
発熱量	kW / 本	2. 3	0. 06

表1.2.7 高レベル放射性廃棄物と地層処分対象 TRU 廃棄物の放射性物質濃度と発熱量<sup>24)</sup>

\* α核種濃度が1 GBq/t 以上のものについて

TRU 廃棄物の放射性物質濃度は処分直後では、高レベル放射性廃棄物の80分の1で、千年後の高レベル放射性廃棄物の5倍程度である。TRU 廃棄物の放射能毒性は、処分直後で高レベル放射性廃棄物の140分の1、千年後の高レベル放射性廃棄物の4分の1程度である。これらのことから、TRU 廃棄物については、処分してから千年経った頃の高レベル放射性廃棄物と同等の廃棄物であると考えて、様々な防護措置を講じればよいと考えられる。また、発熱量を見ると、処分直後で高レベル放射性廃棄物の130分の1程度で、廃棄体あたりにすると0.06 kW程度である。高レベル放射性廃棄物ガラス固化体の場合は1本あたり2.3 kWの発熱があり、地下に処分した時には、岩盤の熱伝導率が低いため、ガラス固化体やその周囲の構造物が熱による影響を受けてしまう。このため高レベル放射性廃棄物を処分する際には、固化体の間隔を置く配置で処分場を建設する。一方、TRU 廃棄物の発熱はこれよりずっと小さく、地下に処分した後もほとんど影響がないため、廃棄体をまとめて処分することができる。このように、TRU 廃棄物は高レベル放射性廃棄物に比べて含まれる放射性物質の量が少ないという特徴がある。その一方、

高レベル放射性廃棄物はガラスで固化された廃棄物であるというごく限られた物理化学的性状を持っているのに対して、TRU 廃棄物は、放射性物質で汚染された廃棄物であるため、様々な材料と固化材を含んでいる。このため、処分した後も、これらの物質が化学反応を起こして処分環境に悪影響を及ぼすことのないように注意が必要となる。

# 1.2.2.3 放射性廃棄物の処分

## (1) 放射性廃棄物の処分深度と区分の考え方

以上のように原子力エネルギーを利用すると、核燃料サイクルの様々な工程から様々な放射性廃棄物 が発生する。これらの廃棄物の特徴としては、これまで述べてきたように、

- ① 少量のため安易な環境への放出がないように管理できる。
- ② 少量のため経費をかけてとじこめを確保できる。
- ③ 放射性物質は時間と共に毒性が減少するため、無毒化に十分な時間閉じ込めを確保すればよい。
- したがって、放射性廃棄物の処理処分については、次のような方針で臨めばよいと考えられている。
- 放射能レベルが低く、速やかな減衰が期待できるもの:管理型処分 浅地中に埋設し、放射能レベルが十分低くなるまで管理する。
- ② 放射能レベルが高く、減衰に管理が出来ないほどの長期を要するもの:地層処分 地層は安定で、その変化は数千万年を越える時間軸で起こるため、非常に半減期の長い物質で も数万から数十万年以上の地質の安定性を見込むことが出来、その間の閉じ込めを確保でき、 その後環境に出てくることがあっても減衰と時間的空間的希釈があるため、無害化(自然との 同化)が期待できる。

このような考えの下,様々な放射性廃棄物は図1.2.26に示すように,放射能レベルに応じた深度や 障壁(バリア)を選び,浅地中処分,余裕深度処分(人間の活動が及びにくい深さである50~100m程 度の深度への処分),地層処分(300m以深への処分)に分けて処分を行うべく研究開発や実施計画が進 められている。



図 1.2.26 放射性廃棄物の種類と処分の概要<sup>27)</sup>



図1.2.27 はそれぞれの処分方法を選ぶ際の放射性物質濃度の区分の大まかな目安を示したものである。放射性物質は、超ウラン核種のように $\alpha$ 放射性で半減期が長いものが多い場合は毒性が高く、核分裂生成物や放射化生成物のように $\beta$ あるいは $\gamma$ 放射性で半減期が短いものが多い場合は、前者に比較して毒性が低いため、図ではそれぞれの廃棄物中の $\alpha$ 放射性物質濃度を縦軸に、 $\beta \cdot \gamma$ 放射性物質濃度を横軸に示している。縦軸も横軸も、1 目盛りごとに濃度が 10 倍になる対数軸になっている。それぞれの区分を決める放射性物質濃度は、それぞれの核種について政令濃度上限値としてあらかじめ区分値が決められ、実施においては、埋設する廃棄物に対して規制により安全評価がなされ、安全が確認された後に実際の処分が行われる。余裕深度処分の $\alpha$ 核種の濃度区分値については、現在安全委員会で議論がなされているところである。図では目安として 100 GBq/t の値が示されている。

# (2) 浅地中処分

発電所廃棄物や、RI・研究所廃棄物の大部分は浅地中処分をすることが適切と考えられている。発電 所廃棄物のうち放射能レベルが極めて低い廃棄物については、浅地中トレンチ処分(人工構造物を設け ない浅地中処分)によって管理型処分が適用できるとされ、動力試験炉(Japan Power Demonstration Reactor、JPDR)の解体に伴って発生したコンクリート等の廃棄物が埋設されている。放射能レベルが 比較的低い廃棄物については、青森県六ヶ所村にある(株)日本原燃六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設 センターでの埋設処分(浅地中コンクリートピット処分)が実施されている<sup>35)</sup>。図1.2.28 は、すでに 青森県六ヶ所村の「低レベル放射性廃棄物埋設センター」で放射能レベルの比較的低い発電所廃棄物に 対して実施されている、浅地中コンクリートピット処分の仕組みで、図1.2.29 はその概観である。固 化された廃棄物ドラム缶がコンクリートピットに置かれセメント系充填材が充填される。この上部を覆 う混合土の成分のベントナイトは粘土の一種で、これにより地下水が通りにくくなり、廃棄物が地下水 に接することを避けることができるようになっている。点検部はもしも汚染された水が下から出てくれ ば直ちに確認できるようになっている。このような状態で放射性核種が崩壊して放射能濃度が十分低く なり、一般的な土地利用が可能となるまで管理する。



図 1.2.28 浅地中埋設コンクリートピット処分の仕組み<sup>36)</sup>

日本原燃(株)低レベル放射性廃棄物埋設センター 原子力発電所の運転に伴い発生した放射能レベルの比較的低い廃棄物について は、平成4年より、青森県六ヶ所村にある日本原燃(株)六ヶ所低レベル放射性廃棄 物埋設センターで埋設を開始している。現在、二つの埋設設備を有しており、200リッ トルドラム缶で2006年3月末で約13.6万本(1号埋設)、3.9万本(2号埋設)を受け入れ ている。最終的には200リットルドラム缶で約300万本相当の規模にすることも考えら れている。



図 1.2.29 日本原燃(株)低レベル放射性廃棄物埋設センター35)

# (3) 余裕深度処分

発電所廃棄物のうち放射能レベルの比較的高いものや、TRU 廃棄物のうちの一部は余裕深度への処分 が計画されている。現在余裕深度処分の対象となるであろうと考えられている廃棄物の種類と量を表 1.2.8に示す。余裕深度処分は「一般的な地下利用に十分余裕を持った深度への処分」の意味で、いま のところ統一した呼び方がないが、浅地中埋設するには放射性物質濃度が高いが、数百年間の管理で十 分安全な程度の放射能濃度になるような廃棄物に対して考えられている処分の方法である。

発生場所	発生時期	主な廃棄物	発生物量
盾之后	運転中	<ul> <li>放射化金属(制御棒、チャンネルボックス、 パーナブルボイズン、原子炉内構造物)</li> <li>・使用済樹脂(一次系)</li> </ul>	約3.9万ton *2 (再処理施設からの放 射化金属を含む)
施設	解体時	<ul> <li>・金属類(放射化/汚染)</li> <li>・放射化コンクリート</li> <li>・付随廃棄物(水中フィルタ等)</li> <li>・黒鉛</li> </ul>	約1.1万ton *2
再処理	運転中	・放射化金属(チャンネルホックス、パーナフルボイスン) ・プロセス廃棄物	約1.3万m <sup>3 *3</sup> (放射化金属は原子炉 施設・運転中と重複)
加設	解体時	·金属類(汚染) ·付随廃棄物	約7.0千m <sup>3 *3</sup>
MOX 燃料加	運転中	・プロセス廃棄物	61m <sup>3 *3</sup>
工施設	解体時	·金属類(汚染) ·付随廃棄物	約1.2千 m <sup>3 *3</sup>

表1.2.8 主な余裕深度処分対象廃棄物の種類<sup>29)</sup>

\*1: 国の検討が進めばサイクル施設等から発生する低レベル放射性廃棄物も対象となる。

\*2: 原安委第3次中間報告(平成12年9月)(2030年時点での累積発生量。合計5万トンで容積は約2万m3) \*3:電気事業分科会コスト等検討小委(平成16年1月)電気事業連合会提出資料(α濃度区分値は1GBq/tonと仮定)

平成10年の10月の原子力委員会バックエンド対策専門部会<sup>37)</sup>で、現状の地下利用を調査した結果では、図1.2.30に示すように、一般の土地所有者による地下利用、公共的な地下利用、都市部以外での大規模な地下利用などについては、廃棄物を地下50~100mに埋設することで、人間との接触の可能性は通常、考えられないとされている。また数十mを超える地下利用の際には、事前の調査がおこなわれるので、文献調査や物理探査などにより、廃棄物が埋設されていることがわかるとして、次にあげるような形で処分することが計画されており、対象廃棄物について埋設事業許可申請を行うことができる放射能濃度上限値が算出され、安全規制のための法整備が検討されているところである。

① 地下利用に十分余裕を持った深度(50~100 m 程度)に処分する。

② 放射性核種の移行抑制機能の高い地中を選ぶ。

③ コンクリートピットと同等以上の放射性核種閉じ込め機能を持つ処分施設を設置する。

④ 放射性核種の濃度の減少を考慮し数百年間処分場を管理する。

余裕深度処分の空洞断面図、調査工事状況を図1.2.31、図1.2.32に示す。



図 1.2.30 余裕深度処分の概念図<sup>37)</sup>



図 1.2.31 余裕深度処分のための空洞施設断面図<sup>29)</sup>



図 1.2.32 余裕深度処分のための本格調査工事状況<sup>29)</sup>

# (4) 地層処分の概要

高レベル放射性廃棄物およびTRU 廃棄物のうち放射能レベルの高いものは、地層処分することが計画 されている。地層処分システムの詳細については後に詳しく述べるが、計画の進捗状況は以下の通りで ある。

高レベル放射性廃棄物については、日本原子力研究開発機構(当時は核燃料サイクル開発機構)が原 子力委員会の指示のもとで、関連する研究機関等の協力を受けて研究開発を進め、その成果を1999年 に「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまと めー」(以下 JAEA、2000年レポート)<sup>1)</sup>という報告書をとりまとめ、高レベル放射性廃棄物の地層処分 について、実施主体が処分事業をすすめる上での処分予定地の選定、安全基準の策定の技術的拠り所を 示した。これを受けて2000年6月に高レベル放射性廃棄物の地層処分事業を進めるための法律である

「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」(最終処分法)<sup>33)</sup>が成立し,これを受けて実施主体である 原子力発電環境整備機構(NUMO)が2000年10月に認可法人として設立された。NUMOは処分事業をすす めるべく,最終処分のための候補地となる概要調査地区を選定するため、2002年12月にその候補地の 公募を開始すると共に、公募関係資料として「高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安定性」<sup>2)</sup>,「概 要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠」<sup>3)</sup>を報告書として作成した(2004年3月)。現在は地 元自治体(市町村)の応募を待っている状態であるが、応募を奨励すべく様々な努力がなされていると ころである。TRU 廃棄物については、その処分について、日本原子力研究機構と電気事業連合会がこれ まで研究開発を進めてきて、2005年9月に「TRU 廃棄物処分技術検討書-第2次TRU 廃棄物処分研究開 発の取りまとめ」(以下 JAEA, 電事連「第2次 TRU レポート」<sup>24)</sup>)という報告書を取りまとめた。日本 ではこれに基づき TRU 廃棄物処分の実施に向けて計画を進めようとしており,これに関する議論が総合 エネルギー調査会電気事業分科会原子力部会の放射性廃棄物小委員会で議論され 2006 年6月に報告書 としてまとめられた(総合資源エネルギー調査会「廃棄物小委員会報告書」<sup>25)</sup>)。TRU 廃棄物は放射能レ ベルが低いものから高いものまで広く分布しているため,そのレベルに応じて分別して浅地中埋設,余 裕深度処分,地層処分がなされる計画となっており,高レベルと同様に実施主体を認可法人として設立 し(あるいは現行の NUMO がその実施主体となることもできる),事業をすすめることになっている。地 層処分するものは,高レベル廃棄物と同じ場所に処分することにより経費の節減やサイト選定などに大 幅な合理化が図れるため,地元自治体の了承が得られれば併置処分をしてもよいとされている<sup>25)</sup>。

## (5) 地層処分の選択

高レベル放射性廃棄物や TRU 廃棄物のうち放射性物質濃度の高い廃棄物は、含まれている核種の半減 期が非常に長いものが多いため、今現在の人々に対する被曝が起こらないようにするだけではなく、非 常に遠い将来の人間や環境に対しても影響を及ぼさないように、安全を確保する必要がある。将来とい うのはいつ頃までなのか、ここで廃棄物処分の難しい問題に入る。1.2.2.1節では、持続可能な開発と いう考え方を紹介し、世代間の公平というのは、将来世代の開発の可能性の保証であると述べたが、そ こでは、将来というのがどのくらいの時間範囲であるかについては触れていない。大抵の社会活動では、 将来というのはせいぜい数世代の、現在の社会構造が持続する時間範囲を指している。一方、放射性廃 棄物の処分では、このような管理の届く時間範囲を超えての将来世代にも迷惑のかからないようにする ことが目標となっている。1.2.2.1節では、46億年前に地球ができ、大気環境や生態環境が何億年もか けて形成され、1.3万年くらい前に最終氷期の終了と共に人間が文明活動を始めたことや、人間の祖先 のホモ・エレクトゥスが170万年くらい前に発生し、50万年前にはホモ・サピエンスが火や石器を使い 始めたことなどを説明した。これらから考えて、少なくとも数万年から数十万年までは、人間に影響を 与えないようにしないといけないし、環境に影響を与えないようにしないといけないということが目標 になる。これは、倫理の問題であるため、いろいろな意見があり、「千年で十分ではないのか」と言う 人もいるし、全ての放射性核種が崩壊し終わるまで「永遠に」という人もいる。いろいろであるが、将 来世代に対しては、数万年から数十万年まではそういう影響がないようにしたいと考えられている。こ のようなことができるかということで、その解決法として考えられたのが地層処分である。地層処分の 発想は、地下の深いところに埋めたら大丈夫だろうというものである。地層というのは、地質学では堆 積岩などの成層構造をなした岩体を指すが、放射性廃棄物の地層処分というときは、ある程度以上の深 さのところにある一定の広がりを持った岩体(堆積岩や結晶質岩など)を指している。図1.2.2は、約 1億年を時間軸として起こるマントル対流による地殻状況の変化に伴い、生物界の再編が起こったこと を紹介した図であるが、この時間軸を見ると、大陸やプレートのより詳細な地殻状況の変化は数百万年 から数千万年を時間軸として起こっていることがわかる。日本列島は約3千万年前に大陸から離れ出し、 1500万年前に今の形になったといわれている。このようなことから地下は静的な環境で、長い間放射性 廃棄物を閉じ込めておくのに適しているであろうと考えられた<sup>1),3)</sup>。

図1.2.33 は地層処分の発想のもととなった事柄の一例である。カナダに、シガーレイクという非常 に大規模でウラン含有量の高い(数%から数十%)鉱床がある。この鉱床は約13億年前に、地下450m のところにできたものであるが、この10億年を超える長期間にわたってウラン鉱床がそのまま保存さ れ、地表になんらかの影響を与えたという話は全くない。これは地下の安定性とウラン鉱床の上にある 粘土質部の閉じ込め性能によっているものと考えられている。もちろん、これが残っているからといっ て、すべての地下の物質が保存されるという証拠にはならないのではあるが、少なくとも良い処分環境 を選び、この鉱床と同様の状態にしておけば、この上の人には影響を与えないであろう、と考えること ができる。すなわち、「じっとしている鉱床と同じ状態を地下につくる」というのが地層処分の目標に なる。



図 1.2.33 カナダのシガーレイクウラン鉱床と地層処分<sup>1)</sup>

地下の深いところ(300mより深いところ)の利点は、図1.2.34に示すように、地表に比べて人間活動や自然現象の影響を受けにくいことにある。生態圏環境は、何億年何十億年をかけてできてきたが、このような変化は、実は地球表面の非常に薄いところと大気環境だけで、数十mほど地下に行くと無機的な還元性の環境になる。還元性の環境というのは、生物活動が始まる前の地球の状態と同じで、酸素が他の元素と化合して遊離の酸素がない状態である。例えば、鉄などの金属は、地球表面では腐食などが起きるが、地下では酸素がないためほとんど起きない。また、地下には地下水があるが、これもほとんど動かないでじっとしているという静的な状態がある。

	自然現象	人間の活動	ものの動き (100m動くのに必要な時間)	残されているもの	金属の腐食
地 表	地震・火山・断層・ 台風・地滑り・ 津波・隕石・他	破壊・爆発・火事・ 公害・事故・戦争・ テロ・他	空気:台風(数秒) 水:河川(数分)	建物:~数千年	腐食しやすい
地下	火山•断層	掘削	空気:なし 水:地下水 (〜数万年)	化石:~数億年 地層:~数十億年	腐食しにくい

図 1.2.34 地表と地下の比較<sup>27)</sup>

このような安定な環境としての深地層を利用することにより、長期にわたる受動的な安全系の構成が 可能になる。この受動的な安全系というのが他の安全システムとの大きな違いで、地層処分という概念 は、この受動的な安全系と密接に関係している。すなわち、放射性廃棄物の地層処分というのは、人間 の管理の行き届かない遠い将来についても、放置されても安全なように手の届かないところに隔離する、 ということである。数万年から数十万年であるから、ずっと見張っているわけにいかない。みんな忘れ てしまって、放っておかれるということもある。そういう場合でも、誰の手も届かないところで、何も 起こらなければ安全という状態にする,ということである。一般に世間で議論される安全というのは, ほとんどの場合,能動的に管理する必要がある。例えば、車を運転する場合、上手に運転しないと危な い、原子炉を運転する場合も臨界を上手に保ちながら運転しないといけない、というように、注意を怠 ると危険をもたらすものを、安全なようにする必要がある。何かをする目的のために不安全が起こらな いようにする、ということが必要になる。反対に、何も起こらなければそのままで大丈夫な状態にする のが受動的な安全系である「処分」という言葉の意味である。

処理と処分という言葉は、よく混乱して使われるが、何らかの目的のために手を加えることが処理 である。一方、処分は、受動的安全系に任せるということである。これは、無責任に放ってしまうの ではなく、将来の安全を考えながらきちんと放るということである。このような考え方が地層処分の 根本にある。

## (6) 地層処分以外の処理・処分法

地層処分以外にもいろいろな方法が検討された。図1.2.35に示すのがその例である。

廃棄物をロケットに積んで宇宙に放り出せばよい、というのはよく言われるが、実際計算してみると、 費用がかかりすぎ、打ち上げ回数も多いことから、事故の確率も高すぎるということで現実的ではない。 海洋底処分は、海の底に置き海洋底の中に埋めるという方法であるが、失敗したときに海洋を通じて いろいろなものが出てくるという危険がある。海洋汚染の防止に関しては、1972年にロンドンで開かれ た国際会議で「廃棄物その他の投棄による海洋汚染の防止に関する条約」通称ロンドン条約が採択され、 放射性廃棄物とその他の廃棄物を海洋へ故意に投棄してはならないとされた<sup>39)</sup>。



図 1.2.35 様々な処分方法<sup>30)</sup>

氷床処分は、南極などの氷の上に廃棄物を置き熱で氷が解けて沈下し、一番下の万年氷のところで安定するであろうという方法である。しかし、南極の氷の底がどのようになっているかわからないし、熱との相互作用で何が起こるかわからないという問題がある。特に南極というのは、世界のどこのものでもなく、1952年には、南極地域の平和利用、国際協力、領土主権の請求権の凍結、核爆発、放射性廃棄物の処分の禁止などを決めた南極条約が日本、アメリカ合衆国、イギリス、フランス、ソ連(現ロシア)等12カ国により採択された<sup>40</sup>。

その他、ボアホール処分という方法も考えられた。これは、地層処分に似ているが、石油を掘るよ

うにボーリングし、そこに廃棄物を入れるという方法である。地層処分の場合は、トンネルを掘って、 そのトンネルに廃棄物を置き、そのトンネルを埋め戻すことになっており、問題があるときにはいつ でも中止して一回埋めたものをもう一度取り出す、というようなことができる形で進めるが、ボアホ ール処分では、簡単に言えば深く掘削し、そこへ入れて処分するという方法である。

また、直接注入という方法は、数百メートルの地下に放射性物質を含む液体を直接注入するという方 法で、旧ソ連時代から現在まで、やや放射性物質の濃度の低い液体廃棄物に対して、ロシアのトムスク で行われている方法である。液体の状態は変化が速く起こるため、少々乱暴であり、あまりよい方法と は考えられていない。サブダクション帯処分も時々「良いアイデアだろう」と言われている。これはプ レートが潜り込むところに置いておけば、だんだん中に入っていくであろうという考えであるが、逆に いうと、地震があって廃棄物が壊れて、そこから何が出てくるかもわからないという危険がある。これ もまだあまりにもわからないことが多すぎるということである。

これらの方法は世代内の公平を欠く、つまり、よその国に迷惑をかけるような方法であったり、実現 性に乏しかったり、将来何が起こるかわからないという意味で、処分としては好ましくない方法と考え られている。それに対してもう少し真剣に出てくる方法として、長期管理と呼ばれる方法がある。これ は地表または地下で管理し続ければいつでもやめられるし、科学は進歩しているから、その進歩を待て ばもっと良い方法が出てくるであろうという考えである。これは一見よさそうに見えるが、実際にはず っと、長ければ数万年から数十万年見張ることを意味している。この数万年から数十万年というのは、 実は原子力を使う年数よりもはるかに長いのである。ウラン資源をそのまま1回使うだけだと、せいぜ い85年程度であり、高速増殖炉を使っても2000年から3000年である。その間は、現世代は原子力を 使って利益を得るが、その後も管理が必要である。つまり将来世代にとっては、何のメリットもないも のを見張らされることになる。これは将来世代に対する大きな負担を与えるということになり、好まし い考え方ではない。社会がいつも良いように変わってくれる、という信頼のもとにこのような考え方が できるのであるが、社会というのは有史以来、戦争がなかった時代というのはなかったほどで、決して 安心であるとは言い切れない。そのような状況で放り出して、将来の人が管理すると思っていたら管理 しなくなった。管理しなくなって誰が迷惑を受けるかといえば、大体は弱者が迷惑を受けるということ になるため、そのようなことができるだけ起こらないようにするというのが今の地層処分である。人間 が管理できるのはせいぜい300 年程度である。このような期間については、地層処分する場合でも、当 然,処分場周辺については放射性物質がもれ出てこないかモニタリングしたり、その地域を立ち入り禁 止にしたり、記録を保存するなどして管理することになっている。放射性廃棄物については、現世代が 原子力を使うことによって利益を得たのであるから、その時代に何とか始末しようというのが今の考え 方になっている。

もう一つの具体性のある方法が、分離・核変換処理と呼ばれる方法で、以前は消滅処理という呼び方 をされていた方法である。これは、超ウラン核種などの半減期の非常に長い核種を、核反応により、よ り短い半減期の核種に変え、長期の安全性に関する負担を減らそうというものである。このためには、 まず核反応をさせるべき核種を核反応しては困る核種と分離し、これらを専用の炉(専燃炉)を使って 燃やし、高速増殖炉などで MOX 燃料に混ぜることによりリサイクルをして燃やす。これは人間が予測で きない遠い将来の安全についての負担を軽減できるし、後者では、プルトニウムを他の超ウラン核種か ら単離しないので核爆弾としてプルトニウムを転用しにくいという点が核不拡散のためにもよいと考 えられており、多くの人がこの方法の研究開発に取り組んでいる。一方、核変換させたい核種のみをそ の他の核種から分離して専燃炉や高速増殖炉で核反応させるターゲットにするのには、様々な困難があ る。このような分離は、高レベル放射性廃棄物については可能かもしれないが、放射性物質で汚染され た材料である低レベル廃棄物については非常に困難である。また、分離の過程で、用いる材料が汚染さ れて低レベル廃棄物が発生する可能性もある。このような点で、分離・核変換は、現在の技術ではまだ 実現が難しく、またこれで減らしたとしても全部がなくなるわけではなく、最後は処分しないといけな い廃棄物が残るということになる。

このような考えの下に、現時点の選択肢としては、300 mよりも深い安定な地層(第四紀の地層を除き、空洞の安定性を考えて堆積岩なら500 m程度、結晶質岩なら1000 m程度の深度)への地層処分が 最もよいと考えられている<sup>1)</sup>。

# 1.2.2.4 地層処分システム

## (1) 地層の長期安定性

ここまで述べたように、地層処分が選択されたのは、適切な場所に地下深く処分することで、放射性 廃棄物を数万年から数十万年にわたり、しっかりと閉じ込めることができると考えられたためである。 このためには、地質環境(300 m より深い地下)が長期間安定であることが確かめられている必要があ る。

日本列島は、図1.2.36のように、地球を覆っている十数枚のプレートのうち4枚のプレートが出会っているところにあり、非常に変化が活発な変動帯にある。この列島は、北米プレートとユーラシアプレートの2つの大陸地殻に対して、太平洋プレートとフィリピンプレートが斜め下に沈み込む形で、2方向から強く圧縮されているためである。このようにして起こる自然現象としては、地震・断層活動、火山・火成活動、隆起・沈降・侵食や海水準変動などが考えられる。



図 1.2.36 日本列島周辺のプレートの位置と第四紀火山帯の分布<sup>11)</sup>

地震・断層活動では、岩盤が破断・破砕されることによって処分施設が破壊されたり地下水が周囲と 比較してより速く流れるような経路が生じたりする可能性が考えられる。 火山・火成活動では、マグマの貫入・噴出により処分施設が破壊され、それに伴い放射性物質が地表 へ放出される可能性が考えられる。また、間接的な影響として、マグマからの熱による地温の上昇や熱 水対流の発生、地下水へ熱水や火山ガスが混入することによる水質の変化などの可能性も考えられる。

隆起・沈降・侵食では、時間の経過とともに処分施設の深度や地表部の状況が変化するため、そのこ とによる地下水の流動、水質の変化や岩盤の地圧・地温の変化などが考えられる。また、極端な場合に は、隆起・侵食の継続により処分施設が露出する可能性も考えられる。

気候・海水準変動では、海水準の変動に伴う地下水の流動や水質の変化などが考えられる。また、気 候変動に伴う降水量の変化や山岳域等での氷河の形成などが処分施設の安全性に影響を与える可能性 も考えられる。

このような懸念に対しては、様々な手法で過去の日本列島の活動履歴が調べられている。図1.2.37 は、第四紀に活動のあった火山、活断層をまとめたものである。



図 1.2.37 日本列島周辺の第四紀火山帯と活断層の分布<sup>26)</sup>

第四紀というのは、人間が出現した頃(180~160万年前)から現在までの、氷期、間氷期が繰り返さ れるようになった期間を指している。日本列島では、プレートが衝突して沈み込む部分が海溝となり、 衝突した岩盤が互いに動くことで地震が発生し、地下深く沈み込んだプレートから分離された水が周辺 の高温岩石と反応して溶解させてマグマを発生し火山が生成される。このため火山の位置は、プレート が地下100~180 kmの深さに到達する場所の上部となるため、図1.2.37 に示すように、その分布は限 られている。東日本火山帯より東側には火山がないので、このラインは火山フロントと呼ばれている。 このような地質環境の変化は、図1.2.2 のところで述べたように数百万から数千万年の時間軸で起こっ ている。言い換えれば数十万年の時間では大きな変化はない。この結果、火山のある場所は、過去数十 万年程度にわたってその活動地域が限定されていることや、火山の周辺では地温の上昇や地下水の水質 変化などが認められるが、そのような範囲は概ね火山の中心から数 km~20 km 程度までを目安とできる ことなどがわかっている。

一方、地震はもっと広い範囲で起こる。プレートが潜り込んで、潜り込んだときに裾をからめとって いって、はねたところで地震の元が起こり、広い範囲が揺れたりするため、日本列島中地震が全くない 場所を探すのは不可能と思われる。ところが、実際にその揺れが伝わるときに何が起こるかというと、 例えば、石垣の一番下に力が加わったときを想像してわかるように、そのとき起こるのは、石垣同士の 隙間のところがずれるのである。石がそのたびに壊れて新しくいろいろなものができるということはあ り得ない。均一なところはそのまま力が伝わっていくだけで、そこで力が解放されて何かが起こるとい うことはなく、既にある隙間が地震のあるたびにずれるということになる。いつもその隙間で力が解放 されるところで第四紀以降に地震を起こし、今後も活動を継続すると考えられる断層を活断層と呼んで いる。活断層が地層処分場にある場合、廃棄体が破壊されるため困るが、地震で揺れるというだけのと ころであれば全体が上下するだけで大きな問題とはならない。このため地層処分では、この活断層のあ る場所だけを避けることになっている。図1.2.37に示してあるように、この活断層の場所についても 調査が進んでおり、主なものについてはその場所がわかっている。最近では、地表からの観測ではわか らない活断層(伏在活断層)が問題になっているが、地層処分では予め処分場の候補となる場所が決め られ、その場所について地表および地下の調査が行われるため、活断層の存在を見落とす可能性は低い と考えられる。また、このような断層活動によって岩盤が破砕される等の影響が及ぶ範囲は数m~数百 m程度で、その外側に小断層や割れ目が分布する範囲は、大規模な断層の事例であっても断層から両側 2km程度の範囲までしか及んでいなかったということがわかっている。

隆起・沈降・侵食については、過去数十万年程度にわたるこれらの現象が、地域ごとに一定の傾向に 沿って継続・累積しており、隆起速度については山岳地域などを除く多くの地域で十万年間に数十~百 m未満であったことがわかっている。また一般に、長期的な侵食速度はその地域の隆起速度と同程度以 下と考えられる。

気候・海水準変動については、過去数十万年以上にわたって氷期(寒冷な時期)と間氷期(温暖な時期)が約十万年の周期で繰り返されており、それに伴う平均気温の差は10℃程度で、海面は現在に比べて十数 m~-120 mの範囲内で変動していたことがわかっている。

したがって、断層や火山の活動については、過去から現在までの活動の中に見出された傾向や規則性 に基づき、地層処分に悪影響を与えない場所を選定することができ、隆起・沈降・侵食や気候・海水準 変動については、変動の激しい地域を避けたうえで、設置する地域における変動の規模を考慮し、適切 な深度に処分施設を設置するなどの対応を図ることにより、地層処分に悪影響を与えないようにするこ とができる。さらに、処分地の選定にあたっては、現地においてより詳細な調査が行われ、これらの影 響を十分に確認しながら進められていく。そのうえで、選定された処分地の地質環境に応じた処分施設 の設計および性能評価を行うことになるため、より確実で安全な地層処分が実施できるものと考えられ る。

#### (2) 天然バリア

図1.2.38は、放射性廃棄物を閉じ込めて生態環境から隔離しておくバリア(障壁)としての地質環 境にとって重要となる自然現象を示したものである。ここまで述べてきたように、火山・火成活動、地 震・断層活動、隆起・沈降・侵食、気候・海水準変動などについては、過去の活動履歴を参考にしてそ の影響を避けることができる。したがって、地層処分された放射性廃棄物によってもたらされる最も重 要な出来事は、放射性物質が地下水中に溶け出して、これが地下水によって運ばれて地表の生態環境に もたらされることである。 図1.2.38 中に地下水の流れの様子を矢印で示してある。地下水は主として雨などによって供給され るほか、沿岸部では海水を起源とするものもある。全体としてはより高い地域(涵養域)で供給された 地下水は、地表の河川と同様、より低地に向かって動いていき、十分低い地域(流出域)で井戸や泉な どの形で地表に現れることになる。地表近くの地下は水を通しやすくなっており、雨と大気が混合した 状態になる(通気帯、不飽和帯)。地下深くになると、水を通しにくい地層(不透水層)があるため、 地下水はこの上に溜まるようになり、帯水層と呼ばれる井戸などに供給できる地下水が大量に含まれる 地層が形成されることもある。また、上下を不透水層に挟まれた所に横から地下水が供給されて帯水層 が形成されていることもある。さらに深い地下が処分のために使われる場所であるが、ここは地下水が 岩石の間隙を全て埋めている飽和帯になっている。



図 1.2.38 天然バリアとしての地質環境<sup>11),27)</sup>

このような場所で、地下水は、重力と圧力によって決まる地下水の位置エネルギー(地下水ポテンシャル)の高い方から低い方へ向かって岩盤の水の通しやすさに従って流れる。地表近くでは地形勾配の影響を受け地下水は比較的速く流れるが、深くなるほどその影響は少なくなり流速も小さくなる。数百mの地下で、特別に地下水を通しやすい亀裂や断層などが少ない場所では、地下水の流れる速さは多くの場合、百年間に数 cm 程度となっていることが知られている。

# (3) 人工バリア

しかし、こうして処分された放射性廃棄物が、遠い将来まで生態圏にもたらされることのないよう に保証するには、地下水の流れや岩盤の亀裂構造などを十分に把握しておく必要がある。これらにつ いては、これまで多くのことがわかってきているが、地下の構造は不均質なため、我々の地下に対す る知識は、万が一の出来事に対して放射性物質の閉じ込めを保証するには、まだまだ十分ではない。 このため、放射性廃棄物の地層処分については、放射性物質の閉じこめをより確実にするために、深 い地下に隔離するほか、人工的なバリアを構築して放射性物質が漏れて出てこないようにする。図 1.2.39 に高レベル放射性廃棄物のためのバリア構成を示す。

高レベルの場合はまず廃棄物をガラスで固める。ガラスで固めるというのは、取り扱いやすいように 固めるということもあるが、ガラスが壊れて溶け、そこから放射性物質が出てくるということはなかな か起こりにくいのである。一般の人は「ガラスは割れるし、危険じゃないの」と言うが、別にガラスが 割れても実際に中の物質が出てくるということではない。色ガラスがいくら割れてもその色が出てくる ということはないし、我々は茶碗やコップに色があったりしても、その色が溶けて出てくるとは思って いないわけである。そのようなことから、ガラスからものが溶けて出ないということが一つある。



図 1.2.39 高レベル放射性廃棄物地層処分のための多重バリアシステム<sup>1)</sup>

それでもガラスに地下水が接触した場合に溶けて出る可能性が考えられるため、ガラスに地下水が接触しないように、この周りをオーバーパックと呼ばれるもので覆っている。現在の考えでは、炭素鋼という鉄の塊で周りを取り囲んでおり厚さが19 cm ある。19 cm の厚さがあるとガラスから出る放射線は、 固化体表面に比べて50万分の1程度となり、放射線が直接水に当たって水を分解して腐食が起こりや すくなるというようなことが少なくなる。この鉄は、地下の深いところでは地表と違って酸素がほとん どないことから、なかなか腐食されない。施工の時に入ってきて残っている酸素の影響や放射線による 水の分解の影響、微生物による影響の可能性などを調べたいろいろな実験から考えると、千年間に起こ る腐食は4 cm を超えることはなく、このオーバーパックが壊れることはないということが保証できる。 最初の千年くらいは放射能が非常に高い時代であるが、まず千年間は大丈夫であると考えられる。

その外側にある約70 cm の厚さの粘土緩衝材は、水を吸うと膨らむ性質(膨潤性)を持っていること と周囲の岩盤があるため、ここに地下水がきても地下水の浸入を抑制する。また粘土は、弾性を持って いるため、周囲の岩盤と廃棄体の間でクッションの役目を果たし、地震などで廃棄体に直接力が加わる のを和らげる。処分坑道は、作業が終わると掘削土(坑道を掘る時に出た岩石、ズリとも言う)などの 埋め戻し材により充填される。図1.2.40 には、地層処分対象 TRU 廃棄物のためのバリア構成を示す。 1.2.2.2 節で述べたが、地層処分対象 TRU 廃棄物のうち最も寄与の大きいハル・エンドピースの放射能 毒性は千年後のガラス固化体より低く、発熱も0.06 kW(ガラス固化体は2.3 kW)しかない。従ってこ の場合にはオーバーパックの部分をセメントで代替している。このようにして作り上げられる天然バリ ア(深い地下の地質構造)と人工バリア(人工的に構築した構造物)を合わせて多重バリアシステムと 呼んでいる。人工バリアの安定性は、天然バリアの安定性に依存しているため、両者の閉じ込め機能は 完全には独立ではないが、それぞれが互いに補完してより安全を確かなものにするというのが多重バリ アシステムの考え方である。原子炉などで「多層防護」という考え方があるが、その場合は一つずつが 別々に独立に機能するという考え方であるが、その場合とは少し異なり、これは全体としてお互いがよ り安全なシステムができるようにするという考え方である。

# JAEA-Research 2008-042



図 1.2.40 TRU 地層処分のための多重バリアシステム<sup>24)</sup>

# (4) 工学設計

高レベル廃棄物やTRU廃棄物は適切な期間(高レベルガラス固化体は30~50年)貯蔵され,地層処 分される。図1.2.41は貯蔵施設の概念図である。ガラス固化体は発熱があるが,下側入口から供給さ れる空気が温められ上側出口から出て行く自然対流により冷却される。ガラス固化体を輸送する際に は放射線,発熱に留意して万が一の事故にも放射性物質が飛散しないよう十分に配慮して図1.2.42 のような容器に入れて運ばれる。中性子は廃棄物からもたらされるα線が酸素などの他の物質にあた ったとき放出されるもので,これについても遮蔽を施す。地層処分では,地表近くの第四紀に形成さ れた地層は長期安定性に不安があるため,300 m よりも深い地下で第三紀以前の安定な岩盤に埋設す る。深度は,硬岩であれば安定な空洞が作りやすいため1000 m 程度,軟岩であれば500 m 程度がよい と考えられている。地層処分場のイメージは図1.2.43 のようになる。地上で廃棄体を受け入れ,これ を図1.2.44 に示すような形でアクセス施設から廃棄体を搬入し,地下の処分坑道に定置し,人工バリ ア材を定置した後,坑道を埋め戻す。



図1.2.41 高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)貯蔵施設<sup>20)</sup>

# JAEA-Research 2008-042



図 1.2.42 高レベル放射性廃棄物輸送容器<sup>20)</sup>



ガラス固化体の置き方(定置方式)については、ガラス固化体を堅に置くのか横に置くのか、また処 分坑道に直接置くのか処分坑道にあけた孔に置くのかの選択がある。処分坑道の間隔やガラス固化体の 定置間隔は、坑道の力学的安定性を確保し、ガラス固化体の熱によりガラス固化体、緩衝材が熱影響に より変質しないように(100℃以下となるように)決められる。



図 5.2.3-14 処分孔竪置き方式の緩衝材定置装置の概念図

図1.2.44 処分孔竪置き方式の緩衝材定置と処分坑道の埋め戻し作業イメージ図<sup>3)</sup>



図 1.2.45 TRU 各廃棄体の処分坑道<sup>24)</sup>

地層処分対象のTRU 廃棄物もほぼ同様の形で処分されるが、この場合には高レベル放射性廃棄物に比べて発熱量が小さいので、大きな処分坑道にまとめて処分することができる。TRU 廃棄物の量は高レベル廃棄物の約3倍であるが、例えば堆積岩の地下500mの深度では、TRU 廃棄物処分の地下施設の面積は約400m×約600m程度(高レベル廃棄物の約30分の1)となる。坑道には様々なグループの廃棄体を定置することになるが、廃棄体ごとの埋め方は図1.2.45のようになる。

軟岩系岩盤に処分される場合には、空洞を安定に維持するための必要となる支保工に覆われた円形坑 道にグループ(1)、グループ(2)は緩衝材で廃棄体の周りを覆い上部を埋め戻し材で埋める。グループ(3)、 グループ(4) は緩衝材を用いずに全て埋め戻し材で埋められる。硬岩系岩盤に処分される場合は、幌 型坑道を用い、グループ(1)、グループ(2)は緩衝材の内側に構造躯体を置き、その中に廃棄体を定置し て隙間を充填材で埋める。グループ(3)、グループ(4)は緩衝材を用いずに構造躯体の内側に廃棄体を定 置して隙間を充填材で埋める。共に幌型の上部は埋め戻し材で埋められる。これらの廃棄物は、図1.2.46 のようにグループごとに別々に配置し、お互いが干渉して悪影響を及ぼさないようにする。図中の四角 で囲まれた廃棄物は、発熱が懸念されるグループ(2)のハル・エンドピースと、含まれる硝酸塩の影響が 懸念されるグループ(3)の濃縮廃液固化体で、地下水の流れを考慮したレイアウトとする。



図 1.2.46 TRU 廃棄物地層処分:軟岩系岩盤中のレイアウト例<sup>24)</sup>

### 1.2.2.5 安全評価

# (1) 安全評価の進め方

高レベル放射性廃棄物や TRU 廃棄物の地層処分システムは、図 1.2.39,図 1.2.40 に示したような 多重バリアシステムとして構築されるわけであるが、処分を実施する前に、この多重バリアシステム が期待通りに機能して生態圏と人々の安全を損なうことがないかどうか確かめておく必要がある。放 射性廃棄物の地層処分の安全性を評価するには、極めて長い時間について、天然の地層という不均質 で大きな空間領域で起こる出来事を考慮しなくてはならず、従来の工学的アプローチのように設計に 基づいて試験的にシステム全体を構築し、実際にその安全性を実証するという直接的な方法をとるこ とができない。このため、システムの安全という観点から考えて、地下深部に処分した廃棄物中の放 射性物質がどのような運命をたどるか、将来の出来事を筋書き(シナリオ)として想定する。このと き、安全を脅かすシナリオを見落とすことがあってはいけないのであるが、原理的には将来の全てを 見通すことはできないため、できる限り見落とすことのないようにシナリオを書き出す工夫をする。 まず、与えられる処分場の場の特徴 (Feature) と、安全機能に影響を及ぼすと考えられる種々の出来 事(Event)およびプロセス(Process)を考慮して、システムの将来挙動に関するシナリオを描く(FEP という)。この際には、廃棄体、充填材、構造躯体、緩衝材、埋戻材、母岩等のそれぞれの場について、様々なFEP が考えられるので、国際的な考え方やそれぞれの分野の専門家が知恵を出し合って、できる限り全てのFEP を表の形に書き出す。このような場の特徴、出来事、プロセスを書き出したものをFEP リストと呼んでいる。

廃棄物中の放射性物質は、このFEP リストの要素をたどりながら廃棄体から人工バリア、天然バリア を経て、あるいは、例えば火山によるマグマの貫入のように、起こる出来事によってはこれらをスキッ プして生態圏の人間に影響を与えることになる。このようにして想定されたシナリオについて、それぞ れのシナリオで何が起こるかを考え、物理・化学的法則に基づいて数学モデルを作り、そのモデルに必 要なデータを得て生態圏の人間がどれだけ被曝するかを計算する。

具体的には、このようなシナリオは大別すると、接近シナリオと地下水シナリオに分類することがで きる。接近シナリオは、生態圏からの廃棄物の隔離という、多重バリアシステムの意図そのものをだめ にしてしまうようなシナリオで、火山によるマグマの貫入で多重バリアシステムが破壊される、長期に わたって隆起が起こり隆起した部分が侵食され結局廃棄物が地表に出てしまう、といったことが考えら れる。また将来廃棄物についての情報が社会から失われ、人間が廃棄物の存在を知らずに資源を求めて 地下を掘削し、これにより廃棄物が地表にもたらされたり、地下水が非常に通りやすいところができて しまったりするということも考えられる。接近シナリオによる危険性については、このような自然現象 が起こる可能性のない場所や地下資源のない場所を処分地として選ぶことにより、これが起こる可能性 を小さくできる。このために、処分場を選ぶにあたっては、火山・火成活動、断層活動、著しい隆起侵 食などがなく、利用可能な天然資源が存在しない場所を選定するようにし、地域の調査を段階的に進め て途中で不都合が見つかった時には、それ以上、その地域で計画を進めないようにすることにしている。 また、安全評価では念のために、このようなことが起こったとしたらどのような結果になるのかを評価 している。

一方,地下水シナリオというのは、多重バリアシステムに対して、安全上最も起こりそうなシナリオ で、地下水が廃棄体に接触して放射性物質を溶かし出し、地下水を通じて放射性物質が生態圏にもたら され、人々が被曝するというシナリオである。地下水シナリオの場合には、ガラス固化体、オーバーパ ック(TRU 廃棄物では廃棄体、充填材、構造躯体)、緩衝材、埋戻材、母岩等のそれぞれの場について、 様々な FEP 要素(特徴、出来事、プロセス)が考えられる。例えば、放射性核種が溶け出す溶解度はど の程度か、緩衝材中を移動するときの拡散の速さや粘土緩衝材に捉えられる程度はどれくらいか、母岩 中を放射性物質が地下水に溶けて運ばれる場合、地下水の流れる速さはどの程度か、母岩中の地下水の 流れる間隙はどの程度の体積で、間隙のつながり具合はどの程度か、これを表す数学モデルとしてはど のようなモデルが最も妥当か等々、様々な可能性が考えられる。これらの組み合わせは膨大となり、そ のすべての組み合わせについて評価解析を行うのは不可能である。しかし、それぞれの場での FEP 要素 (特徴、出来事、プロセス)を十分に研究することにより、中心的に検討すべきシナリオを絞り込むこ とができるため、まずこのシナリオを中心的に検討すべきシナリオ(レファレンスケース)として設定

する。このシナリオについて評価解析を行い、その他の場合については、レファレンスケースの中で問題となる場のFEP要素を変更して評価解析し、レファレンスケースの場合に対してどのような影響があるかを知ることができる(変動ケース)。大抵の場合ならこれでほぼ、廃棄物中の放射性物質の運命を ほぼ理解していると考えられる。しかし、人によっては、このような評価の方法ではFEP要素の全ての 組み合わせを調べたことにはならず、組み合わせによっては特別に不都合な結果が生じるかもしれない ということが心配になる。実際には、全ての組み合わせについて評価解析することは不可能である。そ こで、注目する FEP 要素を取り出し、まずこの FEP 要素の条件を決め、その他の FEP 要素については可 能性のある様々な条件を統計的に選び出し評価結果を得るという作業を何回も繰り返し、一群の結果を 得る。次に注目する FEP 要素の条件を変化させ同様の評価結果を得る。このような解析を繰り返し注目 する FEP の条件が変化すると、評価結果がどのように変化するか、その傾向を知ることができ、注目す る FEP 要素の条件がシステムの安全性にどの程度重要であるかを知ることができ、レファレンスケース と変動ケースで評価した結果の正当性を確かめることができる。さらに注目する FEP 要素に対応する機 能が全く働かないと仮定(例えば天然バリアが人工バリアを健全に維持する以外の機能を全く持たない とか、オーバーパックが早期に破損するなどと仮定)して結果を評価する。これにより、もたらされる 結果が安全を損なうようなものにならないこと(地層処分多重バリアがロバスト(頑健)であること) が確認できる。

## (2) 地下水シナリオの安全評価

具体的に安全上最も重要となる地下水シナリオのレファレンスケースは、図1.2.47,のように設定されており、それぞれのバリア構成要素で起こるプロセスは図1.2.48のように考えられている(TRU 廃棄物の場合はガラス固化体、オーバーパックの部分が固化体、セメント充填材で置き換えられる)。







図 1.2.48 地下水シナリオで考慮されているプロセス<sup>1)</sup>

地下水により、放射性物質が生態圏へ運ばれるには、地下水が母岩から掘削影響領域を経て、粘土緩 衝材を通ってオーバーパック(TRU 廃棄物では充填材)のところまでくる必要がある。掘削影響領域と は処分施設を施工する時に空洞を掘削したため、わずかであるが緩みの生じた母岩の領域であり、ここ は地下水が通りやすい状態になっていると考えられる。一方、粘土緩衝材は、乾燥された状態で施工さ れ水がくると膨潤するため、周囲から閉じ込められた状態ではなかなか水を通さない状況になっている が、それでも時間が経つと水が十分飽和した状態になる(このプロセスを再冠水という)。最終的には、 オーバーパックの周囲まで地下水がしみ込み、オーバーパックの腐食を促進する。1.2.2.4の人工バリ アのところで述べたように炭素鋼の腐食は1000年間で4cmを超えることはないと見積もられているが、 安全側に考えるため1000年たった時点でオーバーパックは4万本全てが壊れて一切のバリア機能を失 うと考える。地下水は次にガラス固化体と接触しガラスが溶ける。その前にガラス固化体を入れている ステンレスのキャニスターがあるが、これは安全側に考えるため特に閉じ込め機能を持っていないと仮 定する。ガラスからの放射性核種の溶け出しについては、色ガラスでいえば中の色が出てくるというこ とである。それがどのくらいの速さで進むのか。海岸の海水でガラスがどんどん削られるというような 場合だと、波によってガラスが揺り動かされて機械的に削られるが、静置している水の中に浸けておい てどの程度溶けていくかがあるが、これは測れないくらい遅いのである。強引に測って、1日あたり、 1m<sup>2</sup>、新聞紙程度の表面積から1 mg 溶けていく、というように溶ける速さを極端に速く仮定する。その 場合,3年で1g溶けるという計算になり,そのように溶けて出てくると仮定する。ただし,一般に様々 な元素は、電荷数が大きい陽イオンほど、それ自身が溶けにくく(溶解度が低く)、さらに固体の表面 での吸着や微小な間隙中に吸収されやすい(吸着と吸収をあわせて収着という)という性質がある。例 えば、温泉の中には、湧き出てくる時に赤茶色の沈殿を生じるものがある。これは地下深くの遊離の酸 素のないところで、Fe<sup>2+</sup>という陽イオンとして溶けていた鉄が、地表で酸素に出会い酸化されて Fe<sup>3+</sup>の陽 イオンに変わり、水酸化物として沈殿しているのである。超ウラン(TRU)元素であるウラン、ネプツ ニウム、プルトニウムなどは、地下の遊離の酸素のないところでは、U<sup>4+</sup>、Np<sup>4+</sup>、Pu<sup>4+</sup>として存在し、地表 では酸化されて酸素を含む UO2<sup>2+</sup>, NpO2<sup>+</sup>, PuO2<sup>2+</sup>という陽イオンになる。このため, 超ウラン元素は, 鉄 とは逆に地下深いところで溶解度が低くなっている。アメリシウムやキュリウムなどの超ウラン元素は 地下でも地表でもAm<sup>3+</sup>, Cm<sup>3+</sup>という陽イオンで,これもまた溶解度が低くなっている。水1リットルに対 する U<sup>4+</sup>, Np<sup>4+</sup>, Pu<sup>4+</sup>などの溶解度は 0.01 mg 以下, Am<sup>3+</sup>, Cm<sup>3+</sup>などの溶解度は数 mg 以下である。したがっ てこれらの元素はたとえ廃棄体から出てきても、地下水に溶けて運ばれるのは地下水中に溶けるだけの 量に限られる。これに比べて電荷数の小さいセシウム (Cs<sup>+</sup>), ストロンチウム (Sr<sup>2+</sup>) や陰イオンになる ヨウ素(I<sup>-</sup>)、有機物になる炭素などは地下水によく溶けるため、廃棄体から出てきたものすべてが地下 水によって運ばれる。

このようにして溶け出た放射性物質が、次に粘土緩衝材中を移行する。粘土は極めて密に詰まっており、間隙は分子やイオンの大きさの数倍から数十倍程度の幅しかなく、水はその抵抗のため自由に流れることができない状態になっている。つまり水自身が動いて放射性物質を運ぶということはないのであるが、それでも放射性物質は濃度の高いところから低いところに向かって動いていく。これは、コップの中に水を入れ、この水を一切かき混ぜないで静かにインクをたらすと、インクがじわりと広がっていくのと同じ効果で、あらゆる気体や液体の分子は微視的に見ると四方八方に運動しているために起こる。原子や分子の大きさは、およそ数百 pm(ピコメートル=10<sup>-10</sup> m)であるが、気体では他の分子に衝突するまで分子の大きさの数百倍動き、衝突後は方向を変化させている。液体では、分子はもっと込み合っており、分子やイオンの大きさの十分の1 ほど動いては他の分子に衝突して方向を変えている。このよ

うな動きの結果,分子やイオンは,徐々に濃度の高い部分から低い部分に広がっていくことになる。こ のような効果を拡散と呼んでいる。粘土やセメント充填材の間隙水の中では,放射性物質の動きはこの ような拡散によって起こっている。拡散によって物質が拡がる速さは,まったく立体的障害のない水の 中での平均した拡がりは、1か月で約14 cm、1年で約50 cm、100 年で5 m程度となる。すなわち、た らしたインクがコップの底に到達するのに約2週間かかる。粘土緩衝材の中では水の占めることのでき る隙間の大きさは、分子やイオンの大きさの数十倍程度で、分子やイオンがある方向に進むには迂回す る必要があるため拡散はさらに遅くなり、1か月で約4 cm、1年で約14 cm、10年で約40 cm程度とな る。粘土の中を放射性物質が移行するにはさらに抵抗がある。これは、粘土やセメントや岩石などは一 般にその表面が負の電荷を持っているため、高い電荷数の陽イオンをひきつけ易くなっていることによ って起こる。固体の表面にひきつけられた陽イオンは自由に拡散して動くことができなくなるため、電 荷数の高い超ウラン元素などでは、もとの速さの数千から数万分の1、セシウム(Cs<sup>+</sup>)で数百分の1に なる。このような効果を収着遅延効果と呼んでいる。

母岩の領域になると、もう少し地下水の占める間隙は大きくなり、分子やイオンの大きさの数千倍以上の幅がある。図1.2.49 は、一般的に見られる岩石である堆積岩や結晶質岩中を放射性物質がどのように移行するかを、地下水の部分や分子やイオンを誇張して大きくして模式的に描いたものである。



図 1.2.49 堆積岩と結晶質岩中の放射性物質の移行<sup>27)</sup>

堆積岩は、長い間に土砂が河口や海底に堆積してできた岩石で、地下水は主に岩の粒子の網目状になった間隙を動く。結晶質岩は、マグマが冷えて固まった火成岩や岩石が熱や圧力で変化した変成岩などで、地下水は主に岩の割れ目の中を動く。この場合の岩の割れ目は、ちょうど平らな板を2枚重ねた時の隙間のように平面的な広がりを持っていて、このような割れ目が、網目状になっている。このような間隙に対しては、地下水は、その場所の重力と圧力によって決まる地下水ポテンシャルの高いほうから低い方へ向かって、岩盤の水の通しやすさに従って流れる。地下水の流れる速さは、処分する場所が決まればもちろん実測されるが、一般に地下の深いところでは、地下水ポテンシャルにあまり差がなく、岩盤も水を通しにくくなっているため、多くの場合1年間に数分の1mm程度となっている。放射性物質は、ベルトコンベヤーに運ばれているように地下水と同じ速さで運ばれる。この効果を移流と呼んでいる。前述の粘土緩衝材中の放射性物質の移行のところで、拡散の速さについて述べたが、岩盤中でもこの拡散の効果がある。地表近くでは地下水の流れが速いため、これによるかき混ぜ効果もあるため、天

然バリア中では一般に、この効果も含めて分散という用語を使う。移流の速さは拡散の速さよりもかな り小さくなっているため、放射性物質は拡散(分散)の効果により、様々な方向に希釈されながら、じ わじわと動いていくことになる。さらに図1.2.49では、放射性物質が岩石の表面に収着されている効 果が示されている。多くの岩石の表面も粘土ほどではないが負の電荷を持っているため、電荷数の大き い陽イオンを強くひきつける。この結果、地下水中の溶存物質は少ない状態となっている。したがって、 ここでも放射性物質は移行に対する抵抗を受ける。

図1.2.47 では、放射性物質はこのような母岩中を100m移行すると断層破砕帯に出会うとしている。 地下の母岩の亀裂や断層の分布は、場所により異なり不均質なため、かなり詳細な調査をしないとわか らない面があるが、おそらく比較的小さな亀裂しかない緊密な部分の中に、もう少し大きな断層がとこ ろどころにあると考えられる。そこで、これまでのいろいろな場所での地下の調査などから考えて安全 を見積もり、緊密な場所を100m動いた後は断層破砕帯に出会うとしているのである。これは活断層で はないが、大昔に断層ができ、その断層の隙間を他の物質が詰めてしまったようなところである。日本 の場合、かなり緊密に鉱物が充填している例が多いが、緊密な岩盤に比べて少しは動きやすいと考えて、 地下水も少し速めに動いていくと考える。このようにして動いていく先は地下水ポテンシャルの低いと ころであるが、安全側に考え、この行先は人間が利用する地下水(帯水層)になると考える。帯水層の 地下水は河川につながって、やがて生態圏に到る。放射性物質は帯水層および河川に入る時に大量の水 で希釈されるが、人間がこの水を利用することになる。

遠い将来の人間がこの水を利用したときに、そこに混入している放射性物質でどの程度被曝するかを 考えるのは大変難しい問題である。遠い将来の人間の生活様式については、全く予測ができない。ただ し、我々が知りたいのは、遠い将来の人たちの生活様式や具体的な被曝線量ではなく、構築した多重バ リア地層処分システムがどの程度の防護性能を持っているかである。すなわち、遠い将来の人たちが現 在と全く同じ生活様式であると仮定して解析評価し、安全であるという結果を得ることができれば、遠 い将来の人に対しても影響を与えることにはならないと考えることができる。もちろん、将来の人間が 酸素もないような深い地下を利用するようになるとか、生物学的に放射線に弱くなるとか、逆に放射線 による癌を治すことができるようになるとか、想像あるいは空想することはできるが、これは我々現世 代が将来世代に対して負うべき責任をいかに果たすかという倫理的問題とは別の問題である。そこで、 生物圏については、現在と全く同じ生活を営む人々がいると仮定して、それらの人々が飲料水として摂 取したり、この水を利用して耕した土壌から得られた作物を摂取したり魚を食べるなど、様々な形で放 射性物質を取り込んで被曝するというように考える。このような生物圏での放射性物質の動きについて は、水中、土中、動物中などに対して物質がどのように移動するかをモデル化し、たとえば水から作物 へどの程度の放射性物質が移行するかなどのデータを用いて人の被曝線量を評価する。このようにモデ ルを作ると、どれだけの放射性物質が生態圏にもたらされれば農業に従事している人々、淡水漁業や海 水漁業に従事している人々等がどれだけの被曝を受けるかを計算することができる。処分システムの将 来を予測するのではなく、防護性能を評価するとの考えで用いるこのような定式化したモデルを様式化 モデルと呼んでいる。

以上のようなストーリーで安全評価を行う。具体的にはそれぞれの場面におけるシナリオを数式モデルとし、図1.2.50に示したような計算コードとデータベースを用いて計算を行い結果を得る。



図1.2.50 第2次取りまとめの安全評価で用いられた計算コードとデータベース<sup>2)</sup>

# (3) レファレンスケースの安全評価結果

ガラス固化体1本あたりの放射能毒性を図1.2.51に示し、この様な固化体4万本が地層処分多重バリアシステムを経て生態圏で人間に与える被ばく線量を、地下水シナリオのレファレンスケースに従って評価した結果を図1.2.52に示す。





図の縦軸は被曝線量を、横軸は処分後の時間をそれぞれ対数軸で示したもので、どちらの軸も1目盛 りごとに線量、時間が10倍になっている。被曝線量は、放射性物質が地表の生態圏にもたらされる遠 い将来に最も高くなるピークを迎える。この時期は、放射性物質の崩壊による放射能の減少がなければ、 移流によって運ばれる時間になるが、拡散によって希釈が起こるため、長い時間にわたって緩やかに上 昇し、廃棄物中の放射性物質が全て運ばれるとその後は下降する。横軸は対数目盛りのため、非常に長 い時間に徐々に放射性物質が届くという、拡散と収着による時間的希釈が起こっていることがわかる。 この結果を見ると、最も高い被曝線量がもたらされるのは、約80万年後で、その線量は5×10<sup>-3</sup>µSv/年 程度であることや、この最大線量はCs-135(半減期2.3×10<sup>6</sup>年)によりもたらされることなどがわかる。 図1.2.51を見ると、ガラス固化体に含まれる放射性物質の潜在的毒性は、プルトニウムやアメリシウ ムなどの超ウラン核種が大きな寄与をしているのであるが、これらの核種を含む元素は、水への溶解度 が低く岩石等の固体へ収着しやすいため、効果的に地下に閉じ込められ、長期に地下にとどめられてい る間に放射性崩壊することから、環境中にはほとんど出てくることはない。図1.2.53はガラス固化体 にあった放射性物質が多重バリアのどこに閉じ込められているかを経過時間と共に示したものである が、ほとんどの放射性物質は人工バリア内に閉じ込められ崩壊してしまうことがわかる。



図 1.2.53 地層処分多重バリアシステムの閉じ込め機能<sup>2)</sup>

この結果,約80万年後の5×10<sup>-3</sup> µSv/年程度の線量は、国際放射線防護委員会の勧告している0.3 mSv/年や、現行の規制免除レベルである0.01 mSv/年あるいは日本の大地からもたらされる自然放射線レベル(0.9~1.2 mSv/年)よりはるかに低くなっており、このように計画された地層処分システムは、十分安全な放射性物質の閉じ込めが達成できる能力を持っており、将来の地球環境に負担をかけずに放射性廃棄物の処分ができると考えることができる。



図 1.2.54 地層処分対象 TRU 廃棄物の総放射能毒性<sup>24)</sup>



図 1.2.55 TRU 廃棄物処分のレファレンスケースの線量評価結果(核種ごと)<sup>24)</sup>

図1.2.54, 図1.2.55 は、TRU 廃棄物地層処分について、毒性(処分対象廃棄物の総量について)と、 レファレンスケースの線量評価結果を示したものである。この場合には、最も高い被曝線量がもたらさ れるのは、約1万年後で、その線量は0.002 mSv/年程度であることや、この最大線量は廃銀吸着材中の ヨウ素(I-129、半減期1.6×10<sup>7</sup>年)によりもたらされることなどがわかる。図1.2.54 よりわかるよう に、TRU 廃棄物に含まれる放射性物質の潜在的毒性には、プルトニウムやアメリシウムなどの超ウラン 核種が大きな寄与をしているのであるが、これらは水への溶解度の低さ、岩石等の固体への収着しやす さのため効果的に地下に閉じ込められ、これに比べて地下水中に溶けやすく動きやすい陰イオンになる ヨウ素(I-129)や有機物になる炭素(C-14)などが、比較的早く(といっても約1万年後であるが) 地表に現れることがわかる。また C-14(半減期5730年)などは、長期に地下にいる間に放射性崩壊す るため、当初あった全ての量が地表にもたらされるのではないこともわかる。約1万年後の0.002 mSv/ 年程度の線量は、TRU 廃棄物に対して計画された地層処分システムが、十分安全な閉じ込め性能を持っ ていることを示している。

## (4) 変動ケースの安全評価結果

一方、放射性廃棄物の地層処分の安全性を評価するには、極めて長い時間について天然の地層という 不均質で大きな空間領域で起こる出来事を考慮しなくてはならないため、将来起こる事柄については不 確実性が伴う。1.2.2.1では地球環境がどのような時間軸の中で変遷してきたかを述べ、そこでは、地 質、気候、生態環境、人類がそれぞれの時間軸の中で変化を遂げてきたことを説明した。また、生物と しての人類は何十万年あるいは何万年かをかけて変化し、約1.3万年前の氷期の終結に伴う地球温暖化 を契機として定住し文明を築くようになり、17世紀の産業革命以降にグローバルな地球文明活動をし、 莫大なエネルギーの利用と環境負荷をもたらしつつあることも示してきた。放射性廃棄物の地層処分の 目的は、このような人間文明と環境の中で、現在はもちろんのこと将来についても放射性物質による害 がもたらされないようにすることである。具体的には深い地層に廃棄物を隔離処分して、数万年から数 十万年の閉じ込めを目指している。その中で地層処分多重バリアシステムがおかれている地質環境や人 エバリア、天然バリアの要素は、その物理的化学的性質に応じた時間軸に従って変化する。この変化の 時間軸は、何百万年、何千万年という時間軸で変化しているマントル対流によるプレートの動きから見 ればずっと短い時間であるし、実験室や日常生活で観察される変化あるいは歴史から知ることの出来る 変化から見ればはるかに長い時間である。数万年から数十万年の間に起こる事柄を正しく理解するため には、それぞれの事柄がどのような速さで起こるのかを正しく把握する必要がある。例えば、我々は明 日や明後日の天気を確実に予測できないが、1年後の今頃の気候は春や夏の気候だろうということはそ れ以上に確実に予測できる。しかし、これが1万年後になると、四季の移り変わりが今と同じなのか氷 期や地球温暖化の影響があるのか不確実性が増してくる。地層処分システムの安全評価に関わる不確実 性の原因は、大きく整理すると次のようになると考えられる。

- ① システムの不確実性
- ② シナリオの不確実性
- ③ モデルの不確実性
- ④ パラメータの不確実性

①のシステムの不確実性とは、地層処分システムが十分理解されており、適切にその特性が把握されているかどうかということで、処分施設の仕様、地下水流速や間隙構造等の環境条件などの理解に伴う不確かさである。②のシナリオの不確実性とは、例えばセメントは長期間にどのようにどの程度 変質するかといった、システムの将来挙動に影響を与える事柄とプロセスに対するシナリオが正しく 網羅的に考慮されているかどうかについての不確かさである。③のモデルの不確実性とは、処分シス テムの各要素の挙動を記述するのに用いられる概念モデルが、実体を十分正しく表現しているかどう かについての不確かさである。④のパラメータの不確実性とは、概念モデルに用いられるパラメータ (溶解度、地下水流速、収着の度合い等)の値と範囲が、自然界の変動や既存の測定技術の未熟性を 正しく把握して設定されているかどうかについての不確実性である。

安全評価では、これらのそれぞれについて検討がなされる。すなわち、有意な影響を与える FEP 要素 (それぞれの場での特徴、出来事、プロセス)を、実験や測定、観察、理論などにより十分に研究し科 学的理解を深めて不確実性を減らし、不確実性に影響を受けにくい設計や解析を考えたりする他、異な る説明原理やモデルなどが同じ結果を導くことを確認する。例えば地下水シナリオについていえば、図 1.2.48 のように大枠を設定されたシナリオが図 1.2.50 のように数式モデルとして表されるわけである が、安全に係るシナリオはこの通りでよいのか、他に安全を脅かす事柄はないのか、このシナリオを表 すモデルは現実を正しく表して正しくモデル化されているかどうか、このモデルで評価するのに用いる 様々な数値 (データ) は信頼がおけるものなのかどうか等々が調べられる。このような検討は、自然界 の観察、実験室での実験などによりなされるが、得られる情報は、対象とする時間範囲のものとは大き く違っているため、理論や考察により推定がなされる。それでも不確実性は残るので、安全性の評価で は、それぞれのシナリオや値、モデルなどの条件を変化させ、評価結果がどの程度影響を受けるかを調 べる。図 1.2.56 は、このような影響について調べた結果である。図には、出てくる放射能による被ば くが何年先に一番高くなるか、その被ばくの線量はどういう値になるかが、いろいろな場合について示 してある。岩石の種類が違ったとき、地下水の流れが違ったとき、周りの地下水の種類が違ったとき、いろいろなことを考え、何が起こっても大丈夫であるということである。

図の中で特に高い被ばく線量を与えているものを見てみると、#35 と記されている場合がある。#35 というのは隆起・侵食が起こった場合である。放射性廃棄物を埋めた場所が、年間に1mm ずつ隆起し、 その隆起した分だけ一番上は削剥されていく状態、言い換えれば山ができていく状態である。そのよう な場所で処分した廃棄物がだんだん上へ上がっていく。これは非常に遅い変化であるが、それでも100 万年くらい経ったら地表近くまできてしまい、動きやすくなって環境に出てきてしまう、そのような若 干無理のある計算ではある。そのような場合でも、このような状態で保持されるなど、様々な計算を行 うのである。

さらに見ると、#37の場合も、線量が少し高くなっている。この場合は、数10万年経ったところで出 てきているのであるが、この場合は、いきなり粘土緩衝材の外側が帯水層で天然バリアがない、そのよ うな無理のある仮定をした場合の計算結果である。この場合でもこの程度のもので人々には何の影響も 与えないことがわかる。したがって、我々がこのような埋め方をして、地質の環境が安定でさえあれば、 まず外の人に影響を与えることはない、このような放射性物質が将来の人に対して影響を与えることが ない、ということがわかる。


図1.2.56 高レベル放射性廃棄物地層処分システム総合安全評価結果<sup>1),2)</sup>



図 1.2.57 レファレンスケース以外の解析結果<sup>24)</sup>

図1.2.57はTRU 廃棄物地層処分システムについて同様の検討した結果の一例で、地下水シナリオの レファレンスケース以外の様々な場合について評価した結果である(具体的条件については JAEA、電事 連「第2次TRU レポート」に詳しく記されている)。この図からは、母岩の種類や処分施設の仕様の違 いなどによる影響はあまり大きくないが、母岩の地下水の通しやすさや動水勾配(任意の2点間での地 下水ポテンシャルによる地下水の流動の差)などは比較的大きな影響を与えることがわかる。このこと は処分地域を選定する際に地下水の流れが速いところはあまり好ましくないことを意味しているが、地 下水の流れやすさ(水の通しやすさと動水勾配)を様々に変化させて検討すると、地下水が10倍流れやすくなると、もたらされる最大線量もおよそ10倍となるため、地下水が100倍流れやすくなっても、線量は諸外国で提案されている安全基準を超えないことがわかる。

変動ケースでは、様々な場合が検討されるが、結果に大きな影響を与える要因を意図的に重ね合わせ、 要因がとり得る変動幅をより大きくすることによって、安全基準や自然放射線レベルを超えるような評 価結果を導くことはできるが、実際にはあり得ないか可能性がほとんどないものとなる。そのようなあ りそうもない重ね合わせについては、たとえ起こったとしても破局的な結果につながらないことを確認 しておけばよいと考えられる。また、気になる事柄として、坑道の埋め戻しが不十分な場合など、ボー リングが処分場を通過することなどが考えられるが、これらについても、被曝線量が諸外国で提案され ている線量基準を下回るか、起こる確率が非常に小さいという評価結果が得られている。さらには、起 こる確率が非常に小さいが、その結果が破局的な影響を与えるような事柄については、人々は、起こる 確率がゼロとはいえないということで極度の心配をするが、放射性廃棄物は、それ自身が爆発するもの ではなく、最悪の出来事は廃棄物による地域一帯の汚染である。どのようにしてこのような結果を導く ことができるのかは想像しにくいものであるが、廃棄物の全潜在的放射能毒性を考えると、たとえこの ようなことが起こったとしても、広い地域の人々を強制的に移住させるなどの何らかの措置が必要とな るような線量(10~100 mSv/年)を超えるような事態には至らないことがわかる。

#### 1.2.2.6 放射性廃棄物地層処分事業の検討状況

### (1) 日本の原子力開発の基本スキーム

放射性廃棄物の処分をどのように進めていくかは、原子力エネルギーの利用と深く関わっており、原子力エネルギーの利用とそれに関連する安全の確保は、国民の生活の安全に深く関わっている。このため、原子力に関する事業の推進や安全規制は、原子力基本法の下で、国が関与しながら進められる<sup>41)</sup>。この大枠を図 1.2.58 に示す。



図 1.2.58 日本の原子力開発と安全規制の枠組み

原子力の利用に関する基本方針は原子力委員会が,安全に関わる基本方針は原子力安全委員会が策定, 整備し,経済産業省の資源エネルギー庁および原子力安全・保安院がこれを受けて,事業をすすめるに 当たっての方針,安全規制法を定め,原子力発電や再処理,廃棄物処分等々を行う実施主体で行われる 事業を指導,規制する。事業の推進,規制の策定等には様々な研究開発が必要となるが,これらは,日 本原子力研究開発機構や原子力安全基盤機構などの独立行政法人や電気事業者,様々な研究機関が行う 他,資源エネルギー庁や原子力安全・保安院が委託事業として行うという仕組みになっている。

#### (2) 日本における放射性廃棄物処分事業の基本スキーム

放射性廃棄物の処理・処分を、どのようにして進めていくかの基本方針は、内閣府原子力委員会が取 りまとめ、2005年10月に閣議決定された「原子力政策大綱」<sup>49</sup>において示されている。この中で、放 射性廃棄物は、「発生者責任の原則」、「放射性廃棄物最小化の原則」、「合理的な処理・処分の原則」およ び「国民との相互理解に基づく実施の原則」のもと、その影響が有意ではない水準にまで減少するには 超長期を要するものも含まれるという特徴を踏まえて適切に区分を行い、それぞれの区分ごとに安全に 処理・処分することが重要であるとされている。また具体的な課題として、高レベル放射性廃棄物やTRU 廃棄物の地層処分、海外から返還される放射性廃棄物の取り扱いについては、適宜適切に必要な措置を 講ずることが重要とされている<sup>49</sup>。まず、問題となるのは誰が最期まで責任を持って、この廃棄物の処 分事業をすすめるのかという点である。高レベル放射性廃棄物やTRU 廃棄物のうち地層処分するのが適 当と考えられるものについては、次のような点が重要となる。

- 処分施設の立地段階から施設閉鎖後のモニタリングを含め100年以上の期間を要する等,長期にわたる事業の安定的な遂行(長期安定性)が求められる。
- ② 長半減期核種の濃度が高い等から、長期にわたる安全性の確保(長期安全性)が求められる。
- ③ 事業の遂行には国民および地元からの信頼性の確保(社会的信頼性)が不可欠である。

これらを考慮して、放射性廃棄物の地層処分事業は、国の法的関与等により計画的かつ確実に事業が 可能な事業形態とすることが必要と考えられている。一方、浅地中処分、余裕深度処分については、基 本的には、発生者等(発電や再処理、MOX 燃料加工等を行う者)が責任を持って計画を立てて事業をす すめるべきであり、国は、処分が確実に行われるため、基盤的技術にかかる研究開発を行う等の適切な 措置を講じるとされている。なおいずれの場合も、その事業について、国民の安全が守られるかどうか については、内閣府原子力安全委員会が安全規制の基本的考え方を取りまとめ、これに従って経済産業 省の原子力安全保安院が具体的な規制を行う。

このような考え方に従って、放射性廃棄物の地層処分については、認可法人が事業をすすめるべきで あるとされている。認可法人というのは、民間等の関係者が発起人となって自主的に設立する法人で、 その設立については特別の法律に基づき主務大臣の認可が要件となっているもので、日本銀行や日本赤 十字社などがその例である。高レベル放射性廃棄物の地層処分については、「特定放射性廃棄物の最終 処分に関する法律」(最終処分法)<sup>38)</sup>が2000年5月に成立し、この法律に基づいて、「基本方針」および 「計画」が同年9月に閣議決定された。TRU 廃棄物の地層処分事業もこれと同様の仕組みによって進め

ていこうと計画されている。その概要を示したのが図1.2.59である。



図 1.2.60 放射性廃棄物地層処分事業の進行状況<sup>43)</sup>

国は、放射性廃棄物の地層処分の基本方針や計画を策定し、安全規制を別に法律で規定するほか、処 分実施主体(原子力発電環境整備機構(NUMO)と呼ばれる)を認可し、実施主体が提出する実施計画を 承認するほか、廃棄物発生者からの拠出金の額を決定する。地層処分事業の現在の進行状況は図1.2.60 に示すようになっている。

高レベル放射性廃棄物については、日本原子力研究開発機構が1999年に「わが国における高レベル 放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-」(2000年レポート)<sup>1)</sup> をとりまとめ、これを受けて2000年6月に高レベル放射性廃棄物の地層処分事業を進めるための法律 である「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」(最終処分法)<sup>38)</sup>が成立し、これを受けて実施主体 である原子力発電環境整備機構(NUMO)が2000年10月に認可法人として設立された。NUMOは処分事業 をすすめるべく、最終処分のための候補地となる概要調査地区を選定するため、2002年12月にその候 補地の公募を開始している。 TRU 廃棄物については、日本原子力研究機構と電気事業連合会が2005年9月に「TRU 廃棄物処分技術 検討書-第2次TRU 廃棄物処分研究開発の取りまとめ」(「第2次TRU レポート」)<sup>24)</sup>を取りまとめ、今後 高レベル放射性廃棄物と同様、実施主体を認可法人として設立し(あるいは現行のNUMO がその実施主 体となることもできる)、事業をすすめることになっている。



処分のために必要となる資金は、処分実施主体が使うのであるが、安全性・透明性を確保するため実施主体とは別に指定された法人が管理することになっている。処分事業のために必要な資金がどの程度になるかを図1.2.61に示す。これは最終的には電力料金から賄われるが、現在1 kWh あたり約20 銭が徴収されている。表1.2.9 は地層処分対象 TRU 廃棄物の処分費用の見積もりである。再処理や MOX 加工から発生する廃棄物の費用は、再処理事業者や MOX 加工事業者が、再処理費や加工費として電気事業者から受け取る費用の中から支払うことになるので、電力量を集める際には、再処理等積立金や燃料取得に関連する費用として調達されることになる<sup>250</sup>。

		単独処分		併置処分			
処	廃棄体量	20					
分	(千 m <sup>3</sup> )	20					
条	岩種	堆積岩	結晶質岩	堆積岩	結晶質岩		
件	深度(m)	500	1, 000	500	1, 000		
	合計	76	96	59	67		
費	(百億円)	70	00	50	07		
用	岩種平均	01		60			
	(百億円)		01	03			

表 1.2.9 事業者による TRU 廃棄物最終処分費用の見積り<sup>25)</sup>

(併置処分で高レベル廃棄物と共通する費用については一定の仮定の下に按分)

TRU 廃棄物の処分事業については、この TRU 廃棄物を高レベル放射性廃棄物と併置して処分すれば、 処分場の数を減らし、処分地選定プロセスや一部施設の共有化による合理化などの経済性の向上が見込 まれる。そのため、地元等関係者の理解を得て、併置処分を視野に入れた施策を進めることが重要と考 えられる。その場合、高レベル廃棄物の処分実施主体が TRU 廃棄物地層処分の実施主体となり得る制度 とすることが合理的と考えられる。

ただし、高レベル放射性廃棄物の地層処分については、すでに2002年12月から、処分地の候補とな るべき概要調査地区に対する公募を行っている。併置処分は、あくまでも地元の理解を前提に進められ るべきものであり、さらには、その地域の地質環境が併置処分に不適当ということもあり得る。このた め、制度としての併置処分の義務付けは行わず、NUMOが調査結果および地元関係者の理解を得た上で、 併置処分を行うと判断し、実施計画の変更等の国の承認を得た上で行う、実施主体が選択可能な事業オ プションとしている<sup>25</sup>。

#### (3) 日本における最終処分の手順とスケジュール<sup>30)</sup>

高レベル放射性廃棄物地層処分の事業の計画の概要を図1.2.62に示す。事業のすすめ方としては、 文献調査、概要調査(4年以上)、精密調査(約10年)の3つの段階を踏んで、事業許可申請(約10年) を経て2035年頃に最終処分施設を建設操業することになっている。このような段階的な進め方をする のは、放射性廃棄物の地層処分は、火山活動や活断層の存在するところあるいは地下資源の存在すると ころを避ければ、多くの地域で可能であると考えられるが、より詳しい情報を得るためには、文献調査、 概要調査、精密調査と順を踏んで不適当な地域を避け、次第に詳細に調べる必要があると考えられてい るからである。文献調査では、既に得られている地形図や地質図等をもとに、地形や主要な岩盤の定性 的評価を行う。概要調査では、地表からのボーリングやトレンチ等の調査により、地下の地質の概要、 岩盤の強度、地下水の通しやすさなど、主に広域の地下環境の情報が得られる。精密調査では、地下坑 道での直接的な調査により、詳細な地質状況、岩盤等の詳細な情報など、おもに特定領域の地下環境情 報が得られる。建設操業段階では、作業場近傍の詳細な地下環境情報を得ながら、作業が進められる。



図 1.2.62 高レベル放射性廃棄物の地層処分事業のフロー<sup>30)</sup>

高レベル廃棄物処分に関する最終処分法では、概要調査地区選定や精密調査地区選定の際には、国 が承認をするという手続きの他に、当該地区等を管轄する都道府県知事および市町村長の意見を聴き、 これを十分に尊重しなければならないとされている。TRU 廃棄物について、併置処分を行う場合には、 これを前提とした調査を含む実施計画の変更申請がそれぞれの段階で出されることになる。TRU 廃棄 物の単独処分の場合は、高レベル放射性廃棄物処分から少し遅らせて 2042 年頃から、併置処分の場合 は、高レベル放射性廃棄物処分にあわせて、2035 年頃から処分を開始する計画である。操業期間はお よそ 25 年で、その後解体・閉鎖、閉鎖後モニタリングを 300 年間行う計画になっている。

#### (4) 最終処分地確保に向けた取組み

放射性廃棄物の地層処分においては、国民あるいは地域の合意を得て事業をすすめることが重要と なる。1.2.2.1 で述べたように, 廃棄物は一般に, これまで希釈拡散によりただで捨てることが出来 ると考えられてきた。そのため、これにより得られる利益を得る(資源として利用する)際には、廃 棄に掛かる経費を見込まずに経済活動がなされてきたといえる。これに対して現代の社会は、廃棄物 による汚染を許さない世論が形成され、廃棄物の発生者に安全な処理処分が要求されるようになって きているのであるが、複雑な経済社会の中で、廃棄物の発生者は自分たちではなく電力会社や企業等 であるとの意識が強くあり、一方では廃棄物に掛かる費用の電力や製品への上乗せを嫌い、一方で廃 棄物を自らの近くに引き受けるのを嫌うという風潮がある。このような背景の下で廃棄物は行き場を 失い、安全を無視した形で違法な投棄などがなされ、汚染事故などにより、ますます廃棄物が嫌われ るという悪循環に陥っているのが現代社会であるといえる。放射性廃棄物の場合には、このような廃 棄物としての問題に加えて、原爆の利用や原子力施設の事故等のため、原子力や放射能は極めて危険 であるとの社会的認識が形成されてしまっているという問題もある。原子力は核のエネルギーを使う ためこれが兵器として用いられれば極めて破壊力があるのは確かなのであるが、社会の認識は、これ が原子力や放射能の存在そのものが悪であるとの結論に結びついており、安全確保のための努力が認 められないといった問題や、全ての原子力に関係する事故は原爆による破壊と同じ結果をもたらすと の不安に結びついているといった問題になっている。

こうした背景があるため,放射性廃棄物処分事業にとって最終処分地の確保は,非常に困難な課題 となっている。最終処分事業を進め処分地の確保を行うためには,放射性廃棄物は電力エネルギーの 利用と共にセットとして選ばれているものであり,地層処分が放射性廃棄物の管理にとってよいオプ ションであり,人々の安全を確保する最適で具体性のある方法であることを,国民一般に理解しても らうと共に,経済活動を基本とする現代社会において,処分が事業として受け入れられるように工夫 する必要がある。この目的に従って,国,実施主体 (NUMO),電力会社は,次のような取組みを行って いくことを考えている。

① 電源三法交付金による地域支援(国)

現行の電源立地地域対策交付金に加え,地域振興や産業振興の支援等に資する支援措置を拡 充

- ② NUMO による地域共生方策の検討(NUMO) 応募前から地域共生のモデルプランを検討し、地域発展の将来像について、より具体的にイ メージできる材料を提供
- ③ 国民との相互理解のための広報活動(国, NUMO, 電力) 概要調査地区等の関係住民のみならず,原子力発電の便益を受ける電力消費者一般との相互

#### 理解のための広報活動の推進

電源三法制度とは、電力利用者の受益者負担の考え方に基づいて行われる「電源立地対策」および 「電源利用対策」に関する政府の計画を明確にするため、一般会計と区分して設置(区分経理特別会 計)されており、図1.2.63に示すように、電気事業者の販売電気に目的税(電源開発促進税)を課し ている。この特別会計予算によって、電源開発のための研究開発や原子力、火力、水力発電施設の周 辺地域において、公共用施設や産業の振興に寄与する施設の整備を行い、発電用施設の設置の円滑化 を図っている。



図 1.2.63 電源三法制度<sup>45)</sup>



表1.2.10 文献調査地区,概要調査地区に対する電源立地地域対策交付金<sup>30)</sup>

高レベル放射性廃棄物の最終処分地の立地については、放射性廃棄物処分はエネルギー生産事業の 一環であるとの考えにより、文献調査地区、概要調査地区のある市町村(半分が当該市町村,残りの 半分が隣接市町村と所在都道府県)に対して電源立地地域対策交付金(表 1.2.10)を交付することに なっている。NUMOによる公募が開始された時点では、文献調査地区に対する交付金額は2.1億円であ ったが、原子力発電全体から発生する廃棄物を処分する事業の重要性を考え、平成19年からこの額は 10億円に引き上げられた。重要なことは、このお金はエネルギー生産事業に参加することへの当然の 報酬として交付されるものであり、その財源は電力利用者の受益者負担(目的税)であるという点で

ある。放射性廃棄物は電力エネルギーの利用と共にセットとして選ばれているものであり、これを現 在の社会の中にエネルギー生産事業の一環として組み込んでいくという考え方が根底にある。また, NUMO では最終処分地を選定していくに当たって、文献調査、概要調査をする候補となる地域を、広く 公募することとし、市町村の判断に委ねた。放射性廃棄物の地層処分事業は、100年近くになる長期 の事業であるので、このため、事業に対する地域の理解と自発的な協力がなければ進めることは大変 困難になるし、地域が発展していくことは事業のための非常に大事な支えになる。廃棄物の処分や原 子力、放射能に対する社会の態度を考えると、このように公募により候補地域を募るというやり方は 大変困難な道を選ぶことになるが、将来の我々の社会が、エネルギーや廃棄物に対してどう対処して いくのがよいかを考えると、人々や社会の理解を得ることは、目の前の廃棄物が当面何とかなればよ いということよりはるかに大事なことなのである。

## (5) 海外における検討状況

諸外国でも、放射能レベルの高い放射性廃棄物については、いずれの国でも地層処分をしようと計画 している。表1.2.11はこれを要約したものである。処分地の地層は、粘土層、岩塩層、堆積岩層、結 晶質岩層などであるが、いずれの国で計画されている処分施設も日本のものと大きく変わるものではな V .

国名	廃棄物形態	実施主体【形態】	処分地	資金確保	状況
フィンランド	使用済燃料	POSIVA(ポシヴァ社) 【民間会社】	オルキルオト	国が管理する基金	2001年処分地が決定 精密調査等を実施中 2020年頃操業開始予定
米国	使用済燃料 (一部ガラス固化体)	DOE OCRWM (エネルギー省 民間放射性廃棄物管理局) 【国(連邦政府)】	ユッカマウンテン	国が管理する基金	2002年処分地が決定 2006年頃建設認可申請予定 2010年頃操業開始予定
スウェーデン	使用済燃料	SKB (スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社)        【民間会社】	オスカーシャム <sup>※2</sup> エストハンマル <sup>※2</sup>	国が管理する基金	候補地2地点で調査を実施中 2017年頃初期操業開始予定 2023年頃本格操業開始予定
ドイツ	使用済燃料、 ガラス固化体	BfS (連邦放射線防護庁) 【国(連邦政府)】	ゴアレーベン*3	廃棄物発生者の引当金	サイト選定手続見直し中 2030年までに操業開始予定
フランス	ガラス固化体	ANDRA (放射性廃棄物管理機関) 【商工業的行政法人】	未定	廃棄物発生者の引当金	地層処分、核種分離・変換、長 期地上貯蔵の3つの研究を実施 し、政府は2006年に総合的な評 価を行う ビュール地下研究所で処分研究 を実施中
スイス	使用済燃料、 ガラス固化体	NAGRA <sup>※1</sup> (放射性廃棄物管 理共同組合) 【発生者出資の共同組合】	未定	国が管理する基金 <sup>Ξ4</sup>	処分実現可能性の検討を実施中 2050年頃操業開始予定
カナダ	使用済燃料	NWWO (核燃料廃棄物管理機関) 【発生者出資の非営利法 人】	未定	民間が管理する信託基金	2002年核燃料廃棄物法制定 地層処分、サイト貯蔵、集中貯 蔵を含む複数のアブローチにつ いて検討・提案し、承認を受け たアブローチを実施する
中国	ガラス固化体	CNNC (中国核工業集団公 司) 【国(公社)】	未定	制度検討中	サイト選定に向けた詳細な地質 調査等を実施中 2030~40年頃に処分場建設予定
日本	ガラス固化体	原子力発電環境整備機構 【認可法人】	未定	国が指定する民間法人が 管理する基金	調査地区を公募中 平成40年代後半(2033~2038年 頃)操業開始予定

表 1.2.11 諸外国の高レベル放射性廃棄物対策の現状 30

※2 処分候補地 ※3 処分候補地、再検討中

※4 研究開発やサイト制定など初期に必要な費用は引当金として管理

## 1.2.3 ニアフィールドコンセプトの再構築

前節では、非専門家を想定した放射性廃棄物の地層処分の解説を試みたが、これを通じて分かること は、「環境安全」と「建設・操業安全」の両者を満足するためには、不均質な環境と長期の時間枠とい うこれまでにない条件の下での問題解決が必要であり、「地層処分工学」とは全く新しい学問・工学領 域であるということである。我々が数万年から数十万年、放射性物質を閉じ込めるといった時、この時 間軸は、実験室の科学や過去の工学あるいは我々の歴史的経験、日常的経験とは異なるものであり、実験や経験の内挿で結果を予測することは出来ない。

一方、世界を構成している諸物質は、全てが同じ時間軸で変化するのではなく、宇宙環境、地質環境、 生熊圏、人間社会、化学物質、機械的物質等々を構成している要素は、それぞれの固有の時間軸を持っ て変化している。地殻を構成している諸元素は、それぞれに特有の時間軸で移動し、化学反応し、その 結果われわれが見る不均質な分布を生み出している。例えば、酸素は、熱力学的平衡からいえば、地球 上では他の物質と化合すべきもので遊離の分子として存在できないが、生物がこれを生成した結果、地 表環境に存在し、無機的に他の物質と結合しないで存在している。すなわち遊離の酸素が他の物質と化 合する速度は、何億年という時間軸から見ても極めて遅い。ところが、生物が持つ酵素は、触媒として 作用して、この酸素を他のものと化合させる。この結果、大気中の酸素濃度は準定常状態になり、地殻 中と地表とで不均質な遊離酸素の分布が達成される。さらに、大気中の酸素は、無機的に他の物質と全 く反応しないかというとそうではなく、非平衡状態として環元状態に形を変えられた多くの金属とゆっ くりと化合する(すなわち腐食が起こる)。これまではこのような変化は、我々の日常の時間軸の中で 速いか遅いかを論じればよかった。しかし、放射性廃棄物の地層処分の安全性にとっては、これよりも はるかに長期の時間軸の中で、変化が速いか遅いかを考える必要がある。また別の例として、セメント は、我々の日常の時間軸にとって最も好都合に働くように開発されてきた。工事に用いる際には、作業 に丁度よい速さで固まるように、またセメントによって結合されたコンクリート構築物は数十年から数 百年安定な強度を持つように開発されてきた。地層処分においては、「建設・操業安全」の観点からこ のような機能は必須のものであるが、同時に「環境安全」の観点から、このセメントがはるかに長期の 時間軸に対して、どのような変化をするのかを見極める必要がある。高レベル放射性廃棄物の処分では、 セメント/コンクリートは「建設・操業安全」の観点から用いられ、長期の変化については、廃棄物環 境に悪影響をもたらす可能性が問題となる。一方、TRU 廃棄物の地層処分や、発電所廃棄物およびTRU 廃棄物の地中処分(余裕深度処分)および浅地中コンクリートピット処分では、数百から数千年の閉じ 込め機能を持つバリア材として用いられる。従って、処分の安全性を主張するためには、より長期の時 間軸によるセメント自身の変化あるいは他の物質との相互作用の進展を把握することが必須となる。

長期の時間軸,地質環境の不均質に由来する地層処分システムの安全評価における不確実性を地下水 シナリオに対する課題として考えると,次のように整理される。

- ① バリアの長期健全性
- ② バリアにおけるシナリオの妥当性
- ③ シナリオ評価におけるモデルの妥当性
- ④ シナリオ評価に用いるデータの妥当性

これらはいずれも、工学的時間軸すなわち実験や人間の経験から実証できる事柄に対する数百年を範囲とする時間軸と地質学的時間軸すなわち自然界の観察から定常的であると推測できる事柄に対する数十から数百万年を範囲とする時間軸をつないで、地層処分が対象とする時間軸で起こる事柄を推測できるかどうかの問題である。ニアフィールドコンセプトを再構築するためには、非専門家を対象とするセーフティーケースからさらにすすめて、安全評価に焦点を絞ったより進化したセーフティーケースをまとめる必要があるが、定性的には、特にニアフィールドにおいて、このような点、すなわち過渡的状態(工学的時間軸から地質学的時間軸へ)の評価が重要となる。地下水シナリオに対する影響の定量的評価が必要となる項目としては次のようなものがあげられる。

① 工学バリアの健全性

緩衝材、オーバーパック、セメント

- ② 操業時にもたらされる一時的変化の回復 水理,水質特性,酸化性雰囲気,再冠水, バックフィル,グラウト,プラグ コロイド形成,微生物 セメント材料
  - 亀裂, 間隙構造, 掘削影響領域
  - ガス移行、ベントナイト流出

これらのそれぞれの課題に対して,掘削,操業,埋設,再冠水,発熱影響段階(千年まで),隔離段階(1万年まで),地質段階(1万年以降)の各段階においてどのような変化がどの程度起こるのかを整理していく必要がある。

#### 1.2.4 参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構:「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層 処分研究開発第2次取りまとめ-総論レポート」, JNC TN1400 99-020, 1999.
- 原子力発電環境整備機構:「高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性」,NUMO-TR-04-01, 2004.
- 3) 原子力発電環境整備機構:「概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠」, NUMO-TR-04-02, 2004.
- 4) 原子力安全委員会原子力安全研究専門部会:「原子力の重点安全研究計画」, 2004.
- 5) 原子力環境整備促進・資金管理センター:「高レベル放射性廃棄物地層処分に関する研究開発全体 マップの整備」,原環センター技術報告書 RWMC-TRJ-04005-1,2005.
- 6) 原子力安全・保安院:「原子力安全・保安院の安全研究ニーズについて」, 2004.
- 7) 日本原子力学会:「平成16年度原子力安全研究ロードマップ整備」,2005.
- 8) 核燃料サイクル開発機構:「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築-平成 17年度取りまとめ-」, 2005.
  - 「-分冊1 深地層の科学的研究-」, JNC TN1400 2005-014
  - 「-分冊2 工学技術の開発-」, JNC TN1400 2005-015
  - 「-分冊3 安全評価手法の開発-」, JNC TN1400 2005-016
  - 「-地層処分技術の知識化と管理-」, JNC TN1400 2005-020
- 9) 丸山茂徳,磯崎行雄:「生命と地球の歴史」,岩波新書,1998.
- 10) アンドルー・H・ノール, 斉藤隆央訳:「生命最初の30億年 地球に刻まれた進化の足跡」, 紀伊國 屋書店, 2005.
- 11) 核燃料サイクル開発機構:パンフレット「地層のことを考える」、 <u>http://www.jaea.go.jp/inc/kikou/punf/index.html</u>
- 12) ジェームズ・ラブロック、竹村健一訳:「ガイアの復讐」、中央公論新社、2006.
- 13) ブライアン・フェイガン、東郷えりか訳:「古代文明と気候大変動」、河出書房新社、2005.
- 14) ジャレド・ダイアモンド、楡井浩一訳:「文明崩壊」、草思社、2005.
- 15) W. P. Cunningham, M. A. Cunningham, B. W. Saigo: "Environmental Science -A Global Concern -", 9th edition, McGraw-Hill, 2007.

- 16) BP Global: "Statistical Review of World Energy 2006", 2006. http://www.bp.com/productlanding.do
- 17) P. Tans: "Trends in Atmospheric Carbon Dioxide Mauna Loa", 2006. http://www.cmdl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/
- 18) 環境と開発に関する世界委員会,大来佐武郎監修:「地球の未来を守るために」,福武書店, 1987.
- 19) 加藤尚武:「新・環境倫理学のすすめ」, 丸善ライブラリー, 2005.
- 20) 経済産業省資源エネルギー庁:パンフレット「原子力 2005」,日本原子力文化振興財団,2005.
- 21) 経済産業省資源エネルギー庁:原子力部会報告書「原子力立国計画-日本の選択-」,2006. <u>http://www.enecho.meti.go.jp/policy/nuclear/nuclear00.htm</u>
- M. Benedict, T. Pigford, H. Levi: "Nuclear Chemical Engineering", 2<sup>nd</sup> edition, McGraw-Hill, 1981.
- 23) 三菱原子燃料株式会社:ホームページ http://www.mnf.co.jp/pages/sei.htm
- 24) 電気事業連合会,核燃料サイクル開発機構:「TRU 廃棄物処分技術検討書-第2次 TRU 廃棄物処分 研究開発取りまとめ」JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR-2-2005-02, 2005.
- 25)経済産業省資源エネルギー庁総合資源エネルギー調査会電気事業分科会原子力部会放射性廃棄物 小委員会:「放射性廃棄物小委員会報告書」,2006.
- 26) 経済産業省資源エネルギー庁資源エネルギー庁パンフレット:経済産業省資源エネルギー庁放射 性廃棄物対策室「TALK 考えよう放射性廃棄物のこと.原子力エネルギーの未来のために,TRU 廃棄物の地層処分」,2006.
- 27) 経済産業省資源エネルギー庁資源エネルギー庁パンフレット:「TRU 廃棄物の地層処分について考 えてみませんか」, 2006.
- 28) 原子力委員会:新計画策定会議 第19回資料第2号,「放射性廃棄物処分について」,2006. http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/sakutei2004/sakutei19/sakutei\_si19.htm
- 29) 原子力安全委員会:放射性廃棄物・廃止措置専門部会 第1回低レベル放射性廃棄物埋設分科会 資料 1-2 号,2006.

http://www.nsc.go.jp/senmon/shidai/maisetsu.htm

- 30) 経済産業省資源エネルギー庁廃棄物対策室:ホームページ「TALK 考えよう,放射性廃棄物のこと. げんしりょくえねるぎーのみらいのために 地層処分」,2006. http://www.enecho.meti.go.jp/rw/hlw/hlw01.html
- 31) UNSCEAR: 1988 Report "Sources, effects and risks of ionizing radiation", 1988. <u>http://www.unscear.org/unscear/en/publication/1988.html</u>
- 32) 近藤宗平:「人は放射線になぜ弱いか(第3版)少しの放射線は心配無用」,講談社ブルーバックス, 1998.
- 33) 舘野之男:「放射線と健康」, 岩波新書, 2001.
- 34) 日本原子力文化振興財団:原子力百科事典 ATOMICA/原子力図書館「げんしろう」「放射線影響と 放射線防護」

http://mext-atm.jst.go.jp/atomica/list.html

35) 日本原燃(株):ホームページ 埋設事業 http://www.jnfl.co.jp/business-cycle/2\_maisetsu/maisetsu.html

- 36) 日本原燃(株):パンフレット「六ヶ所原子燃料サイクルの疑問にお答えします,2007. http://mext-atm.jst.go.jp/panf/issue.html
- 37) 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会:「現行の政令濃度上限値を超える低レベル放射性 廃棄物処分の基本的考え方,1998.
   <a href="http://www.aec.go.jp/jicst/NC/senmon/old/backend/index.html">http://www.aec.go.jp/jicst/NC/senmon/old/backend/index.html</a>
- 38)特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律,2000. http://law.e-gov.go.jp/cgi-bin/strsearch.cgi
- 39) 放射性その他の物の冬季による海洋汚染の防止に関する条約, 1972. http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/haiyo/london\_jyoyaku.html
- 40) 南極条約, 1959. http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kankyo/jyoyaku/s\_pole.html
- 41) 原子力基本法, 1955 (最終改正 2004). http://law.e-gov.go.jp/cgi-bin/strsearch.cgi
- 42) 原子力委員会:「原子力政策大綱」, 2006. http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/tyoki.htm
- 43)経済産業省資源エネルギー庁、日本原子力研究開発機構他:「地層処分計画を支える技術基盤の継続的な強化,2007.
  <a href="http://www.jaea.go.jp/04/tisou/forum/kenkyukaihatsu?houkokukai.html">http://www.jaea.go.jp/04/tisou/forum/kenkyukaihatsu?houkokukai.html</a>
- 44) 経済産業省資源エネルギー庁総合資源エネルギー調査会電気事業分科会原子力部会第5回放射性 廃棄物小委員会資料,2006.

http://www.enecho.meti.go.jp/info/committee/commit11.htm#nuc

45) 経済産業省資源エネルギー庁:原子力広報ページe-原子力「電源三法」の制度とはどのようなものですか,2007.http://www.enecho.meti.go.jp/e-ene/handbook/qa/010000/010600/index.html

(東北大学 杤山 修)

## 1.3 地質環境の観点で抽出された深部地質環境の調査・解析技術に関する研究

#### 1.3.1 はじめに

本研究委員会では、これまで瑞浪超深地層研究所(MIU)で実施すべき研究のみならず、地層処分の 実施(サイト選定、概要調査地区の選定、精査調査地区の選定段階)において必要と考えられる深部地 質環境の調査・解析技術に関する研究開発課題を提示し、かつ具体的に調査研究および手法等の開発・ 高度化を行うことを目的として進めてきた。とくに本研究では、これまでの当委員会での議論、検討を 踏まえ、以下に示した研究課題1~3を設定し調査研究を行ってきている。

一方,日本原子力研究開発機構においては,H12 レポート<sup>1)</sup>およびH17 レポート<sup>2</sup>の研究成果をふま え,瑞浪,幌延における地下研究所での地下環境・坑道周辺の地質環境を用いた研究により,現実的評 価コンセプト,原位置での評価手法(技術)を準備すべき段階に至りつつある。

このような背景にもとづき本研究においては、これまでのサイト選定や、概要調査・精密調査段階で 必要と考えられる断層・割れ目に関する研究と併せて、ニアフィールド(NF)のセーフティケース (Safety Case)の構築に必要と思われる研究課題の抽出検討も開始した。

本報告書は、上記に述べたこれらの調査研究項目に関して、主に平成18年度に実施した内容についてまとめたものである。

#### 研究課題の設定

研究課題1:断層活動に伴う断層周辺岩盤中の割れ目形成に関する情報収集と現場での調査手法開発に 関する研究

研究課題2:割れ目シーリング(充填鉱物)のナチュラルアナログに関する研究

研究課題 3:NF safety case 構築に役立つ研究課題の抽出に関する検討(瑞浪超深地層研究サイトを 例にした NF コンセプト再構築のための原位置試験に関する検討)

#### 1.3.2 研究課題1~3に関する調査・解析技術の開発の必要性

我が国の地下深部の地質環境では、サイト選定段階のみならず、地下坑道や処分場建設の各段階において、断層や割れ目帯といった地層処分場の設計や安全性に影響を及ぼすと考えられる地質構造との遭 遇を避けることはできない。これらに関しては、これまでも様々な地質学的および地球化学的な研究成 果が報告されているものの、地層処分におけるサイト選定や安全評価などに直接的に活用できる地質学 的に十分な情報が必ずしも得られている状況にはない。

とくに将来的な処分場の設計や建設・操業などの段階に対して求められる情報の1つは、断層周辺の 断裂構造、断層運動に伴う新たな割れ目形成の有無や、新たな割れ目が形成された場合の範囲と量、そ してそれらの割れ目の長期的な挙動(成長やシーリング)などに関するものである。また、新たな割れ 目形成における地下施設や設計等への影響がどの程度あると考えられるのか、などといった疑問に対す る解答を準備しておくことも処分を実施するにあたって必要と考えられる。

そのためには実際の断層周辺での緻密な地質調査を実施し、岩盤中に認められる割れ目の形態と分布 などから空間的な割れ目発生に関する情報を得ることが有効と考えられる。本研究ではこのような背景 のもと、現地における割れ目形態の詳細調査を実施し、併せて断層活動に伴う新たな割れ目の発生をど のように調査するのか、また新たに発生した割れ目をどのように定義するのか、といったフィールドで の調査に基づいて具体的な検討を進めている。今年度は、昨年度までの知見に基づき、阿寺断層近傍の 濃飛流紋岩に確認された断層露頭での詳細な調査を実施し、断層およびその近傍での断層運動に伴う地 質構造特性の発達や割れ目の状態変化に関する検討を行った。

また2つ目の研究課題として、新たに発生した割れ目が天然の環境下でシールドされる可能性がある

のか。またシールドされる場合、どのようにシールドされるのかについて、その可能性と現象に関して、 ナチュラルアナログ的観点からの割れ目充填鉱物に関する調査研究を継続中である。これに関しても、 調査事例は阿寺断層近傍の割れ目充填鉱物に注目した調査を行っている。特にどのような地下環境にお いて割れ目の充填が行われるのかなどのプロセスに注目した解析を実施中である。

そして 3 つ目の研究課題として、地下坑道周辺での新たに発生した割れ目が設計やニアフィールド (NF)環境にどのような影響を及ぼすのか、また物質移動現象との複合現象として、NF においてどのよう なシナリオを想定することが現実的なのかの検討を開始した。とくに今回から、瑞浪超深地層研究所で の主立坑および換気立坑近傍の地下の地質環境が明らかになりつつあり、これらの状態を題材にした事 例検討を開始した。これは、とくに NF における操業期間や処分場閉鎖、坑道埋設後での工学的、地球 化学的ならびに物質移動に関する現象を再検討し、現実的な解析シナリオを準備することを目的とする ものであり、現実的な Safety Case を構築することに資するものである。このような NF 環境における 複合反応に関する現象を把握することは、今後の地層処分研究において不可欠の課題であると言える。

本年度は、これらの3つの研究課題についてこれまでの研究成果(途中経過も含め),実施した調査 研究結果を以下に述べる。

# 1.3.3 研究課題1:活断層を含む断層活動に伴う割れ目形成に関する情報収集と現場での調査手法開発に関する研究

1.3.3.1 研究目的

研究課題1における調査研究の目的は以下の通りである。

- 断層周辺の割れ目の特徴的形態を明らかにし、新たな割れ目形成の可能性とその形態的特徴を把 握すること
- 断層運動による割れ目発生の量,密度等の定量的変化の傾向性を把握すること
- 上記のための現地調査手法を構築すること

また,これらの調査結果を用いて,最終的には地下処分場の設計施工方法,割れ目シーリング等との 連携やニアフィールド環境における物質移動との複合現象評価手法の構築を目指す。

#### 1.3.3.2 これまでの主な実施内容および成果

これまでの主な研究成果の概要および今年度実施した内容と結果について以下に示す。

本調査研究では、断層運動および、その影響によって生じたと考えられる割れ目について、天然の 実例をもとにした研究を行っている。その事例として、中部地方において明らかに活断層と認知され ているものの中から阿寺断層を調査対象として抽出し<sup>3</sup>、調査研究を進めている(図1.3.1)。

調査地域は、岐阜県中津川市付知町から同県中津川市川上を走るNW-SE方向の阿寺断層周辺の岩盤(花 崗岩と流紋岩)である。昨年度までは、主に調査地区の南部に広がる苗木花崗岩についての調査を進め てきた。

今年度は、昨年度から継続している阿寺断層の北部半分に分布する濃飛流紋岩中の断層および割れ 目形成に注目した調査を実施した。とくに今年度中では、阿寺断層近傍に良好な断層調査の可能な露 頭を見いだしたことから、そこでの詳細な調査を行うことが可能となった(図1.3.2)。今回の調査目 的は、阿寺断層の運動に伴って形成される断層破砕帯などの構造を詳細に調査することによって、ど のようなプロセスで阿寺断層が形成されてきたのかを示すことである。









調査研究の最終ゴールは、断層および周辺割れ目の変質や充填鉱物の種類などによって、断層運動、 形成に関するどういった情報が取得できるのか、その調査手法を確立することにある。また、断層運 動によって岩体中に形成される割れ目の形態調査を行うことによって、断層周辺の岩盤中に形成され る割れ目の特性についての一般的な傾向性が存在するものかどうかを確認することである(図1.3.3)。



#### 1.3.3.3 今年度の調査内容と主な結果

本年度は、これまでの苗木花崗岩体において実施した阿寺断層の延長上にある、濃飛流紋岩体部分 の断層露頭について、断層周辺に関する詳細な割れ目調査を実施したので、その調査内容、現状(一部 結果)について以下に述べる。

#### (1) 調査地域概説

現地調査は、阿寺断層沿いの付知地域北東部の濃飛流紋岩の分布する地域で、地形図上では、これまで記載、報告されている阿寺断層から北西に 50m ほどの地点にある断層露頭である(図 1.3.2)。現地調査の結果、幅 30m ほどの露頭には、幅数 m の断層が複数本平行して存在する(図 1.3.4)。現在この断層露頭を中心に断層破砕帯の構造と、周辺割れ目の分布や形態についての以下の調査を実施中である。



#### 図 1.3.4 断層位置図

- (2) 濃飛流紋岩中の断層・割れ目調査実施内容
  - ① 断層から直交方向における空間的な割れ目分布密度,形態,走向傾斜の測定
  - ② 岩盤露頭での割れ目詳細調査と割れ目解析
  - ③ 断層周辺岩盤の割れ目と充填鉱物分析

断層運動による影響は、新たな割れ目の形成だけでなく、割れ目の分布、密度、形態そしてその後 の地下水等との二次的な反応によって形成される割れ目充填物などにもその痕跡が示されるものと考 えられる。調査では、これらの情報にも注目した調査を進めている。また野外での割れ目情報をできる だけ一般化し、客観的に解析するためには、均質化した情報として取りまとめる予定である。

## 1.3.3.4 主な調査結果と解析結果について

### (1) 断層および周辺割れ目解析

今回確認した露頭はその位置関係から,阿寺断層の一部を構成していることが確認された。今回確認 することのできた露頭では,阿寺断層とほぼ同一の走向傾斜で4本の断層が確認され,それに伴う割れ 目が多数確認される。これらの割れ目の100本程度を無作為に抽出し,走向傾斜を測ったものを図1.3.5 に示す。



図1.3.5 断層および割れ目分布解析図

阿寺断層(赤)は左横ズレ成分の断層である。その断層運動に伴って周辺岩盤は、基本的に反時計 周りのローテーションを行う。このローテーションに伴って、阿寺断層に斜交する断層(I, II)と緑 色で示した割れ目が形成されるものと考えられる。さらに、これらの附随断層も基本的には左横ズレ成 分を有しており<sup>4)</sup>、その運動に伴って附随断層周辺に紫色で示した開口割れ目系が形成されていった可 能性が考えられる。つまり、阿寺断層の長期に及ぶ断層運動に伴って、断層周辺に階層を伴う附随断層 が形成され、阿寺断層運動に伴う割れ目形成と、附随断層形成に伴う割れ目がオーバーラップした状態 で現在の断層露頭として現れている可能性が高い。

### (2) 阿寺断層形成史

現在,これまでの断層調査結果をもとに,阿寺断層の形成史を構築中である。阿寺断層には,地下深 部で形成されたカタクレーサイトから,現在の地表付近で破砕されたと思われるカタクレーサイトの破 断粒子を含む断層破砕帯が確認できることから,図1.3.6に示すような阿寺断層形成プロセスが描ける。



図 1.3.6 阿寺断層形成プロセス

- ステージ I:地下深部(数キロ以上)での阿寺断層の形成。これはカタクレーサイトの同定で判断され るものである。カタクレーサイトの報告<sup>5)</sup>でもされており、基本的に阿寺断層本体の形成 は、地下深部で初めに形成されたものと考えられる<sup>6)</sup>。
- ステージ II: その後, 阿寺断層近傍に形成された開口割れ目に, 緑簾石などの熱水に伴うと考えられる 充填鉱物の沈殿が形成される。これらの充填状態は,研究課題2でも示すように割れ目内 に自形結晶で成長,充填していることから,隆起に伴う応力解放も関連している可能性が ある。また,一方ではカタクレーサイト近傍に断層角礫の形成も伴うことから,一部カタ クレーサイトが脆性破壊されつつ,断層幅が増大していくプロセスも経ているものと考え られる。
- ステージ III: さらに続く隆起と浸食で、地表近傍に接した阿寺断層およびその周辺割れ目は、雨水の 浸透によって、酸化物や炭酸塩鉱物の沈殿を伴う。一方、左横ズレの断層活動は継続して おり、さらに断層ガウジが成長すると考えられる。

ここで述べた形成プロセスは1つのシナリオであり、さらに構造的および地球化学的データによっ て詰める必要があるが、これまでの調査結果とも併せておおよそ整合的であり、今後、最終的には、割 れ目分布、形態などとも併せて統合的に解析を進めて行く予定である。

- 1.3.3.5 今年度の調査結果について
  - ① 断層露頭において、断層および周辺割れ目の形態や分布、状態について調査し、断層構造の詳 細が確認された。
  - ② 断層および断層周辺割れ目は、阿寺断層の動き(運動)と密接に関わっており、左横ずれの断 層運動に伴う階層構造的割れ目配置/構造を呈している可能性がある。
  - ③ 阿寺断層の形成プロセスを示した。形成史については、まだ確認すべき情報が必要であるが、 おおよその形成史についてはそのアウトラインが示せたものと考える。
- 1.3.4 研究課題2:割れ目シーリングのナチュラルアナログに関する研究 (坑道周辺(ニアフィールド環境)における物質の移動経路の二次的物質(鉄酸化物,炭酸塩 など)による自己シーリングプロセスと物質移動特性への長期的影響の検討)
- 1.3.4.1 研究目的

研究課題2における研究目的は次の通りである。

- 岩盤力学,地球化学,物質移動などの境界領域として、これらの複合現象についての現実的な データ,解析手法、モデルの構築を行う
- ② 地下水-岩石反応に伴うシーリング材、炭酸塩鉱物の沈澱や酸化還元反応に伴う水酸化鉄等酸 化物の沈澱による坑道周辺環境の長期的な変化を検討する
- ③ シーリングに関する「ナチュラルアナログ」現象の抽出/検討を行なう

これらは、研究課題1で得られる「新たに発生する割れ目」という情報をもとに、将来の地下空間に おいて、とくにニアフィールド近傍で遭遇し、処分システムに影響を与えると考えられる割れ目の分類 と、それらの割れ目を介した人工バリア材等と天然バリアとの反応についてのより現実的な FEP と Safety Case を構築することを最終的な目的として実施するものである。

#### 1.3.4.2 今年度実施内容および解析検討結果

今回実施したのは、先に示した断層露頭における割れ目充填鉱物についての調査である。断層露頭 には、断層に伴う少なくとも3つの方向の割れ目が確認される。これらの割れ目充填鉱物には、石英脈 と炭酸塩(カルサイト)脈の他に、今回初めて確認することのできた、緑簾石とアクチノ閃石がある(図 1.3.7)。アクチノ閃石は、晶出した後に石英によって再度埋められており、割れ目が形成された後、 アクチノ閃石が晶出し、その後石英によって埋められたものと考えられる。



図1.3.7 阿寺断層近傍の割れ目充填鉱物

緑簾石の充填についても、アクチノ閃石とほぼ同様の温度条件で晶出すると考えられていることから、 同様の地下環境条件下で形成された可能性が高い。これらの割れ目充填鉱物の形成プロセスは、図 1.3.6 に示した阿寺断層形成史にも反映されているが、現在これらの形成条件(温度,圧力)に関する知見を 整備している最中である。少なくともこれら充填鉱物の形成は、割れ目が形成され(脆性破壊的条件下) で、かつ割れ目が開口していく段階で、熱水の循環を伴って形成(結晶の晶出)が生じたものであるこ とはまちがいない。今後は、これらの詳細な分析および観察によって、これらの形成条件をより明らか にすることによって、さらに断層/割れ目形成史を具体的に示していきたいと考えている。

#### 1.3.5 今後の予定

今後,まず課題1については,断層活動に伴う割れ目形成等,断層活動と割れ目形成,断層の形成史 について統合的に解析を行って行く予定である。例えば断層運動の影響評価として,断層運動によって 形成される割れ目の同定をさらに進め,地質学的,地球化学的手法と併せて,将来的な地下研究での手 法として適用できるものを構築していく予定である。とくに今回調査を行った露頭内での割れ目分布/ 形態に認められる特徴を,これまで実施してきた地表全体の割れ目形態,性状との比較検討を行うこと により,三次元的な断層周辺に二次的に形成された割れ目構造,形態の特性を明らかにすることが重要 と考えている。さらに今回の調査において得られた断層岩および割れ目充填鉱物の情報を基に,割れ目 形態との相関を解析することが次の段階で必要となる。これらの断層岩,割れ目形態および充填鉱物デ ータを統合化することで,阿寺断層の総体が把握できるだけでなく,どのような割れ目(群)が断層近 傍では地下水流動に寄与しているのか,などの判断が容易になるものと期待される。そして最終的には, これらの調査手法を瑞浪超深地層研究所での研究に応用していきたいと考えている。

とくに広域的な断層活動に伴う割れ目発生のメカニズムやその特徴については、これまで、および今回の調査から構築することのできた仮説について、今後の調査によって仮説の検証を行うべく、野外調 査での系統的な割れ目の把握と一般化を行うことに重点をおいて調査研究を展開して行く予定である。

また課題2についても、断層破砕帯、ガウジ中の元素移動データを蓄積し、粘土岩中の物質/元素移動の詳細を把握することにより、グラウト材の破砕帯への注入効果のアナログとして活用可能とも考えられることから、これらの知見をさらに充実させることを進めていきたい。そして、結晶質岩系における割れ目充填鉱物形成/シーリングメカニズムについて取りまとめを行って行く予定である。

これらの知見は、下記に示す NF 研究、新たなコンセプト構築にも不可欠な情報であり、課題 3 とも 密接に関連づけて今後の調査を展開していく予定である。

## 1.3.6 NF Safety Case 構築に役立つ研究課題の抽出に関する検討(瑞浪超深地層研究所を例にした NF コンセプト再構築のための原位置試験に関する検討)

1.3.6.1 背景と目的

昨年度より、将来の地下研究施設での坑道周辺における EDZ(掘削影響領域),割れ目形成あるいは それらの環境下での物質移動をも考慮した複合的環境における原位置試験方法,意義,考え方について の検討を開始した。これは、従来の NF 環境の概念モデルや核種移行解析シナリオの非現実性などが挙 げられるとともに、地下研究施設をより有効に活用することを目的に行うものである。

坑道周辺の地質環境は、グラウト材やコンクリート支保材など、人工材料とのインターフェースであ り、また操業に伴う微生物活動をも伴う酸化還元反応といった物理的・化学的変化を伴う環境(場)で ある。これまでの性能評価においては、これらの複合状態(より現実的な状態)の概念が明確ではなく、 信頼性の高い安全評価体系を整備するためにも早急に準備されることが必要と考えられる。とくに NF における Safety Case を抽出/構築する上では重要かつ不可欠である。また、瑞浪超深地層研究所での 地下環境状態も明らかになってきたことから、近い将来に地下研究施設で実施すべき検討テーマとして もここで事前解析的な位置づけとして検討を行った結果(内容)について述べる。

#### 1.3.6.2 検討内容

## (1) 目的

地下環境評価技術の高度化のために、結晶質岩における地下処分坑道周辺を想定した現実的なNF-FEP を再検討/抽出することを目的とする。

とくに、NF Safety Case の検討において、欧米ではNF 水理状態や地球化学的変化、ガス発生やベントナイト変質などが検討項目としてあげられている<sup>7)</sup>。これらは、欧米での処分システム(地質環境)を想定した上での Safety Case の構築のために検討項目として提示されたものであり、日本の地質環境

(変動帯等々)を想定したものは独自にその項目を検討/抽出することが必要と考えられる。ここでは、 以下に述べるように瑞浪超深地層研究所での地質環境を想定した上での検討内容について述べる。

#### (2) 検討にあたっての諸条件

瑞浪超深地層研究所の地下環境は、結晶質岩の花崗岩であり割れ目/断層を想定した状態でのNF環境を想定することが必要である。また、湧水状態等を考慮した場合のグラウチングやコンクリート吹き付け等の対策も想定される。瑞浪超深地層研究所での最近の主立坑、換気立坑の状態からも(後述)湧水を避けることはできないと考えられる。将来想定されるNF環境は、花崗岩体中の割れ目や断層、湧水対策としてのグラウチング、コンクリート対策状態下での人工バリア材の設置に併せバックフィルなどが充填される環境である。これらから、想定される諸条件と検討すべき項目(課題と思われるもの)を以下に列挙する。

- ▶ 結晶質岩(花崗岩)
- ➢ Post-Closure (再冠水後)のステージ
- ▶ 人工バリア(オーバーパック、ベントナイト)+坑道周辺岩盤+地下水の混在環境
- ▶ 坑道掘削+安全性の観点から最低限のコンクリート、グラウチングを実施
- ▶ コンクリートプラグ+掘削ズリを活用したバックフィル材による埋め戻し
- (3) 検討すべき項目…順不同
  - EDZの水理状態(透水係数)と解決すべきと考えられる問題
    \*飽和・不飽和の状態・・・戻るか/戻らないか?→予測可能か?割れ目との相関は?
    \*ベントナイトの流出を防ぐために必要な最低の水理条件は?
  - ② EDZ の力学的状態と解決すべきと考えられる問題
    \*EDZ の長期的変化や水理にからむ水みちの長期安定性 or 挙動は?
    \*応力の一点集中による廃棄体の物理的破壊の可能性は?(長期的応力 再配分)
  - ③ セメント、グラウト剤の効果と影響、と解決すべきと考えられる問題
    \*長期的状態変化・・・注入範囲の把握は可能か?(必要か?)
    \*岩盤力学・水理・地球化学への影響を何処まで想定すべきか?
  - ④ コンクリートプラグ,埋め戻し材の効果と影響と解決すべきと考えられる問題\*坑道周辺環境への影響をどこまで想定すべきか?
  - ⑤ ガス(H<sub>2</sub>, <sup>14</sup>C)移行の影響と解決すべきと考えられる問題

\*力学的に想定すべき課題が考えられるか?

これらの諸条件,項目をもとに,NF環境として想定されるべき項目(上記)について,委員会メン バーおよび検討会において議論を実施し,以下に示すようなNF環境おける現象の時系列の抽出と,段 階ごとに想定すべき,Safety Caseを構築する上で重要と考えられる大項目(応力再配分・飽和/不飽 和・ガス移行/ベントナイト流出・化学的環境の修復)を提示し,それらの諸条件と相互作用につい て,核種移行をも想定した検討を実施中である(図1.3.8)。とくに今年度は,瑞浪超深地層研究所で の主立坑および換気立坑での地質環境が明らかになりつつあり(図1.3.9),本委員会でもこれらを題 材にした検討を始めた。瑞浪超深地層研究所での地質環境について詳細に述べることはここではしな いが,その概要を以下に示しておく。



Post-closureにおける想定される場および現象の要素





パイロットボーリング孔レイアウト



主立坑および換気立坑でのボーリングによるこれまでの掘削深度は,約350mであり地質状況は主立 坑と換気立坑の地質は,断層帯と健岩部と非常に対称的なものとなっている(図1.3.10)。これらの立 坑周辺において,100m レベルごとに予備ステージの設置が検討されており(図1.3.11),これら予備 ステージにおいても断層部と健岩部分の両方の岩体と遭遇するものと思われる。

## JAEA-Research 2008-042



図 1.3.10 瑞浪超深地層研究所での主立坑および換気立坑周辺の地質状況 (日本原子力開発機構の資料に追記。本図は、日本原子力研究開発機構の検討段階の図であり今後変わりうる)



図 1.3.11 主立坑および換気立坑周辺の地質と各予備ステージでの想定される地質状況 (日本原子カ開発機構の資料に追記。本図は、日本原子カ研究開発機構の検討段階の図であり今後変わりうる)

このような非常にコントラストの明瞭な岩体部分での坑道掘削は、将来予定されている研究坑道で も考えられるものであり、このような地質環境での原位置試験が必須となる。将来の処分場環境で、 このような断層および割れ目帯への遭遇は、これまでの釜石原位置試験場や、国内でのボーリングコ ア調査、地下備蓄サイトでの地下地質構造を鑑みてもおおよそ避けることはできないと考えられる。

今回の瑞浪超深地層研究所で遭遇した地下地質構造は、事前に一部予測されていたものの必ずしも 地表調査の段階から明らかとなっていた訳ではない。したがって、将来の処分場においても、このよ うな地質構造に遭遇した場合の練習問題として瑞浪超深地層研究所での事例は非常に参考になるもの である。とくに先に述べたNF Safety Case の構築と併せて、状態把握とその後に展開される安全評価 として、このような地下地質構造を処分場パネルに取り込むことが可能か否か、安全評価上リスクと 考えるべきか否か、例えば、断層粘土が充填された断層の透水性は低く、また核種吸着能についても 健岩部より期待されることも考えられる。したがって、「断層(帯)イコール排除すべきもの」という 先入観で対応するのではなく、その判断基準を地下環境での原位置試験で確認するというスタンスが 重要であろう。そういった観点から、地質学的状態に併せてグラウチングやコンクリート等、人工材 料との相互反応をも考慮した上でのNF 原位置試験研究のあり方、将来のあるべきNF 安全評価(核種 移行をも含めた)の構造を検討することが重要と考えられる。

以下に,瑞浪超深地層研究所立坑周辺での地下環境を活用した NF 原位置試験研究の考え方について 図 1.3.12 に示す。

## (4) ニアフィールドコンセプトの構築研究

各ステージあるいは主立坑&換気立坑周辺の地質環境においてどのような NF 研究を行うか? (図 1.3.12)。



図 1.3.12 瑞浪超深地層研究所での NF 評価原位置試験研究の考え方(案)

ここで示す調査研究項目の取捨選択と、どのような考え方でどのように展開していくのかを含めて 今後、当委員会でも継続的に議論/検討を重ねていく予定である。 1.3.7 参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構:「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層 処分研究開発第2次取りまとめ-」,総論レポート, JNC TN1400 99-020, 1999.
- 2) 核燃料サイクル開発機構:「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築-平成 17 年度取りまとめ-」
  - ・分冊1 深地層の科学的研究, JNC TN1400 2005-014, 2005.
  - ・分冊2 工学技術の技術開発, JNC TN1400 2005-015
  - ・分冊3 安全評価手法の開発, JNC TN1400 2005-016
- 3)金折裕司,川上紳一,大西小百合,長尾敬介,杉崎隆一,矢入憲二:阿寺断層周辺の苗木-上松花 崗岩に認められるカタクラサイトの微細構造と K-Ar 鉱物年代,岐阜大学教養部研究報告,27, pp.79-91,1991.
- 4) 大嶋章浩,吉田英一:活断層周辺岩盤の割れ目と化学組成の変化―岐阜県付知地域の阿寺断層による事例研究-,第14回環境地質学シンポジウム論文集別冊, pp. 1-10, 2004.
- 5)金折裕司,矢入憲二:阿寺断層中央部周辺に認められる変形構造の特徴。岐阜大学教養部研究報告, 25, pp.111-138, 1990.
- 6) 山田直利,小井土由光,棚瀬充史,原山 智,鹿野勘次:濃飛流紋岩-中部日本における白亜紀大 規模火砕流の研究-,地団研専報 53 号, 2005.
- 7) Nagra : Project Opalinus Clay; Safety Report -Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste, NTB02-05, 2005.

(名古屋大学 吉田英一)

## 2. 調査・解析手法の高度化・体系化

## 2.1 簡易型地下水制御情報化施工システム(SWING-SHAFT)の立坑トンネルへの適用に関する研究 2.1.1 はじめに

地下工事において、もっとも注意しなければならない事項は、地下水の取り扱いである。しかし、 地下水の挙動は、地下は目に見えないという特性から非常に捉えにくい。従来、地下水解析は、膨大 なデータからなる地盤モデルを基に数値解析を行うことが多く、工事開始前の事前評価として多用さ れていた。したがって、工事開始以降は、事前予測結果との整合性を議論することはあっても、解析 時間等の関係から掘削実績を再評価するまでには至らないケースが多かった。トンネル施工に関して は、地下水の厳密な3次元浸透挙動よりも、降雨~浸透~地下水流動などの水収支量の変動を計算す るタンクモデルや修正タンクモデル法による簡易計算が重宝する<sup>1),2),3)</sup>。ただし、これらの方法は、 水循環系の要素は考慮しているが、地下水流動メカニズムを考慮できないことに注意が必要である<sup>4)</sup>。

そこで、水循環系を考慮した地盤の水理情報システム簡易版として地下水情報化施工システムの一部、SWING法(System for Water Information of Ground)を開発した<sup>50</sup>。SWING法は、簡便に掘削実績を組み入れることが可能であり、掘削実績を基に周辺の水環境問題や経済的かつ効果的な施工に有益な地下水評価ができる。また最新データを迅速に将来予測に用いて施工に反映させ、施工面、周辺環境面を考慮したきめ細かい評価が可能である。SWING法は、水循環系を考慮した工事の進捗に応じた地下水挙動評価とその検証実績を同時に行い、施工実績に合致した最終的な影響評価を検証できる利点があり、いくつかのトンネルに適用して本解析法が十分実用レベルにあることも確認できている<sup>60,77</sup>。今回解析の対象としている立坑トンネル掘削で最も注意を要するのは、地下水の制御である。一般的な水平方向のトンネルの排水は、自然流下も含め制御するのがそれ程難しくはない。しかし、立坑では人工的な排水以外に手だてはなく、ポンプがなければ水没してしまうため、地下水の制御が重要となる。立坑トンネル用のSWING法として、SWING-SHAFTは、立坑トンネル掘削時の水循環系を考慮した工事の進捗に応じた地下水挙動評価とその検証実績を同時に行うものであり、施工実績に合致した最終的な影響評価を検証できる利点がある。

今年度は、昨年度に引き続き、日本原子力研究開発機構の瑞浪超深地層研究所の立坑トンネルなら びに周辺の井戸の観測情報を基に、SWING-SHAFT でどの程度のシミュレーションによる再現性がある かを検討した。

#### 2.1.2 SWING-SHAFT 法 (シリンダー)の構築と改良

これまでトンネル等の掘削に関する周辺への水環境保全やトンネル工事の地下水問題について、特 に山岳トンネルにおいて水循環系を踏まえた簡易影響予測評価手法である SWING 法を開発、実用化し ている。本研究は、この SWING 法を基に、立坑掘削問題において簡易に予測精度を有する評価法 (SWING-SHAFT 法と呼ぶ)を開発したものである。

ここで SWING 法の有利な点を改めてここに示すと以下のとおりである。

- 従来の簡易予測法では、恒常湧水量や渇水影響範囲の予測は可能であるが、施工実績による 修正が困難であり、また定量的な評価ができない。これを補う予測評価法であること、さら に工事実績が迅速にフィードバックできる解析法であること。
- ② 水循環系の要素であるトンネル湧水や表流水などの定量的評価が可能であること、既往の地下水数値解析法は、工事実績や水量的な評価が可能であるが、地盤モデルが複雑になること

やパラメータ自体が煩雑となり,随時工事に適合させて予測評価を行うためにはある程度の 解析期間が必要になる。これを補って迅速,且つ数量的な評価が可能な解析方法であること。

③ 可能な限り工事実績を基にした精度のあるトンネル湧水予測および渇水予測評価をする必要 性が高く、この評価結果を基に工事中においても周辺水環境への具体的な保全対応を行うこ とが可能な解析方法であること。

したがって, SWING 法の利点は, 立坑掘削問題 (SWING-SHAFT 法の開発) にも当てはまることになる。 SWING-SHAFT 法の基本的な考え方を以下に述べる。解析の対象となる領域を細分して, ボリューム 毎に透水特性を割り振り, 水理解析を行うが, まず図 2.1.1 に示すように幾つかのシリンダーボリュ ーム (n 等分に分割された領域) に分割する。分割数は計算精度や対象領域でのデータの量によって 随時変更することが出来る。同図には平成 16 年度以降のモデルを比較して示している。シリンダーボ リュームの中心に, 経過時間毎に井戸深度が変化する水を汲み上げるための井戸を配置し, 非定常井 戸理論を適用して, 地下水位や揚水量を計算する。



図 2.1.1 SWING-SHAFT におけるシリンダーボリューム

各シリンダーボリュームに非定常井戸理論を以下のとおり適用すると,

$$Q_n(z,t) = \frac{4\pi K_n (H_n - h_n)}{ln \frac{2.25T_n t}{r^2 \lambda}} \qquad (2.1.1)$$
$$S_n(r,t) = \frac{Q_n}{2\pi T_n} ln \left(\frac{R_n}{r}\right) \qquad (2.1.2)$$



図 2.1.2 シリンダー内の水位低下を合わせコンターとして表示



図2.1.3 2本の立坑がある場合のモデル化と計算手順

これらの式から揚水量および地下水位低下量が算定される。それぞれ(式 2.1.1)は湧水量,(式 2.1.2)は任意地点における地下水位低下量であり,(式 2.1.3)は影響範囲である(図 2.1.2)。さらに,これらの式を全周回に順次適用することで,各シリンダーボリュームのQ(湧水量)とr:地下水位(任意地点の水頭)を求める。

$$\sum Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_{n-1} + Q_n \qquad (2. 1. 4)$$

立坑掘削時に発生する ΣQは, 理論式から得られた Qを各シリンダーボリュームの総和と仮定する。 図 2.1.3 のように, 近接して立坑が 2 本ある場合は, 重ね合わせの原理を用い, 時間差を設けて, 同 じ位置で井戸からの汲み上げが行われているように設定する。計算上は同じ時間ステップにおいて, 2 回の計算手順を繰り返すことで, 相互の重ね合わせを行うことになる。なお, 2 つの井戸の位置が現 実に相当離れている場合は, 群井戸と同じように相互井戸の干渉を考慮する必要がある。

上述した方法を用いて,平成17年度の検討結果を踏まえて,以下に示す手順で,瑞浪超深地層研究 所の立坑掘削に伴う地下水の挙動解析を実行する。

## 2.1.3 瑞浪超深地層研究所における解析

概要ならびに立坑の位置と周辺観測井戸の配置関係を図 2.1.4 に示す。



図 2.1.4 瑞浪超深地層研究所と観測井戸概要

#### (1) 平成 17 年度の予測結果と評価

瑞浪超深地層研究所立坑では、平成17年後半に排水ストップを余儀なくされ、水位が回復する状況 になっている。SWING-SHAFT による再現として、立坑水位変動をパラメータとして、揚水停止に伴う 水理挙動を再現し、評価結果を基に水理物性値を見直した。検討ケースとしては、以下の3ケースで ある。各ケースの水理定数は次の図2.1.5 に示す。CASE-1 は、既往調査による透水係数の中央値、体 積含水比を0.2 の場合、CASE-2 と CASE-3 は、透水係数の中央値を1.3 倍し、体積含水比をそれぞれ 0.1、と0.15 のケースである。

図 2.1.6 は、湧水量と地下水位低下量を3ケースについて比較したものである。立坑の湧水量は、3 つのケースではほとんど差はないが、MSB-3 号孔と DH-2 号孔の観測井戸水位は相当異なる。MSB-3 号 孔で比べると、CASE-1 は解析値が小さすぎるし、CASE-2 は水位低下量が大きすぎる。一方、DH-2 号 孔では CASE-1 が、最も水位低下量をよく表現している。CASE-2、3 ではパラメータを修正したにもか かわらず、実測値との乖離が大きくなっている。さらなる検討が必要であることは言うまでもない。

結果としてシリンダーボリュームの配置や深度方向の水理定数が十分吟味されていないので、最終の結論は出せないが、幾つかの試行解析の結果、CASE-3 が最も適切と思われる。





図 2.1.6 各ケースの比較(掘削時の湧水量と地下水位低下量)

## (2) 平成18年度の第1回予測結果(パイロットボーリング実施中の解析)

瑞浪超深地層研究所の立坑工事における平成18年度は、揚水停止に伴う水位回復から揚水再開、さらにパイロットボーリング(06MI01号孔、06MI02号孔)の掘削が開始されている。SWING-SHAFTでは、 平成17年度成果を基に、パイロットボーリングの実施過程をモデル化し、ボーリング実績との対比を 行った。パイロットボーリングのモデル化は、図2.1.7に示すとおり主立坑および換気立坑の基底面 から所定の孔径で掘削するとし、パイロットボーリングの実績(平成18年7月~10月)に伴う湧水 量、観測孔水位と検証させている。

検討ケースは以下の2ケースである。各ケースで想定した水理定数は図2.1.8に示している。

CASE -3: 平成 17 年度報告(透水係数は既往調査結果の中央値)

CASE -33: ボーリング実施区間のみ CASE-3 の 20 倍の透水係数



条件、且つ同一ステップ中に2本の掘削を行う。



SWING-SHAFT による予測結果を図 2.1.9, 図 2.1.10 に示した。各図とも掘削時の湧水量,周辺の観 測孔水位と比較している。

- ① CASE-3(既施工区間の検証値~未施工区間の推定値) 主立坑および換気立坑の既施工区間(約 200m)の掘削実績には整合するが、パイロットボーリング区間の湧水実績と計算値は、大きな差異(約 10 倍程度)が発生する。また、立坑周辺の地下水位低下も大きく、半径 200m 範囲は、ボーリング孔底(深度 500m)まで低下してしまうことが予測され、少なくとも透水係数は図2.1.6に示した CASE-3 より小さいことが推定された。
- ② CASE-33 (パイロットボーリング区間: CASE-3の1/20の透水係数)

CASE-3の予測結果より、立坑周辺の地下水位(不圧地下水位)が低下しすぎること、および 湧水量自体が多いことから、透水係数がより小さい可能性が高いため、CASE-3の1/20に相当 するものとして感度解析を行った。CASE-33をみると、湧水量は実績に近似した傾向を示した が、このケースにおいても周辺観測孔の地下水位(水頭)に対して合致していない。

すなわち,これらの検討ケースにより立坑水位変動をパラメータとして,揚水停止〜パイロットボ ーリング実施に伴う水理挙動の再現,水理物性値の見直しを行ってみたが,これらの検討ケースでは, 未だ実用的な現況再現までは至っていない。つぎに,主立坑と換気立坑の中間部の断層分布に伴う改 良,具体的にはシリンダーボリュームの異方性を考慮するための改良を試みた。



図 2.1.8 CASE-3, CASE-33 の水理定数の設定(CASE-1, 2は平成 17 年度解析)



図 2.1.9 掘削時に伴う湧水量と地下水位低下(CASE-3)



図 2.1.10 掘削時に伴う湧水量と地下水位低下(CASE-33)
(3) パイロットボーリング実績を基にした予測解析

ここではパイロットボーリング(06MI01 号孔,06MI02 号孔)により得られた透水係数を基に,パ イロットボーリングの掘進工程を考慮した検証を行った。検討ケースは,既施工区間を CASE-4(約 200m)として掘削実績に整合させた上で,順次2箇所のパイロットボーリングを実施するケースであ る。SWING-SHAFTの設定値は図2.1.11に示した。

CASE-4-1 では、パイロットボーリング区間の湧水実績と計算値は、最大で 400L/分程度の差異が発生する(図 2.1.12)。特に深度 300~400m 区間における較差が大きく、立坑周辺の地下水位低下も大きい。MSB-3 号孔以外の観測孔では、計測値に比べて著しく低下している。少なくとも、同観測地点方向に至る透水性は CASE4-1 より小さいことが推定される(図 2.1.13)。



図 2.1.11 パイロットボーリングによる透水係数と検討ケース



図 2.1.12 パ 伯ットボーリングの掘削中における湧水量と地下水位低下量(CASE-4-1)



図 2.1.13 各観測孔水位との対比(CASE-4-1)

## (4) シリンダーボリュームの異方性(CASE-4-2)

CASE-4-1の結果(図2.1.13)をみると、各観測地点の水位変動は、主立坑と換気立坑の中央部を貫 く断層破砕帯(難透水性)の影響から水位低下量に明瞭な差異が発生している。特に、パイロットボ ーリングの透水係数にみられるように、主立坑側の透水性が極めて小さく、主立坑側の水位低下量が 少ない。したがって、CASE-4-2ではSWING-SHAFTのシリンダーモデルにおいても、異方性(実は不均 質性)を考慮することを試みた。具体的には図2.1.14に示すとおり、断層破砕帯に沿って主立坑側の 右半分に主立坑のパイロットボーリング06MI02号孔の透水係数を採用している。すなわち、主立坑側 の地下水位が低下しすぎることから、単純に主立坑方向と換気立坑に区分し、シリンダーモデルの異 方性を考慮した。

予測結果は図 2.1.15, 図 2.1.16 に示している。異方性を考慮すると, 湧水量は実績に比べてやや 少なくなるとともに, 近傍の観測孔水位に対して近似しつつある傾向を示した。図 2.1.17 には地下水 位の低下量について, 異方性を考慮していない CASE-4-1 と比較して示している。

但し、このケースにおいてもすべての周辺観測孔の地下水位(水頭)に対して合致していないこと から、CASE-4-2のような単純な異方性モデルでは充分に現況を再現できていない。今後の課題である が、断層破砕帯の分布位置や近傍観測孔の水位変動の評価を行った上で、異方性モデルを構築する必 要がある。



図 2.1.14 異方性を考慮したシリンダーボリューム (CASE-4-2)



図 2.1.16 各観測孔水位との対比(CASE-4-2)



図 2.1.17 井戸周辺の水位の時間的変化(CASE-4-2)

# 2.1.4 今後の検討課題

平成18年度の検討では、揚水停止~再揚水~パイロットボーリング実施に伴う観測データを基に、 水理物性値の見直し、および立坑工事の各段階における現況の地下水挙動の再現を試みた。また、主 立坑と換気立坑の中間部に存在する断層破砕帯に伴う異方性についても、シリンダーボリュームの異 方性を考慮した場合の予測も行った。検討結果からみると、透水係数の設定だけみても設計時および パイロットボーリングの実績値も含めて相当に難しい適用条件であることが推察される。特に、周辺 観測孔の水位変動に対する評価は、立坑周辺を含めて広域的な地下水挙動を把握するための最重要デ ータであり、SWING-SHAFT の運用を図るためにも、これを再現するための異方性モデルの構築は最重 要課題と考えている。

さらに、まとめとして SWING-SHAFT 法は、施工面、周辺環境面を考慮したきめ細かい評価が可能な 解析法であるが、それなりに解析上の課題が存在するのでそれらを列挙する。

・ 地盤モデルの作成が容易である反面,シリンダーモデルの自由度が制限され,複雑な地盤モデ ルの作成は容易ではない。

- ・ 地盤内の地下水流動は、飽和域のみの解析であり、不飽和域は評価していない。降雨浸透や多 層帯水層構造の解析を行うためには、複雑な地層情報が必要であり、入力に手間がかかる。
- ・ 厳密な3次元浸透理論ではないことから、地盤内部における流動メカニズムは評価できない。

これらの注意点を考慮すれば、SWING-SHAFT 法は簡易解析として有用であり、今後もさらなる検証 を重ねて行くことから、運用を含めて、当該地における地下水情報化施工に関する有力ツールとなる ものと考えられる。

# 2.1.5 参考文献

- 1) 樗木 武:トンネル湧水に関する基礎研究,九州大学工学部,一般研究 255191, p. 171, 1979.
- 2) Sugawara, M., Watanabe, I. : Tank model with snow component, Notes, N.R.C, No-65, pp. 293-298, 1984.
- 3) 石井政次,大島洋志,永橋健三: Geology and Hydrology of Rokko Tunnel in New Sanyo Trunk Line, Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, Vol. 8 No. 4, pp. 188-194, 1967.
- 4) 高橋彦治:トンネル湧水に関する応用地質学的研究 鉄道技術研究広告, No. 279, p. 103, 1962
- 5) 大西有三,大津宏康,高橋健二,安田 亨:山岳トンネルにおける地下水情報化施工の提案, 土木学会第59回年次学術講演会講演集, pp. 785-786, 2004.
- 6) 松井 保,磯崎弘治,早坂 毅,安田 亨:箕面トンネルにおける地下水情報化施工(SWING 法)の開発,土木学会第58回年次学術講演会講演集,pp.31-32,2003.
- 7) 大西有三, 大津宏康, 高橋健二, 安田 亨: Observational Method for Tunnel Construction Considering Environmental Impact to Groundwater Using The SWING Method, ISRM International Symposium 2006, p. 121, 2006.

(京都大学 大西有三)

#### 2.2 岩盤浸透流の3次元特性の調査・解析に関する研究

# 2.2.1 研究内容

本年度研究内容は下記である。

- ① 表層水理現象のニューラルネットワーク (ANN),遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた評価技術の体系化に関する基礎研究
- ② 東濃鉱山周辺における表層水理観測データの再評価による地下水変動監視システムの構築に
   関する検討
- ③ 地下水中へのフッ素・ホウ素溶脱に関する基礎研究

①・②については、立坑掘削など地下水流動に影響を与える地下建設工事を想定し、工事前の地下 水位データの解析と有限要素法などによる地下水解析を組み合わせ、日本原子力研究開発機構 瑞浪 超深地層研究所の主立坑および換気立坑の建設進行に伴う地下水変動を予測するシステムの考え方を 提示することが中心となる。一方、③については、瑞浪超深地層研究所の主立坑および換気立坑掘削 に伴う地下水のフッ素、ホウ素濃度の原因を、数値計算による地下水滞留時間の推定と、水ー岩石相 互作用に関する室内実験を組み合わせて研究することである。但し、水ー岩石相互作用の実験は新た に始めるものであり、実験の準備やサンプルの採取とその処理などを行うことが中心となる。

いづれにしても、地下水解析が共通の問題となり、今年度の研究は、有限要素法による地下水解析システムの開発と地下水滞留時間の推定に力点をおいた。

#### 2.2.2 ANN, GAと有限要素法を組み合わせた地下水変動監視システム

ANN や GA を用いることにより,過去のデータから,地下水位変動の将来予測を行うことは可能であ る。予測が精度良くできれば,予測値と実測値とを比較しながら地下水変動を監視し,局所的な高透 水層の存在などによる突発的な地下水変動を予測できる。このことは筆者らが以前から研究を進めて いるテーマである。ただし,ANN や GA の手法で予測が可能となるのは,地下水の揚水などの地下水変 動を与える条件があまり変化しない場合に限られる。大規模な立坑掘削などの実施により,揚水量の 大幅な変化が与えられると,地下水流動形態が以前とは異なり,過去のデータの解析のみでは将来予 測が難しい。このような問題に対応するため,筆者らは,境界水位が過去の状態から大きく変化する ダムの初期湛水に伴うフィルダム堤体内の間隙水圧変化の予測方法を研究した<sup>1)</sup>。

一方,立坑掘削の影響は,確かに,有限要素法などで地下水解析を行えばある程度評価することが可能である。ただし,この地下水解析では,断層などの地質条件や,透水係数や貯留係数などの水理 定数の推定が必要となる。一般にこの推定は難しい。

このように、ANNやGAは過去の実際のデータを使うため水理定数などの推定は不必要であるが、条件が変化した場合の予測が難しい。一方、地下水解析による将来予測は容易であるが、水理定数の推定が容易ではない。これらの各手法の長所を組み合わせることができれば、より実用的な地下水監視システムが構築できるはずである。しかし、組み合わせることは簡単ではなく、どのように一体化するかについては前述のフィルダム堤体内の間隙水圧解析などの経験を踏まえて検討しなければならない。本年度、まず、この統一化システムの基本的な設計を行った。検討の結果としては、図2.2.1のシステムを提案する。



図 2.2.1 ANN, GA と地下水解析の統合システム

このシステムでは、まず立坑掘削前のデータを用いて、地下水変動予測を行う ANN、GA モデルを構築する<sup>2)</sup>。このモデルでは、掘削によって地下水流れが変化する前の状態の潮汐、気圧、揚水などによる地下水変動を予測することができる。立坑掘削の影響は、有限要素法(FEM)による地下水解析により行う。この場合、立坑掘削後、初期の地下水変動の計測データを用いることができ、その変動を良く再現できる透水係数や貯留係数分布が推定できるならば、このモデルによって地下水に与える立坑掘削影響が推定できる。例えば、それらの係数の分布が一様であれば、ある程度推定は可能である。しかしながら、岩盤のそれら係数の分布は複雑であり、水理地質的に一様なモデルは一般的に成立しない。そのため、以下の手順を考えた。

- ① 水理地質構造は、堆積岩と花崗岩などの違いを考慮するものの、なるべく単純に考える。
- ② 各岩盤における,透水係数や貯留係数の組み合わせをいくつか変化させ,各々の組み合わせ における,立坑周辺地下水変動(間隙水圧変動等)を計算する
- ③ 各々の組み合わせの地下水変動および、掘削前に作られたモデルによる予測結果を入力デー タとし、掘削後に計測されたデータを教師値として、ANN、GA モデルを構築する。教師値と は、モデルのパラメーター決定に用いるデータである。

このシステム構築に当たっては、いくつかの問題がある。まず、立坑掘削後の地下水位変化を、簡 単な水理地質構造を仮定した有限要素法解析によってどの程度再現できるかの検証である。次にこの ことを検討した。

### 2.2.3 有限要素法モデルの構築と妥当性

### 2.2.3.1 モデルの構築と地下水解析の問題点

図 2.2.2 に、今回の解析対象領域を示す。西側境界を日吉川、南側領域を土岐川、その他の境界を 尾根線に設定している。図 2.2.3 は、その 3 次元図である。

JAEA-Research 2008-042





図 2.2.3 解析領域の 3 次元図

図 2.2.4 要素分割図 (10430 要素, 11565 節点)

図 2.2.4 に要素分割図を示す。底面境界は海面下-500m とした。鉛直方向は 14 層に分割し, 立坑周辺および表層部を細かく分割した。境界条件としては,底面および側面を流入出ゼロ境界 とし,地表面の日吉川および土岐川位置に一定水頭を与えた。 また地表面に 0.26 mm/day の降雨を与えた。解析は, 立坑掘削前と掘削中のケースを行った。掘削中のケースでは, 主立坑および換気立坑に坑内水位を与えた。

有限要素法解析では,対象領域の透水係数や貯留係数分布を与えることが必要である。その推定のため,図2.2.5,図2.2.6に示す,立坑周辺のボーリング孔,MSB-1号孔とDH-2号孔で計測された間隙水圧分布を用い,計測値と解析値が概略合うように設定した。





図2.2.6 DH-2号孔の間隙水圧分布(花崗岩中)





170

180

190

160

-250 -300 -350 150 図 2.2.7,図 2.2.8 から,間隙水圧は上部の新第三紀層(不整合面より上部)で大きく低下しているが,花崗岩内(不整合面より下部)ではほぼ一定であることがわかる。この性質をまず表現した上で,図 2.2.5,図 2.2.6 の経時変化を合致させることが解析の目的となる。もし,ある程度単純な水理地質構造モデルで深度方向の間隙水圧分布や,その経時変化が解析しうるならば,地下水解析によってその予測が可能となる。しかし,かなり差があるならば,前述したようにANNやGAの導入が必要となるはずである。今回の解析では,その点を検証することが大きな目的である。

図2.2.5 および図2.2.6 から,間隙水圧分布は,途中で上昇に転じているが,これは,地下水揚水 を停止したことによるものである。解析では,特に揚水停止後の,MSB-1 号孔,DH-2 号孔の間隙水圧 の上昇を概ね再現するような透水係数,貯留係数分布を推定した。ある程度,計測間隙水圧と解析間 隙水圧が合致した結果を図2.2.9,図2.2.10 に示す。これらは、図2.2.11 に示す水理地質モデルを 用いた場合である。水理地質モデルは,前述したように今後ANNやGAとの一体化を考え,単純なもの とした。主および換気立坑の間を通過する断層によって,まず2つの領域に分割し,表層の新第三紀 層と花崗岩に分けた。表2.2.1 は,推定された各層の透水係数および貯留係数区分であり,各部分の 水平と鉛直方向透水係数を変えている。図2.2.9,図2.2.10,特に図2.2.10 より,間隙水圧の回復が 必ずしも良くあっていないことがわかる。これは,対象岩盤の水理地質構造を単純化していることに よるものである。このように,地下水解析のみによって間隙水圧の変化を精度良く予測することは困 難である。そのため,前述したように,ANNやGAを導入してより精度の高い予測を行うわけである。 地下水監視システムでは精度の高い間隙水圧変化の予測が必要となり,有限要素法とANNやGAの総合 化が実用的であることが概略示されたと考える。





 (断層で2つの境域で区切られている。図中、右側の上部(新第三紀層)をZone-1、 下部(花崗岩)をZone-2、左側上部(新第三紀層)をZone-3、左側下部(花崗岩) をZone-4と名づける)

図 2.2.11 透水係数および貯留係数区分

Parameter	Zone-1	Zone-2	Zone-3	Zone-4
Horizontal hydraulic	1. 30E-06	5. 00E-07	1.30E-06	1.00E-06
conductivity (m/s)				
Vertical hydraulic	3. 50E-10	5. 00E-07	3. 50E-10	8. 00E-05
conductivity (m/s)				
Storage coefficient (m <sup>-1</sup> )	4. 50E-05	4. 50E-05	3. 90E-05	3. 90E-05

表 2.2.1 実測間隙水圧変化に合致するよう推定した透水係数, 貯留係数分布

(Zone については、図 2.2.11 の注釈参照)

### 2.2.3.2 地下水滞留時間の解析

有限要素法による地下水解析のもう1つの目的は、水ー岩石相互作用による水質変化、とくにフッ 素、ホウ素の濃度変化を調べるため、それらの濃度が急増した深度である地表下170~180mに立坑掘 削が至るまで、降雨がどの程度の時間で到達したかを概略的に推定することである。また、その経路 の推定も重要な課題である。この目的のため、有限要素法で解析した地下水流動にパーティクル・ト ラッキングの手法を用いて解析した。もちろん前述したように、解析対象場の水理地質モデルは多く の問題を含んでいる。そのため、滞留時間等の解析も必ずしも正確とは言いがたい。しかしながら、 大まかな時間を推定することは可能と考えた。

図 2.2.12, 図 2.2.13 は, 立坑掘削前および立坑が地表下 180m に達した段階の, 2 つの異なる深度 での水頭および流速分布である。図 2.2.14, 図 2.2.15 は, 立坑掘削前後で地表面に降った雨の軌跡 を水平面上で見たものである。立坑掘削後は,立坑に向かう軌跡が明瞭に現れている。勿論,今回の 解析は精度上問題も残るが,立坑掘削前の地表から立坑掘削地点の深度 180m までの滞留時間はほぼ 4500 年となった。一方,掘削後のそれはほぼ 4000 年であり,あまり大きな変化は無かった,この理 由として,表 2.2.1 に示されるように,新第三紀層の鉛直方向透水係数を 10<sup>-10</sup> m/s オーダーとかなり 小さく与えたことによるものと考えられる。ここで小さな鉛直方向の透水係数を与えた理由は、図 2.2.7 に示されたような、新第三紀層内で間隙水圧が大きく変化し、花崗岩内では深度方向の間隙水 圧がほぼ一定である性質を現すためである。









JAEA-Research 2008-042



図 2.2.15 立坑掘削後のパーティクル軌跡(水平面上に投影)

### 2.2.4 水一岩石相互作用実験準備

前章で述べた有限要素法とパーティクル・トラッキングによる解析によって、今回の間隙水圧分布 をある程度表現できる水理地質構造モデルでは、地表に降った雨が、フッ素、ホウ素濃度が急増した 深度までほぼ40年程度かけて到達する結果となった。時間がやや長いようにも思われるが、これは、 新第三紀層の鉛直方向の透水係数を小さく設定していることや、今回設定した解析領域では、雨は必 ず新第三紀層を通過することによるものであり、この点の検討が滞留時間のより高精度の推定のため の今後の問題点である。このような問題はあるものの、一つの目安値となると考える。

本年度行った研究では、実験準備に中心を置き、以下の2項目が中心であった。

- ① 室内実験準備
- ② 特にフッ素を考えた場合、花崗岩中の黒雲母起源と考えるため、実験に使用する花崗岩サン プルを MIZ-1 号孔から採取する。

実験では、各サンプルを粉砕しコニカル・ビーカーの中に入れ、蒸留水と共に長期間攪拌し水質の 経時変化を調べる。この場合、粉砕した試料を用いるため、水質変化が加速され、実際の水ー岩石反 応より速いことが想定される。しかし、水質変化の性質を把握することは可能と考えた。試料は、MIZ-1 号孔ボーリング・コアの以下の花崗岩部分から5個採取した。

- ・110.33-110.35m 区間
- •151.35-151.38m 区間
- · 335.40-335.45m 区間
- •801.30-801.50m 区間
- さらに,新第三紀層(明世累層)の
  - ・35.25-35.28m 区間から1 個採取した。

フッ素,ホウ素の分析は,主にデジタル・パック試験(共立理化学研究所)で行い,いくつかの試料については,より精度の高い分析を行う。図 2.2.16 に実験概略図を示す。現在は,実験準備をほぼ 完了し実験継続中である。



図 2.2.16 実験概略図

# 2.2.5 結論と今後の課題

本年度の研究は,

- 有限要素法による地下水解析による,間隙水圧分布再現とパーティクル・トラッキングによる 降雨滞留時間の推定
- ② 水-岩石相互作用実験準備

に多くの時間を費やし、有限要素法とANN、GA との総合化については、その必要性と基本的な設計方 針を示したにとどまった。また、水ー岩石相互作用実験も準備段階を終え実験中である。しかし、本 年度の研究を続けることにより、瑞浪超深地層研究所周辺の地下水監視と水質の形成過程が明らかに なると考える。

# 2.2.6 参考文献

- 1) 星野吉昇,内田善久,渡辺邦夫,藤井健知: ANN モデルの学習の高度化とロックフィルダムの間 隙水圧の挙動予測,土木学会論文集 F, Vol. 62, No. 2, pp. 387-404, 2006.
- 2) Sohail, A., Watanabe, K., Takeuchi S. : Stream flow analysis by artificial neural network (ANN) model trained by real coded generic algorithm, 地下水学会誌, Vol. 48, No. 4, pp. 233-262, 2006.

(埼玉大学 渡辺邦夫)

# 2.3 超微粒ベントナイトグラウトに関する研究

# 2.3.1 全体研究計画

# 2.3.1.1 研究目的

高レベル放射性廃棄物処分における天然バリア機能の修復・改良(図 2.3.1,図 2.3.2)を目的とした天然グラウト材料としてのベントナイトグラウトに関して以下の研究開発を実施する。

- ・ グラウト材料に関する研究:最適材料の選定(さらに、必要に応じて安価な作成方法の研究)
- ・ 注入方法/注入設備に関する研究:高粘性材料の攪拌,注入仕様(孔配置等)の検討
- 効果の確認方法に関する研究:改良効果,浸透範囲の確認方法等の検討
- 原位置岩盤における実証試験:日本原子力研究開発機構瑞浪・幌延等



図 2.3.1 処分孔の天然亀裂への注入イメージ図



図 2.3.2 止水プラグ周辺の天然亀裂および EDZ への注入イメージ図

このため、まずベントナイトスラリー(溶媒:蒸留水、塩水、エタノール、炭酸プロピレン等)の 注入時の性質および注入後の性質を調査し、淡水および塩水環境下に対して最適な材料組合せ(粒径、 溶媒、分散剤)を検討する。また、特に高濃度スラリーの場合は、グラウト材料が高粘性になること、 あるいは凝集することに起因する浸透性の低下が懸念されるため、その防止方法として分散方法(攪 拌方法)および注入方法(動的注入、高圧注入)、注入孔配置について研究する。

最後に、ベントナイトスラリーのように化学的に固化しない材料を用いて、極めて高い止水性を期 待する場合の効果の確認方法としては、従来のグラウト材の注入のようにチェック孔によるルジオン 試験を適用することは難しい。そこで、新たな効果の確認方法を構築する必要がある。

上記を踏まえて,適宜,原位置岩盤における実証試験を実施し,研究成果の妥当性を確認する(図 2.3.3)。



# 2.3.1.2 研究項目

### (1) グラウト材料研究

- ① グラウト注入時の性状把握
  - ・ グラウト材としての適性に関するフィージビリティスタディ(FS):液性限界試験,ブ リージング等
  - グラウトスラリーの基本的特性の把握:粘性特性(攪拌方法・時間,練混ぜ経過時間が 物性に与える影響)、スラリー中の分散状態(粒径分布)
  - ・ 目詰まり特性の把握: 亀裂入り口における目詰まり特性の把握
  - ・ 亀裂中における浸透性能:平行平板を用いた浸透性試験(動的グラウトの適用)
- ② グラウト注入後の性状把握
  - ・ 膨潤後の物理的安定性の把握:パイピングに対する安定性
  - グラウト固化体の透水試験:淡水,塩水環境(海水の浸入,古代海水,化石海水?を考 慮)における透水係数の確認
- ③ 安価な製造方法の研究(必要に応じて)
  - ・ 遠心分離機(図2.3.4),ボールミルの使用(図2.3.5,図2.3.6)



図 2.3.5 ボールミル<sup>2)</sup>



図 2.3.6 原位置注入におけるボールミルの使用例<sup>3)</sup>

④ 検討フロー (図 2.3.7)



図 2.3.7 検討フロー

- (2) 注入方法/注入設備に関する研究
  - 攪拌方法に関する研究

他の研究(日本原子力研究開発機構の瑞浪超深地層研究所におけるグラウト研究等)で基本的な方法を確立し,適宜,本研究に引用する(図 2.3.8,図 2.3.9)。





図 2.3.8 攪拌効果を増加させる方法 (角型攪拌槽の使用)





図 2.3.9 試験室における確認 (左図:角型攪拌槽,右図:円形攪拌槽+邪魔板の使用)

② 注入仕様に関する検討

実証試験の段階で既往研究成果を整理し、具体的な注入仕様(配合切替,停止基準,注入 孔配置)を決定する(図 2.3.10,図 2.3.11,図 2.3.12)。



図 2.3.10 SKB ストリッパプロジェクトにおけるメガパッカー<sup>4)</sup>

### JAEA-Research 2008-042



図 2.3.11 SKB ストリッパプロジェクトにおける EDZ への注入<sup>4)</sup>



図 2.3.12 AECL の URL における EDZ への注入試験<sup>5)</sup>

# (3) 効果の確認方法に関する研究

確認方法の立案・検証としては、釜石の例と AE の観測例を示す(図 2.3.13,図 2.3.14)。





### (4) 原位置岩盤における実証試験

上記項目を適宜確認するための試験方法の立案,実施,実験結果の分析を今後実施していく予定で ある

#### 2.3.2 超微粒ベントナイトグラウトの細粒化に関する FS

#### 2.3.2.1 水, エタノールを溶媒とした場合の Na 型ベントナイトの分散状態

沈降法により 2μm以上の粒径成分を沈降させた結果を図 2.3.15 に示す。同図中の上澄み液中に 2 μm以下の微粒成分が存在していることになる。同図中において、エタノールベントナイトの場合は 上澄み液が懸濁しておらず、2μm以下の微粒成分がほとんど存在していないことを示している。また、 分散剤(ヘキサメタリン酸)を4%添加した場合は、粘性は低下するが上澄み液は同様な結果を示し、 2μm以下の微粒成分は凝集しているものと考えられる(図 2.3.16)。

上記より,エタノールを溶媒として使用する場合は 2µm 以下の微粒成分が凝集していることがわ かるが,同様な現象が塩水を溶媒とした場合においても生じている可能性は否定出来ない。



図 2.3.15 2µm以下の微粒成分含有状況 (左から、エタノールベントナイト(3%,5%,10%)、水ベントナイト(3%,5%))



図 2.3.16 攪拌状態における粒子の分散状態(想定イメージ図)

次に,光透過式粒度分布測定装置を用いて希釈したベントナイトスラリー(溶媒:蒸留水,エタノ ール)の粒度分布を測定した(表 2.3.1,図 2.3.17,図 2.3.18)。

・ 測定装置:光透過式粒度分布測定装置(ミクロン・フォト・サイザ-SKA-5000II, セイシン企業製)

- ・ ベントナイト:スーパークレイ
- ・ 分散方法:所定の濃度に希釈して測定

その結果,蒸留水を使用した場合に比べて 58 wt%エタノールを使用した場合は,平均粒子径は増加し,100 wt%を使用した場合はさらに増加することが判明した。特に,100 wt%のエタノールを使用した場合は、5µm以上の粒径が増大しており、かなり強い凝集が生じているものと推定される。また、分散剤(ヘキサメタリン酸)の使用量を増やしても、粒子が分散し粒径が大幅に微粒化するという現象は確認出来なかった。

ベ	ントナイト	スーパークレイ(2006.7.7入手)													
	溶媒	水(イオン	交換水)	100wt.9 (分散)	。エタノール 钊無し)	58wt.% (分散教	エタノール 刹無し)	58wt.%エタノール (分散剤:3wt.%)		58wt.%エタノール 分散剤:3wt.%) (分散剤:5wt.%		58wt.%エタノール )(分散剤:10wt.%)			
比表	面積(cm <sup>2</sup> /g)	265	96.1	526	62.8	154	415	17	893	14894.9		17948.3			
平均	J径20%(μm)	0.	64	3.	64	1.	85	1.07		1.22		1.07 1.22		1	.3
平均	]径50%(μm)	1.	25	5.	21	3.	06	2.03		2.	38	1.86			
平均	J径80%(μm)	2.	16	7.	76	4.	19	3.06		4.21		2.46			
No.	粒径(μm)	累積(%)	頻度(%)	累積(%)	頻度(%)	累積(%)	頻度(%)	累積(%)	頻度(%)	累積(%)	頻度(%)	累積(%)	頻度(%)		
1	0.10	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	1.1	0.4	0.4	0.1	0.1	0.6	0.6		
2	0.13	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.1	0.4	0.0	0.2	0.1	0.7	0.1		
3	0.19	0.7	0.7	0.0	0.0	1.2	0.0	0.4	0.0	0.3	0.1	0.8	0.1		
4	0.26	2.7	2.0	0.0	0.0	1.2	0.0	0.9	0.5	0.9	0.6	1.0	0.2		
5	0.37	7.0	4.3	0.0	0.0	1.7	0.5	1.7	0.8	1.4	0.5	1.6	0.6		
6	0.51	13.9	6.9	0.0	0.0	2.3	0.6	3.8	2.1	3.2	1.8	2.4	0.8		
- 7	0.71	23.5	9.6	0.0	0.0	3.4	1.1	8.7	4.9	6.4	3.2	4.2	1.8		
8	1.00	39.3	15.8	0.3	0.3	6.0	2.6	17.4	8.7	13.1	6.7	9.2	5.0		
9	1.38	55.5	16.2	1.3	1.0	11.3	5.3	30.9	13.5	24.8	11.7	23.1	13.9		
10	1.93	71.1	15.6	4.1	2.8	21.5	10.2	47.2	16.3	38.6	13.8	54.1	31.0		
11	2.68	99.9	28.8	9.2	5.1	37.9	16.4	69.3	22.1	57.8	19.2	90.5	36.4		
12	3.72	100.0	0.1	20.8	11.6	70.6	32.7	98.6	29.3	70.3	12.5	99.7	9.2		
13	5.17	100.0	0.0	49.4	28.6	99.9	29.3	100.0	1.4	99.3	29.0	100.0	0.3		
14	7.19	100.0	0.0	74.9	25.5	100.0	0.1	100.0	0.0	99.4	0.1	100.0	0.0		
15	10.00	100.0	0.0	99.9	25.0	100.0	0.0	100.0	0.0	100.0	0.6	100.0	0.0		

表 2.3.1 粒度分布測定結果(スーパークレイ)



図 2.3.18 Na 型ベントナイトスラリーの粒径分布

# 2.3.2.2 Ca型ベントナイトの分散状態について

天然の Ca 型ベントナイトであるベンゲルブライト 11 をスラリー化し,ボールミルで 14 時間粉砕 したスラリーの粒径分布を表 2.3.2 に示す。ボールミルにより 2 次凝集を分散させているが細粒化に は限界があり,概ね 2~5μm 程度の粒径が卓越することがわかる。なお,粉砕時間に関しては,より 細かいボールを使用すれば,短縮できる可能性はある(図 2.3.19,図 2.3.20)。

- ・ ベントナイト:ベンゲルブライト11(天然Ca型ベントナイト)
- · 溶媒:蒸留水

ベント	<b>・</b> ナイト	ベンゲルブライト11										
ベントナ	ベントナイト濃度		20%		25%		30%		40%		50%	
pH	pH(2%)		.3									
導電率	(mS/cm)	0.1	81									
比表面和	責(cm <sup>2</sup> /g)	153	53.7	130	17.8	226	19.3	11400.9		18678		
平均径	20%(μm)	1.	16	1.	39	0.	81	1.59		1.01		
平均径:	50%(μm)	2	.1	2.	56	1.	28	3.	02	1.61		
平均径	80%(μm)	3	.4	4.	04	1.	83	4.45		2.22		
No.	粒径(μm)	累積(%)	頻度(%)	累積(%)	頻度(%)	累積(%)	頻度(%)	累積(%)	頻度(%)	累積(%)	頻度(%)	
1	0.10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	0.13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	0.19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	0.26	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	0.37	1.6	1.5	1.3	1.2	2.4	2.4	0.7	0.7	1.4	1.4	
6	0.51	4.6	3.0	3.1	1.8	7.5	5.1	2.3	1.6	4.5	3.1	
7	0.71	8.5	3.9	6.1	3.0	15.2	7.7	4.1	1.8	8.4	3.9	
8	1.00	15.2	6.7	10.4	4.3	29.0	13.8	8.2	4.1	19.5	11.1	
9	1.38	26.9	11.7	19.8	9.4	58.0	29.0	15.5	7.3	37.3	17.8	
10	1.93	43.6	16.7	33.8	14.0	84.8	26.8	27.4	11.9	67.6	30.3	
11	2.68	71.3	27.7	53.0	19.2	100.0	15.2	42.2	14.8	99.4	31.8	
12	3.72	83.9	12.6	74.8	21.8	100.0	0.0	66.2	24.0	100.0	0.6	
13	5.17	93.1	9.2	97.7	22.9	100.0	0.0	93.8	27.6	100.0	0.0	
14	7.19	95.8	2.7	99.8	2.1	100.0	0.0	100.0	6.2	100.0	0.0	
15	10.00	100.0	42	100.0	02	100.0	0.0	100.0	0.0	100.0	0.0	

表 2.3.2 ベンゲルブライト 11 (ボールミルで 14 時間粉砕) 粒径分布



## 2.3.2.3 現状における微粒ベントナイトスラリー作成のフィージビリティスタディ

例えば、ホージュン株式会社(技術研究所)所有の遠心沈降分離機(分離板型セントリフュージ, 図 2.3.21)を利用して<sup>8)</sup>2μm以下の細粒分を取り出す場合は、水に4%程度ベントナイトを溶解させ る。この場合、スーパークレイを使用する場合は、回収率は40~50%程度となる。

さらに、0.5µm以下の細粒分を取り出す場合は、水に2%程度の濃度とする必要がある。これ以上 濃い場合は、ベントナイト懸濁液の給液が出来ないため、装置の改良が必要となる。さらに、分散性 能が大きく劣る可能性がある上に、抽出されたベントナイト液の濃縮は不可能(完全乾燥のみが可能) であるため、5%以上の高濃度懸濁液を直接作成することは出来ない。

一方,円錐型デカンター(図2.3.22)<sup>9</sup>は,より高濃度の懸濁液に対応可能であるが,0.5µmまでの超微粒成分の抽出は出来ないという欠点がある。上記より,2µm以下のベントナイトについては既存のベンゲル(商品名,表2.3.3)やクニピアF(商品名)の使用が当座は現実的であり,0.5µm以下のベントナイトについては同様にベンゲルA(商品名)を使用し,超微粒ベントナイト材料のグラウト材としての適性を判断するのが良いと思われる。



図 2.3.21 ホージュン技研所有の遠心沈降分離機 (分離板型セントリフュージ)<sup>8</sup>

品名	形状	膨潤力	pH	粘度	特徴	主用途
ベンゲル	微粉末	35	10. 1	(7%) 2, 700	天然のベントナイト精製品。 中粘度タイプ。	水系塗料 ワックス・化粧品 染色用糊剤・釉薬
ベンゲル HV	フレーク	50	10. 1	(7%) 9, 000	天然のベントナイト精製品。 高粘度タイプ。	クリーナー ポスターカラー
ベンゲル HVP	微粉末	42	10. 1	(7%) 9, 000	天然のベントナイト精製品。 HV の粉末タイプ。	水系塗料 沈降防止剤 エマルジョン安定剤
ベンゲル F	フレーク	31	10. 0	(7%) 1, 500	天然のベントナイト精製品。 低粘度タイプ。吸着用に最適。	清澄剤
ベンゲル FW	微粉末	35	10. 0	(7%) 2, 500	天然のベントナイト精製品。 化粧品に最適。	化粧品 セラミックス
ベンゲル ブライト11	微粉末	6	8.5	(7%) 3	天然の白色ベントナイト。 (白色度 80%)鉄分低含有量 低粘性、中性タイプ。	建材 セラミックス
ベンゲル A	微粉末	42	9.9	(2%) 870	天然の粘土から精製した 高純度モンモリロナイト。	化粧品 学術研究用

表 2.3.3 精製ベントナイト:ベンゲルシリーズ<sup>10)</sup>

(ホージュン社パンフより抜粋)

なお、今後超微粒ベントナイトスラリーの安価な製造方法が必要となる場合は、図 2.3.23 に示す デカンタ型遠心分離装置や図 2.3.24 に示すボールミルの採用が考えられるが、ボールミルについては モンモリロナイトの結晶構造を破壊し、膨潤特性を低下させる可能性があるため、その適用に際して は十分な検討が必要である。



図 2.3.23 デカンタ型遠心分離装置の例 1)



図 2.3.24 ボールミルの例<sup>2)</sup>

#### 2.3.2.4 まとめ

超微粒ベントナイトスラリーの安価な製造方法の可能性についてフィージビリティスタディ(FS) を実施した。最初に、蒸留水およびエタノール中における Na 型ベントナイトであるスーパークレイの 分散状態を光透過式粒径測定装置により確認した結果、以下のことが判明した。

- ① Na型ベントナイト (スーパークレイ) の場合
  - ・ 蒸留水中においては、粒径は概ね1~3µmに分布しており、0.5µm以下の微粒成分は13.9%
     存在している。
  - 一方、エタノール(58wt%)中においては、粒径は概ね2~6µmに分布しており、0.5µm 以下の成分は2~3%と、ほとんど存在していない。特に100%エタノールを使用した場合 は、この凝集傾向が顕著であり、0.5µm以下の微粒成分は0%となり、さらに5µm以上の 粒径が卓越する。
  - 塩水を溶媒とした場合においても上記凝集現象は十分に考えられるため、塩水やエタノー ルを溶媒とした超微粒ベントナイトグラウトを作成する場合は、粒径は最小でも 2~6µm に分布することが予想される。
- ② Ca型ベントナイト (ベンゲルブライト11) の場合
  - ・ 蒸留水を溶媒としたベントナイトスラリーをボールミルにより細粒化を図った結果,粒径 は概ね2~5µm程度に分布し,0.5µm以下の微粒成分は2~5%する存在する結果となった。
- ③ 今後の研究の方向性

上記のように、現状技術により安価に製造可能なベントナイトグラウトスラリーの粒径分布は最小でも数μm 程度であると想定される。この粒径は、超微粒子セメントの粒径よりも小さく、現在開発中である超々微粒子セメントが完全に分散した場合とほぼ同等である。これらの超微粒なセメント粒子は注入時には凝集し粒径が大きくなることを考慮すると、実質的には超々微粒子セメント以下の微粒化となる可能性がある。

さらに、数µmのオーダーであれば、現存する遠心分離装置等を改良することにより、ある程度濃度の高い微粒ベントナイトスラリーを直接製造することが可能となるかもしれない。

そこで、今後はまず現存する超微粒な精製ベントナイト(クニピア F、ベンゲル、ベンゲル A 等) を用いて超微粒ベントナイトスラリーのグラウト材料としての適性を見極め、必要となる微粒化の程 度を確認した後に、遠心分離装置等を用いた安価な製造方法に関する研究を実施する方が現実的であ ると考えられる。

### 2.3.3 ベントナイトグラウトのグラウト材としての適性に関する FS

# 2.3.3.1 概要

各種のベントナイト(粒径:普通, 微粒, 超微粒, 交換性イオン種類: Na 型, Ca 型), 4 種類の溶 媒(蒸留水, 塩水, エタノール, 炭酸プロピレン), 分散剤の組み合わせに対して, 簡易にその粘性が 測定可能である以下の3種類の試験を実施し, 注入時におけるベントナイトスラリーのグラウト材料 としての適性を調査することで, 今後研究に使用すべきベントナイトグラウト配合の1次選定を実施 する。

- 液性限界の測定:液性限界試験機
- ・ ファンネル粘性の測定:ファンネル粘度計(500ml)

- ・ ブリージングの測定: JSCE ブリージング袋による測定
- (1) 使用材料
  - ① ベントナイト (7種類) (図 2.3.25, 表 2.3.4)
    - a) 普通ベントナイト(比較用)
      - スーパークレイ:ホージュン(ワイオミング産ベントナイト)
      - クニゲル V1: クニミネ工業(国産ベントナイト)
    - b) 微粒・超微粒ベントナイト
      - ・ ベンゲルA:ホージュン(超微粒(0.5µm以下)高純度ベントナイト)
      - ・ ベンゲル:ホージュン(超微粒(2µm以下)高純度ベントナイト)
      - クニピアF:クニミネ工業(超微粒(数µm以下)高純度ベントナイト)
    - c) 改質ベントナイト
      - ・ キャストボンド:ホージュン(モンモリロナイトを高含有する改質ベントナイト(Ca⇒ Na型に改質,但し交換性イオンが完全にNaに置換しているわけではない模様)
    - d) Ca型ベントナイト
      - ベンゲルブライト11:ホージュン



図 2.3.25 試験に用いたベントナイト

ベントナイト種類	モンモリロナイト含有量(%)
スーパークレイ	86
クニゲル V1	47
ベンゲル A	99
ベンゲル	96
クニピアF	98
ベンゲルブライト11	85

<b>主 9 9 1</b>	エンエリロナイ	ᅡ승方르
衣 乙 ろ 4	モンモリロテイ	トコ月里

\*表中のモンモリロナイトのうち, Na 型の比率については不明

- ② 溶媒 (4 種類)
  - ・ 水(基本的に蒸留水(液性限界),水道水も使用(ファンネル粘性,ブリージング))
  - エタノール(58wt%水溶液)

- 塩水(4wt%)
- ・ 炭酸プロピレン (プロピレンカーボネート:炭酸プロピレン~第4種第3石油類(非水溶性))
- 分散剤の有無(4種類)

通常の泥水は水量に対して 0.1~0.4wt%程度であるが,高密度スラリーであることを考慮し,ここでは溶媒に対して 4wt%とする。

- 分散剤なし
- ・ トリポリリン酸: Na<sub>5</sub>P<sub>3</sub>O
- ・ ヘキサメタリン酸:NaP03
- ・ ピロリン酸:H<sub>2</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>

#### 2.3.3.2 液性限界試験

### (1) 試験の目的

グラウト材料として注入後に地下水流動に対して長期間安定するためには、ベントナイトスラリー はある程度高濃度である必要があるものと考えられる。一方、高濃度ベントナイトスラリー(Na 型ベ ントナイトの場合)はセメントスラリーに比べて、その膨潤特性のためにかなり高粘性となる傾向が ある。そこで、高濃度スラリーにおいても液性限界が小さくなり(仮に 200%以下と設定(図2.3.26)) <sup>11)</sup>、比較的高濃度な配合においてもグラウト材料として岩盤亀裂へ浸透可能となるベントナイトスラ リーの配合を選定するものとする。



(浅田氏博士論文より抜粋)

# (2) 試験方法

ベントナイト(7種)×溶媒(4種)×分散剤の有無(4種)=112配合の試料に関して,日本ベントナイト工業会標準試験方法(JBAS-109-77)<sup>12)</sup>に準拠した液性限界試験を実施する(図 2.3.27,図 2.3.28)。

### JAEA-Research 2008-042



図 2.3.27 手動式液性限界測定装置



(供試体準備中)

(供試体準備完了)



(試験実施中)

(試験終了時)



(左上:供試体準備中,右上:供試体準備完了,左下:試験実施中,右下:試験終了時)

### (3) 試験結果

液性限界試験結果を以下に示す。

① 溶媒の違いの影響について

分散剤が同じ場合における、溶媒の違いによる液性限界への影響を以下に示す。

- a) 分散剤を用いない場合
  - ・ Na型ベントナイトに対しては蒸留水の液性限界が非常に高く、Ca型ベントナイトである ベンゲルブライト 11 を除くと、全て 500%以上となりグラウト材料には不向きである。 一方、他の溶媒の場合は、液性限界は概ね 400%以下であり、特に塩水ベントナイトと炭 酸プロピレン(図中では PC と表示する場合もある)については全て 200%以下となって いる。また、Ca型ベントナイトであるベンゲルブライト 11 は全溶媒に対して液性限界が 十分に低く概ね 150%以下となっている(図 2.3.29)。



図 2.3.29 液性限界:溶媒の違いによる影響(分散剤無し)

b) 分散剤を用いる場合

蒸留水に対しては、ヘキサメタリン酸とトリポリリン酸が効果的であり、特にクニピア Fにおいて、液性限界の低減効果が大きいことがわかる。しかしながら、ベンゲルブライ ト11を除いて全ケースにおいて液性限界は200%を超えており、分散剤を使用しても蒸 留水を溶媒としたベントナイトスラリーでは高濃度グラウト材料として使用できないこ とがわかる(図 2.3.30)。



図2.3.30 液性限界:分散剤の違いによる影響(溶媒:蒸留水の場合)

- ・ 塩水に対しては、分散剤の効果はほとんど確認出来なかった(図 2.3.31)。但し、分散 剤を使用しなくても、液性限界は200%未満となっている。
- エタノールに対しては、トリポリリン酸は溶解しないため、実験は実施していない。一方、ヘキサメタリン酸は十分に溶解し、スーパークレイとベンゲル A については、ある 程度の低減効果が確認されたが、液性限界は200%以上となっている(図 2.3.32)。
- ・ 炭酸プロピレンに対しても、分散剤の効果は顕著でない(図 2.3.33)。但し、分散剤を 使用しなくても、液性限界は200%未満となっている。



図 2.3.31 液性限界:分散剤の違いによる影響 (溶媒:塩水の場合)





図 2.3.33 液性限界:分散剤の違いによる影響(溶媒:炭酸プロピレンの場合)

② グラウト材料として選定した組合せ

上記より、液性限界が200%以下となる組合せを以下に示す。

- ・ 蒸留水に対して: Ca 型ベントナイト (ベンゲルブライト 11) のみ (分散剤の効果は無い ため,分散剤は不要である。)
- ・ 塩水に対して:全てのベントナイトが適用可能であり,特にクニゲル V1 はその液性限界 が100%以下であり,他のベントナイト材料に比べて有意に小さい値を示しており,グラ ウト材料としての適性が高いと言える(図 2.3.31)。
- ・ エタノールに対して: クニゲル V1, クニピア F, キャストボンド, ベンゲルブライト 11 が適用可能であり, 特にクニゲル V1 の適性が高いことがわかる。逆に, スーパークレイ, ベンゲル A, ベンゲルの適性は低いと言える(図 2.3.32)。
- ・ 炭酸プロピレンに対して:スーパークレイ以外のベントナイト材料に対して適性がある と言える(図 2.3.33)。但し,他の溶媒に比較して大幅に高価であり,その粘性低減効果 も塩水とほぼ同等であるため,グラウト材料としての適性は低い可能性が高い。

## 2.3.3.3 ファンネル粘性試験

上記の液性限界試験で選定された組み合わせに対して、ベントナイト濃度の違いによるスラリー粘 性特性を比較検討する。

## (1) 試験方法

日本ベントナイト工業会標準試験方法(JBAS-108-77)に準拠<sup>12)</sup>する。なお、25℃の水のファンネル粘性は 18.3 秒であり、一般的にグラウトポンプで圧送できるスラリーのファンネル粘性は 20~120 秒程度である(但し、亀裂に注入可能となる粘性については別途検討が必要)。そこで、最低条件としてファンネル粘性が 120 秒以下となる液固比条件について整理する。

- ・ 高密度スラリーを作成できる溶媒,分散剤の組み合わせについて整理する。
- ・ 分散剤の効果がある組み合わせについては、分散剤の濃度を変えた検討により、分散剤の 濃度影響についても把握する。

水-ベントナイトの場合の実測例を図 2.3.34 に示す。





### (2) 試験状況について

液固比 2:1(液性限界 200%相当)を基準に、液性限界 200%未満の組み合わせについてファンネル粘性試験を実施したが、液固比 2:1では粘性が大きく、ファンネル粘度を計測できなかったため、標準の液固比として 4:1の計測を実施した。

しかしながら,液性限界 200%未満となった組合せに対しても,液固比 4:1 では粘性が高すぎて, ロートを流動しないため,ファンネル粘度を計測できない組み合わせもあった(図 2.3.35,図 2.3.36)。



市販のジュースミキサーを用いて攪拌したが、組合 せによっては混練が不十分である可能性がある。



図 2.3.36 ファンネル粘性の測定状況

# (3) 試験結果

表 2.3.5, 図 2.3.37~図 2.3.40 にファンネル粘性試験結果を示す。

これらの結果より、以下のことがわかる。

微粒ベントナイトであるベンゲルA,ベンゲル,クニピアFに関しては,液固比4:1ではファンネル粘性が高すぎて測定が出来なかった。クニゲルV1と同程度まで粘性を低減させるためには,液固比を10:1,或いはベンゲルの場合は8:1に増加させる必要がある。

塩水に対して分散剤を使用した結果,スーパークレイとキャストボンドに対して粘性の低減効果が 確認された。ただし、上記の結果はジューサーミキサーによる攪拌であるため、攪拌方法を統一して より精緻に粘性を測定する必要があると言える。



# 表 2.3.5 ファンネル粘性測定結果

# 2.3.4 結論

本年度の研究では、微細な亀裂へのグラウト手法として、超微粒子ベントナイトを対象として、そ の注入の可能性に関しての研究を行った。

その結果,粒子径として1~2µmの粒子を多く含むベントナイト材料があることがわかった。今後は,その材料を種々の分散剤,溶剤を用いて亀裂性岩盤内に注入する予定である。

## 2.3.5 参考文献

1) 巴工業株式会社: BDF 型遠心濃縮機のカタログ.

http://www.tomo-e.co.jp/j/product/sewage\_excreta/

- 2) 中央化工機株式会社:ボールミルのカタログ. http://www.chuokakohki.co.jp/
- 3) 寺戸康隆, 佐藤裕巧: 高透水性グラウトによる空隙質地盤の注入特性と改良性(付)シリカライム 工法のコンセプト, 技術と施工 55, pp. 81-86, 1996.
- 4) M. Gray: OECD/NEA International Stripa Project Overview Volume III Engineerded Barriers, 1993.
- 5) 升元一彦, 増田朝雄, 杉田裕: 坑道周辺の掘削影響領域への粘土系材料を用いたグラウト注入手法の検討, 土木学会論文集 C Vol. 62, No. 1, p. 175, 2006.
- 6) 杉田裕,藤田朝雄,川上進:結晶質岩における粘土グラウト注入, JNC TN84002003-046, 2004.
- 7) 竹原真希, 浜子正, 永井典久: AE によるグラウトの拡散状況のモニタリング, 第40回地盤工学研 究発表会, pp. 1289-1290, 2005.
- 8,9) 近藤三二:ベントナイト-工業技術へのアプローチ 高純度モンモリロナイト.
- 10) 株式会社ホージュン: BEN-GEL S-BEN ORGANITE カタログ.
- 11) 浅田素之:エタノールとベントナイトを用いた遮水工法に関する研究,東京大学博士論文,2003.
- 12) 日本ベントナイト工業会:日本ベントナイト工業会標準試験方法 (JBAS), 1977.

(岡山大学 西垣 誠)
#### 2.4 表層水理観測データを用いた日吉川流域水循環のモデル化に関する研究

#### 2.4.1 はじめに

本研究は、日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター、東濃鉱山、瑞浪超深地層研究所等を含む日吉川流域において取得されている水文・水理観測データや地質データ<sup>1)</sup>を利用して精細水循環モデルを作成し、地表から地下深部までの流動系の定量的理解を深めることを目的としたものである。 また、このような検討により、今後の広域地下水流動解析の方法論に関し知見をまとめ提案することが目的である。既に、平成16年度、17年度には、本流域の精細離散化モデルを作成し、流域地質・水理情報を入力し、水循環シミュレーションを行った。その結果、次のことが明らかとなった。

- ①平成 17 年度までのモデル解析から、2003 年の降雨-日吉川ハイドログラフ観測記録が、非常 に良好に再現され得ること。
- ②深度-地下水位観測記録の水循環モデルによる再現性が悪いこと。多くの観測井戸の観測水位より計算値は高い傾向を示すこと。その理由として、a)シミュレーションモデルにおける蒸発散量が水文学的に期待されるものより小さめであること、b)領域境界位置が地形や地下構造と整合的であるか、などが考えられること。

以上から,平成 18 年度は上記 a), b)の原因をさらに追求し,より適切な流域水循環モデルの確立 を試みた。具体的には,以下(図 2.4.1)に示す作業および検討を行った。



図 2.4.1 平成 18 年度研究の流れ

### 2.4.2 日吉川流域境界設定の適切性に関する2次元モデルによる検討

# 2.4.2.1 検討の目的

日吉川流域3次元モデルの側方境界は、地形的な表流水の分水嶺、および大きな河川(土岐川)に 沿って設定され、全て閉境界として取り扱っている。しかし、一般に地下水系を対象とする場合、分 水嶺は地下の閉境界とならないことも多く、観測値の再現性に大きく影響する場合がある。

本流域モデルの北側境界は 450m 程度の標高の分水嶺であるが、その 2 km 程度北方には標高 170m 程度の木曽川が深い谷を形成しており、地形的に見て現在の 3 次元モデルの北側境界は必ずしも適当 ではないことが考えられる。実際、北側の位置にある DH-10 号孔、DH-11 号孔、DH-13 号孔などの観 測孔での地下水位は計算地下水位よりかなり(40m 程度)低く、木曽川低地の影響の可能性が否定で

きない。ここでは、流域の地形断面を検討し、平成16年度、平成17年度モデルの流域境界が妥当であるか否かを2次元断面モデルによる感度解析から検討する。

### 2.4.2.2 流域の地形

対象流域の全体図を図 2.4.2 に示した。流域面積は約 42km<sup>2</sup>である。領域中央に日吉川が流れ,領域の東側から南側の境界と考えられる土岐川に流出する。図 2.4.2 に示した日吉川流域の鳥瞰図を図 2.4.3,図 2.4.4,図 2.4.5 に示した。地形の状況から,流域モデルの水理的な境界は次のように考えられる。

#### (1) 東側境界, 南側境界

図 2.4.2 のように、土岐川を東側境界として平成 17 年度モデルは作成されている。土岐川はこの 付近の最低地であり、土岐川を挟んだ対岸の山岳部の標高値の対称性は悪くはないから、この境界設 定はおおよそ妥当なものと考えられる。

#### (2)西側境界

西側は尾根筋が境界となっている。この一体の断面図を検討したところ,比較的なだらかな丘陵地 となっており,水理境界を尾根に取ることは最も自然と考えられる。この部分の境界線も修正の必要 はないと考えられる。

# (3)北側境界

北側には木曽川があり,河床付近の標高が170m程度,その南側で500m弱の標高の山岳地が形成されている。平成17年度モデルは木曽川南部の尾根筋を分水境界として取られているが,図2.4.7に見られるように,木曽川の急激な標高低下が,地下水流動に影響する可能性が考えられる。



図 2.4.2 対象流域と水文観測位置図<sup>2)</sup>

# JAEA-Research 2008-042



(国土地理院 50mDEM. カシミール3Dにより描画)
 図 2.4.3 南側(土岐川)からみた領域地形<sup>3)</sup>



(国土地理院 50mDEM, カシミール3Dにより描画)
 図 2.4.4 東側(土岐川)からみた領域地形<sup>3)</sup>



(国土地理院 50mDEM, カシミール3Dにより描画) 図 2.4.5 北側(木曽川)からみた領域地形<sup>3)</sup>



(中央の黒線、白い点線は地形から好ましいと考えられる境界線)

図 2.4.6 日吉川流域地形・格子システムと 2 次元断面モデルの位置 <sup>3</sup>

# 2.4.2.3 2次元断面モデルの選定

図 2.4.6の様に、木曽川から日吉川流域中央部を通り土岐川に至る断面線上の地形を 2 次元感度解 析モデルとして設定した。図 2.4.6の断面に沿う地形を図 2.4.7 に示した。断面線の長さは約 11.5km であり、木曽川河谷が急激に低くなっている様子がよくわかる。

図 2.4.7 には、2 つの断面モデルのグリッド図も合わせて示してある。一つは従来領域モデルであ り、尾根筋を北側境界とするものである。もう一つは、拡張領域モデルであり、北側は木曽川まで伸 ばしたものである。両者の計算結果を比較することで、境界の影響を検討することにする。



図 2.4.7 地形断面と従来領域・拡張領域離散化モデル

		浸透率[m <sup>2</sup> ]			
			H17 モデル	2 次元断面	
				モデル	
	主十	1.0×10 <sup>-11</sup>	(厚さ 0. 1m)、河床 4. 0×10 <sup>-14</sup>		0. 5
	衣工	$5 \times 10^{-12}$ (J	厚さ 0.4m)		0. 5
		1.0×10 <sup>-12</sup>	(厚さ0.5m)		0. 3
	表土下部	*++	1.0×10 <sup>-11</sup> (深度 0.5m まで)		0. 5
土壌		<u></u>	5.0×10 <sup>-12</sup> (深度 2m まで)		0. 4
		農地・	5.0×10 <sup>-12</sup> (深度 0.5m まで)		0. 5
		ゴルフ場	2.5×10 <sup>-12</sup> (深度 2m まで)		0. 4
		士体动	1.0×10 <sup>-12</sup> (深度 0.5m まで)		0. 3
		山田地	2.0×10 <sup>-13</sup> (深度 2m まで)		0. 2
瀬戸層群		1. 0 × 10 <sup>-12</sup>			
瑞浪層群		4.0×10 <sup>-14</sup> (水平方向)4.0×10 <sup>-16</sup> (鉛直方向)			
花崗岩上部		$2.2 \times 10^{-14}$		$1.0 \times 10^{-14}$	0. 05
割れ目帯			2.3 ~ 10	1.0×10	
花崗岩割れ目		$3.5 \times 10^{-15}$			
低密度帯			J. J × 10		
月吉断層		1.0×10 <sup>-18</sup> (面に直交する方向)		$1.0 \times 10^{-15}$	0.05
		1. 2 × 10 <sup>-13</sup>	(面に平行な方向)	1.0×10 %	0.05

表2.4.1 浸透率および間隙率

## 2.4.2.4 地下水理物性の設定

2 次元モデルに入力する地質設定・水理物性値を表 2.4.1 示した。2 次元解析では、流動の詳細を 見るわけではないので、地下深部は一様岩体として感度解析を行う。月吉断層は遮水性の断層として、 簡単のため垂直な形で与えることとする。

# 2.4.2.5 2次元ケーススタディ

従来領域モデルと拡張領域モデルに対し、一定の降雨涵養(1mm/day)を与え、いくつかの計算を 行い、結果のポテンシャル図を比較した。

#### (1) 従来領域モデルと拡張領域モデルのちがい

図 2.4.8 に従来領域モデルと拡張領域モデルのポテンシャル分布を示した。図の左側(北側)のポ テンシャル線の形からみると、従来領域モデルでは分水嶺境界から南への流れが起こるが、拡張領域 モデルではその 1km 以上南で、ポテンシャルの傾向が変化し木曽川方向に流出する流動が起こる様子 が分かる。なお、ポテンシャルの分布形状は、地下浅部の土壌、風化層、堆積層の透水性、異方性、 深部岩体の透水性、異方性に敏感であるから細かな議論は出来ないが、このような傾向は少なくとも 考慮することが望ましいと考えられる。

#### (2)断層の影響

図 2.4.9 に断層のある場合とない場合のポテンシャル分布の違いを示した。断層の影響は断層北部 2km 程度と断層南部全体に影響するが、それ以上離れた北部への影響は無視できる程度と考えられる。

#### (3) 飽和解析と不飽和帯を考慮した解析の結果の違い

図 2.4.10 に従来領域モデルに、不飽和帯を考慮した解析と、地表面に水位を固定した飽和解析の 結果を示した。北部山岳地では不飽和帯が発達するため、両者の結果は異なるが、平地部での違いは 小さくなる。

## (4) 透水性の違いによるポテンシャル分布形状の違い

図 2.4.11 は深部岩体の浸透率を 10<sup>-13</sup> m<sup>2</sup>, 10<sup>-15</sup> m<sup>2</sup> としたものである。透水性が高い場合には、山岳 地の地下水面がほぼ水平になり、木曽川の南部への影響はより遠くまで及ぶ様子が見られる。低透水 の場合には、影響領域は分水嶺付近に限定されるようである。



図 2.4.8 従来領域モデルと拡張領域モデルのポテンシャル分布形の違い



図 2.4.9 拡張領域モデルに断層を入れた場合と入れない場合のポテンシャル比較



従来領域・断層モデル(model-1), 2相解析

図 2.4.10 地表面まで飽和としたケースと 2 相解析結果との違い



図 2.4.11 透水性の違いによるポテンシャル分布の違い

図 2.4.12~図 2.4.15 は図 2.4.8~図 2.4.11 の結果を断面図上の 4 つの観測点で比較したものである(観測点の位置は北側境界からの距離で図のキャプションに示されている)。図 2.4.12,図

2.4.13 は 4 つの地点の従来領域モデルと拡張領域モデルの計算値の違いを示している。分水嶺付近 (図 2.4.12) では、木曽川の影響のため差が大きく、飽和解析をした場合と不飽和解析の結果の差 も大きくなっている。図 2.4.13 では、次第に南部になるため木曽川の影響は小さくなる様子が見ら れる。おそらく、分水嶺から 5km 程度までは多少の影響が入るものと考えられる。図 2.4.14、図 2.4.15 は断層のある場合の影響を示している。図 2.4.14 は北部分水嶺に近い部分のポテンシャルで あり、断層のある場合とない場合で差はほとんど見られない。これに対し、図 2.4.15 の断層近辺の 北と南の観測点では、断層の有無でポテンシャルの形が大きく変化することが分かる。



図 2.4.13 従来モデルと拡張領域モデルのポテンシャルの違い

# JAEA-Research 2008-042



図 2.4.15 拡張領域モデルで断層がない場合とある場合の違い

# 2.4.2.6 2次元ケーススタディのまとめ

2次元モデルによるポテンシャル分布の比較から以下のことが判明した。

① 北側の木曽川低地部の影響は、分水嶺から南に数km程度(5 km程度)まで及ぶ可能性が考 えられる。

- ② 従来領域の北部閉境界付近では、その北側の木曽川低地(河谷)の影響を大きく受け、河谷がないとした場合より計算上数十m水頭が低くなるようである。よって、この位置は閉境界とすることは、モデル化上好ましくない可能性が強い。
- ③ 上記より,北側に位置する DH-10 号孔, DH-13 号孔の観測水位は,木曽川の影響を受けている 可能性が強い。また,それ以南では境界の影響は小さくなり,断層の影響が強くなるものと 考えられる。
- ④ 月吉断層の存在は、その北側の深部ポテンシャルを増加させ、南側の深部ポテンシャルを低下させる効果を持つ。しかし、断層の存在だけでは、DH-2号孔、DH-4号孔、MIU-1号孔、MIU-2号孔、MIU-3号孔の観測水位の低さは説明仕切れず、南側の境界が必ずしも閉境界ではない可能性がある。

より実際に近い地質条件(上部堆積層の構造,異方性,岩体の割れ目・断層)を入れた時に3次元 ポテンシャル場がどのようになるかは、今後,拡張3次元モデルにより検討する必要があろう。

# 2.4.3 3次元モデルによる蒸発散量の影響に関する検討

# 2.4.3.1 平成 17 年度の結果と問題点

平成17年度のモデル計算から得られた水収支結果を図2.4.16に示す。



図 2.4.16 平成 17 年度解析結果から得られた累積水収支

図 2.4.16 から,計算上,本流域では 1 年間に降水量の 10~15%程度が蒸発散し,6 割程度が河川 により流出し,2 割程度が地下に貯留される関係がわかる。これは、モデル内の貯留量を年々増加さ せ、地下水ポテンシャルの計算値が観測値より高めになる原因とも考えられる。よって、本年度は以 下の様な設定変更を行い、解析を実施した。

# (1) 蒸発効率補正係数の修正

シミュレータによる実蒸発散量は、地表面に水深がある場合には水面から起こり、水面がない場合には表土層から起こるものとして計算される。実際には蒸発計による実測やペンマン法<sup>4</sup>などにより得られている各時点の可能蒸発散量に、図 2.4.10 から求められる水分量に応じた蒸発効率をかけて算定する。平成17年度の計算では、図 2.4.16の相関関係を利用したが、結果として計算された蒸発散量の年間累積量は降水量に対して 15%程度であり、水文学的に期待される量の半分程度となっている。補正相関式自体は概括的なもので、これ自体に確たる根拠があるものではない。そこで、平成18年度の検討として、相関関係を変更した計算を行った。

実際には、蒸発散効率は土壌の飽和度に関わらず1.0と設定し、与えられた可能蒸発散量までは、 水がある限り蒸発できるものとした(図2.4.17)。



#### (2) 樹体根系からの蒸散作用を含むケースの設定

使用している水循環シミュレーションモデルでは地表面付近から蒸発散量が引き抜かれるが、森林 地帯を考える場合は、より下部の樹体根系から吸水・蒸散される水量を考慮することも必要であろう。 この観点から、離散化モデルの地表下 1m~2m 程度まで領域全体に樹体根系があることを仮定し、 1mm/day が全域から蒸散に転じるものとした設定を行った。

#### (3) 初期状態の設定

計算初期状態として、平成17年度では、領域初期化過程において約30万日の定常降雨を与えた後、 数年間の定常降雨を与えた状態から出発した。平成18年度の計算初期状態は30万日に8万年間の無 降雨期間を与えた直後の1年間の計算である。それゆえ、両者を単純に比較することは出来ない。

# 2.4.3.2 3次元モデルの解析結果

## (1) 観測点のポテンシャル

図 2.4.18~図 2.4.20 は、観測地下水位と計算地下水位を示したものである。計算値は初期状態 (4700 日時点)、平成 17 年度計算値(5150 日時点、○印)、平成 18 年度計算値(5150 日時点、□ 印)がプロットされている。なお、ポテンシャルは1 年を通じて変化するから、ここでプロットされ ている観測値の観測時点と計算値の時点が同じと見てよいかどうかは議論せねばならないところであ る(ここでは、行わないが)。

図 2.4.18~図 2.4.20 に各観測点での地下水ポテンシャル分布を示す。平成 17 年度の結果に比べ、 少なくとも低い値となっている。断層南部の観測井(MIU-1 号孔, MIU-2 号孔, MIU-3 号孔, DH-2 号孔, DH-4 号孔)では、1 年後には着実にポテンシャルが増加している様子が分かり、ほとんどのものが観 測値より高めになっている。これは、南側の境界の設定(閉じているか漏出があるか)にも関係して いるかもしれない。





図 2.4.18 地下水位観測値と計算値の比較(断層南側, MIU-1, MIU-2, MIU-3)



図 2.4.19 地下水位観測値と計算値の比較(断層南側, DH-2, DH-4)



図 2.4.20 地下水位観測値と計算値の比較(断層北側)





# (2) 河川流量値の再現性

図 2.4.21 は日吉川の観測降水量,観測河川流量,平成 17 年度,平成 18 年度モデル計算河川流量 を示したものである。図 2.4.21 のように,平成 17 年度モデルにより計算された河川流量は観測値に 非常に良く追随している。しかし,平成 18 年度モデルでは再現性が悪化している。これは,平成 18 年度モデルが 8 万日程度の無降雨後を出発点に計算されたもので,地表に河川が十分形成されていな い状態から出発しているためである。

# 2.4.3.3 3次元モデル解析結果の考察

以上の3次元解析の結果から、以下のことがまとめられる。

- 蒸発散量はおおよそ降水量の3割程度に増加したが、各観測点の地下水ポテンシャルは降水の供給により増加しつつある傾向が見られる。
- ② 地表と地下浅部の速い流出過程および基底流出(地下水流出)はある程度再現されており、 地表パラメータおよび地下浅部の水理パラメータは比較的妥当なものである可能性がある。 地下水ポテンシャルの増加は、この領域が実際以上に水を停留させやすい容器になっている ことが原因と考えられ、断層の存在・性状(透水性の程度、連続性、異方性の程度)および 北部と南部の境界設定を吟味する必要があろう。定量的な議論のためには、いくつかのケー ススタディが必要である。

# 2.4.4 まとめと課題

日吉川流域モデルの確立を目的として、3次元モデルの流域境界設定に関する検討、および蒸発散の影響に関する検討を行った。結果は以下の様にまとめられる。

北側境界に関しては、木曽川低地の影響が流域内の内部まで及んでいる可能性が示された。
 今後は、モデルの境界を拡大し、木曽川を流出境界とした3次元モデルスタディが望まれる。

② 蒸発散量の多寡が地下水ポテンシャルに与える影響を検討するため、土壌面からの蒸発を最 大化し、樹体根系からの吸引・蒸散を土壌層 1~2m 程度から一定量行うケースを設定し計算 を行った。その結果、蒸発散量は増加したが、各観測井の地下水ポテンシャルは1年間で増 加傾向にあり、観測値よりは高目となった。この現象は、北側境界および南側境界の設定と も強く関係していると考えられ、今後の本流域モデリングの精細化の良い情報となろう。

本流域の水循環モデリングは、本流域にとどまらず、今後のより一般化された信頼性のある地下 水モデリングの方法論を提示することに大きな意義があるものであろう。

地下水流動の再現・予測には、地質構造・水理構造の推定に大きな不確定性が避けられない。モ デルの信頼性・説得力を担保するためには、自然らしい空間境界条件と、実測に基づく水文境界条件 (降水量)以外は既知条件としない水循環モデリングが重要であり、本検討ではまさにその原点に立 ち戻った議論をすることとなった。

今後は、拡張領域 3 次元モデルによる解析結果と現地情報(各種計測値,地表植生や湧水点情報 など)との照合、フィールドと解析の相互フィードバック、いわゆる "繰り返しアプローチ"を踏ま えて検討を進めたいと考えている。

# 2.4.5 参考文献

- 1) 小出 馨, 前田勝彦: 「東濃地域を対象とした広域地下水流動 研究の現状(その2)」, サイク ル機構技法 No. 12, 2001.
- 2) 宮原智哉, 稲葉 薫ほか: 「広域地下水流動研究実施領域における水収支観測結果と地下水流動 スケールの検討」, サイクル機構技法 No. 16, 2002.
- 3) 国土地理院: 数値地図 50m メッシュ(標高), 日本地図センター, 2001.
- Penman H. L., : Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil, and Grass, Proceedings of the Royal Society of London, Series A, vol. 193, pp. 120-145, 1948.

(東京大学 登坂博行)

# 2.5. CFC トレーサーを用いた地下水の滞留時間推定法の開発

# 2.5.1 はじめに

流域の地下水流動系を把握することは、地下水資源の利用や開発を行う上で、もっとも基本的で重 要な地下水水文学的研究課題であり、地下水の滞留時間推定については、従来から数多くの研究がな されてきた。とくに浅層地下水は、滞留時間が数年から数十年程度と比較的短く、滞留時間を詳細に 求めることが、効率的な地下水資源の利用、開発に役立ってきた。

地下水の滞留時間推定には、水に含まれる様々な物質をトレーサーとして用いることが有効である。 その代表的なものの一つに,水素の放射性同位体である<sup>3</sup>H(トリチウム)を用いた方法がある。<sup>3</sup>Hは 宇宙線の作用により大気上層中で恒常的に生産されるが、1950年代から60年代にかけて行われた大 気圏内における核実験により, 大気中に 🖁 が大量に放出され, その結果としてとくに北半球の各地で 降水の<sup>3</sup>H 濃度が急激に上昇し、実験終息とともに指数関数的に低下した<sup>1)</sup>。このような<sup>3</sup>H 濃度の高い 降水は、我が国においても地下水の滞留時間を導出するうえで、重要なトレーサーとしての役割を果 たしてきた2。しかし、3日の半減期は12.43年と短いことから、近年我が国では降水の3日濃度が天然 レベルにまで低下してきており、<sup>3</sup>Hのトレーサーとしての有効性が希薄になってきている<sup>1),3</sup>。我が 国のように降水量が多く、浅層地下水の滞留時間が数十年程度のオーダーを示すような地域において は、滞留時間の推定に支障をきたすことが大いに考えられることから、<sup>3</sup>H に代わり滞留時間の短い、 新しい地下水に適用できる方法が必要となる。<sup>3</sup>Hに代わるトレーサーとして,現在<sup>3</sup>H/<sup>3</sup>He の<sup>3</sup>He や<sup>85</sup>Kr, <sup>36</sup>C1, SF。などが挙げられるが<sup>4</sup>,国内で分析可能な機関が限られているなどの制約から,研究例が多 くないのが現状である<sup>5</sup>。近年 CFCs (chlorofluorocarbons,フロン類)を利用し地下水の滞留時間 を推定する方法が提案され、欧米を中心に適用事例が積み重ねられつつある<sup>6),7)</sup>。CFCs は人工的にの み生産されかつ、非常に安定な物質であり、さらに大気中の CFCs 濃度は規制前までほぼ単調に増加し ているなど、トレーサーとして非常に有利な特性を有していることから、とくに滞留時間の短い、浅 層地下水の滞留時間推定に有効であると考えられる。しかし国内においては、CFCs をトレーサーとし て地下水の滞留時間推定に適用した例はなく、分析手法も確立されていないのが現状である。

# 2.5.2 CFCs の起源

CFCs は 1930 年代以降, アンモニアや二酸化硫黄に替わる冷媒として米国で人工的に生産された物 質である。1931 年に CFC-12 (dichlorodifluoromethane,  $CCl_2F_2$ )が生産されて以降, 1936 年に CFC-11 (trichlorofluoromethane,  $CCl_3F$ ), その後 CFC-113 (trichlorotrifluoroethane,  $C_2Cl_3F_3$ )と相次いで 生産が開始された。CFCs は非常に安定な化合物であるとともに、毒性が低くまた不燃性でかつ、冷媒 としても優れているという性質から、産業の場面において広く用いられてきた。CFC-11, CFC-12 は主 としてエアコンや冷蔵庫の冷媒,スプレー缶の噴射剤,発泡剤の原料,また溶剤として用いられ、 CFC-113 は主に半導体工場などで洗浄の用途に用いられてきた。CFCs は生産と同時に大気中にも放出 され、生産量の増加とともにその大気中濃度も上昇してきた。その使用形態によって生産から大気中 に放出されるまでの期間は異なるが、大気中濃度は生産開始以降ほぼ増加し続けてきた(図 2.5.1)。



図 2.5.1 北米における大気中の CFCs 濃度長期変動<sup>8)</sup>

ところが CFCs が成層圏内のオゾン層の破壊に寄与する物質であることが明らかになり、オゾン層 破壊を防止する観点から、また CFCs が温暖化物質でもあることから、1987年のモントリオール議定 書発効以降、先進国を中心に CFCs の生産・使用が制限された。しかし依然として大気中に放出されて いない CFCs が、主に発泡剤や冷蔵庫など工業製品に封入されたまま大量に残っており、大気中濃度は 急激には低下してはいない。またこれら CFCs は大気中での寿命も長いことから、現在も比較的高い大 気中濃度を保っている。

# 2.5.3 大気中の CFCs

1930年代以降大気中に放出された CFCs については,前述のように CFCs がオゾン層破壊に寄与する, また温暖化物質であるということから,大気中における濃度等の動態把握を目的とした研究が行われ てきた<sup>9),10)</sup>。巻出ほか<sup>9)</sup>では,CFCs を含む大気中のハロカーボン類の平均濃度を測定するため,分析 法の開発と装置の製作を行っている。大気中のハロカーボン類の濃度は極めて低く(数〜数100pptv 程度),これらを正確に精度よく測定するためには,器具や部品の材質や洗浄処理,用いるガスの精製 などが極めて重要である。Tominaga<sup>10)</sup>は,国内複数箇所における大気中の CFCs 濃度を,1979年~1991 年の間モニタリングした。これによれば,北海道における大気の CFC-11 および CFC-12 濃度は,10 年 間で年当たり約4%の上昇を示した(図2.5.2)。さらに能登半島において1985~1986年の間,週単位 で観測された大気中の CFCs 観測データによれば,冬期の CFCs 濃度はシベリア起源と思われる強い北 西季節風の影響で相対的に低く安定しているのに対し,夏期におけるそれはしばしばローカルな大気 汚染の影響を受け,顕著に高い値をとることが示された(図2.5.3)。都市部における CFCs の降水に よる地下水へのインプットを考える上で,興味深いデータである。

現在国内においては、気象庁が大気環境観測所(岩手県大船渡市綾里)において、1990年以降、大 気中の CFCs 濃度をモニタリングしている(気象庁、HP 公開データ)<sup>11)</sup>。したがって、地下水の滞留 時間推定に background 値として必要な大気中の CFCs 濃度データは、我が国においては 1979年以来現 在まで約 25 年の蓄積がある。一方、東京都環境科学研究所は江東区にある研究所管内において 1993 年から大気中の CFCs 濃度 1 時間平均値を公開している<sup>12)</sup>(図 2.5.4)。これをみると、とくに江東区 における CFC-11 および CFC-12 濃度が綾里におけるそれに比べ顕著に高い値を示しており、とくに CFC-11 については 2 倍にのぼる。



図 2.5.4 東京都江東区と岩手県綾里における大気中の CFCs 濃度変化<sup>12)</sup>



図 2.5.5 ハイデルベルグにおける大気中の CFC12 と CFC11 超過濃度の日変化<sup>13)</sup>

図2.5.5は、ドイツのハイデルベルグにおける大気中のフロン濃度変化を示したものであるが、都 市域における大気中のフロン濃度は、明らかな週内の日変化を示しており、週末に低く月曜から金曜 にかけての工業活動の蓄積に伴って増加している<sup>13)</sup>。図2.5.6は、同じくドイツにおいてハイデルベ ルグの都市域から近郊田園地帯、遠方田園地帯、アルプスの山岳域までに至る4地点において、同時 期に大気中のフロン濃度の空間的変化を測定した結果である。都市域では200%を超過する濃度が見 られるが、アルプスの山岳地帯では20%以下の濃度まで低減しており、大気中のフロン類が明らかに 都市起源であることが示されている。この様な事実は、都市域周辺において地下水へのフロンインプ ットを考える際に検討を要する課題である。

# 2.5.4 CFCs による地下水の滞留時間推定

CFCs を用い地下水の滞留時間, すなわち水分子が地下水システムに涵養されてからサンプリング時 点までの時間を推定する上で,以下の仮定が満たされている必要がある。すなわち,任意の地点で採 水された地下水サンプルが,帯水層中におけるそれを代表し得る CFCs 濃度を有していること,また対 象としている地下水サンプルが,涵養された時点で不飽和帯の空気と溶解平衡状態に達していること, である。すべての溶存ガスの溶解度は,温度,圧力,溶存成分濃度の関数であるため,涵養時におけ る温度,圧力を推定しなければならない。さらに,対象地域における大気中の CFCs 濃度の長期変動デ ータが必要である。放射性親娘核種を利用する <sup>3</sup>H/<sup>3</sup>He 法では,サンプルの <sup>3</sup>H における初期濃度は <sup>3</sup>H と <sup>3</sup>He の両方を測定することにより推定できるが,CFCs のように大気起源のトレーサー成分を用いる 滞留時間推定法では、インプットの長期情報が必要不可欠である。

ヘンリーの法則によれば、空気と平衡状態にある水に溶解しているガスの濃度は、空気中に含まれるガスの分圧(*p*<sub>i</sub>)に比例する。

$$C_i = K_H p_i \tag{2.5.1}$$

ここで、 $C_i$ は水中の CFC 濃度、 $K_H$ はヘンリー則定数である。ガス分圧は、以下で表される。

-215-



図 2.5.6 ドイツのハイデルベルグからアルプスにいたる 4 地点における大気中の CFC11, CFC12 ガス濃度の超過確率(%)の変化<sup>13)</sup>

$$p_i = x_i \left( P - p_{H_2O} \right) \tag{2.5.2}$$

ここで、 $x_i$ は空気中の CFC モル比、Pは大気圧、 $p_{H_2O}$  は水上気圧である <sup>14)</sup>。ヘンリー則定数は、 以下で与えられる。

$$\ln K_{H} = a_{1} + a_{2} \left(\frac{100}{T}\right) + a_{3} \ln \left(\frac{T}{100}\right) + S \left[b_{1} + b_{2} \left(\frac{T}{100}\right) + b_{3} \left(\frac{T}{100}\right)^{2}\right]$$
(2.5.3)

ここで、*T* は絶対温度、*S* は塩分濃度(重量‰)である。 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ の各定数は、 Warner and Weiss <sup>14)</sup> で与えられている。さらに、

$$\ln p_{H_2O} = 24.4543 - 67.4509 \left(\frac{100}{T}\right) - 4.8489 \ln\left(\frac{T}{100}\right) - 0.000544S \qquad (2.5.4)$$

このようにして,得られた地下水中のCFC 濃度を大気中のそれと比較することにより,任意の地点 における地下水の涵養年代推定が可能になる(図2.5.7)。図2.5.7では,水サンプルのCFC-11,CFC-12, CFC-113 濃度測定値は各々,486.5,200.6,27.8 (pg/g)である。



図 2.5.7 CFCs 濃度を用いた地下水涵養年代推定の例<sup>7)</sup>

いま涵養温度を10℃, 涵養標高を海抜0m, 土壌空気は北米の大気組成と同じと仮定すると, 前述のヘンリー則により, 乾燥空気中のCFC-11, CFC-12, CFC-113 分圧は各々, 170, 306, 23 pptv と算出され, これらはいずれも1980年の大気中のフロン濃度を示しているおり, これらを基に地下水の涵

養年代は1980年代であると決定される"。

現在, CFCs を地下水の滞留時間推定に用いる方法は,米国地質研究所 (United States Geological Survey; USGS)<sup>8)</sup>の CFC Laboratory においてきわめて良く事例が積み重ねられており,当実験室における一連の採水・前処理・分析・解析スキームは国際的な地下水 CFC 研究のスタンダードになっている<sup>15)</sup>。

#### 2.5.5 CFCs 濃度を変化させる要因

表 2.5.1 に、CFCs 濃度を変化させる要因を USGS <sup>®</sup>などの情報をもとに整理した。これらは、対象 試料の CFCs 濃度を用いて滞留時間推定を行う際に考慮すべき重要な要素であり、考慮手法の誤りはそ のまま推定誤差につながるものである。

要因	環境	プロセス	滞留時間への影響	文献
涵養温度	浅層地下水面	涵養温度の過大評価 涵養温度の過小評価	過小評価 過大評価 1年 (< 1970)	Busenberg et al (1993)
		±2° <b>C</b>	1-3年(1970-1990)	
過剰空気	亀裂岩盤	涵養時における空気の付加 1990年以降で重要		Wilson and Mcneill (1997)
涵養高度	山地流域	気圧の低下に伴う高標高涵養水のCFCs濃度 ±1000m	数年(<1987)	Busenberg et al (1993)
不飽和帯の厚さ	>10m	深部不飽和層の間隙空気は最近の対流圏空 気より古い 0-10m 30m	過大評価 <2年 8-12 年	Cook and Solomon (1995) Busenberg et al (1993)
都市大気	北米東部・欧州西部等の都市	CFC 混合比の上昇	過小評価	Szabo et al. (1996) Oster et al. (1996)
CFC汚染	都市(工業地帯)	人為起源の地域的なCFC付加	過小評価	Thompson and Hayes (1979) Busenberg and Plummer (1992)
微生物分解	嫌気的環境	発酵, sulphate-reducing CFC-11,113	過大評価	Sonier et al. (1994) Deipser and Stegmann (1997)
吸着	有機物堆積物	有機炭素,鉱物表面での吸着 CFC-113>>CFC-11,12	過大評価	Cook et al. (1995)

表 2.5.1 地下水の CFCs 濃度を変化させる要因

(Plummer and Busenberg, 2006 を参考に作成)<sup>7)</sup>

これらの中でも地下水涵養時の温度は、水試料の CFCs 濃度から涵養時の CFCs 溶存量を推定する際 に、きわめて重要な要素である。原理的には、涵養時の温度は、試料中の希ガスまたは、N<sub>2</sub>、Ar など の濃度からヘンリー則を用いて推定することが可能であるが、後述するように、これらの溶存ガスは、 過剰空気の影響でヘンリー則平衡よりも高い値をとる場合があるので、留意する必要がある。図 2.5.8 は、北米の大気平衡を仮定し海抜 0m における地下水の CFC-11、12 濃度を涵養温度 0~20℃の範囲で 再現したものである。涵養年代が最近になるほど、涵養温度による推定年代の誤差は大きくなる傾向 がある。たとえば 1970 年から 90 年において、±2 ℃の誤差は 3 年弱の推定年代誤差を生ずる。

大気との平衡状態において溶存する濃度以上のガスが地下水中に溶存する現象が,過剰空気(excess air)である。急激な地下水面上昇に伴い,液相と気相との置換が十分になされないまま地下水中にガ スが取り込まれることや,井戸掘削などによっても生ずることがある。涵養時にヘンリー平衡よりも 多くの CFC が地下水中に取り込まれることにより,結果的に過剰空気の効果は推定年代の過小評価を もたらす。その影響は、より高い涵養温度において顕著であり、CFC-11,113に比べ CFC-12において 顕著であり、またより最近涵養された地下水において顕著である。過剰空気 30cm<sup>3</sup>/kg,涵養温度 30℃ という条件における推定涵養年代に対する効果を整理したのが表 2.5.2 である。



Fig. 5a. F-11 concentrations in natural waters at equilibrium with air as a function of the recharge temperature for the years 1945–1990. The concentrations of F-11 in water decrease as the recharge temperature increases.

Fig. 5b. F-12 concentrations in natural waters at equilibrium with air as a function of the recharge temperature for the years 1945–1990. The concentrations of F-12 in water decrease as the recharge temperature increases.

図 2.5.8	CFC-11,	CFC-12 に	トる地下水涵養年	代推定に対す	る涵養温度の影響。
---------	---------	----------	----------	--------	-----------

# 表 2.5.2 過剰空気 30cm<sup>3</sup>/kg, 涵養温度 30°Cという条件における推定涵養年代に対する効果<sup>7</sup>

Recharge	Age offsets from recharge year calculated from CFC concentrations and ratios (a)								
year	CFC-11	CFC-12	CFC-113	CFC-11/ CFC-12	CFC-113/ CFC-11	CFC-113/ CFC-12			
1950	0	2	N/A <sup>a</sup>	-1	N/A <sup>a</sup>	N/A <sup>a</sup>			
1955	0	3	N/A <sup>a</sup>	-1	N/A <sup>a</sup>	N/A <sup>a</sup>			
1960	0	3	N/A <sup>a</sup>	-4	N/A <sup>a</sup>	N/A <sup>a</sup>			
1965	0	3	N/A <sup>a</sup>	-5	N/A <sup>a</sup>	N/A <sup>a</sup>			
1970	1	4	N/A <sup>a</sup>	_7	N/A <sup>a</sup>	N/A <sup>a</sup>			
1975	1	5	1	N/A <sup>a</sup>	0	0			
1980	3	8	3	N/A <sup>a</sup>	2	0			
1985	4	11	3	N/A <sup>a</sup>	2	0			
1990	$\mathbf{C}^{b}$	$\mathbf{C}^{b}$	$\mathbf{C}^{b}$	N/A <sup>a</sup>	$\mathbf{C}^{b}$	0			
1995	$\mathbf{C}^{b}$	$\mathbf{C}^{b}$	$\mathbf{C}^{b}$	N/A <sup>a</sup>	$\mathbf{C}^{b}$	0			

EXCESS AIR IN A WATER SAMPLE FORMED AT 30°C

N/A indicates not applicable (below one year offset).

C: CFC concentrations or ratios higher than the surface water which is at equilibrium with the modern atmosphere, indicating contamination effects.

前述したように、ヘンリー則による CFC 溶解量推定において涵養標高は、大気圧を推定するために 必要な要素である。先の方法で CFC 濃度からヘンリー平衡下における CFC 溶存量を求める場合、涵養 温度 10℃では、CFC-11 (1.0pmo1/kg) において標高 1000m の差が涵養年代に 1 年の推定誤差を、CFC-12 (2.0pmo1/kg) のそれに 1 年の推定誤差を、CFC-113 (0.30pmo1/kg) の場合 1.5 年の誤差を生ずる。 不飽和帯中の空気における CFCs 濃度が大気のそれと平衡状態にあるかどうかは、CFCs を地下水の涵 養年代推定に用いるための重要な条件である。不飽和帯が厚い場合、大気の CFCs 濃度が地下水面にお けるそれと平衡に達するまでの遅れ時間は、CFCs の拡散係数、溶解度、土壌水分の関数である。図 2.5.9 は、水の降下浸透速度 1m/y、液相率 0.3、気相率 0.05、不飽和厚さ 25m とし、CFC-11、CFC-12、SF6 の遅れ時間を推定したものである<sup>16)</sup>。深度 25m における遅れ時間はいずれも、20 年以上に達している ことが示される。しかしながら、実際非定常に生ずる降下浸透(preferential flow など)の状況を 考慮すれば、遅れ時間はより短縮されるものと考えられる。こうした効果を考慮した場合、遅れ時間 効果は深度 5m までではほとんど無視でき、深度 30m において 8~12 年程度と考えられる<sup>16)</sup>。したが って、不飽和帯の厚い不圧帯水層における CFC 法による地下水年代推定には、この効果を配慮する必 要がある。CFC-11、CFC-12、CFC-113 は好気性条件下では安定であるが、嫌気性条件下では分解を生 ずる。



Figure 3 Lag times for water recharged through tracerdiffusion profiles in unsaturated zone air with different depths to the water table based on the model of Cook and Solomon (1995). Parameters used for Chalk are given in text.

図 2.5.9 不飽和帯中の CFC-11, CFC-12, SF6 の遅れ時間 (Cook and Solomon, 1995 をもとに Gooddy et al. 2006 が整理したもの)<sup>16,17)¥</sup>

CFCsの分解は基本的に、脱塩素反応によってHCFCs(hydrochlorofluorocarbons)が生成されることに伴い生ずる<sup>18)</sup>。フィールド、実験室の両方において、CFC-11 が最も分解が早いことが確認されている。地表面下 25cm において、CFC-11 が 12%減少しているのに対し、CFC-12 は 4%、CFC-113 は 2%の減少にとどまっているというデータもある<sup>19)</sup>。CFC-11 分解の半減期については、0.1±0.02years、あるいは 0.9-1.7years というデータがあり、場の条件によってかなり異なる<sup>16)</sup>。CFC の分解は当然、それを用いて求めた地下水滞留時間の推定誤差をもたらす。Katz et al.<sup>20)</sup>は、CFC-11 による滞留時間推定値が CFC-12 による推定値よりも 6~12 年古くなったことを報告している。このような事実を踏まえると、本手法はどちらかといえば被圧地下水よりは不圧地下水の滞留時間推定適しているとい

# 2.5.6 CFCs による地下水滞留時間推定例

CFCs を用いた地下水の涵養年代推定事例は、とくに欧米において 1990 年代以降数多くある。Cook et al.<sup>16)</sup>は、カナダ・オンタリオ中部のシルト質砂層からなる帯水層を対象に、CFCs および<sup>3</sup>Hを用い滞 留時間の推定を行った(図 2.5.10)。



Figure 9. Apparent groundwater age profiles estimated using <sup>3</sup>H and chlorofluorocarbons. The error bar depicts the position of the <sup>3</sup>H peak in 1991. The shaded region depicts the hydraulic age profile calculated using the two-dimensional flow model, using the recharge rate obtained from the position of the <sup>3</sup>H peak. The upper and lower bounds of this region represent the lower and upper bounds of the recharge rate obtained using <sup>3</sup>H (135 and 170 mm yr<sup>-1</sup>, respectively, see text). The solid line bisecting the shaded region represents a recharge rate of 150 mm yr<sup>-1</sup>. Symbols indicate groundwater ages estimated using chlorofluorocarbon dating methods on individual piezometer samples.





Figure 7 Cross-plot of nitrate—nitrogen concentration against calculated date of recharge based on CFC-12 groundwater age and modelled gas diffusion transit time through the unsaturated zone.

図 2.5.11 グリーンランドの農村地域 における CFC-12 による涵養年代 推定結果と NO<sub>3</sub>-N 濃度の関係<sup>17)</sup>



Figure 14 Nitrate concentration versus CFC-12 age of ground water. Fertilizer-derived nitrate and atmospheric mixing ratio of CFC-12 were also shown for comparison where ages mean years from sampling time of ground water (2002). Fertilizer-derived nitrate was scaled as 9 wt% of total chemical fertilizer amount dissolved in average recharge water.

図 2.5.12 韓国チェジュ島における CFC-12 による涵養年代推定結果と NO<sub>3</sub>-濃度<sup>21)</sup> <sup>3</sup>Hをもとに推定した水理学的滞留時間と CFC-12, CFC-113 による推定結果とは,良く一致した。CFC-11 による推定が他の結果よりも過大評価になっているのは,微生物分解による影響ではないかと考えられている。

近年これまで CFCs の適用例がなかった地域においても,研究事例が公表されつつある。Gooddy et al. <sup>17)</sup>は、グリーンランド農村地域のチョークからなる帯水層を対象に、地下水の CFCs および SF<sub>6</sub>を測定 した。図 2.5.11 は CFC-12 による推定涵養年代と NO<sub>3</sub>-N 濃度との関係を示したものである。最近涵養 された地下水ほど NO<sub>3</sub>-N が高いことが示されている。近年の地下水に対する施肥の影響が、涵養年代 の面からも明瞭に示されていることを著者は指摘している。

Koh et al.<sup>21)</sup>は、玄武岩質火山島である韓国チェジュ島を対象に、地下水のCFC-12、<sup>3</sup>H 濃度を測定 した(図2.5.12)。滞留時間が50年以上の比較的古い地下水も、沿岸近くでみられる。NO<sub>3</sub>-濃度とCFC-12 による涵養年代の関係が、図2.5.12に示されている。滞留時間30年よりも新しい農地の地下水にお いて、化学肥料の施肥によるNO<sub>3</sub>-の影響を明確に受けたものがあることが示されている。このように、 CFCによる涵養年代情報とNO<sub>3</sub>-とを組み合わせることにより、地下水の硝酸汚染のメカニズムをより ダイナミックに捉えた研究例は多く、世界各地において最近数十年の地下水滞留時間決定にCFCs法が 有効に利用されている。

# 2.5.7 採水·分析

CFCs は大気中に存在する気体であり、もし水サンプルが大気と接触すると、大気中の CFCs が水サ ンプルに混入する。その結果、大気中の CFCs に汚染された水サンプルを測定・分析することになり、 結果に深刻なエラーをもたらす。また CFCs が含まれる、吸着するなどといった性質を有する器具が、 水サンプルに接触すれば、これも結果に影響を及ぼす。よって採水・分析の各段階において、あらゆ る汚染の可能性を排除した方法が求められる。



図 2.5.13 Thompson ら<sup>22)</sup>による地下水の CFCs 分析前処理ライン

Thompson, et al.<sup>22)</sup>および Thompson and Hayes <sup>23)</sup>は,地下水中の CFC-11 濃度を測定するため,比 較的シンプルな分析ラインを提案している(図 2.5.13)。この分析ラインは地下水サンプル中の CFC を高純度の N<sub>2</sub>でバブリングし,追い出した溶存ガスを低温濃縮用のトラップで濃縮,その後トラップ を加熱し CFC を ECD 付のガスクロマトグラフィーに導入し測定する。その後 Busenberg and Plummer<sup>6)</sup> は, Bullister and Weiss<sup>24)</sup>の分析ラインをもとに,複数の CFCs 濃度の測定を可能とした分析ライン を作成し、主に米国を中心とした複数の地域における地下水の滞留時間推定に適用している。地下水 サンプルの採水は、密封用の中ブタが付属しているネジロのガラス瓶容器を用いる場合が多いようで ある。USGS<sup>80</sup>では、ステンレス容器内に入れた125ml ガラス瓶内に、揚水ポンプから導水された地下 水を、ナイロンチューブ、銅管を通じ導入し、一定時間ステンレス容器ごと揚水した地下水でオーバ ーフローさせた後に水中で密封し、取り出してシールする方法が用いられている。この方法によれば、 密封後地下水サンプルに溶存している空気が水温・水圧変化のために採水後ガラスボトル内で気泡と して発生するが、基本的に外部からの空気の混入はほとんど発生しない。



図 2.5.14 CFCs 分析用の水サンプリングシステムの概要

筆者らは、USGS<sup>80</sup>の方法を参考に、ステンレス容器を用いて実際の地下水および湧水の試験サンプ リングを不知火水文物質循環試験流域(熊本県宇土郡不知火町)において実施した(図 2.5.14)。こ の試験流域ではトリチウムや安定同位体比を用いて、流域内の各地下水・湧水について滞留時間の検 討が行われている<sup>25)</sup>。本研究では試験流域内において、湧水3ヶ所(S-2, S-6, S-15 地点)および海 岸の観測井(SB-2D: 深度 50 m、自噴井)を選び、サンプルの採水を行った(図 2.5.15)。

サンプルの採水は、大気中の CFCs による汚染を防止するため、できる限り大気がサンプルに混合し ないように配慮して行った。方法の概要は、次のようになる。20 0 のステンレスタンク中に 125m0 のサンプル採水用のガラス瓶、およびキャップを入れ、先端をガラス瓶の底まで挿入したチューブを 用いて、湧水または地下水を直接導入した後、ガラス瓶およびステンレスタンクをオーバーフローさ せ、ガラス瓶内の水が完全に新しく入れ替わったところでチューブを抜き、タンク内の水中で気泡が 入らないようにキャップを閉じた。その後気泡がないこと確認し、キャップ部分をブチルテープおよ びビニールテープでシーリングし、密閉した。なお、ガラス瓶内へのサンプルの導入は、可能な限り 水頭差で導入し、不可能な地点のみ液送ポンプを用いて導入した(図 2.5.15)。



図 2.5.15 試験サンプリングを実施した熊本県不知火町の試験流域概要

Samplo	Туре	Environment	Concentration (pg/kg)			Dating by	<sup>3</sup> Н	EC
Jampie			CFC12	CFC11	CFC113	CFC	(TU)	(mS/m)
S-6	Spring	Headwater	218.35	427.72	52.66	15	2.0	11.7
S-2	Spring	Midstream region	139.66	244.25	33.97	25	2.3	13.8
S-15	Spring	Coastline	27.22	60.83	-	> 50	2.2	19.2
SB-2D	Deep borehole	Coastline	23.85	29.78	-	> 50	0.1	19.2

表 2.5.3 サンプルの諸元と分析結果

採取したサンプルは、図2.5.16に示すラインによって地下水中に溶存している CFCs を捕集し、ECD ーガスクロマトグラフ(島津製作所 Shimadzu GC-8AIE)により CFC-11, CFC-12, CFC-113 を測定した。 結果を表2.5.3に示す。これによれば、SB-2Dにおける CFC-11は29.78 pg/kg 程度ときわめて低く、 一方 S-2 のそれは244.25 pg/kg を示した。この値を用い、採水地下水サンプルの滞留時間を推定する と、源流域の湧水において滞留時間15年、中流域のそれは25年、沿岸部において50年以上と推定さ れ、不知火研究流域においてこれまでに明らかにされている観測井を用いた地下水ポテンシャル解析 の結果などと整合性がみられると共に、さらに図2.5.17 や図2.5.18に示されるようにトリチウムや 炭素14を用いた既存の地下水年代分布特性研究では分解能の無かった50年以下の滞留時間解析が CFCs 法によって可能であることが示された。また、炭素年代で195年を示すSB-2Dの湧水において<sup>3</sup>H、 CFCs がほとんど検出されなかったことは、当該地域では人為起源の最近の CFCs の混入の懸念が無い ことを示すものであり、我が国において CFCs が地下水年代決定のトレーサーとして有効であることが 裏づけられた。



# 図 2.5.16 CFCs 分析用前処理ライン



図 2.5.17 不知火研究地域における地下水中のトリチウム濃度<sup>25)</sup>



図 2.5.18 トリチウム濃度および炭素 14 濃度を基にした不知火研究地域地下水の 年齢分布概念図<sup>25</sup>

# 2.5.8 おわりに

本稿では、CFCsを用いた地下水滞留時間の推定について、背景、原理、方法の実際等について概観 した。我が国においては、CFCs法の適用例が全くなく、また地下水のCFCs濃度データそのものも存 在しない状況であるが、本手法は我が国の地下水研究にも十分適用し得るものと思われる。現在筆者 らは、地下水のCFCs分析ラインを開発中であり、間もなく完成予定である。本手法は、従来の<sup>3</sup>H、<sup>3</sup>H/<sup>3</sup>He 等に比較し、システム構成が安価で分析プロセスも簡易であるという長所がある。サンプリング時に 大気の暴露に注意しなければならないこと、あるいは厚い不飽和帯を持つ地域や嫌気性の強い被圧地 下水帯水層等には不向きであるという短所もあるが、<sup>3</sup>H法では追証できない最近数十年の地下水滞留 時間を解析するための汎用手法として普及するポテンシャルを十分備えている。

今後滞留時間推定に関わるスキームも整備し,我が国における地下水学研究の推進に貢献したいと 考えている。

# 2.5.9 参考文献

- 1) 藪崎志穂, 辻村真貴, 田瀬則雄: 関東における降水のトリチウム濃度の近年の変動について, 筑波大学陸域環境研究センター報告, 4, pp. 119–124, 2003.
- 2) 裵相根, 榧根勇: 洪積台地における地下水の三次元的流動-環境トリチウムと水質による地下水の循環と滞留時間, 地下水学会誌, 29, pp. 89-98, 1987.
- Shimada, J., Matsutani, J., Dapaah-Siakwan, S., Yoshihara, M., Miyaoka, K. and Higuchi,
  A. : Recent trend of tritium concentration in precipitation at Tsukuba, Japan, Annual
  Report of the Institute of Geoscience, The University of Tsukuba, 20, pp. 11-14, 1994.
- 4) 田瀬則雄:水文学における環境同位体の利用,化学工業,67, pp. 97-99, 2003.
- 5) 馬原保典:環境放射能測定による地下水年代の推定-トリチウムと溶存ヘリウムの活用例-, RADIOISOTOPE, 45, pp. 435-445, 1996.
- 6) Busenberg, E. and Plummer, L.N. : Use of chlorofluorocarbons (CC13F and CC12F2) as hydrologic tracers and age-dating tools: The alluvium and terrace system of central Oklahoma, Water Resources Research, 28, pp. 2257-2283, 1992.
- 7) Plummer, L.N. and Busenberg, E. : IAEA Guidebook on the use of chlorofluorocarbons in hydrology 2004 edition. Technical Report Series, No. 438, p. 236, 2006.
- 8) United States Geological Survey Web Site: http://water.usgs.gov/lab/chlorofluorocarbons/ (accessed on Jan. 16, 2006)
- 9) 巻出義紘, 金井豊, 富永健: 大気中のハロカーボン類の超微量分析, 日本化学会誌, 1, pp. 133-144, 1981.
- 10) Tominaga, T. : Chlorofluorocarbons in the atmosphere: trends and vertical profiles. Pure & Appl. Chem., 64, pp. 529-536, 1992.
- 11) 気象庁 Web Site: http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/ (2006.1.16 アクセス)
- 12) 東京都環境科学研究所:地球環境関連項目のモニタリング結果について(フロン(CFCS)測定, pp. 8-10, 2004.
   http://www/2.kankyo.metro.tokyo.jp/kankyoken/research/C02etc/C02-etc-gaiyouhtm# フロン
- 13) Oster H., Sonntag, C. and Munnich, K.O. : Groundwater age dating with chlorofluorocarbons,

Water Resources Research, 32 (10), pp. 2989-3001, 1996.

- 14) Warner, M. J. and Weiss, R.F. : Solubilities of Chlorofluorocarbons 11 and 12 in water and seawater, Deep-Sea Research, 32, pp. 1485-1497, 1985.
- 15) Busenberg, E. and Plummer, L.N. : Dating young groundwater with sulfur hexafluoride: Natural and anthropogenic sources of sulfur hexafluoride, Water Resources Research, 36, pp. 3011-3030, 2000.
- 16) Cook, P.G., Solomon, D.K., Plummer, L.N., Busenberg, E. and Schiff, S.L. : Chlorofluorocarbons as tracers of groundwater transport processes in a shallow, silty sand aquifer, Water Resources Research, 31, pp. 425-434, 1995.
- 17) Gooddy, D.C., Darling, W.G., Abesser, C. and Lapworth, D.J. : Using chlorofluorocarbons (CFCs) and sulphur hexafluoride (SF6) to characterize groundwater movement and residence time in a lowland Chalk catchment. J. Hydrol., 330, pp. 44-52, 2006.
- 18) Sonier, D.N., Duran, N.L., and Smith, G.B. : Dechlorination of trichlorofluoromethane (CFC-11) by sulfatereducing bacteria from an aquifer contaminated with halogenated aliphatic compounds, Appl. Environ, Microbiol, 60, pp. 4567-4572, 1994.
- 19) Khalil, M. A. K., Rasmussen, R. A., : The potential of soils as a sink of chlorofluorocarbons and other man-made chlorocarbons, Geophys. Res. Lett. 16, pp. 679-682, 1989.
- 20) Katz, B.G., Lee, T.M., Plummer, L.N., Busenberg, E. : Chemical evolution of groundwater near a sinkhole lake, northern Florida, 1. Flow patterns, age of groundwater and influence of lakewater leakage, Water Resour, Res. 31, pp. 1549-1564, 1995.
- 21) Koh, D.C., Plummer, L.N., Solomon, D.K., Busenberg, E., Kim, Y.J. and Chang, H.W.: Application of environmental tracers to mixing, evolution, and nitrate contamination of ground water in Jeju Island, Korea. J. Hydrol., 327, pp. 258-275, 2006.
- 22) Thompson, G.M., Hayes, J.M. and Davis, S.N. : Fluorocarbon tracers in hydrology. Geophysical Research Letters, 1, pp. 177-180, 1974.
- 23) Thompson, G. M. and Hayes, J. M. : Trichlorofluoromethane in groundwater a possible tracer and indicator of groundwater age, Water Resources Research, 15, pp. 546-554, 1979.
- 24) Bullister, J.L. and Weiss, R.F. : Determination of CC13F and CC12F2 in seawater and air, Deep-Sea Research, 35, pp. 839-853, 1988.
- 25) Inoue, D., Shimada, J., Hase, Y. and Miyaoka, K. : Groundwater flow system study in volcanic low permeability bedrock basin. Proceedings of American Geophysical Union Fall Meeting, H23E-1478, 2005.

(熊本大学 嶋田 純)

## 3. 実用化に向けた研究開発課題の提示および調査・解析技術の高度化・体系化の総括

# 3.1 研究結果の検討

# 3.1.1 基盤技術の実用化・高度化の方向のレビュー

地層処分の研究開発は、「地層処分のための実用的技術の開発」、「地層処分のための技術の高度化へ むけた基礎的研究開発」および「長期の自然現象の計測・観測による、地道な地球科学的知見の蓄積」 に大別される。また研究開発の対象を空間の大きさと時間の長さで捉えると、多重バリアの「ファー フィールド (Far Field)」よりの研究か、「ニアフィールド (Near Field)」よりの研究かによって、 また、処分場の建設/操業および閉鎖時の管理処分段階と閉鎖後の隔離処分段階とでは、研究開発の 性格が異なってくる。そして地層処分施設構築の流れ「サイト選定」、「建設/操業」、「処分(閉鎖後)」 から見た、それぞれの分野の研究開発を、地層処分実現への研究開発プログラムに、どのような配分 と時間で組み込んでいくかといった、技術の実用化へのシナリオを明確にすることも当面の急務であ ることは、すでに言われてから、多くの歳月が流れている。

「実用化に向けた研究開発課題に関する研究」に関しては、上記の地層処分施設構築の流れの中で、 2000 年レポート<sup>1)</sup>の体系の大項目である、「地質環境」、「処分技術」、「安全評価技術」の中で、それ ぞれ課題となっている具体的な研究開発項目を抽出し、調査研究をより深く煮詰めるとともに、それ ぞれの中間領域の調査研究内容と各分野の連携の仕方について、項目を絞った、より詳細な検討をお こなってきた。その結果得られた重要項目の一つが、ニアフィールドのコンセプトの再構築であり、 これに対応したセーフティケースの構築である。ニアフィールドコンセプトの再構築とは、従来のコ ンセプトがどちらかというと、上記の各分野の要素技術毎の安全評価であったのを、各分野間の相互 関連を考慮した安全評価へ移行することにある。この中には、「建設/操業の安全」と「環境安全」の 再整理や「工学的時間軸または人間の生活の時間軸」と「地質学的時間軸」への移行といった時間ス ケールの評価も含まれるし、地層処分のシナリオのオプションや施設の設計コンセプトの変更でカバ ーできる分野もあると思われる。

一方,「調査・解析技術の高度化・体系化」に関しては,「処分場を造るための技術の高度化・実用 化」を目指して,地下水の水理・水文に関する要因の基礎的技術の研究・開発を実施している。ここ 数年,研究開発の目標を,より実用的な高度化技術にシフトさせてきたが,今年度は,さらにその方 向を加速させ,瑞浪超深地層研究所計画の第2段階計画の進行に合わせた研究課題を抽出し,より現 実に即した創造的な研究の一翼を担うことを意識した。瑞浪超深地層研究所の研究開発も立坑の掘削 がはじまり,立坑での調査研究という第2段階に移行している。本調査・研究の成果を反映させて, 第2段階の調査研究計画の評価もおこないながら,より具体的・実用的な調査・解析技術の高度化を おこない,地下水に関する調査・解析技術の体系を構築していきたい。

#### 3.1.2 課題の提示/調査研究と基盤技術実用化への研究開発

#### 3.1.2.1 平成18年度 深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する委員会の基本方針

今年度の研究開発を実施するに当たり、基礎技術から実用技術へ、要素技術から中間領域のシステム化へと転換した基本方針の再認識と相互理解を深めるため、昨年度作成した、基本方針のメモをレビューしておく。

#### (1) 各分野中間領域の調査研究の課題と連携の仕方の検討

平成17年度に検討した地層処分の研究開発課題は、2000年レポート1の研究分野、「地質環境」、「地

層処分の工学技術」,「安全評価」から,それぞれ最重要研究課題のいくつかを取り出し,地層処分施 設構築の視点から,一つの事例として,具体的な検討を試みてきた。よく指摘される,各分野の中間 領域の課題にも様々な場面で遭遇している。各分野の技術の実用化に加え,中間領域の高度化も重要 な問題として検討を重ねてきた。

地質環境の観点からは、「断層周辺の割れ目の幾何学的形状と割れ目充填鉱物の特性」、処分技術からは、「掘削にともなう力学的な EDZ の破壊音による計測・解析とモニタリング手法」および「割れ目 や EDZ のシーリング技術としてのグラウチングとグラウトの充填メカニズムの試験・解析」そして性 能評価の観点からは、「割れ目充填物の形成と変化が分配係数におよぼす影響」や「建設・操業に伴う酸化性地下水・物質等の混入の影響評価」に関する研究などが提示された。またそれぞれの分野間に も重要な研究課題があることが確認された。

これらの調査・研究からニアフィールドコンセプトの再構築の重要性が指摘され、今後の中間分野 の研究開発の具体的な連携のありかたが検討された。日本原子力研究開発機構が目指している「セー フティケース (Safety Case)」の構築にも、中間分野の相互関連を考慮した論理の展開は重要な課題 である。

# (2) 環境安全と建設・操業安全の地下水技術の連携(閉鎖後/長期と建設・操業時/短期の連携Far FieldとNear Fieldの統合)

地層処分の研究・開発には、「環境安全の地下水技術」と「建設・操業安全の地下水技術」がある。 前者は、放射線安全の「地下水シナリオ」の中枢である、「閉鎖後の核種の移行と生活圏の放射線安全」 に密接に係った技術であり、Far Field よりの技術である。後者は、どちらかというと「構築された 処分場の性能」や「労働災害」に関する技術であり、どちらかというとニアフィールドよりの技術で ある。前者については、従来から地層処分特有の技術として、多岐にわたる研究・開発がなされてお り、現状の研究・開発の方向は、地質環境、処分場構築の工学技術、安全評価の各領域の統合へ向け て、中間領域の課題をつめるべき段階にきている。後者については、既成の実用技術の適用が可能で あることから、サイトが特定していない段階では、検討が進まなかったが、深地層の研究施設の構築 を通じて、深部・長期の工学へ向けて、具体的な高度化が望まれる技術も少なくない。環境安全、建 設/操業の両分野について、当研究会の「課題グループ」でも、研究・開発の課題が検討されており、 「調査・解析グループ」の基礎的・要素的研究・開発の諸項目の目標も、両者にまたがるものである。

現時点で早期の解決が望まれる「処分場をつくるための基礎的・実用的な技術の研究・開発」のテ ーマのうち、「深地層の研究施設(URL)の建設と諸試験・調査での重点技術の抽出とその研究・開発 の実施」、「地下水理解析(物理現象)と地化学分析(化学現象)との整合性に関する研究・開発」、「深 部淡塩境界にみる移流と拡散現象の実態の研究・開発」などに関しては、調査・解析技術の高度化は 重要なテーマであり、これらの検討の過程で、閉鎖後の環境安全の論理と建設・操業時の安全の論理 をどう結びつけるかも重要な課題となろう。「操業安全上のグラウチング技術と地下水環境の安全評 価との統合論理」、「掘削に伴う岩盤の擾乱と広域地下水環境の安定性に関する時系列の統合論理」な どがその事例である。

# (3) Safety Case 構築に向けた、重要技術の整備・体系化と中間分野の技術の高度化

課題グループの目標の一つは、それぞれの中間分野で、研究・開発が手薄な穴、共同研究でより明確な方向性が打ち出せると考えられる課題を見出すことにある。その一例は、各分野にわたる具体的

な課題として、別項「課題グループの研究方針」で、また地下水技術に限定したいくつかの課題に関 しては、調査・解析グループの研究開発方向とあわせて、3.2 で述べる。今後これらをたたきだいに して、相互の検討を更に進め、サイト選定/処分場の設計、建設/操業、処分/閉鎖(後)それぞれの 段階で、どうしても必要な、重要な研究開発の具体的な内容と手法および、それらを実用技術として 達成させる共同研究体制等について議論を重ねたい。また中間分野の課題に関する研究開発の進展に より、個々の要素の安全を積み重ねた従来の評価では捕らえにくかった、相互の要素が連携した、よ り現実的な性能の評価が、日本原子力研究開発機構が目指すセーフティケースの構築にむけた知識ベ ースに寄与することが期待される。

一方,課題の中には、例えば掘削影響領域(EDZ; Excavation Disturbed Zone, とくに水理・水質の EDZ)のように、閉鎖後の処分場の性能、長期の核種移行にどれだけ重要な意味をもつか、議論がわかれている項目もある。緩衝材の流出、酸化した地下水の浸透・混合の影響、マイクロクラックへのシーリングなどについても同様な問題を含んでいる。処分場の性能評価の観点から、原点にかえって議論しておくべき問題も少なくない。

調査・解析グループの研究の方向としては、従来はどちらかというと、基礎的な研究開発をすすめ ているが、ここ数年は、成果の実用化を目指した研究を展開してきた。研究開発の内容は、ニアフィ ールド、ファーフィールドの水理に関する計測・解析、地化学に関する計測・解析および地下水に関 する計測法と地下水制御技術などである。基礎的な研究開発の性格から、東濃地科学センターの瑞浪 超深地層研究所の第2段階の研究開発へのコメントを含め、今年度は継続して成果をつみあげてきた。 しかしながら、地層処分のゴールである閉鎖後の処分場の性能評価、地層処分特有の技術の体系化に むけて、的を絞った研究開発が急がれている昨今、第2段階の研究開発と今後の方向についての検討 も併せておこないたい。

なお具体的な研究については、これまでの研究の積み重ねのレビューに今年度の成果を加味して、 以下の項で詳述する。

#### 3.1.2.2 地質環境の観点から抽出された深部地質環境の調査・解析技術に関する研究

- 研究 1: 断層周辺の割れ目特性に関する研究;活断層/阿寺断層周辺の割れ目分布を計測し,フラ クタル分布も考慮して,分布特性を求め,断層周辺の割れ目密度分布の実態を把握した。 さらに本年度は,断層の大きな露頭/切り取り斜面での観察によって,主断層の運動に伴 う,小断層系の破砕帯性状の規則性が見出されるなど,断層を介した水みち性状も考慮し た断層のモデリングを進展させた。
- 研究2:物質移動経路の2次的物質(鉄酸化物,炭酸塩)による,自己シーリングプロセスの長期 的影響を明らかにする。このための野外調査による実態の調査研究を進めているが、上記 の断層群の露頭での破砕帯充填物の知見が、これに加わった。

#### 3.1.2.3 処分技術の観点から抽出された深部地質環境の調査・解析技術に関する研究

深部地下施設の建設時には、地下空洞に大きな地圧と水圧がかかる。建設・操業を安全に実施する には、これらのモニタリングと地山の押し出し・崩壊、出水等の異常に対する手当てが必要である。 特に一般の構造物にとっては良好岩盤、低透水性岩盤に対する、地層処分施設が要求する性能を満た すこれらの手法、地下水環境擾乱の許容度等も含めた考え方の整理が当面の重要課題である。 研究1:掘削影響領域 (EDZ) の解析・評価手法と微小破壊音 (AE: Acoustic Emission) や Micro-seismic Monitoring による調査・計測システムの研究を進展させた。

研究 2:低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の高度化に関する実験,解析を引続き実施した。今年度はさらに、クロスホール透水試験による岩盤の水理地質構造を推定、評価する新しい手法を提案し、数値実験と現場実験によって妥当性と実用性を検証した。

## 3.1.2.4 安全評価の観点から抽出された深部地質環境の調査・解析技術に関する研究

地層処分サイト評価,処分施設の設計・閉鎖後の安全評価手法は,当面は従来の決定論的手法の踏 襲となろう。決定論的な評価/工学的判断の拠り所の原点は,不確実性に対する安全尤度である。人 が納得する安全尤度を決める重要なレファレンスケースに,多重バリアの設計にからむ,核種の移流・ 拡散に関する実用的運用の考え方の構築がある。

放射性核種を含む元素が、地下水条件下で形成する溶解度制限固相の特定およびその固相の溶解度 と種々の岩石表面に対する収脱着分配係数は、地層処分の安全評価解析における重要な入力データと して、その整備がもとめられている。

- 研究 1:鉄含水酸化物の沈殿の生成および非晶質含水酸化物の安定性とその結晶性酸化物への変化に ついてのデータを蓄積した。
- 研究 2: 処分場構築に関連した酸化性地下水の浸入,操業時の酸化性物質混入などの影響評価に関す る検討を試みた。本年度は、ニアフィールドのコンセプトの再構築に際し、これに対応した セーフティケースの構築を具体化するための基盤として、地層処分のシナリオ全体の流れを レビューした。

#### 3.1.2.5 各分野中間領域の調査研究の連携検討

以上のべてきた課題は、2000 年レポート<sup>1)</sup>の研究分野である「地質環境」,「地層処分の工学技術」, 「安全評価」から、それぞれ最重要研究課題のいくつかを取り出し、施設構築の視点から、一つの事 例として、具体的な検討を試みてきた。よく指摘される、各分野の中間領域の課題にもあちこちで遭 遇している。それぞれの技術の実用化に加え、中間領域の高度化も重要な問題として検討を重ねてき た。地質環境の観点からは、「断層周辺の割れ目の幾何学的形状と割れ目充填鉱物の特性」,処分技術 からは、「掘削にともなう破壊音(AE)や"微小地震"の計測・解析とモニタリング手法およびフラクチ ャーのシーリング技術とグラウトの充填メカニズムの試験・解析、水理地質構造の解析評価」,そして 性能評価の観点からは、「割れ目充填物の形成と変化が分配係数におよぼす影響」や「建設・操業に伴 う酸化性地下水・物質等の混入の影響評価、セーフティーケースの構築に関する研究」などが提示さ れた。またそれぞれの中間分野の共同研究、ないしは研究の方向に関する検討がなされ、それぞれの 分野間にも重要な研究課題があることが確認された。これらの調査・研究からニアフィールドコンセ プトの再構築の重要性が抽出され、今後の具体的な進め方、連携のありかたが検討された。

# 3.1.3 環境安全評価の地下水シナリオからみた調査・解析技術の高度化・体系化

#### 3.1.3.1 地下水調査・解析技術の地下水シナリオ FEP の高度化・体系化

2000 年レポート<sup>1)</sup>の総論報告には、地下水シナリオ構築の包括的 FEP がまとめられている。この解 析で抽出された重要項目を横目で見ながら、当研究会の「調査・解析グループ」が現在実施している、 どちらかというと、基礎的、要素的な技術の高度化に関する研究・開発(R&D)の成果を検討・評価し て、地下水に関する調査・解析技術の体系化と実用化への道を進展させる。

# 3.1.3.2 地下水の基盤技術/要素技術の高度化

「調査・解析グループ」は、地下水に関する計測技術、広域・局所の解析技術および地化学分析に 関して、必ずしも現状の地層処分技術開発の基本方針、時限にとらわれない立場で、基盤技術の高度 化を試みている。基礎的研究の常として、成果がすぐに見えるとは限らないが、高度化の芽を大切に した評価をおこない、最新の知見を実用技術へ取り込む方向での議論を進めている。また、この研究 会で培ってきた基盤技術/要素技術も多岐にわたり、蓄積されてきており、技術の体系化へ向けた準 備もかなり整ってきたと認識される。個々の R&D の項目については、研究成果の総括で述べる。

#### 3.1.3.3 環境安全の地下水技術と建設・操業安全の地下水技術

地層処分の研究・開発には、「環境安全の地下水技術」と「建設・操業安全の地下水技術」がある。 前者は、放射線安全の「地下水シナリオ」の中枢、核種の移行に密接に係った技術であり、後者は、 どちらかというと「構築された処分場の性能」や「労働災害」に関する技術である。前者については、 従来から地層処分特有の技術として、多岐にわたる研究・開発がなされており、現状の研究・開発の 方向は、地質環境、処分場構築の工学技術、安全評価の各領域の統合へ向けて、中間領域の課題をつ めるべき段階にきている。後者については、既成の実用技術の適用が可能であることから、サイトが 特定していない段階では、検討が進まなかったが、深部・長期の工学へ向けて、高度化が望まれる技 術も少なくない。環境安全、建設/操業の両分野について、当研究会の「課題グループ」でも、研究・ 開発の課題が検討されており、「調査・解析グループ」の基礎的・要素的研究・開発の諸項目の目標も、 両者にまたがるものである。

3.2 で総括する内容を踏まえて考えると,現時点で早期の解決が望まれる「処分場をつくるための 基礎的・実用的な技術の研究・開発」のテーマのうち,「深地層の研究施設(URL)の建設と諸試験・ 調査での重点技術の抽出とその研究・開発の実施」,「地下水理解析(物理現象)と地化学分析(化学 現象)との整合性に関する研究・開発」,「深部淡塩境界にみる移流と拡散現象の実態の研究・開発」 などに関して,調査・解析技術の高度化は重要なテーマであり,これらの検討の過程で,環境安全の 論理と建設・操業安全の論理をどう結びつけるかも重要な課題であろう。「操業安全上のグラウチング 技術と地下水環境の安全評価との統合論理」「掘削に伴う岩盤の擾乱と地下水環境の安定性の統合論 理」などがその事例であることに変わりはない。

# 3.2 研究結果の取りまとめ及び技術の体系化に関する研究結果の総括

#### 3.2.1 「実用化に向けた研究開発課題の研究の検討」の総括

「処分場を造るための実用的技術の開発」に関し、「2000 年レポート」<sup>1)</sup>の評価に深くかかわった委員の参加をえて、「地質環境」、「処分技術」、「安全評価」それぞれの専門の立場から、「2000 年レポート」<sup>1)</sup>以後の技術の高度化、分野内および各分野にまたがる科学・技術も含めた実用化への重点課題を抽出した。現時点でも処分サイトは特定されていないが、地下実験の地点を特定した、実験施設の建設は、東濃、幌延で始まっている。処分場をつくるための、建設/操業、処分/閉鎖(後)にいたる、具体的なサイト特性調査の手順、設計・施工や操業技術、安全評価とモニタリングなどに関して、「2000 年レポート」<sup>1)</sup>では、可能性は示したにとどまったが、これらの技術を実用的に使うための、より詳細な検討ができる機会が整いつつある。本年度も、各分野の重点課題の事例研究を更に進展さ

せると共に、中間領域の課題の研究開発と各分野の連携の仕方を念頭に、次の研究開発項目に的を絞って、具体的な試験・調査と成果の検討を進め、知見の蓄積と技術の開発をはかっている。
## 3.2.1.1 処分技術

## (1) 微小破壊音(AE)計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術に関する研究

岩石試料の破壊試験と微小破壊音の計測/波形解析を実施し、その破壊過程の数値シミュレーションを加えて、破壊/ゆるみの発生のメカニズムとAEを用いたより高度のモニタリングの可能性を検討してきた。さらに、割れ目系硬岩から堆積軟岩へも、調査研究の領域を広げた。本年度は各種AEパラメータの特性を詳細に検討することによって、岩盤の微小破壊現象の検知が可能となることを明らかにし、処分施設の調査から設計、安全評価のためのモデル構築に至る過程を通して、これが地質環境評価のための重要な指標となることを示した。さらにニアフィールドのコンセプトの再構築のための岩盤の力学-水理学的挙動の評価手法に関する研究の一部も報告した。

### (2) 透水岩盤に対するフラクチャーシーリング技術に関する研究

ー定の注入圧に振動圧を加えた,動的グラウチングの室内試験とその数値シミュレーションにより, グラウト材の充填メカニズムと注入条件に関する基礎データを進展させた。また現場試験により,数 値解析手法の適用可能性を示した。本年度はクロスホール透水試験による岩盤の水理地質構造の新し い評価手法を提案し,3次元の数値実験と現場実験によって,その妥当性と実用性を示した。ニアフ ィールドのコンセプトの再構築に関しては、サイト選定から処分施設の設計,安全評価に至る一連の 流れの中に再構築するための検討を考えている。

### 3.2.1.2 安全評価

# (1) 鉄含水酸化物の沈殿の生成および非晶質含水酸化物の安定性とその結晶性酸化物への変化に関 する研究

種々の元素が沈殿する場合,まず非晶質の含水酸化物を形成し,これが徐々に結晶性の酸化物に変 わっていく。その過程で固相の溶解度も異なる。また元素が地下水中を溶解して移行する際には,地 下水に接している岩石の表面状態によって,収着・移行の遅延が異なる。そしてこれらが長い時間を かけて徐々に変わっていく。放射線元素が形成する固体の溶解度,収着分配係数を左右する固体の表 面状態,そしてその時間変化。本年度は,これを系統的に理解するための上記の実験を継続した。性 能評価の安全尤度を低減させることにつなげることを目標にしている。

#### (2) 酸化性地下水・物質に関する研究

中間領域の研究につなげるため、処分場構築に関連した酸化性地下水の浸入,操業時の酸化性物質 混入などの影響評価に関する検討を試みている。

## (3) セーフティーケースからみた中間領域で遅れている課題の抽出とニアフィールドコンセプトの 再構築

本年度は、このための基盤整備として地層処分のシナリオ全体の流れを、改めてレビューした。

### 3.2.1.3 地質環境

# (1) 地下処分施設の建設に当たって, 遭遇すると考えられる断層/活断層周辺の割れ目特性と長期的 な挙動予測手法に関する研究

阿寺断層/活断層のずれに伴う周辺岩盤の破壊領域の実態を次の二つの指標で表して見た。一つは

割れ目密度の計測値であり,他は割れ目に侵入した雨水起源の地下水と岩石の反応によって,(岩石形 成時にできた一次鉱物とは異なり)割れ目中に2次的に形成された鉱物に関係する,XRF全岩分析値 (新しく形成された割れ目の指標となることが期待される)である。いずれも断層からの距離と相関 があることが認められ,また断層系毎に断層破砕物質が異なることも見出されるなど,サイト選定に おける断層回避に関する実用的,工学的判断の考え方とデータの蓄積が進展しつつある。

# (2) 地下処分施設周辺(とくにニアフィールド)の物質移動経路の二次的充填物質(鉄酸化物や炭酸 塩など)による,長期的な自己シーリングプロセスと物質移動特性への影響に関する研究

上記の XRF 分析を一歩進めて、処分施設坑周辺の水みちである割れ目(掘削に伴う新たに発生した 割れ目も含めて)の、2 次鉱物充填(鉄酸化物や炭酸塩)による地質環境の長期的な変化の定量化と 自己シーリングに関するナチュラルアナログ研究のパイロット研究を進展させた。

### 3.2.1.4 分野間の連携のまとめ/セーフティーケースからの見直しの試み

以上要約したように、それぞれの分野で課題を抽出し、試験・調査を実施して、より具体的な問題 点に踏み込んでみた。課題グループの目標の一つは、それぞれの中間分野で、研究・開発が手薄な穴、 共同研究でより明確な方向性が打ち出せると考えられる課題を見出すことにある。その一例は、各分 野にわたる具体的な課題として、3.1.2.4 で、また地下水技術に限定した課題に関しては 3.1.3.3 で 述べた。これらをたたきだいにして、相互の検討を更に進め、サイト選定/処分場の設計、建設/操 業、処分/閉鎖(後)それぞれの段階で、どうしても必要な、重要な研究開発の具体的な内容と手法お よびそれらを実用技術として達成させる共同研究体制等について議論を重ねた。また中間分野の課題 に関する研究開発の進展により、個々の要素の安全を積み重ねた従来の評価では捕らえにくかった、 相互の要素が連携した、より現実的な安全の評価が可能になることが期待される。セーフティーケー スのサンプルの一つを例示し、ここで試みている地層処分/安全評価の考え方をさらに進展させたい。 なお、重要課題の一つとして抽出した、ニアフィールドのコンセプトの再構築に関しては、共通項と しては、各分野の中間領域の課題を満たすことが前提となるが、再構築の中身に関しては、必ずしも 見解が一致していない。従来のコンセプトと比較しながら、着地点を明確にしておく必要を感じる。

## 3.2.2 「調査・解析技術の高度化・体系化」の総括

「処分場を造るための技術の高度化へむけた基礎的研究開発」に相当する研究テーマについての, 今年度の成果報告である。

#### 3.2.2.1 調査技術の高度化に関する研究開発

# (1) 割れ目系岩盤の水理解析に関する研究/簡易型地下水制御情報化施エシステム(SWING-SHAFT) の立坑トンネルへの適用に関する研究;

最近トンネルの地下水挙動の予測に試みられている SWING 法を,立坑・処分坑道掘削にともなう地 下水の挙動予測に適用する基礎研究を実施した。SWING 法は豊富な地下水情報を使った,簡易な水理 解析手法であり,実用的アルゴリズムとして期待される。従来の亀裂ネットワークモデルによる地下 水流れのアルゴリズムは,計算が複雑であり,諸定数の設定が困難であるなど,いまだ実用化には難 がある。また遺伝的アルゴリズムの研究を積み重ねているが,まだ基礎的研究の段階である。これと は別の,実用化の観点から,上記の手法の研究を,瑞浪超深地層研究所に関連付けて取り組んでいる。 本年度は、SWINGを進展させて、より実用的な「簡易型地下水情報化システム(SWING-SHAFT)を開発 した。瑞浪超深地層研究所の立坑の建設に伴う、試験調査や掘削時のデータを用いて解析を行い、実 用化へ向けた試行錯誤を実施中である。

# (2) 岩盤浸透流の3次元特性の調査・解析に関する研究/地下工事に伴う地圏環境変化総合モニタリ ングの一環としての山地流出モニタリング技術の開発;

地下工事に伴う地圏環境変化の総合モニタリングの一環として河川流出計測を,立坑掘削に伴う環 境変化のモニタリングや環境管理に用いる研究を行ってきた。またニューラルネットワークによる流 出解析のツール (ANN) を作成し,夏季の流出解析のランニングテストでよい結果を得た。引続き深層 地下水流動の影響が比較的大きい,冬季の流出解析を実施した。この基礎研究の成果を踏まえて,地 表面の流出解析に基づく「地圏環境モニタリングシステム」の構築をめざしている。また遺伝的アル ゴリズム (GA) による簡便で実用的な実用ソフトの検証にも取り組んできた。本年度は、これらの広 域、簡易型の解析ツールに、有限要素法 (FEM) による流出解析を組み合わせることによって、実測と の再現性の向上をはかった。また瑞浪超深地層研究所の立坑の建設に伴う、排水の環境基準値を超え るフッ素、ホウ素の含有を解明するため、これを地下水の滞留時間と岩石一水反応の側面から捉える 基礎研究にも着手した。

# (3) 深部岩盤における水理学的調査・試験法に関する研究/超微粒ベントナイトグラウトに関する研究;

地下水に関するモニタリング,特に地中での間隙水圧・水温関連の計測では,従来の機器は長期の 耐久性と維持管理に難点が多く,地層処分で重要な長期の経時変化の観測に適合しない。FBG (Fiber Bragg Grating) 光ファイバーを用いた地盤内の水温・水圧計測システムの開発に解決の可能性を見出 し,良好な成果が得られつつある。実用化に向けては、センサーの連装化やファイバー配線の損失等 の問題が見出され,現地試験を積み重ねている。今年度は、これに加えて、水みちの地下水制御に重 要な割れ目シールの方法の実用化を目指した試験を実施した。グラウト材には天然の材料で、長期安 定を図れるベントナイトスラリーを用いた。スラリーは塩水やエタノールを混ぜ合わせてつくり、粘 性の低下をはかった。その材料特性は、室内試験を実施して求めた。注入は、振動(動的) グラウチ ングを基本とし、岩盤亀裂模型で最適注入条件の実験をおこない、注入圧や注入周波数などに関する 基礎データを取得した。本年度は、東濃の瑞浪超深地層研究所の立坑の止水等具体的な目標設定の基 礎実験を実施した。

# (4) 深層水理の調査方法およびモデル化に関する研究/表層水理観測データを用いた日吉川流域水 循環のモデル化に関する研究;

水収支解析のキーポイントである,「物質の移流・分散に関する基礎的研究」と「蒸発散のメカニズ ムに関する実験と理論的考察,数値解析手法の研究」について報告してきた。また,地表水の地下浸 透の実態を考慮した地表水・地下水の連成を試み,野外計測データによるモデルの校正をおこなった。 本年度は,瑞浪超深地層研究所を含む,日吉川流域の表層水理観測データをもちいて,より適切な流 域水循環モデルの改良を試み,陸域水循環系評価の実用的手法の確立をはかっている。

# (5) 地下水の地球化学的特性調査に関する研究/CFC トレーサーを用いた地下水の滞留時間推定法の開発;

低透水性岩盤における間隙水中の安定同位体比を用いた、広域地下水流動の把握に関する研究をお こないデータの蓄積をはかっている。地下水流動が極めて遅い低透水性媒体/地層には、地下水流動 変遷の履歴情報が保存されていることがわかってきた。この手法を用いて、幌延深地層研究施設の堆 積岩(ボーリングコア)の安定同位体分析から、この地域の深部の地下水は、海水が化学反応やろ過 作用を経て変化した化石水であること、天水浸入/涵養の深度がそこまでおよんでいないこと、山側 から海側への極めて低速な地下水流れが存在することなどが考えられた。また、地下水形成のもとで ある降雨の地下浸透に関し安定同位体の組成の鍵をにぎる、降雨流出過程に焦点をあてた調査を実施 した。とくに昨今、木の幹を伝わって地表へ到達する雨水(樹幹流)が安定同位体組成に与える影響 が大きいことが指摘されており、その実態を把握するために、貯留効果の少ない山地源流域の降雨流 出機構と降水中の安定同位対比の時間変動特性を利用する研究をおこない、その影響が大きいことを 見出した。これらの一連の研究を通して、地下水流動特性と水理試験結果の整合性が見出され、従来 から判断するに足るデータが少なく、「水理/物理的データに基づく地下水理解析と地化学分析結果と の不一致」という命題に解決の糸口が得られてきた。また熊本県の宇土半島地域で地化学的手法と水 理的解析手法を含む、システマテックな研究に着手し、現地での地下水流動と物質移行の実態のケー ススタデーを行っている。本年度は、これらの一連の研究にも必要な、滞留時間の短い、浅層地下水の 滞留時間を計測できるとして注目されている, CFC s (Chlorofluorocarbons, フロン類) トレーサを 用いた地下水の滞留時間推定法の開発をおこなった。

## 3.2.2.2 調査・解析技術の高度化・体系化のまとめ

以上の各委員の研究開発内容は、かなり実用化を意図した方向ヘシフトされた。「簡易地下水情報化 システム(SWING-SHAFT)の開発」、「ANN-GAによる広域・簡易型の水理解析ツールの現地適用性試験」、 「ベントナイトスラリーと振動グラウチングを基本として、現地条件を組み込んだ止水に関する基礎 実験」、「東濃地域・日吉川流域のデータを用いた流域水循環モデルの改良」、「フロン類トレーサを用 いた地下水滞留時間推定法の開発」などが、それである。しかし地層処分のどの段階で使うか/使え るかの目標、達成度はそれぞれ異なっており、まだ全体を統合した実用的な体系ができあがるには時 間を要するが、それぞれの個別研究成果の内容検討と、実用化の見通し、および東濃地科学センター が、計画・実施中のプロジェクトへの取り込み方などについて、これからも議論を展開していきたい。

さらに,研究開発の目標は,現時点での実用化と当面の建設・操業段階の安全に的を絞ったため, 地層処分の本命である,閉鎖後を念頭においた,地層処分特有の技術の開発には手が回らないきらい がある。閉鎖後にも目を向けることも今後の課題としたい。

## 3.2.3 参考文献

1) 核燃料サイクル開発機構:「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地 層処分研究開発第2次取りまとめ-」,総論レポート, JNC TN1400 99-020, 1999.

(地圈空間研究所 小島圭二)

表1.SI 基本単位				
甘木昌	SI 基本单	SI 基本単位		
至中里	名称	記号		
長 さ	『メートン	m		
質 量	<b>』</b> キログラム	kg		
時 間	引 秒	S		
電況	記アンペア	A		
熱力学温度	夏ケル ビン	K		
物質量	して ル	mol		
光质	夏カ ン デ ラ	cd		
	•			

表2.基本単位を用いて表されるSI組立
---------------------

		2021/3	
细六号	SI 基本単位		
組立車	名称	記号	
面 積	平方メートル	m²	
体積	立法メートル	m <sup>3</sup>	
速さ,速度	メートル毎秒	m/s	
加速度	メートル毎秒毎秒	$m/s^2$	
波 数	毎 メ ー ト ル	m-1	
密度(質量密度)	キログラム毎立法メートル	ka/m <sup>3</sup>	
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /ka	
電流密度	アンペア毎平方メートル	$A/m^2$	
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m	
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>	
輝度	カンデラ毎平方メートル	$cd/m^2$	
屈折率	(数の) 1	1	

表5.SI接頭語						
乗数	接頭語	記号 乗数		接頭語	記号	
10 <sup>24</sup>	<b>з</b> 9	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d	
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	С	
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m	
10 <sup>15</sup>	ペタ	Р	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ	
10 <sup>12</sup>	テラ	Т	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n	
10 <sup>9</sup>	ギ ガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	р	
10 <sup>6</sup>	メガ	М	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f	
10 <sup>3</sup>	キ ロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	а	
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z	
10 <sup>1</sup>	デ カ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	у	

#### 表3.固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

		31 組立单位			
組立量	名称	記문	他のSI単位による	SI基本単位による	
	L10 <sup>-</sup>		表し方	表し方	
平 面 角	ラジアン <sup>(a)</sup>	rad		m • m <sup>-1</sup> =1 <sup>(b)</sup>	
立 体 角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>		m <sup>2</sup> • m <sup>-2</sup> =1 <sup>(b)</sup>	
周 波 数	ヘルツ	Hz		s <sup>-1</sup>	
カ	ニュートン	Ν		m ∙kg •s⁻²	
压力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>−1</sup> • kg • s <sup>−2</sup>	
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N•m	m <sup>2</sup> ⋅ kg ⋅ s <sup>-2</sup>	
工率,放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> ⋅ kg ⋅ s <sup>-3</sup>	
電荷,電気量	クーロン	С		s·A	
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> ⋅ kg ⋅ s <sup>-3</sup> ⋅ A <sup>-1</sup>	
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^2 \cdot kg^1 \cdot s^4 \cdot A^2$	
電 気 抵 抗	オーム		V/A	m <sup>2</sup> ⋅ kg ⋅ s <sup>-3</sup> ⋅ A <sup>-2</sup>	
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^2 \cdot kg^1 \cdot s^3 \cdot A^2$	
磁束	ウエーバ	Wb	٧·s	m <sup>2</sup> • kg • s <sup>-2</sup> • A <sup>-1</sup>	
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m <sup>2</sup>	$kg \cdot s^2 \cdot A^1$	
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	m <sup>2</sup> • kg • s <sup>-2</sup> • A <sup>-2</sup>	
セ ル シ ウ ス 温 度	セルシウス度 <sup>(d)</sup>			K	
光東	ルーメン	Im	cd • sr <sup>(c)</sup>	$m^2 \cdot m^2 \cdot cd=cd$	
照度	ルクス	١x	lm/m <sup>2</sup>	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$	
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq		<b>s</b> <sup>-1</sup>	
吸収線量、質量エネル	グレイ	Gv	J/ka	m <sup>2</sup> • s <sup>-2</sup>	
モー分与、カーマ		- )	2. 1.9		
禄重当重,周辺緑重当 旱 七向州组旱业旱 府		<u>e</u> .,	1/kg	22	
里,刀凹注絲重日重,他 人始星出星 知然始星出	- ~ <i>w</i> r	3V	J/Kg	m⁻•s⁻	
八称里当里, 組織跡里当	1			l	

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。
(b)実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号"1"は明示されない。
(c)測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
(d)この単位は、例としてミリセルシウス度mのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4.単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

组立星	SI 組立単位			
組立里	名称    記号	SI 基本単位による表し方		
粘	夏パ ス カ ル 秒 Pa・s	m <sup>-1</sup> ⋅ kg ⋅ s <sup>-1</sup>		
カのモーメント	トニュートンメートル N・m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$		
表 面 張 ク	リニュートン毎メートル N/m	kg ∙ s <sup>-2</sup>		
角速り	ぼラ ジ ア ン 毎 秒 rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$		
角加速度	夏ラジアン毎平方秒 rad/s <sup>2</sup>	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$		
熱流密度,放射照風	夏ワット毎平方メートル W/m <sup>2</sup>	kg ∙s <sup>-3</sup>		
熱容量,エントロピー	-ジュール毎ケルビン J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$		
質量熱容量(比熱容量)	,ジュール毎キログラム	$(1)$ $x^{2}$ $z^{-2}$ $y^{-1}$		
質量エントロピー	- 毎ケルビン 5 <sup>7 (Kg * )</sup>	() m·s·k		
質量エネルギー		m <sup>2</sup> a <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>		
( 比 エ ネ ル ギ ー )		m·s·k		
<b>热                                    </b>	gフット毎メートル毎ケ w//m・k	1 - 1 = 1 = 1 = 1 = 1		
	「ルビン 「"(	) m·kg·s·k		
休積エネルギー	ジュール毎立方メート/3	$m^{-1} \cdot ka \cdot s^{-2}$		
	ル 3711	iii ky s		
電界の強さ	ゴボルト毎メートル V/m	m • kg • s⁻³ • A⁻¹		
体 積 雷 花	カーロン毎立方メート <sub>C/m<sup>3</sup></sub>	m <sup>-3</sup> • <b>s</b> • ∆		
	3 JL 07 m			
雷気空	<u>クーロン毎平方メート</u> C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> • s • A		
	<sup>∞</sup> <i>μ</i>			
誘電	쬒ファラド毎メートル F/m	m <sup>-3</sup> • kg <sup>-1</sup> • s⁴ • A²		
透磁型	科マンリー毎メートル H/m	m • kg • s <sup>-2</sup> • A <sup>-2</sup>		
モルエネルギー	ージュール毎モル J/mol	m <sup>2</sup> • kg • s <sup>-2</sup> • mol <sup>-1</sup>		
゠゠ゕ゠ゔゕゟヮヹ゠゠	」ジュール毎モル毎ケル」/(mol・	K) m <sup>2</sup> · ka · s <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> · mol <sup>-1</sup>		
モール 熟 谷 重				
照射線量(X線及び 線)	)フーロン毎キログラム C/kg	kg⁻ˈ・s̥・A		
	約クレイ毎秒 Gy/s	m <sup>4</sup> • s <sup>-3</sup>		
放 射 强 虚	夏リット母人テフシアン W/sr	$m^{+} \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^{2} \cdot kg \cdot s^{-3}$		
放射 輝 四	gワット毎半方メートル gーフーニジョン W/(m <sup>2</sup> ・s	r) $m^2 \cdot m^{-2} \cdot ka \cdot s^{-3} = ka \cdot s^{-3}$		
放 射 輝 月		r) $m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$		

表6.国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	۰	1°=( /180) rad
分		1 =(1/60) ° =( /10800) rad
秒	**	1 "=(1/60) =( /648000) rad
リットル	I, L	$1I=1 \text{ dm}^3=10^{-3}\text{m}^3$
トン	t	1t=10 <sup>3</sup> kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	В	1B=(1/2)In10(Np)

表7.国際単位系と併用されこれに属さない単位で SI単位で表される数値が実験的に得られるもの			
名称	記号	SI 単位であらわされる数値	
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49) × 10 <sup>-19</sup> J	
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10) × 10 <sup>-27</sup> kg	
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30) × 10 <sup>11</sup> m	

表8.国際単位系に属さないが国際単位系と

	所用されるての他の単位				
	名称		記号	SI 単位であらわされる数値	
海		里		1 海里=1852m	
)	ッ	۲		1 ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s	
ア	-	ル	а	1 a=1 dam <sup>2</sup> =10 <sup>2</sup> m <sup>2</sup>	
$\land$	クタ	- JV	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>	
バ	-	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 <sup>5</sup> Pa	
オン	グスト	ローム		1 =0.1nm=10 <sup>-10</sup> m	
バ	-	ン	b	1 b=100 fm <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>	

素 9 因右の夕称を今む℃℃9組立単位

衣 5. 固有の石材を含め65組立手位				
名称	記号	SI 単位であらわされる数値		
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J		
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N		
ポ ア ズ	Р	1 P=1 dyn⋅s/cm²=0 1Pa⋅s		
ストークス	St	1 St =1 cm <sup>2</sup> /s=10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s		
ガ ウ ス	G	1 G ≙10 <sup>-4</sup> T		
エルステッド	0e	1 Oe ≙(1000/4 )A/m		
マクスウェル	Mx	1 Mx ≙ 0 <sup>-8</sup> Wb		
スチルブ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd/cm}^2 = 10^4 \text{ cd/m}^2$		
ホト	ph	1 ph=10 <sup>4</sup> 1x		
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm/s <sup>2</sup> =10 <sup>-2</sup> m/s <sup>2</sup>		

表10.国際単位に属さないその他の単位の例				
名称	記号	SI 単位であらわされる数値		
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq		
レントゲン	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$		
ラ ド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy		
レ ム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv		
X 線 単 位		1X unit=1.002×10 <sup>-4</sup> nm		
ガンマ		1 =1 nT=10 <sup>-9</sup> T		
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 <sup>-26</sup> ₩ • m <sup>-2</sup> · Hz <sup>-1</sup>		
フェルミ		1 fermi=1 fm=10 <sup>-15</sup> m		
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = $2 \times 10^{-4}$ kg		
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa		
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa		
カロリー	cal			
ミクロン	μ	1 u = 1 un = 10 <sup>-6</sup> m		