JAEA-Research 2011-033



# 中間領域を考慮した地質環境調査・ 評価技術の高度化・体系化に関する研究 -平成 22 年度-(委託研究)

Interdisciplinary Approach to Improve and Systematize the Investigation and Evaluation Techniques on Geological Environment in Relation to Radioactive Waste Repository - Japanese Fiscal Year, 2010 -(Contract Research)

> 小島 圭二 大西 有三 渡辺 邦夫 西垣 誠 登坂 博行 嶋田 純 青木 謙治 杤山 修 吉田 英一 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 東濃地科学研究ユニット

Tono Geoscientific Research Unit Geological Isolation Research and Development Directorate

February 2012

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, 2012

中間領域を考慮した地質環境調査・評価技術の高度化・体系化に関する研究

# -平成22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\*\*

# (2011年9月21日受理)

地層処分の安全性は、①処分に適した安定な地質環境を選定し、②その環境に頑健な人工バリ アを適切に設計・施工し、③構築された処分システムの安全性を科学的な予測によって確認する ことにより保証される。このようなアプローチの信頼性を現実的な技術基盤として高めていくた めには、幅広い学術分野における数多くの課題に対する研究・開発・実証を要する。このような 取り組みを効果的に進めるため、日本原子力研究開発機構ではこれまで、 地層処分の安全性確保 の流れに沿って、「地質環境調査評価技術」、「処分場の工学技術」、「性能評価技術」の3つの技 術分野において,ジェネリックな視点から研究・開発・実証を進めその成果を取りまとめてきた。

地層処分事業の開始段階を迎えた現在、今後の処分事業、安全規制の双方に資する技術基盤を 整備することが求められており、従来のジェネリックな視点からの総合的成果を具体的(スペシ フィック)な技術として体系化していくことが重要である。

このような観点から、本研究においては、分野・課題間の連携や複数の課題や領域にまたがる 技術や評価手法を組み合わせ,地質環境調査評価技術を概念レベルから実施レベルに高度化して いくために,

(1) 実際の地質環境下における連成現象を考慮したニアフィールド(NF) コンセプトの再構築

(2) 各分野・要素技術間の連携を考慮した体系的な地質環境調査技術の開発 に関する研究を実施した。

(1)に関しては、結晶質岩系の現実的な環境でのNFコンセプトの検討を実施するとともに、 委員会での総合討論を実施し、委員各位の NF 研究の中間領域に関する意見を NF コンセプトの 再構築に反映させた。

(2)に関しては、NF と各研究分野間の中間領域を考慮した研究開発を行った。具体的な実施 内容は.

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

<sup>\*1</sup> 地圏空間研究所 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 教授, \*6 熊本大学 教授, \*7地球システム総合研究所 所長, \*8 原子力安全研究協会 処分システム安全研究所 所長, \*9 名古屋大学 教授

<sup>※</sup> 技術開発協力員

- a.「掘削損傷領域へのグラウチングとその結果の評価および長期の止水性の評価手法に関す る研究」の一環としての「掘削損傷領域へのベントナイトと極超微粒子セメントの注入 に関する研究」
- b.「ニアフィールドにおける割れ目形態を考慮した物質移動解析に関する研究」の一環とし ての「軟岩の不飽和特性に関する研究」
- c.「地下坑道周辺岩盤のグラウチング効果の評価・解析に関する研究」の一環としての「粘 性の経時変化や目詰まりを考慮したグラウト注入過程の数値シミュレーション」
- d.「隆起浸食による地形変化,境界変動に(海水準変動)の表現を容易にする安全評価のためのより高度なモデル化」の一環としての「地層処分における不均質媒体中の塩淡密度 流・物質移動の追跡手法に関する検討」
- e.「地質・地下水環境特性を考慮した地下水の滞留時間測定法の開発」の一環としての「<sup>85</sup>Kr トレーサーを用いた地下水の滞留時間測定法の開発」

である。

また、委員会では、これらの研究の「NF コンセプトの再構築」へ向けた連携についても検討 を行った。

# Interdisciplinary Approach to Improve and Systematize the Investigation and Evaluation Techniques on Geological Environment in Relation to Radioactive Waste Repository - Japanese Fiscal Year, 2010 -

(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 Akiyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received September 21, 2011)

The safety of geological disposal is ensured by defining a geological environment which is sufficiently stable to host a repository, designing and constructing robust engineered barrier system and ensuring the long-term safety of disposal system based on a scientific forecast. To improve the reliability of such an approach as a realistic technological base, the research, development, and demonstration in fields and research tasks are required. To advance such an approach effectively, Japan Atomic Energy Agency advanced the research, development, and demonstration on three technical fields of "(a)Geological environment", "(b)Design and engineering", and "(c)Safety evaluation for radioactive waste repository" in a generic point of view.

The next advancements for the research of radioactive waste repository was started to improve and systematize the investigation and evaluation techniques on geological environment in consideration of intra-field of science and technology from a generic point of view to a realistic one. Intra-field means the various fields and research tasks among each study area of (a) geological environment, (b) design and engineering, (c) safety evaluation for radioactive waste repository, here.

The following items were studied and discussed this year.

- (1) To Reconstruct Near Field (NF) Concept in consideration of coupled phenomena on geological environment.
- (2) To develop systematic investigation techniques on the geological environment in consideration of intra-field among each study area above mentioned (a), (b) and (c).

Regarding (1), examination of NF concept focused on the realistic crystalline rock was carried out. Also through the overall discussion in the committee, comments from the all commissioners in relation to the intra-field of their study area were made to reflect on reconstruction of NF concept.

Keywords: Geological Environment, Geological Disposal, Safety Assessment, Near Field Concept, Intra-Field, MIU (Mizunami Underground Research Laboratory)

This work was performed by the Mining and Materials Processing Institute of Japan under contract with Japan Atomic Energy Agency. \*1 Geospace Labo, \*2 Kyoto University, \*3 Saitama University, \*4 Okayama University, \*5 The University of Tokyo,

<sup>\*6</sup> Kumamoto University, \*7 Geosystem Research Institute, \*8 Radioactive Waste Disposal Safety Research Center, \*9 Nagoya University, %Collaborating Engineer

Regarding (2), the research and development in consideration of NF and intra-field among each study area were conducted. Concrete contents of execution are summarized as follows.

- a. "Research on the injection with bentonite clay and super-fine cement into the EDZ (Excavation Disturbed Zone)" as a part of "Research on grouting into the EDZ and evaluation of the result, also evaluation techniques of long term performance in impervious zone"
- b. "Research on the characteristics of unsaturated soft rock" as a part of "Mass transfer analysis focused on fracture form/joint system in NF".
- c. "Numerical simulation of grouting process in consideration of time dependent change of viscosity and clogging" as a part of "Research on the evaluation and analysis of grouting effect on the rock mass, around the underground drift".
- d. "Examination of the tracing techniques for density current between salt and fresh water and mass transfer through a inhomogeneous medium regarding geological disposal" as a part of "Advanced modeling showing that the expression of topography changes due to erosion and crustal uplift, the changes of boundary condition due to sea level changes, for the safety evaluation".
- e. "Development of measuring method of underground water detention time using 85Kr tracer" as a part of "Development of measuring method of underground water detention time in consideration of geological environment and characteristics of underground water"

The link between the results of (2) and the reconstruction of NFC of (1) above mentioned was also discussed in the committee.

はじめに 1 参考文献 1 1 ×素厚の地質環境下における連成現象を考慮したニアフィールド(NF)コンセプトの再構築・2 1.1 結晶質岩系岩盤の現実的なニアフィールド(NF)環境/コンセプトの検討・2 1.1.2 ニアフィールド(NF)における現実的環境に関する検討内容・2 1.1.3 参考文献 8 1.1.4 今後の検討事項 8 1.1.5 参考文献 1 1 2.4 分名の検討事項 1 1 2.1 堀向影響領域へのグラウトとその結果の評価および長期の止水性の評価手法に関する 研究 1 1 2.1 堀向影響領域へのグラウトとその結果の評価および長期の止水性の評価手法に関する 研究 1 1 2.1.1 はじめに 1 1 2.1.2 地層処分のための地下坑道 1 1 2.1.3 グラウトの目的 1 1 2.1.4 グラウト支術の高度化 2 2.1.6 考察 2 2.1.6 考察 2 2.1.6 考察 2 2.2 採品地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究-軟岩の不飽和特性について-2 2.2 解決すべき間題点 2 2.2.1 過去10年間および平成21年度研究との関係 2 2.2.3 用いた不飽和特性式 2 2.3 用いた不飽和特性式 2 2.4 実験およびパラメーターの逆推定法の概要 2 2.2.5 研究結果 3 2.2.6 端準時を用いた van Genuchten 式の適用性の再確認 3 2.2.6 端準時を用いた van Genuchten 式の適用性の再確認 3 2.2.7 平成 22年度研究の結論とニアフィールドコンセプト 4 2.2.8 参考文献 4 2.3 地下坑道周辺岩盤におけるグラウト対果の評価・解析に関する研究 4 4 2.3 体析が諸果 3 2.3.5 今後の課題 7 2.3.7 考察 7 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1					目次
参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	は	じ	めし	z ۰۰۰	
<ol> <li>実際の地質環境下における連成現象を考慮したニアフィールド(NF)コンセプトの両構築:2</li> <li>1.1 結晶質岩系岩盤の現実的なニアフィールド(NF)環境/コンセプトの検討</li></ol>	参	考	文南	献・・・	
<ol> <li>実際の地質環境下における連成現象を考慮したニアフィールド(NF)コンセプトの商構築・2</li> <li>1.1 結晶質岩系岩盤の現実的なニアフィールド(NF)環境/コンセプトの検討・</li></ol>					
<ul> <li>1.1 結晶質岩素岩盤の現実的なニアフィールド(NF)環境/コンセブトの検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</li></ul>	1.	-	実際	祭の国	地質環境下における連成現象を考慮したニアフィールド(NF)コンセプトの再構築・2
<ul> <li>1.1.1 はじめに (背景)</li> <li>2</li> <li>1.2 = アフィールド (NF)における現実的環境に関する検討内容・</li></ul>		1. 1	1	結晶	質岩系岩盤の現実的なニアフィールド(NF)環境/コンセプトの検討2
<ul> <li>1.1.2 ニアフィールド(NF)における現実的環境に関する検討内容・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</li></ul>			1. ]	1.1	はじめに(背景)
1.1.3       参考文献       8         1.1.4       今後の検討事項       8         1.1.5       参考文献       10         2.       各分野・要素技術間の連携を考慮した体系的な地質環境調査技術の開発       11         2.1       掘削影響領域へのグラウトとその結果の評価および長期の止水性の評価手法に関する 研究       11         2.1       はじめに       11         2.1.1       はじめに       11         2.1.2       地層処分のための地下坑道       11         2.1.3       グラウトの目的       11         2.1.4       グラウトの目的       11         2.1.5       今後の課題       22         2.1.6       考察       24         2.1.7       参考文献       25         2.2       解決市べき問題点       27         2.2.1       過去10年間および平成21年度研究との関係       27         2.2.2       解決すべき問題点       27         2.2.3       用いた不飽和特性式       28         2.2.4       実験およびパラメーターの逆推定法の概要       29         2.5       研究結果       30         2.2.6       標準や会研たなの信軸とニアフィールドコンセプト       42         2.3       地下防道周辺岩盤におけるグラウト効果の評価・解析に関する研究一粘性の経時変化         や目詰まりを考慮したグラウト注入過程の数値シミュレーションー       43         2.3       地下防道周辺岩盤におけるグラウト       39         2.4       繁新方法       44			1.1	1.2	ニアフィールド(NF)における現実的環境に関する検討内容3
1.1.4       今後の検討事項       8         1.1.5       参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・			1.1	1.3	参考文献
1.1.5       参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・			1. 1	1.4	今後の検討事項・・・・・.8
<ol> <li>各分野・要素技術間の連携を考慮した体系的な地質環境調査技術の開発 11</li> <li>1 掘削影響領域へのグラウトとその結果の評価および長期の止水性の評価手法に関する 研究 11</li> <li>1.1 はじめに 11</li> <li>1.2 地層処分のための地下坑道 11</li> <li>1.2 地層処分のための地下坑道 11</li> <li>1.3 グラウトの目的 11</li> <li>1.4 グラウト技術の高度化 15</li> <li>2.5 今後の課題 22</li> <li>2.6 考察 24</li> <li>2.7 参考文献 25</li> <li>2 深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究-軟岩の不飽和特性について 27</li> <li>2.1 個量および平成21年度研究との関係 27</li> <li>2.2 解決すべき問題点 27</li> <li>2.3 用いた不飽和特性式 28</li> <li>2.4 実験およびパラメーターの逆推定法の概要 29</li> <li>2.5 研究結果 20</li> <li>2.6 標準砂を用いた van Genuchten 式の適用性の再確認 37</li> <li>2.7 平成 22年度研究の結論とニアフィールドコンセプト 42</li> <li>2.8 参考文献 42</li> <li>2.3 地下坑道周辺岩盤におけるグラウト効果の評価・解析に関する研究-粘性の経時変化 や目詰まりを考慮したグラウト効果の評価・解析に関する研究-粘性の経時変化 や目詰まりを考慮したグラウト効果の評価・解析に関する研究-粘性の経時変化 43</li> <li>3.1 はじめに 43</li> <li>3.2 解析方法 44</li> <li>3.3 解析モデル 49</li> <li>3.4 解析結果 53</li> <li>2.5 令後の課題 74</li> <li>2.6 参考文献 74</li> </ol>			1.1	1.5	参考文献 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
<ul> <li>2.1 掘削影響領域へのグラウトとその結果の評価および長期の止水性の評価手法に関する 研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</li></ul>	2.	3	各分	分野・	・要素技術間の連携を考慮した体系的な地質環境調査技術の開発 ・・・・・・11
研究       11         2.1.1       はじめに       11         2.1.2       地層処分のための地下坑道       11         2.1.3       グラウトの目的       11         2.1.4       グラウト及術の高度化       15         2.1.5       今後の課題       22         2.1.6       考察       22         2.1.7       参考文献       25         2.2       深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究-軟岩の不飽和特性についてー・27       2.1         過去10年間および平成21年度研究との関係       27         2.2.1       過去10年間および平成21年度研究との関係       27         2.2.2       解決すべき問題点       27         2.2.3       用いた不飽和特性式       28         2.4       実験およびパラメーターの逆推定法の概要       29         2.2.5       研究結果       30         2.2.6       標準的を用いた van Genuchten 式の適用性の再確認       37         2.2.7       平成22年度研究の結論とニアフィールドコンセプト       42         2.3       地下坑道周辺岩盤におけるグラウト効果の評価・解析に関する研究一粘性の経時変化       や目詰まりを考慮したグラウト注入過程の数値シミュレーションー         2.3.1       はじめに       43         2.3.2       解析方法       44         2.3.3       解析示       44         2.3.4       解析示       43         2.3.5       今後の課題       44         2.3.5       今後の課題       44		2. 3	1	掘削	影響領域へのグラウトとその結果の評価および長期の止水性の評価手法に関する
2.1.1 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・				研究	
2.1.2       地層処分のための地下坑道       11         2.1.3       グラウトの目的       11         2.1.4       グラウト支術の高度化       15         2.1.5       今後の課題       22         2.1.6       考察       24         2.1.7       参考文献       25         2.2       深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究-軟岩の不飽和特性についてーン?       27         2.1.7       参考文献       27         2.2.1       過去10年間および平成21年度研究との関係       27         2.2.2       解決すべき問題点       27         2.2.3       用いた不飽和特性式       28         2.4       実験およびパラメーターの逆推定法の概要       29         2.5       研究結果       30         2.2.6       標準砲を用いた van Genuchten 式の適用性の再確認       37         2.2.7       平成22年度研究の結論とニアフィールドコンセプト       42         2.3       地下坑道周辺岩盤におけるグラウト効果の評価・解析に関する研究-粘性の経時変化       42         2.3       地下坑道周辺岩盤におけるグラウト対急程の数値シミュレーションー       43         2.3.1       はじめに       43         2.3.2       解析方法       44         2.3       解析方法       44         2.3.4       解析結果       53         2.3.5       今後の課題       74         2.3.6       参考文献       74         2.3.7       考察			2.1	1.1	はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・11
<ul> <li>2.1.3 グラウトの目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</li></ul>			2.1	1.2	地層処分のための地下坑道・・・・・・11
2.1.4       グラウト技術の高度化       15         2.1.5       今後の課題       22         2.1.6       考察       24         2.1.7       参考文献       25         2.2       深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究-軟岩の不飽和特性について       27         2.2.1       過去10年間および平成21年度研究との関係       27         2.2.2       解決すべき問題点       27         2.2.3       用いた不飽和特性式       28         2.2.4       実験およびパラメーターの逆推定法の概要       29         2.2.5       研究結果       29         2.2.6       標準砂を用いた van Genuchten 式の適用性の再確認       37         2.2.7       平成22年度研究の結論とニアフィールドコンセプト       42         2.3       地下坑道周辺岩盤におけるグラウト効果の評価・解析に関する研究粘性の経時変化       42         2.3       北下坑道周辺岩盤におけるグラウト効果の評価・解析に関する研究粘性の経時変化       43         2.3.1       はじめに       43         2.3.2       解析方法       44         2.3.3       解析子デル       49         2.3.4       解析病法果       53         2.3.5       今後の課題       74         2.3.6       参考文献       74			2. 1	1.3	グラウトの目的・・・・・・11
2.1.5 今後の課題       22         2.1.6 考察       24         2.1.7 参考文献       24         2.1.7 参考文献       25         2.2 深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究-軟岩の不飽和特性について27       25         2.2 深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究-軟岩の不飽和特性について27       22         2.1 過去10年間および平成21年度研究との関係       27         2.2 解決すべき問題点       27         2.2 解決すべき問題点       27         2.2 解決すべき問題点       27         2.2.3 用いた不飽和特性式       28         2.4 実験およびパラメーターの逆推定法の概要       29         2.5 研究結果       30         2.6 標準砂を用いた van Genuchten 式の適用性の再確認       37         2.7 平成22年度研究の結論とニアフィールドコンセプト       42         2.8 参考文献       42         2.3 地下坑道周辺岩盤におけるグラウト効果の評価・解析に関する研究-粘性の経時変化       ※目詰まりを考慮したグラウト注入過程の数値シミュレーションー         ※目詰まりを考慮したグラウト注入過程の数値シミュレーションー       43         2.3.1 はじめに       44         2.3.3 解析テデル       49         2.3.4 解析結果       53         2.3.5 今後の課題       74         2.3.6 参考文献       74			2. 1	1.4	グラウト技術の高度化・・・・・・15
2.1.6 考察			2. 1	1.5	今後の課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
2.1.7 参考文献・       25         2.2 深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究-軟岩の不飽和特性について・27       2.2.1 過去10年間および平成21年度研究との関係・       27         2.2.2 解決すべき問題点       27         2.2.3 用いた不飽和特性式・       28         2.2.4 実験およびパラメーターの逆推定法の概要       29         2.2.5 研究結果       30         2.2.6 標準砂を用いた van Genuchten 式の適用性の再確認       37         2.2.7 平成22年度研究の結論とニアフィールドコンセプト       42         2.8 参考文献・       42         2.3 地下坑道周辺岩盤におけるグラウト効果の評価・解析に関する研究-粘性の経時変化       ※目詰まりを考慮したグラウト注入過程の数値シミュレーションー         43       2.3.1 はじめに       43         2.3 解析方法・       44         2.3 解析方法・       44         2.3.1 はじめに       44         2.3.3 解析方法・       44         2.3.4 解析結果       53         2.3.5 今後の課題・       74         2.3.6 参考文献・       74			2. 1	1.6	考察
2.2 深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究-軟岩の不飽和特性について-・27         2.2.1 過去10年間および平成21年度研究との関係         2.2.2 解決すべき問題点         2.2.3 用いた不飽和特性式         2.2.4 実験およびパラメーターの逆推定法の概要         2.2.5 研究結果         30         2.2.6 標準砂を用いた van Genuchten 式の適用性の再確認         37         2.2.7 平成22年度研究の結論とニアフィールドコンセプト         42         2.8 参考文献         42         2.3 地下坑道周辺岩盤におけるグラウト効果の評価・解析に関する研究-粘性の経時変化         や目詰まりを考慮したグラウト注入過程の数値シミュレーションー         43         2.3.1 はじめに         43         2.3.2 解析方法         44         2.3.3 解析モデル         45         46         47         48         49         2.3.4 解析結果         53         2.3.5 今後の課題         74         2.3.6 参考文献			2. 1	1.7	参考文献 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
2.2.1 過去10年間および平成21年度研究との関係       27         2.2.2 解決すべき問題点       27         2.2.3 用いた不飽和特性式       28         2.2.4 実験およびパラメーターの逆推定法の概要       29         2.2.5 研究結果       30         2.2.6 標準砂を用いた van Genuchten 式の適用性の再確認       37         2.2.7 平成22年度研究の結論とニアフィールドコンセプト       42         2.8 参考文献       42         2.3 地下坑道周辺岩盤におけるグラウト効果の評価・解析に関する研究-粘性の経時変化       42         2.3 北下坑道周辺岩盤におけるグラウト効果の評価・解析に関する研究-粘性の経時変化       43         2.3.1 はじめに       43         2.3.2 解析方法       44         2.3.3 解析モデル       49         2.3.4 解析結果       53         2.3.5 今後の課題       74         2.3.7 考察       74		2.2	2	深部	地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究-軟岩の不飽和特性について-・27
2.2.2 解決すべき問題点			2.2	2.1	過去 10 年間および平成 21 年度研究との関係
2.2.3       用いた不飽和特性式			2.2	2.2	解決すべき問題点・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
2.2.4       実験およびパラメーターの逆推定法の概要       29         2.2.5       研究結果       30         2.2.6       標準砂を用いた van Genuchten 式の適用性の再確認       37         2.2.7       平成 22 年度研究の結論とニアフィールドコンセプト       42         2.2.8       参考文献       42         2.3       地下坑道周辺岩盤におけるグラウト効果の評価・解析に関する研究-粘性の経時変化       42         や目詰まりを考慮したグラウト注入過程の数値シミュレーションー       43         2.3.1       はじめに       43         2.3.2       解析方法       44         2.3.3       解析モデル       49         2.3.4       解析結果       53         2.3.5       今後の課題・       74         2.3.7       考察・       74			2.2	2.3	用いた不飽和特性式・・・・・28
2.2.5 研究結果			2.2	2.4	実験およびパラメーターの逆推定法の概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・29
2.2.6 標準砂を用いた van Genuchten 式の適用性の再確認			2.2	2.5	研究結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
2.2.7 平成22年度研究の結論とニアフィールドコンセプト・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・			2.2	2.6	標準砂を用いた van Genuchten 式の適用性の再確認 ····································
2.2.8 参考文献・       42         2.3 地下坑道周辺岩盤におけるグラウト効果の評価・解析に関する研究-粘性の経時変化 や目詰まりを考慮したグラウト注入過程の数値シミュレーション-       43         2.3.1 はじめに・       43         2.3.2 解析方法・       44         2.3.3 解析モデル・       49         2.3.4 解析結果・       53         2.3.5 今後の課題・       74         2.3.7 考察・       74			2.2	2.7	平成 22 年度研究の結論とニアフィールドコンセプト・・・・・・・・・・・・・・・・・42
<ul> <li>2.3 地下坑道周辺岩盤におけるグラウト効果の評価・解析に関する研究-粘性の経時変化 や目詰まりを考慮したグラウト注入過程の数値シミュレーション</li></ul>			2.2	2.8	参考文献 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
や目詰まりを考慮したグラウト注入過程の数値シミュレーション		2. :	3	地下	坑道周辺岩盤におけるグラウト効果の評価・解析に関する研究-粘性の経時変化
2.3.1はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・				や目	詰まりを考慮したグラウト注入過程の数値シミュレーション-・・・・・・・43
2.3.2解析方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・			2.3	3.1	はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
2.3.3 解析モデル492.3.4 解析結果532.3.5 今後の課題742.3.6 参考文献742.3.7 考察74			2. 3	3.2	解析方法
2.3.4 解析結果・532.3.5 今後の課題・742.3.6 参考文献・742.3.7 考察・74			2.3	3.3	解析モデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
2.3.5今後の課題・742.3.6参考文献・742.3.7考察・74			2. 3	3.4	解析結果
2.3.6       参考文献·······74         2.3.7       考察······74			2.3	3.5	今後の課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
2.3.7 考察			2.3	3.6	参考文献
			2. 3	3.7	考察

V

2.4 地層	「処分における不均質媒体中の塩淡密度流・物質移行の追跡手法に関する研究····75
2.4.1	はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
2.4.2	塩淡密度流の支配方程式・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
2.4.3	数値拡散を抑えた手法の導入-CIP 法- ······ 76
2.4.4	移流分散実験
2.4.5	実験再現性の検討・・・・・・93
2.4.6	まとめ・・・・・・104
2.4.7	参考文献
2.5 地質	f・地下水環境特性を考慮した地下水の年代測定法の開発- <sup>85</sup> Kr トレーサーを用い
た地	1下水の滞留時間推定法の開発(その1)
2.5.1	はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・106
2.5.2	地下水年代トレーサーとしての <sup>85</sup> Kr ······106
2.5.3	地下水溶存ガス原位置回収システム・・・・・108
2.5.4	抽出ガスからの Kr 分離と <sup>85</sup> Kr 濃度の液体シンチレーション計測110
2.5.5	釜石鉱山坑内水を用いた <sup>85</sup> Kr法による地下水年代測定法の検証実験・・・・・114
2.5.6	LUMPED モデルによる滞留時間評価 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
2.5.7	まとめと今後の課題・・・・・・119
2.5.8	考察
2.5.9	参考文献
3. 中間領	域を考慮した地質環境調査・解析技術の高度化・体系化に関する研究の総括120
3. 中間領 3.1 はし	域を考慮した地質環境調査・解析技術の高度化・体系化に関する研究の総括120 こめに
3. 中間領 3.1 はし 3.2 中間 2.2.1	域を考慮した地質環境調査・解析技術の高度化・体系化に関する研究の総括120 こめに
3. 中間領 3.1 はじ 3.2 中間 3.2.1	域を考慮した地質環境調査・解析技術の高度化・体系化に関する研究の総括120 こめに
3. 中間領 3.1 はじ 3.2 中間 3.2.1	域を考慮した地質環境調査・解析技術の高度化・体系化に関する研究の総括120 しめに
3. 中間領 3.1 はじ 3.2 中間 3.2.1 3.2.2	域を考慮した地質環境調査・解析技術の高度化・体系化に関する研究の総括120 こめに
3. 中間領 3.1 はし 3.2 中間 3.2.1 3.2.2	域を考慮した地質環境調査・解析技術の高度化・体系化に関する研究の総括120 こめに
3. 中間領 3.1 はじ 3.2 中間 3.2.1 3.2.2 3.3 「算	域を考慮した地質環境調査・解析技術の高度化・体系化に関する研究の総括120 こめに
3. 中間領 3.1 はじ 3.2 中間 3.2.1 3.2.2 3.3 「身 二 3.3.1	域を考慮した地質環境調査・解析技術の高度化・体系化に関する研究の総括… 120 2.めに … 120 1.20 1.20 1.20 1.20 1.27フィールド (NF) コンセプトの再構築」,「中間領域・要素技術間の連携」 に関する検討の経過 … 120 「ニアフィールド (NF) コンセプトの再構築」,「中間領域・要素技術間の連携」 に関する研究方針 … 121 1.21 1.21 1.22 1.22 1.22 1.22 1.22 1.22 1.23 1.23 1.24 1.25 1
<ol> <li>中間領</li> <li>3.1 はじ</li> <li>3.2 中間</li> <li>3.2.1</li> <li>3.2.2</li> <li>3.3.2.2</li> <li>3.3.1</li> <li>3.4 「名</li> </ol>	域を考慮した地質環境調査・解析技術の高度化・体系化に関する研究の総括120 こめに
<ol> <li>中間領</li> <li>1 はじ</li> <li>2 中間</li> <li>3.2 中間</li> <li>3.2.1</li> <li>3.2.2</li> <li>3.3.5</li> <li>3.4 「名</li> <li>3.4.1</li> </ol>	域を考慮した地質環境調査・解析技術の高度化・体系化に関する研究の総括・・・・120 こめに ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
<ol> <li>中間領</li> <li>3.1 はじ</li> <li>3.2 中間</li> <li>3.2.1</li> <li>3.2.2</li> <li>3.3.2.2</li> <li>3.3.1</li> <li>3.4 「名</li> <li>3.4.1</li> <li>3.4.2</li> </ol>	域を考慮した地質環境調査・解析技術の高度化・体系化に関する研究の総括… 120 2.めに
<ol> <li>中間領</li> <li>1 はじ</li> <li>2 中間</li> <li>3.2 中間</li> <li>3.2.1</li> <li>3.2.2</li> <li>3.3.51</li> <li>3.4 「名</li> <li>3.4.1</li> <li>3.4.2</li> <li>3.4.3</li> </ol>	<ul> <li>域を考慮した地質環境調査・解析技術の高度化・体系化に関する研究の総括・・・・120</li> <li>3億域を考慮した地質環境調査・評価技術の高度化・体系化の研究方針・・・・120</li> <li>「ニアフィールド(NF) コンセプトの再構築」,「中間領域・要素技術間の連携」</li> <li>に関する検討の経過・・・・120</li> <li>「ニアフィールド(NF) コンセプトの再構築」,「中間領域・要素技術間の連携」</li> <li>に関する研究方針・・・・121</li> <li>200</li> <li>「ニアフィールド(NF) コンセプトの再構築」,「中間領域・要素技術間の連携」</li> <li>に関する研究方針・・・121</li> <li>211</li> <li>215</li> <li>212</li> <li>214</li> <li>215</li> <li>215</li> <li>215</li> <li>215</li> <li>216</li> <li>217</li> <li>216</li> <li>217</li> <li>218</li> <li>218</li> <li>218</li> <li>219</li> <li>219</li> <li>210</li> <li>210</li> <li>210</li> <li>211</li> <li>210</li> <li>211</li> <li>212</li> <li>212</li> <li>213</li> <li>214</li> <li>214</li> <li>214</li> <li>214</li> <li>214</li> <li>214</li> <li>215</li> <li>214</li> &lt;</ul>
<ol> <li>中間領</li> <li>3.1 はじ</li> <li>3.2 中間</li> <li>3.2.1</li> <li>3.2.2</li> <li>3.3.2.2</li> <li>3.3.1</li> <li>3.4 「名</li> <li>3.4.1</li> <li>3.4.2</li> <li>3.4.3</li> </ol>	域を考慮した地質環境調査・解析技術の高度化・体系化に関する研究の総括・・・ 120 つめに
<ol> <li>中間領</li> <li>1 はじ</li> <li>2 中間</li> <li>3.2 中間</li> <li>3.2.1</li> <li>3.2.2</li> <li>3.3.51</li> <li>3.4.1</li> <li>3.4.1</li> <li>3.4.3</li> <li>3.4.4</li> </ol>	域を考慮した地質環境調査・解析技術の高度化・体系化に関する研究の総括・・・.120 つめに ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
<ol> <li>中間領</li> <li>3.1 はじ</li> <li>3.2 中間</li> <li>3.2.1</li> <li>3.2.2</li> <li>3.3.2.2</li> <li>3.3.1</li> <li>3.4 「名</li> <li>3.4.1</li> <li>3.4.2</li> <li>3.4.3</li> <li>3.4.4</li> </ol>	<ul> <li>域を考慮した地質環境調査・解析技術の高度化・体系化に関する研究の総括・・・ 120</li> <li>3個域を考慮した地質環境調査・評価技術の高度化・体系化の研究方針</li></ul>
<ol> <li>中間領</li> <li>1 はじ</li> <li>2 中間</li> <li>3.2 中間</li> <li>3.2.1</li> <li>3.2.2</li> <li>3.3.1</li> <li>3.4 「名</li> <li>3.4.1</li> <li>3.4.2</li> <li>4.3</li> <li>4.3</li> <li>4.4</li> <li>4.5</li> </ol>	<ul> <li>域を考慮した地質環境調査・解析技術の高度化・体系化に関する研究の総括・・・120</li> <li>120</li> <li>127フィールド(NF)コンセプトの再構築」,「中間領域・要素技術間の連携」</li> <li>に関する検討の経過・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</li></ul>
<ol> <li>中間領</li> <li>1 はじ</li> <li>2 中間</li> <li>3.2 中間</li> <li>3.2.1</li> <li>3.2.2</li> <li>3.3.1</li> <li>3.4 「名</li> <li>3.4.1</li> <li>3.4.2</li> <li>3.4.3</li> <li>3.4.4</li> <li>3.4.5</li> <li>3.5 まと</li> </ol>	<ul> <li>域を考慮した地質環境調査・解析技術の高度化・体系化に関する研究の総括・・・120</li> <li>1個域を考慮した地質環境調査・評価技術の高度化・体系化の研究方針</li></ul>

# **Contents**

Introductic References	n ······ 1 ;-····· 1
1. Recon realis	struction of Near Field (NF) Concept in consideration of coupled phenomena under the tic geological environment2
1.1 E	xamination of NF environment /concept focused on the realistic crystalline rock
en	vironment ·····2
1.1.1	Introduction 2
1.1.2	Examination objects of NF3
1.1.3	References 8
1.1.4	Future tasks ······ 8
1.1.5	References······10
2. Devel consid 2.1 Re	lopment of systematic investigation techniques on the geological environment in deration of intra-field
of	long term performance in impervious zone
2.1.1	Introduction 11
2.1.2	Underground drift for the purpose of the geological disposal
2.1.3	purpose of grouting
2.1.4	Improvement of grouting techniques 15
2.1.5	Future tasks ······ 22
2.1.6	Conclusions 24
2.1.7	References······25
2.2 Re	search on systematic investigation and analytical techniques on geological environment
-C	haracteristic of unsaturated soft rock-
2.2.1	Research carried out last 10 years and FY 2009
2.2.2	Improvement points ····································
2.2.3	Equation from used for characteristics of unsaturated soft rock28
2.2.4	Experiments and parameter estimation in the inverse solution technique
2.2.5	Research results
2.2.6	Reaffirmation of applicability of van Genuchten model using saturated standard sand 37
2.2.7	Conclusion and other researches42
2.2.8	References······42
2.3 Re	search on the evaluation and analysis of grouting effect on the rock mass around the
un	derground drift –Numerical simulation of grout injection process in consideration of
tir	ne dependent change of viscosity and clogging
2.3.1	Introduction 43
2.3.2	Analytical models 44
2.3.3	Analytical models
2.3.4	Result of analysis 53
2.3.5	Future tasks in the injection interval

2.3.6	References
2.3.7	Conclusions
2.4 Ex	amination of the tracing techniques for density current between salt and fresh water
an	nd mass transfer through a inhomogeneous medium regarding the geological disposal… 75
2.4.1	Introduction 75
2.4.2	Governing equation for density currents of salt and fresh water
2.4.3	Adopting Constrained Interpolation Profile Scheme (CIP)76
2.4.4	Experiments for convection-diffusion (equation)
2.4.5	Examination of reproducibility of experiments
2.4.6	Conclusions
2.4.7	References 104
2.5 L	Development of groundwater dating method in consideration of geological and
11y 251	Introduction
2.3.1	$\frac{85}{100}$
2.5.2	In site sampling system for sampling dissolved gas in groundwater
2.3.3	Separation of discolved Vr in sempling gas and measurement of <sup>85</sup> Vr concentration by
2.3.4	liquid agintillation counter of Cos compling under the sampling under
255	Norification experiment of <sup>85</sup> Kr groundwater dating method using groundwater inflow in
2.3.3	the Komaichi Mine
256	Detection time evaluation by lumned modeling
2.3.0	Conclusions and future tecks
2.3.7	Conclusions and future tasks 119
2.3.0	Conclusions 119
2.3.9	References
3. Intero	disciplinary approach to improve and systematize the investigation and evaluation
techn	iques on geological environment
3.1 Int	roduction
3.2 Re	search policy 120
3.2.1	Consideration on "Reconstruction of Near Field (NF) Concept", "between interdisciplinary
	and intra-fields"
3.2.2	Research policy of "Reconstruction of near Field (NF) Concept" and "Interdisciplinary and
	intra-field studies" 121
3.3 Re	econstruction of NF Concept in consideration of coupled phenomena on the geological
en	vironment ······ 122
3.3.1	Examination of NF concept focused on the realistic crystalline rock 122
3.4 Dev	relopment of systematic investigation techniques on the geological environment in
cons	sideration of intra-field among each study area 123
3.4.1	Research on the injection with bentonite clay and super-fine cement into the EDZ 123
3.4.2	Research on the unsaturated character of soft rock
3.4.3	Research on Numerical simulation of grout injection process in consideration of time
~	dependent change of viscosity and clogging 124
3.4.4	Examination of the tracing techniques for density current between salt and fresh water and

	mass transfer through a inhomogeneous medium		
3.4	4.5 Development of measuring method of underground water detention time using		
	<sup>85</sup> Kr tr	acer	125
3.5	Conclusio	15	125
3.6	Reference	3	126

# 図目次

第1章	
図 1.1.1	ニアフィールド(NF)環境を構成する素材等の概念図・・・・・・・・・・・・・・・・・・
⊠ 1.1.2	地層処分場掘削に伴う地下環境の擾乱とその変化の状態を概念的に示した
	「平衡反応図」 ····································
第2章	
× 2. 1. 1	周波数と粘度の関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
図 2.1.2	約和領域への注入の概念・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
⊠ 2.1.3	グラウトにおけるピッチ・・・・・・19
⊠ 2.1.4	複数亀裂内へのグラウト・・・・・・20
図 2.1.5	注入装置の全体図・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
図 2.1.6	ベルヌーイの法則を適用し理論構築した場合のグラウト浸潤半径の経時変化・・・・21
図 2.1.7	平行平板注入試驗裝置図
図 2.2.1	Sandstone-1からの蒸発量変化の実測値と解析値の比較・・・・・・・・・・31
⊠ 2.2.2	Sandstone-2 からの蒸発量変化の実測値と解析値の比較・・・・・・・・・・・・・・・32
図 2.2.3	Sandstone-3 からの蒸発量変化の実測値と解析値の比較・・・・・・・・・・・・・・・32
⊠ 2.2.4	Pumice Tuff-1 からの蒸発量変化の実測値と解析値の比較・・・・・・・・・・33
図 2.2.5	Pumice Tuff-2 からの蒸発量変化の実測値と解析値の比較・・・・・・・・・・・・・・・・33
図 2.2.6	<b>Pumice Tuff-3</b> からの蒸発量変化の実測値と解析値の比較・・・・・・・・・・・・・・・・・34
図 2.2.7	Sandstone-3, Pumice Tuff-2の解析された飽和度と毛管圧関係・・・・・・35
図 2.2.8	Sandstone-3, Pumice Tuff-2の解析された飽和度と不飽和透水係数関係 ·········36
図 2.2.9	研究に用いた実験装置模式図
図 2.2.10	実験結果例(実験中の入気・排気の湿度・温度および計算された蒸発量変化)…38
図 2.2.11	可能蒸発量の推定の難しさ
図 2.2.12	可能蒸発量の推定法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
図 2.2.13	蒸発量変化の実測値と計算値との比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・40
図 2.2.14	毛管圧, 飽和度, 不飽和透水係数の関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・41
図 2.2.15	飽和度分布の実測値と計算値の関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・41
図 2.3.1	解析手順・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
図 2.3.2	分散長設定の例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
図 2.3.3	各配合比における設定関数(超微粒子グラウトの場合)49
図 2.3.4	粘性実験結果による透水係数低減率の設定・・・・・・・・・・・・・・・・50
図 2.3.5	解析モデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・51
図 2.3.6	破砕帯要素(シェル要素、ビーム要素)の組み込み・・・・・・52
図 2.3.7(1	1) グラウト注入圧力(入力値)・・・・・53
図 2.3.7(2	2) グラウト注入濃度(入力値)・・・・・53
図 2.3.8	直交差シェル要素におけるグラウト濃度と浸透距離・・・・・・・・・・54
図 2.3.9	斜交差シェル要素におけるグラウト濃度と浸透距離・・・・・・・・・・55
図 2.3.10	直交差ビーム要素におけるグラウト濃度と浸透距離・・・・・・・・・・・・56
図 2.3.11	直交差シェル要素におけるグラウト濃度の経時変化・・・・・・・・・・・・57
図 2.3.12	斜交差シェル要素におけるグラウト濃度の経時変化・・・・・・・・・・・・58

図 2.3.13 直	重交差ビーム要素におけるグラウト濃度の経時変化・・・・・・・・・・・・59
図 2.3.14(1)	岩盤部のみのグラウト濃度の経時変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・60
図 2.3.14(2)	岩盤部のみの注入時全水頭の経時変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・61
⊠ 2.3.14(3)	岩盤部のみのグラウト注入に伴う透水係数(X 軸)の経時変化・・・・・・62
図 2.3.14(4)	岩盤部のみのグラウト注入に伴う透水係数(Y 軸)の経時変化・・・・・・63
図 2.3.14(5)	岩盤部のみのグラウト注入に伴う透水係数(Z 軸)の経時変化・・・・・・・64
図 2.3.15(1)	直交差シェル要素におけるグラウト濃度の経時変化・・・・・・・・・・・・65
図 2.3.15(2)	直交差シェル要素におけるグラウト濃度の経時変化・・・・・・・・・・・・66
図 2.3.15(3)	直交差シェル要素におけるグラウト濃度の経時変化・・・・・・・・・・・・・67
図 2.3.16(1)	斜交差シェル要素におけるグラウト濃度の経時変化・・・・・・・・・・・68
図 2.3.16(2)	斜交差シェル要素におけるグラウト濃度の経時変化・・・・・・・・・・・・69
図 2.3.16(3)	斜交差シェル要素におけるグラウト濃度の経時変化・・・・・・・・・・・・・.70
図 2.3.17(1)	直交差ビーム要素におけるグラウト濃度の経時変化・・・・・・・・・・・・・・.71
図 2.3.17(2)	直交差ビーム要素におけるグラウト濃度の経時変化・・・・・・・・・・・・・・72
図 2.3.17(3)	直交差ビーム要素におけるグラウト濃度の経時変化・・・・・・・・・・・・・73
図 2.4.1 一	次風上法による数値拡散の例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
図 2.4.2 各	差分法による一次元移流方程式解の比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・.78
図 2.4.3 密	度流解析のフローチャート・・・・・.85
図 2.4.4 二	次元浸透実験装置······86
図 2.4.5 二	次元浸透実験装置模式図 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
⊠ 2.4.6 Ca	use B-7 実験結果(D=1mm 均質, 水頭差 2cm, 塩水注入)88
図 2.4.7 二	次元不均質場(二層)の設定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
⊠ 2.4.8 Ca	use D-2 の実験結果(2 層不均質場,水頭差 2cm,塩水注入,深度 10cm)・・・・・90
図 2.4.9 二	次元不均質場(多層)実験の設定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・.91
図 2.4.10 C	Case F-2 の実験結果・・・・・・92
図 2.4.11 業	数値再現実験の設定・・・・・・93
⊠ 2.4.12 C	Case B-7 計算結果(CIP法,分散効果なし) ·················94
⊠ 2.4.13 C	Case B-7 計算結果(CIP 法,分散効果あり) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・95
図 2.4.14 C	Case B-7 計算結果 (一次風上法)
⊠ 2.4.15 T	`=5[min]の結果比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
図 2.4.16 T	<b>`=20[min</b> ]の結果比較・・・・・・96
図 2.4.17 T	Y=5[min]の結果比較図・・・・・・97
⊠ 2.4.18 T	<b>`=20[min</b> ]の結果比較・・・・・・97
図 2.4.19 C	Case D-2 計算結果(CIP 法) · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
図 2.4.20 C	Case D-2 計算結果(一次風上法) · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
⊠ 2.4.21 T	`=5[min]の結果比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
図 2.4.22 T	`=30[min]の結果比較・・・・・・・100
図 2.4.23	<b>多</b> 層不均質場の解析領域・・・・・・101
図 2.4.24 C	Case F-2 計算結果(CIP 法)       102
図 2.4.25 C	Case F-2 計算結果(一次風上法) · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
⊠ 2.4.26 T	Y=10[min]の結果比較・・・・・・103
図 2.4.27 T	<b>`=25[min</b> ]の結果比較・・・・・・・103

図 2.5.1	若い地下水年代トレーサーの経時変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・107
図 2.5.2	中空糸メンブレンを用いた地下水溶存ガス原位置回収システム・・・・・108
図 2.5.3	ライン導入前後の溶存酸素と溶存 Kr 濃度変化
図 2.5.4	ライン内試料水送水量および水温変化に伴う溶存ガス回収率変化・・・・・・110
図 2.5.5	無機ガス成分の除去(1)・・・・・・111
図 2.5.6	無機ガス成分の除去(2)・・・・・・111
図 2.5.7	TCD ガスクロを用いた Kr ガス精製分離ライン · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
図 2.5.8	TCD ガスクロによる Kr ガス分離に必要な最適分離カラム温度の検討 ・・・・・113
図 2.5.9	釜石鉱山 550m 坑道における Kr 分析用坑内水採取地点と水質のヘキサダイヤグラム
	表示
図 2.5.10	釜石鉱山 550m 坑道内 <sup>85</sup> Kr 分析用地下水のキーダイヤグラム表示・・・・・・・・115
図 2.5.11	釜石鉱山 550m 坑道地下水の安定同位体比δダイヤグラム ······ 115
図 2.5.12	釜石鉱山 550m 坑道における地下水中のトリチウム濃度と CFCs 濃度 116
図 2.5.13	LUMPED モデルの帯水層モデル組み合わせパターン ・・・・・・・・・・118

# 表・写真 目 次

第2章	
表 2.1.1	坑道の種類・・・・・・11
表 2.1.2	グラウトの目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・12
表 2.1.3	高レベル放射性廃棄物の地層処分における各段階と地下坑道とそのグラウトの必要
	性について・・・・・12
表 2.1.4	セメント系グラウト材料・・・・・15
表 2.1.5	粘土系グラウト材料・・・・・16
表 2.1.6	グラウトにおける課題・・・・・・17
表 2.1.7	地層処分におけるグラウトの課題・・・・・・22
写真 2.1.	1 平行平板注入試験装置・・・・・・23
写真 2.1.2	2 平行平板注入試験装置の材料注入部分・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・24
写真 2.1.3	3 平行平板注入試験装置のスペーサー部分・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・24
表 2.2.1	実験に用いた試料・・・・・30
表 2.2.2	推定された各式のパラメーター・・・・31
表 2.3.1	分子拡散係数の例(@25℃水中)48
表 2.3.2	解析モデル諸元・・・・・50
表 2.3.3	解析ケース・・・・・52
表 2.4.1	均質媒体におけるケース設定・・・・・87
表 2.4.2	二次元不均質場(二層)実験ケース・・・・・ 89
表 2.4.3	二次元不均質場(多層)実験ケース・・・・・91
表 2.4.4	ビーズ粒径と物性値・・・・・・93
表 2.4.5	二層不均質場解析対象ケース・・・・・98
表 2.4.6	多層不均質場解析対象ケース・・・・・101
表 2.5.1	中空糸メンブレンを用いた地下水溶存ガス原位置回収システムパーツ仕様・・・・・108
表 2.5.2	TCD ガスクロ分離法による Kr ガス回収率の検討
表 2.5.3	釜石鉱山坑内水の水質および同位体分析結果一覧・・・・・・・・・・・・114
表 2.5.4	釜石鉱山坑内水の溶存 Kr ガス回収関連の情報一覧・・・・・・・・・・・・117
表 2.5.5	各種地下水年代トレーサーによって推定された釜石坑内水の滞留時間・・・・・119

This is a blank page.

#### はじめに

地層処分の安全性は、①処分に適した安定な地質環境を選定し、②その環境に頑健な人工バリ アを適切に設計・施工し、③構築された処分システムの安全性を科学的な予測によって確認する ことにより保証される。このようなアプローチの信頼性を現実的な技術基盤として高めていくた めには、幅広い学術分野における数多くの課題に対する研究・開発・実証を要する。このような 取り組みを効果的に進めるため、日本原子力研究開発機構ではこれまで、地層処分の安全性確保 の流れに沿って、「地質環境調査評価技術」、「処分場の工学技術」、「性能評価技術」の3つの技術 分野において、ジェネリックな視点から研究・開発・実証を進めその成果を取りまとめてきた。

地層処分事業の開始段階を迎えた現在,今後の処分事業,安全規制の双方に資する技術基盤を 整備することが求められており,従来のジェネリックな視点からの総合的成果を具体的(スペシ フィック)な技術として体系化していくことが重要である。このような観点から,本研究におい ては,分野・課題間の連携や複数の課題や領域にまたがる技術や評価手法を組み合わせ,地質環 境調査評価技術を概念レベルから実施レベルに高度化していく。具体的には,「実際の地質環境下 における連成現象を考慮したニアフィールド(NF)コンセプトの再構築」と「各分野・要素技術 間の連携を考慮した体系的な地質環境調査技術の開発」を目指す。

今年度は、「ニアフィールド(NF) コンセプトの再構築」にあたっては、これまでの研究<sup>1),2),3),4),5)</sup> で得られた成果を反映・発展させるとともに、委員会では、委員各位の専門の立場から、ニアフ ィールドの中間領域に関する意見を総合討論の場で反映させてきた。また「各分野・要素技術間 の連携を考慮した体系的な地質環境調査技術の開発」に関しては、実際の地質環境下において生 じる連成現象に着目した、ニアフィールドにおける施工対策影響評価技術の構築に関する研究開 発や水理学および地球化学分野における連携研究、長期の地質現象が深部地下水流動系や物質移 行に与える影響に関する研究など、ニアフィールド、中間領域を考慮した研究開発を行った。

(参考文献)

- 小島圭二・大西有三・渡辺邦夫・西垣 誠・登坂博行・嶋田 純・青木謙治・杤山 修・吉 田英一・尾方伸久・西尾和久(2007):「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17年度-,日本原子力研究開発機構,JAEA-Research 2007-060.
- 小島圭二・大西有三・渡辺邦夫・西垣 誠・登坂博行・嶋田 純・青木謙治・杤山 修・吉 田英一・尾方伸久・西尾和久(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-,日本原子力研究開発機構,JAEA-Research 2008-042.
- 小島圭二・大西有三・渡辺邦夫・西垣 誠・登坂博行・嶋田 純・青木謙治・杤山 修・吉 田英一・尾方伸久・西尾和久(2009):「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19年度-,日本原子力研究開発機構,JAEA-Research 2008-099.
- 小島圭二・大西有三・渡辺邦夫・西垣 誠・登坂博行・嶋田 純・青木謙治・杤山 修・吉 田英一・尾方伸久・西尾和久(2010):「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20年度-,日本原子力研究開発機構,JAEA-Research 2009-055.
- 5) 小島圭二・大西有三・渡辺邦夫・西垣 誠・登坂博行・嶋田 純・青木謙治・杤山 修・吉 田英一・尾方伸久・西尾和久(2011):「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21年度-,日本原子力研究開発機構,JAEA-Research 2010-049.

(地圈空間研究所 小島圭二)

#### 1. 実際の地質環境下における連成現象を考慮したニアフィールド(NF)コンセプトの再構築

#### 1.1 結晶質岩系岩盤の現実的なニアフィールド(NF)環境/コンセプトの検討

#### 1.1.1 はじめに(背景)

地層処分システムの多重バリア機能の健全性は、地下環境を構成する岩石や地下水の性質だけ でなく、掘削された地下空洞環境の工学的施工状態に大きく左右されることは間違いない。しか しながら、これまでの平成12年度レポート<sup>1)</sup>をはじめとする多重バリア機能は、地下環境/工学 的設置環境の情報不足から、いわば理想的状態での設置環境における評価だと言わざるを得ない 部分があることは否めない。そのような状況に成らざるを得なかった理由の1つは、実際の多重バ リアを設置する地下環境についての、どのような知見が重要なのかなど、既存の知識と経験に関 する情報が共有化されていないことによると言えるだろう。一方で、安全評価においては、地下 環境における情報不足と、その「保守的(過ぎるとも言える)」概念から、過度に保守的に見積り すぎとも言える手法を構築してきた。その「弊害」は、実際の地下環境から乖離した状態での、 人工バリア機能の評価や核種移行評価を増長させてきたとも言えなくはない。このような状況は、 さまざまな研究開発における効率化を妨げるものであり、現実的な多重バリア機能の評価を行う ためには、より現実的な地下環境(岩石ー地下水-コンクリート等人工素材の複合環境)に基づ いた概念の再構築が不可欠である。

本委員会における地層処分システムのニアフィールド(NF) コンセプトの検討は, したがって, 平成12年度レポート<sup>1)</sup>で示されるニアフィールド(NF) コンセプトをより現実的なものへと改善す るだけでなく,実際の地下環境でのより合理的調査・評価手法を整備することを最終的な目的と するものである。またこれらの検討は,とくに瑞浪超深地層研究所(MIU)の地下坑道での原位 置試験の構想に大きく関わるものであり,変動帯という広域的地質環境下で形成された我が国の 特異な地下地質環境の特性を把握するための独自の技術を整備する上でも非常に重要である。

将来の地層処分場で遭遇すると考えられる坑道周辺は、地下岩盤(岩石・鉱物)と地下水で満 たされた地下地質環境と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、また操業に伴う力学的擾乱や酸化還元反応などといった物理的・化学的変化を伴う環境 (場)である。これまでの平成12年度レポート<sup>1)</sup>をはじめ、我が国の性能評価の概念モデルにお いては、これらの複合状態(より現実的な状態)の理解が明確ではなく、信頼性の高い安全評価 体系を整備するためには、実環境をより現実的に示すことのできる情報(データ)と調査技術を 早急に準備することが必要と考えられる。またこれらの情報と技術は、多重バリア性能の健全性 を明確にするためのニアフィールド(NF)におけるセーフティケース(Safety case)を抽出/構築 する上でも不可欠である<sup>2),3)</sup>。

平成12年度レポートでは様々な背景のもと、一般的(Generic)かつ保守的という考え方で地層 処分の実施可能性を提示してきたものの、実際の処分事業を効率的に進めていくためには、現場 に即した状態でのニアフィールド(NF)環境、あるいは核種移行に関する性能評価を実施する上で の、より現実的な「場」のモデルを構築することが不可欠である。そのためには、ニアフィール ド(NF)環境を中心としたバリア機能を評価するための現象プロセスを適切に抽出し、その優先順 位を念頭においた現実的なシナリオを設定することが重要である。 以上の観点をもとに、本報告は、瑞浪超深地層研究所における結晶質岩系の現実的なニアフィ ールド(NF)コンセプトの構築を目的として、これまで行ってきた検討内容をまとめたものである。 今年度は、ニアフィールド(NF)環境における現象を検討するにあたって、これまでの当委員会で 行ってきた検討結果の再検討を試みた。検討にあたっては、将来の処分場評価に耐えうる技術と してニアフィールド(NF)コンセプトを再検討/構築するための検討項目について、これまでの当 委員会での議論の内容も踏まえ、以下の1.1.2.1:「場」の特性把握、1.1.2.2:坑道内敷設人工材 料の影響および1.1.2.3:「場」の短期的および長期的変化、という括りから現実的なニアフィー ルド(NF)コンセプトを構築するために重要と思われる現象に関して、その優先順位を念頭に抽出、 列挙した。

#### 1.1.2 ニアフィールド(NF)における現実的環境に関する検討内容

#### 1.1.2.1 「場」の特性把握

結晶質岩における「場」の把握においては、水みちとなる割れ目や割れ目帯(あるいは小断層 など)の地質構造の分布や構造、それらの結晶質岩体における汎用的性質(特性)を明らかにす ることが必要である<sup>4),5)</sup>。とくにこれらの地質学的あるいは鉱物学的特徴に関する知見は、将来 の処分場の特性評価、安全評価手法において移転することのできる非常に重要な技術になるもの と考えられる。

(1) 割れ目(帯)

分布や頻度(密度),形態的特徴,割れ目充填鉱物など

(2) 小断層

分布、断層構造としての特徴、断層内水みち構造、断層内充填鉱物など

(3) 変質岩盤

分布, 産状, 鉱物など

#### 1.1.2.2 坑道内敷設人工材料の影響

空洞維持に関する人工材料(支保材など)は、地層処分場には不可欠である。これらの材料は、 地下空間建設後、操業期間、閉鎖後においてもそのまま埋設されることとなる。しかし、これら の人工材料と坑道周辺岩盤や地下水などとの反応に伴う、坑道周辺環境への影響については、ほ とんど把握されていないのが実状である。瑞浪超深地層研究所での原位置試験においては、長期 にわたる人工材料の坑道周辺環境への影響調査は行えないものの、数年規模の短期の影響調査・ 解析を考慮した原位置試験は十分に実施可能である。以上の観点において、現在検討対象となる 坑道周辺環境における人工材料は以下の通りである。とくにこれらの人工材料が及ぼすバリア機 能への影響を把握することが重要となる(図1.1.1)。

(1) ロックボルト

ロックボルトと岩盤との相互反応。ロックボルトに用いられる素材の酸化反応に伴う酸 化物の周辺岩盤への拡散が及ぼす環境変化,およびその影響評価の必要性等を検討するこ とが重要と思われる。

#### (2) グラウト (ポスト&プレ)

グラウト材と岩盤との相互反応。とくにグラウトを行うことがどのようにバリア機能に

影響を及ぼすのかについての検討が重要である。また、グラウトに関しても、地下環境の バリア機能の保持や、人工バリア材の設置環境の適正化、あるいは操業期間の空洞安定性・ 安全性の保持など、様々な観点での位置づけが考えられるものの、それらの優先順位の議 論はあまりされておらず、継続的に実施されることが必要である。



図1.1.1 ニアフィールド(NF)環境を構成する素材等の概念図

(3) 吹き付けコンクリート

コンクリートと岩盤との相互反応。岩盤内空洞の保全,安全確保上不可欠であるコンク リートのニアフィールド(NF)環境に及ぼす影響評価を,実際の地下構造物などの事例をア ナログ的に検討することで,地下環境のとくにpHに関する緩衝作用の現実的能力の評価を 行うことが重要と思われる。

(4) 支保鋼材

鋼材と岩盤,あるいは鋼材と吹き付けコンクリート(立坑周りのコンクリートも含む) および岩盤との相互反応。上記,記載とおおむね同様の視点として,これら人工素材と周 辺岩盤との相互反応の影響評価が必要と思われる(評価の結果,将来の処分場においては 問題視する必要がない,という判断根拠,拠り所が得られればより効率的に処分事業を展 開できるものと思われる)。

(5) バックフィル

バックフィルについては、未だ地層処分システムにおける位置づけが不明確であること は否めない。しかし、一方でその仕様を厳密化することは、施工の観点からもリスクを負 いかねないことから、バリア機能への補足的役割という観点での議論、検討が重要と思わ れる。

(6) プラグ

プラグの設置方法,意義についての検討が重要である。処分場において,操業期間中に 処分パネルの部分ごとに埋設が行われる場合,プラグによる部分的閉鎖が行われることに なる。その場合,水理学的,地球化学的状態変化への影響素材,施工方法としてどのよう な実施方法が適当かの検討が必要と考えられる。

(7) 微生物影響

微生物影響・活動に関して,基本的には閉鎖後においては,繁殖に必要な栄養分(Nutrients)の枯渇,あるいはベントナイトの膨張に伴う低透水環境の形成によって,その活動は制限 されるものと思われる。また、人工バリアの設置に関しては、低透水性が形成されるとい う認識のもと設置技術の整備が行われていることから、このような設置環境が、地下環境 側から脅かされないような条件を提示できる施工の実施と環境状態の構築を行うことが重 要である<sup>6</sup>。

# 1.1.2.3 「場」の短期的および長期的変化

結晶質岩中の空洞掘削に伴う「場」の変化は、短期的には力学的変化が考えられる。そして中 ~長期的変化としては、応力再配分や地下水の水理場の変化が、そして最終的には、新たに形成 された割れ目(水みち)をも含む割れ目中を透過する地下水と岩盤との反応や、坑道から岩盤内 への酸化反応などに伴う地球化学的変化が挙げられる。これらの理解は、いわゆる掘削影響領域 (EDZ)の理解に直結するものであり、ニアフィールド(NF)コンセプトを再構築する上でも非常 に重要な部分である。また、一方で、応力再配分領域と掘削影響領域(EDZ)の関係など、ニア フィールド(NF)領域の定義的な検討にも関わる部分を含んでいる。これらの現象やプロセスの検 討/理解は、変動帯に位置する我が国の地下地質環境における割れ目媒体の独自のニアフィール ド(NF)コンセプトを構築する上で不可欠である。また、地球化学的および鉱物学的にも、割れ目 (水みち)のシーリングや水みち近傍鉱物の溶解など、数百年~数千年、あるいは数万年オーダ ーで生じ続ける現象もこの範疇には含まれるものであり、限られた期間での原位置試験に置いて 如何にその速度や量に関する知見を導き出すかが重要になる。それらの時空間の変化や状態を概 念的に示したのが図1.1.2である。



図 1.1.2 地層処分場掘削に伴う地下環境の擾乱とその変化の状態を 概念的に示した「平衡反応図」

地下空間,坑道を掘削するにあたって,地下環境はいわゆるサイトスケールの地下地質環境が 長期にわたって育んできた,初期段階としての「(みかけの)平衡状態」として認知される。しか し,掘削と同時にその環境(状態)は擾乱され,処分場においては操業期間も含め,閉鎖される までは何らかの擾乱が進行するフェーズにあるものと思われる。この段階において,また人工バ リア材に代表される様々な物質が持ち込まれ,これらと地下岩盤や鉱物,地下水との短期的〜長 期的な反応が進行することになる。そして,閉鎖とともに再冠水し,それまでに投入された様々 な物質と地下環境との反応が,いわゆる「次の段階の平衡」を目指して進行することとなる。こ の次の段階の平衡状態が,どのような速度と程度で進行するのか,選定された地下環境が掘削の 擾乱に対するどの程度の緩衝作用(能力)を有しているのかに関しては,最終的には選定された サイトの地下環境特性に負うところが大きいと考えられる。したがって,ニアフィールド(NF) 環境はサイト(スケール)の特性に左右されるものであり,構築されるニアフィールド(NF)コン セプトもこのようなサイトスケールの特性を反映したものとして基本的には構築されるべきであ る。

しかしながら現状としては、そのような観点での長期的なバリア機能の回復や、安全機能の維持という調査手法、あるいは考え方を検討した(原位置試験の)事例は皆無に等しい。将来の地下処分場の長期的な安全性をどのような手法によってどのように評価すべきか、これこそが変動帯の地下環境に設けられた深地層の研究施設における原位置試験の本質であると考えられる。

このような観点から、以下に、坑道周辺環境の総合的変化に関する調査解析課題について、一部「1.1.2.1:「場」の特性把握」、「1.1.2.2:坑道内敷設人工材料の影響」の内容とも重複するが、 以下に列挙する。 (1) 掘削影響領域(EDZ)範囲の検討

掘削に伴う明らかな変化の領域の明示と、下記に示す飽和不飽和領域や応力再配分領域 との違いの明記(EDZの再定義が必要)。

- (2) 飽和不飽和領域の検討
   EDZとの関連での定義の再検討
- (3) 応力再配分領域の検討EDZとの関連での定義の再検討
- (4) 地下水流動の変化範囲の検討短期的,長期的影響の確認
- (5) 地下水地球化学条件の変化範囲の検討 長期的な現象変化のインデックスの抽出
- (6) 長期的割れ目シーリング
   鉱物溶解や沈殿反応(炭酸塩反応など)

#### 1.1.2.4 その他の検討課題

その他の検討課題として,結晶質岩中の空洞掘削に伴う「場」の変化(力学的および水理,地 球化学的)は,その坑道掘削方法とも密接に関連するものと考えられる。したがって掘削工法の 違いによる周辺岩盤への影響の相違をどう理解するのか,またどう判定するのかなどの手法も含 めて開発されることが重要となる。

またこれらの工法と絡んで,試験場のレイアウトは,そこにおける結晶質岩の割れ目(帯)や 小断層などの構造的不均質性の特性をどのように把握するのか,その明らかとすべき(あるいは 目論む)科学的論拠・作業仮説と密接に関わるものであり,十分な検討を行うことが重要と考え られる。

(1) 掘削工法

発破工法による機械掘削かトンネルボーリングマシン(TBM)による掘削の影響の相違の検討

(2) 試験場レイアウト

将来のニアフィールド(NF)環境をどのように調査するのかの技術移転の観点の検討も 必要

さらには、地層処分の受動的(passive)な考え方とは相反する、いわゆる廃棄体の「再取り出 し」を考慮した場合の、ニアフィールド(NF)コンセプトについても、果たして受動的(passive) な考え方を基本とする考え方と同等でいいのかどうかの疑問があるが、「再取り出し」は基本的に は、処分坑道やピットでのモニタリング段階での何らかの問題が生じた場合に行うものであり、 基本的に「閉鎖」する判断が下された場合には「再取り出し」は実施されないという認識で進め られるべきものと思われる。

### 1.1.3 参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構(1999):「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」,総合レポート, JNC-TN140099-020.
- 2) Nagra(2005) : Project Opalinus Clay; Safety Report –Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste, NTB02-05.
- 3) De Preter, P. and P. Lalieux(2002) : Fulfilment of the Long-term Safety Functions by the Different Barriers during the Main Time Frames after Repository Closure, in The Handling of Timescales in Assessing Post-closure Safety of Deep Geological Repositories, Workshop Proceedings, Paris, France, pp.16-18.
- 4) Yoshida, H., Takeuchi, M., Metcalfe, R.(2005) : Long-term stability of flow-path structure in crystalline rocks distributed in an orogenic belt, Japan Engineering Geology Vol.78, pp.275-284.
- 5) 吉田英一・西本昌司・長 秋雄・山本鋼志・勝田長貴(2008):地下花崗岩体の変質とその形 態-産総研岡山応力測定用深部花崗岩コア試料の変質を例に-,応用地質 Vol.49, pp.256-265.
- 6) 吉田英一(2007):総説:地層処分システムと微生物-地下研究施設における微生物影響研究の 考え方,原子力バックエンド研究 Vol.14, pp.31-41.

#### 1.1.4 今後の検討事項

現実的なニアフィールド(NF)コンセプトを構築するためには、ニアフィールド(NF)環境にお けるバリア機能を適正に判断、評価することが不可欠である。そのためには、人工バリアと天然 バリアが混在する実際の地下環境において、掘削終了後から操業期間、その後の閉鎖後にわたっ てどのような現象がニアフィールド(NF)で複合的に発生し、その現象が多重バリア機能にどの ようなプラス、マイナス両方の影響を短期から長期に及ぼすのかを科学的論拠に基づいて具体的 に示すことが重要である。

ここではまず問題点の共有化を行うことを念頭に,掘削終了後の処分坑道周辺に存在する「材料」と「現象」を示し,それらの複合現象がニアフィールド(NF)での多重バリア機能に対して, どのようなプラスあるいはマイナスの影響を及ぼすと考えられるかの個人的理解・問題点の認 識・疑問・仮説を提示する。

#### 1.1.4.1 ニアフィールド(NF)環境を構成する材料と関連するプロセス,現状認識

(1) オーバーパック

腐食生成物はどの程度拡散するのか?

- (2) ベントナイトコロイド どの程度発生するのか?
- (3) コンクリートライニング

結晶質岩の場合でも,幌延のような第三紀の堆積岩でも不可欠か?

(4) ロックボルト

特に結晶質岩・割れ目を有する硬岩では不可欠。2~5m 長のボルトを数 m 間隔で敷設。またその固定にはコンクリート等が使用されるのではないか?

(5) グラウト材

特に結晶質岩の場合は止水のために不可欠。坑道周辺 5~10m 程度の領域に存在する水みち となっている割れ目はコンクリート等のグラウト材が注入されることになると考えるのが 現実的か?

(6) バックフィル

現時点でのバックフィルの素材が今ひとつ不明瞭。掘削ズリを再利用するにしても、その加 工の状態、品質、保管の方法などによって性質が変化。ベントナイトなどを添加するにして もどのような形で敷設するか。それによって再冠水後の反応が異なる。どこまでを現時点で の検討事項とするか?

(7) 周辺岩盤

#### ①新鮮母岩と変質母岩のバリア機能評価

これまでの調査から、日本の花崗岩の場合、20~30%部分は少なくとも母岩形成段階での熱水循環に伴う変質を被っている(釜石の場合は、熱水鉱床の近くだったこともありで 70~80%の領域が変質。土岐花崗岩の場合は約50%。岡山の万成花崗岩の場合も30%)<sup>1)</sup>。 したがって、処分場パネルからこれらの変質花崗岩を排除することは不可能と考えられる が、現時点での知見として、変質花崗岩のバリア機能に関して評価を行ったところ、新鮮 母岩と同等以上の遅延効果を有している事が分かり、変質母岩によるバリア機能の劣化は 心配ないと考えられる<sup>2)</sup>。

#### ②割れ目~割れ目帯のバリア機能評価

日本の結晶質岩岩盤の場合,割れ目の平均密度は2~3本/m<sup>2</sup>である。この割れ目の形成や 割れ目(帯)中の充填鉱物の形成とその履歴をおおよそ把握しつつある段階にあり,また アナログ的にも割れ目充填鉱物の産状からシーリングプロセスや長期挙動に関する情報 を得ることのできる段階にある<sup>3</sup>。これらの鉱物は,吸着性もありまた空隙率も高いこと から基本的にはバリア機能を有している。場合によっては母岩よりも高い可能性もある。 一方で,これらの核種遅延効果を定量的に評価する手法の開発に関しては,原位置試験方 法も含めて検討する必要がある。瑞浪超深地層研究所(MIU)での重要な検討事項である。

#### ③地下で遭遇した断層(地質断層)のバリア機能評価

日本の結晶質岩岩盤の場合,これまでの調査から言えることは,数十m~約100mに1本 の割合で,20cm~1m程度の断層粘土や断層角礫を伴う断層と必ず遭遇すると考えられる (瑞浪超深地層研究所(MIU)の場合も同様)<sup>4)</sup>。この程度の断層を地表調査や物理探査, リニアメント解析によって把握することは非常に難しい。したがって処分パネルにこれら を取り込むことが想定されるべきであろう。構造上の特性から,基本的には充填物は割れ 目と同じであり,さらにそれに物理的破壊(milling)が加わることから空隙率や反応表面 積は非常に高くなり,バリア機能としても十分に機能すると考えられるが(現在,瑞浪超 深地層研究所(MIU)での調査を実施中),ニアフィールド(NF)コンセプトの議論にお いても重要な項目と考えられる。

# 1.1.4.2 ニアフィールド(NF)環境での諸現象

先に示した素材のある場所で以下の現象が発生した場合に,いろいろな複合反応をどうとらえ るか,またはどう考えるべきかの共通認識の構築が今後の研究においては重要になると思われる。 現時点では,現象のリストアップのみであり,継続的に複合反応がおよぼすバリア機能への影響 の検討を行う必要がある。

### (1) REDX

酸化物の拡散と酸化物の形成。これらもバリア機能の強化につながる可能性は大きい。酸化物(とくに水酸化物)の吸着固定機能は大きいことから、これらのプラスの影響をどう検討するかが重要となる。

#### (2) コンクリートの溶解反応

岩石との緩衝作用を見る限りでは、大きな影響はないと考えられる。グラウト材も基本的 には水みちであったところをシーリングしていることから、地下水との接触は逆に押さえら れる可能性が大きく、コンクリートも長期的に安定と考えられる。再冠水後であれば地下水 のフラックスも低下し、基本的にはアルカリ状態はニアフィールド(NF)近傍におさえら れ、拡散のみでゆっくりと広がるか、周辺岩盤あるいは地下水によって緩衝(buffer)され る可能性が大きい。地下石油備蓄の場合、揚水した地下水のpHをこの数年間モニタリングし ているが大きくアルカリ性に変化したとの報告はない(地下石油備蓄からの私信による)。

#### (3) ベントナイト流出に対する対策

施工による回避の可能性の検討が必要であるとともに、どのような施工を行うかが重要と なる。施工と周辺環境とのバーターになる可能性が大きい。とくに操業期間における高動水 勾配が坑道周辺で生じた状態で、一部ずつ閉鎖しながら操業をつづけて行く場合での検討が 必要となる。

#### 1.1.5 参考文献

- 1) 吉田英一・西本昌司・長 秋雄・山本鋼志・勝田長貴(2008):地下花崗岩体の変質とその形態 - 産総研岡山応力測定用深部花崗岩コア試料の変質を例に-,応用地質 Vol.49, pp.256-265.
- Yoshdia, H., Nishimoto, S., Metcalfe, R.(2010) : Altered crystalline rock distributed along groundwater conductive fractures and the retardation capacity in the orogenic field of Japan, Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management ICEM2009, Liverpool, UK, ICEM-16332.
- 3) Yoshida, H., Takeuchi, M., Metcalfe, R. (2005):Long-term stability of flow-path structure in crystalline rocks distributed in an orogenic belt, Japan Engineering Geology, Vol.78, pp.275-284.
- 4) 吉田英一(2011):岩盤中の透水性亀裂とその長期的挙動-亀裂性岩盤の長期流体挙動把握に 関する現状と今後の可能性-,地学雑誌(投稿中)

(名古屋大学:吉田英一,地球システム総合研究所:青木謙治,原子力安全研究協会: 杤山 修)

#### 各分野・要素技術間の連携を考慮した体系的な地質環境調査技術の開発

#### 2.1 掘削影響領域へのグラウトとその結果の評価および長期の止水性の評価手法に関する研究

#### 2.1.1 はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、岩盤内への処分は色々な処分方法と比較すると、 長期間(10万年レベル)で考えるときわめて安全な処分システムと評価できる。しかし、地盤内に は地盤が潜在的に持っている亀裂等の高透水ゾーンや地層処分のための坑道が安定しない領域が 存在する。

また,地下に処分のための坑道を掘削することにより坑道の周囲にゆるみ領域(掘削影響領域: EDZ)が発生して,地盤の透水係数が大きくなったり坑道周囲の安定性が悪くなったりする。

このような種々の地盤の亀裂に対して,近年では人工的に地盤を修復する技術としてセメント 系材料を地盤内に注入(以後,グラウトと称する)し,これらの地盤を改善する技術が開発されて おり,LPGの地下備蓄では海面下の大空洞掘削にも関わらず,湧水流量を制御して空洞内の環境 をきわめて良いものにしている<sup>1)</sup>。

本報告では,高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるグラウトの必要性と今後の課題につい て論述する。

#### 2.1.2 地層処分のための地下坑道

地層処分で地下空間を掘削する場合の坑道の種類を表2.1.1に示す。

#### 表 2.1.1 坑道の種類

(1)	アクセス坑道	(立孔, 斜坑など)
(2)	連絡坑道	
(3)	処分坑道	
(4)	処分ピット	

それぞれの坑道は,廃棄物を処分するための処分ピットのように,掘削後は廃棄物を処分後に, 順次埋め戻される坑道や,地層処分場の操業全体が終了するまでの約50年余りの間,地上と地下 処分場を安全に連結する通路となるアクセス坑道等があり,それぞれ期待される機能が異なるた め,その空間を設計する際および施工・維持管理する際には,それぞれの機能に適したコンセプ トで対応するべきである。

### 2.1.3 グラウトの目的

地層処分を考えたグラウトの目的を列挙すると以下のようになる(表2.1.2)。

表 2.1.2 グラウトの目的

(1)	地山の安定性補強(施工性の確保)
(2)	湧水流量の制御
(3)	湧水流速の制御
(4)	湧水排除経費の削減
(5)	湧水による周辺環境保全
(6)	掘削損傷領域(EDZ)の修復
(7)	地下処分空間の環境整備
(8)	地層処分の安全性向上
(9)	地殻変動の修復

原子力発電環境整備機構(NUMO)が実施する地層処分事業では、地下の状態を事前に把握する ための文献調査を行い、その地層が地層処分に適しているかどうかを判断し、適していそうであ ればさらに概要調査へと移行していく。現状ではまだ文献調査でどのような場合に不適格と判断 するかの判断基準については明確になっていない。

概要調査の項目についても現在,原子力発電環境整備機構(NUMO)でその詳細な検討を行っている。この場合も精密調査へと調査を進めていくかどうかについての判断基準はまだ確立していない。

このような調査から地層処分施設の設計,施工,そして地層処分場の操業,最終的な閉鎖段階 等までとグラウトとの関係を表2.1.3に示す。

③ 湧水制御(流速) ⑥ 掘削損傷領域(EDZ)の修復 ⑨ 地殻変動の修復									
~									
		1	2	3	4	5	6	7	8
		文献調査	概要調査	精密調査 (地上からの調査)	精密調査 (地下での調査)	地下施設建設	操業	閉鎖	閉鎖後
A	アクセス坑道 (立坑・斜坑等)	-	-	-	145	1457	-	6	89
В	連絡坑道	-	-	-	14	147	-	6	89
С	処分坑道	-	_	-	12	127	1268	-	-
D	処分ピット	-	-	-	23	23	236	-	-
E	プラグ周辺	-	-	-	68	68	6	6	89
備考	「NUMO安全確保 構想2009ロード マップ詳細版」 <sup>2)</sup> における人工パリ アの実証試験に 関する記述	_	-	-	<ul> <li>・廃棄体・人工</li> <li>バリアの施工に</li> <li>関する地下調査</li> <li>施設での実証試</li> <li>験を実施する</li> </ul>	<ul> <li>・実証試験などを 通して廃棄体・人</li> <li>エバリアの輸送・</li> <li>定置技術を確認</li> <li>する</li> </ul>	・実証試験な どを通じて閉 鎖技術の確 認を行う	_	_

表 2.1.3 高レベル放射性廃棄物の地層処分における各段階と地下坑道と そのグラウトの必要性について

⑤ 湧水制御(周辺環境影響)

⑦ 地下処分空間の環境整備

⑧ 地層処分の安全性向上

グラウトの目的

(2) 湧水制御(流量)

① 地山の安定(施工性確保) ④ 湧水制御(コスト)

**表2.1.3**をベースに各段階で対象とする坑道等に対してのグラウトの目的について以下に検討 する。

#### (1) 地下での精密調査とアクセス坑道の場合

- ①地下での精密調査時におけるアクセス坑道(立坑や斜坑等)の掘削においては,坑道掘削自体 に支障が生じるような大量湧水が想定される場合にグラウトを行うことが想定される。
- ②アクセス坑道は、処分場の一部として閉鎖まで利用されることになる可能性が高いため、数 十年の長期に渡って維持管理がなされることとなる。このため廃水処理費の削減や周辺環 境への影響を低減するためにグラウトを行うことが想定される。
- ③アクセス坑道周辺の掘削影響領域(EDZ)は閉鎖後に核種の選択的な水みちとなる可能性が あるが、立坑プラグによって遮断するため特段の措置を講じる必要は無い可能性が高い。
- ④アクセス坑道の湧水は、処分坑道や処分ピットに求められるような人工バリア設置の際に留意するべき地下水の流量や流速に関する制約は無いと想定される。

#### (2) 地下での精密調査と連絡坑道の場合

- ①地下での精密調査時における連絡坑道の掘削においては、坑道掘削自体に支障が生じるよう な大量湧水が想定される場合にグラウトを行うことが想定される。
- ②連絡坑道は、処分場の一部として閉鎖まで利用されることになる可能性が高いため、数十年の長期に渡って維持管理がなされることとなる。このため、廃水処理費の削減や周辺環境への影響を低減するためにグラウトを行うことが想定される。
- ③連絡坑道は、アクセス坑道とは異なり、深度 300m 以深に掘削されるため、周辺環境への影響の観点での処置は必要にならないと想定される。
- ④連絡坑道周辺の掘削影響領域(EDZ)は閉鎖後に核種の選択的な水みちとなる可能性がある が、坑道プラグによって遮断するため特段の措置を講じる必要は無い可能性が高い。
- ⑤連絡坑道の湧水は,処分坑道や処分ピットに求められるような人工バリア設置の際に留意す るべき地下水の流量や流速に関する制約は無いと想定される。

#### (3) 地下での精密調査と処分坑道の場合

地下での精密調査では、実規模の処分坑道や処分ピットが掘削されて人工バリア施工に関す る実証試験が行われる。実証試験では地盤の安定のためのグラウトはもちろんのこと、実際の 処分坑道を想定して地下水の流量を制限するためのグラウトを行うことが想定される。

#### (4) 地下での精密調査と処分ピットの場合

地下での精密調査では、実規模の処分坑道や処分ピットが掘削されて人工バリア施工に関す る実証試験が行われる。実証試験では、実際の処分ピットへの人工バリアの設置を想定して地 下水の流量や流速を制限するためのグラウトを行うことが想定される。

#### (5) 地下での精密調査とプラグ周辺の場合

地下での精密調査では、実規模の処分坑道や処分ピットが掘削されて人工バリア施工に関す

る実証試験が行われる。実証試験の一環として処分坑道を想定した坑道プラグの施工試験が行われることが想定される。坑道プラグの効果を確実にするためのグラウト試験を行うことが想定される。

# (6) 地層処分場の地下施設建設時のアクセス坑道の場合

(1)と同じ必要性

### (7) 地層処分場の地下施設建設時の連絡坑道の場合

(2)と同じ必要性

#### (8) 地層処分場の地下施設建設時の処分坑道の場合

地下施設建設では、人工バリア定置の実証試験が行われる。実証試験では地盤の安定のため のグラウトはもちろんのこと、処分坑道となることを前提として地下水の流量を制限するため のグラウトを行うことが想定される。

# (9) 地層処分場の地下施設建設時の処分ピットの場合

地下施設建設では、人工バリア定置の実証試験が行われる。実証試験では、実際の処分ピットへの人工バリアの設置を前提として地下水の流量や流速を制限するためのグラウトを行うことが想定される。

#### (10) 地層処分場の地下施設建設時のプラグ周辺の場合

地下施設建設では、人工バリア定置の実証試験が行われる。実証試験では、施工試験の一環 として実際の処分坑道において、坑道プラグの施工試験が行われることが想定される。坑道プ ラグの効果を確実にするためのグラウト試験を行うことが想定される。

#### (11) 地層処分場の操業時の処分坑道の場合

- ①処分坑道においては、坑道掘削自体に支障が生じるような大量湧水が想定される場合にグラウトを行うことが想定される。
- ②処分坑道の湧水や,処分孔の掘削や人工バリア設置の際に支障となるような湧水が想定され る場合にグラウトを行うことが想定される。
- ③処分坑道周辺の掘削影響領域(EDZ)は閉鎖後に核種の選択的な水みちとなる可能性があるため、プラグによって遮断する必要が生じることが想定される。プラグの効果を確実とするために、プラグ周辺と掘削影響領域(EDZ)を対象にグラウトを実施することが想定される。

#### (12) 地層処分場の操業時の処分ピットの場合

- ①処分ピットにおいては、人工バリア設置の際に支障となるような湧水(流量・流速)がある場合(緩衝材の流出を防ぐため)にグラウトを行うことが想定される。
- ②処分ピット周辺の掘削影響領域(EDZ)は閉鎖後に核種の選択的な水みちとなる可能性がある ため、処分ピット周辺を対象にグラウトを実施することが想定される。

(13) 地層処分場の操業時のプラグ周辺の場合

(10)と同じ必要性

#### (14) 地層処分場の閉鎖時の場合

連絡坑道およびアクセス坑道周辺の掘削影響領域(EDZ)は閉鎖後に核種の選択的な水みちと なる可能性があるため、プラグによって遮断する必要が生じる。したがって、プラグの効果を 確実とするために、プラグ周辺にベントナイト系材料でグラウトを実施することが想定される。

#### 2.1.4 グラウト技術の高度化

#### (1) グラウト材料

地盤内へのグラウト技術の高度化に関しては日進月歩している。グラウト技術の進歩に関して は、グラウト材料の開発とグラウト技術での注入方法に分けられる。

グラウト材料に関しては、表2.1.4に示すような材料が用いられている。

表 2.1.4 セメント系グラウト材料

(1)	普通ポルトランドセメント	$(\sim 100  \mu  m)$
(2)	高炉セメント	$(\sim 100  \mu  m)$
(3)	超微粒子セメント	$(\sim 20 \mu\mathrm{m})$
(4)	極超微粒子セメント	(~ 2 $\mu$ m)

この中で特筆すべきは極超微粒子セメントの開発である<sup>3)</sup>。岩盤や地盤へのグラウト材の注入 に関しては,その亀裂や間隙の幅の5分の1以下の材料でなければ注入が困難である。したがって, 岡山県の水島LPGの地下備蓄工事では, 亀裂幅が50µm程度で超微粒子セメントでも注入が困難で あった<sup>1)</sup>。亀裂幅が20µm(ボアホールテレビでの観測限界以下の亀裂であるが)程度のヘヤークラ ックに対しての止水材料として極超微粒子セメントが開発されてきた。

セメント粒子は、粒子が小さくなればなるほどその水和反応速度も速くなり、空気中の水分と の反応等が起こりやすくなる。そのため反応速度を遅くする必要がある。

また,粒子が小さくなればなるほど団粒化しやすくなり,団粒化しないように材料に適した分 散材が必要となる。また,セメントを練り混ぜる際にも団粒化した材料をほぐして,材料本来の 粒径まで分散させる技術が必要である。そのために高速回転で練り混ぜる技術開発を行った。

このような極超微粒子セメントを用いた注入技術開発は、これまでも開発されてはいるが問題 は材料のコストである。また、施工する側としては対象としている地盤をどこまでの透水係数ま でグラウトによって透水係数を低下させるかの「**目標透水係数」**を決定する必要がある。

一般的には,現在のグラウトの技術であれば5.0×10<sup>-7</sup>m/sが改良目標になると考えられる。地山の岩盤の透水係数となると,1.0×10<sup>-10</sup>m/s程度が目標かもしれないが,一般的なセメントではやはり10<sup>-7</sup>m/s程度が目標値となる。場の止水性はグラウトによって改良される範囲によっても変わる。したがって,単純に考えると1.0×10<sup>-7</sup>m/sの改良層を1mにするのか10mにするのかによってその止水性は異なる。ちなみに一般廃棄物の処分場の基礎では,1.0×10<sup>-7</sup>m/sの地層が5m以上あれば人工的な遮水シート等を必要としていない。止水をすると止水した外側の水圧が高くなるため、止水

層の上流と下流に大きな水頭差が生じ、この水頭差によって止水層に大きな浸透水圧が作用する。 改良した地山が十分な強度を持っていないと、この浸透圧によって改良された地山が変形してく る。このような力学的な考察も地下に坑道を掘る場合は検討する必要がある。セメント系材料で は、地山に注入することによって地山の強度は大きくなるがそこに期待される透水係数の改良範 囲は先に述べた程度である。また、岩盤の亀裂が小さい場合にはその止水すら困難な場合がある。

坑道の止水で強度を期待しない場合には、天然素材である粘土系材料の亀裂への注入も考えられる。表2.1.5に粘土系のグラウト材料の例を示す。

表 2.1.5 粘土系グラウト材料

(1)	ベントナイトと水
(2)	ベントナイトと砂と水
(3)	ベントナイトと溶液
(4)	カオリンと水

ここでベントナイトの水による懸濁液は、ベントナイトが膨潤してしまって一般には高圧で注 入してベントナイトを変形させて亀裂内に注入する手法が用いられている。亀裂が大きい場合に は、ベントナイトに砂を混ぜて注入することもある。これらはダムの下の地盤の止水工法として 用いられてきた。

ベントナイトと溶液については、ベントナイトのエタノール溶液による懸濁液を作成して亀裂 の中に注入する工法も考えられている。ベントナイトのエタノール溶液では、ベントナイトは膨 潤しないし凝集して団粒化もしないので亀裂内に簡単に注入される。その後、周囲の地下水によ ってエタノールの濃度が薄くなると、ベントナイトは膨潤して亀裂の透水係数が経時的に低下し てくる<sup>4),5)</sup>。

ベントナイトのこのような性質は、エタノール溶液を用いなくても濃度が4%の塩水でも生じる。 また、米国のワイオミング産のベントナイトでは、粒径が1~2µmときわめて微細でありこの海水 懸濁液を亀裂内に注入すると、注入された後海水はベントナイトから分離するため密度の高い注 入層が形成される。そのベントナイト層だけでも透水係数は1.0×10<sup>-8</sup> m/s程度になる。このベント ナイト注入層に周囲の地下水が拡散的に浸透してくると海水の濃度が低下してそれによってベン トナイトが膨潤してその透水係数は1.0×10<sup>-10</sup> m/s程度になる<sup>6</sup>。

(2) グラウト技術

一般に地盤内へのグラウト材の注入は静的に徐々に注入圧を上げていって注入する方法が長い 間用いられてきた。このような静的な注入方法に対して注入の際にパルス的にある周波数によっ て注入する工法がある。この工法を動的注入工法と称している。

動的注入工法は、セメントにしてもベントナイトにしても周波数が7Hz近傍で粘度が図2.1.1に 示すように低下することを利用したものである。また、動的に注入することによって一度注入時 に目詰まりが生じても注入側の圧力が高くなって、目詰まりが解消されて再び注入量が増加する 現象が生じることが多い<sup>7)</sup>。このような現象より、一般に動的注入工法は静的注入工法の1.5倍程 度多く注入されることが室内試験で確認されている。



注入の際に静的に注入するのではなく動的に注入することは、特別で複雑な装置が必要と考え られるが、注入の際に注入ホースを一定の周波数で打撃するだけでも簡単に一定の注入圧が形成 されることもわかっている。また、そのように形成された注入圧のパルスは、注入管の先端まで 伝達されることも現場で注入管の先端の間隙水圧を計測して確認している<sup>7),8),9)</sup>。

地盤内にセメント系材料等を注入する場合の課題を整理すると以下のようになる(表2.1.6)。

表 2.1.6 グラウトにおける課題

# (a) 亀裂性岩盤への注入によってどれだけの範囲が改良できたか

- (b) 注入によって, 地盤内に理想的に注入されているのか
- (c) 地盤の水押しによる透水試験の結果と注入セメント量の関係
- (d) 複数の亀裂への注入メカニズム
- (e) 高透水性地盤へのグラウト材の注入

これらの課題に対して実験室内で確認しながらの検討を実施した。

### ① 亀裂性岩盤への注入によってどれだけの範囲の改良ができたのか

ダム基礎の岩盤内にグラウトをする際には,最初に15m離れたパイロット孔のそれぞれにグラ ウトを注入して,その中間での透水係数を計測し,その値が目標値になっているかを調査する。 目標値以下であってもなくてもその注入孔に注入をする。注入孔(一次孔)の透水係数が目標値以 下であれば,その注入孔とパイロット孔の中間の注入孔(二次孔)の透水係数を計測してその孔に 注入する。一次孔の透水係数が目標値に達しているならば,このパイロット区間での注入は終了 する。このように二次孔の透水係数が目標値に達していなかった場合は,一次孔と二次孔の中間 に注入孔を掘削し,その透水係数を調査して再び注入する。このような作業を繰り返して全体が 目標値の透水係数以下になるまで注入する。これが一般的なダムでのグラウトの手法である。

これに対して坑道のグラウトに対しては、掘削する坑道の周囲の上下左右にグラウトし、それ

ぞれの孔の中間の透水係数を計測してはグラウトを行う作業を繰り返す手法になる。

ここでもし注入する地盤の有効間隙率 $(n_e)$ がわかれば、ある程度の注入孔の本数の予測ができる。地盤をセメント注入によってどれだけ改良されたかを知るためには、地盤内の間隙率があればその改良範囲は指定できる。

仮に注入によって形成される範囲を図2.1.2のように円柱型と仮定すると、総注入量( $Q_0$ )に対して改良半径(R)は次式より求められる。



図 2.1.2 飽和領域への注入の概念

$$R = \sqrt{\frac{Q_0 t}{\pi L n}}$$

(2.1.1)

ここで, t:注入時間, n:地盤内の間隙率, L:注入長さ。

したがって、改良半径を求めるためには、地盤内の間隙率(n)の値が必要となる。この間隙率の値を原位置で求める手法に関しては開発されていなかったが、グラウトにおいて定流量( $q_0$ )で注入し、注入孔内の注入圧の増加のデータより、連続した亀裂の有効間隙率( $n_e$ )の値を求める手法を示した<sup>10</sup>。

この有効間隙率(*n<sub>e</sub>*)の求め方は, 亀裂性岩盤を多孔質体として仮定したものである。しかしな がらその提案した手法の妥当性を検証するために室内での三次元での亀裂モデルへの注入試験結 果と比較した。その結果, 簡単な手法であるが亀裂性岩盤に対しての有効間隙率を求める手法と して有効であることがわかった。

このようにグラウチングを実施しようとする場合の有効間隙率(*n<sub>e</sub>*)の値が求められると,図 2.1.3に示す坑道周囲のプレグラウトにおける注入孔のピッチが推定できることになる。

#### JAEA-Research 2011-033



図 2.1.3 グラウトにおけるピッチ

#### ② 注入によって地盤内に理想的に注入されているか

注入によって十分な止水が完了され十分な強度が発生しているかについては,注入孔と注入孔 の中間の試験孔で透水試験と孔内載荷試験を実施する必要がある。透水性の値と強度の値から坑 道を掘削しても大丈夫かどうかを判断するには注入範囲の推定が必要である。

岩盤内の注入範囲の推定に対しては、先に述べた有効間隙率(*n<sub>e</sub>*)の値を用いる方法もあるが、 三次元的な物理探査による手法も検討されようとしている<sup>11)</sup>。しかし、この物理探査による手法 では、まだまだ注入範囲を推定するには至っていない。これは今後の大きな課題である。

現状では,注入孔間に試験孔を掘削してその透水係数の値をそれぞれの深度ごとに求めて改良 された範囲を求めている。現実には改良した後,坑道を掘削すると再び坑道周囲に掘削影響領域 (EDZ)が現れることがある。

#### ③ 地盤の水押しによる透水試験結果と注入セメント量の関係

ダム基礎地盤でのカーテングラウト施工においては、地盤のルジオン値と注入セメント量の関 係がしばしば議論される。

セメント注入量が大きければ、そこには大きな間隙があり、その区間の透水量係数の値が大き くなると考えるのが一般的である。しかし、亀裂幅の異なる亀裂では、全体の亀裂の中で亀裂幅 の小さい値がその透水性に大きく関係するため、一概に透水量係数が小さい所では注入量が小さ くなるとは断定はできない。

注入時の注入圧力の変動等やボアホールテレビ観察による亀裂の分布等から結合して, グラウトの効果の判断が必要であり, これには多くの事例の積み重ね・経験等が必要である。

# ④ 複数の亀裂への注入メカニズム

実際の岩盤では、図2.1.4(a)、(b)に示すようにグラウチング区間内に複数の亀裂があり、その 幅も勾配も異なる亀裂に同時に注入を実施する。このような複数の亀裂内への注入では、幅の狭 い亀裂と幅の広い亀裂では、その注入圧が一定であると考えると、幅の狭い亀裂の方が幅の広い 亀裂より抵抗が大きく、透水量係数が小さいため改良範囲は狭いと考えられる。しかし、実際に 図2.1.5に示す大型の亀裂モデルによる実験では、亀裂の幅が狭い方が広い範囲で改良されること がわかった<sup>11)</sup>。



(a) 複数亀裂内へのグラウト

(b) 複数亀裂のモデル

図 2.1.4 複数亀裂内へのグラウト



図 2.1.5 注入装置の全体図
この現象に対応するために、ベルヌーイの法則を基に、幅の異なる亀裂内の注入材の挙動を説 明する新しい理論式を用いて、実験値と理論値の比較を行ったものを図2.1.6に示す。このことに より幅の狭い亀裂の中の広い範囲に渡って改良がされることが説明できた。

この研究は、一見実験の現象を理論的に説明したに過ぎないだけのようであるが、現状のグラ ウト工法の本来の妥当性の検証をしていることになる。



図 2.1.6 ベルヌーイの法則を適用し理論構築した場合の グラウト浸潤半径の経時変化

一般に亀裂内ヘグラウト材を注入する際には、セメント/水比が1:10という薄い状態から段階 的にグラウト材の濃度を濃くして、最終的には1:0.8という濃い状態で注入する。このように濃度 を段階的に濃くすることは、経験的な手法として実施されている。しかし、亀裂内へのグラウト 材の目詰まりの研究では、グラウト材の濃度が淡いほど狭い亀裂内に注入されやすく、濃度が濃 くなると狭い亀裂では目詰まりが生じてしまう<sup>12)</sup>。しかし、亀裂の幅が広い場合には、濃いグラ ウト材も注入されていくので、狭い亀裂が目詰まりした後もグラウト材が注入されることになる。

最初から濃いグラウト材を注入すると、幅の狭い亀裂は目詰まりしてしまって改良されないこ とになる。このように考えると、現在実施されているグラウトの手法は、経験から編み出された 手法であるが、複数の幅の異なる亀裂に対してのグラウト手法としてはきわめて有効な手法と判 断できる。

また,薄いグラウト材で狭い亀裂が広い範囲まで改良した後,この狭い亀裂は濃いグラウト材 で目詰まりするが広い亀裂に関しては,その後も濃いグラウト材が高い圧力で充填されるので, 複数グラウトの全体が平均的な範囲まで改良されることになる。

### ⑤ 高透水性地盤へのグラウト材の注入

ダム基礎のカーテングラウトにおいて,高透水性地盤でグラウトをした場合は,その注入圧力 が低下すると,注入材は軸対象に広がらず,図2.1.3に示すように鉛直方向に流動してしまうため, 地盤全体の透水係数の改良が困難となる。このような高透水性の幅の広い亀裂の存在する岩盤に 対しては,従来よりセメントミルクに種々の材料を混入して粘性を高くした注入材に改良して注 入する工法が取られてきた。坑道を対象とした場合には,注入工法は水平方向になるため,注入 材が鉛直に流動してしまうと注入孔間での透水性の改良も困難になる。

高透水性の亀裂に対しては,注入区間をあらかじめ薬液か早強性のセメント材料の注入によっ て一部充填し,その中に粘性の高いセメントミルクかセメントモルタルを動的に注入して,高透 水性岩盤内に十分にグラウト材を充填する工法が取られている。

掘削によって断層等に遭遇することが予測される場合には,一般的なグラウトの手法ではなく 高透水ゾーンに対応したグラウトと薬液注入を混合した注入工法を用いるべきである。また,注 入時の注入圧に対しても薬液注入によって注入範囲が限定されている時には,それに対応した注 入圧で注入し,注入範囲が限定されていない時には,粘性の高いグラウト材を十分な圧力でゆっ くり注入し,十分な「後押し」をおこなって軸対称に注入した材料が重力方向に流動するのを防 ぐ必要がある。

#### 2.1.5 今後の課題

地層処分における地下水の止水の課題については、これからも研究する課題がある。それを整 理すると表2.1.7のようになる。

ここでは、この2点について論議する。

### 表2.1.7 地層処分におけるグラウトの課題

- (1) グラウト材料の耐久性
- (2) 掘削損傷領域の止水工法

#### グラウト材料の耐久性

地層処分では,処分場の止水環境が経時的に変化するとその安全評価がきわめて困難になる。 したがって,処分場の止水環境は,処分の安全性で要求される操業期間中,閉鎖後の一定期間(例 えば,処分場周辺の動水勾配が安定するまでなど)の止水が要求される場合がある。

一般にセメント系材料では、地下水中では数百年でCaが溶脱されてしまい、その長期の止水性 は期待されないことになる。このような人工材料に対して天然材料であるベントナイトによる止 水が長期にわたって安定していると考えられる。

地層処分では,最終的には坑道掘削後,約50年後より坑道の埋め戻しを行うため,その埋め戻 し後は大きな水圧も作用しないため,ベントナイト系材料によるグラウトが有効である。

この方法でいくとセメント系材料は,閉鎖までの50年程度の間,処分場の環境や処分場周囲の 環境保全のための止水材料になる。

処分した後の安全評価のための水みちや止水に関しては、処分場閉鎖時の坑道内に部分的に設

置するベントナイトによるプラグであると考えられる。

施工中や操業中は掘削影響領域(EDZ)等を通っての地下水の移動はセメント系材料で止水する。 より高度な止水機能を期待するのならベントナイト系材料によって止水をする。しかし、この場 合は止水後の水圧による注入したベントナイトの変形を当然検討する必要がある。セメント系材 料とベントナイト系材料の混合材料の長期における特性がまだ検討されていないのでこれについ ては今後の課題である。

## (2) 注入試験装置

今後実験を予定しているセメント系材料とベントナイト系材料の混合材料の注入試験装置の図 と写真を以下に示す(図2.1.7,写真2.1.1, 2.1.2, 2.1.3)。

実験は複数年を計画しており、今年度は注入の準備を実施した。来年度から注入を開始し、数 年後にその結果を発表する予定である。





写真 2.1.1 平行平板注入試験装置



写真 2.1.2 平行平板注入試験装置の 材料注入部分



写真 2.1.3 平行平板注入試験装置の スペーサー部分

#### (3) 掘削影響領域(EDZ)の修復について

地下坑道を掘削する際に,応力開放や発破工法等による影響により坑道の周囲に掘削影響領域 (EDZ)が生じている。掘削坑道の周囲のどの範囲まで掘削影響領域(EDZ)が生じるかについては, それぞれの地山の初期応力の状況や亀裂の方向等種々の場の状況によってその領域は異なってく る。

また,掘削をトンネルボーリングマシン(TBM)で行うか発破工法で行うかによって異なる。ト ンネルボーリングマシン(TBM)では,掘削影響領域(EDZ)が数cmしか生じないということや,こ れに対する発破工法では1m程度の掘削影響領域(EDZ)が生じるとの報告もある<sup>13)</sup>。ここでは,掘 削影響領域(EDZ)に対してどのように対応するかについて論議する。

掘削影響領域(EDZ)の存在は、処分坑道と高透水層の地山等の連結の「水みち」になるため、 漏水がある場合にはセメント系のグラウト材によって止水する必要がある。ただ、坑道の安定の ためにロックボルトを打設する場合には、ロックボルトの孔が「水みち」になることが多いため ロックボルト内を止水する対策が必要となる。

処分施設の安全評価においては,掘削影響領域(EDZ)や吹き付けコンクリートは,数百年で劣 化したとしても,プラグ等で処分坑道を閉塞する等,きちんと処理が行われていれば処分坑道の 周囲に数百年後に高透水層が形成されたとしても安全評価では問題ないと考えられる。

### 2.1.6 考察

本報告では、地層処分におけるグラウト工法の役割とその材料およびグラウト技術に関しての 総括を行った。なお、今年度からの本委員会の検討の中心となる「実際の地質環境下における連 成現象を考慮したニアフィールドコンセプトの再構築」に関連して亀裂性岩盤におけるグラウト として論じると、例えば、処分坑道の周辺領域を対象として想定されるグラウトについて整理し た場合は、カナダ原子力公社(AECL)では以下の4種類に分類している<sup>13)</sup>。

- ① 湧水箇所に対するグラウト
- ② 掘削影響領域の改良を目的としたグラウト
- ③ 坑道から岩盤内部へ積極的に止水ゾーンを構築するためのグラウト
- ④ 破砕帯の透水性改良を目的としたグラウト

これらのうち,①は掘削時,②~④は主に埋戻し時に実施され,掘削時は通常のトンネルと同様に切羽前方の地盤改良と止水が目的となるのに対して,埋戻し時は核種の移行経路に対する長期的な透水性の改良を目的として位置づけている。

上記の目的に対して実施するグラウト技術に関しては、2.1.5 (2)に示すように、ベントナイト とセメントの混合材料の実験として亀裂モデル(注入試験装置)を用いて検討中であるが、本報 告によって地層処分に関する止水工法は、現状の技術で対応できると考えられる。

今後の最も大きな課題は、ここで考えている止水性が本当に機能しているかどうかを長期的に モニタリングできるかどうかである。しかし、これに関しても閉鎖後の20年余の年月の中でモニ タリングによって地層処分の全体の機能の確認は可能である。次の課題は、地震が発生し大きな 地殻変動が生じた時に処分場がどのようになっているのかを、どのように確認するかである。し かし、これに対しても処分場は大きな地殻変動が生じるような場所には設置しないと想定される ために問題は無いと考えられるが、たとえその様な事象が生じたとしても地上からのベントナイ ト等の注入によって、水みち等を止水できる技術を確立させておけば修復は可能であると考えら れる。

#### 2.1.7 参考文献

- 1) 城代邦宏・植出和雄・本多眞・長谷川誠・小島圭二・小川輝繁(2007):地下石油岩盤タンク における水封機能の健全性評価手法に関する研究,土木学会論文集 C, Vol.63, No.2, pp.624-634.
- 2) 原子力発電環境整備機構(2010):安全確保構想 2009-安全な地層処分の実現のために-, NUMO-TR-09-05.
- 西垣 誠・Chegbeleh Larry Pax・金沢智彦(2008):セメント系極超微粒子注入材による地盤 改良,未来材料 Vol.8, No.9, pp.46-51.
- 4) 西垣 誠・小松 満・見掛信一郎・中島朋宏・金谷賢生・龍田圭亮(2005):坑道の掘削影響 に対する修復技術としてのベントナイトグラウトの適用性に関する評価、土木学会論文集, No.806/Ⅲ-73, pp.56-66.
- 5) 西垣 誠・小松 満・見掛信一郎・田岡 洋・中島朋宏(2004):エタノールを用いたベント ナイトスラリーの亀裂性岩盤へのグラウト効果,土木学会論文集, No.764/III-67, pp.221-233.
- 6) 西垣 誠・小松 満・見掛信一郎・田岡 洋・中島朋宏(2004):エタノールを用いたベント ナイトスラリーの亀裂性岩盤へのグラウト効果,土木学会論文集, No.764/III-67, pp.221-233.
- 7) 西垣 誠・平 治・松生隆司・小橋創一・大橋 昭・高田 徹(2002):動的グラウチング工 法のダム基礎グラウチングへの適用, 鴻池組技術研究報告, Vol.12, pp.33-40.
- 8) 西垣 誠・内田善久・蓮本清二・平 治・大橋昭・高田 徹(2001):ダム基礎グラウチング における動的注入工法の開発,大ダムNo.177,(社)日本大ダム会議, pp.108-115.
- 9) 西垣 誠・平 治・大橋 昭・寺戸康隆・高田 徹(1999):動的グラウチング工法の開発, ダム工学Vol.9, No.3, pp.164-174.
- 10) 西垣 誠・見掛信一郎・小松 満・Kwabena KANKAM-YEBOAH(2003): 亀裂性岩盤におけ るグラウトの注入範囲と有効間隙率の評価, 土木学会論文集, No.743/III-64, pp.199-212.
- 11) 西垣 誠・見掛信一郎(2002): 複数亀裂モデルにおけるグラウトの流動特性のメカニズムに 関する研究, 土木学会論文集, No.715/III-60, pp.323-332.

- 12) 西垣 誠・小松 満・山本浩志・見掛信一郎 (2002): 亀裂性岩盤におけるグラウトの浸透特 性と目詰まり特性に関する研究,土木学会論文集, No.715/III-60, pp.311-321.
- 13) Simmons, G. and Baumgartner, P. (1994) : The disposal of Canada's nuclear fuel waste, Engineering for a disposal facility, AECL-10711 COG-93-1.

(岡山大学 西垣 誠)

### 2.2 深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究-軟岩の不飽和特性について-

### 2.2.1 過去10年間および平成21年度研究との関係

深部地質環境の調査・解析技術の体系化を目的として、地下水流動の高精度解析と予測法について研究を行ってきた。過去の研究は、主に下記の4項目よりなる。

- ニューラルネットワーク(ANN),遺伝的アルゴリズム(GA), FuzzyなどのSoft Computing 手法を用いた地下水,山地流出解析手法の開発に関する研究
- ② 水質と水理解析の総合化に関する研究
- ③ 割れ目岩盤内の浸透流評価研究
- ④ 蒸発計測装置の開発と軟岩の不飽和透水特性評価の研究

勿論,これらは独立した研究項目ではなく,相互に関連しているし,高レベル放射性廃棄物の 地層処分技術を確立する上で不可欠である。今後は,過去の研究の問題点を整理し具体的な技術 として確立する方向で考えている。平成22年度は,この考えに基づいて昨年度<sup>1)</sup>簡単に紹介した, ④番目の課題を主に行った。

#### 2.2.2 解決すべき問題点

新第三紀堆積軟岩は、高レベル放射性廃棄物の地層処分場の母岩として有力な候補と考えられ ている。処分場建設が地下水流動に与える影響については実験や解析を通して十分に検討されね ばならない。その場合、

- ① 処分用トンネル掘削中や操業中の周辺地下水の変化は、解析の精度を検証する上で必要である。その場合、Stripaプロジェクトの最終フェーズでも指摘されたように、トンネル周辺に発達する不飽和帯中の浸透流を解析する必要がある。Stripaプロジェクトでは対象とする岩は花崗岩であった。堆積軟岩ではその影響がさらに大きいと考えられる。
- ② 処分場建設中や操業中にトンネル壁面から発達する不飽和帯が、乾燥収縮に伴う割れ目 を発生、もしくは既存割れ目の開口を促進する可能性がある。つまり、ニアフィールド では不飽和浸透流の評価が極めて大事となる。

このような事から、まず解析の基礎となる不飽和特性(飽和度、サクション圧、不飽和透水係数の関係)を把握しなければならない。しかしながら、岩については理論的に不飽和特性を表現する式はない。そのため、従来から砂などの土壌に対して提案されてきた式の当てはめが行われてきた。砂など土壌に対して検討されてきた式には大別して2つがある。

- 連続関数で表現する式: van Genuchten式など
- ② Air entry valueなどの閾値を考える式: Campbell式, Brooks-Corey式など

従来は、解析の容易さから、連続関数で表現するvan Genuchten式の当てはめが多く行われてきた。しかし、その式の岩への適用の妥当性は理論的にも実験的にも検証されていない。そのことから、閾値を持つ式を想定して、Air entry valueなどの量の測定も行われている。この考えは、砂

などのように、飽和度の大きい状態で発生するサクション圧(毛管圧)が小さい媒体では閾値の 影響は無視できるものの、岩ではその値が大きく、無視できないことによるものと考えている。 このAir entry valueは、軟岩より花崗岩などでは内在する空隙径の小ささから見てとくに大きいと 想定できる。つまり、処分場建設・操業中のニアフィールドの浸透流解析を考えた時、

- ① どの式を岩の不飽和特性として選定するか
- ② どういう論理でその選定を行うか

を明らかにしておく必要がある。

昨年度の報告から、細粒砂岩試料については、蒸発量変化の経時変化の逆解析に基づき、定性 的であるがvan Genuchten式よりCampbell式の方が妥当性が高いことを示した。このことは、閾値 の重要性を明らかにしたものである。今年度は、この性質をさらに明らかにするため、 Brooks-Corey式についても検討した。さらに、今年度の研究で用いた逆解析手法の妥当性を検討 するため標準砂を用いた実験を行った。それらの結果を総合して、不飽和特性式を選定するプロ セスを提案した。

#### 2.2.3 用いた不飽和特性式

昨年度の報告では、下記の2式を検討した。

(1)Campbell式

$$k(\theta) = k_s \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^m$$
(2.2.1)  
$$\theta = \theta_s \left(\frac{\psi_e}{\psi}\right)^{\frac{1}{b}}$$
(2.2.2)

 $m = 2b + 3 \tag{2.2.3}$ 

ここに、 $\theta$ :体積含水率、 $\theta$ s:飽和時の体積含水率、 $\psi_e$ :空気侵入ポテンシャル(Air entry value : JKg<sup>-1</sup>~0.102m of water)、 $\psi(\theta)$ :水のマトリックス・ポテンシャル(JKg<sup>-1</sup>~0.102m of water)、b、 m:モデルが内在するパラメーター、 $k(\theta)$ :不飽和透水係数(ms<sup>-1</sup>)、ks:飽和透水係数(ms<sup>-1</sup>) である。

(2) van Genuchten式

$$k(\theta) = k_{s} \theta_{e}^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - \theta_{e}^{\frac{1}{2}}\right)^{l}\right]^{2}$$
(2.2.4)

$$\theta_{e} = \left(1 + \left|\alpha\psi\right|^{n}\right)^{l} \qquad (\alpha > 0) \qquad (2.2.5)$$

$$\theta_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \qquad (0 \le \theta e \le 1)$$
(2.2.6)

$$n = 1/(1-l) \qquad (0 < l < 1, n > 1) \tag{2.2.7}$$

ここに, $\alpha$  (m<sup>-1</sup>),1:係数, $\theta$ r, $\theta$ s:最小および最大含水率(m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>)である。 $\theta$ e:有効含水率(m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>)である。他のパラメーターの意味は(1)と同じである。

その結果, 閾値(Air entry value)を持つCampbell式の方が, 蒸発量の経時変化を表すには妥当 であることを示した。このことを検討するため, Brooks-Corey式を併せて検討した。

(3) Brooks-Corey式

$$\theta(\varphi) = \theta_r + (\theta_{sat} - \theta_r) \left(\frac{\varphi}{\varphi_b}\right)^{-\lambda} \text{ if } \varphi < \varphi_b$$

$$k = k_{sat} \left(\frac{\varphi}{\varphi_b}\right)^{-2-3\lambda} \text{ if } \varphi < \varphi_b$$
(2.2.9)

ここに,  $\varphi_b$  (Jkg<sup>-1</sup>)は bubbling pressure と呼ばれ, Air entry value と同様な意味を持つ。 $\lambda$ は Brooks-Corey の間隙径分布に関するパラメーターである。添え字 sat は, van Genuchten 式の添え 字 s と同様な意味である。

(1) Campbell式と(3) Brooks-Corey式を比較すると、パラメーターの名前は異なっていても、ほぼ同じ形式を持つことがわかる。これらとvan Genuchten式を比較すれば、閾値の重要性が評価できる。

### 2.2.4 実験およびパラメーターの逆推定法の概要

この手法は、既知の初期条件・境界条件の下で不飽和浸透流実験を行い、解析値と実験値が良 く合致するパラメーターを求めるものである。その方法は昨年度の報告に示した<sup>1)</sup>。今年度は手 法の概要を説明するに留めるが、この方法では薄いディスク状試料からの蒸発量の非定常変化を 用いる。ディスク状試料の下面および側面は止水材で被覆され、蒸発は上面からのみ生じそれに より試料内に一次元の不飽和流れが生ずる。試料内の流れは、毛管水の移動と試料内の水蒸気拡 散により表される。毛管水の移動解析は、Campbell,Brooks-Corey、van Genuchten式のいずれかを 用いて行い、相互の比較を行う。試料上面からの蒸発量は、上面の毛管圧と平衡状態にある空気 湿度と周辺の空気湿度との差に、試料からの可能蒸発量を乗ずることにより計算される。今まで 報告された多くの逆推定法では<sup>例えば2)</sup>、テンシオメーターなどで測定された試料内の飽和度分布や サクション圧分布を解析で合わせることにより行われることが多かった。また解析では毛管水の 移動のみを取り扱うことが一般的であった。しかし、岩では飽和度分布やサクション圧分布を測 定することが困難であり、蒸発量の非定常変化のほうが測定しやすい。その意味で、より合理的 な方法と言いうる。但し、蒸発量の非定常変化を把握するために、岩石試料では透水係数が小さいために時間が長くかかり、薄い(厚さ1~2cm程度)試料を用いる必要がある。

逆推定法では、各式が内在するパラメーター:

- Campbell  $\exists ; m, \psi_e$
- van Genuchten 式;  $\alpha$ , 1
- ・Brooks-Corey 式; $\lambda$ ,  $\varphi_h$

を推定しなければならない。これらの推定には、昨年度報告<sup>1)</sup>した遺伝的アルゴリズム(GA)の方 法を用いた。

# 2.2.5 研究結果

表2.2.1は、今年度の研究で用いた試料とそれらの長さ(L)、直径(D)、密度(ρb)、間隙率、飽和 透水係数(*ks*)を纏めたものである。試料は、六ヶ所村の鷹架層の細粒砂岩:3種類(Sandstone -1, 2, 3)と軽石凝灰岩:3種類(Pumice Tuff-1, 2, 3)を用いた。蒸発実験は、温度25 ℃、湿度40%に 設定された恒温恒湿槽内で行った。表2.2.2は本方法で推定した各式のパラメーターである。実験 で得られた蒸発量変化、解析された蒸発量変化等は後半にまとめて(図2.2.1~図2.2.6)示す。なお、 以下Campbell式、Brooks-Corey式、van Genuchten式をそれぞれ、CB、BC、VGと略記する。

Sample Name	L (cm)	D (cm)	ρb (gcm <sup>-3</sup> )	Porosity	ks (cm/sec)
Sandstone -1	3	9	1.81	0.42	4.0E-7
Sandstone -2	2	6	1.61	0.46	6.5E-7
Sandstone -3	2	6	1.56	0.46	7.5E-7
Pumice Tuff -1	3	9	1.70	0.52	4.2E-6
Pumice Tuff -2	2	7	1.46	0.58	4.8E-6
Pumice Tuff -3	2	7	1.53	0.52	3.6E-6

表 2.2.1 実験に用いた試料

	BC Model		CB Model		VG Model	
Sample Name	φb	λ	b	φe	α	1
	(m)			(m)	(m-1)	
Sandstone-1	-3.69	1.60	1.63	-4.00	0.01	0.40
Sandstone-2	-2.80	1.90	1.94	-3.90	0.01	0.30
Sandstone-3	-3.80	1.90	2.10	-3.90	0.01	0.40
Pumice Tuff-1	-2.40	2.86	2.90	-3.99	0.01	0.30
Pumice Tuff-2	-1.50	3.59	3.87	-1.71	0.06	0.20
Pumice Tuff-3	-2.50	4.00	3.88	-1.78	0.06	0.21

表 2.2.2 推定された各式のパラメーター (Brooks-Corey 式, Campbell 式, van Genuchten 式をそれぞれ, BC, CB, VGと略記)



図 2.2.1 Sandstone-1からの蒸発量変化の実測値と解析値の比較



図 2.2.2 Sandstone-2からの蒸発量変化の実測値と解析値の比較



図 2.2.3 Sandstone-3からの蒸発量変化の実測値と解析値の比較



図 2.2.4 Pumice Tuff-1からの蒸発量変化の実測値と解析値の比較



図 2.2.5 Pumice Tuff-2からの蒸発量変化の実測値と解析値の比較



図 2.2.6 Pumice Tuff-3からの蒸発量変化の実測値と解析値の比較

図2.2.1から図2.2.6に示される結果から、下記のことが読み取れる。

- 各試料とも初期の蒸発量が持続し、一定時間後に急激に低下し低い値となり、その値で 持続する。
- ② それらの傾向は、Campbell式とBrooks-Corey式により良く近似できる。
- ③ van Genuchten式では蒸発量変化傾向が良く近似できない。

従来から,岩石の不飽和特性をvan Genuchten式で近似する試みがなされている。これは,閾値 を持たない連続関数を用いた方法は不飽和浸透解析が行い易いことによるものである。しかし, 今回の結果は,その式を適用することの妥当性に疑いを持たせる結果である。とくに地層処分用 トンネルの壁面近傍の現象の解析では問題があると考えられる。

この点を考えるため,次に,各式で表される毛管圧,飽和度,不飽和透水係数の関係を調べた。 代表的な試料Sandstone-3, Pumice Tuff-2についてそれらの関係を示したのが,図2.2.7,図2.2.8で ある。図2.2.7は毛管圧と飽和度の関係,図2.2.8は不飽和透水係数と飽和度との関係を示している。 図2.2.7から,全体的な傾向は一致しているものの,飽和度の高い範囲でCampbell式とBrooks-Corey 式に比べてvan Genuchten式ではかなり差があることがわかる。これは、閾値の有無によるもので ある。今回の結果から,蒸発量変化で見る限り,この閾値を持った式の方がより妥当性が高いと 言える。次に,この理由を考えてみる。



図 2.2.7 Sandstone-3, Pumice Tuff-2の解析された飽和度と毛管圧関係



図 2.2.8 Sandstone-3, Pumice Tuff-2の解析された飽和度と不飽和透水係数関係

蒸発によって、試料は水を失って乾燥してゆく。つまり、全体的な体積含水率は減少する。一 定の蒸発量を補うためには試料内の水が試料上面に向かって流れることが必要であり、大きな圧 力勾配が必要となる。体積含水率が減少すれば、不飽和透水係数は減少するから、ますます圧力 勾配は大きくなる。つまり、試料上面の毛管圧(不圧)が大きくなることが必要である。試料上 面の毛管圧が小さくなれば、それに平衡する空気湿度が小さくなり、蒸発量は減少することにな る。しかし、実際には試料の乾燥初期には、ほぼ一定の大きな蒸発量を持つ。このことは、上面 の毛管圧の減少が大きくない、つまり、試料の下方からの水の供給がかなりあることを示してい る。換言すれば、不飽和透水係数の低下があまり大きくないと言える。この性質がCampbell式、 Brooks-Corey式のような閾値を持つ関数形で良く表しうることを示している。

Campbell式, Brooks-Corey式, van Genuchten式は, いずれも飽和度-毛管圧, 飽和度-不飽和 透水係数の関係を, 基本的には2つの共通パラメーターで表現するものである。これら一方の関係 が決まれば, 他方の関係も決まることになる。これは元々無理のある考え方と言える。とくに岩 石に対しては, van Genuchten式でその無理が大きく出たものと考えられる。

この性質を地層処分トンネルの壁面近傍の不飽和浸透解析に当てはめると,van Genuchten式で は、壁面のごく近傍の乾燥が加速され、蒸発も少なくなる。しかし実際には壁面の飽和度の減少 はこの式を用いて解析した場合より少なくなる一方、乾燥域の広がりは大きくなる事が想定され る。

#### 2.2.6 標準砂を用いたvan Genuchten式の適用性の再確認

van Genuchten式は、元々、砂質地盤の不飽和特性を理論的に導いた式である。以上述べた蒸発 量の非定常変化に対しても、砂質地盤であればこの式の適合性は高いはずである。その事を、新 たに作製した蒸発実験装置により検討した。実験装置の模式図を図2.2.9に示す。図中、高さ50cm の円筒形土槽に標準砂を充填する。円筒形土槽側面には土壌試料の取り出し口がついており、蓋 を外して試料を採取しうる。実験では飽和した状態から行った。なお、土槽下部に一定水頭を与 えた。蒸発を土槽上面から与え、その量を測定するために、土槽上面に蒸発チャンバーを取り付 けた。このチャンバーに乾燥した空気を流し、同時に他の排気口から排気する。蒸発量は、入気 と排気の湿度と風量から計算できる。図2.2.10は、実験中の温度、湿度および計算された蒸発量 変化をまとめて示した図である。

逆解析を行うにあたって、必要となるのは、試料からの可能蒸発量である。標準砂からの可能 蒸発量の推定は容易ではない。その事を模式的に示した図が図2.2.11であり、状態がStage(1)から Stage(4)に変化した時の蒸発量変化と可能蒸発量の模式図である。

標準砂の上面は凹凸があり、初期のStage(1)は表面に薄い水が覆っている事が多く、大きな蒸発量を示すが、これは可能蒸発量では無い。Stage(2)は表面の一部に水が貯まっている状態、 Stage(3)は、一部が不飽和になった状態である。Stage(4)は、表層が不飽和になった状態である。 これらの蒸発量はすべて可能蒸発量ではない。



(円筒形土槽に標準砂を充填。試料上面からの蒸発を加速するために、シリカゲル層を通した乾燥空気を上部の 蒸発チャンバーに入気、同時に排気。入気と排気の空気湿度の差に風量を乗じて蒸発量を計測する実験装置)



図 2.2.10 実験結果例(実験中の入気・排気の湿度・温度および計算された蒸発量変化)



図 2.2.11 可能蒸発量の推定の難しさ

可能蒸発量推定に用いた方法は下記のようにまとめられる。

- ① いくつかの可能蒸発量を仮定する。
- ② それらの可能蒸発量を用いて、蒸発量変化を計算する。
- ③ 実測蒸発量と計算蒸発量とのRMSEを計算する。
- ④ 最小RMSEとなる蒸発量を可能蒸発量とする。

図2.2.12に仮定した可能蒸発量とRMSEとの関係例を示す。この図からは、可能蒸発量は 6.4(mm/day)と推定できる。

この可能蒸発量を用いてCampbell式(CB), van Genuchten式(VG)で計算した蒸発量変化を実測 値と比較したものが図2.2.13である。両者の式とも,変化を良く表現している。詳細に検討する と,Campbell式の方が初期の蒸発量があまり低下していないことがわかる。これは、前述の堆積 軟岩でも見られた傾向である。実測値と比較して,標準砂の場合はvan Genuchten式の方がより良 く性質を表していると言える。図2.2.14は、推定された2つの式のパラメーターを用いて毛管圧, 飽和度,不飽和透水係数の関係を表したものである。この図から、とくに不飽和透水係数と飽和 度との関係に2つの式の関係に差が大きいことがわかる。乾燥した範囲ではCampbell式の方が不飽 和透水係数が小さい。この解析では、水分の移動は毛管水移動と水蒸気移動の和であり、不飽和 透水係数の違いがそのまま水分移動の差を表すものではない。

図2.2.15は、実験終了時の含水比分布の実測値と計算値の比較である。この図から、van Genuchten式の方がより妥当性が高いと考えられる。



(可能蒸発量を変えて蒸発変化を解析し、実測蒸発量とのRMSEを計算し、最小値を可能蒸発量とする)

図 2.2.12 可能蒸発量の推定法



図 2.2.13 蒸発量変化の実測値と計算値との比較



## 2.2.7 平成22年度研究の結論とニアフィールドコンセプト

今回, 蒸発量変化の逆解析に基づいて, 岩石, とくに堆積軟岩の不飽和特性について検討した。 その結果, 下記の結論が得られた。

- Campbell式, Brooks-Corey式, van Genuchten式の妥当性を検討した結果, 軟岩には閾値を持 つCampbell式, Brooks-Corey式の適応性が高い。
- ② パラメーター推定手法の検討のため、標準砂を用いた解析を行った結果,砂に対してはvan Genuchten式の妥当性が高い。
- ③ 軟岩中の処分用トンネル近傍の不飽和浸透流解析では、Campbell式, Brooks-Corey式の適応 性が高いと思われる。
- ④ 軟岩と同様,花崗岩などについても,不飽和透水特性の式を十分に検討しておく必要がある。

本委員会では、平成22年度から分野間・要素技術間の中間領域を考慮した地質環境調査・評価 技術の高度化・体系化のために、

- ・実際の地質環境下における連成現象を考慮したニアフィールド(NF)コンセプトの再構築
- ・各分野・要素技術間の連携を考慮した体系的な地質環境調査技術の開発

に関する研究を開始しているため、本年度は、遺伝的アルゴリズム(GA)やニューラルネットワーク (ANN)を用いた水圧変動解析, Ant Colony Optimization を用いたニアフィールドにおける物質 移動解析も行ったが、まだ報告できる内容に至っていない。機会があれば別途、もしくは来年度報告する。

## 2.2.8 参考文献

- 小島圭二・大西有三・渡辺邦夫・西垣 誠・登坂博行・嶋田 純・青木謙治・杤山 修・吉田 英一・尾方伸久・西尾和久(2010):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 21年度-(委託研究), JAEA-Research 2010-049.
- Amarasinghe R., Watanabe K., Abouzeid G.(2010) : Inverse estimation of unsaturated properties from evaporation based on Campbell and van-Genuchten models, Ann. Jour. Hydraulic Engineering (CD-ROM), JSCE, Vol.54.

(埼玉大学 渡辺邦夫)

2.3 地下坑道周辺岩盤におけるグラウト効果の評価・解析に関する研究
 -粘性の経時変化や目詰まりを考慮したグラウト注入過程の数値シミュレーション-

## 2.3.1 はじめに

岩盤構造物の建設において,構造物に要求される性能を満たすため,地下水流動を制御し,対 象岩盤を所要の透水性を持つ岩盤に改良することが必要である。グラウトは対象岩盤に掘削した ボーリング孔より,セメントと水を諸配合で混ぜ合わせたグラウトを加圧注入することによって, 岩盤中に存在する亀裂などの不連続面からなる岩盤の遮水性や変形特性を改良する工法であり, その最も一般的な工法として古くから用いられてきた。しかしながら,グラウトは地中で注入孔 から複雑な性状の岩盤割れ目に注入するため,グラウト材の注入・浸透・閉塞の過程は未だ十分 に解明されておらず,注入圧力などの施工パラメータですら技術者の経験に依存しているのが現 状である。また,高レベル放射性廃棄物の地層処分における処分施設の建設においては,これま でに対象とされてこなかった大深度地下(地下500m以深)においてグラウトが検討されており,グ ラウト材料・注入圧の検討を含めたグラウト注入工法およびグラウト注入効果の把握が重要な検 討課題となっている。

効率的かつ効果的な注入工法の開発にはグラウト注入過程のメカニズムの解明が必要不可欠で あるが、岩盤内の亀裂性状は非常に複雑であり、浸透挙動の直接把握は極めて困難である。この ため、原位置での調査・実験だけでなく室内実験によるグラウトの浸透特性の解明を目的とした 研究や施工方法の指針の確立のためのグラウト注入過程の解析モデルの開発・構築を目的とした 研究が行われている。グラウト注入過程においては岩盤内の流路形態やグラウトの流動特性およ びその経時変化をはじめ、様々な物理・化学現象条件が複雑に絡み合っているため、注入後の閉 塞・充填過程をモデル化することは容易ではない。しかし、対象岩盤の地質環境に応じた合理的 なモデルの構築によって、グラウトによる改良範囲および改良効果の把握が可能となれば、施工 現場において効率的な工法の開発に繋げることが可能である。そのため、グラウト注入過程のモ デル化は重要な課題であり、これまで様々な解析モデルが検討されているが、いずれも十分な検 証を経たグラウト注入の制御・実用化の段階までは至っていないのが現状である。また、複雑か つ多様な日本の地質条件を一つのモデルで解析することは困難であり、モデル化に際してはそれ ぞれの岩盤特性に合ったものを選定することが重要である。最近では亀裂性岩盤を平行平板やパ イプおよびそれらが互いに繋ったネットワークとしてモデル化されることが多いが、多孔質媒体 として取り扱うことが多い堆積岩や断層・破砕帯など岩盤内に多数の亀裂を有する岩盤において は、上述のネットワークモデルでは、十分に表現できているとは言い難い。一方、建設サイトの 地質条件の多様化に伴い、個々の地質条件に合った解析モデルが必要とされている。

これらの現状を踏まえ、モデル化に関する知見の少なかった多孔質媒体を対象とした新たなグ ラウト注入過程のモデル構築を行った。なお、グラウトの注入過程をモデル化するにあたり、特 にグラウトの粘性の経時変化および目詰まりによる透水媒体の間隙率の経時変化について注目し た。また、解析コードの開発においては以下の点について考慮した。

三次元への拡張

### ② 不連続面を陽に表現するためのシェル要素の導入

本報告では,現場注入を想定した簡易モデルの解析を実施することで,新たに開発した解析コ ードの妥当性の検討を行った。

### 2.3.2 解析方法

### 2.3.2.1 解析手順

本解析ではグラウトの浸透挙動は、ニュートン流体を仮定し、有限要素法(FEM)により、二次 元円柱モデル(擬似三次元)の浸透流および移流分散解析を行う。浸透流の支配方程式は、質量保 存則(連続式)およびダルシーの法則により式(2.3.1)のように導かれる。

$$\partial_i (\rho \theta) = \left( K_{ij} h_j \right)_i - q \tag{2.3.1}$$

ここで、 $K_{ij}$ :透水係数テンソル、 $h_j$ :全水頭、q:流出入量、 $\rho$ :流体の密度、  $\theta$ :体積含水率( $\theta$ =n・Sw、n:間隙率、Sw:飽和度)である。

また、移流・分散解析の支配方程式は式(2.3.2)で表せられる。

$$\partial_{i}(\rho\theta C) = (\rho\theta D_{ij}C_{j})_{i} - (\rho\theta V_{i}C)_{i} + Q_{c}$$
(2.3.2)

ここで、C: グラウト濃度、 $D_{ij}$ : 分散テンソル、 $V_i$ : 実流速、 $Q_c$ : 流出入量である。 なお、本解析方法は、以下に示すとおり、経時的に地盤が改良されている状態を、順次追跡する計算方法(順解析)である。図2.3.1に解析手順を示している。

- ① 時間t=0で注入開始
- ② 1分後の注入モデル(dt後の透水係数の離散化モデル)を作成する。まず、グラウト濃度および粘性の変化による透水係数の低減、グラウトの注入圧の変化(境界条件の変化)を考慮して、式(浸透流)を解き、得られた流速を式(移流分散)の右辺第2項に用いる。
- ③ ②で作成したモデルを用いて、式(移流分散)を解き、各節点に関して求められた濃度分布 を各要素での平均濃度分布として整理し透水係数分布を再構築することで、次の時間ステ ップモデルを作成する。
- ④ 以下,②,③を所定の時間まで繰り返す。



図 2.3.1 解析手順

また,濃度および粘性の経時変化のモデルについては以下に示す。本モデルでは,グラウトの 注入・浸透・閉塞の過程を透水係数の低減として扱うことを考える。

そこで、第一段階として、グラウトの粘性の経時変化を考慮した注入過程モデルについて言及 する。グラウト注入対象を多孔質体とすると、透水係数kは間隙流体の性質に依存しない媒体の 固有透水係数k,流体(グラウト)の粘性 $\mu$ ,流体(グラウト)の単位体積重量 $\gamma(=\rho g)$ を用いて式 (2.3.3)で定義される。

$$k = K \frac{\gamma}{\mu} \tag{2.3.3}$$

さらに、粘性係数の経時変化を考慮すると式(2.3.3)より、ある時間tにおける透水係数k(t)は式(2.3.4)で表現できる。

< >

$$k = K \frac{\gamma}{\mu(t)} = \frac{K\gamma_0}{\mu_0} \cdot \frac{\gamma(t)}{\gamma_0} \cdot \frac{\mu_0}{\mu(t)} = k_0 \cdot C_f$$
(2.3.4)

ここで、 $\gamma_0$ :初期単位体積重量、 $k_0$ :初期透水係数であり、 $C_f$ :粘性係数の経時変化に伴う 透水係数の低減関数である。またグラウトの粘性の経時変化を表現する式としてKobayashi<sup>1)</sup>らに よって式(2.3.5)が提案されている。

$$\mu(t) = \mu_0 \cdot e^{\beta \cdot t} \quad t < 3600 \text{ sec}$$
 (2.3.5)

式(2.3.5)より粘性係数の経時変化に伴う透水係数の低減関数 $C_f$ は時間に依存する係数 $\beta$ を用いて式(2.3.6)のように表せられる。

$$C_f = \frac{\mu_0}{\mu(t)} = \frac{1}{e^{\beta \cdot t}}$$
(2.3.6)

他方、高濃度グラウトの注入後のグラウト注入量の急激な減少は、グラウトの粘性の経時変化

のみで表現することが困難であることから、本解析モデルでは、粘性の経時変化に加えて、グラウト注入による多孔質媒体の目詰まりに伴う透水係数の低減を考慮したモデルを適用させている。 すなわち、前述した固有透水係数および粘性係数の経時変化に加えて、目詰まりに伴う透水係数 の低減効果を考慮すると、ある時間tにおける透水係数k(t)は式(2.3.7)で表現できる。

 $\sim$ 

$$k(t) = K(t)\frac{\gamma}{\mu(t)} = \frac{K_0\gamma}{\mu_0} \cdot \frac{K(t)}{K_0} \cdot \frac{\mu_0}{\mu(t)} = k_0 \cdot C_s \cdot C_f$$
(2.3.7)

ここで、 $K_0$ :初期固有透水係数、 $\mu_0$ :初期粘性、 $k_0$ :初期透水係数であり、 $C_s$ 、 $C_f$ はそれ ぞれ目詰まり、および粘性の経時変化に伴う透水係数の低減関数である。

このような目詰まり関数の適用として、多孔質媒体の間隙である複雑な流路を単純化して細い 円管と仮定し、流体を層流としてHagen-Poiseuilleの式<sup>2)</sup>を適用することにより、固有透水係数(K) と間隙率(n)の関係式は式(2.3.8)のように導かれる。

$$K = C \frac{n^3}{(1-n)^2} d^2$$
(2.3.8)

ここで、C:定数、d:多孔質媒体の平均粒径であり、この関係式はCozeny-Carmanの式<sup>3)</sup>として時間tにおける固有透水係数の低減率 ( $K(t)/K_0$ )は、グラウト注入による多孔質媒体の平均 粒径dの増加を無視できるとすると、時間tにおける間隙率n(t)および初期間隙率 $n_0$ を用いて式 (2.3.9)で表される。

$$\frac{K(t)}{K_0} = \frac{n(t)^3}{(1-n(t))^2} \cdot \frac{(1-n_0)^2}{n_0^3} \equiv C_s$$
(2.3.9)

上述の方法により透水媒体の目詰まりによる透水係数の低減率は間隙率の経時変化による透水 係数の低減率として定量的に表現できる。したがって、多孔質媒体の目詰まりによる透水係数の 低減については、理論上は上式を用いて計算することが可能であるが、これまで、目詰まりによ る間隙率の経時変化すなわち間隙率の減少について、室内試験などで計測した例はなく、本解析 モデルでは、目詰まりによる透水係数の低減率 $C_s$ を粘性経時変化による低減率と同様に指数関数 で与えられると仮定した。

#### 2.3.2.2 移流パラメータの設定

グラウトに関する移流分散の各パラメータは以下の通り設定する。

### 分散長

分散長は、縦分散長と横分散長に分けられ、縦分散長は流れ方向に地下水の流速に先行して濃 度がぶれる度合いを表し、横分散長は流れに直交する方向への濃度のぶれの度合いを表す(図 2.3.2)。分散長は、巨視的な地盤の不均質性による流速のばらつきにより移行距離に依存し、縦 分散長は、物質の輸送距離の0.1、横分散長は縦分散長の0.1~0.01と言われている。本解析では解 析モデルの規模に応じてグラウト注入距離を推定しこれを輸送距離として設定している。



図 2.3.2 分散長設定の例<sup>2)</sup>

## ② 分子拡散係数

分子拡散とは、分子のランダムな運動によって引き起こされる水粒子の錯乱現象のことであり、 物質が濃度の高い方から低い方へ向かう割合を示したものを分子拡散係数として表す。本解析に おいては、表2.3.1に示すMaryら<sup>4)</sup>の値からみて、金属イオン関係の0.6~1.1×10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/secから1.0×10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/secを設定している。

陽イオン	$D_{\rm o}(\times 10^{-10}{\rm m}^2/{\rm s})$	陰イオン	$D_{\rm o}(\times 10^{-10}{\rm m}^2/{\rm s})$
$\mathbf{H}^+$	93.1	OH <sup>-</sup>	52.7
Na <sup>+</sup>	13.3	· F <sup>-</sup>	14.6
K <sup>+</sup>	19.6	Cl_	20.3
Rb <sup>+</sup>	20.6	Br <sup>-</sup>	20.1
Cs <sup>+</sup>	20.7	HS <sup>-</sup>	17.3
		$HCO_3^-$	11.8
Mg <sup>2+</sup>	7.05		-
Ca <sup>2+</sup>	7.93	CO3 <sup>2-</sup>	9.55
Sr <sup>2+</sup>	7.94	SO4 <sup>2-</sup>	10.7
Ba <sup>2+</sup>	8.48		
Ra <sup>2+</sup>	8.89		
Mn <sup>2+</sup>	6.88		
Fe <sup>2+</sup>	7.19		
Cr <sup>2+</sup>	5.94		
Fe <sup>3+</sup>	6.07		

表 2.3.1 分子拡散係数の例(@25℃水中)<sup>4)</sup>

## ③ 屈曲率

屈曲率は、分子拡散係数を有効分子拡散係数として、例えば多孔質媒体中に適応するための修 正項として用いられるものであり、拡散が支配的な場では屈曲率の値が問題となるが、本試験に おいては、常時グラウト溶液は注入され、地下水が流動しているため相対的に分子拡散係数の与 える影響は少ない。従って屈曲率は1とする。

#### ④ 遅延係数

遅延係数は、物質の化学的吸着、収着、イオン交換、および土壌等への吸着によって汚染物質 の移動速度を遅くする効果に関するパラメータである。塩化物イオンは非吸着性の物質であるた め、本解析では遅延効果(遅延係数)は見込まない。

## ⑤ 減衰定数

塩化物イオンの微生物分解等による減衰については不明であるため、本解析においては見込ま ない。

#### 2.3.3 解析モデル

### 2.3.3.1 グラウト注入に伴う透水係数低減特性

本解析モデルでは、グラウト注入に伴う透水係数低減率は、式(2.3.10)から設定している。

$$k(t) = K(t) \frac{\gamma}{\mu(t)} = k_0 \cdot C_s \cdot C_f = k_0 (1/e^{\beta t} \cdot 1/e^{\gamma t})$$
(2.3.10)

ここで、k(t):ある時間tにおける透水係数k(t)、 $k_0$ :初期固有透水係数,  $k_0$ :初期透水係数であり、 $C_s$ 、 $C_f$ はそれぞれ目詰まり、および粘性の経時変化に伴う透水係数の低減関数である。式 (2.3.10)において粘性項 $C_f$ の $\beta$ は室内粘性試験から得られるが、目詰まり項 $C_s$ の $\gamma$ はパラメータスダディから設定している。具体的には以下の手順となる。

- 粘性実験(図2.3.3)から粘度-濃度相関式を設定する。関数式に置き換え、室内粘性実験を 基に粘性に伴う透水係数低減率を設定する。
- ② 目詰まりによる低減率γは、関数系で表現し、μ(C, t)式のβを粘性実験から得られた濃度 ー時間変化係数を固定し、βの係数および時間項の係数をパラメータとして、最適な係数γを 設定する。
- ③ ①と②より、グラウト材料の配合比に応じた透水係数低減率の関数式が求められる。図2.3.4 には、本解析における超微粒子シリカグラウトの透水係数低減率を示す。



図2.3.3 各配合比における設定関数(超微粒子グラウトの場合)

### JAEA-Research 2011-033



(グラウト溶液濃度と粘性による透水係数低減率の関係)

## 図 2.3.4 粘性実験結果による透水係数低減率の設定

### 2.3.3.2 解析モデル

解析モデルは、図2.3.5に示した20m×20m×35mの岩体を想定し、解析メッシュは一辺0.5mの立方体で分割し、総要素数は112000要素の三次元モデルである。解析モデルの諸元は表2.3.2に示すとおりである。

	延長(m)	分割数
X軸	35	70
Y軸	20	40
Z軸(鉛直方向)	20	40

表 2.3.2 解析モデル諸元

また, グラウト注入区間は, 同図に示すとおり, L=35mのボーリング孔奥部の25~30m区間(5m, の注入区間) としている。



## 2.3.3.3 解析ケース

本解析では破砕帯条件を考慮するため、図2.3.6に示すとおり、シェル要素とビーム要素を採用し、両要素の水理定数および濃度拡散パラメータも合わせて示している。



図 2.3.6 破砕帯要素(シェル要素,ビーム要素)の組み込み

解析ケースは、表2.3.3に示すとおり、破砕帯なしの岩盤(CASE4S-0)を含めて、シェル要素、 ビーム要素の透水係数を3区分に変化させたケースを行っている。破砕帯なしの岩盤の透水係数 は、異方性を持たない1.0×10<sup>-8</sup> m/secを想定している。

解析ケース		ᇡᇄᄬᇑᆂ	透水係数(m/sec)		
直交差	斜交差		岩盤部	破砕帯要素	
4S-0		破砕帯なし 岩盤のみ	1.00E-08	_	
1S-1	1S-2		1.00E-08	1.00E-05	
2S-1	2S-2	シェル要素		1.00E-06	
3S-1	3S-2			1.00E-06	
1B-1				1.00E-05	
2B-1		ビーム要素	1.00E-08	1.00E-06	
3B-1				1.00E-06	

表 2.3.3 解析ケース

## 2.3.3.4 注入条件

各解析ケースにおけるグラウト注入条件は、図2.3.7(1)~(2)に示すとおり注入時間を40分間と し、50m~240mの段階的に注入圧を変化させた場合を想定している。なお、モデル側面の初期水 圧は40mとしているため、注入圧は初期水圧との差圧に相当している。また、図2.3.7(2)はグラウ ト注入濃度の時間変化(一定)を示し、この注入濃度は、粘性試験時の配合比と同じグラウト濃 度を設定している。



図 2.3.7(2) グラウト注入濃度(入力値)

# 2.3.4 解析結果

# 2.3.4.1 グラウト濃度分布

各解析ケースにおけるグラウト浸透距離は、図2.3.8~図2.3.10に示した。

図2.3.8は岩盤のみのケースと直交差シェル要素を含んだケースの浸透距離(水平方向,鉛直方向)を示している。各ケースとも40分後の浸透距離である。同図によれば,岩盤のみでは0.5~0.6m 程度,シェル要素の透水性が3オーダー大きい場合では2.2~2.3m程度まで到達している。



(上図は水平方向,下図は鉛直方向)

図 2.3.8 直交差シェル要素におけるグラウト濃度と浸透距離

図2.3.9も同様に、斜交差シェル要素を含んだケースの浸透距離(水平方向、鉛直方向)を示している。各ケースとも40分後の浸透距離である。同図によれば、岩盤のみでは0.5~0.6m程度、シェル要素の透水性が3オーダー大きい場合では2.2~2.3m程度到達している。殆ど直交差シェル要素の場合と同様な傾向が認められる。



(上図は水平方向,下図は鉛直方向)

図 2.3.9 斜交差シェル要素におけるグラウト濃度と浸透距離

図2.3.10も同様に,直交差ビーム要素を含んだケースの浸透距離(水平方向,鉛直方向)を示 している。各ケースとも40分後の浸透距離である。同図によれば,岩盤のみでは0.5~0.6m程度, ビーム要素の透水性が3オーダー大きい場合では1.0~1.1m程度到達している。シェル要素の場合 に比べて減少している。



(上図は水平方向,下図は鉛直方向)

図 2.3.10 直交差ビーム要素におけるグラウト濃度と浸透距離
### 2.3.4.2 注入区間断面におけるグラウト濃度分布

図2.3.11~図2.3.13には、グラウト注入区間(25~30m)の中央断面におけるグラウト濃度分布の経時変化(5分,20分,40分)を示している。各図とも岩盤のみ(10<sup>-8</sup> m/sec)のケースと高透水性(10<sup>-5</sup> m/sec)のシェル要素やビーム要素を比較して示している。また、図2.3.14~図2.3.17には、各解析ケース(岩盤のみ、直交差・斜交差シェル要素導入モデル)についてグラウト濃度分布、注入時全水頭分布および透水係数(X,Y,Z軸方向)の経時変化を示している。以上の図よりシェル要素(高透水ゾーン)に沿ったグラウト浸透が顕著となり、浸透距離は亀裂の交差角に大きく影響されることがわかる。



 <sup>(</sup>岩盤部 k=1.0E-8 m/sec シェル要素 k=1.0E-6 m/sec)
 図 2.3.11 直交差シェル要素におけるグラウト濃度の経時変化



(岩盤部 k=1.0E-8 m/sec シェル要素 k=1.0E-6 m/sec)

### 図 2.3.12 斜交差シェル要素におけるグラウト濃度の経時変化



(岩盤部 k=1.0E-8 m/sec ビーム要素 k=1.0E-6 m/sec)

# 図 2.3.13 直交差ビーム要素におけるグラウト濃度の経時変化



(岩盤部 k=1.0E-8 m/sec)

図 2.3.14(1) 岩盤部のみのグラウト濃度の経時変化



(岩盤部 k=1.0E-8 m/sec)

図 2.3.14(2) 岩盤部のみの注入時全水頭の経時変化



(岩盤部の初期透水係数 kx=1.0E-8 m/sec)

図 2.3.14(3) 岩盤部のみのグラウト注入に伴う透水係数 (X 軸)の経時変化



(岩盤部の初期透水係数 ky=1.0E-8 m/sec)

# 図 2.3.14(4) 岩盤部のみのグラウト注入に伴う透水係数 (Y 軸)の経時変化



(岩盤部の初期透水係数 kz=1.0E-8 m/sec)

図 2.3.14(5) 岩盤部のみのグラウト注入に伴う透水係数(Z軸)の経時変化



(岩盤部 k=1.0E-8 m/sec シェル要素 k=1.0E-5 m/sec)

# 図 2.3.15(1) 直交差シェル要素におけるグラウト濃度の経時変化



(岩盤部 k=1.0E-8 m/sec シェル要素 k=1.0E-6 m/sec)

図 2.3.15(2) 直交差シェル要素におけるグラウト濃度の経時変化



(岩盤部 k=1.0E-8 m/sec シェル要素 k=1.0E-7 m/sec)

図 2.3.15(3) 直交差シェル要素におけるグラウト濃度の経時変化



(岩盤部 k=1.0E-8 m/sec シェル要素 k=1.0E-5 m/sec)

図 2.3.16(1) 斜交差シェル要素におけるグラウト濃度の経時変化



(岩盤部 k=1.0E-8 m/sec シェル要素 k=1.0E-6 m/sec)

図 2.3.16(2) 斜交差シェル要素におけるグラウト濃度の経時変化



(岩盤部 k=1.0E-8 m/sec シェル要素 k=1.0E-7 m/sec)

図 2.3.16(3) 斜交差シェル要素におけるグラウト濃度の経時変化



(岩盤部 k=1.0E-8 m/sec ビーム要素 k=1.0E-5 m/sec)

図 2.3.17(1) 直交差ビーム要素におけるグラウト濃度の経時変化



(岩盤部 k=1.0E-8 m/sec ビーム要素 k=1.0E-6 m/sec)

図 2.3.17(2) 直交差ビーム要素におけるグラウト濃度の経時変化



(岩盤部 k=1.0E-8 m/sec ビーム要素 k=1.0E-7 m/sec)

図 2.3.17(3) 直交差ビーム要素におけるグラウト濃度の経時変化

## 2.3.5 今後の課題

本報告では、多孔質媒体を対象としたグラウト注入モデル構築を行った。亀裂性岩盤に本モデ ルを適用するには、亀裂ネットワークモデルから等価な多孔質媒体モデルに置き換える必要があ る。また、シェル要素を導入することで不連続面を陽な形で組み込むことも可能である。今後以 下に挙げる点について更なる検討が必要である。

- 等価連続体への置き換え
- 透水異方性の考慮
- グラウト材に応じた粘性の経時変化の把握
- 透水媒体の目詰まりのメカニズムの解明および定式化

## 2.3.6 参考文献

- Kobayashi S. and Stille H. (2007): Design for rock grouting based on analysis of grout penetration, ISSN 1402-3091, SKB Report R-07-13.
- Spitz K, Moreno J, 岡山地下水研究会(翻訳)(2003):実務者のための地下水環境モデリング, 技報堂出版.
- 3) Li YH. and Gregory S. (1974): Diffusion of ions in seawater and in deep-sea sediments, oxford : Pergamon Press.
- 4) Mary P., William W. (1992): Aplied groundwater modeling –Simulation of flow snd advective transport-.

### 2.3.7 考察

ニアフィールドコンセプトの再構築においては、ニアフィールド環境におけるバリア機能の適 正な評価が不可欠である。結晶質岩の割れ目の止水のために使用するグラウト材は坑道周辺の数 m~10m の領域に存在する水みちとなっている割れ目に注入されると考えられ、ニアフィールド 環境を構成する材料となりうる。また、注入されたグラウト材と岩盤の相互反応についても今後 検討が必要であり、そのためには数値解析によるグラウト注入メカニズムの把握および適正なグ ラウト注入範囲の予測が必要不可欠である。

(京都大学 大西有三)

#### 2.4 地層処分における不均質媒体中の塩淡密度流・物質移行の追跡手法に関する研究

### 2.4.1 はじめに

地層処分における,廃棄体からの漏洩核種の人工バリア,ニアフィールド,ファーフィールド における移行の解析は,長期の安全性を検討する上での非常に重要なテーマである。

長期の物質移行解析には,塩淡密度差のように流れ場を大きく変化させる要因から,核種の吸 着,溶解,移流,分散過程までを扱う必要がある。

このような地下水に乗った物質の移行は移流分散方程式によって表される。数値計算上,移流 分散方程式の解法としては様々なものが考えられている。代表的なものとして,風上法があり, 陰的風上法では質量を保存しながら極めて安定に密度流を含む移流分散を解くことが出来る<sup>1),2)</sup>。 しかし,風上法は人工粘性(数値分散)の導入により安定化されているため,移流方程式の解法 としては厳密ではないため移流分散の解法として利用する際には注意が必要となる。

自然の地層は堆積岩であれ火成岩であれ、様々なスケールの不均質性により大きな分散効果を 有するため、風上法が適度な空間分割・時間分割で使われる場合には必ずしも悪い方法ではない が、解の適切性を保証することは難しい場合がある。

数値分散を抑制する方法として、特性曲線法、三次補間を利用した各種TVD(Total Variation Diminishing Schemes)、多数の粒子の動きから濃度を求めるMAC(Marker And Cell)<sup>3),4),5),6)</sup>など があり、矢部ら<sup>7)</sup>によるCIP(Conatained Interpolation Profile Sheme)法がある。

ここでは、数値分散を抑制し、最終的に超長期の計算への適用性が有望と考えられるCIP法の 導入を検討した。本章では、2.4.7参考文献<sup>8),9),10),11),12</sup>に基づき、特に室内実験結果との比較を通 じて、風上法およびCIP法の適用性について論じる。

#### 2.4.2 塩淡密度流の支配方程式

地下の2相ダルシー流れと塩水の移流分散の支配方程式は次のようになる。

$$\nabla \cdot \left( \frac{(\rho_w - C)\mathbf{K}k_{rw}}{\mu_w} \nabla \Psi_w \right) - \rho_w q_w = \frac{\partial}{\partial t} ((\rho_w - C)\phi S_w)$$

$$\nabla \cdot \left( \frac{\rho_g \mathbf{K}k_{rg}}{\mu_w} \nabla \Psi_w \right) - \rho_w q_w = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w - C)\phi S_w$$
(2.4.1)

$$\nabla \cdot \left( \frac{\partial \varphi}{\partial t} \nabla \Psi_g \right) - \rho_g q_g = \frac{\partial \varphi}{\partial t} \left( \rho_g \varphi S_g \right)$$
(2.4.2)

$$\nabla \cdot \left(\frac{C\mathbf{K}k_{rw}}{\mu_{w}}\nabla\Psi_{w}\right) + \nabla \cdot \left(\mathbf{D}_{\phi}\nabla C\right) - C_{inj}q_{w} = \frac{\partial}{\partial t}\left(C\phi S_{w}\right)$$
(2.4.3)

ここで、 $\rho,\mu$ は流体密度、粘性係数、 $K,k_{n\nu}$ は絶対浸透率および相対浸透率、 $C,\Psi$ は溶質濃度 およびポテンシャル、 $\phi,S_{\nu}$ は間隙率および水飽和率、 $D_{\phi}$ は岩石中の拡散係数である。なお、絶 対浸透率および拡散係数はテンソルである<sup>13)</sup>。

ここで,(2.4.3)式は,溶質の移流分散方程式で,左辺第1項が移流項,第2項が分散項に相当 する。希薄溶液の場合には,(2.4.1)(2.4.2)式から決まる流速場から(2.4.3)式を独立に解いて も十分であるが、塩淡密度流の場合には、濃度の変化が流速場を変化させることから、3つの式を 連立させることが望ましい。このため、風上差分法と同時完全陰解法を用いて解くことが最も安 定で実用的である。

しかし,風上差分法では,数値分散の大きさが問題となることがある。そのため,それを抑制 する方法として以下に述べるCIP法を導入する(矢部ら<sup>7)</sup>に従って紹介する)。

#### 2.4.3 数値拡散を抑えた手法の導入-CIP法-

### 2.4.3.1 数値拡散とは

一般的な一次元移流拡散方程式,

$$-u\frac{\partial f}{\partial x} + D\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{\partial f}{\partial t}$$
(2.4.4)

を、陰的一次風上差分および中心差分により展開すると下式のようになる。

$$-u\frac{f_{i}^{n+1}-f_{i-1}^{n+1}}{\Delta x} + D\frac{f_{i-1}-2f_{i}+f_{i+1}}{\Delta x^{2}} = \frac{f_{i}^{n+1}-f_{i}^{n}}{\Delta t} \quad (up - winding)$$
$$-\frac{u}{\Delta x} \left(\frac{f_{i+1}^{n+1}+f_{i}^{n+1}}{2} - \frac{f_{i}^{n+1}+f_{i-1}^{n+1}}{2}\right) + D\frac{f_{i-1}-2f_{i}+f_{i+1}}{\Delta x^{2}} = \frac{f_{i}^{n+1}-f_{i}^{n}}{\Delta t} \quad (central) \quad (2.4.5)$$

風上差分法の左辺第1項は中心差分の左辺第1項に拡散項を加えた形となっている。

$$-u\frac{f_{i}^{n+1}-f_{i-1}^{n+1}}{\Delta x} = -\frac{u}{\Delta x} \left(\frac{f_{i+1}^{n+1}+f_{i}^{n+1}}{2} - \frac{f_{i}^{n+1}+f_{i-1}^{n+1}}{2}\right) + \left(\frac{u\Delta x}{2}\right) \left(\frac{f_{i-1}^{n+1}-2f_{i}^{n+1}+f_{i+1}^{n+1}}{\Delta x^{2}}\right)$$
(2.4.6)

ここで、右辺第2項は拡散に関わる2階微分の差分展開式となっており、その係数(uΔx/2)は人 工粘性あるいは数値拡散と呼ばれ、これにより解は安定化するが、同時に過大な拡散効果が入る 可能性がある。図2.4.1は実線で示された濃度の移流解が、右に移動すると共に数値拡散により崩 れてゆく様子を示している<sup>14)</sup>。



図 2.4.1 一次風上法による数値拡散の例<sup>14)</sup>

### 2.4.3.2 CIP法

### (1) 一次元 CIP 法

CIP法では、状態量に関する移流方程式と同時に、その空間微分の形が保存される(プロファ イルが保存される)ことを以下のように表現する。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial g}{\partial t} + u \frac{\partial g}{\partial x} = -g \frac{\partial u}{\partial x}$$
(2.4.7)
$$(2.4.8)$$

ここで、 $g = \partial f / \partial x$ であり、上記第2式の右辺は速度場が一定ならば0となる。Quickestなどの他 手法と同じ点は三次補間を使うことであるが、違う点は空間微分値も使ってプロファイルを補間 するという点である。

今2つのメッシュi, i-1の間のプロファイルを

$$F_i(x) = a_i(x - x_i)^3 + b_i(x - x_i)^2 + c_i(x - x_i) + d_i$$
(2.4.9)

の様に三次多項式で表す。この時の未知係数*a<sub>i</sub>*,*b<sub>i</sub>*,*c<sub>i</sub>*,*d<sub>i</sub>を次のように求める。* 

点i, i-1の2点における f とその微分値、 $f_i, f_{i-1}, g_i, g_{i-1}$ から、格子点間[i-1, i]の内部のプロフ アイルを表す関数  $F_i(x)$ が端点でこれらの値と微分値を取るという条件で、

$$F_{i}(x_{i}) = d_{i} = f_{i}$$

$$\frac{dF_{i}(x_{i})}{dx} = c_{i} = g_{i}$$

$$F_{i}(x_{i-1}) = -a_{i}\Delta x^{3} + b_{i}\Delta x^{2} - c_{i}\Delta x + d_{i} = f_{i-1}$$

$$\frac{dF(x_{i-1})}{dx} = 3a_{i}\Delta x^{2} - 2b_{i}\Delta x + c_{i} = g_{i-1}$$
(2.4.10)

これより式 (2.4.9) の各係数が求められ,

$$a_{i} = \frac{g_{i} + g_{iup}}{D^{2}} + \frac{2(f_{i} - f_{iup})}{D^{3}}$$

$$b_{i} = \frac{3(f_{iup} - f_{i})}{D^{2}} - \frac{2g_{i} + g_{iup}}{D}$$

$$c_{i} = g_{i}$$

$$d_{i} = f_{i}$$
(2.4.11)

となる。

ここで $iup = i - 1, D = -\Delta x$ であり、もし流速uが負であるなら、 $iup = i + 1, D = \Delta x$ となる。 以上より、次の時刻n+1での値は、このプロファイルを $u\Delta t$ だけ移動したもの、

 $f^{n+1} = F(x - u\Delta t), g^{n+1} = dF(x - u\Delta t)/dx$ で与えられる。具体的には,

$$f_i^{n+t} = a_i \xi^3 + b_i \xi^2 + c_i \xi + d_i$$
  

$$g_i^{n+1} = 3a_i \xi^2 + 2b_i \xi + c_i$$
(2.4.12)

を繰り返す事で移流方程式の解が求まる。ここで、 $\xi = -u\Delta t$ である。

この手法を上記の一次元移流方程式に適用したものと、一次風上法によるもの、三次風上法に よるもの(Quickest)の比較を図2.4.2に示す。CIP法によるものは、若干オーバーシュートしてい るものの、厳密解の概形をほぼ再現できていて、数値拡散は格段に小さく抑えられている事が見 てとれる。Quickestは、上流側の2点と下流側の1点と自分自身の計4点を用いて補間し、微分値は 用いない手法である。



図 2.4.2 各差分法による一次元移流方程式解の比較<sup>14)</sup>

#### (2) 多次元への拡張

一次元に用いた方法を多次元へ拡張する。ここでは以下の二次元移流方程式を例にとって考える。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} = 0$$
(2.4.13)

この方程式の一次空間微分に対する式は以下のようになる。

$$\frac{\partial f_x}{\partial t} + u \frac{\partial f_x}{\partial x} + v \frac{\partial f_x}{\partial y} = -f_x \frac{\partial u}{\partial x} - f_y \frac{\partial v}{\partial x} \equiv R_x$$
(2.4.14)

$$\frac{\partial f_y}{\partial t} + u \frac{\partial f_y}{\partial x} + v \frac{\partial f_y}{\partial y} = -f_x \frac{\partial u}{\partial y} - f_y \frac{\partial v}{\partial y} \equiv R_y$$
(2.4.15)

ここで $f_x, f_y$ は $\partial f / \partial x, \partial f / \partial y$ を表す。簡単のために、格子間隔は一定である場合を考える。

格子間隔が一定でない場合への拡張は容易である<sup>7)</sup>。二次元空間における空間プロファイルの 補間式は以下のようになる。

$$F_{i,j}(x,y) = \sum_{l=0}^{3} \sum_{m=0}^{3} C_{l,m} X^{l} Y^{m}$$
(2.4.16)

この式の未知係数は $C_{\alpha,\beta}$ の16個である。ここで $X = (x - x_i), Y = (y - y_i)$ とする。

しかし全ての未知数を決定するには条件が厳しすぎるため、このうちのいくつかを選んで補間 する。以下に代表的な2つの補間方法を示す<sup>7)</sup>。

### ① A型CIP法

格子点(i, j), (i+1, j), (i, j+1)で与えられた  $f, \partial f / \partial x, \partial f / \partial y$  と, (i+1, j+1)における値  $f_{i+1,j+1}$ という10個の関係式を用いて10個の変数の値を決定する。この時のプロファイルを具体的に書くと、以下のようになる。

$$F_{i,j}(x,y) = C_{3,0}X^3 + C_{2,0}X^2 + C_{1,0}X + C_{0,0} + C_{0,3}Y^3 + C_{0,2}Y^2 + C_{0,1}Y + C_{2,1}X^2Y + C_{1,1}XY + C_{1,2}XY^2$$
(2.4.17)

この式中の10個の未知数を上で述べた10個の関係式から解く。

矢部<sup>7</sup>によれば、この選択は最良ではないが、 $u\Delta t / \Delta x \leq 0.5$ を満たすような小さな時間ステップであれば、良い解が得られるとされる。この手法は、点(i+1, j+1)においてはfの連続性しか要求していない。他の3点においては値と微分の連続性も保証している。

#### ② B型CIP法

(i+1, j+1)においても微分を連続とし、この点の微分値もプロファイルに利用するようにしたのがB型CIP法である。より大きな時間ステップをとる事ができる。この時の未知数は二つ増えて12個である。具体的な形は以下のようになる<sup>7)</sup>。

$$F_{i,j}(x,y) = C_{3,0}X^3 + C_{2,0}X^2 + C_{1,0}X + C_{0,0} + C_{0,3}Y^3 + C_{0,2}Y^2 + C_{0,1}Y + C_{3,1}X^3Y + C_{2,1}X^2Y + C_{1,1}XY + C_{1,2}XY^2 + C_{1,3}XY^3$$
(2.4.18)  
$$F_x(x,y) = 3C_{3,0}X^2 + 2C_{2,0}X + C_{1,0} + 2C_{2,1}XY + C_{1,1}Y + C_{1,2}Y^2$$

$$+3C_{3,1}X^2Y + C_{1,3}Y^3 (2.4.19)$$

$$F_{y}(x, y) = 3C_{0,3}Y^{2} + 2C_{0,2}Y + C_{0,1} + C_{2,1}X^{2} + C_{1,1}X + 2C_{1,2}XY^{2} + C_{3,1}X^{3} + 3C_{1,3}XY^{2}$$
(2.4.20)

ただし, 
$$X = x - x_i, Y = y - y_j, F_x = \frac{\partial F}{\partial x}, F_y = \frac{\partial F}{\partial y}$$
とする。このとき、上式に用いられている

係数は,  $F, F_x, F_y$  それぞれにおける4点(i, j), (iup, j), (i, jup), (iup, jup)の値の連立方程式を解く ことにより, 以下のように得られる。

$$C_{0,0} = f_{i,j}$$

$$C_{1,0} = f_{xi,j}$$

$$C_{0,1} = f_{yi,j}$$

$$C_{2,0} = \frac{3(f_{iup,j} - f_{i,j})}{D^2} - \frac{f_{xiup,j} + 2f_{xi,j}}{D}$$

$$C_{3,0} = \frac{f_{xiup,j} + f_{xi,j}}{D^2} + \frac{2(f_{i,j} - f_{iup,j})}{D^3}$$

$$C_{0,2} = \frac{3(f_{i,jup} - f_{i,j})}{E^2} - \frac{f_{yi,jup} + 2f_{yi,j}}{E}$$

$$C_{0,3} = \frac{f_{yi,jup} + f_{yi,j}}{E^2} + \frac{2(f_{i,j} - f_{i,jup})}{E^3}$$
(2.4.21)

$$C_{1,1} = \frac{1}{DE} \left( \left( f_{xi,jup} - f_{xi,j} \right) D + \left( f_{yiup,j} - f_{yi,j} \right) E + \left( f_{iup,j} + f_{i,jup} - f_{iup,jup} - f_{i,j} \right) \right)$$

$$C_{2,1} = \frac{1}{D^2 E} \left( 3C_{3,0}D^3 + 2C_{2,0}D^2 - 3\left( f_{lup,j} + f_{i,jup} - f_{lup,jup} - f_{i,j} \right) + \left( -f_{xiup,jup} - 2f_{xi,jup} + 3f_{xi,j} \right) D \right)$$

$$C_{3,1} = \frac{1}{D^3 E} \left( -3C_{3,0}D^3 - 2C_{2,0}D^2 + 2\left( f_{lup,j} + f_{i,jup} - f_{lup,jup} - f_{i,j} \right) + \left( f_{xiup,jup} + f_{xi,jup} - 2f_{xi,j} \right) \right)$$

$$C_{1,2} = \frac{1}{DE^2} \left( 3C_{0,3}E^3 + 2C_{0,2}E^2 - 3\left( f_{lup,j} + f_{i,jup} - f_{lup,jup} - f_{i,j} \right) + \left( -f_{yiup,jup} - 2f_{yiup,j} + 3f_{yi,j} \right) E \right)$$

$$C_{1,3} = \frac{1}{DE^3} \left( -3C_{0,3}E^3 - 2C_{0,2}E^2 + 2\left( f_{lup,j} + f_{i,jup} - f_{lup,jup} - f_{i,j} \right) + \left( f_{yiup,jup} - 2f_{yi,j} \right) + 3f_{yi,j} \right) E \right)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} iup = i - 1 \\ u > 0; \Delta x = x_i - x_{i-1} \\ D = -\Delta x \\ iup = i + 1 \\ u \le 0; \Delta x = x_{i+1} - x_i \\ D = \Delta x \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} jup = j - 1 \\ v > 0; \Delta y = y_j - y_{j-1} \\ E = -\Delta y \\ jup = j + 1 \\ v \le 0; \Delta y = y_{j+1} - y_j \\ E = \Delta y \end{array} \right. \right\}$$

# 2.4.3.3 一般的な移流拡散方程式へのCIP法の適応

#### (1) 移流項と非移流項の分離

より一般的な,移流項以外の項を含む方程式の解き方を,矢部ら<sup>7)</sup>に従って以下に説明する。 以下の説明は,多次元でも多変数でも全く同じ議論で式を展開してゆける。移流方程式

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial (fu)}{\partial x} = h \tag{2.4.23}$$

の左辺第2項の速度微分の項を右辺に移し,

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} = H$$

$$H = h - f \frac{\partial u}{\partial x}$$
(2.4.24)

の形にする。こうすると前節の移流方程式に「非移流項」*H*の加わったものとなる。 このように移流項と非移流項とを分離して解く解法の事を一般的にセミ・ラグランジュ (Semi-Lagrange)法と呼んでいる。

CIP法もこの解法に属する。微分 $g = \partial f / \partial x$ についての方程式も式(2.4.23)を空間微分して,

$$\frac{\partial g}{\partial t} + u \frac{\partial g}{\partial x} = \frac{\partial H}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial x}$$
(2.4.25)

のように求める。CIP法では2つの方程式を時間分離解法により求める。すなわち式 (2.4.23),式 (2.4.25) を移流項,非移流項に分離する。移流項は

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial g}{\partial t} + u \frac{\partial g}{\partial x} = 0$$
(2.4.26)

の方程式で記述され、これは前節で述べた方法によって数値分散を抑えて解く事ができる。 次に非移流項では、

$$\frac{\partial f}{\partial t} = H, \quad \frac{\partial g}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial x}g$$
(2.4.27)

を差分、有限要素法、有限体積法などによって解く。

#### (2) 非移流項の解法

非移流項の解法のうちの一つとして以下を取り上げる。

$$f_i^{n+1} = f_i^n + H_i \Delta t$$
(2.4.28)

$$\frac{g_i^{n+1} - g_i^n}{\Delta t} = \frac{f_{i+1}^{n+1} - f_{i-1}^{n+1}}{2\Delta x \Delta t} - \frac{f_{i+1}^n - f_{i-1}^n}{2\Delta x \Delta t} - \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_i g_i^n$$
(2.4.29)

矢部ら<sup>7)</sup>によれば、この解法で重要な部分としては、式 (2.4.27) で現れたHの微分がここでは必要ないということである。これは式 (2.4.28) のfの解法ですでにHが用いられているので、Hの微分の変わりに、式 (2.4.28) より求められる、 $(f^{n+1} - f^n)/\Delta t$ の空間微分をとったためであ

る。これは非移流項に熱伝導や拡散などの空間2階微分がある場合や、これを陰的に解く必要があるときには便利である。*g*の方程式には本来ならば3回の微分や熱伝導係数の微分などが入ってきて複雑になりがちだが、上のように行えばこの複雑さを回避でき、*f*を陰的に解いた後の変化を*g*に組み入れられる。

#### (3) 完全保存保証型 CIP-CSL4

非保存系のCIP法は、保存量が厳密に保存できないことが問題となる。これを解決するCIPスキ ームの一つとして、CIP-CSL4がある<sup>7)</sup>。通常のCIP法と同様に格子間の二点の値と微分値により三 次多項式でプロファイルを計算するが、CIP-CSL4では保存の性質を付加するため、もう一つの束 縛条件、

$$\rho_{i+1/2}^{n} = \int_{x_{i}}^{x_{i+1}} f^{n} dx$$
(2.4.30)

を加える。このため,格子間のプロファイルは以下のような連続条件を満たすように決定される。

$$F_{i}(x) = a_{i}^{n} (x_{i} - x)^{4} + b_{i}^{n} (x_{i} - x)^{3} + c_{i}^{n} (x_{i} - x)^{2} + d_{i}^{n} (x_{i} - x) + e_{i}^{n}$$
(2.4.31)

$$\begin{cases}
F_{i}(x_{i-1}) = f(x_{i-1}) \\
F_{i}(x_{i}) = f(x_{i}) \\
\partial F_{i}(x_{i-1}) / \partial x = g(x_{i-1}) \\
\partial F_{i}(x_{i}) / \partial x = g(x_{i}) \\
\int_{x_{i-1}}^{x_{i}} F_{i}(x) dx = \rho_{i-1/2}
\end{cases}$$
(2.4.32)

四次多項式により補完しているが、三次多項式の時と同様に  $f \ge g$ の時間発展はこの関数  $F_i(x) \ge u\Delta t$  だけ移動して行う。式 (2.4.33)の条件により、それぞれの係数は以下のように与え られる。ただし、 $\xi_i = -u_i^n \Delta t$ とする。

$$\begin{cases} a_{i}^{n} = \frac{-5(6(f_{iup} + f_{i})\Delta x_{i} - (g_{iup} - g_{i})\Delta x_{i}^{2} + 12\operatorname{sgn}(u_{i}^{n})\rho_{i-\operatorname{sgn}(u_{i}^{n})/2})}{2\Delta x_{i}^{5}} \\ b_{i}^{n} = \frac{4((7f_{iup} + 8f_{i})\Delta x_{i} - (g_{iup} - (3/2)g_{i})\Delta x_{i}^{2} + 15\operatorname{sgn}(u_{i}^{n})\rho_{i-\operatorname{sgn}(u_{i}^{n})/2})}{\Delta x_{i}^{4}} \\ c_{i}^{n} = \frac{-3(4(2f_{iup} + 3f_{i})\Delta x_{i} - (g_{iup} - 3g_{i})\Delta x_{i}^{2} + 20\operatorname{sgn}(u_{i}^{n})\rho_{i-\operatorname{sgn}(u_{i}^{n})/2})}{\Delta x_{i}^{3}} \\ d_{i}^{n} = g_{i} \\ e_{i}^{n} = f_{i} \end{cases}$$

$$(2.4.33)$$

$$\begin{cases} u_i^n \ge 0 & ; \frac{iup = i - 1}{\operatorname{sgn}(u_i^n) = 1} \\ u_i^n < 0 & ; \frac{iup = i + 1}{\operatorname{sgn}(u_i^n) = -1} \end{cases}$$

次に、 $\rho$ の時間発展であるが $u\Delta t/\Delta x < 1$ のように簡単な場合には次のように表せる。

$$\rho_{i-1/2}^{n+1} = \rho_{i-1/2}^{n} + \Delta \rho_{i-1}^{n} - \Delta \rho_{i}^{n}$$
(2.4.34)

ここで、 $\Delta \rho_i^n$ は次のように得られる。

$$\Delta \rho_i^n = \int_{x_i - u_i^n \Delta t}^{x_i} F_i^n(x) dx = -\left(\frac{a_i^n}{5}\xi_i^4 + \frac{b_i^n}{4}\xi_i^3 + \frac{c_i^n}{3}\xi_i^2 + \frac{d_i^n}{2}\xi_i + e_i^n\right) \xi_i$$
(2.4.35)

非移流項などを踏まえた計算を行った際,通常の意味での保存( $\sum_i f_i = -$ 定)が成立していないようなときがある。しかし、CIP-CSL4では、質量保存を満たすように内部プロファイルが変化しているため、積分値でみたとき、質量保存は満たされている。他に、完全保存保証の解法として、値と微分値ではなく、値と積分値によって補間を行うCIP-CSL2などがある<sup>7)</sup>。

### 2.4.3.4 時間ステップの大きな計算への適用性<sup>7)</sup>

 $u\Delta t/\Delta x > 1$ の場合にも適用できる方法として、CIP-CSL2を説明する。二つの点(i, i+1)で挟まれたセルの関数値が $(P_i, P_{i+1})$ から運ばれてきたとする。この上流点 $P_i$ は、

$$x_{P_i} = x_i + \int_{t+\Delta t}^t u dt$$

として求められる。上流点 $P_i$ を挟む格子を $(k_i, k_{i+1})$ ,即ち, $x_{k_i} < x_{P_i} < x_{k_{i+1}}$ となるような $k_i$ をおく。上流点の属するセルがわかれば, $f(x_i, t + \Delta t) = f(x_{P_i}, t)$ として関数値が計算できる。先ほどと同様にして,

$$f_i^* = F_{k_i}\left(x_{P_i}\right) = \frac{\partial D_{k_i}\left(x_{P_i}\right)}{\partial x} = 3A1_{k_i}\left\langle\xi^2\right\rangle + 2A2_{k_i}\left\langle\xi\right\rangle + f_{k_i}^n$$
(2.4.36)

で求められる。なお、 $\langle \xi 
angle$ については、 $P_i \ge k_i$ の距離であり、単純に

$$\left\langle \xi \right\rangle = x_{P_i} - x_{k_i} \tag{2.4.37}$$

により与えられる。また,係数 $Al_{k_i}$ , $A2_{k_i}$ については,式において $i \ge k_i$ で置き換えるのみである。

セル内の質量 $\rho$ の時間変化は、 $\rho_i$ を

$$\rho_{i} = \int_{x_{i}}^{x_{i+1}} F_{i}(x) dx$$
(2.4.38)

で定義すると,

$$\rho_i^{n+1} = \int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x, t + \Delta t) dx = \int_{x_{p_i}}^{x_{p_{i+1}}} f(x, t) dx$$
(2.4.39)

 $\rho_i^{n+1}$ は時刻nにおいて、 $(P_i, P_{i+1})$ の間の質量であるから、これを格子で分割して考えて、次式が得られる。

$$\rho_i^{n+1} = \int_{x_{P_i}}^{x_{k_i+1}} F_{k_i}^n(x) dx + \sum_{m=k_i+1}^{k_{i+1}-1} \int_{x_m}^{x_{m+1}} F_m^n(x) dx + \int_{x_{k_{i+1}}}^{x_{P_{i+1}}} F_{i+1}^n(x) dx$$
(2.4.40)

さらに,  $\int_{x_i}^x F_{k_i}^n(x) dx = \int_{x_i}^x (\partial D_i^n(x) / \partial x) dx = D_i^n(x)$ の関係を利用して書き直すと,

$$\rho_{i}^{n+1} = \rho_{k_{i}}^{n} - \int_{x_{k_{i}}}^{x_{p_{i}}} F_{k_{i}}^{n}(x) dx + \sum_{m=k_{i}+1}^{k_{i+1}-1} \int_{x_{m}}^{x_{m+1}} F_{m}^{n}(x) dx + \int_{x_{k_{i+1}}}^{x_{p_{i+1}}} F_{i+1}^{n}(x) dx = \left( D_{k_{i+1}}^{n}\left(x_{p_{i+1}}\right) - D_{k_{i}}^{n}\left(x_{p_{i}}\right) \right) + \sum_{m=k_{i}}^{k_{i+1}-1} \rho_{m}^{n}$$

$$(2.4.41)$$

となる。なお、ここでは $k_{i+1} - 1 \ge k_i$ が想定されている。 $k_{i+1} = k_i$ となる場合は、式の右辺最終項はキャンセルされる。

これで、関数値  $f_i$  とセル内の質量  $\rho_i$  の時間変化を表す式が得られたので、これらを時間ステップごとに値を更新していくと、移流の計算結果が得られる。

なお、従来のCIP法やCIP-CSL4についても同様の方法で、 $u\Delta t/\Delta x > 1$ の場合でも計算が可能である。

### 2.4.3.5 計算フローチャート

CIP法を用いた二相同時陰解法のフローチャートを以下に記す(図2.4.3)。なお、行列解法は、 LSOR以外に、前処理付き共役残差法のソルバーも組み込み、併用できるようにしてある。



図 2.4.3 密度流解析のフローチャート<sup>11)</sup>

### 2.4.4 移流分散実験

#### 2.4.4.1 実験の目的

地層中の不均質性によって,溶質輸送がどの程度の分散効果を受けるかは,必ずしも定量化で きるものではない。本章では,ガラスビーズを様々に配置した層構造を模擬した不均質パターン を作成し,それらが示す溶質の流動形態や,溶質密度の流動特性への影響を定性的に測定する実 験の結果<sup>11)</sup>を述べる。

### 2.4.4.2 実験装置の仕様

図2.4.4、図2.4.5に示した様に、二次元浸透実験装置は透明アクリル板で作成し、内寸は高さ28cm、 幅60cm、奥行き1cmの直方体型となっている。装置の左側の水位を固定し、右側の水位を調整し て水頭差を調整することによって流入・流出量を可変にした。測定領域と左右の水柱の接面では、 媒体の流出を防ぐために金属メッシュを取り付けた。媒体の上流側から15cmの点よりシリンジを 用いて、鉛直下方向の任意の場所に溶質を注入できるようにした。測定領域の上面は取り外しが 可能であり、媒体の入れ替えを行える。本実験では、4種類の粒径のガラスビーズを用いた。また、 注入する流体は食紅によって着色した淡水と3%塩水の2種類とした。図2.4.4示した実験装置の測 定面の格子は縦、横ともに5cmである。



図 2.4.4 二次元浸透実験装置 11)



図 2.4.5 二次元浸透実験装置模式図<sup>11)</sup>

# 2.4.4.3 均質場における移流分散

表2.4.1に均質場の実験のケースを示した。媒体粒径,注入時間,注入深度,両端水頭差,注入 流体(淡水,塩水)を組み合わせている。ここでは、すべてのケースは掲載できないので, Case B-7 の結果のみを紹介する(図2.4.6)。

Case	粒径[mm]	左側水位[cm]	右側水位[cm]	注入量[ml]	注入深度[cm]	注入時間[sec]	溶質
A-1	5	33.5	35.5	10	5	10, 20, 40	淡水
A-2	5	33.5	35.5	10	10	10, 20, 40	淡水
A-3	5	33.5	35.5	10	15	10, 20, 40	淡水
A-4	5	33.5	34.5	10	5	10, 20, 40	淡水
A-5	5	33.5	34.5	10	10	10, 20, 40	淡水
A-6	5	33.5	34.5	10	15	10, 20, 40	淡水
A-7	1	33.5	35.5	10	10	10	淡水
B-1	-5	33.5	35.5	10	5	10, 20, 40	3%塩水
B-2	5	33.5	35.5	10	10	10, 20, 40	3%塩水
B-3	5	33.5	35.5	10	15	10, 20, 40	3%塩水
B-4	5	33.5	34.5	10	5	20	3%塩水
B-5	5	33.5	34.5	10	10	20	3%塩水
B-6	5	33.5	34.5	10	15	20	3%塩水
B-7	1	33.5	35.5	10	10	10	3%塩水

表 2.4.1 均質媒体におけるケース設定<sup>11)</sup>

# (1) 実験結果 (Case B-7)

密度差を踏まえた場合では,水平方向・鉛直方向ともに大きく広がっている。鉛直方向の移動 は,濃度が薄まった部分は水平方向の動きが相対的に大きくなり,濃い部分は鉛直方向にも大き く移動し続けている。



図 2.4.6 Case B-7 実験結果(D=1mm 均質, 水頭差 2cm, 塩水注入)<sup>11)</sup>

# 2.4.4.4 二次元不均質場(二層)における移流分散実験

図2.4.7に示すように、粒径0.6mmと1.0mmの2種類のガラスビーズを用いて二層の不均質場を作成した。



図 2.4.7 二次元不均質場 (二層)の設定<sup>11)</sup>

注入深度,注入時間,溶液の種類について以下の表2.4.2で示すように様々なケースについて実験を行った。本報告では, CASE D-2の結果のみを紹介する(図2.4.8)。

Case	粒径[mm]	左側水位[cm]	右側水位[cm]	注入量[ml]	注入深度[cm]	注入時間[sec]	溶質
C-1	0.6, 1.0	33.5	35.5	10	5	10	淡水
C-2	0.6, 1.0	33.5	35.5	10	10	10	淡水
C-3	0.6, 1.0	33.5	35.5	10	18	10, 30	淡水
C-4	0.6, 1.0	33.5	35.5	10	15	10	淡水
D-1	0.6, 1.0	33.5	35.5	10	5	10	3%塩水
D-2	0.6, 1.0	33.5	35.5	10	10	10	3%塩水
D-3	0.6, 1.0	33.5	35.5	10	18	10	3%塩水

表 2.4.2 二次元不均質場 (二層) 実験ケース<sup>11)</sup>

# (1) 実験結果 (Case D-2)

ビーズ粒径の大きな層から小さな層への溶質侵入時には二層間の流速の違いから,溶質は二層 の境界面を滑り,削り取られながら移動するような形で進み,下層では遅れた部分が下方に次第 に落ちてゆく様子が見られる。



# 2.4.4.5 二次元不均質場(多層)における移流分散実験

測定領域は図2.4.9に示すように多層不均質場とした。媒体は、粒径0.4mm, 0.6mmと1.0mmの3 種類のガラスビーズを用いて設定した。



```
図 2.4.9 二次元不均質場(多層)実験の設定<sup>11)</sup>
```

注入深度,注入時間,溶液の種類について以下の表2.4.3で示すように様々なケースについて実験を行った。本報告ではCase F-2のみを紹介する(図2.4.10)。

Case	粒径[mm]	左側水位[cm]	右側水位[cm]	注入量[ml]	注入深度[cm]	注入時間[sec]	溶質
E-1	0.4, 0.6, 1.0	33.5	35.5	10	7.5	10	淡水
E-2	0.4, 0.6, 1.0	33.5	35.5	10	12.5	10	淡水
E-3	0.4, 0.6, 1.0	33.5	35.5	10	17.5	30	淡水
E-4	0.4, 0.6, 1.0	33.5	35.5	10	10	10	淡水
E-5	0.4, 0.6, 1.0	33.5	35.5	10	15	10	淡水
F-1	0.4, 0.6, 1.0	33.5	35.5	10	7.5	10	3%塩水
F-2	0.4, 0.6, 1.0	33.5	35.5	10	12.5	10	3%塩水
F-3	0.4, 0.6, 1.0	33.5	35.5	5	17.5	30	3%塩水

表 2.4.3 二次元不均質場(多層)実験ケース<sup>11)</sup>

# (1) 実験結果 (Case F-2)

ビーズ粒径の異なる二層間の移動で1.0mmビーズと0.6mmビーズの間 (Case D-2) に比べ, 0.6mm ビーズと0.4mmビーズでは流速の差が小さいためか鉛直方向の浸透が比較的水平方向に伸びるこ と無く流されている様子がみられる。


## 2.4.5 実験再現性の検討

## 2.4.5.1 数值再現手法

前節における移流分散実験に対して、CIP法、一次風上法それぞれについて計算を行い、溶質移動の時間発展についての再現性を検討した<sup>15)</sup>。以下の図2.4.11に示すように、解析対象として、62cm×28cm×1cmの二次元均質媒体を、1cm×1cm×1cmの1736グリッドで分割した。水平方向の両端のグリッドについては、左側は水頭を33.5cmとしたときの静水圧で、右側は与えたい水頭差をつけたときの静水圧で定圧境界とし、鉛直方向の両端は不透水境界とした。



図 2.4.11 数値再現実験の設定<sup>15)</sup>

# 2.4.5.2 基礎水理パラメータ

用いた基礎水理パラメータを表2.4.4に示した。淡水の密度は1000kg/m<sup>3</sup>, 3%塩水の密度は 1030kg/m<sup>3</sup>とした。塩水注入ケースのみ分散効果を踏まえた計算を行い,拡散係数Dは1.0e-7 m<sup>2</sup>/s, 縦分散長αは3.5e-6 m, 横分散長βは, 3.5e-7 mとした。

表 2.4.4 ビーズ粒径と物性値	15)
-------------------	-----

ビーズ粒径	間隙率 [-]	浸透率 [m²]
0.4mm	0.379	1.1×10 <sup>-10</sup>
0.6mm	0.359	2.5 × 10 <sup>-10</sup>
1.0mm	0.397	7.3 × 10 <sup>-10</sup>

## 2.4.5.3 単層均質場の再現性 (Case B-7)

単層均質場については,媒体としてビーズ粒径1.0mmを用いた場合(図2.4.6)について再現解 析を試みた(図2.4.12~18)。なお,注入時は毎秒一定の量を入れられるものとして計算した。 主要な結果を以下に示す。

T=5 minにおいては、CIP法も一次風上法も溶質の位置については、実験結果を精度よく再現 している。濃度に関しては、一次風上法の方が薄くなっており、水平方向に広がりつつある様子 が確認できる(図2.4.12~16)。解析結果で大きな違いは、風上法は過度な分散が生じ早めに濃度 が薄まり、密度の効果が弱まり水平に動く様子がみられることである。これに対し、CIP法では 拡散効果を入れない場合には、溶質移動が鉛直下方に尾を引くような形で起きている。これは、 溶質自体の重さを考慮した場合、薄まった部分は鉛直下方の流れが小さくなり、上部に取り残さ れるという現象のためであろう。実験結果においても同様の傾向が確認できる。



## (1) CIP法による再現解析結果(分散効果なし)

図 2.4.12 Case B-7 計算結果(CIP 法,分散効果なし)<sup>11)</sup>

(2) CIP法による再現解析結果(分散効果あり)



図 2.4.13 Case B-7 計算結果 (CIP 法, 分散効果あり)<sup>11)</sup> (3) 一次風上法による再現解析結果



図 2.4.14 Case B-7 計算結果 (一次風上法)<sup>11)</sup>

# (4) 実験結果と再現解析の解析手法による比較

T=5 min, 20 minの両時間断面において実験結果と再現解析の比較を行う。なお,図2.4.15および図2.4.16の解析結果において示している数値は質量%濃度である。



図2.4.15 T=5[min]の結果比較<sup>11)</sup>

図2.4.16 T=20[min]の結果比較<sup>11)</sup>

## (5) 実験結果と CIP 法による再現解析の分散効果による比較

T=5 min, 20 minの両時間断面において実験結果と再現解析の比較を行う。なお,図2.4.17および図2.4.18の解析結果において示している数値は質量%濃度である。

分散効果を考慮した解析では、時間経過とともに塩分濃度が薄まり、鉛直下方への移動距離が 分散効果の無い場合に比べて小さく、実験結果の溶質移動をよりよく再現しているようである(図 2.4.18)。

T=20 minにおいて,実験結果とCIP法(分散効果なし)による解析結果は水平方向での位置はほ ぼ整合性を示している(図2.4.18)が拡散効果を0として計算している場合には溶質が固まりすぎ 下方の流れが大きくなり鉛直方向での位置のずれが発生している。一方で,分散効果をある程度 考慮したとき,水平方向,鉛直方向ともに実験の溶質分布と近い(図2.4.17,図2.4.18)。

## ① T=5[min]におけるCase B-7結果の比較

② T=20[min]におけるCase B-7結果の比較



図 2.4.17 T=5[min]の結果比較図<sup>11)</sup>

図 2.4.18 T=20[min]の結果比較<sup>11)</sup>

### 2.4.5.4 二層不均質場実験の再現性 (Case D-2)

二層不均質場については,不飽和媒体としてビーズ粒径0.6mmおよび1.0mmを用い,溶質注入 深度10cmの場合について再現解析を試みた (Case D-2)。なお,注入時は毎秒一定の量を入れられ るものとして計算した。

表 2.4.5 二層不均質場解析対象ケース<sup>11)</sup>

Case	粒径[mm]	左側水位[cm]	右側水位[cm]	注入量[ml]	注入深度[cm]	注入時間[sec]	溶質
D-2	0.6, 1.0	33.5	35.5	10	10	10	3%塩水

### (1) 実験結果と再現解析の比較(Case D-2)

T=5 min, 30 minの両時間断面において実験結果と再現解析の比較を行う。なお,図2.4.21および図2.4.22の解析結果において示している数値は質量%濃度である。

図2.4.19, 図2.4.20, 図2.4.21, 図2.4.22に一次風上法, CIP法による再現解析結果を示した。実験結果と比較すると, ビーズ粒径の異なる二層境界面における溶質が下層に削り取られるような形での侵入が再現できていない。この要因としては, 上層と下層の流速の差が大きすぎること(浸透率の入力),本章の解析では拡散・分散を考慮していないこと,下層の間隙率が上層と比較して十分に小さくないこと(間隙率の入力)が考えられる。図2.4.20の一次風上法による再現解析では、単層均質場の時と同様に溶質が広がってしまうため全体として濃度が薄くなり, 浅い位置で移動している。そのため,下層にも溶質はわずかに侵入するのみで侵入後もほとんど鉛直方向の移動が見られない。

T=5 minでは、両解析結果とも実験結果に比べ、水平方向の移動距離が小さい(図2.4.21)。時間 スケールは異なるが、図2.4.19のCIP法における溶質移動の時間発展の中でT=10 minで実験結果に 類似した形になっていることがみられる。

① CIP法による再現解析結果 (Case D-2)





② 一次風上法による再現解析結果 (Case D-2)



# ③ T=5[min]におけるCase D-2結果の比較



図 2.4.21 T=5[min]の結果比較<sup>11)</sup>

④ T=30[min]におけるCase D-2結果の比較

### 2.4.5.5 多層不均質場の再現性の検討

## (1) 多層不均質場の設定

多層不均質場については、不均質媒体としてビーズ粒径 0.4mm、0.6mm および 1.0mm を用い、 溶質注入深度 12.5cm (表 2.4.3, Case F-2)の場合 (図 2.4.10) について再現を試みた。なお、注 入時は毎秒一定の量を入れられるものとして計算した。図 2.4.24 から図 2.4.27 に計算結果を示し た。

表 2.4.6 多層不均質場解析対象ケース<sup>11)</sup>

Case	粒径[mm]	左側水位[cm]	右側水位[cm]	注入量[ml]	注入深度[cm]	注入時間[sec]	溶質
F-2	0.4, 0.6, 1.0	33.5	35.5	10	12.5	10	3%塩水



60cm 図 2.4.23 多層不均質場の解析領域<sup>11)</sup>

## (2) 実験結果と再現解析の比較

図2.4.24のCIP法による再現解析において、T=25 minまでは対応する実験結果と溶質分布の形状、 位置ともに比較的よく合致している。T=65 min以降,実験では0.4mmビーズ層に溶質は留まり、 水平方向に移動していく形であったが、CIP法の解析ではその下の0.6mmビーズ層に侵入し、溶質 が移動している。0.4mmビーズ層における溶質移動の時間発展を、実験結果とCIP法の解析結果で 比べると移動速度は近い値であると思われ、解析において溶質が固まったために鉛直下方流れが 大きく見込まれたことが要因の一つと予想される。

図2.4.25の一次風上法では、多層不均質場における解析のため、溶質の注入点は二層の境界面の付近であり、数値分散の影響が小さい段階で下層へ侵入している。しかし、上層の溶質濃度は次第に薄くなり下層への侵入も弱まり低透水層である下層の上部を滑るような形で溶質は移動する。

T=10 minにおける溶質分布形状はCIP法も一次風上法も実験結果と比較的良く合っているよう に見える(図2.4.26)。T=25 minでは、実験の0.4mmビーズ層では鉛直下方への浸透が進みつつ、 0.6mmビーズ層で水平の流れ方向に押し流されている状態に対し、CIP法による再現解析は大体整 合性を持っている。一次風上法も全体としての濃度は薄れているが、傾向としては同様のことが 見て取れる。

# ① CIP法による再現解析結果











③ T=10[min]におけるCase F-2結果の比較 ④ T=25[min]におけるCase F-2結果の比較



### 2.4.6 まとめ

本章では、地下深部における物質移行解析の数値的な信頼性の向上を図るために、CIP法を導入し、室内実験の結果と比較した。その結果は以下のようにまとめられる。

- ・CIP法は、「物質の保存則」と「濃度プロファイルの保存」の双方を考慮した移流方程式の解 法であり、多次元問題への適応性も良いと考えられる。
- ・この方法を、2相3成分塩淡密度流解析コードに組み込み、圧力と飽和率の陰解法の結果から CIP法による陽解法を行い、新しい濃度を計算するプログラムを開発した。
- ・実験では均質、二層・多層不均質構造を持つ媒体を設定し、着色した塩水の動きを観測した。
- ・数値的再現性を検討したところ、多くの実験結果に対し、一次風上法は過大な分散効果のため濃度分散が早く、密度置換効果が弱まり実験結果からのズレが大きくなる。CIP法では分散効果を適度に与えた場合、比較的再現性の良い結果となった。

地層処分施設の核種移行評価では、ニアフィールド(人工バリアおよび周辺岩盤)およびファ ーフィールドにおける諸現象(水・熱・ガスの移動、化学反応、核種崩壊、吸着・脱離など)や 媒体の不均質性・不確実性の影響を適切に反映することが必要となる。適用する数値解法には、 基本要件として「解の保存性」、「解の信頼性」、「解の高速性」が求められるが、ここで用いたCIP 法(およびその修正法)は、従来法の欠点を解消しそれらを満足する有力な手法と考えられる。 今後は、本法をニアフィールドの精細な物質移行解析からファーフィールドにおける大規模・長 期の三次元解析まで適用できるように、実用解析コードの開発を進めていきたい。

### 2.4.7 参考文献

- 1) 登坂博行(2002):地質時間にわたる淡塩漸移帯の形成過程と形態変化に関する数値解析的検討(その1),静的境界条件下における検討,応用地質Vol.43, pp.293-305.
- 2) 登坂博行(2002):地質時間にわたる淡塩漸移帯の形成過程と形態変化に関する数値解析的検討(その2),動的境界条件下における検討,応用地質Vol.43, pp.306-315.
- 3) 菱谷智幸・西垣 誠・橋本 学(1999):物質移動を伴う密度依存地下水流の三次元数値解析 手法に関する研究,土木学会論文集No.638, pp.59-69.
- 4) 西垣 誠(2000): 浸透流の解析技術と地盤のモデル化, 地質と調査No.83, pp.19-25.
- 5) 神野健二 編著・籾井和朗・藤野和徳・中川啓・細川土佐男・江種伸之・広城吉成 共著(2001): 地下水中の物質輸送数値解析,九州大学出版会.
- 6) 西垣 誠・菱谷智幸・橋本 学・河野伊一郎(1995): 飽和・不飽和領域における物質移動を 伴う密度依存地下水流の数値解析手法に関する研究,土木学会論文集No.511, pp.135-144.
- 7) 矢部 孝·内海隆之·尾形陽一(2003): CIP法, 森北出版.
- 8) 小山 創(2008):沿岸域地層処分における塩淡境界変動に関する数理的研究,東京大学工学 部E&Eコース卒業論文.
- 小山 創・登坂博行(2008):沿岸域地層処分における塩淡境界変動に関する数理的研究,日本地下水学会2008年春季講演会講演要旨,pp.88-91.
- 10) 小山 創・登坂博行(2009):沿岸域の地下塩淡密度流と物質移行シミュレーションの高度化 に関する研究,日本地下水学会2009年秋季講演会講演要旨,pp.154-157.

- 11) 小山 創(2010):沿岸域地層処分における地下塩淡密度流と物質移行の予測に関する実験的・ 数理的研究,東京大学工学系研究科修士論文.
- 12) KOYAMA, H., TOSAKA, H.(2008): What dynamic shapes of freshwater-saltwater interfaces are expected under realistic hydro-geological conditions, XXXVI IAH Congress Abstract, p.156.
- 13) 登坂博行(2006):地圏水循環の数理,東京大学出版会.
- 14) 高山智道(2008):不均質地層における溶質移流分散現象の数理モデルに関する研究,東京大 学大学院工学系研究科修士論文.
- 15) 一言正之(2007):地下水中の溶質移流分散現象のモデル化技術に関する研究,東京大学大学 院工学系研究科修士論文.

(東京大学 登坂博行)

2.5 地質・地下水環境特性を考慮した地下水の年代測定法の開発

- <sup>85</sup>Krトレーサーを用いた地下水の滞留時間推定法の開発(その1)-

## 2.5.1 はじめに

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<sup>3</sup>H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。近年 我が国では降水の<sup>3</sup>H濃度が天然レベルにまで低下してきており、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、トリチウム法を用 いた滞留時間の推定精度が懸念され出している。これに対して、人工的にのみ生産された物質で、 大気中濃度が1990年代の規制前まで増加する特性をもつCFCs(Chlorofluorocarbons、フロン類) を利用した地下水の滞留時間推定法が提案され、海外において滞留時間の短い浅層地下水の滞留 時間推定に広く利用されてきている。我が国においては、この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ため、昨年度までの4ヵ年間にわ たり、このCFCs法による地下水滞留時間推定法の開発とその検証を行ってきた。

CFCsと同様に若い地下水年代トレーサーの候補に挙がっている<sup>85</sup>Krは,1940年以降大気中での 濃度が単調増加している核燃料再処理施設に起源を持つ人工起源の放射性同位体で,半減期は 10.76年で,CFCsの様な濃度規制を受けていないので継続的な単調増加が期待できるため,地下 水年代トレーサーとして理想的な特性を保持している。特にCFCsやSF<sub>6</sub>等のフロンガス年代トレ ーサーが人為的な汚染の影響を受けている人口過剰地域や,還元的環境下でフロン類が分解して 利用できない場所において,化学的に安定な若い年代のトレーサーとしてその有効性が期待され ている。希ガスである<sup>85</sup>Krは,その溶存濃度が12.57×10<sup>8</sup>(0°C),6.22×10<sup>-8</sup>(25°C)と極めて低く,そ の分析には大量の試料水を必要とするため,溶存ガスの抽出法と放射性クリプトンの測定法の双 方の開発が必要である。

我が国において地下水中の<sup>85</sup>Krの抽出・測定実績は無く,諸外国においても未だ測定法やサン プルの採取法が開発段階にあって,未だ方法論として確立されていないことから,本研究では, 抽出法の開発,測定法の開発およびフィールドにおける年代検証実験といったステップを通して 数年間に渡って開発を行ってゆく計画である。

### 2.5.2 地下水年代トレーサーとしての<sup>85</sup>Kr

<sup>85</sup>Krは,1940年以降大気中での濃度が単調増加している核燃料再処理施設に起源を持つ人工起 源の放射性同位体で、半減期は10.76年で、CFCsの様な濃度規制を受けていないため継続的な単 調増加が期待でき、地下水年代トレーサーとして理想的な特性を保持している。再処理施設が主 に北半球に存在しているため、1950年代以降の再処理施設の増加に伴って北半球における大気中 の<sup>85</sup>Kr濃度は図2.5.1に示されるように単調増加しており、大気中の安定Kr(常温常圧状態で 1.14ppm)に対する比をとることで、涵養時の温度や気圧に影響されずに年代評価が可能であり、 また地下水中の<sup>85</sup>Kr採取時や分析時の損失に対する影響を殆ど気にしなくとも良いという優れた トレーサー性能を有している。



図 2.5.1 若い地下水年代トレーサーの経時変化

このような優れた年代トレーサー性能をもつ半面,<sup>85</sup>Krはその存在量(溶存量)が極めて少な いため(25℃,大気圧状態:STPで平衡な水への溶存量:6×10<sup>-8</sup> cm<sup>3</sup>/L)その分析必要量を確保す るための開発が必要とされている。また現在の大気中の<sup>85</sup>Kr濃度と平衡状態にある水に溶存して いる<sup>85</sup>Kr濃度は0.1Bq/m<sup>3</sup>であり,それ以下の濃度が測定できる放射能測定系が必要とされる。

これまでに開発された溶存Krの回収方法としては,

① 加熱 (95℃) による脱ガス法

② フィールドにおける大容量タンクを用いた減圧による溶存ガス回収法

③ 上記①と②の組み合わせ法

④ He追い出し法

⑤ フィールドで脱ガスしたガスをコンプレッサーにより容器充填して持ち帰る方法 等が提案されている<sup>1)</sup>。

また,<sup>85</sup>Krの放射能強度測定には,気体比例計数管法および液体シンチレーション法が提案されているが,これらの測定方法で<sup>85</sup>Krを検出するために必要とされる地下水は10<sup>3</sup>から10<sup>4</sup>Lオーダーの水量が必要である。

## 2.5.3 地下水溶存ガス原位置回収システム

これまで開発されてきた脱ガス装置は、フィールドからタンクローリーに採取した地下水を実 験室に持ち帰って加熱や減圧法で回収する方法等が主体であったが、発想を転換してフィールド において溶存ガスのみ回収することで大型容器による試料水運搬が不要なシステムを検討した。 その結果我々は、溶存ガスを効率的に回収できる中空糸メンブレン(SEPAREL EF0-040P、大日 本インキ化学㈱製)を利用し、オイルフリー真空ポンプ、加圧コンプレッサーを組み合わせた新 たな装置を開発し地下水中の溶存ガス原位置回収システムを構築した<sup>1)</sup>。図2.5.2および表2.5.1に 装置の全体概念図を示す。



Integrating flow meter

図 2.5.2 中空糸メンブレンを用いた地下水溶存ガス原位置回収システム<sup>1)</sup>

表251	中空糸メンブレン	を用いた地下水溶存	ガス原位置回収シ	/ステムパーツ什様	1)
12 2.0.1	- Tエホト ノノレノ		刀穴亦且自己人		

Instrument		
Water pump	HP-50	Terada Co. Ltd.
Pre-filter (5 µm)	FH-A-5, CW-SR	Nihon filter Co. Ltd.
Hollow fiber module	EF-040P	Dainippon Co. Ltd. (DIC Co. Ltd.)
Flow meter	FLTN15A9-40	Nihon flow cell Co. Ltd.
Dry vacuum pump 1	DOP-40D	ULVAC Kiko, Inc.
Dry vacuum pump 2	DOP-80SP	ULVAC Kiko, Inc.
Ball valve	UTK15A	KITZ
Ball valve	SS63TS8	Swagelok
Monometer	A1.5TPF1/4	Daiichi Keiki Seisakisho Co. Ltd.

#### JAEA-Research 2011-033

中空糸メンブレンによる溶存Krガス回収率を確認するため、流速0.5L/minの速度で試水を流し たラインにおいて試水導入前後にセットした溶存酸素計によりガス回収前後の水中の溶存酸素の 変化を測定すると共に、回収する前の導入試水中のKr濃度とガス回収後の排水中のKr濃度をHe 追い出し法によるガスクロ分析によって定量し両者を比較した(図2.5.3参照)。その結果両者は 極めて似た濃度変動を示し、装置運転後約10分で溶存ガス成分の99%以上が除去されていること が確認され、排水中の溶存酸素濃度をガス抽出システムのガス抽出性能確認指標に利用できるこ とが示された。



図 2.5.3 ライン導入前後の溶存酸素と溶存 Kr 濃度変化

また、ライン内の試料水流量変化に伴うガス回収率について溶存酸素濃度変化を基に確認した ところ、図2.5.4に示すように0から24L/minの間では回収率99%で殆ど変化がないことが確認され た。同様に試料水温度変化に伴う回収率についても11~29 ℃の通常の地下水温範囲に於いては、 ほとんど無視できることが確認された<sup>1)</sup>。

以上の性能確認後,ライン内試料水送水量を24L/min以下の条件で5000Lの試料水から6時間の 連続運転を行った結果,排水中の溶存酸素濃度が常時試料水中の初期溶存酸素濃度の0.2%以下で あり,本システムの連続運転によりKrのような地下水中の微量溶存ガスの回収システムとして十 分機能する装置であることが確認された。



Recovery of DO from a water sample in relation to water velocity.



Recovery of DO from a sample water in relation to water temperature.

# 図 2.5.4 ライン内試料水送水量および水温変化に伴う溶存ガス回収率変化

# 2.5.4 抽出ガスからのKr分離と<sup>85</sup>Kr濃度の液体シンチレーション計測

開発された中空糸メンブレンを用いた地下水溶存ガス原位置回収システムを用いてフィールド において、7m<sup>3</sup>の大型ガス容器に回収された溶存ガスには、Krのような希ガスに加えて、N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>O等の無機ガス成分が多量に溶存しているため、事前にこれらを除去しておく必要 がある。



図 2.5.5 無機ガス成分の除去(1)





実験室に持ち帰った後に、図2.5.5および図2.5.6に示すようなステップにより希ガス以外の無機 溶存ガス成分を分離除去して、活性炭を充填した金属容器に希ガス成分を主体とする溶存ガスの みを回収し、その後の測定を行った。

このようにして活性炭トラップに回収された希ガス成分を主体とするガスをさらに精製して Krのみを回収するため、図2.5.7のようなラインを作成した。このラインではTCDセンサー着装の ガスクロを用いて図2.5.8に示すように36 ℃に加熱した分離カラム(30-60メッシュサイズの5Aの モレキュラーシーブを充填した6m長カラム)にガスを通過させることでKrガスのピークが出現す る10~12分の時点でのガスのみを2方コックの切り替えによって回収し,液体シンチレーション測 定用に開発した石英ガラス製の100ccバイアルに入れた液体窒素温度にしたシリカゲルに吸着さ せた。その後、石英バイアルに液体シンチレーターを注入し常温に戻すことで、回収されたKrを シンチレーターに溶存させKr測定専用の液体シンチレーションカウンター(ALOKA製LB-1)に より放射能強度の計測を行った。この方法によるKrの回収率は図2.5.7のラインの右側から大気を 導入して活性炭トラップに吸着させ、大気中のKr量(1.14ppm)と導入した大気量から推測され るKr量と、液シンバイアルに回収されたKr量との比較により、表2.5.2に示すように、平均76.4% あることが確認されている<sup>20</sup>。



図 2.5.7 TCD ガスクロを用いた Kr ガス精製分離ライン<sup>2)</sup>



Fig. 3. Separation of O2, N2, and Kr at different column temperatures.

図 2.5.8 TCD ガスクロによる Kr ガス分離に必要な最適分離カラム温度の検討<sup>2)</sup>

表 2.5.2 TCD ガスクロ分離法による Kr ガス回収率の検討<sup>2)</sup>

Sampling location	Sampling date	Air volume (L)	Recovery (%)*	Concentration (Bq m <sup>-3</sup> )
Fukuoka,	Feb. 12, 2008	1000	74.0	1.53±0.08
Japan	Jun. 2-9,2008	1000	77.0	$1.44 \pm 0.07$
	Jul. 13, 2008	1000	75.4	$1.60 \pm 0.08$
	Aug. 7, 2008	812	92.1	$1.53 \pm 0.08$
	Nov. 25, 2008	1000	82.6	$1.53 \pm 0.08$
	Nov. 26, 2008	1000	76.6	$1.54 \pm 0.08$
	Nov. 27, 2008	1000	73.7	$1.47 \pm 0.07$
	Nov. 28, 2008	1000	62.2	$1.52 \pm 0.07$
	Nov. 29, 2008	500	84.4	$1.58 \pm 0.07$
	Dec. 1, 2008	1000	64.8	$1.58 \pm 0.08$
	Nov. 25 - Dec.	907	74.8	$1.54 \pm 0.08$
	1,2008			
Rokkasho, Japan	Jul. 23, 2008	1000	80.0	1.47±0.07

<sup>\*</sup>Calculated from the air volume and Kr concentration (1.14 ppm).

# 2.5.5 釜石鉱山坑内水を用いた<sup>85</sup>Kr法による地下水年代測定法の検証実験

熊本大学と日鉄鉱業の共同研究として2010年8月に実施された釜石鉱山坑内水(550mレベル坑 道)のKr分析用採水地点を図2.5.9に水質・同位体分析結果を表2.5.3に示す。図には、無機溶存イ オン濃度に基づくヘキサダイヤグラム表示も合わせて示されているが、仙人水湧水は重炭酸ナト リウム型の水質進化したタイプの地下水の特徴を示すのに対し、他の86KM10とKF-3採水地点で は重炭酸ーカルシウム型の比較的浅い滞留時間の短い地下水の水質特性を示している。同様の特 徴は、図2.5.10に示した釜石鉱山550m坑道内地下水のキーダイヤグラム表示にも明確に示されて いる。



図 2.5.9 釜石鉱山 550m 坑道における Kr 分析用坑内水採取地点と 水質のヘキサダイヤグラム表示

表 2.5.3 釜石鉱山坑内水の水質および同位体分析結果一覧

	Na	K Cation	Ca (mg/L)	Mg	CI	SO4 Anion	HCO3 (mg/L)	NO3	Stiff ダイアグラム	δ <sup>18</sup> O (‰)	δD (‰)	CFC-11 pptv	CFC-12 pptv	CFC-13 pptv	<sup>3</sup> H TU
仙人水	11.2	1.0	0.8	0.2	2.2	7.1	35.6	0.0	$\searrow$	-10.6	-69.2	18.7	216.9	0.0	1.6
86KM10	4.1	1.9	11.7	0.5	2.5	6.9	38.0	0.3	$\bigcirc$	-10.6	-69.1	119.6	320.8	30.4	1.4
KF-3	4.9	1.9	12.4	0.3	2.2	7.0	39.3	0.0	$\bigcirc$	-10.6	-69.0	12.0	262.3	0.0	1.5



図 2.5.10 釜石鉱山 550m 坑道内<sup>85</sup>Kr 分析用地下水のキーダイヤグラム表示



図2.5.11のδダイヤグラムには明確に高度効果が現れており,深度の深い採水点ほど同位体比が 軽く,高い標高からの涵養の可能性を示唆している。これらの軽い同位体比の地下水は,水質的 にはNa-HCO3型の進化したタイプの水質特性を示しており,トリチウム濃度も相対的に低く,滞 留時間が長い傾向にある。



図 2.5.12 釜石鉱山 550m 坑道における地下水中のトリチウム濃度と CFCs 濃度

図2.5.12は、釜石鉱山550m坑道でこれまで測定されたトリチウム濃度データを東京における降水中のトリチウム濃度変化上にプロットしたものである。殆どの採水ポイントが1985年以降複数回の濃度測定を行っており、図には過去20年近い地下水中のトリチウム濃度の変化が示されている。この同じポイントで、CFCs濃度を測定し北米大気中のCFCs濃度を入力値としてピストン流を仮定して求めた地下水の滞留時間評価結果は、前述の水質特性や同位体比の特性と整合するように、水質進化の進んだ高い標高成分の涵養が主体である仙人水が相対的に最も古い滞留時間(32年)を示すのに対し、他の2点はやや若い86KM-10(24年)、KF-3(28年)となった。これらのCFCsに基づく地下水の滞留時間は、トリチウム濃度に基づく滞留時間ときわめてよく整合している。

2010年8月に釜石鉱山の550m坑道内において5.3項で述べた溶存ガス抽出システムを持ち込ん で、約1週間にわたり上記3地点の溶存ガス回収を実施した。表2.5.4はこれらの現地作業情報およ びその後のガス精製(筑波大学にて実施),Kr分離精製および低レベル液体シンチレーション計 数装置による放射性Kr測定(九州大学にて実施)関連する情報を示す。回収ガス中に含まれてい るRnの濃度が十分減衰するまで採取後6カ月程度保存してから液シンによる<sup>85</sup>Krの濃度測定を行 う関係で、現時点では抽出回収された溶存ガス中の<sup>85</sup>Krの濃度値はまだ報告されていない。

	水温 (°C)	pН	EC (µS∕cm)	DO (mg/L)	ORP (mV)	累積地下水 採水量 (L)	積算 採水時間 (時間)	バイアルに回収 されたKr量 (mL)	1000L当り のKr量 (mL)	回収率 (%)
仙人水	11.4	9.33	81.8	0.2	134	14340	52.7	0.559	0.03900	60.0
86KM10	10.8	8.66	89.9	4.7	138	10301	17.1	0.369	0.03600	55.4
KF-3	11.0	8.79	88.0	0.4	190	4637	8.5	0.039	0.00084	1.3

表 2.5.4 釜石鉱山坑内水の溶存 Kr ガス回収関連の情報一覧

### 2.5.6 LUMPEDモデルによる滞留時間評価

釜石鉱山坑内水は、これまで複数回のトリチウムやCFCsの年代測定が同じ採水ポイントに於い て行われていることから、これらの年代トレーサーの時系列変化情報を基にした帯水層構造を踏 まえた滞留時間解析が可能である。

N.N. Ozyurt & C.S. Bayari<sup>3)</sup>は、地下水の滞留時間に関係するモデルを組み合わせて、実際の帯 水層の状況に最も近いと思われる状態を再現することで、トリチウム、CFCs、<sup>85</sup>Kr等の年代トレ ーサーを用いた平均滞留時間解析コードを公開している。対象となる帯水層モデルの組み合わせ として図2.5.13に示した14通りを想定し、涵養量や地下水貯留量、バイパスやデッド貯留量等の パラメーターを適宜変動させて、それぞれの年代トレーサーの入力関数(降水あるいは大気中の 濃度長期変化)を基に、地下水中のトレーサー濃度を算出し、実測とレーサ濃度変化パターンに 最もフィットする時の滞留時間を算定することを可能としている。本研究の対象地域である釜石 鉱山の坑内水では、トリチウム、CFCs、<sup>85</sup>Krの測定が行えたことから、トリチウム、CFCsの双方 に於いて成立する帯水層モデル(同じパラメータを適用)を決定してその滞留時間評価を評価す るとともに、同じ帯水層モデルを<sup>85</sup>Krに関しても適用してその測定結果(滞留時間評価)の妥当 性を検証することを考えている。

Model	Model Structure	Model	Model Structure
<u>Model 1</u> : Plug <u>Model 15:</u> Small Dispersion	$\stackrel{q}{\longrightarrow} V_{p} \xrightarrow{q} V$	<u>Model 8:</u> 2Paralel Plug	$\begin{array}{c} q^{1} \\ \hline \\ q^{2} \\ \hline \\ V_{p2} \\ \hline \end{array}$
<u>Model 2:</u> Plug + Dead Volume	$\xrightarrow{q} V_{p} \rightarrow V_{d}$	<u>Model 9:</u> Series Plug + Exponential	$\begin{array}{c} q \\ \downarrow \\$
<u>Model 3:</u> Plug + Bypass Flow		<u>Model 10:</u> Plug + Exponential Dead Volume	
<u>Model 4:</u> Exponential	q vm	<u>Model 11:</u> Plug + Exponential + Dead Volume + Bypass Flow	
<u>Model 5:</u> Exponential + Dead Volume		<u>Model 12:</u> Parallel Plug + Exponential with Cross Flow	
<u>Model 6:</u> Exponential + Bypass Flow	q qb	<u>Model 13:</u> Parallel Exponential+ Plug	
<u>Model 7:</u> 2 Parallel Exponential		<u>Model 14:</u> Series Exponential	

図 2.5.13 LUMPED モデルの帯水層モデル組み合わせパターン<sup>3)</sup>

## 2.5.7 まとめと今後の課題

液体シンチレーションカウンターによる<sup>85</sup>Krの濃度測定結果を基に LUMPED モデルを当ては めた解析による滞留時間推定結果は,表 2.5.5 に示すようにトリチウムや CFCs による滞留時間解 析結果と比較して,かなり若い年代を示した。この矛盾を整合させるためには,溶存ガス抽出中 に現世大気の若い<sup>85</sup>Krの混入をラインのどこかで想定する必要があり,その補正率は表に示され ているように 13 から 35%程度あることが確認された。このリークの存在は,地下水年代の確認 されている試料を用いた複数の年代トレーサーによる今回の検証実験を経て初めて明らかにする ことができたものである。溶存ガス抽出ラインにおいては,真空ポンプやコンプレッサーのシリ ンダー部分からの混入が最も疑わしいため,これらを経由した現世大気の混入が回避できるよう 今後必要な改良を行っていく予定である。

表 2.5.5 名	<b>S種地下水年代トし</b>	ノーサーによっ	て推定された釜石坑	内水の滞留時間
-----------	------------------	---------	-----------	---------

試料名	トリチウム	チウム CFCs滞留時間(年)			<sup>85</sup> Kr	SF <sub>6</sub>	補正後の <sup>85</sup> Kr 準Ø時期(年)
PM114	滞留時間(年)	CFC-11	CFC-12	CFC-113	滞留時間(年)	滞留時間(年)	(大気混入率)
仙人水	<40	47	36	57	13~45	11	45 (24.5%)
86KM10	<40	35	30	28	13	modern	25 (35.4%)
KF-3	<40	50	33	57	19	13	31 (12.9%)

## 2.5.8 考察

本研究開発で対応している相対的に若い年代の地下水年齢を正確に測定するための<sup>85</sup>Krを用い た年代測定手法の確立は、この分野でこれまで広く利用されてきたトリチウムや CFCs 等の年代 測定法に付随した弱点を克服するもので、関連諸外国においてもその開発が試みられているもの の、未だフィールドでのルーチン業務に耐えるような汎用的なシステムは構築できていない。本 研究開発における継続的な研究遂行により汎用的に用いることができる精度の高い地下水年代測 定法が確立できれば、若い循環性地下水の存在が懸念される『ニアフィールド』における調査研 究コンセプトの確立や『各分野・要素技術間の連携』に役立つことが期待される。

### 2.5.9 参考文献

- T. Ohta, Y. Mahara, N. Momoshima, F. Inoue, J. Shimada, R. Ikawa, M. Taniguchi (2009): Separation of dissolved Kr from a water sample by means of a hollow fiber membrane, Jour. of Hydrology, 376., pp.152-158.
- N. Momoshima, F. Inoue, S. Sugihara, J. Shimada, M. Taniguchi (2010): An improved method for <sup>85</sup>Kr analysis by liquid scintillation counting and its application to atomospheric <sup>85</sup>Kr determination, Jour. of Enrironmental Radioactivity, Doi:10.1016/j.jenvrad.
- N. N. Ozyurt & C. S. Bayari (2003):LUMPED : a visual basic code of lumped-parameter models for mean residence time analyses of groundwater systems, Computers Geosciences, 29, pp.79-90.

(熊本大学 嶋田 純)

### 中間領域を考慮した地質環境調査・解析技術の高度化・体系化に関する研究の総括

### 3.1 はじめに

地層処分の安全性は、①処分に適した安定な地質環境を選定し、②その環境に頑健な人工バリ アを適切に設計・施工し、③構築された処分システムの安全性を科学的な予測によって確認する ことにより保証される。このようなアプローチの信頼性を現実的な技術基盤として高めていくた めには、幅広い学術分野における数多くの課題に対する研究・開発・実証を要する。このような 取り組みを効果的に進めるため、日本原子力研究開発機構ではこれまで、地層処分の安全性確保 の流れに沿って、「地質環境調査評価技術」、「処分場の工学技術」、「性能評価技術」の3つの技術 分野において、ジェネリックな視点から研究・開発・実証を進めその成果を取りまとめてきた。

地層処分事業の開始段階を迎えた現在,今後の処分事業,安全規制の双方に資する技術基盤を 整備することが求められており,従来のジェネリックな視点からの総合的成果を具体的(スペシ フィック)な技術として体系化していくことが重要である。

このような観点から、本研究においては、分野・課題間の連携や複数の課題や領域にまたがる 技術や評価手法を組み合わせ、地質環境調査評価技術を概念レベルから実施レベルに高度化して いく。

具体的には,第Ⅰ章の「実際の地質環境下における連成現象を考慮したニアフィールド(NF) コンセプトの再構築」と第Ⅱ章の「各分野・要素技術間の連携を考慮した体系的な地質環境調査 技術の開発」についての検討と研究開発を実施することとした。

今年度は、「ニアフィールド(NF) コンセプトの再構築」にあたって、これまでの研究<sup>1),2),3),4),5),6)</sup> で得られた成果を反映・発展させるとともに、委員会の総合討論の場で、委員各位の、ニアフィ ールド (NF) の中間領域に関する意見を集約して、ニアフィールド (NF) コンセプトの再構築 に反映させてきた。また「各分野・要素技術間の連携を考慮した体系的な地質環境調査技術の開 発」に関しては、実際の地質環境下において生じる連成現象に着目した、ニアフィールド (NF) における施工の影響評価技術の構築に関する研究開発や水理学および地球化学分野における連携 研究、長期の地質現象が深部地下水流動系や物質移行に与える影響に関する研究など、「ニアフィ ールド (NF) コンセプトの再構築」、各分野間の「中間領域」を考慮した研究開発を行った。

### 3.2 中間領域を考慮した地質環境調査・評価技術の高度化・体系化の研究方針

# 3.2.1 「ニアフィールド(NF) コンセプトの再構築」,「中間領域・要素技術間の連携」に関す る検討の経過

「ニアフィールド(NF) コンセプトの再構築」に関しては、これまでの研究開発を通して、検 討を重ねてきた。これまでの検討で、おおよその骨格とニアフィールド(NF) コンセプトに係わ る重要項目の抽出はできつつある。検討の重点としては、中間領域の重要項目の研究開発の連携 の具体化、これが達成されたときの、再構築の効果の具体的な検討があげられてきた。

「中間領域・要素技術間の連携」に関しては、当時の核燃料サイクル開発機構(現:日本原子 力研究開発機構)の「地層処分研究開発第二次取りまとめ」<sup>7)</sup>のレポートでは、研究開発領域を、 「地質環境」、「工学技術」、「安全評価」の3つの要素技術領域に区分して、各分冊で地層処分に関 する科学技術の拠り処と信頼性をまとめている。この流れは、今も受け継がれている。ここでい う「中間領域」は、この3つの研究開発領域の中間領域である。また「要素技術」は、各研究分野 内の専門に特化した科学技術であり、「要素技術間」は、それらの連成である。

当研究会では、これまでも「地質環境」に軸をおいた、要素技術の研究開発を中心にして、要素技術間の連成・連携も念頭に、研究開発を進めてきた。

# 3.2.2 「ニアフィールド(NF) コンセプトの再構築」,「中間領域・要素技術間の連携」に関す る研究方針

### 3.2.2.1 研究項目と研究分担の整理と取り組み方

## (1) ニアフィールド(NF) コンセプト再構築への取り組み方

ニアフィールド(NF) コンセプト再構築の目標としては、これまでにあげてきた再構築の 項目検討を、いわば観念論の段階から抜出して、具体的な検討項目の肉付けを行うとともに、 従来のニアフィールド(NF) コンセプト<sup>7)</sup>と比べて、再構築した場合の効果の予測に関して も議論・検討していきたい。ここで行う地質環境を軸とした検討のニアフィールド(NF) コ ンセプト全体の中での位置付けとしては、当面は、この研究領域から、他の研究開発領域へ 向けて、連成、連携の内容と方法に関する発信をするという立場で、全体像の検討を行う。

### (2) 中間領域・要素技術間の連成,連携への取り組み

中間領域の考慮事項の検討の進め方としては,中間領域の整理・統合と核種移行に重点を おいた連成,連携に関する委員会での総合討論を行い,各委員の着地点を見出していく。

また,地質環境を軸とした,要素技術間の連成,連携の考慮に関しては,従来から,地下 水理解析と地化学計測による知見との連携,地質学的な割れ目の分布・性状とモデリングの 連携など,いくつかの項目については,従来から試みられているが,体系的な研究開発への 組み込みを検討したい。

## (3) ニアフィールド(NF) コンセプト構築へ向けた, 各委員の役割分担

平成21年度までの委員会における「調査解析グループ」の要素技術的な個別研究開発と, 同委員会の「課題グループ」のニアフィールド (NF) コンセプトの再構築とのリンクも重要 な検討項目である。どのようにリンクさせていくかは,委員会での総合討論の場で調整した い。

# (4) ニアフィールド (NF) コンセプトとKMS (Knowledge Management System) との連携 両者の研究開発の進展に併せて、リンクの方向を探りたい。

### 3.2.2.2 地層処分の次世代技術とNFコンセプトのオプション

### (1) 地層処分の基本的考え方のオプションとニアフィールド(NF) コンセプト

以下に、委員会で検討された、いくつかの課題について列挙する。

 ①Retrievability & Reversibility (R&R), 泥岩への直接埋め込みなど,各国の処分・設計の考 え方が多様になりつつある。このような,いわばオプションのシナリオに対応して,ニ アフィールド (NF) コンセプトはどう変わるかの検討も,必要に迫られてきた。

- ②地表の生活圏への環境影響に関するニアフィールド(NF)コンセプトの対応(生活圏の 変化の考慮)
- ③コミュニケーション技術の開発に向けた、「地域社会の複数の選択肢」、「ベストよりベタ ーの選択」へのニアフィールド(NF)コンセプトの反映も重要な課題となりそうである。

## (2) 技術的な課題についての意見

- ①ニアフィールド(NF) コンセプトの再構築へ向けた、中間分野のリンクとその項目の研究開発および平成21年度までの委員会における「調査・解析グループ」の要素技術に関する研究開発の知見のニアフィールド(NF) コンセプトへの具体的なリンク。
- ②「長期」に関するNFコンセプトの再構築の役割

 ③掘削影響領域(EDZ)に関する,発破工法からTunnel Boring Machine(TBM)への切り 替えとその効果,グラウチングによる地層均質化の効果などの中間領域での検討
 ④モニタリングと対策・修復技術のNFコンセプトへの組み込み。 など。

# 3.3 「実際の地質環境下における連成現象を考慮したニアフィールド(NF) コンセプトの再構築」 の総括

### 3.3.1 結晶質岩系の岩盤の現実的なニアフィールド(NF)環境/コンセプトの検討

前述した,核燃料サイクル開発機構の第二次取りまとめ<sup>7</sup>では,Genericかつ保守的という考え 方で地層処分の実施可能性を提示してきた。しかし実際の処分事業を効率的に進めていくために は,より現実的な地下環境(岩石-地下水-コンクリート等人工素材の複合環境)に基づいた, 地層処分概念の再構築が不可欠であるとの認識の基に,これまでに検討してきたニアフィールド

(NF) コンセプトの再構築の項目を整理するとともに,具体的な内容の検討を付け加えた。検討 項目は,「場の特性把握」「坑道内敷設の人工材料の影響」および「場の短期的および長期的変化」 という切り口で,現実的なコンセプトを構築するために必要と思われる事象に関して,重要度を 考慮して抽出した。

(1)「場の特性把握」

割れ目,小断層,変質岩盤などの,ニアフィールド(NF)の岩盤材料,いわば場の内部 条件の特性の詳細な把握と安全評価への知見の移転/連携の重要性が検討されている。ニ アフィールド(NF)コンセプトの再構築に当たっては,地質条件だけでなく,岩盤材料 の地質条件と水理,力学特性などとの要素技術間の連成,いわば場の外部条件に当たる地 下水環境(水質・Ph/Ehなど),地温,応力場,地震動などとの連成および,これらの外部 条件の長期変化なども検討する余地があろう。しかし場の特性のばらつきと不確実性は, 特性把握の宿命であり,一般的な傾向としては認識されるが,数km<sup>2</sup>の処分場の規模では, 詳細な性状の分布は把握が難しい。現実的なニアフィールド(NF)コンセプトの検討の 重要性はここにも見出される。 (2)「坑道内敷設の人工材料の影響」

岩盤材料の主要な特性として工学技術との連携・連成の検討がなされている。ロックボルト,吹き付けコンクリート,支保用鋼材などの支保材,グラウチングなどの岩盤改良,バックフィルやプラグなどの処分施設,微生物影響などの外部条件についての項目抽出と分野間の連成,連携についての考え方の検討がなされている。原位置試験を含む,今後の具体的な連成,連携の手掛かりとしたい。

### (3)「場の短期的および長期的変化」

結晶質岩中の空洞掘削に伴う「場」の変化の,短期的,中・長期的な力学的変化,応力 再配分や地下水の水理場の変化,そして最終的には,地下水と岩盤との反応や,坑道から 岩盤内への酸化反応などに伴う地球化学的変化が挙げられる。これらの理解は,ニアフィ ールド(NF)コンセプトを構築する上でも重要である。EDZに対するTBMと発破による 掘削の影響や処分坑を掘削したらすぐ埋めるか否かの建設・操業の仕方の判断などに関す る連成,連携もこの範疇である。この場の変化を,立地と調査・設計時の自然の長期の準 平衡的な変化の段階から,建設・操業に伴う人工的な擾乱の段階を経て,閉鎖後の再冠水 にともなう次の平衡状態への移行という,処分場周辺環境の時間的平衡過程の変化として 捉えた,ニアフィールド(NF)コンセプトの構築と中間領域の研究開発の重要性とそれ を実証する「深地層の研究施設(URL)」での長期の原位置試験の必要性を検討した。

具体的な検討内容の一例としては、「核種移行の中間領域」では、どこを煮詰めればよいか、中 間領域を考慮すると核種の移行がどれだけ遅くなるかを、変質粘土、割れ目などの場の材料特性 を出発点として、中間領域の知見の統合をはかりたい。

これらの検討から、ニアフィールド(NF) コンセプトの再構築に関する、各委員の問題点を共 有化することを念頭に、問題点の認識、疑問・仮説などを含む今後の課題を提示した。中でも各 研究分野の「中間領域」、「要素技術間」の連成・連携についての体系的な整理と課題の統合、国 内外のURL等における、関連研究開発事項と成果のReviewは、今後のニアフィールド(NF) コン セプト再構築の基礎として急務である。

### 3.4 「各分野・要素技術間の連携を考慮した体系的な地質環境技術の開発」の総括

### 3.4.1 掘削影響領域へのベントナイトと極超微粒子セメントの注入に関する研究

この研究開発は、「掘削影響領域へのグラウチングとその結果の評価および長期の止水性の評価 手法に関する研究」の一環として実施した。本年度は、高レベル放射性廃棄物の地層処分におい て、地山を均質にするためのグラウトの必要性と今後の課題について論述した。その内容は、「地 層処分のための地下坑道」、「グラウトの目的」、「グラウト技術の高度化(グラウト材料と技術)」、 および「今後の課題」についての総括である。

特に、グラウト技術については、(a) 亀裂性岩盤への注入によってどれだけの範囲の改良ができたのか、(b) 注入によって地盤内に理想的に注入されているか、(c) 地盤の水押しによる透水試験結果と注入セメント量の関係、(d) 複数の亀裂への注入メカニズム、(e) 高透水性地盤へのグラウ

ト材の注入に関して、理論と実験データを使って詳述している。また今後の課題としては、長期 のグラウトの耐久性の評価と掘削影響領域の修復について論じている。今後の「中間領域」、「ニ アフィールド(NF) コンセプト」研究への整理が行われている。

### 3.4.2 軟岩の不飽和特性に関する研究

この研究開発は、「ニアフィールド(NF)における割れ目形態を考慮した物質移動解析に関す る研究」の一環として実施した。本年度は、深部地質環境の調査・解析技術の体系化を目的とし た、地下水流動の高精度解析と予測法に関して重要な要素技術である、軟岩の不飽和特性につい て、蒸発量変化の逆解析に基づいて検討した。処分場建設中や操業中にトンネル壁面から発達す る不飽和帯が、乾燥収縮に伴う割れ目を発生、もしくは既存割れ目の開口を促進する可能性があ る。この意味で、ニアフィールド(NF)では不飽和浸透流の評価が重要となる。解析の基礎とな る不飽和特性(飽和度、サクション圧、不飽和透水係数の関係)を把握することと、処分場建設・ 操業中のニアフィールド(NF)の浸透流解析を考えた時、どの式を軟岩の不飽和特性として選定す るか、どういう論理でその選定を行うかを明らかにしておく必要がある。蒸発量変化の経時変化 の逆解析と検証実験に基づき、不飽和特性式を選定するプロセスを提案した。

### 3.4.3 粘性の経時変化や目詰りを考慮したグラウト注入過程の数値シミュレーション

この研究開発は、「地下坑道周辺岩盤のグラウト効果の評価・解析に関する研究」の一環として 実施した。本年度は、モデル化に関する知見の少なかった多孔質媒体を対象とした新たなグラウ ト注入過程のモデル構築を行った。なお、グラウトの注入過程をモデル化するにあたり、特にグ ラウトの粘性の経時変化および目詰まりによる透水媒体の間隙率の経時変化について注目した。 また、解析コードの開発においては以下の点について考慮した。

①三次元への拡張

②不連続面を陽に表現するためのシェル要素の導入

本報告では、現場注入を想定した簡易モデルの解析を実施することで、新たに開発した解析コ ードの妥当性の検討を行った。亀裂性岩盤に本モデルを適用するには、亀裂ネットワークモデル から等価な多孔質媒体モデルに置き換える必要がある。また、シェル要素を導入することで不連 続面を陽な形で組み込むことも可能である。今後は、等価連続体への置き換え、透水異方性の考 慮、グラウト材に応じた粘性の経時変化の把握、透水媒体の目詰まりのメカニズムの解明および 定式化などについて更なる検討が必要である。

### 3.4.4 地層処分における不均質媒体中の塩淡密度流・物質移行の追跡手法に関する検討

この研究開発は、「隆起侵食による地形変化、境界変動(海水準変動)の表現を容易にする安全 評価のための、より高度のモデル化」の一環として実施した。本年度の研究開発は、以下の通り である。

地層処分における廃棄体からの漏洩核種のニアフィールド(NF),ファーフィールドにおける 移行の解析は、長期の安全性を検討する上での重要なテーマである。長期の物質移行解析には塩 淡密度差のように流れ場を大きく変化させる要因から,核種の吸着,溶解,移流,分散過程まで を扱う必要がある。このような,地下水に乗った物質の移行は,移流分散方程式によって表わさ れる。ここでは,数値分散を抑制し,最終的に超長期の計算への適用性が有望と考えられるCIP 法の導入を検討し,室内実験の結果と比較した。この方法を,2相3成分の塩淡密度流解析コード に組み込み,圧力と飽和率の陰解法の結果から,CIP法による陽解法により,新しい濃度を計算 するプログラムを開発した。二層・多層不均質構造をもつ媒体を設定し,着色した塩水の動きを 観測する実験によって,数値的再現性を検討した。この結果,CIP法では,分散効果を適度に与 えた場合,比較的再現性の良い結果となった。今後は,大規模,長期の塩淡境界問題や核種移行 問題の実用解析へ向けた検討をすすめていくつもりである。

### 3.4.5 <sup>85</sup>Krトレーサーを用いた地下水の滞留時間測定法の開発

この研究開発は、「地質・地下水環境特性を考慮した地下水の滞留時間測定法の開発」の一環と して実施した。本年度は、<sup>85</sup>Krを用いた地下水の滞留時間の開発に着手した。地下水の滞留時間 の推定には、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。ここ数年研 究してきたCFCs (フロン)と同様、若い地下水年代のトレーサー候補に挙がっている<sup>85</sup>Krは、1940 年以降、大気中での濃度が単調増加しており、核燃料再処理施設等に起源をもつ人工の放射性同 位体である。半減期は、10.76年で、CFCsのように放出量の濃度規制を受けていないので、時間 に対して継続的な単調増加が期待できる。このため地下水年代トレーサーとしては、理想的な特 性を保持している。しかし希ガスであるKrは、その溶解度がきわめて低く、その分析には大量の 試料水を必要とするため、溶存ガスの抽出法と放射性Krの測定法の両方の開発が必要である。本 研究では、この両者の開発と、フィールドにおける年代検証実験を行う予定である。抽出法に関 しては、地下水溶存ガス源位置回収システムの開発が進んでおり、溶存ガスの回収システムが、 十分機能することが示されている。釜石鉱山坑内水を用いた、年代測定も試みられている。これ らの研究開発に基づいて、時間軸での地化学的な変化の研究の体系化を目指したい。

以上,個別研究の成果の概要を総括した。これらの成果を,ニアフィールド(NF)コンセプトの再構築の総合討論,各研究分野の中間領域の研究の連携に活用していきたい。

### 3.5 まとめ

(1)「実際の地質環境下における連成現象を考慮したニアフィールド(NF) コンセプトの再構築」と、

(2)「各分野・要素技術間の連携を考慮した体系的な地質環境調査技術の開発」についての検討 と研究開発を実施した。

(1)については、「場の特性把握」、「坑道内敷設の人工材料の影響」および「場の短期的および 長期的変化」という切り口で、中間領域に関する具体的な項目を付け加えて、現実的なニアフィ ールド(NF)コンセプトの構築へ向けた、分野間の研究の連携検討を行った。

(2)に関しては、各研究分野の中間領域や要素技術間の連成、連携とニアフィールド(NF)コンセプトの再構築への寄与を念頭に、個別の研究開発を立ち上げた。

委員会は総合討論の場とし、これらの成果を具体的にリンクさせる検討を重ね、ニアフィール

ド(NF)コンセプトの再構築に反映させた。

### 3.6 参考文献

- 1) 小島圭二・大西有三・渡辺邦夫・西垣 誠・登坂博行・嶋田 純・青木謙治・杤山 修・吉 田英一(2005):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16年度),核燃料 サイクル開発機構, JNC TJ7400 2005-081.
- 小島圭二・大西有三・渡辺邦夫・西垣 誠・登坂博行・嶋田 純・青木謙治・杤山 修・吉 田英一・尾方伸久・西尾和久(2007) 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17年度-,日本原子力研究開発機構,JAEA Research 2007-060.
- 小島圭二・大西有三・渡辺邦夫・西垣 誠・登坂博行・嶋田 純・青木謙治・杤山 修・吉 田英一・尾方伸久・西尾和久(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-,日本原子力研究開発機構,JAEA Research 2008-042.
- 小島圭二・大西有三・渡辺邦夫・西垣 誠・登坂博行・嶋田 純・青木謙治・杤山 修・吉 田英一・尾方伸久・西尾和久(2009) 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19年度-,日本原子力研究開発機構,JAEA Research 2008-099.
- 5) 小島圭二・大西有三・渡辺邦夫・西垣 誠・登坂博行・嶋田 純・青木謙治・杤山 修・吉 田英一・尾方伸久・西尾和久(2010) 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20年度-,日本原子力研究開発機構, JAEA Research 2009-055.
- 6) 小島圭二・大西有三・渡辺邦夫・西垣 誠・登坂博行・嶋田 純・青木謙治・杤山 修・吉 田英一・尾方伸久・西尾和久(2011) 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21年度-,日本原子力研究開発機構,JAEA Research 2010-049.
- 7) 核燃料サイクル開発機構(1999):「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二次取りまとめ-」,総論レポート, JNC-TN14000 99-020.
  - ・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

(地圈空間研究所 小島圭二)

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本単位				
盔半里	名称	記号			
長さ	メートル	m			
質 量	キログラム	kg			
時 間	秒	s			
電 流	アンペア	А			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
物質量	モル	mol			
光度	カンデラ	cd			

表2. 基本単位を	2用いて表されるSI組立里(	豆の例				
和辛量	SI 基本単位					
和立里	名称	記号				
面積	平方メートル	$m^2$				
体積	立法メートル	$m^3$				
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 <sup>-1</sup>				
密度,質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>				
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>				
比 体 積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg				
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				
量濃度 <sup>(a)</sup> ,濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>				
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m <sup>3</sup>				
輝 度	カンデラ毎平方メートル	$cd/m^2$				
屈 折 率 <sup>(b)</sup>	(数字の) 1	1				
比透磁率的	(数字の) 1	1				
(a) 量濃度 (amount conce	entration) は臨床化学の分野では	物質濃度				
(substance concentration) とも上げれる						

(substance concentration)ともよばれる。
 (b)これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

#### 表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI 租立单位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
平 面 鱼	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
·                立	ステラジアン(b)	er <sup>(c)</sup>	1 (b)	$m^{2/m^2}$
周 波 数	~ 1. W (d)	Hz	1	-1 -1
л іх "м т	ニュートン	N		m ka e <sup>-2</sup>
正力 応力	パスカル	Pa	$N/m^2$	m <sup>-1</sup> kg s
エネルギー 仕事 執量	ジュール	T	Nm	m <sup>2</sup> hg a <sup>-2</sup>
			11 11	111 Kg S
位 争 举 , 上 举 ,	ワット	w	J/S	m <sup>2</sup> kg s <sup>°</sup>
<b>竜</b> 何 , <b>竜</b> 気 重	クーロン	С		s A
電位差 (電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^{2}$ kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静 電 容 量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電 気 抵 抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m <sup>2</sup>	$\text{kg s}^{-2} \text{A}^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^{-2} A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量,比エネルギー分与,	HIL	a	TA	2 -2
カーマ	9 1 1	Gy	J/kg	mĩsĩ
線量当量,周辺線量当量,方向	2 2 2 1 (g)	C	T/law	2 -2
性線量当量, 個人線量当量	2-212 F (8)	ov	J/Kg	m s
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

酸素活性(カタール) kat [s<sup>1</sup> mol]
 (a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや ュヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 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である数字の1は明 示されない。
 (a)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)へルツは周崩現象についてのみ、ペシレルは抜焼性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (a)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度度を表すために使用される。
 (d)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。
 (d)かけ性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

#### 表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S	[ 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	『パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
表 面 張 九	コニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角 速 度	ミラジアン毎秒	rad/s	$m m^{-1} s^{-1} = s^{-1}$
角 加 速 度	ミラジアン毎秒毎秒	$rad/s^2$	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	『ワット毎平方メートル	$W/m^2$	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	$m^2 kg s^{-2} K^{-1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	- ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^{-2}$
熱 伝 導 率	『ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	- ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電 荷 密 度	「クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> sA
表 面 電 荷	うクーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> sA
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> sA
誘 電 卒	『ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ミヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	- ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> sA
吸収線量率	ゴグレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$
放 射 強 度	「ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放 射 輝 度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	$m^2 m^{-2} kg s^{-3} = kg s^{-3}$
酵素活性濃度	「カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	$m^{-3} s^{-1} mol$

表 5. SI 接頭語							
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号		
$10^{24}$	<b>э</b> 9	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d		
$10^{21}$	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	с		
$10^{18}$	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m		
$10^{15}$	ペタ	Р	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ		
$10^{12}$	テラ	Т	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n		
$10^{9}$	ギガ	G	$10^{-12}$	ピコ	р		
$10^{6}$	メガ	М	$10^{-15}$	フェムト	f		
$10^{3}$	+ 1	k	10 <sup>-18</sup>	アト	а		
$10^{2}$	ヘクト	h	$10^{-21}$	ゼプト	z		
$10^{1}$	デカ	da	$10^{-24}$	ヨクト	v		

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位				
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=86 400 s		
度	٥	1°=(п/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad		
ヘクタール	ha	1ha=1hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>		
リットル	L, 1	1L=11=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>		
トン	t	$1t=10^{3}$ kg		

## 表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

衣される奴値が夫缺的に待られるもの					
名称 記号		記号	SI 単位で表される数値		
電	子ズ	ドル	ŀ	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダ	N	ŀ	$\sim$	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統-	一原子	質量単	〔位	u	1u=1 Da
天	文	単	位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

#### 表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

	名称		記号	SI 単位で表される数値
バ	-	N	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オン	グストロ・	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海		里	М	1 M=1852m
バ	-	ン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm)2=10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネ	-	パ	Np	の形はないの教徒的な眼球は
ベ		N	В	31単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
デ	ジベ	N	dB -	

#### 表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値			
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 cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s			
ストークス	$\operatorname{St}$	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} = 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$			
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd } \text{ cm}^{\cdot 2} = 10^4 \text{ cd } \text{ m}^{\cdot 2}$			
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx			
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>			
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$			
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$			
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe ≙ (10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>·1</sup>			
(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 △ 」					

は対応関係を示すものである。

		表	(10.	SIに 帰	<b>禹さないその他の単位の例</b>
	名称 言			記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
$\scriptstyle  u$	$\sim$	トゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ			K	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
$\scriptstyle  u$			ム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガ	3	~	7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	T.	N	"		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	ートルチ	系カラゞ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
ŀ			N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	進	大気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力	П	IJ	ļ	cal	lcal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	カ	17	~		$1 = 1 = 10^{-6}$ m

この印刷物は再生紙を使用しています