JAEA-Research 2015-017 DOI:10.11484/jaea-research-2015-017



坑道周辺岩盤の概念再構築に関する研究 - 平成26年度-

(委託研究)

Studies on the Reconstruction of the Concept of Rock Mass around the Tunnel - Japanese Fiscal Year, 2014 -(Contract Research)

> 小島 圭二 大西 有三 青木 謙治 杤山 修 西垣 誠 登坂 博行 吉田 英一 村上 裕晃 笹尾 英嗣

Keiji KOJIMA, Yuzo OHNISHI, Kenji AOKI, Osamu TOCHIYAMA Makoto NISHIGAKI, Hiroyuki TOSAKA, Hidekazu YOSHIDA, Hiroaki MURAKAMI and Eiji SASAO

> バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部

Geoscientific Research Department Tono Geoscience Center Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

December 2015

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発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。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 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 Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, 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, 2015

坑道周辺岩盤の概念再構築に関する研究

一平成 26 年度一

(委託研究)

日本原子力研究開発機構

バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部

小島 圭二*1, 大西 有三*2, 青木 謙治*3, 杤山 修*4, 西垣 誠*5,

登坂 博行*6, 吉田 英一*7, 村上 裕晃, 笹尾 英嗣

(2015年10月13日受理)

本報告書は、地層処分におけるニアフィールドコンセプトをより現実的に再構築する研究に関 するものである。本年度は、当委員会の最終年度に当たるため、ニアフィールドコンセプトの再 構築に関する検討概要と基本的考え方のまとめを行った。とくに、地下岩盤の現実的な水みち構 造の理解へ向けて、重要事項を記述した。

「分野間の連携と諸領域の技術や評価手法の組み合わせ」は、ニアフィールドコンセプトの基本的考え方の一つである。これに深く係わっている諸事項に、坑道周辺・ニアフィールド領域での施工・操業や処分場の閉鎖に伴う諸現象の理解と異常事態への対応策などがある。これらの技術や評価手法の現状と課題についても記述した。さらに、日本原子力研究開発機構が計画中の深度 500m 坑道における再冠水試験について、「ニアフィールドコンセプトの再構築」における連成事項の実証につながる計画として意見交換を行った。これに関する各委員の意見は付録として取りまとめた。

第3章では、先ず「坑道周辺岩盤の概念再構築」を総括した。また委員会での検討事項を整理 して、「現実的なニアフィールドコンセプトの再構築」の残された課題を抽出した。とくに、「2011 年東日本大震災」後に、安全に関する社会のパラダイムが大きくシフトしたことを考慮して、地 層処分に関して、社会が従来の安全概念では受け入れがたくなっていると考えられる事項も整理 した。また、地下研究施設/ニアフィールド領域で実証可能な、地層処分「必須の重要事項」へ の対応を検討した。これらを通して、今後の地層処分/ニアフィールド領域の研究開発の方向を 示した。

本報告書は、一般社団法人資源・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:〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64

*1 地圏空間研究所, *2 関西大学, *3 地球システム総合研究所, *4 原子力安全研究協会,

*5 岡山大学, *6 東京大学, *7 名古屋大学

i

JAEA-Research 2015-017

Studies on the Reconstruction of the Concept of Rock Mass around the Tunnel - Japanese Fiscal Year, 2014 -(Contract Research)

Keiji KOJIMA*1, Yuzo OHNISHI*2, Kenji AOKI*3, Osamu TOCHIYAMA*4, Makoto NISHIGAKI*5, Hiroyuki TOSAKA*6, Hidekazu YOSHIDA*7, Hiroaki MURAKAMI and Eiji SASAO

> Geoscientific Research Department, Tono Geoscience Center, Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management, Japan Atomic Energy Agency Akiyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

> > (Received October 13, 2015)

This report is concerned with research to reconstruct more realistic near-field (NF) concept for the geological disposal of radioactive waste. This year is the final year of this committee activities. So we have carried out the summary on Re-thinking of NF concept and its technical basis. We especially towards the understanding of realistic flow-path structure described the commentary on important matters for NF concept. Cooperation between the study fields and combination of various science & technology and evaluation methods are one of the important technical bases of NF concept.

As various matters that are closely related to this cooperation and combination, there are construction and operation of the near field region such as peripheral tunnel, various phenomena associated with the closure of the disposal site and so on. We also described the current situation and challenges of countermeasures about them. In addition, JAEA (Japan Atomic Energy Agency) is planning to re-saturation studies in the investigation tunnel under 500m in depth which leads to the verification of the matters as part of reconstructing practical NF-concept. This committee has done on this plan, the exchanging of views among the committee members.

Since the "Great East Japan Earthquake 2011", the safety paradigm has shifted dramatically. We exchange views on such matters and presented the direction of future research and development for geological disposal.

Keywords: Geological Environment, Geological Disposal, Safety Assessment, Near-Field (NF) Concept, Re-filling Process

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

*1 Geospace Laboratory, *2 Kansai University, *3 Geosystem Research Institute, *4 Nuclear Safety Research Association, *5 Okayama University,*6 The University of Tokyo, *7 Nagoya University

目 次

1.	ま	えがき	1
2.	断	層・割れ目に着目した現実的ニアフィールド核種移行経路構造モデルの検討	2
2	2.1	はじめに	2
2	2.2	検討内容	3
	2.2	2.1 ニアフィールドコンセプトの検討概要と基本的考え方について	3
	2.2	2.2 現実的な坑道周辺における地下岩盤の水みち構造状態(とくに結晶質岩の事例)	4
	2.2	2.3 坑道周辺・ニアフィールド領域での現実的調査手法と開発内容についての	
		現状と課題	16
2	2.3	まとめ	24
3.	20	14 年度の検討事項の総括	25
	3.1	はじめに	25
	3.2	坑道周辺岩盤の概念再構築に関する総括	26
	3.3	ニアフィールドコンセプトの再構築に関する残された課題の抽出	29
	3.4	地層処分に関する必須の重要事項の検討と瑞浪超深地層研究所などの	
		地下研究施設での対応	31
	3.5	まとめ	31
参	考文	'献	32

【付録】

付録A.	坑道周辺岩盤の概念再構築に関する研究: 2013 年度~2014 年度	35
付録 B.	現実的ニアフィールド〜ファーフィールド概念の構築と技術的課題	41
付録 C.	断層・割れ目に着目した現実的ニアフィールド核種移行経路構造モデルの	
	検討について	51

Contents

1.	I	Prefa	ce	1
2.	F	Realis	stic conceptual model description of near-field focusing on fault and	
	f	fractı	ares in crystalline rock	2
	2.1	l In	troduction	2
	2.2	2 Co	ontext	3
	4	2.2.1	Technical basis of near-field conceptual model	3
	4	2.2.2	Realistic flow-path structure around the gallery (case of crystalline rock)	4
	4	2.2.3	Current situations and issues on realistic methodology for investigation and	
			research and development of near-field around the gallery	16
	2.3	3 Su	ımmary	24
3.	S	Sumn	nary of issue discussed in this year	25
	3.1	l In	troduction	25
	3.2	2 Su	ummary on reconstruction of the concept of rock mass around the tunnel	26
	3.3	3 Re	emaining issues on reconstruction of near-field conceptual model	29
	3.4	4 Di	scussion on remaining issues, and research and development at underground	
		re	search laboratory	31
	3.5	5 Su	ımmary	31
R	efe	rence	98	32
	(Ap	opend	lix	
				~ ~

Discussion held in this fiscal year	35
Technical issues on construction of realistic conceptual model of	
near- and far-fields	41
Discussion on realistic conceptual model description of near-field	
focusing on fault and fractures in crystalline rock	51
	Discussion held in this fiscal year Technical issues on construction of realistic conceptual model of near- and far-fields Discussion on realistic conceptual model description of near-field focusing on fault and fractures in crystalline rock

図リスト

図 2.2.1	不確実性と時間との相関の概念図	3
$figuremath{\mathbb{Z}} 2.2.2$	処分場周辺での各時系列変化を検討するための Stage の概念	1
図 2.2.3	瑞浪超深地層研究所地下坑道(深度 300m および 500m)で観察される	
	シーリングされた割れ目および地下水の水みちとなる割れ目の分布状況	5
図 2.2.4	地下の原位置における結晶質岩中の水みち割れ目に形成される方解石の自形結晶 … 6	3
$ extstyle{2.2.5}$	熱水性の充填鉱物でシーリングされる割れ目	7
図 2.2.6	地下約 3,000m から採取された現在冷えつつある花崗岩体の岩石薄片写真 8	3
extstyle 2.2.7	結晶質岩の未変質マトリクス	3
図 2.2.8	未変質マトリクス(新鮮母岩)と変質マトリクス(変質 Gr1 および Gr2)の	
	Csの吸着試験結果)
図 2.2.9	変動帯における結晶質岩中の割れ目形成モデル10)
図 2.2.10	変動帯における花崗岩の貫入に伴う割れ目形成プロセス11	L
図 2.2.11	サイト特性調査で対象とする把握事項の概念図12	2
図 2.2.12	断層およびその周辺岩盤の水みち割れ目の産状とその階層構造15	3
図 2.2.13	断層中の水みち割れ目の充填鉱物	3
図 2.2.14	阿寺断層およびその周辺岩盤中に発達する割れ目密度の調査によって示される	
	断層運動によるダメージゾーン	ł
$ extstyle{2.2.15}$	断層(帯)の水みちと現実的なバリア機能の評価の必要性15	5
extstyle 2.2.16	将来の処分サイトの処分ピットにおいて想定される現実的実施内容および	
	グラウチング工程	7
extstyle 2.2.17	処分ピット周辺の現実的グラウト注入方法の概念18	3
図 2.2.18	瑞浪超深地層研究所で計画中の坑道周辺における工学的対策技術開発18	3
図 2.2.19	瑞浪超深地層研究所で実施予定の再冠水試験の概念図)
図 2.2.20	処分場建設に伴う時空間における環境状態変化の概念図)
図 2.2.21	瑞浪超深地層研究所で予定されている物質移動試験の概念図20)
extstyle 2.2.22	処分場より遅延効果を有しない水みち(断層)までの離間距離を約 100m とする	
	ニアフィールドバリア機能モデル	L
図 2.2.23	スウェーデン(SKB)で用いられているネットワークモデル	L
図 2.2.24	H12 レポート以降の地下岩盤中の割れ目・断層に関する知見を踏まえたモデル…22	2
imes 2.2.25	日本の地質環境と水みちを考慮した構造モデル案22	2
図 2.2.26	沿岸地域を念頭に広域的に想定されうる地下水流動場の予察的モデル23	3
図 2.2.27	上記水理学的条件と併せた単純化した地質モデル	3

This is a blank page.

1. まえがき

日本原子力研究開発機構(以下,「原子力機構」)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技術分野におい て,一般的(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。

地層処分事業が開始段階にある現在,研究開発には処分事業と安全規制の双方に資する,より 実務的な技術基盤の整備が求められている。ジェネリックな視点で蓄積してきた基盤技術を,地 層処分サイトに即した具体的(スペシフィック)な技術として適用していくことが重要である。

このような観点から、本研究では「分野や課題間の連携」,「複数の課題や領域にまたがる技術 や評価手法の組み合わせ」の検討を積み重ねてきた。これらの成果に基づいて、地質環境調査・ 評価技術を、一般論から地層処分サイトに即した実用レベルに高度化していくための概念の再構 築を行ってきた。具体的には、平成24年度から、地質環境、長期挙動、人工材料などの各分野に 係る連成現象に着目して、長期的な側面を含めたニアフィールドコンセプトの再構築を行ってき た。またこの間に、同コンセプトに基づいて、瑞浪超深地層研究所の研究坑道で実施すべき原位 置試験の検討と提示も行ってきた。

今年度は、ニアフィールドコンセプトの構築に向けて残された課題を整理し、その結果に基づいて原位置試験と試験法に関する検討と提示も行った。なお、ニアフィールドコンセプトの再構築に当たっては、平成16年度に始まるこれまでの一連の研究成果 ^{1)~9}を反映させてきた。

本報告書は、長年にわたって実施してきたこれらの研究の成果を「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」としてまとめたものである。

なお、委員会の構成は下記の通りである。

委員長	東京大学名誉教授 地圈空間研究所	代	表	小島	圭二
委員	京都大学名誉教授 関西大学 環境都市工学部	特任教		大西	有三
	岡山大学 大学院 環境生命科学研究科	教	授	西垣	誠
	東京大学 大学院工学系研究科	教	授	登坂	博行
	京都大学名誉教授 (財)地球システム総合研究所	理 事	長	青木	謙治
	(公財)原子力安全研究協会	技術層	顧問	杤山	修
	名古屋大学 博物館	教	授	吉田	英一
事務局	一般社団法人 資源・素材学会			須藤	茂韶

2. 断層・割れ目に着目した現実的ニアフィールド核種移行経路構造モデルの検討

2.1 はじめに

地層処分では、人工バリアおよび天然バリアの多重バリアによる核種隔離機能によって、その 長期的な安全性を担保することを基本的な考え方としている。したがって、人工バリアおよび天 然バリアのバリア機能を適切に評価することが必須となる。とくに近年では、これまでの地下研 究施設をはじめとする地下環境に関する知見の築性によって、第2次取りまとめ⁹⁰(以下、「H12レ ポート」)などで実施してきた安全評価におけるモデルやFEPに関して、より現実的なプロセスに 基づいた修正が進められている。

本委員会において進めてきた「坑道周辺岩盤の概念再構築に関する研究 一断層・割れ目に着目 した現実的にニアフィールド核種移行経路構造モデルの検討一」は、基本的にはこれまでの技術 的知見に基づき、より現実的なモデルが検討すべき現象、プロセスの取捨選択、あるいは優先順 位を検討し、より信頼性の高いモデルや手法、考え方を提示することを目的に行ってきたもので ある(付録A, B参照)。

このような認識のもと、これまでニアフィールドにおける処分場閉鎖後の核種移行等に関係す るさまざまな現象の抽出を行い、それらの複合反応と併せてニアフィールドコンセプトの再構築 についての検討を重ねてきた^{1)~8)}。一方で、これらのニアフィールドにおけるプロセスは長期的 な予測を含むものであり、決定論的に全てを提示することは不可能である。つまり、時空間にお ける「適切な不確実性の幅」も併せて検討することが必須である。その不確実性を、「適切な幅」 として提示するには、長期の時空間で実際に生じた自然現象を参考にすること(ナチュラルアナ ログ)が有効である^{8,10)}。しかし自然現象においては、その現象が生じた際の境界条件の全てが明 確ではない場合も多く、「類似現象」として取り扱う自然現象が、処分場閉鎖後の全ての現象の厳 密な意味でのチューニングに適しているわけではないことも認識しておくことが必要である¹¹⁾。

また一方で、東日本を襲った震災以降における「原子力技術」への不信感、あるいは社会の受 容性の変化への影響は依然大きなものがあり、地層処分に不可避の「不確実性」に対するメッセ ージの発し方は引き続き検討されなければならない⁸⁰。現在、経済産業省において進められている 放射性廃棄物ワーキンググループにおいても、地層処分の社会的受容性の観点から、処分後の回 収可能性を検討することなしにサイト選定は受け入れられない、との認識が示された¹²⁰。このよ うな状況の変化、現状において、将来に向けた回収技術の整備も、日本の地下環境に合致した形 で行われることが重要である。また回収技術は、そのままニアフィールドコンセプトに直結する 課題であることも明らかである。

本年度は、本委員会におけるこれまでの検討結果の取りまとめとして、これまでの検討内容、 結果を網羅的に示すとともに、現在進められている瑞浪超深地層研究所での再冠水試験など、ニ アフィールド環境やニアフィールド領域のバリア機能の理解において将来的な課題を抽出し、今 後、これらの研究を実施していく上で留意すべき内容等の提示を行った。

2.2 検討内容

2.2.1 ニアフィールドコンセプトの検討概要と基本的考え方について

ニアフィールド環境は、それまで地下環境として育まれてきた状態から、坑道(アクセス坑道, 処分坑道など)掘削に伴う擾乱状態を経て、操業期間中の変化状態の維持、そして最終的に埋め 戻し、地下水の再冠水に伴う地質環境の復帰状態への変化、という環境状態の変化・変遷を経る ことになると考えられる⁸⁰(図2.2.1)。これらの状態変化の時間スケールは、現象によっても差が 生じると考えられるが、少なくとも数十年~数百年に及ぶものと考えられる。

これまでのニアフィールドコンセプトの検討においては、この時空間での状態変化において、 核種移行を念頭に「上流~下流」の時系列断面でのシナリオに関して、下記のStage (0~IV) に 分類して検討を行った⁸⁾。なお、これらの状態変化の予測を行う上で、それぞれの時空間断面での 不確実性はそれぞれの時空間断面毎に異なる(図2.2.1)。したがって、各Stageにおける状態の記 述の確からしさの度合いは自ずと同一ではなく、検討されている事象の不確実性に伴う想定現象 の誤差も同一ではない。この誤差は、今後の技術開発や研究成果によって少なくなることが期待 されるが、常に不確実性に伴う誤差が内包されていることを認識しておくことが必要である。

これまでの検討においては、上記に示した背景ならびに考え方のもと、おおよその時空間にお けるニアフィールドにおけるプロセスの検討を行う上でStageを設定し、下記に示すように、それ ぞれのStageにおける事象とその後の事象との連携を示しつつ、処分場閉鎖後のニアフィールドに おけるプロセスの検討を行ってきた。

- Stage 0: 処分場掘削~閉鎖までの地下環境の変化形成段階(処分場掘削~閉鎖直前/100年程 度の期間)
- Stage I: 閉鎖後の地下水の浸入と上流側における人工バリア材との反応段階(処分場閉鎖後~ 数千年程度)



時間

図2.2.1 不確実性と時間との相関の概念図 時間の増大に伴って,事象(予測)に伴う不確実性も増大する

- Stage II: 上流側の人工バリア材を透過した地下水(間隙水)とガラス固化体との反応段階(処 分場閉鎖後,数千年程度~数万年)
- Stage III: ガラス固化体を透過した地下水(間隙水)から,下流側の人工バリア材との反応段階 (処分場閉鎖後,数万年以上)
- Stage IV: 下流側の人工バリアを透過した後,天然バリアと反応する段階(処分場閉鎖後,数十 万年程度)

これらの各Stageは、処分場建設~操業~閉鎖、および閉鎖後の各種バリア機能に期待されている性能期間をもとに、検討すべき時空間とプロセスの抽出を目論みとして行ってきたものである(図2.2.2)。

本委員会では、このようなアプローチにおいて、我が国のような変動帯の地質環境におけるニ アフィールド環境での、とくにStage I 以降の処分場閉鎖後(Post-closure)の坑道周辺岩盤に主 眼をおいて、日本における現実的な坑道周辺における地下岩盤の構造(断層や割れ目などの水み ち構造)、水理モデルの検討方法、安全評価への反映などについての検討を行ってきた。以下、ニ アフィールドの水理地質構造モデル、グラウト材等工学的手法など、瑞浪超深地層研究所で今後 実施される冠水試験や、将来的な処分場におけるピット選定に関する考え方などについて、これ までの本委員会での検討内容について述べる。

2.2.2 現実的な坑道周辺における地下岩盤の水みち構造状態(とくに結晶質岩の事例)

これまでの地下環境での直接的な結晶質岩中の割れ目に関する調査・知見は、釜石鉱山における事例¹³⁾のほか、とくに2000年以降においては、その重要なソースとして瑞浪超深地層研究所、 LPG地下備蓄サイトなどでの知見が挙げられる^{14)~16)}。結晶質岩中の水みち構造に関して、これ らの調査結果から明らかになってきたことは、地下の原位置における変動帯の結晶質岩盤中の水



図 2.2.2 処分場周辺での各時系列変化を検討するための Stage の概念

みちの存在割合や水みち周辺の鉱物学的性質などの特性である。

一般に地表風化の激しい日本において、結晶質岩内部の割れ目や断層に関する詳細な構造を地 表調査で明らかにすることは困難を伴う。近年の瑞浪超深地層研究所での研究からも、地下200m 程度まで地表からの影響が確認されている¹⁷⁾。したがって、地表からの風化の影響を受けること のない地下深部での知見は非常に重要かつ貴重だと言える。その地表からの影響が少ない地下研 究施設やLPGサイトでの知見として明らかになったことは、結晶質岩体中の割れ目頻度、構造¹⁴⁾、 水みちとして機能している割れ目頻度¹⁵⁾、割れ目充填鉱物の性状、充填プロセス、地下水と充填 鉱物や周辺岩盤の変質状態との相関¹⁶⁾、そして断層構造と断層内水みちの構造特性などである¹⁸⁾。 これらの調査結果において示されることは、日本の結晶質岩盤は変動帯としての固有の割れ目状 態や水みちの特性¹¹⁾を有することだと言える。委員会では、これらの成果を踏まえて結晶質岩盤 中の水みちとなりうる断層および割れ目特性についての知見を示すとともに、ニアフィールドの 概念モデルの考え方の提示を行ってきた。とくに2000年以降、データや技術の蓄積によって示さ れる現実的構造モデルの提示を試みた。

(1) 単一割れ目の水みち構造とバリア機能

1) 単一割れ目の水みち構造

結晶質岩体における水みち構造については,瑞浪超深地層研究所での地下300mおよび500mでの水平坑道を用いた詳細な調査,研究が実施されている¹⁵⁾。

図2.2.3は、300mおよび500m坑道での割れ目分布と水みちの特徴を示したものである。図に示 す黒色の実線は天然鉱物でシーリングされた割れ目、青色の線で示すのは透水性を有する水みち 割れ目(以下、「水みち割れ目」)である。なお、この青色には、プレグラウトされた割れ目も含ま れる。これらの調査は、掘削直後に目視によって観察された全ての割れ目について行っているも のであり、その情報の信頼性は高い。

これまでの調査結果から、300mおよび500m坑道で確認することのできた全割れ目(観察では



図2.2.3 瑞浪超深地層研究所地下坑道(深度300mおよび500m)で観察される シーリングされた割れ目および地下水の水みちとなる割れ目の分布状況



図 2.2.4 地下の原位置における結晶質岩中の水みち割れ目に形成される方解石の自形結晶 (図中:電子顕微鏡での空隙状態を示したもの(隙間があると結晶面をもった鉱物が成長する))

目視できた割れ目全てを判読している)に対して,事前に行ったグラウト材の注入が確認された 割れ目および目視によって掘削直後に湧水が確認された割れ目は,全割れ目の10%に満たない割 合である¹⁵⁾。また,これらグラウト材の注入が認められる割れ目は,数メートル以上の連続性を 有する単一割れ目であることが多く,基本的にネットワーク構造をベースとする割れ目のうち, 最も透水性を有する水みち割れ目であることを示している。

グラウト材の注入が確認されていない水みち割れ目は、坑道掘削直後に実施される切り端観察 から、グラウト材の注入がないものの、地下水の滲み出しや湧水の確認された割れ目100ヶ所(本) 程度であり、グラウト材が注入されている割れ目に比べ連続性に乏しく、基本的にグラウト材が 注入されている主要な水みち割れ目から枝分かれするなど、傾向としては付随的な割れ目として 確認されるものである¹⁵⁾。

これらの原位置における詳細な調査から,結晶質岩における全割れ目のうち,水みちとして機 能しているもの(水みち割れ目)の約70%程度にグラウト材の注入が確認でき,岩盤内では,冷 却割れ目あるいは隆起に伴う構造的割れ目としての連続性を有する割れ目が水みちとして機能し ていることを示唆するものである(この形成モデルについては後述)。また,これまでの調査の結 果から,これらの水みち割れ目において確認される特徴は,その充填鉱物として炭酸塩鉱物(方 解石)が割れ目表面に確認されることである¹⁴⁾(図2.2.4)。これらの方解石は,自形結晶として割 れ目の開口空隙中に成長したものである。つまり,自形の充填鉱物の結晶の存在は,割れ目が地 下深部においても開口し,原位置で水みちとして機能していたことの傍証となることを示してい る。

2) 割れ目および結晶質岩マトリクスのバリア機能

これらの水みち割れ目の充填鉱物とは対象的に認められるのが、シーリングされた割れ目(以下「シーリング割れ目」)およびその充填鉱物である(図2.2.5)。シーリング割れ目に認められる 充填鉱物は、熱水の循環に伴う周辺岩盤の変質に伴って形成されたものであることを特徴とする。 それら充填鉱物の主な種類は、緑泥石、石英そして絹雲母などである。これらは、これまでの鉱 床学や地熱開発での調査事例から、100~200℃前後の熱水の循環に伴って形成される鉱物である ことが知られている¹⁹⁾。シーリング割れ目においては、これらの充填鉱物が割れ目の母岩側から



図2.2.5 熱水性の充填鉱物でシーリングされる割れ目¹⁴⁾ a: 沸石の発達が確認される割れ目, b-1,2: 絹雲母と熱水性の方解石で充填される割れ目

おおよそ層状に形成された順番に割れ目内を充填する構造をなす^{20),21)}。このことは、熱水の循環 においても、温度と成分の異なった熱水が段階的に割れ目を透過しつつ、割れ目空隙をシーリン グしていったことを示すものである。

これらの割れ目充填鉱物の産状と鉱物種,その形成プロセスから,貫入に伴う結晶質岩体中での割れ目形成と熱水~地下水(天水)の循環ステージ,そしてそれらの循環に伴う割れ目充填鉱物の沈殿(シーリング)と,沈殿に伴う割れ目の水みちとしての機能の喪失という変遷を読み取ることが可能である¹⁴⁾。

とくに変動帯と呼ばれる日本においては、世界的にも若い花崗岩体の貫入に関する知見が得ら れつつある。その最も端的な事例は、岩手県葛根田の地熱地帯で確認された岩体であり、3,000m を超えるボーリングによる岩石試料の採取や、温度測定や地下水データなどから、現在も冷えつ つある岩体との比較が可能となっている²²⁾。この岩体の調査結果からは、地下3,000mの約600℃ を超える岩体中では、岩体全体が延性変形を主体とすることから割れ目が形成されにくいこと、 また岩体中の鉱物には変質が全く認められないことが示されている²³⁾(図2.2.6)。

したがって、地表に露出した結晶質岩では、冷却~隆起までの期間に被った熱水循環によって 長石類や黒雲母の変質が進行し、岩盤マトリクスの鉱物中に様々な後生的鉱物が形成される(図



cm

図2.2.6 地下約3,000mから採取された現在冷えつつある花崗岩体の岩石薄片写真



図 2.2.7 結晶質岩の未変質マトリクス²⁴⁾

未変質マトリクス (a-1: コア断面, a-2: 薄片写真, a-3~5: 元素マップ) と変質マトリクス (b-1: コア断 面, b-2: 薄片写真, b-3~5: 元素マップ) の状態比較。変質が進行するほどマイクロクラック, NaおよびCa の溶脱, Fe酸化物の沈殿などが進行する。K-Feld; カリ長石, Qz; 石英, Bt; 黒雲母, Chl; 緑泥石, Ser; 絹雲母, Fe-Ox; 水酸化鉄。スケール: a-2およびb-2は2 mm, それ以外は1 cm。

2.2.7)。将来の処分場で遭遇する岩体の性質は、葛根田花崗岩のような形成間もない岩体ではなく、熱水循環によって鉱物の多くが変質している岩体である可能性が高い。その場合、変質マト

JAEA-Research 2015-017



図2.2.8 未変質マトリクス(新鮮母岩)と変質マトリクス(変質Gr1およびGr2)の Csの吸着試験結果²⁴⁾

変質マトリクスの方のバリア機能が期待される結果となっている。

リクスがどの程度のバリア機能を有しているのかの知見は有用である。図2.2.8は、その岩盤マト リクスのバリア機能を簡便的に評価するために実施した、粉砕試料を用いたCsバッチ吸着試験の 結果である。この結果が示すことは、熱水変質を被っていない新鮮な岩盤と変質を被っている岩 盤とも、その吸着機能に大きな差はないか、あるいは二次的に形成された鉱物の吸着機能によっ て、変質した岩盤の方がより吸着機能が高まっている可能性すら示唆する²⁴。

結晶質岩においては、その岩盤のバリア機能は、水みちの分布、構造、遅延効果だけでなく、 周辺岩盤へのマトリクス拡散による吸着、遅延効果が重要になる。安全評価上では、単純化した 平行平板モデルによる評価がなされているが、これらの実際的なバリア機能を踏まえた単純化の 再確認が重要と思われる。

(2) 変動帯における水みちとなる割れ目ネットワーク構造と特性

結晶質岩体中において、いつの段階で割れ目が形成され、水みちとなる割れ目がどの程度維持 されるのか(寿命)、その知見は水みちのみならず、割れ目ネットワークを基本とする地下水流動 モデルの長期安定性という観点からも重要な知見となる。

変動帯の地質環境においては、先に示したように地下深部に貫入したプルトン(貫入岩体)は、 冷却しつつ、約450℃よりも温度の低い部分からは、冷却に伴う岩体の固化と脆性破壊が主体とな り、割れ目が確認されるようになる。つまり、花崗岩で代表される結晶質岩中の水みちとなる割 れ目の形成は、まずは地下深部での岩体の冷却に伴う脆性破壊が主因であり、充填鉱物は、その 後の熱水あるいは天水起源の地下水の循環に伴う溶質の沈殿によるものであると言うことができ る。とくに相対的に初期段階に形成され、熱水を循環させる割れ目の多くは、熱水性の充填鉱物 の形成・沈殿によって、その多くがシーリングされ、水みちとしての機能を喪失するものと思わ



図 2.2.9 変動帯における結晶質岩中の割れ目形成モデル¹⁴⁾

A は年代とともに割れ目頻度が増加するモデル, B は年代を経ても割れ目頻度が変化せず, 充填鉱物の厚みが 増すモデル。これまでの調査・研究結果は, B が変動帯における結晶質岩に適していることを示す。

れる。また、これまでの変動帯における地質環境(日本国内)での異なった形成時代のプルトン の調査から、結晶質岩体の貫入~冷却~上昇(隆起)に伴う割れ目形成とその頻度は、おおよそ 初期段階に形成された割れ目がそのまま保持されることが示されつつある¹⁴⁾(図2.2.9)。このこと は、結晶質岩体の割れ目ネットワークは、現在の様式、構造を岩体形成年代の数十分の1、あるい は数百分の1以下の将来の時空間においても維持する可能性の高いことを示すとともに、現在の地 下構造、割れ目ネットワークに基づく水理学的ネットワークモデルの数万年程度の長期的安定性 についても担保し得ることを示唆する。

瑞浪超深地層研究所の深度 300m 研究坑道での調査事例では、グラウト材の注入および目視に よって確認される明瞭な水みち割れ目は全体の 10%程度である。つまり、90%近い割れ目は、形 成後、主に熱水性の二次的な鉱物の充填によってシーリングされ、水みちとしての機能をほとん ど失っていることが認められている¹⁵⁾。これらの調査、観察事実は、先に示した変動帯における 岩体中の水みち割れ目の形成モデルの傍証となるものである。

結晶質岩体中の割れ目について、その形成プロセスをまとめると、まず岩体の冷却に伴ってその多くが形成され、岩体の隆起とともに応力解放とともに割れ目空隙が解放しつつ、熱水~地下水を循環させ、その際に周辺岩盤と反応した結果として、そのときの温度や水質(熱水)およびそのネットワーク構造は、長期的に安定したものであり、水理学的構造モデルの時空間的変化については、おおよそ担保されていると言える(図 2.2.10)。

一方,変動帯における結晶質岩体中の割れ目頻度は、欧米の安定陸塊としての結晶質岩盤の割れ目頻度の10倍以上であることも特徴的である¹¹⁾。その違いの原因については未だ確定的では



図2.2.10 変動帯における花崗岩の貫入に伴う割れ目形成プロセス¹⁴⁾

ないが、考えられるのは、1) 貫入岩体の規模・大きさの違い(変動帯の岩体は小さい)、2) 貫入 深度の違い(変動帯の岩体は浅い)、そして3)隆起速度の違い(変動帯の岩体は速い)、という基 本的条件の違いである。したがって、変動帯における岩体は貫入岩体の規模が小さく、浅く貫入 していることから冷却速度も早く脆性破壊が岩体全体に及び、隆起速度が早いことから形成され た割れ目に熱水の循環も広がり、岩体全体に変質が及ぶものと思われる。このような岩体の性質、 状態の理解は、変動帯の地質環境での地層処分を実施するにあたって適切な工学技術との合理的 な連携をもたらす上でも非常に重要な要素だと考えられる。

以上の知見をまとめると、変動帯における結晶質岩中の割れ目、水みちの特徴は以下の通りと なる。

<結晶質岩中の水みちとしての割れ目構造の特徴>

- 結晶質岩中に認められる数メートル規模の連続性のある割れ目のうち,水みちとして機能 しているのは10~20%である^{14,15}。
- ・水みち割れ目のほぼ全てに充填鉱物が介在する21)。
- · 水みち割れ目の表面には、方解石が普遍的に確認される14),21)。
- 水みち割れ目の周辺岩盤の鉱物は、おおよそ一様に変質が確認され¹⁶⁾、また空隙率が増加することが示されている²⁴⁾。

- ・ 割れ目周辺の変質部分のマトリクス拡散への寄与,バリア機能への相乗効果が期待される⁴⁾
- ・ 吸着実験およびアナログ事例としても、変質岩盤の吸着機能が示される25),26)。

(3) (活)断層のダメージゾーンと水みちとしての特性

地下環境では、ここまで示してきた結晶質岩中に確認される水みちとしての割れ目ネットワークの他に、地表調査段階で排除することのできなかった小規模の断層が、精密調査段階で遭遇する「選択的な移行経路」となると思われる(図2.2.11)。したがって、将来の処分場空間においては、これら割れ目や小断層で特徴付けられる地下環境をどのようにバリア機能として位置づけるかが重要である。

断層は、地質学的・応用地質学的にも、地表調査やトンネル掘削等での経験から、その性状が 理解されてきている。しかし、その水理学的性状、また地層処分におけるバリア機能という観点 において、果たして十分な理解がなされているかと問われた場合、必ずしもその特性を十分にそ の性状を説明し得る状況、知見の蓄積があるとは言いがたい。図2.2.12は、これまでの地下研究施 設や地下備蓄などで遭遇した小断層の水みちとしての構造上の特徴や、その周辺に形成される割 れ目(帯)の分布、水みちとしての特徴を示したものである。ここで著すように、構造上のスケ ールおよび透水性には、階層的な構造が存在し、断層本体(とくに断層ガウジ部分)が必ずしも 水みちとして機能しているわけではないことである(むしろ遮水帯としての機能を有することが 多い)。このような事例は、LPGの地下備蓄サイトにおいても同様の報告がなされている²¹⁾。 とくに粘土状の充填鉱物が介在する断層およびその周辺割れ目の透水性は、周辺母岩の結晶状の 充填鉱物を有する割れ目(図2.2.13)よりも、約2~3オーダーでの透水性の違い(低い)を有する ことが示されつつある¹⁵⁾。これら粘土状充填物の成因については、未だ不明な点があるが、断層 近傍の割れ目に多く認められることから断層活動に関係する可能性は否定できない。



図2.2.11 サイト特性調査で対象とする把握事項の概念図



図2.2.12 断層およびその周辺岩盤の水みち割れ目の産状とその階層構造 断層近傍では粘土状の充填鉱物が多く観察される一方,健全な母岩では結晶性の充填鉱物が形成,確認され る。これらの構造上の違いによる透水性も大きく異なることが確認されつつある。





このような断層内充填鉱物・組織については、これまでも本委員会での調査研究成果の1つで ある阿寺断層の破砕帯および周辺岩盤中の割れ目(帯)構造からも同様の知見が得られている^{27),28)}。 阿寺断層のような大規模な活断層においても、断層を構成する構造は、「断層ガウジ」「断層周辺 の割れ目帯(ダメージゾーン)」(図2.2.14)とその周辺に認められる変質組織である²⁵⁾。これらの



図2.2.14 阿寺断層およびその周辺岩盤中に発達する割れ目密度の調査によって示される 断層運動によるダメージゾーン¹⁷⁾

断層面に近いほど、連続性の短い割れ目(▲)から長い割れ目(□)へと変化する。

断層およびその近傍での地下水流動については,現在,様々な調査研究が行われている¹⁷⁾。断層 のバリア機能についてのアナログ事例を取り上げて,断層ガウジのバリア機能を論じている。と くに断層ガウジについては,東濃ウラン鉱床を切る月吉断層などの事例²⁹⁾もあり,基本的にガウ ジは非常に高いバリア機能を有していることが示唆される。これらの知見に基づいて,処分場を 含むニアフィールドの主要な水みちを念頭においた現実的なモデルおよびバリア機能については, 過度な保守的立場を取らない限り,断層のバリア機能をも考慮したものであることが必要と考え られる(図2.2.15)。

以上,これまでの調査研究の結果に基づいて,結晶質岩における核種移行の水みちとなる構造, 遅延効果に関する一般的特性について,先に示した知見と供にこれまでの地質学的な理解と併せ て,変動帯における地質環境中の結晶質岩における水みちの特徴を以下に示す。

<水みちとしての断層構造の特徴>

- ・ 空間的に,地下環境においては数十m~100mに1本の割合で,地表調査ではほとんど確認す ることの不可能な小断層の存在を考えることが現実的である²¹⁾。
- ・ 断層の構造は、透水性の低い「断層ガウジ」と透水性の高い「ダメージゾーン」の割れ目帯 のセットで構成されており、透水性には異方性が伴う¹⁷⁾。



図2.2.15 断層(帯)の水みちと現実的なバリア機能の評価の必要性

断層を形成する構造要素は、断層ガウジ、断層運動に伴うダメージゾーン(割れ目帯とそれを充填する粘土状 鉱物)、そして変質した周辺岩盤である。これらの水みちとしての性状を理解することと、断層ガウジや周辺 割れ目中の充填鉱物の核種吸着機能などの、総合的バリア機能(図中の「R」)の理解が重要となる。

- ・ 断層ガウジは、不透水性を有するのみならず、核種の吸着機能にも効果を発する可能性が高い¹⁷⁾。
- 小断層は、さらに構造的に大きなスケールの地表に到達すると思われる断層と連結し、地下 環境中での地下水の循環、移動に寄与しているものと考えられる。この大きな規模での断層 においても、断層ガウジは介在しており、基本的には核種移行における吸着などの遅延効果 が期待できる可能性が高い。

2.2.3 坑道周辺・ニアフィールド領域での現実的調査手法と開発内容についての現状と課題

ここまで結晶質岩中の水みちとしての割れ目や断層の構造,特性およびバリア機能に寄与する と考えられる充填鉱物等の性質などについて述べてきた。ここからは,これらの水みちが分布す る結晶質岩中での坑道周辺・ニアフィールドスケールでの現実的調査手法および研究開発内容に おける現状と課題について,下記の4項目の観点から述べる。

- (1) 地下坑道掘削・処分坑道掘削における現実的グラウチング手法
- (2) 再冠水に伴う諸現象の調査手法とその必要性
- (3) 地下坑道からの物質移動現象の調査手法とその必要性
- (4) ニアフィールド空間における現実的水みち構造の検討

これらの調査研究内容は、瑞浪超深地層研究所における最終段階での地下研究内容に直接リン クするものであり、本委員会での議論の内容をフィードバックすることをもくろみとするもので ある。とくに(3)については、地層処分における処分坑道およびその周辺100m程度でのバリア機能 を考慮した核種移行構造モデルについて、これまでの知見と当委員会で議論した内容として取り まとめを行ったものである。

(1) 地下坑道掘削・処分坑道掘削における現実的グラウチング手法

委員会では、ニアフィールドの水理・バリア機能の他、掘削〜操業〜閉鎖(後)にいたる工学 的技術の役割のうち、とくにグラウチングの機能と効果についての検討を行ってきた。とくに、 日本のように地下水を排除することのできない地下環境では、グラウチングは必須の工学的技術 である。その際、グラウチングに求められる役割は以下の3つと考えられる。

- 1) 処分場の地下坑道・地下空間が掘削可能かどうか(プレグラウチングによる止水の必要性)
- 2) 処分坑道における処分ピットの掘削および維持(処分ピット内への地下水流入の阻止)
- 3) 処分坑道,空間の埋設が可能かどうか(EDZ も含めた地下坑道周辺岩盤への対応およびバックフィル等との相性)

これらの技術は、基本的に処分しようとする場が閉鎖後に「拡散場」であることを維持するこ とと大きく関係する。またこれまでの工学的知見から、グラウト材の長期機能については、ナチ ュラルアナログとして古墳時代の数千年オーダーでの知見が散見される³⁰⁾ものの、未だ多くの実 績は数十年~100年程度のものであり、処分場閉鎖後、数千年~数万年におよぶ現象についての知 見は不十分な状況にある。したがって、現時点においては、掘削~操業~閉鎖段階までにおいて は、グラウト材の十分な機能・効果を期待しつつも、閉鎖後の数百年以上の段階においては、グ ラウト材への物理的あるいは化学的な遅延、バリア機能といった過度な期待をすることなしに、 人工バリアおよび天然バリアの基本的機能を柱とした評価を行うことが現実的と考えられる。 また日本の地下環境においては、処分場全体への地下水の流入を完全に止めることは不可能で あるものの、処分ピットレベルではベントナイトの敷設など、ある程度の期間は流入を止めるこ とが求められる。その際、長期にグラウト材が残留して化学的に人工バリアのバリア機能に影響 を与えるよりは、ある一定期間の後にグラウト材が消失してしまい、基本的に、天然バリア環境 のみで評価し得るような方法を取ることの方が「セーフティケース」としてもより受け入れられ る可能性が高いと考えられる。このような工学的対策、手法についても日本の地下環境に合致し た技術の確認と整備を今後も進めていくことが不可欠である。

とくに現有の技術において、ベントナイトを緩衝材として処分ピットに敷設することを念頭に 置くならば、廃棄体の敷設時間内において、湧水する地下水によって膨潤しすぎて廃棄体の敷設 が困難にならないように、湧水量をコントロールすることが不可欠である。そのためには、処分 ピットの位置決めや処分ピットの掘削段階において十分な水みちとなる割れ目の調査と評価が必 要であり、コンクリート系のグラウト材と、薬剤系のグラウト材の性質に基づいて止水を行うこ とが不可欠である。その場合には、基本的に耐久性の低い薬剤系のグラウト材の効果が期待され る時空間が律速となり、その時空間において適切に廃棄体が処分される手法が検討されなければ ならない(図2.2.16,図2.2.17および付録C参照)。もし、これら現有技術による時空間での廃棄体 の十分な敷設が期待されない場合には、グラウト手法の検討、グラウト材(素材)の開発、処分 ピットや処分空洞の配置検討等の見直しも視野に入れるべきと考えられる。それらの検討も含め、 瑞浪超深地層研究所で行われるグラウチング手法の検討・開発においては、実施前後の解析も含 め、将来の処分サイトへの適用性のあるものにしなければならない(図2.2.18)。



図2.2.16 将来の処分サイトの処分ピットにおいて想定される 現実的実施内容およびグラウチング工程



図 2.2.17 処分ピット周辺の現実的グラウト注入方法の概念



図 2.2.18 瑞浪超深地層研究所で計画中の坑道周辺における工学的対策技術開発 31)

(2) 再冠水に伴う諸現象の調査手法とその必要性

瑞浪超深地層研究所においては、これらの工学的技術開発のほか、地下 500m 坑道において、 再冠水試験を行う予定である³¹⁾。ここでは、埋め戻しの技術開発のほか、再冠水に伴う周辺坑道 への水理学的影響、地球化学的影響、そしてどの程度の時間によって地下環境が復元(回復)す るのか(しないのか)について確認されることとなっている(図 2.2.19)。

したがって、この再冠水の試験研究において重要なことは、再冠水を開始するにあたっての初 期条件(初期状態)をできるだけ明確に把握しておくことが重要となる。また、それらは、掘削 当初の状態と比してどの程度、何が、どのように変化したのかも併せて示すことが求められる。 さらには、それらの変化状態が、サイト(岩盤あるいは地下環境)が有するバリア機能の観点か ら、影響のあるものなのか否かの評価を含めて実施されることが望ましい。その変化の度合いと、 復元の度合い、時間的な速度について把握することと、それらを律速するのが、どのような現象 (要因)によるものなのかも併せて検討することが必要である(図 2.2.20)。



図 2.2.19 瑞浪超深地層研究所で実施予定の再冠水試験の概念図 31)



図2.2.20 処分場建設に伴う時空間における環境状態変化の概念図

(3) 地下坑道からの物質移動現象の調査手法とその必要性

瑞浪超深地層研究所においては、先の原位置試験研究のほか、結晶質岩盤内に分布する水みち 割れ目の物質移動および遅延特性を評価するための手法開発としての物質移動試験研究を予定し ている³¹⁾(図2.2.21)。この手法は、基本的に地下坑道岩盤(坑道壁面)から、水みち割れ目(基 本単一割れ目)をボーリングによって掘削しトレーサーなどの液体、低粘性物質を流動させて評 価を行うものである。手法としては、シングルホールとダイポールの2つの方法が考えられるが、 両方に一長一短があり、将来のサイトにおいては、水みちとなっている割れ目の特徴も踏まえつ つ、手法を選択することが必要になると考えられる。

とくに結晶質岩中の水みちは、前述した割れ目と水みちの特性でも述べたように、存在する全 ての割れ目が水みちとなっているわけではなく、結晶質岩においてはその約1割が水みちとして機 能している¹⁵⁾。また、水みち割れ目には、充填鉱物が充填していることなどの特徴を理解しつつ、 物質移動に寄与する空隙構造やその周辺の多くが変質母岩となっているマトリクスへの拡散のし やすさ(マトリクス拡散)を、如何に簡便にかつ適切に把握できるかが重要になる。そのために も、岩体中の水みちの評価方法が重要であり、とくに多数存在する割れ目の形態や充填鉱物の種



図2.2.21 瑞浪超深地層研究所で予定されている物質移動試験の概念図31)

類から,グルーピングによって単純化し,そのグループ特性毎の評価を行う形が1つの手法とし て考えられる。グルーピングに関しては,例えば石橋ほか¹⁵⁾でまとめられており,これらの手法 は将来的なサイト特性調査においても適用可能と考えられる。

また,坑道周辺においては,グラウト材や吹き付けコンクリートの影響なども及んでいる可能 性を否定することはできない。これらの影響も排除しつつ,岩盤内の自然の状態にできるだけ近 い水みちでの評価が求められる。しかし一方で,そのために坑道壁面から内部に深くボーリング を行うほど,水みちとしての割れ目特性の理解が困難となり,トレーサー等の回収率も低くなる ことは否めない。これらの地下状態を考慮しつつ,最適化された技術と解析方法を整備すること が必要である。

(4) ニアフィールド空間における現実的水みち構造の検討

将来のサイト特性評価において,処分場スケールでのバリア機能が担保されるかどうかの判断 は、最終的には、対象となった地下岩盤の水みち構造の特徴や分布に基づいた核種移行モデルに 帰着する。そのためには、現実的な水みち構造のネットワーク、遅延機能とその周辺での水理学 的状態との相関を理解しておくことが重要となる。

従来の議論のベースとなってきたH12レポート⁹のニアフィールド地下環境で遭遇すると考え られる水みちの階層構造を図2.2.22に示す。これまでのレファレンス地質構造として示されてき たのは、処分坑道から約100mの離間距離を置いて、遅延効果のない連続性のよい水みち(断層) と遭遇し、生物圏に拡散するというモデルである。この際、処分場から約100m離れた断層までは 割れ目ネットワークによって連結するという考え方であり、またこれらの割れ目周辺では、移動 核種(元素)のマトリクス拡散が生じ、遅延効果(バリア機能)を維持するというシステムであ る。

前述した,これまでの地下研究施設やその他の蓄積されてきた知見によって,結晶質岩におけ る割れ目ネットワーク,その割れ目の水みちとしての特性,形成過程,充填鉱物様式,水みち周 辺の変質状態,期待されるマトリクス拡散の領域,そして構造的に大きなスケールとなる水みち (断層)構造とその分布状態から,結晶質岩におけるより現実的なニアフィールドネットワーク 構造を構築することが可能である。例えばスウェーデンにおいては,処分を行う岩盤として選定

した先カンブリア時代の花崗岩体中で確認された水みちネットワークの特徴を基本に、ニアフィ ールドからの核種移行経路モデルを構築している³²⁾(図2.2.23)。このモデルは、H12レポート⁹の



図2.2.22 処分場より遅延効果を有しない水みち(断層)までの離間距離を約100mとする ニアフィールドバリア機能モデル



Target rock volume (fracture domains)

図2.2.23 スウェーデン(SKB)で用いられているネットワークモデル²⁹⁾

核種移行経路の構造モデルに類似するものの,基本的にスウェーデンでの岩盤調査結果に立脚し たモデルであり、日本においても同様に、実際の岩盤中で確認される水みちの構造、頻度、ネッ トワーク等の知見に基づいた概念モデルを構築することが不可欠である。

一方,これまでの当委員会のみならず関係するこれまで(とくに2000年以降)の蓄積された知 見に基づいて,図2.2.24に地層処分場およびその周辺岩盤の,とくに我が国のような変動帯におけ る地下環境中での結晶質岩中の水みちとして,考慮すべき割れ目および断層の空間分布とニアフ ィールドにおける安全評価上の構造モデル案の提示を行った⁸。

この概念モデルをベースに、地下研究施設などの知見を踏まえたモデルを図2.2.25に示す。ここ で示すモデルの特徴は、地下環境では地表調査では排除できないスケールの小断層の分布とバリ ア機能を考慮していることである。実質的な構造としてはこれらの小断層(地表には達していな い断層、あるいは地表に達している断層から派生している断層)は、地表に達しているさらに上 位スケール(Mappable)の断層と連結し、水みちとして機能していることが想定される。モデル







図2.2.25 日本の地質環境と水みちを考慮した構造モデル案

では、想定する岩種は結晶質岩タイプであり、地域的には、山地ではない陸地(モデルA)と沿岸 (モデルB)を想定している。水理学的にはとくに地形に左右されることから、極端な地形勾配は 設定していない。また将来の処分場として沿岸地域も輸送や社会的な側面からも想定され得るこ とから、今回モデルとして取り上げている。また水みちにおける透水性に関する情報は、これま での地下研究施設などの知見をもとに暫定的に設定を行っているが、地下環境において大きな相 違はないものと考えられる。予察的な解析においては、逆にこのようなケーススタディにおいて、 レファレンスケースを提示していくことが望ましいと考えられる。

一方で,この上位スケール(Mappable)の断層は,地表調査(概要調査)で確認が可能であり, 地下環境・岩盤中での水みちを地表調査の段階から明らかにしていくには,これらの構造を想定 しつつ調査を進めて行くことが重要と考えられる。

一方で、これらの水みちを包含する地質環境中の広域的地下水流動場は、さらに周辺領域の地



図2.2.26 沿岸地域を念頭に広域的に想定されうる地下水流動場の予察的モデル このような広域地下水流動モデルは、これまでも膨大な解析事例が存在するが、一方で、処分場および処分ピ ットスケールでの元素移動(基本的に拡散現象と考えられる)をも同時に考慮し、元素移動への影響を解析的 に示したモデルは少ない。処分場のバリア機能を解析的に示すには、このような水理と物質移動のカップリン グ的手法が重要になると思われる。このような解析を、瑞浪超深地層研究所などの地下情報を用いて示すこと も1つの具体的方法になると思われる。

土壤·沖積層10m程度	Φ=0.3、K=5.0E-13m ²	
花崗岩	Φ=0.05、K=1.0E-16m ²	
	Φ=0.05、K=1.0E-16m ² 同じ条件で。	

図2.2.27 上記水理学的条件と併せた単純化した地質モデル

現実的には、これらの空間内に先に示した断層や割れ目による水みちの情報が加わることになるが、ネットワ ーク構造の場合、全ての要素を1つのモデルに集約することが適当かどうかについては、さらに検討(研究開 発を含め)が必要である。

形や清水,塩水の分布等に影響される。本研究委員会では、これまでの知見に基づいてニアフィールド環境(安全評価上のスケールとして処分場および周辺の約100m程度を想定した範囲)における,水理およびバリア機能を評価するための予察的な解析を行うことを目的に、図2.2.26および図2.2.27に示す単純化した水理場の条件設定を提案する。

2.3 まとめ

当検討委員会では、地層処分における天然バリアのバリア機能を、より現実的な知見に基づい て、これまでのニアフィールド概念モデルや水みちの構造モデルの検討を行ってきた。これらの 検討は、先に著したH12レポート⁹⁹等の概念や結果を否定するものではなく、より日本の変動帯と いう地下環境に即した知見に基づいて最適化し、将来の調査研究内容のスリム化や優先順位を明 確にすることを目指したものである。とくに、それらの知見は、現在進行中の地下研究施設にお ける原位置試験研究に直接反映されるものであり、また、将来の処分候補サイトでの実施内容(サ イト特性調査など)を、スムースかつ無駄なく進める上でも重要な事前トレーニングと言えるも のである。また、これらの様々な議論は、実データに基づく地下環境中の水みちに関する知見と モデル構築、解析のほか、処分場閉鎖後の安全性を担保するための「論拠」、いわゆるセーフティ ケースとしても重要かつ不可欠と言えるものである。とくに日本の地質環境における「不確実性」 について、どのように説明し、処分場の長期安全性としての機能の理解促進に役立たせるかが重 要となっている。これらの長期的な時空間における「論拠」の整理と、実際の地下環境に即した 知見の整理は今後も継続的に実施する予定であり、将来的な地層処分の実施に向けて、何がその ための優先課題なのかの検討が分野横断的に行われることが不可欠である。

当委員会としての継続的な検討は今年度をもって終了となるが、実際の技術的な検討や議論に ついては、今後も瑞浪や幌延における地下研究施設での議論に、引き続き継続されることが重要 である。また、ニアフィールド環境におけるバリア機能に関する諸現象の検討、とくに日本の地 下環境のこれまでの知見に基づいた「水みち」(割れ目と断層)に着目した議論や検討は未だ途中 段階と言えるものである。本報告書でも述べているが、例えば、断層内の水みちの階層構造に着 目した、処分坑道における工学的技術やグラウト工法の現状などについて、期待される機能の整 理が引き続き必要である。

これらの知見は、変動帯としての日本の地下環境に合致した技術として今後も継続的に議論、 検討を行っていくべきものであり、その持続的な検討によってのみ、将来の処分サイトにおいて 実施すべき技術開発、研究の優先順位を明確にでき、処分事業を効率的に進めていくことができ ると考える。

3.2014 年度の検討事項の総括

3.1 はじめに

原子力機構の地下研究施設において,従来の基礎的データに加えて,坑道周辺岩盤の試験・調 査での原位置のデータも蓄積されつつある。これらのデータを活用して,これまでどちらかとい うと独立に進められてきた「地質環境評価技術」「処分場の工学技術」「性能評価技術」などの分 野の研究開発も「分野間の連携」と「諸分野の技術や評価手法の組み合わせ」を基本的考え方と する,より現実的なニアフィールド概念の再構築を具体化する環境が整ってきた。

この研究は、「現実的なニアフィールドコンセプトの再構築」を目指して、前年度までに実施し てきた「網羅的な研究開発課題の抽出・分析」や地下水シナリオで最も重要な要因の一つである 断層・割れ目に着目した「現実的なニアフィールド核種移行経路の構造モデル」などを検討して きた。検討に当たっては、あらかじめ策定した概念モデルをたたき台として、それぞれの分野の 要素技術を専門とする委員の意見を集約し、このコンセプトをより現実的なものにする概念の構 築を試みてきた。

また、この検討の一環として、原子力機構が計画している、瑞浪超深地層研究所の深度 500m 坑道での再冠水試験の計画について検討を試みた。この計画は、「再構築されたニアフィールドコ ンセプトの適用性」と「連成事項の実証」につながる計画と認識して、当委員会と試験を計画・ 実施する担当者との意見交換を行ってきた。さらに、2011年東日本大震災後の社会の安全に関す るパラダイムシフトは、従来積み重ねてきた技術や評価手法を高度化して、安全・安心を主張す る研究・開発の方向だけでは、必ずしも社会が納得する概念とはなっていないことも学んできた。

今年度は、当委員会の最終年度に当たる。当委員会は、これらの検討を踏まえて、ニアフィー ルドコンセプトの再構築に関する検討の概要と、基本的考え方のまとめを行った。とくに、地下 岩盤の現実的な水みち構造の理解へ向けて、重要事項の解説も記述した。また地層処分プロジェ クトの実現へ向けて、地下研究施設/ニアフィールド領域で実証できる、地層処分の必須の重要 事項の検討も行った。これらを通して、今後の地層処分/ニアフィールド領域の研究開発の方向 を示した。

3.2 坑道周辺岩盤の概念再構築に関する総括

前年度までの研究では、現実的なニアフィールドコンセプトの再構築の具体化に当たって、「地 質環境評価技術」「処分場の工学技術」「性能評価技術」などの要素技術を組み合わせた相互作用 (連成)と「掘削~操業~処分場閉鎖後」の相互作用の時系列変化とを考慮した概念の再構築を 試みた。また、「坑道周辺岩盤の概念再構築に関する研究」においては、地層処分地下坑道周辺岩 盤およびニアフィールド環境での、現実的な核種移行シナリオについて、各分野の最新の知見を 踏まえつつ「掘削~操業期間~閉鎖後」の時系列の時空間における「場」の状態に着目し、時空 間断面における現実的な「場」についての共通の状態設定を行うことを目標とした。ただし、下 記に示す時空間断面におけるさまざまな想定状態やプロセスの網羅性を重要視し、それらの優劣 については以後の課題として示した。とくにニアフィールド環境における時系列変化(シナリオ) ならびに、時系列断面でのニアフィールドコンセプトを再構築することを目的としてニアフィー ルド場での状態のリストを作成した。ニアフィールド環境における時系列変化ならびに、時系列 断面については、以下のステージを設定して状態のリストを作成した。

- Stage 0: 処分場掘削~閉鎖までの地下環境の変化形成段階(処分場掘削~閉鎖直前/100年程 度の期間)
- Stage I: 閉鎖後の地下水の浸入と上流側における人工バリア材との反応段階(処分場閉鎖後~ 数千年程度)
- Stage II: 上流側の人工バリア材を透過した地下水(間隙水)とガラス固化体との反応段階(処 分場閉鎖後,数千年程度~数万年)
- Stage III: ガラス固化体を透過した地下水(間隙水)から,下流側の人工バリア材との反応段階 (処分場閉鎖後,数万年以上)
- Stage IV: 下流側の人工バリアを透過した後,天然バリアと反応する段階(処分場閉鎖後,数十 万年程度)

このような背景のもとに、とくに変動帯の地質環境におけるニアフィールドのバリア機能の観 点から、地層処分の地下坑道に主眼を置いて、現実的な水理・核種移行の「場」の状態に着目し た概念モデルの検討を進めてきた。

ニアフィールド環境での複合反応の知見を踏まえて、日本の地下環境(とくに変動帯の結晶質 岩系での地下環境)として現実的に想定される水みち等の構造を示す。そして割れ目や断層等の 水みちの構造モデル、水みちの水理学的モデルの検討方法、工学的な坑道周辺岩盤の改良技術、 現実的なニアフィールドの安全評価への反映などについても言及した。

現実的な坑道周辺地下岩盤の水みち構造状態の考察に関しては,2000年以降,日本の地下環境 に関する知見が蓄積されつつある。とくに結晶質岩に関しては,瑞浪超深地層研究所などの地下 研究施設で得られた知見は,水みちの構造状態の研究にも貴重なデータを提供している。

これらの知見を以下の項目について分析・整理し、ニアフィールドコンセプトの考え方を検討してきた。

- (1)結晶質岩盤中で遭遇する水みち構造(割れ目の分布と特性と断層の水みちとしての特性)
 ・水みちとして機能している割れ目の全割れ目数に対する割合や充填鉱物による水みちの維持と熱水変質などによる閉塞などの,長期の割れ目とその水みちの形成過程の整理と分析を行った。
 - ・断層の水みちとしての特性に関しては、断層ガウジと断層周辺の割れ目帯(ダメージゾーン) に関する分布や水みち構造、核種の移行遅延などの知見と現実的なバリア構造に関する整理 と分析を行った。
- (2) ニアフィールドのバリア機能を考慮した現実的核種移行経路の構造モデル
- ・結晶質岩中の水みちとしての割れ目や断層構造の特徴を、上記の知見を加えて総合的に検討し、試みに、ニアフィールドのバリア機能を考慮した現実的核種移行経路の構造モデルを提示した。そして従来の水みちの構造とニアフィールドのバリア機能の考え方との比較を行った。
- (3) ニアフィールドのバリア機能を考慮した現実的核種移行経路の構造モデルに関して、地下水 流動解析による効果の検証を試みた。
- (4) ニアフィールドにおける工学的な補強と修復について
 - ニアフィールドの水理・バリア機能のほか,掘削〜操業〜閉鎖(後)にいたる工学技術のうち、とくにグラウチングの機能と効果についての検討を行った。
- (5) ニアフィールドにおけるセーフティケースについて
 - ・処分場閉鎖後の安全性を担保するための「論拠」,いわゆるセーフティケースの議論を行い, 安全性の網羅的な検討とそれから抽出される重点項目の検討に反映させた。

現実的な坑道周辺地下岩盤の水みち構造状態や構造モデルの考察に関しては、ここで検討内容 のほかにも、地下岩盤の水みち構造状態に影響を及ぼすと思われるいくつかの要因があると思わ れる。ニアフィールドの応力場などの外力や断層・割れ目物性の応力(深度)依存性などの岩盤 の力学特性との連成や上記の知見を総合した、ニアフィールド施設の設計の考え方の構築もその 一つであろう。また地下水シナリオに関しては、ここで検討している概念の再構築と従来ニアフ ィールドコンセプトとの効果の比較も重要である。H12レポート⁹⁾の時点に始まる従来の概念と今 回の高度化した概念とで、どれだけニアフィールドの安全性能に違いが生じるかを見せることが 重要であるが、坑道周辺岩盤や再冠水試験などの場を利用して、モデリングと原位置での試験・ 計測で検証することが期待される。

本年度は、以上述べてきたこれまでの検討を踏まえて、ニアフィールドコンセプの再構築に関 する検討の概要と、基本的考え方のまとめを行った。とくに、地下岩盤の現実的な水みち構造の 理解へ向けて、重要事項の解説も記述した。

基本的考え方としては、上述したニアフィールドの場の状態の時系列変化のステージを反映さ せた解説を行った。

とくに地下岩盤の現実的な水みち構造の理解へ向けて、(1)基本的な単一割れ目の水みち構造 とバリア機能については、割れ目の分布特性や割れ目や基質部分のバリア機能、変動帯の結晶質 岩中の割れ目頻度や充填物の形成過程など、割れ目系岩盤のモデル化に際しての基本的事項を解 説した。(2)変動帯における水みちとなる割れ目ネットワーク構造とその特性に関しては、変動 帯における花崗岩の貫入に伴う割れ目形成過程に言及して、貫入岩体の規模・大きさの違い、貫 入深度の違い、貫入後の隆起速度の違いという基本条件による岩盤特性の違いと工学的性状との 連携に関して記述した。(3)活断層を含む断層のダメージゾーンの重要事項の解説としては、断 層およびその周辺岩盤の水みち割れ目の階層構造と構造上の違いにより透水性状がおおきく異な ること、活断層としての阿寺断層の調査によって示された断層運動に伴うダメージゾーンの性状 などを記述して、水みちとしての断層構造の特徴をまとめた。

坑道周辺・ニアフィールド領域での現実的手法と開発内容の現状と課題については、(1)地下 坑道掘削・処分坑道掘削における,現実的グラウチング手法、(2)再冠水に伴う諸現象の調査手 法の必要性、(3)地下坑道からの物質移動現象の調査手法とその必要性、(4)ニアフィールド空 間における現実的水みち構造の検討を、当委員会の議論を踏まえて記述した。

また地層処分プロジェクトの実現へ向けて,地下研究施設/ニアフィールド領域で実証できる, 地層処分の必須の重要事項の検討も行った。これらを通して,今後の地層処分/ニアフィールド 領域の研究開発の課題と方向を示した。

3.3 ニアフィールドコンセプトの再構築に関する残された課題の抽出

当委員会では、ニアフィールドコンセプトの再構築に関して残された課題の議論も行った。抽 出された課題には、ニアフィールドコンセプトの効果に関するもの、2011年東日本大震災以降の 対応に関するもの、処分施設の施工や操業過程に関するものなどがある。

ニアフィールドコンセプトの効果に関する課題については、核種移行に関する割れ目性状の関 与は、従来の評価に比べて、どの程度の違いがあるか。蓄積されたデータに基づく解析も重要で ある。現状の地下水シナリオは、移流律速に基づいているが、拡散律速が成り立つ条件が有れば、 ニアフィールドコンセプトの視座も異なってくる。原位置での実証も興味ある課題である。ニア フィールドコンセプトの再構築の効果は、再冠水で何が起こるかの予測に関しても、実証の機会 が与えられている。実施計画の今後に期待したい。

2011年東日本大震災以降に関する対応に関しては,次のような検討と課題の抽出も行ってきた。 大震災以降,自然災害や安全に関する考え方が変化したことを踏まえて,地層処分の安全の考え 方と研究開発に関しても,従来の考え方では社会が受け入れ難くなっている事項を抽出して分析 する必要がある。技術的な研究開発にも方向の転換が必要となろう。従来から進めている研究開 発は,地道に実施していくことは言うまでもないが,このパラダイムの変化に対応していくこと も重要である。当委員会の,実用的なニアフィールド概念の構築についても,上記の検討を加え たうえで,今後の方向性を見出していく必要があろう。

前年度までに検討した事項を要約すると、社会の考え方が大きく変わった事項の典型は、「安全 神話の構築」から「想定外の考慮と減災へ(起こったらどうする)」であり、「安全の技術とその 検証」から「モニタリングと修復技術による安心へ(壊れたらどうする)」である。地層処分の技 術開発の、今後の方向を見極めるには、先ず2011年東日本大震災後に言われてきた論点の整理が 必要である。この際に重要なことは、原発の安全と地層処分の安全とでは、両者の安全に視座の 違いがあるが、これに対する社会の混同がある。観念論ではなく、従来の研究開発や地下研究施 設での具体的なデータも加えて分析、整理することが重要である。ちなみに両者の大きな違いは、 地層処分では、原発に比べて、建設・操業期間が長いこと、設置場所が地下深部であること、超 長期の安全の評価が必要なことなどであり、これらは利点にも欠点にも結び付く。

ニアフィールドコンセプトの再構築に関する,自然現象に対する安全と減災の重要事項として は、まず地震であり、活断層である。従来の「避ければよい」から一歩進んだ直下の活断層の認 定とニアフィールドや多重バリアへの影響評価がある。沿岸立地の場合には、津波による影響評 価に関しても、予測・対策の考え方とツールの再構築が必要であろう。

建設・操業期間が長いことは、現状のパラダイムでは、想定外と考えられている現象も、遭遇 する機会が多くなるし、情報量の不足からばらつき/不確実性も多くなる。超長期に関しは、従 来の自然現象の検討に加えて、評価期間毎の時間スケールに合わせた、現実的な自然現象の組み 込みなどにも検討の余地があろう。 ニアフィールドの多重バリア性能とこれが壊れた時の災害・環境安全事象に対しては、地下深 部という地層処分の利点と欠点に関して、社会が十分認識していることが重要である。地下深部 の大きな利点は、施設が破損しても、地表に災害がおよぶのに時間がかかることであり、避難や 修復に要する時間に余裕がもてることである。一方、破損個所が見え難く、早期発見にも難があ る。これを踏まえたモニタリング技術の再検討が重要となる。また破損が認められても接近に難 があり、修復に時間がかかるであろうなどの欠点もある。ここにも、パラダイムシフトに対応し た今後の研究開発課題が多く存在する。地下の可視化技術のより一層の高度化、回収可能性、可 逆性やニアフィールド施設の修復技術の具体的な検討、割れ目へ放射性物質が侵入した場合の除 染技術、および社会に提示するさまざまなオプション技術の選択肢(メニュー)の研究開発など があろう。これらの事項に関しては、従来の地下研究施設での研究開発やそこから得られた経験 とデータの蓄積がある。パラダイムシフトに対応した視座で、ニアフィールドコンセプトとそれ に基づいた今後の研究開発の方向を見定めたい。この委員会でも、まずは以上の観点から、安全 の実証に加えて、モニタリングや修復技術による安心も含めた、2011年東日本大震災後のニアフ ィールド概念の再構築の方向性を検討してきた。

一方,処分施設の施工や操業過程に関するものでは,難工事に遭遇した場合の工学技術,とく に断層・破砕帯からの大量の出水の予測とグラウチングの効果確認に関するニアフィールドコン セプトの再構築の効果の検証なども課題である。

なお、今後の「現実的なニアフィールドコンセプトの構築」に当たっては、社会のパラダイム シフトのほかに原子力規制庁の原子力新規制基準などの規制も見据えながらの検討も課題の一つ である。

3.4 地層処分に関する必須の重要事項の検討と瑞浪超深地層研究所などの地下研究施設での対応

前節までに,地層処分に関して,とくにニアフィールド領域での基本的考え方や必須の重要事 項にも触れた議論を展開してきた。ここでは,これらの議論で抽出された事項も含めて,必須の 重要事項を整理するとともに,瑞浪超地層研究所などの地下研究施設で検証できる必須の重要事 項に関して,意見交換を重ねてきた。

このような必須の重要事項の内,再冠水試験は,施設の閉鎖過程や閉鎖後のニアフィールド環 境の変化を実証する重要事項であるが,これについては,前述したように,瑞浪超深地層研究所 において実施工程に組み込まれている。技術的にも,地域社会の不安に対するコミュニケーショ ン技術の一環としても役割は大きい。

2011年東日本大震災後のパラダイム変化「どの程度壊れるか」「壊れたらどうするか」に対応す るための重要事項としては、地震時のニアフィールド環境の急激な変化、とくに地下水の挙動と 深部・広域の突発的な地下水流動と流体中の物質移動の予測と修復・回復技術の研究開発も急務 である。また、活断層のずれに伴う施設の変位と被害想定/減災への論理構築も必要であろう。

処分施設の施工や操業過程に関するものでは,難工事に遭遇した場合の対策技術を一通り実証 しておくことが,安全・安心の一連の技術のコミュニケーションとしても重要である。とくにグ ラウチング技術は,深部地下での建設と操業が同時進行する地層処分施設の建設・操業段階では, 技術の高度化と効果の確認技術の実証には,依然として研究開発の余地がある。これに加えて, 岩盤弱層の回避と掘削損傷域の軽減に寄与する,急曲掘進が可能なトンネルボーリングマシン

(TBM)や方向制御ドリリング/孔内・孔間計測技術,前方探査技術とこれらをシステム化した, 計測技術の開発も早くから試みるべきである。

3.5 まとめ

本委員会において従来から研究を進めてきた「ニアフィールドコンセプトの再構築」に関して, これまでの研究^{1)~8)}で得られた成果を反映・発展させた,ニアフィールドコンセプトの概要と基 本的考え方のまとめに関する総括を行った。

また,それぞれの分野の要素技術を専門とする委員の意見交換を行い,「現実的なニアフィール ドコンセプトの再構築」で,残された課題の抽出を行った。

地層処分に関する必須の重要項目の一環として,ニアフィールドコンセプトの効果に関するもの,2011年東日本大震災以降の対応に関するもの,処分施設の施工や操業過程に関するものなどの重要事項の内,地下研究施設で対応することができる項目を抽出して検討を加えた。

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: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・(委託研究), JAEA-Research 2007-060, 2007, 210p.
- 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:深部地質環境の調査解析技術の体系化に関する研究・平成 18 年度・(委託研究), JAEA-Research 2008-042, 2008, 236p.
- 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: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・(委託研究), JAEA-Research 2008-099, 2009, 171p.
- 4) 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: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-(委託研究), JAEA-Research 2009-055, 2010, 145p.
- 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: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, 2011, 282p.
- 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: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), JAEA-Research 2011-033, 2012, 126p.
- 小島圭二・大西有三・青木謙治・杤山 修・西垣 誠・登坂博行・吉田英一・尾方伸久:坑 道周辺岩盤の概念再構築に関する研究・平成24年度・(委託研究), JAEA-Research 2013-015, 2013, 21p.
- 小島圭二・大西有三・青木謙治・杤山 修・西垣 誠・登坂博行・吉田英一・尾方伸久, 坑道周 辺岩盤の概念再構築に関する研究 -平成 25 年度-(委託研究), JAEA-Research 2014-011, 2014, 43p.
- 9) 核燃料サイクル開発機構,我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,JNC TN1400 99-020~99-024, 1999.
- 10) 吉田英一, 地層処分 ― 脱原発後に残される科学課題―, 近未来社, 2012, 168p.
- 11) 吉田英一, 岩盤中の透水性亀裂とその長期的挙動 —現状と今後の課題—, 地学雑誌, vol.121, no.1, 2012, pp.68-95.
- 12) 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 放射性廃棄物ワーキン ググループ, 放射性廃棄物WG中間とりまとめ, 2014, 58p.
- Yoshida, H., Aoki, K., Semba, T., Ota, K., Amano, K., Hama, K., Kawamura, M. and Tsubota, K., Overview of the stability and barrier functions of the granitic geosphere at the Kamaishi Mine: relevance to radioactive waste disposal in Japan, *Engineering Geology*, vol.56, 2000, pp.151-162.
- 14) Yoshida, H., Metcalfe, R., Ishibashi, M. and Minami, M., Long-term stability of fracture

systems and their behavior as flow-paths in uplifting granitic rocks from the Japanese orogenic field, *Geofluids*, vol.13, 2013, pp.45-55.

- 15) 石橋正祐紀・安藤友美・笹尾英嗣・湯口貴史・西本昌司・吉田英一, 透水性割れ目とその地質 学的特徴 —土岐花崗岩を例として—, 応用地質, vol.55, no.4, 2014, pp.156-165.
- 16) Nishimoto, S. and Yoshida, H., Hydrothermal alteration of deep fractured granite: Effect of dissolution and precipitation, *Lithos*, vol.115, 2010, pp.153-162.
- 17) Yamamoto, K., Yoshida, H., Akagawa, F., Nishimoto, S., Metcalfe, R., Redox front penetration in the fractured Toki Granite, central Japan: An analogue for redox reactions and redox buffering in fractured crystalline host rocks for repositories of long-lived radioactive waste. *Applied Geochemistry*, vol.35, 2013, pp.75-87.
- 18) Yoshida, H., Nagatomo, A., Oshima, A. and Metcalfe, R., Geological characterization of the active Atera Fault in central Japan: Implications for defining fault exclusion criteria in crystalline rocks around radioactive waste repositories, *Engineering Geology*, vol.177, 2014, pp.93-103.
- 19) Bucher, K. and Stober, I., Fluids in the upper continental crust, *Geofluids*, vol.10, 2010, pp.241-253.
- 20) Yoshida, H., Takeuchi, M. and Metcalfe, R. Long-term stability of flow-path structure in crystalline rocks distributed in an orogenic belt, Japan, *Engineering Geology*, vol.78, 2005, pp.275-284.
- 21) Yoshida, H., Maejima, T., Nakajima, S., Nakamura, N. and Yoshida, S., Features of fractures forming flow paths in granitic rock at an LPG storage site in the orogenic field of Japan, *Engineering Geology*, vol.152, 2013, pp.77-86.
- 22) Muraoka H, Uchida T, Sasada, M, Yagi, M., Akaku, K., Sasaki, M., Yasukawa. K., Miyazaki, K., Doi, N., Saito, S., Sato, K. and Tanaka, S., Deep geothermal resources survey program: igneous, metamorphic and hydrothermal processes in a well encountering 500°C at 3729 m depth, Kakkonda, Japan, *Geothermics*, vol.27, 1998, pp.507-534.
- 23) Sasaki, M., Fujimoto, K., Sawaki, T., Tsukamoto, H., Kato, O., Komatasu, R. and Doi, N., Petrographic features of a high-temperature granite just newly solidified magma at the Kakkonda geothermal field, Japan, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol.121, 2003, pp.247-269.
- 24) Yoshida, H., Metcalfe, R., Seida, Y., Takahashi, H. and Kikuchi, T., Retardation capacity of altered granitic rock distributed along fractured and faulted zones in the orogenic belt of Japan, *Engineering Geology*, vol.106, 2009, pp.116-122.
- 25) Akagawa, F., Yoshida, H., Yogo, Y. and Yamamoto, K., Redox front formation in fractured crystalline rock: an analogue of matrix diffusion in oxidizing front along water conducting fracture, *Geochemistry, Exploration, Environment and Analysis*, vol.6, 2006, pp.49-56.
- 26) 吉田英一・山本鋼志, 地下環境中の鉄 (III) 水酸化鉱物と地層処分: 地下水シナリオへの影響 とその検討. 地質学雑誌, vol.120, no.10, 2014, pp.327-343.

- 27) 長友晃夫・吉田英一, 断層と割れ目系及びその充填鉱物を用いた阿寺断層の地質的履歴解析, 地質学雑誌, vol.115, no.10, 2009, pp.512-527.
- 28) 吉田英一・大嶋章浩・吉村久美子・長友晃夫・西本昌司, 断層周辺に発達する割れ目形態とその特徴 —阿寺断層における'ダメージゾーン'解析の試み—, 応用地質, vol.50, no.1, 2009, pp.16-28.
- 29) Shinjo, N. Yoshida, H. and Ota, K., An Analogue Study on Nuclide Migration in Tsukiyoshi Fault, Tono Uranium Deposit, Abstract of the Sixth International Conference on the Chemistry and Migration Behavior of Actinides and Fission Products in the Geosphere (Migration '97), Japan, 1997, p.94.
- 30) 渡辺邦夫・田中達也・三枝博光, 地質および地下水理現象の解明を基礎としたナチュラルアナ ログの研究, 原子力バックエンド研究, vol.2, no.1&2, 1996, pp.3-12.
- 31) 東濃地科学センター 地層科学研究部, 超深地層研究所 地層科学研究基本計画, JAEA-Review 2015-015, 2015, 39p.
- 32) Crawford, J., Bedrock transport properties Forsmark: Site descriptive modelling SDM-Site Forsmark, SKB R-08-48, 2008, 372p.

付録 A. 坑道周辺岩盤の概念再構築に関する研究: 2013年度~2014年度

坑道周辺岩盤の概念再構築に関する研究

目的:現実的な地下環境(掘削坑道周辺環境)における処分システムの高度化(具体的NFコンセプトの提示)を図る

地層処分システム(多重バリアシステム)



H12レポートで用いられた安全評価の概念モデル





断層帯~近傍母岩の水みちの構造の特徴と階層構造

断層(帯)の「水みち」と現実的なバリア機能の評価の必要性

断層帯における '不均質'構造モデルの提示 (Yoshida et al.,2013; NAWG proceedings)





サイト特性調査における重要把握事項(選択的な移行経路の同定)



サイトにおける移行経路の構造と距離の概念モデル(SR-Site)



移行距離の概念的分類





割れ目・断層の水みちとして理解しておくべき性状は?



日本の地質環境と水みちを考慮した構造モデル案

В





平成26年度の取りまとめ方(案)

◆これまでの当委員会での議論の結果のレビュー

- ◆現実的な処分ピット開削やグラウチング手法の考え方の提示
- ◆現実的なNF~FFの水理ーネットワークモデルの考え方および一部解析結果の提示

B. 現実的ニアフィールド~ファーフィールド概念の構築と技術的課題



NF:結晶質岩盤中の割れ目(シーリング割れ目と透水性割れ目)の産状









岩盤(+グラウト剤) (新鮮岩盤+変質岩盤) ガラス固化体

オーバーパック

- 43 -

性能、および周辺岩盤への影響を考えると、短期間

で実施することが望ましい

現有技術の適用性・性能の確認/過不足の検討



サイト選定における断層(活断層及び大規模地質断層)の考え方 During any repository siting and site characterization, a repository site can be chosen with the respect distance of an active and major quiescent fault in order to maintain the long-term barrier function of the repository site. Fault Repository is located deeper than 300m Active faults: more than 1000 faults are identified. Repository 134 Quiescent fault 100m Nagoya 20km 1 th



断層からの離間距離およびバリア機能についての考え方(案)

The information provided here encourages discussion of *more realistic definitions* of repository exclusion features in particular, Japan.

Several fault-specific features such as;

- i) Rock damage zone developed along faults,
- ii) Redox reactions,
- iii) Radionuclide retardation behaviour in the immediate vicinity of faults,
- iv) Fault hydraulic features

are examined.

Used data are from;

- Atera active fault (one of the major active fault distributed in central Japan)
- LPG storage site (Kurashiki storage sites; A biggest storage in the world)
- URL site (Mizunami Underground Research Lab (MIU))



阿寺断層周辺で観察される割れ目密度とダメージゾーンとの関係





断層破砕帯中の酸化還元状態と物質移動(期待される遅延効果)





断層近傍の水理特性と充填鉱物との相関







断層について言えること(言いたいこと。。。)



Data will be provided which show:

Damage zones developed along faults – The structural features identified in the vicinity of faults suggest that, although the rock in the damaged zone has a relatively mechanically weaker matrix than the surrounding pristine host rock, an increase of shorter fractures and the presence of the associated network structure can be a positive aspect for a radionuclide retardation due to an increase in surface area in a repository host rock. The network structure zone may increase radionuclide retardation due to the increased surface area and the likely higher tortuosity of the flow-path could slow the transport of any radionuclides from the repository to the surface.

Redox front (redox buffer capacity) - Data from several sites in Japan show that the fault buffer capacity minimizes oxidized water penetration, suggesting that faults at the surface are not always necessarily required to be exclusion features.

Retardation capacity - Data from several studies show that the secondary hydrothermal phases with high porosity, high surface area crushed material in the fault gouge are often much more efficient at retarding radionuclides than the pristine host rock minerals.

Hydraulic features – Data from URL and LPG sites in Japan indicate that faults can often be long-term hydraulic barriers. However, three dimensional relationships between specific structural and hydraulic features should be characterized by the combination of regional hydrology and in situ detailed groundwater flow measurement with structural investigations.

C. 断層・割れ目に着目した現実的ニアフィールド核種移行経路構造モデルの検討について

1. 地下坑道掘削・処分坑道掘削における現実的グラウチング手法

1.1 地下坑道や処分横坑道掘削において

地下深部(300m以深を対象とする)坑道掘削においては,坑道内に湧出してくる地下水の処理 が大きな課題になる。この場合に,湧水を湧出させてポンプアップによって対応することが,現 在の一般的な対応になっている。このような工法は,一般的な土木工事でのトンネル掘削工事で も対応されている工法で,地下水位がトンネル掘削深度より100m以上ある場合には,岩盤シー ルド工法や,湧水をグラウチング工法によって止水する工法の適用が困難とされている。

この原因は、100m もの間隙水圧に耐えるだけの覆工工法が現実に困難であるためである。覆 工を真円にしてもその厚さが 5m にもなるような設計になるということが、現実に生じている。 また、施工時の湧水をプレグラウトによって止水することが困難な場合も出てくるからである。

しかし、岡山県倉敷市水島や愛媛県波方で施工された LPG の岩盤備蓄事業では、花崗岩の中で あるが、深さ 180m まで岩盤内に高さ 20m 程度の空洞を掘削して、グラウチング工法によって止 水工法が実施されている¹⁾。ここでは、岩盤が花崗岩の亀裂性岩であり、その亀裂にセメントミル クを注入して止水して、止水による間隙水圧に対応できる強度を岩盤に持たせるためロックボル トで補強して施工を完了している。

原子力機構の瑞浪超深地層研究所でも現在,セメントミルクによるグラウチング工法によって 深度 300m 以深の横坑での止水工法の試験施工がなされている。また,スウェーデン等でも,花 崗岩を対象としてグラウチングによって 300m 以深での止水工法が実施された例もある。

このような止水工法では、グラウチングにより地山の透水係数が低下していることは確認されているが、地山の弾性係数等の力学定数がどの程度増加したかについては、あまり計測されていない。

一般に、地山を掘削する前に前方探査によって地山の状況を探査し、大量湧水地帯を探査して、 その地帯にプレグラウチング工法を実施して、透水係数の低下を現場透水試験で確認している。 しかし、横坑の周囲の地山からの間隙水圧に耐えるだけの強度が地山にあるかについて、掘削前 に検討することはきわめて困難である。

今後の課題としては、地山の初期応力や弾性係数等の力学定数を求めると同時に、グラウチン グによる地山強度がどの程度上昇したかを確認できる計測システムの確立が必要である。また、 亀裂内に介在物を有する亀裂において、グラウチングによってどのように地山の力学特性を上昇 させるかの方法に関しての研究も必要である。

さらに、グラウチングによって掘削孔周囲の止水性が向上することによって、地山にどのよう な浸透水圧が発生し、それによってその場に横坑を掘削することが可能であるかどうかを事前に 検討する数値解析手法(浸透と力学をカップリングした手法)の適用性についての検討も急務で ある。

また,グラウチングによりどこまで注入されているかの効果を確認する手法の確立も重要であ る。これに関しては、比較的電気伝導度の高い注入材料を亀裂性岩盤内に注入することで、これ による地山の比抵抗値の変化を3次元的にトモグラフィー的に、グラウト注入の前後で探査できるため、実際の試験グラウチングを実施する場において、その効果の予測を実施し、横坑を掘削した際にそのコアにより予測手法の信頼性を検討することは、きわめて重要な課題である。

1.2 処分横坑内でのキャニスターの竪置処分孔からの湧水処理

キャニスターを設置するための竪置き型の処分孔(以下,「竪孔」)の掘削によるその竪孔周囲 からの湧水について,スウェーデン等ではその湧水流量によって掘削した竪孔が処分孔として適 しているかどうかの基準を設定している^{例えば2)}。このような基準はキャニスター周囲の止水のため のベントナイト層を構成する際や、ベントナイト層の設置後のパイピング現象防止のために、き わめて重要な課題である。しかし、日本の岩盤では、亀裂が多いため、このような基準を満足す るような竪孔は非常に少ないと考えられる。日本のこのような現状を鑑みて、日本の岩盤に対応 した処分竪孔の新しい施工法を立案する必要がある。

このような施工法として,竪孔掘削前に竪孔の中心に先孔掘削用のボーリング孔を設置して, そのボーリング孔から止水の耐久性が短い薬液型の材料を注入し,その後,竪孔を掘削してキャ ニスターを設置し,その周囲にベントナイト層を形成する手法が考えられる。この工法はグラウ チングに使用する注入材料が薬液であるため,セメント系注入材料では注入が困難な所にでも注 入が可能である。また,薬液材料の注入は,短期の止水にはきわめて有効である。ここで短期と 称するのは,薬液注入では注入後2~3年で注入材料のアルカリ成分が分離してしまうために,止 水期間を2~3年と考えているためである。

しかし、ここで提案する工法は、逆に 2~3 年で竪孔周囲の止水性が低下するため、キャニスタ 一周囲のベントナイト材の膨潤に必要な地下水の浸潤が可能となる。

1.3 処分横坑内での湧水処理

処分横坑を掘削する場合にも、前方探査のための水平方向でのボーリング調査が必要である。 その調査結果より、横坑周囲の「亀裂の分布」、「方向」、「幅」のデータが得られる。これらのデー タより、横坑周囲の亀裂の浸透特性がわかるが、「亀裂の長さ」に関する情報だけは水平ボーリン グ調査結果からは入手しにくい。このような状況に対して、水平ボーリング孔内の孔内流速測定 を実施して、孔内の亀裂中で湧水に関係する亀裂を特定し、そのような結果に一致するような「亀 裂の長さの分布」を予測する手法の確立が必要である。また、このような手法の妥当性を確認す るために、実際に横坑を掘削した後の孔内亀裂調査との比較検証が必要である。このような横坑 周囲の3次元の亀裂モデルの構築技術の確立は「ニアフィールドコンセプト」として重要な課題 であると考えられる。

横坑周囲の亀裂モデルを構築後、横坑への湧水処理のためにプレグラウチング工法を実施し、 横坑を掘削する。この際のグラウチング材料は、力学的要素を考慮するとセメント系材料による グラウチングが有効と考えられる。特に掘削損傷領域(EDZ)の止水と強度幅を考えると、セメ ント系材料しか現状では実績がない。

しかし、このセメント系材料でも数百年単位を考えると、セメント内のカルシウムが分離して、 その透水性が劣化すると考えられる。そのような人工材料の経年的な劣化を考えると、天然材料 であるベントナイトの亀裂への注入も有効である。

このように考えると、ニアフィールドの止水処理に関して、目的に応じて短期止水、中期止水、 長期止水を考慮して、薬液注入、セメント系注入、そしてベントナイトの塩水スラリー材の注入 と、注入材料を選定していく新しい止水法の開発が必要である。

これらの今後の課題として、薬液やセメント系材料から分離するアルカリ性物質が、ベントナ イトの膨潤特性にどのような影響があるかについての検討事項がある。セメント系材料に関して は低アルカリセメントの開発が検討されているが、薬液材に関しての検討はまだなされていない ので、急務を要すると考えられる。

キャニスターの処分において、キャニスターの周囲にベントナイト層を一体として処分する方 法も検討されているが、このような処分方法とここで提案している薬液注入工法との安全性、有 効性に関しての比較試験も検討する必要がある。

2. 再冠水に伴う諸現象の調査手法とその必要性

瑞浪超深地層研究所で再冠水過程の試験が実施される予定になっていることに対して,何をど こまで調査するかについて,以下の事項が考えられる。

2.1 ベントナイト止水層について

ベントナイト止水層の再冠水に伴う調査に関して,既にスイスでの現場試験がなされている³。 その際に,ベントナイト内に種々のセンサーを設置したが,その実験からは体系的なデータが得 られていなかったと考えられる。これは現場試験をする際に,それぞれのセンサーがどのような 挙動をするかについて,3次元での膨潤性材料に対しての予測技術と,設置したセンサーの精度 の問題があったと考えられる。

不飽和状態の膨潤性材料の中での間隙水圧,間隙空気圧,ベントナイト内の含水率,そして膨 潤圧の変化の挙動を,再冠水試験の前に予測する技術の確立には,不飽和状態に締め固められた ベントナイト層への周囲からの地下水の浸潤と,浸潤によってベントナイトがどのように膨潤し, それによってベントナイト層内の透水係数と「透気係数」の値がどのように変化し,時々刻々と 変化する中でベントナイト層内の間隙水圧がどのように増加し,同時に間隙空気圧がどのように 増加して地下水の中に溶解していくかを予測する数値解析ソフトが必要である。これに対しての 準備と,解析ソフトの精度の検証が必要である。

また,同様に,間隙水,間隙空気,膨潤圧の浸潤時の挙動を予測するための入力データが必要 である。再冠水試験は,不飽和状態のベントナイト層が対象であるので,ベントナイト層の不飽 和状態での浸透特性である不飽和土の透水係数(kw-θ 関係),不飽和土の透気係数(ka-θ 関係) とその材料の水分特性曲線(ψ-θ 関係)が必要である。一般にベントナイトは膨潤によって間隙 率が変化するため,数値解析への入力パラメータとして,間隙率が変化したことによる透水係数 の変化も,常に考慮する必要がある。

ベントナイト層の水分特性曲線(ψ-θ 関係)が既知であれば、間隙水圧と間隙空気圧の値がわ かっていると体積含水率(θ)の値は求められる。しかし、その時の間隙率の値が膨潤によって変 化しているので、その値がいくらであるかは、現地で計測されていない。内部での土圧分布がわ かっていると、内部の力学解析から間隙率の変化がわかるが、計測で間隙率の変化を計測するシ ステムが必要である。

ベントナイト材料の浸潤による体積含水率の変化を, FDR, TDR, ADR 等の誘電率の変化から 求める手法が提案されている^{例えば4)}。しかし,粘土系材料は,砂質系材料とは異なり,浸潤してく ると電解質成分を間隙水中に溶出させるため,「体積含水率の変化だけによって誘電率が変化する」 と考える単純な水分量の変化の計測では,飽和に近くなるにつれて,体積含水率の計測に誤差が 生じてくる。この誤差を少なくするには,未知量である体積含水率と間隙水の濃度とを分離する 必要が生じる。したがって,浸潤による誘電率の変化と比抵抗値の変化を計測するような2種類 の手法によって計測し,得た結果を用いて校正式を構築することで体積含水率の値が求められる と考えられる。したがって,再冠水実験で誘電率と電気伝導度の変化を計測すると,ベントナイ トの体積含水率の変化が計測できる可能性がある。

不飽和状態では,負の圧力水頭の値を間隙水圧計で長期間計測する必要がある。しかし一般に, 負の間隙水圧の値を長期間計測することは,きわめて困難である。負の間隙水圧を計測するため には,間隙水圧と間隙空気圧とを分離するセラミックディスク(飽和状態の素焼きのフィルター) を設置する必要がある。しかし,間隙水圧計がベントナイトに接するうちに,このセラミックデ ィスク内の水分が,不飽和のベントナイトによって吸水されてしまうために,長期の計測が困難 になる。この現象を回避するために,エアーエントリーバリューが大きい粒子の小さいセラミッ クディスクを用いる必要があるが,エアーエントリーバリューの大きいセラミックディスクは市 販されていないので,ベントナイトに対応したセラミックディスクの開発が必要である。

ベントナイト内の間隙空気が浸潤過程でどのような挙動をするかについても、きわめて興味深 い実験である。一般に、ベントナイト内の間隙空気圧の変化の挙動を長期で計測する場合にも、 間隙水圧と間隙空気圧との分離が必要で、これを精度よく分離できないと間隙空気圧の計測は困 難である。しかし、深部 300m 以下の間隙水圧に対して、間隙空気の存在は、間隙水のベントナ イト内への浸透にはあまり影響はないと考えられる。すなわち、間隙水の圧力があまりにも大き いため、間隙空気の挙動があまり間隙水の挙動に影響しないと考えると、問題はもう少し単純に なる。

参考文献

- 前島俊雄・中島秀一, LPG 岩盤貯槽の建設で構築した水理地質モデルを地下水挙動管理へ 適用, 地盤工学会誌, vol.58, no.4, 2010, pp.12-15.
- 2) SKB, Final repository facility Underground design premises/D2, SKB R-07-33, 2007.
- 3) ENRESA, Full-scale engineered barriers experiment for a deep geological repository for high-level radioactive waste in crystalline host rock, Final report. PT-01/00, 2000.
- 4) 千々松正和・小松 満・中島貴弘・寺田賢二,地下空洞型処分施設性能確証試験におけるベントナイト水分量測定方法の評価,土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集,2009, pp.167-168.

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. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例						
an de La SI 組立単位	<u>f</u>					
名称	記号					
面 積 平方メートル	m ²					
体 積 立方メートル	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 ⁻¹					
密度,質量密度キログラム毎立方メート/						
面積密度キログラム毎平方メート/	ν kg/m ²					
比体積 立方メートル毎キログラ」	m ³ /kg					
電 流 密 度 アンペア毎平方メート/	ν A/m ²					
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m					
量 濃 度 ^(a) , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m ³					
質量濃度 キログラム毎立方メート/						
輝 度 カンデラ毎平方メート/	ν cd/m ²					
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1					
比 透 磁 率 ^(b) (数字の) 1	1					
(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野-	では物質濃度					

(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

	51和立中位			
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 隹	ラジアン ^(b)	rad	1 (в)	m/m
立 体 催	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 (b)	m^2/m^2
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	1	s ^{·1}
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
压力,応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	$m^2 kg s^{-3}$
電荷,電気量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$
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 ²	$\text{kg s}^{2} \text{A}^{1}$
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 ^(e)	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量,比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 s^{-2}$
線量当量,周辺線量当量, 方向性線量当量,個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(カタール) kat [s¹ 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。
 (c)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)へルツは周頻現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e)セン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。やレシウス度とケルビンの
 (d)ペルジは周頻現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e)センシウス度はケルビンの特別な名称で、1、組定差で建度問題を表す数値はどもらの単位で表しても同じである。
 (f)放射性核種の放射能(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

	SI 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 ⁻¹ kg s ⁻¹	
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²	
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²	
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹	
角 加 速 度	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 ⁻³	
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 ⁻³ K ⁻¹	
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²	
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹	
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A	
表 面 電 荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A	
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A	
誘 電 卒	コァラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$	
透磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²	
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 ⁻¹ s A	
吸収線量率	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 ³	$m^{-3} s^{-1} mol$	

表 5. SI 接頭語						
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号	
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d	
10^{21}	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	с	
10^{18}	エクサ	Е	10-3	ミリ	m	
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ	
10^{12}	テラ	Т	10 ⁻⁹	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^{-18}	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	У	

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=60 s	
時	h	1 h =60 min=3600 s	
日	d	1 d=24 h=86 400 s	
度	٥	1°=(π/180) rad	
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad	
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad	
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²	
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³	
トン	t	$1 t = 10^3 kg$	

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

去される数値が実験的に得られるもの					
名称			記号	SI 単位で表される数値	
電子	ボル	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J	
ダル	ŀ	\sim	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg	
統一原子	「質量単	单位	u	1 u=1 Da	
天 文	単	位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ 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
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海 里	М	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{\cdot 12} \text{ cm})^2=10^{\cdot 28} \text{m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	の単位しの教徒的な問題は
ベル	В	31単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
デシベル	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 ⁻⁷ J		
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N		
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s		
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$		
スチルブ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$		
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx		
ガル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²		
マクスウエル	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 ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)A m ⁻¹		
(a) 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に属さないその他の単位の例						
名称				記号	SI 単位で表される数値	
キ	ユ		IJ	-	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ĸ	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	Ξ		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メー	ートル	/系	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
ŀ				N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力			IJ	-	cal	1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	ц	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$