JAEA-Research 2015-018 DOI:10.11484/jaea-research-2015-018



地層処分実規模設備運営等事業における 工学技術に関する研究 -平成26年度成果報告-(共同研究)

Research on Engineering Technology in the Full-scale Demonstration of EBS and Operation Technology for HLW Disposal — Research Report in FY 2014— (Joint Research)

小林 正人	齋藤 雅彦	岩谷 隆文	中山 雅
棚井 憲治	藤田 朝雄	朝野 英一	

Masato KOBAYASHI, Masahiko SAITO, Takafumi IWATANI, Masashi NAKAYAMA Kenji TANAI, Tomoo FUJITA and Hidekazu ASANO

> バックエンド研究開発部門 幌延深地層研究センター 深地層研究部

C C C

Horonobe Underground Research Department Horonobe Underground Research 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

地層処分実規模設備運営等事業における工学技術に関する研究

-平成26年度成果報告-

(共同研究)

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 幌延深地層研究センター 深地層研究部

小林 正人^{*1}、齋藤 雅彦*²、岩谷 隆文^{*1}、中山 雅、棚井 憲治、 藤田 朝雄、朝野 英一^{*1}

(2015年10月19日受理)

独立行政法人(現、国立研究開発法人)日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)と公益 財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター(以下、原環センター)は、「放射性廃棄物の 処理・処分等の研究開発に関する協力協定書」(以下、協定書)を締結し、高レベル放射性廃棄 物地層処分の研究ならびに技術開発を進めている。

現在、原子力機構は、北海道幌延町において幌延深地層研究計画を進めており、地層科学研究 および地層処分研究開発を実施している。一方、国は深地層の研究施設等を活用して、国民全般 の高レベル放射性廃棄物地層処分への理解促進を目的として、実規模・実物を基本とするが、実 際の放射性廃棄物は使用せずに、地層処分概念とその工学的な実現性や人工バリアの長期挙動ま でを実感・体感できる設備の整備等を行う「地層処分実規模設備整備事業」を平成 20 年度から平 成 25 年度まで公募事業として進めており、平成 26 年度は事業名称を「地層処分実規模設備運営 等事業」に変更した。

原子力機構と原環センターは上記の協定書に基づき、原環センターが受注した「地層処分実規 模設備運営等事業」の工学技術に関する研究を共同で実施するために、「地層処分実規模設備運 営等事業における工学技術に関する研究」に関して、共同研究契約を締結した。本共同研究は上 記事業における工学技術に関する研究を共同で実施するものである。なお、本共同研究は幌延深 地層研究計画のうち、処分システムの設計・施工技術の開発や安全評価手法の信頼性確認のため の研究開発の一環として実施する。

本報告は、本共同研究における平成 26 年度の成果について取りまとめたものである。平成 20 年度に策定した全体計画に基づき、緩衝材定置試験設備や、実物大の緩衝材およびオーバーパッ ク(模擬)の展示の継続と並行して、緩衝材定置(実証)試験を実施し、緩衝材の浸潤試験を継 続した。

本研究は、原子力機構と原環センターとの共同研究に基づいて実施したものであり、原環センターが実施した、 経済産業省資源エネルギー庁受託「地層処分実規模設備運営等事業」の研究成果を基に、取りまとめたものである。 幌延深地層研究センター:〒098-3224 北海道天塩郡幌延町字北進 432 番地 2

^{*1} 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター

^{*2} 日揮株式会社(2015 年 3 月 31 日迄、公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター)

JAEA-Research 2015-018

Research on Engineering Technology in the Full-scale Demonstration of EBS and Operation Technology for HLW Disposal - Research Report in FY 2014 -(Joint Research)

Masato KOBAYASHI^{*1}, Masahiko SAITO^{*2}, Takafumi IWATANI^{*1}, Masashi NAKAYAMA, Kenji TANAI, Tomoo FUJITA and Hidekazu ASANO^{*1}

Horonobe Underground Research Department, Horonobe Underground Research Center Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management Japan Atomic Energy Agency Horonobe-cho, Teshio-gun, Hokkaido

(Received October 19, 2015)

Japan Atomic Energy Agency (JAEA) and Radioactive Waste Management Funding and Research Center (RWMC) concluded the letter of cooperation agreement on the research and development of radioactive waste disposal in April, 2005, and have been carrying out the collaboration work based on the agreement.

JAEA have been carrying out the Horonobe Underground Research Laboratory (URL) Project which is intended for a sedimentary rock in the Horonobe town, Hokkaido, since 2001. In the project, geoscientific research and research and development on geological disposal technology are being promoted. Meanwhile, the government (the Agency for Natural Resources and Energy, Ministry of Economy, Trade and Industry) has been promoting construction of equipments for the full-scale demonstration of engineered barrier system (EBS) and operation technology for high-level radioactive waste (HLW) disposal since 2008, to enhance public's understanding to the geological disposal of HLW, e.g. using underground facility. RWMC received an order of the project in fiscal year 2014 (2014/2015) continuing since fiscal year 2008 (2008/2009). Since topics in this project are included in the Horonobe URL Project, JAEA carried out this project as collaboration work continuing since fiscal year 2008.

This report summarizes the results of the research on engineering technology carried out in this collaboration work in fiscal year 2014. In fiscal year 2014, emplacement tests using buffer material block for the vertical emplacement concept were carried out and visualization tests for water penetration in buffer material were carried out.

Keywords: Horonobe URL Project, RWMC, Geological Disposal Technology, Engineered Barrier System, Demonstration Test, Public Acceptance

This work has been performed in JAEA as a joint research with RWMC, and includes the results which carried out by RWMC under the contract with the Agency for Natural Resources and Energy, Ministry of Economy, Trade and Industry.

^{*1 :} Radioactive Waste Management Funding and Research Center

^{*2 :} JGC CORPORATION (until March 31, 2015, Radioactive Waste Management Funding and Research Center)

目 次

1. 概要	L
1.1 共同研究の背景	L
1.2 共同研究の目的	L
1.3 全体計画	L
1.4 実施方法	2
2. 実施内容	1
2.1 緩衝材定置試験	1
2.2 緩衝材可視化試験	5
3. まとめ	3
参考文献13	3

Table of Contents

1. Outline
1.1 Introduction
1.2 Objective
1.3 Whole idea
1.4 Role
2. Investigation
2.1 Emplacement tests of buffer material blocks for the vertical emplacement concept $\ldots 4$
2.2 Visualization test for water penetration in buffer material
2 - Cummony
5. Summary
References

図表リスト

义	1	おもしろ科学館での緩衝材定置(実証)試験の公開状況	4
义	2	おもしろ科学館での緩衝材定置(実証)試験の公開状況	5
义	3	可視化試験概念	6
义	4	可視化試験装置(平成 21~25 年)	6
义	5	隙間に関する可視化試験の考え方	8
义	6	水平方向の隙間を持つ供試体の作製方法	8
义	7	ランマによる締固め状況	9
义	8	水平方向の隙間の浸潤試験の概要	9
义	9	水平方向の隙間の浸潤試験状況1	.0
义	10	緩衝材可視化試験状況(Case1)1	.1
义	11	緩衝材可視化試験状況(Case3)1	.1
义	12	緩衝材供試体の変位(膨潤)1	.1
义	13	含水比の深さ方向分布と乾燥密度分布1	2
表	1	共同研究分担一覧表	2
表	2	平成 26 年度のスケジュール	3
表	3	試験ケース1	.0

1. 概要

1.1 共同研究の背景

独立行政法人(現、国立研究開発法人)日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)と 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター(以下、原環センター)は、「放射 性廃棄物の処理・処分等の研究開発に関する協力協定」を締結し、高レベル放射性廃棄物 地層処分の研究ならびに技術開発を進めている。

現在、原子力機構は、北海道幌延町において堆積岩の地質環境を対象として、深地層の 研究施設を利用した幌延深地層研究計画を進めており、地層科学研究および地層処分研究 開発を実施している。一方、国の計画では地層処分の開始は平成40年代後半を目途として おり¹⁾、このスケジュールを踏まえ、地層処分研究開発を着実に進めることが望まれている。

また、総合エネルギー調査会電気事業分科会原子力部会放射性廃棄物小委員会の中間取 りまとめ²⁰において、国民が最終処分事業の概念や安全性を体感できるような設備の整備に ついて示されており、これを受けて、国は、深地層の研究施設等を活用して、国民の高レ ベル放射性廃棄物地層処分への理解促進を目的に、実規模・実物を基本とした(実際の放 射性廃棄物は使用しない)、地層処分の安全確保の考え方と、我が国でのその実現性や地 層処分に使用される材料の性質などを実感・体感できる設備等の整備事業である、「地層 処分実規模設備整備事業」を平成20年度から平成25年度まで公募事業として進めており、 平成26年度は事業名称を「地層処分実規模設備運営等事業」に変更した。原環センターは 平成20年度から引き続き、当該事業を受注した。

本共同研究は、上記事業における工学技術に関する研究を共同で実施するためのもので ある。なお、本共同研究は幌延深地層研究計画³における、処分システムの設計・施工技術 や安全評価手法の信頼性確認のための研究開発の一環として実施する。

1.2 共同研究の目的

地層処分の概念や安全性について、国民の理解促進に資することを目的とした体感設備 を活用し、人工バリアの搬送・定置に係わる操業技術や長期挙動等の工学技術に関する研 究(調査、設計、製作、解析等)を実施する。

1.3 全体計画

1.3.1 「地層処分実規模設備運営等事業」の全体構想

国の行う、地層処分実規模設備運営等事業では、以下のことが計画されている^{4), 5)}。

「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-」(以下、第2次取りまとめ)<sup>6),7),8),9)や、原子力発電環境整備機
 構(以下、NUMO)の公募資料¹⁰⁾等に示された、我が国の高レベル放射性廃棄物地層
 処分の概念(多重バリアシステム)、人工バリア材料や処分場の操業に関わる工学的
</sup>

技術等について、実規模・実物を基本とした設備(実際の放射性廃棄物は使用しない) を整備することにより、地層処分概念とその工学的な実現性、および人工バリア材料 の長期挙動等を実感・理解できる設備を設置する。地上の実規模設備を整備し、これ らの設備を用いて工学技術などを実証し、その状況を実際に見て体感できる場にする。

人工バリアシステムやその材料については、実材料に基づく実規模相当品を提示する。
 工学技術の実現性として、操業技術、回収技術*1等を対象とし活用することにより、その状況と成果を提示する。

1.3.2 本共同研究の内容

本共同研究において実施する内容は以下の通りである。

i. 緩衝材定置試験

模擬緩衝材を用いた、定置試験を実施する。

ii. 人工バリアの長期挙動に係る試験

人工バリア可視化設備を用いた試験を継続し、緩衝材中の水の浸潤状況を観察 する。

1.4 実施方法

平成 26 年度の共同研究における原子力機構と原環センターの研究分担を表 1 に、年間の スケジュールを表 2 に示す。

研究項目	原子力機構	原環センター
○緩衝材定置試験		
 試験 	\bigcirc	\bigcirc
○人工バリアの長期挙動に係る試験		
・試験計画検討	\bigcirc	\bigcirc
・供試体の製作	\bigcirc	\bigcirc
・試験	0	0
○報告書の作成	0	\bigcirc

表 1 共同研究分担一覧表

*1 本報告書で取り扱う「回収技術」は、処分場の操業段階において不具合が発生した場合の緩衝材の除去(回収)技術である。

	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
緩衝材定置試験					計画	試験						
人工バリアの長期挙動に	計画				411	×-11	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·					
		後 倒 材 可 視 化 試 疑										
係る試験		供試体		供試体		供試体		供試体				供試体
		入替		入替		入替		入替				入替
報告書の作成												

表 2 平成 26 年度のスケジュール

2. 実施内容

2.1 緩衝材定置試験

緩衝材定置装置を用いて行う緩衝材定置試験をより多くの来館者に見てもらい、同時に 来館者に地層処分技術に対する理解を深めてもらう事を目的に、模擬緩衝材ブロック用い た試験を、平成26年9月6日(土)及び7日(日)に北海道経済産業局が主催した「おも しろ科学館 2014 in ほろのべ」に併せて実施した。

2.1.1 模擬緩衝材ブロックを用いた緩衝材定置試験

本試験は、より多くの来館者に見てもらうために試験回数を多く設定する必要があるため、模擬処分孔にあらかじめ緩衝材を1段目から3段目まで定置した状態で、4段目のみを繰り返し定置する試験を公開した。試験回数は、合計22回実施した(9月6日:11回、7日:11回)。図1および図2に定置試験の公開状況を示す。なお、平成26年度は、試験の公開および来館者への理解促進に重点を置き、定置時間や、定置精度についてのデータの取得は行わなかった。



図 1 おもしろ科学館での緩衝材定置(実証)試験の公開状況



図 2 おもしろ科学館での緩衝材定置(実証)試験の公開状況

(1) 来館者数

9月6日、7日の2日間の来館者数は、905名であった(6日:480名、7日:425名)。 なお、この来館者数は平成22年度の地層処分実規模試験施設開館以降の「おもしろ科学 館」で最多であった。

2.2 緩衝材可視化試験

2.2.1 緩衝材可視化試験の目的

緩衝材可視化試験は、地層処分の人工バリアの構成要素である緩衝材を対象として以下 の目的で実施している。

- 来館者に対して、緩衝材の性質や利用方法の理解促進
- 緩衝材の挙動の把握・理解および理解促進のための資料作成

2.2.2 平成 25 年度までの緩衝材可視化試験

平成 20 年度から平成 25 年度にかけて人工バリア挙動試験において緩衝材可視化試験として緩衝材の膨潤挙動等を観察できるよう展示を行ってきた。

平成 20 年度に実規模サイズの再冠水浸潤過程の可視化設備を計画(図 3)していたものの、平成 21 年度に詳細な検討をした結果、「人工バリア可視化試験」の装置を平成 20 年度の計画の 1/20 に縮小したカラムモデル(直径 10cm、高さ 5cm)とし、装置を製作した(図 4)^{11),12)}。平成 22 年度から平成 25 年度にかけて緩衝材自体の浸潤(一体モデル)お

よび隙間をもつ緩衝材の浸潤(隙間モデル)について試験を実施した。試験結果から、隙間モデルでは、緩衝材の密度および初期の飽和度の差により閉塞するまでの時間の差があるものの、供試体の中心上部の含水比が高いことが分かった。一方、一体モデルの含水比分布では供試体の側面付近が高いことが観測された^{13),14),15),16),17),18),19),20)。}



図 3 可視化試験概念



図 4 可視化試験装置(平成 21~25 年)

2.2.3 緩衝材の機能と可視化試験の検討

「緩衝材の隙間」について、緩衝材の性質を利用した機能および要件から試験の背景を 示す。

緩衝材は人工バリアを構成する一つであり、「放射性物質の移行抑制」のため安全機能 が設定されている²¹⁾。

- 移流による移行の抑制(低透水性)
- コロイド移行の防止・抑制(コロイドろ過能)

吸着による放射性物質の移行遅延(吸着性)

さらに人工バリアの長期健全性の維持の観点から、以下の技術要件が設定されている 21)。

- 自己修復性
- 耐熱性
- 対放射線性
- 緩衝材流出の抑制
- 残置物との相互作用の影響の低減
- バリア材料間の相互作用の影響の低減
- ガラス固化体の過熱防止
- オーバーパックの保護
- オーバーパックの沈下防止
- 施工時の隙間の充填(自己シール性)

上記の緩衝材の技術要件のうち「緩衝材の隙間」に関わる事項と考えられる「自己修復 性」、「自己シール性」について、緩衝材可視化試験において試験・検証と試験状況の展 示を実施することとした。

緩衝材可視化試験に関連する研究では、原環センターが国の委託事業である「処分シス テム工学要素技術高度化開発」において、パイピング・エロージョンに関する試験²²⁾を実施 している。また、原子力機構では緩衝材の流出挙動に関する試験²³⁾や、膨潤挙動に関する試 験²⁴⁾を実施している。

平成26年度は、以下の項目を実施した。

• 緩衝材供試体を用いた水平方向の隙間の浸潤試験

2.2.4 緩衝材供試体を用いた水平方向の隙間の浸潤試験

(1) 目的

平成 25 年度までに、緩衝材可視化試験では緩衝材の隙間に関する縦方向に隙間を設け、 同じ方向から観察していた。しかし、この供試体の隙間閉塞の挙動観察では閉塞の有無の 確認をする程度にとどまっていた。

そのため隙間における緩衝材挙動を観察できるように供試体の上端面に隙間を設けるように境界条件を変更した(図 5)。この水平方向の隙間の浸潤試験は、水の浸潤による隙間の閉塞がどのような緩衝材の挙動(膨潤、流出・侵入など)によるものかを確かめることを目的とした。



図 5 隙間に関する可視化試験の考え方

(2) 供試体作製方法

水平方向の隙間を持つ供試体の作製方法を以下に示す。供試体はベントナイトとケイ砂の混合土(ケイ砂混合率 30%、以下、ベントナイト混合土)で作製し、乾燥密度 1.6 Mg/m³ で飽和度 50%(含水比 12.6%)、80%(含水比 20.2%)および乾燥密度 1.8 Mg/m³で飽 和度 50%(含水比 9.13%)、80%(含水比 14.6%)に設定した。供試体の製作手順を図 6 に、ランマによる締固め状況を図 7 に示す。

- (1) ベントナイト混合土の含水比を調整する。
- (2) ベントナイト混合土を隙間分の厚さのスペーサーを設置したモールドに詰め、 ランマにより締固めを行う。
- (3) 緩衝材を上下反転し、緩衝材可視化試験装置を組み立てる。



図 6 水平方向の隙間を持つ供試体の作製方法



図 7 ランマによる締固め状況

(3) 試験方法

水平方向の隙間の浸潤試験の概要を

図 8 に示す。アクリル板にあけられた孔を通じて緩衝材上面に設けた隙間に水道水を注水し試験を開始した。水の浸潤状況および隙間の状況を供試体上面から観察し、適宜注水量を調整した。

膨潤量を把握するために供試体上面の中心に、薄い円形のアルミプレートを設置し、ダ イヤルゲージを用いて緩衝材の膨潤による鉛直変位を測定した。



ダイヤルゲージ:膨潤量(変位)の計測

図 8 水平方向の隙間の浸潤試験の概要

(4) 試験ケース

試験ケースを表 3 に示す。表中の EX1、EX2 は平成 25 年度に設置したものである。 初期の乾燥密度は、EX1~Case2 が 1.6 Mg/m³、Case3~6 は 1.8 Mg/m³とした。また、 緩衝材供試体上面の隙間はすべてのケースで 10 mm とした。

試験ケース	EX1	EX2	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
乾燥密度 <i>d</i> ₀ 1.6 1.8								
含水比 w ₀ (%)	12.6	12.6	12.6	20.2	9.13	9.13	14.61	14.61
飽和度 Sr (%)	50	50	50	80	50	50	80	80
隙間 (mm)	10							
試験期間 (日)	102	102	47	47	48	131	180	96

表 3 試験ケース

(5) 試験状況と取得データ

試験状況を図 9 に示す。Case1(乾燥密度 1.6 Mg/m³、飽和度 50 %)と Case3(乾燥密 度 1.8 Mg/m³、飽和度 50 %)の緩衝材上面の経時変化を図 10、図 11 に示す。

各試験ケースにより得られた変位量の結果を図 12 に示す。供試体上面の変位は、乾燥密度 1.6 Mg/m³ (EX1~Case2) よりも 1.8 Mg/m³ (Case3~6) の方が早く収束している。 一方、初期飽和度による違いは今回の試験では見られなかった。また、変位量は、隙間 10 mm (緩衝材が膨潤し変位できる最大変位量が 10 mm) に対して、5~9 mm であった。

次に、各試験ケースにより得られた供試体の深さと含水比、乾燥密度の関係を図 13 に示 す。図 13(a)、(b)の横軸は、各試験によって得られた含水比 w、i乾燥密度ρdi を各試 験ケースの初期含水比 wo、乾燥密度ρdo で除して基準化したものである。含水比は、各試験 ケースともに緩衝材上部(隙間を埋めた緩衝材)が最も高くなった。乾燥密度は、隙間の 膨潤挙動により供試体上部が各試験ケースとも最も密度が低くなった。



図 9 水平方向の隙間の浸潤試験状況



試験前

24 日後

47 日後

図 10 緩衝材可視化試験状況(Case1)



試験前

11 日後

48日後



図 12 緩衝材供試体の変位(膨潤)



(a) 含水比分布

(b) 乾燥密度分布

図 13 含水比の深さ方向分布と乾燥密度分布

(6) 観察事項

各試験ともに緩衝材の上面に隙間(10 mm)を設け、水の浸潤による挙動を観察した。 変位量は飽和度によらず、乾燥密度 1.6 Mg/m³では試験開始から 14 日程度、密度 1.8 Mg/m³ では 9 日程度で収束し、乾燥密度の違いにより 5 日程度の差が生じた。なお、収束判定は、 図 12 の変位量に対する経過日数の変化率を算出し、変化率 1%以下を収束とした。

最大 180 日程度の浸潤では、垂直方向の含水比分布は上面と下端部で含水比が均一になることはなかった。

全ての試験ケースで、供試体の乾燥密度は上部のみ密度低下が生じ、下端部は試験開始 時からの変化がなかった。

供試体の表面観察では隙間が閉塞しているが、変位量は初期の隙間よりも小さい値となった。要因として、緩衝材が膨潤する際に、変位測定のために設置した円形アルミプレー ト上に回り込み、堆積し、隙間が閉塞されたと考えられる。

2.2.5 緩衝材可視化試験のまとめ

緩衝材可視化試験によりデータを取得し、水の流速がない場合は緩衝材の隙間が閉塞す ることが確認できた。

水平方向の隙間の浸潤試験では、結果から隙間に水が浸潤すると緩衝材の膨潤により閉 塞が起こることが分かった。また、隙間から離れた位置の緩衝材含水比は試験開始時とほ とんど変化していなかった。今後、さらに条件を変えて隙間閉塞の状況を調査していくこ とにより、人工バリアの品質向上に関わる知見が得られると考えられる。

3. まとめ

平成 26 年度は、模擬緩衝材を用いた緩衝材定置試験を実施するとともに、一般に公開し、地層 処分の工学技術に関する理解促進に努めた。また、緩衝材可視化試験によりデータを取得し、水 の流速がない場合は緩衝材の隙間が閉塞することが確認できた。

参考文献

- 1) 原子力発電環境整備機構:段階的な事業推進における構造化アプローチと要件管理, NUMO-TR-07-01 (2007).
- 2)総合資源エネルギー調査会電気事業分科会原子力部会放射性廃棄物小委員会:報告書中間取り まとめ~最終処分事業を推進するための取組の強化策について~(平成19年11月1日), (2007).
- 3) 核燃料サイクル開発機構:深地層研究所(仮称)計画(平成10年10月), JNC TN1410 98-002, (1998).
- 4) 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成20年度核燃料サイクル関係推進調整等委託費 (地層処分実規模設備整備事業)報告書,(2009).
- 5) 中司昇,畑中耕一郎,佐藤治夫,杉田裕,中山雅,宮原重憲,朝野英一,斉藤雅彦,須山泰宏, 林秀郎,本田ゆう子,菱岡宗介;地層処分実規模設備整備事業における工学技術に関する研究-平成 20 年度成果報告-(共同研究), JAEA-Research 2009-044 (2010), 53p.
- 6) 核燃料サイクル開発機構:わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地 層処分研究開発第2次取りまとめ-総論レポート, JNC TN1400 99-020(1999).
- 7) 核燃料サイクル開発機構:わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地 層処分研究開発第2次取りまとめ-分冊1 わが国の地質環境,JNC TN1400 99-021(1999).
- 8) 核燃料サイクル開発機構:わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地 層処分研究開発第2次取りまとめ-分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022(1999).
- 9) 核燃料サイクル開発機構:わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地 層処分研究開発第2次取りまとめ-分冊3 地層処分システムの安全評価,JNC TN1400 99-023(1999).
- 10) 原子力発電環境整備機構:放射性廃棄物の地層処分事業について(分冊-1)処分場の概要, (2009).
- 11) 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 21 年度核燃料サイクル関係推進調整等委託費 (地層処分実規模設備整備事業)報告書, (2010).
- 12) 中司昇,畑中耕一郎,佐藤治夫,杉田裕,中山雅,宮原重憲,朝野英一,斉藤雅彦,須山泰 宏,林秀郎,本田ゆう子,菱岡宗介:地層処分実規模設備整備事業における工学技術に関する 研究-平成21 年度成果報告-(共同研究),JAEA-Research 2010-060 (2011), 50p.
- 13) 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 22 年度原子力施設立地推進調整事業委託費 地 層処分実規模整備事業 報告書(2011).
- 14) 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成23年度原子力施設立地推進調整事業委託費地 層処分実規模整備事業報告書(2012).
- 15) 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成24年度原子力発電施設広聴・広報等事業地 層処分実規模整備事業報告書(2013).

- 16) 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成25年度原子力発電施設広聴・広報等事業地 層処分実規模整備事業報告書(2014).
- 17) 中司昇,畑中耕一郎,佐藤治夫,杉田裕,中山雅,朝野英一,斉藤雅彦,須山泰宏,林秀郎, 本田ゆう子,菱岡宗介:地層処分実規模設備整備事業における工学技術に関する研究-平成22 年度成果報告-(共同研究),JAEA-Research 2013-026 (2013), 57p.
- 18) 中司昇,佐藤治夫,棚井憲治,杉田裕,中山雅,澤田純之,新沼寛明,朝野英一,斉藤雅彦, 吉野修,塚原成樹,菱岡宗介:地層処分実規模設備整備事業における工学技術に関する研究・平 成23年度成果報告-(共同研究), JAEA-Research 2013-027 (2013), 34p.
- 19) 中司昇,佐藤治夫,棚井憲治,中山雅,澤田純之,朝野英一,斉藤雅彦,吉野修,塚原成樹, 菱岡宗介,小林正人:地層処分実規模設備整備事業における工学技術に関する研究-平成24 年度成果報告-(共同研究), JAEA-Research 2013-034 (2014), 70p.
- 20) 藤田朝雄,棚井憲治,中山雅,澤田純之,朝野英一,斉藤雅彦,吉野修,小林正人:地層処 分実規模設備整備事業における工学技術に関する研究・平成25年度成果報告・(共同研究), JAEA-Research 2014-031 (2014), 44p.
- 21) 原子力発電環境整備機構:地層処分事業の安全確保(2010年度版), NUMO-TR-11-01, (2011).
- 22) 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成24年度地層処分技術調査等委託費高レベル放 射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書(第2分冊)-人工バリア品 質評価技術の開発-,(2013).
- 23) 松本一浩、棚井憲治:緩衝材の流出/侵入特性(II)-幌延地下水(HDB-6 号孔)を用いた緩衝材の 侵入特性評価・, JNC TN8400 2004-026, (2005).
- 24) 杉田裕, 菊池広人, 棚井憲治:人工バリアにおける緩衝材の隙間膨潤挙動に関する基礎試験
 (II), JNC-TN8430 2003-007 (2003).

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					
_{知立} SI 組立単位	SI 組立単位				
和立里 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	ル kg/m ³				
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	ム m ³ /kg				
電 流 密 度 アンペア毎平方メート	\mathcal{N} 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 ⁸				
質量濃度 キログラム毎立方メート	ル kg/m ³				
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

	SI 組立単位					
組立量	名称	記号	他のSI単位による	SI基本単位による		
		10.0	表し方	表し方		
平 面 角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m		
立 体 角	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 ^(b)	m^2/m^2		
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹		
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²		
E 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	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$		
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	$kg s^{-2} A^{-1}$		
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,	ガレイ	Gy	J/kg	m ² e ⁻²		
カーマ	, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	Gy	ong			
線量当量,周辺線量当量,	2 ((g)	Su	I/lrg	2 -2		
方向性線量当量,個人線量当量		30	o/kg	III S		
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)ペルジは高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)センジス度はケルビンの特別な名称で、1、通道を表すために使用される。それシウス度とケルビンの
 (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

	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 ⁻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	コ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	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=60 s		
時	h	1 h =60 min=3600 s		
日	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	•	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

表される数値が実験的に得られるもの				
名称	記号	SI 単位で表される数値		
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J		
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ^{·27} kg		
統一原子質量単位	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	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} = 10^{-4} \text{m}^2 \text{ s}^{-1}$	
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$	
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						
	4	名利	5		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	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$