



JAEA-Review

2019-032

DOI:10.11484/jaea-review-2019-032

## モニタリング機器の放射線影響に関する検討

Preliminary Study on Radiation Effects of Monitoring Equipment

中山 雅 棚井 憲治

Masashi NAKAYAMA and Kenji TANAI

核燃料・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

Horonobe Underground Research Department

Horonobe Underground Research Center

Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

February 2020

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

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 (<https://www.jaea.go.jp>)  
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, 2020

## モニタリング機器の放射線影響に関する検討

日本原子力研究開発機構 核燃料・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  
中山 雅、棚井 憲治<sup>+1</sup>

(2019年11月25日受理)

高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリングには、施工上の品質を確認するためのモニタリング、人工バリアの状態把握や処分施設周辺部における地質環境条件に関するモニタリング、建設・操業・閉鎖の各作業を安全かつ確実に進めるための作業安全のモニタリング、処分場敷地周辺部の環境に関するモニタリングなどの種々のモニタリングが挙げられる。これらのモニタリングのうち人工バリアが設計で想定した状態を逸脱することなく性能が発揮されていることを確認し評価するための人工バリアの状態把握に関わるモニタリングに関しては、国際共同研究としてその考え方や具体的な方法等について検討が進められている。

このようなモニタリング機器が置かれる環境条件には、温度、湿度、圧力、放射線や水質などがあり、地質環境や埋設深度、埋設する廃棄物の種類によって変動するため、モニタリング機器の検討を行う際には、環境条件を考慮した整理が必要である。そこで、人工バリアの状態を把握する際、緩衝材やオーバーパック表面、あるいはその周囲に設置されるモニタリング機器がオーバーパックから放出される放射線に曝されることから、ここではこれらモニタリング機器の放射線による影響について、代表的なセンサーに用いられている材料の耐放射線性と解析により求めた緩衝材中の吸収線量との比較を行った結果、モニタリング機器の使用壽命に影響を及ぼす線量ではないことが推定された。しかしながら電子部品を内蔵するモニタリング機器については、照射試験により信頼できるデータの取得の可能性について検証することが必要である。

---

本報告書は、株式会社 IHI が日本原子力研究開発機構との役務契約により実施した業務の成果に関するものである。

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  
<sup>+1</sup> 核燃料サイクル工学研究所 環境技術開発センター 基盤技術研究開発部

Preliminary Study on Radiation Effects of Monitoring Equipment

Masashi NAKAYAMA and Kenji TANAI<sup>+1</sup>

Horonobe Underground Research Department  
Horonobe Underground Research Center  
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development  
Horonobe-cho, Teshio-gun, Hokkaido

(Received November 25, 2019)

There are various types of monitoring in the geological disposal of high-level radioactive waste, such as monitoring for confirmation of construction quality and the status of engineered barrier, and monitoring to help manage construction, operation and closure activities, etc. Among these monitoring methods, monitoring related to the confirmation of the state of engineered barrier has been studied in international joint research on monitoring concepts and specific methods.

Since monitoring equipment is affected by temperature, humidity, pressure, radiation, water quality, etc., it is important to consider geological environmental conditions and radiation effects. This report compares the radiation resistance of the materials used in the monitoring equipment with the absorbed dose in the buffer material obtained by analysis, and qualitatively examines the effects of radiation on the monitoring equipment. As a result of the examination, it was estimated that the dose did not affect the monitoring equipment. However, it is necessary to verify the possibility of reliable data acquisition by irradiation tests for monitoring devices with built-in electronic components.

Keywords: Geological Disposal, Radiation Effects, Monitoring Equipment

---

This work was performed by IHI Corporation under contract with Japan Atomic Energy Agency.

<sup>+1</sup> Radioactive Waste Processing and Disposal Research Department, Nuclear Backend Technology Center, Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories

目次

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 1. 序論 .....                      | 1  |
| 2. 放射線線量に関する解析的検討.....           | 2  |
| 2.1 解析条件等 .....                  | 2  |
| 2.2 計算結果.....                    | 9  |
| 3. モニタリング機器への概略影響評価 .....        | 12 |
| 3.1 調査対象モニタリング機器 .....           | 12 |
| 3.2 各モニタリング機器の材料調査 .....         | 13 |
| 3.3 モニタリング機器に使用されている材料のまとめ ..... | 23 |
| 3.4 材料に対する線量の影響.....             | 24 |
| 4. 試験の計画.....                    | 29 |
| 4.1 照射試験要否の検討 .....              | 29 |
| 4.2 試験計画.....                    | 29 |
| 5. まとめ.....                      | 31 |
| 参考文献 .....                       | 32 |

Contents

|  |    |
|--|----|
| 1. Introduction .....  | 1  |
| 2. Analytical study on radiation dose in the buffer material ..... | 2  |
| 2.1 Analysis condition .....                                       | 2  |
| 2.2 Analysis result .....  | 9  |
| 3. Impact assessment on monitoring equipment .....                 | 12 |
| 3.1 Investigation object of monitoring equipment .....             | 12 |
| 3.2 Material investigation of monitoring equipment .....           | 13 |
| 3.3 Summary of materials used for monitoring equipment .....       | 23 |
| 3.4 Effect of dose on materials .....                              | 24 |
| 4. Test plan .....   | 29 |
| 4.1 Necessity of irradiation test .....                            | 29 |
| 4.2 Test plan of irradiation test .....                            | 29 |
| 5. Summary.....  | 31 |
| References .....   | 32 |

表リスト

|          |                                      |    |
|----------|--------------------------------------|----|
| 表 2.1-1  | ガンマ線線源強度.....                        | 3  |
| 表 2.1-2  | 中性子線線源強度（自発核分裂）.....                 | 4  |
| 表 2.1-3  | 中性子線線源強度（ $\alpha,n$ 中性子）.....       | 5  |
| 表 2.1-4  | 物質組成（ガラス）.....                       | 8  |
| 表 2.1-5  | 物質組成（空気）.....                        | 8  |
| 表 2.1-6  | 物質組成（オーバーパック）.....                   | 9  |
| 表 2.1-7  | 物質組成（緩衝材）.....                       | 9  |
| 表 2.2-1  | 吸収線量[Gy/year].....                   | 10 |
| 表 3.1-1  | 人工バリア性能確認試験の試験孔内に設置されている計測機器の仕様..... | 13 |
| 表 3.2-1  | 土圧計仕様.....                           | 14 |
| 表 3.2-2  | 間隙水圧計仕様.....                         | 14 |
| 表 3.2-3  | 変位計仕様.....                           | 15 |
| 表 3.2-4  | 湿度計仕様.....                           | 16 |
| 表 3.2-5  | サイクロメータ仕様.....                       | 17 |
| 表 3.2-6  | pH 計仕様.....                          | 18 |
| 表 3.2-7  | 水分計（FDR-V）仕様.....                    | 18 |
| 表 3.2-8  | 温度計（熱電対）仕様.....                      | 19 |
| 表 3.2-9  | 白金電極仕様.....                          | 20 |
| 表 3.2-10 | 炭素鋼電極仕様.....                         | 20 |
| 表 3.2-11 | 比抵抗トモグラフィ用の電極仕様.....                 | 21 |
| 表 3.2-12 | 緩衝材膨出計測センサー仕様.....                   | 22 |
| 表 3.3-1  | 計測機器に使用されている材質のまとめ.....              | 23 |
| 表 3.4-1  | 各計測器の耐放射線性.....                      | 25 |
| 表 4.1-1  | 照射試験の要否検討.....                       | 29 |
| 表 4.2-1  | 照射試験パターン.....                        | 30 |

図リスト

|          |                                  |    |
|----------|----------------------------------|----|
| 図 2.1-1  | 第2次取りまとめ仕様（処分孔縦置き）               | 7  |
| 図 2.1-2  | 計算モデル                            | 7  |
| 図 2.2-1  | 吸収線量[Gy/year]                    | 10 |
| 図 2.2-2  | 吸収線量の線質内訳（貯蔵期間 30 年、飽和度 40%のケース） | 11 |
| 図 3.2-1  | 土圧計（振動弦式）の外観写真                   | 14 |
| 図 3.2-2  | 間隙水圧計（振動弦式）の外観写真                 | 15 |
| 図 3.2-3  | 変位計（振動弦式）の外観写真                   | 16 |
| 図 3.2-4  | 湿度計の外観写真                         | 17 |
| 図 3.2-5  | サイクロメータの外観写真                     | 17 |
| 図 3.2-6  | pH 計の外観写真                        | 18 |
| 図 3.2-7  | 水分計（FDR-V）の外観写真                  | 19 |
| 図 3.2-8  | 温度計（熱電対）の外観写真                    | 19 |
| 図 3.2-9  | 白金電極の外観写真                        | 20 |
| 図 3.2-10 | 炭素鋼電極の外観写真                       | 21 |
| 図 3.2-11 | 比抵抗トモグラフィ用の電極の外観写真               | 21 |
| 図 3.2-12 | 緩衝材膨出計測センサーの外観写真                 | 22 |
| 図 4.2-1  | 試験構成図の例                          | 30 |

## 1. 序論

高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリングとしては、施工上の品質を確認するためのモニタリング、人工バリアの状態把握や処分施設周辺部における地質環境条件に関するモニタリング、建設・操業・閉鎖の各作業を安全かつ確実に進めるための作業安全に関するモニタリング、処分場敷地周辺部の環境に関するモニタリングなどの種々のモニタリングが想定される。

これらのモニタリングのうち、人工バリアが設計で想定した状態を逸脱することなく、性能が発揮されていることを確認し評価するための人工バリアの状態把握に関わるモニタリングに関しては、国際共同研究としてその考え方や具体的な方法等について検討が進められている<sup>1),2),3)</sup>。

このようなモニタリング機器が置かれる環境条件には、温度、湿度、圧力、放射線や水質などがあり、地質環境や埋設深度、埋設する廃棄物の種類によって変動するため、モニタリング機器の検討を行う際には、これらの条件を考慮した整理が必要である。

モニタリングによって人工バリアの状態を把握する際、モニタリング機器は緩衝材やオーバーパック表面、あるいはその周囲に設置されることから、これらのモニタリング機器はオーバーパックから放出される放射線に曝されることになる。そこで、ここでは前述した条件のうち廃棄体から放出される放射線の影響に着目して検討を行う。

本報告では、返還廃棄物を含めたガラス固化体の仕様からオーバーパック表面及び緩衝材中の放射線量の解析を行うとともに、主なモニタリング機器に使用されている材質などの耐放射線性に関する文献調査などから、その影響について定性的な検討を行った。

## 2. 放射線線量に関する解析的検討

返還廃棄物を含めたガラス固化体の仕様をベースに第 2 次取りまとめで示された仕様のオーバーパックを対象とした放射線線量に関する解析を行い、オーバーパック表面、緩衝材中の線量分布を算出した。なお、緩衝材中の線量分布の解析に際しては、緩衝材の水分飽和度の影響を加味して、不飽和から飽和状態での線量分布の検討も行った。また、キャニスタの貯蔵期間については、30 年と 50 年の 2 ケースとした。

### 2.1 解析条件等

#### (1) 線源の設定及び計算モデル

ガラス固化体から放出されるガンマ線及び中性子線の線源強度については、若杉ら<sup>4)</sup>の報告書をもとに表 2.1-1～表 2.1-3 に示すとおり設定した。

オーバーパック及び緩衝材の形状寸法については、第 2 次取りまとめ分冊<sup>2)</sup>の仕様(図 2.1-1)に基づき図 2.1-2 に示す計算モデルを作成した。なお、オーバーパック中のガラス固化体は、内包しているガラスのみをモデル化し、キャニスタは保守的にモデルに含めないものとした。ガラス部分の寸法は、日本原燃株式会社の情報<sup>6)</sup>(キャニスタ外径 430mm、肉厚 5mm、固化ガラス体積 150L)を基に設定した。

評価点としては、キャニスタ軸方向または径方向に設けることが考えられるが、オーバーパック表面からの距離に対して吸収線量率が大きくなる径方向のみとした。評価点を径方向に設定することから、保守的にガラス中心はオーバーパック中心と一致させた。

#### (2) 計算コード

計算コードについては、モンテカルロ輸送計算コード MCNP5 及び当該コードに付属する断面積ライブラリを使用し、吸収線量を計算する機能である F6 タリーを用いた。

MCNP5 は、米国 Los Alamos 国立研究所で開発・メンテナンスされているコードであり、中性子とガンマ線の輸送計算を行うことができる。

MCNP5 はモンテカルロ法を用いており、線源から発生した放射線が物質との相互作用または領域の外への移行により消滅に至るまでを繰り返しシミュレーションし、評価点において到達する放射線の集計を行う。

ここで各ステップの繰り返しシミュレーションにおいては、放射線の進行方向、飛程、反応によるエネルギー変化、散乱角度、中性子の場合は 2 次ガンマ線の生成を核データに基づく確立の範囲でランダムに割り振る。

#### (3) 物質組成

計算コードに入力する物質組成を表 2.1-4～表 2.1-7 に示す。

表 2.1-4～表 2.1-7 には元素の指定のみで核種の指定が無いものがある。MCNP5 では物質組成を入力する際に、核種を指定する必要があるため、表 2.1-4～表 2.1-7 が元素指定の場合は天然同位体組成を入力する。天然同位体組成は ORIGEN2.2UPJ (J33) の崩壊デー

タライブラリを参照する。

表 2.1-1 ガンマ線線源強度

| ガンマ線エネルギー[MeV] |       |        | ガンマ線スペクトル[photon/s/本] |           |
|----------------|-------|--------|-----------------------|-----------|
| 最小             | 最大    | 平均     | 30年貯蔵                 | 50年貯蔵     |
| 0              | 0.02  | 0.01   | 1.121E+15             | 6.963E+14 |
| 0.02           | 0.03  | 0.025  | 2.282E+14             | 1.415E+14 |
| 0.03           | 0.045 | 0.0375 | 2.718E+14             | 1.680E+14 |
| 0.045          | 0.07  | 0.0575 | 2.230E+14             | 1.423E+14 |
| 0.07           | 0.1   | 0.085  | 1.248E+14             | 7.717E+13 |
| 0.1            | 0.15  | 0.125  | 8.606E+13             | 5.065E+13 |
| 0.15           | 0.3   | 0.225  | 1.046E+14             | 6.418E+13 |
| 0.3            | 0.45  | 0.375  | 4.403E+13             | 2.712E+13 |
| 0.45           | 0.7   | 0.575  | 1.932E+15             | 1.217E+15 |
| 0.7            | 1     | 0.85   | 1.446E+13             | 5.809E+12 |
| 1              | 1.5   | 1.25   | 1.056E+13             | 3.053E+12 |
| 1.5            | 2     | 1.75   | 4.238E+11             | 1.596E+11 |
| 2              | 2.5   | 2.25   | 4.355E+07             | 2.328E+07 |
| 2.5            | 3     | 2.75   | 1.567E+07             | 8.234E+06 |
| 3              | 4     | 3.5    | 1.206E+07             | 5.728E+06 |
| 4              | 6     | 5      | 5.160E+06             | 2.450E+06 |
| 6              | 8     | 7      | 5.950E+05             | 2.825E+05 |
| 8              | 11    | 9.5    | 6.836E+04             | 3.245E+04 |
| 合計             |       |        | 4.161E+15             | 2.593E+15 |

表 2.1-2 中性子線源強度（自発核分裂）

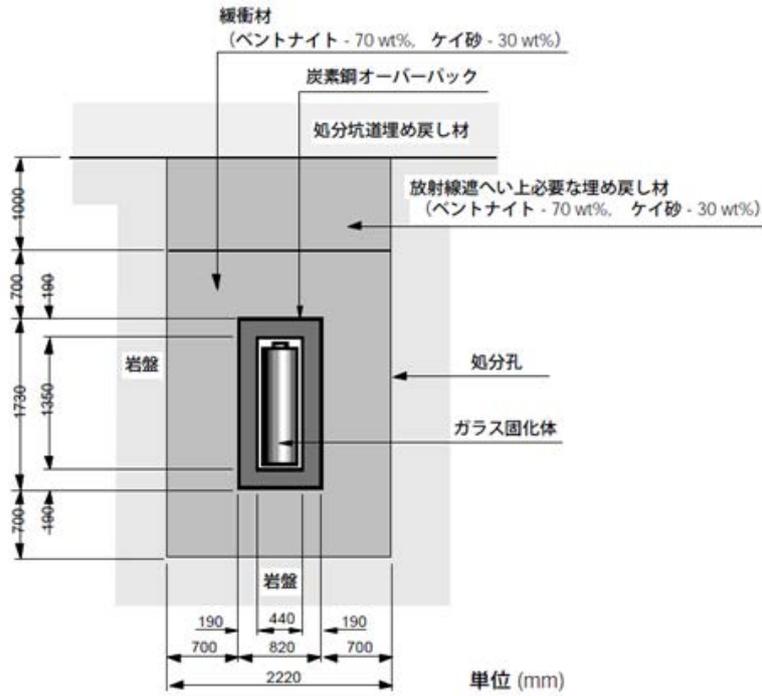
| 中性子エネルギー[MeV] |      |      | 中性子スペクトル[n/s/本] |          |
|---------------|------|------|-----------------|----------|
| 最小            | 最大   | 平均   | 30年貯蔵           | 50年貯蔵    |
| 0.3           | 0.4  | 0.35 | 4.53E+06        | 2.15E+06 |
| 0.4           | 0.6  | 0.5  | 9.39E+06        | 4.46E+06 |
| 0.6           | 0.8  | 0.7  | 9.60E+06        | 4.56E+06 |
| 0.8           | 1    | 0.9  | 8.31E+06        | 3.95E+06 |
| 1             | 1.2  | 1.1  | 8.52E+06        | 4.05E+06 |
| 1.2           | 1.4  | 1.3  | 8.40E+06        | 3.99E+06 |
| 1.4           | 1.6  | 1.5  | 7.32E+06        | 3.48E+06 |
| 1.6           | 1.8  | 1.7  | 6.57E+06        | 3.12E+06 |
| 1.8           | 2    | 1.9  | 5.94E+06        | 2.82E+06 |
| 2             | 2.2  | 2.1  | 5.40E+06        | 2.57E+06 |
| 2.2           | 2.4  | 2.3  | 4.95E+06        | 2.35E+06 |
| 2.4           | 2.6  | 2.5  | 4.74E+06        | 2.25E+06 |
| 2.6           | 2.8  | 2.7  | 3.90E+06        | 1.85E+06 |
| 2.8           | 3    | 2.9  | 3.24E+06        | 1.54E+06 |
| 3             | 3.2  | 3.1  | 3.03E+06        | 1.44E+06 |
| 3.2           | 3.4  | 3.3  | 2.91E+06        | 1.38E+06 |
| 3.4           | 3.6  | 3.5  | 2.79E+06        | 1.33E+06 |
| 3.6           | 3.8  | 3.7  | 2.25E+06        | 1.07E+06 |
| 3.8           | 4    | 3.9  | 2.37E+06        | 1.13E+06 |
| 4             | 4.4  | 4.2  | 3.12E+06        | 1.48E+06 |
| 4.4           | 4.8  | 4.6  | 2.58E+06        | 1.23E+06 |
| 4.8           | 5.2  | 5    | 1.95E+06        | 9.27E+05 |
| 5.2           | 5.6  | 5.4  | 1.50E+06        | 7.13E+05 |
| 5.6           | 6    | 5.8  | 1.20E+06        | 5.71E+05 |
| 6             | 6.4  | 6.2  | 8.85E+05        | 4.21E+05 |
| 6.4           | 6.8  | 6.6  | 6.36E+05        | 3.02E+05 |
| 6.8           | 7.2  | 7    | 4.41E+05        | 2.10E+05 |
| 7.2           | 7.6  | 7.4  | 3.36E+05        | 1.60E+05 |
| 7.6           | 8    | 7.8  | 2.70E+05        | 1.28E+05 |
| 8             | 8.8  | 8.4  | 3.03E+05        | 1.44E+05 |
| 8.8           | 9.6  | 9.2  | 8.85E+04        | 4.21E+04 |
| 9.6           | 10.4 | 10   | 9.30E+04        | 4.42E+04 |
| 10.4          | 11.2 | 10.8 | 6.15E+04        | 2.92E+04 |
| 11.2          | 12.8 | 12   | 4.20E+04        | 2.00E+04 |
| 合計            |      |      | 1.18E+08        | 5.59E+07 |

表 2.1-3 中性子線源強度 (α,n 中性子) (1/2)

| 中性子エネルギー[MeV] |      |     | 中性子スペクトル[n/s/本] |          |
|---------------|------|-----|-----------------|----------|
| 最小            | 最大   | 平均  | 30年貯蔵           | 50年貯蔵    |
| 0.05          | 0.15 | 0.1 | 3.06E+05        | 2.20E+05 |
| 0.15          | 0.25 | 0.2 | 3.79E+05        | 2.72E+05 |
| 0.25          | 0.35 | 0.3 | 4.35E+05        | 3.12E+05 |
| 0.35          | 0.45 | 0.4 | 4.78E+05        | 3.43E+05 |
| 0.45          | 0.55 | 0.5 | 5.33E+05        | 3.82E+05 |
| 0.55          | 0.65 | 0.6 | 5.82E+05        | 4.18E+05 |
| 0.65          | 0.75 | 0.7 | 6.55E+05        | 4.70E+05 |
| 0.75          | 0.85 | 0.8 | 9.31E+05        | 6.68E+05 |
| 0.85          | 0.95 | 0.9 | 1.06E+06        | 7.60E+05 |
| 0.95          | 1.05 | 1   | 1.05E+06        | 7.51E+05 |
| 1.05          | 1.15 | 1.1 | 1.07E+06        | 7.69E+05 |
| 1.15          | 1.25 | 1.2 | 1.25E+06        | 8.97E+05 |
| 1.25          | 1.35 | 1.3 | 1.15E+06        | 8.22E+05 |
| 1.35          | 1.45 | 1.4 | 1.18E+06        | 8.44E+05 |
| 1.45          | 1.55 | 1.5 | 1.27E+06        | 9.13E+05 |
| 1.55          | 1.65 | 1.6 | 1.37E+06        | 9.85E+05 |
| 1.65          | 1.75 | 1.7 | 1.50E+06        | 1.08E+06 |
| 1.75          | 1.85 | 1.8 | 1.74E+06        | 1.25E+06 |
| 1.85          | 1.95 | 1.9 | 1.90E+06        | 1.37E+06 |
| 1.95          | 2.05 | 2   | 2.10E+06        | 1.51E+06 |
| 2.05          | 2.15 | 2.1 | 2.46E+06        | 1.76E+06 |
| 2.15          | 2.25 | 2.2 | 2.71E+06        | 1.94E+06 |
| 2.25          | 2.35 | 2.3 | 3.13E+06        | 2.24E+06 |
| 2.35          | 2.45 | 2.4 | 3.58E+06        | 2.57E+06 |
| 2.45          | 2.55 | 2.5 | 4.28E+06        | 3.07E+06 |
| 2.55          | 2.65 | 2.6 | 4.74E+06        | 3.40E+06 |
| 2.65          | 2.75 | 2.7 | 5.20E+06        | 3.73E+06 |
| 2.75          | 2.85 | 2.8 | 5.68E+06        | 4.08E+06 |
| 2.85          | 2.95 | 2.9 | 5.85E+06        | 4.20E+06 |
| 2.95          | 3.05 | 3   | 5.94E+06        | 4.26E+06 |

表 2.1-3 中性子線源強度 (α,n 中性子) (2/2)

| 中性子エネルギー[MeV] |      |     | 中性子スペクトル[n/s/本] |          |
|---------------|------|-----|-----------------|----------|
| 最小            | 最大   | 平均  | 30年貯蔵           | 50年貯蔵    |
| 3.05          | 3.15 | 3.1 | 5.67E+06        | 4.07E+06 |
| 3.15          | 3.25 | 3.2 | 5.60E+06        | 4.01E+06 |
| 3.25          | 3.35 | 3.3 | 5.20E+06        | 3.73E+06 |
| 3.35          | 3.45 | 3.4 | 5.00E+06        | 3.59E+06 |
| 3.45          | 3.55 | 3.5 | 4.59E+06        | 3.29E+06 |
| 3.55          | 3.65 | 3.6 | 4.21E+06        | 3.02E+06 |
| 3.65          | 3.75 | 3.7 | 3.87E+06        | 2.78E+06 |
| 3.75          | 3.85 | 3.8 | 3.38E+06        | 2.42E+06 |
| 3.85          | 3.95 | 3.9 | 3.13E+06        | 2.24E+06 |
| 3.95          | 4.05 | 4   | 2.77E+06        | 1.99E+06 |
| 4.05          | 4.15 | 4.1 | 2.46E+06        | 1.76E+06 |
| 4.15          | 4.25 | 4.2 | 2.27E+06        | 1.63E+06 |
| 4.25          | 4.35 | 4.3 | 1.97E+06        | 1.41E+06 |
| 4.35          | 4.45 | 4.4 | 1.85E+06        | 1.33E+06 |
| 4.45          | 4.55 | 4.5 | 1.75E+06        | 1.26E+06 |
| 4.55          | 4.65 | 4.6 | 1.59E+06        | 1.14E+06 |
| 4.65          | 4.75 | 4.7 | 1.47E+06        | 1.06E+06 |
| 4.75          | 4.85 | 4.8 | 1.34E+06        | 9.58E+05 |
| 4.85          | 4.95 | 4.9 | 1.00E+06        | 7.21E+05 |
| 4.95          | 5.05 | 5   | 7.47E+05        | 5.36E+05 |
| 5.05          | 5.15 | 5.1 | 5.70E+05        | 4.09E+05 |
| 5.15          | 5.25 | 5.2 | 4.35E+05        | 3.12E+05 |
| 5.25          | 5.35 | 5.3 | 1.90E+05        | 1.37E+05 |
| 5.35          | 5.45 | 5.4 | 1.10E+05        | 7.91E+04 |
| 5.45          | 5.55 | 5.5 | 7.96E+04        | 5.71E+04 |
| 5.55          | 5.65 | 5.6 | 6.74E+04        | 4.84E+04 |
| 5.65          | 5.75 | 5.7 | 6.12E+04        | 4.39E+04 |
| 5.75          | 5.85 | 5.8 | 3.68E+04        | 2.64E+04 |
| 5.85          | 5.95 | 5.9 | 3.06E+04        | 2.20E+04 |
| 5.95          | 6.05 | 6   | 3.06E+04        | 2.20E+04 |
| 6.05          | 6.15 | 6.1 | 2.44E+04        | 1.75E+04 |
| 合計            |      |     | 1.26E+08        | 9.04E+07 |



処分孔縦置き方式の仕様 (硬岩系岩盤 / 軟岩系岩盤)

図 2.1-1 第2次取りまとめ仕様 (処分孔縦置き)

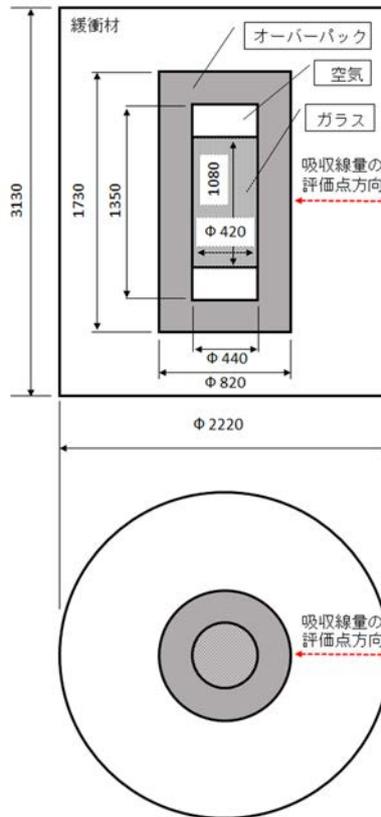


図 2.1-2 計算モデル

表 2.1-4 物質組成 (ガラス)

| 元素または核種   | 密度[g/cc]  |
|---|-----------|
| Li-6  | 2.808E-03 |
| Li-7  | 3.468E-02 |
| B-10  | 2.343E-02 |
| B-11  | 9.425E-02 |
| O   | 1.305E+00 |
| Na  | 2.025E-01 |
| Al  | 7.226E-02 |
| Si  | 5.963E-01 |
| Ca  | 5.801E-02 |
| Zr  | 5.330E-02 |
| Mo  | 8.453E-02 |
| Pd  | 1.773E-02 |
| Cs  | 2.049E-02 |
| Ba  | 3.448E-02 |
| 合計  | 2.600E+00 |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>・ NUMO 包括的技術報告書<sup>7)</sup> を基に設定。</li> <li>・ 質量数の指定の無い元素は天然核種組成とする。</li> </ul> |           |

表 2.1-5 物質組成 (空気)

| 元素または核種   | 密度[g/cc]  |
|---|-----------|
| H   | 1.205E-08 |
| C   | 1.566E-07 |
| N-14  | 9.180E-04 |
| N-15  | 3.410E-06 |
| O   | 2.834E-04 |
| 合計  | 1.205E-03 |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>・ NUMO 包括的技術報告書<sup>7)</sup> を基に設定。</li> </ul> |           |

表 2.1-6 物質組成 (オーバーパック)

| 元素または核種                              | 密度[g/cc]  |
|--------------------------------------|-----------|
| Fe-54                                | 4.516E-01 |
| Fe-56                                | 7.021E+00 |
| Fe-57                                | 1.608E-01 |
| Fe-58                                | 2.145E-02 |
| C                                    | 2.730E-02 |
| Si                                   | 2.730E-02 |
| Mn                                   | 8.580E-02 |
| P                                    | 2.340E-03 |
| S                                    | 2.340E-03 |
| 合計                                   | 7.800E+00 |
| ・ NUMO 包括的技術報告書 <sup>7)</sup> を基に設定。 |           |

表 2.1-7 物質組成 (緩衝材)

| 元素または核種  | 密度[g/cc]  |           |           |
|--|-----------|-----------|-----------|
|  | 飽和度 40%   | 飽和度 70%   | 飽和度 100%  |
| H  | 2.176E-02 | 3.526E-02 | 4.877E-02 |
| C  | 6.758E-03 | 6.758E-03 | 6.758E-03 |
| O  | 9.752E-01 | 1.082E+00 | 1.190E+00 |
| Na   | 2.137E-02 | 2.137E-02 | 2.137E-02 |
| Mg   | 1.534E-02 | 1.534E-02 | 1.534E-02 |
| Al   | 8.219E-02 | 8.219E-02 | 8.219E-02 |
| Si   | 5.963E-01 | 5.963E-01 | 5.963E-01 |
| S  | 3.264E-03 | 3.264E-03 | 3.264E-03 |
| K  | 3.083E-03 | 3.083E-03 | 3.083E-03 |
| Ca   | 1.850E-02 | 1.850E-02 | 1.850E-02 |
| Fe   | 1.715E-02 | 1.715E-02 | 1.715E-02 |
| 合計   | 1.761E+00 | 1.882E+00 | 2.002E+00 |
| ・ TRU 廃棄物処分技術検討書 <sup>8)</sup> を基に設定。<br>・ 真密度 (体積割合 100%) 2.68Mg/m <sup>3</sup> のクニゲル VI+ケイ砂に対し、第 2 次取りまとめ <sup>5)</sup> における飽和膨潤時の乾燥密度 1.6 Mg/m <sup>3</sup> となる間隙率は約 40.3%になる。これに対し、飽和度 40、70、100%として組成を決定した。 |           |           |           |

## 2.2 計算結果

計算により求めたオーバーパック表面からの距離に対する吸収線量 (緩衝材相当) を表 2.2-1 及び図 2.2-1 に示す。吸収線量は、キャニスタの貯蔵期間 30 年に比して 50 年の方が約 50%減衰する。表より、緩衝材中 5cm の位置で 52.3 Gy/year となる。

吸収線量の線質内訳を図 2.2-2 に示す。本計算では線源としてガンマ線、中性子線を考慮しているため、線質として、1 次ガンマ線、中性子線及び 2 次ガンマ線<sup>(\*)</sup> が考えられる。オーバーパ

(\*) 中性子が原子核に捕獲されたときに生成するガンマ線

ック表面付近では1次ガンマ線の影響が支配的であるものの、表面から離れるにつれて2次ガンマの寄与割合が大きくなる。自発核分裂中性子(SF)及び(α,n)中性子は、ほぼ同じ傾向を示している。

オーバーパック表面については、例えば図 2.2-1 の貯蔵期間 30 年、緩衝材飽和度 40%の結果を外挿すると、オーバーパック表面からの距離が 0cm 付近で 100 Gy/year 程度となる。

表 2.2-1 吸収線量[Gy/year]

| OP 表面からの距離 |         | 5 cm    | 15 cm   | 25 cm   | 35 cm   | 45 cm   | 55 cm   | 65 cm   |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 緩衝材飽和度[%]  | 貯蔵期間[年] |         |         |         |         |         |         |         |
| 40         | 30      | 5.23E+1 | 1.61E+1 | 4.95E+0 | 1.59E+0 | 5.46E-1 | 2.01E-1 | 7.66E-2 |
| 40         | 50      | 2.83E+1 | 8.52E+0 | 2.53E+0 | 7.89E-1 | 2.67E-1 | 9.79E-2 | 3.86E-2 |
| 70         | 30      | 5.05E+1 | 1.44E+1 | 4.09E+0 | 1.22E+0 | 3.94E-1 | 1.39E-1 | 5.18E-2 |
| 70         | 50      | 2.74E+1 | 7.55E+0 | 2.06E+0 | 5.92E-1 | 1.87E-1 | 6.55E-2 | 2.49E-2 |
| 100        | 30      | 4.90E+1 | 1.29E+1 | 3.38E+0 | 9.48E-1 | 2.96E-1 | 1.03E-1 | 3.85E-2 |
| 100        | 50      | 2.66E+1 | 6.70E+0 | 1.68E+0 | 4.53E-1 | 1.38E-1 | 4.79E-2 | 1.82E-2 |

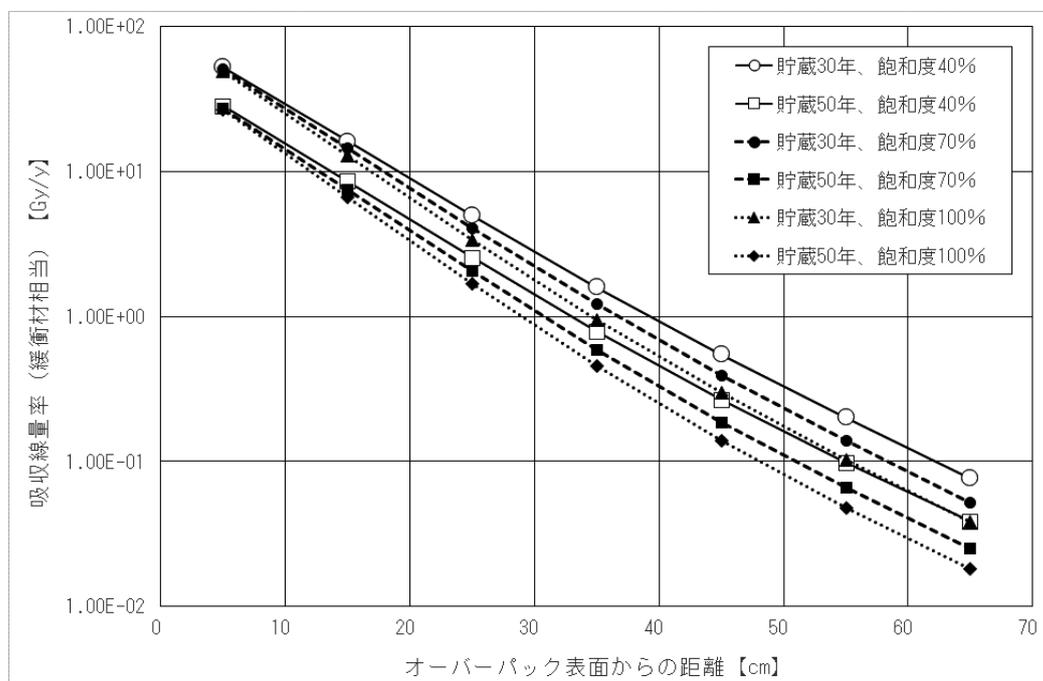


図 2.2-1 吸収線量[Gy/year]

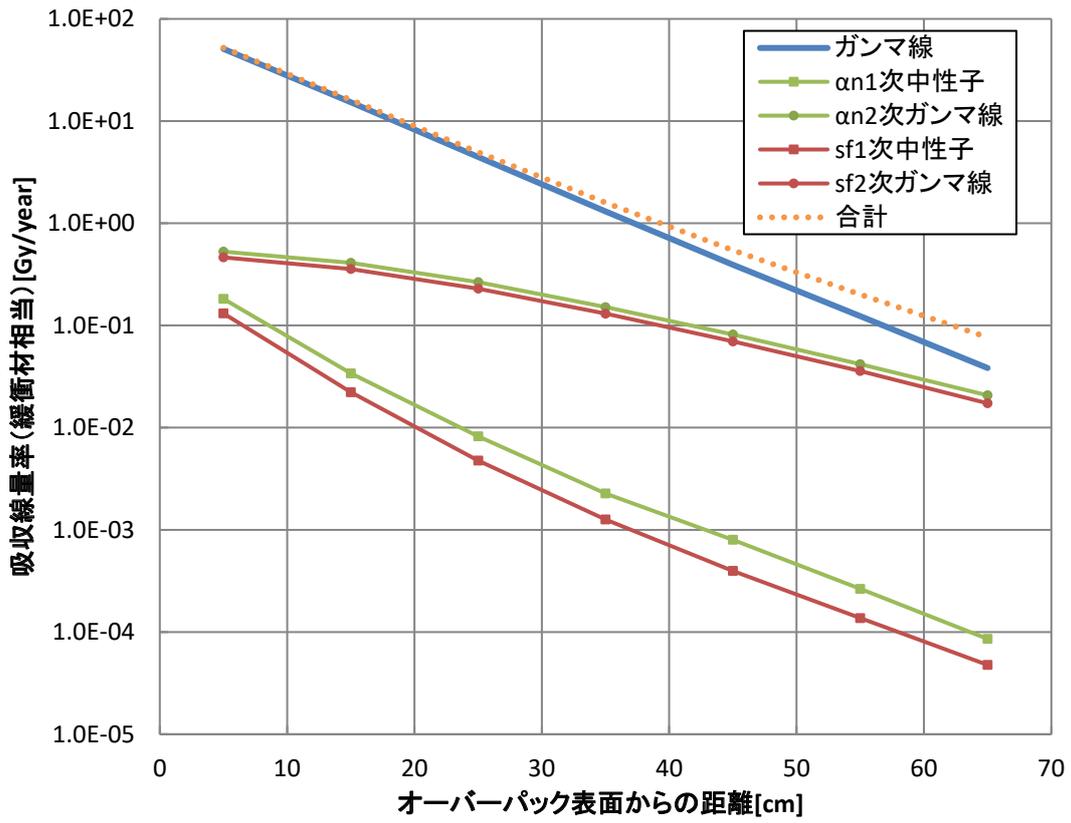


図 2.2-2 吸収線量の線質内訳（貯蔵期間 30 年、飽和度 40%のケース）

### 3. モニタリング機器への概略影響評価

#### 3.1 調査対象モニタリング機器

調査対象とするモニタリング機器としては、幌延地下研究施設の深度 350m 調査坑道において実施している人工バリア性能確認試験の試験孔内に設置されている計測機器をひとつの事例として検討した。人工バリア性能確認試験の試験孔内に設置されるモニタリング機器の仕様・数量をまとめて表 3.1-1 に示す。

モニタリング機器への放射線影響評価の検討においては、これら機器で使用されている材料や電子機器などに対する情報を収集し、それらの材料の耐放射線性の観点から検討を行った。

また、これらの材料の耐放射線性に関する情報を得るための参考とした資料は、以下のとおりである。

- ①アイソトープ便覧改訂 3 版<sup>9)</sup>：アイソトープ・放射線関連の基礎的情報からその応用まで広く収集まとめられ、原子力技術者の参考書の書籍。
- ②高分子系材料の耐放射線特性とデータ集<sup>10)</sup>：日本原子力研究所(現日本原子力研究開発機構)により、各種高分子系材料の耐放射線特性について、国内外で刊行された報告書の収録データをまとめた文献。放射線の影響を受けやすく、また計測機器に使用されていることが多い高分子系材料の影響評価に対する有効な資料となる。
- ③High Gamma-rays Irradiation Tests of Critical Components for ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) in Vessel Remote Handling System (JAERI-Tech 99-003)<sup>11)</sup> (日本語タイトル：ITER (国際熱核融合実験炉) 用炉内遠隔保守装置を構成する主要機器・部品の高ガンマ線照射試験)：耐放射線機器に対するガンマ線照射試験を実施し、高ガンマ線照射下での使用可能性について評価した文献。電子部品 (CCD カメラ等) が用いられた機器に対する試験データが掲載されており、①や②の資料に記載の無い、電子部品等の影響評価に対する有効な資料となる。

表 3.1-1 人工バリア性能確認試験の試験孔内に設置されている計測機器の仕様

| 計測機器                | 仕様  | 設置数量   |
|---------------------|---|--|
| (1)土圧計<br>(振動弦式)    | 2MPa, Geokon 社製<br>Model 4800, φ 150mm                                      | 13 個   |
| (2)間隙水圧計<br>(振動弦式)  | 700kPa, Geokon 社製<br>Model 4500S  | 16 個   |
| (3)変位計<br>(振動弦式)    | Geokon 社製 A-5 Type1,2<br>変位計 : 4450-1-100<br>レンジ : ±50mm<br>精度 : ±0.05mm    | 2 式<br>(8 個)   |
| (4)湿度計              | Rotronic 社製<br>型式 : HC2-IE105<br>測定相対湿度 : 0~100%R.H.<br>精度 : ±0.8%R.H (25℃) | 6 個  |
| (5)サイクロメータ          | Wescor 社製 PST-55  | 9 個  |
| (6)pH 計             | 光ファイバー式 pH 計、ダイヤコン<br>サルタント社製、平成 25 年度型                                     | 9 個  |
| (7)水分計<br>(FDR-V)   | FDR-V (温度補償型)、安藤・間<br>社製  | 6 個  |
| (8)温度計<br>(熱電対)     | シース熱電対 T タイプ(クラス 2)、<br>-40℃以上 133℃未満、測定精度<br>±1℃、東京測器研究所社製                 | 22 個   |
| (9)白金電極             | 白金メッキ Ti 電極、アート科学社<br>製 ART-1310-13-00                                      | 9 個  |
| (10)炭素鋼電極           | 腐食センサー、アート科学社製<br>ART-14-0.4  | 12 個   |
| (11)比抵抗トモグラフィ用の電極   | 比抵抗トモグラフィ(電極タイプ)、<br>安藤・間社製   | ・緩衝材ブロックと岩盤の隙間のケイ<br>砂中に中心角 5 度間隔で設置 : 72ch<br>・緩衝材ブロックと岩盤の隙間のケイ<br>砂中に 11cm 間隔で設置 : 190ch |
| (12)緩衝材膨出計<br>測センサー | 共和電業社製 P13-3633、光ファ<br>イバー式   | 1 式  |

### 3.2 各モニタリング機器の材料調査

モニタリング機器に使用されている材料（金属系は除く）については、メーカーカタログやホームページ公開情報及びメーカーへの聞き取りにより調査した。なお、ノウハウ部分や海外製品で詳細な材質が分からないものもあり、その場合は不明または想定可能なものはカタログ等の情報から想定した。以下にモニタリング機器の材料調査の結果を示す。

#### (1) 土圧計（振動弦式）

土圧計の仕様を表 3.2-1 に、外観写真を図 3.2-1 に示す。Geokon 社ホームページより資料を入手するとともに、日本代理店への聞き取り調査を実施し、使用材料に関する情報を得た（他の Geokon 社センサーについても同様）。調査により分かった使用材料を以下に示す。

- ・ Cell 本体 : SUS316
- ・ Cell 内部 : 油（材質不明）が充填されている。
- ・ トランスデューサ : 金属ハウジング、内部は不明（電氣的構造と想定する。）
- ・ ケーブル被覆 : PVC（ポリ塩化ビニル）

表 3.2-1 土圧計仕様

| 項目      | 仕様           |
|---------|--------------|
| メーカー    | Geokon       |
| 型式      | 4800-1X-2MPa |
| レンジ     | 2MPa         |
| 精度      | ±0.1%F.S.    |
| 形状(L×D) | 350×150mm    |
| 材質      | SUS          |
| 温度範囲    | -20～80℃      |



図 3.2-1 土圧計（振動弦式）の外観写真

(2) 間隙水圧計（振動弦式）

間隙水圧計の仕様を表 3.2-2 に、外観写真を図 3.2-2 に示す。Geokon 社ホームページより資料を入手するとともに、日本代理店への聞き取り調査を実施し、使用材料に関する情報を得た。調査により分かった使用材料を以下に示す。

- ・センサー本体：SUS
- ・センサー内部：
  - Filter、Filter Housing：金属製
  - Oリング：ニトリルゴム
  - Bulkhead Seal：エポキシ系を想定
  - Waterproof Epoxy：エポキシ樹脂（充填）
 その他内部にサーミスタ、ダイヤフラム、コイル、振動ワイヤを収納
- ・ケーブル被覆：PVC（ポリ塩化ビニル）

表 3.2-2 間隙水圧計仕様

| 項目      | 仕様           |
|---------|--------------|
| メーカー    | Geokon       |
| 型式      | 4500S-700kPa |
| レンジ     | 700kPa       |
| 精度      | ±0.1%F.S.    |
| 形状(L×D) | 133×19.1mm   |
| 材質      | SUS          |
| 温度範囲    | -20～80℃      |



図 3.2-2 間隙水圧計（振動弦式）の外観写真

(3) 変位計（振動弦式）

変位計の仕様を表 3.2-3 に、外観写真を図 3.2-3 に示す。Geokon 社ホームページより資料を入手するとともに、日本代理店への聞き取り調査を実施し、使用材料に関する情報を得た。調査により分かった使用材料を以下に示す。

- ・変位計本体 : 金属ケーシング
- ・変位計本体 : トランスデューサー、金属ワイヤ
- ・計測ロッド : 金属ケース、金属ワイヤと推定
- ・アンカー : 強化プラスチック、銅、ナイロン
- ・ケーブル被覆 : PVC (ポリ塩化ビニル) 同等と推定

表 3.2-3 変位計仕様

| 項目              | 仕様         |           |
|-----------------|------------|-----------|
| メーカー            | Geokon     |           |
| 型式              | A-5        |           |
| タイプ             | Type1      | Type2     |
| 変位計の型式          | 4450-1-100 |           |
| 変位計の数量          | 5          | 1         |
| レンジ             | ±50mm      |           |
| 精度              | ±0.05mm    |           |
| アンカーの種類（最大印加圧力） | 油圧膨張(9MPa) |           |
| 形状(L×D)         | 350×88.9mm | 70×88.9mm |
| 材質              | SUS        |           |
| 耐水圧             | 1.72MPa    |           |
| 温度範囲            | -20～80℃    |           |



図 3.2-3 変位計（振動弦式）の外観写真

(4) 湿度計

湿度計の仕様を表 3.2-4 に、外観写真を図 3.2-4 に示す。湿度計を販売している Rotronic 社ホームページより資料を入手し使用材料に関する情報を得た。調査により分かった使用材料を以下に示す。

- ・湿度計本体 : SUS303
- ・湿度計内部 : 基盤、IC チップ
- ・フィルタ : テフロン
- ・ケーブル被覆 : ポリウレタン

表 3.2-4 湿度計仕様

| 項目     | 仕様            |
|--------|---------------|
| メーカー   | Rotronic      |
| 型式     | HC2-IE105     |
| 使用温度   | -100～200℃     |
| 耐圧     | 5MPa          |
| 測定相対湿度 | 0～100%R.H.    |
| 精度     | 25℃ : ±0.8%RH |
| 長期安定性  | <1%R.H/年      |
| アナログ出力 | 電流出力(4～20mA)  |



図 3.2-4 湿度計の外観写真

(5) サイクロメータ

サイクロメータの仕様を表 3.2-5 に、外観写真を図 3.2-5 に示す。サイクロメータを販売する Wescor 社ホームページより資料を入手し使用材料に関する情報を得た。調査により分かった使用材料を次に示す。

- ・湿度計本体：SUS316（内部は熱電対のようなもの）
- ・湿度計内部：
  - 充填材                               ：エポキシ樹脂
  - O リング                               ：ニトリルゴム
  - ケーブルと本体接続：スウェージロック・タイプ（金属）
  - 配線                                       ：塩ビ被膜

表 3.2-5 サイクロメータ仕様

| 項目    | 仕様         |
|-------|------------|
| メーカー  | Wescor     |
| 型式    | PST-55     |
| 使用温度  | -25～70℃    |
| 耐圧    | 最大 5MPa    |
| 測定範囲  | -0.05～8MPa |
| 精度    | ±0.03MPa   |
| 長期安定性 | <1%R.H/年   |



図 3.2-5 サイクロメータの外観写真

(6) pH計

pH計の仕様を表 3.2-6 に、外観写真を図 3.2-6 に示す。pH計を販売する Ocean Insight 社ホームページより資料を入手するとともに、ダイヤコンサルタントに聞き取り調査を実施し、使用材料に関する情報を得た。調査により分かった使用材料を以下に示す。

- ・プローブ本体・外形：トーロン（ポリアミドイミド）
- ・光ファイバー：石英と想定
- ・ケーブル被覆：PVC ファイバジャケット、PEEK ポリマースリーブと推定
- ・指示薬染料：親水性ポリマー（ブロモクレゾールグリーン）

表 3.2-6 pH計仕様

| 項目         | 仕様                                     |
|------------|--|
| メーカー（カスタム） | Ocean Insight（ダイヤコンサルタント）              |
| 型式（カスタム後）  | RFP200-UV-VIS（DOP-SGTF-BCG-2014）       |
| レンジ        | 5～9                                    |
| 使用温度範囲     | -5～70℃                                 |
| 精度         | ±0.3（pH 5.0）～±0.1（pH 7.0）～±0.3（pH 9.0） |



図 3.2-6 pH計の外観写真

(7) 水分計（FDR-V）

水分計（FDR-V）の仕様を表 3.2-7 に、外観写真を図 3.2-7 に示す。メーカーホームページ等を調査したが使用材料に関する情報が無かったため現物から次のように推定した。

- ・本体：不明
- ・シールド：SUS
- ・ケーブル被覆：PVC（ポリ塩化ビニル）同等と推定

表 3.2-7 水分計（FDR-V）仕様

| 項目      | 仕様           |
|---------|--------------|
| メーカー    | 安藤・間         |
| 型式      | FDR-V-double |
| レンジ     | 0～100%R.H.   |
| 形状(L×D) | 200×60mm     |
| 材質      | SUS          |
| 温度範囲    | 最大 90℃       |



図 3.2-7 水分計 (FDR-V) の外観写真

(8) 温度計 (熱電対)

温度計の仕様を表 3.2-8 に、外観写真を図 3.2-8 に示す。メーカーカタログ集やホームページ等を調査したが、新たな使用材料に関する情報が無かったため現物から次のように推定した。

- ・ 熱電対本体及び補償導線 : SUS、酸化マグネシウム充填材、  
熱電対素線 (銅、銅ニッケル合金)
- ・ 補償導線被膜 : PVC、テフロンを想定 (写真朱色)

表 3.2-8 温度計 (熱電対) 仕様

| 項目    | 仕様                   |
|-------|----------------------|
| メーカー  | 東京測器                 |
| 型式    | シース熱電対 T タイプ (クラス 2) |
| レンジ   | -40~+133℃            |
| 精度    | ±1.0℃                |
| 形状(D) | 6.4mm                |
| 材質    | SUS (保護管)            |



図 3.2-8 温度計 (熱電対) の外観写真

(9) 白金電極

白金電極の仕様を表 3.2-9 に、外観写真を図 3.2-9 に示す。メーカーカタログ集等を調査したが、新たな使用材料に関する情報が無かったため現物から次のように推定した。

- ・センサー部：不明（白金、金属ケース、セラミックスと推定）
- ・ケーブル被覆：テフロン

表 3.2-9 白金電極仕様

| 項目      | 仕様             |
|---------|----------------|
| メーカー    | アート科学          |
| 型式      | ART-1310-13-00 |
| 形状(D×L) | 14×15mm        |
| 材質      | テフロン（ケーブル被覆）   |



図 3.2-9 白金電極の外観写真

(10) 炭素鋼電極

炭素鋼電極の仕様を表 3.2-10 に、外観写真を図 3.2-10 に示す。メーカーカタログ集等を調査したが、新たな使用材料に関する情報が無かったため現物から次のように推定した。

- ・センサー部：不明（炭素鋼、金属ケース、セラミックスと推定）
- ・ケーブル被覆：テフロン

表 3.2-10 炭素鋼電極仕様

| 項目      | 仕様           |
|---------|--------------|
| メーカー    | アート科学        |
| 型式      | ART-14-0.4   |
| 形状(D×L) | 25.4×36mm    |
| 材質      | テフロン（ケーブル被覆） |



図 3.2-10 炭素鋼電極の外観写真

(11) 比抵抗トモグラフィ用の電極

比抵抗トモグラフィ用の電極仕様を表 3.2-11 に、外観写真を図 3.2-11 に示す。メーカーホームページ等を調査したが、使用材料に関する情報が無かったため現物から次のように推定した。

- ・電極本体 : 不明
- ・ケーブル被覆 : PVC (ポリ塩化ビニル) 同等と推定

表 3.2-11 比抵抗トモグラフィ用の電極仕様

| 項目             | 仕様        |
|----------------|-----------|
| メーカー           | 安藤・間      |
| 型式             | (電極式ケーブル) |
| 形状 (電極 D×電極 L) | 26×30mm   |
| 温度範囲           | 0～70℃     |
| 耐圧             | 4MPa      |



図 3.2-11 比抵抗トモグラフィ用の電極の外観写真

(12) 緩衝材膨出計測センサー

緩衝材膨出計測センサーの仕様を表 3.2-12 に、外観写真を図 3.2-12 に示す。メーカーホームページ等を調査したが、使用材料に関する情報が無かったため現物から次のように推定した。

- ・センサー : 光ファイバー (石英と想定)
- ・ファイバー被覆 : アクリル、ウレタン、エポキシ系樹脂と推定

表 3.2-12 緩衝材膨出計測センサー仕様

| 項目    | 仕様       |
|-------|----------|
| メーカー  | 共和電業     |
| 型式    | P13-3633 |
| センサー部 | 光ファイバー   |

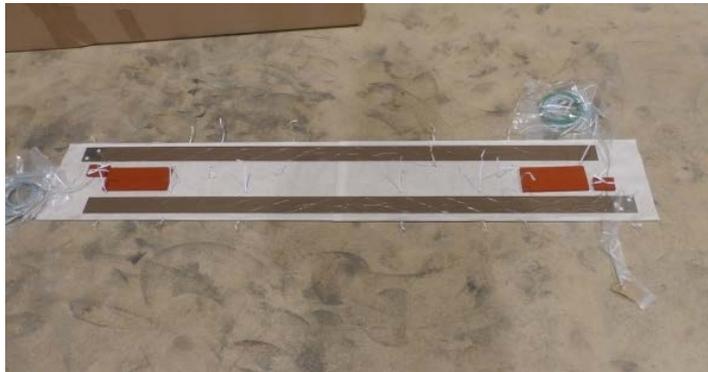


図 3.2-12 緩衝材膨出計測センサーの外観写真

3.3 モニタリング機器に使用されている材料のまとめ

モニタリング機器に使用されている材料のまとめを表 3.3-1 に示す。

表 3.3-1 計測機器に使用されている材質のまとめ (1/2)

| 計測機器    | 部位                     | 材質                              |
|---------|------------------------|---------------------------------|
| 土圧計     | Cell 本体                | SUS316                          |
|         | Cell 内部                | 油充填                             |
|         | トランスデューサ               | 金属製ハウジング、内部は不明                  |
|         | ケーブル被覆                 | PVC                             |
| 間隙水圧計   | Filter, Filter Housing | 金属製                             |
|         | O リング                  | NBR                             |
|         | Bulkhead Seal          | エポキシ系と推定                        |
|         | Waterproof Epoxy       | エポキシ樹脂 (充填)                     |
|         | 水圧計内部計器類               | 不明 (サーミスタ、ダイヤフラム、コイル、振動ワイヤ等を収納) |
|         | ケーブル被覆                 | PVC                             |
| 変位計     | アンカー                   | 強化プラスチック、銅、ナイロン                 |
|         | 計測ロッド                  | 金属ケース、金属ワイヤ                     |
|         | 変位計                    | 不明 (トランスデューサー、金属ワイヤ、金属ケース等と推定)  |
|         | ケーブル被覆                 | PVC と推定                         |
| 湿度計     | 本体ケーシング                | SUS303                          |
|         | 内部集積回路                 | 不明 (基盤、IC チップ等)                 |
|         | フィルタ                   | テフロン                            |
|         | ケーブル被覆                 | ポリウレタン                          |
| サイクロメータ | 本体ケーシング                | SUS316                          |
|         | 本体内部                   | エポキシ樹脂充填                        |
|         | 本体内部シール材 (O リング)       | ニトリルゴム                          |
|         | 内部回路                   | 不明 (配線塩ビ被膜等)                    |

表 3.3-1 計測機器に使用されている材質のまとめ (2/2)

| 計測機器          | 部位        | 材質                                 |
|---------------|-----------|------------------------------------|
| pH 計          | 光ファイバー    | 石英と推定                              |
|               | 本体・ボディ・外形 | トーロン (ポリアミドイミド)                    |
|               | 指示薬染料     | 親水性ポリマー (プロモクレゾールグリーン)             |
|               | ケーブル被覆    | PVC ファイバジャケット、PEEK ポリマースリーブと推定     |
| 水分計           | 本体        | 不明                                 |
|               | シールド      | SUS                                |
|               | ケーブル被覆    | PVC と推定                            |
| 温度計 (熱電対)     | 本体        | SUS、酸化マグネシウム充填材及び熱電対素線 (銅、銅ニッケル合金) |
|               | 補償導線      | PVC、テフロンと推定                        |
| 白金電極          | センサー部     | 不明 (白金、金属ケース、セラミックスと推定)            |
|               | ケーブル被覆    | テフロン                               |
| 炭素鋼電極         | センサー部     | 不明 (炭素鋼、金属ケース、セラミックスと推定)           |
|               | ケーブル被覆    | テフロン                               |
| 比抵抗トモグラフィ用の電極 | 本体        | 不明                                 |
|               | ケーブル被覆    | PVC と推定                            |
| 緩衝材膨出計測センサー   | センサー本体    | 不明 (光ファイバー石英と推定)                   |
|               | ファイバー被膜   | エポキシ系と推定                           |

### 3.4 材料に対する線量の影響

計測機器への放射線影響については、文献をもとに各種計測機器を構成する材料の耐放射線性を推定した。具体的には、有機材料については、アイソトープ便覧<sup>9)</sup>及び高分子系材料の耐放射線特性とデータ集より推定するとともに、無機材料に対する放射線影響は無視できるため検討対象外とした。半導体を含むまたは含む可能性がある測定器の耐放射線性については、日本原子力研究所の技術資料<sup>11)</sup>に掲載されている標準タイプの CCD カメラの試験結果を参考に 1kGy とした。モニタリング機器に使用されている材料に対する耐放射線性の結果を表 3.4-1 に示す。

一方、吸収線量については、表 2.2-1 の 30 年後飽和度 40%、OP 表面からの距離 5cm のデータから 52.3Gy/year 程度であり、当該吸収線量と上記で整理した耐放射線性とを比較した結果、モニタリング機器の使用寿命に影響を及ぼす線量では無いことが推定された。

表 3.4-1 各計測器の耐放射線性 (1/4)

| 計測機器  | 部位                        | 材質                                      | 耐放射線性  | 備考   |
|-------|---------------------------|---|--------|--|
| 土圧計   | Cell 本体                   | SUS316                                  | —      |  |
|       | Cell 内部                   | 油充填                                     | 6MGy   | JAERI-Tech 99-003<br>減速機標準グリース             |
|       | トランスデュース                  | 金属製ハウジング、<br>内部は不明                      | 1kGy   | JAERI-Tech 99-003<br>標準タイプ CCD カメラ         |
|       | ケーブル被覆                    | PVC                                     | 0.1MGy | アイソトープ便覧<br>図 11・34：ポリ塩化ビニル                |
| 間隙水圧計 | Filter,<br>Filter Housing | 金属製                                     | —      |  |
|       | O リング                     | NBR                                     | 10kGy  | アイソトープ便覧<br>図 11・34：ニトリルゴム                 |
|       | Bulkhead Seal             | エポキシ系と推定                                | 1MGy   | JAERI-Data/Code 2003-015                   |
|       | Waterproof<br>Epoxy       | エポキシ樹脂 (充填)                             | 1MGy   | データシート No EPO-1～11 より<br>少なくとも 1MGy はあると推定 |
|       | 水圧計内部計器類                  | 不明 (サーミスタ、ダイヤフラ<br>ム、コイル、振動ワイヤ等を収<br>納) | 1kGy   | JAERI-Tech 99-003<br>標準タイプ CCD カメラ         |
|       | ケーブル被覆                    | PVC                                     | 0.1MGy | アイソトープ便覧<br>図 11・34：ポリ塩化ビニル                |

表 3.4-1 各計測器の耐放射線性 (2/4)

| 計測機器 | 部位   | 材質           | 耐放射線性  | 備考                                       |
|------|--|--------------|--------|--|
| 変位計  | アンカー   | 強化プラスチック     | 0.1MGy | PVCと同等と推定<br>アイソトープ便覧<br>図 11・34：ポリアミド   |
|      |  | 銅            | —      |  |
|      | 計測ロッド<br>変位計（トランス<br>デューサ他）<br>ケーブル被覆<br>本体ケーシング<br>内部集積回路<br>フィルタ<br>ケーブル被覆 | ナイロン         | 10kGy  | JAERI-Data/Code 2003-015<br>図 5-2：ナイロン   |
|      |  | 金属           | —      |  |
|      |  | 不明           | 1kGy   | JAERI-Tech 99-003<br>標準タイプ CCD カメラ       |
|      |  | PVCと推定       | 0.1MGy | アイソトープ便覧<br>図 11・34：ポリ塩化ビニル              |
|      |  | SUS303       | —      |  |
| 湿度計  | 内部集積回路   | 不明（基盤、ICチップ） | 1kGy   | JAERI-Tech 99-003<br>標準タイプ CCD カメラ       |
|      |  | テフロン         | 2kGy   | JAERI-Data/Code 2003-015<br>図 5-1：テフロン   |
|      | ケーブル被覆   | ポリウレタン       | 0.1MGy | JAERI-Data/Code 2003-015<br>図 5-1：ウレタンゴム |
|      |  |              |        |  |

表 3.4-1 各計測器の耐放射線性 (3/4)

| 計測機器    | 部位                  | 材質                                 | 耐放射線性  | 備考   |
|---------|---------------------|------------------------------------|--------|--|
| サイクロメータ | 本体ケーシング             | SUS316                             | —      |  |
|         | 本体内部                | エポキシ樹脂充填                           | 1MGy   | JAERI-Data/Code 2003-015<br>データシート No EPO-1~11 より<br>少なくとも 1MGy はあると推定 |
|         | 本体内部シールド材<br>(Oリング) | ニトリルゴム                             | 10kGy  | アイソトープ便覧<br>図 11・34  |
|         | 内部回路                | 不明                                 | 1kGy   | JAERI-Tech 99-003<br>標準タイプ CCD カメラ                                     |
|         | 光ファイバー              | 石英と想定                              | —      |  |
|         | 本体・ボデイ・外形           | トーロン (ポリアミドイミド)                    | 0.1MGy | JAERI-Data/Code 2003-015<br>図 5-1 : ポリイミド                              |
|         | 指示薬染料               | 親水性ポリマー (プロモクレンジー<br>ルグリーン)        | 不明     |  |
| pH 計    | ケーブル被覆              | PVC ファイバージャケット、PEEK<br>ポリマースリーブと推定 | 0.1MGy | アイソトープ便覧<br>図 11・34 : ポリアミド  |
|         | 本体                  | 不明                                 | 1kGy   | JAERI-Tech 99-003<br>標準タイプ CCD カメラ                                     |
|         | シールド                | SUS                                | —      |  |
| 水分計     | ケーブル被覆              | PVC と推定                            | 0.1MGy | アイソトープ便覧<br>図 11・34 : ポリ塩化ビニル  |

表 3.4-1 各計測器の耐放射線性 (4/4)

| 計測機器         | 部位              | 材質                                 | 耐放射線性  | 備考  |
|--------------|-----------------|------------------------------------|--------|---|
| 温度計 (熱電対)    | 本体              | SUS、酸化マグネシウム充填材及び熱電対素線 (銅、銅ニッケル合金) | —      |   |
|              | 補償導線            | PVC、テフロンと推定                        | 0.1MGy | アイソトープ便覧<br>図 11・34：ポリアミド   |
| 白金電極         | センサー部           | 不明 (白金、金属ケース、セラミックスと推定)            | —      |   |
|              | ケーブル被覆          | テフロン                               | 2kGy   | JAERI-Data/Code 2003-015<br>図 5-1：テフロン                              |
|              | センサー部           | 不明 (炭素鋼、金属ケース、セラミックスと推定)           | —      |   |
| 炭素鋼電極        | ケーブル被覆          | テフロン                               | 2kGy   | JAERI-Data/Code 2003-015<br>図 5-1：テフロン                              |
|              | 本体              | 不明                                 | 1kGy   | JAERI-Tech 99-003<br>標準タイプ CCD カメラ                                  |
| 比抵抗トモグラフィ用電極 | ケーブル被覆          | PVCと推定                             | 0.1MGy | アイソトープ便覧<br>図 11・34：ポリ塩化ビニル   |
|              | センサー本体 (光ファイバー) | 石英と想定                              | —      |   |
| 緩衝材膨出計測計     | ファイバ被覆膜         | エポキシ系と推定                           | 1MGy   | JAERI-Data/Code 2003-015<br>データシート No EPO-1~11 よりり少なくとも 1MGy はあると推定 |

#### 4. 試験の計画

##### 4.1 照射試験要否の検討

文献調査等で耐放射線性が確認できない部品を有する計測機器については、耐放射線性試験（照射試験）を実施する必要がある。3.4 節の検討結果から、無機材料、有機材料については、設置場所での吸収線量から推定すると、十分な耐放射線性を有しており、照射試験の必要はないと考えられる。半導体等を含む又は含む可能性がある測定器については、データがなく、照射試験が必要となる。表 4.1-1 に照射試験要否の検討結果を示す。

表 4.1-1 照射試験の要否検討

| 計測機器          | 検討結果                                   | 要否 | 備考 |
|---------------|--|----|----|
| 土圧計           | 半導体等を含む可能性があるため照射試験で検証する必要がある。         | 要  |    |
| 間隙水圧計         |  |    |    |
| 変位計           |  |    |    |
| 湿度計           |  |    |    |
| サイクロメータ       |  |    |    |
| pH 計          |  |    |    |
| 水分計           |  |    |    |
| 温度計（熱電対）      | 本体は無機材料で構成されているため、照射試験は不要。             | 否  |    |
| 白金電極          | 電極は無機材料で構成されているため、照射試験は不要。             | 否  |    |
| 炭素鋼電極         |  |    |    |
| 比抵抗トモグラフィ用の電極 |  |    |    |
| 緩衝材膨出計測計      | 光ファイバーへの放射線影響が否定できないため、照射試験で検証する必要がある。 | 要  |    |

##### 4.2 試験計画

###### (1) 照射線量率及び照射時間の検討

電子機器の耐放射線性は、線量率に影響され、線量率が高いほど、耐放射線性が低下する傾向がある。しかし、照射試験を合理的に実施するためには、設置場所での線量率よりも大きく設定し、加速試験を実施する必要がある。

そこで JAERI-Tech 99-003「標準タイプ CCD カメラ」での線量率（ $10^4 \sim 10^2$  R/h $\approx$  88 $\sim$ 0.88Gy/h）を参考に設定した。表 4.2-1 に照射試験パターンの例を示す。なお、線量率による影響を確認するために、3 パターンの線量率を設定した。

照射線量については、表 2.2-1 の 30 年後飽和度 40%、OP 表面からの距離 5cm のデータ（52.3Gy/year）で 10 年間として、523Gy を目標とした。

表 4.2-1 照射試験パターン

| 試験パターン | 線量率 (Gy/h) | 照射時間 (h) | 照射線量 (Gy) | 備考 |
|--------|------------|----------|-----------|----|
| パターン 1 | 100        | 6        | 600       |    |
| パターン 2 | 50         | 11       | 550       |    |
| パターン 3 | 10         | 60       | 600       |    |

(2) 試験方法の検討

電子機器の場合、電源が投入されない状態で照射した場合に比べ、実際に測定しながら照射した場合、耐放射線性が低下する傾向にある。従って、照射試験は、計測器を実際に計測状態として、計測機能に問題が無いことを確認する必要がある。

試験構成図の例を図 4.2-1 に示す。

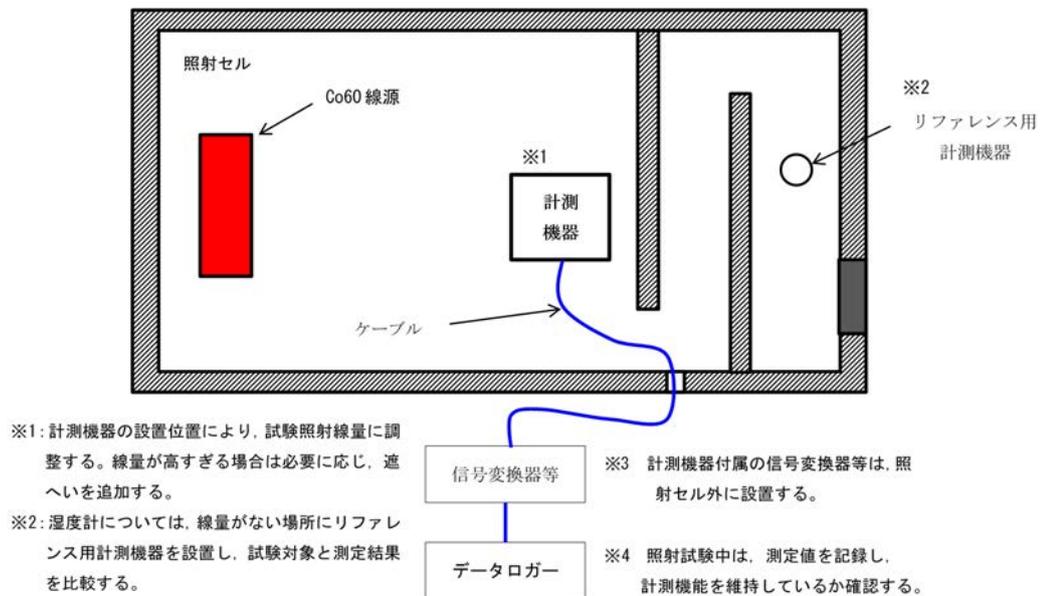


図 4.2-1 試験構成図の例

## 5. まとめ

- 放射線量の解析結果から得られた吸収線量に基づき、計測器に使われている材料に対して耐放射線性を基に比較を行い、モニタリング機器の使用寿命への影響について定性的な検討を行った。その結果、現場測定で想定される期間での使用寿命に影響を及ぼす線量ではないことが推定された。
- ただし、今回の調査ではモニタリング機器に使用されている材料の耐放射線性の観点から整理したものであることから、測定データそのもの妥当性を確認するためには、実際の測定機器を用いた照射試験を実施し確認する必要がある。
- 照射試験計画では、合理的に実施するためには通常加速試験が行われる。試験計画ではオーバーパックに近い吸収線量の高い場所における試験パターンで設定し、加速の影響も含めて評価する計画を策定した。吸収線量率が高いほど、耐放射線性が低下する傾向であることから、実際の環境との整合を考慮しつつ、保守的すぎない試験パターンの設定が必要である。
- さらに、緩衝材の外側は、オーバーパックに近い方と比較して吸収線量が3ケタ低くなっていることもあり、合理的な試験計画の検討が必要である。

参考文献

- 1) MoDeRn : Monitoring Reference Framework Report, Modern Deliverable (D-1.2) Final, 2013.
- 2) M. J. White : Monitoring During the Staged Implementation of Geological Disposal : The MoDeRn Project Synthesis, Modern Deliverable (D-6.1) , 2014.
- 3) Modern 2020 : Modern Deliverable D-2.1, Repository Monitoring Strategies and Screening Methodologies, (2017).
- 4) 若杉圭一郎, 宮原要, 牧野仁史, 石黒勝彦, 澤村英範、根山敦史、西村和哉 : ガラス固化体からの放射線量に関する検討, JNC TN8400 2003-022, 2003, 76p.
- 5) 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－ 分冊2 地層処分の工学技術, JNC-TN1400 99-022, 1999, 703p.
- 6) 日本原燃株式会社 : 返還されるガラス固化体について - ガラス固化体の性状 - , <https://www.jnfl.co.jp/ja/business/about/hlw/summary/return-vitrified-object.html> (参照 : 2019年11月1日) .
- 7) 原子力発電環境整備機構 : 包括的技術報告:わが国における安全な地層処分の実現 - 適切なサイトの選定に向けたセーフティーケースの構築 - レビュー版 付属書2-3, NUMO-TR-18-03, 2018.
- 8) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構 : TRU廃棄物処分技術検討書 根拠資料集 分冊 2\_4-9放射線の影響, 2005.
- 9) 日本アイソトープ協会編 :アイソトープ便覧改訂3版, 丸善, 1984.
- 10) 日本原子力研究所 : 高分子系材料の耐放射線特性とデータ集, JAERI-Data/Code 2003-015, 2003, 255p.
- 11) Japan Atomic Energy Research Institute, High Gamma-Rays Irradiation Tests of Critical Components for ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) in vessel Remote Handling System, JAERI-Tech 99-003 (1999).

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

| 基本量   | SI 基本単位 |     |
|-------|---------|-----|
|       | 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    | A   |
| 熱力学温度 | ケルビン    | K   |
| 物質량   | 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

| 組立量                     | SI 組立単位      |                    |
|-------------------------|--------------|--------------------|
|                         | 名称           | 記号                 |
| 面積                      | 平方メートル       | m <sup>2</sup>     |
| 体積                      | 立方メートル       | m <sup>3</sup>     |
| 速度                      | メートル毎秒       | m/s                |
| 加速度                     | メートル毎秒毎秒     | m/s <sup>2</sup>   |
| 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 <sup>2</sup>   |
| 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                    | キログラム毎立方メートル | kg/m <sup>3</sup>  |
| 輝度                      | カンデラ毎平方メートル  | cd/m <sup>2</sup>  |
| 屈折率 <sup>(b)</sup>      | (数字の)        | 1                  |
| 比透磁率 <sup>(b)</sup>     | (数字の)        | 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

| 組立量                           | SI 組立単位               |                   |                      |   |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|---|
|                               | 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  |
| 平面角                           | ラジアン <sup>(b)</sup>   | rad               | 1 <sup>(b)</sup>     | m/m   |
| 立体角                           | ステラジアン <sup>(b)</sup> | sr <sup>(e)</sup> | 1 <sup>(b)</sup>     | m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>                                |
| 周波数                           | ヘルツ <sup>(d)</sup>    | Hz                |                      | s <sup>-1</sup>   |
| 力                             | ニュートン                 | N                 |                      | m kg s <sup>-2</sup>  |
| 圧力, 応力                        | パスカル                  | Pa                | N/m <sup>2</sup>     | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>                            |
| エネルギー, 仕事, 熱量                 | ジュール                  | J                 | N m                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>                             |
| 仕事率, 工率, 放射束                  | ワット                   | W                 | J/s                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>                             |
| 電荷, 電気量                       | クーロン                  | C                 |                      | s A   |
| 電位差 (電圧), 起電力                 | ボルト                   | V                 | W/A                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>             |
| 静電容量                          | ファラド                  | F                 | C/V                  | m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup> |
| 電気抵抗                          | オーム                   | Ω                 | V/A                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>             |
| コンダクタンス                       | ジーメン                  | S                 | A/V                  | m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup> |
| 磁束                            | ウェーバ                  | Wb                | Vs                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>             |
| 磁束密度                          | テスラ                   | T                 | Wb/m <sup>2</sup>    | kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>                            |
| インダクタンス                       | ヘンリー                  | H                 | Wb/A                 | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>             |
| セルシウス温度                       | セルシウス度 <sup>(e)</sup> | °C                |                      | K   |
| 光照射度                          | ルーメン                  | lm                | cd sr <sup>(e)</sup> | cd  |
| 放射線量                          | グレイ                   | Gy                | J/kg                 | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                |
| 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, カーマ           | グレイ                   | Gy                | J/kg                 | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                |
| 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 <sup>(g)</sup>  | Sv                | J/kg                 | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                |
| 酸素活性化                         | 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コ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) ヘルツは周期現象についてのみ、ベク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) セル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。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどち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

| 組立量             | SI 組立単位           |                       |   |
|-----------------|-------------------|-----------------------|---|
|                 | 名称                | 記号                    | SI 基本単位による表し方   |
| 粘力のモーメント        | パスカル秒             | Pa s                  | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>  |
| 表面張力            | ニュートンメートル         | N m                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>   |
| 角加速度            | ラジアン毎秒            | rad/s                 | m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> = s <sup>-1</sup>                                   |
| 角加速度            | ラジアン毎秒毎秒          | rad/s <sup>2</sup>    | m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> = s <sup>-2</sup>                                   |
| 熱流密度, 放射照度      | ワット毎平方メートル        | W/m <sup>2</sup>      | kg s <sup>-3</sup>  |
| 熱容量, エントロピー     | ジュール毎ケルビン         | J/K                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>                                     |
| 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 <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>  |
| 比エネルギー          | ジュール毎キログラム        | J/kg                  | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>  |
| 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> s A   |
| 電表面積            | クーロン毎平方メートル       | C/m <sup>2</sup>      | m <sup>-2</sup> s A   |
| 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> s A   |
| 誘電率             | ファラド毎メートル         | F/m                   | m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>                         |
| 透磁率             | 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 <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>                                   |
| 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 <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>                   |
| 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> s A  |
| 吸収線量率           | グレイ毎秒             | Gy/s                  | m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>  |
| 放射線強度           | ワット毎ステラジアン        | W/sr                  | m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> |
| 放射輝度            | ワット毎平方メートル毎ステラジアン | W/(m <sup>2</sup> sr) | m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = kg s <sup>-3</sup>                |
| 酵素活性濃度          | カタール毎立方メートル       | kat/m <sup>3</sup>    | m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol  |

表5. SI 接頭語

| 乗数               | 名称  | 記号 | 乗数                | 名称   | 記号 |
|------------------|-----|----|-------------------|------|----|
| 10 <sup>24</sup> | ヨタ  | Y  | 10 <sup>1</sup>   | デシ   | d  |
| 10 <sup>21</sup> | ゼタ  | Z  | 10 <sup>2</sup>   | センチ  | c  |
| 10 <sup>18</sup> | エクサ | E  | 10 <sup>3</sup>   | ミリ   | m  |
| 10 <sup>15</sup> | ペタ  | P  | 10 <sup>6</sup>   | マイクロ | μ  |
| 10 <sup>12</sup> | テラ  | T  | 10 <sup>9</sup>   | ナノ   | n  |
| 10 <sup>9</sup>  | ギガ  | G  | 10 <sup>12</sup>  | ピコ   | p  |
| 10 <sup>6</sup>  | メガ  | M  | 10 <sup>-15</sup> | フェムト | f  |
| 10 <sup>3</sup>  | キロ  | k  | 10 <sup>-18</sup> | アト   | a  |
| 10 <sup>2</sup>  | ヘクト | h  | 10 <sup>-21</sup> | ゼプト  | z  |
| 10 <sup>1</sup>  | デカ  | da | 10 <sup>-24</sup> | ヨクト  | y  |

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 <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>                                      |
| リットル  | L, l | 1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> |
| トン    | t    | 1 t=10 <sup>3</sup> 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 <sup>-19</sup> J   |
| ダルトン     | Da | 1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> 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 <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  |
|-----------|------|--|
| バール       | bar  | 1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> 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 <sup>-10</sup> m  |
| 海里        | M    | 1 M=1852m  |
| バイン       | b    | 1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup> |
| ノット       | kn   | 1 kn=(1852/3600)m/s  |
| ネーパ       | Np   | SI単位との数値的関係は、<br>対数量の定義に依存。  |
| ベレル       | B    |  |
| 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 <sup>-7</sup> J   |
| ダイン                   | dyn | 1 dyn=10 <sup>-5</sup> N   |
| ポアズ                   | P   | 1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s  |
| ストークス                 | St  | 1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> |
| スチルブ                  | sb  | 1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>                          |
| フオト                   | ph  | 1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx                                       |
| ガリ                    | Gal | 1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>                           |
| マクスウェル                | Mx  | 1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb  |
| ガウス                   | G   | 1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T   |
| エルステッド <sup>(a)</sup> | Oe  | 1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>                              |

(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   |
|-----------|------|---|
| キュリー      | Ci   | 1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq                                    |
| レントゲン     | R    | 1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg                                  |
| ラド        | rad  | 1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy                                  |
| レム        | rem  | 1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv                                 |
| ガンマ       | γ    | 1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T                                     |
| フェルミ      | f    | 1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m                                 |
| メートル系カラット |      | 1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 <sup>-4</sup> kg                         |
| トル        | Torr | 1 Torr=(101 325/760) Pa   |
| 標準大気圧     | atm  | 1 atm=101 325 Pa  |
| カロリ       | cal  | 1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ) |
| マイクロ      | μ    | 1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m                                      |

