



JAEA-Review
2009-020

使用済燃料の地層処分の定置技術に関する調査検討

A Preliminary Study on Emplacement Technology
in Direct Disposal of Spent Nuclear Fuel

油井 三和
Mikazu YUI

地層処分研究開発部門
Geological Isolation Research and Development Directorate

October 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

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

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

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

使用済燃料の地層処分の定置技術に関する調査検討

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門
油井 三和

(2009年6月24日受理)

わが国で使用済燃料の直接処分を実施した場合の設計検討が、現在の原子力政策大綱策定時に作成された「基本シナリオの核燃料サイクルコスト比較に関する報告書」において示されている。

本調査検討では、使用済燃料の直接処分で行っているフィンランドやスウェーデンにおける使用済燃料の定置装置、定置方法、処分坑道・処分孔仕様等の最新の検討例を調査し、上記報告書における処分坑道仕様の見直しを試みた。その結果、ある一定の仮定のもとに処分坑道断面積を大幅に低減できる可能性が示された。今後、検討内容の品質を高めるためにも定置装置等の詳細な検討が望まれる。

A Preliminary Study on Emplacement Technology in Direct Disposal of Spent Nuclear Fuel

Mikazu YUI

Geological Isolation Research and Development Directorate

Japan Atomic Energy Agency

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 24, 2009)

A preliminary investigation of direct disposal of spent nuclear fuel was conducted for the current Nuclear Energy Policy by the Japan Atomic Energy Commission to compare the cost between direct disposal and nuclear fuel cycle. One of the important factors for cost estimation was the diameter of the disposal tunnel. In this study, the preliminary design of the disposal tunnel was reexamined from an engineering viewpoint based on examples of Finland and Sweden taking a lead in the research of direct disposal of spent nuclear fuel. The study revealed that under certain conditions the excavated cross section of the disposal tunnel could be decreased to approximately half that of the above investigation. In order to improve these results, further investigation is needed.

Keywords: Direct Disposal, Spent fuel, Design, Disposal Tunnel, Diameter, Engineering

目次

1	はじめに.....	1
2	わが国における直接処分場の検討例.....	1
2.1	キャニスター仕様.....	1
2.2	処分坑道, 処分孔の仕様.....	2
2.3	定置方法.....	3
3	フィンランドおよびスウェーデンにおける定置技術の検討例.....	5
3.1	キャニスター仕様.....	5
3.2	処分坑道・処分孔の仕様.....	6
3.3	定置方法.....	7
4	処分坑道仕様の検討.....	10
4.1	初期設定.....	12
4.2	定置実現性の検討.....	16
4.3	処分坑道仕様の検討.....	20
5	おわりに.....	24
	謝辞.....	24
	参考文献.....	25

CONTENTS

1	Introduction	1
2	Previous Results of Direct Disposal in Japan.....	1
2.1	Canister.....	1
2.2	Disposal Tunnel and Pit.....	2
2.3	Emplacement Method	3
3	Status of Direct Disposal in Finland and Sweden	5
3.1	Canister.....	5
3.2	Disposal Tunnel and Pit.....	6
3.3	Emplacement Method	7
4	Preliminary Design of Disposal Tunnel in Japan.....	10
4.1	Initial Setting.....	12
4.2	Emplacement Feasibility.....	16
4.3	Scales of Disposal Tunnel.....	20
5	Summary	24
	Acknowledgment.....	24
	References.....	25

図目次

図 2-1	日本のキャニスター概念図（4 体収納）	1
図 2-2	ガラス固化体処分の堅置き定置方式の定置設備の構造概念.....	2
図 2-3	処分坑道と処分孔の仕様.....	3
図 2-4	処分孔堅置き定置方式の作業概念	4
図 2-5	ガラス固化体処分での定置方法の検討例.....	4
図 3-1	キャニスターのイメージ図.....	5
図 3-2	フィンランドの処分坑道・処分孔の仕様.....	6
図 3-3	スウェーデンの処分坑道・処分孔の仕様.....	7
図 3-4	スロープの設定	8
図 3-5	定置作業想定図	9
図 4-1	検討フロー図	11
図 4-2	キャニスター被覆容器の寸法.....	12
図 4-3	スロープ詳細図	13
図 4-4	定置概念図.....	13
図 4-5	キャニスター被覆容器の動作範囲の設定.....	14
図 4-6	定置作業順序	15
図 4-7	スライド距離が小さい場合.....	16
図 4-8	スライド距離が大きい場合.....	17
図 4-9	スライド距離が最適な場合.....	17
図 4-10	スライド範囲検討図.....	18
図 4-11	定置実現性検討結果.....	19
図 4-12	スライド距離検討図.....	20
図 4-13	処分坑道高さの検討結果（スロープあり）	21
図 4-14	処分坑道高さの検討結果（スロープなし）	22
図 4-15	フィンランド、スウェーデンの処分坑道・処分孔仕様の概略図.....	23
図 4-16	検討後の日本における処分坑道仕様の概略図.....	23
図 5-1	処分坑道の調査検討結果の比較	24

表目次

表 2-1	キャニスター寸法（4 体収納）	2
表 2-2	処分坑道および処分孔の寸法設定	3
表 3-1	フィンランドおよびスウェーデンのキャニスター寸法	6
表 3-2	海外の処分坑道・処分孔の寸法設定	7
表 3-3	海外の処分孔上端部スロープの仕様	8
表 4-1	日本と海外の検討例の比較	10

1 はじめに

わが国で使用済燃料の直接処分を実施した場合の設計検討が、原子力政策大綱¹⁾策定時に作成された「基本シナリオの核燃料サイクルコスト比較に関する報告書」²⁾(以下、「核燃料サイクルコスト比較」という)において示されている。

本調査検討では、使用済燃料の直接処分で行っているフィンランドやスウェーデンにおける使用済燃料の定置装置、定置方法、処分坑道・処分孔仕様等の最新の検討例を調査し、核燃料サイクルコスト比較における処分坑道仕様の見直しを試みた。

2 わが国における直接処分場の検討例

核燃料サイクルコスト比較²⁾において示された縦置き定置方式の場合のキャニスター(使用済燃料処分容器)、処分坑道、処分孔の仕様、定置方法を以下に整理した。

2.1 キャニスター仕様

日本のキャニスター仕様は、スウェーデンのPWRタイプを参考に、使用済燃料の収納数が2体(0.92tU/キャニスター)と4体(1.84tU/キャニスター)の場合について検討されている。材質は炭素鋼である。図2-1に収納数が4体の場合の概念図、表2-1にキャニスター寸法を示す。

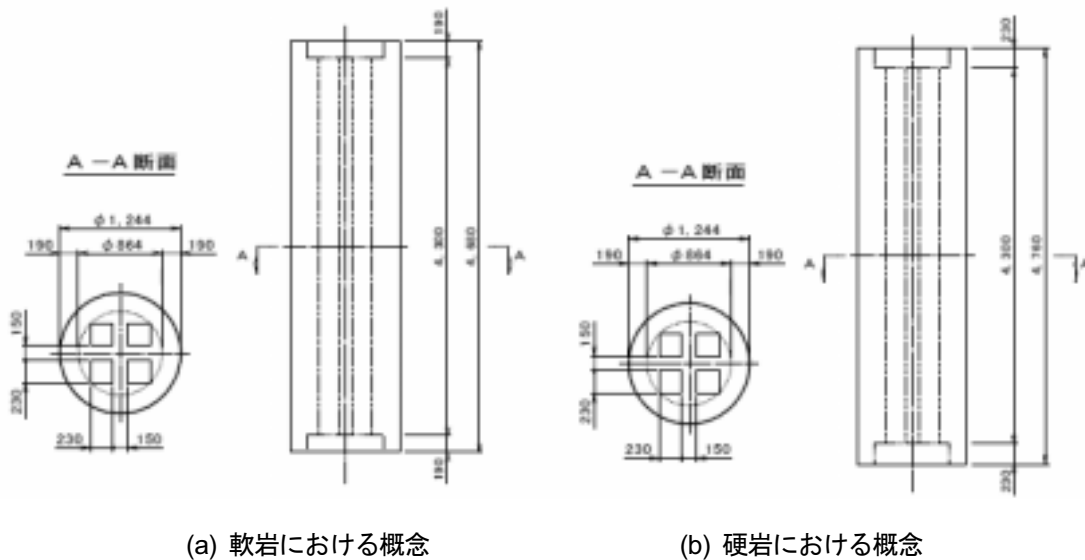


図2-1 日本のキャニスター概念図(4体収納)²⁾

表 2-1 キャニスター寸法 (4 体収納)

岩種	直径	長さ	厚さ
軟岩	φ1.24m	4.68m	190mm
硬岩	φ1.24m	4.76m	190mm (蓋 230mm)

2.2 処分坑道、処分孔の仕様

処分坑道および処分孔の仕様は、図 2-2 に示すようなガラス固化体処分の定置装置寸法に基づき、キャニスターの重量、寸法等を考慮して設定されている。図 2-3、表 2-2 に 4 体／キャニスターの場合の処分坑道と処分孔の仕様を示す。

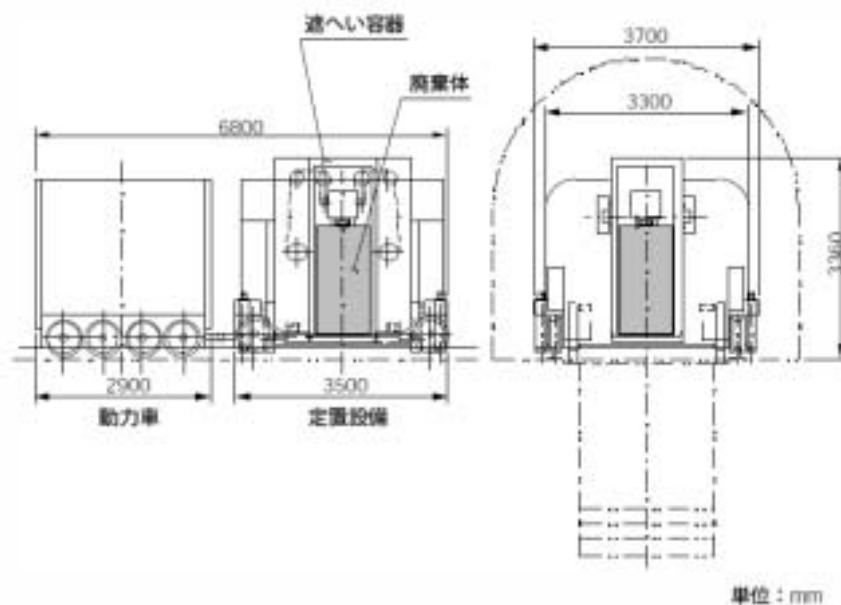
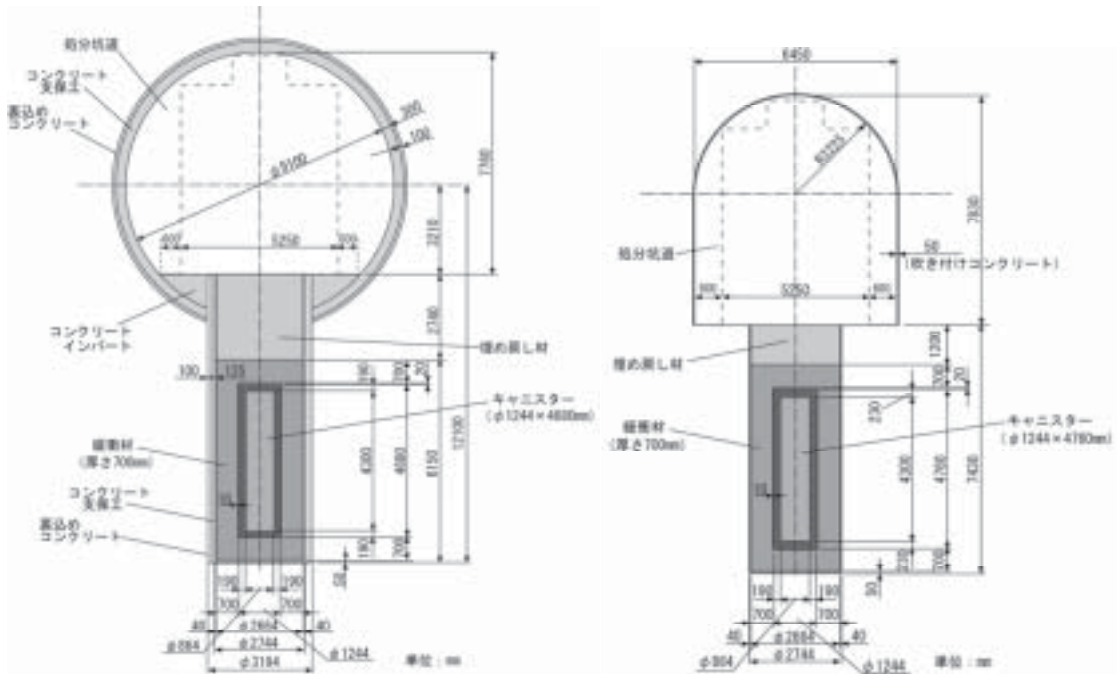


図 2-2 ガラス固化体処分の縦置き定置方式の定置設備の構造概念³⁾



(a) 軟岩における処分坑道・処分孔概念 (b) 硬岩における処分坑道・処分孔概念

図 2-3 処分坑道と処分孔の仕様²⁾

表 2-2 処分坑道および処分孔の寸法設定

岩種	処分坑道		処分孔	
	断面形状	寸法	直径	深さ
軟岩	円形	φ9.1m	φ3.2m	7.2m
硬岩	幌型	H7.8m, W6.5m	φ2.7m	7.4m

2.3 定置方法

キャニスターの定置方法は、ガラス固化体の縦置き方式の定置方法が概念として示されている。図2-4、図2-5にガラス固化体処分における処分孔縦置き定置方式の作業概念、定置方法の検討例をそれぞれ示す。キャニスターは、縦置きで運搬され、下部・側部緩衝材ブロック設置後、定置される。

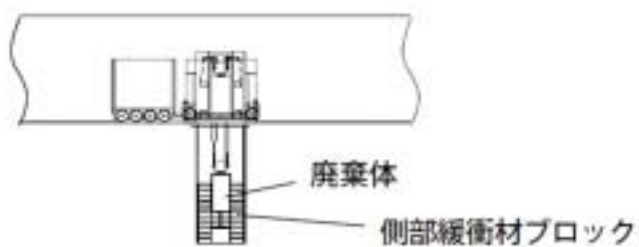


図 2-4 処分孔縦置き定置方式の作業概念³⁾

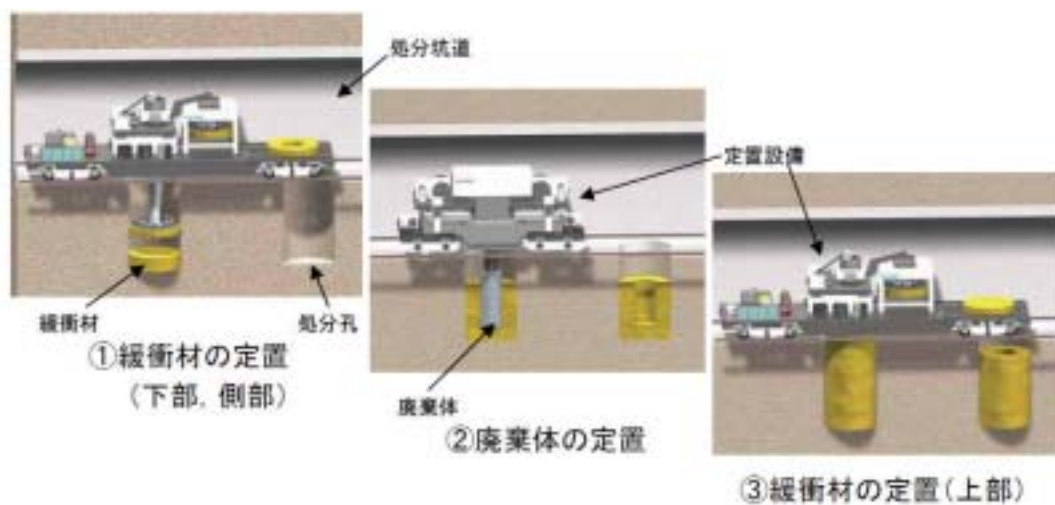


図 2-5 ガラス固化体処分での定置方法の検討例²⁾

3 フィンランドおよびスウェーデンにおける定置技術の検討例

フィンランドとスウェーデンでは、使用済燃料の直接処分を採用しており、現在処分事業が進められている。ここに、それらの最新の検討例を整理した。

3.1 キャニスター仕様

フィンランドでは、異なるタイプの原子炉（VVER 440, BWR, EPR）の使用済燃料に対応するために、3種類のサイズのキャニスター（LO 1 & 2, OL 1 & 2, OL 3）が考えられている⁴⁾。最大寸法は、OL3 の $\phi 1.05 \times 5.25\text{m}$ である。

- LO 1 & 2: ロヴィーサ発電所 1, 2 号機（原子炉タイプ VVER 440）対応
- OL 1 & 2: オルキルオト発電所 1, 2 号機（原子炉タイプ BWR）対応
- OL 3: オルキルオト発電所 3 号機（原子炉タイプ EPR）対応

一方、スウェーデンでも異なるタイプの原子炉（BWR, PWR）の使用済燃料の処分が計画されているが、キャニスターはおおむね同じサイズで計画されており $\phi 1.05 \times 4.83\text{m}$ である⁵⁾。

材質は、図 3-1 に示すようにフィンランドおよびスウェーデンともに外側が銅製、内側が鋳鉄製の二重構造になっており、外側の銅製容器が腐食に耐える役割を、内側の鋳鉄製容器が機械的な応力に耐える役割を担っている⁶⁾。

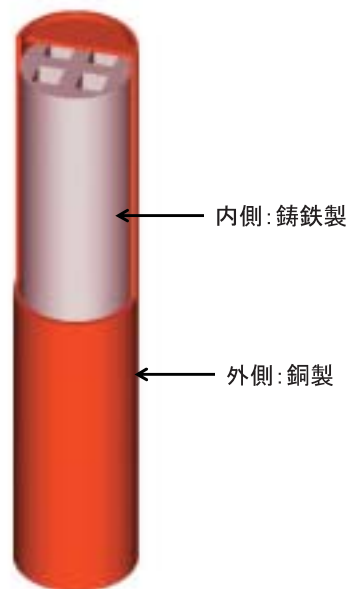


図 3-1 キャニスターのイメージ図

表 3-1 にフィンランドおよびスウェーデンのキャニスター寸法を整理した。

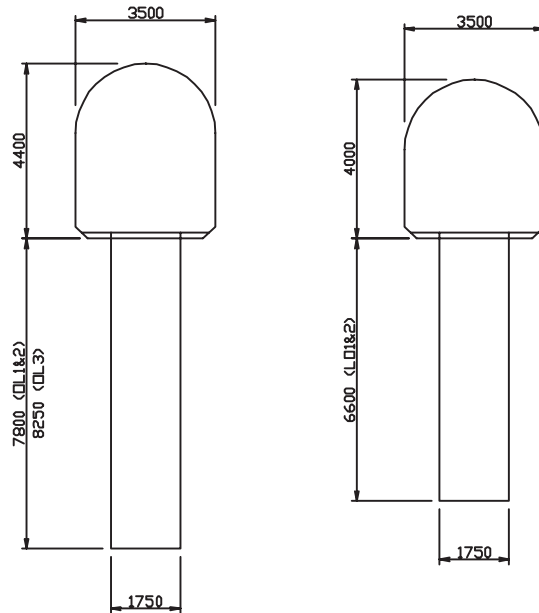
表 3-1 フィンランドおよびスウェーデンのキャニスター寸法

国	直径	長さ	厚さ
フィンランド	φ1.05m	3.60, 4.80, 5.25m	48mm (側部), 50mm (蓋・底部)
スウェーデン	φ1.05m	4.83m	50mm

3.2 処分坑道・処分孔の仕様

フィンランドおよびスウェーデンで計画されている硬岩における処分坑道・処分孔の仕様を図 3-2、図 3-3 および表 3-2 に示す。フィンランドでは、3 種類のサイズのキャニスターに合わせて処分坑道・処分孔の仕様がそれぞれ設定されており、最も大きいキャニスター OL3 の場合、処分坑道は高さ 4.4m、幅 3.5m、処分孔は直径 1.75m、深さ 8.25m である⁷⁾。スウェーデンの場合は、処分坑道は高さ 4.0m、幅 3.6m、処分孔は直径 1.75m、深さ 7.83m である⁸⁾。

このように、処分坑道は、日本の硬岩における仕様と比較して、高さ、幅ともに 1/2 程度の寸法となっている。処分坑道の高さの違いは主に運搬・定置方法に、幅の違いは人工バリア仕様、定置装置寸法等に起因している。



(a) OL 1, 2 & 3 定置用

(b) LO 1 & 2 定置用

図 3-2 フィンランドの処分坑道・処分孔の仕様

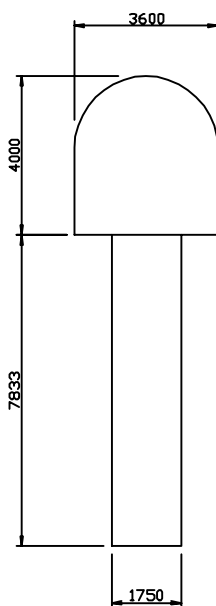


図 3-3 スウェーデンの処分坑道・処分孔の仕様

表 3-2 海外の処分坑道・処分孔の寸法設定

国	岩種	処分坑道		処分孔	
		断面形状	寸法	径	深さ
フィンランド	硬岩	幌型	H4.4m, W3.5m	φ 1.75m	6.60~8.25m
スウェーデン	硬岩	幌型	H4.0m, W3.6m	φ 1.75m	7.83m

3.3 定置方法

フィンランドおよびスウェーデンでは、横置きで運搬し、処分孔上部でキャニスターを回転またはスライドさせながら挿入する定置方法が計画されている。

フィンランドでは、キャニスターの挿入作業を容易にするために、処分孔上端部に切り欠きによるスロープが設けられており（図 3-4）、使用済燃料が EPR タイプの場合、BWR タイプより長いため、スロープ寸法はより大きくする必要があるとしている⁷⁾。また、スウェーデンでも同様の理由で処分孔上端部に切り欠きによるスロープが設けられている。表 3-3 にフィンランドの POSIVA（ポシヴァ社）およびスウェーデンの SKB（スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社）に対するヒアリング調査結果に基づくスロープ寸法を整理した^{9), 10)}。



図 3-4 スロープの設定

表 3-3 海外の処分孔上端部スロープの仕様

国	X	Y
フィンランド	1.0m	1.0m
スウェーデン	1.6m	1.2m

定置装置については、フィンランドでは、キャタピラー型定置装置が検討されており、処分場レベルにおけるキャニスター集荷場所から処分坑道までの運搬、処分孔への定置に使用される⁷⁾。スウェーデンでは、ホイール型定置装置が検討されている。SKBは、2008年度中にいくつかの試験を開始し、現実的な条件で定置プロセスの全てのステップが実行できることを示すとしている。これらの試験は、Äspö HRL（エスポ岩盤研究所）の深度420mレベルの実証トンネルで行われる予定である。定置装置にはナビゲーションシステムと位置決めシステムが装備されており広範な試験が予定されている。目的は、遠隔操作により広範な定置ができることを示すことである。これらの継続的な技術開発は、同様のキャニスターや緩衝材ユニットを定置するPOSIVAと部分的に協力して行われる予定である¹¹⁾。

次に、定置作業順序を検討した。図 3-5 に示すように、回転、スライド、吊り下げ等の動作を組み合わせて定置するものと推察される。このような複合的な動作により、処分坑道寸法を小さく抑えることが可能になっていると考えられる。

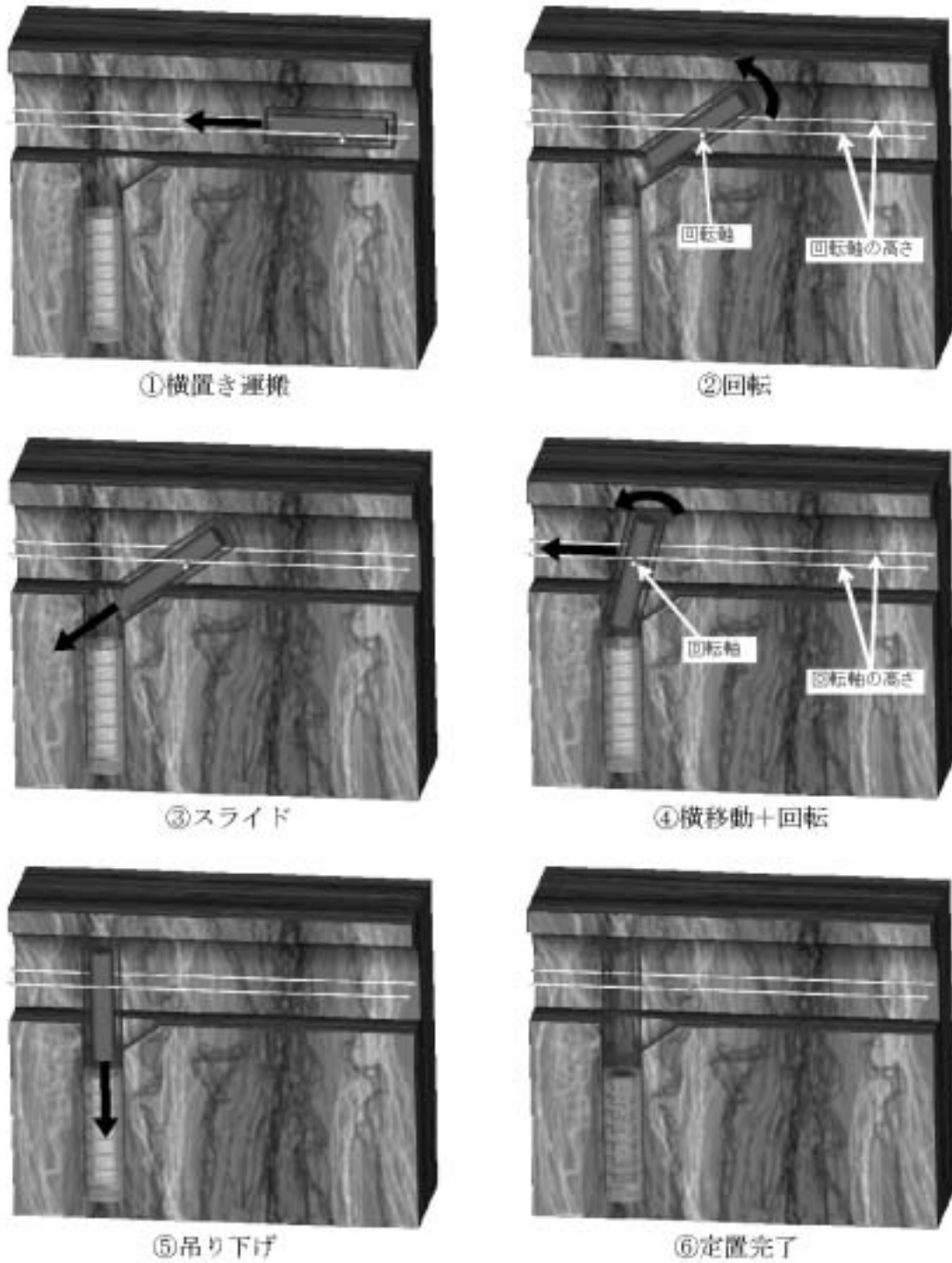


図 3-5 定置作業想定図

4 処分坑道仕様の検討

2章および3章で整理した日本と海外のキャニスター仕様、処分坑道・処分孔の仕様（硬岩）、定置方法等を表4-1にまとめた。これらの検討例を参考に、日本の処分坑道仕様の見直しを試みた。

表4-1 日本と海外の検討例の比較

国名	日本	フィンランド	スウェーデン
キャニスター (D×H)	φ1.24m × 4.76m (PWR, 4体収納)	φ1.05m × 5.25m (EPR)	φ1.05m × 4.83m (BWR, PWR)
処分坑道 (H×W)	7.80m × 6.50m	4.40m × 3.50m	4.00m × 3.60m
処分孔 (D×H)	2.70m × 7.40m	1.75m × 8.25m*	1.75m × 7.83m
運搬方法	縦置き	横置き	横置き
定置方法	吊り下げ	回転 + スライド + 吊り下げ	回転 + スライド + 吊り下げ
スロープ	設定なし	1.0m × 1.0m	1.6m × 1.2m

*：フィンランドで計画されている処分孔深さの最大値（図3-2参照）

図 4-1 に処分坑道仕様の検討フロー図を示す。

4.1 節では、調査結果に基づいてキャニスター被覆容器（運搬、定置作業における放射線被ばく上の安全性確保のために使用済燃料の放射線を適切に遮へいする容器）寸法、定置装置の動作範囲、定置作業順序等を設定した。

4.2 節では、4.1 節の初期設定を用いて、処分坑道高さが比較的小さいスウェーデンの仕様における定置実現性を確認した。

4.3 節では、4.2 節で定置実現性が確認された初期設定を用いて、日本のキャニスター寸法、処分孔直径を適用した場合の定置に必要な処分坑道高さを導出した。また、処分坑道幅については、横断面方向の作業性を考慮して設定した。

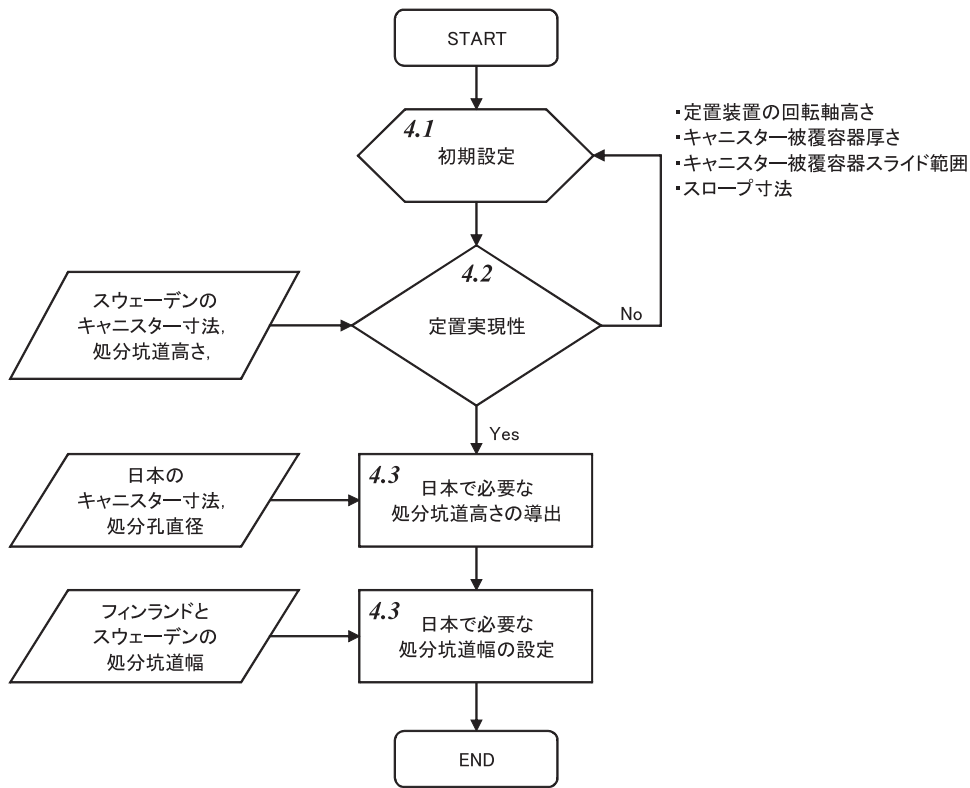


図 4-1 検討フロー図

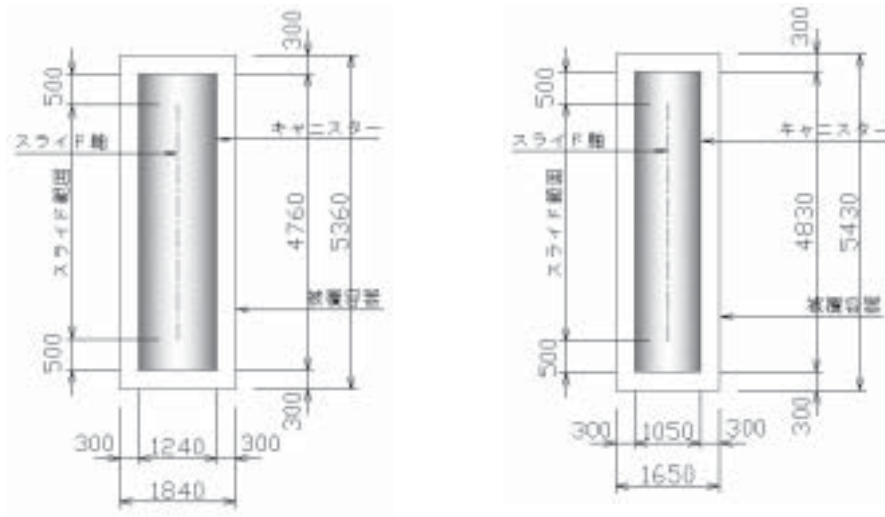
4.1 初期設定

初めに、キャスク（輸送容器）の仕様を参考にキャニスター被覆容器寸法を設定した。

キャニスター被覆容器は、国際原子力機関（IAEA）輸送規則に準拠し設定されている基準（輸送容器表面において線量当量率 2mSv/h 以下）を考慮して設計される必要がある。使用済燃料の放射能の量は、燃焼度の上昇に伴い増加する傾向にあり、SKB では、BWR 燃料において 38GWd/MTU と 55GWd/MTU、PWR 燃料において 42GWd/MTU と 60GWd/MTU を比較しており、燃焼度の上昇に伴い放射能の量はともに 1.4 倍程度（30 年後）増加すると計算している¹²⁾。

このような背景を踏まえ、日本と同様に PWR が稼働しているスウェーデンでは、単純化するために全てのキャニスターに BWR 燃料を収納すると仮定して、38GWd/MTU を用いて諸検討が実施されている¹³⁾。キャスク（輸送容器）の仕様は、直径が約 1.6m、厚さが 250~300mm と計画されている¹⁴⁾。なお、近年スウェーデンでは、技術向上に伴いより高い燃焼度や濃縮度を設定する傾向にあり、BWR と PWR の両方で燃焼度 60GWd/MTU の適用が計画されている。この場合においても、キャスク等に関する設定に変わりはないとしている¹¹⁾。

一方、日本の使用済燃料の仕様は、発熱量が大きいことやガラス固化体処分での設定との整合を考慮して、PWR 燃料、平均燃焼度 45 GWd/MTU として検討が実施されている²⁾。これは、スウェーデンの検討条件と同様と考えられる。したがって、日本のキャニスター被覆容器の寸法については、スウェーデンのキャスク厚さ（250~300mm）を参考に、容器厚さを保守的に 300mm として設定することとした。図 4-2 に設定したキャニスター被覆容器の寸法を示す。



(a) 本検討

(b) スウェーデンのキャニスターの場合

図 4-2 キャニスター被覆容器の寸法

次に、定置方法（スロープ、定置作業順序等）を設定した。定置作業を補助するためのスロープは、スウェーデンのケース $X=1.6\text{m}$, $Y=1.2\text{m}$ を採用した（図 4-3）。定置作業は図 3-5 と同様に、横置き運搬後、回転、スライド、吊り下げを併用して行うものとした。ただし、図 3-5 の④に示した横移動と回転を同時に行う複合的な動作を簡略化するために、キャニスター被覆容器をスロープに沿って挿入後、図 4-3 の A 点を中心にキャニスター被覆容器を回転させることとした。図 4-4 に定置概念図を示す。

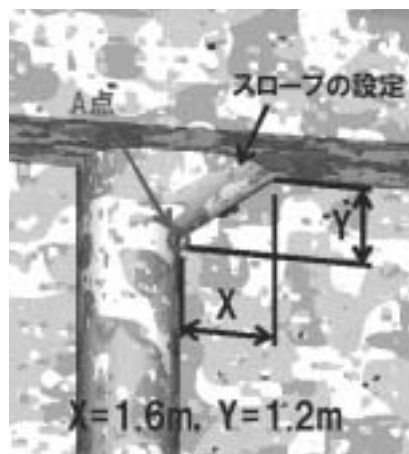


図 4-3 スロープ詳細図

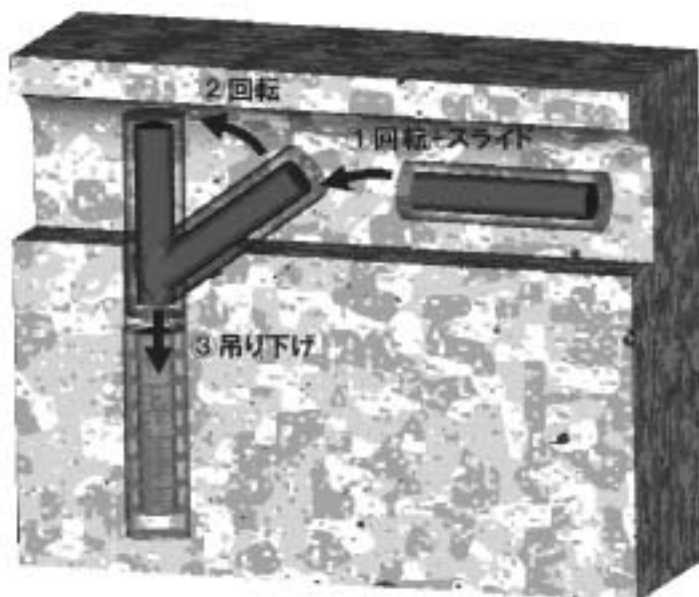


図 4-4 定置概念図

ここで、キャニスター被覆容器の回転軸の高さを仮に1.8mに設定した(図4-5)。

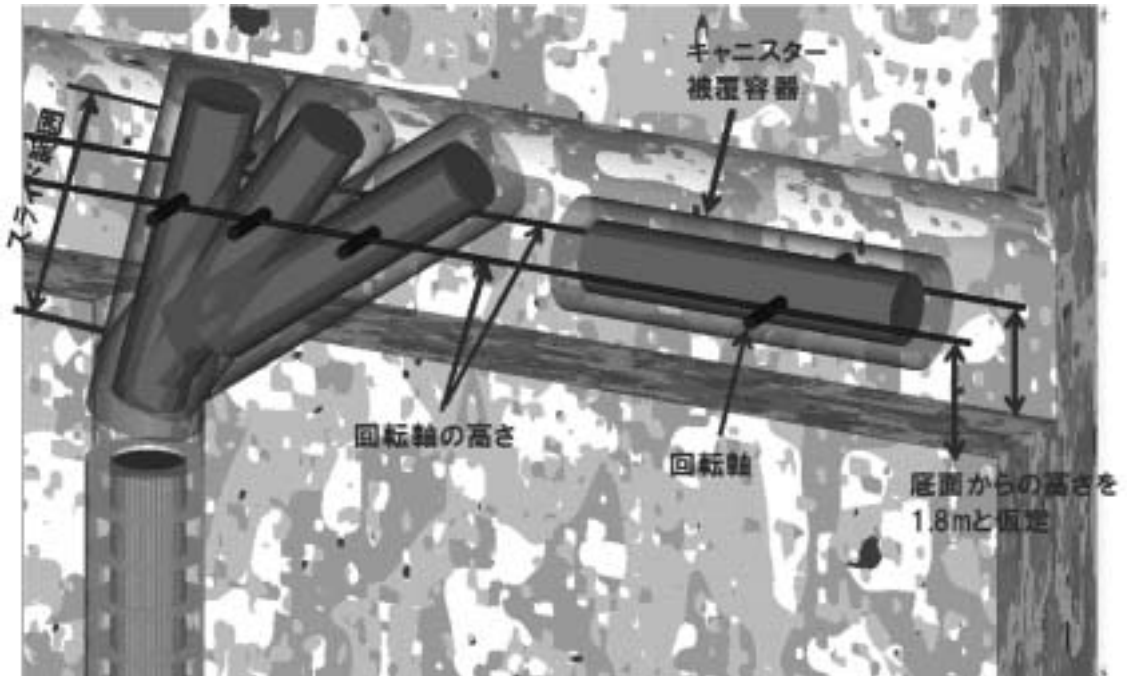


図4-5 キャニスター被覆容器の動作範囲の設定

図 4-6 に初期設定を用いた定置作業順序のイメージを示す。

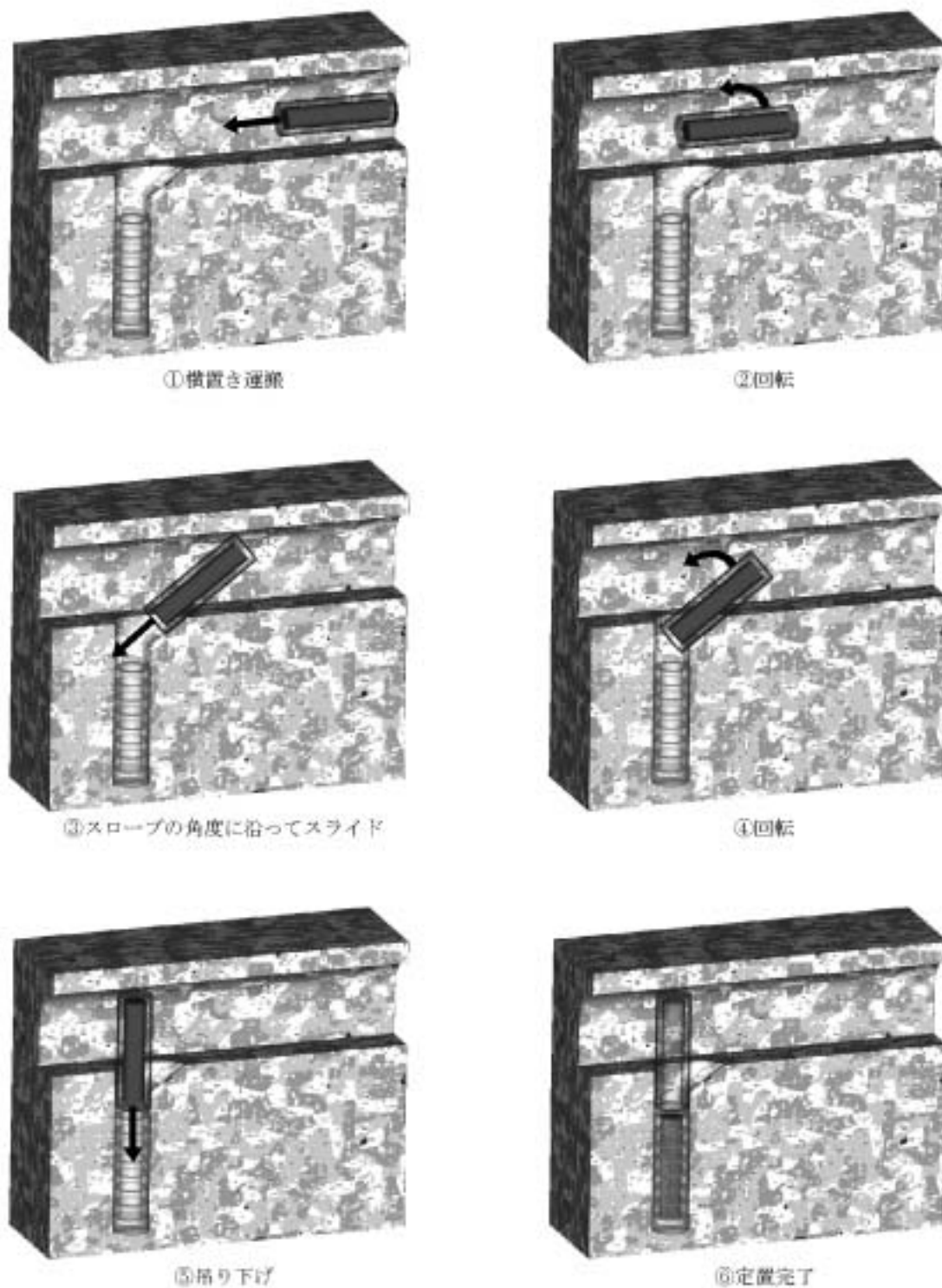


図 4-6 定置作業順序

4.2 定置実現性の検討

スウェーデンの処分坑道・処分孔仕様において、4.1 節の初期設定を用いて定置実現性を検討した。キャニスター被覆容器寸法は、スウェーデンのキャニスターの場合の寸法（図 4-2 (b)）を用いた。

初めに、キャニスター被覆容器がスロープに沿って処分孔内に挿入される際の最適なスライド距離を検討した。スライド距離が小さい場合は、回転した際に処分孔壁面まで余裕があり、必要な処分坑道高さが最小とはならない（図 4-7）。一方、スライド距離が大きい場合は、処分孔壁面と干渉して回転することができない（図 4-8）。したがって、スライド距離が最適な場合は、処分孔壁面に対してクリアランス 0 で回転する状態である（図 4-9）。このとき、A 点を中心とした回転半径は、処分孔の直径と同じ寸法になっている。

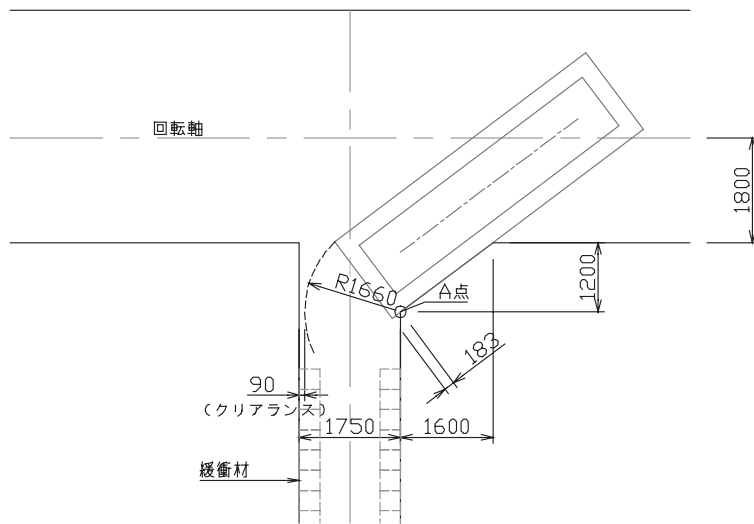


図 4-7 スライド距離が小さい場合

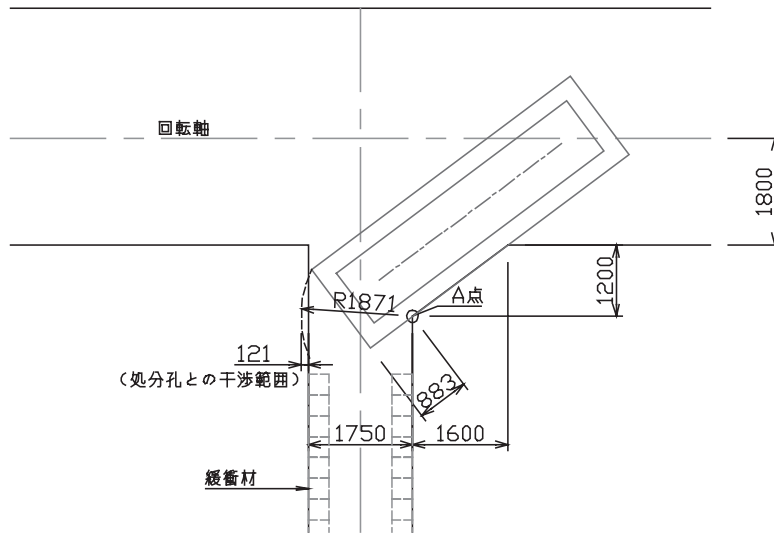


図 4-8 スライド距離が大きい場合

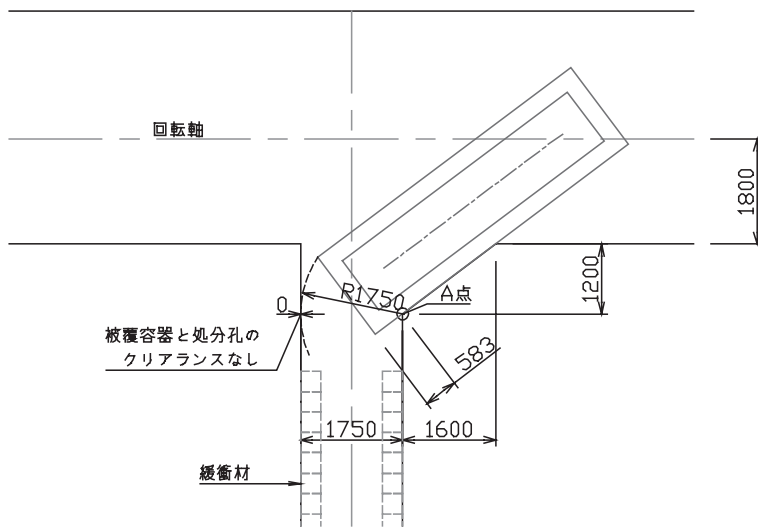


図 4-9 スライド距離が最適な場合

ここで，図 4-10 のキャニスター被覆容器の B 点を中心に半径 1,750mm（処分孔直径寸法）の円と容器外縁との交点を C 点とすると，スロープの A 点と C 点が一致するまでスライドしたとき，キャニスター被覆容器は，処分坑道内において最も効率的に回転することになる（回転のために必要となる坑道高さが最小）。

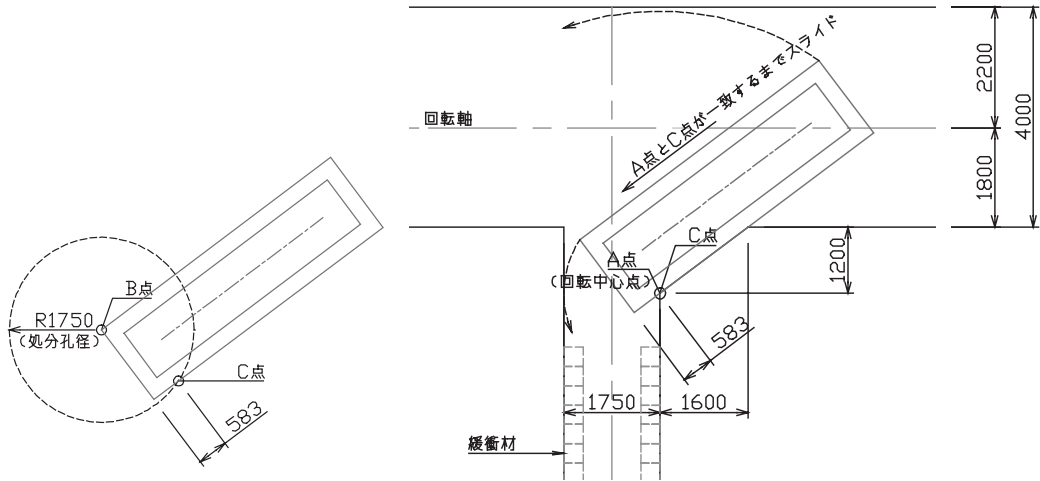


図 4-10 スライド範囲検討図

次に、最適なスライド距離の場合（図 4-9，図 4-10）の回転に必要な坑道高さを求めた。図 4-11 に検討結果を示す。キャニスター被覆容器が回転するために必要な処分坑道高さは 3,920mm 以上となり、スウェーデンの仕様 4,000mm に対して 80mm の余裕を残して回転可能という結果になった。

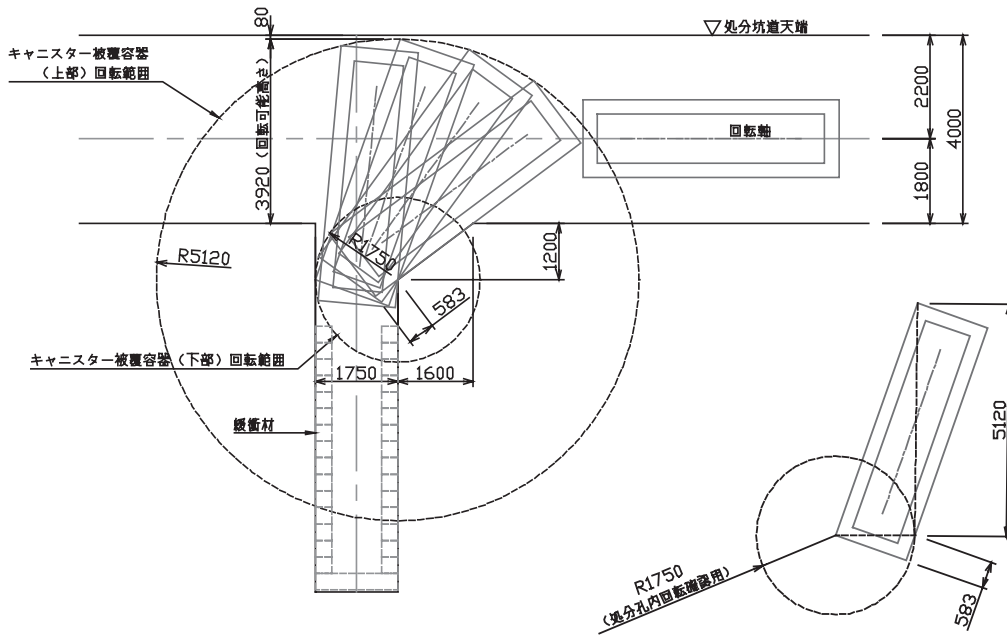


図 4-11 定置実現性検討結果

4.3 処分坑道仕様の検討

日本の処分孔仕様において 4.2 節で定置実現性が確認された初期設定を用いて、キャニスター被覆容器の回転可能な処分坑道高さを求めた。キャニスター被覆容器寸法は、日本のキャニスターの場合の寸法（図 4-2 (a)）を用いた。

図 4-10 と同様にキャニスター被覆容器をスロープに沿って処分孔内に挿入させた場合、処分孔直径が 2,700mm と比較的大きいため、図 4-12 に示すように定置装置の回転軸の動作範囲を逸脱してしまうことから、キャニスター被覆容器スライド軸と定置装置回転軸が交差する範囲でスライドさせることとした。

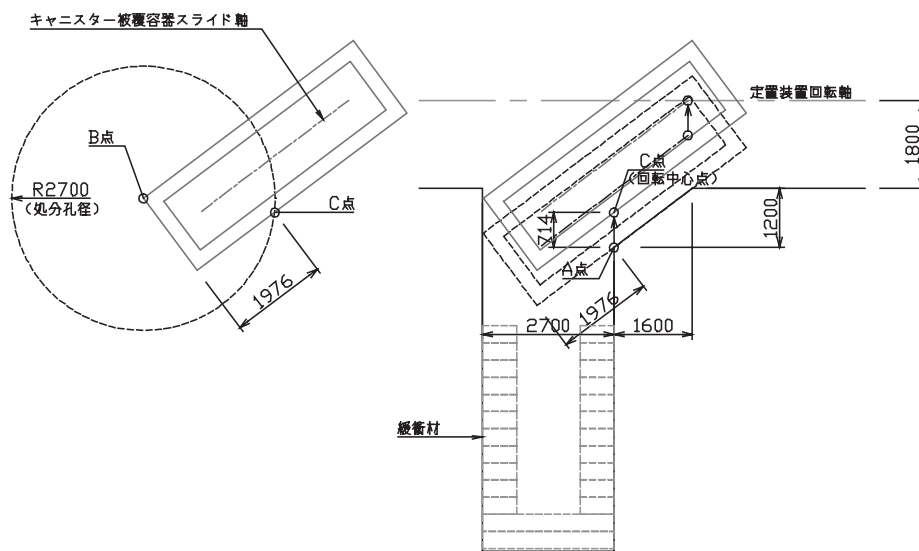


図 4-12 スライド距離検討図

その結果、キャニスター被覆容器は、スロープから離れた状態で回転することになり、処分孔直径が大きい場合は、スロープの設定があまり有効ではないことが推察された。図4-13に検討結果を示す。この場合、スロープ寸法はX=649mm, Y=486mm, 処分坑道高さは3,366mm以上で設置可能という結果を得た。

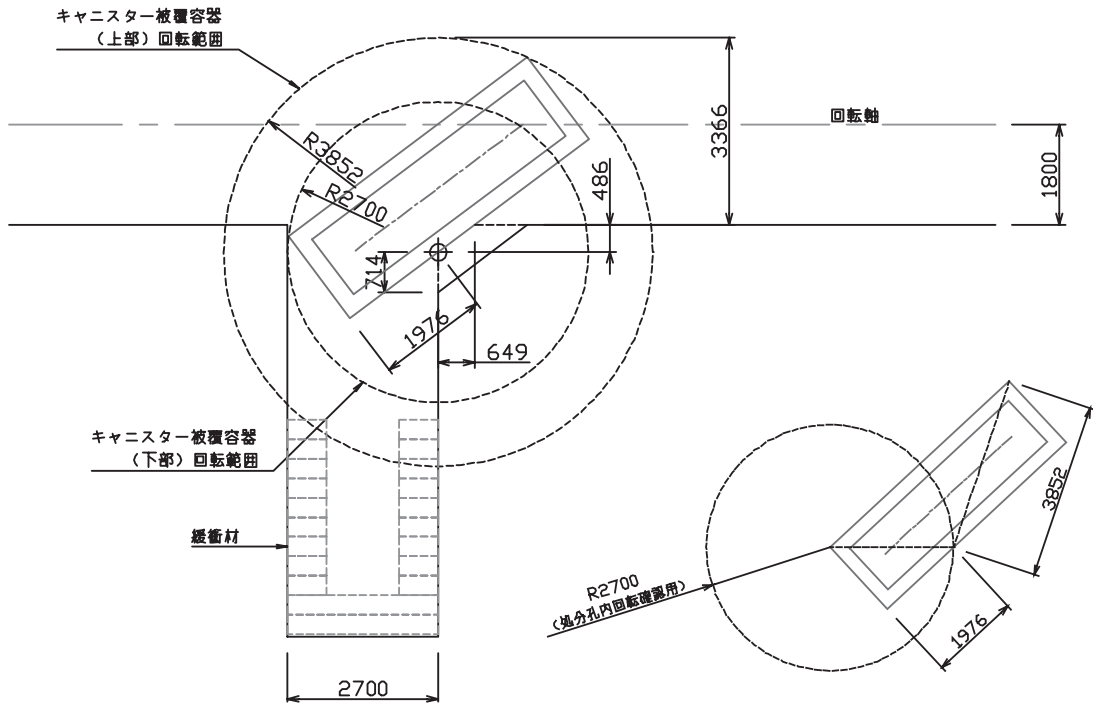


図4-13 処分坑道高さの検討結果（スロープあり）

また、スロープを設定しない場合においても同様の検討を行った。図 4-14 に検討結果を示す。この場合、処分坑道高さが 3,852mm 以上であれば定置可能となった。

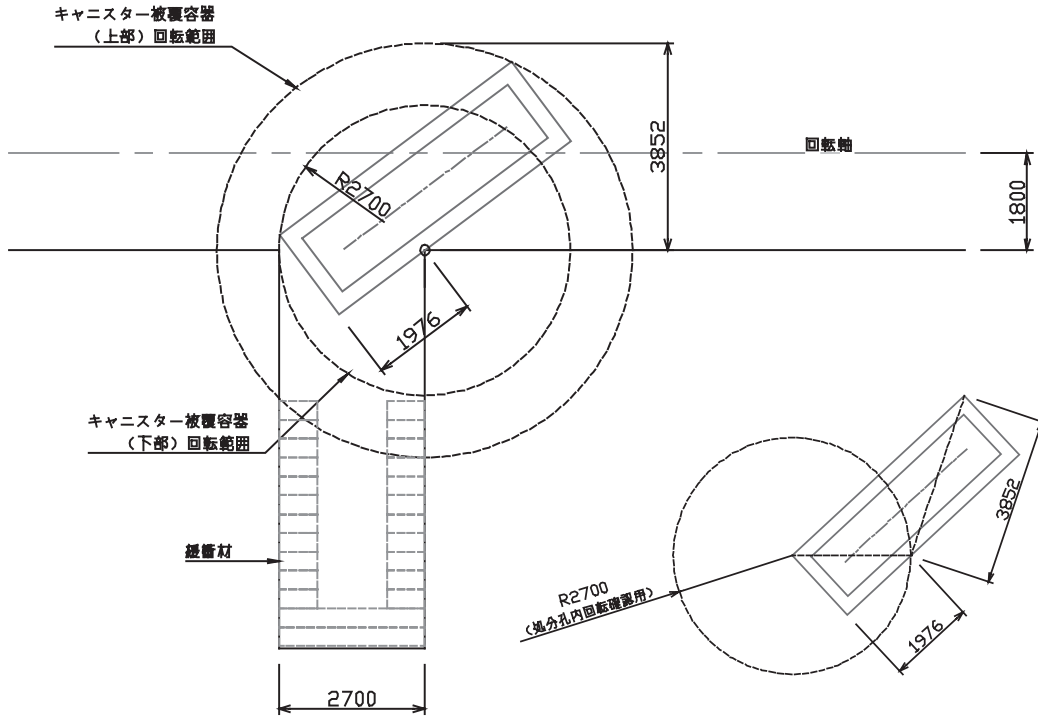


図 4-14 処分坑道高さの検討結果 (スロープなし)

したがって、スロープの有無に関わらず、スウェーデンの処分坑道高さ 4,000mm であれば定置可能である可能性が高いと考えられる。現在、定置装置の詳細検討が行われていないことから、保守的に処分坑道高さを 4,000mm と設定した。

最後に、処分坑道幅の設定を行った。参考として、表 4-1 の処分坑道・処分孔寸法をもとにフィンランドとスウェーデンの処分坑道・処分孔の概略図を作図した (図 4-15)。処分坑道側壁から処分孔までの距離は、フィンランドで 875mm, スウェーデンで 925mm となっている。そこで、作業性 (定置装置の走行場所の確保等) を考慮して、処分坑道側壁から処分孔までの距離を保守的に 925mm と設定し、処分坑道幅を 4,550mm ($=2,700\text{mm} + 925\text{mm} \times 2$) とした。

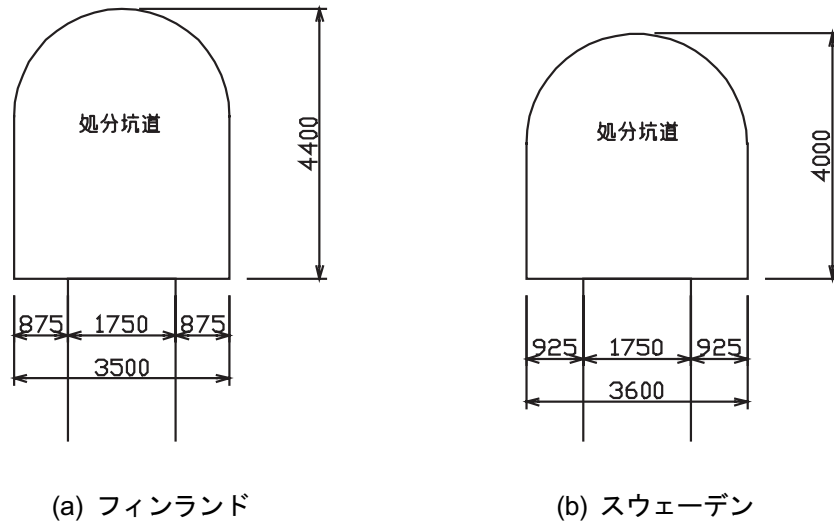


図 4-15 フィンランド, スウェーデンの処分坑道・処分孔仕様の概略図

以上より、処分坑道の仕様は、高さ 4,000mm, 幅 4,550mm となった。図 4-16 に検討後の日本における処分坑道仕様の概略図を示す。

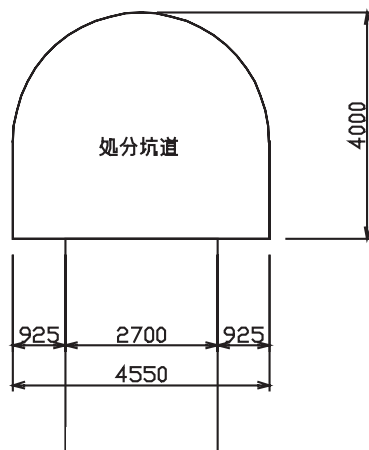


図 4-16 検討後の日本における処分坑道仕様の概略図

5 おわりに

今回の調査検討結果より、核燃料サイクルコスト比較²⁾で示された処分坑道仕様は、断面積で約65%低減できる可能性が示された。本調査検討前後の断面寸法、断面積を図5-1に示す。なお、この結果は、仮設定における検討結果であり、不確定要素を多分に含んでいるものである。特に、本報告で引用したフィンランドやスウェーデンの定置装置、定置方法等については、今後実証が予定されている。したがって、フィンランドやスウェーデンにおける現実的条件での定置技術の実証に関する動向を見極めつつ、処分孔直径、定置装置、処分坑道の断面設計等、詳細な検討を行い、仕様を決定していく必要がある。また、処分坑道施工コストについては、掘削断面が大幅に減少したことにより削減される可能性はあるが、ズリ運搬のためのレール工法の採用や待避場所の設置等のコストアップも考えられるため、施工計画に基づく積算に従って算出される必要がある。

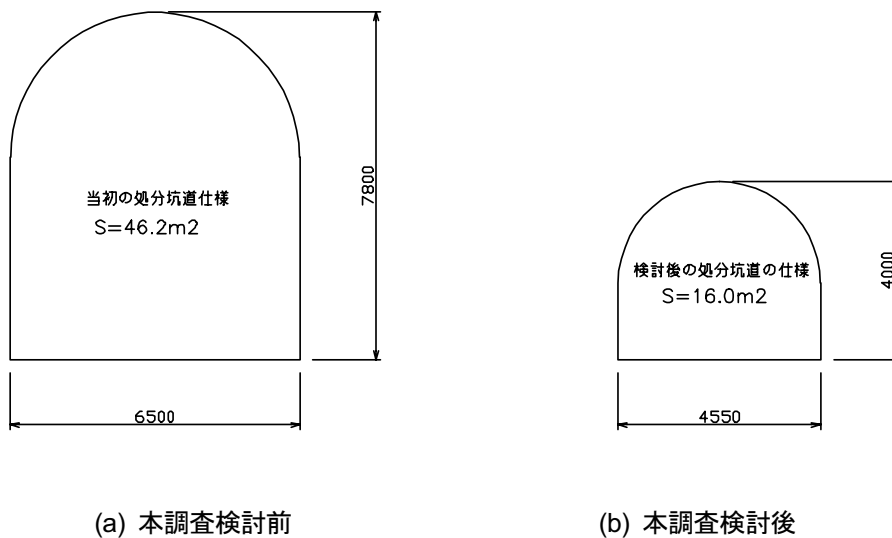


図 5-1 処分坑道の調査検討結果の比較

謝辞

本報告書をまとめるにあたって、フィンランドの POSIVA、スウェーデンの SKB の関係者、地層処分研究開発部門ニアフィールド研究グループの山田勉氏、内藤守正氏に助言や援助をいただいたことに深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 原子力委員会: ”原子力政策大綱”, (2005).
- 2) 原子力委員会 新計画策定会議 技術検討小委員会: ”基本シナリオの核燃料サイクルコスト比較に関する報告書”, (2004).
- 3) 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).
- 4) H. Raiko: “Disposal Canister for Spent Nuclear Fuel—Design Report”, POSIVA 2005-02 (2005).
- 5) C-G Andersson: “Development of fabrication technology for copper canisters with cast inserts—Status report in August 2001”, TR-02-07 (2002).
- 6) 経済産業省 資源エネルギー庁: ”諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について”, (2007).
- 7) T. Saanio, T. Kirkkomäki, P. Keto, T. Kukkola and H. Paiko: “Preliminary Design of the Repository—Stage 2”, Working Report 2006-94 (2007).
- 8) SKB: “SR97—Waste, repository design and sites”, TR-99-08 (1999).
- 9) POSIVA: Private Communication (2007).
- 10) SKB: Private Communication (2007).
- 11) SKB: “RD&D Programme 2007—Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste”, TR-07-12 (2007).
- 12) R. Håkansson: “Beräkning av nuklidinnehåll, resteffekt, aktivitet samt doshastighet för utbränt kärnbränsle”, R-99-74 (2000).
- 13) SKB: “SR 97—Post-closure safety—Main Report Volume I ”, TR-99-06 (1999).
- 14) SKB: “RD&D Programme 2004—Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste, including social science research”, TR-04-21 (2004).

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

Table with 3 columns: 基本量, SI 基本単位 (名称, 記号), and values. Rows include 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

Table with 3 columns: 組立量, SI 基本単位 (名称, 記号), and values. Rows include 面積 (平方メートル, m²), 体積 (立方メートル, m³), 速度 (メートル毎秒, m/s), 加速度 (メートル毎秒毎秒, m/s²), 波数 (毎メートル, m⁻¹), 密度 (キログラム毎立方メートル, kg/m³), 面積密度 (キログラム毎平方メートル, kg/m²), 比体積 (立方メートル毎キログラム, m³/kg), 電流密度 (アンペア毎平方メートル, A/m²), 磁界の強さ (アンペア毎メートル, A/m), 量濃度 (モル毎立方メートル, mol/m³), 質量濃度 (キログラム毎立方メートル, kg/m³), 輝度 (カンデラ毎平方メートル, cd/m²), 屈折率 (数字), 比透磁率 (数字).

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) とよばれる。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

Table with 5 columns: 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. Rows include 平面角 (ラジアン, rad), 立体角 (ステラジアン, sr), 周波数 (ヘルツ, Hz), 力 (ニュートン, N), 圧力 (パスカル, Pa), エネルギー (ジュール, J), 仕事率 (ワット, W), 電荷 (クーロン, C), 電位差 (ボルト, V), 静電容量 (ファラド, F), 電気抵抗 (オーム, Ω), コンダクタンス (ジーメンズ, S), 磁束 (ウェーバ, Wb), 磁束密度 (テスラ, T), インダクタンス (ヘンリー, H), セルシウス温度 (セルシウス度, °C), 光照度 (ルーメン, lm), 放射線量 (グレイ, Gy), 吸収線量 (グレイ, Gy), 線量当量 (シーベルト, Sv), 放射線活性 (カタール, kat).

(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

Table with 4 columns: 組立量, 名称, 記号, SI 基本単位による表し方. Rows include 粘り度 (パスカル秒, Pa s), 力のモーメント (ニュートンメートル, N m), 表面張力 (ニュートン毎メートル, N/m), 角速度 (ラジアン毎秒, rad/s), 角加速度 (ラジアン毎秒毎秒, rad/s²), 熱流密度 (ワット毎平方メートル, W/m²), 熱容量 (ジュール毎ケルビン, J/K), 比熱容量 (ジュール毎キログラム毎ケルビン, J/(kg K)), 熱伝導率 (ワット毎メートル毎ケルビン, W/(m K)), 体積エネルギー (ジュール毎立方メートル, J/m³), 電界の強さ (ボルト毎メートル, V/m), 電荷密度 (クーロン毎立方メートル, C/m³), 表面電荷 (クーロン毎平方メートル, C/m²), 電束密度 (クーロン毎平方メートル, C/m²), 誘電率 (ファラド毎メートル, F/m), 透磁率 (ヘンリー毎メートル, H/m), モルエネルギー (ジュール毎モル, J/mol), モルエンタロピー (ジュール毎モル毎ケルビン, J/(mol K)), 照射線量 (クーロン毎キログラム, C/kg), 吸収線量率 (グレイ毎秒, Gy/s), 放射線強度 (ワット毎ステラジアン, W/sr), 放射線輝度 (ワット毎平方メートル毎ステラジアン, W/(m² sr)), 酵素活性濃度 (カタール毎立方メートル, kat/m³).

表5. SI 接頭語

Table with 6 columns: 乗数, 接頭語, 記号, 乗数, 接頭語, 記号. Rows include 10²⁴ (ヨタ, Y), 10²¹ (ゼタ, Z), 10¹⁸ (エクサ, E), 10¹⁵ (ペタ, P), 10¹² (テラ, T), 10⁹ (ギガ, G), 10⁶ (メガ, M), 10³ (キロ, k), 10² (ヘクト, h), 10¹ (デカ, da), 10⁻¹ (デシ, d), 10⁻² (センチ, c), 10⁻³ (ミリ, m), 10⁻⁶ (マイクロ, μ), 10⁻⁹ (ナノ, n), 10⁻¹² (ピコ, p), 10⁻¹⁵ (フェムト, f), 10⁻¹⁸ (アト, a), 10⁻²¹ (zepto, z), 10⁻²⁴ (yocto, y).

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

Table with 3 columns: 名称, 記号, SI 単位による値. Rows include 分 (min, 1 min=60s), 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/10800) rad), 秒 (″, 1″=(1/60′)=(π/648000) rad), ヘクタール (ha, 1 ha=1hm²=10⁴m²), リットル (L, l, 1 L=1dm³=10³cm³=10⁻³m³), トン (t, 1 t=10³ kg).

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で表される数値が実験的に得られるもの

Table with 3 columns: 名称, 記号, SI 単位で表される数値. Rows include 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)×10¹¹ m).

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

Table with 3 columns: 名称, 記号, SI 単位で表される数値. Rows include バー (bar, 1 bar=0.1MPa=100kPa=10⁵Pa), 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=10⁻¹⁰m), 海里 (M, 1 M=1852m), バン (b, 1 b=100fm²=(10⁻¹²cm)²=10⁻²⁸m²), ノット (kn, 1 kn=(1852/3600)m/s), ネーパ (Np), ベル (B), デシベル (dB). Note: SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

Table with 3 columns: 名称, 記号, SI 単位で表される数値. Rows include エルグ (erg, 1 erg=10⁻⁷ J), ダイン (dyn, 1 dyn=10⁻⁵ N), ポアズ (P, 1 P=1 dyn cm⁻²=0.1Pa s), ストローク (St, 1 St=1cm² s⁻¹=10⁻⁴m² s⁻¹), スチルブ (sb, 1 sb=1cd cm²=10⁻⁴cd m²), フォト (ph, 1 ph=1cd sr cm⁻²=10⁻⁴lx), ガル (Gal, 1 Gal=1cm s⁻²=10⁻²ms⁻²), マクスウェル (Mx, 1 Mx=1G cm²=10⁻⁸Wb), ガウス (G, 1 G=1Mx cm⁻²=10⁻⁴T), エルステッド (Oe, 1 Oe=(10³/4π)A m⁻¹).

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

Table with 3 columns: 名称, 記号, SI 単位で表される数値. Rows include キュリー (Ci, 1 Ci=3.7×10¹⁰ Bq), レントゲン (R, 1 R=2.58×10⁴ C/kg), ラド (rad, 1 rad=1cGy=10⁻² Gy), レム (rem, 1 rem=1 cSv=10⁻² Sv), ガンマ (γ, 1 γ=1 nT=10⁻⁹ T), フェルミ (fm, 1 fm=10⁻¹⁵ m), メートル系カラット (1メートル系カラット=200 mg=2×10⁻⁴ kg), トル (Torr, 1 Torr=(101 325/760) Pa), 標準大気圧 (atm, 1 atm=101 325 Pa), カロリー (cal, 1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリー), 4.1868 J (「IT」カロリー), 4.184 J (「熱化学」カロリー)), ミクロン (μ, 1 μ=1μm=10⁻⁶ m).

