



原子力規制委員会
原子力規制庁殿

令和元年度
乾式貯蔵施設に対する深層防護概念の適用に係る調査

経過報告書
(抜粋版)

令和元年 12 月

三菱重工業株式会社

目次

1. 序論	1-1
1.1 概要	1-1
1.2 実施内容	1-1
1.3 実施期間	1-2
2. 調査結果	2.1.1-1
2.1 乾式貯蔵施設における深層防護概念の適用に係る調査	2.1.1-1
2.1.1 概要	2.1.1-1
2.1.2 調査結果	2.1.2-1
2.1.3 深層防護の国内事例との比較レビュー	2.1.3-3
2.2 乾式貯蔵施設における深層防護概念の適用に係る調査	2.2-1
2.2.1 チェルブイリ原子力発電所構内 ISF-2 の二重壁キャニスタ	2.2-1
2.2.2 サイズウエルB原子力発電所の乾式貯蔵施設の二重壁キャニスタ	2.2-13
付録-1 深層防護の観察と詳細な歴史 (ML13277A421) の要訳	付録 1-1

参考文献

1. 序論

1.1 概要

本事業では、乾式貯蔵施設に対する深層防護※概念の適用事例について諸外国の事例を調査し、国内乾式貯蔵施設技術要件との比較検討を実施する。また、深層防護概念の設計実用化例として既に国外乾式貯蔵施設において採用実績のある二重壁キャニスタについて調査した。

※乾式貯蔵施設における深層防護概念適用の一例

第一層：通常運転時の違反防止

第二層：設計基準事故の防止

第三層：偶発的な事故の制御

第四層：作業員と公衆の防護のための対策

(「乾式使用済核燃料の中間貯蔵施設の安全に関する基本規定」ウクライナ)

1.2 実施内容

(1) 乾式貯蔵施設における深層防護概念の適用に係る調査

乾式貯蔵施設の実績又は計画がある国の貯蔵施設技術要件における深層防護概念の取り込み状況及び当該概念の貯蔵施設への反映状況について調査する。

深層防護の概念が乾式貯蔵施設の技術要件として具体的にどのように規定されているか、また、当該技術要件が実際の貯蔵施設の運用や基本的安全機能（密封機能、遮蔽機能、除熱機能、臨界防止機能）維持等の観点から施設設計へどのように反映されているのか事例を抽出する。

また、抽出した技術要件、施設設計及び施設運用について国内事例との比較レビューを実施し、深層防護概念の階層ごとに分類した上で比較表に整理する。なお、深層防護概念における階層の分類方法は複数考えられるため、比較表作成にあたっては規制庁と作成方針を協議の上で作成作業を実施する。

調査対象とする乾式貯蔵施設の方式は、金属キャスク貯蔵方式、コンクリートキャスク貯蔵方式、サイロ貯蔵方式、ボルト貯蔵方式、半地下貯蔵方式とし、貯蔵対象物は使用済燃料、ガラス固化体、燃料デブリ、破損燃料とする。調査対象国は以下に示す国とする。

調査対象国：

アルゼンチン、ベルギー、ブルガリア、カナダ、中国、チェコ、フィンランド、フランス、ドイツ、ハンガリー、イタリア、韓国、リトアニア、ルーマニア、ロシア、スロバキア、スロベニア、南アフリカ、スペイン、スイス、台湾、ウクライナ、英国、米国

(2) 乾式貯蔵施設における深層防護概念の適用に係る調査

深層防護概念に基づく技術要件が乾式貯蔵施設設計へ実際に反映された例である二重壁キャニスタについて調査を実施する。

チェルノブイリ原子力発電所構内 ISF-2 水平型コンクリート貯蔵モジュール及びサイズウェルB原子力発電所の乾式貯蔵施設に採用されている二重壁キャニスタに関して、乾式貯蔵実施事業者及び二重壁キャニスタ設計製造法人等を対象に海外現地調査（最大二か国）を含めた調査を実施する。調査結果については、(1)で作成する比較表を踏まえて、深層防護概念

に係る技術要件の設計への反映の観点で整理する。

なお、調査は以下の項目に即して実施し、現地調査については規制庁と協議の上で事前に質問事項を取りまとめた上で実施する。

- ・ 本設計導入の目的、経緯
- ・ 許認可技術要件、設計基準、仕様等
- ・ 試験研究実績
- ・ 貯蔵実績
- ・ 使用前検査方法、供用中検査方法、モニタリング項目等
- ・ 技術的課題

1.3 実施期間

令和元年7月23日から令和2年3月31日

2.成果

2.1 乾式貯蔵施設における深層防護概念の適用に係る調査

2.1.1 概要

乾式貯蔵施設の実績又は計画がある国の貯蔵施設技術要件における深層防護概念の取り込み状況及び当該概念の貯蔵施設への反映状況について調査を実施した。

(1)調査対象国

次の24か国について調査を実施した。

アルゼンチン、ベルギー、ブルガリア、カナダ、中国、チェコ、フィンランド、フランス、ドイツ、ハンガリー、イタリア、韓国、リトアニア、ルーマニア、ロシア、スロバキア、スロベニア、南アフリカ、スペイン、スイス、台湾、ウクライナ、英国、米国

(2)調査内容

以下の項目について調査した。

- ①深層防護の概念が乾式貯蔵施設の技術要件として具体的にどのように規定されているか
- ②当該技術要件が実際の貯蔵施設の運用や基本的安全機能（密封機能、遮蔽機能、除熱機能、臨界防止機能）維持等の観点から施設設計へどのように反映されているのか事例を抽出する。
- ③抽出した技術要件、施設設計及び施設運用について国内事例との比較レビューを実施し、深層防護概念の階層ごとに分類した上で比較表に整理する。

(3)調査対象

調査対象とする乾式貯蔵施設の方式は、金属キャスク貯蔵方式、コンクリートキャスク貯蔵方式、サイロ貯蔵方式、ボルト貯蔵方式、半地下貯蔵方式とし、貯蔵対象物は使用済燃料、ガラス固化体、燃料デブリ、破損燃料とする。

(4)調査方法

- ①以下のWebサイトをインターネット検索し、公開情報を収集する。
 - ・対象国の規制機関
 - ・対象国の対象施設の事業主体
 - ・対象国の対象施設に機器/施設を供給するメーカー
 - ・IAEA
 - ・WANO
- ②以下のキーワード（英語、現地語）からインターネット検索し、公開情報を収集する。
 - ・ Spent fuel storage, ・ Dry storage facility, ・ HLW, ・ Licensing, ・ Regulatory requirements,
 - ・ Safety function, ・ Redundancy, ・ Defence-in-depth.

2.1.2 調査結果

(1)概要

表 2.1.2-1 に前述の方法で検索・収集した各国の情報の有無を整理した。イタリアを除く 23 カ国については乾式貯蔵の技術要件を定める法令や規則等を入手した。イタリアについては現在小規模な研究炉燃料の乾式貯蔵施設の許認可が行われているが、それ以上の具体的な情報は入手できなかった。また、フィンランドは乾式貯蔵に対する技術要件はあるものの現時点では使用済燃料乾式貯蔵施設の計画そのものがないため施設設計や施設運用に関する情報はない。その他の国でも使用済燃料等の乾式貯蔵に特化した規制要件ではなく、原子力施設全般や放射線安全に関わる法令、規則を適用していると考えられるものが複数存在している。

(2)深層防護概念の階層分類

各国の乾式貯蔵施設において深層防護概念がどのように反映されているか整理するにあたり、まず深層防護の階層分類を定義しておく。

付録-1 に示すように深層防護概念における防護階層の分類については幾つかの方法が提案されているが、ここでは IAEA が発行した INSAG-10 [UKR39]にしたがって整理する。

INSAG-10 では深層防護の概念を次のように定義している。

「深層防護は、通常時、想定異常時及び事故時において放射性物質と従事者、公衆及び環境の間に設ける複数の物理障壁を維持するための異なるレベルの装置や方法の階層構造によって構成される。」

この概念をより具体的に展開した原子力施設に対する各防護レベルとそれらに対応する事象（事故）を表 2.1.2-2 に示す。なお、この分類は元々原子力発電所に対して作られたものであるが、使用済燃料乾式貯蔵施設に対しても適用できる。しかし、使用済燃料等の乾式貯蔵施設に対して表 2.1.2-2 にあるレベル 5 は現実的に想定し難いので、本調査、レベル 1 から 4 までを考えるものとする。

調査した各国の乾式貯蔵施設に適用している深層防護概念はこの階層分類にしたがって整理した。

表 2.1.2-1 対象各国の情報検査結果のまとめ (○：情報有り △：情報あるが条件有)

番号	国名	a. 乾式貯蔵の法令、規則等	b. (a)の中に深層防護の規定有無	c. 使用済燃料等の貯蔵施設に関わる情報 (施設名、貯蔵対象、貯蔵容量、貯蔵期間等)	d. (c)の中の(b)の深層防護を反映した 設備、運用有無	備考
1	アルゼンチン(ARG)	△ (原子力全般)	-	○	○	
2	ベルギー(BEL)	△ (原子力全般)	○	○	○	
3	ブルガリア(BGR)	○ (湿式含む)	○	○	○	
4	カナダ(CAN)	△ (廃棄物含む)	○	○	○	
5	中国(CHN)	○ (湿式含む)	○	○	○	
6	チェコ(CZE)	△ (安全解析書)	○	○	○	
7	フィンランド(FIN)	△ (湿式、埋設含む)	○	-	-	乾式貯蔵施設無
8	フランス(FRA)	○ (湿式含む)	○	○	○	
9	ドイツ(DEU)	○	○	○	○	
10	ハンガリー(HUN)	○	○	○	○	
11	イタリア(ITA)	×	-	一部	不明	乾式貯蔵は小規模
12	韓国(KOR)	○ (湿式含む)	-	○	○	
13	リトアニア(LTU)	○	○	○	情報無し	
14	ルーマニア(ROU)	○	○	○	○	
15	ロシア(RUS)	○ (湿式含む)	○	○	○	
16	スロバキア(SVK)	△ (廃棄物)	○	一部	一部	乾式貯蔵施設無(計画のみ)
17	スロベニア(SVN)	△ (原子力全般)	○	○	施設建設中で設計情報無し(推定)	乾式貯蔵施設建設中
18	南アフリカ(ZAF)	△ (原子力全般)	○	○	情報無し	
19	スペイン(ESP)	○ (HLW含む)	○	○	○	
20	スイス(CHE)	○	○	○	○	
21	台湾(TWN)	○	-	○	○	
22	ウクライナ(UKR)	○	○	○	○	
23	英国(GBR)	○	○	○	○	
24	米国(USA)	○	○	○	○	

色分け

表 2.1.2-2 原子力施設に対する深層防護の階層分類例[UKR39]

深層防護のレベル	防護の目的	放射能放出有無	事象（状態）
レベル 1	異常運転及び故障防止	無し	通常運転
レベル 2	異常運転の制御と故障検知	無し	想定異常事象
レベル 3	事故を制御して放射能放出を制限し、重大事故への進展を防止する。	有り (少量)	設計基準事故
レベル 4	重大事故を制御して施設外への放射能放出を制限する。	有り (施設内外)	設計基準事故を超える 重大事故
レベル 5	施設外に放射能が大量放出した場合の影響軽減	有り (施設内外)	同上

(3)国別の情報整理

①アルゼンチン[ARZ1~12]

1)概要

アルゼンチンでは1974年に運転を開始したアトーチャ(ATUCHA)原子力発電所1号機(圧力容器型重水炉(PHWR)、35.7万kWe)と1984年に運転を開始したエンバルセ(EMBALSE)原子力発電所(カナダ型重水炉(CANDU炉)、60万kWe)が運転中で、アトーチャ2号機(PHWR、74.5万kWe)及び小型モジュール炉CAREM25が建設中(2016年時点)である。

アルゼンチンにおける2012年の全発電電力量は1299億kWh、構成比率は水力22.7%、火力70.8%で原子力は4.6%である。

放射性廃棄物管理に関しては、使用済燃料の最終的な管理はCNEA(アルゼンチン原子力委員会)が責任を有する。規制機関はANR(アルゼンチン原子力規制庁)である。

エンバルセ発電所では1993年からASECQと呼ぶ貯蔵施設で乾式貯蔵が行われている。使用済燃料は、バスケットと呼ばれる金属容器に収納して溶接密封し、そのバスケット(複数)をコンクリートキャニスタ(サイロ)と呼ぶ鋼製管と鉄筋コンクリートから成る貯蔵モジュールに収容して貯蔵する。

1つのサイロにはCANDUの使用済燃料集合体60本を収納したバスケットが9基収容される。バスケットを収容した鋼製管は溶接により密封される。図2.1.2-1にバスケットへの燃料装荷から貯蔵までの手順を示す。また、図2.1.2-2にサイロの構造を示す。

表2.1.2-3に主な設計仕様を示す。サイロの全数量は248基であるが、2018年時点で209基が満杯となっている。[ARZ6] 図2.1.2-3に貯蔵施設の全景を示す。サイロが設置された貯蔵場所は保安上の理由によって2重フェンスで囲まれている。

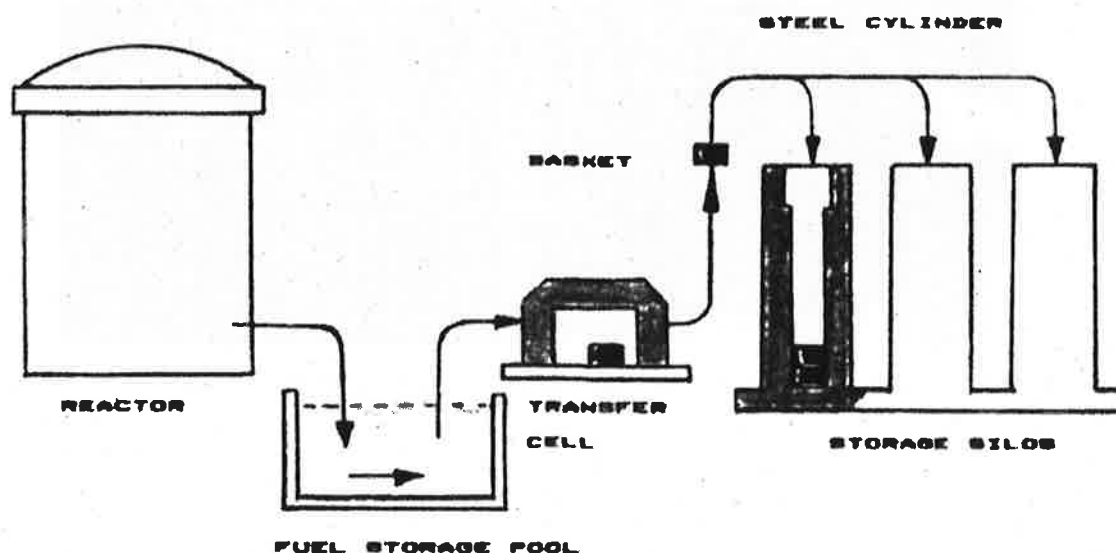


図 2.1.2-1 エンバルセ原子力発電所の乾式貯蔵の手順[ARZ7]

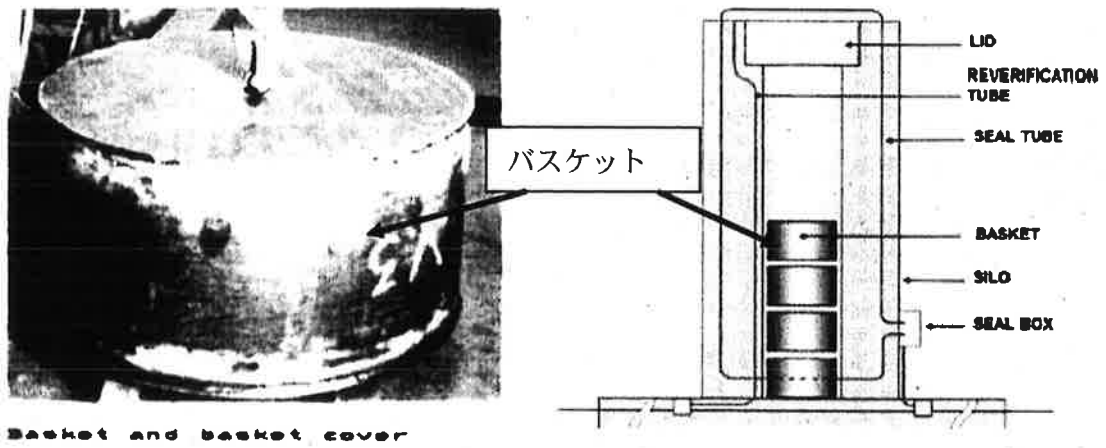


図 2.1.2-2 エンバルセ乾式貯蔵のサイロ構造[ARZ7, 8]

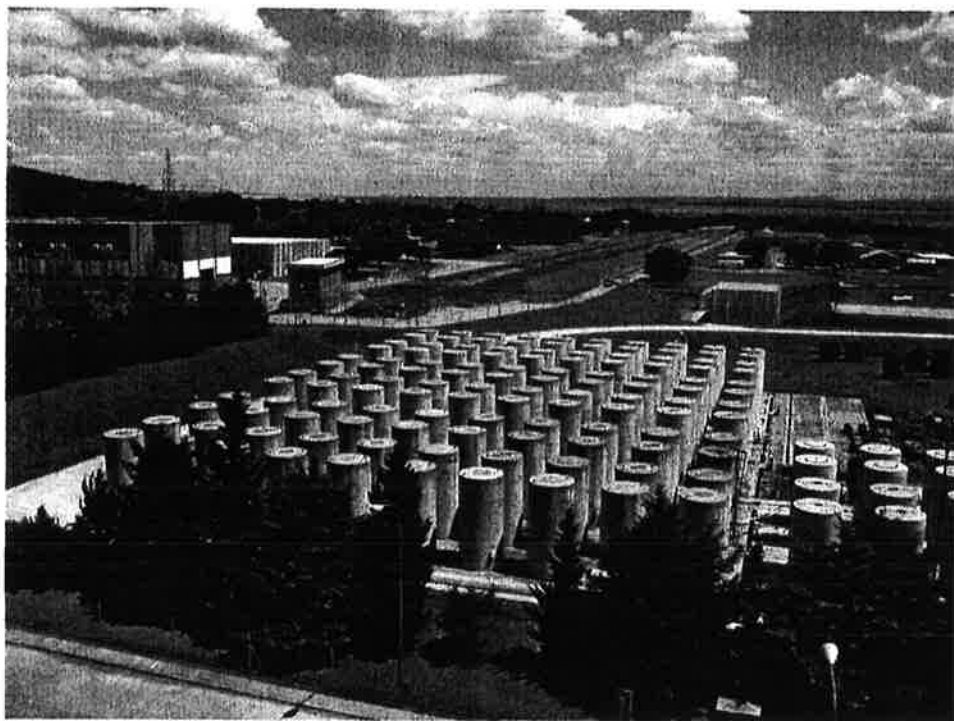


図 2.1.2-3 エンバルセ原子力発電所の乾式貯蔵施設[ARZ3]

表 2.1.2-3 エンバールセ原子力発電所の乾式貯蔵施設の仕様[ARZ4, 7]

項目	仕様	備考
サイロ（貯蔵モジュール）寸法	<ul style="list-style-type: none"> ・ 全長：6.3m ・ 外径：約 3m 	鉄筋コンクリート外套+ キャニスタ(溶接密封鋼管)
設計貯蔵期間	50 年～100 年	1993 年から運用開始
発熱量	6kW/サイロ	
バスケット	<ul style="list-style-type: none"> ・ 燃料集合体：60 体収納 ・ 数量：9 基/サイロ ・ 内圧：0.5kg/cm² 	
燃料集合体	CANDU 燃料集合体 <ul style="list-style-type: none"> ・ 全長：495.3mm ・ 燃料棒本数：37 本 ・ 燃料被覆管：ジルカロイ 4 ・ 燃焼度：7.5～8.5MWd/t* ・ 貯蔵中燃料温度：200℃以下* 	CANDU600 タイプ
想定事象	地震、洪水、竜巻、爆発等*	

* [ARZ12]

また、アトーチャ 1 号機では、新しく使用済燃料乾式貯蔵施設を建設する計画がある。[ARZ6] これは 1 号機のプール建屋に隣接して乾式貯蔵施設を作るというものである。この施設では使用済燃料 9 体を方形金属製容器（バスケット）に収納し、このバスケット 2 基をステンレス鋼製サイロに収容する。幾つかのサイロには線量に加えて使用済燃料被覆管温度を測定する計測系が備えられる予定。

2)技術要件

アルゼンチンには使用済燃料等の乾式貯蔵に特化した規制基準（技術要件）はなく、一般の原子力施設に対する放射性防護の基準と放射性廃棄物の取扱いに関する基準が適用される。表 2.1.2-4 にアルゼンチンの原子力施設における放射線防護基準を示す。また、表 2.1.2-5 に放射性廃棄物取扱いに関わる基準を示す。いずれも貯蔵施設の設計や運用に直接関係する可能性があるもののみを抽出している。さらに表 2.1.2-6 にはこれらを受けた放射性廃棄物の長期中間貯蔵の現状の規制を整理した。[ARZ2]

これらの規制要件の中で深層防護の原理が具体的に示されているものを挙げると次のようになる。

- ・クラス I 施設及びクラス II 施設の設計または運転における事故を防止するとともに事故発生時の放射線影響を軽減できるようにすること。
- ・クラス I 施設の放射線リスクを見積もるために故障、故障の組合せ及び設計基準を超える事態を含むあらゆる想定事故事象を解析すること。
- ・クラス I 施設は必ず内部緊急時対応計画を備えること。
- ・放射性廃棄物は規制当局の要求を満足する従事者、公衆及び環境の適切なレベルの放射線防護と放射線源の安全を保証できるよう管理すること。
- ・放射性廃棄物は固定化し、パッケージは物理的、化学的に安定で劣化に耐え適切な遮蔽機能を持つこと。
- ・放射性廃棄物は外観検査ができるように貯蔵すること。
- ・貯蔵施設の設計及び運用は通常運用時の安全だけでなく洪水、地震、火災その他の事象を考慮すること。
- ・貯蔵施設は ANR の要求にしたがって換気、遮蔽、漏洩制御及び温度、湿度管理の適切な設備を備えること。

表 2.1.2-4 アルゼンチンの放射線安全に係る標準（主要部分） [ARZ13]

分類	条	内容
A.目的	1	放射線の有害な影響から公衆を適切なレベルで防護する。
B.範囲	2	この標準は法令にしたがい規制当局（ARN：アルゼンチン原子力庁）が規制及び監督するすべての施設、活動等に適用される。 以下略
C.用語の説明	3~44	略
D.基準	45,46	略
	47	クラス I 施設とは以下を指す。 1. 発電用原子炉 2. 生産及び研究炉 3. 臨界集合体 4. 臨界になる可能性がある原子力施設※ ※使用済燃料貯蔵施設が含まれる。 5. 以下略
	48	略（クラス II 施設）
	49	略（クラス III 施設）
	50~88	略
	89	放射線防護システムの設計が、従事者の年間線量が 5mSv 以下で公衆の年間線量 100 μ Sv 以下、かつ 1 年間の集団線量が 10Sv 人以下を保証する場合は規制当局が求めなければシステムの最適化を行う必要はない。
D3.3.2 従事者の線量制限値	91~96	略
	97	従事者の線量制限値は以下のとおり。 年間の実効線量制限値は 20mSv でこの値は 5 年間の平均値に対して適用される（5 年間で 100mSv 以下）が、1 年間に 50mSv を超えないこと。 職業人の眼の水晶体の等価線量の制限値は年間 20mSv（施設の通常運転時）でこの値は 5 年間の平均値に対して適用される（5 年間で 100mSv 以下）が、1 年間に 50mSv を超えないこと。 皮膚の等価線量の制限値は年間 500mSv。
D3.3.2 公衆の線量制限値	98~103	略
	104	公衆のメンバーの線量制限値は集団の平均値に適用する。
	105	年間の実効線量の制限値は全身に対して 1mS。眼の水晶体に対して 15mSv、皮膚に対して 50mSv。
	106	略
	107	クラス I 施設及びクラス II 施設の設計または運転における事故を防止するとともに事故発生時の放射線影響を軽減できるようにすること。

	108	クラス I 施設の放射線リスクを見積もるために故障、故障の組合せ及び設計基準を超える事態を含むあらゆる想定事故事象を解析すること。
	109~111	略（クラス I 施設の設計における事故発生確率の設定）
D5 放射性廃棄物管理	112~114	略（廃棄物の最終処分）
D6 運転要件	115	略
	116	施設の運転は線量が合理的に達成可能な限り低くなるよう計画すること。
	117	運転要領書を作成して最新版を保管すること。
	118	略
	119	従事者の定期的な訓練を行うこと。
D6.1 作業場所の分類	120	作業場所は運転経験と特性にしたがって分類し区画すること。
	121	管理区域は適切な物理障壁、標示、近接制限及び個人監視により区画すること。
	122~127	略
D6.3 個人記録	128~131	略
D7 緊急時計画と対応要領	132	クラス I 施設は必ず内部緊急時対応計画を備えること。事故時に公衆に重大な放射線影響が及ぶ可能性がある施設は外部緊急時対応計画も備えること。これらは規制当局の承認を得ること。
	133~135	略
D8 介入	136~147	略
D9 通信連絡	148	クラス I 施設及びクラス II 施設の運営責任者は少なくとも以下の情報を規制当局と連絡する手段を持つこと。 <ul style="list-style-type: none"> -実効線量値 -放射性物質の環境への放出量 -発生した放射性廃棄物量 -従事者の線量または放射性物質の放出量の著しい増加をもたらす通常運転の状態 -施設周辺の環境モニタリング結果
D10 放射性物質輸送	149	放射性物質の輸送は規制当局が示す規則にしたがって行うこと。

表 2.1.2-5 アルゼンチンの放射性廃棄物取扱いに係る標準（主要部分）[ARZ13]

分類	条	内容
A.目的	1	公衆及び環境を放射線の有害な影響から適切なレベルで防護するための放射性廃棄物。
B.範囲	2	この標準は規制当局（ARN：アルゼンチン原子力庁）が規制及び監督するすべての施設、活動における放射性廃棄物管理に適用される。 以下略
C.用語の説明	3~31	略
D.要件 一般的要件	32	放射性廃棄物は規制当局の要求を満足する従事者、公衆及び環境の適切なレベルの放射線防護と放射線源の安全を保証できるよう管理すること。
	33	放射性廃棄物の発生量を合理的に達成可能な範囲で最小にすること。この要件への適合性を設計段階から運転及び操業の終了に至るまでの間考慮すること。
	34	放射性廃棄物からの放射線防護は規制当局が満足する最適化されたものであること。
	35	略（固体廃棄物）
	36	放射性廃棄物管理において発生する排出物の環境への放出は規制当局の該当する規則にしたがって行うこと。
	37~39	略
	40	放射性廃棄物を扱う施設の申請者は許認可過程において規制当局が満足する安全評価を行うこと。
	41	申請者は放射性廃棄物Nに対する品質保証システムを確立すること。
	42	略
特別の要件	43	申請者等は放射性廃棄物が廃棄物施設に搬出されるまで安全な取扱いに責任を持つこと。
	44	略
	45	放射性廃棄物貯蔵建屋の設計と運用は廃棄物パッケージの閉じ込めと回収性を確保できること。
	46,47	略
	48	放射性廃棄物は固定化し、パッケージは物理的、化学的に安定で劣化に耐え適切な遮蔽機能を持つこと。
	49	貯蔵する廃棄物パッケージは識別し分類すること。
	50	危険な特性を持つ廃棄物パッケージは識別し、関係するリスクを考慮し分別して貯蔵すること。
51	廃棄物パッケージは放射性核種、放射能濃度及び総放射エネルギー、それらの物理的形態その他の重要な特性によって分類すること。	

表 2.1.2-6 アルゼンチンの放射性廃棄物の長期中間貯蔵の規制現状（主要部分）[ARZ2]

分類	番号	内容
一般	1	放射性廃棄物の貯蔵施設は ARN（アルゼンチン原子力規制庁）の安全標準（AR10.1.1 及び AR10.12.）にしたがって従事者、公衆及び環境に対する放射線安全要件を満足するよう設計し運用すること。
	2	放射性廃棄物貯蔵施設の運営者は設計、建設、運用及び廃止の各段階における最大の放射能インベントリを考慮して安全評価を行うこと。
	3	放射性廃棄物貯蔵施設の設計及び運用は放射性廃棄物の閉じ込めと回収性を確保できること。
	4	放射性廃棄物貯蔵施設はたとえば不透過性塗装や密封容器によって合理的に可能な限り汚染を少なくするよう設計し運用すること。
	5	放射性廃棄物は α 、 β 、 γ 放出体のように分類すること。
	6	放射性廃棄物は固定化するとともに容器は安定で劣化しないこと。
	7	放射性廃棄物は外観検査ができるように貯蔵すること。
	8	貯蔵施設の設計及び運用は通常運用時の安全だけでなく洪水、地震、火災その他の事象を考慮すること。また、放射性廃棄物貯蔵施設はフェンス、ビデオカメラ、鍵のような ARN 標準で規定するセキュリティシステムを備えること。
	9	貯蔵施設は外表面の最大線量率が $10 \mu\text{Sv/h}$ を超えないよう設計し運用すること。この線量率を満足させるために換気及び冷却システム並びに追加遮蔽を用いてもよい。
	10	放射性廃棄物貯蔵施設の表面汚染レベルは合理的に可能な限り低くすること。
	11	毒物や可燃物を持つ放射性廃棄物は識別して他の放射性廃棄物と別の場所に貯蔵すること。
	12	緊急時における対応要領を策定して緊急対応要員の手が届くところに保持すること。貯蔵施設は ARN の要求にしたがって換気、遮蔽、漏洩制御及び温度、湿度管理の適切な設備を備えること。
長期貯蔵のための特別要件		放射性廃棄物貯蔵施設は放射性廃棄物の識別が行えること。
		放射性廃棄物貯蔵施設は耐久性を保証する記録保管システムを備えること。
		放射性廃棄物貯蔵施設は貯蔵期間中の放射線安全とセキュリティを確保すること。

3)深層防護の反映例

表 2.1.2-2 の深層防護の階層分類にしたがって、前出のエンバルセ原子力発電所の乾式貯蔵施設の貯蔵システムに適用していると考えられる主な深層防護施策を表 2.1.2-7 に整理した。

なお、深層防護のレベル 1 は通常状態の維持に関わるものなので、ここではレベル 2 からレベル 4 までを考える。(以下他国についても同様)

表 2.1.2-7 エンバルセ原子力発電所乾式貯蔵施設の深層防護例[ARZ7]

深層防護レベル(注)	施設設計	施設運用
レベル 1 異常/故障防止	—	—
レベル 2 異常/故障検知及び修正 (事故への進展防止)	閉じ込め障壁の多重化 一次：燃料被覆管 二次：バスケット(密封容器) 三次：サイロ(密封鋼管)	・経年劣化管理計画にしたがう機器、構造物サーベイランス ・サイロ内雰囲気の定期的測定 (エアロゾル、希ガス検知)
レベル 3 事故制御(重大事故への進展防止)	貯蔵施設を囲む二重フェンス	内部緊急時対応計画策定
レベル 4 重大事故制御(施設外影響軽減)	貯蔵施設を囲む二重フェンス	内部緊急時対応計画策定

注：ここでの事故は放射性物質が外部に放出される事象を指し、重大事故とは施設外に放射性物質が放出される事象を指す。

②ベルギー
以下略

2.1.3 深層防護の国内事例との比較レビュー

2.1.2にまとめた各国の乾式貯蔵における技術要件、施設設計及び施設運用について国内事例との比較レビューを実施した。

(1) 深層防護概念の階層分類

2.1.2(1)で説明したように IAEA の INSAG-10 による深層防護概念の階層分類を用いるものとする。これを表 2.1.3-1 に再度整理する。表 2.1.3-1 では、表 2.1.2-2 で取り上げたレベル 5 を除いてレベル 1 から 4 までを考えた。

この階層分類にしたがい我が国と調査した 24 か国の使用済燃料乾式貯蔵施設に適用する技術要件と施設設計、施設運用について表 2.1.3-1 から表 2.1.3-23 に整理した。なお、調査した 24 か国のうちイタリアについては、乾式貯蔵施設及びその技術要件に関する情報がほとんど入手できなかったため、対象から除いた。比較する我が国の施設は対象国の貯蔵方式に合わせて金属キャスクまたはコンクリートキャスクのいずれかとした。

表 2.1.3-1 乾式貯蔵施設における深層防護の階層分類

深層防護のレベル	防護の目的	放射能放出有無	事象（状態）
レベル 1	異常運転及び故障防止	無し	通常運転
レベル 2	異常運転の制御と故障検知	無し	想定異常事象
レベル 3	事故を制御して放射能放出を制限し、重大事故への進展を防止する。	有り (少量)	設計基準事故
レベル 4	重大事故を制御して施設外への放射能放出を制限する。	有り (施設内外)	設計基準事故を超える 重大事故

(2) 比較レビュー結果

前述のとおり表 2.1.3-2 から表 2.1.3-24 にアルゼンチンから米国までの 23 か国の乾式貯蔵施設における深層防護に基づくと考えられる技術要件と施設設計、施設運用について比較評価した。それを要約した結果を表 2.1.3-25 に整理した。

表 2.1.3-2 から表 2.1.3-24 (省略)

表 2.1.3-25 各国の使用済燃料乾式貯蔵の技術要件並びに施設、運用における深層防護の適用比較 (1/7)

国	乾式貯蔵の規則、技術要件	深層防護の規定	乾式貯蔵施設	深層防護の適用例 (主なもの)		備考
				施設	運用	
日本	<ul style="list-style-type: none"> ① 金属キャスク技術要件 ② コンクリートキャスク技術要件 ③ 使用済燃料貯蔵施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則 (平成二十五年十二月六日原子力規制委員会規則第二十四号) ④ 同上の規則の解釈について (平成25年11月27日 原管発第1311272号 原子力規制委員会決定) ⑤ 使用済燃料の貯蔵の事業に関する規則(平成二七年八月三十一日原子力規制委員会規則第六号) 	<p>左記①～⑤に深層防護に直接言及する記載はないがこの概念を踏まえた要件が随所に規定されている。</p> <p>以下例</p> <ul style="list-style-type: none"> ・キャニスタの蓋部は多重化された溶接蓋で密封すること。 ・崩壊熱を動力無しで除去できること。 ・火災及び爆発防止、検知及び消火、影響軽減 ・閉じ込め及び除熱機能の監視施設を設けること。 ・予備電源 等 	<p>福島第1発電所乾式貯蔵施設</p> <ul style="list-style-type: none"> ・方式：貯蔵専用キャスク ・燃料：BWR 燃料 ・建屋：有り (横置き) <p>東海第2発電所乾式貯蔵施設</p> <ul style="list-style-type: none"> ・方式：貯蔵専用キャスク ・燃料：BWR 燃料 ・建屋：有り (縦置き) <p>RFS 中間貯蔵施設(建設中)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・方式：輸送貯蔵兼用キャスク ・燃料：PWR,BWR 燃料 ・建屋：有り (縦置き) <p>※コンクリートキャスクは技術要件及び民間規格策定済</p>	<p>金属キャスク</p> <ul style="list-style-type: none"> ・多重の閉じ込め障壁 ・燃料被覆管※ ・キャスク(二重蓋) <p>コンクリートキャスク</p> <ul style="list-style-type: none"> ・多重の閉じ込め障壁 ・燃料被覆管※ ・キャニスタ (二重溶接蓋) <p>※漏洩燃料は貯蔵しない。</p>	<p>金属キャスク</p> <ul style="list-style-type: none"> ・キャスク漏洩監視 (蓋間圧力測定) <p>コンクリートキャスク</p> <ul style="list-style-type: none"> ・貯蔵中検査 (キャニスタ 外観、塩分濃度等) ・定期的安全レビュー(10年ごと) 	
アルゼンチン	<ul style="list-style-type: none"> ① AR.10.1.1(放射線安全標準) ② AR10.12.1(放射性廃棄物管理標準) ③ Current Regulatory Situation of Long Term Interim Storage of Radioactive Waste in Argentina (2013) <p>※規制機関は ARN(アルゼンチン原子力規制庁)</p>	<p>左記①,②には深層防護の直接的規定なし、しかし該当する規定として例えば以下がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・通常時だけでなく事故時の公衆及び環境保護 ・緊急時対応計画の備え 	<p>ASECQ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・方式：コンクリートキャニスタ (カナダ AECL と同じ方式) ・燃料：CANDU 燃料 ・建屋：無し 	<ul style="list-style-type: none"> ・多重の閉じ込め障壁 ・燃料被覆管 ・バスケット(容器) ・サイロ(密封鋼管) ・多重の障壁 ・施設フェンス(2重) 	<ul style="list-style-type: none"> ・経年劣化管理計画に基づくシステムの機器、構造物のサーベイランス ・サイロ内のエアロゾルと希ガスの定期的測定 	<p>コンクリートキャニスタは AECL が開発したシステムで設計及び運用は基本的に同じと考えられる。</p>
ベルギー	<ul style="list-style-type: none"> ① 王政令 2011.11.30(SNRI-2011) ② 新しいクラス I 原子力施設の安全審査指針 (N° 2013-05-15-NH-5-4-3 4) ③ 米国 10CFR72※ <p>※ ベルギーではキャスクの安全基準は米国 10CFR72 を準用している。</p> <p>※規制機関は FANC(連邦原子力庁)</p>	<p>①は深層防護を適用して、事故防止または防止時の放射能放出を制限することと規定している。</p> <p>また②は通常時～事故を4レベルに分けて公衆及び環境の保護を規定しているが、いずれもキャスクに対する具体的な技術要件を規定するものではない。このため、以下では実際の許認可審査で参照している 10CFR72 も参照して比較した。</p>	<p>ドール乾式貯蔵施設</p> <ul style="list-style-type: none"> ・方式：輸送貯蔵兼用キャスク (TN-24 型キャスク) ・燃料：PWR 燃料 ・建屋：有り 	<ul style="list-style-type: none"> ・多重の閉じ込め障壁 ・燃料被覆管※ ・キャスク (二重蓋) <p>※破損燃料は密封カプセルに収容して貯蔵</p> <ul style="list-style-type: none"> ・航空機落下、火災、埋没に耐えるキャスク設計 	<ul style="list-style-type: none"> ・キャスク漏洩常時監視 (蓋間圧力測定) ・定期的安全レビュー(10年ごと) ・放射能監視 ・緊急時避難計画 	
ブルガリア	<ul style="list-style-type: none"> ① 2004年8月2日政令第196号「使用済燃料の安全管理規則」 <p>※規制機関は NRA(ブルガリア原子力規制庁)</p>	<p>左記①にて公衆及び環境の安全確保は深層防護によることを規定</p> <ul style="list-style-type: none"> ・被曝防止のための複数障壁 ・それらを保護し維持するシステム 	<p>コズドロイ乾式貯蔵施設</p> <ul style="list-style-type: none"> ・方式：輸送貯蔵兼用キャスク (CONSTOR440/44 型) ・燃料：VVER 燃料 ・建屋：有り 	<ul style="list-style-type: none"> ・多重の閉じ込め障壁 ・キャスク三重蓋(1次蓋はボルト、2,3次蓋は溶接) ・換気システム排出口へのフィルタ設置 <p>※漏洩燃料の貯蔵可否は不明</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・放射能監視 (施設内の放射線パラメータの常時監視と制限値からの逸脱の迅速検知及び警報) 	

表 2.1.3-24 各国の使用済燃料乾式貯蔵の技術要件並びに施設、運用における深層防護の適用比較 (2/7)

国	乾式貯蔵の規則、技術要件	深層防護の規定	乾式貯蔵施設	深層防護の適用例 (主なもの)		備考
				施設	運用	
カナダ	① REGDOC-2.11.1, Waste Management, Volume III: Safety Case for Long-term Radioactive Waste Management ② CSA 標準 N292.2, Interim dry storage of irradiated fuel ③ Sixth Report October 2017, Canadian National Report for the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management ※規制機関は CNSC(カナダ原子力委員会)	・左記①にて原子力施設の安全確保のため、設計において5つの深層防護レベルを適切に考慮することを規定している。 ・左記②はより①をより具体化した技術要件を含んでいる。	AECL の乾式貯蔵施設 ・方式： 1) コンクリートキャニスタ (アルゼンチンと同じ) 2) MACSTOR (モジュール方式) ・燃料：CANDU 燃料 ・建屋：無し OPG の乾式貯蔵施設 ・方式：乾式貯蔵コンテナ(2重) ・燃料：CANDU 燃料 ・建屋：有り	AECL ・3重の閉じ込め障壁 ・燃料被覆管 ・バスケット(容器) ・サイロ(密封鋼管) OPG ・2重の閉じ込め障壁 ・燃料被覆管 ・コンテナ(2重容器) ・HEPA フィルタ 外部事象等に対する追加障壁 AECL：サイロ、モジュール OPG：貯蔵建屋	AECL ・貯蔵中監視 ・放射能監視 ・バスケット及びキャニスタの漏洩監視(サイロ内のエアロゾルと希ガスの定期的な測定) 等 OPG ・貯蔵中監視 ・放射線モニタリング ・コンテナの漏洩検査	
中国	① 使用済燃料後処理施設の安全要求 (2018年12月18日) (生態環境部)	左記①の要件9にて深層防護を適用して施設の通常時～事故の各状態における放射性物質の放出に関する制限値を満たすよう設計し、また緊急時に備えることを規定している。	秦山3期発電所の乾式貯蔵施設 ・方式：MACSTOR 400 (モジュール方式) ・燃料：CANDU 燃料 ・建屋：無し ※カナダの AECL と同じ方式	カナダの AECL と同じと考えられる。すなわち ・3重の閉じ込め障壁 ・燃料被覆管 ・バスケット(容器) ・サイロ(密封鋼管) ・貯蔵モジュール (外部事象及び放射能障壁)	・貯蔵中監視 ・放射能監視 ・バスケット及びキャニスタの漏洩監視(サイロ内のエアロゾルと希ガスの定期的な測定) ・定期的安全レビュー ・緊急時対応計画	MACSTOR400 は AECL が開発したシステムで設計及び運用は基本的に同じと考えられる。
チェコ	① 独立施設における使用済燃料貯蔵 安全指示書 (BN-02.1) ※規制機関は SUJB(原子力安全局)	左記①に深層保護の目的が、従事者、公衆及び環境を保護するために事故防止および事故の影響を軽減することであることを規定している。	ドコバニ、テメリン乾式貯蔵施設 ・方式：輸送貯蔵兼用キャスク (CASTOR) ・燃料：VVER 燃料 ・建屋：有り	・多重の閉じ込め障壁 ・燃料被覆管 ・キャスク(二重蓋) ・フィルタ捕集システム ・外部事象障壁 ・キャスク(保護蓋) ・貯蔵建屋	・キャスク漏洩常時監視 (蓋間圧力測定) ・キャスク本体定期検査 (3年ごと外観) ・放射能モニタリング ・定期的安全レビュー ・緊急時対応計画	
フィンランド	① 原子燃料の取扱い及び輸送 (GUIDE YVL D.3 / 15) ※規制機関は STUK (放射線及び原子力安全庁)	左記①に使用済燃料施設の安全性を確保するため深層防護原理を適用することとその基本的要件(冗長性、独立性等)を規定している。	フィンランドでは使用済燃料はプール保管されており、現在のところ乾式貯蔵施設は建設されていない。	—	—	
フランス	① Order of 7 February 2012 laying down the general rules for basic nuclear installations (DEVP1202101A) ※規制機関は、ASN (原子力安全局)	左記①に安全確保のため深層防護原理を適用することとその基本的要件を規定している。(立地選定、品質保証、防御要素の冗長性/多様性/独立性、事故時対応計画等)	CASCAD ・方式：ボルト(直行流冷却) ・燃料：重水炉、研究炉燃料 ・建屋：半地下2階式	・二重の閉じ込め障壁 ・燃料被覆管 ・燃料収納管 ・冷却異常時の強制空冷システム ・燃料取扱いクレーン (二重化電動システム)	・貯蔵中の燃料漏洩検知 (収納管内ガス採取) ・燃料収納管上部蓋シール漏洩検査	

表 2.1.3-24 各国の使用済燃料乾式貯蔵の技術要件並びに施設、運用における深層防護の適用比較 (3/7)

国	乾式貯蔵の規則、技術要件	深層防護の規定	乾式貯蔵施設	深層防護の適用例 (主なもの)		備考
				施設	運用	
ドイツ	① Guidelines for dry cask storage of spent fuel and heat-generating waste (2013 改訂) ※規制機関は BfE (核燃料廃棄物管理連邦安全局)	左記①には明確に深層防護原理を規定していないが、実質的にそれらの原理に基づく細かな要件が書かれている。	集中貯蔵施設、発電所内貯蔵施設 ・方式：輸送貯蔵兼用キャスク (CASTOR) ・燃料：PWR, BWR, ガス炉燃料 ・建屋：有り	・複数の閉じ込め障壁 ・燃料被覆管+ペレット ・キャスク (二重蓋) ※破損燃料はキャンに収納 ・キャスクと建屋の両方で従事者と公衆を放射線から防護 ・バックアップ電源と無停電電源設置	・キャスク漏洩常時監視 (蓋間圧力測定) ・蓋異常時の自動警報 ・定期的安全レビュー (10 年ごと)	
ハンガリー	① 使用済燃料中間貯蔵の安全規格、第 6 巻 (政令 118/2011) ※規制機関は HAEA (ハンガリー原子力庁)	左記①に深層防護原理に基づく安全要件を規定している。 ・燃料ペレット、被覆管、施設の貯蔵ユニット構造及び建屋を放出に対する閉じ込め障壁と見なす。 ・単一故障の仮定 ・安全上重要な要素の冗長性、多様性、独立性、無欠陥設計及び自己チェック性 等	パクシュ中間貯蔵施設 ・方式：モジュラー型ポールト (直行流冷却) ・燃料：VVER-440 型燃料 ・建屋：地上 2 階式	・複数の閉じ込め障壁 ・燃料被覆管+ペレット ・燃料収納管 ・貯蔵建屋 (フィルタ)	・収納管の漏洩監視 収納管への窒素ガス供給システムによる漏洩検知及び警報機能 ・排気設備出口に設置した連続エアロゾルモニタリング装置で空气中放射能監視 ・収納管の経年劣化監視 上部蓋の 5 年ごとの材料破壊試験と収納管材サンプルの監視 ・経年劣化管理システム ・定期的安全レビュー	
イタリア	入手できず。 ※規制機関は ISPRA (環境保護及び調査研究所)	—	ITREC 乾式貯蔵施設 (計画中) ・方式：輸送貯蔵兼用キャスク ・燃料：研究炉燃料 (U-Th) ※ ・建屋：有り (詳細不明) ※U-Th 燃料は再処理できないため長期貯蔵する計画	— 情報入手できず。	同左	
韓国	① 使用済燃料中間貯蔵施設の構造及び設備に関連する詳細な技術基準 (原子力安全委員会告示第 2015-19 号、2016.01.06、制定) ※規制機関は原子力安全委員会	左記①には深層防護の直接的表現はないが、事故防止から事故影響軽減に至る各レベルの防御を規定している。以下例 ・定期的な試験・監視・検査・保守ができる設計 ・消火システム故障時の安全確保 ・複数障壁による放射能放出防止 ・排水中、気中放射能濃度監視と自動警報	月城原子力発電所乾式貯蔵 ・方式： 1)コンクリートキャニスタ 2)MACSTOR 400 (モジュール方式) ・燃料：CANDU 燃料 ・建屋：無し ※カナダの AECL と同じ方式	カナダの AECL と同じと考えられる。すなわち ・3 重の閉じ込め障壁 ・燃料被覆管 ・バスケット (容器) ・密封鋼管 ・貯蔵モジュール、サイロ (外部事象障壁)	・貯蔵中監視 ・放射能監視 ・バスケット及びキャニスタの漏洩監視 (鋼管内のエアロゾルと希ガスの定期的な測定) ・定期的安全レビュー	

表 2.1.3-24 各国の使用済燃料乾式貯蔵の技術要件並びに施設、運用における深層防護の適用比較 (4/7)

国	乾式貯蔵の規則、技術要件	深層防護の規定	乾式貯蔵施設	深層防護の適用例 (主なもの)		備考
				施設	運用	
リトアニア	① 原子力安全要件”使用済燃料乾式貯蔵施設に対する一般要件” BSR-3.1.1-2010 ※規制機関は、VATESI(国家原子力安全検査局)	左記①に深層防護原理を適用して ・複数障壁による放射法放出防止 ・火災防止 を行うことを規定している。	イグナリア発電所乾式貯蔵施設 ・方式：輸送貯蔵兼用キャスク (CASTOR, CONSTOR) ・燃料：RMBK 燃料 ・建屋：有り	・複数の閉じ込め障壁 ・燃料被覆管 ・キャスク(二重蓋※) ※1次蓋は二重 O リング ・キャスク 2次蓋 (衝撃保護用で胴に溶接している。)	・キャスク装荷前の燃料漏洩検査 ・キャスク漏洩検査 (1回/年※) ※漏洩の連続監視は行っていない模様。 ・放射線制御システム (RCS) によるモニタリング ・緊急時対応計画	
ルーマニア	① 使用済燃料を含む放射性物質の廃棄に関わる安全要件、2017年7月11日規則第148号 ※規制機関は CNCAN (原子力活動管理国家委員会)	左記①には以下の深層防護の原理に基づいて設計し運用することを規定している。 ・複数の物理的障壁による放出防止 ・これらの障壁の健全性と有効性を守る技術的及び組織的手段 ・障壁が破れた場合に公衆と環境を保護する手段	チェルナボーク発電所乾式貯蔵施設 ・方式：MACSTOR 200 (モジュール方式) ・燃料：CANDU 燃料 ・建屋：無し ※カナダの AECL と同じ方式	カナダ AECL や韓国と同じと考えられる。すなわち ・3重の閉じ込め障壁 ・燃料被覆管 ・バスケット(容器) ・密封鋼管 ・貯蔵モジュール (外部事象障壁)	・貯蔵中監視 バスケット及びキャニスタの漏洩監視 (サイロ内のエアロゾルと希ガスの定期的な測定) ・放射能監視 ・定期的安全レビュー ・緊急時対応計画	
ロシア	① 原子力施設における使用燃料と貯蔵及び輸送に係る安全規則(NP-061-05) ※規制機関は Rostechnadzor (連邦環境産業原子力監督局)	左記①には深層防護の直接的表現はないが、事故防止から事故影響軽減に至る各レベルの防御を規定している。以下例 ・安全上重要な装置の試験・保守及び補修可能な設計 ・少なくとも2つの閉じ込め障壁 ・放射性物質、減速材検知及び温度の監視手段 ・複数障壁による放射能放出防止 ・事故時に備えたフィルタ	MCC 乾式貯蔵施設 ・方式：ボールド(平行流冷却) ・燃料：VVER 燃料、RBMK 燃料 ・建屋：地上2階式 ホットセル併設	・複数の閉じ込め障壁 ・燃料被覆管 ・燃料ケース※ ・収納管(貯蔵シート) ・フィルタ(放射能外部放出抑制) ※使用済燃料を収納する密封容器(内部 N ₂ +He)	・貯蔵中監視 ・燃料ケース、収納管の定期的漏洩検査(漏洩したケースは新しいものに詰め替え) ・放射能監視	
スロバキア	① 原子力平和利用に関する法律 (2004年9月9日) ② 核物質、放射性廃棄物及び使用済燃料取扱い要件を定める政令 (2012年1月30日) ※規制機関は ÚJD SR(スロバキア原子力規制庁)	左記①にて次のとおり深層防護原理を適用することを規定している。 ・深層防護を用いて事故防止と事故軽減を図る ・すべての設計及び設備に適用する。 左記②はこれを受けて具体的な要件を規定している。 ・環境への影響監視 等	ボフニチェ発電所乾式貯蔵施設 (建設中) ・方式：ボールド(直行流冷却) ・燃料：VVER 燃料 ・建屋：2階式	・複数の閉じ込め障壁 ・燃料被覆管(無漏洩) ・キャニスタ ・ボールド収納管 ・換気システム (放射性ガスの蓄積防止)	・閉じ込め障壁の漏洩の監視 (線量率及び表面汚染) ・定期的安全レビュー	

表 2.1.3-24 各国の使用済燃料乾式貯蔵の技術要件並びに施設、運用における深層防護の適用比較 (5/7)

国	乾式貯蔵の規則、技術要件	深層防護の規定	乾式貯蔵施設	深層防護の適用例 (主なもの)		備考
				施設	運用	
スロベニア	① 放射線及び原子力安全規則 ※規制機関は SNSA (原子力安全局)	左記①にて施設設計に深層防護原理を取り入れることを規定している。またその要素である独立性、多様性、冗長性、単一故障原理、フェールセーフ等を取り入れることも規定している。	クルスコ発電所乾式貯蔵施設 (建設中) ・方式: コンクリートキャスク (HI-STORM FW システム) ・燃料: PWR 燃料 ・建屋: 有り	・複数の閉じ込め障壁 ・燃料被覆管 ・キャニスタ (二重溶接蓋) ・貯蔵建屋内換気システム (事故時放射能除去) ・DEC (設計基準事故を超える事故条件) での安全確保設計 (航空機落下、地震等) 貯蔵建屋とオーバーパックが外部事象に対する障壁を成すと考えられる。	・貯蔵中監視 ・放射能監視 ・建屋内温度、湿度 ・定期的安全レビュー ・緊急時対応計画	
南アフリカ	① 原子力施設の安全評価に係る暫定ガイダンス (RG-0019) ※規制機関は NNR (南アフリカ原子力規制局)	左記①にて事故防止と事故影響軽減のために深層防護を適用することを規定している。また安全解析で深層防護をどのように実現しているか、また安全機能に反映しているかを説明することを求めている。	クバーク発電所乾式貯蔵施設 ・方式: 輸送貯蔵兼用キャスク (CASTOR X/28F) ・燃料: PWR 燃料 ・建屋: 有り(キャスク横置き)	・複数の閉じ込め障壁 ・燃料被覆管 ・キャスク(二重蓋※) ・貯蔵建屋の換気システム (異常時に通風口開放) ・貯蔵建屋 外部事象及び放射性物質放出に対する障壁の一部を成すと考えられる。	・キャスク漏洩常時監視 (蓋間圧力測定※) ・放射能監視 ・貯蔵建屋内温度監視 (38℃を超えると換気口を自動開放)	※具体的な情報は入手できなかったがドイツ他の CASTOR と同じと考えられる。
スペイン	① 使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物の安全基準に係る原子力安全委員会指示 (2010年10月13日 IS-29号) ※審査規制機関は CSN (原子力安全委員会)	左記①にて深層防護の要件※とその適用を規定している。 ※ ・事故防止または事故影響軽減のため多重の防御障壁を用いて施設の安全を確保する。 ・放射性物質閉じ込めのため少なくとも2つの障壁を持ち、いかなる事故時においても1つは機能を維持する。等	アスコ、ホセカブレラ乾式貯蔵施設 ・方式: コンクリートキャスク (HI-STORM 100Z) ・燃料: PWR 燃料 ・建屋: 無し トリロ、サンタマリアデガドナ乾式貯蔵施設 ・方式: 輸送貯蔵兼用キャスク (ENSA 型) ・燃料: PWR, BWR 燃料 ・建屋: 有(トリロ) 無し(サンタマリアデガドナ) 集中中間貯蔵施設 (ATC) ・方式: ボールト(平行流冷却) ・燃料: PWR, BWR 燃料 ・建屋: 半地下2階式 ホットセル併設	複数の閉じ込め障壁 ・輸送貯蔵兼用キャスク ・燃料被覆管 ・キャスク (二重蓋) ・コンクリートキャスク ・燃料被覆管 ・キャニスタ (溶接二重蓋) ・ボールト ・燃料被覆管 ・密封容器 ・収納管	・貯蔵中監視 ・蓋間圧力監視 (兼用キャスク) ・収納管内ガス分析 (ボールト密封容器漏洩検知) ・材料劣化監視 ・使用済燃料棒 (代表サンプルのホットセル調査) ・鉄筋コンクリート (サンプルの長期モニタリング) ・定期的安全レビュー ・緊急時対応計画	

表 2.1.3-24 各国の使用済燃料乾式貯蔵の技術要件並びに施設、運用における深層防護の適用比較 (6/7)

国	乾式貯蔵の規則、技術要件	深層防護の規定	乾式貯蔵施設	深層防護の適用例 (主なもの)		備考
				施設	運用	
スイス	<p>① 放射性廃棄物及び使用済燃料貯蔵施設の設計と運用指針 ENSI G04/d</p> <p>② 中間貯蔵用輸送貯蔵兼用容器の設計、製造及び運用に関する指針 G05</p> <p>※規制機関は ENSI (連邦原子力安全検査局)</p>	<p>左記①には深層防護を適用して事故防止及び軽減を規定している。②にも実質的に深層防護を前提とした要件が取り入れられている。以下例</p> <ul style="list-style-type: none"> ・使用済燃料容器は二重蓋 (②) ・容器の密封性の連続監視 (②) ・航空機落下時の安全確保 (建屋崩壊と火災の影響) (②) 他 	<p>ベツナウ中間貯蔵施設、 ヴェレンリンゲン集中中間貯蔵施設</p> <ul style="list-style-type: none"> ・方式：輸送貯蔵兼用キャスク (CASTOR 型、TN 型、HI-STAR180) ・燃料：PWR 燃料 ・建屋：有り(キャスク横置き) 	<ul style="list-style-type: none"> ・複数の閉じ込め障壁 ・燃料被覆管 ・キャスク(二重蓋) ・貯蔵建屋内換気システム (放射能汚染除去) ・貯蔵建屋(外部事象と放射能放出に対する障壁※) <p>※ENSI-G04 は建屋に納車能等の危険物から公衆と環境を保護する要件を課している。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・キャスク漏洩常時監視 (蓋間圧力測定) ・キャスク表面温度及び貯蔵建屋各部温度監視 ・放射能監視 	
台湾	<p>① 使用済燃料乾式貯蔵施設安全解析報告書審査指針 (會物字第 10800005551 號 令)</p> <p>※規制機関は原子能委員会</p>	<p>左記①には深層防護の適用について直接規定していないが、実質的に深層防護を前提とした要件が取り入れられている。原子能委員会は、審査において米国連邦規制 10 CFR Part 72 等を参照している。</p>	<p>金山発電所乾式貯蔵施設</p> <ul style="list-style-type: none"> ・方式：コンクリートキャスク (MAGNASTOR システム) ・燃料：BWR 燃料 ・建屋：無し 	<ul style="list-style-type: none"> ・複数の閉じ込め障壁 ・燃料被覆管 ・キャニスタ (二重溶接蓋) ・コンクリートキャスク給気口へのフィルター設置 (異物侵入防止) ・コンクリートオーバーパック (外部事象障壁) 	<ul style="list-style-type: none"> ・装荷前燃料漏洩確認 (原子炉データ、吸引試験) ・給排気口温度監視/自動警報、人による定期点検、 ・キャニスタ腐食、SCC 監視 (監視試験片の定期確認) ・キャスク埋没時の復旧手順 	
ウクライナ	<p>①使用済燃料乾式中間貯蔵の安全確保のための基本要件 (2010年12月29日 N-198号)</p> <p>※規制機関は SNRIU(国家原子力規制監督局)</p>	<p>左記①は使用済燃料乾式貯蔵施設に次の4つのレベルの深層防護を備えることを規定している。</p> <p>レベル1：通常運転からの逸脱防止</p> <p>レベル2：設計事故への進展防止 (故障検知と修正による)</p> <p>レベル3：設計事故の制御</p> <p>レベル4：従事者と公衆の防護計画</p>	<p>ザポロジエ発電所乾式貯蔵施設</p> <ul style="list-style-type: none"> ・方式：コンクリートキャスク (型式不明) ・燃料：VVER 燃料 ・建屋：無し <p>チェルノブイリ乾式貯蔵施設(建設中)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・方式：水平コンクリートモジュール ・HUMOHMS システム ・二重壁キャニスタ(DWC) ・燃料：RMBK 燃料 ・建屋：無し <p>集中中間貯蔵施設 (建設中)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・方式：コンクリートキャスク (HI-STORM190) ・二重壁キャニスタ(DWC) ・燃料：VVER 燃料 ・建屋：無し 	<ul style="list-style-type: none"> ・複数の閉じ込め障壁 ・燃料被覆管※ ・DWC 内壁 ・DWC 外壁 ・フィルター設置 (放射性物質捕集) ・貯蔵モジュール、コンクリートオーバーパック (外部事象障壁) <p>※漏洩燃料の貯蔵可否は不明、ペレットは閉じ込め障壁と見なさない。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・放射能監視 ・定期的安全レビュー ・緊急時対応計画 	

表 2.1.3-24 各国の使用済燃料乾式貯蔵の技術要件並びに施設、運用における深層防護の適用比較 (7/7)

国	乾式貯蔵の規則、技術要件	深層防護の規定	乾式貯蔵施設	深層防護の適用例 (主なもの)		備考
				施設	運用	
英国	<p>① 使用済燃料貯蔵の安全要件 (NS-TAST-GD-081 Revision 3) ※規制機関は ONR (原子力規制局)</p>	<p>左記①にて深層防護を適用して火災安全設計 (火災の防止、検知、制御及び軽減) を行うことを規定している。その他にも深層防護の概念に基づく規定がされている。以下例</p> <ul style="list-style-type: none"> ・設計基準を超えるシナリオのすべてに対する除熱及び換気機能確保 ・緊急時対応 ・定期的安全レビュー ・貯蔵環境に侵入する腐食性物質等のリスクとその軽減考慮 (検知と回復手段) 	<p>サイズウエル B 乾式貯蔵施設</p> <ul style="list-style-type: none"> ・方式: コンクリートキャスク (HI-STORM システム) / 二重壁キャニスタ (DWC) ・燃料: PWR 燃料 ・建屋: 有り <p>ヒンクリーポイント発電所乾式貯蔵施設 (計画中)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・方式: コンクリートキャスク (HI-STORM システム) / 二重壁キャニスタ (DWC) ・燃料: PWR 燃料 ・建屋: 有り 	<ul style="list-style-type: none"> ・複数の閉じ込め障壁 ・燃料被覆管※ ・キャニスタ (二重壁) ・コンクリートオーバーパック (外部事象障壁) <p>※漏洩燃料は貯蔵しない</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・装荷前燃料漏洩確認 (Cs-137, Kr-85 で漏洩検知) ・貯蔵中のキャニスタ漏洩監視 (底部と上蓋の温度差の変動監視による) ・定期的安全レビュー ・緊急時対応計画 	
米国	<p>① 10CFR72 使用済燃料および高レベル放射性廃棄物の独立貯蔵に係る認可要件</p> <p>② 審査指針 (R.G.3.60 他)</p> <p>③ 標準審査要領書 (NUREG1536 改 1, NUREG1567 他)</p> <p>④ 暫定審査官手引書 (ISG-〇〇)</p> <p>※規制機関は NRC (原子力規制委員会)</p>	<p>左記の規制文書では防護について直接言及していないが、NRC は古くから深層防護概念を原子力安全規制の根本思想として捉えており [], これらの文書にも随所に反映されている。以下例</p> <ul style="list-style-type: none"> ・貯蔵キャスクは冗長な閉じ込めシールを持つこと。 ・放射線防護システムの設置 ・閉じ込めシステムは、連続監視または定期監視の機能を持つこと。 ・通常時～想定事故時の閉じ込め性が証明できること。 ・貯蔵中の燃料被覆管の健全性維持 ・安全上重要な機器の試験及び監視性 ・強制冷却無しで冷却できること。 	<p>以下の方式が採用されているが、大半はキャニスタ (MPC) を用いるコンクリートキャスクと水平コンクリートモジュール</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. コンクリートキャスク 2. 水平コンクリートモジュール 3. 金属キャスク 4. 地下埋設方式 (MPC) 5. ポールト 	<ul style="list-style-type: none"> ・複数の閉じ込め障壁 ・燃料被覆管※ ・キャニスタ (二重溶接蓋) ・金属キャスク (二重蓋) <p>※ピンホール漏洩燃料は健全と見なす。それ以外の破損燃料は専用キャニスタに収納して貯蔵する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・緊急時用ユーティリティ 	<ul style="list-style-type: none"> ・漏洩監視 ・金属キャスク (蓋間圧力監視) ・放射線監視 (放射能濃度、線量率/警報機能) ・経年劣化管理 ・AMP に基づく安全上重要な SSC の管理 	