

地層処分対象放射性廃棄物の品質マネジメント

～地層処分において必要と考えられる高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の特性～

報告書

平成22年1月

日本原子力学会

「地層処分対象放射性廃棄物の品質マネジメント」

特別専門委員会

本報告書の複製、転載、引用等には、日本原子力学会の承認が必要です。

目 次

1. はじめに	1
2. 検討内容と手順.....	5
3. 高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の諸元と製造プロセス.....	6
4. 地層処分において必要と考えられる高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の特性.....	8
5. 高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）特性の把握.....	12
6. 今後の作業.....	17
7. おわりに.....	17

附属書

附属書 1 高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の諸元と製造プロセス.....	19
附属書 2 地層処分において必要と考えられる高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の特性の抽出	26
附属書 3 高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）製造プロセスと管理内容	51
用語集.....	65

1. はじめに

1.1 背景と目的

我が国では、原子力発電に伴い発生した使用済燃料を全量再処理して、ウラン、プルトニウムを回収し、リサイクル利用することを方針としており、昭和 56 年から本格運転を開始した（独）日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」と言う。）の東海再処理工場（茨城県東海村）では平成 19 年 9 月末までの累積処理量は約 1,140 トンに達し、我が国はじめての商用再処理施設である日本原燃（株）（以下、「JNFL」と言う。）再処理工場（青森県六ヶ所村）が本格的な操業に向けて、現在試運転中である。一部の使用済燃料については、電力会社が海外の再処理事業者（フランス AREVA NC 社、イギリス Sellafield Limited（以下、「SL」と言う。)) に再処理を委託している。

使用済燃料の我が国での再処理にともない発生する高レベル放射性廃液は、ガラス原料と混合されて熔融炉に投入され、水分蒸発と酸化物化が行われる。それとともにガラス原料も高温で熔融され、キャニスターと呼ばれる金属容器に注入され冷却されることにより、高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）（以下、「高レベルガラス固化体」と言う。）となる。

再処理の結果製造された高レベルガラス固化体は、JAEA 東海再処理工場では 247 本が保管中（平成 21 年 8 月末時点）である。また、AREVA NC 社に委託した再処理は全て終了し、製造された高レベルガラス固化体は既に全量（1,310 本）が我が国に返還され、JNFL 高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センターにおいて貯蔵されている。SL からは今後返還される予定である。JNFL 再処理工場が本格操業を開始すると、年間最大 800 トン U の使用済燃料が再処理され、毎年約 1,000 本の高レベルガラス固化体が製造されることとなる。

このような状況の中で、JNFL は、「これまでのガラス固化体の製造実績を踏まえ、原子力学会等の場で、ガラス固化体の製造者、所有者、処分者等の関係当事者も参加し、処分に係るガラス固化体の品質及び評価システムについて有識者の協力を得ながら更に検討を進める。」と表明した¹⁾。

一方、原子力安全・保安院放射性廃棄物規制課は、以下のように述べている²⁾。

「国内再処理事業の操業開始等に伴い、国内において製造されるガラス固化体や地層処分対象の低レベル放射性廃棄物の発生の進展が予想される。

このような国内で製造される地層処分対象の放射性廃棄物については、地層処分事業者の原子炉等規制法に基づく事業許可に係る安全審査において、製造・貯蔵されているガラス固化体等の仕様に応じて組合せられるバリア等を含めた処分システム全体の安全性として評価されることとなる。この安全審査を合理的に行う（例えば、安全評価において過度に保守的な条件とならない）観点からは、ガラス固化体等の仕様につながる廃棄体製造時等の記録が適切に録取されることが望ましいと考えられる。

このため、原子力安全・保安院は、適切に録取されることが望ましい廃棄体製造時等の

記録及びその記録の望ましい取得方法について、安全審査における重要項目を現在の知見で見通しつつ、今後の更なる知見の蓄積も考慮して、できるだけ前広に取りまとめて提示することとした。

その進め方としては、「原子力安全・保安部会 原子力安全基盤小委員会報告～原子力の安全基盤の強化について～（平成 19 年 10 月）」に基づき、以下を考えている。

- ① 社団法人日本原子力学会（以下、「学会」）における検討（1～2 年を目処に、今後、学会と調整）
- ② 学会の検討結果につき、廃棄物安全小委員会の審議を経て、原子力安全・保安院として事業者等に提示

なお、原子力安全・保安院としては、関係する事業者がこの提示した内容を、記録に関する自主保安活動に適切に反映することを望むものである。」

このような関係する事業者や原子力安全・保安院のニーズに対して原子力学会は、将来、地層処分システム全体の安全性を評価する際に、高レベルガラス固化体の種々の特性が必要であることを理解している。一方、処分時点において実測できる高レベルガラス固化体の特性は限定されるため、製造時点や製造時点以前において、製造に関するデータや情報を取得し記録しておくことが必要であることを認識している。

そこで、原子力学会は、「地層処分対象放射性廃棄物の品質マネジメント」特別専門委員会（以下、「委員会」と言う。）を設置し、JNFL と JAEA の再処理工場において軽水炉使用済燃料（MOX 使用済燃料、許可を超える高燃焼度の使用済燃料を除く）の再処理にともない製造される高レベルガラス固化体を対象として、地層処分において必要と考えられる高レベルガラス固化体の特性や、その把握のために適切に録取すべき製造時の記録及びその記録の取得方法、高レベルガラス固化体の地層処分への影響評価を踏まえた要件と製造目標の十分性の確認、少数の逸脱したあるいは非定常の高レベルガラス固化体¹への対応の検討等の、高レベルガラス固化体の特性に係る品質マネジメントについて検討し、そのあり方を提言することとした。

本報告書では、これらのうち、高レベルガラス固化体の地層処分に関して、処分施設の設計、処分施設の操業中の安全評価、処分施設の閉鎖後の長期安全評価等の内容を検討し、それらを行うために必要と考えられる高レベルガラス固化体の特性を抽出するとともに、その特性の把握のために高レベルガラス固化体製造時等に適切に録取すべき記録等について検討した。地層処分において必要と考えられる高レベルガラス固化体の特性を把握するためには、製造がなされた時点においてそれらの特性を直接測定することが考えられるが、それらのすべての特性を、すべての高レベルガラス固化体について直接測定することは困難である。このような特性に対しては、高レベルガラス固化体の運転管理等の

¹少数の逸脱したあるいは非定常の高レベルガラス固化体の例については、本文 3 章 7 ページの記述を参照のこと

記録により把握することについて検討した。

検討においては、高レベルガラス固化体の製造者、所有者、処分者等の関係当事者の説明を受け、これらの情報の基に議論した。

1.2 活動

1.2.1 委員会及び委員

委員会の構成委員、オブザーバ、説明者は以下の通りである。

(五十音順、敬称略)

委員

主査	朽山 修	(財)原子力安全研究協会
	出光 一哉	九州大学
	大江 俊昭	東海大学
	桐島 陽	東北大学
	佐藤 正知	北海道大学
	中條 武志	中央大学
	馬場 恒孝	(独)日本原子力研究開発機構
	藤田 智成	(財)電力中央研究所
	宮原 要	(独)日本原子力研究開発機構
	山名 元	京都大学
幹事	田辺 博三	(財)原子力環境整備促進・資金管理センター

オブザーバ

	大塚伊知郎	(独)原子力安全基盤機構
	木下 智之	原子力安全・保安院放射性廃棄物規制課

(組織名五十音順、敬称略)

説明者

	田村 明男	原子力発電環境整備機構
	加藤 和之	電気事業連合会
	奥田 宏昭	東京電力(株)
	塩月 正雄	(独)日本原子力研究開発機構
	吉沼 明彦	(独)日本原子力研究開発機構
	池田 孝夫	日揮(株)
	小山田 潔	日揮(株)
	越智 英治	日本原燃(株)
	大橋 誠和	日本原燃(株)
	久保田 寿一	日本原燃(株)

1.2.2 委員会の活動

第1回 平成21年5月22日

- ① 委員会設置目的について
- ② 委員会構成について
- ③ 検討の進め方及び議論の方向性について
- ④ 高レベルガラス固化体の特性について
- ⑤ 諸外国における高レベルガラス固化体の基準について
- ⑥ 品質マネジメントの考え方について

第2回 平成21年6月19日

- ① 高レベルガラス固化体に求められる要件・特性の整理について
- ② 高レベルガラス固化体処分の評価システムについて
- ③ 規制当局における検討の動向について

第3回 平成21年7月22日

- ① 各種高レベルガラス固化体の製造プロセス・管理内容・記録取得状況について
- ② 高レベルガラス固化体に関する放射能情報の決定・推定方法について
- ③ 地層処分の設計・安全評価・管理項目と必要な高レベルガラス固化体の特性について

第4回 平成21年9月2日

- ① 報告書案について

第5回 平成21年9月28日

- ① 報告書案について

2. 検討内容と手順

本報告において行った検討の内容と手順は概略次のとおりである（図 2-1 参照）。まず、対象となる高レベルガラス固化体の諸元と製造プロセスを整理した（第 3 章）。次に、高レベルガラス固化体の地層処分の概念に基づき、処分施設の設計、操業中の安全評価、及び閉鎖後の安全評価等において把握が必要と考えられる高レベルガラス固化体の特性を抽出した（第 4 章）。次にこれらに基づき、製造プロセスの管理内容と、抽出された特性との関連付けを行い、高レベルガラス固化体の特性の把握について検討した。また、これらの特性を把握するための判断材料として必要な製造プロセス管理以外の関連情報（運転条件と高レベルガラス固化体特性との関係に関する技術情報（以下技術情報と呼ぶ）、燃料履歴等）についても検討した（第 5 章）。さらに、4 章及び 5 章の検討においては、高レベルガラス固化体の製造プロセスにおいて起こる可能性を排除できない万一の誤認や故障等の逸脱も考慮し、それらによって製造される高レベルガラス固化体の特性を把握するために必要となる記録についても考察した（第 5 章）。

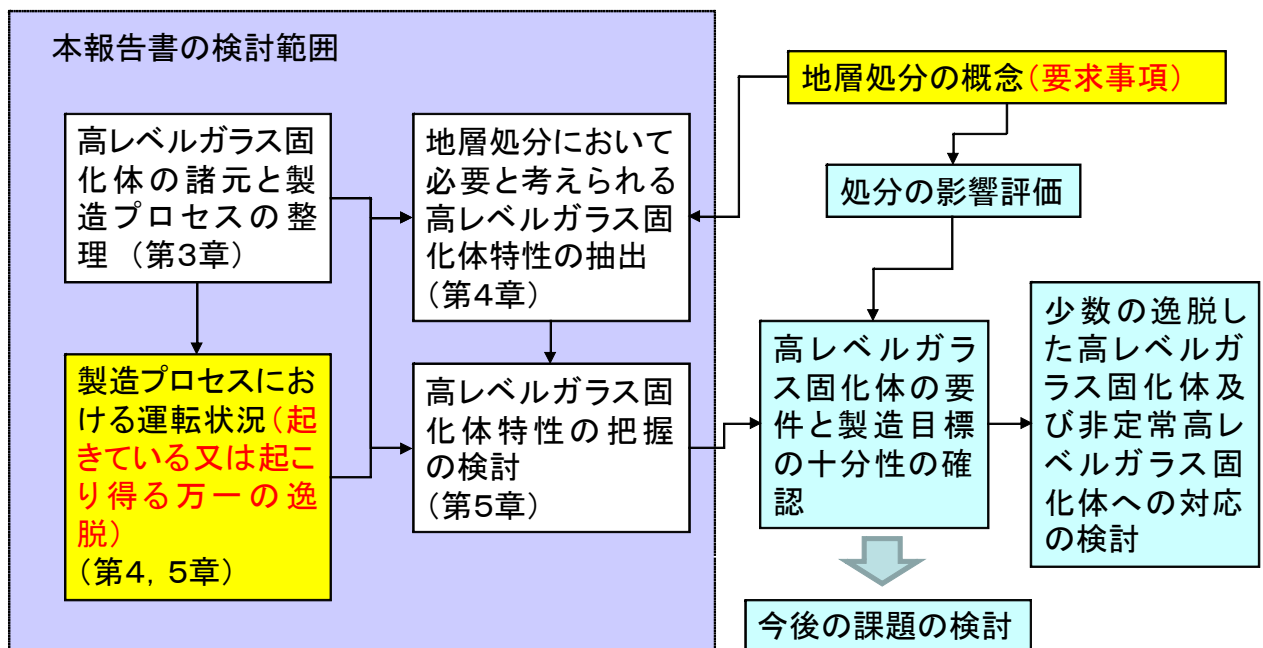


図 2-1 検討の進め方

3. 高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の諸元と製造プロセス

特性の抽出、及びその把握の検討の対象となる、国内で製造される高レベルガラス固化体は次の2種類である。

- ① JNFL 製造の高レベルガラス固化体
- ② JAEA 製造の高レベルガラス固化体

また、特性の抽出、及びその把握の検討に当たっては、すでに製造が完了し我が国に返還されている AREVA NC 社の高レベルガラス固化体についても参考にすることとする。

各高レベルガラス固化体の標準的な諸元を表 3-1 に示す。各高レベルガラス固化体はいずれも、ホウケイ酸ガラスにより固化しており、寸法（キャニスター高さ）は JAEA のものがやや小さく他の2種類は同じである。1本当たりの放射能レベルは全 β , γ 放射能濃度で 10^{16}Bq のオーダー、全 α 放射能濃度で 10^{14}Bq のオーダー以下で、発熱量は 2.3kW/本 以下、全体重量は $300\text{kg/本}\sim 500\text{kg/本}$ の範囲にある。

JNFL と JAEA の製造プロセスは LFCM (Liquid Fed Joule-heated Ceramic Melter) 法で、高レベル放射性廃液とガラス材料を同時にセラミック製熔融炉に投入し、熔融炉で熔融して高レベルガラス固化体とする方式である。一方、AREVA NC 社の製造プロセスは AVM (Atelier Vitrification de Marcoule) 法である。この方法の特徴は、高レベル放射性廃液をか焼した後、か焼物とガラス材料を金属製熔融炉に投入し、熔融炉で熔融して高レベルガラス固化体とする方式である。両方式ともに熔融温度は $1,000^{\circ}\text{C}$ 以上である。高レベルガラス固化体の製造プロセスにおいては、その貯蔵、輸送、処分の観点から適切な管理を行い、各々の観点到に適合した高レベルガラス固化体を製造し、逸脱の発生を最小化する必要がある。

詳細な諸元と製造プロセスは附属書 1 に示す。

表 3-1 高レベルガラス固化体の標準的な諸元*

	JNFL	JAEA	AREVA NC
全放射能濃度 (製造時)	$\beta, \gamma : 2.17 \times 10^{16} \text{Bq}$ $\alpha : 1.29 \times 10^{14} \text{Bq}$	$\beta, \gamma : \leq 1.5 \times 10^{16} \text{Bq}$ $\alpha : \leq 2.6 \times 10^{14} \text{Bq}$	(代表値) $\beta, \gamma : 2.8 \times 10^{16} \text{Bq}$ $\alpha : 1.4 \times 10^{14} \text{Bq}$
発熱量	2.3kW 以下 (製造時)	1.4kW 以下 (製造時)	< 2.0 kW (輸送時)
高レベルガラス 固化体寸法	高さ 約 1,340 mm 外径 約 430 mm キャニスター肉厚 約 6 mm	高さ 約 1,040 mm 外径 約 430 mm キャニスター肉厚 約 6 mm	高さ 約 1,340 mm 外径 約 430 mm キャニスター肉厚 約 5 mm
高レベルガラス 固化体重量	約 500kg	約 380kg	約 492kg

* : 附属書 1 表 1-1 より抜粋

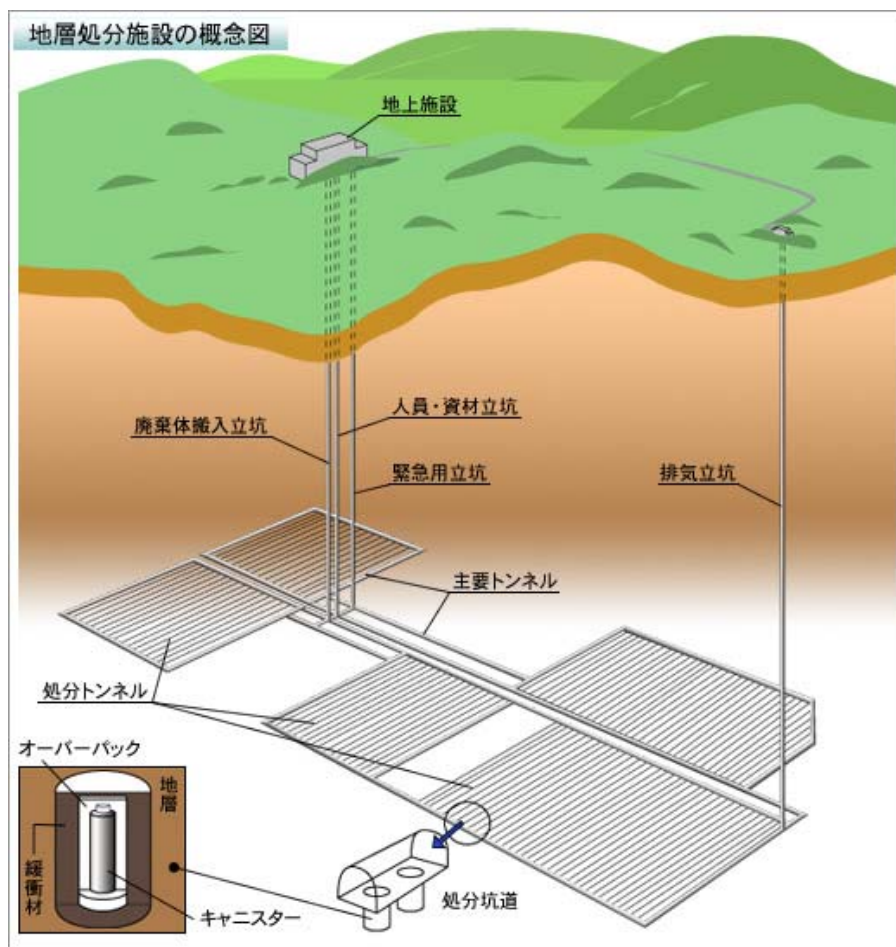
なお、4章及び5章の検討に当たっては、定常的に製造される高レベルガラス固化体以外に、製造時の逸脱により発生したイエローフェーズ含有高レベルガラス固化体及び軽量高レベルガラス固化体に加え、万一の誤認や故障等により発生が想定される比較的少数の高レベルガラス固化体（附属書 3、第 2 章参照）についても考慮した。定常運転の前後のスタートアップ、シャットダウン時や装置のメンテナンス時に少数発生する非定常ガラス固化体（附属書 3、第 2 章参照）については、通常の場合と運転条件が異なるため、今後必要な検討を行うこととした。

4. 地層処分において必要と考えられる高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の特性
本章では、処分に必要な高レベルガラス固化体の特性を、処分場の施設設計や施設の操業中、閉鎖後の安全評価等の観点から抽出した。特性抽出の具体的詳細については附属書2に示すこととし、ここではその概略を示す。

4.1 地層処分の概念

再処理の結果製造された高レベルガラス固化体は、30～50年間冷却のために専用施設で貯蔵管理され、その後地層処分施設まで輸送され、地上施設に搬入される。

地層処分において必要と考えられる高レベルガラス固化体の特性を検討する上で想定した概念を図4-1に示す。高レベルガラス固化体は、地上施設でオーバーパックに封入されて、300メートル以深の地下に設けられた処分坑道内に埋設（地層処分）される。オーバーパックの周囲には緩衝材が設置される。最終的には処分坑道等地下施設が埋め戻される。



出典：「原子力・エネルギー」図面集 2008³⁾

図 4-1 地層処分の概念

4.2 特性の抽出方法

上記の処分概念を前提として、処分の安全性に必要な高レベルガラス固化体の特性を抽出する上で、まず、高レベルガラス固化体は物理的・化学的に変化を受けにくく安定な固化体でなければならないと考えられる。そのため、安定性の確認に必要な特性を抽出する。次に、事業許可等の許認可の観点も含めて処分場の設計や安全評価等の評価項目別に高レベルガラス固化体の特性を抽出し整理する。

また、高レベルガラス固化体のハンドリングのため、当該高レベルガラス固化体は識別可能でなければならないので、そのために必要な特性を抽出する。

したがって、以下に示す評価項目の区分により、高レベルガラス固化体に必要な特性を抽出するものとする。

- a) 高レベルガラス固化体の安定性の確認に関する評価項目
- b) 処分施設の設計（人工バリア設計を含む）に関する評価項目
- c) 処分施設の操業中の安全評価に関する評価項目
- d) 処分施設の閉鎖後の安全評価に関する評価項目
- e) 高レベルガラス固化体の識別管理に関する評価項目

a. 高レベルガラス固化体の安定性の確認に関する評価項目

高レベルガラス固化体は前提として安定な固化体でなければならない。すなわち、高レベルガラス固化体は、物理的・化学的に変化を受けにくく放射能の閉じ込め機能に優れ、貯蔵・処分を通じて臨界にならないことの確認が必要である。このような、安定性の確認のために必要と考えられる高レベルガラス固化体の特性を、逸脱等により発生が想定される高レベルガラス固化体も考慮して抽出した。

物理的・化学的に変化を受けにくく、閉じ込め性に優れているという観点からは、溶接部や母材が健全で、著しい破損がなく放射性物質が容易に漏えいしないこと、及び埋設後の固化ガラスの溶解速度が小さいことに加えて、キャニスターの耐食性、固化ガラスの熱的安定性が求められる。

再処理における分離が適切に行われれば、高レベルガラス固化体には核分裂性核種及び崩壊後に核分裂性物質になる核種は微量しか含まれない。また、「地層処分研究開発第2次取りまとめ 分冊3 地層処分システムの安全評価」では、安全評価で考慮するFEPの選択（4.1.2.2項）において、臨界が生じるようなウランの濃集は現実的には起こりえないと考えられることから、ガラス固化体を地層処分する場合の臨界は安全評価で考慮する必要のないFEPとして除外されている⁵⁾。したがって、高レベルガラス固化体の臨界に対しては、再処理において核分裂性物質が適切に分離されていることを確認できる記録が取得されていればよい。

b. 処分施設の設計（人工バリア設計を含む）に関する評価項目

「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」⁴⁾によれば、処分施設は地上受入・オーバーパック施設、アクセス坑道（立坑、斜坑）、処分坑道、処分孔（竖置きの場合）から構成される。また、処分施設の設計は、熱、水理、力学、放射線の影響を考慮して行われている。それらを整理すると高レベルガラス固化体の特性が直接関連する設計項目としては腐食防止及び放射線被ばくの観点からのオーバーパック、熱変質抑制の観点からの緩衝材及び処分坑道・処分孔、遮へいの観点からの処分孔上部埋め戻し材があげられる。さらに、オーバーパック封入までの地上ハンドリング設備、地上地下冷却設備、放射線遮へい設備、地下ハンドリング設備等、がある。これらの設計に必要な特性を抽出した。

c. 処分施設の操業中の安全評価に関する評価項目

操業時の行為と、その行為に係る評価項目は、日本原子力学会標準「返還廃棄物の確認に関する基本的考え方：2007」⁶⁾の、“確認項目を抽出する上で考慮する貯蔵時の評価項目”を参考にして設定した。さらに、これらの項目の妥当性を見るために、再処理施設安全審査指針⁷⁾との対応を確認した。その結果、両者に共通する評価項目として、閉じ込め、放射線遮へい、表面付着放射性物質の揮発/剥離、冷却空気の放射化及び高レベルガラス固化体の落下が考えられる。これらのうち、冷却空気の放射化については影響が有意でないと考えられることから、それ以外の閉じ込め性、放射線遮へい、表面付着放射性物質の揮発/剥離、及び高レベルガラス固化体の落下事故の評価に必要な高レベルガラス固化体の特性を抽出した（附属書2，表1-2参照）。

d. 処分施設の閉鎖後の安全評価に関する評価項目

「地層処分研究開発第2次取りまとめ 分冊3 地層処分システムの安全評価」⁵⁾によれば、処分の閉鎖後安全評価では地下水移行シナリオと接近シナリオの評価を行うこととなる。そのための評価項目は閉鎖後環境条件評価と閉鎖後安全評価（被ばく評価）に大別される。これらの評価に必要な特性を抽出した。

e. 高レベルガラス固化体の識別管理に関する評価項目

高レベルガラス固化体の処分施設への受入れからオーバーパックへの封入までの間、高レベルガラス固化体は一体毎に識別管理可能でなければならない。そのため、識別管理の観点から必要な特性を抽出した。

4.3 地層処分において必要と考えられる特性

4.2 節に抽出した高レベルガラス固化体の安定性の確認、処分施設の設計、処分施設操業中、閉鎖後の安全評価及び識別管理に必要な特性をまとめて表4-1に示す。

表 4-1 地層処分において必要と考えられる高レベルガラス固化体の特性

放射性核種濃度	固化ガラス熱特性（熱容量、熱伝導度）
高レベルガラス固化体表面線量率	固化ガラス密度
固化ガラス化学組成	キャニスター材質
発熱量（発熱核種インベントリ）	キャニスター寸法・形状
高レベルガラス固化体重量	キャニスター溶接部の健全性（胴部）
プレナム部容積	キャニスター母材の健全性
表面汚染密度	キャニスター強度
固化ガラス重量	キャニスター熱特性
固化ガラス寸法（外径・高さ）	キャニスター溶接部の健全性（蓋部）
固型化の状態（均質性）	破損・欠陥がないこと（外観）
固化ガラス破碎係数	整理番号
固化ガラス浸出速度（溶解速度）	整理番号の表示方法・位置
最低結晶化温度	—

なお、放射性核種濃度については、高レベルガラス固化体の放射線遮へい評価、発熱量の評価、含有される放射性核種の地下水移行評価等、評価項目毎に必要な核種が異なる。例えば、放射線遮へい評価には Cs-137、Cm-244 等、発熱量の評価には Sr-90、Cs-137、Eu-154、Cm-244 等、地下水移行評価には Se-79、Cs-135、Np-237 等の放射性核種濃度が必要である。

4.4 内外の技術的基準との関係

我が国の第一種埋設規則廃棄体技術基準、及び高レベルガラス固化体を含む廃棄体を処分対象とするフランス、スイス、ベルギー、ドイツの技術的基準（規則、指針及び性能評価書等）を調査した結果、上記の特性を把握すれば、高レベルガラス固化体に関するこれらの技術的基準に記載された内容の充足性の判定が可能であることが分かった。したがって、将来の高レベルガラス固化体の確認においても、上記特性の把握が必要と考えられる。

5. 高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）特性の把握

本章では表 4-1 に示した特性を把握するためには、どのような情報、記録が必要となるかを考察した。高レベルガラス固化体の特性の把握方法として高レベル放射性廃液や製造された固化体等を直接測定する方法が考えられるが、特性の中にはすべての高レベルガラス固化体について直接測定により把握することが困難なものが含まれるため、運転管理の記録により特性把握が行われる。すなわち、製造時（貯蔵を含む）の管理内容のうち、特性に関連するものについて管理、確認に関する記録を録取し、それらの記録を評価することにより特性の把握が可能と考えられる。また、記録による特性の評価にあたり、製造時以外の関連情報（燃料履歴等）が必要になることがある。

さらに、運転管理の記録により特性を把握する際には、運転条件と高レベルガラス固化体特性との関係に関する技術情報が取得されていること、及び運転管理並びに記録の録取が適切に行われることが求められる。

5.1 高レベルガラス固化体製造時の管理内容

高レベルガラス固化体の製造プロセスの管理内容としては、大別して、廃液の放射能・化学分析、製造した高レベルガラス固化体の重量等の測定に係る管理、熔融温度や廃液供給量等の運転パラメータの管理、キャニスター等の調達管理が行われる。概要を以下に示す。なお、管理内容の詳細については附属書 3 に示す。

5.1.1 分析・測定管理

分析・測定管理としては廃液組成、ガラス原料、添加剤の分析、重量の測定、表面汚染密度の測定等があげられる。

5.1.2 運転管理

運転管理としては廃液供給量、熔融炉の温度、注入状況、蓋溶接等の管理があげられる。

5.1.3 調達管理

調達管理としてはキャニスター、ガラス原料、添加剤の管理等があげられる。

5.1.4 特性の把握の例

(1) 特性の把握に必要と考えられる情報

各製造プロセスにおいて行われている管理について説明を受け、表 4-1 に示した特性の把握に必要と考えられる情報を、JNFL の事例に対して検討した。必要と考えられる高レベルガラス固化体の特性、関連する管理、録取すべき記録、備考を表 5-1 に示した。表 5-1 には、運転条件と高レベルガラス固化体特性との関係に関する技術情報の必要性を併記した。表の第 1 列は、表 4-1 に抽出した、処分施設の設計、操業中の安全評価、及び閉鎖後

の安全評価において把握が必要と考えられる高レベルガラス固化体の特性である。第 2 列は、この特性を決定する製造プロセスの管理であり、この管理が適切になされているかどうかは第 3 列の記録により確認できる。必要となる固化体の特性の把握のためには、これらの記録さえあれば十分であるという裏付けが必要となる。これらの裏付けのためには、運転条件と特性の関係を明らかにする技術情報が必要である。こうした技術情報が特に重要となる項目については第 5 列にその旨の記述を加えている。

固化ガラスの安定性に関する重要な特性である固型化の状態（均質性）と固化ガラスの化学組成を例にした場合、固型化の状態の列の右に挙げられている熔融ガラス温度・保持時間管理、注入状況管理、冷却管理、貯蔵中の管理に関する分析記録が取得されていることが望ましい。固化ガラスの化学組成については、固化前の廃液の化学組成、 NaNO_3 溶液の濃度と供給量及びおよびガラス原料の組成と供給量に加えて固化前の廃液中に含まれる固形物（不溶解残渣、ファイン等）の量に関する分析記録が取得されていることが望ましい。

放射性核種濃度については直接分析が困難な核種もあり、評価により把握する必要がある。なお、評価に必要な情報の詳細は、附属書 2 に示す。

また、3 章に記述したように、高レベルガラス固化体の製造プロセスにおいては、逸脱等の発生を最小化するよう適切な管理を行うものの、逸脱により発生する可能性のある比較的少数のイエローフェーズ含有高レベルガラス固化体や、軽量高レベルガラス固化体については、その発生を直ちに検知し、発生量や重量を把握することが可能となるようにすべきである。イエローフェーズ含有高レベルガラス固化体は放射能の閉じ込め機能が劣るため発生の有無、及びその量の把握が必要であり、JNFL のアクティブ試験における知見から、注入状況管理によりその発生が検知できることが分かっている。JNFL では、注入状況を確認するために、注入の開始から終了までの録画情報を記録するとともに結合装置の内圧を記録する。イエローフェーズの発生時には、内圧が変動するとともに注入状況監視画面に明らかな変化が現れる。軽量高レベルガラス固化体については、高レベルガラス固化体重量から発生の有無とその程度を判断できる。

なお、高レベルガラス固化体の特性と製造プロセスの管理内容との相互関係を附属書 3 に示す。また、メンテナンス時等に少数発生する非定常ガラス固化体や逸脱により発生する可能性がある固化体の種類についても附属書 3 にまとめた。

表 5-1 高レベルガラス固化体の特性、運転記録、必要な技術情報 (JNFL)

固化体の特性	運転管理			必要な技術情報
	製造プロセスで実施している管理	録取すべき記録	備考	
放射性核種濃度	廃液の分析	調整済廃液の放射能組成分析結果	測定困難な核種については評価により求めるため、キー核種の情報、燃焼履歴等の情報が必要である	
	廃液供給量の管理	廃液の供給量		
	ガラス原料供給量管理	ガラス原料の供給量		
	重量管理	熔融ガラスの充填量		
高レベルガラス固化体表面線量率	廃液の分析	調整済廃液の放射能組成分析結果	測定困難な核種については評価により求めるため、キー核種の情報、燃焼履歴等の情報が必要である	
	廃液供給量の管理	廃液の供給量		
	ガラス原料の調達管理	ガラス原料の組成分析結果		
	ガラス原料供給量管理	ガラス原料の供給量		
	重量管理	熔融ガラスの充填量		
固化ガラス化学組成	廃液の分析	調整済み廃液の化学組成、固形物分析結果		
	NaNO ₃ 溶液濃度管理	NaNO ₃ 溶液の濃度		
	NaNO ₃ 溶液供給量管理	NaNO ₃ 溶液の供給量		
	廃液供給量の管理	廃液の供給量		
	ガラス原料の調達管理	ガラス原料の組成分析結果		
	ガラス原料供給量管理	ガラス原料の供給量		
発熱量	廃液の分析	調整済廃液の放射能組成分析結果		
	廃液供給量の管理	廃液の供給量		
	ガラス原料供給量管理	ガラス原料の供給量		
高レベルガラス固化体重量	キャニスターの調達管理	キャニスター製造検査の管理記録		
	重量管理	熔融ガラスの充填量		
プレナム部容積	キャニスターの調達管理	キャニスター製造検査の管理記録	充填重量とキャニスターの内径、さらに固化ガラス密度から算出する	
	重量管理	熔融ガラスの充填量		
表面汚染密度	表面汚染密度検査	表面汚染密度検査結果		
固化ガラス重量	重量管理	熔融ガラスの充填量		
固化ガラス寸法 (外径・高さ)	キャニスターの調達管理	キャニスター製造検査の管理記録	充填重量とキャニスターの内径、さらに固化ガラス密度から算出する	
	重量管理	熔融ガラスの充填量		
固型化の状態 (均質性)	熔融ガラス温度・保持時間管理	熔融炉内の熔融ガラス温度及び保持時間	注入状況管理からイエローフェーズの発生とその量を評価できる ガラス化学組成が目標通りであることの確認も必要である	運転条件と固化体特性の関係が明確な技術情報が必要である
	注入状況管理	注入状況の記録 (ITV 画像記録及び結合装置の内圧変動)		
	冷却管理	冷却管理記録		
	貯蔵中の管理	貯蔵中の管理記録		
固化ガラス破砕係数	冷却管理	冷却管理記録		運転条件と固化体特性の関係が明確な技術情報が必要である
固化ガラス浸出速度 (溶解速度) 最低結晶化温度 固化ガラス熱特性 (熱容量、熱伝導率) 固化ガラス密度	廃液の分析	調整済廃液の化学組成、固形物分析結果		運転条件と固化体特性の関係が明確な技術情報が必要である
	NaNO ₃ 溶液濃度管理	NaNO ₃ 溶液の濃度		
	NaNO ₃ 溶液供給量管理	NaNO ₃ 溶液の供給量		
	廃液供給量の管理	廃液の供給量		
	ガラス原料の調達管理	ガラス原料の組成分析結果		
	ガラス原料供給量管理	ガラス原料の供給量		
	熔融ガラス温度・保持時間管理	熔融炉内の熔融ガラス温度及び保持時間		
	注入状況管理	注入状況の記録 (ITV 画像記録及び結合装置の内圧変動)		
	冷却管理	冷却管理記録		
	貯蔵中の管理	貯蔵中の管理記録		
キャニスター材質	キャニスターの調達管理	キャニスター製造検査の管理記録		
キャニスター寸法・形状				
キャニスター母材の健全性				
キャニスター強度				
キャニスター熱特性				
キャニスター溶接部の健全性 (胴部)	キャニスターの調達管理	キャニスター製造検査の管理記録		
	閉じ込め検査	閉じ込め検査記録		
溶接部の健全性 (蓋部)	蓋溶接パラメータの管理	溶接パラメータ		溶接条件と溶接部の健全性を示す技術情報が必要
	閉じ込め検査	閉じ込め検査記録		
破損・欠陥がないこと (外観)	外観・識別管理	ガラス固化体の外観検査の記録		
整理番号	外観・識別管理	ガラス固化体の識別管理の記録		
整理番号の表示方法・位置				

(2) 製造時に実施している管理と録取すべき記録

表 5-2 に JNFL の製造プロセスについて、関連する管理と録取すべき記録のまとめを示す。

表 5-2 製造プロセスで実施している管理及び録取すべき記録

製造プロセスで実施している管理	録取すべき記録
廃液の分析	調整済み廃液の放射能組成分析結果
	調整済み廃液の化学組成、固形物分析結果
NaNO ₃ 溶液濃度管理	NaNO ₃ 溶液の濃度
NaNO ₃ 溶液供給量管理	NaNO ₃ 溶液の供給量
廃液供給量の管理	廃液の供給量
ガラス原料の調達管理	ガラス原料の組成分析結果
ガラス原料供給量管理	ガラス原料の供給量
溶融ガラス温度・保持時間管理	溶融炉内の溶融ガラス温度及び保持時間
キャニスターの調達管理	キャニスター製造検査の管理記録
重量管理	溶融ガラスの充填量
注入状況管理	キャニスターへの溶融ガラス注入状況 (ITV 画像記録及び結合装置の内圧変動)
蓋溶接パラメータの管理	溶接パラメータ
冷却管理	冷却時間
表面汚染密度検査	表面汚染密度検査結果
外観・識別管理	高レベルガラス固化体の外観検査と整理番号の記録
閉じ込め検査	閉じ込め検査記録
貯蔵中の管理	貯蔵管理記録

(3) 放射能評価に有効なデータ

高レベルガラス固化体の放射能濃度を評価するための方法として、ガラス固化する廃液を分析し、固化体中の放射能濃度を決定する方法、固化体の外部から非破壊測定し、放射能濃度を決定する方法、当該核種とキー核種との相関関係から、固化体中の当該核種の放射能濃度を決定する方法等がある。また、使用済燃料等の燃焼履歴等の情報から、評価によって固化体中の放射能濃度を決定する方法がある。この場合には、使用済燃料の組成、燃焼度、冷却期間、再処理における U/Pu の回収率、高レベル廃液への移行率、被覆材の組成、固形物の量、製造後の貯蔵期間等の情報が有効である。

5.2 特性評価に必要な技術情報

5.2.1 運転条件と高レベルガラス固化体特性との関係に関する技術情報の必要性

高レベルガラス固化体の特性の把握方法として直接測定が考えられるが、特性の中にはすべての高レベルガラス固化体について直接測定により把握することが困難なものが含まれる。このような特性については、運転管理の記録により特性把握を行うことが考えられる。すなわち、高レベルガラス固化体の製造において、運転管理の記録に基づき運転条件と誤差が適切な範囲と精度で管理されていることが確認できれば、特性を直接測定しなくても、一定値として取り扱うことが考えられる。一定値として取り扱ってよいかどうかを検討するためには、運転条件と高レベルガラス固化体特性との関係に関する技術情報が必要である。

なお、当該技術情報の取得時においてもその信用度について充分配慮すべきと考える。

5.2.2 技術情報を必要とする特性

運転管理の記録に基づき適切に製造されていることを確認することにより、一定値として取り扱うことができる特性としては、固型化の状態、固化ガラス破碎係数、固化ガラス浸出速度（溶解速度）、最低結晶化温度、固化ガラス熱特性、固化ガラス密度、溶接部の健全性（蓋部）があり、これらについては事前の運転条件と製品品質の関係を設定するための技術情報が求められる。高レベルガラス固化体の特性については、これまでに多くの試験が実施されているが、適切な特性の高レベルガラス固化体が製造されていることの信用度をさらに高めるため、再処理事業者は、今後とも必要な試験を実施していくべきである。

また逸脱により比較的少数のイエローフェーズ含有高レベルガラス固化体等が発生した場合、その特性及びイエローフェーズに起因する処分の安全性への影響の把握に努める必要がある。例えば、イエローフェーズとキャニスターとの両立性（耐食性）については、早急にその影響を把握する必要がある。

5.3 製造時の品質マネジメント

固化体製造時の管理により高レベルガラス固化体特性を適切に把握するため、再処理事業者は 5.1 節に示した「分析・測定管理」、「運転管理」、「調達管理」に係る管理計画を作成し、計画に基づいて活動を行うことが求められる。そのため、今後とも管理計画及びそれに基づく製造時の管理は、以下に示す項目を満たす必要がある。

- ① 手順(書)が定められていること
- ② 管理の方法と程度が影響に応じて妥当なこと(手順が技術的に妥当であること)
- ③ 手順(書)を守る活動・仕組みがあり、機能していること
- ④ 製造時に逸脱が発生したことを検出し、検出したものについて評価を行い、必要に応じて措置を講じる仕組みがあり、機能していること

6. 今後の作業

今後は地層処分に必要と考えられる高レベルガラス固化体の特性の処分システム性能への感度を勘案して、高レベルガラス固化体特性に求められる要件及び製造時管理の目標値について検討を行う。また、逸脱もしくは非定常的に発生した比較的少数の高レベルガラス固化体の処分への対応についても検討を行う。

7. おわりに

委員会は、学術的な立場から、高レベルガラス固化体の地層処分に関して、処分施設的设计、処分施設の操業中の安全評価、処分施設の閉鎖後の長期安全性評価等の内容を既往の知見に基づいて検討し、それらを行うために把握することが必要と考えられる高レベルガラス固化体の特性について評価、抽出した。次に高レベルガラス固化体製造が具体的に行われている JNFL、JAEA、さらに参考として AREVA NC 社の事例について、各々の高レベルガラス固化体の諸元、高レベルガラス固化体製造プロセスと管理内容を調査し、各々の施設で製造される高レベルガラス固化体の特性を決定するプロセスと管理内容を特定し、そのうち、JNFL の製造プロセスを代表例として記録されるべきデータや技術情報を整理して示した。

委員会が示した、地層処分において把握が必要と考えられるこれらの高レベルガラス固化体の特性や必要である記録については、今後その充分性、妥当性について、原子力安全・保安院において規制の立場から審議されるとともに、その結果が再処理事業者の高レベルガラス固化体の製造等に十分反映され、適切にデータや技術情報が取得され記録されることを期待する。さらに、技術情報取得のために必要な試験があれば、それが実施されるべきと考える。

参考文献

- 1) 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会（第34回）-参考資料4 六ヶ所再処理工場高レベル廃液ガラス固化施設の試験状況について，平成20年7月3日．
- 2) 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会（第35回）-配付資料、資料 3-1 国内において製造される地層処分対象廃棄物の記録について，平成20年10月17日．
- 3) 電気事業連合会，「原子力・エネルギー」図面集 2008．
- 4) 核燃料サイクル開発機構，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．
- 5) 核燃料サイクル開発機構，地層処分研究開発第2次取りまとめ 分冊3 地層処分システムの安全評価，4.2.4.4 臨界 IV-55 頁，JNC TN1400 99-023, 1999．
- 6) 日本原子力学会，日本原子力学会標準 返還廃棄物の確認に関する基本的考え方：2007，AESJ-SC-F011:2007．
- 7) 再処理施設安全審査指針，昭和61年2月20日原子力安全委員会決定，平成元年3月27日一部改訂．

附属書1 高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の諸元と製造プロセス

1. 高レベルガラス固化体の諸元

ホウケイ酸ガラスは、水に溶けにくく、酸やアルカリなどの薬品類にも強く化学的に安定しており、物理的に熱膨張が低い等の特徴から、高レベル放射性廃液の固化材料として選定されている。これらの特徴を実現するために、高レベルガラス固化体の固化ガラス化学組成が設定されている。また、貯蔵・処分にあたっては、廃棄体の発熱による人工バリア等の熱変質抑制の観点から放射線量、発熱量が設定されている。固化ガラスの熱的安定性の観点からは、最低結晶化温度（相転移温度）、熔融温度などの固化ガラスの特有温度が、また、放射性核種の閉じ込め性の観点から浸出速度等が測定されている。

附属書1 表 1-1 に、JNFL、JAEA 及び AREVA NC 社の高レベルガラス固化体の標準的な諸元を示す。

附属書1 表 1-1 高レベルガラス固化体諸元

	JNFL	JAEA	AREVA NC ¹⁾
放射線量	$\beta \cdot \gamma$: 2.17×10^{16} Bq α : 1.29×10^{14} Bq	$\beta \cdot \gamma$: $\leq 1.5 \times 10^{16}$ Bq α : $\leq 2.6 \times 10^{14}$ Bq	$\beta \cdot \gamma$: 2.8×10^{16} Bq α : 1.4×10^{14} Bq
固化ガラス 化学組成	SiO ₂ : 48.5wt% B ₂ O ₃ : 14.8wt% Al ₂ O ₃ : 5.2wt% Li ₂ O : 3.1wt% CaO : 3.1wt% ZnO : 3.1wt% FP 酸化物 : 9.2wt% AC 酸化物 : 1.0wt% Na ₂ O : 8~12wt% CP 酸化物 : 0.2 wt % Gd ₂ O ₃ : 1.2% 全廃棄物酸化物含有 量 : 20~30 wt %	SiO ₂ : 46.7wt% B ₂ O ₃ : 14.3wt% Al ₂ O ₃ : 5.0wt% Li ₂ O : 3.0wt% CaO : 3.0wt% ZnO : 3.0wt% Fe ₂ O ₃ : 2.0wt% NiO : 0.2wt% Cr ₂ O ₃ : 0.1wt% P ₂ O ₅ : 0.3wt% FP 酸化物 : 9.9wt% AC 酸化物 : 2.5wt% 全酸化物 : 30wt%以下 Na ₂ O : 8~12wt%	42.4 % < SiO ₂ < 51.7 % 12.4 % < B ₂ O ₃ < 16.5 % 3.6 % < Al ₂ O ₃ < 6.6 % 60.0 % < SiO ₂ +Al ₂ O ₃ + B ₂ O ₃ 8.1 % < Na ₂ O < 11.0 % Fe ₂ O ₃ < 4.5 % NiO < 0.5 % Cr ₂ O ₃ < 0.6 % P ₂ O ₅ < 1.0 % 1.6 % < Li ₂ O < 2.4 % 2.2 % < ZnO < 2.8 % 3.5 % < CaO < 4.8 % RuO ₂ +Rh+Pd < 3.0 % 7.5 % < (FP+Zr+アクチニド) 酸化物及び金属性粒子 < 18.5 %
線量率			$\beta \cdot \gamma$ 線 表面 1.4×10^4 Gy/h 以下 中性子線 表面 6.1×10^{-3} Gy/h 以下
発熱量	2.3kW 以下（製造時）	1.4kW 以下（製造時）	<2.0 kW（輸送時）
密度	2.7~2.8g/cm ³	2.74g/cm ³	2.75 g/cm ³
浸出速度	MCC-1: 2.2×10^{-4} kg/m ² d	MCC-1: 2.5×10^{-4} kg/m ² /d	ソックスレー試験（100℃, 28 日間平均）： 2×10^{-4} g/cm ² /d $0.5 \sim 0.6 \times 10^{-4}$ g/cm ² /d（浸出液 交換無し）
比熱	0.80~0.99kJ/kg・℃ （100℃~400℃）		$2.6 \times 10^6 \sim 3.84 \times 10^6$ J/m ³ ・℃ （100℃~600℃）
熱伝導率	1.13~1.52W/m・℃ （100℃~400℃）	0.94W/m・℃	1.22~1.49W/m・℃ （100℃~400℃）

固化ガラスの安定性に関する特有温度	ガラス平均転移温度: 503℃ 最低結晶化温度:650℃	ガラス転移温度:501℃ 軟化点:604℃	平均転移温度:502℃ 変形温度:546℃ 最低結晶化温度:610℃ 液化温度:1,160℃
ガラス固化体寸法	高さ: 約 1,340 mm 外径: 約 430 mm キャニスター肉厚: 約 6 mm	高さ: 約 1,040 mm 外径: 約 430 mm キャニスター肉厚: 約 6 mm	高さ: 約 1,340 mm 外径: 約 430 mm キャニスター肉厚: 約 5 mm
キャニスター内容積	約 160 L	約 120L	約 170 L
キャニスター当たりの充填量	約 145 L	約 110 L	約 150 L
全体重量	約 500 kg	約 380 kg	約 492 kg
キャニスター重量	約 100kg	約 80 kg	約 80 kg
キャニスター材質	胴体:SUS304L 蓋部:SUSF304L	SUS304L /SUSF304L	JIS SUH309 相当

2. 高レベルガラス固化体の製造プロセス

2.1 JNFLの製造プロセス

高レベルガラス固化体製造プロセスとして、JNFLはJAEAが研究開発したLFCM法を採用している。LFCM法は、液体供給式直接通電型セラミックメルタ(Liquid Fed Joule-heated Ceramic Melter)を採用したガラス固化方式であり、米国、ドイツ、日本において開発が進められた。後述するAVM法は、廃液をか焼しか焼物とガラス原料を溶融炉で混合溶融するのに対し、LFCM法は溶融炉内で、廃液の水分蒸発と酸化物化及び高レベルガラス固化体としての混合溶融を一段で行う方法である。

附属書1 図 2-1にJNFLの高レベルガラス固化体製造プロセスを示す。また、高レベルガラス固化体製造プロセスの概要を以下に示す。

- ① 再処理プラントから、移送される3種の廃液を混合槽で混合する。
- ② 混合槽廃液の分析を行い、硝酸ナトリウム溶液を添加してナトリウム濃度を調整する。
- ③ 所定量の廃液を供給槽から溶融炉に供給する。
- ④ 上記と並行して、ガラス組成が確認されたガラスビーズを受入れる。
- ⑤ 計量・供給ユニットを経由して、廃液供給に対応して、ガラスビーズを所定量供給する。
- ⑥ 溶融炉でガラスビーズ及び廃液を加熱・溶融する。
- ⑦ 溶融炉下部に調達管理された容器(ステンレス鋼製キャニスター)を配置する。
- ⑧ 溶融炉から加熱混合された溶融ガラスをキャニスターに流下する。
- ⑨ 溶融ガラスを一定時間冷却した後、キャニスター上部のふたを溶接する。
- ⑩ キャニスターの表面汚染検査、漏えい検査、外観検査等を行った後、貯蔵施設で高レベルガラス固化体を保管する。

2.2 JAEA の製造プロセス

附属書 1 図 2-2 に JAEA の高レベルガラス固化体製造プロセスを示す。また、高レベルガラス固化体製造プロセスの概要を以下に示す。

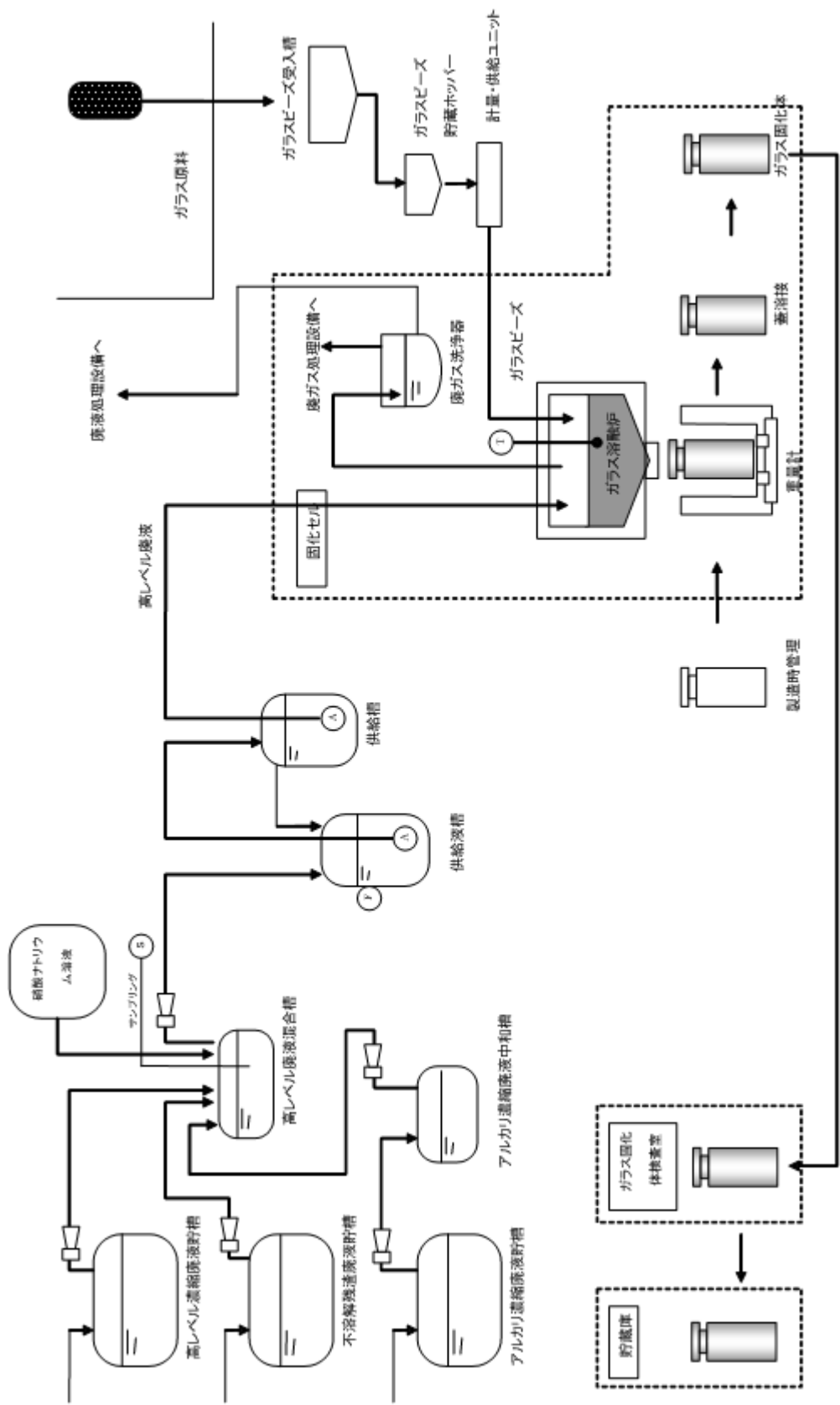
- ① 高放射性廃液貯槽から、高放射性廃液を受入槽に受入れる。
- ② 受入槽で廃液の分析を行い、組成調整のための試薬添加量及び濃縮倍率を決定する。
- ③ 廃液を濃縮器に移送し、組成調整及び濃縮する。
- ④ ガラス組成等を確認したガラス原料を受け入れる。
- ⑤ 濃縮液供給槽から廃液をガラス原料に含浸させ、熔融炉へ定量供給する。
- ⑥ 熔融炉でガラス原料及び廃液を加熱・熔融する。
- ⑦ 寸法等を確認したキャニスターを熔融炉下部に設置する。
- ⑧ 熔融炉から熔融ガラスをキャニスターに流下する。
- ⑨ 熔融ガラスを一定時間冷却した後、キャニスターの蓋を溶接する。
- ⑩ ガラス固化体の表面汚染検査、外観検査等を行ったのち、保管設備で保管する。

2.3 AREVA NC 社の製造プロセス

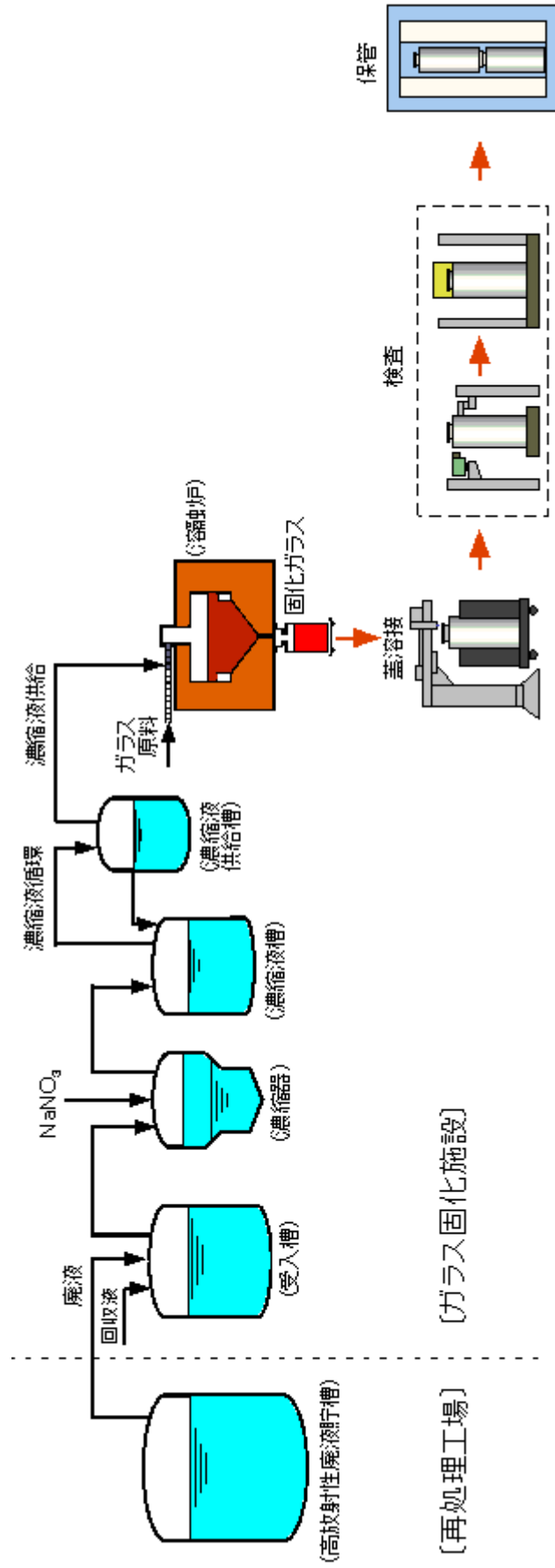
AREVA NC 社製の高レベルガラス固化体の製造方法である AVM 法(Atelier Vitrification de Marcoule) は、フランスで開発されたガラス固化方式であり、ロータリキルンか焼炉でか焼した上で、ガラス原料とともに熔融炉へ供給し、熔融炉壁に設けられた高周波誘導加熱装置により熔融を行う方式である。

附属書 1 図 2-3 に AREVA NC 社の製造プロセスを示す。また、高レベルガラス固化体製造プロセスの概要を以下に示す。

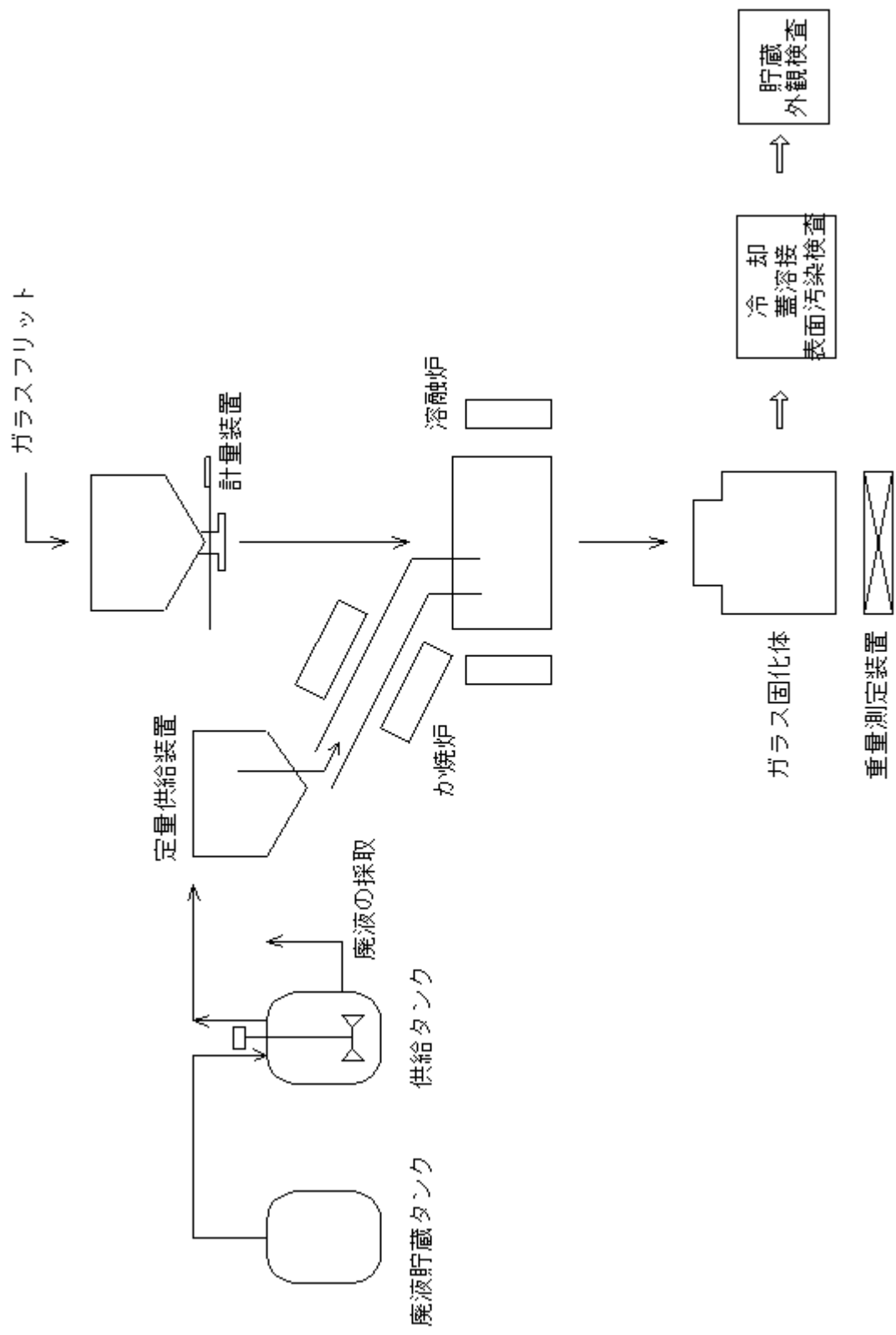
- ① 再処理プラント廃液貯蔵タンク中の高レベル放射性廃液を供給タンクに移送後、廃液のサンプリングを行い、廃液の組成及び核種濃度を分析・測定する。
- ② 上記と並行して、ガラス原料の組成を確認する。
- ③ 廃液の分析結果に基づき、決められた量の廃液を定量供給装置を経由して、か焼炉に供給し、か焼する。
- ④ か焼物とガラス原料を熔融炉に所定速度で供給し、高周波誘導によって加熱熔融する。
- ⑤ 熔融炉下部に調達管理された容器(ステンレス製キャニスター)を配置する。
- ⑥ 熔融炉から加熱混合された熔融ガラスをキャニスターに流下する。
- ⑦ 熔融ガラスを一定時間冷却した後、キャニスター上部の蓋を溶接する。
- ⑧ 洗浄処理し、一時的に貯蔵するためピットに格納する。
- ⑨ 貯蔵施設で高レベルガラス固化体を冷却する。



附属書 1 図 2-1 JNFL 高レベルガラス固化体製造プロセス



附属書 1 図 2-2 JAEA 高レベルガラス固化体製造プロセス



附属書 1 図 2-3 AREVA NC 社高レベルガラス固化体製造プロセス

参考文献

- 1) ガラス固化体に係る安全性チェック・検討会, ガラス固化体に係る安全性について 安全性チェック・検討会報告書 付録-1

附属書 2 地層処分において必要と考えられる高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体） の特性の抽出

1. 地層処分において必要であると考えられる高レベルガラス固化体の特性の抽出の考え方

1.1 地層処分において必要であると考えられる高レベルガラス固化体特性の抽出の基本的考え方

処分に必要な高レベルガラス固化体の特性を、処分場の施設設計や施設の操業中、閉鎖後の安全評価の観点から抽出する。まず、高レベルガラス固化体は安定な固化体でなければならないので、安定性の確認に必要な特性を抽出する必要がある。なお、ここでは、安定な固化体とは、物理的、化学的に変化を受けにくく、放射能の閉じ込め機能に優れ、貯蔵・処分を通じて臨界にならないことが確認できる固化体と定義する。

次に、事業許可等の許認可の観点も含めて処分場の設計や安全評価等の評価項目別に高レベルガラス固化体の特性を抽出し整理する。

また、高レベルガラス固化体のハンドリングのため、当該高レベルガラス固化体は識別可能でなければならないので、そのために必要な特性を抽出する。

したがって、以下に示す評価項目の区分により、高レベルガラス固化体に必要な特性を抽出するものとする。

- a) 高レベルガラス固化体の安定性の確認に関する評価項目
- b) 処分施設の設計（人工バリア設計を含む）に関する評価項目
- c) 処分施設の操業中の安全評価に関する評価項目
- d) 処分施設の閉鎖後の安全評価に関する評価項目
- e) 高レベルガラス固化体の識別管理に関する評価項目

具体的な高レベルガラス固化体特性は、以下の手順で抽出する。

- ① 「返還廃棄物の確認に関する基本的考え方 2007」¹⁾、「地層処分研究開発第 2 次取りまとめ 分冊 3 地層処分システムの安全評価」²⁾における閉鎖後安全評価における高レベルガラス固化体の評価条件等から、高レベルガラス固化体の安定性に関する特性を抽出する。
- ② 国内外の概括的処分概念検討書及び安全評価書を調査して、検討されている設計及び安全評価項目の解析モデルのパラメータのうち、高レベルガラス固化体

特性が直接使用されているものを抽出する。我が国の処分概念検討書及び安全評価書としては、「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」³⁾ 及び「高レベル廃棄物地層処分の事業化技術」⁴⁾ を調査した。海外では高レベルガラス固化体の閉鎖後安全評価を行っているフランス、スイス、ベルギーを調査した。閉鎖後の安全評価に関しては、処分場の環境条件評価及び様々な被ばくシナリオ解析を参照する。

- ③ 地層処分の地上施設と類似性の高い我が国の返還廃棄物貯蔵施設の事業許可申請書を調査して、検討されている設計及び安全評価項目のうち、高レベルガラス固化体の特性が直接使用されているものを抽出する。
- ④ 地層処分場での、高レベルガラス固化体の受入から閉鎖までの一連の工程を検討し、操業中の安全評価の観点から必要性が高いと考えられる評価項目に関する高レベルガラス固化体の特性を抽出する。
- ⑤ 地層処分場での、高レベルガラス固化体の受入から閉鎖までの一連の工程検討において高レベルガラス固化体の識別管理が必要であるため、識別管理の観点から必要性の高い高レベルガラス固化体の特性を抽出する。

1.2 特性抽出のための評価項目選定

1.2.1 高レベルガラス固化体の安定性の確認に関する評価項目

「地層処分研究開発第2次取りまとめ 分冊3 地層処分システムの安全評価」²⁾ の検討条件や日本原子力学会標準「返還廃棄物の確認に関する基本的考え方：2007」¹⁾ の評価条件（同資料附属書1付表2 高レベルガラス固化体の貯蔵と処分における評価項目と重要特性）の記載内容を参照して検討した結果、高レベルガラス固化体は長期の放射能の閉じ込めに優れていること、また、臨界の危険性がないことが確認できることが求められると考える。

「返還廃棄物の確認に関する基本的考え方：2007」¹⁾ の評価条件（同資料附属書1付表2）では、受入れ貯蔵時の返還廃棄物自体の安定性に関する評価項目として、耐放射線性、キャニスターの耐食性、熱的安定性及び閉じ込め性の4項目が挙げられており、処分の観点からこれらの項目を検討して評価項目を選定した。

同報告書によると放射線影響として照射によるガラスの膨張とヘリウム蓄積による内圧上昇を取り上げ、これらの影響の重要度は小さいと記載しており、処分の観点からも影響は小さいと考えられることから評価項目とはしなかった。キャニスターの耐食性とはキャニスター外側環境への耐食性、及び固化ガラスと接触するキャニスター内側の耐

食性（キャニスターと固化ガラスの両立性）のことであり、熱的安定性とは温度上昇により容易に変質劣化しないことであり、いずれも重要であるから評価項目とした。閉じ込め性とは溶接部や母材が健全で、著しい破損がなく放射性物質が容易に漏えいしないこと、及び埋設後の固化ガラスの溶解速度が小さいことであり、いずれも重要であるから評価項目とした。

再処理における分離が適切に行われれば、高レベルガラス固化体には核分裂性核種及び崩壊後に核分裂性物質になる核種は微量しか含まれない。また、「地層処分研究開発第2次取りまとめ 分冊3 地層処分システムの安全評価」では、安全評価で考慮するFEPの選択（4.1.2.2項）において、臨界が生じるようなウランの濃集は現実的には起こりえないと考えられることから、ガラス固化体を地層処分する場合の臨界は安全評価で考慮する必要のないFEPとして除外されている²⁾。したがって、高レベルガラス固化体の臨界に対しては、再処理において核分裂性物質が適切に分離されていることを確認できる記録が取得されていればよい。

1.2.2 処分施設の設計に関する評価項目

人工バリアの設計、地上施設設計及び地下施設設計を含む処分場の設計において、「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」²⁾及び「高レベル廃棄物地層処分の事業化技術」³⁾の記載内容を参照して、高レベルガラス固化体の特性を直接必要とする評価項目を附属書2 表 1-1に整理した。

附属書 2 表 1-1 処分施設の設計に必要な評価項目

設計対象	評価項目	関連する特性	設計における特性の影響	備考
オーバーパッキング	オーバーパッキングの寸法、材料	<ul style="list-style-type: none"> 放射性物質濃度 固化ガラス化学組成 固化ガラス密度 	<ul style="list-style-type: none"> 従事者の被ばく 放射線分解によるオーバーパッキング腐食形態の変化 	放射線分解により発生する酸性物質の濃度が腐食形態を変える。
緩衝材	緩衝材の材料・寸法	<ul style="list-style-type: none"> 発熱量 固化ガラス熱特性 	発熱による周辺の温度上昇と、その結果としての緩衝材変質 特になし	オーバーパッキングの寸法、重量が必要であるが、個々の高レベルガラス固化体の特性は特に必要としない
アクセス坑道及び地下ハンドリング設備	アクセス坑道の形態（立坑、斜坑）、及び地下ハンドリング設備の諸元	特になし	特になし	
処分坑道	処分坑道の離間距離	<ul style="list-style-type: none"> 発熱量 固化ガラス熱特性 	<ul style="list-style-type: none"> 発熱による周辺の温度上昇を考慮した坑道離間距離 	坑道寸法設計にはオーバーパッキングの寸法、重量が必要であるが、高レベルガラス固化体の特性は必要としない
高レベルガラス固化体（処分孔）の間隔、処分孔	<ul style="list-style-type: none"> 高レベルガラス固化体定置間隔（処分孔）、 処分孔上部の遮へい厚み 	<ul style="list-style-type: none"> 発熱量 固化ガラス熱特性 放射性物質濃度 固化ガラス化学組成 固化ガラス密度 	<ul style="list-style-type: none"> 発熱による周辺の温度上昇を考慮した定置間隔 放射線強度を考慮した処分孔深さ、埋め戻し材厚み 	
地上ハンドリング設備	地上受入れ施設からオーバーパッキング封入施設までの高レベルガラス固化体のハンドリング設備の諸元	<ul style="list-style-type: none"> 放射性物質濃度 固化ガラス化学組成 固化ガラス密度 キャニスター寸法形状 高レベルガラス固化体重量 	<ul style="list-style-type: none"> キャニスターの寸法/形状/重量を考慮した設備諸元 放射線を考慮した管理区域設定 	
地上地下冷却設備	施設内冷却容量及び設備の諸元	<ul style="list-style-type: none"> 発熱量 固化ガラス熱特性 	<ul style="list-style-type: none"> 冷却設備の諸元 作業環境温度の維持 	セメント系材料の温度上昇が懸念される
地上地下施設遮へい	遮へい及び補助遮へいに関する施設及び設備の諸元	<ul style="list-style-type: none"> 放射性物質濃度 固化ガラス化学組成 固化ガラス密度 	<ul style="list-style-type: none"> 放射線の種類と強度を考慮した一般公衆及び従事者の被ばく 	

1.2.3 操業中安全評価における評価項目

高レベルガラス固化体を扱う処分場の地上施設に類似した施設として、返還廃棄物の管理施設がある。「廃棄物管理施設の安全性の評価の考え方」⁵⁾において、「再処理施設から発生した放射性廃棄物を取り扱う廃棄物管理施設については、次の指針の基本的な考え方がそのまま適用できる。

- ・核燃料施設安全審査基本指針
- ・再処理施設安全審査基本指針

とあることから、同管理施設は上記2つの指針が適用されている。両基本指針は各々21と22の指針で構成されている。これらのうち高レベルガラス固化体の特性に直接係るものとしては、指針10から指針12の臨界に関する指針を除外した次の6つの指針があげられる。

- ・指針4 閉じ込めの機能
- ・指針5 放射線遮蔽
- ・指針6 放射線被ばく管理
- ・指針7 放射性廃棄物の放出管理
- ・指針8 貯蔵等に対する考慮
- ・指針17 放射性物質の移動に対する考慮

一方、日本原子力学会標準の「返還廃棄物の確認に関する基本的考え方：2007」¹⁾において、返還廃棄物の受入・貯蔵時の評価項目が示されている。学会標準で取り上げられた評価項目と安全審査基本指針の上記6項目の指針の関係、さらに、処分場の操業工程との関係を附属書2 表 1-2 に示す。表中で○がつけられた箇所が、評価が必要な工程であると判断した。

附属書 2 表 1-2 安全審査基本指針に対応する操業中安全評価項目

学会標準 評価項目	対応する安全審査基本 指針	評価項目	処分場の操業工程					備考
			高レベル ガラス固 体化受入	オーバーパ ックに封入、 蓋溶接	処分場地 下施設に 移送	廃棄体 定置	埋戻し・ 閉鎖	
閉じ込め性 (内部被ばく)	4 閉じ込め 8 貯蔵等に対する考慮 17 放射性物質の移動 に関する考慮	吸入による被ばく等を考慮した、放射能 の漏えいの有無(閉じ込め性)の評価	○	○				オーバーパック 封入後は考慮せ ず
	5 遮へい 8 貯蔵等に対する考慮 17 放射性物質の移動 に関する考慮	遮へい設計を反映しハンドリング時等 の作業時の、一般公衆及び放射線被ば くが適切であること	○	○	○	○	○	
	冷却機能	—						発熱量が小さく 問題とならない
	廃棄体定置方法等に対 する考慮	—						オーバーパック の寸法、重量に 依存
落下	キヤニスター付着放射 性物質の揮発/剥離 冷却空気の放射化	キヤニスター表面の付着性放射性物質 が、許容値以下であること 高レベルガラス固化体の冷却用の排気 が放射化されること	○	○				影響なし
	冷却機能の低下	冷却用空気の供給が減少し、高レベル ガラス固化体温度が上昇し、放射性核 種の放出につながる事象						発熱量が小さく 問題とならない
	落下	17 放射性物質の移動 に関する考慮	○	○	○	○	○	
平常時の安全性の評価								
異常時								

1.2.4 閉鎖後安全評価における評価項目

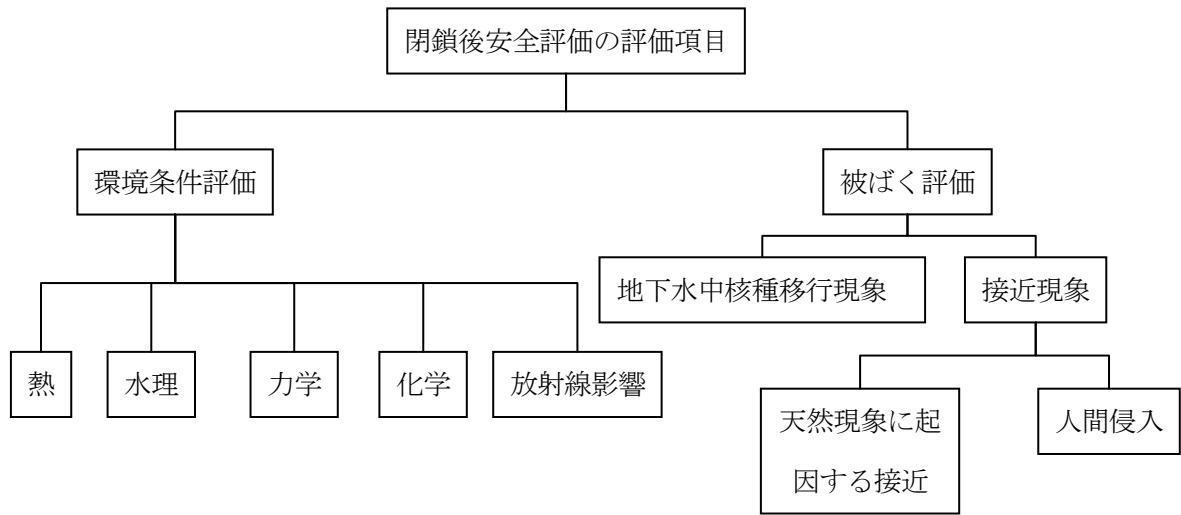
閉鎖後安全評価における評価項目は、以下の2点を考慮して抽出した。

- ① 国内外の安全評価書を調査して、検討されている安全評価項目の評価モデルのパラメータのうち、高レベルガラス固化体の特性が直接使用されているものを抽出する。
- ② 地層処分場の閉鎖後における現象を、高レベルガラス固化体周囲の長期的な環境条件の変化と、核種移行を含む被ばくに関する現象に2分する。それらの現象のうち検討が必要と考えられる評価項目に関して高レベルガラス固化体の特性を抽出する。

これらの評価項目を附属書2 図 1-1 に示す。また、これらの内容をまとめた処分施設閉鎖後の安全評価に関する評価項目及びそれらの内容を附属書2 表 1-3 に示す。

処分場の環境条件評価に係わる特性因子は、熱 (T)、水理 (H)、力学 (M)、化学 (C)、放射線 (R) が考えられる。上記の5 分類の具体的評価内容を考えた場合、従来の評価では、緩衝材が拡散支配場であることを前提としており、高レベルガラス固化体領域の水理をモデル化している事例は見当たらなかった。さらに、力学 (M) 分野に関しては、オーバーパック及び高レベルガラス固化体の全重量に占める高レベルガラス固化体比率が小さいことや応力を受ける実体が高レベルガラス固化体でなくオーバーパックであることから、評価項目から実質的に除外できるものと考えた。

被ばく評価で対象とする被ばくシナリオは地下水移行シナリオと接近シナリオに大別される。さらに、接近シナリオはボーリング等による人間侵入シナリオと廃棄体が天然現象により生物圏に接近するシナリオに大別される。接近シナリオは隆起・侵食の継続による廃棄体の地上への接近及び地表への露出、意図的でないボーリング、火山の噴火、隕石の落下等の種々の現象が考えられるが、これらの様々な被ばくシナリオのうち、対象とすべき被ばくシナリオから除外できると考えられるものは、隕石の落下のような、発生確率が非常に低いものが相当する。なお、将来の火山活動の影響による被ばくも、サイト選定で排除する方針であることから、発生頻度が低いと考えられる。



附属書 2 図 1-1 閉鎖後安全評価項目の分類

附属書 2 表 1-3 処分施設閉鎖後の安全評価に関する評価項目

分野	評価項目	評価の内容	備考	
閉鎖後環境条件評価	熱的現象	ガラスの溶出速度や核種溶解度を設定するためのガラス温度	亀裂が著しく増加すると均一固化体の熱特性値を適用できない	
	水理学的現象	評価項目はないと考えられる	高レベルガラス固化体領域の水理をモデル化している事例は見当たらなかった	
	力学的現象	<ul style="list-style-type: none"> オーバーパックの長期的沈下に対する緩衝材バリアの性能維持 埋設後の高レベルガラス固化体にかかる長期的応力の性能維持 	<ul style="list-style-type: none"> オーバーパック重量に対して、高レベルガラス固化体の重量は 1/10 程度であり、影響度の観点から評価項目から削除する オーバーパック封入後の状態にあり、荷重はオーバーパックで受けるものとなる 	
	化学的現象	処分システムの核種移行評価を行うための地下水化学特性の経時変化		
	放射線化学的現象	放射線がバリア性能に与える影響 (放射線分解、放射線損傷)	解析モデル上キヤニスターの遮へい性能を考慮しないケースもある	
	地下水移行シナリオ (核種移行現象)	核種移行現象を評価するパラメータの設定		
	接近シナリオ	天然現象に起因する接近	<ul style="list-style-type: none"> 長期的な隆起・侵食により廃棄体が地上に露出するシナリオの被ばく影響を評価するパラメータの設定 火山・火成活動でのマグマの貫入・噴出による破壊、地表への放出シナリオの被ばく影響を評価するパラメータの設定 	
	人間侵入	人間侵入	ボーリング掘削による被ばく影響を評価するパラメータの設定	
	閉鎖後被ばく評価			

1.2.5 識別管理のための評価項目

高レベルガラス固化体の処分施設の受入れ時、高レベルガラス固化体のオーバーパックへの封入までのハンドリング時においては、高レベルガラス固化体の識別管理の観点からの評価項目が必要である。

1.3 特性の分類

前節に記載した設計、安全評価等の各々の評価が必要である高レベルガラス固化体の特性は、その抽出の過程を含めて附属書の2章以降に示し、その結果は本文4章にまとめたとおりである。これらの設計、安全評価等の評価項目と抽出された高レベルガラス固化体の特性の関連を附属書2 附表-1に示す。抽出された特性は、計量可否の観点から大きく2分される。計量可能な特性については、製造条件によってある幅をもって1体毎に変動する特性と、運転管理の記録に基づき適切に製造されていることを確認することにより、一定値として取り扱うことができる特性及び製造時の精度が高く一定値として取り扱い可能なキャニスターに関する特性に3分類される。一方、計量不可能な特性については、高レベルガラス固化体のキャニスターの健全性に関する特性と、識別管理に必要な特性に分類できる。以上より、高レベルガラス固化体の特性の把握方法を合理的に検討する観点から、必要な高レベルガラス固化体の特性を、以下に示す5種に区分する。

- I 製造条件によってある幅をもって1体毎に変動する特性
- II 適切に製造されていることを確認することにより一定値として取り扱うことができる特性
- III 一定値として取り扱うことができる特性
- IV 健全性に関係する特性
- V 識別管理に必要な特性

このうちIの1体毎に変動する特性については、安定な固化体を製造する観点からある幅を持っており、それらの特性のうち固化ガラスの化学組成については運転条件と高レベルガラス固化体特性との関係に関する技術情報により定められている。固化ガラスの化学組成が定められた範囲内に入れば、IIの特性は、適切に製造されている限り、運転条件と高レベルガラス固化体特性との関係に関する技術情報により得られた値が適用できると期待される。また、Iの特性が仮にその範囲を逸脱した場合について、IIの特性の変動の度合いを検討する必要がある。

なお、附属書2 附表-1において、設計や安全評価上の評価項目として実施する必要があるものの高レベルガラス固化体の特性が評価結果に大きな影響を与えないと考えられるものは、備考欄にその理由をのべている。

2. 高レベルガラス固化体の安定性の確認に必要な特性

高レベルガラス固化体が安定な固化体であることを確認するためには、1.1 節に既述したように、放射能の閉じ込めに優れていること、また、臨界の危険性がないことを示す必要がある。

① 閉じ込め性の評価のためには、まず固化ガラスについて「固化ガラスの化学組成」、「固型化の状態（均質性）」の確認が必要であり、確認結果と技術情報にもとづいて「固化ガラス破碎係数」、「固化ガラス浸出速度（溶解速度）」を決定する必要がある。次に、キャニスターについて「キャニスター材質」、「キャニスター強度」のデータ、及び「キャニスター溶接部の健全性（胴部及び蓋部）」、「キャニスター母材の健全性」、「破損・欠陥がないこと（外観）」の確認が必要である。また、固化ガラスとキャニスターの両立性の確認について「固化ガラスの化学組成」と「キャニスター材質」のデータが必要である。また、キャニスターの耐食性の評価について「キャニスター材質」のデータが必要である。さらに、固化ガラスの熱的安定性の評価について「最低結晶化温度」の値が必要である。

② 臨界の評価のためには「放射性核種濃度」が必要である。

3. 処分施設の設計に必要な特性

(1) オーバーパック

オーバーパックの厚さによっては、オーバーパックを透過するガンマ線と中性子線が引き起こす水の放射線分解により、酸化性化学種が多く生成し腐食に影響を及ぼすことが想定される。このような放射線分解による局部腐食防止のための遮へい厚さの評価においては、高レベルガラス固化体の特性として、線源強度、線源の形状及び廃棄体中の自己遮へい効果を設定する必要がある。線源強度を設定するには「放射性核種濃度」が、線源の形状を設定するには「固化ガラス寸法」が、廃棄体中の自己遮へい効果を設定するには、内在する物質の情報となる「固化ガラス化学組成」及び「固化ガラス密度」が必要となり、これらの値が不明の場合は、「廃棄体表面線量率」を用いることとなる。また、評価においては固化体が均質であることが前提となるため、「固型化の状態」も必要である。

なお、キャニスターによる遮へいを考慮する評価モデルを使用する場合には、上記に加えて「キャニスター寸法・形状」、「キャニスター材質」が必要である。

(2) 緩衝材・処分坑道

固化ガラスの発熱により高レベルガラス固化体及びその近傍の温度が上昇すると、膨張による密度の低下、軟化や液化による均質性の喪失、並びに結晶化（失透）が生じ、固化ガラスの安定性に影響を与えることが想定される。また、温度上昇によりオーバーパックの腐食特性が変化するとともに、緩衝材の劣化の原因となることが想定される。このため、埋設された高レベルガラス固化体の発熱によって、各部位の最高温度が、それぞれの性能を損なうような変質が生じないとされる制限温度（固化ガラスの最低結晶化温度や、緩衝材の劣化防止のため上限温度）を下回るように、緩衝材の諸元諸元及び廃棄体埋設密度（坑道離間距離、廃棄体定置間隔）を設計する必要がある。

緩衝材の諸元及び熱変質抑制の観点からの坑道離間距離、廃棄体定置間隔の評価においては、

高レベルガラス固化体の特性として、発熱量、熱解析モデルを作成する上での形状及び寸法に係るガラスの特性、及び高レベルガラス固化体の熱特性を設定する必要がある。熱源の発熱量を設定するには「発熱量」が、形状及び寸法を設定するには「固化ガラス寸法」が、高レベルガラス固化体の熱特性を設定する上では「固化ガラス熱特性」及び「固化ガラス密度」が必要である。また、発熱量は放射性核種濃度の時間変化とともに変化するため、この評価のため発熱に寄与する「放射性核種濃度」が必要となる。ここでの整理では「発熱量」としての特性にこのような情報も含むものとする。なお、既往の国内外の報告書の評価では、固化体が均質であることを前提として熱解析を実施している。そのため、固化体部分の発熱分布が均質であることの確認として「固型化の状態」が必要である。熱解析結果として前述の固化ガラスの制限温度を考慮する場合、「最低結晶化温度」をもとに評価する。詳細な評価を実施する場合には、高レベルガラス固化体中の空隙部の空気の断熱性を考慮することにより結果が多少異なるものとなる可能性があることから、「プレナム部容積」及び「固化ガラス破碎係数」が必要である。

なお、キャニスターの熱伝達を考慮する詳細な評価モデルを使用する場合には、上記に加えて「キャニスター寸法・形状」、「キャニスター熱特性」が必要である。

(3) 緩衝材（オーバーパック支持性）

緩衝材は、高レベルガラス固化体を内包するオーバーパックの周囲に設置され、閉鎖後長期にわたり拡散バリアとしての性能を発揮する必要がある。このため、オーバーパックが緩衝材内部で沈降し、オーバーパック下部の緩衝材厚みが低減しないように、緩衝材のオーバーパック支持性を考慮した設計を行う必要がある。評価には、オーバーパックと高レベルガラス固化体の合計重量が使用されるため、高レベルガラス固化体の特性である「高レベルガラス固化体重量」が必要である。ただし、オーバーパックと高レベルガラス固化体の合計重量に占める高レベルガラス固化体の割合は 1/10 程度と比較的小さい。

(4) 処分孔（竖置きの場合）

竖置き方式の処分孔については、定置の際の遮へい材として緩衝材の上に適切な厚さの埋め戻し材を設置することによって定置後の処分坑道内の空間線量率が管理区域条件を十分下回るように、遮へいに必要な埋め戻し材の厚さを設定することが考えられている。³⁾

線量率低減の観点からの処分孔の埋め戻し材厚みの評価においては、高レベルガラス固化体の特性として、線源強度、線源の形状、廃棄体中の自己遮へい効果の設定及びキャニスターによる遮へいを考慮する必要がある。線源強度を設定するには「放射性核種濃度」が、線源の形状を設定するには「固化ガラス寸法」が、廃棄体中の自己遮へい効果を設定するには、内在する物質の情報となる「固化ガラス化学組成」及び「固化ガラス密度」が必要となり、これらの値が不明の場合は、「高レベルガラス固化体表面線量率」を用いることとなる。また、評価においては固化体が均質であることが前提となるため、「固型化の状態」も必要である。

上記に加えて、キャニスターによる遮へいを詳細に評価する場合、「キャニスター寸法・形状」、「キャニスター材質」も必要である。

(5) オーバーパックへの高レベルガラス固化体封入までの地上ハンドリング設備

地上の高レベルガラス固化体受入・封入・検査施設では、高レベルガラス固化体を収納した

キャスク（輸送容器）を受け入れて高レベルガラス固化体をキャスクから抜き出し、オーバーパックに封入して搬出する作業が行われる。このため、高レベルガラス固化体をオーバーパックに封入するまで適切にハンドリングできることの評価が必要である。

施設内のハンドリングが可能であることの評価においては、高レベルガラス固化体の特性として、高レベルガラス固化体の重量・強度及びキャニスターの形状の設定が必要である。廃棄体の重量・強度の設定には「高レベルガラス固化体重量」と「キャニスター強度」が、キャニスターの形状の設定には「キャニスター寸法・形状」が必要である。

(6) 地上地下冷却設備

地上地下施設の冷却機能は、高レベルガラス固化体の発熱を安全に除去し、高レベルガラス固化体や人工バリアの健全性が損なわれることのない温度範囲に維持できるように設計する必要がある。このため、高レベルガラス固化体の発熱を外部に伝え、高レベルガラス固化体等の安定な形態を損なう熱による変質を生じさせないような施設の冷却機能の評価が必要である。また、処分孔竖置き方式の処分概念では、高レベルガラス固化体埋設後閉鎖終了まで坑道内に作業者が立ち入ることが考えられる。したがって、施設内作業環境温度維持のための冷却設備設計の基礎データとして、高レベルガラス固化体の発熱量が必要である。

熱変質抑制及び作業環境温度維持の観点からの施設冷却性能設計の評価においては、高レベルガラス固化体の特性として、発熱量、熱解析モデルを作成する上での形状及び寸法に関するガラスの特性及び高レベルガラス固化体の熱特性を設定する必要がある。熱源の発熱量を設定するには「発熱量」が、形状及び寸法を設定するには「固化ガラス寸法」が、高レベルガラス固化体の熱特性を設定する上では「固化ガラス熱特性」及び「固化ガラス密度」が必要である。なお、既往の国内外の報告書の評価では、固化体が均質であることを前提として熱解析を実施している。そのため、固化体部分の発熱分布が均質であることの確認として「固型化の状態」が必要である。熱解析結果として前述の固化ガラスの制限温度を考慮する場合、「最低結晶化温度」をもとに評価する。詳細な評価を実施する場合には、高レベルガラス固化体中の空隙部の空気の断熱性を考慮することにより結果が多少異なるものとなる可能性があることから、「プレナム部容積」及び「固化ガラス破碎係数」が必要である。

なお、キャニスターの熱伝達を考慮する詳細な評価モデルを使用する場合には、上記に加えて「キャニスター寸法・形状」、「キャニスター熱特性」が必要である。

(7) 放射線遮へい

地上及び地下施設内の高レベルガラス固化体を取り扱う作業では、一般公衆及び従事者の被ばく量をできるだけ低減するために、放射線の遮へいを考慮する。

高レベルガラス固化体ハンドリング時に適切な放射線遮へい構造を設計するためには、高レベルガラス固化体の特性として、線源強度、線源の形状、廃棄体中の自己遮へい物質を設定する必要がある。線源強度を設定するには「放射性核種濃度」が、線源の形状を設定するには「固化ガラス寸法」が、廃棄体中の自己遮へい物質を設定するには、内在する物質の情報となる「固化ガラス化学組成」及びその量を算出するための「固化ガラス密度」が必要となり、これらの値が不明の場合は、「高レベルガラス固化体表面線量率」を用いることとなる。また、評価においては固化体が均質であることが前提となるため、「固型化の状態」も必要である。

上記に加えて、キャニスターによる遮へいを詳細に評価する場合、「キャニスター寸法・形状」、「キャニスター材質」も必要である。

4. 作業中の安全評価に必要な特性

4.1 平常時の安全性の評価

(1) 閉じ込め性（内部被ばく）

地上及び地下施設内の高レベルガラス固化体を取り扱う作業では、一般公衆及び従事者の被ばく量をできるだけ低減するために、管理区域の設定を行い、適切な閉じ込め性能を有するよう安全上の考慮を行う。

廃棄体からの放射性核種漏洩の有無の評価には、「キャニスター溶接部の健全性（胴部）」、「キャニスター溶接部の健全性（蓋部）」、「キャニスター母材の健全性」及び「破損・欠陥がないこと（外観）」が必要である。

(2) 放射線遮へい

地上及び地下施設内の高レベルガラス固化体を取り扱う作業では、一般公衆及び従事者の被ばく量をできるだけ低減するために、放射線の遮へいを考慮する。

高レベルガラス固化体ハンドリング時の遮へいによる放射線被ばくが適切であることの評価においては、高レベルガラス固化体の特性として、線源強度、線源の形状、廃棄体中の自己遮へい物質を設定する必要がある。線源強度を設定するには「放射性核種濃度」が、線源の形状を設定するには「固化ガラス寸法」が、廃棄体中の自己遮へい物質を設定するには、内在する物質の情報となる「固化ガラス化学組成」及びその量を算出するための「固化ガラス密度」が必要となり、これらの値が不明の場合は、「高レベルガラス固化体表面線量率」を用いることとなる。また、評価においては固化体が均質であることが前提となるため、「固型化の状態」も必要である。

上記に加えて、キャニスターによる遮へいを詳細に評価する場合、「キャニスター寸法・形状」、「キャニスター材質」も必要である。

(3) キャニスター付着放射性物質の揮発/剥離

キャニスターに付着した放射性物質の揮発/剥離は、作業員の放射性核種吸入による内部被ばくの原因となるとともに、身体汚染及び処分施設の汚染拡大の原因となる。

飛散量が許容値以下であることの評価においては、高レベルガラス固化体の特性として、定置中の廃棄体表面に付着した放射性核種の揮発並びに剥離する量の設定が必要である。廃棄体表面に付着した放射性核種が揮発並びに剥離する量を設定するには、「表面汚染密度」が必要である。

4.2 異常時の安全性の評価

(1) 落下事故

受入・貯蔵施設において高レベルガラス固化体の落下事故が生じないように、また万一の落下事故が生じてもその影響を緩和するように設計を進めるが、念のための高レベルガラス固化体の落下の評価では、万一の取扱い中の落下を想定したうえで、キャニスターの健全性が適切

に確保されていることを評価する必要がある。

落下事故時の高レベルガラス固化体の貫通破損の有無の評価は、落下事故時にキャニスターにかかる荷重に対して十分な機械的強度を持つことを評価することとなる。そのため、高レベルガラス固化体の特性として、キャニスターにかかる荷重とキャニスターの機械的強度を設定する必要がある。キャニスターにかかる荷重を設定するには「高レベルガラス固化体重量」が、キャニスターの機械的強度を設定するには「キャニスター強度」と「キャニスター寸法・形状」が必要である。また、強度の評価においてはキャニスターに著しい破損が無いことが前提となるため、「破損・欠陥がないこと（外観）」が必要である。

なお、事故によりキャニスターが破損した場合の被ばく評価には、上記に加えて「放射性核種濃度」と「プレナム部容積」が必要である。

5. 閉鎖後安全評価に必要な特性

5.1 閉鎖後環境条件評価

(1) 熱的現象

閉鎖後の熱的現象としては、高レベルガラス固化体の溶出速度や核種の溶解度を設定するための環境条件としての温度を明らかにする必要がある。

熱解析モデルを作成する上では、高レベルガラス固化体内部の放射性物質の空間的分布が必要である。このため、「固型化の状態」が特性として必要である。

温度評価を行う上では、高レベルガラス固化体の「発熱量」、「固化ガラス寸法」、「固化ガラス熱特性」、「固化ガラス密度」が必要である。

高レベルガラス固化体内部の構造が温度評価に及ぼす影響を厳密に解析するためには、高レベルガラス固化体中の空間の空気が断熱効果を有することから「プレナム部容積」、「固化ガラス破碎係数」が必要である。また、熱伝導性の良好なキャニスター金属材料は解析結果に大きな影響を与えないが、厳密な解析を行う上では「キャニスター寸法・形状」、「キャニスター熱特性」が必要である。

(2) 力学的現象

標準的な地下水移行シナリオにおいて、緩衝材は、高レベルガラス固化体を内包するオーバーパックの周囲に設置され、閉鎖後長期にわたり拡散バリアとしての性能を発揮するものとされている。このため、オーバーパックが緩衝材内部で沈降し、オーバーパック下部の緩衝材厚みが低減しないように、緩衝材のオーバーパック支持性を評価する必要がある。評価には、オーバーパックと高レベルガラス固化体の合計重量が使用されるため、高レベルガラス固化体の特性である「高レベルガラス固化体重量」が必要である。ただし、オーバーパックと高レベルガラス固化体の合計重量に占める高レベルガラス固化体の割合は 1/10 程度と比較的小さい。

(3) 化学的現象

閉鎖後の化学的現象としては、高レベルガラス固化体の溶解に伴う高レベルガラス固化体周辺の間隙水組成の経時変化を明らかにする必要がある。化学解析モデルを作成する上では、高レベルガラス固化体内部の化学組成の空間分布が必要である。このため、「固型化の状態」が必要である。また、地下水や間隙水の化学組成変化にガラス溶出成分とその溶出量が影響を及ぼすことから「固化ガラス化学組成」、「固化ガラス浸出速度」が必要である。厳密な解析を進めるためには、「キャニスター材質」も必要である。

(4) 放射線化学的現象

閉鎖後の放射線化学的現象としては、放射線分解と高レベルガラス固化体及び周囲の人工バリア材料の放射線損傷が考えられる。放射線影響の解析モデルを作成する上では、高レベルガラス固化体内部の放射性物質や遮へい材としての化学組成の空間分布が必要である。このため、「固型化の状態」が特性として必要である。

また、高レベルガラス固化体内部及び外部での線量を評価するために、「放射性核種濃度」、「高レベルガラス固化体表面線量率」、「固化ガラス寸法」に加えて、ガンマ線や中性子線の遮

へい効果を見るための「固化ガラス密度」、「固化ガラス化学組成」が必要である。厳密なしゃへい評価を行う上では「キャニスター寸法・形状」、「キャニスター材質」が必要である。

5.2 閉鎖後安全評価（被ばく評価）

(1) 地下水中核種移行現象

地下水中核種移行現象を評価する上で、高レベルガラス固化体内部の放射性物質や化学組成の空間分布が必要である。このため、「固型化の状態」と「固化ガラス化学組成」が特性として必要である。

また、高レベルガラス固化体からの核種の溶出フラックスを設定するためには、「放射性核種濃度」、「固化ガラス浸出速度」、「固化ガラス破碎係数」、「固化ガラス寸法」が必要である。第2次取りまとめでは「固化ガラス寸法」と「固化ガラス密度」を用いて人工バリア中核種移行評価モデルを作成しているが、「固化ガラス寸法」と「固化ガラス重量」もしくは「固化ガラス密度」から人工バリア中核種移行評価モデルを作成することも可能である。

(2) 天然現象

長期的な隆起侵食により高レベルガラス固化体が地上に露出するシナリオの被ばく影響を評価する場合、露出する高レベルガラス固化体の放射性物質や化学組成の空間分布が必要である。このため、「固型化の状態」が特性として必要である。

また、地表に露出した高レベルガラス固化体からの外部被ばく線量を評価するために、「放射性核種濃度」、「固化ガラス寸法」に加えて、ガンマ線や中性子線の遮へい効果を見るための「固化ガラス密度」、「固化ガラス化学組成」が必要である。

(3) 人間侵入

ボーリングにより高レベルガラス固化体の一部をコアとして地上に取り出すシナリオの被ばく影響を評価する場合、高レベルガラス固化体の放射性物質の空間的分布が必要である。このため、「固型化の状態」が特性として必要である。

地表に採取したコアからの被ばく線量を評価するためには「放射性核種濃度」が必要である。この他、外部被ばく線量を評価するために、「固化ガラス寸法」に加えて、ガンマ線や中性子線の遮へい効果を見るための「固化ガラス密度」、「固化ガラス化学組成」が必要である。

6. 高レベルガラス固化体の識別管理

高レベルガラス固化体の処分施設への受入れからオーバーパック封入までのハンドリング時において、個々の高レベルガラス固化体の識別管理が必要である。これらの管理に特有な高レベルガラス固化体の特性として「整理番号」、「整理番号の表示方法・位置」の情報が必要である。

7. 放射能に関する考察

7.1 放射性核種に関する情報の必要性

地層処分の安全性を評価する上で、高レベルガラス固化体中の放射性核種の量及び濃度は重要な特性である。それらは、附属書 2 表 7-1 に示すように、操業中及び閉鎖後の種々の安全評価や施設設計を行う上で必須の基礎情報である。これらの主要核種の選定については、「六ヶ所事業所再処理事業指定申請書」⁶⁾の高レベルガラス固化体のインベントリの計算条件を基礎とした。

附属書 2 表 7-1 放射性核種量・濃度を必要とする対象事象と主要核種

対象期間	対象事象	主要核種
操業中	放射線遮へい	Sr-90,Cs-137,Am-241,Cm-244
	地上施設冷却性能	Sr-90,Cs-137, Eu-154, Am-241,Cm-244
	地上地下坑道（立坑）における 廃棄体落下事故	Sr-90,Ru-106, Am-241,Cm-244
閉鎖後	埋設後処分場温度評価	Sr-90,Cs-137, Eu-154, Am-241,Cm-244
	高レベルガラス固化体による 放射線場の影響	Sr-90,Cs-137,Am-241,Cm-244
	地下水移行シナリオ被ばく 評価	Se-79,Cs-135,Np-237
	廃棄体接近・人間侵入シナリオ 被ばく評価	Cs-137, Eu-154,Pu-239,Am-241,Am-243

操業中の放射線遮へいについては、ガンマ線及び中性子線を放出する核種量が重要である。操業中の施設冷却性能や埋設後処分場温度評価に関しては、評価時点において発熱に支配的な核種量が重要である。また、万一の立坑搬送中の高レベルガラス固化体落下事故を想定した場合、吸入や外部被ばくの影響計算のために核種量が必要である。閉鎖後の地下水移行シナリオや接近シナリオを考慮した被ばく評価においては高レベルガラス固化体の核種量の経時変化が必要である。これらの核種量の経時変化は、高レベルガラス固化体製造時の核種インベントリをもとに評価できる。

7.2 放射性核種の量・濃度に関する評価方法

各種の被ばく評価においては、放射性核種の濃度と量が必要である。内外の安全評価書によると、Cs-135やSe-79のように高レベルガラス固化体製造時に直接測定が難しい核種（以下、「難測定核種」と言う。）も評価対象核種として含まれている。また、高レベルガラス固化体中の存在量がわずかで、かつ、半減期が長く地質媒体に吸着され難い I-129 等を対象としている例もある^{7) 8) 9)}。これらの核種を含む難測定核種については、信頼性の高い分析技術を開発することも必要であるが、既往の知見に基づき、計算等により核種量を評価することが考えられる。その評価方法としては、以下のような種々の方法が考えられている。これらの方法については、その適用性を確かなものにするため、データの収集、蓄積を図る必要がある。

- ① 測定済みのキー核種との比例関係を利用、別途比例係数を算出してキー核種に乗じる。
- ② 測定済み核種との放射平衡、同位体分率を利用して求める。
- ③ 指標核種から便宜的な平均的燃焼度・冷却期間等を算出し、計算にて求める。

8. 内外の技術的基準

各国及び我が国での高レベルガラス固化体及び地層処分対象廃棄物の製造、受け入れ及び処分時における技術的基準¹⁾について、各国の規則、指針及び性能評価書等の中で述べられている内容を調査した。

附属書 2 表 8-1 及び附属書 2 表 8-2 に、フランス、スイス、ベルギー、ドイツ及び日本における高レベルガラス固化体の製造／受け入れ及び、処分時における技術的基準を示す。これらの基準は、高レベルガラス固化体以外の廃棄体も含めて対象としているものもあることに留意が必要である。

我が国を含む各国の規則、指針及び性能評価書等の中で述べられている内容に関して、附属書 2 附表-1 に挙げた高レベルガラス固化体の評価項目及びそれらに必要な特性との充足性を、附属書 2 附表-2 にまとめた。以下の 2 項目を除き、附属書 2 附表-1 に示した高レベルガラス固化体の特性が充足性を満足していることが確認された。

- ① 生物学的耐性を明示すること
- ② ガス発生が有意でないこと

上記のうち、生物学的耐性については、無機物である固化ガラスへの微生物の侵食は、考えにくい。またキャニスター材料であるステンレス鋼への微生物腐食は、原理的に考えられるが、処分場地上施設の操業環境である大気中では考えにくい。処分場埋設後においてはオーバーパックがあるので、ステンレス鋼製キャニスターの耐食性は重要でない。ガス発生については、放射性ガスとなり得る核分裂生成物は、再処理工程で除去されるため、高レベルガラス固化体中に含まれる量は少なく、崩壊系列中で親核種により生成される放射性ガス成分もその半減期が短いことから顕著な量が存在するとは考えられない。また、微生物によって生成するメタンガスは、その溶解度が大きいこと、さらに放射線分解によって発生する水素ガスは、オーバーパックの腐食による発生と比較し有意ではないこと、等から、高レベルガラス固化体に起因するガス発生による処分システムへの影響は顕著でない。

したがって、将来の廃棄体確認においては、本附属書の 2 章から 6 章において抽出した高レベルガラス固化体の特性の把握が必要と考えられる。

なお、日本の核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第一種廃棄物埋設の事業に関する規則¹⁴⁾では、防護措置のために「第一種廃棄物埋設事業者は、特定核燃料物質の区分に応じ、それぞれの措置を採らなければならない。」とされている。核物質防護対象物としての上限値はないものの、特定核燃料物質の防護のために、プルトニウム及びウランの量と線量率の区分が規定されている。

1) ここで言う技術的基準とは、法令等で定められた基準のほか、性能評価書等で推奨されている基準も含む。

附属書 2 表 8-1 内外の技術的基準（高レベルガラス固化体製造／返還受入れ時）

規則、指針及び性能評価書等に 記載された内容*1	フランス	スイス	ベルギー	ドイツ	日本 (規則等)	日本 (学会標準)
最大放射能濃度を超えないこと	◎			◎	○	◎
廃棄物及びキャニスターの亀裂・割れを評価 すること	◎		○			
放熱曲線を提供すること。発熱量/変質点/ 熱特性を明示すること（内部の熱負荷による 顕著な影響を受けないこと）。	◎	○		◎		
核種浸出の測定条件／結果及び溶解率を示 すこと（固化体として水性媒体への抵抗力 があること）	◎	○		◎		
放射線影響を評価すること （内部の放射線負荷による顕著な影響を受 けないこと）	◎	○	○			
化学的要因に対する耐性を明示すること	◎		○		○	◎
生物学的耐性を明示すること （微生物の影響を受けないこと）	◎	○				
表面汚染密度が一定値未満であること	◎			◎		◎
キャニスターが圧縮強度を有すること （強度を有すること）	◎	○	○		○	
可能な限り一杯の充填	◎	○	○			
輸送に関する基準に適合すること		○	○		○	
標識をつけること		○		◎	○	
いかなる条件下でも臨界が発生しないこと		○		◎		
爆発性、自然発火性等の物質を大量に含ま ないこと		○				
巨視的に均一で連続的であること	◎	○	○	◎		

（◎：高レベルガラス固化体に固有な基準、○：地層処分対象廃棄物全般に対する基準、又は高レベルガラス固化体以外の廃棄物に対する基準）

*1：フランスは安全基本規則 RFSⅢ.2.b¹⁰⁾、スイスは指針 HSK-R-14¹¹⁾（現 HSK-B05/d¹²⁾）、ベルギーは安全評価・実現可能性第2次中間報告書 SAFIRⅡ⁷⁾、ドイツは Wissenschaftliche Berichte FZKA 6651¹³⁾、日本は第1種廃棄物埋設事業規則¹⁴⁾、外廃棄規則¹⁵⁾及び学会標準（返還廃棄物）¹⁾に記載の事項。

附属書 2 表 8-2 内外の技術的基準（高レベルガラス固化体処分時）

規則、指針及び性能評価書等に 記載された内容*1	フランス	スイス	ベルギー	ドイツ	日本 (規則等)	日本 (学会標準)
操業中及び閉鎖後の健全性	○					
廃棄物とオーバーパックの相互作用	○					
ガス発生が顕著でないこと	○	○	○			
化学的健全性（バリア劣化促進がない）	○	○	○		○	
熱的健全性（バリア劣化促進がない）	○	○				◎
閉鎖後一定期間のキャニスター力学的 健全性	○		○		○	
空隙が（力学的な）問題とならない	○		○			
未臨界	○	○		◎		
放射線影響（耐放射線性）		○	○			
最終的な安全評価に基づく判断	○					
放射性核種インベントリ	○	○		◎	○	◎
線量率		○		◎		◎
処分時のハンドリング可能性			○	◎		◎
化学毒性及び有害物質を含まない			○			
輸送要件に適合している			○		○	

（◎：高レベルガラス固化体に固有な基準、○：地層処分対象廃棄物全般に対する基準、又は高レベルガラス固化体以外の廃棄物に対する基準）

*1：フランスは ASN 安全指針¹⁶⁾、スイスは指針 HSK-R-14¹¹⁾（現 HSK-B05/d¹²⁾）及び Nagra,NTB02-05⁹⁾、ベルギーは安全評価・実現可能性第2次中間報告書 SAFIR II⁷⁾、ドイツは Wissenschaftliche Berichte FZKA 6651¹³⁾、日本は第1種廃棄物埋設事業規則¹⁴⁾、外廃棄規則¹⁵⁾、放射線障害防止法¹⁷⁾、電離放射線障害防止規則¹⁸⁾及び学会標準（返還廃棄物）¹⁾に記載の事項。

参考文献

- 1) 日本原子力学会, 日本原子力学会標準 返還廃棄物の確認に関する基本的考え方: 2007, AESJ-SC-F011:2007.
- 2) 核燃料サイクル開発機構, 地層処分研究開発第2次取りまとめ 分冊3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023, 1999.
- 3) 核燃料サイクル開発機構, 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.
- 4) 電力中央研究所・電気事業連合会 (1999): 高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術.
- 5) 廃棄物管理施設の安全性の評価の考え方, 平成元年3月27日, 原子力安全委員会決定.
- 6) 日本原燃株式会社 (1992a): 六ヶ所事業所再処理事業指定申請書(平成元年3月).
- 7) "SAFIR 2: Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2", 2001, NIROND 2001-06 E, ONDRAF/NIRAS.
- 8) "Dossier 2005 Argile - Safety evaluation of a geological repository.", 2005, Andra.
- 9) "Nagra: Project Opalinus Clay; Safety Report - Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste.", NTB02-05, 2005, Nagra.
- 10) "Dispositions particulières applicables à la production, au contrôle, au traitement au conditionnement et à l'entreposage des déchets de haute activité conditionnés sous forme de verre et résultant du traitement de combustibles irradiés dans des réacteurs nucléaires à eau ordinaire sous pression.", RFS-III.2.b, 1982, ASN.
- 11) "Guideline on Conditioning and Storage of Radioactive Waste", HSK-R-14, 1988, HSK.
- 12) "Requirements for Conditioning of Radioactive Waste", HSK-B05/d, 2007, HSK.
- 13) "Endlagerrelevante Eigenschaften von hochradioaktiven Abfallprodukten, -Charakterisierung und Bewertung-, Empfehlungen des Arbeitskreises HAW-Produkte", FZKA6651, 2001, Karlsruhe GmbH.
- 14) 核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第一種廃棄物埋設の事業に関する規則 (平成二十年三月二十八日経済産業省令第二十三号) 最終改正: 平成二十一年三月三十一日経済産業省令第一八号
- 15) 核燃料物質等の工場又は事業所の外における廃棄に関する規則 (昭和五十三年十二月二十八日総理府令第五十六号) 最終改正: 平成二〇年六月二七日文部科学省・経済産業省・国土交通省令第四号
- 16) "Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde du 12.02.08 (ex-RFS-III.2.f)", 2008, ASN.
- 17) 放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律, (昭和三十二年六月十日法律第六十七号), 最終改正: 平成一九年五月一日法律第三八号
- 18) 電離放射線障害防止規則, (昭和四十七年九月三十日労働省令第四十一号), 最終改正: 平成二十一年三月三〇日厚生労働省令第五五号

附属書3 高レベル放射性廃棄物ガラス固化体製造プロセスの管理内容

1. 各製造プロセスの管理内容

1.1 JNFLにおける製造プロセスの管理内容

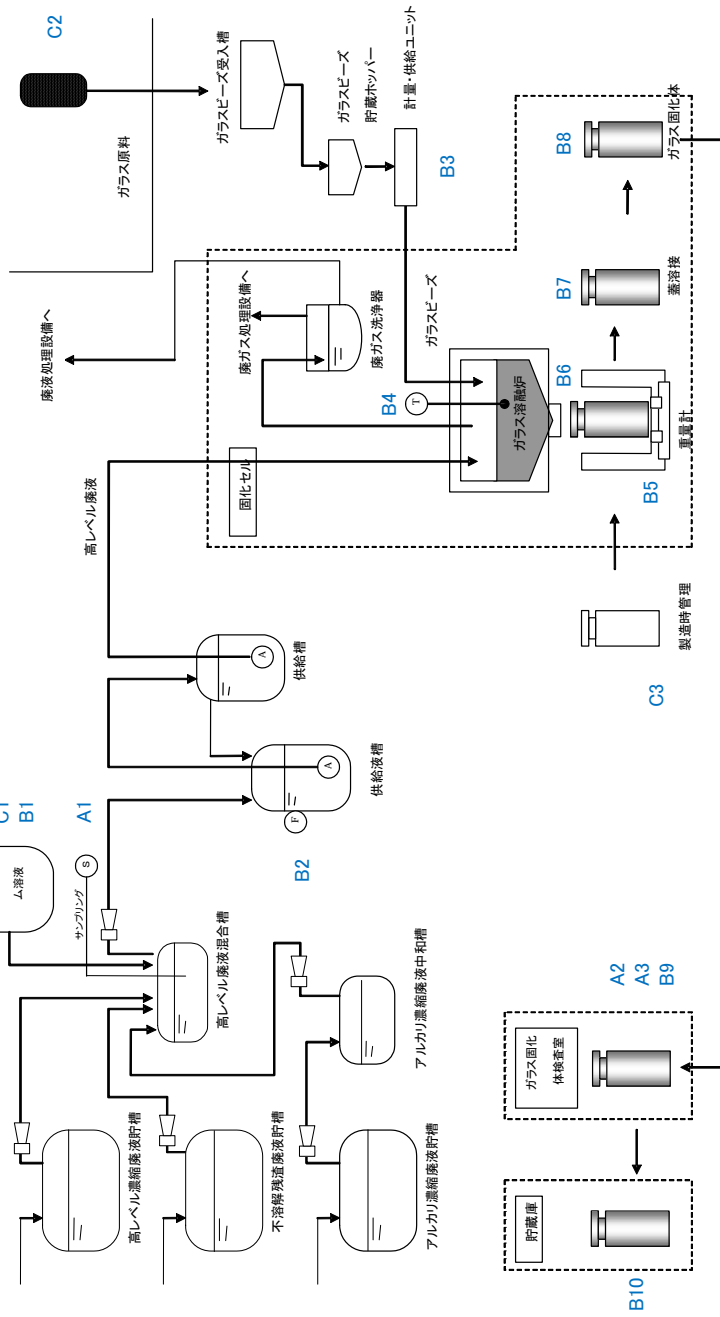
附属書3図 1-1にJNFLにおける高レベルガラス固化体製造プロセス及びプロセス中で実施している管理を示す。

高レベルガラス固化体製造プロセスの管理は、分析・測定、運転管理、調達管理の3分野に区分される。上記のプロセスフローの順序に沿った管理及び管理内容の概要を附属書3表 1-1に示す。

上記の製造プロセスの適切なポイントで、高レベルガラス固化体の特性を把握するための種々の管理が実施されている。処分に必要である高レベルガラス固化体の各特性とプロセス中で実施している管理との関係を附属書3表 1-2に示す。

なお、製造時の逸脱により、イエローフェーズを含む高レベルガラス固化体が発生すること、固化ガラス重量が極端に小さい高レベルガラス固化体が発生すること等が、低い確率で想定される。しかしながら、附属書3表 1-1に示す管理を適切に行うことにより、これらの製造時の逸脱は把握することが可能である。

[ガラス固化体製造プロセスフロー]



[プロセス中で実施している管理]

分析・測定	A1 廃液の組成分析	A2 表面汚染密度検査	A3 閉じ込め検査
運転管理	B1 NaNO ₃ 溶液供給量管理 B5 重量管理 B9 外観・識別管理	B2 廃液供給量管理 B6 注入状況管理 B10 貯蔵中の管理	B3 ガラス原料供給量管理 B7 蓋溶接パラメータ管理 B8 溶融ガラス温度管理・保持時間管理 B8 冷却時間(冷却)管理
調達管理	C1 NaNO ₃ 溶液濃度管理	C2 ガラスの品質管理	C3 キャニスターの調達管理

附属書 3 図 1-1 JNFL 高レベルガラス固化体製造プロセス及びプロセス中で実施している管理

附属書 3 表 1-1 JNFL のプロセス中で実施している管理及び管理内容

プロセス中で実施している管理		管理内容
A1	廃液の組成分析	採取した混合廃液サンプルの元素濃度、Na 濃度、放射性核種濃度を分析し、廃液組成が決定され、記録管理される。
C1	NaNO ₃ 溶液濃度管理	受け入れ検査で溶液中の Na 濃度を品質記録で確認する。
B1	NaNO ₃ 溶液供給量管理	混合槽の Na 濃度を元に供給量を調整する。
B2	廃液供給量の管理	廃液の分析結果、ガラス原料の Na 濃度及び高レベルガラス固化体の目標組成に基づき、廃液供給量が決定され、供給液槽の液位により設定した供給量に管理される。
C2	ガラスの品質管理	受け入れ検査でガラス原料中の Na 濃度を品質記録で確認する。
B3	ガラス原料供給量管理	廃液の分析結果、ガラス原料の Na 濃度及び高レベルガラス固化体の目標組成に基づき、ガラス原料供給量が決定され、ガラス原料供給積算値により設定した供給量に管理される。
B4	熔融ガラス温度・保持時間管理	熔融炉内の熔融ガラス温度及び保持時間が基準範囲内にあるように炉内に設置された温度計で管理される。
C3	キャニスターの調達管理	キャニスターの形状、寸法、重量、材料及び溶接部の健全性については、キャニスター製造時の検査結果に基づいて確認される。また、整理番号については、受入検査時に表示位置、表示方法を確認する。
B5	重量管理	<ul style="list-style-type: none"> ・ 充填するガラス重量は熔融炉下の重量計にて計測管理する ・ キャニスター重量及び充填ガラス重量を高レベルガラス固化体製造履歴記録に記載し管理する。
B6	注入状況管理	ITV 画像及び結合装置内圧力によりキャニスターへの注入状況を確認し、ITV 画像、イエローフェース発生の有無及びその発生量を記録・管理する。
B7	蓋溶接パラメータの管理	作動試験により妥当性の確認された溶接条件と同一条件で溶接が行われていることを確認する。
B8	冷却管理	工程管理によりガラス流下後の結合装置解除～高レベルガラス固化体除染までの時間を管理する。
A2	表面汚染密度検査	スミヤふき取り測定の結果、表面の放射性物質の密度が表面密度限度の十分の一を超えないことを確認する。
B9	外観・識別管理	高レベルガラス固化体製造後の外観検査において、有害な破損、傷等がないことを目視 (ITV) により確認する。
A3	閉じ込め検査	閉じ込め検査により健全性を確認する。
B10	貯蔵中の管理	固化体の発熱量が設定値以下であることを高レベルガラス固化体製造時の工程管理により確認している。また、貯蔵設備においては設置された冷却空気の温度計にて、高レベルガラス固化体が適切に貯蔵されていることを監視している。

附属書3表 1-2 高レベルガラス固化体の特性とプロセス中で実施している管理の関係 (JNFL)

プロセス区分	廃液タンク調整タンク			廃液供給	ガラス組成/供給		溶融炉	キヤニスター調達	注入		冷却/溶接/スミア				貯蔵前	貯蔵	
	A1	C1	B1		B2	C2			B3	B4	C3	B5	B6	B7			B8
プロセス中で実施している管理 固体の特性	プロセス中で実施している管理																
	放射性核種濃度	○			○				○								
	廃棄体表面線量率	○			○				○								
	固化ガラス化学組成	○	○		○												
	発熱量	○			○												
	廃棄体重量							○									
	プレナム部容積*							○									
	表面汚染密度												○				
	固化ガラス重量								○								
	固化ガラス寸法 (外径・高さ) *								○								
	固形化の状態 (均質性・非晶質性)								○								○
	固化ガラス破碎係数												○				
	固化ガラス浸出速度 (溶解速度)	○	○		○	○							○				○
	最低結晶化温度	○	○		○	○							○				○
	固化ガラス熱特性 (熱容量、熱伝導率)	○	○		○	○							○				○
	固化ガラス密度	○	○		○	○							○				○
	キヤニスター材質								○								
	キヤニスター寸法・形状								○								
	キヤニスター溶接部の健全性 (胴部)								○					○			
	キヤニスター母材の健全性								○								
キヤニスター強度								○									
キヤニスター熱特性								○									
キヤニスター溶接部の健全性 (蓋部)								○						○			
破損・欠陥がないこと (外觀)																○	
整理番号																○	
整理番号の表示方法・位置																○	

*:これらの重要特性の算出には、固化ガラスの密度が必要である。

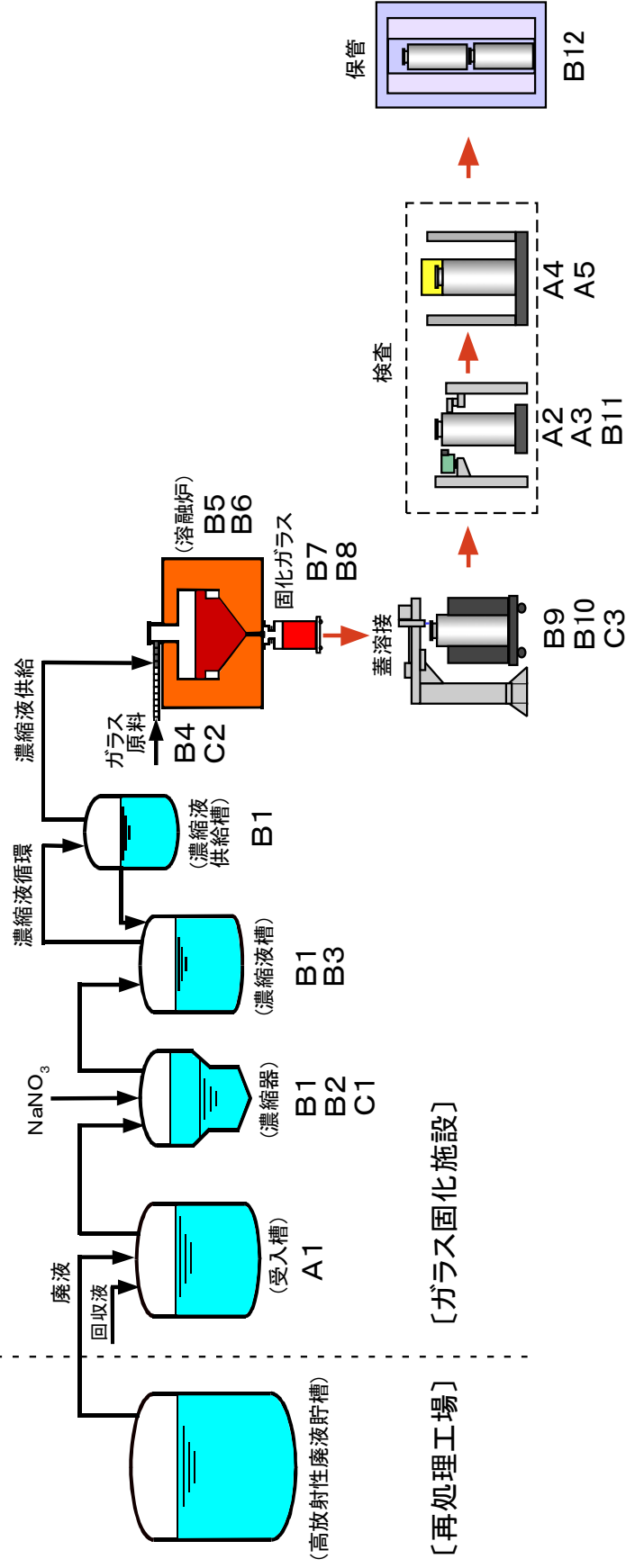
1.2 JAEAにおける製造プロセスの管理内容

附属書 3 図 1-2 に JAEA における高レベルガラス固化体製造プロセス及びプロセス中で実施している管理を示す。プロセスフローの順序に沿った管理及び管理内容の概要を附属書 3 表 1-3 に示す。

高レベルガラス固化体製造プロセスの管理は、JNFL と同様に、分析・測定、運転管理、調達管理の 3 分野に区分される。

上記の製造プロセスの適切なポイントで、高レベルガラス固化体の特性を把握するための種々の管理が実施されている。処分に必要な高レベルガラス固化体の特性とプロセス中で実施している管理との関係を附属書 3 表 1-4 に示す。

〔ガラス固化体製造プロセスフロー〕



〔プロセス中で実施している管理〕

A:分析・検査	A1:廃液の分析	A2:表面密度検査	A3:外観検査	A4:寸法検査	A5:閉じ込み確認検査
B:運転管理	B1:廃液濃度の算出	B2:NaNO ₃ 溶液添加	B3:廃液供給速度管理	B4:ガラス原料供給速度管理	B5:溶融温度管理
C:調達管理	B6:固化ガラス組成管理	B7:流下監視	B8:注入管理	B9:蓋溶接管理	B10:自然空冷
	B11:ID番号確認	C2:ガラス原料調達管理	C3:キャニスター調達管理		

附属書 3 図 1-2 JAEA 高レベルガラス固化体製造プロセス及びプロセス中で実施している管理

附属書 3 表 1-3 JAEA のプロセス中で実施している管理及び管理内容

プロセス中で実施している管理		管理内容
A1	廃液の分析	受入槽から廃液の試料を採取し、全廃棄物酸化物濃度、放射能濃度等の分析を行い、結果を確認する。
B1	廃液濃度の算出	受入槽の廃液分析結果を基に、廃液濃度を算出する。
C1	NaNO ₃ 調達管理	NaNO ₃ が仕様通りであることを確認する。
B2	NaNO ₃ 溶液添加	廃液の分析結果を基に、固化ガラス中のNa ₂ O含有率が目標値となるようにNaNO ₃ 溶液を添加する。
B3	廃液供給速度管理	廃液の分析結果を基に、固化ガラス中の全廃棄物酸化物含有率が目標値になるよう溶融炉への廃液供給速度を設定し、供給量は濃縮液槽の液位から算出した値により確認する。
B4	ガラス原料供給速度管理	設定したガラス製造速度を基に、ガラス成分酸化物含有率が目標値になるよう溶融炉へのガラス原料供給速度を設定し、供給量はガラス原料供給量積算計の積算値により確認する。
C2	ガラス原料調達管理	仕様書に記載する組成、寸法等を満足していることを確認する。
B5	溶融温度管理	溶融ガラス温度が運転目標値になるよう溶融炉の温度を監視し、溶融炉を運転する。
B6	固化ガラス組成管理	廃液濃度、廃液供給量、ガラス原料供給量、流下重量を基に固化体毎の組成を算出する。
B7	流下監視	ガラス流下状況の目視監視等により、ガラス流下の異常の有無を確認する。
B8	注入管理	溶融ガラスの注入重量を確認する。
B9	蓋溶接管理	電流・電圧などの溶接条件を確認する。
B10	自然空冷	平衡となる温度まで冷却するために自然空冷を行う。
C3	キャニスター調達管理	仕様書に記載する材料、寸法等を満足していることを確認する。
A2	表面密度検査	固化体の表面密度の放射能測定を行い、管理値以下であることを確認する。
A3	外観検査	ITVにて有意な傷、変形等がないことを確認する。
B11	ID番号確認	ITVにて固化体IDを確認する。
A4	寸法検査	固化体に有害な変形がないことを、加熱装置内に挿入できることにより確認する。
A5	閉じ込め確認検査	加熱装置に固化体を収納し、加熱後空気掃引によりサンプリングし放射能測定を行い、管理値以下であることを確認する。
B12	保管管理	保管セルの排気風量、排気出口温度などを監視する。

附属書3表 1-4 高レベルガラス固化体の特性とプロセス中で実施している管理の関係 (JAEA)

プロセス区分	受入槽	濃縮器			濃縮液槽	ガラス原料		溶融炉		キャニスター	ガラス固化体								保管																								
		B1	C1	B2		B3	C2	B4	B5		B6	C3	B7	B8	B9	B10	A2	A3		B11	A4	A5	B12																				
プロセス中で実施している管理	A1	廃液の分析	廃液濃度の管理	NaNO ₃ 調達管理	NaNO ₃ 溶液添加	B3	廃液供給速度管理	C2	ガラス原料調達管理	B4	ガラス原料供給速度管理	B5	溶融温度管理	B6	固化ガラス組成管理	C3	キャニスター調達管理	B7	流下監視	B8	注入管理	B9	蓋溶接管理	B10	自然空冷	A2	表面密度検査	A3	外観検査	B11	I D 番号確認	A4	寸法検査	A5	閉じ込め確認検査	B12	保管管理						
	放射線核種濃度	○	○			○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○																	
廃棄体表面線量率	○	○			○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○																	
固化ガラス化学組成	○	○			○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○																	
発熱量	○	○			○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○																	
廃棄体重量																																											
プレナム部容積																																											
表面汚染密度																																											
固化ガラス重量																																											
固化ガラス寸法 (外径・高さ)																																											
固化ガラス状態 (均質性・非均質性)																																											
固化ガラス破砕係数																																											
固化ガラス浸出速度 (溶解速度)	○	○																																									
最低結晶化温度	○	○																																									
固化ガラス熱特性 (熱容量、熱伝導率)	○	○																																									
固化ガラス密度	○	○																																									
キャニスター材質																																											
キャニスター寸法・形状																																											
キャニスター溶接部の健全性 (胴部)																																											
キャニスター母材の健全性																																											
キャニスター強度																																											
キャニスター熱特性																																											
キャニスター溶接部の健全性 (蓋部)																																											
破損・欠陥がないこと (外観)																																											
整理番号																																											
整理番号の表示方法・位置																																											

*: これらの重要特性の算出には、固化ガラスの密度が必要である。

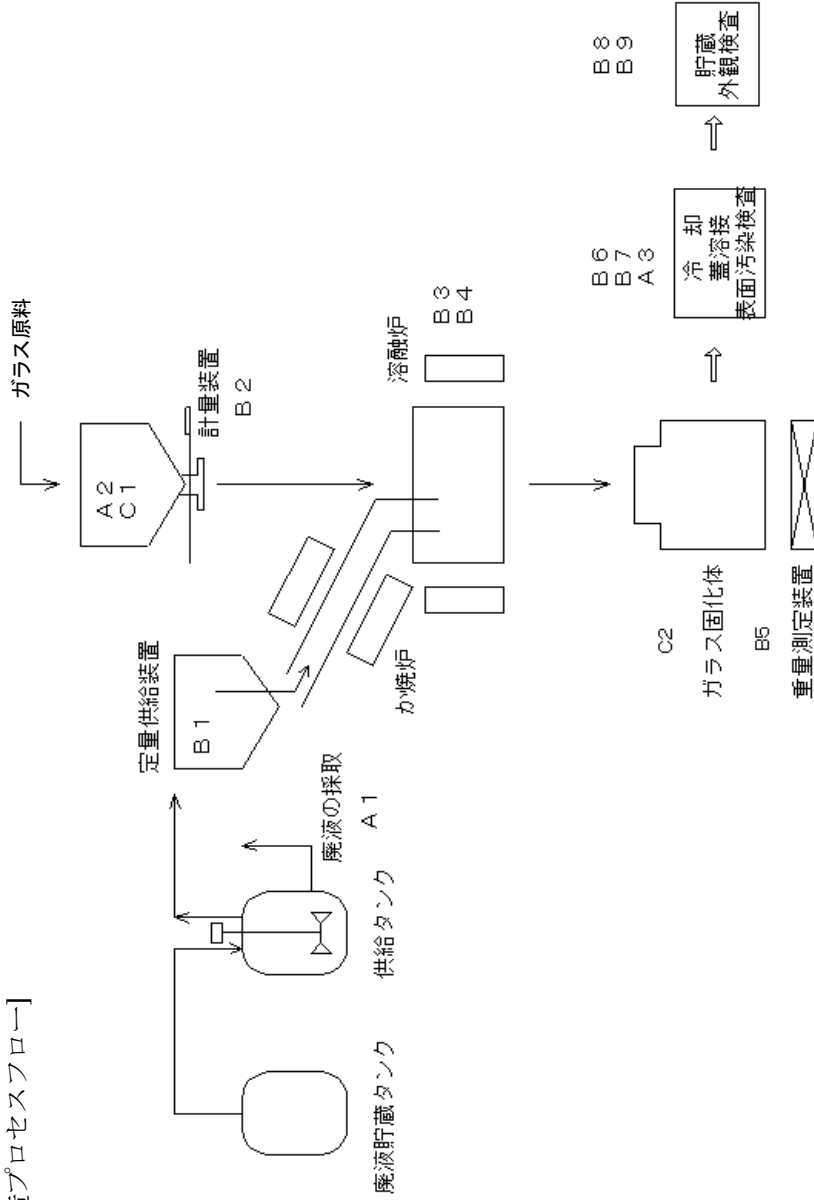
1.3 AREVA NC 社における製造プロセスの管理内容

附属書 3 図 1-3 に AREVA NC 社における高レベルガラス固化体製造プロセスとプロセス中で実施している管理を示す。上記のプロセスフローの順序に沿った管理と管理内容の概要を附属書 3 表 1-5 に示す。

高レベルガラス固化体製造プロセスの管理項目は、JNFL 及び JAEA と同様に、分析・測定、運転管理、調達管理の 3 分野に区分される。

上記の製造プロセスの適切なポイントで、高レベルガラス固化体の特性を把握するための種々の管理が実施されている。処分に必要な高レベルガラス固化体の特性とプロセス中で実施している管理の関係を附属書 3 表 1-6 に示す。

[ガラス固化体製造プロセスフロー]



[プロセス中で実施している管理]

分析・測定	A1 廃液の分析	A2 ガラス原料の組成管理	A3 表面汚染密度検査
運転管理	B1 廃液供給量の管理	B2 (ガラス原料)添加量の管理	B3 溶融炉の温度管理
調達管理	B6 冷却管理	B7 溶接パラメータの管理	B8 貯蔵中の管理
	C1 ガラス原料の調達管理	C2 キャニスターの調達管理	
			B5 重量測定
			B9 外観検査

附属書 3 図 1-3 AREVA NC 社高レベルガラス固化体製造プロセス及びプロセス中で実施している管理

附属書 3 表 1-5 AREVA NC 社のプロセス中で実施している管理及び管理内容

プロセス中で実施している管理		管理内容
A1	廃液の分析	供給タンクで採取された廃液の組成が分析により決定され記録管理される。
B1	廃液供給量の管理	廃液の分析結果に基づいて、高レベルガラス固化体一本あたりの廃液の供給量が決定され、定量供給装置により設定した供給量に管理される。
C1	ガラス原料の調達管理	ガラス原料の品質が規格を満足することが確認される。
A2	ガラス原料の組成管理	ガラス原料の組成が分析により確認される。
B2	(ガラス原料)添加量の管理	ガラス原料の分析結果に基づいて、高レベルガラス固化体一本あたりのガラス原料の供給量が決定され、計量装置により設定した供給量に管理される。
B3	溶融炉の温度管理	溶融炉内の溶融ガラス温度が、基準範囲内にあるよう管理される。
B4	注入速度管理	注入速度が基準範囲内にあるよう管理される。
C2	キャニスターの調達管理	キャニスターの寸法、形状、重量、材質及び溶接部の健全性について、キャニスター製造時の検査結果に基づいて確認される。
B5	重量測定	キャニスター注入時の重量変化を基にした溶融ガラスの重量が記録される。
B6	冷却管理	冷却位置で 24 時間以上自然空冷される。
B7	溶接パラメータの管理	溶接パラメータが基準範囲内にあるように管理される。
A3	表面汚染密度検査	$\beta \cdot \gamma$ 放射体の表面汚染密度が所定値以下に管理される。
B8	貯蔵中の管理	貯蔵施設での冷却状況が管理される。
B9	外観検査	有害なきず等の損傷のないことが確認される。

附属書 3 表 1-6 高レベルガラス固化体の特性とプロセス中で実施している管理の関係 (AREVA NC 社)

プロセス区分	廃液の分析	廃液供給	ガラス原料調達	ガラス原料組成・添加		溶融炉	キヤニスター調達	注入		冷却・溶接・表面汚染		貯蔵	
	A1	B1	C1	A2	B2	B3	C2	B4	B5	B6	B7	B8	B9
プロセス中で実施している管理 固化体の特性	放射線核種濃度	○											
	廃棄体表面線量率	○		○	○								
	固化ガラス化学組成	○		○	○								
	発熱量	○											
	廃棄体重量							○					
	プレナム部容積*						○						
	表面汚染密度												
	固化ガラス重量								○				
	固化ガラス寸法 (外径・高さ) *												
	固化ガラスの状態 (均質性・非晶質性)												
	固化ガラス破砕係数												
	固化ガラス浸出速度 (溶解速度)	○	○		○	○	○		○		○	○	
	最低結晶化温度	○	○		○	○	○		○		○	○	
	固化ガラス熱特性(熱容量, 熱伝導率)	○	○		○	○	○		○		○	○	
	固化ガラス密度	○	○		○	○	○		○		○	○	
	キヤニスター材質												
	キヤニスター寸法・形状												
	キヤニスター溶接部の健全性(胴部)												
	キヤニスター母材の健全性												
	キヤニスター強度												
キヤニスター熱特性													
キヤニスター溶接部の健全性(蓋部)											○		
破損・欠陥がないこと(外観)												○	
整理番号													○
整理番号の表示方法・位置													○

*: これらの重要特性の算出には、固化ガラスの密度が必要である。

2. 非定常及び逸脱で発生する高レベルガラス固化体の例

2.1 JNFLにおいて非定常及び逸脱により発生する高レベルガラス固化体の例

JNFLの製造プロセスにおける非定常作業や逸脱によって発生することが想定される高レベルガラス固化体の例を、附属書3表2-1に示す。なお、逸脱により発生する高レベルガラス固化体については、附属書3表2-1の逸脱の検知手段に示した内容を適切に管理することにより、発生の有無を検知できる。

附属書 3 表 2-1 JNFL 高レベルガラス固化体製造プロセスにおける非常作業及び逸脱によって発生する高レベルガラス固化体の例

< 非常作業等 >

番号	非常作業等の内容	製造される高レベルガラス固化体	検知手段
1	ガラス溶融炉立ち上げ、洗浄・運転時等、模擬ガラス原料※を使用してガラス溶融炉の運転を行う。	発熱量の低い高レベルガラス固化体が発生する可能性がある。化学組成等は通常の高レベルガラス固化体と同様。	B2：廃液供給量管理 B3：ガラス原料供給量管理
2	白金族元素がガラス溶融炉の炉底へ堆積した場合の復旧作業として、炉内のはつりを実施する。	はつりガラスが発生する。高レベルガラス固化体として扱うかどうかは未定。	高レベルガラス固化体とは別に管理している。

※ 標準ガラスの組成を模擬し、模擬廃棄物成分とガラス成分を調整してガラス原料としたもの。

< 逸脱 >

番号	逸脱の内容	製造される高レベルガラス固化体	逸脱の検知手段
1	廃液の調整ミス等により、ガラス流下運転時にイエローフェーズが発生する。	イエローフェーズを含む高レベルガラス固化体が発生する可能性がある。	B6：注入状況管理
2	高周波加熱装置の故障等によりガラスの流下不良が発生し、やむを得ず流下操作を停止する。	ガラスの充てん量が少ない高レベルガラス固化体が発生する可能性がある。	B5：充填重量管理
3	蓋溶接作業において、溶接パラメータが管理値を逸脱する。	蓋溶接の不十分な高レベルガラス固化体が発生する可能性がある。	A3：閉じ込み検査 B7：蓋溶接パラメータ管理 B9：外観・識別管理
4	高レベルガラス固化体を取扱う機器の故障等により、高レベルガラス固化体の転倒、落下が発生する。	ガラスが損傷した（破砕係数の大きい）高レベルガラス固化体が発生する可能性がある。 キャニスタ表面に傷のある高レベルガラス固化体が発生する可能性がある。 キャニスタが変形した高レベルガラス固化体が発生する可能性がある。	B9：外観・識別管理

用語集

ア行

液化温度

最低結晶化温度以上にガラスを加熱していくと、ある温度で結晶構造がなくなる。その温度を液化温度と称する。

オーバーパック

高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）を封入する容器。放射能レベルや発熱量が、ある程度減少するまでの期間、ガラス固化体に地下水が接触することを防止し、地圧などの外力から高レベルガラス固化体を保護する。候補材料は炭素鋼などの金属。

カ行

緩衝材

オーバーパックと岩盤の間に充填し、地下水の浸入と放射性物質の溶出・移行を抑制するもの。さらに岩盤の変位を物理的に緩衝するクッションの働きや、地下水の水質を化学的に緩衝する働きも持つ。高密度に充填、圧縮した粘土（ベントナイト）系材料が候補として考えられている。

ガラス平均転移温度

ガラスを加熱していくと温度に比例して熱膨張が始まる。ある温度を超すとそれまでよりも一段と急激な膨張が始まる。これはガラスの転移に伴う構造上の変化によるものであり、この温度を転移温度と称する。

ガラス変形温度

転移温度以上にガラスを加熱するとある温度から軟化変形し、見かけの収縮が起こる。この温度をガラス変形温度と称する。

キャニスター

ガラス原料と高レベル放射性廃液を溶融炉で混合溶融し、溶融ガラスを注入するためのステンレス製容器。（ガラス固化体容器とも言う）

高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）

再処理工程において使用済燃料から分離される高レベル放射性廃液を、ガラスを形成する成分と一緒に加熱することにより、水分を蒸発させて非結晶に固結（ガラス化）させ、物理的・化学的に安定な形態にするプロセスをガラス固化という。ガラス固化体は、廃液をステンレス鋼製の堅牢な容器（キャニスター）中にガラス固化したものであり、放射性物質が安定な形態に保持され、地下水に対する耐浸食性に優れている。

サ行

最低結晶化温度（相転移温度、又は失透温度）

ガラス変形温度以上にガラスを加熱すると結晶化が起こる。この温度を結晶が現れる最低結晶化温度（相転移温度、又は失透温度）と称する。

人工バリア

埋設された放射性廃棄物から、放射性物質が生活環境へ移行することを抑制するために、人工的に設けられる障壁（バリア）をいい、オーバーパック、緩衝材、コンクリートなどの人工構築物の総称。

固化ガラス浸出速度（溶解速度）

固化ガラスから物質が溶解あるいは浸出してくる速度。

固化ガラス破碎係数

固化ガラスの幾何学的表面積に対する内部の破碎による亀裂を含んだ状態での表面積の比。

タ行

地層処分

人間の生活環境から十分離れた安定な地層中に、適切な人工バリアを構築することにより長期的な安全性を確保する処分方法。ここで言う「地層」には、地質学上の堆積岩を指す「地層」と、地質学上は「地層」とみなされない「岩体」が含まれている。

天然バリア

処分施設の周囲に存在し、埋設された放射性廃棄物から漏出してきた放射性物質の生活環境への移行抑制が期待できる岩体や土壌など。

ハ行

ホウケイ酸ガラス

ケイ酸塩ガラスの一種。主成分はソーダ Na_2O 、無水ホウ酸 B_2O_3 、シリカ SiO_2 。無水ホウ酸（5～25%）の添加によりガラス生成温度が低くなり、耐水性、耐酸性、電気的性質が良好になり、また熱膨張率が低下するため硬質ガラス、耐熱ガラスなどの主体とされる。

A～Z 行

AREVA NC 社

アレバ 原子燃料サイクル社（旧フランス核燃料公社：Cogema 社）。ラ・アーグの再処

理工場において自国の再処理を行うとともに、外国の使用済燃料も受け入れて再処理を行っている。

Sellafield Limited

セラフィールド社（旧英国原子カグループ・セラフィールド社：BNGS 社）。セラフィールドの再処理工場において自国の再処理を行うとともに、外国の使用済燃料も受け入れて再処理を行っている。