

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
機能と要件～

報告書

平成 23 年 3 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
1.1 背景と目的	1
1.2 活動	3
2. 検討内容と手順	5
3. 高レベルガラス固化体の要件の検討	6
3.1 貯蔵・輸送・処分における安全確保方策	6
3.2 高レベルガラス固化体の要件の検討手順	11
3.3 高レベルガラス固化体に求められる基本的な要件	15
3.4 高レベルガラス固化体の処分場受入れにおいて想定される要件	20
3.5 高レベルガラス固化体の処分場受入，閉鎖のための品質マネジメント上の要求	29
4. 高レベルガラス固化体特性の重要度の分類と品質マネジメントの考え方	32
4.1 重要度検討の方法	32
4.2 高レベルガラス固化体特性の重要度	33
4.3 高レベルガラス固化体特性の重要度に応じた品質マネジメントの考え方	34
5. 国内製造高レベルガラス固化体の製造目標の十分性と品質マネジメント	38
5.1 製造目標の妥当性・十分性	38
5.2 高レベルガラス固化体の記録・技術情報の信頼性確保と長期保存のための要点	38
6. 逸脱によって発生する固化体・非定常に発生する固化体の処分における対応	43
6.1 逸脱固化体・非定常固化体の発生状況と特性	43
6.2 逸脱固化体の処分への対応	43
6.3 非定常固化体の処分への対応	44
7. 今後の課題	48
8. おわりに	50
留意事項	52

1. はじめに

1.1 背景と目的

わが国では、使用済燃料の再処理にともない発生する高レベル放射性廃液を固化処理し、製造した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。）は数十年の冷却のための貯蔵の後に、地層処分される方針である。

この高レベルガラス固化体に関して、日本原燃（株）（以下、「JNFL」と言う。）は、「これまでの高レベルガラス固化体の製造実績を踏まえ、原子力学会等の場で、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も参加し、処分に係る高レベル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。」¹⁾¹⁾と表明した。一方、規制当局である原子力安全・保安院放射性廃棄物規制課は、「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・貯蔵されている高レベル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、高レベル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。」¹⁾²⁾と述べ、その進め方として、社団法人日本原子力学会（以下、「原子力学会」と言う。）において検討することを要望した。

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、「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と日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」と言う。）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、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。ここで言う品質マネジメントの検討とは、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、要件に照合した場合の製造目標の十分性の確認、固化体特性の重要性に応じた品質マネジメントの考え方の整理、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への処分における対応の検討等を行うことである。

委員会はまず、上記のニーズに応えるため、「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」を検討した。具体的には、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、操業中の安全評価、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前広

に抽出するとともに、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。また、直接測定することが困難な特性については、高レベルガラス固化体の運転管理等の記録により把握することについて検討した。以上の結果は、報告書「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～」平成 22 年 1 月、としてとりまとめ、公表した。

本報告書は、上記報告書に引き続き、「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の整理、要件に照合した場合の製造目標の十分性の確認、固化体特性の重要性に応じた品質マネジメントの考え方の整理、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への処分における対応の検討等」を行い、その検討結果をとりまとめたものである。また、検討においては、国際的な議論も踏まえた。高レベルガラス固化体については、地層処分の安全要件に関するIAEAの文書「WS-R-4 放射性廃棄物の地層処分」¹⁻³⁾において、バリアの一つにあげられており、通常時及び異常時における放射性核種の閉じ込め機能が期待されている。しかしながら、高レベルガラス固化体に求める性能を明確化するためのバリアとしての機能の定量的または定性的記述については、これまで具体的に詳しく定量的に検討された事例がない。WS-R-4 の多重安全機能のための要件では、「天然バリアと人工バリアは、多重安全機能によって閉鎖後の安全性を確保するように選定、設計されねばならない。すなわち、安全性は、種々の物理的、化学的プロセスによって性能が達成される多重バリアによって提供されねばならない。全般的な地層処分システムの安全性は単一のバリアもしくは機能に依存してはならない。」とされており、地層処分システム全体としての多重安全機能によって、安全性が担保されるべきことを求めている。したがって、個々のバリアに求める性能は、地層処分システム全体としての性能評価結果に及ぼす決定論的影響の観点からのみでなく、安全機能の多重性に及ぼす影響の観点からも評価されなければならない。一方、処分システムの安全機能の多重性は、個々のバリアが有する性能の時間的変遷に伴って変化するので注目するバリアの性能変化がこの多重性にどのような影響を与えるかを評価する必要がある。

本報告書では国内製造高レベルガラス固化体の処分施設の設計や安全評価への適応性を確認するという観点から、多重バリアの性能を保守的に変動させた処分場において、高レベルガラス固化体の特性が地層処分の全体性能に及ぼす影響の大きさを評価し、特性が有すべき性能を要件として評価検討した。

このような要件として、処分だけでなく、貯蔵、輸送工程も対象として、処分概念やサイトによらず安全性の観点から、高レベルガラス固化体に求められる基本的な要件と、高レベルガラス固化体の処分場受入れにおいて想定される要件の 2 階層に分類して検討した。さらに、これらの要件を満足することを示す上で必要な、高レベルガラス固化体の処分場受入、閉鎖のための品質マネジメント上の要求について検討した（第 3 章）。

次に、高レベルガラス固化体特性に求められる要件の重要度を判断して、重要度に応じた

製造時の品質マネジメントの考え方を検討した（第4章）。

さらに、国内製造高レベルガラス固化体の諸元を勘案して、固化体の製造目標が処分の要件を満足することを確認したうえで、この製造目標への適合を示す記録の信頼性確保のための要点をまとめた（第5章）。

また、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、及び非定常時の運転を考慮し、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と処分への対応を検討した（第6章）。

最後に、今後の課題を検討した（第7章）。

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	栢山 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	(公財)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)
兼平 憲男	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)から第5回(平成21年9月28日)までは、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(高レベルガラス固化体)の特性について検討したので、ここではそれ以降の活動について示す。

第6回 平成21年10月22日

- ① 今後の検討内容とスケジュールについて
- ② 高レベルガラス固化体の規制・基準における要件の整理について
- ③ 高レベル放射性廃棄物処分の評価システム検討の経過について
- ④ 設計・評価に必要な放射能情報の整理について

第7回 平成21年11月24日

- ① 高レベル放射性廃棄物処分の安全性と裕度について
- ② 高レベルガラス固化体の要件の検討について
- ③ 評価システムの検討(その2)について
- ④ 高レベル放射性廃棄物(高レベルガラス固化体)処分の評価システム評価結果について

第8回 平成21年12月14日

- ① 貯蔵・輸送等における高レベルガラス固化体の要件について
- ② 処分における高レベルガラス固化体の要件について
- ③ 高レベルガラス固化体の必須の要件について

第9回 平成22年1月22日

- ① 報告書案について

第10回 平成22年3月19日

- ① 報告書案について

第11回 平成22年6月2日

- ① 報告書案について
- ② 平成22年度の活動について

第12回 平成22年7月9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 1.2-1 参照）。まず、処分の安全確保方策を整理した上で、高レベルガラス固化体の処分の要件を検討した（第 3 章）。その際、処分の影響評価を行い、定量的な要求の有無を確認した。次に、ガラス固化体特性に求められる要件の重要度を整理して、製造時の品質マネジメントを検討した（第 4 章）。さらに、国内製造高レベルガラス固化体の諸元を勘案して、固化体の製造目標が処分の要件を満足することを確認した。（第 5 章）また、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、及び非定常時の運転を考慮し、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と処分への対応を検討した。（第 6 章）。最後に、今後の課題を検討した（第 7 章）。

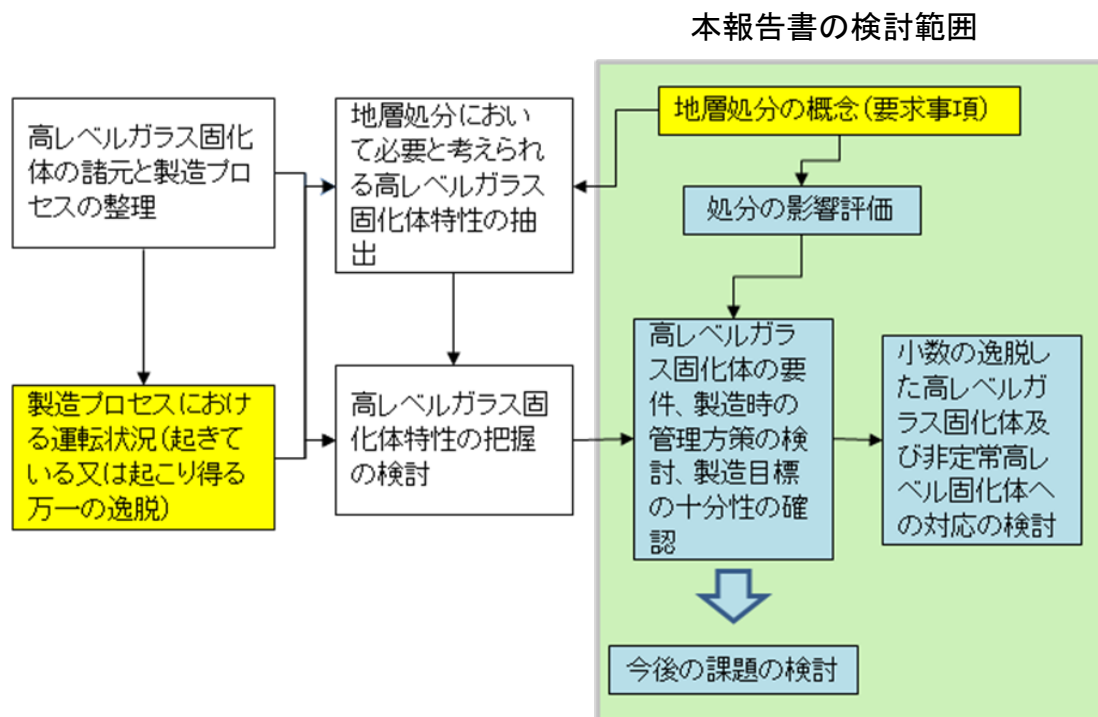


図 1.2-1 検討の進め方

3. 高レベルガラス固化体の要件の検討

高レベルガラス固化体の地層処分において求められる性能，すなわち要件を検討する。

貯蔵・輸送に加え，地層処分において一般公衆の安全を確保するため，高レベルガラス固化体には定性的及び定量的に求められる要件が存在する。安全を確保することが高レベルガラス固化体の一義的な要件であるが，安全の確保は高レベルガラス固化体と施設・設備・周辺環境との組み合わせにより達成されるものであることから，処分サイト，処分概念，規制の要求が確定していない現時点において，定量的な要件を明確化することが困難なものも含まれる。

そこで本章では，地層処分の安全確保の方策を整理した後，高レベルガラス固化体の要件を，処分概念やサイトによらず安全性の観点から，高レベルガラス固化体に求められる基本的な要件と，将来，サイト条件・処分概念・規制内容が明確になった後，処分場の評価・設計において設定した特性値あるいは条件を満たすために必要となる，高レベルガラス固化体の処分場受入れにおいて想定される要件に分類し，それらの要件の内容を検討する。前述の通り定量的な要件は現時点で明確にはできないが，将来，サイト条件や処分場の仕様が明らかになった時点で，それらと高レベルガラス固化体要件との関係を容易に把握できるようにしておくことが重要である。そのため，閉鎖後の長期安全を確保するために必要な特性について予備的な検討を行い，要件の傾向を把握する。現時点では，サイト条件や規制の考え方のように確定していないことが多いので要件としては前広に検討するが，要件の厳守が重要なのではなく，製造時において要件の重要度に応じた対応をとることが肝要である。

3.1 貯蔵・輸送・処分における安全確保方策

高レベルガラス固化体はガラス固化後30～50年間にわたり冷却のために貯蔵され，その後輸送されて処分に供される。貯蔵・輸送・処分の各段階で安全性の確保が求められるので，まず，その安全の確保方策を整理する。ただし，貯蔵・輸送についてはすでに返還廃棄物の事例があり，技術的にも制度的にもその方策は確立されているので，詳細な検討は実施しない。

3.1.1 地層処分における安全確保方策と高レベルガラス固化体の役割

我が国において高レベルガラス固化体は，貯蔵後，安定な地下深部（地下300m以深）に搬入・埋設し，高レベルガラス固化体の周囲に人工的に設けられる複数の障壁（人工バリア）とこれらを長期に亘って固定する働きを備えた天然の地層（天然バリア）とを組み合わせた「多重バリアシステム」により，高レベルガラス固化体を物理的に生活環境から隔離し，その中の放射能やそれからの放射線が人間とその環境に影響を及ぼさないようにすることを基本としている³⁻¹⁾。

海外でも同様の考え方をとっており，IAEAの地層処分の安全基準（WS-R-4）では，

地層処分の目的として、以下をあげている³⁻²⁾。

- ・放射能の大部分、特に短寿命放射性核種の有する放射能の大部分が減衰するまで廃棄物を閉じ込める
- ・生物圏から廃棄物を隔離し、廃棄物への不注意による人間侵入の可能性を十分に減らすこと
- ・生物圏への放射性核種の有意な移行を、放射能の大部分が減衰する遠い将来まで遅延すること

またWS-R-4 では、「天然バリアと人工バリアは、多重安全機能によって閉鎖後の安全性を確保するように選定、設計されなければならない。すなわち、安全性は、種々の物理的、化学的プロセスによって性能が達成される多重バリアによって提供されなければならない。全般的な地層処分の安全性は単一のバリアもしくは機能に依存してはならない。」³⁻²⁾とされている。

国際放射線防護委員会（ICRP）勧告のICRP Pub81 においては、図 3.1-1 に示すように廃棄物処分の戦略は「希釈/分散」、及び「濃縮と保持」の 2 つのアプローチがあり、相互に相容れないものではない³⁻³⁾と記述されている。

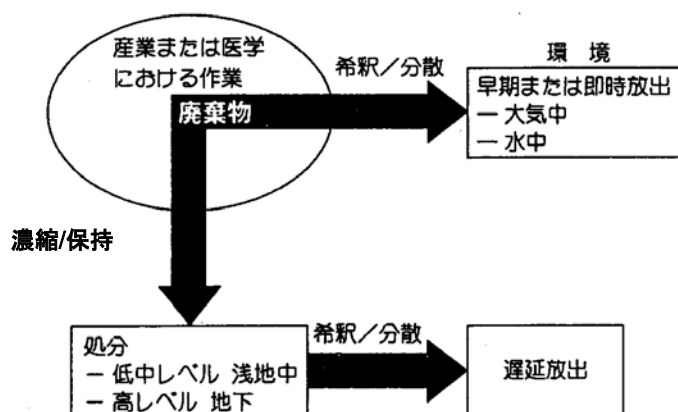


図 3.1.-1 廃棄物生成のシステムと処分戦略

同報告書では、長寿命放射性固体廃棄物の処分は「濃縮と保持」の戦略を用いると述べられている。なお、破壊的事象からの高い被ばくの可能性は、処分施設中に廃棄物を集中するという決定の避けられない結果であると述べられている。

以上の、わが国及び国際機関の地層処分の安全確保の方策を整理すると次のとおりである。

- ・高レベル放射性廃棄物を安定な固化体（高レベルガラス固化体）に（濃縮して）閉じ込める。
- ・高レベルガラス固化体を生物圏から隔離し、意図的でない人間侵入の可能性を低減し、天然現象（浸食、氷河）及び人間活動により処分の安全機能が損なわれないよう安定な地下深部に埋設（処分）する。
- ・常に処分施設からの放射性核種の漏出を制限する。
- ・漏出した放射能の移行を遅延、減衰させることにより、生物圏への流入量を減少させ、人間及び環境への影響を十分安全なレベルに低減する。
- ・安全性は、種々の物理的、化学的プロセスによって性能が達成される多重バリアによって提供されなければならない。全般的な地層処分の安全性は単一のバリアもしくは機能に依存してはならない。

このような地層処分による安全性は、以下の対策によって確保される。³⁻¹⁾

① 適切なサイト選定を行う

長期的に安定で、放射性核種の移行を常に制限し、減少させ、減衰させるのに影響のないサイトを選定する。

② 放射性核種の移行を常に制限し、減少させ、減衰させるのに有効な人工バリアを設置する。第2次取りまとめの処分概念によると、人工バリアとしてオーバーパック、及び緩衝材が検討されている。オーバーパックは高レベルガラス固化体が閉鎖後1000年程度、地下水との接触を防止する役割を担い、緩衝材は高レベルガラス固化体周囲の地下水流速を低減させ、放射性核種を沈澱、吸着させることにより移行の制限を達成する。

また、地層処分の安全確保を図るためには、処分事業の各段階でそれぞれの安全確保対策の妥当性について確認することが必要である。その方策の一つが安全評価である。

③ 安全評価等による安全確認

安全評価においては、適切なシナリオを仮定し、一般公衆が放射性物質から受けると想定される線量を評価し、定められた放射線防護レベルから超えることがないことを確認することが基本である。

なお、地層処分は人間の行為により安全性を確保するシステムではなく、受動的な安全確保システムである。しかしながら、記録の保存により人間侵入を防止する、モニタリングによりシステムの状況を監視する等、能動的な管理による安全確保の考え方もあり、その内容は今後具体化されるものと考えられる。

3.1.2 不確実性への対応

地層処分の閉鎖後長期安全評価を行う際には、不確実性を考慮する必要がある。安全性の確保は人工バリアと天然バリアに依存しているが、特に天然バリアはその特性を正確に把握することが困難であり、極めて長い時間スケールを対象とした将来像の予測が困難であるという、二つの不確実性が存在し、人工バリアに比べ不確実性は相対的に大きいと考えられる。この不確実性について、原子力安全委員会「低レベル放射性廃棄物埋設に関する安全規制の基本的考え方（中間報告）」では、以下の記載がある。

「長期の安全性に係る評価については、上記のようなリスク論的考え方にもとづき基本的に可能と考えられるものの、評価の長期性に伴う不確実性を考慮し、以下のような諸点に留意することが重要である。（中略）、これらパラメータの設定等において重要なことは、将来的に新たな知見が明らかになったとしても、それが、評価結果から導かれるべき「シナリオごとの線量の「めやす」となる値（以下「線量めやす値」という。）を満足することから安全上は妥当」との当初の判断にできるだけ影響が及ばないように、すなわち、評価結果にもとづく「その判断」を変更する必要性ができるだけ生じないように、処分システム的设计に予め適切に安全裕度を見込み、それに見合ったパラメータ設定を行うなど、処分システムの頑健性（Robustness）に配慮しておくことである。ここで、処分システムの頑健性とは、安全評価結果の数値上の強固性、すなわち、数値の不変性を意味するものではなく、評価結果にもとづく判断（線量めやす値を満足するか否か）の変更不要性、すなわち判断根拠に係る不変性を意味していることに注意する必要がある。」³⁻⁴⁾

さらに、期待されるバリアについても不確実性の存在が避けられないので、WS-R-4に述べられている通り単一のバリアに依存しないこと³⁻²⁾、つまりシステムとしての冗長性の確保も重要である。頑健性や冗長性を処分システムに具備させるためには単一の条件に基づく安全性に及ばず決定論的影響により各バリアの要件を判断するのではなく、各バリアの時間的な変遷、あるいは不確実性を考慮して安全評価を行い、バリア全体の多重安全機能と各バリアの安全確保上の機能を理解した上でバリアの要件を評価する必要がある。

また、長期の将来の安全性を、現在の技術的知見に基づいて確保し、説明するために有効な考え方として、原子力安全委員会は、スウェーデン等諸外国の放射性廃棄物処分の安全規制において検討されてきた「技術的に最善の手段(Best Available Technique, 以下BAT)の概念の適用可能性を指摘している。^{3-5), 3-6)}スウェーデンの規制機関である放射線防護機関(SSI)は「BAT」について以下のように述べている。「最終処分におけるBATの適用とは、合理的に可能と考えられる範囲で、できるだけ人工バリア及び地質バリアからの核種の移行を抑制、遅延するように、処分場とそのシステム要素を立地、設計、建設、操業及び閉鎖することを意味する。」^{3-7), 3-8)}BATについてはICRPの勧告において「”過大な費用を伴わない”を追加することによって、この概念は、合理的に達成できる限り線量を低く保つというICRPの勧告にやや近づくが、費用が関係するのはそれらが過大になったときだけである。これらの方策は防護の最適化を達成するには不十分である」³⁻⁹⁾と否定的な見解が述べられ

ている。しかしながら「”過大な費用を伴わない利用できる最良の技術”の使用は、損害の定量的評価が現在利用できない自然環境に対する線量を減らすといった、特定の目的について有利になるであろう。」³⁻³⁾と、目的に応じた使用を推奨している。

3.1.3 貯蔵・輸送の安全確保方策と高レベルガラス固化体の役割

高レベル放射性廃棄物の安全な貯蔵，輸送はすでに実例があり，その技術的，制度的な対策は整備されている。貯蔵，輸送の安全性は，施設・設備（輸送にあっては輸送容器）と高レベルガラス固化体の組み合わせにより確保されている。しかしながら，高レベルガラス固化体には，安定性（物理的・化学的な安定性，閉じ込め性）が求められる。安全の確保は，多重のバリアにより達成されるべきであり，たとえ容器が破損してもその他の設備，あるいは，高レベルガラス固化体自体の閉じ込め性により放射能の大量の漏洩を抑制しなければならない。そのため高レベル放射性廃棄物は固型化して，容易に放射能が飛散せず，漏洩しないことが求められる。ガラス固化直後の放射能レベルは極めて高く，その意味で高レベルガラス固化体の閉じ込め性に対する要求は，処分における要求レベルに比べ相対的に高いと考えられる。

3.2 高レベルガラス固化体の要件の検討手順

要件の検討は次の2段階で行うこととする。

まず、処分の安全性の確保、処分場の設計の観点から高レベルガラス固化体に求められる定性的な要件を内外の技術基準も参考にしながら整理する。これらの要求は、処分場のサイトや処分概念の条件には左右されない要件とも解釈でき、高レベルガラス固化体に求められる基本的な要件と称する。その際、これらの要件は、すでに抽出された高レベルガラス固化体に必要な特性としてカバーされていることを、再度確認する。

次に、高レベルガラス固化体の処分場受入れにおいて想定される要件を整理する。処分場の設計及び安全評価を実施する場合、高レベルガラス固化体の特性値あるいは条件が設定され、処分場への受入の際にそれらの特性が設定通りであることが確認される。このような、処分場の設計及び安全評価において特性値あるいは条件が満たすべき要件を整理する。

高レベルガラス固化体の処分場受入れにおいて想定される要件は、設計、安全評価において定量的な要求（性能要求と称する）が与えられるもの、定性的な要求（機能要求と称する）があるもの、要求範囲はないが、評価・設計にあたり数値が明確になればよいもの（設計・評価条件）の3種に区分する。なお、要件は、評価や設計の方法に合致していることが求められる。例えば、固化体特性の平均値により設計・評価を行うのか、最大/最小値で行うのか、個々の値により行うのか、評価モデルにより求められる要件が異なる。

なお、高レベルガラス固化体がこれらの要件を満足すること、及び要件を満足することを示すためには、適切な品質マネジメントが必要である。高レベルガラス固化体の処分場への受け入れを確実にし、閉鎖までの種々の管理を合理的に実施可能とするためには品質マネジメント上の要求がある。これは品質マネジメントの枠組みに入るものであり、「高レベルガラス固化体の処分場受入、閉鎖のための品質マネジメント上の要求」と称する。具体的にはまず、高レベルガラス固化体の処分場受入れにおいて想定される要件を満たすことを確認できることで、これは検査のみでなく製造記録や燃料履歴にも依存するため、R&Dや運転管理も含めた総合的な作業により達成される。また、これに用いる記録や技術情報が信頼性のあるものでなくてはならない。さらに、高レベルガラス固化体特性の把握方法が、評価や設計の方法に合致していることが求められる。例えば、固化体特性の平均値により設計・評価を行うのか、最大/最小値で行うのか、個々の値により行うのか、評価モデルにより高レベルガラス固化体に求められる要求は異なる。また処分場の閉鎖までには安全評価の見直しや処分場の修復処置等がとられる可能性があるため、記録や技術情報の長期保存が必要であり、保存すべき内容と保存の方法についても検討が必要である。

以上の内容をまとめると次の通りである。

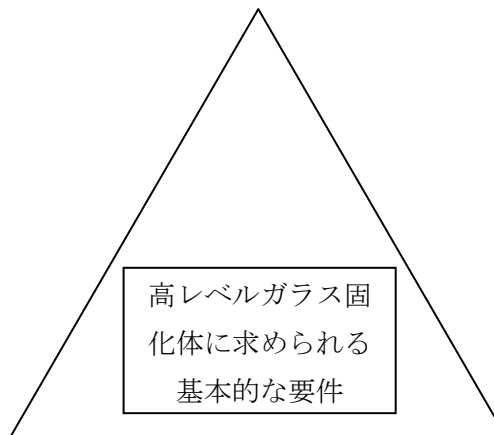
高レベルガラス固化体の要件を次の2階層に分類した。さらに品質マネジメント上の要

求を検討した。

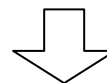
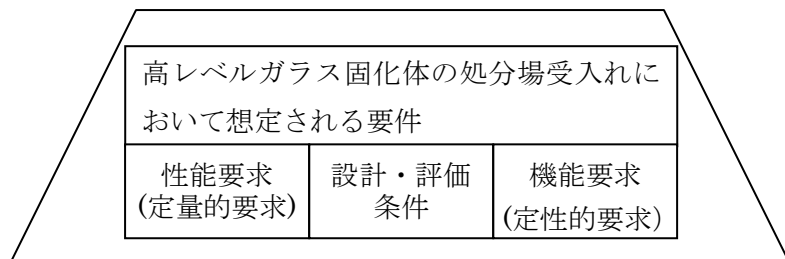
- 高レベルガラス固化体に求められる基本的な要件：処分概念やサイトによらず，高レベルガラス固化体に求められる基本的な要件（処分だけでなく，貯蔵，輸送工程も安全性の対象とする）
- 高レベルガラス固化体の処分場受入れにおいて想定される要件：将来の処分場の設計，及び安全評価において設定されることが予想され，高レベルガラス固化体の受入れにあたり充足することを求められる可能性が高い特性値あるいは条件。以下の3種に区分される。①高レベルガラス固化体の個々の特性に対する定量的な要求（性能要求），②明確な要求ではないが特性の数値が明らかになっていること（設計・評価条件），あるいは，③定性的な要求（機能要求）。ただし，性能要求は，将来の処分場の設計，安全評価を実施する時点で明確になる。
- 高レベルガラス固化体の処分場受入，閉鎖のための品質マネジメント上の要求：①高レベルガラス固化体の特性が処分場受入れにおいて想定される要件を満たすことを確認できる記録・技術情報が得られていること，及び②それらの記録・技術情報に信頼性があること，また，③それらの記録・技術情報が長期間保存できること

以上の，要件及び品質マネジメント上の要求の分類を図 3.2-1 に示す。また，検討フローを図 3.2-2 に示す。

処分概念やサイトによらず，高レベルガラス固化体に求められる基本的な要件（処分だけでなく，貯蔵，輸送工程も対象とする）



将来の処分場の設計，及び安全評価において設定されることが予想され，高レベルガラス固化体の受入れにあたり充足することを求められる可能性が高い特性値あるいは条件



①高レベルガラス固化体の特性が処分場受入れにおいて想定される要件を満たすことを確認できる記録・技術情報が得られていること，及び②それらの記録・技術情報に信頼性があること，また，③それらの記録・技術情報が長期間保存できること

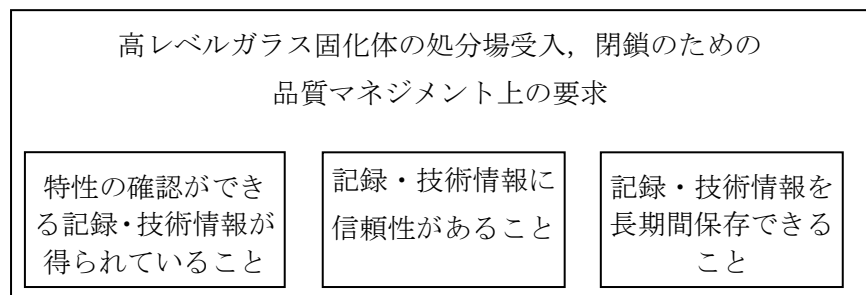


図 3.2-1 要件及び品質マネジメント上の要求の構成

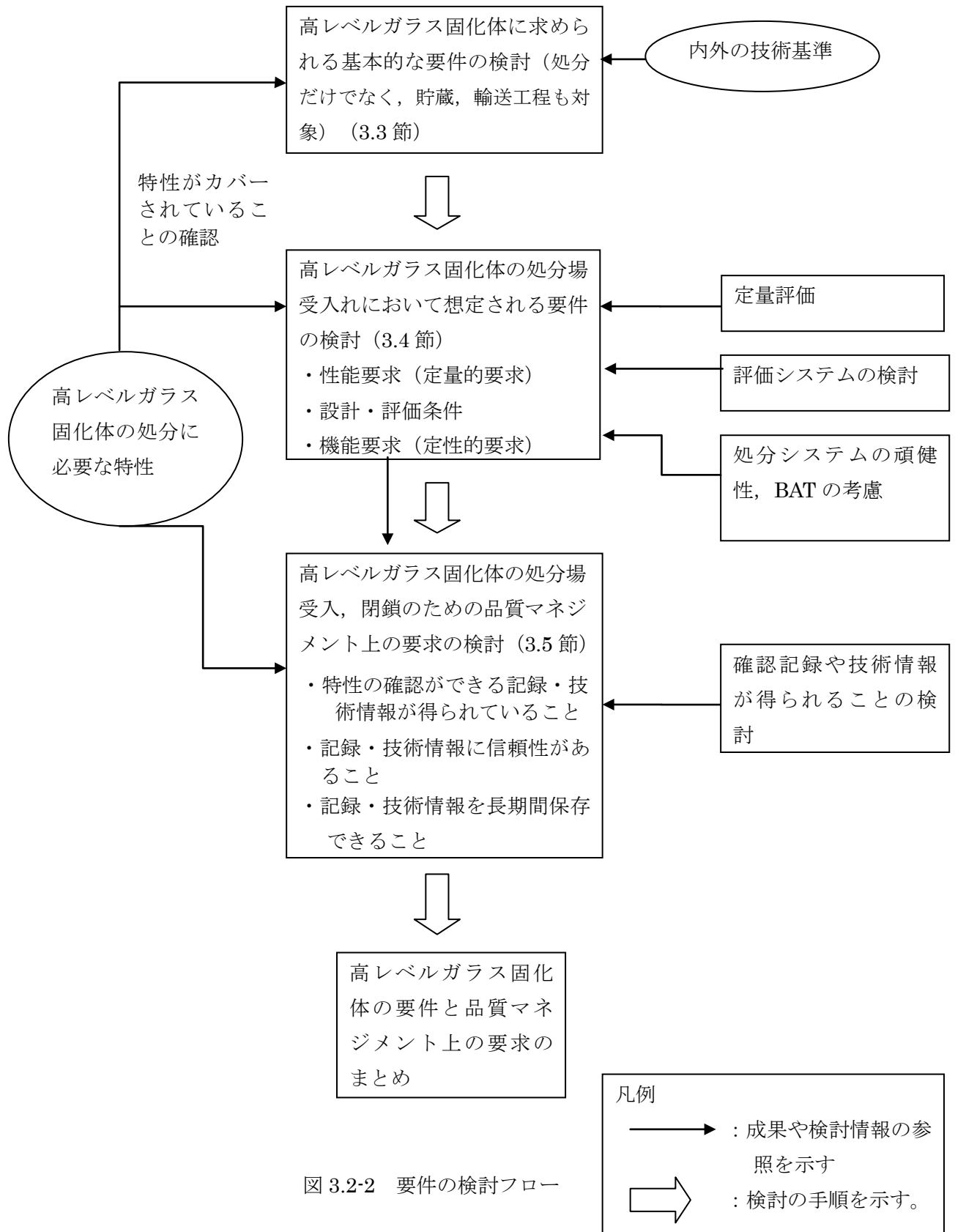


図 3.2-2 要件の検討フロー

3.3 高レベルガラス固化体に求められる基本的な要件

3.3.1 高レベルガラス固化体に求められる基本的な要件の抽出

国内外の地層処分対象廃棄物の規制あるいは技術基準を、処分に必要な特性毎に整理して、高レベルガラス固化体に求められる基本的な要件を抽出した。これらの要件は、処分概念やサイトによらず、高レベルガラス固化体の貯蔵、輸送、処分を通じて、安全性の観点から高レベルガラス固化体自体に求められる基本的な要件である。この要件の抽出結果は以下の通りである。

- 放射性物質が容易に飛散し漏洩しないこと
- 爆発性、自然発火性物質を含んでいないこと
- 耐放射線性があること
- 臨界安全が図られていること
- 物理的、化学的に安定していること
- 熱的に安定であること
- 著しい破損がないこと
- 容器が十分な耐食性を有すること
- 放射線遮へい、冷却、定置（ハンドリングを含む）が可能であること
- 処分において他のバリアの健全性に影響しないこと

これらのうち、殆どの要件が高レベルガラス固化体自体の安定性についてのものであるが、処分施設的设计可能性と、高レベルガラス固化体が他のバリアの健全性に影響を及ぼさないという要件も含まれている。

地層処分の設計・安全評価・管理項目とそれらに必要な高レベルガラス固化体の特性に関しては、委員会の既報³⁻¹⁰⁾にまとめられている（表 3.3-1 参照）。これらの特性と上記の高レベルガラス固化体に求められる基本的な要件との関係、及び事業許可申請で想定される地層処分施設的设计、安全評価（操業中、閉鎖後）の関連する評価項目を整理して表 3.3-2 に示す。表 3.3-2 から、上記要件の充足性が判断できる。

なお、高レベルガラス固化体に対する保障措置上の扱いについて、動燃 30 年史に次のような記載がある。「ガラス固化体に対する保障措置上の扱いは、国、IAEA の検認を受け、IAEA の定める濃度基準を満たしていることが確認され、かつ保障措置の対象外となっても IAEA に所定の連絡がなされることが約束されていることを条件に、保障措置の対象としての所要の手続きを終了することができることとなった。」³⁻¹¹⁾

従って、高レベルガラス固化体に関しては、放射性物質濃度と管理番号の記録といった高

レベルガラス固化体の処分場受入れにおいて想定される要件を準備することで十分であり、保障措置の観点から高レベルガラス固化体に求められる基本的な要件が提示される可能性はないと考える。

3.3.2 必須の要件の検討

高レベルガラス固化体の貯蔵・輸送・処分は、施設あるいは設備との組み合わせにより安全が確保されるため、固化体に欠陥があっても安全上、致命的な結果となるわけではない。しかしながら、施設あるいは設備に関わらず、高レベルガラス固化体として、具備すべき基本要件を設定することが、高レベルガラス固化体の要件の理解に有効と考えられる。例えば高レベルガラス固化体の処分場受入れにおいて想定される要件を厳密に設定できない処分サイト選定以前の段階においても、高レベルガラス固化体としての基本的な安全性を説明する上で、それらの要件は重要である。

さらに、想定外の事象発生時においても必要な安全性は確保されるべきとの観点から、その場合でも安全を確保するために必要な高レベルガラス固化体の要件を必須の要件として検討する。

高レベルガラス固化体の安全性に影響を及ぼす場合としては、処分場の閉鎖までの期間において、異常事象等により遮へい・閉じ込め機能が喪失する場合は考えられる。閉鎖後については処分システムの頑健性により対応すべき事象はほとんどないと考えられる。このことから、貯蔵・輸送時を含めた、管理期間内の異常時が高レベルガラス固化体に求められる必須の要件の主要な対象となる。仮に高レベルガラス固化体が液体、あるいは粉体状であった場合、容器の閉じ込め機能が喪失すると放射性物質が漏えいし被害が拡大する恐れがある。つまり、異常時に対しても設計時に対応が可能であるように、固化体そのものの安定性と閉じ込め性に関する基本的な要件が重要となる。そのような要件としては、3.3.1に示した高レベルガラス固化体に求められる基本的な要件のうち、以下が該当する。

- ・ 放射性物質が容易に飛散し漏洩しないこと
- ・ 爆発性、自然発火性物質を含んでいないこと
- ・ 臨界安全が図られていること
- ・ 物理的、化学的に安定していること
- ・ 熱的に安定であること
- ・ 著しい破損がないこと

以上の固化体そのものの安定性と閉じ込め性に関する要件の検討結果をまとめたものとして、以下のような必須の要件をあげる。処分における国内外の法令や技術基準においてもこれらの3点は十分に考慮されている。

- 固型化されていること
- 容器に著しい破損がないこと
- 臨界にならないこと，爆発性又は自然発火性物質を含んでいないこと

表 3.3-2 高レベルガラス固化体に求められる基本的な要件の整理

固化体の特性	関係する基本的な要件	関連する評価項目			
		処分施設の設計	操業中安全評価	閉鎖後安全評価	
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	放射性核種濃度	臨界安全が図られていること 放射線遮へい, 冷却, 定置が可能であること	オーバーパック, 処分孔, 放射線遮へい	放射線遮へい, 落下事故	放射線化学的現象, 地下水中核種移行, 天然現象, 人間侵入
	高レベルガラス固化体表面線量率	放射線遮へい, 冷却, 定置が可能であること 処分において他のバリアの健全性に影響しないこと	オーバーパック, 処分孔, 放射線遮へい	放射線遮へい	放射線化学的現象
	固化ガラス化学組成	爆発性, 自然発火性物質を含んでいないこと 耐放射線性があること 物理的, 化学的に安定していること 処分において他のバリアの健全性に影響しないこと 熱的に安定であること	オーバーパック, 処分孔, 放射線遮へい	放射線遮へい	化学的現象, 放射線化学的現象, 地下水中核種移行, 天然現象, 人間侵入
	発熱量(発熱核種インベントリ)	放射線遮へい, 冷却, 定置が可能であること 処分において他のバリアの健全性に影響しないこと	緩衝材, 処分坑道, 冷却設備		熱的現象
	高レベルガラス固化体重量	放射線遮へい, 冷却, 定置が可能であること	緩衝材(力学), ハンドリング設備	落下事故	力学的現象
	プレナム部容積		緩衝材, 処分坑道, 冷却設備	落下事故	熱的現象
	表面汚染密度	放射性物質が容易に飛散し漏洩しないこと		キャニスター付着放射性物質の揮発/剥離	
	固化ガラス重量				地下水中核種移行
	固化ガラス寸法(外径・高さ)		オーバーパック, 緩衝材, 処分坑道, 処分孔, 冷却設備, 放射線遮へい	放射線遮へい	熱的現象, 放射線化学的現象, 地下水中核種移行, 天然現象, 人間侵入
Ⅱ・適切に製造されていることにより一定値として取り扱うことができる特性	固化状態(均質性)	放射性物質が容易に飛散し漏洩しないこと 物理的, 化学的に安定していること 熱的に安定であること	オーバーパック, 緩衝材, 処分坑道, 処分孔, 冷却設備, 放射線遮へい	放射線遮へい	熱的現象, 化学的現象, 放射線化学的現象, 地下水中核種移行, 天然現象, 人間侵入
	固化ガラス破砕係数	物理的, 化学的に安定していること	緩衝材, 処分坑道, 冷却設備		熱的現象, 地下水中核種移行
	固化ガラス浸出速度(溶解速度)	物理的, 化学的に安定していること			化学的現象, 地下水中核種移行
	最低結晶化温度	熱的に安定であること	緩衝材, 処分坑道, 冷却設備		熱的現象
	固化ガラス熱特性(熱容量, 熱伝導率)		緩衝材, 処分坑道, 冷却設備		熱的現象
	固化ガラス密度		オーバーパック, 緩衝材, 処分坑道, 処分孔, 冷却設備, 放射線遮へい	放射線遮へい	熱的現象, 放射線化学的現象, 地下水中核種移行, 天然現象, 人間侵入
Ⅲ・キャニスター関連の一定値として取り扱える特性	キャニスター材質	容器が十分な耐食性を有すること	オーバーパック, 処分孔, 放射線遮へい	放射線遮へい	化学的現象, 放射線化学的現象
	キャニスター寸法・形状	放射線遮へい, 冷却, 定置が可能であること	オーバーパック, 緩衝材, 処分坑道, 処分孔, ハンドリング設備, 冷却設備, 放射線遮へい	放射線遮へい, 落下事故	熱的現象, 放射線化学的現象
	キャニスター溶接部の健全性(胴部)	放射性物質が容易に飛散し漏洩しないこと			閉じ込め性
	キャニスター母材の健全性	放射性物質が容易に飛散し漏洩しないこと			閉じ込め性
	キャニスター強度	放射線遮へい, 冷却, 定置が可能であること	ハンドリング設備	落下事故	
	キャニスター熱特性	放射線遮へい, 冷却, 定置が可能であること	緩衝材, 処分坑道, 冷却設備		熱的現象
Ⅳ・健全性に関する特性	キャニスター溶接部の健全性(蓋部)	放射性物質が容易に飛散し漏洩しないこと			閉じ込め性
	破損・欠陥がないこと(外観)	著しい破損がないこと			閉じ込め性, 落下事故
Ⅴ・管理上の必要な特性	整理番号	放射線遮へい, 冷却, 定置が可能であること			
	整理番号の表示方法・位置	放射線遮へい, 冷却, 定置が可能であること			

3.4 高レベルガラス固化体の処分場受入れにおいて想定される要件

3.4.1 高レベルガラス固化体の処分場受入れにおいて想定される要件の検討

高レベルガラス固化体の処分場受入れにおいて想定される要件とは将来の処分場の設計、及び安全評価において設定されることが予想され、高レベルガラス固化体の受入れにあたり充足することを求められる可能性が高い特性値あるいは条件を意味する。

安全評価、あるいは設計において確認が必要となる特性値には次の2種類がある。

- ① 施設設計、あるいは安全評価において、定量的な要求が定められるもの(性能要求)。高レベルガラス固化体の特性の数値が変動した場合、施設能力、あるいは処分システムの安全性が変動する可能性がある。
- ② 施設設計、あるいは安全評価を遂行するための条件として数値が必要な特性(設計・評価条件)。施設能力、処分システムの安全性を担保するための特性ではない。

さらに、特性値のような定量的な値を含まない要件がある。

- ③ 定量的な要求が明確でない、定性的な要件がある。(機能要求)

そこで、表 3.3-1 に示した処分施設の設計、安全評価に必要な高レベルガラス固化体の特性について、処分場受入れにおいて想定される要件の内容を検討し、上記の3種類(性能要求、設計・評価条件、機能要求)に区分した。その検討結果を表 3.4-1 に示す。

3.4.2 処分場受入れにおいて想定される要件の検討方法

前項に記載した高レベルガラス固化体の処分場受入れにおいて想定される要件の分類については、従来の原子力施設の設計と事業許可申請における安全評価の内容を参照して検討した。ただし、事業許可申請の事例がない閉鎖後の緩衝材温度変化や放射性核種移行挙動については、感度解析を実施して発熱量や浸出速度等の特性の変動幅が、処分場の設計や安全評価に及ぼす影響を定量的に把握して分類の参考とした。

また、感度解析の結果を参照して、記録や検査結果としての特性値等について、どのような特性値もしくは情報であれば設計や安全評価に適用可能であるかを、個別の特性毎に検討する。これらの検討は特性の記録が適切な形で取得されていることを確認するために重要である。

このため評価システムという概念を導入する。評価システムとは評価の目的や評価モデルに応じて評価パラメータの項目や要求事項が異なることを勘案した上で、評価モデルと特性に求められる情報の質(例えば、高レベルガラス固化体1体毎の測定もしくは計算値か、多くの高レベルガラス固化体の記録をもとにした上限値が必要な特性か、あるいは平均値で良いのか)の組み合わせである。

例えば、放射能、発熱量は廃液バッチ毎に異なり、厳密には固化ガラス重量に依存するので、1体毎に値は異なる。一方、現行の安全評価は、代表的な固化ガラス特性を設定して、全ての高レベルガラス固化体はその特性を保持していると仮定し、影響評価に当たっては、1本の影響を4万倍することにより平均化した上で、全体の影響を算出している。また、発熱量についても代表値を決定し、全ての固化体はその特性を保持していると仮定して熱解析を行い、処分孔の間隔、坑道間距離を決定している。しかしながら前述の通り放射能・発熱量^{注1}は一定ではないため、設計・影響評価で使用する特性値の設定方法に関する要求を検討する必要がある。この値の振れ幅や評価方法により、許認可（申請方法）、廃棄物確認、操業の方法も異なるため、評価だけではなく総合的な検討を行って、特性値の設定方法を決定する必要がある。現時点では、将来実施される評価における評価モデル、パラメータ等の与え方を特定することはできないので、評価システムに関する複数の候補案(オプション)もしくは可能性の高い候補案を選定して、必要な特性の項目と内容を認識する。併せて、これらの要求に応じた特性値の把握方法（固化体のデータ取得方法）についての検討が必要となる。なお、検討の段階により評価システムの内容が変わる可能性がある。具体的には検討段階によって、評価モデルの改良や詳細化が進み、評価モデルが精緻化されることによって、必要な高レベルガラス固化体の特性に関する情報の種類や性質が変化することが考えられる。逆に、高レベルガラス固化体の特性が明確になり、評価モデルが変更される可能性もある。

従来の原子力施設の遮へい設計、ハンドリング設備設計、操業期間中の施設における熱設計等は、最も保守的な数値を使用して設計・評価することが一般的であるが、閉鎖後の温度解析及び核種移行解析では、対象とする高レベルガラス固化体が多数あり、1体毎の関連する特性を反映した評価をすることは合理的ではないこと、それにも関わらず、特性に変動があるため厳密には1体毎に評価条件が異なること、最も保守的な値を使用すると設計上の合理性を逸する可能性が高くなる設計項目もあることから、廃棄物の確認や操業方法をも考慮した評価システムの検討が必要である。

評価システムのオプションとしては以下の3通りが考えられる

- (ア) 評価にあたり最も保守的な値を使用する
- (イ) 評価にあたり代表値（平均値等）を使用する
- (ウ) 1体毎に実際の値を使用する

(ア) のオプションについては、処分概念が過大となり合理性の欠如が懸念される。(ウ)

¹注：第1種廃棄物埋設規則において発熱量は言及されていない。

のオプションについては、評価が煩雑になる。(イ)のオプションについては、保守的な評価結果が得られることの裏付けが必要である。そこで各々のオプションの可能性について予備的な評価を実施したところ、以下の結果を得た。

3.4.3 要件の分類のための解析結果

(1) 熱影響評価

熱影響に係る感度解析の結果によると、仮に1本の固化体のみを設置しても緩衝材の温度が100℃を越える制限値の存在が明確になり、発熱量の制限値がある(地温が45℃であるなら約540~560W以下であること。解析用熱物性値^{3・12)}及び解析結果は、表3.4-1、図3.4-1および表3.4-2を参照)。このため、発熱量は、定量的な要求が求められる性能要求となる。その他の高レベルガラス固化体の熱特性(熱伝導度、熱容量)及びプレナム部容積の振れ幅は、緩衝材の温度制限に対してほとんど影響を与えなかった。この結果から熱特性とプレナム部容積は設計・評価条件に分類した。

評価システムの観点から発熱量について検討すると、最大値の使用、一定値(平均値等)の使用が可能であるが、最大値を使用した場合、処分場面積が過大になる可能性がある。一定値を使用する場合は、平均値に余裕を持たせた発熱量の使用、あるいは緩衝材の制限温度を厳しめ(100℃未満)にして平均値を使用する方法がある。しかしながら、緩衝材の温度に最も感度があるパラメータは、当該高レベルガラス固化体の発熱量であり、隣接ガラス固化体の影響は小さい。そのため、当該高レベルガラス固化体とその周囲の高レベルガラス固化体の発熱量を平均化した場合の平均値等の代表値の使用は、制限温度の遵守の観点からは裕度の設定のための解析や将来の定置作業に多くのリソースを必要とするものの、設定すべき裕度が大きくなってしまい、必ずしも合理的でない。貯蔵期間を調整して出来るだけ発熱量の平坦化を図り、最大発熱量で設計する方が合理的と考えられる。

(ア)から(ウ)の何れのオプションにおいても発熱量は高レベルガラス固化体1体毎に取得する必要がある。また、発熱量の感度が大きいので、誤差についての十分な情報が必要である。

表 3.4-1 解析用熱物性値

	熱伝導率： λ [W/m·K]	比熱： C [kJ/kg·K]	密度： ρ [kg/m ³]	(熱容量= $C \cdot \rho$) [kJ/ m ³ ·K]
ガラス固化体	1.2	0.96	2800	2688
オーバーパック	51.6	0.47	7860	3694
緩衝材	0.78	0.59	1712	1010
埋戻し材	0.78	0.59	1712	1010
岩盤(硬岩系)	2.8	1.0	2670	2670
岩盤(軟岩系)	2.2	1.4	2200	3080

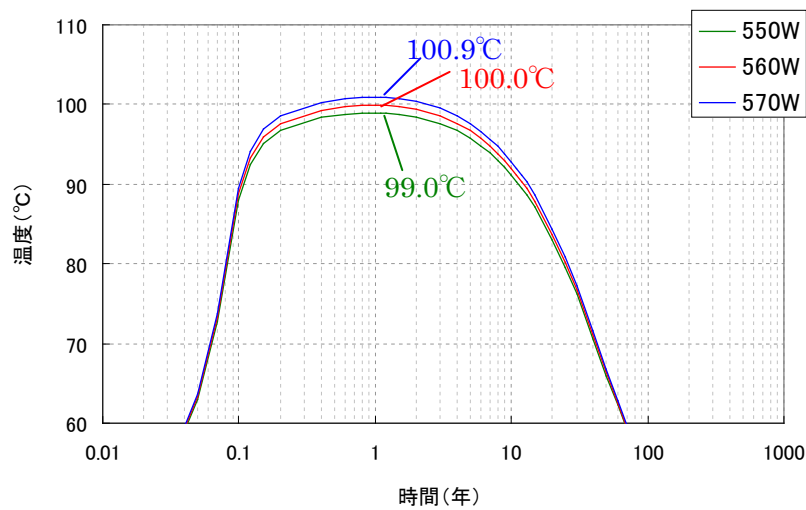


図 3.4-1 緩衝材内側の温度の経時変化（深度 1000m, 硬岩）

表 3.4-2 ガラス固化体の初期発熱量の限界値算定結果

	硬岩	軟岩
深度 300m	775 [W]	744 [W]
深度 1000m	560 [W]	538 [W]

(2) 核種移行評価

1) 特性の影響を見るための感度解析

核種移行に係る感度解析の結果によると、放射性核種濃度と固化ガラス浸出速度が被ばく影響に強く関係する特性であり、定量的な要求が求められる性能要求となる。一方、破碎係数は核種の浸出に関与する固化ガラス表面積を決定するパラメータであるが、次のような知見がある。製造時の模擬固化ガラス外部表面積と比較して大幅に増加した内部破碎表面積を有する落下ガラス試験体の浸漬試験が行われた。ガラスからの特定成分の浸出がガラス表面の変質層の生成と関連することから、浸出速度の目安として浸漬後の変質層の体積増加分を測定した。その結果、内部破碎総表面積の変質層体積は、製造時の外部表面積の変質層体積の半分以下であった³⁻¹³⁾。この結果によれば、内部破碎表面積の増大による浸出速度増大への影響はかなり低減されているので破碎係数は設計・評価条件に分類した。

一方、放射性核種濃度と浸出速度（溶解速度つまりガラスからの核種溶出率にガラスの実効的表面積を乗じたもの）について、標準的な処分場条件を仮定した核種移行の感度解析結果では、明確な制限値は存在しなかった。この点では、浸出速度を設計・評価条件と考えることも可能である。しかしながら閉鎖後長期の安全評価においては、バリアの変動や不確実性を考慮し、当該バリア機能が喪失した場合の高レベルガラス固化体の役割を検

討する必要がある。核種移行に関する定量評価の結果によると、緩衝材中の雰囲気酸状態になった場合に溶解度が上昇して人への被ばく影響が大きくなるケースがあるが（例えば Se-79, 図 3.4-2 の青線および青点を参照）、高レベルガラス固化体の浸出速度が小さいと影響の程度を緩和する。同様に、母岩の地下水流速が大きくなった場合に人への被ばく影響が大きくなるケースがあるが（例えば Cs-135, 図 3.4-3 の赤線及び赤点を参照）、高レベルガラス固化体の浸出速度が小さいと影響の程度を緩和する。つまり、他のバリア機能が低下した場合に、核種放出率を低下させることによる補完の役割を果たすことが高レベルガラス固化体には期待される。ただし、地層の条件や変化の状況を現段階で設定できないため、ガラスの浸出速度の定量的な制限値の設定はできない。

さらに、不確実性への対応としての B A T の概念の適用可能性の観点も重要である。以上から、ガラスの浸出速度は合理的に達成できる範囲で小さいことが望ましいが、すでに英仏において商業再処理施設でガラス固化の実績があることから、ほとんどの固化体が内外の高レベルガラス固化体と同等の性能を有することが性能要求の目安となる。

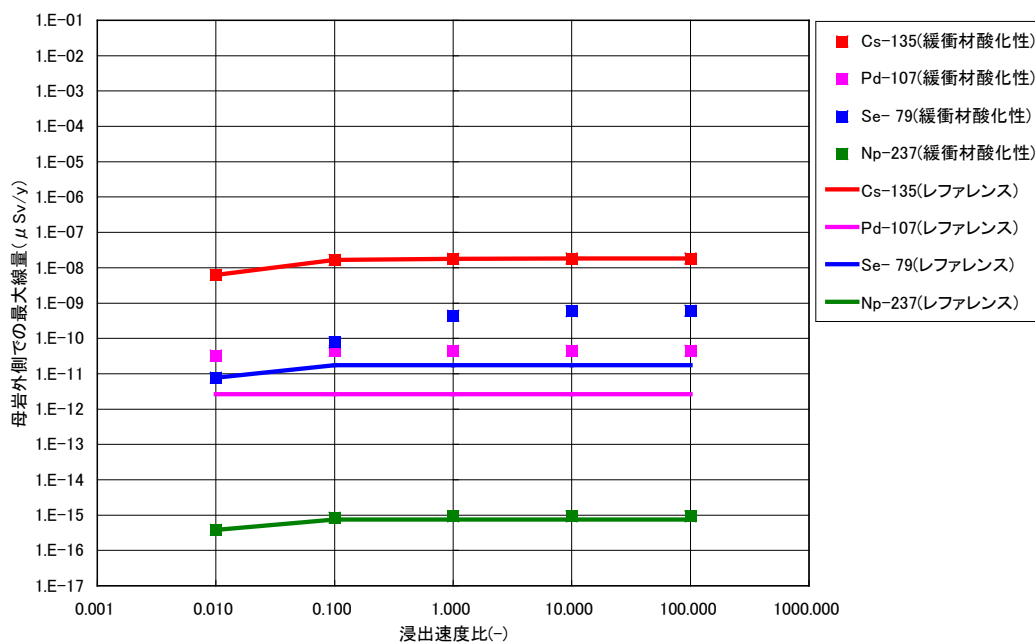


図 3.4-2 緩衝材酸化性変動時の最大線量の浸出率依存性

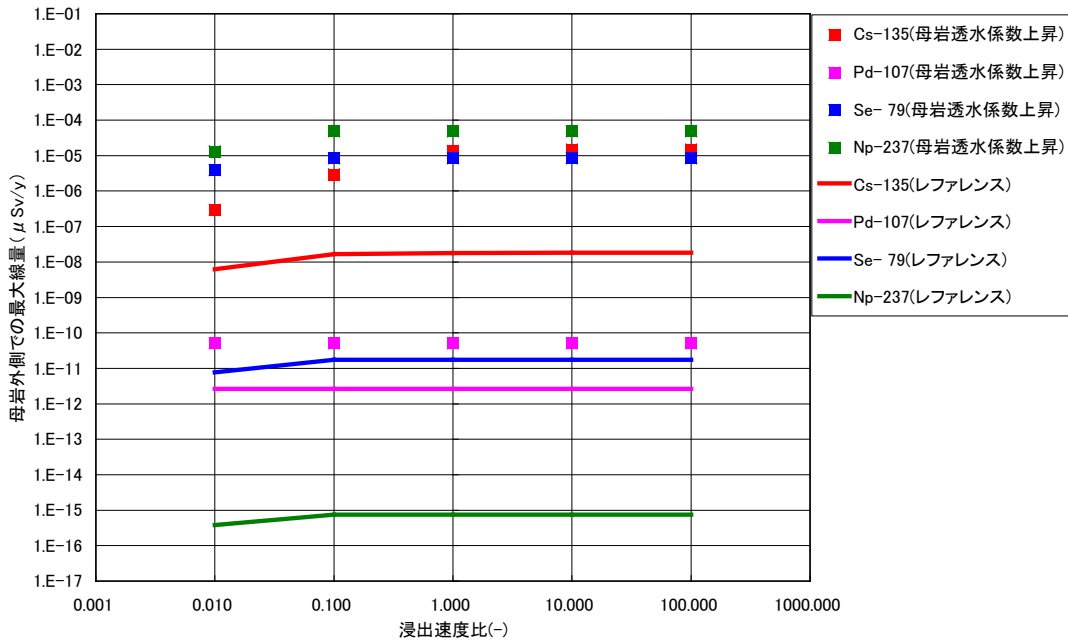


図 3.4-3 母岩透水性上昇時の最大線量の浸出率依存性

2) 評価システムのための解析

次に評価システムの観点から検討を行う。放射性核種濃度について、溶解度が小さい核種以外は、影響評価結果は放射性核種濃度に比例する。一方、溶解度が小さい核種は、放射性核種濃度の大小にかかわらず核種浸出量の影響は同じとなる。現状の閉鎖後安全評価モデルでは核種漏えいの始点と評価点が離れており、総インベントリに対して安全評価結果を算定していることから、結果として、核種移行評価のための放射性核種濃度については、他の条件（浸出量、核種移行距離、生物圏条件等）が同一であれば平均値の使用が可能である。最大値の使用も可能であるが、その場合、評価が保守的に過ぎる可能性がある。何れのオプションについても、放射性核種濃度は高レベルガラス固化体 1 体毎に取得する必要がある。ただし、一定の処分場単位に含まれる高レベルガラス固化体の平均値を把握することにより安全評価を実施することは原理的には可能であり、放射能濃度の不確実性が高い場合への適用が想定される。また、誤差についての十分な情報が必要である。

浸出速度について、影響評価の結果によると処分システムの頑健性が発揮されるため、天然バリア条件と生物圏条件によって十分な移行遅延効果が期待できる場合は、浸出速度が異なる場合であっても、影響はほぼ変わらない。つまり代表値(平均値)の使用が可能である。ただし、天然バリアにおける移行距離が短い場合、あるいは地下水流速が大きい場合は、浸出速度により結果は変動する。浸出速度は直接測定ができない特性であるため、管理基準通りに製造されたことを確認することにより、浸出速度の代表値を使用することが

現実的である。ただし、誤差等も考慮した保守的な値であることが望ましい。

これまでの安全評価手法を踏襲した場合、核種移行評価の観点からは、評価システムの（ウ）のオプションのように高レベルガラス固化体 1 体毎の測定値や計算値を用いる必要はなく、評価システムの（イ）のオプションのようなガラス固化体全量の平均値による評価であっても妥当と考えられる。

3.4.4 性能要求の検討

性能要求に該当する特性は、従来の原子力施設の設計と事業許可申請における安全評価の内容、及び閉鎖後の安全評価事例や前述の感度解析結果から選定した。その結果選定された特性は放射性核種濃度、高レベルガラス固化体の表面線量率、固化ガラス化学組成、高レベルガラス固化体重量、表面汚染密度、キャニスター特性、キャニスター溶接部の健全性、固化ガラス浸出速度である。

性能要求の定量的数値については前述の通り処分場の環境条件、処分施設の内容、規制の内容が決まっていないので、現時点では具体的な要件を示すことはできないが、処分施設の設計、操業中の安全評価に関するものは工学的な対応が柔軟に実施できるので、高レベルガラス固化体に対して、将来の処分場受入れにおいて想定される要件として定量的制限値が設定されたとしても実現困難な制限値が設定される可能性は小さい。例えば、遮へい評価に必要な高レベルガラス固化体表面線量率は、既往の原子力施設の事業許可申請においては保守的な最大線量率を想定した遮へい設計が実施されるので、これらの施設と同様の事業許可申請がなされることを想定すると、将来、処分場で受入れる高レベルガラス固化体の表面線量率に関しても、設計で使用した最大線量率を下回ることが要求される。高レベルガラス固化体はすでに貯蔵が開始されているが、その際、適切に遮へい設計がなされていることから、将来の処分施設の設計においても現実的な制限値が設定されるものと考えられる。閉鎖後安全評価に関する特性についての制限値は前述のとおりである。

なお、固化ガラス浸出速度は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（製造目標値）として扱い、その値が閉鎖後安全評価に使用された値を満足することが求められる。

3.4.5 設計・評価条件の検討

設計・評価条件に該当する特性は、プレナム部の容積、固化ガラス自体の重量・寸法、固化ガラス破碎係数、最低結晶化温度、固化ガラス熱特性、及び固化ガラス密度である。

これらの特性を設計・評価条件に区分した理由を以下に示す。熱伝導率等や破碎係数等は、解析結果によれば、温度分布や被ばく線量の評価結果への影響は小さかった。固化ガラス自体の重量や寸法は、核種移行解析に使用するガラスの拡散表面積を設定するために必要なパラメータであるが、その数値が制限値とはならない。最低結晶化温度についても

固化ガラスの化学組成や製造後の冷却工程を適切に管理すれば、品質を満足する値を設定できる。

上記の諸特性のうち、破砕係数については実固化体の情報が少ないことから、今後、定量的情報の入手に努めることが望ましい。

なお、固化ガラス破砕係数、最低結晶化温度、固化ガラス熱特性、固化ガラス密度は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（製造目標値）として扱い、その値を設計・評価条件とすることになる。

3.4.6 機能要求の検討

機能要求に該当する特性は、固型化の状態（均質性）、破損欠陥がないこと(外観)及び整理番号の表示方法・位置である。

特性に関する要求は必要であるが、定量的な要求が明確でないものが機能要求の定義である。例えば、高レベルガラス固化体の固型化の状態（均質性）は、高レベルガラス固化体の種々の評価を行う際に前提となる特性であるが、均質性の程度について定量的な要件の設定は困難である。そこで、直接に確認ができない固化体特性を把握できる程度に均質であることが求められるものとする。

また、処分施設のハンドリングの観点からは、高レベルガラス固化体に欠陥や破損がないことが重要であるが、一般的に外観検査では、そのような欠陥の定量的基準を設定することは困難である。整理番号の表示方法・位置についても、固化体の同定のために必要であるが、定量的な要求の設定は困難である。

表 3.4-1 高レベルガラス固化体の処分場受入れにおいて想定される要件の分類とその内容

特性	要件の分類	要件の内容	要件の定量的要求	
I. 製造条件によって幅をもって1体毎に変動する特性	放射性核種濃度	性能要求	閉鎖後安全評価から明確な制限値は算出されないが、申請において最大放射能濃度が設定されること、遮へい設計等において最大放射能濃度が設定されるので、設計・評価の制限範囲を満足する必要がある。	しゃへいや閉じ込め等の設計において制限値を満足する必要がある。閉鎖後安全評価において明確な要件はないが、評価において設定された制限値を満足する必要がある。
	高レベルガラス固化体表面線量率	性能要求	遮へい設計上の普遍的な制限値はないが、遮へい設計において線量率を使用する場合、最大線量率が設定されるので、設計・評価の制限範囲を満足する必要がある。	設計・安全評価において設定された制限値を満足する必要がある。閉鎖後安全評価において、明確な要件はない。
	固化ガラス化学組成	性能要求	目標通りの固化ガラスが、高レベルガラス固化体に求められる基本的な要件を満たすことを予め確認する必要がある。その上で、管理範囲を満足する必要がある。	固化ガラス組成が管理範囲内にあること。これにより、固化ガラスの基本的要件が充足される。
	発熱量(発熱核種インベントリ)	性能要求	緩衝材等の地下施設の温度制限を設定した場合、最大発熱量が設定される。施設設計等においても最大発熱量が設定されるので、設計・評価の制限範囲を満足する必要がある。	閉鎖後において緩衝材の温度制限を守るため、発熱量に制限がある。熱解析において設定された制限値を満足する必要がある。
	高レベルガラス固化体重量	性能要求	設備設計上の普遍的な制限値はないが設計重量が設定されるので、設計・評価の制限範囲を満足する必要がある。	設計・評価において設定された制限値を満足する必要がある。
	プレナム部容積	設計・評価条件	熱解析、力学解析、落下解析への影響は小さく制限値はない。評価上の値があればよい。	設計・評価において、明確な要件はない。値が明らかであればよい。
	表面汚染密度	性能要求	被ばく対策が可能なこと、除染が可能ことから制限値はない。施設受入基準と放射線管理区域設定の考え方に対応した制限値が設定される可能性があるため、施設の制限範囲を満足する必要がある。	設計・安全評価において設定された制限値を満足する必要がある。閉鎖後安全評価において、明確な要件はない。
	固化ガラス重量	設計・評価条件	制限値はない。ガラス固化体1本当たりの放射エネルギーを算出するため、値が必要である。	設計・評価明確な要件はない。値が明らかであればよい。
	固化ガラス寸法(外径・高さ)	設計・評価条件	熱解析、閉鎖後安全評価への影響は小さく制限値はない。評価上の値があればよい。	設計・評価明確な要件はない。値が明らかであればよい。
II. 適切に製造されていることを確認し、一定値と取り扱うことができる特性*	固型化の状態(均質性)	機能要求	高レベルガラス固化体に求められる基本的な要件から、放射性物質が容易に飛散し漏洩しないこと、耐放射線性があること、物理的、化学的に安定していることが求められる。また、固化体の評価を行うため、特性が把握できる程度に均質であることが求められる。	設計・操業時及び閉鎖後の安全評価において、明確な定量的要求はない。特性が把握できる程度に均質であるためには、適切に製造されていることが必要。
	固化ガラス破砕係数	設計・評価条件	制限値はない。固化ガラスの(熱、浸出)特性が大きく変動する程度に破砕されてなければ良い。	明確な要件はない。適切に製造されていることにより代表値の使用が可能であり、代表値が閉鎖後安全評価で使用する値と同等であればよい。
	固化ガラス浸出速度(溶解速度)	性能要求	制限値はないが、処分システムの頑健性と冗長性の確保、B A Tの観点から、内外の高レベルガラス固化体(例えばAREVA NC)と同等の性能を発揮すること。閉鎖後安全評価において浸出速度が設定されると考えられるので、その制限範囲を満足する必要がある。	閉鎖後安全評価において明確な要件はないが、浸出速度が設定されると考えられるので、その値が制限値となる。適切に製造されていることにより代表値の使用が可能であり、代表値が閉鎖後安全評価で使用する値と同等であればよい。
	最低結晶化温度	設計・評価条件	極端に低くないことが求められる。	明確な定量的要求はない。適切に製造されていることにより代表値の使用が可能であり、代表値が極端に低くなければよい。
	固化ガラス熱特性(熱容量、熱伝導率)	設計・評価条件	熱解析結果にあまり影響しない。熱解析に用いた値と同程度であればよい。	明確な要件はない。値が明らかであればよい。適切に製造されていることにより代表値の使用が可能であり、代表値が熱解析で使用する熱特性値と同等であることが確認できればよい。
	固化ガラス密度	設計・評価条件	制限値はないが、遮へい設計、熱解析等において密度が設定される。遮へい設計上は結果にあまり影響しない。熱解析については評価上の値があればよい。	明確な要件はない。値が明らかであればよい。適切に製造されていることにより代表値の使用が可能であり、代表値が解析で使用する値と同等であることが確認できればよい。
III. キャニスター一定値と取り扱える特性	キャニスター材質	性能要求	仕様通りのキャニスターが、機能として具備すべき要件(耐食性、強度、熱特性)を満たすことを予め確認する必要がある。そのため、仕様通りの材質であればよい。	左記の特性値や特性に関する定量的な情報が、キャニスターの仕様を守ること、設計・安全評価において設定された仕様、設計値あるいは製造目標を満足することが必要である。
	キャニスター寸法・形状	性能要求	設計において目標値及び公差が設定されるので、その範囲を満足する必要がある。	
	キャニスター溶接部の健全性(胴部)	性能要求	閉じ込め性の観点から、溶接部が健全であることが求められるが、溶接パラメータと検査により確認できる。	
	キャニスター母材の健全性	性能要求	閉じ込め性能に影響するような著しい欠陥がないことが求められる。	
	キャニスター強度	性能要求	設計において設計値が設定されるので、その値を満足する必要がある。キャニスター材質から判定可能である。	
	キャニスター熱特性	性能要求	設計において設計値が設定されるので、その値を満足する必要がある。キャニスター材質から判定可能である。	
IV. 健全性に関する特性	キャニスター溶接部の健全性(蓋部)	性能要求	閉じ込め性の観点から、溶接部が健全であることが必要である。健全性は溶接パラメータ、及び漏えい率検査から把握可能である。	漏洩率の測定値が、設計・安全評価において設定された漏えい率の制限範囲を満足する必要がある。
	破損・欠陥がないこと(外観)	機能要求	閉じ込め性能に影響するような著しい欠陥がないことが必要である。	設計・安全評価において、明確な定量的要求はない。
V. 識別管理に必要な特性	整理番号	性能要求	技術的観点から制限はない。管理上必要であり、第一種埋設規則との関連で対応が必要となる。	管理上の観点から、唯一性を有する番号を付与する必要がある。
	整理番号の表示方法・位置	機能要求	技術的観点から制限はない。管理上必要であり、第一種埋設規則との関連で対応が必要となる。整理番号の目視検査、記録検査と同時に確認される。	整理番号の継続的利用の観点から必要だが、定量的要求ではない。

※：適切に製造されていることを確認することにより、当該固化体の特性は一定値(代表値)を取るものとする。製造管理項目としてはガラス固化体組成、溶融温度、冷却時間等がある。

3.5 高レベルガラス固化体の処分場受入、閉鎖のための品質マネジメント上の要求

3.5.1 特性の確認の可能性

高レベルガラス固化体の処分場受入、閉鎖のための品質マネジメント上の要求の一つとして、高レベルガラス固化体の特性が処分場受入れにおいて想定される要件を満たすことを確認できる記録・技術情報が得られていることが求められる。

高レベルガラス固化体の処分場受入れにおいて想定される要件への充足性については、処分実施の際に十分な論拠を持って確認されるべきで、確認の方法は、高レベルガラス固化体の処分場受入れにおいて想定される要件の内容や判定基準、そして確認の難易を考慮したうえで設定する必要がある。

特性の把握方法とし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、高レベルガラス固化体の製造管理記録に基づき、一定値として取り扱うことが可能と考えられる。したがって、直接的な検査結果に加えて、製造プロセスの運転管理記録や調達品の管理記録の裏付けが必要となる。そのため、運転条件と高レベルガラス固化体の特性との関係についての技術情報（高レベルガラス固化体の特性を特定するために、製造装置の運転管理記録等と製造されるガラス固化体の製品品質を関連付けるR&Dによる技術情報）が取得されていることも重要となる。例えば、高レベルガラス固化体の浸出速度について定量的な要件が定められても、直接的な確認は困難である。その場合、目標通りのガラスであることの確認方法としては、固化体製造時の運転記録（運転時のパラメータ）からの確認が考えられる。具体的な記録としては、ガラス特性への影響が想定される製造時の熔融温度や熔融時間等の運転記録並びにガラス原料組成のような調達記録が考えられる。このような確認が可能であるためには、運転パラメータ値等の記録と浸出速度との関係が明らかになっている技術情報の存在が前提である。これらの特性に関する要件を確認するための関連特性や技術情報の項目については、表 3.5-1 の確認における留意点に、概要を記載している。

なお、これらの特性に関する記録は、製造されるガラス固化体 1 体毎に測定もしくは計算される記録（例えば、ガラス固化体重量）もあれば、特性値そのものはデータシートに記載されないものの、その特性値を担保するための間接的な記録（例えば、最低結晶化温度に対しては固化ガラス化学組成や均質性）が記載されるものもある。いずれの記録もトレーサビリティを確保するため、各ガラス固化体のデータシートに値が記載される。なお、後者に関しては、前述のように固化ガラスの製造条件と製品品質の関係に関する技術情報が得られている必要がある。

3.5.2 記録・技術情報に信頼性があること

特性値を用いて設計・評価を行い適切な結果を得るためには、記録及び技術情報の信頼性の確保が必要である。記録の信頼性を確保するためには高レベルガラス固化体製造業者による、測定・記録に関する手順書の整備、教育訓練、装置の校正・保守、自動化、測定

値等の誤差評価、監督者による監視等の状況を確認することが有効である。

技術情報の信頼性を確保するためには、運転条件と高レベルガラス固化体の特性との関係を明確にするために実施された試験の試験条件や試験結果に基づき、妥当性の評価が行われることが有効である。

これらの活動と検討を通じて、製造業者が作成する製造記録が、それらの記録の変動範囲も含めて問題がないことが確保される。

3.5.3 記録の長期保存

高レベルガラス固化体の処分場受入、閉鎖のための品質マネジメント上の要求として、確認可能な記録の長期保存について検討する。地層処分は 100 年以上にわたる長期的な事業であり、定期的な安全評価が義務付けられていることから高レベルガラス固化体に関する記録は長期間保存することが求められる。高レベルガラス固化体に関する記録は原材料の調達・検査記録、使用済燃料等の履歴、製造に関する技術情報、運転記録、検査記録等多岐にわたり、その量も膨大になると予想される。したがって、記録の長期保存の方策の検討と共に、保存すべき記録の選定も重要である。また、信頼性の高い記録を確実に取得することが必要である。

以上の検討結果を表 3.5-1 に示す。

表 3.5-1 高レベルガラス固化体の処分場受入、閉鎖のための品質マネジメント上の要求

固化体の特性		記録への要求	品質マネジメント上の要求*	確認における留意点
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	放射性核種濃度	遮へい設計、操業中の安全評価のための設計は最大値で行われると考えられる。閉鎖後安全評価は、平均値により実施されることが現実的である。ただし、規制上最大値以下であることが求められるので、1体毎に記録が必要となる。	各高レベルガラス固化体に、放射性核種濃度の記録が得られていること。	放射能の分析結果等から評価可能。 分析困難な核種は他核種との相関関係あるいは燃料履歴等から評価可能。
	高レベルガラス固化体表面線量率	遮へい設計における設計値は保守性を考慮した最大値を使用すると考えられる。設計値を超えていないことを確認するために、1体毎に記録が必要となる。	各高レベルガラス固化体に、線量率が算出できる記録が得られていること。	放射性核種濃度から評価可能。
	固化ガラス化学組成	固化ガラスの浸出特性、熱特性、最低結晶化温度、密度等を決定する要件であり、それらの妥当性を判断するためにも、1体毎に記録が必要となる。	各高レベルガラス固化体に化学組成の記録が得られていること。	廃液組成、ガラスフリット組成等から評価可能。
	発熱量(発熱核種インベントリ)	冷却設計、操業中の安全評価のため、1体毎に記録が必要となる。ただし、設計は最大値で行われると考えられる。閉鎖後安全評価も、値の分布を考慮した解析が必要と考えられる。	各高レベルガラス固化体に、発熱量の記録が得られていること。	放射性核種濃度から評価可能。
	高レベルガラス固化体重量	荷重計算用の設計値を超えないことの確認が必要となる。設計は保守性を考慮した最大値で行われると考えられる。	各高レベルガラス固化体に、固化体重量の記録が得られていること。	固化ガラス充填後の測定により対応可能。
	プレナム部容積	熱解析、オーバーパック封入後の力学解析で使用される可能性がある。	解析結果への影響が小さいので、プレナム部容積の平均的な値が算出可能なこと。	固化ガラス重量と密度から算出可能である。
	表面汚染密度	地上施設内でのハンドリングが可能かどうかを確認するため、放射線管理上の制限値と1体毎の記録を比較する。	各高レベルガラス固化体に表面汚染密度の記録が得られていること。	搬出時あるいは受入時の測定により対応可能。
	固化ガラス重量	高レベルガラス固化体の放射線量算出に必要であり、1体毎の値が求められる。	各高レベルガラス固化体に対して、固化ガラス重量が算出可能なこと。	固化ガラス充填時の測定により対応可能。
	固化ガラス寸法(外径・高さ)	閉鎖後安全評価のために必要。核種移行解析モデル上のガラスの有効表面積を決定するために値があれば良い。	各固化ガラス寸法が安全評価で用いられた範囲内にあることを示す記録が得られていること。	固化ガラス重量と密度から算出可能である。
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	固型化の状態(均質性)	熱解析や閉鎖後安全評価の定性的な前提となる。直接測定できないため、固型化の状態が固化体特性を評価を可能とする程度であることを示す製造管理記録が1体毎に求められる。	高レベルガラス固化体に求められる均質性を示すための記録が得られていること。	熔融、冷却、貯蔵時の運転・管理パラメータ値から確認可能。 技術情報が必要
	固化ガラス破砕係数	閉鎖後安全評価のために必要。直接測定できないため、安全評価で使用した破砕係数と同等の性状であることを示す製造管理記録が1体毎に求められる。	各高レベルガラス固化体が範囲内の破砕係数であることを示すための記録が得られていること。	冷却時の運転パラメータ値から確認可能。 技術情報が必要
	固化ガラス浸出速度(溶解速度)	閉鎖後安全評価のために必要。直接測定できないため、安全評価で使用した浸出速度と同等の性能であることを示す製造管理記録が1体毎に求められる。	浸出速度が安全評価で使用した値以下であることを示すための記録が得られていること。	固化ガラス化学組成、固型化の状態(均質性)から確認可能。 技術情報が必要
	最低結晶化温度	閉鎖後のガラスの浸出速度の妥当性を示すために、製造された固化ガラスの最低結晶化温度が一定温度以上であることを示す製造管理記録が1体毎に求められる。	各高レベルガラス固化体が一定温度以上の結晶化温度と推定できることを示すための記録が得られていること。	固化ガラス化学組成、固型化の状態(均質性)から確認可能。 技術情報が必要
	固化ガラス熱特性(熱容量、熱伝導率)	熱解析に必要なパラメータとして固化ガラス熱特性が求められる。直接測定できないため、設計で使用したと熱特性と同等の性状であることを示す製造管理記録が1体毎に求められる。	熱解析結果への影響が小さいので、平均的な値が得られていればよい。	固化ガラス化学組成、固型化の状態(均質性)から確認可能。 技術情報が必要
	固化ガラス密度	熱解析等に必要なパラメータとして固化ガラス密度が求められる。直接測定できないため、設計で使用したと密度と同等の性状であることを示す製造管理記録が1体毎に求められる。	熱解析や遮へい計算結果への影響が小さいので、平均的な値が得られていればよい。	固化ガラス化学組成、固型化の状態(均質性)から確認可能。 技術情報が必要
III. キャニスター一定値として取り扱える特性	キャニスター材質	材質、寸法、溶接部健全性、母材健全性を示す記録・検査結果が1体毎に記録として求められる。キャニスター強度と熱特性は、キャニスター材質から、材質とこれらの内容を関連付ける既往の情報から求めることができる。	使用するキャニスターの材質、寸法・形状、強度、熱特性の記録が得られていること。キャニスター胴部の溶接記録があること。材質と対応した強度記録があること。	キャニスターの製造時検査、受入検査にて確認可能。
	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			
IV. 健全性に関係する特性	キャニスター溶接部の健全性(蓋部)	溶接部が健全であることを示すための溶接記録及び漏えい検査記録があること。製造管理記録としての運転パラメータが健全な溶接を実現するための適切な範囲内にあること	各高レベルガラス固化体に、溶接の記録及び漏えい検査記録が得られていること	溶接後の検査、運転パラメータ値により確認可能。 技術情報が必要
	破損・欠陥がないこと(外観)	著しい欠陥がないこと。	各高レベルガラス固化体に著しい欠陥がないことを示す外観検査記録があること。	外観検査により確認可能。
V. 識別管理に必要な特性	整理番号	1体毎に識別可能であることが求められる。	唯一性のある整理番号が廃棄体にあること。また、整理番号に対応する記録があること。	目視検査により確認可能。
	整理番号の表示方法・位置	整理番号が必要な期間に亘って確認可能であること。	1体毎に表示方法・表示位置が確認されること。	目視検査により確認可能。

*：品質マネジメント上の全般的な要求としては、表中に記載した内容に加えて、記録・技術情報に信頼性があること、記録・技術情報が長期間保存されることも含む

4. 高レベルガラス固化体特性の重要度の分類と品質マネジメントの考え方

委員会のこれまで検討では、高レベルガラス固化体の製造時に関する品質マネジメントとして、「管理の方法と程度が影響に応じて妥当なこと」としている⁴¹⁾。もとより処分に必要な特性の抽出に当たっては、将来の処分施設への受入において困ることがないように前広に抽出した経緯もあり、特性について重要度を区分した上で、今後、重要度に応じた特性の確認や製造プロセス管理の方策を考える必要がある。

そこで本章では、高レベルガラス固化体に求められる基本的な要件よりも、要件の内容が相対的に明確である高レベルガラス固化体の処分場受入れにおいて想定される要件を対象として、処分実施の観点から重要度検討の方法を定めた上で、ガラスの特性の重要度を判断し、特性把握に必要な記録の取得方法、あるいは高レベルガラス固化体製造に係る品質マネジメント決定の参考にするものとする。

なお、特性把握に必要な記録の取得項目や方法については、対象とする製造プロセスの特徴及び管理の考え方並びに特性の重要度を反映して定めるべきものである。したがって、その取得方法あるいは管理方法は安全性を担保できる条件を満足するものであれば、画一的である必要はなく、製造プロセスの特徴と運転組織の品質マネジメントの方針に基づいて策定されるべきものとする。

4.1 重要度検討の方法

処分に必要な高レベルガラス固化体の特性は表 3.3-1 に示すように処分施設的设计，あるいは安全性の評価項目を設定し，その设计・評価に必要な高レベルガラス固化体特性を検討することにより抽出した。次に重要度の検討にあたり，设计内容や安全評価内容に応じて，同様の評価項目が繰り返し表出することを整理し，評価項目を以下のものに集約する。

- ・放射能・化学組成/均質性/物理的・化学的安定性
- ・健全性/閉じ込め性評価
- ・放射線遮へい評価
- ・力学的評価
- ・熱的評価
- ・臨界の防止・核物質防護
- ・表面汚染
- ・標識

表 4.1-1 に評価項目の集約結果を示す。

次に，これらの評価に際して必要となる高レベルガラス固化体特性を選定し，評価内容

と評価結果への影響度，並びに高レベルガラス固化体特性の変動性を勘案して重要度を検討する。

重要度の判定に際して，以下について考慮する。

- ① 評価におけるソースタームであるか，その他のパラメータや条件であるか
- ② 評価において，影響の程度を大きく変え得るようなパラメータや条件であるか
- ③ 当該特性の変動幅が大きい小さいか，また特性の変動が評価の影響の程度を大きく変え得るか

その上で，重要度を次の3段階で設定する

- ◎：評価におけるソースターム*を決定し，特性の変動により評価における影響度が有意に変動する
- ：特性の変動により評価における影響度が有意に変動する
- △：品質マネジメントにより特性がほとんど変動しないもの，あるいは変動しても影響度が大きく変わらないもの

なお，本来評価項目自体の重要性も考慮すべきであるが，表 3.3-1 に示された評価項目は重要なものを選択していることから，ここでは集約された評価内容はすべて重要度の高いものとする。

※ソースターム：ソースタームとは原子炉安全評価における用語の一つであり，その定義は次のとおりである。炉心損傷事故時，燃料は溶解し核分裂生成物が炉心から放出され，一定の漏れ率で環境へ放出される。環境への影響を評価するには，核分裂生成物の種類，化学形，放出量を明らかにする必要がある，これらを総称してソースタームと呼ぶ。

これを処分に適用すると，処分による人類あるいは環境への影響を評価するためには放射能の種類，化学形，高レベルガラス固化体からの放出量，発熱量を明らかにする必要がある，これらを総称してソースタームと呼ぶことが適当である。

4.2 高レベルガラス固化体特性の重要度

前記の重要度の考え方に基づき，高レベルガラス固化体特性の重要度を検討した。結果を表 4.2-1 に示す。これによれば高レベルガラス固化体特性のうち重要度が高いと判断した特性及びそれらの選定理由は表 4.2-2 のとおりである。

表 4.2-1 において，重要度が低いと判断された特性に関しても，すべての高レベルガラス固化体のデータシートに記録が得られていることが原則である。

これらの重要度は、処分システムの設計及び安全評価の観点から高レベルガラス固化体の処分場受入れにおいて想定される要件を考慮して処分の実施の観点から重要度を設定したものである。

4.3 高レベルガラス固化体特性の重要度に応じた品質マネジメントの考え方

4章の冒頭に記載した通り特性把握に必要となる記録の取得項目や方法については、対象とする製造プロセスの特徴及び管理の考え方並びに特性の重要度を反映して定めるべきものである。したがって、その取得方法あるいは管理方法は安全性を担保できる条件を満足するものであれば、画一的である必要はなく、製造プロセスの特徴と運転組織の品質マネジメント方針に基づいて策定されるべきものとする。

一方で、高レベルガラス固化体製造時の品質マネジメントの基本的な管理として以下に示す4項目を満たす必要がある⁴⁾¹⁾。

- ① 手順(書)が定められていること
- ② 手順(書)が技術的に妥当であること (管理の方法と程度が影響に応じて妥当なこと)
- 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、必要に応じて処置を講じる仕組みがあり、機能していること

①については、特性把握に必要となる記録の取得項目や方法に関する必要な手順書が整備される必要がある。また、これらの手順書は、再処理施設高レベル廃液ガラス固化施設における今後の試運転や本格操業で得られた知見に基づき、適切に改訂される必要がある。

②については、定められた手順書の内容が、各特性に求められる要件を満たせるものとなっている必要がある。技術情報に基づいて、記録の取得に影響する各種の条件と特性との関係を明らかにし、この結果を踏まえて、特性への影響が大きい条件については厳密に管理する必要がある。

③については、手順書の内容に関する教育・訓練を行い、必要な知識・技能をもった人が作業を行うようにする必要がある。また、手順の遵守を確実にするための体制、意図しないエラーを防止するための取り組みについても検討が行われることも重要である。さらに、これらのしくみがうまく機能していることを監査等により確認することも考えられる。

④の処置については、発生した製品に対する処置のみでなく、①～③に対する処置も必要である。事業組織によってPDCAのサイクルが常にまわされ、高レベルガラス固化体の特性に関する記録の取得項目や取得方法、その管理の仕組みが継続的に見直されるべきである。

表 4.1-1 処分の評価内容の整理

固化体の安定性・設計・安全評価・管理の評価項目		評価の内容	放射能・物理的・化学組成・均質性 / 化学的安定性	健全性 / 閉じ込め性評価	放射線遮へい評価	機械的評価	熱的評価	臨界の防止・核物質防護	表面汚染	標識
高レベルガラス固化体の安定性の確認		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、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れにくいこと、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。	○	○				○		
処分施設の設計(含人工バリア設計)	オーバーバック	・オーバーバックを透過した放射線による従事者被ばくの評価 ・放射線分解によるオーバーバック腐食形態の変化			○					
	緩衝材	発熱による周辺の温度上昇と、その結果としての変質を考慮した緩衝材仕様(処分孔間隔を含む)設定					○			
	処分坑道	発熱による周辺の温度上昇と、その結果としての変質を考慮した坑道間距離・廃棄体定置間隔の設定					○			
	緩衝材	緩衝材仕様としてのオーバーバック支持性				○				
	処分孔(竖置きの場合)	処分孔深さに依存する遮へい効果による管理区域内外の設定			○					
	オーバーバック封入までの地上ハンドリング設備	キャニスターの寸法/形状/重量を考慮した設備仕様				○				
	地上地下冷却設備	地上受入れ施設から地下埋設までの固化ガラス及び緩衝材の熱変質抑制の観点からの冷却設備設計 ・施設内作業環境温度維持のための冷却設備設計					○			
	放射線遮へい	ハンドリング時の遮へい設計			○					
処分施設 作業中安全評価(平常時)	閉じ込め性(内部被ばく)	吸入による被ばく等を考慮した、放射線の漏えいの有無(閉じ込め性)の評価		○						
	放射線遮へい	遮へい設計を反映しハンドリング時等の作業時の放射線被ばくが適切であることの評価			○					
	キャニスター附着放射性物質の揮発/剥離	キャニスター附着放射性物質の揮発/剥離						○		
処分施設 作業中安全評価(異常時)	落下事故	高レベルガラス固化体搬送中の落下事故時の評価	○		○					
処分施設 閉鎖後安全評価(閉鎖後環境条件解析)	熱的現象	高レベル固化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					○			
	水理学的現象	高レベルガラス固化体内部の水理学的現象の核種移行への影響								
	力学的現象	オーバーバックの長期的沈下に対する緩衝材バリアの性能維持 埋設後のガラス固化体にかかる長期的応力				○				
	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)			○					
処分施設 閉鎖後安全評価(被ばく評価)	地下水核種移行(核種移行現象)	地下水中核種移行に伴う被ばく影響(核種移行現象を評価するガラス固化体のパラメータの設定)	○							
	天然現象	長期的な隆起侵食により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パラメータの設定	○							
	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	○							
識別管理	廃棄体識別管理	高レベルガラス固化体と記録との照合								○

表 4.2-1 集約した評価内容と高レベルガラス固化体の特性の関係性

ガラス固化体の特性 集約した評価内容	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. キャニスター一定値として取り扱える特性					IV. 健全性に関する特性		V. 識別管理に必要な特性		
	放射性核種濃度	高レベルガラス固化体表面線量率	固化ガラス化学組成	発熱量（発熱核種インベントリ）	高レベルガラス固化体重量	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・熱伝導度）	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
放射能・化学組成/均質性/物理的・化学的安定性	◎		◎				○	△	○	△	○			△										
健全性/閉じ込め性評価																△	△				◎	○		
放射線遮へい評価	◎	◎	△					△	○					△										
機械的評価					○	△									△			△				○		
熱的評価				◎		△		△	△		○	△	△	△	△					△				
臨界の防止/核物質防護	◎	◎																						
表面汚染							○																	
標識																						◎	○	

◎：評価におけるソースタームを決定し、特性の変動により評価における影響度が有意に変動するもの

○：特性の変動により評価における影響度が有意に変動するもの

△：品質マネジメントにより特性がほとんど変動しないもの、あるいは変動しても影響度が大きく変わらないもの
網かけ部は、高レベルガラス固化体の特性のうち、重要度が高いと判断したものを示す。

表 4.2-2 地層処分の操業から閉鎖後までの設計及び安全評価の観点から選定した重要度の高い特性

重要な特性	重要と選定した理由	備考
放射性核種濃度	<ul style="list-style-type: none"> ・ 操業期間及び閉鎖後の安全評価や処分施設の放射線安全をふまえた施設設計において、主要な核種の濃度（存在量）が必要である。 ・ 廃棄体自体の安定性への影響を考慮した放射線分解や損傷の評価のソースタームとして必要で、影響度が有意に変動する。 ・ 発熱や表面線量率のような他の重要な特性の算定根拠となる。 ・ 処分の対象となる操業及び閉鎖後の長期安全の観点から臨界としないことを確認するために必要である。 	<p>廃液の分析により決定する核種と直接分析した核種との相関や燃焼度等の情報を用いて計算により決定する核種がある。</p>
高レベルガラス固化体表面線量率	<ul style="list-style-type: none"> ・ 処分事業の操業期間中の高レベルガラス固化体受入施設の放射線安全をふまえた遮へい設計等の施設設計結果の妥当性を示すために必要なデータとなる。 ・ 核物質防護の観点から「表面から1 mでの吸収線量率」の結果に応じて、核物質防護の取り扱いレベルが異なるため、影響度が有意に変動する可能性がある。 	<p>直接測定を実施する場合と、各放射性核種の存在量と固化ガラス及びキャニスターの組成（材質）、寸法、密度から計算する場合がある。</p>
固化ガラス化学組成	<ul style="list-style-type: none"> ・ 廃棄体自体の安定性への影響を考慮した物理的及び化学的安定性（固型化の状態、固化ガラスの破碎係数・浸出速度、最低結晶化温度、固化ガラスの熱特性・密度）の評価のソースタームとして必要で、影響度が有意に変動する。 	
発熱量(発熱核種インベントリ)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 緩衝材温度を一定値以下とする閉鎖後安全性の制約条件を考慮した場合、（高レベルガラス固化体製造までの冷却期間とサイト特性に依存するが）上限となる発熱量が存在する。ソースタームとなる発熱量の変動により影響度が有意に変動する。 	<p>直接測定を実施せずに、放射性核種濃度等のデータから計算により設定可能である。</p>
キャニスター溶接部の健全性(蓋部)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 操業期間中の地上施設でのキャニスターハンドリング時に、万一の放射性核種の漏えいがないことを示すために、キャニスター溶接部の健全性が重要となる。核種の漏えいがあった場合、操業中の安全性への影響度が有意に変動する。 	
整理番号	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高レベルガラス固化体の性能ではなく、唯一の整理番号による記録の識別、各高レベルガラス固化体の品質マネジメントが可能となる。処分施設の操業に必要なデータである。 	

5. 国内製造高レベルガラス固化体の製造目標の十分性と品質マネジメント

高レベルガラス固化体の処分場受入れにおいて想定される要件について、JNFL 及び JAEA の高レベルガラス固化体の製造目標が要件を満足するか、すなわち製造目標がそれらの要件に対して十分であるかどうかを検討する。

5.1 製造目標の妥当性・十分性

表 5.1-1 に、国内製造高レベルガラス固化体の諸元の妥当性、製造目標の十分性の評価結果を示す（参考までに AREVA NC 高レベルガラス固化体の諸元も示す）。処分場サイト環境、処分施設概念、規制内容は現時点で未定であるが、現状の固化体諸元であれば処分施設・設備の合理的な設計・建設が可能であり、安全性も確保可能と考えられる。結果として、JNFL 及び JAEA が製造する高レベルガラス固化体の製造目標は、高レベルガラス固化体の処分場受入れにおいて想定される要件を満足するものと考えられる。

個別に評価すると、高レベルガラス固化体の要件のうち最もクリティカルなものは、発熱量である。この要件は、処分システムの緩衝材の温度制限値を超えないように発熱量が一定値以下であることが求められるが、国内製造高レベルガラス固化体は、例えば第2次取りまとめで暫定的に使用された値と同等であり問題ないと考えられる。その他の特性については、既存の原子力施設設計や感度解析結果から明確な制限値がないか、あるいは制限値があっても設計で対応可能であるので、処分施設への受け入れに問題はないと考えられる。

核種移行評価において特に重要な特性である固化ガラスの長期浸出速度については前述の通り、閉鎖後安全評価（線量評価）から明確な要件を見出すことは困難であった。そこで、BAT の観点から、例えば世界で最も製造実績のある AREVA NC の高レベルガラス固化体と同程度の長期浸出性能を発揮することを目安とすることが考えられる。

しかしながら、長期浸出速度に関する実験的な性能比較は困難であり、ガラス組成に対応する概略性能の指標として、現時点ではソックスレー試験等の結果を用いる。ガラスの浸出試験方法は多様であるが、国内外の機関で広汎に試験結果が得られており、比較が実施しやすい固化ガラスの浸出試験方法として、現状ではソックスレー試験法に基づく結果の比較により AREVA NC 程度の高レベルガラス固化体であることを確認することが適切と考える。

5.2 高レベルガラス固化体の記録・技術情報の信頼性確保と長期保存のための要点

前節で述べた製造目標を参照して、受入時の要件を設定する場合、それらの製造目標が安全確保上妥当であることに加えて、高レベルガラス固化体の特性に関する記録の信頼性

が重要となる。それらの記録の信頼性を維持するために、以下のような要点が考えられる。

(1) 高レベルガラス固化体には処理・貯蔵に加えて処分の要件がある。要件を満足すること、ならびに要件を満足していることを示すためには、品質マネジメントが重要である。4.3 節では品質マネジメントの基本的な管理として、以下の4項目を記述している。

- ① 手順(書)が定められていること
- ② 手順(書)が技術的に妥当であること(管理の方法と程度が影響に応じて妥当なこと)
- 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、必要に応じて処置を講じる仕組みがあり、機能していること

① 手順(書)が定められていること；

定めるべき手順書は、表 3.4.1 で示された特性に関する記録の取得項目および方法に関する手順書である。例えば、放射性核種濃度測定について定めた要領などである。高レベルガラス固化体の製造に関しても、事業者において手順書を作成する必要がある。

② 手順(書)が技術的に妥当であること(管理の方法と程度が影響に応じて妥当なこと)；

現時点で、この委員会において、特性ごとに、関連する記録の取得項目およびその取得方法の詳細を示すことは難しい。しかし、実験結果等に基づいて製造目標、管理方法の妥当性を評価し、その内容が手順書に反映され、その手順書に従えば要件を満たす特性に関する記録が得られるようにすること、特性に大きな影響を与える各種の条件については厳密に管理するようにすることが必要である。

③ 手順(書)を守る活動・仕組みがあり、機能していること；

手順書の内容に関する教育・訓練の計画があり、計画通り実施されていること、必要な知識・技能がない人が作業を行うことがないようにすることが必要である。また、意図的に手順を省略することのないよう、手順(書)を守る必要性について、十分な教育・指導を行うとともに、監督者による定期的な監視・記録の確認を行い、不遵守が放置されないようにすることが大切である。さらに、意図しないエラーについては、発生したものについて早急に再発防止策を講じるとともに、起こりそうなものを事前に洗い出し予め対策を講じておくことが大切である。

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、必要に応じて処置を講じる仕組みがあり、機能していること；

6章に述べるように、逸脱した運転条件により製造された高レベルガラス固化体の特性を十分把握した上で処分における対応を図る必要がある。また、逸脱の発生状況の確認と原因の分析を十分に行った上で、運転管理方法や設備の点検・保守方法の見直し、特性に関する記録の取得項目や取得方法、その管理の仕組みの改善が必要となる。

逸脱固化体については処分時の影響を個別に評価し、追加的な是正処置を講ずることなく処分することが可能か（例えば軽量固化体）、あるいは、個別の評価結果に対応して別種のガラス固化体として是正処置等の個別の対応を必要とするかどうかを判断することが適当である。

なお、上記に関する具体的管理内容は、高レベルガラス固化体の各特性が設計や安全評価結果に及ぼす影響の大きさに応じて決定される必要がある。各特性の重要度については4章で検討を行ったが、重要度の高い放射性核種濃度、高レベルガラス固化体表面線量率、固化ガラス化学組成、発熱量、キャニスター溶接部の健全性、整理番号については、他に比べてより信頼性を高くする内容が求められる。

- (2) 高レベルガラス固化体に関するすべての要件の適合性を検査で示すことは困難である。製造プロセスの管理（運転管理、調達管理を含む）で高レベルガラス固化体の品質を管理することが重要である。そのためには、相応の技術情報（R&D）が必要となる。

相応の技術情報とは、運転条件と高レベルガラス固化体の特性との関係に関する技術情報を意味している。これらの技術情報については、その妥当性の評価が行われることが適切である。

- (3) すべてのガラス固化体に対して、特性値あるいはそれに関係する管理記録が必要である。それらの記録が1体毎に固有の値を記載する必要があるのか、あるいは代表値の使用が適切なのか、その選択は、それらの記録が関連する要件やその特性値が、地層処分施設の設計や安全評価に及ぼす影響の大きさや影響の感度によって、適切になされることが必要である（3.4節の評価システムの検討結果を参照）。また、特性値に関する誤差評価を含む精度の情報も必要となる。

表 5.1-1 国内製造高レベルガラス固化体の諸元と製造目標の十分性

固化体の特性		高レベルガラス固化体の処分場受入れにおいて想定される要件	JNFL	JAEA	AREVA NC(参考)	製造目標の十分性の評価
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	放射性核種濃度	閉鎖後安全評価から制限値は算出されないが、申請において最大放射能濃度が設定されること、遮へい設計等において最大放射能濃度が設定されるので、設計・評価の制限値を守る必要がある。	$\beta \cdot \gamma : \leq 2.17 \times 10^{16} \text{Bq}$ $\alpha : \leq 1.29 \times 10^{14} \text{Bq}$	$\beta \cdot \gamma : \leq 1.5 \times 10^{16} \text{Bq}$ $\alpha : \leq 2.6 \times 10^{14} \text{Bq}$	$\beta \cdot \gamma : \leq 2.8 \times 10^{16} \text{Bq}$ $\alpha : \leq 1.4 \times 10^{14} \text{Bq}$	左記と同等の値であれば十分高レベルガラス固化体の処分場受入れにおいて想定される要件を満たす
	高レベルガラス固化体表面線量率	遮へい設計上の普遍的な制限値はないが、遮へい設計において線量率を使用する場合に、最大線量率が設定されるので、設計・評価の制限値を守る必要がある。			$\beta \cdot \gamma$ 線 表面 $1.4 \times 10^4 \text{Gy/h}$ 以下 中性子線 表面 $6.1 \times 10^{-3} \text{Gy/h}$ 以下	左記と同等の値であれば十分高レベルガラス固化体の処分場受入れにおいて想定される要件を満たす
	固化ガラス化学組成	目標通りの固化ガラスが、高レベルガラス固化体に求められる基本的な要件を満たすことを予め確認する必要がある。その上で、管理範囲を満足する必要がある。 注：JNFL及びJAEAの場合、固化ガラス化学組成に製造管理範囲が設定されるのは全廃棄物酸化物含有量とNa ₂ Oであり、他の成分については目標値の位置づけにある。	Na ₂ O：目標値 10%，製造管理範囲，8～12wt% 全廃棄物酸化物含有量： 目標値 22.1%，製造管理範囲，20～30 wt % 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% CP酸化物：0.2 wt % Gd ₂ O ₃ ：1.2%	Na ₂ O：目標値 10%，製造管理範囲，8～12wt% 全酸化物：目標値 25%，製造管理範囲：30wt%以下 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% FP酸化物：9.9wt% AC酸化物：2.5wt% Fe ₂ O ₃ ：2.0wt% NiO：0.2wt% Cr ₂ O ₃ ：0.1wt% P ₂ O ₅ ：0.3wt%	8.1 % < Na ₂ O < 11.0 % 7.5 % < (FP+Zr+アクチニド)酸化物及び金属性粒子 < 18.5 % 42.4 % < SiO ₂ < 51.7 % 12.4 % < B ₂ O ₃ < 16.5 % 3.6 % < Al ₂ O ₃ < 6.6 % 1.6 % < Li ₂ O < 2.4 % 3.5 % < CaO < 4.8 % 2.2 % < ZnO < 2.8 % 60.0 % < SiO ₂ +Al ₂ O ₃ + B ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ < 4.5 % NiO < 0.5 % Cr ₂ O ₃ < 0.6 % P ₂ O ₅ < 1.0 % RuO ₂ +Rh+Pd < 3.0 %	浸出速度等が AREVA NCの固化体と同等であり、組成の管理範囲及び目標値は妥当である
	発熱量(発熱核種インベントリ)	緩衝材等の地下施設の温度制限を設定した場合、最大発熱量が設定される。施設設計等において最大発熱量が設定されるので、設計・評価の制限値を守る必要がある。	2.3kW 以下 (製造時)	1.4kW 以下 (製造時)	<2.0 kW(輸送時)	左記と同等の値であれば十分高レベルガラス固化体の処分場受入れにおいて想定される要件を満たす
	高レベルガラス固化体重量	設備設計上の普遍的な制限値はないが設備設計上設計重量が設定されるので、設計・評価の制限値を守る必要がある。	約 500 kg	約 380 kg	約 492 kg	左記と同等の値であれば十分高レベルガラス固化体の処分場受入れにおいて想定される要件を満たす
	プレナム部容積	熱解析，力学解析，落下解析への影響は小さく制限値はない。評価上の値があればよい。				影響が小さいので平均的な値が得られていれば良い。運転管理情報から入手可能
	表面汚染密度	被ばく対策が可能なこと，除染が可能なことから制限値はない。施設受入基準と放射線管理区域設定の考え方に対応した制限値が設定される可能性があるため、施設の制限値を守る必要がある。				測定により入手可能
	固化ガラス重量	制限値はない。ガラス固化体1本当たりの放射エネルギーを算出するため、値が必要である。				測定により入手可能
	固化ガラス寸法(外径・高さ)	熱解析，閉鎖後安全評価への影響は小さく制限値はない。評価上の値があればよい。				運転管理情報から入手可能

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	固型化の状態(均質性)	高レベルガラス固化体に求められる基本的な要件から、放射性物質が容易に飛散し漏洩しないこと、耐放射線性があること、物理的、化学的に安定していることが求められる。また、固化体の評価を行うため、特性が把握できる程度に均質であることが求められる。				溶融、冷却、貯蔵時の運転・管理パラメータ値から確認可能。	
	固化ガラス破砕係数	制限値はない。固化ガラスの(熱、浸出)特性が大きく変動する程度に破砕されてなければ良い。				今後、技術情報の取得が望ましい	
	固化ガラス浸出速度(溶解速度)	現時点で制限値はないが、処分システムの頑健性と冗長性の確保、BATの観点から、内外の高レベルガラス固化体(例えばAREVA NC)と同等の性能を発揮すること。閉鎖後安全評価において浸出速度が設定されると考えられるので、その制限値を守る必要がある。	約 $3 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{d}$ (ブロック試料)	$8.0 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{d}$ (粉末試料) ※	ソックスレー試験(100°C, 28日間平均): $2 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^2/\text{d}$ $0.5 \sim 0.6 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^2/\text{d}$ (浸出液交換無し)	AREVA NCの固化体と比較すると、国内製造固化体は同等の浸出速度と考えられる	
	最低結晶化温度	極端に低くないことが求められる。	ガラス平均転移温度: 503°C 最低結晶化温度: 650°C	ガラス転移温度:501°C 軟化点:604°C ※	平均転移温度:502 °C 変形温度:546 °C 最低結晶化温度:610 °C 液化温度:1,160 °C	AREVA NCの固化体と比較すると、国内製造固化体は同等の温度と考えられる	
	固化ガラス熱特性(熱容量, 熱伝導率)	熱解析結果にあまり影響しない。熱解析に用いた値と同程度であればよい。	0.80~0.99kJ/kg・°C (100°C~400°C)		$2.6 \times 10^6 \sim 3.84 \times 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{°C}$ (100°C~600°C)	AREVA NCの固化体と比較すると、国内製造固化体は同等の特性値と考えられる	
	熱伝導率		1.13~1.52W/m・°C (100°C~400°C)	0.94W/m・°C ※	$1.22 \sim 1.49 \text{ W/m} \cdot \text{°C}$ (100°C~400°C)		
	固化ガラス密度	制限値はないが、遮へい設計、熱解析等において密度が設定される。遮へい設計上は結果にあまり影響しない。熱解析については評価上の値があればよい。	2.7~2.8g/cm ³	2.74g/cm ³ ※	2.75 g/cm ³	AREVA NCの固化体と比較すると、国内製造固化体は同等の特性値と考えられる	
Ⅲ.キャニスター一定値として取り扱える特性	キャニスター材質	仕様通りのキャニスターが、機能として具備すべき要件(耐食性、強度、熱特性)を満たすことを予め確認する必要がある。そのため、仕様通りの材質であればよい。	胴体:SUS304L 蓋部:SUSF304L	SUS304L /SUSF304L	JIS SUH309 相当	キャニスターの製造時検査、受入検査にて確認可能	
	キャニスター寸法・形状	設計において目標値及び誤差が設定されるので、その範囲を守る必要がある。	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		
	キャニスター溶接部の健全性(胴部)	閉じ込め性の観点から、溶接部が健全であることが求められる。					
	キャニスター母材の健全性	閉じ込め性能に影響するような著しい欠陥がないことが求められる。					
	キャニスター強度	。設計において制限値が設定されるので、その値を満足する必要がある。キャニスター材質から判定可能である。					
	キャニスター熱特性	設計において制限値が設定されるので、その値を満足する必要がある。キャニスター材質から判定可能である。					
Ⅳ.健全性に関係する特性	キャニスター溶接部の健全性(蓋部)	閉じ込め性の観点から、溶接部が健全であることが必要である。				溶接後の検査、運転パラメータにより確認可能	
	破損・欠陥がないこと(外観)	閉じ込め性能に影響するような著しい欠陥がないことが必要である。					
Ⅴ.識別管理に必要な特性	整理番号	技術的観点から制限はない。管理上必要であり、第一種埋設規則との関連で対応が必要となる。				外観検査により確認可能	
	整理番号の表示方法・位置	技術的観点から制限はない。管理上必要であり、第一種埋設規則との関連で対応が必要となる。					

※: 化学組成が管理目標と同等であれば得られる性能 (R&D の評価値)

6. 逸脱によって発生する固化体・非定常に発生する固化体の処分における対応

ガラス固化設備を技術的に裏付けられた手順書に従って運転することにより、品質が確保された高レベルガラス固化体を製造することが可能である。しかしながら、製造プロセスにおける運転状態の逸脱（変動）によって、当初目指していた品質と性状が一部異なる高レベルガラス固化体（逸脱によって発生する固化体、逸脱固化体と称する）が製造される可能性がある。この場合、品質マネジメント計画を逸脱した運転条件により必ずしも品質と性状が異なる固化体が製造されるわけではないので、まず製造された高レベルガラス固化体の特性を十分把握した上で処分における対応を図る必要がある。また、逸脱の発生状況の確認と原因の分析を十分に行った上で、運転管理方法の見直し、設備の点検・保守等の改善対策が必要となる。

なお、ガラス固化設備の熔融炉運転立ち上げ時や熔融炉の洗浄運転などの非定常運転を行った場合、通常の操業条件で製造される品質とは異なる高レベルガラス固化体（非定常に発生する固化体、非定常固化体と称する）が製造される。この高レベルガラス固化体は、逸脱固化体と区別する必要があるが、逸脱固化体と同様に非定常固化体の特性を十分把握した上で処分における対応を可能にしておく必要がある。

6.1 逸脱固化体・非定常固化体の発生状況と特性

逸脱固化体、あるいは非定常固化体の例としては以下のものが考えられる。

<逸脱固化体>

- ・イエローフェーズ含有固化体
- ・軽量固化体
- ・蓋溶接が不十分な固化体
- ・落下転倒固化体

<非定常固化体>

- ・低発熱固化体
- ・ハツリガラス（ハツリガラスは固型化前の状態である）

これらの固化体の特性を表 6.1-1 及び表 6.1-2 に示す。

6.2 逸脱固化体の処分への対応

6.2.1 処分への対応

原子力学会の「イエローフェーズ含有ガラス固化体評価」特別専門委員会報告及び本委員会におけるイエローフェーズ含有ガラス固化体の処分可能性の検討等で明らかになったように、地層処分の多重バリアシステムでは、個々のバリア要素の機能低下がシステム全体の性能に重大な影響を及ぼさないように設計されるため、イエローフェーズ含有ガラス固化体

のような部分的に機能の劣る高レベルガラス固化体が発生した場合でも、多重バリアシステムの相互補完性により、処分場全体のシステム性能に重大な影響を及ぼさない。⁶⁻¹⁾。しかしながら、規制の内容や逸脱固化体の特性が十分に把握されていない段階で安全性に対する考え方を決定することは避けなければならない。前記のとおり、逸脱固化体の特性を十分に把握した上で、処分への対応方法を検討する必要がある。

表 6.2-1 及び表 6.2-2 に逸脱固化体、非定常固化体の処分における想定される影響を示す。

逸脱固化体については、当該固化体の貯蔵・輸送・処分時の影響を個別に評価し、安全性を確認した後に、追加的な是正処置を講ずることなく処分することが可能か（例えば軽量固化体）、あるいは、個別の評価結果に対応して別種のガラス固化体として是正処置等の個別の対応を必要とするかどうかを判断することが適当である。

その際、固化体の特性を十分に把握し記録する必要がある。また、特性によっては、処分時の影響等を評価するための R&D 等も行う必要がある。

個別の対応の一例としては、逸脱固化体について合理的に達成可能な範囲で是正処置を講じることが考えられる。例えば蓋溶接が不十分な固化体については再溶接を行うことが考えられる。また、落下転倒により閉じ込め性が劣化した固化体については、容器の修復が考えられる。

逸脱により固化体のハンドリング等に影響がある場合、及び処分場閉鎖後の影響が大きく変動する場合は、人工バリア等の諸元を逸脱固化体に合わせて個別に変更することも考えられる。例えば落下転倒により容器が変形した場合は、専用のオーバーパックの使用が考えられる。

このような検討を踏まえた上で、処分場の設計、安全評価、事業許可の申請を進めていくものとする。

6.2.2 再発防止への対策

製造の品質マネジメントとして、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、必要に応じて処置を講じる仕組みがあり、機能していることが求められる。その上で逸脱が発生した場合は、発生状況の確認と原因の分析を十分に行い、運転管理方法の見直し、設備の点検・保守等の改善対策を行うものとする。

6.3 非定常固化体の処分への対応

非定常固化体についても固化体の特性を十分に把握し記録する必要がある。その上で、通常の高レベルガラス固化体と同様に扱うことが可能か、あるいは発生する非定常固化体の特性に応じて、ガラス固化体ではあるが別種としての対応を検討することとする。

非定常固化体のうち低発熱固化体は通常の固化体と同様に十分な管理がなされ、その特性も十分に把握可能と考えられるので、通常の固化体と同様に貯蔵し、処分することが可能と

考えられる。

一方ハツリガラスについては、まだ、固型化されている状態ではないため、充填固化等の処置の必要性や充填後の性状について検討する必要がある。その上で、製造される固化体の特性と振れ幅を考慮して、高レベルガラス固化体として扱うか否か、今後検討する必要がある。

なお、ハツリガラスには白金族元素が多く含有すると考えられるため、処分システムの性能への影響を評価する必要がある。

表 6.1-1 JNFL 製造プロセスにおいて発生する可能性のある逸脱固化体の特性

名称	逸脱固化体等の発生に対し想定される事象または作業	固化体の特性	備考
イエローフェーズ含有固化体	廃液の調整ミス等	イエローフェーズ部分の核種浸出率が高い。イエローフェーズには、Cs 等の特定元素が随伴する可能性がある。	
軽量固化体	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	インベントリ及びガラスの充てん量が少ない。	
蓋溶接が不十分な固化体	溶接パラメータの管理値の逸脱	溶接不良により密封性が低下する。	
落下転倒固化体	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。	ガラスが損傷し破砕係数が大きくなる可能性がある。キャニスター表面に傷が発生する可能性がある。キャニスターが変形する可能性がある。	

46

表 6.1-2 JNFL 製造プロセスにおいて発生する可能性のある非定常固化体の特性

名称	非定常固化体等の発生に対し想定される事象または作業	固化体の特性	備考
低発熱固化体	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。	インベントリが少なく発熱量が小さい。	化学組成等は通常の高レベルガラス固化体と同様。
ハツリガラス	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。	ガラス片、ガラス粉等のハツリガラス。	高レベルガラス固化体として扱うかどうかは未定。充填固化等の処置の必要性を検討すべき。

※ 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。

表 6.2-1 逸脱固化体の処分における影響

名称	核種移行	発熱	その他
イエローフェーズ含有固化体	Cs, Zr, Pd, Tc 等の核種の一部が、高い放出率で溶解する。通常の多重バリア性能の条件では、閉鎖後核種移行の結果としての被ばく影響はほとんどない。	固化体中の発熱量分布は均一でないが、オーバーパックより外側では不均質熱源の影響はほとんどない。	間隙水性状への影響やオーバーパックの腐食影響等の化学的影響の確認が必要。
軽量固化体	インベントリが少ないため高レベルガラス固化体 1 体あたりの核種移行量は低下する。	インベントリが少ないため発熱量は低下する。	
蓋溶接が不十分な固化体	オーバーパック前のハンドリング中に、放射性核種が漏洩する可能性がある。オーバーパック後は問題ない。	発熱量や熱解析結果には影響しない。	貯蔵・輸送時についても放射性核種漏洩の問題がある。
落下転倒固化体	キャニスターが破損し放射性核種が漏洩する可能性がある。オーバーパック後は問題ない。破碎係数の大きな固化体となる可能性があるが、通常の多重バリア性能の条件では、閉鎖後核種移行の結果としての被ばく影響はほとんどない。	発熱量や熱解析結果には影響しない。	キャニスター変形のため、ハンドリングやオーバーパックへの封入に問題が生じる可能性がある。

表 6.2-2 非定常固化体の処分における挙動

名称	核種移行	発熱	その他
低発熱固化体	核種インベントリが少ないため高レベルガラス固化体 1 体あたりの核種移行量は低下する。	発熱核種量が少ないため発熱量は低下する。	
ハツリガラス	—	—	高レベルガラス固化体として取扱うか、今後検討が必要。

7. 今後の課題

委員会の高レベルガラス固化体の製造時に関する品質マネジメントに関する検討成果として、既刊の「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）及び本報告書がある。

これらの検討内容を俯瞰した場合、高レベルガラス固化体の品質マネジメントの観点から、以下の対応が望まれる。

(1) 高レベルガラス固化体の特性に関する情報の整理・蓄積

処分の観点から重要な高レベルガラス固化体の特性として放射性核種濃度がある。既刊の報告書では、「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。7-1）」としている。それらの核種の分析・測定方法を高度化するとともに、計算等で評価・算定する手法の検討及び開発が求められる。

ガラス製造に係る重要な技術情報の整理及び蓄積として、固型化の状態（均質性）、破碎係数等の特性と運転条件との関係についての技術情報の整理と必要に応じた技術開発が求められる。

核種移行評価の観点から重要な浸出速度に関しては、高レベルガラス固化体の処分後の長期安全性を評価する観点から必要な、長期的ガラス溶解速度に関する情報の蓄積が求められる。

(2) 記録・技術情報の信頼性確保の方法

記録や技術情報はその信頼性が確保できていなければならない。本報告書では、記録や技術情報の信頼性を確保するために検討すべき項目をあげたが、特性の重要度に応じてどのような方法を用いるのがよいのか、その具体的な内容を検討する必要がある。これは事業者が個別に考えるべき内容とも言えるが、基本的な指針や最低の要求事項を明らかにしておくことは有用と考えられる。

(3) 記録の区分と長期的保存方法

高レベルガラス固化体に関する記録は多岐にわたり多量となることが考えられる。一方で、現在の地層処分計画からは 40,000 本の高レベルガラス固化体に関する各々の記録を 100 年以上の期間にわたり保存することが求められる。これらの記録の保存方法については、記録の充足性、記録閲覧の効率、記録収容スペースの適正化の観点を考慮すべきである。また、各種の記録について重要度等を踏まえて、保存期間の観点からの区分を検討し、各種記録の合理的な保存期間を検討することが求められる。

(4) 非定常固化体及び逸脱固化体への対応に関する検討

将来発生する非定常固化体や、既に発生した逸脱固化体に関する特性の振れ幅を検討し、これらの固化体が地層処分場の他のバリアに及ぼす影響についての調査・検討が求められる。逸脱固化体については追加処置の要否等を含めて検討することが求められる。

8. おわりに

委員会は、「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～」平成22年1月のとりまとめに引き続き、「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の整理、要件に照合した場合の製造目標の十分性の確認、固化体特性の重要性に応じた品質マネジメントの考え方の整理、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への処分における対応の検討等」を行い、その検討結果をとりまとめた。

高レベルガラス固化体の機能と要件に関しては、処分施設の設計、操業中の安全評価、閉鎖後の長期安全評価等を対象として、検討を行った。また、検討においては、国際的な議論も踏まえた。高レベルガラス固化体は、地層処分の安全要件に関するIAEAの文書「WS-R-4 放射性廃棄物の地層処分」において、バリアの一つにあげられており、通常時及び異常時における放射性核種の閉じ込め機能、すなわち、低い浸出速度あるいは溶解速度が期待されている。本報告書で、長期安全評価に関して、高レベルガラス固化体の機能が顕在化するように、その他のバリアの性能が現実的に機能すると設定した場に加えて、機能を科学的に合理的な変動範囲で保守的に設定(バリアの性能が劣化)した場も評価した結果、いずれの条件であっても、高レベルガラス固化体の浸出速度に要件を設定する結果にはならなかった。これは、処分システムが本来、多重安全機能の概念により、一部のバリア要素に不具合があったとしてもシステム全体としての安全性に大きな影響を及ぼさないように頑健に設計されていること、また、放射性核種の多くは溶解度が小さいために、高レベルガラス固化体から浸出したとしても地下水中の溶解度制限により地下水に溶解して移行する量が律速されること、溶解度の大きい放射性核種については緩衝材の収着・拡散や天然バリアの収着・拡散・分散の効果により移行が遅延及び／あるいは希釈されることによって、例え高レベルガラス固化体が瞬時に溶解したとしても生物圏での放射線被ばくに有意な影響を与えないことによるものである。すなわち、地層処分の多重バリアシステムでは、その相互補完性により、機能の劣る高レベルガラス固化体が製造された場合でも、処分場全体のシステム性能に重大な影響を及ぼさない。一方で、高レベルガラス固化体は、固化ガラスの低い核種浸出速度が維持されることにより、多重バリアシステムの頑健性に寄与する。このことから、委員会は、IAEAの安全要件文書に示される定性的な要件や、これまでわが国で開発され、HLW第2次取りまとめやさまざまな資料で説明されて来た高レベルガラス固化体の機能の説明を踏まえ、要件を緩和することなく、製造目標に掲げた標準的な高レベルガラス固化体が安定して製造されることを期待する。

以上の検討の結果も踏まえて、高レベルガラス固化体の要件を次の2階層に分けて検討した。まず、処分だけでなく、貯蔵、輸送工程も対象として、処分概念やサイトによらず安全性の観点から、高レベルガラス固化体に求められる基本的な要件を整理した。この要件は、処分の安全性を示すための最低限の要件ということもできる。次に、高レベルガラス固化体の処分場受入れにおいて想定される要件を検討した。この要件は、将来の処分場の設計、及

び安全評価において設定されることが予想され、高レベルガラス固化体の受入れにあたり充足することを求められる可能性が高い特性値あるいは条件を意味する。特性値を用いた評価の可能性に関しては、確認した特性値が一定の幅をもって分布することを考慮して、性能評価においてどのように用いることが可能であるか（評価システム）について、熱影響評価と核種移行評価を題材にして検討した。検討の結果は、①高レベルガラス固化体の個々の特性に対する定量的な要求（性能要求）、②明確な要求ではないが特性の数値が明らかになっていること（設計・評価条件）、及び、③定性的な要求（機能要求）に区分して整理した。このうち、性能要求は、将来、処分場の設計、安全評価を実施していく過程で定量化されていくものであり現時点で要求を明示できないが、発熱量には制限値が存在する。さらに、これらの要件を満足することを示す上で必要な、高レベルガラス固化体の処分場受入、閉鎖のための品質マネジメント上の要求について検討し、①高レベルガラス固化体の特性が処分場受入れにおいて想定される要件を満たすことを確認できる記録・技術情報が得られていること、及び②それらの記録・技術情報に信頼性があること、また、③それらの記録・技術情報が長期間保存できることに区分して整理した。

また、高レベルガラス固化体特性に求められる要件の重要度を判断して、重要度に応じた製造時の品質マネジメントの考え方を検討した。さらに、国内製造高レベルガラス固化体の諸元を勘案して、固化体の製造目標が処分の要件を満足することを確認したうえで、この製造目標への適合を示す記録の信頼性確保のための要点をまとめた。

次に、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地層処分に関して、検討した。このうち、非定常の高レベルガラス固化体は、ガラス固化施設の操業を行ううえで、中長期的に必ず発生するものである。それらの性状は基本的に標準的な高レベルガラス固化体と同等もしくはより安全性の高いものであり、長期安全評価に影響を与える成分は含まれていないことを確認した。ただし、白金族元素が多く含まれるハツリガラスについては、高レベルガラス固化体の区分に含まれるかどうかを今後検討し、さらには念のため核種移行パラメータや人工バリア自体に影響を与えるものではないことを確認すべきである。一方、逸脱した高レベルガラス固化体については、逸脱固化体の特性を十分に把握した上で処分への対応方法を検討し、必要があると判断された場合には合理的に達成可能な範囲で是正処置されることが妥当である。これには、キャニスター蓋の溶接欠陥を再溶接するなどの是正処置などがあげられる。イエローフェーズ含有高レベルガラス固化体については、日本原子力学会「イエローフェーズ含有ガラス固化体評価」特別専門委員会報告書「イエローフェーズを含むガラス固化体の処分時影響評価試算結果の妥当性について」（平成20年10月）において検討したとおり、特定の核種が濃縮したイエローフェーズ部分を瞬時放出するとしての性能評価の結果では、標準的な処分概念と環境条件においては、十分な安全が確保されると考えられる。しかしながら、イエローフェーズ含有ガラス固化体の特性を十分に把握したうえでの慎重な評価を課題として指摘している。このような少数の逸脱した高レベルガラス固化体については、標準的な高レベルガラス固化体とは別に、その特性を十分に把握したうえで、処分

への対応方法を個別に評価すべきである。

最後に、委員会での検討内容を俯瞰し、高レベルガラス固化体の品質マネジメントの観点から、今後対応が望まれる課題を提示した。

留意事項

委員会が抽出した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とは、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、操業中の安全評価、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前広に抽出した結果にもとづくものである。今後、具体的な処分候補地における地質調査等が進展することにもない、処分施設の設計、操業中の安全評価、閉鎖後の長期安全評価等が段階的に具体化されていくことが予想されるので、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も、段階的により具体化することが想定される。また、特性の把握のために録取すべき記録及びその記録の望ましい取得方法についても、高レベルガラス固化技術の今後の操業経験やプロセス改良等により、より合理的なプロセス管理が行われる可能性等が考えられることから、現時点で検討した内容が今後とも変わらないものであると解釈されるべきではない。

一方、機能と要件に関しては、処分施設の設計、操業中の安全評価、閉鎖後の長期安全評価等を対象として、検討を行った。特に、長期安全評価に関しては、国内製造ガラス固化体の処分への適応性を確認するという観点から、地層処分の多重バリアの性能を保守的に変動させた処分場において、高レベルガラス固化体の特性が地層処分の全体性能にどのような影響を与える可能性があるかについて評価し、特性が有すべき性能を要件として評価検討したものである。ここでいう要件とは、地層処分の安全性についてより現実的に評価するための、あるいはより信頼性を高くするための要件であると理解すべきであって、いわゆる規制上の要件とみなすべきではない。

委員会は、以上のことから、「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～」平成 22 年 1 月でとりまとめた特性と録取すべき記録、及び本報告書でとりまとめた機能と要件について、高レベルガラス固化技術の進展等や地層処分事業の段階に応じて、適宜、見直しを行うことを進言する。

参考文献

- 1-1) 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．
- 1-2) 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．
- 1-3) IAEA, “Geological Disposal of Radioactive Waste”, IAEA Safety Standards Series, Safety Requirements, No. WS-R-4, (2006)

- 3-1) 原子力安全委員会，「高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について（第1次報告）」，平成12年11月6日
- 3-2) IAEA , “Geological Disposal of Radioactive Waste”, IAEA Safety Standards Series, Safety Requirements, No. WS-R-4, (2006)
- 3-3) 日本アイソトープ協会，長寿命放射性固体廃棄物の処分に適用する放射線防護勧告，ICRP Publication 81 邦訳版，平成12年11月
- 3-4) 原子力安全委員会，「低レベル放射性廃棄物埋設に関する安全規制の基本的考え方（中間報告）」
- 3-5) 原子力安全委員会，「放射性廃棄物処分の安全規制における共通的重要事項について」
- 3-6) 杉山大輔，長谷川宏，「放射性廃棄物処分における技術的最善の手段（BAT）の考え方 - 諸外国事例のレビューとわが国への示唆 -」，平成18年11月
- 3-7) 原子力安全基盤機構，「BATに関連する最近の動向と頑健性について」平成20年5月20日，原子力安全委員会 放射性廃棄物・廃止措置専門部会 第二種廃棄物埋設分科会（第8回）会合資料より
- 3-8) SSI 2005:5, ”The Swedish Radiation Protection Authority’s guidelines on the application of the regulations (SSI FS 1998:1) concerning protection of human health and the environment in connection with the final management of spent nuclear fuel and nuclear waste”, 2005.
- 3-9) 日本アイソトープ協会，放射性廃棄物の処分に対する放射線防護の方策，ICRP Publication 77 邦訳版，平成10年11月
- 3-10) 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，「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
- 3-11) 動力炉・核燃料開発事業団，「動燃30年史」，平成10年7月
- 3-12) 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」(HLW 第2次取りまとめ)
分冊2 地層処分システムの工学技術, 平成11年11月26日

3-13) 園部一志・石黒勝彦, :「実規模ガラス固化体の浸出試験」, PNC TN8410 90-068,
1990年7月

4-1) 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,
「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

6-1) 日本原子力学会「イエローフェーズ含有ガラス固化体評価」特別専門委員会,「イエロ
ーフェーズを含むガラス固化体の処分時影響評価試算結果の妥当性について 報告
書」, 平成20年11月

7-1) 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,
「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