

核燃料サイクル技術の安定性に関する検討

第一ステップ

再処理工場におけるガラス固化設備の安定運転
実現に向けた見通しの技術的評価

報 告 書

平成 2 5 年 9 月



一般財団法人 エネルギー総合工学研究所

本報告書は、一般財団法人エネルギー総合工学研究所が、自主研究として作成したものであり、著作権は当研究所が有する。本報告書の全部または一部の転載、複写、引用には、当研究所の許可が必要である。

概 要

本報告書は、「核燃料サイクル技術の安定性に関する検討」の第一ステップ「再処理工場におけるガラス固化設備の安定運転実現に向けた見通し」に関する技術的検討と評価を行った結果を取りまとめたものである。

我が国の核燃料サイクルの中核をなす再処理工場の安定的な操業は、核燃料サイクル技術確立し長期的に安定した原子力エネルギー利用という面から、重要な課題の一つと考えられる。

(一財) エネルギー総合工学研究所(以下、「エネ総研」という)は、日本あるいは世界のエネルギーに関連する重要課題について委員会や運営会議等を設置して議論することを主な役割の一つとし、これまで我が国のエネルギー政策、その中でも特に、原子力エネルギー政策に対する提言を行ってきた。この一環として、エネ総研は、幾度かの竣工時期の延期を経てきた六ヶ所再処理工場において、試験運転の最終段階であるガラス固化試験が本年5月末に完了したことを契機として、再処理、放射性廃棄物処理・処分に関する技術的な視点から、自主研究「核燃料サイクル技術の安定性に関する検討」を行うこととした。自主研究の全体計画は複数のステップより構成されており、第一ステップは「再処理工場におけるガラス固化設備の安定運転実現に向けた見通し」、第二ステップは「再処理工場の安定した運転に関する課題と見通し」及び第三ステップは「高レベル放射性廃棄物の処理・処分に関する課題と見通し」について技術的検討と評価を行う。(「付録1 エネ総研自主研究『核燃料サイクル技術の安定性に関する検討』の全体計画について」を参照。)

今回は、そのうち第一ステップに関するものである。

エネ総研は、自主研究を始めるに当たって、客観性を確保するために、学識経験者により構成される「核燃料サイクル技術の安定性に関する検討委員会」(以下、「委員会」という)を設置し、委員会の指導、レビューを受けつつ自主研究を実施した。また、エネ総研は委員会の事務局として技術的評価をする上で必要となる資料等を準備するとともに、議事運営等の事務作業も担当した。

第一ステップでは、最初に事務局であるエネ総研において「安定運転とは、当該設備・機器の性能を安定に維持しつつ、所定の期間を運転し所定の処理量を達成すること」と定義し、それに基づき、評価に関わる3つの検討の視点「(1) アクティブ試験で顕在化した技術課題に対する対応策の妥当性」、「(2) 操業中の諸条件の変動を想定した安定運転の見通し」、及び「(3) ガラス固化に関する技術開発」、を策定して、委員会へ付託した。また、委員会において、事業者に必要な技術資料の提供を求めるとともに、内容聴取と現地視察を行い、ガラス固化設備の安定運転実現に向けた見通しについて技術的検討と評価を実施した。

委員会では、上記（１）及び（２）の２つの検討の視点に基づいて、現行のガラス固化設備の安定運転の見通しを評価し、その結果、ガラス固化設備と運転管理体制に対してアクティブ試験の経験を踏まえた改善により、様々な対策が練られており、現時点で想定される範囲において安定運転実現に向けての準備が整っていると判断された。但し、ガラス固化設備は経験工学的要素が強く、発生することを想定していない事象が発生する可能性は否定できないが、それらに対応するための技術サポート体制が整えられており、万一そのような事象が発生したとしてもタイムリーに適切な対応が期待できるものと評価した。

以上は、現行設備の制約条件の中で判断したものであって、上記（３）の視点からは、ガラス熔融炉等の寿命や経年劣化を考慮して、今後も改善に向けた継続的な努力を期待するという意見が示された。その主な点を以下に示す。

- ・ 安定運転を達成する上で重要な役割を担う定期的な洗浄運転は、ガラス固化体量の増加に繋がるため、廃棄物減容の観点からは望ましいことではない。今後、継続的な運転技術の向上等によりその頻度や量を低減する努力を行うこと。
- ・ アクティブ試験で発生した様々な不具合事象に対する対策は、現行設備の制約を踏まえて運転管理の面から実施されたものであることを理解した上で、ガラス固化技術の高度化、すなわち新型炉の開発では、より抜本的な設備改善により、可能な限り洗浄運転を必要としないガラス熔融炉の実現等を目指すこと。

以上に示した委員会の判断を受けて、エネ総研としては、事業者である日本原燃(株)に対して、再処理工場の中で重要な設備と位置付けられるガラス固化設備の安定的な操業運転に向けて、万全の態勢を以って粛々と進めていくことを期待するものである。

目 次

1. はじめに	1
2. 検討の視点	3
3. 検討の手順と方法	5
4. 事業者から聴取した技術情報	7
4. 1 六ヶ所再処理工場について	7
4. 1. 1 六ヶ所再処理工場の採用技術	7
4. 1. 2 六ヶ所再処理工場での試験運転の経緯	8
4. 2 高レベル廃液ガラス固化施設及びガラス溶融炉の概要	10
4. 2. 1 高レベル廃液ガラス固化施設の概要	10
4. 2. 2 ガラス溶融炉の概要	11
4. 2. 3 ガラス溶融炉の運転方法の概要	12
4. 2. 4 ガラス溶融炉の運転管理	13
4. 3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要	15
4. 3. 1 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の経緯	15
4. 3. 2 アクティブ試験で経験した設備に関連する事象とその対応	16
4. 3. 3 アクティブ試験で経験したガラス溶融炉の運転に関連する事象とその対応	20
4. 3. 4 KMOC 試験による原因究明、設備及び運転方法の改善の検証	25
4. 3. 5 事前確認試験及びガラス固化試験	27
4. 3. 6 アクティブ試験結果のまとめ	32
4. 4 ガラス固化設備の操業運転における安定運転の見通しについて	37
4. 4. 1 操業運転における安定運転の評価ポイント	37
4. 4. 2 ガラス固化体の品質	38
4. 4. 3 不具合事象の発生に対する対応（運転手順の整備）	39
4. 4. 4 運転体制と不具合事象発生時の対応	40
4. 4. 5 事業者の自己評価	42
4. 5 ガラス固化技術の高度化	45
4. 5. 1 高度化概要	45
4. 5. 2 高度化の基本方針	45
4. 5. 3 新型炉の開発	47
4. 5. 4 ガラス固化技術開発施設	47
5. 安定運転の見通しに対する技術的検討と評価	48
5. 1 アクティブ試験で顕在化した技術課題に対する対応策の妥当性	48
5. 1. 1 アクティブ試験で経験した事象に対する取り組み	48
5. 1. 2 安定化対策の確認試験	52
5. 1. 3 処理能力の確認（高レベル廃液のバッファ容量）	53

5. 1. 4	処理能力の確認（ガラス固化設備の安定的な処理能力）	53
5. 1. 5	ガラス固化体品質の安定性	54
5. 2	操業中の諸条件の変動を想定した安定運転の見通し	56
5. 2. 1	不具合事象への対応	56
5. 2. 2	操業中の運転条件の変動への対応	58
5. 3	評価	59
5. 4	今後の改善への期待	60
6.	まとめ	62

付 録

- 1 (一財)エネルギー総合工学研究所 自主研究「核燃料サイクル技術の安定性に関する検討」の全体計画について
- 2 核燃料サイクルにおける再処理の位置づけ
- 3 ガラスとは何か—その性質と放射性廃液ガラス固化への応用

添付資料

1. はじめに

我が国の核燃料サイクルの中核をなす再処理工場の安定的な操業は、核燃料サイクル技術確立し長期的に安定した原子力エネルギー利用という面から、重要な課題の一つと考えられる。

(一財) エネルギー総合工学研究所(以下、「エネ総研」という)は、日本あるいは世界のエネルギーに関連する重要課題について委員会や運営会議等を設置して議論することを主な役割の一つとし、これまで我が国のエネルギー政策、その中でも特に、原子力エネルギー政策に対する提言を行ってきた。この一環として、エネ総研は、幾度かの竣工時期の延期を経てきた六ヶ所再処理工場において、試験運転の最終段階であるガラス固化試験が本年5月末に完了したことを契機として、再処理、放射性廃棄物処理・処分に關する技術的な視点から、自主研究「核燃料サイクル技術の安定性に関する検討」を行うこととした。自主研究の全体計画は複数のステップより構成されており、第一ステップは「再処理工場におけるガラス固化設備の安定運転実現に向けた見通し」、第二ステップは「再処理工場の安定した運転に関する課題と見通し」及び第三ステップは「高レベル放射性廃棄物の処理・処分に關する課題と見通し」について技術的検討と評価を行う。(「付録1 エネ総研自主研究「核燃料サイクル技術の安定性に関する検討」の全体計画について」を参照。)

今回は、そのうち第一ステップに関するものである。

エネ総研は、自主研究を始めるに当たって、客観性を確保するために、学識経験者により構成される「核燃料サイクル技術の安定性に関する検討」委員会(以下、「委員会」という)を設置し、委員会の指導、レビューを受けつつ自主研究を実施した。なお、エネ総研は委員会の事務局として技術的評価をする上で必要となる資料等を準備するとともに、議事運営等の事務作業も担当した。

第一ステップでは、六ヶ所再処理工場の操業開始に当たって、種々のトラブルを経験して工程遅延の要因の一つになっているガラス固化設備に着目し、アクティブ試験の状況について事業者(日本原燃(株))より技術資料の提供を求めるとともに、内容聴取と現地視察を行い、ガラス固化設備の安定運転実現に向けた見通しについて技術的検討と評価を実施した。

本報告書は、以上に述べた「核燃料サイクル技術の安定性に関する検討」の第一ステップに関する技術的検討と評価を行った結果を取りまとめたものである。

本報告書の構成は、以下のとおりである。

第1章である本章では、エネ総研として実施する自主研究の趣旨及び本報告の位置づけを示している。

第2章では、事務局であるエネ総研が委員会での検討を開始するに当たり策定した検討の視点を、第3章では本委員会を含めた自主研究における検討の手順と方法を示している。

第4章では、委員会での検討に当たって事業者から聴取した技術情報の概要を、第5章では、それらを踏まえて委員会が行った技術的検討と評価を示し、第6章では、全体のまとめを示している。なお、添付資料においては、知財保護の観点から数字を削除した箇所がある。

また、平成25年12月を目途に使用済燃料再処理施設の新規制基準が施行されることが計画されており、ガラス固化設備に対する新規制基準による適合性評価については、別の場で取り扱われるものであることから、今回の検討範囲には入っていない。さらに、ガラス固化設備の品質保証体制については、再処理工場全体の枠組みで検討すべきものであることから、第二ステップでの評価対象とした。

2. 検討の視点

第一ステップでは、現行のガラス固化設備を対象として再処理工場の操業開始後の安定運転実現に向けた見通し（以下、「安定運転の見通し」という）に着目した。事務局であるエネ総研において「安定運転とは、当該設備・機器の性能を安定に維持^(*)しつつ、所定の期間^(*)を運転し所定の処理量^(*)を達成すること」と定義し、それに基づき、評価に関わる3つの検討の視点を策定し、これを委員会へ付託した。以下に、検討の視点を示す。

（*）「性能を安定に維持」とは、当該設備・機器は消耗品であるとの認識の下にその設計寿命期間中に安定な性能を維持すること、「所定の期間」とは1年程度～設計寿命、「所定の処理量」とはガラス溶融炉の処理廃液条件に基づいて決められた年間当たりの使用済燃料の処理量を意味する。

（1）アクティブ試験で顕在化した技術課題に対する対応策の妥当性

＜検討の視点＞

ガラス固化設備のアクティブ試験において、どのような技術課題に遭遇し、それをどのように解決してきたかという取り組みと得られた成果を整理し、操業運転開始後のガラス固化設備の安定運転の見通しが得られているか、という視点から検討する。

＜検討のポイント＞

- ・アクティブ試験で経験した事象に対する取り組み：
アクティブ試験で経験した事象に対する原因究明と対策検討を行う上で、課題の特定が妥当であるか、課題解決の具体的方法と課題解決に向けたプロセスは妥当であるか、等を検討
- ・安定化対策の確認試験：
アクティブ試験で経験した事象に対して講じた対策の効果を試験運転により確認し、所定の試験結果が得られているか等の対策の有効性と妥当性を検討

（2）操業中の諸条件の変動を想定した安定運転の見通し

＜検討の視点＞

操業運転において、発生する様々な不具合事象や想定される運転条件の変動へ適切に対応できるか、という視点から検討する。

＜検討のポイント＞

- ・不具合事象への対応：
アクティブ試験において発生した事象から得られた運転経験の蓄積を基にして、運転手順や運転マニュアル、教育・訓練及びトラブル対応マニュアル等が整備されているか、アクティブ試験等で経験していないが発生が想定される事象への対応能力があるか、等を検討
- ・操業中の運転条件の変動への対応：
処理する使用済燃料の燃焼度が高くなる等、操業中に想定される運転範囲の把握とその対応及び当該設備・機器の経年劣化への対応の見通しが得られているかを検討

(3) ガラス固化に関する技術開発

<検討の視点>

現行のガラス固化設備の安定運転に関する見通しという観点からは付加的な事項であるが、これまで経験してきた事象が将来発生することも想定して、それらの発生確率と影響の大きさを低減するために、さらなる改善に向けた努力が継続的にかつ的確になされているか、という視点から検討する。

<検討のポイント>

- ・技術開発状況の確認：

現行のガラス固化設備で確認された課題に対して、より良い対応方法を導き出すという観点で行われている技術開発について、その状況を確認

3. 検討の手順と方法

「核燃料サイクル技術の安定性に関する検討」の第一ステップに関する検討の手順と方法を以下に示す。

① 委員会の設置：

エネ総研は、自主研究を始めるに当たって、客観性を確保するために、学識経験者により構成される委員会を設置し、委員会の指導、レビューを受けつつ自主研究を実施した。委員会の構成を、表 3-1 に示す。また、委員会の開催実績を、表 3-2 に示す。

② 評価に関わる検討の視点の策定：

第 2 章に示したとおり、事務局であるエネ総研は安定運転を定義するとともに評価に関わる検討の視点を策定し、委員会へ付託した。

③ 事業者からの資料提供、聴取と現地視察：

委員会は、事業者から②に必要となる技術資料の提供を求めるとともに、内容聴取を行った。また、ガラス固化施設の現状に対する理解をさらに深めるため、委員会の開催に合わせ、六ヶ所再処理工場の視察を行った。

④ 検討と評価：

委員会は、事務局から提示された検討の視点に沿って、事業者からの資料提供と内容聴取を踏まえ、「再処理工場におけるガラス固化設備の安定運転実現に向けた見通し」に対する技術的検討と評価を行った。

⑤ 報告書のとりまとめ：

委員会における技術的検討と評価の結果について、報告書にとりまとめた。また、核燃料サイクル技術の重要性とその技術の現状の広い理解促進に役立てることを目的に、本報告書を公表することとした。

表 3-1 核燃料サイクル技術の安定性に関する検討委員会の構成

<p>〔主査〕寺井 隆幸 東京大学 工学系研究科 総合研究機構 機構長 教授 原子力国際専攻兼任、工学部システム創成学科兼任</p>	
<p>〔委員〕出光 一哉 九州大学 工学研究院 エネルギー量子工学部門 エネルギー物質科学 教授</p>	
<p>〔委員〕織田 健嗣 元 旭硝子株式会社 ガラスカンパニー日本アジア事業本部 ソーラー産業事業部 マネージャー</p>	
<p>〔委員〕河田 東海夫 元 原子力発電環境整備機構（NUMO）理事</p>	
<p>〔委員〕作花 済夫 京都大学名誉教授</p>	
<p>〔委員〕湊 和生 日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター 原子力科学研究所 副所長</p>	
<p>〔委員〕宮野 廣 法政大学 デザイン工学研究科 客員教授</p>	
<p>事務局：（一財）エネルギー総合工学研究所</p>	

表 3-2 核燃料サイクル技術の安定性に関する検討委員会の開催実績

委員会	内 容	備 考
第 1 回委員会 平成 25 年 6 月 17 日（月） 13：30～16:45 （於：エネ総研）	1. 趣旨、委員会開催予定説明 2. 評価の視点等について 3. 六ヶ所再処理工場全体の設計と特徴、試運転の経緯 4. ガラス固化設備の設計と特徴、試運転の経緯 5. その他	
第 2 回委員会 平成 25 年 6 月 28 日（金） 13：30～16:30 （於：エネ総研）	1. ガラス固化設備 アクティブ試験について 2. ガラス固化設備 操業後の安定運転について 3. ガラス固化設備 安定運転に関する評価、提言について 4. その他	
第 3 回委員会 平成 25 年 7 月 10 日（水） 13：00～16：20 （於：エネ総研）	1. 前回委員会における質問等への回答について 2. ガラス固化技術の高度化について 3. ガラス固化設備 安定運転に関する評価、提言について 4. その他	
第 4 回委員会 平成 25 年 7 月 24 日（水） 9：10～12：00 （於：日本原燃・六ヶ所）	1. 前回委員会における質問等への回答について 2. 第一ステップ報告書について	日本原燃 六ヶ所再 処理工場 視察
第 5 回委員会 平成 25 年 8 月 22 日（木） 13：30～16：30 （於：エネ総研）	1. 前回委員会における質問等への回答について 2. 第一ステップ報告書について	

4. 事業者から聴取した技術情報

本検討に当たり、事業者より以下の項目について聴取した。

- ①再処理施設全体の設計と特徴、試験運転の経緯（添付資料－１参照）
- ②ガラス固化設備について（添付資料－２参照）
- ③ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要（添付資料－３参照）
- ④アクティブ試験に発生したガラス固化設備関連のトラブル事象（添付資料－４参照）
- ⑤ガラス固化設備における操業後の安定運転の見通しについて（添付資料－５参照）
- ⑥ガラス固化技術の高度化について（添付資料－６参照）
- ⑦ガラス熔融炉解析コードの開発状況について（添付資料－７参照）

以下に技術情報の概要を示す。詳細は、添付資料を参照願いたい。

4. 1 六ヶ所再処理工場について

4. 1. 1 六ヶ所再処理工場の採用技術

六ヶ所再処理工場は、実績と安全性を考慮し、実用可能な最良技術を国内外から選び構成した。

- ・フランスより技術導入：再処理工程の主要部分（主工程）であるせん断、溶解、抽出等
- ・イギリスより技術導入：放射性廃液の減圧蒸発処理技術
- ・ドイツより技術導入：溶解オフガス中のヨウ素除去技術
- ・国内技術（日本原子力研究開発機構）：周辺工程のウラン脱硝、ウラン・プルトニウム混合脱硝、高レベル放射性廃液のガラス固化

詳細は、図4.1-1中に示されている。導入元の区別は凡例に示したとおりである。

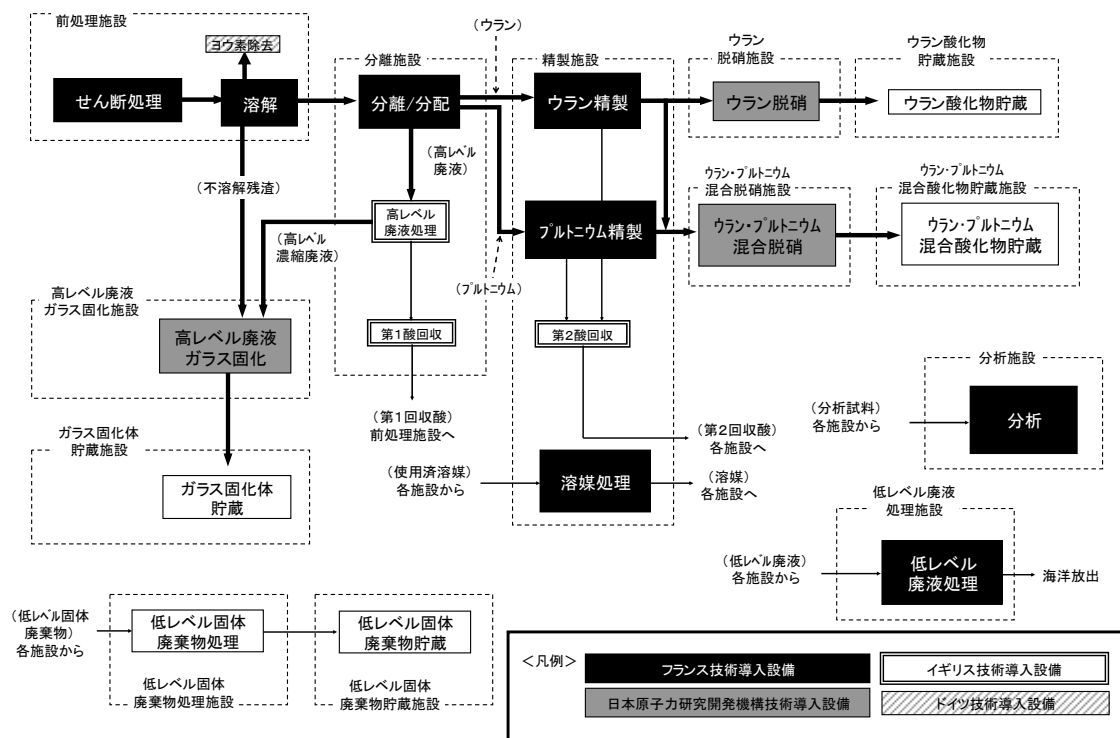


図4.1-1 六ヶ所再処理工場の採用技術

（「添付資料－１ 再処理施設全体の設計と特徴、試験運転の経緯」より）

4. 1. 2 六ヶ所再処理工場での試験運転の経緯

六ヶ所再処理工場の試験運転の経緯を、図4.1-2に示す。配管等の施工状態を確認するための通水作動試験は、2001年4月～2004年9月に行った。試験運転は、化学試験、ウラン試験、及びアクティブ試験からなる。化学試験は2002年11月～2005年12月に、ウラン試験は2004年12月～2006年1月に行った。使用済燃料を用いた試験運転の最終段階となるアクティブ試験は、2006年3月に開始した。

アクティブ試験の経緯を図4.1-3に示す。アクティブ試験では、実際の使用済燃料を用い、環境への放出放射能量、核分裂生成物の分離性能、ウランとプルトニウムの分離性能、除染性能、放射線のしゃへい機能等の確認を行うことを目的としている。アクティブ試験は、第1から第5の5つのステップで段階的に試験を行ってきており、ガラス固化設備のアクティブ試験は、試験に必要な高レベル廃液の貯留後、第4ステップから開始した。アクティブ試験において、ガラス固化設備以外の設備については、工程に影響する事象の発生はあったものの、試験実施に直接関係するものではなく、アクティブ試験として計画した試験を全て終了し、試験の判断基準を満足する結果が得られた。

アクティブ試験開始以降、竣工までの工程の見直しを10回行っているが、試験実施に直接関係する工程の見直しは、ガラス固化設備の試験に関連するもののみである（図4.1-4参照）。

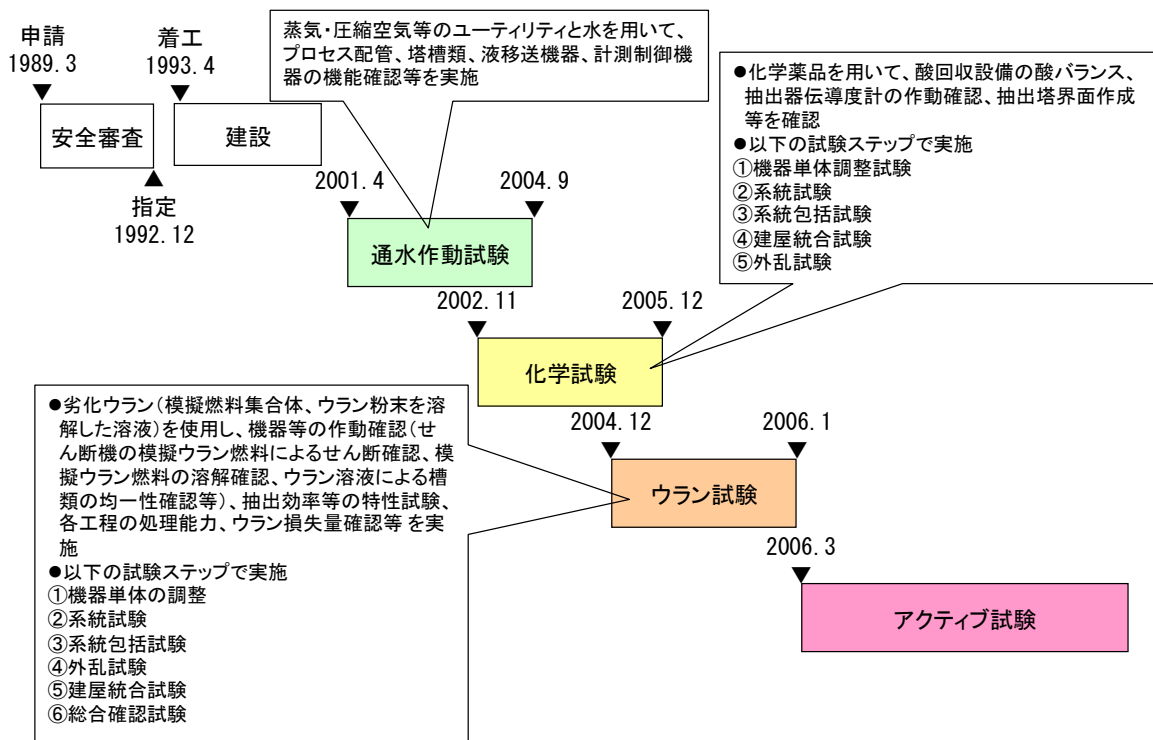


図4.1-2 六ヶ所再処理工場における試験運転の経緯

（「添付資料－1 再処理施設全体の設計と特徴、試験運転の経緯」より）

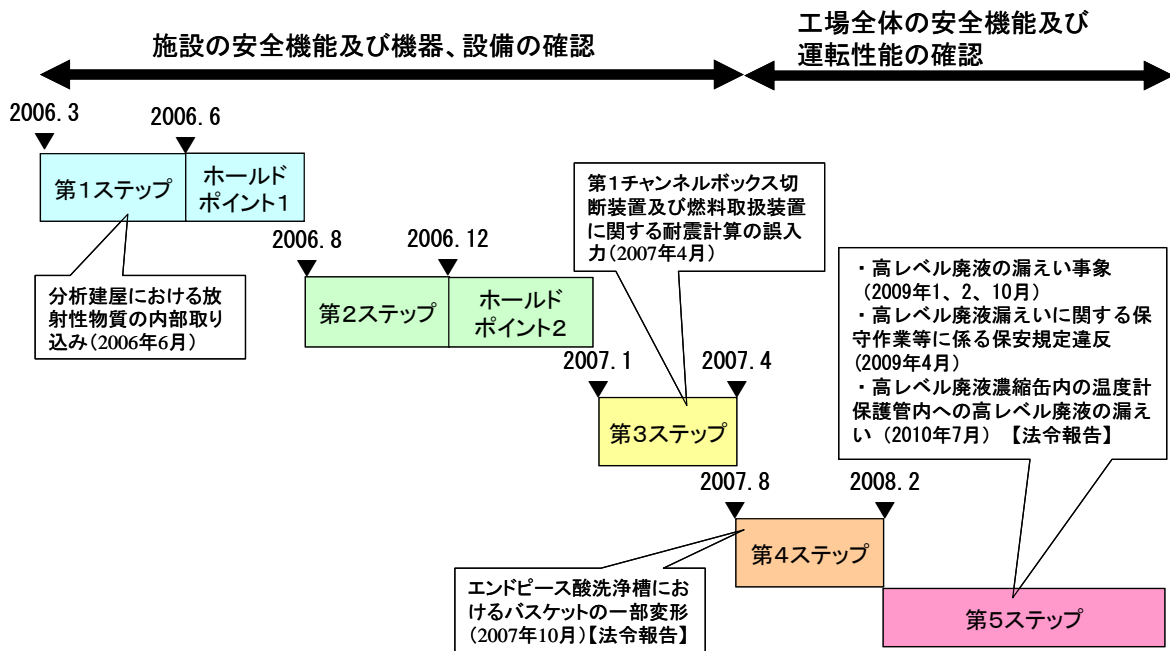


図4. 1-3 六ヶ所再処理工場におけるアクティブ試験の経緯
(「添付資料－1 再処理施設全体の設計と特徴、試験運転の経緯」より)

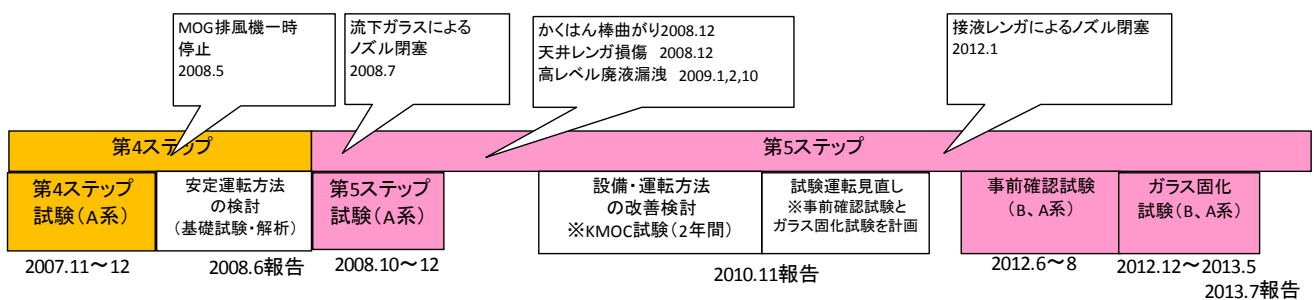


図4. 1-4 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の経緯
(「添付資料－3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」を元に作成)

4. 2. 2 ガラス溶融炉の概要

高レベル廃液ガラス固化施設のガラス溶融炉は、高レベル廃液をガラス原料（ビーズ形状）とともにガラス溶融炉に連続供給し、直接通電加熱（ジュール加熱）によって1200℃付近で溶融した後、間欠的に固化体容器に抜き出すことによりガラス固化体を製造する装置である。

ガラス溶融炉の鳥瞰図及び構成イメージを図4. 2-3と図4. 2-4に示す。

ガラス溶融炉は、耐火物を外側から金属製のケーシングで囲った構造であり、ガラスを溶融し保持するための溶融槽には、耐食性に優れたアルミナ・クロミア電鍍レンガが採用されている。

溶融槽には、対向する壁面に主電極及び補助電極が設置されており、耐食性に優れたニッケル・クロム・鉄を主成分としたインコネルが採用されている。

ガラス溶融炉底部（以下、「炉底部」という）には、溶融したガラスをガラス固化体容器に注入するために、溶融ガラス抜き出し用の流下ノズルが設置されている。流下ノズルを高周波加熱・空気冷却することで溶融ガラスの抜き出し、停止を行うことができる。

溶融槽のガラス保有量は、最大約4,800kg、ガラス溶融炉への高レベル廃液供給速度は最大70L/h（一日当たりの最大再処理能力 4.8トンUに相当）であり、1日当たり2～3本のガラス固化体を製造する能力を有する。また、ガラス溶融炉の設計寿命は、高温の溶融ガラスによるレンガや電極の腐食等を考慮し、5年と設定している。

なお、六ヶ所再処理工場のガラス溶融炉は、先行施設である日本原子力研究開発機構（以下、JAEAという）の東海ガラス固化技術開発施設（以下、「TVF」という）の溶融炉を大型化（5倍のスケールアップ）したものである。

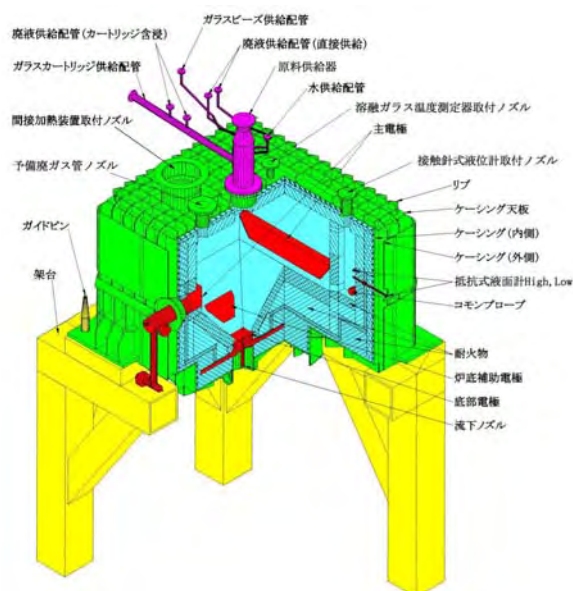


図4. 2-3 ガラス溶融炉の鳥瞰図

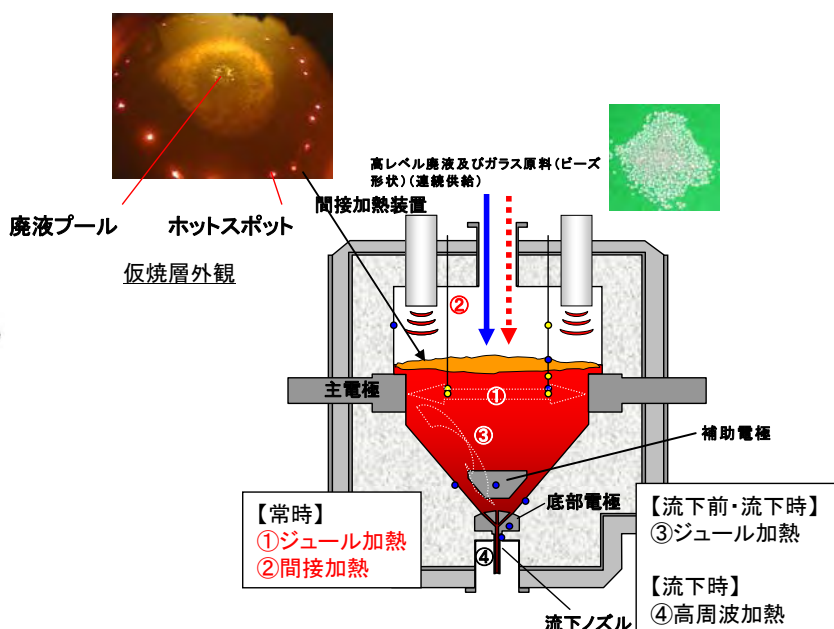


図4. 2-4 ガラス溶融炉の構成イメージ図

（「添付資料－2 ガラス固化設備について」より）

4. 2. 3 ガラス溶融炉の運転方法の概要

(1) ガラス固化設備の運転計画

ガラス固化設備の運転は、ガラス溶融炉の立上げ（熱上げ）、廃液供給運転、停止（ドレンアウト）の流れで行い、年間の廃液供給運転日数は250日間程度を見込んでいる。

また、廃液供給運転以外のガラス溶融炉の立上げ・停止、保守・点検等は、115日間程度の期間である。

立上げ (熱上げ)	廃液供給運転	停止 (ドレンアウト)	保守・点検等	立上げ (熱上げ)	廃液供給運転	停止 (ドレンアウト)
--------------	--------	----------------	--------	--------------	--------	----------------

(2) ガラス溶融炉の運転方法

ガラス溶融炉では、上部から高レベル廃液とガラスビーズを連続的に供給し、主電極間通電によるジュール加熱と間接加熱装置による外部加熱により、1100～1200℃程度で溶融する（図4. 2-4参照）。

高レベル廃液には、白金族元素（Ru、Rh、Pd）が含まれており、この白金族元素は、①ガラスへの溶解性が悪い（図4. 2-5参照）、②密度が大きく沈降しやすい、③濃度増加により溶融ガラスの粘性が増加する、④濃度増加により溶融ガラスの電気抵抗が低下する、等の特徴を有しており、通電により加熱を行うガラス溶融炉では、この白金族元素の管理が重要となる。このため、「(1) ガラス固化設備の運転計画」で示した廃液供給運転におけるガラス溶融炉の運転は、以下のステップを繰り返して行うこととしている（図4. 2-6参照）。また、以下の①～④のステップの1サイクル分を1バッチと定義している。

- ①炉底低温運転：ガラス溶融炉上部（以下、「炉上部」という）のガラスは高温状態とし、炉底部ガラスは補助電極等に冷却空気を流して炉上部ガラスよりも低い温度に保つ。それによって、白金族元素の炉底部への沈降・堆積を防止する。
- ②炉底加熱：溶融ガラスを流下するための準備として、炉底部ガラスの温度を流下可能な温度まで上昇させる。
- ③流下：炉底部ガラスの温度が流下可能な温度に達した後、高周波加熱コイルにより流下ノズルを加熱し、溶融ガラスをガラス固化体容器に流し込む。
- ④炉底冷却（流下終了後）：流下終了後、①の状態とするため、炉底部を冷却空気により強制的に冷却を行い、炉底部ガラスの温度を下降させる。

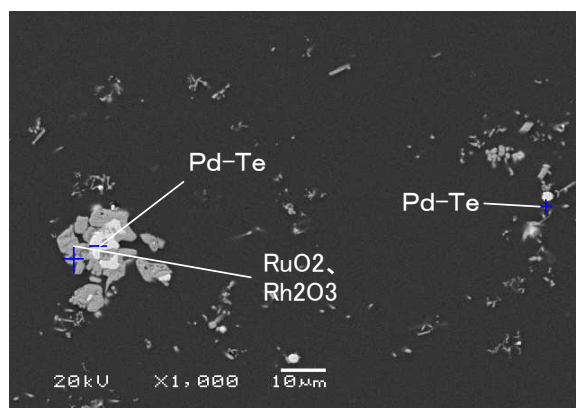


図4. 2-5 ガラス中の白金族元素の存在状態（例）
（「添付資料－2 ガラス固化設備について」より）

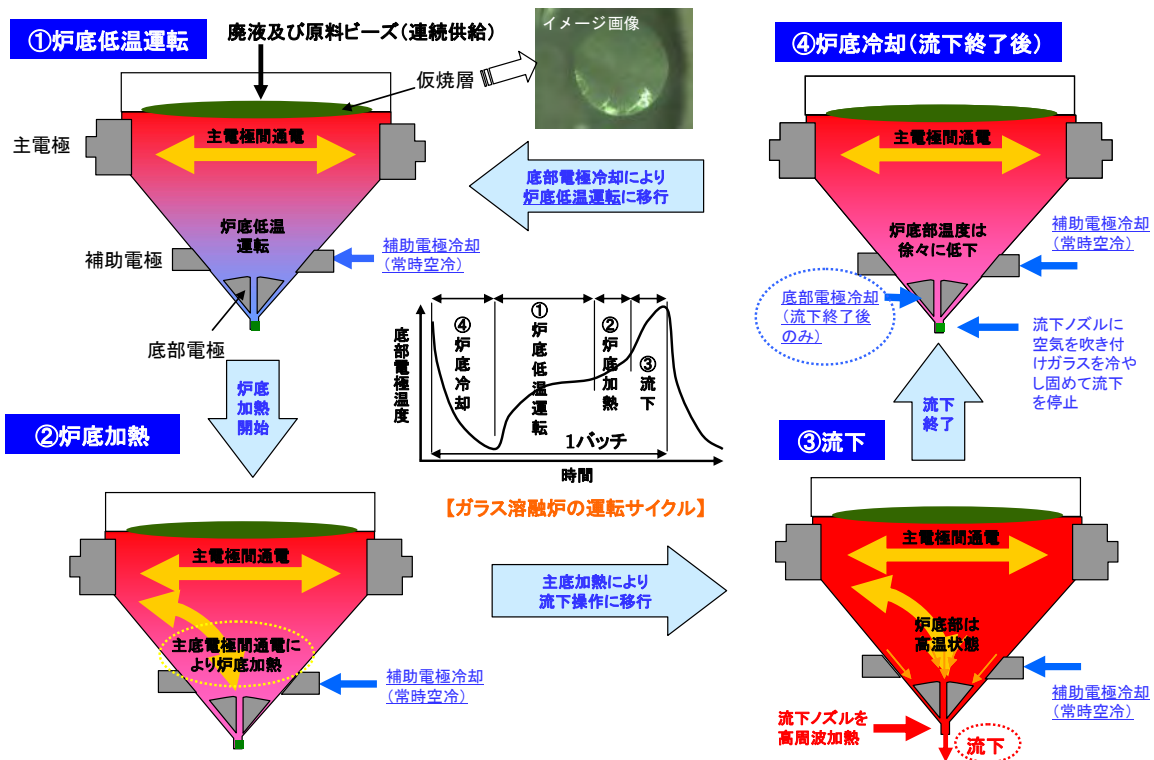


図 4.2-6 ガラス溶融炉の運転方法（「添付資料－2 ガラス固化設備について」より）

4. 2. 4 ガラス溶融炉の運転管理

先行施設の経験から、ガラス溶融炉の運転において、炉内温度管理と白金族管理が重要である。以下に、その管理方法の概要を示す。

（１）炉内温度管理

炉上部温度管理は、ガラス温度と気相温度を目標範囲内に制御するため、それら温度を監視しながら、主電極間電力と間接加熱電力によって調整する(図4.2-7参照)。

炉底部温度管理は、炉底温度①を管理範囲内に制御するため、底部電極及び補助電極冷却空気流量で調整する(図4.2-7参照)。

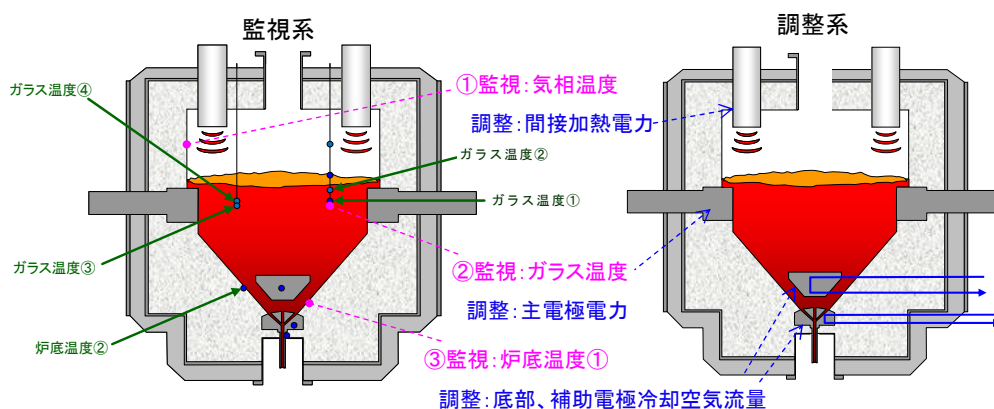


図4.2-7 ガラス溶融炉の運転制御項目

（「添付資料－2 ガラス固化設備について」より）

(2) 白金族管理

第4.2.3項で示したとおり、白金族元素は、ガラス溶融炉内で沈降・堆積することで、溶融ガラスの粘性上昇や電気抵抗を低下させ、流下性低下や炉底加熱性低下に繋がることが確認されている。このため、白金族管理としては、「炉底低温運転」によって、白金族管理の沈降・堆積を抑制するとともに、炉底加熱性や流下性を監視している（図4.2-8参照）。

炉底加熱性や流下性の監視により、白金族元素が炉底部に沈降、堆積した場合は、洗浄運転と攪拌運転等を行い、炉内状態を回復する。これらを回復運転と定義している。

洗浄運転は、白金族元素を含んだ高レベル廃液の供給を停止し、白金族元素を含まない模擬廃液等を供給し、溶融ガラスをガラス固化体容器に抜き出すことで、ガラス溶融炉内の白金族元素保有量を低減するものである。

攪拌運転は、直棒等を用いてガラス溶融炉内の白金族元素を強制的にガラス固化体容器に抜き出すことである。直棒を用いた攪拌運転の概要を図4.2-9に示す。

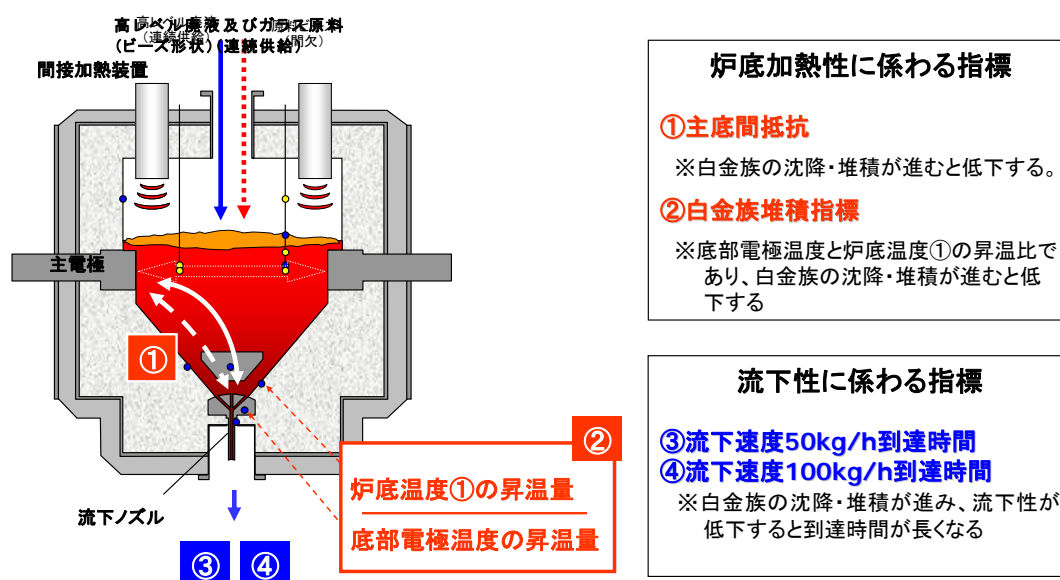


図4.2-8 白金族元素の沈降・堆積に係る判断指標
（「添付資料－2 ガラス固化設備について」より）

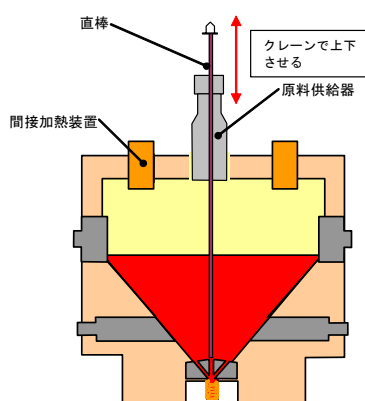


図4.2-9 直棒を用いた攪拌運転の概要（「添付資料－2 ガラス固化設備について」より）

4. 3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要

第4. 1. 2項に示したようにガラス固化設備におけるアクティブ試験は、アクティブ試験第4ステップの2007年11月から開始したが、試験の判断基準を満足する結果が得られた2013年5月までに5年程度の期間を要した。

本節では、「4. 3. 1 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の経緯」として、2007年11月にガラス溶融炉のアクティブ試験を開始してから試験の判断基準を満足する結果が得られた2013年5月までのガラス固化設備におけるアクティブ試験の経緯を示すとともに、ガラス固化設備のアクティブ試験が長期化した一因である設備に関連する事象に関する内容、原因及び対策等を「4. 3. 2 アクティブ試験で経験した設備に関連する事象とその対応」として、また、アクティブ試験が長期化したもうひとつの原因であるガラス溶融炉の安定運転ができなかったことに関する運転状況、原因及び対策等を「4. 3. 3 アクティブ試験で経験したガラス溶融炉の運転に関連する事象とその対応」として示す。

4. 3. 1 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の経緯

ガラス固化設備におけるアクティブ試験の経緯を図4. 3-1に示す。

ガラス固化設備のアクティブ試験の間、天井レンガ落下等の設備トラブル、白金族堆積による流下不調等の運転課題が発生し、これらに対し、その都度、原因究明と対策を図った。

第5ステップにおいては、モックアップ試験装置(KMOC)を用いた模擬廃液によるコールド試験を2年間実施し、ガラス溶融炉の設備・運転方法の改善を図り、これを受けて、事前確認試験、ガラス固化試験を実施した。

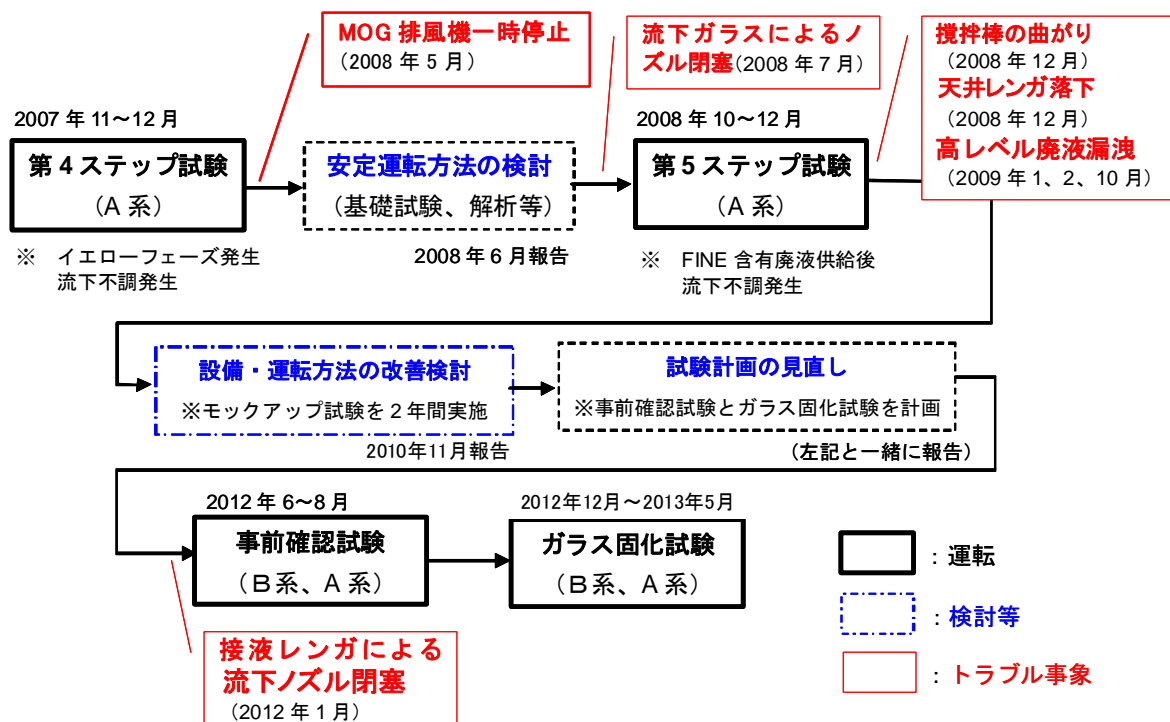
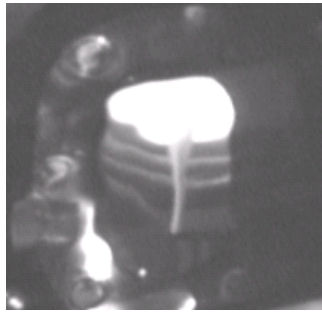


図4. 3-1 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の経緯
(「添付資料－3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」より)

事象⑨ 接液レンガによる流下ノズル閉塞

-16-



(変更前：流下監視用鏡で間接的に監視) (変更後：I T V直視)

図4.3-3 流下監視方法の改善

(「添付資料－3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」より)

(2) 天井レンガ落下 (A系列) (事象⑥)

a. 発生事象

- ・2008年12月に炉内観察を実施したところ、天井レンガの一部が損傷し落下していることを確認した(図4.3-4参照)。
- ・2010年1月に異物除去装置を用いて、流下ノズル下部より遠隔でコアドリルを挿入し、底部電極上部に落下したレンガが存在することを確認した。

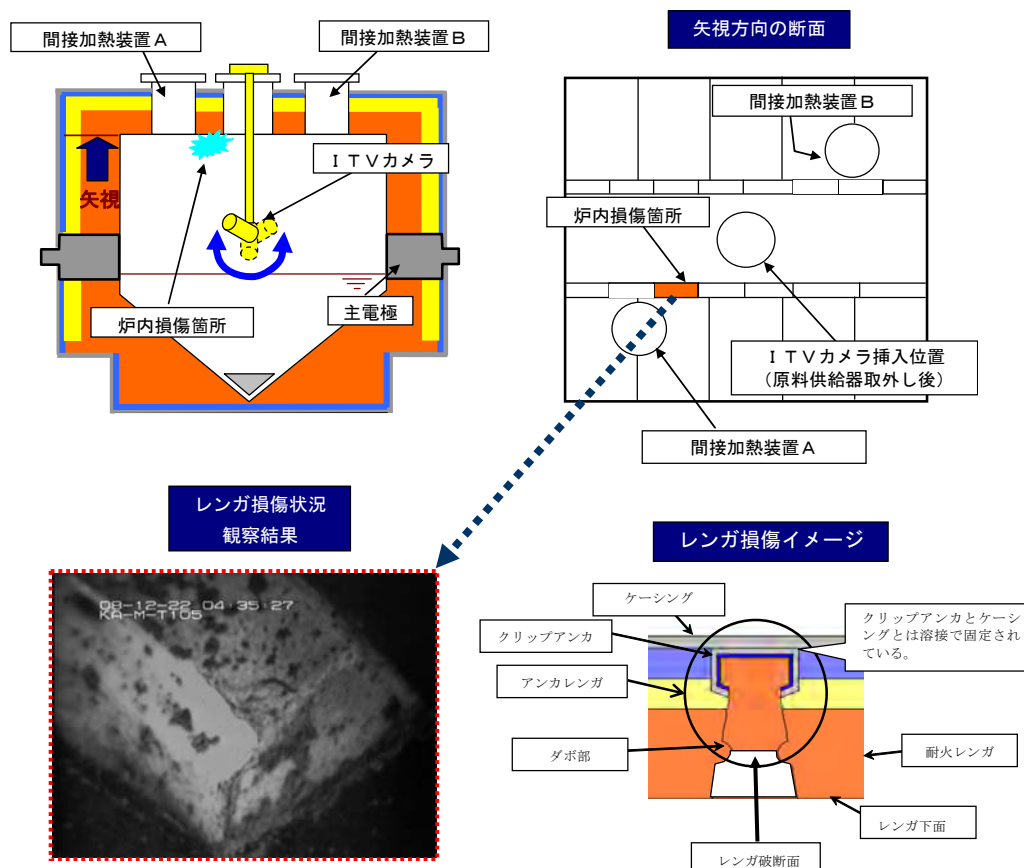


図4.3-4 天井レンガ落下 (A系列) の状況

(「添付資料－3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」より)

b. 要因分析と再発防止策

- ・ 要因分析と再発防止策を以下に示す。

要因分析	再発防止策及びその効果
<ul style="list-style-type: none"> ・ 過去に実施した間接加熱装置の温度降下が急激であったため、その際に発生した引張応力が大きく（図4.3-5参照）、アンカレンガに亀裂が発生し、最終的に損傷し落下に至ったと推定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 天井レンガの落下防止に対する対策として、間接加熱装置を停止する際のヒータ温度降下速度を管理する（効果）防止策実施以後、同様な天井レンガの落下事象は発生していない ・ 熔融ガラスの流下性低下が落下したレンガによる影響であると推定された場合には、レンガの回収作業を行い、ドレンアウトにより炉内のガラスを抜き出し、炉内観察を実施する ・ 設備更新時には、ガラス熔融炉の設計及び製作に知見を反映する（天井レンガにせり構造を採用し落下を防止）

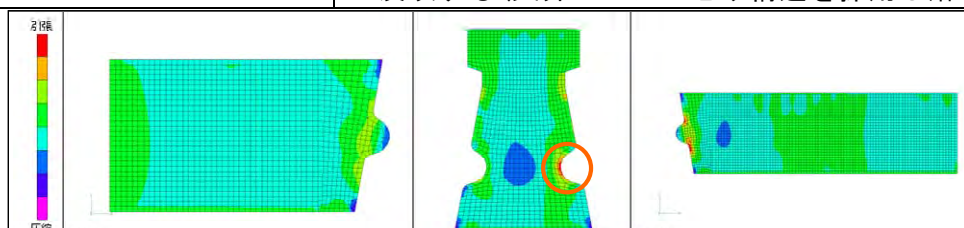


図4.3-5 間接加熱装置の温度効果に伴う発生応力の評価（解析）
（「添付資料－3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」より）

（3）接液レンガによる流下ノズル閉塞（B系列） （事象⑨）

a. 発生事象

- ・ 2012年1月にB系列事前確認試験に先立ち、作動確認を開始したが、1バッチ目で流下性低下事象が発生した。回復運転を実施したが回復に至らなかったため、ガラス熔融炉を停止した。
- ・ その後、2012年2月に異物除去装置を用いて流下ノズル内部の流路を確保するとともに、回収した異物の分析を実施した。その結果、接液レンガによって流下ノズルが閉塞していることを確認した（図4.3-6参照）。

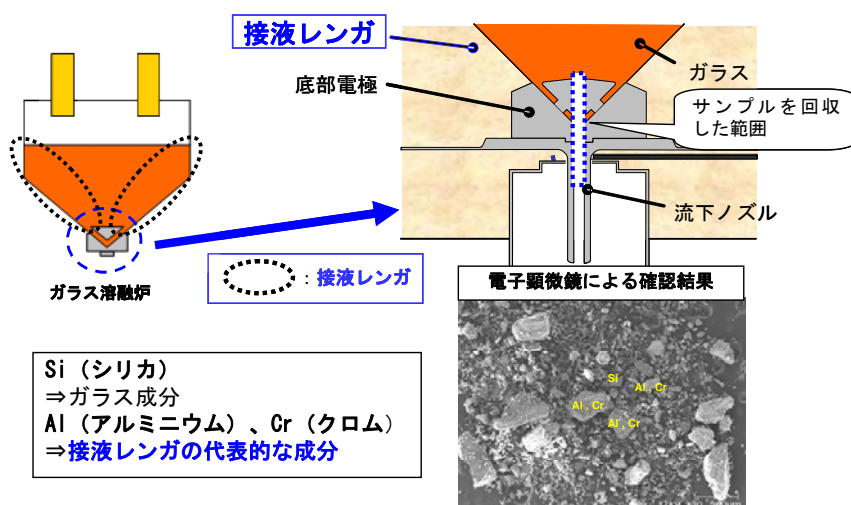


図4.3-6 接液レンガによる流下ノズル閉塞
（「添付資料－3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」より）

b. 要因分析と再発防止策

- ・ 要因分析と再発防止策を以下に示す。

要因分析	再発防止策及びその効果
<ul style="list-style-type: none"> ・ B系列のアクティブ試験中の運転履歴等を踏まえると、以下の要因で溶融炉停止・立上げの際に発生したレンガ小片が炉底部に溜まった状態で作動確認を行ったためと推定 ◇ 第4、第5ステップのA系列運転時に、B系列は長期保持運転（3.5ヶ月間）を行っていたこと ◇ ガラスを保持した状態でガラス溶融炉の停止・立上げを2回実施していること ◇ その間に1回しか流下を行っていないこと 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ガラス溶融炉の立上げ・停止において温度変化を緩やかにする運転とし、接液レンガの欠けが発生する可能性が高い運転は避ける
	<ul style="list-style-type: none"> ・ 万が一、流下性が低下した場合には、改良型直棒を用いて回復操作を実施する <div data-bbox="817 510 1257 636" data-label="Image"> </div> <p>(効果) 流下性の低下が確認された際に改良型の直棒を用いた回復操作を行い、流下性が回復することを確認した</p>
	<ul style="list-style-type: none"> ・ ドレンアウトを実施した際には炉内観察を行い、接液レンガの割れや欠けの進展状況を確認する ・ 立上げ後の1、2バッチの流下状況を確認し、異物等の発生状況を把握する

(「添付資料－3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」を元に作成)

その他のアクティブ試験で経験した、ガラス固化廃ガス処理設備の排風機一時停止(2008年5月)や高レベル廃液漏えい(2009年1、2、10月)事象については、要因分析を行い、必要な再発防止策を講じている。詳細は、「添付資料－4 アクティブ試験に発生したガラス固化設備関連のトラブル事象」参照。

4. 3. 3 アクティブ試験で経験したガラス溶融炉の運転に関連する事象とその対応

(1) 第4ステップ

a. 運転状況

第4ステップにおけるA系列での運転では、以下の事象が確認された。(図4.3-7、図4.3-8 参照)

- ・ 仮焼層形成が不十分・不安定なため、ガラス温度等が安定しない。(事象①)
- ・ 白金族元素の沈降・堆積の影響で偏流が発生(60 バッチ中 5 バッチ)し、試験が進むにつれて、炉底加熱性や流下性が低下した(事象②)。
- ・ 初期のアクティブ試験の多くのバッチ(60 バッチ中 35 バッチ)で YP が発生した。(事象③)

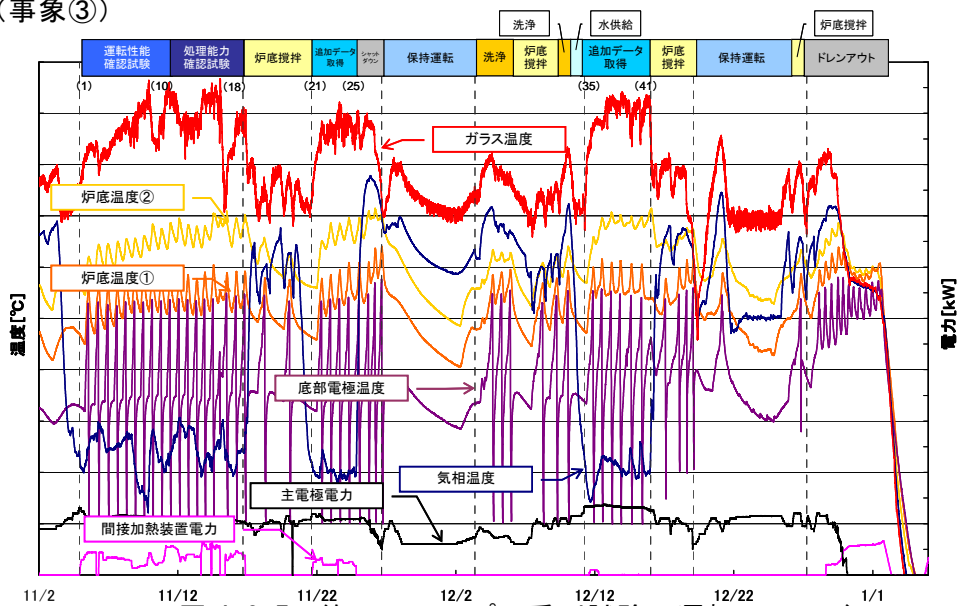


図 4.3-7 第4ステップA系列試験の運転トレンド

(「添付資料-3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」より)

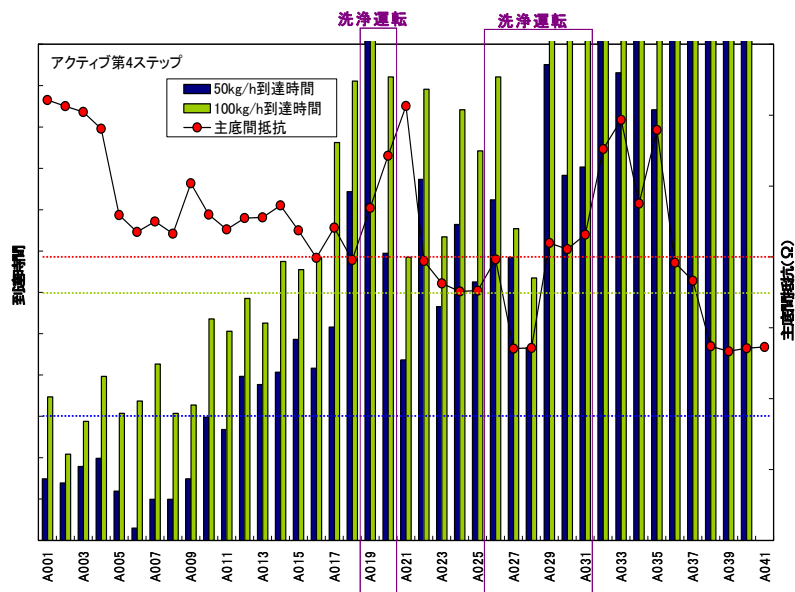


図 4.3-8 第4ステップA系列試験の白金族管理に係る指標

(「添付資料-3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」より)

b. 要因分析及び対策検討

a. に示した事象に対する推定原因と対策を表 4.3-1 に示す。

なお、これら結果は、旧原子力安全・保安院（以下、「保安院」という）に「再処理施設高レベル廃液ガラス固化設備の安定運転条件検討結果報告(2008年6月11日)（以下、「安定運転報告書」という）」として提出した。

表 4.3-1 第4ステップA系列運転の発生事象に対する推定原因とその対策
（「添付資料-3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」を元に作成）

事象① 仮焼層形成が不十分・不安定なため、ガラス温度等が安定しない	
推定原因	対策
・ 廃液中に含まれる硫黄、リン等の微量成分の影響によって、仮焼層が形成されにくい	・ 調整液（模擬廃液）を添加し、廃液濃度や仮焼層形成を不安定にする成分の濃度を調整する
・ 廃液中の廃棄物濃度が低いため、仮焼層が形成されにくい	
・ 崩壊熱により仮焼層内の昇温性が向上し、仮焼層が形成されにくい	
・ 電力投入バランス（主電極と間接加熱）が悪く、仮焼層が安定しない	・ 新たに熱バランス計算プログラムを作成し、主電極電力と間接加熱電力の電力バランスの調整を行う
事象② 事象①の影響により白金族元素が炉底部に沈降、堆積した	
推定原因	対策
・ 炉底部のガラス流下性と白金族堆積の改善措置が不十分な状態で廃液供給を実施したため、白金族元素堆積が促進された	・ 流下性や炉底加熱性に係る指標等を追加した「回復運転への移行判断フロー」及び回復運転方法を記載した「回復運転フロー」を用いた運転を行う
・ 白金族元素を炉内に保持したまま、炉底高温運転を長時間行ったため、白金族元素の沈降が促進された	・ 設定時間を超えた場合の措置等を定めた廃液供給停止が必要な事象発生時の「保持運転フロー」を用いた運転を行う
・ 溶接機故障により、白金族元素を炉内に長時間保持したため、白金族元素の沈降が促進された	
・ 保持運転によって、仮焼層の溶込みによって、白金族元素の沈降量が増加した	・ 事象①の対策により、溶融ガラス温度を一定に保つ
・ 溶融ガラス温度が変動し、白金族元素の沈降速度が変動し、炉内の白金族バランスが崩れた	
事象③ 初期のアクティブ試験の多くのバッチでYPが発生した	
推定原因	対策
・ 廃液中に含まれるMO等YP成分濃度が高いため、YPを生成した	・ 調整液（模擬廃液）を添加し、YP成分濃度を調整する
・ 仮焼層の形成が不安定な状態が影響し、YPが生成した	・ 事象①の対策により、仮焼層形成を安定させる

事象②の対策として整備した「回復運転への移行判断フロー」、「回復運転フロー」を図4.3-9、図4.3-10に示す。

※「回復運転への移行判断フロー」では、白金族元素がガラス溶融炉底部に沈降・堆積した兆候を把握するための指標（流下性、白金族元素堆積指標）に洗浄運転に移行する基準を設定し、この基準に基づき洗浄運転への移行判断を行うフローを示す。

※「回復運転フロー」では、回復運転の方法である洗浄運転と直棒等による白金族元素の抜き出し操作等の実施フローを示す。

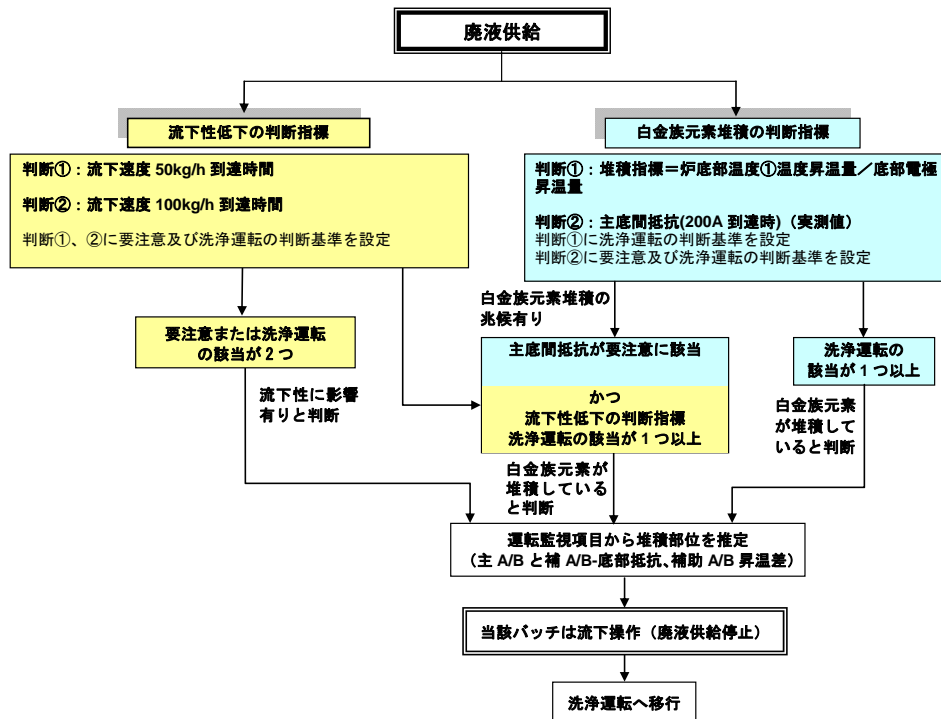


図4.3-9 回復運転への移行判断フロー

(「添付資料-3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」より)

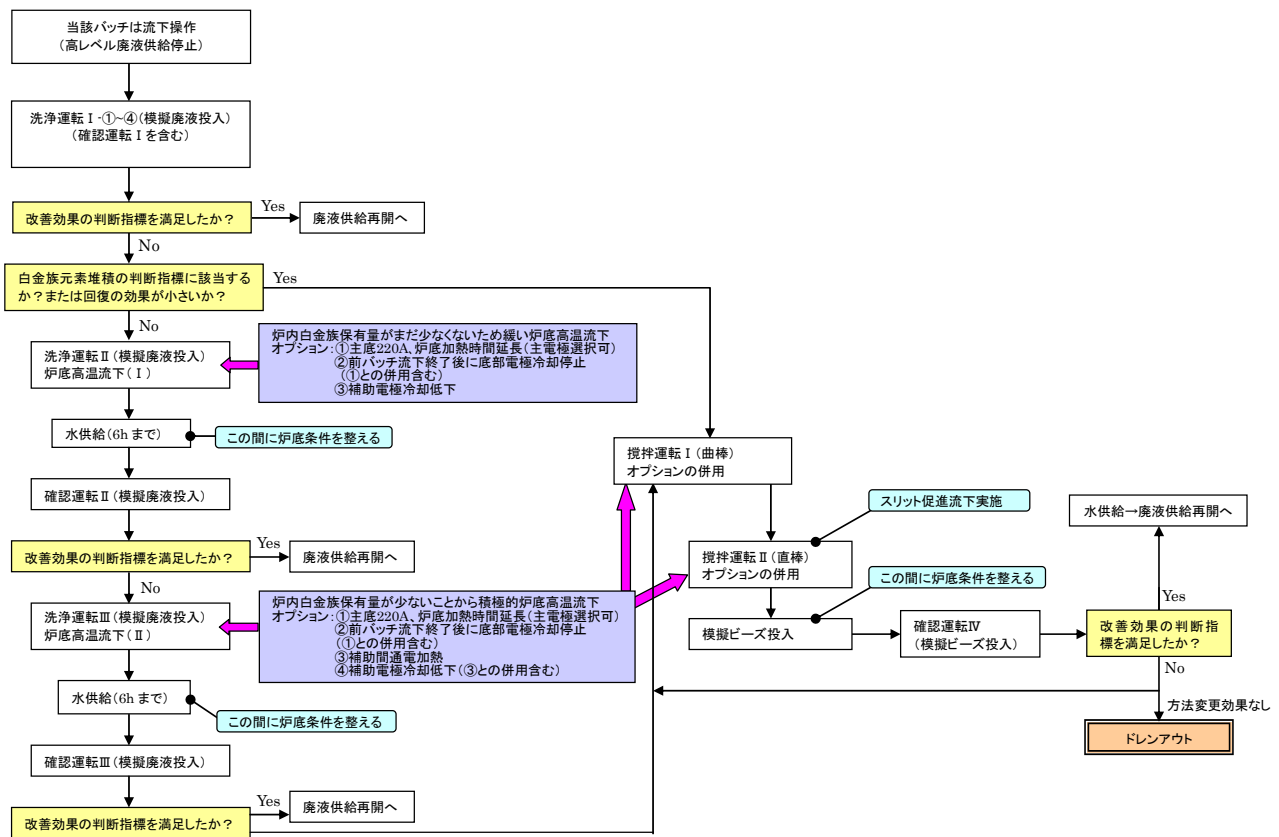


図4.3-10 回復運転フロー

(「添付資料-3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」より)

(2) 第5ステップ

a. 運転状況

安定運転報告書に基づき実施した第5ステップにおけるA系列での運転では、事象①と②の対策の効果により、不溶解残渣を含まない廃液に対して、安定運転（炉内温度が安定）、洗浄運転による回復、YP発生抑制、偏流発生抑制ができた（図4.3-11参照）が、不溶解残渣廃液を含む廃液供給後、流下性及び炉底加熱性が急激に低下した（図4.3-12参照）。（事象⑧）

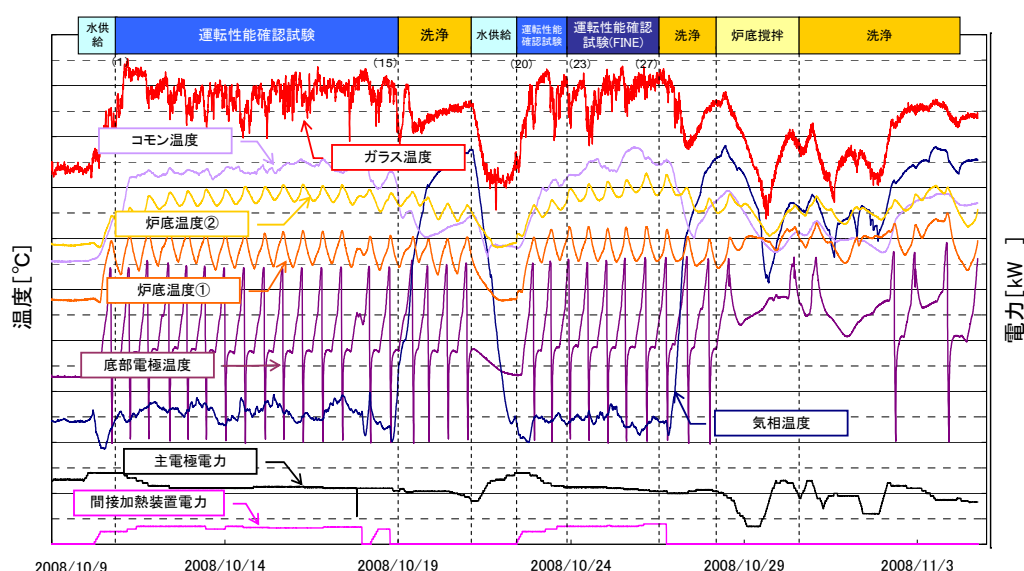


図 4.3-11 第5ステップA系列試験の運転トレンド

（「添付資料－3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」より）

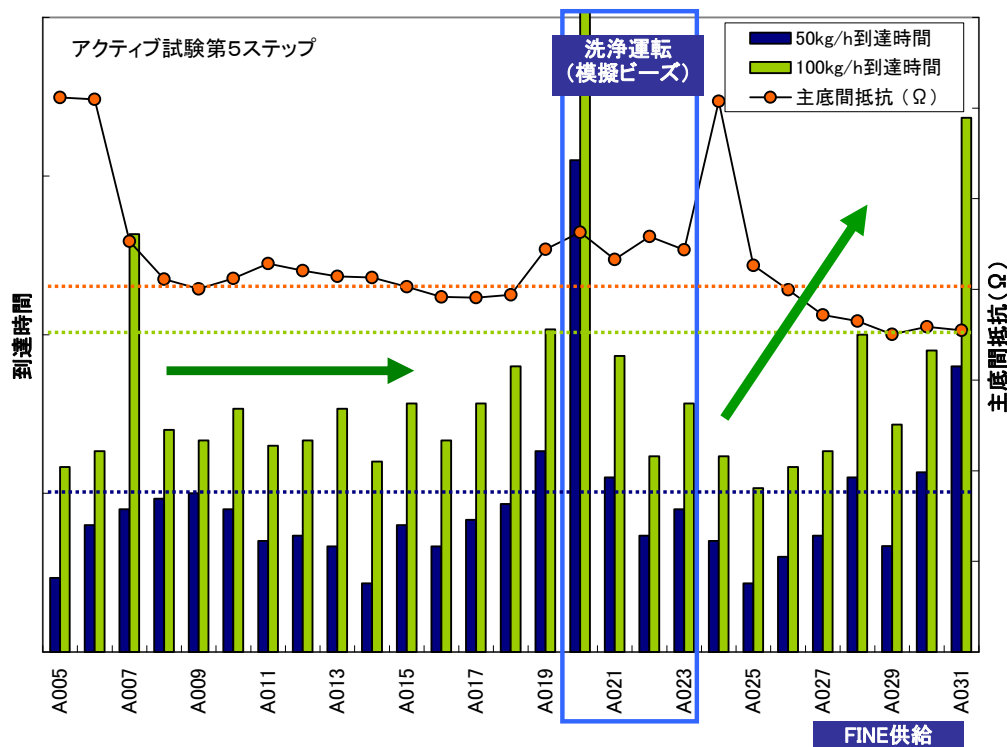


図 4.3-12 第5ステップA系列試験の白金族管理に係る指標

（「添付資料－3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」より）

b. 要因分析及び対策検討

事象⑧に対する推定原因と対策を纏めた結果を表 4.3-3 に示す。これらの原因究明及び対策の効果は、第 4.3.3 項に示す JAEA 東海にある確証改良溶融炉（以下、「KMOC」という）を用いたモックアップ試験（以下、「KMOC 試験」という）によって確認し、ガラス温度等が安定し、白金族元素を管理した状態で運転できる見通しを得た。

なお、これら結果は、保安院に「再処理施設高レベル廃液ガラス固化建屋ガラス溶融炉運転方法の改善検討結果について（改正版 その 2）（2010 年 11 月 1 日）（以下、改善報告書）」として提出した。

表 4.3-3 第 5 ステップ A 系列運転の発生事象に対する推定原因とその対策
（「添付資料－3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」を元に作成）

事象⑧ 不溶解残渣廃液を混合した廃液供給以降に流下性低下が発生した	
推定原因	対策
<ul style="list-style-type: none"> ・流下ノズルの加熱性低下に伴い、流下開始時の底部電極温度を上昇させることにより流下性を確保したため、炉底温度が従来よりも高い状態となり、白金族沈降が促進された 	<ul style="list-style-type: none"> ・流下ノズルの加熱性確保 <ul style="list-style-type: none"> ◇ A 系列：高周波加熱コイルの交換 ※加熱電力が制限値一杯のため ◇ B 系列：高周波電力の上昇 ※加熱電力が制限値まで余裕があるため
	<ul style="list-style-type: none"> ・流下ノズル根元にインリーク抑止材を設置し、流下ノズルの加熱性を向上する。
<ul style="list-style-type: none"> ・仮焼層の変化により、ガラス温度全体が高い状態となったが、ガラス温度の指示値の変動が大きかったため、加熱電力の調整が遅延し、白金族沈降が促進された ※仮焼層が変化した要因は、ガラス溶融炉に供給した廃液中の DBP の影響によるものであることを KMOC 試験で確認した（DBP はアルカリ濃縮廃液中に含まれているが、高レベル濃縮廃液との混合で放射線分解により濃度が低下する。当該事象が確認されたときは混合時間がそれまでの運転と比較し、短かった） 	<ul style="list-style-type: none"> ・温度監視の強化 <ul style="list-style-type: none"> ◇ 常設温度計の測定点追加（2 点式⇒5 点式） ◇ 西側温度計の追設（2 点式） ◇ 主電極間抵抗を用いてガラス温度を推定 ・上記温度監視に基づく熱バランス計算を利用し、適切に加熱電力を調整

また、上述の対策に加え、運転方法の改善として、以下を実施することとした。

- ・炉底部の状態が悪化する前に回復できるよう、定期的に洗浄運転を実施
- ・洗浄運転中に仮焼層を壊さぬよう、洗浄運転の方法を、ガラス溶融炉への高レベル廃液の供給を停止し模擬ビーズのみを供給する方法から、廃液の供給を停止し低模擬廃液（白金族を含まない模擬廃液）と原料ガラスを供給（模擬廃液の専用供給ラインを追設）する方法に変更※

※仮焼層は、廃液成分とガラス成分が混ざりあって溶融する過程で生じるものであり、洗浄運転において廃液の供給を止め、模擬ビーズのみを供給すると仮焼層が壊れ、仮焼層中に含まれる白金族元素が炉底部に沈降することに繋がる。低模擬廃液と原料ガラスを供給する洗浄運転では仮焼層を維持した状態で白金族元素を抜き出すことができる。

4. 3. 4 KMOC試験による原因究明、設備及び運転方法の改善の検証

(1) KMOC試験の経緯

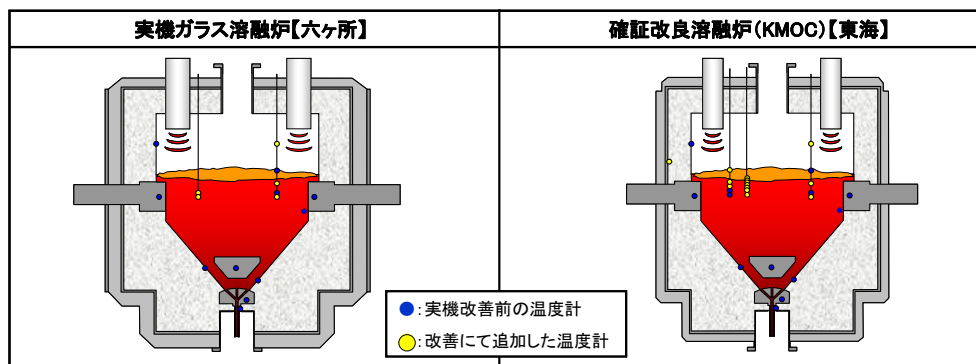
事象⑧に対しては、安定運転報告書に示した事象①と②の対策を実施した上で流下性等の低下が確認されたことを踏まえ、根本的な原因に遡った評価が必要であると考えた。そのため、実際にガラス溶融炉で処理を行う高レベル廃液の分析による性状の把握、分析結果に基づく模擬廃液の準備を行った上で、KMOCを用いて、不溶解残渣廃液を含む廃液供給後、流下性等が低下した原因究明及びその対策の効果確認等に着目し、2年間にわたり試験を実施した（図4.3-13参照）。

参考に、KMOCと実機ガラス溶融炉の比較を図4.3-14に示す。



図 4.3-13 KMOC を用いた原因究明等に係る試験の経緯

(「添付資料－3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」より)



構造	外部構造の相違により放熱特性等に若干相違があるものの、炉内構造（溶融表面積）は同等
耐火材	レンガ厚みが異なる
ケーシング	形状が異なる（KMOC；1重、実機；2重）
温度計測点	KMOCは試験設備であるため、実機に比べて多数の温度計を有す
設備の運用	KMOCは試験設備であるため、仮焼層観察や流下ガラス中の白金族元素濃度の分析が可能

図 4.3-14 KMOC と実機ガラス溶融炉の比較

(「添付資料－3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」より)

(2) KMOC試験を踏まえた運転方法の見直しと設備改善

KMOC 試験の結果を踏まえ、以下に示す実機の運転方法の見直しと設備改善を行った。

a. ガラス温度、気相温度管理

- ・ ガラス温度測定点（図 4.3-15[B]参照）を増やすための設備改造を実施
- ・ 複数の温度計の値の変化を総合的に判断することで電力調整を行う運転方法を KMOC 試験で習熟
- ・ 電力量を調整する際の支援ツールとして、電力量から炉内温度予測できる熱バランス計算プログラム（改良版）を整備
- ・ 廃液組成や供給流量をパラメータとした安定運転範囲を確認

b. 白金族管理（炉底温度管理）

- ・ 白金族元素の沈降・堆積を抑制するため、ガラス温度、気相温度、炉底温度の管理目標を設定（ガラス温度、気相温度、炉底温度はバッチで変化があるため、1 バッチの平均温度（バッチ平均温度）を管理目標として設定）※バッチの定義については、第 4. 2. 3 項（2）参照
- ・ 長期連続運転のため、定期的な洗浄運転の実施
- ・ 洗浄運転時の仮焼層維持のため、模擬廃液供給設備を設置（図 4.3-15[A]参照）
- ・ 流下ノズル上部の温度低下を防ぐためインリーク抑止材を設置（図 4.3-15[C]参照）
- ・ 流下ノズルの加熱性を確保するため、A 系列結合装置を交換（図 4.3-15[D]参照）

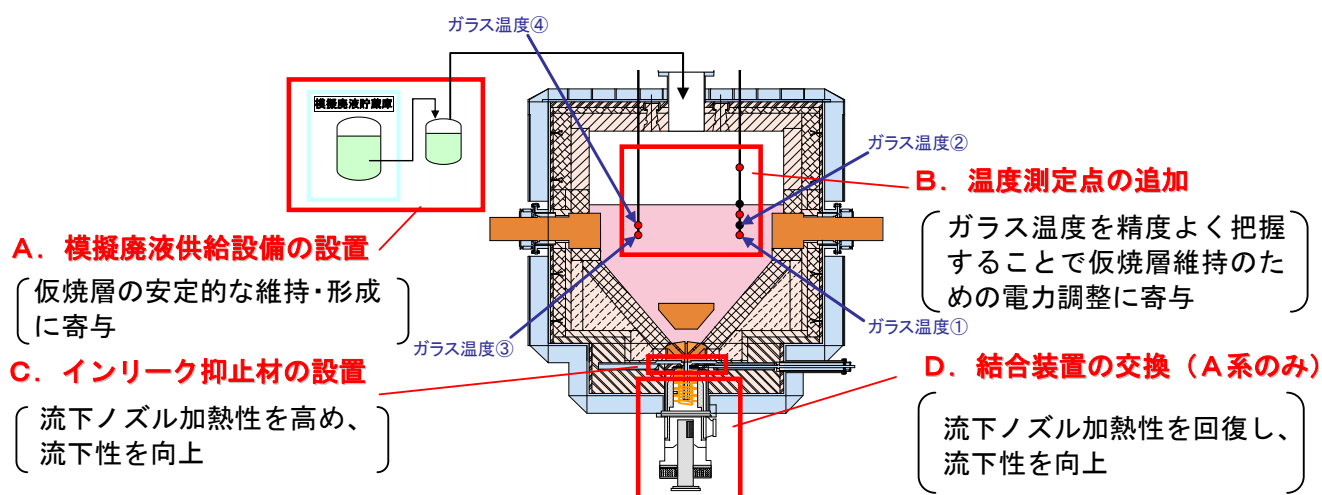


図 4.3-15 KMOC 試験を踏まえた実機の設備改善

（「添付資料－3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」より）

4. 3. 5 事前確認試験及びガラス固化試験

(1) 試験の進め方

これまでの試験運転では、確認された事象に対して原因究明を行った結果をもとに対策を講じ、その効果の確認と併せて実機における試験運転を実廃液等により行ってきたが、事象⑧に対して、根本的な原因に遡った評価を行ったことも踏まえ、対策の効果の確認と実廃液を用いた試験運転を段階的に行うこととした。

具体的な試験の進め方としては、まず、実機における対策の効果の確認として KMOC 試験で確認した安定運転の条件に基づき模擬廃液及び実廃液を用いた「事前確認試験」を行い、事前確認試験で想定した結果が得られたことを条件として、安定運転等を確認するための試験運転である「ガラス固化試験」を行うこととした。(図 4.3-16 参照)

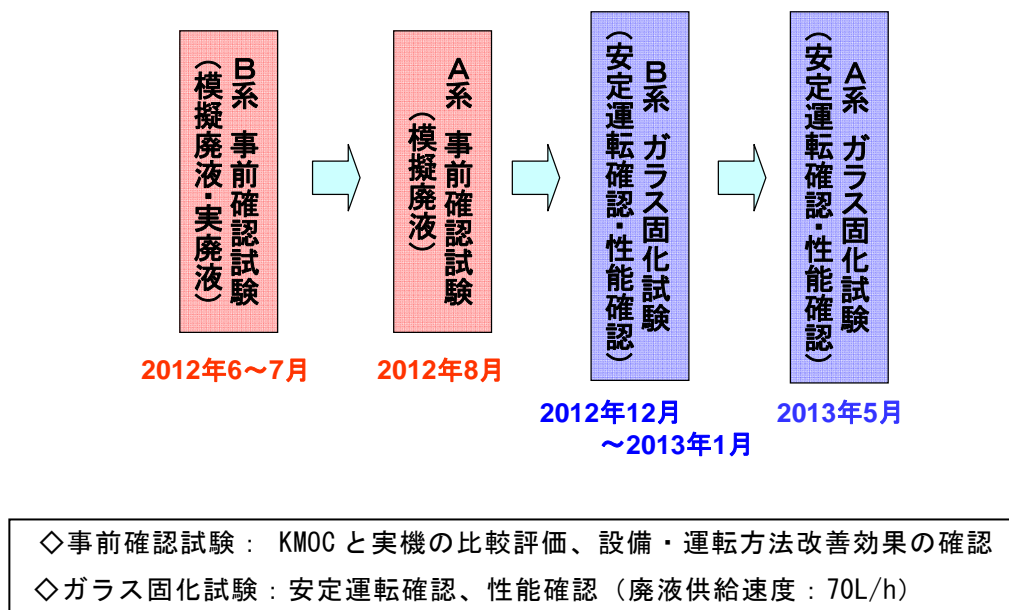


図4.3-16 高レベル廃液ガラス固化設備に係るアクティブ試験の試験シーケンス
（「添付資料－3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」より）

第4. 2. 3項に示したようにガラス固化設備の運転は、立上げ（熱上げ）－廃液供給運転－停止（ドレンアウト）の流れで行う。また、廃液供給運転の部分では、白金族元素管理の一環として長期連続運転のため、定期的な回復運転の実施を踏まえ、「廃液供給 10 バッチ＋洗浄運転 3 バッチ＋廃液供給 10 バッチ＋洗浄運転 3 バッチ＋・・・」と廃液供給運転と洗浄運転を繰り返して行うことになる。

そのため、「ガラス固化試験」の安定運転確認では、ガラス固化施設の運転のひとつのパターンである「廃液供給 10 バッチ＋洗浄運転 3 バッチ＋廃液供給 10 バッチ」の運転を行い、安定運転を確認することとした。

この運転で安定した状態が維持できれば、その繰り返しによりガラス固化設備は年間 800 トンの処理が可能かの見通しを得ることができる（図4.3-17）。

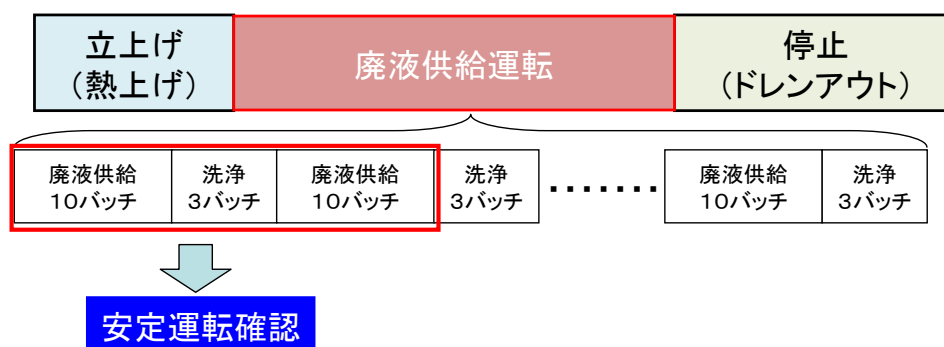


図4. 3-17 ガラス固化設備の運転と安定運転確認の関係
(「添付資料－3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」より)

(2) 事前確認試験で得られた結果

事前確認試験では、KMOC試験を踏まえた実機の設備改善及び運転方法の見直しの効果確認に加え、KMOC（模擬廃液）と実機（実廃液）の相違を確認するため、A系列（模擬廃液のみ）、B系列（模擬廃液と高レベル廃液）において表4. 3-4に示す試験項目を実施し、試験開始前に設定した確認項目を確認した。

その結果、B系列の高レベル廃液を用いた運転では、炉内温度管理、白金族管理という観点からも安定した運転が継続できた。参考に、ガラス溶融炉B系列における事前確認試験（高レベル廃液）で得られたデータを図4. 3-18、19に示す。

以上から、KMOC試験を踏まえた実機の設備改善及び運転方法の見直しの効果を確認し、実機とKMOCの相違も確認できたことから、ガラス固化試験に移行した。

表4. 3-4 事前確認試験における確認結果
(「添付資料－3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」を元に作成)

試験項目	確認項目	確認結果概要
1. 溶融炉構造の相違（レンガ厚み等）による影響確認		
模擬廃液	溶融炉の熱特性（放熱、熱容量）	<ul style="list-style-type: none"> ・ KMOC に比べ、実機の主電極電力を 10kW 程度抑えることで、ほぼ同じ炉内温度分布に調整できた ・ KMOC と同じ炉底冷却条件で実機運転を行った結果、解析結果と同様に、実機の炉底温度が十数℃程度高くなることを確認した ・ 以上から、構造の相違を考慮した電力調整、炉底温度管理を行うことで、実機においても KMOC 同様の運転が可能であり、KMOC の知見が十分反映できる
2. 実廃液と模擬廃液の相違による影響確認		
実廃液	崩壊熱の影響	<ul style="list-style-type: none"> ・ KMOC と実機の構造の違い、実廃液の崩壊熱を考慮した運転を行うことで、実機（実廃液）で KMOC 運転をトレースできた ・ 以上から、KMOC の知見を実機に反映できる見通しが得られた

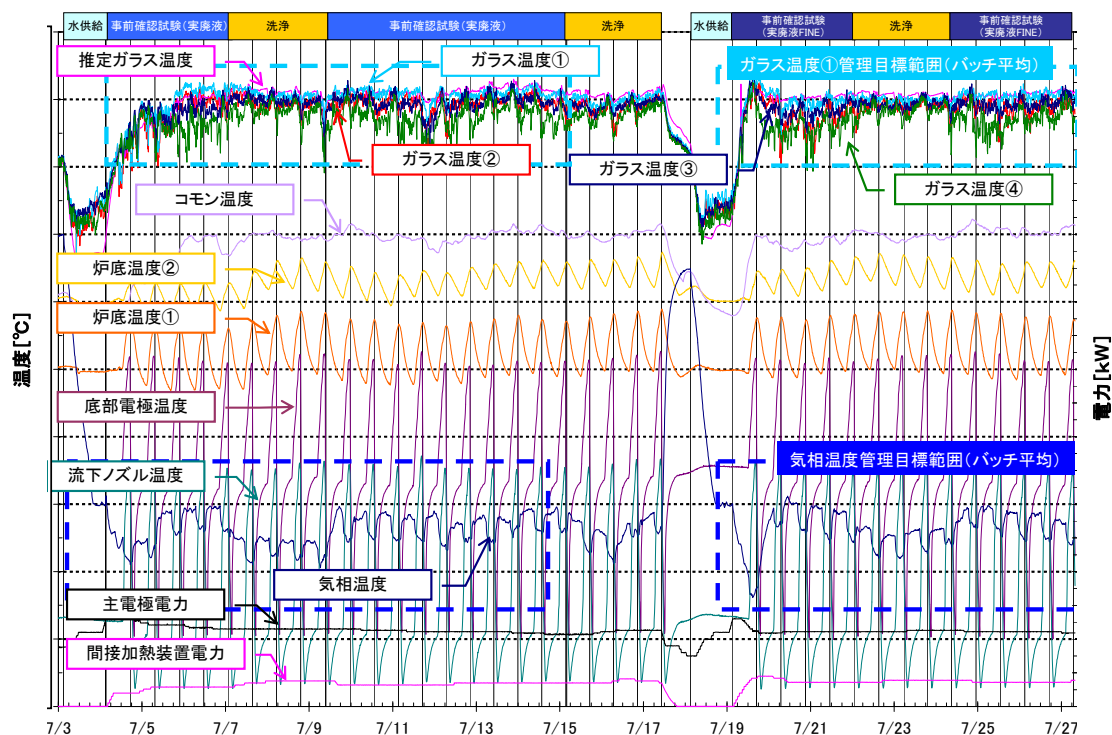


図4.3-18 B系列事前確認試験のガラス温度等の推移
(「添付資料－3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」より)

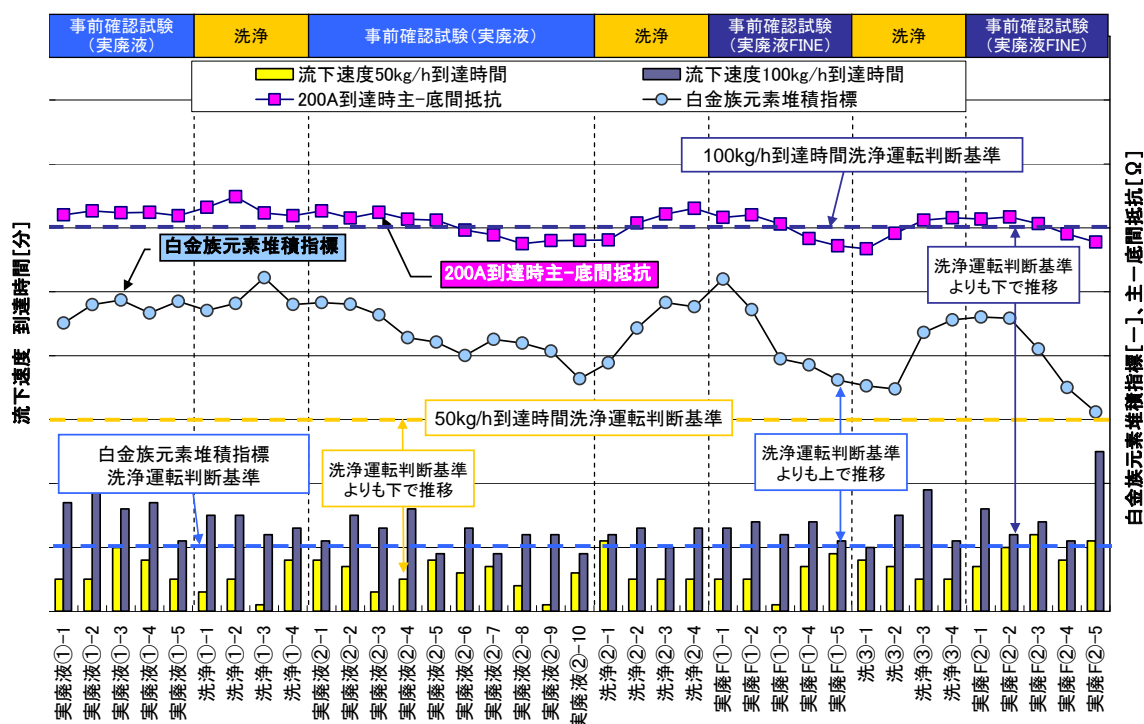


図4.3-19 B系列事前確認試験の白金族管理に係る指標の推移
(「添付資料－3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」より)

※グラフ中に記載されている白金族元素堆積指標等については、第4.2.4項の図4.2-8参照。

(3) ガラス固化試験で得られた結果

ガラス固化試験では、A系列、B系列において表4.3-5に示す試験項目を実施し、試験開始前に設定した安定運転と性能確認の判断基準を満足する結果が得られた。

参考に、ガラス溶融炉A系列におけるガラス固化試験の安定運転確認で得られたデータを図4.3-20～22に示す。

ガラス固化試験において、ガラス溶融炉の安定運転と性能（廃液供給速度70L/h）が確認できたことから、KMOC試験を踏まえて実施した設備改善及び運転方法の改善が有効であることを確認した。

表4.3-5 ガラス固化試験における試験項目、判断基準と確認結果

（「添付資料－3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」を元に作成）

試験項目	判断基準	確認結果概要
安定運転確認	「廃液供給 10 バッチ＋洗淨 3 バッチ＋廃液供給 10 バッチ」の運転において、安定した運転状態が維持できること	計画通りのバッチ数を実施し、ガラス温度、気相温度及び炉底温度が、「安定運転確認」における判定基準として示した管理目標範囲内であるとともに、洗淨運転に移行することなく、白金族元素が管理された運転が維持できた
性能確認	5 バッチの中で 70L/h 以上で運転できること	計測を実施した 1 時間において、「性能確認」の判定基準である 70L/h 以上を満足する約 76L/h の処理量（A 系列）で運転することができた

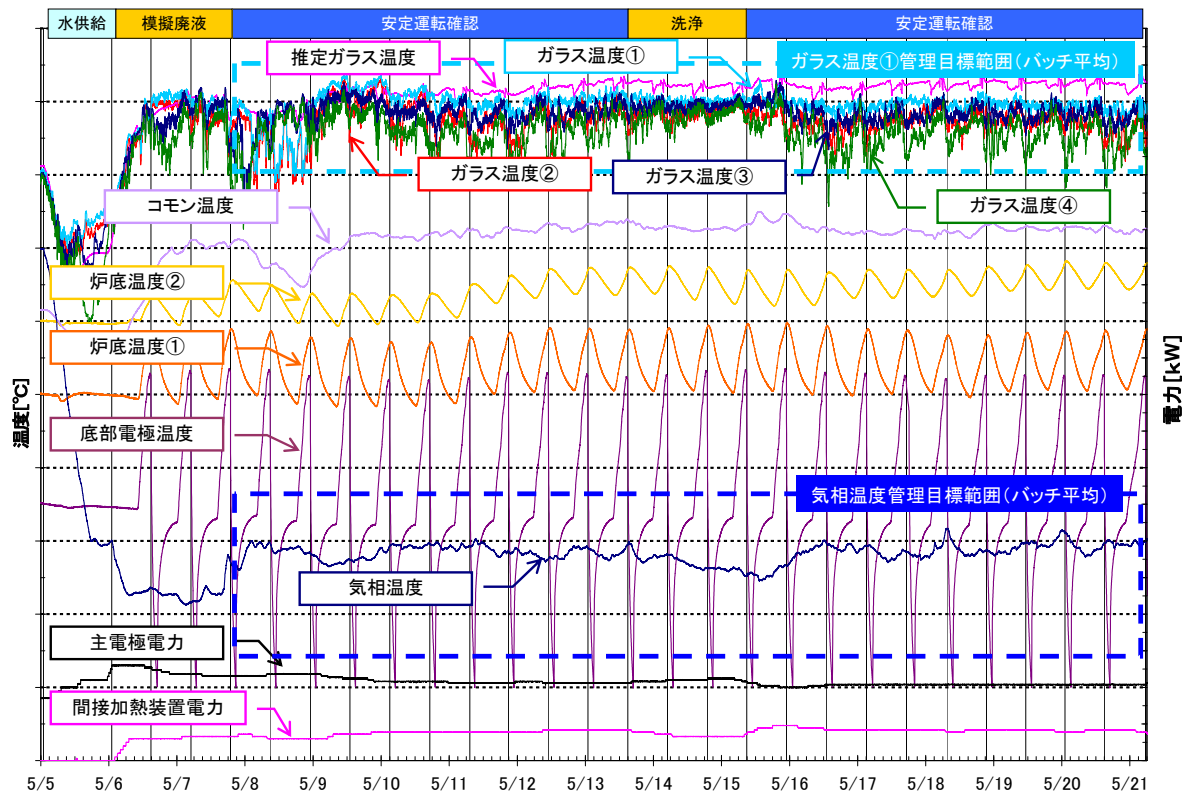


図4.3-20 A系列ガラス固化試験のガラス温度等の推移

（「添付資料－3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」より）

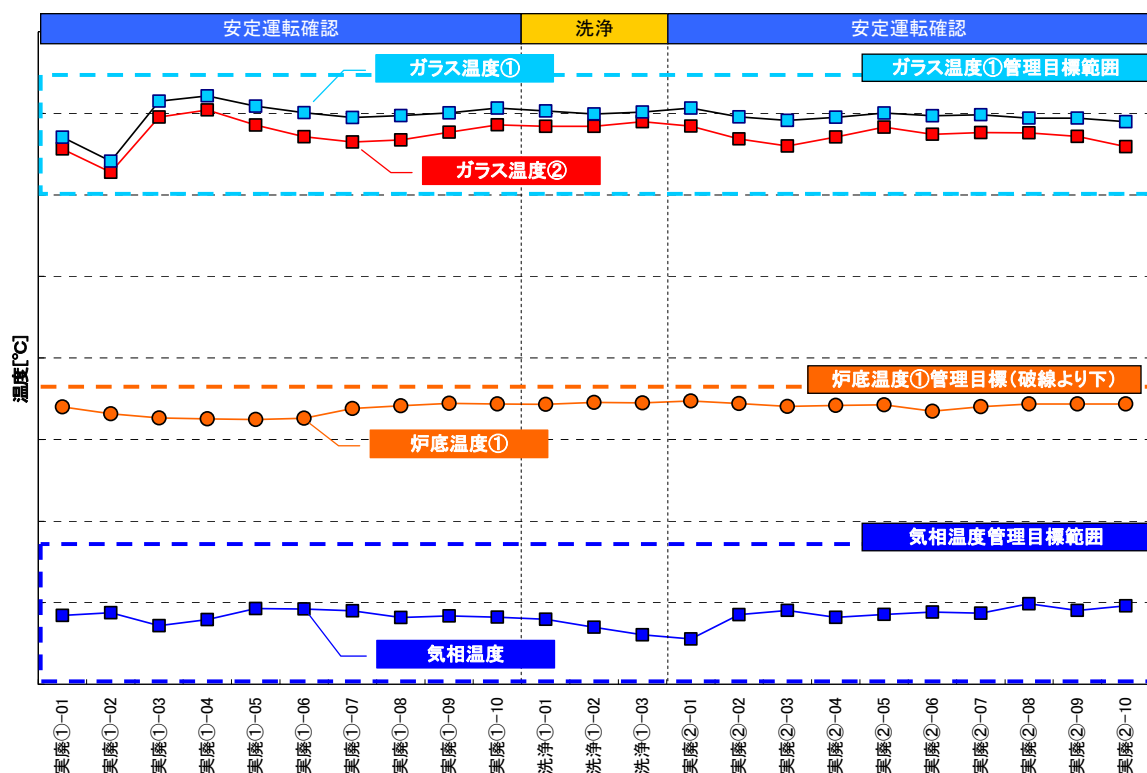


図4.3-21 A系列ガラス固化試験のガラス温度等のバッチ平均推移
(「添付資料-3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」を元に作成)

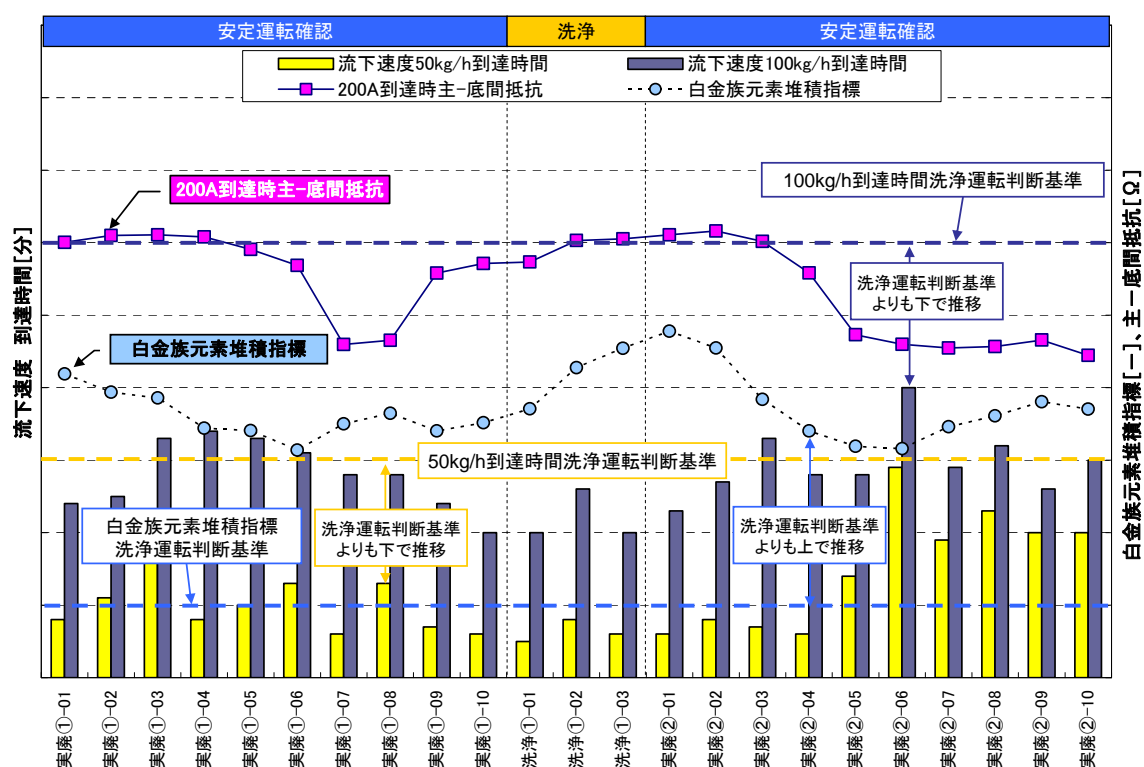


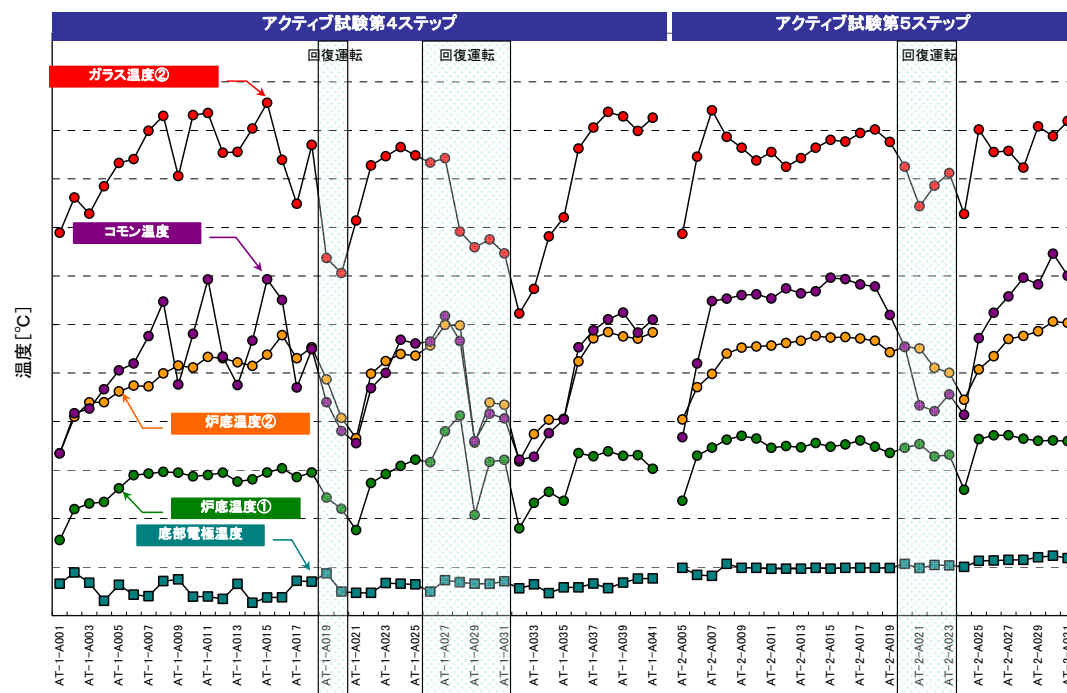
図4.3-22 A系列ガラス固化試験の白金族管理に係る指標の推移
(「添付資料-3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」を元に作成)

4. 3. 6 アクティブ試験結果のまとめ

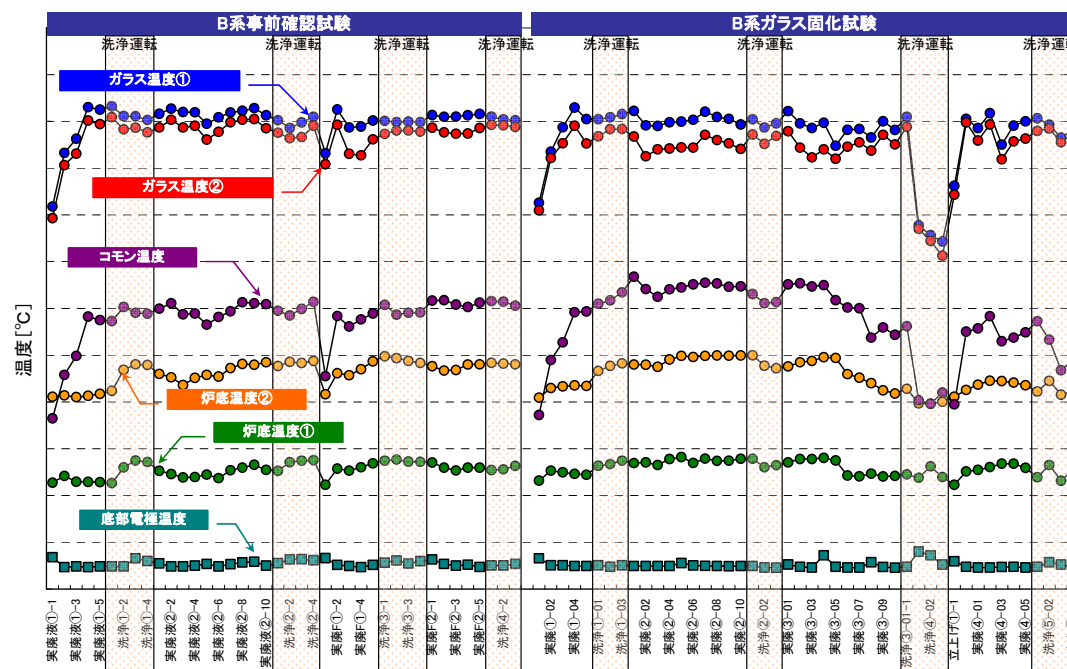
(1) 設備及び運転方法の改善効果

a. 炉内温度管理

温度測定点の追加、KMOC による運転習熟等の改善効果として、事前確認試験やガラス固化試験で炉内温度管理が大幅に向上したことによって、ガラス温度や気相温度を目標範囲内に制御できた（図 4.3-23 参照）。



(改善前：第4ステップ、第5ステップのA系列運転)



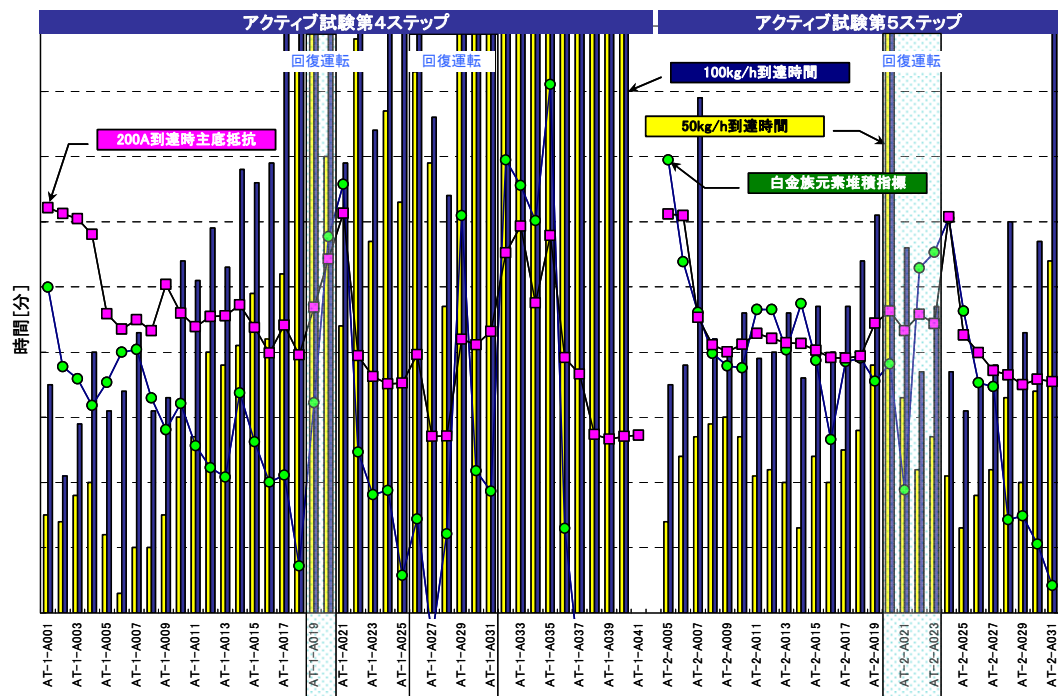
(改善後：B系列の事前確認試験及びガラス固化試験)

図 4.3-23 炉内各部温度のバッチ平均

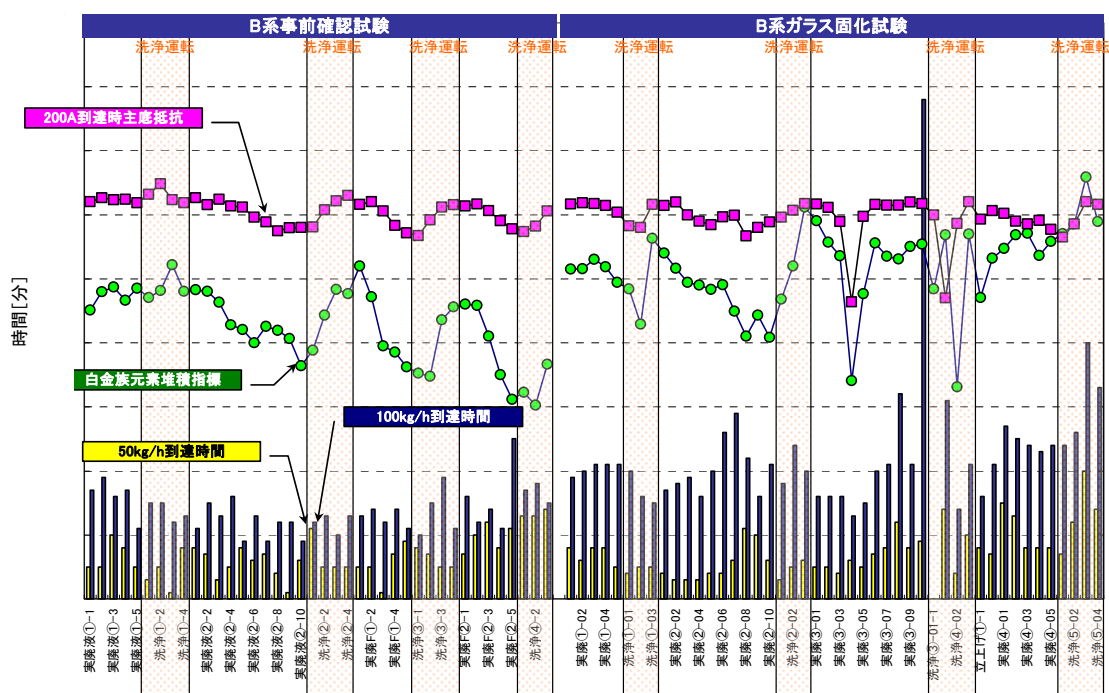
(「添付資料－3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」より)

b. 白金族管理

- 上記炉内温度管理、流下ノズルの加熱性向上等の設備改善、定期的な洗浄運転等の改善効果として、事前確認試験、ガラス固化試験では白金族管理に係る指標類が非常に安定しており、定期的な洗浄運転によって炉内状態が回復することを確認した（図 4.3-24 参照）。



（改善前：第4ステップ、第5ステップのA系列運転）



（改善後：B系列の事前確認試験及びガラス固化試験）

図 4.3-24 白金族管理に係る指標の推移

（「添付資料－3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」より）

(2) アクティブ試験での経験をもとに実施することとした運転管理項目

a. 運転管理マニュアルへの反映

アクティブ試験での経験をもとに実施することとした運転管理項目を表 4.3-6 に示す。これらの反映事項は、ガラス溶融炉の運転管理等に用いる「運転管理マニュアル」に反映した。

表4.3-6 アクティブ試験での経験をもとに実施することとした運転管理項目の整理
(「添付資料-3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」を元に作成)

No.	管理項目	目的	関連する報告書類
1	調整液添加による廃液調整 (混合槽)	安定運転	報告書 A
	崩壊熱		
	廃棄物濃度		
	YP 形成成分濃度		
	核分裂生成物含有率		
2	ガラス温度等	安定運転	報告書 B
	ガラス温度バッチ平均温度		
	気相温度バッチ平均温度		
	炉底温度①バッチ平均温度		
3	回復運転に移行するための判断基準	安定運転	報告書 B
4	流下に必要な流下ノズル温度	不具合防止	報告書 C
	流下開始時の流下ノズル温度計温度		
5	直棒の曲がり防止	不具合防止	報告書 D
	遠隔による荷重負荷		
	減肉管理の実施		
6	天井レンガ落下抑制	不具合防止	報告書 D
	間接加熱装置温度降下速度		
7	接液レンガ欠け抑制	不具合防止	報告書 E
	ガラス溶融炉の立上げ・停止における温度変化		
8	DBP 濃度	安定運転	—
	混合槽における DBP 濃度		
9	不溶解残渣廃液 (FINE) 混合量	安定運転	—
	混合槽への FINE 混合量		

報告書 A : 再処理施設高レベル廃液ガラス固化設備の安定運転条件検討結果報告 (2008 年 6 月 11 日 原子力安全・保安院へ提出)

報告書 B : 再処理施設高レベル廃液ガラス固化建屋ガラス溶融炉運転方法の改善検討結果について (改正版 その 2) (2010 年 11 月 1 日 原子力安全・保安院へ提出)

報告書 C : 再処理施設高レベル廃液ガラス固化建屋ガラス溶融炉におけるガラスの流下停止について (最終報告) (2008 年 10 月 8 日 原子力安全・保安院へ提出)

報告書 D : 再処理施設高レベル廃液ガラス固化建屋ガラス溶融炉 (A 系列) の一部損傷について (最終報告) (2010 年 7 月 28 日 原子力安全・保安院へ提出)

報告書 E : 流下性低下事象の原因と対策について (2012 年 5 月 原燃 H P で公表)

b. 想定事象マニュアルへの反映

アクティブ試験で経験した事象が発生した場合の対応手順を「想定事象マニュアル」に反映するとともに、先行施設及び KMOC で実際に発生した不具合事象、設備として発生が想定される不具合事象を洗い出し、事象想定リストに取り纏め、事象想定リストに記載されている事象については想定事象への対応フローにて対応方法や対応手順を「想定事象マニュアル」に反映した。

参考に、ガラス溶融炉の事象想定リストを図 4.3-25、ガラス固化体取扱設備における想定事象への対応フローの例を図 4.3-26 に示す。

番号 メルタ	件名	概要(発生状況)	KA 事例	備考
33	原料供給器の腐食	(事象の発見は主に運転停止中に取り外した場合と考えられる。流下性低下といった影響がある場合は、運転上の事象として認識される)	あり	
36	負圧維持オフィスの操作不可	負圧維持オフィスの操作ができずに炉底攪拌装置の設置または、撤去ができない。	あり	
40	高周波冷却水漏洩、流量低下	流路に漏洩等が発生する。または冷却水の流量が低下する。	なし	運転停止時に発生
02	計器類の故障(熱電対断線等)	03 流下不良(異物等による流下ノズルの閉塞)	あり	
11	間接加熱ヒータエレメント断線	04 流下不良(炉底部温度が低い場合)	なし	
13	結合装置結合不可	09 低粘性流体(YP)の発生	あり	
14	結合装置及びガラスカッター内の流下ガラス滞留事象	24 炉底部加熱不良	あり	
15	AGからの流下監視不可(ITV)	05 熱上げ期間の延長	なし	(想定事象)
17	電極冷却ユニット起動不可または起動中の停止	06 水供給期間の延長	なし	(想定事象)
18	各通電系電極の対地間抵抗の下	19 流下重量、流下速度(指示値)の異常変動	あり	
26	ガラスカッター、サンプリング装置作動不良	20 流下ガラスの柱状化	あり	
12	間接加熱ヒータ抵抗値上昇	23 製造ガラス組成のズレ傾向	なし	
21	冷却ユニット配管内結露水の発生	25 処理能力の低下	なし	(想定事象)
38	流下ノズル加熱性の低下	高周波加熱装置の劣化などで、流下ノズル温度の上昇が低下する。または流下性が低下する。	あり	
39	流下ガラスの偏流	ガラス溶融炉の流下運転中に流下ガラスの偏流が発生する。	あり	
08	高周波ジャンパ管からの冷却水漏れ	ガラス溶融炉の溶融運転中、高周波加熱装置用ジャンパ管から冷却水が漏れ出す。	なし	運転停止時に発生
32	レンガの割れ、欠けの発生	(事象の発見はドレンアウト後の炉内観察と考えられる。流下性低下といった影響がある場合は、運転上の事象として認識される)	あり	

図4.3-25 事象想定リスト（ガラス溶融炉の例）

(「添付資料－3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」より)

–36–

4. 4 ガラス固化設備の操業運転における安定運転の見通しについて

本節では、事業者としてのガラス固化設備の操業運転での安定運転の見通しに対し、操業運転で要求される安定運転に関する評価ポイントを示すとともに、この評価ポイントに基づく「事業者の自己評価」を示した。また、前節までに示した安定運転の評価に必要な技術情報に加えて「ガラス固化体の品質」や「運転体制の確立」に関する技術情報の概要を示した。

4. 4. 1 操業運転における安定運転の評価ポイント

ガラス固化設備を含む六ヶ所再処理工場の廃棄物処理設備については、上流設備で発生する廃液等を処理できる能力を有していることが操業運転の必要条件（上流が使用済燃料を年間 800 トン処理する場合に発生する廃液を 1 年で処理できること）であるが、以下の観点から、ガラス固化設備の操業運転に対しては、現時点で必ずしも年間 800 トンの処理能力に見合う能力を必要とするものではないと考える。

- ・ 高レベル廃液を 5 ヶ月程度貯蔵できるバッファ槽がある
- ・ 操業運転開始後、段階的に年間当たりの使用済燃料の処理量を上げ、4 年程度で年間 800 トン処理に移行する
- ・ バッファ槽の容量に応じて上流側の処理量を変更することは可能である

アクティブ試験の結果を踏まえ、ガラス固化設備の操業運転における安定運転として要求される項目は、以下のとおりと考える。

- ・ 安定運転を継続して実施できる運転管理範囲を把握していること
- ・ 運転管理範囲を維持できる運転管理方法を有していること
- ・ 上記を実施するための運転手順が整備されていること
- ・ 上記を実施する運転員が技術的な対応能力を有していること

以上をまとめると、表 4. 4-1 に示す通り、「**運転管理手法の把握**」、「**運転手順の整備**」、「**運転体制の確立**」が、操業運転における安定運転の評価ポイントである。

表 4. 4-1 操業運転における安定運転の評価ポイント

（「添付資料－5 ガラス固化設備における操業後の安定運転の見通しについて」を元に作成）

大項目	評価ポイント
1. 運転管理手法の把握	（１）ガラス熔融炉で安定運転を継続して実施できる運転管理範囲を把握できていること
	（２）運転管理範囲で管理した運転ができること 炉内温度管理：炉内温度を安定な状態で維持できること 白金族管理：白金族元素を管理された状態での運転が維持できること
	（３）ガラス固化体の製品品質が満足していること
2. 運転手順の整備	（１）運転方法が手順書・マニュアル等に整備されていること
	（２）発生が想定される事象に対する対応が定められていること
3. 運転体制の確立	（１）トラブル時に解決する能力を有すること

上記評価ポイントのうち、「運転管理手法の把握」（表 4. 4-1 1. （１）、（２）に該当）や「運転手順の整備」（表 4. 4-1 2. （１）に該当）に関する技術情報は、第 4. 3 節で概ね取り纏めたことから、次項以降に「ガラス固化体の品質」（表 4. 4-1 1. （３）に該当）、「不

具合事象の発生に対する対応（運転手順の整備）（表 4.4-1 2.（2）に該当）や「運転体制の確立」（表 4.4-1 3に該当）に関する技術情報を纏めた。

4. 4. 2 ガラス固化体の品質

（１）ガラス固化体の確認項目

ガラス固化体の確認項目は、放射エネルギー、発熱量、固化ガラス化学組成、ガラス固化体重量、容器閉じ込め性、外観健全性、表面汚染密度及び固化ガラス均質性である。（表 4.4-2 参照）

（２）ガラス固化体の品質管理方法の検討経緯

アクティブ試験の開始に当たり、六ヶ所再処理工場で製造されるガラス固化体の仕様（管理項目、判断基準）を整理するとともに、品質保証の観点から化学試験、KMOC 試験データの整理及び流下したガラスの分析を実施し、品質管理方法の妥当性を確認している（表 4.4-2 参照）。

表 4.4-2 ガラス固化体の品質確認項目と品質管理項目

品質確認項目	品質管理項目
放射エネルギー	廃液分析、廃液・原料ビーズ供給量管理、流下重量管理、原料ビーズ調達管理
発熱量	
固化ガラス化学組成	廃液分析、廃液・原料ビーズ供給量管理、硝酸ナトリウム・原料ビーズ調達管理
ガラス固化体重量	流下重量管理
容器閉じ込め性	溶接製造管理、固化体容器調達管理、閉じ込め検査
外観健全性	固化体容器調達管理、外観・寸法検査
表面汚染密度	表面汚染密度検査
固化ガラス均質性	熔融温度・冷却時間製造管理

実廃液を用いたアクティブ試験では、流下したガラスの分析は行っていないが、化学試験、KMOC 試験等により検証した品質管理方法に基づき、ガラス溶融炉に供給する廃液の成分分析の結果、供給流量の管理及びガラス流下重量等の管理を行うことにより、判定基準を満足するガラス固化体を製造するための品質管理を行った。

（３）アクティブ試験で製造したガラス固化体の品質管理実績

アクティブ試験において製造したガラス固化体 346 本（A 系列：196 本、B 系列：150 本）は全て品質管理記録を残しており、YP 発生やガラス固化体重量が規定の量に達していないものを除き、判断基準を満足していることを確認している。

4. 4. 3 不具合事象の発生に対する対応（運転手順の整備）

（１）想定事象マニュアルの整備

第 4. 3. 6（２）項で示した通り、先行施設、化学試験、アクティブ試験、KMOC 試験において発生した不具合事象や設備として発生が想定される不具合事象に対する対応手順等を「想定事象マニュアル」として整備している。

（２）不具合事象の発生防止のリスク管理

過去の不具合事象の発生実績を踏まえ、想定される不具合事象の発生を未然に防ぐとともに、不具合事象発生時に速やかに対応できる体制を整備することを目的として、想定される不具合に対する作動確認及び対策と発生時の対応を見直し、想定される不具合事象の発生防止のリスク管理として実施している。参考に、ガラス溶融炉に対する作動確認及び対策と発生時の対応を表 4. 4-3 に示す。

表 4. 4-3 ガラス溶融炉に想定される不具合事象に対する作動確認及び対策と発生時の対応
（「添付資料－5 ガラス固化設備における操業後の安定運転の見通しについて」より）

設備名	想定される不具合	作動確認及び対策 □:実施項目 ■:計画 中	発生時の対応
間接加熱装置	◆間接加熱装置の故障、断線	□絶縁・導通確認 ■抵抗確認による寿命管理から定期交換による予防保全に変更 □予備品の準備	■間接加熱装置は 2 基あり、1 基故障したとしても 1 基の出力で ドレンアウトは対応可能 ■熱上げ中や通常運転中は、溶融炉を停止または保持運転とし予備品と交換
温度計	◆熱電対の故障、断線	□単体作動確認 □予備品の準備	■代替監視可能な熱電対が他にある場合は運転継続 ■インターロックを有する熱電対は自動的に通電停止するものもある ■運転に必須の熱電対については、溶融炉を保持運転または停止し、予備品に交換 ■代替監視可能な熱電対で運転継続 ■但し、熱電対を交換する場合は、ガラス溶融炉を停止
	◆警報の発報	□警報対応手順書の準備	■インターロックを有する場合、その作動を確認 ■各警報対応手順書に従った対応を実施
溶融炉耐火物	◆溶融炉天井レンガ落下	□間接加熱装置温度降下速度の管理 □レンガ回収治具の準備	■溶融炉を停止し、再熱上げ後、落下レンガ回収
	◆接液レンガの割れ・欠け、脱落	□立上げ・停止時の温度変化を緩やかにする □シャットダウンを原則実施しない。やむなく実施した場合は立上げ後、直棒設置状態で確認流下を実施	■流下ノズルの閉塞に至った場合は、「異物による流下ノズル閉塞」の対応を実施
加熱・通電系	◆加熱・通電系の異常	□絶縁抵抗確認 □予備品の準備	■異常、故障部品の補修・交換
冷却ユニット	◆電動機の故障 ◆冷却ユニット配管内での結露水滞留	□単体作動確認 □予備品の準備 □固化セル給気系への除湿機の設置	■溶融炉を保持運転とし、電動機の交換 ■溶融炉を保持運転とし、結露水乾燥を実施 ■除湿機故障の場合は吸気口を切り替える
流下ノズル高周波加熱装置	◆高周波加熱性能の低下 ◆高周波加熱装置の異常、故障 ◆ジャンパ管からの水漏れ	□加熱性能の事前確認 □インリーク抑止材設置による加熱性能向上 □ジャンパ管及び結合装置予備品の準備 ■流下ノズル温度測定装置による確認	■溶融炉を停止し、結合装置予備品と交換 ■A 系は新型結合装置に交換しており、輻射率の低下は低い。B 系は YP 影響が無いいため、輻射率の低下は低いので 1 系列の評価で対応可能
	◆高周波整合器、電力盤の冷却水温度異常	□冷却水温度調整、事前確認 □予備品の準備	■運転に必須の計器については、流下していない時に予備品に交換

4. 4. 4 運転体制と不具合事象発生時の対応

(1) 運転体制

六ヶ所再処理工場では運転対象施設毎に6つのセクションで構成されており、運転員は5班3交替で運転を実施している。

ガラス固化施設の運転は第6ブロックで実施しており（図4.4-1参照）、ガラス固化施設の運転員は各班9～11名で構成されている（表4.4-4参照）。

アクティブ試験等の試験運転では、ガラス溶融炉の主電極電力等の調整、設備トラブル対応等に対する技術的な判断の助勢をするため、日勤スタッフを36人程度配置している。

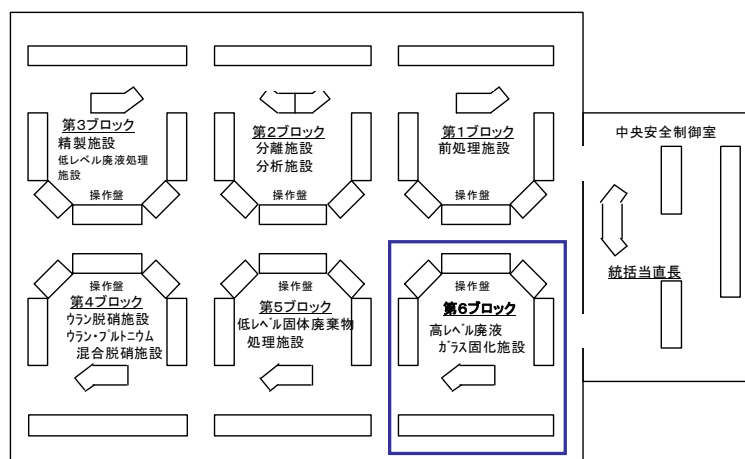


図4.4-1 中央制御室のレイアウト

（「添付資料－5 ガラス固化設備における操業後の安定運転の見通しについて」より）

表4.4-4 ガラス固化施設の運転員構成

（「添付資料－5 ガラス固化設備における操業後の安定運転の見通しについて」より）

担当	業務概要	人数
当直長	全体工程管理、運転指示・管理・調整、事象発生時の対応指揮等	1
液ガス工程	高レベル廃液の移送、混合・中和操作、換気設備の運転、液体廃棄物処理等を実施	1～2
ガラス溶融工程	ガラス溶融炉、ガラス原料供給設備、模擬廃液供給設備の運転を実施	2～4
固化体取扱工程	ガラス固化体の移動、溶接、除染、検査（外観、表面汚染、閉じ込め）、貯蔵等を実施	2～3
遠隔工程	遠隔サンプリング操作、溶融炉の遠隔直棒操作、他工程助成等を実施	2
合計		9～11

(2) 教育・訓練

六ヶ所再処理工場の運転員は技術・技能認定制度により運転に必要な技術・技能を有していることを定期的に確認しており、ガラス固化施設ではアクティブ試験評価結果やKMOC試験評価結果、運転方法への反映事項について、次の運転を開始する前に運転員への教育を実施している。

また、運転員及び日勤者の運転技能等の維持・向上を目的としてKMO C試験の運転に、事業者の運転員が25人(延べ66人)、日勤者が10人(延べ27人)参画している。

(3) 事象発生時の対応と体制

天井レンガ落下等の事象発生やA系列運転の運転改善に対する対応として、日本原燃－JAEA－メーカーによる体制を構築し、原因究明及び対策により再発を防止するとともに、遠隔による現場復旧を実施した。この体制は現在も継続されており、今後不具合事象として想定されていない事象が発生した場合も協力要請を行い、原因究明・対策検討、予防保全の見直し等が実施可能である。

事象発生時の対応の一例として、アクティブ試験第4ステップのA系列運転に対する原因究明と対策検討の体制を図4.4-2に示す。再処理事業部長を委員長とするガラス固化試験運営委員会の下に、各WGを設置し、総合的に原因究明・対策を立案する体制となっている。

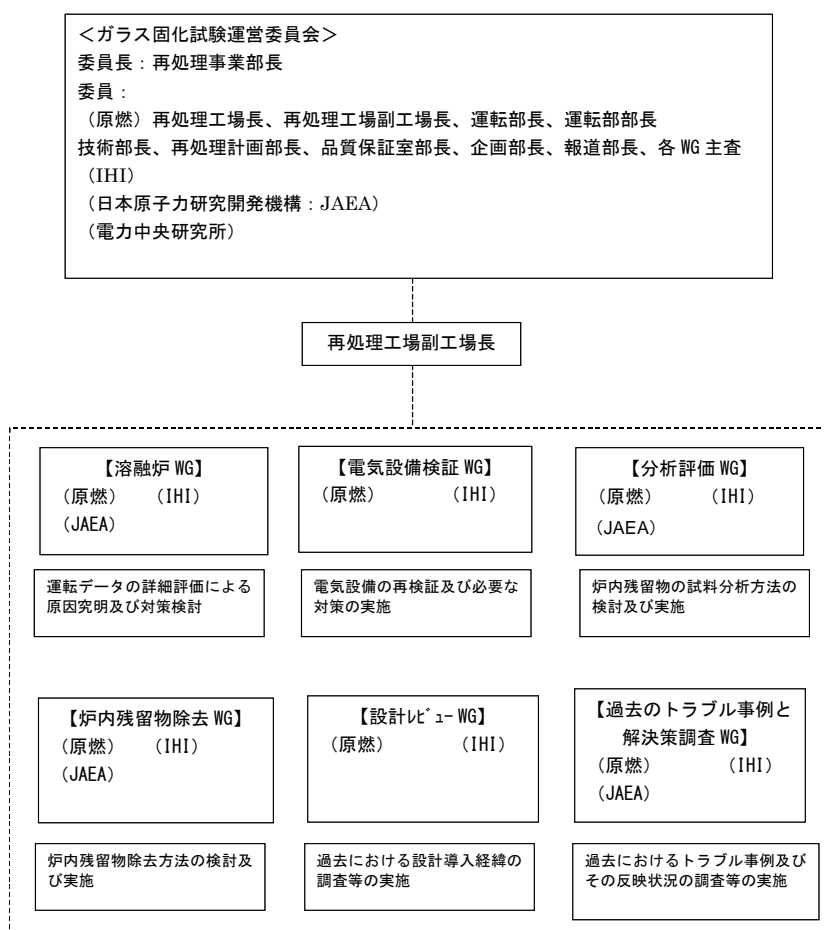


図 4.4-2 アクティブ試験第4ステップのA系列運転に対する原因究明と対策検討の体制
（「添付資料－5 ガラス固化設備における操業後の安定運転の見通しについて」より）

4. 4. 5 事業者の自己評価

「表 4. 4-1 操業運転における安定運転の評価ポイント」に対して、これまでの運転実績（化学試験、KMOC 試験、アクティブ試験結果等）に基づき、事業者としての自己評価結果を纏めたものを表 4. 4-5 に示す。

これら評価結果として、操業運転における安定運転の見通しが得られており、今後の運転経験による改善やガラス固化技術のさらなる改善により、より信頼性を向上する予定である。

表 4.4-5 ガラス固化設備の安定運転の評価（「添付資料-5 ガラス固化設備における操業後の安定運転の見通しについて」より）

	【これまでの運転実績からの評価】	【今後の運転経験による改善】
1. 運転管理手法の把握		
(1) ガラス溶融炉で安定運転を継続して実施できる運転管理範囲を把握できていること	<ul style="list-style-type: none"> これまでの運転経験から、ガラス溶融炉の安定運転継続における管理項目として、炉内温度管理と白金族管理が挙げられ、これら管理については、アクティブ試験で確認している 	—
(2) 運転管理範囲で管理した運転ができること ① 炉内温度管理: 炉内温度を安定な状態で維持できること	a. KMOC による安定運転範囲の確認 <ul style="list-style-type: none"> 日本原燃-JAEA-メーカーの体制を組み、2 年間の KMOC 試験を通じて、安定運転範囲（廃液条件、廃液供給速度）を確認している b. アクティブ試験で確認した安定運転範囲 <ul style="list-style-type: none"> アクティブ試験において、安定運転のための各種温度の管理範囲を設定し、確認している ガラス固化試験において、想定される最も厳しい廃液条件（3 種混合）で、炉内温度を安定な状態で維持できることを確認している 	<ul style="list-style-type: none"> 再処理量の増加に合わせて、段階的に運転範囲の拡大と安定性を確認する 必要に応じて、KMOC 試験を行い、実機運転に反映する
② 白金族管理: 白金族元素を管理された状態での運転が維持できること	c. KMOC による長期運転方法の確認 <ul style="list-style-type: none"> 日本原燃-JAEA-メーカーの体制を組み、2 年間の KMOC 試験を通じて、定期洗浄運転の採用や洗浄運転方法の改善を実施している d. アクティブ試験で確認した白金族を管理した状態での運転管理方法 <ul style="list-style-type: none"> KMOC 試験及びアクティブ試験初期の運転経験をもとに、白金族が炉底部に沈降、堆積した兆候を把握するための指標、白金族が炉底部に堆積した場合の洗浄運転等の回復運転の管理方法等を定め、運転を実施している e. アクティブ試験における白金族を管理した状態での運転実績 <ul style="list-style-type: none"> ガラス固化試験において、想定される最も厳しい廃液条件（3 種混合）で、定期洗浄運転を行うことで 30 バッチ運転できることを確認している 	<ul style="list-style-type: none"> 運転実績の積み重ねにより、洗浄運転間隔の拡大を行う 必要に応じて、KMOC 試験を行い、実機運転に反映する

表 4.4-5 ガラス固化設備の安定運転の評価（つづき）（「添付資料－5 ガラス固化設備における操業後の安定運転の見通しについて」より）

	【これまでの運転実績からの評価】	【今後の運転経験による改善】
1. 運転管理手法の把握（つづき）		
（３）ガラス固化体の品質が満足されていること	f. ガラス固化体の品質管理方法の検討経緯 ・アクティブ試験開始前に、ガラス固化体の品質管理方法が十分検証されている	—
	g. アクティブ試験で確認した品質管理手法 ・アクティブ試験において製造したガラス固化体 346 本は全て品質管理記録が残されている	
2. 運転手順の整備		
（１）運転方法が手順書・マニュアル等に整備されていること	h. 運転マニュアルの整備 ・アクティブ試験、KMOC 試験等で得られた知見を運転方法にフィードバックするため、手順書・マニュアルに反映している	・運転実績の積み重ねにより得られる知見は都度、手順書・マニュアルに反映する
（２）想定事象に対する対応が定められていること	i. 想定事象マニュアルの整備 ・先行施設、K 施設における発生事象や想定事象に対する対応マニュアルを整備している	・今後の運転で発生した事象及び対応については都度、対応マニュアルに反映する
	j. リスク管理（作動確認及び対策、予備品の準備） ・過去のトラブル事象を踏まえて、作動確認及び対策の実施内容・タイミングを見直すことで、想定事象の発生を未然に防ぐと共に、発生時に速やかに対応できるように事前に対応を検討している	
3. 運転体制の確立		
（１）トラブル時に解決する能力を有すること	k. 設備トラブルに対する対応実績 ・天井レンガ落下等のトラブル事象に対して、日本原燃-JAEA-メーカーの体制を組み、原因究明・対策により再発を防止するとともに、遠隔による現場復旧を実施している	・今後の運転でトラブルが発生した場合、JAEA、メーカーに協力要請を行い、これまでの体制を組み、原因究明・再発防止、予防保全の見直し等を実施する

4. 5 ガラス固化技術の高度化

4. 5. 1 高度化概要

現行のガラス溶融炉の設計寿命は5年であり、ガラス溶融炉の更新時には、これまでのアクティブ試験で得られた経験や操業運転で得られる経験を反映し、安定運転の信頼性を向上させるため、より性能の高いガラス固化技術を導入する計画である。

現在実施している具体的な性能向上（高度化）として、以下の研究・開発を行っている。

- (1) 新ガラス素材の開発：YP発生を抑制可能な新しいガラス素材やより多くの高レベル廃液を充填（高充填）可能なガラス素材を開発する。
- (2) 新型炉の開発：白金族元素の沈降・堆積抑制が可能なガラス溶融炉の構造、炉底部加熱方法等を開発する。
- (3) 要素技術の開発：新型炉の性能向上を図る個別要素技術（バブリング装置、エアパージ式液位計、かくはん装置）を開発し、検証を行う。
- (4) 解析評価ツールの開発：信頼性の高い設計支援／運転支援ツールとして溶融炉解析コードを高度化する。
- (5) 基礎的研究：解析コードの高度化等に必要となる物性データ、評価モデルの整備、各種メカニズム解明を行う。

4. 5. 2 高度化の基本方針

(1) 設計前提・制約条件

固化セルのスペース、付帯設備等の制約条件の中で溶融炉（2基）を更新する。

1基当たりの処理能力（溶融表面積）は現行炉と同等とする。但し、溶融炉の設計寿命は、現行炉の5年間に対して、新型炉では7年間（目標）とする。

(2) 技術検証・採用技術

アクティブ試験において現行炉で確認された課題を解決することを念頭に開発を行い（表 4.5-1 参照）、溶融炉の更新計画に基づき、検証された技術を順次、採用する。また、検証は、段階的に実施するものとし、重要度、優先順位等に応じて、検証方法（解析、基礎試験、モックアップ試験等）を選択する。

“オール ジャパン” の実施体制の下で高度化研究を実施する（図 4.5-1 参照）。

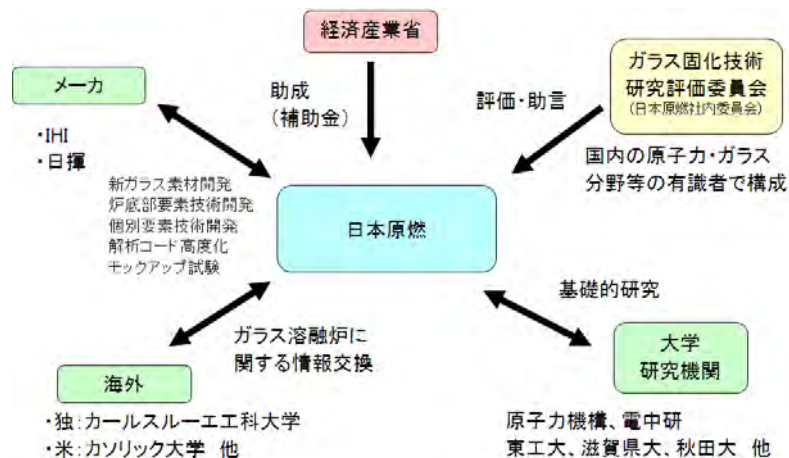


図 4.5-1 ガラス固化技術の高度化研究の実施体制

（「添付資料－6 ガラス固化技術の高度化について」より）

表 4.5-1 現行炉で確認された課題に対する改善方針
(「添付資料－6 ガラス固化技術の高度化について」より)

事象	現行炉での改善	新型炉での改善
① ガラス温度が安定した状態を維持できない	<ul style="list-style-type: none"> ・ 熱バランス計算プログラムの運転への適用【運転管理】 ・ 調整液添加による廃液調整【運転管理】 	—
② 事象①の影響により白金族元素が炉底部に沈降、堆積した	<ul style="list-style-type: none"> ・ 洗浄運転への移行判断フロー、保持運転フローの整備【運転管理】 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 炉底形状を円錐、傾斜角度を 60°に変更し白金族元素の堆積を防止【設備改善】 ・ 炉底部の加熱手段（下段補助電極、炉底部高周波加熱装置）を追加【設備改善】
③初期のアクティブ試験の多くのバッチで YP が発生した	<ul style="list-style-type: none"> ・ 調整液添加による廃液調整【運転管理】 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 新組成ガラスビーズまたはバブリングの採用により YP の発生を抑制【設備改善】
④ 流下ガラスによる流下ノズル閉塞	<ul style="list-style-type: none"> ・ 流下ノズル全段加熱開始時のノズル温度監視【運転管理】 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 炉底部の加熱手段（下段補助電極、炉底部高周波加熱装置）を追加【設備改善】
⑤ かくはん棒の曲がり	<ul style="list-style-type: none"> ・ かくはん棒使用時に過度の荷重をかけない【運転管理】 	<ul style="list-style-type: none"> ・ かくはん装置のモーター駆動により荷重を制限【設備改善】
⑥ 天井レンガ落下	<ul style="list-style-type: none"> ・ 間接加熱装置の温度降下速度の管理【運転管理】 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 天井レンガにせり構造を採用し落下を防止【設備改善】
⑦ 高レベル廃液漏えい	<ul style="list-style-type: none"> ・ 運転停止時の貯槽液位管理【運転管理】 ・ 閉止フランジ部の締め付け管理【運転管理】 	—
⑧ 不溶解残渣廃液を混合した廃液供給以降に流下性低下が発生した	<ul style="list-style-type: none"> ・ 定期的な洗浄運転の実施【運転管理】 ・ 洗浄運転方法の改良【運転管理】 ・ ガラス温度計の追加【設備改善】 ・ ガラス温度の管理方法の改善【運転管理】 	—
⑨ 接液レンガによるノズル閉塞	<ul style="list-style-type: none"> ・ 運転停止時にドレンアウト実施を原則とする管理【運転管理】 ・ かくはん棒（直棒）の改良（流下性低下時の対応）【設備改善】 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 底部電極ストレーナ構造の変更により閉塞し難い構造であることを確認（アクリルモデル）【設備改善】 ・ かくはん装置の改良【設備改善】

4. 5. 3 新型炉の開発

新型炉では炉内温度管理及び白金族元素管理の信頼性を向上させる観点から、図 4.5-3 に示すとおり、炉底部形状の変更と炉底加熱方法の追加を行っている。具体的には、白金族元素の堆積抑制をするために炉底部形状は円錐、傾斜角度 60 度とし、白金族元素に影響を受けない炉底ガラスの加熱手段として底部電極外部に高周波加熱装置を追加設置する。また、運転モニタの改善として、温度測定点の追加と最適化を行う。

さらに、かくはん装置、バブリング装置、エアパージ式液位計等個別要素技術の導入により、新型炉の性能向上を目指す。

これまで、大きく構造を変更した炉底部のみを模擬した炉底部モックアップ試験において流下性等が大きく向上することを確認しており、今後、実規模モックアップ試験でさらなる性能確認を行う。

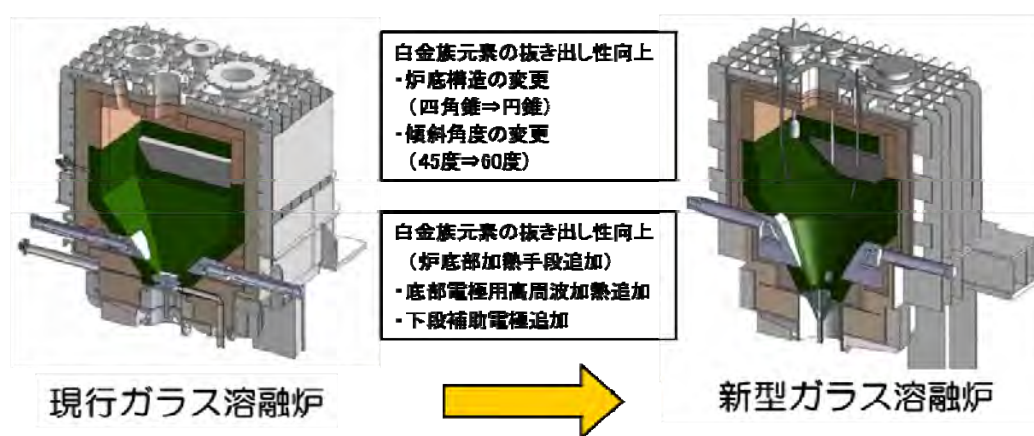


図 4.5-3 現行炉と新型炉の構造比較

（「添付資料－6 ガラス固化技術の高度化について」より）

4. 5. 4 ガラス固化技術開発施設

ガラス溶融炉の開発課題の解決を目的として、ガラス溶融炉に係る各種試験等の研究・開発を行うとともに、遠隔操作性の確証試験ならびに運転員等の教育訓練を行う複合施設を建設中である。

本施設で得られた情報・知見を六ヶ所再処理工場 高レベル廃液ガラス固化施設へ迅速にフィードバックすることができるよう再処理事業所敷地内に建設している。

本施設で実施する試験等は以下のとおりである。

- ①取替用ガラス溶融炉（実機）のコールド試験
- ②新型炉開発に資する確証試験
- ③遠隔操作によるガラス溶融炉の交換・保守・解体に係る確証試験及び訓練
- ④遠隔操作機器の遠隔操作性確証試験及び訓練
- ⑤ガラス物性データ取得のための小型溶融炉等を使用した基礎試験
- ⑥試験で採取した試料等の各種分析

5. 安定運転の見通しに対する技術的検討と評価

本章では、第2章に示した検討の視点に沿って、安定運転の見通しに対する技術的検討と評価を行った結果をまとめた。

検討を進める中で、第4章に示した事業者から聴取した技術情報に加え、設備の処理能力（高レベル廃液のバッファ容量、ガラス固化設備の安定的な処理能力）とガラス固化体の品質管理について、追加的に事業者からの資料提供と聴取が必要となった。これらについて、第5. 1. 3項～第5. 1. 5項に記述した。

委員会では、「(1) アクティブ試験で顕在化した技術課題に対する対応策の妥当性」、及び「(2) 操業中の諸条件の変動を想定した安定運転の見通し」という2つの視点に基づいて、現行のガラス固化設備の安定運転の見通しを評価できるものと考え、その結果を第5. 3節に記述した。また、「(3) ガラス固化に関する技術開発」という視点については、将来に向けた改善への期待と合わせて第5. 4節に記述した。

5. 1 アクティブ試験で顕在化した技術課題に対する対応策の妥当性

検討の視点で示したようにアクティブ試験で発生した様々な事象への対応について、そのプロセスに重点を置き、経験した事象に対する課題の抽出が十分か、解決策が妥当かという観点から検討を行うとともに、アクティブ試験の実績を踏まえて実施された改善策に基づく安定運転の実現性を検討した。

5. 1. 1 アクティブ試験で経験した事象に対する取り組み

(1) 聴取した結果の要点

事象の原因究明と対策検討のプロセスの妥当性を調べるために、アクティブ試験で経験した様々な事象に対する取り組みについて、事業者から聴取し、表5. 1-1～2のように整理した。その結果は、以下のとおりである。

- ・ガラス熔融運転フェーズに関する事象とそれ以外に関する事象に分けて、発生した事象毎に要因(原因)、影響と対策に分類して整理した。同表に示すとおり、それぞれの事象が根本的な要因にまで遡って究明され、必要な対策が講じられている。根本的な要因まで遡ることで、TVFと共通の要因と六ヶ所再処理工場固有の要因があり、固有の要因は処理対象廃棄物の相違であることが分かる。
- ・一つの事象に対する対策が別の事象に対しても有効であることが分かる。

表 5.1-1 ガラス溶融運転フェーズに関する事象と対策

事 象	要 因	影 響	対 策
① 仮焼層形成が不十分・不安定なため、ガラス温度等が安定しない	廃液中の硫黄の混入 ・処理対象に分析廃液を含むことによる 《六ヶ所再処理工場固有》	・仮焼層形成の阻害 →ガラス溶融炉の温度制御に悪影響 ・YP を形成しやすくなる →ガラス溶融炉の温度制御が不十分な場合、YP が発生	・調整液を用いた当該成分量の調整 ・温度管理（測定、運転）の改善
③ 初期のアクティブ試験の多くのバッチで YP が発生した	Mo 等の成分の影響 ・使用済燃料中に含まれる YP の生成原因となる Mo 等の濃度が高かった 《六ヶ所再処理工場固有》	・YP を形成しやすくなる →ガラス溶融炉の温度制御が不十分な場合、YP が発生	・調整液を用いた当該成分量の調整 ・温度管理（測定、運転）の改善
② 事象①の影響により白金族元素が炉底部に沈降、堆積した	白金族元素の堆積 ・白金族元素は、温度が高くなることで炉底部への沈降が進む （高比重のため沈降しやすい） ・使用済燃料中に含まれる白金族元素の濃度が高かった	・高濃度領域では溶融ガラスの比抵抗値が低下して、ジュール加熱を阻害 →ガラス溶融炉の温度制御に悪影響 →溶融ガラス流下速度低下	・当該成分量の調整 ・温度管理（測定、運転）の改善 ・炉底部への沈降の監視と制御 ・洗浄、回復運転
⑧ 不溶解残渣廃液を混合した廃液供給以降に流下性低下が発生した	廃液中の DBP の影響 ・処理廃液中の DBP 濃度が高かったことによる （DBP はアルカリ濃縮廃液に含まれる） 《六ヶ所再処理工場固有》	・仮焼層を成長させる →ガラス溶融炉の温度制御に悪影響	・高レベル濃縮廃液との混合で DBP 分解を促進させ、当該成分濃度の調整 ・温度管理（測定、運転）の改善

表 5.1-2 ガラス溶融運転フェーズ以外に関する事象と対策

事 象	原 因	影 響	対 策
④ 流下ガラスによる流下ノズル閉塞	・流下ノズルの加熱性低下により流下ガラスに偏流が発生、ノズルを閉塞	・流下ノズル閉塞によりガラス固化体容器に溶融ガラスが流下せず	・流下ノズルの加熱性の向上（高周波加熱電力増加、断熱材設置） ・流下状況の監視方法改善 ・温度確認後に流下を開始
⑤ かくはん棒の曲がり	・過大な負荷をかけた	・流下性回復のための回復運転できず	・かくはん棒への負荷と棒減肉の管理
⑥ 天井レンガ落下	・間接加熱装置の温度降下が急激であったため、発生した応力によりレンガに亀裂が生じて落下	・溶融ガラスの流下性低下	・ガラス溶融炉の立上げ／停止時の温度降下速度を管理
⑨ 接液レンガによる流下ノズル閉塞	・アクティブ試験中に熱応力によって接液レンガに欠けが生じ、レンガ小片が炉底部に蓄積	・溶融ガラスの流下性低下	・ガラス溶融炉の立上げ／停止時の温度降下・昇温速度を管理 ・立上げ、停止方法を見直し、欠け発生の可能性を低減 ・ガラスを保有した状態でのシャットダウン時には、レンガ小片の抜き出しを実施

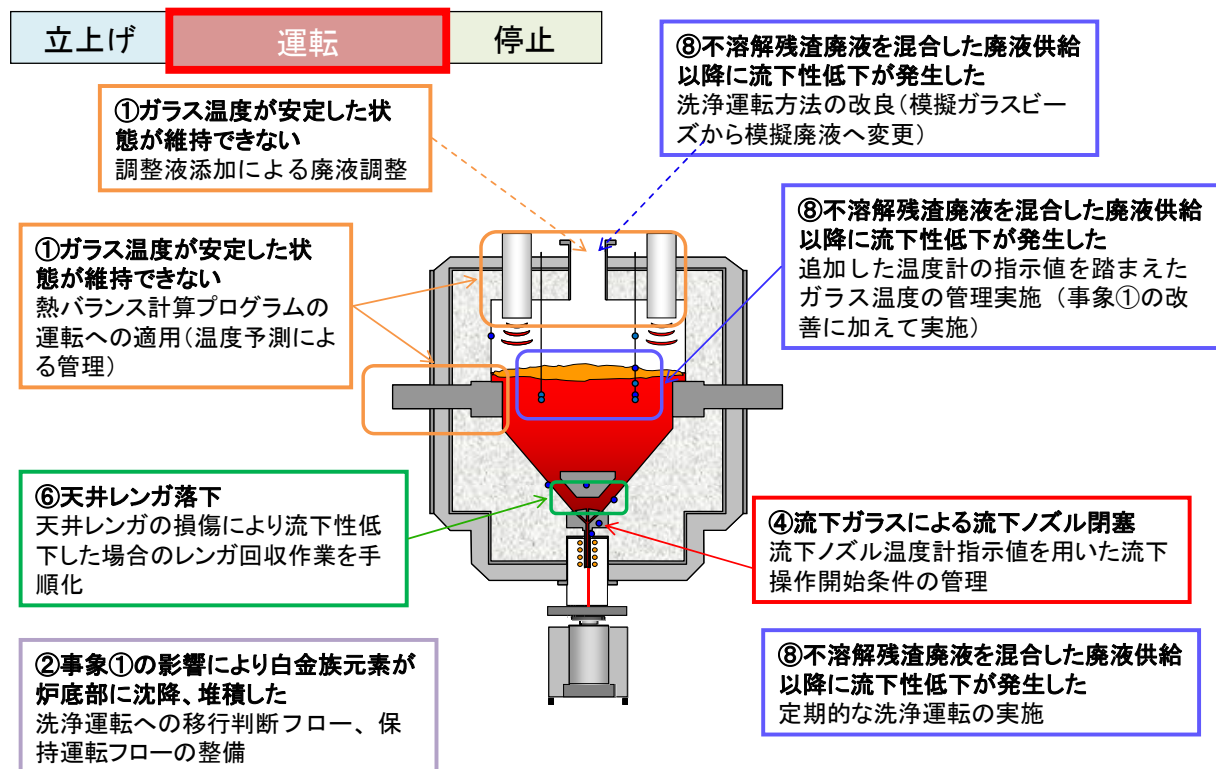
さらに原因究明や対策検討のプロセスの妥当性・充足性について評価、確認するという観点から、特に「ガラス溶融運転フェーズに関する事象」に対する対策が安定運転とどう関連しているか、及び個々の対策が相互に重なり合って安定運転に悪い影響を及ぼしていないかという点については、以下のとおりである。

- ・図 5.1-1 に示すように、「① 仮焼層形成が不十分・不安定なため、ガラス温度等が安定しない」、「② 事象①の影響により白金族元素が炉底部に沈降、堆積した」、「④ 流下ガラスによる流下ノズル閉塞」、「⑥ 天井レンガ落下」及び「⑧ 不溶解残渣廃液を混合した廃液供給以降に流下性低下が発生した」事象に対して、ガラス溶融炉の運転方法の改善のうち運転フェーズに関係する対策(図中の赤四角で囲った部分)を講ずることにより、各々の対策が相互に悪い影響を及ぼしていないことが分かる。
- ・ガラス溶融炉において発生した不具合事象に対して、「供給条件(廃液、原料ガラスビーズ、模擬廃液)」、「運転条件(炉底低温運転、主電極－底部電極間通電、流下運転、運転上の温度設定等)」、「設備条件(温度測定点、運転管理ツール、レンガ構造、かくはん棒等)」の3つの影響因子に分類して原因と対策を記述している(図 5.1-2)。
- ・このような分析によって、事業者はガラス溶融炉の中で起こっている様々な現象について反応メカニズムの把握に努めていることが分かる。
- ・ガラス溶融炉の立上げ、運転及び停止に至る一連の運転管理に必要な項目の洗い出しと安定運転管理範囲を把握し、設備の制約条件下で効果的な対策が講じられていることが分かる。

(2) 委員会での確認事項

最初にガラス固化技術を開発した TVF と六ヶ所再処理工場における処理対象廃棄物の相違等、当初は必ずしも十分に把握されていなかった根本的な要因にまで遡及した原因究明がなされ、KMOC 試験の結果も踏まえ、運転管理に必要な項目の洗い出しと安定運転のための管理範囲が把握される等、安定運転の実現に向けて必要な対策が講じられていることを確認した。

また、原因究明と対策検討に関するプロセスにおいて、ガラス溶融炉の中で起こっている現象についてその反応メカニズムの把握に努めるとともに、安定運転の面から各々の対策が相互に悪い影響を及ぼしていないことを確認しながら、設備の制約条件下で効果的な対策を講じていくという一連の事象を解決していくプロセスは妥当であったことを確認した。



事象	立上げ	運転	停止
①ガラス温度が安定した状態が維持できない	—	・調整液添加による廃液調整 ・熱バランス計算プログラムの運転への適用(温度予測による管理)	—
②事象①の影響により白金族元素が炉底部に沈降、堆積した	—	・洗浄運転への移行判断フロー、保持運転フローの整備	—
④流下ガラスによる流下ノズル閉塞	—	・流下ノズル温度計指示値を用いた流下操作開始条件の管理	—
⑤かくはん棒の曲がり	—	—	—
⑥天井レンガ損傷	間接加熱のヒータ温度降下速度を10℃/10分程度以内として管理	・天井レンガの損傷により流下性低下した場合のレンガ回収作業を手順化	間接加熱のヒータ温度降下速度を10℃/10分程度以内として管理
⑦高レベル廃液の漏れ	—	—	—
⑧不溶解残渣廃液を混合した廃液供給以降に流下性低下が発生した	—	・追加した温度計の指示値を踏まえたガラス温度の管理実施(①の改善に加えて実施) ・洗浄運転方法の改良 ・定期的な洗浄運転の実施	—
⑨接液レンガによる流下ノズル閉塞	炉底温度②昇温速度を15℃/h程度以内として管理	—	炉底温度②温度昇温速度を15℃/h程度以内として管理 運転停止時にドレンアウト実施を原則とする管理

図 5.1-1 ガラス溶融炉の運転方法の改善のうち運転に関する項目
(「添付資料－8 アクティブ試験におけるガラス溶融炉の運転改善」より)

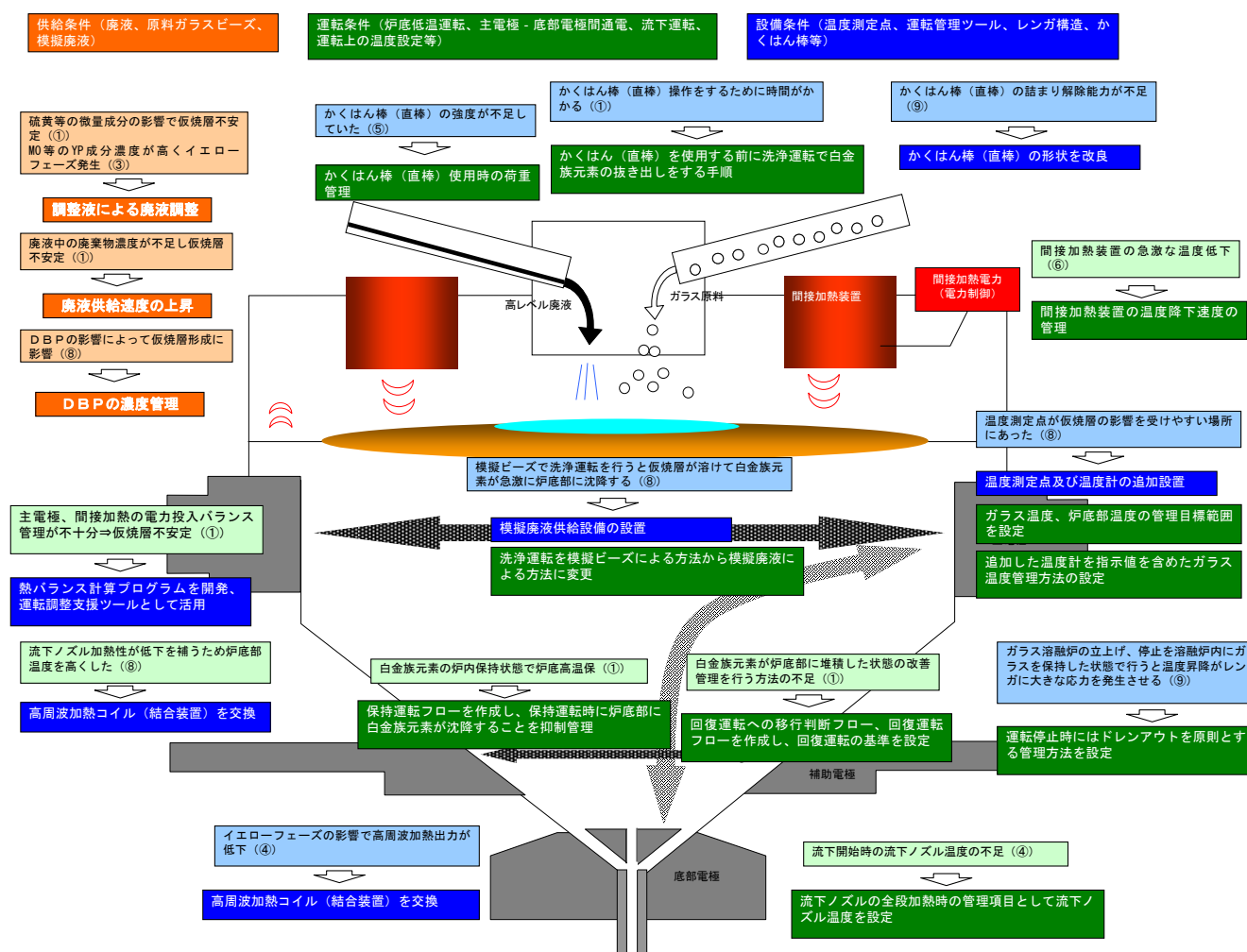


図 5.1-2 ガラス熔融炉の試験で発生した不具合事象の原因と対策の分類
(「添付資料ー 8 アクティブ試験におけるガラス熔融炉の運転改善」より)

5. 1. 2 安定化対策の確認試験

(1) 聴取した結果の要点

アクティブ試験で経験した事象に対して講じた安定化対策の効果が、確認試験においても同様に安定した結果が得られたかを調べるために、事業者から聴取し、以下の結果を得ている。

- ・ガラス熔融炉の安定運転確認の判断基準は、1) ガラス温度と気相温度が運転管理マニュアルで設定した温度範囲内であること、2) 炉底部の温度が運転管理マニュアルで設定した温度以下であること、3) 白金族管理指標が運転管理範囲にあること(白金族元素が炉底部に過度に沈降、堆積することなく運転できること)、としている。
- ・ガラス固化設備の処理能力は高レベル廃液供給速度が最大 70ℓ/h とされており、これは再処理工場の 1 日当たりの最大再処理量である 4.8tU/日に対応するものとしている。
- ・ガラス固化試験の安定運転確認において、“廃液供給 10 バッチ＋洗浄 3 バッチ＋廃液供給 10 バッチ”の運転を行い、上記 1)～3) を満足する安定した状態が維持できることが分かる。
- ・ガラス固化試験の性能確認において、70ℓ/h の廃液供給速度で運転できることが分かる。

(2) 委員会での確認事項

事業者においてガラス溶融炉の安定運転確認と性能確認の判断基準が定められ、ガラス固化試験において、その判断基準を達成することができたことから、これまでに経験した事象に対して講じた安定化対策の有効性と妥当性を確認した。

なお、廃液供給と洗浄運転を相当程度繰り返す場合に安定運転ができるかについては、第5. 1. 4項において検討した。

5. 1. 3 処理能力の確認（高レベル廃液のバッファ容量）

(1) 聴取した結果の要点

ガラス固化設備の操業性に関する確認を行うに際し、ガラス固化設備の処理能力だけではなく、上流工程との関係を含めたプラント全体として円滑な処理が見込めることが必要と考え、ガラス固化設備に係る高レベル廃液のバッファ容量について事業者から聴取し、以下の結果を得ている。

- ・上流設備から供給される溶液を大きな貯槽で一旦廃液を貯めることにより上流設備との運転調整を行うガラス固化設備では、高レベル廃液のバッファ容量として、表 5. 1-3 に示すとおり、ガラス固化設備が停止した場合でも上流設備から供給される溶液を半年から2年程度貯蔵でき、ガラス固化設備の停止がプラント全体の処理に直ちに影響を及ぼすことはない。

表 5. 1-3 高レベル廃液のバッファ容量

場 所	対象溶液	バッファ容量 ^(注)
前処理-ガラス固化	不溶解残渣廃液	2年程度
分離-ガラス固化	高レベル濃縮廃液	5ヶ月程度
	アルカリ濃縮廃液	7ヶ月程度

(注) 処理運転の期間（年間250日程度）において、上流設備から供給される溶液を貯留できる容量

(2) 委員会での確認事項

ガラス固化設備と上流設備の間には一定期間のバッファ容量が確保されており、ガラス固化設備の一時的な稼働率低下が上流設備の稼働率に、あるいは逆に上流設備の稼働状況がガラス固化設備の稼働に影響を与えるものでないものと考えられる。

5. 1. 4 処理能力の確認（ガラス固化設備の安定的な処理能力）

(1) 聴取した結果の要点

安定運転の見通しを得るためには、操業運転開始後のガラス固化設備がどの程度のバッチ数を処理するかを見極める必要があると考えた。その点については、以下のとおりである。（第4. 3. 5項（1）参照）

- ・熱上げからドレンアウトまでの廃液供給運転の期間（年間250日程度）において、ガラス固化試験の安定運転確認に基づく「廃液供給10バッチ＋洗浄運転3バッチ」のサイクルを複数サイクル繰り返すことが分かる（図5. 1-3参照）。

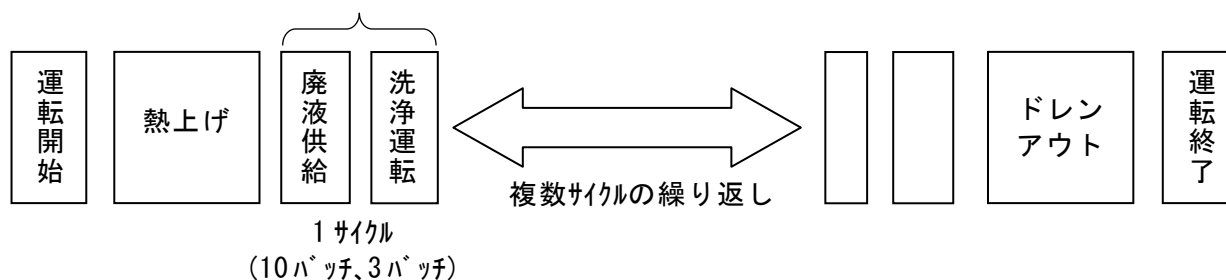


図 5.1-3 操業運転開始後のガラス固化設備の基本運転工程

(2) 委員会での確認事項

ガラス固化試験では廃液供給 10 バッチを 2 回実施した程度であることから、廃液供給 10 バッチ＋洗浄運転 3 バッチのサイクルが相当程度繰り返される場合に安定運転可能かという観点で、事業者が公表した「再処理施設アクティブ試験におけるガラス固化試験結果等に係る報告について」（日本原燃(株)、平成 25 年 7 月 26 日）をもとに評価を行った。その結果、当該資料の 2 ページに記載されている事項から、ガラス固化設備では、運転管理指標を確実に監視し、「廃液供給 10 バッチ＋洗浄運転 3 バッチ」サイクルを基本とし、状況に応じて洗浄頻度を変える等の柔軟な運転をすることによって、既設炉の設計寿命期間中の安定運転が期待できる。また、安定運転が継続できないような状況が発生した場合においても、5.1.1 項に記載のような対策により早期の検知が可能である。

なお、現行のガラス溶融炉の試験運転での実績をもとに、安定運転を実現するためには、堆積する白金族の洗浄運転を定期的に入れる必要がある。ガラス固化体発生本数の低減化の観点からは、洗浄運転を入れることは望ましいことではないが、洗浄運転を含めた運転サイクルの設定は、事前確認試験やガラス固化試験の結果より現行設備で安定運転を実現するための現実的な対処方策として妥当と判断した。但し、操業運転開始後は経時的な状態の変化に十分留意する必要がある、状況に応じて柔軟かつ適切な対応を講じることが肝要である。

5. 1. 5 ガラス固化体品質の安定性

(1) 聴取した結果の要点

ガラス固化設備の安定運転に関する見通しを得るために、ガラス溶融炉の運転だけではなく、ガラス固化体の品質管理も重要であると考え、ガラス固化体の品質管理について、事業者から聴取し、以下の結果を得た。

- ・ガラス固化体の品質管理項目は発熱量、固化ガラス化学組成、ガラス固化体重量及び固化ガラス均質性とし、表 5.1-4 に示す管理方法で品質管理をしている。
- ・各品質管理項目に対して、化学試験や KMOC 試験等及び流下ガラスの分析に基づく品質管理方法を適用している（表 5.1-4 参照）。
- ・KMOC 試験等により検証した品質管理方法は、アクティブ試験においても有効であることを確認するとともに、これまでに約 350 本のガラス固化体製造実績がある。
- ・ガラス固化体の品質管理に関係する事象として、アクティブ試験第 4 ステップで発生した YP の抑制対策がある。ガラス溶融炉に供給する廃液に対する YP 成分の管理目標値を

設定し、廃液調整の段階で成分管理を行っている。この対策実施以降のアクティブ試験において YP の発生は確認されておらず、ガラス固化体の品質維持という観点で講じた対策に効果があったことが分かる。

- ・アクティブ試験で製造した約 350 本のガラス固化体については、YP 発生やガラス固化体重量が規定の量に達していないものを除き、品質管理基準を満足している。なお、YP が発生したガラス固化体の処分については、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(平成 20 年 11 月)において安全上問題ないとの評価がなされている。

表 5.1-4 ガラス固化体品質管理項目
(「添付資料－１０ ガラス固化体の製品品質について」より)

管理項目		管理基準	管理方法
発熱量 ＜ガラス固化体貯蔵中における固化体の温度上昇防止＞		発熱量の上限値を設定	①ガラス固化する廃液の分析による組成管理と供給量管理 ⇒化学試験 ^(注) で組成評価プロセスの検証、廃液供給精度の検証等を行い、組成管理の妥当性を確認 ②原料ガラスビーズの調達管理
固化ガラス化学組成	廃棄物含有率 ＜固化体の浸出率抑制＞	廃棄物含有率の管理値を設定	
	ナトリウム含有率 ＜固化体の浸出率抑制＞	酸化ナトリウム含有率の管理値を設定	
ガラス固化体重量 ＜流下ガラスの溢流防止＞		標準重量値の設定	①重量計の指示値を用いた管理 ⇒化学試験 ^(注) で固化体重量の検証を行い重量管理の妥当性を確認
固化ガラス均質性*		熔融ガラス温度の下限値を設定	①熔融ガラス温度管理 ⇒基礎試験で均質性が確保できるガラス温度条件を検証 ⇒KMOC 試験で温度管理と均質性の関係を確認

(注) 図 4.1-2 六ヶ所再処理工場における試験運転の経緯を参照

(2) 委員会での確認事項

ガラス固化体の品質管理方法が定められており、そのための運転管理方法等が整備されている。さらに、既に相当程度の品質管理基準を満足するガラス固化体の製造実績があり、ガラス熔融炉の温度条件、供給する廃液条件が管理され、安定運転の諸条件が達成できれば、操業運転においても安定した品質のガラス固化体製造が期待できる。

なお、ガラス固化設備の品質保証体制については再処理工場全体の安定運転を維持し、継続的に改善に取り組んでいくためにも重要と認識しているが、再処理工場全体の枠組みで検討すべきものであり、今回の評価対象から除外した。

5. 2 操業中の諸条件の変動を想定した安定運転の見通し

操業中に設備として発生することが想定される事象への対応やアクティブ試験を踏まえた操業中の運転範囲に対する評価に基づく操業運転後の安定運転の見通しについて検討を行った。

5. 2. 1 不具合事象への対応

(1) 聴取した結果の要点

アクティブ試験での様々な運転経験を基にして、今後の操業運転において発生が想定される事象や運転条件に対する手順の整備や適切な対応能力等については、以下のことが分かった。

- ・アクティブ試験の結果を踏まえた運転管理として、a) 調整液添加による廃液調整、b) ガラス温度、気相温度、炉底温度の管理、c) 廃液混合に関わる DBP 濃度や不溶解残渣廃液(FINE)量の管理、d) 天井レンガ落下防止のための管理等を運転管理マニュアルに反映している(表 5.2-1 参照)。
- ・先行施設及び実機の試験運転で発生した事象に加え、設備に発生が想定される事象を想定事象リストとしてまとめるとともに、事象発生時の対応フローや対応手順を明確化し、想定事象マニュアルに反映している。
- ・ガラス固化設備のアクティブ試験では、ガラス溶融炉の電力調整に対する技術的判断の助勢を行うための日勤スタッフを運転員とは別に配置することで安定運転実現に向けた運転管理に万全を期す体制を整備している。
- ・KMOC 試験への参画によりガラス固化設備の運転員に対する技術力の維持・向上を図るとともに、六ヶ所再処理工場全体として、技術・技能認定制度を整備し、定期的な試験や面接を行うことで関係者の技術力の維持・向上に努めている。
- ・アクティブ試験において経験した「仮焼層形成が不十分・不安定なため、ガラス温度等が安定しない」、「天井レンガ落下」等の事象は当初は想定していなかったものであるが、事業者の社内体制に加え JAEA、電力中央研究所、当該施設メーカーである IHI 等の協力を得て対応し解決できている。
- ・今後の操業運転において発生が想定される事象以外の事象が発生した場合にも、これまでと同様の体制が維持・構築され、速やかな原因究明・再発防止、予防保全見直し等が可能である。

表 5.2-1 安定運転を行うための運転管理項目

(「添付資料－3 ガラス固化設備におけるアクティブ試験の概要」を元に作成)

No	管理項目	安定運転の障害となる事象 ^(注)	管理項目設定の成果と効果
1	調整液添加による廃液調整（混合槽）		
	崩壊熱	① 仮焼層形成が不十分・不安定なため、ガラス温度等が安定しない ③ 初期のアクティブ試験の多くのバッチで YP が発生した	・ 安定運転の確認ができた ・ YP の発生が抑えられた
	廃棄物濃度		
	YP 形成成分濃度		
	核分裂生成物含有率		
2	1 バッチの平均温度		
	ガラス温度	① 仮焼層形成が不十分・不安定なため、ガラス温度等が安定しない ② 事象①の影響により白金族元素が炉底部に沈降、堆積した	・ 安定運転の確認ができた ・ 白金族元素が炉底部に過度に沈降、堆積することなく運転できた
	気相温度		
	炉底温度①		
3	回復運転に移行するための判断基準	② 事象①の影響により白金族元素が炉底部に沈降、堆積した	・ 白金族元素が炉底部に過度に沈降、堆積することなく運転できた
4	流下ノズル温度		
	流下開始時の流下ノズル温度計温度	④ 流下ガラスによる流下ノズル閉塞	・ 流下ガラスによる流下ノズル閉塞は発生していない
5	直棒の曲がり防止		
	遠隔による荷重負荷減肉量	⑤ かくはん棒の曲がり	・ かくはん棒の使用実績はあったが、かくはん棒の曲がり事象は発生していない
6	天井レンガ落下防止		
	間接加熱装置温度降下速度	⑥ 天井レンガ落下	・ 天井レンガ落下は発生していない
7	接液レンガ欠け抑制		
	立上げ・停止における温度変化	⑨ 接液レンガによる流下ノズル閉塞	・ 接液レンガの割れ、欠けの発生は抑えられている
8	DBP 濃度		
	混合槽における DBP 濃度	⑧ 不溶解残渣廃液を混合した廃液供給以降に流下性低下が発生した	・ 安定運転の確認ができた ・ 白金族元素が炉底部に過度に沈降、堆積することなく運転できた
9	不溶解残渣廃液（FINE）混合量		
	混合槽への FINE 混合量	⑧ 不溶解残渣廃液を混合した廃液供給以降に流下性低下が発生した	・ 安定運転の確認ができた ・ 白金族元素が炉底部に過度に沈降、堆積することなく運転できた

(注) 事象①～⑨については第 4. 3. 1 項を参照。

(2) 委員会での確認事項

以下の 1)～4) の事項を確認した。

- 1) ガラス固化設備の安定運転を目指す上で、アクティブ試験での経験を踏まえ、マニュアル類を整備することが重要であるが、これに対して、ガラス溶融炉等の運転に関わるマニュアル類には、化学試験、アクティブ試験、KMOC 試験等で得られた知見が反映されており、安定運転を目指す上で必要な対策が講じられている。
- 2) 今後も、継続的な教育・訓練の実施により、運転員の技術力の維持・向上を図る体制、社内のバックアップ体制が構築されている。
- 3) 操業運転において発生が想定される事象に適切に対応できる体制がある。
- 4) さらには、アクティブ試験開始当初想定していなかった事象に対して対応した実績が示すように、発生が想定される事象以外の事象が発生した場合でも適切に対応できる体制がある。

5. 2. 2 操業中の運転条件の変動への対応

(1) 聴取した結果の要点

アクティブ試験のガラス固化試験において安定運転が確認できたことを受けて、操業運転で想定される廃液条件に対する安定運転の見通しが得られているかについては、以下のとおりである。

- ・ ガラス溶融炉で処理する廃液の処理パターンと白金族成分、YP 成分、FINE 及び DBP 等の溶融炉への影響因子を整理し、ガラス固化試験では、最も厳しい条件と考えられる高レベル濃縮廃液 (HALW)、FINE 及びアルカリ濃縮廃液 (ALW) の 3 つの廃液を混合した処理パターンでの安定運転ができる (表 5. 2-2 参照)。
- ・ 仮焼層を安定的に管理するという観点では、廃液中の FINE 混合量と DBP 濃度が関係する因子である。KMOC 試験の結果を踏まえて、FINE 混合量については設計相当、DBP 濃度については濃度の管理目標値相当という廃液条件を設定してガラス固化試験において安定運転ができる (表 5. 2-3 参照)。

表5. 2-2 処理廃液パターンと溶融炉への影響因子の関係

(「添付資料－5 ガラス固化設備における操業後の安定運転の見通しについて」より)

処理パターン		溶融炉への影響因子				溶融炉への影響評価
		白金族成分	YP 成分	FINE	DBP	
1	HALW + FINE + ALW	○	○	○	○	溶融炉運転として、最も厳しい廃液条件
2	HALW + ALW	○	○		○	1. に次いで厳しい条件
3	HALW + FINE	○	○	○		
4	HALW 単独	○	○			
5	ALW 単独				○	

表5.2-3 事前確認試験及びガラス固化試験の廃液条件

(「添付資料－5 ガラス固化設備における操業後の安定運転の見通しについて」より)

		B系事前確認試験		B系ガラス固化試験	
				安定運転確認	性能確認
廃液条件	廃液混合	HALW+ALW	HALW+FINE+ALW	HALW+FINE+ALW	
	白金族濃度	設計相当		設計相当	
	YP 成分濃度	調整液によって管理目標値以下に調整		調整液によって管理目標値以下に調整	
	FINE 混合量	－	設計 1/2 相当	設計相当	
	DBP 濃度	長期貯留によって DBP は放射線分解		管理目標値相当	

(2) 委員会での確認事項

アクティブ試験の廃液条件は操業運転の運転範囲を踏まえて決められたものであり、その廃液条件によりアクティブ試験のガラス固化試験において安定運転が確認できたことから、操業運転における運転条件への対応も可能であり、操業運転での安定運転の見通しがあると言える。

5. 3 評価

再処理工場におけるガラス固化設備の安定運転に関する見通しについて、委員会での確認事項に基づき技術的評価を行った。以下に評価結果をまとめる。

(1) アクティブ試験で顕在化した技術課題に対する対応策の妥当性

- ・当初は必ずしも十分に把握されていなかった根本的な要因にまで遡及した原因究明がなされ、KMOC 試験の結果も踏まえ、運転管理に必要な項目の洗い出しと安定運転のための管理範囲が把握される等、安定運転に必要な対策が講じられている。
- ・原因究明と対策検討に関するプロセスにおいて、安定運転の面から各々の対策が相互に悪い影響を及ぼしていないことを確認しながら、設備の制約条件下で効果的な対策を講じていくという一連の事象を解決していくプロセスは妥当であった。
- ・事業者においてガラス溶融炉の安定運転確認と性能確認の判断基準が定められ、その基準を適用してガラス固化試験において、その判断基準を達成することができたことから、これまでに経験した事象に対して講じた対策の有効性と妥当性が確認された。
- ・ガラス固化施設と上流設備の間には一定期間のバッファ容量が確保されており、ガラス固化設備の一時的な稼働率低下が上流設備の稼働率に、あるいは逆に上流設備の稼働状況がガラス固化施設の稼働に直ちに影響を与えるものでない。
- ・ガラス固化設備では、運転管理指標を確実に監視し、「廃液供給 10 バッチ＋洗浄運転 3 バッチ」サイクルを基本とし、状況に応じて洗浄頻度を変える等の柔軟な運転をすることによって、既設炉の設計寿命期間中の安定運転が期待できる。また、安定運転が継続できないような状況が発生した場合においても、早期の検知が可能である。
- ・ガラス固化体の品質管理方法が定められており、そのための運転管理方法等が整備されている。さらに、既に相当程度の品質管理基準を満足するガラス固化体の製造実績があることから、操業運転においても安定した品質のガラス固化体製造が期待

できる。

(2) 操業中の諸条件の変動を想定した安定運転の見通し

- ・アクティブ試験での経験を踏まえ、マニュアル類を整備することが重要であるが、ガラス溶融炉等の運転管理マニュアル類には、想定される事象への対応を含め、化学試験、アクティブ試験、KMOC 試験等で得られた貴重な知見が反映されており、ガラス固化設備の安定運転を目指す上で必要な対策が講じられている。
- ・継続的な教育・訓練の実施や技術・技能認定制度を整備し、定期的な試験や面接を行うことにより、運転員の技術力の維持・向上を図るしくみや社内バックアップ体制が構築されている。
- ・アクティブ試験の廃液条件は操業運転の運転範囲を踏まえて決められたものであり、その廃液条件で実施したアクティブ試験のガラス固化試験において安定運転ができている。
- ・上記3点より、操業運転において発生が想定される事象や運転条件へ適切に対応できる能力がある。
- ・アクティブ試験で経験した当初想定していなかった事象に対応した実績が示すとおり、発生が想定される事象以外の事象が発生した場合においても適切に対応できる体制がある。

以上のことから、ガラス固化設備と運転管理体制に対して、アクティブ試験の経験を踏まえた改善により、様々な対策が練られており、現時点で想定される範囲において安定運転実現に向けての準備が整っていると判断した。但し、ガラス固化設備は経験工学的要素が強く、発生することを想定していない事象が発生する可能性は否定できないが、それらに対応するための技術サポート体制が整えられており、万一そのような事象が発生したとしてもタイムリーに適切な対応が期待できるものと評価する。なお、操業運転開始後は継続的な状態の変化を常に監視し、状況に応じて柔軟かつ適切な対応を講じることが肝要である。

但し、以上は現行設備の制約条件の中で判断したものであって、ガラス溶融炉等の寿命や経年劣化を考慮して、今後も継続的な改善を行う必要がある。これらについては次節に示した。

5. 4 今後の改善への期待

現行のガラス固化設備の安定運転に関する見通しを得るという観点からは付加的な事項である、ガラス固化に関する技術開発という視点からの評価と今後の改善へ期待される事項を合わせて、以下に示す。

- ・安定運転の達成に対する役割を担ったと考えられる定期的な洗浄運転は、ガラス固化体量の増加に繋がるため、廃棄物減容の観点からは望ましいことではない。今後、継続的な運転技術の向上等によりその頻度や量を低減化する努力を行うこと。
- ・アクティブ試験で発生した様々な不具合事象に対する対策は、現行設備の制約を踏ま

えて運転管理の面から実施されたものであることを理解した上で、第4.5節に示されたガラス固化技術の高度化、すなわち新型炉の開発では、より抜本的な設備改善により、可能な限り洗浄運転を極小化する（あるいは必要としない）ガラス溶融炉の実現を目指すこと。

また、操業中の運転管理体制に関しては、

- ・ 今後経験する新たな知見についても逐次マニュアル等に反映し、安定運転に必要な体制の改善に継続的に取り組むこと。
- ・ 運転期間が増加すると、各種機器の経年劣化等も考えられることから、寿命を意識した保守作業の実施を心がけること。
- ・ ガラス固化設備の運転をマニュアル通り実施していても、運転条件の変動によって廃液条件が変化し、品質へ影響することもあることから、運転データを分析・解析することによりガラス固化の状況を把握すること。

将来技術への期待として、

- ・ 流下ガラスの温度、流動状況のモニタリングについては、ガラス溶融炉が設置されている場所が高放射線下にあるという制約を踏まえ、古典的ではあるが頑健な方法も視野に入れて検討すること。
- ・ 不溶解残渣廃液を他の高レベル廃液とは別に処理することの是非については、最終処分を含めた最適化の観点より検討すること。

6. まとめ

エネ総研は、幾度かの竣工時期の延期を経てきた六ヶ所再処理工場において、試験運転の最終段階であるガラス固化試験が本年5月末に完了したことを契機として、再処理、放射性廃棄物処理・処分に関する技術的な視点から、自主研究「核燃料サイクル技術の安定性に関する検討」を行うこととした。自主研究の全体計画は複数のステップより構成されており、今回は、そのうち第一ステップ「再処理工場におけるガラス固化設備の安定運転実現に向けた見通し」に関するものである。

エネ総研は、自主研究を始めるに当たって、客観性を確保するために、学識経験者により構成される「核燃料サイクル技術の安定性に関する検討」委員会を設置し、委員会の指導、レビューを受けつつ自主研究を実施した。第一ステップでは、事務局であるエネ総研において「安定運転とは、当該設備・機器の性能を安定に維持しつつ、所定の期間を運転し所定の処理量を達成すること」と定義し、それに基づき、評価に関わる3つの検討の視点「(1) アクティブ試験で顕在化した技術課題に対する対応策の妥当性」、「(2) 操業中の諸条件の変動を想定した安定運転の見通し」、「(3) ガラス固化に関する技術開発」、を策定して、委員会へ付託した。それに基づいて、事業者から必要となる技術資料の提供を求め、内容聴取と現地視察を行い、ガラス固化設備の安定運転実現に向けた見通しについて技術的検討と評価を実施した。

委員会では、上記(1)及び(2)の2つの検討の視点に基づいて、現行のガラス固化設備の安定運転の見通しを評価し、その結果、ガラス固化設備と運転管理体制に対してアクティブ試験の経験を踏まえた改善により、様々な対策が練られており、現時点で想定される範囲において安定運転実現に向けての準備が整っていると判断された。但し、ガラス固化設備は経験工学的要素が強く、発生することを想定していない事象が発生する可能性は否定できないが、それらに対応するための技術サポート体制が整えられており、万一そのような事象が発生したとしてもタイムリーに適切な対応が期待できるものと評価した。

以上は、現行設備の制約条件の中で判断したものであって、上記(3)の視点からは、ガラス溶融炉等の寿命や経年劣化を考慮して、今後も改善に向けた継続的な努力を期待するという意見が示された。その主な点を以下に示す。

- ・安定運転の達成に対する役割を担ったと考えられる定期的な洗浄運転は、ガラス固化体量の増加に繋がるため、廃棄物減容の観点からは望ましいことでない。今後、継続的な運転技術の向上等によりその頻度や量を低減する努力を行うこと。
- ・アクティブ試験で発生した様々な不具合事象に対する対策は、現行設備の制約を踏まえて運転管理の面から実施されたものであることを理解した上で、ガラス固化技術の高度化、すなわち新型炉の開発では、より抜本的な設備改善により、可能な限り洗浄運転を必要としないガラス溶融炉の実現等を目指すこと。

以上に示した委員会の判断を受けて、エネ総研としては、事業者である日本原燃(株)に対して、再処理工場の中で重要な設備と位置付けられるガラス固化設備の安定的な操業運転に向けて、万全の態勢を以って粛々と進めていくことを期待するものである。