

金属燃料リサイクルシステムの 臨界安全設計検討(Ⅱ)

A Study of the Criticality Safety Design
for the Metal Fuel Recycle System (Ⅱ)

中林 弘樹 栗坂 健一 佐藤 浩司 丹羽 元 青木 和夫*

Hiroki NAKABAYASHI, Kenichi KURISAKA, Koji SATO,
Hajime NIWA and Kazuo AOKI*

次世代原子力システム研究開発部門
FBRサイクルグループ

FBR Cycle Group

Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

March 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。

本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。

なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>) より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っています。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4

日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課

電話029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency

Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency

2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan

Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5901

金属燃料リサイクルシステムの臨界安全設計検討 (II)

日本原子力研究開発機構 次世代原子力システム研究開発部門

FBRサイクル統括ユニット

中林 弘樹、栗坂 健一、佐藤 浩司、丹羽 元

青木 和夫*

(2006 年 1 月 27 日受理)

本報告書は、電力中央研究所および核燃料サイクル開発機構の共同研究である「金属燃料リサイクルシステムの設計評価」の内容に基づき、大型電解精製槽の臨界安全設計について検討したものであり、2003 年に報告した「金属燃料リサイクルシステムの臨界安全設計検討 (I)」の続編となるものである。検討では、「金属燃料リサイクルシステムの臨界安全設計検討 (I)」で提案した「化学形態管理併用質量管理」概念に基づいて、より具体的な臨界安全管理設計および核的制限値の素案を提示し、その設定の考え方を示した。

次に、実際のプロセスにおいて臨界安全性に影響をおよぼす可能性のある異常事象の要因を抽出し、それらに基づいた解析モデルを構築し臨界安全性の解析を行った。その結果、ここで提示した臨界安全設計の下では、抽出された大部分の異常事象に対して十分な安全マージンを確保できることが示された。一方で、溶融塩中の Pu の不安定性に起因する不溶解物の異常発生事象では、極端に安全側の想定に基づくと臨界安全上の問題が生じることが分かった。

さらに、これまで明確化されてこなかったが本システムにおける臨界安全を確保するために重要な工程間物質移送についても検討を行い、その管理方法及び手順を示した。複雑な物質管理および移送管理が必要な金属電解法システムにおいて誤装荷や誤移送などのヒューマンエラーを排除するために、完全に電子化・自動化されたプラント制御・運転システムである「オペレーション・バイ・ワイヤ」の概念を提示した。

最後に、本検討で示した臨界安全設計を実現するために解決が必要な技術的課題について検討した。指摘した課題の中で特に重要なものは、不溶解物の生成挙動および関係するデータの取得、化学形態管理の実現に不可欠な計量管理・工程管理システムの構築である。

A Study of the Criticality Safety Design for the Metal Fuel Recycle System (II)

Hiroki NAKABAYASHI, Kenichi KURISAKA, Koji SATO, Hajime NIWA,
and Kazuo AOKI*

FBR Cycle Synthesis Unit
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received January 27, 2006)

This report describes a study about the criticality safety design for the large-scale electrorefiner, which is designed in the activities of “The Design Study of Metal Fuel Recycle System (2002)”, under the collaboration with Central Research Institute of Electric Power Industry, and the continuation of “A Study of the Criticality Safety Design for the Metal Fuel Recycle System”, which was published in September 2003. The report includes a detail design and quantitative criticality parameter limits based on the “mass control supported with chemical form control” concept which is proposed in “A Study of the Criticality Safety Design for the Metal Fuel Recycle System”. Furthermore procedures to determine these limits are presented in the report.

Next we studied contingencies anticipated under the critical control and executed quantitative criticality safety analyses of models based on these abnormal conditions. The analytical result shows adequate safety margins are maintained in the criticality safety design even if many of these contingencies could occur. However the event of abnormal generation of insoluble led to intolerable results on the design if extremely strict modeling would be imposed to uncontrollable criticality parameters like geometry.

Moreover we propose a concept of material transfer and production control system, we call it as “Operation by wire”, which all the equipment and handling machines are electrified and the control system provides completely automated process control and operation. The control system eliminates human errors and violations like over batching error or transfer error in the commercial scale metal fuel recycle system with complicated operation procedures.

Finally technical issues in order to substantialize the concept of mass control supported with chemical form control in the recycle system are indicated.

Keywords: Criticality Safety Design, Criticality Safety Evaluation, Electro-metalurgical Process, Metal Fuel Recycle, Metallurgical Process

* Advanced Reactor Technology Co., Ltd.

目次

1. はじめに.....	1
2. 電解精製槽の臨界安全設計.....	3
2.1 基本戦略.....	3
2.2 臨界安全設計.....	3
3. 臨界因子の設定根拠.....	8
3.1 容積（制限）.....	8
3.1.1 陽極.....	8
3.1.2 液体Cd陰極.....	9
3.2 化学形態（管理＋制約）.....	10
3.3 質量（管理＋制限）.....	11
3.3.1 陽極（HM-Zr合金）.....	11
3.3.2 液体Cd陰極（PuCd ₆ ）.....	12
3.3.3 溶融塩中溶解Pu（Puイオン濃度）.....	14
3.3.4 不溶解物（Pu酸化物粒子）.....	15
3.3.5 Cdプール.....	18
3.4 Pu富化度（制約）.....	18
3.5 濃度（管理）.....	20
3.6 同位体組成（制約）.....	21
3.7 嵩密度（制約）.....	22
3.8 減速度.....	23
3.9 可溶性中性子吸収材.....	24
3.10 不溶解物の核的制限値設定の考え方.....	24
3.10.1 不溶解物発生量の計量.....	24
3.10.2 本設計において一例として算出した不溶解物の核的制限値.....	26
3.10.3 実際の設計における許容量の設定.....	27
4. 安全マージンに関する考え方.....	30
4.1 安全マージンと安全係数について.....	30
4.2 核的制限値と計量誤差.....	31
5. 電解精製槽における偶発的事象の分析.....	33
5.1 陽極.....	33
5.1.1 容積制限に影響する偶発的事象と設計対応.....	33
5.1.2 化学形態管理に影響する偶発的事象と設計対応.....	36
5.1.3 質量管理に影響をおよぼす偶発的事象と設計対応.....	37
5.1.4 Pu富化度管理に影響をおよぼす偶発的事象と設計対応.....	38

5.1.5 同位体比管理に影響をおよぼす偶発的事象と設計対応	39
5.1.6 嵩密度管理に影響をおよぼす偶発的事象と設計対応.....	40
5.1.7 減速度管理に影響する偶発的事象と設計対応	40
5.1.8 反射条件管理に影響する偶発的事象と設計対応.....	40
5.1.9 隔離距離管理に影響する偶発的事象と設計対応.....	41
5.2 固体陰極.....	42
5.2.1 化学形態管理に影響する偶発的事象と設計対応.....	42
5.3 液体Cd陰極	42
5.3.1 容積制限に影響する偶発的事象と設計対応.....	43
5.3.2 化学形態管理に影響する偶発的事象と設計対応.....	45
5.3.3 質量管理に影響をおよぼす偶発的事象と設計対応	46
5.3.4 Pu富化度管理に影響をおよぼす偶発的事象と設計対応.....	47
5.3.5 減速度管理に影響する偶発的事象と設計対応	48
5.3.6 反射条件管理に影響する偶発的事象と設計対応.....	48
5.3.7 隔離距離管理に影響する偶発的事象と設計対応.....	49
5.4 溶融塩.....	49
5.4.1 化学形態管理に影響する偶発的事象と設計対応.....	50
5.4.2 質量管理に影響する偶発的事象と設計対応.....	51
5.4.3 濃度管理に影響する偶発的事象と設計対応.....	52
5.4.4 可溶性中性子吸収材管理に影響する偶発的事象と設計対応.....	53
5.5 Cdプール.....	54
5.5.1 化学形態管理に影響する偶発的事象と設計対応.....	54
5.5.2 質量管理に影響をおよぼす偶発的事象と設計対応	55
5.6 不溶解物.....	56
5.6.1 化学形態管理に影響する偶発的事象と設計対応.....	56
5.6.2 質量管理に影響する偶発的事象と設計対応.....	56
5.6.3 嵩密度制約に影響を与える偶発的事象と設計対応	58
6. 異常事象をモデル化した臨界安全性解析.....	76
6.1 基本状態のモデル化	76
6.1.1 溶融塩	76
6.1.2 Cdプール	76
6.1.3 陽極バスケット.....	77
6.1.4 固体陰極	77
6.1.5 液体Cd陰極.....	78
6.1.6 同位体比	78
6.2 基本状態における臨界安全性解析.....	78

6.3 質量異常事象の臨界安全性解析	79
6.3.1 陽極過剰装荷	79
6.3.2 陽極過剰装填	79
6.3.3 液体Cd陰極におけるPuの優先的析出.....	79
6.3.4 液体Cd陰極における過剰析出	79
6.3.5 析出陰極未取出状態における装荷陽極の装填	80
6.4 電極の落下	80
6.4.1 落下.....	80
6.4.2 落下後接触.....	80
6.5 同位体比の異常	80
6.5.1 Pu同位体比の異常	80
6.5.2 Li同位体比の異常	81
6.6 液位の異常	81
6.6.1 溶融塩液位の異常	81
6.6.2 Cdプール液位の異常	81
6.7 不溶解物の異常生成	81
7. 電解精製槽内不溶解物の発生に関する検討	97
7.1 不溶解物の工学的な発生防止方策.....	97
7.2 不溶解物発生量の推算.....	97
7.2.1 雰囲気中不純物による不溶解物生成量の計算モデル.....	97
7.2.2 平常状態における不溶解物増加の試算	98
7.2.3 電解精製槽カバーガス異常による不溶解物増加の試算	99
7.2.4 推算モデルの問題と不溶解物発生に関わる工学的課題	99
8. Arセル内の核燃料物質移送管理およびその手順の検討	102
8.1 検討の前提	102
8.2 設計思想.....	102
8.3 工程管理システム.....	104
8.4 物質の管理および取扱.....	105
8.4.1 ハンドリング装置による取扱	105
8.4.2 配管による移送.....	106
8.5 各物質の移送手順.....	107
8.5.1 陽極.....	107
8.5.2 固体陰極	109
8.5.3 液体Cd陰極.....	110
8.5.4 溶融塩.....	110
8.5.5 Cd (Cdプール)	111

9. 大型電解精製槽の臨界安全設計に関する技術的課題.....	115
9.1 基礎的な知見に関する課題	115
9.2 工学／技術に関する課題.....	116
9.3 本質的安全設計に関わる課題.....	117
10. まとめ	118

Contents

1. Introduction	1
2. A Criticality Safety Design of the Electro-refiner	3
2.1 Essential Strategy	3
2.2 The Criticality Safety Design	3
3. Design Basis of the Described Criticality Parameters	8
3.1 Volume	8
3.1.1 Anode	8
3.1.2 Liquid Cd Cathode	9
3.2 Chemical Form	10
3.3 Mass	11
3.3.1 Anode (HM-Zr Alloy)	11
3.3.2 Liquid Cd Cathode (PuCd6)	12
3.3.3 Pu in the Molten Salt (Pu ion solubility)	14
3.3.4 Insoluble (Pu Oxide Particle)	15
3.3.5 Cd Pool	18
3.4 Pu enrichment	18
3.5 Concentration	20
3.6 Isotopic Composition	21
3.7 Bulk Density	22
3.8 Moderation	23
3.9 Soluble Neutron Absorber	24
3.10 Mean to Design the Criticality Safety Limits of the Insoluble	24
3.10.1 Measurement of the Generated Insoluble	24
3.10.2 An Example of the Designed Criticality Safety Limits of the Insoluble	26
3.10.3 General Method to Design of the Limits of the Insoluble	27
4. Thinking about The Safety Margin	30
4.1 Safety Margin and Safety Factor	30
4.2 Operational Limit and Measurement Error	31
5. Analysis of Contingencies on the Electro-refiner	33
5.1 Anode	33
5.1.1 Contingencies effecting on the Volume Restriction and the Protection	33
5.1.2 Contingencies effecting on the Chemical Form Control and the Protection	36
5.1.3 Contingencies effecting on the Mass Control and the Protection	37
5.1.4 Contingencies effecting on the Pu Enrichment Control and the Protection	38

5.1.5	Contingencies effecting on the Isotopic Composition Control and the Protection	39
5.1.6	Contingencies effecting on the Bulk Density Control and the Protection ..	40
5.1.7	Contingencies effecting on the Moderation Control and the Protection	40
5.1.8	Contingencies effecting on the Reflection Control and the Protection	40
5.1.9	Contingencies effecting on the Distance Control and the Protection	41
5.2	Solid Cathode	42
5.2.1	Contingencies effecting on the Chemical Form Control and the Protection	42
5.3	Liquid Cd Cathode	42
5.3.1	Contingencies effecting on the Volume Restriction and the Protection	43
5.3.2	Contingencies effecting on the Chemical Form Control and the Protection	45
5.3.3	Contingencies effecting on the Mass Control and the Protection	46
5.3.4	Contingencies effecting on the Pu Enrichment Control and the Protection	47
5.3.5	Contingencies effecting on the Moderation Control and the Protection	48
5.3.6	Contingencies effecting on the Reflection Control and the Protection	48
5.3.7	Contingencies effecting on the Distance Control and the Protection	49
5.4	Molten Salt	49
5.4.1	Contingencies effecting on the Chemical Form Control and the Protection	50
5.4.2	Contingencies effecting on the Mass Control and the Protection	51
5.4.3	Contingencies effecting on the Concentration Control and the Protection ..	52
5.4.4	Contingencies effecting on the Soluble Neutron Absorber Control and the Protection	53
5.5	Cd Pool	54
5.5.1	Contingencies effecting on the Chemical Form Control and the Protection	54
5.5.2	Contingencies effecting on the Mass Control and the Protection	55
5.6	Insoluble	56
5.6.1	Contingencies effecting on the Chemical Form Control and the Protection	56
5.6.2	Contingencies effecting on the Mass Control and the Protection	56
5.6.3	Contingencies effecting on the Bulk Density Control and the Protection ..	58
6.	Criticality Safety Evaluations of the Contingencies	76
6.1	Modeling of the Normal State	76
6.1.1	Molten Salt	76
6.1.2	Cd Pool	76
6.1.3	Anode Basket	77
6.1.4	Solid Cathode	77
6.1.5	Liquid Cd Cathode	78

6.1.6 Isotopic Composition	78
6.2 Criticality Safety Evaluations on the Normal State	78
6.3 Criticality Safety Evaluations on the Mass Error State	79
6.3.1 Overloading in the Anodes	79
6.3.2 Setting Excess Anodes to the Electrorefiner	79
6.3.3 Precedented Deposition of Pu in the Liquid Cd Cathode	79
6.3.4 Excess Deposition of Pu in the Liquid Cd Cathode	79
6.3.5 Setting New Anodes without drawing Deposited Liquid Cd Cathode	80
6.4 Falling Down of Electrodes	80
6.4.1 Falling Down	80
6.4.2 Falling Down and Closing with Each Electrodes	80
6.5 Wrong Isotopic Composition	80
6.5.1 Wrong Isotopic Composition of Pu	80
6.5.2 Wrong Isotopic Composition of Li	81
6.6 Abnormal Liquid Level	81
6.6.1 Abnormal Liquid Level of Molten Salt	81
6.6.2 Abnormal Liquid Level of Cd Pool	81
6.7 Abnormal Generation of Insoluble	81
7. Study on the Generation of Insoluble in the Electro-refiner	97
7.1 Protection System of Insoluble	97
7.2 Estimation of Quantity of Insoluble	97
7.2.1 Calculational Model to Estimation of Insoluble by Impurities Concentration in the Ar Atmosphere	97
7.2.2 Test Estimation of Generated Insoluble Quantity on the Normal State	98
7.2.3 Test Estimation of Generated Insoluble Quantity on the Abnormal State of Ar Cover Gas System	99
7.2.4 Problems of the Estimation Model and the Technical Issues	99
8. Control and Procedure of the Fuel Material Handling in the Ar Cell	102
8.1 The Precondition	102
8.2 The Design Philosophy	102
8.3 The Process Control System	104
8.4 Management and Control of the Materials	105
8.4.1 Control by the Material Handling Equipments	105
8.4.2 Material Transport by Piping	106
8.5 Material Transport Procedures	107
8.5.1 Anode	107

8.5.2 Solid Cathode	109
8.5.3 Liquid Cd Cathode	110
8.5.4 Molten Salt	110
8.5.5 Cd in the Cd Pool	111
9. Technical Issues about Criticality Safety to realize the Large-scale Electro-refiner	115
9.1 Issues about Basic Knowledges	115
9.2 Industrial/Technological Issues	116
9.3 Issues about Essential Safety Design	117
10. Concluding Remarks	118
References	119

表目次

表 1.1	電解精製槽の設計変更点	2
表 2.1	金属電解法 大型 8 極電解精製槽 単一ユニット臨界安全管理項目	4
表 2.2	金属電解法 大型 8 極電解精製槽 単一ユニット臨界安全管理項目の制限値設定（案）	5
表 2.3	電解精製槽にて扱う化学形態の推定臨界下限値（1/2）	6
表 5.1	臨界安全性に影響を与える事象とその起因事象(1/5)	59
表 5.2	臨界安全性に影響をおよぼす事象に対するバリアと事象のもたらす影響度(1/12)	64
表 6.1	臨界安全解析の基本モデル	83
表 6.2	解析モデルのケース（濃度、液位および同位体比のパターン）	84
表 6.3	解析モデルのモード分け（電極および不溶解物の位置および量）	85
表 6.4	臨界解析モデル 基本状態	86
表 6.5	異常の臨界解析モデル 質量異常(1/2)	87
表 6.6	異常の臨界解析モデル 質量異常(2/2)	88
表 6.7	異常の臨界解析モデル Pu/U比異常	89
表 6.8	異常の臨界解析モデル 電極の落下	90
表 6.9	異常の臨界解析モデル 同位体比異常、熔融塩・Cdプール液位異常	91
表 6.10	異常の臨界解析モデル 不溶解物の異常生成	92

図目次

図 3.1	測定の不確かさを考慮した不溶解物の生成許容量	29
図 3.2	溶融塩中Puの変動許容幅と核的制限値	29
図 6.1	Case03-MODE00 の計算体系	93
図 6.2	Case03-MODE01 の計算体系	93
図 6.3	Case03-MODE02 の計算体系	94
図 6.4	Case03-MODE06 の計算体系	94
図 6.5	Case30-MODE31 の計算体系	95
図 6.6	Case30-MODE32 の計算体系	95
図 6.7	Case30-MODE33 の計算体系	95
図 6.8	Case99-MODE21 の計算体系	96
図 6.9	Case99-MODE22 の計算体系	96
図 8.1	電解精製槽周りの物流の概略	112
図 8.2	セル内主要機器配置図	113
図 8.3	オペレーション・バイ・ワイヤによる安全機能の自動化	114

1. はじめに

「金属燃料リサイクルシステムの臨界安全設計検討(I)」⁽¹⁾では、電力中央研究所と核燃料サイクル開発機構との共同研究である「金属燃料リサイクルシステムの設計評価」における電解精製槽⁽²⁾⁽³⁾について、そのプロセス及び機器設計の特徴に基づいた臨界安全設計の基本戦略を提示した。具体的には、質量管理を主体としつつ新たに提案した「化学形態管理」の概念を併用することにより合理的な臨界安全設計を実現しようというものであり、臨界安全性の視点から本概念の成立可能性を、平常状態と比べて極端に保守的なモデルを用いた解析計算により確認した。

その続編となる本報告書では、上記概念を基に具体的な核的制限値および最大許容限度の案とその設定の考え方を提示した。さらに実際のプロセスにおいて臨界安全性に影響をおよぼす可能性のある異常事象を抽出し、それらに基づいた異常解析モデルで安全性評価を行った。最後に、ここで提示した臨界安全設計を実現するために今後の解決が必要な技術的課題について記述した。

なお、本報告書では前報告書の発行以降に設計研究にて行われた変更（主に電解精製槽寸法の大型化）⁽⁴⁾を反映している。表 1.1に設計変更点をまとめる。

表 1.1 電解精製槽の設計変更点

変更点	変更後	変更前
機器寸法の大型化 サンプリング装置、塩/Cd抜き出し用のポンプ装置および攪拌装置の設置により大型化。	幅 : 3820mm 奥行き : 1220mm 高さ : 950mm	幅 : 2720mm 奥行き : 1220mm 高さ : 950mm
溶融塩使用量 機器寸法の大型化に伴う溶融塩使用量の増大（電極面積との関係から液位は同じ）。	1762L (溶融塩液位 : 378mm)	1254L (溶融塩液位 : 378mm)
溶融塩中溶解HM量 溶融塩使用量の増大に伴う在庫量の増加（電界制御上の理由から濃度は同じ）。	U : 60kg Pu : 181kg MA : 13kg	U : 43kg (23.7wt%) Pu : 129kg (71.1wt%) MA : 9.5kg (5.2wt%)
炉心燃料と径ブランケット燃料の混合処理 Pu同位体の平均化のため。	炉心燃料と径ブランケット燃料を陽極単位で受け入れて同じ電解精製槽で混合処理する。	炉心燃料（軸ブランケット部含む）用と径ブランケット燃料用にそれぞれ専用の電解精製槽を使用。

2. 電解精製槽の臨界安全設計

2.1 基本戦略

バッチ式運転により、固体および液体状の核分裂性物質を含む物質を取り扱い、固体に関してはマテリアルハンドリング装置による移送、液体に関しては配管による移送を行うこと、および特に固体系では臨界質量が比較的大きい一方で安全形状寸法が小さいという特徴があることから機器設計上の合理性を優先して、主たる臨界安全管理方法として質量管理を適用する。

また、単一ユニットである電解精製槽内で核分裂性物質のとり化学形態が複数あること、それら各化学形態に対する推定臨界質量が大きく異なること、ただし化学形態間の移動（化学形態の変化）を工学的に制御可能であることから、質量管理に化学形態管理を併用する。

2.2 臨界安全設計

表 2.1に大型8極電解精製槽を単一ユニットとする臨界安全設計を示す。さらに、表 2.2にこの臨界安全設計における核的制限値、最大許容限度を現時点で得られる情報をもとに設定した素案を示す。この設定根拠は次章にて詳しく説明する。また制限値設定において参考としたデータとして、電解精製工程において核分裂性物質が取りうる化学形態それぞれの推定臨界下限値（計算値）を表 2.3に示す。

なお本報告書では、核的制限値、最大許容限度および推定臨界下限値を以下の意味で使用する。

核的制限値 : 臨界管理パラメータについて、平常運転範囲で許される最大値。

最大許容限度 : 単一の偶発的事象が発生した場合における臨界管理パラメータの許容限度値。すなわち、想定される如何なる単一事象が生じたとしても最大許容限度を超えないように安全設計を行う。

推定臨界下限値 : 臨界解析コードの計算結果より未臨界であると推定される臨界管理パラメータの最大値。具体的には一般に広く使用されるモンテカルロ計算コードによる中性子実効増倍率の計算結果が 3σ の誤差を含めて0.95以下となる値。

表 2.1 金属電解法 大型 8 極電解精製槽 単一ユニット臨界安全管理項目

ユニット	大型 8 極電解精製槽（工業規模）	基本戦略	管理方法				主管理項目※	説明
			臨界因子	管理		制約		
				管理	制限			
カテゴリーⅠ	形状 容積	—	—	—	—	—	△	・陽極バスケットの容積制限により、陽極に装荷されうる核物質の物理的質量を制限。 ・液体 Cd 陰極るつぼの容積制限により、液体 Cd 陰極に回収されうる Pu の物理的質量を制限。
		内部固体中性子吸収材 化学形態（元素組成）	—	—	—	—	—	使用しない
カテゴリーⅡ	形状 容積 質量 Pu 富化度 濃度 同位体組成 高密度 減速度 可溶性中性子吸収材	陽極： HM-Zr 合金 ・固体陰極： U 金属 ・液体 Cd 陰極： Pu-Cd 化合物 ・電解精製槽： 溶融塩及び 不溶解物 (Pu 酸化物)	—	—	・液体 Cd 陰極の装荷試験を Cd 金属のみに制約。	△	・陽極については、装荷物質の種類を管理。 ・固体陰極については、電解操作の管理により Pu 析出を防止。 ・液体陰極については、反応物種類(Cd)、電解操作の管理により Pu の化学形態を管理。 ・溶融塩中については、酸素および水分の管理により、不溶解物 (Pu 酸化物) の生成および蓄積を防止。 ・Pu 単体金属もしくは Pu 酸化物を生成しうる反応試験の使用を禁止。	
		化学形態毎の Pu 質量	—	—	・陽極および液体 Cd 陰極については容積制限から、物理的質量が制限される。	○	・陽極については、装荷物質の質量を管理。 ・液体陰極については、Cd 装荷量、電解操作の管理により Pu の回収量を管理。 ・溶融塩中については、受入/払出差計量および塩サンプリング等のプロセス管理により内部在庫量を管理する。	
		Pu 富化度	—	—	陽極装荷物の Pu 富化度 (受入燃料)	—	・陽極装荷物の Pu 富化度を装荷前のサンプリング等により管理する。	
		濃度	溶融塩の Pu 濃度	—	—	溶融塩中の Pu 濃度をプロセス管理を通じて監視する。		
		同位体組成	Pu/MA 同位体比	—	U 同位体組成	—	・受入燃料の仕様を制限する。 ・プランケット燃料は炉心燃料との適切な混合により、Pu-239 を希釈する。	
		高密度	—	—	Pu 酸化物（不溶解物）	—	・Pu 酸化物（不溶解物）の高密度を実証された最大の高密度を考慮して設定する。	
		減速度	雰囲気中湿度の管理	—	減速材の不使用	—	・電解精製槽中の雰囲気は高純度 Ar ガスとし、セル雰囲気に対して弱正圧とする。	
		可溶性中性子吸収材	Li（溶融塩成分）同位体比	—	—	—	・溶融塩成分の Li 同位体(Li-6)を監視（緩やかな管理）。	

※主管理項目はその重要度に応じて分類し、○は主たる管理要素、△は補助的管理要素を示す。

表 2.2 金属電解法 大型8極電解精製槽 単一ユニット臨界安全管理項目の制限値設定 (案)

ユニット	大型8極電解精製槽 (工業規模)		工程		電解精製 (同時電解)		
	臨界因子		管理方法		プロセス中央値		
	形状	容積	管理方法	制限値	核的制限値	最大許容限度 (案)	臨界因子の設計値
カテゴリーⅠ	形状	—	—	—	—	—	設計基準値/推定臨界下限値
	容積	陽極および液体Cd陰極の容積を制限。	陽極 3.1L 液体Cd陰極	陽極 3.1L 液体Cd陰極	耐用年数、腐食、変形、製作上の精度を考慮して設定。	球形状 陽極 22.6L 液体Cd陰極 80.0L	球形状 陽極 22.6L 液体Cd陰極 80.0L
カテゴリーⅡ	内部固体中性子吸収材	—	—	—	—	—	—
	化学形態 (元素組成)	管理+制約	陽極 HM-Zr合金 (せん断片) 固体陰極 U金属 (デンンドライト) 液体Cd陰極 PuCd金属間化合物 溶融塩中 装荷溶融塩 (LiCl-KCl)	陽極 HM-Zr合金 (せん断片) 固体陰極 U金属 (デンンドライト) 液体Cd陰極 PuCd金属間化合物 溶融塩中 装荷溶融塩 (LiCl-KCl) 不溶解物 (Pu酸化物)	陽極 HM-Zr合金 (せん断片) 固体陰極 U金属 (デンンドライト) 液体Cd陰極 PuCd金属間化合物 溶融塩中 装荷溶融塩 (LiCl-KCl) 不溶解物 (Pu酸化物)	陽極 HM-Zr合金 (せん断片) 固体陰極 U金属 (デンンドライト) 液体Cd陰極 PuCd金属間化合物 溶融塩中 装荷溶融塩 (LiCl-KCl) 不溶解物 (Pu酸化物)	陽極 HM-Zr合金 (せん断片) 固体陰極 U金属 (デンンドライト) 液体Cd陰極 PuCd金属間化合物 溶融塩中 装荷溶融塩 (LiCl-KCl) 不溶解物 (Pu酸化物)
	質量	各化学形態毎に管理。 陽極および液体Cd陰極は制限。 Cdプールと溶融塩は区別しない。	陽極(HM-Zr合金) 1.14kg-Pu/基 液体Cd陰極(PuCd ₆) 2.275kg-Pu/基 溶融塩中溶解Pu 227kg-Pu 不溶解物(PuO ₂ 粒子) 0 kg-Pu	陽極(HM-Zr合金) 2.3kg-Pu/基 液体Cd陰極(PuCd ₆) 4.1kg-Pu/基 溶融塩中溶解Pu 240kg-Pu 不溶解物(PuO ₂ 粒子) 40kg-Pu未満 (計測等の不確かさに依存)	陽極(HM-Zr合金) 7.0kg-Pu/基 液体Cd陰極(PuCd ₆) 19.0kg-Pu/基 溶融塩中溶解Pu 252kg-Pu 不溶解物(PuO ₂ 粒子) 40kg-Pu	陽極(HM-Zr合金) 55kg-Pu (> 物理的最大量) 液体Cd陰極(PuCd ₆) 194kg-Pu (> 物理的最大量) LiCl-KCl-Pu 2557kg-Pu (+濃度異常) 不溶解物(PuO ₂ 粒子) 57kg-Pu	陽極(HM-Zr合金) 55kg-Pu (> 物理的最大量) 液体Cd陰極(PuCd ₆) 194kg-Pu (> 物理的最大量) LiCl-KCl-Pu 2557kg-Pu (+濃度異常) 不溶解物(PuO ₂ 粒子) 57kg-Pu
	Pu 富化度	制約	陽極装荷物 17.3wt%	陽極装荷物 20.0wt%	陽極装荷物 70.0wt%	陽極装荷物 100.0wt%	陽極装荷物 100.0wt%
	濃度	管理 (塩中Pu濃度)	溶融塩中溶解Pu (7.58wt%/salt)	溶融塩中溶解Pu (7.58wt%/salt)	溶融塩中溶解Pu (7.58wt%/salt)	溶融塩中溶解Pu (7.58wt%/salt)	溶融塩中溶解Pu (7.58wt%/salt)
	同位体組成	管理+制約 (U/Pu/MA 同位体組成)	U : 0.06/0.01/0.03/99.9 Pu : 使用済燃料相当 MA : 使用済燃料相当	U : 0.06/0.01/0.03/99.9 Pu : 使用済燃料相当 MA : 使用済燃料相当	U : 0.06/0.01/0.03/99.9 Pu : 使用済燃料相当 MA : 使用済燃料相当	U : 0.06/0.01/0.03/99.9 Pu : 使用済燃料相当 MA : 使用済燃料相当	U : 0.06/0.01/0.03/99.9 Pu : 使用済燃料相当 MA : 使用済燃料相当
	高密度	制約 (不溶解物の高密度)	酸化物粉末に対して 2~3g/cc	酸化物粉末に対して 2~3g/cc	酸化物粉末に対して 2~3g/cc	酸化物粉末に対して 2~3g/cc	酸化物粉末に対して 2~3g/cc
	減速度	管理+制約 (零閉気中湿度)	—	—	—	—	—
	可溶性中性子吸収材	管理 (溶融塩成分 Li 同位体比)	天然組成 Li-6/Li-7 = 7.5/92.5	天然組成 Li-6/Li-7 = 7.5/92.5	天然組成 Li-6/Li-7 = 7.5/92.5	天然組成 Li-6/Li-7 = 7.5/92.5	天然組成 Li-6/Li-7 = 7.5/92.5

※同位体比の記述順 Pu : ²³⁸Pu/²³⁹Pu/²⁴⁰Pu/²⁴¹Pu/²⁴²Pu、U : ²³⁴U/²³⁵U/²³⁶U/²³⁸U、MA : ²³⁷Np/²⁴¹Am/²⁴³Am/²⁴⁴Cm/²⁴⁵Cm

表 2.3 電解精製槽にて扱う化学形態の推定臨界下限値 (1/2)

ユニット	大型 8 極電解精製槽		工程		電解精製 (同時電解)	
	代表的化学形態別評価表					
化学形態	形状制限	密度	濃度・Pu 富化度	同位体比	推定臨界下限値	備考
HM-10%Zr 合金 (陽極装荷物)	なし (球体系)	15.8g/cc	17.3wt%	U : 0.03/0.01/0.06/99.9 Pu : 1/68/26/2.5/2.5	54.567 kg-Pu (22.18L)	UPu1730Zr10Met_Sph-iNFL-Wat20 ・水全反射 ・外側炉心 (平衡) 新燃料の富化度 (核的制限値) ・同位体組成は平衡炉心新燃料組成 (核的制限値)
				U : 0.03/0.01/0.06/99.9 Pu : 0/80/10/10/0	34.778 kg-Pu (14.13L)	UPu1730Zr10Met_Sph-i080-Wat20 ・水全反射 ・外側炉心 (平衡) 新燃料の富化度 (核的制限値) ・同位体組成は異常 (最大許容限度)
			20.0wt%	U : 0.03/0.01/0.06/99.9 Pu : 1/68/26/2.5/2.5	45.849 kg-Pu (16.12L)	UPu2000Zr10Met_Sph-iNFL-Wat20 ・水全反射 ・Pu 富化度異常 (最大許容限度) ・同位体組成は平衡炉心新燃料組成 (核的制限値)
				U : 0.03/0.01/0.06/99.9 Pu : 0/80/10/10/0	30.133 kg-Pu (10.59L)	UPu2000Zr10Met_Sph-i080-Wat20 ・水全反射 ・Pu 富化度異常 (最大許容限度) ・同位体組成は異常 (最大許容限度)
U-Pu 合金 (標準リワーク品)	なし (球体系)	19.86g/cc	70wt%	U : 0.03/0.01/0.06/99.9 Pu : 1/68/26/2.5/2.5	8.6562 kg-Pu (0.622L)	UPu70Met_Sph-iNFL-Wat20 ・水全反射 ・Cd 陰極回収物の U/Pu 比 (最大許容限度) ・同位体組成は平衡炉心新燃料組成 (核的制限値)
				U : 0.03/0.01/0.06/99.9 Pu : 0/80/10/10/0	6.9217 kg-Pu (0.497L)	UPu70Met_Sph-iNFL-Wat20 ・水全反射 ・Cd 陰極回収物の U/Pu 比 (最大許容限度) ・同位体組成は異常 (最大許容限度)
Pu 金属 (異常リワーク品)	なし (球体系)	19.86g/cc	100wt%	U : 0.03/0.01/0.06/99.9 Pu : 1/68/26/2.5/2.5	5.9592 kg-Pu (0.300L)	PuMet_Sph-iNFL-Wat20 ・水全反射 ・Cd 陰極回収物の U/Pu 比異常 (設計基準) ・同位体組成は平衡炉心新燃料組成 (核的制限値)
				U : 0.03/0.01/0.06/99.9 Pu : 0/80/10/10/0	4.9559 kg-Pu (0.249L)	PuMet_Sph-iNFL-Wat20 ・水全反射 ・Cd 陰極回収物の U/Pu 比異常 (設計基準) ・同位体組成は異常 (最大許容限度)

表 2.3 電解精製槽にて扱う化学形態の推定臨界下限値 (2/2)

ユニット		大型 8 極電解精製槽		工程		電解精製（同時電解）	
代表的化学形態別評価表							
化学形態		形状制限	密度	濃度・Pu 富化度	同位体比	推定臨界下限値	備考
PuCd ₆ （液体 Cd 陰極回収物）		なし （球体系）	9.28g/cc	100wt%	U：0.03/0.01/0.06/99.9 Pu：1/68/26/2.5/2.5	196.396 kg-Pu (80.80L)	PuCd ₆ _Sph-iNFL-Wat20 ・水全反射 ・同位体組成は平衡炉心新燃料組成（核的制限値）
					U：0.03/0.01/0.06/99.9 Pu：0/80/10/10/0	134.480 kg-Pu (55.33L)	PuCd ₆ _Sph-i080-Wat20 ・水全反射 ・同位体組成異常（最大許容限度）
LiCl-KCl-Pu （均一溶融塩系）		なし （球体系）	1.856g/cc	8.405wt%	U：0.03/0.01/0.06/99.9 Pu：1/68/26/2.5/2.5	∞	LiClKCl_Sph-HM008048Pu100-iNFL-Wat20 ・水全反射 ・Pu 濃度異常（最大許容限度） ・同位体組成は平衡炉心新燃料組成（核的制限値）
					U：0.03/0.01/0.06/99.9 Pu：0/80/10/10/0	∞	LiClKCl_Sph-HM008048Pu100-i080-Wat20 ・水全反射 ・Pu 濃度異常（最大許容限度） ・同位体組成異常（最大許容限度）
			2.125g/cc	20.0wt%	U：0.03/0.01/0.06/99.9 Pu：1/68/26/2.5/2.5	5483 kg-Pu	LiClKCl_Sph-HM008405Pu100-iNFL-Wat20 ・水全反射 ・Pu 濃度異常（設計基準） ・同位体組成は平衡炉心新燃料組成（核的制限値）
					U：0.03/0.01/0.06/99.9 Pu：0/80/10/10/0	2976 kg-Pu	LiClKCl_Sph-HM008405Pu100-i080-Wat20 ・水全反射 ・Pu 濃度異常（設計基準） ・同位体組成異常（最大許容限度）
PuO ₂ （不溶解物）		なし （球体系）	4.5g/cc	100wt%	U：0.03/0.01/0.06/99.9 Pu：1/68/26/2.5/2.5	57.151 kg-Pu	PuO ₂ TD040-iNFL-Wat20 ・水全反射 ・同位体組成は平衡炉心新燃料組成（核的制限値）
					U：0.03/0.01/0.06/99.9 Pu：0/80/10/10/0	41.249 kg-Pu	PuO ₂ TD040-i080-Wat20 ・水全反射 ・同位体組成異常（最大許容限度）
PuCl ₃ （溶融塩不均質化）		なし （球体系）	5.7g/cc	100wt%	U：0.03/0.01/0.06/99.9 Pu：1/68/26/2.5/2.5	65.313 kg-Pu	PuCl ₃ -iNFL-Wat20 ・水全反射 ・同位体組成は平衡炉心新燃料組成（核的制限値）
					U：0.03/0.01/0.06/99.9 Pu：0/80/10/10/0	47.322 kg-Pu	PuCl ₃ -i080-Wat20 ・水全反射 ・同位体組成異常（最大許容限度）

3. 臨界因子の設定根拠

ここでは、前章において示した核的制限値および推定臨界下限値の素案をどのような考えに基づいて設定したかを詳述する。なお、ここで定量値を決めるのに用いた安全係数や誤差などは、現時点で十分な信頼性を持つ値もしくは完全に合理的な理由を基に定めたものではなく、今後の研究開発において明らかにしていくべきデータであることを予め断っておく。

3.1 容積（制限）

3.1.1 陽極

(1) プロセス中央値

陽極バスケット内容積（寸法通り）

$$(3 \times 10 \times 24) \times 4 + 3 \times 3 \times 24 = 3096 \text{cc} \cong 3.1 \text{L}$$

(2) 核的制限値

加工時の公差および製作精度上の裕度を保守側に評価して使用前における制限値を設定。さらに、腐食代と耐用年数、許容される変形余裕を考慮した核的制限値を設定する。

核的制限値を超えそうな変形もしくは腐食に到った場合には、直ちに使用を停止する。

(3) 最大許容限度

容積の異常を検知可能な範囲で裕度を設定する。すなわち、核的制限値を超える容積の異常が生じてから、それを検知するまでの進展によって生じる更なる容積の増大によっても臨界と成り得ないような設計とする。

(4) 推定臨界下限値

外側炉心新燃料相当（Pu富化度、Pu同位体比）のHM-Zr合金（100%TD）の推定臨界下限容積（球形状）より、

$$22.6 \text{ L (55kg-Pu)}$$

が陽極バスケット容積制限における最大許容限度設定の目安となる。

(5) 備考

陽極バスケットの容積拡大について、上記のようにきわめて裕度の大きい設計となっている（ $22.6/3.1=7.3$ 倍）ため、使用中の検査としては極度に異常な変形、腐食が発生していないことを確認する（目視確認）程度で良いと考えられる。また、陽極バスケットは交換可能部品（準消耗品）であり、適切な維持基準を設けることにより合理的な運用が可能になると考えられる。

なお、腐食については陽極バスケット外面寸法（完全腐食）においても容積上の臨界安全性は確保できる。容器部材厚さを1cmとしても

$$(5 \times 12 \times 25) \times 4 + 5 \times 5 \times 25 = 6625 \text{cc} \cong 6.7 \text{L}$$

となり、推定臨界下限値に比べて十分に小さい。

3.1.2 液体 Cd 陰極

(1) プロセス中央値

陰極るつぼ内容積（寸法通り）

$$\pi \times 13^2 \times 15 = 7964 \text{cc} \cong 8.0 \text{L}$$

(2) 核的制限値

加工時の公差および製作精度上の裕度を保守側に評価して使用前における制限値を設定。さらに、腐食代と耐用年数、許容される変形余裕を考慮した核的制限値を設定する。

核的制限値を超えそうな変形もしくは腐食に到った場合には、直ちに使用を停止する。

(3) 最大許容限度

容積の異常を検知可能な範囲で裕度を設定する。すなわち、核的制限値を超える容積の異常が生じてから、それを検知するまでの進展によって生じる更なる容積の増大によっても臨界と成り得ないような設計とする。

(4) 推定臨界下限値

PuCd₆ (Pu同位体組成は新燃料相当) の推定臨界下限容積を最大許容限度設定の目安とする。

$$80.0 \text{L} \text{ (194kg-Pu)}$$

(5) 備考

液体Cd陰極るつぼの容積拡大について、きわめて裕度の大きい設計となっている（80.0/8.0=10倍）ため、使用中の検査においては極度に異常な変形、腐食が発生していないことを確認する（目視確認）程度で良いと考えられる。また、陰極るつぼは交換可能部品（消耗品）であり、適切な維持基準を設けることにより合理的な運用が可能になると考えられる。

なお、腐食についてはるつぼ外面寸法（完全腐食）においても容積上の臨界安全性を確保できる。陰極るつぼの部材厚さは1cmであるので、

$$\pi \times 14^2 \times 16 = 9852 \text{cc} \cong 9.9 \text{L}$$

となり、推定臨界下限値に比べて十分に小さい。

3.2 化学形態（管理＋制約）

(1) プロセス中央値

電解精製槽においてPu等の核分裂性核種は、陽極におけるHM-Zr合金、液体Cd陰極におけるCd金属間化合物、熔融塩中のイオンおよびCdプール中の溶解物という形態で存在している。なお、固体陰極回収物のデンドライト状U金属があるが、U同位体比がプラント運用レベルで制約・管理されているため、これは臨界管理上の核物質ではないものと規定できる。

また、熔融塩中の金属イオンが酸素原子等と結合することにより発生する不溶解物については、その発生を極力防止するが存在は考慮するものとする。

(2) 核的制限値

陽極においてはプラントに受け入れる燃料形態を限定することでその化学形態をHM-Zr合金（金属燃料せん断片）に制約する。電解精製工程の後工程からのリワークを考慮すると、U-Pu合金の受入の可能性がある。ただし現時点ではリワーク品の受入は行わない設計となっているので考慮しない。

固体陰極での析出物は固体陰極材料、電解操作の管理（浴塩組成、電圧および電流値）によってU金属以外が析出しないよう管理する。

液体Cd陰極での析出物は、るつばに装荷する反応媒体の種類（金属Cd）および電解操作の管理によってPuCd₆以上の核的に厳しい化学形態が析出しないよう管理する。

Arカバーガス中の不純物と反応して出来る不溶解物については、その完全な生成防止（Arカバーガス中の不純物濃度ゼロ）は工学的に困難であるため、平常運転状態においてもその存在を考慮する。

(3) 最大許容限度

不溶解物の最大許容限度については、長期運転における異常な蓄積と雰囲気異常等による急激な生成の二通りのシナリオを考慮して最大許容限度を定める（質量管理）。

(4) 推定臨界下限値

化学形態管理は主たる臨界管理因子である質量管理を補助する因子である。従って、質量管理における推定臨界下限値を定める際には各化学形態に対応したものを求める。

(5) 備考

不溶解物についてはその発生量低減に努めること、また異常な発生を検知可能なものとするのが重要である。ただし、完全な発生防止は工学的観点から困難であるため化学形態管理のみに依存する設計は非合理的であり、質量管理の対象

となる。

熔融塩中の金属イオンについて、温度の低下などで溶解度が低下すると塩化物などの固体として析出し均質性が失われる可能性がある。現時点では十分低い濃度での操業としているため非均質化を考慮していないが、今後の研究開発により挙動を明らかにする必要がある。

3.3 質量（管理＋制限）

3.3.1 陽極（HM-Zr 合金）

(1) プロセス中央値

マスバランス上の平均装荷質量は1.14kg-Pu/陽極（厳密には1.1375kg-Pu）である。これは、陽極に装荷する燃料物質の量は取り出す量（液体Cd陰極に析出させる量）とバランスする必要があることから決められている。後述する液体Cd陰極でのPuのプロセス中央値は2.28kgであり、電解プロセスの一単位操作で陽極4基と液体Cd陰極2基を使用することから、 $(2.28 \times 2) \div 4 = 1.14\text{kg}$ と決められる。

(2) 核的制限値

プロセスマスバランスにおいて陽極装荷量と陰極析出量は釣り合うように設計されるが、Nernstの式に従う実際の電解反応においては「反応に寄与する個別の元素について、陽極装荷量＝陰極析出量」が成り立つわけではなく、「反応に寄与する全ての元素の価数にたいして、陽極溶解量＝陰極析出量」になる。電解電位が一定ならば液体Cd陰極に析出する物質の組成は陽極装荷物の組成ではなく、陰極近傍の熔融塩中のイオン組成および陰極界面の状態に依存する。したがって、陽極ではUしか溶解していなくても、陰極でPuが析出することはあり得るので、陽極においてPuのみを制限するのは陰極での過析出を防止する上では余り意味がない。

一方、陽極に装荷するHM-Zr合金の推定臨界下限値（55kg-Pu）とプロセス中央値（1.14kg-Pu）には非常に大きな差があることから、平常時の陽極のダブルバッチ誤装荷に相当する装荷量の変動が異常な過渡変化として扱われないように裕度設定することが可能なので、

$$1.14 \times 2 = 2.28 \cong 2.3\text{kg} - \text{Pu}$$

を核的制限値とする。推定臨界下限値からみればもっと多くの量を取り扱うことが可能であるが、プロセス設計で必要とされる量よりきわだって過剰に取り扱うと潜在的な危険性を増すため、上記のようにプロセス設計値の二倍程度にとどめることとする。

(3) 最大許容限度

外側炉心新燃料相当の三元合金をバスケットの容積一杯に完全充填した場合の装荷質量を最大許容限度と設定する。

$$7.0\text{kg} - \text{Pu}$$

(4) 推定臨界下限値

外側炉心新燃料相当（Pu富化度、Pu同位体比）のHM-Zr合金（100%TD）の推定臨界下限質量より、

$$55.0\text{kg} - \text{Pu}$$

が陽極バスケット質量制限における最大許容限度設定の目安となる。

Cd陰極処理装置からのリワークの受入を考慮する場合には、上述するPu富化度管理との関連からPu富化度70wt%のU-Pu合金の推定臨界下限値を用いる。

(5) 備考

陽極装荷物であるHM-Zr合金は、工程管理（受入時の秤量およびサンプリング分析）によって質量が管理されると共に陽極バスケットの容積が制限されることから物理的な最大装荷限度が限定される。上記の設計値においてはHM-Zr合金の質量管理上の裕度は極めて大きい。ただし、バスケットから漏れ出るHM-Zr合金については上記のどちらの管理方法からも計量されず、工程物質収支における在庫量に計上される。在庫量の許容限度は後述する不溶解物の質量管理として扱われることになるので、漏えい率が一定であるならば1batch受入量が増大するほど不溶解物の質量管理が厳しくなる。

3.3.2 液体 Cd 陰極 (PuCd₆)

(1) プロセス中央値

マスバランス上の平均回収質量は2.275kg-Pu/陰極である。これは陽極2基分に当たる。電解操作の一単位操作におけるPuの処理量は4.5kg-Puであり、電解精製槽への入量は4基の陽極バスケットに分けて行われる。一方、回収側である液体Cd陰極は一度に1基しか電解精製槽に装着できないが、一単位操作中に取り換えることによって4.5kg-Puを2回に分けて回収する（2.275kg-Pu/陰極）。

(2) 核的制限値

後工程の陰極処理装置へ秤量操作だけで送れるように、炉心新燃料相当のPu同位体比のPu金属の推定臨界下限質量5.95kg-Puに安全係数0.7をかけて得られる

$$5.95 \times 0.7 = 4.165 \approx 4.1\text{kg} - \text{Pu}$$

を核的制限値と設定する。

これにより、二重誤析出（電解電流値異常）は通常運転範囲に入らないが塩中Pu/U比異常によるPuの過剰析出（平常時のHM析出量3.4875kgが全てPuである場合）は異常事象に該当しなくなる。

(3) 最大許容限度

装荷した反応媒体であるCdが陰極るつぼ一杯に充填され、かつ全て化学量論的にPuCd₆になったときのPu質量（19.339kg-Pu）を基準に

$$19\text{kg} - \text{Pu}$$

を最大許容限度とする。この量であってもPuCd₆の推定臨界下限質量以下であるが、後工程の陰極処理へそのまま送ることは禁止される。

なお、このことから二重誤析出が生じても臨界には到らない。

(4) 推定臨界下限値

炉心新燃料相当のPu同位体比におけるPuCd₆単体の推定臨界質量は、

$$194\text{kg} - \text{Pu}$$

となる。

(5) 備考

液体Cd陰極回収物であるPuCd₆は、電解操作（電解電位および電流値）によって回収質量が管理および工学的に制限されると共に、陰極るつぼの容積が制限されることから物理的な最大回収限度が限定される。

核的制限値はPuCd₆よりもむしろ後工程（陰極処理）でとりあつかうU-Pu合金を基準に設定される。後工程での化学形態は、平常時ではPuCd₆→U-Pu合金であるが、厳密なPu富化度管理を行うことが困難なことからPu単体を想定する。従って、炉心新燃料相当のPu同位体比にあるPu金属の推定臨界下限値（5.96kg-Pu）に対して定められる陰極処理装置の核的制限値以下になることが必要である。将来の技術開発によりCd陰極析出物のU/Pu比を高い信頼性で制御することが可能となれば、陰極処理工程においてPu富化度管理を適用できるようになり、液体Cd陰極回収量の制限値を緩和することが出来るであろう。

後工程に移送する前に直接計量できる値は固化したCd相の質量のみである。電解精製槽より取り出されたCd陰極るつぼにはフリーボード（乾舷）に熔融塩も付随してくるが、これは陰極処理工程に移る前に機械的に分離される。標準状態で回収Cd相のバルク質量は、

$$30\text{kg} - \text{Cd} + 1.1375\text{kg} - \text{U} + 2.275\text{kg} - \text{Pu} + 0.075\text{kg} - \text{MA} = 33.4875\text{kg}$$

になる。回収物中のU、Pu、MAの比率は環境状態（セル電圧、熔融塩中のU、Pu、MAの原子数密度比や熔融塩-Cd界面状態等）に依存して経験的に求められ、現在の知見に基づけば信頼性の高い予測は困難と考えられる。また、取り出したCd相のサンプリングによる分析を行う場合、分析結果が得られるまでの時間待

ちが発生する上に、サンプリングの代表性の問題もある。したがって、第一次管理指標として回収Cd相のバルク質量が、30kgのCdに核的制限値4.1kgを足し合わせた34.1kgを超える場合にはサンプリングに回し詳細なPu質量を計量するが、34.1kg以下であれば回収HMが全量Puであったとしても核的制限値以下であると分かるので、分析無しで後工程へ移送する、という分岐が考えられる。ただし、Cd自体が揮発により損耗し易いため、Cd減少に対する補償をどのように考えるか（Cdが揮発して減少するとバルクの秤量だけではPu量を過小評価する可能性がある）など課題もある。

3.3.3 溶融塩中溶解 Pu (Pu イオン濃度)

(1) プロセス中央値

電解条件より、

HM濃度：10.67wt%/salt

Pu/U比：3/1(重量比) → Pu濃度：7.68wt%/salt

が求められる。電解工程では陽極における溶解と陰極における析出が同時におこなわれ、その間の電荷移動量がバランスするので標準状態として溶融しているPuの量は（電解操作によって）変化しないとしている。

新しい電解精製槽の標準液位時の溶融塩容積1762Lと溶融塩の密度1.7g/cc、プロセス物質収支上のPu濃度7.57wt%/saltより227kg-Puがプロセス中央値である。

(2) 核的制限値

ここでは本制限値を定めるロジックを確認するために、操業中のプロセス変動を5%、計量誤差に対する裕度幅を1%と仮定して

$$227 \times 1.05 \times 1.01 = 240 \text{ kg} - \text{Pu}$$

を核的制限値とする。なお5%および1%という値自体には明確な根拠はなく、どの程度の不確かさが実際に見込まれるかについては今後の技術開発において明らかにする必要がある。

この場合、プロセス中央値との差は13kg-Puであり、これは電解プロセスの一単位操作入量（陽極4基分）の2.8倍程度であるため、実際にこの制限値に抵触するには2バッチ分以上に相当する物質収支上の不一致が発生しなくてはならないので、通常操業において円滑に処理を進めるための余裕が十分確保できると考えられる。

(3) 最大許容限度

核的制限値に対してさらにプロセス変動等に関する不確かさに対する余裕を5%と仮定して、

$$240 \times 1.05 = 252 \text{ kg} - \text{Pu}$$

を最大許容限度とする。なお、ここで見込む不確実さの定量値としてどの程度を見込めば良いかについても今後の研究開発において明らかにすべき事柄である。

(4) 推定臨界下限値

Pu濃度が25wt%/saltと極端なPu濃度異常とPu同位体組成異常（Pu-239のみ）を考慮した場合で推定臨界下限値を設定するならば、

2557kg - Pu

となり、またPu同位体組成が新燃料相当であったならば5483kg-Puにまで増加する。

また、このときの容積（推定臨界下限容積）は6016Lに達する。これは通常時の溶融塩使用量の3倍以上である。大型電解精製槽の内容積が5760Lであることから、このような極端なPu濃度の溶融塩で電解精製槽内が満たされたとしても臨界に到ることはない。

(5) 備考

臨界管理上は質量管理が主たる管理因子であるが、3tonを越える高温の溶融塩を直接計量することは困難であるので溶融塩中の濃度と溶融塩体積（液位）から間接的に計量、管理することになる。一方、工程管理上溶融塩中のPu濃度は常に一定値に保たれていることが理想であり、かつ変動要素が少ないため実質的に計量技術の精度によって管理目標値（質量管理についての核的制限値および最大許容限度）が定められる。

溶融塩中のPu量が多くなるほど不溶解物の生成などを与える潜在的な危険性が高くなることを考慮する必要がある、溶融塩系における推定臨界下限値が大きいとはいえ大量のPuの存在を許容する設計は望ましいものではない。

3.3.4 不溶解物（Pu 酸化物粒子）

(1) プロセス中央値

不溶解物はプロセスに一切貢献しないため、平常時の運転状態ではゼロであることが理想的である。したがって、平常運転時には不溶解物の在庫量が極小になるような操作に努める。

(2) 核的制限値

実際の不溶解物の生成速度と、工程物質収支の精度（サンプリングの代表性、化学分析の正確さ、モデル予測の正確さ等）および物質収支確定の間の時間を考慮して定める必要がある。金属電解法に関する開発の現状ではこれらの事項の多くは不確かであるので、現時点では明確な定量的根拠に基づいて具体的な制限値を設定することは出来ない。

収支における不明量が核的制限値に到達する前に電解精製槽のクリーンアウト（棚卸し）を行わなくてはならない。

不溶解物を直接検知・計量する技術は確立されていないので、電解精製槽に対する物質収支からその生成量を評価するほかない。このような間接的な評価では様々な誤差が含まれ、また伝播するので核的制限値を設定するにはそれらの誤差によって検知できない量の生成を前提にする必要がある。

ここでは本制限値を定めるロジックを確認するために、熔融塩中のPuの計量において1%程度の誤差があると仮定する。その場合、計量値が $x\text{kg}-\text{Pu}$ であるとき真の在庫量は $0.99x \leq X \leq 1.01x$ の間にある。すなわち、計量管理上把握している不溶解物量に加えて $0.1x\text{kg}-\text{Pu}$ が実際に不溶解物となっても検知できないことになる。したがって、熔融塩中に存在するPu量の平常時のプロセス制御上の変動（5%と仮定）の上限を考慮して、その上限状態において偶発的なプロセス制御上の異常により発生する量および計量誤差のため検知できない量を最大許容限度から差し引いた値を核的制限値として設定することになる。この意味するところは後述する3.10で述べるが、平常時に存在が許容される不溶解物の量が20kgで、残りの20kgのうち10kgは単一の偶発的事象に対する余裕（偶発的事象の検知まで生成する不溶解物の最大量）で、他の10kgは計量誤差に隠れて検知できない可能性のある量である。すなわち、計量管理によって明らかに発生していると見なされる不溶解物の量が20kg-Pu以下ならば、プロセス制御に起因する偶発的な異常により熔融塩中に溶解しているPuの10kgが新たに不溶解物となったとし、かつその場合の計量管理に1%の誤差が含まれたとしても、真の不溶解物の全量が最大許容限度を越えることはない（逆に考えると、急激なプロセス制御異常により10kgのPuが不溶解物となってしまうような事象は「単一の偶発的事象」と見なされる程度の低い発生確率に抑えなくてはならない）。

繰り返すが、ここで用いた計量誤差1%、平常時のプロセス制御上の変動5%および偶発的なプロセス制御上の異常5%は上記の論理を確認するための仮定値であり、具体的な根拠のある値でないため今後の研究開発で得られるデータを基に更新していく必要がある。例えば、計量誤差が0.1%の高精度計量技術の開発に成功したとすれば上記の制限値は38kg-Puまで拡大する。あるいは制限値を大きくするより効果的な方法は熔融塩中のPuイオンの総量を減らすことであり、総量が1/10の電解精製槽であれば10%の計量誤差であっても20kg-Puが制限値となる（これを裏返せば、十分な精度で不溶解物の生成量を把握できない、あるいは単一事象による生成量が最大許容限度を超える可能性があるような場合には、電解精製槽内に存在することが許されるPuの全量を不溶解物の最大許容限度以上に設計することは許されない。このような設計では、電解精製槽中の全Puが不溶解物となったとしても未臨界を維持できる）。ただし、どのような場合でも核的制

限值が最大許容限度を超えることは許されないので、プロセス制御および計量の精度および信頼性に物理的な上限が与えられる。

なお、物質収支の履歴に基づいて間接的に発生量を推測する場合には、各計測時の不確かさが伝播していくことになるので、実際にプロセス操業に適用する場合には誤差伝播を組み込んだ詳細な計算ロジックを組み上げる必要がある。

(3) 最大許容限度

嵩密度40%TDのPuO₂粉体（炉心新燃料相当のPu同位体比）の推定臨界下限値に安全係数0.7をかけたものを最大許容限度と設定する。

$$57 \times 0.7 = 39.9 \approx 40 \text{ kg} - \text{Pu}$$

これは溶融塩中に溶解しているPuの約30%に相当する。急激な析出が発生した場合には、この量に到達するまでに反応を停止させる何らかの操作が求められる。

(4) 推定臨界下限値

嵩密度40%TDのPuO₂粉体（炉心新燃料相当のPu同位体比）の推定臨界下限質量である

$$57 \text{ kg} - \text{Pu}$$

を用いる。

(5) 備考

不溶解物の質量を直接計量することは（現時点の技術的知見を基にして考えると）工学的に困難である。したがって、その質量の管理は電解精製工程の物質収支の不明量から間接的に評価せざるをえない。すなわち、受入量履歴（トータルの陽極バスケットによる受入量）から在庫量（現時点での溶融塩およびCdプール中のPu溶解量）と払出量履歴（トータルの液体Cd陰極による回収量）を引くことによって得られる不明量が不溶解物を生成したものと見なす。この不明量は実際の不溶解物量以外に受入/払出の計量誤差を含むため、受入/払出の計量誤差が大きいと実際には不溶解物は発生していないのにクリーンアウトの要求回数が増加し工程の運転効率を阻害する。

さらに、不溶解物の核的制限値は上記のように溶融塩中のPu量とその計量の不確かさによって算出されるため、Pu在庫量が多いほど、また計量の不確かさが大きいほど核的制限値は小さくなり、円滑な操業が困難となる（クリーンアウト回数が増える）。

不溶解物の嵩密度については、その値が推定臨界下限値の設定に大きな影響を与えるため、実際に発生する不溶解物の形態および性状の確かなデータを得ることは重要である。上記の40%TDの嵩密度はMOX燃料製造工程におけるタップ後の密度（グリーンペレット）に相当するものであるため保守的であると思われるが、実際に確認することが必要である。

3.3.5 Cd プール

(1) プロセス中央値

Cdプールは溶融塩の下側に存在する約1000kgの液体Cd金属層である。運転時においてCdプール中にHMが存在する必要はない。Cdプール中へのHMの混入としては、陽極や陰極からの脱落、漏えいが考えられる。また、偶発的事象により陰極の短絡が生じた場合、液体Cd陰極と同様のメカニズムによって溶融塩中のUイオンおよびPuイオンが還元されてCdプール中に移行する。前者の内でCdに溶解しない形態でのものはCdプールのサンプリングによっては検知できないためCdプール中の量ではなく、不溶解物として扱われる。Cdプール中の在庫として捉えられるPuの状態は、金属Cdに溶解している状態もしくはCdと化合物を形成している状態である。

(2) 核的制限値

溶融塩中のPuの核的制限値に含まれるものとする。すなわち、溶融塩中の在庫量とCdプール中の在庫量の合計が溶融塩に対する核的制限値を超えないこととする。

(3) 最大許容限度

核的制限値と同じく、溶融塩中の在庫量とCdプール中の在庫量の合計が溶融塩に対する最大許容限度を超えないこととする。

(4) 備考

Cdプール中にPuが存在することは好ましくない。Cdプール中にPuが移行する原因として想定されるもののうち平常時の運転状態ではCdプール中に溶解しているUと溶融塩中のPuイオンとの分配平衡によるものが考えられ、偶発事象としては、液体Cd陰極の脱落もしくは内容物の漏えい、電極短絡などによる異常な電流パスの発生である。これらのいずれの事象も、液体Cd陰極を電解精製槽に装填し、取り出したときに異常が検知される。

本検討では、溶融塩とCdプールは常に接触しており、物質の移動を妨げる物理的な障壁が存在しないことから、溶融塩中にPuが存在するのかCdプール中に存在するのかを区別しないものとして上記の制限値を設定した。なお、CdはPu飽和濃度でも臨界に達することはない。

3.4 Pu 富化度（制約）

(1) プロセス中央値

Pu富化度を制約できるのは陽極バスケットの装荷物であるせん断燃料片のみである。Cd陰極回収物のPu富化度は環境状態（セル電圧、溶融塩中のU、Pu、

MAの原子数密度比や溶融塩-Cd界面状態等）に依存して経験的に求められ、それほど信頼性の高いものではないことから、クレジットを取らない（Pu富化度100wt%と想定する）。

陽極におけるPu富化度のプロセス中央値としては受入燃料のうちの最大のPu富化度であり、これは外側炉心燃料の値

17.2wt%

になる。

(2) 核的制限値

陽極に対する上記の17.2wt%は平衡炉心のものであり、初期装荷炉心あるいはより高燃焼度を目指した炉心の変更等をどこまで考えるかによって核的制限値を変えなくてはならない。現時点では暫定的な裕度を加味して

20wt%

とする。

(3) 最大許容限度

陽極装荷物として液体Cd陰極で回収したHM合金を誤ってリワークすることを想定して、

$$2.275 \div (2.275 + 1.1375 + 0.075) = 67.38 \cong 70\text{wt}\%$$

を最大許容限度とする。この場合、陰極回収物は陰極処理されてPu富化度及びPu質量が確定済みで、かつ質量管理上の核的制限値を満足していなければ受け入れられない。

(4) 推定臨界下限値

陽極装荷物として液体Cd陰極で回収したHM合金を誤ってリワークし、かつその析出物のPu富化度がプロセス中央値から逸脱することを想定して、

100wt%

を用いる。

(5) 備考

誤ったリワークが発生すると想定してPu富化度をCd陰極回収物のプロセス中央値を基準に70wt%と定めたが、上述したようにCd陰極回収物中のPu富化度制御の信頼性は高くない。従って、70wt%を超える回収物が得られる可能性は十分に考えられる。なお、システム設計において電解工程以降の中間製品を電解工程へリワークすることは通常操作の中で認めていない。

3.5 濃度（管理）

(1) プロセス中央値

Pu濃度と熔融塩の密度変化の関係が明らかでなくてはならない（硝酸水溶液系における密度式であるMaimoniの式と同様のものが必要とされるが、水溶液系と異なり広い温度範囲－融点～操業温度までの情報が必要とされる）が、現時点ではこのような信頼性の高い評価式は存在しない。したがって、ここでは安全側にPu濃度増加に対する体積膨張はないものとしている（非減速系であるため核分裂性核種数密度が高いほど中性子実効増倍率は高くなる）。

電解条件から計算して、128.8g-Pu/ccが濃度のプロセス中央値になる。

(2) 核的制限値

濃度は主たる臨界管理因子である質量を管理するための間接的な制御因子である。したがって、濃度だけで一意的な制限値を設けることは出来ず、常に容積とセットで規定される。よって、ここでは具体的な値を設定しない。

ただし、化学形態管理からの要請により如何なる場合も飽和溶解度以下である必要がある。

(3) 最大許容限度

上記と同じくここでは具体的な値を設定しない。

(4) 推定臨界下限値

臨界管理上は質量管理が主たる管理因子であるが、直接計量することは困難であるので熔融塩中の濃度と熔融塩体積（液位）から間接的に管理することになる。したがって、Pu濃度だけでは具体的な管理値を一意に定めることは出来ず、必ず容積とセットで扱われる。一方、工程管理上熔融塩中のPu濃度は常に一定値に保たれていることが理想であり、かつ変動要素が少ないため実質的に計量技術の精度によって管理目標値（質量管理についての核的制限値および最大許容限度）が定められることになる。

(5) 備考

熔融塩中Pu濃度はPu質量を計量する際に測定される値である。臨界管理上は濃度自体が問題と言うよりはPu質量が問題なのである。したがって、濃度の範囲は容積の変動範囲および測定誤差の程度を考慮して決める必要がある。また、熔融塩中のPu濃度は電解条件に影響を与えるため、液体Cd陰極回収物の組成にも影響を与える。従って、熔融塩中のPu質量の核的制限値を現実的に決める場合には、Pu計量技術（工程物質収支）の精度、電解操作制御技術と電解反応に対する感度を考慮して決める必要がある。他のサブユニットの化学形態に比べてその計測誤差が臨界安全性に与える影響が大きいため、実際に使用する計量技術の誤差

が、運用される安全マージン設定上の誤差許容値以下にあることを予め証明し、保証する必要がある。

ただし、溶解度を超える濃度では異なる問題（化学形態管理上の問題）が現れるためLiCl-KClに対するPuの溶解度を明らかにする必要がある。

3.6 同位体組成（制約）

(1) プロセス中央値

電解精製工程では同位体の濃縮あるいは分離という現象が生じないため、受入物質の同位体比の中で最も厳しい同位体比の状態がプラント操業条件（プラントに受け入れを許可する燃料のスペック）により制約される。

Uについては、対象とする燃料（平衡炉心新燃料）の設計値より

$$^{234}\text{U}/^{235}\text{U}/^{236}\text{U}/^{238}\text{U}=0.06/0.01/0.03/99.9$$

であるので、再処理工程で取り扱うUは臨界管理の対象外となる。なお、U同位体組成が劣化ウラン相当

$$^{234}\text{U}/^{235}\text{U}/^{236}\text{U}/^{238}\text{U}=0.00/0.3/0.0/99.7$$

であった場合でも、化学形態、Pu富化度にもよるが例えばPu富化度50%のMOXの中性子実効増倍率に与える影響は0.00数%のオーダーである。（なお、0.93wt%以下の濃縮度のUは単体では臨界に到らない[ANS-8.1]）

また、PuおよびMAについては照射後冷却した炉心燃料の同位体比が標準となる。

(2) 核的制限値

ほとんど照射しなかった燃料の受入まで考慮して、新燃料相当のPu同位体比を核的制限値とする。

$$^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}=1/68/26/2.5/2.5$$

(3) 最大許容限度

最大許容限度は、受入燃料の種類（初期装荷燃料等）を考慮して以下のように定める。

$$^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}=0/80/10/10/0$$

(4) 推定臨界下限値

臨界管理因子としての同位体組成は質量管理を補助する因子であるので、核種の化学形態についての推定臨界下限質量を求める際には、さらに同位体組成異常を重ね合わせるならば、

$$^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}=0/80/10/10/0$$

重ね合わさない場合には、

$$^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}=1/68/26/2.5/2.5$$

を適用するものとする。

なお、照射済ブランケット燃料のみを単独で電解精製する場合には、下記のPu同位体比を適用する必要がある。

$$^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}=0/95/5/0/0$$

(5) 備考

Pu同位体比の核的制限値を新燃料相当に設定したため、受入燃料に対する燃焼度クレジットは取らなくて良い。また、同位体組成管理は他の主たる臨界管理因子に従属する因子であるため、質量管理上の管理目標値と合わせて議論する必要がある。

なお、実際に受入可能とする燃料のPu同位体比は炉心設計に依存するため、より詳しい変動幅が明らかになり次第再評価する必要がある。

3.7 嵩密度（制約）

(1) プロセス中央値

嵩密度を考慮する化学形態は不溶解物（酸化物粒子）のみであり、MOX燃料製造に使用するPuO₂粉体の嵩密度である

$$2\sim 3\text{g/cc}$$

程度と推測する。

(2) 核的制限値

物理的な制約であるため核的制限値を設定して、その値を直接監視する必要はない。

(3) 最大許容限度

物理的な制約であるため、その値を直接監視する必要はない。ここでは電解精製工程の環境および操作において物理的に到達しうる最大の嵩密度を、粉体の機械的な圧縮による嵩密度を参考に、

$$4.5\text{g/cc}$$

と設定する。これはMOX燃料製造におけるタップ密度（グリーンペレット密度）に相当するものである。

臨界安全管理上は、不溶解物の嵩密度を直接管理するのではなく、嵩密度を変化しうる要因を排除するという間接的方法を行う。

(4) 推定臨界下限値

臨界管理因子としての嵩密度は不溶解物の質量管理を補助する因子であるので、不溶解物の推定臨界下限質量を求める際（嵩密度管理異常を重ね合わせる場

合) には

4.5g/cc

を用いる。

(5) 備考

溶融塩中で生成する不溶解物の嵩密度に対するデータは存在しないため、MOX燃料製造での情報を参考として上記のように設定した。ただし、酸化物粉体の嵩密度自体が、粒子の大きさと形に依存し、一律に決まるものでないため、これらの設定値の妥当性を判断するためには不溶解物についての詳しいデータが必要である。

3.8 減速度

(1) プロセス中央値

電解精製槽Arカバーガスとして供給するArガス中の不純物濃度は、

水分：10ppm以下

酸素：10ppm以下

その他窒素等：10ppm以下

供給Arガスはワンスルーで使用し、流量は36Nm³/hである。

(2) 核的制限値

考慮せず。

(3) 最大許容限度

考慮せず。

(4) 推定臨界下限値

考慮せず。

(5) 備考

プロセスで使用する物質中の軽核種であるLiは、散乱による減速よりもLi-6による吸収の方が遙かに大きな寄与（負の反応度）をもたらす。

電解精製槽内部のAr雰囲気管理系統は外部のArセル雰囲気管理系等とは独立したより高純度（水分濃度10ppm以下）のものが使用されており、かつ微正圧の運転でインリークを防止する設計としている。さらに外部のArセルにおいても厳しい湿度管理（水分濃度100ppm以下、酸素濃度100ppm以下、窒素等1000ppm以下）が成されているため、有意な減速材の流入は防止される。

3.9 可溶性中性子吸収材

(1) プロセス中央値

意図して使用している訳ではないが、熔融塩成分のLiの同位体Li-6は高い中性子吸収断面積をもつ。特に濃縮等をしたLiを使用するわけではないため、天然組成であるとする。

$${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}=7.5/92.5$$

また、液体Cd陰極やCdプールに使用しているCdの同位体Cd-113は特に熱中性子に対する吸収断面積が大きい。しかしながら、電解精製工程での中性子は非常に硬いスペクトルを持ち、Cdのように密度の大きな物質は吸収効果よりも反射体効果（正の寄与）が大きくなる傾向があり、臨界安全上有用な中性子吸収材としての働きは大きくない。

(2) 核的制限値

設定せず。

(3) 最大許容限度

設定せず。

(4) 推定臨界下限値

設定せず。

(5) 備考

熔融塩に溶解した状態のPuの臨界質量が極めて大きい理由は、Puの数密度が低いことと、この中性子吸収断面積の大きなLi-6が均質に存在することにある。従って、熔融塩に溶解した状態の化学形態に対する臨界安全性はLi-6に負うところが大きい。他の化学形態に対しては大きく寄与しない。また、熔融塩中Pu濃度が核的制限値にある状態では十分な安全マージンを持っているため、例えばLi-6がなくともそれだけで臨界に到ることはない。なお、平常状態の電解精製槽は十分低い未臨界度にあるため中性子束密度も小さく、Li-6の損耗の程度も低い。特に厳しい管理を行わなくてもよいと考えられる。

3.10 不溶解物の核的制限値設定の考え方

ここでは上述した不溶解物の核的制限値に関して、より詳しくその設定の考え方を述べる。

3.10.1 不溶解物発生量の計量

電解精製槽内部の偶発的異常に起因する不溶解物発生量（熔融塩中のPuが何らかの異常により侵入した不純物と反応して出来る不溶解性の固体化合物量）は、

溶融塩中およびCdプール中に溶融しているPuの質量（溶解Pu量と総称する）の変化値より間接的に検知、推定するものとする。

ある測定時点*i*における真の溶解Pu量を T_i 、不確かさを $\pm e$ とする（図 3.1）。溶解Puの測定値は誤差を考慮して目標値に対して $\pm e$ の範囲の変動は通常許容されるものとする。*i*-1において不溶解物の生成が始まり、真の溶解Pu量は単調に減少する場合を考える。また、そのときの生成速度 v は連続する計量の測定間隔 P において変動量が誤差に隠れて分からない程度の量のうちで最大のものとする（ $v=4e/P$ ）。*i*-1における測定値（見かけの溶解Pu量）を過小評価して $M_{i-1}=T_{i-1}-e$ 、*i*における測定値を過大評価して $M_i=T_i+e$ を得る場合、実際の不溶解物生成量は $T_{i-1}-T_i$ であるのに、測定上は不溶解物の生成を判断できず、測定誤差の範囲内で正常な状態と判断されてしまう。このとき発生が検知できない不溶解物の量は $v=4e/P$ より最大 $4e$ である。

その後さらに不溶解物の生成が進行して*i*+1の測定時点において真の溶解Pu量が T_{i+1} まで低下したとき、その測定値が M_{i+1} であったとする。この場合の測定値が過大評価側（ $T_{i+1}+e$ ）であるとき、推定された不溶解物の発生量は過小評価になる。従って、測定時点*i*+1における見かけの不溶解物発生量は

$$\Delta M_{i+1} = M_i - M_{i+1} = (T_i - T_{i+1})$$

になるが、実際の不溶解物発生は測定時点*i*-1から生じているため

$$\begin{aligned} \Delta T &= T_{i-1} - T_{i+1} \\ &= (M_{i-1} + e) - (M_{i+1} - e) \\ &= (M_{i-1} - M_{i+1}) + 2e \\ &= 8e \end{aligned}$$

である（ここで $v=4e/P$ より $2P$ の間に $8e$ の不溶解物が発生する）。この場合、異常が発生していることが明らかになるのは*i*+1の時点であり、その時の真の不溶解物発生量が推定臨界下限値 L 以下である必要があるので、

$$L > \Delta T = 8e \Rightarrow L/8 > e$$

すなわち、測定間隔を P で行うときにその測定の誤差が $L/8$ 以上あると不溶解物の生成検知が有効でない。また、連続する計量操作によって不溶解物の生成が検知できない量である $\Delta s = 4e$ を不溶解物の発生事象に対する計量管理上の安全マージンとする。

この考え方では、不溶解物の存在量がゼロであるところから始めている。はじめの測定間隔の前後では計測値そのものは許容範囲内にあるため、この計測結果だけで不溶解物が発生したのか、それとも測定のバラツキによるものかを判断することは出来ず、次の測定間隔後の測定結果でようやく不溶解物の生成が原因で計量値が低下していると判断される。しかしながら、実際の操業においては不溶解物の存在量を常にゼロに維持することは困難である。したがって、通常状態で

も不溶解物がある程度存在することを許容できるようにしなくてはならない。したがって、平常時に許容する不溶解物の量（すなわち不溶解物の核的制限値）を A とすると

$$L - A > \Delta T = 8e \Rightarrow (L - A)/8 > e$$

とする必要があり、したがって $A/8$ の分だけ計量誤差に対する要求が厳しくなる。

ところで、上記の論理で設定される Δs は計量値の信頼性に依存する。現実にはここで許される信頼幅 $\pm e$ を超える過小もしくは過大評価というのも当然生じ得る。そこで、この様な許容誤差を超える計量値の観測によって上記で設定した最大許容限度を超える可能性を考える。評価された質量のばらつきが正規分布に従うと仮定すると、許容される信頼性が 3σ になるよう e を設定するならば、真の値が評価値を超えるような結果となる確率は約 2.6×10^{-3} である。したがって、評価値の過評価が二回続けて生じる確率は 6.76×10^{-6} である。問題となるのは過小評価が二回続けて起きる時なので、確率は $1/4$ に低下し、 1.69×10^{-6} になる。測定頻度が1回/日ならば200日運転/年の操業で年間の測定回数は200回であり、したがって確率は 3.38×10^{-4} /年になる（実際には一回のサンプリングで複数のサンプルを取得するため、より低い確率となる）。50tHM/yプラントには5基の電解精製槽が設置されているので、プラント全体では 1.69×10^{-3} /年・プラントの確率で、二重の過小評価が発生する。これはプラント設計寿命（40年）に比べて十分低い頻度である。さらに、他の安全裕度（密度や形状、反射条件）などを考慮すれば 3σ を基準とした場合、不溶解物の質量管理に起因する臨界事故は技術的に発生が想定されないと判断できる（臨界安全設計に課せられる二重偶発性原理により設計されているならば、不溶解物の質量管理が最大許容限度に到っただけで臨界に到ることはない）。なお、急激な不溶解物の生成という事象そのものが単一事象に相当するため、これにさらに上記の計量上の希有な事象が重ねられることは技術的に想定できない。

3.10.2 本設計において一例として算出した不溶解物の核的制限値

不溶解物の生成量評価における不確かさがどの程度になるかについて定量的な値は現段階で定かではないが、ここでは上記の 3σ を満たすものとしてプロセス上の変動 $\pm 5\%$ 、計量の不確かさ $\pm 1\%$ を仮定して核的制限値がどの程度かになるか試算した。

プロセス上許容される平常時溶解Pu量上限 $M = 227 \times 1.05 \approx 238 \text{ kg} - \text{Pu}$ より

$$e = 238 \times 0.01 \approx 2.5 \text{ kg} - \text{Pu}、4e = 10 \text{ kg} - \text{Pu}$$

最大許容限度 $L = 40 \text{ kg} - \text{Pu}$ より

$$A = L - 8e = 20 \text{ kg} - \text{Pu}$$

すなわち、不溶解物の異常発生が生じたときにそれを検知出来るまでの最大生

成量20kg-Pu (8e) を考慮して、受入/払出差に起因する不明量が不溶解物として既に存在しているとするならば、不明量が20kg-Puを超えるならば事象によって生成する量を加えると最大許容限度を超える可能性がある。従って、受入/払出差に起因する不明量に起因する不溶解物の核的制限値を20kg-Puとする。溶融塩中Pu質量の核的制限値と測定値およびその真の値の関係を図 3.2に示す。

ただしこのモデルでは測定間隔より短い時間で不溶解物の急激な生成事象が生じた場合には検知する前に推定臨界下限値に到る可能性があるため、偶発的事象による不溶解物の急激な生成の最悪の進展速度を評価し、それと核的制限値から測定時点の最小間隔 $P = 4e/v$ を決める必要がある。さらに異常な生成を検知したときに、事象を速やかに停止させる方策を予め提供しなくてはならない。

ところで、上述の計量誤差 e は推定臨界下限値と関連して定量値として重量単位で与えられるため、実際の計量システムの性能としての相対的な計量誤差 (%) は溶解Pu量が多くなるほど低い値となるよう要求される。すなわち、溶融塩量が大きいほど、また溶融塩中のPu濃度が高いほど高精度の計量システムの確立が必須となる。

なお、ここで言う不溶解物の核的制限値とは、操業を続けることによって徐々に蓄積する不溶解物の平常時許容量を表す。徐々に蓄積した不溶解物量とは、電解精製槽への受入/払出差(S/RD)の累積値に相当する。例えば、1 バッチ当たりのS/RDが0.1kgならば連続処理可能なバッチ数は200回となる(200回の運転で見なし不溶解物量が20kgに達するため、電解精製槽のクリーンアウトを実施して在庫量をゼロクリアしなくてはならない)。

これらのS/RDは受入物および取り出し物の計量の誤差を保守側になるよう含む。S/RDの内、溶融塩中のPuへ移行したものは溶融塩中Puの在庫(溶融塩中Pu質量のプロセス変動)に計上されるため見込みの不溶解物量には本来計上されないが、スループット量(4.55kg-Pu)に対して溶融塩中の平常時在庫量が大きい(227kg-Pu) ことと、その計量技術の精度が低い(ここでは1%と仮定した)と判断していることから、(誤差幅がスループット量を超えるため) S/RDが全て不溶解物と見なすものとした。

3.10.3 実際の設計における許容量の設定

ここまでの検討では、はじめに要求処理能力から定められたPu濃度、および機器設計上の容量から通常時在庫量が定まるので、仮定として設定した計量誤差及び運転の変動範囲を用いて許容量を求めた。

しかし、現実には計量誤差及び運転の変動範囲もその時点での技術的限界があるため、技術的根拠の乏しい値を用いることは出来ない。さらに、推定臨界下限

値も物理的に一意に定まるので、上記とは逆にこれらの計量誤差及び推定臨界下限値から、その時点の技術的能力から使用することが許される在庫量というのが定められる。それに基づき、機器設計及び処理能力が定まるのである。

また、推定臨界下限値は一種の物理定数とみなせるので、溶解Pu量をいかに正確かつ迅速に計量できるかが不溶解物に対する核的制限値の合理化、さらには使用が許されるPu量の増大につながる。

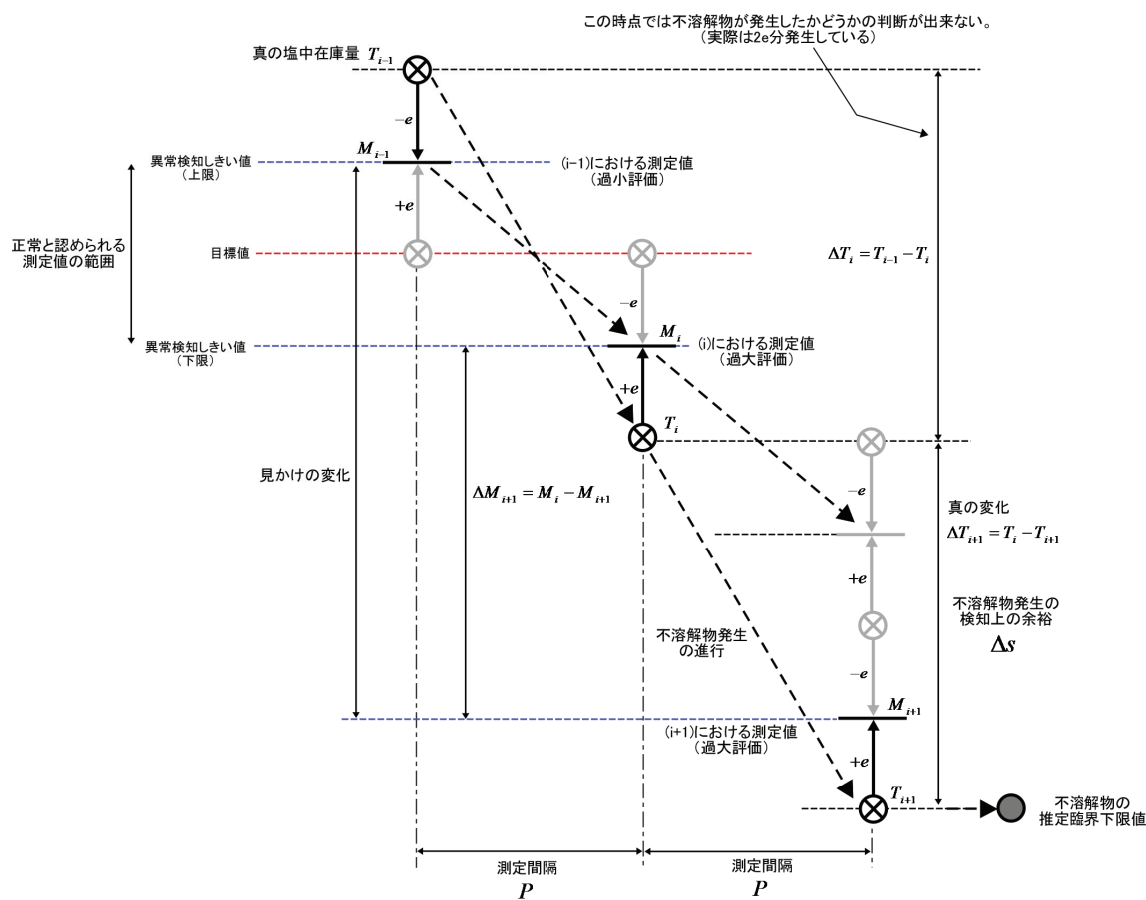
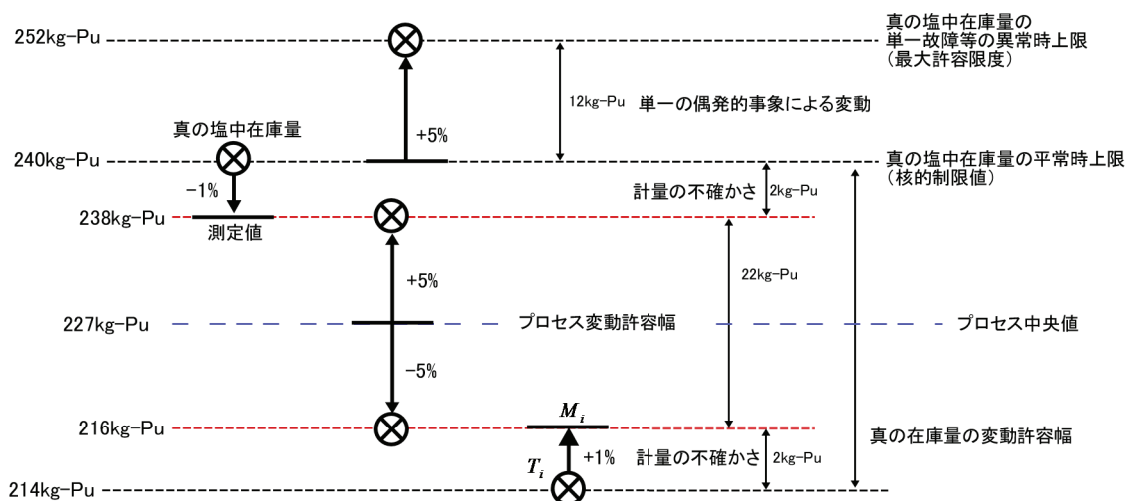


図 3.1 測定の不確かさを考慮した不溶解物の生成許容量



※ここにおけるプロセス変動幅5%、計量の不確かさ1%は仮定値である。

図 3.2 熔融塩中 Pu の変動許容幅と核的制限値

4. 安全マージンに関する考え方

4.1 安全マージンと安全係数について

上述した核的制限値の一部の設定において安全係数0.7を用いている。一般に用いられることが多い安全係数は、質量管理について二重装荷の可能性のある場合0.43、二重装荷の可能性の無い場合で不均一性の可能性がある場合0.7、二重装荷の可能性のない場合で不均一性の可能性も無い場合0.85であり、これらはフランスの臨界安全ガイド⁽⁸⁾ "Guide de Criticite"において定められている値である。この中で上記の安全係数の設定根拠として、濃度の関数としての推定臨界質量の計算誤差がおよそ15%と評価されており、現実の体系で発生しうる連続的不均一性の影響が均一であるという前提の実験もしくは計算体系から推定される臨界質量に与える影響として15%と評価していることが述べられている。これらは臨界質量計算（評価）上の誤差である。実際には、これらの不確定性に加えてさらに運転上の誤差、製作上の誤差、操作上の誤差を考慮して修正されなくてはならないとも述べられており、特に質量管理における二重装荷が単一の偶発事故によって生起する場合には安全係数を0.43に修正しなくてはならないと記述されている（従って、この場合は計算上の誤差15%に加えて、操作上の安全率50%を考慮した値と考えられる）。すなわち、二重装荷の安全係数0.43と計算上の誤差に対する安全係数0.7および0.85はそれぞれの持つ意味合いが異なることに注意する必要がある。いずれにせよ、これらの数値は多分に歴史的なものであり、当時の知見および技術レベルに基づいたヒューリスティックな値に過ぎない。

さて、現代的な安全マージンの意味に照らし合わせるならば臨界質量を求める際の不確定性に対する裕度とは推定臨界値に対する推定臨界下限値のことを意味する。したがって、"Guide de Criticite"における0.7や0.85は推定臨界値にかけて推定臨界下限値を求める際の安全係数であると理解できる。そして、推定臨界下限値に対して単一の偶発事象に対する安全マージンを意味するのが、運転上の裕度に対する安全係数（二重装荷に対しては0.5、 $0.85 \times 0.5 = 0.425$ ）であると言える（平常時における系の揺らぎの影響は推定臨界下限値を求める際のモデル化において考慮されるので、安全係数には含めない）。ただし、運転上の誤差は二重装荷だけではないため、これを決めるためには起こりうる偶発事象の全てを明らかにし、それらの内で最も悲観的な事象を基準にモデル化と安全係数を定める必要がある。

本設計で用いている0.7という安全係数は計算誤差、モデル化誤差に対する裕度ではなく、運転上の単一の偶発事象に対する安全マージンであると見なしている。上述したように、この安全マージンは偶発事象の解析により妥当な値を決めるべきものであるが、現時点では特に化学形態管理の技術や遠隔自動操作に関す

る信頼性、不確実性がどれくらいの程度のものか不明であるため、一律0.7を適用することと判断した。0.7の選定理由は、自動操業による質量管理を行っている東海事業所プルトニウム燃料第三開発室の臨界管理上の安全係数に0.7が適用されているためである⁽⁹⁾。従って、この安全係数の値は知見の拡大と技術開発の進展と共に変えるべきものであることを明記しておく。

4.2 核的制限値と計量誤差

核的制限値設定のための安全マージンの中に、その臨界管理因子の計測における誤差を含めるか否かについては、直接測定可能な臨界因子に対しては原則としては含めないものの、他の測定可能な値から何らかの演算処理により間接的に計量する因子については、許容される計測誤差を明示した上で安全マージンに含めるものとした。本検討の内でこれを適用されるのは溶融塩中のPu質量と不溶解物の質量管理である。溶融塩中のPu質量は複数の溶融塩サンプルの化学分析値から統計処理あるいは特定の予測モデルに従って評価した濃度値と、溶融塩およびCdプール界面位置から計算した容積を掛けることによって得る。不溶解物の量は、電解精製槽の計量管理における不明物質量をそのまま適用する。

計量に伴う誤差を核的制限値の外に出す場合には、実際に工程で評価される計量値に計量誤差を加えた値と核的制限値が安全性確認のために比較される。一方、誤差を核的制限値に含めた場合、比較される対象は誤差を含まない計量値になる。前者の場合、計量技術は安全設計上の要求には入らない（誤差が分かっているならば任意の計量技術が利用できる）が、後者の場合には計量技術も安全設計上の要求事項となる（設計時に認定された計量技術しか使用できない）。

不溶解物の存在量は直接計量することが出来ず、溶融塩中の溶解量と操作履歴からの受入/払出差から推定する。従って、不溶解物の質量推定値に付随する誤差は、受入物（陽極）中のPu質量の計量誤差、払出物（固体陰極および液体Cd陰極）中のPu質量の計量誤差、および在庫（溶融塩およびCdプール）中のPu質量の計量誤差である。これらの計量値から不溶解物に対して以下の2つの視点から見た生成量を推定する。

(1)複数回の受入/払出の実行によって電解精製槽内に次第に蓄積する場合

(2)偶発的な事象により溶融塩中のPuが不溶解物化する場合

(1)については受入/払出量の計量値および溶融塩、Cdプールの計量値から推定する。(2)は溶融塩およびCdプールの計量値のみから推定する。そして、事象としては(1)は不可避の蓄積であるため、これをある範囲で許容する設計になる。一方、(2)は偶発的な事象によるものであるため、その発生防止に重点を置くが(1)の許容量が既に存在している時に(2)が起きたとしても臨界に達するようなことは排除せねばならない。

特に在庫量中には平均値で227kgのPuが存在することから、これに対する誤差は不溶解物の推定量に対して支配的な影響を与える。すなわち、熔融塩中の在庫量の計量値に対する誤差分は、実際に熔融塩中に存在しているのか、あるいは他の形態（不溶解物など）へ変化したのか確認がとれない量として位置づけられる。この場合、悲観的に見て誤差分は不溶解物として存在すると見なす。そして、現時点では多量のHMおよびFP元素が溶解した高温の熔融塩の容積計量、その成分分析、サンプリングの代表性（均一性）に伴う誤差は少なくないと考えている。これらの誤差を本検討では一例として $\pm 1\%$ (3σ) を仮定し、不溶解物の核的制限値を定めた。したがって、この設計が成立するには熔融塩中のPuの計量技術の誤差は1%以下である必要がある。また、技術開発の成果により1%を下回る高い信頼性を持った計量技術が確立された場合には、その技術の誤差を基準にして新たに核的制限値を定めることが出来る。

なお、誤差と核的制限値の関係について前出の”Guide de Criticite”では、濃度から質量を計量するような場合の核的制限値（質量）を定める際には、運転と分析の誤差を考慮して定めるとあり、この場合には核的制限値の安全マージンの中に分析の不確かさが含まれることになる。

5. 電解精製槽における偶発的事象の分析

この章では、第3章までに記した臨界安全管理において想定しうる異常事象とそれに対するバリアの有効性について検討した結果を記す。表 5.1に臨界安全性に影響を与えると考えられる事象とその原因を、表 5.2にその事象に対する設計上のバリアと事象の影響度についてまとめる。なお次章では、ここで挙げた異常事象を基にモデル化した体系で臨界解析を実施した結果を述べる。

5.1 陽極

陽極アセンブリは、陽極バスケット、電極支持モジュールから構成される。せん断燃料片を装荷する陽極バスケットは水平断面が十字型の鋼製容器であり、電解精製時に熔融塩の流れを良くするために側面壁がパンチング板あるいはメッシュ板により製作されている。したがって、陽極バスケット単体では内容物の確実な保持ができないため、陽極アセンブリに組み上げるまで移送時および貯蔵時にはバスケットは陽極容器に格納されて取り扱われる。

5.1.1 容積制限に影響する偶発的事象と設計対応

陽極バスケットへのせん断燃料片の受入時には、せん断機の燃料ピンせん断本数のカウントにより受入量がチェックされる。従って、陽極バスケットの過大な変形が生じ、かつせん断燃料片受入時に過剰装荷が重ねあわされなければ臨界に到る可能性はない。また、取扱時には陽極容器に格納されることから変形した陽極が継続的に取り扱われるには陽極容器の変形も同時に生じる必要がある。

さらに、陽極バスケット本体に異常がないか運転員による目視確認が定期的の実施される。

(1) 変形

形状の変形、寸法の変形により陽極バスケット内部容積が変化する事象。なお、陽極バスケットに装荷される燃料物質は質量管理されているため、変形だけで臨界に到ることはない。

(i) 圧力差による変形

陽極バスケット本体の側面は鋼製のパンチング板あるいはメッシュ板により製作されており、陽極バスケットの内外で圧力差は発生しない。陽極容器にはある程度の気密性があるため圧力差による変形の可能性があるが、その場合にでも変形するのは陽極容器だけである。

(ii) 内部荷重・応力による変形

せん断燃料を装荷した状態でも形状が維持できるように構造設計される。またZr合金燃料の推定臨界下限体積よりも十分小さい容積しか持たないため、現実的

に生じうると想定される程度の変形では臨界安全性に影響を与えない。また、移送時および貯蔵時には陽極容器に格納されることから、過大な変形が生じた場合には陽極容器に格納できなくなり取扱が出来なくなる。

(iii) 外部衝撃による変形

移送時あるいは吊り上げ時の掴み不良により落下して変形する。あるいは移送中の物質もしくは移送装置が衝突することにより変形する。

移送などのハンドリング時には掴み具にインターロックが設けられ、不適切な状態での吊り上げ、移送が防止される設計とする。移送装置の最大移動速度は制限される。また、貯蔵エリアや架台には必要に応じて物理的な防護板もしくはバードケージが設置され、移送装置との接触を防止する。

(iv) 熱変形

熱膨張や熔融により変形する。

取扱環境を考慮した材料および構造設計が行われるため、平常時の最大温度域（500～650℃）で過大な変形を生じることはない。プロセス機器の加熱装置にはインターロックが設けられ過加熱を防止する。移送中および仮置き中の陽極バスケットはArセル雰囲気によって自然冷却される。短時間の全動力電源の喪失あるいは短時間のArセル冷却系の停止を考慮しても、陽極バスケットの温度が最大使用温度以上にならず、内部の合金燃料の融点（1000～1100℃程度）以下になるようにArセル雰囲気の平常時温度制限値や貯蔵エリアのラック間隔等が設定される必要がある。

(2) 容器壁の減肉

容器壁の減肉により内部容積が増加する。ただし、容器壁の厚さを考慮しなくても臨界に到ることはない。また、陽極バスケット本体に異常がないか運転員による目視確認が定期的実施される。なお、陽極バスケットに装荷される燃料物質は質量管理されているため、変形だけで臨界に到ることはない。

(i) 化学的腐食

溶融塩等による腐食によって容器壁が減肉する。

使用環境を考慮した材料および構造設計が行われ、平均的な耐用使用回数（あるいは期間）が設定される。また、陽極バスケット本体に異常がないか運転員による目視確認が定期的実施される。

(ii) 電気化学的腐食

陽極バスケット構造材の酸化還元電位より高い陽極電位で電解操作が行われることによりバスケット材料が溶解する。

セル電位および積分電流値により電解操作が監視される。またインターロック

により異常な電位での電界操作は排除される。また、陽極バスケット本体に異常がないか運転員による目視確認が定期的に実施される。

(iii) 摩擦・研削による減肉

シューターから落下してくるせん断燃料片の受取時の衝撃により容器壁が削られる。

陽極バスケット本体に異常がないか運転員による目視確認が定期的に実施される。

(3) 漏えい

陽極バスケットへのせん断燃料片の受入時には、せん断機の燃料ピンせん断本数のカウントにより受入量がチェックされる。従って、内容物が漏えいしただけで臨界に到る可能性はない。また、取扱時には陽極容器に格納されることから陽極バスケット自体の破損だけではセル内部に漏えいしない。

さらに、陽極バスケット本体に異常がないか運転員による目視確認が定期的に実施される。

(i) 破損等による漏えい

過大な変形（落下、衝突）、腐食、摩擦（せん断燃料片の受け止め時の擦過）等により陽極バスケットが破損し、内容物が漏えいする。

前述のような対策により、漏えいが生じるほどの過剰な破損等に到るまでに異常は検知される。

(ii) オーバーフローによる漏えい

陽極バスケットの容積を超えるせん断燃料片を受け入れることによりオーバーフローする。

陽極バスケットへのせん断燃料片の受入時には、せん断機の燃料ピンせん断本数のカウントにより受入量がチェックされる。また、一度せん断燃料片を受け入れたバスケットは工程管理システムにより管理されるので二重装荷される恐れはない。また二重装荷されたとしてもオーバーフローするまでにはまだ内部容積に余裕がある。

(iii) 取扱時の漏えい

陽極バスケットを傾ける、もしくは転倒することにより内容物が漏えいする。

取扱時には陽極容器や陽極アセンブリに入れられているため傾けただけで内容物が漏えいすることはない。Naボンド除去装置や陽極アセンブリ組立装置など陽極バスケットを露出して扱う工程では、こぼれがないか運転員の目視による確認が行われる。

5.1.2 化学形態管理に影響する偶発的事象と設計対応

陽極バスケットにはせん断燃料片しか受け入れないため、基本的に規定された物質（被覆管付きのHM-Zr合金燃料）以外を受け入れることはない。

(1) 誤物質装荷

(i) 規定外物質の受入

陰極処理後の製品のリワークなどを実施しようとして陽極にHM-Zr合金以外のよりPu密度の高い物質を装荷した。

規定外の物質を受け入れるような操作は工程管理システムによりプロテクトされる。セル内の物質移動はその物質を入れる容器のIDと秤量値によって管理され、移動には工程管理システムによる確認が自動的に実施される。

なお、陽極バスケットの質量管理上の核的制限値は2.3kg-Puであるから、プラントで取り扱う物質のなかで最も臨界質量の小さいU-Pu金属（液体Cd陰極処理後の製品）を受け入れたとしても臨界には到らない。

(ii) 受入物質データの誤り

入力データのミスなどにより工程管理システムが把握しているデータと実際の物質が異なることにより、本来受け入れられない化学形態の物質が取り扱われる。

工程管理システムのデータベースにアクセスする場合には複数の運転員がデータの確認を行う。また、工程管理システム自体の異常検知システムにより運転員からの入力データのセットの一部と実際の物質のデータが（例えば質量などの自動化機器が自律的に測定できるデータについて）照合される。

なお、工程管理システムのプロテクションを解除して操作を行う場合には、工程管理システムのデータに対するアクセスは運転員だけで行うことは出来ず、管理権限者の認証を要するものとする。

(2) 異常析出

(i) 逆電位電解

電解時に陽極と陰極の電位を逆転して運転することによって陽極に析出物が付着する。

陽極、固体陰極、液体Cd陰極の電源コネクタの形状がそれぞれ異なる設計とすることにより、コネクタ接続ミスによって電位が逆転することはない。また、電位計により監視するため、仮に逆転電位がかかったとしても異常な運転は継続しない。さらに、逆転電位（ただし電位値は平常値）において陽極バスケットに析出するのは低密度の樹枝状U金属析出物（天然ウラン以下の濃縮度）であり、臨界安全性への影響（反射体効果など）はほとんど無視できる。

5.1.3 質量管理に影響をおよぼす偶発的事象と設計対応

陽極バスケットへのせん断燃料片の受入時には、せん断機の燃料ピンせん断本数のカウントにより受入量が自動的に監視される。なお、最大装荷可能量は陽極バスケットの容積によって物理的に制限され、この極限状態においても陽極単体での臨界安全性は確保される。

せん断ピン本数と装荷操作終了後の秤量値の比較により装荷質量の確認を行うが、この場合過剰装荷そのものの防止は出来ない（異常は装荷操作終了後に検知される）。もしターンテーブル上のせん断燃料片の装荷位置にロードセルが仕込まれていれば、装荷しながらの装荷質量の確認が同時に行えるため、ピンせん断数のカウントと合わせて装荷質量管理の二重化が可能となる。

(1) 取扱量過多

陽極バスケットへ規定量以上のせん断燃料片を装荷する。燃料ピンせん断工程の異常による1バッチ装荷量の過剰と、陽極バスケット取扱上の異常による多重装荷（既に装荷済の陽極バスケットを再度装荷位置に置く）が考えられる。なお、陽極の容積が制限されていることから、物理的に可能な最大装荷量に限度がある。

(i) 過剰装荷

1バッチに18本以上の燃料ピンをせん断して陽極バスケットに装荷した。あるいは、径ブランケットの場合の1バッチ量（11.3kg-HM）と間違えて燃料ピンを装荷した。

せん断機において一度にせん断にかけられる燃料ピンの本数は燃料ピンパレットの大きさによって制限されている。また、せん断時のせん断歯のストロークおよび燃料ピンの押し出し量が管理されているため、1バッチに18本以上の燃料ピンをせん断することはない。これらの工程は運転員により監視される。

径ブランケットと燃料ピンのパレットは形状寸法が異なるため取り違えることはない。

なお、陽極バスケットを満たすほどせん断燃料を装荷した場合でも臨界に到ることはない。

(ii) 多重装荷

既に1バッチ装荷済の陽極バスケットを再び装荷位置に移動させて、もう1バッチ分のせん断燃料片を装荷した。

陽極バスケットおよび陽極容器には固有の容器IDが割り当てられており、工程管理システムによってそれらの位置および使用履歴が把握されている。また、その容器内に何がどれくらい入っているかについても工程管理システムによって管理され、工程での取扱時には容器IDの確認および秤量が確実に実施される。従って、既にせん断燃料片を装荷した陽極バスケットを誤って装荷位置に搬送する

ことはない。

なお、陽極バスケットを満たすほどせん断燃料を装荷した場合でも臨界に到ることはない。

(2) 過剰装填

電解精製槽の電極ポートは8基あり、通常運転時にはその内の4基に陽極、3基に固体陰極、残りの1基に液体Cd電極を装填する。マテリアルハンドリングの異常により、電極ポート8基全てにせん断燃料ピン装荷済の陽極を装填する。

(i) 全電極ポートに陽極を誤装填

マテリアルハンドリング時には二重化された容器IDの確認操作が実施され、また運転員による目視での操作確認が行われるため、他の電極と誤認しての誤装填は考え難い。なお、万が一全ての電極ポートに陽極を装填した状態においても臨界に到ることはない。

5.1.4 Pu 富化度管理に影響をおよぼす偶発的事象と設計対応

陽極に受け入れる物質のPu富化度は、プラントが受け入れる使用済燃料の新燃料時のPu富化度を超えることはない。使用済燃料のプラントへの受入時には、その燃料集合体の製造履歴、集合体IDの確認および照射履歴などを確認する。したがって、陽極への装荷操作の誤りにより規定以上のPu富化度の物質を装荷することはあり得ないが、プラント受入時に認可対象外の使用済燃料を受け入れた場合、陽極に装荷される物質のPu富化度は保証されない。なお、Pu富化度の確認はせん断後に、せん断燃料ピンのサンプルの化学分析によって実施される。

(1) Pu 富化度過剰

規定以上のPu富化度を持つ燃料をせん断して装荷する事象。あるいは核的制限値を超えるPu富化度のHM-Zr合金を装荷する事象。

(i) 装荷物の Pu 富化度過剰

プラントの受け入れ基準を超えるPu富化度の燃料集合体を受入てせん断し、陽極バスケットに装荷する。

プラントに受け入れる燃料の仕様は規定されており、実際の受入時には燃料製造履歴や炉心での燃焼履歴等を厳しくチェックされる。したがって、誤って仕様を超える燃料の受入を許可することはない。

なお、燃料製造におけるHM-Zr合金のリワークは射出成形工程に対してのみ行われるため、高Pu富化度のHM-Zr合金が電解工程にリワークされることはなく、その様な操作は工程管理システムによってプロテクトされる。

5.1.5 同位体比管理に影響をおよぼす偶発的事象と設計対応

陽極に受け入れる物質のU濃縮度およびPu同位体比は、プラントが受け入れる使用済燃料の新燃料時の濃縮度を超えることはない。使用済燃料のプラントへの受入時には、その燃料集合体の製造履歴、集合体IDの確認および照射履歴などを確認する。したがって、陽極への装荷操作の誤りにより規定以上のU濃縮度およびPu同位体比の物質を装荷することはあり得ないが、プラント受入時に認可対象外の使用済燃料を受け入れた場合、陽極に装荷される物質のPu富化度は保証されない。なお、U濃縮度およびPu同位体比の確認はせん断後に、せん断燃料ピンのサンプルの化学分析によって実施される。

ブランケット燃料のPu同位体比は ^{239}Pu 比率の非常に高いものであるが、Pu富化度管理の併用により臨界安全性は確保される。なお、電解精製槽の溶融塩中のPuの同位体比管理のために、電解精製槽に受け入れられる炉心燃料とブランケット燃料の割合は厳密に管理される。

(1) U 同位体比異常

規定以上の濃縮度のUを使用した燃料をせん断して装荷する事象。

(i) 装荷物の ^{235}U 濃縮度過剰

プラントの受け入れ基準を超えるU濃縮度の燃料集合体を受入てせん断し、陽極バスケットに装荷する。

プラントに受け入れる燃料の仕様は規定されており、実際の受入時には燃料製造履歴や炉心での燃焼履歴等を厳しくチェックされる。したがって、誤って仕様を超える燃料の受入を許可することはない。

(2) Pu 同位体比異常

規定以上のPu同位体比のPuを使用した燃料をせん断して装荷する事象。なお、陽極における同位体比の管理は陽極の臨界安全性だけでなく、溶融塩および液体Cd陰極に対する臨界安全性にも影響する。

(i) 装荷物の Pu 同位体比異常

Pu同位体比については、質量管理と関連して取り扱われる。例えば照射済ブランケットではPu富化度は極めて小さいが、Pu同位体組成では ^{239}Pu が90%を超える。そのため、Pu同位体比だけを独立して制限することは意味がない。よって、実際の管理においては質量管理と一体となって運用される（例えば等価fissile質量の管理など）。

なお、核的制限値の状態にある陽極においてPu同位体比がPu-239のみの状態となったとしてもそれだけで臨界に到ることはない。

5.1.6 嵩密度管理に影響をおよぼす偶発的事象と設計対応

陽極の主たる臨界管理因子は質量である。物質の臨界質量はその嵩密度に依存するため、核的制限値設定の基準となる推定臨界下限質量の嵩密度が変化することは臨界安全性に影響する。陽極の核的制限値設定の基準として100%理論密度のZr合金燃料（三元合金）を用いているため、嵩密度がこれ以上の厳しい変化を起こすことはない。実際の照射済燃料はより低い嵩密度である。また、同様に燃料被服管も考慮しないため安全側である。

(1) 嵩密度増加

対象とする化学形態の核的制限値で定められた嵩密度を超える密度に到る事象。

(i) Zr 合金燃料の再熔融凝固

Naボンド除去装置での温度異常（過加熱）や、移送および仮置き持の冷却不良により融点以上の温度に達し、熔融後凝固する。

Naボンド除去装置の加熱装置にはインターロックが設けられており、制限温度以上の加熱が生じることはない。また、冷却不良による崩壊熱による加熱が生じないようArセル雰囲気温度が制御され、短時間の冷却能力喪失時を考慮しても融点に達することがないよう雰囲気温度制限値が設定される。

5.1.7 減速度管理に影響する偶発的事象と設計対応

金属電解法プラントでは、有意な量の減速材となりうる物質の使用を禁止している。また、Arセル雰囲気純度管理において湿分濃度は極めて低い値を管理値としている。なお、プラント設計立地条件として水没は生じないものとする。

(1) セル雰囲気中湿分濃度の上昇

Arセル雰囲気浄化系の配管リーク等により、Arセル雰囲気湿度が上昇する。

Arセル雰囲気湿度は複数の濃度計により常時監視されており、規程上限値に達した場合には警報により運転員に異常が警告される。なお、セルライニングの大規模破断は排除する設計としているため、小破断もしくはクラックなどが原因による湿度の上昇は十分に緩慢な事象であると考えられる。したがって、湿度異常に対しては設計対応ではなく運転員の対応によるものとする。

5.1.8 反射条件管理に影響する偶発的事象と設計対応

金属電解法プラントではハンドリング装置による物体の移動を日常的に行うことから、単一ユニットにおける臨界安全評価においては他の物体の異常接近がもたらす影響を考慮し、水20cm厚の反射条件の下でも臨界安全性が維持できる

ように設計している。なお、プラント設計立地条件として水没は生じないものとする。

(1) 電解精製槽装填時における電極の落下

電解精製槽内部では等間隔（600mm）で電極ポートが設置されており、各電極は電極支持モジュールのシャフトによりつり下げられている。通常電解位置は熔融塩層の高さ中心にあるが、接合不良もしくはシャフトの破損等で落下した場合、熔融塩より密度が高く反射体効果の高いCdプール中へ落下する。またこの場合、槽底部に接地するため下方の反射条件も厳しくなる。

電極支持モジュールおよび電極の取り付け部は十分な強度を持つよう設計され、かつ定期的に運転員の目視による確認が成される。

なお、単一ユニットにおいて厳しい反射条件が課されているため、上記の条件変化によっても未臨界を維持できる。

(2) 他の非燃料物質、機器の接近

非燃料物質や空容器、機器等の移動操作時に誤って陽極に近接する位置に移動され、反射体効果をもたらす。

セル内で取り扱われる非燃料物質や空容器、機器の設置場所や移送経路は予め定められており、自動化されたハンドリングシステムによりその取り決めが厳守され、運転員の目視確認が行われる。なお、単一ユニットにおいて厳しい反射条件が課されているため、上記の条件変化によっても未臨界を維持できる。

5.1.9 隔離距離管理に影響する偶発的事象と設計対応

陽極ターンテーブル、ボンドNa除去槽および電解精製槽においては陽極の設置位置は予め指定されており、構造物等によりそれ以外の場所への設置が出来ないようになっている。

陽極移送時には移送装置による排他的な移送経路の占有がなされるため、移送中に他の陽極と異常接近することはない。

(1) 電解精製槽装填時における電極の落下後の異常接近

電解精製槽内部では等間隔（600mm）で電極ポートが設置されており、各電極は電極支持サポートのシャフトによりつり下げられている。各電極間距離は電極支持モジュールのシャフトにより維持される。接合不良もしくはシャフトの破損等で複数の電極が落下した場合、隔離距離の維持を担保できなくなる。

同時に複数の電極が落下するような事象は通常の取扱では考えにくく、地震等による外乱がその起因事象として考えられる。電極支持モジュールおよび電極の取り付け部は要求される耐震性を満たすために十分な強度を持つよう設計され、かつ定期的に運転員の目視による確認が成される。

5.2 固体陰極

固体陰極アセンブリは、鉄製の棒状電極と電極支持モジュールから構成される。電極は回転することが出来、析出物（樹枝状U金属）が過剰に成長して槽内壁や他の電極と短絡しないように径方向および下方向に電極棒からある間隔を置いてスクレーパーが設置されている。スクレーパー以上に成長した樹枝状析出物は陰極の回転とスクレーパーによりそぎ落とされ、電解精製槽底部のCdプール中へ落下する。

5.2.1 化学形態管理に影響する偶発的事象と設計対応

(1) 異常析出

(i) Pu 金属の電析

固体陰極に印可する電位が通常値より大きく逸脱し、Puイオンの酸化還元電位より低い電位で電界を行った。

電解精製槽の電位および各電極の電流値等のプロセス値は常に監視され、工程制御装置に組み込まれたプロセスシミュレーターの予測する値あるいは予め規定された運転範囲より大きく逸脱した場合にはそれ以上の逸脱が起きないようにプロテクションされる。また、重要な計装装置は二重化されている。

また例えPuの析出が可能な電位に到ったとしても、熔融塩中にUが共存していればPu単体での析出は生じない。したがって熔融塩中のPu/U比の異常が重ねあわされている必要がある。

さらに、固体陰極へのPuの付着性は極めて悪いと言われており、臨界に到るほどの多量のPuが析出することは物理的に考えにくい。ただし、この点を安全上のバリアと見なすためには実験的な実証が必要と考えられる。

5.3 液体 Cd 陰極

液体Cd陰極アセンブリは、液体Cdを充填するセラミクス製るつぼと、るつぼを保持するるつぼサポートおよび電極支持モジュールから構成される。電極支持モジュールにはパウダーが設置され、Cd界面に析出した樹枝状U金属結晶が過度に析出しないようにしている。るつぼ本体はセラミクス材料（BeO）、るつぼサポートはSUS製である。

所定の電位を印可すると、Cd界面にあるUイオンとPuイオンが還元され析出する。Uは固体陰極と同様の樹枝状析出物を形成するが、析出速度が十分遅いと液体Cd中に溶解する。Puについては固体陰極では安定的に析出しなかった電位でもCdと反応することで金属間化合物PuCd₆を形成し、液体Cd中に回収される。

5.3.1 容積制限に影響する偶発的事象と設計対応

液体Cd陰極るつぼへ液体Cdを充填する際には、（るつぼの容積とは独立に）その充填量が管理される。また、電解中は電位および電流値が監視され、過剰な析出あるいは異常な析出が生じないように工程管理システムによりプロテクションされる。

物理的限界としては、るつぼ容積一杯（8.0L）のPuCd₆が充填された場合においてもその量はPuCd₆の推定臨界下限値を十分下回る。したがって、液体Cd陰極において臨界に到るには、少なくともCd充填量の異常、電解プロセス制御異常および容積異常が同時に生じる必要がある。さらにこの時の容積異常がPuCd₆の推定臨界下限値（80.8L）以上の極端なものでなくてはならないが、るつぼ材料の材料特性上そのような変形は想定できない。

(1) 変形

るつぼ形状の変形、寸法の変形により液体Cd陰極るつぼの内部容積が変化する事象。

(i) 圧力差による変形

液体陰極るつぼ自体は気密容器ではないため、るつぼの内外で圧力差は生じない。

(ii) 内部荷重・応力による変形

想定される内容物の荷重および応力に十分耐えうる強度を持つように設計される。るつぼ本体はセラミクス材料であるため金属容器のように大きな塑性変形が生じることはない。万が一、過剰な荷重を受けた場合にはるつぼ自体が割れるなどの破損に到り、取扱が出来なくなる。

(iii) 外部衝撃による変形

移送時あるいは吊り上げ時の掴み不良により落下して変形する。あるいは移送中の物質もしくは移送装置が衝突することにより変形する。

前述の「内部荷重・応力による変形」と同様、応力により過剰な変形を生じることとはなく、それによる容積の大きな変化も想定されない。

なお、移送などのハンドリング時には掴み具にインターロックが設けられ、不適切な状態での吊り上げ、移送が防止される設計とする。移送装置の最大移動速度は制限される。また、貯蔵エリアや架台には必要に応じて物理的な防護板もしくはバードケージが設置され、移送装置との接触を防止する。

(iv) 熱膨張

材料の物理的性質上、臨界安全性に影響するほどの大きな熱膨張を起こすことはない。急激な温度変化が生じた場合、熱応力によりるつぼが破損する場合が考

えられるが、この様な場合には材料特性上るつば自体が割れるなどの破損に到り、取扱が出来なくなる。また、るつば材料は使用温度条件に合わせた適切な材料が使用されており、健全性に影響を与えるほどの急激な温度変化を与えるような操作は禁止される。

(2) 容器壁の減肉

容器壁の減肉により内部容積が増加する。

容器壁の厚さを考慮しなくても臨界に到ることはない。また、るつば自体に異常が生じていないか、運転員による目視確認が定期的実施される。

(i) 化学的腐食による減肉

溶融塩あるいは充填するCd等との化学的反応により腐食し、内部容積が増加する。

使用環境を考慮した材料及び構造設計が行われ、平均的な耐用使用回数（あるいは期間）が設定される。また、るつば自体に異常が生じていないか、運転員による目視確認が定期的実施される。

(ii) 電気化学的腐食

陰極電位では溶解は生じない。したがって、陰極側で電気化学的な溶解が生じるには、配線ミスか印可電位の設定異常（電位の逆転）が生じる必要があるが、これらは配線コネクタの形状や工程管理システムによりプロテクションされる。さらに、例えば逆転電位で電解したとしてもるつば材料の物質的性質上、電気化学的な腐食は生じない（るつばサポートが腐食することは考えられるが、これは容積変形に関係しない）。

なお、るつば自体に異常が生じていないか、運転員による目視確認が定期的実施される。

(iii) 摩擦・研削による減肉

パウダーとの接触、析出物の取り出し操作時の扱いなどにより内部壁面が機械的に削り取られ、内容積が増加する。

るつば自体に異常が生じていないか、運転員による目視確認が定期的実施される。

(3) 漏えい

るつばに回収される核燃料物質の量は推定臨界下限値を十分下回る量であるため、漏えいしただけで臨界に到ることはない。また、電解中に漏えいが発生した場合、漏えい物と電極との電氣的結合が切断されるため、漏えい物への電解析出は生じない。

電解精製槽中で漏えいした場合、核燃料物質を含んだ液体Cdは電解精製槽下

部のCdプールに取り込まれる。このCdプールは約1000kgの液体Cdからなっており、1電極分のCdが加えられたとしてもそれは十分希釈され、臨界安全性に大きな影響を与えることはない。

電解精製槽外ではるつぼはCdの融点より低い温度で取り扱われるため、るつぼが破損したとしても液体状で漏えいすることはない。また、移送中および仮置き中は電極支持モジュール内に内蔵されるため、るつぼの破損だけで内容物がセル内に漏えいすることは防がれる。

(i) 破損等による漏えい

過大な変形（落下、衝突）、腐食、摩擦、熱応力等により液体Cdるつぼが破損し、内容物が漏えいする。電解精製槽内部で漏えいした場合は、電解精製槽下部Cdプールで希釈されるため、臨界安全性に大きな影響を与えない。また、電解精製槽外ではCdの融点を下回る温度で取り扱われることからオーバーフローによる液体の漏えいは生じない。

(ii) オーバーフローによる漏えい

液体Cdるつぼの容積を超える液体Cdを充填する。このとき充填されるCd中には核燃料物質は含まれていないため、臨界安全性に影響しない。また、電解精製槽外ではCdの融点を下回る温度で取り扱われることからオーバーフローによる液体の漏えいは生じない。

(iii) 取扱時の漏えい

液体Cd陰極を傾けることなどにより内容物が漏えいする。

電解精製槽外では内容物は固体化した状態で取り扱うため、傾けることで漏えいすることはない。電解精製槽に設置した状態では、電極ゲートバルブのリグなどで結合されるため、電極が傾くようなことはない。例え傾いて内容物が漏えいしたとしても、電解精製槽下部Cdプールで希釈されるため、臨界安全性に大きな影響を与えない。

5.3.2 化学形態管理に影響する偶発的事象と設計対応

液体Cd陰極にはCdしか充填しない。また、電解時には電位と電流値が常時監視され、電解開始前の溶融塩の状態と合わせて工程管理システムにより意図しない化学形態が電解析出しないようにプロテクションされる。

(1) 異常析出

(i) 単体 Pu 金属の析出

Pu単体金属の電解析出が生じうる電位となり、（ある程度の塊で）Pu単体金属が析出する。

電解電位が工程管理システムによりプロテクションされるので、異常電位での電解が継続されることはない。また、電解開始前の溶融塩のPu/U比の確認により、Pu単独で析出が生じることはない。なお、電流値もプロテクションされ、規定量の電流値で析出される物質の量がすべてPuであったとしても、Pu金属の推定臨界下限値を十分下回る。

なお、Cd陰極表面でPu金属が析出したとしてもこれはCd中に溶解される。

(2) PuCd₆の塊の析出

液体陰極内ではPuの溶解した液体Cd相と金属間化合物のPuCd₆の微小粒子が混在した状態にある。Cdは揮発により徐々に減少していくことから、高温で長時間放置された場合フリーのCd原子が全て揮発し、PuCd₆の塊が残される。

PuCd₆は液体陰極で通常取り扱う化学形態として規定されているため、PuCd₆の塊が発生したとしても化学形態管理上の以上ではなく、また質量管理上の核的制限値ではこのような状態でも臨界に到ることはない。

5.3.3 質量管理に影響をおよぼす偶発的事象と設計対応

液体Cd陰極に回収される核燃料物質の質量は、るつぽに予め充填されるCdの量、電解電位、電解電流値および溶融塩中のHM濃度とPu/U比によって決まる。充填されるCdの量は充填時に確認される。溶融塩中のHM濃度およびPu/U比は電解開始前に溶融塩サンプルの化学分析によって確認される。さらに電解時の電位変化および電流値が制御される。これらの制御パラメータは平常運転範囲から逸脱しないよう、工程制御システムによりプロテクションされる。

(1) 回収量過多

(i) 過剰析出

1バッチの電解操作において、規定量以上の核燃料物質が析出、回収される。原因としては、電解電流量が多かった場合と、（溶融塩中のHM組成の異常により）電解析出物のPu/U比が既定値より大きかった場合が考えられる。

これらの異常は工程制御システムによりプロテクションされる。また、例えば充填したCd全てがPuと金属間化合物を作るような極端な場合であっても、陰極に回収されるPuの質量は推定臨界下限値を十分下回る。

(ii) 多重析出

一度電解析出操作を行った液体Cd陰極を、再び電解精製槽に装填し電解析出を行う。あるいは、既に電解回収を終えた電極の交換を行わずに次のバッチ操作を実行する。

液体Cd陰極るつぽおよび陰極アセンブリには固有の容器IDが割り当てられて

おり、工程管理システムによってそれらの位置および使用履歴が把握されている。また、その容器に何がどのくらい入っているかについても工程管理システムによって管理され、電解後はその電解運転パラメータ値から予測された陰極内の回収物量および組成が暫定値として設定されている。陰極の移動の際には容器IDと秤量値が確認され、工程管理システムに登録されているデータとの照合および確認が行われる。したがって、一度電解析出させた液体Cd陰極を未電解のものと誤って取り扱うことはない。

なお万が一、2バッチ分の核燃料物質を回収したとしても、その量は推定臨界下限値に比べて十分少ない。

(2) 過剰装填

電解精製槽の電極ポートは8基あり、通常運転時にはその内の4基に陽極、3基に固体陰極、残りの1基に液体Cd電極を装填する。マテリアルハンドリングの異常により、陰極を装填するポート4基全てに液体Cd陰極を装填する。

(i) 全陰極ポートに液体 Cd 陰極を誤装填

マテリアルハンドリング時には二重化された容器IDの確認操作が実施され、また運転員による目視での操作確認が行われるため、他の電極と誤認しての誤装填は考え難い。なお、万が一全ての陰極ポート（4基）に液体Cd陰極を装填して標準量のPuを電解回収したとしても臨界に到ることはない。

5.3.4 Pu 富化度管理に影響をおよぼす偶発的事象と設計対応

液体Cd陰極に回収されるUとPuおよびMAの割合は、溶融塩中のそれらの存在比と関係している。

液体Cd陰極においては、回収されるPuの質量は管理されるが、その基準となる推定臨界下限値を求める際に想定する化学形態ではUによる希釈を考慮しない。すなわち、Pu富化度管理は適用されない。溶融塩中のPu/U比による液体Cd陰極中へのPu/U回収比の制御は質量管理に関連したものであり、その比自体に臨界安全上の効果を認めない設計としている。ただし、電解プロセス中は質量を直接監視するのではなく電解において通電する電流量を制御することにより、回収されるHMの質量を管理することになるので、Pu富化度管理を適用しない場合には流れた電子全てがPuの還元析出にのみ消費されるとして評価する。

(1) Pu 富化度過剰

電解操作の電流量は通常値であるが、プロセス制御の失敗によりPuのみが優先的に析出する。

(i) U/Pu 回収比異常

熔融塩中のU/Pu濃度の異常および電解電位の異常等により、液体Cd陰極においてPuのみが析出する。電解電流量が通常値であるとする、通常回収されるHMの全量に近いPuが回収される。このとき、Uによる希釈は生じない。

熔融塩中のU/Pu比は、熔融塩サンプルの化学分析と過去の電解精製槽の物質収支、およびプロセスモデルによる予測値によって相互に確認される。

5.3.5 減速度管理に影響する偶発的事象と設計対応

金属電解法プラントでは、有意な量の減速材となりうる物質の使用を禁止している。また、Arセル雰囲気純度の管理において湿分濃度は極めて低い値を管理値としている。なお、プラント設計立地条件として水没は生じないものとする。

(1) セル雰囲気中湿分濃度の上昇

Arセル雰囲気浄化系の配管リーク等により、Arセル雰囲気の湿分濃度が上昇する。

Arセル雰囲気の湿分濃度は複数の濃度計により常時監視されており、規程上限値に達した場合には警報により運転員に異常が警告される。なお、セルライニングの大規模破断は排除する設計としているため、小破断もしくはクラックなどが原因による湿分濃度の上昇は十分に緩慢な事象であると考えられる。したがって、湿分濃度異常に対しては設計対応ではなく運転員の対応によるものとする。

5.3.6 反射条件管理に影響する偶発的事象と設計対応

金属電解法プラントではハンドリング装置による物体の移動を日常的に行うことから、単一ユニットにおける臨界安全評価においては他の物体の異常接近がもたらす影響を考慮し、水20cm厚の反射条件の下でも臨界安全性が維持できるように設計している。なお、プラント設計立地条件として水没は生じないものとする。

(1) 電解精製槽装填時における電極の落下

電解精製槽内部では等間隔（600mm）で電極ポートが設置されており、各電極は電極支持モジュールのシャフトによりつり下げられている。通常電解位置は熔融塩層の高さ中心にあるが、接合不良もしくはシャフトの破損等で落下した場合、熔融塩より密度が高く反射体効果の高いCdプール中へ落下する。またこの場合、槽底部に接地するため下方向の反射条件も厳しくなる。

電極支持モジュールおよび電極の取り付け部は十分な強度を持つよう設計され、かつ定期的に運転員の目視による確認が成される。

なお、単一ユニットにおいて厳しい反射条件が課されているため、上記の条件

変化によっても未臨界を維持できる。

(2) 他の非燃料物質、機器の接近

非燃料物質や空容器、機器等の移動操作時に誤って陽極に近接する位置に移動され、反射体効果をもたらす。

セル内で取り扱われる非燃料物質や空容器、機器の設置場所や移送経路は予め定められており、自動化されたハンドリングシステムによりその取り決めが厳守され、運転員の目視確認が行われる。なお、単一ユニットにおいて厳しい反射条件が課されているため、上記の条件変化によっても未臨界を維持できる。

5.3.7 隔離距離管理に影響する偶発的事象と設計対応

電解精製槽においては陽極の設置位置は予め指定されており、構造物等によりそれ以外の場所への設置が出来ないようになされている。

陰極移送時には移送装置による排他的な移送経路の占有がなされるため、移送中に他の陽極と異常接近することはない。

(1) 電解精製槽装填時における電極の落下後の異常接近

電解精製槽内部では等間隔（600mm）で電極ポートが設置されており、各電極は電極支持サポートのシャフトによりつり下げられている。各電極間距離は電極支持モジュールのシャフトにより維持される。液体Cd陰極に規定量のPuが回収された状態では既に陽極バスケット内には燃料物質は残っていない。また固体陰極に析出するのは濃縮度の十分低いウラン金属である。従って、各電極の隔離距離が変化したとしても臨界安全性に影響を与えない。

同時に複数の電極が落下するような事象は通常の取扱では考えにくく、地震等による外乱がその起因事象として考えられる。電極支持モジュールおよび電極の取り付け部は要求される耐震性を満たすために十分な強度を持つよう設計され、かつ定期的に運転員の目視による確認が成される。

5.4 溶融塩

電解精製プロセスで使用する溶融塩は44/56wt%比のLiCl-KCl共晶塩である。溶融塩は所定の成分に調整されたものが電解精製槽に供給される。供給される溶融塩の量は基本的に液位によって定められる。すなわち、一番背の高い陽極バスケットが十分浸漬する高さまで充填される。したがって、溶融塩の量は電解精製槽の大きさと関係があり、大型8極電解精製槽では約1800L程度の溶融塩が必要になる。

十分な電解速度と液体陰極に回収されるU/Puの比を制御するため、溶融塩中のHM濃度は10.66wt%、Pu/U比は約3/1に調整される。通常の電解においては陽

極において溶解する量と各陰極で析出する量がバランスするため、溶融塩中の濃度に大きな変動は生じない。

5.4.1 化学形態管理に影響する偶発的事象と設計対応

溶融塩中に溶解したPuは3価のイオンの状態にある。この状態の安定性は他に共存する物質の酸化還元電位との差によって定まり、特に雰囲気中に混入する不純物である酸素やH₂Oと反応し酸化物を形成する。これらの不純物との反応はUイオンが共存する場合、先にUと選択酸化を起こしPuの酸化は抑制されると言われているが、この性質を安全上のバリアとするためにはより詳しい知見と実証が必要である。

なお、これらの不純物の侵入を防止するため、電解精製槽に独立した高純度Arカバーガス供給系が設けられ、より純度の低いArセル雰囲気が入り込まないようにセル圧力に対して微正圧を維持する設計としている。実際の微正圧の程度は、電解精製槽の気密性能やArセル雰囲気の純度管理との取り合いになるため、現時点で具体的な数値設定は行わない。また、Arセル雰囲気も電解精製槽カバーガスの純度より悪いとはいえ、十分低い不純物濃度に維持されているためカバーガス供給系に対するバックアップとして機能する。

(1) 析出物の生成

溶融塩中に均質に溶解している核燃料物質が、他の反応性物質と反応し固体状の析出物を生成する。なお、ここでの析出物の生成は偶発的異常により大量の発生が想定されるような事象であって、平常運転時にも発生する微量の不溶解生成物の蓄積については「不溶解物の質量管理」の項目で考慮される。

(i) 雰囲気異常による生成

Arカバーガスの成分異常により溶融塩中に溶解している核燃料物質と反応して固体状の反応生成物を生成させる化学成分（湿分、酸素あるいは窒素など）が侵入する。あるいは、カバーガスの流量低下、カバーガスオフガス流量増大によりカバーガスの微正圧が負圧に変わるか、または電解精製槽の気密シール異常によって純度の低い電解精製槽外のArセル雰囲気が槽内へ流入する。

オフガス圧力バランスの調整は工程管理システムによりプロテクションされるため、流量異常あるいは気密異常による低純度ガスの流入を防止する。また、流入するカバーガスの純度も工程管理システムにより監視され、異常時には電解精製槽の使用が停止される。

急激な雰囲気異常の場合には、工程管理システムは電解精製槽のヒーター加熱を停止させ、内蔵している溶融塩液面を凝固させて過剰な不溶解物の生成を防止するなどの事象拡大防止対策を採る。

上記の異常等が発生した場合は、実際に発生したかどうかに関わりなく、電解精製槽は完全にクリーンアウトし、不溶解生成物の在庫量をゼロに戻す。

(ii) 酸化性物質等の添加

反応物が上記のような気体ではなく、電極等他の物質の出し入れに随伴する形で侵入する。例えば、セル内での使用が許可されていない試薬や、除去しきれなかったボンドNaがセル雰囲気中の湿分と反応して水酸化物を形成し、それが付着したまま電解精製槽へ装填されるような場合である。

通常、電解精製槽へ受け入れられる前にボンドNa除去槽によってボンドNaは除去される。したがって、臨界安全上大きな影響を与えるほどの水酸化物が短期間に侵入することはない。

また、電解精製槽に受け入れられる他の化学物質（塩化カドミウムなどの調整試薬）は受入前に厳重な確認が行われ、受入操作は全て工程管理システムの監視下で実施される。さらに、通常許可されない物質のセル内での使用は責任者により事前に審査されるため、誤って許可されていない物質を受け入れることはない。

(2) 不均質化

均一に溶解している核燃料物質が何らかの原因により、臨界安全性に影響するほどの濃度不均一な状態となる。

(i) 塩化物の凝固、析出

熔融塩中の温度分布の異常などによって、熔融塩中のPuイオンが PuCl_3 として析出凝固する。またこのとき、他の物質との融点の違いなどにより PuCl_3 だけが濃縮されて凝固する。

PuCl_3 の融点は 760°C であり、これは電解精製槽の通常運転温度である 500°C より高い。熔融塩内部では LiCl-KCl 共晶塩の存在によりPuイオンとして分散した状態にあるが、理想的な温度分布および濃度と濃度分布があれば PuCl_3 の析出が考えられる。

電解精製槽では異常な濃度分布や温度分布が生じないよう熔融塩相を十分攪拌している。また温度分布については極端な分布が生じないようヒーターの設計を行う。これらの運転状況および熔融塩中の温度分布は工程管理システムにより監視されている。

現設計のような多量の熔融塩の冷却時の固化挙動について詳しくは不明であるため、前述の極端な析出物の濃縮が生じないことを実験的に実証する必要がある。

5.4.2 質量管理に影響する偶発的事象と設計対応

熔融塩中に溶解しているPuの質量を直接計量することは出来ないため、容積

(液位からの間接的な計算値)と濃度(サンプル塩の化学分析値)から間接的に求めた値と、計量管理におけるインベントリ量およびセル電位に基づく予測モデルの推定値などを相互に評価して評価する。

LiCl-KCl-PuCl₃系の熔融塩の推定臨界下限濃度は極めて大きく、平常状態におけるPu量は想定される変動の幅に対して十分な余裕を持っている。

(1) 熔融塩質量過剰

熔融塩中に存在するPuが多くなるには、熔融塩体積が多いか熔融塩中のPu濃度が高い場合の二通りがある。

(i) 塩量過多

塩中Pu濃度は規定値だが、存在している熔融塩の体積が多い。

熔融塩量が多くなる原因としては、供給熔融塩量が多かった場合と、塩リサイクル時に抜き取る量が少なかった場合が考えられる。熔融塩の供給および排出は配管移送によって行うが、電解精製槽および供給槽あるいは受槽それぞれの液位変動の監視および相互確認により、移送量の誤りがないことを検知する。

なお、通常操業時のPu濃度では無限体系においても臨界に到ることはない。

(ii) 塩中 Pu 濃度過剰

熔融塩の体積は規定値だが、塩中Pu濃度が高い。

Pu濃度の上昇は、電解時に回収されるUとPuの比率が変化した場合に生じる。ただし、熔融塩自体の容積に比べて電解1バッチ当たりのPu量は少ないことから、有意な熔融塩中のPu濃度の変化が起きるには、複数回の操作にわたって異常の検知に失敗しなくてはならない。

5.4.3 濃度管理に影響する偶発的事象と設計対応

熔融塩中のPu濃度は、熔融塩サンプルによる化学分析と、計量管理および熔融塩液位からの間接的計算および予測モデルからの推定値によって相互に確認される。

(1) 濃度過剰

(i) 塩中 Pu 濃度過剰

初期塩濃度調整時および通常運転時において、過剰量のPuの溶解もしくはPuの回収不良により熔融塩中のPu濃度が増加する。

熔融塩の量が極めて大きいため、4基の陽極に装荷される1バッチ分が余分に溶解したとしてもそれによる濃度上昇は臨界安全性に大きな影響を与えない。また、LiCl-KCl-PuCl₃系の熔融塩の推定臨界下限濃度は極めて大きく、平常時濃度は想定される変動の幅に対して十分な余裕を持っている。

熔融塩濃度は定期的なサンプリング分析により確認される。また、陽極装荷量、陰極回収量もサンプリング分析および秤量による直接計量と、電解予測モデルによるプロセスシミュレーション予測値のダブルチェックが行われ、これらのデータに基づいて工程管理システムが実際の運転操作をプロテクションする。

(ii) 塩中 Pu 濃度不均一化

攪拌不良等により熔融塩相にPu濃度の不均一分布が発生する。

熔融塩の攪拌は攪拌のための装置（複数設置されたインペラーもしくはパルセータ）によるだけでなく、陽極の回転等によっても行われるため、全ての攪拌操作が同時に喪失することは考えにくい。また、外部電源喪失ではこれらの動的装置が同時に停止するが、一方で電解操作も停止するため、大きな濃度勾配が生じる可能性は小さい。

さらに、LiCl-KCl-PuCl₃系の熔融塩の推定臨界下限濃度は極めて大きく、平常時濃度は十分な余裕を持っているため、自然に生じうる濃度勾配を考慮したとしても臨界に到る可能性は低い。ただし、現実的に生じうると考えられる濃度勾配がどの程度であるか具体的かつ定量的な実績値はないため、試験等により確認する必要がある。

5.4.4 可溶性中性子吸収材管理に影響する偶発的事象と設計対応

LiCl-KClに含まれるLiの同位体Li-6の中性子吸収は非常に大きいため、可溶性中性子吸収材として働く。ただし、本システムにおいてはLi-6は臨界安全管理上の目的で用いているわけではなく、プロセス上必要な物質の天然同位体組成に基づいて導入されたものであるため、臨界安全管理上の機能を期待しない。

(1) Li 同位体比異常

中性子吸収断面積の大きな核種の存在割合の低下。

(i) Li-6 の損耗

LiCl-KClに含まれるLiの同位体Li-6の中性子吸収による損耗（熔融塩の再生利用による自然損耗）により熔融塩中の可溶性中性子吸収材Li-6濃度が低下する。

使用している熔融塩中のLiの同位体組成は天然同位体組成であり、特に濃縮されたものではない。したがって必然的に同伴するLi-6による中性子吸収効果は臨界安全解析において考慮されているが、平常時の状態においてLi-6濃度が0%であったとしても、それだけで臨界に到ることはない。なお、通常の電解精製槽の状態では主として自発核分裂等により放出される中性子を吸収して損耗するが、この中性子束密度はLi-6の数密度に比べて十分小さく、かなりの長期間にわたる使用においても有意な損耗は生じないと予想される。

(ii) 溶融塩組成の異常

電解に用いるLiCl-KClのLiCl/KCl重量組成は44/56wt%であるが、塩調整時などでKClの割合が規程より多くしてしまった場合に溶融塩中に含まれるLi-6の量も減少する。

供給される溶融塩は、供給前に所定の組成であることが確認される。また、例えばLi-6が存在しない極端な場合においても、それだけで臨界に到ることはない。

5.5 Cd プール

Cdプールは溶融したCd金属の層で比重により電解精製槽底部に存在する。Cdプールの役割は、固体陰極のスクレーパーによって削り落とされたU金属や、陽極バスケットからこぼれ落ちる不溶解性のFPを受け止めて回収しやすくすることである。これらは液体Cdをポンプで電解精製槽から取り出す際に随伴して回収される。

電解精製槽に装荷されるCdプールは液位を基準にして決められる。現在の設計では最深部で10cm程度である。電解精製槽底部は液抜き（ポンプによる吸引）が行いやすいように傾斜が設けられるので傾斜角も含めた詳細な機器設計が行われないと実際の装荷量は評価できないが、底部が平坦であると仮定すれば466Lが装荷されることになる。

5.5.1 化学形態管理に影響する偶発的事象と設計対応

CdプールとPuが溶解した溶融塩が常時接触しているが、イオン状態のPuは接触しているだけではCd中に移行しない（還元されない）ことから、Cdプール中には通常TRU元素は存在しない。

(1) 析出物の生成

(i) 電解による Pu 化合物の析出

電極の短絡や漏電によってCdプールが陰極として働き、CdプールにPuCd₆が析出する。

陰極電流がパスがCdプールにつながるような場合には、陰極面積が通常電極に比べて大きくなり電流値が増加するか、セル抵抗が低下することになる。このような電解電流値およびセル電位の値が通常運転範囲を逸脱するような場合には、工程管理システムにより電解が自動停止される。また、電解操作は予め設定された通電量でプロテクションされるため、大規模な電流パスの異常によってCdプールに析出したと仮定してもその最大量は制限される。

微小量の漏電により上記の工程管理システムのプロテクションに抵触しないような場合では、臨界安全性に影響を与えるほどの析出物が蓄積するには十分な

時間を要する。このような事象は、定期的に行われるCdプールの抜き出し操作における分析によって検知される。

5.5.2 質量管理に影響をおよぼす偶発的事象と設計対応

Cdプールの役割は主として固体陰極のスクレーパーによって削り落とされたウラン金属や、陽極バスケットから脱落する物質（貴金属FPやZr、燃料せん断屑など）を回収しやすくすることである。これらはCdプール内に落下すると液体Cdの飽和溶解度に到るまで溶解するので、CdプールのCdを吸い出すことによって電解精製槽中から回収できる。Cdプールの液体Cdは年に一度定期的に全体量の約8割が抜き取られて精製処理（溶解物の回収処理）が行われる。電解操作の各バッチ処理の前後でCdプールの液位とサンプリングの分析が行われ、異常がないことを確認する。Cdプール中に存在することを許されるPuの質量は、熔融塩中のPuの質量と合計された形で熔融塩中のPu質量制限値で規程される。

理想的にはCdプール内にはPuは存在しないが、陽極バスケットからのせん断燃料屑の落下や液体Cd陰極中の液体Cdの異常漏えいなどでPuがCdプール中に移行することが考えられる。なお、還元剤がない状態や電位が印可されていない状態では、Cdプールに常時接触している熔融塩中のPuイオンはCd中に移行しない。

(1) Cd プール中溶解質量過多

(i) Cd 量過多

Cdプール中のCd量が多いと濃度が低くても溶解している全体量は増大する。しかしながら、Cdプールの臨界管理因子は濃度ではなく質量（濃度値と全体量の両方）であるため、Cdの量自体が過剰なだけでは臨界安全性に影響を与えない。

(ii) Cd 中 Pu 濃度過剰

還元剤の誤った添加や電流パスの異常等で熔融塩中のPuイオンがCdプール中に移行し、Cdプール中のPu存在量が増大する。あるいは液体Cd陰極の落下により液体Cd中に回収されたPuがCdプール中に移行する。

液体Cd陰極の落下によってCdプール中に1バッチ回収量相当のPuが移行しても、その量はPu-Cd系の推定臨界下限質量を十分下回る量であるため臨界安全性に大きな影響を与えることはない。

電流パスの異常によるCdプールへのPuの析出によるPu濃度過剰は、前述した析出物の生成事象と同様の方法で防止される。

また、電解精製槽への物質の移送は工程管理システムにより管理されるため、還元剤の誤った添加は起こりえない。

5.6 不溶解物

前述したように熔融塩中に溶解したPuは3価のイオンの状態にあり、特に雰囲気中に混入する不純物である酸素や H_2O と反応し酸化物を形成する。Arカバーガスにはこれらの不純物が極力入らないような対策が施されるが、完全に侵入を防止することは出来ないので不溶解物のある程度の発生を許容し、その発生量を管理する。

5.6.1 化学形態管理に影響する偶発的事象と設計対応

電解精製槽で発生する不溶解物の化学形態としては酸化物を想定している。理想状態では不溶解物は存在しないが、Arカバーガス中の不純物や電極の出し入れに伴って侵入する不純物を完全に排除することは技術的に困難であるため、ある程度の発生を許容している。不溶解物の量を直接計量する方法は確立されていないため、電解精製槽内のインベントリ変化および受入/払出量差から推定する方法を採っているが、その推定の正確さや精度の粗さを考慮して許容される制限値が設定される。

(1) 窒化物等高密度化合物の生成

不溶解物として想定している酸化物形態よりも密度の高い化学形態が生じると臨界安全上の脅威となる。不純物として許容しているものは、酸素、水分および窒素であり、このうちPuの窒化物は酸化物よりも密度が高い。ただし、LINEX法などに代表される窒化プロセスの技術的困難さから考えれば、窒化反応の起こりやすさは酸化のそれに比べて十分低いと思われる。

(i) 雰囲気成分異常

Arカバーガス成分異常による窒素濃度の上昇。

流入するカバーガスの純度は工程管理システムにより監視され、異常時には電解精製槽の使用が停止される。

(ii) 窒化剤等の添加

熔融塩中のPuイオンを窒化しうる反応剤の誤った投入。

電解精製槽への物質の移送は工程管理システムにより管理され、かつ通常許可されない物質のセル内での使用は責任者により事前に審査されるため、上記のような物質の誤った添加は起こりえない。

5.6.2 質量管理に影響する偶発的事象と設計対応

不溶解物の量を直接計量することは出来ないため、電解精製槽への受入・払出の計量管理や、熔融塩中の在庫量評価、カバーガス中不純物濃度履歴などからの発生量予測により間接的に質量管理を行う。したがって、不溶解物の質量管理上

の核的制限値には大きな不確定性を考慮して余裕ある数値が設定される。

(1) 蓄積量過剰

通常運転時においても微量な不溶解物生成は生じる。間接的な推定値に基づいて蓄積量が管理され、この推定蓄積量が予め定められた制限値に到るか、あるいは定められた運転期間に到るときに電解精製槽のクリーンアウト操作が実施される。

(i) 長期間にわたる蓄積

定められたクリーンアウト操作を実施しなかった、もしくは実施が完全でなかった場合、制限値以上の不溶解物が存在する可能性がある。また、推定値に異常があった場合にも制限値以上の不溶解物が蓄積する可能性がある。

クリーンアウト操作の実施警告は工程管理システムにより発せられ、これを無視すると運転継続ができないようにプロテクションされる。クリーンアウト操作は工程管理システムから切り離された作業であるが、そのために作業員および監督者、責任者等のプラントの管理階層による多重チェックが実施される。物質評価のエラーによる推定値の過小評価は、その可能性を考慮して制限値が設けられるため単独のエラーだけで制限値を超過することはない。なお、受入/払出量差は実際の秤量値およびサンプリング分析値から計算されるため、工程管理システムの評価ミスは運転員の確認により検知することができる。

(ii) 短期間の異常発生

Arカバーガスの成分異常により熔融塩中に溶解している核燃料物質と反応して固体状の反応生成物を生成させる化学成分（湿分、酸素あるいは窒素など）が侵入した。あるいは、カバーガスの流量低下、カバーガスオフガス流量増大によりカバーガスの微正圧が負圧に変わるか、または電解精製槽の気密シール異常によって純度の低い電解精製槽外のArセル雰囲気槽内へ流入した。

オフガス圧力バランスの調整は工程管理システムによりプロテクションされるため、流量異常あるいは気密異常による低純度ガスの流入を防止する。また、流入するカバーガスの純度も工程管理システムにより監視され、異常時には電解精製槽の使用が停止される。

急激な雰囲気異常の場合には、工程管理システムは電解精製槽のヒーター加熱を停止させ、内蔵している熔融塩液面を凝固させて過剰な不溶解物の生成を防止する。

上記の異常等が発生した場合は、実際に発生したかどうかに関わりなく、電解精製槽は完全にクリーンアウトされ、不溶解生成物の在庫量をゼロに戻す。

5.6.3 嵩密度制約に影響を与える偶発的事象と設計対応

発生した不溶解物は微小な粒子状であり、粒径にも依存するがこれらは重力により槽底部に堆積するか、対流の止水点などに蓄積する。いずれにせよ大きな圧縮力は作用しないため、粉体密度程度で存在すると考えられる。また、粒径の小さなものは熔融塩中に浮遊すると考えられる。

(1) 不溶解物嵩密度の異常

不溶解物に対する核的制限値の設定根拠として、嵩密度を40%TD (4.5g/cc) と仮定している。酸化物燃料加工工程における酸化物粉体の嵩密度はその粒径分布に依存するが大体1.4～3.4g/cc程度といわれているため、上記の想定値は機械的圧縮が生じることに對して十分な裕度を持っていると言える。なお、40%TDは酸化物燃料加工工程においてバインダーを混合した状態で機械的にプレスした後のグリーンペレットの密度(2.4～4.4g/cc)に相当する。したがって、これ以上嵩密度を高くするには高温で焼結させる必要がある。

(i) 不溶解物の圧縮

不溶解物自体の自重、熔融塩およびCdプールの重さにより沈殿蓄積した不溶解物が圧縮され、嵩密度が増加する。

上記のように、不溶解物の核的制限値はすでに機械的圧縮力によって固められた嵩密度を基準としているため、電解精製槽内に存在する物質の重みで不溶解物の嵩密度がこの想定値(40%TD)を超えることは考えられない。

なお、振動充填燃料の加工においては焼結なしで80%TDを達成できることが確認されているが、電解精製槽ではこのような特定周波数の震動源はなく、かつ振動充填工程で厳格に要求される原料粉の粒径分布と同じ状態になることは想定しがたいこと、およびそれらの不溶解物が小さな領域に囲い込まれることがない(振動充填では細い燃料被服管の中に詰め込まれ、上から重しで蓋をされた状態で加振しなくてはならない)ことから、このような嵩密度に到ることは想定されない。

(ii) 不溶解物の焼結もしくは熔融再凝固

酸化物の焼結は、酸化物燃料加工プロセスでは1600～1700℃の高温環境下でおこなわれる。このような高温状態は電解精製槽内部では生じ得ないため、集積した不溶解物が焼結もしくは熔融再凝固することは想定されない。

表 5.1 臨界安全性に影響を与える事象とその起因事象(1/5)

No.	対象	臨界因子	事象	事象の原因	原因の起因事象
1-1	陽極	容積	変形	(1)圧力差による変形 (2)内部荷重・応力による変形 (3)外部衝撃による変形 (4)熱膨張	(1)なし [圧力差は発生しない]。 (2)過剰量装荷時の自重による変形。 (3)陽極取扱時の落下・衝突。 電極アセンブリ組立時の応力。 (4)装荷物質の崩壊熱の除熱異常。 Na ボンド除去装置での加熱。 電極精製槽装填後の加熱。
1-2	陽極	容積	容器壁の減肉	(1)化学的腐食による減肉 (2)電気化学的腐食による減肉 (3)摩擦・研削による減肉	(1)溶融塩による腐食。 (2)電解操作時の電位異常。 (3)せん断片投入、ハル取り出し時の擦過。
1-3	陽極	容積	漏えい	(1)破損等による漏えい (2)オーバーフローによる漏えい (3)取扱時のスピルアウト	(1)外部衝撃による破損。 腐食による破損。 (2)せん断燃料ピンの過剰量装荷によるオーバーフロー。 (3)取扱時の傾斜、転倒、落下。
1-4	陽極	化学形態	誤物質装荷	(1)規定外物質の受入	(1)リワーク品 (U-Pu 合金等) の誤搬入。 規定外核燃料物質 (Zr 合金以外) の受入。 受入核燃料物質の間違い (ID 確認ミス)。
1-5	陽極	化学形態	異常析出	(1)逆電位電解	(1)電極コネクタ接続のミス。 電解プロセス制御操作のエラー。
1-6	陽極	質量	取放量過多	(1)過剰装荷 (2)多重装荷	(1)せん断時の装荷本数カウンタエラー。 秤量操作のエラー。 (2)装荷済陽極のせん断工程への再受入。 せん断工程での陽極交換のミス。
1-7	陽極	質量	過剰装填	(1)全電極ポート (8 基) に陽極を誤装填	(1)電極装填操作のエラー。 ・ プラント制御システムの判断ミス。 ・ 人為的な強制介入による誤操作。
1-8	陽極	Pu 富化度	Pu 富化度過剰	(1)装荷物の Pu 富化度過剰	(1)核的制限値を超える Pu 富化度の燃料集合体のプランドへの受入。 規定外の高 Pu 富化度 Zr 合金の受入。
1-9	陽極	同位体比	U 同位体比異常	(1)装荷物の ^{235}U 濃縮度過剰	(1)核的制限値を超える U 同位体比 (^{235}U 濃縮度) の燃料集合体のプランドへの受入。
1-10	陽極	同位体比	Pu 同位体比異常	(1)装荷物の Pu 同位体比異常	(1)核的制限値を超える Pu 同位体比の燃料集合体のプランドへの受入。
1-11	陽極	高密度	高密度増加	(1)Zr 合金燃料の再熔融凝固	(1)Na ボンド除去装置での加熱溶融。 崩壊熱による加熱溶融。

表 5.1 臨界安全性に影響を与える事象とその起因事象(2/5)

No.	対象	臨界因子	事象	事象の原因	原因の起因事象
1-12	陽極	反射条件	反射条件異常	(1)電解中の電極の水平方向位置の異常	(1)電極支持棒の折損等により、陽極が Cd プール内に落下。
1-13	陽極	隔離距離	異常近接	(1)電解中の電極の落下および近接	(1)地震等により、複数の電極が落下すると共にそれらが移動して近接する。

表 5.1 臨界安全性に影響を与える事象とその起因事象(3/5)

No.	対象	臨界因子	事象	事象の原因	原因の起因事象
2-1	固体陰極	化学形態	異常析出	(1)Pu 金属の電析	(1)電解操作時の電位異常。 溶融塩中 Pu/U 比過剰。
3-1	液体 Cd 陰極	容積	変形	(1)圧力差による変形 (2)内部荷重・応力による変形 (3)外部衝撃による変形 (4)熱膨張	(1)なし [圧力差は発生しない]。 (2)過剰量装荷時の自重による変形。 (3)陰極取扱時の落下・衝突。 電極アセンブリ組立時の応力。 (4)装荷物質の崩壊熱。 電解精製槽装填後の加熱。
3-2	液体 Cd 陰極	容積	容器壁の減肉	(1)化学的腐食による減肉 (2)電気化学的腐食による減肉 (3)摩擦・研削による減肉	(1)溶融塩による腐食。 Cd による腐食。 (2)電解操作時の電位異常。 (3)るつぼメンテナンス時の過剰研削。
3-3	液体 Cd 陰極	容積	漏えい	(1)破損等による漏えい (2)オーバーフローによる漏えい (3)取扱時のスピルアウト (1)単体 Pu 金属の析出	(1)外部衝撃による破損。 腐食による破損。 (2)過剰量析出によるオーバーフロー。 Cd 装荷量過剰によるオーバーフロー。 (3)取扱時の傾斜、転倒、落下。
3-4	液体 Cd 陰極	化学形態	異常析出	(1)単体 Pu 金属の析出	(1)電解操作時の電位異常。 電解操作時の電流量異常。 装荷 Cd 量過小あるいは減少。
3-5	液体 Cd 陰極	質量	回収量過多	(1)過剰析出 (2)多重析出	(1)電解操作時の電流量異常。 装荷 Cd 量過剰。 装填前電極秤量操作のエラー。 (2)電析済陰極の電解精製槽への再受入。 析出物取り出しの未実施。 電解精製槽での陰極交換のミス。
3-6	液体 Cd 陰極	質量	過剰装填	(1)過剰装填 全陰極ポート (4 基) に液体 Cd 陰極を誤装填	(1)電極ハンドリングの誤移送。 電解時電位の異常。
3-7	液体 Cd 陰極	Pu 富化度	Pu 富化度過剰	(1)Pu/U 回収比異常	(1)溶融塩中 Pu/U 比過剰。 陰極スクレーパーの異常動作。
3-8	液体 Cd 陰極	反射条件	反射条件異常	(1)電解中の電極の水平方向位置の異常	(1)電極支持棒の折損等により、陽極が Cd プール内に落下。 下。
3-9	液体 Cd 陰極	隔離距離	異常近接	(1)電解中の電極の落下および近接	(1)地震等により、複数の電極が落下すると共にそれらが移動して近接する。

表 5.1 臨界安全性に影響を与える事象とその起因事象(4/5)

No.	対象	臨界因子	事象	事象の原因	原因の起因事象
4-1	溶融塩	化学形態	析出物の生成	(1)雰囲気異常による生成 (2)酸化性物質等の添加	(1)Ar カバーガス異常 (純度、流量) 電解精製槽オフロガス流量異常。 電解精製槽気密異常。 (2)ボンドNa 吸着物の過剰受入。 反応物質 (沈殿剤) の誤受入。
4-2	溶融塩	化学形態	不均質化	(1)塩化物の凝固、析出	(2)温度分布異常。 温度低下。
4-3	溶融塩	質量	塩中溶解質量過多	(1)塩量過多 (2)塩中 Pu 濃度過剰	(1)溶融塩液位異常 (高)。 塩装荷時計量操作のエラー。 塩調整時 Pu 装荷量異常。 (2) 塩装荷時計量操作のエラー。 定常電解操作時 Pu 回収量過小。
4-4	溶融塩	濃度	HM 濃度過剰	(1)塩中 Pu 濃度過剰 (2)塩中 Pu 濃度不均一化	(1)溶融塩液位異常 (低)。 塩装荷時定置異常。 塩調整時 Pu 装荷量異常。 (2)攪拌不良。
4-5	溶融塩	可溶性中性子 吸収材	Li 同位体比異常	(1)Li-6 の損耗 (2)溶融塩組成の異常	(1)再生塩の繰り返し利用。 (2)LiCl/KCl の成分調整エラー。
5-1	Cd プール	化学形態	析出物の生成	(1)電解による Pu 化合物の析出	(1)電解精製槽絶縁不良。 陰極と槽本体の短絡。
5-2	Cd プール	質量	Cd プール中溶解質量過多	(1)Cd 量過多 (2)Cd 中 Pu 濃度過剰	(1)Cd プール液位異常 (高)。 Cd 装荷時秤量操作のエラー。 (2)陽極装荷物の過剰脱落。 液体 Cd 陰極内容物の過剰脱落。 電解精製槽絶縁不良。 陰極と槽本体の短絡。 Cd 中 Pu 濃度分析操作のエラー。 還元剤の誤添加。

表 5.1 臨界安全性に影響を与える事象とその起因事象(5/5)

No.	対象	臨界因子	事象	事象の原因	原因の起因事象
6-1	不溶解物	化学形態	窒化物等の生成 (高密度化合物)	(1)雰囲気成分異常 (2)窒化剤等の添加	(1)Ar カバーガス異常 (純度、成分)。 (2)許可されない試薬の使用。
6-2	不溶解物	質量	蓄積量過剰	(1)長期間にわたる蓄積 (2)短期間の異常発生	(1)クリーニングアウト操作の未実施。 溶融塩中 Pu 濃度分析操作時のエラー。 物質収支評価時のエラー。 (2)Ar カバーガス異常 (純度、流量)。 電解精製槽オフガス流量異常。 電解精製槽気密異常。 反応物質 (沈殿剤) の誤受入。
6-3	不溶解物	高密度	不溶解物高密度の異常	(1)不溶解物の圧縮 (2)不溶解物の焼結もしくは溶融再凝固	(1)塩、Cd の質量による圧力。 (2)崩壊熱による加熱。 ヒーターによる異常加熱。

表 5.2 臨界安全性に影響をおよぼす事象に対するバリアと事象のたらず影響度(1/12)

対象	臨界因子	事象	バリア	事象の影響度
1-1	陽極 容積	変形	・取扱時の落下防止機能 [機械的バリア・発生防止] ・取扱時の移送速度制限 [機械的バリア・発生防止] ・接触防止バー ドケージ等の設置 [機械的バリア・発生防止] ・Ar セル冷却系による除熱性能の維持 [機械的バリア・発生防止] ・定期的な容器の健全性確認 [人的バリア・拡大防止]	過大な変形を生じた陽極は、正常なハンドリングが行えなくなること、継続して使用することは物理的に不可能となる。 ○質量管理されているので、容積異常だけで臨界に到ることはない。
1-2	陽極 容積	容器壁の減肉	・電解電位の制限 [機械的バリア・発生防止] ・維持基準に則った保守管理 [人的バリア・発生防止] ・定期的な容器の健全性確認 [人的バリア・拡大防止] ・腐食を考慮しても臨界容積を十分下回る寸法設計 [機械的バリア・拡大防止]	容器壁自体の占める体積は小さいので、減肉（陽極容積の拡大）が臨界安全性へおよぼす影響は小さい。 ○質量管理されているので、容積異常だけで臨界に到ることはない。
1-3	陽極 容積	漏えい	・せん断本数の自動カウント [機械的バリア・発生防止] ・移送および保管時には陽極容器に入れて取り扱う [機械的バリア・発生防止] ・取扱時の落下防止 [機械的バリア・発生防止] ・定期的な容器の健全性確認 [人的バリア・発生防止] ・操作前後の秤量によるインベントリ確認 [機械的バリア・発生防止] ・定期的なセル内の目視点検 [人的バリア・拡大防止]	腐食環境ではないため、陽極容器の腐食による漏えいは想定されない。 内容物は固体であり、容器当たりのインベントリが小さいため漏えいした場合にでも臨界安全性へおよぼす影響は小さい。 ○質量管理されているので、容積異常だけで臨界に到ることはない。
1-4	陽極 化学形態	誤物質装荷	・二重化された ID 確認 [機械的バリア・発生防止] ・プロセス制御データ入力時確認操作の多重化 [人的バリア・発生防止] ・通常運転状態での人為的操作の排除 [機械的バリア・発生防止] ・非通常運転時における操作において権限者による確認の多重化 [人的バリア・発生防止]	機械化動作に関しては独立二重化された確認機能、マニュアル操作に関しては多重化された確認操作を求めるため、誤操作を生じるには二つの独立した機能あるいは操作の異常が必要。 ○質量管理上の核的制限値 2.3kg・Pu では、プロセスで扱う最も反応度の高い物質形態である U-Pu 合金でも臨界に到ることはない。

表 5.2 臨界安全性に影響をおよぼす事象に対するバリアと事象のたらず影響度(2/12)

	対象	臨界因子	事象	バリア	事象の影響度
1-5	陽極	化学形態	異常析出	・電極コネクタの設計 [機械的バリア・発生防止] ・電解電位 (印可電位) の監視およびインターロック [機械的バリア・発生防止] ・運転員による操作状況の監視 [人的バリア・発生防止]	逆転電位になるためには、プロセス制御システムの印可電位指示値の誤りと、その検知システムの異常が重ねあわされる必要がある。 ○電位逆転が生じても P_u は析出し難い。
1-6 (1)	陽極	質量	過剰装荷 (1 バッチ量が過剰)	・せん断機における 1 バッチせん断本数の限定およびせん断機ストローク数、ピン送り値の監視、確認 [機械的バリア・発生防止] ・運転員による操作状況の監視 [人的バリア・拡大防止] ・二重化された秤量操作 [機械的バリア・拡大防止]	過剰装荷が生じるためには、せん断機によるせん断本数カウンターの誤りと、運転員監視の過誤が重ねあわされる必要がある。 ○最大容積が制限されているため、物理的な装荷量に上限があり、容積の限界まで装荷したとしても臨界に到ることはない。
1-6 (2)	陽極	質量	多重装荷 (規程バッチ量を複数回装荷)	・二重化された秤量操作 [機械的バリア・発生防止] ・二重化された ID 確認操作 [機械的バリア・発生防止] ・運転員による操作状況の監視 [人的バリア・発生防止]	多重装荷が生じるためには、それぞれ二重化された ID 確認操作と秤量操作が同時に異常となる必要がある。 ○最大容積が制限されているため、物理的な装荷量に上限があり、容積の限界まで装荷したとしても臨界に到ることはない。
1-7	陽極	質量	過剰装填 (全電極ポートに陽極を装填)	・二重化された ID 確認操作 [機械的バリア・発生防止] ・運転員による操作状況の監視 [人的バリア・発生防止]	過剰装填が生じるためには、独立二重化された ID 確認操作の誤りと、運転員監視の過誤が重ねあわされる必要がある。 ○電極ポート間隔が維持されているので、全ての電極ポートに陽極を装荷したとしても臨界に到ることはない。

表 5.2 臨界安全性に影響をおよぼす事象に対するバリアと事象のもたらす影響度(3/12)

	対象	臨界因子	事象	バリア	事象の影響度
1-8	陽極	Pu 富化度	Pu 富化度過剰	・受入燃料の確認 [操作条件制約・発生防止]。 (燃料製造履歴、炉心装荷履歴等) ・二重化された ID 確認操作 [機械的バリア・発生防止]	○せん断する燃料としては、プラントの受入条件を満たす使用済燃料のみが取り扱われる。 リワーク品の電解精製槽への受入は原則禁止される。 ○質量管理上の核的制限値 2.3kg-Pu では、プロセスで扱う最も反応度の高い物質形態である U・Pu 合金でも臨界に到ることはない。
1-9	陽極	同位体比	U 同位体比異常	・受入燃料の確認 [操作条件制約・発生防止]。 (燃料製造履歴、炉心装荷履歴等)	○せん断する燃料としては、プラントの受入条件を満たす使用済燃料のみが取り扱われる。
1-10	陽極	同位体比	Pu 同位体比異常	・電解プロセスでのプランケット燃料の混合操作 [機械的バリア・発生防止] ・受入燃料の確認 [操作条件制約・発生防止]。 (燃料製造履歴、炉心装荷履歴等) ・液体 Cd 陰極回収物の同位体比分析 [人的管理・異常拡大防止]	電解精製槽の溶融塩中 Pu インベントリが大さいため、Pu 同位体比の明らかな異常が生じるには混合操作 (陽極への装填割合) のミスが長期間にわたって継続する必要がある。 ○核的制限値の Pu 富化度において全ての Pu が Pu-239 であったとしても、核的制限値の質量を装荷した陽極が臨界に到ることはない。
1-11	陽極	高密度	高密度増加	・Ar セル冷却系による除熱性能の維持 [機械的バリア・発生防止]	○平常状態範囲 (核的制限値) では高密度増加を考慮しても臨界には到らない。
1-12	陽極	減速度	セル雰囲気濃度の上昇	・厳重な気密性を有する Ar セラライニング [機械的バリア・発生防止] ・Ar セル雰囲気中湿分濃度の監視 [機械的バリア・拡大防止]	○セル外雰囲気の流れによる湿分濃度上昇は十分緩慢な事象である。
1-13	陽極	反射条件	電極落下	・十分な強度を持った電極支持構造 [機械的バリア・発生防止] ・構造物の定期的な健全性確認 [人的バリア・発生防止]	○電解精製槽内にある電極の水平方向位置の変化が臨界安全性へおよびず影響は小さい。

表 5.2 臨界安全性に影響をおよぼす事象に対するバリアと事象のもたらす影響度(4/12)

	対象	臨界因子	事象	バリア	事象の影響度
1-14	陽極	反射条件	他の非燃 料物質、機 器の接近	・工程管理システムによるハンドリング装置の監視、異常接近停止インタロック [機械的バリア・発生防止] ・バードケージ等による異常接近の物理的防護 [機械的バリア・発生防止] ・運転員による操作状況の監視 [人的バリア・発生防止] ・十分な強度を持った電極支持構造 [機械的バリア・発生防止]	○物体の近接の影響を考慮した反射体条件によつて核的制限値が定められる。
1-14	陽極	隔離距離	電極の落 下、異常 近接		○電解精製槽内にある電極の近接が臨界安全性へおよぼす影響は小さい。

表 5.2 臨界安全性に影響をおよぼす事象に対するバリアと事象のもたらす影響度(5/12)

	対象	臨界因子	事象	バリア	事象の影響度
2-1	固体陰極	化学形態	異常析出	・電解電位の監視およびインタローック [機械的バリア・発生防止] ・熔融塩中 Pu/Up 比の監視 (サンプリング分析) [人的バリア・発生防止] ・運転員による操作状況の監視 [人的バリア・拡大防止]。	固体陰極において Pu が析出するには、プロセス制御システムによる電解電位の制御異常と、運転員の電位監視過誤が重ねあわされる必要がある。 ○固体陰極では単体で多量の固体状 Pu は析出しない。

表 5.2 臨界安全性に影響をおよぼす事象に対するバリアと事象のたらず影響度(6/12)

	対象	臨界因子	事象	バリア	事象の影響度
3-1	液体Cd陰極	容積	変形	・取扱時の落下防止機能 [機械的バリア・発生防止] ・取扱時の移送速度制限 [機械的バリア・発生防止] ・接触防止バードケージ等の設置 [機械的バリア・発生防止] ・定期的な容器の確認操作 [人的バリア・拡大防止]	材料の物性上過度の塑性変形はあり得ない (過度の変形の前に破壊される)。 ○質量管理されているので、容積異常だけで臨界に到ることはない。
3-2	液体Cd陰極	容積	腐食/減肉	・定期的な容器の確認操作 [人的バリア・拡大防止] ・維持基準に則った保守管理 [人的バリア・拡大防止]	一切の腐食あるいは減肉を防止することは出来ないが、臨界体積に対して容器壁自体の占める体積は小さいので、減肉による陽極容積の拡大が臨界安全性へおよぼす影響は小さい。 ○腐食を考慮しても臨界容積を十分下回る寸法設計
3-3	液体Cd陰極	容積	漏えい	・取扱時の落下、傾き防止機能 [機械的バリア・発生防止] ・液体状態 (溶融温度以上) での Cd 陰極の移送禁止 [機械的バリア・発生防止] ・移送および保管時にはるつぽ搬送容器もしくは陰極アセンブリに入れて取り扱う [機械的バリア・拡大防止] ・定期的な容器の健全性確認 [人的バリア・拡大防止] ・定期的なセル内の目視点検 [人的管理・拡大防止]	内容物は固体であり、容器当たりのインベントリが小さいため臨界安全性へおよぼす影響は小さい。 ○質量管理されているので、容積異常だけで臨界に到ることはない。
3-4	液体Cd陰極	化学形態	異常析出	・電解電位の監視およびインターロック [機械的バリア・発生防止] ・運転員による操作状況の監視 [人的バリア・拡大防止] ・溶融塩中 Pu/U 比の制御および化学分析による確認 [人的バリア・発生防止]	逆転電位になるためには、プロセス制御システムの印可電位指示値の誤りと、その検知システムの異常が重ねあわされる必要がある。 ○電気化学的還元反応による析出物が全て Pu であったとしても、規定の電流量で析出する量は推定臨界下限値を下回る。

表 5.2 臨界安全性に影響をおよぼす事象に対するバリアと事象のたらず影響度(7/12)

	対象	臨界因子	事象	バリア	事象の影響度
3-5 (1)	液体Cd陰極	質量	過剰析出	・Cd 装荷量の制限 [機械的バリア・発生防止] ・通電電流量、電解電位の確認およびインターロック [機械的バリア・発生防止] ・運転員による操作状況の監視 [人的バリア・拡大防止] ・溶融塩中 Pu/U 比の管理 [人的バリア]	単体の Pu 金属が析出するには、プロセス制御システムによる電解電位の制御異常と、運転員の電位監視過誤が重ねあわされる必要がある。 ○例え過剰析出が生じる条件が満たされたとしても、液体 Cd 陰極に許される通電電流量ではその析出量は推定臨界下限質量を下回る。 ○2 バッチ分が電解析出したとしても、その量は推定臨界下限値を下回る。
3-5 (2)	液体Cd陰極	質量	多重析出	・二重化された秤量操作 [機械的バリア・発生防止] ・二重化された ID 確認 [機械的バリア・発生防止] ・運転員による操作状況の監視 [人的バリア・拡大防止]	過剰装填が生じるためには、独立二重化された ID 確認操作の誤りと、運転員監視の過誤が重ねあわされる必要がある。 ○例え誤装填したとしても、給電ケーブルのコネクタ形状が異なるため電解を実施することは出来ない。 ○液体 Cd 陰極回収物の核的制限値設定において、Pu 富化度は考慮しない。
3-6	液体Cd陰極	質量	過剰装填 (全陰極ポートに液体 Cd 陰極を装填)	・二重化された ID 確認操作 [機械的バリア・発生防止] ・形状の異なる電源プラグの採用 [機械的バリア・発生防止] ・運転員による操作状況の監視 [人的バリア・拡大防止]	過剰装填が生じるためには、独立二重化された ID 確認操作の誤りと、運転員監視の過誤が重ねあわされる必要がある。 ○例え誤装填したとしても、給電ケーブルのコネクタ形状が異なるため電解を実施することは出来ない。 ○液体 Cd 陰極回収物の核的制限値設定において、Pu 富化度は考慮しない。
3-7	液体Cd陰極	Pu 富化度	U/Pu 回収比異常	・プロセス制御システム (プロセス予測モデル) による異常検知 [機械的バリア・拡大防止] ・溶融塩中 Pu/U 比の管理 (サンプリングの化学分析値) [人的バリア・発生防止]	○セル外雰囲気中の流入による湿分濃度上昇は十分緩慢な事象である。
3-8	液体Cd陰極	減速度	セル雰囲気中湿分濃度の上昇	・厳重な気密性を有する Ar セルライニング [機械的バリア・発生防止] ・Ar セル雰囲気中湿分濃度の監視 [機械的バリア・拡大防止]	○セル外雰囲気中の流入による湿分濃度上昇は十分緩慢な事象である。

表 5.2 臨界安全性に影響をおよぼす事象に対するバリアと事象のもたらす影響度(8/12)

	対象	臨界因子	事象	バリア	事象の影響度
3-9	液体Cd陰極	反射条件	電極落下	- 十分な強度を持った電極支持構造 [機械的バリア・発生防止] - 構造物の定期的な健全性確認 [人的バリア・発生防止]	電解精製槽内にある電極の水平方向位置の変化が臨界安全性へおよぼす影響は小さい。
3-10	液体Cd陰極	反射条件	他の非燃料物質、機器の接近	- 工程管理システムによるハンドリンドリッド装置の監視、異常接近停止インタロック [機械的バリア・発生防止] - バードケージ等による異常接近の物理的防護 [機械的バリア・発生防止] - 運転員による操作状況の監視 [人的バリア・発生防止]	○物体の近接の影響を考慮した反射体条件によって核的制限値が定められる。
3-11	液体Cd陰極	隔離距離	電極の落下、異常近接	十分な強度を持った電極支持構造 [機械的バリア・発生防止]	○電解精製槽内にある電極の近接が臨界安全性へおよぼす影響は小さい。

表 5.2 臨界安全性に影響をおよぼす事象に対するバリアと事象のもたらす影響度(9/12)

	対象	臨界因子	事象	バリア	事象の影響度
4-1 (1)	熔融塩	化学形態	析出物の生成 (急激な雰囲気 異常による生 成)	・ 専用の高純度 Ar カバーガスシステムによる不活性雰囲気 の維持 [機械的バリア・発生防止] ・ 電解精製槽気密シール、二重ハッチ [機械的バリア・発生防止] ・ Ar カバーガスの微正圧維持 [機械的バリア・発生防止] ・ 多重化された酸素濃度計/湿度計による監視 [機械的バリア・拡大防止] ・ 運転員による雰囲気状態の監視 [人的バリア・拡大防止] ・ Ar セルによるバックアップ [機械的バリア・拡大防止] (・ 電解精製槽隔離システム)	○Ar カバーガスシステムと Ar セル雰囲気の独立した二重の安全上重要なシステムが同時に破れることがない設計としている。したがって、不純物の急激な進入による短期間での多量の不溶解物の発生は想定されない。 (ウランイオンの選択酸化による Pu 不溶解物生成妨害に関しては実験的な確認が必要)
4-1 (2)	熔融塩	化学形態	析出物の生成 (酸化性物質等の添加)	・ 通常運転状態での人為的操作の排除 [機械的バリア・発生防止] ・ 非通常運転時における操作において権限者による確認の多重化 [人的バリア・発生防止] ・ 多重化された ID 確認 [機械バリア・発生防止] ・ 運転員による操作状況の監視 [人的バリア・拡大防止] ・ プロセス制御データ入力時確認操作の多重化 [人的バリア・発生防止]。	機械化動作に関しては独立二重化された確認機能、人為的操作に関しては多重化された確認操作を求めため、誤操作を生じるには二つの独立した機能あるいは操作の異常が必要。
4-2	熔融塩	化学形態	不均質化 (塩化物の凝固、析出)	・ 温度管理 (高信頼性のヒーター) [機械的バリア・発生防止] ・ 攪拌による均質化操作 [機械的バリア・発生防止] ・ 運転員による操作状況の監視 [人的バリア・発生防止]	(熔融塩凝固時における PuCl_3 の偏析の可能性については実験的な確認が必要)
4-3	熔融塩	質量	熔融塩質量過剰	・ 多重化された液位計による監視とインターロック [機械的バリア・発生防止] ・ 装荷/抜き取り操作時の容積計量 [人的バリア・発生防止] ・ 物質収支管理 [人的バリア・拡大防止]	○熔融塩質量自体は臨界管理対象ではない。Pu 濃度と合わせて管理される。

表 5.2 臨界安全性に影響をおよぼす事象に対するバリアと事象のもたらす影響度(10/12)

	対象	臨界因子	事象	バリア	事象の影響度
4-4	溶融塩	濃度	Pu 濃度異常	・多重化された濃度計による監視 [機械的バリア] ・攪拌による均質化操作 [機械的バリア・発生防止] ・定期的な化学分析 [人的バリア・拡大防止] ・物質収支管理 [人的バリア・拡大防止]	○電解精製槽中の溶融塩の量が大きく、かつ1バッチでのHM受入量が少ないため、誤操作による溶融塩中HM濃度の急激な変化は生じない。
4-5	溶融塩	可溶性中性子吸収材	Li 同位体比異常	・供給溶融塩組成の化学分析 [人的バリア・発生防止]	○Li-6の中性子吸収効果を期待しなくとも臨界安全性が確保される。

表 5.2 臨界安全性に影響をおよぼす事象に対するバリアと事象のもたらす影響度(11/12)

	対象	臨界因子	事象	バリア	事象の影響度
5-1	Cd プール	化学形態	析出物の生成	・短絡の検知および自動停止 [機械的バリア・拡大防止] ・1 バッチ操作における積分電流量が限定されている [機械的バリア・拡大防止] ・運転員による操作状況の監視 [人的バリア・拡大防止]	○短絡により Pu が Cd プール中へ析出したとしても、電気化学的還元反応により規定の電流量で析出する量は推定臨界下限値を下回る。
5-2	Cd プール	質量	Cd プール中溶解質量過多	・通常運転状態での人為的操作の排除 [機械的バリア・発生防止] ・短絡の検知および自動停止 [機械的バリア・拡大防止] ・多重化された液位計による監視 [機械的バリア・拡大防止] ・装荷抜き取り操作時の容積計量 [人的バリア・拡大防止] ・定期的な化学分析 [人的バリア・拡大防止] ・定期的なクリーンアウト操作 [人的バリア・拡大防止] ・物質収支管理 [人的バリア・拡大防止]	○還元反応が生じなければ溶解塩中の Pu イオンが Cd プール中へ移行することはない。

表 5.2 臨界安全性に影響をおよぼす事象に対するバリアと事象のもたらす影響度(12/12)

	対象	臨界因子	事象	バリア	事象の影響度
6-1	不溶解物	化学形態	窒化物等の生成 (高密度化合物)	・高純度 Ar カバーガスシステムによる不活性雰囲気維持 [機械的バリア・発生防止] ・Ar カバーガスの微正圧維持 [機械的バリア・発生防止] ・多重化された酸素濃度計/湿度計による監視 [機械的バリア・拡大防止] ・運転員による雰囲気状態の監視 [人的バリア・拡大防止] ・電解精製槽気密シール、二重ハッチ [機械的バリア・発生防止] ・Ar セルによるバックアップ [機械的バリア・拡大防止]	○Ar カバーガスシステムと Ar セル雰囲気との独立した二重の安全上重要なシステムが同時に破れることがない設計とする。したがって、不純物の急激な進入による短期間での多量の不溶解物の発生は想定されない。 (窒化物等の生成速度が極めて遅いことを安全管理上のバリアとするには実験等によってデータを得ることが必要)
6-2	不溶解物	質量	蓄積量過剰	・専用的高純度 Ar カバーガスシステムによる不活性雰囲気維持 [機械的バリア・発生防止] ・電解精製槽気密シール、二重ハッチ [機械的バリア・発生防止] ・Ar カバーガスの微正圧維持 [機械的バリア・発生防止] ・多重化された酸素濃度計/湿度計による監視 [機械的バリア・拡大防止] ・運転員による雰囲気状態の監視 [人的バリア・拡大防止] ・Ar セルによるバックアップ [機械的バリア・拡大防止] (・電解精製槽隔離システム) ・定期的なクリーンアウト操作 [人的バリア] ・物質収支管理 [人的バリア]	○定期的なクリーンアウト操作に加え、保守的に評価された不溶解物生成量を基に、適時クリーンアウト操作を実施することにより、通常運転状態においても発生すると予想される (異常でない) 微量の不溶解物が長期間放置されることによる異常な蓄積を防止する。 (実際の生成速度に関するデータを取得し、クリーンアウトの実施間隔を決める必要がある)
6-3	不溶解物	密度	不溶解物嵩密度の異常	・機械的圧縮力を発生させる機構は存在しない [機械的バリア・発生防止] ・温度管理による焼結の防止 [機械的バリア・発生防止]	○十分保守的な嵩密度を想定して核的制限値を定めている。 (電解精製槽環境における最大到達密度の実証を要する)

6. 異常事象をモデル化した臨界安全性解析

前章で検討した臨界安全性に影響を与えると考えられる事象について、それらが生じた場合にどの程度の影響を与えるかについて定量的な評価を行った。解析には連続エネルギー中性子輸送モンテカルロ計算コードMVP94⁽¹¹⁾と核データJENDL-3.2⁽¹²⁾を使用した。

6.1 基本状態のモデル化

まずはじめに、平常時における電解精製槽の臨界安全性を評価するためにその基本状態を設定した（表 6.1）。なおこの基本状態のモデルでは、臨界安全管理を行うと明確に規定していない因子については評価結果が安全側になるようモデル化を行っている。

次に、モデルにおける溶融塩のHM濃度、液位およびCdプールの液位、これらの系におけるPuおよびLiの同位体組成比の組み合わせをCaseとして表 6.2にあるように分類した。さらに、モデルにおける電極及び不溶解物の位置・量の場合分けを表 6.3に示すようにModeとして分類した。解析モデルは基本状態におけるCaseとModeの組み合わせによって構成される。

6.1.1 溶融塩

(1) 溶融塩容積（液位）

電解精製槽の幅（3820mm）および奥行き（1220mm）と標準液位（378mm）より1762Lを溶融塩の基本量とする。純塩密度を1.7g/ccとするとおよそ3000kgになる。

(2) 溶融塩中の Pu 濃度および質量

プロセス標準のHM濃度10.66wt%、Pu/U比3/1で存在するから、HMに対するPu富化度は75wt%になる。ただし、基本状態としてはMA分（5wt%程度）を考慮して80wt%と考える（MAはPuと見なして解析することで安全側となる）。このときのPu濃度は0.162g/cc（9.55wt%/salt）となるので、全体で285kg程度となる。

6.1.2 Cd プール

(1) Cd プール容積（液位）

電解精製槽底部の傾斜を無視し、幅（3820mm）および奥行き（1220mm）と標準液位（100mm）より466LをCdプールの基本量とする。Cdの密度を8.0g/ccとするとおよそ3700kgとなる。

(2) Cd プール中の Pu 濃度および質量

基本的にCdプール中にはPuは存在しないこととなっているが、Cdに対するPuの飽和溶解度3.62wt%を考慮する。この場合0.3g/ccの濃度で存在し、全体で140kg程度が溶解していることになる。

6.1.3 陽極バスケット

(1) 陽極バスケット容積

陽極バスケットは十字型のバスケットで、組み立て式ではなく一体型のものを想定すると容積は3.096Lである。

(2) 陽極バスケット中の装荷量

1基のバスケットに装填するのは軸方向ブランケットが混ざった状態で燃料ピン18本分である。これには平均して10.6kg (0.67L) の三元合金が含まれる。これが全てPu富化度の高い外側炉心燃料の炉心部であると安全側に仮定すれば、2.56g-Pu/ccなので全体で1.72kg-Puとなる(プロセス標準装荷量は1.14kg-Pu)。

なお、平衡炉心装荷用の外側炉心燃料のPu富化度は17.3wt%であるが、0.53wt%のMA分をPuと等価と考えて18wt%と見なした。

(3) モデル化形状

形状管理は適用しないので、最も反応度の高い形状として球形状でモデル化を行う。また100%TDのHM-Zr合金を仮定する。体積より半径5.44cmとする。

(4) 装填位置

装填される数は4基で、これらは電極ポート一つおきに交互に装填される。水平方向の位置は、標準溶融塩液位の中心と陰極の中心が一致するように装填される。

6.1.4 固体陰極

(1) 固体陰極回収量

固体陰極にはデンドライト状のU金属がおおよそ10kg析出する。モデル化では、これらは単純な球形状(半径5cm)の金属インゴットとする。なお、U-235濃縮度が低いと臨界安全性に対する影響はほとんどない。

(2) 装填位置

装填される数は3基で、これらは陽極バスケットと互い違いに装填される。電解開始前には何も析出していないため、モデル化では省略する。水平方向の位置は、標準溶融塩液位の中心と陰極の中心が一致するように装填される。

6.1.5 液体 Cd 陰極

(1) 液体陰極容積

直径260mm、内部高さ150mmの円筒型容器であるので、内部の容積は約8Lである。ここに30kg (3.75L) の液体Cdを装填して用いる。

(2) 液体陰極回収量

プロセス標準の回収量は1.1375kg-U、2.275kg-Pu、0.075kg-MAである。ウランによる希釈を考慮せず、MAをPuと見なして安全側にモデル化すると2.35kg-Puが液体Cd陰極における基本状態でのPu在庫量である。

また、すべてのPuはPuCd₆を形成していると仮定する。

(3) モデル化形状

形状管理は適用しないので、最も反応度の高い形状として球形状でモデル化を行う。PuCd₆では2.43g-Pu/ccなので半径6.14cmとする。

(4) 装填位置

装填数は1基である。8基の電極ポートの内、隅に装填するものとする。水平方向の位置は、標準溶融塩液位の中心と陰極の中心が一致するように装填される。

6.1.6 同位体比

UおよびPuの同位体比は、平衡炉心新燃料の同位体比に従うものとし、それぞれ

$$^{234}\text{U}/^{235}\text{U}/^{236}\text{U}/^{238}\text{U} = 0.06/0.01/0.03/99.9$$

$$^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu} = 1/68/26/2.5/2.5$$

を基本状態とした。溶融塩中のLiについては、

$$^6\text{Li}/^7\text{Li} = 7.50/92.5$$

Cdについては、天然組成とした。

6.2 基本状態における臨界安全性解析

以上の様にモデル化した体系において臨界安全性解析を行った。MODE00 (図 6.1) は標準の溶融塩、Cdプールで電極は未装填の状態、MODE01 (図 6.2) は装荷した陽極を装填した状態 (通常の電解操作開始前)、MODE02 (図 6.3) は陰極に所定量が析出した状態 (通常の電解操作終了時) である。結果を表 6.4 に示す。いずれのモデルも400kgを超えるPuが存在しているが、大部分は反応度の低い溶融塩およびCdプール中にあり、系の中性子実効増倍率は十分低い。また、これらプロセスの実際の状態に近い状態をモデル化したもののうち、最も中性子実効増倍率が大きくなるのは装荷陽極を装填したときであると分かる。

6.3 質量異常事象の臨界安全性解析

質量異常に関する解析モデルとその解析結果を表 6.5、表 6.6に示す。

6.3.1 陽極過剰装荷

4つの陽極とも容積一杯までHM-Zr合金（新燃料炉心部相当）を隙間無く装荷した場合のモデルがMODE03である。したがって、陽極へのピンせん断本数カウントの異常事象と装荷後の陽極の秤量確認の異常が重なっても、さらに安全余裕があることが分かる。MODE01の約5倍の陽極装荷量である。

またMODE11は陽極バスケットの容器壁の腐食等による減肉（すなわち内容積の拡大）を考慮したモデルで、6.5倍の装荷量である。

いずれのモデルにおいても臨界に到ることはないことが確認できる。

6.3.2 陽極過剰装填

基本量を装荷した陽極を全電極ポートに装填した場合がMODE05である。機器設計において、各電極ポートがそれぞれ割り当てられた電極に排他的にしか使用できないような物理的な構造（電極ポート形状が異なるなど）を採用すればこのような異常は起きえない。

6.3.3 液体 Cd 陰極における Pu の優先的析出

液体Cd陰極ではPuと共にUおよびMAも同時に析出するが、表 6.7に示すMODE02aではこれら全てがPuであった場合の評価である。したがって、3.5kg-PuがPuCd6として液体Cd陰極に析出した場合である。このような事象は熔融塩中のPu/U比が極端に大きい場合にしか発生し得ないが、発生を仮定したとしても中性子実効増倍率は十分低い。なお、熔融塩中のUおよびPuの絶対量は1バッチ回収量に対して非常に大きいため、塩中のPu/Uが標準から大きくずれるには長期間にわたる投入量/回収量の異常と、塩サンプリング分析の異常が重ねあわされなくてはならない。

6.3.4 液体 Cd 陰極における過剰析出

液体Cd陰極るつば容積一杯まで析出物が詰まった状態がMODE04である。基本量の8倍の質量異常である。Puのみが析出するには熔融塩中のPu/U比の異常が起きなくてはならないこと、液体Cd陰極るつばに装填されるCdの量は計量されること、電解操作によって回収される量は電位・電流によって制御されることから、これらの多重異常が生じなければこのような異常は考えられない。さらに、供給されたCdが全て反応に使用される（収率が100%になる）ことは物理的に想定しがたい。このような極端な想定事象においても臨界に到ることがないと確認

できる。

またMODE12はるつぼの容器壁の腐食等による減肉（すなわち内容積の拡大）を考慮したモデルで、約7倍の装荷量である。

いずれのモデルにおいても臨界に到ることはないことが確認できる。

6.3.5 析出陰極未取出状態における装荷陽極の装填

すでに基本量を析出させた陰極を取り出さずに、陽極のみ新しく装荷したものと取り換えた状態をモデル化したものがMODE06（図 6.4）、MODE07およびMODE13である。MODE07では、過剰装荷と過剰析出の重ね合わせを、MODE13ではさらに容器壁の減肉をモデル化している。MODE01およびMODE04、MODE12と比較しても、この異常による中性子実効増倍率の大幅な増加が認められないことから、各電極間の核的相互作用は小さいと言える。

6.4 電極の落下

電極位置の変動に関する解析モデルとその解析結果を表 6.8に示す。

6.4.1 落下

MODE01およびMODE02において、各電極が落下し底部のCdプール内へ沈んだ場合のモデルがMODE31（図 6.5）とMODE32（図 6.6）である。MODE01およびMODE02と比較して若干増加することから、Cdプールの反射体効果があることが分かる。

6.4.2 落下後接触

MODE31において落下した4基の陽極がさらに電解精製槽中央部で接触しているモデルがMODE33（図 6.7）である。接触することにより核的相互作用が強まってMODE31に対して24%の中性子実効増倍率の増加が認められたが、臨界に到るまでにはまだ十分な余裕がある。

6.5 同位体比の異常

同位体比の異常に関する解析モデルとその解析結果を表 6.9に示す。

6.5.1 Pu 同位体比の異常

Pu同位体比がすべてPu-239であった場合のモデルがcase00-MODE01、case01-MODE01である。

6.5.2 Li 同位体比の異常

Li-6はLiCl-KCl溶融塩体系の臨界質量を押し上げる重要な因子であるが、Liの同位体がLi-7だけであった場合のモデルがcase07-MODE01である。

6.6 液位の異常

溶融塩層およびCdプール層の液位の異常に関する解析モデルとその解析結果を表 6.9に示す。

6.6.1 溶融塩液位の異常

溶融塩液位が+10cm増加した場合のモデルがcase05-MODE01である。溶融塩中のPu濃度は基本モデルと同じとしたため、溶融塩増加分に比例して溶融塩中のPu溶解量も増加している。なお、電極の位置は液位とは無関係であるため、液位上昇の影響は受けない。

6.6.2 Cd プール液位の異常

Cdプール液位が+10cm増加した場合のモデルがcase06-MODE01である。Cdプール中のPu濃度は基本モデルと同じとしたため、Cd増加分に比例してCdプール中のPu溶解量も増加している。なお、電極の位置は液位とは無関係であるため、液位上昇の影響は受けない。

6.7 不溶解物の異常生成

基本状態にある電解精製槽内のPu全てが不溶解物となった場合を解析した(表 6.10)。MODE21、MODE23、MODE25は不溶解物が層状に堆積した場合、MODE22、MODE24、MODE26は球状に集まった場合である。またMODE21、MODE22は不溶解物密度が粉体密度として想定する20%TD、MODE23、MODE24は不溶解物が圧縮力により固められた粉体の密度として想定する40%TD、そしてMODE25とMODE26は理論密度の場合である。

これらの解析では球体系を考慮したモデルでは全て中性子実効増倍率が0.95を大きく上回る一方で、層状に堆積するモデルでは臨界に到ることはないという結果を得た。これらのことから、粉体の形状が臨界安全性に大きな影響を与えることが分かる。図 6.8と図 6.9をみると直感的に理解できるが、実際にはこのような理想的な球形状になることは考えがたい。しかし平滑な層状で堆積するということも完全に保証できない。発生した不溶解物の形状を完全に保証できない場合には安全側に球体系と想定する必要があるというならば、不溶解物の異常発生は臨界安全上許容される事象ではない。

この問題の本質には二つの因子がある。一つは、重力下で発生した不溶解物が

自発的完全な球体に集まることは考えにくい、では実際に生じうる状態で最も厳しい体系は何かについては曖昧であるということや、U等が共存している環境下においてPuだけが選択的に沈殿するのかについてもよく分かっていないことである。これらは実際の現象においては安全性を高める方向に作用するが、その信頼性の証明が曖昧であることから、設計時の評価において適切なモデル化を行えない。すなわち、設計時点における知識の欠如によって過剰な安全マージンの組み込みが為されていることで、この解決には実際のデータを取得し、関連する物理現象についての科学的な知見を深めることによってリスクにふさわしい安全マージンを明らかにすることである。

もう一つの本質的な問題点は電解精製槽の大型化によってPuの通常時在庫量が増加したことである。根本的な改善を行うには電解精製槽を小型化し、溶融塩の体積を小さくする必要がある。目安として少なくとも粉体密度を想定した球形状モデルにおいて未臨界を維持できることであると考ええる。

表 6.1 臨界安全解析の基本モデル

機器構造		
胴部形状 (寸法 [mm])	直方体 (W3820×D1220×H1236)	フェーズ I 設計に比べて幅が 1100mm、 高さが 286mm 増加。
内部容積 [L]	5760	
電極ポート数 [基]	8	
陽極同時装填数 [基]	4	
固体陰極同時装填数 [基]	3	
液体 Cd 陰極同時装填数 [基]	1	
溶融塩層		
化学形態	LiCl-KCl 共晶塩	
液位 (高さ) [mm] (容積[L])	378 (1762)	電極の浸漬による液位上昇は考慮しない。
HM 濃度 [wt%]	10.66	塩重量に対する濃度。
Pu 富化度 [wt%]	80	MA を Pu とみなして安全側に設定。
U 溶解量 [kg]	72	左記濃度で 0.0406g-U/cc
Pu 溶解量 [kg]	285	左記濃度で 0.1623g-Pu/cc
Cd プール層		
液位 (高さ) [mm] (容積 [L])	100 (466)	槽底部傾斜を無視して、最大深さで統一。
Pu 濃度 [wt%]	3.62	飽和溶解度を仮定。
Pu 溶解量 [kg]	140	
陽極		
化学形態	HM-Zr 合金	Zr は 10wt%。100%TD を仮定。
形状	球	
容積 [L]	0.67	
HM-Zr 合金装荷量 [kg/基]	10.6	燃料ピン 18 本に相当。
Pu 富化度 [wt%]	18	外側炉心燃料の炉心部のみ考慮。 MA を Pu とみなして安全側に設定。
Pu 装荷量 [kg/基]	1.72	
固体陰極		
化学形態	U 金属	100%TD を仮定。
形状	球	
容積 [L]	0.53	
U 析出量 [kg/基]	10	
液体 Cd 陰極		
化学形態	PuCd ₆	U、フリーCd による希釈を考慮しない。
形状	球	
容積 [L]	0.97	
Pu 析出量 [kg/基]	2.35	MA を Pu とみなして安全側に設定。

表 6.2 解析モデルのケース（濃度、液位および同位体比のパターン）

ID	液位	同位体比	溶融塩中 HM 濃度
Case00	溶融塩 : 37.8cm Cd プール : 10cm	Pu239 のみ	10.66 wt%
Case01	溶融塩 : 37.8cm Cd プール : 10cm	Pu239 のみ	20.00 wt%
Case02	溶融塩 : 0cm Cd プール : 0cm	平衡炉心新燃料相当 Pu238/239/240/241/242 = 1/68/26/2.5/2.5	—
Case03	溶融塩 : 37.8cm Cd プール : 10cm	平衡炉心新燃料相当 Pu238/239/240/241/242 = 1/68/26/2.5/2.5	10.66 wt%
Case04	溶融塩 : 37.8cm Cd プール : 10cm	平衡炉心新燃料相当 Pu238/239/240/241/242 = 1/68/26/2.5/2.5	20.00 wt%
Case05	溶融塩 : 47.8cm Cd プール : 10cm	平衡炉心新燃料相当 Pu238/239/240/241/242 = 1/68/26/2.5/2.5	10.66 wt%
Case06	溶融塩 : 37.8cm Cd プール : 20cm	平衡炉心新燃料相当 Pu238/239/240/241/242 = 1/68/26/2.5/2.5	10.66 wt%
Case07	溶融塩 : 37.8cm Cd プール : 10cm	平衡炉心新燃料相当 Pu238/239/240/241/242 = 1/68/26/2.5/2.5 Li6/7 = 0/100	10.66 wt%
Case99	溶融塩 : 37.8cm Cd プール : 10cm	未装荷溶融塩、Cd プール	0.0 wt%

表 6.3 解析モデルのモード分け（電極および不溶解物の位置および量）

ID	状態	
MODE00	電極未装荷	電極無し
MODE01	電解開始直前	陽極 4 基（標準量装荷済）＋固体陰極 3 基（未析出）＋液体 Cd 陰極 1 基（未析出）
MODE02	電解終了直後	陽極 4 基（空）＋固体陰極 3 基（標準量析出）＋液体 Cd 陰極 1 基（標準量析出）
MODE02a	電解終了直後 液体 Cd 陰極における Pu の優先的析出	陽極 4 基（空）＋固体陰極 3 基（標準量析出）＋液体 Cd 陰極 1 基（標準量析出、全 Pu）
MODE03	陽極の最大過剰装荷	陽極 4 基（容積最大量装荷済）＋固体陰極 3 基（未析出）＋液体 Cd 陰極 1 基（未析出）
MODE04	液体 Cd 陰極の最大過剰析出	陽極 4 基（空）＋固体陰極 3 基（標準量析出）＋液体 Cd 陰極 1 基（容積最大量析出）
MODE05	陽極の過剰装填	陽極 8 基（標準量装荷済）
MODE06	析出陰極未取出状態における次バッチ陽極の装填	陽極 4 基（標準量装荷済）＋固体陰極 3 基（標準量析出）＋液体 Cd 陰極 1 基（標準量析出）
MODE07	最大過剰析出陰極未取出状態における最大過剰装荷陽極の装填	陽極 4 基（容積最大量装荷済）＋固体陰極 3 基（標準量析出）＋液体 Cd 陰極 1 基（容積最大量析出）
MODE11	陽極の最大過剰装荷（容器腐食考慮）	陽極 4 基（容器壁腐食を考慮した容積最大量装荷済）＋固体陰極 3 基（未析出）＋液体 Cd 陰極 1 基（未析出）
MODE12	液体 Cd 陰極の最大過剰析出（容器腐食考慮）	陽極 4 基（空）＋固体陰極 3 基（標準量析出）＋液体 Cd 陰極 1 基（容器壁腐食を考慮した容積最大量析出）
MODE13	析出陰極未取出状態における次バッチ陽極の装填（容器腐食考慮）	陽極 4 基（容器壁腐食を考慮した容積最大量装荷済）＋固体陰極 3 基（標準量析出）＋液体 Cd 陰極 1 基（容器壁腐食を考慮した容積最大量析出）
MODE21	熔融塩中 Pu 全量の不溶解物化、粉体密度、均一沈殿	粉体密度（20%TD）、熔融塩と Cd プールの界面
MODE22	熔融塩中 Pu 全量の不溶解物化、粉体密度、球状集積	粉体密度（20%TD）
MODE23	熔融塩中 Pu 全量の不溶解物化、圧縮粉体密度、均一沈殿	圧縮粉体密度（40%TD）、熔融塩と Cd プールの界面
MODE24	熔融塩中 Pu 全量の不溶解物化、圧縮粉体密度、球状集積	圧縮粉体密度（40%TD）
MODE25	熔融塩中 Pu 全量の不溶解物化、理論密度、均一沈殿	100%TD、熔融塩と Cd プールの界面
MODE26	熔融塩中 Pu 全量の不溶解物化、理論密度、球状集積	100%TD
MODE31	電解開始前電極落下	陽極 4 基（標準量装荷済）、槽底部に落下
MODE32	電解終了後電極落下	固体陰極 3 基（標準量析出）＋液体 Cd 陰極 1 基（標準量析出）、槽底部に落下
MODE33	電解開始前電極落下、近接	陽極 4 基（標準量装荷済）、槽底部に落下し中央部に近接
MODE34	析出陰極未取出状態における次バッチ陽極の装填時における電極落下	陽極 4 基（標準量装荷済）＋固体陰極 3 基（標準量析出）＋液体 Cd 陰極 1 基（標準量析出）、槽底部に落下

表 6.4 臨界解析モデル 基本状態

ケース名 事象名称	Case03-MODE00 基本状態 (電極未装填)	Case03-MODE01 基本状態 (電解開始前)	Case03-MODE02 基本状態 (電解終了時)	Case03-MODE02a 液体Cd陰極におけるPuの優先的析出
溶融塩液位(質量)	37.8 cm	37.8 cm	37.8 cm	37.8 cm
溶融塩中 HM 濃度	10.66 wt%	10.66 wt%	10.66 wt%	10.66 wt%
溶融塩中 Pu 富化度(Pu/U 比)	80wt% (4.0)	80wt% (4.0)	80wt% (4.0)	80wt% (4.0)
Cd プール液位(質量)	10 cm	10 cm	10 cm	10 cm
Cd プール中 Pu 濃度	3.62 wt%	3.62 wt%	3.62 wt%	3.62 wt%
陽極装荷物質形態	—	HM-Zr 合金(100%TD)	—	—
陽極形状	—	球(R=5.44cm)	—	—
陽極装荷量(/基)	—	10.655kg-alloy	—	—
陽極装填数	—	4	—	—
固体陰極物質形態	—	—	U 金属 (100%TD)	U 金属 (100%TD)
固体陰極形状	—	—	球(R=5.0cm)	球(R=5.0cm)
固体陰極析出量(/基)	—	—	9.97kg-U	9.97kg-U
固体陰極装填数	—	—	3	3
液体 Cd 陰極析出物形態	—	—	PuCd ₆	PuCd ₆
液体 Cd 陰極形状	—	—	球(R=6.14cm)	球(R=7.00cm)
液体 Cd 陰極析出量(/基)	—	—	8.998kg-PuCd ₆	13.333kg-PuCd ₆
液体 Cd 陰極装填数	—	—	1	1
電極位置	—	標準	標準	標準
Pu 同位体比	1/68/26/2.5/2.5	1/68/26/2.5/2.5	1/68/26/2.5/2.5	1/68/26/2.5/2.5
異常の重ね合わせ		・電極形状異常 ・陽極物質富密度異常	・電極形状異常 ・析出物富密度異常	・電極形状異常 ・析出物富密度異常 ・析出物中 Pu 富化度異常
Pu インベントリ (本解析では MA は一括して Pu と等価と見なした。)	[溶融塩] 285.913kg [Cd プール] 139.952kg [陽極] 0kg [Cd 陰極] 0kg [不溶解物] 0kg [合計] 425.865kg	[溶融塩] 283.633kg [Cd プール] 139.952kg [陽極] 6.904kg [Cd 陰極] 0kg [不溶解物] 0kg [合計] 430.489kg	[溶融塩] 285.546kg [Cd プール] 139.952kg [陽極] 0kg [Cd 陰極] 2.357kg [不溶解物] 0kg [合計] 427.855kg	[溶融塩] 285.417kg [Cd プール] 139.952kg [陽極] 0kg [Cd 陰極] 3.492kg [不溶解物] 0kg [合計] 428.861kg
k _{eff} +3σ	0.2735	0.3174	0.2835	0.3026

表 6.5 異常の臨界解析モデル 質量異常(1/2)

ケース名	Case03-MODE03	Case03-MODE04	Case03-MODE05	Case03-MODE06	Case03-MODE07
事象名称	陽極過剰装荷	液体 Cd 陰極過剰析出	陽極過剰装填	析出陰極未取出状態における標準装荷陽極の装填	過剰析出陰極未取出状態における過剰装荷陽極の装填
溶融塩液位(質量)	37.8 cm	37.8 cm	37.8 cm	37.8 cm	37.8 cm
溶融塩中 HM 濃度	10.66 wt%	10.66 wt%	10.66 wt%	10.66 wt%	10.66 wt%
溶融塩中 Pu 富化度(Pu/U 比)	80wt% (4.0)	80wt% (4.0)	80wt% (4.0)	80wt% (4.0)	80wt% (4.0)
Cd プール液位(質量)	10 cm	10 cm	10 cm	10 cm	10 cm
Cd プール中 Pu 濃度	3.62 wt%	3.62 wt%	3.62 wt%	3.62 wt%	3.62 wt%
陽極装荷物質形態	HM-Zr 合金(100%TD)	—	HM-Zr 合金(100%TD)	HM-Zr 合金(100%TD)	HM-Zr 合金(100%TD)
陽極形状	球(R=9.045cm)	—	球(R=5.44cm)	球(R=5.44cm)	球(R=9.045cm)
陽極装荷量(基)	48.980kg-alloy	—	10.655kg-alloy	10.655kg-alloy	48.980kg-alloy
陽極装填数	4	—	8	4	4
固体陰極物質形態	—	—	—	U 金属 (100%TD)	U 金属 (100%TD)
固体陰極形状	—	—	—	球(R=5.0cm)	球(R=5.0cm)
固体陰極析出量(基)	—	—	—	9.97kg-U	9.97kg-U
固体陰極装填数	—	—	—	3	3
液体 Cd 陰極析出物形態	—	PuCd ₆	—	PuCd ₆	PuCd ₆
液体 Cd 陰極形状	—	球(R=12.388cm)	—	球(R=6.14cm)	球(R=12.388cm)
液体 Cd 陰極析出量(基)	—	73.899kg-PuCd ₆	—	8.998kg-PuCd ₆	73.899kg-PuCd ₆
液体 Cd 陰極装填数	—	1	—	4	1
電極位置	標準	標準	標準	標準	標準
Pu 同位体比	1/68/26/2.5/2.5	1/68/26/2.5/2.5	1/68/26/2.5/2.5	1/68/26/2.5/2.5	1/68/26/2.5/2.5
異常の重ね合わせ	- 電極形状異常 - 陽極物質富密度異常 - 陽極の過剰装荷	- 電極形状異常 - 析出物富密度異常 - Cd 陰極の過剰析出 - 析出物中 Pu 富化度異常	- 電極形状異常 - 陽極物質富密度異常 - 陽極の過剰装填	- 電極形状異常 - 陽極物質富密度異常 - 析出物富密度異常 - 陽極の過剰装荷 - Cd 陰極の過剰析出 - 析出物中 Pu 富化度異常 - 電極取扱異常	
Pu インベントリ (本解析では MA は一括して Pu と等価と見なした。)	[溶融塩] 283.548kg [Cd プール] 139.952kg [陽極] 31.740kg [Cd 陰極] 0kg [不溶解物] 0kg [合計] 455.238kg	[溶融塩] 283.888kg [Cd プール] 139.952kg [陽極] 0kg [Cd 陰極] 19.356kg [不溶解物] 0kg [合計] 443.196kg	[溶融塩] 284.773kg [Cd プール] 139.952kg [陽極] 13.808kg [Cd 陰極] 0kg [不溶解物] 0kg [合計] 438.533kg	[溶融塩] 284.976kg [Cd プール] 139.952kg [陽極] 6.904kg [Cd 陰極] 2.357kg [不溶解物] 0kg [合計] 434.189kg	[溶融塩] 285.913kg [Cd プール] 139.952kg [陽極] 31.736kg [Cd 陰極] 19.356kg [不溶解物] 0kg [合計] 476.960kg
k _{eff} +3σ	0.5000	0.5332	0.3334	0.3204	0.5383

表 6.6 異常の臨界解析モデル 質量異常(2/2)

ケース名	Case03-MODE11	Case03-MODE12	Case03-MODE13
事象名称	陽極の最大過剰装荷 (容器腐食考慮)	液体 Cd 陰極の最大過剰析出 (容器腐食考慮)	析出陰極未取出状態における過剰装荷陽極の装 填 (容器腐食考慮)
溶融塩液位(質量)	37.8 cm	37.8 cm	37.8 cm
溶融塩中 HM 濃度	10.66 wt%	10.66 wt%	10.66 wt%
溶融塩中 Pu 富化度(Pu/U 比)	80wt% (4.0)	80wt% (4.0)	80wt% (4.0)
Cd プール液位(質量)	10 cm	10 cm	10 cm
Cd プール中 Pu 濃度	3.62 wt%	3.62 wt%	3.62 wt%
陽極装荷物質形態	HM-Zr 合金(100%TD)	—	HM-Zr 合金(100%TD)
陽極形状	球(R=10.173cm)	—	球(R=10.173cm)
陽極装荷量(基)	69.678kg-alloy	—	69.678kg-alloy
陽極装填数	4	—	4
固体陰極物質形態	—	U 金属 (100%TD)	U 金属 (100%TD)
固体陰極形状	—	球(R=5.0cm)	球(R=5.0cm)
固体陰極析出量(基)	—	9.97kg-U	9.97kg-U
固体陰極装填数	—	3	3
液体 Cd 陰極析出物形態	—	PuCd ₆	PuCd ₆
液体 Cd 陰極形状	—	球(R=13.300cm)	球(R=13.300cm)
液体 Cd 陰極析出量(基)	—	91.452kg-PuCd ₆	91.452kg-PuCd ₆
液体 Cd 陰極装填数	—	1	1
電極位置	—	標準	標準
Pu 同位体比	1/68/26/2.5/2.5	1/68/26/2.5/2.5	1/68/26/2.5/2.5
異常の重ね合わせ	- 電極形状異常 - 陽極物質富密度異常 - 陽極の過剰装荷 - 陽極の過剰減肉	- 電極形状異常 - 析出物富密度異常 - Cd 陰極の過剰析出 - 析出物中 Pu 富化度異常 - Cd 陰極の異常減肉	- 電極形状異常 - 陽極物質富密度異常 - 陽極の過剰装荷 - 陽極の過剰減肉 - 析出物富密度異常 - 析出物中 Pu 富化度異常
Pu インベントリ (本解析では MA は一括して Pu と等価と見なした。)	[溶融塩] 283.050kg [Cd プール] 139.952kg [陽極] 45.152kg [Cd 陰極] 0kg [不溶解物] 0kg [合計] 468.153kg	[溶融塩] 283.925kg [Cd プール] 139.952kg [陽極] 0kg [Cd 陰極] 23.954kg [不溶解物] 0kg [合計] 447.830kg	[溶融塩] 281.062kg [Cd プール] 139.952kg [陽極] 45.152kg [Cd 陰極] 23.954kg [不溶解物] 0kg [合計] 490.118kg
k _{eff} +3σ	0.5596	0.5723	0.5843

表 6.7 異常の臨界解析モデル Pu/U 比異常

ケース名	Case03-MODE02a
事象名称	液体 Cd 陰極における Pu の優先的析出
溶融塩液位(質量)	37.8 cm
溶融塩中 HM 濃度	10.66 wt%
溶融塩中 Pu 富化度(Pu/U 比)	80wt% (4.0)
Cd プール液位(質量)	10 cm
Cd プール中 Pu 濃度	3.62 wt%
陽極装荷物質形態	—
陽極形状	—
陽極装荷量(/基)	—
陽極装填数	—
固体陰極物質形態	U 金属 (100%TD)
固体陰極形状	球(R=5.0cm)
固体陰極析出量(/基)	9.97kg-U
固体陰極装填数	3
液体 Cd 陰極析出物形態	PuCd ₆
液体 Cd 陰極形状	球(R=7.00cm)
液体 Cd 陰極析出量(/基)	13.333kg-PuCd ₆
液体 Cd 陰極装填数	1
電極位置	標準
Pu 同位体比	1/68/26/2.5/2.5
異常の重ね合わせ	・電極形状異常 ・析出物富化度異常 ・析出物中 Pu 富化度異常
Pu インベントリ (本解析では MA は一括して Pu と等価と見なした。)	[溶融塩] 285.417kg [Cd プール] 139.952kg [陽極] 0kg [Cd 陰極] 3.492kg [不溶解物] 0kg [合計] 428.861kg
k _{eff} +3σ	0.3026

表 6.8 異常の臨界解析モデル 電極の落下

ケース名	Case03-MODE31	Case03-MODE32	Case03-MODE33	Case03-MODE33
事象名称	基本状態 (電解開始前) 陽極落下	基本状態 (電解終了時) 陰極落下	基本状態 (電解開始前) 陽極落下、接触。	析出陰極未取出状態における標準装荷陽極の装填。 全電極落下。
溶融塩液位(質量)	37.8 cm	37.8 cm	37.8 cm	37.8 cm
溶融塩中 HM 濃度	10.66 wt%	10.66 wt%	10.66 wt%	10.66 wt%
溶融塩中 Pu 富化度(Pu/U 比)	80wt% (4.0)	80wt% (4.0)	80wt% (4.0)	80wt% (4.0)
Cd プール液位(質量)	10 cm	10 cm	10 cm	10 cm
Cd プール中 Pu 濃度	3.62 wt%	3.62 wt%	3.62 wt%	3.62 wt%
陽極装荷物質形態	HM-Zr 合金(100%TD)	—	HM-Zr 合金(100%TD)	HM-Zr 合金(100%TD)
陽極形状	球(R=5.44cm)	—	球(R=5.44cm)	球(R=5.44cm)
陽極装荷量(/基)	10.655kg-alloy	—	10.655kg-alloy	10.655kg-alloy
陽極装填数	4	—	4	4
固体陰極物質形態	—	U 金属 (100%TD)	—	U 金属 (100%TD)
固体陰極形状	—	球(R=5.0cm)	—	球(R=5.0cm)
固体陰極析出量(/基)	—	9.97kg-U	—	9.97kg-U
固体陰極装填数	—	3	—	3
液体 Cd 陰極析出物形態	—	PuCd ₆	—	PuCd ₆
液体 Cd 陰極形状	—	球(R=6.14cm)	—	球(R=6.14cm)
液体 Cd 陰極析出量(/基)	—	8.998kg-PuCd ₆	—	8.998kg-PuCd ₆
液体 Cd 陰極装填数	—	1	—	4
電極位置	標準	標準	標準	標準
Pu 同位体比	1/68/26/2.5/2.5	1/68/26/2.5/2.5	1/68/26/2.5/2.5	1/68/26/2.5/2.5
異常の重ね合わせ	- 電極形状異常 - 陽極物質嵩密度異常 - 電極落下	- 電極形状異常 - 析出物嵩密度異常 - 電極落下	- 電極形状異常 - 陽極物質嵩密度異常 - 電極落下 - 電極接触	- 電極形状異常 - 陽極物質嵩密度異常 - 析出物嵩密度異常 - 電極取扱異常 - 電極落下
Pu インベントリ (本解析では MA は一括して Pu と等価と見なした。)	[溶融塩] 285.913kg [Cd プール] 167.132kg [陽極] 6.904kg [Cd 陰極] 0kg [不溶解物] 0kg [合計] 459.949kg	[溶融塩] 285.913kg [Cd プール] 167.651kg [陽極] 0kg [Cd 陰極] 2.357kg [不溶解物] 0kg [合計] 455.921kg	[溶融塩] 284.913kg [Cd プール] 167.132kg [陽極] 6.904kg [Cd 陰極] 0kg [不溶解物] 0kg [合計] 459.949kg	[溶融塩] 285.913kg [Cd プール] 180.836kg [陽極] 6.904kg [Cd 陰極] 2.357kg [不溶解物] 0kg [合計] 476.010kg
k _{eff} +3σ	0.3301	0.2864	0.4094	

表 6.9 異常の臨界解析モデル 同位体比異常、溶融塩・Cd プール液位異常

ケース名	Case00-MODE01	Case01-MODE01	Case05-MODE01	Case06-MODE01	Case07-MODE01
事象名称	基本状態 (電解開始前)	基本状態 (電解開始前)	基本状態 (電解開始前)	基本状態 (電解開始前)	基本状態 (電解開始前)
溶融塩液位 (体積)	37.8 cm (1760L)	37.8 cm	50 cm	37.8 cm	37.8 cm
溶融塩中 HM 濃度	10.66 wt%	10.66 wt%	10.66 wt%	10.66 wt%	10.66 wt%
溶融塩中 Pu 富化度 (Pu/U 比)	80wt% (4.0)	80wt% (4.0)	80wt% (4.0)	80wt% (4.0)	80wt% (4.0)
Cd プール液位 (質量)	10 cm	10 cm	10 cm	20 cm	10 cm
Cd プール中 Pu 濃度	3.62 wt%	3.62 wt%	3.62 wt%	3.62 wt%	3.62 wt%
陽極装荷物質形態	HM-Zr 合金(100%TD)	HM-Zr 合金(100%TD)	HM-Zr 合金(100%TD)	HM-Zr 合金(100%TD)	HM-Zr 合金(100%TD)
陽極形状	球(R=5.44cm)	球(R=5.44cm)	球(R=5.44cm)	球(R=5.44cm)	球(R=5.44cm)
陽極装荷量 (/基)	10.655kg-alloy	10.655kg-alloy	10.655kg-alloy	10.655kg-alloy	10.655kg-alloy
陽極装填数	4	4	4	4	4
固体陰極物質形態	—	—	—	—	—
固体陰極形状	—	—	—	—	—
固体陰極析出量 (/基)	—	—	—	—	—
固体陰極装填数	—	—	—	—	—
液体 Cd 陰極析出物形態	—	—	—	—	—
液体 Cd 陰極形状	—	—	—	—	—
液体 Cd 陰極析出量 (/基)	—	—	—	—	—
液体 Cd 陰極装填数	—	—	—	—	—
電極位置	標準	標準	標準	標準	標準
Pu 同位体比	0/100/0/0/0	0/100/0/0/0	1/68/26/2.5/2.5	1/68/26/2.5/2.5	1/68/26/2.5/2.5
異常の重ね合わせ	• Pu 同位体比異常 • 電極形状異常	• Pu 同位体比異常 • 電極形状異常 • 塩中 Pu 濃度異常	• 電極形状異常 • 溶融塩量過剰 (+10cm 液位)	• 電極形状異常 • Cd プール量過剰 (+10cm 液位)	• 電極形状異常 • Li 同位体比異常 (Li-6 なし)
Pu インベントリ (本解析では MA は一括して Pu と等価と見なした。)	[溶融塩] 283.633kg [Cd プール] 139.952kg [陽極] 6.904kg [Cd 陰極] 0kg [不溶解物] 0kg [合計] 430.489kg	[溶融塩] 594.179kg [Cd プール] 139.952kg [陽極] 6.904kg [Cd 陰極] 0kg [不溶解物] 0kg [合計] 741.035kg	[溶融塩] 375.912kg [Cd プール] 139.952kg [陽極] 6.904kg [Cd 陰極] 0kg [不溶解物] 0kg [合計] 522.768kg	[溶融塩] 283.633kg [Cd プール] 279.904kg [陽極] 6.904kg [Cd 陰極] 0kg [不溶解物] 0kg [合計] 570.441kg	[溶融塩] 283.633kg [Cd プール] 139.952kg [陽極] 6.902kg [Cd 陰極] 0kg [不溶解物] 0kg [合計] 430.489kg
$k_{eff}+3\sigma$	0.3671	0.5514	0.3361	0.3364	0.3356

表 6.10 異常の臨界解析モデル 不溶解物の異常生成

ケース名	Case99-MODE21	Case99-MODE22	Case99-MODE23	Case99-MODE24	Case99-MODE25	Case99-MODE26
事象名称	溶融塩中 Pu 全量の不溶解物化、粉体密度、均一沈殿	溶融塩中 Pu 全量の不溶解物化、粉体密度、球状集積	溶融塩中 Pu 全量の不溶解物化、圧縮粉体密度、均一沈殿	溶融塩中 Pu 全量の不溶解物化、圧縮粉体密度、球状集積	溶融塩中 Pu 全量の不溶解物化、理論密度、均一沈殿	溶融塩中 Pu 全量の不溶解物化、理論密度、球状集積
溶融塩液位(質量)	37.8 cm	37.8 cm	37.8 cm	37.8 cm	37.8 cm	37.8 cm
溶融塩中 HM 濃度	0 wt%	0 wt%	0 wt%	0 wt%	0 wt%	0 wt%
溶融塩中 Pu 富化度(Pu/U 比)	—	—	—	—	—	—
Cd プール液位(質量)	10 cm	10 cm	10 cm	10 cm	10 cm	10 cm
Cd プール中 Pu 濃度	0 wt%	0 wt%	0 wt%	0 wt%	0 wt%	0 wt%
不溶解物形状・位置	層状沈殿 溶融塩-Cd プール界面	球状 槽底部中央	層状沈殿 溶融塩-Cd プール界面	球状 槽底部中央	層状沈殿 溶融塩-Cd プール界面	球状 槽底部中央
不溶解物中 Pu 密度	2.022 g/cc (20%TD)	2.022 g/cc (20%TD)	4.044 g/cc (40%TD)	4.044 g/cc (40%TD)	10.109 g/cc (100%TD)	10.109 g/cc (100%TD)
不溶解物層厚さ	4.563 cmH	—	2.282 cmH	—	0.913 cmH	—
不溶解物塊半径	—	37.029 cmR	—	29.390 cmR	—	21.655 cmR
Pu 同位体比	1/68/26/2.5/2.5	1/68/26/2.5/2.5	1/68/26/2.5/2.5	1/68/26/2.5/2.5	1/68/26/2.5/2.5	1/68/26/2.5/2.5
異常の重ね合わせ	・不溶解物の大量発生	・不溶解物の大量発生 ・不溶解物の集積	・不溶解物の大量発生 ・不溶解物の圧縮	・不溶解物の大量発生 ・不溶解物の集積 ・不溶解物の圧縮	・不溶解物の大量発生 ・不溶解物の焼結	・不溶解物の大量発生 ・不溶解物の集積 ・不溶解物の焼結
Pu インベントリ (本解析では MA は一括して Pu と等価と見なした。)	[溶融塩] 0kg [Cd プール] 0kg [陽極] 0kg [Cd 陰極] 0kg [不溶解物] 430.00kg [合計] 430.00kg	[溶融塩] 0kg [Cd プール] 0kg [陽極] 0kg [Cd 陰極] 0kg [不溶解物] 430.00kg [合計] 430.00kg	[溶融塩] 0kg [Cd プール] 0kg [陽極] 0kg [Cd 陰極] 0kg [不溶解物] 430.00kg [合計] 430.00kg	[溶融塩] 0kg [Cd プール] 0kg [陽極] 0kg [Cd 陰極] 0kg [不溶解物] 430.00kg [合計] 430.00kg	[溶融塩] 0kg [Cd プール] 0kg [陽極] 0kg [Cd 陰極] 0kg [不溶解物] 430.00kg [合計] 430.00kg	[溶融塩] 0kg [Cd プール] 0kg [陽極] 0kg [Cd 陰極] 0kg [不溶解物] 430.00kg [合計] 430.00kg
$K_{eff}+3\sigma$	0.5581	1.1652	0.5585	1.5146	0.6150	2.0245

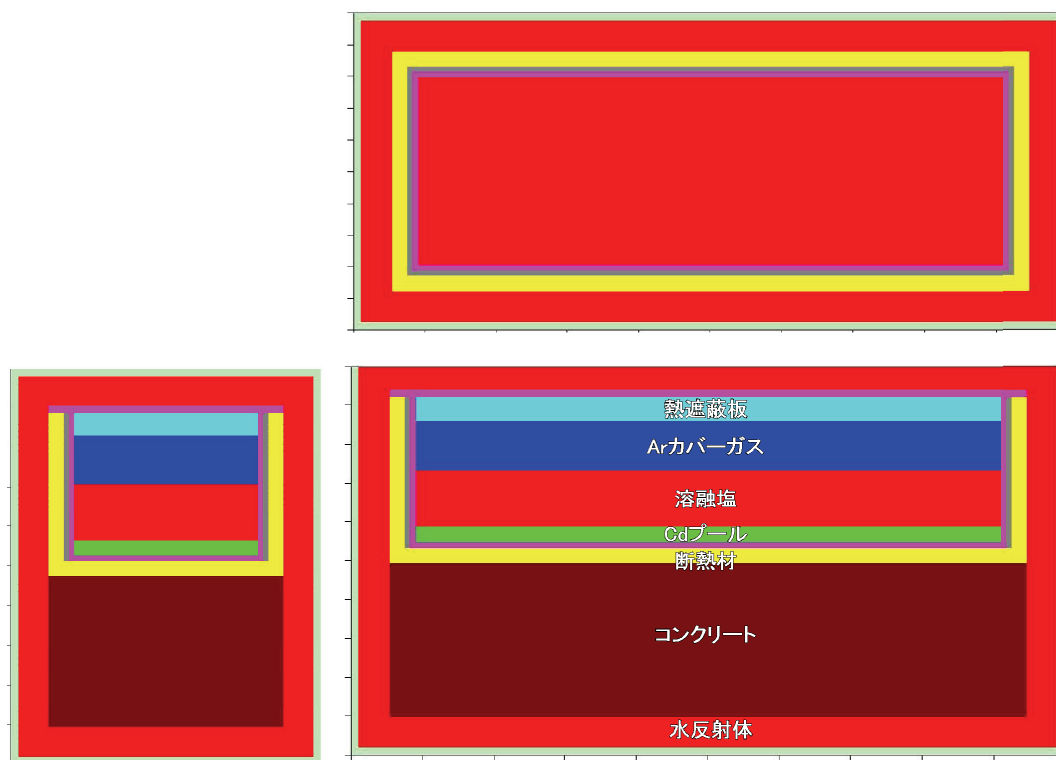


図 6.1 Case03-MODE00 の計算体系

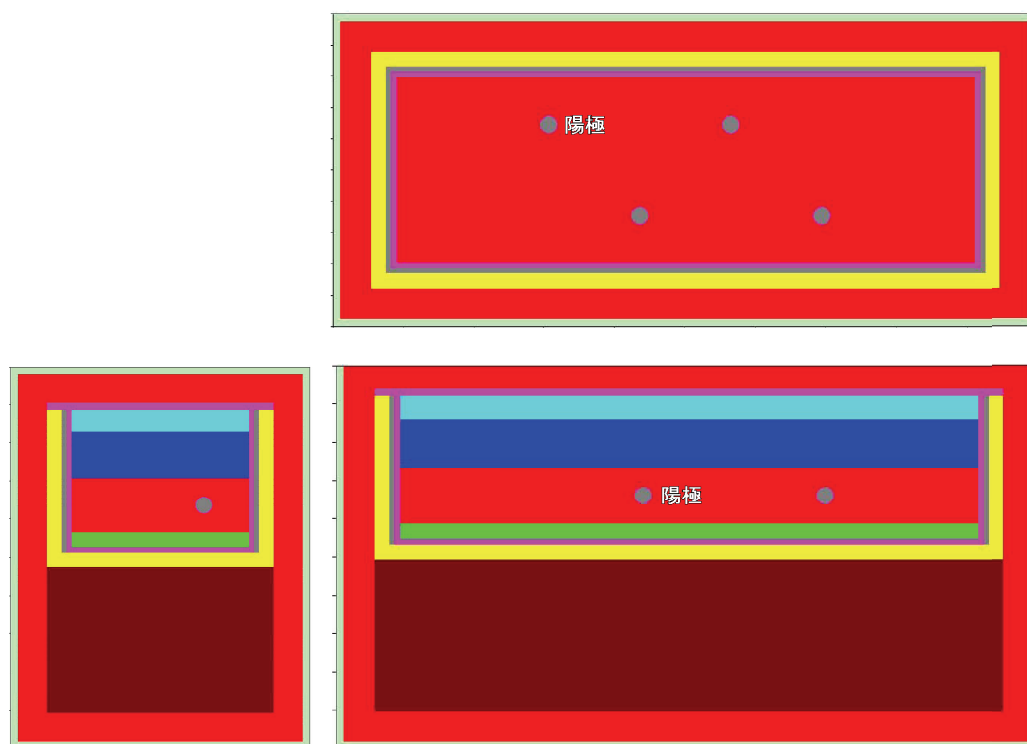


図 6.2 Case03-MODE01 の計算体系

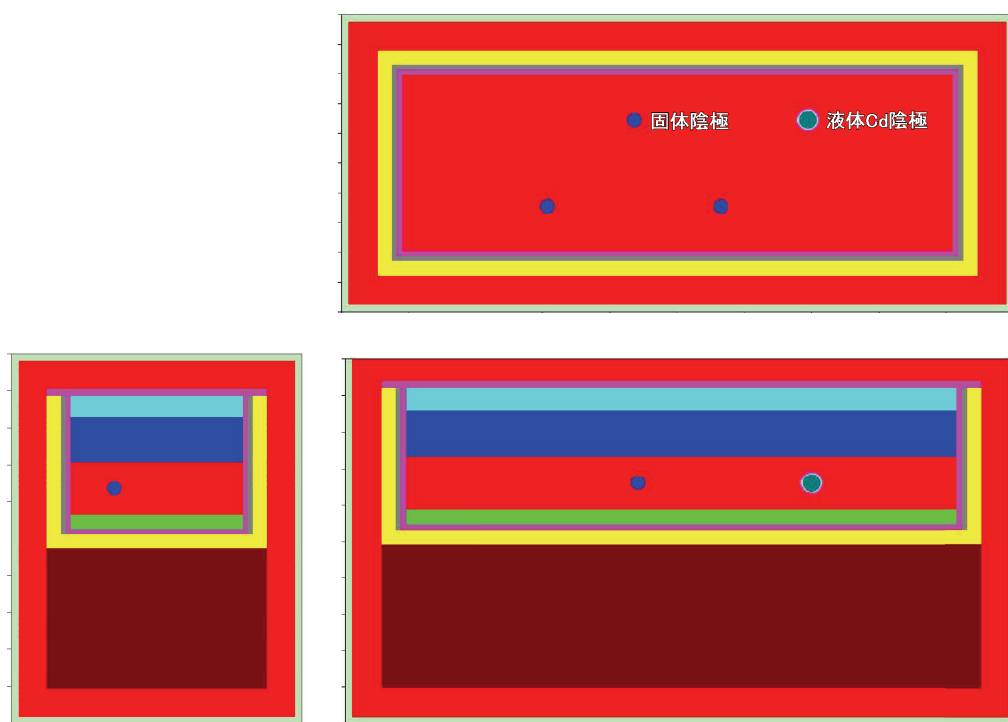


図 6.3 Case03-MODE02 の計算体系

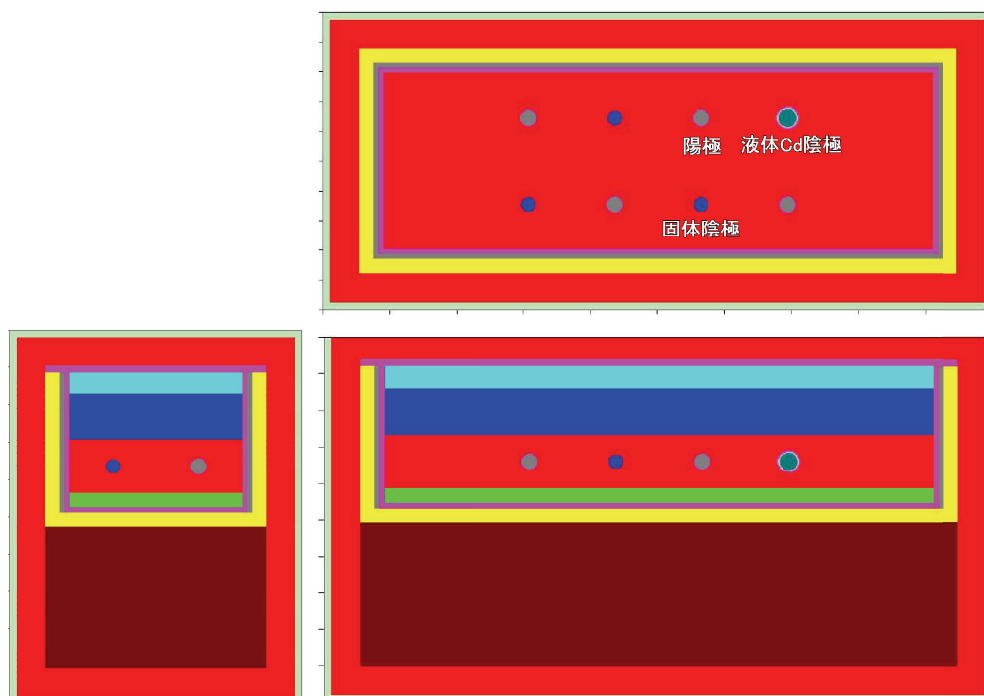


図 6.4 Case03-MODE06 の計算体系

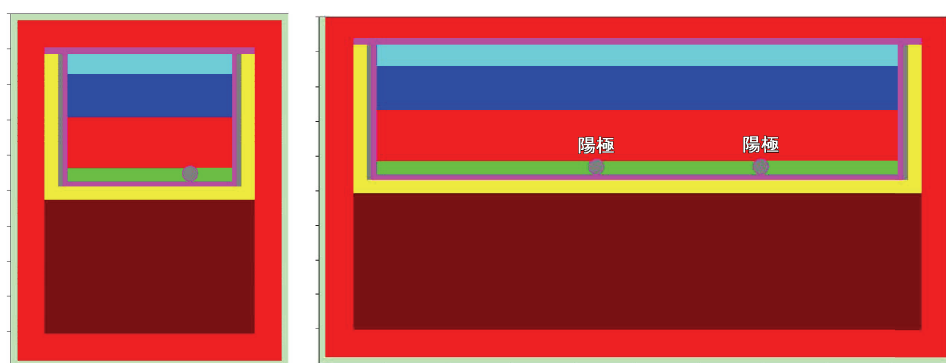


図 6.5 Case30-MODE31 の計算体系

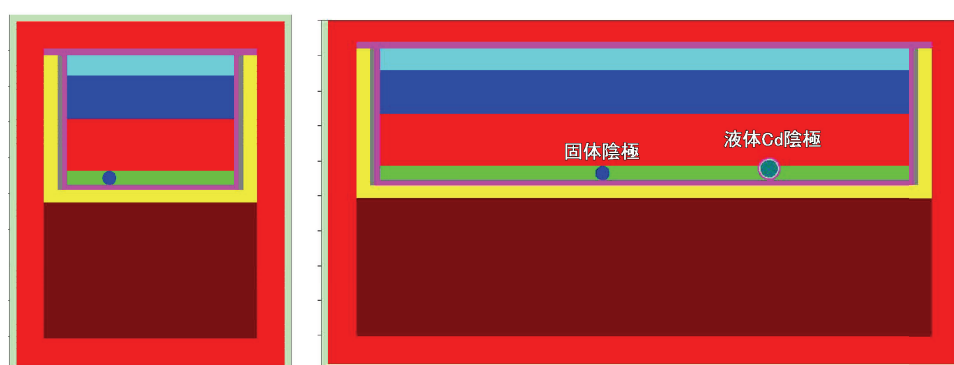


図 6.6 Case30-MODE32 の計算体系

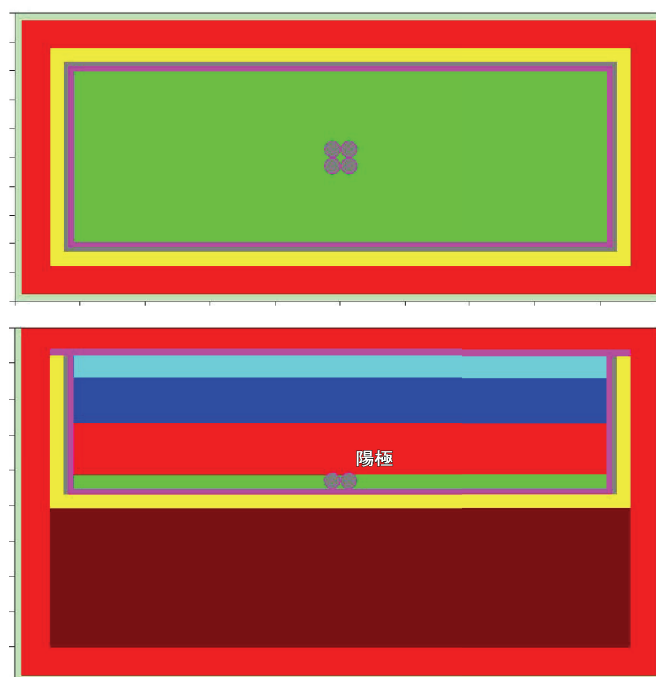


図 6.7 Case30-MODE33 の計算体系

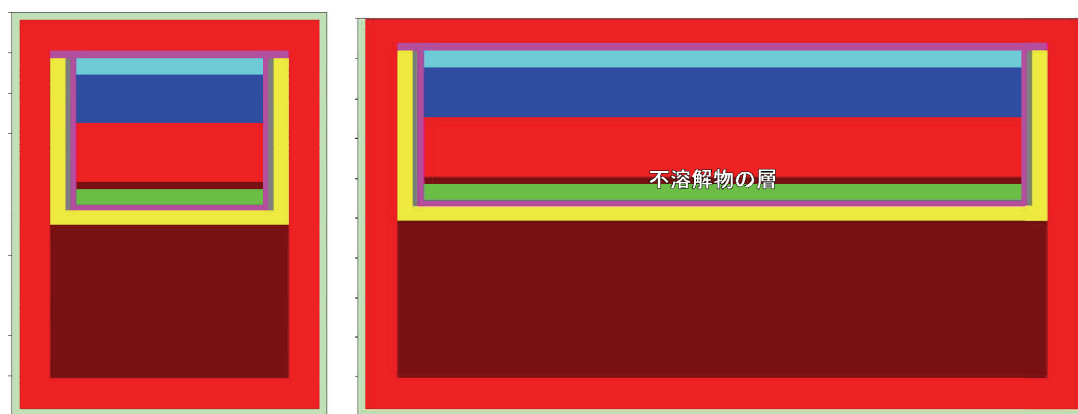


図 6.8 Case99-MODE21 の計算体系

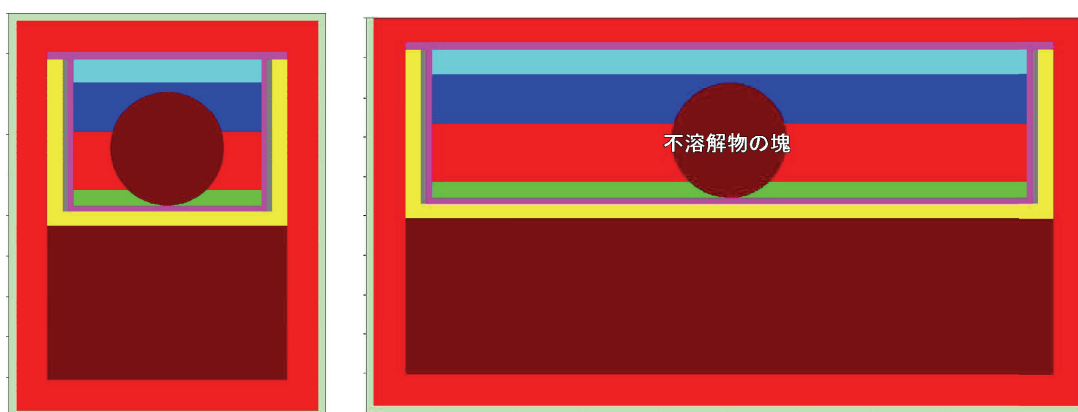


図 6.9 Case99-MODE22 の計算体系

7. 電解精製槽内不溶解物の発生に関する検討

前章の解析結果では不溶解物の発生が臨界安全性を維持する上で極めて重要であることが示された。この章では、不溶解物の定常時の発生及び異常な発生に関して検討を行った。

7.1 不溶解物の工学的な発生防止方策

電解精製槽は高度に純度管理されたArセル内に設置されている。Arセルバウンダリは鋼製の気密容器であり、その雰囲気管理基準は

酸素：100ppm以下

湿分：100ppm以下

その他（主として窒素）：1000ppm以下

に設定されている。

さらに電解精製槽は専用の高純度Arカバーガス供給系により内部雰囲気が常にパージされる設計（高純度Arガスのワンスルー）になっている。パージガスの純度は外部から供給される純Arの製造時純度に依存するが、設計値として

酸素：10ppm以下

湿分：10ppm以下

その他（主として窒素）：10ppm以下

が要求されている。さらに、この純度を維持するために基本的に電解槽気相部圧力は外部セル雰囲気圧力に対して微正圧に設定されており、装置隙間からのインリークを排除する設計となっている。加えて、電極ポートや電解精製槽上部蓋フランジ部など構造上非溶接となる箇所に対しても可能な限り密閉性の高い構造とすることで不純物のインリークおよび内部雰囲気のアウトリークを可能な限り低減するとしている。なお、パージする高純度Arガスの排気および温度等の変動に対する圧力バランスの制御のため機器オフガス（VOG）系がCdトラップ装置を経由して接続されている。

Arセル雰囲気制御系および電解精製槽カバーガス系は共に安全上重要な設備であり、動的機器は二重化されるなどの十分な対策を採る。また、それぞれは独立した系統である。従って、これらの系統が同時に機能喪失にいたるような事象は技術的に想定されない。

7.2 不溶解物発生量の推算

7.2.1 雰囲気中不純物による不溶解物生成量の計算モデル

電解精製槽へ不純物濃度が c [ppm]のArガスが F [Nm³/h]の流量でパージされているとする。電解精製槽に侵入した不純物分子が熔融塩中のPuなどと反応し不

溶解物を生成する割合は、不純物分子の滞留時間、気相部気流の挙動、温度、圧力、液面面積、熔融塩中Pu濃度等様々な因子に依存するものと思われる。ここでは単純に侵入した不純物分子の内のある割合 x だけが不溶解物の生成に寄与するものとする。そうすると単位時間当たりの不溶解物生成量は、

$$(\text{単位時間当たりの侵入分子数}) \times (\text{反応割合}) = F \times \frac{1000}{22.4} \times c \cdot 10^{-6} \times x \text{ [mol/h]}$$

となる。生成する不溶解物が二酸化物であるならば、酸素原子2で不溶解物分子1が生成することになるので、不純物が酸素の場合、

$$F \times \frac{1000}{22.4} \times c_{O_2} \cdot 10^{-6} \times x$$

不純物が湿分の場合、

$$F \times \frac{1000}{22.4} \times \frac{c_{H_2O}}{2} \cdot 10^{-6} \times x$$

一方、窒化物は窒素原子1に対して不純物分子1であるから、

$$F \times \frac{1000}{22.4} \times 2c_{N_2} \cdot 10^{-6} \times x$$

となる。

7.2.2 平常状態における不溶解物増加の試算

電解精製槽カバーガス系が平常に動作し、電解精製槽のシール機能にも特に異常がない場合における不溶解物の生成を考える。Arカバーガスパーシ流量が未設定であるためANL-FCFの電解精製槽のパーシ流量2.7[scfm]をもとに、FCF電解精製槽と本システムの電解精製槽の気相部容積比で規格化したものを用いる。

$$2.7 \times 1.7 \times \frac{2.72 \times 1.22 \times 0.472}{\pi \times 0.508^2 \times 0.3302} = 26.86 \text{ [Nm}^3\text{/h]}$$

平常状態での不純物濃度上限は、酸素、湿分、窒素とも10ppmである。保守的に全ての不純物が不溶解物の生成に寄与する ($x=1$) と想定すると、

	侵入不純物量[mol/h]	生成不溶解物量[mol/h]
酸素(O ₂)	1.199×10^{-2}	1.199×10^{-2}
湿分(H ₂ O)	1.199×10^{-2}	5.995×10^{-3}
窒素(N ₂)	1.199×10^{-2}	2.398×10^{-2}
合計	3.597×10^{-2}	4.197×10^{-2}
1日当たり不溶解物発生量 [mol/day]		1.007

生成した不溶解物が全て²³⁹PuO₂だとすれば、一日当たり239gのPuが不溶解物と

して沈殿することになる。

しかし、金属電解法における熔融塩中でPuイオンとUイオンが共存している場合、その化学的性質からPuイオンより先にUイオンが不溶解物を作るという可能性も指摘されており、そうであるとすれば上記の仮定ではUイオンがすべて酸化物を形成するまでPu酸化物の生成が抑制されるため、事象の進展速度の観点から保守的な設定となる。そこで、極端な場合でも熔融塩中のPu/U比に応じて沈殿物を生成すると仮定するならば、設計値でPu/U=3/1なので臨界安全上問題となるPuの不溶解物生成量は0.7553mol/dayとなり、質量に換算すると180.5g/dayである。1%の計測誤差と5%のプロセス誤差を仮定した場合のPu不溶解物の核的制限値は20kgと設定されているのでこの場合には核的制限値に到るまで110日の余裕があることになり、Puのみが優先的に酸化物となると仮定した場合に比べて一ヶ月程度余裕が増える。

7.2.3 電解精製槽カバーガス異常による不溶解物増加の試算

電解精製槽カバーガスの純度管理が異常をきたした場合、もしくは大規模なインリークが生じた場合、電解精製槽カバーガスの雰囲気はArセル雰囲気と同じ程度にまで悪化する可能性がある。そこで、前項の計算を不純物濃度をArセル雰囲気同等として計算する。この時、流量は不明であるため通常時（26.86[Nm³/h]）と変わらないとする。

	侵入不純物量[mol/h]	生成不溶解物量[mol/h]
酸素(O ₂)	1.199×10^{-1}	1.199×10^{-1}
湿分(H ₂ O)	1.199×10^{-1}	5.995×10^{-2}
窒素(N ₂)	1.199	2.398
合計	1.439	2.578
1日当たり不溶解物発生量 [mol/day]		61.868

結果より、Arカバーガス異常の時には平常時の60倍の速度で不溶解物の生成が進展することがわかる。先と同じように生成する不溶解物の組成が熔融塩中のPu/U比に従うとすると、Puの不溶解物の生成量は10.91kg/dayとなる。すなわち、5%の計測誤差と1%のプロセス誤差を仮定した場合の核的制限値に達するまで44時間の裕度がある。

7.2.4 推算モデルの問題と不溶解物発生に関わる工学的課題

上記の計算においては、

- (1)不純物の不溶解物生成への寄与率 x を1とした。

(2)Pu不溶解物の生成がU不溶解物の生成と同時に生じるとした。

の2点が結果を極端に厳しくしている要因である。したがって、より現実的な生成量を求めるためには、寄与率 x を実験等によりある程度定量的に求めること、およびUイオン存在下でのPuイオンの安定性についての実証的な知見をえることが重要であると考え（特に窒化物燃料の生成が技術的に容易でないとの報告もあることから、実際の寄与率は非常に小さいものと思われる）。

雰囲気中の不純物に起因する不溶解物の蓄積を直接検知する機会は、熔融塩中のFPおよびNaを除去する塩処理操作およびCd精製操作時に与えられる。塩処理は4日毎に熔融塩の1/30を抜き出し、Cd精製は25日毎にCdプールの80%を抜き出して再生処理を行う。この時抜き出された塩およびCdを濾過し異常な量の不溶解物が含まれるかどうかを確認することが出来る。これらの操作の処理間隔は、悲観的に予測した不溶解物の発生量が核的制限値に到達する時間よりも短い。ただしこの検知は定性的なものであるため、確実性および信頼性を向上するために実証試験等を行って知見を深める必要がある。

一方、この生成物推算モデルでは気相不純物の寄与しか考慮していない。実際には、電解精製槽に出し入れする陽極や陰極に付着する形で不純物の侵入が考えられる。特にせん断燃料に付着するNaは電解精製槽に投入されるまでに酸素や湿分と反応してNaOHなどの形で酸素原子のキャリアと成りやすい。したがって、影響は大きくないと思われるものの、ボンドNa除去装置での除去率および除去後に残存するNaによる影響なども考慮する必要がある。

不溶解物生成を低減する工学的な対策としては、

- (1)Arカバーガスパージ流量を低減する。
- (2)Arカバーガス不純物量を低減する。
- (3)Arカバーガス純度異常時の対策を付加する。
- (4)Arセル雰囲気不純物量を低減する。

等が考えられる。

(1)は特に平常時の発生量を低減するのに有効である。パージ量は具体的にはまだ設定されておらず、設定する場合には電解精製槽のリーク率、電極交換時の外部ガスの流入量、CdプールからのCd蒸発量等を加味して決めるものと考えられる。

(2)は定量的には有効であるが、現設計10ppmよりも高い純度を要求するのはコスト的な影響を踏まえて検討する必要がある。

(3)は異常時の発生量を低減するために有効である。上記推算では流量がパージ流量に等しいとしたが電解精製槽の気密性が高ければ、カバーガス異常時にはパージを停止させ、オフガス排気量も低下させるなどの対策が考えられる。また、気相と熔融塩の接触を防止するために熔融塩液面を急速冷却して固化させ

るといった緊急時安全機能も有効と考えられる。

(4)も(2)と同様、他の設備設計や全体コストとのトレードオフ（Arセルの気密性、Arセル雰囲気浄化装置の性能等）の問題となる。Arセル雰囲気は電解精製槽のカバーガス異常に備える役割よりも、金属の火災防止を主眼とした設備であるため、カバーガス異常のために過剰な設備要求を行うのは合理的でないかもしれない。

8. Ar セル内の核燃料物質移送管理およびその手順の検討

金属電解法における臨界安全管理の主たる方法は質量管理であるため、核燃料物質の移送は臨界安全上極めて重要な操作である。金属電解法における物流の特徴の内、臨界安全管理に関係するものとして以下の点が上げられる。

- (1)遠隔自動操業である。
- (2)マテリアルハンドリング装置に大きく依存している。
- (3)重しやへいのセル内で行われる（近接目視による確認が困難。ただしインセルカメラの利用は可能）。

これらの事柄を踏まえ、臨界安全管理の観点からセル内での物質移送の手段および手順について検討を行った。

8.1 検討の前提

ここでは特に物質移送手順が複雑な電解精製槽周りののみを取り上げる。電解精製槽周りの物質移送の流れの概要を図 8.1に、機器のセル配置を図 8.2に示す⁽⁴⁾。

8.2 設計思想

本システムでは、完全に配管で接続された連続処理プラントと異なり広い意味での定常状態は存在しない。同じ処理を行う機器が多数並列に設けられており、その間を物質がハンドリング装置によって行き来する。したがって、多数の処理が同時に実施され、それらの処理のスケジューリングは機器の稼働状況およびプロセス条件に照らし合わせて動的に割り当てられる。また、個々の処理は単純なルーチンワークであるが、並列で働くということと、処理回数が膨大なことから全てを運転員によって掌握、制御することは現実的でない（運転人員を大きく増加させることはそれだけ人的過誤の発生を増加させる上に、商業施設においては経済性を悪化させる）。従って、プラント全体の大まかな制御（例えばあるキャンペーン期間における運転計画）は運転員等により決められるが、ある瞬間に個々の装置および移送装置をどのように動かして処理を進めていくかについては計算機により自動的に決定、制御されるものとする。従って、運転員は大まかな目標を計算機に入力し、計算機は現在のプラント状況と入力値から最適なスケジューリングを求める。運転員はそのスケジュールを確認し、実行許可を与える。その後、各操業は自動的に計算機の制御のもとで進められる。

セル内の全ての装置（工程装置、ポンプ、バルブ、クレーン、ハンドリング装置、マスタースレーブマニピュレーター、秤量器、各種計装機器、インセルカメラにいたるあらゆる動的機器）は電気信号によって制御され動作する（アルゴンセル内では圧力空気の使用は出来ない）。これら多数の機器群を直接監視し、制

御するために工程管理システムが設けられている。プラントの操業はこの工程管理システムから出る電気信号によって実行され、運転員が工程管理システムを飛び越えて直接セル内の機器を扱うことは出来ないようにする（オペレーション・バイ・ワイヤ、OBW）。この考えは高度に自動化された（あるいはそうしようとしている）旅客航空機の安全設計概念を参考にしている。

このように操作系の中に工程管理システムを組み込むことにより、不用意な操作や許可されていない操作を排除し、かつその為の安全機能の簡素化が可能となる。すなわち、工程管理システムはセル内の全ての運転操作に対してソフトウェアによる安全保護系を提供し、異常操作に対して動的なフェールセーフ機能を実現する。逆に、このようなプラント全体をカバーできる安全保護機能を可能としているのは、セル内のあらゆる動的機器が電気信号（バイ・ワイヤ）により動作するものだからである。

プラントの全ての情報を把握しているのは工程管理システムである（ただし、運転員はこれらの情報の全てをいつでも知ることができる）。従って、定常時操作だけでなく如何なる非定常時操作も工程管理システムの監視下で行われる。プラント内のあらゆる装置の制御系は工程管理システムに接続されている。工程管理システムには大別して、操業の省力化、合理化および迅速化のための自動化操作制御系と安全性を確保するための自動防護系が用意されている。平常時は自動化操作制御系が最適にスケジューリングされた操作シーケンスを生成し、それに基づいて自動的に操業が進められる。運転員は常に工程管理システムを経由して装置を制御する（図 8.3）。例えば、非常時においてマニュアル操作により装置を動かす場合においても、その装置の制御信号は工程管理システムに監視され、予め定められた安全上の許容範囲（エンベロープ）を超える操作を行おうとした場合には、工程管理システムの自動防護系によりその操作が停止される（オートプロテクション）。すなわち運転員は自動操作の内容をマニュアル操作でオーバーライト（自動化操業制御系で生成された運転シーケンスを直接手入力により変更する操作）できるが、エンベロープを防護している工程管理システム（自動防護系）を飛び越えて操作（ディスエンゲージ）することは出来ない。この点が単純な省力化および効率化を目指す自動化（オートオペレーション）と、本システムにおいて提案している安全上重要な機能を担う自動化（オートプロテクション）の本質的な違いである。ディスエンゲージは現場運転員レベルでは実施することは出来ず、適切な権限を持つ上位管理階層の領域となる。したがって、ディスエンゲージ状態のプラントは特殊な状態として明確に区別され、その状態における一切の安全確保の責任はプラントの上位管理階層の責任となる。これは、本システムが自動車や航空機とは異なり時間というリソースに対して厳しくないことから実現されるもので、運転員とオートプロテクションが衝突した場合には、

プロセスをサスペンドし、その問題について上位管理階層を含む関係者が判断をおこなえる十分な時間が提供されるということである。

この様な厳格な自動化により、定常時であっても膨大なルーチンワークにより複雑化するプラント操業におけるヒューマンエラーを防止するものとする。

8.3 工程管理システム

工程管理システムは、セル内の全ての装置（工程装置、ポンプ、バルブ、クレーン、ハンドリング装置、マスタースレーブマニピュレーター、秤量器、各種計装機器、インセルカメラにいたるあらゆる動的機器）を制御し、それらの動作を監視すると共に、工程の全ての情報を掌握し、移送および工程操作の自律的判断を実施する工程管理計算機から構成される。

セル内の全ての物質（核燃料物質、容器等の移動可能な単位）の情報は工程管理計算機により一元的に管理される。工程管理計算機は、物質の各情報（内容物の性状、重量、組成、位置、収納容器など）、工程機器の情報、プロセス手順についても掌握している。ただし、重要な移送やプロセスの実行に関しては、実施前に運転員の許可を問い合わせるものとする。

セル内の物質の機器間および工程間の移動は基本的に全て専用のハンドリング装置により実行される。セルクレーンを含む全てのハンドリング装置は工程管理計算機の制御下に置かれ、工程管理計算機を通さない直接の操作は不可能とする（すなわち、運転員の任意による操作は、一旦工程管理計算機のチェックロジックによってその正当性が確認されて後、工程管理計算機のプログラムにより実際の機器が動作する）。

工程管理計算機の動作の検証およびストアされているデータの検証のため、工程管理計算機はハードおよびソフトの両方が少なくとも独立二重化され、非常用電源系統（バッテリーからの直流電源を含む）からの給電を受ける。

動的な臨界安全管理は全て工程管理システムが掌握しているデータベース上の情報に依存する。したがって、工程管理システムを通さない物質の移送・操作や、工程管理システムの掌握しているデータベースへの介入は臨界安全性に対して重大な影響を与えることになり、運転規則により原則的に禁止されるだけでなく、それらの端末とエンゲージされた工程制御システムの自動防護系（オートプロテクション）により強制的に排除される。

8.4 物質の管理および取扱

8.4.1 ハンドリング装置による取扱

(1) 原則

取り扱う物質は必ず専用の容器に包蔵して移送、保管される。容器は容器IDにより区別される。核燃料物質を直接包蔵する容器が開放式の場合、移送時および貯蔵時には密閉式の外容器に入れられて取り扱われるものとする。これは、移送時に内容物がこぼれないようにすると共に、落下・転倒に対する備えでもある。さらに、内容物が可燃性物質（活性金属等）である場合にはArセル雰囲気異常時における火災発生防止を兼ねている。

容器に対して物質の出入りが生じた場合、その直後には必ず秤量を行い意図した通りの移動が行われたかを確認する。秤量は容器の風袋重量も含めたバルクの重量で行われる。秤量時には同時に容器IDの確認も実施され、その容器IDと内容物情報が工程管理計算機のデータベースで関連づけられる。これらの操作は外容器を利用する際にも実施される（外部からは外容器のIDしか確認できないため）。この様に何度も秤量とID確認を行うのは、Arセル内での取扱中に内容物の漏えいや取り残しが発生した場合、これを検知できる手段が計量値の異常に限られているためである。セル内カメラを通した運転員による目視という確認手段も併用可能であるが、運転操作の省力化とセル内カメラの設置数を出来るだけ少なくする必要があるため、特に重要な移動や移し替えにのみに限定する。

単一の工程機器が質量管理上の単一ユニットに当たるため、機器への受入前には受入物質の容器IDの確認および秤量を実施する。登録された容器IDに内蔵されている物質の情報と現時点での工程機器の状態から、受入によって各臨界パラメータの核的制限値を超えないことが確認されてはじめて工程機器への受入が実行される。移動中もしくは貯蔵時には容器それ自体が単一ユニットとして扱われる。

工程機器から払い出す場合も、容器IDの確認と秤量を実行する。工程によっては核燃料物質の組成が変化するものがある。この場合、サンプリング分析等も同時に実施される。サンプリング分析等の結果が得られるまでは核燃料物質の質量を計算できないため、原則的にサンプリング分析等の結果が明らかになるまで工程からの払出は行えない（払出先の受入の判定が不可能なため）。

ある単一ユニットから他の単一ユニットへ物質を移送する場合、その移送の完了が確認されるまで、それらのユニットへ新たな物質の受入を行うことは禁止される。また、異常な接近や衝突を防止するため、移送完了が確認されるまで移送経路は当該ハンドリング装置により排他的に占有される。

移送時の落下や転倒を防止するため、ハンドリング装置の掴み具あるいは固定

装置にはインタロックを設け、不適切な状態のまま移送操作が行われることを防止する。

(2) 例外的取扱

核燃料物質の払出の際、最も保守的な状態、すなわち秤量値から風袋重量を差し引いた正味の質量全てが核分裂性物質としても払出先の核的制限値に抵触しない場合は、分析等の結果が得られるまでこの質量を暫定的な核燃料物質質量として適用することを認める。この場合、分析等の結果が得られるまで払出元の在庫量は更新しない（核燃料物質の減少がなかったと仮定する）。

あるいは信頼性が高いことが保証され、かつ正確さ（誤差の程度）が明らかな予測モデルが利用可能であれば、その予測値を暫定値として用いることを認める。この場合には払出元の在庫量も予測値に対して更新され、暫定値が適用される。なお、予測モデルが適用可能であるには、その予測モデルが予め検証されたプロセスパラメータの範囲に、実際のプロセスの状態値が含まれている必要がある。

ただし、これらの暫定値のままの物質を次の（物質組成の変動を生じる）工程を超えて移送することは禁止する。

特に工程間に仮置き場が設置されている場合、仮置き場の配置設計において物質配置間隔を保守的な条件で仮定することにより、分析値を得る前の物質を仮置き場に受け入れるようにすることが可能となる。

(3) 秤量器および ID 確認装置の独立二重化

秤量器および ID 確認装置を二重化することによって、それら装置の単一故障に対する信頼性が向上する。すなわち、これら装置が二重化されている場合には実際とは異なる秤量値あるいは ID で誤移送をすることを排除できる。ただし、秤量操作および ID 確認操作の実施自体に対する確実性は向上しない。

(4) 運転員による直接確認

秤量および ID 確認によるトレーサビリティが満足されていれば、短時間で異常な量の蓄積や漏えいが見過ごされることはない。しかしながら、容器の密閉具合や工程操作によっては秤量によって検知できない微量な漏えいが生じ、長期間の運転において蓄積する恐れがある。そのような箇所に対しては、セル窓あるいはセル内カメラを通した運転員の目視による確認（遠隔巡視点検）を定期的を実施する。

このような確認が必要であると考えられる箇所は、ピンせん断機、せん断ピンシューター下部、Naボンド除去装置内部、各陰極組立装置内部などである。

8.4.2 配管による移送

金属電解法のシステム設計においては、液体系についても質量管理、容積管理、

濃度管理もしくはこれらの組み合わせを主たる臨界バリアとし、形状管理を用いない。従って、配管による移送を実行する前に、移送対象流体の組成、移送先の在庫量を明らかにし、計画量の移送によって移送先の核的制限値を超えないことを確認してから移送操作を実行する。また、移送操作中においても移送元および移送先の容積変動（液位計の指示値）を確認し、異常があった場合には速やかに移送操作を停止する。積算流量計によるダブルチェックも有効と思われるが、これは流量計の信頼性、精度に依存する。移送後には移送先の物質の組成を分析等によって明らかにし、計画通りの移送が実行されたことを確認する。

ただし、配管移送を主体とする水溶液系の再処理システムに比べて、液移送の動力が電氣的機械的なものであること、取り扱う液体系（溶融塩および液体Cd）の臨界質量が比較的大きいことなどから、配管系を通じた意図しない液体の移動による臨界は生起し難い。

なお、配管による移送に対しては、一般に一度の移送量が比較的大きく、過剰量の移送が生じる可能性がハンドリング移送時よりも高いため、暫定値による物質管理は適用しない。

8.5 各物質の移送手順

8.5.1 陽極

陽極バスケットの側面はパンチングされたあるいはメッシュ状の鋼製板であるため、単体では内容物やせん断時に発生する切りくず（スワーフ）が漏えいする。したがって、外容器（陽極容器）に装填して取り扱う。空の陽極バスケットを秤量し容器IDを確認した後、陽極容器に入れ、さらに秤量し陽極容器のIDを確認する。その後、バスケットテーブルの指定位置に装填する。装填したバスケットテーブルの位置情報も指定値と間違っていないかが確認される。

陽極バスケットテーブルでは、一つの陽極バスケットのみがシューターに接続されている。陽極バスケットテーブルは円周上に陽極バスケット（陽極容器ごと）を配置し、所定量のせん断燃料片を受け入れた後にテーブルを回転させることによってシューターに接続された陽極バスケットを次の空の陽極バスケットに切り替える。一つの陽極バスケットには18本分のせん断燃料片を受け入れる。せん断機における燃料ピンの情報、せん断本数およびストローク数と、それを受ける陽極バスケットテーブル上の陽極容器の容器IDが関連づけられる。この時点で、どの容器IDの陽極容器にどのような燃料せん断片が何本入ったかという情報が更新され、それらの情報から装荷済の陽極容器のバルクの質量が予測される。装荷作業が終了した陽極容器がテーブルの所定の位置まで移動してくると、ハンドリング装置により秤量器へ移送され、陽極容器のバルクの質量が計量される。こ

の時に容器IDも確認され、データベース上の燃料ピンデータから推測されるバルク質量予測値と計量値が一致することを確認し、データを更新する。

確認された陽極容器について、次の工程であるNaボンド除去装置への移送の可否が照会され、許可された後移送を実行する。

ボンドNa除去装置では、ボンドNaの滴下除去も行うため陽極バスケットは陽極容器から取り出されて装置内へ置かれる。この際、取り出し後の陽極容器と陽極バスケットの各質量および容器IDが確認される。ボンドNa除去装置で一度に処理できる最大量は8陽極である。ボンドNa除去操作後、装置から取り出された陽極バスケットはID確認後秤量されて、質量データが更新される。工程前後の質量の差は除去されたNaの質量に等しいので、予め予測されるNa量と比較検証される。その後、組になっていた陽極容器に入れられ再び秤量され、陽極バスケット仮置き架台へ移送される。陽極取り出し後のNaボンド除去装置内に燃料物質が陽極バスケットから漏れだしていないかを目視により確認する。また、Naドレイン管を通じて漏れ出た燃料物質が非臨界管理機器に漏れいしないかを監視する装置を設置する。

電解精製工程からの要請に応じて、指定された陽極容器を陽極バスケット仮置き架台から陽極アセンブリ組立装置に移送し、陽極アセンブリに組み立てる。この時、陽極バスケットに組み付ける前の陽極支持モジュール、組立後の陽極アセンブリと空になった陽極容器の質量計量およびID確認が実行される。陽極支持モジュールは電極コネクタ、回転機構等が一体化されたもので、下部に電解精製槽電極ポートに接続するためのゲートバルブが設けられており、陽極バスケットの外容器を兼ねている。組み上げられた陽極アセンブリは陽極アセンブリ仮置き架台へ移送され、空になった陽極容器は電解後の陽極アセンブリを解体して取り出す陽極バスケットのために取り置かれる。また、空となった陽極容器中に有意な量のホールドアップが無いことを計量値と目視で確認する。

電解精製工程からの要請に応じて、指定された陽極アセンブリを陽極アセンブリ仮置き架台から電解精製槽へ移送して、指定された電極ポートへ装着する。電解精製工程への受入前に陽極アセンブリの秤量と容器IDの確認を行い、電解精製槽の（陽極の）核的制限値に抵触しないことを確認する。

電解操作によって陽極中の燃料物質は溶解し熔融塩中に移行する。電解後の陽極バスケット内には、ハル、不溶解残渣が含まれ、さらに熔融塩が若干付着している。取り出した陽極アセンブリを秤量して電解前の質量との差を求める。この質量差はハル、不溶解残渣、付着塩を含んだものになる。電解操作時には、電解電位、積算電流値が監視され、熔融塩成分などから電解プロセス予測モデルにより電解精製槽内での物質移動がシミュレートされる。このシミュレーションにより予測される電解後の陽極質量と実際の計量値が比較され、規程の誤差内に収ま

れば予測値が正しいと判断され、その予測値が暫定値として扱われる。なお、電解工程の予測計算結果の検証は、陽極の秤量値以外に固体陰極および液体Cd陰極の秤量値に対しても検証され、それらの判定が同時に満たされる必要がある。

暫定値が払出先（ハル取り出し装置）の核的制限値以下であることが確認された後、ID確認を行い一旦陽極アセンブリ仮置き架台に払い出される。その後、陽極アセンブリ組立装置において陽極支持モジュールが取り外され、陽極バスケットは陽極容器に収納される。陽極容器は陽極バスケット仮置き架台を經由してハル取り出し装置に送られ、陽極バスケット中のハルをハル収納缶へ移し替える。これらの過程においても操作毎に秤量とID確認操作が実施される。空になったことが確認された陽極バスケットは陽極容器に入れられて陽極バスケットテーブルに移送される。

規定量のハルを受け入れたハル収納缶は電解分離セルから高放射性固体廃棄物処理セルへ移送される。高放射性固体廃棄物処理セルで受け入れる際にハル収納缶を秤量した後、非破壊検査装置によって随伴する核燃料物質の計量が行われる。この計量値と電解プロセス予測モデルによる暫定値が誤差の範囲で一致したとき、陽極の物質移動量が確定される。

8.5.2 固体陰極

固体陰極は鋼製の棒状電極である。固体陰極は固体陰極析出物回収・組立装置において電極支持モジュールを取り付けられて固体陰極アセンブリになる。なお固体陰極では支持モジュールと陰極本体を分離するのは、交換等を実施する保守時のみである。組み立てられた固体陰極アセンブリは固体陰極アセンブリ仮置き架台に送られる。電解工程からの要請に応じて電解精製槽に移送され、指定された電極ポートに装填される。電解により固体陰極に回収されるのは電極当たりウラン金属10kgである。電解後取り出された固体陰極アセンブリは陽極取扱時と同様に、電解前後の秤量値差と電解プロセス予測モデルによる予測質量が比較され、誤差の範囲であるならば予測値が暫定値として認められる。一旦固体陰極アセンブリ仮置き架台に送られた固体陰極アセンブリは、次に固体陰極析出物回収・組立装置に移送されて、支電析物を陰極から削り落として、付着塩ごと固体陰極用のプロセスるつぼに移し替えられる。一つのプロセスるつぼには固体陰極2基分の析出物（約20kgのウラン金属）が回収される。プロセスるつぼ、電極アセンブリそれぞれは秤量され、操作前後での質量変化が確認される。回収物の入ったプロセスるつぼは移送容器に入れられてプロセスるつぼ貯蔵庫へ払い出される。回収物を全て削り落とした固体陰極アセンブリは確認後固体陰極アセンブリ仮置き架台へ移送される。以上の過程における全ての操作、移送の前後には秤量と容器IDの確認が実施される。電解回収されたHMの組成及び質量は、固体陰極処理

後の均一な製品から得たサンプリングの分析および製品の秤量によって明らかにされる。この時点で予測値による暫定値は真値によって更新される。

8.5.3 液体 Cd 陰極

Cd陰極るつぼには、はじめにCd充填装置において所定量のCdが充填される。Cd充填後の陰極るつぼはCd陰極るつぼ搬送容器に収納されてCd陰極用るつぼ貯蔵庫に払い出される。その後、液体陰極取出・組立装置に送られて液体Cd陰極用の電極支持モジュールを取り付けられる。組み立てられた液体陰極アセンブリはCd陰極仮置き架台へ移送される。電解工程からの要請に応じて仮置き架台から電解精製槽へ移送され、指定された電極ポートに装填される。電解操作によって1.1375kgのU、2.275kgのPuおよび0.075kgのMA（主としてAmおよびCm）が回収される。電解精製槽から引き上げたCd陰極るつぼには予め装填したCd、電解回収されたHMに加えてるつぼのフリーボード（Cd液面からるつぼ上縁部の自由空間部）に溶融塩がすくい取られた状態にある。陽極、固体陰極と同様に取り出された液体Cd陰極アセンブリの質量と電解プロセス予測モデルによる予測重量が比較、確認される。液体Cd陰極アセンブリは仮置き架台に一旦保管された後、液体陰極取り出し・組立装置に搬送され、支持アセンブリが取り外され、るつぼ内の回収HMを含むCd部分が陰極るつぼからプロセスるつぼに移される。プロセスるつぼは搬送容器に収納された後、プロセスるつぼ貯蔵庫に払い出される。以上の過程における全ての操作、移送の前後には秤量と容器IDの確認が実施される。電解回収されたHMの組成及び質量は、液体Cd陰極処理後の均一な製品から得たサンプリングの分析および製品の秤量によって明らかにされる。この時点で予測値による暫定値は真値によって更新される。

8.5.4 溶融塩

電解精製槽への溶融塩の受入はHM塩受槽から配管で移送される。移送前には塩のサンプリング分析により濃度が確認される。移送はポンプにより連続的に行われ、両方の槽の液位計の変化量が監視される。電解槽からの溶融塩の払出は使用済塩受槽に対して行われ、移送前には塩のサンプリング分析により濃度が確認される。移送はポンプにより連続的に行われ、両方の槽の液位計の変化量が監視される。

漏えいあるいは意図しない流体の移送を監視するため液位計は多重化される。

サンプリングの代表性を確保するために、サンプリング前には溶融塩の攪拌を十分行う。

溶融塩中に不溶解残渣が懸濁していると、塩処理の後工程においてこれら不溶解残渣の蓄積が発生しうる。したがって、払い出される際にはフィルター等によ

り不溶解残渣を回収する。フィルターケーシングは不溶解物で満たされた場合においても臨界になり得ないようにその寸法（容積）が制限される。

8.5.5 Cd（Cd プール）

電解精製槽へのCdの受入は、Cd供給槽から配管で移送される。移送前にはCdのサンプリング分析により濃度が確認される。移送はポンプにより連続的に行われ、両方の槽の液位計の変化量が監視される。電解槽からのCdの払出は使用済Cd回収装置に対して行われ、移送前にはCdのサンプリング分析により濃度が確認される。移送はポンプにより連続的に行われ、両方の槽の液位計の変化量が監視される。

漏えいあるいは意図しない流体の移送を監視するため液位計は多重化される。

液体Cd中に不溶解残渣が懸濁していると、後工程においてこれら不溶解残渣の蓄積が発生しうる。したがって、払い出される際にはフィルター等により不溶解残渣を回収する。フィルターケーシングは不溶解物で満たされた場合においても臨界になり得ないようにその寸法（容積）が制限される。

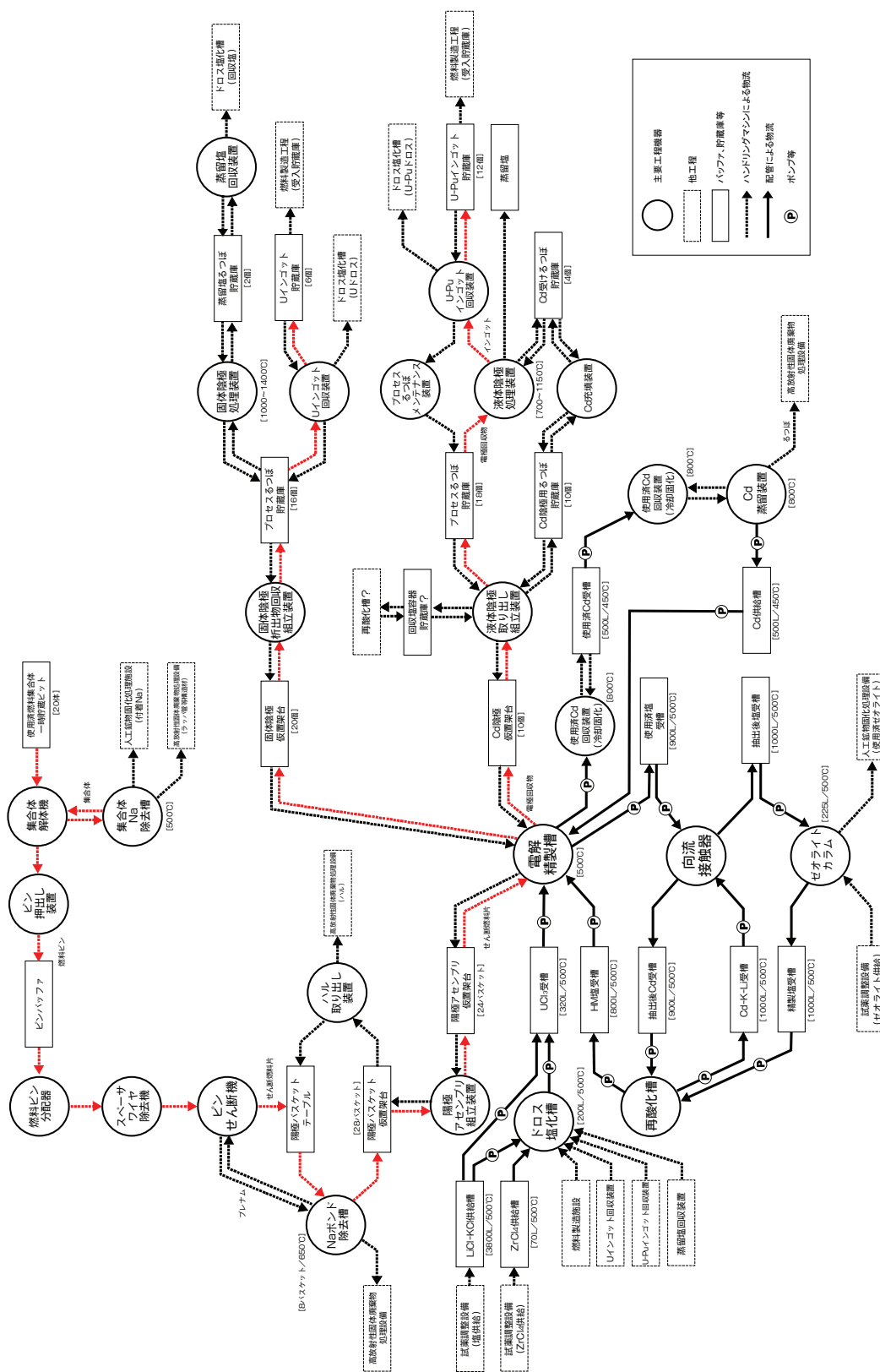


図 8.1 電解精製槽周りの物流の概略

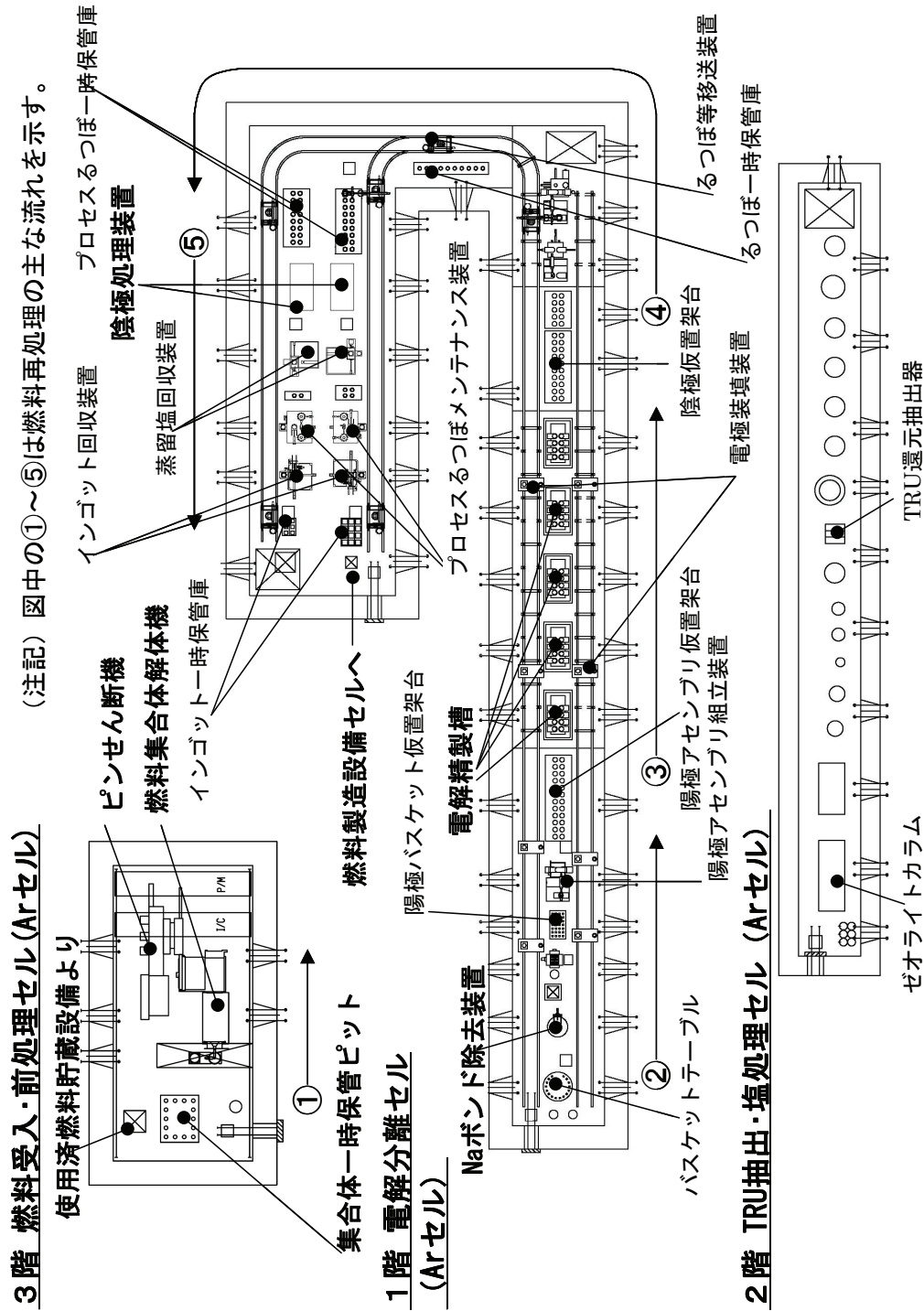


図 8.2 セル内主要機器配置図

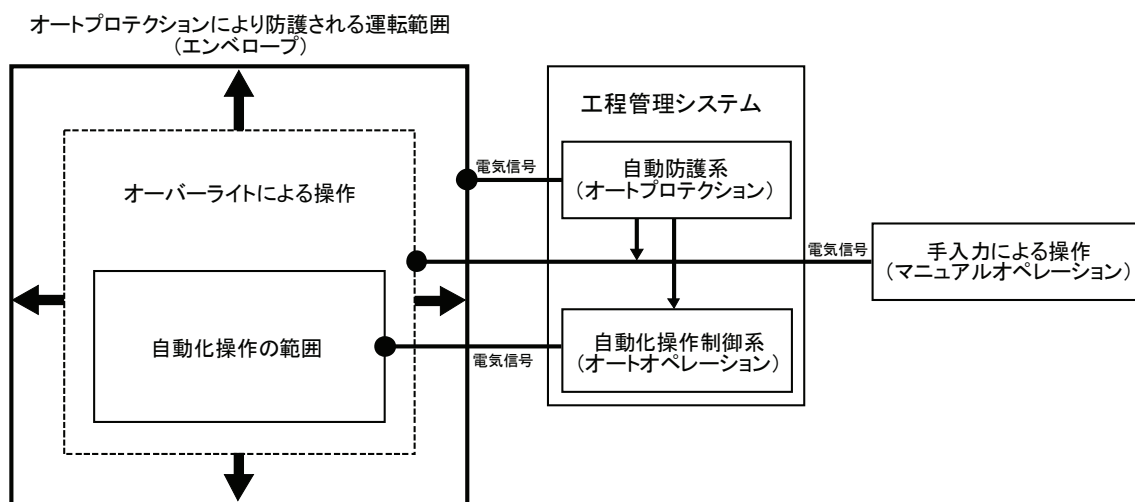


図 8.3 オペレーション・バイ・ワイヤによる安全機能の自動化

9. 大型電解精製槽の臨界安全設計に関する技術的課題

ここではこれまでに提示してきた電解精製槽における臨界安全設計が実現するために解決が必要な技術的課題についてまとめる。

9.1 基礎的な知見に関する課題

臨界安全上重要な基礎データは工学的手段に関係なく、同一の物質系、プロセスを用いるならば必要とされるものである。また、安全設計および評価を行う上での根本となるため高い信頼性（再現性）を要求される。この基礎的な知見に含まれる不確定性の程度に応じて臨界安全設計上の安全マージンの幅（安全係数）が大きくなる。このことから、合理的で経済的な（高い性能を持つ）プロセス・要素機器を開発するためには幅広い知識、データが必要である。

(1) 密度の HM 濃度依存性

溶液系（LiCl-KCl、液体Cd系）に関して、U、PuおよびMAの溶解濃度に対する溶液密度の依存性を定量的に明らかにする必要がある（硝酸Pu水溶液系におけるMaimoniの式に相当するもの）。

(2) HM 濃度分布および非均質化に関する知見

臨界安全設計および評価では溶液系に関して均一系を仮定するが、実際には濃度分布が生じる。実際に生じ得る濃度分布の幅の上限を知ることにより、均一系の仮定において非安全側の設定を行ってしまうリスクを避けることができる。

また、温度低下によって固化する場合にPuCl₃の偏析などの非均質化が生じるか、生じるとすればどの程度の非均質化が起こりうるのかについて把握することも重要である。

(3) 不溶解物の生成に関する知見

異常事象評価において見たように、不溶解物の生成は電解精製槽における臨界安全性の最も重要な事象の一つである。しかしながら、不溶解物については不明確な点が多くあり、現状では非常に保守的な想定で評価を行わざるを得ない。したがって、より現実的な想定に基づく合理的な安全評価を行うためには不溶解物に関する以下の知見を得ることが重要である。また、これらの知見は、不溶解物生成量の予測や防止に関する工学的対策の検討および開発においても重要な情報となる。

- ・ 生成不溶解物の性状（化学形態、安定性、粒径分布、密度など）
- ・ 不溶解物の生成速度（濃度、温度、不純物の種類に対する依存性）
- ・ 生成反応過程の詳細
- ・ 選択酸化性（Uイオン共存下におけるPuイオン酸化の抑制）の確実性についての実証

(4) 核データおよび臨界安全解析コードの信頼性検証

溶融塩系やCd系化合物における臨界質量の実験的評価はこれまでに行われたことがない。したがって、本評価および将来の評価・解析はENDEFやJENDL等の核データに基づくSCALEコードシステムやJAX、MVP、MCNPなどの臨界解析コードに依存する割合が高いと考えられるが、これら既存のコード群の利用においても電解精製プロセスの系の取扱に対する信頼性検証は未実施である。よって、無用の安全マージンを排するためには解析コードの信頼性を定量的に評価する必要がある。ただし、臨界質量を実験的に直接求めるための臨界実験の実施には多大の費用および施設、期間を要するため、より容易な方法で同等の結果を得られるような技術（感度解析の活用など）の開発が有効である。

(5) 固体陰極へのPu析出条件の明確化

溶融塩中Pu濃度および電解電位に制限を設けなければ固体陰極へのPu析出は物理的に可能である。したがって、臨界安全設計における化学形態管理では固体陰極へのPu析出を防止するため、溶融塩中Pu濃度および電解電位に制限値を設けることとしている。しかしながら、どのような条件が整えば析出が生じうるかについて定量的な知見がなければ制限値の設定が出来ないため、その条件を明らかにする必要がある。

9.2 工学／技術に関する課題

臨界安全設計上の異常事象の発生防止および異常拡大防止を担う工学的施設についての課題を示す。これらの信頼性は、異常の発生頻度および拡大防止失敗確率と深い関係があるので、特に臨界安全に求められる二重偶発性原理を満足するためには信頼性の高い設備に作り上げる必要がある。

(1) 計量管理システム・工程管理システム

電解精製槽の主たる臨界安全管理は質量管理であるため、計量管理システムを構成するあらゆるハードウェアおよびソフトウェアは臨界安全の根幹となる工学的施設である。計量管理システムは電解精製槽への受入・払出量および在庫量の評価および検証を担い、その役割を実現するための要素をすべて含む。すなわち、工程制御コンピュータおよびそのソフトウェアとマンマシンインターフェイス、モニター装置、サンプリング装置、分析装置、秤量装置などである。商業施設においては高度に自動化されることが不可欠であるため、これら機器間の連携や制御を実現する技術や自己診断機能などが必要になる。また、データベースの信頼性・健全性維持などにも特別な配慮が必要になる。特に、直接計量できない不溶解物の発生量をどのようにして評価するかは大きな課題である。

これらの動的なシステムによる安全性確保は、厳格なハードウェア対応のみに

よって構成される水溶液系の安全性確保と異なることから、特にその信頼性に関して直感的な安全性の認識を得ることが難しい。したがって、こういった動的システムの信頼性をどのように証明、説明して理解を得ていくかという点も重要な課題である。

(2) 電解精製工程運転・制御システム

化学形態管理は電解精製槽の運転・制御パラメータを通じて実現される。したがって、運転・制御システムも臨界安全上求められる信頼性を有することが必要である。また、直接的に確認できない化学形態や核燃料物質の移動を把握するために極めて信頼性の高い予測モデルの構築が必要となる。

(3) マテリアルハンドリングシステム

特にマテリアルハンドリングにおける過剰装荷や異常装荷を防止するために、ID確認装置および秤量装置と組み合わせた自律型の高信頼性マテリアルハンドリングシステムが必要となる。

また、移送中の物体の破損や衝突を防ぐための掴み具の工夫や、ハンドリングマシン同士の異常接近の検知など自動化に伴う諸機能が必要である。

上記のシステムは個別に動作するのではなく、高度に統合化され、自律的に協調して機能を果たすことになる。したがって、それら複雑なシステムの信頼性確保および信頼性の保証をどのように行うかについても重要な課題となる。

9.3 本質的安全設計に関わる課題

電解精製槽の臨界安全性にとって最も潜在的な危険性が高い事象は不溶解物の生成である。このそもそもの原因は、溶融塩中に大量の核燃料物質を溶解していることにある。プロセス条件からは溶融塩中の核燃料物質の質量ではなく濃度が重要なのであるから、多量の核燃料物質を在庫しておく必要性はない。一方で、本質的な臨界安全の確保という観点からは危険物である核燃料物質の存在量を極小にすることが重要である。本システムにおいて電解精製槽内部の核燃料物質がその単位処理量に比べて大きい原因は、電解精製槽の物理的大きさそのものにある。したがって、より本質的な意味で臨界安全性を向上させるには、電解精製槽の処理能力を維持したまま如何に電解精製槽を小型化するかという点についての考慮が必要になる。そのためには、プロセスについての基礎研究だけでなく、電極形状や攪拌装置、塩処理装置などの機器開発による総合的な改善が不可欠である。

10. まとめ

本検討書では以下の三点について検討の結果を記載した。

はじめに、「金属燃料リサイクルシステムの臨界安全設計検討（I）」で提示した化学形態管理併用質量管理に基づいて、大型電解精製槽の各制限値を設定するための考え方を構築し、それら制限値の素案を提示した。

次に、本書で示した臨界安全設計の下で想定される偶発的事象を抽出し、それらの発生防止策を明確にすると共に、偶発的事象が生じた場合においても臨界安全性を確保しうるかどうかの解析計算を実施した。それらの結果、本設計の妥当性が確認できた。ただし不溶解物の生成に関して、評価のためのモデル化および安全マージンの設定を適切にするために幾つかの課題があることが明らかとなった。また、本システムの臨界安全設計は動的に管理される因子に多く依存していることから、プラントの操業における誤操作を排除して信頼性を確保するためにはどのような設計が合理的かを検討し、有効な方法の一つとして「オペレーション・バイ・ワイヤ」の概念を提示した。

最後に、本臨界安全設計を実現するために解決すべき技術的課題を、基礎的知見、工学的知見および本質的安全の観点から明確にした。特に、金属電解法プロセスについての工学レベルでの知見が乏しいことに起因して、過剰な安全マージンの組み込みが設計の合理性を損なっていると同時に、処理能力を確保するための電解精製槽の単純な大型化が臨界安全設計や計量技術に過大な負担となっていることを、今後の技術開発における焦点の一つとして示しておく。

参考文献

- (1) 中林弘樹, 佐藤浩司, 他, “金属燃料リサイクルシステムの臨界安全設計検討(I) (研究報告),” JNC TN9400 2003-082, 核燃料サイクル開発機構, (2003)
- (2) 佐藤浩司, 他, “高速炉増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズII中間報告ー燃料サイクルシステム技術検討書ー (研究報告),” JNC TN9400 2004-036, 核燃料サイクル開発機構, (2004)
- (3) 藤岡綱昭, 他, “金属燃料リサイクルシステムの設計評価 (研究報告),” JNC TY9400 2001-028, 核燃料サイクル開発機構, (2001)
- (4) 藤岡綱昭, 他, “金属燃料リサイクルプラントの設計評価 (その5)ー電解精製プロセスの検討ー,” 日本原子力学会 2003年春の年会 (2003)
- (5) “日本原子力学会標準 臨界安全管理の基本事項: 2004,” AESJ-SC-F004:2004 (2004)
- (6) “臨界安全ハンドブック,” 科学技術庁原子力安全局核燃料規制課 編, (1988)
- (7) “臨界安全ハンドブック第2版,” *JAERI 1340*, 日本原子力研究所, (1999)
- (8) “Guide de Criticite, PartI, II, III,” CEA-R3114, Commissariat a l’Energie Atomique (1967)
- (9) “核燃料の臨界安全,” 財団法人 原子力安全研究協会 (1984)
- (10) “Nuclear Criticality Safety in Operations with Fissionable Material Outside Reactors,” ANSI/ANS-8.1-1998 (1998)
- (11) Mori, T. and Nakagawa, M., “MVP/GMVP: General Purpose Monte Carlo Codes for Neutron and Photon Transport Calculations based on Continuous Energy and Multigroup Methods,” JAERI/DataCode-94-007, (1994).
- (12) K. Shibata and et al., “Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version-3 ---JENDL-3---,” JAERI-1319, (1990)
- (13) Mariani, R. D. and et al., “Criticality Safety Strategy for the Fuel Cycle Electrefiner at Argonne National Laboratory West,” Proc. of Global’93, (1993)
- (14) Lell, R. M., Klann, R. T. and et al., “Nuclear Criticality Safety Program at the Fuel Cycle Facility,” Proc. of RECOD’94 (1994)
- (15) J. Ninagawa and et al., “Criticality Safety Control at the Plutonium Fuel Production Facility,” Proc. of the International Symposium NUCEF2001, JAERI-Conf 2002-004 (2002)
- (16) J. E. Herceg and et al., “Engineering and Acquisition of Equipment for Electrometallurgical Treatment of Spent Nuclear Fuel,” Proc. of ICON-8
- (15) Wu T. S., Blomquist C. A. and Herceg J. E., “Structural Evaluation in the Design of Electrefiner,” Proc. of the 1995 ASME PVP Conference, 308, pp125-130.

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m・kg・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光強度	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 質量エネルギー分与, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときにいくつかの用例は表4に示されている。
- (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
- (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
- (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	SI 基本単位による表し方	
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m ⁻¹ ・kg・s ⁻¹	
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg・s ⁻²	
角度	ニュートン毎メートル	N/m	kg・s ⁻²	
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹	
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²	
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg・s ⁻³	
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² ・kg・s ⁻² ・K ⁻¹	
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹	
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹	
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m・kg・s ⁻³ ・K ⁻¹	
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²	
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m・kg・s ⁻³ ・A ⁻¹	
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s・A	
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s・A	
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²	
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m・kg・s ⁻² ・A ⁻²	
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg・s ⁻² ・mol ⁻¹	
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹	
モル熱容量				
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s・A	
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³	
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg・s ⁻³ =m ² ・kg・s ⁻³	
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg・s ⁻³ =kg・s ⁻³	

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1 海里=1852m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バール	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe [†] =(1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホ	ph	1 ph=10 ¹¹ x
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位		1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ		1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	
ミクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m