JAEA-Technology 2008-037



フッ化ヨウ素ガスによる系統除染技術開発

ーIF7 処理条件とウラン除染結果の評価-

Technology Development of System Chemical Decontamination Using lodine Heptafluoride Gas

- Evaluation of IF7 Treatment Condition and Uranium Decontamination Result -

江間 晃 横山 薫 中塚 嘉明 島池 政満 杉杖 典岳

Akira EMA, Kaoru YOKOYAMA, Yoshiaki NAKATSUKA Masamitsu SHIMAIKE and Noritake SUGITSUE

> 人形峠環境技術センター 環境保全技術開発部

Environmental Research and Development Department Ningyo-toge Environmental Engineering Center

P

日本原子力研究開発機構

June 2008

Japan Atomic Energy Agency

本レポートは独立行政法人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(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人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 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

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 +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

フッ化ヨウ素ガスによる系統除染技術開発 - IF7 処理条件とウラン除染結果の評価 -

日本原子力研究開発機構 人形峠環境技術センター 環境保全技術開発部 江間 晃,横山 薫^{*},中塚 嘉明,島池 政満,杉杖 典岳

(2008年3月28日 受理)

遠心法ウラン濃縮プラントでは、六フッ化ウラン(UF6)ガスを長期間にわたり供給する。 長期間 UF6 ガスを流通させたウラン濃縮プラントの濃縮機器内で生成される中間フッ化物等 のウラン化合物は、運転終了後もそのまま保持された状態にある。また、ウラン化合物の化学 組成は常温・真空(あるいは N2 封入状態)では固体の中間フッ化物 UFx (4≦x≦5)が主で あると推定されている。この中間フッ化物は、七フッ化ヨウ素(IF7)との反応により、再フ ッ化され、常温では気体の UF6と IF5 が生成される。この反応を利用した系統での除染技術 を確立するために、実プラントに対して、4パターンの異なる処理条件による IF7 処理試験を 実施し、実プラント内に滞留しているウラン化合物の除染試験を行った。実プラント内のウラ ン化合物の除染を効率的に実施するためには、IF7 処理条件と除染特性の関係を解明し、最適 な処理条件を設定する必要がある。そのため、IF7 処理条件と除染特性の関係を解明し、最適 な処理条件を設定する必要がある。そのため、IF7 処理条件と除染特性の関係を解明し、最適 な処理条件を設定する必要がある。そのため、IF7 処理条件と除染特性の関係を解明し、最適 な処理条件を設定する必要がある。そのため、IF7 処理条件を設定する必要がある。そのため、IF7 処理条件を設定する必要がある。そのため、IF7 処理条件の防染結果を、処理時間、除染レベル及 び除染レベルのバラツキの観点からまとめた。この結果、除染期間を短くするためには、IF7 処理条件の「循環処理」が有効であり、除染レベルについては「循環バッチ」が有効である等 の知見を得た。今後は、更に詳細な解析を行い、最適な処理条件の設定について検討を進める。

人形峠環境技術センター:〒708-0698 岡山県苫田郡鏡野町上齋原 1550※技術開発協力員

Technology Development of System Chemical Decontamination Using Iodine Heptafluoride Gas - Evaluation of IF7 Treatment Condition and Uranium Decontamination Result

> Akira EMA, Kaoru YOKOYAMA^{**}, Yoshiaki NAKATSUKA, Masamitsu SHIMAIKE and Noritake SUGITSUE

Environment Research and Development Department Ningyo-toge Environmental Engineering Center Japan Atomic Energy Agency Kagamino-cho, Tomata-gun, Okayama-ken

(Received March 28, 2008)

In the centrifuge method uranium enrichment plant, the UF6 gas is supplied for a long term. The main uranium compounds are estimated to $UFx(4 \le x \le 5)$ in the normal temperature and the vacuum (or filler N2 gas state) after plant operation. This $UFx(4 \le x \le 5)$ is changed to UF6 and IF5 gas again by the reaction with IF7. Using this reaction, the uranium compound in the plant was decontaminated. The IF7 treatment tests were executed to the plant in four treatment conditions. It is necessary to clarify the relation between IF7 treatment condition and decontamination results for the best treatment condition setting. Therefore, the decontamination development is evaluated using the result of the weight measurement of recovered UF6 and IF5 gas, the γ -ray measurement, and the ICP-MS analysis in the IF7 treatment tests. Then the technical knowledge to clarify the decontamination characteristic features is accumulated for analyzing the treatment trend, the treatment time, decontamination level and variation of the decontamination level. As a result, we confirmed "Circulation treatment" is effective for the treatment time and, "Circulation batch treatment" is effective for the decontamination level. Then, we will execute a detailed analysis, and set the best treatment condition.

Keywords: Iodine Heptafluoride Gas, IF7, Treatment, Decontamination

[%] Collaborating Engineer

目 次

1. 序論	- 1
2. IF7 処理条件	- 2
2.1 処理対象と処理設備	- 2
2.2 IF7 処理条件の設定	- 4
3. IF7 処理試験結果	- 6
3.1 IF7 処理前の計測	- 6
3.1.1 γ 線計測条件	- 6
3.1.2 IF7 処理前のウラン分布	- 8
3.2 IF7 処理中の計測	- 8
3.2.1 IF7 処理中の γ 線計測	- 8
3.2.2 IF7 処理状況	- 11
3.3 IF7 処理後の計測	- 12
3.3.1 γ 線計測条件	- 12
3.3.2 IF7 処理後のウラン分布	- 13
3.3.3 難除染機発生状況	- 14
4. 各処理条件での除染特性評価	- 15
4.1 IF7 除染傾向	- 15
4.2 IF7 処理日数	- 15
4.3 除染レベル	- 16
4.4 除染レベルのばらつき	- 17
4.4.1 濃縮機器ごとのばらつき	- 17
4.4.2 分解点検結果	- 18
5. 結論	- 18
参考文献	- 19

付録 1	IF7 処理前のウラン分布状況	 20
付録 2	IF7 除染前ウラン付着量計算方法	 24
付録3	IF7 除染後ウラン付着量計算方法	 28

Contents

1. Introduction	1
2. IF7 treatment condition	2
2.1 Treatment object and facilities	2
2.2 IF7 treatment condition setting	4
3. IF7 treatment test result	6
3.1 Uranium quantity measurement before IF7 treatment	6
3.1.1 γ -ray measurement condition	6
3.1.2 Uranium distribution before IF7 treatment	8
3.2 Uranium quantity measurement during IF7 treatment	8
3.2.1 γ -ray measurement during IF7 treatment	8
3.2.2 IF7 treatment development	11
3.3 Uranium quantity measurement after IF7 treatment	12
3.3.1 γ -ray measurement condition	12
3.3.2 Uranium distribution after IF7 treatment	13
3.3.3 Occurrence of difficult decontamination equipment	14
4. Uranium decontamination characteristic features evaluation for each condition	15
4.1 IF7 treatment trend	15
4.2 IF7 treatment time	15
4.3 Decontamination level	16
4.4 Variation of the decontamination level	17
4.4.1 Variation of the decontamination level for the equipment	17
4.4.2 Decomposition and check result	18
5. Conclusion	18
References	19

Appendix 1 Uranium detailed distribution before IF7 treatment	20
Appendix 2 Uranium quantity computation method before IF7 treatment	24
Appendix 3 Uranium quantity computation method after IF7 treatment	28

表リスト

Table 2.1	IF7 処理条件一覧	29
Table 2.2	カスケード処理条件①の詳細	· 30
Table 2.3	カスケード処理条件②の詳細	30
Table 3.1	IF7 処理前のウラン量	\cdot 31
Table 3.2	各カスケード処理での物質収支結果	-31
Table 3.3	カスケード処理条件①終了後の濃縮機器の分解調査結果	• 31
Table 3.4	IF7 処理後のウラン量	· 31
Table 4.1	IF7 処理日数	32
Table 4.2	濃縮機器の分解調査結果	32
Table A.1	ウラン付着密度	- 32

Table list

Table 2.1	List of IF7 treatment condition	29
Table 2.2	Detail of cascade treatment condition $\textcircled{1}$	30
Table 2.3	Detail of cascade treatment condition $\textcircled{2}$	30
Table 3.1	Uranium quantity before IF7 treatment	31
Table 3.2	Mass balance results for each cascade treatment condition	31
Table 3.3	Decomposition and check result of the equipment	
	decontaminated by cascade treatment condition $\textcircled{1}$	31
Table 3.4	Uranium quantity after IF7 treatment	31
Table 4.1	IF7 treatment time	32
Table 4.2	Decomposition and check result of the equipment	32
Table A.1	Uranium density	32

図リスト

Fig.2.1	濃縮機器概要図	33
Fig.2.2	処理設備概要図	33
Fig.2.3	カスケード構成図	33
Fig.2.4	単流処理	34
Fig.2.5	循環処理	34
Fig.2.6	バッチ処理	34
Fig.3.1	初期ウラン量のカスケード間比較	35
Fig.3.2	カスケード処理条件①	36
Fig.3.3	カスケード処理条件②	37
Fig.3.4	カスケード処理条件③	38
Fig.3.5	カスケード処理条件④	39
Fig.3.6	各カスケードでの混合ガス回収量の推移	40
Fig.3.7	混合ガス回収流量	41
Fig.3.8	「反応生成ガス回収量」と「IF7 ガス反応量」の割合評価	41
Fig.3.9	残留ウラン量のカスケード間比較	42
Fig.3.10	カスケード処理条件①での難除染機測定	43
Fig.3.11	カスケード処理条件③での難除染機測定	44
Fig.4.1	難除染セットを除くウラン分布	45
Fig.4.2	平均ウラン残存量	46
Fig.4.3	チェンバ平均重量濃度	46
Fig.4.4	ケーシング平均重量濃度	46
Fig.4.5	ウラン残存量ヒストグラム	47
Fig.4.6	チェンバ重量濃度ヒストグラム	47
Fig.4.7	ケーシング重量濃度ヒストグラム	47
Fig.A.1	周方向と高さ方向のγ線計数率分布	48
Fig.A.2	濃縮機器下部での γ 線計数率分布 ······	49
Fig.A.3	前面コリメータ有無の場合のγ線計数率比率	50

Figure list

Fig.2.1	Outline drawing of uranium enrichment equipment	33
Fig.2.2	Outline drawing of facilities	33
Fig.2.3	Outline drawing of cascade	33
Fig.2.4	Single current treatment	34
Fig.2.5	Circulation treatment	34
Fig.2.6	Batch treatment	34
Fig.3.1	Comparison of the initial uranium quantity for each cascades	35
Fig.3.2	Cascade treatment condition $$	36
Fig.3.3	Cascade treatment condition $\textcircled{2}$	37
Fig.3.4	Cascade treatment condition ③	38
Fig.3.5	Cascade treatment condition $\textcircled{4}$	39
Fig.3.6	Recovery mixed gas development for each cascades	40
Fig.3.7	Flow rate of Recovery mixed gas	41
Fig.3.8	Ratio estimation of recovered product gas and consumed IF7 gas	41
Fig.3.9	Comparison of the remaining uranium quantity for each cascades	42
Fig.3.10	γ -ray measurement of difficult decontamination equipment	
	for cascade treatment condition $\textcircled{1}$	43
Fig.3.11	γ -ray measurement of difficult decontamination equipment	
	for cascade treatment condition $\textcircled{3}$	44
Fig.4.1	Uranium distribution without the difficult decontamination equipment	45
Fig.4.2	Average remaining uranium quantity	46
Fig.4.3	Chamber average activity concentration	46
Fig.4.4	Casing average activity concentration	46
Fig.4.5	Remaining uranium quantity histogram	47
Fig.4.6	Chamber activity concentration histogram	47
Fig.4.7	Casing activity concentration histogram	47
Fig.A.1	γ -ray count rate distribution for circumferential and height direction	
	of the equipment	48
Fig.A.2	γ -ray count rate distribution at lower part of the equipment	49
Fig.A.3	γ -ray count rate with or without front collimator	50

This is a blank page.

1. 序論

遠心法ウラン濃縮原型プラントは 1989 年~1999 年の間, ウラン濃縮のための役務運転を 行った。¹⁾運転が終了した濃縮プラントの廃止措置では, フッ化ガスによる乾式のプロセス 系統除染(以下, 系統除染)と硫酸による湿式除染を組み合わせて, 主要な機材・部品を クリアランスレベル²⁾まで除染することを基本方針としており, この2つの手法の最適化 を図ることが課題となっている。

しかし,系統除染については,新技術であることから,除染性能に関する知見が報告さ れていない。

このため、ウラン濃縮プラントを供して、4段階(4パターン)の IF7 処理を実施し、 IF7 による系統除染技術の確立、性能、除染特性等に関する知見を整理した。

カスケード処理条件①では、カスケード単位での IF7 ガスによる系統除染に関する知見 がなかったため、γ 線計測結果等から除染の進展状況を随時評価し、除染が進展していな いカスケード段を効果的に除染することを目的に、IF7 ガス供給箇所及び反応生成ガス(IF5 及び UF6) 排気箇所や、処理パターン等を随時変更・再設定しながら実施した。

カスケード処理条件①の結果から、反応生成ガスが濃縮機器底部に滞留し、IF7 ガスと付着ウランの反応を阻害することが推定された。

そのため、カスケード処理条件②では、真空まで排気したカスケードへ IF7 ガスを供給 することを繰り返す「バッチ処理」を採用した。ただし、カスケードに供給した IF7 ガス が全て反応するまでの間は、反応生成ガスをコールドトラップに回収し、未反応 IF7 ガス は再度カスケードに供給する「循環バッチ処理」とした。除染終期の「循環バッチ処理」 では、反応での IF7 ガス消費量が減少し、カスケードが規定圧力まで低下するのに長時間 要するため、除染終期には「バッチ処理」に移行することとした。

更に, IF7 ガス供給箇所及び反応生成ガス排気箇所については, γ 線計測結果等から除 染進展状況を評価し,除染が進展していないカスケード段を効果的に処理することを目的 に, IF7 ガス供給箇所及び反応生成ガス排気箇所の変更・再設定を行った。その結果, IF7 処理に約 160 日を要した。

カスケード処理条件③ではカスケード処理条件②の結果を踏まえ、処理期間の短縮(目 標期間 90 日)及び除染レベル(目標除染レベル:残留ウランの表面密度 3.4×10⁻⁵gU/cm2 以下)を表面汚染密度及び想定クリアランスレベルから具体的に設定し、IF7 処理に関する 工学試験結果を基に、IF7 処理流量一定で圧力を可能な限り高く設定した「循環処理」を行 った。

カスケード処理条件③では、処理試験と平行して、濃縮機器内部の IF7 ガス及び反応生 成ガスの流動解析を行っている。その結果、濃縮機器内の除染の進展には、IF7 ガスと反応 生成ガスの拡散が大きく影響していることが分かってきた。 そこで,カスケード処理条件④では,基本的条件は,カスケード処理条件③と同一とし, IF7 ガスと反応生成ガスの拡散を促進させるため,処理圧力を,反応速度が低下しない範囲 で可能な限り低い値に設定した。また,IF7 処理流量は可能な限り高い流量に設定した。

なお,カスケード処理条件①とカスケード処理条件③の処理終了後には,除染効果を確認するため,それぞれのカスケードから濃縮機器1台の分解調査を行った。

IF7 処理試験を通して,各種の試験データを得ている。IF7 処理前には,除染前のウラン 分布を評価するため,カスケードの多数の濃縮機器について付着ウラン量を推定するため γ線計測を実施した。IF7 処理中には,除染状況を把握するため,UF6 と IF5 の回収重量測 定,カスケードの特定の濃縮機器についてのγ線計測を行った。IF7 処理後には,除染結果 を評価するため,カスケードの多数の濃縮機器についてのγ線計測を実施した。また,濃 縮機器の分解点検機についてはテストピースを採取して,ICP-MS により残留ウランの定量 分析を行った。

これらのデータから,異なる処理条件での除染傾向,処理時間,除染レベル及び除染レ ベルのバラツキを評価し,この結果をもとに,除染特性解明のための知見を整理した。

2. IF7 処理条件

- 2.1 処理対象と処理設備
 - (1) 処理対象

処理対象は、1989 年~1999 年までの間、ウラン濃縮のための役務運転を行った 「遠心法ウラン濃縮原型プラント」とする。

各カスケードは多数台の濃縮機器で構成される。濃縮機器主要部品は、チェンバ、 ケーシング、回転胴であり(Fig. 2.1)、各部位の付着ウランは、運転終了後の保持 状態である常温・真空(あるいは窒素封入状態)では、固体の中間フッ化物 UFX ($4 \leq X \leq 5$)が主であると推定されている。

この中間フッ化物は, IF7 ガスと(2.1)式の反応により,再フッ化され,常温では 気体の UF6 と IF5 が生成される。本技術では,この反応を利用し,系統状態でカス ケード内に滞留している中間フッ化物を主体としたウラン化合物の除染を行う。

$$aUF_x(s) + bIF_7(g) \rightarrow aUF_6(g) + bIF_5(g)$$
 (a, b:モル数) ・・・(2.1)

(2) 処理設備

処理設備は,主に「IF7 発生系」「カスケード系」「コールドトラップ系」「コンプ レッサ系」「排気系」から構成される。概要を Fig. 2.2 に示す。 ①IF7 発生系

IF7 発生系は、「ボンベ槽」「IF7 調整槽」から構成される。ボンベ槽には A 槽, B 槽の 2 系統があり、各々IF7 ガスボンベを最大 4 本装着可能である。

②カスケード系

遠心法ウラン濃縮原型プラントは、複数のカスケードからなる。各カスケード は、濃縮機器から構成される(Fig. 2. 3)。また、段と段の間をバイパスする段間 連絡弁が設置されている(Fig. 2. 2)。

各カスケードへの IF7 ガスの供給及び反応生成ガスの排気は,供給系(フィード ヘッダ),製品系(プロダクトヘッダ),廃品系(テイルヘッダ)により行うが,以下 に示す組み合わせが可能である。

・IF7 ガス供給(供給系)⇒反応生成ガス排気(製品系+廃品系)

- ・IF7 ガス供給(供給系+製品系)⇒反応生成ガス排気(廃品系)
- ・IF7 ガス供給(供給系+廃品系)⇒反応生成ガス排気(製品系)
- ・IF7 ガス供給(製品系)⇒反応生成ガス排気(廃品系)
- ・IF7 ガス供給(廃品系)⇒反応生成ガス排気(製品系)

③コールドトラップ系

コールドトラップ系は、「混合ガスコールドトラップ」「IF7 コールドトラップ」 から構成される。

混合ガスコールドトラップは,カスケードから排気された反応生成ガスである IF5 と UF6 を混合ガスとして回収するための機器である。IF7 コールドトラップは, カスケードから排気された未反応 IF7 ガスを回収するための機器である。

また,混合ガスコールドトラップ下流には,単流ライン・循環ラインを切り替 える弁を設置しており,単流ラインは,混合ガスコールドトラップを通過した未 反応 IF7 ガスを IF7 コールドトラップに回収する場合に使用する。循環ラインは, 混合ガスコールドトラップを通過した未反応 IF7 ガスを循環用コンプレッサで昇 圧し,カスケードに IF7 ガスを再供給する場合に使用する。

IF7 コールドトラップで回収した IF7 ガスは, ボンベ槽の IF7 ボンベ内に回収する。

④コンプレッサ系

コンプレッサ系は、「回収用コンプレッサ」「循環用コンプレッサ」から構成される。回収用コンプレッサは、カスケードから排気される反応生成ガス及び未反応 IF7 ガスを昇圧する機器である。循環用コンプレッサは、循環ラインを使用し、 混合ガスコールドトラップを通過した未反応 IF7 ガスをカスケードに再供給する 場合に IF7 ガスが混合ガスコールドトラップ内に逆流しないような流れを作る機器である。

⑤排気系

排気系は、「捕集排気系」と「パージ系」から構成される。各排気系統は、ケミ カルトラップ (NaF, A1203)、ブースタポンプ (パージ系のみ)、ロータリポンプ の機器からなる。カスケードやボンベ槽等の窒素パージ等に使用する。

- 2.2 IF7 処理条件の設定
 - (1) 処理パターン

カスケード IF7 処理では, IF7 ガス供給箇所及び反応生成ガス排気箇所は異なるものの,「単流処理」,「循環処理」,「バッチ処理」,「循環バッチ処理」の処理パターンの組み合わせにより実施した。以下に,各処理パターンの概要を示す。

①単流処理

Fig.2.4 に示したように,

- カスケード供給弁・排気弁:開
- 混合ガス及び IF7 コールドトラップ: 捕集モード
- 俳気系:運転の状態

で、ボンベ槽から IF7 ガスをカスケードに供給し続ける。カスケードから排気 される反応生成ガスは、混合ガスコールドトラップで回収し、未反応 IF7 ガス は混合ガスコールドトラップを経由し、IF7 コールドトラップで回収する。

②循環処理

Fig. 2.5 に示したように,

- カスケード供給弁・排気弁:開
- 混合ガスコールドトラップ: 捕集モード

の状態で、ボンベ槽から IF7 ガスをカスケードに供給し続ける。カスケードから排気される反応生成ガスは、混合ガスコールドトラップで回収し、未反応 IF7 ガスは混合ガスコールドトラップを経由し、循環コンプレッサでカスケードに再供給する。

③バッチ処理

Fig. 2.6 に示したように,所定圧力までカスケード排気後,

○ カスケード排気弁:閉

の状態で、ボンベ槽から所定圧力となるまで IF7 ガスをカスケードに供給する。 その後、

○ IF7 ガス供給:停止

○ カスケード排気弁:開

○ 混合ガス及び IF7 コールドトラップ: 捕集モード

とし、カスケード排気を行う。カスケードから排気される反応生成ガスは、混合ガスコールドトラップで回収し、未反応 IF7 ガスは混合ガスコールドトラッ プを経由し、IF7 コールドトラップで回収する。バッチ処理ではこの作業を繰り 返す。

④循環バッチ

所定圧力までカスケード排気後,

○ カスケード排気口:閉

の状態で,ボンベ槽から所定圧力となるまで IF7 ガスをカスケードに供給する。 その後,

- IF7 ガス供給:停止
- カスケード排気弁:開

○ 混合ガス及び IF7 コールドトラップ: 捕集モード

とし、カスケード排気を行う。カスケードから排気される反応生成ガスは、混 合ガスコールドトラップで回収し、未反応 IF7 ガスは混合ガスコールドトラップ を経由し、循環コンプレッサでカスケードに再供給する。そして、IF7 ガスが付着 ウランとの反応で消費され、カスケードが所定圧力まで低下するまで、IF7 ガスの 循環を継続する。循環バッチ処理ではこの作業を繰り返す。

(2) IF7 処理条件

カスケード IF7 処理は, Table 2.1 に示す処理条件を設定し, カスケード単位で実施する。

3. IF7 処理試験結果

カスケード単位で処理条件①~④にしたがって IF7 処理を実施した。以下に IF7 処理状 況を示す。最初に IF7 処理前のウラン分布状態を評価する。 γ 線計測データを用いて IF7 処理前のウラン分布を評価した結果について示す。次に IF7 処理状況経緯を示す。ここで は、 γ 線計測データによる濃縮機器の個別の除染状況の推移と、UF6 と IF5 の回収重量測定 による全体の混合ガス回収量の推移を示す。なお、 γ 線計測データによる濃縮機器の除染 状況の推移より、濃縮機器は上部から下部に向けて除染されることがわかった。最後に IF7 処理後のウラン分布状態を評価する。 γ 線計測データを用いて IF7 処理後のウラン分布を 評価した結果について示す。なお、濃縮機器は上部から下部に向けて除染されるため、IF7 処理後の評価では、濃縮機器の下部の γ 線計測のみを行い、濃縮機器のウラン量を計算し た。

3.1 IF7 処理前の計測

各カスケードについて, IF7 ガスによる濃縮機器内部のウラン付着物除去実施前の濃縮機 器内部のウラン付着物量を把握するため, IF7 ガス供給前 γ 線測定を行った。以下に各カ スケードについての γ 線計測条件, 及び γ 線計測結果から評価した IF7 処理前のウラン 分布を示す。

3.1.1 y 線計測条件

IF7 ガスによる濃縮機器内部のウラン付着物除去実施前の濃縮機器内部のウラン付着物 量を把握するため, IF7 ガス供給前 γ 線測定を行った。γ線測定は,測定位置の特徴から ウラン量を評価しやすい位置で実施した。測定位置の特徴は「付録 1」に示す。

(1) カスケード処理条件①

測定装置の構成は次のとおりである。

Ge 検出器モデル	EG&G ORTEC GLP-25325/10-P
Ge 結晶のタイプ	高純度ゲルマニウム (HPGe), プレナ型

γ 線測定の測定条件を以下に示す。

①測定位置

要素機真横

②測定高さ

濃縮機器高さの13,16,31,45,63%位置

③測定時間

製品段:2000秒, 廃品段:3000秒

(2) カスケード処理条件②

測定装置の構成は次のとおりである。

Ge 検出器モデル	EG&G ORTEC GEM-30185-S
Ge 結晶のタイプ	高純度ゲルマニウム (HPGe), 同軸型

y 線測定の測定条件を以下に示す。

①測定位置

要素機真横

②測定高さ

濃縮機器高さの13, 16, 21, 45, 63%位置③測定時間

製品段:2000秒, 廃品段:3000秒

(3) カスケード処理条件③

測定装置の構成は次のとおりである。

Ge 検出器モデル	EG&G ORTEC GEM-60P-X
Ge 結晶のタイプ	高純度ゲルマニウム (HPGe), 同軸型

γ 線測定の測定条件を以下に示す。

①測定位置

要素機真横

②測定高さ

濃縮機器高さの13, 17, 31, 58, 85%位置

③測定時間

製品段:2000秒, 廃品段:3000秒

(4) カスケード処理条件④

測定装置の構成は次のとおりである。

Ge 検出器モデル	EG&G ORTEC GEM-60P-X
Ge 結晶のタイプ	高純度ゲルマニウム (HPGe), 同軸型

γ 線測定の測定条件を以下に示す。

①測定位置

要素機真横

②測定高さ

濃縮機器高さの13,17,31,58,85%位置

③測定時間

製品段:2000秒, 廃品段:3000秒

3.1.2 IF7 処理前のウラン分布

Ge 検出器を用いて実施した各カスケード濃縮機器の y 線計数率からウラン量を計算する。 計測データのうち, U235 から放射されるエネルギー186keV と U238 (Pa234m) から放射され るエネルギー1001keV の y 線量から滞留ウラン量を計算する。計算方法は「付録 2」に示 す。ウラン付着量の平均,上限,下限を Table 3.1 に示す。また,ウラン量の分布を Fig. 3.1 に示す。

IF7 処理前のウラン分布は、カスケードによる差は見られず、ほぼ同様の分布だった。また、カスケード内の濃縮機器内のウラン付着量は P→F→T の順に増加している傾向が見られた。

3.2 IF7 処理中の計測

IF7 処理状況経緯では、γ線計測データによる濃縮機器の個別の除染状況の推移と、UF6 と IF5 の回収重量測定による全体の混合ガス回収量の推移を示す。

3.2.1 IF7 処理中の y 線計測

除染状況を把握するため,カスケードの特定の濃縮機器について y 線計測を行った。以下に, y 線計測条件と y 線計数率変化状況を示す。

3.2.1.1 y 線計測条件

各カスケードについて, γ線計測条件を示す。

(1) カスケード処理条件①

測定装置の構成は次のとおりである。

Ge 検出器モデル	EG&G ORTEC GLP-25325/10-P
Ge 結晶のタイプ	高純度ゲルマニウム (HPGe), プレナ型

γ線測定の測定条件を以下に示す。

①測定位置

要素機真横

②測定高さ

濃縮機器高さの13,16,31,45,63%位置

③測定時間

製品段:2000秒, 廃品段:3000秒

(2) カスケード処理条件②

測定装置の構成は次のとおりである。

Ge 検出器モデル	EG&G ORTEC GEM-30185-S
Ge 結晶のタイプ	高純度ゲルマニウム (HPGe), 同軸型

y 線測定の測定条件を以下に示す。

①測定位置

要素機真横

②測定高さ

濃縮機器高さの13, 16, 21, 45, 63%位置

③測定時間

製品段:2000秒, 廃品段:3000秒

(3) カスケード処理条件③

測定装置の構成は次のとおりである。

Ge 検出器モデル	EG&G ORTEC GEM-60P-X
Ge 結晶のタイプ	高純度ゲルマニウム (HPGe), 同軸型

γ 線測定の測定条件を以下に示す。

①測定位置

要素機真横

②測定高さ

濃縮機器高さの13,17,31,58,85%位置

③測定時間

製品段:2000秒, 廃品段:3000秒

(4) カスケード処理条件④

測定装置の構成は次のとおりである。

Ge 検出器モデル	EG&G ORTEC GEM-60P-X
Ge 結晶のタイプ	高純度ゲルマニウム (HPGe), 同軸型

γ 線測定の測定条件を以下に示す。

①測定位置

要素機真横

②測定高さ

濃縮機器高さの13, 17, 31, 58, 85%位置

③測定時間

製品段:2000秒, 廃品段:3000秒

3.2.1.2 y 線計数率変化状況

各カスケードについて、γ線計数率変化状況を示す。

(1) カスケード処理条件①

カスケード処理条件①については、IF7 除染中の γ 線計測を Table 2.2 に示した 処理のタイミングで実施した。 γ 線計測結果は Fig. 3.2 に示す。

(2) カスケード処理条件②

カスケード処理条件②については, IF7 除染中の γ 線計測を Table 2.3 に示した 処理のタイミングで実施した。ただし,除染経過を観察するために同じ処理期間中に 複数回計測を実施している場合もある。γ 線計測結果は Fig. 3.3 に示す。

(3) カスケード処理条件③

カスケード処理条件③については、IF7 除染中の γ 線計測を混合ガスの回収量ご とに実施した。 γ 線計測結果は Fig. 3.4 に示す。

(4) カスケード処理条件④

カスケード処理条件④については, IF7 除染中の γ 線計測を連続的に実施した。(測 定タイミングは IF7 処理開始時点からの経過時間で表す。) γ 線計測結果は Fig. 3.5 に示す。

(5) ウラン付着物除染状況

γ 線計測結果から、カスケード処理条件①~④の全てについて、濃縮機器上部から除染が進み、除染領域が下方へ広がっていくことがわかる。したがって、濃縮機器の下部が最後に除染されるため、濃縮機器の下部をγ線計測することで、ウラン付着物の除染が濃縮機器全体にわたって行われたかどうかを判断することができる。

- 3.2.2 IF7 処理状況
 - (1) 混合ガス回収量の時間推移

IF7 処理時の混合ガス回収量の時間推移として,各処理条件①~④での混合ガス回収量を Fig. 3.6 に示す。

この結果から, IF7 と付着ウランの反応が終息したと考えられる, 混合ガス回収量 の増加率がゼロとなる経過時間は, カスケード処理条件②が最も長く, カスケード 処理条件①, ③, ④の順で短くなっている。なお, この図では, 以下の 2 点につい て留意する必要がある。

○カスケード処理条件③での IF7 処理では,経過時間約 60 日時点で,混合ガス回収 量の減少が見られる。これは,混合ガスコールドトラップに捕集された IF7 ガスの 抜取り操作を行ったためである。

○カスケード処理条件④での IF7 処理では,経過時間約 20 日時点で,混合ガス回収 量の増加率がゼロ近傍になっている。これは, IF7 ボンベ交換に伴い, IF7 の供給を 一時的に中断したためである。

(2) IF7 処理の終了条件

IF7 処理は、それぞれ混合ガス回収流量がほぼ零であることを終了条件とし終了した。(Fig. 3. 7)

(3) 物質収支から見た IF7 処理反応モデルの妥当性

IF7 供給量及び混合ガス回収量等の物質収支から,前述した(2.1)式の IF7 処理反応モデルの妥当性について評価した。

(2.1)式で、UFx を UF4³⁾ と仮定すると、重量比で、IF7 を 1 供給すると、IF5+UF6 の混合ガスが 2.2 回収される。このことを確認するため、Table 3.2 に示した「総 IF7 供給量」「未反応 IF7 回収量」「総混合ガス回収量」のデータを使用して、IF7 処理終 了時点での「反応生成ガス総回収量」と「IF7 ガス総反応量(=IF7 ガス総発生量-未反応 IF7 ガス総回収量)」の比率を算出した結果を Fig. 3.8 に示す。

この結果から,カスケード処理条件①,②,④については,反応式から求められる 混合ガス/IF7 重量比である 2.2 と一致した値を示していることから,中間フッ化物の 組成を UF4 とし,(2.1)式に示した反応が生じているものと考えてよい。一方,カス ケード処理条件③については,この値が 2.2 よりも小さい方向にずれている。このこ とから, IF7 が(2.1)式の反応以外で消費されていることが推定される。 3.3 IF7 処理後の計測

IF7 処理後のウラン残留量を評価するため,多数台濃縮機器を対象とした γ 線測定を実施した。濃縮機器は上部から下部に向けて除染されるため,濃縮機器の下部のγ線計測を行い,濃縮機器のウラン量を計算する。以下に,γ 線計測条件,IF7 処理後のウラン分布を示す。また,カスケード処理条件①と③については,未除染領域が残っている濃縮機器(以下,「難除染機」と記す。)が存在した。難除染機での γ 線計測結果についても説明する。

3.3.1 γ 線計測条件

(1) カスケード処理条件①

測定装置の構成は次のとおりである。

Ge 検出器モデル	EG&G ORTEC GEM-60P-X , GEM-30185-S
Ge 結晶のタイプ	高純度ゲルマニウム (HPGe), 同軸型

γ 線測定の測定条件を以下に示す。

①測定位置

要素機真横

②測定高さ

濃縮機器高さの13%位置

③測定時間

5000秒

(2) カスケード処理条件②

測定装置の構成は次のとおりである。

Ge 検出器モデル	EG&G ORTEC GEM-30185-S
Ge 結晶のタイプ	高純度ゲルマニウム (HPGe), 同軸型

γ 線測定の測定条件を以下に示す。

①測定位置

```
要素機真横
```

②測定高さ

濃縮機器高さの13%位置

③測定時間

5000秒

(3) カスケード処理条件③

測定装置の構成は次のとおりである。

Ge 検出器モデル	EG&G ORTEC GEM-60P-X
Ge 結晶のタイプ	高純度ゲルマニウム (HPGe), 同軸型

γ 線測定の測定条件を以下に示す。

①測定位置

要素機真横

②測定高さ

濃縮機器高さの13%位置

③測定時間

5000秒

(4) カスケード処理条件④

測定装置の構成は次のとおりである。

Ge 検出器モデル	EG&G ORTEC GEM-60P-X
Ge 結晶のタイプ	高純度ゲルマニウム (HPGe), 同軸型

γ 線測定の測定条件を以下に示す。

①測定位置

要素機真横

②測定高さ

濃縮機器高さの13%位置

③測定時間

5000秒

3.3.2 IF7 処理後のウラン分布

除染が終了した濃縮機器について,濃縮機器高さの13%位置での γ 線量が,濃縮機器高 さ方向・周方向の全ての位置に適用できるものとして,濃縮機器 1 台あたりの残留ウラン 量を計算する。このとき,IF7 処理後のウラン付着部位ごとのウラン付着比率が必要になる。 ウラン付着比率が必要な部位は,回転胴内側,ケーシング内面,ケーシング外面,チェン バ内面である。

各部位のウラン付着比率は、カスケード処理条件①の濃縮機器1台の健全機に対する分 解調査結果から得られた値を用いる。この値をカスケード処理条件①~④の全てに適用し、 ウラン分布を評価する。分解調査結果をTable 3.3 に示す。Table 3.3 のウラン付着比率は 付着密度にチェンバ・ケーシングの表面積を乗じて、その量の比を計算したものである。 IF7 処理後のウラン付着量の計算方法については「付録 3」に示す。IF7 処理後のウラン 付着量の平均を Table 3.4 に示す。また,ウラン量の分布を Fig. 3.9 に示す。

この結果から、IF7処理後の付着ウランの分布には以下のような特徴が見られる。

○濃縮機器単位での平均残留ウラン量は 0.09kg から 0.18kg。

○IF7 処理条件単位での付着ウラン除去率は 96%から 99%。

3.3.3 難除染機発生状況

濃縮機器高さの13%位置での y 線分布から難除染機が数台発生したことがわかった。難除染機については,詳細な y 線計測を実施した。以下に, y 線計測条件と y 線計数率分布 状況を示す。

3.3.3.1 y 線計測条件

(1) カスケード処理条件①

測定装置の構成は次のとおりである。

Ge 検出器モデル	EG&G ORTEC GEM-60P-X
Ge 結晶のタイプ	高純度ゲルマニウム (HPGe), 同軸型

測定箇所を以下に示す。

	測定位置
排気口近接	濃縮機器高さの13,21%位置
排気口遠方	濃縮機器高さの13,21%位置

	測定位置
排気口近接	濃縮機器高さの13,21,51,68,85%位置
排気口遠方	濃縮機器高さの13,21,51,68,85%位置
排気口近接	濃縮機器高さの21%位置
排気口遠方	濃縮機器高さの21%位置
中間点(8 点)	濃縮機器高さの 21%位置

(2) カスケード処理条件③

測定装置の構成は次のとおりである。

Ge 検出器モデル	EG&G ORTEC GEM-60P-X
Ge 結晶のタイプ	高純度ゲルマニウム (HPGe), 同軸型

測定箇所を以下に示す。

	測定位置			
排気口近接	濃縮機器高さの13,21,31,51,68,85%位置			
排気口遠方	濃縮機器高さの13,21,31,51,68,85%位置			
排気口近接	濃縮機器高さの21%位置			
排気口遠方	濃縮機器高さの 21%位置			

	測定位置				
排気口近接	濃縮機器高さの13,21,31,51,68,85%位置				
排気口遠方	濃縮機器高さの13,21,31,51,68,85%位置				
中間点(2 点)	濃縮機器高さの13,21,31,51,68,85%位置				
排気口近接	濃縮機器高さの21%位置				
排気口遠方	濃縮機器高さの 21%位置				
中間点(2 点)	濃縮機器高さの 21%位置				

3.3.3.2 y 線計数率分布状況

難除染機の γ 線分布を Fig. 3. 10 と Fig. 3. 11 に示す。この結果から,廃品配管に近い側 で残留ウランが少なく,廃品配管から遠い側で残留ウランが多い傾向があることがわかる。 なお,難除染機についても, IF7 除染前に比較すると γ 線計数率がわずかに減少してい る。

4. 各処理条件での除染特性評価

異なる処理条件での IF7 処理の実施結果として IF7 除染傾向, IF7 処理日数, 除染レベル, 除染レベルのばらつきについて整理する。

4.1 IF7 除染傾向

γ線計測データから評価した濃縮機器の除染状況の推移より,濃縮機器は上部から下部 に向けて除染されることがわかった。この結果は,濃縮機器内でのガスの流動を考えると IF7 ガスの広がりは拡散が支配的になっていることを示唆している。

4.2 IF7 処理日数

各処理条件で要した IF7 処理日数を Table 4.1 に示す。本処理日数は、処理中断期間及 びカスケード排気期間を省いた期間である。 4.3 除染レベル

IF7 処理条件に応じて, IF7 処理後の除染レベルにどのような特徴が見られるか評価する。 このとき、ウラン残存量についての評価と重量濃度についての評価を行う。

(1) ウラン量評価

IF7 処理条件に応じて分布する IF7 処理後のウラン残存量の平均値を計算する。ただし, IF7 処理条件によって難除染機が発生している。難除染機は IF7 処理時間が長くなれば,除染される可能性がある。したがって,Fig. 3.9 に示した IF7 処理後のウラン分布から,難除染機を除いて除染レベルを計算する。

難除染機を除いたウラン分布を Fig. 4.1 に示す。各カスケードについて残存ウラン量の平均を計算する。また、それぞれのカスケードについて標準偏差を計算する。 残存ウラン量の平均と平均±1 σ を Fig. 4.2 に示す。

(2) 重量濃度評価

IF7 処理条件に応じて分布する IF7 処理後のウラン残存量からチェンバ及びケーシングでの重量濃度の平均を評価する。Fig. 4.1 に示した難除染機を除いたウラン分布から、チェンバ及びケーシングでの重量濃度を計算する。

Fig. 4.1 に示したウラン分布は、チェンバ、ケーシング、回転胴に付着したウラン 量の総和である。チェンバ及びケーシングでの重量濃度を計算するため、Fig. 4.1 に 示したウラン量から回転胴に付着したウラン量を差し引き、チェンバとケーシング へのウラン付着量を計算する。

回転胴に付着したウラン量は Table 3.3 に示した分解・点検結果から求められた 付着密度より計算したウラン付着量を全回転胴に適用した。したがって, Fig. 4.1 に 示したウラン量から,全回転胴に適用したウラン付着量を差し引き, Table 3.3 に示 したチェンバとケーシングへのウラン付着比率でウラン付着量を分けることでチェ ンバとケーシングへのウラン付着量を計算する。この値と比放射能,チェンバ・ケ ーシングの重量から重量濃度を計算する。

チェンバ及びケーシングでの重量濃度の平均と平均±1 σ を Fig. 4.3 と Fig. 4.4 に示す。

(3) 除染レベル分布状況

ウラン残存量の平均値が1番小さい処理条件はカスケード処理条件②で、標準偏 差も最も小さいことがわかる。これは、除染結果に濃縮機器による差があまりなか ったことを示している。ウラン残存量の平均値が1番大きい処理条件はカスケード 処理条件③で、標準偏差も最も大きいことがわかる。これは、除染結果で濃縮機器 による差が大きかったことを示している。

重量濃度の平均値についても、ウラン残存量の平均値と同様であるが、標準偏差 については、カスケード処理条件③の標準偏差よりもカスケード処理条件①と④の 方が大きいという結果になっている。これは、Fig. 4.1 に示した残留ウラン分布で、 カスケード処理条件③では比放射能の小さい廃品段に残存ウラン量の大きい濃縮機 器が集中して発生し、カスケード処理条件①と④については、比放射能の大きい製 品段や供給段に残存ウラン量の大きい濃縮機器が発生したことによると推定できる。

4.4 除染レベルのばらつき

γ線計測結果から評価した濃縮機器内のウラン残存量についてのばらつきと分解点検に よって評価した濃縮機器部位間のばらつきを示す。

4.4.1 濃縮機器ごとのばらつき

IF7 処理条件に応じて, IF7 処理後の除染レベルのばらつきにどのような特徴が見られる か評価する。このとき,ウラン残存量についての評価と重量濃度についての評価を行う。

(1) ウラン残存量評価

IF7 処理条件に応じて分布する IF7 処理後のウラン残存量のばらつきを評価する。 ただし, IF7 処理条件によって発生している難除染機は除いて評価する。各処理条件 でのウラン残存量ヒストグラムを Fig. 4.5 に示す。

(2) 重量濃度評価

IF7 処理条件に応じて分布する IF7 処理後の重量濃度のばらつきを評価する。その ため、ウラン残存量からチェンバ及びケーシングでの重量濃度を計算し、チェンバ、 ケーシングごとに IF7 処理後の重量濃度のばらつきを評価する。ただし、IF7 処理条 件によって発生している難除染機は除いて評価する。各カスケードについての重量 濃度ヒストグラムを Fig. 4.6 と Fig. 4.7 に示す。

(3) 除染レベルのばらつき分布状況

ウラン残存量ヒストグラムは、カスケード処理条件①、②、④の分布ピークが重 なり、カスケード処理条件③の分布ピークが大きい側にシフトしていることがわか る。したがって、分布ピークのみを考えると、カスケード処理条件①、②、④の除 染レベルは同等と考えられる。ただし、カスケード処理条件①と④では、残存ウラ ン量の大きい濃縮機器が発生していることから、カスケード全体の平均では、 Fig. 4.2 に示したような差が出てくる。

重量濃度ヒストグラムについても、ウラン残存量ヒストグラムと同様であるが、 カスケード処理条件①と④については、Fig. 4.1 に示した残留ウラン分布で、比放射 能の大きい製品段や供給段に残存ウラン量の大きい濃縮機器が発生したことにより、 分布ピークがわずかに大きい側にシフトしていることがわかる。 4.4.2 分解点検結果

カスケード処理条件①の濃縮機器1台及びカスケード処理条件③の濃縮機器1台の分解 調査結果をTable 4.2に示す。

この結果,どちらの濃縮機器も,濃縮機器部位間でばらつきが発生しており,最もレベルが高い部位がチェンバ円筒,最もレベルが低い部位がチェンバ上板であることが確認された。

5. 結論

カスケード処理条件①では、除染傾向などのデータが得られたが、単流処理、循環処理、 バッチ処理など様々な方法を実施したため、処理条件と処理結果の評価が難しい。そのた め、処理条件が一貫しているカスケード処理条件②~④について、処理条件と処理結果の 関係を評価する。

(1) 現象論的知見

○除染の進展

除染傾向の結果から, IF7 ガスによるカスケード規模での系統除染処理では, 濃縮機器 の除染は上部から下部に向けて進むことがわかった。これは, IF7 ガスの出入口が濃縮機 器の上部にあり, IF7 ガスが拡散によって下部の領域に徐々に広がっていくことを示して いる。

○除染期間

除染期間はカスケード処理条件③と④で実施した「循環処理」がカスケード処理条件 ②の「循環バッチ」に比較して短時間で終了した。また、カスケード処理条件③と④を比 較すると、圧力はカスケード処理条件③で36~59hPa、カスケード処理条件④で21~30hPa であり、圧力の低い処理条件の方の除染期間が短かった。このことからも、IF7 ガスによ るカスケード規模での系統除染処理では、ガスの拡散速度が除染期間に影響していること がわかる。

○除染レベル

除染レベルについては、カスケード処理条件②と④でよい結果が得られた。これは、 カスケード処理条件②では「循環バッチ」の結果, IF7 ガスと反応して発生した混合ガス (IF5, UF6)が長時間にわたり濃縮機器内部にとどまることなく排気され、ウラン化合物 の付着面での反応が進行しやすかったことが要因と考えられる。また、カスケード処理条 件④では除染期間が短かったため、混合ガス(IF5, UF6)が長時間にわたり濃縮機器内部 にとどまらず、ウラン化合物の付着面での反応が進行しやすかったことが要因と考えられ る。 ○除染レベルのばらつき

除染レベルのばらつきについても、カスケード処理条件②が最もよい結果になった。 これは、IF7 供給口変更を行ったことにより、IF7 ガス流量や濃度が IF7 処理期間の中で 平均化されたことが要因と考えられる。一方、カスケード処理条件④でカスケード処理条 件②よりもばらつきが大きくなったのは、IF7 供給口を固定したため、カスケード内を流 れる IF7 の流量や濃度に分布が生じたためと推定される。

(2) 今後の課題

本試験を通じて,除染期間を短くするためには,「循環処理」が有効であることがわかった。また,除染レベルについては「循環バッチ」が有効であることがわかった。しかし,「循環処理」であっても圧力などの処理条件を最適化することによって「循環バッチ」と同等な除染レベルを達成することが可能と考える。

このために、今後、以下の点について、更に詳細な解析を行う計画である。

○濃縮機器内部での IF7 ガス及び反応生成ガスの拡散に着目した解析

○IF7 ガスと中間フッ化物の反応面における分子挙動

○カスケード内における多成分ガスの流動解析

参考文献

1) 杉杖 典岳:"ウラン濃縮原型プラントの目的と運転実績", サイクル機構技報, No.10 別 冊 2001.3, p.3-10 (2001)

2) International Atomic Energy Agency, "Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance", Safety Guide No.RS-G-1.7 (2004)

3) 門 一実:"ウラン濃縮原型プラントにおける技術の実証", サイクル機構技報, No.10 別 冊 2001.3, p.11-24 (2001)

付録1 IF7 処理前のウラン分布状況

濃縮機器ではその構造上、ウラン滞留物が複数の領域(主に、チェンバ内面、ケーシング外面、回転胴内面)に存在することになる。このような状況のため、ウラン滞留量を推定するために、γ線計測値を解析して、ウラン滞留物の存在領域を分離しなければならない。それと同時に、そのウラン滞留量の定量化を行なわなければならない。このため、濃縮機器の各領域に存在するウラン滞留物から放射されるγ線量のシミュレーションを行い、γ線量の実測値と比較することでウラン滞留物の存在領域の分離とウラン滞留量の定量化を行なうことができる計算モデルを検討することが必要である。

ウラン滞留量の定量化を行なうための計算モデルを検討するために, Ge 検出器を用い, 濃縮機器の γ 線計測を行った。この結果をもとにウラン分布状況を評価する。

(1) チェンバ・ケーシングでのウラン分布

チェンバ及びケーシングでのウラン分布を評価するため,濃縮機器を周方向と高 さ方向に測定した。γ線計測は以下の条件で実施した。

Ge 検出器モデル	EG&G ORTEC GEM-30185-S
Ge 結晶のタイプ	高純度ゲルマニウム (HPGe), 同軸型

①周方向

	計測位置	•	•	•	ケーシング間
	計測範囲	•	•	•	周全体の 75%(270°)
	計測高さ	•	•	•	濃縮機器高さの 30%位置
2)高さ方向				
	計測位置	•	•	•	ケーシング真横
	計測範囲	•	•	•	濃縮機器高さの 15~45% 位置

周方向の計測はケーシング間で行ったため、Ge 検出器の方向が回転胴から外れ回 転胴の影響が小さくなるため、γ線計測結果からチェンバとケーシングでのウラン 分布が推定できる。高さ方向の計測では、γ線計測結果からチェンバとケーシング でのウラン分布と回転胴内面のウラン分布が合わさった分布が推定できる。

γ 線計測方法と γ 線計測結果を Fig. A.1 に示す。γ 線計測結果から,測定した 範囲ではほぼ均一の γ 線計数率が得られることがわかる。したがって,チェンバと ケーシングでウランがそれぞれの密度でほぼ均一に分布していると推定できる。ま た,回転胴内面は濃縮機器高さの 15%以上については,ウランがほぼ均一に分布し ていると推定できる。 (2) 回転胴内面でのウラン分布

回転胴内面のウラン分布は, Fig. A.1 の結果から,回転胴上部(濃縮機器高さの15% 以上)については,ほぼ均一であると推定できる。一方,回転胴下部でのウラン分布 を評価するため,濃縮機器を高さ方向に計測した。y線計測は以下の条件で実施した。

Ge 検出器モデル	EG&G ORTEC GEM-30185-S
Ge 結晶のタイプ	高純度ゲルマニウム (HPGe), 同軸型

①高さ方向

計測位置・・・ケーシング真横

計測範囲・・・濃縮機器高さの13~20%位置

濃縮機器下部では、ケーシングの厚みが大きくなるため、その影響が加わった γ 線 分布が計測される。

γ線計測方法と γ線計測結果を Fig. A. 2 に示す。γ線計測結果から,回転胴上部 ではウランがほぼ一定の密度で分布していると推定できる。回転胴下部ではケーシン グの厚みの影響を受けるため,回転胴下部でのウラン付着密度はγ線計数率のみでは 評価できない。そのため,回転胴下部では回転胴上部とは別個に,ある密度でウラン が分布していると推定する。

(3) チェンバ・ケーシングでのウラン分布比率

濃縮機器に対する y 線計測結果からウラン分布状況を推定した。その結果, チェン バとケーシングでウランがそれぞれの密度でほぼ均一に分布していると評価した。ま た,回転胴内部では,回転胴上部でウランがほぼ一定の密度で分布していると評価し た。また,回転胴下部には,回転胴上部とは別個に,ある密度でウランが分布してい ると推定した。

チェンバとケーシングについては,濃縮機器が異なってもUF6ガス雰囲気に大き な違いはないためウラン付着状況(ウラン分布比率)にも大きな違いはないと推定で きる。一方,回転胴内面については,濃縮機器によって,運転状態に差があるため, ウラン付着状況にも差ができると推定できる。

ウラン付着量を計算する場合,チェンバ,ケーシング,回転胴上部,回転胴下部を 全て評価すると,長時間のγ線計測が必要なため,ウラン付着状況(ウラン分布比率) に大きな違いはないと推定されるチェンバとケーシングのウラン付着量計算ではウラ ン付着状況(ウラン分布比率)を固定したモデルを用いる。

チェンバとケーシングでのウラン分布比率を評価するため、コリメータを利用した 計測を行なう。以下に、コリメータを使った計測を行なうことで、γ 線計測結果にど のような特徴が表れるかを示す。

このため,前面コリメータを使用した場合と使用しない場合の y 線計測結果の差を 考察する。まず,チェンバとケーシングからの y 線計数率を次のように定義する。

a 1	チェンバからの γ 線計数率	(前面コリメータ未使用)
\mathbf{a}_2	チェンバからの γ 線計数率	(前面コリメータ使用)
b 1	ケーシング 1,2 からの γ 線計数率	(前面コリメータ未使用)
b_2	ケーシング 1,2 からの γ 線計数率	(前面コリメータ使用)
G_1	γ 線計数率の実測値	(前面コリメータ未使用)
G_2	γ 線計数率の実測値	(前面コリメータ使用)

このとき、これらの γ 線計数率の比率には(A.1)式のような関係がある。

 $\frac{\mathbf{a}_2}{\mathbf{a}_1} \leq \frac{\mathbf{G}_2}{\mathbf{G}_1} \leq \frac{\mathbf{b}_2}{\mathbf{b}_1} \quad \cdot \quad \cdot \quad (A. 1)$

この比率がチェンバとケーシングでのウラン付着量の比率に対応している。そのた め、この比率の値を y 線計測により求める必要がある。なお、チェンバとケーシング でできる y 線計数率の比率の違いは、チェンバとケーシングの曲率の違いと位置関係 から生じている。コリメータを用いた y 線計測は以下の条件で実施した。

Ge 検出器モデル	EG&G ORTEC GEM-30185-S
Ge 結晶のタイプ	高純度ゲルマニウム (HPGe), 同軸型

①コリメータ計測

計測位置・・・ケーシング間
 計測高さ・・・濃縮機器高さの 30%位置
 前面コリメータ・・・30 φ 穴コリメータ

 γ 線計数率実測値 (G₁, G₂) 比率の分布を Fig. A. 3 に示す。 γ 線計数率実測値 (G₁, G₂) 比率の平均値 R_{30 ϕ} は、30 ϕ 穴前面コリメータの場合、R_{30 ϕ} = 0.162 である。 γ 線計数率実測値比率の平均値 R_{30 ϕ} = 0.162 を用いてチェンバとケーシングでのウラン付着量を計算する。 γ 線計数率 (a1, a2, b1, b2, G1, G2) の定義に加え、チェンバとケーシングのウラン付着量を次のように定義する。

X_1 , X_2	ケーシング1,2のウラン付着量
Yc	チェンバのウラン付着量

チェンバとケーシングのウラン付着量は、(A.2)式で計算できる。

$$Y_{C} = \frac{\frac{G_{1}}{a_{1}} - \frac{G_{2}}{a_{2}}}{\frac{b_{1}}{a_{1}} - \frac{b_{2}}{a_{2}}} \qquad X_{1} + X_{2} = \frac{\frac{G_{1}}{a_{1}} - \frac{G_{2}}{a_{2}}}{\frac{b_{1}}{a_{1}} - \frac{b_{2}}{b_{1}}} \quad \cdot \quad \cdot \quad (A. 2)$$

このとき、a1、a2、b1、b2 の値はMCNPコードから計算する。チェンバとケーシ ングのウラン付着密度の計算結果をTable A.1に示す。Table A.1のウラン付着比率は、 付着密度にチェンバ・ケーシングの表面積を乗じて、その比を計算したものである。

(4) ウラン付着量評価のための計測方法

濃縮機器については、測定高さによって測定される γ 線の主な放射箇所が異なる。各部 位でのウラン付着量を計算するためには、 γ 線測定高さを変化させ、放射箇所を特定する ことが必要である。IF7 処理時に実施する γ 線計測高さは Ge 検出器の形状の関係もあり、 濃縮機器下部では、濃縮機器高さの 13, 16, 21%位置または 13, 17, 31%位置、濃縮機器 上部では、濃縮機器高さの 45, 63%位置または 58, 85%位置となる。以下にそれぞれの測 定位置の特徴を示す。

濃縮機器高さの13%位置

ケーシングが分厚くなっている箇所のため,回転胴内部の影響が少なくチェンバとケー シングに付着したウランからの γ 線を主に測定できる。

②濃縮機器高さの16%位置または17%位置

チェンバとケーシングに付着したウランからの γ 線に加え,回転胴下部のウランからの γ 線が主に測定できる。

③濃縮機器高さの21%位置または31%位置

チェンバとケーシングに付着したウランからの γ 線に加え,回転胴側面のウランからの γ 線が主に測定できる。この高さでは,回転胴下部のウランからの γ 線の寄与は小さくな る。

(ただし,このような測定から γ 線の放射位置を推定できるのは,U235 から放射される 186keVの γ 線を評価した場合である。)

このような測定を行うことで、回転胴の内部(回転胴上部と回転胴下部)のウラン付着 量とチェンバとケーシングに分布しているウラン付着量のバランスが推定できる。また、 濃縮機器上部(濃縮機器高さの45,63%位置または58,85%位置)での測定は、IF7処理 でチェンバとケーシングに付着したウランがどの高さまで除去されたかを判断できる。 付録2 IF7 除染前ウラン付着量計算方法

最初に、エネルギー186keVの y 線量から各領域(チェンバ・ケーシング、回転胴上部、回転胴下部)のU235 量を計算する。次に、エネルギー1001keVの y 線量から濃縮機器全体のU238 量を計算する。最後に、U235 量とU238 量の和をとって、濃縮機器全体のU 量(U235 量+U238 量)を計算する。

(1) U235 量の計算

U235 から放射される 186keV の γ 線の到達確率を計算し,各部位に,U235:1g が 存在する場合の γ 線量を計算する。γ 線測定高さは,濃縮機器高さの13,16,21% 位置または13,17,31%位置である。各部位からの γ 線を次のように定義する。

	高さ	γ 線量
	濃縮機器高さの 13%位置	al
チェンバ	濃縮機器高さの 16 または 17%位置	a2
	濃縮機器高さの 21 または 31%位置	a3
	濃縮機器高さの 13%位置	b1
ケーシング	濃縮機器高さの 16 または 17%位置	b2
	濃縮機器高さの 21 または 31%位置	b3
	濃縮機器高さの13%位置	c1
回転胴上部	濃縮機器高さの 16 または 17%位置	c2
	濃縮機器高さの 21 または 31%位置	c3
回転胴下部	濃縮機器高さの 13%位置	d1
	濃縮機器高さの 16 または 17%位置	d2
	濃縮機器高さの 21 または 31%位置	d3

チェンバ・ケーシングからの γ 線については、チェンバとケーシングの付着密度 から、それぞれの部位から放射される γ 線量を計算し、チェンバ・ケーシング全体 に U235:1g が存在する場合の γ 線量を計算する。 γ 線量は次のように表される。 チェンバ・ケーシングの付着密度とウラン量の付着比率は Table A.1 の値を用いる。

	高さ	γ 線量
	濃縮機器高さの13%位置	$e1 = 0.465 \times a1 + 0.535 \times b1$
チェンバ・ ケーシング	濃縮機器高さの16または 17%位置	$e2 = 0.465 \times a2 + 0.535 \times b2$
	濃縮機器高さの 21 または 31%位置	$e3 = 0.465 \times a3 + 0.535 \times b3$

	チェンバ・ ケーシング	回転胴上部	回転胴下部
濃縮機器高さの 13%位置	e1	c1	d1
濃縮機器高さの 16 または 17%位置	e2	c2	d2
濃縮機器高さの 21 または 31%位置	e3	c3	d3

この結果をまとめて、各部位に、U235:1g が存在する場合の γ 線量を計算する。 γ 線量は次のように表される。

この γ 線量と各部位のウラン量 (X_{ch+ca}^{U235}, X_{ru}^{U235}, X_{rd}^{U235}), γ 線測定結果 (g₁^{U235}, g₂^{U235}, g₃^{U235})の関係は(B.1)式で表せる。

$\left(e_{1}\right)$	\mathbf{c}_1	d_1	$\left(X_{ch+ca}^{U235}\right)$		$\left(g_{1}^{U235} \right)$		
e ₂	c_2	d ₂	X _{ru} ^{U235}	=	g_2^{U235}	•••	(B. 1)
$\left(e_{3}\right)$	c_3	d_3	X_{rd}^{U235})	$\left(g_{3}^{U235}\right)$		

 γ 線測定結果を(B.1)式に入れ、ウラン量を計算する。計算は、 γ 線測定結果と 各部位に存在すると仮定したウラン量から計算される γ 線量(計算値)の差を最小 にするアルゴリズムにより実施する。なお、 γ 線測定結果と各部位に存在すると仮 定したウラン量から計算される γ 線量(計算値)の差は(B.2)式で計算できる。

$$\Delta = \left(g_{1}^{U235} - \left(e_{1}X_{ch+ca}^{U235} + c_{1}X_{ru}^{U235} + d_{1}X_{rd}^{U235}\right)\right)^{2} + \left(g_{2}^{U235} - \left(e_{2}X_{ch+ca}^{U235} + c_{2}X_{ru}^{U235} + d_{2}X_{rd}^{U235}\right)\right)^{2} \cdot \cdot (B. 2) + \left(g_{3}^{U235} - \left(e_{3}X_{ch+ca}^{U235} + c_{3}X_{ru}^{U235} + d_{3}X_{rd}^{U235}\right)\right)^{2}$$

この結果, U235 量 (X_{ch+ca}^{U235}, X_{ru}^{U235}, X_{rd}^{U235}) が計算できる。

(2) U238 量の計算

U238 から放射される 1001keV の γ 線の到達確率を計算し,各部位に,U238:1g が存在する場合の γ 線量を計算する。 γ 線測定高さは,濃縮機器の高さ方向につい て広く γ 線が入射する濃縮機器高さの 21 または 31%位置とする。 γ 線を次のよう に定義する。

	高さ	γ 線量
チェンバ	濃縮機器高さの 21 または 31%位置	s3
ケーシング	濃縮機器高さの 21 または 31%位置	t3
回転胴上部	濃縮機器高さの 21 または 31%位置	u3
回転胴下部	濃縮機器高さの 21 または 31%位置	v3

U238 から放射される 1001keV の γ 線では線源分離ができないため、U235 から放射される 186keV の γ 線から評価した各部位のウラン付着量 (X_{ch+ca} ^{U235}, X_{ru} ^{U235}, X_{rd} ^{U235}) で、チェンバ・ケーシング、回転胴内部に U238:1g が存在する場合の γ 線量を計算する。計算式は(B.3)式と (B.4)式のようになる。

チェンバ・ケーシングからの y 線量(濃縮機器高さの21または31%位置)

 $g_{ch+ca}^{U238} = 0.465 \times s_3 + 0.535 \times t_3$ (B. 3)

回転胴内部からの y 線量(濃縮機器高さの21 または31%位置)

$$\mathbf{g}_{r}^{U238} = \frac{\mathbf{X}_{ru}^{U235}}{\mathbf{X}_{ru}^{U235} + \mathbf{X}_{rd}^{U235}} \times \mathbf{u}_{3} + \frac{\mathbf{X}_{rd}^{U235}}{\mathbf{X}_{ru}^{U235} + \mathbf{X}_{rd}^{U235}} \times \mathbf{v}_{3} \quad \cdot \quad \cdot \quad (B. 4)$$

回転胴端板と回転胴側面の付着比率には,回転胴端板と回転胴側面のU235 量 (X_{ru}^{U235}, X_{rd}^{U235})から求めた比率を使用する。またチェンバとケーシングの付着比率 は Table A.1 の値を使用している。

チェンバ・ケーシング,回転胴内部に U238:1g が存在する場合の γ 線量から濃 縮機器全体に U238:1g が存在する場合の γ 線量を計算する。濃縮機器内の回転胴 数を N_r とすると,計算式は (B.5)式のようになる。

濃縮機器全体からの γ 線量(濃縮機器高さの 21 または 31%位置)

$$g_{set}^{U238} = \frac{X_{ch+ca}^{U235}}{X_{ch+ca}^{U235} + (X_{ru}^{U235} + X_{rd}^{U235}) \times N_{r}} \times g_{ch+ca}^{U238} + \frac{(X_{ru}^{U235} + X_{rd}^{U235}) \times N_{r}}{X_{ch+ca}^{U235} + (X_{ru}^{U235} + X_{rd}^{U235}) \times N_{r}} \times g_{r}^{U238} + \frac{(X_{ru}^{U235} + X_{rd}^{U235}) \times N_{r}}{X_{ch+ca}^{U235} + (X_{ru}^{U235} + X_{rd}^{U235}) \times N_{r}} \times g_{r}^{U238}$$

チェンバ・ケーシングと回転胴内部の付着比率には、チェンバ・ケーシング、回 転胴端板、回転胴側面のU235 量(X_{ch+ca}^{U235}, X_{ru}^{U235}, X_{rd}^{U235})から求めた比率を使用す る。 濃縮機器に U238:1g が存在する場合の γ 線量と濃縮機器のウラン量 (X_{set}^{U238}), γ 線測定結果 (g₃^{U238})の関係は(B.6)式で表せる。

$$X_{set}^{U238} = \frac{g_3^{U238}}{g_{set}^{U238}} \cdot \cdot \cdot (B.6)$$

この結果, U238 量 (X_{set}^{U238}) が計算できる。

(3) 全ウラン量の計算

U235 量とU238 量の和をとることで、各カスケードのウラン量を計算する。このと き 95%信頼区間でウラン付着量の上限・下限を計算する。信頼区間の計算方法を以下 に示す。

100(1-α)%信頼区間

$$\left(\overline{\mathbf{X}} - \mathbf{t}_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\mathbf{s}}{\sqrt{n}}, \overline{\mathbf{X}} + \mathbf{t}_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\mathbf{s}}{\sqrt{n}}\right) \cdot \cdot \cdot (\mathbf{B}. 7)$$

$$\overline{X}$$
 =標本平均 s =標本標準偏差 n=標本の大きさ
 $t_{\frac{\alpha}{2}} = 100(1-\alpha)%$ 信頼区間を表す t 分布

計算に必要な標準偏差は,濃縮機器のウラン量と,その濃縮機器を含む段の平均 ウラン量の差の2乗から計算する。

(4) 濃縮度

濃縮機器内の U235 量と U238 量から濃縮度が計算できる。濃縮度 N_wは(B.8)式によって計算することができる。

$$N_{w} = \frac{X_{ch+ca}^{U235} + (X_{ru}^{U235} + X_{rd}^{U235}) \times N_{r}}{X_{set}^{U238} + X_{ch+ca}^{U235} + (X_{ru}^{U235} + X_{rd}^{U235}) \times N_{r}} \quad \cdot \quad \cdot \quad (B.8)$$

付録3 IF7 除染後ウラン付着量計算方法

濃縮機器下部(濃縮機器高さの13%位置)のγ線計測結果から,濃縮機器全体のU量(U235 量+U238量)を計算する。以下に計算方法を示す。

各部位からの γ線量を次のように定義する。

	高さ	γ 線量
チェンバ内面	濃縮機器高さの13%位置	al
ケーシング外面	濃縮機器高さの13%位置	b1
ケーシング内面	濃縮機器高さの13%位置	p1

濃縮機器に U235:1g が存在する場合の γ 線量と濃縮機器のウラン量(X_{set}^{U235}), γ 線測 定結果(g₁^{U235})の関係は, Table 3.3 に示したウラン付着比率を用いると次のようになる。

 $g_{set}^{U235} = 0.225 \times a_1 + 0.492 \times b_1 + 0.283 \times p_1$ (C. 1)

$$X_{set}^{U235} = \frac{g_1^{U235}}{g_{set}^{U235}} \cdot \cdot \cdot (C.2)$$

回転胴内面のウラン付着密度は全ての濃縮機器について Table 3.3 で示した 5.83E-05 gU/cm²として,回転胴内面のウラン量 X,^{U235+U238}を計算している。

U235 量と濃縮度から、チェンバ内面、ケーシング外面、ケーシング内面のウラン量(U235+U238)を計算し、回転胴内面のウラン量 $X_r^{U235+U238}$ を加えて、濃縮機器内のウラン付着量を計算する。濃縮機器内の回転胴数を N_r とすると、濃縮機器内のウラン付着量は(C.3)式で計算できる。ただし、Nw には(B.8)で計算できる IF7 処理前の濃縮度を使う。

$$X_{set}^{U235+U238} = X_{set}^{U235} \times \frac{100}{N_{w}} + X_{r}^{U235+U238} \times N_{r} \quad \cdot \quad \cdot \quad (C.3)$$

Table 2.1 IF7 処理条件一覧

	カスケード処理 条件①	カスケード処理 条件②	カスケード処理 条件③	カスケード処理 条件④
		初期・終期 : バッ チ処理 中期 : 循環バッチ	初期:単流処理 中期,終期:循環 処理	循環処理
処理方法	 声法 単流処理・循環処 理・バッチ処理 様々で実施 	「循環バッチ」: 真空下のカスケ ードに IF7 を供給 し, IF7 が完全に 消費されるまで, 循環を継続	バッファ オート で,一定流量にな るよう, カスケード P 流 調弁を手動調整	バッファ オート で,一定流量にな るよう, カスケード P 流 調弁を手動調整
供給口·排気口 段間連絡弁	表 2.2 参照	表 2.3 参照	F 供給, P+T 排気 全て閉	F 供給, P+T 排気 全て閉
カスケード恒 温水	停止	停止	停止	停止
回収用コンプ レッサ	一部使用	無	無	無
IF7 供給流量	5g/min~85g/min	13g/min∼ 613g/min	80~120g/min — 定→170g/min — 定 →300g/min —定 →120g/min —定	170g/min 一定 (カスケード排 気前は除く)
処理圧力 (カス ケード)	0. 0hPa∼11. 7hPa	0. 0hPa∼15. 2hPa	45hPa→59hPa→ 48hPa→36hPa→ 47hPa	30hPa→外気温低 下→21hPa
処理温度	常温成り行き	常温成り行き (15℃~34℃)	初期・中期:暖房 (30℃~34℃) 処理 51 日目以 降:暖房停止,常 温成り行き(23℃ ~34℃)	常温成り行き (20℃~31℃)
カスケード排 気	多数回実施	バッチ処理を含 め,22 回実施	除染中は実施せ ず	処理 23 日後, 1 回実施

	宇振口粉	処理パターン		
	关旭口级	IF7 供給方法	IF7 供給箇所	混合ガス抜出箇所
処理①	23	バッチ処理(組成確認)・ 単流処理・循環処理	F	P+T
処理②	7	循環処理	F	P+T 又は Por T
処理③	6	循環処理	F	P+段間弁開閉操作
処理④	3	循環処理	F	P+T 又は P or T + 段間弁開閉操作
処理⑤	4	単流処理	Р	Т
処理⑥	9	循環処理	Р	Т
処理⑦	14	バッチ処理	Т	P+T
試験⑧	39	循環処理	F	P or T + 段間弁開閉操作
試験⑨	30	バッチ処理	F 又は T	F + P+T + 段間弁開

 Table 2.2
 カスケード処理条件①の詳細

Table 2.3 カスケード処理条件②の詳細

			処理パターン	
	美施日쮫	IF7 供給方法	IF7 供給箇所	混合ガス抜出箇所
処理①	14	バッチ処理		
処理②	106	循環バッチ処理	F	I™I ™双间开闸闭探作
処理③	12	循環バッチ処理		P +段間弁開閉操作
処理④	20	循環バッチ処理		D→印朗会問問場佐
処理⑤	2	バッチ処理	Т	「「双间开開闭探下
処理⑥	28	バッチ処理		P+T +段間弁開閉操作

Table 3.1 IF7 処理前のウラン量

	カスケード処理	カスケード処理	カスケード処理	カスケード処理
	条件①	条件②	条件③	条件④
よった 10中点に入見	696±25kgU	708±38kgU	670±20kgU	694±22kgU
カベクシート的ワフン里	誤差は,95%信頼区間で評価した値			

*濃縮機器外部から計測したγ線計数率からの推定

Table 3.2 各カスケード処理での物質収支結果

	カスケード処理	カスケード処理	カスケード処理	カスケード処理
	条件①	条件②	条件③	条件④
IF7 総供給量	926kg	882kg	1110kg	824kg
未反応 IF7 回収量	128kg	109kg	254 kg	69kg
混合ガス総回収量	1718kg	1667kg	1662kg	$1665 \mathrm{kg}$

Table 3.3 カスケード処理条件①終了後の濃縮機器の分解調査結果

	付着密度(gU/cm ²)	ウラン付着比率
チャンバ内面	$1.61 imes 10^{-4}$	0.225
ケーシング外面	$1.00 imes 10^{-4}$	0.492
ケーシング内面	$6.05 imes 10^{-5}$	0.283
回転胴内面	$5.83 imes 10^{-5}$	_

Table 3.4 IF7 処理後のウラン量

	カスケード処理	カスケード処理	カスケード処理	カスケード処理
	条件①	条件②	条件③	条件④
平均残存ウラン量	$0.14 \mathrm{kgU}$	$0.09 \mathrm{kgU}$	0.18kgU	0.12kgU

Table 4.1 IF7 処理日数

	カスケード処理	カスケード処理	カスケード処理	カスケード処理
	条件①	条件②	条件③	条件④
除染期間(中断期間 を省いた期間)	125 日間	168 日間	91 日間	60 日間

Table 4.2 濃縮機器の分解調査結果

	カスケード処理条件①	カスケード処理条件③
チェンバ上板 平均	$1.7 imes10^{-5} m gU/cm^2$	$6.1 imes10^{.5} m gU/cm^2$
チェンバ円筒 平均	22.8×10 ⁻⁵ gU/cm ²	$160 imes 10^{-5} m gU/cm^2$
チェンバ下板 平均	未測定	13×10 ⁻⁵ gU/cm ²
ケーシング表面 平均	10.1×10 ⁻⁵ gU/cm ²	15.9×10 ⁻⁵ gU/cm ²
ケーシング裏面 平均	45.4×10 ⁻⁵ gU/cm ²	$7.8 imes10^{-5} m gU/cm^2$

Table A.1 ウラン付着密度

	付着密度(gU/cm ²)	ウラン付着比率
チェンバ	0.0229	0.465
ケーシング	0.0074	0.535







Fig. 2.2 处理設備概要図



Fig.2.3 カスケード構成図



Fig. 2.4 単流処理



Fig. 2.5 循環処理



Fig.2.6 バッチ処理



Fig. 3.1 初期ウラン量のカスケード間比較



	測定 タイミング
No. 1	供給前
No. 2	処理①
No. 3	処理②
No. 4	処理③
No. 5	処理④
No. 6	処理⑤



	測定
	タイミング
No. 1	供給前
No. 2	処理①
No. 3	処理②
No. 4	処理③
No. 5	処理④
No. 6	処理⑤





	測定
	タイミング
No. 1	供給前
No. 2	処理①
No. 3	処理②
No. 4	処理③
No. 5	処理④
No. 6	処理⑤

Fig. 3.2 カスケード処理条件①



	測定
	タイミング
No. 1	供給前
No. 2	処理①
No. 3	処理②
	経過観察1
No. 4	処理②
	経過観察2
No. 5	処理④



	測定
	タイミング
No. 1	供給前
No. 2	処理①
No. 3	処理②
	経過観察1
No. 4	処理②
	経過観察2
No. 5	処理④





	測定 タイミング
No. 1	供給前
No. 2	処理①
No. 3	処理② 経過観察1
No. 4	処理② 経過観察 2
No. 5	処理④

Fig. 3.3 カスケード処理条件②



r	
	測定
	タイミング
No. 1	供給前
No. 2	混合ガス回 収量 500 kg
No. 3	混合ガス回 収量 1000 kg
No. 4	滞留ウラン 95%以上回収



	測定 タイミング
No. 1	供給前
No. 2	混合ガス回 収量 500 kg
No. 3	混合ガス回 収量 1000 kg
No. 4	滞留ウラン 95%以上回収





	測定 タイミング
No. 1	供給前
No. 2	混合ガス回 収量 500 kg
No. 3	混合ガス回 収量 1000 kg
No. 4	滞留ウラン 95%以上回収

Fig. 3.4 カスケード処理条件③



	測定 タイミング
No. 1	供給前
No. 2	処理開始後 22 hr
No. 3	処理開始後 148 hr
No. 4	処理開始後 278 hr
No. 5	処理開始後 577 hr



	測定 タイミング
No. 1	供給前
No. 2	処理開始後 89 hr
No. 3	処理開始後 217 hr
No. 4	処理開始後 347 hr
No. 5	処理開始後 528 hr





	測定 タイミング
No. 1	供給前
No. 2	処理開始後 140 hr
No. 3	処理開始後 262 hr
No. 4	処理開始後 389 hr
No. 5	処理開始後 551 hr

Fig. 3.5 カスケード処理条件④

- 39 -



Fig. 3.6 各カスケードでの混合ガス回収量の推移

カスケード処理条件①

カスケード処理条件②





カスケード処理条件④



Fig. 3.7 混合ガス回収流量



Fig. 3.8 「反応生成ガス回収量」と「IF7 ガス反応量」の割合評価



Fig.3.9 残留ウラン量のカスケード間比較



Fig. 3.10 カスケード処理条件①での難除染機測定



Fig. 3.11 カスケード処理条件③での難除染機測定



Fig. 4.1 難除染セットを除くウラン分布



Fig.4.2 平均ウラン残存量



Fig.4.3 チェンバ平均重量濃度



Fig. 4.4 ケーシング平均重量濃度



Fig. 4.5 ウラン残存量ヒストグラム



Fig. 4.6 チェンバ重量濃度ヒストグラム



Fig. 4.7 ケーシング重量濃度ヒストグラム



Fig. A.1 周方向と高さ方向のγ線計数率分布





Fig.A.2 濃縮機器下部でのγ線計数率分布



Fig.A.3 前面コリメータ有無の場合のγ線計数率比率

表1. SI 基本単位

甘木昌	SI 基本単位			
本个里	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	А		
熱力学温度	ケルビン	K		
物質量	モル	mol		
光 度	カンデラ	cd		

和辛量	SI 基本単位				
和卫星	名称	記号			
面積	平方メートル	m ²			
体積	立法メートル	m ³			
速 さ , 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)	キログラム毎立法メートル	kg/m ³			
質量体積(比体積)	立法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2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

#	_	OT	+++	HH	÷T.
77	5		122	HH.	34
-48	•	01	14	June .	υш

衣 0. 51 佞與硙								
乗数	接頭語	語	記号	乗数	接頭語	記号		
10^{24}	Э	タ	Y	10^{-1}	デシ	d		
10^{21}	ゼ	タ	Z	10^{-2}	センチ	с		
10^{18}	エク	サ	Е	10^{-3}	ミリ	m		
10^{15}	\sim	タ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ		
10^{12}	テ	ラ	Т	10^{-9}	ナノ	n		
10^{9}	ギ	ガ	G	10^{-12}	ピコ	р		
10^{6}	メ	ガ	М	10^{-15}	フェムト	f		
10^{3}	キ		k	10^{-18}	アト	а		
10^{2}	ヘク	ŀ	h	10^{-21}	ゼプト	Z		
10^{1}	デ	力	da	10^{-24}	ヨクト	у		

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

如去出た

	51 加立半位					
組立量	名称	記号	他のSI単位による	SI基本単位による		
			衣し刀	衣し方		
平 面 角	ラジアン ^(a)	rad		$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$		
立 休 角	フテラジアン(a)	(c)		m ² m ⁻² -1 (b)		
		SI		-1 -1		
向 波 剱		HZ		s		
力	ニュートン	N		m•kg•s ⁻²		
圧力,応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$		
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N • m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$		
工 恋 故 財 市		w	I/c	m ² . Iso		
			J/ 3	III - Kg - S		
〔 何, 〕 <u>、</u> 〕		U		s•A		
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$		
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$		
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$		
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$		
磁東	ウェーバ	Wb	V•s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$		
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m^2	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$		
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$		
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K		
光東	ルーメン	lm	cd • sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd = cd$		
照度	ルクス	1x	1m/m^2	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$		
(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	H L Z	<i>C</i>	T /le m	2 -2		
ギー分与, カーマ		Gy	J/Kg	m •s		
線量当量 周辺線量当						
具 七台林始县业县 府		C.,	T /ls m	2 -2		
里,刀凹注廠里当里, 恒		3V	J/Kg	m•s		
人称重当重, 組織線重当						

(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の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℃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

和立量		SI 組立単位		
胆立里	名称	記号	SI 基本単位による表し方	
粘度	ミパスカル秒	Pa•s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$	
カのモーメント	ニュートンメートル	N•m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$	
表 面 張 九]ニュートン毎メートル	N/m	kg • s ⁻²	
角 速 度	ミラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$	
角 加 速 度	ミラジアン毎平方秒	rad/s ²	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$	
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	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$	
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)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$	
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	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$	
熱 伝 導 率	ワット毎メートル毎ケ ルビン	W/(m•K)	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3} \cdot \mathbf{K}^{-1}$	
体積エネルギー	ジュール毎立方メート ル	J/m^3	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$	
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3} \cdot \mathbf{A}^{-1}$	
体積電荷	クーロン毎立方メート ル	C/m^3	$m^{-3} \cdot s \cdot A$	
電気変位	クーロン毎平方メート ル	C/m^2	$m^{-2} \cdot s \cdot A$	
誘 電 卒	『ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$	
透 磁 率	ミヘンリー毎メートル	H/m	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-2} \cdot \mathbf{A}^{-2}$	
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$	
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケル ビン	J/(mol·K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$	
照射線量(X線及びv線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ • s • A	
吸収線量率	ジレイ毎秒	Gy/s	m ² • s ⁻³	
放射强度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$	
放射輝度	ワット毎平方メートル 毎ステラジアン	$W/(m^2 \cdot sr)$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$	

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	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	0	$1^{\circ} = (\pi/180)$ rad
分	,	1' = $(1/60)^{\circ}$ = $(\pi/10800)$ rad
秒	"	1" = $(1/60)$ ' = $(\pi/648000)$ rad
リットル	1, L	$11=1 \text{ dm}^3=10^{-3}\text{m}^3$
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	В	$1B=(1/2)\ln 10(Np)$

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	1eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J					
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg					
天 文 単 位	ua	1ua=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

	同用されてるこの地の単位							
	名称	記号	SI 単位であらわされる数値					
海	里		1 海里=1852m					
1	ット		1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s					
P	— л	а	$1 \text{ a=} 1 \text{ dam}^2 = 10^2 \text{m}^2$					
\sim	クタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²					
バ	- 1L	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa					
オン	ノグストローム	Å	1 Å=0. 1nm=10 ⁻¹⁰ m					
バ	ー ン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=10^{-28} \text{m}^2$					

	衣9. 回有の名称を古む65組立単位							
	名称		記号	SI 単位であらわされる数値				
L	ιL	グ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J				
ダ	イ	\sim	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N				
ポ	P	ズ	Р	1 P=1 dyn•s/cm²=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	K	0e	1 Oe ≙(1000/4π)A/m				
\checkmark	クスウェ	ル	Mx	1 Mx ≙10 ⁻⁸ Wb				
ス	チル	ブ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd/cm}^2 = 10^4 \text{ cd/m}^2$				
朩		ŀ	ph	1 ph=10 ⁴ 1x				
ガ		ル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$				

	表10. 国際単位に属さないその他の単位の例								
	名	品称		記号	SI 単位であらわされる数値				
キ	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq				
\mathcal{V}	ン	トゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$				
ラ			ド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy				
\mathcal{V}			Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv				
Х	線	単	位		1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm				
ガ		ン	7	γ	$1 \gamma = 1 nT = 10^{-9}T$				
ジ	ャン	スキ	-	Jy	$1 \text{ Jy}=10^{-26} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$				
フ	I.	ル	111		1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m				
メー	ートル	系カラッ	ノト		1 metric carat = 200 mg = 2×10^{-4} kg				
ŀ			ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa				
標	準	大 気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa				
力	D	IJ	-	cal					
11	ク	П	ン	μ	$1 \text{ u} = 1 \text{ um} = 10^{-6} \text{ m}$				

この印刷物は再生紙を使用しています