

【公開版】

令和元年 11 月 25 日	
資料番号	1 - 11

六ヶ所再処理施設における
新規制基準に対する適合性

有機溶媒等による火災又は爆発に関する事
象選定の見直しおよびTBP等の錯体の急
激な分解反応に関する事象発生シナリオ等
の見直しについて

日本原燃株式会社

目次

1. 有機溶媒等による火災又は爆発の事象選定の見直し
 1. 1 概要
 1. 2 火災に関する選定の見直し
 1. 2. 1 これまでの選定
 1. 2. 2 見直しの内容
 1. 2. 3 見直し後の選定結果
 1. 3 爆発に関する選定の見直し
 1. 3. 1 これまでの選定
 1. 3. 2 見直しの内容
 1. 3. 3 見直し後の選定結果

2. T B P 等の錯体の急激な分解反応の事象発生シナリオ及び対策の見直し
 2. 1 概要
 2. 2 これまでの事象発生シナリオ
 2. 3 事象発生シナリオの再検討
 2. 3. 1 プルトニウム濃縮缶の運転方法
 2. 3. 2 起因の整理
 2. 3. 3 事象発生シナリオ
 2. 4 事象発生シナリオ変更による影響
 2. 4. 1 T B P 等の錯体の急激な分解反応を起こす T B P 等の量の増加による影響
 2. 4. 2 事故対策

1. 有機溶媒等による火災又は爆発の事象選定の見直し

1. 1 概要

2019年10月31日に行われた第311回審査会合において、有機溶媒等による火災又は爆発に関する事象選定に対して、現実的な評価に基づいた選定とするようコメントを受けた。

このため、これまでに実施した事象選定における評価内容を確認したところ、有機溶媒火災において、漏えいした有機溶媒の温度評価を断熱条件で実施していた点について見直しが必要と判断し、現実的な放熱条件で評価を行ったところ、n-ドデカンの引火点には到達しないことが確認された。このため、これまでの選定においては分離建屋の分配塔セル、精製建屋のプルトニウム精製塔セルにて重大事故が発生するとしていたものを、重大事故は発生しない、との選定結果に見直す。

また、爆発の対象事象であるTBP等の錯体の急激な分解反応については、事象選定フローに基づく検討を行うとともに物理的な発生の観点から、これまで分配設備のウラン濃縮缶、ウラン精製設備のウラン濃縮缶、プルトニウム精製設備のプルトニウム濃縮缶を対象としていたものを、事象発生時に一般公衆へ与える影響を考慮し、プルトニウム精製設備のプルトニウム濃縮缶のみとの選定結果に見直す。

以下に選定見直しの内容を記載する。

1. 2 火災に関する選定の見直し

1. 2. 1 これまでの選定

設計上定める条件より厳しい条件である内部事象及び外部事

象により有機溶媒の漏えいが発生し、回収機能が喪失した場合に、放熱条件による漏えい液の温度を評価したところ、n-ドデカンの引火点には到達しない結果となった。このため、更に厳しい条件として、断熱条件による温度評価を実施し、引火点へ到達することを確認した。このため、引火点に到達するまでの時間が1年以下であり火災によって放出される放射エネルギーの大きいセルである分離建屋の分配塔セル及び精製建屋のプルトニウム精製塔セルを評価対象セルとして選定していた。ここで行った温度評価は、断熱条件で実施した。

1. 2. 2 見直しの内容

設計上定める条件より厳しい条件では、漏えいした有機溶媒の温度は引火点には到達しないため、更に厳しい条件を与えて評価を行う際、より現実的な条件での評価となるよう、これまで断熱条件を用いて評価していたものを、放熱評価（気相部への放熱を考慮）を用いるとともに換気停止を考慮した。

有機溶媒から気相部及びセルコンクリートへ熱伝達することで、漏えいした有機溶媒が引火点に到達しないことを確認した。

漏えいした有機溶媒の温度について、放熱を考慮した評価の詳細について、別紙-1に示す。

1. 2. 3 見直し後の選定結果

漏えいした有機溶媒の温度は引火点に到達しないため、火災は発生しないとした。

1. 3 爆発に関する選定の見直し

1. 3. 1 これまでの選定

爆発に関してはT B P等の錯体の急激な分解反応を対象事象とし、T B P等の錯体の急激な分解反応として発生し得る濃縮缶として、分配設備のウラン濃縮缶、ウラン精製設備のウラン濃縮缶、プルトニウム精製設備のプルトニウム濃縮缶、高レベル廃液濃縮設備の高レベル廃液濃縮缶、酸回収設備の第2酸回収蒸発缶から、2建屋3機器（分配設備のウラン濃縮缶、ウラン精製設備のウラン濃縮缶、プルトニウム精製設備のプルトニウム濃縮缶）を選定した。

高レベル廃液濃縮設備の高レベル廃液濃縮缶、酸回収設備の第2酸回収蒸発缶では、減圧蒸発を採用することで運転温度を下げていることから、135℃に至ることはない。高レベル廃液濃縮缶については、冷却機能の喪失が発生し、缶内の高レベル廃液が崩壊熱により沸騰した場合でも、冷却機能の停止によりT B Pが高レベル廃液濃縮缶に供給されることはなく、沸点は135℃を超えることもなく、蒸発乾固の対策として内部ループ通水等を実施することから、135℃に達することはないため、選定対象から除外した。

1. 3. 2 見直しの内容

一般公衆及び従事者への影響を考慮し、安全上重要な施設を対象として重大事故等の選定を行う。ここでウラン精製設備のウラン濃縮缶は安全上重要な施設ではないため選定の対象外となる。分配設備のウラン濃縮缶、プルトニウム精製設備のプルトニウム濃縮缶、高レベル廃液濃縮設備の高レベル廃液濃縮缶及び第2酸

回収蒸発缶を対象として、設計上定める条件よりも厳しい条件を与えた場合に事象の発生の有無を確認した。その結果、事象は発生しないという評価になったが、過去に同事象が他プラントで発生していること、事象が発生した場合の影響の大きさを考慮し、設計上定める条件よりも厳しい条件よりも更に厳しい条件を与え、事象の発生の有無を確認した。この結果、物理的に事象が発生しない機器として減圧により蒸発濃縮する高レベル廃液濃縮缶及び第2酸回収蒸発缶を除いた分配設備のウラン濃縮缶及びプルトニウム精製設備のプルトニウム濃縮缶において事象の発生が想定される結果となった。事象が発生した場合の両機器の一般公衆への影響は、下記2.において見直す事象発生シナリオに基づく評価において、プルトニウム精製設備のプルトニウム濃縮缶では $0.4 \mu\text{Sv}$ となる。分配設備のウラン濃縮缶では、除染機能の低下等の想定外事象が発生した場合であっても、一般公衆への影響は $6.8 \times 10^{-5} \mu\text{Sv}$ であり、平常時を十分下回る。このため、プルトニウム精製設備のプルトニウム濃縮缶を対象機器として選定した。

分配設備のウラン濃縮缶及びプルトニウム精製設備のプルトニウム濃縮缶における事象発生時の放出放射エネルギー及び線量について、表-1に示す。

なお、分配設備のウラン濃縮缶では、事象発生シナリオの見直しによりTBP等の錯体の急激な分解反応に寄与するTBP量が、従来の事象発生シナリオでは約1.8kgであったものが、約4.3kgに増加する。この状態でTBP等の錯体の急激な分解反応の発生による圧力及び温度の上昇については、TBP量が約

6.4 k g の場合の F l u e n t による解析結果において、ウラン濃縮缶の出口における圧力が約 480 k P a であり、許容圧力を超えない。分離建屋塔槽類廃ガス処理設備の塔槽類廃ガス処理系の高性能粒子フィルタについては、フィルタ差圧が約 0.29 k P a 、温度が約 170℃であり、フィルタの健全性が確認されている 9.3 k P a 及び 200℃を下回る。このため、ウラン濃縮缶及び分離建屋塔槽類廃ガス処理設備の塔槽類廃ガス処理系の高性能粒子フィルタの健全性は担保できる。

表－１（１／２）：分配設備のウラン濃縮缶とプルトニウム精製設備のプルトニウム濃縮缶における事象発生時の放出放射能量

核種グループ	C s 換算放出放射能量 (T B q)	
	ウラン濃縮缶	プルトニウム濃縮缶
Z r / N b	0.0E+00	0.0E+00
R u / R h	3.9E-14	1.2E-15
C s / B a	0.0E+00	0.0E+00
C e / P r	0.0E+00	0.0E+00
S r / Y	0.0E+00	0.0E+00
その他 F P	2.0E-11	6.1E-13
P u (α)	1.6E-10	5.1E-04
A m / C m (α)	7.7E-08	0.0E+00
U (α)	1.8E-08	1.2E-12
N p (α)	3.5E-09	0.0E+00
合計	9.8E-08	5.1E-04

表－１（２／２）：分配設備のウラン濃縮缶とプルトニウム精製設備のプルトニウム濃縮缶における事象発生時の線量

核種グループ	被ばく線量（ μ Sv）	
	ウラン濃縮缶	プルトニウム濃縮缶
Zr / Nb	0.0E+00	0.0E+00
Ru / Rh	2.8E-11	8.9E-13
Cs / Ba	0.0E+00	0.0E+00
Ce / Pr	0.0E+00	0.0E+00
Sr / Y	0.0E+00	0.0E+00
その他FP	4.6E-10	1.4E-11
Pu (α)	1.3E-07	4.0E-01
Am / Cm (α)	6.2E-05	0.0E+00
U (α)	5.0E-06	3.3E-10
Np (α)	1.7E-06	0.0E+00
合計	6.8E-05	4.0E-01

1. 3. 3 見直し後の選定結果

プルトニウム精製設備のプルトニウム濃縮缶を対象機器として選定する。

2. T B P 等の錯体の急激な分解反応の事象発生シナリオ及び対策の見直し

2. 1 概要

T B P 等の錯体の急激な分解反応については、これまでの事象発生シナリオが、事象発生が想定される全シナリオを内包できるものとなっていなかった。このため、事象発生に至るシナリオを網羅的に確認した結果、事象発生シナリオを見直し、プルトニウム溶液を連続供給しながら過濃縮が発生するシナリオとした。

この変更に伴い、拡大防止対策及び異常な水準の放出防止対策の一部に変更が生じ、放出放射エネルギーについても変更となった。以下に見直しの詳細を記載する。

2. 2 これまでの事象発生シナリオ

T B P 等の錯体の急激な分解反応は、T B P 等が錯体を形成するとともに 135℃以上に加熱された場合に発生するとされている。これまでの想定は以下のとおり。また、図-1 に想定した状態を示す。

- ・プルトニウム濃縮缶に供給される硝酸プルトニウム溶液の T B P 除去機能が喪失し、加熱蒸気の異常な温度上昇を防止する機能が喪失することで加熱蒸気が 135℃を超えて上昇し、濃縮缶内の硝酸プルトニウム溶液が過濃縮されることで沸点が上昇し 135℃を超えた時点で事象が発生
- ・プルトニウム濃縮缶における硝酸プルトニウム溶液の過濃縮については、速やかに T B P 等の錯体の急激な分解反応が発生する条件を考慮し、プルトニウム濃縮缶への硝酸プルトニ

ウム溶液の供給が停止した状態で 135℃以上の蒸気による加熱が継続することで発生

- ・事象発生に伴い、プルトニウム濃縮缶内の濃縮された硝酸プルトニウム溶液は全て飛散し、濃縮缶内は空になり、誤操作を含む何らかの要因により溶液の供給が再開され、事象の再発に至る

上記想定に基づき事象が発生した場合には、拡大防止対策として移送機器の停止による供給液の供給停止及び一次蒸気の手動弁を閉止することによる加熱停止を実施するとともに異常な水準の放出防止対策として再発が発生した場合に備えたセル及び建屋への閉じ込め並びに管理放出を実施することとしていた。

拡大防止対策の概要を図－２、異常な水準の放出防止対策の概要を図－３に示す。

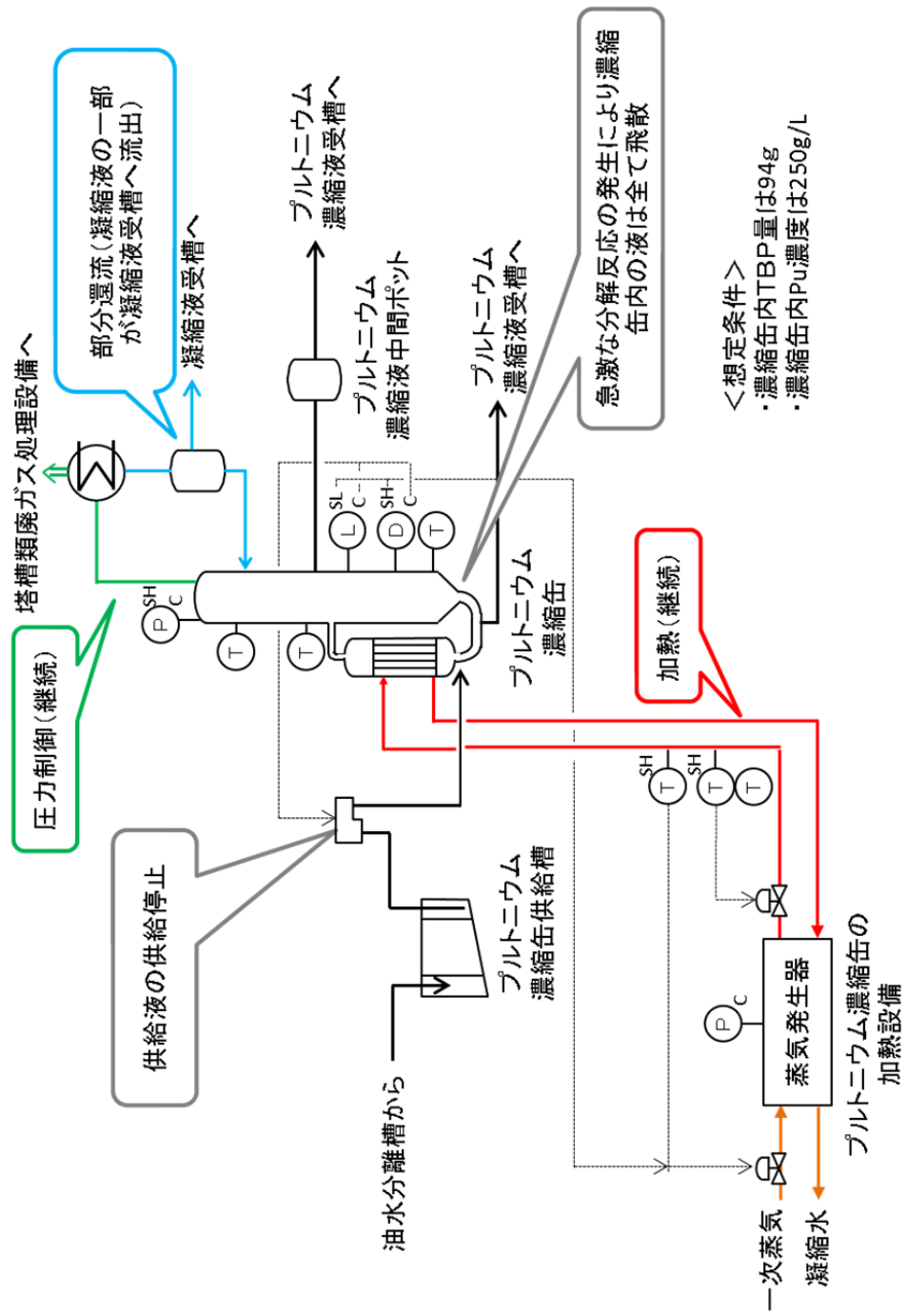


図-1 (1 / 2) 従来のTBP等の錯体の急激な分解反応の事象発生シナリオ (事象の発生まで)

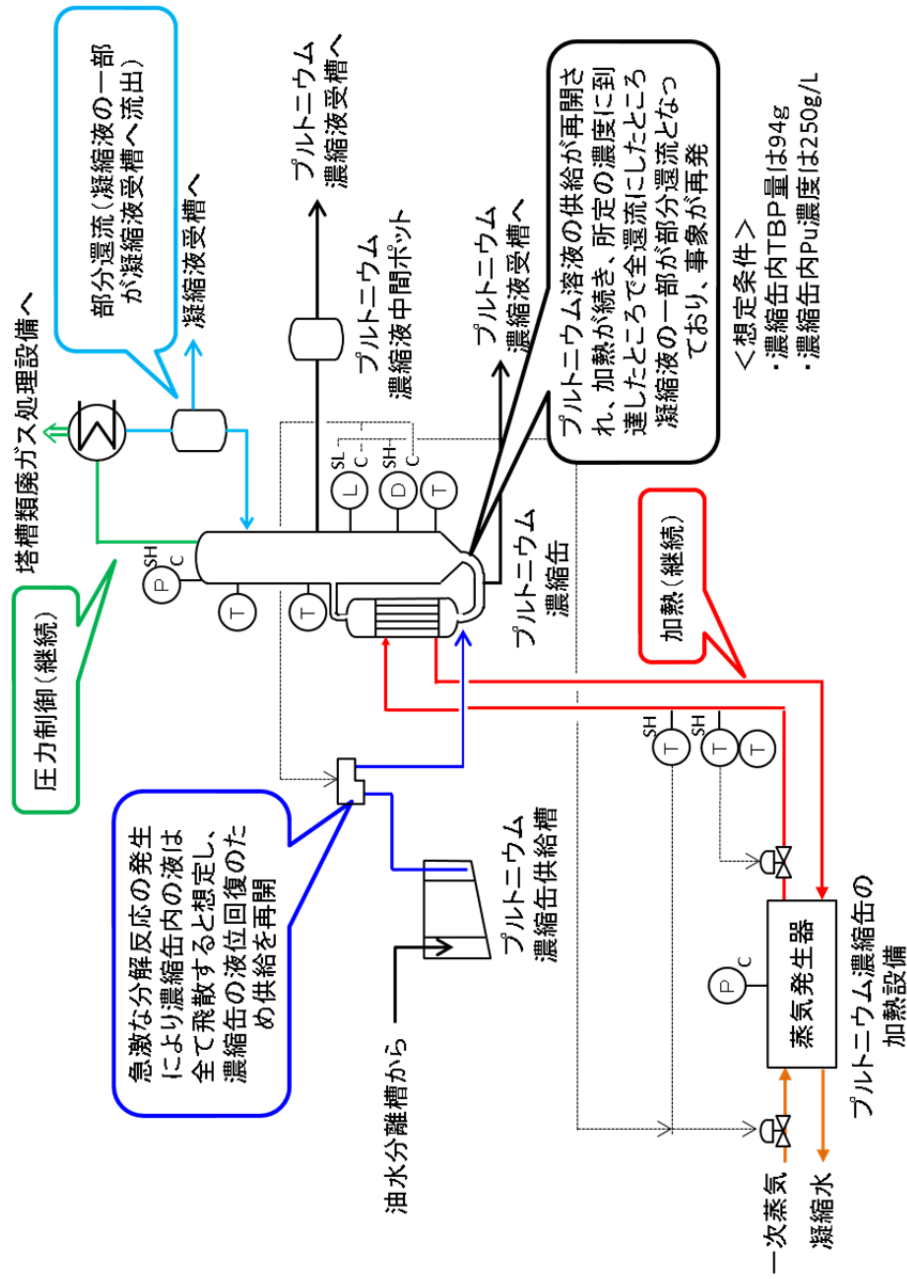
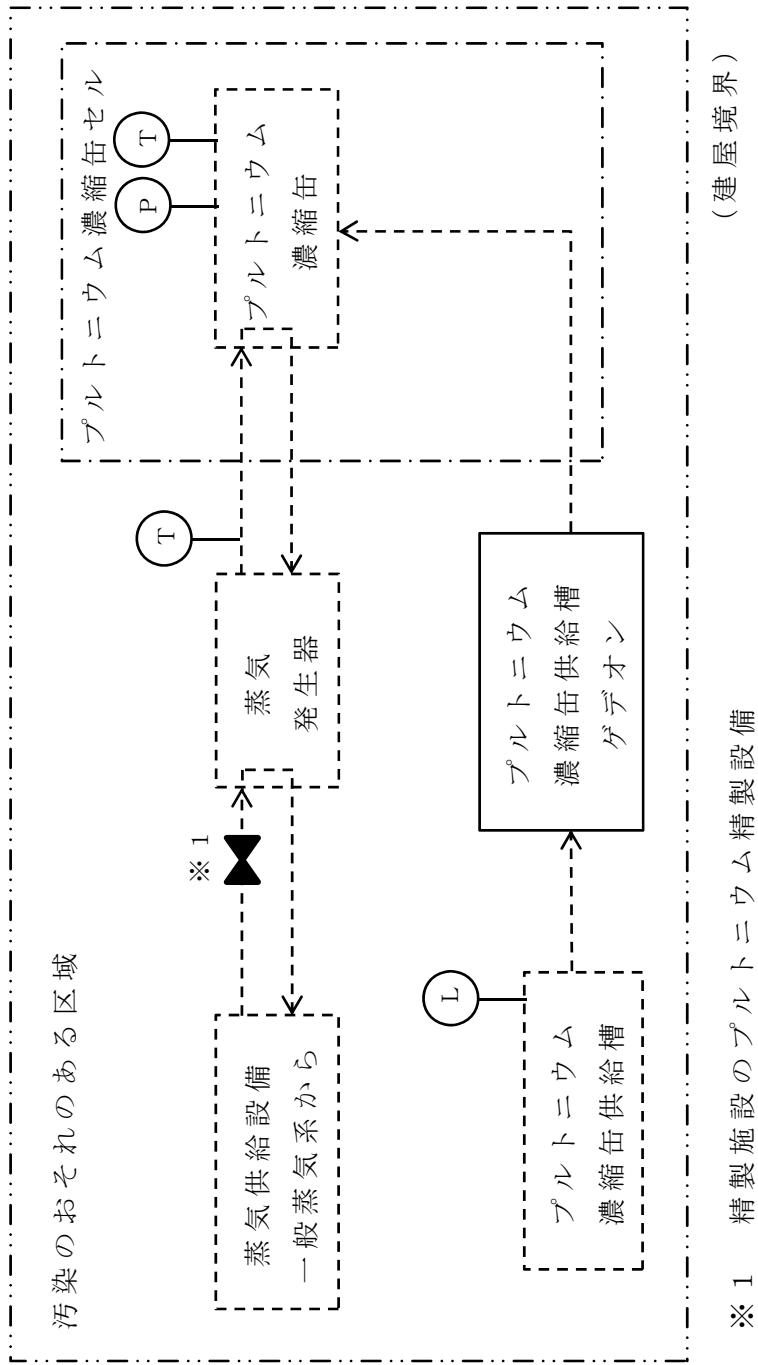


図-1 (2/2) 従来のTBP等の錯体の錯体の急激な分解反応の事象発生シナリオ (事象発生から再発まで)



図一 2 従来の精製建屋の T B P 等の錯体の急激な分解反応に対処するための設備の系統概要図
 (T B P 等の錯体の急激な分解反応収束設備) (プルトニウム濃縮缶)

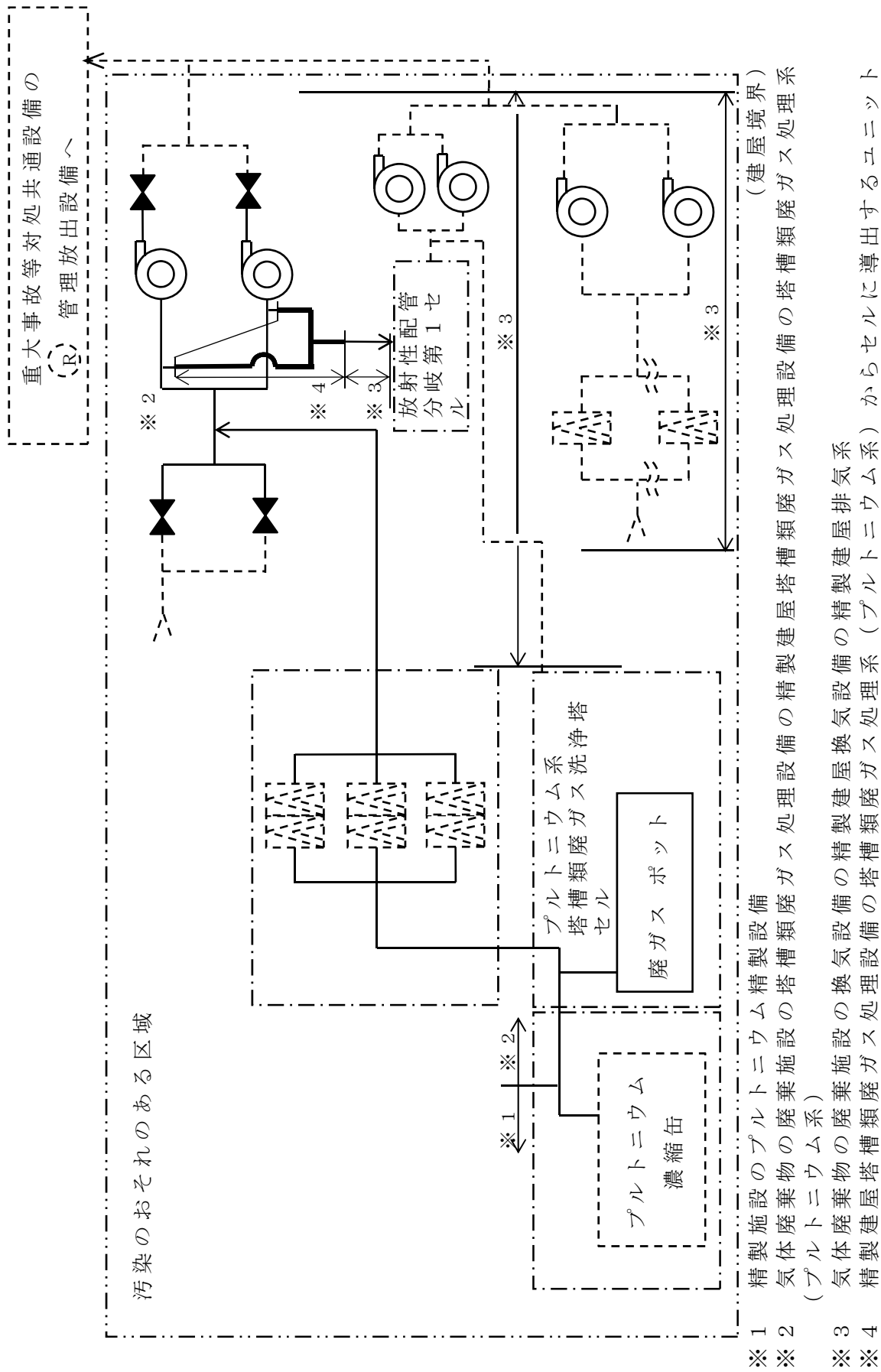
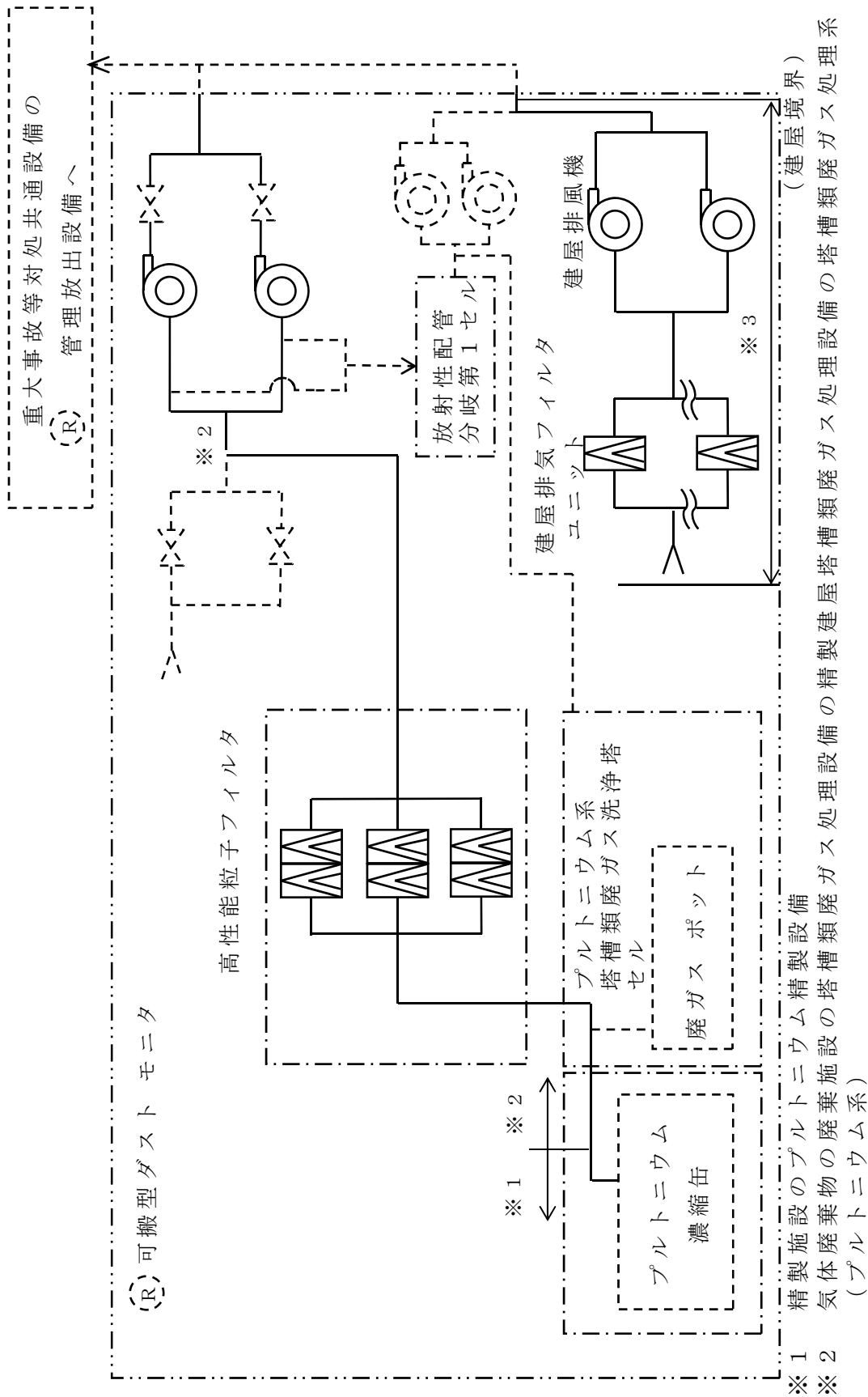


図-3 (1/2) 従来の精製建屋のT B P等の錯体の急激な分解反応に対処するための設備の系統概要図 (換気系統遮断・セル内導出設備) (プルトニウム濃縮缶)



※1 精製プラトニウム系
 気体廃棄物のプラトニウム濃縮缶
 ※2 精製プラトニウム系
 塔槽類のプラトニウムガス洗浄塔
 ※3 精製プラトニウム系
 換気設備のプラトニウム濃縮缶
 (放出影響緩和設備) (プラトニウム濃縮缶)

2. 3 事象発生シナリオの再検討

事象発生シナリオについて、プルトニウム濃縮缶の運転方法を踏まえ、考え得るシナリオを検討した。

2. 3. 1 プルトニウム濃縮缶の運転方法

プルトニウム濃縮缶の運転は、立ち上げ、液位制御による硝酸プルトニウム溶液の濃縮、密度制御による濃縮運転、待機運転、停止に大別される。

立ち上げでは、プルトニウム濃縮缶に硝酸又は硝酸プルトニウム溶液を張り込み、加熱を開始する。

液位制御による硝酸プルトニウム溶液の濃縮では、プルトニウム濃縮缶内の溶液密度を所定の値まで上昇させるため、濃縮缶内の液位が一定となるよう硝酸プルトニウム溶液の供給量を制御しながら濃縮を行う。

密度制御による濃縮運転では、濃縮缶内の硝酸プルトニウム溶液の濃度が 250 g/L に相当する密度となるよう、プルトニウム溶液の供給流量を制御するとともに濃縮した硝酸プルトニウム溶液（以下、「プルトニウム濃縮液」と言う。）の抜き出しを実施する。液位制御による濃縮から密度制御による濃縮は、液位制御と密度制御がともに自動制御モードであり、硝酸プルトニウム溶液の供給流量制御がカスケードモード（液位制御と密度制御の両方からの信号を受け付け、制御を行うモード）となっている状態で自動的に切り替わる。

待機運転は、上流工程からのプルトニウム溶液の移送が遅れる等の理由により短期的に濃縮運転の継続が困難となった場合に実施し、プルトニウム濃縮缶の加熱を継続しながら硝酸プルトニ

ウム溶液の供給は停止し、プルトニウム濃縮缶から発生する凝縮液の全量をプルトニウム濃縮缶に戻すことで、プルトニウム濃縮缶内の液位を保ちながら待機する。

工程停止は、加熱を停止するとともにプルトニウム濃縮液をプルトニウム濃縮缶から抜き出し、硝酸を張り込んで終了となる。

上記運転の概要を図－４に示す。

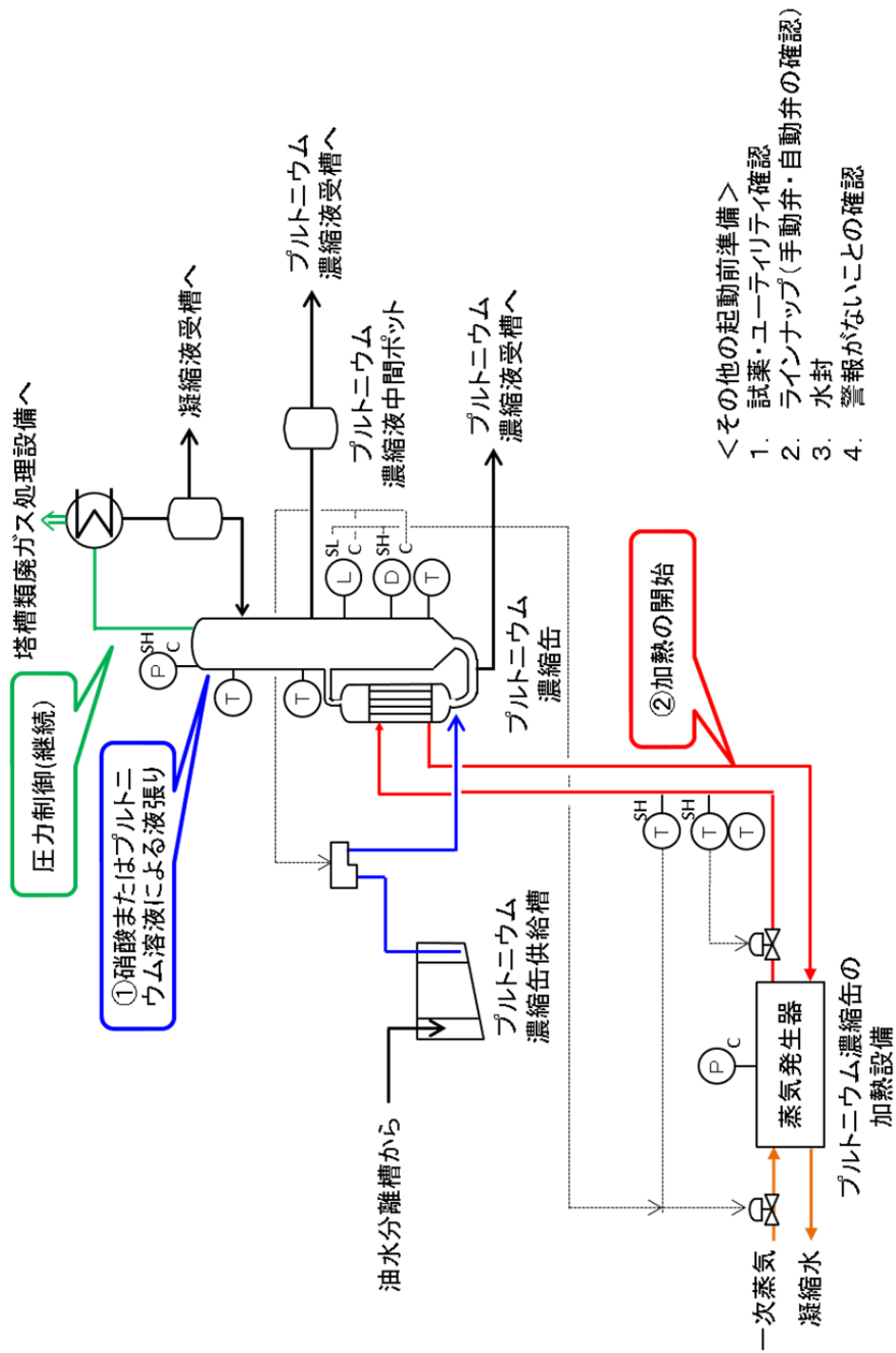


図-4 (1/5) プルトニウム濃縮缶の運転概要 (立ち上げ)

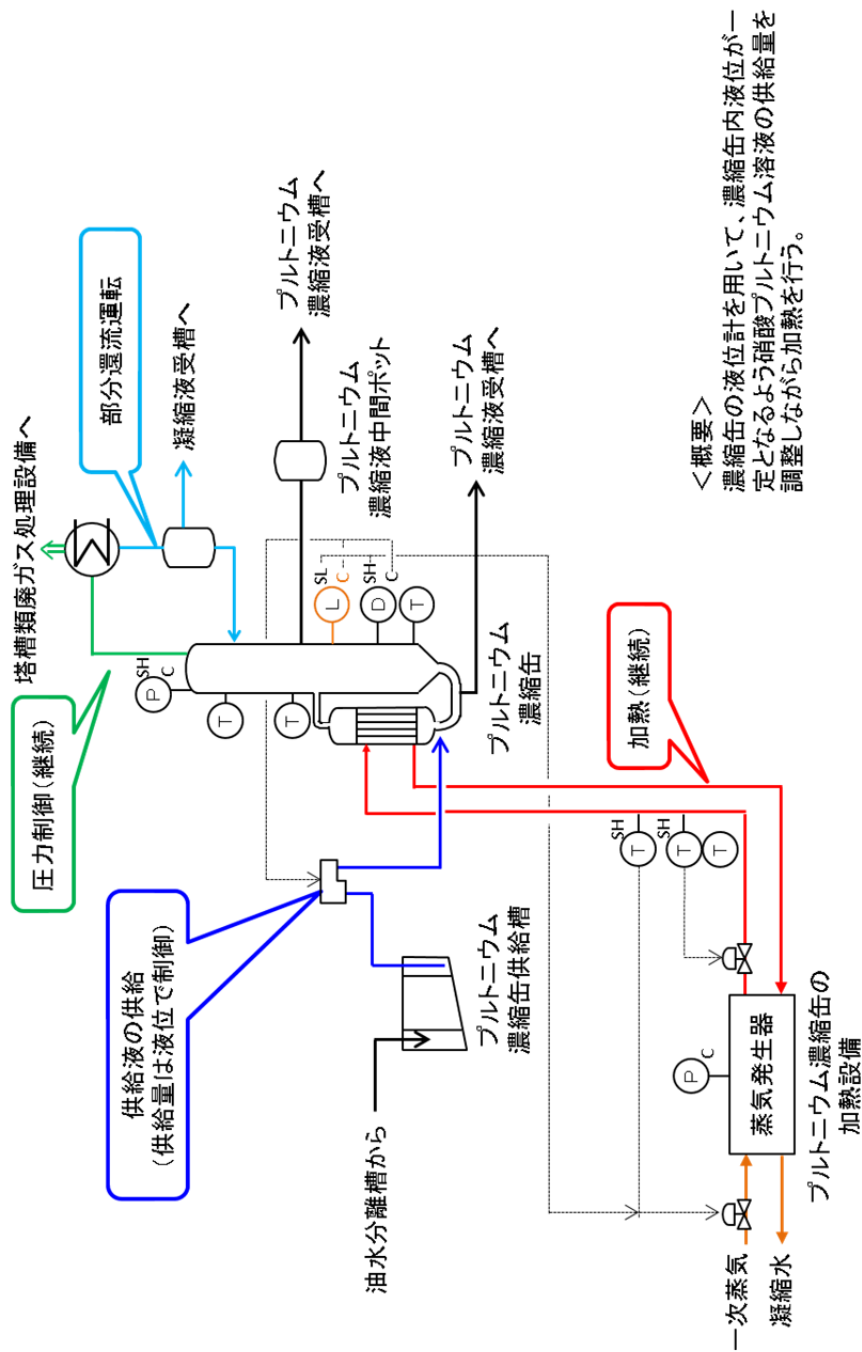


図-4 (2/5) プルトニウム濃縮缶の運転概要 (液位制御運転)

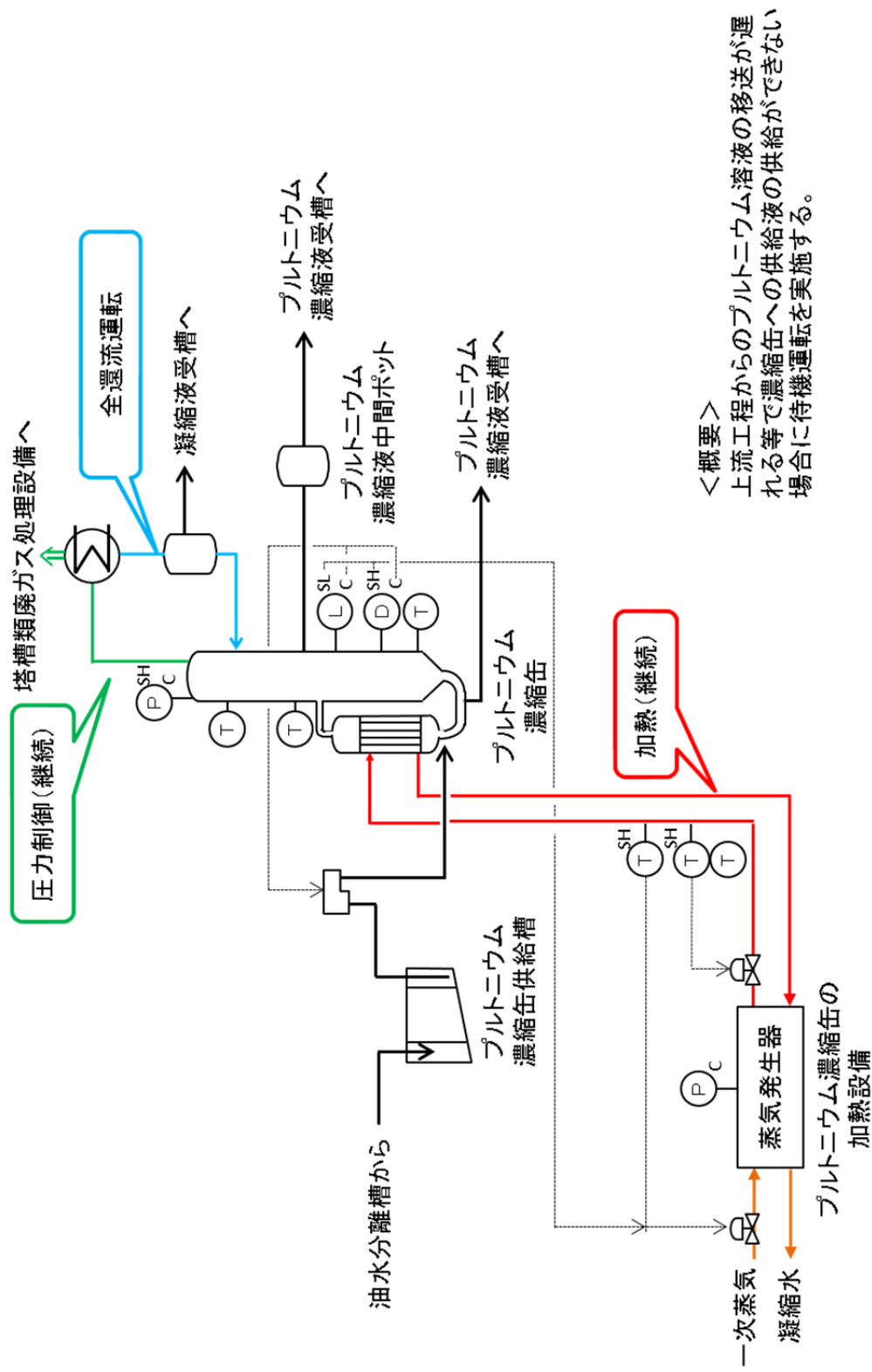
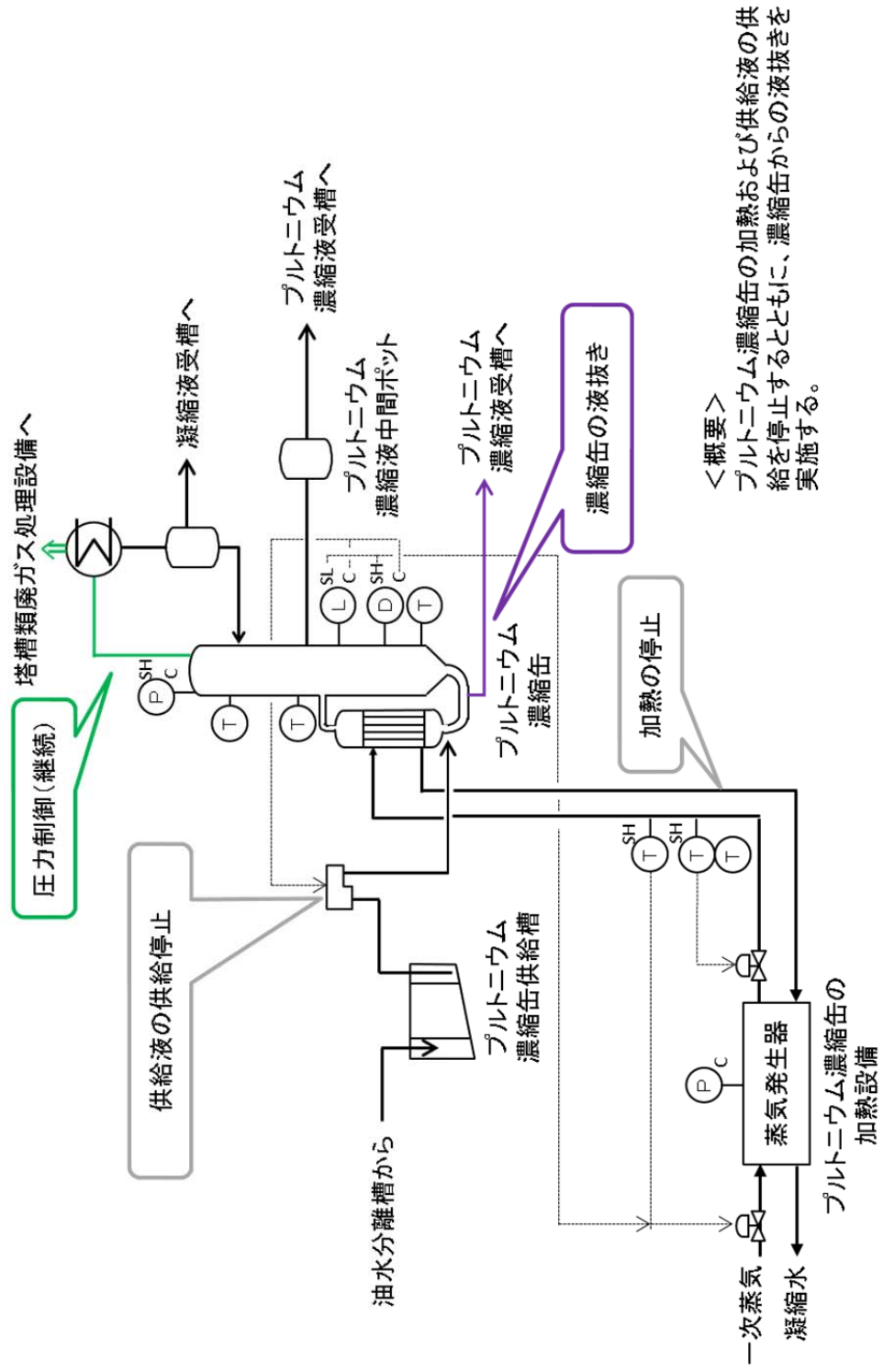


図-4 (4/5) プルトニウム濃縮缶の運転概要 (待機運転)



<概要>
 プルトニウム濃縮缶の加熱および供給液の供給を停止するとともに、濃縮缶からの液抜きを実施する。

図-4 (5 / 5) プルトニウム濃縮缶の運転概要 (停止)

2. 3. 2 起因の整理

プルトニウム濃縮缶での T B P 等の錯体の急激な分解反応に対して、発生防止を期待できる機能としては、以下のものがある。

図－5 に発生防止機能を図示する。

① T B P 等の濃縮缶への持ち込み防止

- ・ T B P 洗浄器における希釈剤洗浄
- ・ 貯槽の下部からの溶液の抜き出し
- ・ 下流工程への移送前における溶液の T B P 濃度の確認
- ・ 油水分離槽からプルトニウム濃縮缶供給槽への移送機器の液位低信号による移送停止

② 加熱蒸気温度の 135℃ への到達防止

- ・ 蒸気発生器における加熱蒸気の圧力（温度）制御
- ・ 加熱蒸気圧力高警報に基づく運転員による対処
- ・ 加熱蒸気温度高警報に基づく運転員による対処
- ・ 加熱蒸気の温度が更に上昇した場合に、インターロックによる蒸気発生器への一次蒸気の供給停止
- ・ 加熱蒸気の温度が更に上昇した場合に、インターロックによる濃縮缶等への加熱蒸気の供給停止
- ・ 運転員による加熱蒸気温度、加熱蒸気圧力の確認

③ 過濃縮（溶液温度の 135℃ 到達）防止

- ・ 濃縮缶の密度制御
- ・ 濃縮缶の密度が異常に上昇した場合に、警報を発するとともにインターロックにより蒸気発生器への一次蒸気の供給停止
- ・ 濃縮缶の液位が異常に低下した場合に、警報を発するとともに

にインターロックにより蒸気発生器への一次蒸気の供給停止

- ・運転員による定期的なログシートの採取による，濃縮缶の密度、液位，温度の確認

T B P 等の錯体の急激な分解反応が発生する場合の、上記の発生防止機能の喪失については、以下の考え方に基づき選定した。選定結果を表－２に示す。

- ・上記①、②及び③の機能を担う主要な機能は喪失する。また、この機能喪失による事象の進展を防止する機能は 2 つまで機能喪失を想定する。
- ・運転員による異常の検知及び対処については、期待しない。

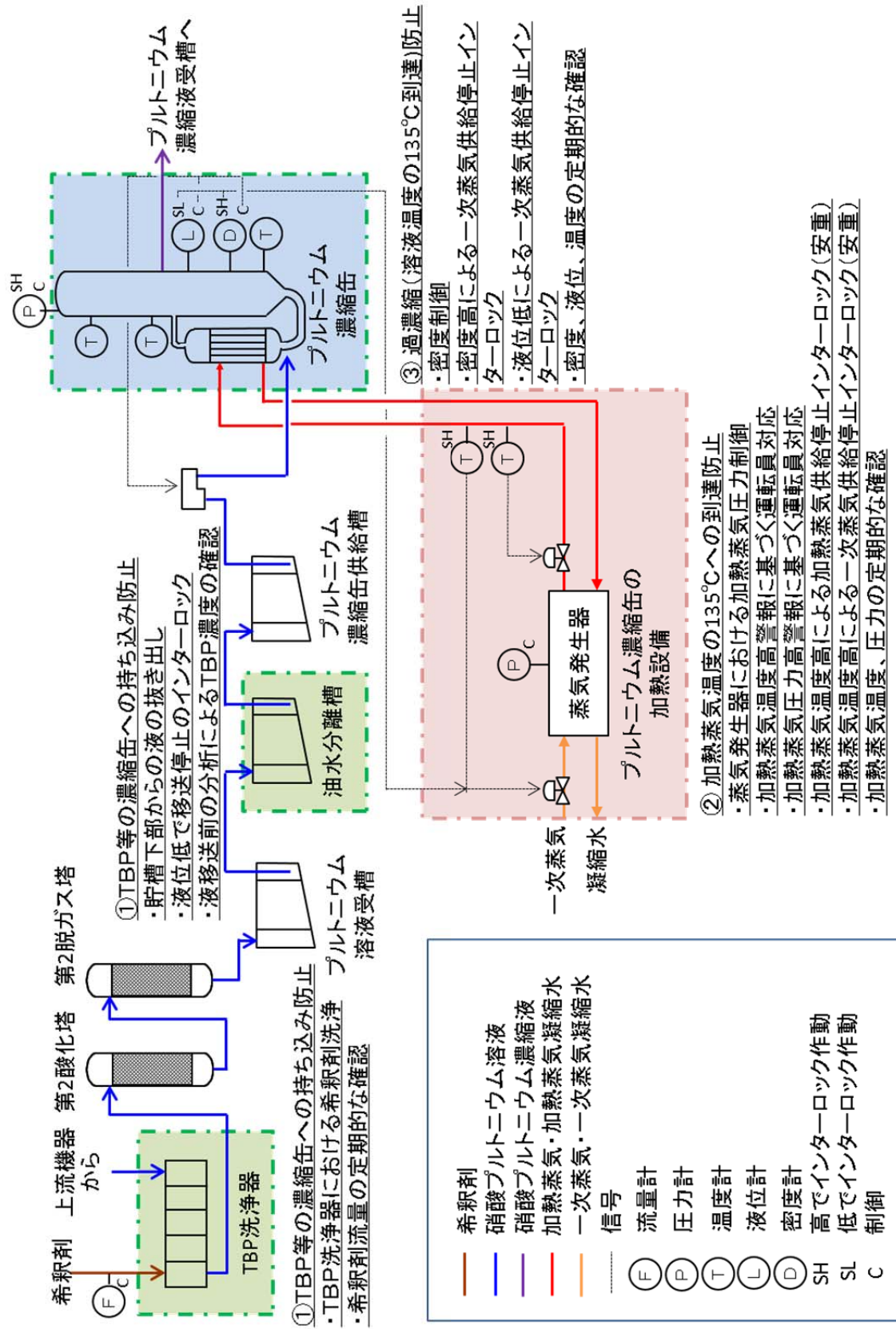


図-5 発生防止機能一覧

表-2 事象発生に関して機能喪失又は機能維持を想定する発生防止機能 (1/7)

No.	発生防止機能 (大分類)	発生防止機能 (詳細) 及び機能喪失の有無	発生防止機能を構成する機能 (小分類) 及び機能喪失の有無	発生防止機能に係る確認等の数	機能喪失の想定	想定の根拠
1	T B P 等の濃縮缶への持ち込み防止	T B P 洗浄器における希釈剤洗浄 (主要な発生防止機能)	希釈剤流量計	1	流量計が正しく機能しないため希釈剤供給 (流量制御) が停止することを想定	
			流量制御機能			
			流量制御弁			
2		運転員による希釈剤流量の定期的な確認による異常の検知及び対応	希釈剤流量計	1	流量計が正しく機能していないため、異常の把握が行えないと想定	
			運転員			
3		貯槽内の抜き出し配管の位置	-	-	-	静的機能であるため機能喪失は想定しない
4		貯槽の下部からの溶液の抜き出し	油水分離槽液位計	-	-	他の喪失する機能との関連がないため、機能維持を想定
		油水分離槽からブルトニウム濃縮缶供給槽への移送機器の液位低停止による移送停止	液位低による移送機器停止インタロック			

表一 2 事象発生に関して機能喪失又は機能維持を想定する発生防止機能 (2 / 7)

No.	発生防止機能 (大分類)	発生防止機能 (詳細) 及び機能喪失の有無	発生防止機能を 構成する機能	発生防止機能を構成する 機能 (小分類) 及び 機能喪失の有無		発生防止に 係る機能の 数	機能喪失の 想定	想定 の根拠
				試料採取設備	分析設備			
5	T B P 等の濃 縮缶への持ち 込み防止	×	下流工程への移送 前における溶液の T B P 濃度の確認	試料採取設備	○	-		他の喪失する機能との 関連がないため、機能 維持を想定
				分析設備	○			
6			運転員による分 析結果の確認	運転員	×	5	運転員によ る認知漏れ を想定	
7	加熱蒸気温度 の 135℃到達 防止	×	蒸気発生器におけ る加熱蒸気の圧力 (温度) 制御 (主要な発生防止 機能)	蒸気発生器圧 力計	×	1	圧力計が正 しく機能し ないことによ る圧力調整 機能の喪 失を想定	
				圧力制御機能	▲			
				圧力制御弁	○			
8	加熱蒸気圧力高警 報に基づく運転員 の対応	×	圧力高警報に基 づく運転員の対 応	蒸気発生器圧 力計	×	1	圧力計が正 しく機能し ていないこと による警報 機能の喪 失を想定	
				蒸気発生器圧 力計の圧力高 報に基づく警報 機能	▲			
				運転員の認知 及び対応	▲			

表-2 事象発生に関して機能喪失又は機能維持を想定する発生防止機能 (3/7)

No.	発生防止機能 (大分類)	発生防止機能 (詳細) 及び機能喪失の有無	発生防止機能を 構成する機能	発生防止機能を構成す る機能(小分類)及び 機能喪失の有無	発生防止 機能に係 る確認等 の数	機能喪失の 想定	想定 の根拠
9	加熱蒸気温度 の135℃到達 防止	加熱蒸気温度高警 報に基づく運転員 の対応	加熱蒸気温度高 警報に基づく運 転員の対応	加熱蒸気温度 計1 ○	1	運転員によ る認知漏れ を想定	
				加熱蒸気温度高 計1の温度高 報に基づく警報 機能 ○			
10		加熱蒸気温度高に よる一次蒸気停止 のインターロック (事象の進展を防 止する機能)	加熱蒸気温度高 の警報に基づく 運転員の対応	加熱蒸気温度 計2 ○	1	運転員によ る認知漏れ を想定	
				加熱蒸気温度高 計2の温度高 報に基づく警報 機能 ○			
				運転員の認知 及び対応 ×			
11		インターロック による一次蒸気 供給停止	加熱蒸気温度高 計2の温度高 報に基づく一次 蒸気供給停止 回路 ○	1	一次蒸気遮 断の機能 喪失による インターロ ックの機能 喪失を想定		
							加熱蒸気温度高 計2の温度高 報に基づく警報 機能 ○
							運転員の認知 及び対応 ×

表一 2 事象発生に関して機能喪失又は機能維持を想定する発生防止機能 (4 / 7)

No.	発生防止機能 (大分類)	発生防止機能 (詳細) 及び機能喪失の有無	発生防止機能を構成する機能 (小分類) 及び機能喪失の有無	発生防止機能に係る機能の数	機能喪失の想定	想定の根拠
12	加熱蒸気温度の 135℃ 到達防止	加熱蒸気温度高による濃縮缶等への加熱蒸気供給停止のインタローック (事象の進展を防止する機能)	加熱蒸気温度高計 3	1	運転員による認知漏れを想定	
			加熱蒸気温度高計 3 の温度高報に基づく警報機能			
13		インタローックによる加熱蒸気供給停止	加熱蒸気温度高計 3 の温度高報に基づく加熱蒸気供給回路	1	加熱蒸気遮断の機能喪失によるインタローックの機能喪失を想定	
			加熱蒸気遮断弁			

表一 2 事象発生に関して機能喪失又は機能維持を想定する発生防止機能 (5 / 7)

No.	発生防止機能 (大分類)	発生防止機能 (詳細) 及び機能喪失の有無	発生防止機能を 構成する機能	発生防止機能を構成す る機能 (小分類) 及び 機能喪失の有無	発生防止 機能に係 る確認等 の数	機能喪失の 想定	想定 of 根拠
14	加熱蒸気温度 の 135℃への 到達防止	運転員による加熱 蒸気温度、加熱蒸 気圧力、一次蒸気 温度の確認	確認による異常 の検知及び対応	×	1	蒸気発生器 圧力計及び 運転員によ る漏れ を想定	
				×			
				○			
				○			
15	過濃縮 (溶液温 度の 135℃到 達) 防止	濃縮缶の密度制御 (主要な発生防止 機能)	濃縮缶への供給流 量の調整による 密度の制御	○	-	誤操作によ り密度制御 に切り替わ らない状態 を想定	
				×			
				○			
				○			
16	濃縮缶等の密度高 による蒸気発生器 への一次蒸気供給 停止インターロッ ク	密度高の警報に 基づく運転員の 対応	濃縮缶密度計 の密度高に基 づく警報機能	○	1	運転員によ る漏れ を想定	
				○			
				○			
				×			

表-2 事象発生に関して機能喪失又は機能維持を想定する発生防止機能 (6 / 7)

No.	発生防止機能 (大分類)	発生防止機能 (詳細) 及び機能喪失の有無	発生防止機能を 構成する機能	発生防止機能を構成す る機能 (小分類) 及び 機能喪失の有無	発生防止に係 る機能に係 る確認等 の数	機能喪失の 想定	想定 of 根拠	
17	過濃縮 (溶液温 度の 135℃ 到 達) 防止	濃縮缶等の密度高 による蒸気発生器 への一次蒸気供給 停止インターロッ ク	インターローロック による一次蒸気 供給停止	プルトニウム 濃縮缶密度計	1	機能喪失を 想定	一次蒸気遮断弁は No.11 にて機能喪失を 想定しているため、本 インターロックも機能 喪失 (作動不可) と想 定。	
				プルトニウム 濃縮缶密度計 の密度高に基 づくインター ロック回路				
				一次蒸気遮断 弁				×
18		濃縮缶等の液位低 による蒸気発生器 への一次蒸気供給 停止インターロッ ク	液位低の警報に 基づく運転員の 対応	プルトニウム 濃縮缶液位計	-	機能維持	液位制御が維持される ことで過濃縮が進むこ とを想定するため、機 能は維持	
				プルトニウム 濃縮缶液位計 の液位低に基 づく警報機能				
				運転員による 認知及び対応				○

表-2 事象発生に関して機能喪失又は機能維持を想定する発生防止機能 (7/7)

No.	発生防止機能 (大分類)	発生防止機能 (詳細) 及び機能喪失の有無	発生防止機能を構成する機能 (小分類) 及び機能喪失の有無	発生防止機能に係る確認等の数	機能喪失の想定	想定の根拠								
19	過濃縮 (溶液温度の 135℃到達) 防止	濃縮缶等の液位低下による蒸気発生器への一次蒸気供給停止インターロック	<table border="1"> <tr> <td>プルトニウム濃縮缶液位計</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>プルトニウム濃縮缶液位計の液位低に基づくインターロック回路</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>一次蒸気遮断弁</td> <td>×</td> </tr> </table>	プルトニウム濃縮缶液位計	○	プルトニウム濃縮缶液位計の液位低に基づくインターロック回路	○	一次蒸気遮断弁	×	1	機能喪失を想定	一次蒸気遮断弁は No.11 にて機能喪失を想定しているため、本インターロックも機能喪失 (作動不可) と想定。		
プルトニウム濃縮缶液位計	○													
プルトニウム濃縮缶液位計の液位低に基づくインターロック回路	○													
一次蒸気遮断弁	×													
20	過濃縮 (溶液温度の 135℃到達) 防止	プルトニウム濃縮缶の密度、液位、温度の定期的な確認	<table border="1"> <tr> <td>プルトニウム濃縮缶液位計</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>プルトニウム濃縮缶溶液温度</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>プルトニウム濃縮缶気相部温度</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>運転員による認知及び対応</td> <td>×</td> </tr> </table>	プルトニウム濃縮缶液位計	○	プルトニウム濃縮缶溶液温度	○	プルトニウム濃縮缶気相部温度	○	運転員による認知及び対応	×	16	運転員による認知漏れを想定	
プルトニウム濃縮缶液位計	○													
プルトニウム濃縮缶溶液温度	○													
プルトニウム濃縮缶気相部温度	○													
運転員による認知及び対応	×													

【凡例】

- ：機能維持
- ▲：他の機能の喪失により自身の機能が喪失
- ×：自身の機能が喪失

2. 3. 3 事象発生シナリオ

事故の起因の中で、その状態に至るまでの過程の違いにより事故の規模や対処が変わるものとして、過濃縮により 135℃に至るまでのシナリオが挙げられる。

過濃縮はプルトリウム濃縮缶内に硝酸プルトリウム溶液があり、加熱を行っている状態でプルトリウム濃縮液の抜き出しが行われない状態でなければ発生しない。2. 3. 1に記載したプルトリウム濃縮缶の運転方法を踏まえると、過濃縮に至るシナリオは、待機運転の実施中に凝縮液が下流工程へ流出する場合と、硝酸プルトリウム溶液の濃縮運転中に硝酸プルトリウム溶液の供給は継続するがプルトリウム濃縮液の抜き出しが行われない場合の2ケースのみが想定される。各ケースの詳細を以下に示す。

(1) ケース1：待機運転時の過濃縮

待機運転時、プルトリウム濃縮缶の加熱により発生した蒸発蒸気は、凝縮器において凝縮させ、全量を凝縮液としてプルトリウム濃縮缶に戻すが、何らかの誤操作により一部の凝縮液が下流工程に移送される状態で待機運転が継続されることを想定する。時間の経過とともに濃縮缶内の液位が低下し、プルトリウム濃縮液の濃度が高まることで沸点が上昇し、最終的に 135℃を超える状態に至る。

なお、プルトリウム濃縮液は、希釈剤洗浄が行われず T B P 濃度が高い状態の硝酸プルトリウム溶液を処理することでプルトリウム濃度は 250 g / L、濃縮缶内の T B P 量は 94 g となっており、加熱蒸気温度は、待機運転が開始され凝縮液の一部が下流工程に移送される状態が始まった時点で 135℃を超えていると

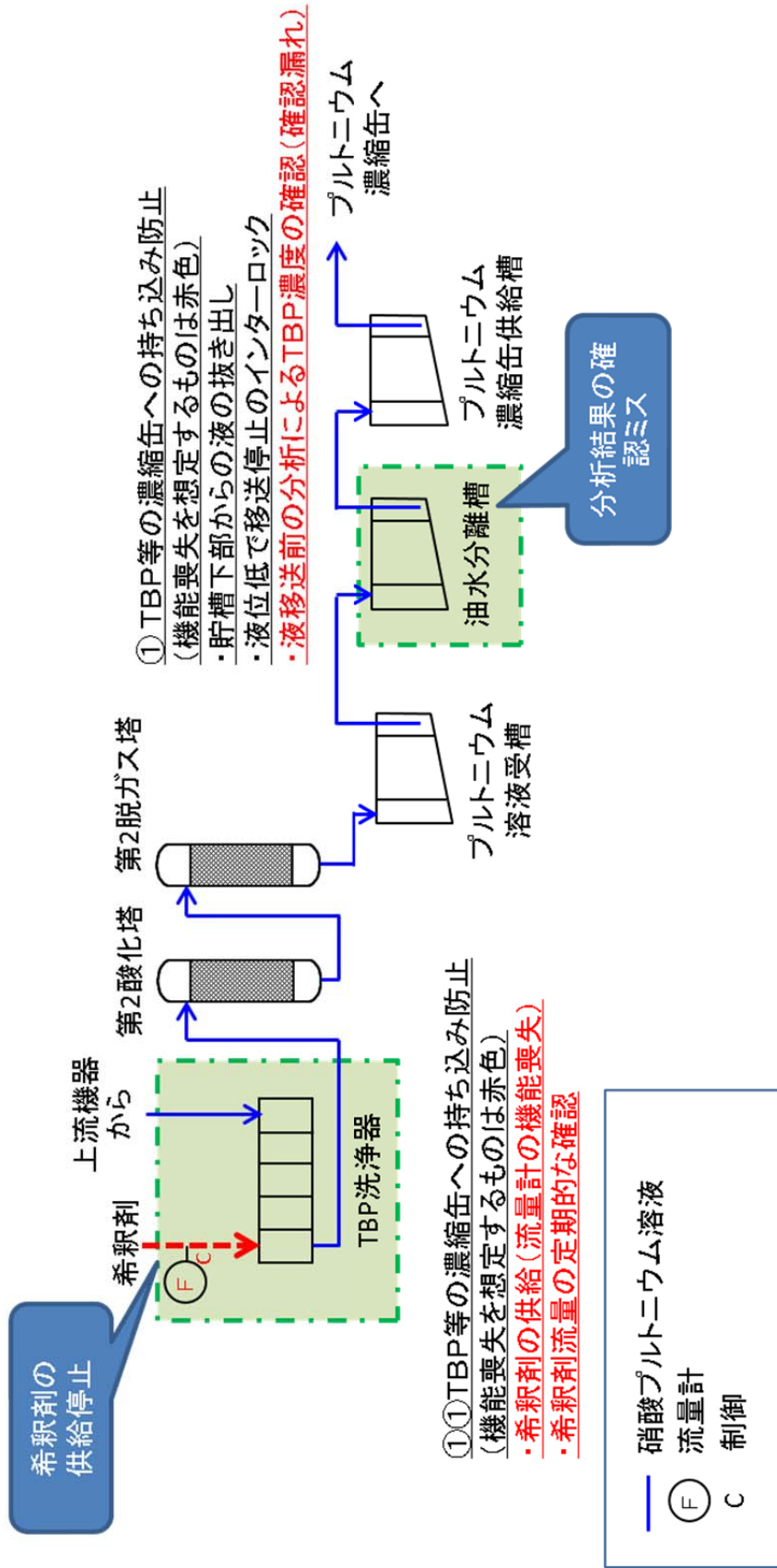
想定する。

このケースでは、異常の発生（待機運転状態で凝縮液の一部が下流工程に移送される）から事象の発生（800 g / L への到達）までの時間は約 29 時間となる。

ケース 1 の運転状態を図－6、事象発生の起因となる発生防止機能の喪失状態を図－7 に示す。

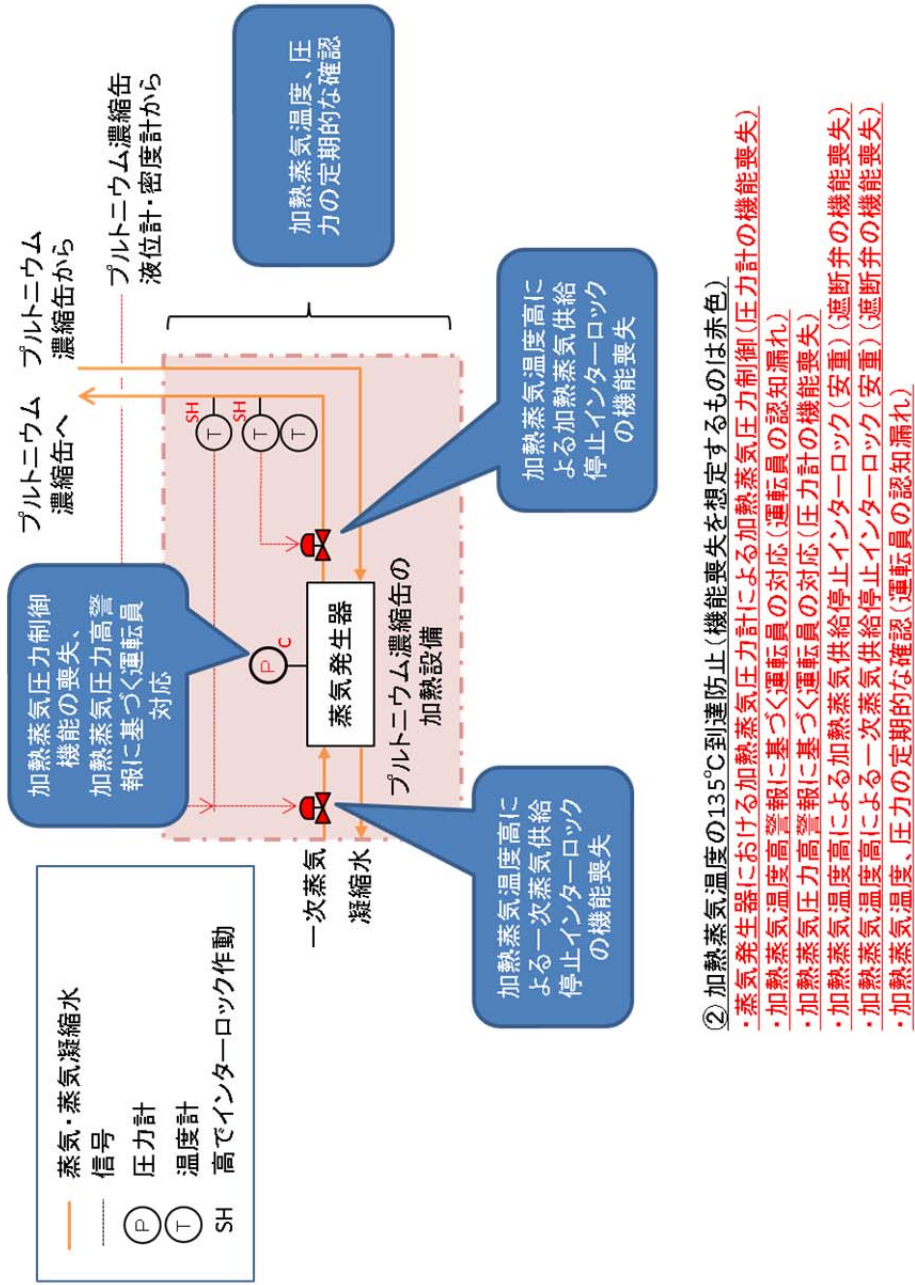
ケース 1 の場合、事象発生時にはプルトニウム溶液の供給は停止している状態であり、事象発生後の再供給は実施しない。また、T B P 等の錯体の急激な分解反応により、T B P 等の錯体は全てが分解されてしまうことから、事象発生後はプルトニウム濃縮缶内には T B P 等が存在しないこととなるため、T B P 等の錯体の急激な分解反応は再発しない。

TBP等の混入防止に係る機能の喪失



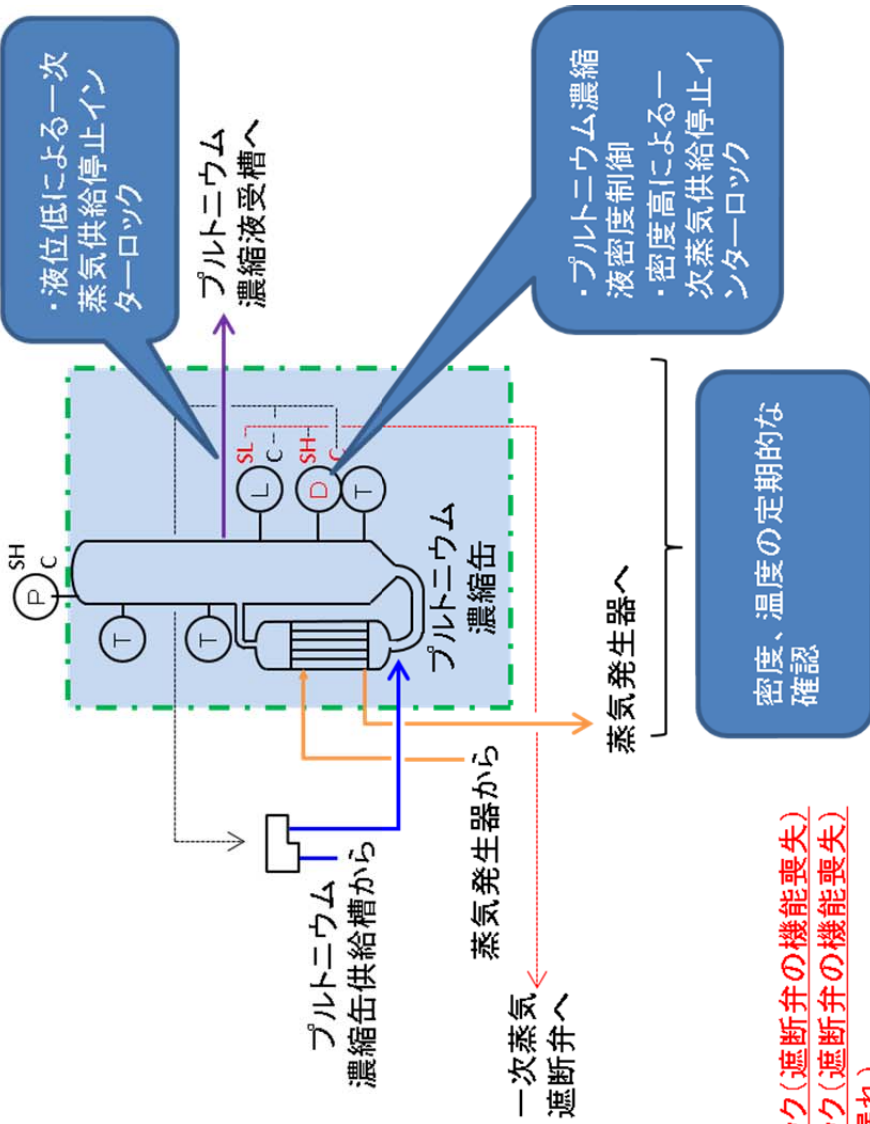
図ー7 想定シナリオケース1の事象発生の原因となる発生防止機能の喪失状態 (1 / 3)

加熱蒸気温度の135℃到達防止に係る機能の喪失



図－7 想定シナリオケース1の事象発生時の起因となる発生防止機能の喪失状態 (2 / 3)

過濃縮防止に係る機能の喪失



- 硝酸プルトリウム溶液
- 硝酸プルトリウム濃縮液
- 蒸気・蒸気凝縮水
- - - 信号
- P 圧力計
- T 温度計
- L 液位計
- D 密度計
- SH 高でインターロック作動
- SL 低でインターロック作動
- C 制御

- ③ 過濃縮(溶液温度の135°C到達)防止
(機能喪失を想定するものは赤色)
- ・プルトリウム濃縮液密度制御(誤操作)
- ・密度高による一次蒸気供給停止インターロック(遮断弁の機能喪失)
- ・液位低による一次蒸気供給停止インターロック(遮断弁の機能喪失)
- ・密度、温度の定期的な確認(運転員の認知漏れ)

図-7 想定シナリオケース1の事象発生の原因となる発生防止機能の喪失状態 (3 / 3)

(2) ケース2：濃縮運転中の過濃縮

液位制御による硝酸プルトニウム溶液の濃縮運転を実施しており、所定の密度に到達したことから、通常であれば自動で密度制御に切り替わるところが、液位制御の制御モードが手動制御モードとなっており、密度制御への自動切り替えが行われず、液位制御による運転が継続することを想定する。さらに、加熱蒸気についても、この異常の発生と同時に圧力制御機能が喪失し、温度が上昇すると想定する。この状態では、硝酸プルトニウム溶液の供給は継続されるがプルトニウム濃縮液の抜き出しは行われないため、過濃縮が進むと想定する。プルトニウム濃縮液の密度の上昇が継続し、沸点が 135℃に相当する 800 g / L に到達した時点で事象が発生する。

このケースでは、異常の発生（密度制御機能の自動切り替えの未実施及び加熱蒸気温度の上昇）から事象の発生（800 g / L への到達）までの時間は、硝酸プルトニウム溶液の供給流量（ L / h）と供給する硝酸プルトニウム溶液のプルトニウム濃度（24 g / L）から、約 時間となる。

ケース2の運転状態を図-8、事象発生の起因となる発生防止機能の喪失状態を図-9に示す。

ケース2の場合、事象発生時にはプルトニウム溶液の供給が継続しており、事象の継続（再発）が想定される。

 について商業機密の観点から公開できません。

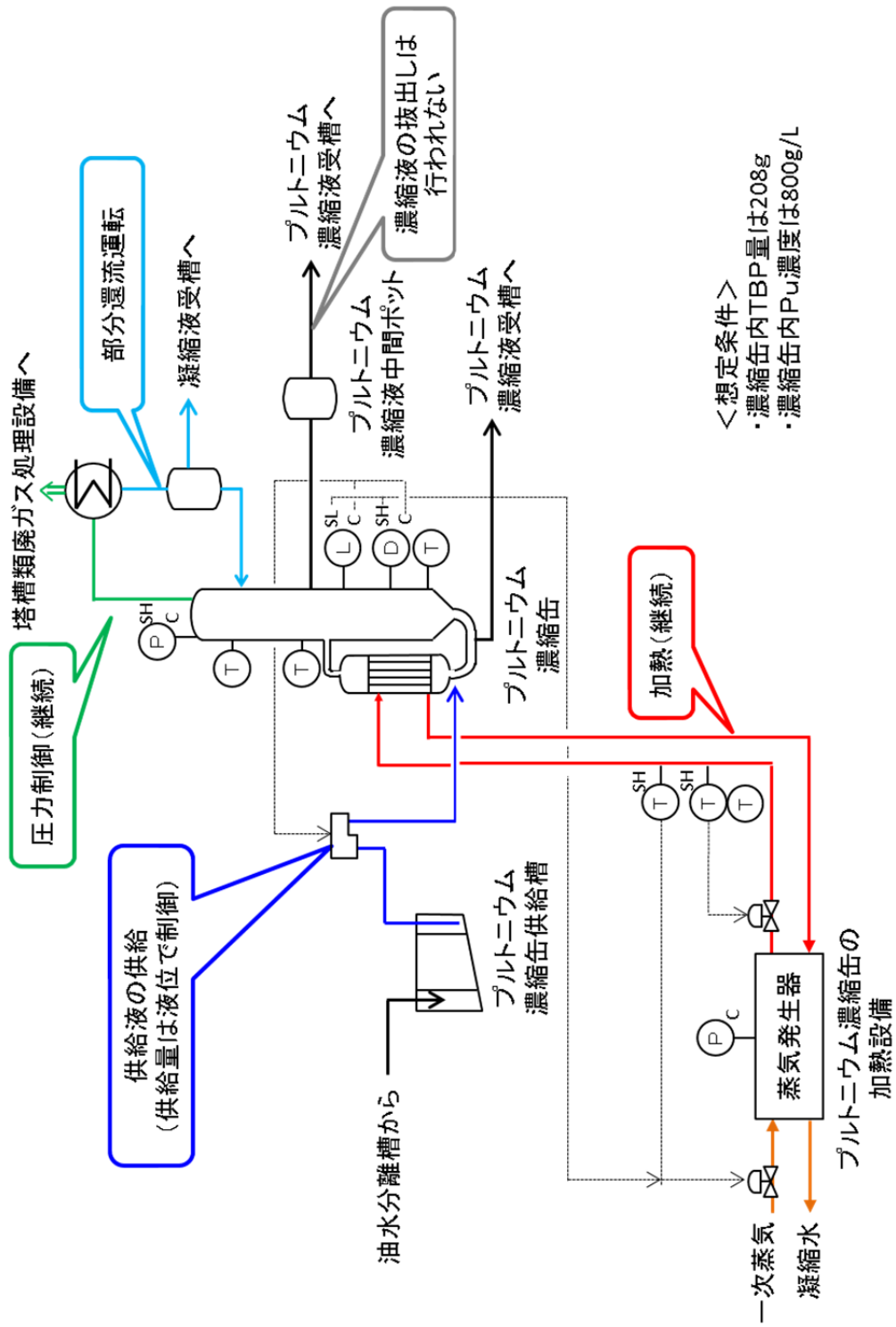


図-8 想定シナリオケース2の運転状態

TBP等の混入防止に係る機能の喪失

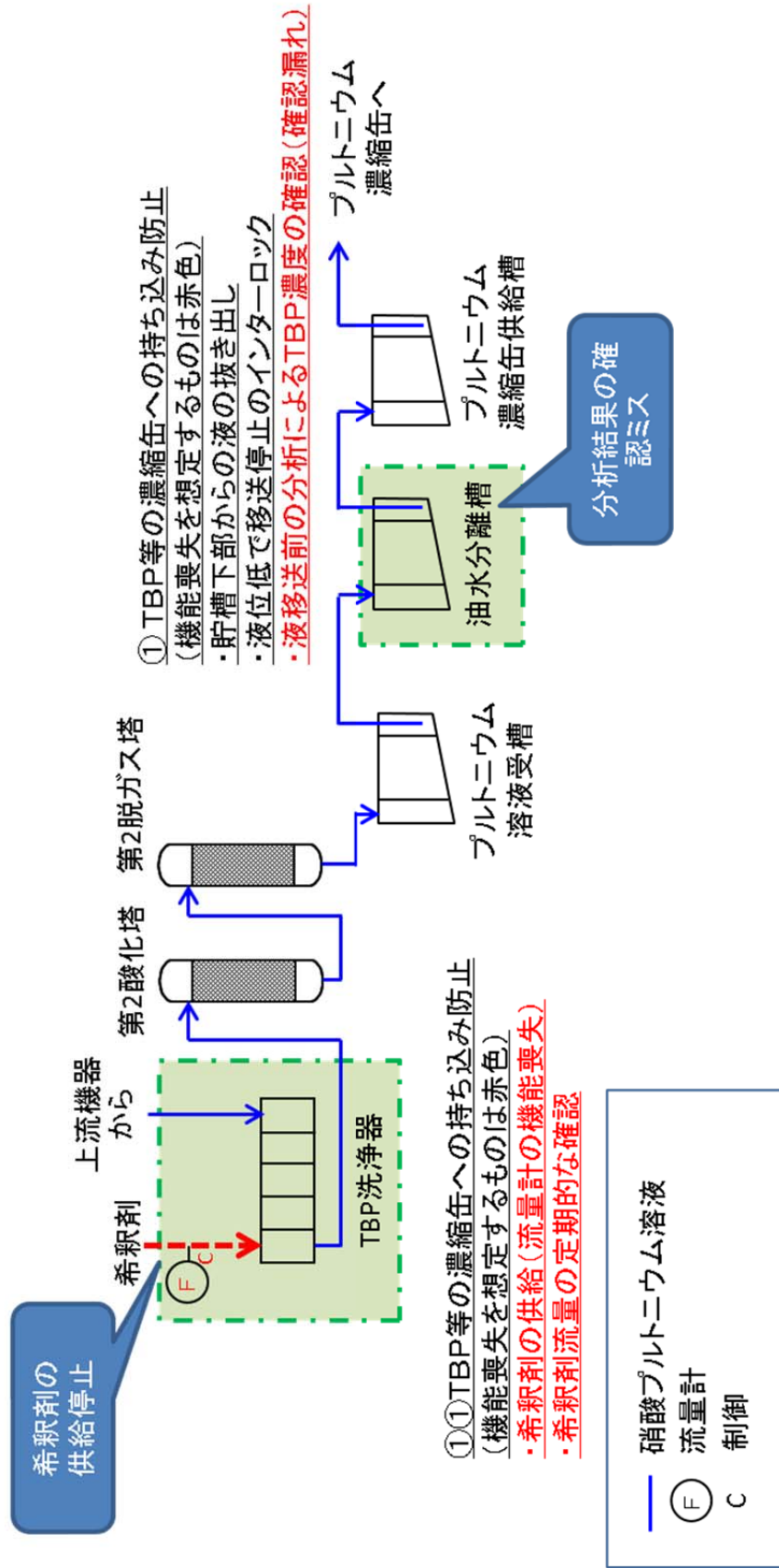
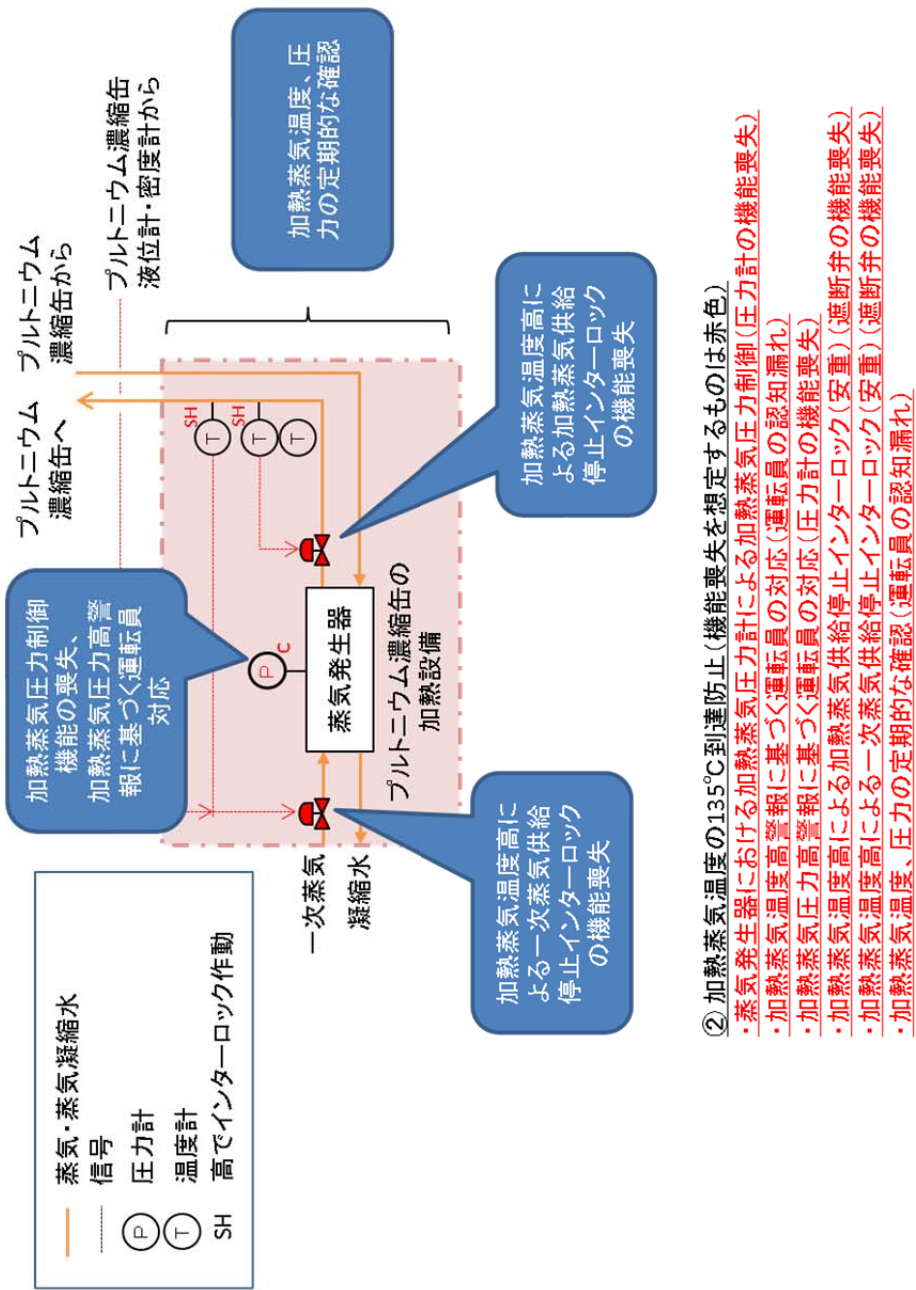


図-9 想定シナリオケース2の事象発生時の起因となる発生防止機能の喪失状態 (1/3)

加熱蒸気温度の135℃到達防止に係る機能の喪失



図－9 想定シナリオケース2の事象発生の原因となる発生防止機能の喪失状態(2/3)

過濃縮防止に係る機能の喪失

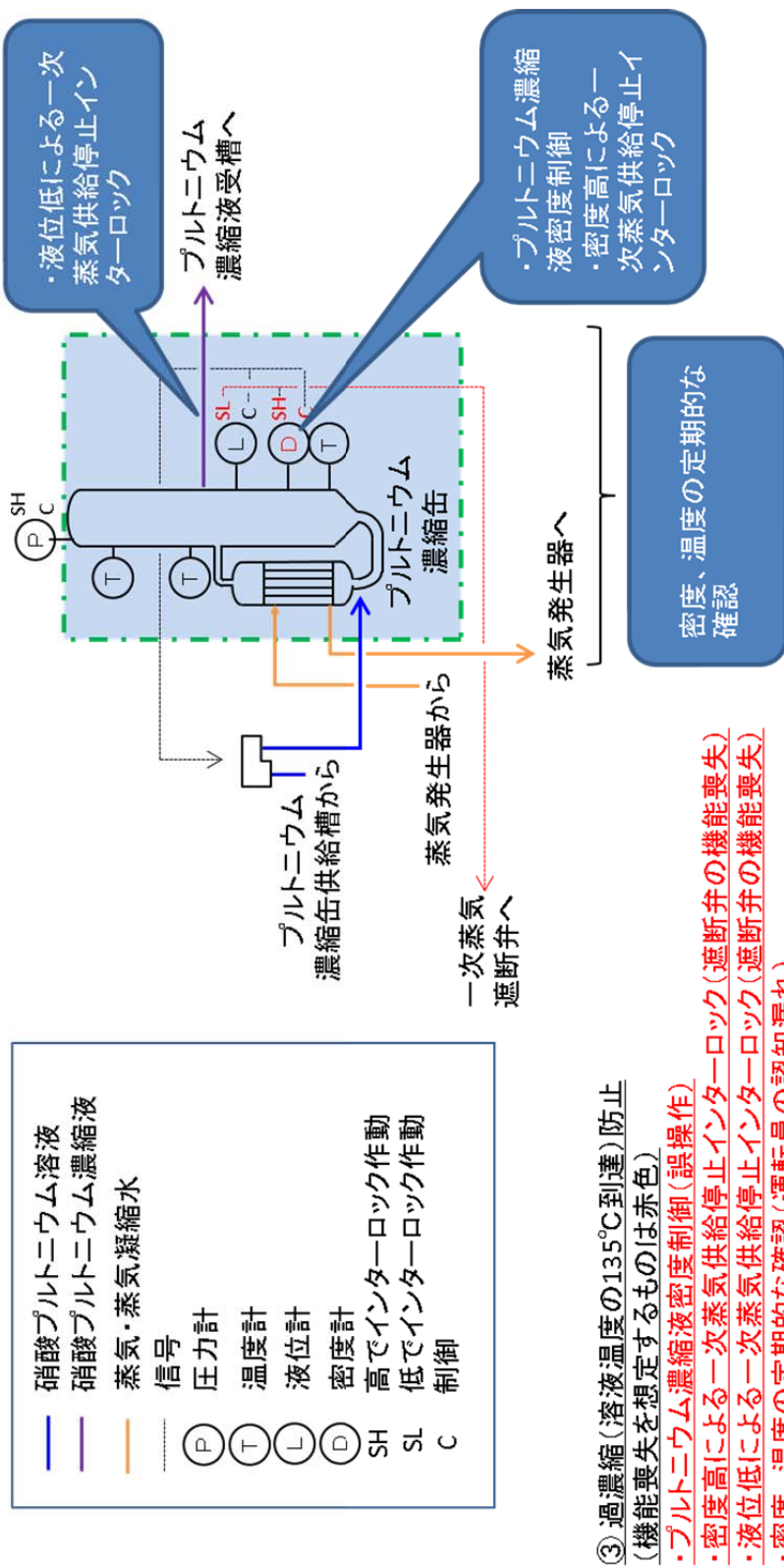


図-9 想定シナリオケース2の事象発生の原因となる発生防止機能の喪失状態 (3 / 3)

ケース 1 とケース 2 について、事象発生までの時間、事象の大きさ、再発の可能性等について比較を行った。結果を表 3 に示す。

比較の結果、以下の観点からケース 2 を対象とする。

- ・ケース 2 は、反応する T B P 等の量及び放出放射エネルギーが多い
- ・ケース 2 は、事象発生時にもプルトニウム溶液をプルトニウム濃縮缶へ供給しており事象が再発（継続）する可能性があるため、拡大防止対策として実施すべき事項がケース 1 よりも多く、ケース 2 の拡大防止対策を行うことでケース 1 においても拡大防止が可能

表－3：ケース1とケース2の比較（1／3）

項目	ケース1	ケース2
事象発生までの時間	異常の発生（待機運転状態で凝縮液の一部が下流工程に移送される）から事象の発生（800 g / L への到達）までの時間は約 29 時間となる。	異常の発生（液位制御から密度制御へ切り替わるべき状態で液位制御が継続）から事象の発生（800 g / L への到達）までの時間は約 ■■■■ 時間となる。
反応に使われる T B P 量	反応に使われる T B P 等の錯体量（T B P 等の量）は、約 24 g / L のプルトニウム溶液を 250 g / L に濃縮するために必要なプルトニウム溶液量に相当する量（94 g）	反応に使われる T B P 等の錯体量（T B P 等の量）は、250 g / L のプルトニウム濃縮液を、約 24 g / L のプルトニウム溶液を用いて 800 g / L に濃縮するために必要な硝酸プルトニウム溶液量に相当する量（約 208 g）
事象の大きさ（圧力、温度、放出放射エネルギー）	濃縮缶の健全性は保たれ、V O G の高性能粒子フィルタの健全性も維持できる。放出放射エネルギーは現状と同じ。	濃縮缶の健全性は保たれ、V O G の高性能粒子フィルタの健全性も維持できる。放出放射エネルギーは、T B P 等の量が増えるため A R F が上昇することから増加する。

■■■■ について商業機密の観点から公開できません。

表－３：ケース１とケース２の比較（２／３）

項目	ケース１	ケース２
再発の可能性	<p>事象発生時にはプルトニウム溶液の供給は停止している状態であり、事象発生後の再供給は実施しない。また、T B P等の錯体の急激な分解反応により、T B P等の錯体は全てが分解されてしまうことから、事象発生後はプルトニウム濃縮缶内にはT B P等が存在しないこととなるため、再発しない。</p>	<p>事象発生時にもT B P濃度が高いプルトニウム溶液をプルトニウム濃縮缶へ供給しており、缶内が高温、高硝酸濃度であることを踏まえると、供給したプルトニウム溶液に含まれるT B P等が、プルトニウム濃縮缶に供給した瞬間に分解反応を起こす可能性が否定できないため、再発（事象の継続）を想定する。</p>
拡大防止対策	<p>拡大防止対策は、プルトニウム溶液の供給が停止していることから、拡大防止対策は不要。</p>	<p>拡大防止対策は、プルトニウム溶液の供給の停止及び加熱の停止が必要。</p>

表－３：ケース１とケース２の比較（３／３）

項目	ケース１	ケース２
異常な水準の放出防止対策	<p>１回の反応による放射性物質の放出を考慮する。再発しないため、再発を考慮した対策は不要。</p>	<p>プルトニウム溶液の供給を止めるまでは放射性物質の放出が継続する可能性があるため、プルトニウム溶液の供給停止までを考慮した対策（再発を考慮した対策）が必要。</p>
対策に対する時間余裕	<p>拡大防止対策については、事象の再発がないことから、時間制限はない。</p>	<p>事象が再発（継続）していることから、拡大防止対策は速やかに実施する必要がある。</p>

2. 4 事象発生シナリオ変更による影響

2. 3 で示したケース 2 を採用した場合、現在の事故想定及び対策のうち変更を受けるもの及びその影響度合いは以下のとおり。

2. 4. 1 T B P 等の錯体の急激な分解反応を起こす T B P 等の量の増加による影響

プルトニウム濃縮缶に供給される T B P 等の量は、T B P 等の濃度の高いプルトニウム溶液を供給しながら過濃縮に至ることから、従来の 94 g から約 208 g に増加する。

T B P 等の量が増加することにより、T B P 等の錯体の急激な分解反応が発生した場合の放射性物質の気相への移行割合 (A R F) が増大し、放出放射エネルギーが増大する。また、プルトニウム濃縮缶内のプルトニウム量が従来の評価よりも増えるため、M A R も増大する。T B P 等の錯体の急激な分解反応によるプルトニウム濃縮缶から精製建屋塔槽類廃ガス処理設備の塔槽類廃ガス処理系 (プルトニウム系) (以下、「V O G」と言う。) の高性能粒子フィルタまでの経路の温度及び圧力の上昇、濃縮缶の健全性、V O G の高性能粒子フィルタの健全性に関する評価も変更になる。それぞれの影響は以下のとおり。

① 放出放射エネルギー

放出放射エネルギーについては、T B P 等の錯体の急激な分解反応に使われる T B P 量が増加することに伴い A R F が約 2 倍、プルトニウム濃縮缶に供給される硝酸プルトニウム溶液の液量が増えることから M A R が 3.2 倍となり、 5.1×10^{-4} T B q (従来の放出放射エネルギーは 8.2×10^{-5} T B q) となる。また、被ばく線量につ

いては、 $4.0 \times 10^{-1} \mu S v$ となる。

②プルトニウム濃縮缶からVOGの高性能粒子フィルタまでの温度、圧力及び濃縮缶

TBP等の錯体の急激な分解反応を起こすTBP等の量が増えているため、それぞれの温度、圧力も上昇する。

TBP等の量を240gとした場合のFluentを用いた解析では、当該濃縮缶の出口における圧力は約840kPaとなり、この圧力においてもプルトニウム濃縮缶の健全性は維持されると評価している。VOGの高性能粒子フィルタについても、最大差圧が約3.6kPa、温度は約44℃となり、健全性が確認されている9.3kPa及び200℃を下回るため、健全性は確保できる。

2.4.2 事故対策

(1) 拡大防止対策

これまでの拡大防止対策は、運転員の中央制御室からの操作によるプルトニウム濃縮缶供給槽からプルトニウム濃縮缶へのプルトニウム溶液の移送の停止及び運転員が現場にて手動弁を操作することによりプルトニウム濃縮缶への加熱蒸気の供給停止（加熱蒸気の蒸気発生器への一次蒸気の供給停止）であった。

ケース2の事象の特徴として、事象発生後もプルトニウム濃縮缶へのプルトニウム溶液の供給が継続している。このプルトニウム溶液はTBP等を含んでいることから、プルトニウム濃縮缶への供給が継続する間は、規模は小さいが、TBP等の錯体の急激な分解反応が継続的に発生する可能性がある。このため、対策としては速やかにプルトニウム溶液の供給を停止し、事象の再発

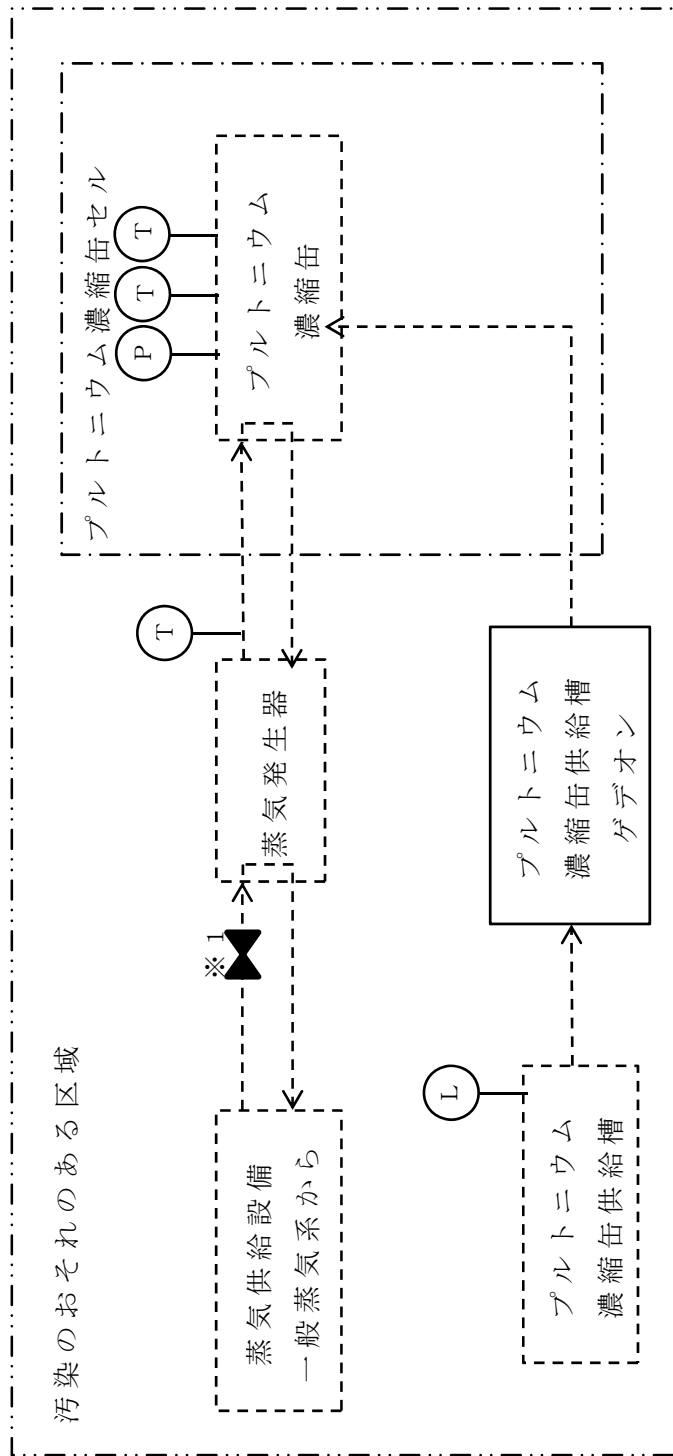
(継続) を防止する必要がある。

以上を考慮し、プルトニウム溶液の濃縮缶への供給はインターロックによる自動停止及び運転員による緊急停止系による手動停止を実施する。蒸気発生器への一次蒸気の供給停止は、従来どおり、運転員が手動弁を操作することにより実施する。インターロックによる供給停止操作は、既存のインターロックの作動時間を踏まえると、事象発生から 30 秒程度で実施可能と考えられ、緊急停止系を用いた運転員による供給停止操作は、事象発生から 1 分で実施可能と想定する。

この対策で使用するインターロックは、プルトニウム濃縮缶の気相部の温度を測定する 2 つの独立した温度計を用い、T B P 等の錯体の急激な分解が発生した場合の温度に相当する設定値により作動させることを検討している。また、作動時間についても検討中である。

拡大防止対策で使用する緊急停止系、一次蒸気の手動弁、上記温度計及びインターロックにより停止する移送機器は、事象の発生防止機能を有しておらず、事象発生時にも機能喪失を想定していないため、対策として使用できる。

また、2. 3. 3 で検討したケース 1 の場合、硝酸プルトニウム溶液の供給は行われないため、全てのシナリオにおいて本対策を行うことで事象の拡大が防止できる。対策の概要を図-10 に示す。



(建屋境界)

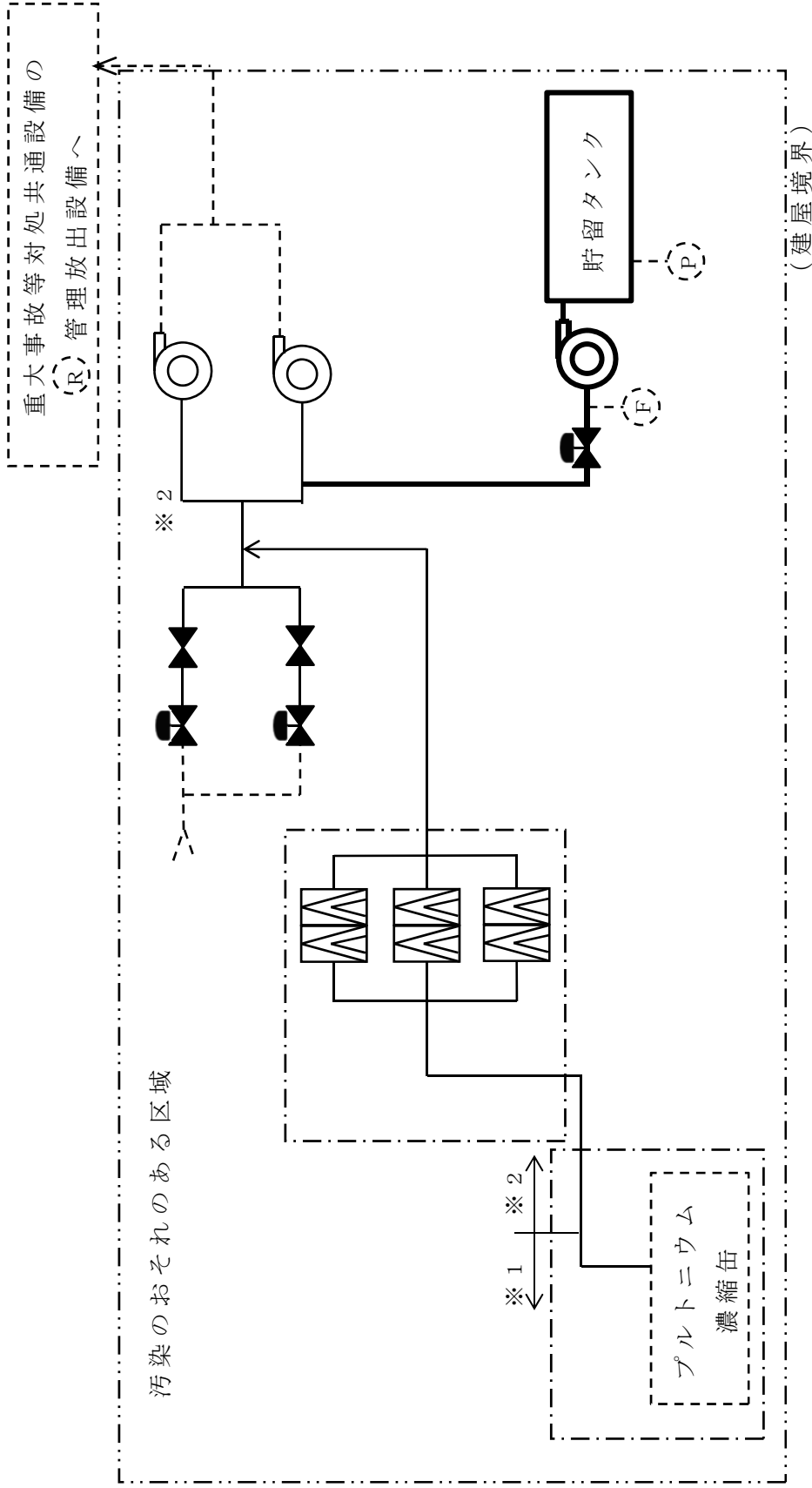
※1 精製施設のプルトリウム精製設備

図-10 見直し後の拡大防止対策の概要

(2) 異常な水準の放出防止対策

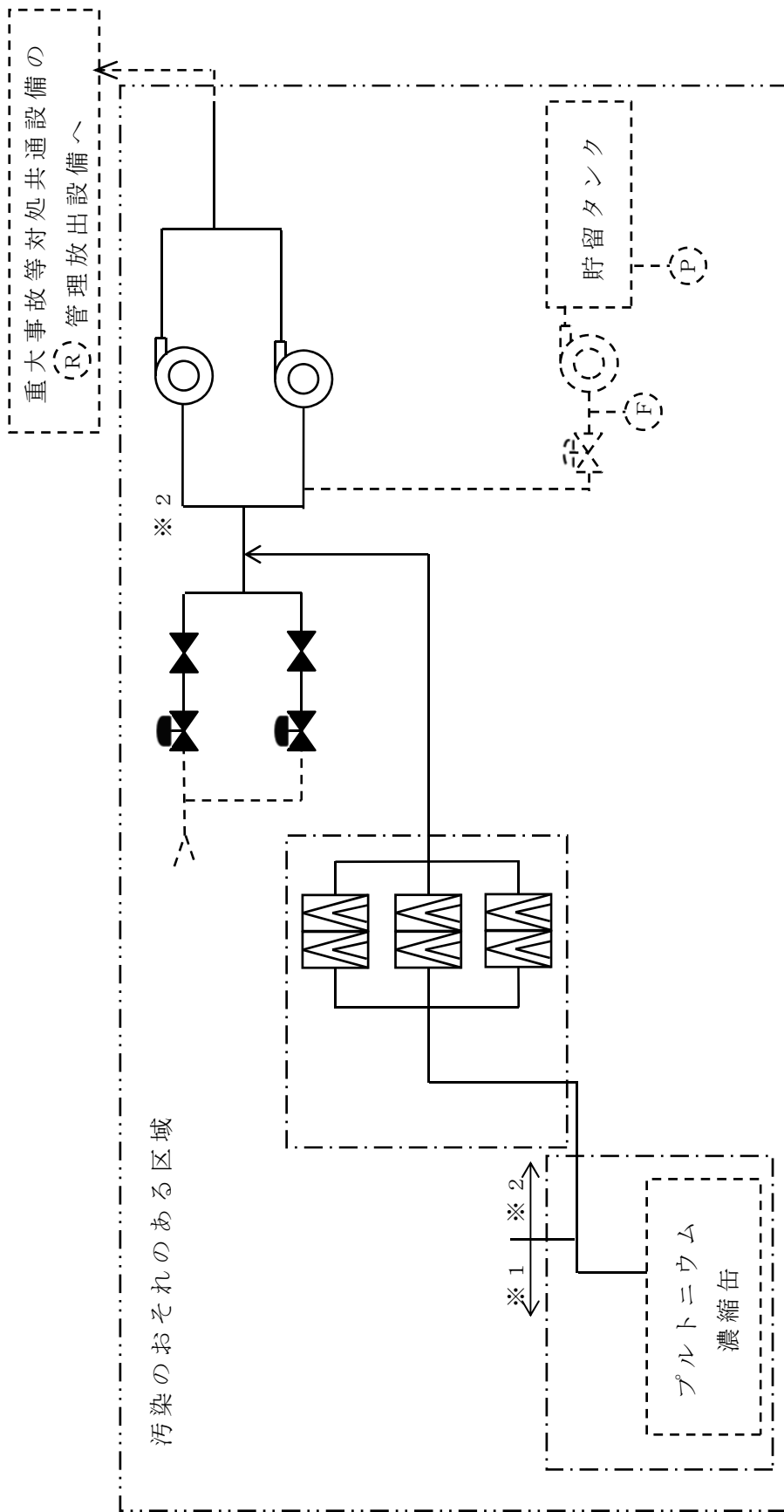
これまでの異常な水準の放出防止対策は、事象の発生に伴う放射性物質の放出に対しては、既設のVOGの高性能粒子フィルタによる放射性物質の除去とし、事象が再発した場合には、放射性物質をセルに導出するとともに閉じ込め、セルから建屋へ漏出した場合には建屋へ閉じ込め、建屋からの漏出を検知した場合には、建屋排気系からの管理放出を行うこととしていた。

ケース2の場合、事象発生からプルトニウム溶液の供給停止までの間は分解反応が継続する可能性があるため、この期間は放射性物質の放出が継続すると想定する。万一、拡大防止対策が失敗し供給が継続する場合には、供給されるTBP等の量に応じて放出放射エネルギーが増加することになる。このような状態であっても、放出放射エネルギーを低減できるよう、本事象により気相に移行する放射性物質は、容器に一旦閉じ込め、その後、VOGの系統から放出する対策に変更する。対策の概要図を図-11に示す。



※1 精製施設のプラトニウム精製設備
 ※2 気体廃棄物の廃棄施設の塔槽類廃ガス処理設備の精製建屋塔槽類廃ガス処理設備の塔槽類廃ガス処理系
 (プラトニウム系)

図-11 (1 / 2) 見直し後の異常な水準の放出防止対策の概要



(建屋境界)

※ 1 精製施設のプルトニウム精製設備

※ 2 気体廃棄物の廃棄施設の塔槽類廃ガス処理設備の塔槽類廃ガス処理系
(プルトニウム系)

図-11 (2 / 2) 見直し後の異常な水準の放出防止対策の概要

容器への閉じ込めはインターロックにより作動させる。この対策で使用するインターロックは、プルトニウム濃縮缶の気相部の温度を測定する2つの独立した温度計を用い、T B P等の錯体の急激な分解が発生した場合の温度に相当する設定値により作動させることを検討している。

インターロックは、事象の検知から1分以内に作動させるよう検討する。

異常な水準の放出防止対策で使用する容器閉じ込めに使用する系統、機器、プルトニウム濃縮缶の気相部温度計は、事象の発生防止機能を有しておらず、事象発生時にも機能喪失を想定していないため、対策として使用できる。

また、2.3.3で検討したケース1の場合、事象に寄与するT B P量に差はあるが、放射性エアロゾルが気相部に移行するメカニズムは同じと考えられることから、ケース1の場合でも事象の発生を検知し、容器閉じ込めを作動させることで異常な水準の放出を防止することができる。

この対策で使用する容器及び容器への導出ラインは臨界事故で準備する予定のものであるが、以下の評価により、T B P等の錯体の急激な分解反応でも使用できると判断した。
①事象により発生する放射性物質を含む廃ガスが閉じ込めの容器に到達するまでの時間

T B P等の錯体の急激な分解反応では、事象発生から約

0.3 秒で高性能粒子フィルタにて圧力上昇のピークが発生し、約 3 秒後には圧力上昇は収束する。これは、分解反応によって発生した圧力の伝播の様子を表すものであり、放射性エアロゾルの移動は、これとは別の挙動を示す。

放射性エアロゾルは、主に V O G 排風機による排気で生まれる廃ガスの流れに乗り高性能粒子フィルタ等の機器まで移動していく。この挙動は臨界、水素と同様と考えられる。

この速度は V O G 排風機の排気風量と同等と考えられ、プルトニウム濃縮缶から V O G 排風機までの距離は、約 m であるため、V O G 排風機までの到達時間は約 1 分と考えられる。

臨界における、放射性物質の V O G 排風機までの到達時間は約 1 分であり、この時間余裕の中で V O G 排風機を停止し容器への閉じ込めラインを形成するインターロックを作動させる。

T B P 等の錯体の急激な分解反応における時間余裕は臨界と同程度であるため、臨界において準備する容器閉じ込めは、時間余裕の観点では適用可能である。

② ガス発生量

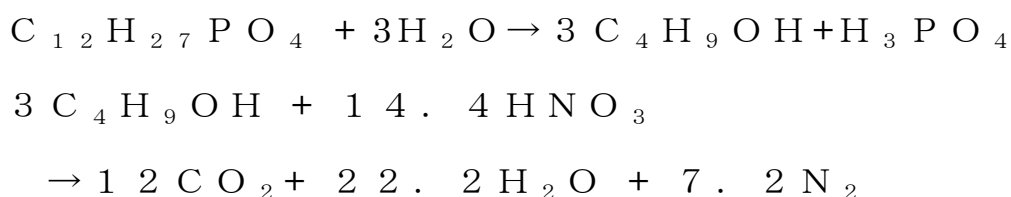
臨界では、事象発生から 1 時間は容器閉じ込めを実施する計画であり、この間に発生するガスとしては、水素掃気用圧縮空気と臨界によって発生するガス（水蒸気、放射性エアロ

 について商業機密の観点から公開できません。

ゾル) を考慮している。

T B P 等の錯体の急激な分解反応では、主要なガスとして酸素、窒素、水が発生する。

T B P に作用させる硝酸濃度が 14M の場合における T B P 等の錯体の分解反応について、以下の反応式がある。¹⁾



T B P 等の錯体の急激な分解反応で反応する T B P 量は約 208 g (約 0.8m o l) であり、分解ガスとしては約 43m o l が発生する。ガスの体積としては、標準状態で約 740 リットルとなる。

水素掃気用圧縮空気の発生量は同じであり、ガス量は臨界よりも少ないことから、臨界で準備する容器閉じ込めは利用可能である。

参考文献

- 1) 日本原子力研究所. 再処理施設における溶媒と硝酸の熱分解反応に関する安全性実証試験(受託研究). 1995-02, JAERI-Tech 95-005.

漏えいした有機溶媒の温度評価

検討中：数値を継続チェック中

1. 放熱による漏えい液温度の推定について（セル換気設備運転時）

ここでは、セル換気設備が運転している場合の放熱を考慮した漏えい液の平衡温度について評価する。

1.1 熱移行の概念

熱移行の概念を下図に示す。

セル換気設備が運転している場合、漏えい液の崩壊熱は①「漏えい液表面からセル雰囲気への熱伝達」により、漏えい液からセル雰囲気へ熱が移行する。

このとき、セル雰囲気はセル換気設備が運転していることから、①の熱移行量が漏えい液の崩壊熱と等しい値となった時が定常状態であり、このときの漏えい液温度が平衡温度となる。



図1 熱移行の概念図

1.2 放熱量の算出方法

(1) ①漏えい液表面からセル雰囲気への熱伝達

漏えい液温度を T_0 、セル雰囲気の温度を T_1 とした場合の漏えい液

表面からセル雰囲気への放熱量 Q_1 は、以下のとおり求められる。

$$Q_1 = h_1 \times A_1 \times (T_0 - T_1)$$

$$h_1 = \frac{\lambda_1 \times \overline{Nu_1}}{L_1}$$

$$\overline{Nu_1} = 0.13 \times (Gr \times Pr)^{1/3}$$

表1 放熱量 Q_1 の算出に用いる各種パラメータ

Q_1	[W]	放熱量 (崩壊熱)
h_1	[W/m ² K]	漏えい液⇄セル雰囲気熱伝達率
A_1	[m ²]	漏えい液表面積
T_0	[°C]	漏えい液表面温度
T_1	[°C]	セル雰囲気温度

表2 熱伝達率 h_1 の算出に用いる各種パラメータ

λ_1	[W/mK]	セル内空気の熱伝導率
L_1	[m]	代表長さ
$\overline{Nu_1}$	[-]	平均ヌセルト数
Pr	[-]	セル雰囲気のプラントル数 (=0.719)
Gr	[-]	セル雰囲気のグラスホフ数 (= $g \times L_1^3 \times \beta \times \rho^2 \times (T_1 - T_0) / \mu^2$)
C	[J/kgK]	セル雰囲気の比熱
μ	[Pa·s]	セル雰囲気の粘度
g	[m/s ²]	重力加速度 (=9.81)
β	[K ⁻¹]	セル雰囲気の体膨張係数
ρ	[kg/m ³]	セル雰囲気の密度

1.3 漏えい液平衡温度の計算

定常状態では、「 $Q_1 =$ 漏えい液の崩壊熱」の状態が成り立っているため、 T_1 を起点として、 T_0 の流れで各温度を算出する。

ここで、漏えい液の崩壊熱密度が最も大きいプルトニウム精製塔セルを例に、重大事故時の以下の条件で評価を行った。

表3 プルトニウム精製塔セルでの評価条件

漏えい液量	0.2 [m ³]
漏えい液崩壊熱密度	390 [W/m ³]
有効床面積	57 [m ²]
セル容積	1250 [m ³]
セル高さ	22 [m]
セル壁厚さ	1 [m]

セル内雰囲気温度（T1）を40℃として評価した結果、漏えい液の平衡温度は約41℃となり、引火点に到達することはない。

表 4 計算に使用した条件及び計算過程

漏えい液情報

項目	数値	単位	備考
漏えい液量	0.2	m ³	
漏えい液崩壊熱密度	390	W/m ³	
漏えい液崩壊熱	78	W	

セル情報

項目	数値	単位	備考
有効床面積	57	m ²	
セル容積	1250	m ³	
セル高さ	22	m	
セル壁(内側)表面積	662	m ²	

①漏えい液表面からセル雰囲気への熱伝達

項目	数値	単位	備考
$\lambda 1$	0.02759	W/mK	@320K
L1	8	m	
Nu1	4.0E+02	-	
Pr	0.719	-	@320K
Gr	3.9E+10	-	
C	1008	J/kgK	
μ	0.00002	Pa·s	@320K
g	9.81000	m/s ²	
β	0.00313	1/K	@320K
ρ	1.10260	kg/m ³	@320K
Q1	78	W	
h1	1.4E+00	W/m ² K	
A1	57	m ²	
T1	40.00	°C	
T0	40.95	°C	

検討中：数値を継続チェック中

2. 放熱による漏えい液温度の推定について（セル換気設備停止時）

ここでは、セル換気設備が停止している場合の放熱を考慮した漏えい液の平衡温度について評価する。

2. 1 熱移行の概念

熱移行の概念を下図に示す。

漏えい液の崩壊熱は、主に以下の形態で熱が移行する。

- ・「①漏えい液表面からセル雰囲気への熱伝達」により、漏えい液からセル雰囲気へ熱が移行
- ・「②セル雰囲気からセル壁（内側）への熱伝達」により、セル雰囲気からセル壁（内側）へ熱が移行
- ・「③セル壁（内側）からセル壁（外側）への熱伝導」により、セル壁（内側）からセル壁（外側）へ熱が移行

①、②及び③の熱移行量がいずれも漏えい液の崩壊熱と等しい値となった時が定常状態であり、このときの漏えい液温度が平衡温度となる。

なお、実際の現象としては、漏えい液と直に接している床面への熱移行が最も支配的な要因となるが、安全側にこの効果は無視して四方の壁面のみを考慮した。

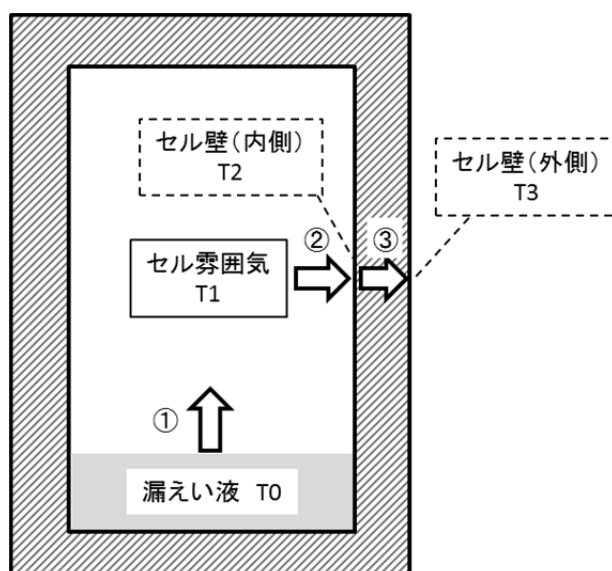


図2 熱移行の概念図

2. 2 放熱量の算出方法

① 漏えい液表面からセル雰囲気への熱伝達

漏えい液温度を T_0 ，セル雰囲気の温度を T_1 とした場合の漏えい液表面からセル雰囲気への放熱量 Q_1 は、以下のとおり求められる。

$$Q_1 = h_1 \times A_1 \times (T_0 - T_1)$$

$$h_1 = \frac{\lambda_1 \times \overline{Nu_1}}{L_1}$$

$$\overline{Nu_1} = 0.13 \times (Gr \times Pr)^{1/3}$$

表5 放熱量 Q_1 の算出に用いる各種パラメータ

Q_1	[W]	放熱量 (崩壊熱)
h_1	[W/m ² K]	漏えい液⇄セル雰囲気熱伝達率
A_1	[m ²]	漏えい液表面積
T_0	[°C]	漏えい液表面温度
T_1	[°C]	セル雰囲気温度

表6 熱伝達率 h_1 の算出に用いる各種パラメータ

λ_1	[W/mK]	セル内空気の熱伝導率
L_1	[m]	代表長さ
$\overline{Nu_1}$	[-]	平均ヌセルト数
Pr	[-]	セル雰囲気のプラントル数 (=0.719)
Gr	[-]	セル雰囲気のグラスホフ数 (= $g \times L_1^3 \times \beta \times \rho^2 \times (T_1 - T_0) / \mu^2$)
C	[J/kgK]	セル雰囲気の比熱
μ	[Pa·s]	セル雰囲気の粘度
g	[m/s ²]	重力加速度 (=9.81)
β	[K ⁻¹]	セル雰囲気の体膨張係数
ρ	[kg/m ³]	セル雰囲気の密度

②セル雰囲気からセル壁（内側）への熱伝達

セル雰囲気の温度を T_1 ，セル壁（内側）の温度を T_2 とした場合のセル雰囲気からセル壁（内側）への放熱量 Q_2 は、以下のとおり求められる。

$$Q_2 = h_2 \times A_2 \times (T_1 - T_2)$$

$$h_2 = \frac{\lambda_1 \times \overline{Nu_2}}{L_2}$$

$$\overline{Nu_2} = \frac{4}{3} \times Nu_x$$

$$Nu_x = C_t \times Ra^{\frac{1}{5}}$$

表7 放熱量 Q_2 の算出に用いる各種パラメータ

Q_2	[W]	放熱量 (崩壊熱)
h_2	[W/m ² K]	セル雰囲気⇄セル壁 (内側) 熱伝達率
A_2	[m ²]	セル壁 (内側) 表面積
T_1	[°C]	セル雰囲気温度
T_2	[°C]	セル壁 (内側) 温度

表8 熱伝達率の算出に用いる各種パラメータ

λ_1	[W/mK]	セル内空気の熱伝導率
L_2	[m]	代表長さ
\overline{Nu}_2	[-]	平均ヌセルト数
Nu_x	[-]	局所ヌセルト数
C_t	[-]	プラントル数の関数 $\left(= \left(\frac{Pr}{4 + 9\sqrt{Pr + 10Pr}} \right)^{\frac{1}{5}} \right)$
Ra	[-]	レイリー数 ($Ra = Pr \times Gr$)
Pr	-	セル内空気のプラントル数 (=0.719)
Gr	-	セル内空気のグラスホフ数 ($= g \times L_2^3 \times \beta \times \rho^2 \times (T_1 - T_2) / \mu^2$)
C	[J/kgK]	セル雰囲気の比熱
μ	[Pa·s]	セル雰囲気の粘度
g	[m/s ²]	重力加速度 (=9.81)
β	[K ⁻¹]	セル雰囲気の体膨張係数
ρ	[kg/m ³]	セル雰囲気の密度

③セル壁 (内側) からセル壁 (外側) への熱伝導

セル壁 (内側) の温度を T_2 、セル壁 (外側) の温度を T_3 とした場合のセル壁 (内側) からセル壁 (外側) への放熱量 Q_3 は、以下のとおり求められる。

$$Q_3 = \lambda_2 \times A_2 \times \frac{(T_2 - T_3)}{L_3}$$

表9 放熱量Q3の算出に用いる各種パラメータ

Q3	[W]	放熱量 (崩壊熱)
λ2	[W/mK]	セル壁 (コンクリート) の熱伝導率
A2	[m ²]	セル壁 (内側) 表面積
L3	[m]	セル壁 (コンクリート) の厚さ
T2	[°C]	セル壁 (内側) 温度
T3	[°C]	セル壁 (外側) 温度

2.3 漏えい液平衡温度の計算

定常状態では、「Q1 = Q2 = Q3 = 漏えい液の崩壊熱」の状態が成り立っているため、T3を起点として、T3 → T2 → T1 → T0の流れで各温度を算出する。

ここで、漏えい液の崩壊熱密度が最も大きいプルトニウム精製塔セルを例に、重大事故時の以下の条件で評価を行った。

表10 プルトニウム精製塔セルでの評価条件

漏えい液量	0.2 [m3]
漏えい液崩壊熱密度	390 [W/m3]
有効床面積	57 [m2]
セル容積	1250 [m3]
セル高さ	22 [m]
セル壁厚さ	1 [m]

セル壁 (外側) の温度 (T3) を 40°C として評価した結果、漏えい液の平衡温度は約 42°C となり、引火点に到達することはない。

以上

表 11 計算に使用した条件及び計算過程 (1 / 2)

漏えい液情報

項目	数値	単位	備考
漏えい液量	0.2	m3	
漏えい液崩壊熱密度	390	W/m3	
漏えい液崩壊熱	78	W	

セル情報

項目	数値	単位	備考
有効床面積	57	m2	
セル容積	1250	m3	
セル高さ	22	m	
セル壁(内側)表面積	662	m2	

③セル壁(内側)からセル壁(外側)への熱伝導

項目	数値	単位	備考
Q3	78	W	
λ 2	1.2	W/mK	石灰岩コンクリート@293K
A2	662	m2	
L3	1	m	
T3	40	°C	
T2	40.10	°C	

②セル雰囲気からセル壁(内側)への熱伝達

項目	数値	単位	備考
λ 1	0.02759	W/mK	@320K
L2	22	m	
Nu2	1.5E+02	-	
Nux	1.1E+02	-	
Ct	0.52049	-	
Ra	4.6E+11	-	
Pr	0.719	-	@320K
Gr	6.4E+11	-	
Ct	1008	J/kgK	
μ	0.00002	Pa·s	@320K
g	9.81000	m/s2	
β	0.00313	1/K	@320K
ρ	1.10260	kg/m3	@320K
Q2	78	W	
h2	1.9E-01	W/m2K	
A2	662	m2	
T2	40.10	°C	
T1	40.73	°C	

表 11 計算に使用した条件及び計算過程 (2 / 2)

①漏えい液表面からセル雰囲気への熱伝達

項目	数値	単位	備考
$\lambda 1$	0.02759	W/mK	@320K
L1	8	m	
Nu1	4.0E+02	-	
Pr	0.719	-	@320K
Gr	3.9E+10	-	
C	1008	J/kgK	
μ	0.00002	Pa·s	@320K
g	9.81000	m/s ²	
β	0.00313	1/K	@320K
ρ	1.10260	kg/m ³	@320K
Q1	78	W	
h1	1.4E+00	W/m ² K	
A1	57	m ²	
T1	40.73	°C	
T0	41.67	°C	