

核燃料サイクルの安全性

(1) 再処理プロセスの安全機能と事故

2011年12月27日

原子炉工学研究所 原子力国際共同研究センター
小澤正基

(ふりがな) 氏名	おざわ まさき 小澤 正基	生年月日(年齢)	1950年9月1日 (61才)
		出身都道府県	山梨県甲府市
所属・役職	(国) 東京工業大学原子炉工学研究所 教授		
専門分野	核燃料再処理、放射分離化学、分離変換工学、核セキュリティ		
学位	工学博士(東京大学)1993年7月		
主な所属学会	電気化学会、日本原子力学会、日本化学会、日本溶媒抽出学会、水素エネルギー協会、日本希土類学会、国際テネカムシンポジウム国際諮問委員会委員、国際核化学会、(国際) 応用電気化学誌査読委員、(国際) 放射分析・核化学誌査読委員・編集委員		
主な外部兼職・委員	「分離変換サイクル」研究専門委員会・委員(1993～現在)、(国) 東京工業大学大学院理工学研究科原子核工学専攻客員教授(2003～2010)、「核燃料サイクルの物質利用」研究専門委員会委員・幹事(2005～現在)、(独) 科学技術振興機構(JST) 原子力領域主管(プログラムオフィサー)(2007～2011)		
略歴	<ul style="list-style-type: none"> ・1969年3月山梨県立甲府第一高等学校卒業 ・1975年3月山梨大学大学院工学研究科修士修了(燃料電池触媒の研究) ・1975年4月旧動力炉・核燃料開発事業団(PNC) 入社(東海再処理工場) ・1981年6月～1982年6月旧ドイツ・カールスルーエ原子核センター(IHCh) 留学(旧科学技術庁昭和55年度原子力関係海外留学生) ・1998年10月旧核燃料サイクル開発機構(JNC) 経営企画本部 研究主幹 ・2005年分離変換工学グループリーダー ・2006年主任研究員(日本原子力研究開発機構(JAEA)) 		
研究・業務概要	1975～1986; 軽水炉燃料再処理技術開発(東海再処理工場 MP 主分離担当) 1986～1990; 高速炉燃料再処理技術開発(日米共同研究・化学分離担当 TC) 1990～1998; 核種分離に関する研究開発(日仏研究協力・核種分離担当 TC) 1998～2000; 実用化戦略調査研究(FS) の立ち上げ 2001～2010; 分離・変換・利用工学研究(日露共同研究(フロンテニア研究所)、ISTC 研究協力(アルメニア科学アカデミー)、Adv. -ORIENT Cycle) 2011～ ; 原子力リサイクル、核種変換、核セキュリティ、原子力人材育成		
その他	<ul style="list-style-type: none"> ・受賞歴; 核燃料サイクル開発機構 理事長賞・開発功績賞(平成17年度)、日本原子力学会再処理・リサイクル部会 部会賞・業績賞(平成22年度) ・講師・非常勤講師; 東北大学(1995)、埼玉大学(1997)、金沢大学(2010, 2011)、茨城大学(2010, 2011)、他 ・特別講義; カリフォルニア大学バークレイ校(2007)、早稲田大学(2010)、上海交通大学(2010)、ベトナム電力大学(2011)、他 ・招待講演(ブラジル(2010)、イタリ(2010)、中国(2010)、ロシア(2011)、アメリカ(2012)) 		
趣味・特技	伊・トスカナ料理、独・白ワイン、Alchemy、パレホール、ゴルフ(数回/年)		

燃料電池（水素エネルギー）研究

再処理研究

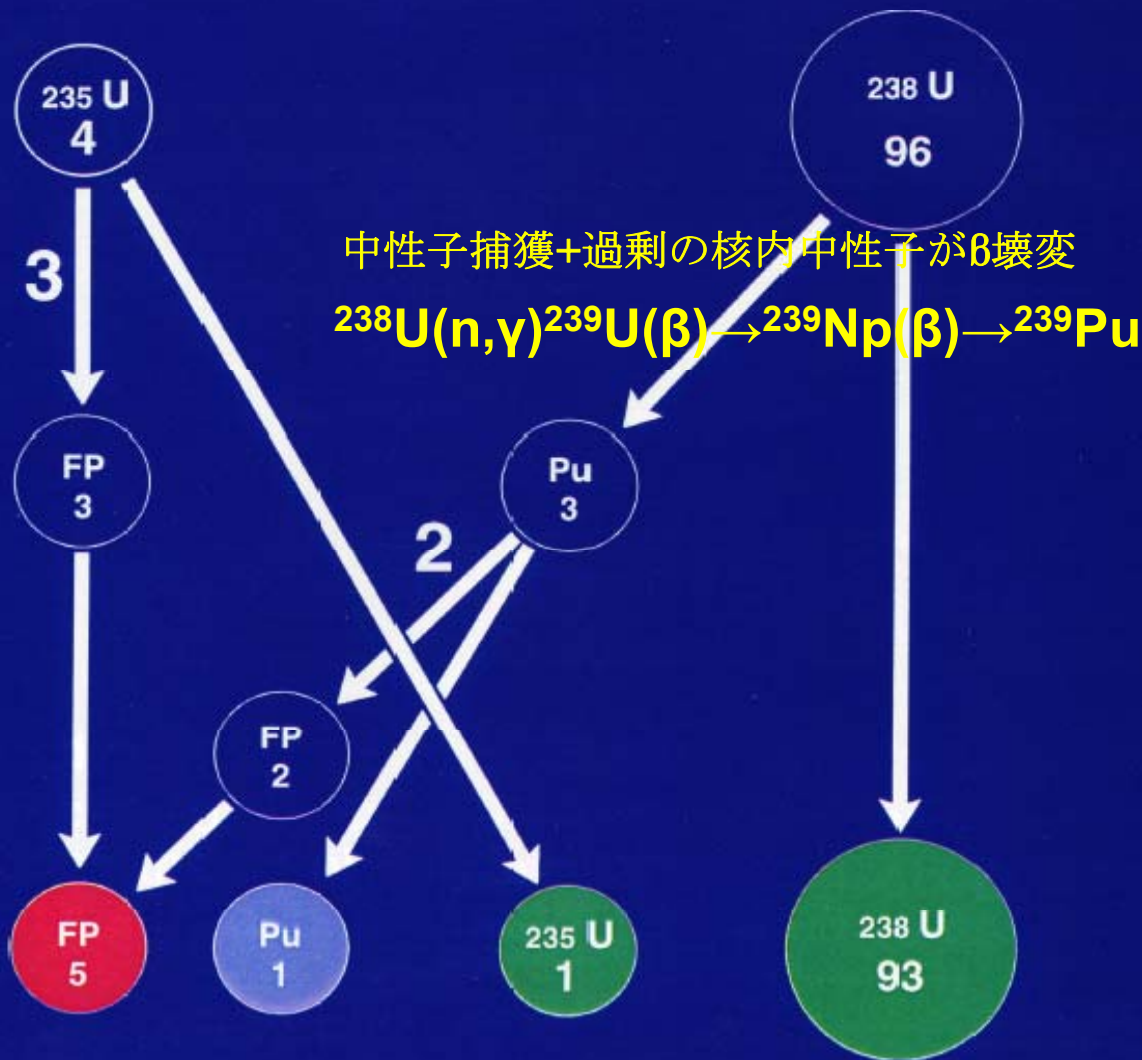
放射性核種の消滅処理研究
核燃料サイクル研究

放射性核種の利用研究
核セキュリティ研究

原子力発電でどのくらいの核分裂生成物、TRU（Pu他）が生ずるのか？

標準的PWR (45000MWD/tU) における核分裂収支

FISSION REACTIONS IN STANDARD PWR ASSEMBLIES (45,000 MWD/tU)



高密度エネルギー源としてのプルトニウム

PLUTONIUM: A WORLD ENERGY RESOURCE

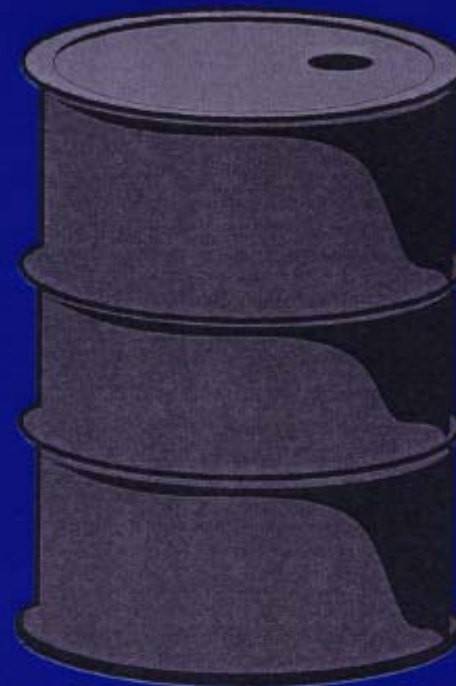
1000tの使用済み燃料（≒約10tPu）は
2,000～2,500万tの原油 と等価



クウェート年間産油量1億tの約 1/4に相当！



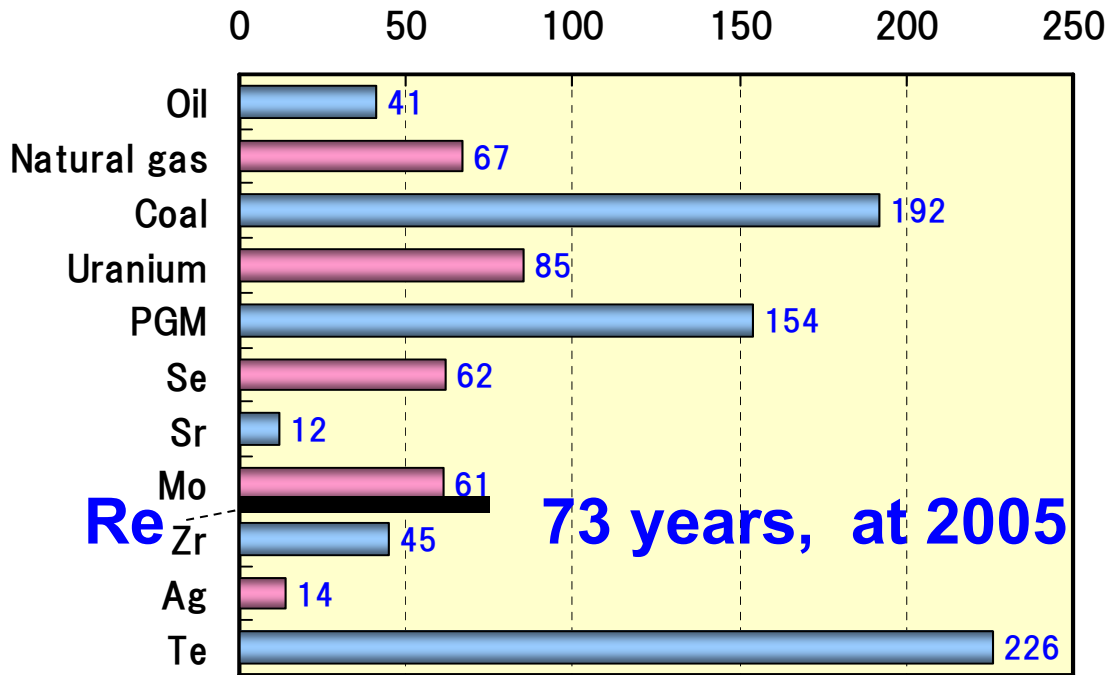
1 g of Pu



1 to 2 t of oil

1,000 t of recycled* spent fuel produce the same amount of
electricity as the combustion of 20 to 25 000 000 t of oil
(Kuwait's annual output: about 100 000 000 t of oil)

Incentives; Can Nuclear Rare Metals compensate Natural Rare Metals ?



(1) Natural fossil fuels (Oil, Gas) and U are limited to 40-80 years, and Coal is limited to around 200 years.

(2) Worldwide CO₂ issue (waste of Oil !) is inevitable.

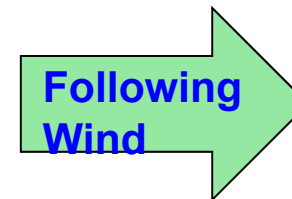
R/P Ratio (year) at 2004 on Estimated Available Time

(3) PGM (ca.200y) and Rare Earth (RE) (>850y) seems to be rather abundant however, they are extremely localized. More than 90% of RE were from China (Japanese case).

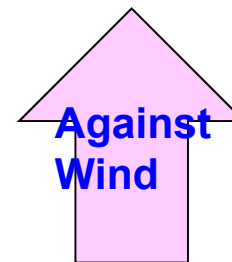
1992.1 南巡講話·鄧小平 ” 中東有石油、中国有稀土”

About 1% of national GDP will drop, if ca.20% of those supply decreased.

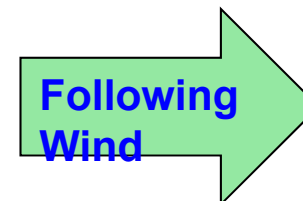
Strategies of producing countries will thus dominate the stable supply and prices.



Nuclear (FBR) Renaissance in Europe, USA, (Japan), etc



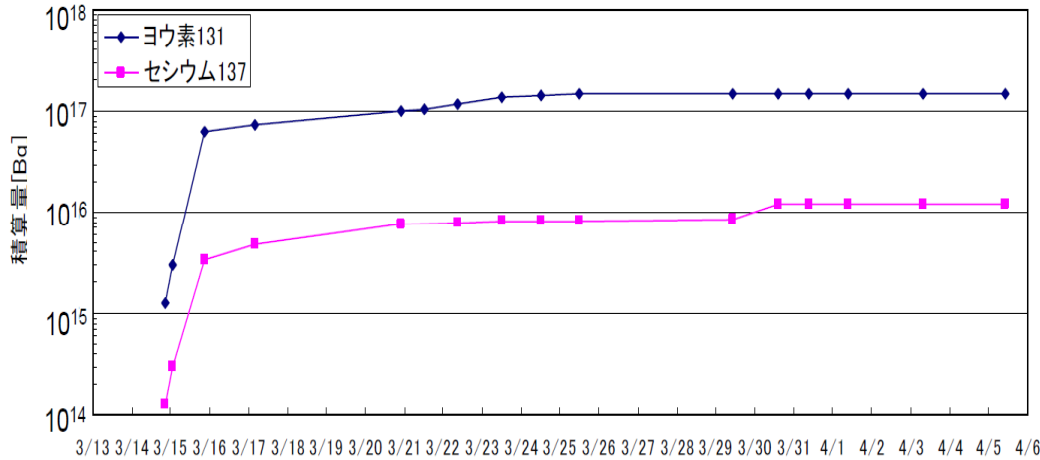
3.11 Catastrophe of Fukushima NPP in Japan



Urban Mine, Nuclear Ore

外部被ばくを計算する

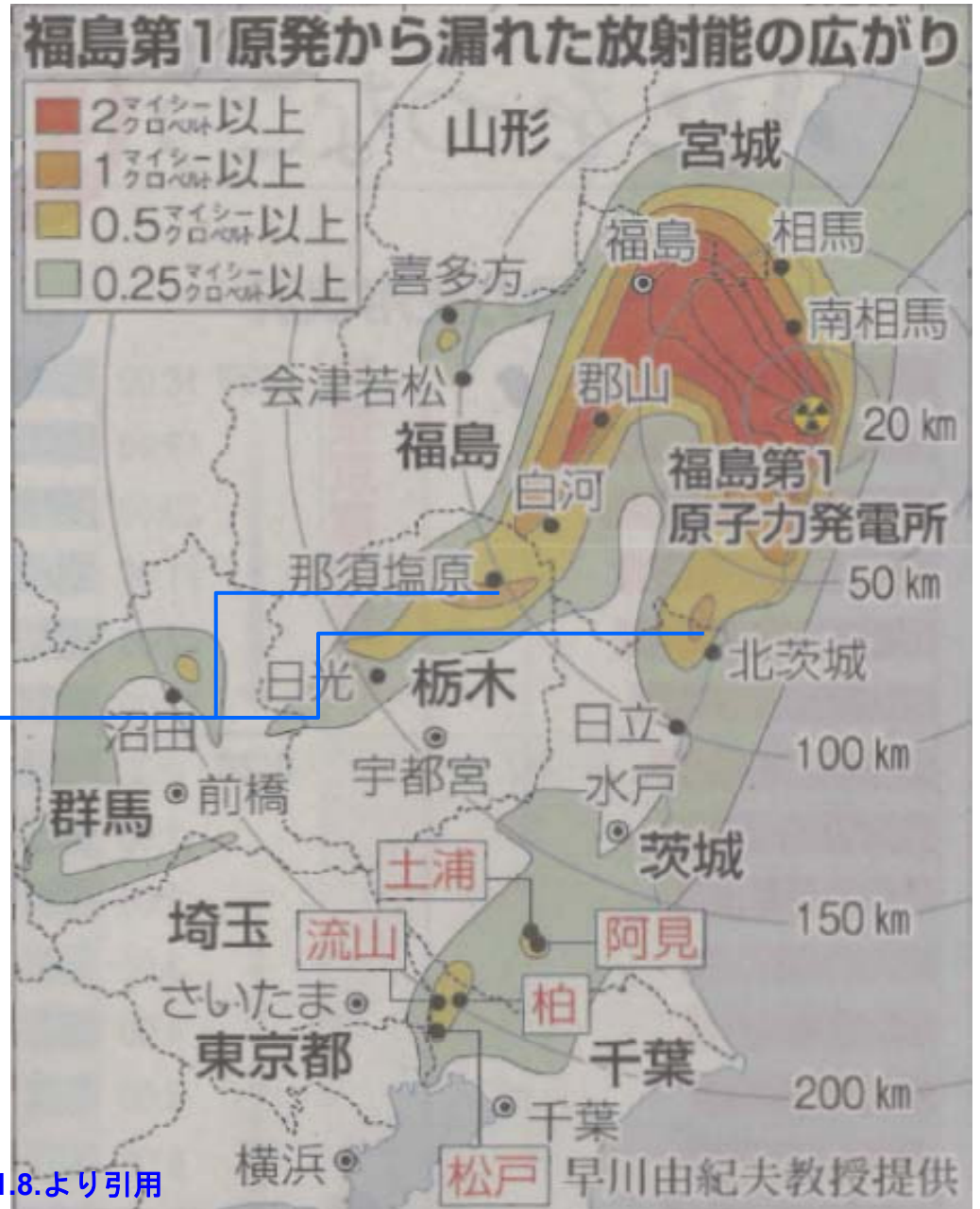
ヨウ素131、セシウム137の大気中への放出総量(モニタリングデータからの推定値)



外部被ばく量の計算・評価

1μSv/hrの地域の場合、年間被ばく量は、
 $1\mu\text{Sv/hr} \times 24\text{hr} \times 365\text{day} = 8.76\text{mSv/y}$

- 100mSvの確定的影響のしきい値を大幅に下回る。
- 被ばく量は1~10mSvの世界の年間自然被ばく値の変動範囲内で、発癌リスクの増加があるとは考えられない



産経新聞2011.8.より引用

早川由紀夫教授提供

宇宙線

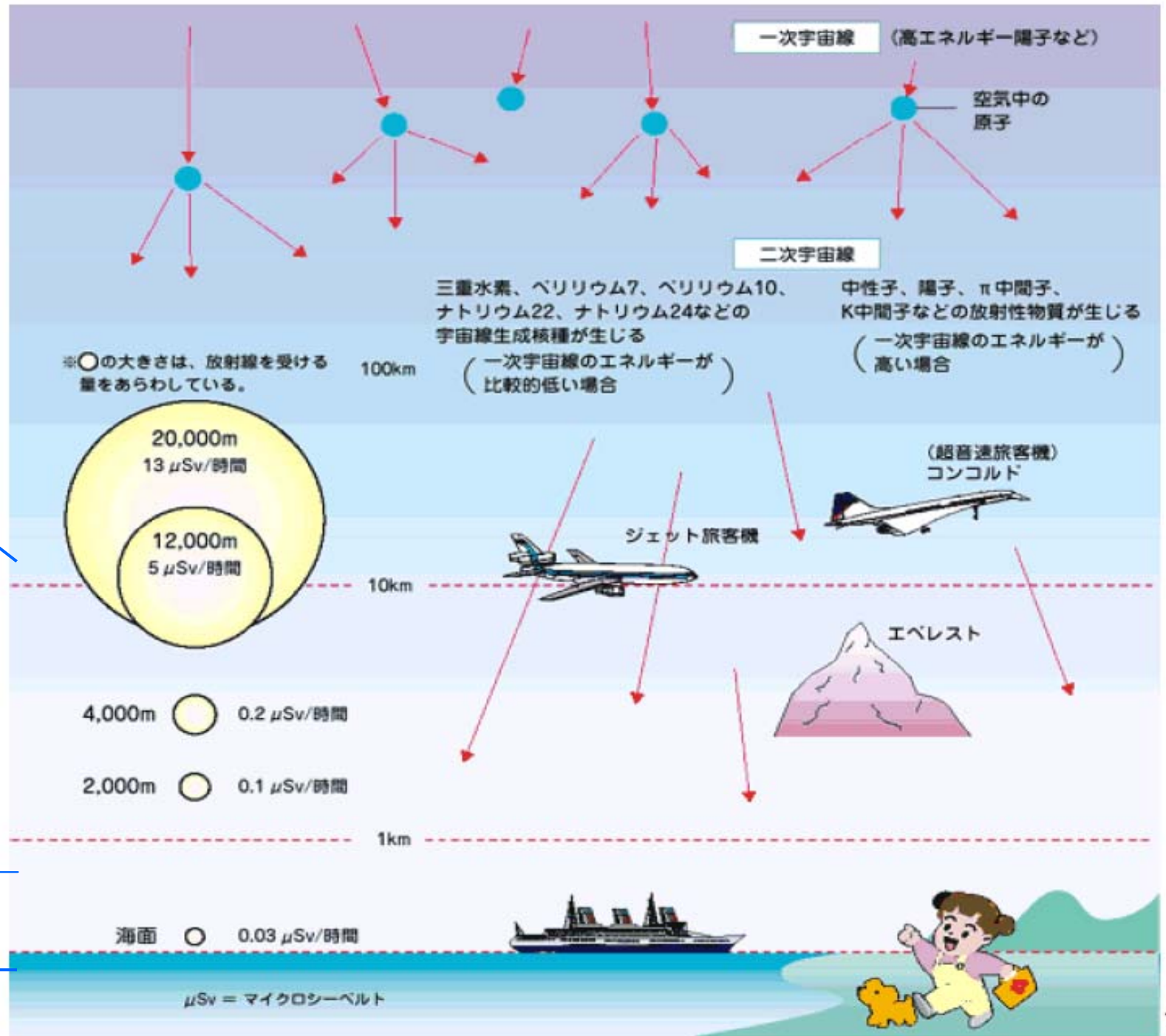
0.344 μ Sv/hr ; シベリア
上空ノボシビルスク北
高度11,582m(2011.7.2
12:18)

高度により
大きく変わる

0.055 μ Sv/hr ; 成田市
(2011.7.2 11:00)

0.071 μ Sv/hr ; モスクワ
市(2011.7.2 22:10)

0.03 μ Sv/hr ; モスクワ市
地下鉄(2011.7.6)



内 容

1. 巨大技術と安全性
2. 原子力発電所と核燃料サイクル
3. 再処理プロセスと安全設計
4. 原子力の事故例
5. 再処理（核燃料サイクル）の事故例
 - (1)歴史
 - (2)Red-Oil爆発、等に関する知見
 - (3)アスファルト爆発に関する知見
- 6.再処理の安全評価

巨大技術と安全性

【巨大技術の定義】

- 1) 非常に沢山の技術要素を含んだ、複雑で高度な技術応用体
- 2) かなりのエネルギーないし有害要素を内包した体系、巨大な運動量を帯びた体系
- 3) 今後の社会経済の活力の維持向上、豊かな生活の確保のためにも欠かせない技術 ⇔ テロ対象技術

【例】

- 1) 高層ビル、地下街
 - 2) 化学プラント、石油施設
 - 3) 原子力発電プラント
 - 4) 巨大ダム
 - 5) 微生物研究施設
 - 6) 高速鉄道システム
 - 7) 大型船舶
 - 8) 大型航空機
 - 9) 宇宙飛行システム
- } 核燃料サイクル施設

リスクとは

【定義】

- 将来発生するかも知れない、人間にとって望ましくないこと（人命、健康、財産等に関する有害な影響）に対する懸念

- 「リスク」＝「被害の大きさ」×「発生確率」 単位 10^{-6} 死/人・年
⇒ 人口100万人あたりの年間死亡者数

$<10^{-6}$; 諦める

$10^{-5} \sim 10^{-4}$; リスクとベネフィットのバランスを考えて対策や改善のための投資を図る

$>10^{-3}$; 容認されない

【事例】 $\times 10^{-6}$ 死/人・年

i) 自動車事故 ; 200

ii) 墜落事故、地震 (30)、鉄道事故 (20)、台風津波 (12)、海難・火災 (10)

iii) 洪水、落雷 ($\ll 1$)

【巨大技術のリスクの特徴】

- 偏在し、一挙であること。しかも集中的、衝撃的。
- 最新鋭の技術への信頼を揺るがし、施設全体の財産的損害も巨額。

リスクの比較 (人口100万(10⁶)人あたりの年間死亡者概数)

全死因	8485	放射線発がん (放射線業務従事者)	41
がん	2551	水難事故	7.0
心疾患	1354	インフルエンザ	5.5
脳血管疾患	1039	他殺	5.2
喫煙発がん(現状)	800	自然災害	1.0
喫煙発がん(1000円)	300	HIV	0.4
自殺	239	食中毒	0.04
交通事故	91	落雷	0.02
放射線発がん (一般公衆)	55	BSE感染牛による クロイツフェルトヤコブ病	0.009

リスク及びリスク情報等について

リスク: 一般に、望ましくない事象が起きる頻度(たとえば、年あたりの発生確率)とその影響の積で表される。原子力施設の安全性を議論する際のリスクとは、施設周辺の人々の健康や社会、環境に影響を及ぼす潜在的危険性、すなわち、異常の発生、拡大により、放射性物質が放出され、人等に被害をもたらす場合の発生確率と被害の積のことをいう。

リスク情報: リスク評価結果そのもの、及び系統や機器等のリスクに対する寄与に係る情報等をいう。定量的な確率論的安全評価(PSA)だけでなく、総合安全解析(ISA)から得られる安全対策の重要度などに関する情報もリスク情報といえることができる。

リスク情報の活用: 規制への活用に加え、アクシデントマネジメント整備や防災計画、事業者における自主保安活動など、規制外の領域まで含めた広義のリスク情報利用のことをいう。

リスク情報を活用した規制: 従来の安全規制では、決定論的手法による安全評価がなされてきたが、これを補完するものとして、確率論的評価を行い、そこから得られるリスク情報を判断の参考あるいは根拠として用いる規制のことをいう。

確率論的安全評価(PSA): 発生する可能性のあるさまざまな事象に対して、その発生の確率と影響を考慮して安全性を評価すること。原子炉の場合、原子力施設等で発生し得るあらゆる事故を対象として、その発生頻度と発生時の影響を定量評価し、その積の総和である「リスク」がどれ程小さいかで安全性の度合いを表現する。施設の安全性を総合的に評価することができる。

注1: 「リスク情報を活用した安全規制の導入に関する関係機関の取組みと今後の課題と方向性—リスク情報のより一層の活用と進展に向けて—、平成19年9月20日、原子力安全委員会」より

参考:安全目標案[注1](原子力安全委員会)

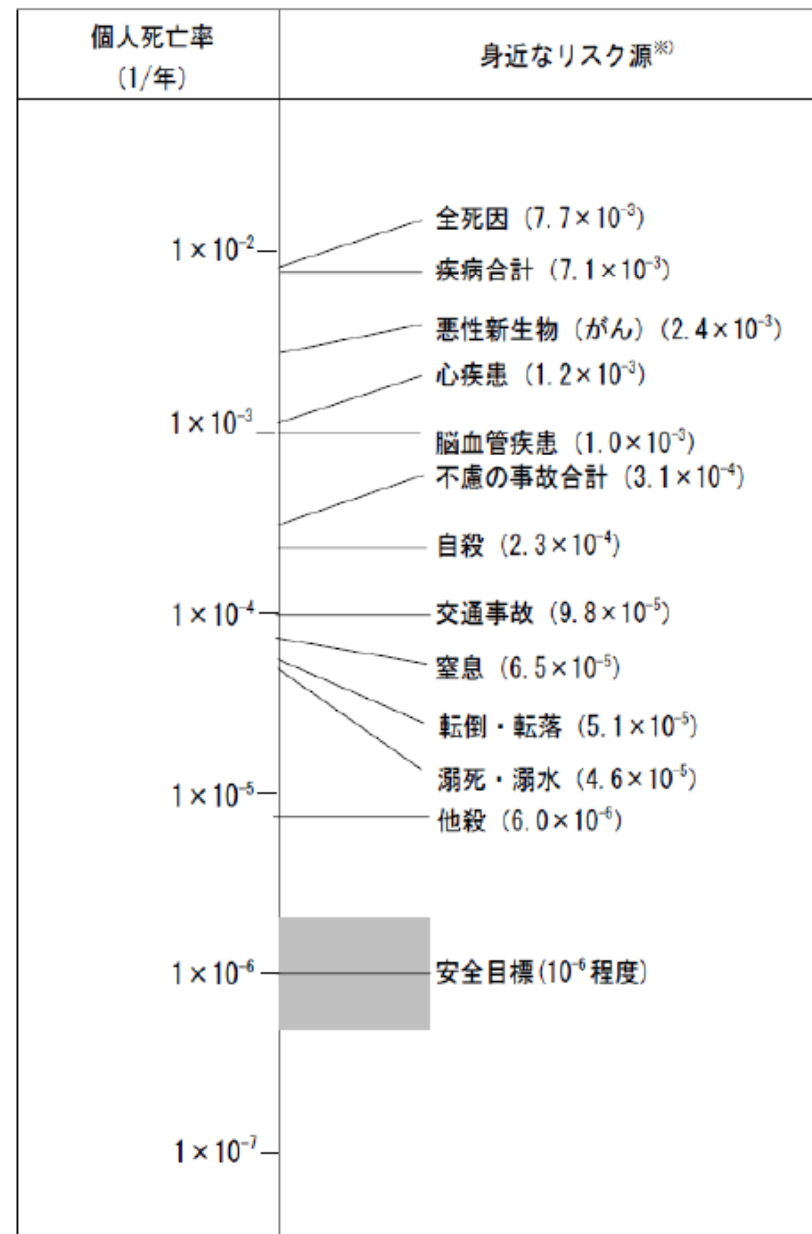
○定性的安全目標案

原子力利用活動に伴って放射線の放射や放射性物質の放散により公衆の健康被害が発生する可能性は、**公衆の日常生活に伴う健康リスクを有意には増加させない水準に抑制されるべきである。**

○定量的安全目標案

原子力施設の事故に起因する放射線被ばくによる、施設の敷地境界付近の公衆の**個人の平均急性死亡リスクは、年あたり百万分の1程度を超えないように抑制されるべきである。**

原子力施設の事故に起因する放射線被ばくによって生じ得るがんによる、施設からある範囲の距離にある公衆の**個人の平均死亡リスクは、年あたり百万分の1程度を超えないように抑制されるべきである。**



注1: 原子力安全委員会「安全目標に関する調査審議状況の中間とりまとめ」(平成17年5月)より

※) 出典:「人口動態統計」(厚生労働省) 2001 年データより
安全目標案の位置のイメージ

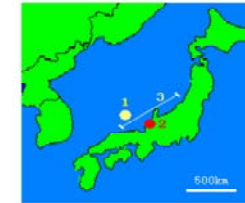
巨大技術(非原子力)の事故例

- 1) メキシコ、イスワテペックの事故 (LPG貯蔵センター) 1984. 11. 19
火災爆発、死者約500人、負傷者約7000人、
- 2) インド、ボパールの事故 (化学プラント) 1984. 12. 2
UC殺虫剤製造プラント、毒性のメチルイソシアネート(MIC)の放出、死者約2500人、障害者20万人
- 3) 日本航空ボーイング747事故 (旅客機) 1985. 8. 12
死者520人、負傷者4人、
- 4) スペースシャトル・チャレンジャー号事故 (宇宙) 1985. 1. 28
死者7人、個体ブースター継手部Oリングの機能不備、約30億\$の損害
- 5) ナホトカ号重油流出事故 (タンカー) 1997. 1. 2
船体の破断、死亡1名、約6m³の原油流出・重大な環境汚染、損害補償金額261億円

- 6) H2ロケット打ち上げ失敗 (宇宙) 1999. 11. 15

343億円の損害

●事故の概要



1. ナホトカ号沈没地点
2. 船首部漂着地点
3. 重油漂着の範囲

1997年1月2日未明、大しけの日本海(島根県隠岐島沖)において、暖房用C重油約19,000klを積んで上海からベトロバロフスクへ航行中のロシア船籍タンカー「ナホトカ」号(建造後26年経過)に破断事故が発生。
船体は浸水し、31名の乗組員は救命ボートに避難。しかし船長は行方不明となり、後日福井県の海岸に遺体が漂着した。
船体は水深約2,500mの海底に沈没したが、船体から分離した船首部分は強い北西季節風にあおられて数日間南東方向へ漂流し、対馬海流を横断して1月7日13時頃、越前加賀海岸国定公園内の福井県三国町安島沖に座礁した。
積み荷の重油は、約6,240klが海上に流出。また、海底に沈んだ船体の油タンクに残る重油約12,500klの一部はその後も漏出を続けている。
座礁した船首部分の油タンクに残っていた重油は、海上での回収作業および陸上からの仮設道を利用した回収作業により2月25日に回収を終えた。
海上に流出した重油は福井県をはじめ、日本海沿岸の10府県におよぼ海岸に漂着し、環境および人間活動に大きな打撃を与えた。

【ボパール事故の知識化】

- (1) 事故防止システムが幾重に用意されていても、そのシステムが設計通り機能しなければ、事故は起こる。システムとして構築した計器類などのハード面と従業員の教育などのソフト面との両面を維持しなければならない。
- (2) 利益優先の合理化は、保守点検レベルを低下させ、計器の誤動作を日常化し、大きな事故のきっかけを作る。
- (3) 化学プラントは各プロセスにおける危険分析を行い、それに基づいて必要な対策の実施計画をあらかじめ作成しておくことが大切である。
- (4) 化学プラントの地域への情報公開とコミュニケーションを密にし、防災訓練などで万一の際の対応に備えておくことが大切である。
- (5) 本質安全の考えで設計する。もしMICがなければ、漏洩もしなかった。またMICの量が適切であれば、こんなに大きな被害にはならなかった。

流出重油又は原油の処理方法(特許第3003846号)

技術的特長

- (1) 海水、塩、砂利などを含有した高粘性の流出重油又は原油に粉末吸着体を混合させる。
- (2) 重油又は原油を吸着体に付着させ、粘性を図り、処理阻害物質を分離する。
- (3) 回収重油又は原油に酸化剤粉末を用いて処分することを可能とする。

発明の効果

重油又は原油と処理阻害物質を分離し、更にフィルターによる塩のろ過を併用することで、重油又は原油の分解効率を高め、処分を容易にすると共に、砂利などの浄化処理も可能。

本特許の活用用途

1. 海水に流出した、重油、または原油の処理、処分。
2. 流出重油等の中に混在する、石、砂等の環境物質の浄化

ご相談は下記まで御連絡ください

〒319-1184

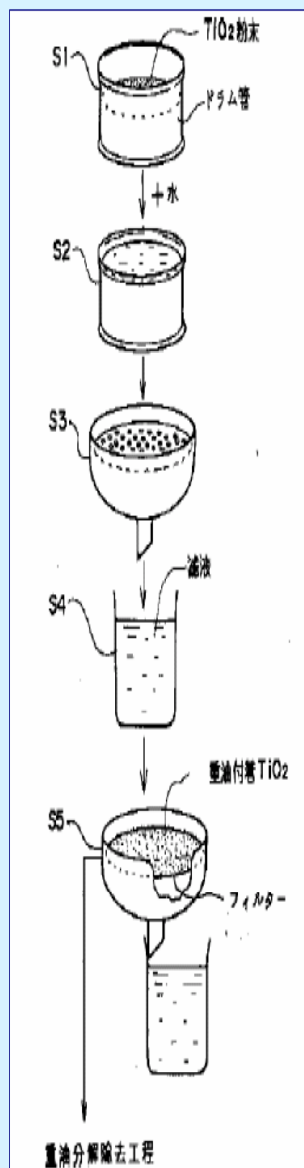
茨城県那珂郡東海村村松4-49

TEL: 029-282-1122

FAX: 029-282-7980

核燃料サイクル開発機構・技術展開部

- S1: 吸着体混合工程
S2: 水中懸濁工程
S3: 処理阻害物質除去工程
S4: ろ液回収工程
S5: 高性能フィルターろ過工程



【図1】吸着体混合工程及び重油又は原油付着吸着体回収工程

粉末吸着体の使用で流出重油また原油の粘性を低下させ、重油又は原油と海水、砂利など処理阻害物質の効率的分離を可能すると共に、回収重油又は原油を燃焼によらない電解酸化法、放射線触媒法での処分が可能。

流出重油処理技術【例】

ポイント1 酸化物触媒による吸着処理

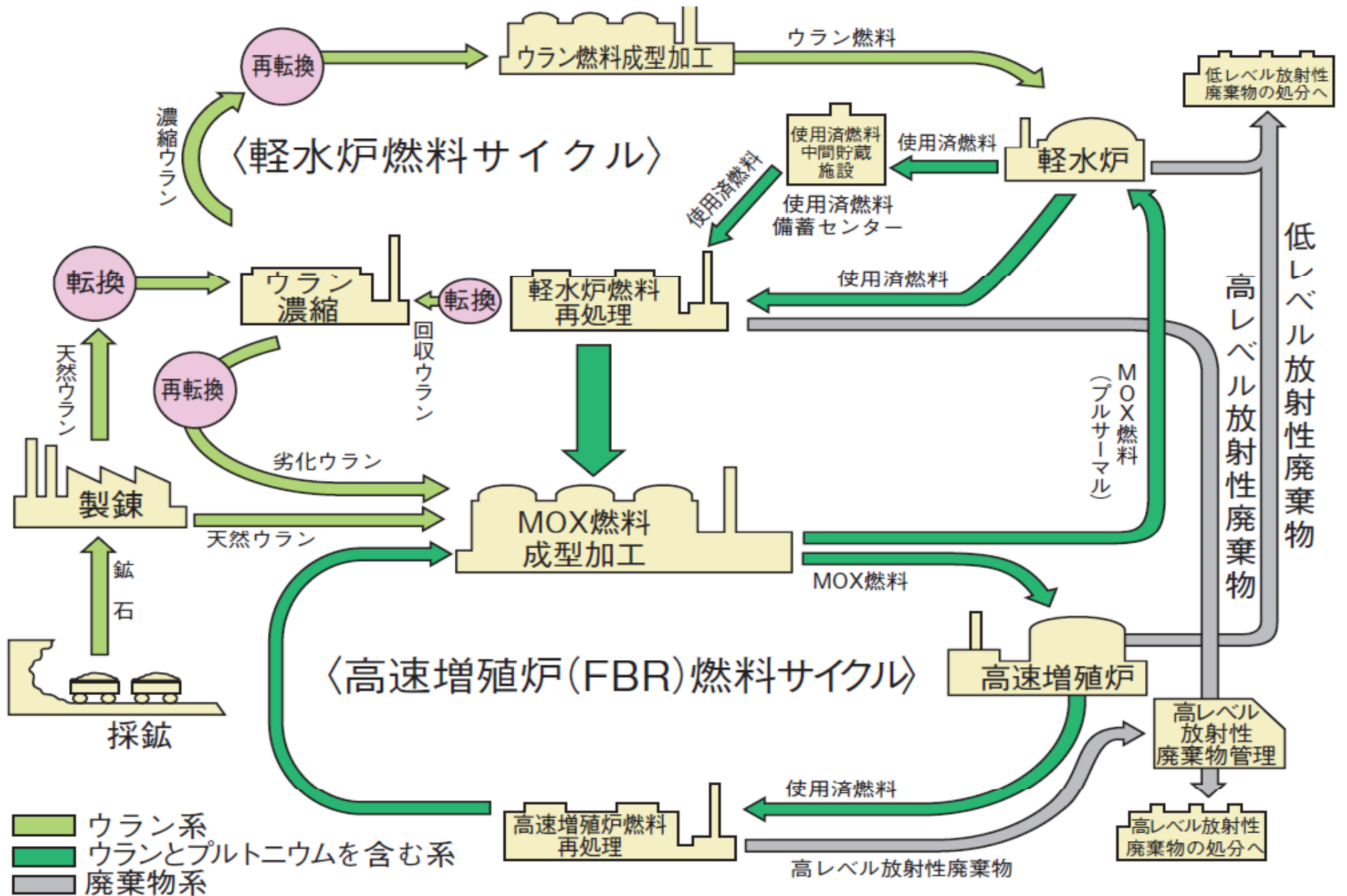
【0015】また、前記吸着体は、例えば TiO_2 、 ZrO_2 、 Al_2O_3 のような油を吸着しうる酸化物粉末を用いる。好ましくは、吸着体として TiO_2 を使用する。 TiO_2 は、例えば、 Al_2O_3 よりも5倍近くの油を吸着することができ、また、 ZrO_2 よりも2倍近くの油を吸着することができる。そのため、 TiO_2 を使用した場合には、他の酸化物よりも比較的少ない量で流出重油又は原油を吸着することができる。

ポイント2 電解触媒による分解処理

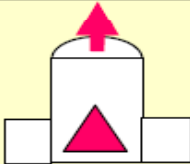
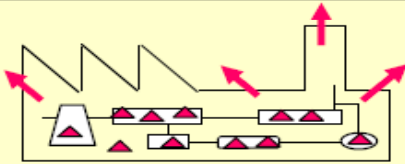
【0027】上記酸化剤としては、既存の酸化剤のいずれを利用することもできるが、大量の重油又は原油付着吸着体を処理するためには、廃棄物などの発生を伴わないという理由から以下の酸化剤を用いることが好ましい。

【0028】すなわち、前記酸化剤として、 Ag^+ を含む電解液を用いて電解酸化した際に生じる Ag^{2+} およびこれにより生ずる活性種を用いる。特に、 Ag^{2+} は強い酸化力を有し、この酸化力により重油又は原油付着吸着体の重油又は原油を酸化分解する。また、 Ag^{2+} は、電解液中の水を分解し、 OH^\cdot ラジカル等の活性種を生成し、この活性種によっても、重油又は原油付着吸着体の重油又は原油が酸化分解される。この Ag^{2+} は、重油又は原油を酸化することにより、自己は Ag^+ となるが、この Ag^+ は、再び電解酸化されて Ag^{2+} となり、酸化剤として作用する。従って、この方法によれば、酸化分解後に廃棄物を発生させることなく、重油又は原油を分解することができる。尚、 Ag は比較的高価なため、分解終了後、 Ag を回収することが望ましい。 Ag の回収は、分解終了後、電極の極性を交換し、銀をカソード析出させることにより行うことができる。

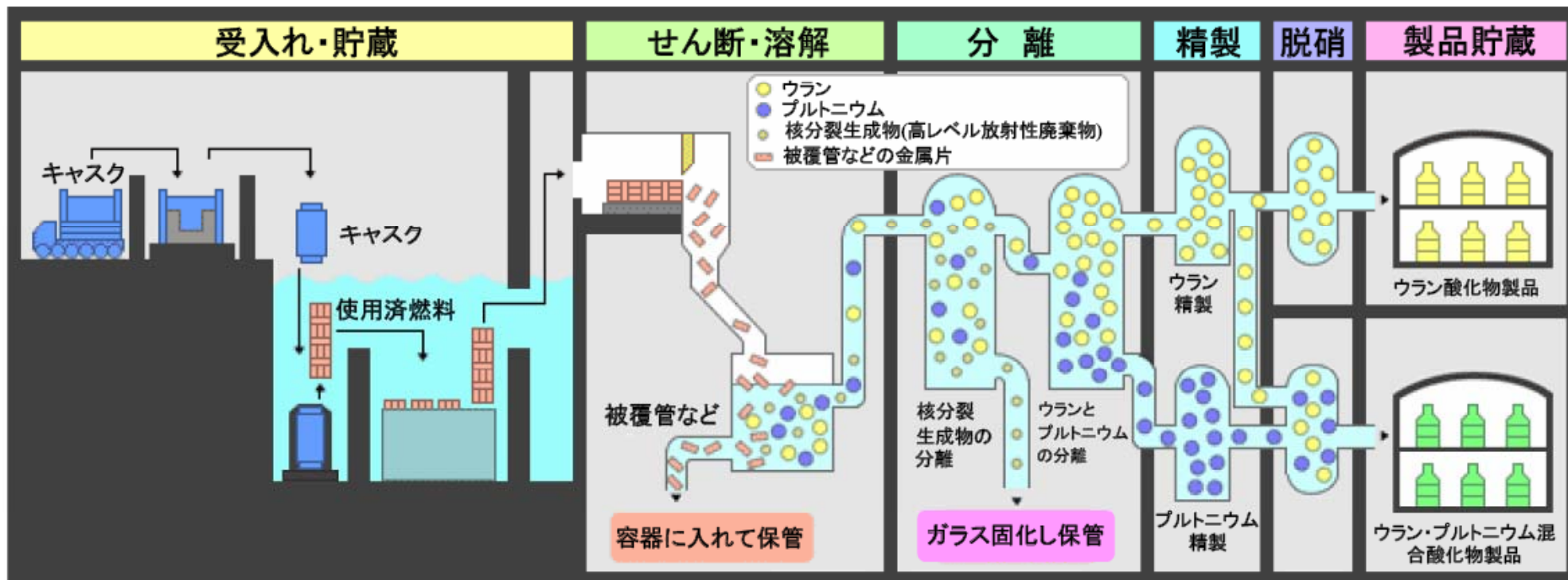
核燃料サイクル



原子力発電所と再処理施設

項目	原子力発電所	再処理施設
基本技術	核分裂によって発生する莫大なエネルギーの冷却材である水への伝達を制御し、熱エネルギーを電気エネルギーに変換	放射性物質、化学物質の各工程内の挙動を制御することによって物質を分離(核分裂は起こさない)
閉じ込め機構	多重の静的バリアによる閉じ込め 冷却材喪失事故時に内圧が急速に上がるために頑丈な格納容器が必要	<ul style="list-style-type: none"> ・雰囲気の高圧管理による動的閉じ込め ・放射性物質の一部に対しては、吸着除去によって環境への放出を制限値以下に抑えるシステムによる閉じ込め
ハザード源	炉心に集中	工程内各箇所分散(各所で多様な事象発生の可能性、個々の事象の影響は限定的)
施設のリスク[注1]	炉心損傷に至る事象で代表できるとの共通認識が認知 	施設のリスクを代表する事象に対する共通認識の認知なし 
性能目標案	炉心損傷頻度、格納容器機能喪失頻度により設定	—

再処理工程の特徴



気体廃棄物処理設備、液体廃棄物処理設備(高レベル、低レベル)

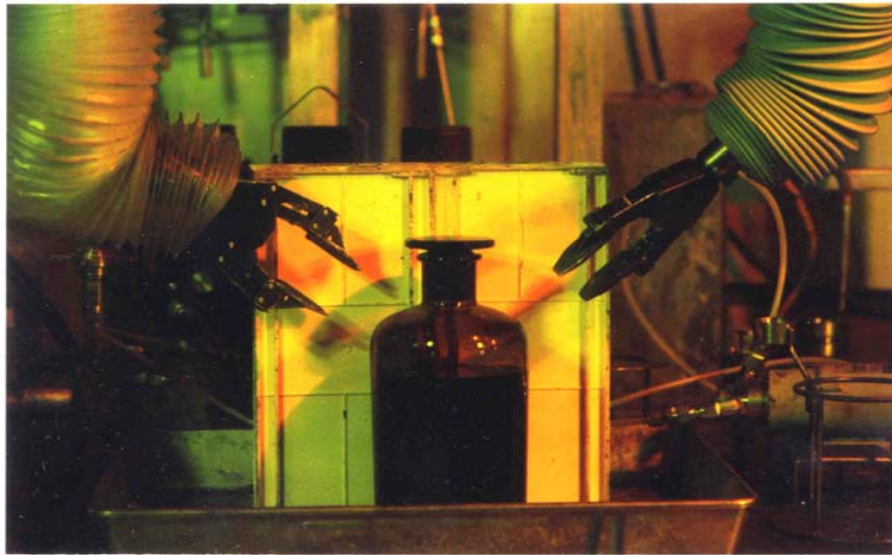
固体廃棄物処理設備(高レベル廃液ガラス固化、ガラス固化体貯蔵、低レベル固体廃棄物処理・貯蔵)

酸回収設備、溶媒回収設備、分析設備

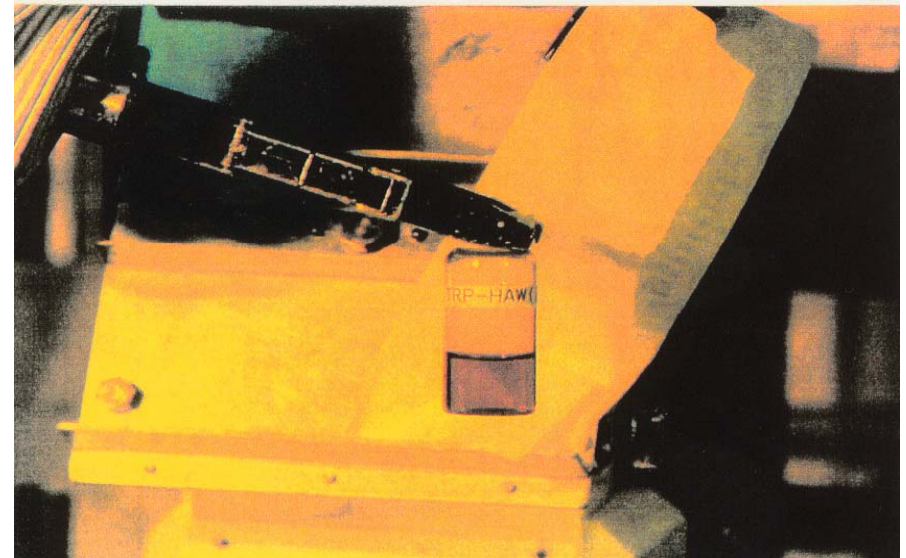
○様々な形態(固体、液体、気体)・性質の放射性物質を、様々な箇所で、様々な規模・環境で扱う。

○工程内各箇所に様々なハザード源(放射性物質、熱、可燃性・爆発性物質)が分布しており、様々な異常事象が想定。

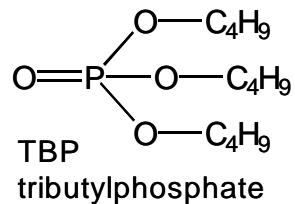
核燃料再処理（PUREX法）と核種分離



高速炉（「常陽」）照射済み燃料溶解液（東海、C P F）



高レベル放射性濃縮廃液（H L L W；東海再処理工場）、C P F



**核燃料再処理
(従来技術)**

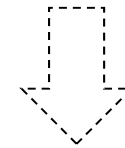
PUREX法；TBP抽出
Plutonium, Uranium, Reduction, EXtraction

ウラン（U）、プルトニウム（Pu）の回収

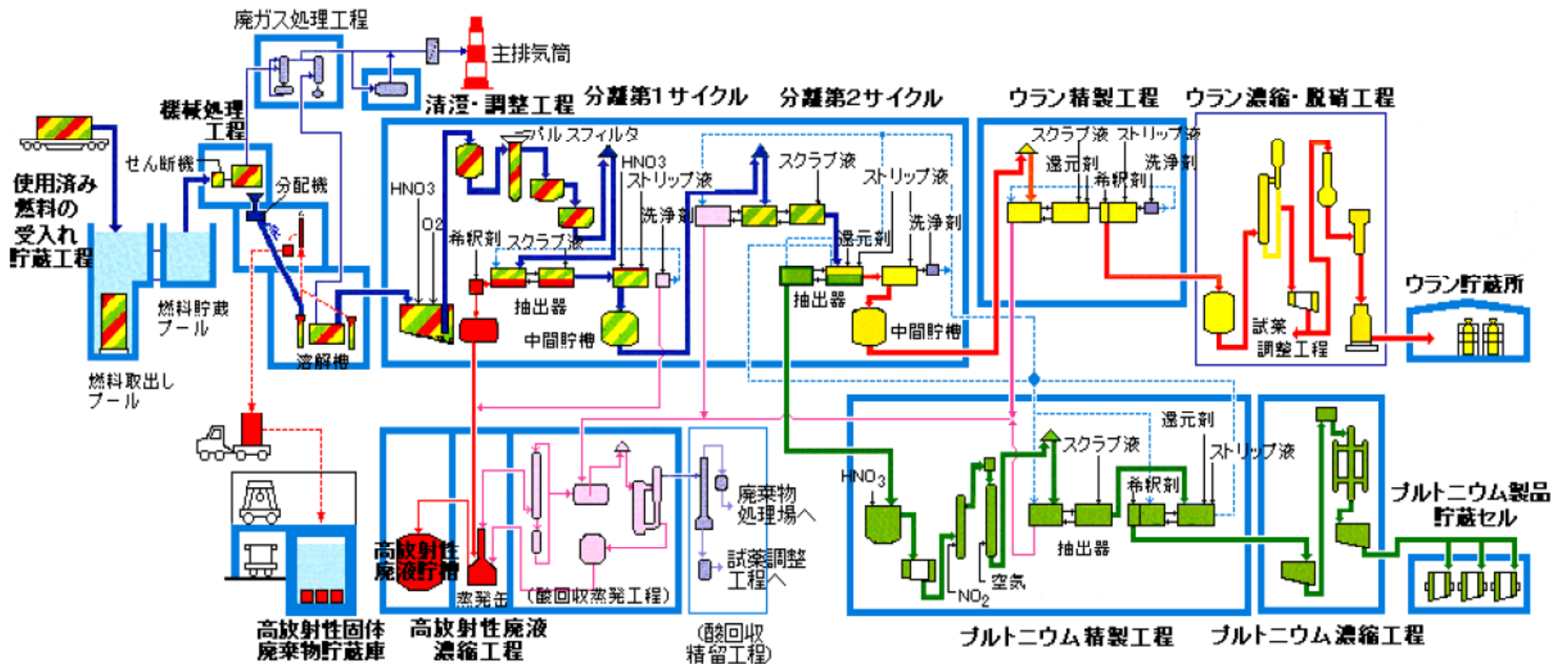


H L L W	マイナーアクチニド（Am, Cm, Np）		
	<table border="1"> <tr> <td>希少金属類</td> <td>腐食生成物</td> <td>その他</td> </tr> </table>	希少金属類	腐食生成物
希少金属類	腐食生成物	その他	

MA & FP

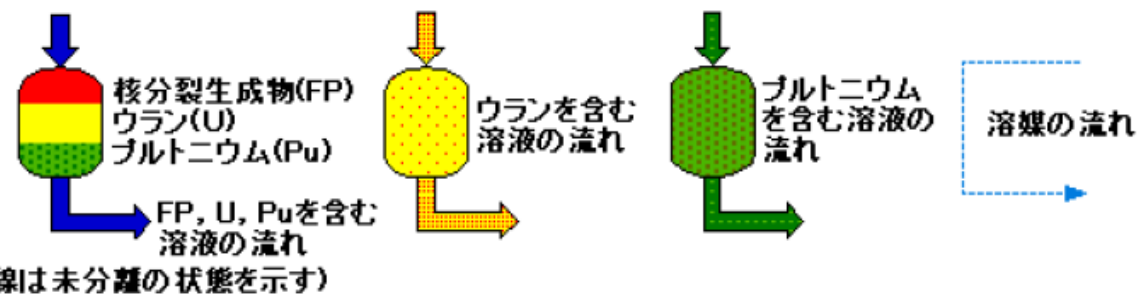


回収硝酸アメリシウム
(Am(NO₃)₃)
溶液



- 溶媒 …… 30%リン酸トリブチル・70%ドデカン
- 希釈剤 …… ドデカン
- 還元剤 …… 硝酸ウラナス(4価のウラン) + ヒドラジンの溶液
- ストリップ液… 0.02規定程度の希硝酸
- スクラブ液… 3規定程度の硝酸
- 洗浄剤 …… 水酸化ナトリウム, 硝酸, 炭酸ナトリウム

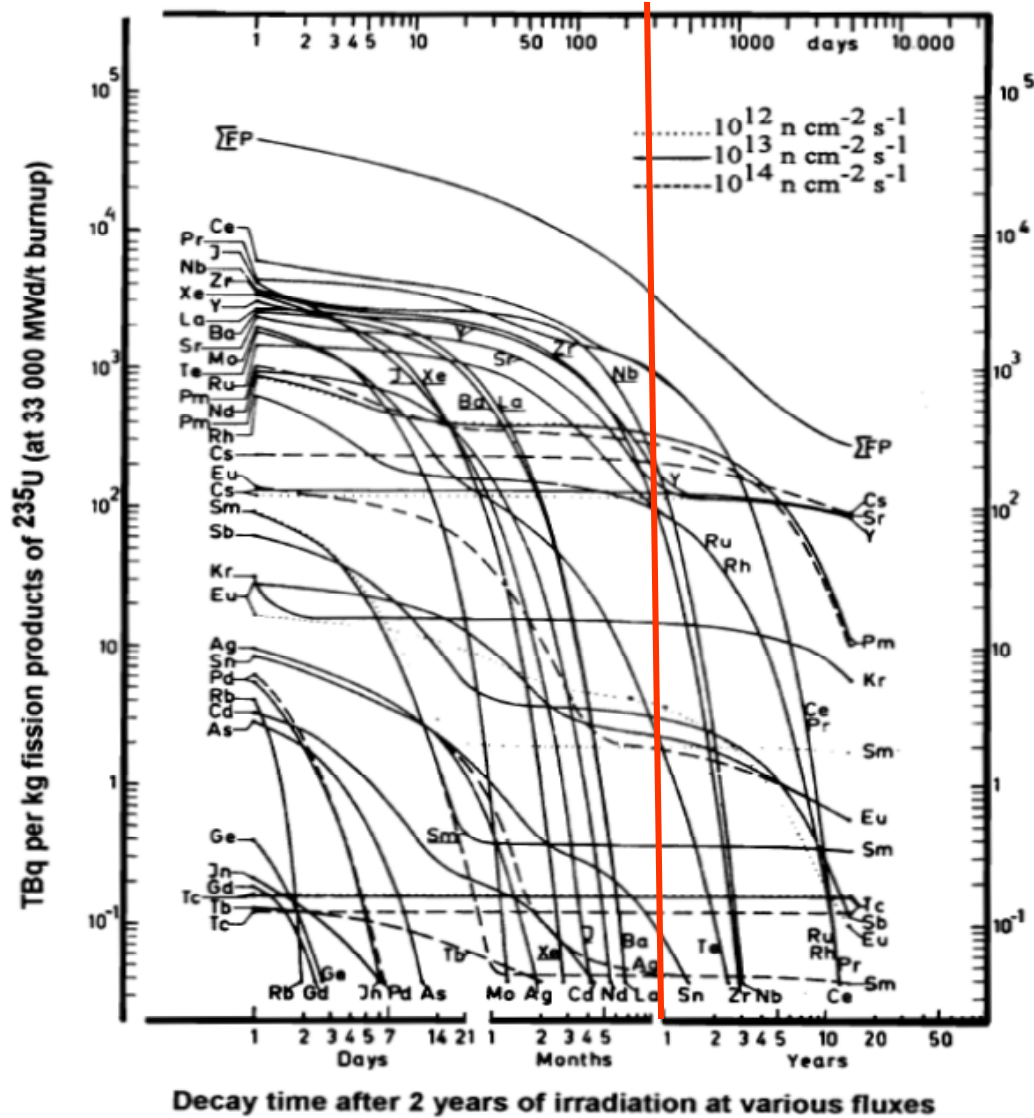
《再処理工程図の凡例》



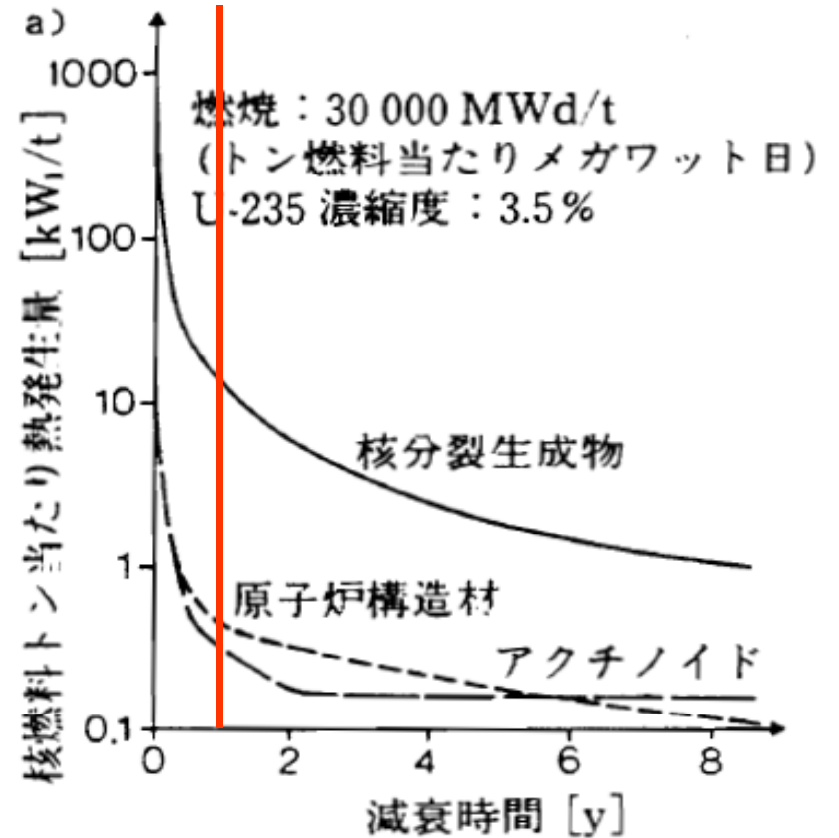
PUREX法による再処理工程(東海再処理施設)

[出典] 動力炉・核燃料開発事業団：よみがえるエネルギー「使用済核燃料の再処理」(1994年11月) p. 4-5

使用済み核燃料



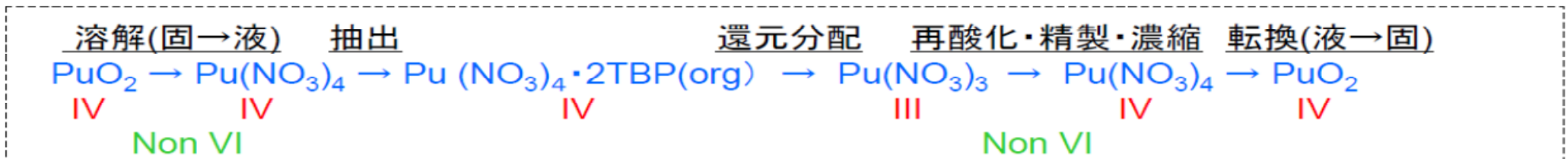
Radioactivities per ton IHM of elements formed in thermal fission of ^{235}U 2 years irradiation. Inflexion points indicate the existence of several radioisotopes of element.



✓ 原子炉停止後1年で、全核分裂生成物量 (Bq)は約1/10に、発熱量は1/100に減衰する。

◆再処理プロセス（工場）の特徴

- 使用済燃料からの核分裂物質（U、Pu）の回収（回収率＞99.5%）
FPからの分離（除染係数DF: $10^6 \sim 10^8$ ）。
- 核物質、放射性物質をマクロ量扱う、巨大化学工場。
- 技術（工学）及び人間の信頼性を最も重視。

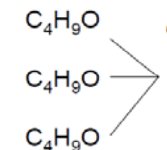


1. 選択的であること。即ち分配係数の比が大きいこと。
2. 抽出能力が良いこと。即ち抽出部における分配係数は1に近いがそれより大きいこと(工学規模設計では10以上が望ましい)。
3. 逆抽出が容易なこと。即ち逆抽出部における分配係数は1よりは大きくないこと(工学規模設計では0.1以下が望ましい)。
4. 溶解による損失(並びに漏洩率)を小さくするため、水に対し比較的不溶性であること。
5. 抽出後の相分離を促進するために、密度が水と異なること、また粘度が低くかつ界面張力が大きいこと。
6. 比較的不揮発性かつ不燃性、また有害でないこと(安全性)。
7. 分別蒸留などにより、容易に精製できること(リサイクル)。
8. 化学薬品(例えば硝酸)に対し安定であること。放射線に対しても十分安定なこと(安全性、経済性)

TBPはほとんどの要件を満たすが、粘度及び水との密度差が小さいという欠点
⇒ 芳香族を含まないケロシンのような軽飽和炭化水素で希釈する

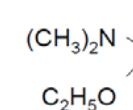
Phosphoryl (P=O)化合物

TBP



LD₅₀: 3000mg/kg for rats

GA(Tabun)

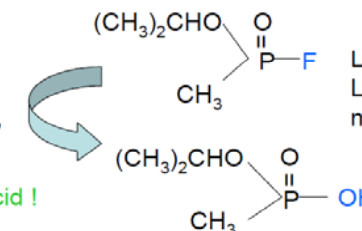


LD₅₀: 0.6 mg/kg for mice

GB(Sarin)

Hydrolysis ; NaOH,
Na₂CO₃

Non Toxic Acid !



LD₅₀: 0.42 mg/kg for mice
Lethal dose for men : 0.01 mg/kg

溶媒 (TBP) 抽出の化学的基礎

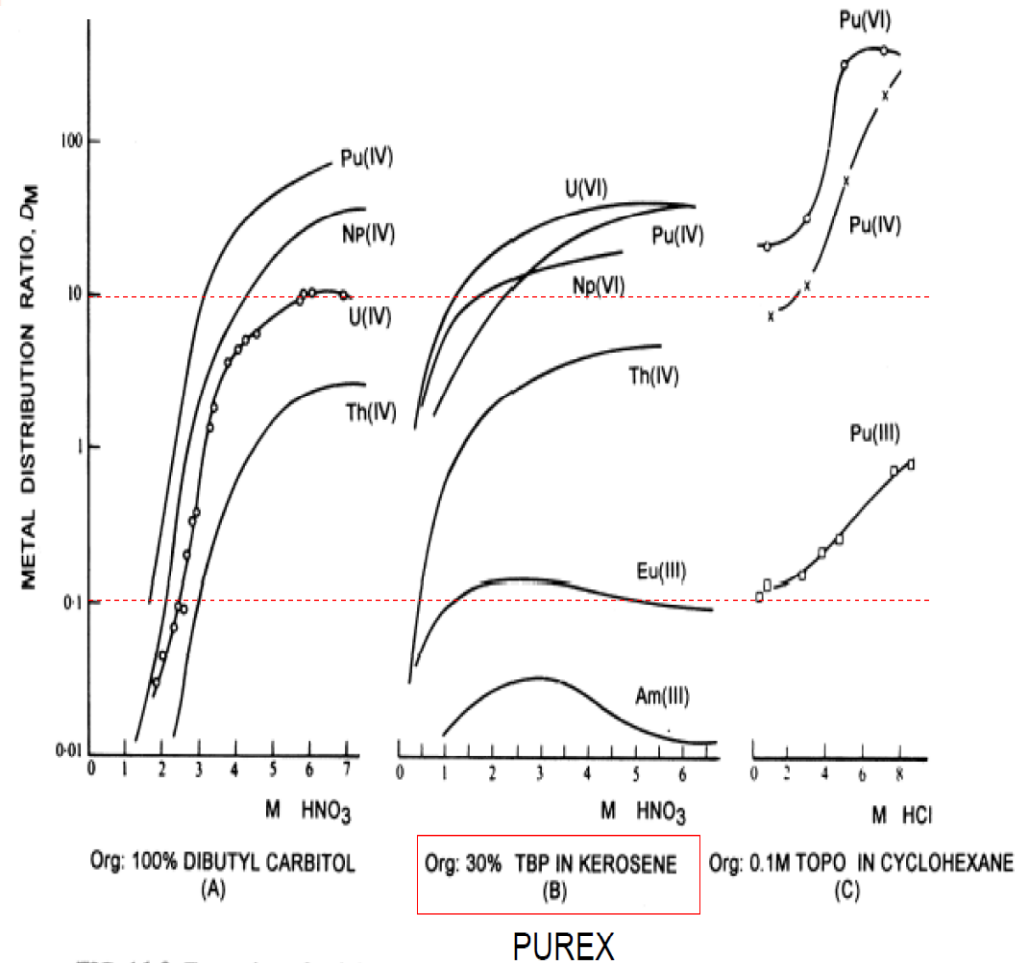


分配比(D)、分配係数(KD)、抽出率E(%)、分離係数 α 、除染係数(DF)
 UO_2^{2+} を例にとると、

- $D_U = [\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{TBP}(\text{org})] / [\text{UO}_2^{2+}(\text{aq})]$
- $K_D = [\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{TBP}(\text{org})] / [\text{UO}_2^{2+}(\text{aq})][\text{NO}_3^-(\text{aq})]^2[\text{TBP}(\text{org})]^2$

→ $D_U = K_D[\text{NO}_3^-(\text{aq})]^2[\text{TBP}(\text{org})]^2$
 $\log D_U = 2 \log[\text{TBP}] + C$ ($C = \log K_D[\text{NO}_3^-]^2$ とする) ⇒ 配位子分子数2
 の決定

- $E(\%) = 100D / (D + V_{\text{aq}} / V_{\text{org}})$
- $\alpha = D_A / D_B$
- $DF_U = ([\text{FP}_{\text{inlet}}] / [\text{UO}_2^{2+}_{\text{inlet}}]) / ([\text{FP}_{\text{product}}] / [\text{UO}_2^{2+}_{\text{product}}])$
 $= [\text{FP}_{\text{inlet}} \cdot [\text{UO}_2^{2+}_{\text{product}}] / [\text{UO}_2^{2+}_{\text{inlet}}] \cdot [\text{FP}_{\text{product}}]$



ウラン、プルトニウムの分離(分配)

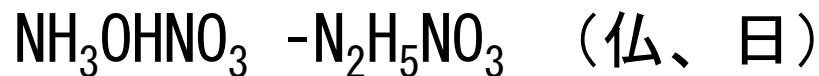
有機相中のPu(IV)を非抽出性Pu(III)に還元し、選択的に水相に逆抽出する。有機相に残ったU(VI)は希硝酸で逆抽出する。分配法としては以下の方法が開発されている。

(a) スルファミン鉄 : $\text{Fe}(\text{SO}_3\text{NH}_2)_2$ (英国)

(b) 硝酸ウラナス、硝酸ヒドラジン混合液 : $\text{U}(\text{NO}_3)_4 - \text{N}_2\text{H}_5\text{NO}_3$



(c) 硝酸ヒドロキシルアンモニウム (HAN)、
硝酸ヒドラジン混合液 :



(d) *in situ*電解還元法 (旧西独、日)

(e) 酸分配法 (米、英、日)

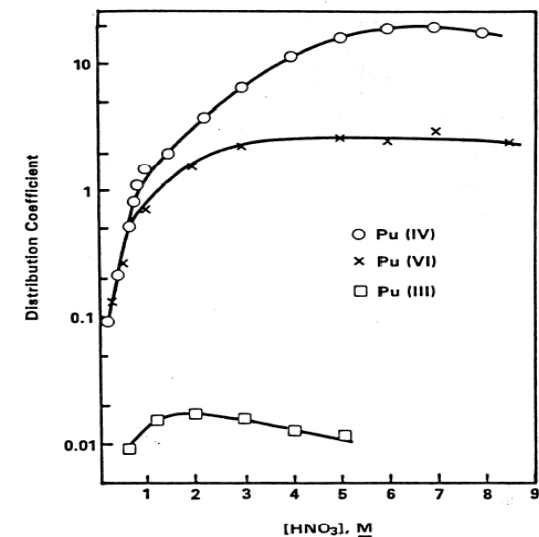
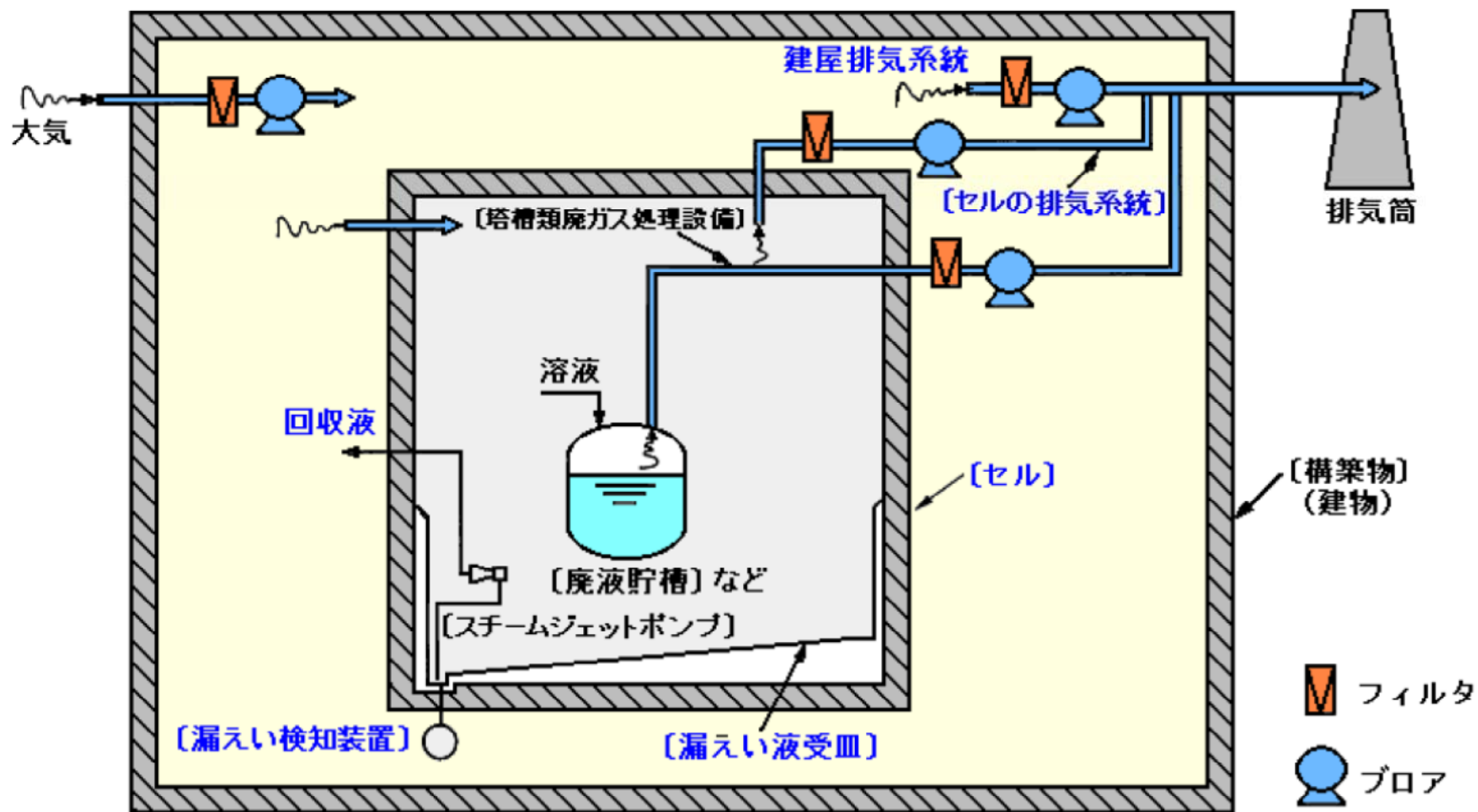


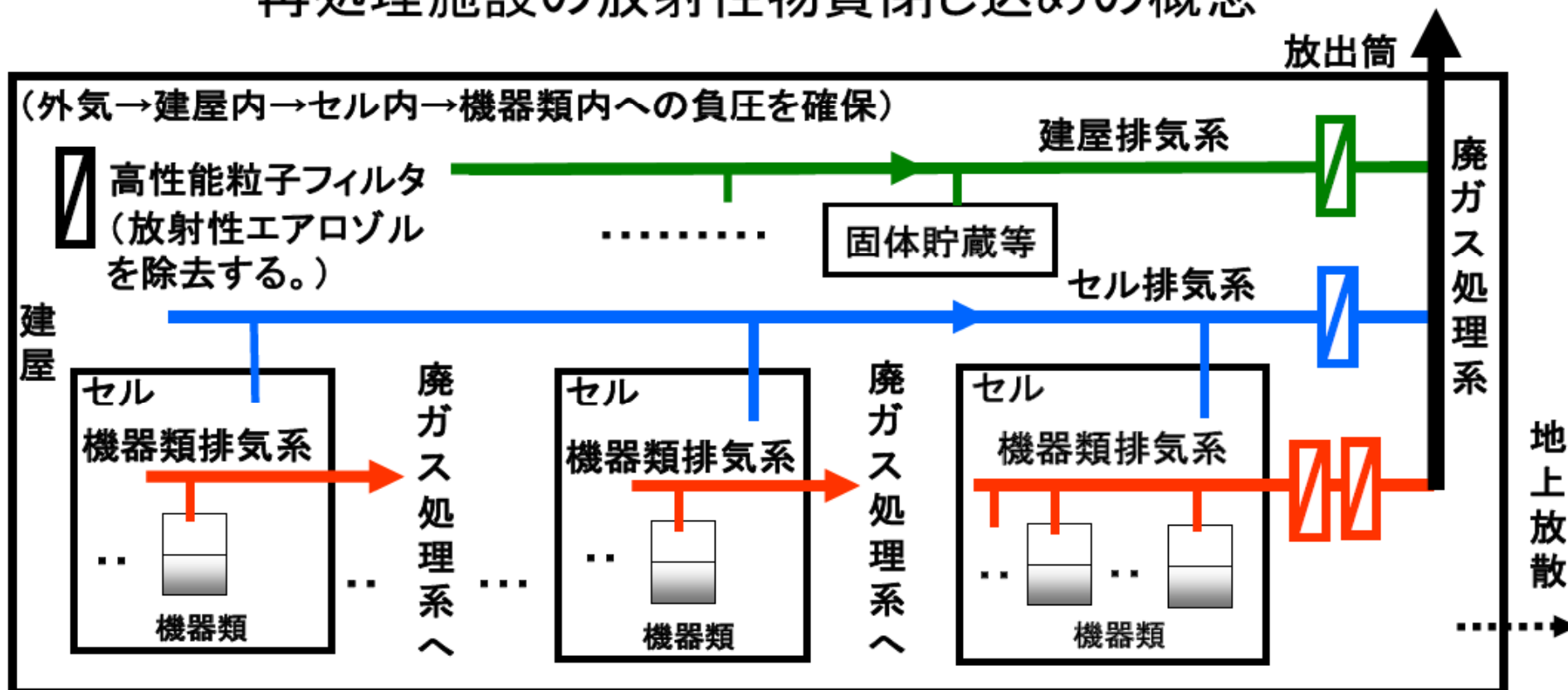
FIGURE 2. Extraction of plutonium in the III, IV, and VI valency states by 20% tributyl phosphate. (From McKay, H. A. C., and Woodgate, P. R., The extraction of plutonium by tributyl phosphate. I. U.K. At. Energy Res. Establishment Rep. AERE-C/R 994, Her Majesty's Stationery Office, London, England, 1952. With permission.)



—— 再処理工程における放射性物質の多重閉じ込め機能

[出典] 住谷寛ほか: 再処理工場開発の現況 - 六ヶ所再処理工場施設の概要と安全性を探る -、
 原子力工業、38(10)、p.25(1992)

再処理施設の放射性物質閉じ込めの概念



いずれかの機器類から気相への放射性物質の移行量が増加すると、平常時以上の放射性物質の放出に至る可能性がある。(臨界についても、各箇所いずれかで臨界安全管理条件(質量、濃度等)が保たれなくなると、発生の可能性がある。)

- 様々な箇所で、様々な原因で、様々な規模で、独立に又は相互に関連して、様々な異常事象の発生が想定。
- 但し、各異常事象の潜在的影響の規模は、事象により発生箇所が限定されるので原子力発電所に比べ限定的。

再処理の安全設計の特徴

- ・ 工程が多数のユニットに分かれており、それぞれがセルに収納。事故の原因となる場所及び要因の種類が多様。
- ・ 各工程はほぼ常圧で、工程温度は高くても沸点付近である。操作条件は原子炉に比べ一般的にはゆるやか。
- ・ 核分裂生成物は溶液に溶存しているので封じ込め要件は原子炉に比べきびしい。
- ・ 想定される事故の、種類は多いが、規模は原子炉に比べ小さい。
- ・ 従来は決定論的手法による事故評価。COGEMA社はUP3-A, UP2-800に確率論的評価を実施。
- ・ EXXon社は事故を5グループに分類。高レベル放射性廃液蒸発缶のRed-Oil爆発、他までを「設計基準事故」としてプラント工学的安全システムに反映。以下の「仮想事故」については実際には起こりえない事象として考察のみに留めた。(PNCZJ199 83-26(1)1983.5)
大地震、大洪水、トルネード、破壊的大火災、大型航空機の衝突 (外部事象)
冷却機能の全喪失、HLLWの土壌への流出
- ・ COGEMA社はUP3-Aの設計で、4つの頻度カテゴリーに分類。発生頻度 10^{-1} /年は運転上の事故とし、 10^{-7} /年以上の事象を設計に考慮。外部事象はサイト依存として設計に考慮すべき、としている。

再処理工場の安全設計の例

1) 臨界設計 (装置、工程)

形状管理 ; ①スラブ (S, D) 、 ②アニューラー (S, D) 、 ③円筒

中性子毒 ; ①B入りラシヒリング、 ②Cd板

濃度管理 ; 比重 (水相、有機相)

質量管理 ; 220gPu, 20Kg4%濃縮U

インラインモニター ; nモニター (抽出器)

臨界警報装置 (建屋)

2) 火災爆発

工程温度管理 ; 60°C (溶媒抽出工程)

135°C (加熱用蒸気温度 : 蒸発濃縮工程)

工程操作管理 ; 希釈剤洗浄装置、LP+

計装設計 ; 圧力上限緊急操作装置PP+、温度上限緊急操作装置TP+

3) 漏洩

加熱用蒸気凝縮水放射性物質検知装置 ; α RP+、 γ RA+

漏洩検知装置 (セル等) ; LW+

負圧警報装置dPA⁻ (グローブボックス)

4) 被ばく管理 ; ラディエーションマップ、各種モニター

5) 耐震強度

免震装置、地震モニター

6) 非常用電源

非常用発電機 (ユーティリティー施設、他) ; 20秒以内に給電状態 (電圧6.6kV \pm 3.5%、周波数50Hz \pm 5%) に復帰

無停電電源装置 (高放射性廃液貯蔵場、他) ; 充電器、蓄電池

ウラン分配及び精製工程におけるリスク評価（定性的）の例 (UP2-400)

Inventory of precursor events of external origin taken into account for the "Medium activity uranium" workshop in the UP2-400 works.

Sub-assemblies Risks		Adjustment		Extraction solvent treatment		Concentration		Storage	Uranyl Nitrates	Laboratory
		A	G	B	H	C	I	D	E	F
NON NUC LEAR	Fire	X	X	X	X	X	X	X	XX	X
	Explosion								XX	
	Chemical	XX	X	X	X	XX	XX	X	X	X
	Pressure					XX	XX		XX	
	Handling			X	X			X		X
	Electrical	X	X	X	X	X	X	X	X	X
NUC LEAR	Criticality	X	X	XX	X	X	XX		X	X
	Irradiation	XX	X	XX	X	X	X	X		XX
	Contamination	XX	XX	XX	X	XX	XX	XX	X	XX

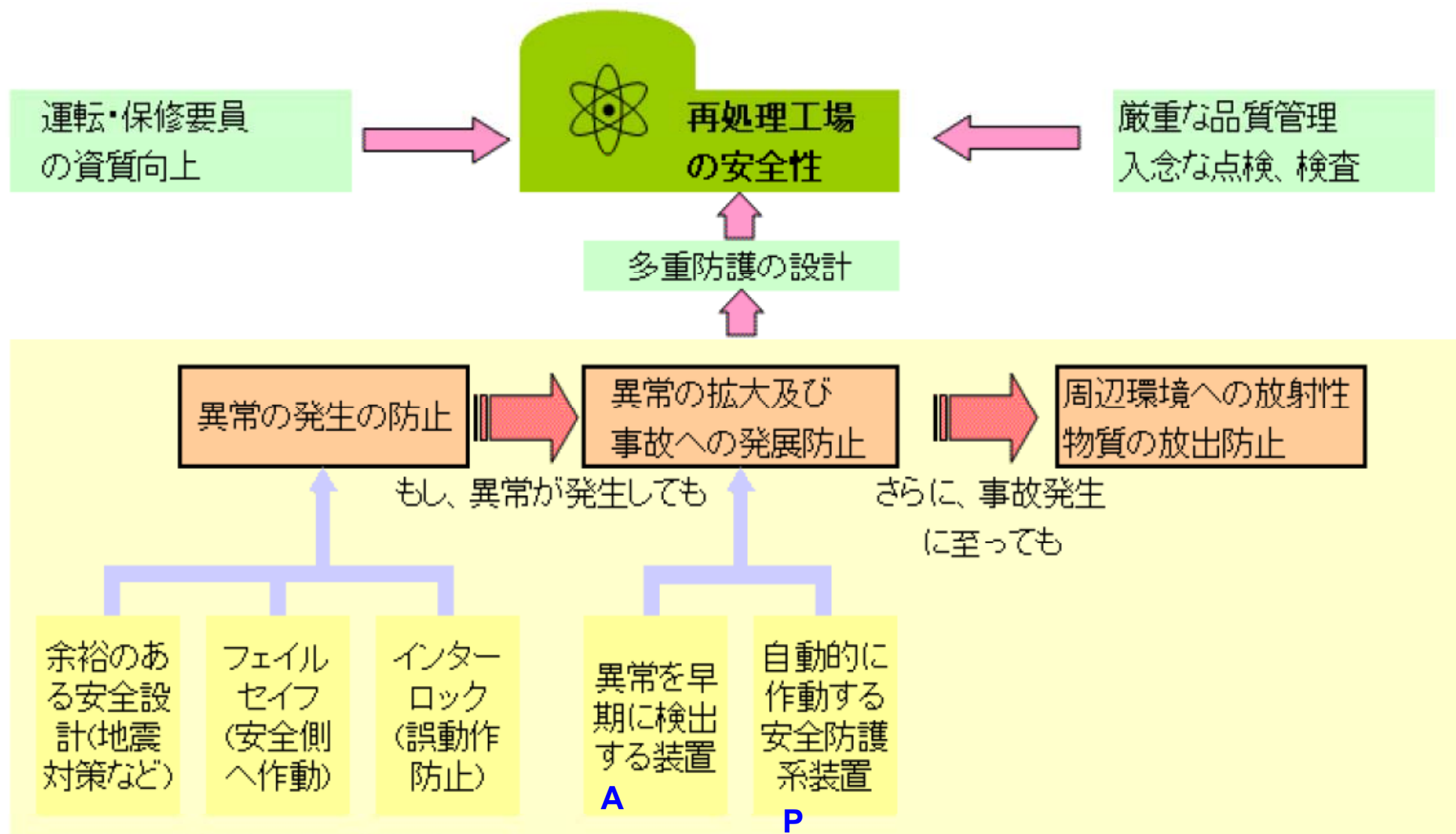
Remarks:

Sub-assemblies A, B, C correspond to the U-Pu partition cycle.

Sub-assemblies G, H, I correspond to the third U purification cycle.

Key:

: Probability not allocated
 X : Very low probability risk
 XX : Low probability risk
 XXX : Medium probability risk



下記の出典をもとに作成した。

安全確保の仕組み

[出典] 経済産業省 資源エネルギー庁(編): 原子力2001、(財)日本原子力文化振興財団(2001年7月)p.51

想定される異常事象の種類[注1]

事象	概要	発生が想定される箇所
崩壊熱除去機能喪失による溶液沸騰	溶液中の崩壊熱除去のための冷却機能(冷却水の供給)が喪失し、溶液の温度が沸点を超え沸騰する。	崩壊熱除去用の冷却水が供給されている各種機器
放射線分解による水素の爆発	硝酸溶液の放射線分解により発生する水素の掃気機能(圧縮空気の供給)が喪失し、水素濃度が爆発下限界濃度を超え且つ着火源が存在し、水素が爆発する。	水素掃気用の圧縮空気が供給されている各種機器
有機溶媒火災	機器内の溶媒又はセル内に漏えいした溶媒が加熱により引火点を超え且つ着火源が存在し、溶媒が燃焼する。	有機溶媒を扱い且つ加熱源がある機器又はセル
TBP等の錯体の急激な分解反応	TBP等の錯体が誤って混入し且つ135℃以上に加熱され、TBP等の錯体が急激に分解する。	加熱源とTBP等の錯体混入の可能性がある機器(濃縮缶、蒸発缶)
臨界	誤装荷、過装荷、誤移送、溶解不良、過濃縮、漏えい、抽出不良等により、臨界安全管理条件(濃度、質量等)が維持できなくなり、臨界が発生する。	溶解槽、抽出工程等、施設内各箇所の各種機器及びその近傍
漏えい	各種機器、配管等の破損、事故等により、機器、配管等の内容物(溶液、熔融ガラス等)が漏えいする。	各種機器、配管の周辺
使用済燃料集合体等の取扱いに伴う破損	キャスク、使用済燃料集合体等の取扱い中に落下・衝突等が発生し、使用済燃料集合体等が破損する。	使用済燃料集合体等を取り扱う箇所
有機化合物の爆発	ヒドラジン、アジ化水素等が爆発条件に至り爆発する。	当該爆発性物質を扱う箇所
各種機器、配管等の破損、事故等による機能喪失	各種機器、配管等が破損、事故等により本来の機能を喪失し、放射性物質閉じ込め機能の喪失又は放射性物質浄化機能の低下が発生する。	各種機器、配管及びその近傍(例: 廃ガス洗浄塔、排風機、凝縮器等の機能喪失)
その他	全動力電源の喪失、上記以外の溶液沸騰、水素爆発、火災等。	各種機器、配管等

注1:「核燃料施設の事故影響評価手法に関する調査(I)、原子力学会和文論文誌、Vol. 9, No. 1, pp. 52-59, 2010」より

巨大技術(原子力)の事故例

- 1) ウラル (マヤーク (チェリャビンスク65)) HLLW貯槽の爆発 放射性核種放出 **1957. 9. 29**
- 2) ウインズケール火災 (イギリス) **1957. 10. 10** 炉心黒鉛減速材火災 2万CiのI-131放出 数十人が白血病で死亡
- 3) サンローラン・デ・ソー原子炉(フランス)炉心溶融 **1963. 10**
- 4) 原子力砕氷船レーニン号原子炉暴走 **1965. 2**
- 5) パロマレス米軍機B52-G墜落 (スペイン南部) **1966. 1. 17** 4個の水爆のうちの2個の起爆装置が爆発500 gのPuが土壤に残留
- 6) 原子力船「むつ」放射線漏れ **1974. 9. 1**
- 7) 海洋偵察衛星墜落(カナダ) **1978. 1. 24** 原子力電池搭載コスモス954 300万\$の損害賠償
- 8) TMI島原子力発電所 炉心溶融 **1979. 3. 28 レベル5**
- 9) 原潜事故 エコー2型K-431原子炉爆発 (ウラジオストック) **1985. 8. 10** 10名死亡250名被ばく
- 10) チェルノブイリ原子力発電所爆発 **1986. 4. 26 レベル7** 9000名死亡(WHO) 55,000名死亡 (14周年追悼式典)
- 11) ゴイアニア被ばく事故 (ブラジル) **1987. 9** Cs-137線源の盗難 250人被ばく、4名死亡
- 12) トムスク再処理施設爆発 **1993. 4. 6** U-TBP錯体の熱分解 Pu 3.7×10^{10} Bqの環境放出
- 13) ラプソディーNa貯蔵タンクの爆発 **1994. 3. 31** プロパノールとNaとの反応による水素爆発 **レベル3**
- 14) 動燃高速増殖炉「もんじゅ」ナトリウム漏洩 **1995. 12. 8**
- 15) 動燃東海アスファルト固化施設火災爆発 **1997. 3. 11 レベル3**
- 16) JCO核燃料加工施設臨界事故 **1999. 9. 30 レベル4** 日本で3番目の臨界事故2名死亡
- 17) トリカスタン原子力発電所 放射性核種放出 **2008. 7. 7 レベル0** 3万 μ Ciのウラン溶液の流出 250人被ばく
- 18) 福島第一原子力発電所炉心溶融・水素爆発 **2011. 3. 11 レベル7**

再処理・火災爆発事故例

世界における再処理施設の火災・爆発事故例

本文の章	再処理施設等	発生年	事故の種類	原因	被害	防止対策
1	英国ウインズケール(セラフィールド)	1973	抽出工程溶媒供給器の発火	有機溶媒の不溶解性残さによる発火	運転員の被ばく等 35名の被ばく	不溶解性残さの除去工程の設置
2	米国サバンナリバー	1953	抽出工程蒸発缶の爆発	TBP-硝酸ウラン錯体の急激な熱分解反応	機器の損傷、建屋の一部破壊、運転員2名負傷等	多量有機溶媒の混入防止 蒸発缶の加熱温度制限
		1975	転換工程脱硝器の爆発	上記と同じ	上記と同じ	多量有機溶媒の混入防止等
3	ロシアトムスク	1993	抽出工程調整貯槽の爆発	TBP-硝酸ウラン錯体の急激な熱分解反応	機器の損傷、建屋の破壊、放射性物質の環境への放出等	多量有機溶媒の混入防止 硝酸に対して反応性の低い希釈剤の使用等
4	旧ソ連キシテム	1957	高レベル廃液貯槽の爆発	冷却系の故障による有機混合物(酢酸塩等)の爆発	多量の放射性物質の環境への放出等	独立した換気系と信頼性の高い計器の設置
5	米国ハンフォード・プルトニウム回収施設	1997	プルトニウム回収施設の試薬貯槽の爆発	硝酸ヒドロキシルアミン(HAN)の急激な熱分解反応	機器、建屋の一部破壊等	運転管理の改善等
6	仏国ラアーグ	1980	電源系の火災	電源系の短絡	応急措置により汚染等なし	電源系の多重化等
7	ベルギーユーロケミック・アスファルト固化処理施設	1981	アスファルト固化体の火災	アスファルトと硝酸塩の急激な化学反応	機器損傷、作業員の外部被ばく等	廃液の熱分析による事前確認等
8	日本動燃アスファルト固化処理施設	1997	アスファルト固化体の火災	アスファルトと硝酸塩の急激な化学反応	設備損傷、作業員の内部被ばく等	運転管理の改善等

[出典] 本文中の#SEEREFER(1)～(9)を基に作成

主な再処理事故（１）

【火災・爆発事故の特徴】

- ・ 過去に約50件の発生。ほとんどが1960年代の初期まで。主に軍事用施設で発生
- ・ 有機溶媒の火災；溶媒の不適切処理、低引火点有機溶媒の仕様、不溶解残渣（高崩壊熱）と有機溶媒の混合（ウインズケール1973.9）
- ・ ジルコニウム粉末の発火；湿潤Zrの自然発火(ORNL1956.5)
- ・ 蒸発缶等でのウラン抽出錯体の爆発（Red-Oil）；TBP（DBP）錯体を含む溶媒（TBP,ケロシン）の加熱分解反応(SRP1953.1)
- ・ この他金属ウラン、プルトニウムの自然発火、化学薬品による火災、イオン交換樹脂の火災、電気設備ケーブルブル火災、水素爆発

主な火災事故例

1963/11/6 プルトニウム精製用陰イオン樹脂塔からの火災

ハンフォード工場（米）

概要：レドックスプラントに付随する陰イオン交換樹脂を用いたプルトニウム精製プラントの火災。

原因：プルトニウムを吸着させた陰イオン交換樹脂に必要なない重クロム酸カリウムを加えたことによる酸化反応等により、引き起こされたと推定されている。

操作温度が高かった可能性もある。

（事故後、操作限度温度を70℃としている。）

1964/10/1 陰イオン交換塔の陰イオン樹脂からの発火による火災

サバンナリバー工場（米）

概要：ネプツニウムを回収するための陰イオン交換塔から白煙があがる。

原因：明確にされていない。

主な爆発事故例

1953/1/12 硝酸ウラニル、TBP、有機溶媒混合物（レッドオイル）の蒸発間での爆発
サバンナリバー工場（米）

概要：硝酸ウラニル溶液の蒸発濃縮中に蒸発缶が爆発

原因：蒸発缶の供給液にTBPと希釈剤（ケロシン）が多量に混入、
有機物と硝酸ウラニルの急激な反応により爆発。

1959/11/20 蒸発缶での除染剤と硝酸のニトロ化反応による爆発
オークリッジ国立研究所（米）

概要：蒸発缶の除染作業中に爆発が発生。

原因：蒸発缶の除染作業では除染剤で除染、水洗いして、硝酸で洗浄のプロセスを
作業員が除染剤投入後、水洗いをせずに4M硝酸を加えて加熱洗浄したこと
により起こる。

1961/3/18 蒸発缶での有機物と濃硝酸の反応爆発
トムスク工場（露）

概要と原因：蒸発缶に有機物と濃硝酸が流入して反応し爆発。その経過等は不明

1962/6/26 Pu精製用陰イオン交換樹脂塔のピアレックスガラスカラムの破裂
フォントネオローズ研究所（仏）

概要：Puの分離精製実験のためにDowex1-X4(強塩基性陰イオン交換樹脂)に
Puを吸着させて放置、4日間後作業を再開したところ、カラムが破裂。

原因：樹脂を高濃度の硝酸と長時間接触させたことによる発泡による物理破裂

主な再処理事故（2）

【臨界事故の特徴】

- ・過去に8件の発生。ウラン系5件、プルトニウム系3件。ウインズケールを除くとほとんどが米国軍事用施設・研究施設で発生。
- ・ウラン系は全て高濃縮ウラン（ ^{235}U ～90%）の取り扱い時。非形状安全槽への高濃縮ウランやプルトニウムの誤移送が原因。
- ・非形状安全槽でのプルトニウムの蓄積、抽出条件異常によるウラン濃度上昇

【漏洩事故の特徴】

- ・環境への放射性物質の異常放出。約30件の内、期待漏洩約20件、作業ミスが原因。液体漏洩約10件、配管の腐食、点検作業ミス、海洋放出罐の亀裂、バルブの故障が原因
- ・ハンフォード再処理工場での漏えい事故1973.7；貯槽のレベルチェック漏れと炭素鋼ライニングの腐食が原因。
高レベル放射性廃液が435m³地中からコロンビア川に流出（ ^{137}Cs ;40,000Ci, ^{90}Sr ;1,4000Ci, ^{239}Pu ;4Ciを含む）
- ・旧ソ連チェリャビンスク（マヤック核兵器生産コンビナート）での漏洩事故1957.9(ウラル核惨事)；高レベル放射性廃液貯槽の爆発で漏洩。2,000,000Ciが環境放出。下流300Km環境汚染、34,000人が被ばく。
- ・放出核種は $^{144}\text{Ce}+^{144}\text{Pr}$ （66%）、 $^{95}\text{Zr}+^{95}\text{Nb}$ （24.9%）、 $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ （5.4%）。Puは痕跡程度
- ・事故直後の被ばくは ^{95}Zr や ^{106}Ru 、5年後の土壤汚染は ^{90}Sr が主因
- ・被ばく者7852人についての健康調査（～1987人）では、全ソ連の対象値と比較して悪性腫瘍や生殖機能に関し優位な差はなし

Red-Oil爆発について (1)館盛ら1986.2 JAERI-memo61-032

レッドオイルとは、高い温度でTBP-希釈剤と金属硝酸塩溶液の反応によって生成する物質である。希釈剤がニトロ化されて赤色を呈するため、この名称がつけられた。レッドオイルは加熱されると爆発的な分解反応をすることが知られている。

一方、金属硝酸塩-TBPの錯体 ($UO_2(NO_3)_2 \cdot 2 TBP$ など)も、高温にすると分解反応をし、可燃性の気体を発生する。レッドオイルの存在は、可燃性気体を引火濃度以上に発生させるような、錯体の急激な分解反応を誘発する可能性もある。

実際、過去においては、Savannah River PlantとHanford Worksの蒸発缶あるいは脱硝器で、レッドオイルに関わると考えられる3件の火災・爆発事故が発生している。

本報は、現在、設計が進められている燃料サイクル安全工学研究施設 (Nuclear Fuel Cycle Safety Engineering Research Facility, 略称NUCEF)に設置される濃縮缶の安全な運転に資することを目的として、レッドオイルおよび錯体 ($UO_2(NO_3)_2 \cdot 2 TBP$ など)の分解反応に関する報告と、他の再処理施設のレッドオイル爆発防止対策を調査したものである。参考として、上記3件の事故の概要を附録にまとめた。

2 レッドオイル爆発に関する実験報告

2.1 概 論¹⁾

レッドオイルと呼ばれる物質は、加熱されたTBP-希釈剤溶液と金属硝酸塩溶液の反応により生成する有機物質からなる高密度 ($1.1 \sim 1.6 \text{ g/cm}^3$) の混合物である。レッドオイル生成には、有機相中の $UO_2(NO_3)_2$ 、 $Pu(NO_3)_4$ 、あるいは $Th(NO_3)_4$ とTBPの錯体の存在が不可欠である。核燃料の再処理におけるレッドオイルの重要性から、その生成と性質については多くの研究が行われ、この分野における最新の報告は、Wilbourn⁸⁾のものである。

TBP-NPH (normal paraffin hydrocarbon)あるいはTBP-n-ドデカン系より、TBP-ケロシン系の方が、レッドオイル生成が起りやすいことが、Wilbournおよび他の研究者から報告されている。Wilbournの実験では、レッドオイルの赤い色は、希釈剤のニトロ化合物によることが示されている。NowakとNowak⁹⁾は、TBP-n-ドデカンあるいはTBP-メシチレン (トリメチルベンゼン) 溶液が、少量の $UO_2(NO_3)_2$ 、 $Pd(NO_3)_2$ または $Zr(NO_3)_4$ を含む硝酸水溶液と $80 \sim 100^\circ\text{C}$ で反応すると、有機性の亜硝酸化合物とニトロ化合物が生成することを確認した。TBP-n-ドデカン系よりも、TBP-メシチレン系において、TBPの加水分解に対する耐性は大きい、ニトロ化合物の生成量は、後の方が大きい。

レッドオイルは $130 \sim 150^\circ\text{C}$ で分解することが多くの研究者から報告されている^{2), 3), 4), 5), 6), 7)}。しかしながら、Harmon⁷⁾らは 170°C 以下においては $UO_2(NO_3)_2 \cdot 2 TBP$ の急激な分解は発生しないこと

4. あとがき

今回の調査で以下のことがあきらかになった。

- (1) 開放系においては、急激な分解反応が生じる最低温度は 135°C である。希釈剤として、不飽和系の炭化水素を用いた場合の方が、飽和系の炭化水素を用いた場合より一般的に反応開始温度が低い。
- (2) 硝酸ウランに対するTBPの比が0.12以下の場合には、急激な反応は発生しない。
- (3) 昇温速度が小さい方が、急激な反応は発生しにくい。
- (4) 加圧系においては、着火源が存在すると反応の開始温度は開放系の場合より低くなる。その最低温度は 130°C としているが、不明確な点が多い。
- (5) レッドオイルが存在すると、分解反応は容易に発生する。
- (6) プルトニウムおよびトリウム系でも分解反応は発生する。その特性は、ウラン系のときと良く似ている。
- (7) 蒸発缶の温度を 130°C (ベント系の容量が十分であれば 135°C) 以下に保てば、急激な反応は防止できる。しかし、ウラン-TBPの錯体は、分解されることなくプロセス内に存在し続ける。脱硝を行うときには、これらの除去、あるいは分解反応の制御が重要な問題となる。
- (8) 金属を含まないTBP-希釈剤-硝酸系の分解反応は、反応開始温度は高いが、反応時の温度上昇、および圧力上昇は非常に大きい。これは有機物のニトロ化合物の分解が関係しているのではないかと推定される。

Red-Oil爆発について (2)小澤ら1989.8 PNCZN8510 89-002

The Red-Oil Problem and Its Impact on Purex Safety
(ORNL/TM-10798)

レッドオイル問題およびそのピューレックス法の安全性への影響
(翻訳資料)

訳者 小沢正基, 山田 隆,
田村伸彦, 鷺谷忠博

要 旨

目 的

1953年米国で発生した2件の事故以来、レッドオイルの問題は核燃料再処理施設の設計及び運転に際し考慮すべき大きな制約条件の1つとなってきた。しかし、核燃料再処理プロセス中におけるレッドオイルの挙動に関して、世界的に見ても知見は少なくかつ整理されていないのが実情であり、現在でも主要な研究テーマの1つとなっている。

この様な状況においてレッドオイルに関する既存の文献を整理、再評価することによって、レッドオイルの問題解決のための一つの新しい指標を得ることを目的として本研究がなされた。

方 法

高速炉燃料再処理日米協力における先進溶媒抽出技術(カテゴリーII)のワークスコープに基づき、主として東海プラント設計開発室(EDS)で収集したレッドオイル関係の文献を米国ORNLが評価、その結果作成された報告書(ORNL/TM-10798)を翻訳した。ORNLでの評価に供された資料は30編にのぼり(内EDSより送付したものは20編)、評価は最終的に以下の8項目の勧告としてまとめられた。

結 論

レッドオイルの問題を回避する方法は以下の8項目の勧告としてまとめられる。

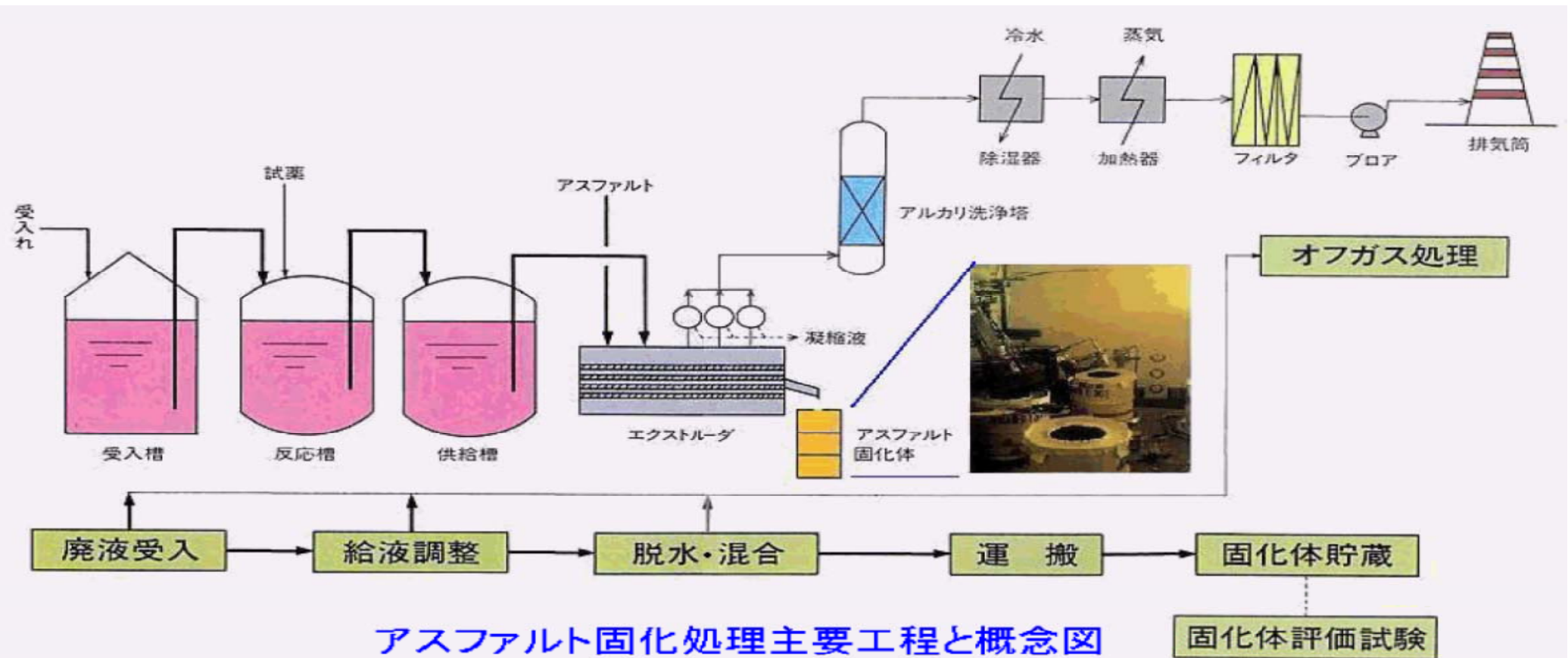
1. 水相流が高温に熱せられる直前に同伴する有機相を除去するために効果的なデカンテーションを設けること。異常に多量の有機相の混入のみがレッドオイル事故の原因になる。

2. スチームストリップや希釈剤洗浄のような大掛りな油分除去法は必要ない。もしこのような方法が使われるのであればスチームストリップの方がいくつかの点で有利である。
3. 蒸発缶温度を135℃より低く保持すること。n-パラフィン系炭化水素を希釈剤に使用している限りは、より高い温度(150℃以上)でもレッドオイルの問題は生じないであろうがこれを許すにはなお一層の研究が必要である。
4. 温度を特定された温度以内に保持することを担保すること。
5. 温度計や密度計等の運転に必要な計装機器が正確に作動しない限り蒸発缶や脱硝器を運転しないこと。
6. 有機物の分解や、爆発性の混合物の存在を知るために脱硝オフガスモニタリングの精度に対する研究を一層進める必要がある。
7. 脱硝に対してより良い方法は、有機物の蓄積を生じさせないために、少量供給による連続プロセス式か反復利用プロセスを用いる事である。
8. 恐らく最も重要なことはいかなる操作においても、もしそれが手順通りではないか、あるいは通常の手順から離れているのであれば、注意深く評価しなおすことである。本レポートで評価された事故は、通常では扱わない物質を取り扱っている時に起きたものである。そしてどちらの蒸発缶事故も重要な計装が作動しない時に起きている。

アスファルト固化爆発について

アスファルト固化 あすふあるとこか

bitumen solidification, bitumenization. 原子炉の冷却水の浄化に関連する濃縮廃液や再処理プロセスから発生する中・低レベル液体放射性廃棄物の固体化法の一つである。放射性廃液は、その放射能レベルに応じて、蒸発処理、凝縮沈澱処理、またはイオン交換処理により、放射性物質が濃縮された二次廃液が得られる。この二次廃液をアスファルト及び乳化剤と混合して加熱し、脱水・溶融する。溶融物はドラム缶に注入されることによって、放射性物質がアスファルトと均一に混合した固化体得られる。アスファルト固化法は、セメント固化法に比べて減容率大きい、放射能の水への浸出率が小さいなどの利点がある。反面、放射線損傷のおそれがあり、水に接触して膨潤現象を起こす恐れがあるので、廃棄物の含有率、貯蔵法に配慮が必要である。



[出典] 動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所:アスファルト固化技術開発施設パンフレット

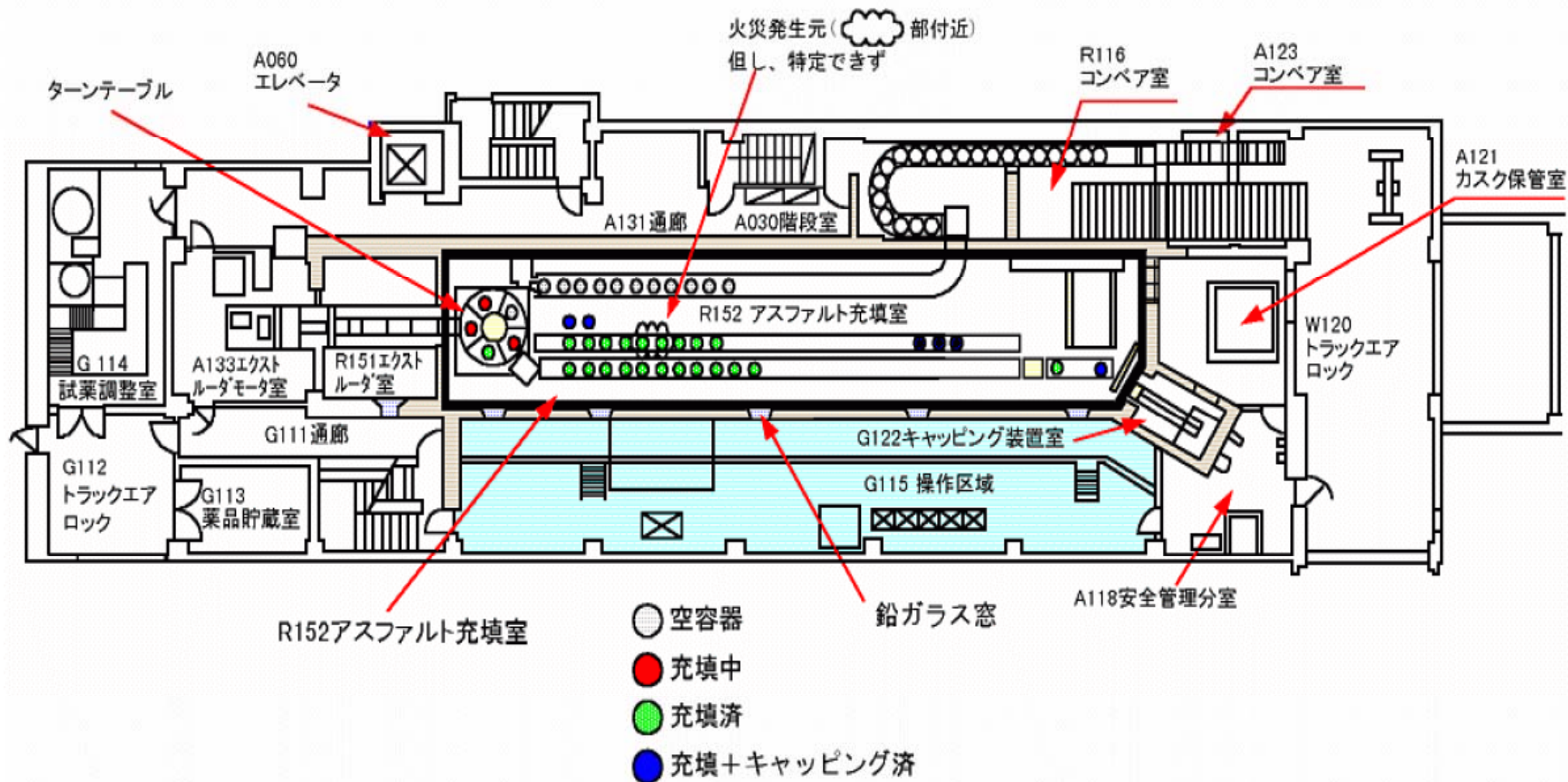
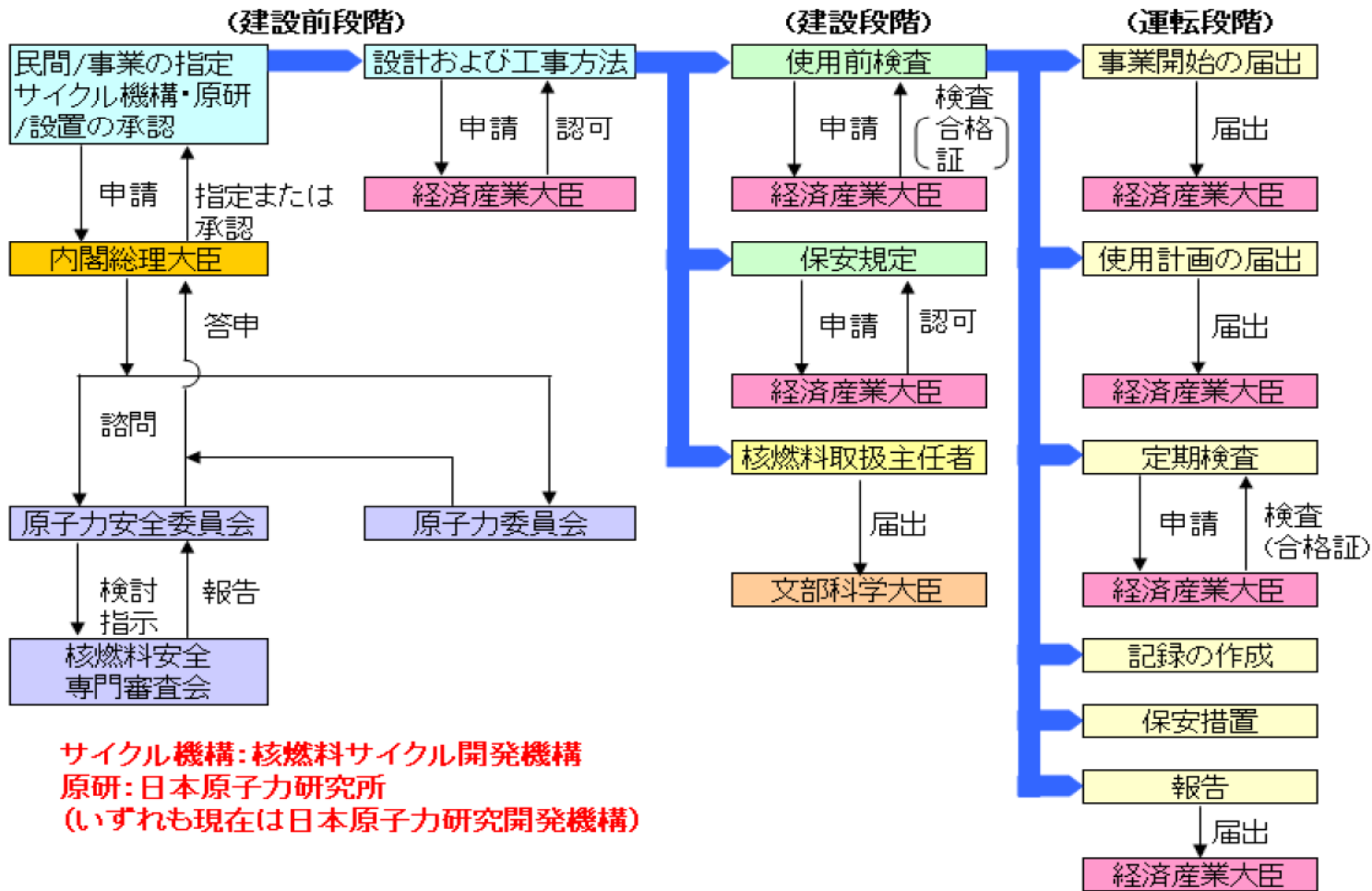


図5 火災発生場所

[出典] 原子力広報誌「あす」臨時号、動燃東海アスファルト固化処理施設 火災爆発事故特集、
茨城県/社団法人茨城原子力協議会(発行)、p.2(1997)

事故原因の知識化

- (1) プロセス；再処理工場の低レベル放射性廃液（硝酸ソーダを大量に含む）をpH調整後、蒸発濃縮する。濃縮液に原料アスファルトを混合し、エクストルーダ（混合機）に送り、蒸気により加熱、混合脱水する。脱水後のアスファルトはターンテーブル状の空ドラムに充填されて放冷して、安定固化体となる。
- (2) 事故1997. 3. 11；充填済みドラム缶数本に火災発生。火災発生後セル換気系のフィルターが目詰まりし、建屋及びセル換気系が全停止した。火災から約10時間後に爆発が発生し、放射性物質が環境放出された。レベル3の評価。
- (3) 原因；アスファルト混合物の加熱昇温
- ・脱水・混合機（エクストルーダ）内での物理的な発熱（摩擦熱）による充填温度の上昇
 - ・廃液とアスファルト原料の供給速度を低下させたことによる出口温度の上昇。蓄熱性の高い固化体の温度が徐々に上昇。硝酸塩・亜硝酸塩とアスファルトの酸化還元反応が進行し、可燃性熱分解生成物を発生、ついに空気と熱分解生成物との燃焼暴走反応（爆発）にいたる。
 - ・セル換気系の全停により不完全燃焼化が起こり、可燃性物質が滞留。しかしながら再起動した槽類換気系及び建屋換気系からの空気が混入して、爆発限界内となった。
 - ・不十分（1分）な火災消火（8分以上の規定）及びアスファルトの自己発火あるいはダクト内での電気系統による発火で着火
 - ・アスファルトは種々の成分の混合物で熱化学反応の制御困難。硝酸塩も良くない。化学安全への配慮不足
- (4) 環境影響；¹³⁷Cs放出量14GBq、公衆の実効線量当量0.02mSv以下



サイクル機構:核燃料サイクル開発機構
 原研:日本原子力研究所
 (いずれも現在は日本原子力研究開発機構)

再処理事業に対する安全規制体系

シーケンス検討に係るプロセス過渡応答の解析項目の例

事象名	事象発生設備・機器等	発生条件等	解析項目
溶液沸騰	(安全冷却水系から)崩壊熱除去用の冷却水の供給が必要な機器	冷却機能が喪失し、溶液温度が沸点を超える	溶液温度の過渡変化(上昇)
水素爆発	(安全圧縮空気系により)水素掃気が必要な機器	水素掃気機能が喪失し、水素濃度が爆発下限界濃度(4%)を超える(+着火源あり)	機器内気相部の水素濃度の過渡変化(上昇)
TBP等の錯体の急激な分解反応	「TBPの誤混入(TBP洗浄不良)+加熱源あり」を満たす機器(濃縮缶、蒸発缶)	故障、誤操作等により、混入したTBPが135℃以上に加熱される	機器内の溶液温度の過渡応答 TBP混入量
臨界	臨界安全管理の想定外の状態になった設備・機器	故障、誤操作等により、臨界安全管理状態が保たれなくなる	抽出工程溶液濃度の過渡変化など
セル内有機溶媒火災	「有機溶媒あり+加熱源あり」を満たす設備・機器	セル内に漏えいした有機溶媒の温度が引火点を超える(+着火源あり)	温度上昇の過渡変化 漏えい溶媒が引火点を超えるかどうか

再処理（原子力施設）安全に関する経験知・則

- 定常作業より非定常作業の方に多くの危険が存在（全工程、特にリワーク工程）
- 非形状管理槽（通称バカタンク）への液移送および液処理には特注意を払う（試薬調整、リワーク工程）
- 多種の化学試薬を、同時に扱う工程（試薬調整など）は要注意
- バイオリズムに反した勤務体制には問題が多い
- 工程パラメータは安易に変更してはいけない。操作・管理判断は多重に行う（特に、液移送）
- ハイドリックガード（水封）は信用しないほうがよい
- （蒸気圧の異なる）混合溶媒のインベントリーには注意が必要
- 放射性核種の配管内マイグレーションには注意
- 全原子力施設を通じ、火災、腐食、水素爆発など、化学反応、化学安全に対する配慮不足を第一に改善しなければならない