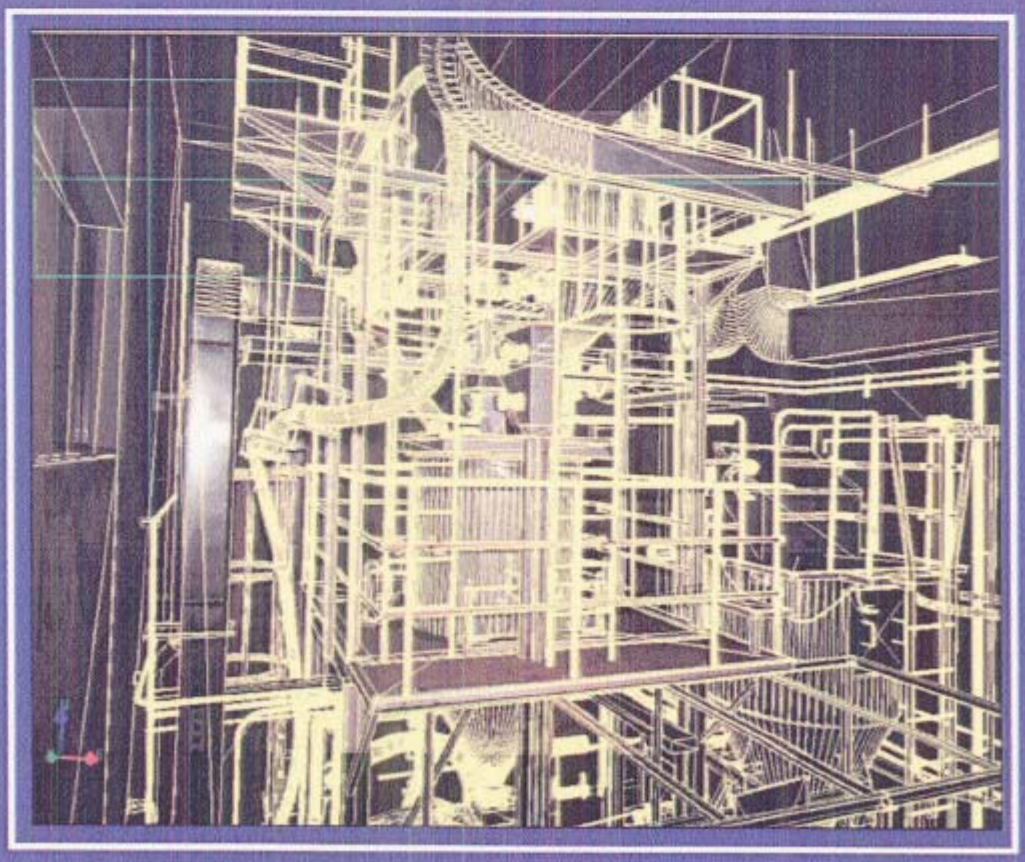
JNC TN9400 2003-001

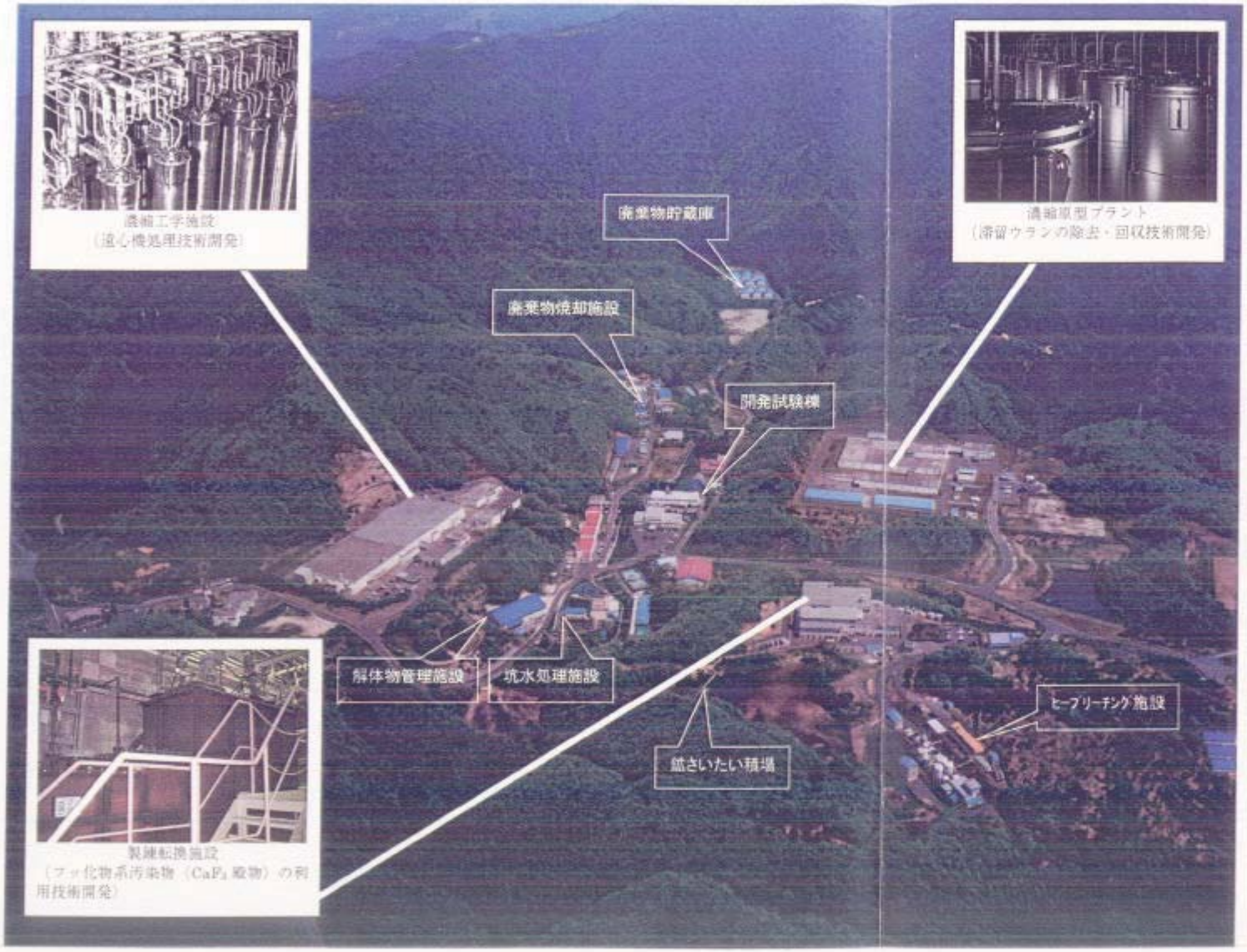
NINGJO-TOGE

核燃料施設廃止措置と廃棄物処理技術の体系化を目指して！



NINGYO-TOGE

核燃料施設廃止措置と廃棄物処理技術の体系化を目指して！



遠心工学施設
（遠心機処理技術開発）

遠心原型プラント
（滞留ウランの除去・回収技術開発）

製錬転換施設
（フッ化物系汚染物（CaF_2殻物）の利用技術開発）

NINGYO-TOGE

核燃料施設廃止措置と廃棄物処理技術の体系化を目指して！

解体エンジニアリングと人形峠 …… 1

1. 滞留ウランの除去・回収技術開発 …… 3
1.1 はじめに …… 3
1.2 滞留ウランの除去・回収原理 …… 3
1.3 計画・実績 …… 4
1.4 周辺技術開発 …… 5
1.4.1 除去・回収用ガスの選定 …… 5
1.4.2 IF_7 製造技術開発 …… 5
1.4.3 滞留ウラン計測技術開発 …… 6
1.5 滞留ウラン除去・回収試験 …… 6
1.5.1 基礎試験 …… 6
1.5.2 カスケード滞留ウラン除去・回収試験 …… 7

2. 遠心機処理技術開発 …… 9
2.1 はじめに …… 9
2.2 計画・実績 …… 10
2.3 処理技術 …… 11
2.3.1 処理設備の概要 …… 11
2.3.2 遠心分離機へのウラン付着状況 …… 12
2.3.3 除染技術 …… 13
2.4 検認技術 …… 15
2.4.1 直接測定 …… 15
2.4.2 重量濃度 …… 16
2.4.3 溶融二次処理 …… 16

3. フッ化物系汚染物（CaF_2殻物）の利用技術開発 …… 17
3.1 はじめに …… 17
3.2 計画・実績 …… 18
3.3 模擬殻物を用いた性能確認試験 …… 19

4. 解体エンジニアリングシステム開発 …… 21
4.1 はじめに …… 21
4.2 解体エンジニアリングシステム …… 22
4.3 解体エンジニアリングシステムの構成 …… 23
4.3.1 3DCAD システム …… 23
4.3.2 支援システム …… 25
4.3.3 データベース …… 25
4.4 技術成果の普及 …… 26

用語解説 …… 27

解体エンジニアリングと人形峠

核燃料施設廃止措置と廃棄物処理技術の体系化を目指して！

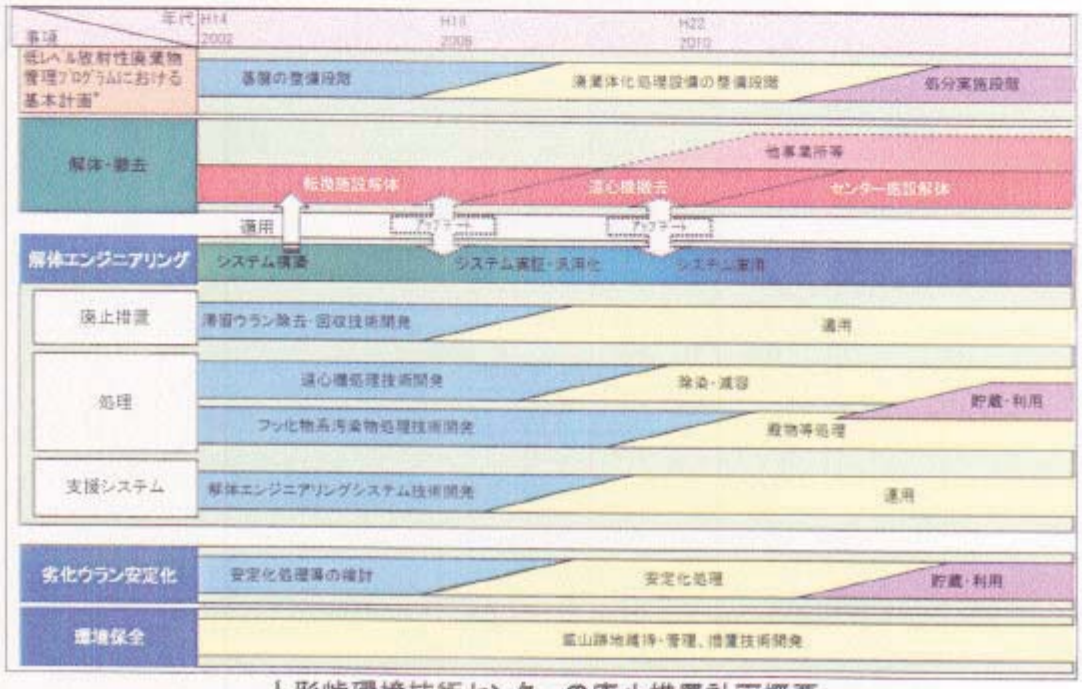
核燃料施設の合理的な廃止措置と廃棄物処理を目的とした研究開発を進めています。

人形峠環境技術センターでは、昭和30年(1955年)に人形峠でウラン鉱床が発見されて以来、40年以上にわたって、ウラン資源開発からウラン濃縮技術開発に至る、核燃料サイクルのフロントエンドに関わる技術開発を実施してきた。平成10年10月に資源開発が、平成11年7月に製錬転換技術開発が、平成13年3月にウラン濃縮技術開発が、それぞれ所期の目標を達成したことに伴い、これらの施設の廃止措置と廃棄物の処理を目的とした技術開発が現在の主要なプロジェクトとなっている。

核燃料施設の廃止措置と廃棄物の処理を合理的かつ安全に遂行するためには、設備解体に先立つ放射性物質の回収技術、運転により発生した廃棄物と廃止措置に伴って発生する廃棄物の処理技術、これらを支援するシステム技術が必要である。このような技術の開発は、国内のウラン燃料施設における先駆けであり、原子炉や再処理施設とは異なり、建材や機材に含まれる天然核種濃度のレベルを考慮して実施しなくてはならない特殊性がある。このため、取り組み過程を含めた積極的な技術成果の公開はもちろん、解体から廃棄物の処理・処分に至る技術を体系化し、「解体エンジニアリング」として確立していくことがセンターの重要な役割のひとつである。

この観点から、センターは、平成12年2月にISO14001*の認証を取得し、安全と環境に配慮した活動を継続的に展開しながら、解体エンジニアリング、劣化ウランの安定化措置、鉱山跡措置等について検討を進め、関連する技術開発を実施している。

本冊子は、解体エンジニアリングを構成する4つの要素技術の開発についてまとめたものである。これらの技術開発の目的、意義、範囲、成果等については、平成15年3月に外部有識者による中間評価*を受け、センターの取り組みは概ね適切であり、ウラン廃棄物*処分の実用化に向けたパイオニアとして進むことを期待すると評価された。



人形峠環境技術センターの廃止措置計画概要

滞留ウラン除去・回収技術開発

長期のウラン濃縮設備の運転により、プラント内に蓄積した滞留ウランは、設備を解体・処理する際、作業員の被ばくや遠心機処理における技術的困難性及び 2 次廃棄物量の増加の要因となりうるため、解体する前に濃縮プラント系内に滞留するウランを除去・回収する技術を開発している。

遠心機処理技術開発

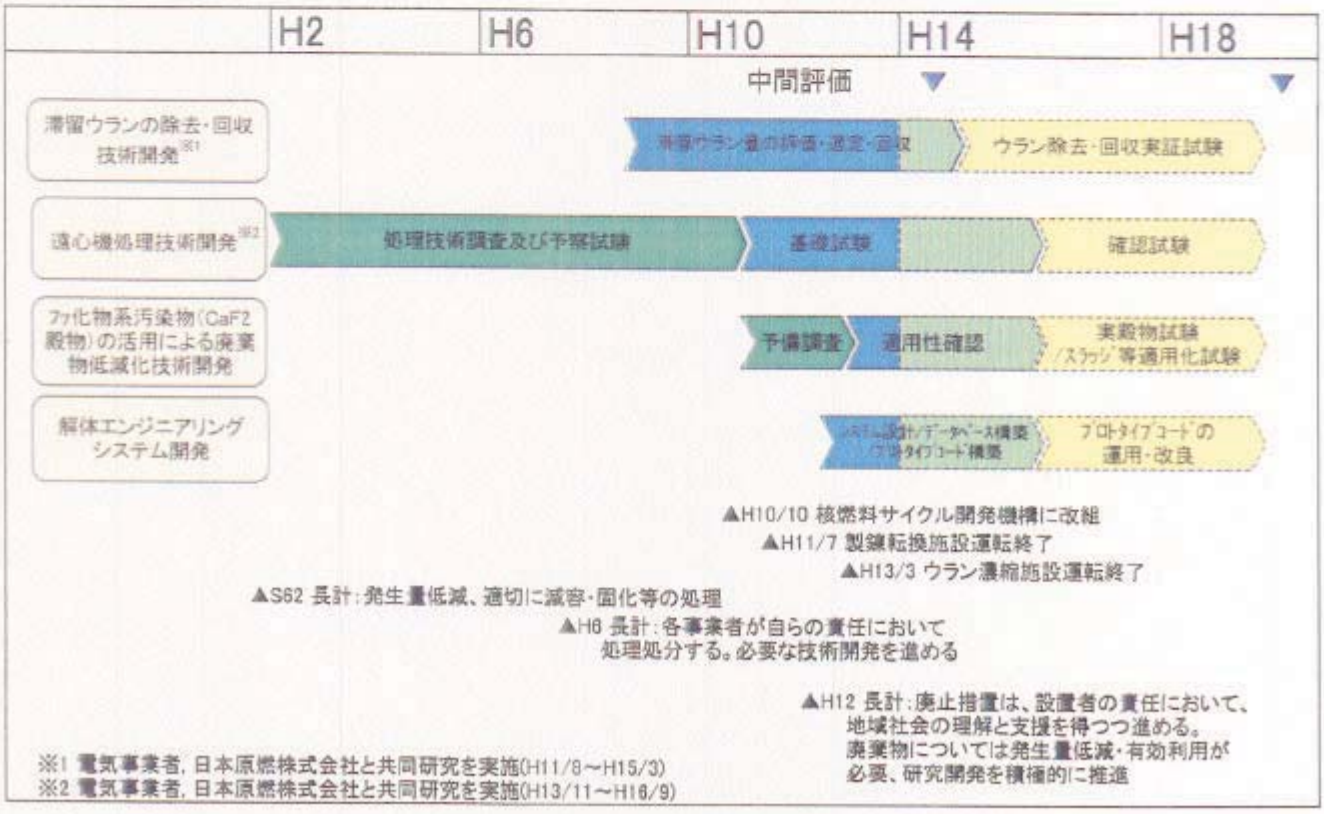
核不拡散に係る機微情報を有する遠心分離機を解体・処分するにあたり、資源の有効利用と廃棄物を低減するための処理技術の開発及びその信頼性を保証する検認技術の開発をしている。

フッ化物系汚染物の有効利用技術開発

核燃料施設で発生した廃棄物の有効利用という観点で、CaF_2 殻物を廃棄物固型化物の骨材等として有効利用する技術など、フッ化物系汚染物の利用技術を開発している。

解体エンジニアリングシステム開発

核燃料施設の廃止措置を合理的に進めるためには、解体から処分までの全工程を総合的な観点で最適化することが重要であり、センターの解体作業の経験を活用し、様々なデータを整理・集合蓄積することで、廃止措置に必要な情報を提供できる支援システムを開発している。



解体エンジニアリング技術開発の状況

1 滞留ウラン除去・回収技術開発

1．1 はじめに

人形峠環境技術センターでは、平成8年より滞留ウラン除去・回収技術開発を実施している。「滞留ウラン」とは、遠心法ウラン濃縮プラント*の長期間にわたる運転により、遠心分離機*内の部材表面に付着したウランである。滞留ウランは、プラント解体時における作業員の被ばくや、遠心機処理（第2章参照）における技術的困難性及び 2 次廃棄物量の増加の要因となり得るため、あらかじめ除去・回収する必要がある。滞留ウラン除去・回収試験では、プラント運転時間が 10 年を超えたウラン濃縮原型プラント第 2 運転単位（以下、「DOP-2」という。）のカスケード*を活用し、①プラント内の滞留ウランの分布を非破壊的手法により効率的に計測する技術 ②カスケード内に付着している滞留ウランの95%以上を除去・回収する技術③反応して生成した五フッ化ヨウ素（以下「IF_5」という。）をリサイクルし、七フッ化ヨウ素（以下「IF_7」という。）を製造する技術の確立を目標としている。

図1－1 ウラン濃縮原型プラントカスケード

1．2 滞留ウランの除去・回収原理

固体のウランフッ化物 UF_x（$4 \leqq x \leqq 5$）である滞留ウランは、IF_7 ガスや三フッ化塩素（以下「ClF_3」という。）ガスと反応して、六フッ化ウラン（以下「UF_6」という。）となる。したがって、IF_7 や ClF_3 を除去・回収用ガスとして遠心分離機内に供給することで、遠心分離機を解体せずに滞留ウランを除去し、UF_6 ガスとして回収できる。この手法を採用することで、作業員の被ばく低減化、解体作業の安全性向上及び遠心機処理の負荷低減に寄与できる。

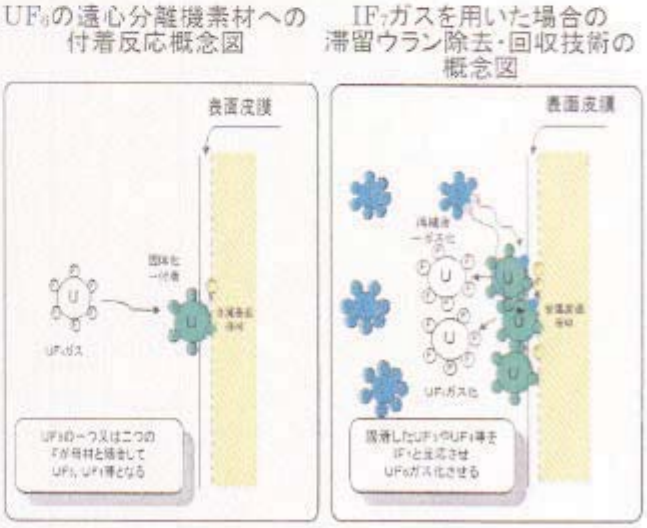


図1－2 滞留ウランの除去・回収原理

1．3 計画・実績

平成 8 年に滞留ウラン除去・回収用ガスの選定に着手し、その後、滞留ウラン計測技術の開発、IF_7 製造技術の開発、遠心分離機及び集合型遠心分離機*を単機で使用した滞留ウラン除去・回収基礎試験、滞留ウラン除去シミュレーション解析コードの開発を実施した。また、平成 14 年にはウラン濃縮原型プラント DOP-2 の 1カスケードを対象に滞留ウラン除去・回収試験を実施した。現在も、継続して滞留ウラン除去・回収試験を行うとともに、滞留ウラン除去・回収試験で回収した IF_5 をリサイクルし再び原料とする IF_7 製造試験等を実施している。

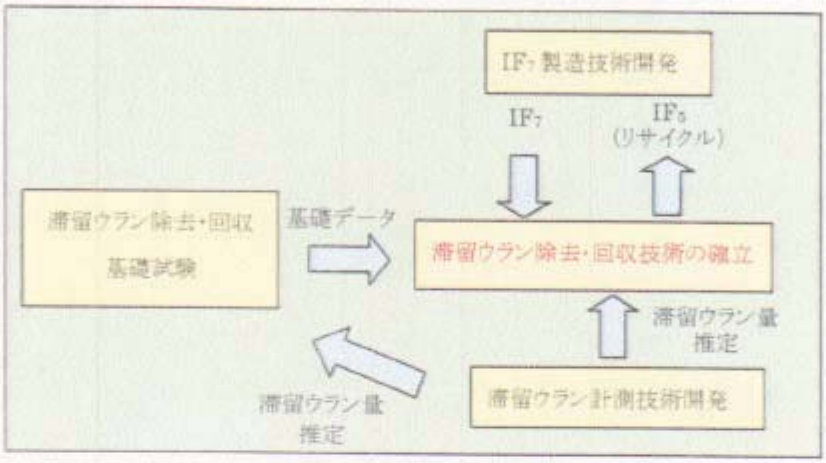
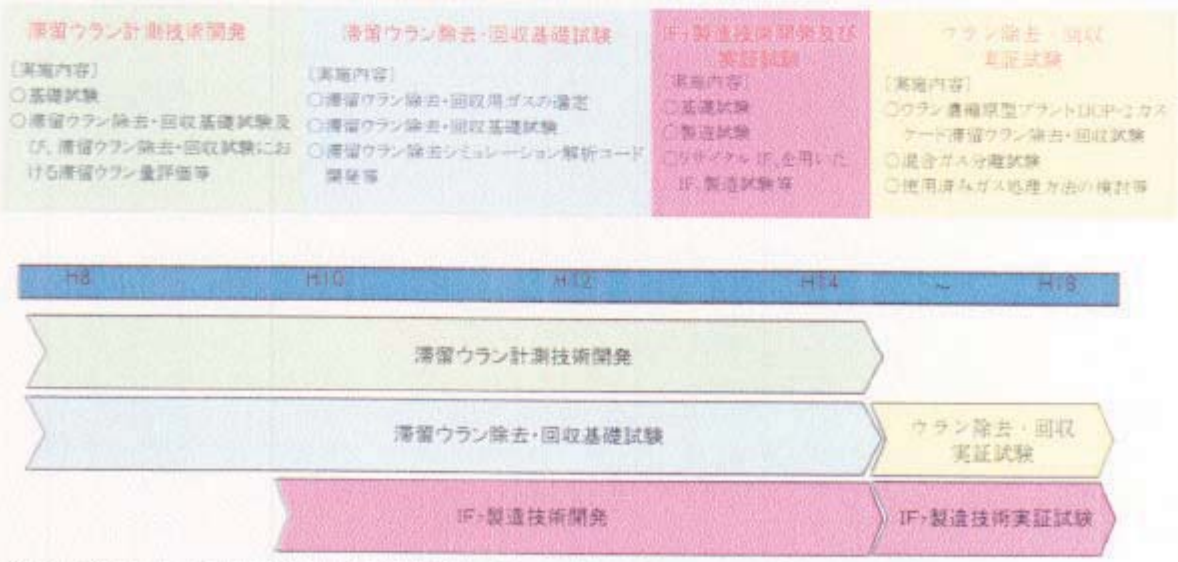


図1－3 技術開発概要図



※電気事業者，日本原燃株式会社と共同研究を実施（H11/8～H15/3）

図1－4 技術開発スケジュール

1．4 周辺技術開発

1．4．1 除去・回収用ガスの選定

滞留ウラン除去・回収用ガスとしては、滞留ウランと反応性を示す IF_7 や ClF_3 があるが、安全性や経済性等の観点から比較・検討した結果、滞留ウラン除去・回収用ガスとして IF_7 を選定した。

表1－1 IF_7 と ClF_3 の比較

	IF_7	ClF_3	備考
安全性	高い	低い	除去・回収試験時、ClF_3はウラン酸化物と反応した場合、爆発性の高いガス（ClO_2）を発生する危険がある。
経済性	優	劣	IF_7は安全性が高いため設備の簡略化が可能となるとともに、ウランフッ化物との反応生成ガスをIF_7の原料としてリサイクルがすることが容易である。ClF_3は反応生成ガスのリサイクルが複雑となる。
製造技術の成熟性	低い	高い	IF_7は実験室規模での製造実績のみである。

1．4．2 IF_7 製造技術開発

滞留ウラン除去・回収用ガスである IF_7 は、フッ素（以下「F_2」という。）と IF_5 を原料とし、$F_2+IF_5 \rightarrow IF_7$ の化学反応により生成される。しかし、ウラン濃縮原型プラントカスケードの滞留ウラン除去・回収試験においては、必要となる IF_7 は多量であること、また、原料である IF_5 は IF_7 と滞留ウランとの反応によっても生成され、リサイクル可能であることなどを考慮する必要がある。これらを踏まえ、基礎試験を経て、効率的でかつ安全に、多量の IF_7 が製造可能である IF_7 製造試験等を行っている。

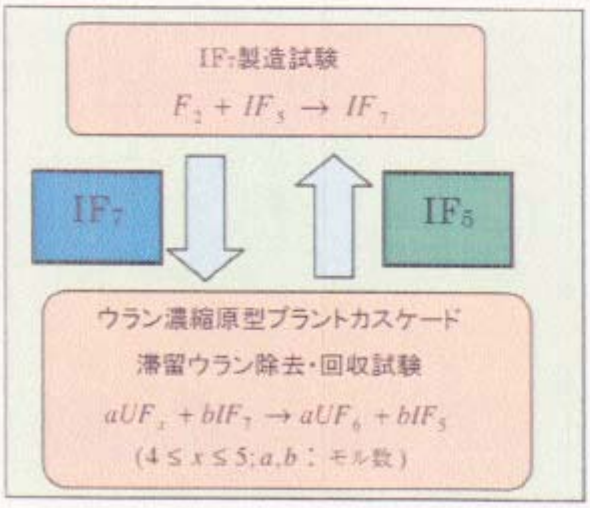


図1－5 IF_7製造技術開発概要図

図1－6 IF_7製造設備

1．4．3　滞留ウラン計測技術開発

滞留ウランの除去・回収割合を評価することを目的として、遠心分離機を解体せずに滞留ウランの量及び分布を評価する滞留ウラン計測技術の開発を行った。ここでは、ウラン及びその子孫核種が放出するγ線量の計測結果を、モンテカルロ法計算コードにより解析し、滞留ウラン量を推定する手法と、ウランの自発核分裂や(α,n)反応で放出される中性子を計測することにより、滞留ウランのおおよその重量を迅速に推定する方法(DOE*との共同研究)の2つを採用した。γ線量の計測結果から滞留ウラン量を推定する手法では、コリメートした線源を使用した基礎試験により計算コードの妥当性を確認し、DOP-2 集合型遠心分離機を用いた滞留ウラン除去・回収基礎試験において、実際に回収した滞留ウラン量と、本手法により推定した滞留ウランの減少量はほぼ一致したことより、本技術の有効性が確認された。中性子の計測結果から滞留ウラン量を推定する方法においても、同様に、回収した滞留ウラン量と、本手法により推定した滞留ウランの減少量が、おおよそ一致したことより、有効性が確認された。

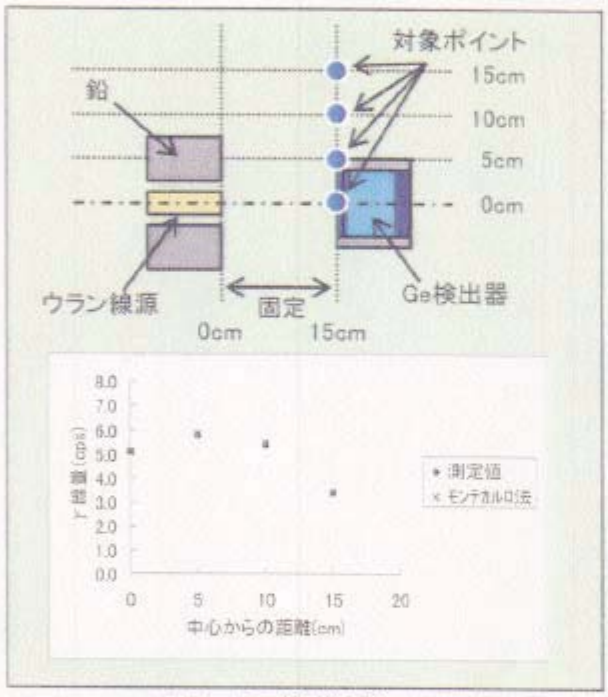


図1－7　基礎試験
（モンテカルロ法計算コードの妥当性検証）

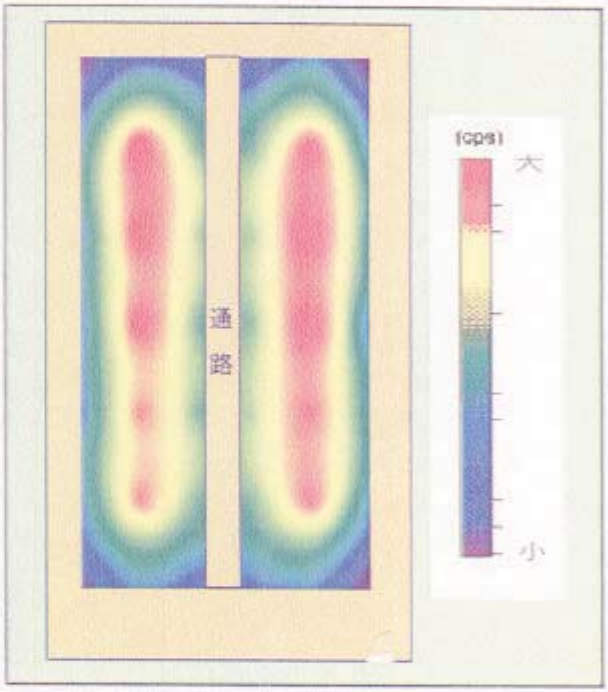


図1－8　ウラン濃縮原型プラント
DOP-2 カスケード内の中性子測定結果

1．5 滞留ウラン除去・回収試験

1．5．1　基礎試験

滞留ウラン除去・回収試験の実施にあたり、単機遠心分離機及び DOP-2 集合型遠心分離機を使用し、IF_7ガスによる滞留ウランの除去・回収効果、IF_7ガス、IF_5ガスの遠心分離機内流動特性、分離性能等の基礎データを把握した。さらに、基礎データを用いて、DOP-2 カスケードに対する滞留ウラン除去シミュレーションコードを開発し、滞留ウランの除去・回収状況を推定することが可能となった。

1．5．2　カスケード滞留ウラン除去・回収試験

基礎試験データを基に滞留ウラン除去・回収試験設備の設計・製作を行い、DOP-2 カスケードに対する滞留ウラン除去・回収試験を実施している。

(1) 試験方法

滞留ウラン除去・回収試験方法には、遠心分離機を運転した状態で IF_7 ガスを供給する連続処理と、遠心分離機を停止した状態で IF_7 を供給するバッチ処理の 2 通りがある。連続処理では UF_6 と IF_5 はカスケードから分離されて排出されるが、バッチ処理では UF_6 と IF_5 が混合物として回収されるため、これを UF_6 と IF_5 に分離する工程が必要となる。この方法としては、滞留ウランを除去・回収した遠心分離機を運転し UF_6、IF_5 混合ガスを供給することにより分離する方法と、UF_6 と IF_5 の蒸気圧差を利用し精製分離する方法の 2 通りがある。連続処理及びカスケードによる UF_6、IF_5 分離方法は効率的であるが遠心分離機にかかる負荷が問題となる。そのため、最適化を目指した技術開発の第一段階として1カスケードを対象にバッチ処理と精製分離による試験を実施した。

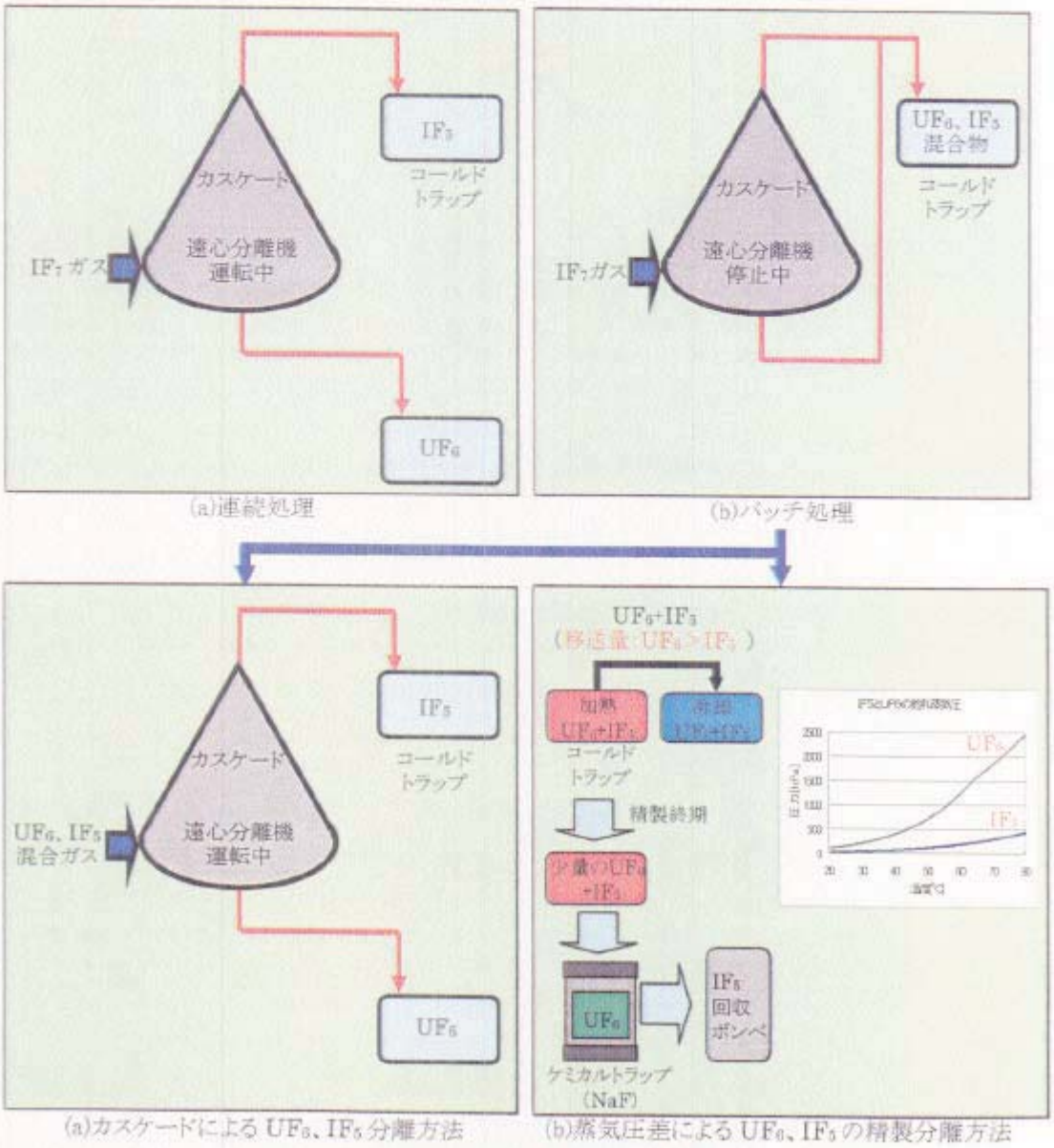


図1－9　滞留ウラン除去・回収試験方法概要図

(2) 滞留ウラン除去・回収試験結果

本試験におけるIF_7ガスの供給重量と反応生成物であるUF_6、IF_5混合ガスの回収重量の割合から、カスケード内に付着していた滞留ウランの平均的な化学組成形態は四フッ化ウラン（以下「UF_4」という。）と推定された。それにより、回収したUF_6、IF_5混合ガスの重量から除去・回収できた滞留ウラン量を推定することが可能となった。この結果、本試験前にγ線量から推定した滞留ウラン量の 95%以上を除去・回収でき、滞留ウラン除去・回収技術確立への見通しを得た。

また、回収したUF_6、IF_5の混合物から85%以上のIF_5を、精製分離することができ、リサイクルIF_5を用いたIF_7製造技術開発の見通しを得た。

図1－10 滞留ウラン除去・回収試験設備

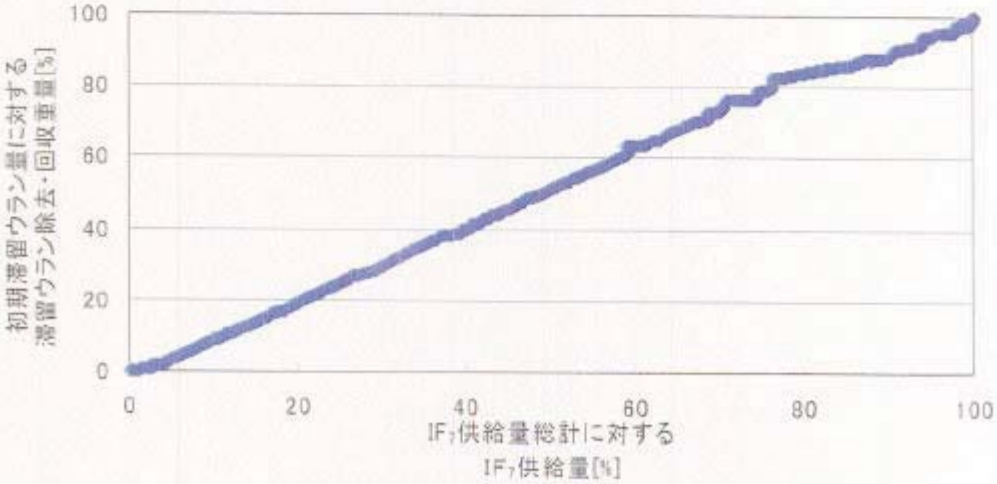


図1－11 滞留ウラン除去・回収試験結果

2 遠心機処理技術開発

2．1 はじめに

人形峠環境技術センターでは、遠心分離機を解体・処分するにあたり、核不拡散に係る機微情報の消滅、廃棄物の低減、資源の有効利用を目的とした遠心機処理技術開発を実施している。

センターのウラン濃縮試験は、東海事業所で開発された遠心分離機等について、プラント規模でのウラン濃縮技術を実証するため、昭和 54 年 9 月から濃縮工学施設で開始し、平成 13 年 3 月に所期の目的を達成しウラン濃縮原型プラントの運転を終了した。試験で使用した遠心分離機は約 6,000ton あり、現在実施している本施設の処理試験を通じて得られる技術を活用し、遠心機処理技術を確立することを最終目標としている。

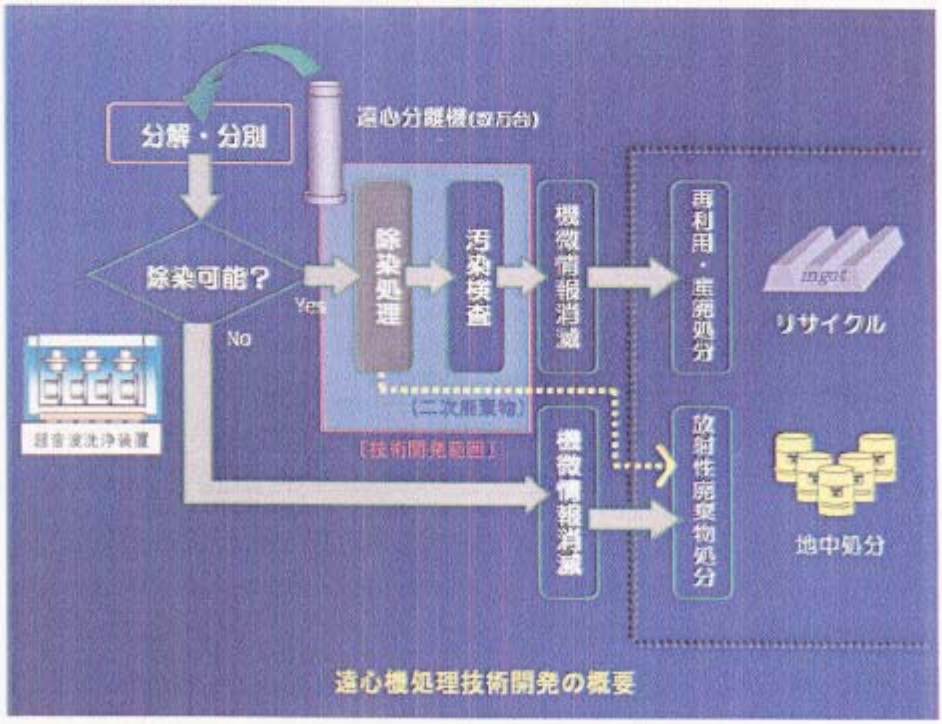


図2－1 遠心機処理技術開発の概要

2．2 計画・実績

遠心機処理技術開発では、機微情報の消滅及び除染を目的とした処理技術と除染レベルを把握する検認技術の確立が重要である。処理技術としては、平成２年から除染技術の調査等に着手し、平成10年には実機の使用済遠心分離機を用いた基礎試験を開始した。現在は、多数台処理に向けた検討を実施している。

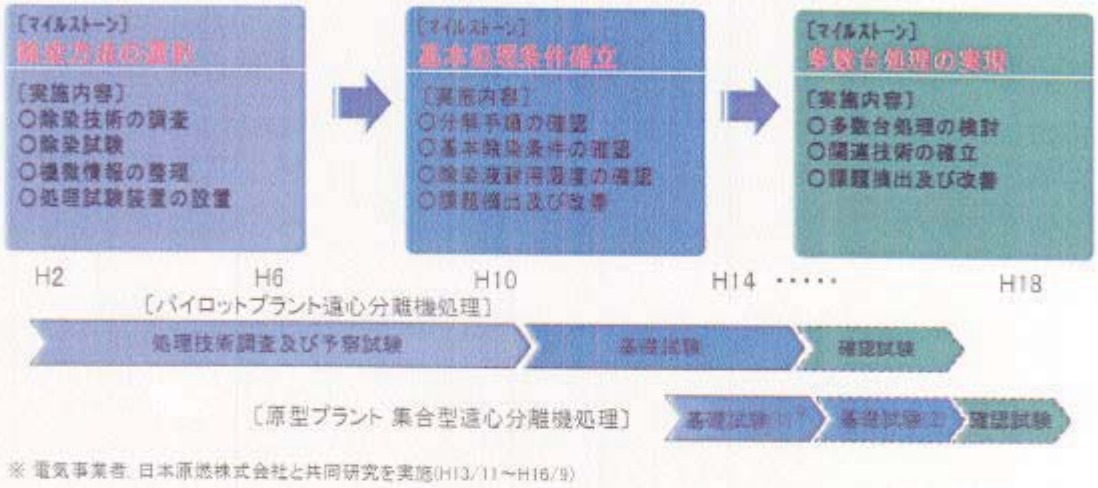


図2－2 遠心機処理技術開発計画

図2－3 遠心機処理技術の全体像

2．3 処理技術

2．3．1 処理設備の概要

濃縮工学施設に設置している使用済遠心分離機の処理設備（以下、「処理設備」）は、平成 5 年から詳細設計に着手し、平成 10 年に完成した。処理設備は、分解等で発生する放射性物質等の飛散を封じ込めるために、局所排気系で負圧にしたハウス内に各装置を設置し、作業員は外部からグローブ操作により作業する構造である。

遠心分離機は、搬送台車により処理設備に運ばれ、分解設備で各部品を取り外した後、大型部品と小型部品に分けられ、化学分離設備により除染される。その後、各部品は表面密度検査等を経て、所定の場所に保管される。

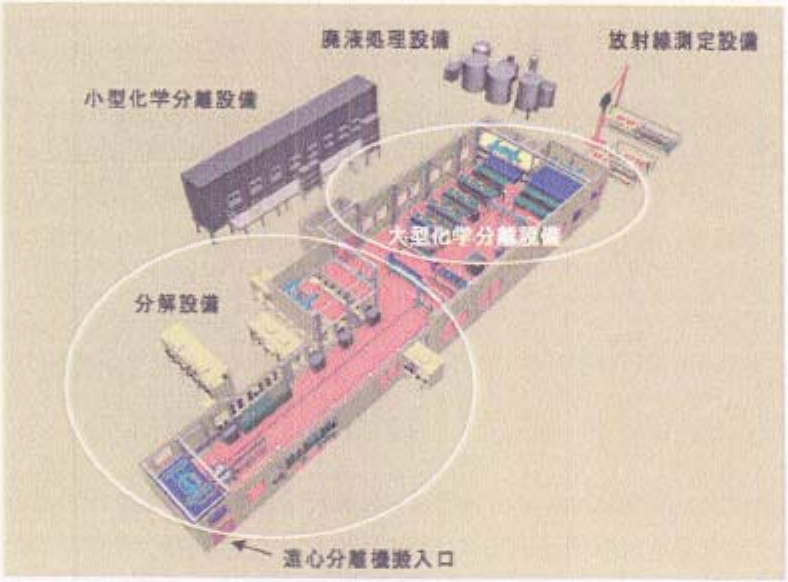


図2－4 処理設備の鳥瞰図

遠心分離機は、密閉容器（以下、「ケーシング」）とその中に設けた高速回転する円筒（以下、「回転胴」）、UF_6 ガス供給配管、UF_6 ガス抜出配管、回転を保持するモーター及び軸受け等で構成されている。なお、人形峠環境技術センターでは、単機型と六ヶ所のウラン濃縮工場に技術移転した集合型の遠心分離機を設置している。

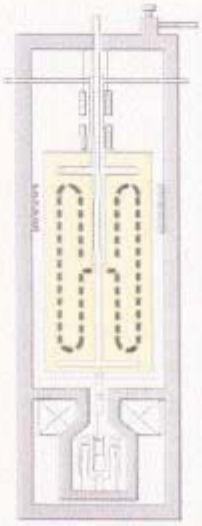


図2－5 遠心分離機の概略図

2. 3. 2 遠心分離機へのウラン付着状況

長期間のウラン濃縮試験による遠心分離機へのウラン付着状況を調査した。ウラン付着量は、滞留ウラン除去・回収基礎試験に用いた集合型遠心分離機を調査した。

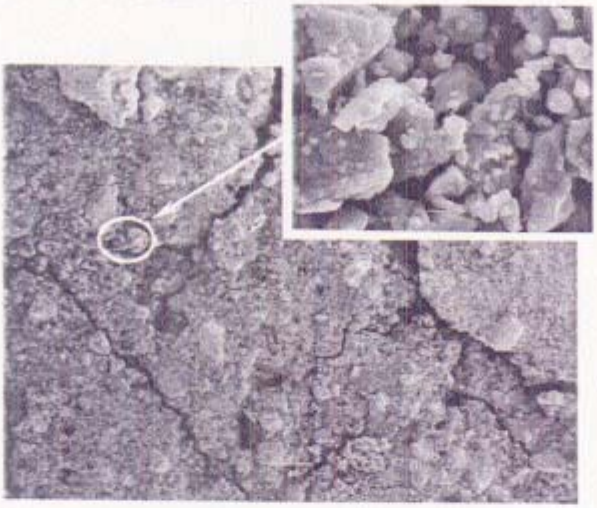


図2－6 ウラン付着物の観察例（観察装置：フィールドエミッション型走査電子顕微鏡）

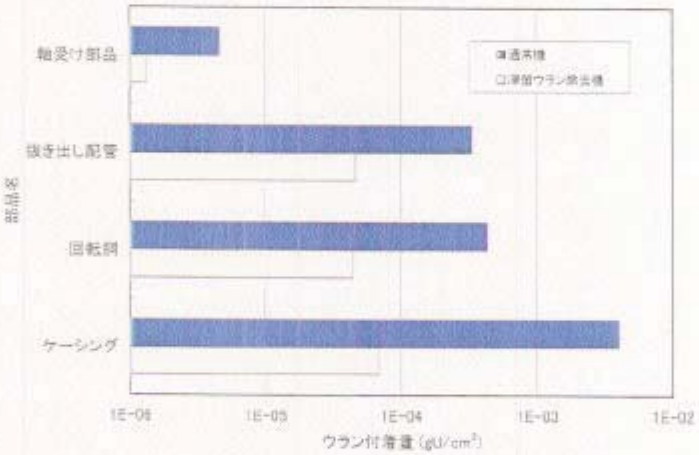


図2－7 集合型遠心分離機の各部品のウラン付着量（測定装置：誘導結合型質量分析装置）

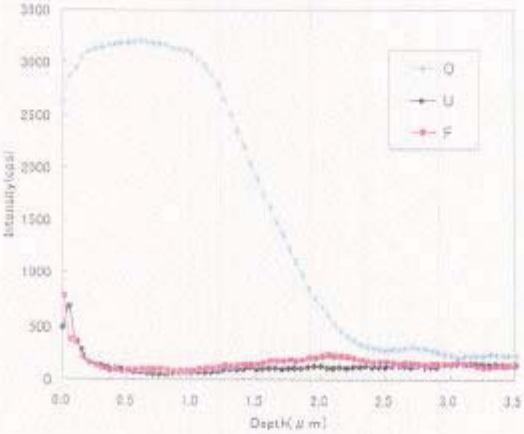


図2－8 遠心分離機部品表層の元素分布（測定装置：オージェ電子分光計）

2. 3. 3 除染技術

● 除染試験

遠心分離機の除染法は、経済性及び除染能力を評価し湿式除染法とし、取り扱い及び装置への腐食性等を考慮し、希硫酸による処理法(硫酸処理)を選定した。

各部品の除染は、硫酸処理(超音波洗浄又は浸漬)、水洗浄(超音波洗浄又は浸漬)、ジェット洗浄を組み合わせて処理した。

分離・除染効果は、放射線管理に用いられているα線及びβ(γ)線の表面密度測定及び表層領域のウラン濃度を誘導結合型質量分析装置(ICP-MS)により評価した。

表面密度の測定結果は、いずれの試験条件においても測定器の検出下限値(α:0.02Bq/cm^2 程度、β(γ):0.1Bq/cm^{2}程度)以下であった。

処理後の各部品から採取したテストピース表層のウラン濃度と硫酸処理時間の関係を図に示す。

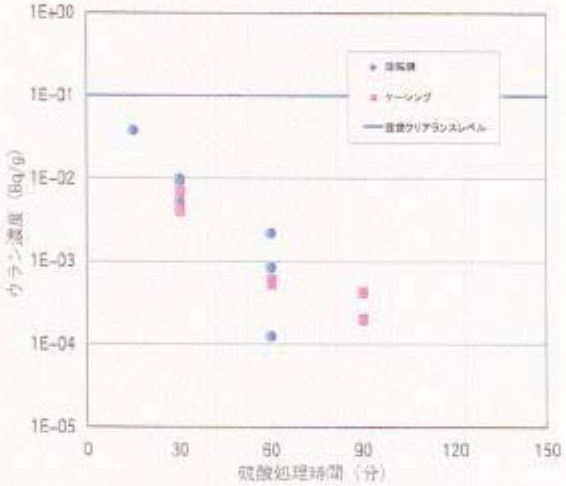


図2－9 パイロットプラント遠心分離機表層のウラン濃度と硫酸処理時間(測定装置:ICP-MS)

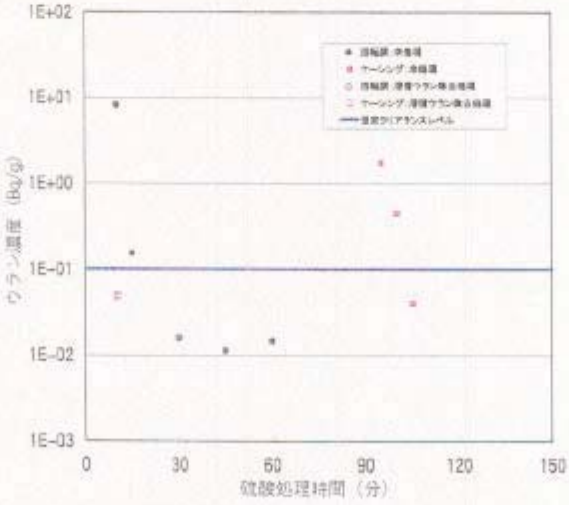


図2－10 集合型遠心分離機表層のウラン濃度と硫酸処理時間(測定装置:ICP-MS)

ほとんどの部品は、硫酸処理を30分以上行うことにより、IAEA TEC-DOC855を参考にクリアランスの目安として想定したレベルの 0.1Bq/g を下回るウラン濃度を示した。集合型遠心分離機ケーシングは、滞留ウラン除去・回収処理による硫酸処理時間に及ぼす影響が顕著に表れており、未処理機では、処理機の約10倍の処理時間を必要とする。滞留ウランの除去・回収処理後の汚染の均一性は、集合型遠心分離機の処理に大きな影響を与えることが判明した。集合型遠心分離機の中で、構造的に IF_7 ガスと接し難く、滞留ウラン除去効果が低い部位に対する除染処理条件の検討が必要である。

● 除染メカニズムの考察

遠心分離機回転胴の除染メカニズムを推定するために、処理時間毎に集束イオンビーム装置により、溶解状況の断面を観察した。

回転胴は、母材領域が優先的に溶解し表層が剥離することにより、汚染部が除去されることがわかる。

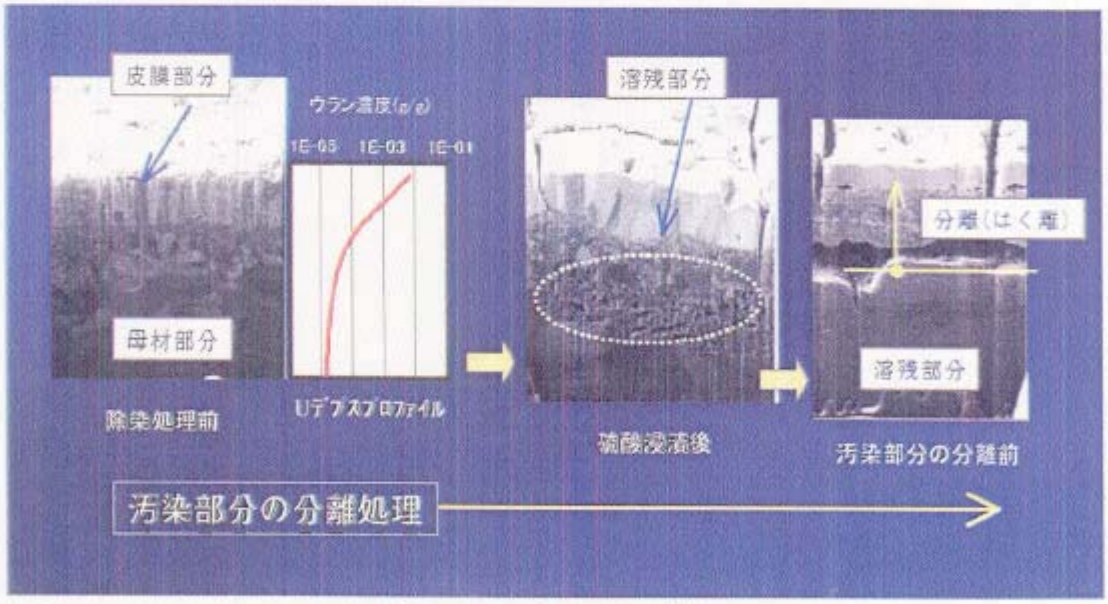


図2－11 除染メカニズム

2．4 検認技術

検認技術は、本技術開発の最終的な信頼性を保証する技術であるとともに、資源の有効利用の観点からも重要な技術である。除染レベル以下であることの確認には、設定レベルと比較して十分な測定精度があり、かつ全体が検認できる技術が要求される。

2．4．1 直接測定

● 光伝送型検出器

光ファイバーケーブルを利用した大型検出器を試作し、検出性能を確認した。光伝送検出器は、光電子増倍管を削減し、検出器を大型化でき、サーベイ時間の短縮が期待される。

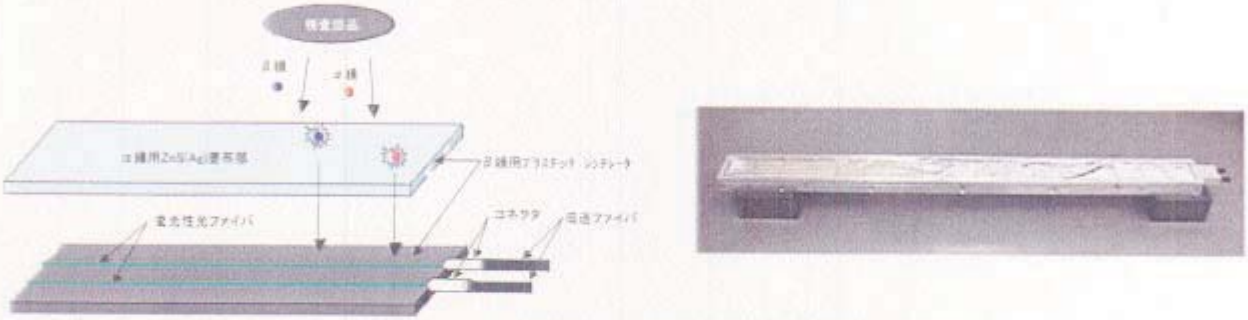


図2－12 光伝送型検出器の概略原理図及び写真

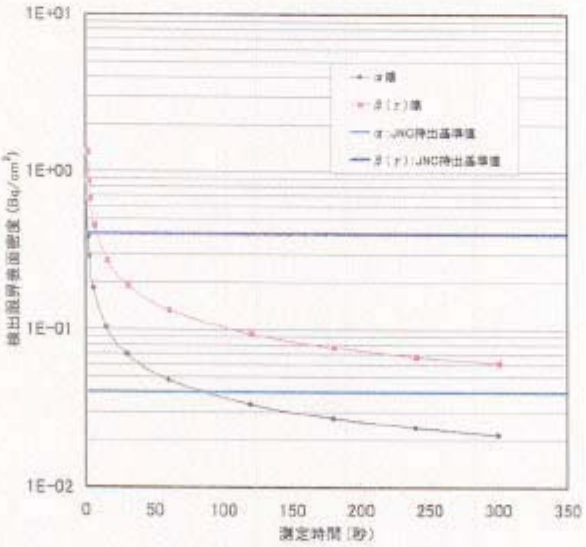


図2－13 光伝送型検出器の検出性能例

● グリッド・イオンチャンバ

一般的なシンチレーション式と検出原理の異なるグリッド・イオンチャンバ式の表面密度測定装置の検出性能を確認した。グリッド・イオンチャンバは、α放射能が空気を電離するときに生成するイオンを検出するもので、高感度及び一括測定により、部品によっては、サーベイ時間の短縮が期待される。

2. 4. 2 重量濃度

処理部品の重量濃度は、想定レベルのウラン濃度が微量なため、高感度の ICP-MS を用いて、処理部品表層に残留した濃度を測定し、ウランの放射能比で換算している。

2. 4. 3 溶融二次処理

平成 13 年に原子力安全委員会から報告された「原子炉施設におけるクリアランスレベル検認のあり方について」では、検査対象物の放射性核種濃度が均一である場合等、放射性核種濃度を代表できるサンプルを採取し測定する方法もあり得ることが記載されている。この方法により、検認作業の効率化が期待されることから、溶融二次処理による検認システムについて検証した。

溶融二次処理を行った処理部品のインゴットの測定例では、表層のウラン濃度が高い。表層部分からのサンプリングにより検認した場合、より保守的な値が得られ安全性が担保できる可能性が示唆された。従って、溶融二次処理により、クリアランスレベルの効率的検認が期待できる。ウラン濃度は、表層をグロー放電質量分析装置で、内部を ICP-MS で測定した。

溶融条件

加熱方式	昇温速度 (℃/min)	溶融雰囲気	ルツボ
高周波誘導	10	ロータリーポンプ排気後Arガス 0.4MPa封入	黒鉛 φ8cm H:3cm

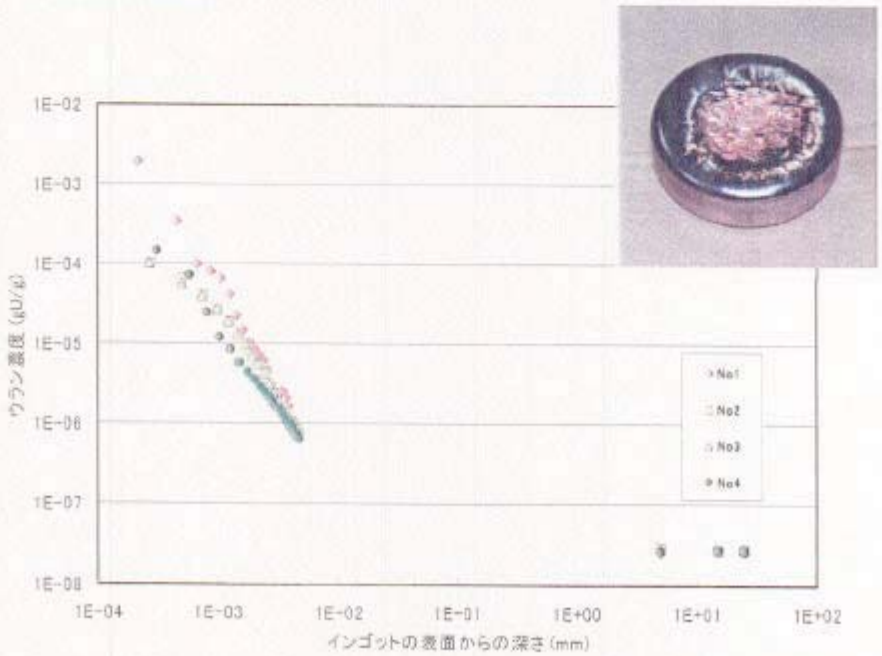


図2－14 溶融インゴットのウラン濃度分布例（測定装置：ICP-MS 及びグロー放電質量分析装置）

3 フッ化物系汚染物（CaF_2殻物）の利用技術開発

3．1 はじめに

人形峠環境技術センターでは、核燃料施設で発生した廃棄物の有効利用という観点で、フッ化物系汚染物*の活用による廃棄物量低減化技術開発を進めている。

センターでは、天然ウラン（イエローケーキ*等）を原料とした湿式法及び回収ウラン*（UO_3）を原料とした乾式法により、UF_6 転換に係る一連の転換技術開発を行ってきた。技術開発に伴って発生したウランとフッ素を含む廃液は、廃液処理工程で水酸化カルシウム（$Ca(OH)_2$）により中和沈殿処理され、フッ素を CaF_2（以下、「殻物」という）の形態で回収し、ドラム缶保管している。さらに、オフガス系に移行したUF_6の吸着除去に使用したフッ化ナトリウム*（NaF）、F_2ガスの吸着除去に使用した活性アルミナ*（Al_2O_3）等をドラム缶で保管している。

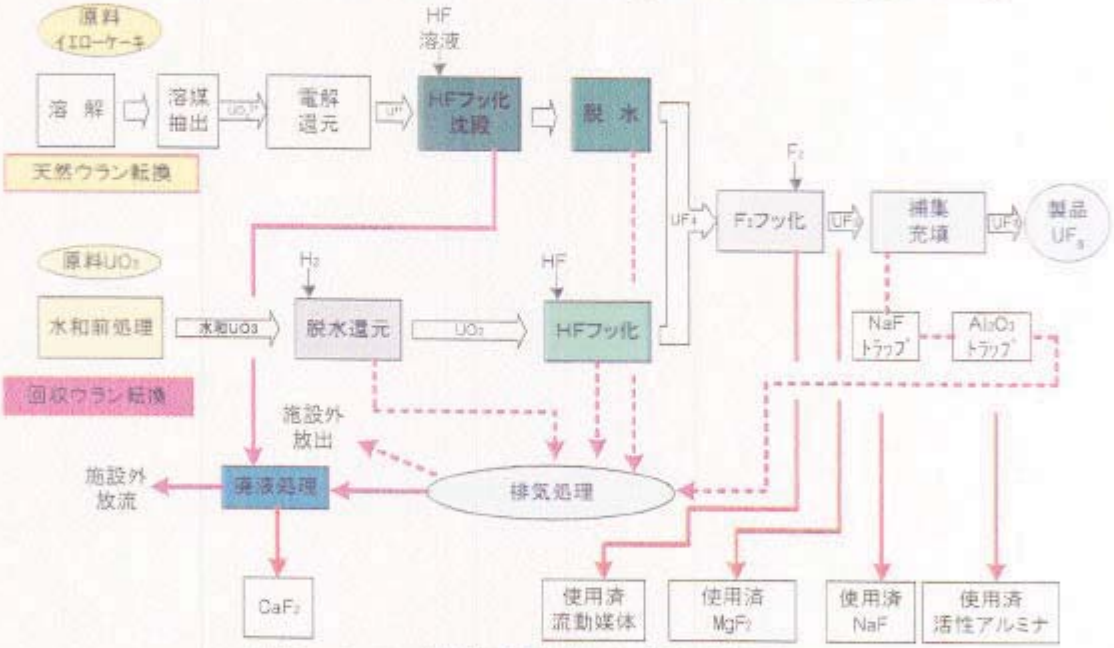


図3－1 フッ化物系汚染物の主な発生個所

廃棄物の固形化に一般に使用されるモルタル*は、固型化材料*であるセメント*と固型化混和材料である水及び砂（骨材*）からなる。この砂の一部を殻物で置き換えることにより、殻物を固型化混和材料として活用することができ、廃棄物量の低減を図ることが可能である。

図3－2 殻物の利用方法

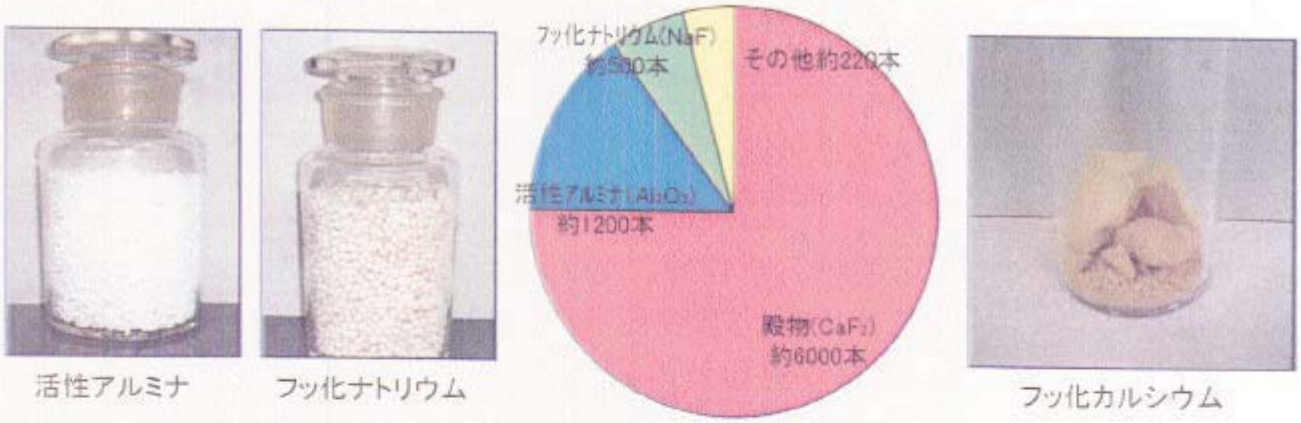


図3－3 フッ化物系汚染物の割合（200リットルドラム缶換算）

3．2 計画・実績

フッ化物系汚染物を低レベル廃棄物の固型化混和材料として活用する方策について、平成 11 年より検討を進めている。ここでは、殻物の性状調査と、コールド試験、ホット試験を通じた殻物添加モルタルの物理的及び化学的特性把握により、殻物の混和材料としての適用性を評価する。保管殻物はウランを含んでいるため、化学的にウランを回収した後、再度 CaF_2 殻物とし、固型化混和材料として利用する方策を検討している。

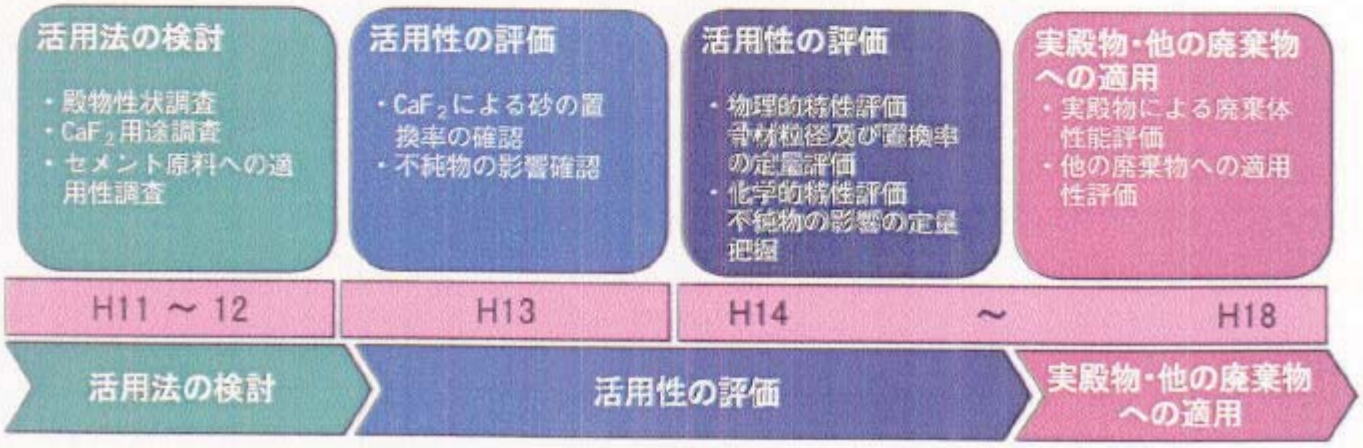


図3－4 フッ化物系汚染物の技術開発

3．3 模擬殿物を用いた性能確認試験

固型化材料の目標性能としては、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（原子炉等規制法）で定める基準と、財団法人 原子力環境整備センター（（財）原環センター）の技術レポート（表3－1参照）を参考とした。殿物を固型化混和材料として利用する場合、JISに示されたモルタルとしての要求性能とその他の放射性雑固化体としての要求性能の評価が必要である。さらに、殿物中の不純物の影響評価及び長期間の（化学的・物理的）健全性評価が必要であり、図3－5の手順で評価を進めている。

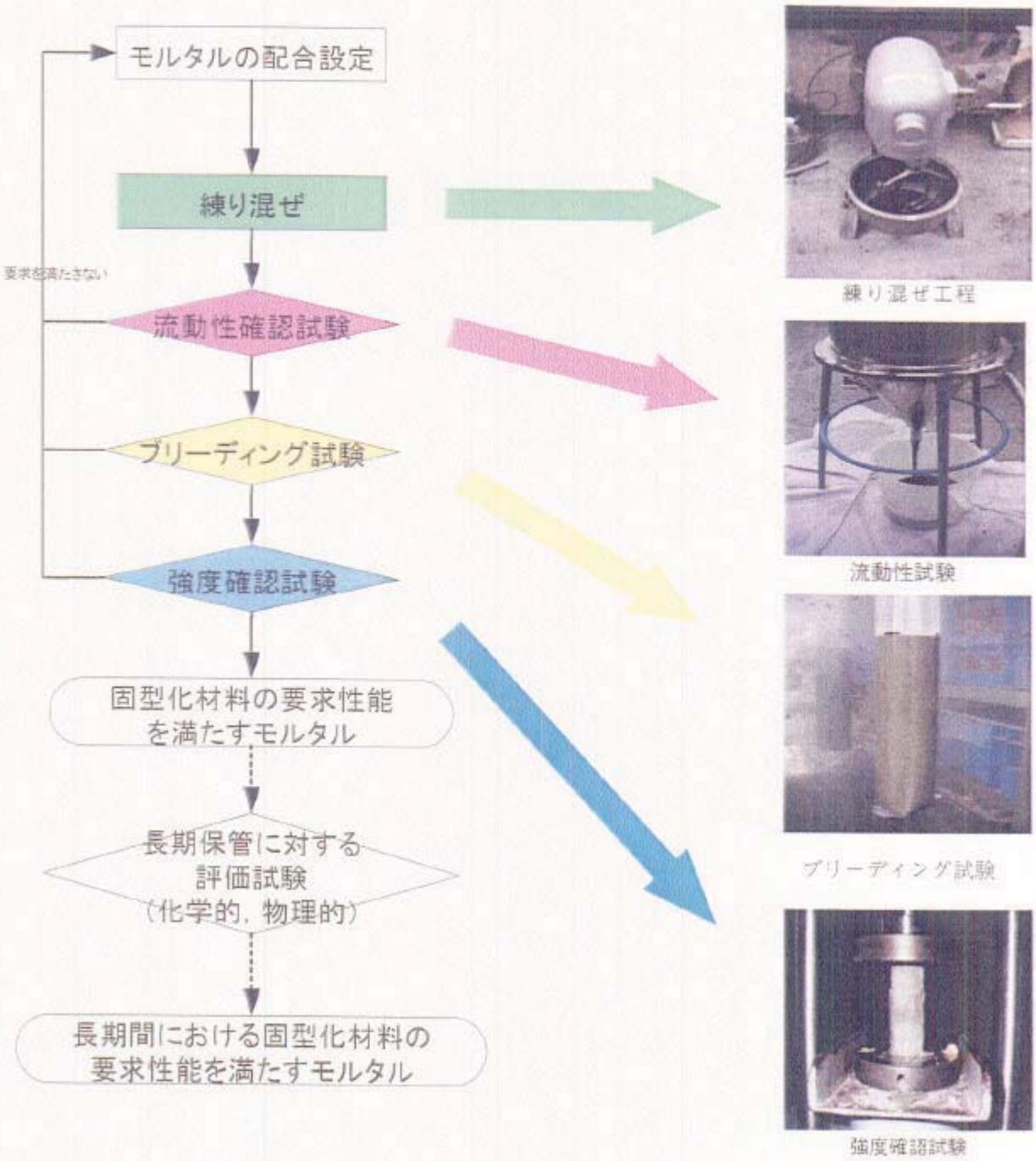


図3－5 固型化材料の評価手順

表3－1　固型化材料の目標性能

原子炉等規制法 （核燃料物質等の埋設に関する措置等に係る技術細目を定める告示）	（1）法令の要求事項 ・JIS R5210(1992)、JIS R5211(1992)と同等以上の品質を有するセメントであること。 ・固型化材料等と容器内の放射性廃棄物が一体化となる充填。 ・容器内に有害な空隙がないこと。
（財）原環センター （低レベル放射性廃棄物処分用廃棄体製作技術について）	（2）モルタルの要求性能 圧縮強度・・・固化後 28 日の圧縮強度が 30MPa 以上 流動性・・・固化前の流動性がよいこと。 （Pロート流下時間が 16 秒～50 秒） 材料分離・・・液体成分と固体成分が分離しにくいこと。 （24 時間後のブリーディング＊水がない）

●殿物に含まれる不純物成分における影響評価例　<セメントの水和発熱速度測定>

殿物の主要成分として考えられる化合物は、CaF_2 の他に、$Ca(OH)_2$、$CaSO_4 \cdot 2H_2O$、$CaCl_2 \cdot 2H_2O$ がある。これらを添加し、微少熱量計＊(コンダクションカロリーメータ)によるセメントの水和発熱速度を測定することで、強度や流動性などの物理的な特性を推測することができる。

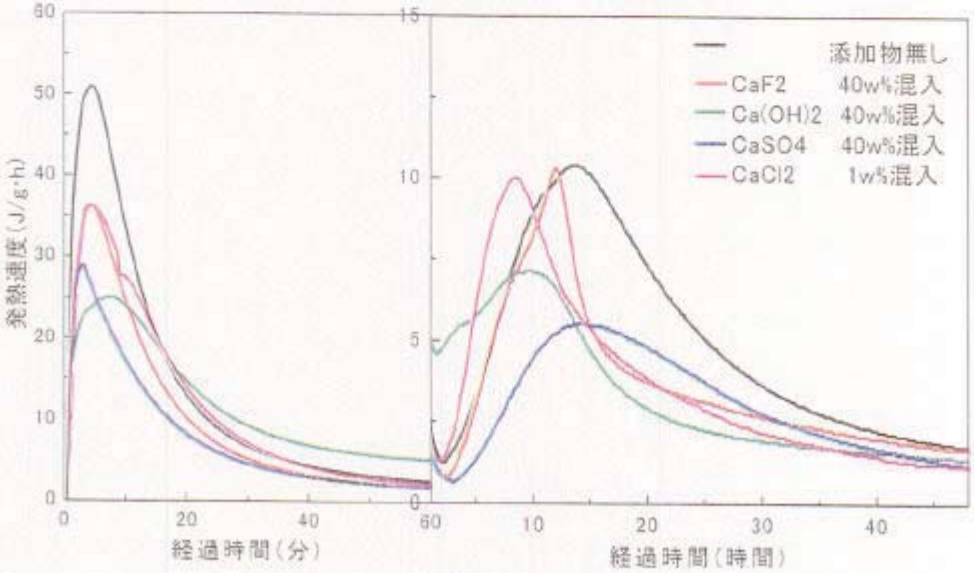


図3－6　不純物を含んだ殿物を混合したセメントの水和発熱速度グラフ

4 解体エンジニアリングシステム開発

4．1 はじめに

人形峠環境技術センターでは、設備・施設の解体・撤去経験の蓄積と体系化を図りながら、核燃料施設の廃止措置を支援する「解体エンジニアリングシステム*」の開発を進めている。

核燃料施設の廃止措置を安全確保とトータルコスト低減を両立させながら進めるためには、解体から処分までの全工程を総合的な観点で検討し、最適化することが重要となる。

このシステムを運用することで、設備や施設を解体することにより発生する材質や放射性物質の付着のレベルの違う廃棄物量、処分や再利用を図るための処理（除染・減容）方法、二次廃棄物、コスト、措置期間などの評価が容易となる。

図4－1 解体エンジニアリングシステムの目標

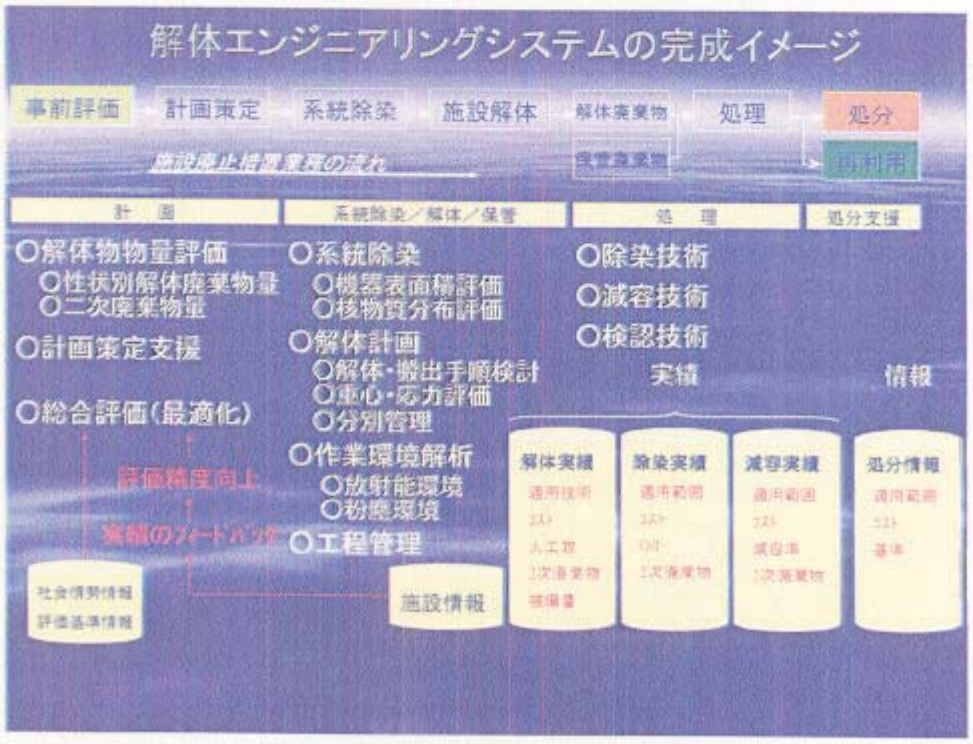


図4－2 解体エンジニアリングシステムの完成イメージ

4．2 解体エンジニアリングシステムの機能

解体エンジニアリングシステムは、設備や施設の解体から処分に至る各工程に適用する技術の組み合わせの最適化やコスト試算等の「全体計画の立案」、「詳細な解体計画の立案」、「解体現場における作業管理」、「解体物の追跡管理」の４つの機能を有する。

センターの各施設・設備を廃止措置技術の確認フィールドとして活用しながら、他の核燃料施設への適用性を考慮しつつシステム開発を進め、一通りの機能を持ったプロトタイプコード*の運用と改良を進める計画である。

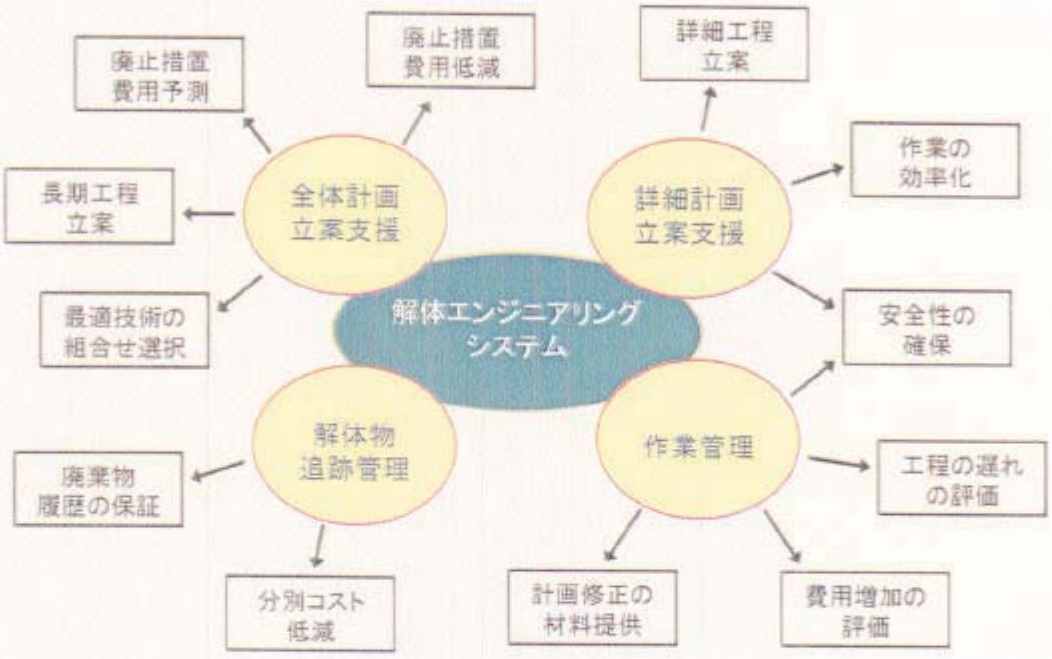


図4－3 解体エンジニアリングシステムの機能

図4－4 解体エンジニアリングシステム開発スケジュール

4．3　解体エンジニアリングシステムの構成

解体エンジニアリングシステムは、コスト試算、技術選択などを評価するために、3つのサブ・システムとそれらを統合するシステムにより構成される。サブ・システムは施設・設備情報の集約とインテリジェント化、解体シミュレーションなど行う「3DCAD*システム」、解体物管理、解体物の追跡管理や作業実績管理などを行う「支援システム」、技術情報・コスト情報の「データベース」で構成される。支援システムの一部は既にセンターの実務の中で運用されている。

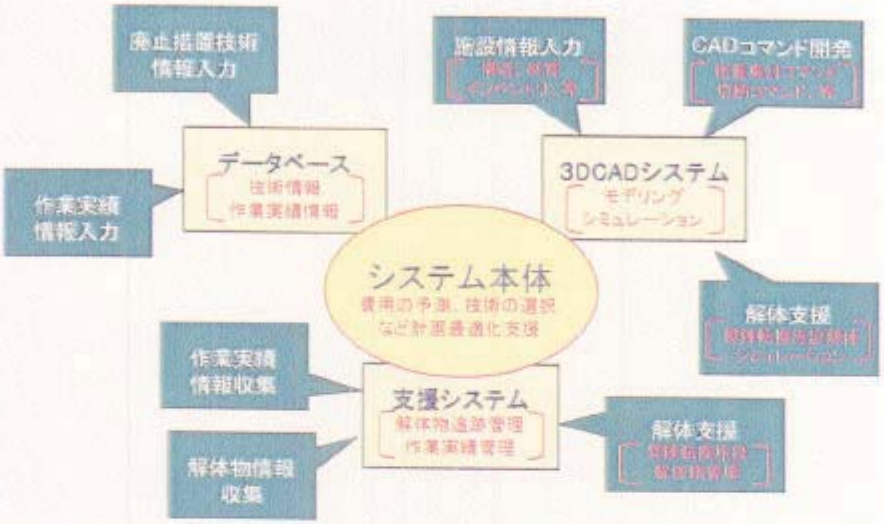


図4－5　解体エンジニアリングシステム構成

4．3．1　3 DCAD システム

3 DCAD システムには施設・設備情報を集約しており、評価を行うための共通情報基盤となっている。本 3 DCAD システムにより、設備の切断/移動シミュレーションや物量集計等を行い、パソコン上で解体作業を疑似体験することができる。また、技術や作業実績データベースとリンクし、自動的に主要な作業工程（ガントチャート）を作成する機能を持たせている。これらの機能を活用し、実際の解体前に作業の流れをシミュレーションすることで、作業の安全性をより向上することができるとともに作業効率をより高めることが可能となる。

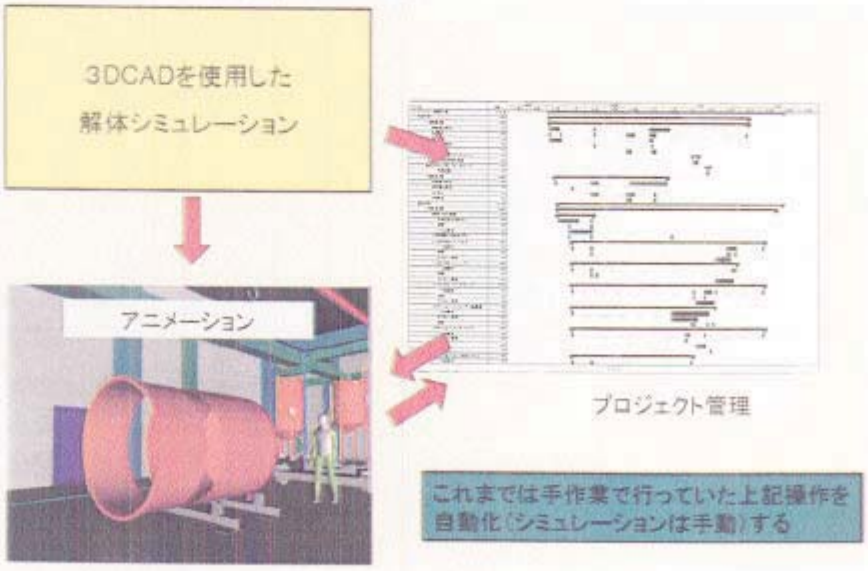


図4－6　解体シミュレーションの例

3 DCAD システムには以下のような施設情報が集約されている。

(1) 施設の幾何情報：解体物発生量、物の移動や干渉のチェックなどの評価に必要な情報として、建家や設備、配管等に代表される構造物 3 次元構造を Surface 情報（表面幾何情報）或いは Solid 情報（肉厚、材質、内部構造などを含めた情報）としている。

(2) 施設の材質情報：種類別発生量の評価や最適な処理・処分技術の選択評価に必要な情報として、幾何情報の最小要素ごとに、その要素の材質を色と画層の組合せで表現している。現在は、約 250 種類の材質を定義している。

色	層	材質	比重
0	1	フジFRP	1.40
0	2	フジパイプ	1.85
5	1	ステンレス鋼	7.90
7	1	PEP(4-6ふっ化樹脂)	2.12
11	1	PFA(パーフロアルコキシ樹脂)	2.12
13	1	ステンレス鋼	7.90
13	2	65/35 黄銅	8.46
13	3	5%Sn 青銅	8.86

色	層	体積	表面積	材質	比重	重量
0	1	20000	8400	フジFRP	1.4	28000
0	2	20000	8400	フジパイプ	1.85	32000
5	1	2E+06	92843	ステンレス鋼	7.9	13089146.8
7	1	187500	24014	PEP(4-6ふっ化樹脂)	2.12	397500
11	1	15707	3769.8	PFA(パーフロアルコキシ樹脂)	2.12	33298.2093
13	1	15707	3769.8	ステンレス鋼	7.9	124084.288
13	2	15707	3769.8	65/35 黄銅	8.46	132879.9
13	3	15707	3769.8	5%Sn 青銅	8.86	139162.638

図4－7　施設情報の使用例

(3) 放射性物質インベントリー量情報：最適な処理・処分技術の選択評価に必要な情報として、幾何情報に放射性物質保有量（表面汚染密度等）を属性情報として与えている。

(4) 運転履歴情報：その他、以下のような属性情報を取り扱える。

①運転中に発生した特別な状況や、扱った化学物質等の文字情報

②運転中の圧力や温度といった数値情報

③機器や配管の外観観察や詳細な表面分析結果などの画像情報

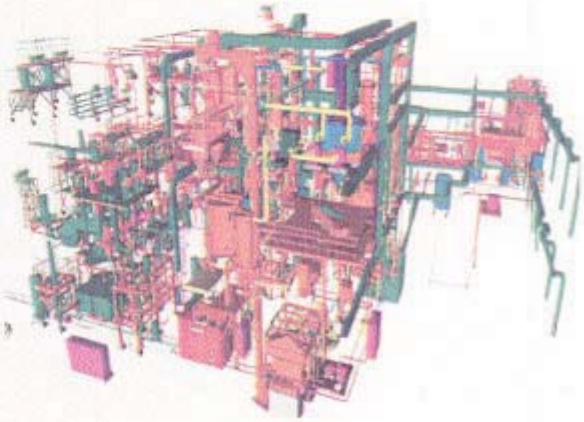


図4－8　CAD 化情報の例

このような施設情報を3 DCAD に集約しておくことで、解体方法や手順を視覚的でかつ定量的に3次元空間でシミュレーションすることが可能となり、解体計画の検討において極めて有効な手段となる。また、作業前教育用として活用することで、安全確保に貢献できる。

4. 3. 2 支援システム

本システムでは3DCADシミュレーションと組み合わせて、解体物に管理番号を発行するとともに、実際の解体物とドラム缶等の収納容器にバーコードを添付することで、収納物の履歴管理が可能となる。この情報は除染・減容等の解体以降の工程にも受け継がれていく。

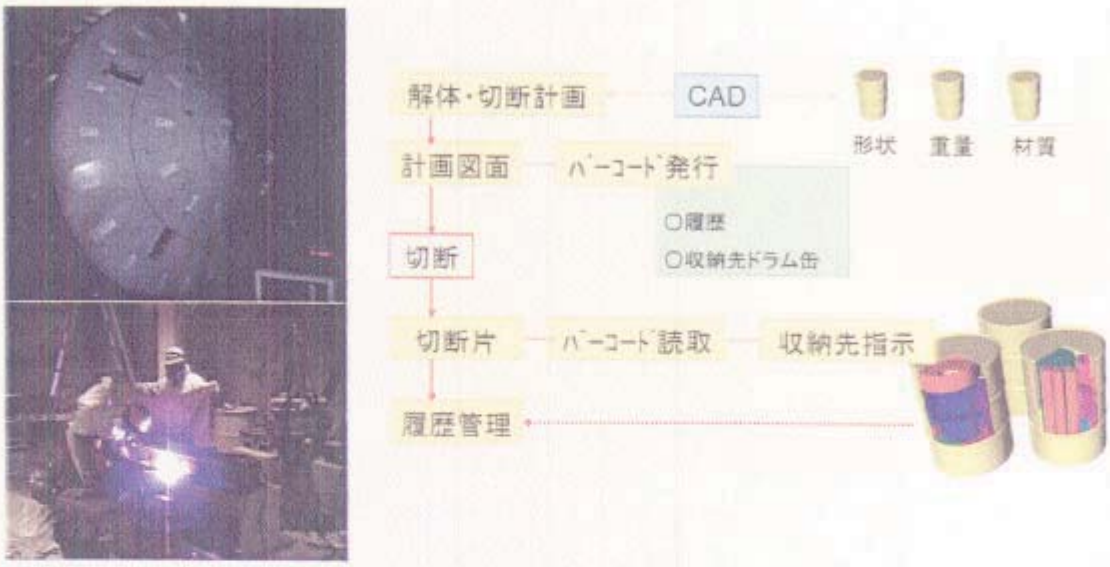


図4－9 バーコードによる解体物管理

4. 3. 3 データベース

本システムでは、解体工法、除染・減容、測定など技術的情報と合わせて人工、コストなどの情報が集約されている。センターでは、これらのデータの取得・蓄積をとおして評価精度の向上を図っている。データベースを充実させることにより、センター以外の施設への適用も可能なシステム構成としている。なお、解体物についてもデータベース化（図 4-10）しており、使用履歴等を追跡することが可能である。図4-11は解体データの一例である。設備解体に要する時間は解体工法や解体物材質との相関が認められる。今後、実績データの蓄積を重ね、相関精度の向上を図る計画である。

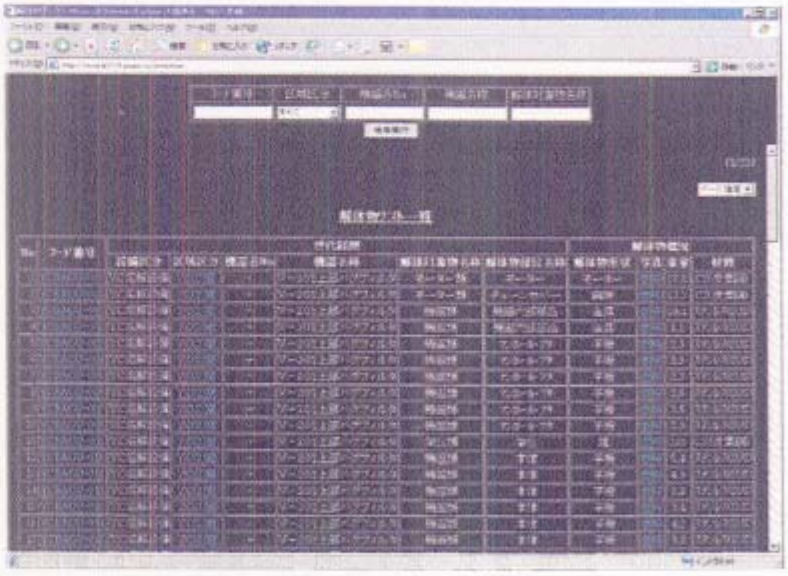


図4－10 解体物データベースの例

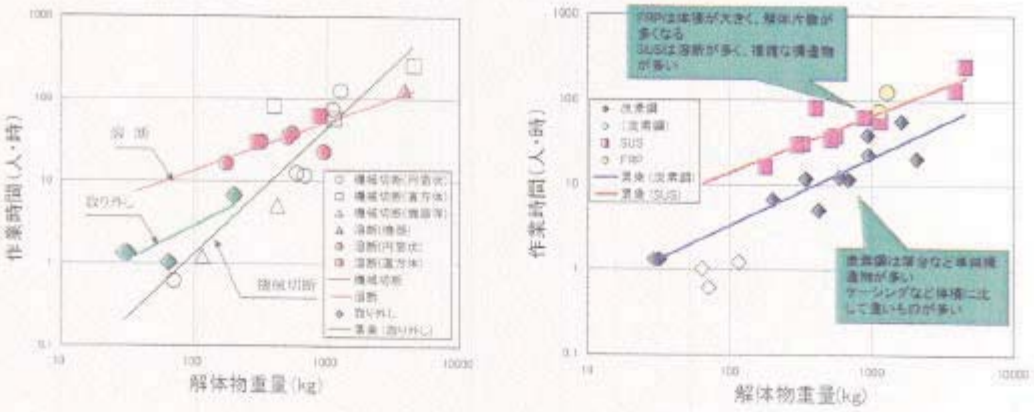


図4－11　センターで取得した解体データの例

4．4　技術成果の普及

本システムを構成する機能の一部である、材質別重量評価、表面積評価、切断評価などを行う「解体計画策定支援ツール」は、既に民間会社（日立造船情報システム株式会社）を通じて販売されている。

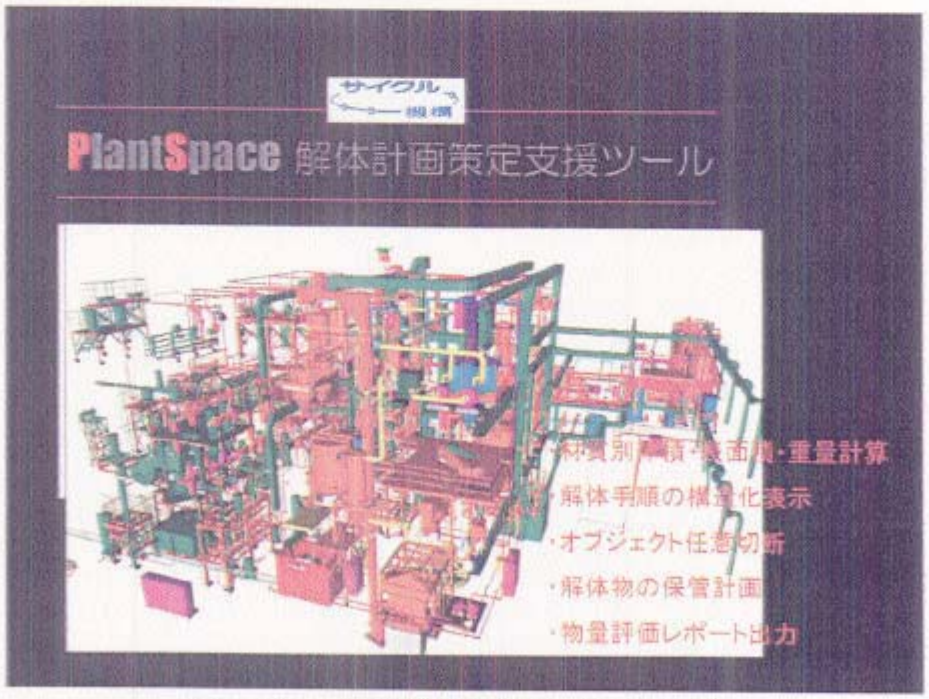


図4－12　解体計画策定支援ツール（市販中）

用語解説（五十音順）

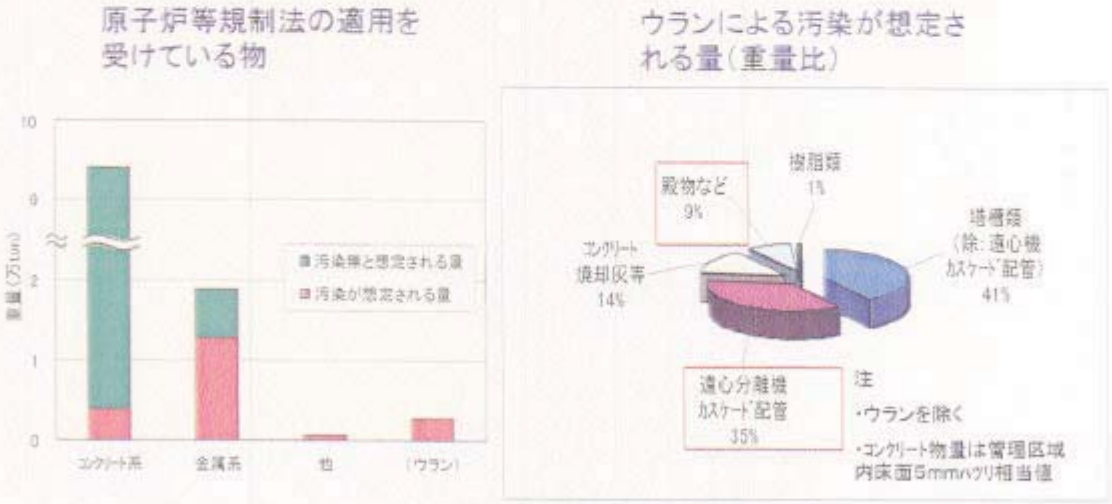
【ア】

イエローケーキ
粗製錬によって、ウラン鉱石に含まれる大部分の不純物を除いた「ウラン精鉱」の通称。黄色い粉末であることから、このように呼ばれる。

ウラン濃縮
天然のウラン中の核分裂しやすいウラン235の割合（約0.7%）を原子炉の燃料として使える割合（3～5%程度）に高めることをいう。わが国では、「遠心分離法」という濃縮方法が採用されている。

ウラン濃縮原型プラント
商業化に向けての最終段階として、遠心分離機の量産技術の確立とウラン濃縮事業全般にわたる技術、運転、経済性データの取得を目的に作られたプラント。

ウラン廃棄物
放射性廃棄物は、高レベル放射性廃棄物と低レベル放射性廃棄物に区分されており、低レベル放射性廃棄物は、更に、原子炉施設から発生する廃棄物、超ウラン核種を含む廃棄物、ウラン廃棄物とRI・研究所等廃棄物に区分されている。人形峠環境技術センターで発生する放射性廃棄物は、ウラン廃棄物若しくはRI・研究所等廃棄物に該当する。人形峠環境技術センターの措置対象物量は大よそ下図に示すとおりである。なお、下図では廃棄物ではないがウラン（主として劣化ウラン）の量も併せて示している。



人形峠環境技術センターの措置対象物量

遠心分離機
UF_6ガスを洗濯機の脱水装置のような円筒状の機械の中で高速回転させて、UF_6ガスに遠心力を加えることで重いU-238と軽いU-235を分離する機械。

遠心法ウラン濃縮プラント
遠心分離機を用いてウランの濃縮を行う施設をいう。

【カ】

回収ウラン
使用済燃料から再処理によって分離精製して回収したウラン。天然ウランには、U-235 が 0.7%程度しか含まれていないが、使用済燃料には約1%の U-235 が残っており、この点で使用済燃料はウランを回収して濃縮する価値がある資源であるといえる。

解体エンジニアリングシステム
センターで開発中の燃料サイクル施設廃止措置計画最適化支援システム(固有名詞)のこと。

外部有識者による中間評価
核燃料サイクル機構研究開発課題評価委員会(廃棄物処理処分課題評価委員会)のこと。

カスケード
遠心分離法によるウラン濃縮において1台の遠心分離機によって濃縮される度合いは、一般的にはごくわずかであり、軽水炉に必要な濃縮度を得るために何回も処理を繰り返す必要がある。このために複数の遠心分離機を連結して、効率よく運転を行う設備が必要であり、これをカスケード(滝が流れ落ちる様子の意味)という。

活性アルミナ
吸着力の特に強いアルミナで、一般的には気体中から湿気、油の蒸気を吸着するのに用いられている。人形峠環境技術センターでは廃ガス中に含まれる F_2 ガスの吸着材として用いている。

クリアランスレベル
「放射性物質として扱う必要がないもの」を区分するレベルを「クリアランスレベル」という。このレベル以下では、自然界の放射線レベルに比較して十分低く、地域差や生活習慣などを考慮すれば、人の健康に対するリスクは無視できると考えられる。

減容処理
廃棄物の貯蔵や処分を容易にするため、濃縮(水分等を蒸発する)、焼却(布、プラスチック等を灰にする)、圧縮(金属片等を押しつぶす)、溶融(金属片、粉末等を溶かす)などして体積を減らすこと。

固型化材料
「核燃料物質等の埋設に関する措置等に係る技術的細目を定める告示」では、セメント、アスファルト、不飽和ポリエステル樹脂の3種が定められており、固型化の際には、固型化材料を用いて、又は固型化材料及び骨材、添加剤等の混和材料を用いて容器に固型化することと定められている。

骨材
モルタルを造るため、セメントおよび水と練り混ぜる材料のこと。砂、砕砂、砂利、砕石、その他これに類似するものをいう。

【サ】

集合型遠心分離機
複数台の遠心分離機または回転体を一つの、あるいは一体となった外筒に納めたもの。

セメント
一般には、土木、建築工事用に用いるポルトランドセメント、混合セメント、アルミナセメントなどの水硬性セメントを指す。「核燃料物質等の埋設に関する措置等に係る技術的細目を定める告示」においては、固型化材料の一種に定められている。

【タ】

低レベル放射性廃棄物管理プログラム
核燃料サイクル機構では、機構で発生する低レベル放射性廃棄物を、安全かつ合理的に処理・処分していくため、その発生から、保管、処理・処分にいたるまでの総合的な管理計画を「低レベル放射性廃棄物管理プログラム」として策定した。その総合的な管理計画のことを指す。

【ハ】

微小熱量計
微小の反応熱量を測定する装置。ここでは、セメントと水を反応による熱量を連続的に測定した。

フッ化カルシウム(殿物)
製錬転換施設では、工程から出てくる廃液に $Ca(OH)_2$ を添加し、廃液中に含まれるフッ素分を CaF_2 として中和沈殿・ろ過処理により、廃液中から除去している。この中和沈殿物のことを指している。なお、天然に産出する CaF_2 は、蛍光塗料、レンズのコーティング剤、セメント製造助剤として用いられている。

フッ化ナトリウム
化学形態は NaF である。NaF は UF_6 ガスを吸着する能力をもっていることから、廃ガス系の吸着剤として用いられる。なお、NaF は、たんぱく質及び接着剤の防腐、結合剤、木材の防腐剤、殺菌、殺鼠剤などに用いられている。

フッ化物系汚染物
核燃料物質によって汚染されたフッ素化合物のことであり、人形峠環境技術センターには、中和殿物(CaF_2)、プロセスオフガス系に用いたフッ化ナトリウム(NaF)等がある。

ブリーディング
練り混ぜ水の一部が骨材、セメント粒子の沈降に伴って上面に集まってくる現象。比重差に起因する材料分離の一種。

プロトタイプコード
解体エンジニアリングシステムにおいて、センターのウラン系施設の廃止措置計画立案に対し、当初予定した機能が一通り揃った段階をプロトタイプコードと呼ぶ。機能は揃っているが精度と適用範囲において十分ではない。

【マ】

モルタル
セメントと骨材(主として砂)とを水で練り混ぜたもの。

【数字・アルファベット】

3DCAD

(Three Dimensional Computer Aided Design の略。)

コンピュータを用いた設計や設計システムのこと。建築、回路図、航空機、車など多種多様な分野で利用されている。平面図のみを扱うものを 2 次元 CAD、立体図を扱うものを 3 次元(3D)CAD と呼ぶ。最近ではコンピュータグラフィックの機能と組み合わせて完成図のシミュレーションやプレゼンテーションにも利用されている。

DOE

米国エネルギー省(Department of Energy)のこと。

ISO 14001

国際標準化機構(ISO)が平成8年(1996 年)9 月に定めた ISO14000s(シリーズ)『環境マネジメントシステム規格』。ISO14000s の中核となる ISO14001 は環境マネジメントシステム(EMS)の仕様を定めている。平成 4 年、180 カ国以上の国家代表が参加して開催された地球環境会議(通称地球サミット/ブラジル)において採択された行動計画「アジェンダ 21」を具体化した。人形峠環境技術センターでは平成 12 年 2 月に ISO14001 の認証を受けた。

P ロート試験

モルタルの要求性能を確認するため特殊なロートを用いて、一定量が流れ落ちる時間を測定する試験のこと。

NINGYO-TOGE

核燃料施設廃止措置と廃棄物処理技術の体系化を目指して！

平成 15 年 9 月 30 日 初版発行

執筆者 安念外典、石森有、江間晃、高信修、長安孝明、美田豊（50音順）

監修 人形峠環境技術センター 研究技術開発委員会

発 行 核燃料サイクル開発機構 人形峠環境技術センター

〒708-0698 岡山県苫田郡上齋原村 1550

Phone 0868-44-2211, Fax 0868-44-2502

JNC

核燃料サイクル開発機構　人形峠環境技術センター
〒708-0698　岡山県苫田郡上齋原村 1550
Phone 0868-44-2211, Fax 0868-44-2502