



# ウラン濃縮施設機材の切削除染技術開発

遠藤 裕治 大曾根 勤\* 八木澤 博

人形峠環境技術センター 環境保全技術開発部  
\*検査開発株式会社

Development of Scraping Decontamination Technology for the Equipment  
of Uranium Enrichment Facilities.

Yuji ENDO Tsutomu OSONE\* Hiroshi YAGISAWA

Environmental Research and Development Division, Ningyo-toge Environmental Engineering Center  
\* Inspection and Development Company Ltd.

表面が汚染されたウラン濃縮施設の機材について、汚染部分を機械的に切削除去する除染方法の開発を実施した。炭素鋼又はアルミ合金製の円筒状機材の表面形状に沿って、汚染した部分を一定深さだけ切削することができる「円筒加工装置」を試作した。ウラン濃縮機材の汚染深さに合わせて切削量を0.5mmに設定して、切りくずを吸引回収に適した形状にする加工条件、加工精度を検討する試験を行い、汚染を模擬した試験体の切削試験により除染効果を把握した。その結果、「円筒加工装置」の基本機能の妥当性及び切削除染に適した加工条件を確認したが、切りくず回収機構、切削部の冷却など、実機機材の処理に適用するための課題も併せて抽出した。

*The decontamination method of scraping off contaminated depth mechanically was developed for the equipment of uranium enrichment facilities whose surface was contaminated by uranium.*

*The "Cylinder Scraping Machine," made as an experiment, can scrape off a constant depth of cylinder-shaped equipment along the surface of equipment made of carbon steel or aluminum alloy. The depth of scraping was set at 0.5mm in accordance with the contamination depth of the uranium enrichment equipment, and examination of the processing condition, which makes the scraps into a suitable form for suction collection, and of the processing precision was conducted and the decontamination effect was gauged by a scraping test of the test body with simulated contamination.*

*As a result, the validity of the basic function of the "Cylinder Scraping Machine" and the processing conditions suitable for scraping decontamination were confirmed and the subjects to apply it to the processing of the actual used materials regarding the scraps collection mechanism, cooling of the scraping part and others were extracted.*

## キーワード

放射性廃棄物，金属廃棄物，ウラン，ウラン濃縮，除染，切削除染，炭素鋼，アルミ合金，汚染深さ

*Radioactive Waste, Metal Waste, Uranium, Uranium Enrichment, Decontamination, Scraping Decontamination, Carbon Steel, Aluminum Alloy, Contaminated Depth*

## 1. はじめに

人形峠環境技術センターでは、ウラン濃縮パイロットプラント(当時。1991年に「濃縮工学施設」

と改称。)で1979年から1990年、ウラン濃縮原型プラントで1988年から2001年までの期間、ウラン濃縮技術開発に係る各種試験及び電力会社との役務



遠藤 裕治

遠心機処理技術課所属  
遠心機処理技術開発業務に従事



大曾根 勤

遠心機処理技術課所属  
遠心機処理技術開発業務に従事



八木澤 博\*1

遠心機処理技術課所属  
遠心機処理技術開発業務に従事

\*1現在：日立製作所サイクルプロジェクト部所属

契約に基づく濃縮ウランの生産を行ってきた。2001年9月に核燃料サイクル開発機構におけるウラン濃縮技術開発業務が終了したことから、現在これらの施設ではウラン濃縮に使用した機材の除染技術の開発を実施している。

今回、ウラン濃縮に使用した機材のうち円筒状の機材を対象に、ウランで汚染した部分を切削除去する切削除染法について、切削除染用に試作した円筒加工装置と汎用工作機器及び汚染模擬機材を用いて試験を実施したので、以下に主な成果を示す。

## 2. 切削除染の概要

### (1) 切削除染方法の特徴

ウラン濃縮施設の機材は、10年程度の期間六フッ化ウランに曝され、機材表面で六フッ化ウランとの反応によりウラン化合物が付着し、汚染している。汚染の形態は表面汚染であり、極表層の汚染部分が除去できれば、クリアランスレベルを適用して、機材の大部分を産業廃棄物と同様に措置することが可能になると考えられる。

これまで、想定クリアランスレベルを0.1Bq/gと仮定して、湿式化学除染法を用いて除染試験を実施してきた。今回試験を行った切削除染法は、切削・研削など機械的な加工法によって汚染部分を除去する方法であり、レーザー加工、電解研磨、化学研磨などの電気的、化学的な加工法に比べて、エネルギー効率や金属表面の除去速度に優れている特徴がある。

一般の機械工作では、潤滑剤が摩擦を小さくして切削抵抗を減らすことで工具の磨耗を軽減し、冷却効果により工具硬度や加工寸法精度の低下の抑制など重要な役割を果たしている。しかし、切削除染法では、放射性物質で汚染した機材を機械加工するという特徴から、潤滑剤による切削面への二次汚染を避けるため、潤滑剤を使用しない乾式切削を試みた。

また、旋盤などによる加工法では「切削量+製作公差」が切りくずとして廃棄物になる可能性があるため、加工対象物（以下「ワーク」という。）の表面形状に合った加工方法を選択し、表面からの切り込み量を汚染深さに合わせて一定に保ち、二次廃棄物の発生量を抑制するシステムとした。

### (2) 円筒加工装置の構造

切削除染用に試作した円筒加工装置を図1及び

写真1に、ワーク表面形状に倣って加工するための倣い機構の概要を図2に示す。

円筒加工装置は中型旋盤に取り付けられた専用ツールバー、工具ホルダ、チップ、倣いローラ、スプリング、切りくず回収機構などで構成されている。ワークの表面形状が変化しても、図2のようにスプリングがローラをワークに

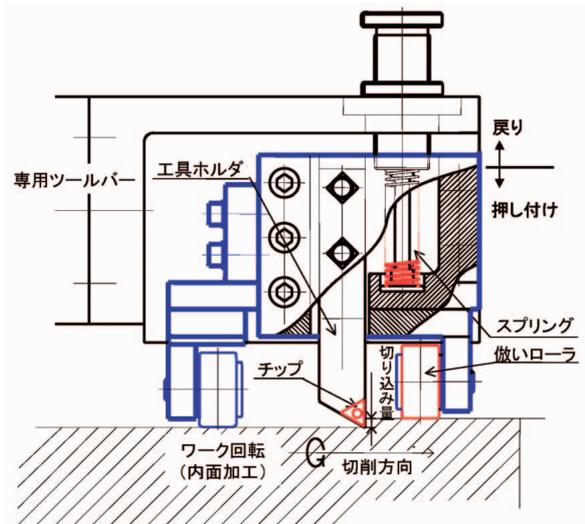


図1 円筒加工装置の構造

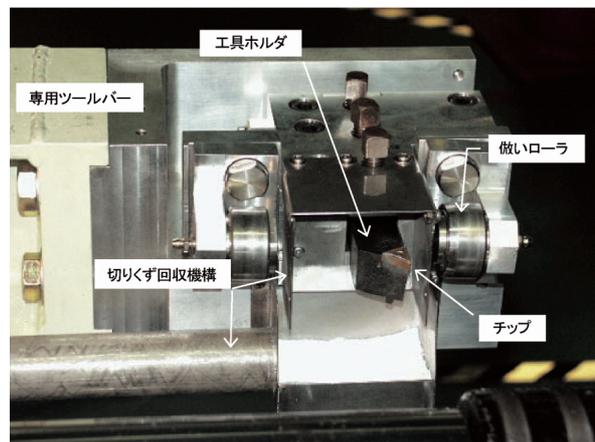


写真1 円筒加工装置

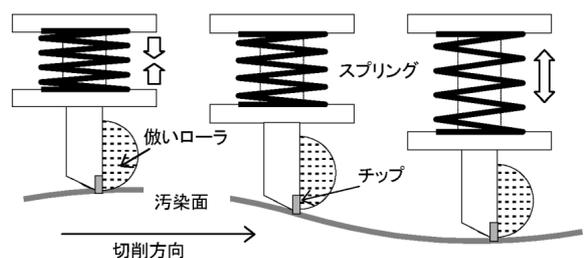


図2 円筒加工装置の倣い機構原理

押し付け，接触面を基準に一定の切り込み量でワーク表面を切削していく構造としている。

円筒加工装置を構成する各部品の役割は次のとおりである。

#### 工具ホルダ，チップ

ワークの表面を切削加工する。

円筒加工装置では，切りくず回収機構で確実に切りくずが回収されるよう，加工条件により切りくずの形状を制御するようにしている。

#### 倣いローラ

ワークの汚染表面を走行し，工具ホルダ，チップに対してワーク表面からの切削深さを決定する。

#### スプリング

チップ，倣いローラをワーク表面に押し当てて，倣いローラの跳ね上がりを防止するとともにチップに対して切削加工に必要な切削力を伝える。

#### 切りくず回収機構

切りくず回収カバーと真空クリーナで構成し，切りくずを回収して切削面への二次汚染を防止する。

### 3．試験概要

円筒加工装置の基本性能を確認するための試験の流れを図3に示す。なお，本除染法の適用対象は，鋼材（炭素鋼）と軽金属（アルミ合金）とした。

#### 3.1 汚染深さの特定

切削除去する表面の汚染範囲を特定するため，ウラン濃縮施設で使用され，長時間六フッ化ウランに曝された機材から試験片を採取し，グロー放電質量分析装置（GDMS）により表面から金属内部に向かってウラン濃度の分析を行い，深さ方向

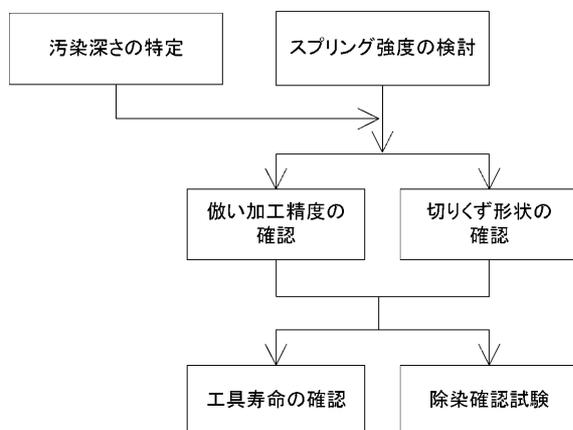


図3 円筒加工装置基本性能確認のための試験フロー

のウラン濃度分布を明らかにした。

#### 3.2 円筒加工装置基本性能の確認

実機材を用いた試験を行う前に，切削除染に適した加工条件を見出すため，実機材を模擬したワークを用いて円筒加工装置の基本性能を確認した。

##### (1) ローラ押し付け力の検討

本除染法の特徴である倣い加工を実現するためには，倣いローラがワーク表面を的確に捉えて回転する必要がある。ワーク表面の凹凸によるローラの跳ね上がりなどを防止するスプリング力を検討するため，スプリング力を変化させながら，倣いローラとワークとの電気導通状態を測定することによりローラの押し付け状態を確認した。

##### (2) 切りくず形状の確認

本除染法では，切削面への二次汚染を防止するため，切りくず形状を制御して回収することが重要である。

一般切削での代表的な切りくず形状は図4のとおりであるが，本除染法では切りくずを回収カバーに閉じ込め，真空クリーナまで排気回収する構造としているため，小片状の「折れた切りくず」又は「せん断形切りくず」にすることが望ましいことから，切りくず寸法10mm程度を目安として加工条件を検討した。

なお，本除染法の実用化時を考慮して，チップ

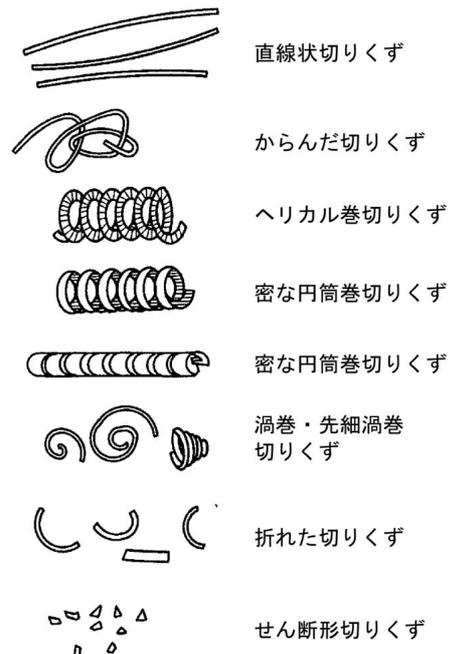


図4 一般加工における切りくず形状の例<sup>1)</sup>

は入手が容易な汎用品の中から複数選定して、切りくず形状を基に選別を行った。

### (3) 倣い加工精度の確認

ローラ押し付け力、切りくず形状の確認結果に基づいてワークを切削加工し、ダイヤルゲージによる変位量から軸方向、周方向の切削量（切削深さ）を求め、設定切り込み量に対する倣い加工の精度を確認した。

### (4) 工具寿命の推定

本除染法では乾式で切削するため、チップ寿命が短くなると考えられる。本除染法を実用化の上では、工具寿命によるチップ交換頻度を予め把握しておく必要があるため、上述の検討結果で得られた加工条件に基づいてワークを加工し、チップの欠損状況など外観観察結果から寿命を推定した。

## 3.3 除染確認試験

### (1) 汚染模擬機材による試験

炭素鋼及びアルミ合金製の試験機材に銅メッキで表面汚染を模擬して切削加工し、加工面の銅濃度をGDMSで分析し、除染効果の程度を確認した。

### (2) 実機材による試験

管理区域から持ち出せるレベルまで湿式化学除染法にて除染した炭素鋼及びアルミ合金の実機材をワークとして切削加工し、加工表面のウラン濃度をGDMSで分析し、除染効果の程度を確認した。

## 4. 試験結果

### 4.1 汚染深さの特定

ウラン濃縮施設の実機材から採取した試験片について、GDMSを用いたウラン汚染深さの確認結果は表1に示すとおり、炭素鋼では表面に堆積したウラン化合物を含め約500 $\mu\text{m}$ 、アルミ合金では約53 $\mu\text{m}$ の汚染深さであった。これらの分析結果より、以降の試験では炭素鋼の汚染深さに合わせ、切り込み深さを0.5mmに設定して各種試験を実施した。

表1 汚染深さの調査結果

ワーク	データ数	最大値	最小値	平均値	標準偏差	平均+3
炭素鋼	2	500 $\mu\text{m}$	140 $\mu\text{m}$	-	-	-
アルミ合金	16	42 $\mu\text{m}$	3 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$	11 $\mu\text{m}$	53 $\mu\text{m}$

## 4.2 円筒加工装置基本性能の確認

### (1) ローラ押し付け力の検討

表2に示すとおり、スプリング力を変化させた時の倣いローラとワークの電気導通状態から、炭素鋼、アルミ合金それぞれにおいて100N又は300Nを超えるローラ押し付け力が必要となる結果を得た。

### (2) 切りくず形状の確認

加工条件（ローラ押し付け力、回転数、チップ送り速度等）及び使用するチップにより、切りくずの形状が異なり回収しやすい切りくず形状となる組み合わせとして表3の加工条件及び切りくず形状を選択した。

### (3) 倣い加工精度の確認

倣い加工精度の確認結果を図5及び図6に示す。

切り込み量設定0.5mmに対して十分な切削量が確保できていることから、スプリングによる切削力が十分に作用していることが確認できた。

しかし、切り込み量設定値に対して最大0.1mm程度深く切削される箇所があり、各測定箇所間での切削量にもばらつきが発生している。二次廃棄物発生量を低減する観点から切り込み量の設定精度を向上させて切削量との差を低減する必要があることが分かった。

### (4) 工具寿命の確認

アルミ合金は長さ800mmのワークをチップ交換無しで切削可能であった。チップ先端の外観観察結果では、写真2のとおり乾式切削により高温となったチップ先端にアルミの溶着が観られた。更に、チップ先端ではこの溶着と脱離が繰り返されていることも観察されたが、チップ自体に磨耗、欠損等もなく、この間の切りくずも安定した形状を保っていた。

一方、炭素鋼ではワーク長さ800mm付近でチップに欠損が発生した。乾式切削による切削抵抗の増大が原因と考えられ、冷却対策やチップ材質の見直しによる長寿命化の検討が必要である。

## 4.3 除染確認試験

### (1) 汚染模擬機材による試験

炭素鋼及びアルミ合金製ワーク切削加工後の外観は、写真3に示すとおり銅メッキが一様に除去され、母材の金属色に変化していた。

アルミ合金製ワークの切削加工で、アルミ溶着・脱離が発生したがチップ先端をフィールドエミッ

表2 ローラ押し付け力の検討結果

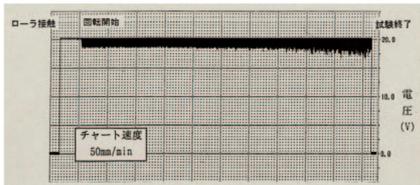
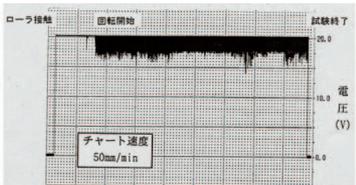
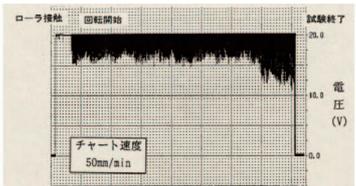
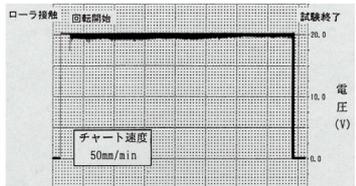
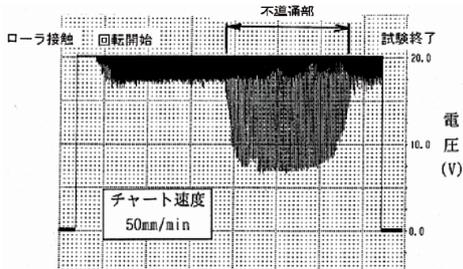
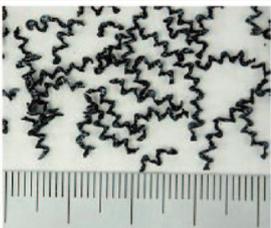
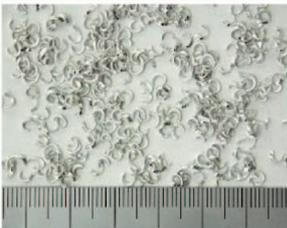
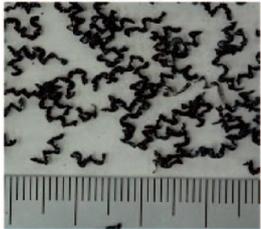
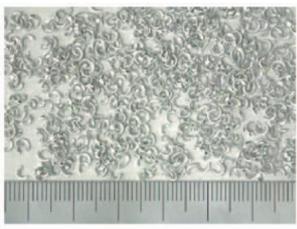
	炭素鋼	アルミ合金
外面加工	 <p>スプリング設定：100N</p>	 <p>スプリング設定：300N</p>
内面加工	 <p>スプリング設定：300N</p>	 <p>スプリング設定：100N</p>
備考	<p>ローラ追随性の確認判定（導通状態）</p> 	

表3 切りくず形状の確認結果

	炭素鋼	アルミ合金		
外面加工				
	回転数	280rpm	回転数	140rpm
	送り速度	0.2mm/rev	送り速度	0.2mm/rev
	切り込み量	0.5mm	切り込み量	0.5mm
	ローラ押し付け力	300N	ローラ押し付け力	300N
	チップ型式	ダイジェット製 TNMG160404 F1	チップ型式	京セラ製 TNGG160402R B
内面加工				
	回転数	400rpm	回転数	140rpm
	送り速度	0.2mm/rev	送り速度	0.2mm/rev
	切り込み量	0.5mm	切り込み量	0.5mm
	ローラ押し付け力	400N	ローラ押し付け力	300N
	チップ型式	ダイジェット製 TNMG160404 F1	チップ型式	京セラ製 TNGG160402L B

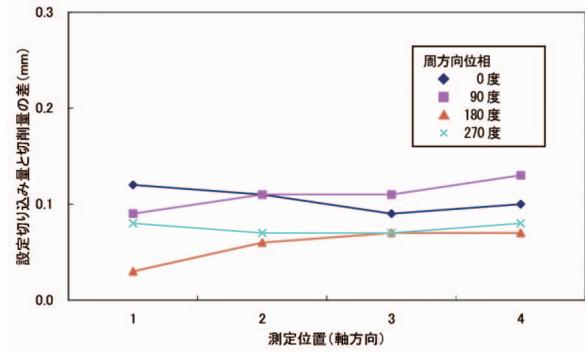


図5 炭素鋼切削時の食い加工精度確認結果

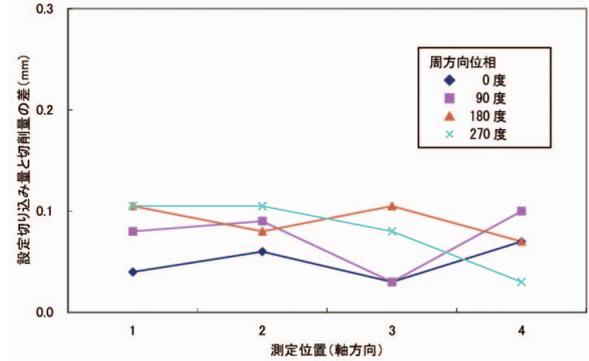


図6 アルミ合金切削時の食い加工精度確認結果

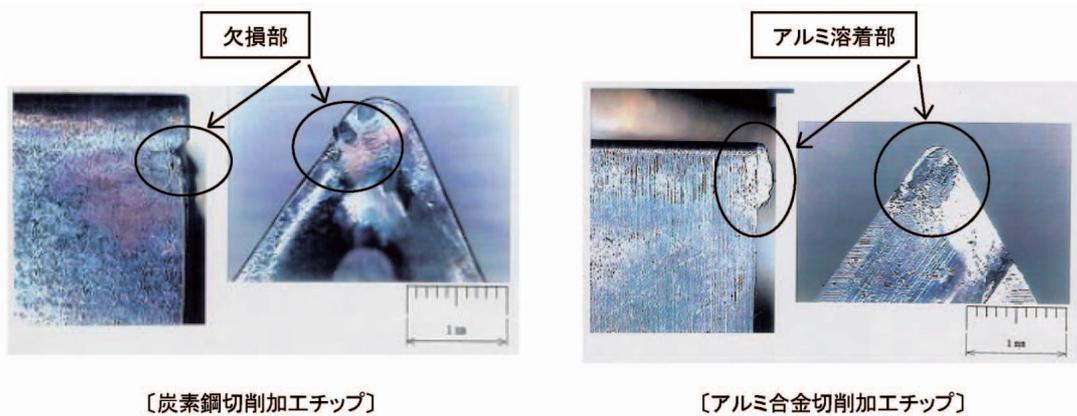


写真2 チップ寿命の確認結果

シオン型電子顕微鏡 (FE SEM) により観察した結果、写真4のとおり切削部の表面状態は、溶着アルミの脱離部と脱離せずに溶着アルミが残る周辺部の二種類に別れ、脱離部は未使用チップの観

察結果と同様の表面状態であった。また、チップ先端部への二次汚染を確認するため、銅の付着状況をX線マイクロアナライザー (EPMA) により

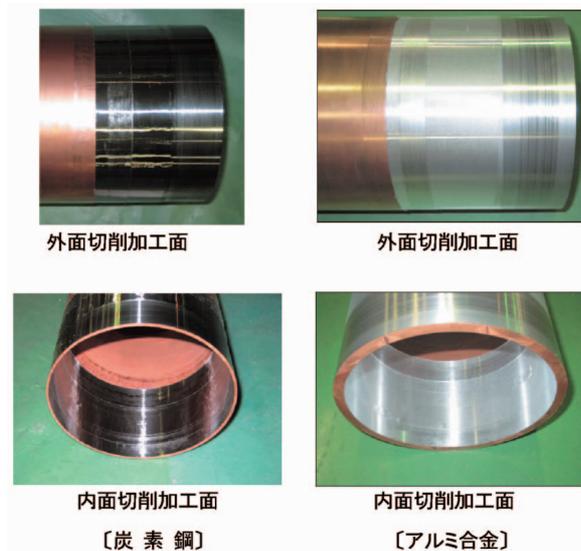


写真3 切削加工後のワーク外観 (銅メッキワーク)

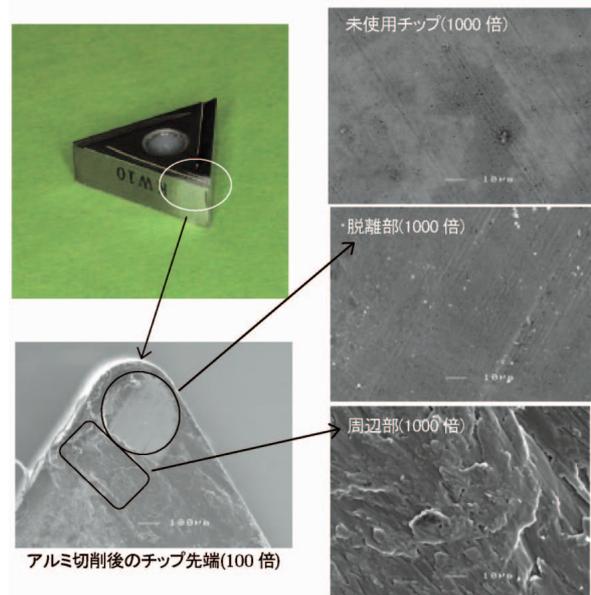


写真4 アルミ合金切削チップの外観観察

定性分析したが、銅成分は検出されなかった。

次に、切削面から採取した試験片について、表面から深さ方向にGDMSによる銅濃度分析を行った。分析は実機材の汚染状況から、炭素鋼製ワークは内外面、アルミ合金製ワークでは内面のみ行った。分析結果を図7及び図8に示す。

内面切削加工面の銅濃度は、炭素鋼製ワークで約0.2 $\mu\text{m}$ 、アルミ合金製ワークで約0.5 $\mu\text{m}$ の極表面部分の銅濃度が高くなる傾向にあった。EPMA及びGDMSの分析結果から、切削加工時の銅微小塵埃による二次汚染などが原因として考えられ、切りくず回収機構の吸引能力向上などによる二次汚染対策が必要と考える。

## (2) 実機材による試験

銅メッキによる汚染模擬材と同様に、切削後の表面からGDMSによるウラン濃度分析を行った。分析結果を図9及び図10に示す。

炭素鋼製ワーク内外面の切削加工面でのウラン濃度は、分析した深さ方向全域にわたって、除染後の目標値として設定している0.1Bq/g相当のウラン濃度(比放射能を濃縮度5 wt%としてウラン濃度を評価)を下回っている。ウラン濃度は、酸

素濃度と同様に表面に向かって緩やかな上昇を示している。未使用炭素鋼材の切削加工面でも同様の傾向を示しており、炭素鋼表面での酸化が進むことに合わせてウラン濃度も上昇する傾向にあることから、二次汚染とは特定できない。ただし、表面のウラン付着量が多い場合には、銅メッキの切削試験で見られたような二次汚染にも配慮する必要があることが分った。

アルミ合金製ワーク内面の切削加工面でのウラン濃度は、分析した深さ方向全域にわたって未使用アルミ合金材中のウラン濃度を下回っており、機材中に含まれるウラン濃度の範囲内に留まっていることを示した。

## 5. おわりに

ウラン濃縮施設で使用した円筒状の機材を対象に、切削除染用に試作した円筒加工装置を用いた、炭素鋼及びアルミ合金の切削試験を行い、以下の結果を得た。

(1) ウラン濃縮施設で使用した機材のウラン濃度分析を行った結果、汚染深さは炭素鋼で約500 $\mu\text{m}$ 、アルミ合金で約50 $\mu\text{m}$ であることが分った。

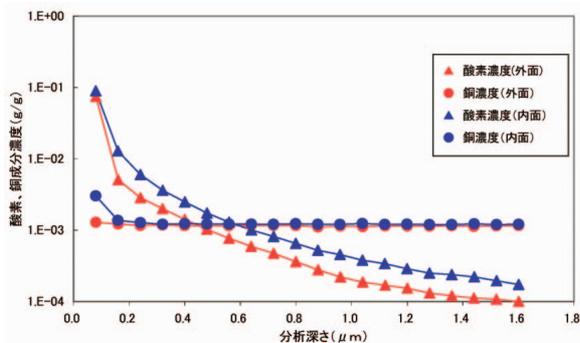


図7 炭素鋼切削加工面の銅濃度

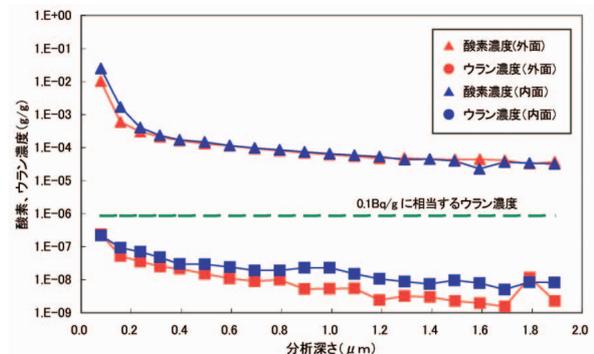


図9 炭素鋼切削加工面のウラン濃度

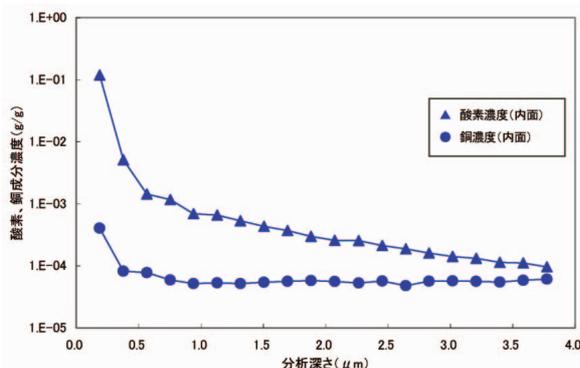


図8 アルミ合金切削加工面の銅濃度

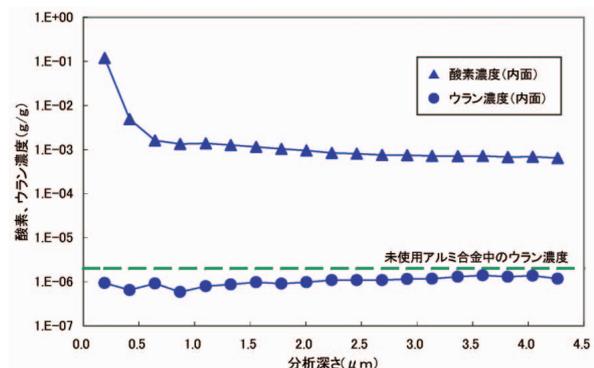


図10 アルミ合金切削加工面のウラン濃度

(2) 試作した円筒加工装置を基本構造として、機材形状に倣って表面を一定深さだけ切削加工できることを確認した。

(3) 切りくず回収が可能なチップ、切り込み深さ、回転数、送り速度、押し付け力（スプリング力）などの加工条件の絞り込みを行った。

(4) 改善すべき項目として、二次汚染低減のための切りくず回収機構の能力向上、倣い精度の向上のための切り込み量設定方法の見直し、チップ寿命向上のための冷却対策などの課題を抽出した。

これまでの試験により、切削除染に使用する円

筒加工装置の基本機能の妥当性及び切削除染に適した加工条件を確認した。また、実機機材の処理に適用するための課題も併せて抽出した。今後は、抽出した課題の対策も含め、ウラン濃縮施設で実際に使用してきた汚染機材を用いた試験の中で除染性能の確認を実施していく予定である。

なお、本試験の一部は電気事業者との共同研究として実施している。

#### 参考文献

- 1) 社団法人日本機械学会：機械工学便覧，B 2 127（1991）