

新除染技術の実用化に関する調査報告書

(核燃料サイクル開発機構 契約業務成果報告書)

2000年 3月

株式会社 日立製作所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2000

2000年3月

新除染技術の実用化に関する調査報告書

新田 秀行* 小野 正博*

要　　旨

表面汚染が主な放射性固体廃棄物に対して、高除染度の得られる可能性がある技術として、レーザークリーニング法、真空アーククリーニング法について、文献および特許調査を実施した。また、得られた情報に基づき具体的な適用例として集合型遠心機チャンバーの胴体部を除染するための装置の概念設計及び経済性評価を実施した。

固体表面クリーニング技術(レーザー法、放電法)の現状調査では、公開文献、特許、その他の資料により技術調査を実施し、関連する文献をリストにまとめるとともに、技術データシートを作成した。また、クリーニングシステムを設計するために有用な情報を構成機器毎にまとめた。除染処理への検討例、適用例等の調査と評価では、固体表面クリーニング技術と同様、公開文献、特許、その他の資料により技術調査を実施し、関連する文献をリストにまとめるとともに、技術データシートを作成した。これら調査結果に基づき、炭酸ガスレーザー、YAGレーザー、真空アークそれぞれを用いた除染処理プロセス・装置概念設計を実施し、装置および処理プロセス概念の具体化をはかった。いずれの装置も回転リングを用いて除染対象物を回転させ、除染ヘッドを除染対象物の円周方向に走査することにより、除染速度が一定となるように設計した。本概念設計結果に基づき、各除染システムの経済性について比較評価した。

本報告書は株式会社日立製作所が核燃料サイクル開発機構殿の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：11C2743

サイクル機構担当課室：東海事業所 環境保全・研究開発センター
環境保全部 技術開発グループ

* 株式会社 日立製作所 原子力事業部

Report on practical use of new decontamination technology

Hideyuki Nitta*, Masahiro Ono*

Abstract

For removing surface contamination of a solid waste with radioactivity, technology of laser cleaning and vacuum arc cleaning has the possibility to obtain the high decontamination rate. We made a research for practical uses of these methods as a new cleaning technology from published papers and patents. From these results, we discussed about an applicability of laser cleaning and vacuum arc cleaning to decontaminate a body of centrifugal separator.

At first, we investigate the solid surface cleaning technology with a laser or a vacuum arc from published papers in the world and the patents in Japan. The results were listed in tables. Each information was abstracted into a technical data sheet and sorted into a related technology (system or equipment). We also investigate the decontamination technology by the same way and the results were abstracted into technical data sheets and sorted into related technologies, too.

As an application of the above research, we considered the process and the system for decontaminating a body of centrifugal separators (cylinders). In the system, the cleaning head is set inside the cylinder and the inner surface contaminated by radioactivity is removed by the irradiation of a YAG laser, a CO₂ laser or a vacuum arc. The cylinder is rotated by rotational rings and moved towards the direction of the central axis and the whole inner surface of the cylinder is cleaned with a constant cleaning rate. We also estimated the costs of each decontamination technology.

This work was performed by Hitachi, Ltd. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison : 11C2743

Waste Technology Development Group, Waste Management Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

* : Nuclear Systems Division, Hitachi Ltd.

— 目 次 —

1.	まえがき	1
2.	研究計画	2
2.1	研究目的	2
2.2	研究内容	2
2.3	研究体制	3
2.4	研究期間	4
2.5	研究工程	4
3.	固体表面クリーニング技術の現状調査と評価	6
3.1	レーザー光による固体表面クリーニング技術の調査	6
3.2	放電法による固体表面クリーニング技術の調査	17
4.	除染処理への検討例、適用例等の調査と評価	24
4.1	レーザー光による除染技術の調査	24
4.2	放電法による固体表面除染技術の評価	28
5.	プロセス・装置概念設計	31
5.1	装置全体に係わる前提条件	31
5.2	炭酸ガスレーザーによる除染処理プロセス・装置概念設計	31
5.3	YAG レーザーによる除染処理プロセス・装置概念設計	54
5.4	真空アークによる除染処理プロセス・装置概念設計	66
6.	高除染技術の経済性評価	78
6.1	前提条件	78
6.2	評価結果	79
7.	まとめ	80
8.	参考文献	82
(添付資料) 技術データシート		

1. まえがき

原子力施設の高経年化等に伴い、装置のリプレースや廃棄処理が考えられるようになり、廃棄物の減容・貯蔵・処分等に係わる研究の重要度が高まっている。施設から排出される廃棄物には表面等に放射性物質が付着しているものがあり、これについては環境中に放出されないよう外部と隔離し保管するか、クリアランスレベル以下まで取り除く必要がある。

放射性物質の除染作業では、クリアランスレベル以下になるまで対象物を除染するとともに、対象となる放射性物質のみを選択的に取り除き、2次廃棄物を極力発生させない方法を用いることが望ましい。また、作業に携わる従事者の被曝低減を図ることも重要である。現在のところ、放射性物質の除去は化学物質や研磨、拭き取り等により行われるのが主であるが、これら方法は、2次廃棄物量や作業者被曝低減の観点からは余り望ましい方法とは言えない。これに対し、近年、汚染のある表層のみ除去可能で自動化や遠隔操作性に優れ、除染処理コストが抑えられる新除染技術として、レーザーや真空アークを用いた方法が研究されている。レーザクリーニングは、塗装の除去、電子部品の洗浄等、既にさまざまな産業で利用されるようになっており、真空アーククリーニングも、対象物が小型に限定されるものの、装置として市販されており、今後、原子力分野への応用が期待されている。

本研究では、レーザー及び真空アークを利用したクリーニング技術を調査し、その得られた情報に基づき、具体的な適用例として集合型遠心機チェンバーの胴体部を除染するための装置の概念設計と、その経済性を評価した。本書は、その調査結果をまとめたものである。

2. 研究計画

2.1 研究目的

表面汚染が主な放射性固体廃棄物に対して、高除染度の得られる可能性がある技術を調査し、放射性固体廃棄物への適用性を検討する。また、核燃料サイクル開発機構殿（以下、J N C 殿と略する）の保有する放射性金属廃棄物を除染する装置の概念設計を実施し、プロセスの具体的イメージを作り上げる。

2.2 研究内容

2.2.1 固体表面クリーニング技術（レーザー法、放電法）の現状調査

(1) レーザー光による固体表面クリーニング技術の調査

公開文献、特許、その他の資料により技術調査を実施し、以下の項目について出来る限り具体的にまとめる。なお、除染に関連するものは2.2.2項で実施する。

- a. 目的・標題
- b. 資料名等・年巻号
- c. 実施機関・発表者名
- d. 実施年月
- e. 対象
- f. 方法・条件
- g. 装置等仕様
- h. 成果
- i. 評価（技術的特徴、安全性、課題、関連法令等）
- j. その他必要な項目

(2) 放電（プラズマ・アーク等）による固体表面クリーニング技術の調査

2.2.1-(1)項と同様にまとめる。

2.2.2 除染処理への検討例、適用例等の調査と評価

(1) レーザー光による固体表面除染技術の調査

2.2.1-(1)項と同様にまとめる。

(2) 放電（プラズマ・アーク等）による固体表面除染技術の調査

2.2.1-(1)と同様にまとめる。

2.2.3 プロセス・装置概念設計

具体的な放射性金属固体廃棄物をモデルに、除染処理プロセスと装置の概念設計を実施する。

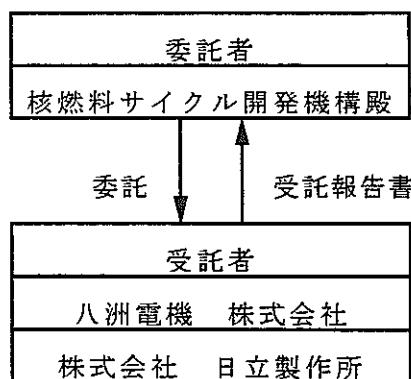
- (1) 炭酸ガスレーザーによる除染処理プロセス・装置概念設計
 - ・除染プロセス設計
 - ・装置概念設計
- (2) YAG レーザーによる除染処理プロセス・装置概念設計
 - ・除染プロセス設計
 - ・装置概念設計
- (3) 真空アークによる除染処理プロセス・装置概念設計
 - ・除染プロセス設計
 - ・装置概念設計

2.2.4 高除染技術の経済性評価

- (1) 炭酸ガスレーザー除染法の経済性評価
 - ・建設または製作コスト
 - ・運転・メンテナンスコスト
 - ・処理単価
 - ・その他必要な項目
- (2) YAG レーザー除染法の経済性評価
 - ・2.2.4-(1)項と同様
- (3) 真空アーク除染法の経済性評価
 - ・2.2.4-(1)項と同様

2.3 研究体制

本研究の実施体制を下記に示す。



2.4 研究期間

(自) 平成 12 年 1 月 11 日

(至) 平成 12 年 3 月 17 日

2.5 研究工程

本研究の工程を表 2.5-1 に示す。

表2.5-1 研究工程

No.	項目	1月				2月				3月				備考
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
1	固体表面クリーニング技術の現状調査 (1) レーザー光による固体表面クリーニング技術の調査 (2) 放電による固体表面クリーニング技術の調査													
2	除染処理への検討例、適用例等の調査と評価 (1) レーザー光による固体表面クリーニング技術の調査 (2) 放電による固体表面クリーニング技術の調査													
3	プロセス・装置概念設計 (1) 炭酸ガスレーザーによる除染処理プロセス・装置概念設計 (2) YAGレーザーによる除染処理プロセス・装置概念設計 (3) 真空アークによる除染処理プロセス・装置概念設計													
4	高除染技術の経済性評価 (1) 炭酸ガスレーザー除染法の経済性評価 (2) YAGレーザー除染法の経済性評価 (3) 真空アーク除染法の経済性評価													
5	報告書作成													

3. 固体表面クリーニング技術の現状調査と評価

3.1 レーザー光による固体表面クリーニング技術の調査

3.1.1 調査方法

レーザーを用いた固体表面クリーニングは、除去形態により次の2つの方法に分類される。

- ① 母材には影響を与えず、表面の付着物のみ除去する方法
 - ② 付着物を母材表層部とともに加熱溶融し吹き飛ばすことにより除去する方法
- ここで、①はアブレーション法、②は溶融法と呼ばれるが、これらは更に、付着物に対するレーザーエネルギーの作用のさせ方により、次の2つに分類できる。
- a. 付着物に直接レーザー光を照射し除去する場合
 - b. 付着物表面にある物質を吸着させ、その吸着物質を蒸発させることにより除去する場合

ここで、aを直接法、bを間接法と呼ぶこととする。本研究ではいずれの方法も調査対象とするが、例えば、アブレーションによる薄膜生成過程や、切断の途中過程といった、目的がクリーニング以外のものまで調査対象とすると対象資料は膨大となるため、クリーニングを目的としているもののみを調査対象とした。

調査では JICST、NUCLEN、PATOLIS を用い、レーザーおよびクリーニング、あるいはレーザーおよび洗浄をキーワードとして、本キーワードを含む資料を選定し、後述する放射性物質の除染に関するものを除きリストに纏めた。リストに記載した資料の中から、装置設計に有益な情報が得られるものについて、記事に示される試験設備の構成、クリーニング条件、試験結果等を中心にデータシートに纏めた。データシートは巻末に添付する。

3.1.2 文献によるレーザークリーニング技術の調査

文献調査結果を表 3.1.2-1 に示す。レーザークリーニングに用いられるレーザーの種類としては、炭酸ガスレーザー、YAG レーザー、エキシマレーザー (KrF、XeCl 等) が主なものである。一方、クリーニング対象物は電子部品、光学部品、ガラス、コンクリート、金属、紙等多岐にわたり、除去する物質も様々である。本項では、次章以下で検討する炭酸ガスレーザーと YAG レーザーの装置概念設計を念頭に、これら 2 種類のレーザーを用いた技術に関する情報を整理する。

(1) 炭酸ガスレーザーによるクリーニング

炭酸ガスレーザーをクリーニングに用いた場合の対象物や方法、特徴をまとめたものを表 3.1.2-2 に示す。炭酸ガスレーザーには連続波型(CW 型)とパルス波型があるが、前者は溶融法に、後者はアブレーション法に使用されるケースが多い。大半が直

表3.1.2-1 レーザーによる固体表面クリーニング技術の文献調査結果 (1/4)

No.	JICST記事番号	英文タイトル	和文タイトル	著者名(所属)	雑誌名	巻号	シートNo.	備考
1	84A0163393 (C-1)	Dependence of the threshold of formation of an air breakdown plasma near copper mirrors on the absorption coefficient of their surface at the wavelength of 10.6 μ .	銅鏡表面近くの空気絶縁破壊プラズマ形成しきい値の、表面での波長10.6 μ mの吸収係数への依存性	KONO V I, LAVRENT'EV YU V, STEPANOV YU I, CHAPLIEV N I, SHIRKOV A V (P.N. Lebedev Physics Inst. Academy of Sciences of the USSR)	Sov J Quantum Electron	VOL. 13, NO. 8 PAGE. 1128 - 1130 1983	LGM-0001	
2	84A0358004	Dynamics of recontamination of laser-cleaned metallic surfaces in laser-produced plasma experiments.	レーザ生成プラズマ実験におけるレーザ洗浄金属表面の再汚染のダイナミクス	DINGER R, ROHR K, WEBER H (Univ. Kaiserslautern, West Germany)	J Phys D	VOL. 17, NO. 8 PAGE. 1707 - 1712 1984		
3	84A0452453	—	レーザ照射による固体表面の清浄化	宇佐美誠二 (横浜国大)	Surface Control & 洗浄設計	NO. 22 PAGE. 5 - 11, 20 1984		
4	84A0491818	Plasma-formation threshold conditions for the interaction of pulsed ultraviolet radiation with solid targets.	パルス紫外光と固体標的の相互作用におけるプラズマ生成しきい値条件	AGEEV V P, GORBUNOV A A, DANILOV V P, KONO V I, NIKITIN P I, PROKHOROV A M (P.N. Lebedev Physics Inst. Academy of Sciences of the USSR)	Sov J Quantum Electron	VOL. 13, NO. 12 PAGE. 1595 - 1598 1983		
5	85A0250242	In situ cleaning of probe surfaces by pulsed laser heating.	パルス・レーザ加熱によるプローブ表面のその場洗浄	TAGLE J A, POSPIESZCZYK A (KFA Jülich, West Germany)	Fusion Technol	VOL. 6, NO. 2 Pt 2 PAGE. 405 - 410 1984		
6	88A0087395	Laser cleaning of glass surfaces : The effect of thermal diffusion.	ガラス表面のレーザ洗浄 熱拡散効果	WUERZBERG E (Rafael Lab., Haifa, ISR); MARMUR A (Technion, Haifa, ISR)	J Colloid Interface Sci	VOL. 119, NO. 2 PAGE. 362 - 370 1987	LGO-0002	
7	90A0037500 (C-2)	Laser cleaning of an optical surface.	光学表面のレーザクリーニング	BELOV N N	Sov J Opt Technol	VOL. 56, NO. 3 PAGE. 164 - 166 1989	LGO-0003	
8	90A0459446 (C-3)	Substrate cleaning in vacuum by laser irradiation.	レーザ照射による真空中での基板のクリーニング	RAJ T, MCCREADY D E, CARNIGLIA C K (Martin Marietta Astronautics Group, NM)	Spec Tech Publ (Am Soc Test Mater)	NO. 1099 PAGE. 152 - 165 1989	LGO-0004	
9	91A0236912 (C-4)	Laser-assisted micron scale particle removal.	レーザによるミクロン規模の粒子の除去	IMEN K, LEE S J, ALLEN S D (Univ. Iowa, Iowa)	Appl Phys Lett	VOL. 58, NO. 2 PAGE. 203 - 205 1991	LGM-0005	
10	91A0421213	Special issue : laser and light - unexpected applications. Cleaning by light. Light cleaning.	特集：レーザーと光・その意外な応用 光できれいにする ：光洗浄		O plus E	NO. 137 PAGE. 80 - 85 1991		
11	92A0045986 (C-5)	Laser Cleaning of Glass.	ガラスのレーザ洗浄	UEDA M, MAKINO R, KAGAWA K (Fukui Univ., Fukui, JPN); NISHIYAMA B (Nishiyama International Patent Office, Nagoya, JPN)	Opt Lasers Eng	VOL. 15, NO. 4 PAGE. 275 - 278 1991	LGO-0006	
12	92A0230686 (Y-1)	Surface cleaning by laser ablation.	レーザアブレーションによる表面浄化	AU PEEBLES H C, CREAGER N A, PEEBLES D E (Sandia National Lab., New Mexico)	US DOE Rep	PAGE. 1 - 9 1990	LGM-0007	
13	92A0523665 (Y-2)	Cleaning of Thomson scattering window by a laser blow-off method.	レーザ噴き飛ばし(ブローオフ)法によるThomson散乱窓の洗浄	NARIHARA K, HIROKURA S (National Inst. Fusion Science, Nagoya, JPN)	Rev Sci Instrum	VOL. 63, NO. 6 PAGE. 3527 - 3528 1992	LGO-0008	
14	92A0563089	The Use of Laser Energy to Clean Polluted Stone Sculpture.	汚染された石材彫刻の清浄へのレーザエネルギーの利用		J Photogr Sci	VOL. 40, NO. 2 PAGE. 55 - 57 1992		
15	92A0632167	CLEO/ELS '92 REPORT IV. Laser Processings, Medical and Biological Applications.	CLEO/ELS '92報告 IV レーザープロセス, 医用・生体応用		レーザー研究	VOL. 20, NO. 7 PAGE. 588 - 597 1992		
16	93A0353500	Laser Cleaning: Laser-induced Removal of Particles from Surfaces.	レーザ洗浄 表面からの粒子レーザ誘起除去	ZAPKA W, ZIELMLICH W (IBM Sindelfingen, Sindelfingen, DEU); LEUNG W P (IBM ADSTAR, CA, USA); TAM A C (IBM Research Division, CA, USA)	Adv Mater Opt Electron	VOL. 2, NO. 1/2 PAGE. 63 - 70 1993		
17	93A0413536	From "Particles on Surface. (3). Detection, Adhesions and Removal Ed. K. L. Mittal Plenum Press(1991)".	Particles on Surface(3) Detection, Adhesion, and Removal Ed. K. L. Mittal Plenum Press(1991)から		Surface Control & 洗浄設計	NO. 57 PAGE. 42 - 47 1993		
18	93A0955179	A Review: Laser Ablation and its Effect on Surface Removal.	概説：レーザアブレーションとその表面除去への効果	W. Reitz, et al	Surf Modif Technol 6	PAGE. 521 - 538 1993		
19	94A0117446 (C-6)	Shock wave analysis of laser assisted particle removal.	レーザ光による粒子除去の衝撃波解析	LEE S J, IMEN K, ALLEN S D (Univ. Iowa, Iowa)	J Appl Phys	VOL. 74, NO. 12 PAGE. 7044 - 7047 1993	LGM-0009	
20	94A0364706	Laser-Induced Dry Cleaning in Air. A New Surface Cleaning Technology in Lieu of Carbon Fluorochloride (CFC) Solvents.	空気中におけるレーザ誘起ドライクリーニング フルオロクロロカーボン(CFC)溶媒に代る新しい表面クリーニング法	LU Y-F (National Univ. Singapore, Singapore); AOYAGI Y (Inst. Physical and Chemical Research, Saitama)	Jpn J Appl Phys Part 2	VOL. 33, NO. 3B PAGE. L430 - L433 1994		
21	94A0685624	Coating - Removal Techniques : Advantages and Disadvantages.	被覆除去技法 長所と短所		JOM	VOL. 46, NO. 7 PAGE. 55 - 59 1994		
22	94A0732128 (C-7)	High Speed Cleaning of Solid Surface by High-Repetition Rated Pulses from a TEA CO2 Laser.	高繰り返しTEA CO2レーザによる固体表面の高速クリーニング	常見明良, 萩原弘二, 田代英夫 (理研); 平井亮, 長坂啓吾 (東京理大)	レーザー研究	VOL. 22, NO. 7 PAGE. 566 - 572 1994	LGM-0010	

表3.1.2-1 レーザーによる固体表面クリーニング技術の文献調査結果 (2/4)

No.	JICST記事番号	英文タイトル	和文タイトル	著者名(所属)	雑誌名	巻号	シートNo.
23	94A0781119 (C-8)	Laser-Induced Removal of Fingerprints from Glass and Quartz Surfaces.	ガラス及び石英表面の指紋のレーザ誘起除去	LU Y - F (National Univ. Singapore, Crescent, SGP); KUMURO S, AOYAGI Y (RIKEN, The Inst. Physical and Chemical Research, Saitama)	Jpn J Appl Phys Part 1	VOL. 33, NO. 8 PAGE. 4691 - 4696 1994	LGM-0011
24	94A0832026	Surface cleaning of metals by pulsed-laser irradiation in air.	空気中のパルスレーザ照射による金属の表面清浄化	LU Y F (National Univ. Singapore, Singapore); TAKAI M (Osaka Univ., Osaka, JPN); KUMURO S, SHIOKAWA T, AOYAGI Y (Inst. Physical and Chemical Research, Saitama)	Appl Phys A	VOL. 59, NO. 3 PAGE. 281 - 288 1994	
25	95A0133489	Laser Surface Cleaning in Air: Mechanisms and Applications.	空気中におけるレーザ表面清浄化 機構と応用	LU Y - F (National Univ. Singapore, Singapore); AOYAGI Y (Inst. Physical and Chemical Research, Saitama); TAKAI M, NAMBA S (Osaka Univ., Osaka, JPN)	Jpn J Appl Phys Part 1	VOL. 33, NO. 12B PAGE. 7138 - 7143 1994	
26	95A0152246	A Practical Excimer Laser - Based Cleaning Tool for Removal of Surface Contaminants.	表面汚染の除去を行う実用エキシマレーザによる浄化ツール		IEEE Trans Compon Packag Manuf Technol Part A	VOL. 17, NO. 4 PAGE. 631 - 643 1994	
27	95A0247533	Laser processing of optical surfaces.	光学表面のレーザ処理	ONOKHOV A P, REZNICHENKO V V, YAKOVLEVA N S (S. I. Vavilov State Optical Inst., St. Petersburg)	J Opt Technol	VOL. 62, NO. 1 PAGE. 52 - 54 1995	LGO-0012
28	95A0272898	Practical Excimer Laser - Assisted Cleaning of Solid Surfaces.	実用的なエキシマレーザによる固体表面の洗浄		ASME HTD (Am Soc Mech Eng Heat Transf Div)	VOL. 289 PAGE. 117 - 124 1994	
29	95A0421937	Photoemission studies on LaB6 and pure metals using a nanosecond KrF excimer laser.	ナノ秒KrFエキシマレーザを用いたLaB6及び純金属の光放出	QIAN M - Q, YANG M - R, PAN Q, HU K - S, DENG R - P, SHI J - J, TAO Z - C (China Acad. Engineering Physics, Sichuan, CHN); RAN Q - J, LIN Z - L (Univ.)	Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A	VOL. 358, NO. 1/3 PAGE. 280 - 283 1995	
30	95A0457609 (Y-3)	Characterization of laser cleaning of limestone.	石灰石のレーザクリーニングの特性化	COOPER M I, EMMONY D C (Univ. Technol., Leicestershire, GBR); LARSON J (National Museums and Galleries on Merseyside, Liverpool,	Opt Laser Technol	VOL. 27, NO. 1 PAGE. 69 - 73 1995	LGO-0013
31	95A0470059	Window transmission monitoring and cleaning schemes used with the Light Detection and Ranging Thomson scattering diagnostic on the JET tokamak.	JETトカマクにおける光検出レンジング法Thomson散乱計測に用いる窓の透過率モニタリングとクリーニング法	BROWN B W, GOWERS C W, NIELSEN P, SCHUNKE B (JET Joint Undertaking, Oxon.)	Rev Sci Instrum	VOL. 66, NO. 4 PAGE. 3077 - 3078 1995	
32	95A0829650	High-speed surface cleaning by a high repetition TEA-CO2 laser. (Sponsor: Institute of Physical and Chemical Research).	高繰り返しTEA-CO2レーザによる高速表面クリーニング	常見明良, 萩原弘二, 田代英夫 (理研); 平井亮, 長坂啓吾 (東京理大)	レーザー科学	VOL. 17th PAGE. 56 1995	LGMG-0014
33	96A0200229	KrF-excimer-laser-induced native oxide removal from Si(100) surfaces studied by Auger electron spectroscopy.	KrFエキシマレーザによるSi(100)表面からの固有酸化膜除去のAuger電子分光による研究	LARCIPRETE R, BORSELLA E (ENEA, Frascati (RM), ITA); CINTI P (ENEA, Bologna, ITA)	Appl Phys A	VOL. 62, NO. 2 PAGE. 103 - 114 1996	
34	96A0296825	Kinetics of laser-induced surface melting and oxide removal in single-crystalline Ge.	単結晶ゲルマニウムにおけるレーザ誘起表面融解及び酸化膜除去速度	SOLIS J, VEGA F, AFONSO C N (CSIC, Madrid, ESP)	Appl Phys A	VOL. 62, NO. 3 PAGE. 197 - 202 1996	
35	96A0369531	Laser surface cleaning of aluminum alloy.	アルミニウム合金のレーザ表面洗浄		溶接学会全国大会講演概要	NO. 58 PAGE. 130 - 131 1996	
36	96A0462569	Excimer laser cleaning of Si(100) surfaces at 193 and 248nm studied by LEED, AES and XPS spectroscopies.	LEED, AESおよびXPSで調べた193, 248nmでのSi(100)表面のエキシマレーザクリーニング		J Electron Spectrosc Relat Phenom	VOL. 76 PAGE. 607 - 612 1995	
37	96A0646007	Laser removal of particles from magnetic head sliders.	磁気ヘッドスライダからの粒子のレーザ除去	LU Y F, SONG W D, HONG M H, TEO B S, CHONG T C, LOW T S (National Univ. Singapore, Singapore)	J Appl Phys	VOL. 80, NO. 1 PAGE. 499 - 504 1996	
38	96A0650189	In situ surface cleaning of pure and implanted tungsten photocathodes by pulsed laser irradiation.	純及び注入タンゲステンの光電陰極のパルスレーザ照射によるその場表面洗浄		Appl Surf Sci	VOL. 96/98 PAGE. 469 - 473 1996	
39	96A0650191	Cleaning of copper traces on circuit boards with excimer laser radiation.	回路ボード上の銅トレースのエキシマレーザ照射による洗浄		Appl Surf Sci	VOL. 96/98 PAGE. 479 - 483 1996	
40	96A0650192	Modelling and diagnostic of pulsed laser cleaning of oxidized metallic surfaces.	酸化された金属表面のパルスレーザ洗浄のモデリングと診断		Appl Surf Sci	VOL. 96/98 PAGE. 484 - 490 1996	
41	96A1024532	Complete removal of paint from metal surface by ablation with a TEA CO2 laser.	TEA-CO2レーザアブレーションによる金属表面からの塗料の完全な除去	常見 明良	Appl Phys A	VOL. 63, NO. 5 PAGE. 435 - 439 1996	
42	97A0117439	Pulsed laser cleaning of oxidized metallic surfaces in electrochemically controlled liquid confinement.	電気化学的制御した液体閉じ込めによる酸化金属表面のパルスレーザクリーニング		Surf Coat Technol	VOL. 88, NO. 1/3 PAGE. 157 - 161 1997	
43	97A0163168	Study on Laser Materials Processing in the 21st Century.	最近のレーザビームの応用技術 1 21世紀のレーザ研究		溶接学会誌	VOL. 65, NO. 8 PAGE. 648 - 650 1996	
44	97A0260041	Approach to a window coating problem by in situ transmission monitoring and laser blow-off cleaning developed in the JT-60U Thomson scattering system.	JT - 60U Thomson散乱システムで開発したその場透過率測定とレーザ噴き出し洗浄による窓被膜付着問題の解決法	YOSHIDA H, NAITO O, HATAE T, NAGASHIMA A (Japan Atomic Energy Res. Inst., Ibaraki, JPN)	Rev Sci Instrum	VOL. 68, NO. 1 Pt 1 PAGE. 256 - 257 1997	

表3.1.2-1 レーザによる固体表面クリーニング技術の文献調査結果 (3/4)

No.	JICST記事番号	英文タイトル	和文タイトル	著者名(所属)	雑誌名	巻号	シートNo.	備考
45	97A0271725	Laser Surface Cleaning of Aluminum Alloy.	レーザによる精密微細加工 アルミニウム合金のレーザ表面洗浄		レーザ熱加工研究会論文集	VOL. 39th PAGE. 61 - 69 1996		
46	97A0402026	The effect of screening in an erosion flare on the recoil momentum and on the measurement of the reflection coefficient.	エロージョンフレアにおけるスクリーニングが反跳運動量と反射係数測定に及ぼす効果	KUZNETSOV L I (Inst. Thermal Physics, Russian Acad. Sci., Novosibirsk, RUS)	Tech Phys	VOL. 42, NO. 3 PAGE. 304 - 308 1997		
47	97A0514516	CO ₂ laser-assisted particle removal from silicon surfaces.	シリコン表面からのCO ₂ レーザ支援による粒子除去		Can J Phys	VOL. 74, NO. Supplement 1 PAGE. S95 - S99 1996		
48	97A0624181 (Y-4)	Dependence of photoemission efficiency on the pulsed laser cleaning of Tungsten photocathodes, part 1: Experimental.	タンゲステン光電極の光電子放出効率へのパルスレーザクリーニングの影響 1 実験	TOMAS C, GIRARDEAU - MONTAUT J P, AFIF H, ROMAND M, CHARBONNIER M, DUC T M (Univ. Claude Bernard - Lyon 1, Villeurbanne, FRA)	Appl Phys A	VOL. 64, NO. 5 PAGE. 467 - 471 1997	LGM-0015	
49	97A0624182	Dependence of photoemission efficiency on the pulsed laser cleaning of Tungsten photocathodes, part 2: Theory.	タンゲステン光電極の光電子放出効率へのパルスレーザクリーニングの効果 2 理論	GIRARDEAU - MONTAUT J P, TOMAS C, GIRARDEAU - MONTAUT C (Univ. Claude Bernard - Lyon 1, Villeurbanne, FRA)	Appl Phys A	VOL. 64, NO. 5 PAGE. 473 - 476 1997		
50	97A0652876	Mechanism of and method to avoid discoloration of stainless steel surfaces in laser cleaning.	レーザ洗浄におけるステンレス鋼表面の変色を避ける機構と方法	LU Y F, SONG W D, HONG M H, CHONG T C, LOW T S (National Univ. Singapore, Singapore)	Appl Phys A	VOL. A64, NO. 6 PAGE. 573 - 578 1997		
51	97A0720920	A theoretical model for laser removal of particles from solid surfaces.	固体表面からの粒子のレーザ除去の理論モデル	LU Y F, SONG W D, ANG B W, HONG M H, CHAN D S H, LOW T S (National Univ. Singapore, Singapore)	Appl Phys A	VOL. A65, NO. 1 PAGE. 9 - 13 1997		
52	97A0729592	Surface Etching and Cleaning Processes of Solid-State Materials by Laser Ablation.	レーザアブレーションによる固体表面の除去、清浄化プロセス	佐藤俊一, 清水幸喜 (産業創造研)	真空	VOL. 40, NO. 6 PAGE. 518 - 522 1997		
53	97A0913635	Cleaning processes of encrusted marbles by Nd:YAG lasers operating in free-running and Q-switching regimes.	連続及びQスイッチ動作のNd:YAGレーザによる皮膜形成のある大理石彫刻物のクリーニング法	SIANO S, MARGHERI F, PINI R, MAZZINGHI P, SALIMBENI R (Inst. Elettronica Quantistica, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Firenze)	Appl Opt	VOL. 36, NO. 27 PAGE. 7073 - 7079 1997	LGO-0016	
54	97A0914076	Acoustic wave monitoring of cleaning and ablation during excimer laser interaction with copper surfaces.	エキシマレーザと銅表面の相互作用におけるクリーニングとアブレーションの音響波モニタリング	LU Y F, LEE Y P, HONG M H, LOW T S (National Univ. Singapore, SGP)	Appl Surf Sci	VOL. 119, NO. 1/2 PAGE. 137 - 146 1997		
55	97A0978229	Growth and decay of macroparticles: A feasible approach to clean vacuum arc plasmas?	マクロ粒子の成長と崩壊 真空アークプラズマを清浄にするための実現可能な方法	ANDERS A (Univ. California, California)	J Appl Phys	VOL. 82, NO. 8 PAGE. 3679 - 3688 1997		
56	98A0117517	Removal of submicron particles from nickel-phosphorus surfaces by pulsed laser irradiation.	パルスレーザ照射によるニッケル・リン表面からのサブミクロン粒子の除去	LU Y F, SONG W D, YE K D, HONG M H, LIU D M, CHAN D S H, LOW T S (National Univ. Singapore, Singapore, SGP)	Appl Surf Sci	VOL. 120, NO. 3/4 PAGE. 317 - 322 1997		
57	98A0259107	Laser cleaning of etch-induced polymers from via holes.	ビアホールからのエッティング誘起重合体のレーザクリーニング	LU Y F, LEE Y P (National Univ. Singapore, Singapore); ZHOU M S (Chartered Semiconductor Manufacturing Ltd., Singapore)	J Appl Phys	VOL. 83, NO. 3 PAGE. 1677 - 1684 1998	LGM-0017	
58	98A0437868 (Y-5)	Wavelength Effects in the Laser Cleaning Process.	レーザ洗浄プロセスの波長効果	LU Y - F, SONG W - D, TEE C - K, CHAN D S - H, LOW T - S (National Univ. Singapore, Singapore, Singapore)	Jpn J Appl Phys Part 1	VOL. 37, NO. 3A PAGE. 840 - 844 1998	LGO-0018	
59	98A0610927 (C-9)	Optical surface breakdown of alkali halide crystals by microsecond pulses from a wide-aperture CO ₂ laser.	大面積CO ₂ レーザからのマイクロ秒パルスによるアルカリハライド結晶の光学的表面破壊	KAZANTSEV S G ('Raduga' State Laser and Scientific-Res. Test Centre (Test Range) of the Russian Federation, Vladimir Province)	Quantum Electron	VOL. 28, NO. 4 PAGE. 322 - 325 1998	LGO-0019	
60	98A0619960	Steam Laser Cleaning of Plasma-Etch-Induced Polymers from Via Holes.	バイアホールからのプラズマエッティングポリマーの蒸気レーザ洗浄	LEE Y P, LU Y F, CHAN D S H, LOW T S (National Univ. Singapore, Singapore); ZHOU M S (Chartered Semiconductor Manufacturing Ltd.,	Jpn J Appl Phys Part 1	VOL. 37, NO. 5A PAGE. 2524 - 2529 1998		
61	98A0669473	Laser cleaning of micro-particles from a solid surface - Theory and applications.	固体表面からのミクロ粒子のレーザクリーニング 理論と応用	LU Y - F, SONG W - D, LOW T - S (National Univ. Singapore, Singapore, SGP)	Mater Chem Phys	VOL. 54, NO. 1/3 PAGE. 181 - 185 1998		
62	98A0735556	Laser cleaning of surface contaminants.	表面汚染物質のレーザ洗浄	TAM A C (IBM Almaden Res. Center, CA, USA); PARK H K (IBM Manufacturing Technol. Center, FL, USA); GRIGOROPOULOS C P (Univ. Califio	Appl Surf Sci	VOL. 127/129 PAGE. 721 - 725 1998		
63	98A0735559	Excimer laser restoration of painted artworks: procedures, mechanisms and effects.	ペイントアートワークのエキシマレーザによる修復手続き、機構及び効果	GEORGIOU S, ZAFIROPOULOS V, ANGLOS D, BALAS C, TORNARI V, FOTAKIS C (Foundation for Res. and Technol. - Hellas, Crete, GRC)	Appl Surf Sci	VOL. 127/129 PAGE. 738 - 745 1998		
64	98A0735560	Laser interaction with coated collagen and cellulose fibre composites: fundamentals of laser cleaning of ancient parchment manuscripts and paper.	被覆コラーゲン及びセルロース繊維のコンポジットとレーザとの相互作用 古代羊皮紙の原稿及び紙のレーザ洗浄の基礎	KAUTEK W, PENTZIEN S, RUDOLPH P, KRUEGER J (Federal Inst. Materials Res. and Testing, Berlin, DEU); KOENIG E (Free Univ. Berlin, B	Appl Surf Sci	VOL. 127/129 PAGE. 746 - 754 1998		
65	98A0735564	Laser removal of oxides from a copper substrate using Q - switched Nd : YAG radiation at 1064nm, 532nm and 266nm.	1064nm, 532nm及び266nmのQスイッチNd:YAGレーザ照射による銅基板上の酸化膜の除去		Appl Surf Sci	VOL. 127/129 PAGE. 773 - 780 1998		
66	98A0847794	Interaction of laser-generated surface acoustic pulses with fine particles: Surface cleaning and adhesion studies.	レーザによって発生した弾性表面波パルスと微粒子との相互作用 表面クリーニングと付着の研究		J Appl Phys	VOL. 84, NO. 5 PAGE. 2404 - 2410 1998		

表3.1.2-1 レーザーによる固体表面クリーニング技術の文献調査結果 (4/4)

No.	JICST記事番号	英文タイトル	和文タイトル	著者名(所属)	雑誌名	巻号	シートNo.	備考
67	98A0921537 (Y-6)	The laser ablation/desorption process used as a new method for cleaning treatment of low carbon steel sheets.	低炭素鋼板の洗浄処理の新たな手法としてのレーザアブレーション/脱離プロセス	LAFARGUE P E, CHAOUI N, MILLON E, MULLER J F (Lab. Spectrométrie de Masse et de Chimie Laser, Metz, FRA); DERULE H, POPADENEC A (LEDEPP - SOLLAC, Florange, FRA)	Surf Coat Technol	VOL. 106, NO. 2/3 PAGE. 268 - 276 1998	LGM-0020	
68	98A0985859	Role of Line-Beam on the Removal of Particulate Contaminations from Solid Surfaces by Pulsed Laser.	パルスレーザによる固体表面からの微粒子汚染の除去へのライン-ビームの役割		J Electron Mater	VOL. 27, NO. 10 PAGE. 1104 - 1106 1998		
69	99A0318524	Laser cleaning of silicon surface with deposition of different liquid films.	各種液体膜の堆積によるシリコン表面のレーザ清浄化	LU Y F, ZHANG Y, WAN Y H, SONG W D (National Univ. Singapore, Singapore, SGP)	Appl Surf Sci	VOL. 138/139 PAGE. 140 - 144 1999		
70	99A0471814	Commercialization Plan Laser-Based Decoating Systems. (Topical rept.)	レーザによる塗膜除去システムの商業化計画。(トピックスレポート。)	FREIWALD J, FREIWALD D A (F2 Associates, NM)	PB Rep	PAGE. 60p 1998		
71	99A0483738	Laser-assisted removal of particles on silicon wafers.	シリコンウエハ上の粒子のレーザ支援除去	VEREECKE G, ROEHR E, HEYNIS M M (IMEC, Leuven, BEL)	J Appl Phys	VOL. 85, NO. 7 PAGE. 3837 - 3843 1999		
72	99A0566285	Cleaning and surface preparation: which lasers for which applications?	表面前処理と清浄化 どの用途にどのレーザを		Assem Autom	VOL. 19, NO. 2 PAGE. 104 - 108 1999		
73	99A0605442	Excimer Laser Induced Removal of Particles from Hydrophilic Silicon Surfaces.	親水性シリコン表面からの粒子のエキシマレーザ照射による除去		J Adhes	VOL. 70, NO. 1/2 PAGE. 167 - 178 1999		
74	99A0722333	Large system and tribology. Surface cleaning by laser. Surface removal.	大型システムとトライボロジー レーザによる表面清浄化表面除去について		月刊トライボロジ	NO. 143 PAGE. 16 - 18 1999		
75	99A0814539	Development of damage-free super surface dry cleaning method by light. (Osaka Univ. laser fusion research center S).	光による無損傷超表面ドライクリーニング法の開発 (大阪大学レーザー核融合研究センターS)	瀧川靖雄, 建部聰, 寺尾朋成 (大阪電通大); 黒沢宏 (宮崎大); 松野博光, 菱沼宣是 (ウシオ電機); 井沢靖和 (大阪大 レーザー核融合研セ)	大阪大学レーザー核融合研究センター共同研究成果報告書	VOL. 1999 PAGE. 211 - 212 1999		

表 3.1.2-2 炭酸ガスレーザーによるクリーニングの文献調査結果

No.	記事番号	実施機関	レーザー	対象物	除去物質	クリーニング条件	技術・装置の特徴
C-1	84A0163393	P. N. Lebedev Physics Inst. Academy of Sciences of the USSR	CW-CO2 (型式 : LG-25)	光学ミラー(銅)	不明	パルスエネルギー : 500mJ 以下 パルス幅 : 1.5 μ s	集光には NaCl レンズ 使用。エネルギー調整にポリエチレン製フィルターを使用
C-2	90A0037500	BELOV N N	TEA-CO2 (200Hz)	NaCl, K8, スチール	高密度のごみ 粒子	不明	具体的記述無し
C-3	90A0459446	Martin Marietta Astronautics Group, NM	CW-CO2 コヒーレント社製 型式: 41	溶融石英基板	水、炭化水素	出力密度 : 300W/cm ² スキャン間隔 : 3.75mm スキャン速度 : 4mm/sec	真空中でのクリーニング。アライメント確認用に He-Ne レーザを用い、アルミニウム製反射ミラー、ZnSe 製ビームブリッカー、リップテン製スキャニングミラー(2枚)より光学系を構成。スキャニングミラーはステージコントローラと PC により制御している。
C-4	91A0236912	Univ. Iowa, Iowa	TEA-CO2 Lumonics 製 型式 : T-103	シリコン基板	Al203	水を吹き付けた場合 フルエンス : 30J/cm ² パルスエネルギー : 55mJ パルス幅 : 1 μ m	基板に水蒸気を吹き付けた場合と吹き付けない場合で除去特性を評価。ZnSe 製レンズで集光。角度 40° で基板にレーザ光照射。左記条件では水を吹き付けない場合、除去出来ない。
C-5	92A0045986	Fukui Univ., Fukui, JPN; Nishiyama International Patent Office, Nagoya, JPN	TEA-CO2	ガラス(厚さ 5mm)	黒色インク	フルエンス : 0.5J/cm ² パルスエネルギー : 3J パルス幅 : 100 ns	ガラスを対象に 3 種類のレーザ (TEA-CO2, YAG, イキシマ) を用いて除去特性比較。エネルギー強度はレンズにて調整。CO2 ではガラス表面のみ除去可能(裏面不可)。
C-6	94A0117446	Univ. Iowa, Iowa	TEA-CO2	シリコン基板	ポリスチレン及び Al203 (1μm)	特に無し	クリーニング時に水を吸着。クリーニング条件の把握が目的ではなく、衝撃波解析がメイン。ビーム伝送には金メッシュ銅ミラー、集光には ZnSe 製レンズ、アライメントには He-Ne レーザを使用。
C-7	94A0732128	理研 ; 東京理大	TEA-CO2 型式 : KDM-2	鉄板 他	塗装(56μm) 他	フルエンス : 4.5J/pulse·cm ² ステージ掃引速度 : 10mm/s 繰り返し数 : 40Hz	ビーム形状は線状、シリンドリカルレンズで集光。自動並進ステージ上にサンプル設置。照射部近傍に吸引ポンプ設置。
C-8	94A0781119	National Univ. Singapore, Crescent, SGP; RIKEN, The Inst. Physical and Chemical Research, Saitama	CW-CO2 TEA-CO2	ガラス	指紋	効果的除去できず	CW, TEA 共、効果的な指紋の除去は出来ず。
C-9	98A0610927	'Raduga' State Laser and Scientific - Res. Test Centre (Test Range) of the Russian Federation, Vladimir Province	TEA-CO2	アルカリハライド結晶	-	フルエンス : 1~30J/cm ² パルス幅 : 0.8~2.5 μ s	具体的記述無し

接法による付着物除去であるが、クリーニング対象物の表面に水、アルコール類等の液体を吸着させ、これにレーザー光を照射して液体を爆発的に蒸発させることにより、付着物を除去する事例も紹介されている。

炭酸ガスレーザーを用いたクリーニング技術に関する情報を整理すると次の通りである。

① 装置構成

装置の基本的な構成はどの文献でもレーザー本体、伝送光学系、クリーニング対象物設置ステージからなるものであり、試験の内容により、付着物を回収するための吸引装置、付着物の除去率等を計測する計測系を設置している。以下に各機器の情報をまとめる。

② レーザー発振器に関する情報

前述のように、CW型とパルス型のレーザーがあるが、パルス型は殆どがTEAレーザーである。また、CW型で何らかの方法（詳細は不明）によりレーザー光をショッピングし、パルス的に照射するのに用いているものもある。

文献ではクリーニング時のレーザー出力、繰り返し数等の仕様は掲載されているものの、型式、製造メーカー、スペックまで記載されているものは殆どなかった。調査した文献で、TEAレーザーにルモニクス社のものを用いているものがあったが⁽¹⁾、数十Hz、数十mJ程度の小出力のものである。理化学研究所で開発されたTEAレーザー（型式：KDM-2）については、今回調査した文献の引用文献⁽²⁾に仕様が記載されており、それによれば1kHz、500mJ/pulseオーダーの発振が可能で、炭酸ガスレーザークリーニングに使われたレーザーとしては、最も高性能のものと考えられる。

③ 光学系に関する情報

炭酸ガスレーザーの伝送光学系は全てミラー伝送で、光学系は固定している。炭酸ガスレーザーの波長は10.6μmであり、光ファイバー（素材は石英、ガラス、プラスチック）は素材の光透過特性が可視光領域（0.4μm～0.76μm）から数μmのところまであるため透過しない。ファイバーの変わりに中空導波管を用いることも考えられるが、今回調査した文献には、それを用いた例は無かった。

光学部品の仕様は基本的に、反射ミラー、ビームスプリッター、レンズである。反射ミラーにはアルミニウム、銅、金コート銅ミラーが用いられており、ビームスプリッターはZnSe、レンズにはNaCl、ZnSe、KBrが用いられていた。最も使用例が多いのは、Cu製の反射ミラーとZnSe製のレンズ及びビームスプリッターの組み合わせである。

ビーム径は殆どの文献で、レンズの位置を制御することにより調整していた。ビーム形状は殆どが円形であったが、線状にしているものも紹介されている。また、

2枚のモリブデンミラーを用い、ビームをスキャニングして照射面積を拡大している例も紹介されていたが⁽³⁾、ここでは CW の炭酸ガスレーザーを用いており、特に集光させていない。

④ 付着物の除去に関する情報

付着物を特に回収していないものが多かったが、回収している場合はアシストガスの吹き付け、排気装置による吸引及びフィルターでの回収が基本的な付着物除去装置構成である。フィルターには H E P A を用いている例が多い。

⑤ クリーニング対象物設置ステージに関する情報

前述のように光学系が固定されるためか、クリーニング対象物を X-Y ステージに設置しているものか、あるいは定点照射による研究例が多かった。どれも実験室規模のものであり、ストロークは数 10cm 程度である。

(2) YAG レーザーによるクリーニング

レーザークリーニングに最も良く用いられているのが、Q スイッチパルス発振の Nd : YAG レーザーである。本レーザーを用いる場合の対象物、照射条件等を整理したものを表 3.1.2-3 に示す。

① 装置構成

炭酸ガスレーザーの時と同様、装置の基本的な構成はレーザー本体、伝送光学系、クリーニング対象物設置ステージからなるものである。これに、対象物を系外から隔離するためのチェンバー、付着物を回収するための吸引装置、付着物の除去率等を計測する計測系が研究の目的に応じ設置されている。以下に各機器の情報をまとめる。

② レーザー発振器に関する情報

YAG レーザーの場合、炭酸ガスレーザーの時とは対照的に殆どの文献で発振器を製造したメーカ名と型式の記載がある。調査した範囲では、スペクトラ・フィジックス社、ルモニクス社、スペクトロン社、カンテル(現、コンテニュアム)社、B.M. インダストリー社の YAG レーザーがあがった。YAG レーザーの基本波は 1.06 μ m であり、クリーニングの大半はこの波長を用いて行われているが、中には 0.266、0.532 μ m といった高調波を用いた例も紹介されている⁽⁴⁾。本文献によれば、より短波長側のレーザー光を用いた方が、付着物のクリーニング閾値エネルギーを下げることができ、これは表面におけるレーザー光の反射率と吸収係数が波長に依存し、表面における温度分布が波長により異なるためとされている。ただし、実際には、クリーニング対象物毎に、母材への熱的影響、波長毎に得られるピークエネルギー、付着物のアブレーション閾値、反射率、吸収係数等を総合的に考慮し、付着物の除去に適した波長や照射条件を選定する必要があると考えられる。

表 3.1.2-3 YAG レーザーによるクリーニングの文献調査結果

No.	記事番号	実施機関	レーザー	対象物	除去物質	クリーニング条件	技術・装置の特徴
Y-1	92A0230686	Sandia National Lab., New Mexico	Q-Switch Nd:YAG スペクトラライジング製 型式: DCR-2A	SUS 304L	薄いクロム酸化物皮膜(5nm)	波長: 1064 nm ビーグ強度: 120MW/cm ² パルスエネルギー: 100mJ パルス幅: 10 ns	チャンバー内に対象物を設置。ヘリウムガス雰囲気中(大気圧)で対象物にレーザ照射。微粒子をノズルで吸引し、フィルターで濾過した後、ガスをチャンバーに戻している。
Y-2	92A0523665	National Inst. Fusion Science, Nagoya, JPN	Nd:YAG ルモニクス製 型式: YH-900 100Hz (Max.)	ピューポート(ガラス)	茶色のフィルム (詳細不明)	波長: 1064 nm フルエンス: 2J/cm ² パルスエネルギー: 400mJ パルス幅: 30 ns	真空アレーカせずに窓を清掃するのが目的。レーザのスペック以外、特に具体的な記述無し。照射エネルギーは焦点からの距離を変えることにより調整。クリーニング速度は 6cm ² /s が得られている。
Y-3	95A0457609	Univ. Technol., Leicestershire, GBR; National Museums and Galleries on Merseyside, Liverpool,	Nd:YAG Spectron 製 型式: SL282) 10 Hz	石灰岩彫刻	表面の複合酸化物 (大気中にさらされてきたもの)	波長: 1064 nm フルエンス: 0.4J/cm ² パルスエネルギー: 300 mJ パルス幅: 6 ns	凸レンズを用い直径 6mm のビームを集光、レンズと対象物との距離を調整し照射している。表面に水を付着させクリーニングを行うと、より低エネルギーで除去可能。
Y-4	97A0624181	Univ. Claude Bernard - Lyon 1, Villeurbanne, FRA	Nd:YAG Quantel 製 型式不明 10Hz	光電陰極 (タンクステン)	有機物	波長: 213 nm フルエンス: 2.5mJ/cm ² パルス幅: 16 ps	真空中でのクリーニング。YAG の高調波を用いていること、汚染物除去の度合いを知るために、光電信号を計測し、その減少から付着物が除去できたか否か確認している。
Y-5	98A0437868	National Univ. Singapore, Singapore	Nd:YAG B. M. Industry 製 型式: 5022	石英基板	Al 粉末 Cu 粉末	波長 1064nm の場合 フルエンス: 80mJ/cm ² (Cu) フルエンス: 40mJ/cm ² (Al) 波長 532 nm の場合 フルエンス: 40mJ/cm ² (Cu) フルエンス: 30mJ/cm ² (Al) 波長 266 nm の場合 フルエンス: 20mJ/cm ² (Cu) フルエンス: 10mJ/cm ² (Al)	パルス幅 7ns のレーザ光を 10Hz で 500ショット照射することを前提に、波長毎にクリーニング効率のフルエンス依存性を評価。基板は X-Yステージ 上に設置。
Y-6	98A0921537	Lab. Spectrométrie de Masse et de Chimie Laser, Metz, FRA; LEDEPP - SOLLAC, Florange, FRA	Nd:YAG Quantel 製 型式: 581	鋼材	カーボン 50ug/cm ²	波長: 266 nm ビーグ強度: 40MW/cm ² ショット数: 5~10shot パルス幅: 6ns	X-Yステージにサンプルを設置し、ステージを動かしながらビームが重ならないように走査。入射角度は垂直。

③ 光学系に関する情報

基本的な構成は炭酸ガスレーザーの時と変わらず反射ミラーあるいはプリズム、ビームスプリッター、レンズである。QスイッチパルスYAGレーザーでファイバーを用いた例としては、次章のレーザー除染技術に関する文献で単一のファイバーを用いた伝送試験に関する記述⁽⁵⁾があり、一方、市販のレーザープラスト装置（カンテル社製、型式：Laserblast1000、出力：335mJ/Pulse、繰り返し数：120Hz、パルス幅：10ns）では、4本の光ファイバーを用いてレーザー光を伝送させている⁽⁶⁾。

光学部品の仕様に関する記載は殆ど見当たらなかったが、通常のYAGに用いられる光学部品で特に問題ないと考えられる。また、反射ミラーの変わりにプリズムを使用しているケースもある。

ビーム径も炭酸ガスレーザーと同様、レンズの位置を制御することにより調整している。ビーム形状は殆どが円形であった。

④ 付着物の除去に関する情報

付着物を特に回収していないものが多かったが、回収している場合はアシストガスの吹き付け、排気装置による吸引及びフィルターでの回収が基本的な付着物除去装置構成であった。また、クリーニング対象物をチェンバー内に設置し、チェンバーにHe等の不活性ガスを充填、その充填したガスを循環させ、フィルターにて除去した付着物を回収する方法も紹介されている⁽⁷⁾。

⑤ クリーニング対象物設置ステージに関する情報

クリーニング対象物をX-Yステージに設置するか、対象物は固定でレーザー光スキャニングさせるかのどちらかの方法を用いており、それは、クリーニング対象となる物の形状により決められている。X-Yステージを用いた時のストロークは数10cm程度のものであった。

3.1.3 特許によるレーザークリーニングの技術調査

レーザー加工技術に関しては、特許マップが特許庁により作成されている⁽⁸⁾。本マップでは、レーザー加工技術を、加工技術（除去、接合、表面処理加工）と加工装置技術（構造、制御、加工部の雰囲気制御）に分類して整理されている。レーザークリーニングをこのマップに当てはめると、加工技術のうちの除去加工技術と表面処理技術が関連し、これに加工装置技術が加わった形で整理されると考えられるが、調査対象は、3.1.1項で示したようにPATOLISを用いレーザークリーニングあるいはレーザー洗浄で検索し選定されたものののみを対象とした。特許調査結果を表3.1.3-1に示す。

表3.1.3-1 レーザーによる固体表面クリーニング技術の特許調査結果 (1/1)

No.	公開番号	発明件名	発明会社名	発明者	対象物	備考
1	特許2744893 (特開平8-48018)	湿式リトグラフ印刷用のレーザー結像可能な印刷部材	プレステク INC	トマス イー ルイス、ケネス アール カシディー	リトグラフ用	
2	特許2820534 (特表平8-509652)	照射による表面汚染物質の除去方法及び装置	コールドロン リミテッド パートナーシップ	エンゲルスパークオードリーシー	基板	
3	特開平1-102503	光学用基板の洗浄方法	キャノン(株)、大阪大学長	吉田 国雄、藤田 尚徳、大谷 実	光学基板	
4	特開平3-504687	レーザーを用いた素材表面の洗浄方法	アジヤンス レジヨナル ドゥ D E V テクノロジク	ボキヨン ジヤンービエール、ブレソン フィリップ、ベルジエール ウベル	限定無し	
5	特開平4-263213	光学部品、とりわけコンタクトレンズを表面洗浄および/または滅菌する方法	ノバルティス	ペーター ハーダマン、ペーター ヘフラー、ペーター ハーブレヒツマイアー	光学部品 (コンタクトレンズ)	
6	特開平6-71467	レーザを用いたプリント配線板の洗浄方法および洗浄装置	富士通	照屋 嘉弘	プリント基板	
7	特許2615362 (特開平7-225300)	レーザによる表面付着物の除去方法及び装置	理化学研究所	田代 英夫、常見 明良	限定無し	
8	特開平8-27584	金属材料の洗浄方法および表面処理方法	日立造船	北側 彰一、中島 宏幸、井上 鉄也、鈴木 基光、小村 明夫、石辺 二朗	金属	
9	特開平8-197265	レーザ洗浄装置およびこれを用いた基板洗浄装置	大日本スクリーン製造	長良 修治、赤尾 喜代志、田中 康博、田井 洋一	基板	
10	特開平10-189639	プリント配線板の洗浄方法	イビデン	塙田 輝代隆、加藤 泰孝	プリント基板	

3.2 放電法による固体表面クリーニング技術の調査

3.2.1 調査方法

放電法を用いた固体表面クリーニングは、除去形態により次のように分類される。

- ① 放電によりプラズマを生成させ、スパッタリングにより表面上の不純物を除去する方法
- ② 付着物を陰極点とし、真空アーク放電により陰極点を蒸発させる方法
- ③ その他

放電法もレーザーの時と同様、例えば、放電法蒸発による薄膜生成過程といった、目的がクリーニング以外のものまで調査対象とすると対象資料は膨大となるため、クリーニングを目的としているもののみを調査対象とした。

調査では JICST、NUCLEN、PATOLIS を用い、放電およびクリーニング、あるいは放電および洗浄をキーワードとして、本キーワードを含む資料を選定し、後述する放射性物質の除染に関するものを除きリストに纏めた。また、実験に関する記述のあるものを中心に選定し、理論的記述のみとされる文献は除外した。リストに記載した資料の中から、装置設計に有益な情報が得られるものについて、記事に示される試験設備の構成、クリーニング条件、試験結果等を中心にデータシートに纏めた。データシートは巻末に添付する。

3.2.2 文献による放電法クリーニング技術の調査

文献調査結果を表 3.2.2-1 に示す。調査した文献の殆どが上記カテゴリーの①あるいは③に関するものであり、②に関するものは 1 件しかなかった。①は E C R 放電洗浄、グロー放電洗浄が多く、これは核融合装置等の真空チャンバー表面の洗浄に使われている。次章以下で検討する内容から重要なものは②の真空アーク放電による陰極点の蒸発の方であり、その論文⁽⁹⁾に記載された情報を整理する。

(1) 装置構成

装置の基本的な構成は真空容器、真空排気装置、電源、アノード、試料設置ステージからなるものであり、これに各種の計測をするための計測制御系を設置している。以下に各機器の情報をまとめた。

(2) 真空容器

装置の大きさに関する情報は無かったが、除去対象となる試験片が 100×200mm 程度のものであること、アノードから対象物までの距離が 100mm 程度であることから、小型のチャンバーであると考えられる。到達真空度としては 10Pa 程度で放電させクリーニングしている。この真空度は真空放電が起こりやすい圧力であることから、その条件で実施しているものと考えられる。排気装置に関する記述もな

表3.2.2-1 放電法によるクリーニング技術の文献調査結果 (1/3)

No.	JICST記事番号	英文タイトル	和文タイトル	著者名(所属)	雑誌名	巻号	シートNo.	備考
1	81A0145248	Preliminary discharge-cleaning and arcing studies in Mini-Torus.	ミニ・トーラスにおける放電清浄とアーキングの予備的研究	CAO J, CHEN J, DUAN W, FANG K, YAN D, YANG S, ZHU Y (Southwestern Inst. Physics, People's Republic of China)	J Nucl Mater	VOL. 93/94, NO. Pt A PAGE. 343 - 348 1980		
2	81A0273821	-	核融合装置の表面処理について	坂本雄一(理研)	Ionics	VOL. 7, NO. 6 PAGE. 26 - 30 1981		
3	83A0079073	Light impurity removal from stainless steel by atomic hydrogen.	原子状水素によるステンレス鋼からの軽不純物の除去	TSCHERSICH K G, Von SEGGERN J (Kernforschungsanlage Juelich, Federal Republic of Germany)	J Nucl Mater	VOL. 111/112 PAGE. 489 - 492 1982		
4	83A0289818	Model study on ECR discharge cleaning of a sector magnet vacuum chamber for the RIKEN SSC	理研SSC用セクターマグネット真空容器のECR(電子サイクロotron共鳴)放電洗浄に関するモデル実験		Sci Pap Inst Phys Chem Res	VOL. 77, NO. 1 PAGE. 78 - 86 1983		
5	84A0324926	-	JIPPT-IIのECR放電洗浄実験	石部行雄, 石井成行, 関崎清比古, 大山等, 坂本雄一, 矢野勝喜(理研); 野田信明, 東井和夫, たな橋秀ご(名古屋大プラズマ研)	真空	VOL. 27, NO. 5 PAGE. 376 - 379 1984		
6	85A0183214	Surface composition changes of Inconel 625 during RG and ECR discharge cleaning of TEXTOR.	300°CにおけるTEXTORのRGおよびECR放電洗浄の過程でのインコネル625の表面組成変化	CLAUSING R E, HEATHERLY L (Oak Ridge National Lab., TN); TSCHERSICH K G, FLEISCHHAUER H P, WAELBROECK F, WINTER J, WIENHOLD P (Kernforschungsanlage Juelich, Federal Republic of Germany); SAKAMOTO Y, ISHII S (Inst. Physical and Chemical Research, Wako-shi)	J Nucl Mater	VOL. 123, NO. 1/3 PAGE. 1145 - 1150 1984		
7	85A0269300	Discharge cleaning and surface conditioning.	放電洗浄とコンディショニング	坂本雄一(理研)	核融合研究	VOL. 53, NO. 1 PAGE. 7 - 23 1985		
8	86A0301238	Active gas discharge cleaning for superconducting lead-plated resonators.	超電導鉛被覆共振器に対する活性ガス放電洗浄		Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A	VOL. 244, NO. 1/2 PAGE. 312 - 317 1986		
9	86A0349354	Bake-out and discharge cleaning.	核融合装置における真空技術Ⅳ 加熱脱ガスと放電洗浄	坂本雄一(理研)	核融合研究	VOL. 55, NO. 3 PAGE. 257 - 271 1986		
10	86A0371312	Simulation experiment on removal of carbon film from observation window of carbonized fusion machine.	炭素コーティングした核融合装置の観測窓からの炭素薄膜の除去についてのシミュレーション実験	SAKAMOTO Y, ISHIBE Y, OKAZAKI K, OYAMA H (Inst. Physical and Chemical Research, Wako-shi)	Jpn J Appl Phys Part 1	VOL. 25, NO. 5 PAGE. 764 - 765 1986		
11	86A0421025	Generation and removal of light impurities in TPE-2 plasma.	TPE-2プラズマにおける軽元素不純物の発生と除去	木山浩子, 早瀬喜代司, 弘田公, 木山学, 前嶋良紀, 佐藤康宏, 矢作栄一, 鬼頭正史, 竹田昭平(電総研エネルギー部)	電子技術総合研究所い報	VOL. 50, NO. 5/6 PAGE. 505 - 519 1986		
12	87A0064829	Comparison of glow discharge cleaning and ion-impact desorption of stainless steel.	ステンレス鋼のグロー放電洗浄とイオン衝撃脱離の比較	RUZIC D N, GERDING A, LOXTON C M (Univ. Illinois, IL, USA)	J Vac Sci Technol A	VOL. 4, NO. 3 Pt. 2 PAGE. 1232 - 1235 1986		
13	87A0226074	Study of metal deposition on low Z samples during ECR and glow discharge cleaning in TEXTOR.	TEXTORでのECR及びグロー放電洗浄時における低Z試料への金属付着の研究	Study of metal deposition on low Z samples during ECR and glow discharge cleaning in TEXTOR.	J Nucl Mater	VOL. 145/147 PAGE. 647 - 650 1987		
14	87A0270340	Glow-discharge cleaning in oxygen of carbon-contaminated optical elements.	炭素汚染光学部品の酸素によるグロー放電洗浄		Phys Scr	VOL. 35, NO. 3 PAGE. 313 - 317 1987		
15	88A0018238	Resuscitation of carbon-contaminated mirrors and gratings by oxygen-discharge cleaning. I. Efficiency recovery in the range 4-40 eV.	炭素汚染されたミラーおよび回折格子の酸素放電洗浄による再生 1 4-40 eVでの効率的回復		KEK Prepr	NO. 87-19 PAGE. 26p 1987		
16	88A0023215	Characteristics of cleaning and carbonizing plasmas in TEXTOR.	TEXTORにおける放電洗浄とカーボニゼーションプラズマの特性	AMEMIYA H, ISHII S, OYAMA H, SAKAMOTO Y (Inst. Physical and Chemical Research, Wako-shi, JPN); MINAGAWA H, SATAKE T, HASHIBA M, YAMASHINA T (Hokkaido Univ., Sapporo, JPN); NODA N (Nagoya Univ., Nagoya, JPN)	Jpn J Appl Phys Part 1	VOL. 26, NO. 9 PAGE. 1534 - 1543 1987		
17	88A0133835	Vacuum system for the RIKEN ring cyclotron.	理研リングサイクロtronの真空系		11th Int Conf Cyclotr Their Appl 1986	PAGE. 392 - 395 1987		
18	88A0446079	In situ reactive cleaning of X-ray optics by glow discharge.	グロー放電によるX線光学素子のその場反応性洗浄	JOHNSON E D, GARRETT R F (Brookhaven National Lab., NY, USA)	Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A	VOL. 266, NO. 1/3 PAGE. 381 - 385 1988		
19	88A0505032	Reduction of outgassing from stainless-steel surfaces by glow discharge cleaning.	グロー放電净化法によるステンレス鋼表面からのガス放出の低減		J Vac Sci Technol A	VOL. 6, NO. 4 PAGE. 2421 - 2425 1988		
20	88A0602125	Glow discharge techniques for conditioning high-vacuum systems.	高真空システムの調整のためのグロー放電技術	高真空システムの調整のためのグロー放電技術	J Vac Sci Technol A	VOL. 6, NO. 3 Pt. 1 PAGE. 1276 - 1287 1988		

表3.2.2-1 放電法によるクリーニング技術の文献調査結果 (2/3)

No.	JICST記事番号	英文タイトル	和文タイトル	著者名(所属)	雑誌名	巻号	シートNo.	備考
21	89A0070704	Surface cleaning by vacuuming.	真空による表面清浄化	西村基彦(帝商機械販売)	Surface Control & 洗浄設計	NO. 40 PAGE. 2 - 9 1988		
22	90A0008433	Lecture course on vacuum technology. For ultra-high vacuum experiment. 19. Charged particles and vacuum. (1).	真空技術講座 超高真空実験のために (19) 荷電粒子と真空 [1]	赤石憲也(核融合科研)	真空	VOL. 32, NO. 9 PAGE. 712 - 715 1989		
23	90A0254971	Charged particles, plasma and vacuum. A collection of drafts, Regular meeting of The Vacuum Society of Japan in June, 1986. (Sponsor: The Vacuum Society of Japan)	『荷電粒子・プラズマと真空』予稿集 日本真空協会昭和61年6月研究例会 (日本真空協会S)	宮原昭(名古屋大プラズマ研); 坂本雄一, 野田信明, 赤石憲也(理研); 山田礼司(原研)	荷電粒子・プラズマと真空 日本真空協会昭和61年6月研究例会 予稿集	PAGE. 29p 1986		
24	90A0295210	A comparison of hydrogen vs. helium glow discharge effects on fusion device first-wall conditioning.	核融合装置第一壁コンディショニングに対する水素対ヘリウムグロー放電効果の比較	DYLIA H F (Princeton Univ., NJ)	US DOE Rep	PPPL-2642 PAGE. 17p 1989		
25	91A0273840	Discharge cleaning and gas trapping by use of a glow-mode plasma source.	グローモードプラズマ源を利用する放電洗浄とガス捕獲	KAWABE T, KAMINAGA M, FUZAWA M, NAKAZATO K, HAYASHI T, SATO S (Univ. Tsukuba, Ibaraki, JPN); ITOH A (Hitachi Ltd., Ibaraki, JPN)	Vacuum	VOL. 41, NO. 7/9 PAGE. 1977 - 1979 1990		
26	91A0734622	Discharge cleaning on TFTR after boronization.	ほう素化後のTFTRの放電洗浄	MUELLER D, DYLIA H F, LAMARCHE P H, BELL M G, BLANCHARD W, BUSH C E, GENTILE C, HAWRYLUK R J, WONG K L (Princeton Univ., N.J.)	US DOE Rep	PPPL-2758 PAGE. 12p 1991		
27	92A0084424	Glow Discharge Cleaning of Vacuum Switch Tubes.	真空スイッチ管のグロー放電洗浄		IEEE Trans Plasma Sci	VOL. 19, NO. 5 PAGE. 740 - 742 1991		
28	93A0912337	Dual-function remote plasma etching/cleaning system applied to selective etching of SiO ₂ and removal of polymeric residues.	二重機能遠隔プラズマエッティング/洗浄系を用いたSiO ₂ の選択的エッティングと高分子残留物の除去	YASUDA T, LUCOVSKY G (North Carolina State Univ., North Carolina)	J Vac Sci Technol A	VOL. 11, NO. 5 PAGE. 2496 - 2507 1993		
29	93A0912339	Oxygen discharge cleaning method for aluminum storage ring vacuum chambers.	アルミニウム製のストレージリング真空チャンバの酸素放電洗浄法	SAITO H, KANAZAWA K, MOMOSE T, ISHIMARU H (National Lab. High Energy Physics, Ibaraki, JPN); OTA N (Graduate Univ. Advanced Studies, Ibaraki, JPN); URAMOTO J (Nagoya Univ., Aichi, JPN)	J Vac Sci Technol A	VOL. 11, NO. 5 PAGE. 2518 - 2524 1993		
30	94A0369010	Cleaning of metal parts in oxygen radio frequency plasma: Process study.	酸素高周波プラズマ中での金属部分の洗浄 プロセス研究	KORZEC D, RAPP J, THEIRICH D, ENGEDEMANN J (Univ. Wuppertal, Wuppertal, DEU)	J Vac Sci Technol A	VOL. 12, NO. 2 PAGE. 369 - 378 1994		
31	94A0525730	Creeping discharge phenomena in a vacuum and change of surface state of alumina.	真空中の沿面放電現象とアルミナの表面状態変化		電気学会開閉保護研究会資料	VOL. SP - 94, NO. 23 - 28 PAGE. 27 - 36 1994		
32	94A0909808	Plasma surface cleaning in a microwave plasma source.	マイクロ波プラズマ源中のプラズマ表面洗浄	TSAI C C, NELSON W D, HASELTON H H, SCHECHTER D E (Oak Ridge National Lab.); THOMPSON L M, CAMPBELL V B, GLOVER A L, GOOGIN J M (Oak Ridge Y-12 Plant)	US DOE Rep	ORNL-TM-12495 PAGE. 44p 1994		
33	95A0321403	Pre-Treatment Effects of Substrate by Transferred Arc in Low Pressure Plasma Spraying, II. Effect of Surface Treatment for Metals by Transferred Arc.	減圧プラズマ溶射における移行アークを用いた基材の前処理効果 第2報 移行アークによる金属材料の表面処理効果		材料	VOL. 44, NO. 498 PAGE. 303 - 308 1995		
34	95A0435822	-	真空技術におけるホロー陰極プラズマ源の応用	LEONHARDT G, WILBERG R (Firma VTD Vakuumtechnik Dresden GmbH)	Vak Forsch Prax	VOL. 7, NO. 1 PAGE. 17 - 27 1995		
35	96A0227346	The combined plasma-cleansing facility.	プラズマを組入れた洗浄装置		Prod Finish	VOL. 49, NO. 1 PAGE. 6 - 8 1995-1996		
36	96A0665895	Arc plasma jet cleaning of the silicon surface before CoSi ₂ /Si contact formation	CoSi ₂ /Siの接触形成前のシリコン表面のアークプラズマジェット洗浄	PAVLOV G YA (Centre for Analysis of Substances, Moscow, SUN); PUGACHEVICH V P, GROMOV D G, KUDRYASHOVA E B (Moscow Inst. Electronic Engineering, Moscow, SUN)	Appl Phys A	VOL. 63, NO. 1 PAGE. 9 - 12 1996		
37	96A0854341	Plasma-Sprayed Beryllium for ITER.	ITER用プラズマ溶射ベリリウム	CASTRO R G, STANEK P W, ELLIOTT K E (Los Alamos National Lab., N.M., USA); YOUNCHISON D L, WATSON R D, WALSH D S (Sandia National Lab., N.M., USA)	Proc IEEE/NPSS Symp Fusion Eng	VOL. 16th, NO. Vol 1 PAGE. 381 - 384 1995		
38	97A0701405	On the use of biased movable B4C-limiter for pumping O ₂ and H ₂ O during discharge cleaning.	放電洗浄過程でO ₂ とH ₂ O排気のためのバイアスした可動B4Cリミタの使用	GLAZUNOV G P, VOLKOV E D, KOTENKO V G, SHTAN A V, MIRONOV YU K, NASAROV N I (Kharkov Inst. Physics and Technol., Kharkov, UKR); SAGARA A, OHYABU N, MOTOJIMA O (National Inst. Fusion Sci., Nagoya, JPN)	J Nucl Mater	VOL. 241/243 PAGE. 1052 - 1054 1997		
39	97A0931424	ECR-discharge cleaning for TRIAM-1M.	TRIAM-1MのECR放電洗浄	JOTAKI E, ITOH S (Kyushu Univ., Fukuoka-ken, JPN)	Fusion Eng Des	VOL. 36, NO. 4 PAGE. 447 - 450 1997		
40	97A0978229	Growth and decay of macroparticles: A feasible approach to clean vacuum arc plasmas?	マクロ粒子の成長と崩壊 真空アークプラズマを清浄にするための実現可能な方法	ANDERS A (Univ. California, California)	J Appl Phys	VOL. 82, NO. 8 PAGE. 3679 - 3688 1997		

表3.2.2-1 放電法によるクリーニング技術の文献調査結果 (3/3)

No.	JICST記事番号	英文タイトル	和文タイトル	著者名(所属)	雑誌名	巻号	シートNo.	備考
41	98A0617659	Microwave plasma cleaning of ion implant ceramic insulators.	イオン注入セラミック絶縁体のマイクロ波プラズマ洗浄	LAW V J (Cambridge Fluid Systems, Cambridge, GBR); TAIT D (Motorola Ltd., Glasgow, GBR)	Vacuum	VOL. 49, NO. 4 PAGE. 273 - 278 1998		
42	99A0085006	Development of Surface Cleaning and Roughening System by Arc.	アークによる表面クリーニングおよび粗面化装置の開発		日本溶射協会全国講演大会講演論文集	VOL. 68th PAGE. 25 - 26 1998		
43	99A0140132	Damages of hot-pressed boron carbide during solid target boronization in Uragan-3M torsatron.	Uragan-3Mトルサトロンにおける固体ターゲットほう素化の際のホットプレス炭化ほう素の損傷	GLAZUNOV G P, VOLKOV E D, PAVLICHENKO O S, VOITSENYA V S, NAZAROV N I, KOTENKO V G (KIPT, Kharkov, UKR); TANAKA S (Univ. Tokyo, Tokyo, JPN); MOTOJIMA O (NIFS, Nagoya, JPN)	J Nucl Mater	VOL. 258/263, NO. Pt.A PAGE. 682 - 685 1998		
44	99A0195620	Recent Development of Thermal Plasma Materials Processing. Removal of Oxide Layer on Metal Surface by Vacuum Arc.	熱プラズマ材料プロセッシングの最近の発展 真空アークによる金属表面酸化膜の除去	武田 鉱一、竹内 順(新日本製鉄)	日本金属学会誌	VOL. 63, NO. 1 PAGE. 41 - 47 1999	AGM-0001	
45	99A0281670	Plasma-Assisted Deposition of a Three-Layer Structure by Vacuum and Gas Arcs.	真空及び気体アークを用いた三層構造のプラズマ支援蒸着	BORISOV D P, GONCHARENKO I M, KOVAL N N, SCHANIN P M (High Current Electronics Inst. Russian Acad. Sci., Tomsk, RUS)	IEEE Trans Plasma Sci	VOL. 26, NO. 6 PAGE. 1680 - 1684 1998		
46	99A0461076	Surface cleaning by plasma-enhanced desorption of contaminants (PEDC).	汚染物質のプラズマ増強脱離(PEDC)による表面洗浄	KRUEGER P, KNES R (Plasma Finish, Schwedt/Oder, DEU); FRIEDRICH J (Federal Inst. Materials Res. and Testing (BAM), Berlin, DEU)	Surf Coat Technol	VOL. 112, NO. 1/3 PAGE. 240 - 244 1999		
47	99A0675709	Erosion and deposition during the sputter cleaning of substrates prior to the cathodic arc evaporation of transition metal nitride coatings.	遷移金属窒化物被膜の陰極アーク蒸発に先立つ基板スパッタ洗浄中の浸食と堆積	MACKENZIE M, CRAVEN A J (Univ. Glasgow, Glasgow, GBR); HATTO P (Multi-Arc(UK) Ltd., Durham, GBR)	Thin Solid Films	VOL. 349, NO. 1/2 PAGE. 176 - 185 1999		

かったが、上記のようなものを設置する真空チャンバーから予想するとロータリーポンプあるいはメカニカルブースターポンプ程度のものと考えられる。ただし、蒸発時には 50Pa 程度まで圧力が上昇する等、圧力変動が見られることから、その影響を考慮してポンプを選定するとともに、文献には書かれていないが、圧力調整のためのコントロールバルブを設置する必要があると考えられる。

(3) アーク電源

電圧は無負荷で 200V、電流は 50A～400A で調整できるものを定電流モードで使用しており、必要に応じパルスで動作可能としている。パルス時の周波数については不明である。

(4) アノード

直径 200mm の水冷型の銅円盤を用いており、アノードー試料設置ステージ間距離を 100mm で固定している。

(5) 試料設置ステージ

具体的な記述は無いが、内容と概念図から固定式の設置ステージで、試料を陰極として巣かせるように電気的に絶縁されたものが使用されているものと考えられる。

3.2.3 特許による放電法クリーニングの技術調査

PATOLIS を用い放電クリーニングあるいは放電洗浄をキーワードとして検索したが、数 100 件にのぼる特許が選定され対象が絞り切れなくなったため、見方を変え、真空アーククリーニングあるいは真空アーク洗浄で検索し、当該技術に該当するものを選択した。特許調査結果を表 3.2.3-1 に示す。

本表によれば、特許提出元の大部分が新日本製鉄(株)によるものである。先の文献調査により選定した論文の著者が同社に所属していることを考えると、真空アーククリーニングは同社の独自性が強いものと予想される。

表3.2.3-1 放電法によるクリーニング技術の特許調査結果 (1/2)

No.	公開番号	発明件名	発明会社名	発明者	対象物	備考
1	特許2614705 (特開平8-172780)	衝撃電圧・電流発生装置	ニチコン	植山 達哉	限定無し	
2	特開平04-974	放電洗浄装置	—	岡上 公彦	限定無し	洗浄液使用
3	特開平05-21156	真空アーク点火法	新日本製鐵	竹内 順	金属	
4	特開平05-78733	真空アークデスケール方法	新日本製鐵	竹内 順	金属	
5	特開平05-82257	真空アーク装置及び真空アーク点火方法	新日本製鐵	竹内 順	金属	
6	特開平05-86451	減圧プラズマ溶射方法および装置	新日本製鐵	井藤 三千寿、竹内 順	金属	
7	特開平05-98412	非溶射材料の前処理方法	新日本製鐵	井藤 三千寿	金属	
8	特開平05-98428	真空アーク処理装置	新日本製鐵	竹内 順	金属	
9	特開平05-104245	真空アークデスケール装置及び真空アークデスケール方法	新日本製鐵	竹内 順	金属	
10	特開平05-112810	真空アーク放電による表面処理方法	新日本製鐵	堀江 正信	金属	
11	特開平05-112813	真空アークデスケーリング装置	新日本製鐵	堀江 正信	金属	
12	特開平05-112815	真空アーク放電による表面疵処理方法	新日本製鐵	堀江 正信	金属	
13	特開平05-112838	金属合金材料の表面改質方法	新日本製鐵	武田 鮎一、竹内 順	金属	
14	特開平05-115969	真空アーク処理装置	新日本製鐵	武田 鮎一、竹内 順	金属	
15	特開平05-115970	真空アーク処理装置	新日本製鐵	竹内 順	金属	
16	特開平05-121386	基板表面のプラズマ洗浄法とウエハの フォトレジスト・プラズマ洗浄方法と基 板表面の洗浄装置	マットソン・テクノロジー・ インコーポレイテッド	プラット・エス・マットソン、他	基板	
17	特開平05-131270	真空アーク処理装置	新日本製鐵	竹内 順	金属	
18	特開平05-161967	金属表面の不純物除去方法	新日本製鐵	堀江 正信	金属	
19	特開平05-269517	ステンレス鋼等の表面疵除去装置列	新日本製鐵	卯月 邦夫、中田 利雄、小森 哲志、 及川 雄介	金属	
20	特開平06-220616	真空アーク処理装置及び真空アーク処理 方法	新日本製鐵	竹内 順	金属	
21	特開平06-220664	真空アークデスケール装置及び真空アー クデスケール方法	新日本製鐵	竹内 順	金属	
22	特開平06-220665	真空アーク処理装置	新日本製鐵	竹内 順	金属	
23	特開平06-220666	真空アークデスケーリング装置	新日本製鐵	竹内 順	金属	
24	特開平06-220667	真空アークデスケール装置及び真空アー クデスケール方法	新日本製鐵	竹内 順	金属	
25	特開平06-220668	プラズマ洗浄装置	大同特殊鋼	中村 雅知、大倉 未代史、松井 宏司	限定無し	
26	特開平06-220669	プラズマ洗浄装置	大同特殊鋼	中村 雅知、大倉 未代史、松井 宏司	限定無し	
27	特開平06-256981	真空アークデスケーリング電極装置	新日本製鐵	武田 鮎一、竹内 順	金属	
28	特開平06-256982	交流電源真空アークデスケール方法	新日本製鐵	武田 鮎一、竹内 順	金属	
29	特開平06-264276	真空アークデスケール装置	新日本製鐵	竹内 順、堀江 正信	金属	
30	特開平06-280069	真空アークデスケーリング装置	新日本製鐵、日鉄プラント設 計	松岡 譲、北 美次	金属	

表3.2.3-1 放電法によるクリーニング技術の特許調査結果 (2/2)

No.	公開番号	発明件名	発明会社名	発明者	対象物	備考
31	特開平07-068312	真空アークデスケーリングにおける電力制御方法	新日本製鉄	松岡 淳	金属	
32	特開平07-75819	金属の表面処理装置	新日本製鉄	堀江 正信、武田 鮎一、竹内 順、松岡 淳	金属	
33	特開平07-106052	放電洗浄装置	日立製作所	中嶋 雄二	限定無し	
34	特開平07-227585	高速真空アークデスケーリング方法およびその装置	新日本製鉄	竹内 順、竹内 順、近藤 次郎	金属	
35	特開平07-227615	真空アークデスケール方法	新日本製鉄	近藤 次郎、竹内 順、武田 鮎一	金属	
36	特開平07-227616	グリッドを有する真空アークデスケール装置	新日本製鉄	近藤 次郎、竹内 順、武田 鮎一	金属	
37	特開平07-228928	金属の連続熱処理・表面処理装置列	新日本製鉄	堀江 正信	金属	
38	特開平07-228990	プラズマ洗浄装置	大同特殊鋼	中村 雅知、松尾 英明	限定無し	
39	特開平07-236908	真空アークデスケール方法	新日本製鉄	近藤 次郎、竹内 順、武田 鮎一、松岡 淳	金属	
40	特開平07-236909	磁場による真空アークデスケーリングの制御方法及びその装置	新日本製鉄	武田 鮎一、竹内 順、近藤 次郎、堀江 正信	金属	
41	特開平07-236910	真空アークデスケール装置	新日本製鉄	近藤 次郎、竹内 順、武田 鮎一、堀江 正信	金属	
42	特開平07-243031	金属の表面処理装置の真空アーク電極	新日本製鉄	近藤 次郎、武田 鮎一	金属	
43	特開平07-243071	洗浄装置	大同特殊鋼	大倉 未代史、松井 宏司	金属	
44	特開平07-252681	洗浄装置	大同特殊鋼	大倉 未代史、松井 宏司	金属	
45	特開平07-290139	真空アークによるデスケール方法	新日本製鉄	岡崎 栄三、松岡 淳	金属	
46	特開平07-290140	真空アークデスケールの終了判定方法	新日本製鉄	岡崎 栄三、松岡 淳	金属	
47	特開平08-215711	ステンレス鋼薄板の製造方法	新日本製鉄	竹内 順、武田 鮎一	金属	
48	特開平08-232088	真空アークデスケーリング用電極クリーニング方法及び装置	新日本製鉄	武田 鮎一、竹内 順、鈴木 常司	金属	
49	特開平08-239783	連續帯状鋼板の真空アークデスケーリング方法	新日本製鉄	松岡 淳、竹内 順	金属	
50	特開平08-243630	真空アークデスケール方法	新日本製鉄	近藤 次郎、武田 鮎一、竹内 順	金属	
51	特開平09-248617	真空アークデスケーリング局所処理装置	新日本製鉄	武田 鮎一、鈴木 常司、菊池 利治、田村 元紀	金属	
52	特開平09-248618	真空アークデスケーリング装置	新日本製鉄	武田 鮎一、鈴木 常司	金属	
53	特開平09-251900	真空アークデスケーリング用電極	新日本製鉄	武田 鮎一	金属	
54	特開平09-276924	真空アークデスケーリング法におけるマスキング方法	新日本製鉄	武田 鮎一	金属	
55	特開平10-251882	真空アークによる表面クリーニング方法及びその装置	新日本製鉄	武田 鮎一、久保 祐治	金属	
56	特開平11-77141	真空アークによる金属表面局所処理装置	新日本製鉄	武田 鮎一、菊池 利治	金属	
57	特開平11-80983	真空アークによる金属表面処理装置	新日本製鉄	武田 鮎一、竹内 順	金属	

4. 除染処理への検討例、適用例等の調査と評価

4.1 レーザー光による除染技術の調査

4.1.1 調査方法

レーザー光により固体表面に付着した放射性物質を除去する技術に関し、公開文献および特許に基づき技術調査を実施した。調査では J I C S T、P a t l i s 等を用い、レーザークリーニング（レーザー洗浄）をキーワードとして一次調査を実施した後、これらの中から、除染に関する記述があるものを選定した。また、ここで選定した文献等の中で、装置概念設計および経済性評価に有用な資料については、各文献毎にデータシートを取り纏めた。データシートは巻末に添付する。

4.1.2 文献によるレーザー除染技術の調査

文献調査結果を表 4.1.2-1 に示す。この中には、実際には放射性物質を用いていないが、模擬物質を使用して除去試験を行ったものも含まれる。実際に放射性物質を用いて研究した例としては、国内では J N C 殿、原研、海外ではエームス研究所、ウェスティングハウス・ハンフォート研究所、アイオワ大学（以上、米）等である。

レーザークリーニングを除染に適用した際の留意点・課題としては、付着物の再付着や母材への溶け込み防止、照射条件適正化、除去物質回収条件の適正化、除染ヘッド部構造の最適化、大型除染対象物への適用性検討、コスト低減が挙げられている。

4.1.3 特許によるレーザー除染技術の調査

特許調査結果を表 4.1.3-1 に示す。レーザー除染に関する特許としては、1982 年に公開され、米国ウェスティングハウス社にて特許権を有するもの（特許：1559860 号）がある。本特許によれば、レーザー光を走査し、吸引装置とフィルターを用いることにより、放射性物質を含む材料表面の酸化物層が除去できるとしている。具体的な条件としては、レーザーに Nd : YAG レーザーを用い、パルス幅 30 ないし 40ns、波長 1.06μm、パルスエネルギー : 0.3J/pulse、フルエンス : 8~9J/cm² で、材料表面上を反射ミラーを用い走査するようにしている。また、1992 年に公開され、住友重機械工業にて特許権を有するもの（特許：2773785 号）では、光ファイバーを用いてレーザー光を導光し、そのレーザー光を細長い線形に集光し、細長い方向と交差する方向に除染物表面を走査することにより、除去効率を向上させることができるとしている。さらに、アトックス社より自走式配管内壁除染装置が実用新案として登録されている（実登 3022303 号）。

上記以外は公開特許公報段階のものが殆どで、除染方式、ヘッド構造、付着物の回収方法に関するものが提出されている。除染方式では、クラッドの高速ガス流に

表4.1.2-1 レーザによる除染技術の文献調査結果 (1/1)

No.	JICST記事番号	英文タイトル	和文タイトル	著者名(所属)	雑誌名	巻号	シートNo.	備考
1	87A0216614	Developing techniques for removing activated concrete.	放射化コンクリートの除去技術の開発	DAVIES I LL, FLEISCHER C C, PATON A A (Taylor Woodrow Construction Ltd., Middlesex, GBR)	Nucl Eng Int	VOL. 32, NO. 392 PAGE. 45 - 47 1987	LNC-0001	
2	92A0814429	Laser decontamination: A new strategy for facility decommissioning.	レーザ除染 施設使用廃止措置のための新戦略	PANG H M, LIPERT R J, HAMRICK Y M, BAYRAKAL S, GAUL K, DAVIS B, BALDWIN D P, EDELSON M C (Ames Lab., IA)	US DOE Rep	PAGE. 7p 1992	LNM-0002	
3	94A0417837	Lasers for the Radioactive Decontamination of Concrete.	コンクリートの放射能除染用レーザ	CANNON N S, FLESHER D J (Westinghouse Hanford Co., Washington)	US DOE Rep	PAGE. 12p 1993	—	
4	94A0456367	Lasers and High-Energy Light as a Decontamination Tool for Nuclear Applications.	原子力用の除染手段としてのレーザ及び高エネルギー光	FLESHER D J (Westinghouse Hanford Co., Washington)	US DOE Rep	PAGE. 7p 1993	—	
5	95A0340541	Surface Processing By High Power Excimer Laser.	高出力エキシマレーザによる表面加工	STEHLE M (SOPRA, Bois - Colombes, FRA)	日本原子力研究所JAERI-Conf	PAGE. 223 - 228 1995	LNM-0005	
6	95A0914125	Lasers and high-energy light as a decontamination tool for nuclear applications.	原子炉用汚染除去用具としてのレーザ及び高エネルギー光	FLESHER D J (Westinghouse Hanford Co., Washington)	Elev Temp Coat Sci Technol 1	PAGE. 379 - 383 1995	LNC-0006	
7	95A0914126	Lasers for the radioactive decontamination of concrete.	コンクリートの放射能除染のためのレーザ	CANNON N S, FLESHER D J (Westinghouse Hanford Co., WA)	Elev Temp Coat Sci Technol 1	PAGE. 385 - 391 1995	LNC-0007	
8	96A0175856	Preliminary Design and Estimate of Capital and Operating Costs for a Production Scale Application of Laser Decontamination Technology.	レーザ除染技術を生産規模で適用するための予備設計及び投資・運転コストの推定	PANG H - M, EDELSON M C (Iowa State Univ., IA)	US DOE Rep	PAGE. 33p 1994	LNM-0008	
9	96A0286393	New Applications of Lasers to Architecture and Civil Engineering. Laser Surface Cleaning of Solid Materials.	建設分野における新しいレーザー応用 構造材料のレーザクリーニング	常見明良, 田代英夫 (理研)	レーザー研究	VOL. 24, NO. 2 PAGE. 154 - 164 1996	LNM-0009	
10	96A0286396	New Applications of Lasers to Architecture and Civil Engineering. Study on Methods for Decontaminating Concrete Surface by Laser Treatment.	建設分野における新しいレーザー応用 レーザーによるコンクリート表層はく離の研究	鎌田博文, 立岩正明 (大成建設); 三森武男 (原研 東海研); 杉本賀司 (大成建設 技研)	レーザー研究	VOL. 24, NO. 2 PAGE. 182 - 190 1996	LNC-0010	
11	96A0448775	Testing and Evaluation of Light Ablation Decontamination.	光アブレーション放射能除染の試験及び評価	DEMMLER R L, FERGUSON R L (Lockheed Idaho Technol. Co., Idaho)	US DOE Rep	PAGE. 46p 1994	LNM-0011	
12	96A0693806	A Laser-Based Solution to Industrial Decontamination Problems.	工業用除染問題のレーザによる解決	EDELSON M C, PANG H - M (Iowa State Univ., IA)	US DOE Rep	PAGE. 10p 1995	LNM-0012	
13	97A0028107	Decontamination technologies evaluations.	除染技術評価	TRIPP J (Lockheed - Martin Idaho Technol. Co., ID)	US DOE Rep	PAGE. 7p 1996	LNM-0013	
14	97A0174702	Application of Laser Energy to Nuclear Fuel Cycle.	最近話題のレーザー応用—重厚長大産業への応用を中心に レーザーエネルギーの原子力分野への応用	矢戸弓雄, 岸本洋一郎, 河田東海夫, 中野啓昌 (動燃)	Optronics	NO. 181 PAGE. 104-110 1997	LNM-0014	
15	98A0071841	Laser-Based Characterization and Decontamination of Contaminated Facilities.	汚染施設のレーザに基づく特性評価と除染	LEONG K H, HUNTER B V, GRACE J E, PELLIN M J (Argonne National Lab., Illinois, USA); LEIDICH H F, KUGLER T R (Lumonics Corp.)	US DOE Rep	PAGE. 12p 1996	LNM-0015	
16	98A0343943	Simulation of Ablation Process on Laser Cleaning.	レーザー除染におけるアブレーション過程のシミュレーション	古河裕之, 今崎一夫, 藤田雅之, 山中千代衛 (レーザー技術総合研); ANISIMOV S I, 西原功修 (大阪大レーザー核融合研セ); 船橋達, 二村嘉明, 坂岸光二 (アトックス)	レーザー研究	VOL. 26, NO. 2 PAGE. 172 - 175 1998	LNM-0016	
17	98A0557954	Radioactive waste treatment and disposal. Technological development of waste body of nuclear fuel cycle waste.	放射性廃棄物処理・処分 核燃料サイクル廃棄物の廃棄体化の技術開発	動力炉・核燃料開発事業団(動燃)	動力炉・核燃料開発事業団公開資料	NO. PNC TN1000 98 - 001 PAGE. カク. ガイ. 1/3(1) - カク. セツ. 14/14 (Total 20p) 1998	LNM-0017	
18	98A0619646	Removal technique of radiocontaminant with laser beam.	レーザー光による放射性汚染物の除去技術について	島崎善広 (動燃)	Energy Humanit	NO. 45 PAGE. 19 - 23 1998	LNM-0018	
19	98A0865192	—	放射性汚染物質を瞬時に取り去るレーザクリーニング技術	鈴木美寿 (動燃)	原子力EYE	VOL. 44, NO. 10 PAGE. 50 - 53 1998	LNM-0019	
20	99A0141383	Research and Development Activities for Nuclear Facilities Decommissioning. Developing Technology of IHF Co., Ltd.	原子力施設廃止措置技術の開発状況 石川島播磨重工業の開発技術	小林博栄, 伊藤俊行, 福井寿樹, 三尾圭吾, 大村豊, 小嶋敏雄, 渡部和夫 (石川島播磨重工業)	デコミッショニング技報	NO. 19 PAGE. 51 - 61 1998	LNM-0020	
21	99A0608362	Laser surface cleaning of contaminated materials.	環境問題の解決に貢献する光技術 レーザーによる除染	今崎一夫 (レーザー技術総合研)	Optronics	NO. 210 PAGE. 135 - 138 1999	LNM-0021	
22	99A0823149	Theoretical research on removal of surface contaminant by laser. (Laser Technology Laboratory S).	レーザーによる表面汚染物の除去に関する理論的研究 (レーザー技術総合研究所S)	古河裕之, ANISIMOV S I, 西原功修, 今崎一夫, 藤田雅之, 石垣壮洋, 本田茂男, 二村嘉明, 山中千代衛 (レーザー技術総合研)	ILT年報	VOL. 1997 PAGE. 61, 63 - 66 1997	LNM-0022	
23	99A0831950	Laser ablation of contaminants from concrete & metal surfaces.	コンクリートと金属の表面の汚染物レーザアブレーション	CASE R P, FREIWALD D A, PEEBLES H C (F2 Associates Inc., NM)	Proc Int Conf Decommissioning Decontam Nucl Hazard Waste Manag Vol 1 1998	PAGE. 124 - 130 1998	LNM-0023	
24	99A1002758	Development of laser decontamination technique. (3). Experiments of laser beam transmission.	レーザ除染技術の開発 (3) レーザ伝送系の特性試験	福井康太, 小川竜一郎, 石島昇, 谷本健一 (J N C 大洗工学セ)	核燃料サイクル開発機構公開資料	PAGE. 119p 1999	LNM-0024	

表4.1.3-1 レーザーによる除染技術の特許調査結果 (1/1)

No.	公開番号	発明件名	発明会社名	発明者	対象物	備考
1	特許1559860 (特開昭58-187898)	レーザによる除染法	ウエスチングハウス エレクトリック CORP	サデウス アンソニイ ウオジシック 、ハーバート エドワード フエリイ 、ウイルアム ヘンリイ カスナー	金属	
2	特許2773785 (特開平4-168400)	レーザによる除染法と除染装置	住友重機械工業(株)	伊藤 一芳	限定無し	
3	実登3022303	レーザ光による自走式配管内壁除染装置	アトックス(株)	原 光男	金属	
4	特開昭63-241399	レーザ除染装置	東芝(株)	頓宮 雄一	限定無し	
5	特開平4-109200	レーザ除染装置	中部電力(株)、東芝(株)	山崎 広美、杉山 貞夫、木村 盛一 郎、頓宮 雄一	限定無し	
6	特開平8-110396	レーザーによる除染方法	石川島播磨重工業(株)	上原 実、金沢 純孝、山口 滋、柴田 章司	限定無し	
7	特開平9-222498	レーザー除染法	動力炉・核燃料開発事業団、 産業構造研究所(財)	福井 康太、根本 正信、清水 幸喜、 佐藤 俊一	金属	
8	特開平9-281296	レーザ除染装置	石川島播磨重工業(株)	道下 静夫、赤川 勝彦	限定無し	
9	特開平10-288670	非接触型表面汚染検査方法、表面処理方 法および装置	東芝(株)	日塔 光一、深沢 拓司、田村 俊幸、 山口 敏志、松井 政雄	限定無し	
10	特開平11-101894	除染方法および除染剤	石川島播磨重工業(株)	伊藤 俊行	金属	
11	特開平11-183693	除染方法およびその装置	東芝(株)、東芝エンジニア リング(株)	福島 正、日塔 光一、深沢 拓司、岡 本 裕	金属	
12	特開平11-258350	非接触型表面汚染検出装置および方法	東芝(株)	深沢 拓司、日塔 光一	限定無し	
13	特表平8-505704	放射性物質除染	ブリティッシュ ニュークリ ア フュエルス PLC	リン リー、スティーン ウィリアム マックスウェル、モーダン ピーター ジュリアン	金属	

による飛散と吸収塔による回収、除去物質の放射線測定に係わる検査装置（以上、東芝）、2本のレーザー光を用いることによる除去と表面改質（石川島播磨重工）等であり、ヘッド構造では、レーザーヘッド部の形状と走査方法（JNC殿）である。付着物の回収方法では、特許の実施例に水中捕集や、バッファータンクを設けタンク内で水を噴霧し除去する方法が見られる。

4.2 放電法による固体表面除染技術の評価

4.2.1 調査方法

放電法により固体表面に付着した放射性物質を除去する技術に関し、公開文献および特許に基づき技術調査を実施した。調査では J I C S T、P a t l i s 等を用い、放電クリーニング（放電洗浄）をキーワードとして一次調査を実施した後、これらの中から、除染に関する記述があるものを選定した。

4.2.2 文献による放電法除染技術、特許の調査

文献調査結果を表 4.2.2-1 に、特許調査結果を表 4.2.2-2 示す。一般技術調査の項で示した、付着物を陰極点とし真空アーク放電により陰極点を蒸発させる方法については、除染に適用したもののが見当たらなかった。類似の方法として、ロシアにおけるコンクリートのパルス放電による除染の文献があったが、将来に向けての提言と議論のみで具体的な記載は無い。他の放電法では、弊社プラズマアーク（トーチ）と炭酸ガスを用いた表面酸化物の除去に関するものがあり、これは特許化されている（特許：1449391 号）。

表4.2.2-1 放電法による除染技術の文献調査結果 (1/1)

No.	JICST記事番号	英文タイトル	和文タイトル	著者名(所属)	雑誌名	巻号	シートNo.	備考
1	81A0382736	Application of a plasma arc in decontamination of radioactive metallic wastes.	汚染金属廃棄物の除染へのプラズマアークの適用	KURIYAMA O, KOYAMA T (Hitachi)	Trans Am Nucl Soc	VOL. 38 PAGE. 195 - 196 1981	ANM-0001	
2	83A0265326	Decontamination of radioactive metal surfaces by plasmaarc gouging.	プラズマアークにより放射性金属表面を削る放射能除染	KURIYAMA O, KOYAMA T, KIKUCHI M (Hitachi Ltd., Hitachi)	Nucl Technol	VOL. 61, NO. 1 PAGE. 93 - 99 1983	ANM-0002	
3	90A0125479	Criticality analysis support for the Three Mile Island Unit 2 fuel removal operations.	Three Mile Island-2原子炉の核燃料除去作業支援臨界解析	PARKS C V, WESTFALL R M, BROADHEAD B L (Martin Marietta Energy Systems, Inc., Tennessee)	Nucl Technol	VOL. 87, NO. 3 PAGE. 660 - 678 1989		
4	92A0370589	Decontamination of Stainless Steel	ステンレス鋼の除染	ANTONIAZZI A B, SHMAYDA W T (Ontario Hydro Research Division, Ontario, CAN); SURETTE R A (Atomic Energy of Canada Ltd., Ontario, CAN)	Fusion Technol	VOL. 21, NO. 2 Pt 2 PAGE. 867 - 871 1992	ANM-0003	
5	94A0707977	Plasma driven decontamination of tritiated stainless steel.	トリチウム化ステンレス鋼のプラズマ駆動除染	ANTONIAZZI A B, SHMAYDA W T (Ontario Hydro Research Division, Ontario, CAN)	Fusion Technol 1992 Vol 2	PAGE. 1680 - 1684 1993		
6	96A0825642	Radioactive Scrap Metal Decontamination Technology Assessment Report.	放射性スクラップ金属の除染技術評価報告	BUCKENTIN J M, DAMKROGER B K, SCHLIEGER M E (Sandia National Lab., New Mexico)	US DOE Rep	PAGE. 44p 1996		
7	96A0847246	Cleaning of Tritiated Laboratory Tools Using a Plasma Decontamination Facility	プラズマ汚染除去施設を用いた三重水素化実験室ツールの洗浄	ANTONIAZZI A B, SHMAYDA W T, BAKSH D P (Ontario Hydro Technol., Ontario, CAN)	Proc IEEE/NPSS Symp Fusion Eng	VOL. 16th, ND, Vol 2 PAGE. 1026 - 1030 1995	ANM-0004	
8	97A0303762	Removal of tritium from TFTR.	TFTRからのトリチウム除去	MUELLER D, BLANCHARD W, COLLINS J, HOSEA J, KAMPERSCHROER J, NAGY A, OWENS D K, RAFTOPoulos S, SKINNER C H (Princeton Plasma Physics Lab., NJ)	Fusion Technol	VOL. 30, NO. 3 Pt 2A PAGE. 840 - 844 1996	AN0-0005	
9	99A0831953	Concrete decontamination and other D&D applications of electric pulse power technology	電気パルス放電技術のコンクリート除染とその他のD&Dへの応用	GOLDFARB V, GANNON R, SWALLON D W (Textron Systems, MA); SHNEERSON G (St. Petersburg Technical Univ., St. Petersburg, RUS)	Proc Int Conf Decommissioning Decontam Nucl Hazard Waste Manag Vol 1 1998	PAGE. 140 - 147 1998	ANC-0006	
10	99A0884984	Research and Development of Decontamination and Decommission for Tritiated Wastes in Fusion Reactor.	核融合炉におけるトリチウム廃棄物の処理・処分	奥野健二(静岡大)	KURRI KR	NO. 30 PAGE. 218 - 228 1999		

表4.2.2-2 放電法による除染技術の特許調査結果 (1/1)

No.	公開番号	発明件名	発明会社名	発明者	対象物	備考
1	特許1449391 (特開昭58-14099)	放射性汚染金属部材の浄化処理方法及び装置	(株) 日立製作所	栗山 修、小山 隆男	金属	
2	特許1483861 (特開昭58-115998)	放射性汚染金属廃棄物の除染方法	(株) 日立製作所	小山 隆男、遊佐 英夫、栗山 修	金属	
3	特開昭57-94700	放射性汚染金属廃棄物の除染方法	(株) 日立製作所	栗山 修	金属	
4	特開昭58-19480	放射線汚染金属用除染用プラズマトーチ	(株) 日立製作所	栗山 修	金属	
5	特開昭58-168998	放射性汚染金属廃棄物の除染方法	(株) 日立製作所	栗山 修	金属	
6	特開昭60-60599	放射性物質で汚染された金属廃棄物の除染方法	(株) 東芝	宮地 延吉	金属	

5. プロセス・装置概念設計

5.1 装置全体に係わる前提条件

除染装置の概念設計を実施するにあたり、下記を前提とする。

- (1) 除染対象機器は集合型遠心機のチャンバー胴体部とし、その形状は直径 1.7 m、高さ 3 m、板厚 16mm の円筒とする。
- (2) 上記機器は、フランジ、配管等の部品は、除染時において既に取外された状態であることとする。
- (3) 除染対象機器には酸化ウラン等が付着しており、その付着量は $2\text{Bq}/\text{cm}^2$ とする。これより想定される付着物の厚さは、 $8.43 \times 10^{-2} (\mu \text{m})$ である。
- (4) 上記付着物は胴体部内面に均一に付着しているものとし、外面には付着物が無いものとする。
- (5) 処理台数は 1 台／日を基準とする。

5.2 炭酸ガスレーザーによる除染処理プロセス・装置概念設計

5.2.1 前提条件

炭酸ガスレーザーによる除染装置を検討するに当たり、前提条件を表 5.2.1-1 に示す。

表 5.2.1-1 炭酸ガスレーザーによる除染 前提条件

項目	条件
レーザーの種類	TEA-CO ₂ レーザー
フルエンス	10.0 J/cm ²
波長	10.6 μm シングルモード
繰り返し	1 kHz
1shot 当たり	1J/shot
必要エネルギー	
ビーム径	Φ 3.6mm (円形)
処理速度	0.02 μm/shot (深さ)
照射角度	90 度 (目安。傾いて也可)
汚染物回収方法	Ar ガス吹付 (10Nl/min)、吸引 フィルターによる除去 (プレ+HEPA) 及び静電捕集

5.2.2 処理プロセスの検討

(1) 処理の基本フロー

炭酸ガスレーザーを用いて除染する場合の基本フローと、各ステップに対応する要素機器を図 5.2.2-1 に示す。本図に示すフローに従って除染作業を行う場合、処理の各プロセスにおいて特に検討が必要な項目としては下記が挙げられる。

- ① 除染対象物の設置方法
- ② レーザー光の導光方法
- ③ レーザー光の走査方法
- ④ 汚染物の捕集方法
- ⑤ 汚染レベル確認方法
- ⑥ 汚染物の処理方法
- ⑦ その他

これら各項目について検討した結果を以下に示す。なお、これらの中で①と③は関係が深いため併せて示す。

(2) 除染対象物の設置方法の検討

5.1 節に示した機器をレーザー光を用いて除染する場合、① 除染対象物の設置方向（縦置きか、横置きか）、② 駆動方法（対象物を移動させるか、除染ヘッドを移動させるか）、③ 除染対象物に対する除染ヘッドのアクセス方向（対象物に対し上下方向からアクセスするか、横方向からアクセスするか）、④ 走査方向（除染対象物の円周方向から走査するか、幅方向に走査するか）について検討し、最終的にどのように搬出入し、設置するかを決める必要がある。これら①～④の観点から考えられる方式と特徴をまとめたものを表 5.2.2-1 に示す。

まず、対象物の設置方向について、縦に設置した場合、除染対象物が高さ 3 m の円筒であることから、除染装置の高さは、除染ヘッド部（レーザー光先端）までのストロークを考慮すると、6 m 以上になると考えられる。この場合、装置メンテナンス時に高所作業になるとともに、専用の足場を設ける等の対策が必要となる。一方、横に設置した場合は基本的に手が届く高さに装置は設置されるため、安全性の面では後者の方が望ましいと考えられる。

次に、駆動方法について、TEA-CO₂ レーザーの場合、光伝送は反射ミラーを用いることになるため、除染ヘッド部を大幅に移動させる方式の場合、光伝播距離が変わり照射条件が変わるために、安定した除染が行えなくなる可能性がある。TEA-CO₂ レーザーによる除染装置の場合、除染ヘッド部は固定し、除染対象物を移動させる方式が望ましい。

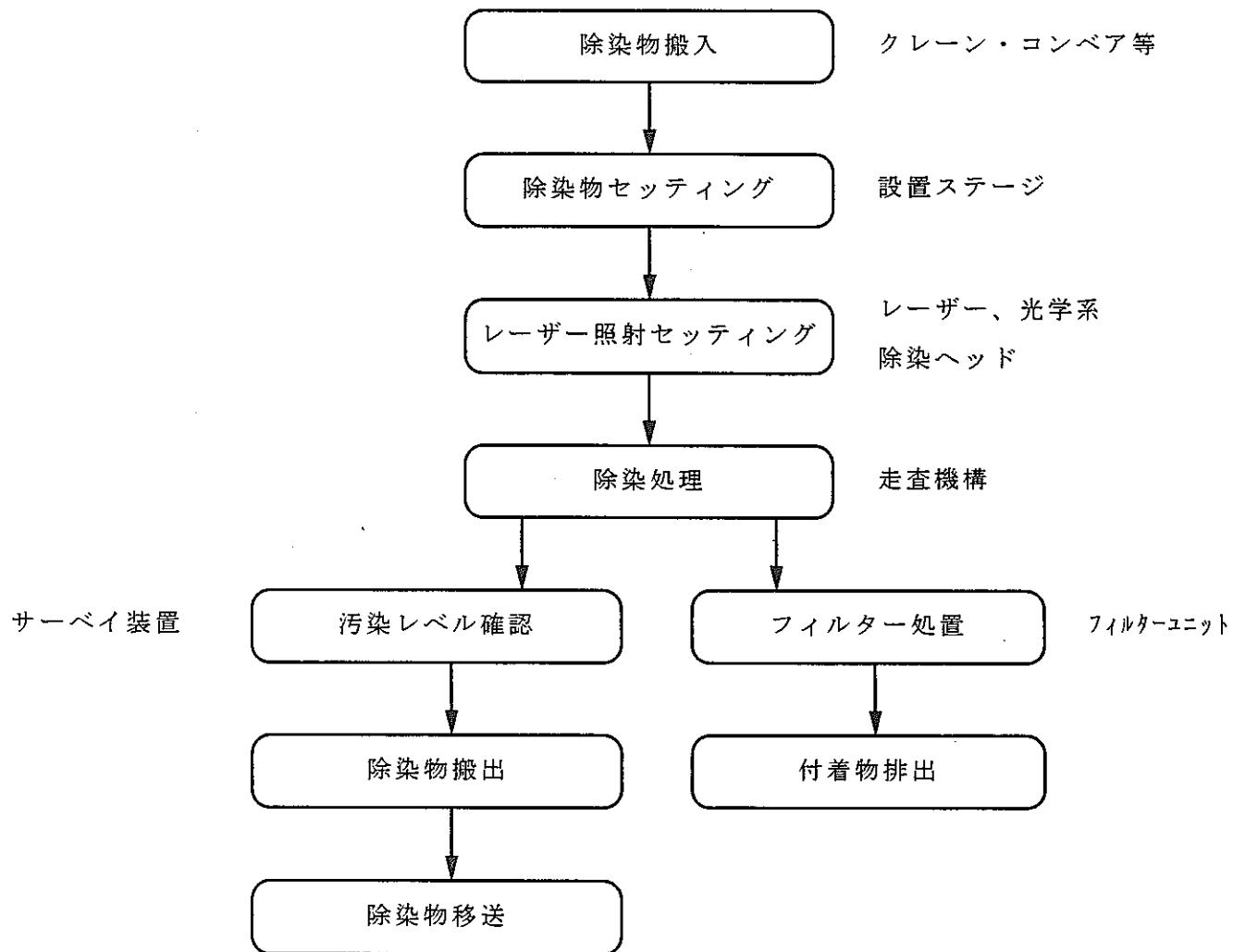
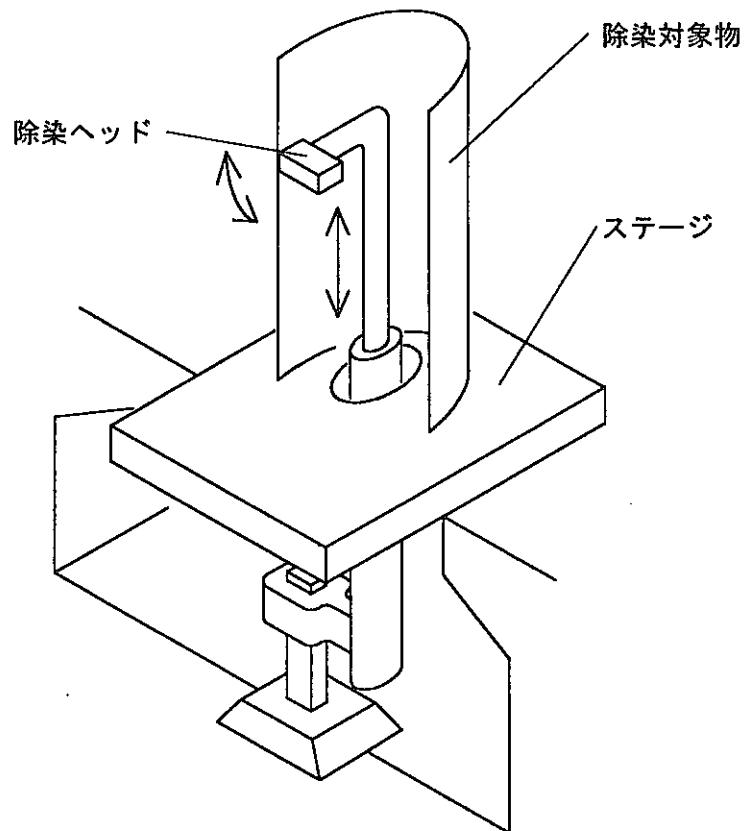
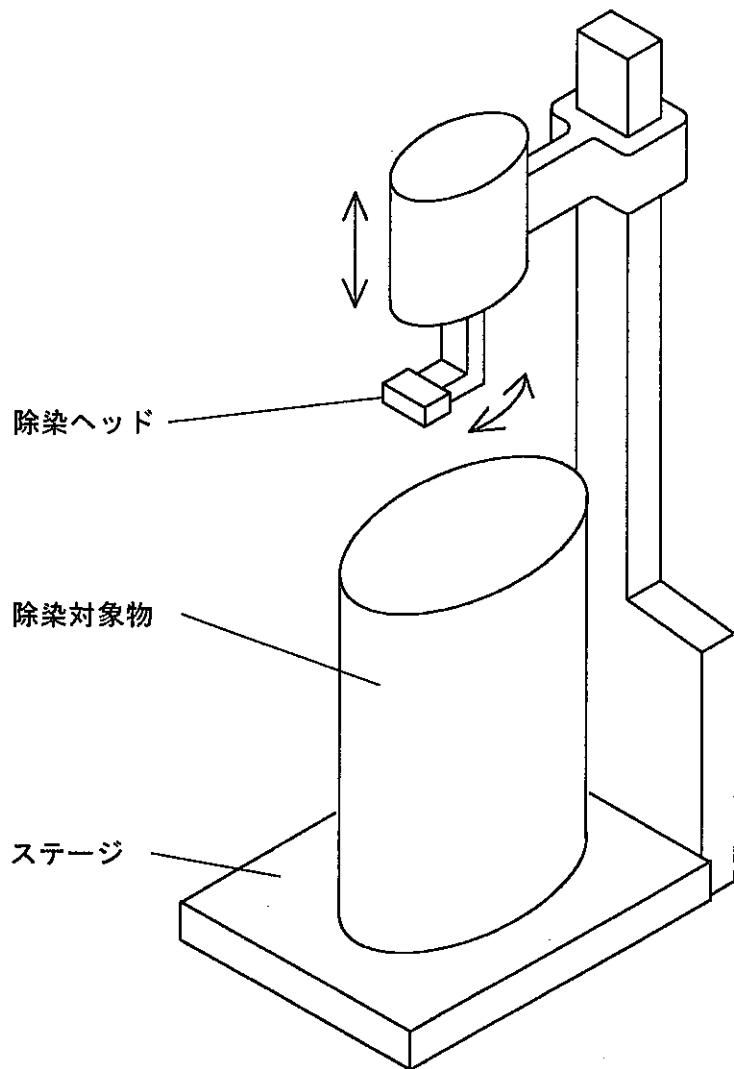
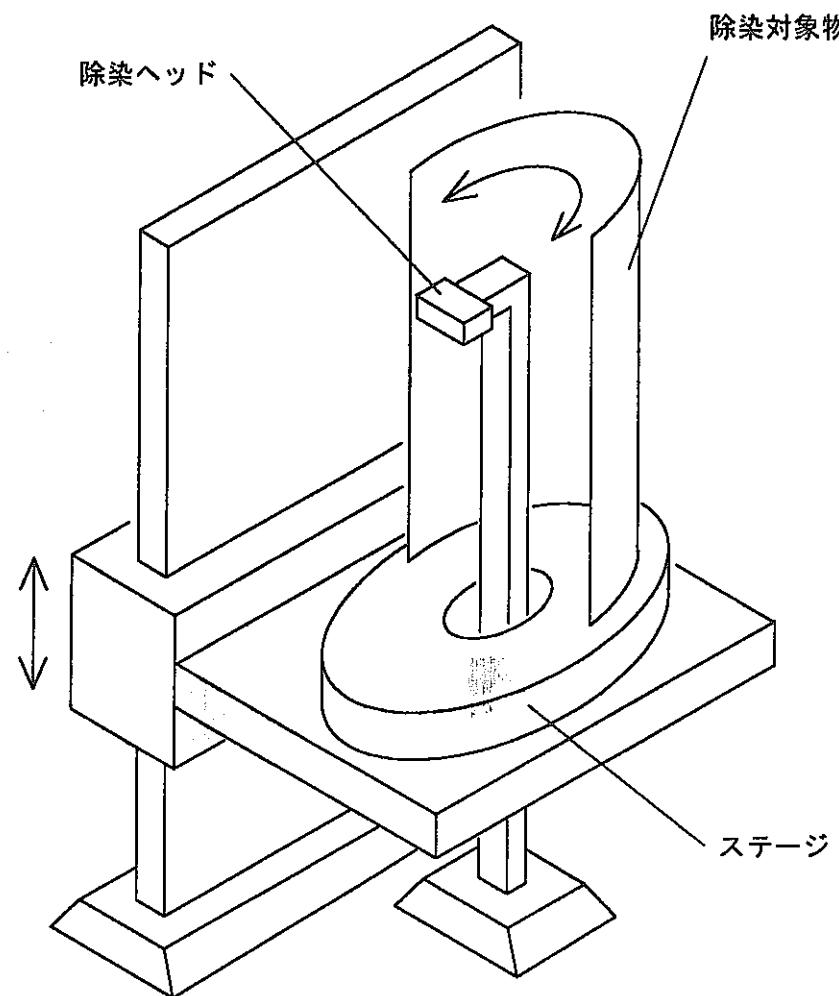
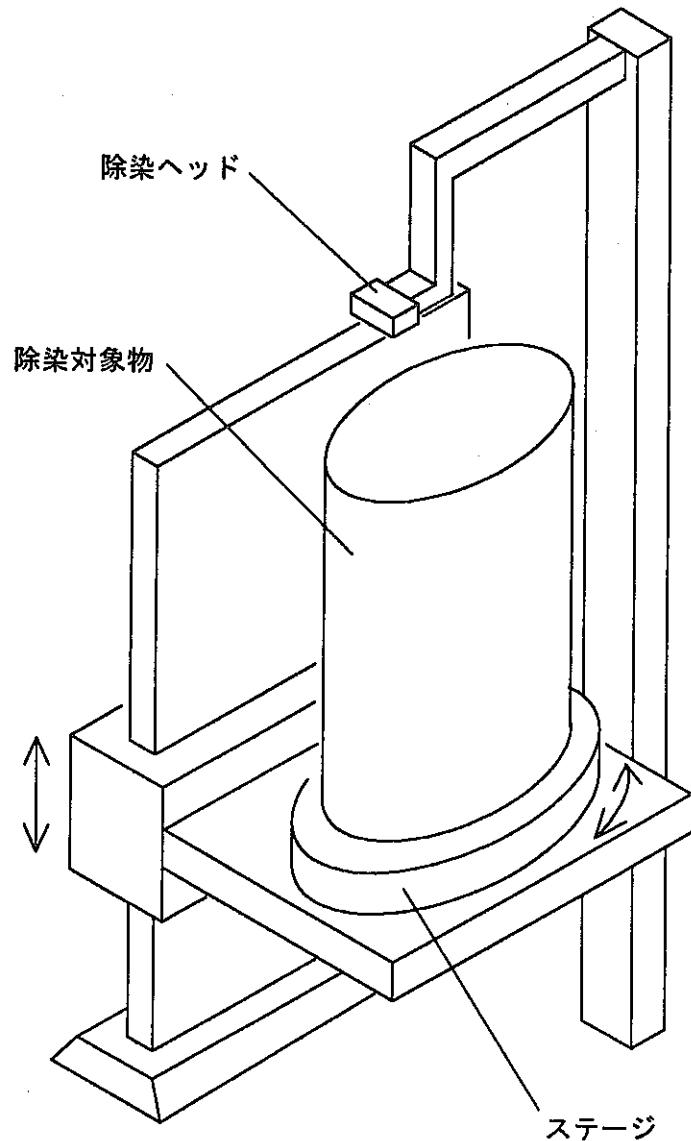


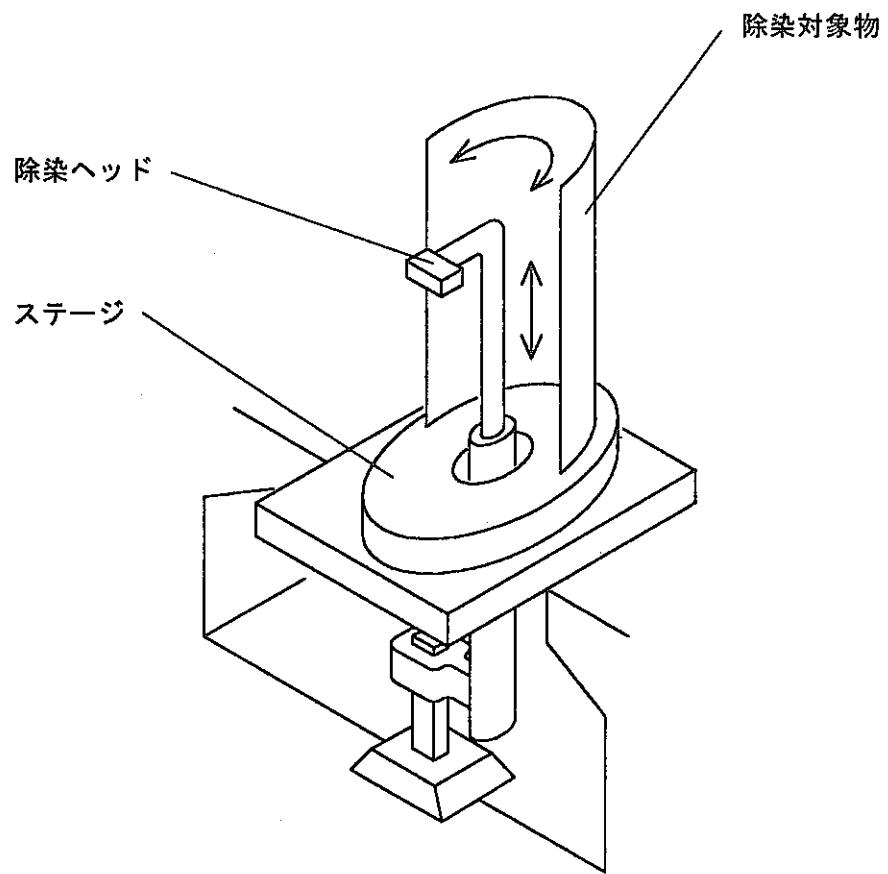
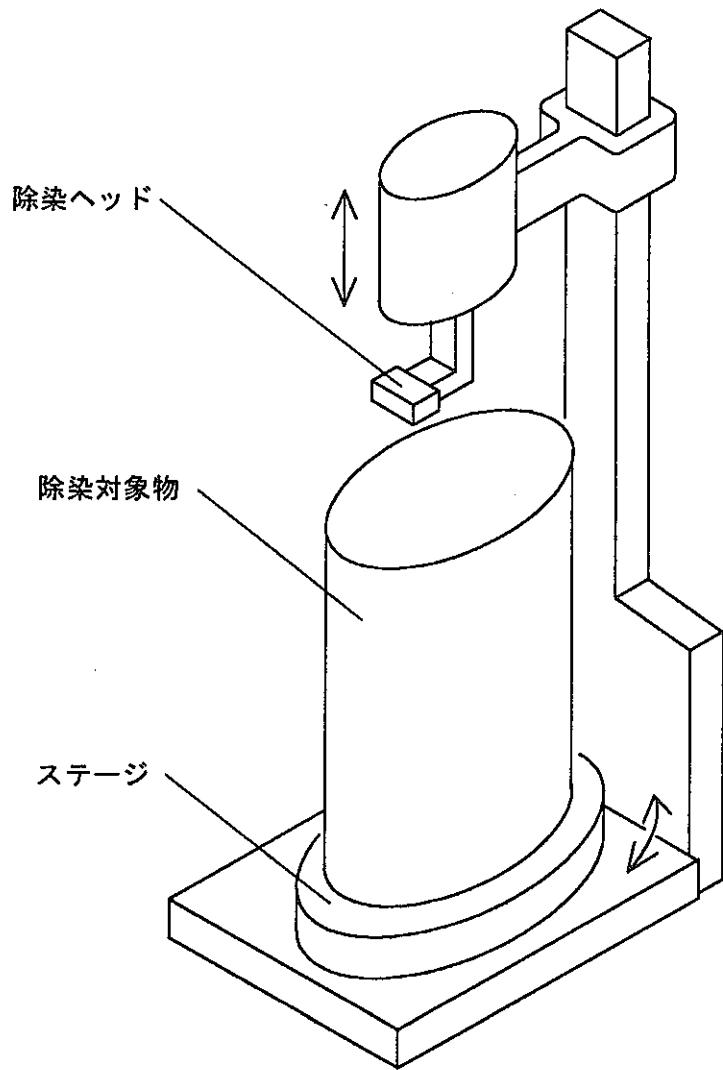
図 5.2.2-1 処理の基本フロー

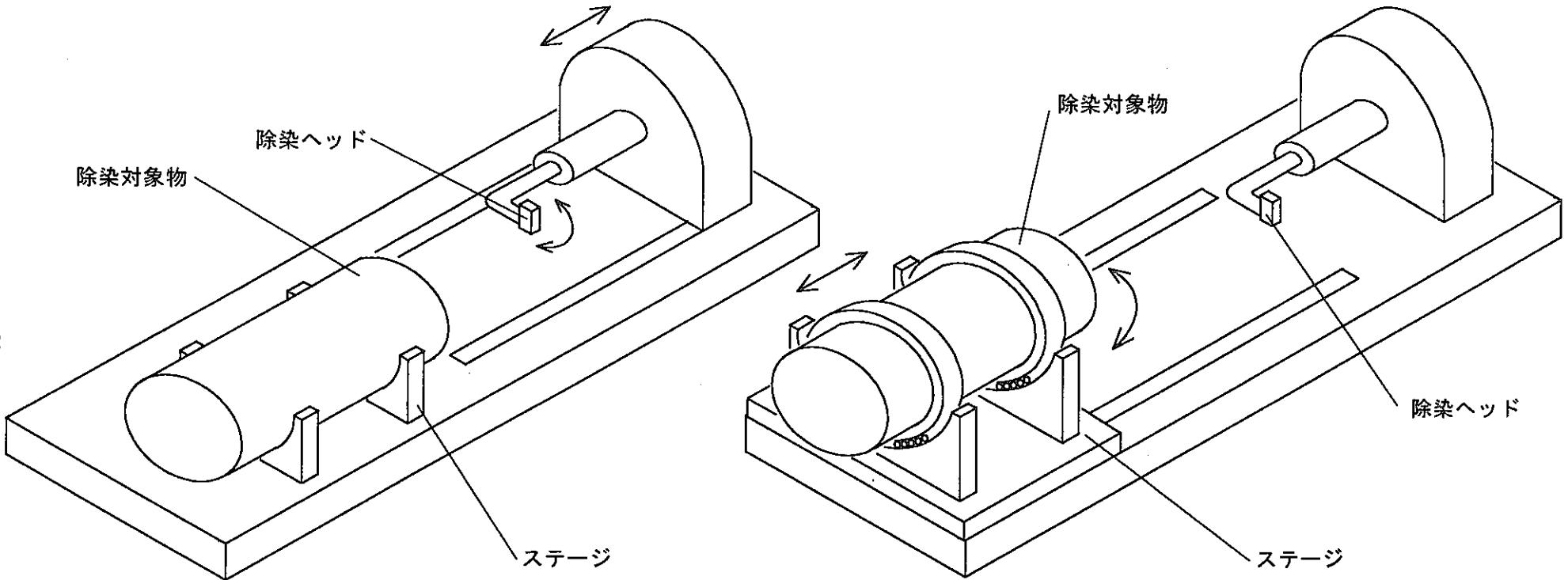
表5.2.2-1 レーザー除染装置の仕様検討

No.	除染対象物設置方向	駆動方法	除染対象物に対するレーザー光アクセス方向	概念図	特徴（長所）	設計上の留意点			
						全般	除染物搬出入時	除染時	保守時
1	縦置き	レーザー光側	上方	図A	<ul style="list-style-type: none"> ・装置構造はシンプル ・大型除染ステージを設置不要のため、スケールアップ容易 	<ul style="list-style-type: none"> ・レーザー照射部の回転（反転）方法について検討要（除染部における照射条件が変わりにくい方式） 	<ul style="list-style-type: none"> ・除染対象物設置時にレーザー光側構造物と干渉しないように構造(大きさ)検討要 	<ul style="list-style-type: none"> ・レーザー照射が除染対象物から外れた際、レーザー光が四方に向かう可能性があるため、防護機構要 	<ul style="list-style-type: none"> ・高所作業を伴うため、足場等の設置要
2			下方	図B	<ul style="list-style-type: none"> ・除染対象物設置時にレーザー光側構造物との干渉が少なく、対象物設置が容易 	<ul style="list-style-type: none"> ・除染対象物設置ステージ下部を掘る必要有り ・レーザー照射部の回転（反転）方法について検討要（除染部における照射条件が変わりにくい方式） 	<ul style="list-style-type: none"> ・特に無し 	<ul style="list-style-type: none"> ・レーザー照射が除染対象物から外れた際、レーザー光が四方に向かう可能性があるため、防護機構要 	<ul style="list-style-type: none"> —
3	除染対象物側	上方	上方	図C	<ul style="list-style-type: none"> ・定位位置を照射する為レーザー光の除染部における照射条件を変えずに作業が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・重量物を駆動させる方式検討要 ・除染対象物の中心位置出し方法検討要 	<ul style="list-style-type: none"> ・除染対象物設置時にレーザー光側構造物と干渉しないように構造(大きさ)検討要 	<ul style="list-style-type: none"> ・重心位置の高い重量物を上下、回転させることになり、更なる安全対策要。 	<ul style="list-style-type: none"> ・高所作業を伴うため、足場等の設置要
4			下方	図D	<ul style="list-style-type: none"> ・除染対象物設置時にレーザー光側構造物との干渉が少なく、対象物設置が容易 ・定位位置を照射する為レーザー光の除染部における照射条件を変えずに作業が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・重量物を駆動させる方式検討要 ・除染対象物設置ステージ下部を掘る必要有り 	<ul style="list-style-type: none"> ・特に無し 	<ul style="list-style-type: none"> ・重心位置の高い重量物を上下、回転させることになり、更なる安全対策要。 	<ul style="list-style-type: none"> —
5	併用	上方	上方	図E	<ul style="list-style-type: none"> ・装置構造は比較的シンプル ・スケールアップは比較的容易 ・レーザー光照射時の条件を比較的変えずに作業が可能。 	<ul style="list-style-type: none"> ・除染対象物の中心位置出し方法検討要 	<ul style="list-style-type: none"> ・除染対象物設置時にレーザー光側構造物と干渉しないように構造(大きさ)検討要 	<ul style="list-style-type: none"> ・重心位置の高い重量物を回転させることになり、転倒する可能性有り。 	<ul style="list-style-type: none"> ・高所作業を伴うため、足場等の設置要
6			下方	図F	<ul style="list-style-type: none"> ・除染対象物設置時にレーザー光側構造物との干渉が少なく、対象物設置が容易 ・レーザー光照射時の条件を比較的変えずに作業が可能。 	<ul style="list-style-type: none"> ・除染対象物の中心位置出し方法検討要 ・除染対象物設置ステージ下部を掘る必要有り 	<ul style="list-style-type: none"> ・特に無し 	<ul style="list-style-type: none"> ・重心位置の高い重量物を回転させることになり、転倒する可能性有り。 	<ul style="list-style-type: none"> —
7	横置き	レーザー光側	サイド	図G	<ul style="list-style-type: none"> ・装置構造はシンプル ・スケールアップ容易 	<ul style="list-style-type: none"> ・レーザー照射部の回転（反転）方法について検討要（除染部における照射条件が変わりにくい方式） 	<ul style="list-style-type: none"> ・特に無し 	<ul style="list-style-type: none"> ・レーザー照射が除染対象物から外れた際、レーザー光が四方に向かう可能性有り。 	<ul style="list-style-type: none"> —
8		除染対象物側	サイド	図H	<ul style="list-style-type: none"> ・装置構造はややシンプル ・スケールアップはやや容易 ・レーザー光照射時の条件を比較的変えずに作業が可能。 	<ul style="list-style-type: none"> ・重量物を駆動させる方式検討要 ・除染対象物回転方式について検討要 	<ul style="list-style-type: none"> ・対象物の設置方法について検討要 	<ul style="list-style-type: none"> ・特に無し 	<ul style="list-style-type: none"> —
9		併用	サイド	図I	<ul style="list-style-type: none"> ・除染対象物設置時にレーザー光側構造物との干渉が少なく、対象物設置が容易 ・レーザー光照射時の条件を比較的変えずに作業が可能。 	<ul style="list-style-type: none"> ・重量物を駆動させる方式検討要 ・除染対象物回転方式について検討要 	<ul style="list-style-type: none"> ・対象物の設置方法について検討要 	<ul style="list-style-type: none"> ・特に無し 	<ul style="list-style-type: none"> —









図G

図H

-39-

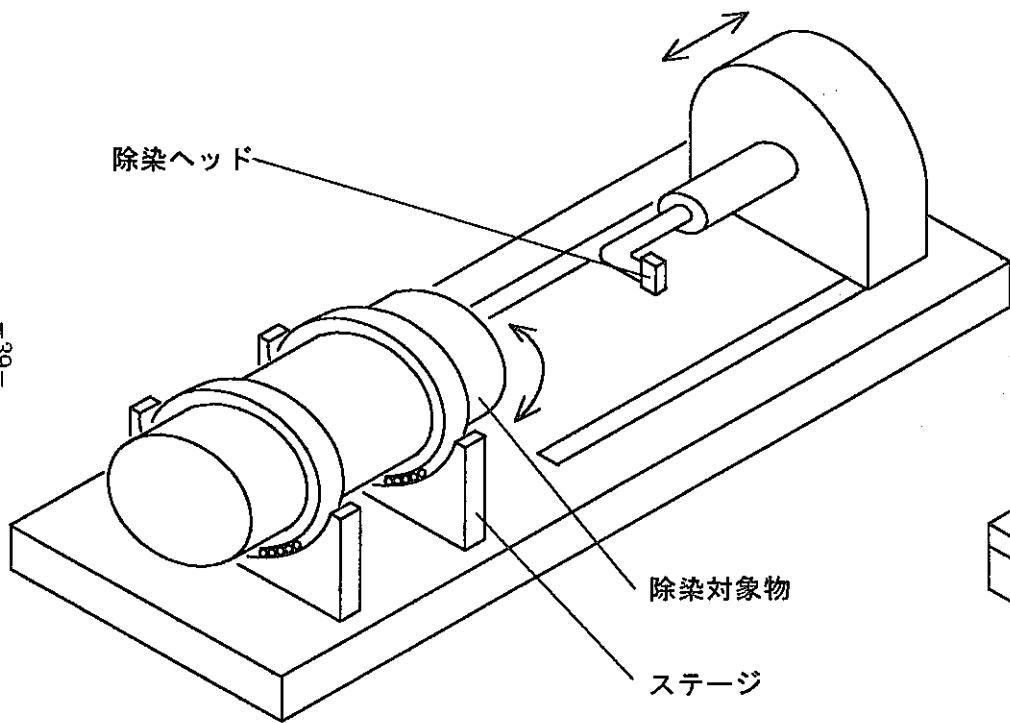


図1-1

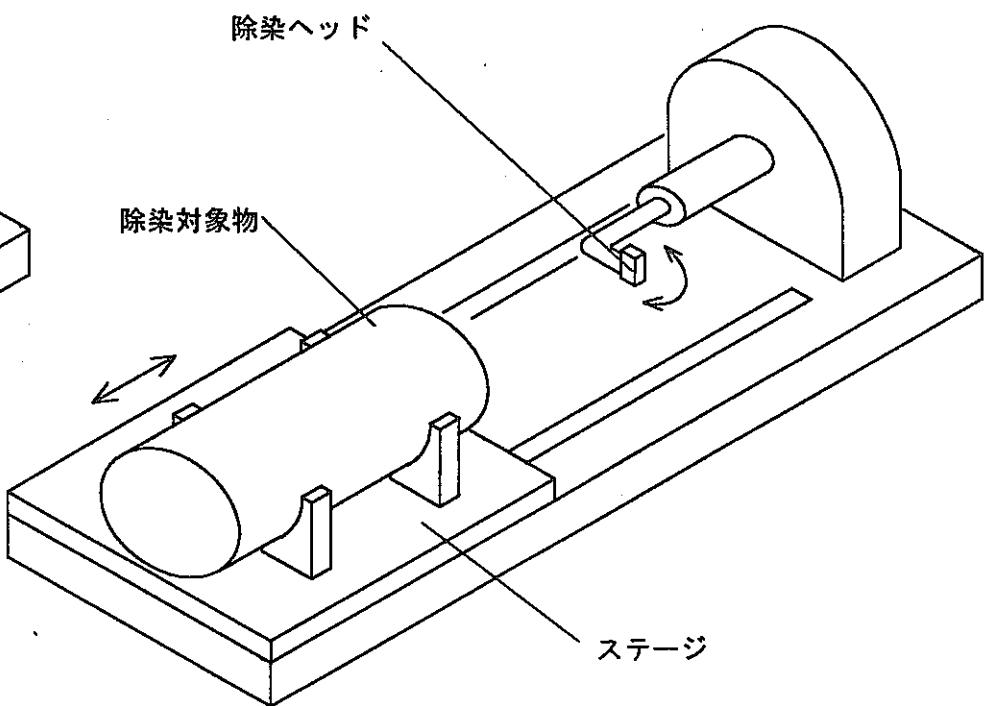


図1-2

次に、走査方法について検討する。レーザー光の走査速度は常に一定になるようにする方が望ましいと考えられる。5.2.1 項の前提条件で、レーザー光を半径分ずつ重ねるように照射するとして必要走査速度を求めると下記のようになる。

$$\text{付着物厚さ} : 8.43 \times 10^{-2} (\mu \text{m})$$

(2.0Bq/cm² のウラン単体が付着していると仮定)

$$\text{必要ショット数} : 8.43 \times 10^{-2} / 0.02 = 4.22 \approx 5 (\text{shot})$$

レーザー繰り返し数 : 1kHz

$$\text{照射部ビーム径} : 3.6 \text{ mm}$$

$$\text{必要走査速度} : (1.00 \times 10^3 / 5) \times (3.6 / 2) = 360 (\text{mm/s})$$

これより、 $\phi 1.7 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ の円筒の長手方向に走査する場合は一方向につき約 8.3 秒で 3 m の距離を除染対象物を動かすことになり、円周方向に走査する場合は 14.8 秒で 1 回転 (4.0 rpm) させることになる。長手方向への走査は除染対象物を頻繁に往復運動させる必要があること、対象物が重量物であることを考慮すると速度を一定に保つのは難しい。一方、円周方向走査の場合は、回転速度も 4.0 rpm 程度であり、速度を一定に保つのは容易である。よって、走査方向については円周方向とする。なお、この方法による除染対象物 1 台当たりの除染時間は、照射部ビーム径を 3.6 mm として

$$16.0 / (0.360 \times 3.60 \times 10^{-3}) = 1.23 \times 10^4 (\text{s}) = 3.43 (\text{h})$$

である。

以上より、本設計では除染対象物を横に置く方式を採用することとする。なお、この場合、除染ヘッドのアクセス方向は必然的に横方向からとなる。

本方式を用いる場合、対象物の僅かな変形でも、回転がうまく出来なくなる可能性がある。そこで、除染対象物には 1 対の回転リングを装着することとする。この時の作業手順概念を図 5.2.2-2 に示す。回転リングを装着するため、除染対象物はクレーンにより吊り上げることとし、除染対象物がこの回転リングの装着を容易に出来るように、専用の治具を設けることとする。

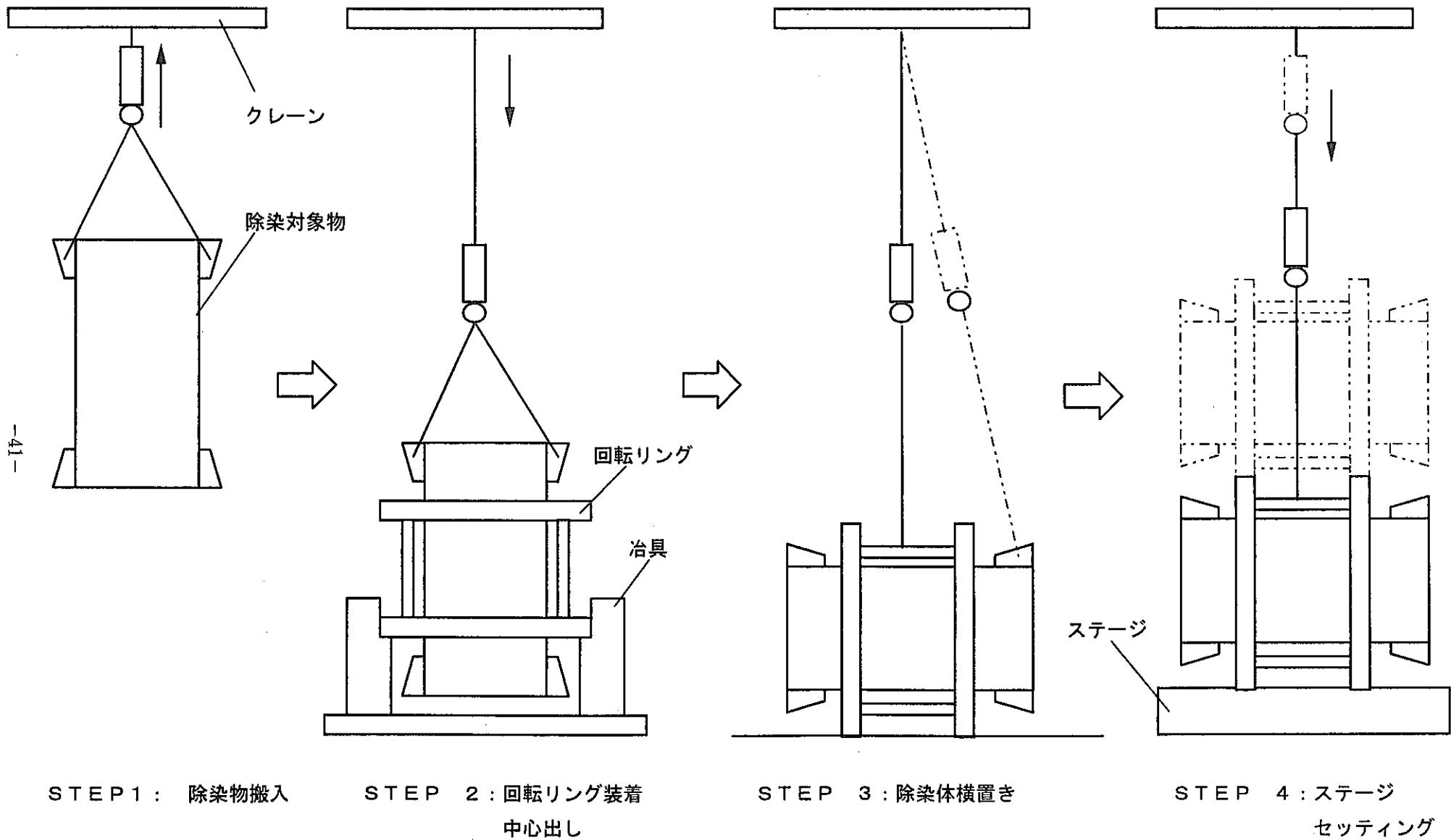


図 5.2.2-2 除染対象物の設置方法

(3) レーザー光の導光方法

TEA-CO₂ レーザーを用いる場合、波長 10.6 μm のレーザー光を発振器から照射部まで伝送するのに適する光ファイバー等が無いため、反射ミラーを用いてレーザー光を伝送することとする。レーザー光は目に見えない領域にあるため、He-Ne レーザーを用い、TEA-CO₂ レーザー光との光軸を合わせ、照射ポイントを確認できるようする。また、照射部において所定のビーム径（フルエンス）を得るために、レンズ等の調整機構が必要である。ここでレンズを用いる場合、除染対象物と焦点間の距離の変化がビーム径に影響を与え、照射部におけるフルエンスが変わる可能性がある。文献等の調査結果によれば、この調整をレンズの位置を変えることによりフルエンスを調整しているが、ここでは、焦点距離の長いレンズを用いることとし、距離の変動の影響がなるべくフルエンスに影響を与えないようにすることとする。照射部におけるビーム形状は円形、正方形、長方形、線状等が考えられるが、ここでは、前提条件に示すとおり円形とする。

(4) 汚染物の捕集方法

レーザー照射により生成したアブレーションブルームは、キャリアガスを吹き付けることにより対象物から分離され、排気系により排出される。このガスの吹き付けおよび吸引と、レーザー照射部との位置関係を決める除染ヘッド構造について、具体的な構造は今後の検討を待つことになるが、ここではレーザー光軸を基準に、吹き付け口と吸引口は対称の位置に配置することとする。キャリアガスとともに運ばれるアブレーションブルームの分離は、プレフィルターとヘパフィルターによって捕集するが、これでも取りきれない粒子が生ずる可能性がある。フィルターによって取りきれない粒子を取るための方法としては、水中捕集法や、バッファータンクを設けタンク内で水を噴霧し除去する方法があるが、これらはその後の水処理等に手間を要するため、ここでは、粒子を帯電させ電気的に除去する静電捕集法を用いることとする。なお、キャリアガス（アルゴンガス）は安価であり、大気中に存在するため、ガスの循環、再生は行わずに排出するが、排出の際、放射性物質がガス中に含まれていないか検知するための検知器、および含まれていた場合に排気系を外部から遮断するためのバルブを設けることとする。

(5) 汚染レベル確認方法

除染後の対象物の汚染レベル確認は、対象物をステージからサーベイ設備に搬送しそこでチェックする。なお、このサーベイ設備は、本設計の対象外とする。

(6) フィルター処置方法

放射性物質の捕集に用いたフィルターは、手作業にてビニール等に詰め排出する。

(7) その他

稼動中に装置本体にトラブルが発生した場合、および排ガス中の放射性物質が除去しきれず、放射性物質を放出する恐れが生じた場合に備え、インターロックを設置する。

(8) まとめ

以上の検討結果をまとめた炭酸ガスレーザーによる除染処理のシステム設計書を表5.2.2-2に、概念図を図5.2.2-3に示す。本装置を用いた場合、作業プロセスとしては表5.2.2-2に記載のようになると考えられる。

表5.2.2-2 炭酸ガスレーザー除染システム システム設計書

No.	項目	内 容	備 考
1	要求仕様	<p>レーザーの種類：パルス型TEA-CO₂レーザー</p> <p>フルエンス : 10.0 J/cm²</p> <p>波長 : 10.6 μm シングルモード</p> <p>繰り返し : 1kHz</p> <p>1shot当たり必要エネルギー : 1J/shot</p> <p>ビーム径 : φ3.6mm</p> <p>処理速度 : 0.02 μm/shot (深さ)</p> <p>照射角度 : 90度 (目安。傾いても可)</p> <p>除染係数 : 4/shot</p> <p>汚染物回収方法 : Arガス吹付 (10Nl/min)、吸引フィルターによる除去 (プレ+HEPA) 及び静電捕集</p>	
2	除染対象	<p>使用済み集合型遠心機の遠心機チェンバー胴体部</p> <p>形状 : 直径 : 1.7m 高さ : 3.0m の円筒</p> <p>材質 : 鉄</p> <p>重量 : 2040 kg(板厚16mmと仮定)</p>	左記チャックは切り離された状態。上板、下板は対象から除く 内径
3	付着物	<p>対象物質 : UF4/U2F9</p> <p>付着量 : 2.0 Bq/cm²</p> <p>付着厚さ : 8.43 × 10⁻² μm(付着量からの推定値)</p>	
4	作業量	<p>処理台数 : 1台/日</p> <p>作業時間 : 7時間 (9:00~17:00、途中1時間休憩)</p>	
5	設置環境条件	<ul style="list-style-type: none"> 既存の管理区域内に設置されることとする。 ユーティリティ設備は撤っていることを前提とする。 	
6	装置構成	<ul style="list-style-type: none"> レーザーシステム レーザガス再生装置 導光系 (反射ミラー、光学架台、レンズ) 遠隔操作装置 (レーザー、ステージ、フィルターユニット) 除染対象物設置ステージ 除染対象物搬入装置 (クレーン) 付着物捕集装置 局所排気装置 パーティション その他 	フィルターユニット
7	その他条件	<ul style="list-style-type: none"> 除染作業は遠隔操作、非接触が前提 除染時には対象物を駆動出来るようにする。 除染ステージは回転+1軸 基本的にレーザ照射部、Arガス吹き付けノズル、吸引ノズルの位置関係は変わらないように一体化する。 ミラーによる伝送 	除染ヘッド
8	処理プロセス	<ol style="list-style-type: none"> 除染対象物搬入 回転リング設置 除染ステージまで移動 レーザ装置起動 レーザアライメント確認、照射条件確認 付着物吸引装置起動 ガス吸引流量確認 ガス吹き付け流量確認 レーザ照射、除染 除染終了 照射ステージ退避 除染対象物搬出ポイントまで移動 回転リング取外し 除染対象物搬出 フィルター清掃 	

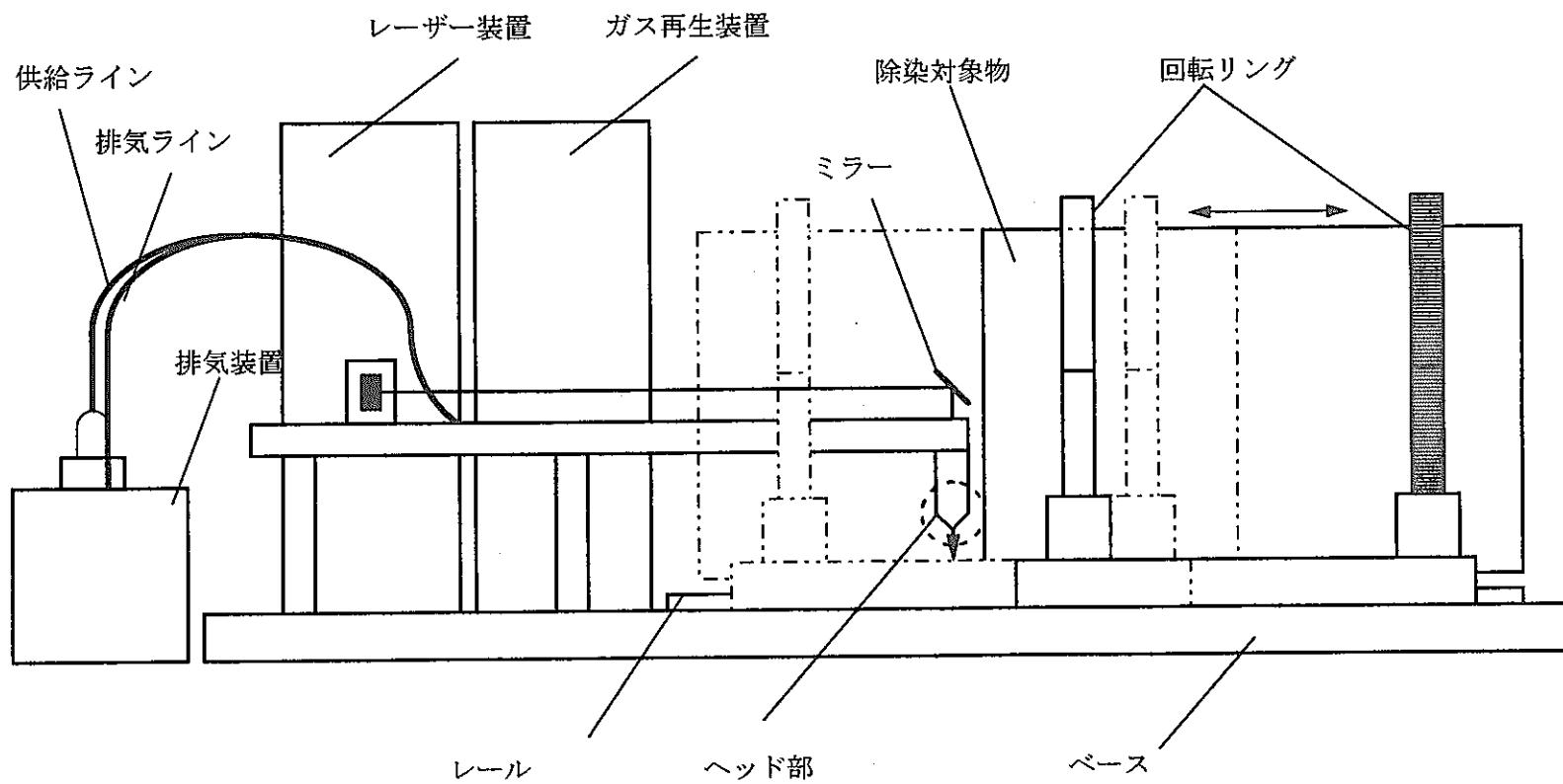


図 5.2.2-3 炭酸ガスレーザー除染システム概念図

5.2.3 炭酸ガスレーザーによる除染処理装置概念設計

本装置の外形図を図 5.2.3-1 に、装置配置図を図 5.2.3-2 に示す。装置は、波長 $10.6 \mu\text{m}$ のパルスレーザー光を発生させるための TEA-CO₂ レーザーシステム、レーザー光を照射部まで伝送するための導光系、レーザー光の照射、キャリアガスの吹き付け、及びアブレーションブルームの除去を行うための除染ヘッド、キャリアガスとアブレーションブルームの排出、キャリアガス中からアブレーションブルームの分離、排気ガス中に放射性物質が含まれるか否か確認するための排気システム、除染対象物を搬出入するためのクレーン設備、除染対象設備を設置するための駆動ステージから構成される。本装置を構成する機器の一覧を表 5.2.3-1 に示す。特注となる機器が多いが、市販品で適用可能と思われるものについては、本表の仕様欄に市販品の仕様を記載した。

表 5.2.3-1 炭酸ガスレーザー除染システムの装置構成・仕様 (1/2)

No.	装置名	機器名	仕 様	員数
1	レーザーシステム	TEA-CO ₂ レーザー本体	発振波長 : $10.6 \mu\text{m}$ 繰り返し数 : 1 kHz 出力 : 1.0 J/Pulse	1
2		ガス再生装置	He, N ₂ , CO ₂ 混合ガス再生	1
3		恒温水チラー	レーザー用	1
4	光学系	反射ミラー	高出力赤外用ミラー 型番 : 181068 (ミクロコントロール製) 材質 : Auコート付きCuミラー	4
5			He-Neレーザー用アルミ平面ミラー $\phi 30$ TFA-30C05-20 (シグマ光機製)	4
6		He-Neレーザー	アライメント確認用 (2台) 品番 : 05-LLP-851 (シグマ光機製)	2
7		ビームスプリッター	II-VI 製 2インチビームコンバイナー TEA-CO ₂ レーザーと He-Ne レーザーの結合用 品番 : Z, F00406-03 材質 : ZnSe f=127mm	2
8		ウインド	II-VI 製 2インチビームウインド Hot-Cold 室隔離用 品番 : 940161	1
9		レンズ	II-VI 製 2インチビームレンズ 品番 : Z, F00406-02 材質 : ZnSe	1
10		光学定盤	ミラー等設置用 (2台) 大型空気バネ式防振台 (アルミハニカム製) HOA-3015LA (シグマ光機)	2
11		マグネットベース	Σ -30-(5) (シグマ光機)	12
12		A型ミラーholダー	Σ -46K (シグマ光機)	13
13		ロッドスタンド	Σ -33 (シグマ光機)	12
14	除染ヘッド	除染ヘッド本体	吸排気ノズル付き	1

表 5.2.3-1 炭酸ガスレーザー除染システムの装置構成・仕様(2/2)

No.	装置名	機器名	仕 様	員 数
15	フィルターユニット	局所排気装置ユニット (集塵フィルタ付き)	形式 : FCA-60 (日本環境調査研究所) 外形寸法 : 縦1150×横700×高2500mm 定格出力 : 3.7kW 風量 : 0~45m ³ /min プレセラフィルタ寸法 : 300×250×30mm HEPAフィルタ寸法 : 610×950×150mm	1
16		静電捕集装置	機器名 : 高効率電気集塵機 (招栄社) 高圧発生器 : 40kV, 300mA ハンマリング装置 : 0.1kW ダンパ : φ150(2台)	1
17		緊急遮断弁	形式 : 電磁スイッチ式スプリング駆動玉型弁 EI-FS (ベン) 口径 : 150A 所要全閉時間 : 1 sec以下 全閉リミットスイッチ付	1
18		検知器 (放射性物質検知装置)	機器名 : アルファダストモニタ ALPHA-6 (エバーライン) 外形寸法 : 400×360×310 mm	1
19	搬出入装置	クレーン設備	形式 : DAM-3-4 (象印) 許容最大荷重 : 3000 kg	1
20	除染ステージ	駆動装置	回転及び一軸駆動	1
21		回転リング	除染対象物回転用	1
22		回転リング用冶具	回転リング設置用	1
23	その他	インターロック盤	トラブル箇所指示、システム停止	1
24		制御盤・電源盤	レーザ、駆動装置等用	7
25		遠隔操作盤	レーザ、駆動装置等用	4
26		現場操作盤	レーザ、駆動装置用	3
27		パーティション	寸法 : 9200W×4400D×3100H 材質 : SS400 付属品 : 電動シャッタ、窓、扉、照明灯	1
28		監視カメラ	CCDカメラ本体	2

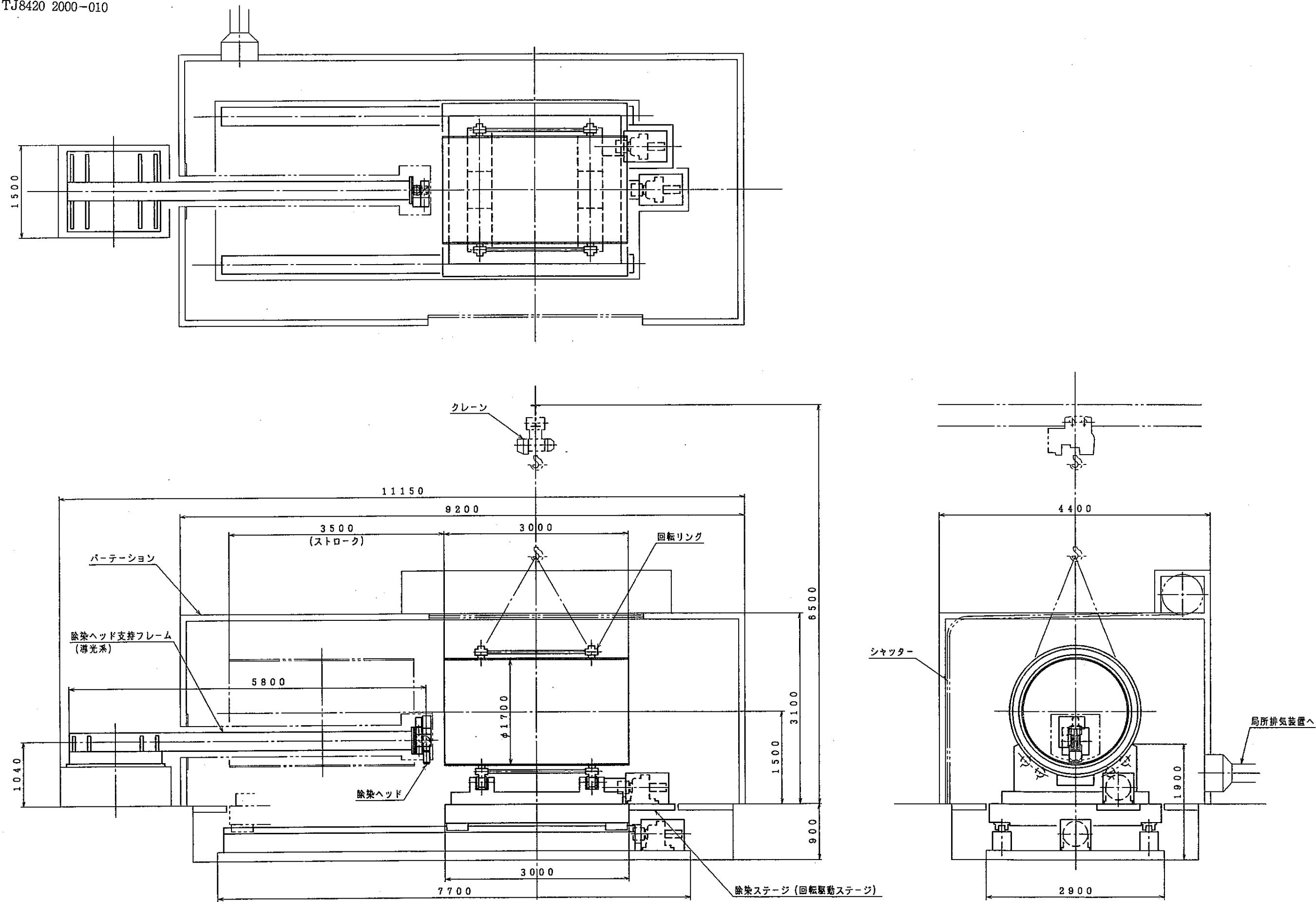


図 5.2.3-1 炭酸ガスレーザー除染装置

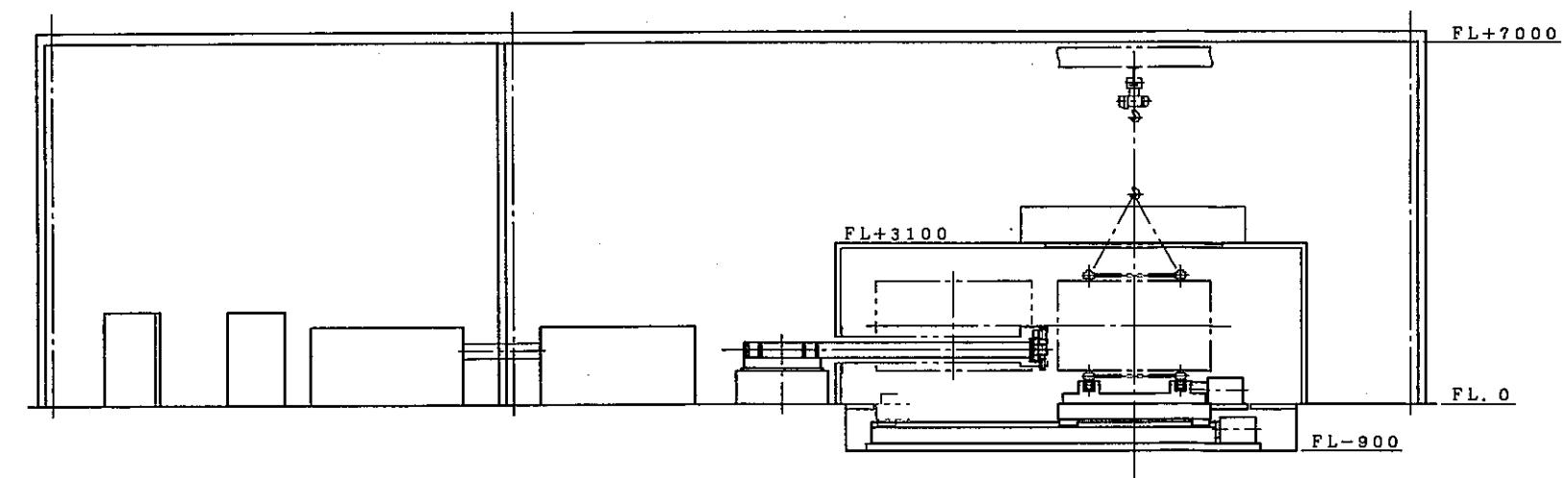
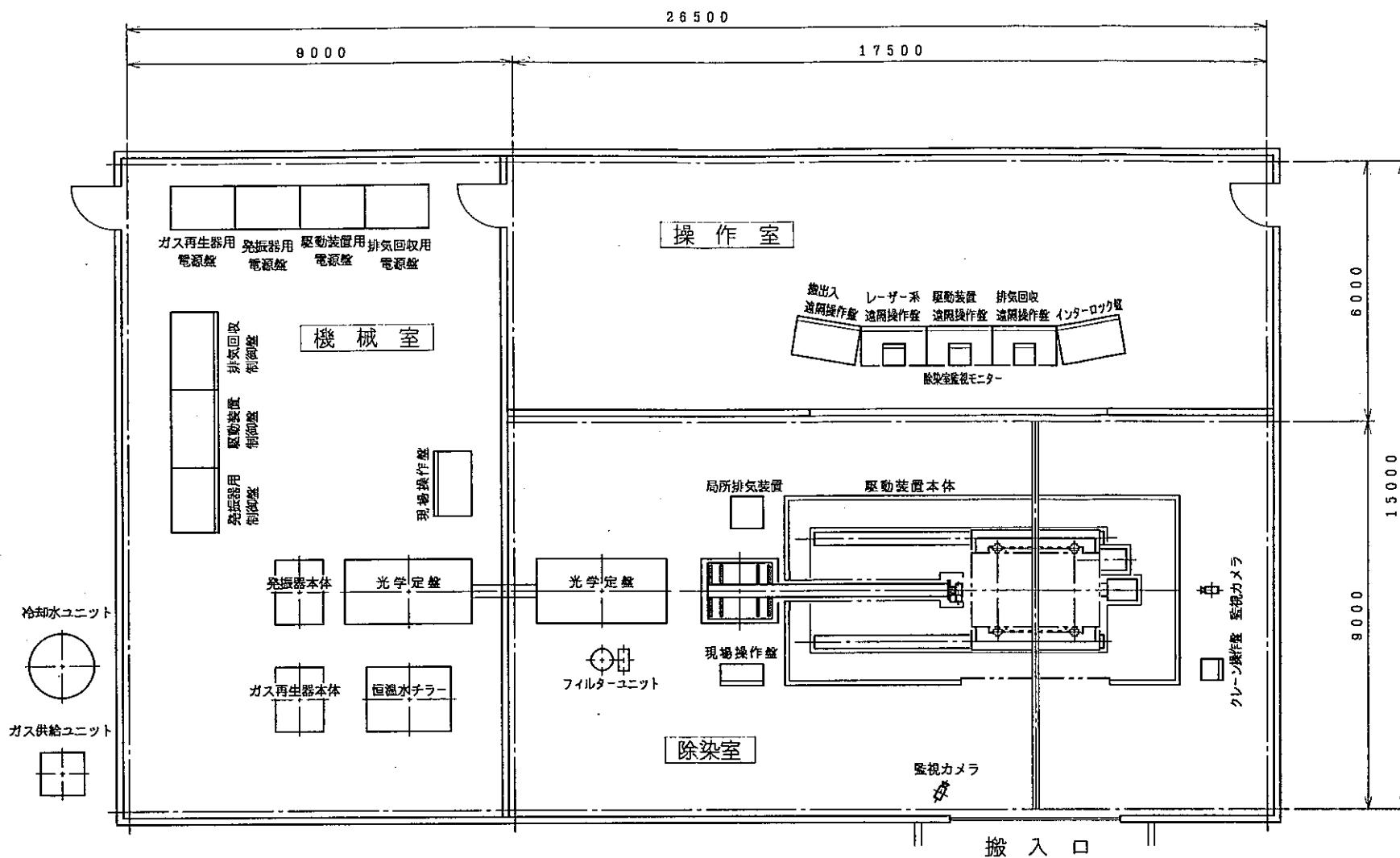


図 5.2.3-2 炭酸ガスレーザー除染システム配置図

5.2.4 運転操作方案

(1) 作業体制

炭酸ガスレーザーによる除染作業において、レーザー側の調整、操作と除染ステージ側の調整、操作を並行作業として実施する場合、レーザー側 3 名（オペレータ：1名、調整等作業者：2名）、除染ステージ側 3 名（オペレータ：1名、設置等作業者：2名）の 6 名体制で実施することが考えられる。一方、レーザー側、除染ステージ側作業を連続で行う場合、作業がピークとなるところの必要人員（次項に示す検討結果から 4 名）で実施することが考えられる。これら作業者は、装置調整時には現場作業、除染時には監視室において装置監視、オペレーション等を行うものとする。

(2) 作業工程

一日の運転操作スケジュールを表 5.2.4-1 に示す。本表では、レーザー側の調整と除染室側の調整を並行作業とした場合と連続作業とした場合それぞれについて、必要となる積算作業時間を示している。並行作業とした場合は 1 台の除染につき 5 時間 29 分、連続作業とした場合は 6 時間 39 分という結果となった。いずれの方法においても、1 日の実動作業時間（7 時間）以内で 1 台の処理が可能である。

(3) メンテナンス工程

レーザー側メンテナンスは、積算 10^8 shot 毎に 1 日（8 台分除染した後に 1 回）の頻度で、発振器、ミラー等のクリーニングを実施する。この時に合わせて除染室側装置側の点検（駆動機構のストロークチェック等）も行う。また、電気系の絶縁チェック、インターロックの作動確認といった、全装置の定期点検を年に 1 回、5 日間実施するものとする。メンテナンス作業は通常作業員が実施するものとする。

以上より、炭酸ガスレーザーを用いた場合の年間処理台数は、1 式当たり 192 台となる。

(4) 運転に必要なユーティリティ使用量の検討

表 5.2.3-1 に示した装置を用いた時の 1 回の除染作業に必要な電力量について、表 5.2.4-2 に示す。

(5) 消耗品交換頻度の検討

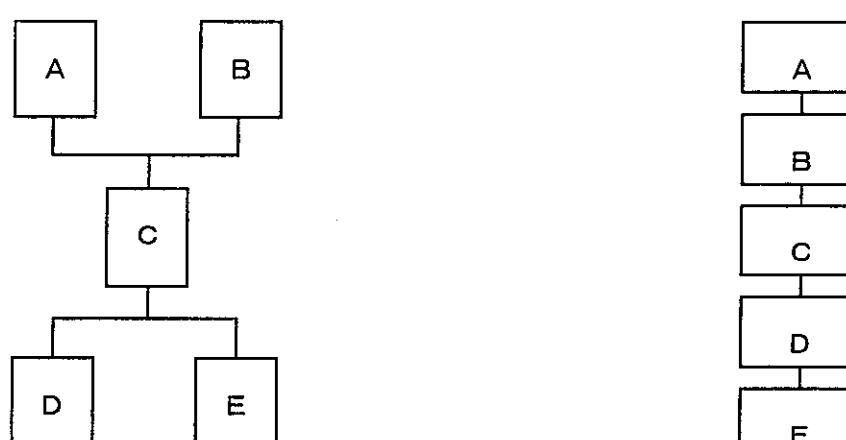
本システムで必要となる消耗品としては、ヘパフィルター等のフィルター類があるが、その交換頻度が多いと 2 次廃棄物量の増加に繋がり好ましくない。そこで、本概念設計ではフィルターの交換が殆ど不要となる逆洗式の排気装置を選定した⁽¹⁰⁾。本装置を使用した場合、プレフィルターと成型フィルターで 99.8% 以上のアブレーションブルームの捕集が可能であり、ここで捕集されたものはパルスジェットにより払い落とされる。よって、残る 0.2% が HEPA フィルター部に到達する量である。

1 回の除染で除去する付着物の質量は、ウラン換算で約 26g（除染面積：16m²、付着物厚さ $8.43 \times 10^{-2} \mu$ m、比重 19.1g/cm³ として計算）と見積られる。これらのう

表5.2.4-1 炭酸ガスレーザー除染システムの運転操作方案

段階	対象装置	作業区分	項目	作業内容	所要時間(分)	必要人員(人)	積算時間(1) 並行作業	積算時間(2) 連続作業	備考		
除染前	レーザー装置	A	START	—	—	—	0:00	0:00			
			装置立ち上げ	(1) 電源投入 (2) チラ一起動 (3) ガス交換	30	3	0:30	0:30	定常状態になるまで		
			出力等確認	(1) 低出力低繰り返し発振 (2) モード確認 (3) パーンパターン確認 (4) エネルギー確認	5	3	0:35	0:35			
			レーザアライメント (Gold側)	(1) He-Ne光との光軸調整、確認 (2) 伝送ミラーアライメント	10	3	0:45	0:45			
			START	—	—	—	0:00	—			
	除染装置	B	装置立ち上げ	・各種機器電源投入	10	3	0:10	0:55			
			除染対象物搬入	・除染対象物を指定箇所に持ち込み	—	—	(0:10)	(0:55)	指定箇所に持ち込み済であることを前提		
			対象物状況確認	(1) 汚染状況確認、把握 (2) 機器変形状況確認、把握 (3) 除染の可否判断	5	3	0:15	1:00			
			玉掛け	(1) 除染対象物の吊り治具にワイヤー掛け (2) 重心位置調整、吊り上げ確認	5	3	0:20	1:05			
			移動	・搬入指定箇所から回転リング設置場所まで、クレーンにて移動	1	3	0:21	1:06			
			回転リング設置	(1) 除染対象物を回転リング内に装荷 (2) 中心位置確認調整(真出し) (3) 回転リング固定	10	3	0:31	1:16			
			移動	・回転リング設置場所から、一次置き場所までクレーンにて移動	1	3	0:32	1:17			
			除染対象物向き変更	(1) 除染対象物を横置きに倒す (2) 吊りワイヤー取外し (3) 吊りワイヤー再設置(リング上)	5	3	0:37	1:22			
			移動	・除染ステージへ移動	1	3	0:38	1:23			
			セッティング	(1) 除染対象ステージにセットティング (2) 吊りワイヤー取外し	2	3	0:40	1:25			
除染中	全装置	C	駆動系試運転	(1) 回転方向駆動確認 (2) 水平方向駆動確認	5	3	0:45	1:30			
			レーザアライメント (Hot側)	(1) He-Ne光との光軸調整、確認 (2) 伝送ミラーアライメント	15	3	1:00	1:45			
			除染ヘッド位置調整	(1) 照射ポイント調整、位置確認 (2) 高出力、高繰り返し運転開始 (3) 付着物排気系、ガス供給系運転開始	5	4	1:05	1:50			
除染後	レーザー装置	D	除染開始	(1) 除染作業開始 (2) 除染状況、装置監視	206	4	4:31	5:16			
			除染終了	・装置運転停止	—	—	—	—			
			点検	(1) 光学系部品損傷確認 (2) その他点検	10	3	4:41	5:26			
			性能確認	(1) 低出力低繰り返し発振 (2) モード確認 (3) パーンパターン確認 (4) エネルギー確認	5	3	4:46	5:31			
			装置立ち下げ	・レーザー系立ち下げ	10	3	4:56	5:41			
	除染装置	E	点検	(1) 除染物確認 (2) 除染ステージ点検	10	3	4:41	5:51			
			除染対象物取外し	・吊りワイヤー設置	5	3	4:46	5:56			
			移動	・除染ステージから、一次置き場所までクレーンにて移動	1	3	4:47	5:57			
			除染対象物向き変更	(1) 吊りワイヤー取外し (2) 吊りワイヤー再設置(吊り治具に設置) (3) 除染物を縦置きにする	5	3	4:52	6:02			
			移動	・一次置き場所から回転リング設置場所まで、クレーンにて移動	1	3	4:53	6:03			
			回転リング設置	・除染対象物から回転リングを取り外し	5	3	4:58	6:08			
			移動	・除染物を搬出指定場所まで移動	1	3	4:59	6:09			
			フィルター清掃	(1) フィルター付着物払い落し (2) 付着物回収	20	3	5:19	6:29			
			装置立ち下げ	・除染装置系立ち下げ	10	3	5:29	6:39			
							総積算時間	5:29	6:39	並行作業の場合、各作業区分で時間がかかる方が速い	

* 積算時間(1)は、レーザー側作業と除染装置側作業を並行しておこなった場合。積算時間(2)は、レーザー側作業と除染装置側作業を連続して行った場合。
具体的には下記の通り。



(並行作業の場合～積算時間(1))

(連続作業の場合～積算時間(2))

表5.2.4-2 炭酸ガスレーザー除染システムの消費電力量

No.	装置名	機器名	員数	電力 (W/h)	合計電力 (W/h)	運転時間 (h)	1回当たりの 消費電力量 (W)
1	レーザーシステム	TEA-CO ₂ レーザー本体	1	112,500	112,500	3.43	386,250
2		ガス再生装置	1				
3		恒温水チラー	1				
4	光学系	He-Neレーザー	2	0.016	0.032	3.43	0.11
5	フィルターユニット	局所排気装置ユニット (集塵フィルタ付き)	1	3,700	3,700	3.43	12,703
6		静電捕集装置	1	12,000	12,000	3.43	41,200
7		検知器 (放射性物質検知装置)	1	300	300	3.43	1,030
8	搬出入装置	クレーン設備	1	30,000	30,000	0.10	3,000
9	除染ステージ	駆動装置	1	40,000	40,000	3.43	137,333
10	その他	インターロック盤	1	4,000	4,000	6.15	24,600
11		制御盤・電源盤	7	4,000	28,000	6.15	172,200
12		遠隔操作盤	4	4,000	16,000	6.15	98,400
13		現場操作盤	3	4,000	12,000	6.15	73,800
14		監視カメラ	2	0.025	0.050	6.15	0.31
						総消費電力量 (kW)	950.5

ち、0.2%がHEPA フィルター部に到達するとして、その質量を求めると 0.052g となる。HEPA フィルター1個の許容捕集量を 17g（カタログに記載の文献値）とする
と、326 台の除染に1回の割合でフィルター交換となる。これは炭酸ガスレーザー除
染システムの年間処理台数が1式当たり 192 台であることを考えると、年1回の交換
で充分と考えられる。

5.3 YAG レーザーによる除染処理プロセス・装置概念設計

5.3.1 前提条件

YAG レーザーによる除染装置を検討するに当たり、前提条件を表 5.3.1-1 に示す。

表 5.3.1-1 YAG レーザーによる除染 前提条件

項目	条件
レーザーの種類	Nd : YAG レーザー
フルエンス	5.0 J/cm ²
波長	1064 nm
繰り返し	100Hz
1shot 当たり 必要エネルギー	0.5 J/shot
ビーム径	φ 3.6 mm (円形)
処理速度	0.1 μ m/shot (深さ)
照射角度	90 度 (目安。傾いて也可)
汚染物回収方法	Ar ガス吹付 (10N L/min) 、吸引 フィルターによる除去 (プレ+HEPA) 及び静電捕集

5.3.2 処理プロセスの検討

YAG レーザーを用いて除染する場合の基本フロー、及び各ステップに対応する要素機器の対応は基本的には炭酸ガスレーザーの時と同じである。ただし、YAG レーザーの場合、炭酸ガスレーザーと異なり光学系にファイバーを用いることが期待でき、これによりレーザー光伝送の取り回しが容易になることから、このメリットを反映させた装置設計とする。

処理プロセスとして炭酸ガスレーザーの時と変わるのは、駆動方法 (対象物を移動させるか、除染ヘッドを移動させるか) の検討において、ファイバーを用いることにより伝送距離は一定に保たれることから、除染ヘッドを動かしても、ビームへの影響が無くなるところにある。炭酸ガスレーザーの場合には除染ステージに回転機構と一軸方向の駆動機能を有する構造していたが、この場合、ステージの構造が大型化、複雑化することも予想される。駆動機能を除染ヘッド側にさせた方がステージ構造の簡素化が可能となる。よって、YAG レーザーを用いた除染システムでは、除染ヘッドに駆動機能をもたせることにする。

5.3.1 項の前提条件で、レーザー光を半径分ずつ重ねるように照射するとして必要走査速度を求めるところ記のようになる。

付着物厚さ : $8.43 \times 10^{-2} (\mu\text{m})$
 (2.0Bq/cm² のウラン単体が付着していると仮定)

必要ショット数 : $8.43 \times 10^{-2} / 0.1 = 0.84 \approx 1$ (shot)

レーザー繰り返し数 : 100 Hz

照射部ビーム径 : 3.6 mm

必要走査速度 : $1.00 \times 10^2 / 1 \times (3.6/2) = 180 (\text{mm/s})$

これより、 $\phi 1.7 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ の円筒の長手方向に走査する場合は一方向につき約 17 秒で除染ヘッドを動かすことになり、円周方向に走査する場合は除染対象物を 30 秒で 1 回転させることになる。長手方向への走査は除染ヘッドの頻繁な往復運動を伴い、これによりファイバーにストレスを与える可能性がある。一方、円周方向走査の場合は、回転速度も 2.0 rpm 程度であり、速度を一定に保つのは容易である上、安定した除染速度が得られる。よって、走査方向については円周方向とする。

この方法による除染対象物 1 台当たりの除染時間は、照射部ビーム径を 3.6 mm として

$$16.0 / (0.180 \times 3.60 \times 10^{-3}) = 2.47 \times 10^4 (\text{s}) = 6.86 (\text{h})$$

となる。前提条件に示したように、1 日当たり 1 台処理することとし、1 日の実動時間を 7 時間とすると、この除染時間では、前処理や後処理に必要な時間を考慮した場合、処理しきれなくなる恐れがある。そこで、YAG レーザーを 2 台使用することとし、照射面積を倍にすることとする。これにより、除染時間は 1 台の時の半分の 3.43 (h) となる。これは、炭酸ガスレーザーの時と同じ除染時間である。

YAG レーザーの場合、無色透明の光学材料を用いることができるため、これを利用して照射ポイントの監視をすることができる。その時の除染ヘッド構造の一例を図 5.3.2-1 に示す。

以上を反映した YAG レーザーによる除染処理のシステム設計書を表 5.3.2-1 に、システム概念を図 5.3.2-2 に示す。本装置を用いた場合、作業プロセスとしては表 5.3.2-1 に記載のようになると想われる。

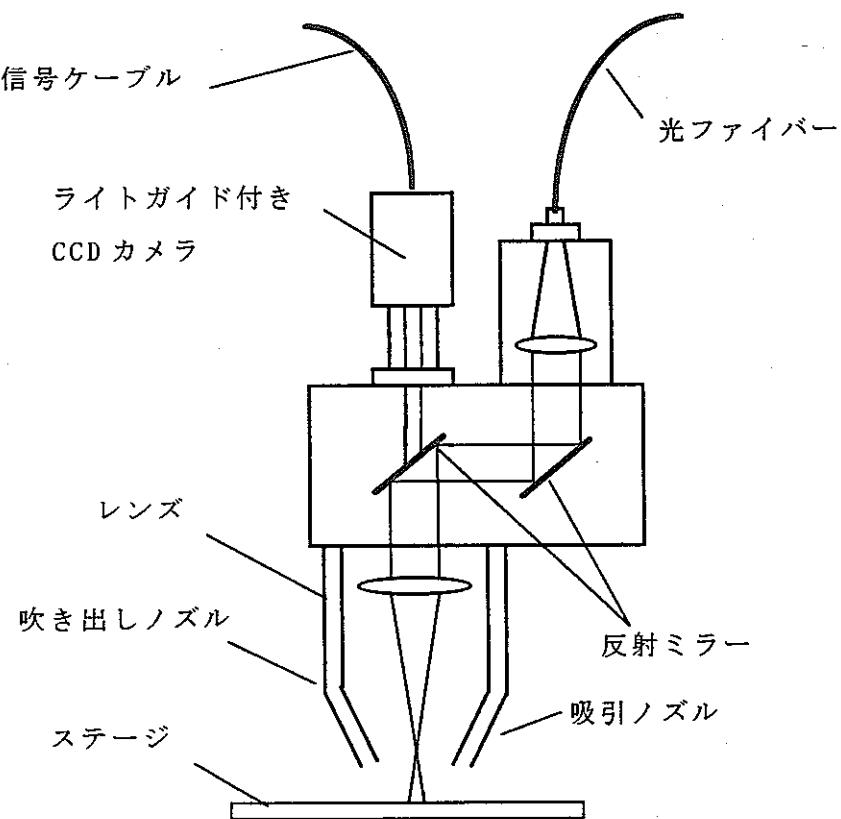


図 5.3.2-1 除染ヘッド部構成

表5.3.2-1 YAGレーザー除染システム システム設計書

No.	項目	内 容	備 考
1	要求仕様	レーザーの種類 : Q-Switch Nd:YAGレーザー フルエンス : 5.0J/cm ² 波長 : 1064nm 繰り返し : 100Hz 1shot当たり必要エネルギー : 0.5J/shot ビーム径 : φ3.6mm 処理速度 : 0.1μm/shot (深さ) 照射角度 : 90度 (自安。傾いても可) 除染係数 : 20/shot 汚染物回収方法 : Arガス吹付 (10N ^l /min) 、吸引 フィルターによる除去 (プレ+HEPA) 及び静電捕集	
2	除染対象	使用済み集合型遠心機の遠心機チェンバー胴体部 形状 : 直径 : 1.7m 高さ : 3.0m の円筒 材質 : 鋼 重量 : 2040 kg(板厚16mmと仮定)	左記チャンバーは切り離された状態。上板、下板は対象から除く 内径
3	付着物	対象物質 : UF4/U2F9 付着量 : 2.0 Bq/cm ² 付着厚さ : 8.43×10 ⁻² μm(付着量からの推定値)	
4	作業量	処理台数 : 1台/日 作業時間 : 7時間 (9:00~17:00、途中1時間休憩)	処理は1式につき1台/日以上可能であればなお良い。
5	設置環境条件	・既存の管理区域内に設置されることとする。 ・ユーティリティ設備は揃っていることを前提とする。	
6	装置構成	・レーザーシステム ・導光系 (光ファイバー、レンズ) ・遠隔操作装置 (レーザー、ステージ、フィルターユニット) ・除染対象物設置ステージ ・除染対象物搬入装置 (クレーン) ・付着物捕集装置 ・局所排気装置 ・パーテーション ・その他	フィルターユニット
7	その他条件	・除染作業は遠隔操作、非接触が前提 ・除染時には対象物を駆動出来るようにする。 ・除染ステージは回転のみ ・基本的にレーザ照射部、Arガス吹き付けノズル、吸引ノズルの位置関係は変わらないように一体化する。 ・ファイバーによる伝送	除染ヘッド
8	処理プロセス	(1) 除染対象物搬入 (2) 回転リング設置 (3) 除染ステージまで移動 (4) レーザ装置起動 (5) レーザアライメント確認、照射条件確認 (6) 付着物吸引装置起動 (7) ガス吸引流量確認 (8) ガス吹き付け流量確認 (9) レーザ照射、除染 (10) 除染終了 (11) 照射ステージ退避 (12) 除染対象物搬出ポイントまで移動 (13) 回転リング取外し (14) 除染対象物搬出 (15) フィルター清掃	

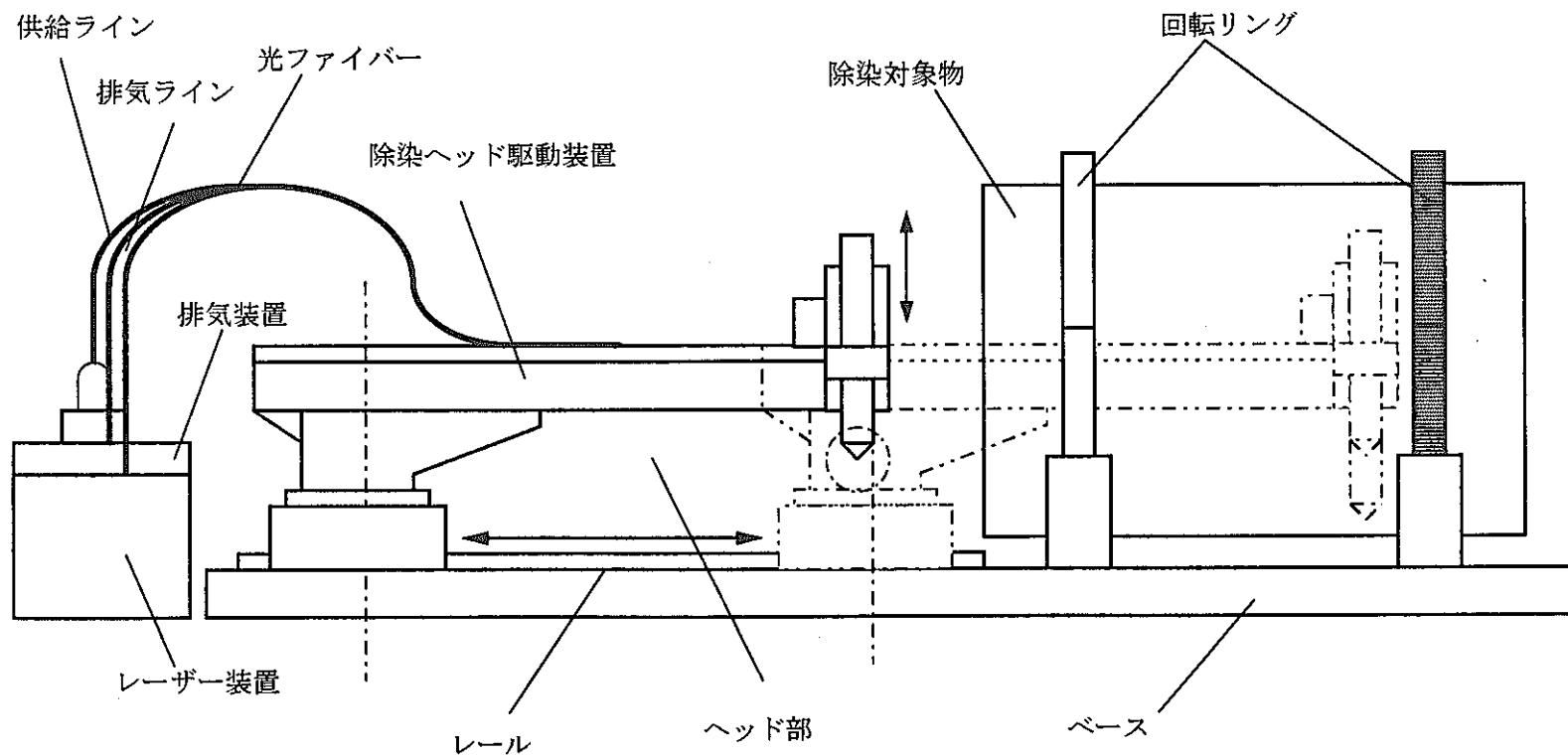


図 5.3.2-2 YAG レーザー除染システム概念図

5.3.3 YAGガスレーザーによる除染処理装置概念設計

本装置を構成する機器の一覧を表 5.3.3-1 に、装置外形図を図 5.3.3-1 に、装置配置図を図 5.3.3-2 に示す。装置は、波長 $1.06 \mu\text{m}$ のパルスレーザー光を発生させるための Nd : YAG レーザーシステム、レーザー光を照射部まで伝送するための導光系、レーザー光の照射、キャリアガスの吹き付け、及びアブレーションブルームの除去を行うための除染ヘッド、キャリアガスとアブレーションブルームの排出、キャリアガス中からアブレーションブルームの分離、排気ガス中に放射性物質が含まれるか否か確認するための排気システム、除染対象物を搬出入するためのクレーン設備、除染対象設備を設置するための駆動ステージから構成される。

表 5.3.3-1 YAG レーザー除染システムの装置構成・仕様 (1/2)

No.	装置名	機器名	仕 様	員数
1	レーザーシステム	Nd:YAGレーザー本体	infinity 40-100 (COHERENT製) 発振波長: $1.06 \mu\text{m}$ 繰り返し数: 100 Hz 最大出力: 600mJ/pulse パルス幅: 3.5ns	2
2		恒温水チラー	レーザー用	2
3	光学系	光ファイバー	YAGレーザー光伝送用	2
4		ファイバーカップラー	ファイバー導入用 ファイバーアライナー モデル 9131-FS (インデコ製) 及び アクセサリー	4
5		反射ミラー	アルミ平面ミラー $\phi 30$ TFA-30C05-20 (シグマ光機製)	4
6		プリズム	レーザー光反射用 45° 直角反射プリズム RPB2-30-550 (シグマ光機製)	1
7		He-Ne レーザー	アライメント確認用 (1台) 品番: 05-LLP-851 (シグマ光機製)	1
8		ビームスプリッター	YAGレーザーと He-Ne レーザーの結合用 材質: ZnSe	1
9		レンズ	YAGレーザ集光レンズ YDL-30-150PY1 (シグマ光機製) $f=150\text{mm}$	1
10		レーザビームエキスパンダー	YAGレーザ用 YBE-(2) (シグマ光機製)	2
11		光学定盤	ミラー等設置用 (1台) 大型空気バネ式防振台 (アルミハニカム製) HOA-3015LA (シグマ光機)	1
12		マグネットベース	$\Sigma-30-(5)$ (シグマ光機)	8
13		A型ミラーホルダー	$\Sigma-46K$ (シグマ光機)	6
14		ロッドスタンド	吸排気ノズル付き	8
15	除染ヘッド	除染ヘッド本体	ガス供給、排気ノズル付き	1
16		CCDカメラ	除染部観察用	1

表 5.3.3-1 YAG レーザー除染システムの装置構成・仕様(2/2)

No.	装置名	機器名	仕 様	員 数
17	フィルターユニット	局所排気装置ユニット (集塵フィルタ付き)	形式 : FCA-60 (日本環境調査研究所) 外形寸法 : 縦1150×横700×高2500mm 定格出力 : 3.7kW 風量 : 0~45m³/min プレセラフィルタ寸法 : 300×250×30mm HEPAフィルタ寸法 : 610×950×150mm	1
18		静電捕集装置	機器名 : 高効率電気集塵機 (招栄社) 高圧発生器 : 40kV, 300mA ハンマリング装置 : 0.1kW ダンパ : φ150(2台)	1
19		緊急遮断弁	形式 : 電磁スイッチ式スプリング駆動玉型弁 EI-FS (ベン) 口径 : 150A 所要全閉時間 : 1 sec以下 全閉リミットスイッチ付	1
20		検知器 (放射性物質検知装置)	機器名 : アルファダストモニタ ALPHA-6 (エバーライン) 外形寸法 : 400×360×310 mm	1
21	搬出入装置	クレーン設備	形式 : DAM-3-4 (象印) 許容最大荷重 : 3000 kg	1
22	除染ステージ	駆動装置	回転及び一軸駆動	1
23		回転リング	除染対象物回転用	1
24		回転リング用治具	回転リング設置用	1
25	その他	インターロック盤	トラブル箇所指示、システム停止	1
26		制御盤・電源盤	レーザ、駆動装置等用	6
27		遠隔操作盤	レーザ、駆動装置等用	4
28		現場操作盤	レーザ、駆動装置用	3
29		パーティション	寸法 : 5500W×4400D×3100H 材質 : SS400 付属品 : 電動シャッタ、窓、扉、照明灯	1
30		監視カメラ	C C D カメラ本体	2

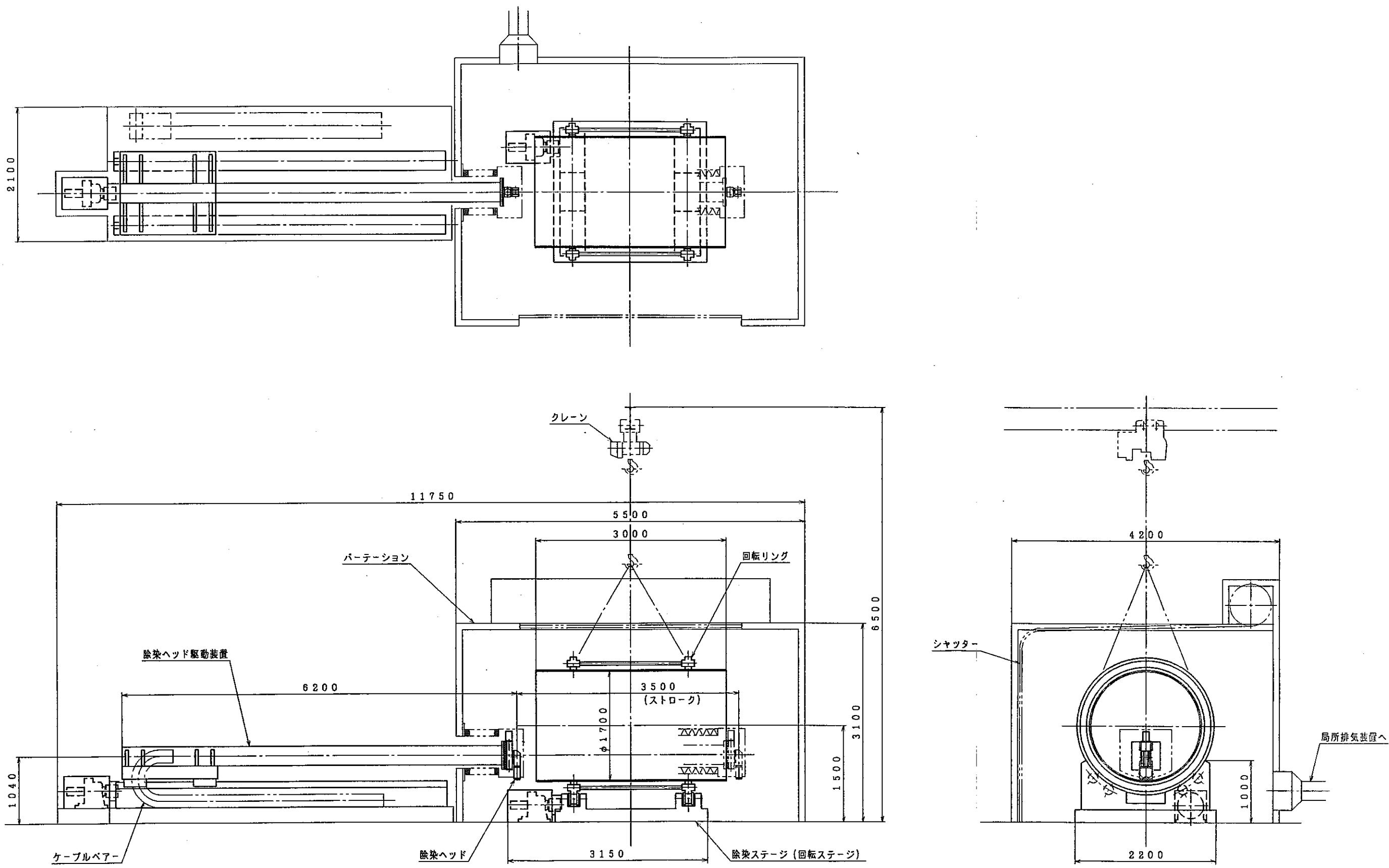


図 5. 3. 3-1 ND : YAG レーザー除染装置

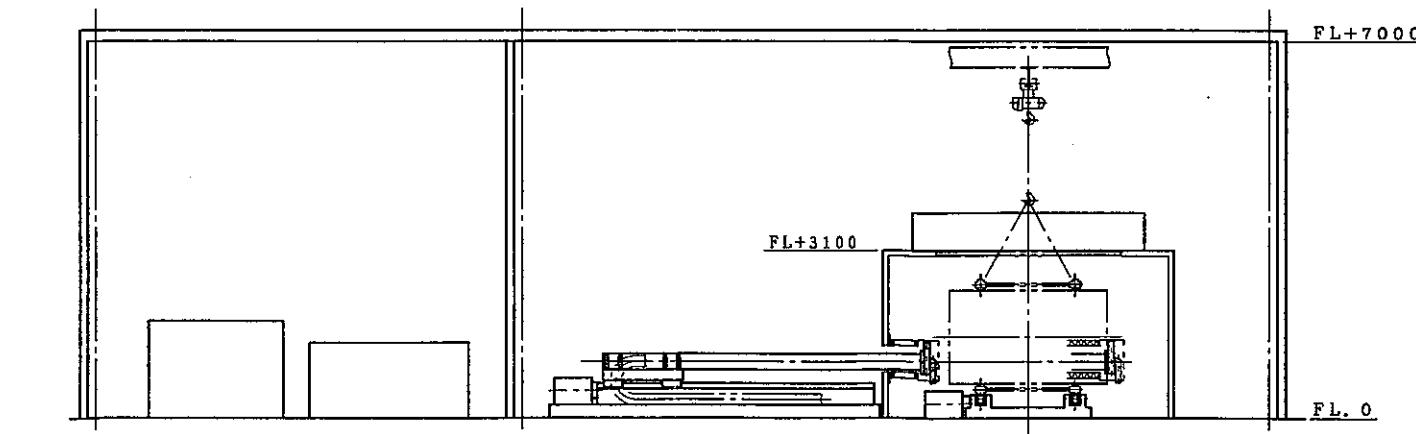
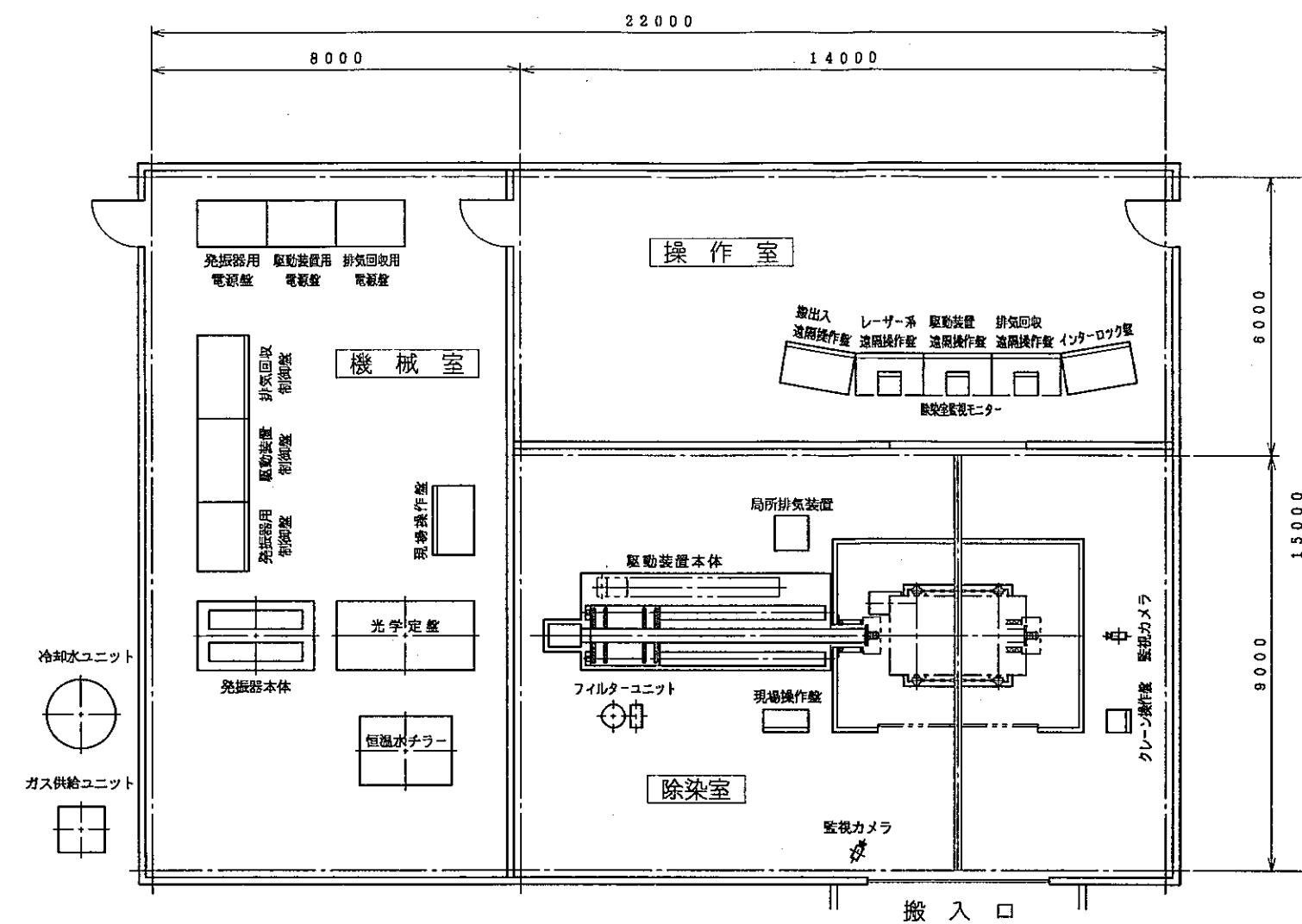


図 5.3.3-2 N D : Y A G レーザー除染システム配置図

5.3.4 運転操作方案

(1) 作業体制

YAG レーザーによる除染作業において、レーザー側の調整、操作と除染ステージ側の調整、操作を並行作業として実施する場合、レーザー側 3 名（オペレータ：1名、調整等作業者：2名）、除染ステージ側 3 名（オペレータ：1名、設置等作業者：2名）の 6 名体制で実施することが考えられる。一方、レーザー側、除染ステージ側作業を連続で行う場合、作業がピークとなるところの必要人員（次項に示す検討結果から 4 名）で実施することが考えられる。これら作業者は、装置調整時には現場作業、除染時には監視室において装置監視、オペレーション等を行うものとする。

(2) 作業工程

一日の運転操作スケジュールを表 5.3.4-1 に示す。本表では、レーザー側の調整と除染室側の調整を並行作業とした場合と連続作業とした場合それぞれについて、必要となる積算作業時間を示している。並行作業とした場合は 1 台の除染につき 5 時間 14 分、連続作業とした場合は 6 時間 09 分という結果となった。炭酸ガスレーザーの時と必要除染時間が同じであるにもかかわらず、若干作業時間が短縮されたのは、YAG レーザーはガス交換が不要であること、ファイバーを用いているため、アライメント作業時間が短縮されることによる。いずれの方法においても、1 日の実動作業時間（7 時間）以内で 1 台の処理が可能である。

(3) メンテナンス工程

レーザー側メンテナンスは、積算 60Mshot（コヒーレント社製 Infinity40-100 を使用した場合のランプ寿命）毎に 1 日（48 台分除染した後に 1 回）の頻度で、フラッシュランプの交換、ミラー等のクリーニングを実施する。この時に合わせて除染室側装置側の点検（駆動機構のストロークチェック等）も行う。また、電気系の絶縁チェック、インターロックの作動確認といった、全装置の定期点検を年に 1 回、5 日間実施するものとする。メンテナンス作業は通常作業員が実施するものとする。

以上より、YAG レーザーを用いた場合の年間処理台数は、1 式当たり 211 台となる。

(4) 運転に必要なユーティリティー使用量の検討

表 5.3.3-1 に示した装置を用いた時の 1 回の除染作業に必要な電力量について、表 5.3.4-2 に示す。

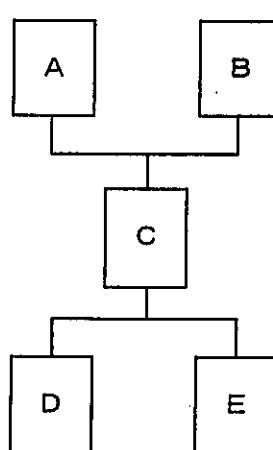
(5) 消耗品交換頻度の検討

本システムで必要となる消耗品としては、レーザー用フラッシュランプ、フィルター類があり、その交換頻度についてはフラッシュランプについては 60Mshot に 1 回必要である。フィルターについては炭酸ガスレーザーの時と同様、年 1 回の交換とする。

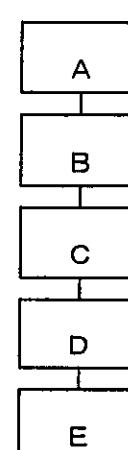
表5.3.4-1 YAGレーザー除染システムの運転操作方案

段階	対象装置	作業区分	項目	作業内容	所要時間(分)	必要人員(人)	積算時間(1) 並行作業	積算時間(2) 連続作業	備考
除染前	レーザー装置	A	START	—	—	—	0:00	0:00	
			装置立ち上げ	(1) 電源投入 (2) チラー起動	15	3	0:15	0:15	定常状態になるまで
			出力等確認	(1) 低出力低繰り返し発振 (2) モード確認 (3) パーンパターン確認 (4) エネルギー確認	5	3	0:20	1:20	
			レーザアライメント (Cold側)	(1) He-Ne光との光軸調整、確認 (2) 伝送ミラーアライメント	10	3	0:30	0:30	
	除染装置	B	START	—	—	—	0:00	—	
			装置立ち上げ	・各種機器電源投入	10	3	0:10	0:40	
			除染対象物搬入	・除染対象物を指定箇所に持ち込み	—	—	(0:10)	(0:40)	指定箇所に持ち込み済であることを前提
			対象物状況確認	(1) 汚染状況確認、把握 (2) 機器変形状況確認、把握 (3) 除染の可否判断	5	3	0:15	0:45	
			玉掛け	(1) 除染対象物の吊り治具にワイヤー掛け (2) 重心位置調整、吊り上げ確認	5	3	0:20	0:50	
			移動	・搬入指定箇所から回転リング設置場所まで、クレーンにて移動	1	3	0:21	0:51	
			回転リング設置	(1) 除染対象物を回転リング内に装荷 (2) 中心位置確認調整(真出し) (3) 回転リング固定	10	3	0:31	1:01	
			移動	・回転リング設置場所から、一次置き場所までクレーンにて移動	1	3	0:32	1:02	
			除染対象物向き変更	(1) 除染対象物を横置きに倒す (2) 吊りワイヤー取外し (3) 吊りワイヤー再設置(リング上)	5	3	0:37	1:07	
			移動	・除染ステージへ移動	1	3	0:38	1:08	
除染中	全装置	C	セットティング	(1) 除染対象ステージにセッティング (2) 吊りワイヤー取外し	2	3	0:40	1:10	
			駆動系試運転	(1) 回転方向駆動確認 (2) 水平方向駆動確認	5	3	0:45	1:15	
			除染ヘッド位置調整	(1) 照射ポイント調整、位置確認 (2) 高出力、高繰り返し運転開始 (3) 付着物排気系、ガス供給系運転開始	5	4	0:50	1:20	
			除染開始	(1) 除染作業開始 (2) 除染状況、装置監視	206	4	4:16	4:46	
除染後	レーザー装置	D	除染終了	・装置運転停止	—	—	—	—	
			点検	(1) 光学系部品損傷確認 (2) その他点検	10	3	4:26	4:56	
			性能確認	(1) 低出力低繰り返し発振 (2) モード確認 (3) パーンパターン確認 (4) エネルギー確認	5	3	4:31	5:01	
			装置立ち下げ	・レーザー系立ち下げ	10	3	4:41	5:11	
	除染装置	E	点検	(1) 除染物確認 (2) 除染ステージ点検	10	3	4:26	5:21	
			除染対象物取外し	・吊りワイヤー設置	5	3	4:31	5:26	
			移動	・除染ステージから、一次置き場所までクレーンにて移動	1	3	4:32	5:27	
			除染対象物向き変更	(1) 吊りワイヤー取外し (2) 吊りワイヤー再設置(吊り治具に設置) (3) 除染物を縦置きにする	5	3	4:37	5:32	
			移動	・一次置き場所から回転リング設置場所まで、クレーンにて移動	1	3	4:38	5:33	
			回転リング設置	・除染対象物から回転リングを取り外し	5	3	4:43	5:38	
			移動	・除染物を搬出指定場所まで移動	1	3	4:44	5:39	
			フィルター清掃	(1) フィルター付着物払い落し (2) 付着物回収	20	3	5:04	5:59	
			装置立ち下げ	・除染装置系立ち下げ	10	3	5:14	6:09	
					総積算時間		5:14	6:09	並行作業の場合、各作業区分で時間がかかる方が速

* 積算時間(1)は、レーザー側作業と除染装置側作業を並行しておこなった場合。積算時間(2)は、レーザー側作業と除染装置側作業を連続して行った場合。
具体的には下記の通り。



(並行作業の場合～積算時間(1))



(連続作業の場合～積算時間(2))

表5.3.4-2 YAGレーザー除染システムの消費電力量

No.	装置名	機器名	員数	電力 (W/h)	合計電力 (W/h)	運転時間 (h)	1回当たりの 消費電力量 (W)
1	レーザーシステム	Nd:YAGレーザー本体	2	7,000	14,000	3.43	48,067
2	光学系	He-Ne レーザー	2	0.016	0.032	3.43	0.11
3	除染ヘッド	CCDカメラ	1	0.025	0.025	3.43	0.09
4	フィルターユニット	局所排気装置ユニット (集塵フィルタ付き)	1	3,700	3,700	3.43	12,703
5		静電補集装置	1	12,000	12,000	3.43	41,200
6		検知器 (放射性物質検知装置)	1	300	300	3.43	1,030
7	搬出入装置	クレーン設備	1	30,000	30,000	0.10	3,000
8	除染ステージ	駆動装置	1	40,000	40,000	3.43	137,333
9	その他	インターロック盤	1	4,000	4,000	6.15	24,600
10		制御盤・電源盤	6	4,000	24,000	6.15	147,600
11		遠隔操作盤	4	4,000	16,000	6.15	98,400
12		現場操作盤	3	4,000	12,000	6.15	73,800
13		監視カメラ	2	0.025	0.050	6.15	0.31
						総消費電力量 (kW)	587.7

5.4 真空アークによる除染処理プロセス・装置概念設計

5.4.1 前提条件

真空アークによる除染装置を検討するに当たり、前提条件を表 5.4.1-1 に示す。

表 5.4.1-1 真空アークによる除染 前提条件

項目	条件
アーク電流	200 A
処理面積	20cm ²
到達真空度	0.5 Torr (10Pa) 以下
処理速度	$2.5 \times 10^{-9} \text{m}^3/\text{s}$ ($1 \mu\text{m}$ を $25\text{cm}^2/\text{s}$ で除去)
汚染物回収方法	<ul style="list-style-type: none"> ・粉塵：真空吸引、フィルターによる除去 (プレ+HEPA) ・固形物：大半がセラミック内筒に付着する。 セラミック交換時（除去量 10cm^3 当たり 1 回交換）に回収する

5.4.2 処理プロセスの検討

(1) 処理の基本フロー

真空アークを用いて除染する場合の基本フローと、各ステップに対応する要素機器を図 5.4.2-1 に示す。本図に示すフローに従って除染作業を行う場合、処理の各プロセスにおいて特に検討が必要な項目としては下記が挙げられる。

- ① 除染対象物の設置方法
- ② 汚染物の捕集方法
- ④ その他

これら各項目について検討した結果を以下に示す。

(2) 除染対象物の設置方法の検討

5.1 節に示した機器を真空アークを用いて除染する場合、① 真空環境の生成方法（部分的か、全体か）、② 除染対象物の設置方向（縦置きか、横置きか）、③ 駆動方法（対象物を移動させるか、除染ヘッドを移動させるか）、④ 走査方向（除染対象物の円周方向から走査するか、幅方向に走査するか）について検討し、最終的にどのように搬出入し、設置するかを決める必要がある。

まず、真空環境をどのようにして生成させるかについては、除染対象箇所を部分的に真空にする場合、頻繁に真空排気と大気開放を繰り返すことになることになり、

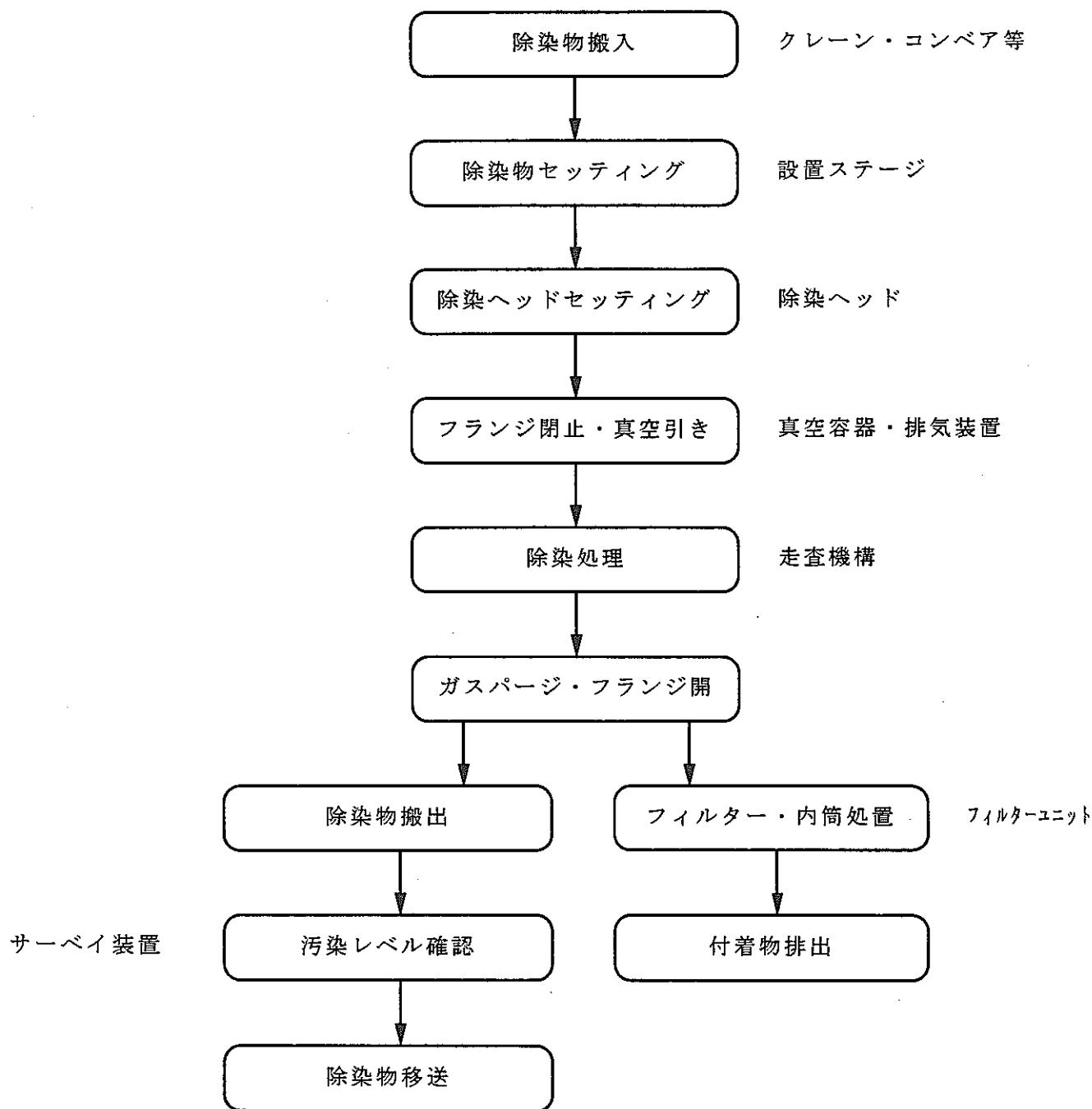


図 5.4.2-1 処理の基本フロー

効率が悪くなることが予想される。また、除染が必要な箇所に直接装置が接触することにもなり、それによる再汚染の心配もある。ここでは、除染対象物全体を真空にする方法を採用することとし、除染対象物を格納可能な真空容器を準備することとする。

除染対象物を真空容器内に格納する場合、なるべくコンパクトにするのが望ましい。除染対象物の設置方向は 5.1 節に示した機器の場合、形状が円筒であることから、この形状に合わせ横置きにするのが、装置がコンパクトになる。また、内部引き出し台車を設けて真空容器のフランジを開放する際に、台車を引き出し、その上に除染対象物を設置できるようにする。

駆動方法、走査方向については、YAG レーザーの時と同様に除染対象物を回転させ、除染ヘッドを円筒長手方向に一軸駆動させる方式を採用することとした。理由は YAG レーザーの時と同様、安定した除染速度が得られるからである。

以上より、5.4.1 項の前提条件で走査時間を探るが、前提条件には不明点が多いため、ここでは付着物の厚さが $1 \mu\text{m}$ 以下のものは $25\text{cm}^2/\text{s}$ の面積速度で処理できると仮定する。

$$\begin{aligned}\text{付着物厚さ} &: 8.43 \times 10^{-2} (\mu\text{m}) < 1 \mu\text{m} \\ &(2.0\text{Bq/cm}^2 \text{のウラン単体が付着していると仮定})\end{aligned}$$

$$\text{処理速度} : 25\text{cm}^2/\text{s}$$

これより、 $\phi 1.7\text{m} \times 3\text{m}$ の円筒の全面積を走査するのに充分な時間は、1.78 時間ということになる。

(3) 付着物の捕集方法

真空アークにより除去された付着物は、大半がセラミック内筒に付着すると考えられるが、粉塵も発生する可能性がある。この粉塵の回収に関しては現状知見が無いが、排気装置側排気口から漏れる可能性があるため、排気口にプレフィルターと H E P A フィルターを設置し回収することとする。

(4) その他

稼動中に装置本体にトラブルが発生した場合、および排ガス中の放射性物質が除去しきれず、放射性物質を放出する恐れが生じた場合に備え、レーザーヘッドや除染対象物の駆動を止める、レーザーの照射を止める等のインターロックを設置する。

(5) まとめ

以上の検討結果をまとめた真空アーク法による除染処理のシステム設計書を表 5.4.2-1 に、概念図を図 5.4.2-2 に示す。本装置を用いた場合、作業プロセスとしては表 5.4.2-1 に記載のようになると考えられる。

表5.4.2-1 真空アーク除染システム システム設計書

No.	項目	内 容	備 考
1	要求仕様	<p>真空アークによる除染装置 ハーク電流 : 200A 到達真空度 : 0.5Torr以下 处理面積 : 20cm² 处理速度 : 0.1 μm / shot (深さ) 除染係数 : 20/0.1 μm(深さ)</p> <p>汚染物回収方法 : 粉塵: 真空吸引、フィルターによる除去 (プレ+HEPA) 固形物: 大半がセラミック内筒に付着する。セラミック 交換時 (除去量10cm³当たり1回交換) に回収する。</p>	
2	除染対象	<p>使用済み集合型遠心機の遠心機チャンバー胴体部 形状: 直径: 1.7m 高さ: 3.0m の円筒 材質: 鉄 重量: 2040 kg(板厚16mmと仮定)</p>	左記チャンバーは切り離された状態。上板、下板 は対象から除く 内径
3	付着物	<p>対象物質: UF4/U2F9 付着量: 2.0 Bq/cm² 付着厚さ: 8.43 × 10⁻² μm(付着量からの推定値)</p>	
4	作業量	<p>処理台数: 1台/日 作業時間: 7時間 (9:00~17:00、途中1時間休憩)</p>	
5	設置環境条件	<ul style="list-style-type: none"> 既存の管理区域内に設置されることとする。 ユーリティ-設備は撤っていることを前提とする。 	
6	装置構成	<ul style="list-style-type: none"> 真空容器本体 真空排気装置 付着物捕集装置 電流導入系 除染トーチ 付着物蒸着セラミック内筒 遠隔操作装置 真空容器内部ステージ 除染対象物搬入装置 (クレーン) 局所排気装置 パーティション その他、必要な装置 	フィルターユニット
7	その他条件	<ul style="list-style-type: none"> 除染作業は遠隔操作、非接触が前提 対象物は真空容器内に納めることとする。 除染対象物は回転、アーク発生トーチは一軸駆動。 	
8	処理プロセス	<ol style="list-style-type: none"> 除染対象物搬入 回転リング設置 真空容器内部台まで移動 真空排気装置起動 アーク発生トーチ設定 移動フランジ閉止 真空引き アーク照射、スキヤニング スキヤニング終了 アーク発生トーチ退避 真空ブレーキ 移動フランジ開 除染対象物搬出ポイントまで移動 回転リング取外し 除染対象物搬出 フィルター清掃 	

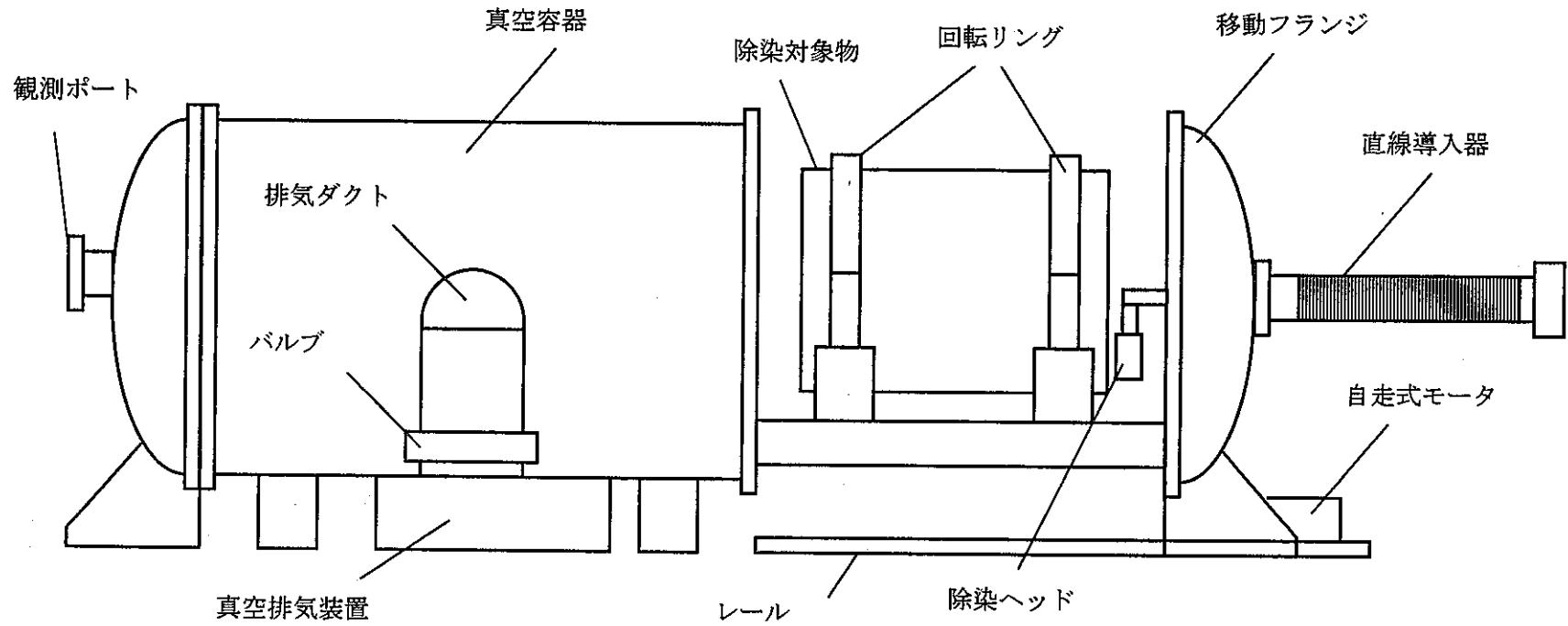


図 5.4.2-2 真空アーク除染システム概念図

5.4.3 真空アークによる除染処理装置概念設計

本装置を構成する機器の一覧を表 5.4.3-1 に、装置外形図を図 5.4.3-1 に、装置配置図を図 5.4.3-2 に示す。装置は、除染対象物を真空環境におくための真空容器及び排気装置、真空アークの照射及び付着物の除去を行うための除染ヘッド、除染対象物を回転させるための駆動ステージ、付着物の分離、排気ガス中に放射性物質が含まれるか否か確認するためのフィルターユニット、除染対象物を搬出入するためのクレーン設備から構成される。

表 5.4.3-1 真空アーク除染システムの装置構成・仕様(1/2)

No.	装置名	機器名	仕 様	員 数
1	真空容器	真空容器本体	Φ3000×5100 mm 材質: SUS フランジ開閉機構付き	1
2		排気装置	ロータリーポンプ 形式: M2021C1F (アルカテル) 排気速度: 375 L/min 到達真空度: 2×10^{-1} Pa	1
3	除染ヘッド	除染ヘッド本体	セラミック内筒付き陽極	1
4		直線導入器	除染ヘッド駆動用 ストローク: 3500mm	1
5	電源	アーク発生電源	形式: GP060-300R (高砂製作所) 出力電圧範囲: 0~60V 出力電流範囲: 0~300A 入力電圧: 200V 3φ 寸法: 650W × 850D × 850H	1
6	フィルターユニット	局所排気装置ユニット (集塵フィルタ付き)	形式: FCA-60 (日本環境調査研究所) 外形寸法: 縦1150 × 横700 × 高2500mm 定格出力: 3.7 kW 風量: 0~45 m³/min プレセラフィルタ寸法: 300 × 250 × 30mm HEPA フィルタ寸法: 610 × 950 × 150mm	1
7	検知器 (放射性物質検知装置)	緊急遮断弁	形式: 電磁スイッチ式スプリング駆動玉型弁 EI-FS (ベン) 口径: 150A 所要全閉時間: 1 sec以下 全閉リミットスイッチ付	1
8		検知器 (放射性物質検知装置)	機器名: アルファダストモニタ ALPHA-6 (エバーライン) 外形寸法: 400 × 360 × 310 mm	1
9	搬出入装置	クレーン設備	形式: 電気トロリ式電気チェンブロック DAM-3-4 (象印) 許容最大荷重: 3000 kg	1
10	除染ステージ	駆動装置	回転及び一軸駆動	1
11		回転リング	除染対象物回転用	1
12		回転リング用治具	回転リング設置用	1

表 5.4.3-1 真空アーク除染システムの装置構成・仕様(2/2)

No.	装置名	機器名	仕 様	員数
13	その他	インターロック盤	トラブル箇所指示、システム停止	1
14		制御盤・電源盤	アーク、駆動装置等用	7
15		遠隔操作盤	アーク、駆動装置等用	4
16		現場操作盤	アーク、駆動装置用	3
17		パーティション	寸法 : 7750W×5000D×4100H 材質 : SS400 付属品 : 電動シャッタ、窓、扉、照明灯	1
18		監視カメラ	CCDカメラ本体	2

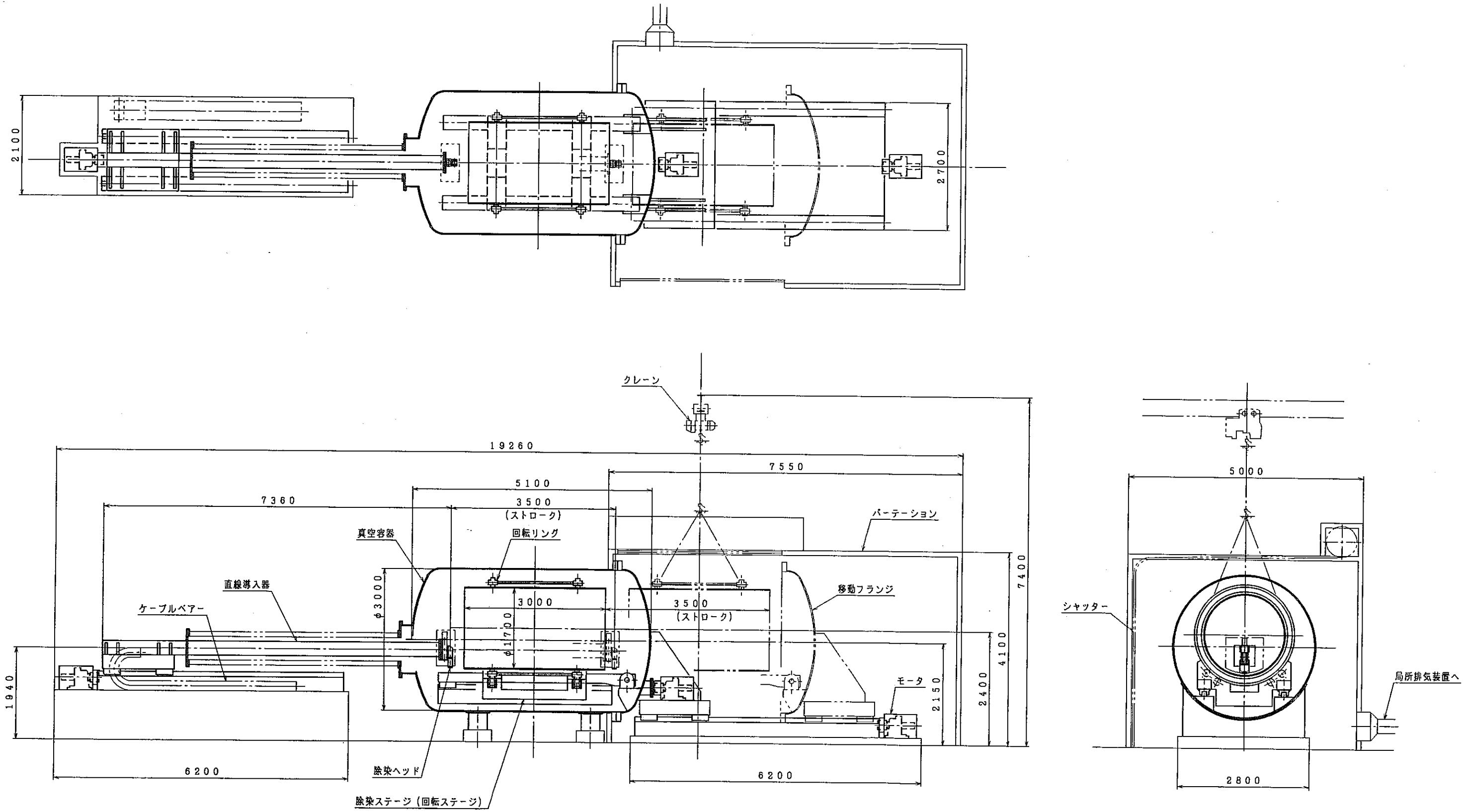


図 5 . 4 . 3 - 1 真空アーク除染装置

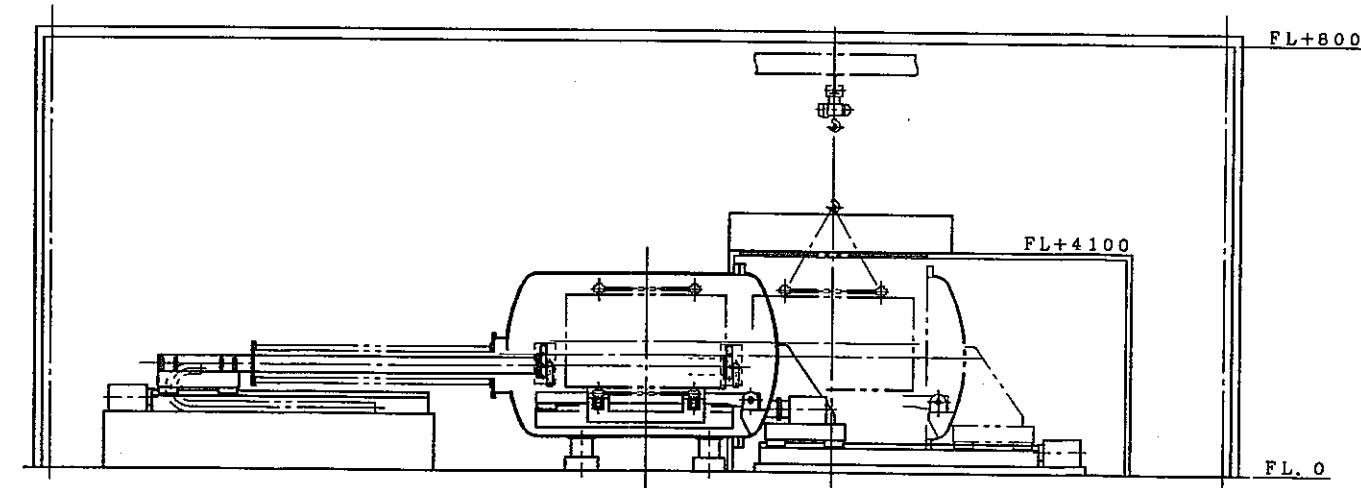
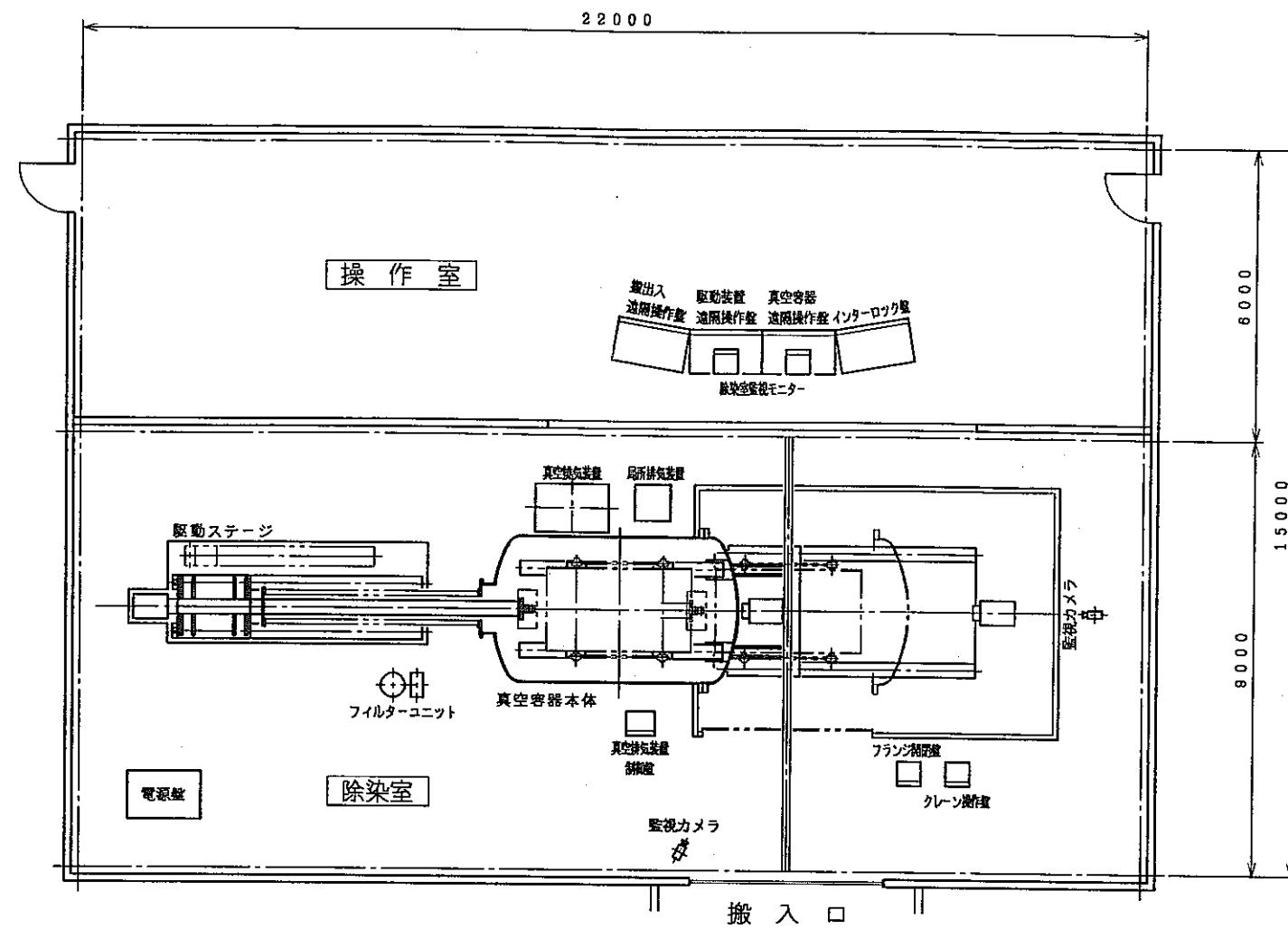


図 5. 4. 3-2 真空アーク除染システム配置図

5.4.4 運転操作方案

(1) 作業体制

真空アーク法はレーザー法と異なり、並行して実施可能な作業が無いため連続作業となる。作業は3名体制（オペレータ：1名、設置等作業者：2名）で実施することが考えられる。これら作業者は、装置調整時には現場作業、除染時には監視室において装置監視、オペレーション等を行うものとする。

(2) 作業工程

一日の運転操作スケジュールを表5.4.4-1に示す。作業時間は4時間30分と、今回検討した除染法の中では最も短い時間で処理が可能となった。除染対象物1台当たりの必要除染時間が1時間47分と短いことから、1日に2台処理可能か検討したが、この場合、最短でも8時間を僅かに超えると考えられる（表5.3.4-1の除染前の除染ステージ移動から除染後のフィルター清掃までの一連の作業を2回繰り返しとして作業時間を積算）。

(3) メンテナンス工程

メンテナンスは、半年に1回1日間の割合で除染室側装置の点検（駆動機構のストロークチェック等）を行う。また、電気系の絶縁チェック、インターロックの作動確認等の全装置の定期点検を年に1回、5日間実施するものとする。メンテナンス作業は通常作業員が実施するものとする。

以上より、真空アーク法を用いた場合の年間処理台数は、1式当たり213台となる。

(4) 運転に必要なユーティリティー使用量の検討

表5.4.3-1に示した装置を用いた時の1回の除染作業に必要な電力量について、表5.4.4-2に示す。

(5) 消耗品交換頻度の検討

本システムで必要となる消耗品としては、除染ヘッドに使用するセラミック内筒、及び排気装置に使用するフィルター類がある。セラミック内筒については付着量 10cm^3 につき1回交換が必要である。1回の除染で除去する付着物の体積は、ウラン換算で約 1.33cm^3 （除染面積： 16m^2 、付着物厚さ $8.43 \times 10^{-2}\mu\text{m}$ として計算）と見積られる。よって、7台の除染に1回の割合でセラミック内筒交換となる。フィルターについては炭酸ガスレーザーの時と同様、年1回の交換とする。

表5.4.4-1 真空アーク除染システムの運転操作方案

段階	項目	作業内容	所要時間	必要人員	積算時間	備考
	START	—	—	—	0:00	
	装置立ち上げ	・各種機器電源投入	10	3	0:10	
	真空容器移動フランジ開放	・移動フランジを所定位置まで開放	10	3	0:20	
	除染対象物搬入	・除染対象物を指定箇所に持ち込み	—	—	(0:20)	指定箇所に持ち込み済であることを前提
	対象物状況確認	(1)汚染状況確認、把握 (2)機器変形状況確認、把握 (3)除染の可否判断	5	3	0:25	
	玉掛け	(1)除染対象物の吊り治具にワイヤー掛け (2)重心位置調整、吊り上げ確認	5	3	0:30	
	移動	・搬入指定箇所から回転リング設置場所まで、クレーンにて移動	1	3	0:31	
	回転リング設置	(1)除染対象物を回転リング内に装荷 (2)中心位置確認調整(真出し) (3)回転リング固定	10	3	0:41	
	移動	・回転リング設置場所から、一次置き場所までクレーンにて移動	1	3	0:42	
除染前	除染対象物向き変更	(1)除染対象物を横置きに倒す (2)吊りワイヤー取外し (3)吊りワイヤー再設置(リング上)	5	3	0:47	
	移動	・除染ステージへ移動	1	3	0:48	
	セッティング	(1)除染対象ステージにセッティング (2)吊りワイヤー取外し	2	3	0:50	
	駆動系試運転	(1)回転方向駆動確認 (2)水平方向駆動確認	5	3	0:55	
	真空容器移動フランジ閉止	・移動フランジを閉止	10	3	1:05	
	真空引き	・所定圧力まで真空引き	20	3	1:25	
除染中	除染開始	(1)除染作業開始 (2)除染状況、装置監視	107	3	3:12	
	除染終了	・装置運転停止	—	—	—	
除染後	真空リーグ	・真空容器を大気圧まで復圧	10		3:22	
	真空容器移動フランジ開放	・移動フランジを所定位置まで開放	10	3	3:32	
	点検	(1)除染物確認 (2)除染ステージ点検	10	3	3:42	
	除染対象物取外し	・吊りワイヤー設置	5	3	3:47	
	移動	・除染ステージから、一次置き場所までクレーンにて移動	1	3	3:48	
	除染対象物向き変更	(1)吊りワイヤー取外し (2)吊りワイヤー再設置(吊り治具に設置) (3)除染物を縦置きにする	5	3	3:53	
	移動	・一次置き場所から回転リング設置場所まで、クレーンにて移動	1	3	3:54	
	回転リング設置	・除染対象物から回転リングを取り外し	5	3	3:59	
	移動	・除染物を搬出指定場所まで移動	1	3	4:00	
	セラミック内筒交換	(1)セラミック内筒の取外し (2)新規内筒設置 (3)使用済内筒パッキング	(20)	(3)	(4:20)	セラミック内筒交換必要時
	フィルター清掃	(1)フィルター付着物払い落し (2)付着物回収	20	3	4:20 (4:40)	
	装置立ち下げ	・除染装置系立ち下げ	10	3	4:30 (4:50)	

表5.4.4-2 真空アーク除染システムの消費電力量

No.	装置名	機器名	員数	電力 (W/h)	合計電力 (W/h)	運転時間 (h)	1回当たりの 消費電力量 (W)
1	真空容器	排気装置	1	550	550	1.78	981
2	電源	アーク発生電源	1	26,400	26,400	1.78	47,080
3	フィルタユニット	局所排気装置ユニット (集塵フィルタ付き)	1	3,700	3,700	1.78	6,598
4		検知器 (放射性物質検知装置)	1	300	300	1.78	535
5	搬出入装置	クレーン設備	1	30,000	30,000	0.10	3,000
6	除染ステージ	駆動装置	1	40,000	40,000	4.50	180,000
7	その他	インターロック盤	1	4,000	4,000	4.50	18,000
8		制御盤・電源盤	7	4,000	28,000	4.50	126,000
9		遠隔操作盤	4	4,000	16,000	4.50	72,000
10		現場操作盤	3	4,000	12,000	4.50	54,000
11		監視カメラ	2	0.025	0.050	4.50	0.23
						総消費電力量 (kW)	508.2

6. 高除染技術の経済性評価

6.1 前提条件

6.1.1 基本的な考え方

新除染技術の経済性評価では、処理単価を算出する必要がある。処理単価は除染対象となる装置を除染するために要する、集合型遠心機チェンバー胴体部1台当たりのコストである。処理単価を算出するためには、以下の各費用を評価する必要がある。

- (1) 建設費
- (2) 運転（人件費、ユーティリティー費）
- (3) 保守費
- (4) その他費用（固定資産税等）

本評価では、上記の諸費用を算出するために必要な次項以下に示す作業を実施する。なお、本評価で算出する費用は、経済性評価実施時点での知見をもとに評価した概算値である。

6.1.2 評価内容・方法

(1) 建設費

各設備の建設費を評価する。具体的には、市販の一般産業品の価格、あるいはスケールアップ則等を用いた推定値算出を主とする。設備費算出に関する条件を下記に示す。

- ① 設備費は本研究での装置概念設計をもとに構成する各機器の購入製作費用を算出する。
- ② 据付調整費は設備費に適切な比率を乗じることにより評価する。具体的には分子レーザー法ウラン濃縮プラントの経済性評価で用いた30%を用いる
- ③ 価格は平成11年度価格とし、エスカレーションを含めない
- ④ 設備は十分な性能検証が行われていることを前提とする。なお、性能保証に要する費用は含まない。
- ⑤ 研究開発費および借入金利子は含まない
- ⑥ 土地取得、整地、立地に係わる申請書、許認可取得費、法体系整備に関する費用は含まない。
- ⑦ 装置設計費は含まない。
- ⑧ 装置試運転費用は含めない。
- ⑨ 装置償却期間は10年とする。

(2) 運転費

JNC 殿御提示の人件費単価、ユーティリティー単価をもとに、人件費、ユーティリ

ティー費、消耗品費を評価する。運転に必要な消耗品は、フィルター、セラミック内筒、YAG レーザー用フラッシュランプを対象とし、各々の交換頻度に基づき費用を算出する。なお、除染後の2次廃棄物処理費用は、本検討では評価しない。

(3) 保守費

保守費については、設備費に適切な比率を乗じることにより評価する。具体的には分子レーザー法ウラン濃縮プラントの経済性評価で用いた 1.5% を用いる

(4) その他費用（固定資産税等）

本評価では算出せず。

6.2 評価結果

評価結果については、別冊資料（経済性評価結果について）に示す。

7.まとめ

7.1 研究成果のまとめ

表面汚染が主な放射性固体廃棄物に対して、高除染度の得られる可能性がある技術として、レーザークリーニング法、真空アーククリーニング法について、文献および特許調査を実施した。また、得られた情報に基づき、具体的な適用例として集合型遠心機チェンバーの胴体部を除染するための装置の概念設計を実施し、下記の成果が得られた。

- (1) 固体表面クリーニング技術（レーザー法、放電法）の現状調査では、公開文献、特許、その他の資料により技術調査を実施し、関連する文献をリストにまとめるとともに、技術データシートを作成した。また、クリーニングシステムを設計するために有用な情報を構成機器毎にまとめた。
- (2) 除染処理への検討例、適用例等の調査と評価でも、上記と同様、公開文献、特許、その他の資料により技術調査を実施し、関連する文献をリストにまとめるとともに、技術データシートを作成した。
- (3) 上記調査結果に基づき、炭酸ガスレーザー、YAGレーザー、真空アークそれぞれを用いた除染処理プロセス・装置概念設計を実施し、装置および処理プロセス概念の具体化をはかった。いずれの装置も回転リングを用いて除染対象物を回転させ、除染ヘッドを除染対象物の円周方向に走査することにより、除染速度が一定となるように設計した。

7.2 今後の開発課題

今後、装置の実用化に向けて設計上必要と考えられる開発課題を以下に列記する。

(1) 炭酸ガスレーザーおよびYAGレーザー除染システム

① 除染ヘッドの構造適正化

除染部においてガスの吹きつけ量に関する情報はあるものの、吸引速度、ガスの照射吸引角度や除染対象物からの距離と捕集率との関係に関するデータ、レンズ等の汚れに関するデータはあまり無い。これらのデータを取得し、除染ヘッド部構造の適正化をはかる必要がある。

② フィルターによる捕集特性

フィルターによるアブレーションブルームの捕集特性を把握するとともに、フィルターの交換頻度等に関する知見を得る必要がある。

③ ファイバーによるビーム伝送特性

本設計では、YAGレーザーによる除染システム設計においてファイバーを用いた。これは、市販のレーザープラスト装置において、複数本のファイバーを用いてQスイッチパルスYAGレーザーのレーザー光を伝送していることに基づく

ものであるが、その伝送特性については不明な点が多い。今後、複数本のファイバーでの伝送特性について評価する必要がある。

④ 除染システムの仕様詳細化と経済性評価精度の向上

今回の概念設計で設定した個々の機器については、更に仕様詳細化をはかる必要がある（除染ステージ、駆動機構等）。これらハードの仕様検討結果、および運転に関する詳細データに基づき、除染システムの経済性評価精度の向上をはかる必要がある。

(2) 真空アーク除染システム

本法については、放射性物質の除去に関する知見が無い。今後、試験により、除染係数の把握をはじめ、除去特性について把握する必要がある。

8. 参考文献

- (1) IMEN K, LEE S J and ALLEN S D: Laser-assisted micron scale particle removal, *Appl Phys Lett*, VOL.58, No.2, 203-205(1991)
- (2) Midorikawa K, Hatanaka H, Obara M and Tashiro H: A 1kHz repetition-rate 500W CO₂ TEA laser employing solid-state pulse power conditioning, *Meas Sci Technol*, VOL.4, 388(1993)
- (3) RAJ T, McCREADY D E and CARNIGLIA C K: Substrate cleaning in vacuum by laser irradiation, *NIST Spec Publ*, 775, 152-165(1989)
- (4) LU Y F, SONG W D, TEE C K, CHAN D S H and LOW T S: Optical surface breakdown of alkali halide crystals by microsecond pulses from a wide-aperture CO₂ laser, *Jpn J Appl Phys Part1*, VOL.37, No.3A, 840-844 (1998)
- (5) 福井康太, 小川竜一郎, 石島昇, 谷本健一: レーザ除染技術の開発(3) レーザ伝送系の特性試験, 核燃料サイクル開発機構公開資料 JNC TN 9410 99-008, 119(1999)
- (6) カンテル社: レーザーブラスト装置カタログ
- (7) PEEBLES H C, CREAGER N A and PEEBLES D E: Solvent Substitution, Surface cleaning by laser ablation, *Annu. Int. Workshop Solvent Substitution*, 1st, 1-9(1990)
- (8) 特許序編: レーザ加工機械 11, 社団法人発明協会(1999)
- (9) 武田 鉱一、竹内 順: 真空アークによる金属表面酸化膜の除去, 日本国金属学会誌, VOL.63, No.1, 41-47(1999)
- (10) 日本環境調査研究所: 放射性ヒューム捕集装置カタログ

添付資料：技術データシート

技術データシート

(1/1)

資料コード LGM-0001

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	84A0163393
2	和文標題	銅鏡表面近くの空気絶縁破壊プラズマ形成しきい値の、表面での波長 $10.6 \mu m$ の吸収係数への依存性
3	英文標題	Dependence of the threshold of formation of an air breakdown plasma near copper mirrors on the absorption coefficient of their surface at the wavelength of 10.6μ .
4	著者・発表者	KONO V I, LAVRENT'EV YU V, STEPANOV YU I, CHAPLIEV N I, SHIRKOV A V
5	資料名	Sov J Quantum Electron
6	年巻号	
7	実施機関	P. N. Lebedev Physics Inst. Academy of Sciences of the USSR
8	目的・内容	機械的方法を用いて研磨した多結晶の銅鏡表面を種々の方法で洗浄し、吸収係数と標題のプラズマ形成しきい値エネルギー密度との関係を明らかにした。
9	クリーニング対象	銅鏡
10	方法・条件	CO ₂ レーザパルスは、出力エネルギーが 0.5 J 以下でパルス幅が約 $1.5 \mu s$ である。NaCI のレンズを用い約 0.7 mm^2 のスポットに集光した。
11	成果・結論	スポットの強度分布はほぼ一様でホットスポットが無かった。 測定の結果照射エネルギー密度は洗浄法に関係なく、吸収係数に対して一価の依存性を示す。 レーザー照射前に機械的洗浄（エチルアルコール、水酸化物の超音波浴室内に浸す）を実施すると、吸収係数は縮小し、逆に、エネルギー密度は増大する。
12	評価	装置設計に有用な情報としては下記があげられる。 特になし。

技術データシート

(1/1)

資料コード LG0-0002

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	88A0087395
2	和文標題	ガラス表面のレーザ洗浄 熱拡散効果
3	英文標題	Laser cleaning of glass surfaces: The effect of thermal diffusion.
4	著者・発表者	WUERZBERG E (Rafael Lab., Haifa, ISR) ; MARMUR A (Technion, Haifa, ISR)
5	資料名	J Colloid Interface Sci
6	年巻号	VOL. 119, NO. 2 PAGE. 362 - 370 1987
7	実施機関	上記
8	目的・内容	cw CO ₂ レーザ照射によるソーダガラス及びパイレックスの表面洗浄についてオージェ分析の連続スパッタリング解析により検討し、メカニズムを解明する。
9	リーニング 対象	ソーダガラス及びパイレックス
10	方法・条件	cw CO ₂ レーザー (1020 Hadron マルチライン) の照射条件 出力 : 7 ~ 9W レーザ径 : 1.27cm 照射時間 : 15~300sec
11	成果・結論	cw CO ₂ レーザーによる照射により、汚染が表面だけでなく表面下の界面領域からも取り除かれる。 界面領域から表面への汚染物質の輸送は主として熱拡散機構によると確認した。
12	評価	装置設計に有用な情報としては下記があげられる。 特になし。

技術データシート

(1/1)

資料コード LG0-0003

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	90A0037500
2	和文標題	光学表面のレーザクリーニング
3	英文標題	Laser cleaning of an optical surface.
4	著者・発表者	B E L O V N N
5	資料名	Sov J Opt Technol
6	年巻号	VOL. 56, NO. 3 PAGE. 164 - 166 1989
7	実施機関	
8	目的・内容	高密度のゴミ粒子が、NaCl, K8 およびスチールのプレート表面に存在する場合の光学素子のレーザクリーニングについて調べた。
9	クリーニング対象	NaCl, K8, スチールのプレート
10	方法・条件	使用レーザー：CO ₂ レーザー 埃で覆われていた基板に対し、レーザー放射し、埃の除去状況を観察した。
11	成果・結論	基板上の粒子密度が増加すると、所与の方向の粒子供給精度が減少とともに、レーザクリーニング中に表面上に亀裂のネットワークが生ずる確率が増大することが分かった。 ちり分子は、閾値値の近くで、強烈に損傷をあたえること無く NaCl サブストレートの表面から取り除かれた。 レーザー光線による粒子供給の高い精度のために重要な必要な条件は、1 点のみにレーザー光線粒子があることである。 光学要素の線形スキャン速度とレーザーパルスの反復頻度は、第一レーザーパルスの後に、分子除去される表面に対して、第二のレーザー照射が表面そのものを除去することをレーザー光線の軸への正確な角度での照射で防がなければならない。 レーザー光線での分子の軽い反作用的な加速は、他の光学の要素表面の 1 部分からのちり分子の取り除くのに貢献する。
12	評価	装置設計に有用な情報としては下記があげられる。

技術データシート

(1/2)

資料コード LG0-0004

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	90A0459446
2	和文標題	レーザ照射による真空中での基板のクリーニング
3	英文標題	Substrate cleaning in vacuum by laser irradiation.
4	著者・発表者	RAJ T, MCCREADY D E, CARNIGLIA C K
5	資料名	A S T M S p e c T e c h P u b l (Am Soc Test Mater)
6	年巻号	NO. 1099 PAGE. 152 - 165 1989
7	実施機関	Martin Marietta Astronautics Group, NM
8	目的・内容	溶融石英基板の超高真空チャンバー中のCW CO ₂ レーザ照射によるクリーニング効果を調べた。
9	クリーニング対象	溶融石英基板
10	方法・条件	<p>装置の主要構成</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 200W CW CO₂ レーザー (Coherent Model 41) ・ He-Ne レーザー (NRC Model 1103P)、 ・ アルミ製反射ミラー ・ ビームスプリッター (ZnSe) ・ 自動式ステージ (Aerotech モデル ATS-302H) <p>試験時のレーザー照射条件</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 出力 : 100W at 0.34cm² (パワー密度 : 300W/cm²) ・ スキャン間隔 : 3.75mm ・ スキャン速度 : 4mm/sec
11	成果・結論	<p>レーザ照射は、低パワービームで水は脱離するが、炭化水素の脱離には更に高いパワーが必要である。蒸着直前のレーザクリーニングは、被覆膜の改善に有用である。</p> <p>ただし、除去後10数時間で有機物の再沈着が起こる。また、炭化水素または水の構成分子は基板表面の状態に関わりなく検出される。</p> <p>これは、レーザー照射によって基板表面が高温となり、分子破壊を起こしている可能性がある。</p>
12	評価	装置設計に有用な情報としては下記があげられる。 1. レーザー装置構成

補足説明シート
(装置仕様・構成・実験データ等)

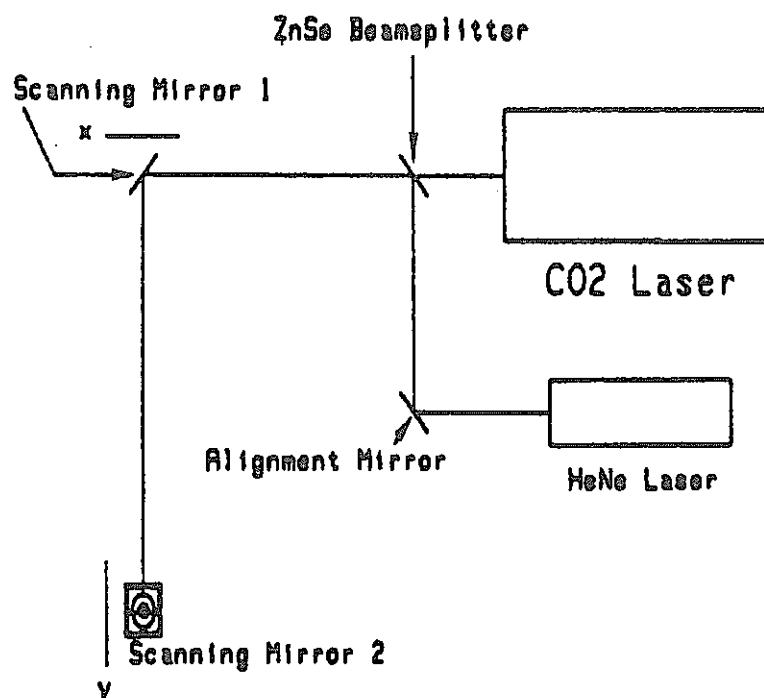


Figure 1. Schematic of optical train used for laser irradiation experiments.

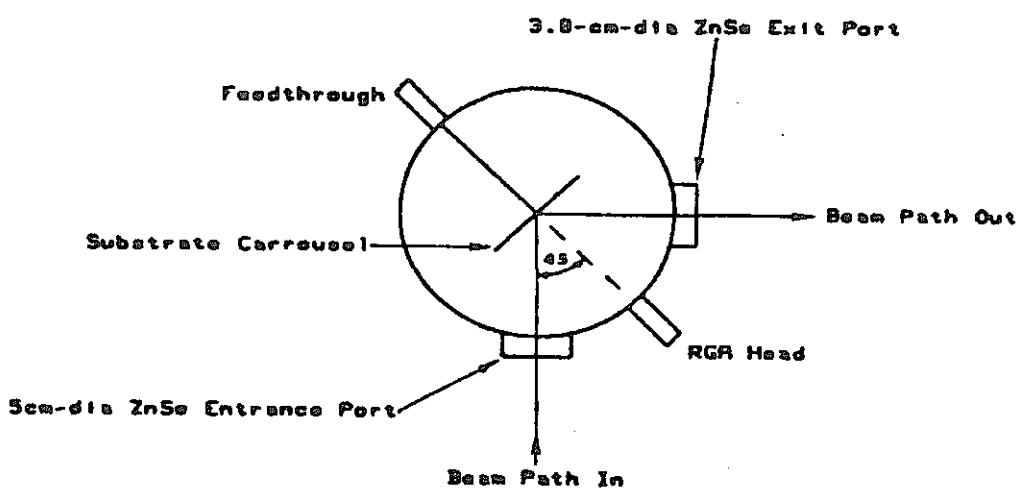


Figure 3. Schematic of the UHV chamber.

技術データシート

(1/2)

資料コード LGM-0005

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	91A0236912
2	和文標題	レーザによるミクロン規模の粒子の除去
3	英文標題	Laser-assisted micron scale particle removal.
4	著者・発表者	IMEN K, LEE S J, ALLEN S D
5	資料名	H0613A (APPLA) (0003-6951) Appl Phys Lett
6	年巻号	VOL. 58, NO. 2 PAGE. 203 - 205 1991
7	実施機関	Univ. Iowa,
8	目的・内容	半導体基板表面からミクロン規模の粒子の除去が可能なレーザ促進粒子除去 (LAPR) について述べた。 シリコンの基板に吸着した水にCO ₂ レーザパルスを照射し挙動を観察した。
9	リーニング対象	シリコン基板
10	方法・条件	TEA CO ₂ レーザー (Lumonics T-103) の照射条件 波長 : 10.6 μm パルス長 : 1 μs 最大エネルギー密度 : 30J/cm ² (55mJ/パルス)
11	成果・結論	基板を水に浸漬すると水は粒子の周りに優先的に吸着する。これにCO ₂ レーザパルスを照射すると、レーザ光は水にだけ吸収され基板には吸収されない。 このため、吸着水分子は爆発的蒸発を起こし、基板と粒子間に働く付着力に打ち勝って粒子を基板表面から除去する。 LAPRは本質的に清浄化技術であり、原位置デバイス・プロセス中で高真空中か超高真空中(UHV)に組入れられた時、初期及びプロセス生成時の微粒子の除去することができる。
12	評価	装置設計に有用な情報としては下記があげられる。 特になし。

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

EXPERIMENTAL SETUP

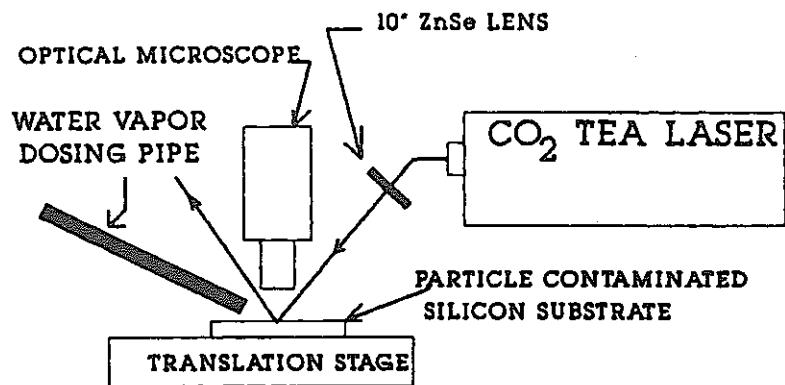


FIG. 1. Experimental setup.

技術データシート

(1/1)

資料コード LG0-0006

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	92A0045986
2	和文標題	ガラスのレーザ洗浄
3	英文標題	Laser Cleaning of Glass.
4	著者・発表者	UEDA M, MAKINO R, KAGAWA K; NISHIYAMA B
5	資料名	Opt Lasers Eng
6	年巻号	VOL. 15, NO. 4 PAGE. 275 - 278 1991
7	実施機関	Fukui Univ., Fukui, JPN; Nishiyama International Patent Office, Nagoya, JPN
8	目的・内容	パルスレーザ(YAG, CO ₂ およびN ₂ レーザ)をガラス洗浄に用いるために調査した。
9	クリーニング対象	ガラス
10	方法・条件	<p>下記の3種類のレーザを用いて実験した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ YAG レーザ : パルスエネルギー 1J パルス持続 0-2ms ・ N₂ レーザ : パルスエネルギー 6mJ パルス持続 6ns ・ TEA CO₂ レーザ : パルスエネルギー 3J パルス持続 100ns <p>レーザ光をレンズで集光し、ガラス表面の黒インクに照射した。</p>
11	成果・結論	<p>YAG レーザ清掃では効果的な清掃のために必要な閾値エネルギー強度がおよそ 90J/cm²であり、ガラス表面に多くの亀裂が生じた。</p> <p>N₂ レーザ清掃のための閾値エネルギー強度は、およそ 0.1J/cm²であり、YAG レーザ清掃のおよそ 1000 分の 1 であった。また、亀裂は、観察されなかった。</p> <p>CO₂ レーザ清掃のための閾値エネルギー強度は、0.5J/cm²あり、N₂ レーザ清掃の評価とほぼ同じであった。</p> <p>効果的な清掃のために閾値エネルギー強度を得るレーザ光ピーク出力は N₂ レーザ清掃では 10⁸J/s、CO₂ レーザ清掃では 10⁷J/s、YAG レーザ清掃では 10⁴J/s と評価された。</p> <p>以上のことより洗浄はレーザ光の熱エネルギーによるガラス上の汚れの蒸発とスパッタリングに基づくことが判明した。N₂ レーザのみがガラスの出射口表面の洗浄に用いることができた。ピーク出力 10⁶J/s と 10 ns 以下の短いパルス幅を持つレーザが実用上必要であると判明した。</p>
12	評価	<p>装置設計に有用な情報としては下記があげられる。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. レーザ光の種類及び照射条件

技術データシート

(1/1)

資料コード LGM-0007

No.	項目	内 容
1	JICST記事番号	92A0230686
2	和文標題	
3	英文標題	SURFACE CLEANING BY LASER ABLATION
4	著者・発表者	H. C. Peebles, N. A. Creager, and D. E. Peebles
5	資料名	U. S. DOE Reports
6	年巻号	CONF-901285
7	実施機関	Sandia National Laboratories
8	目的・内容	SUS304ステンレス鋼表面の金属酸化物のNd : YAGレーザークリーニングについて評価した。薄いクロムの酸化物層は120MW/cm ² 以上の単一の10nsパルスのレーザーを照射することによって完全に除去された。より厚い鉄の酸化物層のレーザーエッティングではステンレス連ラスチール基盤への過度のエッティングを避けるような自己制限作用を示した。
9	クリーニング 対象	SUS304L
10	方法・条件	<p>レーザー : QスイッチパルスNd : YAGレーザー (Spectra Physics製 Model DCR-2A)</p> <p>波長 : 1.064nm</p> <p>パルス幅 : 10ns</p> <p>ビームプロファイル : ガウシアン(直径5.9mm)</p> <p>その他 :</p> <ul style="list-style-type: none"> ・フラットトップのレーザービームを得るために直径2.9mmのアパチャーレンズを使用 ・サンプルは、SUS304製の真空チャンバ内に設置されている。 ・真空チャンバ内は真空排気後、ヘリウムガス(1気圧)で満たされる。 ・レーザーはクォーツ製窓を通してチャンバ内に基盤に垂直に照射される。
11	成果・結論	<p>SUS304Lステンレス鋼表面の金属酸化物のNd : YAGレーザークリーニングについて評価した。</p> <p>薄いクロムの酸化物層は120MW/cm²以上の単一の10nsパルスのレーザーを照射することによって完全に除去された。</p> <p>より厚い鉄の酸化物層のレーザーエッティングではSUS304Lステンレス鋼におけるよりも15倍のエッティング率を示した。</p> <p>30パルス以上のレーザー照射では、エッティング率はゼロであった。このことは、レーザー除去にとっては都合がよい。ステンレス鋼基盤への過度のエッティングを避けることができる(自己制限作用)。</p>
12	評価	<p>装置設計に有用な情報としては下記があげられる。</p> <p>SUS304L表面の鉄及びクロム酸化物に対して、レーザーのパルス数とエッティング深さの関係。また、鉄の酸化物層が除去されても、SUS304L基盤へのエッティング率はゼロであった。</p>

技術データシート

(1/1)

資料コード LG0-0008

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	92A0523665
2	和文標題	—
3	英文標題	Cleaning of Thomson scattering window by a blow-off method
4	著者・発表者	K. Narihara, S. Hirokura
5	資料名	Rev. Sci. Instrum
6	年巻号	63(6), June 1992
7	実施機関	National Institute for Fusion Science
8	目的・内容	<p>レーザーによってトムソン散乱窓のクリーニングする実用性について除去速度と窓に与える損傷の可能性の観点から検討した。</p> <p>トムソン散乱は磁気閉じ込め核融合において電子温度や密度を計測し、診断するための技術として広く使われている。</p> <p>得られた最適の除去速度は、YAG レーザーを用いて 30 Hz の繰り返し数で 0.4 J/パルスの条件で約 $6 \text{ cm}^2/\text{s}$ であった。</p>
9	クリーニング対象	ビューポート(ガラス)
10	方法・条件	<p>レーザー : Nd : YAG レーザー (YH900S; LUMONICS) 波長 : 1064 nm くりかえし数 : ~100 Hz パルスエネルギー : ~0.4 J パルス幅 : ~30 ns レーザーモード : TEM00</p>
11	成果・結論	<p>レーザーのエネルギー密度は直径 10 mm のレーザービームのフォーカスを変えて調整した。レーザーのエネルギー密度 E で分類すると以下のような結果となった。</p> <ul style="list-style-type: none"> (1) $E < 0.5 \text{ J/cm}^2$ 700 パルスのレーザーを照射しても除去されない (2) $0.5 \text{ J/cm}^2 < E < 2 \text{ J/cm}^2$ レーザーのショットに比例して除去される (3) $2 \text{ J/cm}^2 < E$ 1 ショットのレーザーで除去される <p>これらの結果、除去スピードは $2500 \text{ cm}^2/\text{7min}$ となった。</p> <p>また、レンズメーカーがレンズにダメージを与えない値として保証している 5 J/cm^2 以下のエネルギー密度の 2 J/cm^2 で十分除去できる。</p> <p>市販の高繰り返しレーザーを用いて、トムソン散乱窓の内側に形成された薄い層を、実用的な速度、かつガラスへの損傷が無視できる条件で除去することができた。また、市販の二次元のコンピュータ制御されたレーザースキナーを用いてレーザー窓クリーナを構成した。</p>
12	評価	レーザーのスペック以外特に装置設計に有用な具体的な記述は無し。また、除去しようとしているビューポート(ガラス)に付着している物質についての記載もなし。

技術データシート

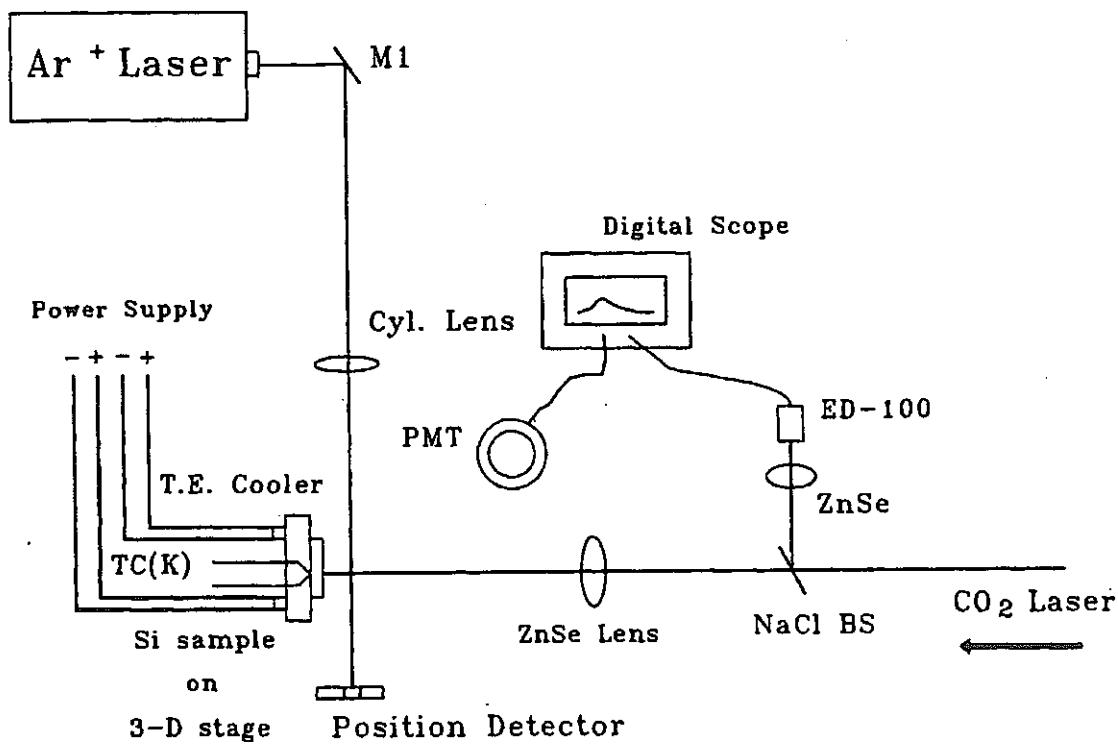
(1/2)

資料コード LGM-0009

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	94A0117446
2	和文標題	レーザ光による粒子除去の衝撃波解析
3	英文標題	Shock wave analysis of laser assisted particle removal.
4	著者・発表者	LEE S J, IMEN K, ALLEN S D
5	資料名	C0266A (JAPIA) (0021-8979) J Appl Phys
6	年巻号	VOL. 74, NO. 12 PAGE. 7044 - 7047 1993
7	実施機関	Univ. Iowa, Iowa
8	目的・内容	固体表面から水のようなエネルギー移動媒質をレーザ照射によって爆発的に蒸発させて各種の粒子を除去する新しいレーザクリーニング技術を研究した。
9	リーニング対象	Si 基板
10	方法・条件	TEA CO ₂ レーザーを He-Ne レーザーをガイドとして、ポリスチレンまたは Al2O3 をスプレーした Si 基板上に水を吸着させた汚染サンプルへ照射する。 照射時の基板表面を観察するためフォトマルチプライアーチューブ（波長 488nm）で、cw Ar+レーザーを利用した。 CO ₂ レーザー照射条件 波長 : 9.6 μm , 出力エネルギー : 30mJ
11	成果・結論	CO ₂ レーザ光のエネルギーが粒子除去の許容限界値より非常に高い場合には、超音速で伝搬する衝撃波の発生を観測し、その変換効率を測定した。 この時の変換効率は 30%、衝撃波の許容限界は 16.1 mJ (=4.2 J/cm ²) である。 1 回の照射で Si 表面の粒子のおよそ 92%は取り除かれる。、5 回照射すると除去率はほとんど 100%に近づく。（大気圧下では一部再沈着を伴う）
12	評価	装置設計に有用な情報としては下記があげられる。 1. 装置概略構成

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

FIG. 1. The schematic diagram of the Ar^+ laser reflection/scattering experiments.

技術データシート

(1/1)

資料コード LGMC-0010

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	94A0732128
2	和文標題	高繰り返し TEA CO ₂ レーザによる固体表面の高速クリーニング
3	英文標題	High Speed Cleaning of Solid Surface by High-Repetition Rated Pulses from a TEA CO ₂ Laser.
4	著者・発表者	常見明良、萩原弘二、田代英夫；平井亮、長坂啓吾
5	資料名	レーザー研究
6	年巻号	VOL. 22, NO. 7 PAGE. 566 - 572 1994
7	実施機関	(理化学研究所) ; (東京理科大学)
8	目的・内容	塗装鉄板の表面塗料のアブレーションレート及び閾値測定を行なった。 レーザーフルエンスに対するアブレーション深さの変化及び、レーザー繰り返し率に対する除去効率の違いを測定した。 レーザーアブレーションの技術を用い、レーザー光による固体表面の高速クリーニングを行った。
9	クリーニング対象	鉄板、コンクリート
10	方法・条件	レーザー : TEA CO ₂ レーザー 繰り返し率 : 1 Hz ~ 1 kHz 平均出力 : ~ 500 W パルス出力 : ~ 500 mJ (実験では 300 mJ に固定して使用) パルス幅 : 約 100 ns 波 長 : 10.6 μm 上記レーザーを用いて、塗装鉄板の表面塗料のアブレーションレート・閾値測定及び、レーザーフルエンスに対するアブレーション深さの変化・レーザー繰り返し率に対する除去効率の違いを測定した。
11	成果・結論	TEA CO ₂ レーザーで 1 パルス当たりのフルエンスを 4.5 J/cm ² に固定し、鉄板上の塗装の除去を行なった場合、塗装の厚みの終端まで除去されると、それ以上レーザーを照射しても母材中には掘り進んでいかないことがわかった。 レーザーの繰り返し率を変化させ鉄板上の塗装の除去を行なった場合、レーザーの繰り返し速度を制御することにより、実質的なレーザー光強度を変化させ、多層膜上付着物でも、層ごとに除去が行なえることが確認できた。 鉄錆の除去では、ドライ状態では 200 Hz 以上で焦げができる、微量の錆が残った。アシスト液を吹き付けた後、除去した場合は焦げもできず、むらなく除去が行なえた。 泥、苔が付着したコンクリートブロックの除去を行なった場合、200 Hz 以上でブロック表面が露出した。 以上の結果より、比較的薄い塗料の鉄板を自動並進ステージで移動し、塗装の面積処理を行った結果、17 m ² /h の面積処理速度を得た。 表面付着物の除去は、これまで化学作用や機械的剥離によって除去されてきたが、レーザーを用いることによりドライプロセスができる点、また遠隔操作できるなど、レーザー除去法は従来に無い特色を持っており、様々な産業分野への応用、発展が期待される。
12	評価	装置設計に有用な情報としては下記があげられる。 1. 繰り返し率と除去対象物の関係

技術データシート

(1/1)

資料コード LG0-0011

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	94A0781119
2	和文標題	ガラス及び石英表面の指紋のレーザ誘起除去
3	英文標題	Laser-Induced Removal of Fingerprints from Glass and Quartz Surfaces.
4	著者・発表者	LU Y - F (National Univ. Singapore, Crescent, SGP); KUMURO S, AOYGAI Y (RIKEN, The Inst. Physical and Chemical Research, Saitama)
5	資料名	Jpn J Appl Phys Part 1
6	年巻号	VOL. 33, NO. 8 PAGE. 4691 - 4696 1994
7	実施機関	上記
8	目的・内容	大気中でのKrFエキシマレーザ、連続CO ₂ レーザまたはパルスCO ₂ レーザの照射による指紋の除去を研究した。
9	リーニング 対象	ガラス、石英
10	方法・条件	<p>1. KrFエキシマ・レーザー (ラムダ Physik LPX 100) 波長 : 248nm パルス幅 : 20ns エネルギー密度 : 70~450mJ/cm² 繰り返し率 : 5~10Hz</p> <p>2. TEA CO₂レーザー (CW及びパルス) 波長 : 10.6μm パルス幅 : 100ns エネルギー密度 : 420mJ/cm² 繰り返し率 : 1 Hz</p>
11	成果・結論	<p>レーザ洗浄前後の基板表面をEPMAで評価し、指紋除去には短波長で短パルス幅のレーザを用いる必要があることが分かった。 KrFエキシマレーザではガラス及び石英表面の指紋をパルスエネルギーが十分に強ければ数パルスで除去できる。 ガラス表面からの指紋除去は、パルス・エネルギー密度が高いときは、主に熱アブレーションによって行われ、低いときは光分解プロセスになる。 石英表面の洗浄効果はパルスレーザの入射方向により差がある。 CO₂レーザの連続照射では、指紋は長い波長のために加熱され、「乾かされる」だけであり、パルス照射の場合はガラス表面で固化を起こし完全に除去できないため、ともに有効でない。</p>
12	評価	装置設計に有用な情報としては下記があげられる。 特になし。

技術データシート

(1/1)

資料コード LG0-0012

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	95A0247533
2	和文標題	光学表面のレーザ処理
3	英文標題	Laser processing of optical surfaces.
4	著者・発表者	ONOKHOV A P, REZNICHENKO V V, YAKOVLEVA N S
5	資料名	J Opt Technol
6	年巻号	VOL. 62, NO. 1 PAGE. 52 - 54 1995
7	実施機関	S. I. Vavilov State Optical Inst., St. Petersburg
8	目的・内容	真空中で石英またはガラス部品の光学表面をCO ₂ レーザによりクリーニングする方法を理論計算及び実験の両方の観点から検証した。
9	クリーニング対象	石英またはガラス部品
10	方法・条件	レーザー : CO ₂ レーザー 光線パワー : 50W 上記レーザーを用い、計算及び実験にてクリーニング条件の最適化を行なった。
11	成果・結論	非定常の材質に対する加熱状態から理論計算して、レーザービームの照射時間、照射強度、クリーニングに要する全時間の最適化を行なった。また、サンプルの表面プロファイルを比較することでクリーニング対象物表面の光学的特性が大幅に改善できた。
12	評価	装置設計に有用な情報としては下記があげられる。

技術データシート

(1/2)

資料コード LG0-0013

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	95A0457609
2	和文標題	石灰石のレーザクリーニングの特性化
3	英文標題	Characterization of laser cleaning of limestone.
4	著者・発表者	COOPER M I, EMMONY D C (Univ. Technol., Leicestershire, GBR); LARSON J (National Museums and Galleries on Merseyside, Liverpool,
5	資料名	D0245B (OLTCA) (0030-3992) Opt Laser Technol
6	年巻号	VOL. 27, NO. 1 PAGE. 69 - 73 1995
7	実施機関	上記
8	目的・内容	汚れた石灰石影像のQスイッチNd:YAGレーザによる微細で制御されたクリーニング法について述べた。
9	クリーニング対象	石灰石影像
10	方法・条件	<p>使用レーザー: Spectron SL282 Nd:YAG Q-スイッチ・マルチモード</p> <ul style="list-style-type: none"> ・波長: 1.06 μm ・パルス幅: 6 ns ・繰り返し率: 10 Hz (最大エネルギー: 300 mJ/パルス) <p>石灰石影像にレーザーを照射し、吸収率の違いにより、黒く汚れたクラスト(外被)のみを選択的に蒸発、除去させる。</p>
11	成果・結論	<p>レーザー照射中の衝撃パルスの音響モニタリングすることで、石灰石影像石の表面から黒く汚れたクラストを選択的に除去できる。 (クラストが除去されるに従い衝撃パルスの振幅が大きくなり、やがて消滅する。)</p> <p>レーザー照射前に表面に薄い水膜を形成させることにより、必要なレーザエネルギーを低下させることができる。 (クラストの持つ沢山の孔に水分子を保留し、レーザー照射によるエネルギーで、水分子が爆発的な蒸発を起こし除去を促進する。)</p>
12	評価	装置設計に有用な情報としては下記があげられる。 特になし。

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

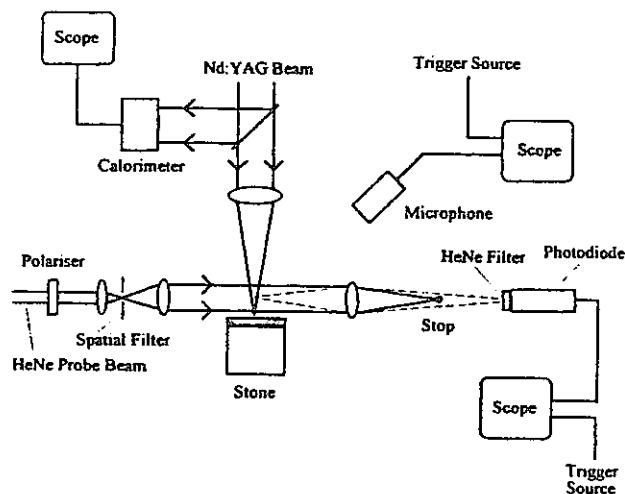
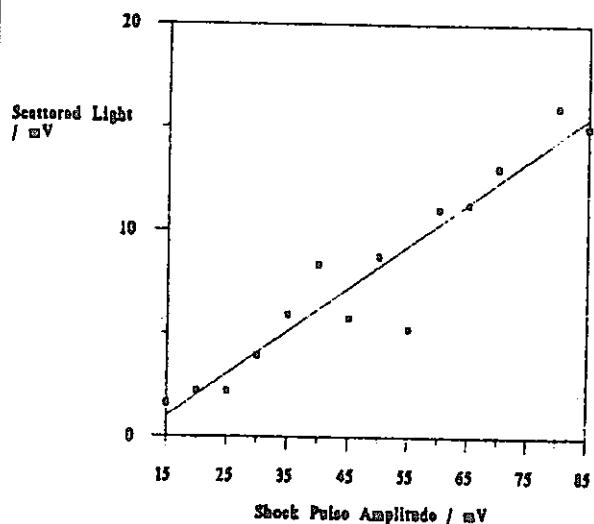
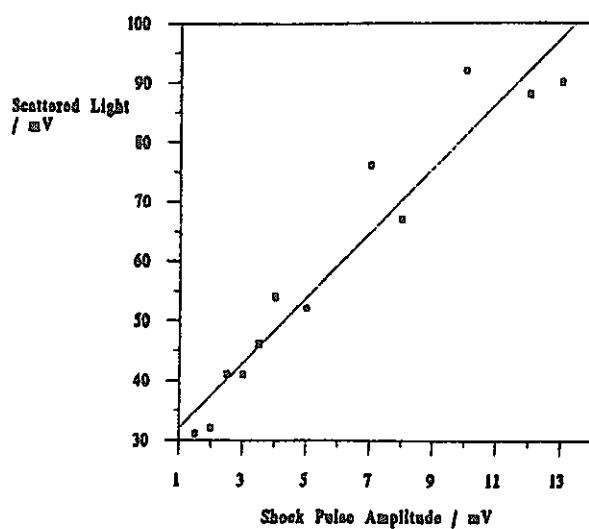


Fig. 2 Experimental arrangement

Fig. 3 Scattered light as a function of acoustic pulse amplitude at 0.8 J cm^{-2} (dry)Fig. 5 Scattered light as a function of acoustic pulse amplitude at 0.8 J cm^{-2} (wet)

技術データシート

(1/1)

資料コード LGMC-0014

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	95A0829650
2	和文標題	高繰り返し TEA - CO ₂ レーザによる高速表面クリーニング (理化学研究所S)
3	英文標題	High-speed surface cleaning by a high repetition TEA-CO ₂ laser. (Sponsor : Institute of Physical and Chemical Research).
4	著者・発表者	常見明良, 萩原弘二, 田代英夫; 平井亮, 長坂啓吾
5	資料名	レーザー科学
6	年巻号	VOL. 17 th PAGE. 56 1995
7	実施機関	(理化学研究所) ; (東京理科大学)
8	目的・内容	理化学研究所において1 kHzの高繰り返し及び、10 ⁸ shot以上の連続動作をするTEA CO ₂ レーザ, KDM-2 (Kilohertz Demonstration Machine-2) を開発した。 このKDM-2を利用して、固体表面上の付着物を除去し、高速クリーニングを行った。
9	クリーニング対象	鉄板、コンクリート
10	方法・条件	レーザー : TEA CO ₂ レーザ 繰り返し率 : ~1 kHz ショット数 : 10 ⁸ 回以上 フルエンス : 4. 5 J/cm ² 波長 : 10. 6 μm 上記レーザーを用いて、固体表面上の付着物を除去し、高速クリーニングを行った。
11	成果・結論	塗装鉄板の塗料除去は、溝の深さはパルス数とともに増加するが、塗装の厚み分だけ掘られ母材表面に達するとそこで停止し、塗料のみが除去され、表面クリーニングされていることが確認できた。 レーザー照射をしながらサンプルを自動並進ステージで移動し、塗装の面積処理を行った結果、厚さ13. 5 μmの塗装サンプルでは最高で17 m ² /hの面積処理速度が得られた。
12	評価	装置設計に有用な情報は無し。

技術データシート

(1/2)

資料コード LGM-0015

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	97A0624181
2	和文標題	タングステン光電陰極の光電子放出係数へのパルスレーザクリーニングの影響 1 実験
3	英文標題	Dependence of photoemission efficiency on the pulsed laser cleaning of Tungsten photocathodes, part 1: Experimental.
4	著者・発表者	TOMAS C, GIRARDEAU - MONTAUT J P, AFIF M, ROMAND M, CHARBONNIER M, DUC T M
5	資料名	D0256C (APHYC) (0947-8396) App I Phys A
6	年巻号	VOL. 64, NO. 5 PAGE. 467 - 471 1997
7	実施機関	Univ. Claude Bernard - Lyon 1, Villeurbanne, FRA
8	目的・内容	光電陰極の表面状態を制御するために、パルスレーザクリーニングによる光電流の発展を測定した。光電陰極表面の清浄性へのレーザパルスの作用と残留圧力の効果を調べ、結果を論じた。
9	クリーニング 対象	タングステン光電陰極
10	方法・条件	使用レーザー : Nd ³⁺ : YAG レーザ • 波長 : 213 nm • パルス幅 : 16 ps • 繰り返し率 : 10 Hz • 最高エネルギー : 0. 5 mJ
11	成果・結論	レーザーフルエンスが高いとき、照射区域はより多くのエネルギーを受け、飽和状態に速く達し、それだけ表面清掃が効率的である。 光電流感度は真空度が高い方がより高くなる。 チェンバ圧力 10 ⁻⁷ Torr の真空中においても、残留ガスによる再汚染が発生する。汚染の一部は多分レーザー・パルス近辺の吸収されない不純物であると推測する。 光電陰極クリーニング中の、光電子特性を改善するためのパラメータは表面での仕事関数である。 汚染された表面ときれいな表面とでは、仕事関数のシフト量はおよそ 0.2 eV である。
12	評価	装置設計に有用な情報としては下記があげられる。 1. 機器構成等

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

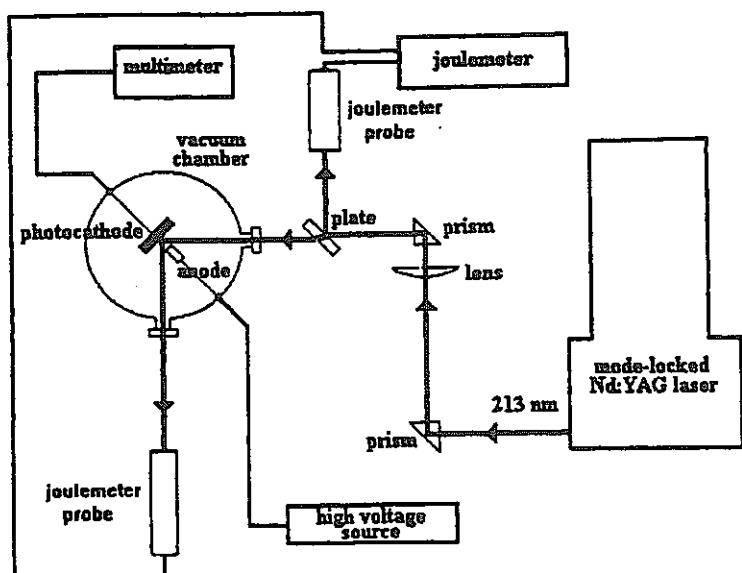


Fig. 1. The experimental setup

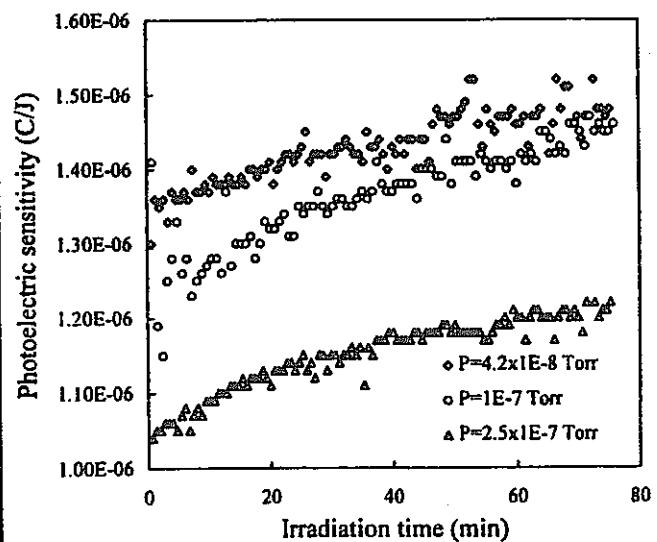


Fig. 5. Photoelectric sensitivity improvement during cleaning for different pressures

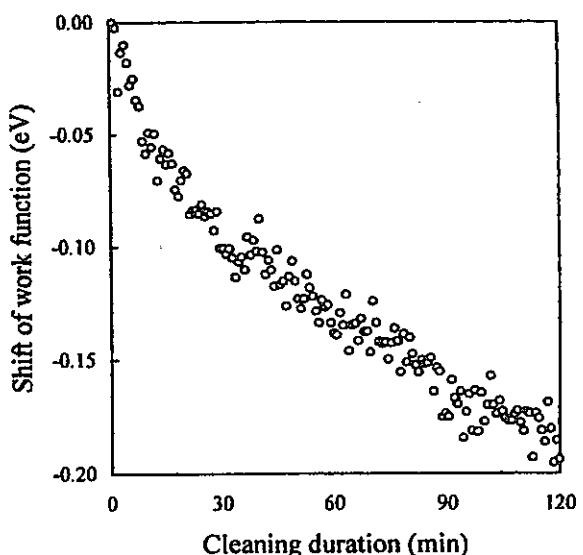


Fig. 7. Work function shift during 120 min laser cleaning

技術データシート

(1/1)

資料コード LG0-0016

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	97A0913635
2	和文標題	連続及びQスイッチ動作のNd:YAGレーザによる皮殻形成のある大理石彫刻物のクリーニング法
3	英文標題	Cleaning processes of encrusted marbles by Nd:YAG lasers operating in free-running and Q-switching regimes.
4	著者・発表者	SIANO S, MARGHERI F, PINI R, MAZZINGHI P, SALIMBENI R
5	資料名	App I Opt
6	年巻号	VOL. 36, NO. 27 PAGE. 7073 - 7079 1997
7	実施機関	Inst. Elettronica Quantistica, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Firenze
8	目的・内容	大理石像の劣化表面層について、レーザ加工による石像修復法を検討した。
9	クリーニング対象	大理石
10	方法・条件	<p>レーザ : Nd:YAGレーザ 波 長 : (1064 nm) パルス幅 : QS - 60 ns (500 mJ) SFR - 20 μs (1 J) NFR - 200 μs (1 J)</p> <p>大理石試料にパルス幅を変えて、Nd:YAGレーザを照射し、シャドーイング像の時間変化を観察した。 さらに、放出ブルームを発光分光により解析した。 レーザによる熱及び機械的損傷、及びサイド加工の発生についても調べた。</p>
11	成果・結論	<p>大理石に掃除するために3つのパルス幅で、黒い石膏層のレーザ除去閾値を評価した結果、黒い石膏付着物の基礎をなしているカルシウム硝酸塩青銅に対して、パルス幅の短いQSパルスレーザでは損傷を与えたが、パルス幅が長い2つのパルスレーザは損傷を与えるなかった。</p> <p>ブルーム分光と時分割シャドーイング像は、パルス持続期間に依存したレーザ標的の相互干渉の下記の3つの方法を立証した。</p> <ul style="list-style-type: none"> (a) QSパルスによる光学爆発によって誘発される波動膨張爆発 (b) SFRパルスレーザによるレーザ継続燃焼 (c) NFRパルスレーザによる加熱と蒸発 <p>これらの実験結果から最適なレーザ照射条件を決定した。</p> <p>SFRパルスレーザ除去は青銅残しながらの対象物の掃除での選択性を証明した。</p> <p>速くて効果的な除去のために最適な照射条件は、一時的な誘発を起こすのに必要な十分短いパルス持続期間、しかし、サブストレートに機械的な損傷を与える非常に短いパルスではない。</p> <p>SFRパルスレーザは、マイクロ秒におけるレーザ掃除に適用できる予備的検証を規定した。</p>
12	評価	<p>装置設計に有用な情報としては下記があげられる。</p> <p>1. パルス幅と照射条件の関係</p>

技術データシート

(1/1)

資料コード LGM-0017

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	98A0259107
2	和文標題	ビアホールからのエッチング誘起重合体のレーザクリーニング
3	英文標題	Laser cleaning of etch-induced polymers from via holes.
4	著者・発表者	LU Y F, LEE Y P; ZHOU M S
5	資料名	J Appl Phys
6	年巻号	VOL. 83, NO. 3 PAGE. 1677 - 1684 1998
7	実施機関	National Univ. Singapore, Singapore ; Chartered Semiconductor Manufacturing Ltd., Singapore
8	目的・内容	ミクロン以下クリーニングを要するウエハークリーニング技術の新しい要求を提案する。 KrF エキシマレーザー及び、 KrF エキシマレーザー用いて、極超LSI用ウエハーサンプルにレーザー光を照射して、レーザークリーニングを行ない、最適化を行なった。
9	クリーニング対象	極超LSI用ウエハー
10	方法・条件	(1) KrF エキシマレーザー 波長 : 248 nm パルス幅 : 23 ns 繰り返し率 : ~30 Hz パルス出力 : ~300 mJ (2) KrF エキシマレーザー 波長 : 1064 nm, 532 nm, 355 nm, 266 nm パルス幅 : 7 ns 繰り返し率 : ~10 Hz 上記レーザーを用いてウエハーサンプルにレーザー光を照射して、クリーニングを行なった。
11	成果・結論	超LSIにおけるビアホールの側壁と底面にプラズマエッチングにより生じた重合体を除去する手段として、エキシマレーザパルス (248 nm, 23 ns) をフルエンス約 200 mJ/cm ² で 100 パルス程度照射するのが極めて有効なことを示した。この照射では Al - Cu 配線層 (損傷しきい値 250 ~ 280 mJ/cm ²) は損傷されないことを確かめた。側壁を照射するための斜入射でも垂直入射に匹敵するアブレーション速度が得られた。 Nd-YAG レーザパルス (7 ns) 照射は重合体除去率は高いが、ウエハー上の Al - Cu 配線層も損傷されるので、好ましくないことも分かった。 Nd-YAG レーザパルス (7 ns) 照射でレーザー波長が紫外線から赤外線まで変化するとき、除去される厚さは徐々に減少した。
12	評価	装置設計に有用な情報は無し。

技術データシート

(1/1)

資料コード LG0-0018

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	98A0437868
2	和文標題	レーザ洗浄プロセスの波長効果
3	英文標題	Wavelength Effects in the Laser Cleaning Process.
4	著者・発表者	LU Y - F, SONG W - D, TEE C - K, CHAN D S - H, LOW T - S
5	資料名	Jpn J Appl Phys Part 1
6	年巻号	VOL. 37, NO. 3A PAGE. 840 - 844 1998
7	実施機関	National Univ. Singapore, Singapore
8	目的・内容	レーザ洗浄におけるレーザ波長効果について、石英表面からの銅とアルミニウム分子の除去より、理論的および実験的に調査した。
9	クリーニング対象	石英
10	方法・条件	<p>レーザー : Nd:YAGレーザー</p> <p>波 長 : 1064 nm (基本波長)、 532 nm (第二高調波)、 266 nm (第四高調波)</p> <p>反復率 : 10 Hz</p> <p>パルス幅 : 7 ns</p> <p>3種類の波長についてレーザーフルエンスを増やし、石英表面からの銅とアルミニウム分子の除去について実験し、理論的解析と比較検討した。</p>
11	成果・結論	反射率および吸収係数がレーザ波長に依存し、異なる波長では分子や基板に異なる温度分布を生じるため洗浄の力や効率が変わることを示した。短波長のレーザー照射ほど、分子の中で大きなエネルギー吸収を引き起し、高温度を生じさせるために、大きな清掃作用となる為、石英表面上の銅分子やアルミニウム分子が、短波長ほど高い洗浄効率になることを示した。理論的解析は実験結果とよく一致した。
12	評価	装置設計に有用な情報は無し。

技術データシート

(1/1)

資料コード LG0-0019

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	98A0610927.
2	和文標題	大面積CO ₂ レーザからのマイクロ秒パルスによるアルカリハライド結晶の光学的表面破壊
3	英文標題	Optical surface breakdown of alkali halide crystals by microsecond pulses from a wide-aperture CO ₂ laser.
4	著者・発表者	KAZANTSEV S G ('Raduga' State Laser and Scientific - Res. Test Centre (Test Range) of the Russian Federation, Vladimir Province
5	資料名	D0044C (QUELE) (1063-7818) Quantum Electron
6	年巻号	VOL. 28, NO. 4 PAGE. 322 - 325 1998
7	実施機関	上記
8	目的・内容	TEA-CO ₂ レーザのパルス照射により、アルカリハライド結晶のプラズマのスペクトル特性の時空変化を調査した結果を報告する。
9	クリーニング対象	アルカリハライド結晶
10	方法・条件	フレンス : 1~30J/cm ² パルス幅 : 0.8~2.5 μ s
11	成果・結論	アルカリハライド結晶の表面損傷のメカニズムは三段階の機構がある。 1) レーザパルスの先端と比較して 1 μ s の時間遅れを持ち表面から 3 ~ 5 mm の深さでの破壊の開始 2) 更に 3 ~ 5 μ s 後の蒸発 3) 吸着と、プラズマジェット及びレーザ放射との相互作用、更に結晶の加熱と亀裂の開始 得られた結果から、吸着を除去するためのレーザ洗浄による放射強度の最適化を行った。 照射パルス時間は 15~20 分以下で、レーザー放熱量はプラスマ形成の許容限界を上回ってはならない。 その時のパルス繰り返し数は、表面の分解を避けるため 5~10 kHz である。
12	評価	装置設計に有用な情報はなし。

技術データシート

(1/1)

資料コード LGM-0020

No.	項目	内 容
1	JICST記事番号	98A0921537
2	和文標題	低カーボンスチールのクリーニング処理のための新しい方法としてのレーザー除去/脱離プロセス
3	英文標題	The laser ablation/desorption process used as a new method for cleaning treatment of low carbon steel sheets
4	著者・発表者	(a) P. E. Lafargue, N. Chaoui, E. Millon, J. F. Muller (b) H. Deruelle, A. Popadence
5	資料名	Surface and Coating Technology
6	年巻号	106(1998)268-276
7	実施機関	(a) Laboratoire de Spectrometrie de Masse et de Chimie Laser (b) LEDEPP-SOLLAC
8	目的・内容	低炭素鋼シート状の電気メッキあるいは亜鉛メッキコーティングの特性は、特に表面の化学状態に依存する。2つの物質間の密着力は、工業的な準備過程から生じる鋼表面の残留混合物の影響を受ける。特に、鋼の常温圧延段の潤滑材として使用される残留圧延オイルは、続くアニール段で殆ど除去される。にもかかわらず、鋼シート表面の少い割合で数種の残留炭素混合物が残っている。鋼シートの表面をよりきれいにするため、我々はレーザー除去/脱離プロセスを基にした方法を実施した。実験は、常温圧延とアニーリング段からの鋼シートサンプルで実施された。レーザーの波長とパワー密度を調整することにより、残留酸素汚染物の約90%、及び鉄さびの75%を除去できた。
9	クリーニング対象	低炭素鋼
10	方法・条件	<p>レーザー：</p> <ul style="list-style-type: none"> (1) エキシマレーザー (ArF) (Lambda Physic 210i) <ul style="list-style-type: none"> 波長 : 193 nm 最大パルスエネルギー : 180 mJ パルス幅 : 25 ns スポット形 : 四角 スポットサイズ : 4 mm × 24 mm スポットプロファイル : プレーン (2) Nd-YAGレーザー (Quantel 581) <ul style="list-style-type: none"> 波長 : 266, 532 nm 最大パルスエネルギー : 150, 300 mJ パルス幅 : 6 ns スポット形 : 円 スポットサイズ : 直径 6 mm スポットプロファイル : ガウシアン <p>サンプル：2種類</p> <ul style="list-style-type: none"> ・アニーリング段の比較的少量の表面汚染のあるもの： 10 mg/m² (カーボン)、5 mg/m² (鉄粉) ・アニーリング前の常温圧延段の大量に汚染のあるもの 500 mg/m² (カーボン)、20-100 mg/m² (鉄粉) <p>サンプルセットアップ：X-Yマニピュレータ</p> <p>ショット数 : 1~10</p> <p>レーザーとの距離 : 30 cm</p> <p>レーザーの入射 : 垂直</p>
11	成果・結論	レーザーの波長とパワー密度を調整することにより、残留酸素汚染物の約90%、及び鉄さびの75%を除去できた。
12	評価	装置設計に有用な情報としてはX-Yマニピュレータを用いてサンプルを動かしていること。実験体系の記載、図等はなし。

技術データシート

(1/1)

資料コード LNC-0001

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	87A0216614
2	和文標題	放射化コンクリートの除去技術の開発
3	英文標題	Developing techniques for removing activated concrete
4	著者・発表者	DAVIES I LL, FLEISCHER C C, PATON A A
5	資料名	Nucl Eng Int
6	年巻号	VOL. 32, NO. 392, PAGE. 45-47, 1987
7	実施機関	Taylor Woodrow Construction Ltd., Middlesex, GBR
8	目的・内容	放射化コンクリートの除去に関し、放射化された層のみを取り除く技術の調査結果と、その技術の概要を説明している。レーザー除染に関する記述は僅か。
9	クリーニング対象	コンクリート
10	方法・条件	レーザーの種類：不明 照射条件：出力 9.5kW
11	成果・結論	出力 9.5kW のレーザー光で厚さ 200mm のコンクリートに対し、16mm/min の速さで深さ 80mm の穴開けが可能である。
12	評価	特に有用な情報無し。

技術データシート

(1/2)

No.	項目	内 容	資料コード	LNM-0002
1	JICST 記事番号	92A0814429		
2	和文標題	レーザ除染 施設使用廃止措置のための新戦略		
3	英文標題	Laser decontamination: A new strategy for facility decommissioning.		
4	著者・発表者	H. M. Pang, R. J. Lipert, Y. M. Hamrick, Suna Bayrakal, K. Gaul, B. Davis, D. P. Baldwin, and M. C. Edelson		
5	資料名	U. S. DOE Rep		
6	年巻号	PAGE. 7p 1992		
7	実施機関	Ames Laboratory		
8	目的・内容	<p>レーザーによる金属材料の表面およびバルク放射性汚染の除去方法について実験的検討を行い、実用化の可能性を評価している。レーザーにはエキシマレーザー(KrF)を用い、銅、アルミおよびステンレス鋼の表面除去を行なった。</p> <p>レーザ光の円柱レンズを用いた照射技術、高分解能レーザスペクトル分析技術などを用い、低レベルの汚染材について表面除染、バルク除染、ガドリニウム吸収、鉄の光イオン化などの実験的検討を行い、本方法の実用可能性を評価した。</p>		
9	クリーニング対象	銅、アルミニウム、ステンレス鋼 (SS316、SS430)		
10	方法・条件	<p>レーザー : エキシマレーザー (KrF) 出力 : 100 W 波長 : 248 nm 照射時間 : 27 ns 繰り返し率 : 300 Hz</p> <ul style="list-style-type: none"> ・レーザー光線集光レンズとして球形レンズと円柱形レンズを用いた。 ・He 雰囲気、Ar 雰囲気、空気中での除去率の比較をした。 ・レーザー除去物の再付着について調査した。 		
11	成果・結論	<ul style="list-style-type: none"> ・対象物がレーザー集光レンズの焦点に置かれた時に、最大の除去率が得られることがわかった。 ・円柱形レンズは球形レンズと比較して焦点のパワー密度は低いが、広範囲の除去ができる為、20~30%の量を除去することができた。 ・また、円柱形レンズは焦点が線上になるため、球形レンズの点焦点よりも、除去の作業性がよい。 ・He 雰囲気でのレーザー除去は、Ar 雰囲気、空気中とひかくして、アルミニウムでは50%の除去率を強化したが、銅、ステンレスはあまり改善が見られなかった。 ・薄い油膜がある場合、レーザー除去で分解された分子の再付着のため、除去率が約10%低下した。 ・球形レンズは1回でほぼ除去できたが、円柱形レンズは再付着のため数回のレーザー照射を必要とした。 ・レーザーを用いてガドリニウムの蛍光スペクトルを調査した。 ・容積汚染除去の予備的実験が成功した、可変同調型レーザーを用いれば、金属汚染物質の安定した代理法として拡張することができる。 		
12	備考	<p>装置設計に有用な情報としては下記があげられる。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. レーザーの照射条件等 2. 集光レンズの構造 		

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

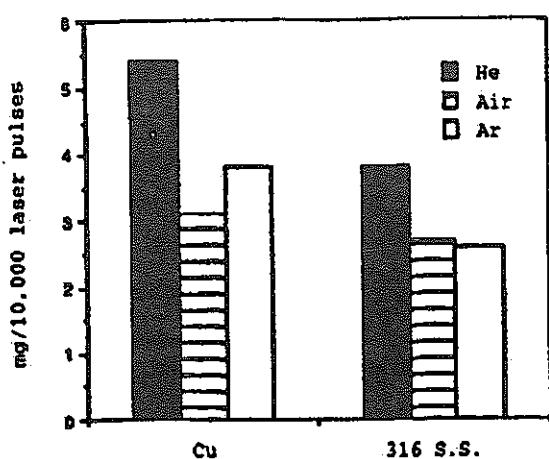


Figure 1: Typical ablation rates for Cu and 316 S.S. in He, Ar, and air with the use of 15 cm f.l. spherical lens and laser energy of 500 mJ/pulse at 100 Hz.

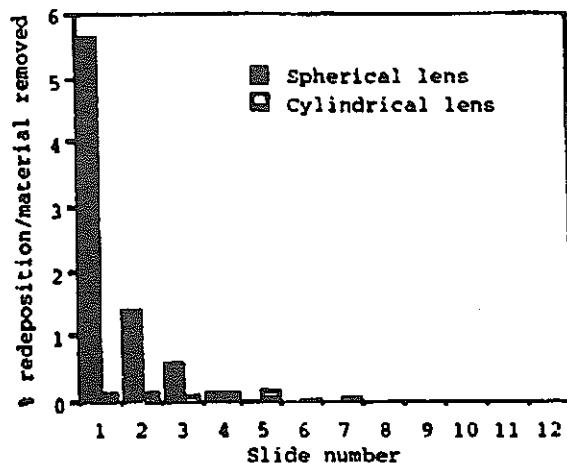


Figure 2: Distribution of redeposited material on a surface after laser surface cleaning. Two different focusing lenses were used. 10,000 laser pulses at 400 mJ/pulse (50 Hz repetition rate) were used.

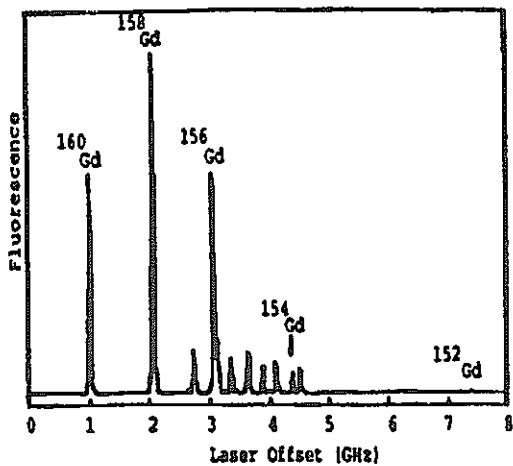


Figure 3: Fluorescence excitation spectrum of Gd vapor observed in Ames NMSS atomic beam apparatus.

Table 2. Laser Photoionization Schemes for Selected Radioactive Contaminants.

Element	$t_{1/2}(\text{y})$	$\lambda_1(\text{nm})$	$\lambda_2(\text{nm})$
⁹⁴ Nb	2.0 E4	353.5	351
⁹³ Mo	3.5 E3	380	308
⁹⁹ Tc	2.1 E5	608.5	193
¹⁰⁸ Ag	130	328	308
⁵⁹ Ni	7.6 E4	608.5	193
⁶⁰ Co	5.27	304.4	308

技術データシート

(1/2)

資料コード LNM-0005

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	95A0340541
2	和文標題	高出力エキシマレーザによる表面加工
3	英文標題	Surface Processing By High Power Excimer Laser.
4	著者・発表者	STEHLE M
5	資料名	日本原子力研究所 JAERI-Conf
6	年巻号	PAGE. 223 - 228 1995
7	実施機関	SOPRA, Bois-Colombes, FRA
8	目的・内容	レーザによる表面加工は有望な研究主題であり、金属基板にセラミック被覆したタービン翼の表面ガラス化による耐食性向上、壊れやすい複合材料の蒸着有機物皮膜の選択的アブレーション、バルク金属又は合金の表面硬化による耐摩耗性向上、汚染鋼の表面酸化物のアブレーションなどの研究が行われている。 表面アブレーションでは、例えば、原子力用ステンレス鋼の除染のため、紫外線アブレーションの知識を用いて最適化した。
9	クリーニング対象	ステンレス鋼
10	方法・条件	レーザー：エキシマレーザー (XeCI) 波長 : $\lambda = 308\text{nm}$ 最大出力 : 1 kW ・ レーザー発振装置の高出力化を行なった。 ・ 光ファイバー伝送についての基礎実験を行なった。
11	成果・結論	エキシマレーザーの出力として、1992年に1 kW (10J × 100Hz) のレーザー発振装置を開発した。 光ファイバー伝送に関しては、での制限される入口エネルギーが2 J /ショットで、長さ2メートルの光ファイバーに対して、出口で 1.1 J 以上のエネルギーが得られた。 表面アブレーションでは、例えば、原子力用ステンレス鋼の除染のために除去する酸化物の厚みが1～5 μm であり、基板から酸化物をアブレーションするのに必要なエネルギー密度が1～5 J / cm^2 であるとき、多重光ファイバ導波路を用いた1 kWエキシマレーザによって、1～10 m^2 / hで処理可能であった。このプロセスは、紫外線アブレーションの知識を用いて最適化した。
12	評価	装置設計に有用な情報としては下記があげられる。 1. レーザーの照射条件 2. レーザー光線の光ファイバー伝送

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

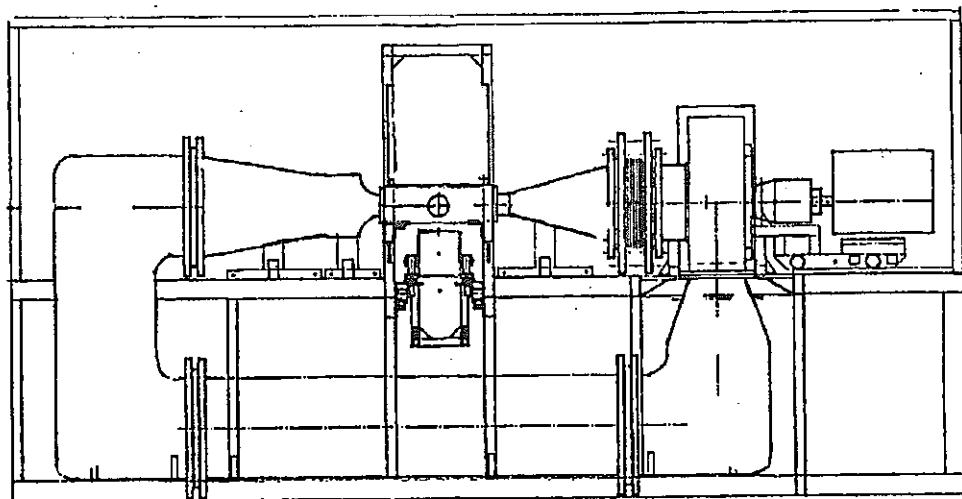


Fig. 1 - SET UP

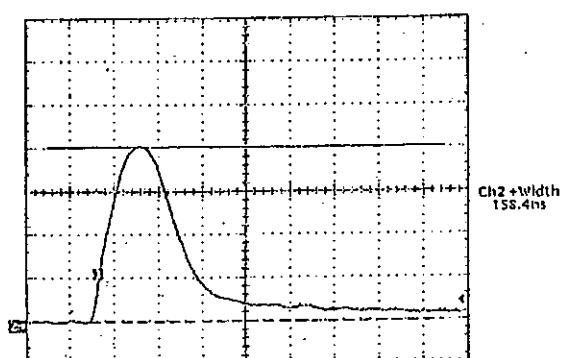


Fig. 2

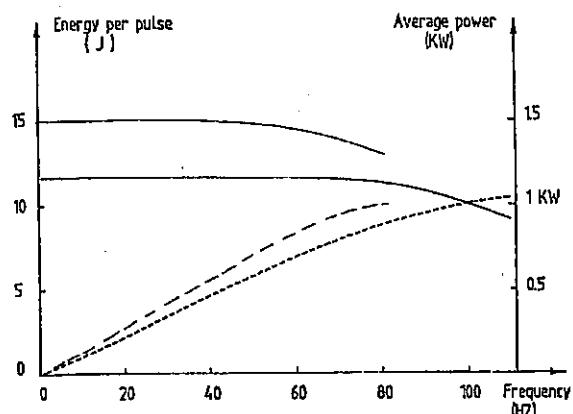


Fig. 3

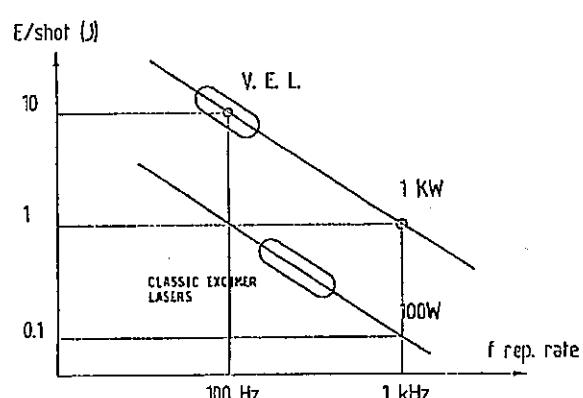


Fig. 4

技術データシート

(1/1)

資料コード LNC-0006

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	95A0914125
2	和文標題	原子炉用汚染除去用具としてのレーザ及び高エネルギー光
3	英文標題	Lasers and high-energy light as a decontamination tool for nuclear applications.
4	著者・発表者	FLESHER D J (Westinghouse Hanford Co., Washington)
5	資料名	K19950519 (0-87339-289-2) Elec Temp Coat Sci Technol 1
6	年巻号	PAGE. 379 - 383 1995
7	実施機関	
8	目的・内容	原子力工業の塗料及びコンクリート層の遠隔除去用レーザ及び光支援除去装置について、利点及び欠点、今後の展望等を簡潔に記述した。
9	クリーニング対象	コンクリート
10	方法・条件	レーザーの仕様、条件等に関わる記述ないため詳細不明。
11	成果・結論	0. 28 m ² /min, 厚さ0. 64 cmのコンクリート上の塗料を0. 042 m ² /hで除去できる。 利点は、化学物質や研磨材が不要なこと、廃棄物が少ないとこと、137 mまでの遠隔操作ができること、等である。 最近は、関連産業の発達に伴いコストも低下している。
12	評価	装置設計に有用な情報としては下記があげられる。 特になし。

技術データシート

(1/2)

資料コード LNC-0007

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	95A0914126
2	和文標題	コンクリートの放射能除染のためのレーザ
3	英文標題	Lasers for the radioactive decontamination of concrete.
4	著者・発表者	CANNON N S, FLESHER D J
5	資料名	Elev Temp Coat Sci Technol 1
6	年巻号	PAGE. 385 - 391 1995
7	実施機関	Westinghouse Hanford Co., WA
8	目的・内容	放射能汚染コンクリートを除去するため、予備実験としてレーザー除去実験を行った。
9	クリーニング対象	コンクリート
10	方法・条件	レーザー：YAG（イットリウム-アルミニウムガーネット）レーザー 出力 : 50W (パルス), 600W (CW) ・対象物であるコンクリートに対し、空中及び水中でレーザー除去実験を実施した。
11	成果・結論	小型設備のデータを、強力な商業設備に外挿すると、0.64cmの厚さのコンクリートを 420 cm ² /h の速度で除去できる。 水中では除去速度が低下する。 レーザーエネルギーの 78%が 1.27cm (0.5 インチ) の水を通してコンクリートに届き、乾燥状態と比較して重さで 14.6%、深さで 14.7% の減少となった。 1日 24 時間自動操業も可能である。 廃棄物を少なくしたい所では、コスト効率の良い応用技術となる。 今後の研究で、除去速度は大きくなる。
12	評価	装置設計に有用な情報としては下記があげられる。 1. レーザーの照射条件等 2. 装置の基本構成

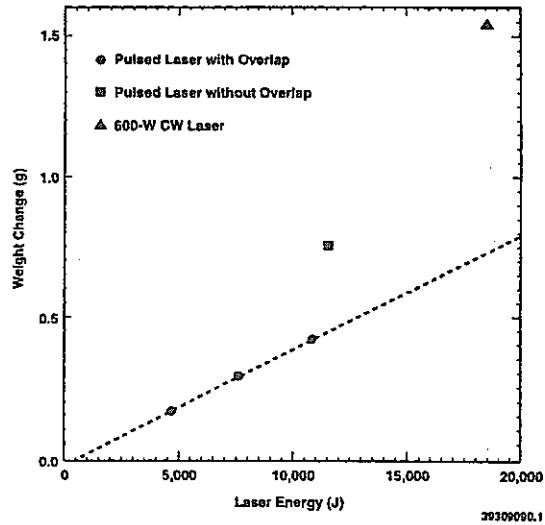
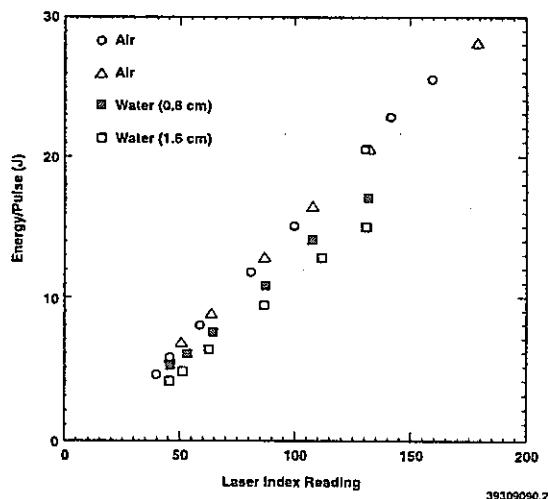
補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

Table I - Removal Data from K-West Concrete Core Sample Chips

Specimen Condition	Laser Type	Pulse Power (W)	Average Power (W)	Total Energy (J)	Test Time (s)	Target Area (mm ²)	Weight Removed (g)	Final Depth (mm)
Dry	Pulsed	1,593	1.86	4,690	2,523	5.1 x 5.1	0.173	2.29
Dry	Pulsed	2,579	3.01	7,590	2,523	5.1 x 5.1	0.296	3.91
Dry	Pulsed	3,710	4.33	10,920	2,523	5.1 x 5.1	0.426	6.05
Wet*	Pulsed	2,857	3.33	8,410	2,523	5.1 x 5.1	0.062	0.89
Dry	Pulsed	3,711	4.33	11,690	2,700	15.2 x 15.2	0.759	NA
Dry	CW	NA	620	18,600	30	17.8 x 25.4	1.546	NA

*Specimen under 1.3 cm (0.5 in.) of water.



技術データシート

(1/2)

資料コード LNM-0008

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	96A0175856 JST copyright
2	和文標題	レーザ除染技術を生産規模で適用するための予備設計及び投資・運転コストの推定
3	英文標題	Preliminary Design and Estimate of Capital and Operating Costs for a Production Scale Application of Laser Decontamination Technology.
4	著者・発表者	PANG H - M, EDELSON M C (Iowa State Univ., IA)
5	資料名	P0998A US DOE Rep
6	年巻号	33 p 1994
7	実施機関	アイオワ大学(アメリカ)
8	目的・内容	放射性金属、特に設備表面の除染へのレーザ技術の応用について検討しするとともに装置試設計を行い、経費の試算を実施。使用レーザは商業的エキシマレーザ及びNd:YAGレーザ。レーザ除染技術が大形対象物に実行可能か、制限されたアクセス環境で遂行できるか、他の廃棄物管理代替法とコスト競争力があるかなどについて議論されている。
9	クリーニング対象	タンク(ステンレス製)
10	方法・条件	エキシマレーザによるリモートコントロール除染システム レーザー光を光学系(ミラー及び円筒形レンズ)により、タンク内に集約してレーザを照射する。このときの除染対象への距離、角度の調整は検出器及びコンピュータからなる制御系が受け持つ。レーザー照射により除去された汚染物は収集セルにより、再沈着することなく排気される。 除染時のレーザーの照射条件、及び、除染後の評価等は不明。
11	成果・結論	エキシマレーザー除染システムを用いてタンク内外表面のクリーニングをデモンストレーションすることにより、商用ベースのコスト評価を実施した。 コスト合理化を図れば汎用のエキシマレーザ及びNd:YAGレーザを使用した除染システムは、他の除染装置に対抗しうるコストに抑えられる可能性がある。(総コストの中で支配的のは人件費である。)
12	評価	装置設計に有用な情報としては下記があげられる。 1. 部品・機器構成及びそれらの配置 2. レンズ/収集セルの構造

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

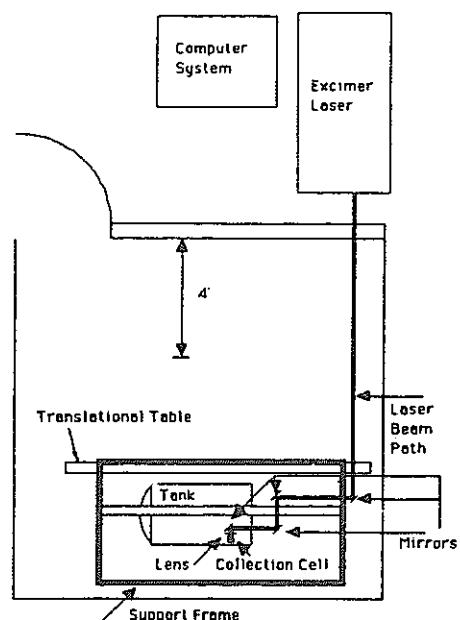


Fig. 2. Schematic diagram of experimental arrangement used to simulate the decontamination of a WINCO tank in a restricted access environment.

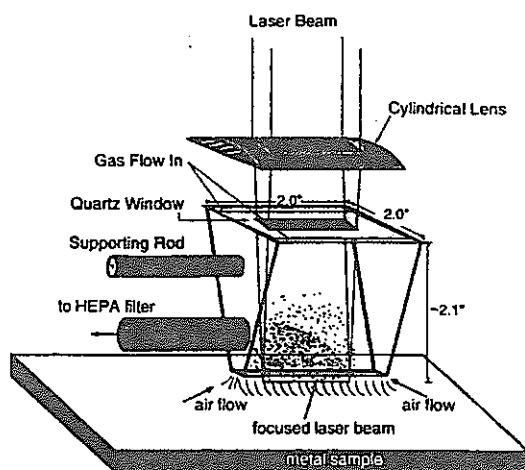


Figure 3. Focusing Lens/Collection Cell apparatus used to deliver laser energy to a surface and capture particulates generated during the laser ablation process.

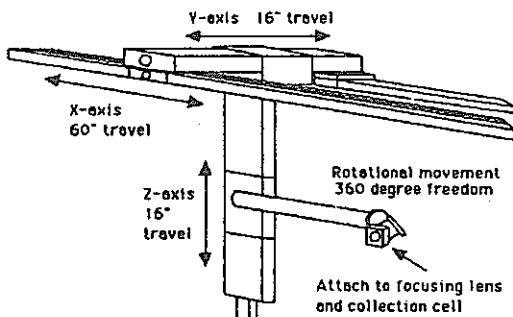


Figure 4. Design of laser positioning apparatus for tank cleaning experiment. This design features a rotational stage, which is not currently implemented in Ames, at the end of the rod that supports the collection cell and focusing lens.

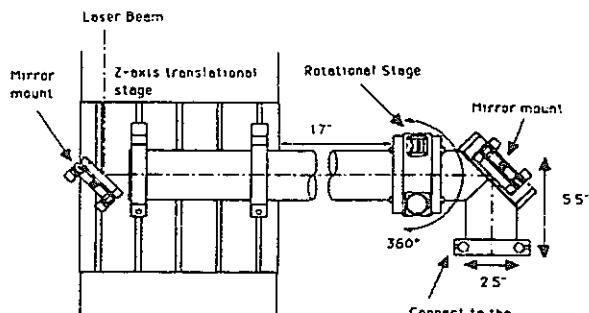


Figure 5. Detail of design shows implementation of rotational cell.

Table 3. Relevant Parameters and Estimated Time Required to Decontaminate WINCO Tank Using Excimer and Nd:YAG lasers*.

Laser	Excimer (Questek 2460 vβ)	Nd:YAG (Continuum YG660)	Nd:YAG (Continuum NY82)	Nd:YAG (US Lasers)
Rep. rate	150 Hz	30 Hz	30 Hz	5000 Hz
Pulse energy	250 mJ	150 mJ	700 mJ	50 mJ
Pulse width	25 ns	8 ns	10 ns	150 ns
Focused area	0.1 cm ²	0.037 cm ²	0.14 cm ²	6.7E-4 cm ²
Pulses/area	15	15	15	15
Time	11.4 hours	151.4 hours	40.5 hours	51.1 hours

*Calculations based on 1E08 W/cm² irradiance for excimer laser decontamination and 5E08 W/cm² for Nd:YAG lasers. This choice is explained in the Appendix.

技術データシート

(1/4)

資料コード LNM-0009

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	96A0286393
2	和文標題	構造材料のレーザークリーニング
3	英文標題	Laser Surface Cleaning of Solid Materials
4	著者・発表者	常見明良、田代英夫
5	資料名	レーザー研究
6	年巻号	第 24巻 第 2号 (1996 年)
7	実施機関	理化学研究所
8	目的・内容	レーザーによる金属表面の塗装や酸化物、また放射性物質等の付着物除去など、理化学研究所で手がけ始めた高出力 TEA CO ₂ レーザーの応用を中心、レーザークリーニングの可能性を紹介した。
9	クリーニング対象	1. メラミン樹脂塗装 (サンプル) 2. 合成樹脂塗装を塗りつけたステンレス板と圧延鉄板
10	方法・条件	1. メラミン樹脂塗装 (サンプル) に対して 1) レーザー : TEA CO ₂ レーザー、YAG レーザー、エキシマレーザー 2) フルエンス : 約 7 J/cm ² 3) パルス数 : 50 2. 合成樹脂塗装を塗りつけたステンレス板と圧延鉄板に対して 1) レーザー : TEA CO ₂ レーザー 2) 繰り返し : 1 kHz 3) 1パルス当たり最大出力 : 500 mJ 4) 平均出力最高 : 500 W (ただし、これらはパラメータとした)
11	成果・結論	1. メラミン樹脂塗装 (サンプル) に対して 塗装物 (除去対象物) と母材はレーザーアブレーションしきい値が異なるので使用するレーザーによって母材の表面状態が異なる。 鋼材の表面塗装に使われる合成樹脂類は紫外から赤外領域の光に対して概して高い吸収係数を持っており、レーザーアブレーションしきい値も低い。また、母材 (この場合金属) は可視から紫外領域に吸収があり、母材自身の変成や損傷、また被除去物の浸透などが起きやすい。したがってこの場合は CO ₂ レーザーが除去効率、母材損傷の観点からより適している。 2. 合成樹脂塗装を塗りつけたステンレス板と圧延鉄板に対してトータルフルエンス 6 J/cm ² をしきい値として、溝が掘れ始め、7 J/cm ² (1パルス当たり 1.75 J/cm ²) 以上で完全に除去され鉄板面が露出した。さらにフルエンスをあげても母材表面のアブレーションは起こらない。またレーザーパルスの繰り返し速度を 1 Hz から 1000 Hz に変化させてもほぼ同じ除去特性が得られており、高繰り返しパルス運転における処理速度の線形性が保たれている。また、表面の粗い母材ほど残留付着物除去のために除去効率が低下した。
12	評価	装置設計に有用な情報としては下記があげられる。 1. TEA CO ₂ レーザーによるレーザーのフルエンスに対する除去深さの変化、およびレーザーの繰り返し速度に対する除去効率の違い 2. アシスト液の効果

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

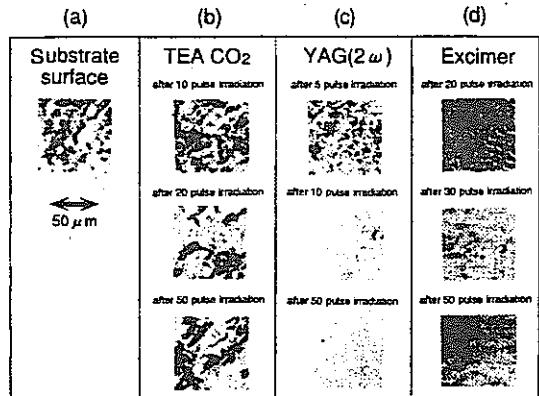


Fig. 1 Microscopic pictures of the painted iron surfaces irradiated by TEA CO₂, YAG (2 ω) and excimer lasers. 10, 20 and 50 pulses were irradiated on each samples.

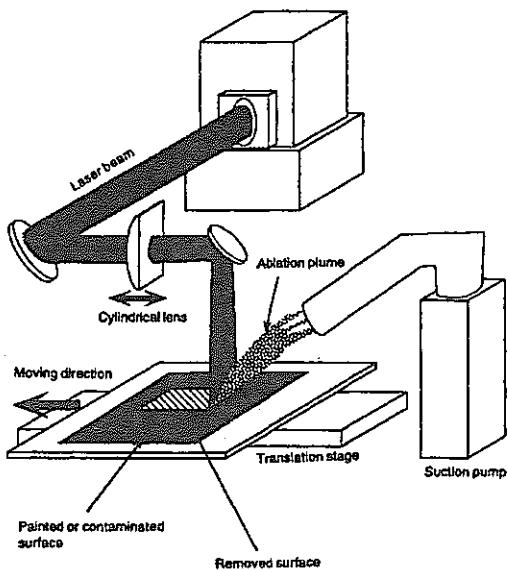


Fig. 2 Experimental setup of laser surface cleaning.

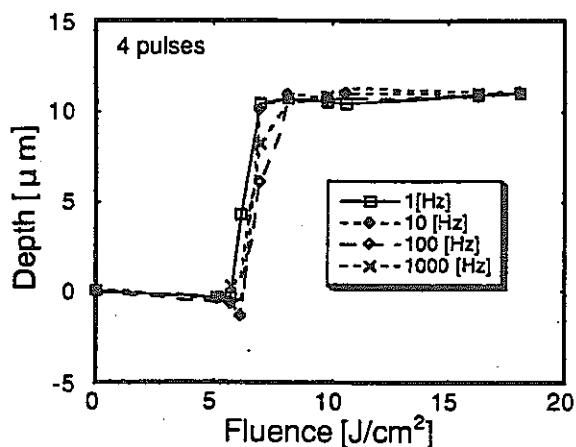


Fig. 3 Dependence of removed depth at the painted surface on the irradiated laser fluences. Iron plates with melamine resin paint of 11 μm thick were irradiated. The depth was measured after four-pulse irradiation. The laser repetition rate was changed from 1 to 1000 Hz.

補足説明シート

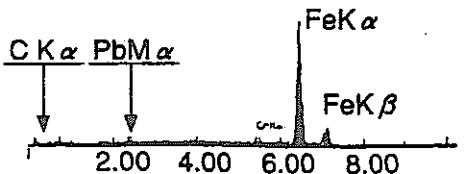
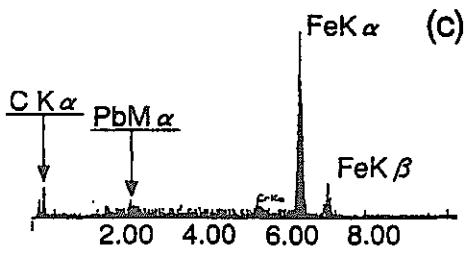
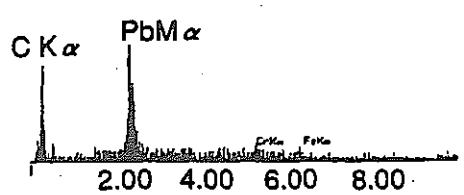
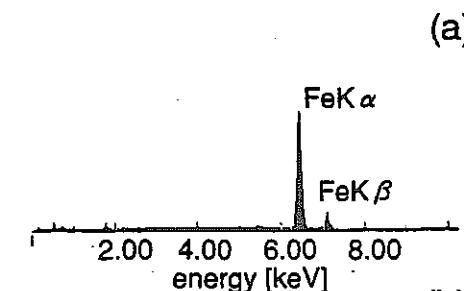


Fig. 5 EDX spectra. (a) Roll formed iron surface without painting, (b) painted surface before laser irradiation. The thickness of the paint was about 25 μm , (c) painted surface after 5-pulse laser irradiation, (d) paint surface after 15-pulse irradiation.

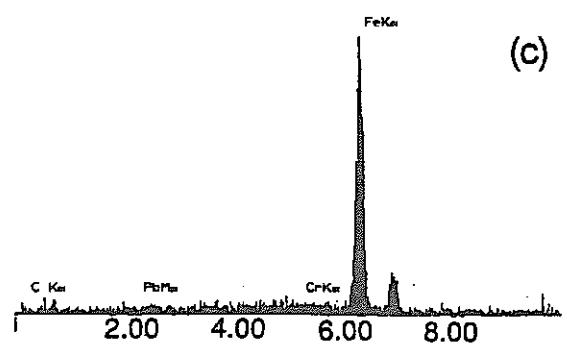
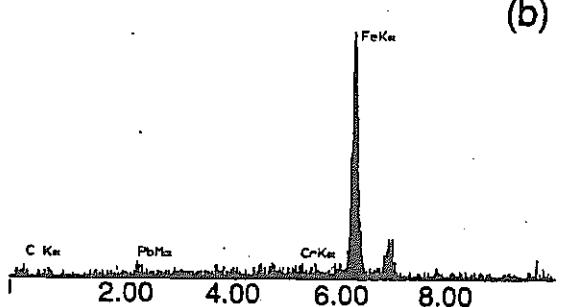
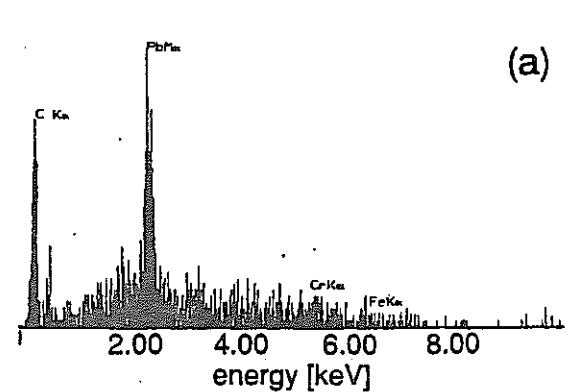


Fig. 6 EDX spectra of painted iron surface. (a) Before laser irradiation, (b) after 10-pulse laser irradiation, (c) same as (b), but very little DFM were applied onto the surface after the fifth laser pulse.

補足説明シート

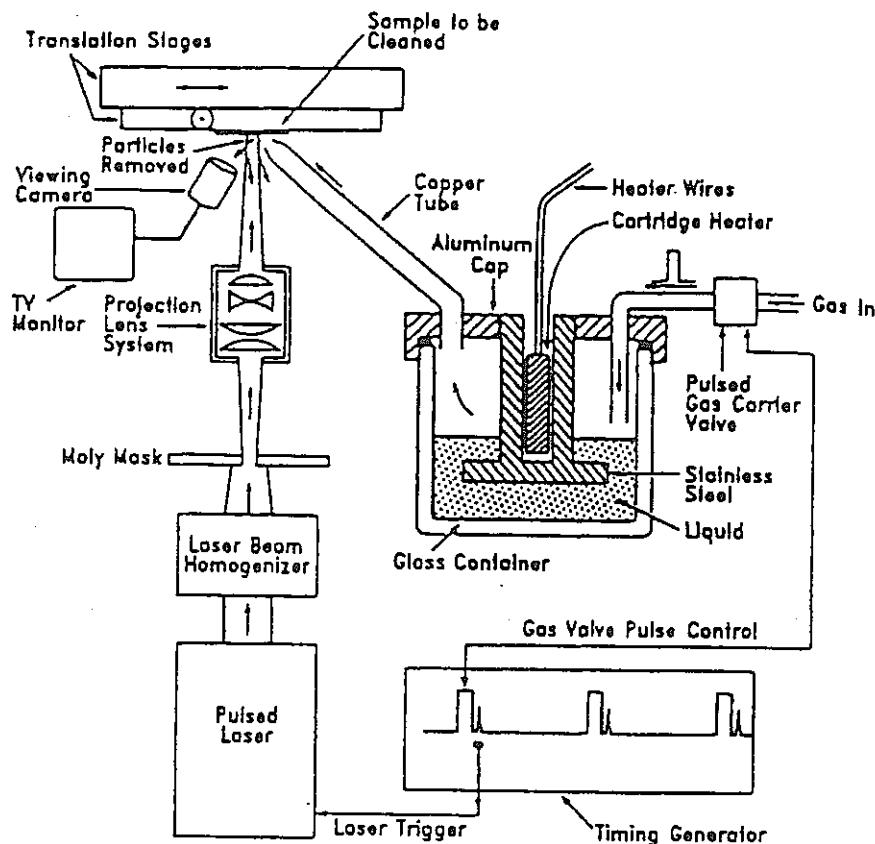


Fig. 7 Experimental arrangement for liquid-film enhanced pulse laser cleaning to remove particulates on a surface.

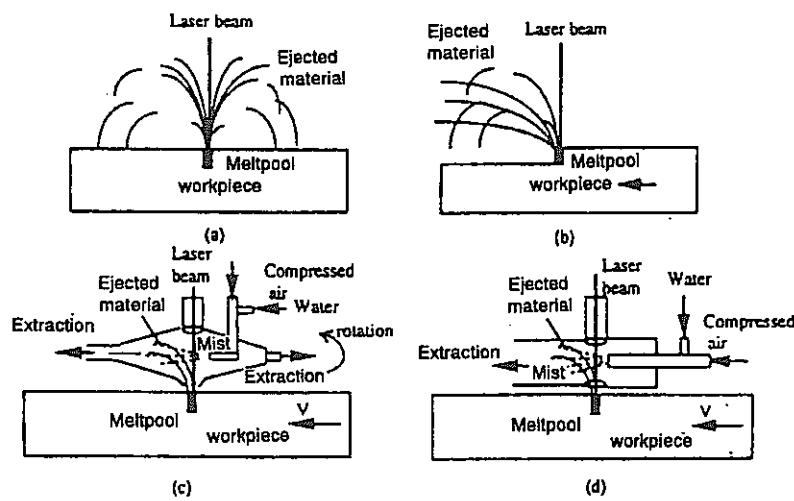


Fig. 9 Illustration of laser generated liquid ejection for material removal. (a) Stationary, (b) moving (c) removal with air/water and dynamic waste collector, (d) static waste collector with air/water mist.

技術データシート

(1/3)

資料コード LNC-0010

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	96A0286396 JST copyright
2	和文標題	建設分野における新しいレーザー応用 レーザーによるコンクリート表層はく離の研究
3	英文標題	New Applications of Lasers to Architecture and Civil Engineering. Study on Methods for Decontaminating Concrete Surface by Laser Treatment.
4	著者・発表者	鎌田博文, 立岩正明(大成建設); 三森武男(原研 東海研); 杉本賢司(大成建設 技研)
5	資料名	X0335A (0387-0200) レーザー研究
6	年巻号	VOL. 24, NO. 2 PAGE. 182 - 190 1996
7	実施機関	
8	目的・内容	日本原子力研究所・東海研究所の再処理特別研究棟では、建物内部のコンクリートの一部が放射化されてはいないものの、表面から約10mmの深さまで α 核種を含む放射性物質で汚染されている。これらのコンクリート除染のため以下に示す二つの方法について研究した。 1) 高エネルギー密度のレーザ光を低速で走査することで表層を高熱で溶融させ、表層をガラス化し除去収拾する方法。2) 低エネルギー密度のレーザを高速で走査し含有水分を瞬時に高温膨張させて爆裂破碎する方法。 実験の結果、どちらの方法も、コンクリートの表層はく離に有効であることを示した
9	クリーニング対象	コンクリート
10	方法・条件	CO ₂ レーザーを以下の条件で試験片表面に照射する。 出力: 500~1250W 焦点外し距離: 50~400mm 照射速度: 50~800mm/min
11	成果・結論	試験片表層がガラス化は、照射速度が遅く、かつ、焦点外し距離が少ない、即ち、エネルギー密度が高い場合に起こり得る。 反対に爆裂破碎は、照射速度が早く、かつ、焦点外し距離が大きい、即ち、エネルギー密度が低い場合に起こる。
12	備考	

(装置仕様・構成・実験データ等)

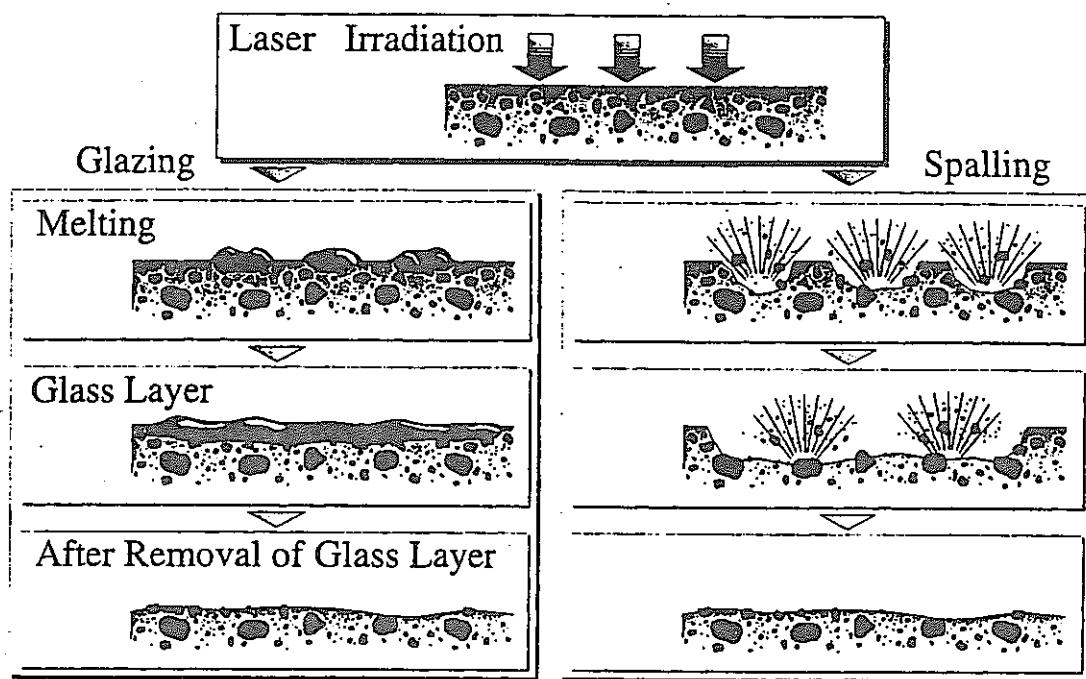


Fig. 1 Principles of surface layer removal by laser.

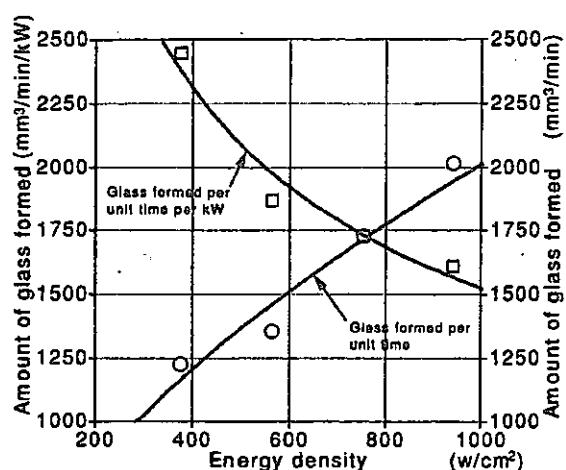


Fig. 3 Relation between energy density and amount of glass formed.

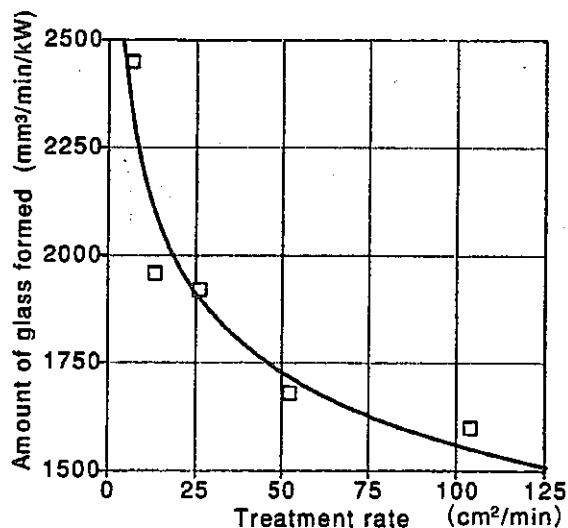


Fig. 4 Relation between treatment rate and amount of glass formed.

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

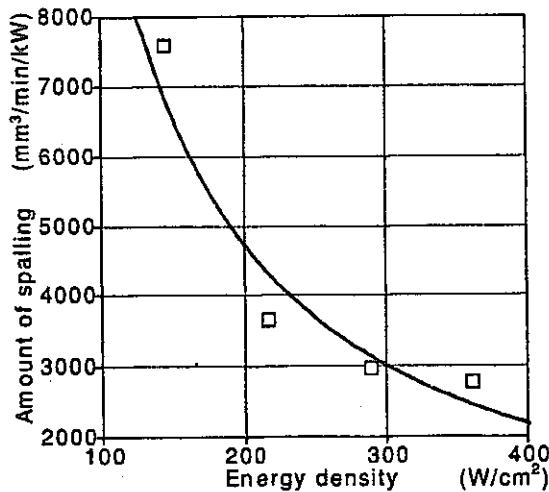


Fig. 9 Relation between energy density and amount of spalling.

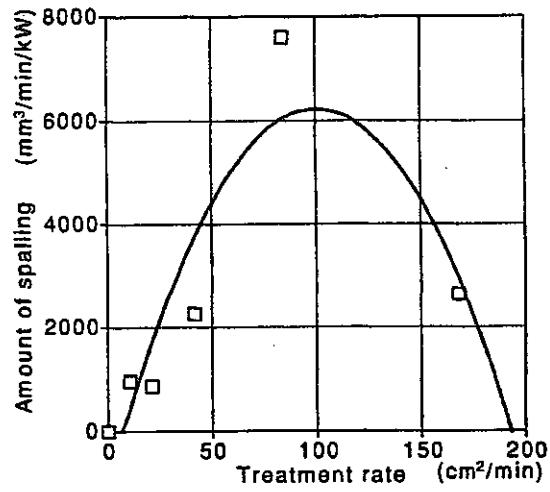


Fig. 10 Relation between treatment rate and amount of spalling.

技術データシート

(1/2)

資料コード LGM-0011

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	96A0448775
2	和文標題	光アブレーション放射能除染の試験及び評価
3	英文標題	Testing and Evaluation of Light Ablation Decontamination.
4	著者・発表者	DEMNER R L, FERGUSON R L (Lockheed Idaho Technol. Co., Idaho)
5	資料名	P0998A US DOE Rep
6	年巻号	PAGE. 46p 1994
7	実施機関	
8	目的・内容	光アブレーション放射能除染において用いる3種類のレーザ(CO ₂ レーザ, エキシマレーザ, Nd:YAGレーザ)を比較する試験について記した。速度, 効果, コスト, プラント装置に対する全体的な適応性を基準に比較評価した。
9	リーニング対象	アルミニウム、SUS304、SUS316、インコネル、銅、モネル
10	方法・条件	テスト時のレーザー照射条件 CO ₂ レーザー 出力: 310W, 波長: 10.6 μm 照射時間: 170秒 Nd:YAGレーザー 波長: 1064 nm 繰り返し率: 30 Hz パルス幅: 8 ns 出力エネルギー: 190 mJ エキシマレーザー 平均出力: 100 W 繰り返し率: 300 Hz パルス幅: 28 ns
11	成果・結論	テストの結果 CO ₂ レーザは、汚染物質が蒸発を伴う金属溶融及び変形を起こすため、除染用レーザーとしては不適とされた。 Nd:YAGレーザ及びエキシマレーザは放射能除染に用いられる可能性があり、ICPPにおける放射能除染の要求に適用するため更なる試験及び開発を行う
12	評価	装置設計に有用な情報としては下記があげられる。

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

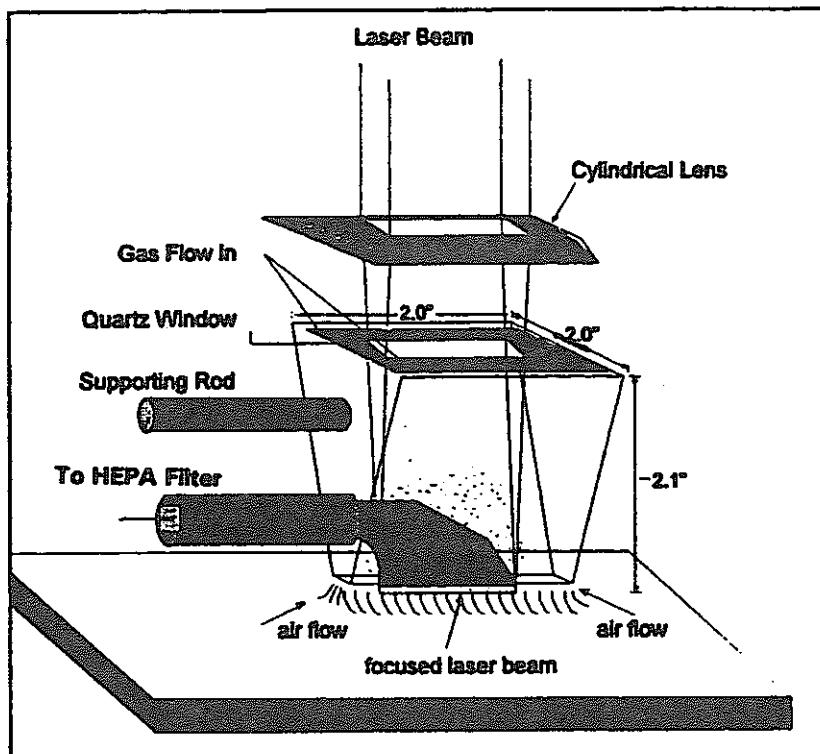


Figure 1, Lens and Collection Cell Used During Laser Ablation Process.

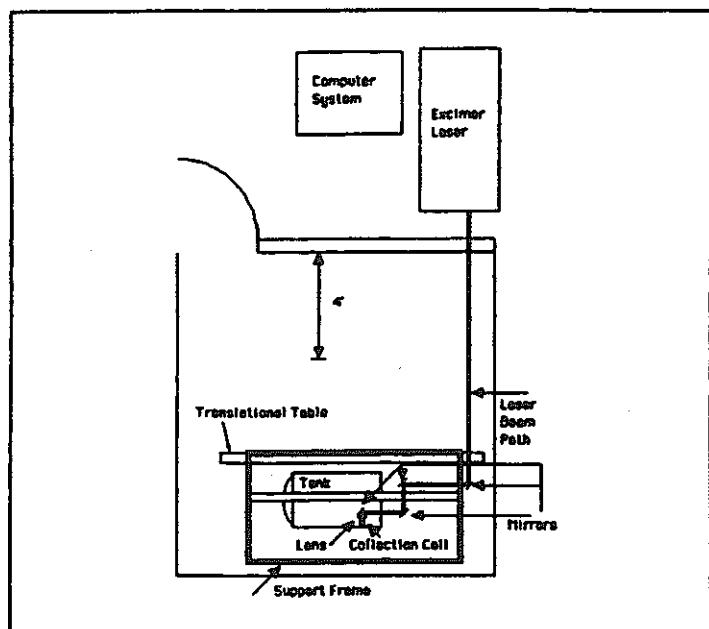


Figure 2, Diagram of Equipment to Simulate Decon of Tank in Restricted Access Area.

技術データシート

(1/3)

資料コード LNM-0012

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	96A0693806
2	和文標題	工業用除染問題のレーザによる解決
3	英文標題	A Laser-Based Solution to Industrial Decontamination Problems.
4	著者・発表者	EDELSON M C, PANG H- M
5	資料名	P0998A US DOE Rep
6	年巻号	1995 P10
7	実施機関	Iowa State Univ., IA, Lockheed Martin Idaho Technol.,
8	目的・内容	AmesとLMITが開発している除染システムは、金属表面に埋め込まれた汚染物を除去できるように設計されている。このシステムは表面から数ミクロンの金属を除去できる放射輝度をもち、表面から除去された物質の再沈着を防ぐ排ガス系を備えている。種々の金属に対して、この装置を用いて得られた結果を示した。
9	クリーニング対象	ステンレス鋼、鉛レンガ
10	方法・条件	レーザーのスペックとして以下の記載あり。 レーザー : YAGレーザー (U. S. レーザー モデル405Q) 最大平均出力 : 200W (繰り返し率 > 9 kHzにおいて) 出力波長 : 1064 nm 繰り返し率 : 100 Hz ~ 30 kHz
11	成果・結論	1. ステンレス鋼に対するクリーニング 照射速度 10 cm/s (照射回数: 2回)、繰り返し率 7 kHz としたとき、サンプル表面のジルコニウムは 90% 以上、セシウムは 100% 近く除去可能。また、セシウムは照射速度 5 ~ 10 cm/s の範囲で除去率 100% 近くを示す。一方、ジルコニウムは 94% 前後に留まる。なお、照射速度 10 cm/s、繰り返し率 5 kHz としたとき、1 回の照射だけでジルコニウムは 91%、セシウムは 93% が除去される。 2. ステンレス鋼に対する除染 繰り返し率 5 kHz、出力 150W のとき、1 回目の照射でサンプルからの放射線は 4500 → 2000 cpm に減少した。結局、4 回の照射で 1300 cpm まで (結果として約 80% の除染率) 減少したが、それ以後は目立った効果は無い。これについては除去した放射性物質が再付着した可能性を示唆している。 3. 鉛レンガについての除染 繰り返し率 4 kHz、出力 148W、照射速度 10 cm/s のとき、1 回の照射だけで 2500 → 50 cpm まで (バックグラウンドと同等) 減少した。ただし、あるサンプルが 200 cpm までしか減少しなかつるのは、汚染の及んだ範囲が表面から深かったためと推測している。
12	評価	装置設計に有用な情報としては下記があげられる。 1. レーザー仕様及び照射条件等

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

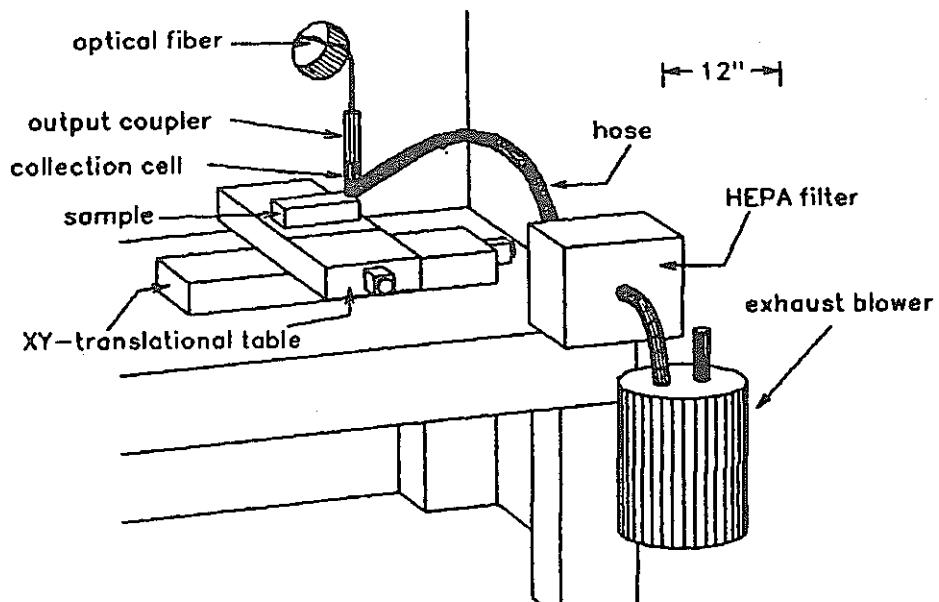


Figure 1. Expanded view of the experimental setup for laser ablation.

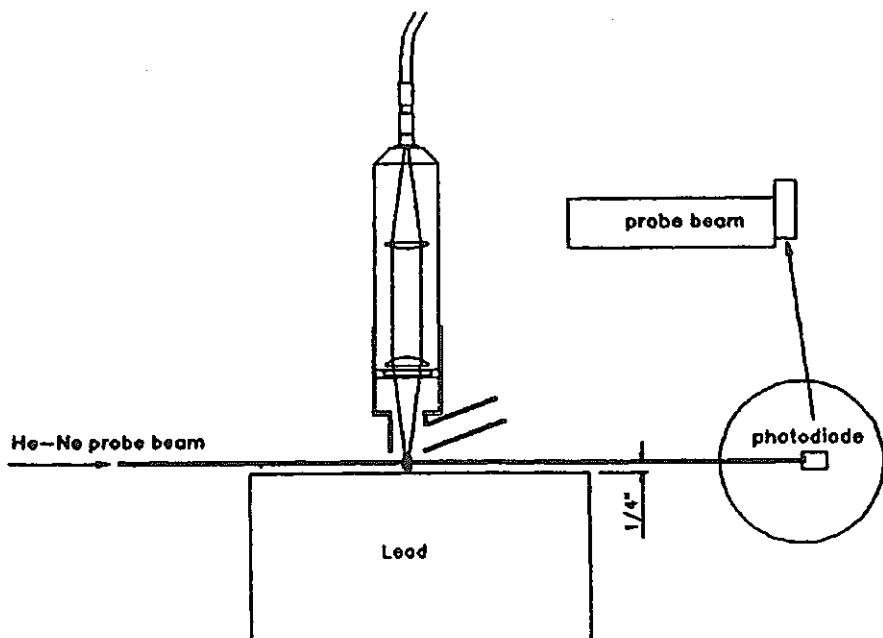


Figure 2. Experimental setup for density gradient measurements.

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

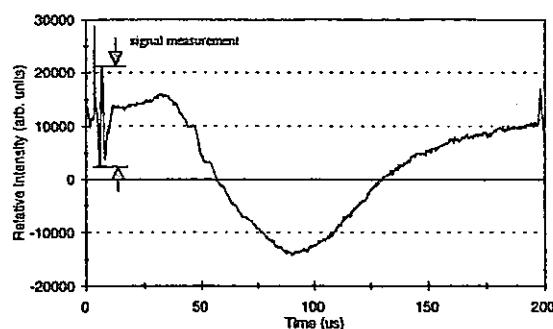


Figure 3. Result of density gradient measurements (stainless steel ablation).

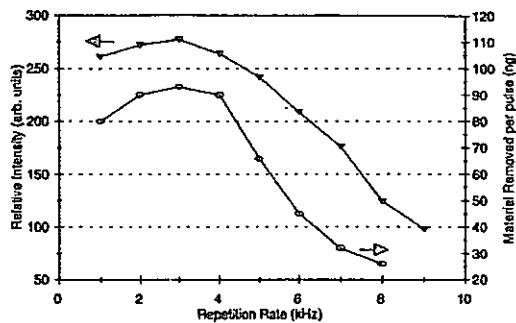


Figure 4. Comparison of density gradient (black triangle) and weight loss measurements (stainless steel). Both exhibit same repetition rate dependence.

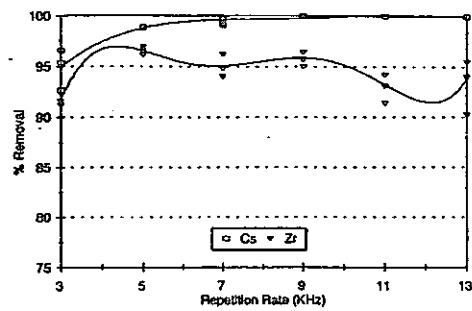


Figure 5. Cleaning efficiency of Cs and Zr on "SIMCON II" coupons as a function of laser repetition rate (without fiber optics delivery system).

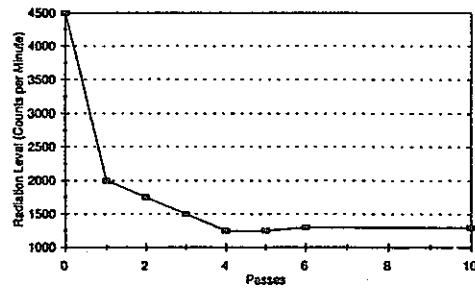


Figure 6. Decrease in radioactivity of the flat surface of a "REALCON I" sample as a function of the number of laser passes across that surface.

技術データシート

(1/1)

資料コード LNM-0013

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	97A0028107
2	和文標題	除染技術評価
3	英文標題	Decontamination technologies evaluations.
4	著者・発表者	TRIPP J
5	資料名	P0998A US DOE Rep
6	年巻号	PAGE.7p 1996
7	実施機関	Lockheed- Martin Idaho Technol. Co.,
8	目的・内容	<p>アイダホ化学処理プラント(I C P P)で、原位置リサイクル可能研磨剤 サンドプラスチング、コンクリート清浄化 機械的荒仕上げ、特殊化学品、電気浸透を使用)、金属のレーザ光除染に関する試験の結果を要約している。</p> <p>レーザ除染システムのスペックについても言及している。</p> <p>その他、幾つかの小規模試験をはぎ取塗料、CO₂ペレット - ブラスチング、その他技術についても結果を要約した。</p>
9	クリーニング対象	金属、鉛レンガ、炭素鋼・ステンレス鋼(レーザー除染に関わるもの)
10	方法・条件	<p>金属：YAGレーザー(Qスイッチ)を利用して、出力1 kW/cm²以上、パルス長1064nm、波長150ns以下で実施。</p> <p>鉛レンガ：詳細不明。</p> <p>炭素鋼・ステンレス鋼：黒いペンキの除去について記述。</p>
11	成果・結論	<p>金属：放射能汚染したサンプルのシミュレーションでは1パスのレーザー照射でほぼ良好な結果(除去効率：80%)が得られた。</p> <p>鉛レンガ：効果的に除去できた。</p> <p>炭素鋼・ステンレス鋼：最適化された条件ではないが、表面の黒ペンキの除去はできた。</p>
12	評価	装置設計に有用な情報としては下記があげられる。 ① レーザーの照射条件等

技術データシート

(1/2)

資料コード LNM-0014

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	97A0174702
2	和文標題	最近話題のレーザー応用—重厚長大産業への応用を中心に レーザーエネルギーの原子力分野への応用
3	英文標題	Application of Laser Energy to Nuclear Fuel Cycle.
4	著者・発表者	矢戸 弓雄, 岸本 洋一郎, 河田 東海夫, 中野 啓昌
5	資料名	Y0019A (0286-9659) Opttronics
6	年巻号	NO. 181 PAGE. 104 - 110 1997
7	実施機関	動力炉・核燃料開発事業団
8	目的・内容	レーザー除染に関係する部分のみ抜粋。 表面付着物を高速に、かつ母材表面を傷つけることなく付着物を除去する 技術は、原子力施設での放射能汚染物質の除染においても強く求められ ている。 レーザーアブレーション法の放射性廃棄物の表面除染への応用は、大気中 でのドライ処理、遠隔操作が可能なため、確立すれば作業者の被爆量低下 、2次生成物の低下に有効な技術となる。
9	リーニング対象	SUS304
10	方法・条件	レーザー: TEA-CO ₂ レーザー 汚染物質: 硝酸ウラニル溶液を固着した試験片
11	成果・結論	レーザーアブレーション法が放射性物質で汚染された材料に対しても効 果があることが確認されようとしている。 除染係数、照射エネルギー効率の向上や、装置の小型化、狭い空間の処 理方法を考案することにより有効な除染技術となることが期待されてい る。
12	備考	

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

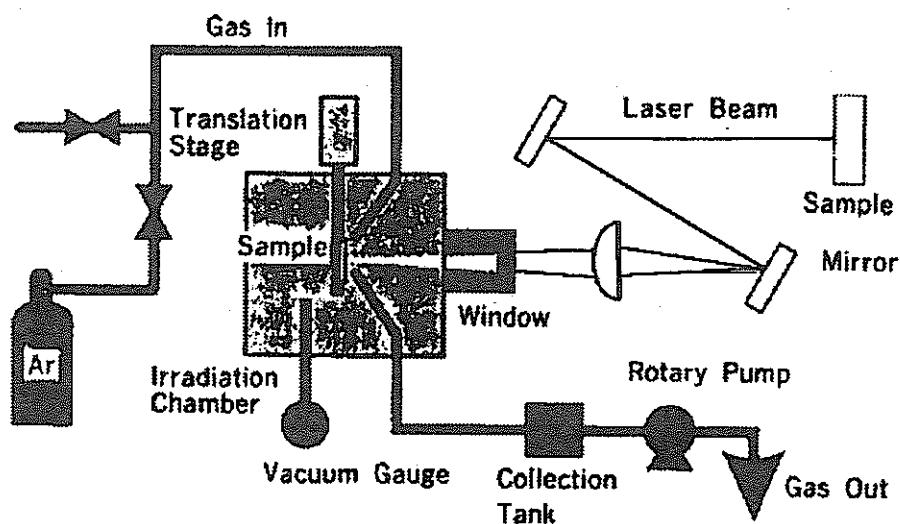


図4 レーザーアブレーション

技術データシート

(1/2)

資料コード LNMC-0015

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	98A0071841
2	和文標題	汚染施設のレーザに基づく特性評価と除染
3	英文標題	Laser-Based Characterization and Decontamination of Contaminated Facilities.
4	著者・発表者	LEONG K H, HUNTER B V, GRACE J E, PELLIN M J; LEIDICH H F, KUGLER T R
5	資料名	P0998A U S D O E R e p
6	年巻号	P A G E. 1 2 p 1996
7	実施機関	(Argonne National Lab., Illinois, USA), (Lumonics Corp., Michigan, USA)
8	目的・内容	米国D O E の多くの施設に典型的な塗装および非塗装のコンクリートおよび金属表面の特性評価と除染へのレーザ - アブレーションの適用を検討し、概念システムを提案した。この有望な技術の有用性をレビューし、効率的な除去の要件を抽出した。塗装鋼表面とコンクリートの除去に関して得た最近のデータを示した。
9	リーニング 対象	塗装鋼、コンクリート
10	方法・条件	レーザー : CO ₂ レーザー Nd : YAG レーザー エキシマレーザー 波形 : 連続波動 (cw) 及びパルス
11	成果・結論	Nd : YAG レーザーでペンキ層の除去は 0.25mm (10 mils) がほぼ最適の厚さである。 パルスエネルギー及び点サイズを変えることによって $0.94 \times 10^4 \sim 3.9 \times 10^4 \text{W/cm}^2$ 異なる流速及びピーク放射値を得られた。 原子炉設備で使われる高密度コンクリートの除去は、パルス Nd : YAG レーザーを使って調べた。 Lumonics レーザーのピークの放射は、2.25J のパルス及び 100Hz での 0.5ms によるおよそ $6 \times 10^3 \text{Wcm}^{-2}$ であった。 進行速度は 3.2~4.2cm/s (75~100 ipm) で使用した。 レーザー除去によって生じる蒸気及び純粋なエアゾール分子 (< 10 μ m) は、煙霧抑制システムによって捕らえられることができた。 表面の除去部分の特性評価は汚染レベルの同時測定を可能にし、この考え方により、オンラインで適用を可能とし、除去終点を決定できた。
12	評価	装置設計に有用な情報としては下記があげられる。 1. レーザー仕様及び照射条件等 2. 除去物の回収方法

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

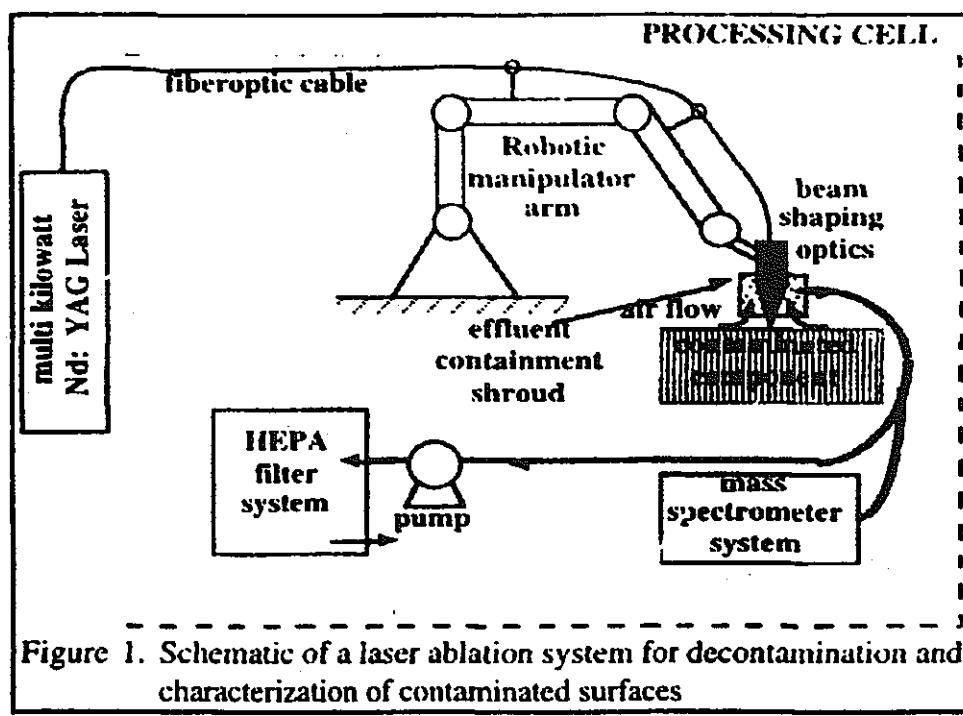


Figure 1. Schematic of a laser ablation system for decontamination and characterization of contaminated surfaces

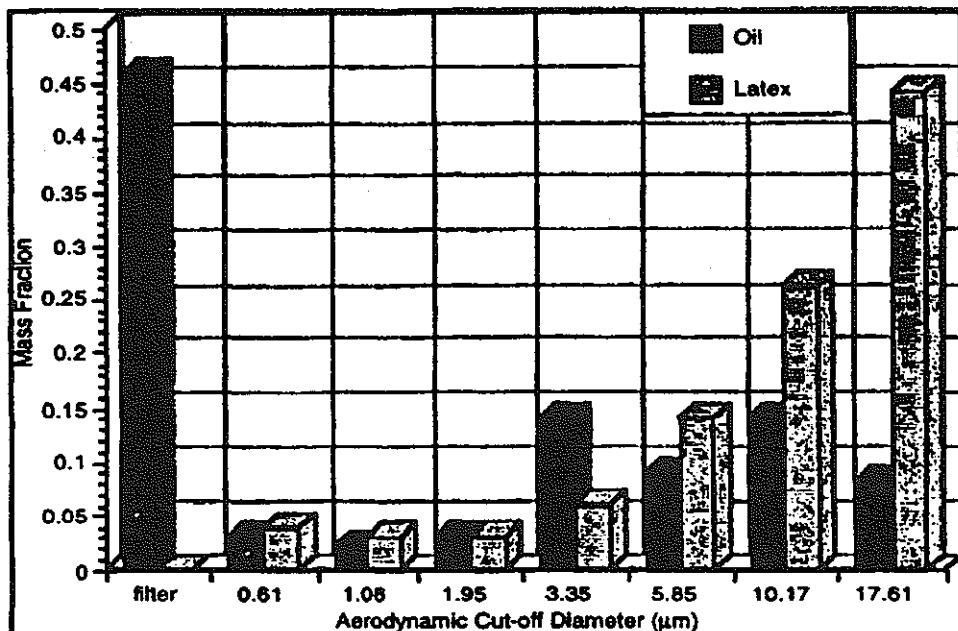


Figure 3. Size distributions of aerosols produced by laser ablation of oil-base and latex paints. The paint thicknesses used were 240 μm for the oil-base and 368 μm for latex. The character of the size distributions were not affected by paint thickness.

技術データシート

(1/2)

資料コード LNM-0016

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	98A0343943
2	和文標題	レーザー除染におけるアブレーション過程のシミュレーション
3	英文標題	Simulation of Ablation Process on Laser Cleaning
4	著者・発表者	古河裕之、S. I. ANISIMOV、西原功修、今崎一夫、藤田雅之、船橋達、二村嘉明、坂岸光二、中西友和、本田茂男、中山千代衛
5	資料名	レーザー研究
6	年巻号	第26巻 2号 (1998年)
7	実施機関	(財) レーザー技術総合研究所
8	目的・内容	原子力施設内の汚染物表面にレーザーを照射し、レーザーアブレーションにより汚染物表面に付着した放射性物質のみを融解、蒸発し除去する。そのためのレーザーのパルス幅、波長、強度等の最適化をシミュレーションにより行う。
9	クリーニング対象	原子力施設の除線のための予備実験として SUS304 の表面に酸化被膜等を作り、試料とした
10	方法・条件	試料作成方法：試料(SUS304)を大気中で 600°C または 800°C に保ちながらガスバーナーで 1 時間加熱し 1 μm 程度の酸化被膜を作った レーザー：Nd:YAG レーザー 波長 : 1064 nm パルス幅 : 20 ps ミクロパルス間隔 : 11. 2 ns マクロパルス幅 : 10 μs 評価方法 : レンズと試料の距離を 250, 255, 265, 270, 275 mm と変えてレーザーを照射し、SUS 304 表面の除去の様子を調べた
11	成果・結論	厚み方向のみの 1 次元のシミュレーションを行った。熱伝導方程式を解いて温度分布を決定し、融解、蒸発の効果を入れた。その結果、照射エネルギー密度が $2 \times 10^4 \text{ J/m}^2$ ~ $2 \times 10^6 \text{ J/m}^2$ の範囲でシミュレーション結果と実験結果は非常に良い一致を示した。 今後のシミュレーションではレーザーの波形、パルス幅等の最適化を行う。
12	評価	融解、蒸発には閾値があり、特に蒸発現象は融解現象に比べ、より閾値依存性の強い現象であることが示唆される。

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

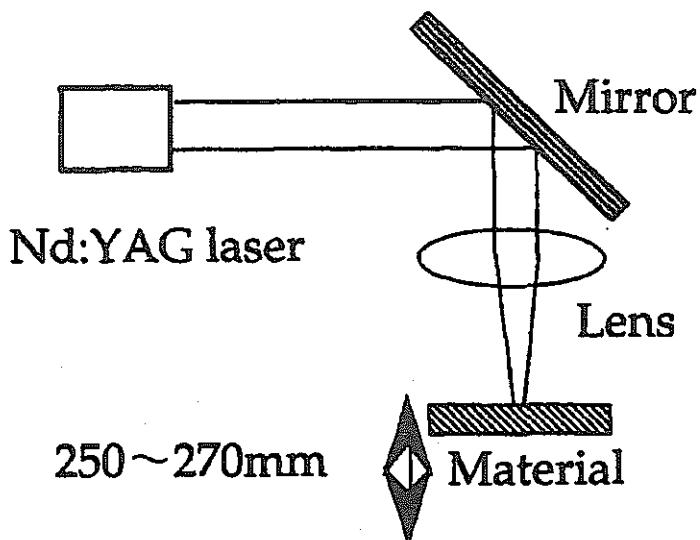
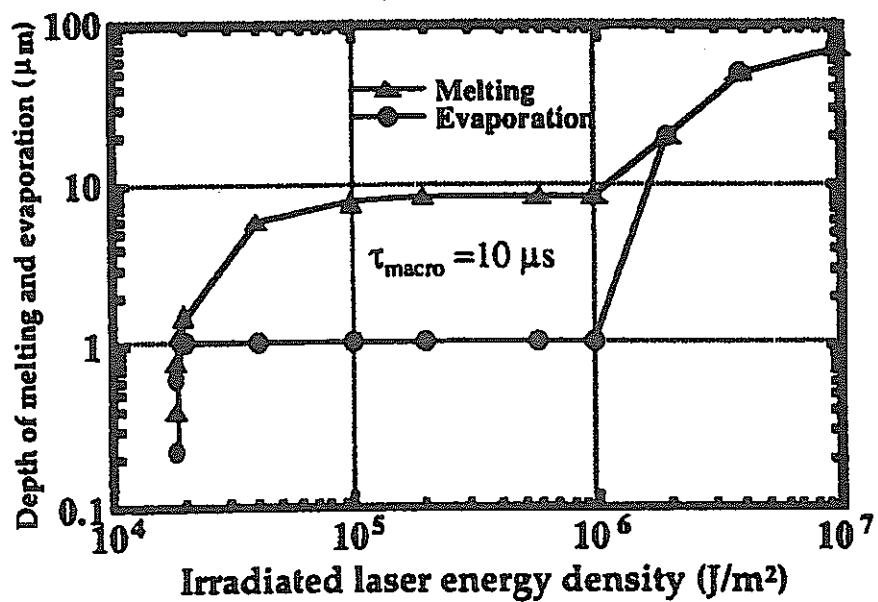


Fig.3 Schematic diagram of laser irradiation.

Fig.8 Depth of melting and evaporation of Fe_3O_4 (1 μm thickness) and SUS304.

技術データシート

(1/1)

資料コード LNM-0017

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	98A0557945
2	和文標題	放射性廃棄物処理・処分 核燃料サイクル廃棄物の廃棄体化の技術開発
3	英文標題	—
4	著者・発表者	—
5	資料名	動力炉・核燃料開発事業団公開資料
6	年巻号	PNC TN1000 98-001
7	実施機関	動力炉・核燃料開発事業団
8	目的・内容	<p>動力炉・核燃料開発事業団における平成11年度から15年度の5年間の放射性廃棄物処理・処分の研究計画について述べたもの。</p> <p>動力炉・核燃料開発事業団で発生する全ての核燃料サイクル廃棄物の発生、処理、貯蔵、処分に関する合理的かつ総合的な廃棄物管理計画の立案と計画の実施に必要な以下の技術の開発（ソフトの開発を含む）を行なう。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 核燃料サイクル廃棄物管理に関する解析システムの開発 2. 固体廃棄物の廃棄体化技術開発 3. ウラン系廃棄物の高除染技術開発 4. 超臨界による放射性有機廃棄物の処理技術開発 <p>この結果、動力炉・核燃料開発事業団における核燃料サイクル廃棄物データを一元的に管理できるようになるとともに、廃棄物の性状に応じた合理的、体系的な廃棄物対策計画の策定と実施が可能となる。成果は、既存の処理施設の今後の運転計画及び新設の処理貯蔵施設の建設・運転及び廃止措置、処分計画に反映させる。民間へも成果・ノウハウを技術移転していく。なお、技術開発に当たっては、外部の専門化等の意見をうかがい、評価を受けつつ進める。</p>
9	クリーニング 対象	—
10	方法・条件	—
11	成果・結論	—
12	評価	—

技術データシート

(1/3)

資料コード LNM-0018

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	98A0619646
2	和文標題	レーザー光による放射性汚染物の除去技術について
3	英文標題	—
4	著者・発表者	島崎 善広
5	資料名	Energy and Humanity
6	年巻号	No. 45 page. 19-23 (1998 年)
7	実施機関	動力炉・核燃料開発事業団
8	目的・内容	1. 従来の除染技術の問題点とレーザー除染の特徴について。 2. 動力炉・核燃料開発事業団におけるウランで汚染されて試料に対するレーザー除染を適用した場合の実験結果について。 3. レーザークリーニングの主な応用例。
9	クリーニング対象	ウランによって汚染された金属材料の表面
10	方法・条件	試料：1) 表面に硝酸ウラン溶液を滴下し水分を蒸発させたステンレス鋼 2) ウランガス（六フッ化ウラン）中に長期間曝された鉄材 レーザー：炭酸ガスレーザー 繰り返し数：100 Hz パルスエネルギー：5 J 平均出力：500 W その他：アブレーションブルームは吸引ノズルにより回収。 半導体励起固体レーザー（波長：1 μm前後） 評価方法： 試料 1) に対して：レーザー照射前後の表面観察および表面元素分析 試料 2) に対して：α 線計測および表面の走査型電子顕微鏡観察
11	成果・結論	試料 1) の表面に硝酸ウラン溶液を滴下し水分を蒸発させたステンレス鋼についてはエネルギー分散型 X 線分光 (EDX) 結果からはレーザー照射前に明瞭に確認できたウランのピークが、照射後はカクニンできず、表面に付着していたウランが除去されていることが分った。 試料 2) の α 線の計測により 99 %以上の除染率を確認した。 結論 (1) レーザークリーニング法を実際の放射性物質（ウラン）に汚染された材料に適用し十分な除去効率があることを実証した。 (2) レーザークリーニング法では、母材を損傷せず表面の汚れだけを除去できることを実証した。 (3) レーザーの特徴である非接触性、遠隔操作性を利用することにより、除染の自動化が期待できる。
12	評価	装置設計に有用な情報としては下記があげられる。 1. 実験装置構成 2. 除染効率の評価方法（走査型電子顕微鏡観察、エネルギー分散型 X 線分光、α 線計測） 3. レーザー照射回数と除去深さの関係

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

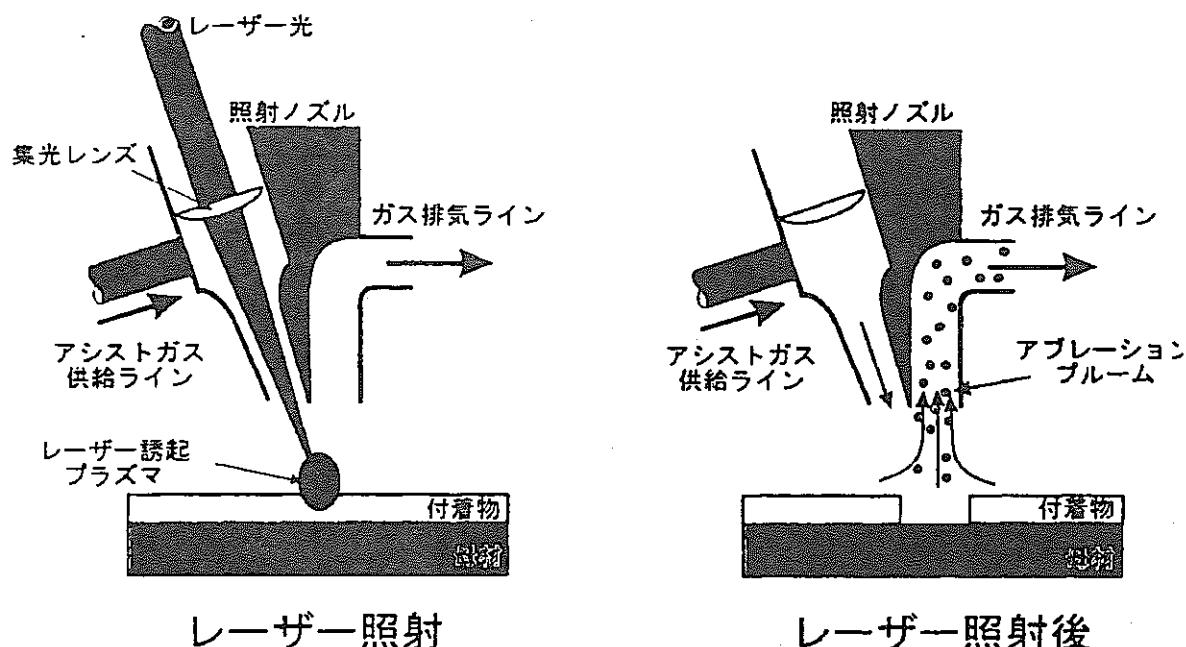


図1 レーザー除染法概念図

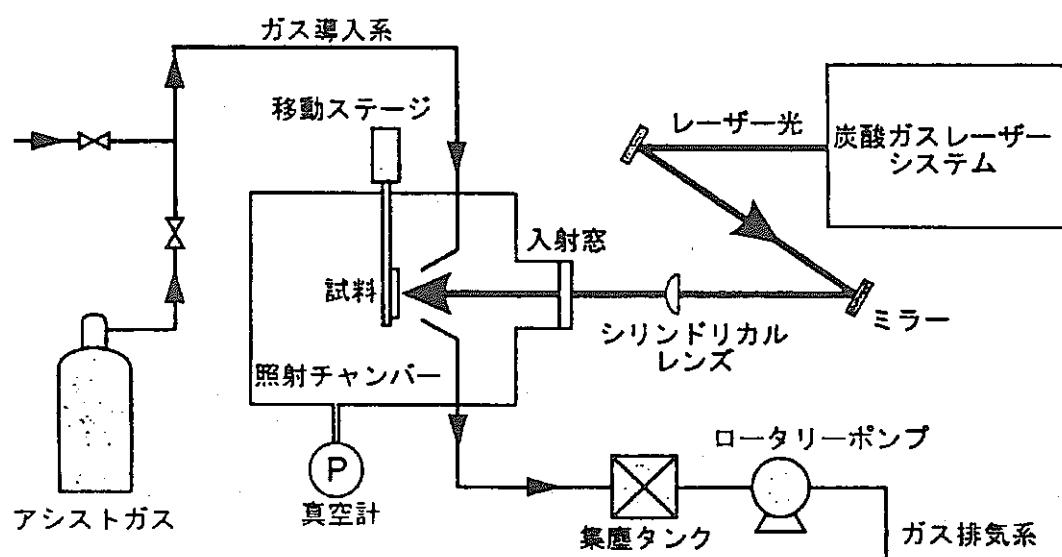
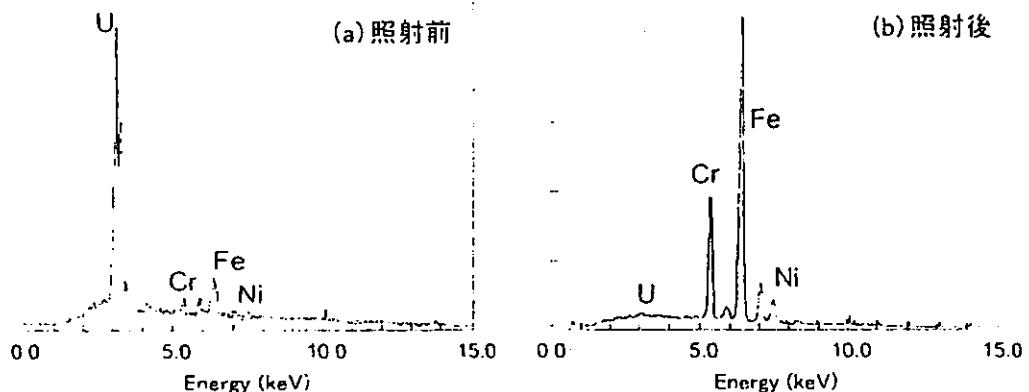


図2 実験装置構成

補足説明シート



エネルギー分散型X線分光(EDX)結果
図4 レーザー除染の試験結果

表1 表面が汚染された鉄材の試験結果
(レーザーエネルギー条件: 10J/cm²)

サンプル番号	照射前 (α 線 cpm)	照射後 (α 線 cpm)	除染率(%)
1	219.6	1.2	99.5
2	263.1	2.6	99.0
3	376.8	2.8	99.3

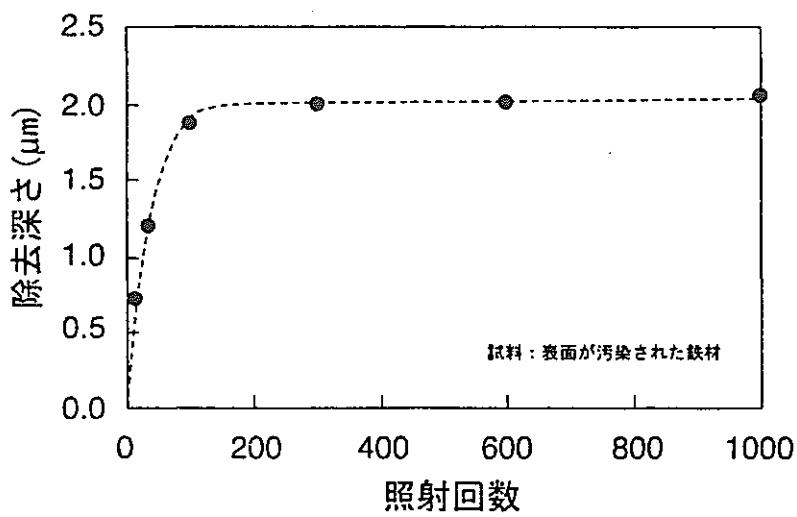


図5 レーザー照射回数と除去深さの関係

技術データシート

(1/3)

資料コード LNM-0019

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	98A0865192
2	和文標題	放射性汚染物質を瞬時に取り去るレーザークリーニング技術
3	英文標題	—
4	著者・発表者	鈴木美寿
5	資料名	原子力 eye
6	年巻号	Vol. 44 No. 10 (1998年10月号)
7	実施機関	動力炉・核燃料開発事業団
8	目的・内容	<p>レーザークリーニング技術が原子力分野において注目を集めてきた背景について簡単に記載した。また、動力炉・核燃料開発事業団が今回実施した放射性汚染物質を用いての国内で初めてのレーザー除染実証試験の結果について説明した。また、こうしたレーザービーム利用技術の適用が期待される分野について紹介した。</p> <p>特に、レーザーウラン濃縮において用いられた高出力の炭酸ガスレーザーを用いて、実際に放射性物質によって汚染された試料を用いて除染効率を測定し、レーザー除染技術の実証を行った。</p>
9	クリーニング対象	ウラン系固体廃棄物
10	方法・条件	<p>レーザー : 炭酸ガスレーザー 繰り返し : 100 Hz パルスエネルギー : ~5 J 平均出力 : 500 W 試料 : 2種類(表面汚染試料、浸透汚染試料) その他 : 照射セルは20mm厚のアクリル製であり、レーザー照射時の雰囲気圧力を低真空まで制御できるようになっている。アシストガスを吹き付けるためにガス導入管を取り付けており、その先端部分を試料近傍に配置した。照射により生じるアブレーションブルームは照射位置近傍に設置した吸引ノズルにより回収した。</p> <p>また、レーザー照射前後の比較は、走査型電子顕微鏡(SEM)による表面観察写真とエネルギー分散型X線分光(EDX)による表面元素分析により行なった。</p>
11	成果・結論	<p>除去対象領域に照射するショット数を増やす、あるいはレーザー波長を適切に選ぶことによって被膜の完全除去が可能であることがわかり、さらに高い除染係数が得られることが確認できた。</p> <p>また、酸化被膜中の酸素元素が、炭酸ガスレーザーよりもエキシマレーザーを用いることによってより効果的に除去された。</p>
12	評価	装置設計に有用な情報としては、レーザー照射前後の比較方法として、走査型電子顕微鏡(SEM)による表面観察写真とエネルギー分散型X線分光(EDX)による表面元素分析により行なったこと。

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

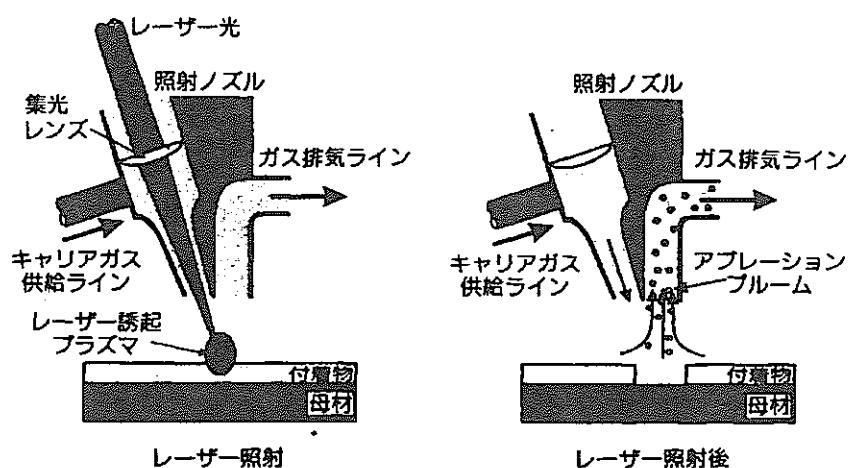


図1 レーザー除染技術の概念図

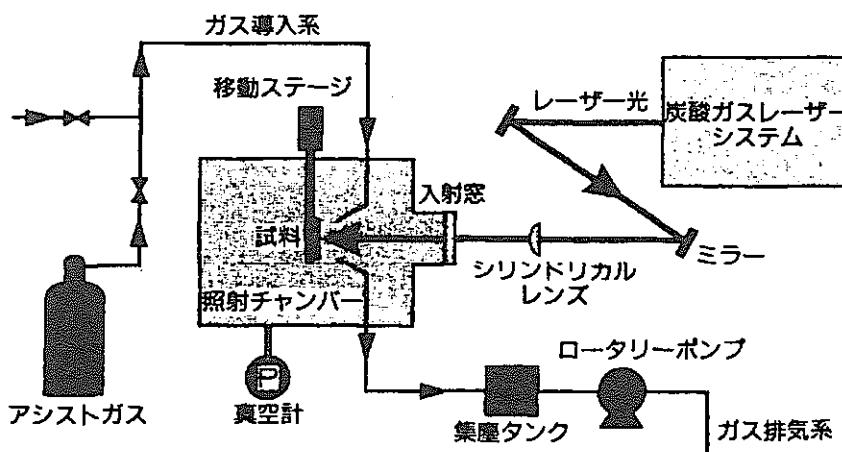
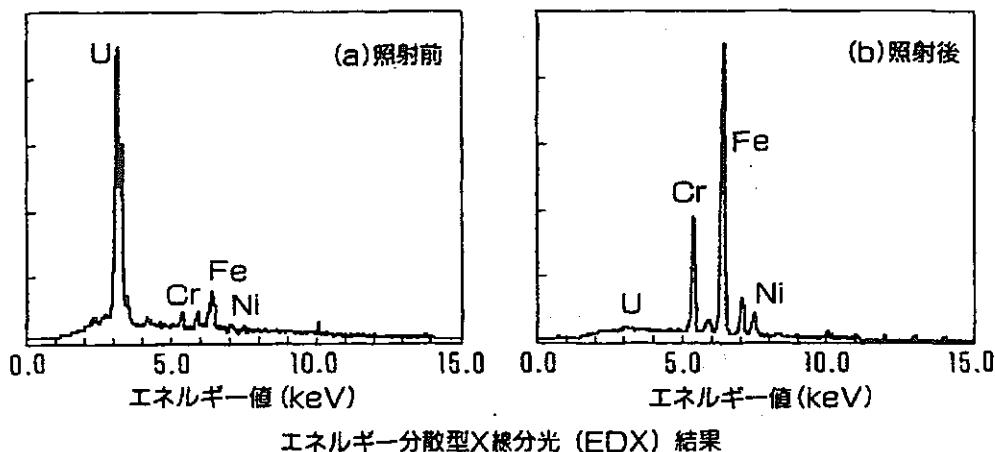


図2 実験装置構成



エネルギー分散型X線分光(EDX)結果

図3 表面汚染試料の試験結果

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

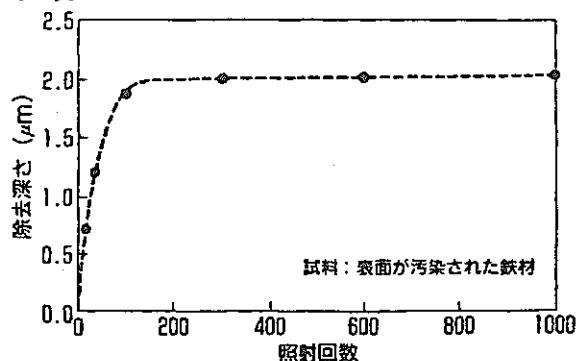


図4 照射回数と除去深さの関係

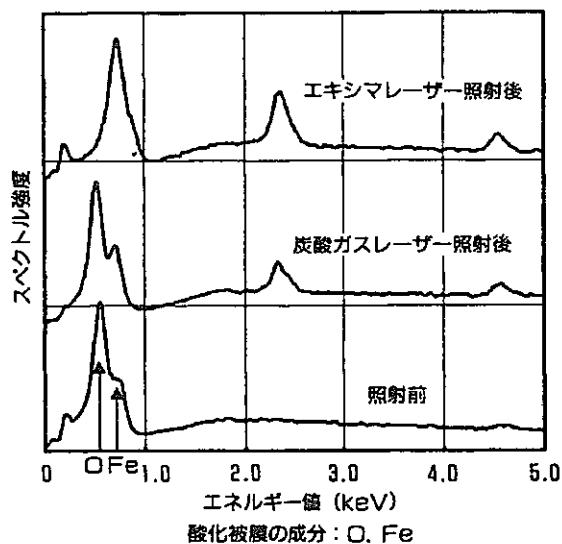


図5 エキシマレーザーの酸化被膜除去特性

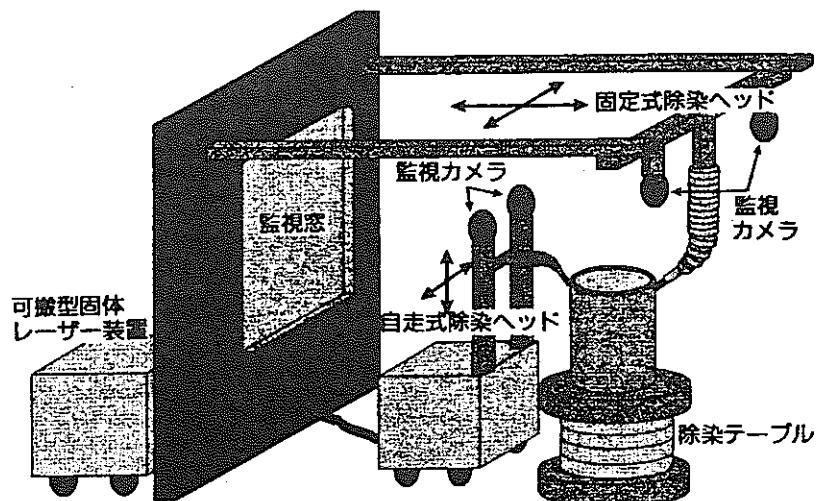


図6 高出力固体レーザー付自走式ロボット

技術データシート

(1/2)

資料コード LNM-0020

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	99A0141383
2	和文標題	原子力施設廃止措置技術の開発状況－石川島播磨重工業の開発技術－
3	英文標題	Research and Development Activities for Nuclear Facilities Decontamination -Developing Technology of IHI Co., Ltd.-
4	著者・発表者	小林博栄、伊藤俊行、福井寿樹、三尾圭吾、大村豊、小嶋敏雄、渡部和夫
5	資料名	デコミッショニング技報
6	年巻号	第 19 号(1998 年 12 月)
7	実施機関	石川島播磨重工業(株) 原子力事業部
8	目的・内容	<p>石川島播磨重工業(株)(以下、IHI)における原子力施設の廃止措置について研究開発を進めてきた以下の技術について述べる。</p> <ul style="list-style-type: none"> 1. 安全評価技術 <ul style="list-style-type: none"> ・放射のインベントリ評価 ・遮蔽解析 2. 解体・遮蔽技術 <ul style="list-style-type: none"> ・切断技術(レーザ) ・除染技術(レーザ、氷粒プラスト) 3. 遠隔技術 <ul style="list-style-type: none"> ・デジタルモックアップ技術と遠隔操作支援技術 ・水中検査測定ロボット (AIRIS21TM) 4. 解体廃棄物再利用技術 <ul style="list-style-type: none"> ・高温溶媒抽出法 ・鋼板製造システム 5. 廃棄物保管および使用済燃料貯蔵 <ul style="list-style-type: none"> ・廃棄物保管施設 ・使用済燃料貯蔵施設
9	ターニング 対象	上記目的・内容で記載した除染技術(レーザ)では、特に具体的な対象物はない(原子力施設におけるレーザを利用した除染技術の一般的紹介)
10	方法・条件	対象物の表面にレーザ光を集光し、アブレーションにより表面物質と汚染物質をプラズマ状に分離し、飛散した表面物質と汚染物質を、回収装置によって回収する(文章による一般的な記載のみ)。
11	成果・結論	レーザ除染法は、遠隔操作性に優れ、照射条件を選ぶことによって、除去面積、深さ、処理速度を制御できる。また、熱的な影響が小さく母材の物理的・機械的性質を損なうことがない。さらに、乾式プロセスであることから、廃液などの副次的な生成物が発生しないことから、二次廃棄物の発生の大大幅な軽減が期待できる。
12	評価	装置設計に有用な情報としては特になし。 レーザ除染装置の一般的な概念図があるのみ。

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

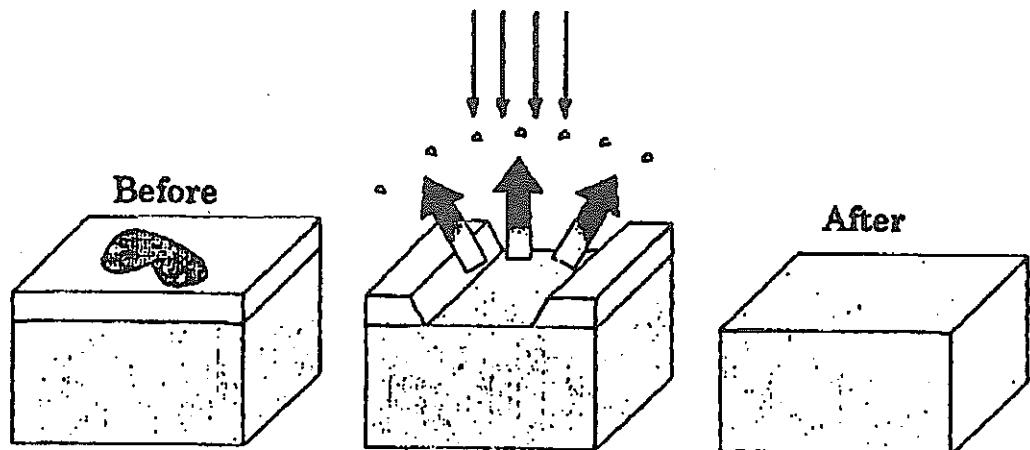


Fig. 2 Laser ablation

図2：レーザアブレーションによる除染の原理の模式図(一般的なもの)

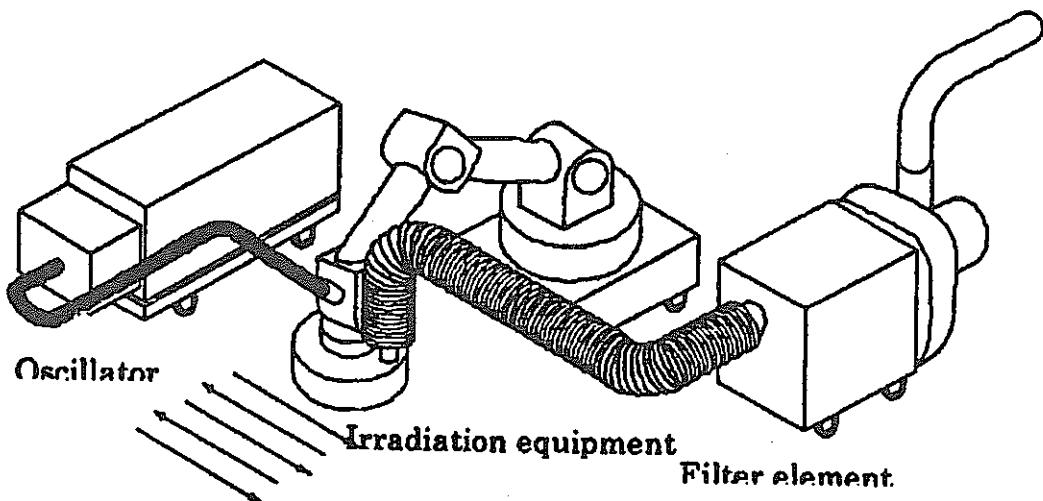


Fig. 3 Schematic configuration of Laser decontamination system

図3：レーザ除染装置の概念図(一般的なもの)

技術データシート

(1/2)

資料コード LNMC-0021

No.	項目	内容
1	JICST 記事番号	99A0608362
2	和文標題	レーザーによる除染
3	英文標題	—
4	著者・発表者	今崎 一夫
5	資料名	OPTRONICS
6	年巻号	No. 6 page. 135-138 (1999 年)
7	実施機関	(財) レーザー技術総合研究所
8	目的・内容	レーザー除染を原子力施設の放射性汚染機器および構築物に適用する場合の一般的紹介記事。また、レーザー除染の現状と展望についても記載。
9	クリーニング対象	原子力施設の放射性汚染機器および構築物
10	方法・条件	<p>レーザー除染時のパラメータとして以下の条件の記載あり。</p> <p>レーザー : 半導体励起固体レーザー (波長 : 1 μm 前後) 出力 平均 : ~ kW ピーク : ~100 MW 効率 : 10% 除去速度 : 1 m²当たり 10 分程度 パルス幅 : 100 ps ~ 1 ns 繰り返し率 : 1 ~ 10 kHz</p>
11	成果・結論	<p>レーザー除染技術を原子力施設の放射性汚染機器および構築物の放射性物質の除去、除染に適用することは以下の大きな利点がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・除染による副次の廃棄物発生がほとんど無い ・自動および遠隔操作が容易であるため作業従事者の被曝する線量当量の低減化に寄与する ・高度に表面除染ができるために、放射性廃棄物の減容に役立つ。その結果廃棄物管理が容易になり、環境に及ぼす影響も最低限に抑えられる。
12	評価	<p>装置設計に有用な情報としては下記があげられる。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. レーザーによる除染モデルについて検討し、固体表面でのアブレーション現象についての定性的検討内容。 2. 発電炉の解体に伴ない発生する金属廃棄物量、建造物のコンクリート量。 3. 種々のレーザーパルスにおけるアブレーション率の比較 (レーザー波長は 1 μm)

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

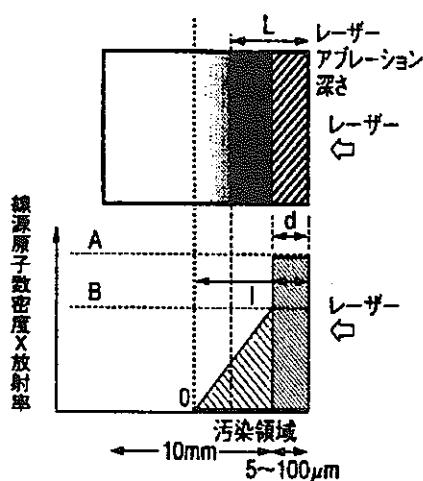
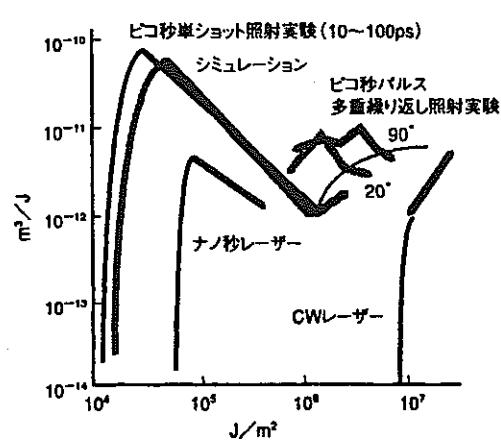
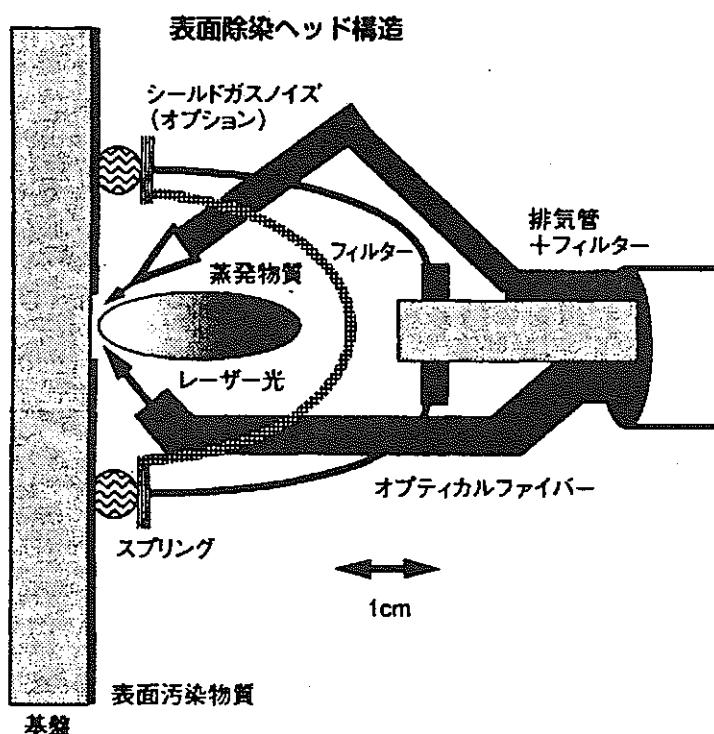


図1 レーザー除染モデル

図2 種々のレーザーパルスにおけるアブレーション率の比較、
レーザーは波長 1 μm図3 除染ヘッドの概要、ロボットアーム先端に取り付けて
除染

技術データシート

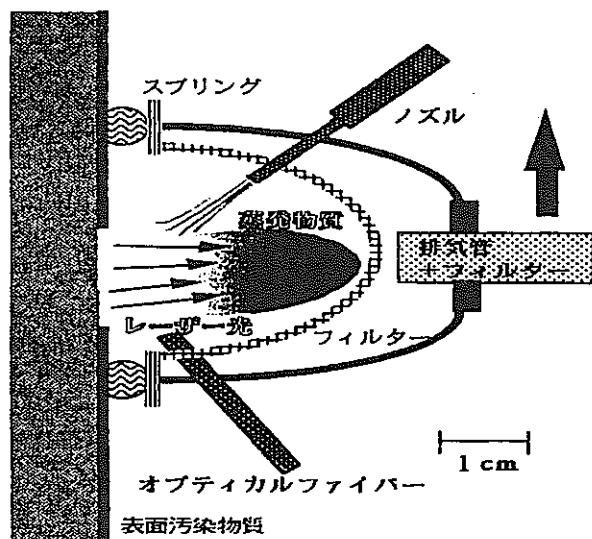
(1/2)

資料コード LNM-0022

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	99A0823149
2	和文標題	レーザーによる表面汚染物の除去に関する理論的研究
3	英文標題	Theoretical research on removal of surface contaminant by laser.
4	著者・発表者	古河裕之、S. I. ANISIMOV、西原功修、今崎一夫、藤田雅之、石垣壮洋、本田茂男、二村嘉明、中山千代衛
5	資料名	ILT 年報
6	年巻号	PAGE. 61, 63~66 (1997 年)
7	実施機関	(財) レーザー技術総合研究所
8	目的・内容	原子力施設内の汚染物表面にレーザーを照射し、レーザープレーショ ンにより汚染物表面に付着した放射性物質のみを融解、蒸発し除去する。 そのためのレーザーのパルス幅、波長、強度等の最適化を行うことを目的 とする。 除染率の簡単な式表示をした。その後、厚み方向のみの1次元のシミ ュレーションを行った。熱伝導方程式を解いて温度分布を決定し、融解、 蒸発の効果を入れた。
9	クリーニング対象	原子力施設の除線のための予備実験として SUS304 の表面に作った黒錆
10	方法・条件	原子力施設の除線のための予備実験として SUS304 の表面に黒錆を作り、 それをレーザーで除染する実験を行った。 試料作成方法：試料（SUS304）を大気中で 600°C または 800°C に 保ちながらガスバーナーで 1 時間加熱し 1 μm 程度の 酸化被膜を作った レーザー：Nd:YAG レーザー 波長 : 1064 nm パルス幅 : 20 ps ミクロパルス間隔 : 11. 2 ns マクロパルス幅 : 10 μs 評価方法 : レンズと試料の距離を 250, 255, 265, 270, 2 75 mm と変えてレーザーを照射し、SUS 304 表面の除去の様子を調べた
11	成果・結論	実験の結果、単位エネルギー当たりの除染体積は、レーザーのエネル ギー密度に逆比例している。また、シミュレーションの結果と良く一致 した。 また、解析の結果から、レーザーの照射エネルギー密度が $2 \times 10^4 \text{ J/m}^2$ を越えた当たりから急激に融解、蒸発が起こっている。また、 $2 \times 10^4 \text{ J/m}^2 \sim 2 \times 10^6 \text{ J/m}^2$ 当たりの領域では黒錆のみが蒸発しており、融解 現象は SUS304 内部まで進んでいる。 10^6 J/m^2 を越えた当たりから SUS304 も蒸発し始めており、 $2 \times 10^6 \text{ J/m}^2$ を越えた当たりからは、液 体部分は殆ど存在しなくなっている。
12	評価	融解、蒸発には閾値があり、特に蒸発現象は融解現象に比べ、より閾値依 存性の強い現象であることが示唆される。

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)



除染ヘッドの概要

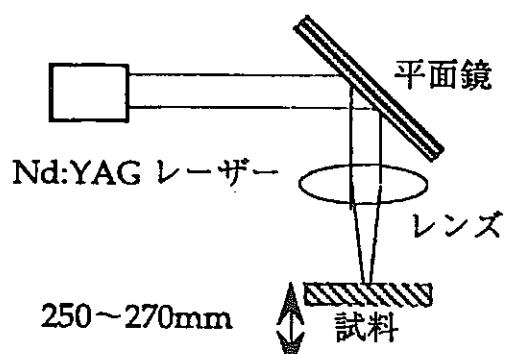


図3 レーザーの照射図

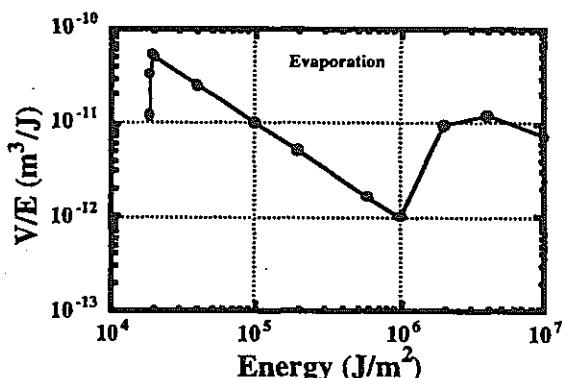


図8 単位エネルギー当たりの除染体積

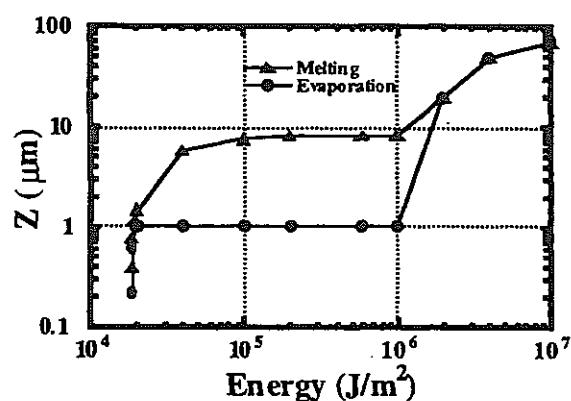


図9 黒鉛及びSUS304が融解、蒸発する厚さ

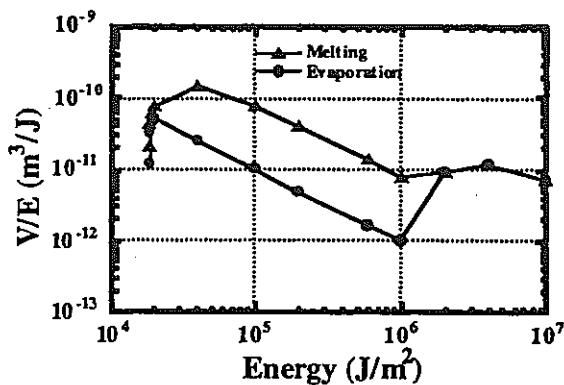


図10 単位エネルギー当たりの溶融体積と蒸発体積

技術データシート

(1/2)

資料コード LNMC-0023

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	99A0831950
2	和文標題	コンクリートと金属の表面の汚染物レーザアブレーション
3	英文標題	Laser ablation of contaminants from concrete & metal surfaces.
4	著者・発表者	CASE R P, FREIWALD D A, PEEBLES H C
5	資料名	K19990318 (0-89448-635-7) Proc Int Conf Decommissioning Decontam Nucl Hazard Waste Manag Vol 1 1998
6	年巻号	PAGE. 124 - 130 1998
7	実施機関	F 2 Associates Inc., NM
8	目的・内容	コンクリートと金属の表面の汚染物レーザアブレーションによるコンクリート、金属、合金の基盤の被覆に対する除染を調べた。
9	クリーニング対象	コンクリート、金属、合金
10	方法・条件	<p>レーザー：高出力パルス CO₂ レーザー（平均出力：2kW） 波長：10.6 の μ m 温度：約 10,000°C</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コーティングタイプ PCBs、PCB、安全な材料コーティング、金属コーティング ・サブストレート コンクリート、厚い金属、精巧な基体（薄い金属、複合材料、木） ・システムタイプ 小規模清掃装置、大規模清掃装置、ノズル付きハンド装置、移動ロボットシステム
11	成果・結論	<ul style="list-style-type: none"> ・レーザー除去用の機器仕様の概念として、小規模清掃装置、大規模清掃装置、ノズル付きハンド装置、移動ロボットシステムを提案した。 ・レーザー除去後の剥離物の回収装置にて回収した。 ・レーザー除去技術でコンクリートに対し、表面を 2、3mm 削除するため使用できるを証明できた。 ・鉛ペンキは、1.4ft²/分の進度で 1.4kW の CO₂ レーザー光線を使って鋼サブストレートから取り除かれた。 ・鉛ペンキをコンクリートから剥離する場合の有機的蒸気の評価ピーク濃度は、OSHA によって定められる基準値に対し、すべて基準値以下であった。 ・鉛ペンキの除去で捕らえられる鉛測定は、OSHA PEL の水準以下であった。 ・レーザアブレーション技術は、空気の放出のための現在の政府規定、労働者被爆および表面汚染クリアランス水準に対応した。 ・危険な化学薬品の使用は、この技術によって避けることができる。 ・レーザー除去技術は、実際に操作を剥離する際に発生する全廃棄物の量を減らす唯一の表面汚染除去技術である。
12	評価	装置設計に有用な情報としては下記があげられる。 1. レーザー仕様及び照射条件等 2. 装置の基本構成 3. 除去物の回収方法

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

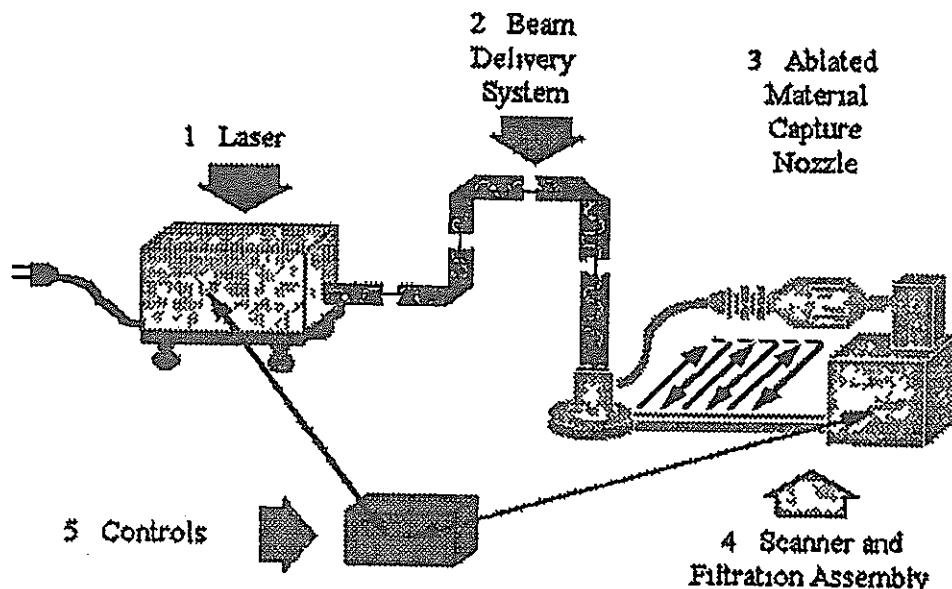


Figure 1

Phase II Test Layout Instrumentation & Controls

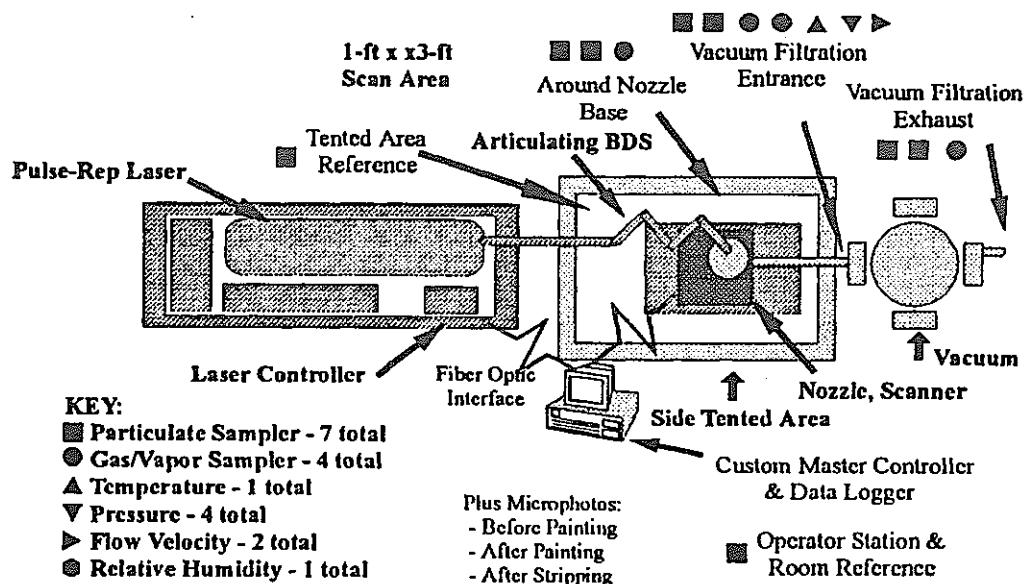
F2 Associates Inc.

Figure 2

技術データシート

(1/4)

資料コード LNM-0024

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	99A1002758 JST copyright
2	和文標題	レーザ除染技術の開発 (3) レーザ伝送系の特性試験
3	英文標題	Development of laser decontamination technique. (3). Experiments of laser beam transmission.
4	著者・発表者	福井康太, 小川竜一郎, 石島昇, 谷本健一 (核燃料サイクル開発機構大洗工学セ)
5	資料名	L3630A 核燃料サイクル開発機構公開資料
6	年巻号	PAGE. 119 p 1999
7	実施機関	核燃料サイクル開発機構 大洗工学セ
8	目的・内容	レーザ除染法は、物質表面にレーザ光を照射し、表面を急速に加熱して蒸散あるいは溶融させて、それらをシールドガスとともに排気系に捕集することにより汚染を除去するものである。その利点は、徹底除染が可能であること、二次廃棄物量が少なく処理が容易なこと、遠隔除染が可能であることである。本試験は、ステンレス鋼表面の除染に適するレーザとして選定されたYAGレーザを用いて、レーザビーム伝送特性試験、各種形状模擬試験片の除染試験及び二次生成物特性測定試験を行った。
9	クリーニング対象	SUS304試験片
10	方法・条件	各種形状模擬試験片の除染試験時のレーザー照射条件 Qスイッチパルス 最大出力エネルギー：650mJ／パルス パルス幅：8ns 繰り返し周波数：10Hz ノーマルパルス ピーク出力：800W以上 (50Hz デューティー比50%時)
11	成果・結論	QスイッチYAGレーザーを用いた場合は、平坦な形状の試験片に対しては、処理速度が遅いながらも高い除染性能が得られる。 ノーマルパルスYAGレーザーは試験片の形状によらず良好な除去性能が得られるが、試験片が熱変形を起こす。 気中浮遊物はシールドガスに空気を用いた方が、アルゴンを用いた時より多い。 試験片の移動速度は、二次生成物の発生に影響を与えない。 二次生成物の回収は、対象物をフードで囲い、気中浮遊物はフィルタで、飛散したドロスはフード内でトレイ等により回収する方法が有効である。
12	評価	装置設計に有用な情報としては下記があげられる。 1. 装置構成及びノズル等構成要素の概念

(2/4)

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

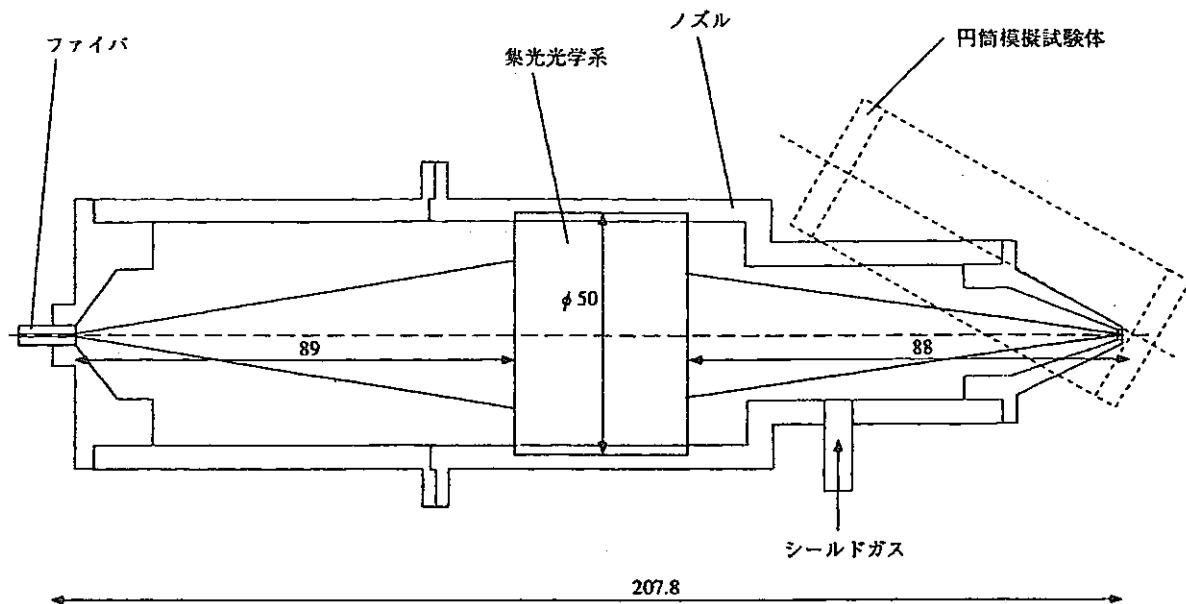


図 2.4 ノズル概念図

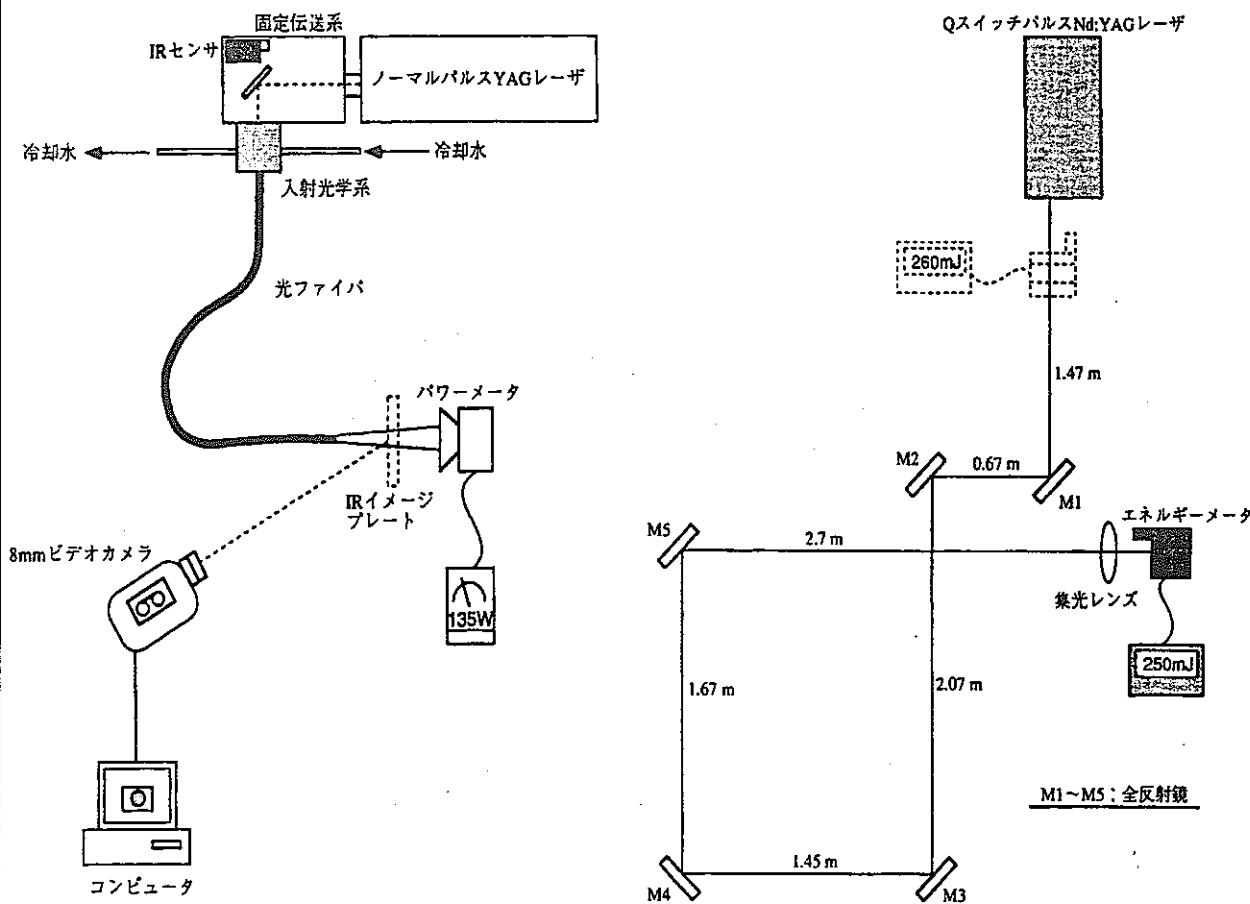


図 4.1 ノーマルパルス YAG レーザのファイバ伝送試験概念図

図 4.3 Qスイッチパルス YAG レーザのミラー伝送試験概念図

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

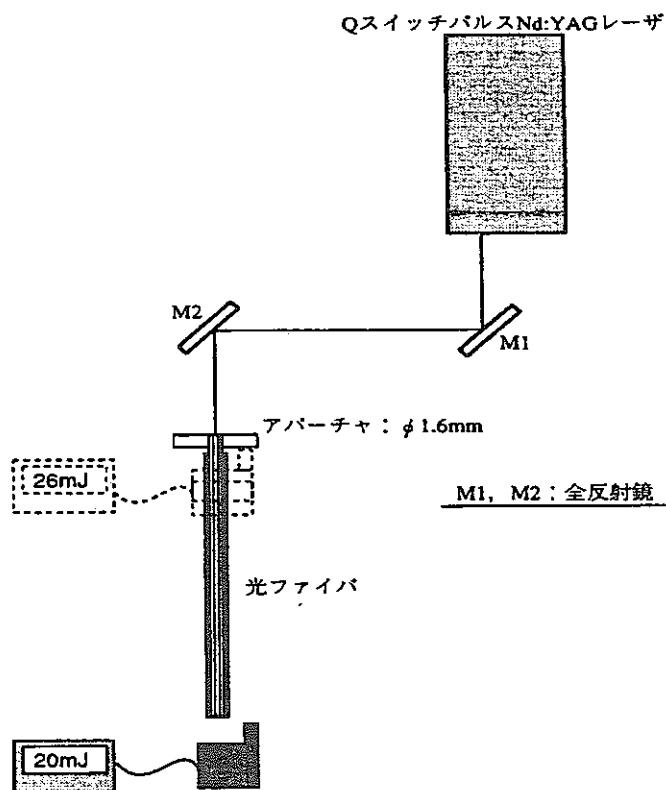


図 4.5 QスイッチパルスYAGレーザのファイバ伝送試験概念図

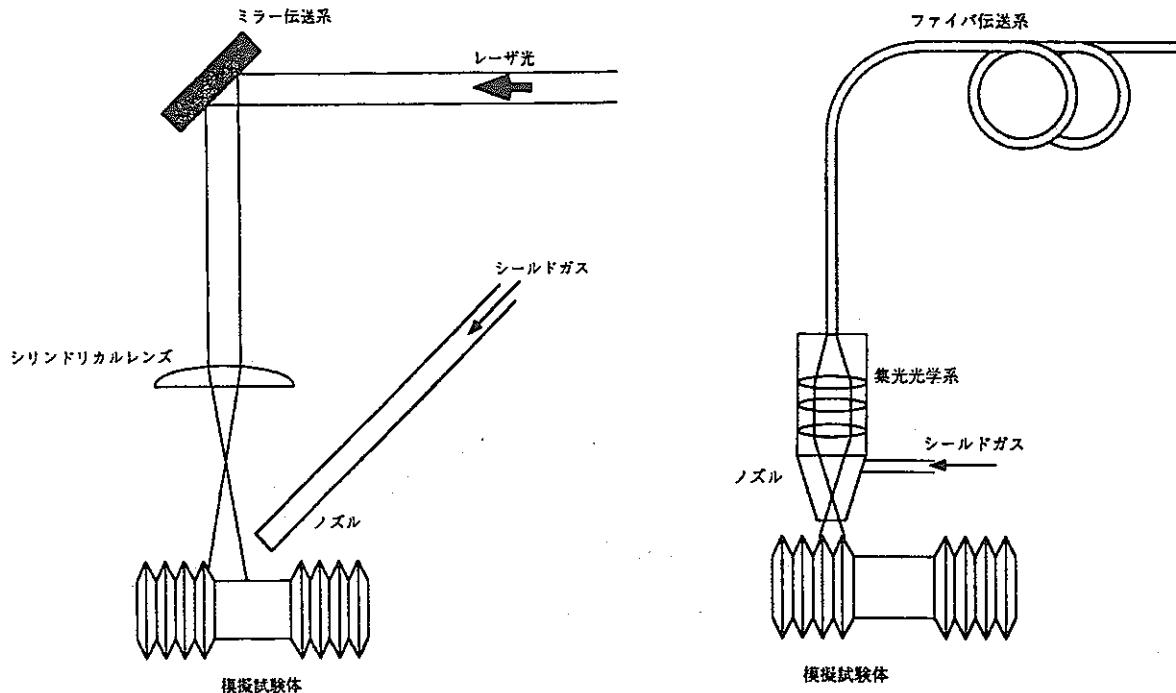


図 4.7 模擬試験片除染概念図 (QスイッチパルスYAGレーザ)

図 4.8 模擬試験片除染概念図 (ノーマルパルスYAGレーザ)

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

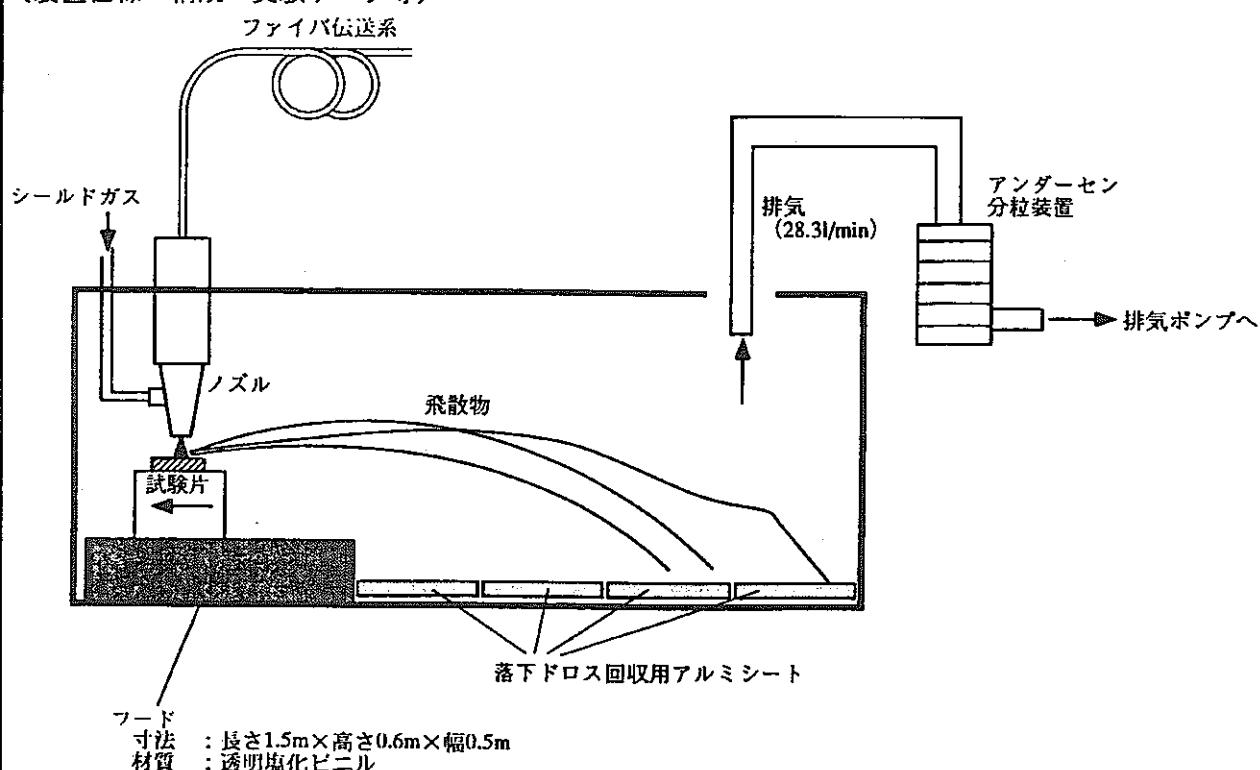


図 4.21 二次生成物特性測定試験概念図

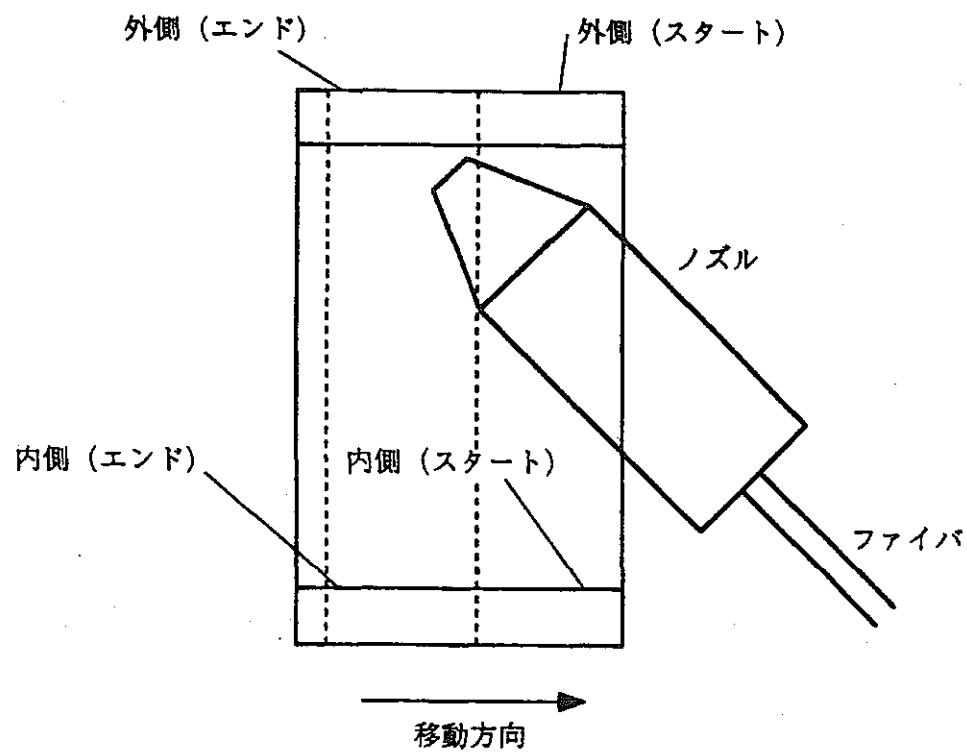


図 5.31 ノーマルパルス YAG レーザ照射試験分割方法

技術データシート

(1/2)

資料コード AGM-0001

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	99A0195620
2	和文標題	熱プラズマ材料プロセッシングの最近の発展 真空アークによる金属表面酸化膜の除去
3	英文標題	Recent Development of Thermal Plasma Materials Processing. Removal of Oxide Layer on Metal Surface by Vacuum Arc.
4	著者・発表者	武田 鉱一、竹内 順
5	資料名	日本金属学会誌
6	年巻号	VOL. 63, NO. 1 (1999)
7	実施機関	新日本製鉄
8	目的・内容	真空アークを用いた酸化膜除去について、陰極点特性の理解を深め、酸化物除去現象を支配する因子を明らかにし、クリーニング速度を理論的に推定することを目的とした。実験観測により、陰極点の基本的な物理量と酸化物除去速度を推定した。次に、除去プロセスを陰極点でのエネルギーバランスを基に近似的に定式化することにより予想される除去速度を推定し、実験モデルとの妥当性を検証した。
9	クリーニング対象	SUS430
10	方法・条件	実験装置は、水冷銅円盤よりなる陽極と陰極として働く試験片(SUS430)を内部にセットした真空容器、陽極と試験片との間にアークを発生させる直流電源、陰極を水冷するための冷却水循環システム、真空排気システム、制御装置等で構成する。 真空容器内は、実験開始当初は10Paに減圧する。 アーク電源(無負荷電圧: 200V)は、定電流モード(調整範囲: 50~400A)で作動させ、試験片上の酸化物除去を実施した。なお、陰極点のクレータ直径測定時においてはパルスモードで作動させた。
11	成果・結論	<ol style="list-style-type: none"> 1. 真空アークでは複数の陰極点が陰極面上に散在して形成され、その数は電流値に比例する。本実験では陰極点1点当たりの電流は18Aである。 2. 真空アークにおける陰極点のエネルギー密度Eは、$10^{10} < E < 10^{14} \text{W/m}^2$の範囲であり、非常に高い。 3. 陰極点は酸化物の上に優先的に形成され、酸化物を求めて動き回る。陰極点のエネルギー密度が高いので短時間で蒸発除去される。 4. 酸化物層除去の面積速度はアーク電流に比例し、酸化物厚みに反比例して変わる。 5. 陰極点による酸化物除去作業が終了し、陰極前面が清浄な金属面になると真空アーク維持電圧が上昇する。 6. 陰極点による酸化物除去が起きたためには、ある限界エネルギー密度値が存在する。この限界エネルギー密度より陰極点のエネルギー密度が小さければ、酸化物の除去はできない。
12	評価	装置設計に有用な情報としては下記があげられる。 1. 装置構成

(2/2)

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

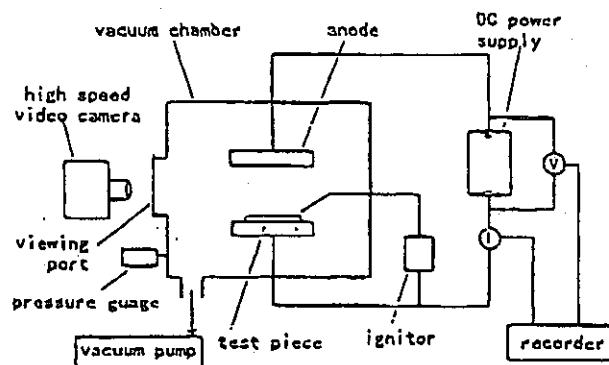


Fig. 1 Schematic illustration of the experimental setup for the removal of oxide layer by vacuum arc.

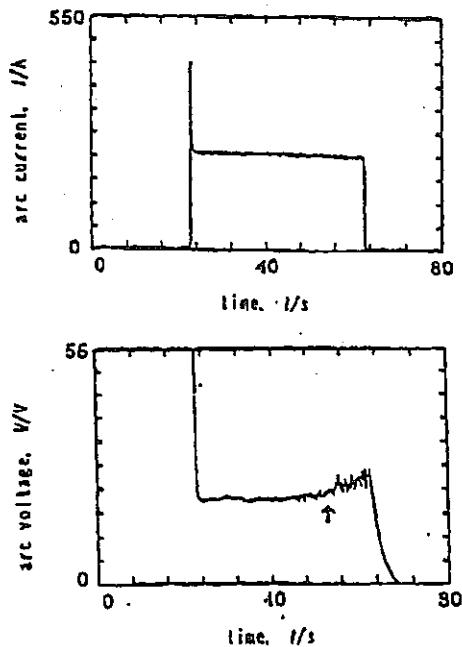


Fig. 7 Current and voltage characteristics of the vacuum arc in a constant current operation.

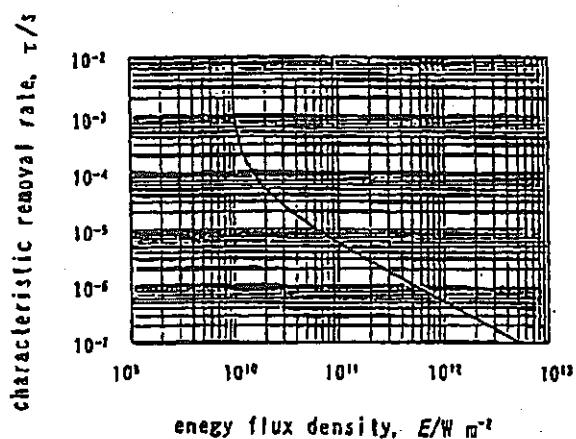


Fig. 13 Predicted change of the characteristic removal time with the energy flux density. The thickness of oxide layer is assumed 5 μm.

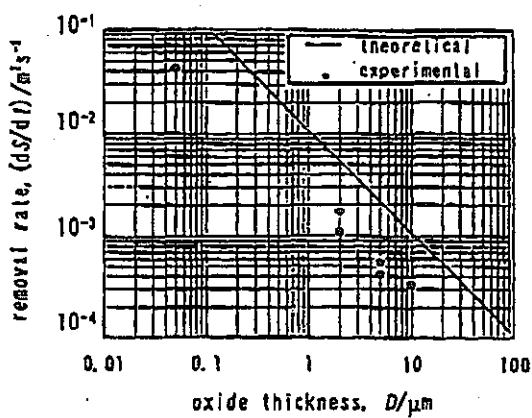


Fig. 14 Comparison of the removal rate predicted from the modeling with that obtained by experiment at an arc current of 200 A.

技術データシート

(1/1)

資料コード ANM-0001

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	81A0382736
2	和文標題	汚染金属廃棄物の除染へのプラズマアークの適用
3	英文標題	Application of a plasma arc in decontamination of radioactive metallic wastes.
4	著者・発表者	KURIYAMA O, KOYAMA T
5	資料名	Trans Am Nucl Soc
6	年巻号	VOL. 38 PAGE. 195 - 196 1981
7	実施機関	(Hitachi Ltd., Hitachi)
8	目的・内容	汚染した金属表面を、プラズマアークで溝切りすることにより除染し、廃棄物の減容をはかる方法を開発。実験には、ステンレス鋼管 (I. d. 216×4 (厚さ) ×300 mm) を用い、これをフード内で回転しながら、溝切り速度とプラズマガス流速を、それぞれ、 $7.5 \times 10^{-2} \text{ m/s}$, $23 \text{ L}_N/\text{分}$ で、内面にスパイラルの溝切りを行った。
9	クリーニング対象	ステンレス鋼管
10	方法・条件	ノズル直 径 : $2.0 \text{ mm}\Phi$, $2.4 \text{ mm}\Phi$, $3.0 \text{ mm}\Phi$ 溝 切り 速 度 : $7.5 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ プラズマガス流速 : $23 \text{ L}_N/\text{分}$
11	成果・結論	出力密度（出力/ノズル直徑）の上昇に伴い、溝の深さは増すが、出力密度 1.5 kW/mm のときの溝の深さは 0.2 mm であった。また、管表面に水まくをはることにより、ダスト発生を大きく低下させることができた。溝切りされる量は、全体の 0.1% 未満で、除染係数として $\sim 10^{-3}$ が期待できる。
12	評価	装置設計に有用な情報としては下記があげられる。 1. プラズマアークの照射条件

技術データシート

(1/3)

No.	項目	内 容	資料コード	ANM-0002
1	JICST 記事番号	83A0265326		
2	和文標題	プラズマアークにより放射性金属表面を削る放射能除染		
3	英文標題	Decontamination of radioactive metal surfaces by plasmaarc gouging.		
4	著者・発表者	KURIYAMA O, KOYAMA T, KIKUCHI M (Hitachi Ltd., Hitachi)		
5	資料名	C0265B (NUTYB) (0029~5450) Nucl Technol		
6	年巻号	VOL. 61, NO. 1 PAGE. 93 - 99 1983		
7	実施機関	日立製作所		
8	目的・内容	プラズマアークにより放射性金属表面を削る際のトーチノズル開口部形状、切削角度、水皮膜や除染因子について調べた。トーチノズルとけずり角度を、除染速度が増加するよう最適化した。		
9	クリーニング対象	ステンレス鋼パイプ、炭素鋼パイプ		
10	方法・条件	実験装置の概要を下記に示す。 (Fig. 2) 供給電流 : 100~150 A , 供給電圧 : 50~100 V ノズルエリア : 12.5mm ² , プラズマガス: アルゴン 供給ガス値 : 20~60L/min , 切削速度 : 76mm/s アーク長 : 8.5mm 上記装置を用い、4種類のトーチノズル開口部形状と切削深さの関係、クリーニング対象物と切削角度の関係、水皮膜の影響及び、除染因子について調査し、トーチノズルと切削角度を、除染速度が最大となるように最適化を行なった。		
11	成果・結論	橿円形ノズルを用いた場合、他の3種類と比較して、最も大きな切削深さが得られた。 (Fig. 4) クリーニング対象物とトーチ角度が 30 deg のときに増大の切削深さが得られた。 (Fig. 5) 水皮膜がパイプ表面に形成されるため、切削面への融解スラグの付着が減少した (Fig. 6)。また、オフガスシステムによるダスト分散が水皮膜がある場合は、水皮膜が無い場合に比べて、量が 10% (ステンレス鋼) に減少した。 (Fig. 7) クロムを電解メッキした炭素鋼パイプ試料に本方法を適用したところ、0.2mm の深さに切削した結果、10 ² の除染係数を得たが、金属酸化物、炭素粉がわずかに残った。このために、超音波洗浄を併用したところ、約 0.5mm の深さまで切削されて、10 ³ 以上の除染係数を達成することが出来た。 (Fig. 8)		
12	評価	装置設計に有用な情報としては下記があげられる。 1. プラズマアークの照射条件 2. 除染装置の構成		

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

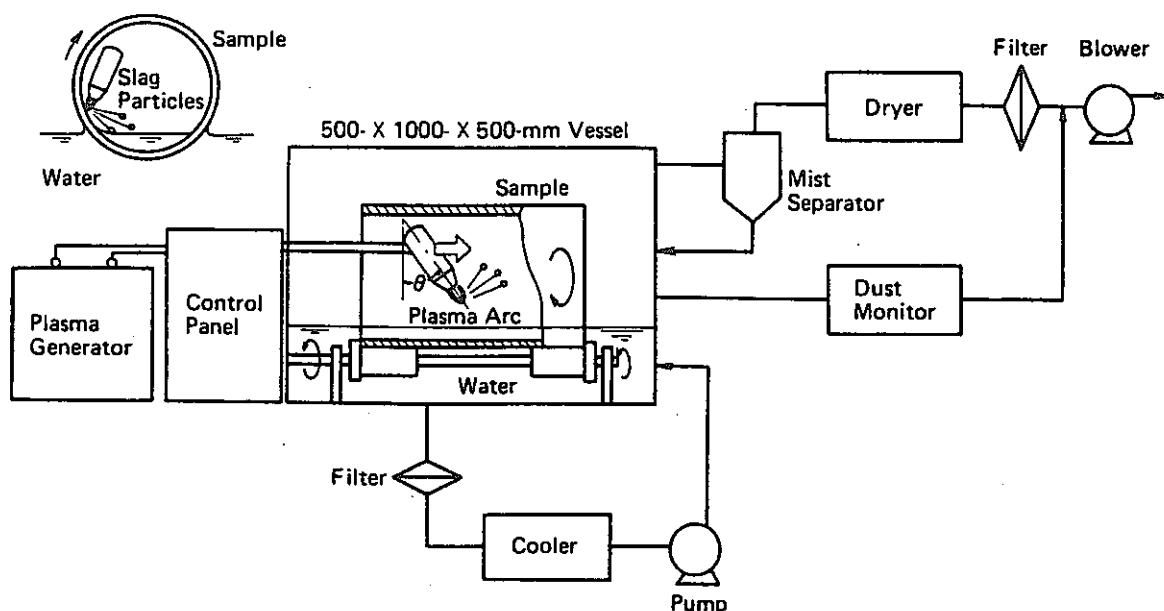


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

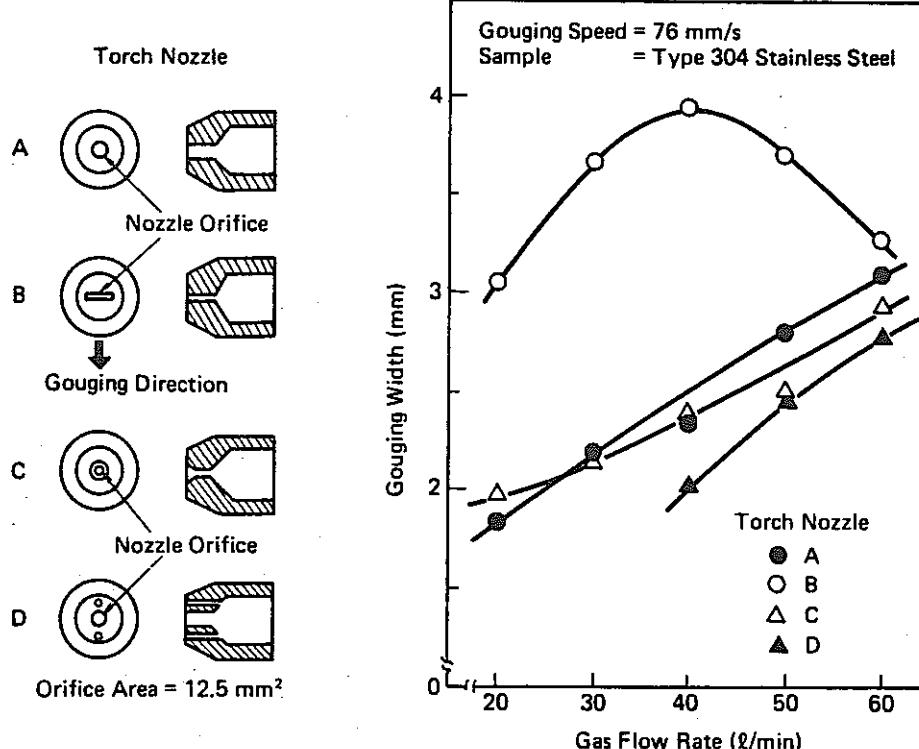


Fig. 4. Effect of torch nozzle on the gouging width.

補足説明シート

(装置仕様・構成・実験データ等)

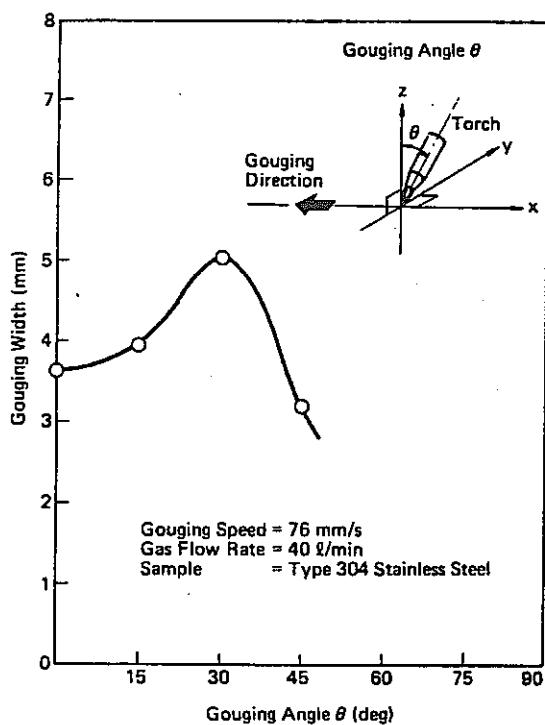


Fig. 5. Effect of gouging angle on the gouging width.

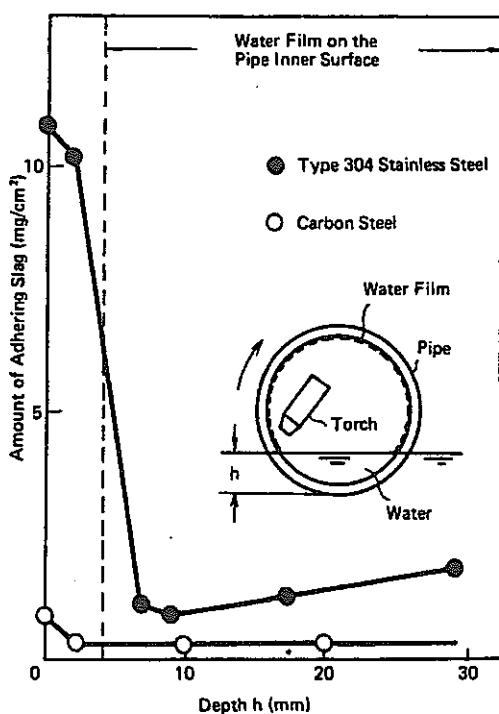


Fig. 6. Effect of water film on the adhering slag.

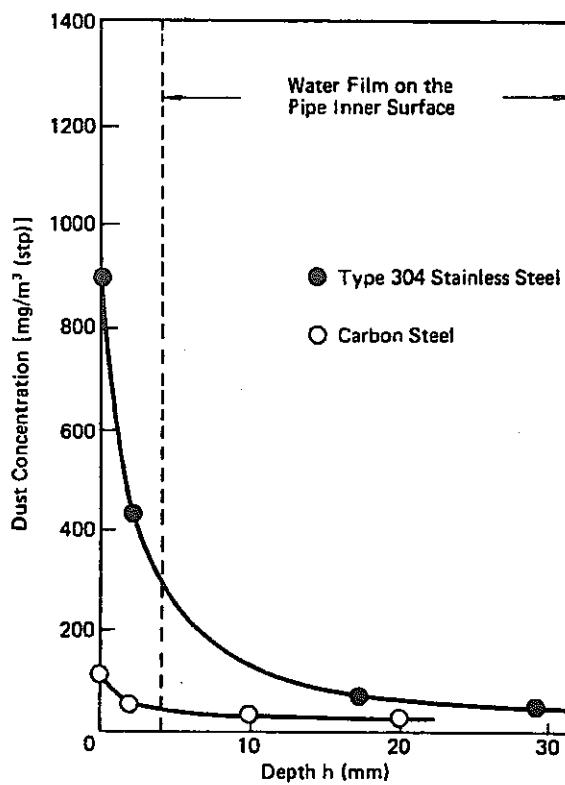


Fig. 7. Effect of water film on the dust concentration.

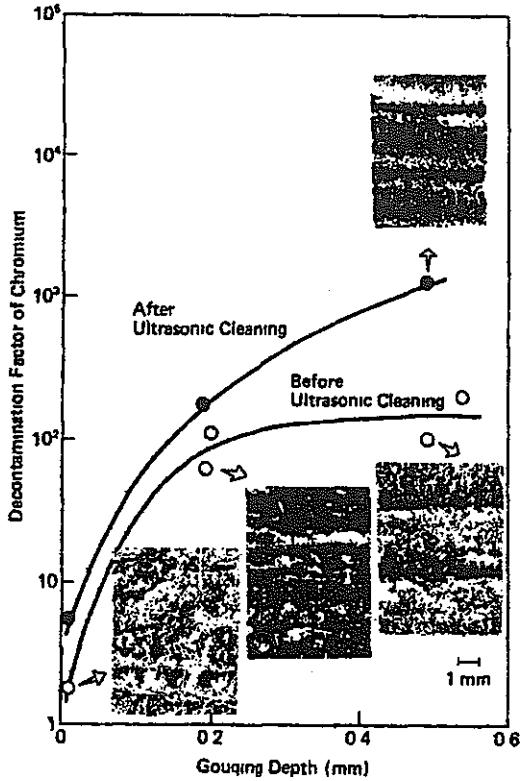


Fig. 8. Decontamination factors of chromium on pipe surfaces.

技術データシート

(1/1)

資料コード ANM-0003

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	92A0370589
2	和文標題	ステンレス鋼の除染
3	英文標題	Decontamination of Stainless Steel.
4	著者・発表者	ANTONIAZZI A B, SHMAYDA W T ; SURETTE R A
5	資料名	Fusion Technol
6	年巻号	VOL. 21, NO. 2 Pt 2 PAGE. 867 - 871 1992
7	実施機関	Ontario Hydro Research Division, Ontario, CAN ; Atomic Energy of Canada Ltd., Ontario, CAN
8	目的・内容	熱脱着スペクトロスコピーを用いてステンレス鋼表面に吸着されたトリチウムを含む物質の性質とトリチウム量を調べた。トリチウムを含む316SS材表面へのヘリウムグロー放電の影響を測定した。
9	刈ニング対象	316SS材
10	方法・条件	ヘリウムグロー放電 周 波 数 : 13. 56 MHz 供給電力 : ~300W
11	成果・結論	316SS 試料からの主な吸着物質は、HTO であってと吸着放射能の最高97%を原因であることを示した。グロー放電除染により吸着されたトリチウムの除染係数として250以上の値を得た。
12	評価	装置設計に有用な情報は無し。

技術データシート

(1/1)

資料コード ANM-0004

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	96A0847246
2	和文標題	プラズマ汚染除去施設を用いた三重水素化実験室ツールの洗浄
3	英文標題	Cleaning of Tritiated Laboratory Tools Using a Plasma Decontamination Facility.
4	著者・発表者	ANTONIAZZI A B, SHMAYDA W T, BAKSH D P
5	資料名	Proc IEEE/NPSS Symp Fusion Eng
6	年巻号	VOL. 16th, NO. Vol 2 PAGE. 1026 - 1030 1995
7	実施機関	Ontario Hydro Technol., Ontario, CAN
8	目的・内容	アルゴンRFグロー放電による標記ツールの汚染除去を試みた。トリチウムグローブボックス中で汚染したクロムめっきレンチを洗浄し表面放射能を決定した。
9	クリーニング対象	クロムめっきレンチ
10	方法・条件	アルゴンRFグロー放電 周 波 数 : 13. 56MHz 供給電力 : ~300W (但し150Wで実験) 作動圧力 : 7~70Pa
11	成果・結論	トリチウムグローブボックス中で汚染したクロムめっきレンチをアルゴンRFグロー放電で洗浄し表面放射能を測定したところ、イオン束1~160A. hr/m ² を用い表面放射能を0.6から0.04まで低下できた。しかしながらイオンスパッタリングに熱脱着が常に伴った。また、放射能の再成長は見られなかった。
12	評価	装置設計に有用な情報は無し。

技術データシート

(1/1)

資料コード ANO-0005

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	97A0303762
2	和文標題	TFTRからのトリチウム除去
3	英文標題	Removal of tritium from TFTR.
4	著者・発表者	MUELLER D, BLANCHARD W, COLLINS J, HOSEA J, KAMPERSCHROER J, NAGY A, OWENS D K, RAFTOPoulos S, SKINNER C H
5	資料名	A0310B (0748-1896) Fusion Technol
6	年巻号	VOL. 30, NO. 3 Pt 2A PAGE. 840 - 844 1996
7	実施機関	Princeton Plasma Physics Lab., NJ
8	目的・内容	1993～1995年のD-T実験期間のブランケットや真空容器内部品への平均トリチウムリテンションは $52 \pm 15\%$, Lモード実験時には90%に達したことを確認した。このトリチウム除去に種々の方法を試みた。
9	クリーニング対象	真空容器内部品等
10	方法・条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ D 2 浸透グロー放電洗浄 (D-GDC) : Innotech Model PPS7920 660V (at 20A) ・ パルス放電洗浄 (PDC) ・ He-Oグロー放電洗浄 (He-OGDC)
11	成果・結論	グロー放電洗浄 (D-GDC) が非常に高い除去率であることが分かった。それは、1995年の運転終了時に残留したトリチウムの半分を取り除くことに成功した。(50%の in-vessel インベントリを縮小) D-GDCはさらに 150°Cにおいてより効果的である。 またパルス放電洗浄 (PDC) も有効である。 He-OGDCでの除去はエッティング効果によるだけで、実験室規模のデータより一桁低い値しか達成できなかった
12	評価	装置設計に有用な情報はなし。

技術データシート

(1/1)

資料コード ANC-0006

No.	項目	内 容
1	JICST 記事番号	99A0831953
2	和文標題	電気パルス放電技術のコンクリート除染とその他のD & Dへの応用
3	英文標題	Concrete decontamination and other D&D applications of electric pulse power technology.
4	著者・発表者	GOLDFARB V, GANNON R, SWALLOM D W ; SHNEERSON G
5	資料名	Proc Int Conf Decommissioning Decontam Nucl Hazard Waste Manag Vol 1 1998
6	年巻号	PAGE. 140 - 147 1998
7	実施機関	(Textron Systems, MA) ; (St. Petersburg Technical Univ., St. Petersburg, RUS)
8	目的・内容	原子力や化学の施設の構造物や材料の除染のための標題の電気パルス放電技術を述べた。この技術は除染と解体（D & D）への適用がねらいで、特徴としてウランで汚染されたコンクリート表面の除染に Textron システム、電気パルス、電磁流体の活用を解説した。
9	クリーニング対象	コンクリート
10	方法・条件	電気パルス放電 繰返し率 : ~15 Hz 供給電力 : ~30 kW
11	成果・結論	実験での水からの有機汚染物の除去、清浄な石炭の燃焼のための石炭／水スラリーの準備、ガスタービンの排気中のNOxの低減、有害な廃棄物の中性化を説明した。電気パルス放電技術の内容とプロセス、コンクリート面の除染試験のデータを紹介した。 30 kWの電力供給で、汚染コンクリートが深さ1インチ、幅2インチ、進行速度 3 m/m in で取り除かれた。 コンクリートに10インチの穴を開けたとき、15 m/h の穿孔速度が得られた。 今後、試作の電気パルス放電装置を改良することにより、D & D 作業でいろいろな電気パルス放電技術の試験を実施する。 最近実用的な関心がもたてれている電気パルス放電技術は、確実な技術進歩により、工業製品としての市販装置及び構成機器にも適している。
12	評価	装置設計に有用な情報は無し。