

ハル等廃棄物処理技術開発施設(HWTF)における 新技術の適応性検討

1997年6月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所 技術開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 4-33 O-aza-Muramatsu, Tokai-mura, Naka, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

ハル等廃棄物処理技術開発施設（H W T F）における 新技術の適用性検討

実施責任者：渡辺 義之*，村山 重雄*
報告者：小坪 正之*，倉形光一郎*
杉本 雅彦*，大森 勇二**
高橋 望**

要 旨

ハル等廃棄物処理技術開発施設（以下、H W T Fという）は、再処理工場等から発生するハル等の高線量固体廃棄物の処理を行うための施設であり、平成15年度の運転開始を目標に、現在、施設設計を進めている。

本報告書は、H W T Fプロセスにおいて重要となる切断技術及び高圧縮体の物性測定技術について試験・検討を行い、その結果を要約しまとめたものである。

(1) Y A Gレーザによるハル缶切断への適用性検討

本研究は、Y A Gレーザ技術がハル缶の切断・解体装置として適用性を有しているか確認することを目的に実施した。

その結果、H W T Fで要求される処理能力（切断能力：2缶/日）を十分に満足することが確認できた。

(2) X線C Tによるハル等圧縮体内部空隙及び異物測定への適用性検討

本研究は、すでに医療用C T分野で活用されているX線C T技術に着目し、より高密度の被検体中の空隙及び異物の測定に適用性を有しているか確認することを目的に実施した。

その結果、C T撮影条件（検出器コリメータのスリット構造）、領域抽出手法及び密度評価時の補正手法について、精度向上のための技術課題はあるが、適用の可能性は十分にあることが確認できた。

* 環境施設部 技術課 ** 検査開発(株)

目 次

1. YAGレーザーによるハル缶切断への適用性検討	1
1.1 はじめに	1
1.2 本研究の開発経緯	1
1.3 本研究で得られた結果	1
1.3.1 ステンレス鋼の切断特性	1
1.3.2 ハル缶切断の確証	2
1.3.3 切断時に発生する2次生成物の調査	2
1.3.4 遠隔切断装置としての適用性調査	2
1.4 まとめ	3
1.5 参考文献	3
付録 原子力学会発表資料	17
2. X線CTによるハル等圧縮体内部空隙及び異物測定への適応性検討	37
2.1 はじめに	37
2.2 試験体のX線CT撮影	37
2.2.1 X線CT装置及び撮影条件	37
2.2.2 試験体	37
2.3 特定領域の体積評価	38
2.3.1 体積評価サンプルの評価結果	38
2.3.2 模擬ハル圧縮体の評価結果	38
2.4 CT値による模擬ハル圧縮体内異材の密度評価	40
2.4.1 サンプル材による密度評価結果	40
2.4.2 模擬ハル圧縮体内の異材の密度評価と材質の推定	40
2.5 まとめ	41
2.6 参考文献	41

表・図・写真 目 次

1.	YAGレーザーによるハル缶切断への適用化研究	
表1.1	各種大出力レーザー比較	4
表1.2	YAGレーザーによるハル缶切断への適用化研究 開発工程	5
表1.3	アシストガスの違いによる2次生成物発生量	6
表1.4	センサ比較表	7
図1.1	アシストガスによる切断特性	8
図1.2	スタンドオフ制御	9
図1.3	ハル缶切断箇所と手順	10
図1.4	湾曲部の追従試験結果	11
図1.5	段差の追従試験結果	12
写真1.1	アシストガスによる切断面状況 (板厚4mm)	13
写真1.2	板厚6mmの斜め切断の模擬試験体	14
写真1.3	板厚15mmの残渣部切断後の模擬試験体裏側 (残渣側)	14
写真1.4	鋼棒φ20mmの切断後の模擬試験体切断面	15
写真1.5	鋼管φ38mmの切断後の模擬試験体切断面	16
2.	X線CTによるハル等圧縮体内部空隙及び異物測定への適用化研究	
表2.1	HiXCT-3Mの仕様	42
写真2.1	領域抽出手法の精度評価用の単純形状の評価サンプル	43
写真2.2	模擬ハル圧縮体	43
写真2.3	評価サンプルの金属部抽出結果	44
写真2.4	ハル圧縮体の3次元画像	45
写真2.5	空隙部の一部抽出結果	46
写真2.6	上下5スライスデータを削除した場合のハル圧縮体金属部抽出結果	47
写真2.7	異材部抽出結果	48
写真2.8	サンプル材のCT画像	49
写真2.9	サンプル材の平均CT値処理 (円内領域の平均)	49
写真2.10	模擬ハル圧縮体内の異材のCT画像	50
写真2.11	各異材の平均CT値処理	50

1. YAGレーザによるハル缶切断への適用性検討

1.1 はじめに

現在、設計が進められているHWT Fでは、ハル等を減容処理した後に残る余剰ハル缶について、切断による解体・減容を行う計画である。

余剰ハル缶の切断設備は、ハル缶内面がハル等により高線量に汚染されていることが考えられるため、しゃへい機能を十分有するセル内にて遠隔作業により切断解体できることが要求される。また、できるだけセル内の設置機器を少なくすること、切断時に発生する2次生成物を少なくできることも合わせて求められる。

これらの要求を解決する切断法として、レーザ切断法に着目した。レーザ切断法は、大きく別けて表1.1に示すような種類のレーザがある。この中から、本研究においては以下の理由からYAGレーザを選択した。

- ① レーザパワーを光ファイバによるフレキシブルな伝送が可能であり、伝送損失を最小にすることが可能である。
- ② 光ファイバにて伝送可能なことにより、レーザ発振器等の本体装置をセル外に設置でき、セル内設置機器を最小限にすることが可能でメンテナンスが容易である。
- ③ レーザ発振器等の本体装置が、固体レーザであることからコンパクトである。
- ④ レーザトーチを把持することにより、遠隔操作対応が容易である。
- ⑤ レーザトーチにより集光させるため、切断幅が小さく2次生成物の発生を少なくすることが可能である。

本研究では、YAGレーザがハル缶の切断・解体装置として適用性を有しているか確認するとともに、HWT Fの設計への設計データを取得し、設備設計に対する課題、問題点の抽出を行うことを目的として、実ハル缶の切断を含めて実施した。

1.2 本研究の開発経緯

本研究は、表1.2に示す開発工程で実施した。

1.3 本研究で得られた結果

1.3.1 ステンレス鋼の切断特性

SUS304の模擬試験体として、ハル缶の構造材である板厚25mm, 22mm, 9mm, 6mm, 4mmの平板、直径20mmの鋼棒、肉厚1.2mmで直径38mmの鋼管及び板厚15mmの平板に板厚6mmの平板をT字型に溶接した構造物の各種を使用した。各試験体にレーザ条件、アシストガス、焦点位置、スタンドオフ等をパラメータとして切断試験を実施した。

平板模擬試験体における切断特性（アシストガスの影響）を図1.1に、切断状況を写真1.1に示す。なお、アシストガスは酸素、窒素、空気の3種類とした。本図からも分かるように、アシストガス酸素の場合が最も切断能力が良く、アシストガス窒素、空気に対して約3倍の切断能力を有していることが確認できた。

これは、ステンレス鋼に含まれる鉄との酸化燃焼反応による相乗効果の有無により切断能力に違いが生じたものと考えられる。

また、T字型に溶接された試験体については、板厚6mmの部分を斜め方向に350mm/minの速度で切断した後、板厚15mmの部分を板厚6mmの切断残渣部を含め、切断残渣部に対して直角方向に160mm/minの速度で切断できることを実証した。さらに、鋼棒と鋼管ともに一方向からのレーザー照射のみで、それぞれ160mm/min、140mm/minの速度で切断できることが確認できた。

主な模擬試験体の切断状況を写真1.2～1.5に示す。

注) スタンドオフとは、図1.2に示すとおりである。

1.3.2 ハル缶切断の確証

ハル缶を効率良く切断・減容するための方法を検討した。その結果を図1.3に示す。また、この検討結果を基に実ハル缶の切断を行い、切断片の取扱い時間を除き約1時間でハル缶1缶分を切断でき、HWT Fの設計目標である2缶/日を十分満足できる切断能力を有していることが確認できた。ハル缶2缶分を切断し収納後、さらに収納缶上部に約200mmの空間を確保できることが確認できた。

1.3.3 切断時に発生する2次生成物の調査

アシストガス酸素及び空気により、切断時に発生する2次生成物量についてハル缶構造材の内、切断部位の長い板厚4mm、15mmの模擬試験体について調査した。

その結果を表3に示す。本表から分かるように、どちらのアシストガスでもヒューム発生量はドロス発生量の約1/10であり、アシストガスを空気とした方が、2次生成物発生量を少なく抑制できた。

以上のことから、アシストガスの違いによる2次生成物の発生挙動を明らかにすることができたとともに、切断部位の板厚切断能力に叶ったアシストガスを選択することで2次生成物の発生を抑制できることが確認できた。

1.3.4 遠隔切断装置としての適用性調査

遠隔切断については、実際のハル缶を多軸ロボットを用いて切断することを想定した加工

用レーザトーチの制御精度の確認を板厚 4 mmと15mmで確認した。切断速度、レーザ条件等は、切断特性で確認した値とした。

その結果、スタンドオフはそれぞれ 2 mm, 3 mm以内であれば図 1. 1 の切断速度を低下させずに切断可能であった。また、レーザトーチと切断物との傾斜角度は、切断進行方向に関係なく切断物の垂直方向から10° までは図 1. 1 の切断速度を低下させずに切断できることが確認できた。

以上のことから、最適な切断速度を維持して切断を行うには、スタンドオフを一定間隔に制御する必要があることが確認できた。

スタンドオフセンサについては、一般工業用センサの中から表 1. 4 に示した検討を行い、静電容量式センサとレーザ変位センサの 2 種類に絞り込み、予備的試験を行った結果から、静電容量式センサを選定した。本センサを用いたスタンドオフ制御システムにより切断時の追従性を確認した結果、湾曲部は曲率 $R = 30\text{mm}$ 、段差部は $H = 5\text{mm}$ までは図 1. 4 及び図 1. 5 に示す切断速度で追従が可能であることが確認できた。

以上のことから、ハル缶切断上複雑と考えられる締めつけリングについて、実ハル缶を用いて切断を行い、 $160\text{mm}/\text{min}$ の切断速度で追従切断できることを確認した。なお、 $160\text{mm}/\text{min}$ の切断速度はハル缶 2 缶/日の処理能力上問題の無い速度である。

1. 4 まとめ

YAGレーザ技術が、ハル缶の切断技術として適用するか模擬試験体の切断試験、実ハル缶の切断試験をとおり、技術開発及び能力確認を実施してきた。

その結果、HWT Fにおけるハル缶切断設備として処理能力的にも十分に満足することが確認でき現在、進められている施設設計においても十分に反映することができた。

1. 5 参考文献

- (1) YAGレーザによるハル缶切断試験 (PNC ZJ8068 95-001)
- (2) YAGレーザによるセンサ追従切断試験 (PNC ZJ8068 96-001)
- (3) YAGレーアシストガス空気による切断試験 (PNC ZJ8068 96-002)

表 1.1 核種大出力レーザー比較

項目	レーザー種類	ガスレーザー			
	固体レーザー	I ₂ レーザー	COレーザー	CO ₂ レーザー	
レーザー特性	発振波長 [μm]	1.064	1.315	5.0	10.6
	平均出力 [kW]	1.0	1.0	1.0	1.0
	ピークパワー [kW]	20	1	~ 1	~ 1
	効率 [%]	2 ~ 3	40 (化学効率)	~20	~10
	消費電力 [kW]	50	120	10	25 ~ 30
	レーザー媒体	Na ³⁺ :Y ₃ Al ₅ O ₁₂ 結晶	I ₂ , Cl ₂ , NaOH, H ₂ O ₂	CO, N ₂ , He, O ₂	CO ₂ , N ₂ , He
	励起法	ランプ法	化学反応	高周波放電	高周波放電
	データ引用装置	富士電機	レーザー工学研究センター	産業創造研究所	カタログ
装置の適宜性	大出力化 (可能性等)	○ (計画 2 kW : 富士電機)	○ (計画 10kW : KHI)	○ (20kW : MHI)	◎ (最高 30kW : ME)
	光ファイバ伝送	◎	◎	×	×
	波形制御性	◎ (パルス、CW等可能)	×	○ (放電のパワーである程度制御可能)	○ (放電のパワーである程度制御可能)
	パワーの変更に対する応答性	◎ (ランプへの電流変更)	×	◎ (変調での準CWの実績有)	◎ (変調での準CWの実績有)
	起動、停止特性	◎ (YAGの固体結晶をランプで励起させるため瞬時に起動、停止が可能)	△ (起動時は、レーザー媒体の低温保持、ガス混合にかなりの時間が必要。また、停止時は化学反応が終了までの時間が必要)	△ (起動時は、レーザー媒体の低温保持、ガス混合にかなりの時間が必要。)	△ (起動時は、ガスの混合及び設定温度までの温度上昇に約30分程度必要。)
	装置サイズ	◎	△	△	○
	特殊装置	特になし	水トラップ (~210K) (水の混入は効率低下を引き起こすため水にして除去する。)	COの低温保持 (~100K) (COの温度が上昇すると効率低下が生じる。)	特になし
	材料への吸収率	◎ (短波長ほど吸収率が高い)	◎ (短波長ほど吸収率が高い)	○	△
	加工性 (集光性)	○ (レーザー制御により同等)	○ (レーザー制御により同等)	○ (レーザー制御により同等)	○ (レーザー制御により同等)
	メンテナンス	◎ (ランプ交換程度でそれ以外のメンテナンスはフリー)	○ (・危険ガスの交換 ・ガス循環系 (ブLOW、熱交換器等) のメンテ)	○ (・ガスの交換 ・ガス循環系 (ブLOW、熱交換器等) のメンテ)	○ (・ガス、光学素子の交換 ・ガス循環系 (ブLOW、熱交換器等) のメンテ)
消耗品	ランプ	ガス	ガス、液体窒素	ガス (CO ₂ , N ₂ , He) 光学素子	
安全性	◎ (活性的な物は無い)	△ (レーザー媒体はすべて危険)	△ (COは活性化ガス)	◎ (不活性ガス使用)	
装置の特徴	・ YAG固体結晶は、消耗せず半永久的にレーザーを発生させることが可能。 ・ 固体レーザーであるため、発振器自体は小型で構造が簡単である。	・ ファイバ伝送性能が良い	・ ミラー伝送するためミラーの位置等を厳密に設定する必要がある。	同 左	
課題	結晶サイズに限界	トラップした氷の除去 I ₂ の回収方法 レーザーパワーの制御性	液体窒素 大型ポンプ	光学素子	

表1.2 YAGレーザーによるハル缶切断への適用化研究 開発工程



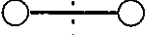
開発内容	平成6年度	平成7年度	平成8年度
<p>(1) YAGレーザーによるハル缶切断試験 (PNC ZJ8068 95-001)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・レーザー切断の最適切断条件の調査試験 ・ハル缶切断確証試験 ・遠隔切断装置への適用性調査試験 ・HWT Fにおける装置の概念設計 			
<p>(2) YAGレーザーによるセンサ追従切断試験 (PNC ZJ8068 96-001)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・模擬試験体の製作 ・センシングシステムの確証試験 ・自動化切断システムの実体化 			
<p>(3) YAGレーザーアシストガス空気による切断試験 (PNC ZJ8068 96-002)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・アシストガス空気による切断試験 ・粉じん, ドロスの調査 ・切断線からの温度分布測定試験 			

表1.3 アシストガスの違いによる2次生成物発生量

アシストガスの種類		2次生成物の発生量	単位切断長あたりのドロス発生量 (g/mm)	単位切断長あたりのヒューム発生量 (mg/mm)
アシストガス酸素	板厚 4 mm		0.07	6.0
	板厚15mm		0.2	19.0
アシストガス空気	板厚 4 mm		0.03	1.1
	板厚15mm		0.14	6.5

表1.4 センサ比較表

項目	渦電流式	超音波式	レーザ三角測距式	レーザフォーカス式	接触式	静電容量式
対象物	金属	ほとんどの物体	不透明体・半透明体	ほとんどの物体	固体	金属
測定基準距離	短い (0~10mm)	長い (60~600mm)	普通 (40~300mm)	短い (5mm)	普通 (30~60mm)	短い (0.3~10mm)
測定範囲	短い (0~10mm)	長い (60~600mm)	普通 (±5~±100mm)	短い (±0.3mm)	短い (30~60mm)	短い (0.3~5mm)
分解能	高い (0.3~1μm)	低い (0.1mm)	高い (2~50μm)	高い (0.1μm)	高い (±2μm)	普通 (0.01mm)
応答速度	速い (3.3~18kHz)	遅い (3~20Hz)	速い (~1kHz)	普通 (~100Hz)	遅い (~40Hz)	トーチ全体可動速度 max300mm/sec
検出物体サイズ	ヘッド径の 3倍以上	□10mm以上	スポット径φ1mm	スポット径2μm	センサヘッドと同等	2mm
センサヘッド	普通 φ8~φ22mm	大きい φ20~φ65mm	大きい 25×70mm	大きい 33×90mm	小さい φ3.5~φ5mm	小さい ノズル先端がセンサ電極
耐環境性	強い	普通 検出物体とセンサヘッドの熱風で誤差大	普通 白熱ランプ/蛍光灯 :4000lx以下	普通 白熱ランプ/蛍光灯 :2000lx以下	弱い 周囲金属や外部磁界 で出力変化大	強い
メーカー例	キーエンス オムロン	キーエンス オムロン	キーエンス オムロン	キーエンス	キーエンス オムロン	Precitec/ 日本ワイドミューラー
評価	センサの大きさが 過大 ×	応答速度が遅い ×	対象物の反射率に依 存性有 △	検知幅がせまい △	耐環境性, 耐磨耗性 に問題有り △	特に問題点はない ○

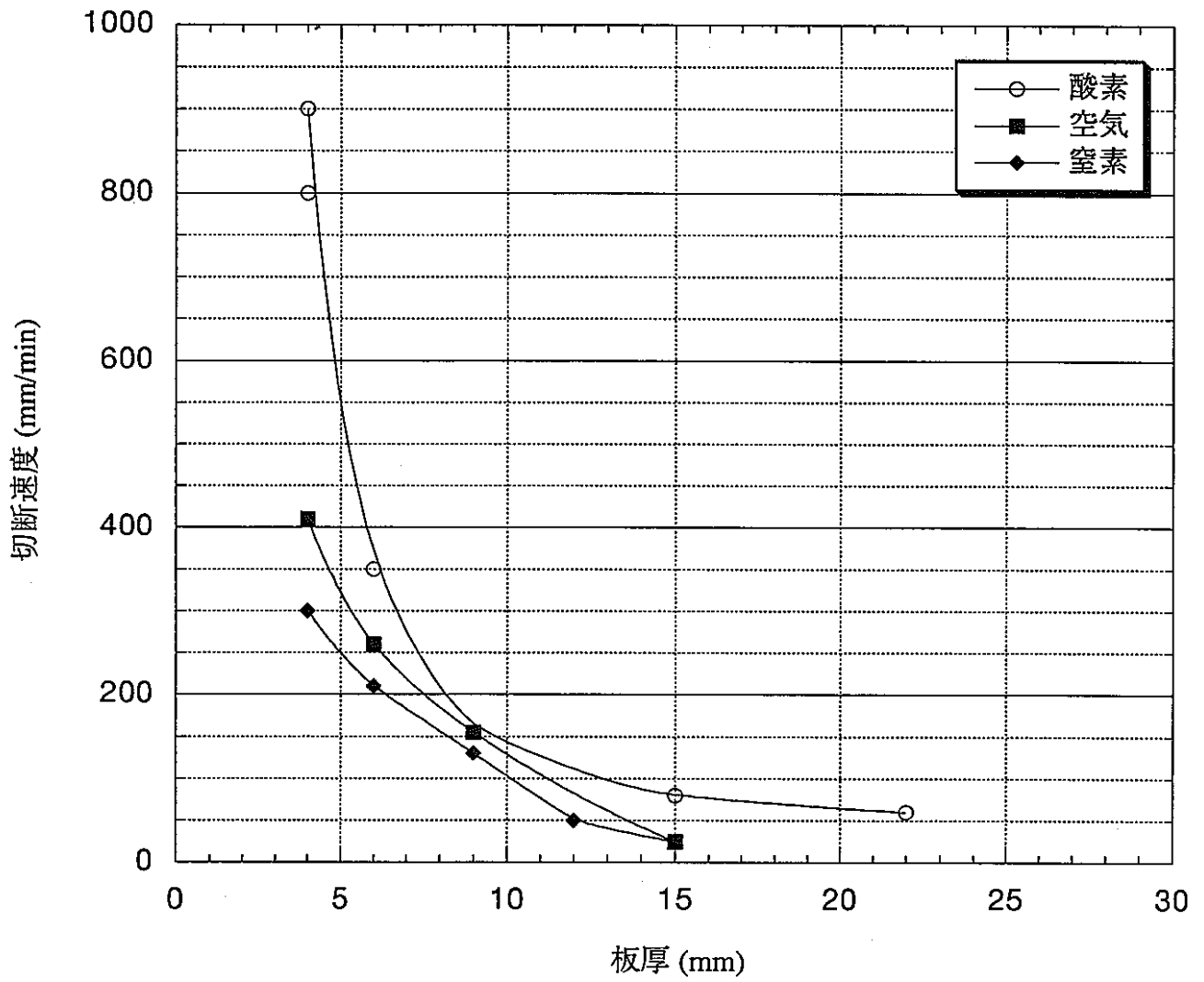


図1.1 アシストガスによる切断特性

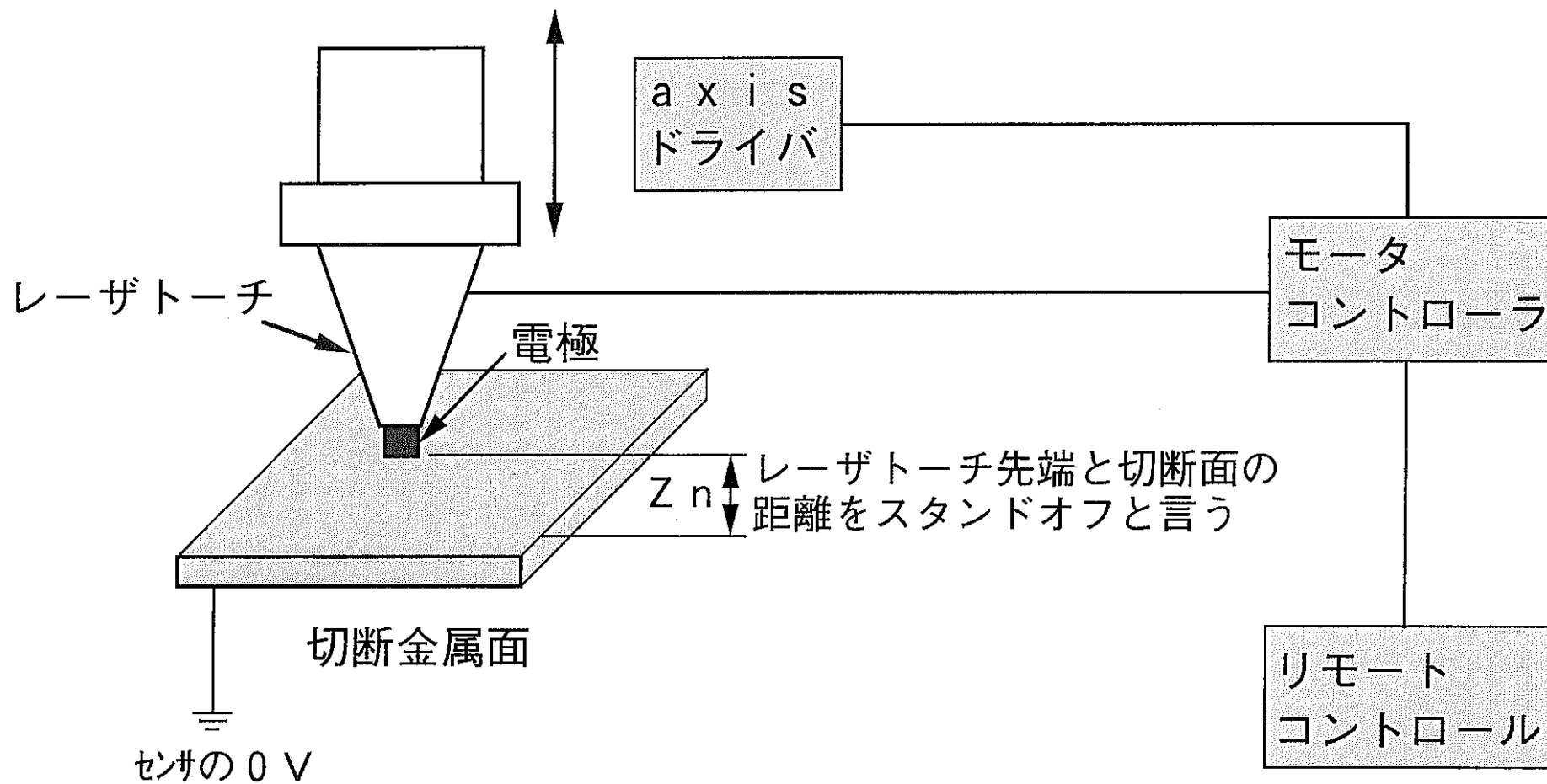


図1.2 スタンドオフ制御

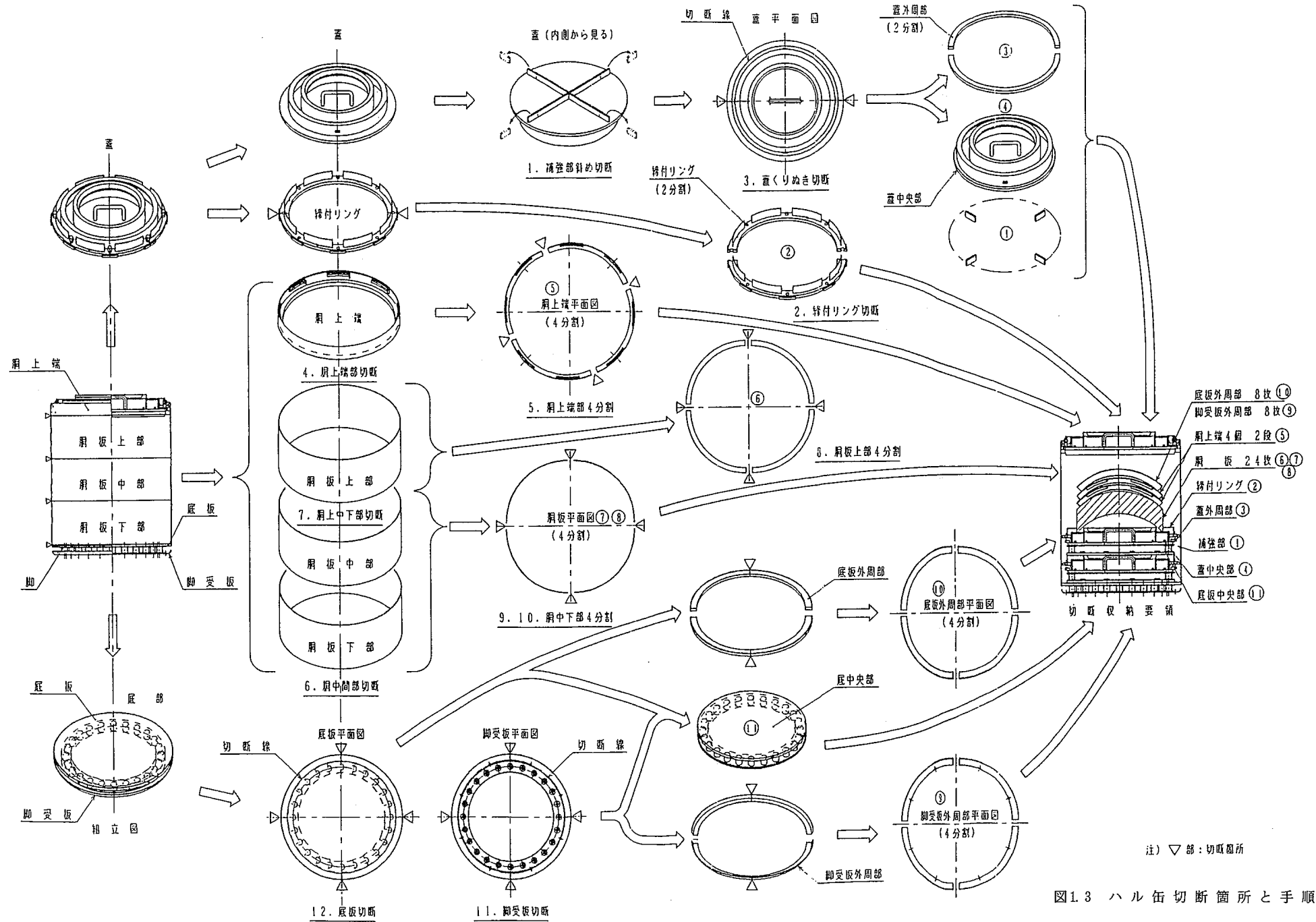
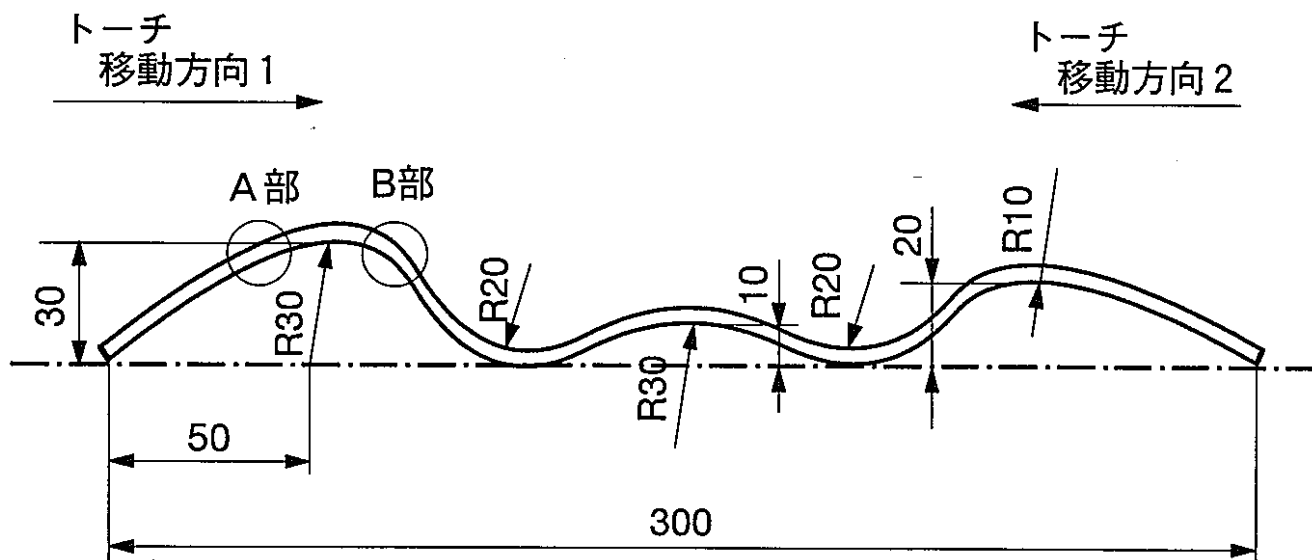


図1.3 ハル缶切断箇所と手順

*R部の根拠は、ハル缶の湾曲部に合わせて製作
(新、旧ハル缶のR部)



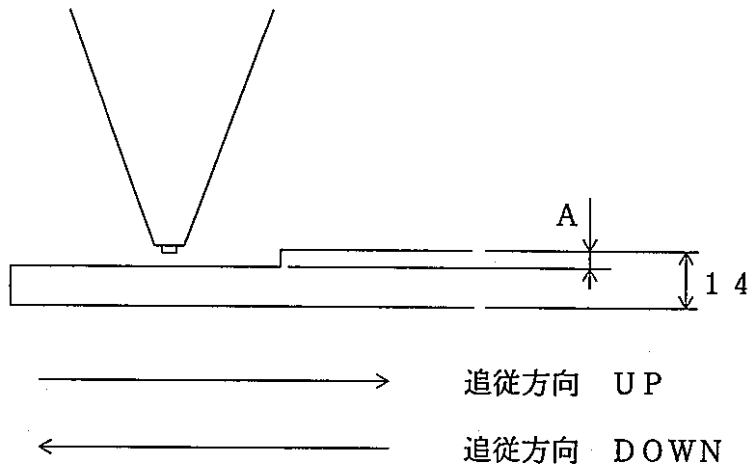
A部傾斜角度 約40°

B部傾斜角度 約50°

トーチ 移動速度	速度 (×100mm/min)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
方向1	○	○	○	○	○	○	○	△ ^A
方向2	○	○	○	○	△ ^B	×	×	×

注) △: 移動方向により切断不可

図1.4 湾曲部の追従試験結果

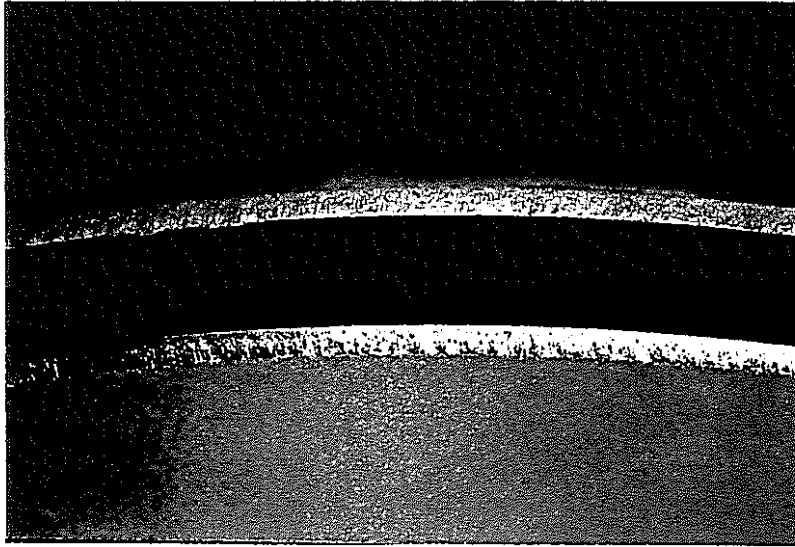


段差追従性試験

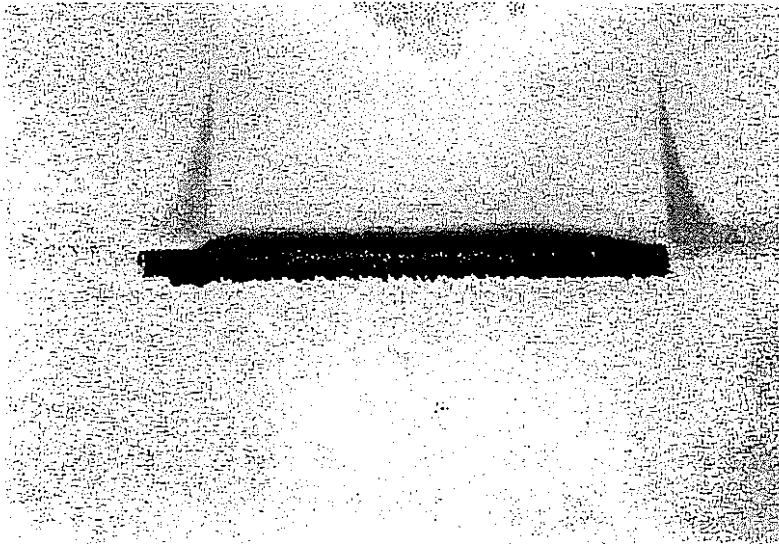
ステップ (mm)	段差 (mm)	移動速度(mm/min)										
		50	100	150	200	300	400	600	700	800	1200	
1	1	UP	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		DOWN	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	2	UP	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×
		DOWN	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	3~5	UP	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
		DOWN	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2	≦ 2	UP	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		DOWN	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	3	UP	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×
		DOWN	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	4	UP	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×
		DOWN	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5	UP	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	
	DOWN	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
3	≦ 4	UP	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		DOWN	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	5	UP	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
		DOWN	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4	≦ 5	UP	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		DOWN	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

[○ : 追従可能, × : 追従不可能]

図1.5 段差の追従試験結果



	切断速度
酸素	900mm/min
窒素	300mm/min



	切断速度
空気	420mm/min

写真1.1 アシストガスによる切断面状況 (板厚 4mm)

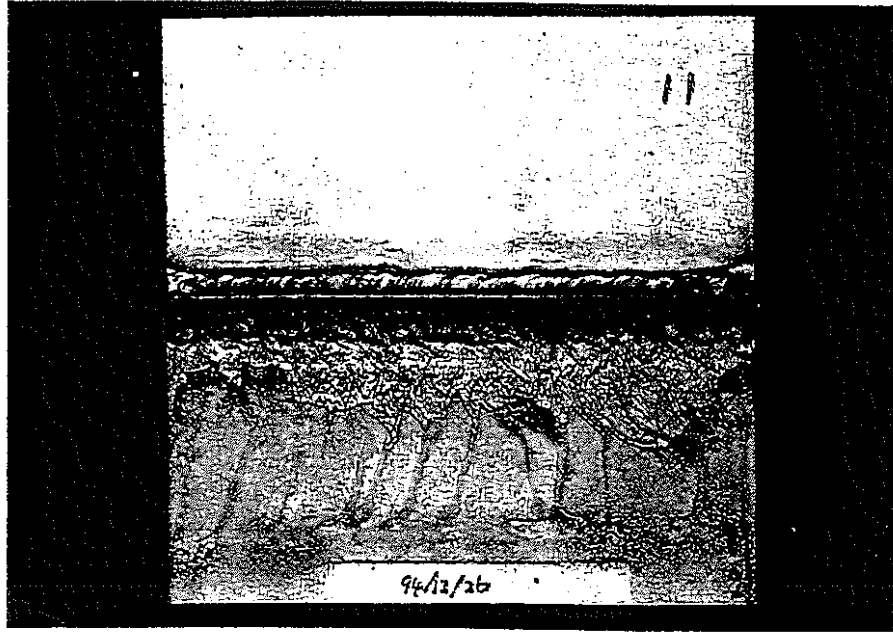


写真1.2 板厚 6mmの斜め切断の模擬試験体

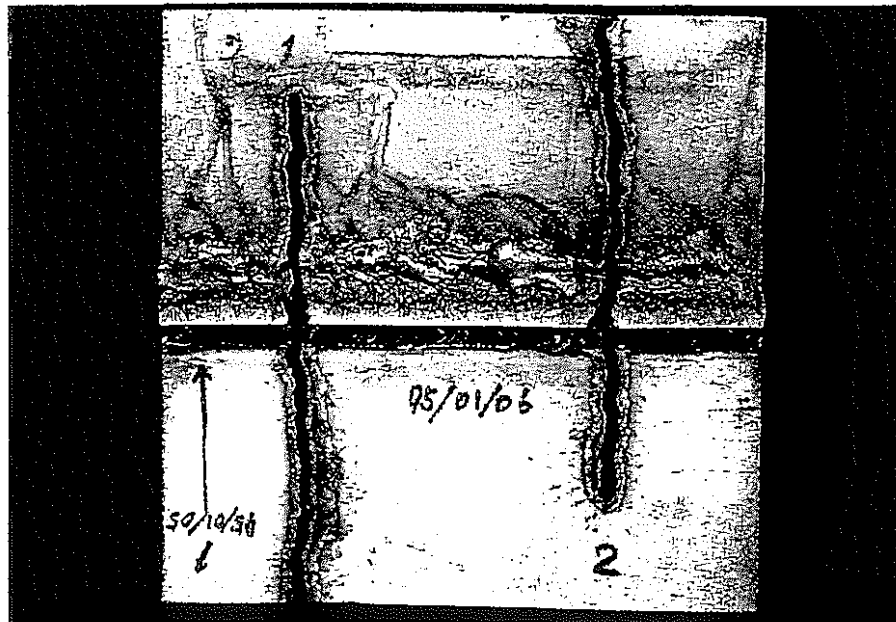
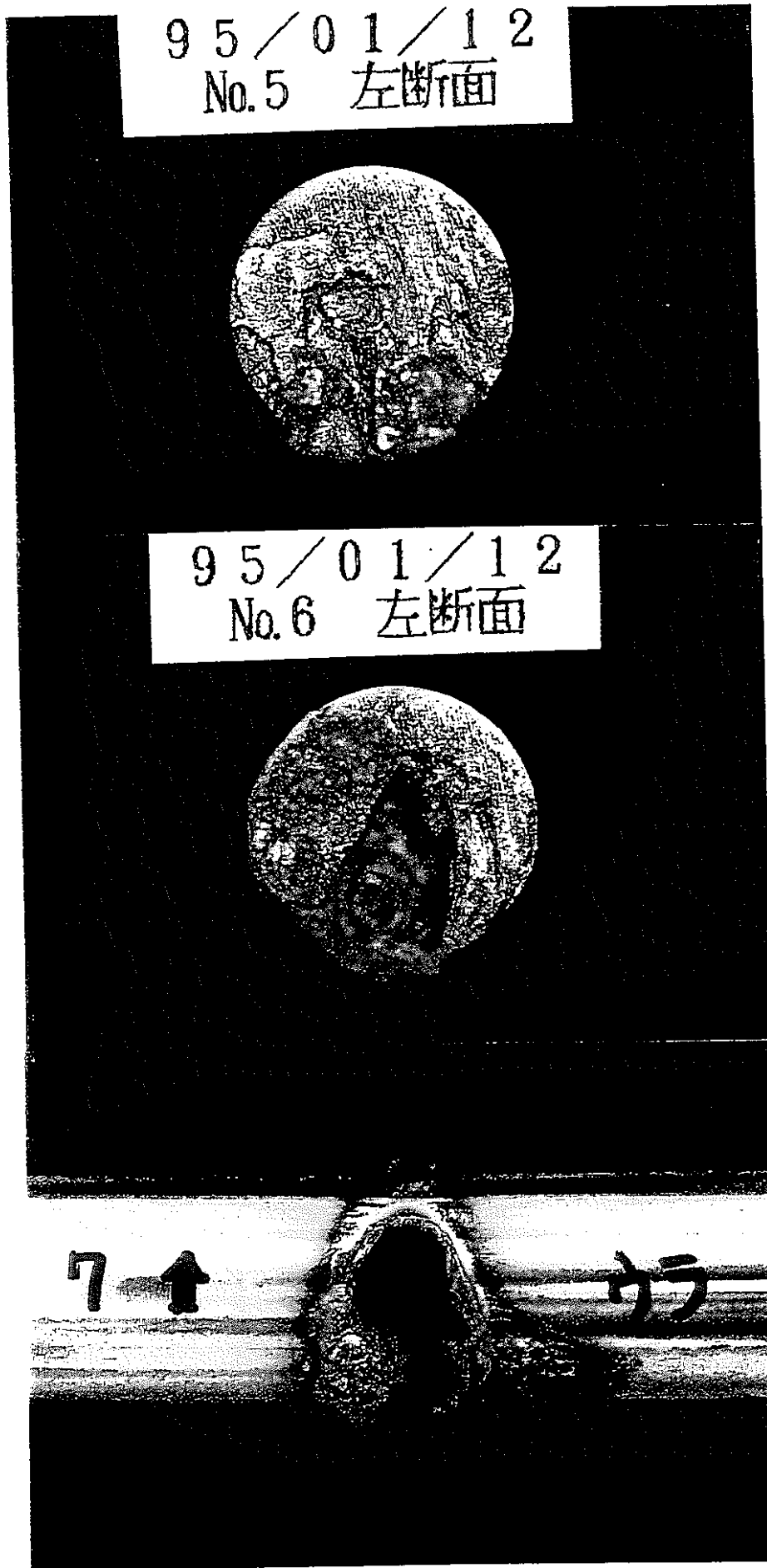


写真1.3 板厚15mmの残渣部切断後の模擬試験体裏側（残渣側）



(a) 160mm/min

(b) 180mm/min

(c) 200mm/min

写真 1. 4 鋼棒 ϕ 20mm の切断後の模擬試験体切断面

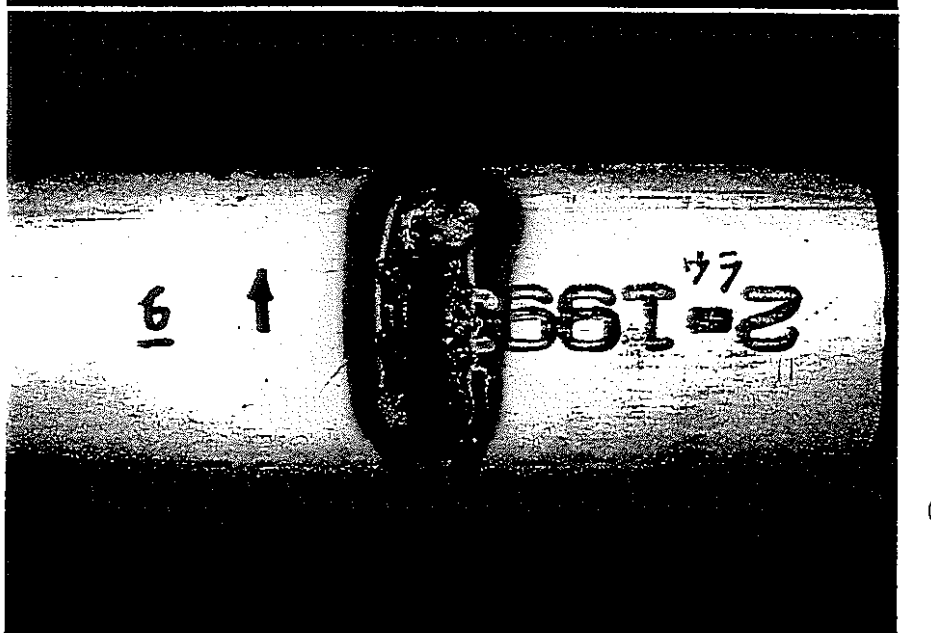
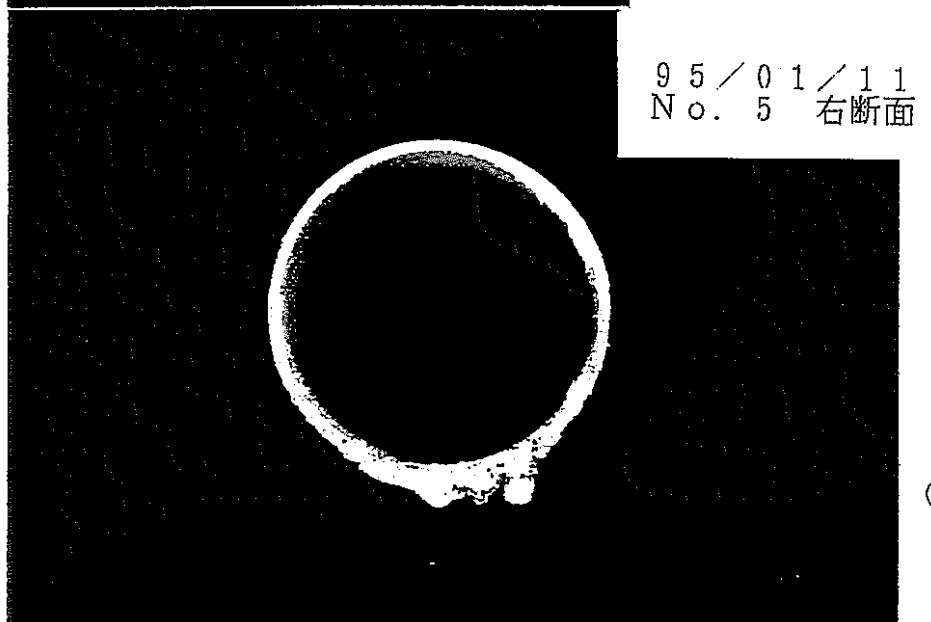
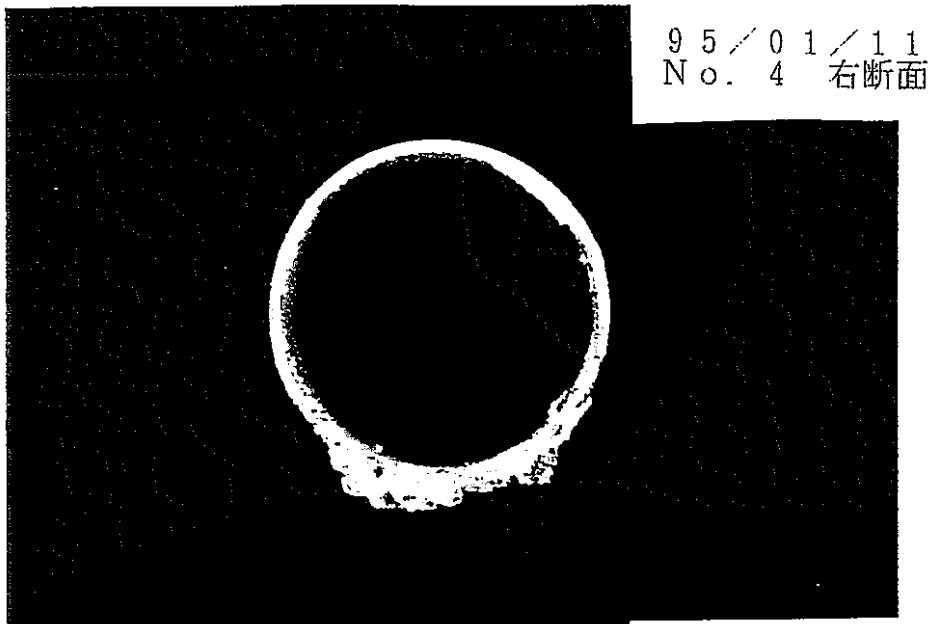


写真 1. 5 鋼管 φ38mm の切断後の模擬試験体切断面
- 16 -

YAGレーザによる

ハル缶切断技術の開発（1）

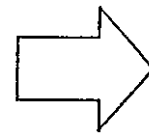
（切断特性）

開発の背景

- 東海再処理工場の貯蔵施設で保管しているハル缶は、現在計画中のHWT Fで切断し減容処理する計画である。

設備計画における要求条件

- ・ セル内での遠隔操作性が容易
- ・ セル内での保守性が容易
- ・ 2次生成物の発生が少ない
- ・ 切断能力：ハル缶2缶／日程度

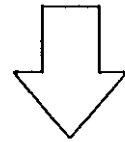


YAGレーザー切断法 に着目

- ・ ファイバー 伝送が可能
- ・ トーチ 以外はセル外
設置が可能

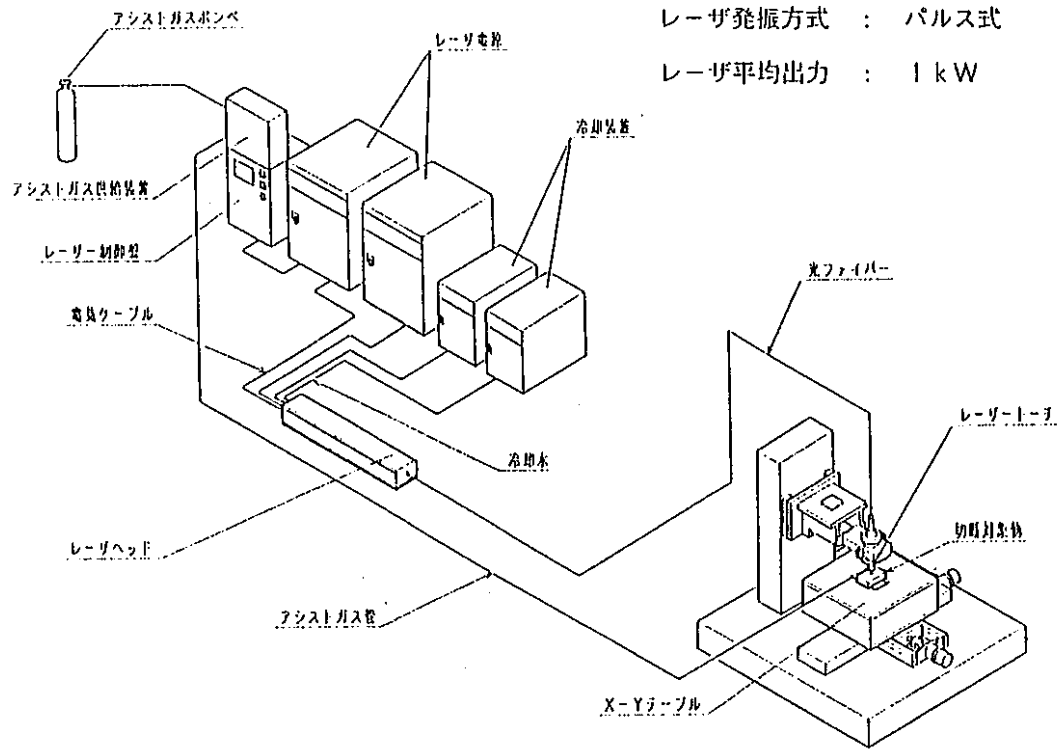
目 的

- ステンレス鋼の切断性能確認（平板、配管、丸棒）
- 実ハル缶の減容処理性能の確認（ハル缶1缶分の切断能力）
- 2次生成物の性状調査及び定量評価（ドロス、ヒューム）
- 2次生成物への放射性物質移行量の調査（ドロス、ヒューム）



ハル缶切断技術へのYAGレーザー切断法の
適用性を確認する

試験装置及び試験方法

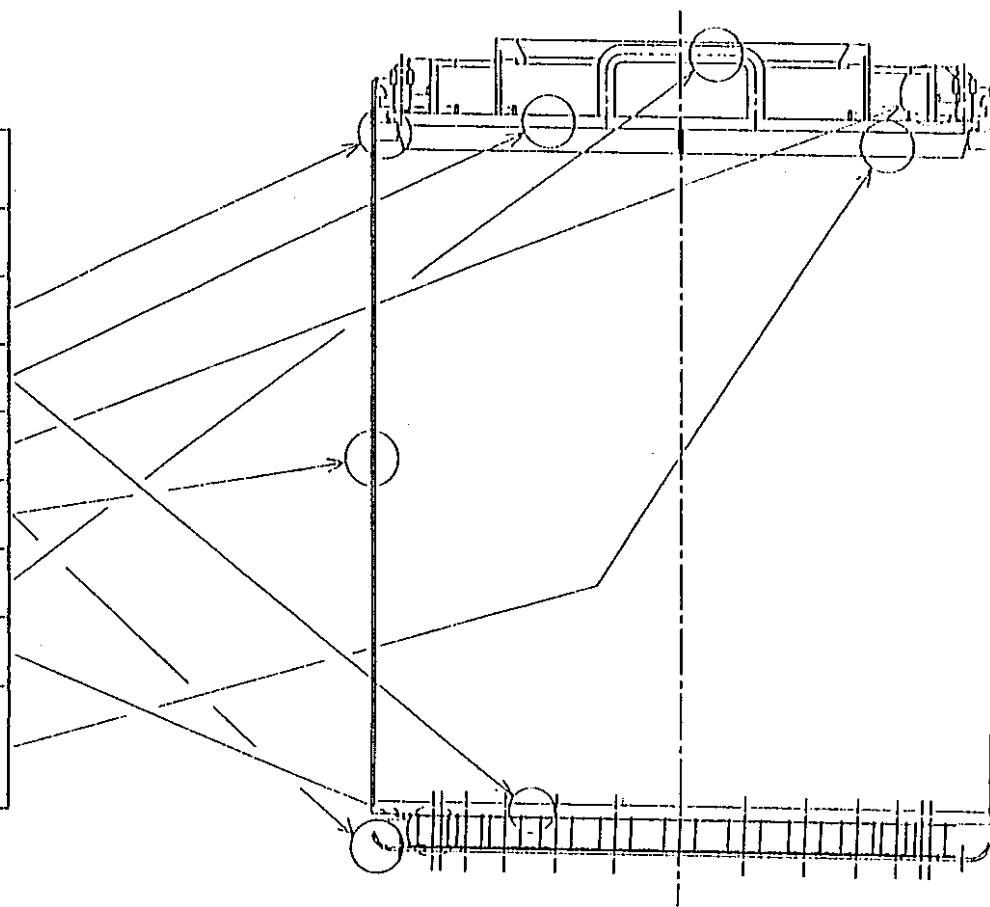


パラメータ	設定範囲
パルス幅	0.5 ~ 3 ms
ピークパワー	3 ~ 15 kW
繰り返し周波数	20 ~ 100 Hz
アシストガス	酸素、窒素

○ 試験片：平板、配管、丸棒
 (ステンレス鋼)

試験装置の概要

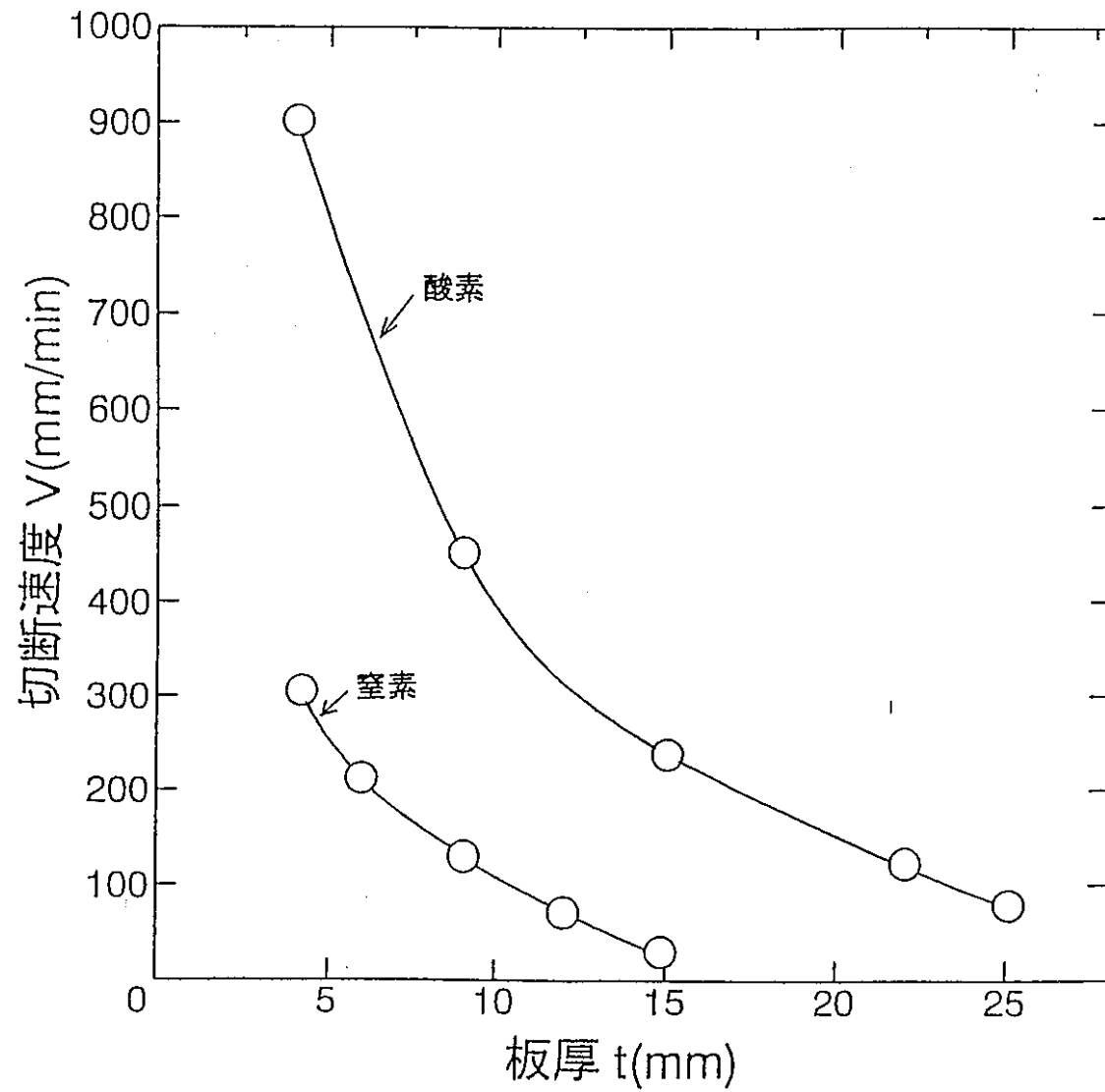
模擬試験体		対応するハル缶部位
鋼板	厚さ 25 mm	溶接継ぎ上がりを予想した厚さ
	22 mm	蒸気持用の胴部の最大厚箇所
	15 mm	蓋、底部の板
	9 mm	蓋のドラム受け座のリング
	4 mm	胴部の板、脚の受板
鋼棒	直径 20 mm	蒸気吊り具の鋼棒
鋼管	外径 38 mm / 肉厚 1.2 mm	底部のショックアブソーバ用鋼管
補強部材 模擬体	厚さ 6 mm と厚さ 15 mm との溶接	蒸気面の補強板



試験片の模擬部位

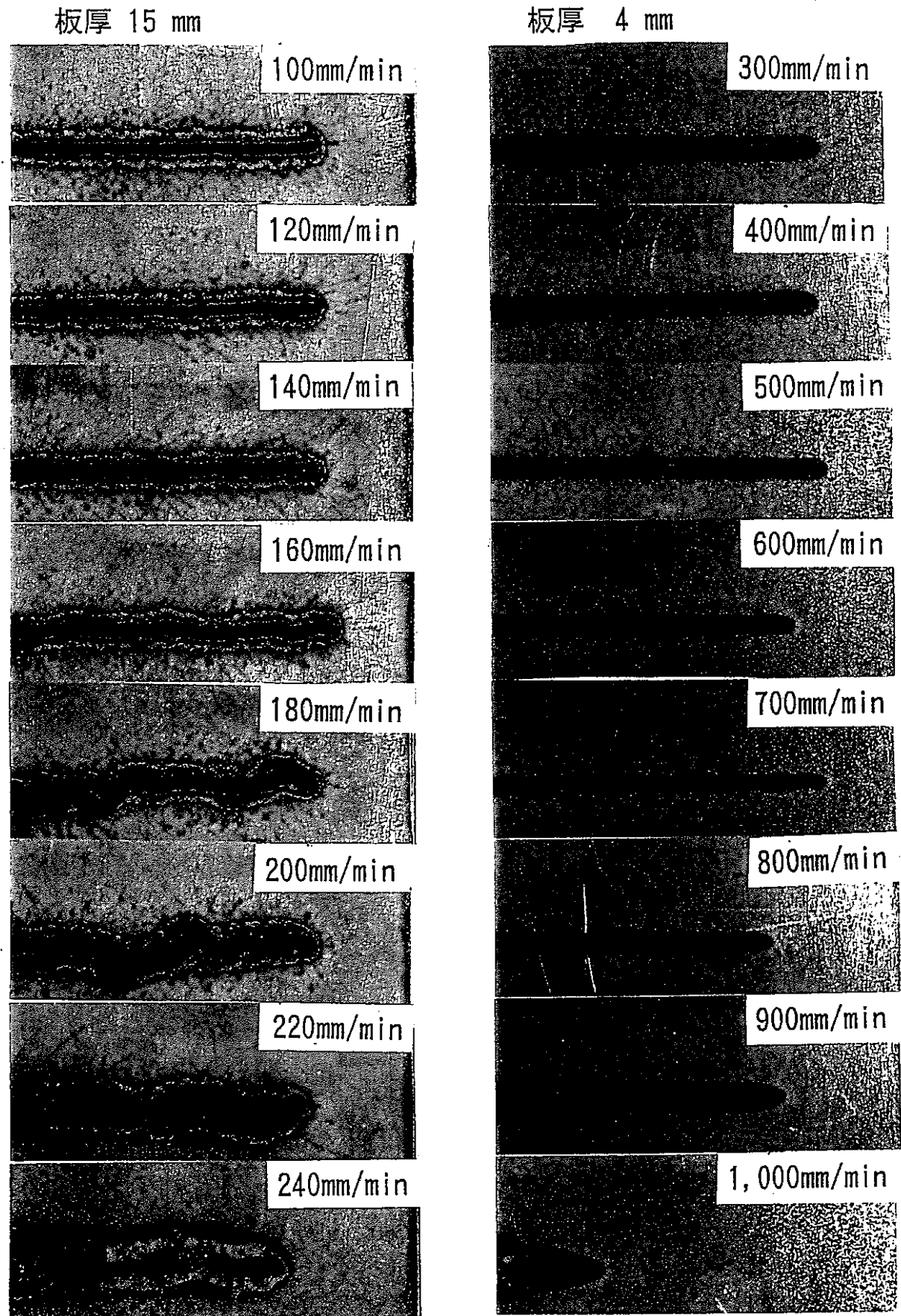
試験結果

(1) ステンレス鋼板の切断速度

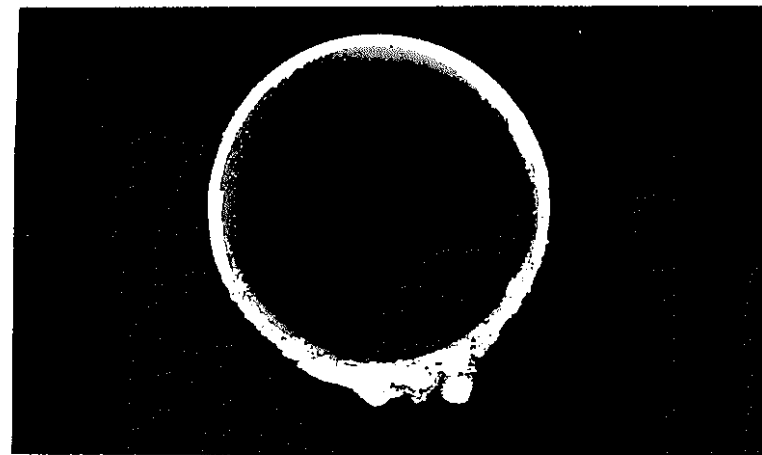
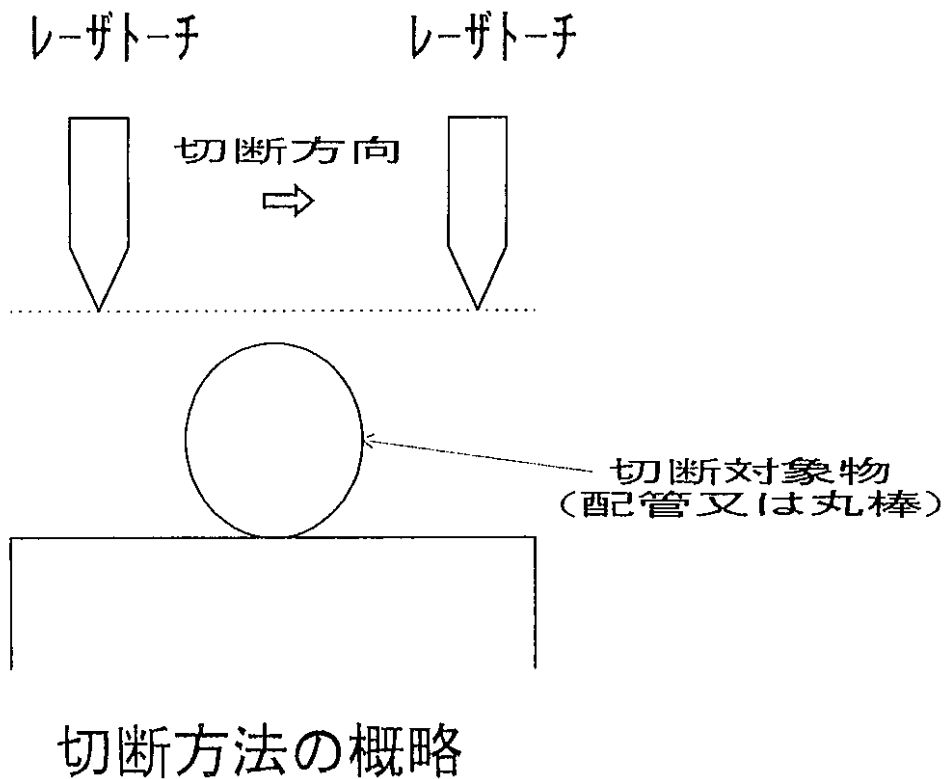


切断片の観察結果

SUS鋼板の切断速度依存性（レーザ照射裏面）



(2) ステンレス鋼配管、丸棒の切断状況

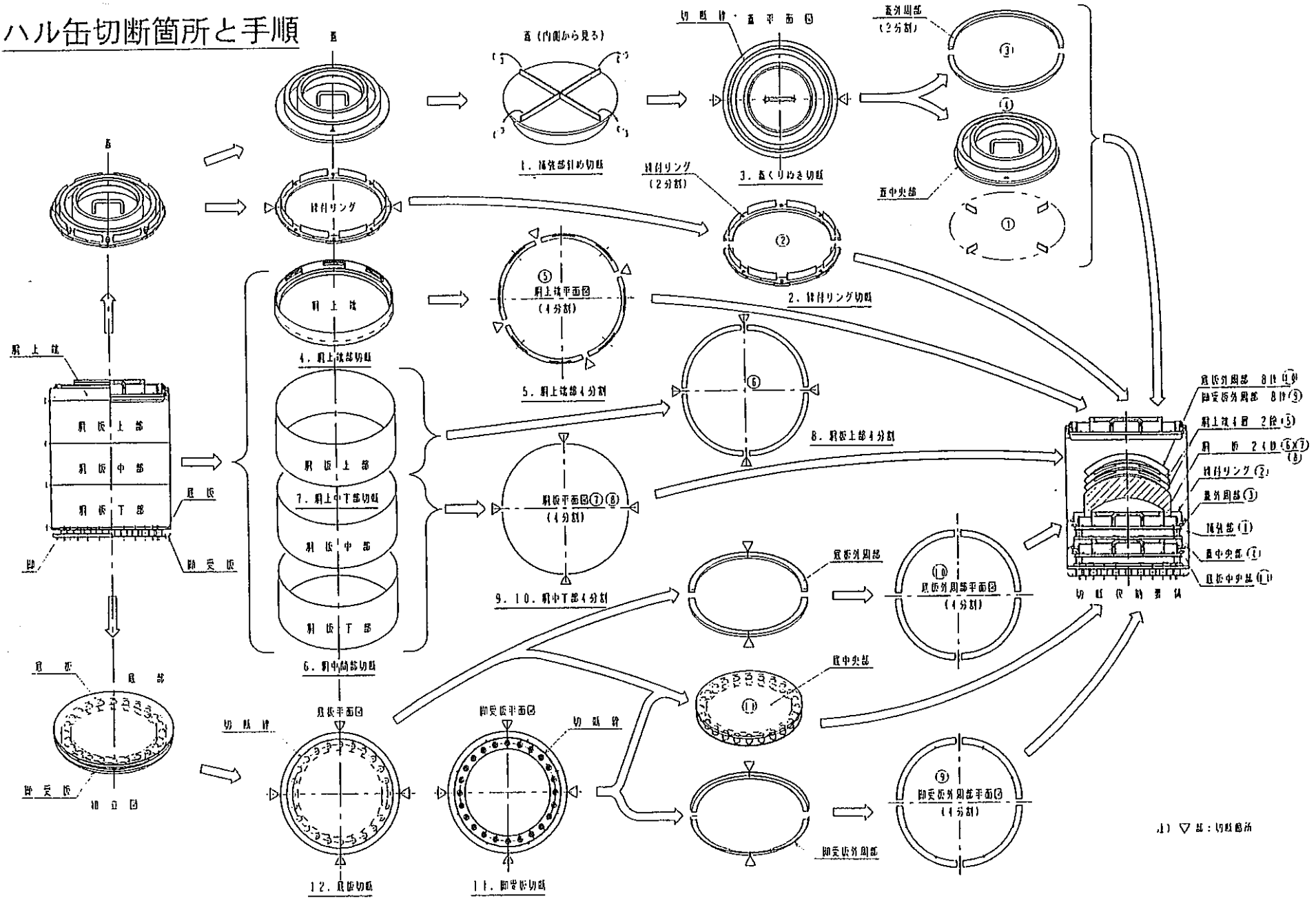


配管サイズ： $\phi 38\text{mm}$, $t=1.2\text{mm}$
切断速度：140 mm/min
アシストガス：酸素

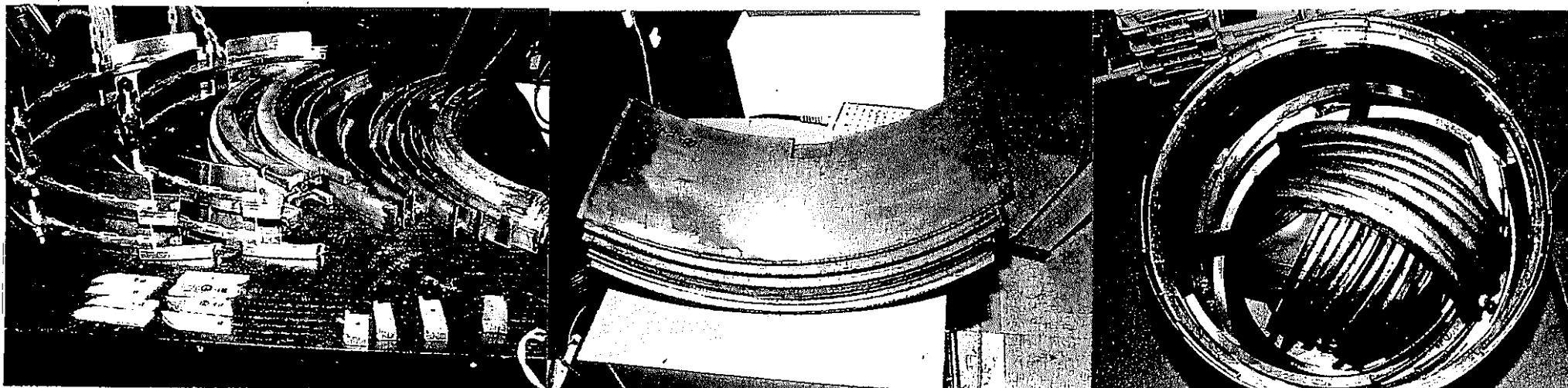


丸棒サイズ： $\phi 20\text{mm}$
切断速度：180 mm/min
アシストガス：酸素

ハル缶切断箇所と手順



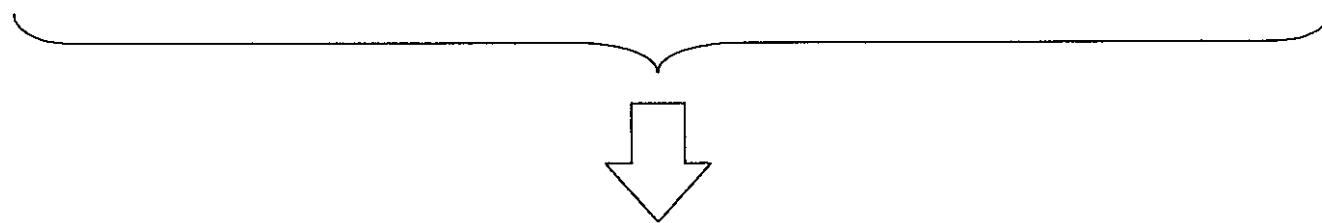
(3) 実ハル缶の切断状況



締め付けリング
蓋外周、低部外周等

胴本体部

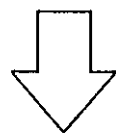
ハル缶 2 缶分の
収納状況



○ 切断片のハンドリングを除いて約 1 時間で切断可能 (1 缶分)

まとめ・結論

- ステンレス鋼の切断性能
 - ・ 板厚 4 mm ⇒ 約 900 mm/min (アシストガス：酸素)
 - ・ 板厚 4 mm ⇒ 約 300 mm/min (アシストガス：窒素)
 - ・ 板厚 25 mm ⇒ 約 70 mm/min (アシストガス：酸素)
 - ・ 配管材 $\phi 38$ mm $t=1.2$ mm ⇒ 約 140 mm/min (アシストガス：酸素)
 - ・ 丸棒材 $\phi 20$ mm ⇒ 約 180 mm/min (アシストガス：酸素)
- 実ハル缶の減容処理能力 (ハル缶 1 缶分)
 - ・ 切断片のハンドリングを除いて約 1 時間で切断可能



YAGレーザー切断法はハル缶の切断技術として
十分適用性がある

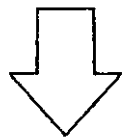
YAGレーザーによる

ハル缶切断技術の開発（2）

（スタン材の制御性、粉じん性状）

目 的

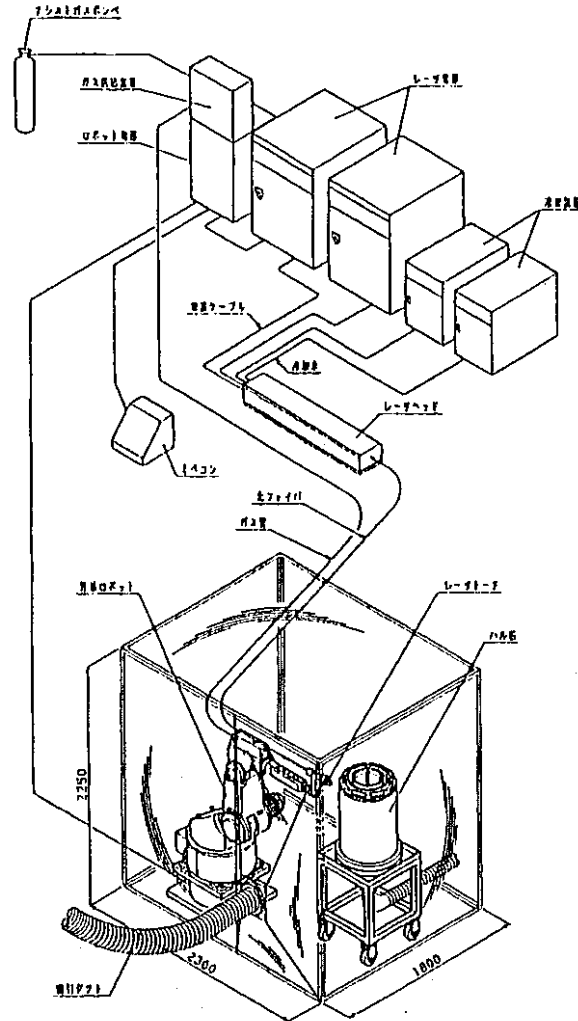
- ステンレス鋼の切断性能確認（平板、配管、丸棒）
- 実ハル缶の減容処理性能の確認（ハル缶1缶分の切断能力）
- 2次生成物の性状調査及び定量評価（ドロス、ヒューム）
- 遠隔自動切断における要素技術の確証
（湾曲部、段差部、トーチ傾斜部でのスタンドオフ制御性等）



実機計画のための設計データの取得、要素
技術の適用性を確認する。

試験装置及び試験方法

(スタンドオフ 制御性の確認)



試験装置の概要

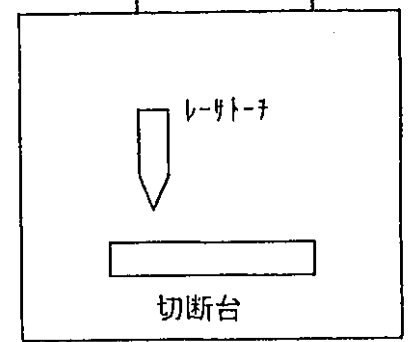
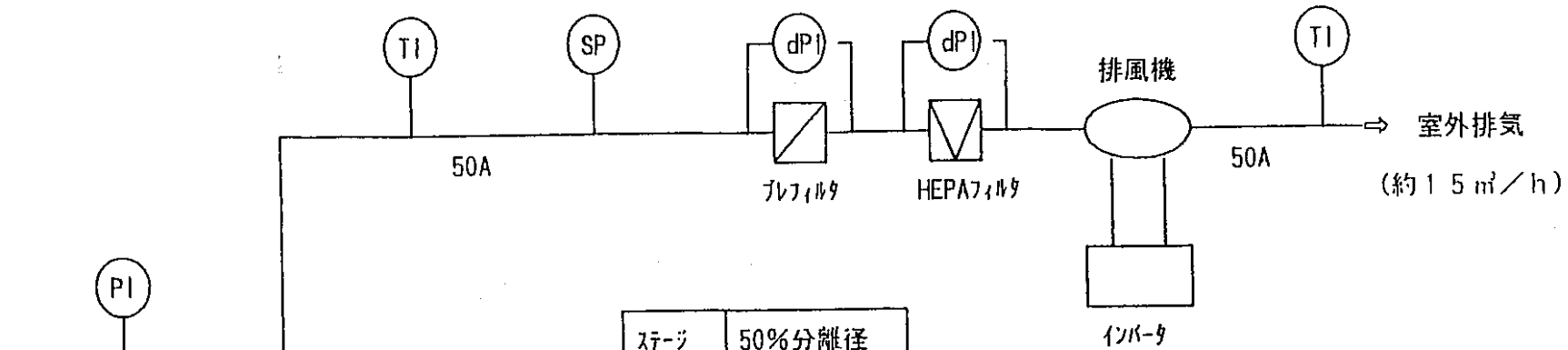
パラメータ	設定範囲
スタンドオフ	1 ~ 5 mm
切断速度	100 ~ 800mm/分
トーチ角度	0 ~ 60°
アシストガス	酸素

○ 試験片：湾曲板、段差
(ステンレス鋼)

○ レーザ 発振方式：パルス 式

○ レーザ 平均出力：1 kW

(粉じん性状の確認)



切断フード (容積: 約1.2 m³)

ステージ	50%分離径 (μm)
0	≥ 11
1	7.7
2	5.1
3	3.5
4	2.1
5	1.2
6	0.68
7	0.48
L 1	0.29
L 2	0.19
L 3	0.12
L 4	0.05
バックアップ	≤ 0.05

- (記号)
- PI : 圧力計
 - dPI : 差圧計
 - TI : 温度計
 - SP : サンプルング口

アダーソン型分級捕集器の分級性能 (20°C 1 atm)

概略系統構成

試験結果

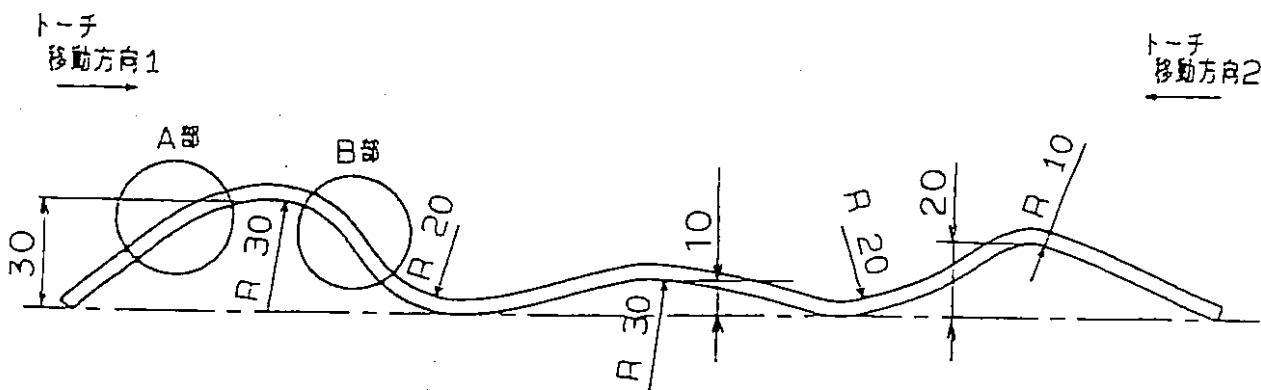
① 湾曲板の追従性

<試験条件>

- ・ スタンドオフ設定値：2 mm
- ・ トーチ移動方向：2方向
- ・ トーチ移動速度：100mm/min ~800mm/min

<試験結果>

トーチ 移動方向	速度 (×100 mm/min)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
方向1	○	○	○	○	○	○	○	△ ^A
方向2	○	○	○	○	△ ^B	×	×	×



湾曲板試験体 (SUS304 板厚 4mm)

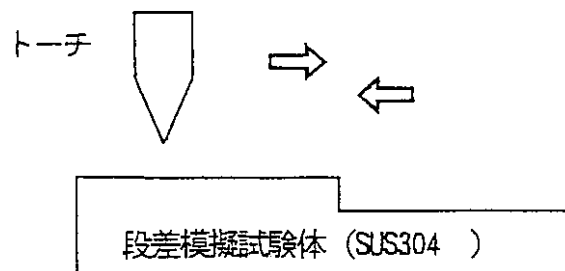
② 段差片の追従性

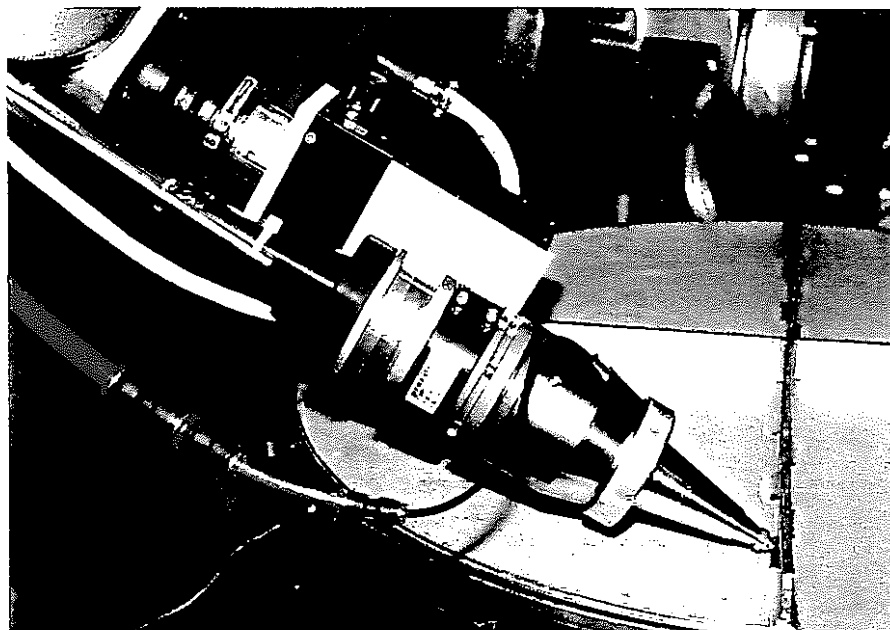
<試験条件>

- ・ スタンドオフ設定値：2 mm
- ・ トーチ移動方向：2方向
- ・ トーチ移動速度：100mm/min ~800mm/min

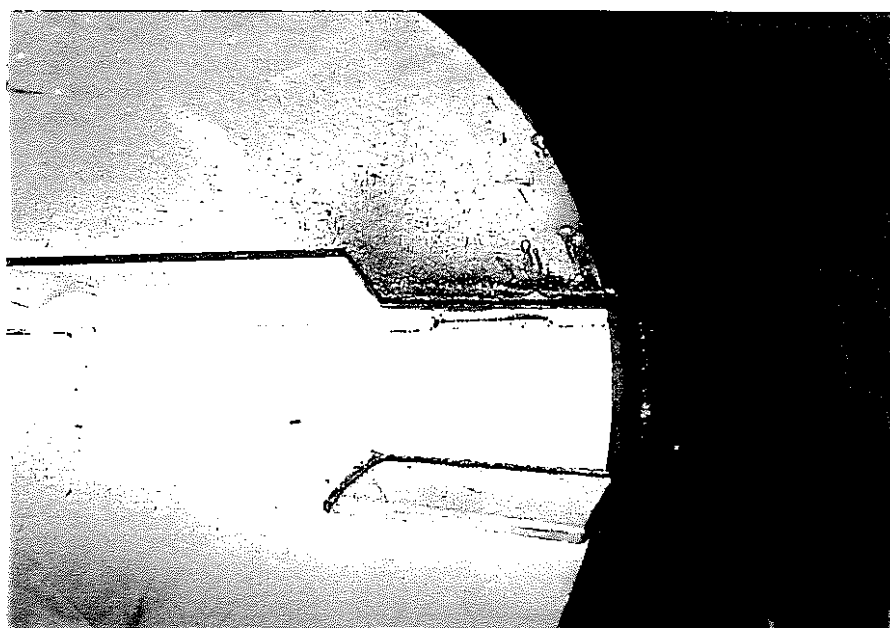
<試験結果>

段差	トーチ移動方向	速度 (×100 mm/min)								
		1	1.5	2	3	4	5	6	7	8
2 mm	UP	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	DOWN	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3 mm	UP	○	○	○	○	○	×	×	×	×
	DOWN	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4 mm	UP	○	○	○	×	×	×	×	×	×
	DOWN	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5 mm	UP	○	○	×	×	×	×	×	×	×
	DOWN	○	○	○	○	○	○	○	○	○





(a) 補強部のセンシング状況



(b) 補強板の切断状況

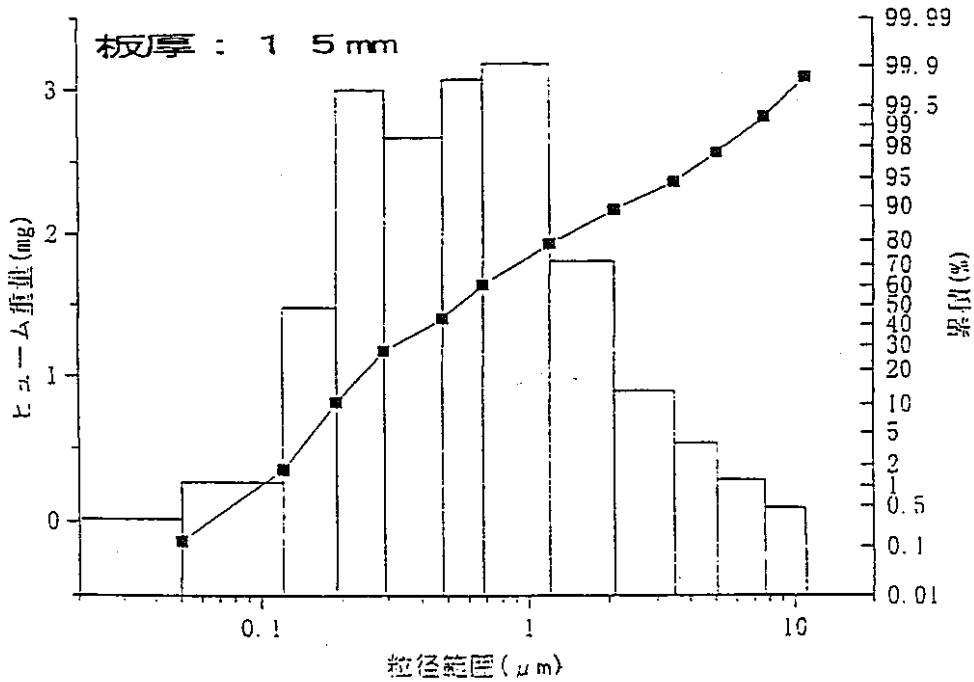
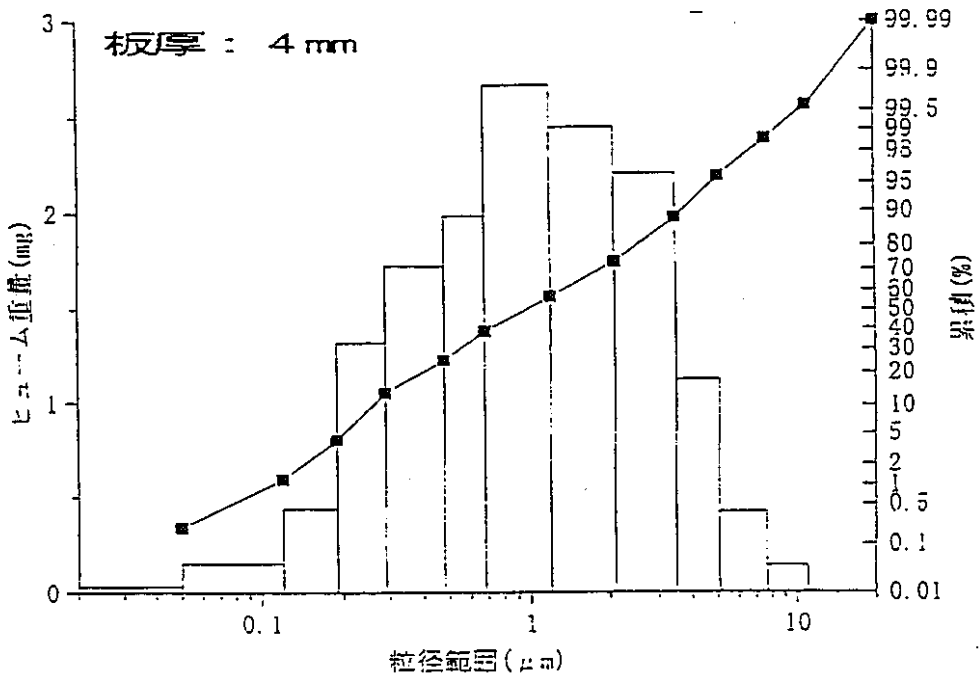
蓋補強部の切断状況

③ 粉じん性状

<試験条件>

- ・ 排気流量 : 約 15 m³ / h
- ・ 分級捕集器 : アンダーセン型
- ・ 測定方法 : JIS K0302 に準拠

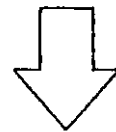
<試験結果>



まとめ・結論

- スタンドオフ制御性
 - ・ 静電容量センサーを用いたスタンドオフ制御系を確証した。
 - ・ 本システムによりスタンドオフ制御を行い、実ハル缶各部の切断ができた。

- 粉じん性状
 - ・ 粉じん粒径分布は、板厚の違いにより異なることが分かった。
平均粒径 : 板厚 4 mm \Rightarrow 約1.1 μ m
板厚15mm \Rightarrow 約0.5 μ m



本システムは、スタンドオフ制御系として十分適用可能である。
レーザー切断により発生する粉じん性状を明らかにした。

2. X線CTによるハル等圧縮体内部空隙及び異物測定への適応性検討

2.1 はじめに

現在、設計が進められているHWT Fでは、ハル等を圧縮減容処理し保管する計画である。圧縮減容処理した処理体は、将来処分を考慮した場合、処理体内部の空隙部体積・空隙率及び混在する異物の種類・量等のデータが必要となる可能性が高い。このため、これらのデータを非破壊で測定できる可能性があるX線CT法に着目し、適応性検討を実施した。

今回の重要な課題は、ハル圧縮体のように空隙部分のギャップ間隔が非常に狭くかつ、複雑な形状と空間的な拡がりをもっている場合、どの程度の精度で空隙部の体積を評価できるかにある。すなわち、CT撮影条件である「画素サイズ」と「スライス幅」を無限小にすることは不可能であるため、CT画像においては、金属材と空隙部との境界を明確に区別できず、その結果、空隙部分の体積の評価にあいまいさが伴う。特に空隙部のギャップ幅が狭い場合には、厳しい条件になると考えた。

上述のような前提条件のもとに、X線CT撮影で得られたハル圧縮体の3次元CT画像に領域抽出手法を適用することにより、空隙部の全体積を評価する。領域抽出手法は、すでに医療用CT分野（身体の断層撮影）では確立されたものであるが、今回の適用の検討により、さらに拡張性を高めるための具体的な方向性が得られると考え基礎的な撮影試験を実施した。

また、ハル圧縮体に混在する異材の密度同定については、3種類の既知の金属（アルミニウム、鉄、黄銅）に対するCT値と密度の関係にもとづいて、ハル圧縮体内の異材の密度及び材質を推定できると考え基礎的な撮影試験を実施した。

2.2 試験体のX線CT撮影

2.2.1 X線CT装置及び撮影条件

CT撮影に使用したX線CT装置は、日立HiXCT-3Mである。この装置の主要な仕様を表2.1に示す。今回のCT撮影はスライス幅1.0mm、画素寸法0.4mmの条件で実施した。

2.2.2 試験体

(1) 空隙率評価試験用試験体

① 領域抽出手法の精度評価用の単純形状の評価サンプル（写真2.1の①）

② 模擬ハル圧縮体

BWR 8×8 ZRY-2の焼鈍材、圧縮圧 356.8MPa

真密度比 約80%（写真2.2）

(2) 密度同定試験用試験体

- ① 密度既知の金属製評価サンプル (写真2.1の② アルミ, 鉄, 黄銅)
- ② 模擬ハル圧縮体 (内部異材 4個)

2.3 特定領域の体積評価

2.3.1 体積評価サンプルの評価結果

評価サンプル(写真2.1の①)について3Dシステムで対話的処理を行い、空隙部の体積を求めた。しかし、サンプルの空隙部が非常に小さい領域であり、空隙部周囲の密度が等しいため、空隙部にリージョンローイング(領域拡張法)を行っても、周囲の空気層にまで拡張が進行し、収束が認められなかった。従って、空隙部の体積を直接求めることは現段階では限界がある。今回は、空隙部ではなく逆に、サンプルの金属部の体積を求めることにより、空隙部の体積を算出する方法を採用した。評価サンプルは溝が細く、空隙部が抽出しにくいいため、パラメータL(LOCAL RANGE)によって結果が大きく異なる。従って、リージョンローイング後に、3Dシステム上でサンプルの空隙部の任意断面を随時調べ、逆リージョンローイングを行う、または、パラメータを新たに設定し、リージョンローイングを再度行う、などの対話的処理によりパラメータを決定した。写真2.3は、3種類のパラメータLに対する金属部の体積を領域抽出した結果である。

下表に空隙部の評価結果を示す。

L	20	30	40
サンプルの体積 (mm ³)	3106.5	3451.5	3337.2
空隙部の体積 (mm ³)	427.8	82.8	197.1
空隙部の理論値 (mm ³)	88.2	88.2	88.2

(パラメータG=99)

- サンプルの体積：リージョンローイングによって算出した体積
- 空隙部の体積 = (φ30, 高さ5mmの円板の体積) - (サンプルの金属部の体積)
- パラメータ
 - L：LOCAL RANGE (拡張点とその拡張元の濃度差がLより小さいとき関心領域と定義する。)
 - G：GLOBAL RANGE (開始点とその拡張点との濃度差がGより小さいとき関心領域と定義する。)

2.3.2 模擬ハル圧縮体の評価結果

(1) 空隙部の評価

空隙部は、存在位置、形状が認識し得ず、また領域が連続的でないため、リージョンローイングの領域拡張がすべての空隙部にまで進行せず、現段階では空隙部を直接求めることは困難である。

従って2.3.1と同様に、逆に模擬ハル圧縮体の金属部の体積を求めることにより空隙部の体積を算出した結果を写真2.4に示す。下表はパラメータLに対する空隙部の結果を示す。

また、上述の方針により空隙部を直接抽出した場合を写真2.5に示す。

L	19	28	40	49	58
金属部の体積測定値 (mm ³)	205409.9	207598.1	205564.0	207650.6	205660.0
空隙部の体積 (mm ³)	30209.5	28021.3	30055.4	27968.8	29959.4
空隙率 (%)	12.8	11.9	12.8	11.9	12.7

(G=70)

空隙部の体積 = 模擬ハル試験体の実体積 (235619.4mm³) - 金属部の体積の測定値

$$\text{空隙率} = \frac{\text{空隙部の体積}}{\text{実体積}} \times 100$$

撮影時、圧縮体がやや傾いてCT撮影されたため、水平の場合と比較して、試験体の上面及び底面付近は、有限なスライス幅のため、圧縮体と空気層が混じってぼやけた映像となる程度が増加し、リージョンローイングを行った場合、領域拡張がより広く空気層にまで進行し、上記表の結果に示すように抽出がうまく行えなかった。

処理対策として、リージョンローイング後に、試験体の上面、底面と空気層の境界付近断面を随時調べ、空気層だと判断できる領域を逆リージョンローイングによって削除したが、真密度比から算出した空隙率(20%)に比べ上記表の結果のとおり空隙率が小さかった。結果として、逆リージョンローイングがうまく行えなかったといえる。そのため、映像のぼやけていた上面及び底面の5スライスの部分のデータを削除し、合計24スライスのデータ(模擬ハル圧縮体の高さ24mm)を用いて再度抽出を行った結果、真密度比から算出した空隙率(20%)に近い結果が得られた。

結果を下表及び写真2.6に示す。

領域抽出パラメータ		抽出領域体積	算出体積	空隙率
Local	Global	金属部体積 (mm ³)	空隙部体積 (mm ³)	(%)
19	70	160035	34334	18
28	70	162038	32331	17
40	70	161591	32778	17
49	70	161696	32673	17
58	70	162577	31792	16

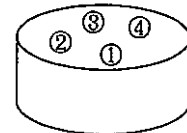
全体の体積(計算値) 194369 (mm³)

(2) 異材部の評価

異材部の体積を求めた結果を下表及び写真2.7に示す。

パラメータは、リージョンローイング、逆リージョンローイングを繰り返し、目視にて最適と判断される値 $L=35$, $G=29$ を用いた。

異材部 No.	1	2	3	4
異材部の体積 (mm ³)	622.08	809.44	349.76	754.0



2.4 CT値による模擬ハル圧縮体内異材の密度評価

2.4.1 サンプル材による密度評価結果

密度が既知の3種類（アルミ、鉄、黄銅）のサンプル材に対してCT値による密度評価を実施した。写真2.8は、サンプル材のCT画像である。各サンプル材の密度差をCT値に対応して模擬カラーで着色し、色の違いにより表現した。

次に、写真2.9は、各サンプル材の平均CT値の処理結果を示す。CT値からの密度の計算は下記に基づく。

$$\rho = \frac{CT\text{値}}{\mu_m} \times A \quad \dots\dots\dots (1)$$

μ_m : 質量減衰係数 (平均X線エネルギー 2.0 MeV に対応)

アルミ; 0.043(cm²/g), 鉄; 0.0425, 黄銅; 0.0419

A : 鉄を基準とした場合の比例定数

上記から得られた密度は、アルミ材 : 2.76 (物性値2.7), 黄銅 : 8.45 (物性値8.65) となり、その物性値との相違は約2%であった。

2.4.2 模擬ハル圧縮体内の異材の密度評価と材質の推定

写真2.10は、模擬ハル圧縮体内の異材のCT画像を示す。4種類の異材の着色とカラーバー（着色と密度との関係）との比較により異材相互の密度関係が分かる。写真2.11は、各異材ごとのCT値を得るために平均値処理した結果を示す。また、式(1)により異材の密度を推定した結果を下表に示す。なお、質量減衰係数 (μ_m) は鉄の値を使用した (μ_m は材質による依存性が小さくX線エネルギーにより一義的に決まる)。

各異材の密度推定値と物性値との相違は最大で約20パーセントであった。

	材 質	真密度	推定密度	誤差 (%) *1
①	SUS	7.8	6.72	- 13.8
②	銅	8.96	7.4	- 17.4
③	インコネル	8.44	7.3	- 13.5
④	アルミ	2.7	2.83	4.8
標準	鉄	7.86	—	—

注) *1: 誤差 = (真密度 - 推定密度) / 真密度 × 100

2.5 まとめ

模擬ハル圧縮体内部の空隙率の評価及び混在する異材の密度同定にX線CT法の適用の可能性について予備的な試験を実施した。その結果、その実用性について現状の段階では下記のようなになる。

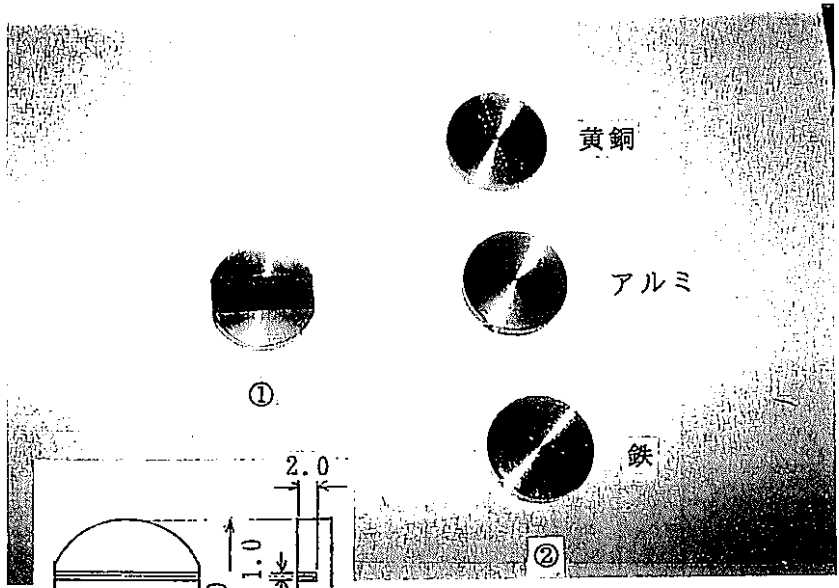
- ① CT撮影条件（検出器コリメータのスリット構造）及び領域抽出手法について技術開発すべき課題はあるが、適用の可能性は十分にあると考える。
- ② 密度評価時の補正手法（リファレンスとして、事前に圧縮体の中に標準物質を入れる等）について検討する課題はあるが、適用の可能性は十分にあると考える。
- ③ 実際の圧縮体の大きさ（φ400mm）、X線エネルギースペクトルの減弱効果を考えた場合、高いX線エネルギーを発生できる電子線形加速器が必要となる。
- ④ 高いX線エネルギーを発生できる電子線形加速器により、測定精度を上げることができる。

2.6 参考文献

- (1) 模擬ハル圧縮体X線CT撮影（PNC ZJ8124 95-010）

表 2.1 HiXCT-3Mの仕様

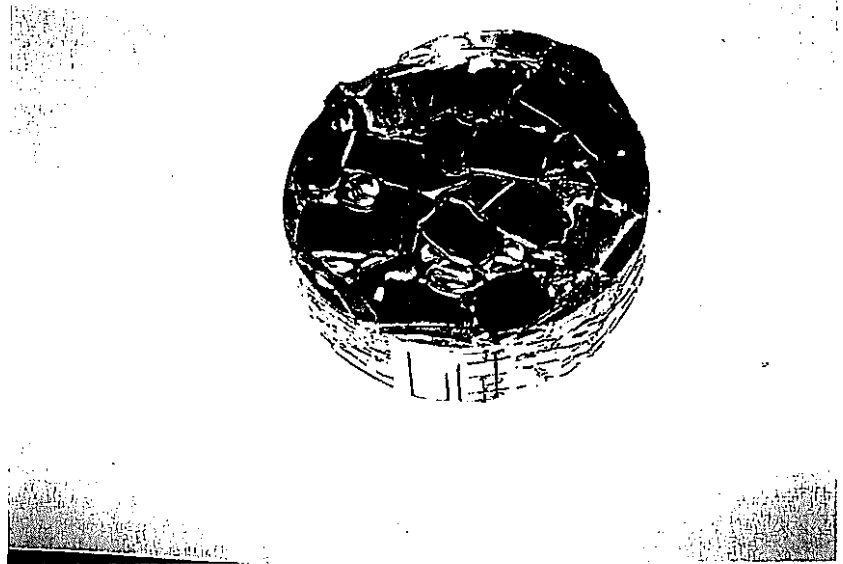
項 目	仕 様
走査方法	第 2 世代方式
ファンビーム角度	15°
スキャン時間/画像	3.5分 (1024×1024)
スライス幅	1mm, 3mm
X線源	電子線形加速器
X線エネルギー(Max)	3MeV
X線出力	200R/min-m
検出器センサー構成	固体シンチレータ +ホットダイオード
検出器構成の種類 (コリメータスリットサイズ)	①1.0W×6Hmm ②0.4W×2Hmm
検出器チャンネル数	75ch
再構成マトリックス	1024×1024 2048×2048
表示マトリックス	1024×1024
画素寸法	1.0×1.0mm, 0.4×0.4mm



評価サンプル

- ① 領域抽出手法の精度評価用の
単純形状の評価サンプル
- ② 密度既知の金属製評価サンプル
(直径 30mm)

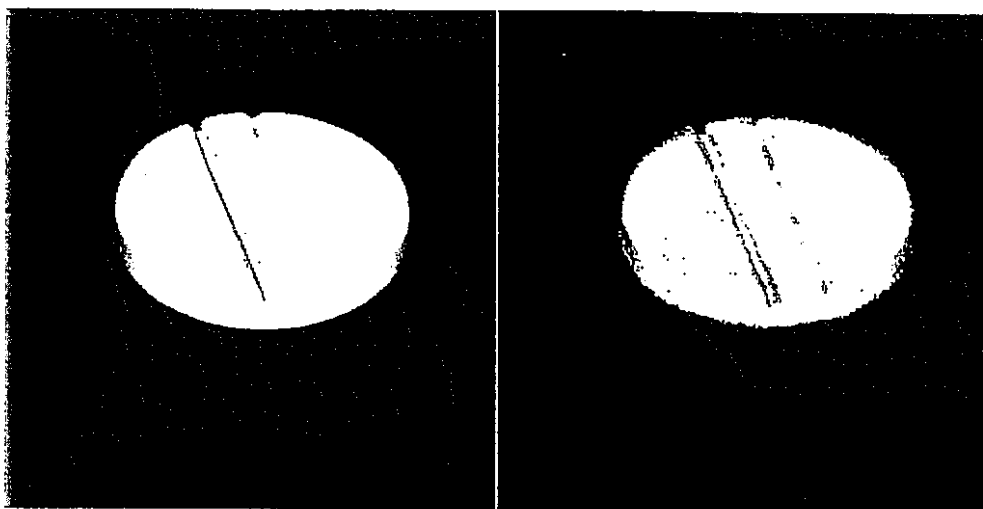
写真 2.1 領域抽出手法の精度評価用の
単純形状の評価サンプル



模擬ハル圧縮体

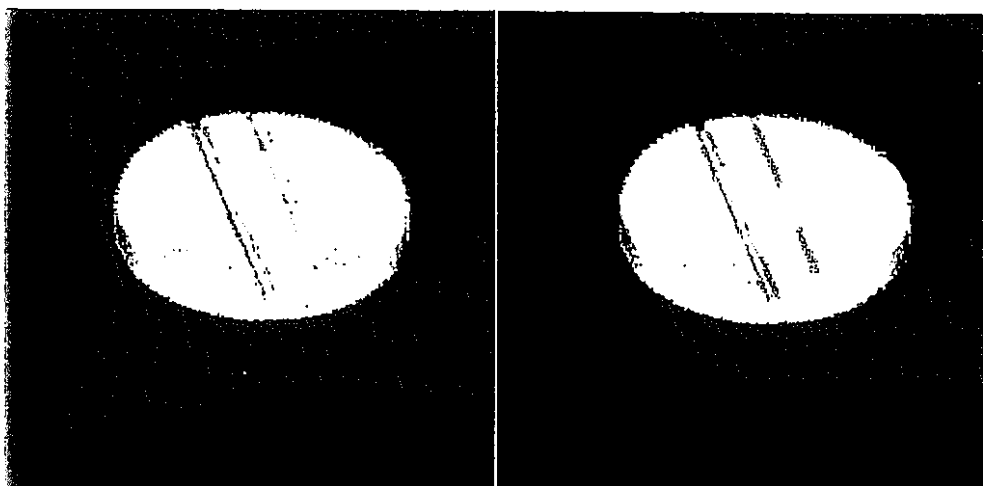
直径 約100mm
高さ 約 30mm

写真 2.2 模擬ハル圧縮体



評価サンプルの3次元画像

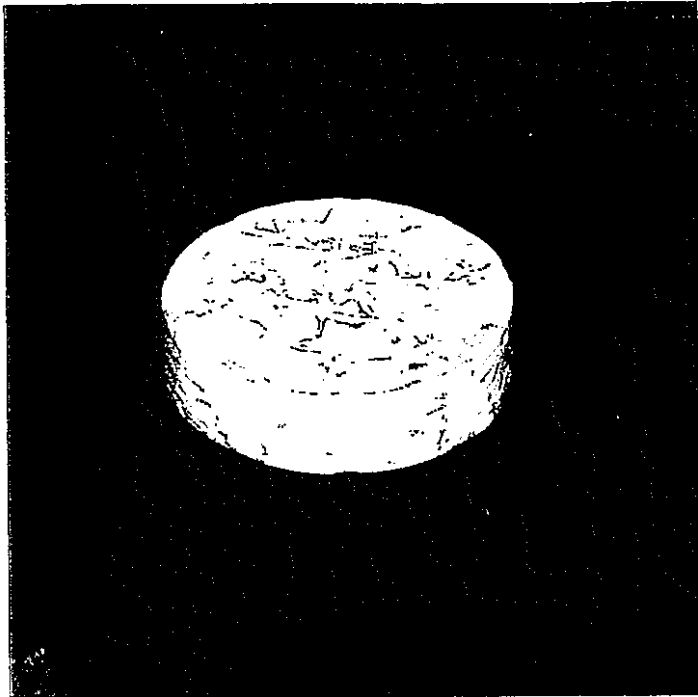
サンプル金属部抽出画像 (L = 20)



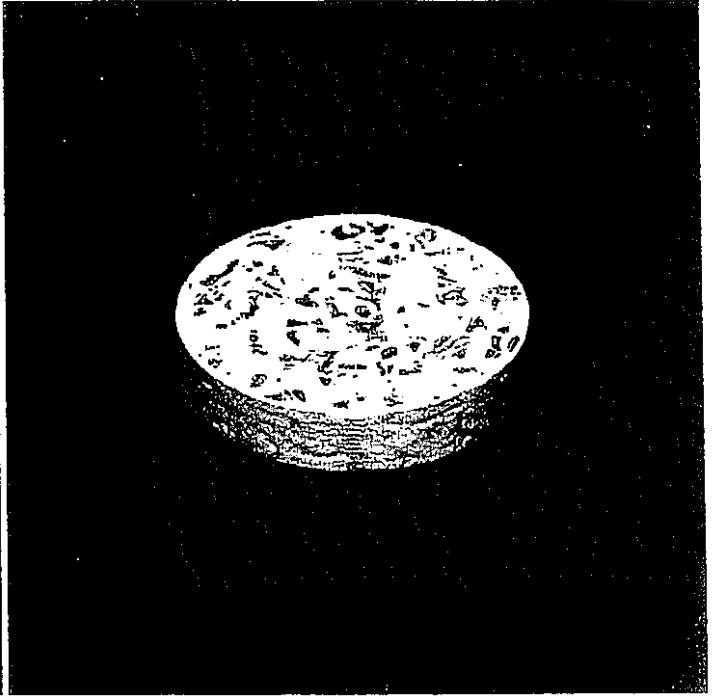
サンプル金属部抽出画像 (L = 30)

サンプル金属部抽出画像 (L = 40)

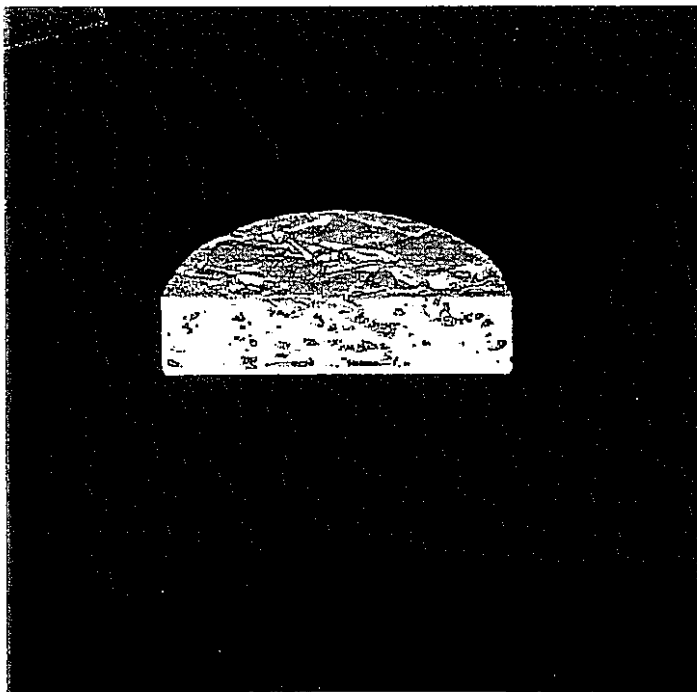
写真2.3 評価サンプルの金属部抽出結果



ハル圧縮体の3次元画像



ハル圧縮体の任意切断面像(1)

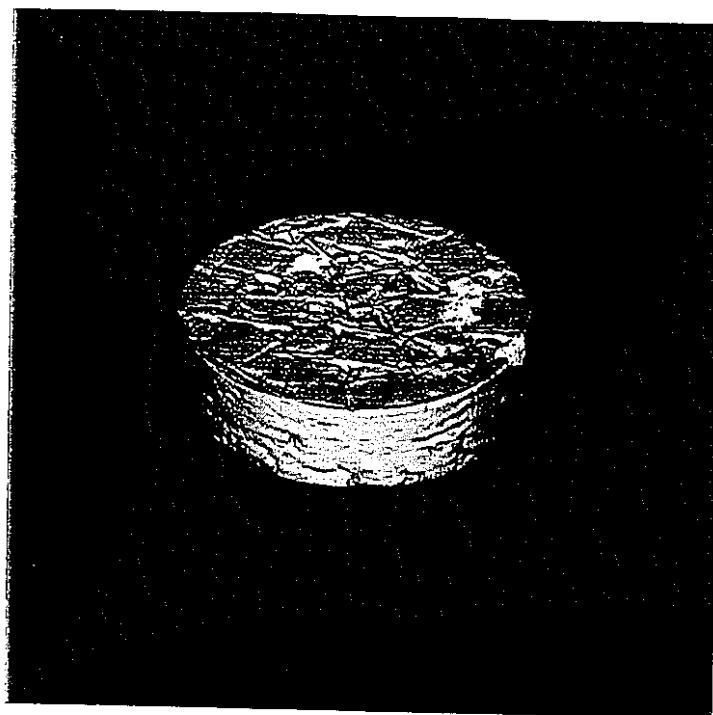


ハル圧縮体の任意切断面像(2)

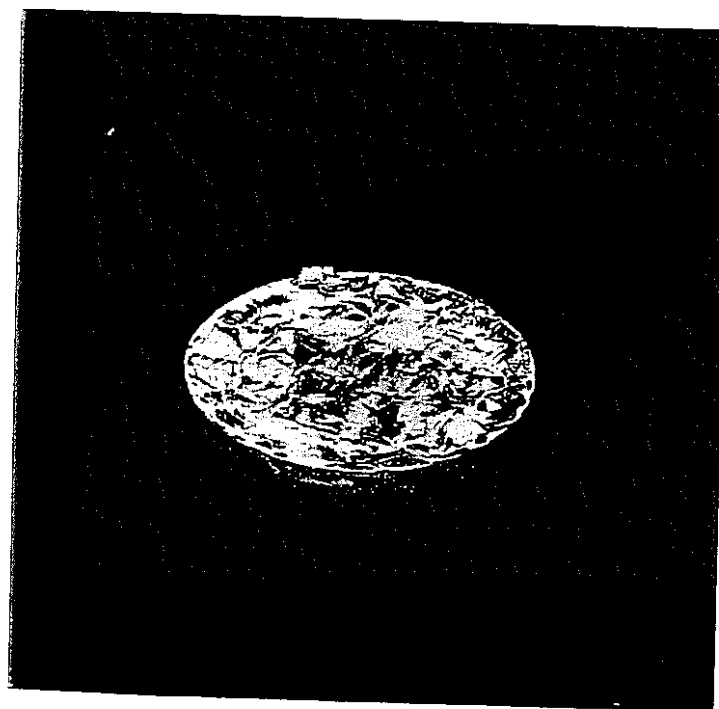


ハル圧縮体の任意切断面像(3)

写真2.4 ハル圧縮体の3次元画像

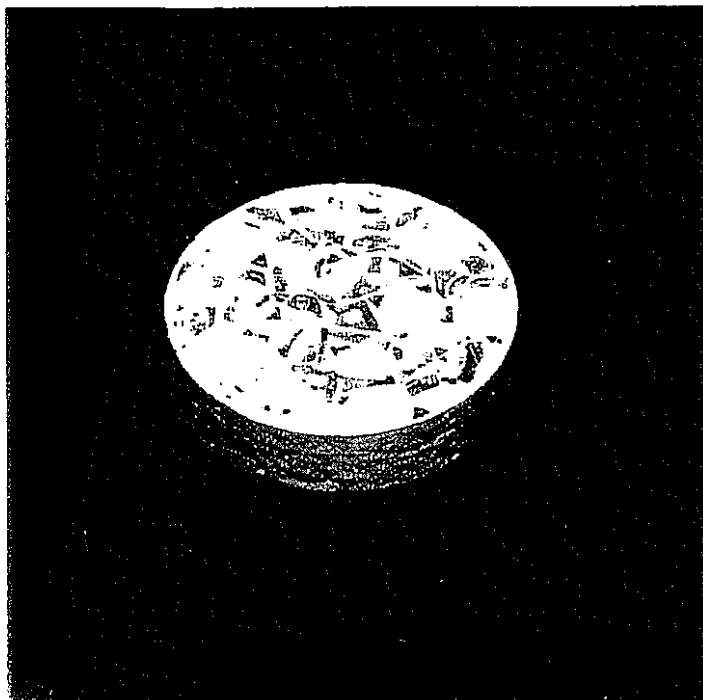


空隙部の一部抽出画像

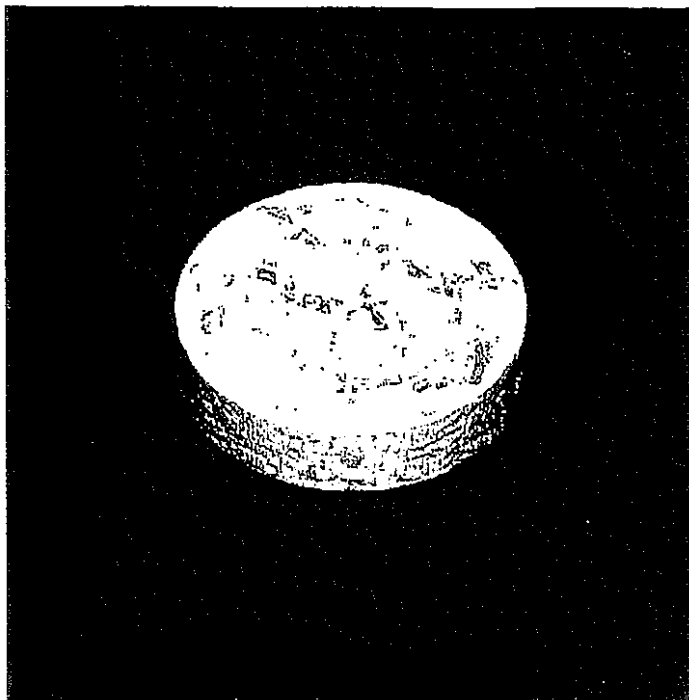


空隙部の一部を抽出した時の任意切断面像

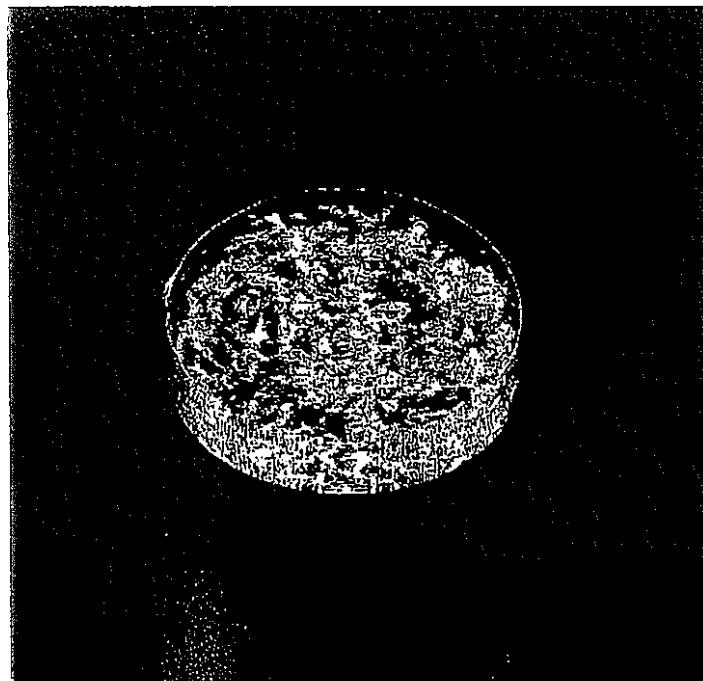
写真 2.5 空隙部の一部抽出結果



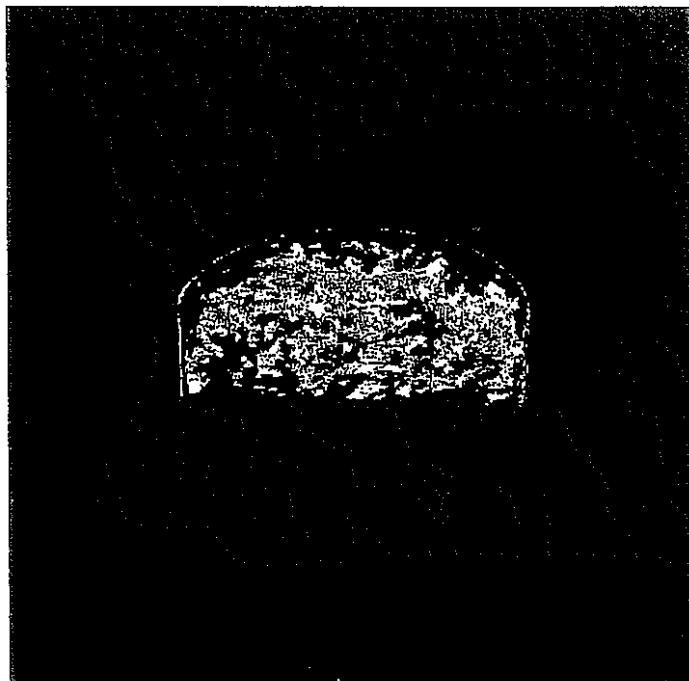
ハル圧縮体の3次元画像



金属部抽出画像

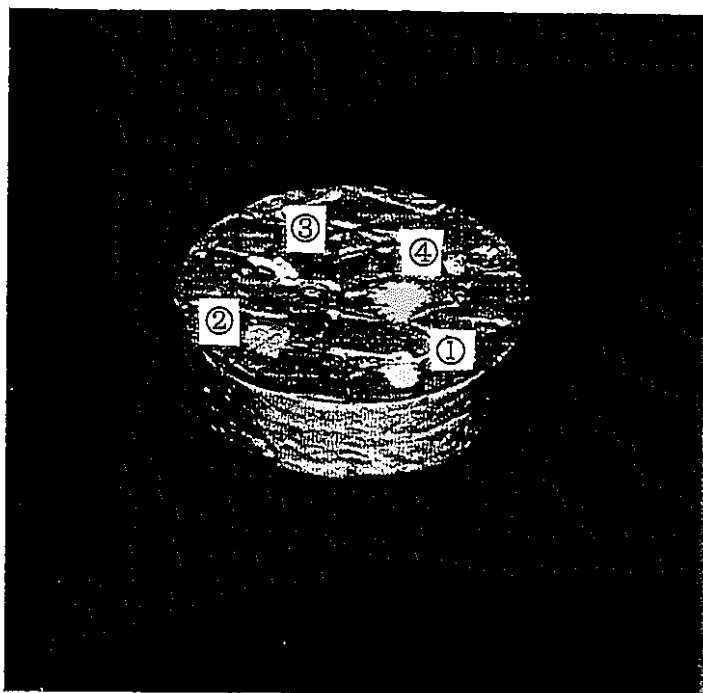


空隙部画像

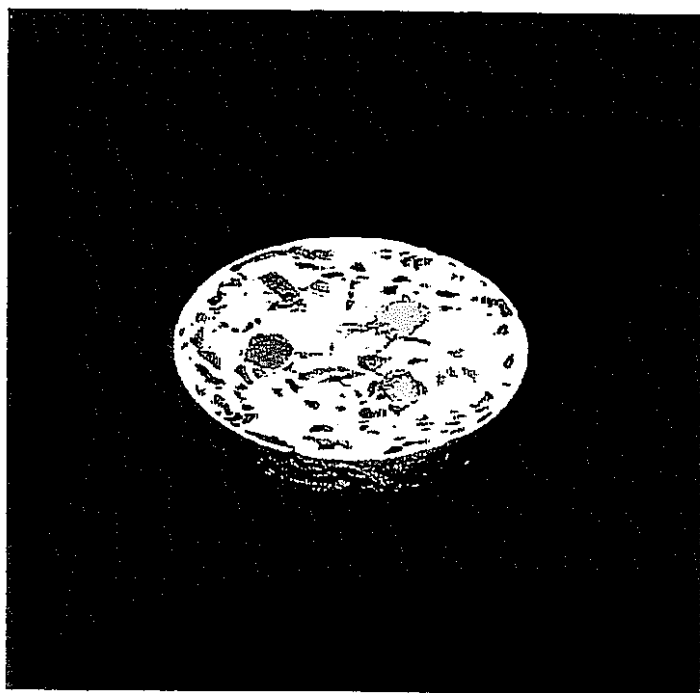


空隙部の任意切断面像

写真2.6 上下5スライスデータを削除した場合のハル圧縮体金属部抽出結果



異材部抽出 3次元画像
(模擬ハル圧縮体内異材部の透視像)



異材部を抽出した時の任意切断面像

写真 2.7 異材部抽出結果

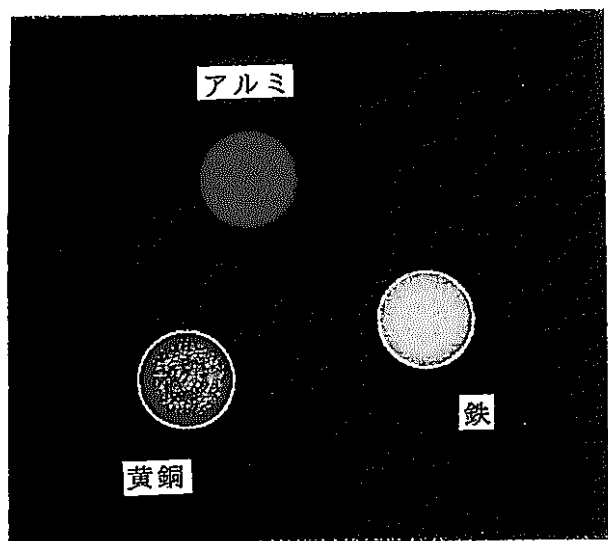


写真2.8 サンプル材のCT画像

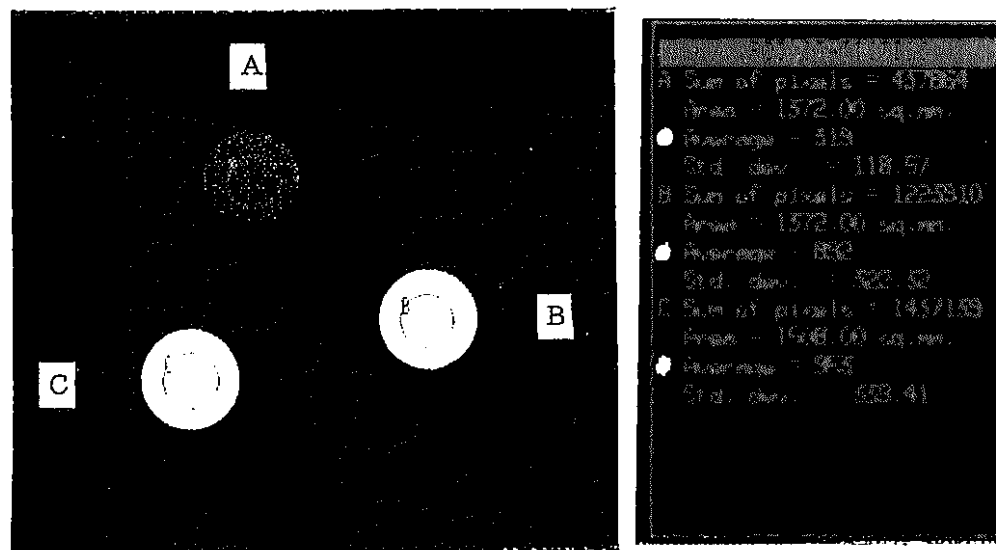


写真2.9 サンプル材の平均CT値処理
(円内領域の平均)

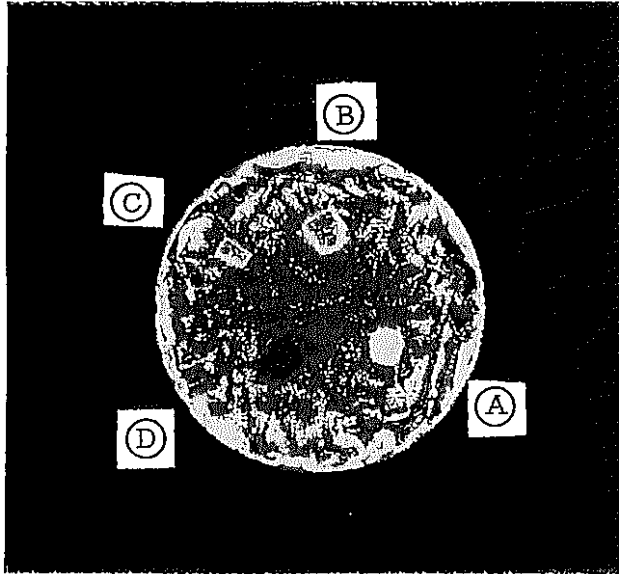


写真2.10 模擬ハル圧縮体内の異材のCT画像

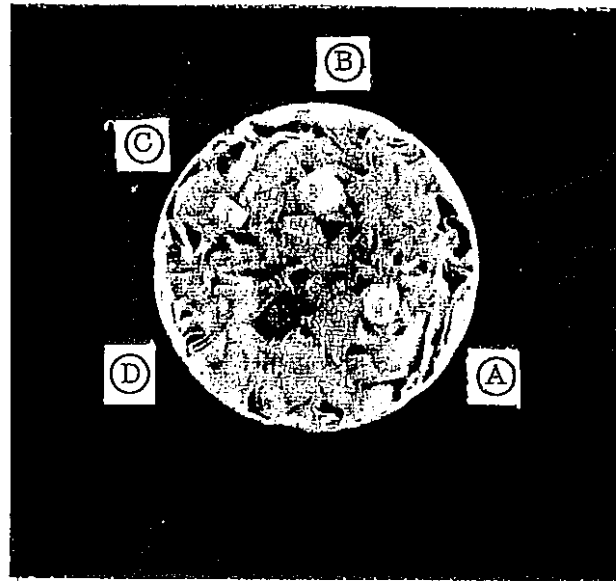


写真2.11 各異材の平均CT値処理

Material	Average CT Value
UO ₂ fuel	119.55
ZrO ₂ cladding	119.55
Graphite moderator	119.55
Water moderator	119.55
Aluminum structure	119.55
Steel structure	119.55
Control rod	119.55
Reflector	119.55
Shielding	119.55



低CT値

カラーバー

高CT値