

原子力機器, 設備における溶接の自動化

Automatization of Welding for Nuclear Power Equipments and Facilities

原子力発電プラント建設での高信頼性の要求, あるいは既納プラント改良工事での放射線被曝低減のために, 溶接の自動化, 遠隔化はますますその必要性を増している。本稿はそのような背景に照らし, 日立製作所での各種原子力発電プラント用機器及び配管製作での溶接自動化の現状について述べたものであり, 原子炉格納容器などの大型構造物の溶接自動化, 及び遠隔式配管自動溶接システムを中心に, 自動化開発のねらい, 設備の特長, 実機適用状況などについて紹介する。これらの自動化により, 原子力機器に要求される溶接品質の向上に大きな成果を挙げているばかりでなく, 運転開始後の原子力発電プラントの改良工事で, 人体に対する放射線被曝低減と, 高品質な溶接とを要望される原子力発電プラントに特有の作業に対しても顕著な成果を挙げている。

玉井康方*
松本輝夫*
小山高一*

Yasumasa Tamai
Teruo Matsumoto
Takaichi Koyama

1 緒 言

近年の目覚ましいエレクトロニクス技術の発達に伴い, 溶接作業の自動化が進んでおり, 原子力発電プラントでも工場内作業はもとより, 現地での原子炉格納容器などの大型構造物の組立溶接や配管の溶接作業に, 大幅に自動溶接技術が適用されつつある。このことは, 原子力発電プラントの高信頼性要求や熟練溶接士の高齢化対策と密接に関連しており, 今後も溶接自動化の要求はますます高まるものと予想される。

また, 近年主として供用期間中検査(定期検査)の期間を利用して行なわれている既設プラントの改良工事は, 残留放射線環境下の作業となるため, 人体に対する放射線被曝という問題があり, 技術的にも人員的にも建設時と比較して, 作業はかなりの困難を伴う。これらの改良工事は, 配管の取替え(材質変更)工事がほとんどであるので, 前述の問題に対処す

るため, 既設配管の切断から開先加工や溶接作業に利用できる遠隔作業システムを開発, 実用化して大幅な放射線被曝低減効果が得られた。このうち本稿では, 上記のプラント建設用の自動溶接機と既設プラント配管改造用の自動溶接機について, それぞれの機能, 及び現地適用状況について述べる。

2 日立における原子力機器設備の溶接自動化の現状

日立製作所での工場内及び現地での溶接自動化の主なものを表1に示す。工場内の溶接では, サブマージドアーク溶接などのワーク回転の下向き溶接が可能な溶接継手が主体となっているが, 再循環配管のように, 24inと大径でかつ形状が複雑であり, ワーク回転困難で, かつ高品質が要求されるものについては, 溶接作業品質の安定確保の観点から全姿勢自

表1 日立製作所における原子力機器, 設備の溶接自動化の現状

原子力プラント製作(RPV除く)の工場内及び現地の自動溶接の主なものを, 既設プラント改造, 新プラント建設に分けて示す。

No.	適用部名称		適用溶接法	材質	溶接姿勢	適用実績	備考
1	工場	配管	サブマージアーク溶接	ステンレス	下向き	適用済み	再循環配管ほか
			自動ティグ溶接		全姿勢		
			ホットワイヤプラズマ		下向き		
2	工場	原子炉格納容器	パルスミグ溶接	炭素鋼	下向き, 横向き	適用済み	
		熱交換器	サブマージアーク溶接				
3	内	燃料チャンネルボックス	プラズマキーホール溶接	ジルカロイ-4	下向き	適用済み	
4		燃料ラック	自動ティグ溶接	ステンレス	横向き	適用済み	
5	現地	原子炉格納容器本体	パルスミグ溶接	炭素鋼	立向き, 横向き 下向き, 上向き	適用済み	
			サブマージアーク溶接	炭素鋼	横向き, 下向き		
6		原子炉格納容器ペネトレーション部	ショートアーク溶接	炭素鋼	全姿勢	開発済み	着工プラント適用予定
7		CRDハウジングとスタブの溶接	自動ティグ溶接	インコネル	下向き	適用済み	
8		5/8B~24Bステンレス配管	自動ティグ溶接	ステンレス	全姿勢	開発済み	着工プラント適用予定
9		大径炭素鋼配管	自動ミグ溶接	炭素鋼	全姿勢	開発済み	着工プラント適用予定
10		セーフエンドサーマルスリーブ自動ティグ溶接機	遠隔操作式自動ティグ溶接	インコネル	全姿勢 (内面溶接)	開発中	既設サーマルスリーブ改造 新プラント
11		ライニング槽 (使用済み燃料プール他)	ワイヤベンディング パルスミグ溶接	ステンレス	立向き, 横向き 下向き	適用済み	
12		既設配管改造	遠隔操作式自動ティグ溶接機	炭素鋼 ステンレス	全姿勢	適用済み	放射線環境下作業

注：略語説明 RPV(Reactor Pressure Vessel), CRD(制御棒駆動機構)

* 日立製作所日立工場

動ティグ溶接を採用している。また、ジルカロイ-4を用いる燃料チャネルボックスの溶接には、溶接作業の安定性、熱影響部の極小化、変形防止、高効率溶接及びオープンエアで作業可能な方法として、プラズマキーホール溶接を適用しており、良好な結果を得ている。

一方、現地溶接の自動化では、後述する既設現地配管の改良、あるいは新プラント用の小径から大径までの配管溶接用の自動ティグ溶接機、格納容器本体の全姿勢パルスミグ自動溶接機、厚肉炭素鋼配管への全姿勢ショートアーク溶接、そして使用済み燃料貯蔵プールなどのステンレスライニング槽への立て向き、横向きのワイヤベンディングパルスミグ溶接の適用など、着実に自動化が進められている。

3 自動溶接設備の開発と実機適用の状況

前述の表1に日立製作所での溶接自動化の現状を示したが、このうち、既設プラント配管改良工事用の遠隔操作式配管自動ティグ溶接、原子炉格納容器本体の全姿勢パルスミグ自動

溶接機、原子炉格納容器ペネトレーション部遠隔式ショートアーク自動溶接、及び使用済み燃料プールなどのライニング槽のワイヤベンディングミグ溶接の適用などについて次に述べる。

3.1 遠隔操作式配管自動ティグ溶接

主として一次系SUS304ステンレス鋼管の応力腐食割れの積極的な予防措置として、数年来行なわれている既設プラントの配管改良工事（炭素鋼配管又は低炭素ステンレス鋼配管への取替え）は、プラントを停止して作業を行なうもので、原子炉格納容器内での作業が多く、従来の手溶接作業では、次に述べるような問題点が挙げられる。

- (1) 放射線下の作業となり、接近が困難である。
- (2) 放射線量によっては、実質的な作業は15～30分/日・人程度を管理の目安として行なう場合が多く、作業信頼性、品質確保のため、多くの熟練溶接士を必要とする。他方、その確保が困難である。
- (3) 作業スペースが狭く、作業条件が悪い。

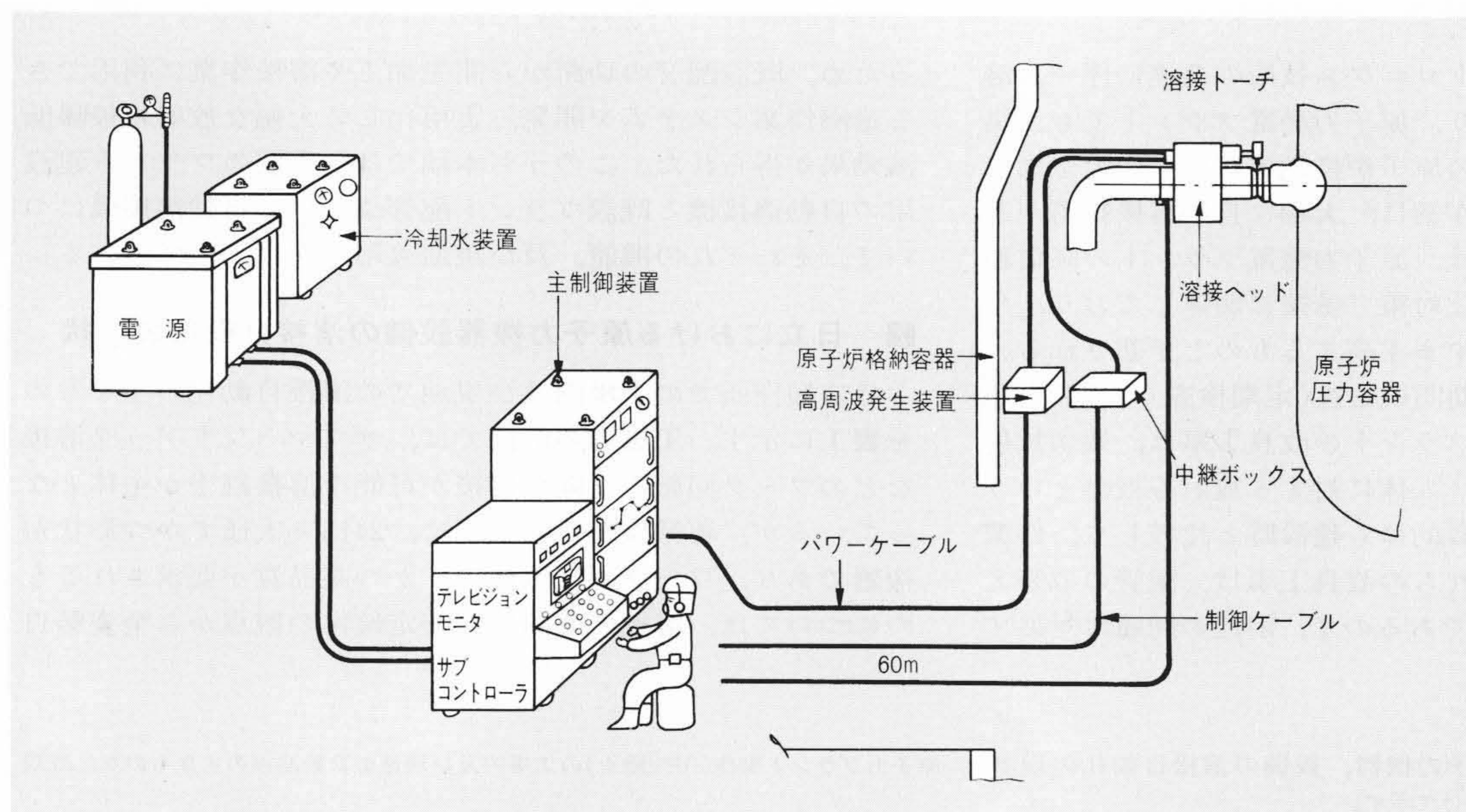


図1 遠隔操作式配管自動溶接システム概念図

高放射線レベルの格納容器内配管に溶接ヘッドをセットした後、すべての溶接操作を格納容器外の低放射線レベルの区域から行なっている状況を示す。

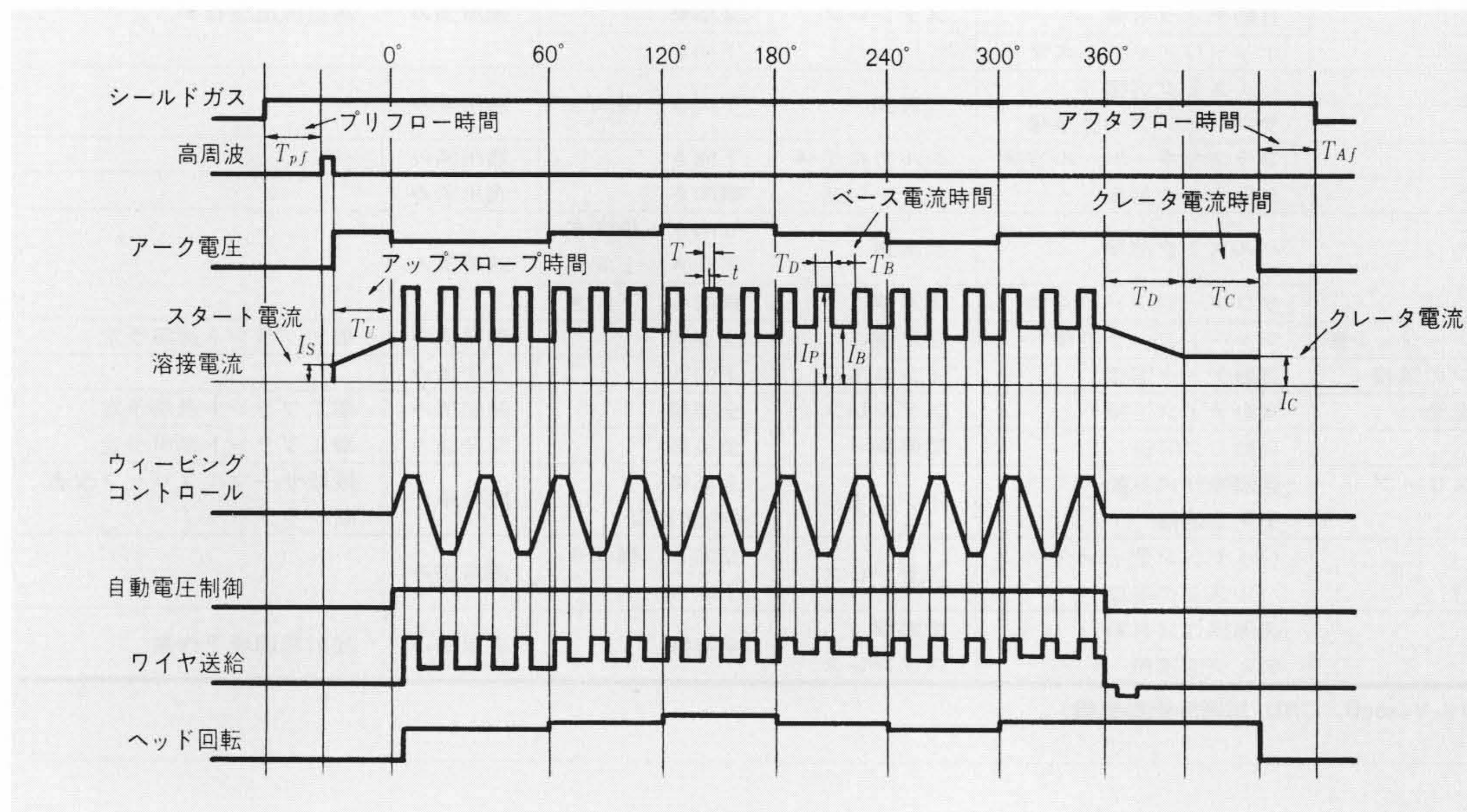


図2 溶接制御シーケンス
溶接スタートボタンを押すと、自動的に本シーケンスに示すプリセット溶接条件に従い溶接が進行し、ヘッドが1回転すると自動的にクレータ処理を行ないアークがストップする。

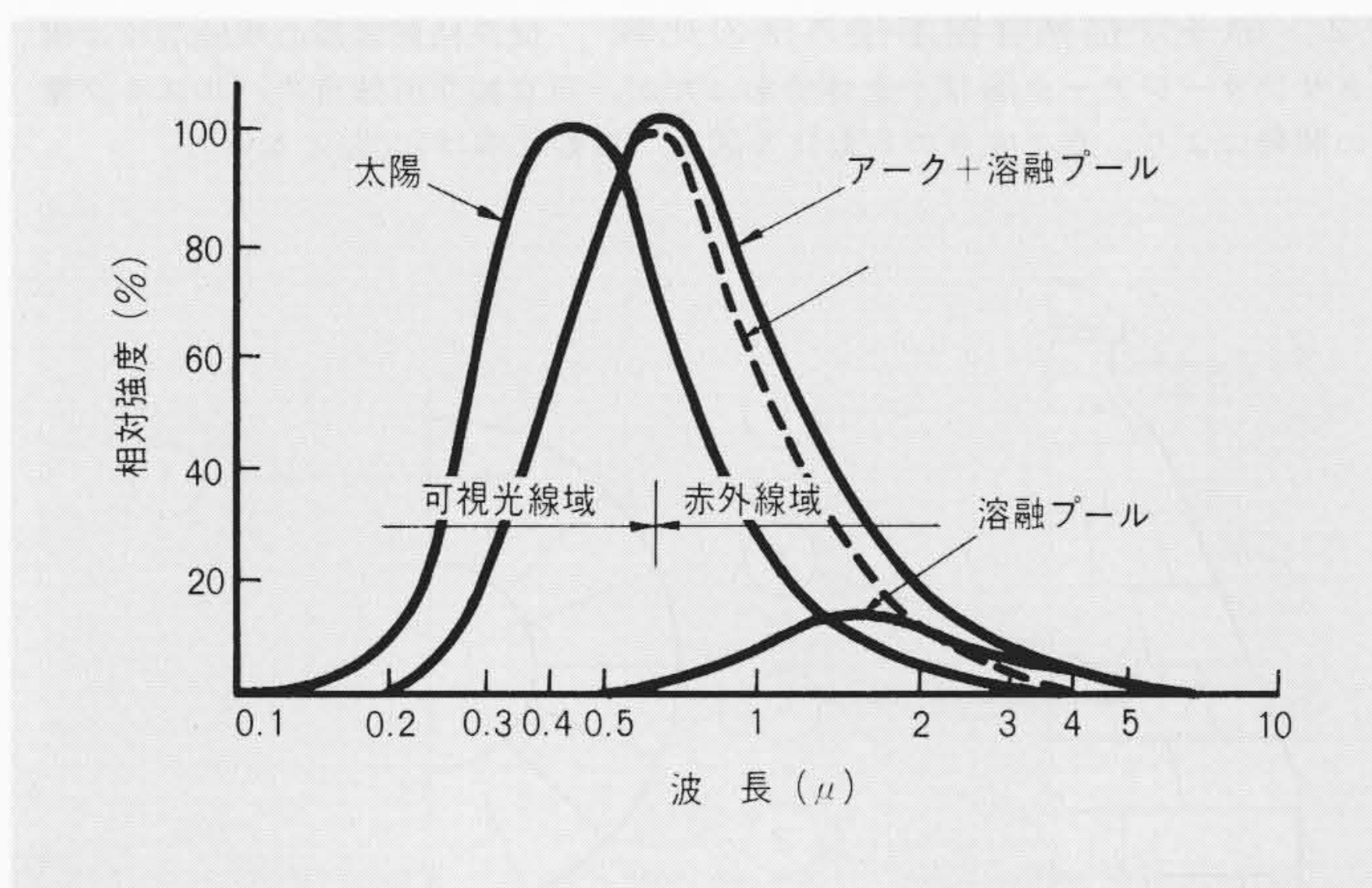


図3 太陽光と溶接時の光の波長分布 溶接アーキ及び溶融プールからの光は赤外線域に偏しており、このため、この部分で感度の高いシリコンビジコンを視覚装置の撮像管として用いている。

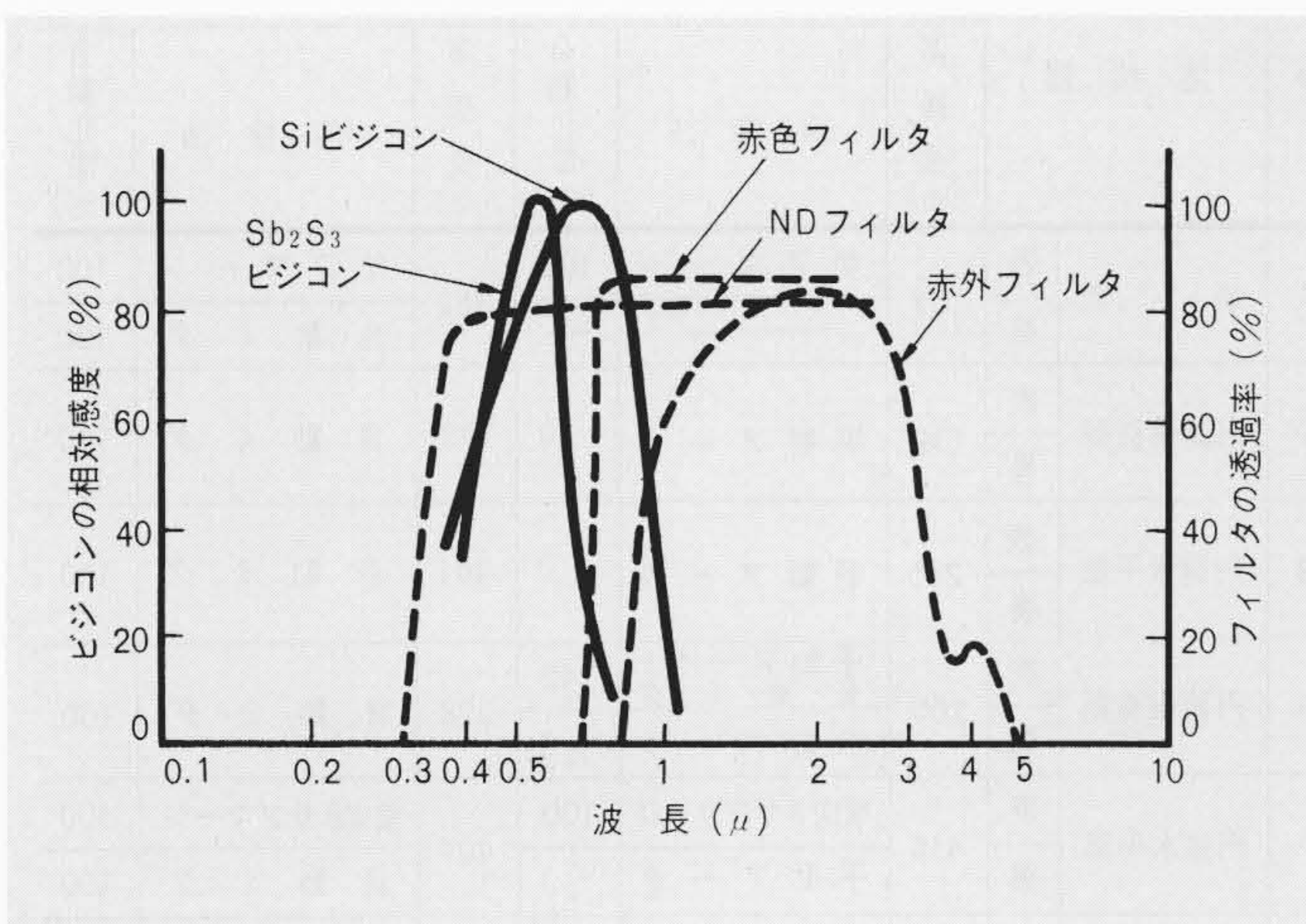


図4 ビジコン及びフィルタの波長特性 ビジコンの波長に対する相対感度を示すもので、図3と合わせてビジコンが溶接アーキのモニタリングに適していることが分かる。

そこで、放射線下での溶接作業で、溶接士が短時間作業を行なって別人と交替するために発生する溶接品質のばらつきを抑えるため、遠隔操作式配管自動ティグ溶接機を開発実用化し、既に国内の日立製作所関連プラントに適用され、大きな効果を挙げている。そのシステムの概要を図1に示す。本装置の特長は次に述べるとおりである。

- (1) デジタル方式で制御装置にプリセットされた円周6分割の全姿勢溶接条件に従って溶接が行なわれ、かつ溶接条件はすべてフィードバック制御されるので、再現性のある安定した溶接が可能である。図2に溶接制御シーケンスを示す。
- (2) ローパルスティグ溶接の採用により、低入熱、安定溶け込みの高品質な溶接が可能である。
- (3) 溶接ヘッドにテレビジョンカメラを搭載しており、溶接状態が60m以上離れた格納容器外のオペレータ室でテレビジョンモニタに映し出され、これによりヘッドの取付け以外はすべて遠隔操作により初層から最終層までの溶接が行なえる。ヘッドに搭載された小形テレビジョンカメラの撮像管には、図3に示すように、アーキ及び溶融プールからの光線が赤外線領域に偏していることから、図4に示す長波長域の感度の高いシリコンビジコンを選んでいるため、極めて良質な画像

が得られる。図5は視覚装置の構造であるが、非常にコンパクトにまとまっており、溶接ヘッドに搭載しても他との干渉もなく好結果を得ている。図6は、この視覚装置を通してテレビジョンモニタに映し出された溶接アーキ、溶融プール及び溶接ビードを示し、開先形状を含めて鮮明にとらえている。

(4) 溶接ヘッドは、ガイドリング上に溶接ユニット、テレビジョンカメラ、ワイヤ送給ユニット及びヘッド駆動ユニットをセットオンする方式を採用しており、ガイドリングは2サイズごとに取り替えるが、各ユニットは全サイズ共用である。ヘッドの取付けに要する時間は短時間で、作業性は良好である。図7(a)に突合せ溶接用ヘッドを、同図(b)に管内面肉盛溶接用ヘッドを示す。

(5) パルス電流とウィビングパターン及びワイヤ送給とが完全に同期しており、また、日立製作所独自のAVC(自動電圧制御)方式により、総合的には従来の手溶接(被覆アーキ溶接)に勝る高効率溶接装置となっている。

(6) 応力腐食割れ防止対策の管内面肉盛溶接と突合せ溶接が、同一の電源、制御装置で可能なように設計されており、応用範囲が広い。

(7) 溶接作業は、正転、逆転とも可能で、これは特に初層裏

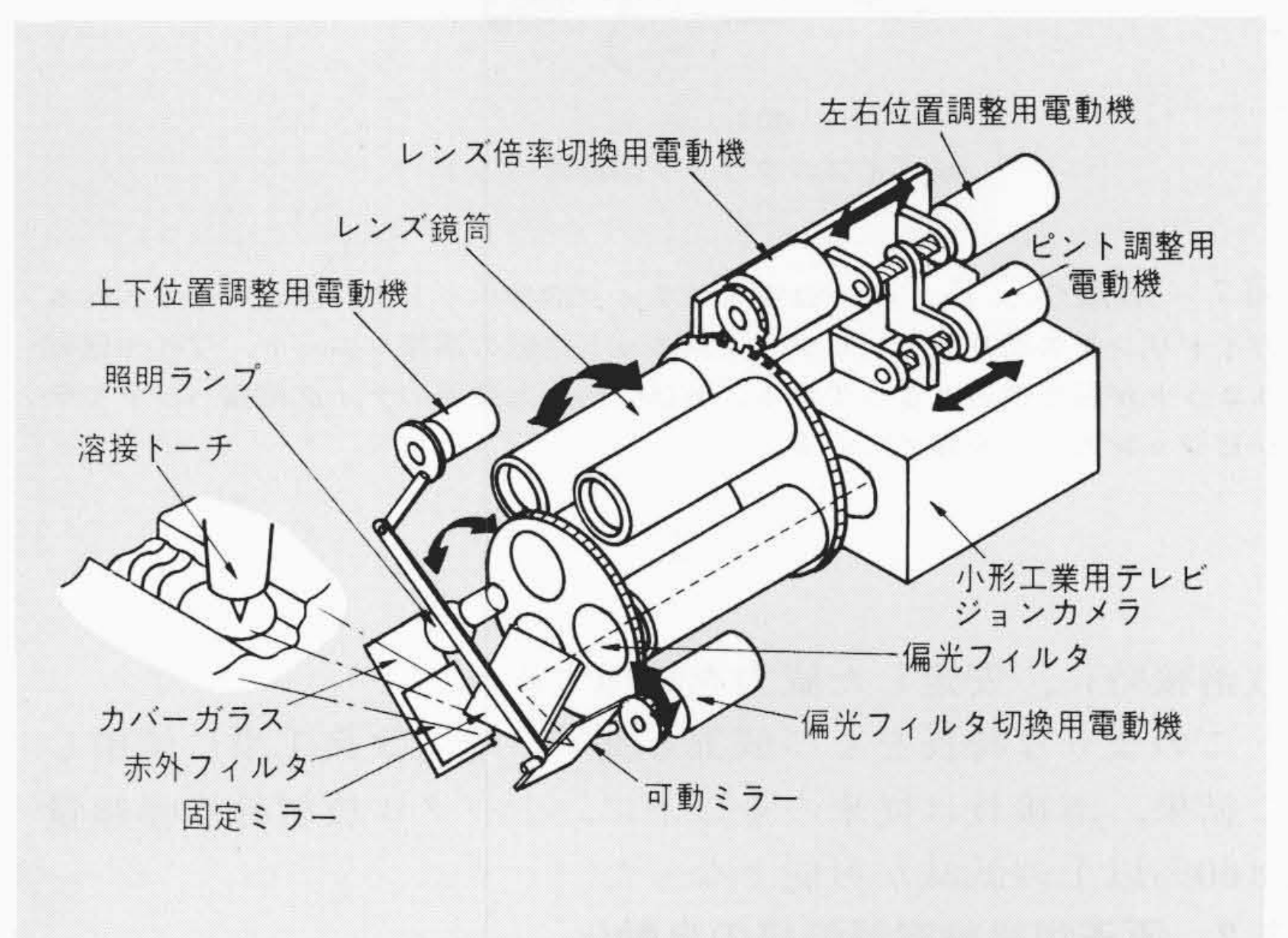


図5 視覚装置の構造 ミラー、赤外フィルタ、照明ランプ、レンズ鏡筒、小形工業用テレビジョンカメラ及び電動機をコンパクトにまとめており、溶接ヘッドに搭載しても周囲との干渉の問題がない。



図6 テレビジョンモニタによる溶接状況の再現 溶接アーキ、溶接金属、溶融プール、開先エッジ部及び電極が見事にモニタ用テレビジョンにとらえられており、これにより遠隔溶接が可能となった。

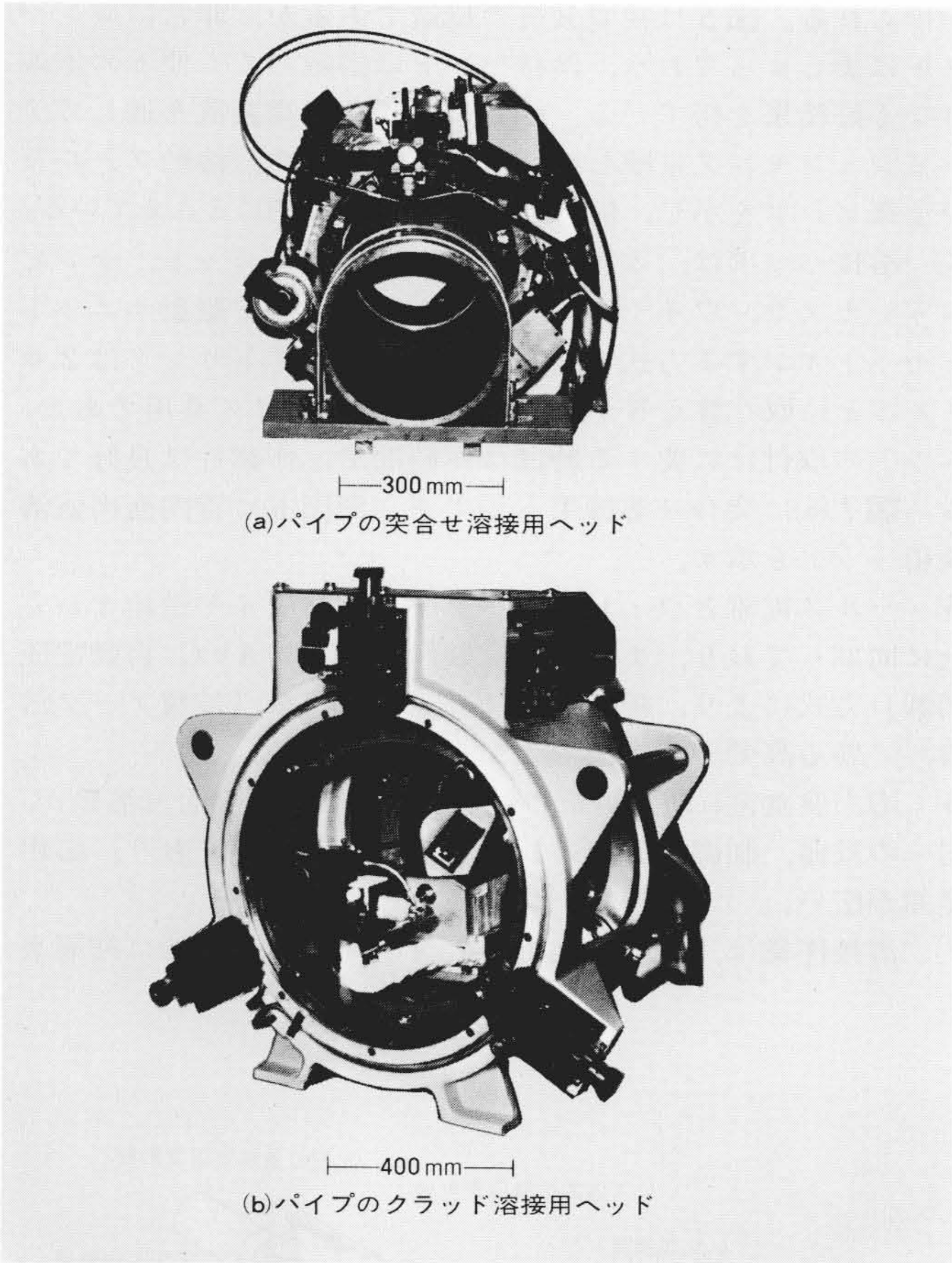


図7 溶接ヘッド (a)は突合せティグ溶接ヘッドで、固定セットされるガイドリングの周りをテレビジョンユニット搭載の溶接ユニット、ワイヤ送給ユニットが回る構造となっている。(b)は管内面肉盛用のティグ溶接ヘッドでテレビジョンカメラを備えている。

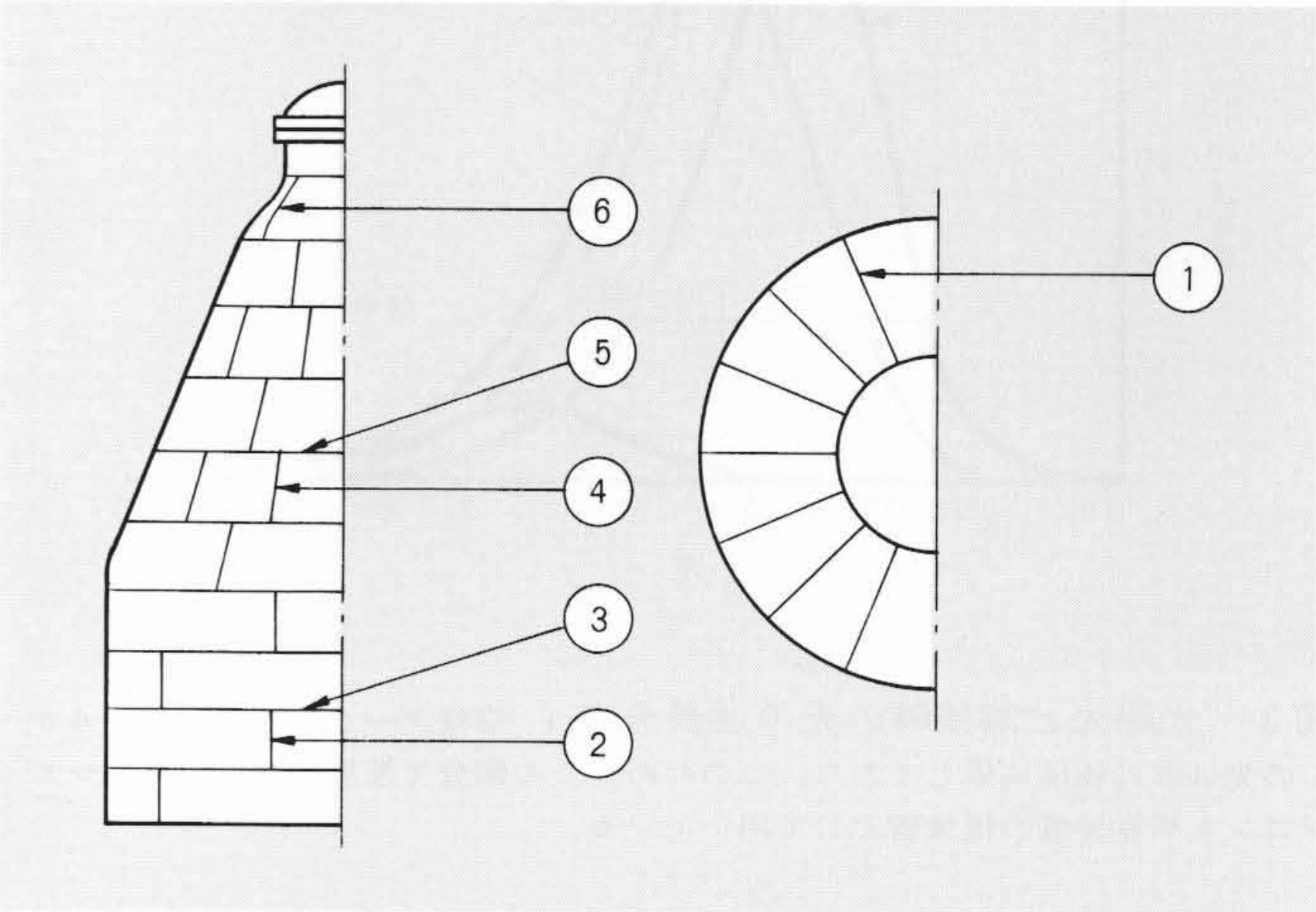
波溶接時に、安定した威力を発揮する。
このような特長をもつ装置を実際に配管改良工事に使用した結果、溶接員は従来の $\frac{1}{2}$ 以下に、トータル放射線被曝線量は60%以上の低減が可能となった。

3.2 原子炉格納容器溶接の自動化

格納容器のような大型の構造物の溶接では、現地のプラント建設期間の短縮のため、溶接効率の良い自動溶接の開発が望まれている。また、使用材料がSGV50などの高張力鋼も一部採用されるようになり、そのため破壊靱性を考慮した溶接品質が要求されるようになり、今まで進めてきた格納容器の現地溶接自動化を更に進めることになった。表2に1,100MWe級MARK II型原子力格納容器に対する溶接方法と自動化率の比較を示す。この格納容器は底部ライナ、円筒部(3段)、円錐部(5段)、球形部及び上部ヘッドから構成され、底部ライナは狭隘部のため人間工学の見地から、図8に示すように上向き姿勢でパルスミグ溶接ヘッドにテレビジョンカメラを搭載し、アークを常に監視しながら遠隔操作して溶接を行なっている。その他、円筒部、円錐部については、図9に示すようなパルスミグ溶接と従来のサブマージアーク溶接との組合せで施工される。

従来の現地自動化は、主として横向きサブマージアーク溶接であったが、今回日立製作所で新たに開発したパルスミグ溶接電源(パルスエース)により、立て向き溶接線の完全自動化を図ることができた。日立パルスミグ溶接電源が従来のものより優れている点は、パルス波形がシャープで幅の狭いパ

表2 原子炉格納容器溶接方法の比較 従来格納容器の現地溶接は横向きサブマージアーク溶接が主体であったが、日立製作所独自のパルスミグ電源の開発により、立て向きの自動化を図り、自動化率は100%となった。



No.	溶 接 部*		従 来 法			自動化の現状		
			溶 接 長 (m)	溶 接 法	自 動 化 率 (%)	溶 接 長 (m)	溶 接 法	自 動 化 率 (%)
1	底 部	表	107	サ ブ マ ー ジ	100	362	サ ブ マ ー ジ	100
		裏		—	—		自 動 ミ グ	100
2	円錐垂直部	表	139	手 動 ア ー ク	0	108	自 動 ミ グ	100
		裏						
3	円筒水平部	表	285	手 動 ア ー ク	0	461	自 動 ミ グ	100
		裏						
4	円筒垂直部	表	266	手 動 ア ー ク + 自 動 ミ グ	42	228	自 動 ミ グ	100
		裏		手 動 ア ー ク	0			
5	円錐水平部	表	415	横 向 き サ ブ マ ー ジ	100	407	横 向 き サ ブ マ ー ジ	100
		裏		手 動 ア ー ク	0		自 動 ミ グ	100
6	球 形 部	表	—	—	—	181	自 動 ミ グ	100
		裏						
計			1,212	—	30	1,747	—	100

注：*は、主な溶接継手を示し、貫通部及び構造部の溶接継手は除く。

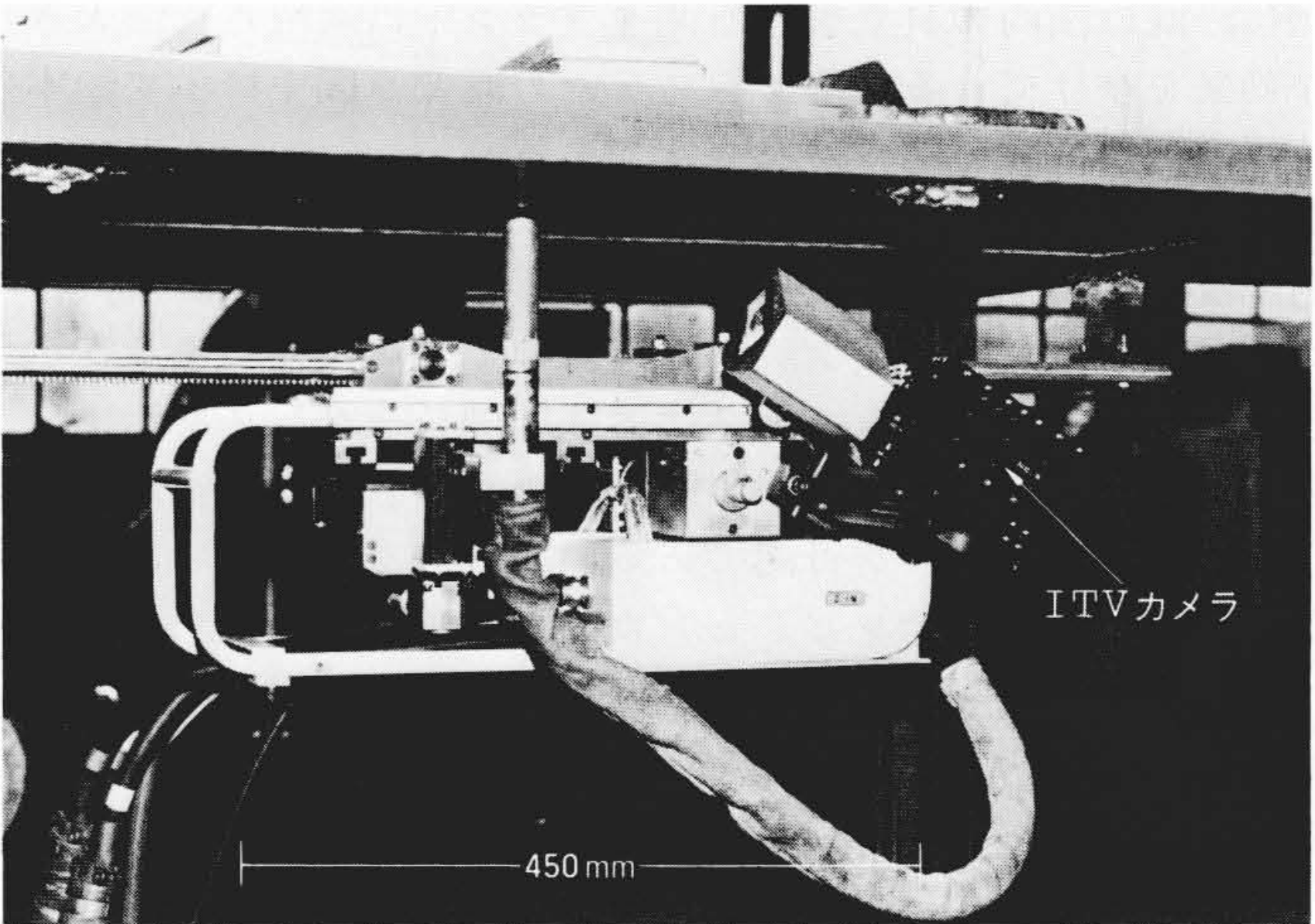


図8 底部ライナ上向き溶接用ヘッド 狭隘で閉じられた空間の溶接に対し、手溶接時の溶接ヒューム吸引防止などの人間工学的見地から、このようなテレビジョンカメラ付自動溶接機(ミグ溶接)を採用し、遠隔化を図っている



図9 横向きパルスミグ現地自動溶接 日立製作所で独自に開発したパルスミグ電源により、安定で効率の良い横向き及び立て向き溶接自動化が可能となった。本図は現地での施工状況を示す。

ルス波形が得られること、従来から問題となっていた低電圧での小電流パルスの場合のアーク切れ現象を完全に防止する特性をもっていることであり、極めて溶接効率の高い安定した溶接方法である。図10に本方法により得られた立て向きビード外観を示す。溶接のままだでも十分に非破壊検査が可能なビード外観が得られている。また、格納容器の現地溶接作業が屋外となるため、風、雨などの気象条件の影響を受けやすい。そのため作業は、図11に示すような防風箱の中で行なわれる。

3.3 その他の自動溶接システム

その他の現地自動溶接システムとしては、図12に示す格納容器ペネトレーション部の自動溶接装置や、図13に示す使用済み燃料貯蔵プールなどのライニング槽の自動溶接装置がある。ペネトレーション自動溶接装置は全姿勢自動溶接となるため、ショートアーク溶接方式を採用しており、溶接はマイクロコンピュータにインプットされた溶接アルゴリズムに従い行なわれ、また、開先のなれば開先のテレビジョン画像をコンピュータで処理し、制御する方式を採用している。一方、使用済み燃料貯蔵プールなどのライニング槽の自動溶接には、日立製作所で開発したワイヤベンディング機構による狭開先ミグ溶接法を用い、効率の良い安定した溶接結果が得られている。

その他、工場内製作の燃料チャネルボックスのプラズマキーホール溶接、使用済み燃料ラックの自動ティグ溶接も信頼性の向上に大きく寄与している。図14は、使用済み燃料ラックへの6電極同時自動ティグ溶接の適用状況を示したものである。

4 放射線被曝低減用配管自動加工機の開発と適用の現状

遠隔操作式配管自動ティグ溶接機と同様に、既設プラントの放射線下での配管改造作業の被曝低減を目的として、配管の自動プラズマ切断装置、遠隔操作式自動開先加工機を作業

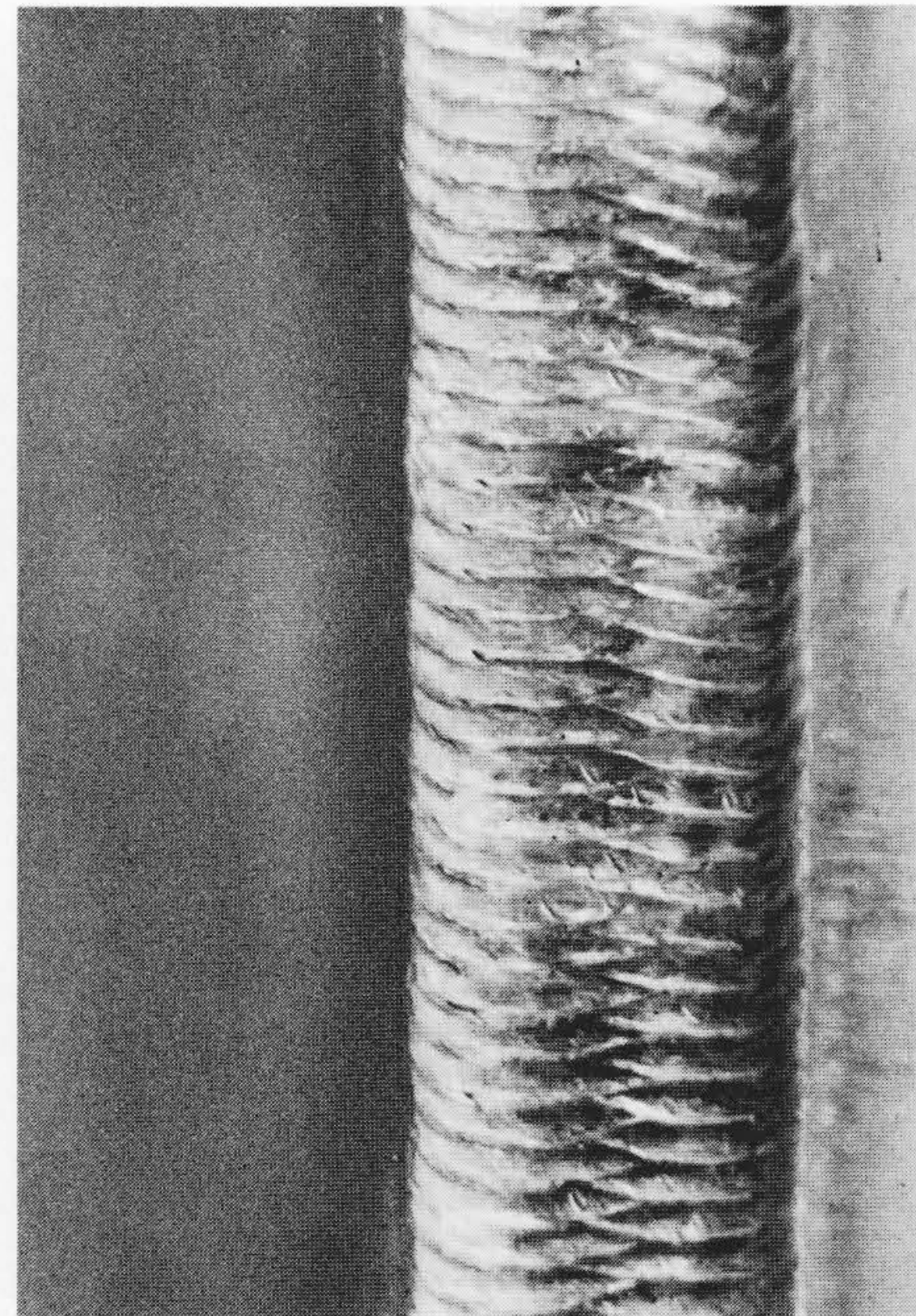


図10 パルスミグ溶接による立て向きビード外観 極めて美しいビード外観が得られており、溶接のまま放射線検査や液体浸透探傷検査が可能となった。

—25～30mm—

の一連の流れとして開発し、従来の作業に比べ50%以上の放射線被曝低減を達成している。自動プラズマ切断装置は、プラズマトーチを駆動リングに取り付けて自動回転切断するものであり、現状ではテレビジョンカメラシステムなどの遠隔化は図られていないが、技術的には十分可能であり、近い将来遠隔化を進める方針である。開先加工機については、マイクロコンピュータを組み込んだNC(数値制御)加工装置を試

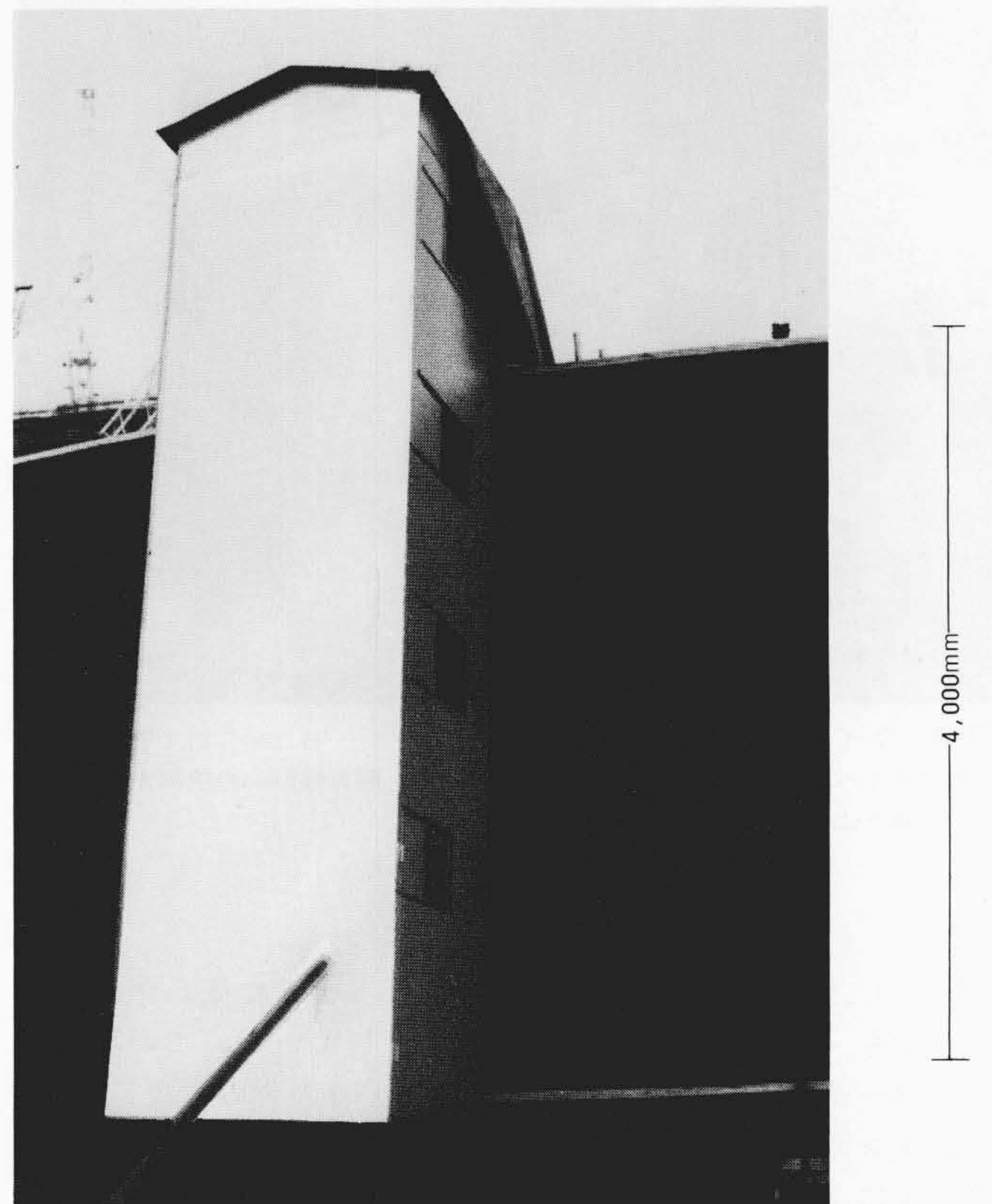


図11 防風箱外観 格納容器の現地溶接は屋外作業となるため、雨、風など気象条件に対する対策が必要である。溶接は本図のような防風箱の中で施工される。

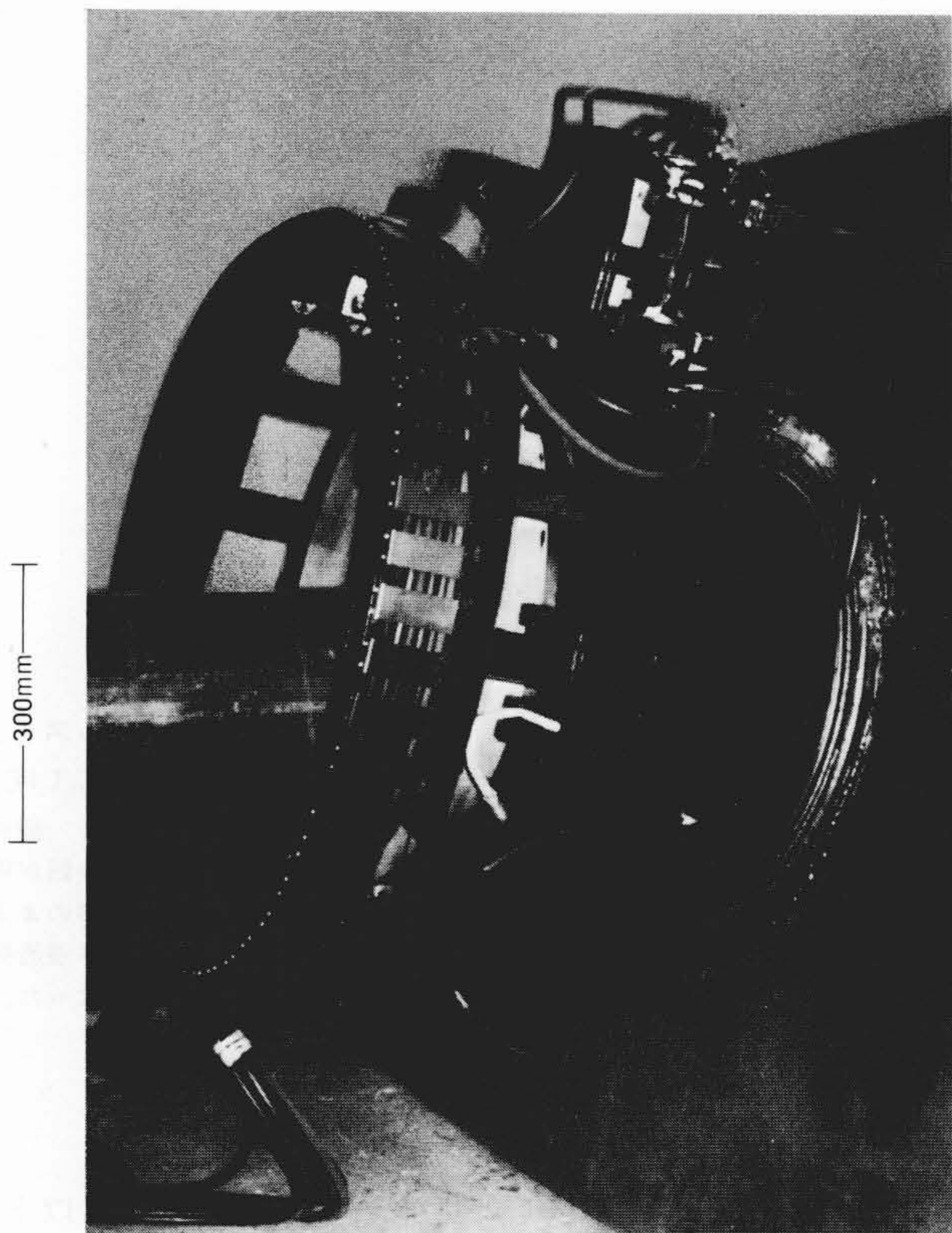


図12 ペネトレーション自動溶接機ヘッド(テレビジョンカメラ搭載) 格納容器ペネトレーション部の溶接は、特殊な形状の全姿勢溶接となるため、開先ならい及び溶接条件の制御は溶接アルゴリズムに従い、マイクロコンピュータにより行なっている。

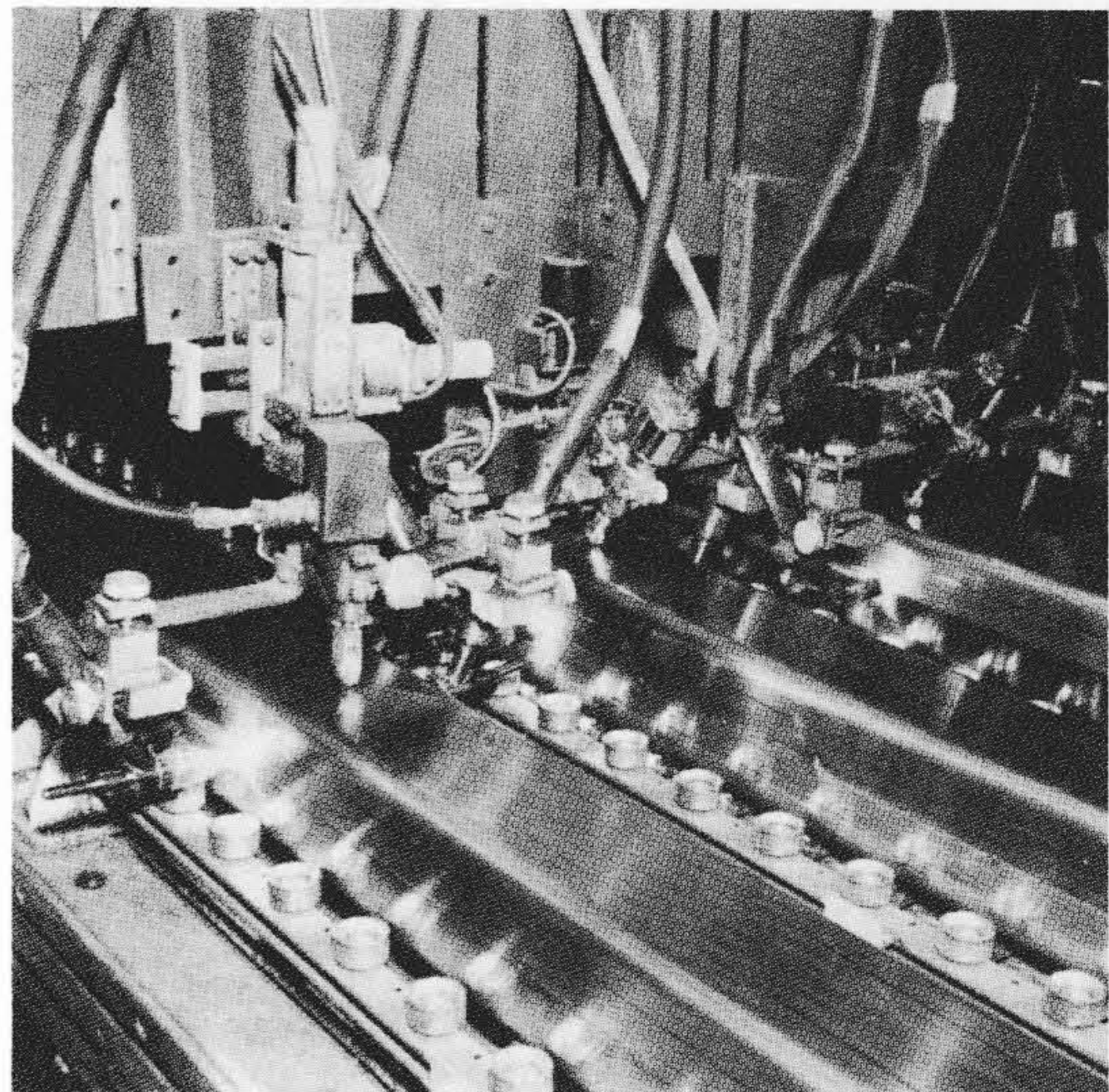
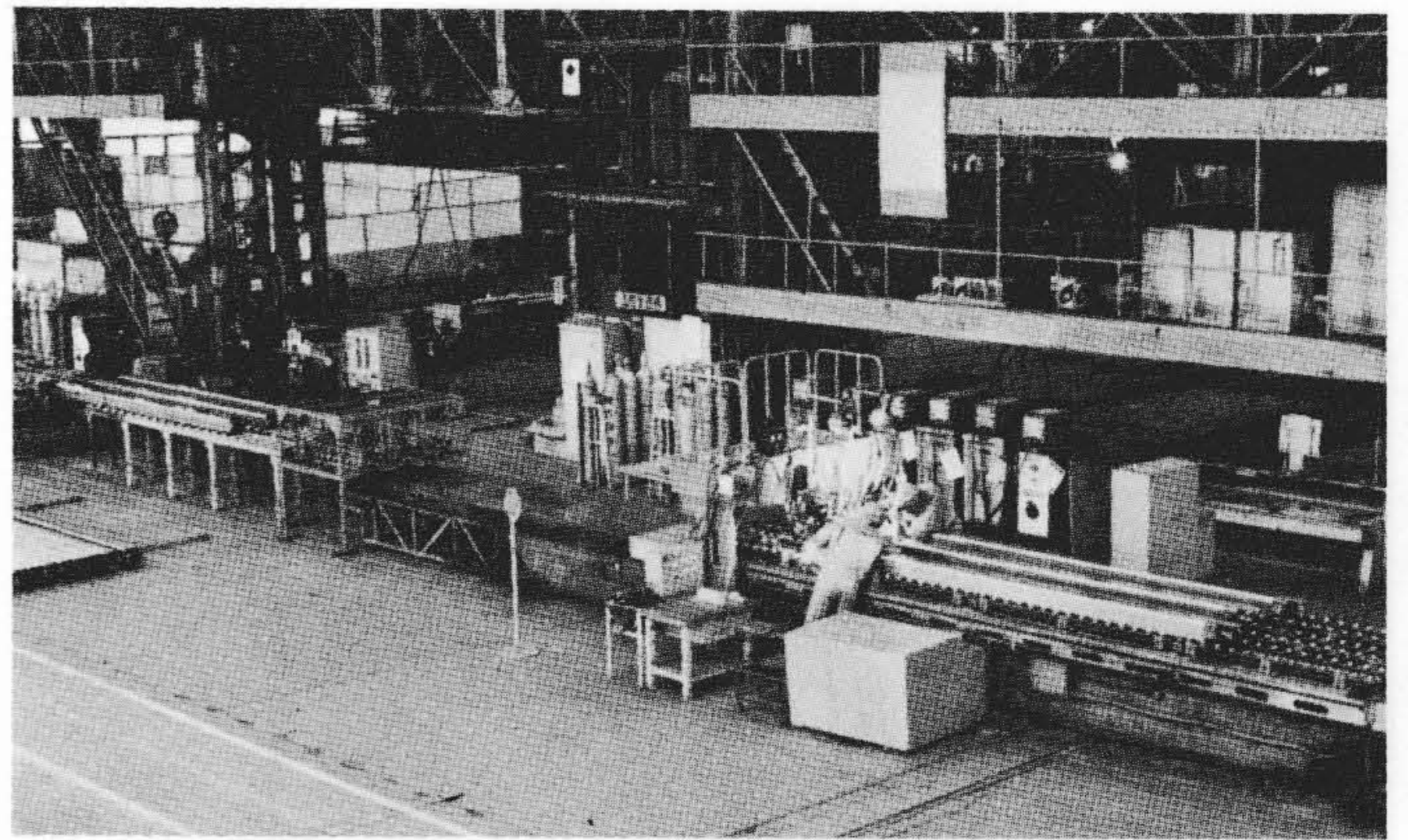


図13 ライニング現地自動溶接(横向き) 日立製作所で独自に開発したワイヤベンディング方式によるミグ溶接で、開先幅6mmの狭開先溶接を行ない効率を上げている。

作開発し、溶接と一部同時作業を行なうような極めて厳しい条件でも、ノイズ対策を完璧なものとしている。この加工機はパワーモータ、サウンドセンサ(加工時の音の監視)、テレビジョンカメラによる切削状況の監視、グラフィックディスプレイによる加工プログラムの確認、及び作業進行状況の確認が行なえるもので、遠隔加工機として抜群の性能をもっている。

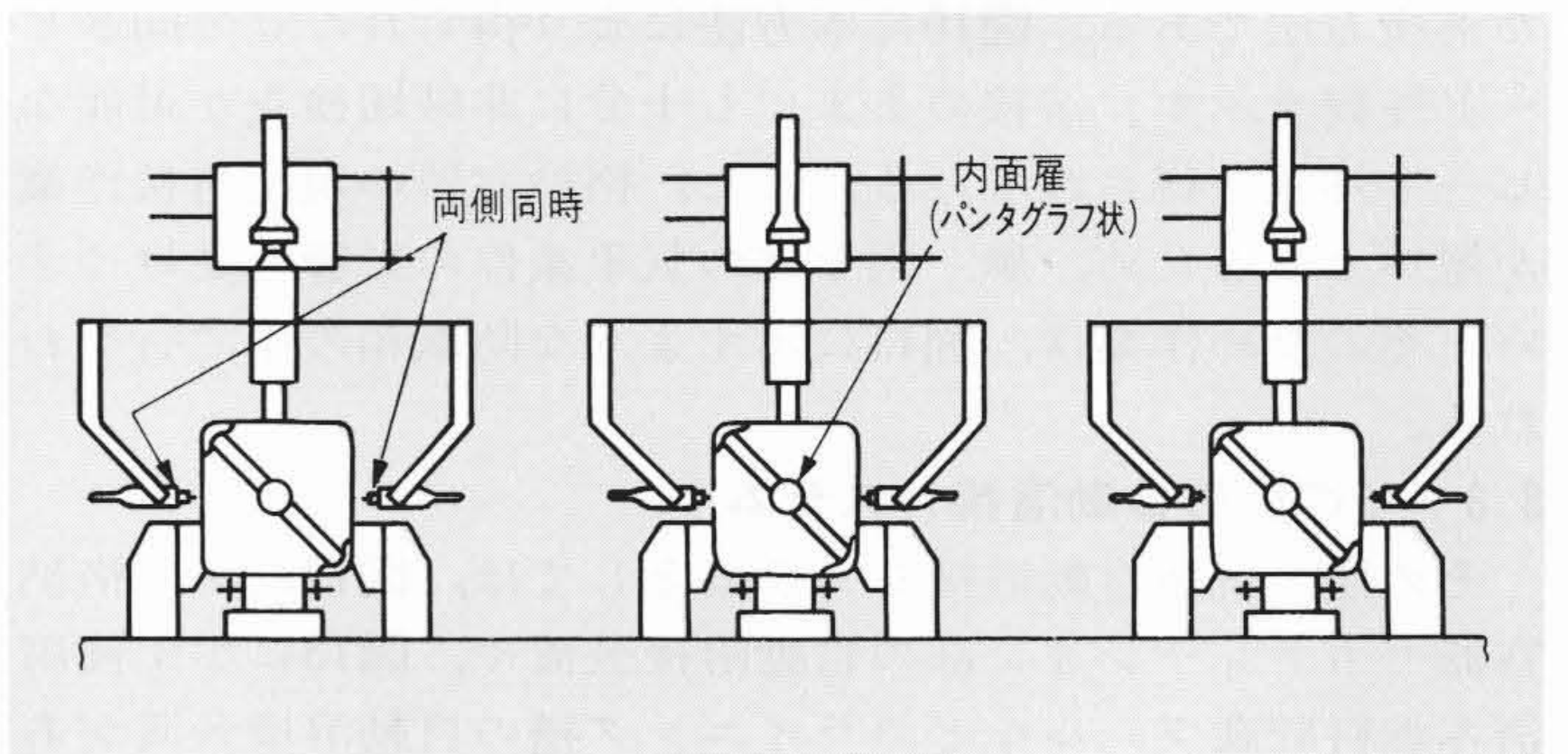


図14 6電極同時自動ティグ溶接による使用済み燃料ラックの溶接 6電極同時自動ティグ溶接による使用済み燃料ラックの製作は、効率向上と変形防止に大いに貢献している。

5 結 言

高信頼性、高品質及び高効率の観点から、原子力発電プラント用機器の溶接自動化を大幅に採用してきたが、本稿では、原子炉圧力容器を除く原子力機器及び配管を対象として、最近開発し実効果を挙げている自動溶接を中心に紹介した。

特に、放射線下での被曝低減を目的として開発した切断、開先加工及び溶接から成る遠隔式配管加工システムは、顕著な効果を挙げており、今後もその適用拡大が予想される。

原子力発電プラント全体としては、自動化、機械化されるべき対象がまだまだ残されており、特に現地作業にその割合が多い。今後、更に研究を重ね、高品質、高効率及び放射線被曝低減を目的として、社会のニーズに合わせた溶接の自動化を進めていく考えである。