

JAERI-M
93-206

F P ガス圧力計再計装技術の開発(II)
—遠隔操作による溶接組立技術—

1993年10月

大島 邦男・清水 道雄・田山 義伸・松本 正勝
河村 弘・石井 忠彦・相沢 静男・中川 哲也
佐藤 均・酒井 陽之

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1993

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 日立高速印刷株式会社

FP ガス圧力計再計装技術の開発 (Ⅱ)

— 遠隔操作による溶接組立技術 —

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

大島 邦男・清水 道雄・田山 義伸・松本 正勝
河村 弘・石井 忠彦・相沢 静男・中川 哲也
佐藤 均・酒井 陽之

(1993年9月21日受理)

JMTRでは、1985年からFPガス圧力計再計装技術の開発を開始して以来、再計装機器の設計・製作及びその炉内性能試験、ホットセル内での照射済燃料棒と再計装機器との組立技術及びキャプセルへの挿入技術の開発を行ってきた。1990年には、これらの技術により軽水炉で照射された2本の燃料棒にそれぞれ再計装機器を計装し、JMTRで出力急昇試験を実施した。この結果、FPガス圧力計は、燃料棒の出力変動に伴う内圧変化を連続して測定し、所期の目的を達成した。現在、JMTRにおいて本技術を用いたFPガス圧力計再計装燃料棒での出力急昇試験が進められている。

本報告では、これらの技術開発全体の概要を述べるとともに、ホットセル内での遠隔操作による燃料棒と再計装機器との溶接組立技術の開発について詳細に述べる。

Development of Pressure Transducer
Re-instrumentating Technique (II)
- Remote Welding and Fabrication Techniques -

Kunio OHSHIMA, Michio SHIMIZU, Yoshinobu TAYAMA
Masakatsu MATSUMOTO, Hiroshi KAWAMURA
Tadahiko ISHII, Shizuo SOUZAWA, Tetsuya NAKAGAWA
Hitoshi SATOU and Haruyuki SAKAI

Department of JMTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received September 21, 1993)

Development of FP gas pressure transducer re-instrumentating technique have been conducted since 1985. The initial stage, the followings have been made : design and fabrication of re-instrumentation device and in pile performance test ; development of remote welding and fabrication technique of re-instrumentating device to irradiated fuel rod in the hot cell ; and remote inserting technique of fuel rod into capsule. In 1990, a power ramping test was carried out instrumentating two irradiated fuel rod with re-instrumentated devices respectively. As a result of performance test, it was found that FP gas pressure transducer had been successively indicating the inner pressure corresponding to linear heat rate of fuels. At present, the power ramping test adopting these techniques acquired is on-going in JMTR (Japan Materials Testing Reactor).

Keywords : Remote Technique, Re-instrumentation, FP Gas Pressure Transducer, Welding, Irradiated Fuel Rod, Power Ramping Test

目 次

1. 序論	1
2. FP ガス圧力計再計装技術の概要	1
3. 溶接装置の構成	3
3.1 溶接機	3
3.2 溶接チャンバー	4
3.3 真空排気装置	5
4. 溶接試験	5
4.1 溶接条件の設定	5
4.2 溶接試験	6
4.3 曲がり修正試験	8
4.4 溶接試験結果	8
5. 再計装燃料棒の組立	9
6. 遠隔操作による溶接試験技術の開発結果及び評価	11
7. 結言	11
謝辞	11
参考文献	12
付録1 溶接チャンバー内トーチの心出し方法	39
付録2 溶接条件の決定方法	40
付録3 各溶接条件の溶接機盤面設定	43

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Re-instrumenting Technique for Irradiated Fuel Rods	1
3. Development of Welding System	3
3.1 Power Supplier	3
3.2 Welding Chamber	4
3.3 Vacuum Exhaust Unit	5
4. Welding Tests	5
4.1 Welding Conditions	5
4.2 Welding Performance	6
4.3 Straining of Curved Rods	8
4.4 Result of Welding Tests	8
5. Assembling for Re-instrumenting Fuel Rods	9
6. Results and Evaluation	11
7. Conclusion	11
Acknowledgment	11
Reference	12
Appendix 1 Centering Method of Welding Torch	39
Appendix 2 Fixing Welding Conditions	40
Appendix 3 Welding Conditions	43

1 序 論

軽水炉燃料の研究においては、安全性及び経済性の観点から、高燃焼度燃料のふるまい^{1) 2) 3)}の究明が一層重要になるものと考えられる。しかし、現在のところ、高燃焼度燃料については十分な照射データが得られていない。従って、これらのデータを取得するために、高燃焼度燃料の再照射試験に対する要求が高まっている。

上記の試験で採取すべき重要なデータは、再照射試験中の燃料のふるまい、すなわち燃料からのF Pガス放出量及び燃料中心温度、燃料棒内に放出されてくるF Pガス成分等である。これらのデータを得るため、再照射試験に先立って、燃料棒に計装する内圧計や温度計、あるいはガスセンサー等の開発を進めるとともに、高い放射能を有する高燃焼度燃料への再計装技術を確立することが必要となった。

以上の状況から、発電炉等で照射された燃料棒にF Pガス圧力計を再計装し、出力急昇試験中の燃料棒の内圧を測定するためのF Pガス圧力計再計装技術の開発が開始された。

本開発の目的は、

- (1) 技術開発に必需となるF Pガス圧力計・穿孔装置・装着装置からなる再計装機器の開発
- (2) ホットセル内での遠隔操作による再計装機器と照射済燃料棒との溶接技術の開発
- (3) 再計装後の燃料棒のキャプセルへの挿入技術の開発

を通して一連の再計装技術を確立することである。

本技術開発は、再計装機器の試作から開始し、最終的に開発した再計装機器の炉内性能試験を実施した。その後、JMTRでの総合確認試験として、実炉で照射した燃料棒に再計装機器を計装し、その再計装燃料棒をBOCAキャプセル⁴⁾に挿入して出力急昇試験を実施した。この結果、F Pガス圧力計は、照射中の燃料棒の内圧変化を連続して測定可能なことが確認された。

また、装着装置の技術は、現在開発を進めている燃料中心温度計再計装技術開発や、今後開発を進めるガスセンサー等の再計装技術開発に役立つ。

2 F Pガス圧力計再計装技術の概要

再計装した照射済燃料棒（以下、再計装燃料棒という）についてJMTRで出力急昇実験を行う場合、まず再計装燃料棒を沸騰水キャプセル（以下、BOCAキャプセルという）に挿入し、これをJMTRに設置された出力急昇試験設備⁵⁾に装荷して実施する。JMTR出力急昇試験設備の概略構造を Fig. 1 に示す。この設備は、炉心部に設けた中性子吸収材であるヘリウム-3ガスのスクリーンの圧力を変化させることにより、照射試験中のBOCAキャプセル内の燃料棒の出力を変化させることができる。

また、再計装燃料棒を装荷したBOCAキャプセルの概略構造を Fig. 2 に示し、その詳細構造を Fig. 3 に示す。BOCAキャプセル内部の冷却材は、BWR冷却水条件の圧力及び温度に保持される。穿孔装置、F Pガス圧力計⁶⁾、装着装置からなる再計装機器は、燃料棒の上部に取り付けられる。

F Pガス圧力計再計装機器の概略構造を Fig. 4 に、再計装機器の詳細構造を Fig. 5 に示す。再計装機器の開発では、BOCAキャプセルの構造上の制約から、再計装機器の外径と全長がそ

1 序 論

軽水炉燃料の研究においては、安全性及び経済性の観点から、高燃焼度燃料のふるまい^{1) 2) 3)}の究明が一層重要になるものと考えられる。しかし、現在のところ、高燃焼度燃料については十分な照射データが得られていない。従って、これらのデータを取得するために、高燃焼度燃料の再照射試験に対する要求が高まっている。

上記の試験で採取すべき重要なデータは、再照射試験中の燃料のふるまい、すなわち燃料からのF Pガス放出量及び燃料中心温度、燃料棒内に放出されてくるF Pガス成分等である。これらのデータを得るため、再照射試験に先立って、燃料棒に計装する内圧計や温度計、あるいはガスセンサー等の開発を進めるとともに、高い放射能を有する高燃焼度燃料への再計装技術を確立することが必要となった。

以上の状況から、発電炉等で照射された燃料棒にF Pガス圧力計を再計装し、出力急昇試験中の燃料棒の内圧を測定するためのF Pガス圧力計再計装技術の開発が開始された。

本開発の目的は、

- (1) 技術開発に必需となるF Pガス圧力計・穿孔装置・装着装置からなる再計装機器の開発
- (2) ホットセル内での遠隔操作による再計装機器と照射済燃料棒との溶接技術の開発
- (3) 再計装後の燃料棒のキャプセルへの挿入技術の開発

を通して一連の再計装技術を確立することである。

本技術開発は、再計装機器の試作から開始し、最終的に開発した再計装機器の炉内性能試験を実施した。その後、JMTRでの総合確認試験として、実炉で照射した燃料棒に再計装機器を計装し、その再計装燃料棒をBOCAキャプセル⁴⁾に挿入して出力急昇試験を実施した。この結果、F Pガス圧力計は、照射中の燃料棒の内圧変化を連続して測定可能なことが確認された。

また、装着装置の技術は、現在開発を進めている燃料中心温度計再計装技術開発や、今後開発を進めるガスセンサー等の再計装技術開発に役立つ。

2 F Pガス圧力計再計装技術の概要

再計装した照射済燃料棒（以下、再計装燃料棒という）についてJMTRで出力急昇実験を行う場合、まず再計装燃料棒を沸騰水キャプセル（以下、BOCAキャプセルという）に挿入し、これをJMTRに設置された出力急昇試験設備⁵⁾に装荷して実施する。JMTR出力急昇試験設備の概略構造をFig. 1に示す。この設備は、炉心部に設けた中性子吸収材であるヘリウム-3ガスのスクリーンの圧力を変化させることにより、照射試験中のBOCAキャプセル内の燃料棒の出力を変化させることができる。

また、再計装燃料棒を装荷したBOCAキャプセルの概略構造をFig. 2に示し、その詳細構造をFig. 3に示す。BOCAキャプセル内部の冷却材は、BWR冷却水条件の圧力及び温度に保持される。穿孔装置、F Pガス圧力計⁶⁾、装着装置からなる再計装機器は、燃料棒の上部に取り付けられる。

F Pガス圧力計再計装機器の概略構造をFig. 4に、再計装機器の詳細構造をFig. 5に示す。再計装機器の開発では、BOCAキャプセルの構造上の制約から、再計装機器の外径と全長がそ

それぞれ15mm, 300mm以下に制限され、かつ燃料棒と共に炉内に挿入されて中性子照射を受けるため、耐放射線性を要求されるとともに、照射済燃料棒と再計装機器の組立作業は、燃料棒が高い放射能を有することから、ホットセル内の遠隔操作によって行う必要があるなどの厳しい制約を受ける。再計装機器のうち、穿孔装置は、燃料棒内のガスを外に逃がさずにFPガス圧力計まで導くために、燃料棒端栓をアーク放電により孔を開けるように設計された。

穿孔装置の詳細を Fig. 6 に、完成した穿孔装置を Photo. 1 に示す。アーク放電による燃料棒端栓の穿孔方法は、他の方法例として穿孔部付近に設けたドリルによる穿孔方法と比較して、以下のすぐれた長所を有している。

- ① 構造が簡単で、しかも小型化が容易である。
- ② アークを用いるため、遠隔操作による穿孔が極めて容易である。
- ③ 孔開け時間は1秒と短く、かつ孔開け時の振動が無い。
- ④ アークで溶けた端栓部材は、重力により穴の下方に凝固するか、飛散した場合でもその殆どが飛散した周囲に固着するので、燃料棒内ギャップ等に入り込むおそれが無い。

さらに、装着装置は、再計装後の燃料棒をクイックジョイント方式により、ワンタッチでBOCAキャプセルに装着するもので、装着によってBWR冷却水条件の高温高圧水(7.3kg/cm²G, 280℃)を金属Oリングでシールするとともに、FPガス圧力計の計測信号線とBOCAキャプセル側の計測信号リード線を接続して照射中の圧力計測を可能にする。

このように、本技術の開発では、再計装機器の小型化を図るとともに、照射済燃料棒に遠隔操作により再計装機器を取り付ける作業を容易にするように設計することが重要な課題であった。

照射済燃料棒へのFPガス圧力計の再計装手順を Fig. 7 に、再計装手順の内容を以下に示す。

(1) 照射済燃料棒端栓の加工

最初に、燃料棒端栓の中ぐり加工を行う。加工目的は、その後の工程で行う端栓穿孔のために、端栓の肉厚を薄くしておくことである。端栓の肉厚は、穿孔能力を考慮して約1mmとする。端栓の加工は、遠隔操作技術開発の一環として、別途開発した端栓加工機を用いる。端栓加工機の寸法加工精度は±50μmである。

(2) 再計装機器の照射済燃料棒への溶接

穿孔装置、FPガス圧力計及び装着装置を一体にした再計装機器と燃料棒端栓とを溶接装置により溶接する。

(3) 燃料棒端栓の穿孔

穿孔装置内の電極と燃料棒端栓との間の約1mmのギャップに、外部から電流を流すことによりアークを生じさせ、このアークにより端栓の中央付近を溶融させて穴をあける。この結果、燃料棒内のFPガスを外部に漏洩させることなく、燃料棒とFPガス圧力計の間を連通させることができる。燃料棒端栓の穿孔後は、セラミックス電極絶縁部をSUS製の保護管で覆い、保護管の両端を穿孔装置本体の部材と溶接して密封する。

(4) 再計装燃料棒のBOCAキャプセルへの挿入

再計装燃料棒は、BOCAキャプセルを横にした状態で、BOCAキャプセル最下部の挿入孔から専用の端栓締付機とマニプレータ操作により水平に挿入される。その後、専用の端栓締付機により荷重をかけて装着する。この装着操作により、FPガス圧力計の信号線が接続されるとともに、内部の金属Oリングを締め付けるのでBOCAキャプセル中の高圧冷却水がシールされる。

この装着方法の考案により、照射試験後の再計装燃料棒の交換を容易にし、BOCAキャプセルの再使用を可能にした。

3 溶接装置の構成

照射済燃料棒への再計装機器の接続作業は、照射済燃料棒が高い放射能を有することから、ホットセル内で遠隔操作により行う必要がある。また、この作業には、再計装機器と照射済燃料棒端栓との溶接作業の他に、穿孔装置のセラミックス部分を保護する保護管の溶接作業がある。このため、溶接装置は、ホットセル内でマニプレータによる操作で容易に作業が行えるように配慮して設計・製作された。

再計装機器と照射済燃料棒の溶接部及び穿孔装置保護管の片側は、ともに突合せ溶接構造であり、保護管の他端はすみ肉溶接構造である。再計装燃料棒の組立に必要な再計装作業における溶接位置を Fig. 8 に示す。

溶接装置は、溶接機、溶接チャンバー及び真空排気装置からなる。溶接チャンバーは、内部に溶接トーチが回転する自動溶接機構を備えており、再計装機器と照射済燃料棒を挿入した状態で、真空排気装置により真空排気や溶接ガス雰囲気制御ができる構造になっている。溶接装置の構成を Fig. 9 に示す。溶接チャンバーは、セル内に設置し、溶接機、真空排気装置及びアフターガスポンベはセル外の操作室に設置された。電気配線、ガス配管等は、セルの壁に設けられた貫通孔を通して接続された。

3.1 溶接機

溶接機はウエルドロジック社製（米国）で、パルスTIG溶接電源を備えているので非常に安定したアーク電流出力が得られる。また、外径が3mmから50mm、肉厚が0.13mmから3.2mmまでの管を溶接することができる。

本溶接機の仕様を以下に示す。

- ① トランジスタ・クローズドループ制御、AC100V定電流回路
- ② 溶接電流、溶接時間制御
- ③ フィクスチャースピード制御（タコメータ付、フィードバック方式）
- ④ リモートコントロール方式

(4) 再計装燃料棒のBOCAキャプセルへの挿入

再計装燃料棒は、BOCAキャプセルを横にした状態で、BOCAキャプセル最下部の挿入孔から専用の端栓締付機とマニプレータ操作により水平に挿入される。その後、専用の端栓締付機により荷重をかけて装着する。この装着操作により、FPガス圧力計の信号線が接続されるとともに、内部の金属Oリングを締め付けるのでBOCAキャプセル中の高圧冷却水がシールされる。

この装着方法の考案により、照射試験後の再計装燃料棒の交換を容易にし、BOCAキャプセルの再使用を可能にした。

3 溶接装置の構成

照射済燃料棒への再計装機器の接続作業は、照射済燃料棒が高い放射能を有することから、ホットセル内で遠隔操作により行う必要がある。また、この作業には、再計装機器と照射済燃料棒端栓との溶接作業の他に、穿孔装置のセラミックス部分を保護する保護管の溶接作業がある。このため、溶接装置は、ホットセル内でマニプレータによる操作で容易に作業が行えるように配慮して設計・製作された。

再計装機器と照射済燃料棒の溶接部及び穿孔装置保護管の片側は、ともに突合せ溶接構造であり、保護管の他端はすみ肉溶接構造である。再計装燃料棒の組立に必要な再計装作業における溶接位置を Fig. 8 に示す。

溶接装置は、溶接機、溶接チャンバー及び真空排気装置からなる。溶接チャンバーは、内部に溶接トーチが回転する自動溶接機構を備えており、再計装機器と照射済燃料棒を挿入した状態で、真空排気装置により真空排気や溶接ガス雰囲気制御ができる構造になっている。溶接装置の構成を Fig. 9 に示す。溶接チャンバーは、セル内に設置し、溶接機、真空排気装置及びアフターガスポンベはセル外の操作室に設置された。電気配線、ガス配管等は、セルの壁に設けられた貫通孔を通して接続された。

3.1 溶接機

溶接機はウエルドロジック社製（米国）で、パルスTIG溶接電源を備えているので非常に安定したアーク電流出力が得られる。また、外径が3mmから50mm、肉厚が0.13mmから3.2mmまでの管を溶接することができる。

本溶接機の仕様を以下に示す。

- ① トランジスタ・クローズドループ制御、AC100V定電流回路
- ② 溶接電流、溶接時間制御
- ③ フィクスチャースピード制御（タコメータ付、フィードバック方式）
- ④ リモートコントロール方式

(1)溶接電源の仕様

入 力		出 力	
電 圧	AC 100V	電 圧	DC 20V (最大負荷時)
電 流	20A	溶接電流	1~100A
		無負荷電圧	DC 40V
		ケーブル	断面 20mm ²

(2)溶接条件設定器

溶接条件は、溶接電源装置の前面上部の設定器によって設定する。溶接電源装置をPhoto. 2に示す。また、本溶接電源装置は、以下の機能を備えている。

①ベース電流設定 (BACKGROUND CURRENT)

②溶接時間、溶接電流設定 (SEC, AMPS)

溶接時間を4つの区分に分け、各区分の溶接時間と溶接電流レベルを任意に設定することができる。設定値はベース電流を加えた値として表示し、ベース電流以下に設定された場合は、ベース電流設定値が優先する。

③パルス数、パルス巾設定 (PULSE WIDTH, PULSE RATE)

パルスの周波数とパルス巾を任意に設定することができる。

④溶接電流、溶接電圧のアナログ表示 (AMPS, VOLTS)

⑤溶接開始電流処理及び溶接終了電流処理 (UPSLOPE, DOWNSLOPE)

溶接設定電流に到達するまでの時間と溶接終了後の電流が零になるまでの時間を設定し、電流の急激な変化を防ぐ。

⑥トーチの周速度設定 (FIX. SPEED)

⑦アフターガス制御 (PRE FLOW, POST FLOW, FIX. DELAY)

溶接チャンバー内全体をアフターガス雰囲気とするので、溶接機本体のガス制御系は使用しない。

3.2 溶接チャンバー

セル内に設置した溶接チャンバーを Photo. 3に示す。溶接チャンバーの形状は、ステンレス製の外径200mm、長さ150mmの中空円筒状である。その円筒の側面から、直径約14mmの再計装機器と燃料棒とをそれぞれ側面から挿入し、Oリングでシールして固定するための貫通部を備えている。

模擬の再計装燃料棒をセットした時の溶接チャンバーの写真を Photo. 3に示す。溶接チャンバーは、再計装燃料棒に振動を与えないために、トーチ側を回転する自動溶接構造である。また、溶接トーチの回転機構を Fig. 10に示す。

溶接機からの電源ケーブルの負極側は、予めトーチ側に接続されているが、正極側は電源ケーブル付の専用クリップにより燃料棒の一部に接続した。

溶接チャンバー内は、真空排気・ガス置換(アルゴンガスまたはヘリウムガス)を4回行った後、セル外の高圧ガスボンベから配管を通してアフターガスを供給し、ガスを流した状態で

溶接を行う。溶接中に、アフターガスの圧力が $0.2 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ を越えると、フロート式の弁が開いて排気した。アフターガスの種類は、アルゴンガスまたは実験に供する燃料棒内ガスとヘリウム-ゼノン (9.1%) - クリプトン (1.1%) 混合ガスを用途に応じて使い分けた。

3.3 真空排気装置

真空排気装置は、溶接チャンバー内ガスの置換に使用するもので、真空排気用のロータリーポンプ (排気速度 300 l/min) を備えている。セル外に設置した真空排気装置を Photo. 4 に示す。真空排気装置とホットセル内の溶接チャンバーとはホットセル壁の貫通孔を通した配管によって接続し、ガス置換時のガスの排気は、セル壁の排気系に接続した。

4 溶接試験

実機の再計装機器や燃料棒の形状を模擬した試料を用い、最適溶接条件を求めるために溶接試験を行った。実際の溶接では、試料の形状、材質、溶接電流や溶接速度、更にトーチの電極と溶接部の位置やアフターガス等の種々な条件によってその溶接結果が異なってくる。このため、溶接速度や電流のパルス幅、アップスロープ、ダウンスロープ時間、電極と溶接部とのギャップ、アフターガス等の条件を固定し、主要な溶接電流及び溶接時間をパラメータとして溶接試験を行った。これらの溶接結果から最適な溶接条件を求めた。

溶接条件を求めた各溶接位置は、以下の通りである。

- ① 再計装機器の穿孔装置側の先端と、燃料棒のプレナム側の端栓部との突き合わせ溶接 (以後、端栓溶接という)。
- ② 再計装機器の穿孔装置保護管の突き合わせ溶接 (以後、保護管突き合わせ溶接という) 及び溶接前の仮付けのための点溶接 (以後、保護管の点溶接という)。
- ③ 再計装機器の穿孔装置保護管のすみ肉溶接 (以後、保護管すみ肉溶接という)。
- ④ 燃料棒下部端栓と照射中の燃料棒の伸びを吸収するために取り付ける伸び吸収装置とのネジ接合部の緩み止め点溶接 (以後、伸び吸収装置の点溶接という)。

4.1 溶接条件の設定

溶接するにあたって使用した機器及び試験内容を以下に示す。

(1) 溶接試料

① 端栓溶接試料

溶接試験に用いた燃料棒端栓溶接試料を Fig. 11 に示す。試料の材質は、燃料棒端栓と同じジルカロイとし、試料の両側にネジを設けて試料を交換できるようにした。

② 保護管突合せ溶接及びすみ肉溶接試料

溶接試験のために製作した穿孔装置保護管の溶接試料を Fig. 12 に示す。試料の材質を実際に溶接する保護管と同じ SUS304 とし、試験部の両端にネジを設け、それぞれ直径 1.4 mm のロッドを取り付けて再計装燃料棒と同じ長さにした。試料部分の交換は、このネジによる取り付け取り外しによって行った。

(2) 溶接トーチ用電極の形状

溶接を行う。溶接中に、アフターガスの圧力が0.2 kg/cm²Gを越えると、フロート式の弁が開いて排気した。アフターガスの種類は、アルゴンガスまたは実験に供する燃料棒内ガスとヘリウム-ゼノン (9.1%) - クリプトン (1.1%) 混合ガスを用途に応じて使い分けた。

3.3 真空排気装置

真空排気装置は、溶接チャンバー内ガスの置換に使用するもので、真空排気用のロータリーポンプ (排気速度300 l/min) を備えている。セル外に設置した真空排気装置を Photo. 4 に示す。真空排気装置とホットセル内の溶接チャンバーとはホットセル壁の貫通孔を通した配管によって接続し、ガス置換時のガスの排気は、セル壁の排気系に接続した。

4 溶接試験

実機の再計装機器や燃料棒の形状を模擬した試料を用い、最適溶接条件を求めるために溶接試験を行った。実際の溶接では、試料の形状、材質、溶接電流や溶接速度、更にトーチの電極と溶接部の位置やアフターガス等の種々な条件によってその溶接結果が異なってくる。このため、溶接速度や電流のパルス幅、アップスロープ、ダウンスロープ時間、電極と溶接部とのギャップ、アフターガス等の条件を固定し、主要な溶接電流及び溶接時間をパラメータとして溶接試験を行った。これらの溶接結果から最適な溶接条件を求めた。

溶接条件を求めた各溶接位置は、以下の通りである。

- ① 再計装機器の穿孔装置側の先端と、燃料棒のプレナム側の端栓部との突き合わせ溶接 (以後、端栓溶接という)。
- ② 再計装機器の穿孔装置保護管の突き合わせ溶接 (以後、保護管突き合わせ溶接という) 及び溶接前の仮付けのための点溶接 (以後、保護管の点溶接という)。
- ③ 再計装機器の穿孔装置保護管のすみ肉溶接 (以後、保護管すみ肉溶接という)。
- ④ 燃料棒下部端栓と照射中の燃料棒の伸びを吸収するために取り付ける伸び吸収装置とのネジ接合部の緩み止め点溶接 (以後、伸び吸収装置の点溶接という)。

4.1 溶接条件の設定

溶接するにあたって使用した機器及び試験内容を以下に示す。

(1) 溶接試料

① 端栓溶接試料

溶接試験に用いた燃料棒端栓溶接試料を Fig. 11 に示す。試料の材質は、燃料棒端栓と同じジルカロイとし、試料の両側にネジを設けて試料を交換できるようにした。

② 保護管突合せ溶接及びすみ肉溶接試料

溶接試験のために製作した穿孔装置保護管の溶接試料を Fig. 12 に示す。試料の材質を実際に溶接する保護管と同じ SUS 304 とし、試験部の両端にネジを設け、それぞれ直径 1.4 mm のロッドを取り付けて再計装燃料棒と同じ長さにした。試料部分の交換は、このネジによる取り付け取り外しによって行った。

(2) 溶接トーチ用電極の形状

電極は、太さφ1.6 mmのTIG溶接で一般に使用されているトリタン (97.5% W-1.9% Th)を用いた。電極の先端部は30度の鋭角とし、その先端は、アークの発生を容易にする目的から僅かに平らにした。トーチ用電極の形状寸法を Fig. 13に示す。

(3) 電極の先端と溶接試料とのギャップ

電極の先端と溶接試料のギャップは、TIG溶接を行う場合の一般的な1mmを採用した。

(4) 溶接速度

溶接速度は、一般に溶接部の周速度で示される。本溶接機では、溶接部の直径(単位mm)の数値を、トーチの一周に要する時間(秒)とした値に設定することが推奨されている。この値を確認するために、溶接速度を変化させた溶接試験を実施したが、推奨速度の方が良い溶接結果が得られた。この結果から、直径1.4mm程度の溶接部については、溶接速度を約1.4秒で一周する3.14 mm/sに決定した。溶接条件の溶接電流と周速度の算出方法を付録-2に示す。

(5) アフターガス

本溶接装置では、溶接チャンバー内のガス置換を4回実施した後、アフターガスを充填した。置換前の真空度は 1×10^{-3} Torrであった。ガス置換後は、ガスの流量を10 l/minで、溶接チャンバーの排気弁からオーバーフローさせながら溶接した。

溶接後に内部のギャップの空間にアフターガスが残る端栓溶接及び保護管の突合せ溶接では、アフターガスとして穿孔装置の内部に封入した燃料棒内ガスと同じヘリウム-ゼノン(9.1%) - クリプトン(1.1%) 混合ガスを用いた。

また、保護管のすみ肉溶接では、保護管の反対側が点溶接状態であり、溶接後にも保護管内のガス置換が可能なので、溶接し易いアルゴンガスを用いた。なお、高純度ヘリウム(99.9999%)を用いた場合には、点火用高周波からアークに移行せず、溶接できなかった。

4.2 溶接試験

溶接される試料を固定し、トーチ側が回転する溶接方式では、重力の影響を受けるために、溶接位置によって電流やその時間などを調整する必要がある。本溶接試験では、あらかじめ4つに区分された各溶接電流値と溶接時間の最適設定値を得るために、付録-2に示す溶接条件の溶接速度算出方法により計算した値に基づいた溶接試験結果から、各溶接条件を修正する作業を繰り返し、妥当な設定値を求めた。その後、それらの設定値で溶接試験を実施し、溶接後の外観や断面の金相写真によって、以下の各溶接条件を評価した。

(1) 端栓溶接試験

燃料棒端栓と穿孔装置との溶接試験では、試料の寸法、形状及び材質(Zry-2)を実機の溶接部材と同一形状寸法で実施した。使用した試料の形状寸法を Fig. 14に示す。

電極は、再計装燃料棒側を移動して試料の突合せ部の真上の位置に調整した。また、試料と電極とのギャップが約1mmになるように、電極の長さを決定した。試料と電極との位置関係を Fig. 14の(A)に示す。また、溶接時に燃料棒内に幾分かのガスが残留することが避けられない。このため、溶接時のアフターガスには、照射実験に供する燃料棒内ガスと同じ成分のヘリウム-ゼノン(9.1%) - クリプトン(1.1%) 混合ガスを用いた。

溶接後の試料を Photo. 5に示し、溶接部の金相写真を Photo. 7に示す。Photo. 7の(a)のケースでは、溶接電流が大きすぎた場合で、溶接が終了する直前にブリストアを生

じたものである。また、溶接速度が速すぎる場合も、同様なブリストアを生じた。溶接電流及び溶接速度が妥当で、良好な溶接結果が得られた場合の溶接部の金相写真を Photo. 7の (b) に、この場合の溶接設定条件を Table 1 に示す。

Photo. 7の (b) に見られるように、端栓の内側端面が面取りされているために、溶融量不足が生じて空間として残っている。電流を増加させて溶接した場合でも面取り部分の空間が残った。この結果から、ジルカロイ材の突合せ溶接では、端栓内側端の面取りを避ける必要があることが判った。

一方、ステンレス材の溶接では、同様な面取りがあった場合でも面取り部まで十分に溶け込むことを確認した。

(2) 保護管の点溶接試験

保護管の溶接で、突合せの溶接を先に行うと、穿孔装置本体と保護管とのギャップが片側に寄せられ、反対側のギャップが大きくなってすみ肉溶接が困難になる。このため、保護管のすみ肉部を最初に溶接することにした。この場合でもすみ肉溶接を直接行くと、溶接した側に保護管が引かれ、反対側の突合せ部にギャップが生じて突合せ溶接が困難になった。このため、保護管を固定する目的から、最初に Fig. 14の (B) に示す突合せ位置で、周方向に3カ所(約120度間隔)の点溶接を行った。アフターガスにはアルゴンガスを用いた。求めた点溶接の溶接条件を Table 2 に示し、この条件で点付けした試料を Photo. 6の (a) に示す。電流を Table 2の条件よりも多くした場合は、溶接した部分が溶け過ぎてへこみを生じ、その後、同位置で実施した突き合わせ溶接で、溶接不良を生ずる原因となるケースがあった。

(3) 保護管のすみ肉溶接試験

保護管突き合わせ部の点溶接後のすみ肉溶接は、アルゴンガス雰囲気で行った。この場合の溶接試験では、Fig. 14の (B) すみ肉溶接に示すように、保護管端から電極の中心までの軸方向の距離を0.8mm離すことによって良好な溶接結果を得た。この時の溶接条件を Table 1 に示す。また、この条件で溶接した試料の写真を Photo. 6の (b) に示し、溶接部の金相写真を Photo. 8の (a) に示す。

本溶接試験の初期には、溶接性能を向上する目的ですみ肉溶接部の保護管端に45度の傾斜をつけたが、溶融量不足から溶接不良を生じた。この対策として、傾斜をつけない保護管で実施し、良好な溶接結果を得た。

また、電極と保護管との距離を1.0mmにした場合には、まれに保護管側の一部に溶け込み不足を生ずることがあった。

(4) 保護管の突合せ溶接

保護管と穿孔装置本体との突合せ溶接では、Fig. 14の (B) に示すように、電極中心を突き合わせ部の中心に合わせ、ギャップを1mmにして良好な溶接結果を得た。試験結果の溶接条件を Table 1 に示し、溶接した試料の金相写真を Photo. 8の (b) に示す。

照射実験中に穿孔装置のセラミックス部に亀裂等の破損を生じた場合、保護管内に閉じ込められた幾分かのアフターガスが燃料棒の内部に混入するため、照射実験に供する燃料棒内ガスと同じ成分のヘリウム-ゼノン(9.1%) - クリプトン(1.1%) 混合ガスを用いた。

また、仮に溶接不良が生じて、突合せ部のギャップの間隔が広がった場合でも、その広がりが僅かであれば、同一条件で再溶接することにより、良好な結果が得られた。

溶接速度（周速度）が、Table 1に示す溶接速度よりも更に遅くなると、溶接の最終段階で内部ガスの熱膨張による吹かれが生じて $\phi 1\sim 2\text{mm}$ 程度の孔が開くことがあった。このような孔ができた場合には、すみ肉溶接の前に実施したTable 2に示す点溶接条件で、孔の上部を封孔することによって修復できることを溶接後試料の金相観察により確認した。

4.3 曲がり修正試験

溶接試験の結果、端栓溶接部と突合せ溶接部は共に溶接による曲がりは僅かであったが、すみ肉溶接部ではかなりの曲がりを生じた。一般的に、曲がりは、溶接終了時の高温部分が室温に戻るまでに収縮することにより生ずるものと考えられているが、この曲がりを生じた原因は、溶接性を高めるために、Fig. 14の(B)のすみ肉溶接部付近に、深さ0.75 mmの溝を設けた結果、特にその薄肉部が高温になり、室温に戻るまでに収縮して曲がりを生じたと考えられる。

この曲がりを修正するために、曲がりのある溶接部の外側の一部を加熱し、その加熱部が冷却時に収縮する現象を利用する方法について試験を実施した。すみ肉溶接後の曲がり修正試験では、曲がりの裏側の溶接部について、周方向約60度の範囲を表面が僅かに溶ける温度まで加熱した。曲がり修正はTable 3に示すように、溶接部が溶けないように電流の設定値を少なくし、溶接速度を遅くした。曲がり修正手順は、Fig. 15の(a)に示す。

また、Fig. 15の(b)には、修正結果と修正回数との関係を示す。縦軸は、試料の軸方向長さを680 mmとして中心軸との距離をmmで示し、横軸は曲がりを修正した回数を示す。

試験の結果、曲がりの復元量は加熱を重ねる毎に少なくなり、約3回の修正で軸心との振れ巾が0.6 mmまで減少した。

一方、溶接部近くの溝の無い試料で溶接試験を実施した結果では、曲がりはかなり減少することを確認した。

4.4 溶接試験結果

溶接条件決定のための試験結果は、以下の通りである。

- (1) 端栓溶接ではTable 1に示す溶接条件で良い溶接結果が得られた。この時の試料表面と電極先端とのギャップは1 mmとした。しかし、この溶接条件においても、面取り部分に空間を生じた。これを避けるためには、ジルカロイ材での突合せ部内側の面取りを避ける必要がある。
- (2) 突合せ部の点溶接では、スポット位置を突き合わせ部の中心に合わせ、Table 2に示す溶接条件で良い点溶接結果が得られた。
- (3) すみ肉溶接では、電極と保護管との軸方向の距離を0.8 mmに設定し、Table 1に示す溶接条件で良い溶接結果が得られた。
- (4) 突き合わせ溶接では、溶接部上に電極の中心を設定し、Table 1に示す溶接条件で良い溶接結果が得られた。
- (5) 端栓溶接、突合せ溶接及びすみ肉溶接では、初回に溶接を失敗した場合でも、再溶接により良好な溶接結果が得られた。
- (6) すみ肉溶接部の溶接後に生ずる曲がりの修正には、曲がりの外周方向をTable 3に示す条件で加熱、空冷を3回程度繰り返すことにより、初期の曲がりを修正することができた。

また、曲がりを生じにくくするには、溶接部の近くに溝を設けない構造にすることが必要である。

5 再計装燃料棒の組立

溶接試験で求めた溶接条件により、実際にBOCAキャプセルに挿入して照射試験に使用する再計装機器と照射済燃料棒との溶接組立作業を実施した。照射済燃料棒の名称は、C6-2及びC6-4の計2本である。作業はすべてホットセル内に設置した溶接装置を用い、ホットセルの鉛ガラス窓から内部を観察しながら、マニプレータによる遠隔操作で作業を実施した。このときの再計装燃料棒の溶接組立手順を Fig. 16 に示す。

組立作業の各ステップ終了後には、再計装燃料棒の健全性を確認するための各種検査を実施した。溶接手順の詳細を以下に示す。

(1) 端栓溶接作業

Table 1 の溶接条件により端栓部を溶接した。溶接後の溶接部観察結果は、先の溶接試験結果とほぼ同等であることを目視により確認したが、更に、ヘリウムリーク試験及び溶接部の放射線透過試験を実施し、正常に溶接されていることを確認した。アフターガスには、照射実験に供する燃料棒内ガスと同じ成分のヘリウム-ゼノン (9.1%) - クリプトン (1.1%) 混合ガスを用いた。

(2) 端栓内部の穿孔

端栓溶接により一体となった再計装燃料棒端栓の中心部分を、穿孔装置内部の電極と端栓とに外部から通電し、発生したアークにより遠隔操作により穿孔した。この結果、端栓に孔があいたことを、放射線透過検査により確認した。

(3) 保護管突き合わせ部の点溶接作業

Table 1 の溶接条件で保護管突き合わせ部の点溶接は120度の間隔で3点とした。アフターガスには、アルゴンガスを用いた。点溶接後の溶接部観察結果は、先の溶接試験結果と同じ程度で良好であることを目視により確認した。

(4) 保護管すみ肉溶接作業

Table 1 の溶接条件で保護管すみ肉溶接を行った。電極は、マニプレータにより溶接チャンバーの窓をあけてすみ肉用の電極と交換した。アフターガスには、アルゴンガスを用いた。溶接後の溶接部観察結果は、先の溶接試験結果とほぼ同じ程度で良好であることを目視により確認した。

(5) 保護管突き合わせ溶接作業

Table 1 の溶接条件で保護管突き合わせ部の溶接を行った。その前に行った作業とは電極の長さが異なるので、突き合わせ溶接用の電極と交換した。アフターガスにはアルゴンガスを用いた。溶接後の溶接部観察結果は、先の溶接試験結果とほぼ同じ程度で良好であることを目視により確認した。

また、曲がりを生じにくくするには、溶接部の近くに溝を設けない構造にすることが必要である。

5 再計装燃料棒の組立

溶接試験で求めた溶接条件により、実際にBOCAキャプセルに挿入して照射試験に使用する再計装機器と照射済燃料棒との溶接組立作業を実施した。照射済燃料棒の名称は、C6-2及びC6-4の計2本である。作業はすべてホットセル内に設置した溶接装置を用い、ホットセルの鉛ガラス窓から内部を観察しながら、マニプレータによる遠隔操作で作業を実施した。このときの再計装燃料棒の溶接組立手順を Fig. 16 に示す。

組立作業の各ステップ終了後には、再計装燃料棒の健全性を確認するための各種検査を実施した。溶接手順の詳細を以下に示す。

(1) 端栓溶接作業

Table 1 の溶接条件により端栓部を溶接した。溶接後の溶接部観察結果は、先の溶接試験結果とほぼ同等であることを目視により確認したが、更に、ヘリウムリーク試験及び溶接部の放射線透過試験を実施し、正常に溶接されていることを確認した。アフターガスには、照射実験に供する燃料棒内ガスと同じ成分のヘリウム-ゼノン (9.1%) - クリプトン (1.1%) 混合ガスを用いた。

(2) 端栓内部の穿孔

端栓溶接により一体となった再計装燃料棒端栓の中心部分を、穿孔装置内部の電極と端栓とに外部から通電し、発生したアークにより遠隔操作により穿孔した。この結果、端栓に孔があいたことを、放射線透過検査により確認した。

(3) 保護管突き合わせ部の点溶接作業

Table 1 の溶接条件で保護管突き合わせ部の点溶接は120度の間隔で3点とした。アフターガスには、アルゴンガスを用いた。点溶接後の溶接部観察結果は、先の溶接試験結果と同じ程度で良好であることを目視により確認した。

(4) 保護管すみ肉溶接作業

Table 1 の溶接条件で保護管すみ肉溶接を行った。電極は、マニプレータにより溶接チャンバーの窓をあけてすみ肉用の電極と交換した。アフターガスには、アルゴンガスを用いた。溶接後の溶接部観察結果は、先の溶接試験結果とほぼ同じ程度で良好であることを目視により確認した。

(5) 保護管突き合わせ溶接作業

Table 1 の溶接条件で保護管突き合わせ部の溶接を行った。その前に行った作業とは電極の長さが異なるので、突き合わせ溶接用の電極と交換した。アフターガスにはアルゴンガスを用いた。溶接後の溶接部観察結果は、先の溶接試験結果とほぼ同じ程度で良好であることを目視により確認した。

(6) 伸び吸収装置の接続作業

再計装燃料棒の下部端栓に、最終的な組立て作業として、伸び吸収装置をねじ込みにより取り付け後に、Table 2の溶接条件で接続部の回り止めの点溶接(3ヵ所)を行った。アフターガスにはアルゴンガスを用いた。

(7) 溶接部検査

溶接により組み立てられた再計装燃料棒は、保護管溶接部のヘリウムリーク試験及び放射線透過検査を行って正常に溶接されていることを確認した。

(8) 真直度検査

再計装前の照射済燃料棒は、高燃焼度(2.5 GWd/t)で、さらに短尺化して両端の端栓を溶接しているために、僅かに曲がりを生じていた。

これらの曲がりのある照射済燃料棒に再計装した後のC6-2及びC6-4の再計装燃料棒の軸方向プロファイルをそれぞれFig. 17及びFig. 18に示す。C6-2再計装燃料棒は、再計装機器の穿孔装置保護管の突き合わせ溶接部に曲がり確認されたが、真直度は、1/1000(0.9mm/871mm)であった。その後、この曲がりを持った状態で、BOCAキャプセルに挿入したが、正常に装着されたことを確認した。

一方、C6-4再計装燃料棒では、再計装機器の穿孔装置保護管のすみ肉溶接部曲がりと燃料棒の曲がりが見られ、全体として弓なりになっていることが確認された。このときの真直度は1.8/1000(1.6mm/871mm)であった。この曲がりのある状態で、実際にBOCAキャプセルに挿入したが、正常には装着できなかった。このため、C6-4再計装燃料棒については、曲がり修正を施した。

(9) 曲がり修正作業

C6-4燃料棒について曲がり修正を行った。曲がりの修正位置は、燃料棒の全体的な反りを修正することは困難であることから、燃料棒の下部端栓と伸び吸収装置との接続部、再計装機器の穿孔装置保護管のすみ肉溶接部の2ヵ所とした。曲がり修正は、4.3項の曲がり修正試験で得られた燃料棒の下部端栓と伸び吸収装置との接続部及び再計装機器の穿孔装置保護管のすみ肉溶接部について、Table 3に示す条件で実施した。修正回数は、前者及び後者について、それぞれ3回実施した。曲がり修正後のC6-4燃料棒の軸方向プロファイルを図19に示す。

曲がり修正後の真直度は、0.8/1000(0.7mm/871mm)になった。また、BOCAキャプセルの最小内径を模擬した内径15.0mm、長さ900mmの亚克力製の通過検査治具を用いて、通過試験を実施した。この結果、曲がり修正以前には、約300mmまで挿入した位置で止まってしまったが、曲がり修正後はスムーズに挿入できた。用いた再計装後の燃料棒の通過検査治具を図20に示す。

曲がりのあったC6-4再計装燃料棒の真直度は、曲がり修正後にはほぼC6-2の再計装燃料棒の真直度以内に修正できたことをFig. 19のC6-4燃料棒の軸方向プロファイルによって確認した。この曲がり修正後のC6-4再計装燃料棒を、BOCAキャプセルに挿入し、正常に装着したことを確認した。

6 遠隔操作による溶接試験技術の開発結果及び評価

遠隔操作技術による開発においては、照射済の燃料棒を取り扱うために全ての作業をマニピュレータによる遠隔操作でできるように、溶接チャンバーの設計・製作を行った。しかし、実作業にあたっては、チャンバー内の電極の交換や、電極と再計装燃料棒との周方向ギャップを一定にするための調整作業等には、高度の遠隔操作技術が必要であった。

穿孔装置保護管のすみ肉溶接では、その溶接形態から溶接不良を生じ易かったが、溶接位置や4つの区分からなるそれぞれの妥当な溶接電流・溶接時間の設定により、最適な溶接条件を求めることにより解決した。また、再計装機器と照射済燃料棒との端栓溶接試験及び穿孔装置保護管の突合せ溶接技術についても、最適な溶接条件を求めることができた。

万一、溶接不良や溶接終了直前に、吹かれて小さな孔を生じた場合でも、再溶接することにより良好な溶接結果を得られることが確認できた。

溶接終了後の保護管のすみ肉溶接部には、比較的大きな曲がりを生じたが、端栓溶接部及び保護管の突合せ溶接部の曲がりについては、真直度に影響を与えないほどの僅かな曲がりであった。すみ肉溶接部の曲がりの原因は、溶接部に近い外周に深さ 0.75 mmの溝を設けたため、薄肉部分で曲がり易くなったために生じたもので、その後は溝を設けない設計にした。

上記の溶接による曲がり修正方法は、曲がりのある外側の一部を加熱して曲がりに戻す方法を用い、妥当と思われる加熱条件を求めた。

7 結 言

溶接条件設定のために実施した溶接試験の結果、再計装機器と照射済燃料棒との端栓溶接試験及び穿孔装置保護管のすみ肉溶接部と突合せ溶接のそれぞれについて、最適溶接条件を求めることができた。これらの溶接条件と開発された遠隔溶接技術とを用い、発電炉で高燃焼度まで照射されたC6-2燃料棒及びC6-4燃料棒について、セル内での遠隔操作によるFPガス圧力計のセル内組立を実施し、良好な結果を得た。

C6-2再計装燃料棒は、BOCAキャプセルに挿入した後、JMTRのBOCA照射設備に装荷して出力急昇試験に供された結果、FPガス圧力計は、再照射試験中の燃料棒内のFPガスの圧力変化を連続して測定したことが確認された。C6-4再計装燃料棒についても、その後出力急昇試験が実施され、C6-2計装燃料棒と同様な試験結果が得られた。これらの結果、本遠隔操作技術の開発は初期の目的を達成し、完了した。

謝 辞

本報告の遂行にあたり、適切な御指導を賜りました斉藤 実材料試験炉部長、小山田六郎材料試験炉部次長、山本克宗計画課長及び原山泰雄主任研究員の方々に深く感謝致します。

また、本技術の開発に際し、御協力戴いた燃料挙動安全研究室の中村 仁氏、技術的な面で御援助をいただいた浜野 昇工作課長代理、沢島 求課長代理の諸氏にお礼申し上げます。

6 遠隔操作による溶接試験技術の開発結果及び評価

遠隔操作技術による開発においては、照射済の燃料棒を取り扱うために全ての作業をマニピュレータによる遠隔操作でできるように、溶接チャンバーの設計・製作を行った。しかし、実作業にあたっては、チャンバー内の電極の交換や、電極と再計装燃料棒との周方向ギャップを一定にするための調整作業等には、高度の遠隔操作技術が必要であった。

穿孔装置保護管のすみ肉溶接では、その溶接形態から溶接不良を生じ易かったが、溶接位置や4つの区分からなるそれぞれの妥当な溶接電流・溶接時間の設定により、最適な溶接条件を求めることにより解決した。また、再計装機器と照射済燃料棒との端栓溶接試験及び穿孔装置保護管の突合せ溶接技術についても、最適な溶接条件を求めることができた。

万一、溶接不良や溶接終了直前に、吹かれて小さな孔を生じた場合でも、再溶接することにより良好な溶接結果を得られることが確認できた。

溶接終了後の保護管のすみ肉溶接部には、比較的大きな曲がりを生じたが、端栓溶接部及び保護管の突合せ溶接部の曲がりについては、真直度に影響を与えないほどの僅かな曲がりであった。すみ肉溶接部の曲がりの原因は、溶接部に近い外周に深さ 0.75 mm の溝を設けたため、薄肉部分で曲がり易くなったために生じたもので、その後は溝を設けない設計にした。

上記の溶接による曲がり修正方法は、曲がりのある外側の一部を加熱して曲がりに戻す方法を用い、妥当と思われる加熱条件を求めた。

7 結 言

溶接条件設定のために実施した溶接試験の結果、再計装機器と照射済燃料棒との端栓溶接試験及び穿孔装置保護管のすみ肉溶接部と突合せ溶接のそれぞれについて、最適溶接条件を求めることができた。これらの溶接条件と開発された遠隔溶接技術とを用い、発電炉で高燃焼度まで照射された C 6 - 2 燃料棒及び C 6 - 4 燃料棒について、セル内での遠隔操作による F P ガス圧力計のセル内組立を実施し、良好な結果を得た。

C 6 - 2 再計装燃料棒は、BOCA キャプセルに挿入した後、JMTR の BOCA 照射設備に装荷して出力急昇試験に供された結果、F P ガス圧力計は、再照射試験中の燃料棒内の F P ガスの圧力変化を連続して測定したことが確認された。C 6 - 4 再計装燃料棒についても、その後出力急昇試験が実施され、C 6 - 2 計装燃料棒と同様な試験結果が得られた。これらの結果、本遠隔操作技術の開発は初期の目的を達成し、完了した。

謝 辞

本報告の遂行にあたり、適切な御指導を賜りました斉藤 実材料試験炉部長、小山田六郎材料試験炉部次長、山本克宗計画課長及び原山泰雄主任研究員の方々に深く感謝致します。

また、本技術の開発に際し、御協力戴いた燃料挙動安全研究室の中村 仁氏、技術的な面で御援助をいただいた浜野 昇工作課長代理、沢畠 求課長代理の諸氏にお礼申し上げます。

6 遠隔操作による溶接試験技術の開発結果及び評価

遠隔操作技術による開発においては、照射済の燃料棒を取り扱うために全ての作業をマニピュレータによる遠隔操作でできるように、溶接チャンバーの設計・製作を行った。しかし、実作業にあたっては、チャンバー内の電極の交換や、電極と再計装燃料棒との周方向ギャップを一定にするための調整作業等には、高度の遠隔操作技術が必要であった。

穿孔装置保護管のすみ肉溶接では、その溶接形態から溶接不良を生じ易かったが、溶接位置や4つの区分からなるそれぞれの妥当な溶接電流・溶接時間の設定により、最適な溶接条件を求めることにより解決した。また、再計装機器と照射済燃料棒との端栓溶接試験及び穿孔装置保護管の突合せ溶接技術についても、最適な溶接条件を求めることができた。

万一、溶接不良や溶接終了直前に、吹かれて小さな孔を生じた場合でも、再溶接することにより良好な溶接結果を得られることが確認できた。

溶接終了後の保護管のすみ肉溶接部には、比較的大きな曲がりを生じたが、端栓溶接部及び保護管の突合せ溶接部の曲がりについては、真直度に影響を与えないほどの僅かな曲がりであった。すみ肉溶接部の曲がりの原因は、溶接部に近い外周に深さ 0.75 mm の溝を設けたため、薄肉部分で曲がり易くなったために生じたもので、その後は溝を設けない設計にした。

上記の溶接による曲がり修正方法は、曲がりのある外側の一部を加熱して曲がりに戻す方法を用い、妥当と思われる加熱条件を求めた。

7 結 言

溶接条件設定のために実施した溶接試験の結果、再計装機器と照射済燃料棒との端栓溶接試験及び穿孔装置保護管のすみ肉溶接部と突合せ溶接のそれぞれについて、最適溶接条件を求めることができた。これらの溶接条件と開発された遠隔溶接技術とを用い、発電炉で高燃焼度まで照射された C 6 - 2 燃料棒及び C 6 - 4 燃料棒について、セル内での遠隔操作による F P ガス圧力計のセル内組立を実施し、良好な結果を得た。

C 6 - 2 再計装燃料棒は、BOCA キャプセルに挿入した後、JMTR の BOCA 照射設備に装荷して出力急昇試験に供された結果、F P ガス圧力計は、再照射試験中の燃料棒内の F P ガスの圧力変化を連続して測定したことが確認された。C 6 - 4 再計装燃料棒についても、その後出力急昇試験が実施され、C 6 - 2 計装燃料棒と同様な試験結果が得られた。これらの結果、本遠隔操作技術の開発は初期の目的を達成し、完了した。

謝 辞

本報告の遂行にあたり、適切な御指導を賜りました齊藤 実材料試験炉部長、小山田六郎材料試験炉部次長、山本克宗計画課長及び原山泰雄主任研究員の方々に深く感謝致します。

また、本技術の開発に際し、御協力戴いた燃料挙動安全研究室の中村 仁氏、技術的な面で御援助をいただいた浜野 昇工作課長代理、沢畠 求課長代理の諸氏にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 柳澤和章：“照射後試験データによる長期照射燃料棒の内圧増加に関する解析評価とFEM AXI-III計算” JAERI-M 80-021 (1984)
- (2) 燃料安全特別委員会編：“軽水炉燃料のふるまい” (財)原子力安全研究会 (1990)
- (3) 燃料安全特別委員会編：“負荷変動時の燃料ふるまいに関する調査(III)” (財)原子力安全研究会 (1988)
- (4) 材料試験炉部編：“JMTR照射ハンドブック”， (1987)
- (5) 中田宏勝, 瀬崎勝二：“JMTR出力急昇設備の開発(その3)” JAERI-M 85021 (1985)
- (6) 小森芳廣, 大島邦男, 他：“FPガス圧力計再計装技術の開発, -FPガス圧力計の試作結果-” JAERI-M 88-156 (1988)
- (7) 私信

Table 1 各種溶接設定条件

溶接条件		溶接の種類	端栓溶接	保護管スポット	保護管隅肉	保護管突き合わせ	封孔
パルス	LEVEL 1	電流 (A) 時間 (秒)	7 5 6	5 0 2	5 0 6	5 0 6	4 0 2
	LEVEL 2	電流 (A) 時間 (秒)	7 0 5	—	5 0 5	5 0 5	—
	LEVEL 3	電流 (A) 時間 (秒)	6 5 4	—	5 0 4	5 0 4	—
	LEVEL 4	電流 (A) 時間 (秒)	5 5 4	—	4 5 4	4 5 4	—
ベース電流 (A)			4 0	2 6	4 0	4 0	2 6
パルス幅 (%)			3 0	3 0	3 0	3 0	3 0
パルスレート (パルス数/秒)			4 0	4 0	4 0	4 0	4 0
アップスロープ (秒)			1	1	1	1	1
ダウンスロープ (秒)			3	2	2	2	3
フィクスチャデレイ (秒)			1	1	1	1	1
フィクスチャスピード (%)			2 3	0 0	2 3	2 3	0 0
アフターガス			混合ガス	A r	A r	混合ガス	混合ガス

Table 2 点溶接設定条件

	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">4 0</div> 1-99 AMPS. LEVEL 1 <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">0 1</div> 0-99 SEC.	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">0 0</div> 1-99 AMPS. LEVEL 2 <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">0 0</div> 0-99 SEC.	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">0 0</div> 1-99 AMPS. LEVEL 3 <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">0 0</div> 0-99 SEC.	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">0 0</div> 1-99 AMPS. LEVEL 4 <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">0 0</div> 0-99 SEC.	
ANPS.	PULSE WIDTE	TIMER	PULSE	PULSE RATE	VOLTS
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">3 0</div> 1-99 %	0 N ⇐ OFF	0 N ⇐ OFF	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">4 0</div> × 0.1 1-99 P. P. S.	
UPSLOPE	BACKGROUND CURRENT		DOWNSLOPE		
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">1</div> 0-9 SEC.	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">2 6</div> 1-99 AMPS.		<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">2</div> 0-9 SEC.		
PRE FLOW	FIX. DELAY		FIX. SPEED		POST FLOW
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">0 1</div> 0-99 SEC.	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">1</div> 0-99 SEC.		<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">0 0</div> 1-99 %		<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">0 1</div> 0-99 SEC.

雰囲気： Ar ガス， 電極の寸法： 2 3 . 8 mm， 試料： SUS 3 0 4
 試料： Zry-2, Ar ガス置換を 5 回行った後、Ar ガス雰囲気て溶接

Table 3 曲がり修正条件

	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 20px; text-align: center;">6</td><td style="width: 20px; text-align: center;">0</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">1-99 AMPS.</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">LEVEL 1</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">6</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">0-99 SEC.</td></tr> </table> </div>	6	0	1-99 AMPS.		LEVEL 1		0	6	0-99 SEC.		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 20px; text-align: center;">0</td><td style="width: 20px; text-align: center;">0</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">1-99 AMPS.</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">LEVEL 2</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">0</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">0-99 SEC.</td></tr> </table> </div>	0	0	1-99 AMPS.		LEVEL 2		0	0	0-99 SEC.		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 20px; text-align: center;">0</td><td style="width: 20px; text-align: center;">0</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">1-99 AMPS.</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">LEVEL 3</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">0</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">0-99 SEC.</td></tr> </table> </div>	0	0	1-99 AMPS.		LEVEL 3		0	0	0-99 SEC.		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 20px; text-align: center;">0</td><td style="width: 20px; text-align: center;">0</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">1-99 AMPS.</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">LEVEL 4</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">0</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">0-99 SEC.</td></tr> </table> </div>	0	0	1-99 AMPS.		LEVEL 4		0	0	0-99 SEC.		
6	0																																												
1-99 AMPS.																																													
LEVEL 1																																													
0	6																																												
0-99 SEC.																																													
0	0																																												
1-99 AMPS.																																													
LEVEL 2																																													
0	0																																												
0-99 SEC.																																													
0	0																																												
1-99 AMPS.																																													
LEVEL 3																																													
0	0																																												
0-99 SEC.																																													
0	0																																												
1-99 AMPS.																																													
LEVEL 4																																													
0	0																																												
0-99 SEC.																																													
ANPS.	PULSE WIDTE	TIMER	PULSE	PULSE RATE	VOLTS																																								
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">3 0</div> 1-99 %	0 N ← OFF	0 N ← OFF	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">8 0</div> × 0.1 1-99 P. P. S.																																									
UPSLOPE	BACKGROUND CURRENT			DOWNSLOPE																																									
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">1</div> 0-9 SEC.	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">4 0</div> 1-99 AMPS.			<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">3</div> 0-9 SEC.																																									
PRE FLOW	FIX. DELAY		FIX. SPEED		POST FLOW																																								
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">0 1</div> 0-99 SEC.	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">1</div> 0-99 SEC.		<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">4 7</div> 1-99 %		<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">0 1</div> 0-99 SEC.																																								

雰囲気：Ar ガス (10 ℓ/min)，電極の長さ：24.6 mm,

試料：Zry-4, Ar ガス置換を4回おこなった後、Ar ガス雰囲気ですべての溶接部付近を約1/3周(上記設定条件)を加熱する。

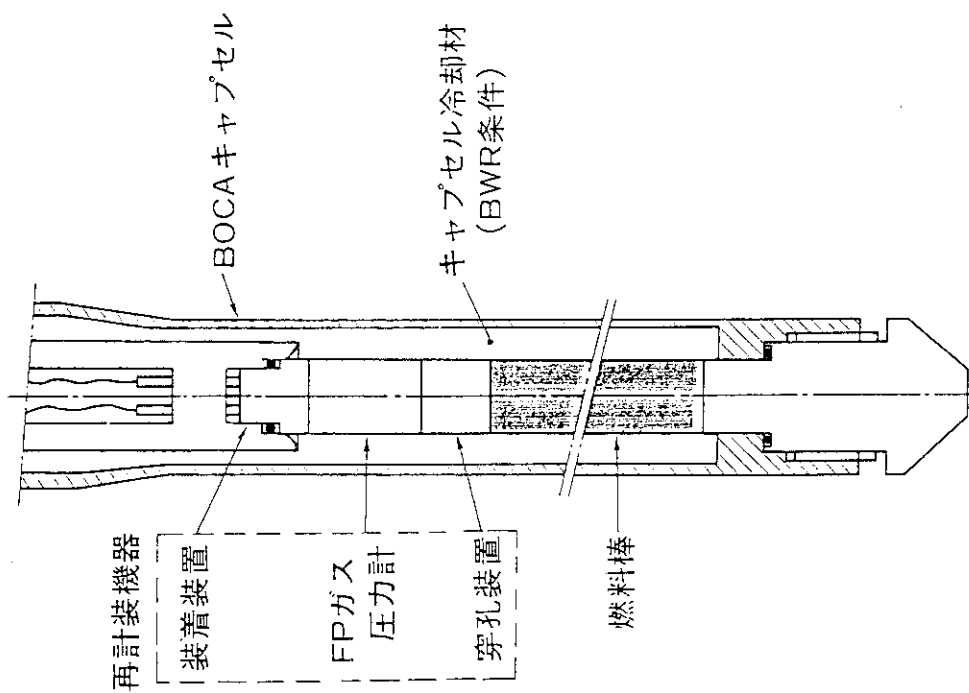


Fig.2 BOCA キャプセル内再計装燃料棒

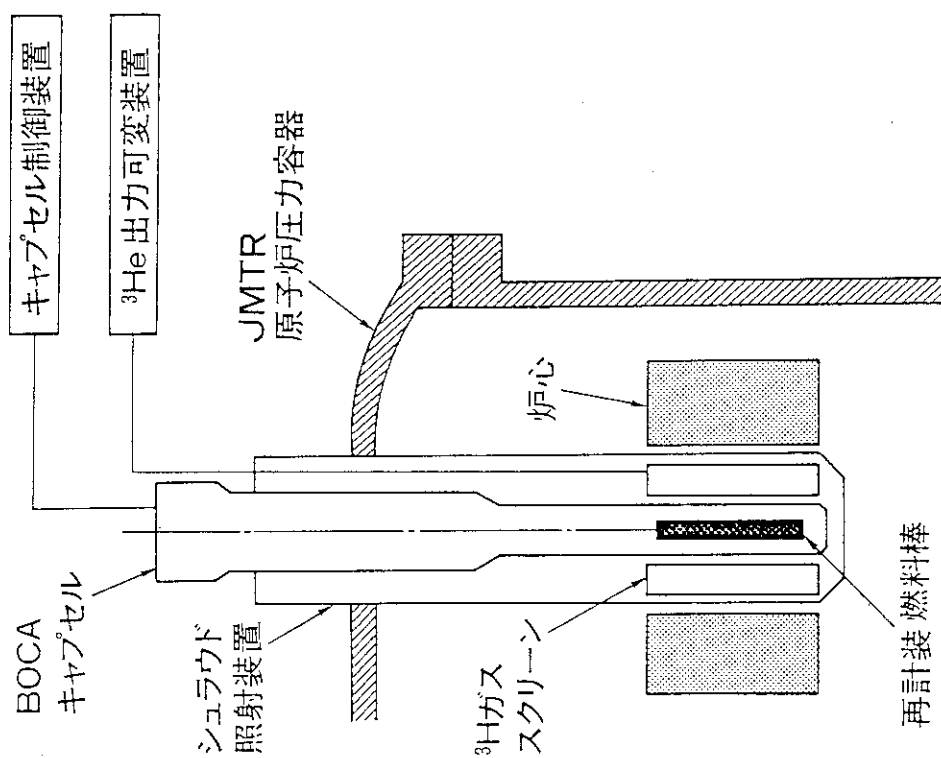


Fig.1 MTR出力急昇試験設備

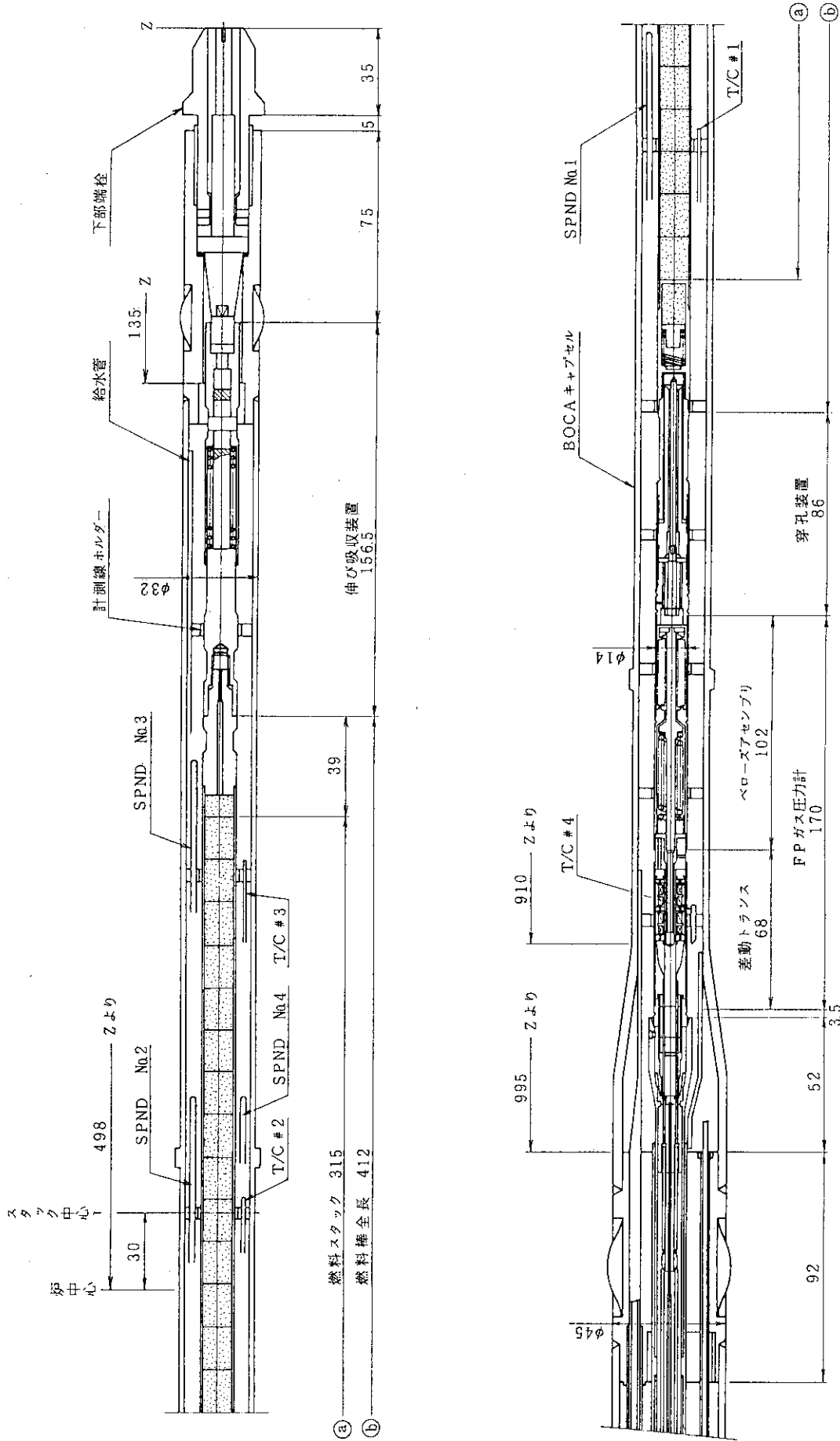


Fig.3 再計装燃料棒を装荷したBOCA キャップセル

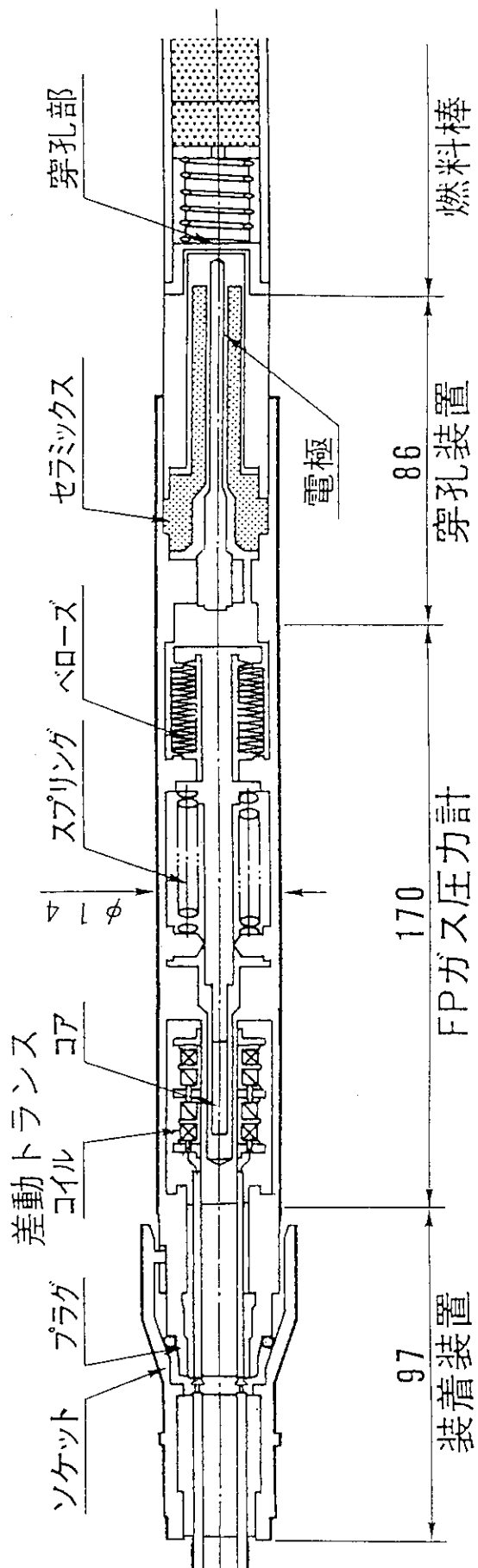
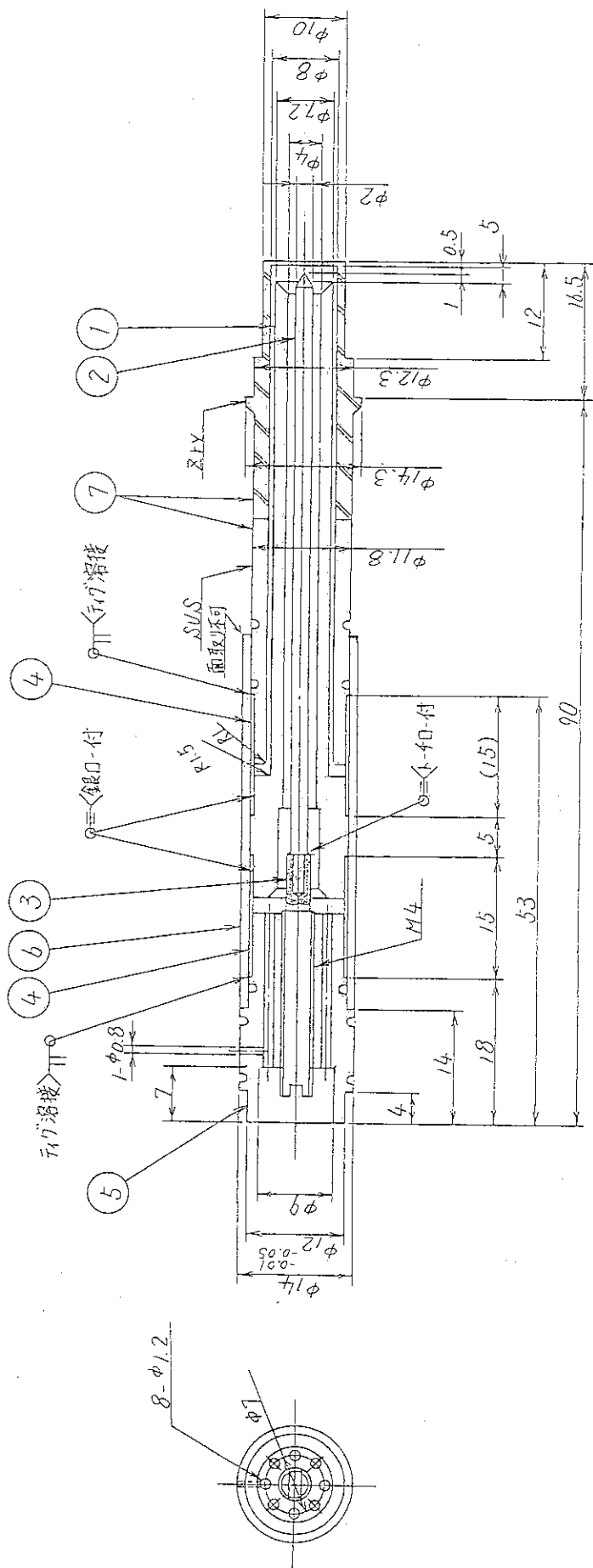


Fig.4 再計装機器構造の概略



番号	部品名	材質	員数
1	絶縁管	アルミナ	1
2	電極	W (Th 入り)	1
3	調整ネジ	SUS304	1
4	短管	Fe-Ni	2
5	通気管	SUS304	1
6	保護管	SUS304	1
7	穿孔部栓手	SUS-Zry 継手	1
8	止ナット	SUS304	1

Fig.6 穿孔装置

全ての作業は遠隔操作で実施する。

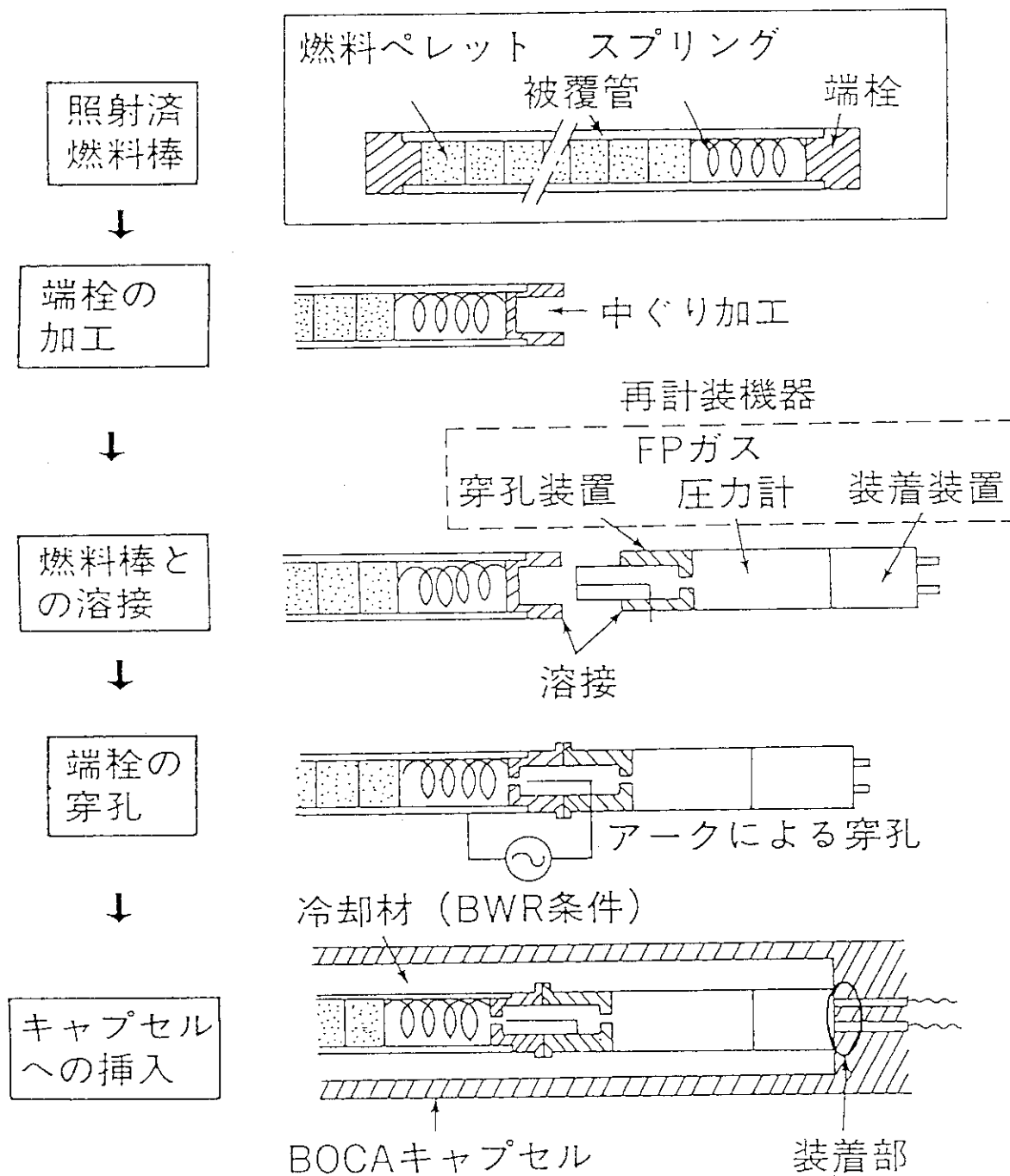


Fig.7 照射済燃料棒へのFPガス圧力計再計装手順

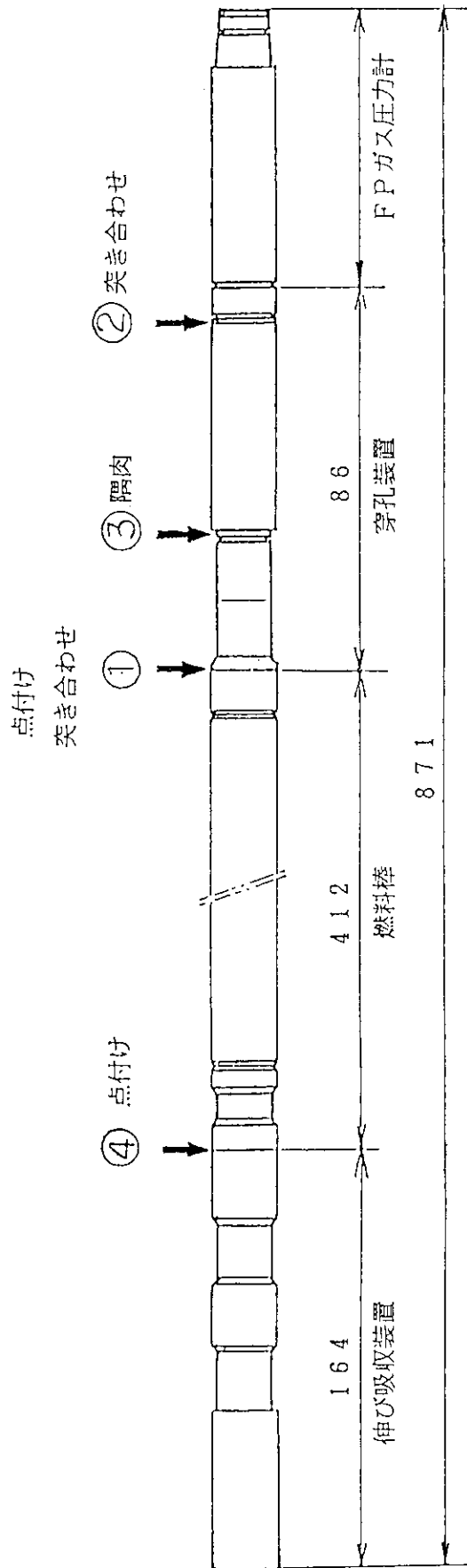


Fig.8 再計装燃料棒の溶接位置

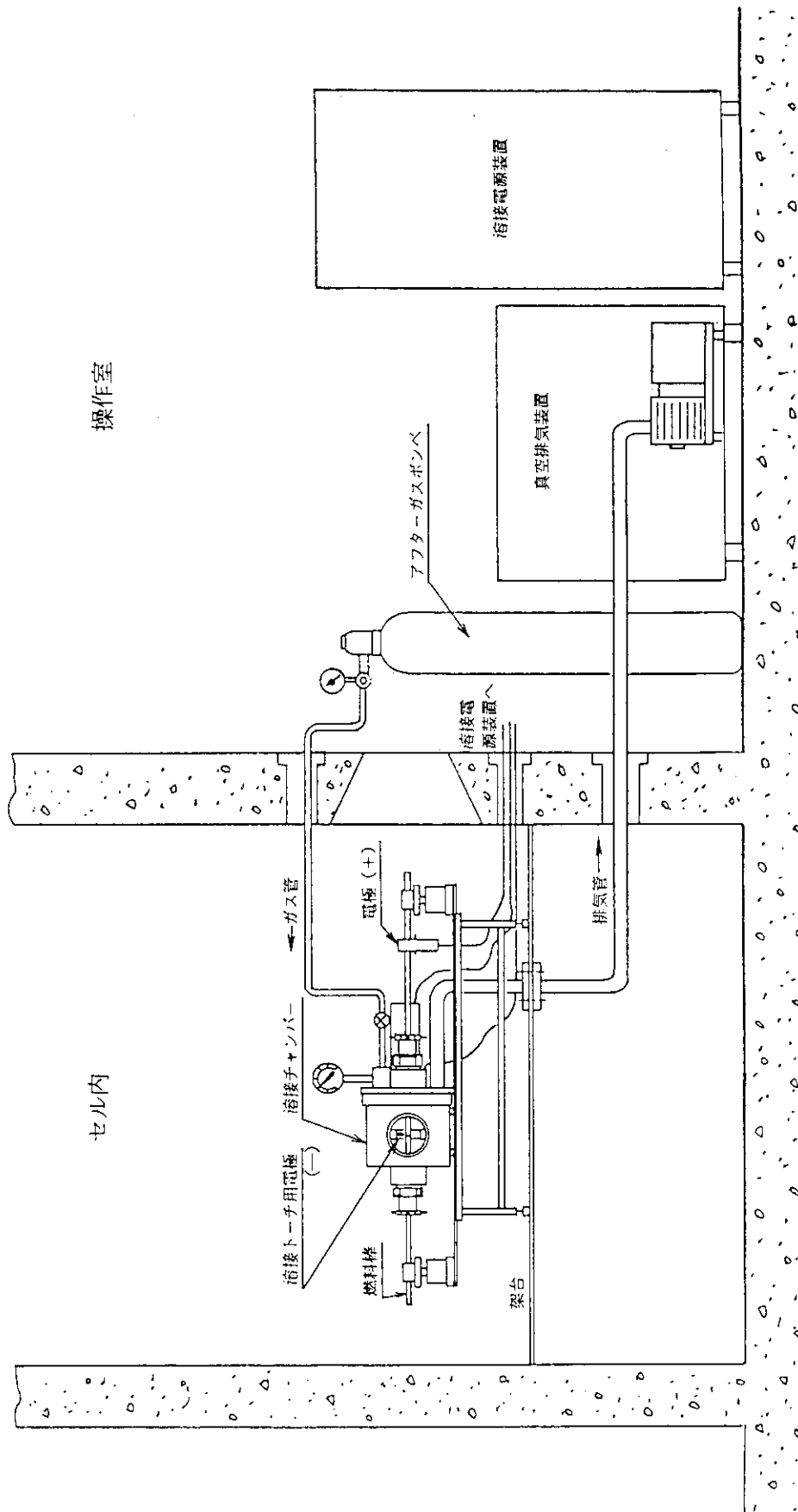


Fig.9 溶接装置の機器構成

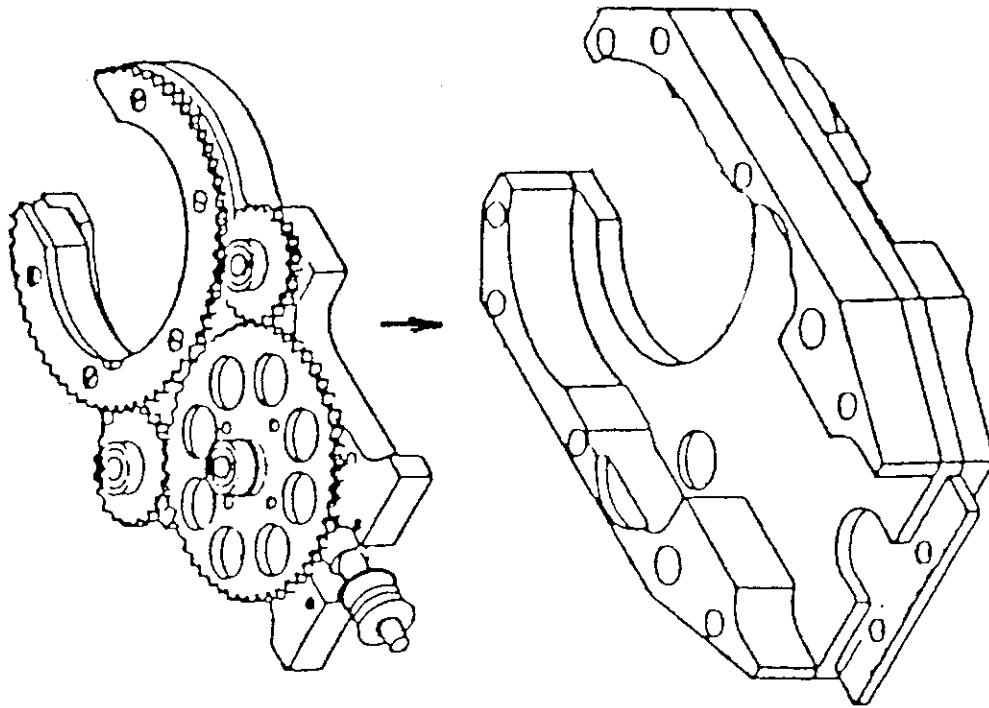


Fig.10 溶接トーチの回転機構

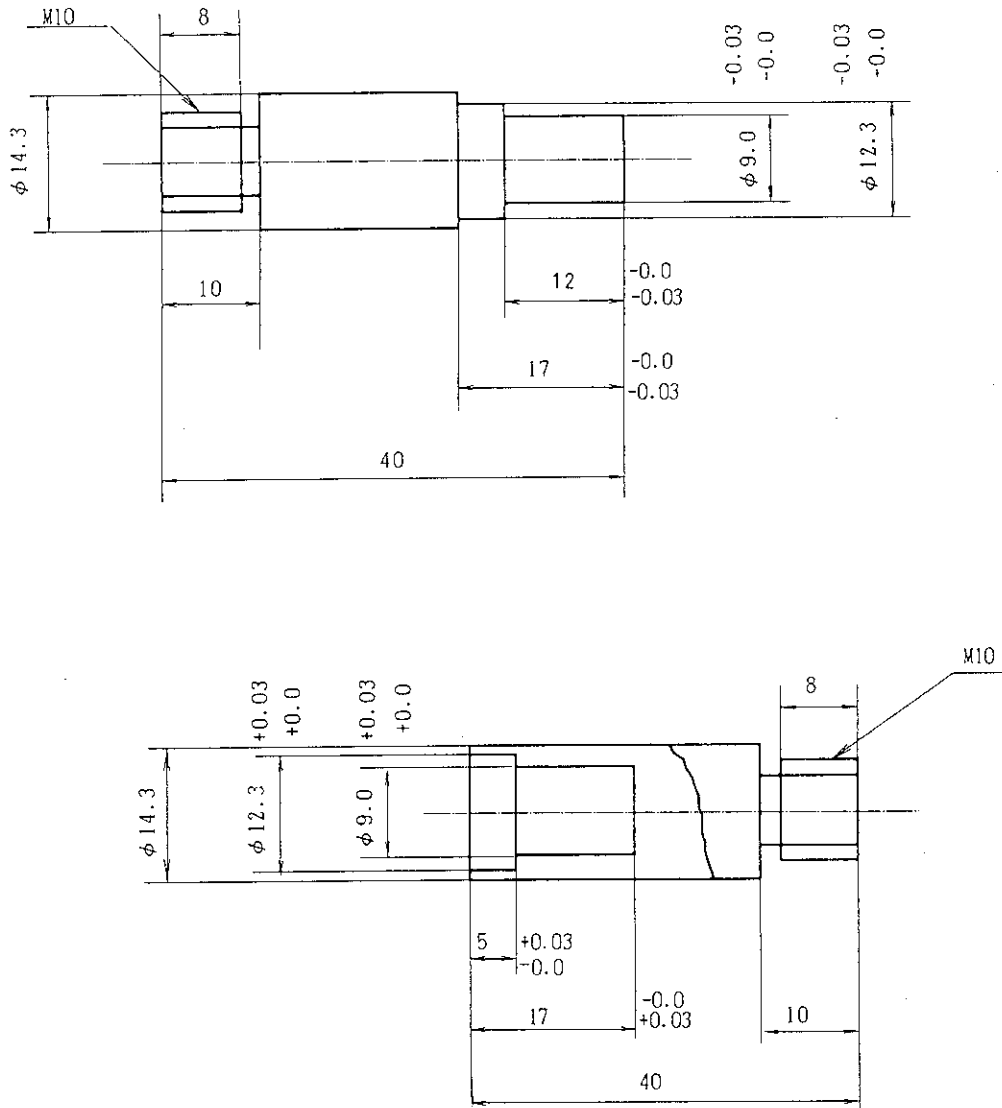
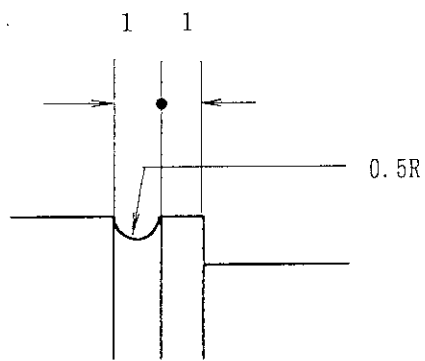
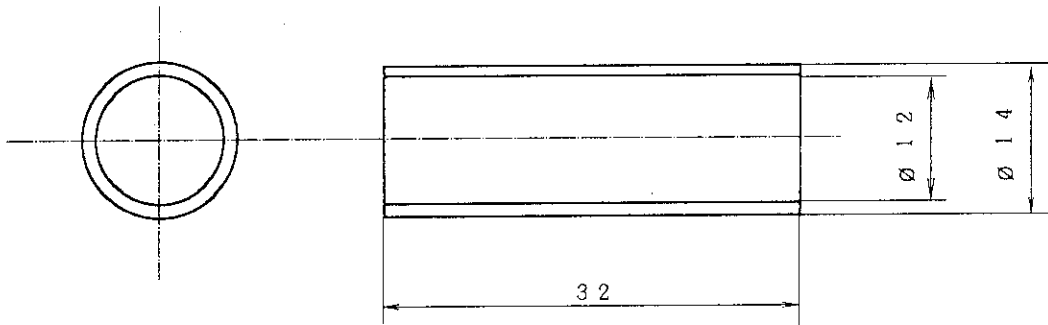
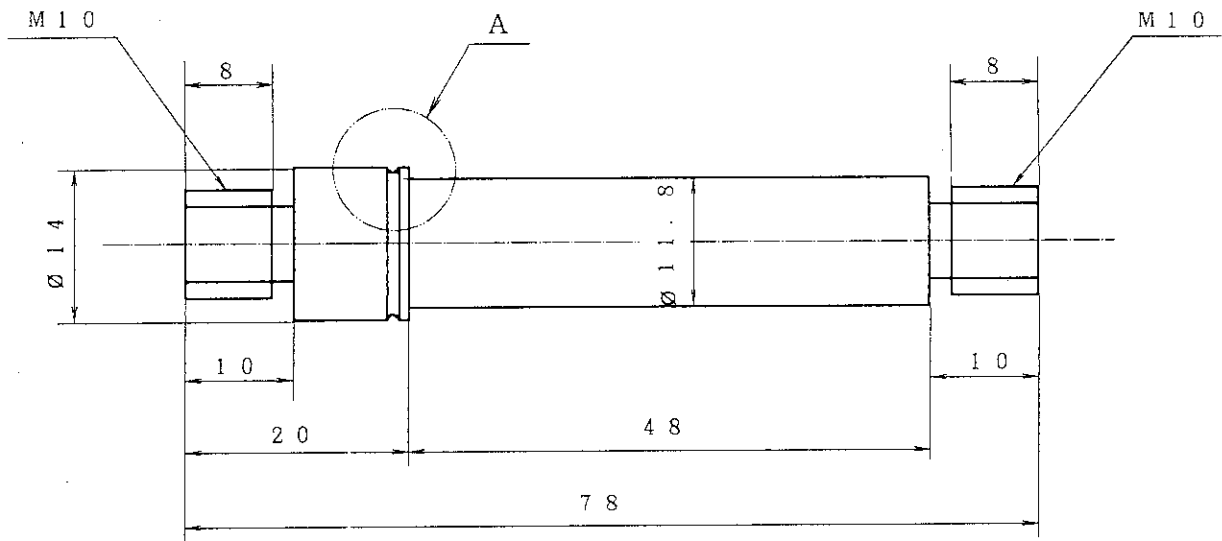


Fig.11 燃料棒端栓溶接試験試料の構造



A部詳細図

Fig.12 穿孔装置の保護管溶接試験試料の構造

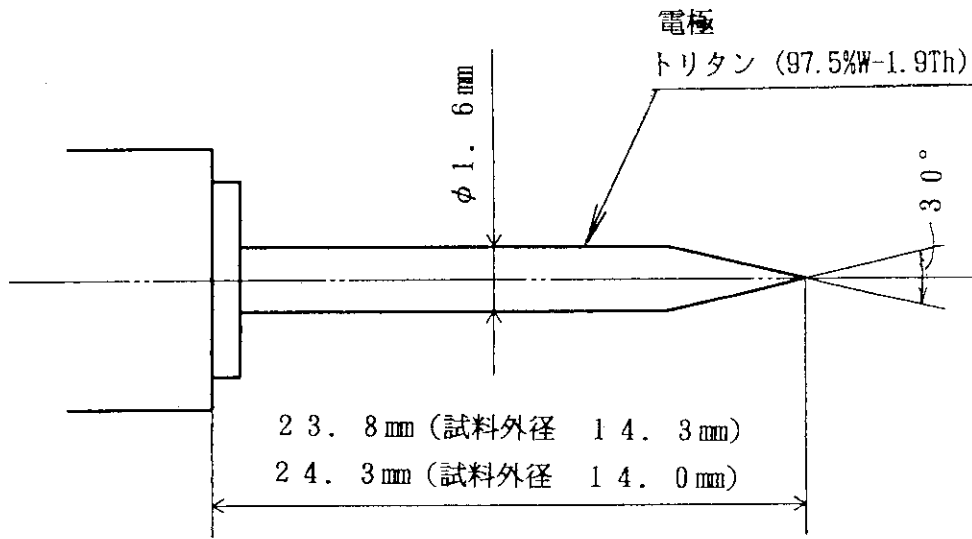


Fig.13 溶接トーチ用電極の形状

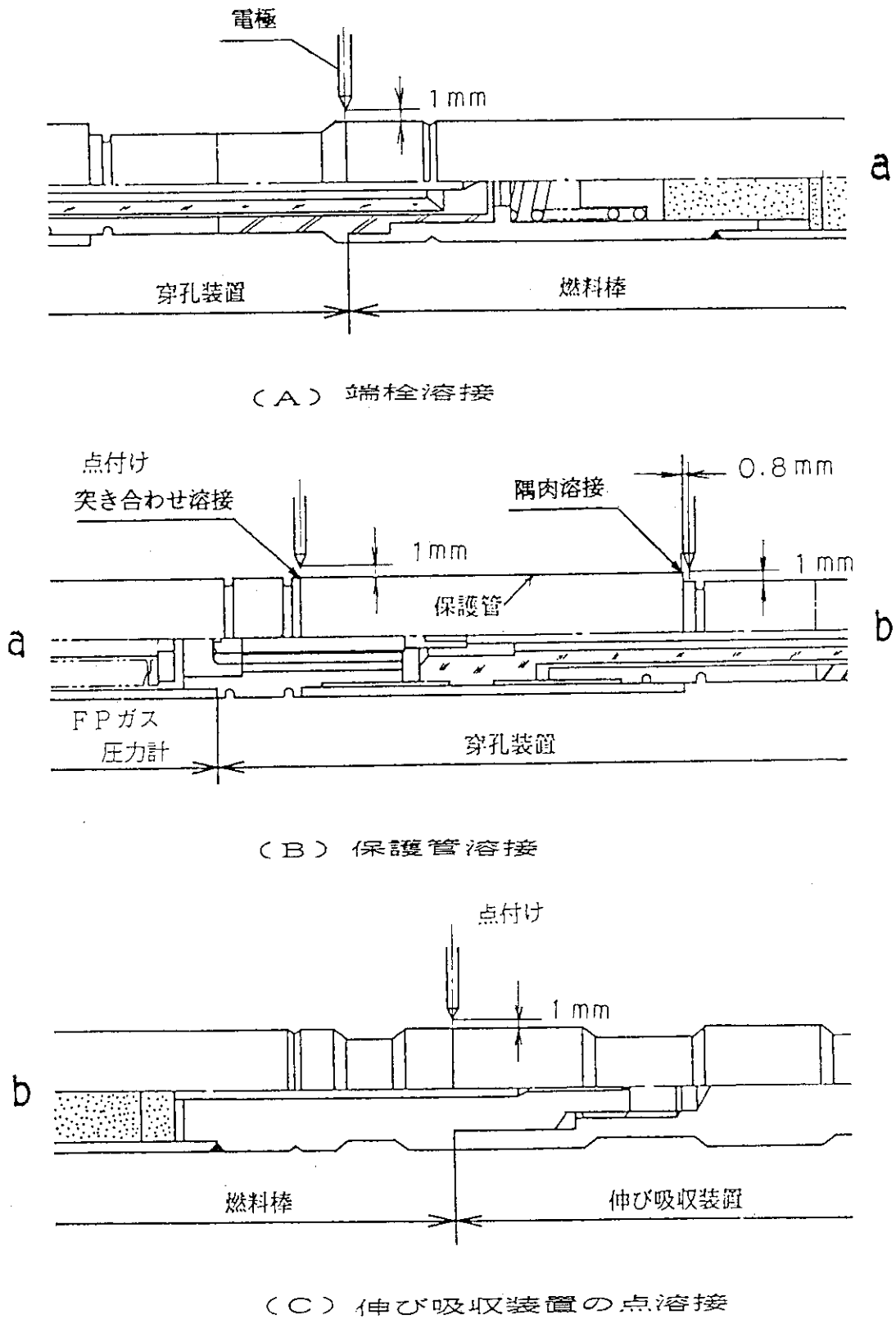
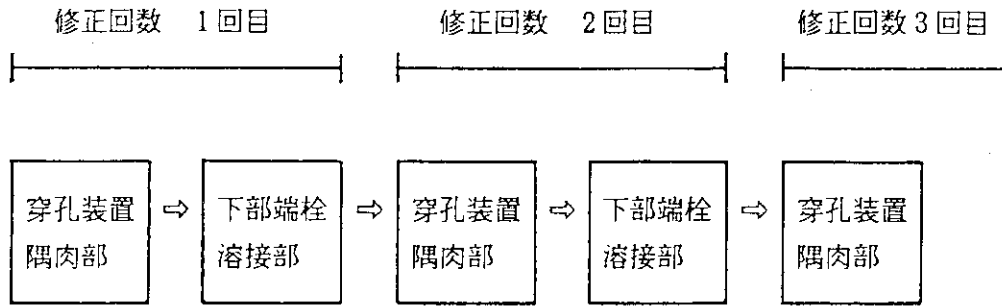
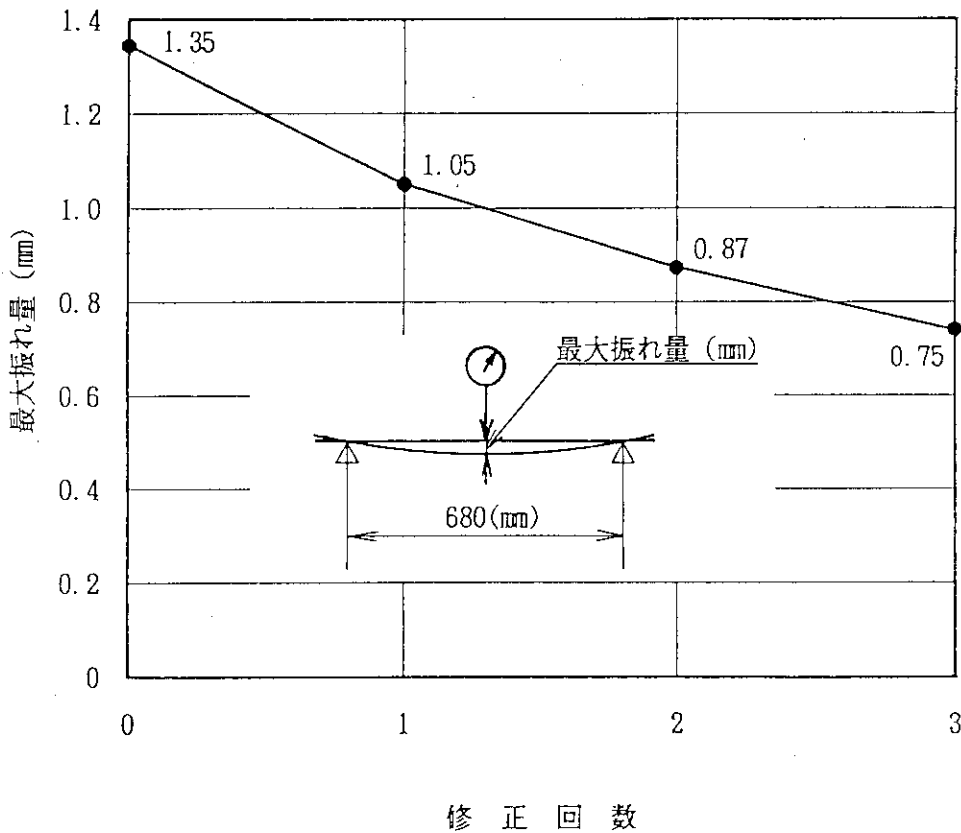


Fig.14 溶接試験試料と電極の位置相関



(a) 修正手順



(b) 修正結果と修正回数との関係

Fig.15 溶接部曲がり修正試験結果

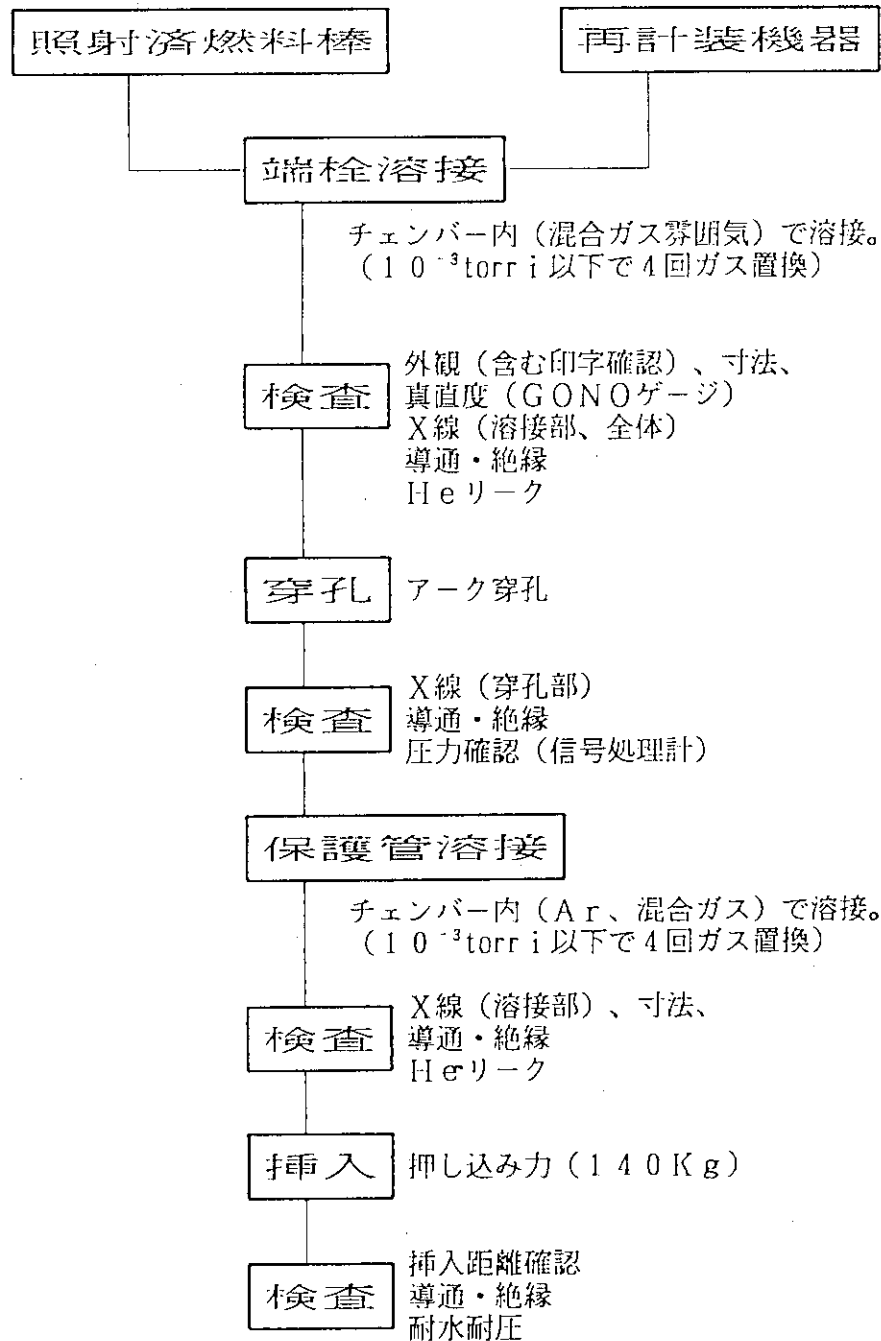


Fig.16 再計装燃料棒の溶接組立手順

(軸方向プロフィール:真直度基準値 1/500)

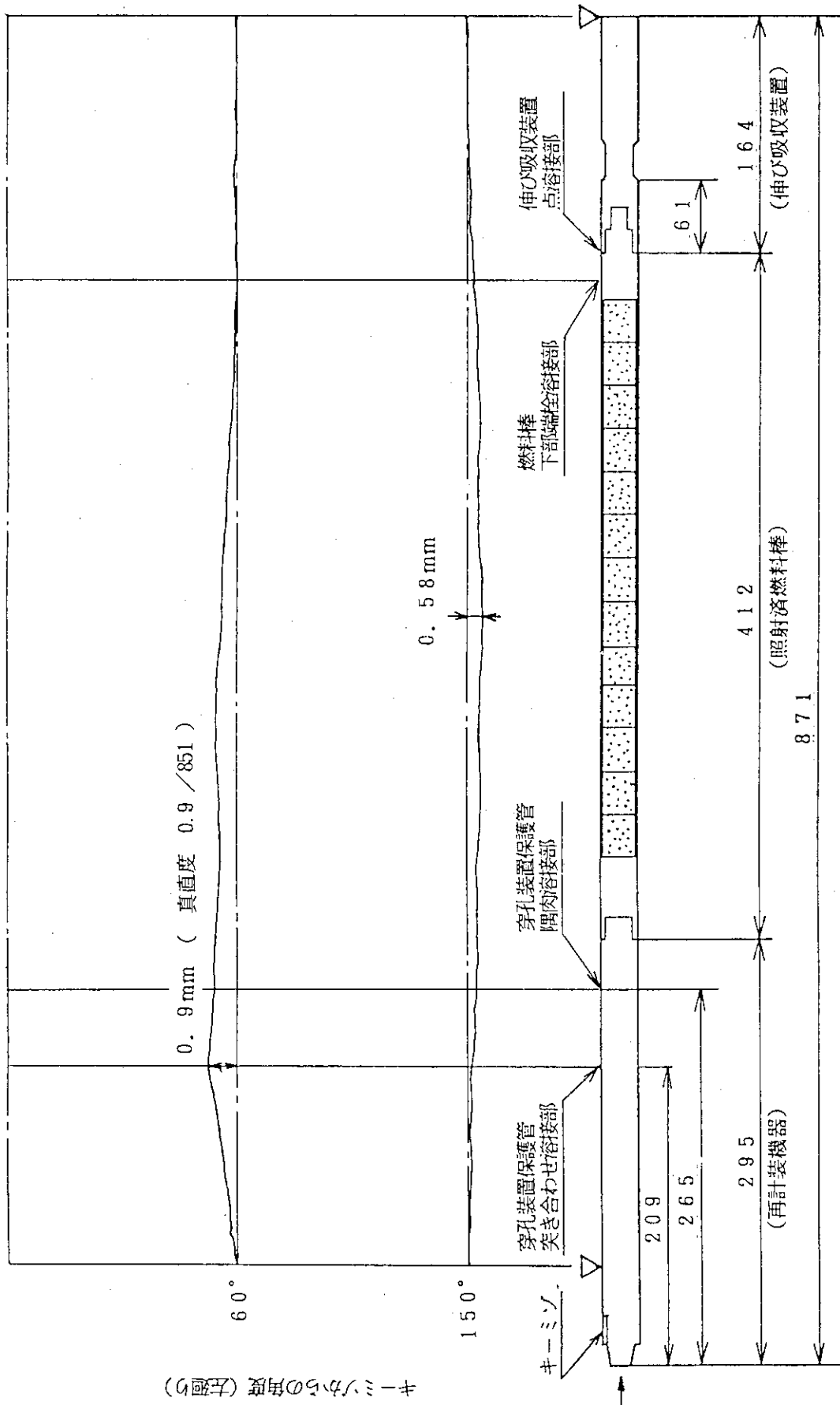


Fig.17 C6-2再計装燃料棒

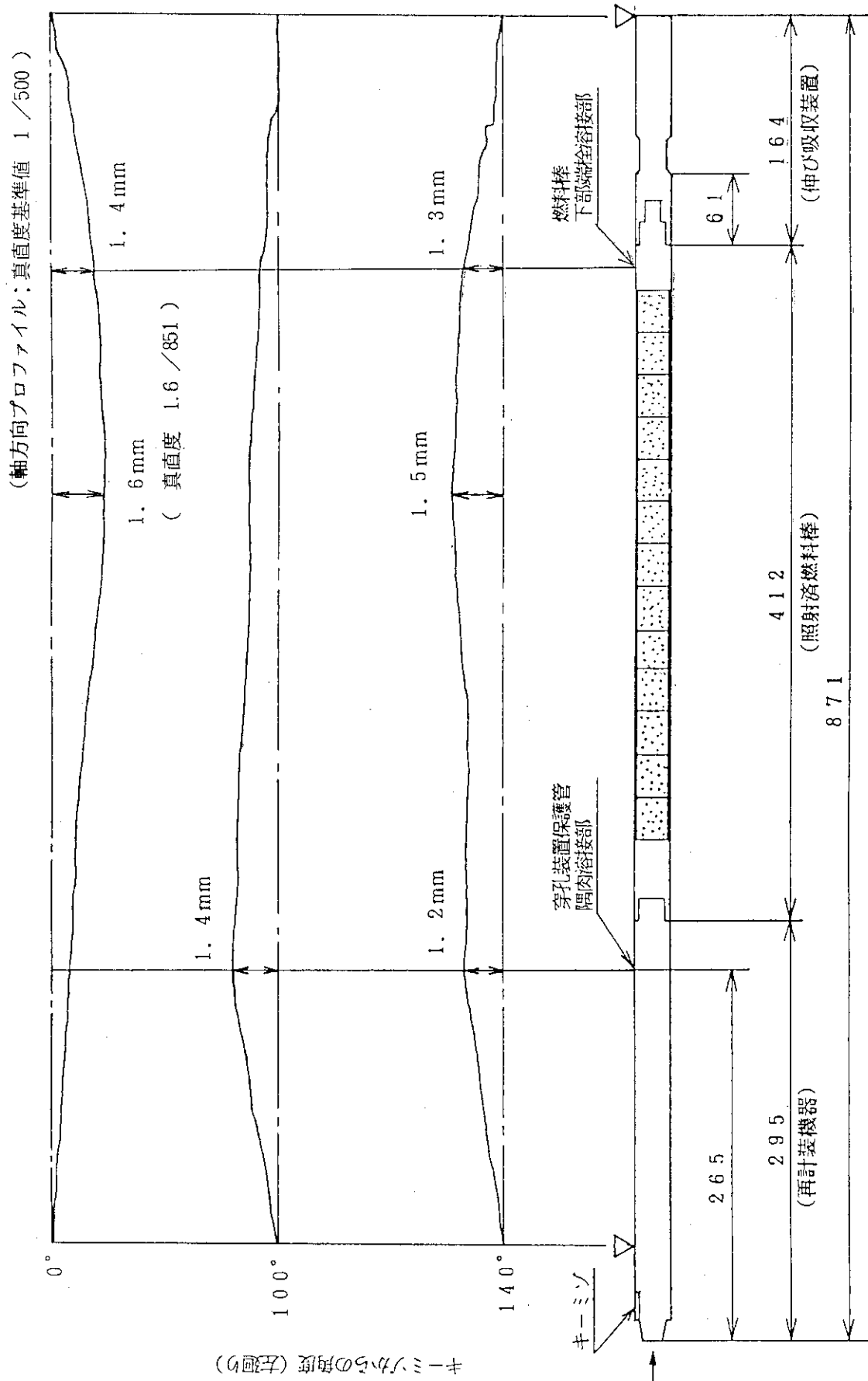


Fig.18 曲がり修正前のC6-4再計装燃料棒

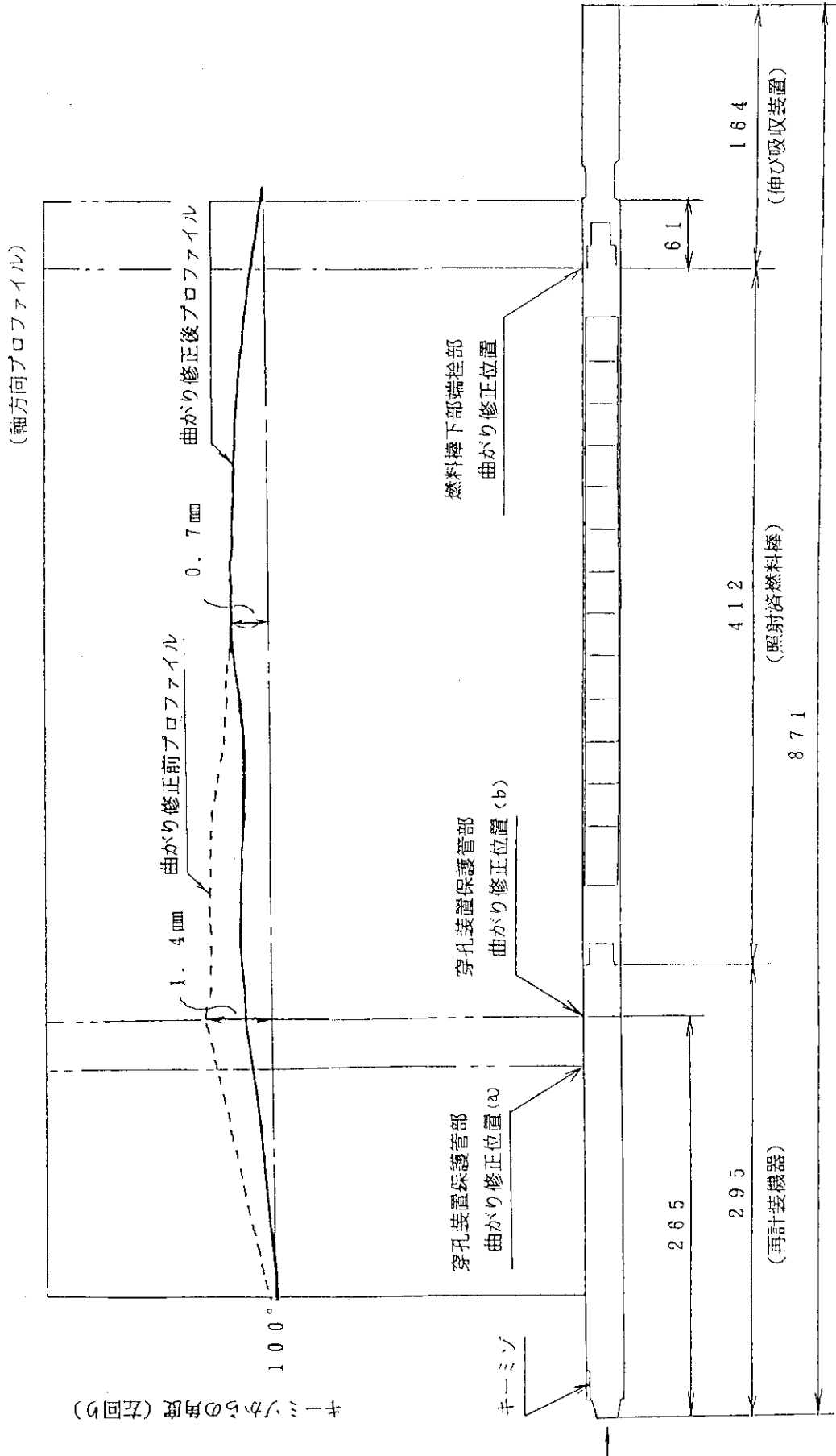


Fig.19 曲がり修正後のC6-4再計装燃料棒

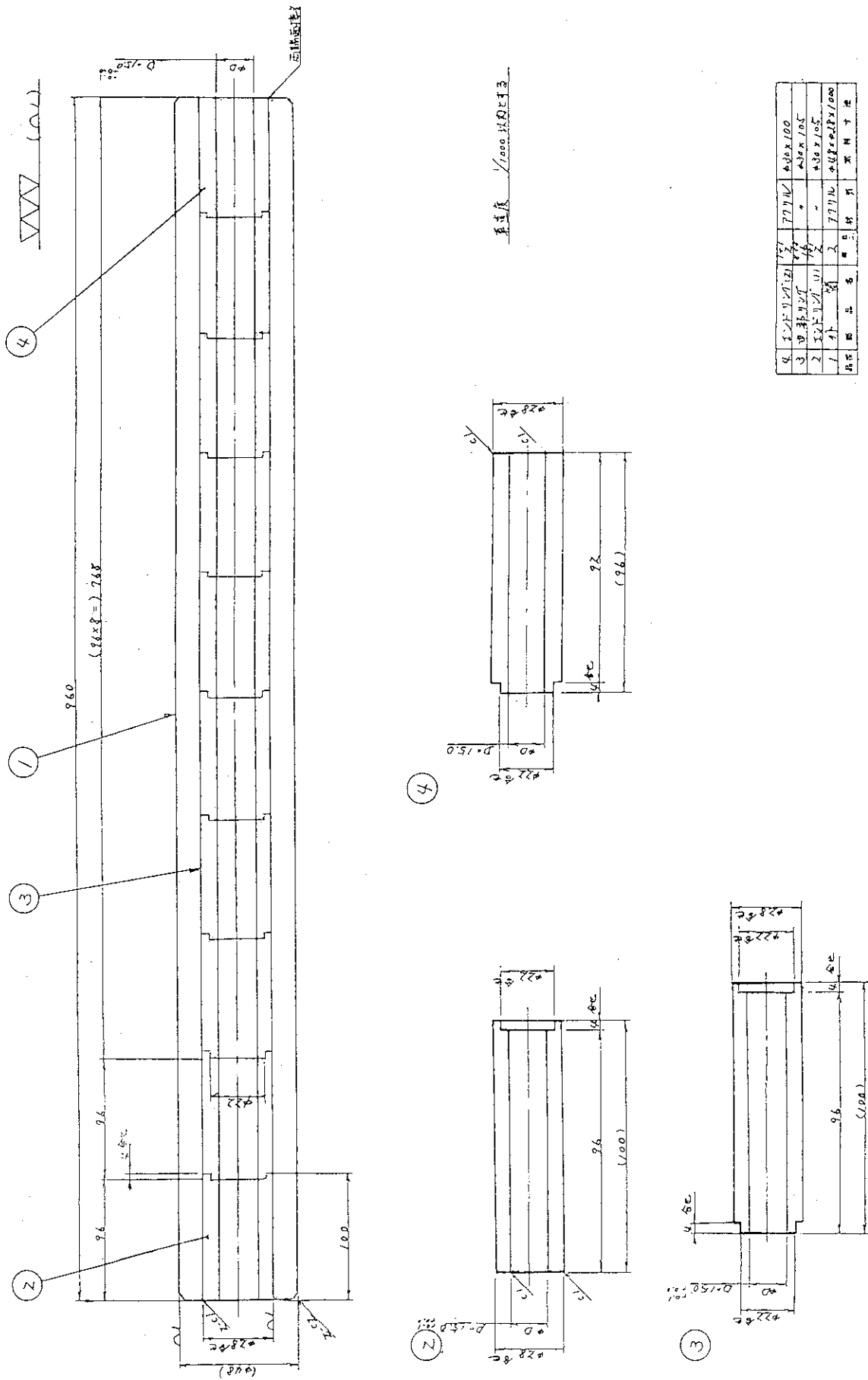


Fig.20 再計装燃料棒の通過検査治具

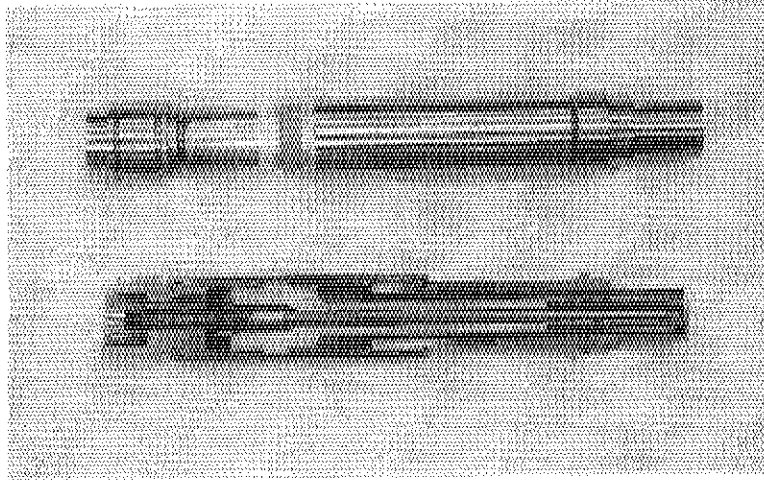


Photo.1 穿孔装置

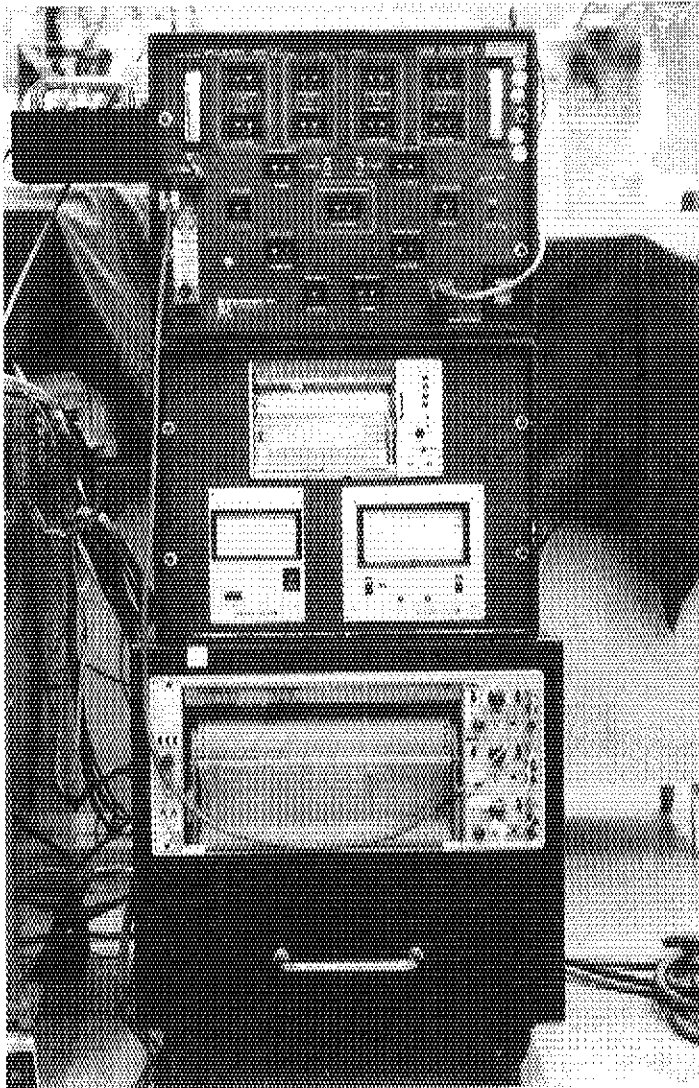


Photo.2 溶接電源装置

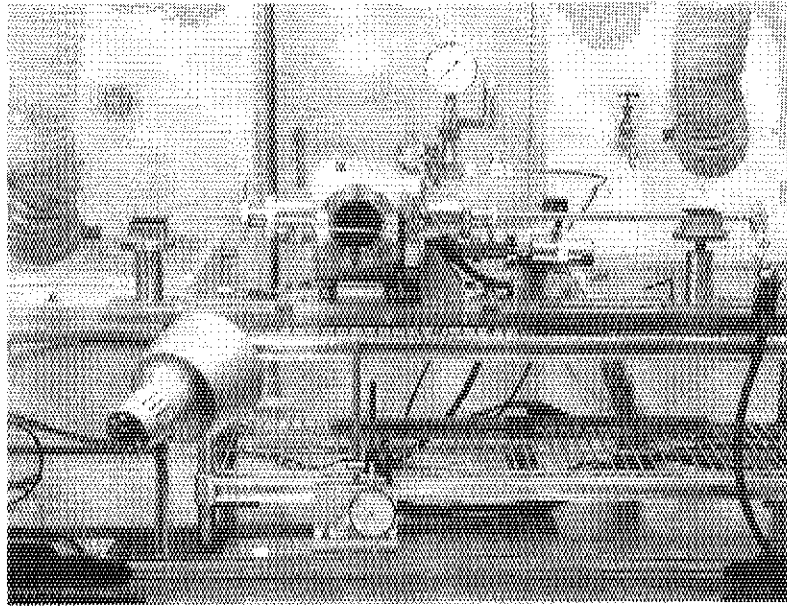


Photo.3 溶接チャンバー

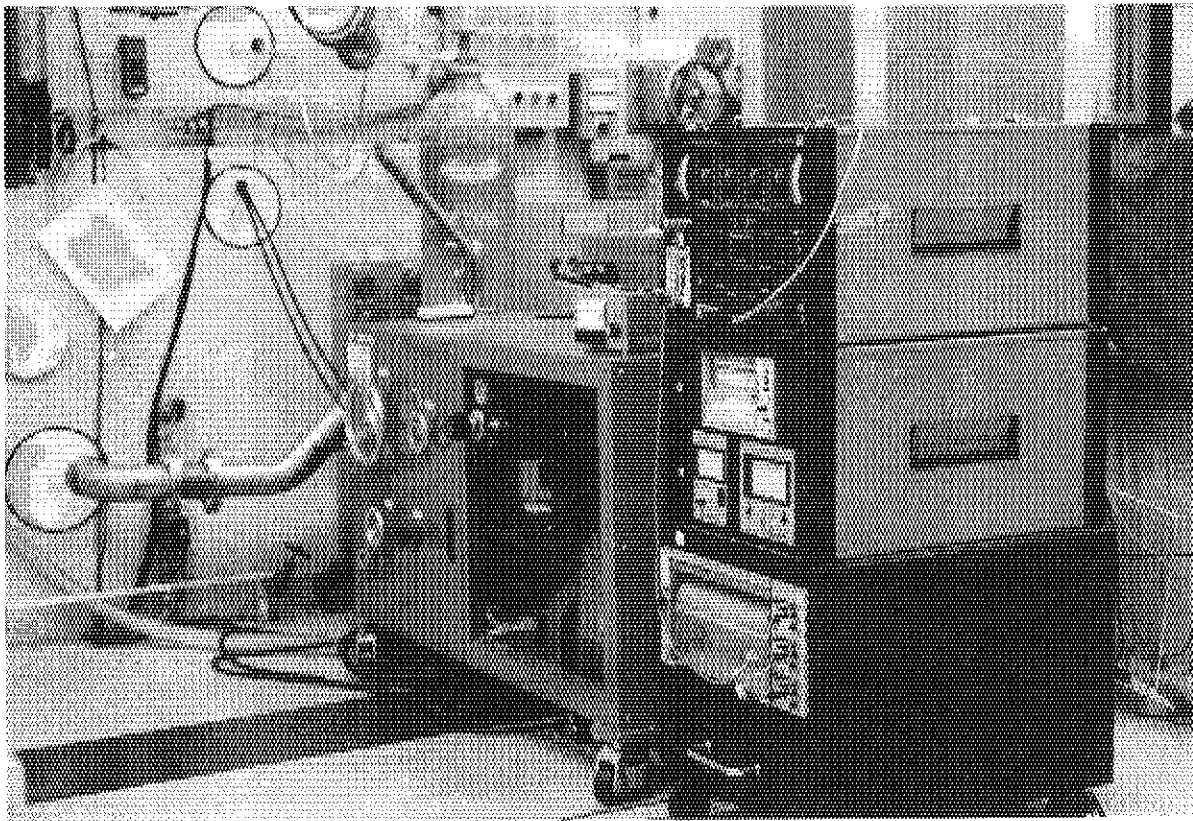


Photo.4 真空排気装置

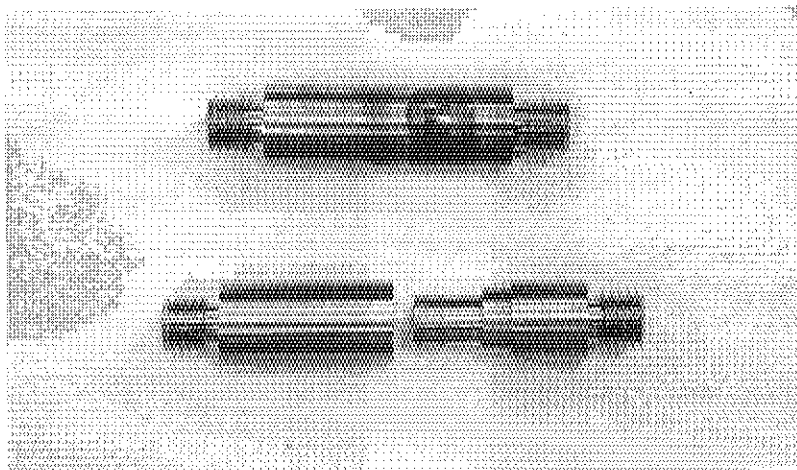
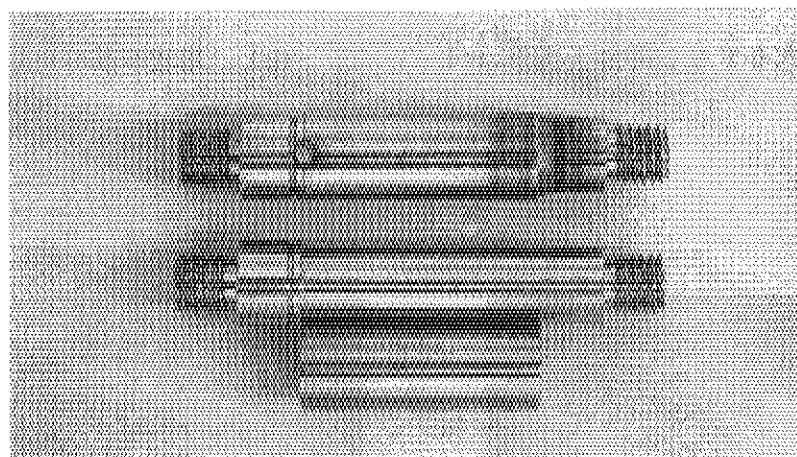
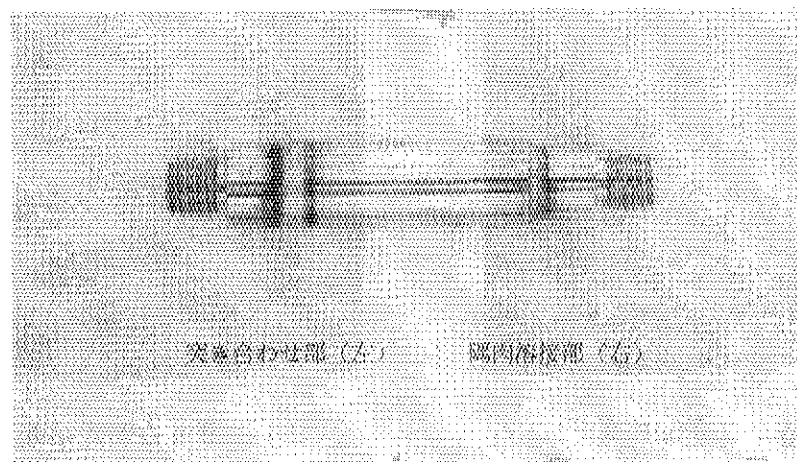


Photo.5 端栓溶接試料

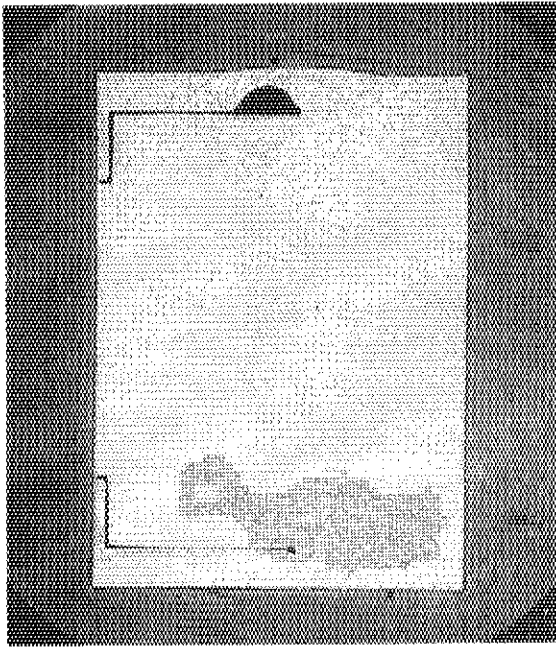


(a) 穿孔装置保護管の点溶接

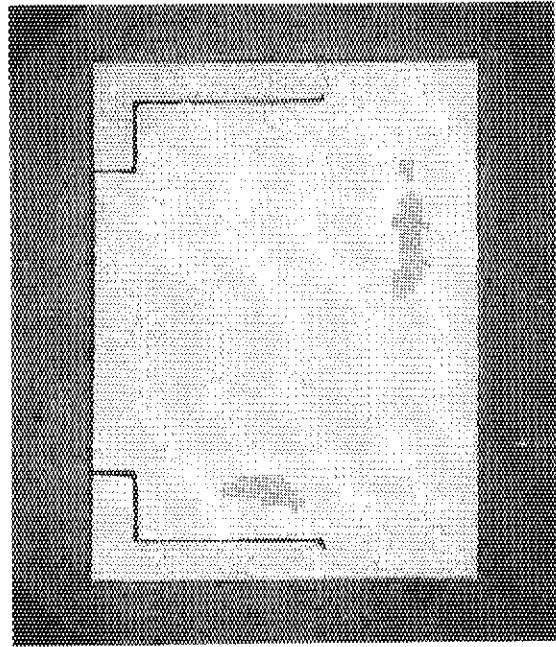


(b) 穿孔装置保護管の溶接

Photo.6 保護管溶接試料

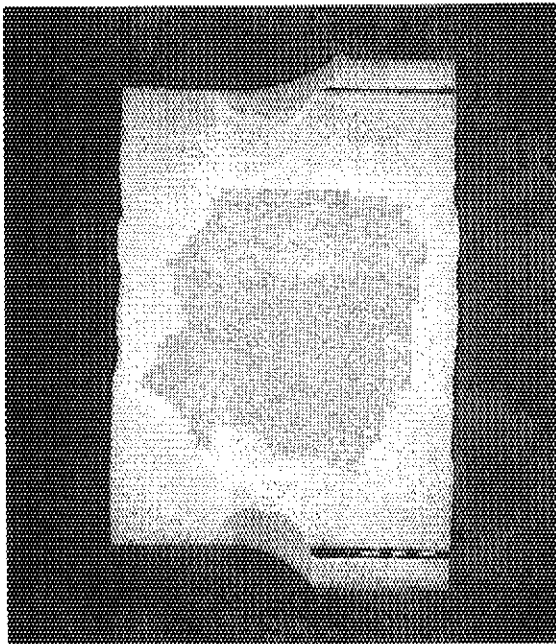


(a) 電流が大きすぎる場合

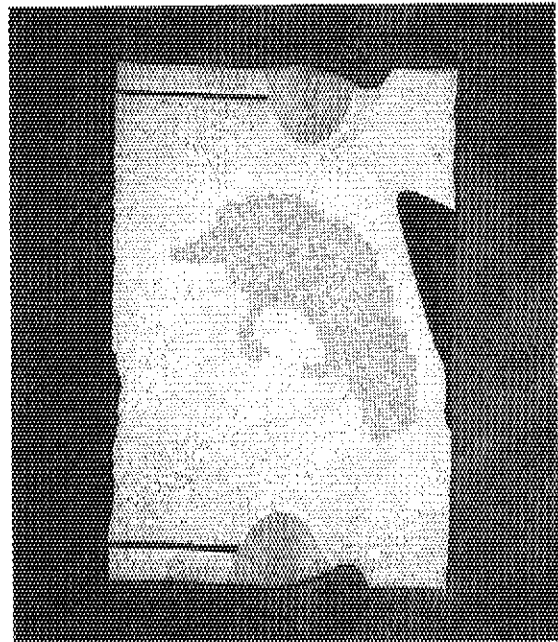


(b) 電流が妥当な場合

Photo.7 端栓溶接部金相写真



(a) すみ肉溶接部金相写真



(b) 突き合わせ溶接部金相写真

Photo.8 保護管溶接部金相写真

付録1 溶接チャンバー内トーチの心出し方法

〔作業手順〕

- (1) 溶接チャンバーの両サイドのVブロック用高さ調節台にVブロックを乗せる。
- (2) 溶接チャンバーの両サイドの再計装燃料棒締め付けナットを緩め、心出し棒を挿入する。
- (3) 両サイドの再計装燃料棒締め付けナットを締め付ける。
- (4) Vブロック用高さ調節台の円盤を回転させ、Vブロックの溝が心出し棒に接触するまで上げる。
- (5) 円盤とVブロックとをガムテープで固定する。
- (6) 両サイドの再計装燃料棒締め付けナットを緩め、心出し棒を引き抜く。
- (7) 溶接チャンバーの組込みボルト3本を外し、溶接チャンバーを左右に開く。
- (8) 心出し棒を再び挿入し、Vブロック上に乗せる。
- (9) 溶接ヘッドに溶接トーチ用電極を取り付ける。
- (10) リモート操作ペンダントの「JOG」ボタンを押し、トーチを回転させて心出し棒の中心軸と電極先端の軸心が一致するように以下の要領で調整する。
 - ① 溶接ヘッドの取り付けボルト4本を緩め、トーチを回転させながら溶接ヘッドを移動し、心出し棒と電極の先端との周方向ギャップが均等になるように4本のボルトで調節する。
 - ② 心出しが終了したら、心がずれないように注意して溶接ヘッドの取り付けボルト4本を増し締めして固定する。
 - ③ 再びトーチを回転させて、心出し棒と電極の先端との周方向ギャップが均等になっていることを確認する。
- (11) 心出し棒を引き抜き、左右の溶接チャンバーを合わせて溶接チャンバーの組込みボルト3本で締め付ける。
- (12) Vブロックを取り去り、溶接チャンバーを初期の状態に戻す。

付録 2 溶接条件の決定方法⁷⁾

(1) 平均電流の設定法

同一肉厚のパイプの突き合わせ溶接では、電流 I アンペアは以下の実験式が成立する。

$$I = K_g \times K_m \times S^{0.5} \times t^{1.25} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

- I : 平均電流 (A)
- K_g : ガス係数
- K_m : 材質係数
- S : 周速度 (mm/min)
- t : 肉厚 (mm)

ガス係数 K_g は、

使用ガス	K _g
Ar (100%)	1.0
Ar (95%) - He (5%)	0.9
He (100%)	0.6

材質係数 K_m は、

材質	K _m
SUS304	1.5 ~ 1.7
SUS316L	1.7 ~ 1.9
Zry, Ti	2.3 ~ 2.5
Cu	4.5 ~ 4.7

(2) 周速度の設定法

速度が2倍になると、平均電流は(1)式から $2^{0.5} = 1.414$ 倍になる。また、高速で大電流のほうが表面のビード幅は狭くなる。

本溶接装置では、周速度は常に188mm/minで溶接を行う。例えば、直径が40mmであれば、その溶接時間は1周で40秒となる。従って、周速度 S (mm/min) は次式で示される。

$$S = \frac{\pi \times D \times 60}{T} = 60\pi = 188 \text{ (mm/min)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

- D : パイプの外径 (mm)
- T : 1周に要する時間 (s)

(3) 電流波形の選定

電流波形は、電流比（ピーク電流とバックグラウンド電流との比）と及びパルス幅（％）に係している。一般に、電流比が大きく、パルス幅の小さな波形が使われる。

本溶接装置では、常に電流比は2倍、パルス幅は50％に設定する。

(4) ビードピッチ

ビードピッチとは、溶接によってできる円周のプールが、次のパルスできる円周プールと重ならない部分のピッチをいう。

ビードピッチは、パルスレート（パルス数／秒）が大きいほど小さく、周速度が大きいほど大きくなる。ビードピッチP（mm）は、次式で示される。

$$P = \frac{S}{60 \times f} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

f : パルスレート（パルス数／秒）

ビードピッチは、パルスによりできる円周プールに対して2/3～3/4が重なり合うようにする。

ビード幅で円周プールに対して3重ねると、ピッチは1mm、周速度が188mm/minであればパルスレートは、

$$f = \frac{S}{60 \times P} = \frac{188}{60} = 3.13 \quad (\text{パルス／秒})$$

となる。

(5) フィクスチャーディレイ

アークがスタートしてから一定の溶け込み深さになるまで、電極を動かさずにおく機能で、本溶接装置では、約1～3秒のフィクスチャーディレイが必要になる。

(6) アップスロープ

アークのスタート時に、設定した電流まで急激に上げると電極の消耗が激しくなるため、徐々に電流を上げることが必要である。本溶接装置の場合、フィクスチャーディレイと同じ秒数に設定するのが良い。

(7) ダウンスロープ

電極が1周して、溶接が終わる時に電流を徐々に減らす時間で、溶接終了時のクレータ処理を行う時間である。通常は、この部分の長さを5～10mmにする。

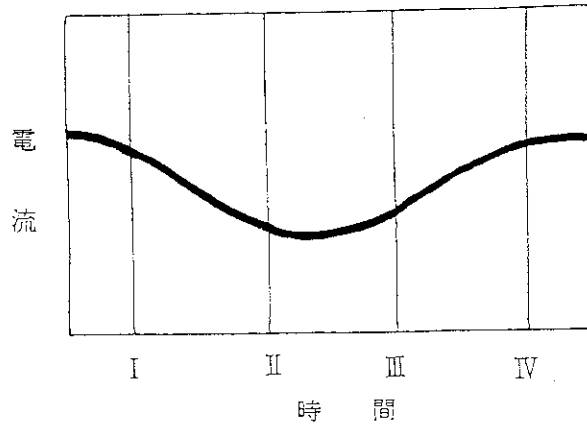
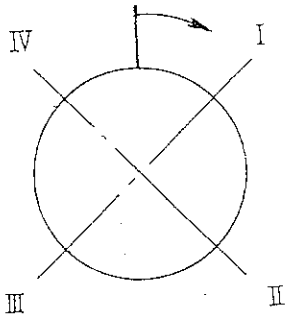
すなわち、周速度が188mm/minの場合、ダウンスロープ長さを8mmにする時間Tは、

$$T = \frac{8 \text{ mm} \times 60}{188 \text{ mm/min}} = 2.6 \text{ min}$$

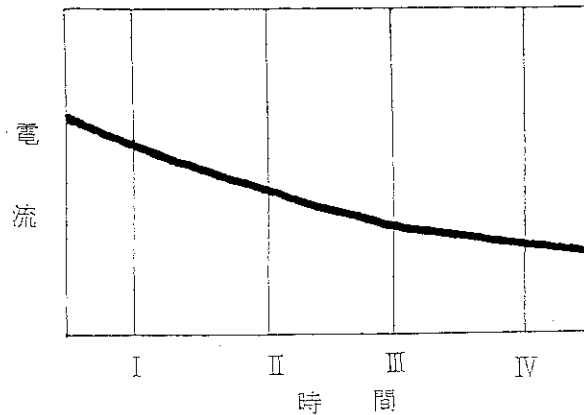
となる。

(8) 電流配分

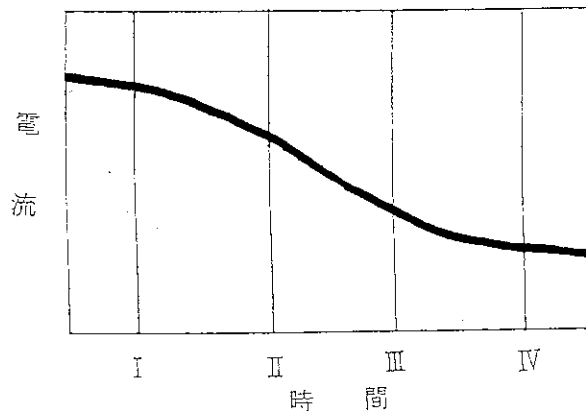
パイプを水平に固定して電極が回転する全姿勢溶接では、電極が下方に動く時よりも、上方に動く時の方が電流が小さくて良いという現象 (a) があり、溶接姿勢による電流配分が必要になる。また、溶接が進むにつれて、パイプの温度が上がっていく (b) ので、電流を減らしていく必要がある。従って、一般的にはこの (a) (b) の現象を合成した (c) に示す電流配分が用いられる。



(a) 電極が回転する場合の電流補正



(b) パイプの温度上昇による電流補正



(c) a, bを合成した電流補正

付録 3 各溶接条件の溶接機盤面設定

- (1) 端栓の突き合わせ溶接条件
- (2) 保護管の点溶接条件
- (3) 保護管のすみ肉溶接条件
- (4) 保護管突き合わせ溶接条件
- (5) 穿孔装置のガス封入孔の封孔条件

(1) 端栓突き合わせ溶接条件

	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%; text-align: center;">7</td><td style="width: 50%; text-align: center;">5</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">1-99 AMPS.</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">LEVEL 1</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">6</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">0-99 SEC.</td></tr> </table> </div>	7	5	1-99 AMPS.		LEVEL 1		0	6	0-99 SEC.		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%; text-align: center;">7</td><td style="width: 50%; text-align: center;">0</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">1-99 AMPS.</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">LEVEL 2</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">5</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">0-99 SEC.</td></tr> </table> </div>	7	0	1-99 AMPS.		LEVEL 2		0	5	0-99 SEC.		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%; text-align: center;">6</td><td style="width: 50%; text-align: center;">5</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">1-99 AMPS.</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">LEVEL 3</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">4</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">0-99 SEC.</td></tr> </table> </div>	6	5	1-99 AMPS.		LEVEL 3		0	4	0-99 SEC.		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%; text-align: center;">5</td><td style="width: 50%; text-align: center;">5</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">1-99 AMPS.</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">LEVEL 4</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">4</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">0-99 SEC.</td></tr> </table> </div>	5	5	1-99 AMPS.		LEVEL 4		0	4	0-99 SEC.		
7	5																																												
1-99 AMPS.																																													
LEVEL 1																																													
0	6																																												
0-99 SEC.																																													
7	0																																												
1-99 AMPS.																																													
LEVEL 2																																													
0	5																																												
0-99 SEC.																																													
6	5																																												
1-99 AMPS.																																													
LEVEL 3																																													
0	4																																												
0-99 SEC.																																													
5	5																																												
1-99 AMPS.																																													
LEVEL 4																																													
0	4																																												
0-99 SEC.																																													
ANPS.					VOLTS																																								
	PULSE WIDTE	TIMER	0 N ← OFF	PULSE	0 N ← OFF																																								
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">3 0</div> 1-99 %				PULSE RATE <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">4 0</div> × 0.1 1-99 P. P. S.																																								
UPSLOPE		BACKGROUND CURRENT			DOWNSLOPE																																								
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">1</div> 0-9 SEC.		<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">4 0</div> 1-99 AMPS.			<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">3</div> 0-9 SEC.																																								
	PRE FLOW		FIX. DELAY		POST FLOW																																								
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">0 1</div> 0-99 SEC.		<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">1</div> 0-99 SEC.		<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">0 1</div> 0-99 SEC.																																								
			FIX. SPEED																																										
			<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">2 3</div> 1-99 %																																										

雰囲気：He + Xe + Kr 混合ガス， 電極の長さ：23.8 mm

試料：Zry-2, Ar ガス置換を5回行った後、混合ガス雰囲気です溶接

〔作業手順〕

- (1) ロータリーポンプ及び溶接装置の電源ON
- (2) 再計装機器を左側から、燃料棒を右側からそれぞれ溶接チャンバーに挿入し、再計装機器の先端を燃料棒の端栓に挿入し、チャンバーの両側ネジを締めて固定する。
- (3) 23.8 mmの電極をトーチに取り付け、チャンバーの両側ネジを調整して電極先端と突き合わせ部の位置合わせを行う。
- (4) トランシットで再計装機器と燃料棒の真直度を確認する。
- (5) アースケーブルを燃料棒の端栓付近に取り付ける。(端栓表面に酸化膜があると、電流が流れにくいので酸化膜部を避けて接続すること。)
- (6) ヘリウムガスを流し、溶接チャンバー内を2回ガス置換し、その後、混合ガスで2回のガス置換を行った後、混合ガスを流す。
- (7) パネル上で上図の溶接条件を操作盤設定する。
- (8) コントロールボックスのSTARTボタンを押し、溶接を開始する。
- (9) トーチが、約1回転と1/3回転して自動周溶接を行う。

(2) 保護管の点溶接条件

	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%; text-align: center;">5</td><td style="width: 50%; text-align: center;">0</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">1-99 AMPS.</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">LEVEL 1</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">2</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">0-99 SEC.</td></tr> </table> </div>	5	0	1-99 AMPS.		LEVEL 1		0	2	0-99 SEC.		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%; text-align: center;">0</td><td style="width: 50%; text-align: center;">0</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">1-99 AMPS.</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">LEVEL 2</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">0</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">0-99 SEC.</td></tr> </table> </div>	0	0	1-99 AMPS.		LEVEL 2		0	0	0-99 SEC.		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%; text-align: center;">0</td><td style="width: 50%; text-align: center;">0</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">1-99 AMPS.</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">LEVEL 3</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">0</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">0-99 SEC.</td></tr> </table> </div>	0	0	1-99 AMPS.		LEVEL 3		0	0	0-99 SEC.		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%; text-align: center;">0</td><td style="width: 50%; text-align: center;">0</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">1-99 AMPS.</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">LEVEL 4</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">0</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">0-99 SEC.</td></tr> </table> </div>	0	0	1-99 AMPS.		LEVEL 4		0	0	0-99 SEC.		
5	0																																												
1-99 AMPS.																																													
LEVEL 1																																													
0	2																																												
0-99 SEC.																																													
0	0																																												
1-99 AMPS.																																													
LEVEL 2																																													
0	0																																												
0-99 SEC.																																													
0	0																																												
1-99 AMPS.																																													
LEVEL 3																																													
0	0																																												
0-99 SEC.																																													
0	0																																												
1-99 AMPS.																																													
LEVEL 4																																													
0	0																																												
0-99 SEC.																																													
ANPS.	PULSE WIDTE	TIMER	PULSE	PULSE RATE	VOLTS																																								
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">3 0</div> 1-99 %	0 N ⇐ OFF	0 N ⇐ OFF	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">4 0</div> × 0.1 1-99 P. P. S.																																									
UPSLOPE	BACKGROUND CURRENT			DOWNSLOPE																																									
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">1</div> 0-9 SEC.	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%; text-align: center;">2</td><td style="width: 50%; text-align: center;">6</td></tr> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">1-99 AMPS.</td></tr> </table> </div>			2	6	1-99 AMPS.		<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">2</div> 0-9 SEC.																																					
2	6																																												
1-99 AMPS.																																													
PRE FLOW				POST FLOW																																									
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">0 1</div> 0-99 SEC.	FIX. DELAY			FIX. SPEED																																									
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">1</div> 0-99 SEC.			<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">0 0</div> 1-99 %																																									

雰囲気： Ar ガス， 電極の寸法： 23.8 mm， 試料： SUS 304

試料： Zry-2， Ar ガス置換を 5 回行った後、Ar ガス雰囲気で溶接

〔作業手順〕

- (1) ロータリーポンプ及び溶接装置の電源 ON
- (2) 再計装燃料棒を溶接チャンバー内に挿入し、チャンバーの両側ネジを締め
て固定する。
- (3) 23.8 mm の電極をトーチに取り付ける。
- (4) ピンセットで保護管のズレを直し、保護管の突き合わせ部と電極の先端位
置を合わせる。
- (5) アースケーブルを燃料棒の端栓付近に取り付ける。（端栓表面に酸化膜が
あると、電流が流れにくいので酸化膜部を避けて接続すること。）
- (6) アルゴンガスを流し、溶接チャンバー内を 4 回ガス置換した後、アルゴン
ガスを流す。
- (7) パネル上で上図の溶接条件を操作盤設定する。
- (8) コントロールボックスの START ボタンを押し、点溶接を行う。
- (9) トーチがを 120 度ずつ回転して周方向に 3 点を溶接する。

(3) 保護管のすみ肉溶接条件

	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> <div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100%;"> 50 </div> <p>1-99 AMPS.</p> <p>LEVEL 1</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100%;"> 06 </div> <p>0-99 SEC.</p> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> <div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100%;"> 50 </div> <p>1-99 AMPS.</p> <p>LEVEL 2</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100%;"> 05 </div> <p>0-99 SEC.</p> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> <div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100%;"> 50 </div> <p>1-99 AMPS.</p> <p>LEVEL 3</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100%;"> 04 </div> <p>0-99 SEC.</p> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> <div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100%;"> 45 </div> <p>1-99 AMPS.</p> <p>LEVEL 4</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100%;"> 04 </div> <p>0-99 SEC.</p> </div>	
ANPS.	PULSE WIDTE	TIMER	PULSE	PULSE RATE	VOLTS
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">3 0</div> 1-99 %	<input type="checkbox"/> ON \leftrightarrow <input type="checkbox"/> OFF	<input type="checkbox"/> ON \leftrightarrow <input type="checkbox"/> OFF	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">4 0</div> $\times 0.1$ 1-99 P. P. S.	
UPSLOPE	BACKGROUND CURRENT			DOWNSLOPE	
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">1</div> 0-9 SEC.	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> <div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100%;"> 40 </div> <p>1-99 AMPS.</p> </div>			<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">2</div> 0-9 SEC.	
PRE FLOW				POST FLOW	
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">0 1</div> 0-99 SEC.	FIX. DELAY	FIX. SPEED		<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">0 1</div> 0-99 SEC.	
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">1</div> 0-99 SEC.	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">2 3</div> 1-99 %			

雰囲気： Arガス， 電極の長さ： 24.6 mm， 試料： SUS304

Arガス置換を5回行った後、Arガス雰囲気ですり溶接

〔作業手順〕

- (1) ロータリーポンプ及び溶接装置の電源ON
- (2) 試料棒を溶接チャンバー内に挿入し、チャンバーの両側ネジを締めて固定する。
- (3) 24.6 mmの電極をトーチに取り付ける。
- (4) トランシットで保護管のすみ肉と電極との真直度を確認する。
- (5) アースケーブルを燃料棒の端栓付近に取り付ける。(端栓表面に酸化膜があると、電流が流れにくいので酸化膜部を避けて接続すること。)
- (6) アルゴンガスを流し、溶接チャンバー内を4回ガス置換した後、アルゴンガスを流す。
- (7) パネル上で上図の溶接条件を操作盤設定する。
- (8) コントロールボックスのSTARTボタンを押し、溶接を開始する。
- (9) トーチが約1回転と1/3回転して自動周溶接を行う。

(4) 保護管の突き合わせ溶接条件

	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">4 5</div> 1-99 AMPS.	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">4 5</div> 1-99 AMPS.	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">4 5</div> 1-99 AMPS.	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">4 0</div> 1-99 AMPS.	
	LEVEL 1	LEVEL 2	LEVEL 3	LEVEL 4	
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0 3</div> 0-99 SEC.	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0 3</div> 0-99 SEC.	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0 3</div> 0-99 SEC.	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0 3</div> 0-99 SEC.	
ANPS.					VOLTS
	PULSE WIDTE	TIMER	PULSE	PULSE RATE	
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">3 0</div> 1-99 %	0 N ⇐ OFF	0 N ⇐ OFF	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">8 0</div> × 0.1 1-99 P. P. S.	
UPSLOPE		BACKGROUND CURRENT		DOWNSLOPE	
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</div> 0-9 SEC.		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">4 0</div> 1-99 AMPS.		<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">3</div> 0-9 SEC.	
	PRE FLOW	FIX. DELAY	FIX. SPEED	POST FLOW	
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0 1</div> 0-99 SEC.	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</div> 0-99 SEC.	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2 3</div> 1-99 %	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0 1</div> 0-99 SEC.	

雰囲気：He + Xe + Kr 混合ガス， 電極の長さ：23.8 mm

Ar ガス置換を5回行った後、混合ガス雰囲気で溶接

〔作業手順〕

- (1) ロータリーポンプ及び溶接装置の電源ON
- (2) 再計装燃料棒を溶接チャンバーに挿入し、チャンバーの両側ネジを締めて固定する。
- (3) 23.8 mmの電極をトーチに取り付け、チャンバーの両側ネジを調整して電極先端と突き合わせ部の位置合わせを行う。
- (4) トランシットで再計装燃料棒の真直度を確認する。
- (5) アースケーブルを燃料棒の端栓付近に取り付ける。(端栓表面に酸化膜があると、電流が流れにくいので酸化膜部を避けて接続すること。)
- (6) ヘリウムガスを流し、溶接チャンバー内を2回ガス置換し、その後、混合ガスで2回のガス置換を行った後、混合ガスを流す。
- (7) パネル上で上図の溶接条件を操作盤設定する。
- (8) コントロールボックスのSTARTボタンを押し、溶接を開始する。
- (9) トーチが、約1回転と1/3回転して自動周溶接を行う。

(5) ガス封入孔の封孔溶接条件

	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-bottom: 5px;"> 40 </div> <p>1-99 AMPS.</p> <p>LEVEL 1</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-bottom: 5px;"> 02 </div> <p>0-99 SEC.</p> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-bottom: 5px;"> 00 </div> <p>1-99 AMPS.</p> <p>LEVEL 2</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-bottom: 5px;"> 00 </div> <p>0-99 SEC.</p> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-bottom: 5px;"> 00 </div> <p>1-99 AMPS.</p> <p>LEVEL 3</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-bottom: 5px;"> 00 </div> <p>0-99 SEC.</p> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-bottom: 5px;"> 00 </div> <p>1-99 AMPS.</p> <p>LEVEL 4</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-bottom: 5px;"> 00 </div> <p>0-99 SEC.</p> </div>	
ANPS.	PULSE WIDTE	TIMER	PULSE	PULSE RATE	VOLTS
	<div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 5px;">3 0</div> 1-99 %	ON ⇐ OFF	ON ⇐ OFF	<div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 5px;">4 0</div> × 0.1 1-99 P. P. S.	
UPSLOPE	BACKGROUND CURRENT			DOWNSLOPE	
<div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 5px;">1</div> 0-9 SEC.	<div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 5px;">2 6</div> 1-99 AMPS.			<div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 5px;">3</div> 0-9 SEC.	
PRE FLOW				POST FLOW	
<div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 5px;">0 1</div> 0-99 SEC.	FIX. DELAY			FIX. SPEED	
	<div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 5px;">1</div> 0-99 SEC.			<div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 5px;">0 0</div> 1-99 %	

雰囲気：He + Xe + Kr 混合ガス，電極の長さ：23.8 mm，孔：φ1 mm
 試料：Zry-4，Ar ガス置換を2回、混合ガス置換を2回行った後、混合ガス
 雰囲気で点溶接