

JAERI - M

90-091

技術報告：PWR型燃料棒の短尺化

1990年6月

柳澤 和章・宇野 久男・笛島 栄夫・山崎 利
稲邊 輝雄・石島 清見・黒羽 裕・関田 憲昭
大和田 功・本田 順一・伊藤 忠春・飯田 省三
斎藤 光男・黒羽根史朗・喜多川 勇

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

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。
入手の問合せは、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, 1990

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

技術報告：PWR型燃料棒の短尺化

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

柳澤 和章・宇野 久男・笛島 栄夫・山崎 利
稻邊 輝雄・石島 清見・黒羽 裕・関田 憲昭⁺
大和田 功⁺・本田 順一⁺・伊藤 忠春⁺⁺・飯田 省三⁺⁻
斎藤 光男⁻⁺・黒羽根史朗⁻⁺・喜多川 勇⁺⁺

(1990年5月28日受理)

予備照射済燃料（商用炉で使用したLWR型燃料他）を用いたNSRRでの反応度事故（RIA）模擬実験遂行に関しては、実験遂行にあたり次のような3つの技術的課題を克服する必要があった。

(1) 燃料棒の短尺化：

商用炉で使用された予備照射燃料棒の有効発熱長は3.6mであり、これをNSRR実験で使用するには、有効発熱長0.12m程度に短尺化した燃料棒（短尺化率1/30）を作製しなければならなかった。

(2) 炉内計装機器の開発：

炉内使用期間中、燃料棒は水側腐食、曲がり、つぶれ、等の構造及び寸法変化をおこしていた。この様な状況の下で、研究上の必要性から、燃料棒内圧センサー、被覆管と燃料ペレットの伸びセンサー及び被覆管表面の熱電対等の計装類を遠隔操作で燃料棒に取付ける技術を開発しなければならなかった。

(3) パルス後の短尺燃料棒の照射後試験機器の整備：

パルス照射を行った予備照射済短尺燃料棒に対し、照射後試験(PIE)を実施する必要があった。特に、燃料破損の重要なメカニズムとして、ペレット-被覆管の力学的互作用(PCMI)に起因するものが考えられたため、この破損をいち早く検出できるよう、短尺燃料棒用のPIE機器の開発・整備を行う必要があった。

以上の3つの課題につき、反応度安全研究室、NSRR管理室、実燃燃料試験室及び研究炉管理部ホットラボの技術陣が約4年の歳月をかけて当該技術課題と取り組み、解決に至った。

本報は、その技術的成果を集大成したものである。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根2-4

+実用燃料試験室

++研究炉管理部

Technical Report: Fabrication of PWR Type Rodlet Fuel

Kazuaki YANAGISAWA, Hisao UNO, Hideo SASAJIMA
Satoshi YAMAZAKI, Teruo INABE, Kiyomi ISHIJIMA
Hiroshi KUROHA, Noriaki SEKITA⁺, Isao OHWADA⁺
Junichi HONDA⁺, Tadaharu ITO⁺⁺, Shozo IIDA⁺⁺
Mitsuo SAITO⁺⁺, Shiro KUROBANE⁺⁺ and Isamu KITAGAWA⁺⁺

Department of Fuel Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 28, 1990)

With respect to the simulated reactivity initiated accident (RIA) experiments with pre-irradiated LWR type fuel rods at nuclear safety research reactor (NSRR), there were principally three technical difficulties which should be overcome:

(1) Fabrication of the rodlet fuel:

Fuel rods from the commercial power reactors had an active column length by 3.6m. To utilize this for NSRR pulse experiment, rodlet fuel having an active column length by 0.12m (reduced to one thirtieth) is requested to fabricate without changing the inside fuel conditions.

(2) Development of in-core instrumentations:

During pre-irradiation stages, a long-sized fuel rod had dimensional changes by waterside corrosion, bowing, creep down and so on. The fuel also had greater amount of radioactive fission products. This condition is significant to in-core instrumentations to be attached to the fuel rods. Well characterized data to be obtained from

+ Department of Reactor Fuel Examination

++ Department of Research Reactor Operation

these, however, are quite necessary and important from research point of view. Remote handling techniques to attach the rod pressure sensor, the cladding extensometer, the fuel extensometer, and the cladding surface thermocouple to pre-irradiated fuel rods are, therefore, requested to develop.

(3) Installation of PIE equipments for pulsed rodlet fuels:

PIE on the pulsed rodlet fuels are necessary to better understanding the fuel performance detaily. Equipments which can easily detect the data related to PCMI type fuel failure are matter of concern.

Since 1986, the technical difficulties have been tried to overcome by all staffs belonging to Reactivity Accident Laboratory, NSRR Operation Division, Department of Reactor Fuel Examination and Hot Laboratory. This report describes the technical achievements obtained through four years work.

Keywords: RIA, Pre-irradiated LWR Fuel, Refabrication, In-core Apparatus, PIE Devices

目 次

1. 序論（稻邊）	1
2. 商用炉燃料棒の短尺化技術	4
2.1 概要（石島）	4
2.2 モックアップ装置の整備（大和田）	4
2.3 燃料加工設備（本田）	7
2.4 短尺燃料棒のパンクチュアリング治具の設計製作（関田）	10
2.5 燃料棒部材の設計・製作（笹島）	11
2.6 短尺燃料棒収納容器の設計・製作（黒羽）	15
3. 炉内計装機器の開発	57
3.1 概要	57
3.2 燃料棒表面熱電対取付装置及び酸化膜除去用ブラッシング装置の製作（宇野）	57
3.3 熱電対溶接用酸化膜付ダミー燃料棒の製作（柳澤）	59
3.4 ジルカロイ製内圧計、燃料棒内圧計樹脂注入治具 及びキャップセル内圧計の製作（宇野）	60
3.5 燃料棒伸び計の設計製作（山崎）	62
3.6 燃料棒支持具、計装プラグ及び計装ケーブルの開発（宇野）	64
4. パルス照射後の燃料棒照射後試験装置の整備	78
4.1 概要	78
4.2 X線検査装置及び実験カプセル解体装置の製作（斎藤、飯田）	78
4.3 燃料棒の寸法測定装置、渦電流探傷試験装置 及び同装置類アダプタの製作（黒羽根）	82
4.4 標準傷付ジルカロイ被覆管の製作（柳澤）	85
4.5 ガンマスキャニング装置の製作（伊藤）	86
4.6 FPガスパンクチュアリング装置の製作（喜多川） 及びモックアップ用燃料棒の製作（黒羽）	89
4.7 燃料溶解装置の製作（伊藤）	90
5. 結論	118
謝 辞	119
参考文献	120
附録1 予備照射済燃料棒の短尺化（切断、内圧再加圧等）に伴って生じた技術的問題点	121
附録2 渦電流探傷試験に用いる標準傷つきジルカロイ管の製作詳細データ	129

Contents

1.	Introduction (T. Inabe)	1
2.	Segmentation of the fuel rod obtained from the commercial power reactors	4
2.1	Objective (K. Ishijima)	4
2.2	Preparation of mock-up apparatus (I. Owada)	4
2.3	Fabrication of the welding apparatus, the pressure chamber, and the cladding welding torch (J. Honda)	7
2.4	Preparation of the puncturing devices for the segmented fuel rod (N. Sekita)	10
2.5	Design and fabrication of the parts for segmented fuel rod (H. Sasajima)	11
2.6	Design and fabrication of the fuel storage rack (H. Kuroha)	15
3.	Development of in-core instrumentation equipment	57
3.1	Objective	57
3.2	Preparation for the electron beam machine for thermocouple welding and for ZrO ₂ removal abrasion (H. Uno)	57
3.3	Fabrication of pre-oxidized cladding dummy tube for thermocouple welding (K. Yanagisawa)	59
3.4	Design and fabrication of the rod internal pressure sensor, the resin injection device, and the capsule pressure sensor (H. Uno)	60
3.5	Design and fabrication of the cladding and the fuel stack elongation sensors (S. Yamazaki)	62
3.6	Development of the fuel supporter, the instrumentation plug and the instrumentation cable (H. Uno)	64
4.	Preparation of post-pulse irradiation examination devices	78
4.1	Objective	78
4.2	Preparation of the X-ray apparatus, and disassembling device of double capsule (M. Saito, S. Iida)	78
4.3	Preparation of diameter profile, eddy current apparatus and its adaptors (S. Kurobane)	82
4.4	Preparation of the calibration cladding tube for eddy current measurement (K. Yanagisawa)	85
4.5	Fabrication of gamma scanning apparatus (H. Ito)	86

4.6 Design and fabrication of the FP gas puncturing device (I. Kitagawa) and fabrication of the prepressurized fuel rod for mock-up (H. Kuroha)	89
4.7 Fabrication of the apparatus for dissolution of fuel pellet (H. Ito)	90
5. Conclusion	118
Acknowledgment	119
References	120
Appendix 1 Technical problems arisen from the fabrication of rodlet fuel cut from pre-irradiated commercial power reactor	121
Appendix 2 Detail data including the standard zircaloy cladding tube used for the eddy current calibration	129

List of Tables

- Table 2.2-1 Specification of dry cutting device used for refabrication of rodlet fuel
Table 2.2-2 Specification used for dry
Table 2.2-3 Specification used for peripheral welding
Table 2.2-4 Specification used for end plug seal welding
Table 2.4-1 Result of FP gas puncturing made on pulse irradiated PWR fuel
Table 2.4-2 Result of mass spectrometry against sampled FP gas from irradiated PWR fuel
Table 4.4-1 Specification of pre-irradiated fuel and that of unirradiated standard cladding tube for calibration of eddy current test
Table 4.4-2 Artificially made cladding damage with various kinds of scratches

List of Figures

- Fig. 2.2-1 Schematic arrangement of mock-up devices designed for fuel refabrication
Fig. 2.2-2 Work flow used for segmented fuel fabrication
Fig. 2.2-3 Schematic drawing of dummy fuel for mock-up test
Fig. 2.2-4 Dismantling device of UO₂ pellet from fuel rod
Fig. 2.2-5 Device for inserting end plugs into fuel cladding
Fig. 2.2-6 Peripheral welding device
Fig. 2.2-7 FP gas puncturing apparatus
Fig. 2.2-8 Macrostructure (1) showing the welded gas filling hole and (2) showing the location after peripheral welding ; As-etched by distilled water+HNO₃ (45ml)+HF(10ml)
Fig. 2.3-1 Array of fuel refabrication devices in hot cell
Fig. 2.3-2 Work flow used in fuel refabrication system
Fig. 2.3-3 Assembling method for the end plug insertion into cladding
Fig. 2.3-4 Chamber for circumferential welding
Fig. 2.3-5 Chamber for seal welding
Fig. 2.4-1 Sleeve for degassing test
Fig. 2.5-1 Schematic drawing of the PWR type segmented fuel rod refabricated from the commercial power reactor fuel

- Fig. 2.5-2 Upper part structure of the PWR type segmented fuel rod
Fig. 2.5-3 Lower part structure of the PWR type segmented fuel rod
Fig. 2.5-4 Upper end plug
Fig. 2.5-5 Plenum spring
Fig. 2.5-6 Spring supporter
Fig. 2.5-7 Ferric core to measure the displacement of fuel stack
Fig. 2.5-8 Cladding tube made of zircaloy-4
Fig. 2.5-9 Upper cladding joint
Fig. 2.5-10 Hafnium disk to reduce end peaking factor
Fig. 2.5-11 Lower cladding joint
Fig. 2.5-12 Spacer
Fig. 2.5-13 Alumina pellet (1)
Fig. 2.5-14 Alumina pellet (2)
Fig. 2.5-15 Alumina pellet (3)
Fig. 2.5-16 Zircaloy-4 cladding tube
Fig. 2.5-17 Movement marker
Fig. 2.5-18 Pressure sensor
Fig. 2.5-19 Outline of the fuel rod segmented from the commercial power reactor fuel rod, where spans of 14mm and 6mm are prepared to fuel dismantling
Fig. 2.5-20 Change of rod internal pressure as a function of time
Fig. 2.6-1 Schematic drawing of the storage rack for pre-irradiated rodlets fuels (units are in mm)
Fig. 3.2-1 Abrasing device to remove the coherent zirconia (ZrO_2) formed at the zircaloy cladding surface during pre-irradiation stage
Fig. 3.2-2 (a): Schematic drawing of the electron beam welding apparatus for thermocouple attachment to the cladding surface
(b): Outerview of the welding apparatus; this was viewed from the direction shown in (a).
(c): Condition of thermocouples welded set to the cladding surface, and
(d): Outerview of semi-hot cable located in the 2nd basement of NSRR
Fig. 3.4-1 Drawing of the zircaloy sheathed pressure sensor set to measure the change of rod internal pressure during RIA
Fig. 3.4-2 Schematic representation of the resin supplier set in the

- hot cell for assembling of fuel rod pressure sensor
Fig. 3.4-3 (a) Outline of the double capsule designed to perform the pulse irradiation with pre-irradiated LWR fuel rod
(b) Capsule pressure sensor attached to the capsule
- Fig. 3.5-1 Schematic representation of the cladding extensometer and fuel stack extensometer assembled together with supporter
- Fig. 3.5-2 Block diagram using in the measuring system in the extensometers
- Fig. 3.5-3 Principal method used in assembling and disassembling of the extensometers
- Fig. 3.5-4 Resultant behaviors of the pulse irradiated PWR type fuel rod with energy deposition of about 100 cal/g fuel; accumulated burn-up of which was 32 MWd/kgU in assembly average
- Fig. 3.6-1 (a) Double capsule designed to perform pulse irradiation with pre-irradiated LWR fuel rods,
(b) Assembled fuel rod supporter
(c) Schematic drawing of instrumentation plug
- Fig. 4.2-1 X-ray inspection devices for the irradiation capsules
- Fig. 4.2-2 (1) Procedures to perform X-ray inspection
(2) Outerview of X-ray inspection apparatus installed in the Hot-laboratory
(3) Result of X-ray inspection made on the pulse irradiated PWR fuel at approximately 80 cal/g fuel: No sign of failure indication was made
- Fig. 4.2-3 (1) Schematic representation of the capsule disassembling device installed in hot cell inside
(2) Outerview of the capsule disassembling device (left) and its schematics (right)
- Fig. 4.3-1 Measuring system used in the laser scanning micrometer
- Fig. 4.3-2 Apparatus useful both for measuring fuel rod diameter profile and for eddy current inspection
- Fig. 4.3-3 Measured diameter profiles of the pulse irradiated PWR type fuel (accumulated burn-up before pulse was 35 MWd/kgU)
- Fig. 4.3-4 Results of the eddy current test on the pulsed irradiated PWR type fuel (100 cal/g fuel energy deposition at burn-up of 35 MWd/kgU) where (a)' and (b)' are magnification of (a) and (b) at the locations shown with notations (*) and (-),

respectively.

- Fig. 4.3-5 Artificially scratched PWR type cladding surface for the calibration of the eddy current apparatus
- Fig. 4.3-6 Results of the eddy current test made on the scratched PWR type rod shown in the previous figure 4.3.5, : three peaks besides the scratch (noted by the arrows) are uninternationally fabricated. (Notations, shown are identical to Fig. 4.3.4)
- Fig. 4.3-7 Prepared adaptors for five different types of fuel rods to be inspected by eddy current testing
- Fig. 4.4-1 Drawing of the zircaloy cladding tube having simulated ridging, hole, and scratches
- Fig. 4.4-2 Results of the eddy current test on ridges performed with unirradiated calibration tube, where notations (a)' and (b)' are magnifications of (a) and (b) at points indicated by (*), and (-), respectively.
- Fig. 4.5-1 Schematic representation of the gamma scanning devices
- Fig. 4.5-2 Obtained gamma spectrum at the plenum location of the pulse irradiated PWR type fuel rod ($BU=35 \text{ MWd/kgU}$)
- Fig. 4.6-1 Installed FP gas puncturing system in hot laboratory for the pre-irradiated fuel rods
- Fig. 4.6-2 (1) Drawing and (2) photograph of the served zircaloy-4 cladding tube for the performance check of gas puncturing devices, in which mixed gas being composed of He, Xe and Kr are filled in.
- Fig. 4.7-1 Devices for dissolving the UO_2 pellet specimen to be used for burn-up analysis: (1) Schematic representation, and (2) Outlook of the whole apparatus from cell outside through to cell inside

List of Photographs

- Photo. 2.5-1 Result of burst test with unirradiated zircaloy-4 tube at 20°C : It is seen that no cladding rupture occurred at the welded portions.
- Photo. 2.5-2 Result of burst test with unirradiated zircaloy-4 tube at 385°C : It is also seen that no cladding rupture occurred at the welded portions.

- Photo. 2.5-3 (1) Outerview and (2) schematic representation of unirradiated PWR type fuel after segmentation.
- Photo. 2.5-4 (1) Upper and (2) lower part structures of segmented PWR type fuel.
- Photo. 2.5-5 (1) Outerview of the pulse irradiated PWR type fuel rod, (2) magnified lower end plug and (3) magnified upper end plug. It is shown that no damage occurs after pulse.
- Photo. 2.5-6 X-ray photograph taken from (1) the fuel before pulse and (2) the fuel after pulse: this travelled distance of the movement marker is determined from this.
- Photo. 3.3-1 Preparation of the oxidized/hydrogen absorbed PWR fresh fuel to be used for the mock-up test of oxidation abrasing devices.
- Photo. 4.4-1 (1) Outerview of the cladding tubes for calibration, which is made of BWR and PWR type zircaloy claddings, (2) schematic drawing of the standard PWR type calibration tube, and (3) its photograph, where circled numbers are referring to the same specimens.

1. 序論（稲邊）

燃料に係わる安全研究のうち、反応度事故 (Reactivity Initiated Accident, 以下 RIA と称す) は、冷却材喪失事故 (LOCA) と並んで重要な研究の 1 つであると考えられる。

日本原子力研究所における RIA 研究は、昭和 50 年 (1975) 年に原子炉安全性研究炉 (Nuclear Safety Research Reactor, 以下 NSRR と称す) が設立されて以来、それを用いて鋭意実施されてきた。また、その研究成果は、昭和 59 年 (1984 年) に「発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象に関する評価指針について」という形で、原子力安全委員会の安全審査指針に反映された。この指針に記述されている判断基準のうち、燃料の許容設計限界等については、特に以下の様な項目が設けられている。

「5. 燃焼の進んだ燃料に関して特に考慮すべき事項について」

燃料の燃焼が進むと、中性子照射効果により、被覆材の延性が低下する。このために、燃焼の進んだ燃料は、反応度投入事象において、ペレットの急激な熱膨張に伴い、被覆管に割れが生じて燃料が破損する可能性がある。

この破損は、実験の回数は少ないが、米国の SPERT-CDC の実験で認められている。しかしながら、現状では破損しきい値と燃焼度の関係等破損の条件については必ずしも明確ではなく、今後の課題として残されている部分が少なくない。

以上の点から、反応度投入事象における当該破損に関する取扱いは、今後の SPERT-CDC の実験において破損した燃焼の進んだ燃料の燃料エンタルピの最少値として 85 cal/g・UO₂ が報告されているので、この値を目安値として当該破損を考慮し、事故時における破損本数の最大ケースを検討するのは妥当である。

なお、本破損は、その性格上、極めて生じるものであるため、上記目安値をピーク出力部断熱燃料エンタルピとして取扱うことは差し支えないと考える。」

すなわち、現行 RIA 指針は主として未照射燃料実験よりなるデータベースに基づいたものであり、例えば、破損しきい値と燃焼度の関係は、今後の課題として残されている。

NSRR は、現行指針の見直しをも含めた安全審査時の判断基準データベースの充実拡大のため、昭和 62 年度 (1987 年) から原子炉改造工計画に着手した。このうち、NSRR 原子炉施設の改造成に係わる経緯は、稲辺らの報告¹⁻¹⁻²に記載されている。

筆者らは炉改造後の NSRR を用いた実験遂行にあたって、必要と考えられる以下の項目、すなわち

- (1) 燃料棒の製作,
- (2) 炉内計装機器の開発,
- (3) パルス照射後試験装置の整備,

に対して取り組むこととなった。これには、以下のような背景がある。

- (1) 予備照射済燃料を用いた NSRR 実験 (通称バーンアップ実験) に関しては、当初は、JMTR にてキャップセル照射して来た NSRR 標準燃料 (14 × 14 型 PWR 仕様に近い燃料) が

用いられる予定であった。これは、従来から NSRR 未照射燃料実験で用いられて来た燃料棒と同一仕様である。すなわち、NSRR パルス炉心高さに十分適合できる有効発熱長 12 ~ 14 cm を有した燃料棒である。

一方、実験の模擬性をより高めるためには、発電用商用炉にて実際に照射された燃料によるパルス照射実験を実施するのがもっとも妥当であると考えられる。幸いにして、原電の敦賀炉から BWR 型長尺燃料（有効発熱量約 3.6 m）3 本、関電の美浜炉及び九電玄海炉から PWR 型長尺燃料（有効発熱量約 3.6 m）が各々 1 本ずつ合計 5 本の長尺燃料棒が原研に供試されることになった。これを受け、著者らは長尺燃料を NSRR パルス炉心高さに適合させるための燃料棒短尺化技術開発に取り組むこととなった。

この短尺化については、長尺燃料棒の切断、端栓取付けに必要な燃料ペレットの取り出し、端栓溶接等の各工程で思いもかけない技術的困難に遭遇した。次章以降で、技術的に直面した諸問題とそれをどのように解決していったかについても報告する。

(2) 従来の NSRR 実験計画用いられて来た炉内計装機器類として、

- (a) 燃料棒内圧計（歪ゲージ型）
- (b) 燃料棒軸方向伸び計（差動トランス型）
- (c) 燃料スタック伸び計（差動トランス型）
- (d) 三方支持直径測定計
- (e) 燃料被覆管表面温度計
- (f) 水塊速度計
- (g) カプセル内圧計

等がある。

また、これら計装機器の取り扱いは、これまでほとんどが遠隔操作を用いずに行われて来た。しかし、予備照射済燃料を使用した実験に際しては、まずセミホットケーブ施設、遠隔操作による各種計装機類の取付け及び取付けに必要な支持具や治具の設計、製作等があらたに必要になった。

予備照射済燃料のいわば再利用を可能とする技術開発は、当面要求される最も緊急で重要な課題であった。その良い例として、未照射燃料実験に多用されてきた被覆管表面熱電対取付け作業を挙げてみる。従来は、燃料棒の一端を陰極とし、熱電対取付部を陽極として、Pt / Pt - 13% Rh の細線 (0.2 mm ϕ) をジルカロイ被覆材に溶接することにより、熱電対は難なく取付けることができた。しかし、予備照射済燃料棒に関しては、BWR 型燃料棒ではその表面に数 μm の均質酸化膜 (ZrO_2) の他にヘマタイト (Fe_2O_3) を主成分とする（クラッド）が付着しており、PWR 型燃料棒では数十 μm の均質で緻密な ZrO_2 の酸化膜が付着している。この ZrO_2 は電気伝導度が悪く、従来容易であった熱電対溶接を極めて困難なものとする事が判明した。やむなく、筆者らは遠隔操作にて、この被覆管表面に付着する ZrO_2 酸化膜を機械的に削り取る方法を考案した。しかし、PWR 型燃料の被覆管肉厚は初期値であっても 0.57 mm と薄いため、遠隔操作で燃料の健全性に影響を与える前に、うまく熱電対を研削面に溶接できるかという点に最も苦労した。

次章以下では、これらの技術的課題をどのように克服し、最終的にはどの様な精度で炉内

データを入手できるに至ったかについて報告する。

(3) 燃料短尺化に際して、短尺化前の長尺燃料に対する照射後試験は、実用燃料試験室にて実施した。また、短尺化を行った後で、必要とされる短尺燃料棒の照射後試験（例：X線撮影、軸方向プロフィールやガンマスキャニング）についても実用燃料試験室にて実施している。

一方、NSRR でパルス照射した短尺燃料に関するパルス照射後の照射後試験（以下、PIE）は、研究炉管理部ホットラボにて実施することとなった。同ホットラボは、もともと Magnox 金属燃料の PIE 等を効率良く実施するためのラボであり、最近まで研究炉用の燃料（板状燃料や HTTR 燃料）の PIE を最得意なものにしていた。そこに、軽水炉用の UO₂ 一ジルカロイ被覆管体系の燃料棒を持ち込むことになった訳で、まず必要な装置類の整備を行う事が、緊急かつ重要な当面の課題となった。

具体的には、パルス照射後 NSRR から搬出された二重カプセル（FP 放出防止のため、従来のカプセルの外側に更にカプセルをかぶせたもの）の解体及び X 線検査を行う装置、直径プロフィール、渦電流探傷、ガンマスキャニング、燃料ペレットの溶解等を行う装置がそれらに相当する。これら装置の整備過程及び実際に NSRR でパルスした予備照射済燃料から得られた PIE データ等について報告する。

PIE に関して付言すれば、JMTR にてキャップセル照射して来た NSRR 標準燃料に関するパルス前 PIE は、JMTR ホットラボにて実施中である。すなわち、NSRR による予備照射済燃料のパルス実験は、原研が所有する 3 つのラボの全面的な協力をあおぐものとなっている。これら 3 つのホットラボ間を、予備照射済燃料は移動する訳であり、必然的にそれに係わる輸送技術も要求された。

2. 商用炉燃料棒の短尺化技術

2.1 概要（石島）

予備照射済の商用炉燃料（発熱長約3.6m）を、NSRRにてパルス照射するには、約0.12m程度に燃料棒を短尺化して使用する必要があった。しかしながら、対象となる長尺3.6m燃料は放射化が進んでおり、短尺化に際しては、遠隔操作の機能を十分に備えた装置を開発する必要があった。この燃料短尺化については、実用燃料試験室（以下実燃試）で行うこととした。

燃料短尺化は、まず長尺燃料（約3.6m）から必要長さ（約0.12m）だけ燃料を切断し、その両端に新品のジルカロイ製の端栓をとりつける事から開始された。切断に必要なカッター等は実燃料の既存のものを利用したが、端栓・周溶接装置等は新たに製作した。更に、短尺化後、燃料棒に再加圧を行ったが、これに必要な加圧チャンバー等も製作する必要があった。これら機器については、その説明を第2.3節に行う。

短尺燃料棒の作製は、この様に切断した予備照射済燃料棒に新品の端栓をとりつけることで実施したが、使用した端栓等の部材に関しては、脆化したジルカロイ材との溶接適合性等技術的に未知の分野があり、考慮しなければならない加圧技術上の問題が沢山あった。これらをどの様に解決したかの説明を第2.5節にて行う。

短尺化された燃料棒はNSRRでパルス照射され、その後ではPIEのためにホットラボに輸送された。しかし、予算上の制約もあって、ホットラボではパルス後の短尺燃料に対するFPガスパンクチュアリングが実施できる体制になるのに時間を要することが判明した。このため、非破壊試験後、当該燃料棒を一担実燃施に持ち帰り、そこでFPガスパンクチュアリングを実施した。実燃料のFPガスパンクチュアリング装置は、長尺燃料用に設計されていたため、短尺燃料棒でガスパンクチュアリングを行うために、それに適した治具を整備する必要があった。これについては第2.4節で説明する、これらホットセルでの試験機器の整備に際しては、必要なモックアップ実験を実施した。この内容については第2.2節で記述する。

最後に、製作した短尺化燃料はNSRR炉室内地下にあるセミホットセルに保管しておくこととなった。このために必要な収容器を作製した。この機器の概要については、第2.6節で記述する。

2.2 モックアップ装置の整備（大和田）

2.2.1 目的

モックアップ装置は、商業用原子力発電炉で使用された照射済実用燃料棒を用いて、NSRRパルス照射実験に供する短尺燃料棒を、燃料試験施設の $\beta\gamma$ コンクリートセル内で作製するための予備装置である。その目的は、短尺燃料棒を製作するのに必要な遠隔操作による燃料加工設備の設計・製作技術データを収集すると共に、短尺燃料棒製作の作業工程及び遠隔操作性を確認する

ために整備されたものである。

2.2.2 装置の構成

モックアップ装置は、以下の主要機器により構成されている。

- (1) 乾式切断装置
- (2) ペレット取出装置
- (3) 端栓挿入装置
- (4) 燃料棒乾燥装置
- (5) 溶接装置
 - (a) 被覆管－端栓全周溶接用
 - (b) 端栓シール溶接用
- (6) 燃料棒パンクチャー装置
- (7) 被覆管端部処理装置
- (8) He リーク検査装置
- (9) 超音波洗浄装置

以上の主要機器は Fig. 2.2-1 に示す様に配置した。また、模擬燃料棒による短尺燃料棒製作の作業工程は、Fig. 2.2-2 に示すように作成した。

モックアップ実験により製作した短尺燃料棒の 1 例を Fig. 2.2-3 に示す。

2.2.3 各装置の概要

2.2.3.1 乾式切断装置

乾式切断装置は、アルミナ製ダミーペレットを挿入した模擬燃料棒を所定の寸法に乾式で切断するものである。乾式切断装置の仕様を Table 2.2-1 に示す。

2.2.3.2 ペレット取出装置

ペレット取出装置は、模擬燃料棒内に挿入されているアルミナ製ダミーペレットを所定量だけ取り出すものである。ペレット取り出しはダイヤモンドコアドリル方式とし、使用するドリル刃寸法は、PWR 燃料棒 ($\phi 10.72$) 用を直径 8 mm また BWR 燃料棒 ($\phi 12.27$) 用を直径 9 mm とした。ペレット取出装置の概略を Fig. 2.2-4 に示す。

2.2.3.3 端栓挿入装置

端栓挿入装置は、所定量のアルミナ製ダミーペレットを取り出した後の模擬燃料棒の被覆管両端部の端面を被覆管端部処理装置により仕上処理したあと、各種構成部材（模擬断熱ペレット、変位測定用コア、スプリング、スプリング受け、ディスク、スペーサー等）を内蔵した模擬燃料棒が装置に固定され、上部及び下部端栓を挿入するものである。端栓挿入装置の概略を Fig. 2.2-5 に示す。

2.2.3.4 燃料棒乾燥装置

燃料棒乾燥装置は、模擬燃料棒に取り付けられた上部端栓のガス封入口を通して、模擬燃料棒内部に取り込まれている可能性のある水分を除去するものである。本装置は、真空系と加熱系より構成されている。燃料棒乾燥装置の仕様を Table 2.2-2 に示す。

2.2.3.5 溶接装置

溶接装置には2種類がある。1つは、模擬燃料棒に挿入した上下部端栓と被覆管の接合部の全周を溶接するものであり、被覆管－端栓全周溶接装置と称している。もう1つは、模擬燃料棒内に封入した模擬ガスを上部端栓のガス封入口で封じるためのものであり、端栓シール溶接装置と称している。

(1) 被覆管－端栓全周溶接装置

ジルカロイ製の模擬燃料棒被覆管と上下部両端栓の接合部を全周溶接するためのものであり、TIG自動溶接装置である。被覆管－端栓全周溶接装置の仕様及び概略を、Table 2.2-3 及び Fig. 2.2-6 に示す。

(2) 端栓シール溶接装置

ジルカロイ製の上部端栓に設けられているガス封入口の封入溶接を行う TIG 自動溶接装置である。端栓シール溶接装置には、封入ガス（ヘリウム、キセノン、クリプトン等）を混合調整するガス混合タンクの設備も設けられている。被覆管と上下部端栓の全周部の溶接が終った模擬燃料棒内を初めに燃料棒乾燥装置を用いて水分除去する。続いて、燃料棒を溶接チャンバー内に挿入し、それを封入混合ガスで加圧し（最大 50 kg/cm^2 ），上部端栓の封入口より、模擬燃料棒内に混合ガスを拡散させる。最後に、ガスの平衡状態を見計って、上部端栓の封入口をシールする。端栓シール溶接装置の仕様を Table 2.2-4 に示す。

2.2.3.6 燃料棒パンクチャー装置

燃料棒パンクチャー装置は、模擬燃料棒内の混合ガス封入結果を確認するためのものである。このため、上部プレナム部をニードルで穿孔し、チャンバー内に拡散されたガスの圧力を測定する。拡散されたガスをサンプリングボトルに捕集もする。得られたガス圧力データから燃料試料内の自由容積も算出できる。燃料棒パンクチャー装置の概略を、Fig. 2.2-7 に示す。

2.2.3.7 被覆管端部処理装置

被覆管端部処理装置は、乾式切断装置によって切断された模擬燃料棒の被覆管外面、内面及び端面を、端栓の挿入時や被覆管－端栓全周溶接時に不都合が出ないよう仕上処理するものである。

2.2.3.8 He リーク検査装置

He リーク検査装置は、被覆管－端栓全周溶接部分及び上部端栓混合ガス封入口のシール溶接部のリーク量を検査するものである。

2.2.3.9 超音波洗浄装置

超音波洗浄装置は、製作が完了した短尺燃料棒の表面を洗浄するために使用するものである。

2.2.4 得られた成果

NSRR 予備燃料済燃料実験に供試する短尺燃料棒を製作するため、ホットセルを模擬してモックアップ装置を整備した。このモックアップ装置を使用して、模擬燃料棒による一連の燃料棒加工シミュレーションを行い、装置の特性が理解された。また、遠隔操作型の燃料加工設備を本格的に設計・製作する際の基礎データも得ることが出来た。特に、端栓部のシール溶接及び被覆管－端栓全周溶接においては、Fig. 2.2-8 に示す様な良好な溶接結果が得られ、コールド試料に

に対する溶接条件を確立することに成功した。

2.3 燃料加工設備（本田）

2.3.1 目的

燃料加工設備は、商業用原子力発電炉で使用された照射済実用燃料棒を NSRR パルス照射実験用の短尺燃料棒に加工するため、燃料試験施設の $\beta\gamma$ コンクリート No. 3 セルに設置したものである。

2.3.2 設備の構成

燃料加工設備は以下の主要機器により構成されている。主な機器の配置を Fig. 2.3 - 1 に示す。

- (1) 乾式切断機：実用燃料棒を所定の寸法に被覆管のみを乾式で切断する。
- (2) ペレット取出機：切断した実用燃料棒の両端部に、端栓等を挿入するため、切断燃料棒内部から UO_2 ペレットを取出すとともに、切断燃料棒被覆管端部を仕上加工する。
- (3) 組立機：ペレット取出機にて加工した切断燃料棒の両端部に、上部及び下部端栓を圧入し、組立てる。
- (4) ガスユニット：上下部端栓を切断燃料棒に周溶接し、更に、上部端栓のシール溶接を行うために必要なシールドガスを (He, Ar) 調整・供給する。また、切断燃料棒内部に充填する混合ガス (He, Kr, Xe 等) も調整・供給する。
- (5) 周溶接チャンバー：上下部端栓と切断燃料棒被覆管との周溶接を行う。
- (6) シール溶接チャンバー：切断燃料棒内部を加熱により乾燥させ、混合ガスを加圧した状態で上部端栓のガス封入口のシール溶接を行う。
- (7) 真空ポンプ：周溶接チャンバー及びシール溶接チャンバーをシールドガス又は混合ガスの雰囲気にするため脱気する。
- (8) リークテストチャンバー：シール溶接が終了した切断燃料棒（短尺燃料棒）のリークテストを行う。
- (9) 超音波洗浄器：加工の完成した短尺燃料棒外表面の洗浄を行う。
- (10) 制御操作盤及び計器盤：各機器の操作、バルブ開閉及び各種検出器信号の表示・記録を行う。

2.3.3 製作工程

短尺燃料棒の加工工程を流れ図にまとめ、Fig. 2.3 - 2 とした。以下、この図に基づき短尺燃料棒の加工工程を概説する。

- (1) 照射済実用燃料棒の切断
乾式切断機により当該燃料棒の端切りを行い、所定寸法に仕上げる。
- (2) 切断燃料棒の位置決め及びクランプ
切断した実用燃料棒のペレット取出し加工のため、位置決めクランプ治具により、切断燃料

棒をコレットチャックに同定し、クランプする。

(3) ペレットの取出し

ペレット取出機により、切断燃料棒の内側ペレットを取り出し、その後端面の仕上及び被覆管内外面をブラシ研磨する。

(4) 切断燃料棒の抜き取り

ペレット取出し工程で用いられた切断燃料棒を、コレットチャックより抜き取る。

(5) 端栓の圧入

ペレット取出し加工が終了した時点では組立機を用い、Fig. 2.2-3 の1回目作業に示すように端栓の圧入を行う。

(6) 周溶接

周溶接チャンバー、真空ポンプ及びガスユニットを用いて行う。端栓が圧入された切断燃料棒被覆管の端栓接合部にて全周溶接を行う。周溶接チャンバーの概略を Fig. 2.3-4 に示す。その具体的な条件設定例を以下に示す。

① 電流及び時間の設定 (Peak weld currents)

[1周を4分割しそれぞれの部分での溶接電流及び時間の設定]

LEVEL 1	LEVEL 2	LEVEL 3	LEVEL 4
65A	65A	60A	50A
4 SEC	4 SEC	4 SEC	3 SEC

② パルスの山の巾の設定 (Pulse width)

25%

③ パルス数の設定 (Pulse rate)

30. p. p. s

④ 立上り時間の設定 (Upslope)

1 sec

⑤ パルス下限の電流の設定 (Background current)

35 A

⑥ 立上り時間の設定 (Downslope)

5 sec

⑦ アーク発生から回転までの時間の設定 (Fix. delay)

1 sec

⑧ 回転速度の設定 (Fig. speea)

40% (4 rpm → 15 sec / 1回転)

(100% → 10 rpm)

(7) 切断燃料棒の位置決め及びクランプ

第2回目の切断燃料棒の位置決めは、位置決めクランプ治具により、片側の端栓周溶接が終了した切断燃料棒の、未加工側のペレット取出しを目的としている。また、ペレット取出し後

は、そのまま加熱乾燥も行う。

(8) ペレットの取出し

第2回目のペレット取出しも、ペレット取出機により行う。第1回目と同様に端栓の仕上処理等もなされる。

(9) 切断燃料棒の加熱乾燥

シール溶接チャンバーを用い、チャバー内にセットした切断燃料棒を He ガス置換した状態で行う。

(10) 切断燃料棒の抜き取り

第2回目の抜き取りは、位置決めクランプ治具により、シール溶接チャンバーにて乾燥が終了した切断燃料棒を、コレットチャックより抜き取る。

(11) 端栓の圧入

第2回目の端栓の圧入も、切断燃料棒片側のペレット取出し加工が終了した時点で組立機を用い、Fig. 2.3 - 4 に示す様な2回目の作業として行われる。

(12) 周溶接

・ 第2回目の溶接も端栓を圧入した切断燃料棒の、被覆管と端栓の接合部の全周の溶接を行う。周溶接の条件、方法等は、第1回目に実施したものと同様に行う。

(13) 切断燃料棒の位置決め及びクランプ

第3回目の切断燃料棒の位置決めは、位置決めクランプ治具により、周溶接が終了した切断燃料棒の端栓シール溶接を行うためのものである。

(14) シール溶接

シール溶接は、周溶接が終了した切断燃料棒に混合ガスを封入し、ガス封入口を密封する。シール溶接チャンバーの概略を Fig. 2.3 - 5 に示す。その具体的な条件設定例を以下に示す。

① 電流及び時間の設定 (Peak weld currents)

LEVEL 1 20A 1 SEC	LEVEL 2 20A 1 SEC	LEVEL 3 20A 1 SEC	LEVEL 4 20A 1 SEC
-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------

② パルスの山の巾の設定 (Pulse width)

20%

③ パルス数の設定 (Pulse rate)

90. p. p. s

④ 立上り時間の設定 (Upslope)

1 sec

⑤ パルス下限の電流の設定 (Background current)

7 A

⑥ 立下り時間の設定 (Downslope)

1 sec

(15) 切断燃料棒の抜き取り

第3回目の切断燃料棒の抜き取りは、シール溶接チャンバーにてシール溶接した切断燃料棒を、コレットチャックより抜き取る。

(16) 短尺燃料棒のリークテスト

リークテストチャンバー及びリークテスト検出器を使用して、周溶接及びシール溶接を終了した切断燃料棒（短尺燃料棒）に対し、リークテストを行う。

(17) 短尺燃料棒の洗浄

洗浄は超音波洗浄器を使用し、周溶接、シール溶接及びリークテストを完了した短尺燃料棒について、その表面について行う。

(18) ガスユニット

ガスユニットは、周溶接を行う場合のシールドガス（He, Ar）の供給及び上部端栓のシール溶接を行う場合の混合ガス（He, Kr, Xe等）の供給を行う。

2.3.4 得られた成果

コンクリートセル内に設置した一連の燃料加工設備を用いて、NSRR パルス照射実験に必要な短尺燃料棒の製作が可能となった。なお、燃料ペレットの取出しには、照射済実用燃料棒の燃焼度が比較的低かったため、卓上旋盤と超鋼ドリルを用い、端面よりペレットを砕くことにより実施した。しかし、今後、実用燃料棒の燃焼度がより高くなった場合には、ペレット取出機の改良等が必要になると思われる。

2.4 短尺燃料棒のパンクチュアリング治具の設計製作（関田）

2.4.1 使用目的

燃料試験施設 $\alpha\gamma$ セルでは主に研究炉で照射された FBR 燃料ピンの PIE を実施してきた。従って LWR 燃料棒のように、FBR からみて相対的に太径の燃料棒を取扱うには燃料棒摺み治具等の製作が必要となる。

今回、 $\alpha\gamma$ コンクリート No. 1 セルで、NSRR パルス照射した PWR 型短尺燃料棒のパンクチュアリングを実施するにあたり、専用の燃料棒摺み治具が必要となり、このための設計製作を行った。本治具はガス抜き試験用スリーブと称し、燃料棒プレナム部の上下を保持してダブルパッキングでシールし、FP ガスを逃がす事無く捕集する目的で使用した。

2.4.2 治具概要

ガス抜き試験用スリーブの概要を Fig. 2.4-1 に示す。

短尺燃料棒はプレナム長が 21 mm しかないこと、ホットセル内での端栓溶接や NSRR でのパルス照射等により燃料棒に曲りが生じている可能性があること、等に注意して治具の設計を行った。

穿孔位置をプレナム中央部に合致させるべく、上部キャップ(A)下面に燃料棒上部端栓肩部を当て、肩面より 20 mm 下に穿孔ポンプ芯が位置するよう設計した。上部端栓側シール部は溶接

ビート部を避けた部分にパッキングが位置するようにした。また、燃料棒が曲っている事を想定し、燃料棒の頂部側より 76 mm 下のスリーブ内径を太くした。この結果、燃料棒とのギャップがより大きくなかった。

設計されたガス抜き試験用スリーブに対し、反応度安全研究室から供与されたダミー燃料棒による諸機能検査及び He リークテスト等の検査を実施し、十分使用に耐える事を確認した。He リークテストの結果はリークレート 1×10^{-6} atm・cc/sec 以下であった。

2.4.3 成 果

燃料試験施設 $\alpha\gamma$ コンクリート No. 1 セル内に設置したパンクチュアリング装置は、ガス捕集を行うのにテプラーポンプを使用している。このため、FP ガス放出量が例え少量でも、全量のガスサンプリングが可能なことに特徴がある。

予備照射後 NSRR でパルスした PWR 型燃料棒のガス捕集試験結果を Table 2.4-1 に示す。主要なデータとして燃料棒内空隙容積 4.22 cm^3 、燃料棒内ガス圧力 $4.19 \times 10^6 \text{ Pa}$ 、全ガス量 159.85 cm^3 等の測定値を得た。この他、捕集したガスの分析試験を実施した。分析結果を Table 2.4-2 に示す。主要なデータとしてガス成分比、Xe/Kr 比及び Xe、Kr の同位体存在比等の分析値を得ることができた。

これらのデータは、パルス照射された PWR 型予備照射済燃料棒の FP ガス放出ふるまいを研究するのに、十分に役立った。

2.5 燃料棒部材の設計・製作（笹島）

2.5.1 設計・製作の目的

予備照射済燃料による反応度事故模擬実験を遂行するためには、実験用燃料棒を製作する必要があった。従来 NSRR 炉を用いて行われて来ている未照射燃料実験は、燃料有効長が約 14 cm の短尺燃料を用いて来ており、予備照射済燃料実験においても、これとほぼ同一長の実験燃料とすることにした。

照射済の商用炉燃料はいずれも有効長が 360 cm 程度ある。従って、予備照射済商用炉燃料（長尺燃料）を切断し、NSRR 実験用に短尺化する必要が生じた。

2.5.2 燃料棒の構造

Fig. 2.5-1 に燃料棒の組立図を示す。また、Fig. 2.5-2 に燃料棒上部構造物を Fig. 2.5-3 に燃料棒下部構造物を、Fig. 2.5-4 ~ Fig. 2.5-19 に部品図を示す。

予備照射済商用炉燃料は、まず 141.6 mm 長に切断された後、溶接代をとるために上部側の燃料ペレットを 14 mm、下部側の燃料ペレットを 6 mm 削り出した。その後、上部構造物及び下部構造物を溶接した。

燃料棒の構造は、照射済燃料を切断し燃料ペレットを削除したあと、両端に被覆管ジョイント、未照射被覆管、上部端栓及び圧力センサを溶接し、燃料棒空間にハフニウムディスク、アルミナペレット、ムーブメントマーカ、変位測定用コア、スペーサ、スプリング受及びスプリングを装

荷するようになっている。なお、圧力センサは下部端栓も兼た構造になっている。

① 上部端栓

Fig. 2.5-4 に上部端栓の部品図を示す。材質はジルカロイ-4 であり、外径 10.72 mm、長さ約 17 mm である。ガス封入孔は、上部側 $\phi 0.6$ mm キリ、下部側 $\phi 1.2$ mm キリとし、上面は面取不可とした。この面取不可の理由は、上部端栓溶接時に部材がだれて直径がものと外径の 4 mm を超えると、計装として準備している軸伸び計の取付けに支障が出るため、それを考慮したものである。

② スプリング

Fig. 2.5-5 にスプリングの部品図を示す。材質は SUS 304 WPB であり、外径 8 mm、自由長 25.0 ± 0.3 mm である。燃料棒組立時のスプリング長さは 21 mm となるが、これはプレナムボリュウムを NSRR 標準燃料のプレナム比と同程度とするためである。この結果、燃料部のプレナム容積は約 2 cm^3 となった。また、バネ定数は組立てを考慮し 0.443 kgf/mm とした。

③ スプリング受

Fig. 2.5-6 にスプリング受の部品図を示す。材質は SUS 304 であり、外径 9.2 mm、長さ 6.0 mm である。

④ 変位測定用コア

Fig. 2.5-7 に変位測定用コアの部品図を示す。材質は電磁軟鉄せあり、腐食防止のために表面をカニゼンメッキしてある。外径は 9.2 mm、長さ 18.0 mm で、照射実験時に発生するとと思われる FP ガスを、プレナム部へスマーズに導くための溝が大きさ 0.5 mm、深さ 3 mm の十字形状で設けてある。変位測定用コアを装荷した目的は、照射実験時に起こると思われるペレットの軸方向伸びを LVDT 方式で測定するためである。

⑤ 未照射被覆管

Fig. 2.5-8 及び Fig. 2.5-16 に、頂部側被覆管及び底部側被覆管をそれぞれ示す。材質は、商用炉の PWR 型燃料棒と同じジルカロイ-4 を用いた。外径は 10.72 mm、内径は 9.48 mm である。

⑥ 被覆管ジョイント

Fig. 2.5-9 及び Fig. 2.5-11 に上下部被覆管ジョイントの部品図を示す。材質はジルカロイ-4 で、外径 10.72 mm、長さ 20 mm である。被覆管ジョイントは、中性子照射により硬化した照射済被覆管と部品の上部及び下部構造物を機械的に結合させて一体化するためのものであり、端面にテーパーを付けて溶接を行うこととした。テーパー部では、照射済被覆管に生じているオバリティ及びクリープダウン等も吸収できるように考慮した。

この部分は、溶接によって部品同志を結合する構造としたため熱による影響が生じる可能性もある。特に、有効発熱長に近いジョイント部では、実験によって急激に発生した燃料のスウェーリングにより大きな引張応力が作用する可能性が考えられた。これについては、あらかじめ同一仕様・同一形状のモックアップ試料を作製し、常温及び高温バースト試験等によりその健全性を確認した。

Photo. 2.5-1 に常温バーストの、Photo. 2.5-2 に高温バースト試験の結果を示す。両試験とも再現性を確認するために 2 回ずつ行った。常温バースト試験は約 20°C で行い、バースト圧

力は 1165 kg/cm^2 及び 1158 kg/cm^2 であった。また、高温バースト試験は 385°C で行い、バースト圧力は両方とも 610 kg/cm^2 であった。なお、昇圧速度は $200 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ とした。これら写真から分かるように、破損した位置は溶接部でなく、直管部であった。溶接部の健全性に関して炉外実験にてまず確認した。

また、ジョイント部中央の V 溝は、パルス照射前後の PIE における直径プロフィールや渦電流探傷試験での基準位置とするために設けたものである。

⑦ ハフニウムディスク

Fig. 2.5 - 10 にハフニウムディスク（以下 Hf ディスク）の部品図を示す。材質は Hf で、外径 9.29 mm 、厚さ 2.0 mm である。Hf ディスクは、燃料棒の有効発熱部最外端に挿入したのち、その熱中性子吸収断面積が大きい（1・5 バーン）ことを利用して、照射実験時に燃料有効長両端に発生するエンドピークを低減するために利用した。Hf ディスクの板厚に関しては、PWR 型燃料棒の第1回組立て時には板厚 1 mm のディスクを経験的に用いたが、その後、最適必要最少板厚を決定するためのパルス実験^(2.5-1)が実施された。実験では未照射燃料棒に、 0.5 mm 、 1 mm 、 2 mm 及び 4 mm の 4 種類の板厚を持つ Hf ディスクがそれぞれ装荷され、パルス照射がなされた。この結果、次の知見が得られた。

- 1) パルス照射時に発生するエンドピーク係数 1.18 程度に低く抑えるために必要な Hf ディスクの最少肉厚は 2.0 mm であること。
- 2) Hf ディスクの厚さを 2.0 mm より厚くしても、ピーキング係数は、その厚さにほとんど依存しないこと。

この結果、に基づき、エンドピークをできる限り低く抑えるための最少板厚を 2.0 mm と決定し、以後この厚みの Hf ディスクを短尺化燃料製作時に用いることとした。

⑧ スペーサ

Fig. 2.5 - 12 にスペーサの部品図を示す。材質は SUS 304 で、外径 9.2 mm 、長さ 4.0 mm である。スペーサーは、照射実験時に発生する圧力を、下部側の圧力計に支障なく伝えるため、中空構造とした。

⑨ アルミナペレット

Fig. 2.5 - 13, Fig. 2.5 - 14 及び Fig. 2.5 - 15 にアルミナペレットの部品図を示す。材質は断熱効果を考慮しアルミナ材 (Al_2O_3) を用いた。横断面に切り欠きが入っているのは、パルス照射によって燃料ペレットから放出された FP ガスが、大きな流動抵抗を伴わずに燃料棒上部側のガスプレナム部及び下部側の圧力センサー部に導入されるよう工夫されている。また、組立前の品質管理では水分が吸着しないよう配慮がなされた。

⑩ ムーブメントマーカ

Fig. 2.5 - 17 にムーブメントマーカの部品図を示す。材質はジルカロイ-4 であり、装荷前外径は 9.58 mm 、厚さ 3 mm であった。

ムーブメントマーカは、その動きから照射実験時の燃料ペレットの伸びを測定するものである。移動量は照射前後の燃料棒の X 線撮影から測定する。実際には、燃料ペレット上部側の Hf ディスクと接して取り付けられている。ディスク幅は、燃料棒の取り扱い時及び輸送時に位置がずれたりしないようにプレナムスプリングを利用している。また、パルス実験時には燃料ス

タックの熱膨張に対してスムーズに移動することなどが考慮された。

⑪ 圧力計

Fig. 2.5 - 18 に圧力計の部品図を示す。材質はジルカロイ-4であり、外径は 10.72 mm、長さ 60 mm である。圧力計は電気抵抗ブリッジを使用したメンプラン（薄膜）型の内圧型である。パルス照射のため燃料ペレットから放出された FP ガスに対し、タイトな構造を保持するために耐熱エポキシ樹脂を使用している点に特徴がある。この圧力計は燃料棒底部にとりつけたが、照射済燃料ペレットから放出される中性子等によりエポキシ樹脂が空洞化されると測定性能に支障をきたす恐れがある。ある一定の中性子束下での性能保障は組立後 1 年と見積られている。また、燃料底部に取り付けるとき、溶接がなされるが、その時に過度の熱を加えるとその熱影響により圧力センサー自身が破損する恐れもある。

⑫ 照射済燃料及び被覆管

Fig. 2.5 - 19 に照射済燃料及び被覆管の概略図を示す。照射済燃料内部では、リロケーション、被覆管内側と燃料のボンディング等により、被覆管とペレットとの機械的結合力が増加される傾向にある。燃料製作に当たっては、燃料頂部側で約 14 mm 及び底部側で約 6 mm の長さに相当する燃料ペレットを取り出し、この部分にて上部及び下部構造物とのジョイントを行うことにした。このため、燃料棒の切断面から上部 14 mm 及び下部 6 mm の間は、燃料ペレットを取り除く作業が必要となった。実際の切断に際しては、この燃料削除部分の末端を、燃料ペレットの境界面と一致させ、なるべくスムーズに燃料を被覆管より取り出す努力がなされている。

2.5.3 セグメント化に伴って生じた技術的問題点

最終的には、技術的問題は克服されたものの、セグメント化に際しては、幾つかの技術的な困難に遭遇している。これについては、附録 1 に概要を示したので参照されたい。

2.5.4 得られた成果

燃料棒の発熱部 (126 ± 1 mm) を設計寸法通りに作成するため、切断した燃料棒から燃料ペレットを所定量だけ削除する作業は、ホットケーブ内の遠隔作業として相当の技術力が要求された。しかし、現在その技術は確立された。また同様に遠隔作業で行う燃料棒の組立及びガス封入後の端栓溶接並びに熱電対や圧力計等計測機の取り付け技術も確立した。Photo. 2.5 - 3 に、この様な技術的困難を克服して作り上げられた組立後の燃料棒の写真を示す。また、Photo. 2.5 - 4 に燃料棒構成部材の写真も示す。

短尺化後の燃料棒を NSRR にてパルス照射してみたが、その結果、以下のような知見が得られた。

① 燃料棒外観

Photo. 2.5 - 5 に予備照射済燃料をパルス照射した照射後の燃料棒外観写真を示す。この写真から分かるように、懸念されていた燃料棒溶接部の破損等は生じなかった。溶接部の健全性は、炉外実験の予測通り、炉内実験でも確認することができた。

② 炉内圧力計

Fig. 2.5 - 20 に燃料棒圧力計を用いて得られたパルス時の燃料棒内圧データを示す。この図から分かるように、圧力計についてもそれがパルス時に正常に作動することが確認された。パルス照射の極短時間の実験についても、実験上精度の良好な燃料棒内圧データが得られることになった意義は大きい。

③ ムーブメントメーカー

Photo. 2.5 - 6 に燃料棒燃料前後の X 線写真を対比して示す。ムーブメントメーカーは、燃料ペレット上部側に位置しており、照射前後の位置を比較することにより、パルス照射時の燃料ペレットの軸伸び量が求められる。これらデータから、燃料健全性研究に一ブメントメーカーも測定機器の 1 つとして十分に機能しうることが確認された。燃料ペレットのパルス照射時の炉内挙動の一端を示すデータが、ムーブメントメーカーにより得られることになった意義は大きい。

2.6 短尺燃料棒収容器の設計・製作（黒羽）

2.6.1 目的

予備照射済燃料を用いた NSRR パルス実験では、商用炉で照射した長尺燃料（有効発熱長約 3.6 m）をそのまま用いずに短尺化して使用する。この短尺化燃料棒（有効発熱長約 0.12 m）は、実用燃料試験室において、研究室の要請に従って必要な本数だけ作製される。この本数決めの際に、重要な因子となっているのが、3.3 節で記述する燃料棒内圧計の寿命である。すなわち、各々の燃料棒は燃料底部に内圧計をとりつけるが、一旦内圧計を予備照射済燃料棒にとりつけてしまうと内圧計はその後燃料から放射線（主として γ 線）を常にあびることになる。そのため、あまり長期間燃料棒を保存しておくと内圧計が放射劣化して使いものにならなくなってしまうことが分かっている。従って、実験用燃料棒は、毎年、必要な分だけ、製作する方式がとられている。

作製された燃料棒は、実用燃料試験室から NSRR に搬入されるが、内圧計等の劣化がなるべく進まず、かつ崩壊熱によって燃料棒表面温度が不用意に上昇しないよう考慮を払った収納容器を製作する必要があった。

2.6.2 容器の概要

本容器は、搬入された燃料棒を収納し、NSRR のセミホットケーブ及びセル内の貯蔵ピットへ保管するためのものである。容器の形状は、Fig. 2.6 - 1 に示す様に 18 本の燃料棒収納管から成り、また、ピットへ吊り下げて保管するためのフック等がついている。

燃料棒収納管は、BWR 用及び PWR 用の 2 種類の燃料棒に合わせ 2 種類の収納管を内外周の 2 列に配列した。外周には、PWR 用燃料棒を 12 本、内周には BWR 用燃料棒を 6 本収納できる。また、収納管の外面には、燃料棒の温度上昇を抑えるための空気孔が備えられている。

Table 2.2-1 Specification of dry cutting device used for refabrication of rodlet fuel

	項 目	主な仕様及び寸法
1	主軸モートル	0.75 ^{kw} 4P全閉モートル 200V/50·60Hz
2	使用カッター 径	150mm(ダイヤモンドカッター)
3	バイス型式	ダブルバイス(手動)
4	ワーク横送リストローク	≈ 250mm
5	バイス開き	35mm (刃高さ 25mm)
6	前後ストローク	100mm(スクリュ送り丸ハンドル)
7	電気関係	マグネットスイッチ、2点押シボタンスイッチ付
8	機械寸法	≈ 650×600×1005mm
9	機械重量	≈ 160kg
10	電源	φ3, 200V, 50Hz
11	カッター回転	1900RPM

Table 2.2-2 Specification used for dry

項 目	仕 様
燃料棒収納数	2本
[真空系] 真空度 真空ポンプ型式 真空ポンプ電動機仕様	1. 33Pa ゲーテ型 φ1, 100V, 200W, 4P
[加熱系] 最高使用温度 運転温度 ヒーター型式 ヒーター定格電圧容量	200°C 120°C(MAX) シーズヒーター φ3, 200V, 1.8kW
重 量	130kg

Table 2.2-3 Specification used for peripheral welding

項 目		仕 様
型 式		トーチ回転式
チャンバー	雰囲気	H e + A r
	設計温度	常温
	設計圧力	- 1 ~ 1 kg/cm ² G
	トーチ回転速度	3 ~ 11 R P M
溶接機		東亜精機(株)製 TIG Pulse 150型
電源	溶接機	φ 3, AC 200V
	制御電源	φ 3, AC 100V
		φ 1, AC 200V
重量	チャンバー	約 70 kg
	溶接機	約 75 kg

Table 2.2-4 Specification used for end plug seal welding

項 目		仕 様
型 式		点 溶 接
溶接チャンバー	流体	ヘリウムガス+キセノンガス
	設計圧力	-1 ~ 50 kg/cm ² G
	常用圧力	-1 ~ 50 kg/cm ² G
	設計温度	40 °C
ガス混合タンク	流体	ヘリウムガス+キセノンガス
	設計圧力	-1 ~ 60 kg/cm ² G
	常用圧力	-1 ~ 60 kg/cm ² G
	設計温度	40 °C
溶接機		東亜精機㈱製 TIG Pulse 100型
電 源	溶接機	φ3 AC 200V
	制御電源	φ3 AC 100V
		φ1 AC 200V
重 量	チャンバー等	約200kg
	溶接機	約140kg
適用法規		高压ガス取締法

Table 2.4-1 Result of FP gas puncturing made on pulse irradiated PWR fuel

燃料棒ガス捕集試験データ		試験名	燃料棒ガス捕集試験
		燃料集合体番号	G 0 8
		燃料棒番号	K 4 - K 1
試験日	平成 2年 2月 9日		
<hr/>			
穿孔前空隙容積 (cm ³)		84.78	
穿孔後空隙容積 (cm ³)		89.00	
燃料棒内部空隙容積 (cm ³)		4.22	
穿孔前到達真空度 (Pa)		1.09×10^{-2}	
ガス平衡圧力 (Pa)		1.32×10^5	
燃料棒内部ガス圧力 (Pa)		4.19×10^6	
穿孔後集中配管温度 (°C)		25.2	
全ガス量(標準状態) (cm ³)		159.85	

特記事項

1) 各空隙容積は、8回の測定データの算術平均値を示す。

Table 2.4-2 Result of mass spectrometry against sampled FP gas from irradiated PWR fuel

パンクチャー試験 データシート(ガス分析)	試験名	パンクチャー試験(ガス分析)
	集合体名	G 0 8
	燃料棒	K 4
試験期間	H 2. 2.13~H 2. 3. 1	試料名

1. 成分比

成 分	容 量 比 (Vol %)	重 量 (g) #1
H ₂	<0. 01	
He	BASE	
N ₂	0. 02	
O ₂	<0. 01	
Ar	0. 14	
Kr	0. 16	9. 7 × 10 ⁻⁴
Xe	1. 68	1. 6 × 10 ⁻²

Xe/Kr 10. 5

2. 同位体比

核 種	存 在 比 (%)
83-Kr	9. 2
84-Kr	34. 9
85-Kr	2. 4
86-Kr	53. 5

131-Xe	5. 4
132-Xe	21. 8
134-Xe	27. 5
136-Xe	45. 3

3. 特記事項

分析機器 SHIMADZU GCMS-2019 / GC-9A

※ 1 パンクチャー試験により得られた燃料管内ガス量に、Kr、Xeの容量比及びその平均質量数を乗じた値である。

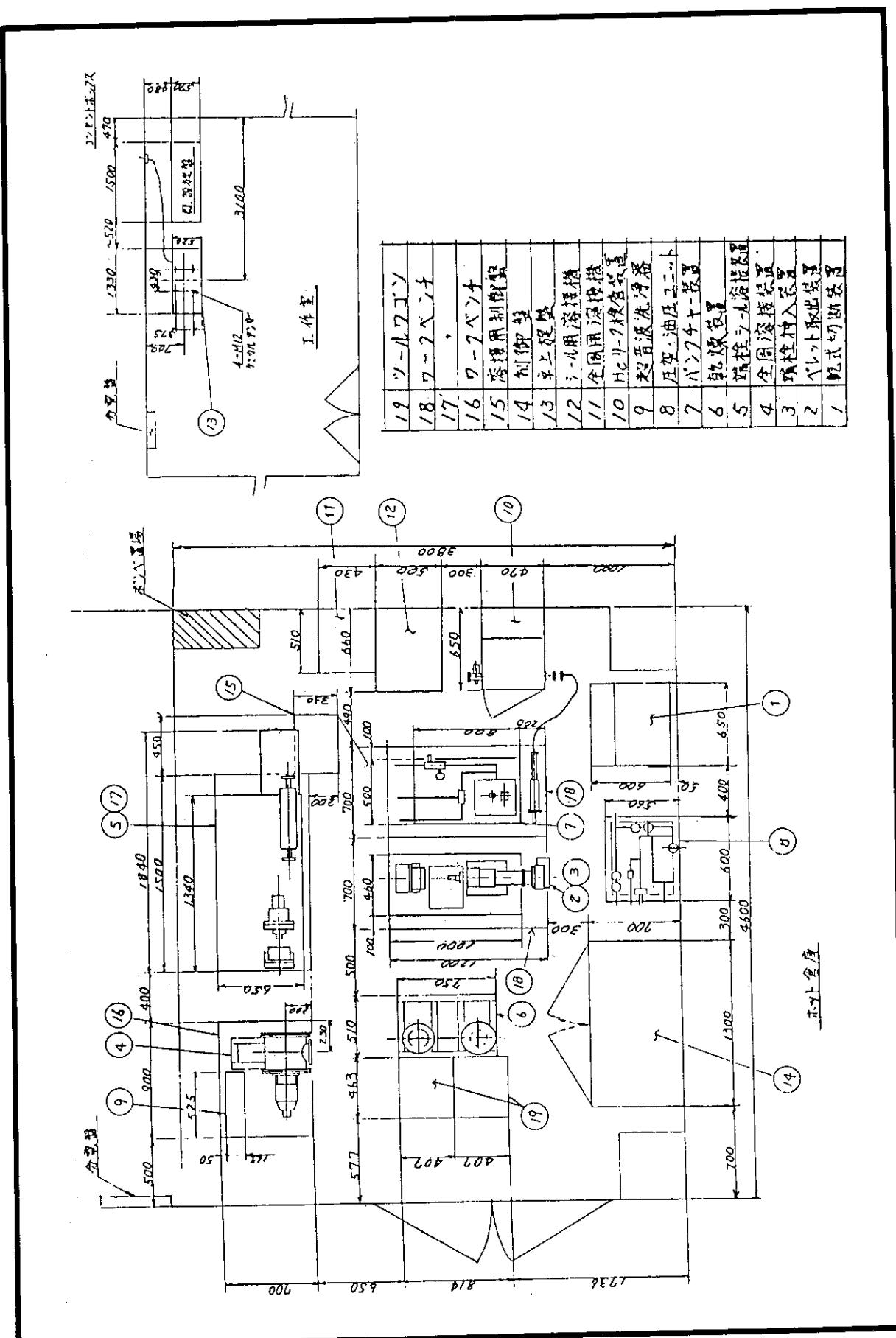


Fig. 2.2-1 Schematic arrangement of mock-up devices designed for fuel refabrication

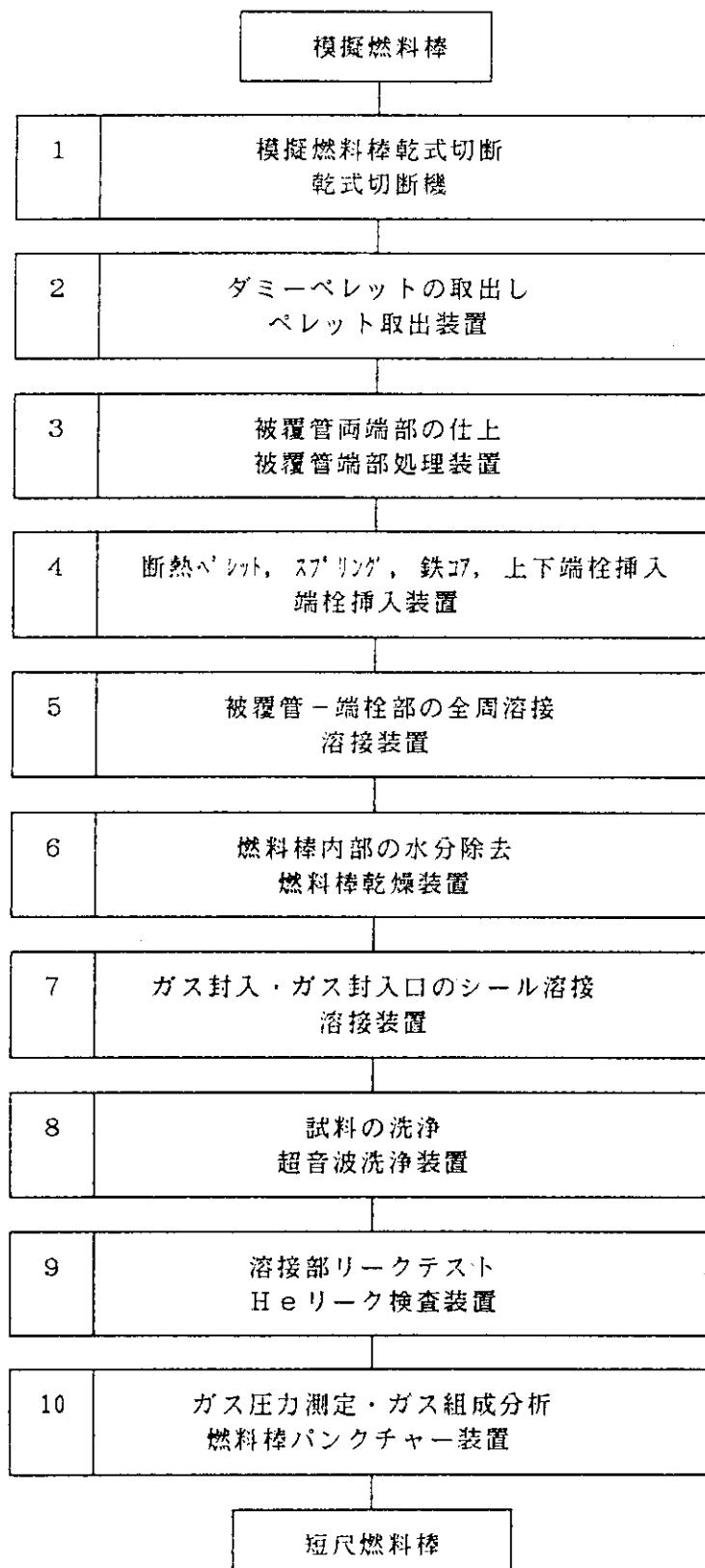


Fig. 2.2-2 Work flow used for segmented fuel fabrication

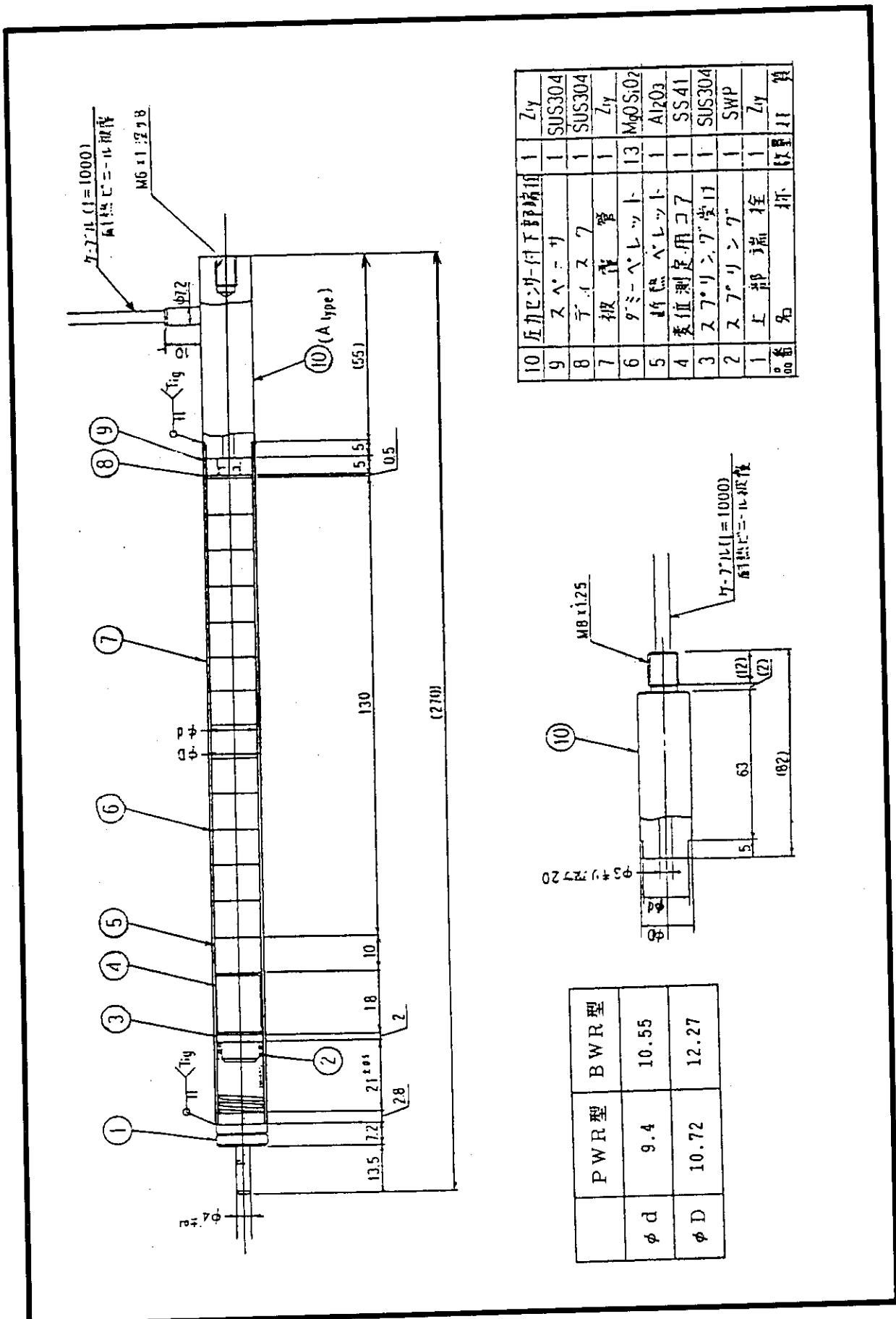
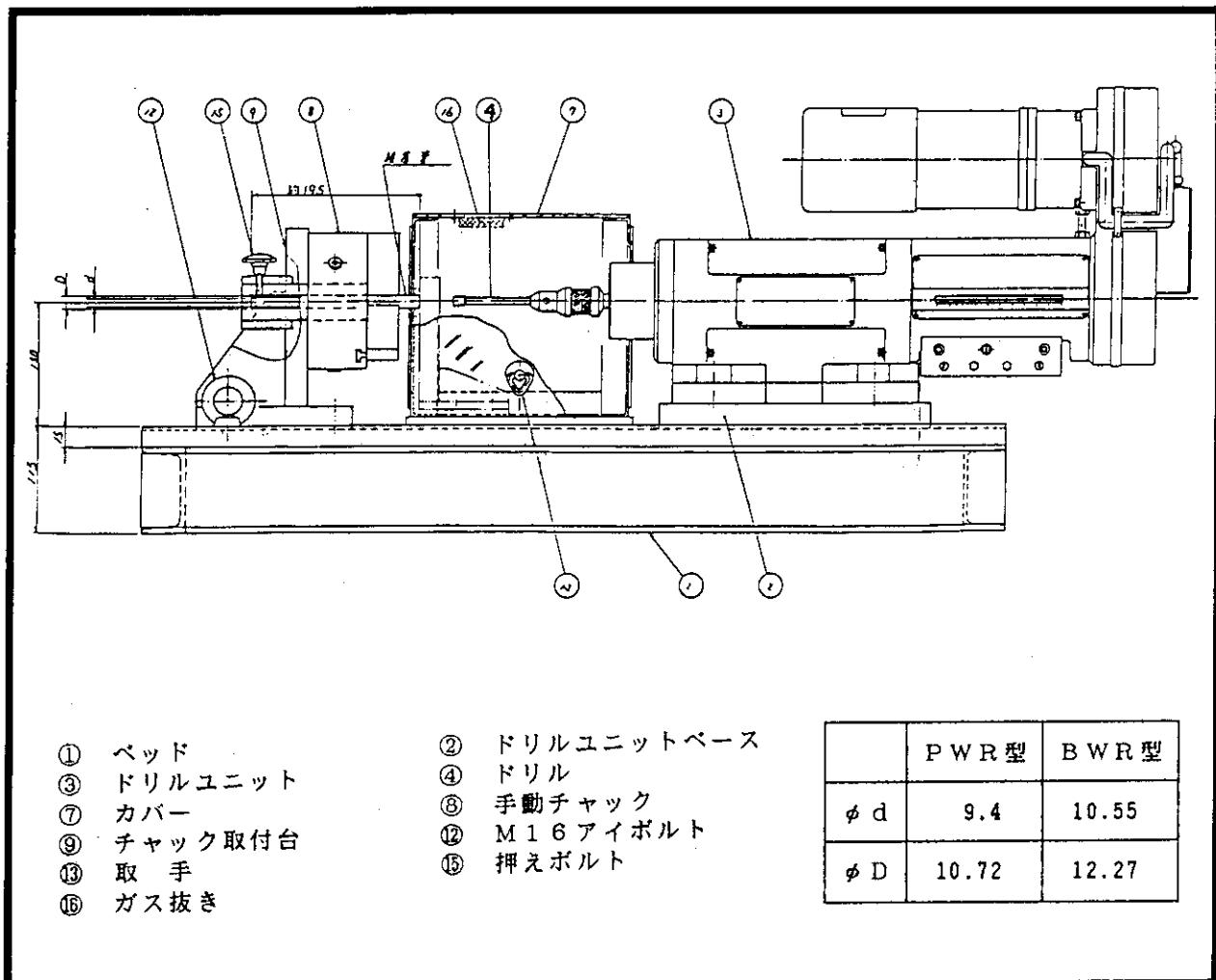


Fig. 2.2-3 Schematic drawing of dummy fuel for mock-up test

Fig. 2.2-4 Dismantling device of UO_2 pellet from fuel rod

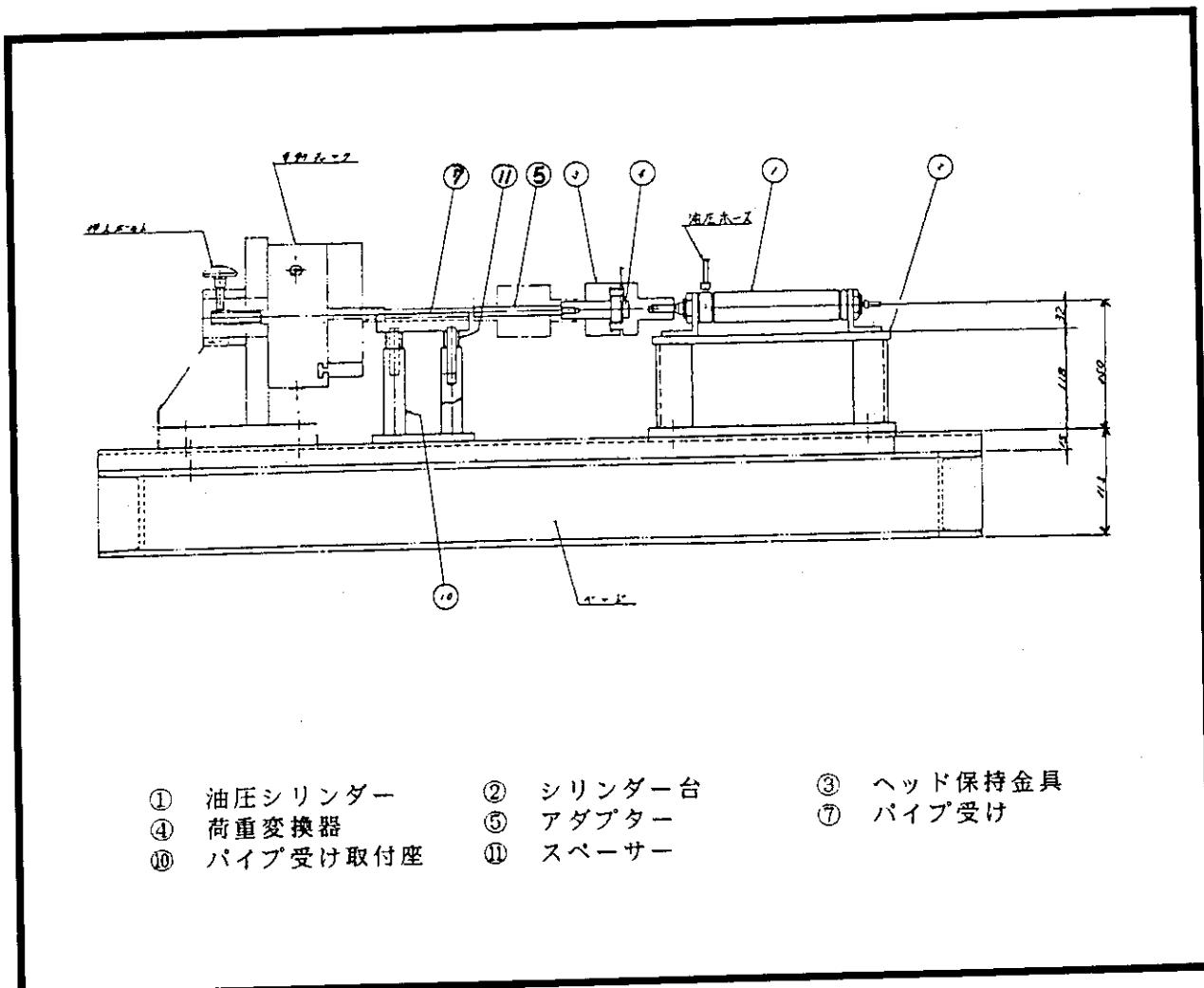


Fig. 2.2-5 Device for inserting end plugs into fuel cladding

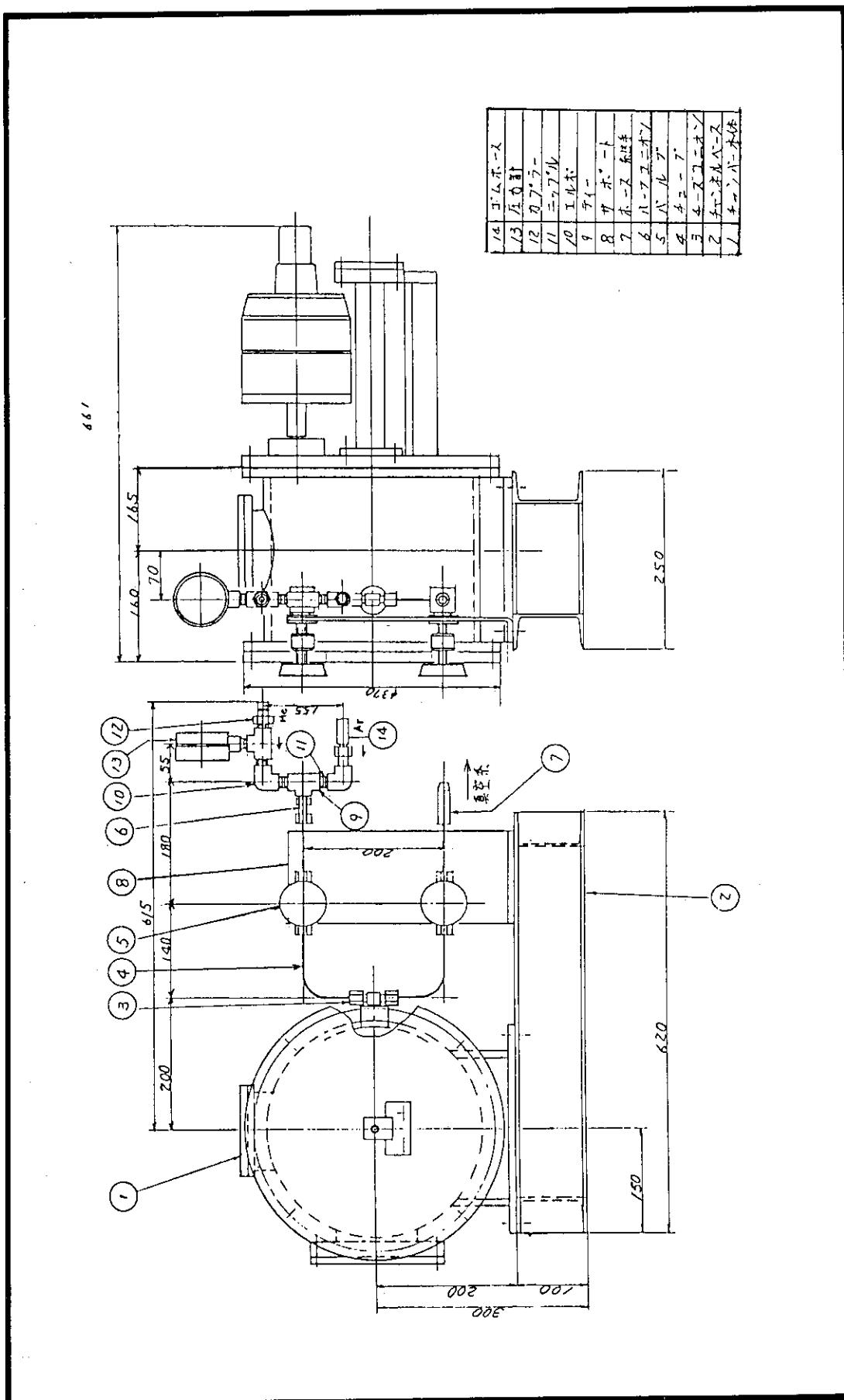


Fig. 2.2-6 Peripheral welding device

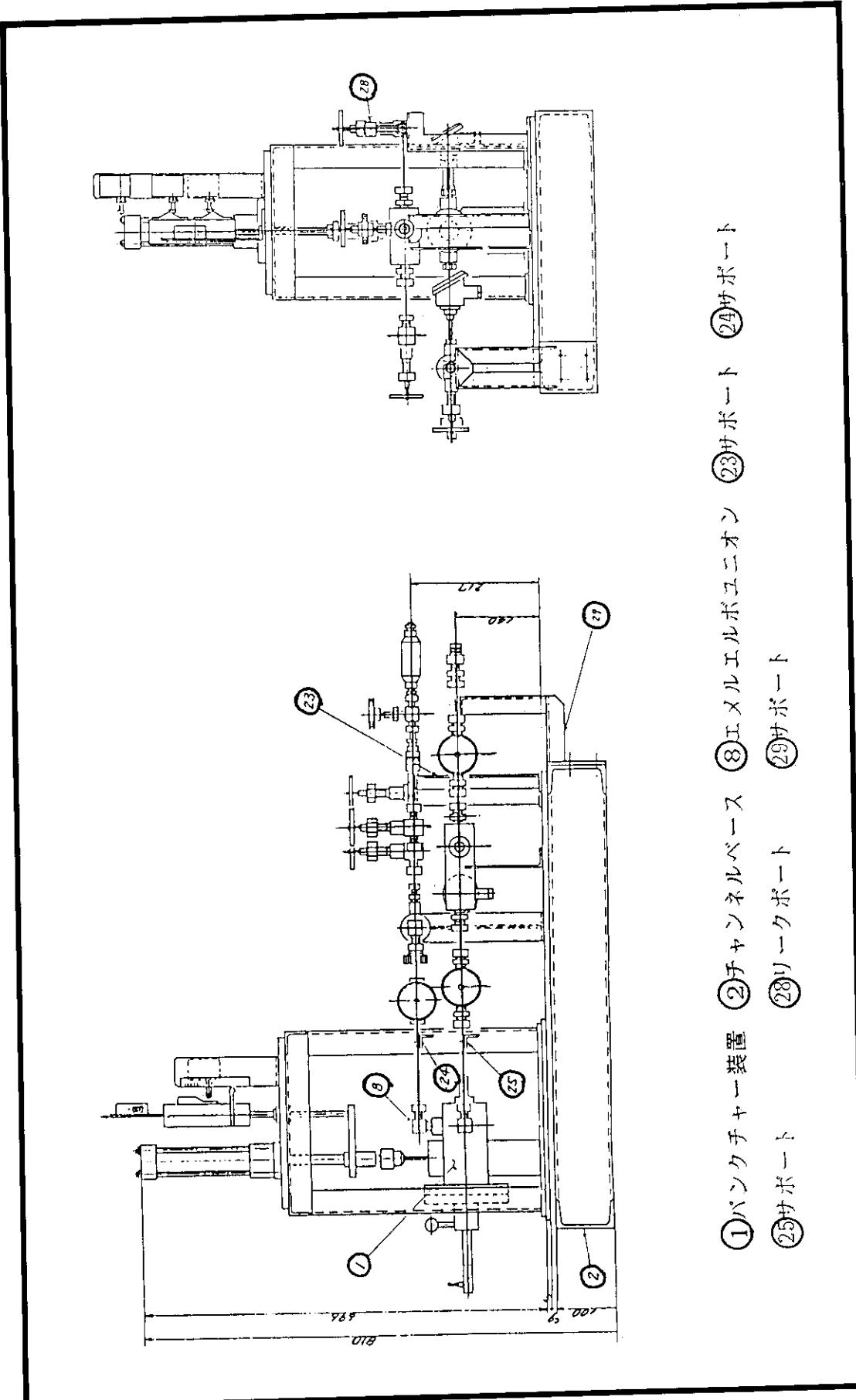


Fig. 2.2-7 FP gas puncturing apparatus

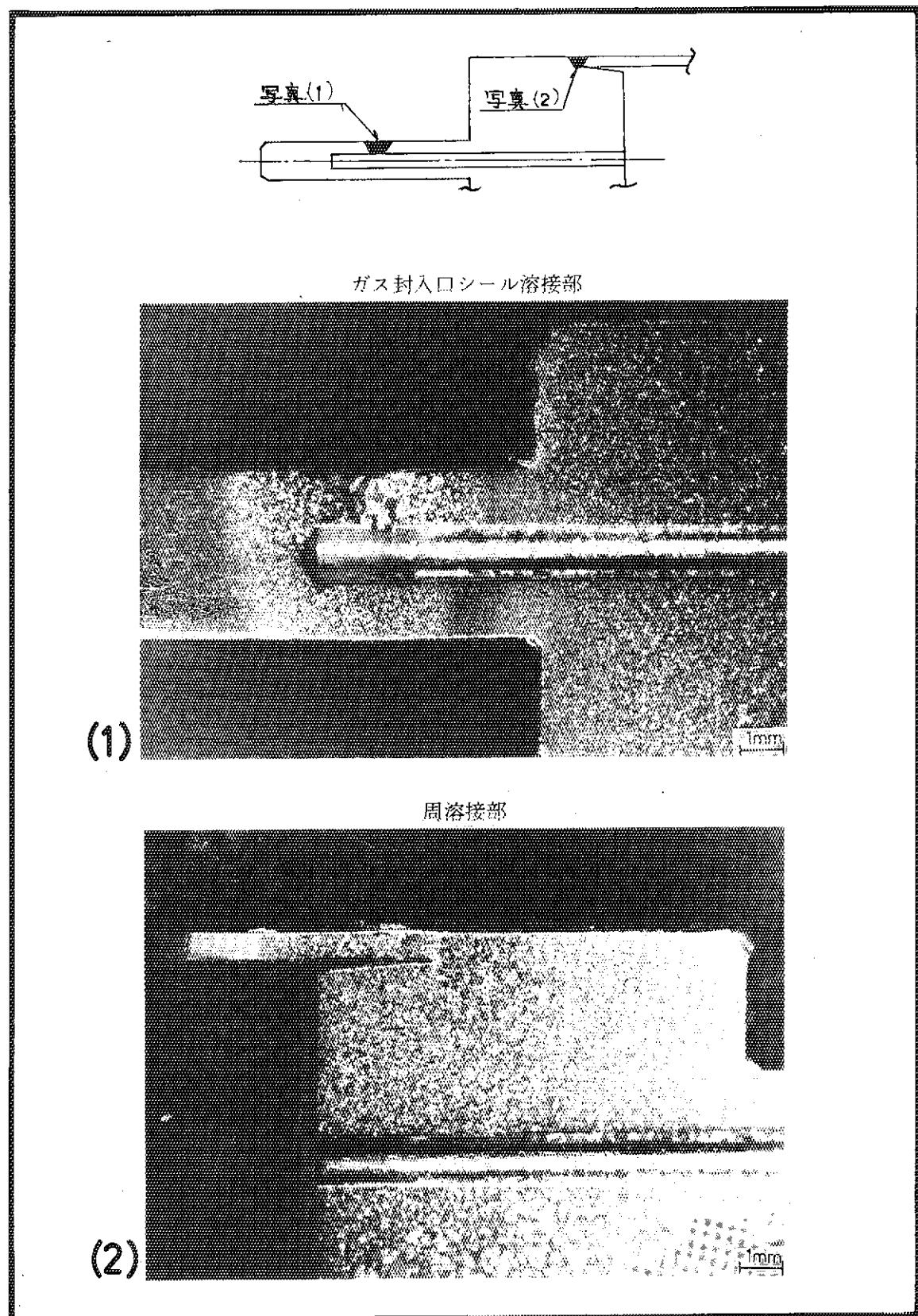


Fig. 2.2-8 Macrostructure (1) showing the welded gas filling hole and (2) showing the location after peripheral welding; As-etched by distilled water+HNO₃ (45ml)+HF(10ml)

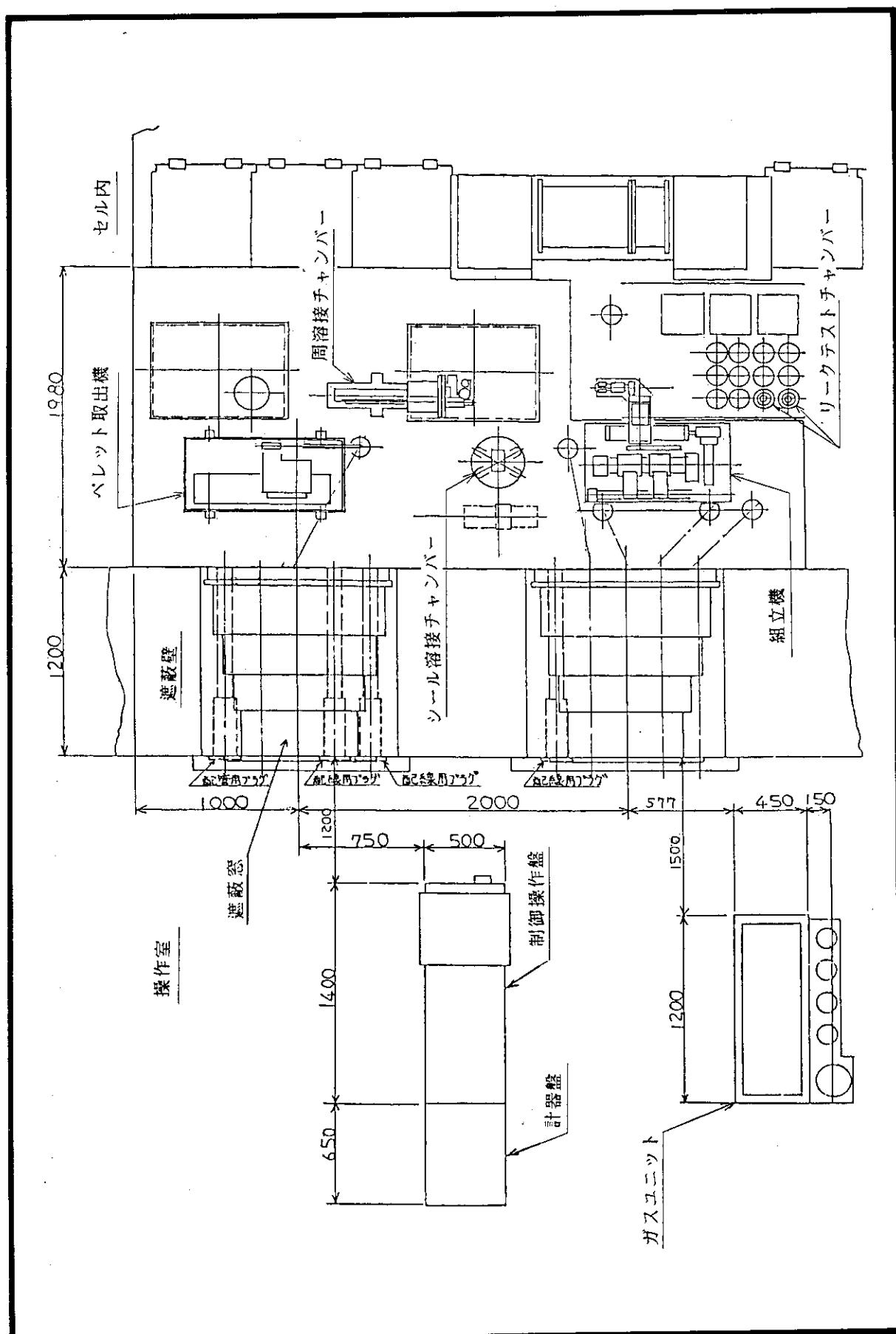
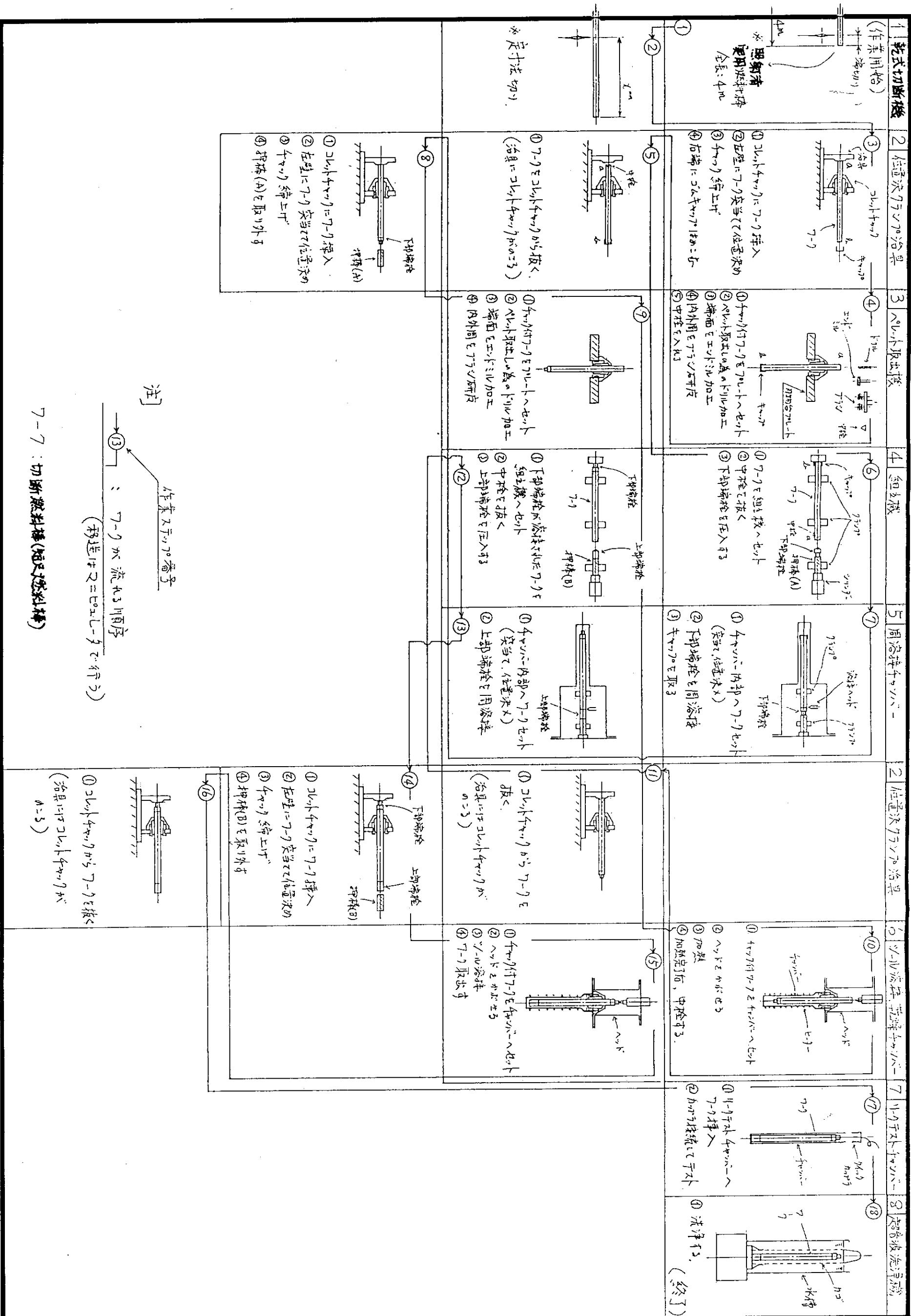


Fig. 2.3-1 Array of fuel refabrication devices in hot cell



7-7：切斷燃料棒(短尺燃料棒)

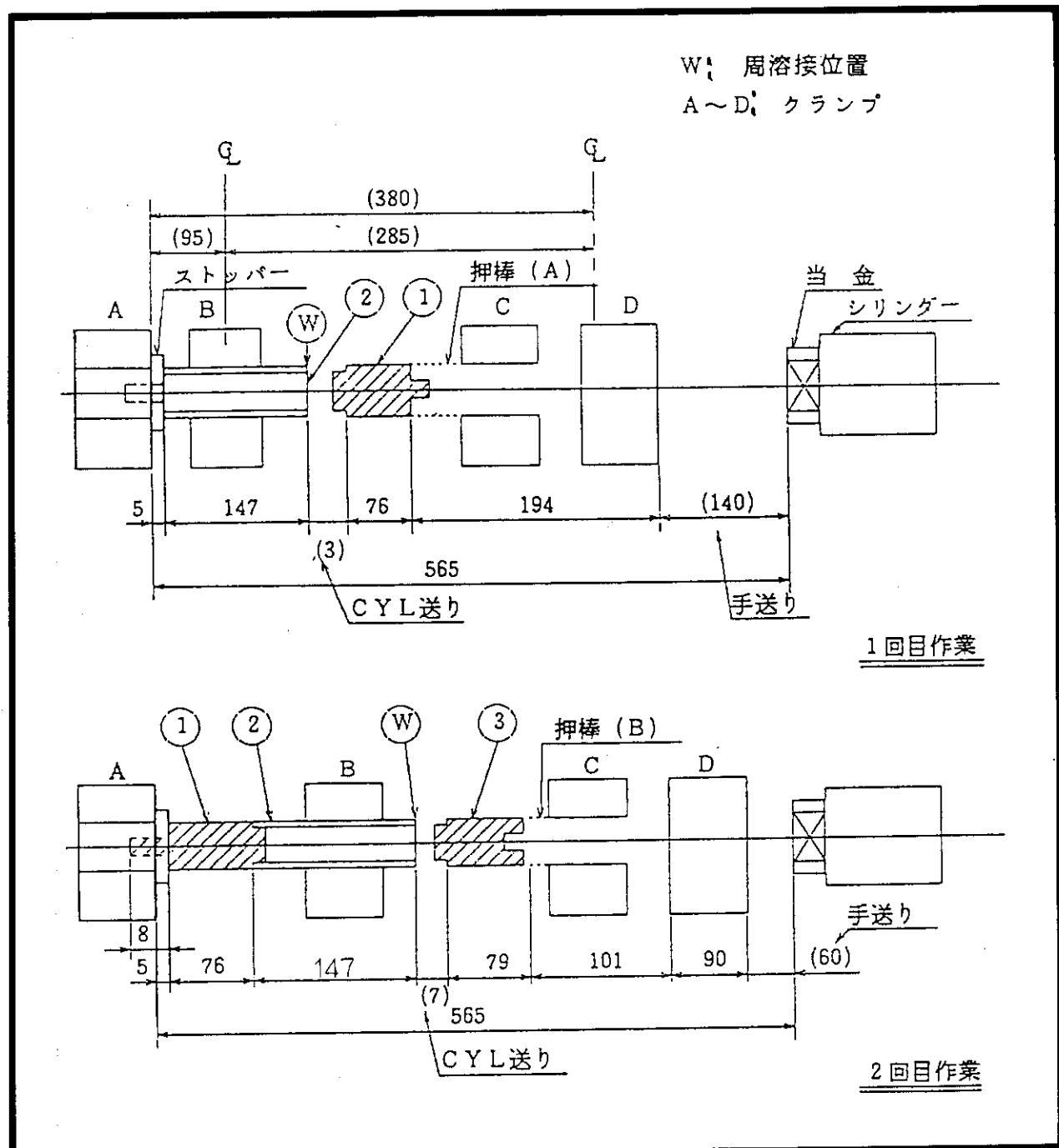


Fig. 2.3-3 Assembling method for the end plug insertion into cladding

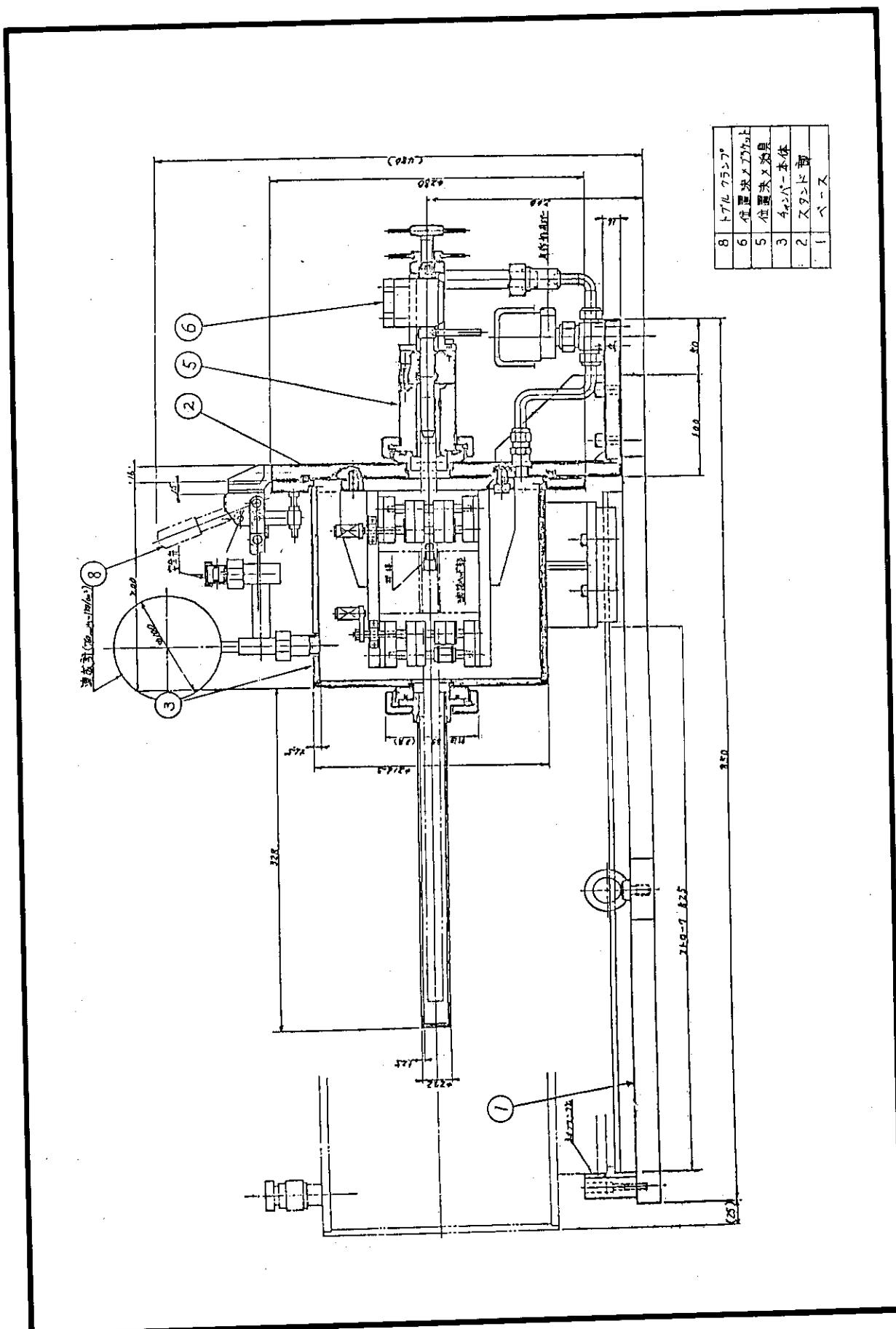


Fig. 2.3-4 Chamber for circumferential welding

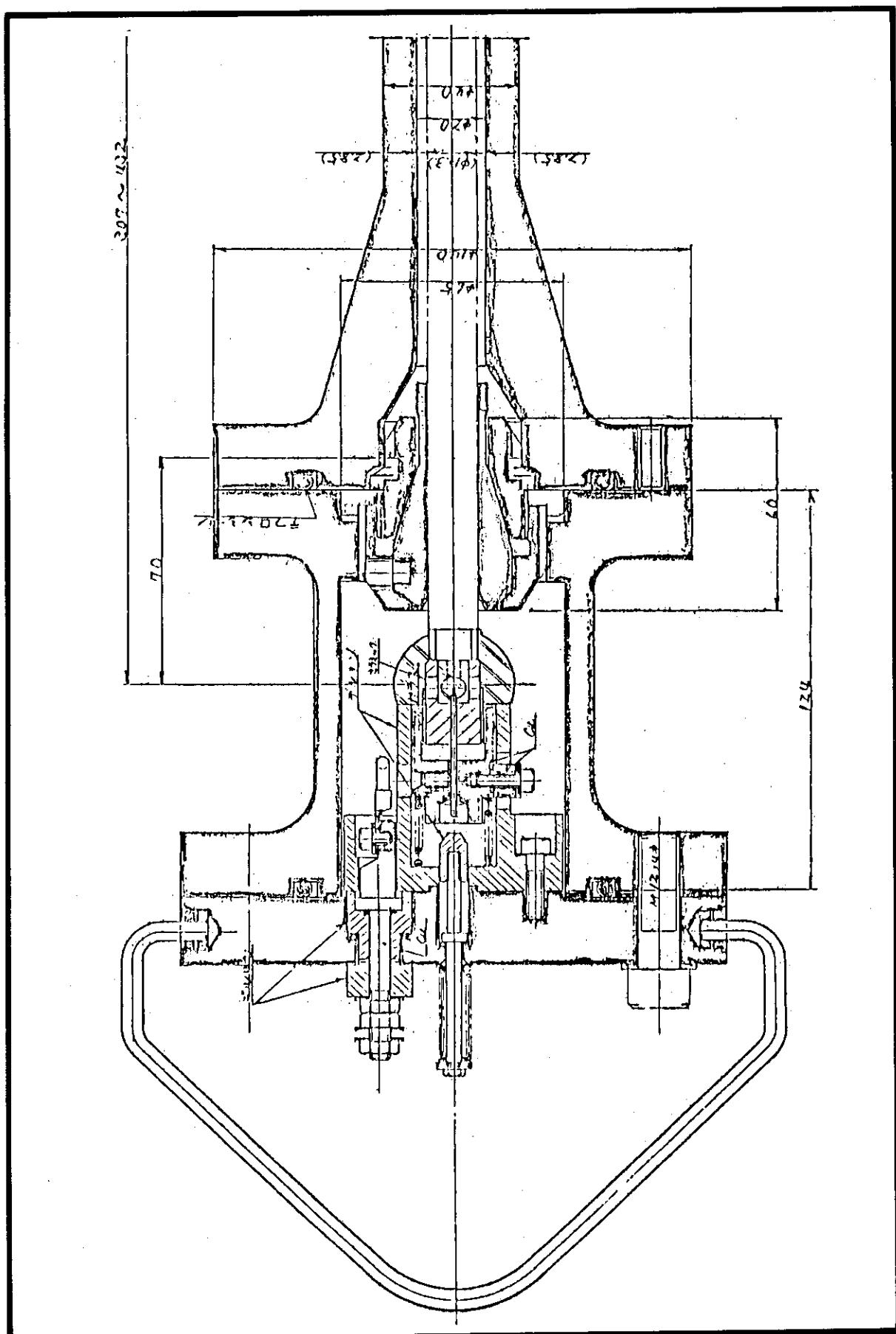


Fig. 2.3-5 Chamber for seal welding

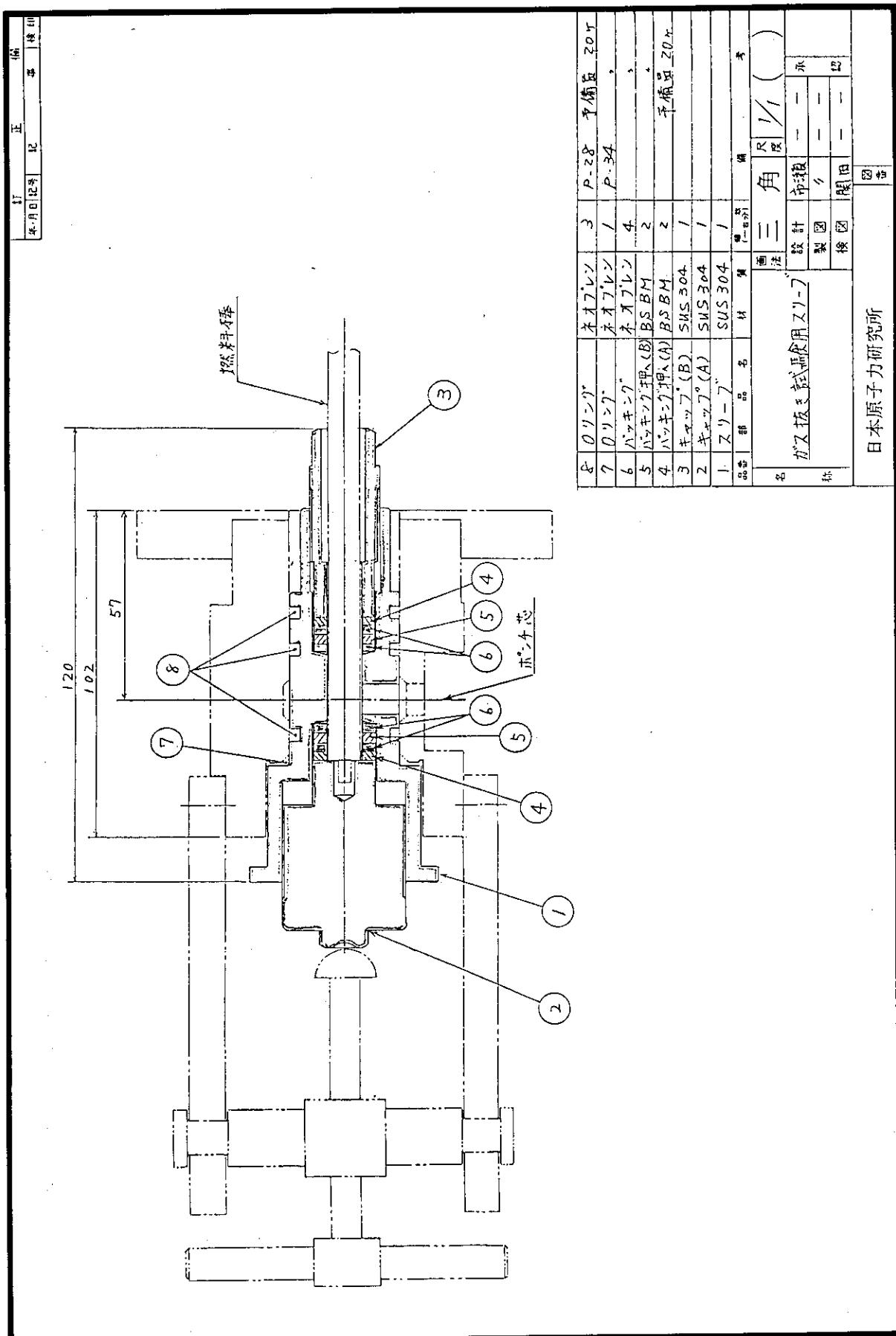


Fig. 2.4-1 Sleeve for degassing test

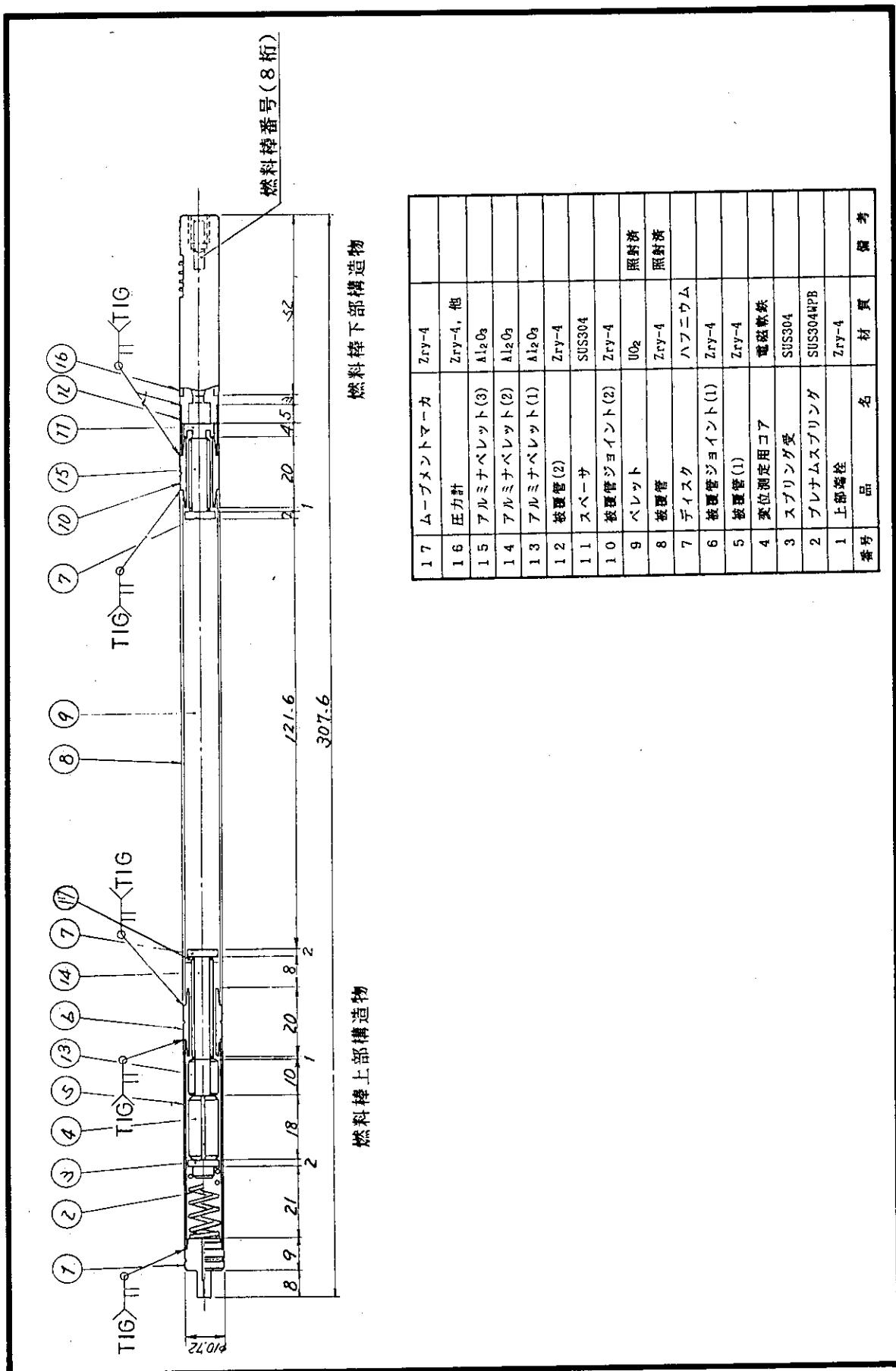


Fig. 2.5-1 Schematic drawing of the PWR type segmented fuel rod refabricated from the commercial power reactor fuel

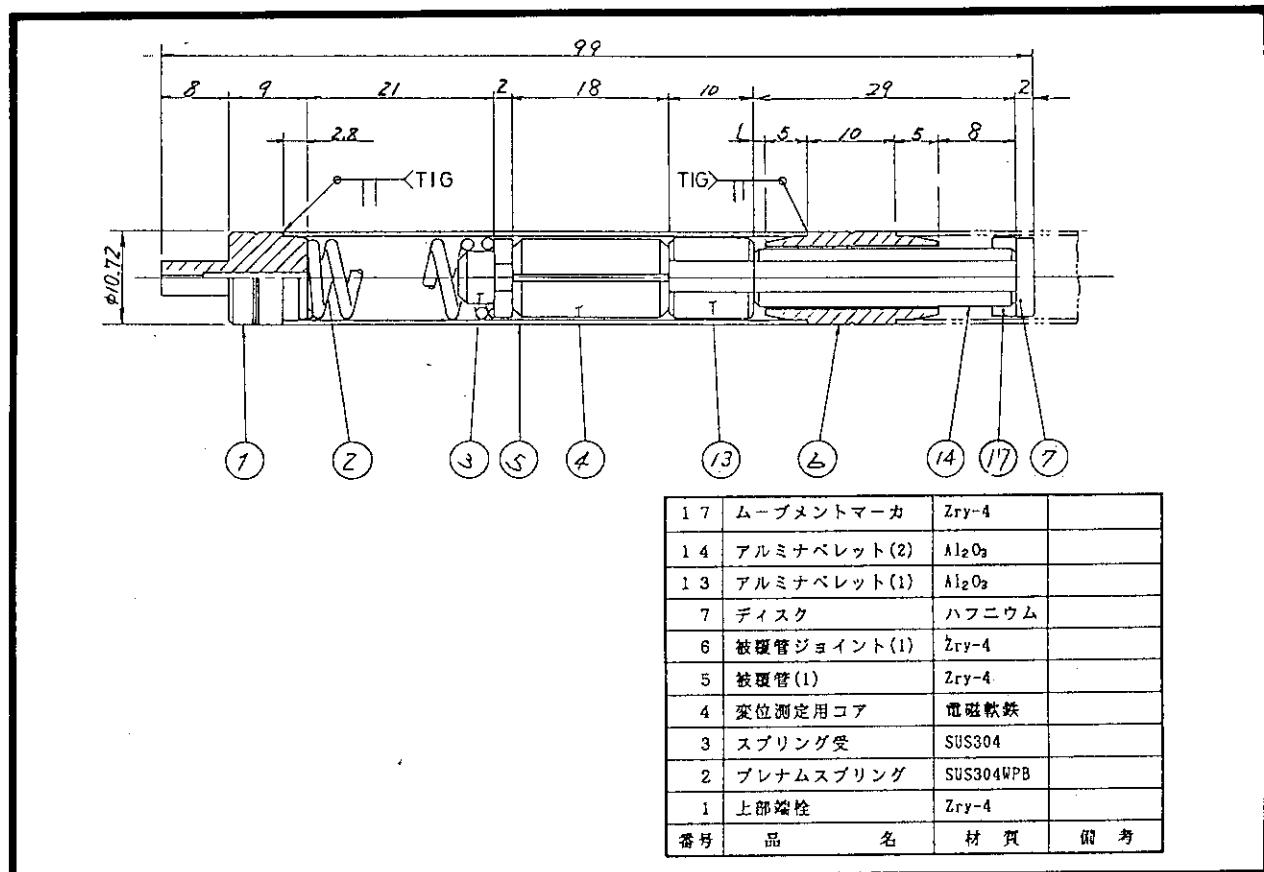


Fig. 2.5-2 Upper part structure of the PWR type segmented fuel rod

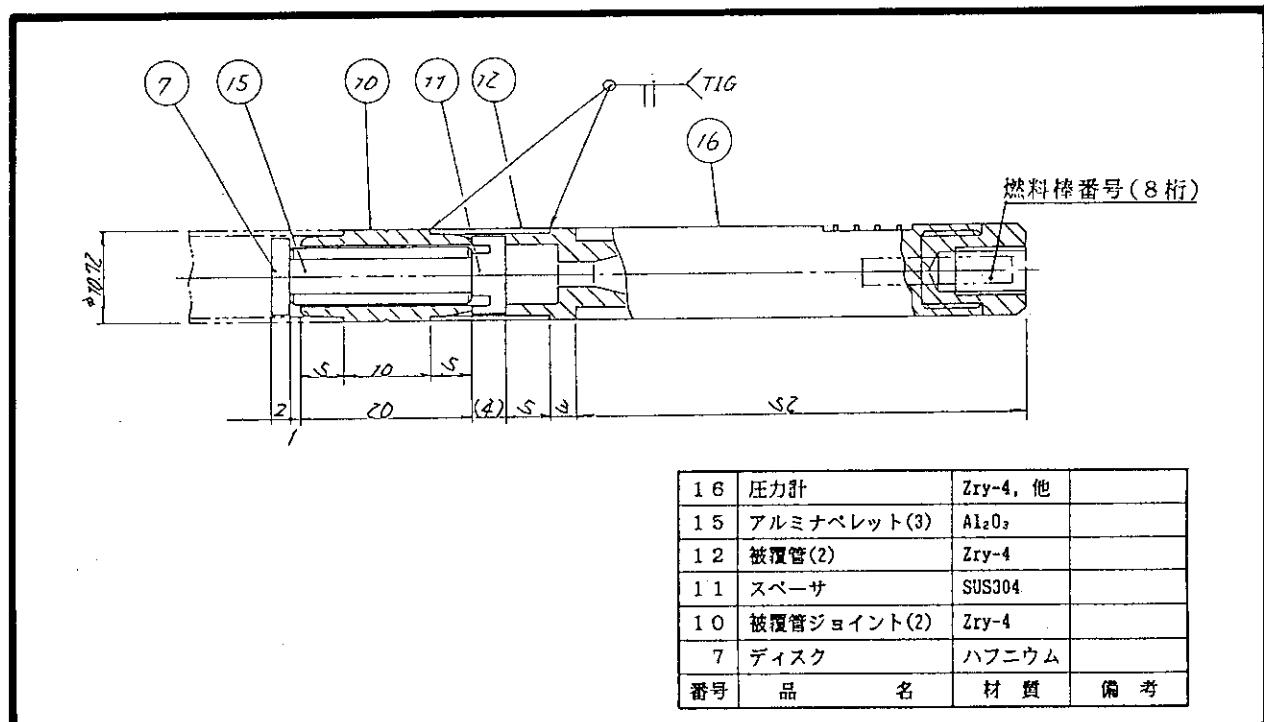


Fig. 2.5-3 Lower part structure of the PWR type segmented fuel rod

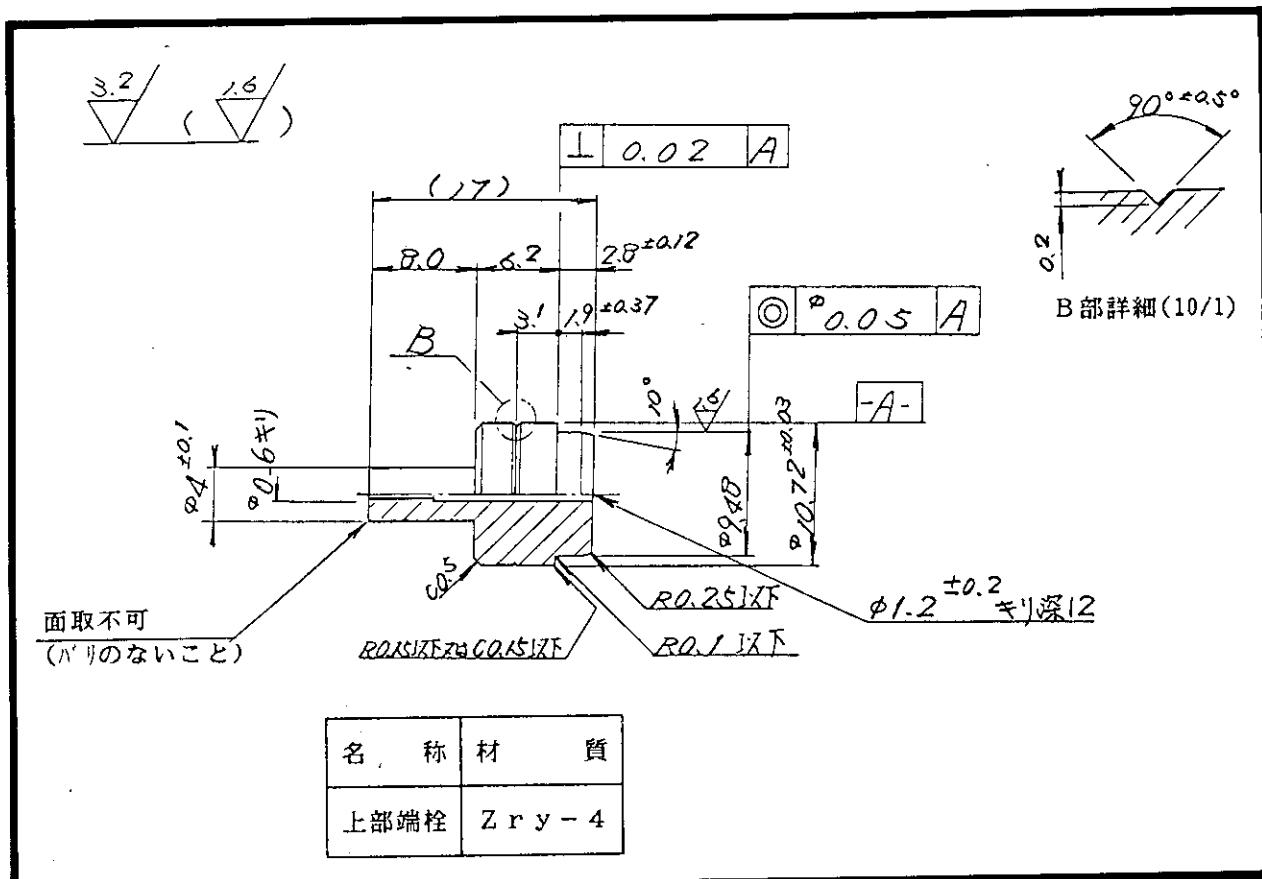


Fig. 2.5-4 Upper end plug

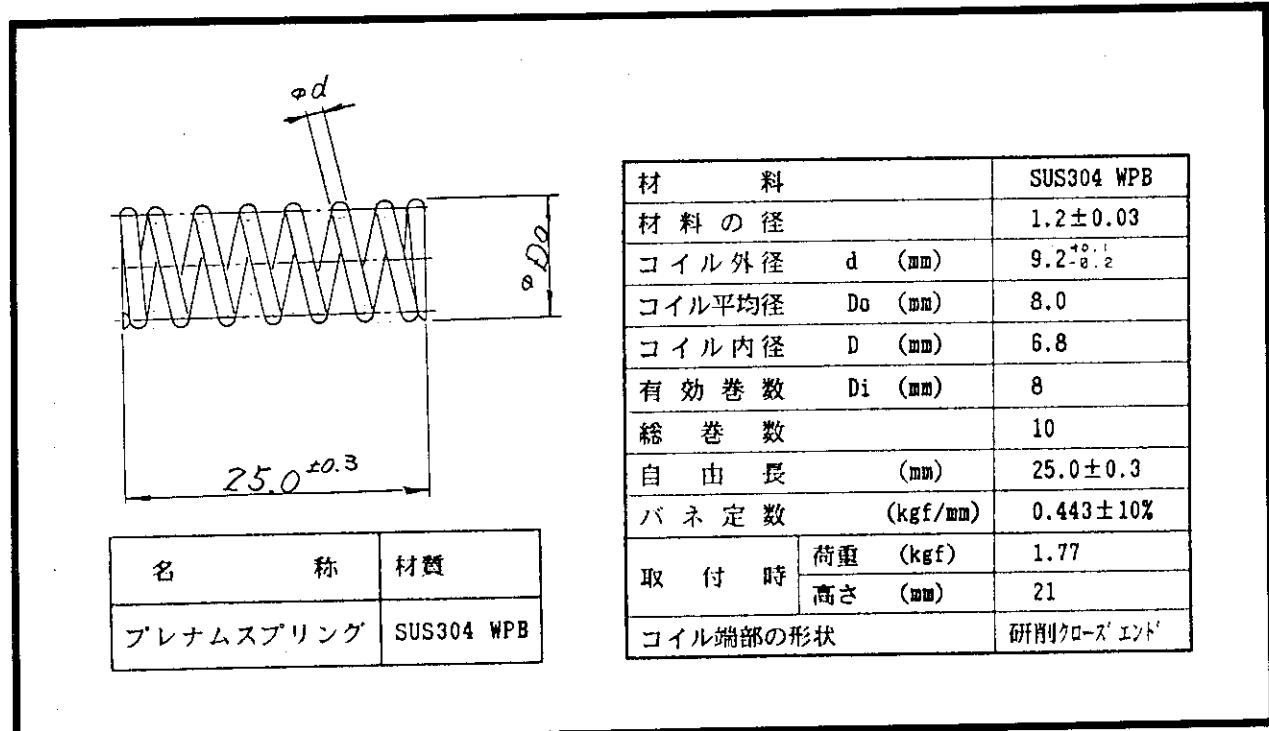


Fig. 2.5-5 Plenum spring

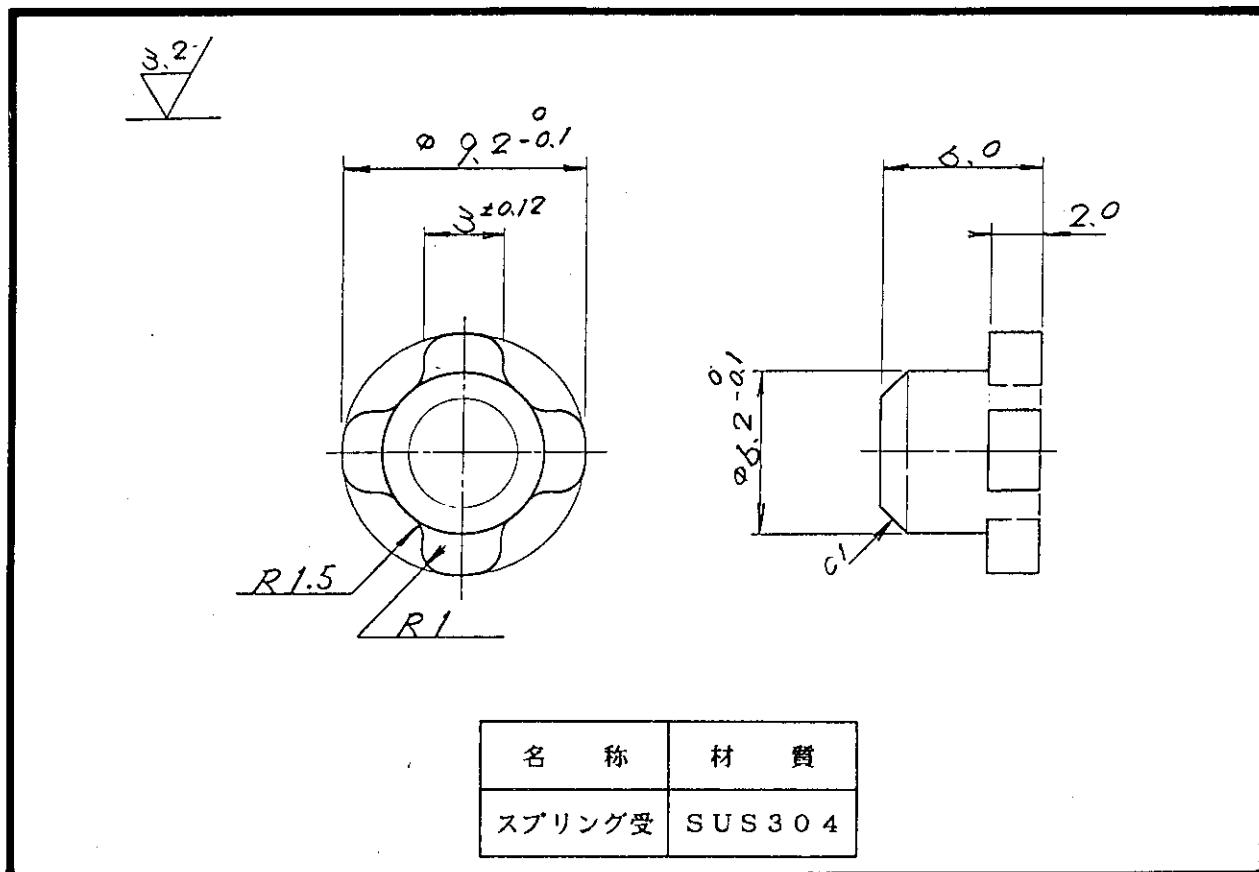


Fig. 2.5-6 Spring supporter

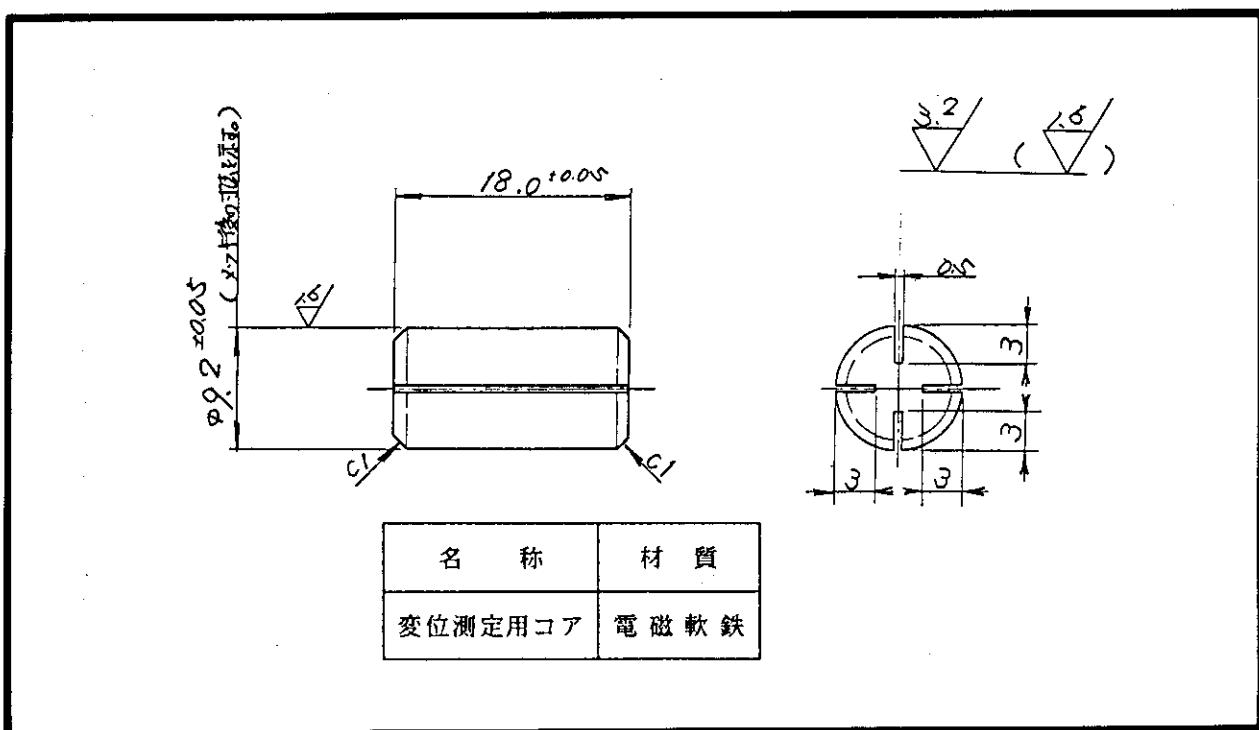


Fig. 2.5-7 Ferric core to measure the displacement of fuel stack

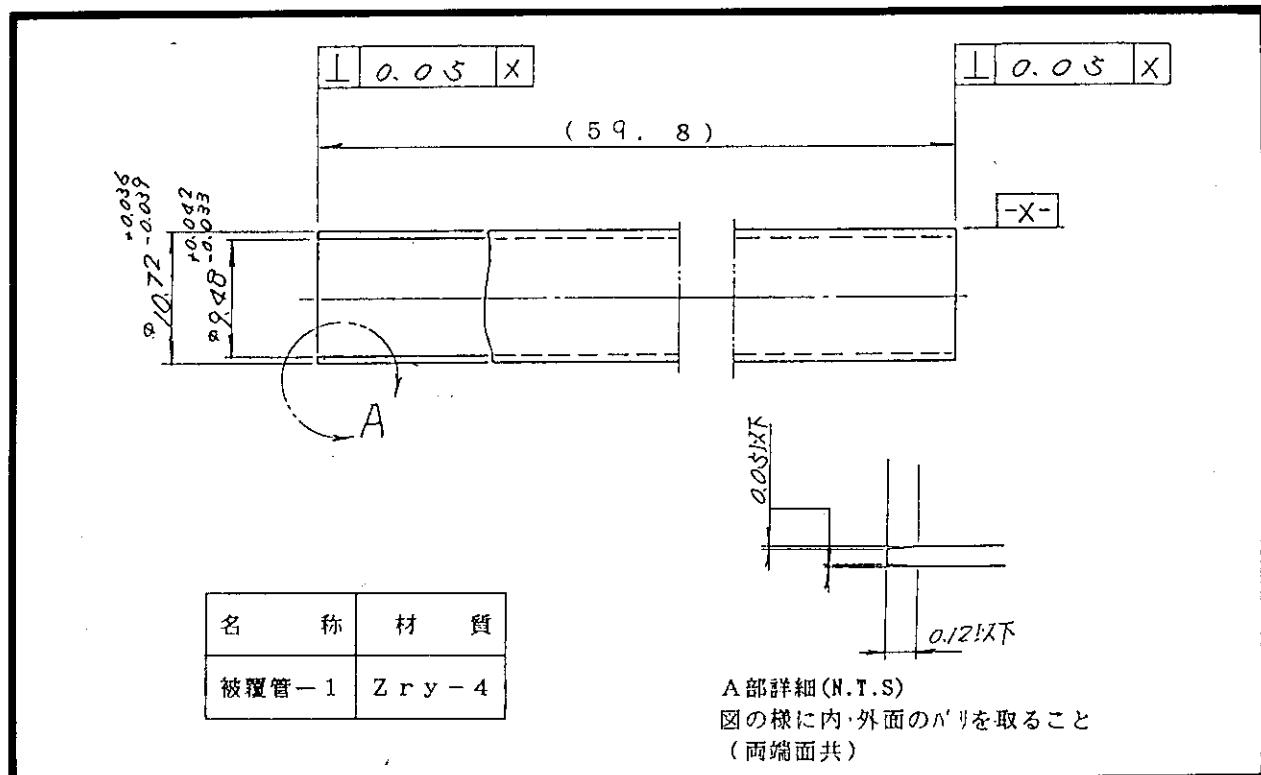


Fig. 2.5-8 Cladding tube made of zircaloy-4

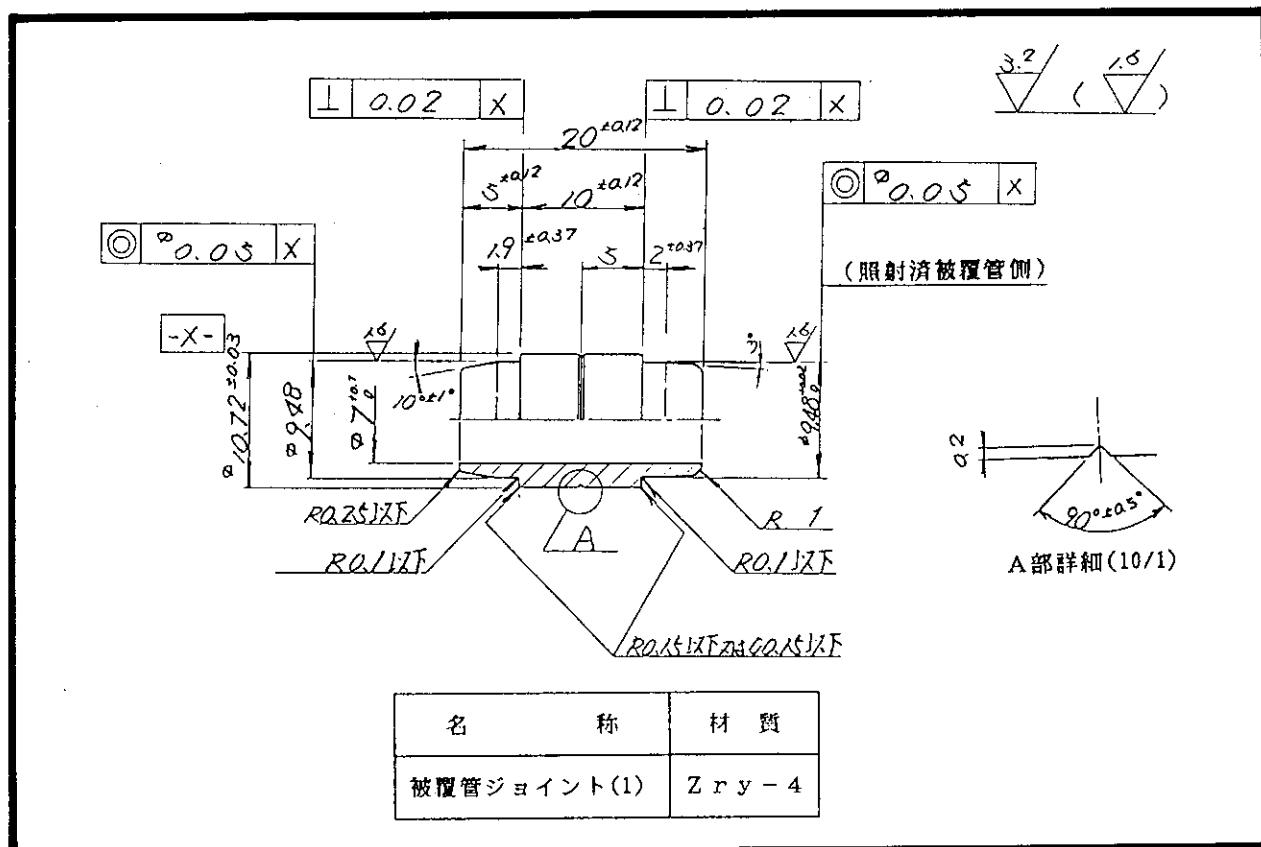


Fig. 2.5-9 Upper cladding joint

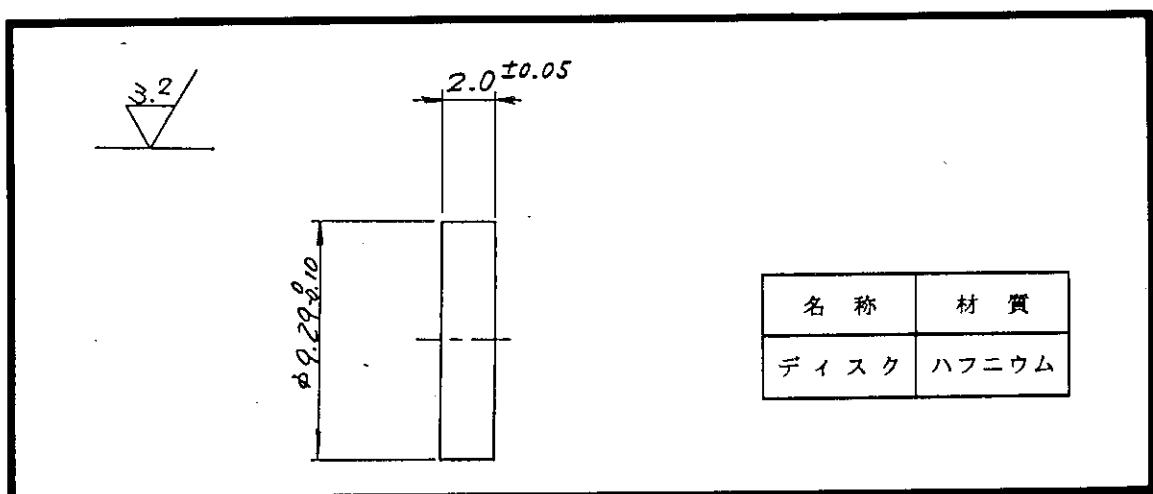


Fig. 2.5-10 Hafnium disk to reduce end peaking factor

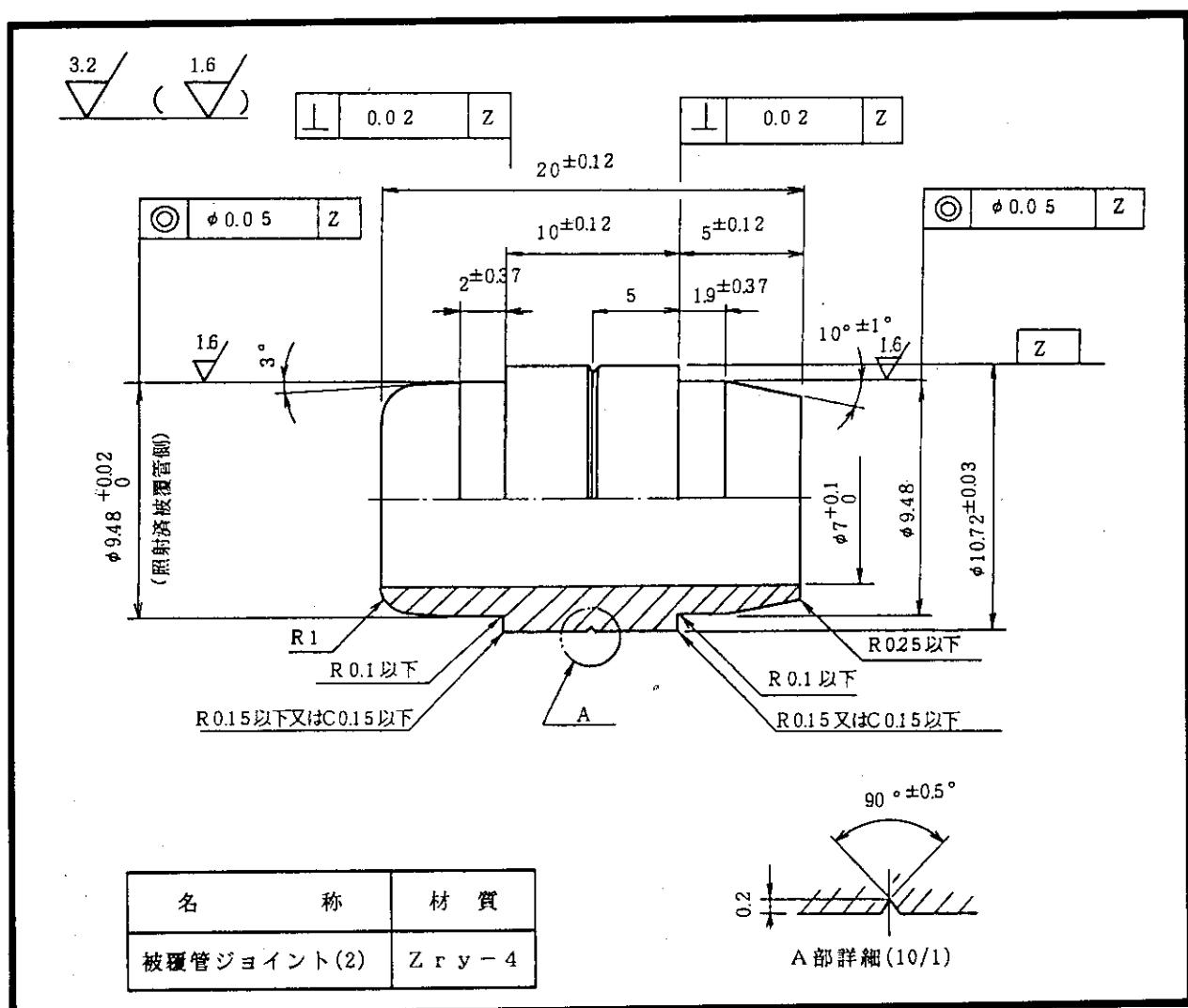


Fig. 2.5-11 Lower cladding joint

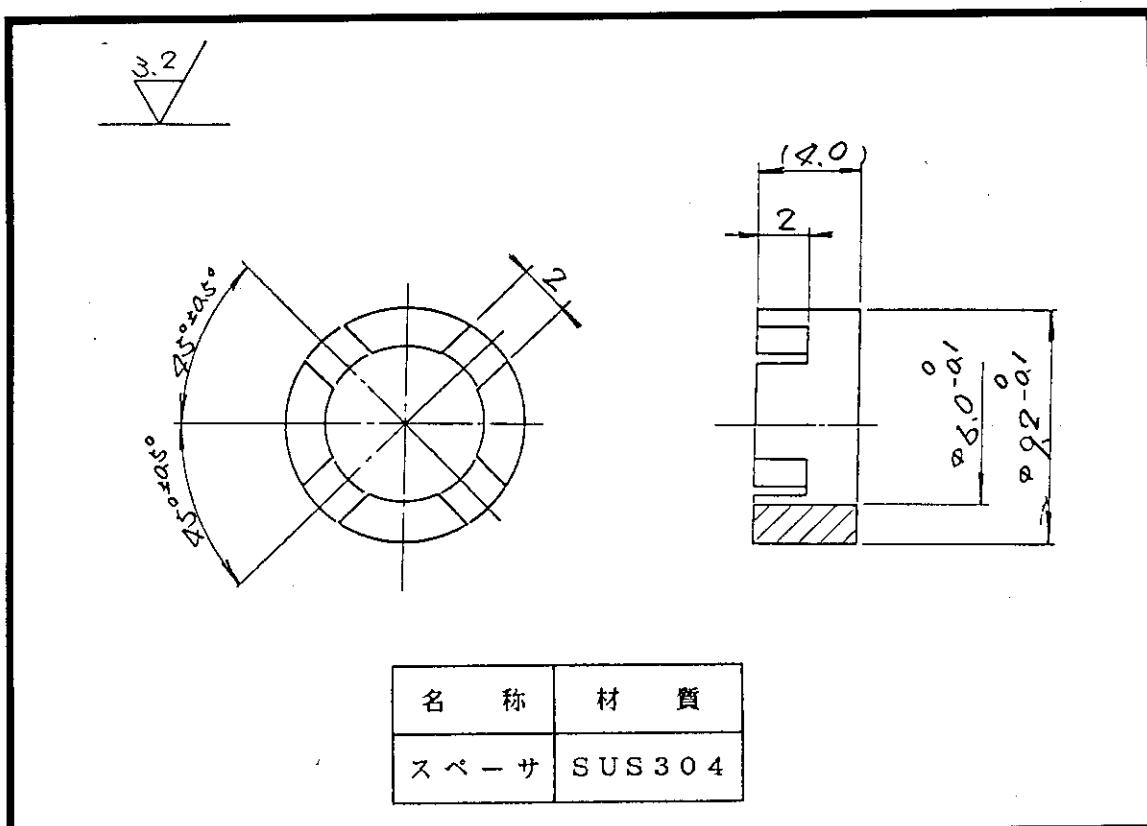


Fig. 2.5-12 Spacer

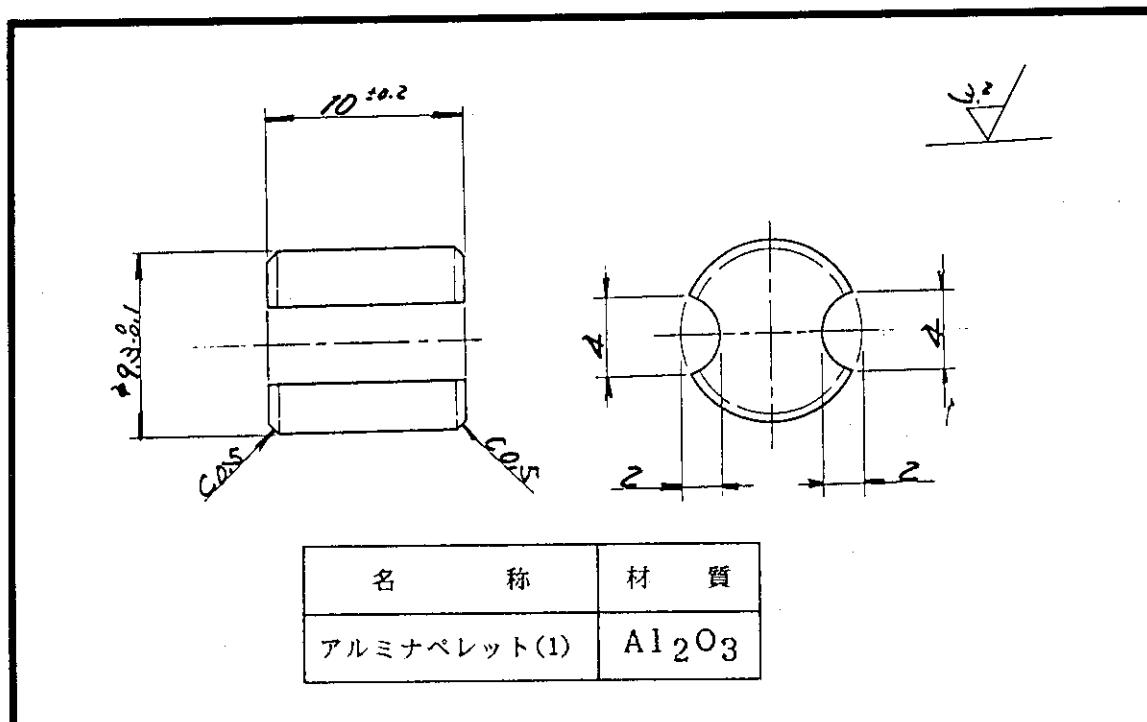


Fig. 2.5-13 Alumina pellet (1)

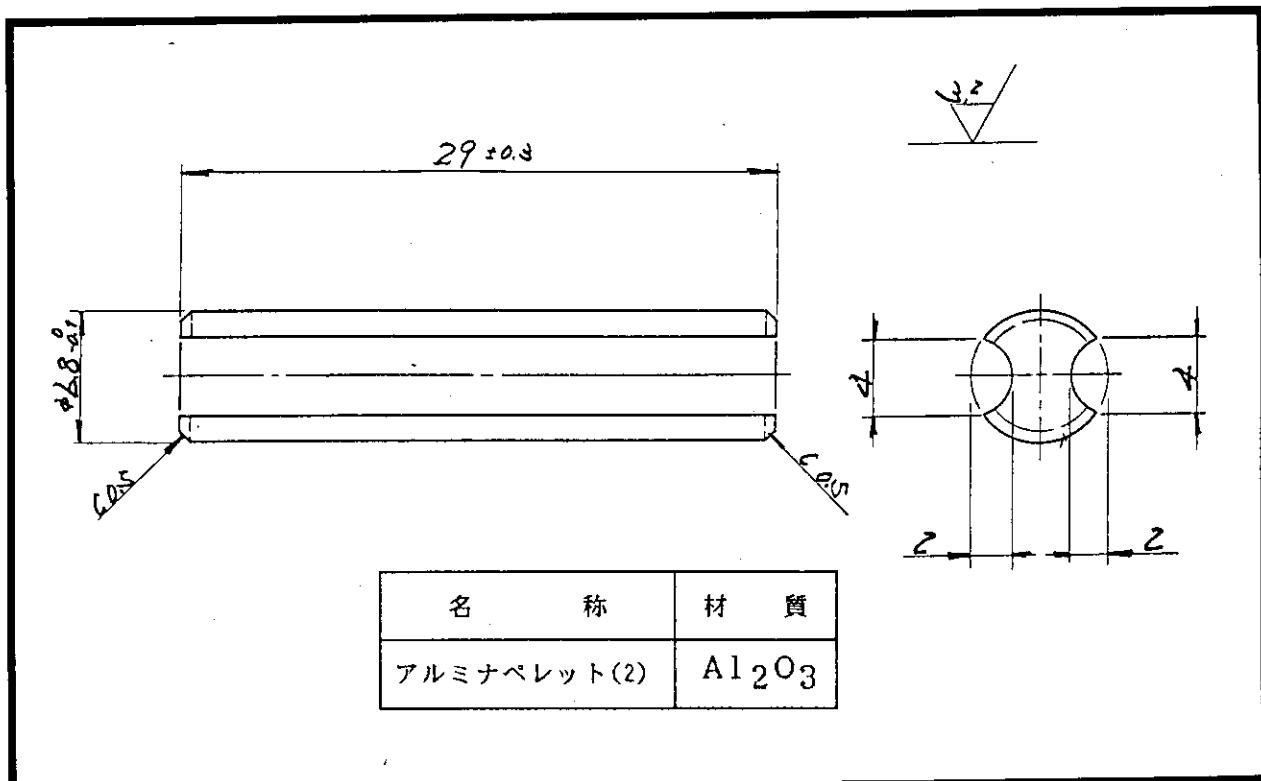


Fig. 2.5-14 Alumina pellet (2)

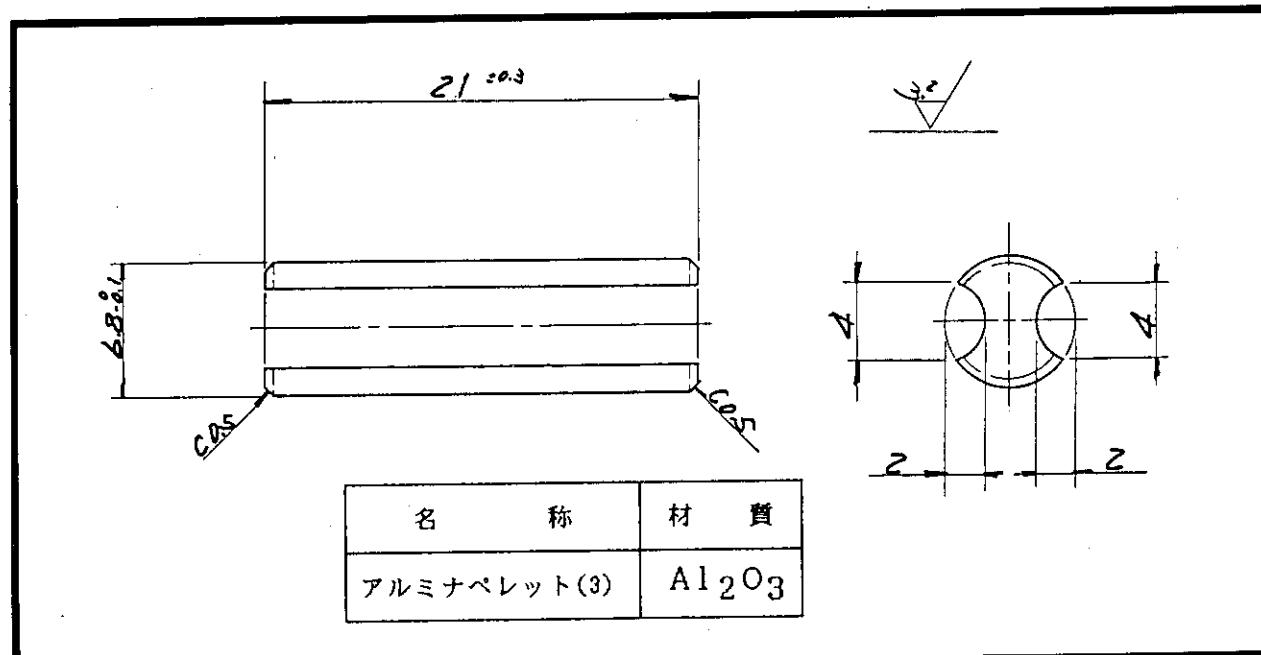


Fig. 2.5-15 Alumina pellet (3)

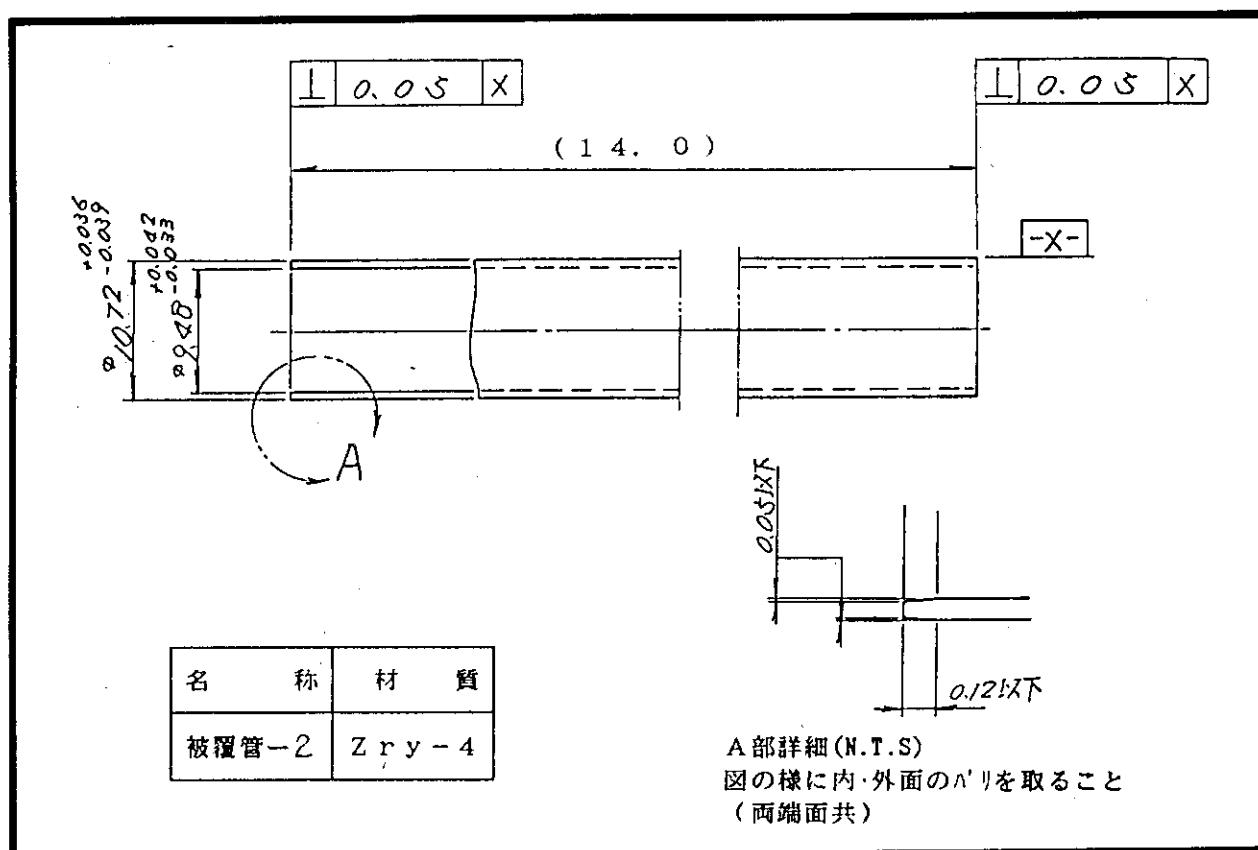


Fig. 2.5-16 Zircaloy-4 cladding tube

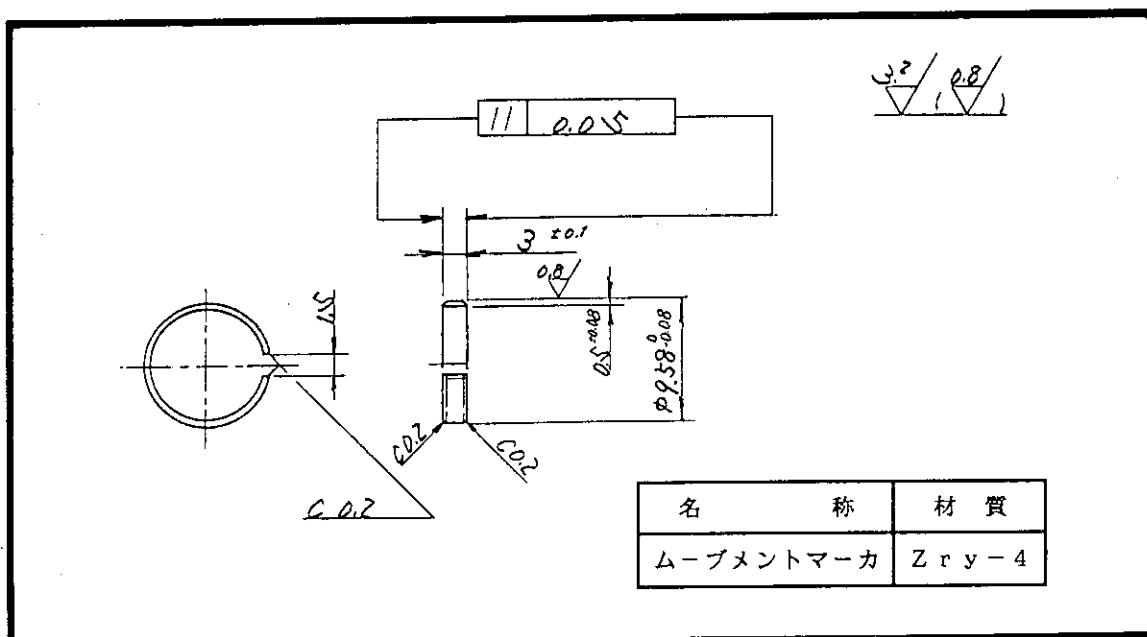


Fig. 2.5-17 Movement marker

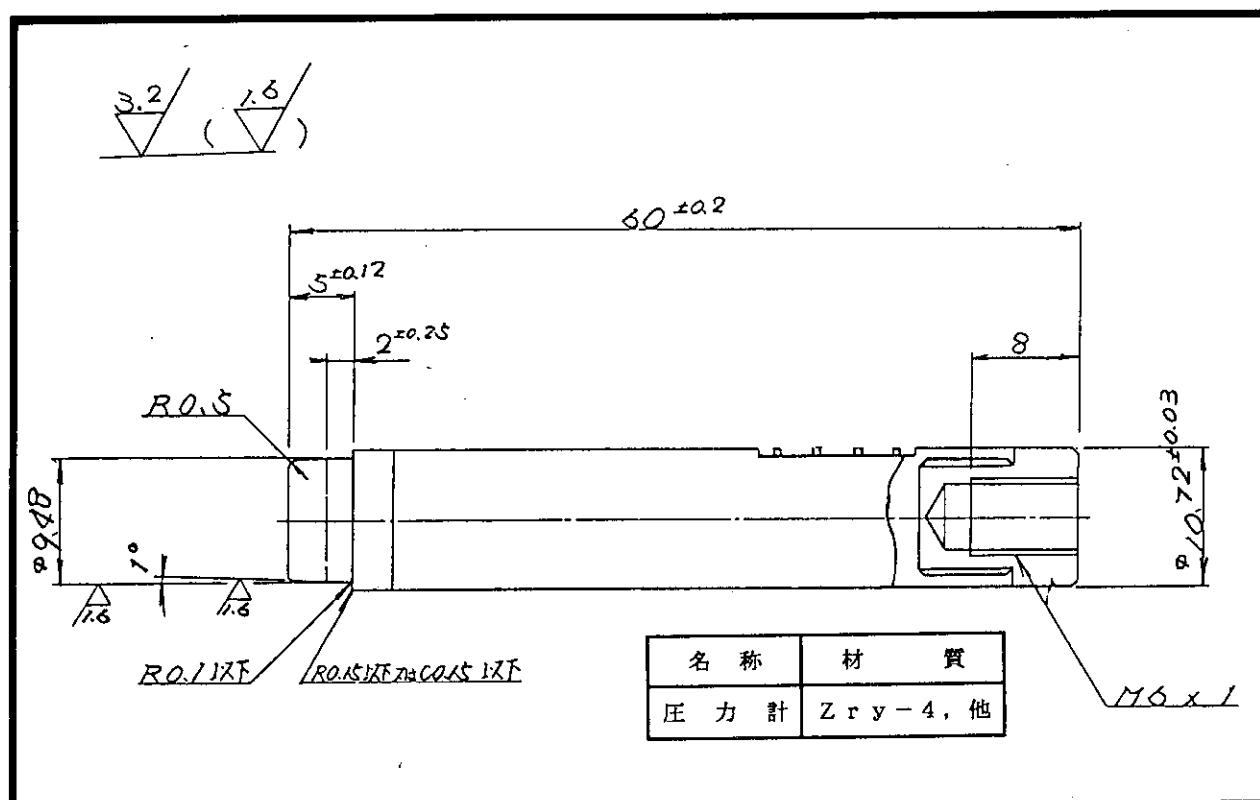


Fig. 2.5-18 Pressure sensor

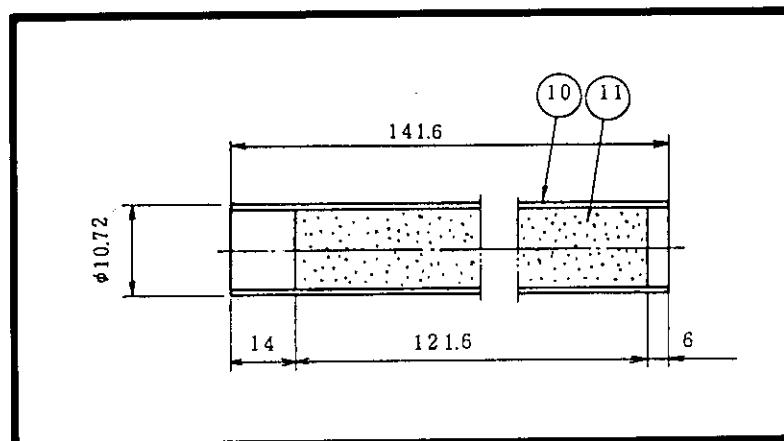


Fig. 2.5-19 Outline of the fuel rod segmented from the commercial power reactor fuel rod, where spans of 14mm and 6mm are prepared to fuel dismantling

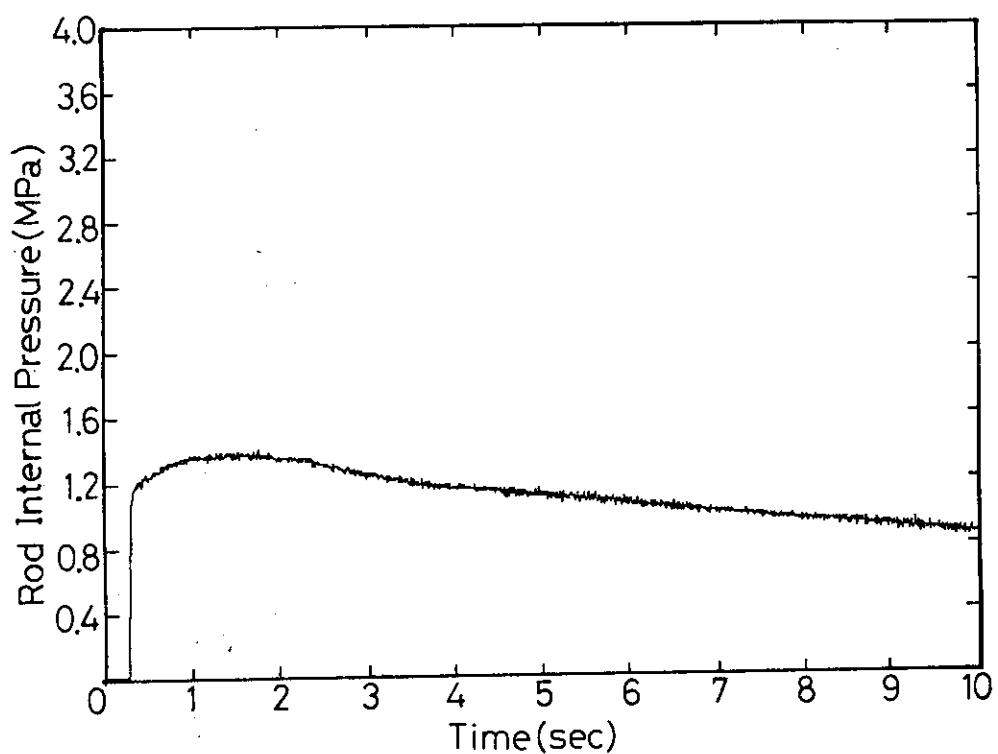


Fig. 2.5-20 Change of rod internal pressure as a function of time

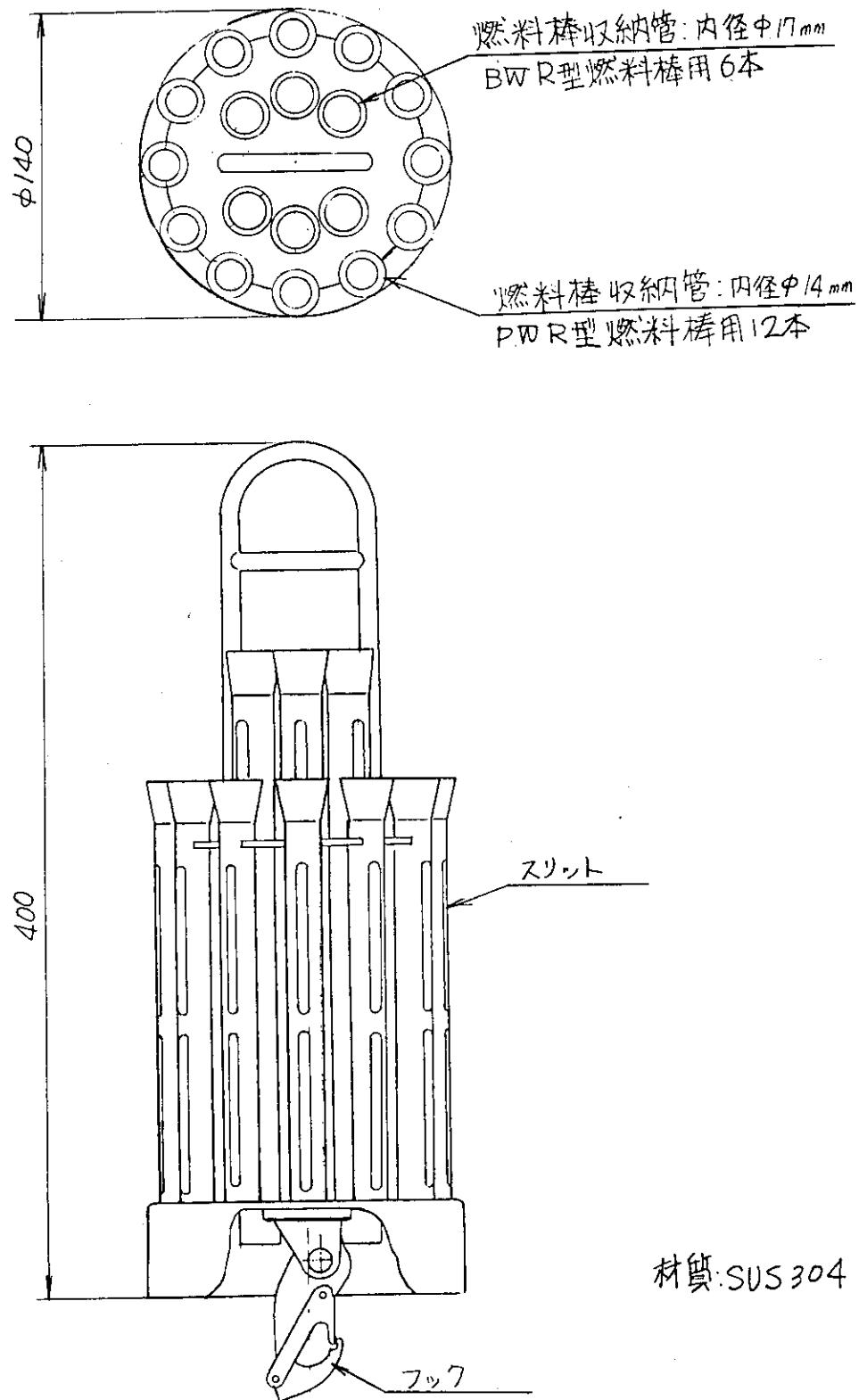


Fig. 2.6-1 Schematic drawing of the storage rack for pre-irradiated rodlets fuels (units are in mm)

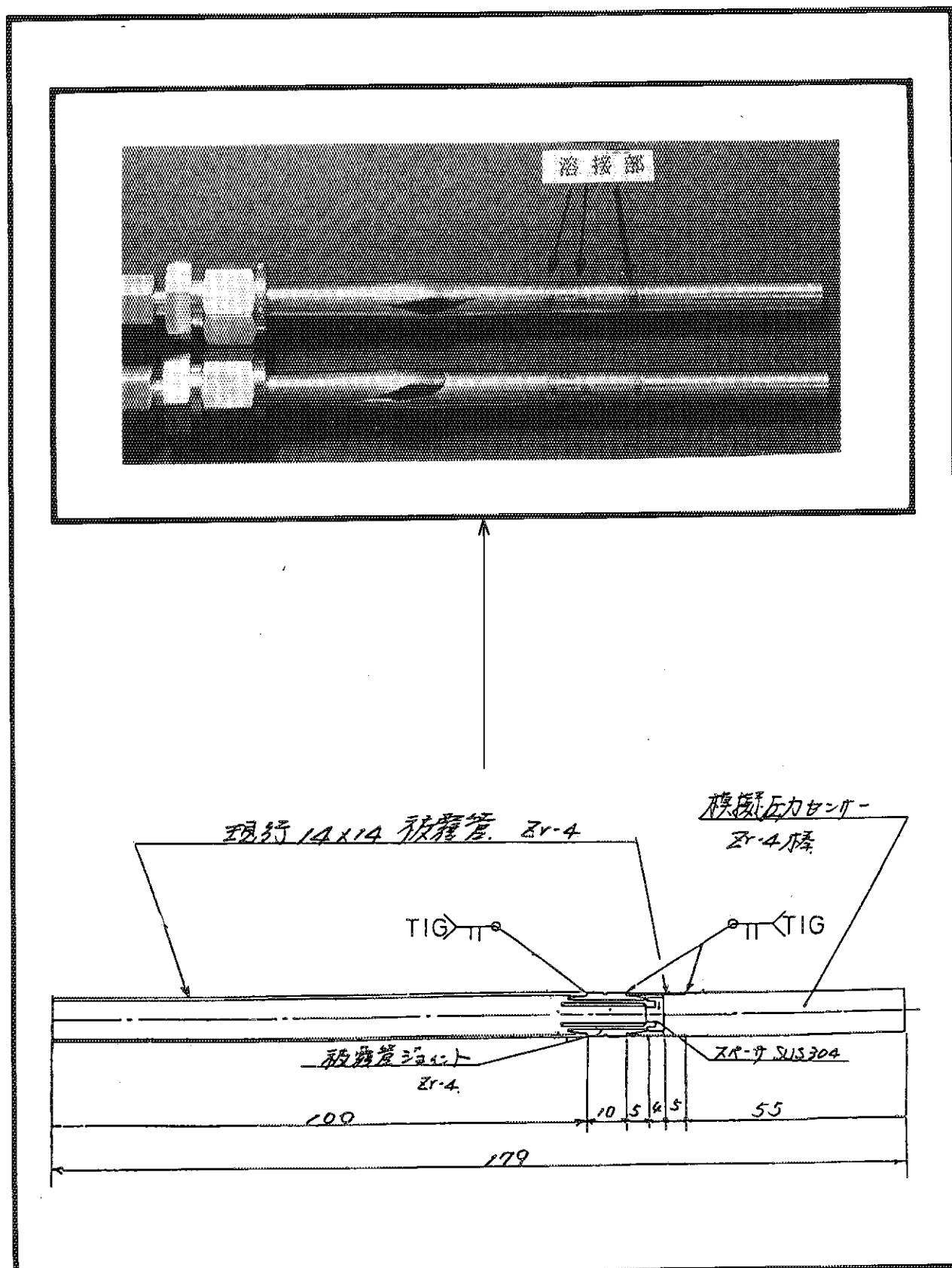


Photo. 2.5-1 Result of burst test with unirradiated zircaloy-4 tube
at 20°C: It is seen that no cladding rupture occurred
at the welded portions.

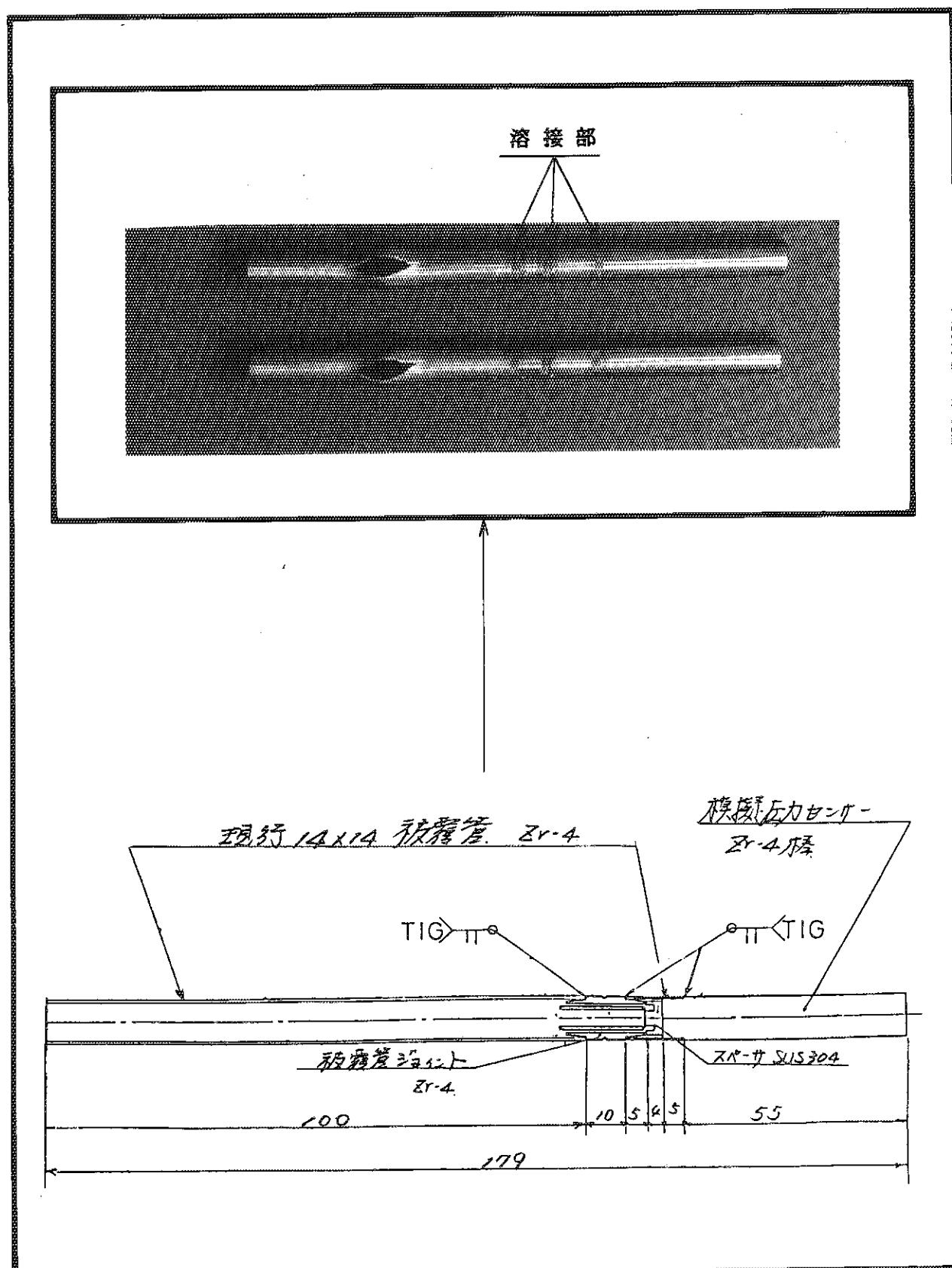
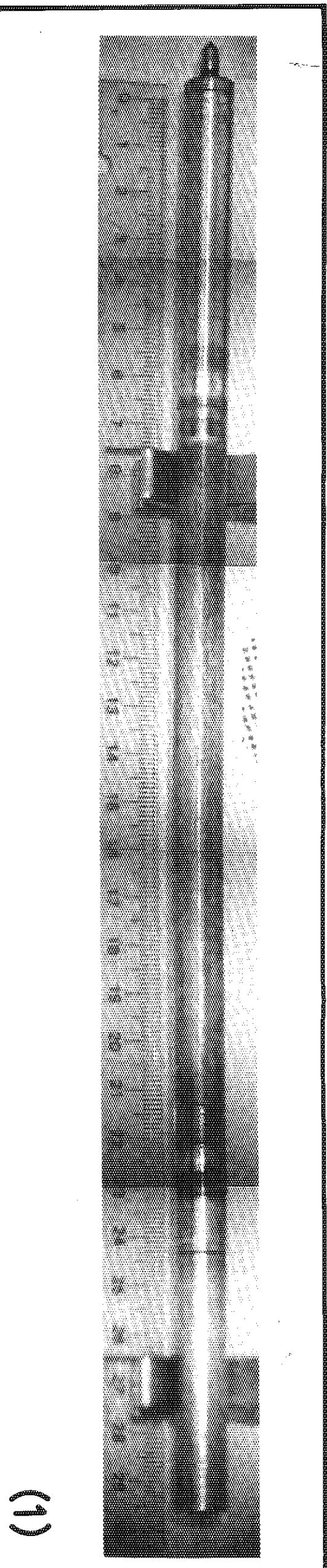
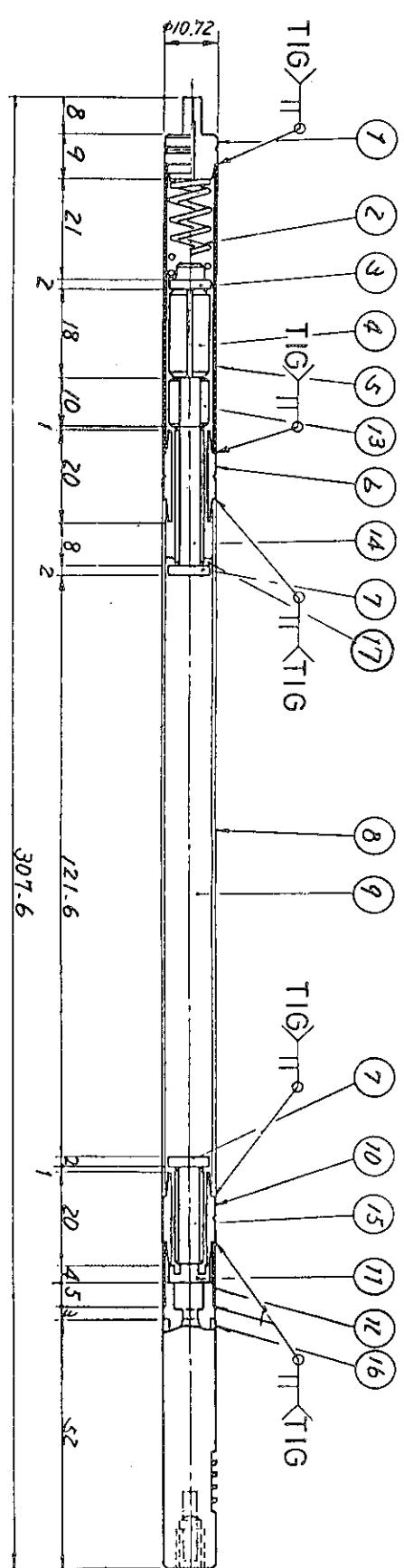


Photo. 2.5-2 Result of burst test with unirradiated zircaloy-4 tube at 385°C: It is also seen that no cladding rupture occurred at the welded portions.



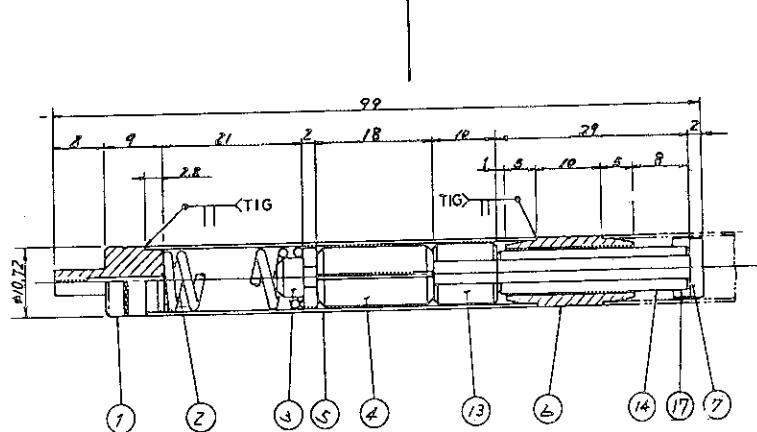
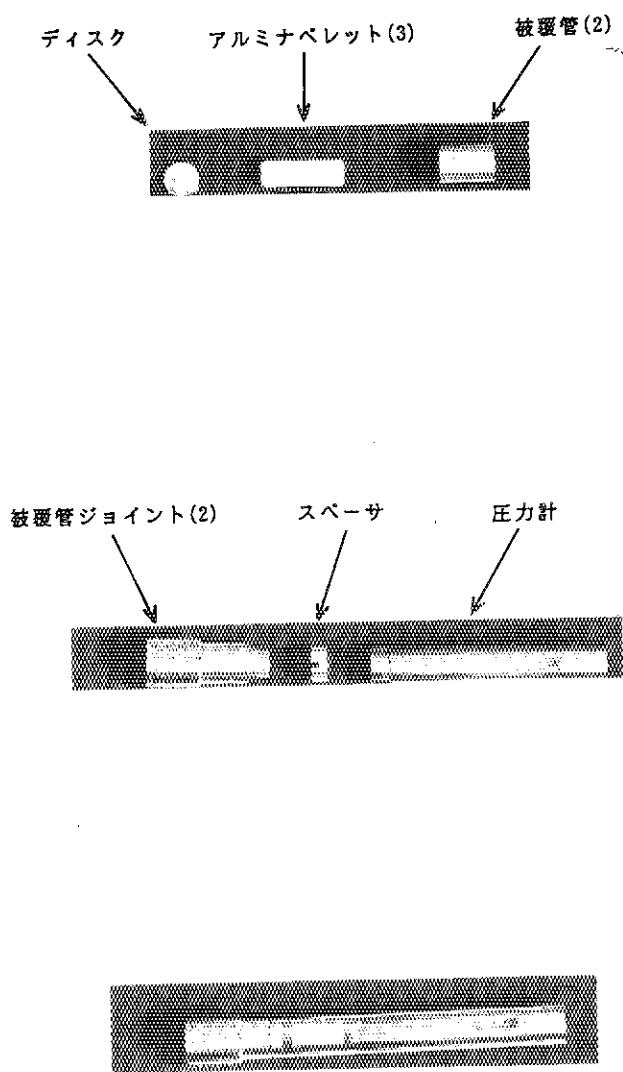
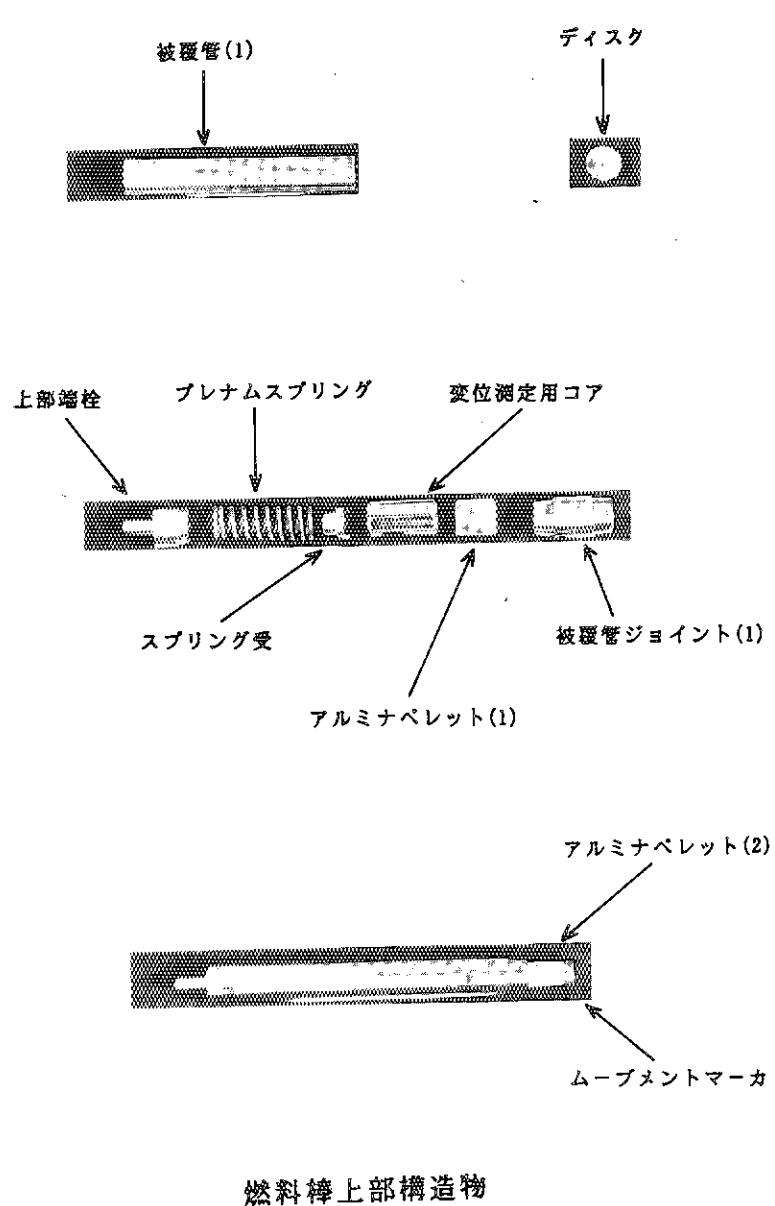
(1)



(2)

番号	品名	材質	備考
17	ムーブメントマーク	Zry-4	
16	圧力計	Zry-4, 他	
15	アルミニナベレット(3)	Al ₂ O ₃	
14	アルミニナベレット(2)	Al ₂ O ₃	
13	アルミニナベレット(1)	Al ₂ O ₃	
12	検査管(2)	Zry-4	
11	スペーサ	SUS304	
10	検査管ジョイント(2)	Zry-4	
9	ベレット	UO ₂	照射済
8	検査管	Zry-4	照射管
7	ティスク	ハフニウム	
6	検査管ジョイント(1)	Zry-4	
5	検査管(1)	Zry-4	
4	位置測定用コア	電磁軟鉄	
3	スプリング受	SUS304	
2	プレナムスプリング	SUS304HPB	
1	上部端栓	Zry-4	

Photo. 2.5-3 (1) Outerview and (2) schematic representation of unirradiated PWR type fuel after segmentation.



燃料棒上部構造物

(1)

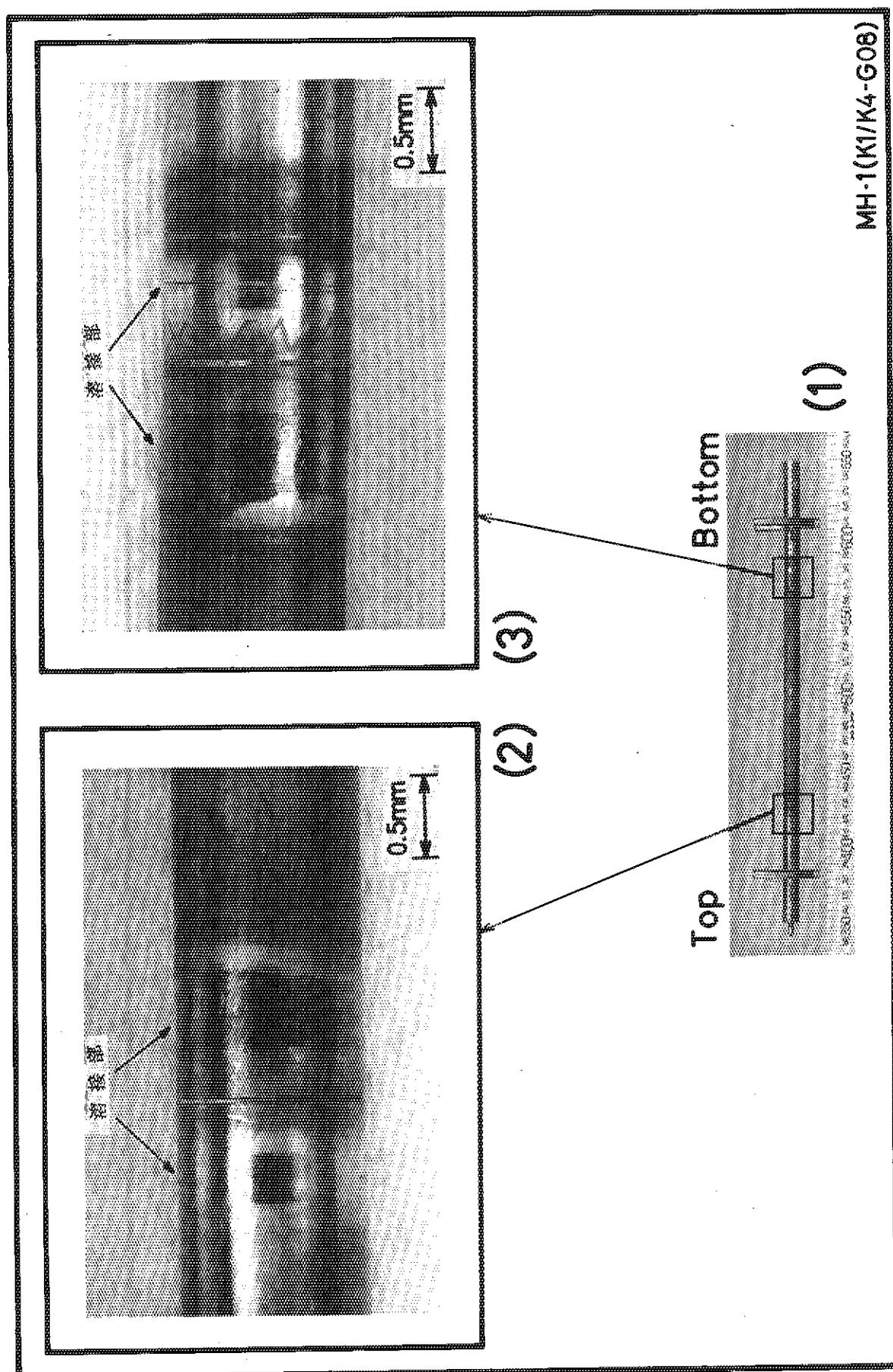
17	ムーブメントマーク	Zry-4	
14	アルミナベレット(2)	Al ₂ O ₃	
15	アルミナベレット(1)	Al ₂ O ₃	
7	ディスク	ハフニウム	
6	被覆管ジョイント(1)	Zry-4	
5	被覆管(1)	Zry-4	
4	変位固定用コア	電離放射	
3	スプリング受	SUS304	
2	プレナムスプリング	SS304WPB	
1	上部端栓	Zry-4	
番号	品 名	材 质	備考

燃料棒下部構造物

(2)

16	圧力計	Zry-4, 他	
15	アルミナベレット(3)	Al ₂ O ₃	
12	被覆管(2)	Zry-4	
11	スペーサ	SUS304	
10	被覆管ジョイント(2)	Zry-4	
7	ディスク	ハフニウム	
番号	品 名	材 质	備考

Photo. 2.5-4 (1) Upper and (2) lower part structures of segmented PWR type fuel.



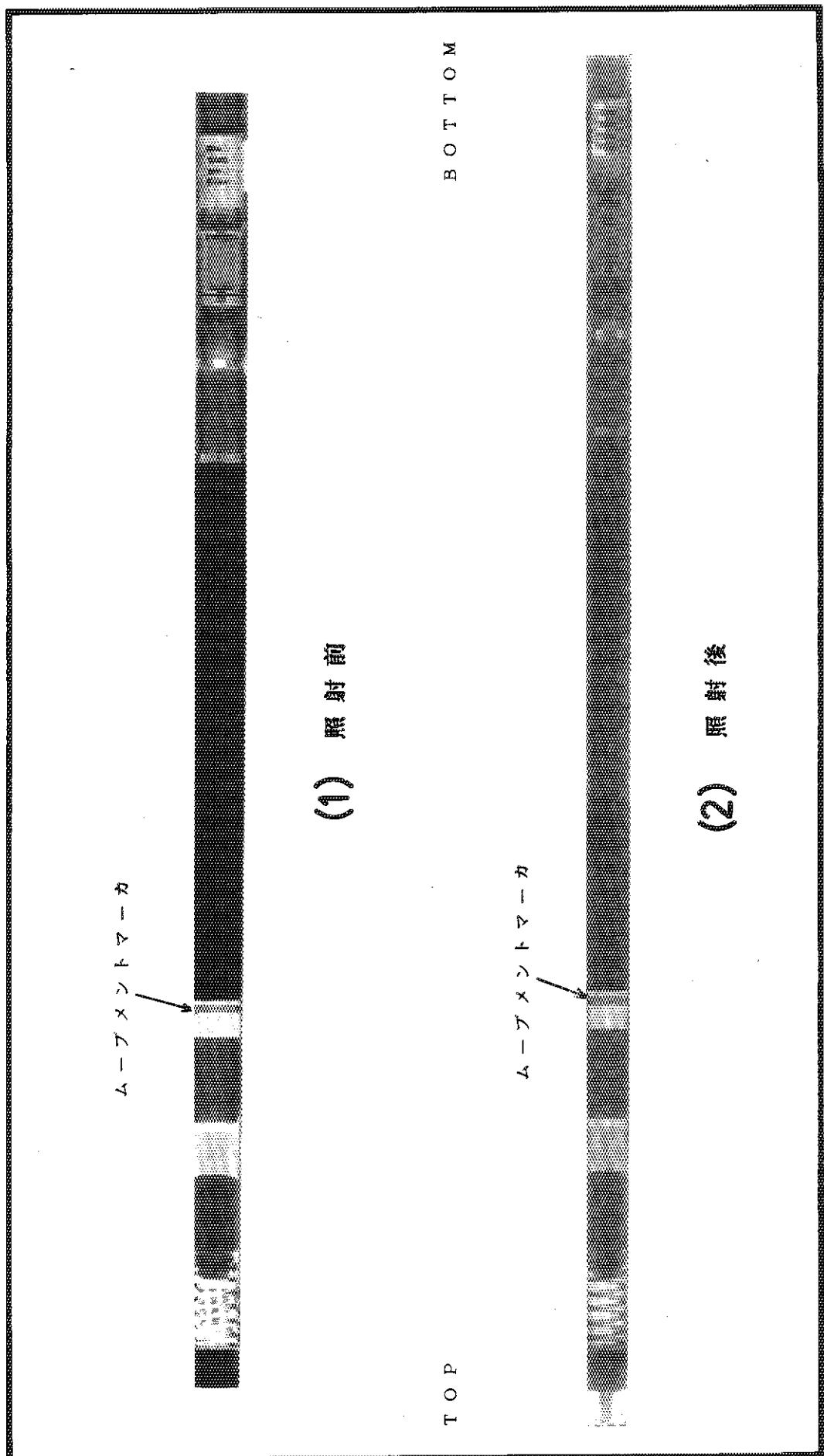


Photo. 2.5-6 X-ray photograph taken from (1) the fuel before pulse and (2) the fuel at after pulse:
this travelled distance of the movement marker is determined from this.

3. 炉内計装機器の開発

3.1 概 要

予備照射済燃料による PIE 実験では、破損しきい値等を十分に見極め、安全審査指針に反映することが最重要課題とされている。破損しきい値の見極めを行うには、燃料挙動に関する精度のよい炉内データを得ることが必須条件である。また、この精度のよいデータは、計算コードのモデリングに際しても極めて重要なものである。

このため、まず燃料棒表面に熱電対を取り付け、RIA 時の熱的挙動データをとる事が考えられた。しかし、予備照射済燃料棒の表面には、すでに熱電導特性の悪い均質酸化膜 (ZrO_2) が形成されており、熱電対溶接にあたってこれを必要量だけ除去する遠隔操作技術が必要になった。この技術内容について第 3.2 節及び第 3.3 節にて報告する。

予備照射済燃料からの FP ガス放出挙動も把握するため、燃料棒底部に内圧センサーを取付けることを考えた。しかし、従来用いられて来た圧力センサーは、未照射燃料という事もあって、耐放射線遮蔽を十分に計算したものではなかった。また、遠隔操作性も十分に考慮されていなかった。このため、従来型とは製作条件の異なる圧力センサーを開発する必要性に迫られた。この技術内容について、第 3.4 節にて報告する。

RIA 時に燃料棒に生ずる力学的挙動を把握するために、燃料棒の伸び及びペレットスタックの伸びデータが必要であると考えられた。しかし、比較的収納容量の小さい二重カプセルの中で、形状の大きい挙動トランスを遠隔にて燃料棒に取り付けるには、相当無理があった。また、これら機器は、実際の燃料伸び量と計測電圧が一時比例する領域が限られており、炉内使用に先立つて行う較正試験も重要であった。この技術内容については第 3.5 節にて報告する。

最後に、二重カプセル中に燃料棒を収納するための、燃料棒支持具の製作、計装線をカプセル内から炉外に引き出すための計装プラグと計装ケーブルの製作等についても新たな設計概念が必要とされた。これらについては第 3.6 節にて報告する。

3.2 燃料棒表面熱電対取付装置及び酸化膜除去用ブラッシング装置の製作（宇野）

3.2.1 目 的

反応度事故を模擬した燃料実験では、燃料棒に与えられる発熱量の増加とともに、燃料被覆管が高温化する。被覆管への入熱がある一定量以上になると（約 120 cal/g 程度の発熱量に相当）、核沸騰離脱（DNB）が発生し、被覆管温度は急激に上昇する事が分かっている。被覆管温度の上昇は、やがて被覆管の脆化をもたらし、ついには破損（約 260 cal/g 程度の発熱量に相当）に至るようになる。

このように、RIA 時の燃料ふるまいを評価する場合、燃料棒の表面温度はきわめて有用な検証データとなる。従来の NSRR 実験は、未照射燃料棒 (UO_2 ペレットジルカロイ被覆材) 体系にて

実施して来た。このため、温度測定は、Pt/Pt-13%Rhのワイヤ線（直径約0.2mm）を被覆材であるジルカロイに溶接する方法が用いられて来た。

一方、予備照射済燃料棒では、従来の方法をそのまま踏襲する事が困難であることが判明した。その主たる原因の1つは、熱電対溶接機器に遠隔操作性能をもたらせる必要が生じたためであり、もう1つは予備照射済燃料棒の表面に電気伝導性の悪いジルコニア(ZrO_2)が予備照射の段階で形成されており、これが溶接を困難にしているためである。この2つの困難性を打破できる熱電対付装置及び酸化膜除去用ブラッシング装置の設計・製作を行った。

3.2.2 装置の概要

酸化膜除去用ブラッシング装置の概要を、Fig. 3.2-1に示す。基本的には、①で示すグラインダーにて、ジルコニア(ZrO_2)酸化膜についた燃料棒表面を機械的に研削し、ジルカロイ素材を露出させる構造となっている。②は、取付データや減速材等を制御する機器である。

Fig. 3.2-2は熱電対取付装置の概略図である。すなわち、(a)図において酸化膜を除去した予備照射済燃料棒を図中の①の箇所に設定する。続いて、②及び③で燃料棒と支持具側のアース電極をとる。④は、熱電対(Pt/Pt-13%Rh)細線を内蔵したカートリッジである。まず④-aと示されているカートリッジで熱電対1本を燃料棒に溶接したあと、もう1つのカートリッジである④-bを同位置まで平行移動し、残りの熱電対を溶接する構造になっている。

図(b)は、ホットケーブの外側から熱電対溶接部を撮影したものである。図(c)は、電極部側から燃料棒の熱電対部分を撮影したものである。溶接された熱電対は、続いて、支持導体につながれ、リード線に結合される。

また、図(d)は、熱電対取付作業を行っているセミホットケーブの様子を撮影したものである。本装置に関する主要な仕様値は、以下のとおりである。

- (1) 入力電源 AC 100 V ± 10% 50 / 60 Hz 3 kVA
- (2) 使用周囲温度 5 °C ~ 40°C
- (3) 使用周囲湿度 35% ~ 90% (結露しないこと)
- (4) 外径寸法及び重量

• 制御盤	重量	170kg
• リモートコントロールパネル操作部	重量	30kg
• リモートコントロールパネル架台	重量	80kg
• トランス	重量	20kg
• ヒューズ F-7165		20A
TD-250 V		10A
		3A

3.2.3 得られた成果

予備照射済燃料に対して実施されたパルス実験は、これまで6回であるが、いずれの実験においても燃料棒表面の研磨（酸化膜落し）及び熱電対の溶接に成功している。

溶接作業中、指定した方向以外の場所で、誤って酸化膜除去を行ってしまった等の軽微な失敗

はあったが、順調に熱電対溶接作業は進められた。また、溶接された最電対はパルス実験中に不具合が生じる事はなかった。例えば、Fig. 3.5-4 ①に示すように、予備照射済 PWR 型燃料棒の炉内挙動を知るうえで重要な被覆管表面温度データをうまく手に入れることができた。

3.3 熱電対溶接用酸化膜付ダミー燃料棒の製作（柳澤）

3.3.1 目的

予備照射済燃料のうち、NSRR 実験に使用が予定されている BWR 型燃料棒に関しては、当該燃料集合体の照射後試験に係わる文献^(3.3-1)から、その酸化膜厚さはせいぜい $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下である事が判明した。一方ヘマタイト (Fe_2O_3) を主成分とするクラッド (CRUD) は、第 3.2 節で記述した装置を用いて行う熱電対の溶接作業に関しては何らの問題も生じないことが分かった。

一方、NSRR 実験に使用が予定されている PWR 型燃料棒に関しては、当該燃料集合体の照射後試験に係わる文献^(3.3-2, 3.3-3)から、その酸化膜厚さは $40\text{ }\mu\text{m}$ に近いことが判明した。ニッケルフェライト ($\text{Ni}_x\text{Fe}_3 - x\text{O}_4$, $x = 6.5 \sim 6.7$) を主成分とする CRUD は、BWR 燃料棒と同様第 3.2 節で記述した溶接装置では何らの問題も生じない事が分かった。

実験に用いる予定の燃料棒について、その被覆管肉厚に注目すると、BWR 型燃料棒の製造時のそれは 0.81 mm であり、PWR 型燃料棒の製造時のそれは 0.57 mm であった。予備照射済燃料のうち、特に PWR 型燃料棒は炉内使用中、 $\text{Zr} + \text{O}_2 \rightarrow \text{ZrO}_2$ の酸化反応で、被覆管の肉厚が減少するとともに均質酸化膜の厚みが三乗則又は直線則で増加する。例えば、照射後 $40\text{ }\mu\text{m}$ の ZrO_2 酸化膜が観察されたとすれば、初期肉厚の 7% ($0.57\text{ mm} \times 7 / 100 = 0.04\text{ mm}$) は、すでに酸化膜となって失われている計算になる。

従って、予備照射済燃料棒に係わる熱電対溶接時の最大の問題は、できる限り確実に生成酸化膜を被覆管から除去し、かつ未酸化のジルカロイ被覆材をあまり削り込まない様にしながら、必要な溶接条件を整えることにあった。

もう 1 つの技術上の心配として、商用炉にて長期間照射されて来ているため、冷却軽水の分解から生じた水素が被覆管中に一定の割合でとりこまれたことによる脆化（被覆材の水素吸収）の問題があった。被覆管の脆化により、予測せぬ事態—例えば熱電対溶接時に不測の応力により被覆管が割れる事態が心配された訳である。これらを踏まえて、炉外にて酸化膜を意図的に付着させたダミー燃料棒をあらかじめ準備し、第 3.2 節で記述した酸化膜除去用ブラッシング装置による炉外モックアップ実験を行うこととなった。

3.3.2 酸化膜付ダミー燃料棒の製作方法

予備照射済 PWR 型燃料棒と仕様がほとんど同じの未照射 PWR 管を準備した。KWU の Garzarolli らの文献^(3.3-4)を参考に、 ZrO_2 酸化厚み $1\text{ }\mu\text{m}$ を形成するのに 14.4 mg/dm^2 の被覆材料が消耗されると仮定した。また、冷却軽水との酸化反応で発生した水素 ($\text{Zr} + 2\text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{ H}_2$) のうち、10% が被覆管中に吸収されるものとの仮定も設けた、この様な仮定のもとに、未照射の PWR 管を 450°C の酸素雰囲気中に 125 日間放置した。

Photo. 3.3-1 は、125 日目に取り出した当該 PWR 管の輪切り断面写真及びそれより観察さ

れた水素吸収の状態である。この写真から分かる様に、約 $41\text{ }\mu\text{m}$ の酸化膜及び 67 ppm の水素吸収を持つ試料が得られた。この試料の上部及び下部に端栓をつけて、予備照射済燃料棒と同一形状に作り上げ、モックアップ試験に供した。

3.3.3 得られた成果

酸化膜除去用ブラッシング装置に、酸化膜付ダミー燃料棒を装荷して、同装置の性能特性を調べる炉外実験を実施した。このモックアップ実験から得た結果によれば、 $40\text{ }\mu\text{m}$ までの酸化厚みをもつ PWR 型燃料棒に対しては、燃料有効発熱長中央部に削り幅約 1.5 mm 、長さ 6 mm のブラッシングをかける事で酸化膜が除去でき、余分な削りこみもなくかつ十分に熱電対も溶接できる事が明らかになった。このモックアップデータに基づいて、予備照射済の PWR 型燃料棒に対し、酸化膜除去を行ったあと熱電対を溶接した。その結果が成功であったことについては第3.2節で報告した通りである。また、被覆管の健全性に悪影響を及ぼす事なく、パルス照射時の被覆管の温度測定にも成功した。

3.4 ジルカロイ製内圧計、燃料棒内圧計樹脂注入治具及びキャプセル内圧計の製作（宇野）

3.4.1 製作の目的

予備照射済燃料棒は、比較的高燃焼度 ($\sim 40\text{ MWd/kgU}$) まで照射されているため、燃料ペレット中に多量の FP ガスが保持されている。この燃料中に保持されている FP ガスは、NSRR パルス照射によって、急激なスウェーリングを発生したり、バースト的なガス放出をおこす可能性がある。この急激なスウェーリングや FP 放出は、また予想される燃料と被覆管の力学的相互作用 (PCMI) による破損の原因ともなるものであり重要である。これらをモニタリングする装置として、ジルカロイ製の内圧計を製作した。

また、この内圧計には遠隔操作性をもたせる必要があったので、計装線の取り出し方法を簡単化し、防水機能を考慮した。このため、これに適した樹脂注入装置も開発した。

FP を多量に保持した燃料棒に破損が生ずれば、高温化した UO_2 燃料が水と接触し、微粒子化を拡大することにより、大きな圧力波を発生する可能性がある。この為、これに対応できる様なキャプセル内圧計を製作する必要があった。

3.4.2 装置の概要

3.4.2.1 ジルカロイ製内圧計及び樹脂注入治具

ジルカロイ製内圧計の基本構造を Fig. 3.4-1 に示す。

内圧計の左端は、①の部分で、短尺化された予備照射済燃料棒の底部と溶接により結合がなされる。②の部分が、歪ゲージ型の圧力センサーであり、照射棒側の内圧を歪ゲージにより検出して読みとる様になっている。③の部分は、歪ゲージに付随したブリッジ回路からの入出力信号を取り出す部分である。それらは耐密エポキシ樹脂により固定される。内圧計の右端にある④の部分は、燃料棒支持具に、この部分は、燃料棒支持具に、この部分をねじ込む事により、内圧計付の燃料棒を固定するものである。

この圧力センサーの主要な仕様は以下のとおりである。

定格容量 : 75 kg/cm² (PWR型燃料用)

定格出力 : 0.5 mV/V以上

使用温度 : 室温～200°C (但し、端子部は Max 100°C)

フォイルゲージ : ACT×4のフルブリッジ構成

入出力抵抗 : 120 Ω

直線性 : 1% FS以下

再現性 : 0.5% FS以下

温度特性 : 0.05% FS/°C以下

ヒステリシス : 1% FS以下

過負荷 : 120% FS

本体材質 : ジルカロイ-4 (PWR)

Fig. 3.4-2 は、前図の③の部分に樹脂を強制的に注入するために工夫して製作した樹脂注入製作した樹脂注入治具である。

原理は簡単で、まず①の部分に液状の樹脂をつめておき、②のコントローラーを介して、③から圧縮空気を送り、④に示すニードルの先端から樹脂を流し出すようになっている。

3.4.2.2 キャプセル内圧計

キャプセル内圧計の基本構造を Fig. 3.4-3 に示す。これは、燃料棒が破損し圧力波が発生する様な状況に至った場合を仮定し、発生圧力波を二重カプセルの底部にて測定しようとする目的で作製されたものである。図に示す様に、薄膜型の歪ゲージを受圧面の内側にはりつけ、水圧の増加があった場合、それを受圧面の変形歪に置きかえて水圧を検出する原理となっている。

なお、この受圧面は図に示す様に、カプセル底部でなくカプセル内壁に平行に設定されている。これは、受圧面をカプセル底部に設置し、上向きにおいて、破損燃料から発生した衝撃圧力（通常正弦波の形状となっている）が、この面で反射波を作り、畳重して最大2倍の衝撃圧力を受圧面に与える可能性が考えられるので、これを避けるために考案された。

このカプセル内圧計の主要な仕様は、以下のとおりである。

定格容量 : 10 kg/cm²

定格出力 : 0.5 mV/VFS以上

使用温度 : 0～100°C

入出力抵抗 : 120 Ω

直線性 : 0.5% FS以下

再現性 : 0.2% FS以下

温度特性 : 0.05% FS/°C以下

過負荷 : 120%

コード長さ : 50 cm

概略寸法 : φ15 × t10 mm (本体寸法)

本体材質 : ステンレス鋼

3.4.3 得られた成果

燃料棒底部に取付けたジルカロイ製内圧計については、すでに4回（1990.4現在）の使用実績がある。いずれの実験においても、パルス照射時に生じた燃料棒内圧の過渡変化をうまく計測する事ができた。図が重複するので、ここには示さないが、例えば、PWR型燃料棒に関しては、Fig. 3.5-4 ②に示す様に、発熱量 100 cal/g fuel における燃料棒内圧の過渡データを手に入れることができた。この圧力過渡データは、世界で初めて得られたものであり、きわめて貴重なものである。

キャプセル内圧計については、これまでに行われた予備照射済燃料によるパルス実験では、照射破損が発生していない。従って、カプセル内圧に関する衝撃圧力データは今までのところ、得られていない。

3.5 燃料棒伸び計の設計製作（山崎）

3.5.1 目的

予備照射済燃料棒を用いたパルス実験では、燃料棒の破損ふるまいが問題となる。この燃料性能、特に炉内ふるまいを評価し、その結果を計算コードのモデリング等に反映させるには、精度の良い炉内データが必要である。このため、当該実験では、燃料被覆管（クラッド）の伸び計及び燃料スタック（ペレット）伸び計を燃料に同時に装荷し、時間依存型のデータを測定できる計装機器を開発した。これらは、従来から未照射燃料実験に用いられてきたものの構造と基本的に変わらないが、実験前の較正試験や二重カプセル中への装荷時の、遠隔操作性の機能が十分に発揮されるような配慮がなされたものとなっている。

3.5.2 測定原理等

燃料棒の伸び計は差動トランス（LVDT）の原理を利用したものであり、可動コアを燃料棒側へ、コイル部を支持具（支柱）側へ取付けてある。コイル部はボビン中央に一次コイル、その両側に同一寸法同一巻数の2つの二次コイルを巻いたものである。一次コイルにある周波数（3 kHz）の電圧を加え、コアをコイルの中心に置いた時、2つの二次コイル出力電圧が 0 (V) になるような結線とする。コアを中心から少しずらした時、2つの二次コイルの出力電圧の差、すなわち、 $\Delta e = e_1 - e_2$ (V) が出力となる。この出力値はコアの移動量に比例するので、測定に先立って出力 Δe (V) と移動量 (mm) の関係を較正しておけば、燃料棒の伸び量を測定することが可能である。

本センサは、測定範囲 ± 3 (mm)_{max}、応答速度：300 (Hz)_{max} で設計製作している。

3.5.3 基本構造

燃料棒伸び計はクラッド（被覆管）伸び計とペレット（燃料ペレット）伸び計がある。Fig. 3.5-1 に示すようにクラッド及びペレット伸び計のコイル部は円筒型のホルダに収納し、ホルダは支持具の支柱部分に固定している。クラッド伸び計のコアは燃料棒上部端栓の上側に延長棒を継ぎ足し、コアを支持している。ペレット伸び計のコアは燃料棒の製作時に積み重ねたペレットの

最上段へ、ペレットと同様に積み重ねてある。クラッド伸びの延長棒は非磁性体（常磁性体のものも1部含む）の材料を使用し、各コアは強磁性体の材料を用いている。

二次コイルからの出力はFig. 3.5-2に示すように、二次コイル1ケづつの出力(e_1 及び e_2)を個々にプリアンプで増幅し、整流した後直流差動アンプに入れ、2つのコイル出力を増幅している。更にメインアップで電力増幅と出力インピーダンスの整合をはかっている。発振器はアンプと同じ筐体に組込み一次コイルへ供給している。発振電圧5Vp-p程度(可変)、発振周波数3(kHz)一定としている。標準電圧発生器はアンプの利得を決定する時に標準電圧として用いるもので、切替え可変式となっている。電源は原研規格のビン電源で、ビン電源1台で同時に6台のアンプを作動させている。

3.5.4 較 正

本センサ類は使用に支立って伸び量(mm)、すなわちコアの移動量(mm)とアンプの出力電圧(V)の関係を較正しておく必要がある。

センサの較正は実験に使用するコア、延長棒、コイル、ホルダ、アンプ及び較正用マイクロメータを使って、コアの移動量(mm)に対するアンプの出力電圧(V)を測定記録し、グラフ化する。較正範囲は実験で測定したい最大の移動量までとする。

3.5.5 組立み方法

クラッド伸び計、ペレット伸び計共にコイル部は、リード線側が上側になるようにホルダへ組込む。コイル部を組込んだホルダは、Fig. 3.5-3に示すように支持具(支柱)の軸方向に対して90°方向にネジ止めし、コア付き燃料棒を挿入する。燃料棒と共にホルダを回転して、燃料の下部端栓を支持具の燃料固定座へ固定する。さらにホルダを支持具へ固定する。

3.5.6 調 整

支持具へ組込み後のセンサは調整が必要である。調整は機械的零調整及びアンプ利得の決定である。

機械的零の調整はアンプ出力電圧の絶対値が最小になるようにホルダのコイル押えを回転してコイル部を上下し調整する。

電気的零の調整は機械的零が成立している時、アンプ出力電圧が0(V)になるようにアンプのレベルを調整する。

アンプ利得の決定は実験で測定しようと考えている最大の伸び量(mm)をアンプ出力で10(V)になるようにアンプ利得を決定することである。通常アンプ利得の決定は較正時に行う。

3.5.7 得られた成果

予備照射済PWR型燃料棒(燃料集合体平均燃焼度約32MWd/t U)に、被覆管伸びセンサ等をとりつけ、約100cal/g fuelでパルス照射を行った。Fig. 3.5-4は、このパルス照射実験から得られた炉内データである。

燃料棒伸びは、積分出力の増加と共に増加し、一定値に到達している。最大到達軸歪は0.43%

であり、非破損であった。また、この後燃料棒伸びは緩和し、パルス後約3.8秒で残留変形を示さず、元の長さに復帰した。すなわち、燃料棒の変形は弾性変形モードであったことも、この取得データから分かった。

これら炉内データは、また過渡/事故解析コード FPRETAIN の検証計算にも有効に活用されつつある。

いずれにしても、開発した計装装置は十分に所期の目的を果たしている事が、明らかになった。

3.6 燃料棒支持具、計装プラグ及び計装ケーブルの開発（宇野）

3.6.1 目的

未照射燃料実験に使用されてきた NSRR カプセルの基本的な内部構造は、燃料を水中に支持し、また、必要な計装線を配線するための支持具、計装線類を密封カプセルから取り出し、炉外コンピュータ室内のデータログ装置に直結させるための計装プラグ及び計装ケーブル等によりなりたっている。

一方、予備照射済燃料実験では、FP の封じ込めを主眼とする設計思想をキャップセル設計に適用した。このため、キャップセル壁はこれまで用いて来た様な一重ではなく、二重となった。これに伴い、これまでの支持具や計装プラグ類に用いて来た設計概念をそのまま適用することが難しくなった。すなわち、二重カプセル構造に適した燃料棒支持具、計装プラグ及び計装ケーブルをあらたに設計・製作する必要が生じた。

3.6.2 装置の概要

Fig. 3.6-1 に、予備照射済燃料実験用のカプセルの基本構造を示す。この図から分かる様に、照射容器は内部カプセル（肉厚 3.0 ~ 4.5 mm, 試験燃料の型で異なっている）及び外部容器（3.0 ~ 4.0 mm）で構成されている。内カプセルには、燃料棒及び図(b)に示す支持具（PWR 型燃料棒に使用したもの）及び冷却材が入っている。図(b)の支持具頂部は、取付計装線（熱電対、燃料スタック伸び計、被覆管補伸び計、燃料棒内圧計、カプセル内圧計等）を、さらに外部容器に引き出す工夫がなされている。その様子を図(c)に示す。すなわち、図(b)及び図(c)は計装プラグ及び計装ケーブルの概要を示すものである。

3.6.3 得られた成果

Fig. 3.6-1 に示すカプセル構造にて、予備照射済燃料を用いたパルス照射実験を 6 回実施し、どの実験においても計装ケーブルやプラグの不具合、また内部及び外部カプセルの不具合も生じなかった。

これは、図に示す機器の基本構造が実験の遂行上、何ら問題もなく、RIA 下でも燃料挙動を評価するのに、十分なものであることを裏付けたものと考えられる。

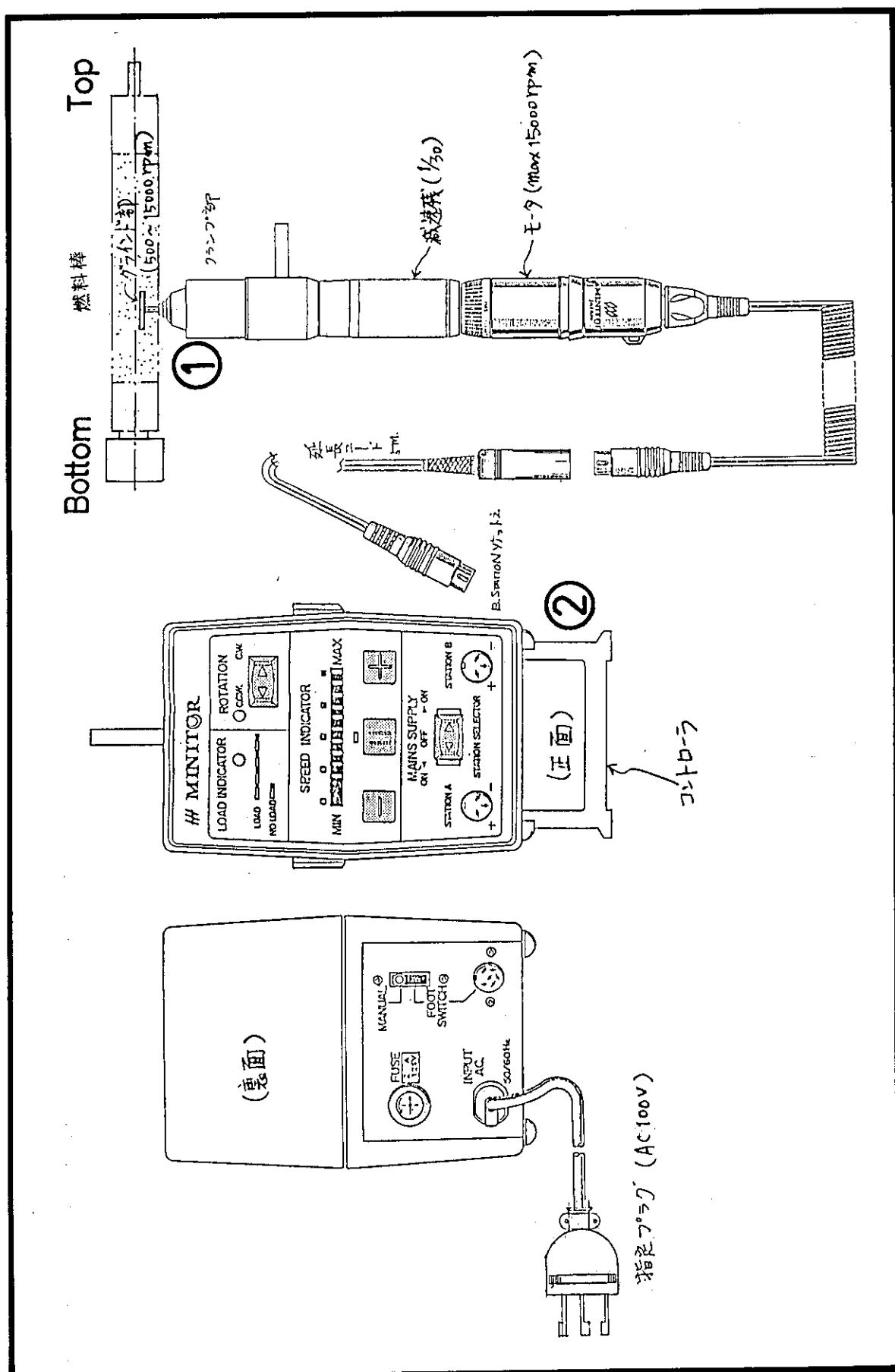


Fig. 3.2-1 Abrasing device to remove the coherent zirconia (ZrO_2) formed at the zircaloy cladding surface during pre-irradiation stage.

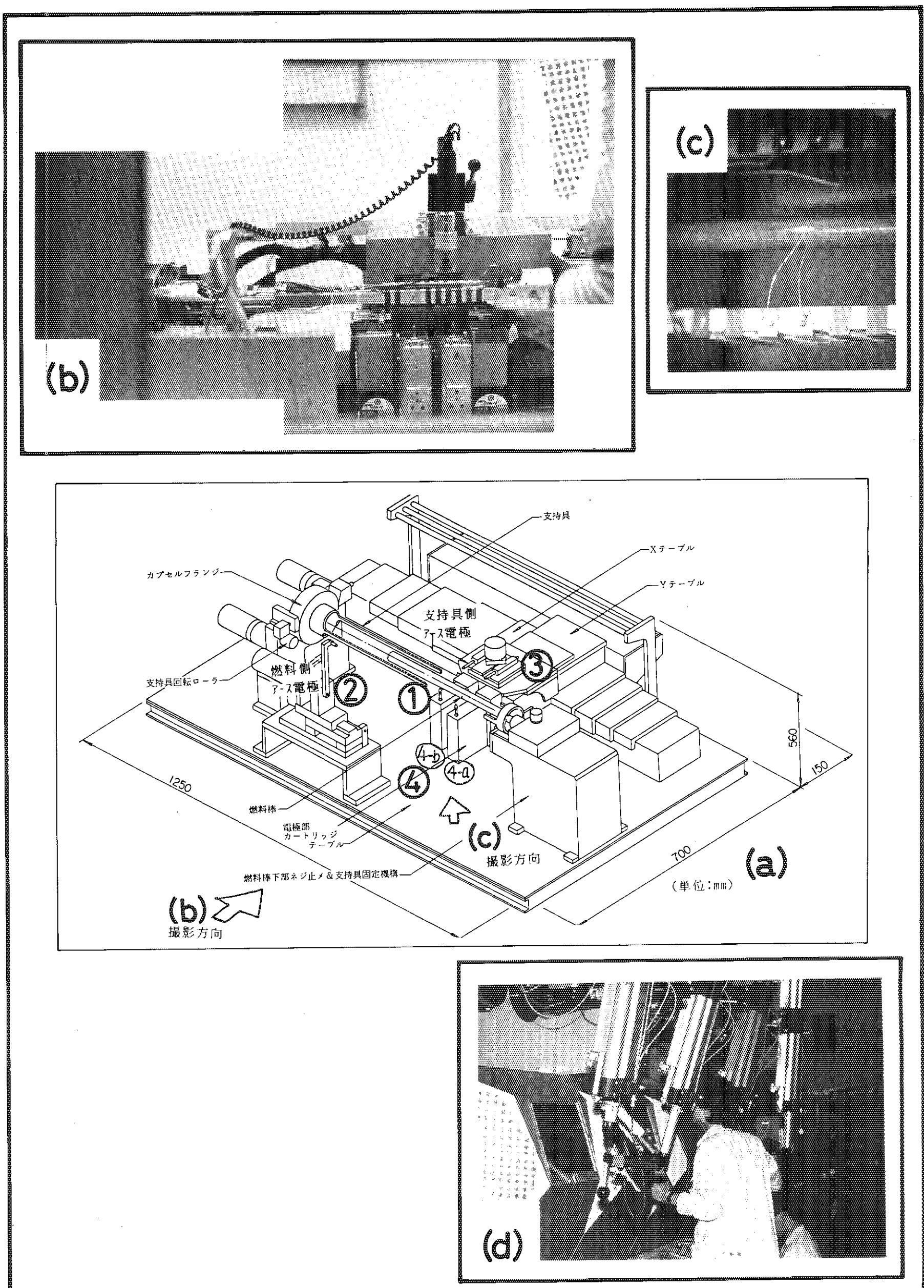


Fig. 3.2-2 (a): Schematic drawing of the electron beam welding apparatus for thermocouple attachment to the cladding surface
 (b): Outerview of the welding apparatus; this was viewed from the direction shown in (a).
 (c): Condition of thermocouples welded set to the cladding surface, and
 (d): Outerview of semi-hot cable located in the 2nd basement of NSRR

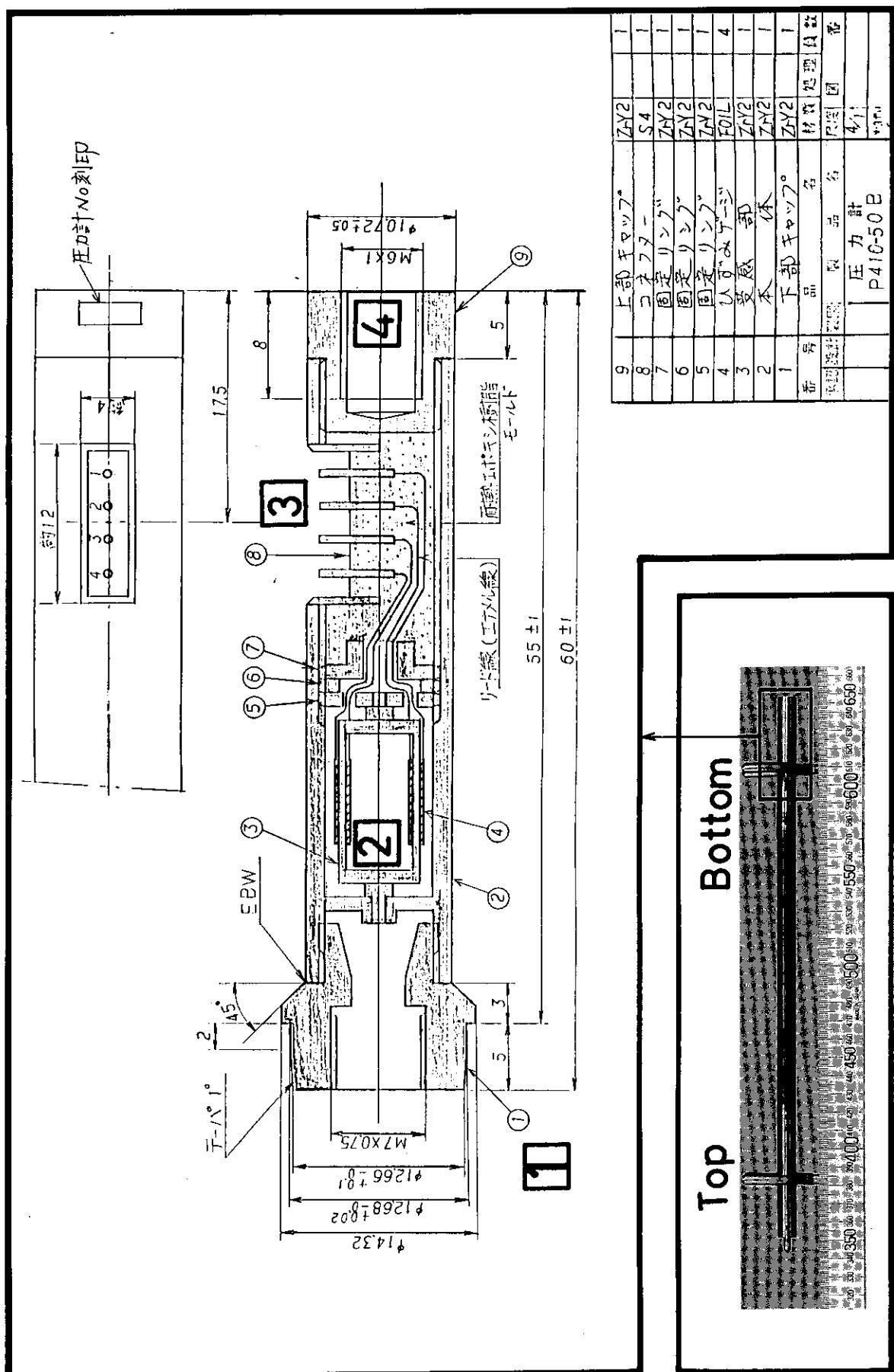


Fig. 3.4-1 Drawing of the zircaloy sheathed pressure sensor set to measure the change of rod internal pressure during RIA

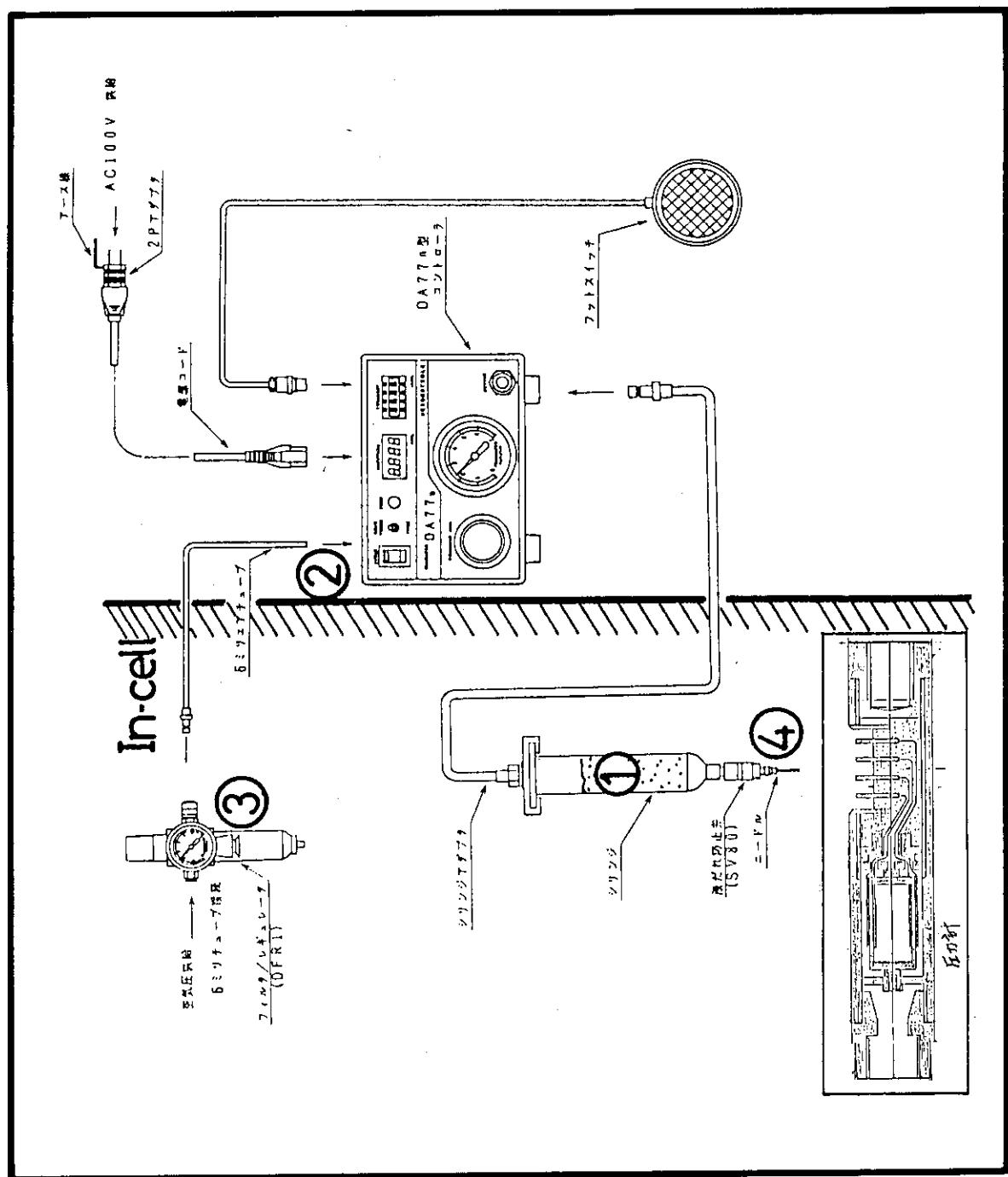


Fig. 3.4-2 Schematic representation of the resin supplier set in the hot cell for assembling of fuel rod pressure sensor

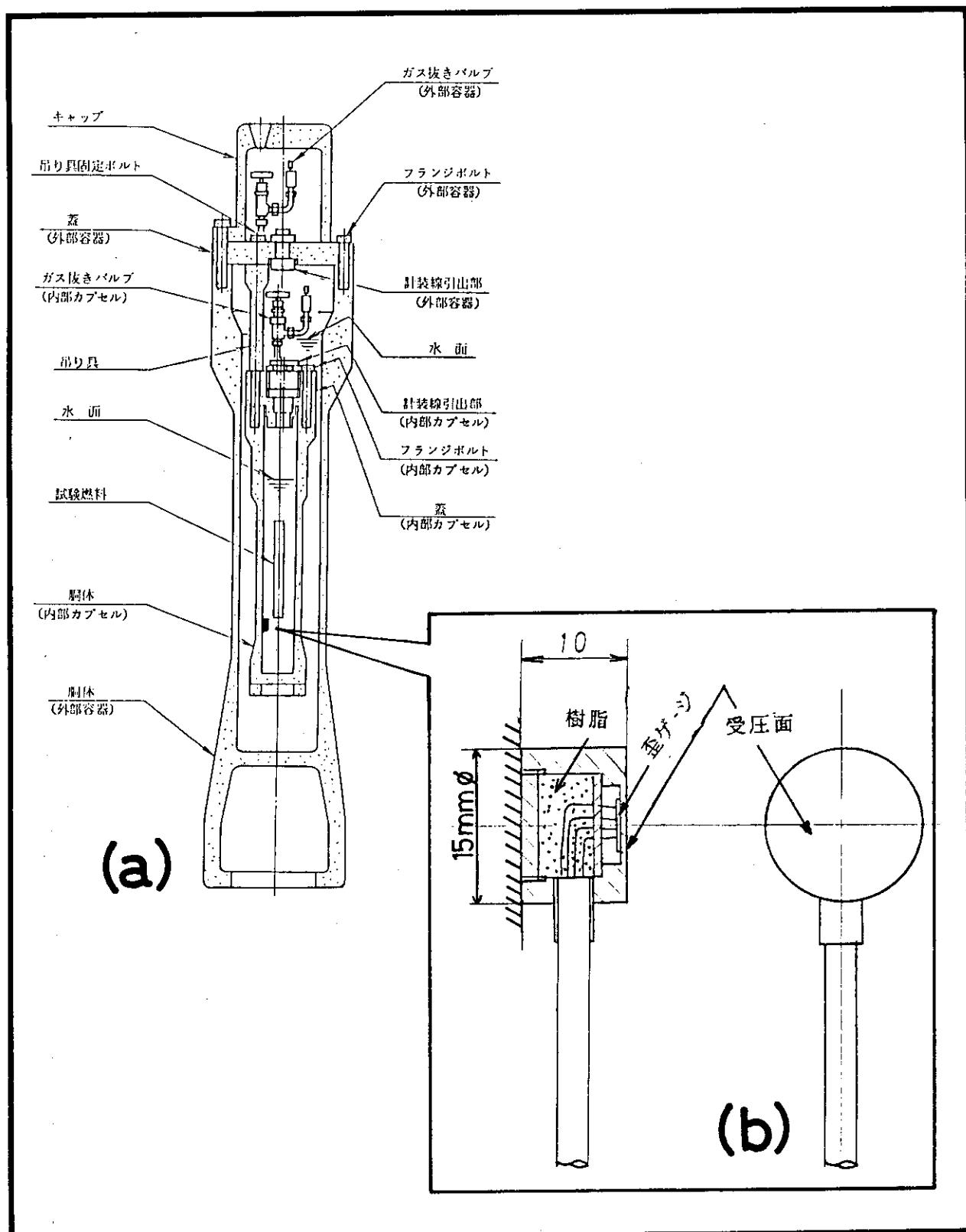


Fig. 3.4-3 (a) Outline of the double capsule designed to perform the pulse irradiation with pre-irradiated LWR fuel rod
 (b) Capsule pressure sensor attached to the capsule

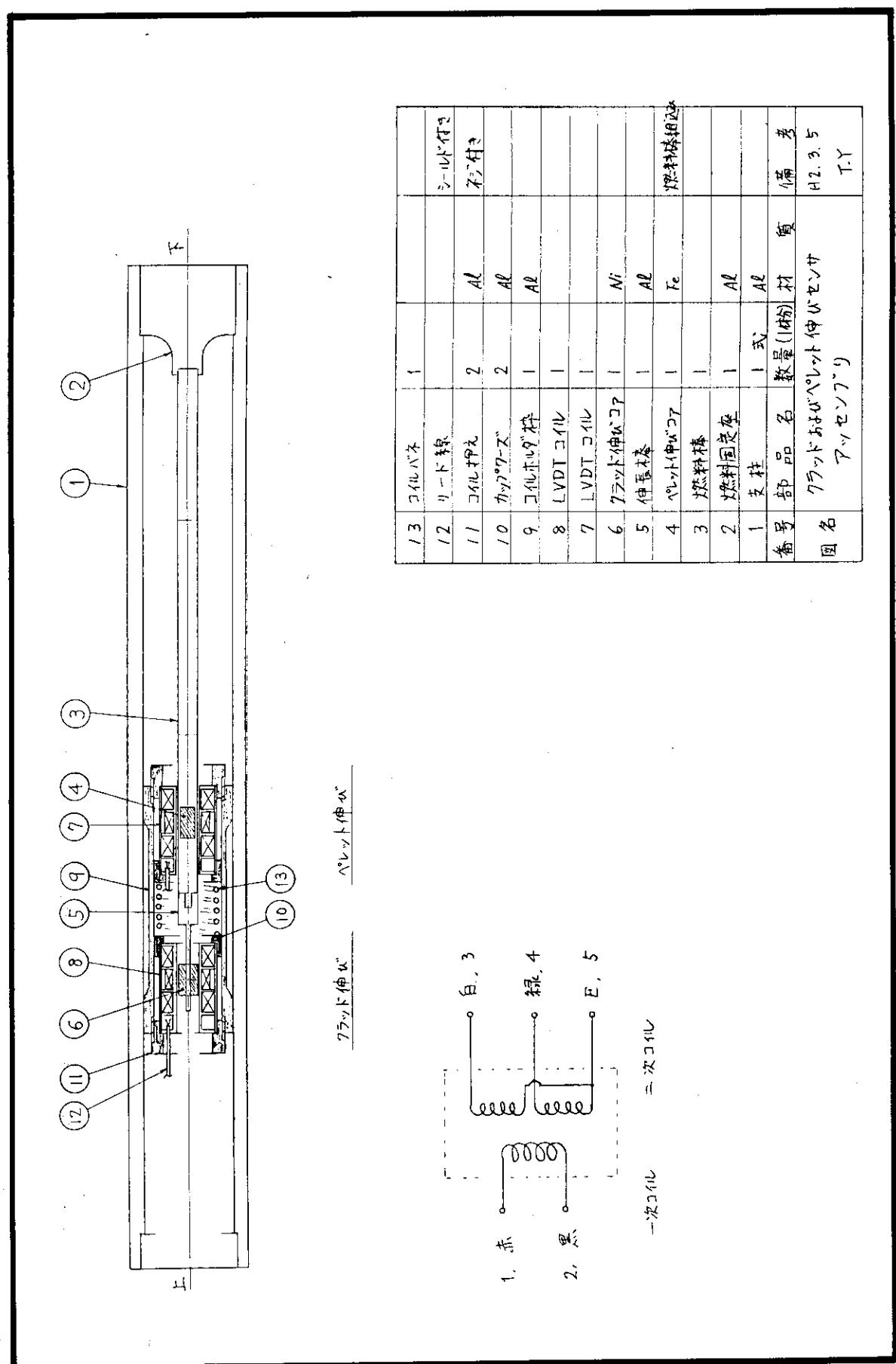


Fig. 3.5-1 Schematic representation of the cladding extensometer and fuel stack extensometer assembled together with supporter

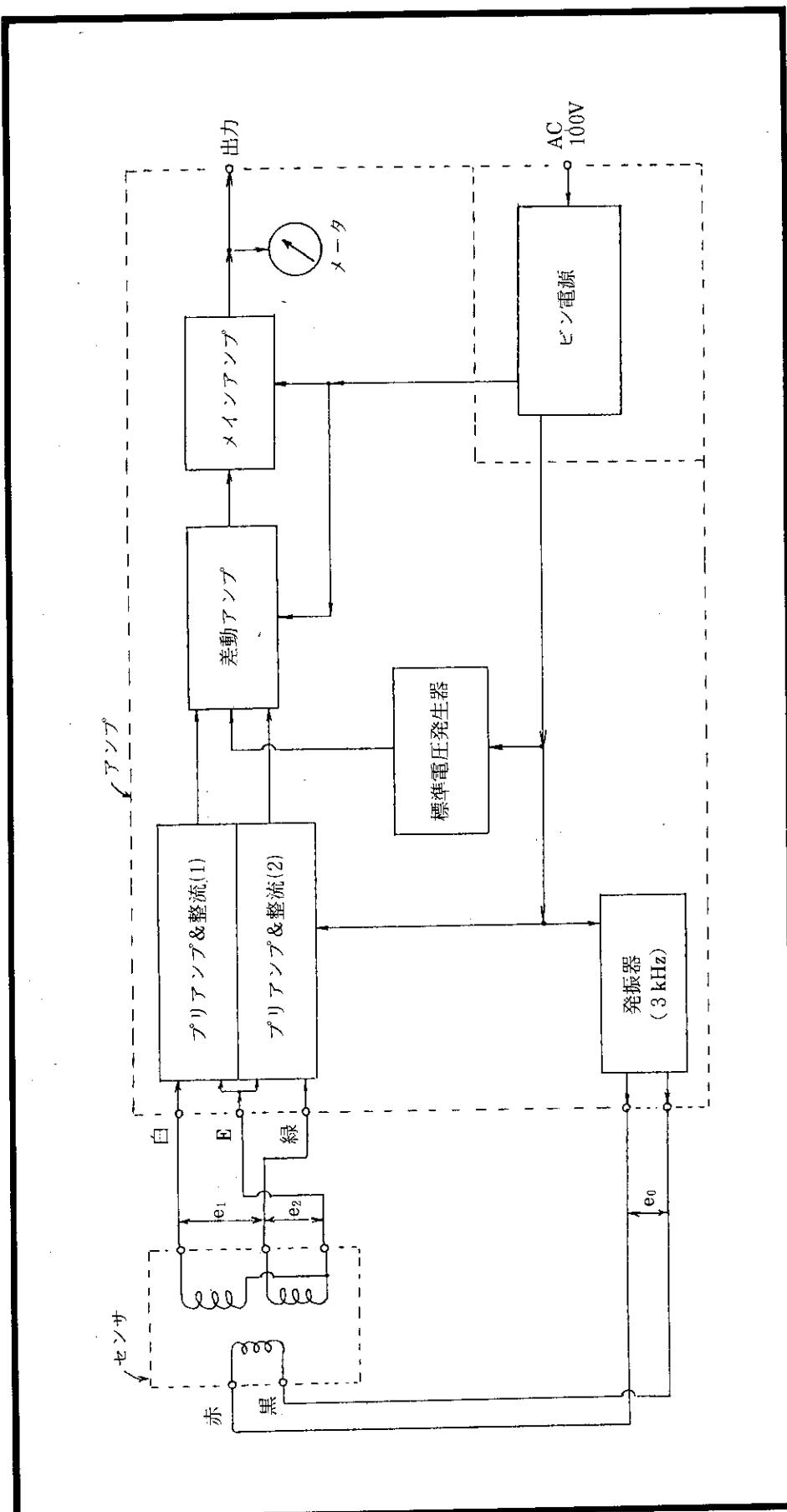


Fig. 3.5-2 Block diagram using in the measuring system in the extensometers

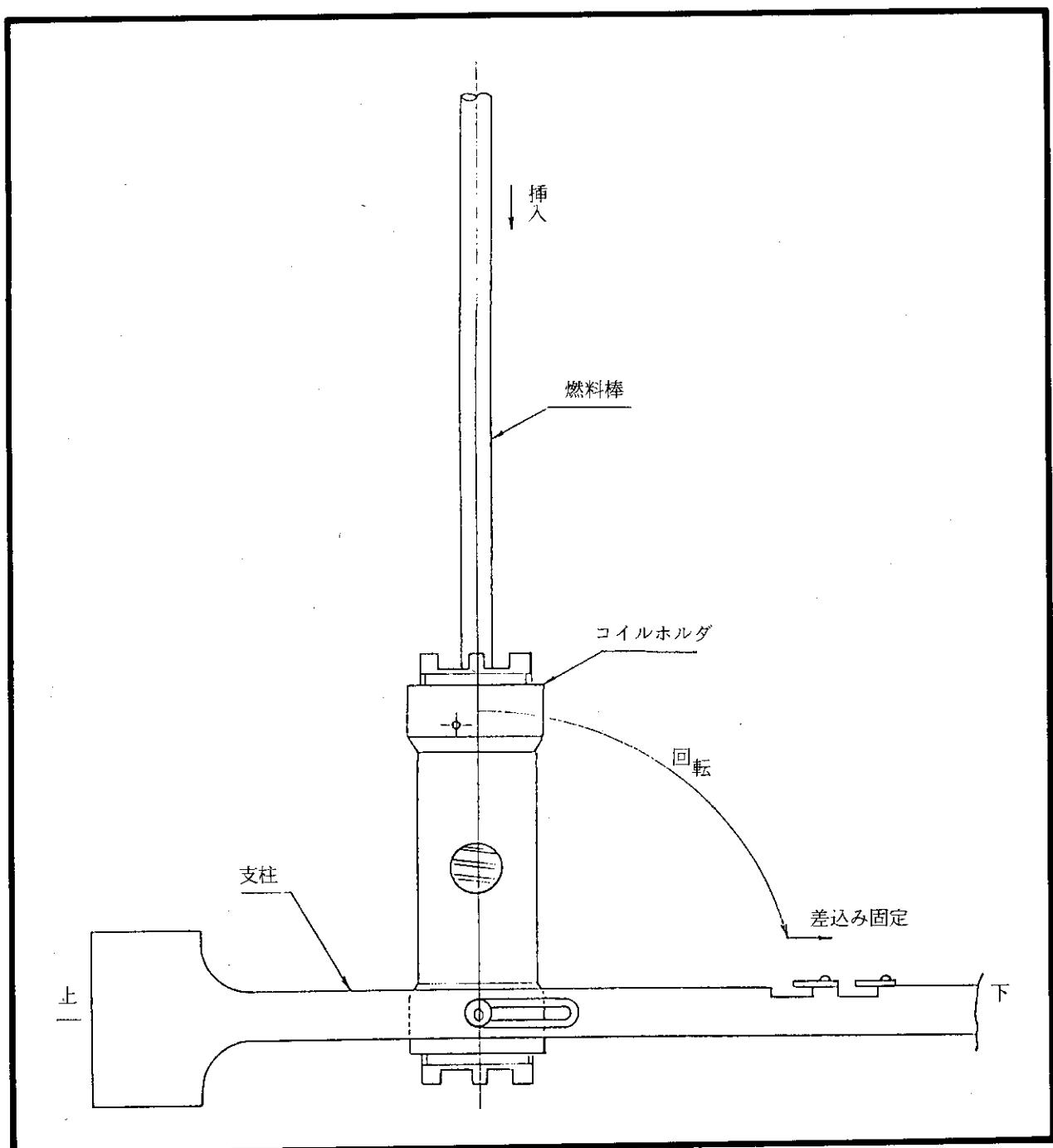


Fig. 3.5-3 Principal method used in assembling and disassembling of the extensometers

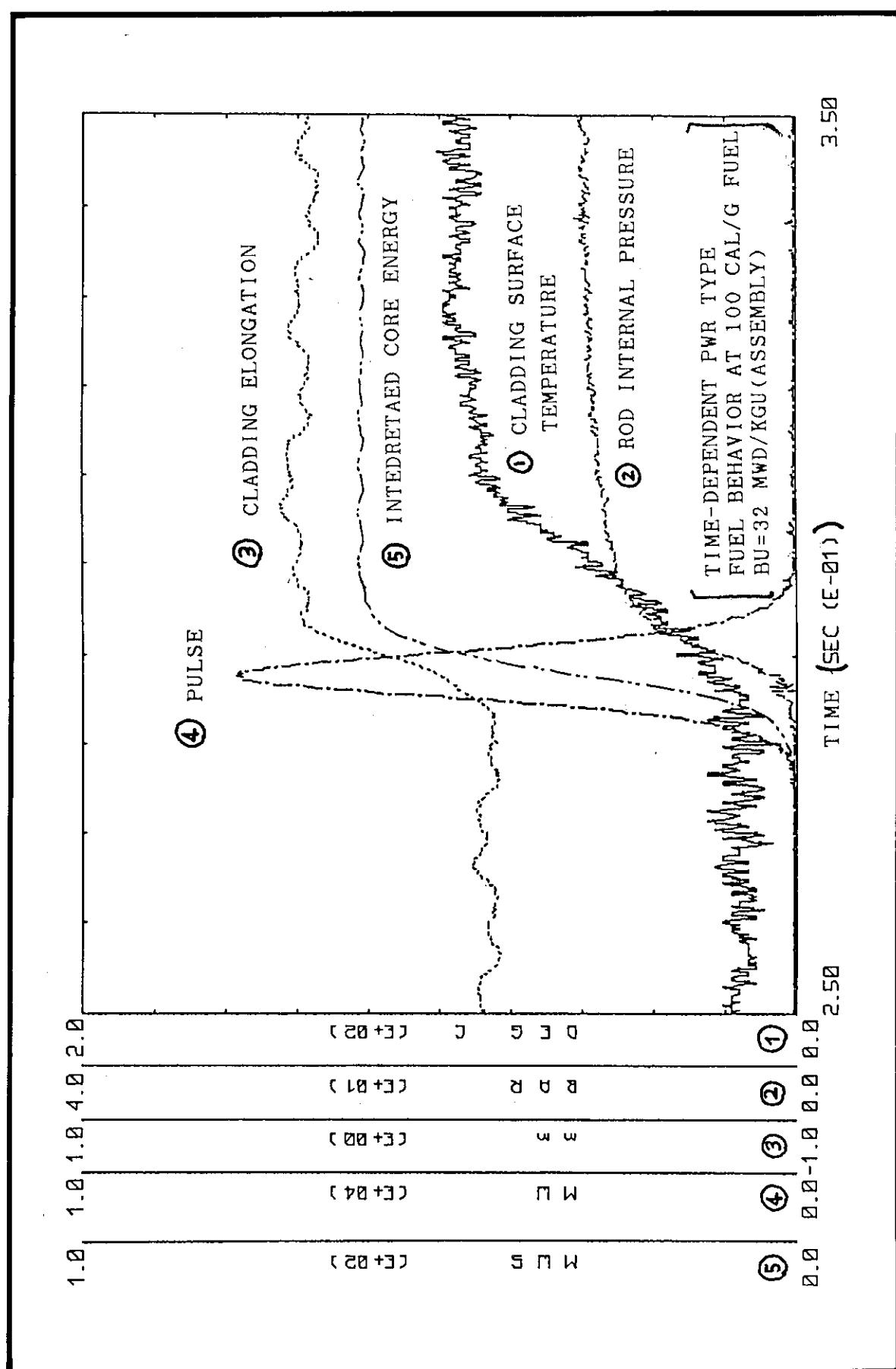


Fig. 3.5-4 Resultant behaviors of the pulse irradiated PWR type fuel rod with energy deposition of about 100 cal/g fuel; accumulated burn-up of which was 30 MWd/kgU in assembly average

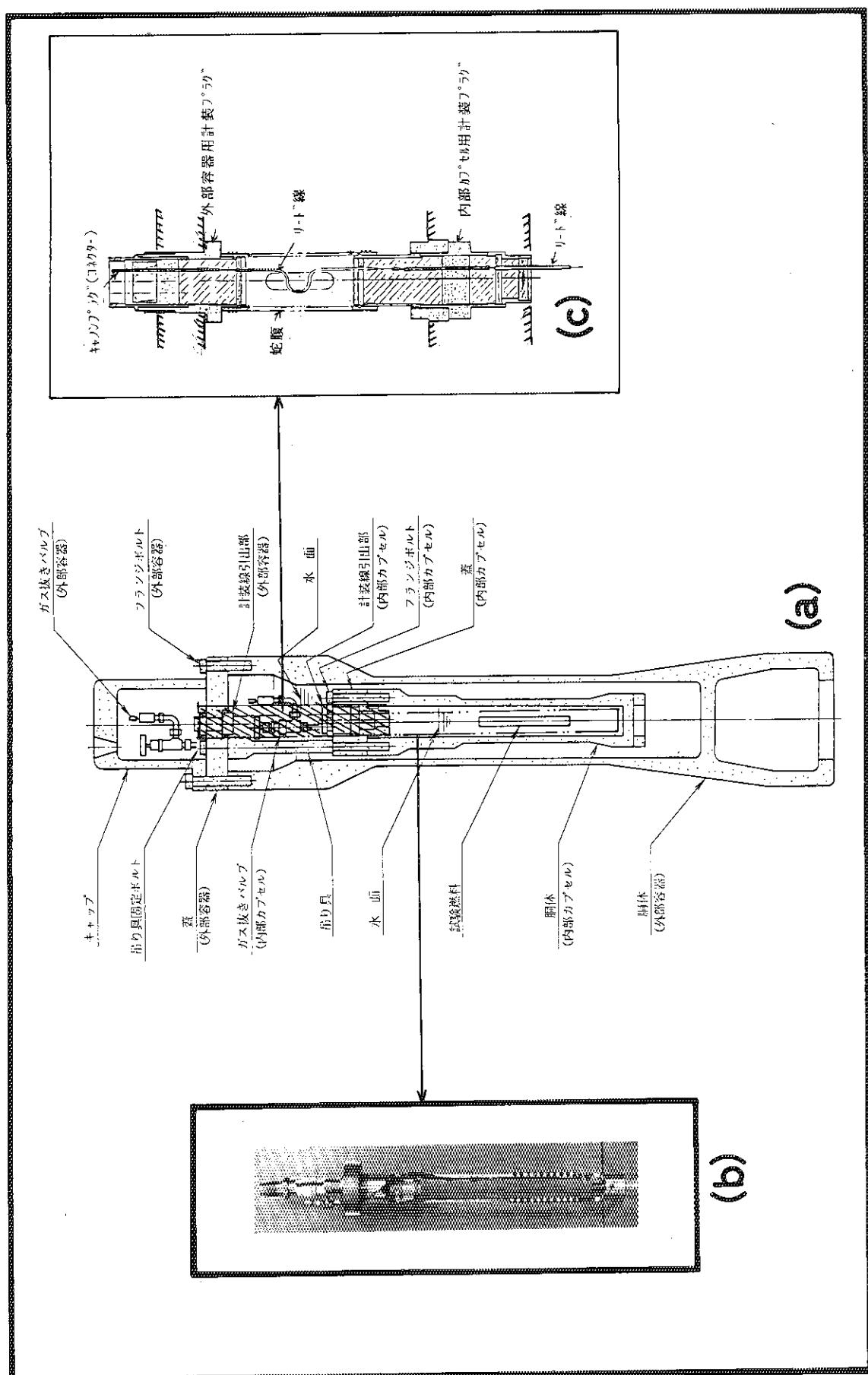


Fig. 3.6-1 (a) Double capsule designed to perform pulse irradiation with pre-irradiated LWR fuel rods
 (b) Assembled fuel rod supporter
 (c) Schematic drawing of instrumentation plug

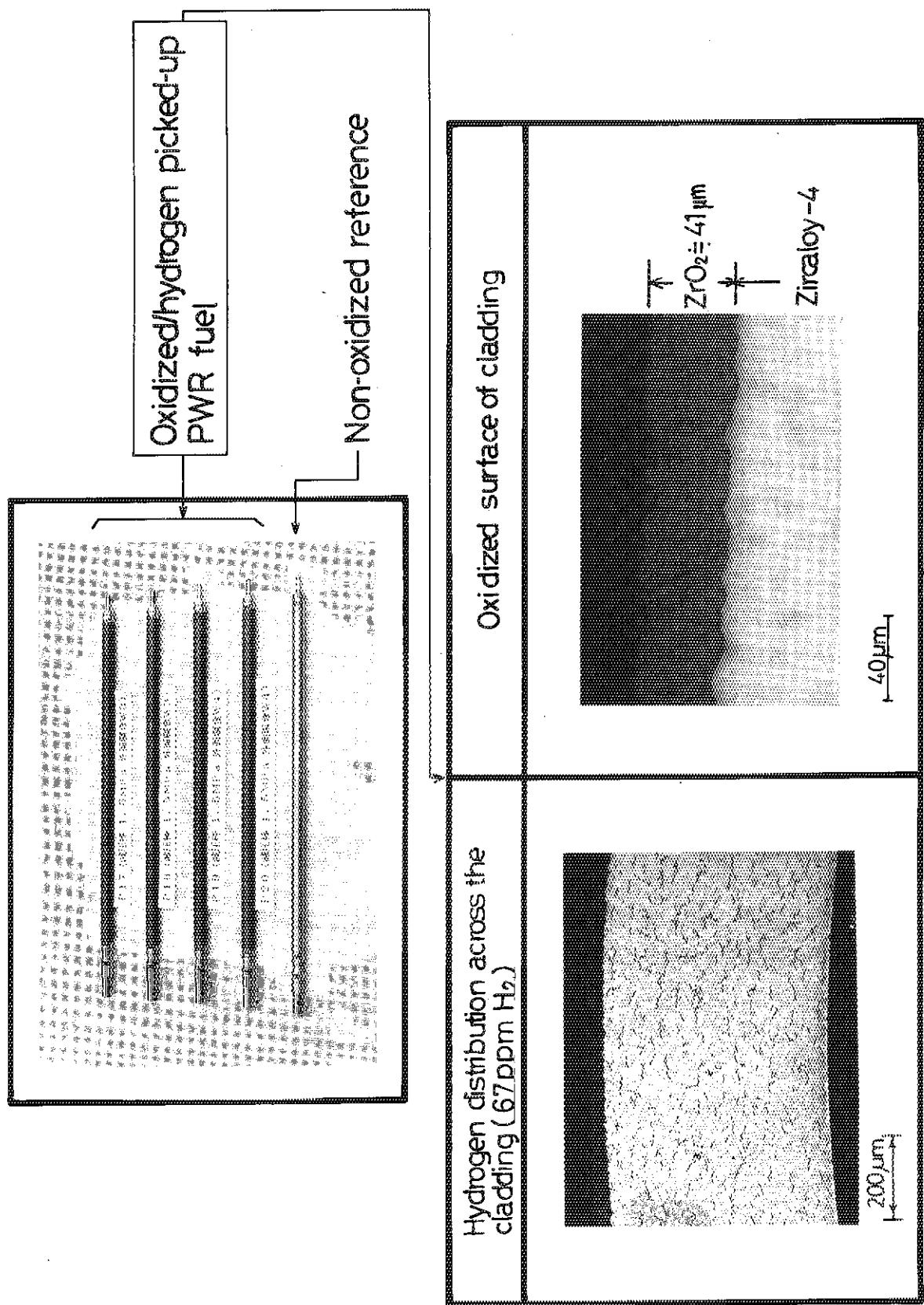


Photo. 3.3-1 Preparation of the oxidized/hydrogen absorbed PWR fresh fuel to be used for the mock-up test of oxidation abrasing devices.

4. パルス照射後の燃料棒照射後試験装置の整備

4.1 概 要

予備照射済燃料の NSRR パルス実験に関しては、実験後の照射後試験も行う。この照射後試験は、例えば、商用炉で供試した燃料の照射後試験とは少し性格の異なる点がある。すなわち、実験では商用炉での使用が終了した燃料棒を用いて、短時間 (< 1 s) であるが非常に高い出力（最大 320 cal/g fuel を予定）のパルスが加えられる。実験後の照射後試験とは、そのパルス照射後の燃料健全性を評価するために行う照射後試験である。すなわち、Post-pulse irradiation examination (PIE) と称すべき性質のものを、本報では、照射後試験（以下、PIE）と称している。そのパルス照射した予備照射済燃料の照射後試験は、原研の研究炉管理部ホットラボ（Hot Laboratory, Department of Reactor Operation）で実施する事になっている。同ホットラボのこれまでの活動は、高温ガス炉用のコンパクト燃料や研究炉で使用した板状（金属）燃料の PIE が主流であった。従って、ジルカロイ合金被覆-UO₂燃料の PIE を実施するに際しては、ホットラボ中にある程度の PIE 装置も整備する必要が生じた。このため、反応度安全研究室では、1987 年度から、NSRR 短尺燃料の PIE に適した装置をホットラボに導入することを計画し、ホットラボ側の大きな協力を得て、実施にはいった。この計画は、現在でも進行中であるが、燃料健全性の評価上必要最低限度の装置と考えられるものはほぼ整備が終了し、実際に稼働している。また、研究成果も得られている。

そこで、以下の PIE 機器（一部に試験試料に関するものもある）について、使用目的、装置の概要及び得られた成果を報告する。

- (1) X 線検査装置及び実験カプセルの解体装置
- (2) 燃料棒の寸法測定装置、渦電流探傷試験装置及び同装置アダプタ類
- (3) 標準傷付渦電流探傷試験較正試験用ジルカロイ被覆管
- (4) ガンマスキャニング装置
- (5) FP ガスパンクチュアリング装置及びモックアップ用燃料棒
- (6) 燃料溶解装置

なお、これら機器類の設計・製作はホットラボ職員全員の協力のもとに完成されたものであるが、本報では装置の設計・製作にたずさわった数多くのエンジニアのうち 1 人が、目的や装置の概要並びに得られた成果につき記述した。

4.2 X 線検査装置及び実験カプセル解体装置の製作

4.2.1 X 線検査装置の製作（斎藤）

4.2.1.1 目 的

予備照射済燃料を用いた NSRR パルス実験では、破損燃料からの FP リークを防止するため、

従来は一重であったカプセル壁を二重にした。すなわち、従来からの外部カプセルの内側に、更に内部カプセルを設けた。

この変更により、内部カプセルがパルス後においても健全なものは内部カプセルの状態で、NSRR からホットラボへの輸送が行われる。一方、内部カプセルの健全性が担保できない状態であれば、外部カプセルをつけたままの状態でホットラボへの輸送が行われる。ホットラボでのカプセル解体に先立って、まず装荷燃料棒の健全性を確認することが、安全性の観点から必要である。この趣旨にそって X 線検査装置が製作された。

4.2.1.2 装置の概要

本装置は、パルス照射された予備照射済燃料棒の健全性を確認するために、カプセル開封前に X 線撮影を行う装置で、クリーンケーブル No. 1 に設置した。装置の概要を Fig. 4.2.1 に示す。

4.2.1.3 検査方法

従来の X 線撮影装置は、医療用 X 線管球（3 個）を使い、大電流で短時間撮影する方式であった。しかし、NSRR 照射用内部カプセルは、肉厚が厚い（3.0 ~ 4.5 mm）ので透過力を高める必要が生じた。このため、従来と同様の位置（試料までの距離、以下 FSD: 1800 mm）に、同等の X 線管球（A 管球 1 個）を設置し、± 500 mm の移動ができるようにするとともに、医療用管球（B 管球 1 個）を更に被写体に接近させ（FSD: 650 mm）、± 500 mm の移動ができるようにした。

4.2.1.4 装置の構成

① 管球支持部

A 管球（FSD: 1800 mm）支持部については、従来の性能を考慮し、管球支持レールを再使用した。また、B 管球（FSD: 650 mm）支持部を、S_T-C_LB 扉ヒンジ及び電気錠との取り合いに留意して試料支持部の左側に設置した。

② 試料支持部

上部チャック（固定式）、下部チャック（移動式）を数種類作製し、また、小試料用撮影箱を設置して、撮影対象物全ての撮影を可能にした。

カセットの汚染防止及びケーブル内の負圧維持のために周囲にカバーを取り付けた。

③ カセット駆動部

Fig. 4.2.2(1)に示すように、操作室側でカセットフィルムを装填した後、撮影ボタンを押すことにより、ケーブル壁面の搬入口開、カセット搬入、搬入口閉、カセット前進、シャッタ横スライド、カセット横スライド、撮影、カセット戻り、シャッタ戻り、カセット後退、搬入口開、カセット搬出、搬入口閉という一連の動作が自動的に約 90 秒で行われる設計とした。

④ X 線発生部

操作室側に設置した高電圧発生機、制御機及び操作盤の切替えで、ケーブル内 A、B 2 台の管球の制御及び操作を行う。なお、最高使用管電圧は、150 KVp 最高使用管電流は、320 mA である。

⑤ フィルム観察装置

フィルムの観察は実体顕微鏡の他、テレビカメラでも行える。また、その映像をハードコピーすることも可能となるように工夫がなされている。

4.2.1.5 得られた成果

完成した同装置を、Fig. 4.2.2(2)に示す。

同装置完成後、NSRR 実験カプセルを用いてコールドモックアップ試験を実施した。その結果、本装置によってカプセル内の燃料ピンの状態を確認することができた。すなわち、所期の目的が達成できた。Fig. 4.2.2(3)は、約 100 cal/s fuel でパルス照射した PWR 型の予備照射済燃料の健全性を調べるために撮影した X 線写真である。その様にコールドモックアップのみならず、実際の燃料棒に対しても、健全性の確認が十分になされることが立証された。

4.2.2 実験カプセル解体装置（飯田）

4.2.2.1 目的

本実験カプセル解体装置は、NSRR でパルス照射実験を行った予備照射済燃料を実験カプセルから取出すため、外部カプセルと内部カプセルを解体する装置である。JMTR ホットラボから搬入される NSRR 標準型予備照射済燃料もホットラボを経由して NSRR に運搬される。このための収納容器の組立にも本装置を利用することが可能となっている。

本装置の基本的な設計条件としては

- ① 長期に亘って使用するため故障の少ない堅牢な構造とし、長期間安定に作動すること、
- ② 高放射線下で使用するため、放射線に対して耐久性を持った装置であること、
- ③ 遠隔操作性に優れていること、
- ④ カプセル解体時の反力や地震力に十分耐える構造であること、

等を考慮した。

4.2.2.2 装置の概要

実験カプセル解体装置は、次の機器から構成される。

- ① ボルト脱着装置
- ② ナットランナ
- ③ 実験カプセル固定装置
- ④ 架台
- ⑤ 制御装置
- ⑥ 配線用遮蔽プラグ

装置の基本構造を Fig. 4.2.3(1)に示す。

4.2.2.3 装置の設計製作

① ボルト脱着装置

本装置は、先端にナットランナを取り付け、実験カプセル固定装置に固定した実験カプセルの締め付けボルト、吊りロッド、計装プラグナット等を予め設定した座標位置において確実に脱着、締め付けるための装置である。装置の基本形は三つの自由度を有する既成のスカラ型ロボットであり、 θ_1 軸駆動部、第 1 アーム、 θ_2 軸駆動部、第 2 アーム及び昇降ユニットから成る。 θ_1 、 θ_2 駆動部は、第 1 アーム及び第 2 アームを旋回させるものである。これらは耐放射線性を考慮に入れ、AC サーボモータとレザルバの組合せを採用することにより、精度の良い位置合わせが可能である。昇降ユニットは、エアシリングダにより、ナットランナを昇降させるもので

ある。

② ナットランナ

ナットランナは、実験カプセルのボルト等の脱着・締め付けに用い、先端に六角レンチ等のアタッチメントをセットする。駆動部はDCモータと減速機から成り、先端のアタッチメントを時計方向又は反時計方向に回転させるとともに、設定したトルク又は時間によって停止する。アタッチメントには、ボルト等のサイズ、取り付け位置によりM14(長尺)、M14(短尺)、M16及びソケット用の種類が準備されている。

③ 実験カプセル固定装置

本装置は、ボルト脱着装置による実験カプセルのボルト等の脱着、締め付けの際に実験カプセルを固定するための装置である。ボルトの脱着等を目視確認しやすくするため、精度の良い位置合わせと回転機構を有する。回転機構は、耐放射線性と精度の良い位置合わせを考慮し、ボルト脱着装置と同様にACサーボモータとレゾルバの組合せを採用し、停止時にはサーボロック機能により回転を防止する。実験用外部カプセルは、カプセル上部の3箇所に設けられたカプセル固定溝で支持、固定し、内部カプセルと燃料収納容器は、底部に固定溝を有する内部カプセル固定治具により支持、固定する。

④ 架台

架台は、装置据付架台、実験カプセル搬入架台、実験カプセル保管架台から成る。架台にはそれぞれレベル調整ができる4本の脚を設け、上面板は鏡面仕上げを施した。実験カプセル搬入架台には、NSRRから運搬される実験カプセルを保管するための容器を設けた。

⑤ 制御装置

本装置は、ケーブ前面の操作室に設置し、ボルト脱着装置、ナットランナ及び実験カプセル固定装置の電源供給や、それらの運転制御、動作表示等を集中的に行うものである。

⑥ 配線用遮蔽プラグ

配線用遮蔽プラグは、ケーブ内の装置と操作室の制御装置間の動力、信号及び圧空を中継して接続するもので、2本から成る。動力用遮蔽プラグには、モータ等への動力ケーブルと、昇降ユニットへの圧空パイプを、信号用遮蔽プラグにはレゾルバ等への信号ケーブルを埋め込んだ。遮蔽体には鉛とシリコン樹脂の混合物を使用した。

4.2.2.4 クリーンケーブへの設置

本装置は、先行してCL-1ケーブに設置したX線検査装置に引き続いでCL-2ケーブに設置した。装置据え付け架台の他に、その両側に各々幅1mの実験カプセル搬入架台、実験カプセル保管架台を据え付けた。各々の架台は独立して水平地震力0.36Gに耐えるものであり、レベル調整の上相互に連結した。また天板はSUS304とし、表面を鏡面仕上げ(バフ研磨=800相当)することにより除染を容易にした。

ケーブ内設置状況をFig.4.2.3(2)に示す。

4.2.2.5 得られた成果

実験カプセル解体装置は、1988年にクリーンケーブ内への据え付けが完了した。調整後、模擬実験カプセルを使用して、コールドモックアップテストを行い、使用上大きな問題のないことを確認した。このときの模擬実験カプセルの解体の様子をFig.4.2.3(2)に示す。この過程でカプセ

ル解体の詳細なマニュアルを整備するとともに、解体時に必要な治具について検討した。現在(1990.3)までに、実際にパルス照射した予備照射燃料棒の入った実験カプセル6体の解体を実施している。

4.3 燃料棒の寸法測定装置、渦電流探傷試験装置及び同装置類アダプタの製作（黒羽根）

4.3.1 燃料棒の寸法測定装置

4.3.1.1 目的

パルス照射された予備照射済燃料棒の被覆管は、燃料ペレットから引張応力を受ける他、被覆管自身が高温化されるため、きわめて複雑な寸法形状を呈することがある。パルス照射後の燃料棒形状寸法を測定し、そのデータを燃料棒の健全性研究に資するとともにRIA時の燃料挙動の評価研究にも資するため、同測定装置をホットラボに設置した。

4.3.1.2 寸法測定装置の概要

同装置は、寸法測定のみならず渦電流探傷試験もあわせて実施できるところに特徴がある。後者については、次節で記述する。

寸法測定は、He-Neレーザ光を燃料棒にあびせ、それより得た信号を電気的に処理して外径寸法、曲がり、真直度及び軸方向長さ等を読みとる方式で行われる。レーザ光を使用した主たる理由は、測定対象燃料棒に熱電対等が接合しており、外径がスムーズでないためである。Fig. 4.3.1にこのレーザ光を利用した測定原理の記述がなされている。すなわち、燃料棒の外径をD(mm)、モータの回転速度をn(rev/s)、コリメータレンズ(Fθレンズ)の焦点距離をF(mm)、計測用クロックパルスの周波数をf(Hz)とする。レーザ光は、回転ミラーにあたったのち、コリメータレンズから平行光線となって直進するが、燃料棒の存在によってある時間間隔Δt(sec)だけ遮られる。

この時間Δtに対応してパルス数N(個)が計測されたとすれば、

$$\Delta t = N/f \quad (4.3.1)$$

となる。走査ビームの速度V(mm/s)は、回転するポリゴンミラーでの反射を考慮して

$$V = 2\pi n \cdot F \quad (4.3.2)$$

となる。従って、燃料棒の外径Dは

$$\begin{aligned} D &= V \cdot \Delta t \\ &= 2\pi n \cdot F \cdot N/f \end{aligned}$$

で求められる。

実際の測定では、Nを計測してDを求めている。Fig. 4.3.2は、寸法測定装置の構成を示している。すなわち、同装置は、検査部機構、制御部及びデータ処理部から構成されており、設計、製作にあっては、耐放射性特性の良い材料の使用及び必要な遮蔽設備が加味されている。また、主要な測定条件は、以下のとおりである。

測定器：レーザスキャンマイクロメータ（LSM-1610 E型）

測定精度：外径： $\pm 0.005\text{ mm}$

曲がり： $\pm 0.05\text{ mm}$

長さ： $\pm 0.05\text{ mm}$

同装置は、1988年9月にホットラボに設置された。

4.3.1.3 得られた成果

NSRR にてパルス照射された予備照射済燃料棒に対し、同装置を用いた寸法測定等はすでに5回（1990.2現在）実施されている。

Fig. 4.3.3 は、得られた成果例である。すなわち、約 100 cal/g fuel でパルス照射された予備照射済の PWR 燃料（集合体平均燃焼度約 35 MWd/kgU）の外径プロフィールである。この図から、例えば、有効発熱長部は比較的滑らかな形状であること、また、その中央部 16.6 mm の範囲内で、熱電対（T/C）をとりつけるために削りとった最大深さ 0.035 mm の外面傷がついていること等が明らかにされた。

このプロフィールデータとパルス前のプロフィールデータとの相互比較により、パルス照射が燃料棒の直径に与えた影響についても考慮がなされている。

4.3.2 涡電流探傷試験装置

4.3.2.1 目的

NSRR を用いた未照射燃料棒によるパルス照射実験では、これまでに 2 種類の破損モードが発見されている^(4.3.2-1)。すなわち、燃料棒の加圧量が大きいとき ($< 0.6\text{ MPa}$) の被覆管の溶融脆化による破損及び燃料棒の加圧量が大きいとき ($> 0.6\text{ MPa}$) の被覆管のふくれによる破裂破損である。

一方、予備照射済燃料による NSRR パルス照射実験では、従来からの破損モードに加え、燃料ペレットとジルカロイ被覆管が接触し、被覆管が引張応力を受ける、すなわち、力学的相互作用（Pellet-Cladding Mechanical Interaction, 以下 PCMI）に起因する破損も考えられている。

この PCMI 破損では、極めて小さなタイトな被覆割れが、被覆管の内面から外面に向かって進行すると考えられる。予備照射済燃料のパルス後 PIE では、この割れの存在を非破壊的に探傷できればそれ以後の検査が非常に容易になる。渦電流探傷試験（Eddy Current Testing, 以下 ECT と略す。）装置は、この PCMI 型の割れを非破壊的にいち早く検出するのに、最も効率が良い装置である。

4.3.2.2 ECT 装置の概要

Fig. 4.3.2 に示した様に、ECT 装置は寸法測定装置に ECT 用の貫通（又はプローブ）コイルを付設したものである。ECT 時には、燃料棒が貫通コイル（例、PWR 型燃料棒では内径約 11.5 mm）中を通過していく方法がとられている。装置の構造等は前節に記述した通りであるので、ここでは説明を省略する。

また、この装置の製作と同時に、較正試験用の標準傷入り未照射ジルカロイ被覆管を準備した。これは、あらかじめ正体の知れた形状と大きさを持つ傷を作製しておき、ECT 装置を較正するためのものである。そのデータに基づいて試験燃料棒から得られた寸法形状不明のデータを分析

し、未知の傷の形状と大きさについて同定がなされた。この標準傷入り被覆管については、第 4.4 節にて詳細に記述する。

4.3.2.3 基本測定原理

渦電流探傷試験の測定原理は、対象物体の形状に対応して変化する磁束の変化を、起電力の形で捕えて解析・評価するものである。すなわち、起電力を v とすれば、

$$v = -N \cdot d\Phi/dt \quad (4.3.3)$$

となる。ここに N はコイルの巻数、 Φ は磁束、 t は時間である。

この起電力 v は

$$\begin{aligned} v &= V_m \sin(\omega t + \phi) \\ &= (V_m \cos \phi) \sin \omega t + (V_m \sin \phi) \cos \omega t \end{aligned} \quad (4.3.4)$$

となる。ここに V_m は振幅、 ω は $2\pi f$ (f は周波数)、 ϕ は位相角である。

このとき、渦電流 I_m は、 Z をインピーダンス、 R を直流抵抗、 L をリアクタンス、 C をコンダクタンスとして

$$\begin{aligned} I_m &= V_m/Z \\ &= V_m / \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2} \end{aligned} \quad (4.3.5)$$

となる。この式から分かるように、インピーダンスは直流 (resistive) と誘導 (inductive) 成分から構成されるベクトルである。この直交ベクトルが時間又はコイル位置の関数として ECT 試験では表示される。

燃料棒に欠陥（例えば、被覆管表面の切り欠き傷）があれば、位相角 Φ (Phase angle) に応答があらわれる。一方、振幅 V_m (signal amplitude) は、欠陥寸法の大小に応答する。

Φ 及び V_m は試験に用いた周波数 f やコイルの型、ECT のシステム等にも依存するのが知られている。これらに関する詳細は文献^(4.3.2.2)を参照されたい。

本装置では、以下の条件にて ECT を実施した。

装 置：MIZ-18 (米国 ZETEC 社製)

コ イ ル：貫通型コイル (11.5 mmφ, PWR 型燃料棒の場合)

試験周波数：400 kHz

位 相 角 度：30°

ゲ イ ン：-4 dB

探 傷 速 度：30 mm/sec

4.3.2.4 得られた成果

NSRR を用いた予備照射済燃料棒のパルス照射は、1989 年から開始されている。これまでに ECT による燃料棒傷の探傷を 5 回行った。

Fig. 4.3.4 は、得られた結果例である。すなわち、周波数 400 kHz、位相 30° の状態で、PWR 型燃料棒に対し、寸法測定と ECT を実施したものである。図中には、測定対象全域にわたる水平成分(a)と垂直成分(b)が表示されている。このうち、*印をつけた位置（すなわち、燃料棒の頂部側

に設けたゼロ基準位置から 55 mm にある位置)付近での水平及び垂直成分がそれぞれ(a)' 及び(b)'として示され、その合成ベクトル図が(c)として示されている。

この位置は、Fig. 4.3.3 に示したように、熱電対を取付けるため、意図的に燃料被覆管の外面を削りとった位置である。すなわち、直径プロフィールで観察された外面が ECT でも検出・再現されている。

この傷の型は、光学的顕微鏡による観察結果によれば、軸方向に長い流線形のひっかき傷であり、その最大寸法は長さ約 16.6 mm, 幅 1 mm, 深さ 0.035 mm であった。なお、このような傷は、パルス照射によって生ずるとは考え難かったので、較正試験用の標準傷入り被覆管では考慮されていなかった。しかし、予備照射済燃料のパルス実験では、この熱電対取付けによるひっかき傷が恒常的につく可能性が高いので、類似ひっかき傷をつけた標準管を別途準備した。それを Fig. 4.3.5 に示す。この標準管に対する ECT の結果を Fig. 4.3.6 に示す。これから分かるように、Fig. 4.3.4 にてすでに観られた(c)に対応する傷が再現された。すなわち、パルス照射後の照射済燃料の熱電対用ひっかき傷は、ECT により他の傷と分離測定することが可能となった。

4.3.3 湍電流探傷試験用アダプタの製作

4.3.3.1 目 的

予備照射済燃料は、詳しく言うと形状の異なる種類の燃料棒 (BWR: 2 タイプ, PWR: 3 タイプ) がある。すなわち、BWR 型では、燃料棒外径寸法が 14.30 mm の敦賀燃料 (旧 7 × 7 型 BWR) 及び燃料棒外径寸法が、12.26 mm のイタリア型改良燃料 (8 × 8 型 BWR) がある。一方、PWR 型では外径寸法が 10.72 mm の美浜燃料、玄海燃料及び JMTR 予備照射燃料がある。これらについては、燃料棒寸法が上下の端栓部や有効発熱長領域で異っている。このため遠隔操作で容易に試料セットが行えるよう、まず燃料棒底部側に、アダプタを取付けて全長を統一した。統いて、ワークガイドを介してスムーズに上部チャックで燃料がくわえられるような構造とした。これら燃料の形状とアダプタの詳細図を Fig. 4.3.7 に示す。

4.4 標準傷付ジルカロイ被覆管の製作 (柳澤)

4.4.1 製作の目的

炉管理ホットラボに ECT (湍電流探傷試験) 装置を設置する必要が生じた。この ECT 装置は、燃料棒 (主としてジルカロイ被覆管) が照射されたときに生じた外径異状を、湍電流による磁束の乱れに反映し、更にブリッジ回路に生じている不均衡を電気的に検出することによって検知し、傷のそれぞれに対応した振幅と位相のデータを得るものである。従って、ECT 装置より得られたデータは相対測定データであり、これを絶対尺度に直すにはあらかじめ正体の知れた傷 (標準傷) による較正 (振幅と位相の固定) を実施する必要がある。

また、検出効率を向上させるのに最も良い方法は、ECT にかける被試験体の寸法仕様と較正用試験体の寸法仕様とがなるべく近いもの (特に燃料棒の直径値が近いもの) を用いることである。これは、仕様差がそのまま誤差精度に大きく影響してくるためである。この場合、標準傷の種類が多様でその形状や大きさがあらかじめ詳細に判明しているのが最も望ましい^(4.4-1, 4.4-2)。

4.2.2 製作の方法と結果

NSRR を利用した予備照射済燃料のパルス照射実験で用いる燃料棒は、ECT の見地から大別すると 3 種類になる。すなわち、(a)旧 7 × 7 型 BWR の敦賀燃料（被覆管外径 14.3 mm, 被覆管肉厚 0.81 mm, オートクレーブ材）、(b)14 × 14 型 PWR の玄海燃料、美浜燃料及び JMTR 燃料（二者とも被覆管外径は 10.72 mm と共通だが、肉厚は玄海と JMTR 燃料が 0.62 mm, 美浜燃料が 0.57 mm であり、いずれも非オークレーブ材）及び(c)8 × 8 型 BWR のアンサルド燃料（被覆材外径 12.26 mm, 被覆肉厚 0.81 mm, 非オークレーブ材），の 3 種類である。

これに対して、準備した較正用試料と予備照射済燃料の仕様比較を行うと、Table 4.4-1 のようになる。いずれの較正用供試材も、同表から分かるように予備照射済燃料に極めて近い仕様となっている。

これら 3 種類の較正用被覆管は、予備照射済燃料実験の PIE を相当する JMTR ホットラボ、実用燃料試験室、及び研究炉管理部ホットラボに支給された。このうち、渦電流探傷試験装置の機器上の制約から、前 2 者については全長を 460 mm にし、後者については全長を 330 mm とした。Fig. 4.4-1 は、PWR 型供試被覆材（長さ 460 mm）の、模式図である。

製作後の仕上がり寸法調査については、Table 4.4-2 に示す方法にて実施した。また、詳細な検査結果は、附録 2 に収録した。結果は、各々較正用供試間で僅かなバラツキはあるものの、極めて満足のいくものであった。

4.4.3 成 果

Photo. 4.4-1 は、作製に成功した 460 mm 長の較正用被覆材の外観写真である。このうち、PWR 型燃料被覆管（Table 4.4-1 中、G 型と称するもの）に作製した 15 μm リッジングの ECT 結果を、Fig. 4.4-2 に示す。図中、(a) 及び(b) は燃料被覆管全長に関する ECT 測定データのうち、水平 (resistive) 及び垂直 (inductive) 成分である。このうち、(a) に関しては * 記号の位置、また、(b) に関しては一記号の位置（ともに頂部側に設定した基点から 65 mm の位置）での拡大図を、(a)' 及び(b)' として示した。図(c) はそれら(a)' と(b)' の合成ベクトル図である。

(c) から、リッジングの合成ベクトル図は、ほとんど第 I 及び第 III 象限に限定されて表示されるパターンであることが分かる。本実験システムでは、図(c)のパターンでリッジングが認識されたが、システムが異なるとこのパターンも少し異なることも判明した。例えば、岩井^(4.4-1) らの報告書では、同じようなリッジングが第 III 及び第 IV 象限に現れている。

4.5 ガンマスキャニング装置の製作（伊藤）

4.5.1 目 的

燃料棒は、予備照射の段階で軸方向に余弦曲線形状の出力（発熱）分布を持つ事が多い。この不均一な発熱分布は、燃料棒の炉内挙動、特に FP それに大きな影響を与える。この発熱部分は、例えば、炉停止時に行われるシャフリングによって、制御棒の近くに置かれたりすると、その影響を大きく受ける場合が多い。この発熱分布は燃料挙動上燃料性能に大きくフィードバックされるので、これに関する詳細なデータが必要である。

NSRR パルス実験では、更に、NSRR でのパルス照射による発熱分布の変動が疊重されるので、燃料棒の履歴は一層複雑になる。燃料棒に生じるこれら複雑な履歴を明らかにし、燃料ふるまい解析の一助となるのが、ガンマスキャニング試験から得られるデータである。この装置を用いれば、比較的半減期の短い核種については、例えば、 $^{95}\text{Zr}-^{95}\text{Nb}$ の挙動、また、比較的半減期の長い核種については、例えば、 ^{137}Cs の挙動を調べる事により、燃料棒の軸方向の履歴が容易に明らかにされると思われる。

本装置は、NSRR でパルス照射された予備照射済燃料棒の出力履歴を明らかにし、また、過渡/事故予測解析計算コード FPRETAIN 等のモデリングの改良と検証に必要な、精度のよい実験データの入手を目指して作製されたものである。

4.5.2 装置の概要

本装置の基本構造は、Fig. 4.5-1 に示すとおりである。予備照射済燃料のガンマスキャニングを実施するに際し、既設のガンマスキャニング装置に対し、以下の構成部分に着目した改良を施した。

- ① スキャナ
- ② ガンマ線スペクトル測定装置
- ③ 鉛コリメータ
- ④ ストレージケーブルポート遮蔽シャッタ

以下では、ガンマスキャニング装置に加えられた改良事項を中心に、同装置の概要を説明する。

① スキャナ

既設のスキャナは実用炉燃料の寸法に合致して設計されたもので、燃料棒の体系に変化があると、それに追従しがたいものとなっていた。このため、従来構造のままでは、NSRR でパルス照射された予備照射済燃料の試験を行うことが不可能であった。

NSRR パルス照射後の燃料棒に関しては、PWR 型及び BWR 型燃料の寸法差（直径 10～14 mm、長さ 220 mm～310 mm）に対応して、各試料の中心軸をまず固定し、次に定位置にセットしてスキャンを行う必要があった。このため、V ブロック状の試料支持台を製作し移動ベース上に設置するとともに、試料支持台の片隅にストップを設け試料端が定位置にくるような構造の改良を行った。試料支持台の材質は、放射線の後方散乱による測定への影響を避けるためアルミニウム材を使用した。

また、研究上の要請からガンマ（以下 γ ）線強度分布測定を精度良く行う必要があるため、老朽化したモータの更新及び駆動部の分解点検を実施し、動作を円滑化すると共に、インバータを設置し、スキャンスピードを最小 5 mm/min まで変化させないようにした。

② γ 線スペクトル測定装置

試料の γ 線スペクトル測定は、ガンマスキャニングセル天井に設けたプラグ孔を使用するため、プラグ孔に垂直に設置できるダウンルッキング型の Ge（ゲルマニウム）検出器を整備した。

Ge 検出器は、ホットセル外のサービスエリヤに設置されるため検出器冷却用の液体窒素の管理が困難となる事が予想された。そのため、検出器下部にロードセル型重量計を設置し操作

室の重量表示器により液体窒素残量が確認でき、操作室からも補給も行えるような補給システムに改良した。また、Ge 検出器用の高圧電源、測定システムへ検出器信号を増幅伝達するためのアンプ類の整備も行った。

③ 鉛コリメータ

γ スキャニングにあつたては、試料軸方向の γ 線強度分布を求めるため、鉛コリメータに幅 0.2 mm、長さ 23 mm のスリットを設けた。これは、直径の異なる予備照射済燃料棒全てに対応できる様配慮した結果である。

鉛コリメータには、小径 50 mm、中径 70 mm、大径 99 mm、遮蔽厚 400 mm の段付円柱型でコリメータ外周からの漏洩放射線を遮蔽できる形状とした。併せて、様々に形状の異なる試料であつても、測定時に試料表面とコリメータとの間隔が同一になるよう調整機能を有したコリメータ用プラグを製作し、測定条件の違いからの誤差が混入しないよう配慮した。

また、ガンマスキャニングセル内天井のプラグ孔下部に既設されているコリメータ用遮蔽体のみでは、本装置で扱う高燃焼度燃料に対する遮蔽能力が不足し、精度のよい γ 線強度分布測定ができないことが予測されたため、さらに幅 100 mm、長さ 300 mm、厚さ 100 mm の鉛遮蔽体を増設し遮蔽能力を高めた。

④ ストレージケーブポート遮蔽シャッタ

スキャナへの試料のセットはガンマスキャニングセルから連絡ポートを介して隣接しているストレージケーブルに試料支持台を移動させる方式がとられている。

ストレージケーブルには多数の高線量試料が保管されているので、ポートよりスキャニングセル内に放射線が散乱し、測定データに撮影を及ぼす恐れがあった。これを防止するため、ストレージケーブル側のポートに遮蔽シャッタを設置した。

ポート下半分はスキャナベースによって十分に遮蔽されており、予備調査の結果ストレージケーブルからの放射線の影響はないことが明らかになった。このため、ポート開口部上半分をカバーする厚さ 100 mm の鉛遮蔽体がスキャナベース上面まで下降しポート上部を遮蔽する方式を採用した。

4.5.3 装置の諸性能

(1) γ スキャナ

- スキャナスピード: 5 mm/min ~ 600 mm/min
- 測定可能試料寸法: 最長 450 mm、最大径 20 mm

(2) γ 線スペクトル測定装置

- エネルギー分解能: 2.0 keV (at 1332.5 keV)
- 相対効率 : 25%
- 測定可能エネルギー範囲: 40 keV ~ 3000 keV

4.5.4 得られた成果

NSRR でパルス照射を行った予備照射済燃料に対し、定点ガンマ線スペクトル測定及び軸方向ガンマスキャニング等の試験を実施した。数多くの研究論文^(4.5-1)で紹介されている様に、プレナ

ム部に存在する Kr のアイソトープのうち、 安定核種でかつガスパンクチュアリング等で定量化できるのは、 ^{80}Kr , ^{83}Kr , ^{84}Kr 等である^(4.5-2)。

一方、 準安定核種（半減期が 10.76 年）のものとして、 ^{85}Kr がある。この ^{85}Kr に関しては、 定点ガンマ線スペクトル測定により比破壊的に定量化した量とは良い相関がある事が知られている。すなわち、 従来は破壊試験まで行わなければ判断できなかった FP ガスの放出率当が非破壊的に求められるということであり、 これは実験遂行上、 極めて効率的なデータの採取方法であると考えられる。しかし、 この ^{85}Kr を定量化するためには、 プレナムの押えバネから出る ^{60}Co などの影響（比放射能が強いので ^{85}Kr をマスクしてしまう傾向がある）を排除する必要があり、 実験的に ^{85}Kr をうまく定量化するのはかなり難しいとされて来た。Fig. 4.5 - 2 は、 約 100 cal/g でパルス照射した PWR 型燃料棒の、 プレナムに関する定点ガンマ線スペクトル測定の結果である。

この結果から明らかな様に今回実施した PWR 型燃料棒に対する定点ガンマ線スペクトル測定において、 ^{85}Kr を非破壊的に検出することに成功した。これは、 ガンマスキャニング装置に測定精度の面からいろいろな改良を加えた結果と理解される。得られたデータは、 実施予定のガスパンクチュアリングデータとの相互比較により、 FP ガス放出や燃焼度評価等に効率的に活用されよう。

4.6 FP ガスパンクチュアリング装置の製作（喜多川）

及びモックアップ用燃料棒の製作（黒羽）

4.6.1 目的

予備照射済燃料ペレット中には、 生成 FP に対して約 30% の割合で FP ガスが存在しているとされている。このガスの中には、 ヨウ素の様に腐食環境を形成し、 被覆管の応力腐食割れを誘起する可能性のあるものもいる。一方、 燃料ペレットからの FP ガス放出は、 燃料棒の内圧を上昇させるだけでなく燃料ペレットと被覆管間のギャップコンダクタンスも劣化させ、 最終的に燃料温度を上昇させる可能性がある。燃料温度の上昇は、 燃料健全性の観点からみれば、 好ましい現象ではない。

これから分かるように、 NSRR パルス実験に使用した予備照射済燃料について、 放出 FP ガスの定量化を行うことは、 燃料の健全性評価上極めて重要である。この認識に基づいて、 FP ガスパンクチュアリング装置をホットラボに設置した。

4.6.2 装置の概要

本装置は、

- ① 穿孔装置（パンクチュアリング）
- ② FP ガス捕集装置（FP ガスの捕集と放出量測定を行う）
- ③ ガス分析装置（捕集ガスの分析を行う）

から構成されている。その基本構造を Fig. 4.6 - 1 に示す。

- ① 穿孔装置は、 高真空中に保たれた系内で燃料棒に穿孔ピンを突刺し、 燃料棒内にたまっている FP ガスを放出させる装置であり、 燃料棒を直接取扱うためケーブル内に設置されている。

試験可能な燃料棒寸法は、長さ 10 mm～1000 mm、直径 8 mm～30 mm、被覆管厚最大 1.5 mm (SUS 304) となっている。

- ② 捕集装置は、ケーブルプラグ孔に設けた真空配管を介してケーブル内の穿孔装置と接続されており穿孔後放出ガスを捕集装置の真空系内に拡散させ系内での圧力差から全放出ガス量を求め、更に一部を専用アンプルに捕集するものである。ガス量測定範囲は、0.5 cc～400 cc (精度±5%) 程度である。この装置は、操作室に設置するため、万一の FP ガス漏洩に対する安全対策として、装置全体を負圧に保たれたアクリル製透明ボックス内に内装した。また、真空電磁コック、真空計、真空ポンプ等の操作は、チェック機能を有する小型計算機を介して行い誤操作を防止する。なお、穿孔装置及び捕集装置の真空系は、最高到達真空度 10^{-7} mmHg、リークレート 10^{-5} lusec 程度の真空性能を有している。
- ③ 分析装置は、捕集ガスのガス組成、同位体組成等を分析するためガスクロマトグラフ質量分析計より構成されている。FP ガスの主成分である Kr 及び Xe に関する同位体核種分析を対象に、その質量分析範囲は、m/z: 1～300 のものを使用している。

4.6.3 モックアップ用燃料棒の製作

予備照射済燃料のガスパンクチュアリングに先立ち、未照射被覆管中に、He、Xe 及び Kr をある一定の割合で封入したモックアップ用燃料棒（燃料棒といっても UO_2 ペレットのかわりに、アルミニウム棒が装填されている）を作製した。その概要を Fig. 4.6-2 に示す。この図において、番号①の微小孔から 94.82% He + 1.01% Kr + 4.17% Xe の組成（体積割合）を持つ混合ガスを 2.0 MPa まで加圧充填し、供試材とした。これを用いてガスパンクチュアリングがなされる予定である。

4.7 燃料溶解装置の製作（伊藤）

4.7.1 目的

NSRR でパルス照射した燃料棒の性能を評価する基本的な量の 1 つは、投入発熱量 (Energy Deposition) である。パルス照射は、照射開始から終了まで時間的には約 25 ms (25 / 1000 秒) 程度で終了してしまう極めて短い事象である。従って、通常運転下で用いているような線出力密度 (Linear Power Generation Rate [kW/m]) の概念はなじまない。投入発熱量は、単位燃料重量当たりの投入エネルギー [cal/g fuel] で表示される。このエネルギー表示のうち、分母はパルス実験に用いた燃料の総重量から評価できる。一方、分子は燃料に投入されたエネルギーの積分値を [J・s] であり、原理は以下に記述するが、基本的には燃料中に発生した核分裂生成物 (FP) のエネルギーの評価値を用いている。このエネルギー評価のためには、パルス照射後の燃料ペレットを溶解・希釈する化学的な操作が必要である。本装置は、そのために準備されている。

4.7.2 発熱量評価の基本的考え方

パルス照射された燃料 UO_2 ペレット中の FP 核種 FP_i から単位時間当たり Gr_i の原子が放出されているとする。このとき、パルス照射後におけるガンマ線エネルギーを Er とすれば、次式が成

立する。

$$N_i = \{Gro/Ir \cdot \lambda_i\} \cdot 24 \times 60^2 \quad (4.7.1)$$

ここに、

N_i : 時間 t における核分裂生成物 FP_i の存在量 (atom)

λ_i : FP_i 核種の崩壊定数 (day^{-1})

Ir : エネルギーレベル Er で、1核分裂により放出されたガンマ線数
全 FP_i が核分裂のみで生じたとすれば、全原子数 N_{oi} (atom) は、

$$\begin{aligned} N_{oi} &= N_i \exp(\lambda_i \cdot t) \\ &= \{Gro/Ir \cdot \lambda_i\} (24 \times 60^2) \exp(\lambda_i \cdot t) \end{aligned} \quad (4.7.2)$$

となる。一方、 FP_i が他の核種 FP_j の崩壊系列から生じてきたとすれば、

そのときの全原子数 N_{oj} (atom) は、

$$\begin{aligned} N_{oj} &= N_i \exp(\lambda_i \cdot t) \{\lambda_j / (\lambda_j - \lambda_i)\} \\ &\quad (1 - \exp(\lambda_i - \lambda_j)t)^{-1} \end{aligned} \quad (4.7.3)$$

で与えられる。

ここに λ_i は FP_i 核種の崩壊定数 (day^{-1}) である。

この (4.7.2) 及び (4.7.3) 式から、全核分裂数 (fission/g) は次のようになる。

$$F_i = 100 \times N_{oi} / Y \cdot M$$

または、

$$F_i = 100 \times N_{oi} / Y \cdot M \quad (4.7.4)$$

ここに、

Y : 核分裂収率(%)

M : 測定対象 UO_2 試料片中に含まれる UO_2 の質量数(g)

である。

1回の核分裂において発生するエネルギーを 176.4 MeV (≤ 1 秒) とすれば、パルス照射にて発生した積分出力当りの発熱量 η (cal/g fuel/MWs) は、

$$\eta = F \times 176.4 \times 10^6 \times 1.6022 \times 10^{-19} / 4.186 \times Q \quad (4.7.5)$$

として求められる。

ここに Q は、フィションモニタにより測定された原子炉の積分出力である。また、 F の値は、測定対象とする FP 核種のうち、数種を選定し、5 % 以内の誤差精度を持つものを用いて統計的に求められる値である。

予備照射済燃料を用いた NSRR パルス照射実験では、半減期 68.3 秒で Cs から生ずる ^{140}Ba

($^{140}\text{Cs} \xrightarrow[85.8\text{ s}]{} ^{140}\text{Ba}$) を、測定対象核種に選定している。

4.7.3 装置の概要

燃料棒の一部を試験片として切断し、8 mol 硝酸で溶解した後、一定量に希釀し、その一部を化学分析試料として分取する燃料試験片溶解装置を製作した。同装置の概要を Fig. 4.7-1 に示す。図では、平成元年度に行われた美浜燃料が溶解にかけられている状態を示している。さて、図に示すように、装置架台後部に 1 本のスクリュー軸を設け、数個のナットをネジ込み、ナット上部には核種器具を保持するための支持具となる回転自在の棹付リングが設けられている。これにより溶解、濾過、希釀、攪拌、分取の操作手順に従って、それぞれの各器具を一台の電動ラボジャッキにセットしたホットスターの上で操作することができる。また、使用する機器及び操作は、架台に内装した作業ベンチ (SUS パット) で行い、当試験におけるケーブル内の作業スペースを極力小さくするとともにそれぞれの制御をケーブルプラグを介して、操作室より制御盤で操作可能なようにした。

なお、本装置は、他の照射後試験装置と内装を共にするため、本体を組み込んだ架台の四隅に吊り具を設け、ケーブル内ホイストで移動できるようにした。さらに、電動ラボジャッキ、ホットスター、温度コントローラの電源・信号線や冷却水、排ガス用配管等がマニプレータ操作で容易に着脱できる構造とした。

4.7.4 得られた成果

JMTR でキャップセル照射した NSRR 標準燃料、敦賀炉及び美浜炉で使用した商用炉燃料をそれぞれパルス照射実験に供した後、それらの中央部において、約 2 mm の厚さを持つ輪切り試料を作製し、溶解するのに成功した。溶解試料は、約 1/200 ~ 1/1000 に希釀後、燃焼度分析（第 4.7.2 項の (4.7.5) で示される η 値で求めるための解析）が実施され、最終的な燃料棒の発熱量値決定に至っている。

Table 4.4-1 Specification of pre-irradiated fuel and that of unirradiated standard cladding tube for calibration of eddy current test

予備照射済燃料	渦電流較正試験供試被覆材
(a) old 7×7 BWR型, Zry-2 O. D. = 14.3mm t = 0.81mm オートクレーブ材	(a) T型: Zry-2 O. D. = 14.14mm t = 0.76mm オートクレーブ材
(b) 14×14 PWR型, Zry-4 O. D. = 10.72mm t = 0.62, 0.57mm 非オートクレーブ材	(b) G型: Zry-4 O. D. = 10.72mm t = 0.62mm 非オートクレーブ材
(c) 8×8 BWR型, Zry-2 O. D. = 12.26mm t = 0.81mm 非オートクレーブ材	(c) A型: Zry-2 O. D. = 12.23mm t = 0.70mm 非オートクレーブ材

Table 4.4-2 Artificially made cladding damage with various kinds of scratches

*仕上り寸法検査方法

被覆管に予想される傷 ⁽¹⁾	傷の主要な形成要因	模擬寸法 目標値(㍉)	加工方法	*	製作結果
(1) リッシング	燃料ペレットと被覆材の相互作用(PCHI)による被覆材の永久変形	0.005+0.005 及び -0 0.015+0.005 -0	電子ビーム溶接による ジルカロイの内盛りを利用	(2)	附録4.4-1 「渦電流較正試 験供試被覆材製 造結果データ」 を参照のこと
(2) 外面孔	ピッティング、フレッシング等	0.4φ×0.38(深さ)	放電加工機	(3)	
(3) ホットスポット	濃縮度不均一、厳しい燃料粒けーション	3φ、400°C局部加熱	電子ビーム溶接機のビーム 集束を緩和し、ジルカロイ 管にビームをあてる	(4)	
(4) 軸方向外面スクラッチ	引っかき傷、PCM割れ	0.15~0.20(深さ) 15°~20°(角度)	放電加工	(5)	
(5) 円周方向外面スクラッチ	脆性破損				
(6) 円周方向内面スクラッチ	初期内面割れ				

(注) (1)軸方向の傷位置の測定は、ノギス、スケール等で実施

(2)表面粗さ測定器による円グラフプロット

(3)光学的顯微鏡検査

(4)外面目視、写真測定

(5)電極の形状寸法からの推定値

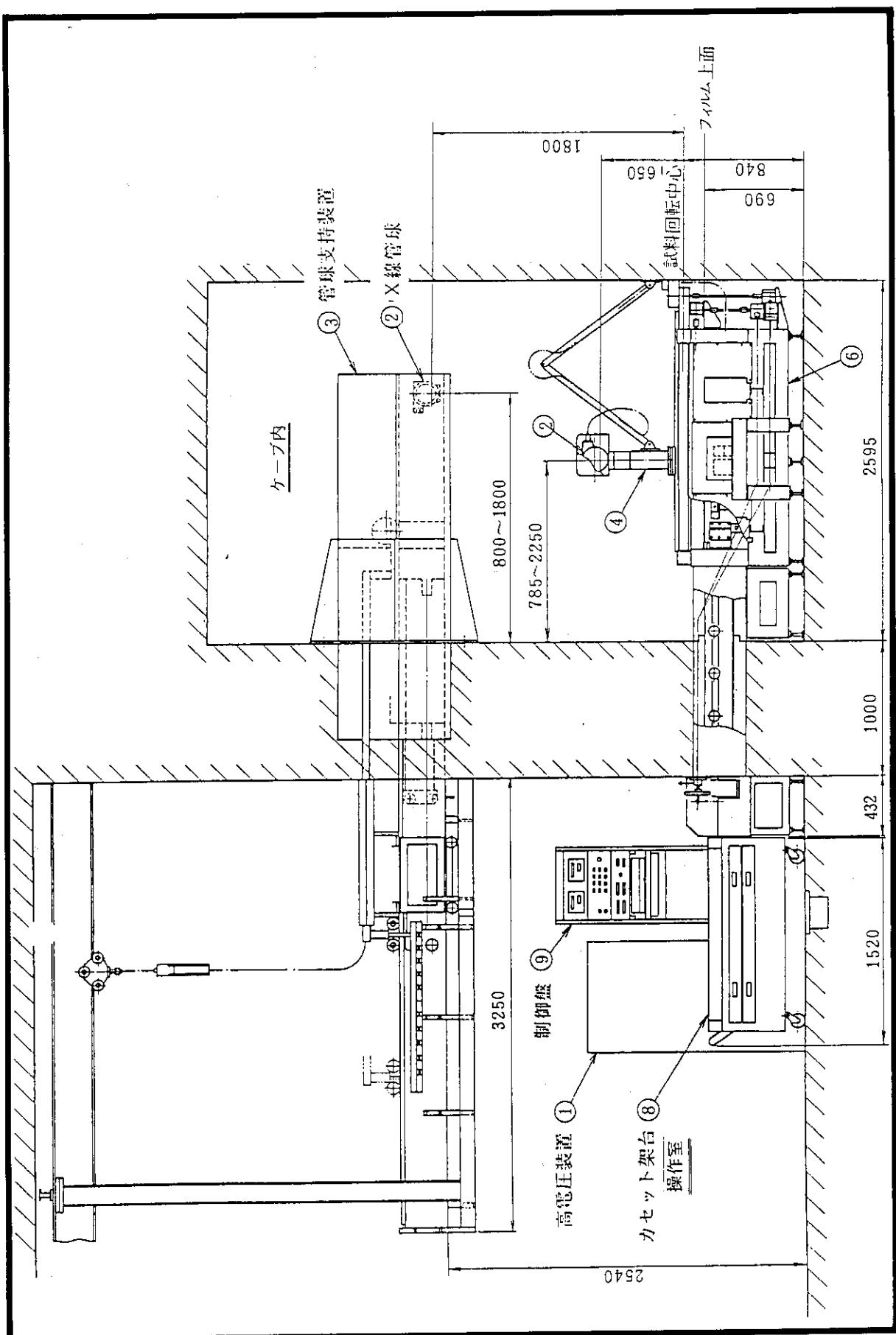


Fig. 4.2-1 X-ray inspection devices for the irradiation capsules

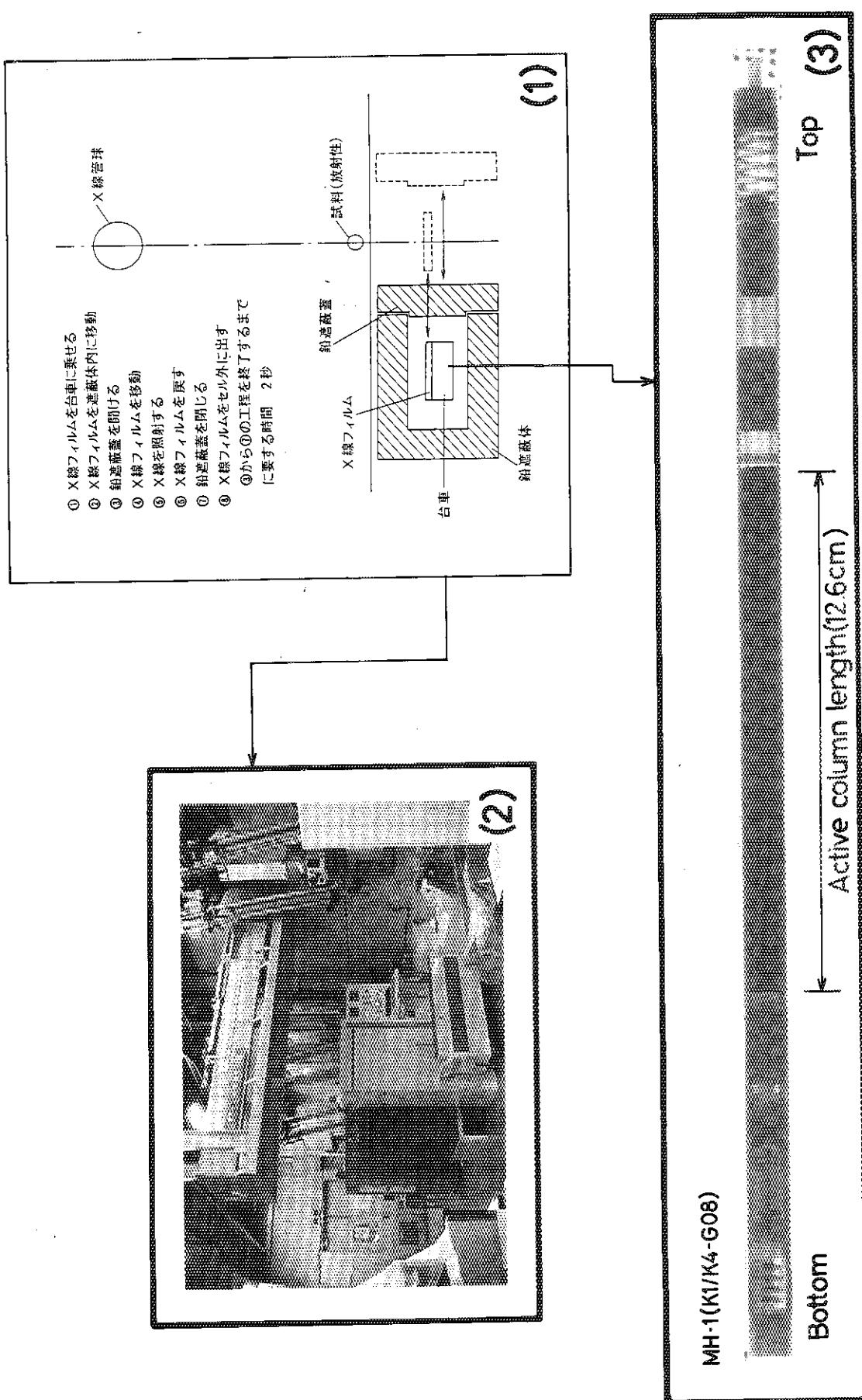


Fig. 4.2-2 (1) Procedures to perform X-ray inspection,
 (2) Outerview of X-ray inspection apparatus installed in the Hot-laboratory,
 (3) Result of X-ray inspection made on the pulse irradiated PWR fuel at approximately 80 cal/g fuel:
 No sign of failure indication was made.

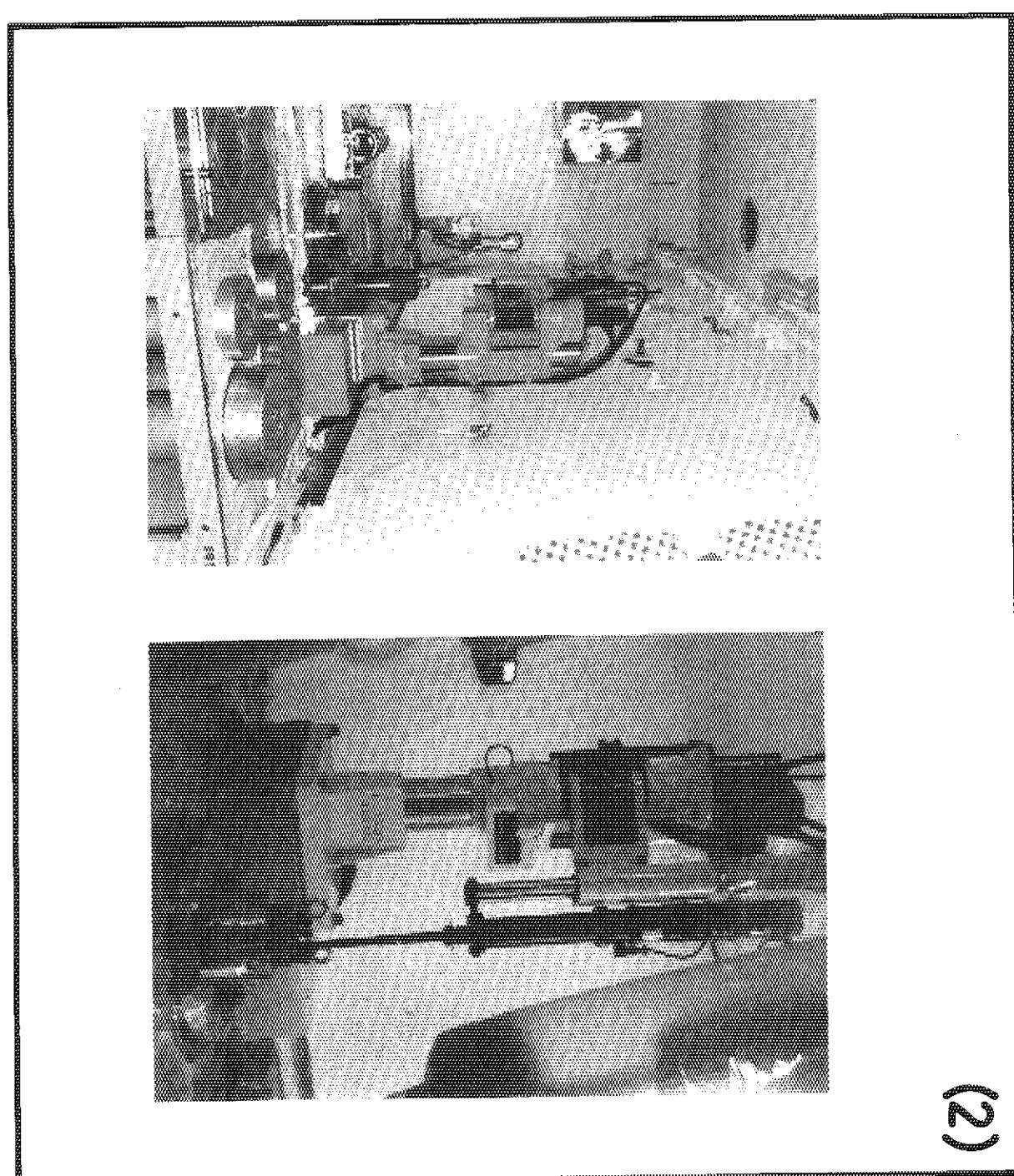
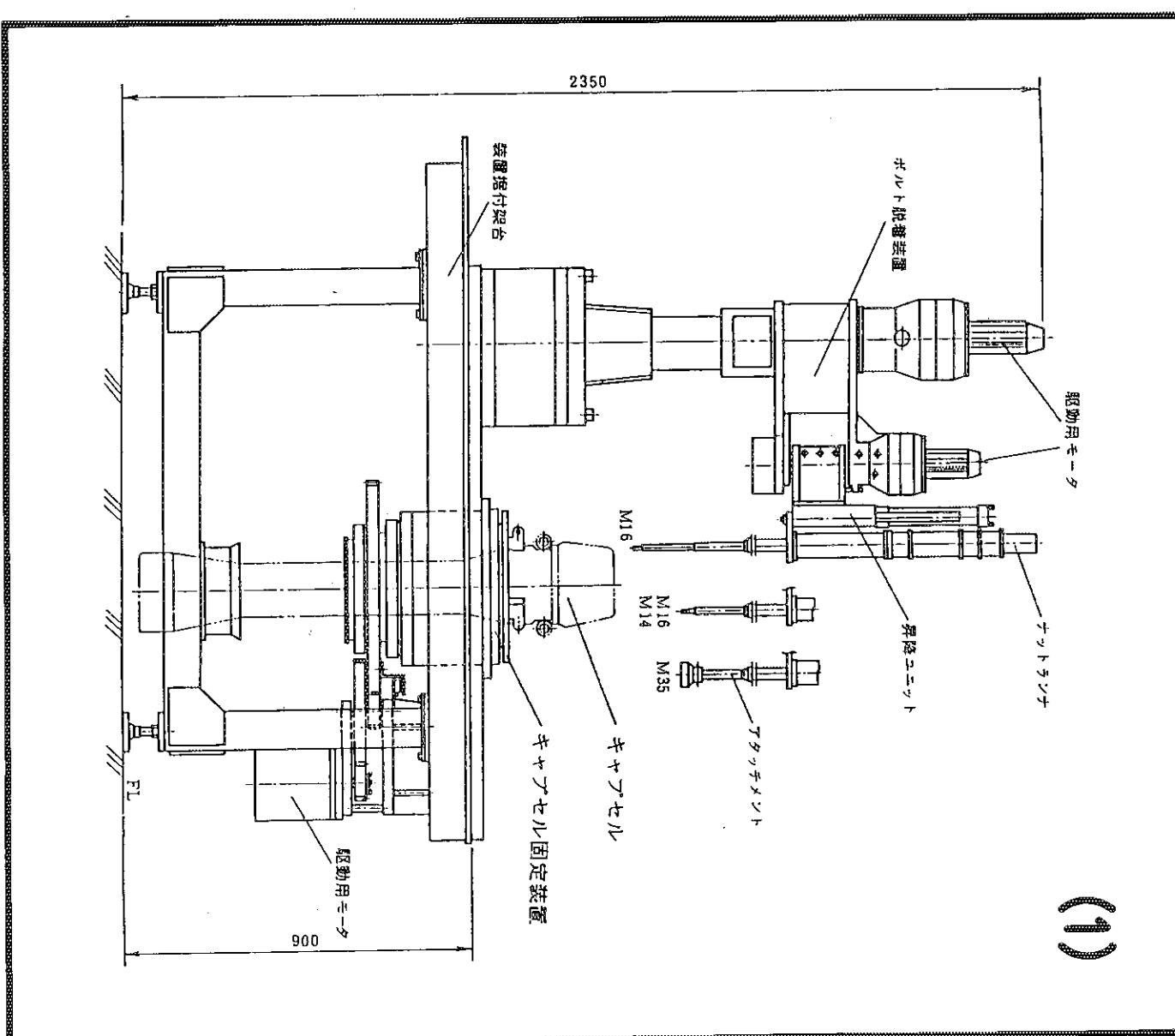


Fig. 4.2-3 (1) Schematic representation of the capsule disassembling device installed in hot cell inside
 (2) Outerview of the capsule disassembling device (left) and its schematic (right)

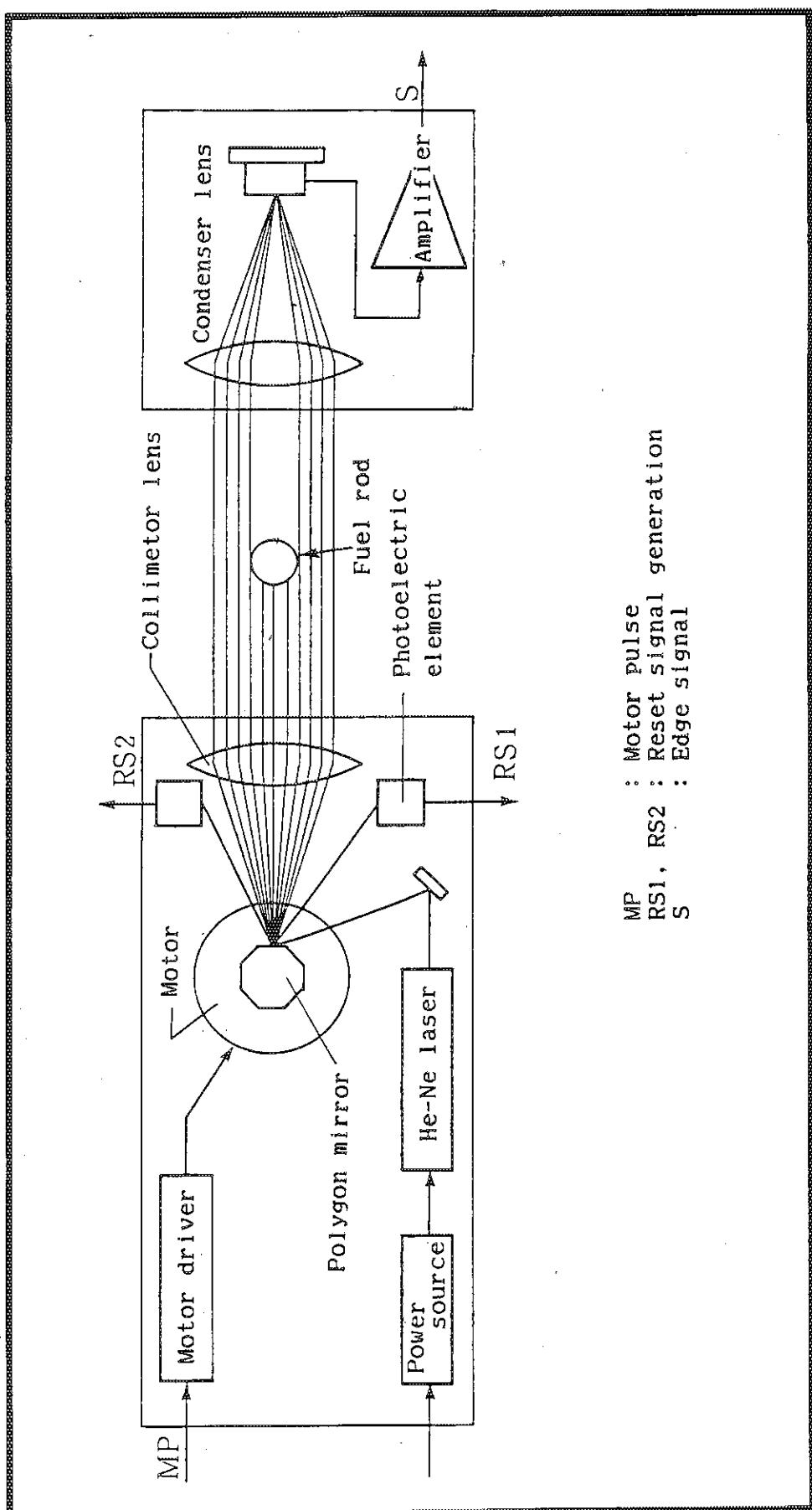


Fig. 4.3-1 Measuring system used in the laser scanning micrometer

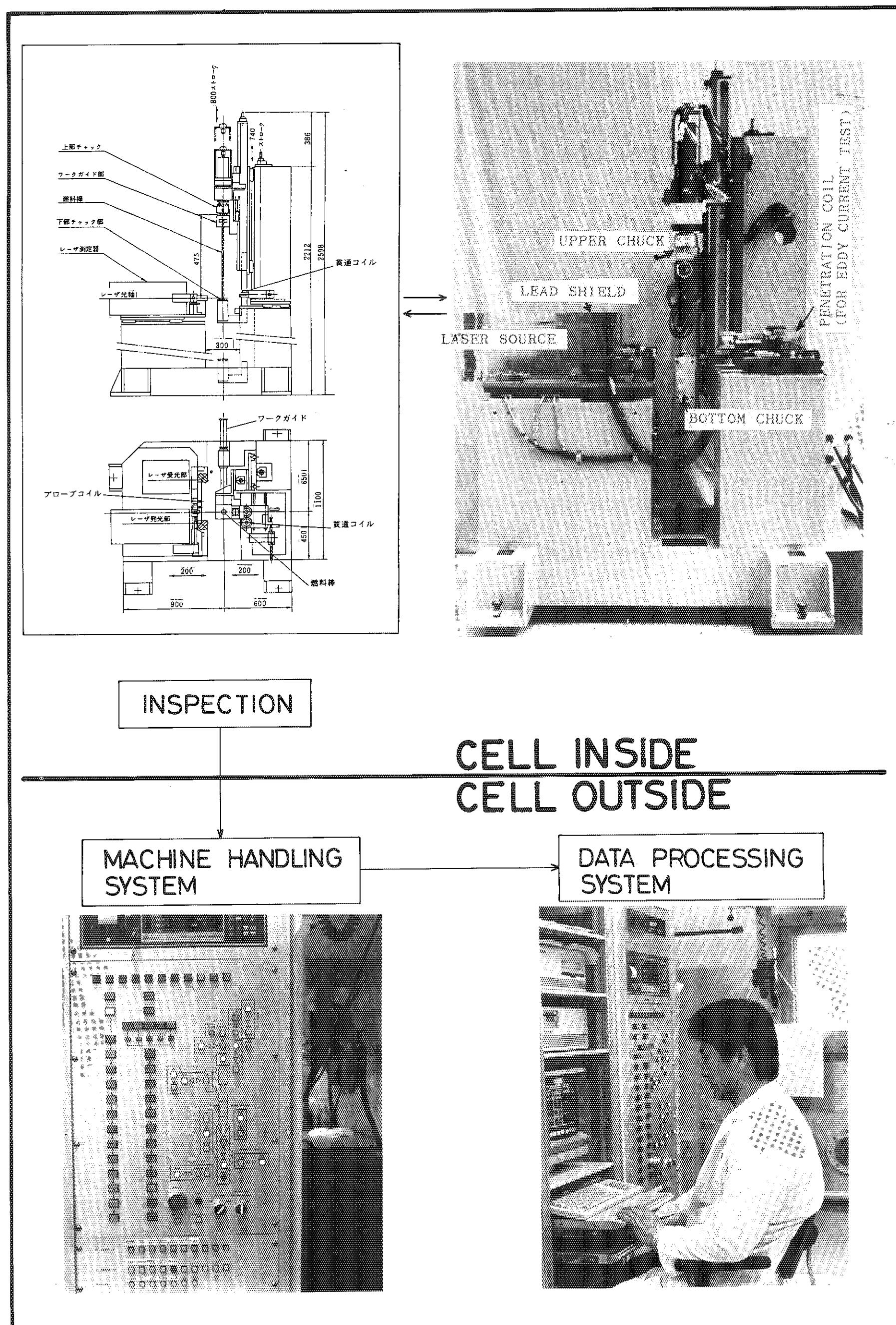


Fig. 4.3-2 Apparatus useful both for measuring fuel rod diameter profile and for eddy current inspection

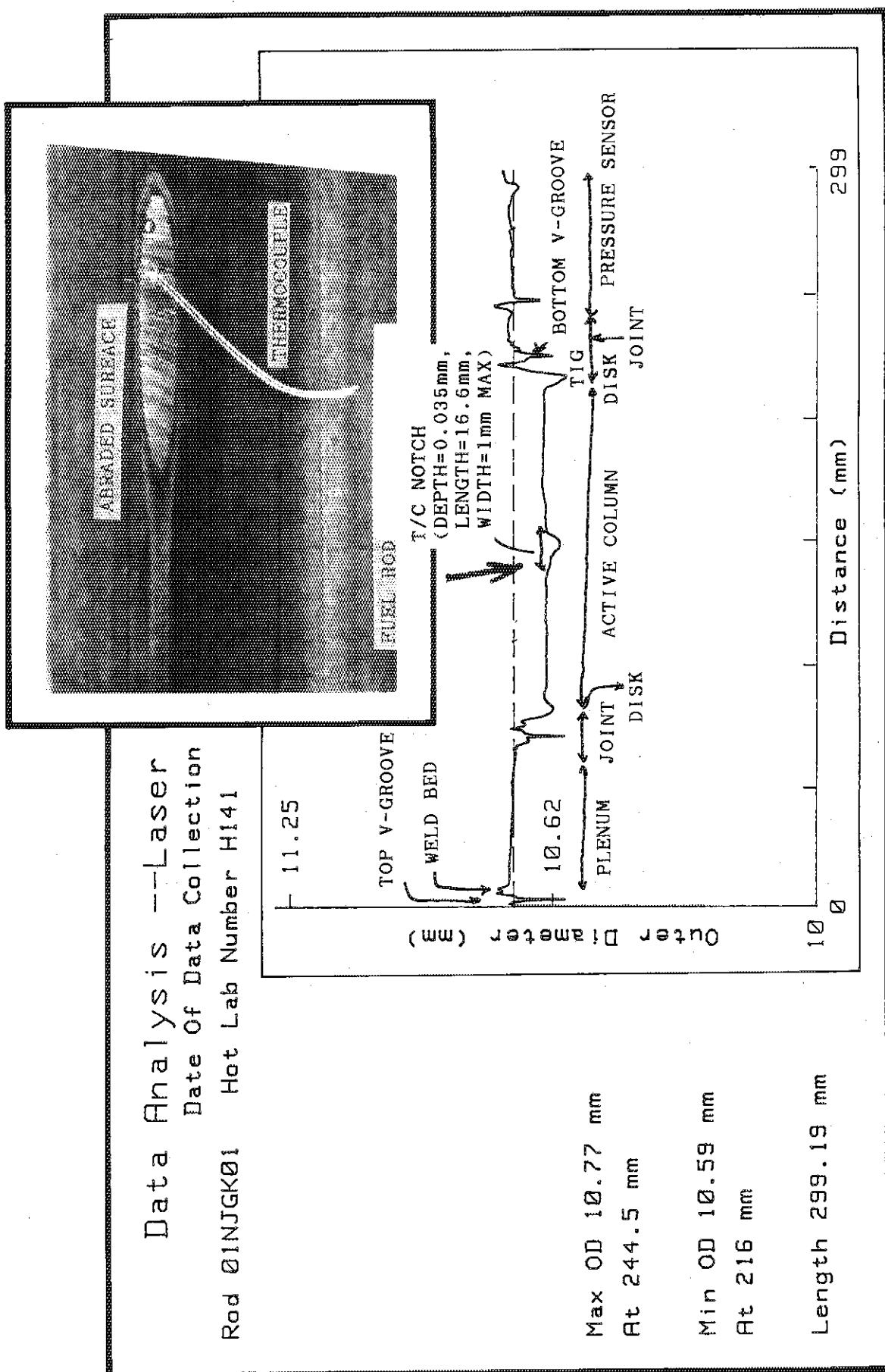


Fig. 4.3-3 Measured diameter profiles of the pulse irradiated PWR type fuel (accumulated burn-up before pulse was 35 Mwd/kgU)

Data Analysis --Eddy Current Bobbin Data
 Date of Data Collection: 11 Dec 1989 16:09:21
 Rod Lab H141
 Rod 01NJGK01

JAERI-M 90-091

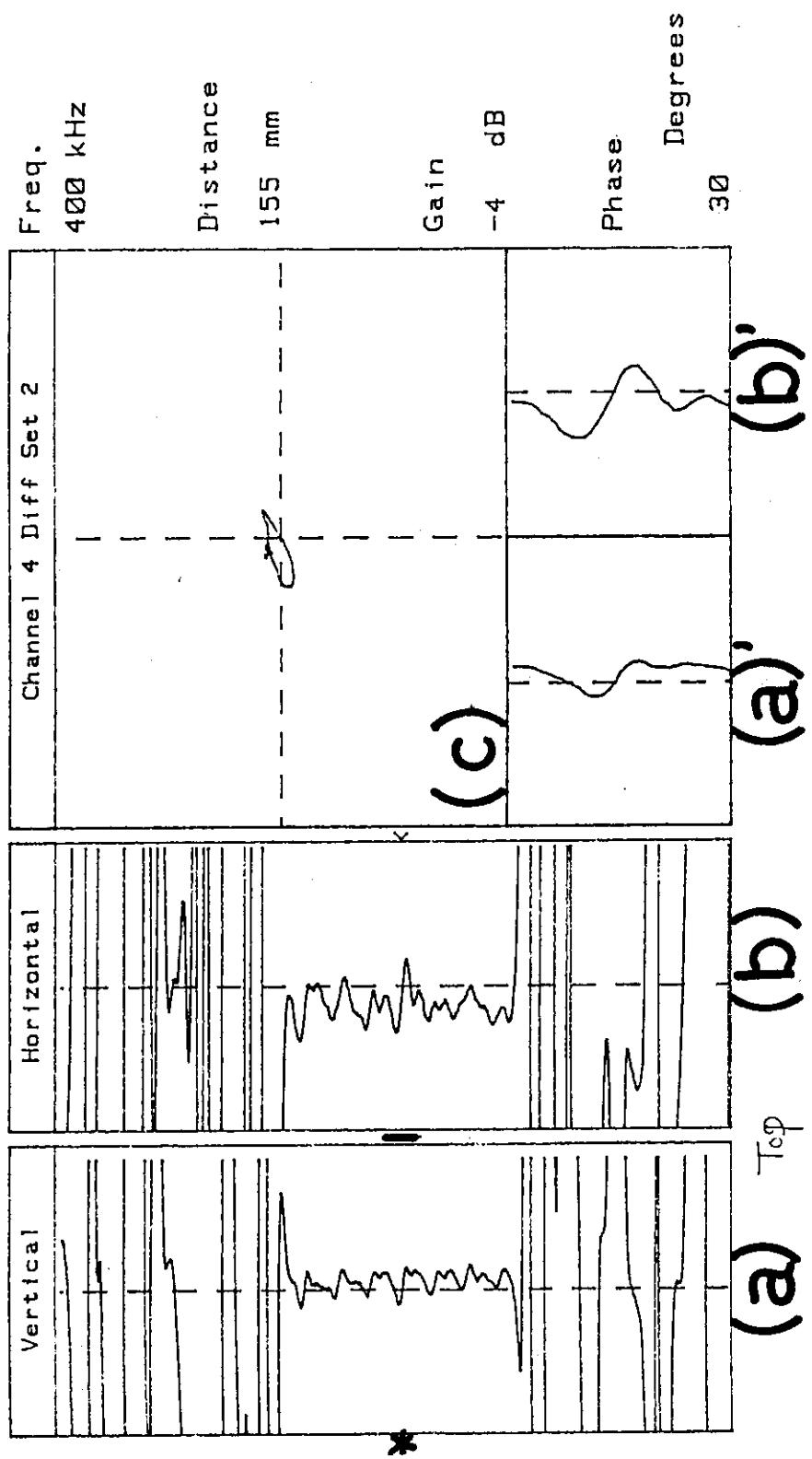


Fig. 4.3-4 Results of the pulsed eddy current test on the irradiated PWR type fuel (100 cal/g fuel energy deposition at burn-up of 35 MWd/kgU) where (a)', and (b)', are magnification of (a) and (b) at the locations shown with notations (*) and (-), respectively.

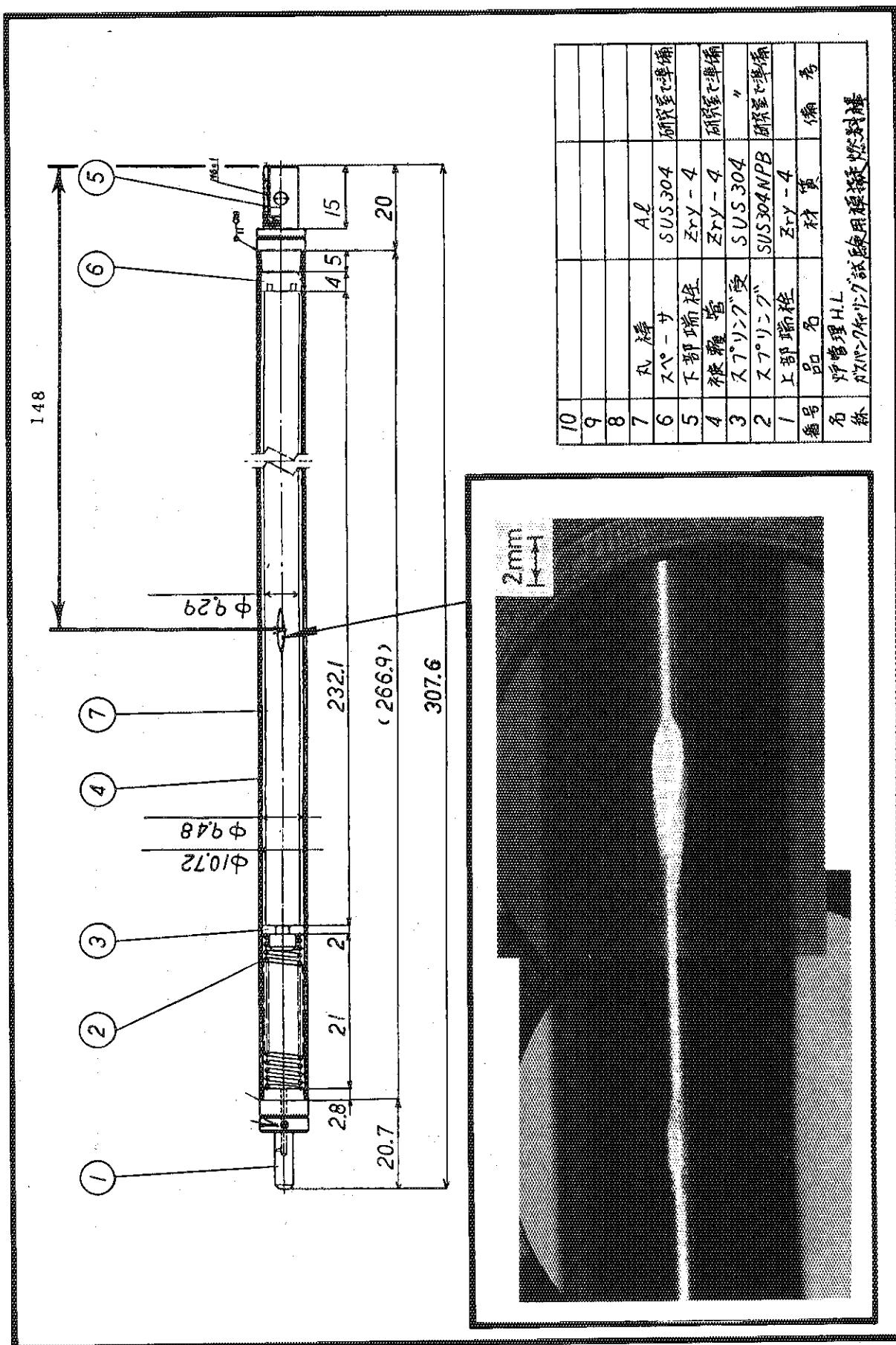


Fig. 4.3-5 Artificially scratched PWR type cladding surface for the calibration of the eddy current apparatus

Data Analysis --Eddy Current Bobbin Data
 Date Of Data Collection: 13 Mar 1990 14:33:55
 Rod MH2SUMPLE Hot Lab

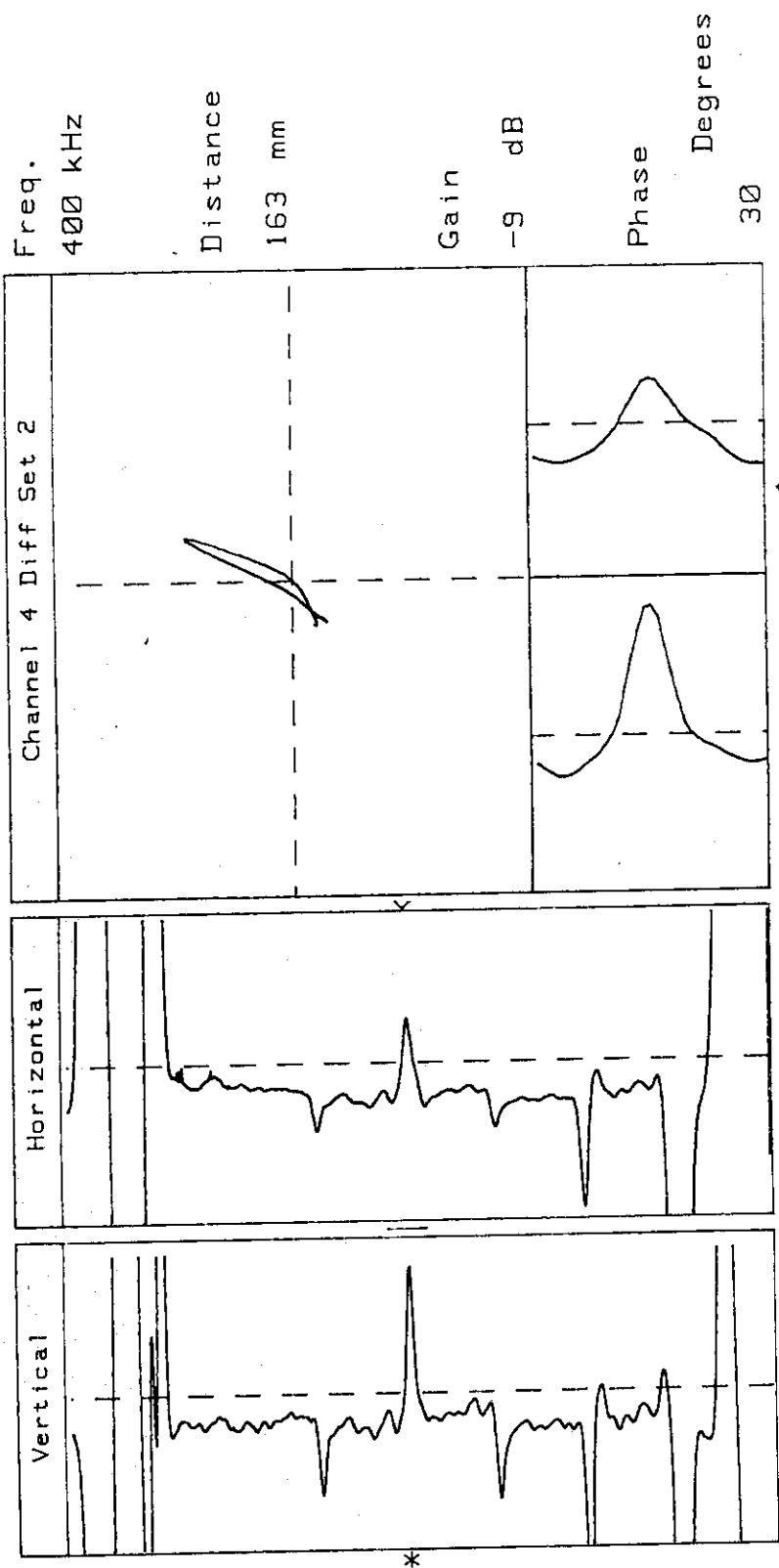


Fig. 4.3-6 Results of the eddy current test made on the scratched PWR type rod shown in the previous figure 4.3-5; three peaks besides the scratch (noted by the arrows) are unintentionally fabricated. (Notations, shown are identical to Fig. 4.3-4)

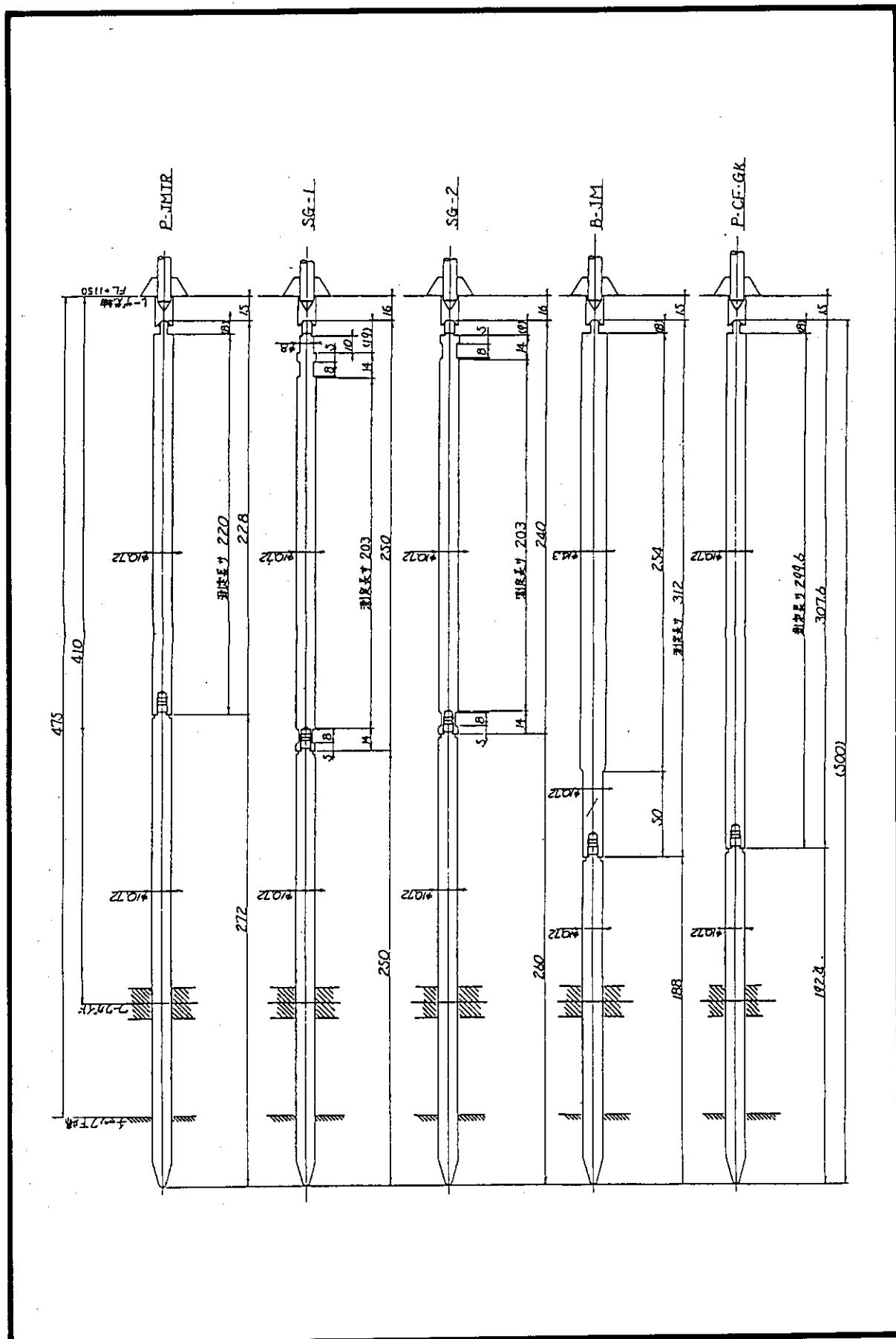


Fig. 4.3-7 Prepared adaptors for five different types of fuel rods to be inspected by eddy current testing

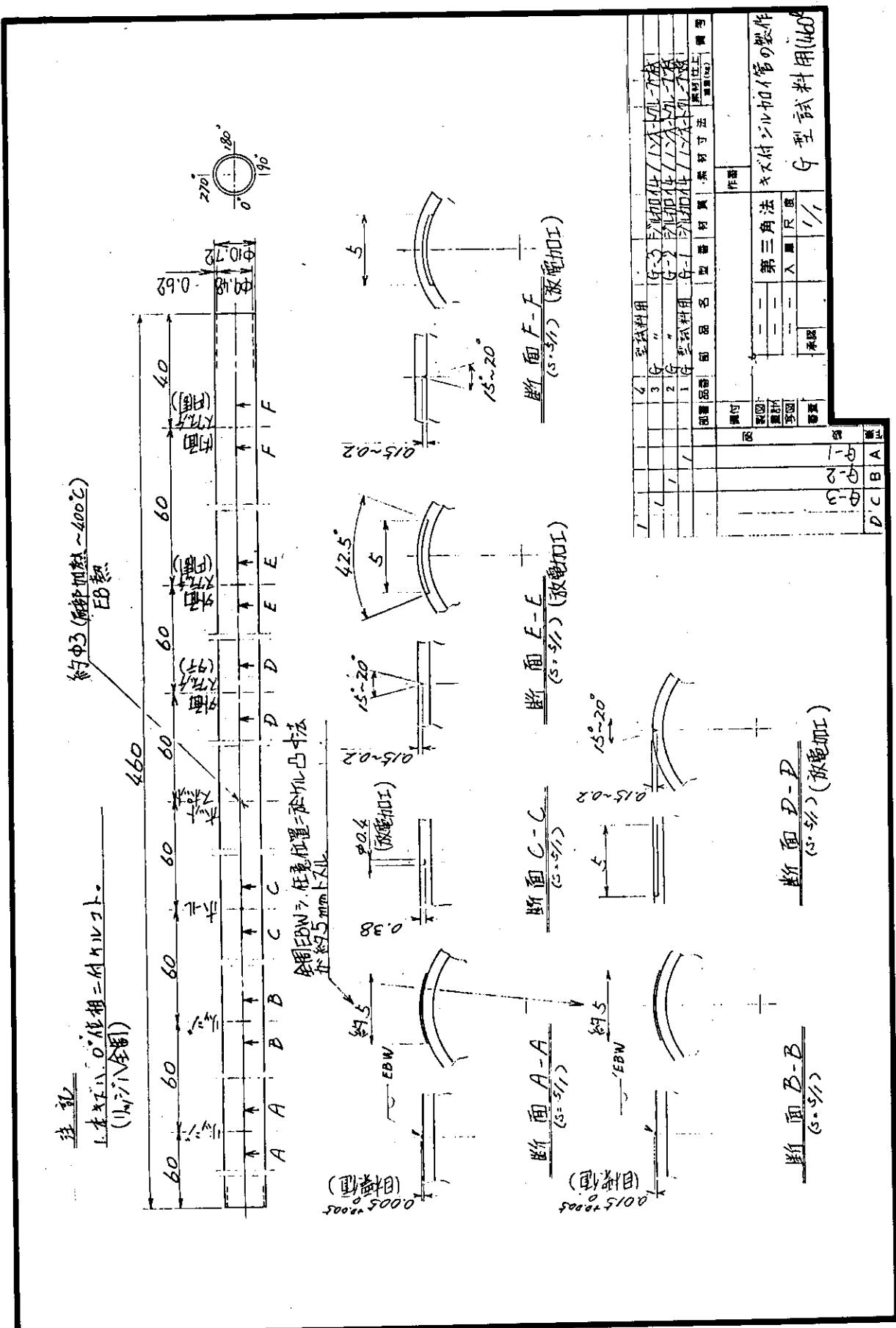


Fig. 4.4-1 Drawing of the zircaloy cladding tube having simulated ridging, hole, and scratches

Data Analysis --Eddy Current Bobbin Data
 Date Of Data Collection: 6 Dec 1989 14:21:38
 Rod PWRREFARE Hot Lab Ø
 Rod Type P-CF, GK

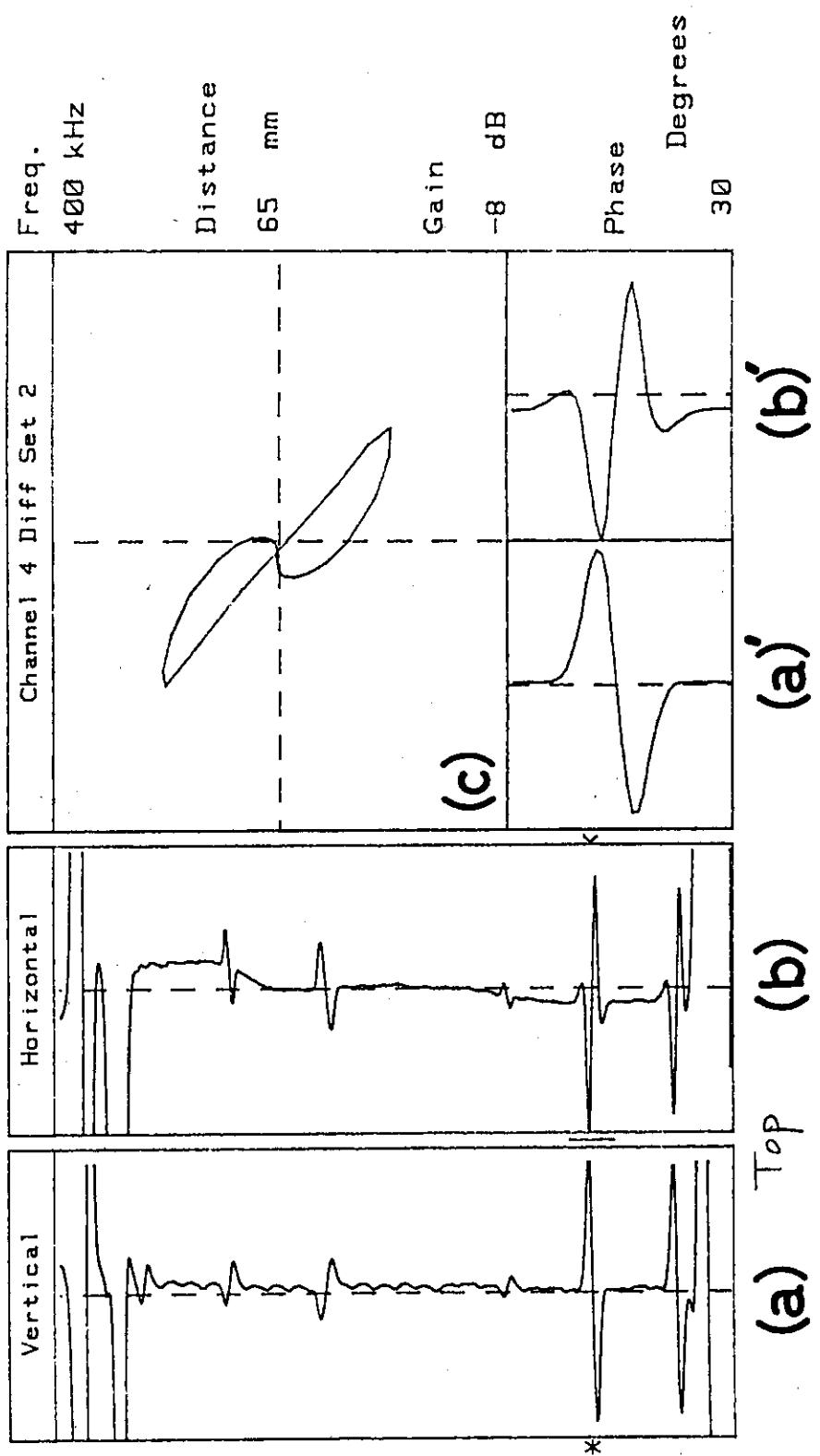


Fig. 4.4-2 Results of the eddy current test on ridges performed with unirradiated calibration tube, where notations (a)', and (b)', are magnifications of (a) and (b) at points indicated by (*) and (-), respectively.

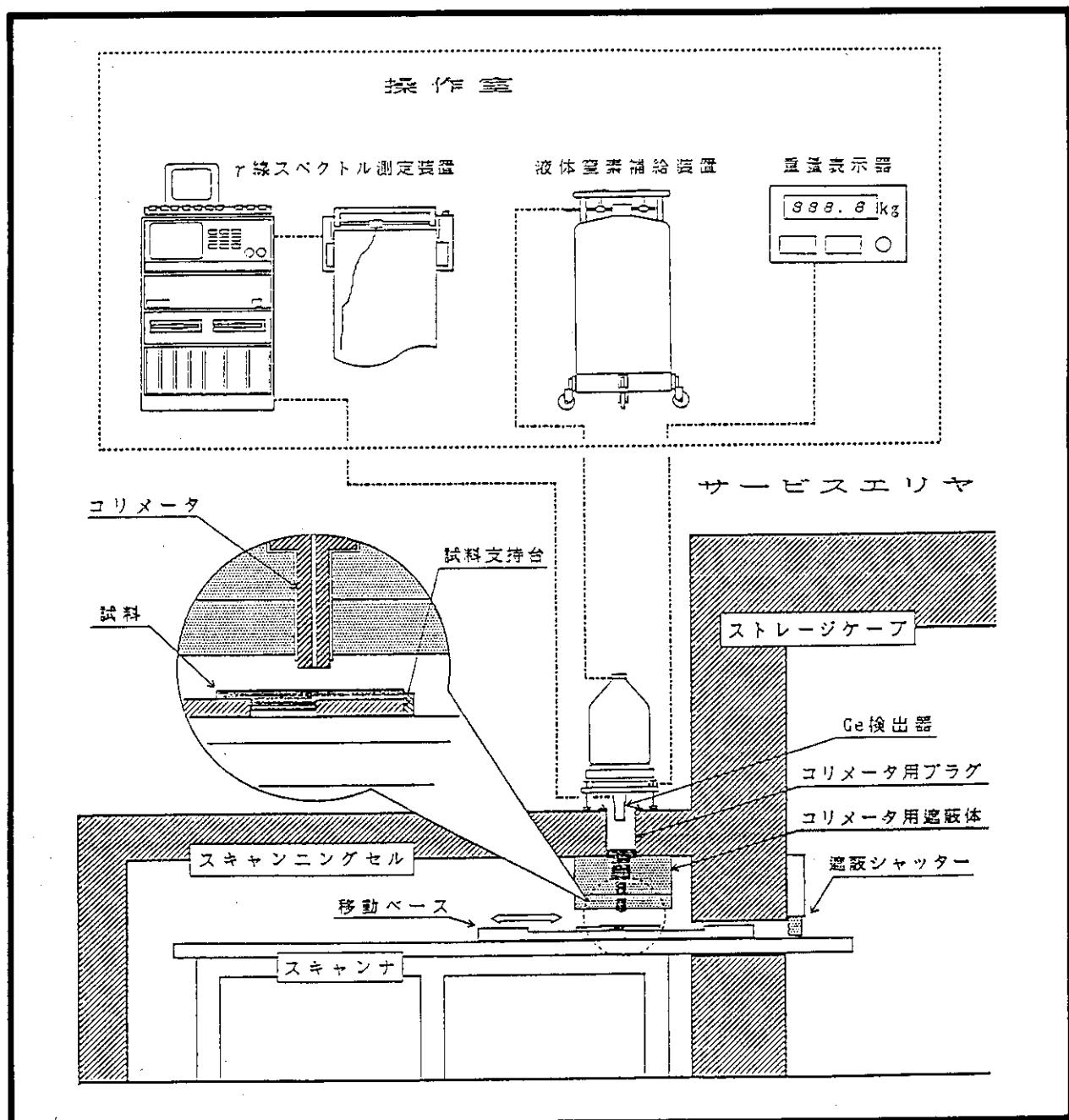


Fig. 4.5-1 Schematic representation of the gamma scanning devices

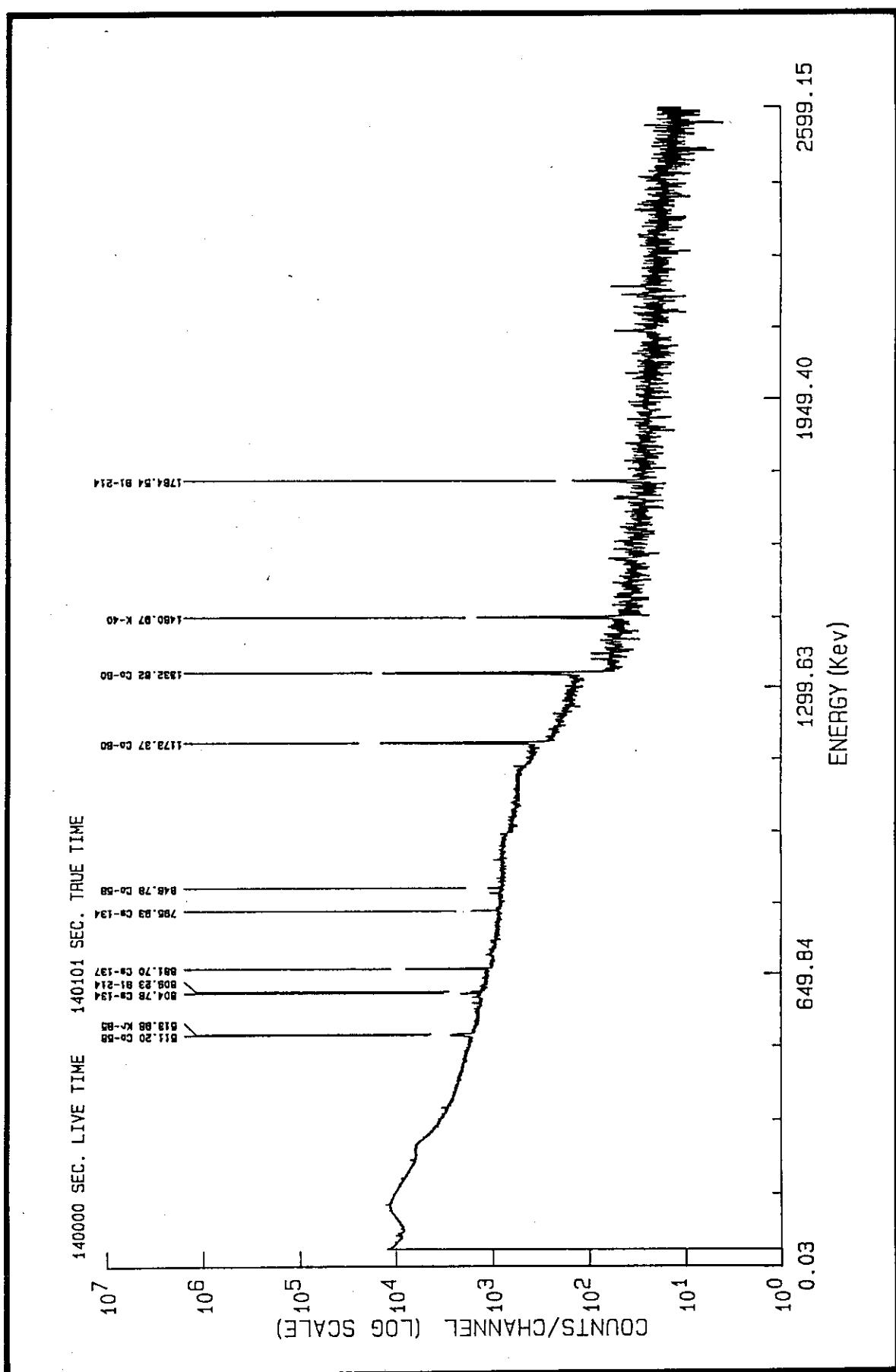


Fig. 4.5-2 Obtained gamma spectrum at the plenum location of the pulse irradiated PWR type fuel rod
(BU=35 Mwd/kgU)

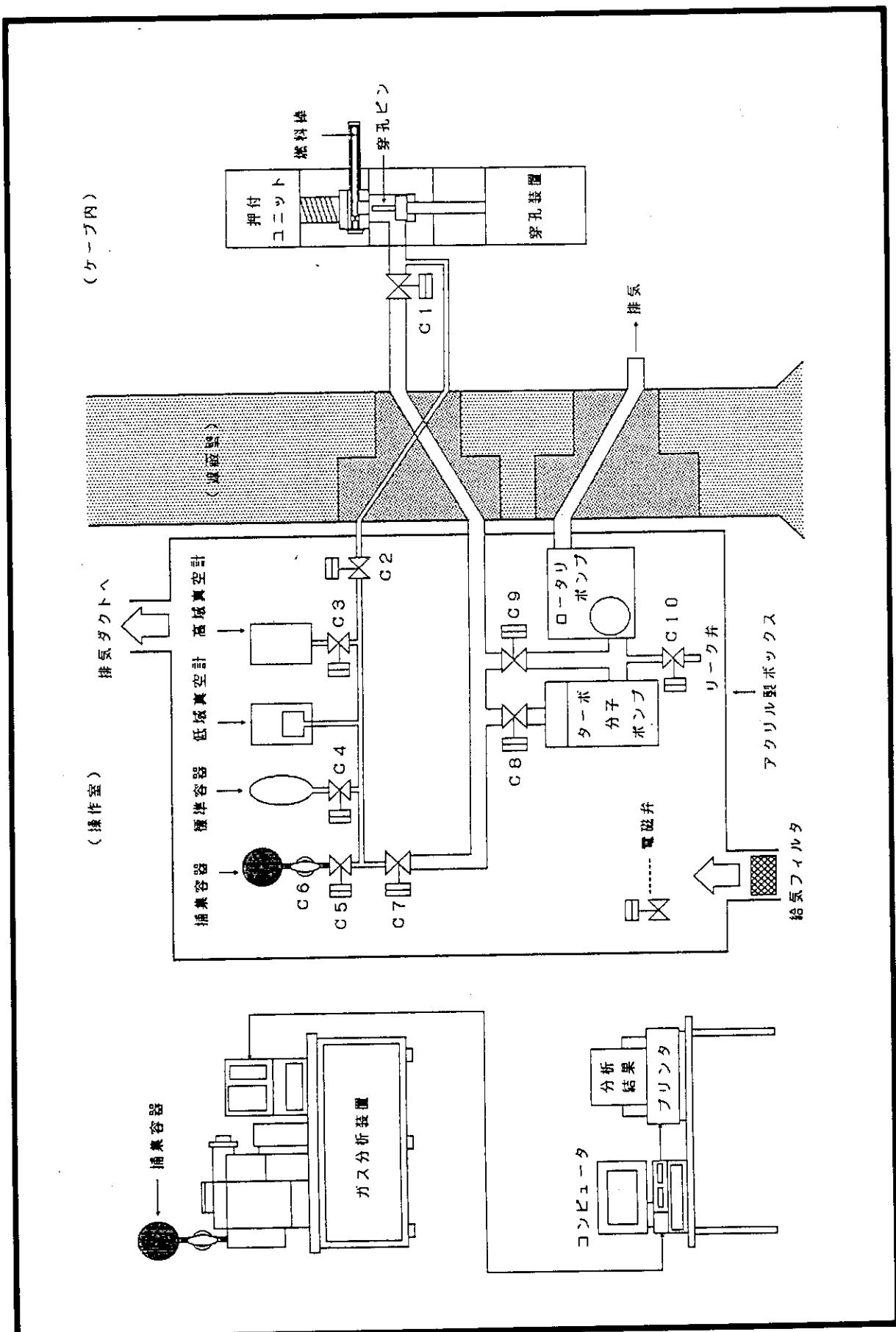


Fig. 4.6-1 Installed FP gas puncturing system in hot laboratory for the pre-irradiated fuel rods

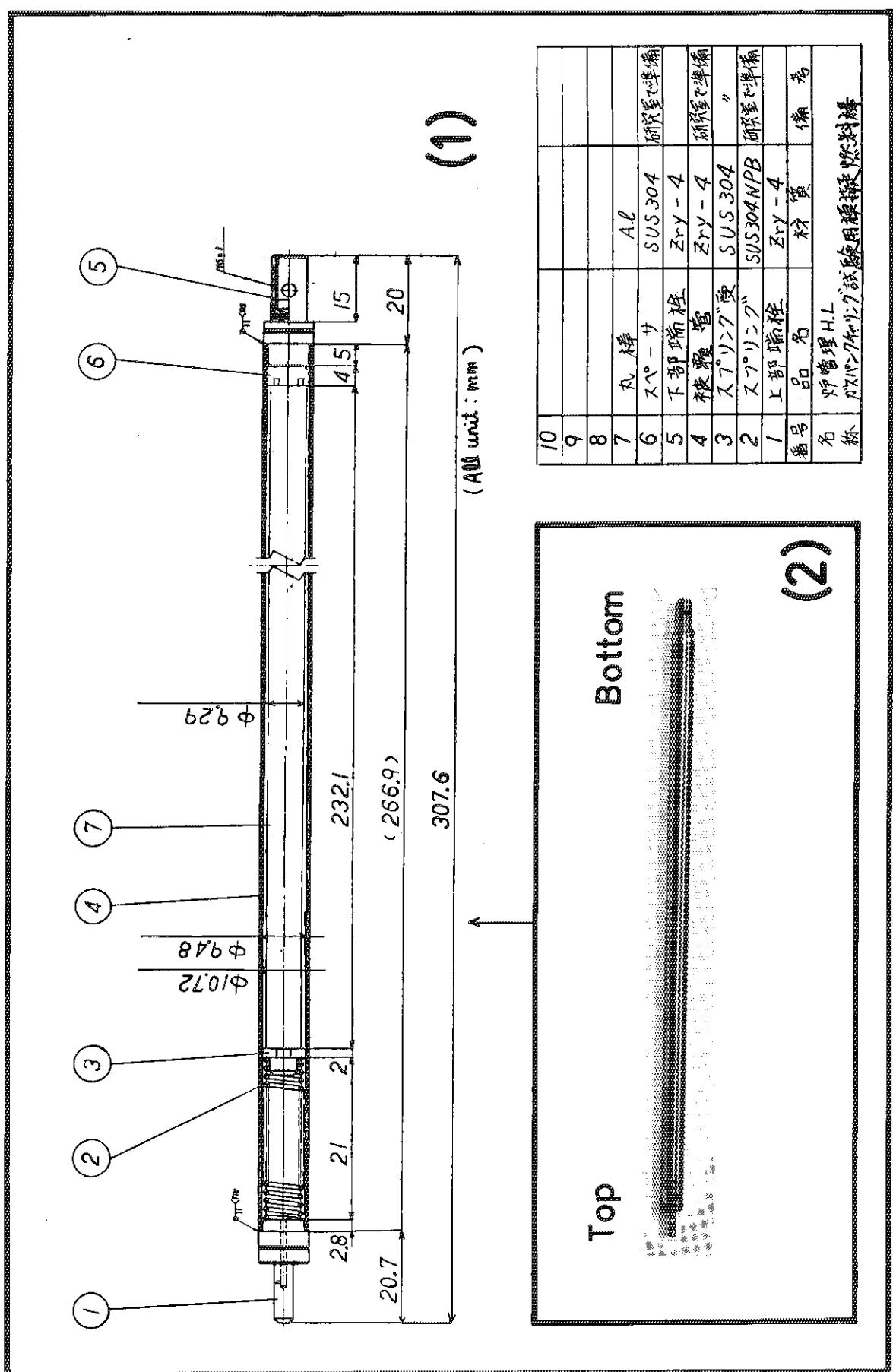
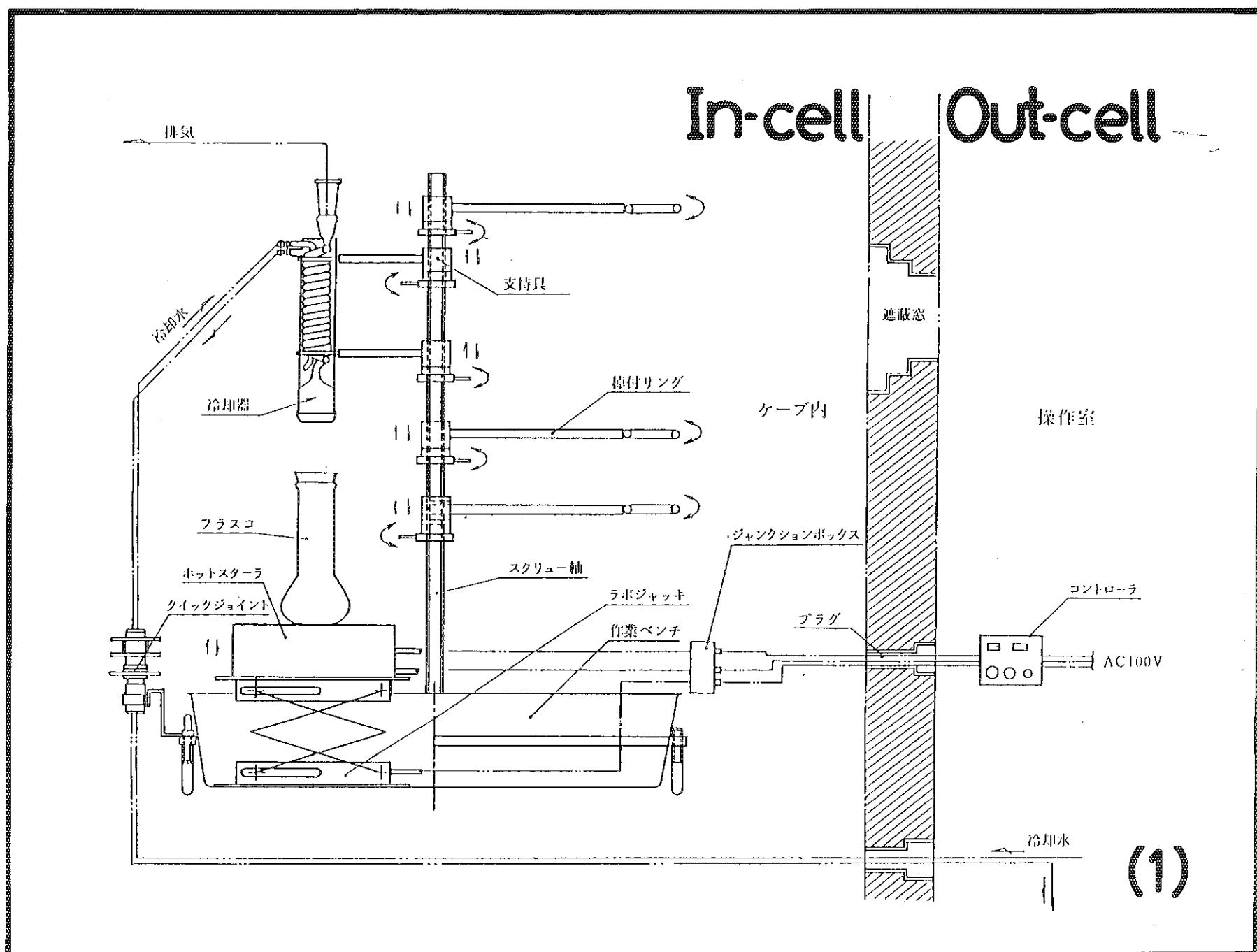
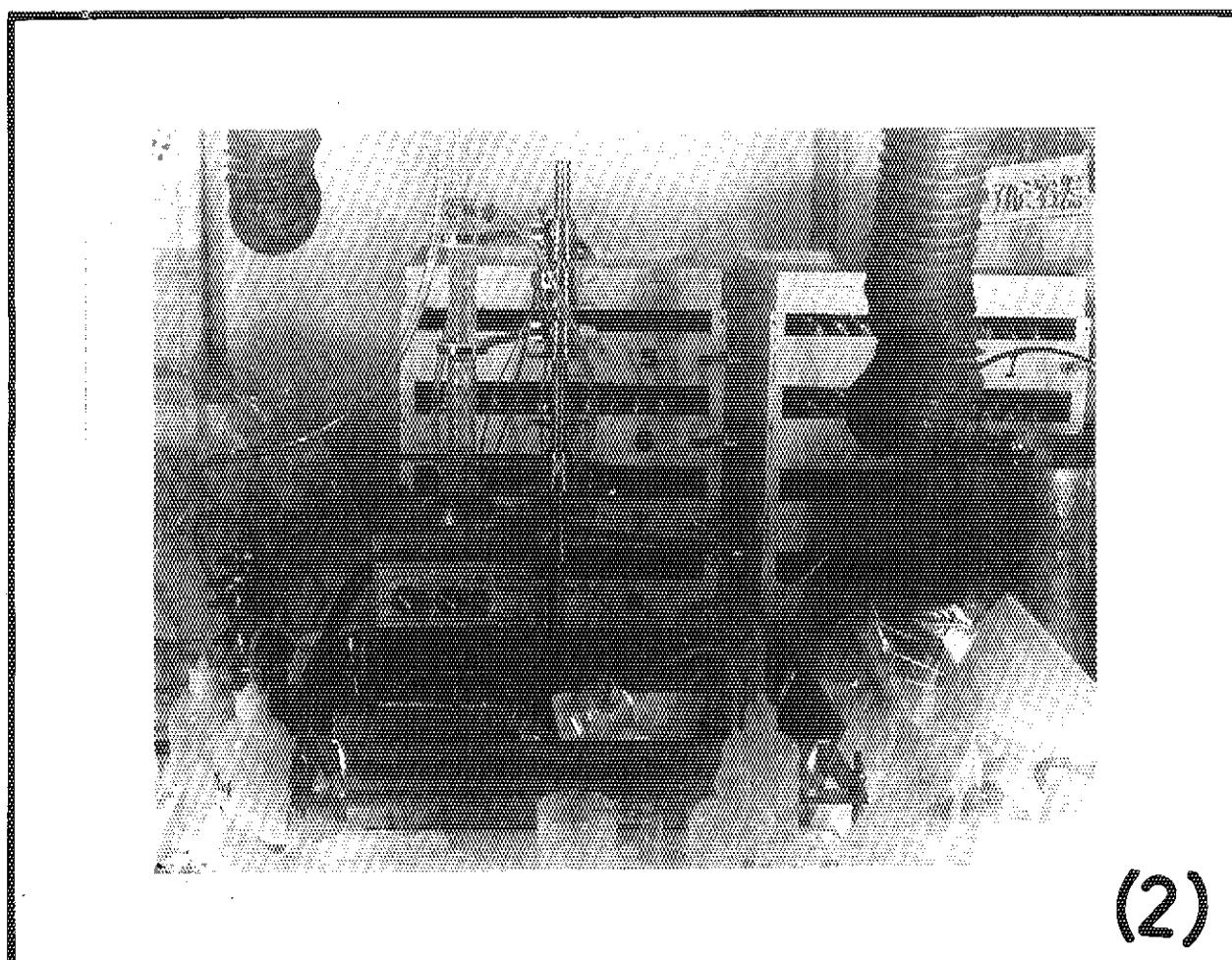


Fig. 4.6-2 (1) Drawing and (2) photograph of the served zircaloy-4 cladding tube for the performance check of gas puncturing devices, in which mixed gas being composed of He, Xe and Kr are filled in.



JAERI-M 90-091



(2)

Fig. 4.7-1 Devices for dissolving the UO_2 pellet specimen to be used for burn-up analysis:
(1) Schematic representation, and (2) Outlook of the whole apparatus from cell outside through to cell inside

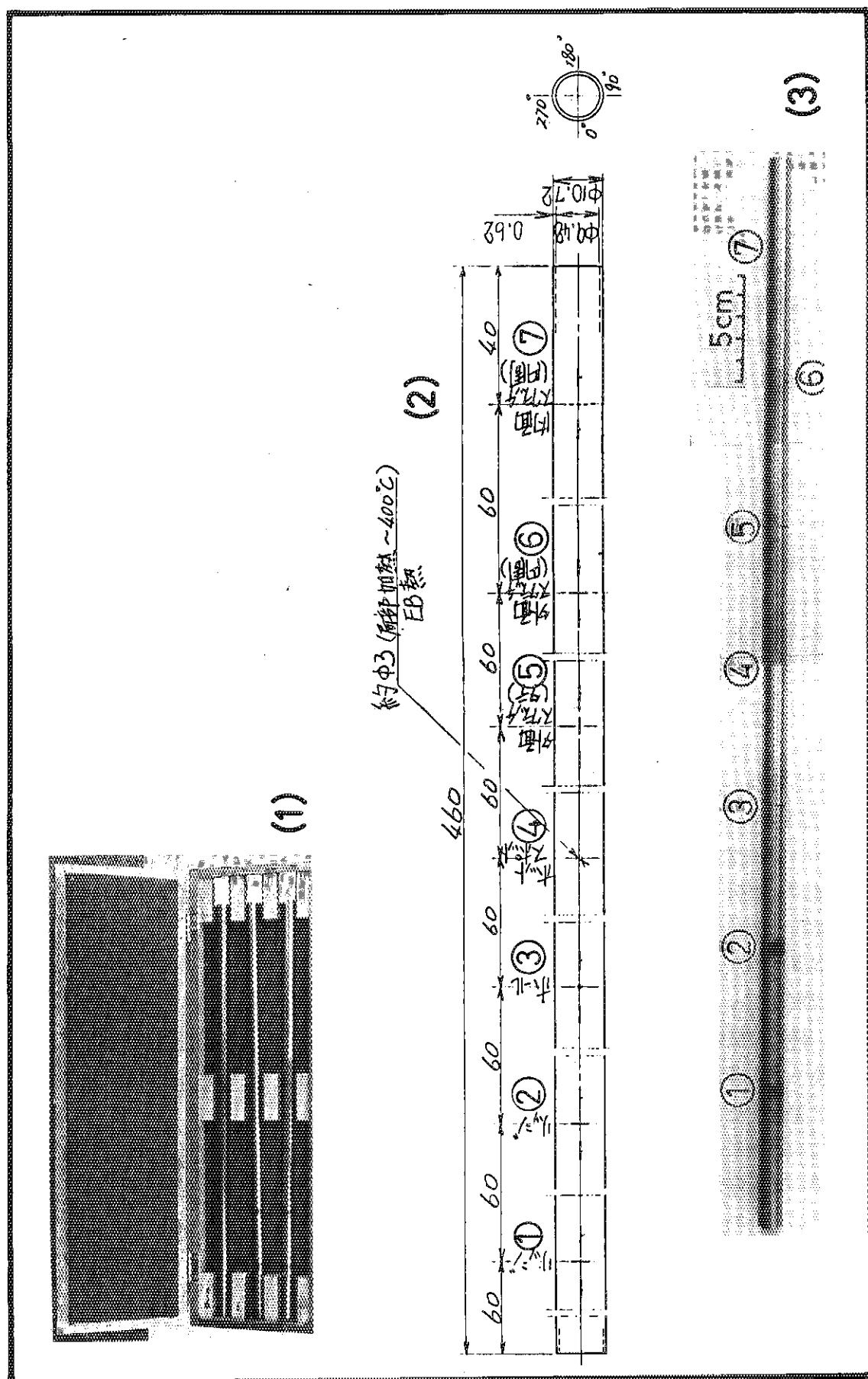


Photo. 4.4-1 (1) Outerview of the cladding tubes for calibration, which is made of BWR and PWR type zircaloy claddings. (2) Schematic drawing of the standard PWR type calibration tube, and (3) Its photograph, where circled numbers are referring to the same specimens.

5. 結 論

原研の安全性試験研究炉（Nuclear Safety Research Reactor : NSRR）では、反応度事故（Reactivity Initiated Accident : RIA）を想定した燃料破損実験を昭和 50 年（1975 年）より開始し、現在に至っている。

これまでの実験は、 14×14 PWR 型燃料棒の製造仕様に近い未照射燃料棒を NSRR 標準燃料棒とし、パルス照射で、この燃料棒の破損しきい値及び破壊エネルギーしきい値を見い出すことを主眼として実施されて来た。実験の成果は、昭和 59 年（1984 年）に、「発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象に関する評価指針について」という形で、原子力安全委員会の安全審査指針として反映された。

現行指針は、主として未照射燃料棒のデータに基づく RIA 下での燃料破損しきい値に及ぼす記述が中心であり、燃料棒の破損しきい値に及ぼす燃焼度の効果が十分に加味されたものとなっていないため、NSRR では、予備照射済燃料（燃焼度蓄積燃料）による実験を計画して来た。しかし、実験の実施にあたっては技術的に解決しなければならない次の 3 つの最重要課題があった。すなわち、

(1) 燃料棒の短尺化：

商用炉で使用された予備照射済燃料棒有効発熱長は 3.6 m あり、これを NSRR 実験で使用するには、有効発熱長 0.12 m 程度に短尺化した燃料棒（短尺化率 1 / 30）を作製しなければならなかった。

(2) 炉内計装機器の開発

炉内使用期間中、燃料棒は水側腐食、曲がり、つぶれ、等の構造及び寸法変化を生じていた他、放射化も進んでいた。この様な状況の下で、評価研究上の必要性から、燃料棒内圧センサー、被覆管と燃料ペレットの伸びセンサー及び被覆管表面の熱電対等の計装類を遠隔操作で燃料棒に取付ける技術を開発しなければならなかった。

(3) パルス後の短尺燃料棒の照射後試験機器の整備

パルス照射を行った予備照射済短尺燃料棒に対し、照射後試験（PIE）を実施する必要があった。特に、燃料破損の重要なメカニズムとして、ペレット-被覆管の力学的相互作用（PCMI）に起因するものが考えられたため、この破損をいち早く検出できる様、短尺燃料棒用の PIE 機器の開発・整備を行う必要があった。

以上の 3 つの課題につき、反応度安全研究室、NSRR 管理室、実燃燃料試験室及び研究炉管理部ホットラボの技術陣が約 4 年の歳月をかけて当該技術課題と取り組み、解決に至った。

本報は、その技術的成果を集大成したものである。

謝 辞

本開発研究に関しては、燃料安全工学部長市川達生博士、反応度安全研究室長藤城俊夫博士、NSRR 管理室長堀木欧一郎氏、実用燃料試験室長児玉敏夫氏及び伊丹宏治氏、同次長石本清氏、同燃料試験課長菊地章氏、研究炉管理部長川崎稔氏、同ホットラボ室長足立守氏、及び各室に属する沢山の技術職員による御教示・御指導があった。

本文中には記述しなかったが、予備照射済燃料のうち JMTR 型燃料については、その照射後試験及び燃料輸送（JMTR→東海ホットラボ）を JMTR ホットラボ課長板倉敦氏をはじめとするホットラボの技術スタッフに遂行して戴いた。

また、2つのホットラボと NSRR 間の所内外燃料輸送に関しては、RI 製造課長守屋孝氏及び伊藤康博氏他の御協力を戴いた。

ここに厚く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1-1) 稲辺輝雄, 他: “改良型パルス運転のための NSRR 計測制御系統施設の安全設計”, JAERI-M 88 - 133 (1988)
- (1-2) 稲辺輝雄, 他: “改良型パルス運転及び照射済燃料実験のための NSRR 原子炉施設の変更に係わる安全評価”, JAERI-M 88 - 218 (1988)
- (2.5-1) 笹島栄夫: “ハフニウム材による燃料棒のエンドピーク削減の研究”, JAERI-M 90 - 029 (1990)
- (2.5-2) 小西隆夫, 角間政: “ジルカロイ燃料被覆管の製造の検査” 原子力学会誌 20 [8] 539 (1978)
- (3.3-1) Y. Tsuchie : “PIE of Turuga fuel Part II”, IAEA Specialists' Mtg. on Post Irradiation Examination and Experience, JA - 5, Tokyo (1984)
- (3.3-2) S. Suzuki et al : “PWR Fuel Performance and Burnup Extension Program in Japan”, Proc IAEA International Symposium Improvements in Water Reactor Fuel Technology and Utilization, Stockholm, IAEA-SM - 288 / 66 (1986)
- (3.3-3) T. Baba et al : “Power Ramp Demonstration Program in Japanese PWRs” Proc. ANS Topical Mtg. on LWR Fuel Performance, Williamsburg, Virginia, USA p 142 (1988)
- (3.3-4) F. Garzarolli et al : Int. Symp. on Improvement on Water Reactor Fuel Technology and Utilization, Stockholm, Sweden, (1986)
- (4.3.2-1) K. Yanagisawa : “A study on the behavior of prepressurized hollow UO₂ fuel under reactivity initiated accident conditions”, Nucl. Eng. Design 116, 171 (1989)
- (4.3.2-2) P.C. Watson and M.T. Cross, ND-R-1405 (W), (1987)
- (4.4-1) T. Iwai et al, : “Results of eddy current test for second round robin by Halden Reactor Project”, JAERI-M 86 - 126 (1986)
- (4.4-2) I. Ohwada et al, : “The second eddy current testing of zircaloy tube samples from the OECD Halden Reactor Project at Reactor Fuel Examination Facility, Tokai, JAERI”, JAERI-M 86 - 106 (1986)
- (4.5-1) C. Bagger, : IWGFPT/22 (1981)
- (4.5-2) K. Yanagisawa, : JAERI-M 89 - 095 (1989)

附録1 予備照射済燃料棒の短尺化（切断・内圧再加
圧等）に伴って生じた技術的問題点
(第2.5節補足)

抽出された問題点及びそれに対する技術的対応は、以下の(1)～(6)のとおりである。

(1) 加圧中の燃料棒内圧が経時的に測定できないチャンバー構造になってしまっている事が判明した。

燃料棒をチャンバー中に入れ、ガスを充填すると、燃料ペレット内をガスが拡散して行くため、燃料棒内圧が一定になるまでに時間がかかる。特に照射済燃料は燃料ペレットと被覆管間のギャップが狭いため、燃料棒内のガス圧力が一定化するのにかなりの時間が必要である。ところが、この拡散平衡に達するまでに必要な時間が測定できないことが分った。このハードウェア上の問題は、すぐには改良できないことが明らかになったので、加圧チャンバー中における燃料棒の放置時間を2hとした。これは、燃料計算ふるまいコード FEMAXI で混合ガスの拡散時間をシミュレートすると拡散平衡状態に到達するのに約1h程度かかるという計算結果を参考に、さらに安全をとって設定したものである。

(2) PWR 燃料が固くて燃料棒から所定量が切削出きない事態が生じた。

切削バイトを超鋼に変えることにより燃料ペレットの取り出しに成功した。また、切削の度がすぎて、PWR 型燃料棒（K-1 燃料棒）では燃料のディッシュ部まで削り込んでしまったが、軽微であり、かつ実験の許容範囲内である事が明らかにされた。

(3) ムーブメントマーカの誤封入

燃料棒頂部側に1ヶだけ入れるべきムーブメントマーカを PWR 型燃料棒（K-1 燃料棒）では底部側にも挿入し、両方とも、封入してしまった。すなわち、寸法上では余裕がなかったのに、恐らく燃料ペレットの割れによるギャップを利用して強制的に封入がなされてしまったものと考えられる。この結果、予定したムーブメントマーカが1ヶ不足する事態となつたが、予備品で切り抜けて急場をしのぐことができた。

また、別の PWR 型燃料棒（K-2 燃料棒）では、今度は同様な事を実行しようとして封入できなかつた。封入できなかつたのは、燃料底部側の圧力センサーの径寸法が長すぎるとの誤判断なされた。すなわち、マーカーの封入が K-1 燃料棒でできないのは圧力センサーの寸法が設計図通りにできていないせいだと解釈され、同圧力センサーを長さ方向に僅かであるが削ってしまった。このため、圧力センサー1つが使いものにならなくなつた。

圧力センサーはとりあえず、予備品で代用することができた。この圧力センサーには別燃料のための燃料番号が打ってあり、将来混同する恐れもあったので、燃料棒番号は、PWR では、底部側の刻印番号を用いず單に頂部側で判断するというルールを作つた。

(4) K-2 及び K-3 燃料棒の圧力センサーが破損した。

圧力センサーの概要を、Fig. A 1.1 に示す。実際は約 44 kg/cm^2 に加圧したはずなのにヘリウムガス充填を行つた PWR 型燃料棒（K-2 燃料棒）の圧力センサーからの読み取り値は 69 kg/cm^2 を指していた。この値はガスボンベ容量～ 50 kg/cm^2 も上回る値であり、不自然なものであった。

更に、別に充填加圧した圧力センサー K-3 の読み値は、期待値 46.6 kg/cm^2 に対して 34.7 kg/cm^2 を示し、時間において測定した 2 度目のときは読み取り不能となった。この原因是、リード線断線と判断された。

このように、圧力センサーの指示値が正当な値を示さない問題は、電子ビーム溶接 (EB) 後に、圧力センサーの健全性を示す導通試験等を実施していなかったことから生じたものであろうと、推察された。従って、以後は、圧力センサーの溶接後の健全性をチェックすることとしたが、この K-2 及び K-3 圧力センサーの不具合の原因は、特定できなかった。

(5) 加圧を行った燃料棒の上部端栓孔閉鎖（溶接）時に、その外径（ $4 \text{ mm}\phi$ ）がだれた。

これは、Fig. A 1.2 の模式図で示すように、燃料棒を加圧するために設けた加圧用の孔（ 1ϕ ）を溶接にて封じ込めるため、TIG にて 20 A , 3 sec の条件でアーケークしたところ、上部端栓の端面部がだれてしまったというものである。

この端部のだれは計装に際して悪影響が出るために無視できないものである。つまり、1つは、NSRR にて熱電対 (T/C) を取りつける際に、この部分をアースに利用しており、 4ϕ の径をほぼ保持していないと十分にアースができなくなる可能性がある。また1つには、実験ではこの部分を用いて、燃料棒の軸方向伸びを測定することを予定しており、この形状のままで測定に必要な挙動トランジットが使用できない可能性が出た。

こうなった原因について調査した結果、以下の知見を得た。

- ① Fig. A 1.3 に示すように、上部端面を面取り (C1) していたため、アーケークを最もよく受けるこの先端部分の熱容量は十分でなく、そのため溶接時に比較的早く昇温してとろけ、だれてしまうという現象が明らかになった。この対策として、今後は端面取りをしない構造とし、熱容量を少しでも大きくしてだれの防止に努めることになった。
- ② また、別の原因として、加圧用の孔径 1ϕ が寸法的に大きすぎて、それを溶接によって閉鎖するのに、 3 sec という予想よりはるかに長い時間が必要となっていることも明らかになった。そのために多量の熱が先端部に加わり、だれの原因の1つになっていた。この対策として、孔径を Fig. A 1.3 のように2段構造とし、現行の 1ϕ 孔による1段構造をやめ、孔を閉鎖するのに必要最小限な時間で行えるように配慮がなされた。

(6) 圧力センサー耐熱エポキシ樹脂部分に He が多量にとけ込む事態があることが判明した。

すなわち、He リーク試験時にこの He の溶け込み現象があることが判明した。

これは、Fig. A 1.1 に示す燃料棒底部、圧力センサーの樹脂部分に於て、燃料加圧時に溶け込んでいた He がリーク試験時に逆に抜け出して来る現象であり、平衡 ($10^{-7} \text{ atm/cc} \cdot \text{sec}$) に達するのに 2 日間も時間が必要であったと報告された。これは予想外のことであり、極めて He リーク試験の作業効率を悪化させるものであった。

PWR 燃料棒では、特に 46 kg/cm^2 程度の加圧が燃料棒なされるので、この雰囲気下では相当量の He が化学的もしくは物理的に樹脂中に吸着されたり、拡散して溶け込んでいくものとみられる。現行では、これに対する良好な対応策はないが、当面は He 加圧時にのみテープを樹脂表面に巻いて、He の吸着、拡散を防止したらどうかとのコメントも出ている。

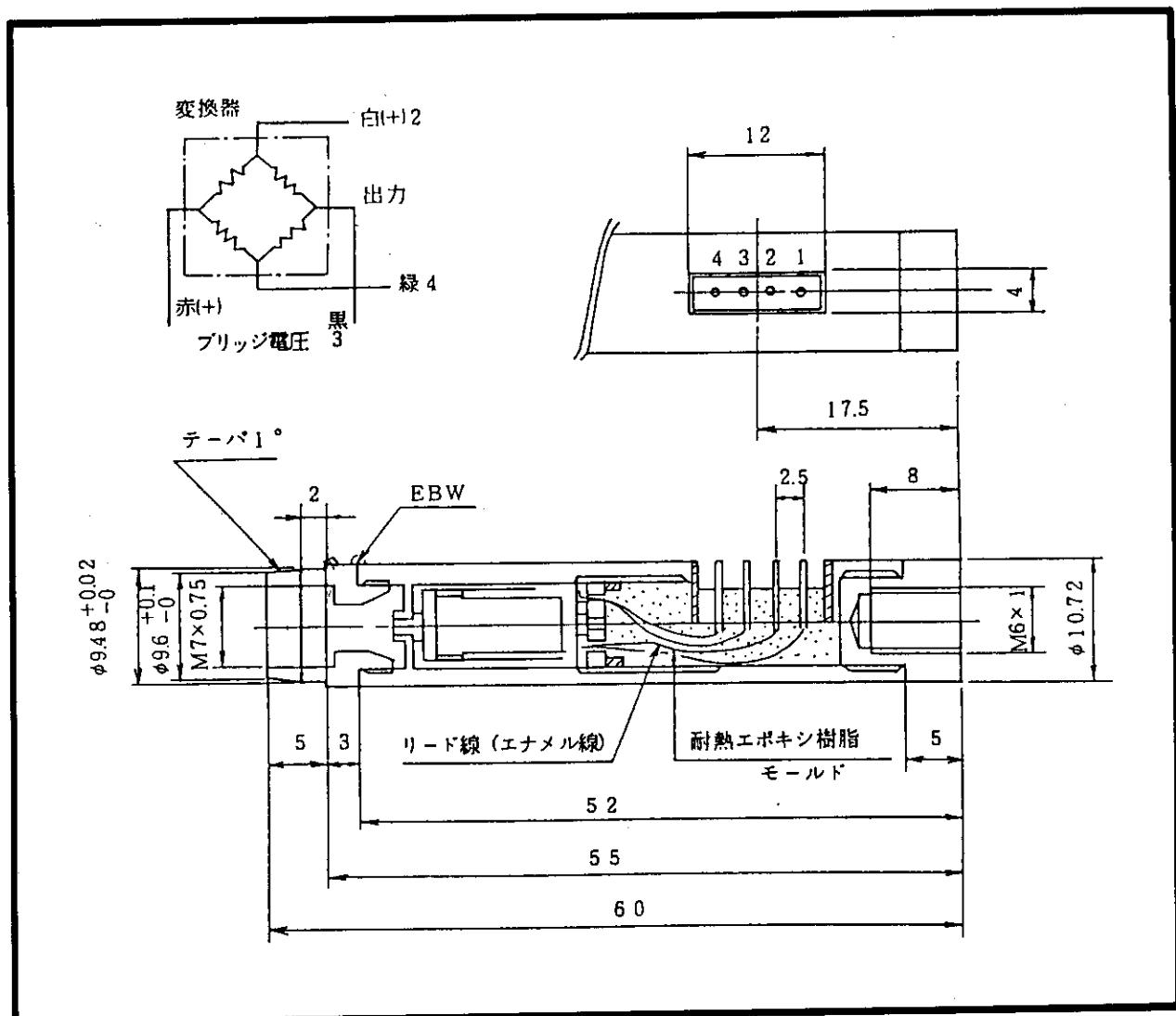


Fig. A.1.1 Structural representation of the PWR type pressure sensor

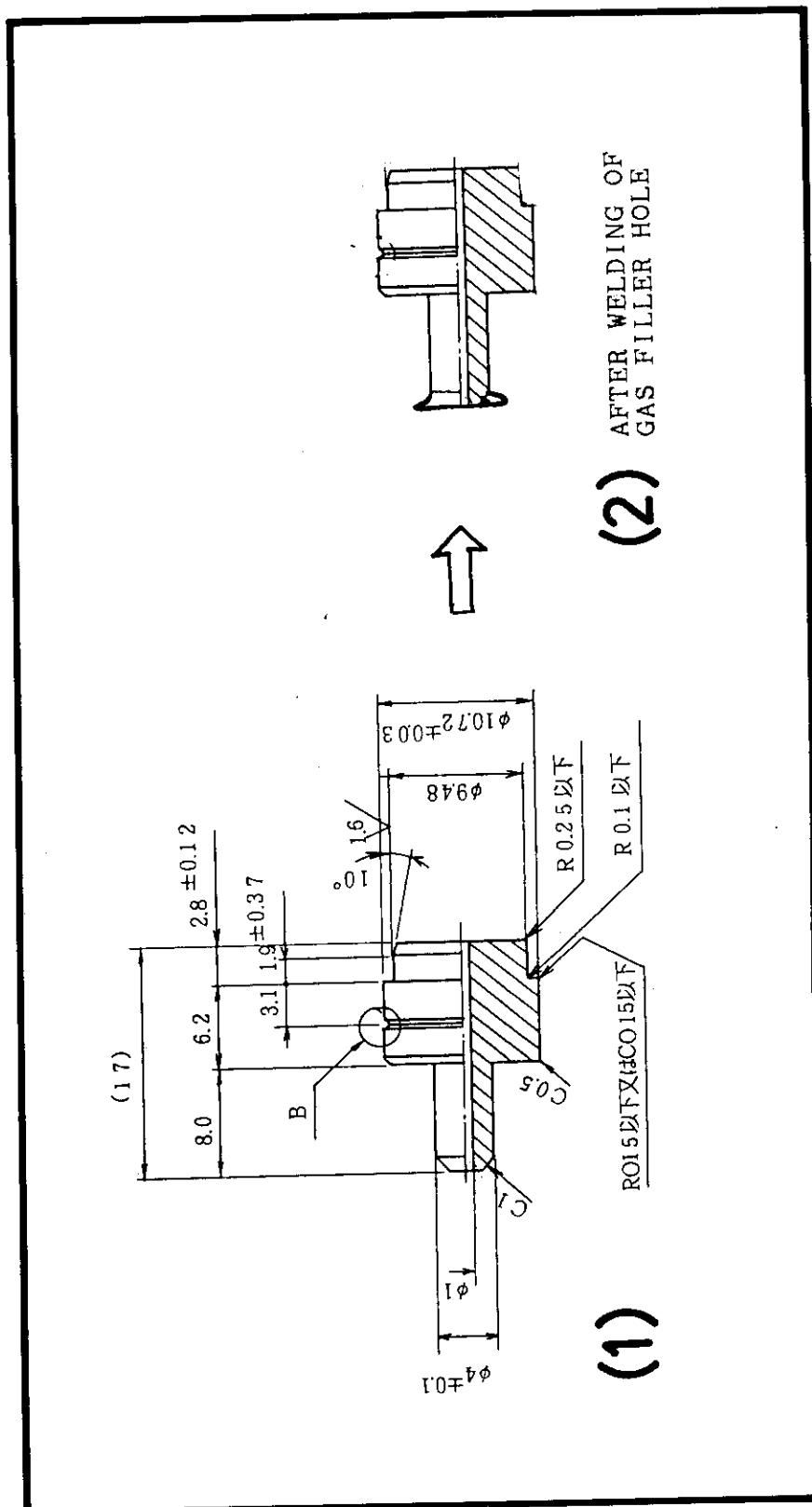
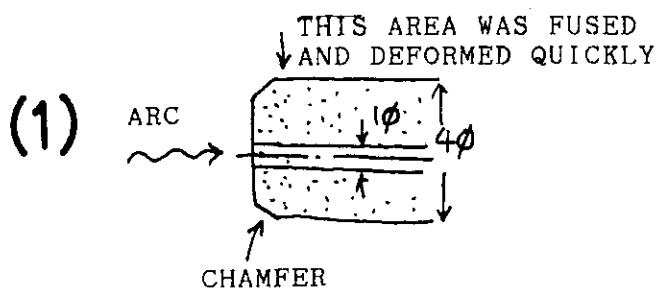


Fig. A.1.2 Schematic representation of top end plug, showing
 (1) before welding of gas filler hole (1mmφ) and
 (2) after welding of gas filler hole, resulted in
 causing the edge irregularity



MODIFICATION

- 1) DELETION OF CHAMFERING
AT THE EDGE OF TOP END PLUG
2) ADOPTION OF MULTI GAS FILLER HOLE SYSTEM
FILLER HOLE SYSTEM

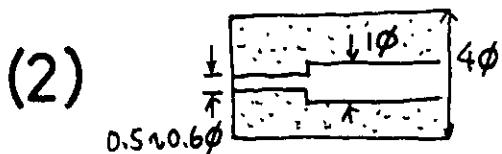


Fig. A.1.3 (1) Cause of the edge irregularity at top end during welding of gas filler hole, and (2) Modified end plug, deletion of chamfering and adoption of multi gas filler hole system

附録2 涡電流探傷試験に用いる標準傷つきジルカロ
イ管の製作詳細データ
(第4.4節の補足)

キズ付シルカロイ管検査成績データ目次

No	検査項目	頁
1	外観検査記録	2
2	リッジ寸法検査記録一覧	3
3	個別リッジ凸抜去測定データ	4~15
4	ホル寸法検査記録	16
5	外面スクランチ(平行)寸法検査記録	17
6	外面スクランチ(円周) "	18
7	内面スクランチ(円周) "	19
8	キズ位置寸法検査記録	20~21
9	顕微鏡検査(ホルスクランチ)	22~33
10	" (リッジ)	34~36
11	員数検査	37
12	キズの作製条件データ(EBW)	38~40
13	" (放電加工)	41

No. 2

外観検査記録

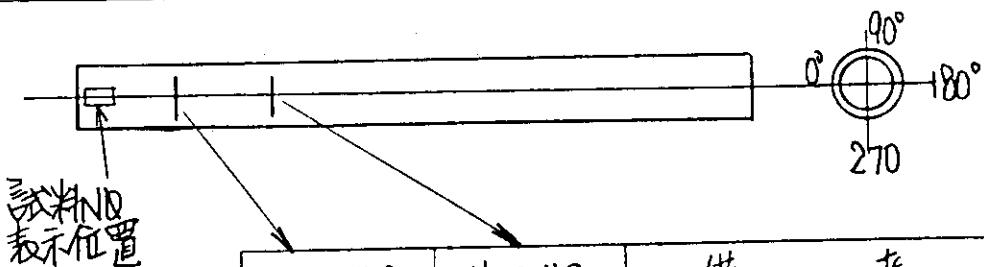
品名	キズ付ジル加1管	顧客	日本原子力研究所東海研究所
部品名	同上		
作番	417G 19701		
図面番号	決定図	検査年月日	昭和 63年 12月 10日

NO	試料NO	マキシマム	欠陥位置	有無	細胞	判定
1	T-1	良	良	良	良	合格
2	T-2	良	良	良	良	合格
3	T-3	良	良	良	良	合格
4	T-4	良	良	良	良	合格
5	G-1	良	良	良	良	合格
6	G-2	良	良	良	良	合格
7	G-3	良	良	良	良	合格
8	G-4	良	良	良	良	合格
9	A-1	良	良	良	良	合格
10	A-2	良	良	良	良	合格
11	A-3	良	良	良	良	合格
12	A-4	良	良	良	良	合格

単位:		検査		照査		承認	
-----	--	----	--	----	--	----	--

リッジ寸法検査記録

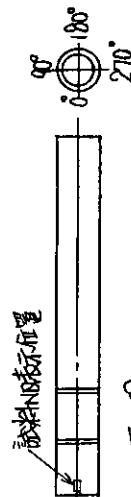
品名	キズ付リッジ加1管	顧客	日本原子力研究所東海研究所
部品名	リッジ寸法		
作番	417G19701		
図面番号	決定図	検査年月日	昭和 63 年 12 月 12 日



	リッジA 試料NO	リッジB 0.015 ^{+0.005}	備考
			左端は設計目標値
1	T-1 0.008	0.012	A位置; 225° B位置; 120°
2	T-2 0.008	0.010	, 300° , 55°
3	T-3 0.008	0.012	, 270° , 105°
4	T-4 0.009	0.012	, 255° , 90°
5	G-1 0.006	0.008	, 180° " 120°
6	G-2 0.006	0.006	, 330° " 340°
7	G-3 0.008	0.008	, 150° " 320°
8	G-4 0.006	0.006	, 30° " 135°
9	A-1 0.006	0.012	, 200° " 270°
10	A-2 0.008	0.010	, 165° " 210°
11	A-3 0.010	0.012	, 270° " 270°
12	A-4 0.006	0.008	, 270° " 90°

単位: mm	検査	照査	承認
--------	----	----	----

試験用 T-1



U.V.寸法検査記録

品名	外径仕上加工口管	部品名	日本原子力研究所東海研究所
作番	417619701	検査場所	
前面番号	決定用	検査年月日	昭和 63 年 12 月 12 日

外径部

ビット直下部

ビット直上部

内径部

ビット直下部

ビット直上部

内径部

ビット直下部

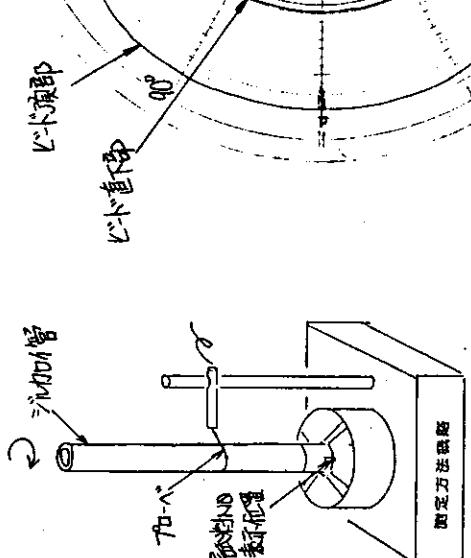
ビット直上部

内径部

ビット直下部

ビット直上部

内径部



測定方法盤面

被測面

測定面

A

B

C

D

E

F

G

H

I

J

K

L

M

N

O

P

Q

R

S

T

U

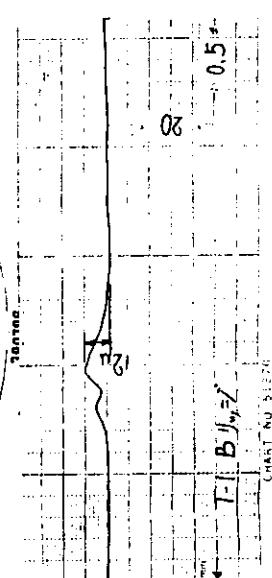
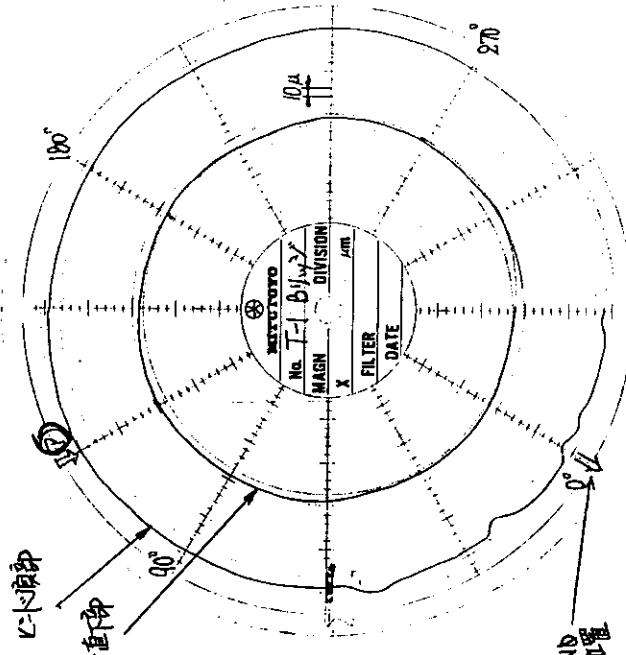


CHART NO. 5137

390706

T-1-A

1 → 0.5 mm

Q

R

S

T

U

V

W

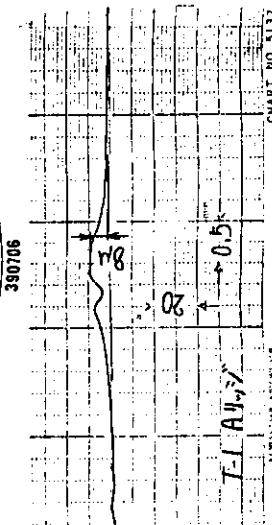
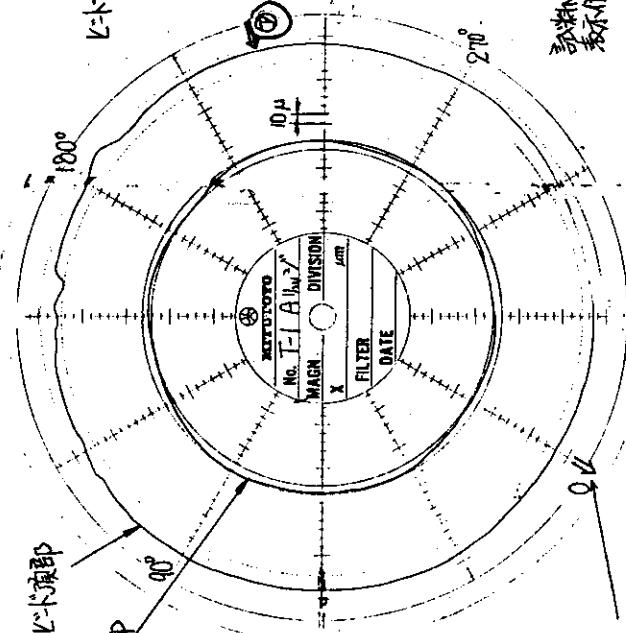


CHART NO. 5137

390706

T-1-B

1 → 0.5 mm

Q

R

S

T

U

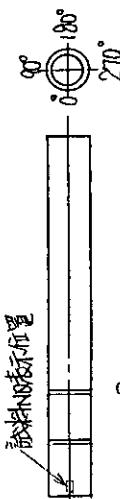
V

W

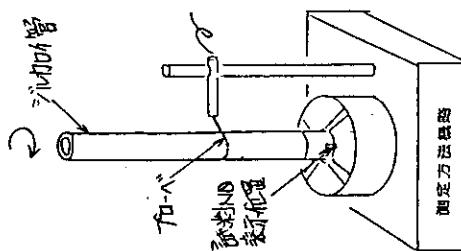
表面行が計上値
山量の測定結果
(上部円孔⑦の位置)

No. 5

試料 No. T-2



A 1 mm



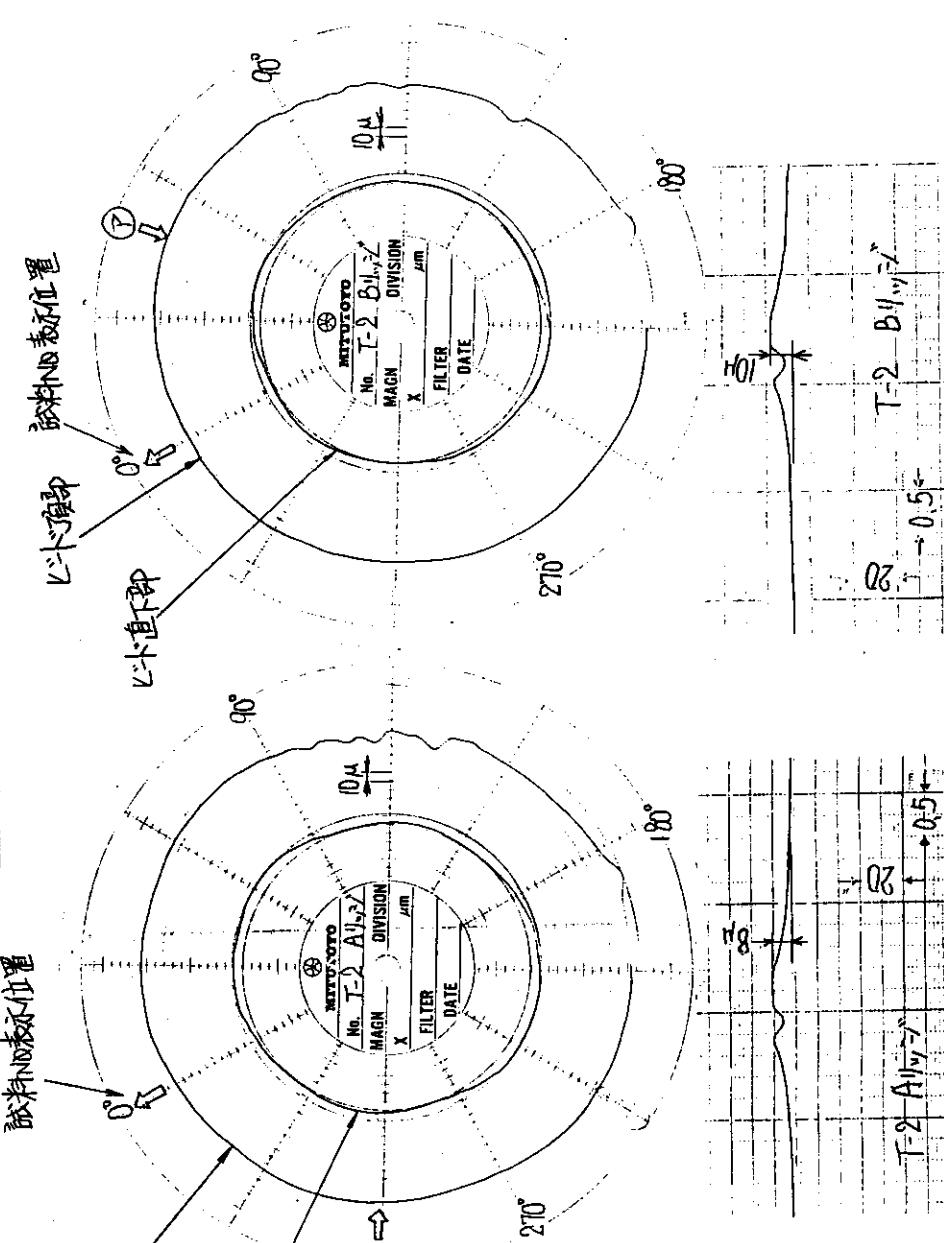
測定器: 三重式 Roundness Measuring Machine

「ノジ」寸法検査記録

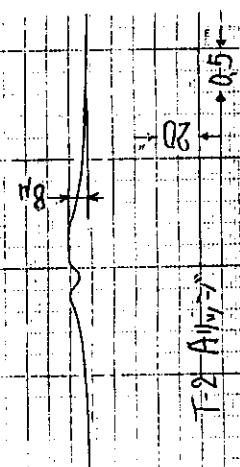
規	規	承	規
正	量	量	規

品名	丸柱外径切口管	日本原子力研究所東海研究所
部品名		検査場所
作番	417G19701	検査年月日
試面番号	決定面	昭和 63 年 12 月 12 日

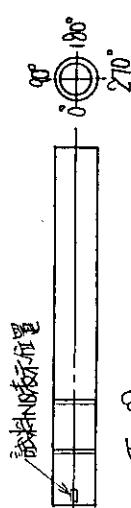
試料位置



板面アライメント板子
凸量の測定結果
(上部円柱①の位置)



底面番号 T-3

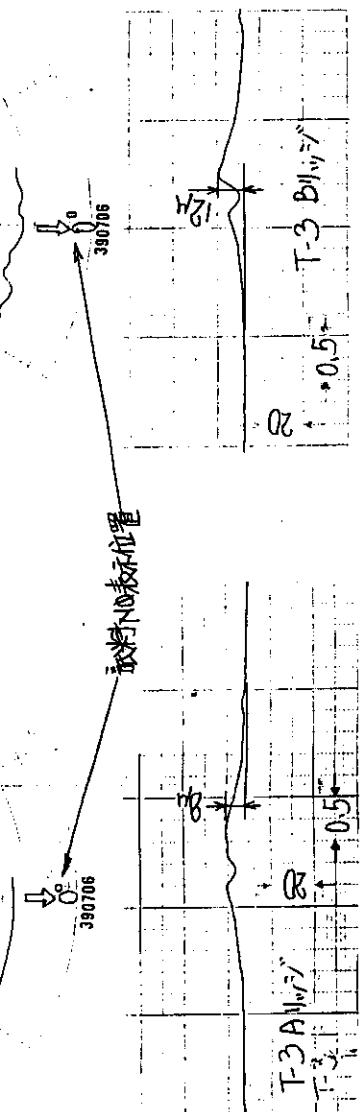
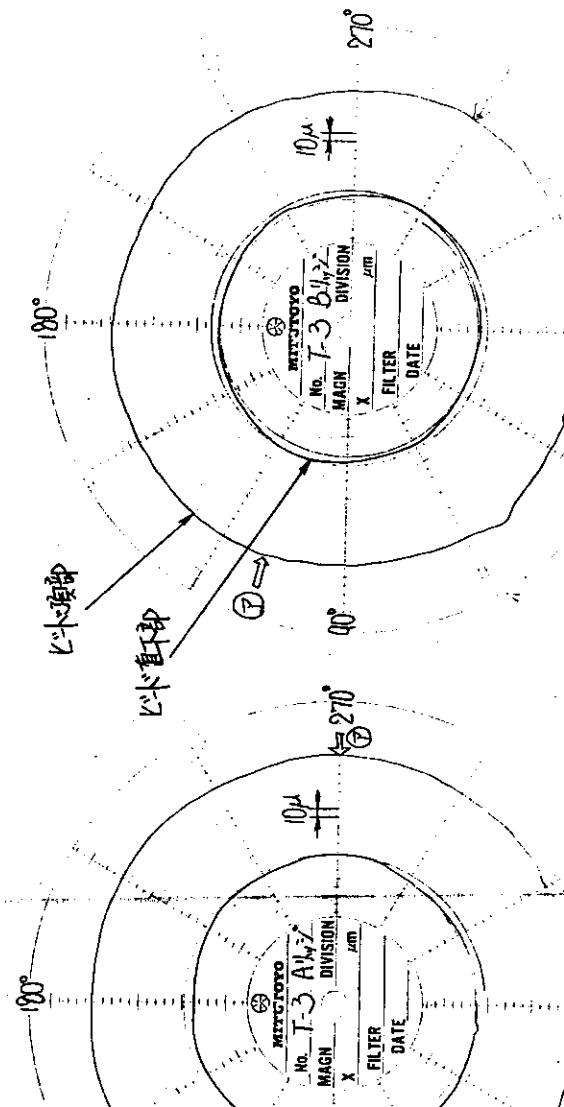
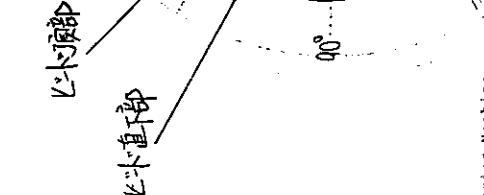
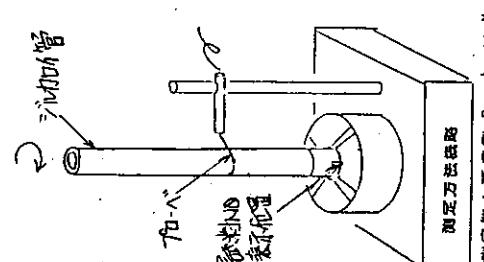


1) リンジ凸寸法検査記録

機種	風	風	品名	日本原子力研究所東海研究所
	左	右	品名	
底面番号	決定	日	底面番号	検査場所

作番 417G19701

検査年月日 昭和 63 年 10 月 12 日



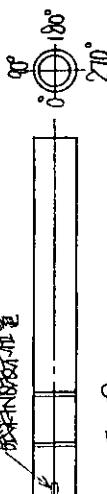
表面アーチサッハ値
凸量の測定結果
(上部円筒①の位置)

測定器：三盤型 Roundness Measuring Machine

No. 7

試料 No. T-4

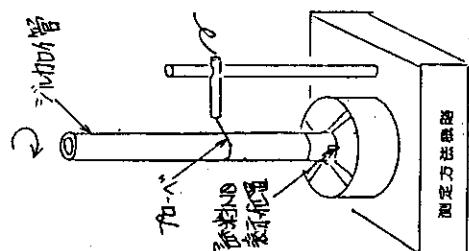
測定方法表示位置



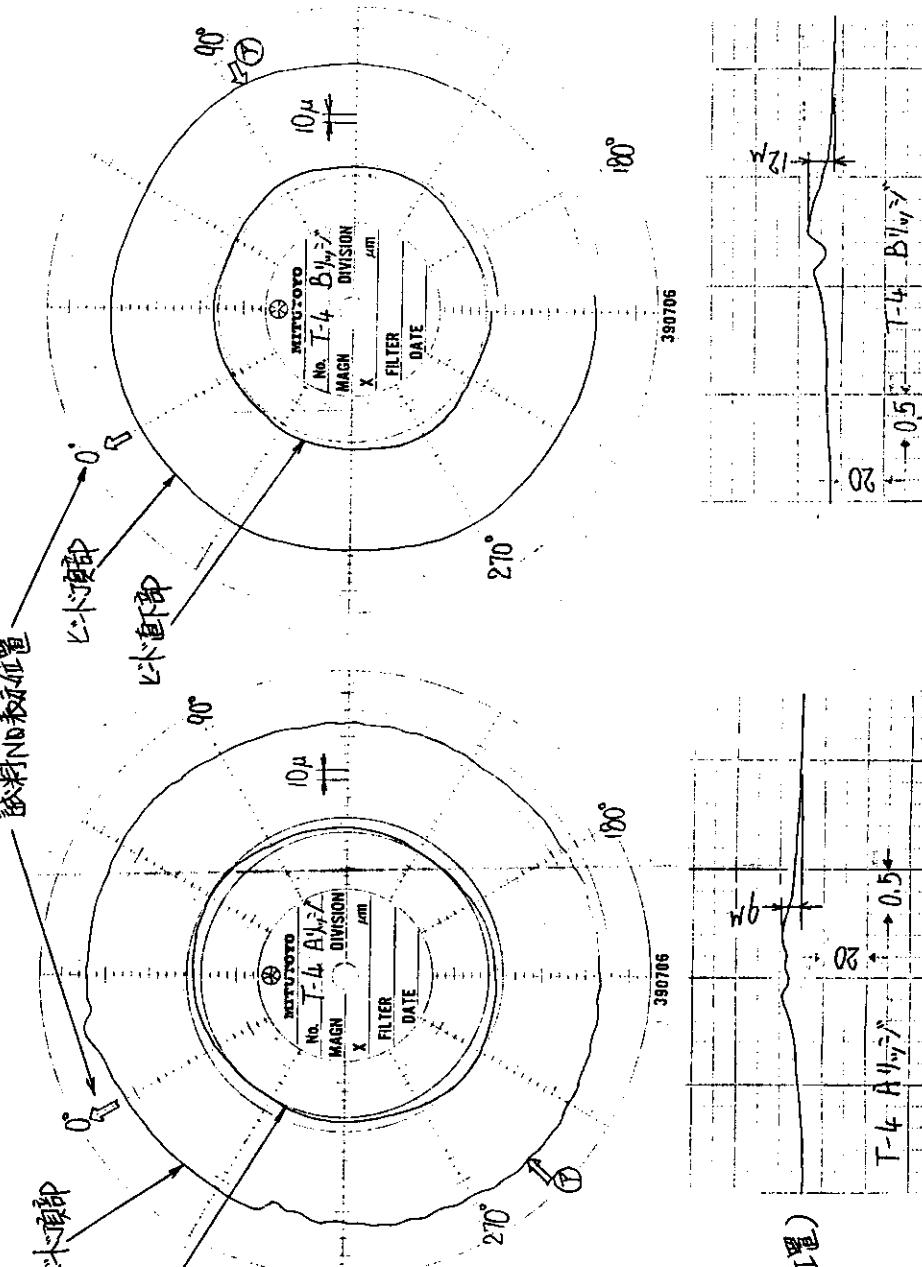
1) リンジ凸寸法検査記録

機 種	規 格	承 認
元	正	22

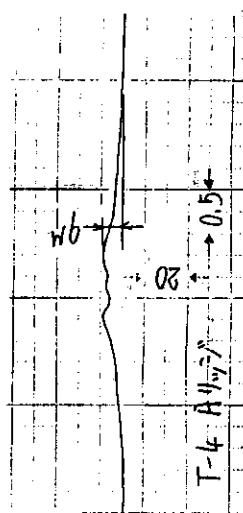
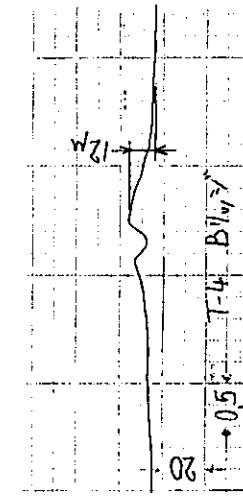
品名	
日本原子力研究所東海研究室	
部品名	検査場所
417G19701	63年12月12日
次年度	



測定機：三盤式圓度測量機

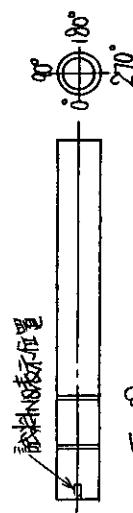


表面 A ① の測定結果
凸量の測定結果
(上記円形①の位置)



No. 8

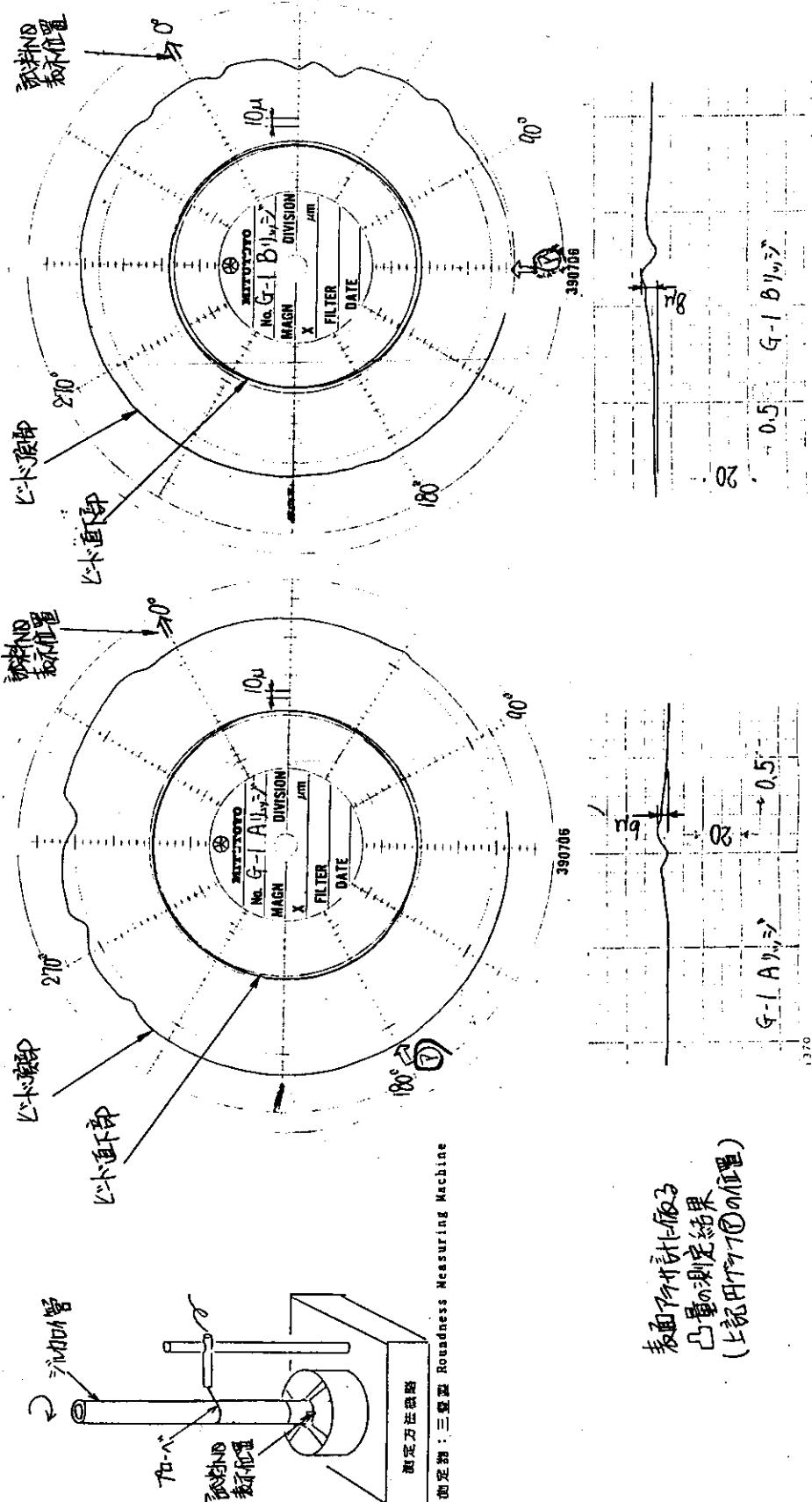
試験用 G-1



1) ハジ凸寸法検査記録

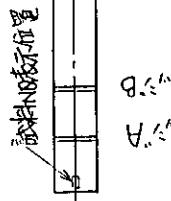
機種番号		品名	機種番号	機種名	機種番号	機種名	機種番号
作業番号	417G19701						
出力番号	決定用						

検査年月日 昭和 63 年 12 月 12 日



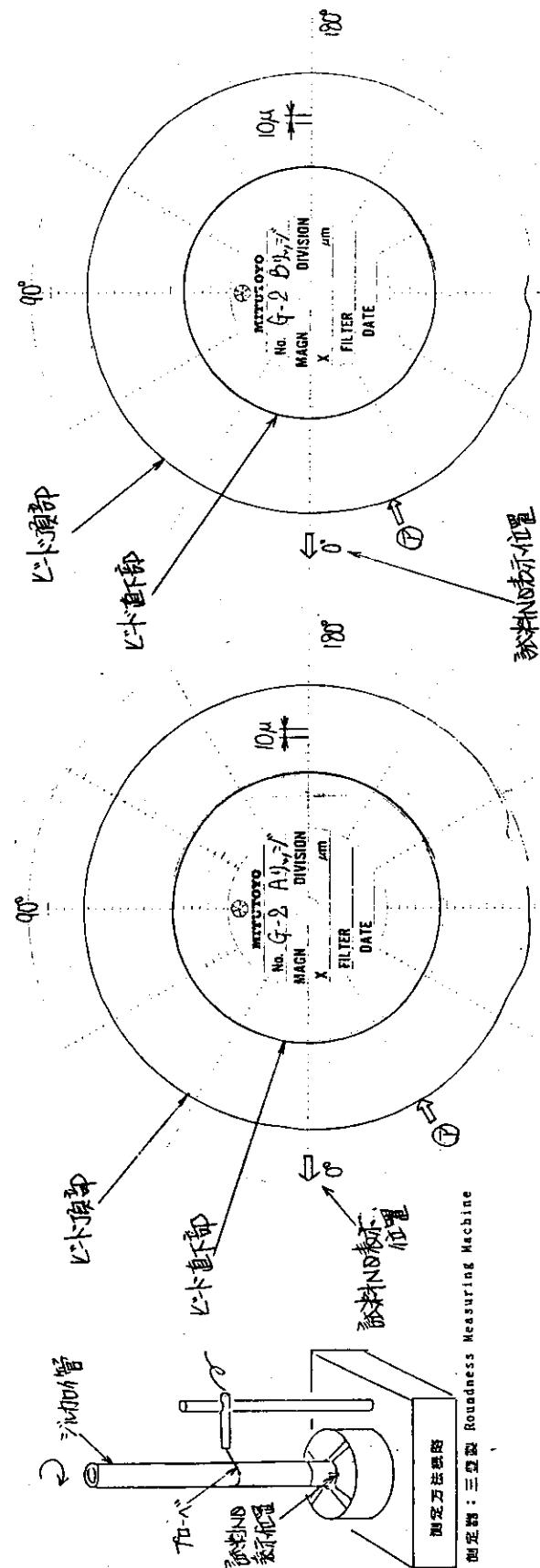
No. 9

試料 No. G-2



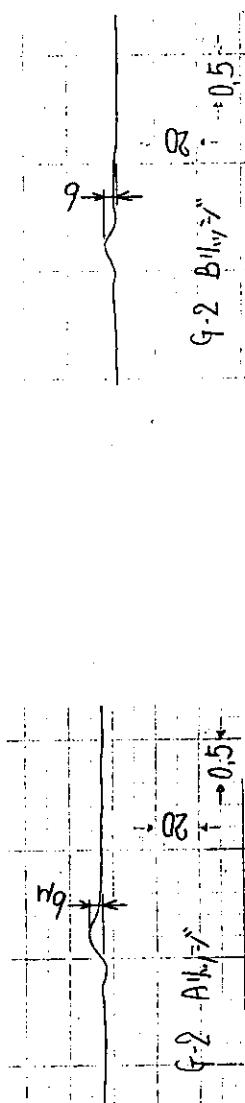
1) リジ凸寸法検査記録

品名			名	品名	名
規格	基準	承認	規格	基準	承認
			日本原子力研究所東海研究所以	日本原子力研究所東海研究所以	
規格番号	試験用	作成年月日	検査用月日	規格番号	作成年月日



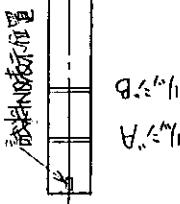
測定器：三立式 Roundness Measuring Machine

表面アラサ計測値
凸量の測定結果
(上記円⑦の位置)



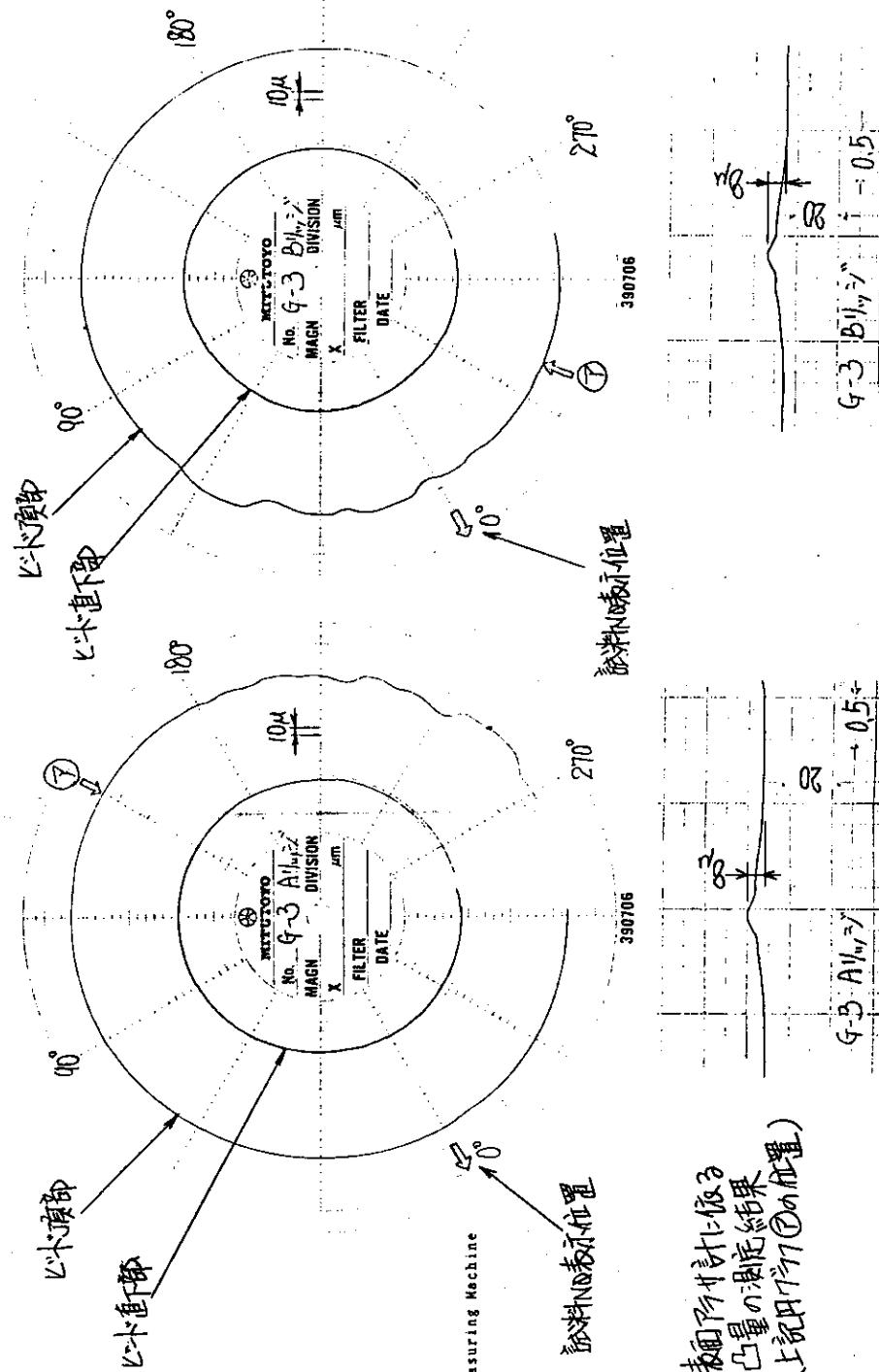
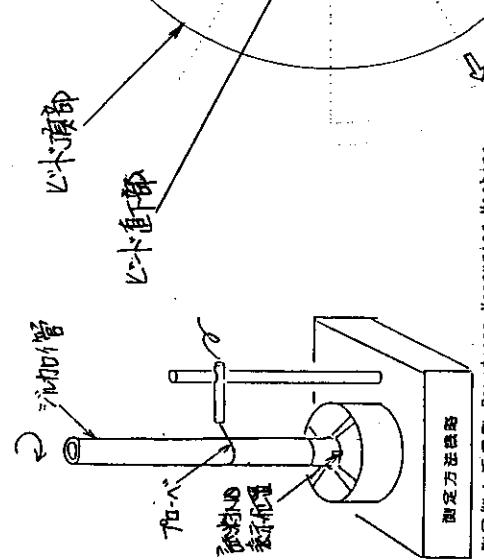
No. 10

試験番号 G-3

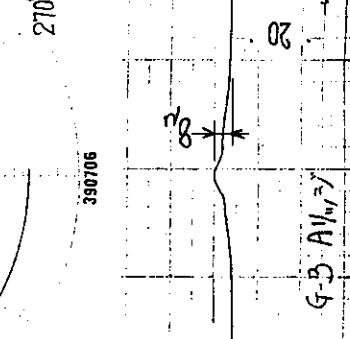


ノジ寸法検査記録

品名		メタルゲージ	測定場所	日本原子力研究開発機構研究所
番号		47G19701		
試験番号		決定	検査年月日	昭和 63 年 12 月 12 日

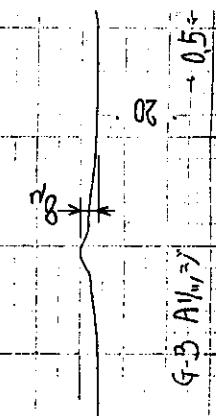
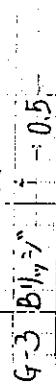


表面アサヒ位置



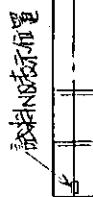
表面アサヒ位置
山量の測定結果
(上記用グラフ⑦の位置)

390.06



No. 11

試料 No. G-4



A. 1/10

180°

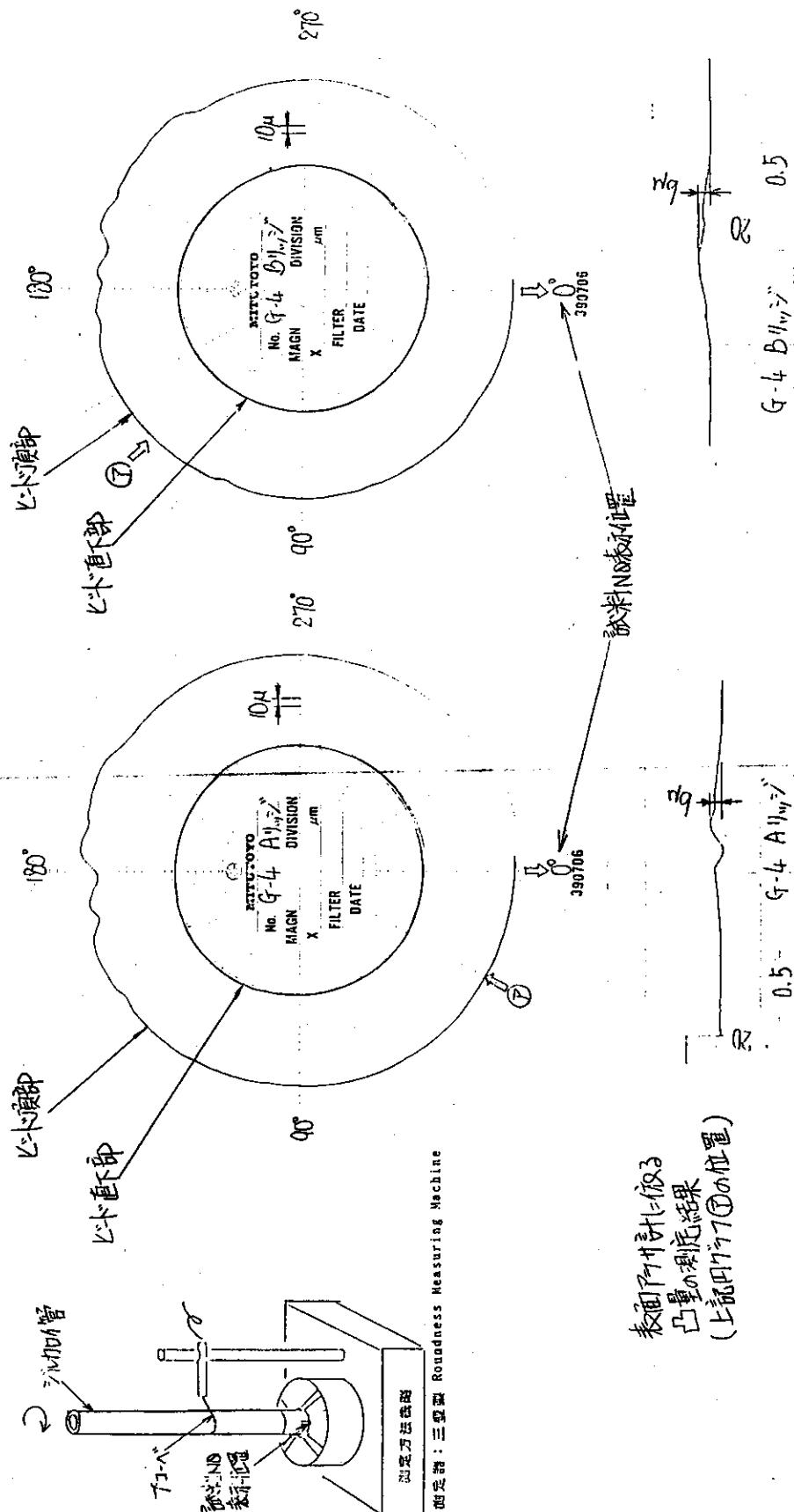
270°

90°

規	規	規
規	規	規

1) リジット法検査記録

品名		日本原子力研究所東海研究室	
形品名		検査者	
作番	447G19701	検査日	昭和 63 年 12 月 12 日
型番号	決定	測定工具	



No. 12

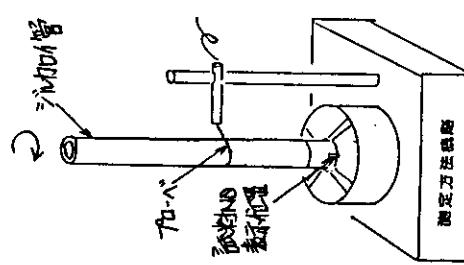
試料 No. A-1

部材測定位置



A-1

凹面管

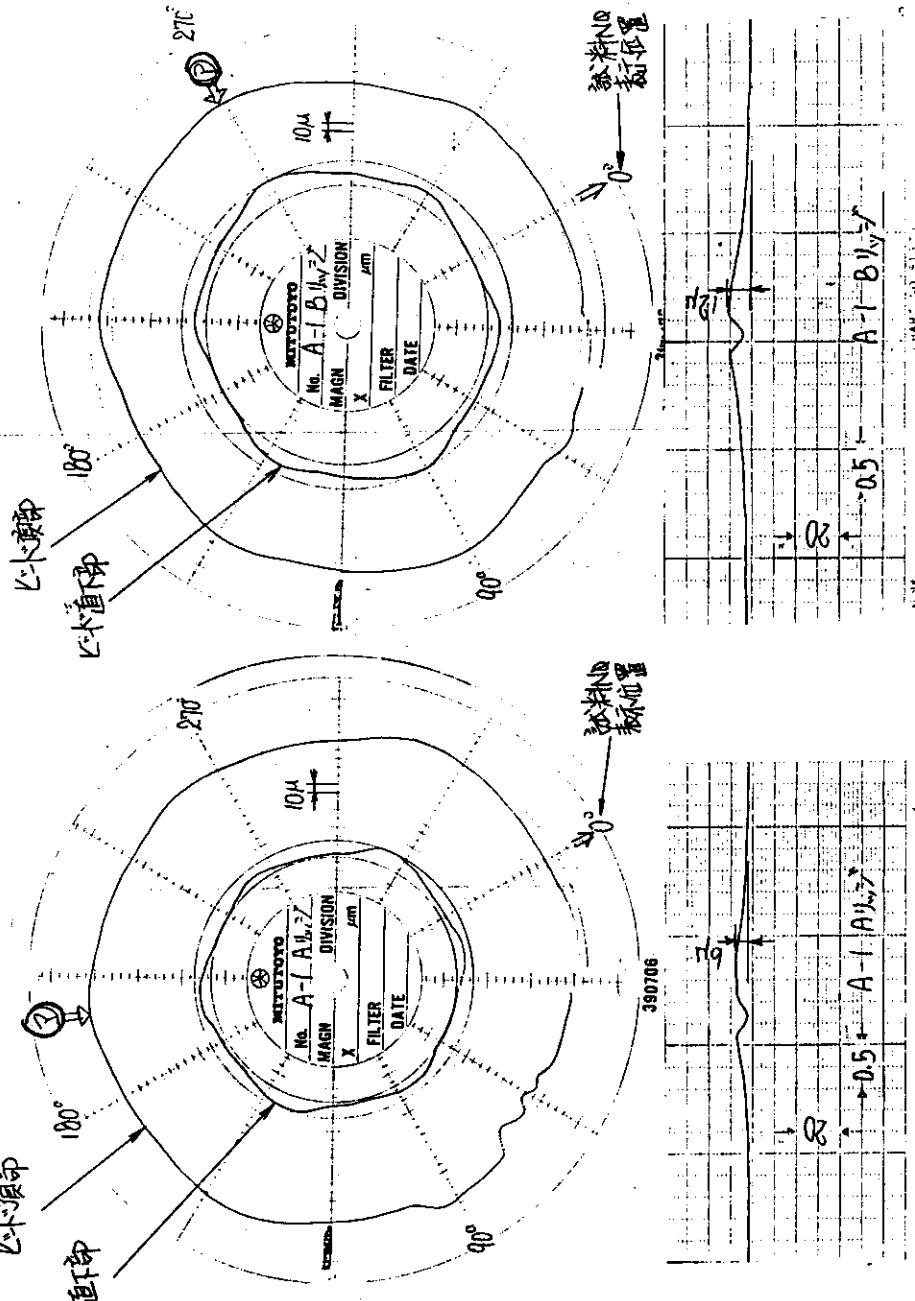


測定方法基盤

測定機: 三量圓度測定機

11.11.11寸法検査記録

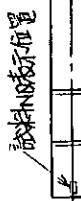
品名		試験機器	検査場所
部品名	作番	検査場所	検査場所
試験機器	47619701	日本原子力研究所東海研究部	検査場所
試験機器	決定	検査年月日	昭和63年12月12日



表面アラサ計測値
凸面の測定結果
(上部円筒①の位置)

No. 13

試験 No. A-2



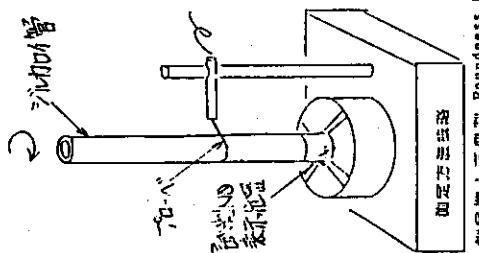
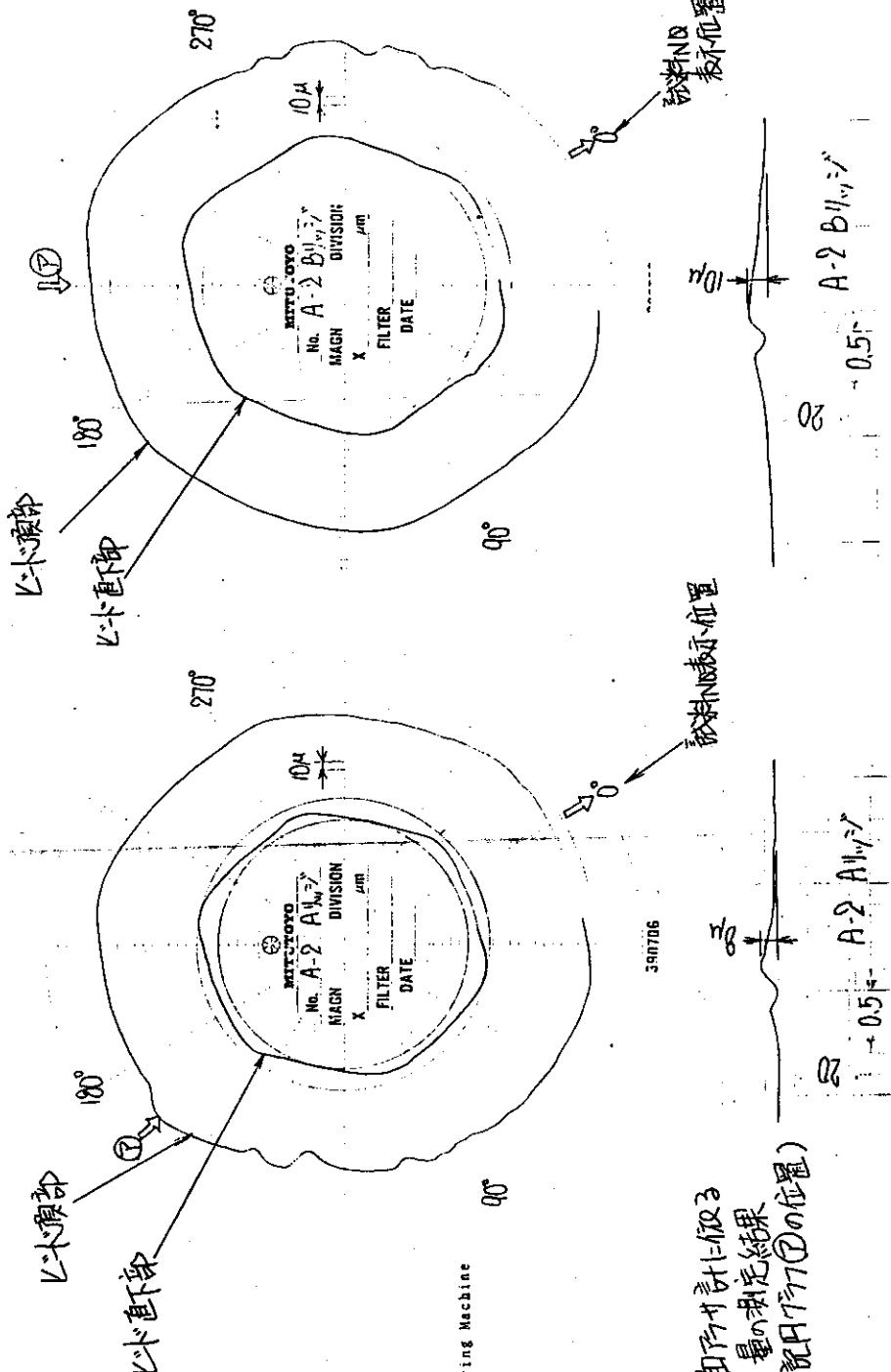
A-2

寸法検査記録

品名	ガラス内蔵油圧管	日本原子力研究所東海研究施設
部品名		検査所
作番	417G19701	

前面番号 汽泡圧 63 ± 12 Hg 日

規	承	5
元	五	

測定方法説明
測定方法説明
 表面アサギは1段目
 □量の検定結果
 (上部円アーチ⑦の位置)

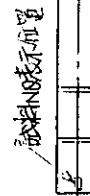
0.5 mm A-2 A1.17

0.5 mm A-2 B1.17

0.5 mm

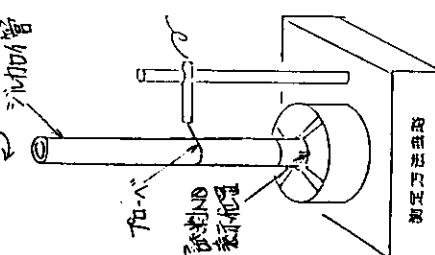
No. 14

試験 A-4

A-4
B-290°
270°

品名	部品名	作成年月日	検査出所
示	番号		
丸穴付凸凹管	417G19701	63年12月	日本原子力研究所実験研究部
	決定圖		

凸凹管

測定方法説明
測定機：三立式 Roundness Measuring Machine

凸凹部

直部

180°

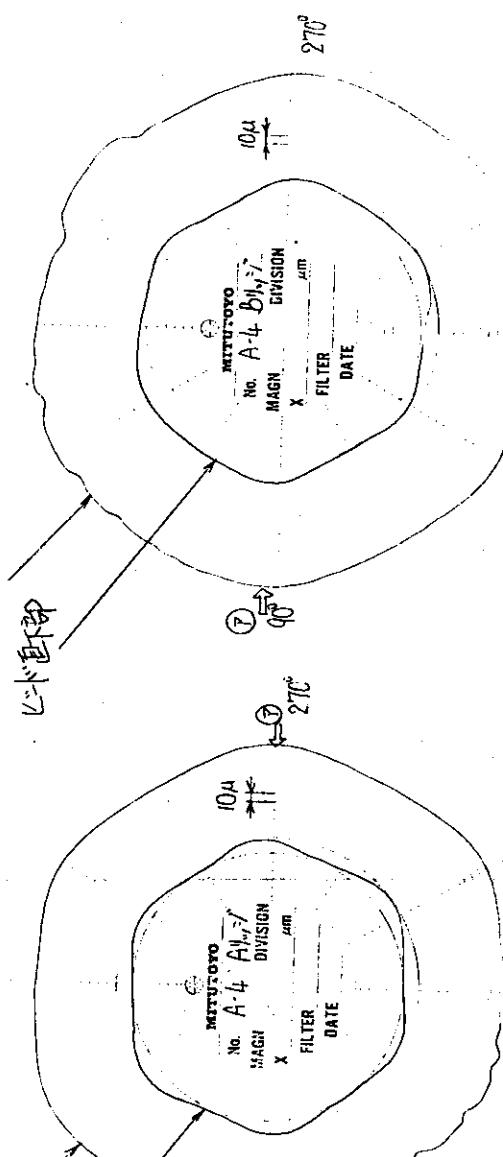
90°

凸凹部

直部

180°

90°

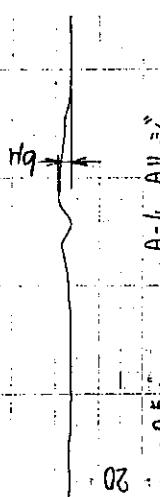
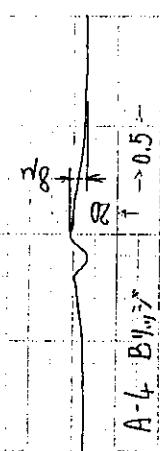


測定位置

390706

390706

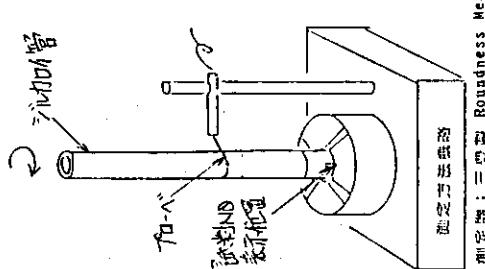
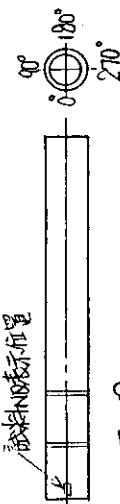
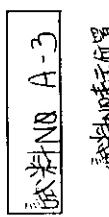
390706

表面アラサ計測値
凸凹部測定結果
(上記A-4⑦の位置)

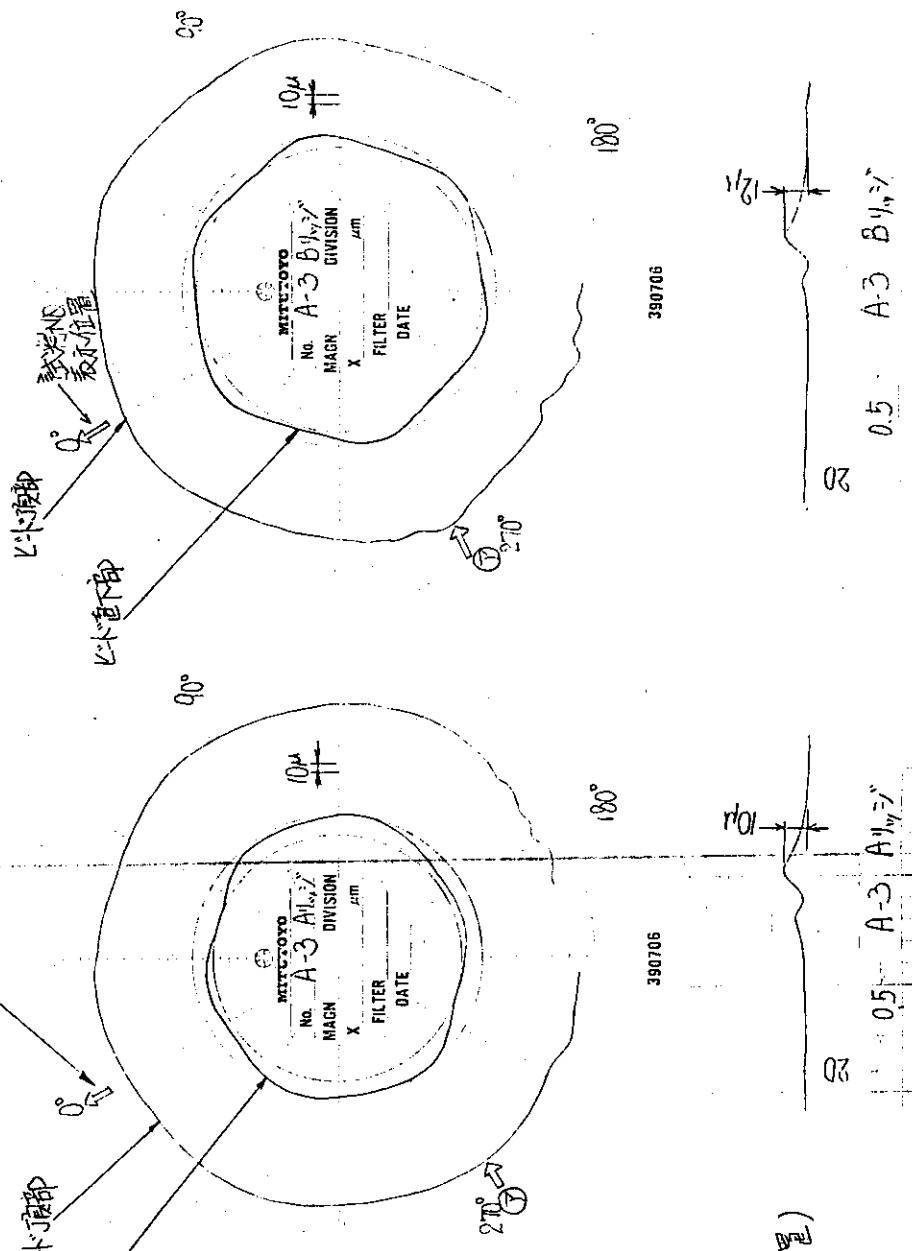
52

錄記查檢法寸尺公分

品名	名	大穴付シロ口管	酒	日本原力研究所所長海研究室
商品名	商		酒	研究所
作番	番	41761970		
上面告号	号	天宝四	酒類	日本原力研究所所長海研究室



THE THREE-POINT ROUNDNESS MEASURING MACHINE

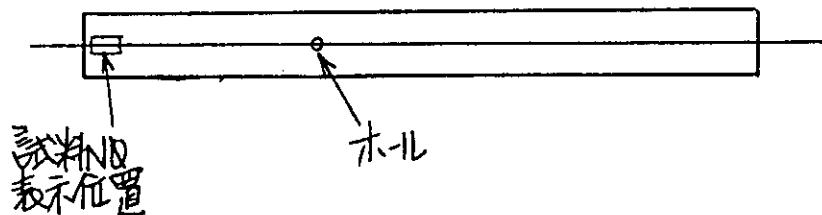


表面アラサ計に依る
山量の測定結果
(上記田ケ原①の位置)

No. 16

ホール寸法検査記録

品名	キズ付孔加工管	顧客	日本原子力研究所東海研究所
部品名	ホール寸法		
作番	417G19701		
図面番号	決定図	検査年月日	昭和 63 年 12 月 10 日



	試料NO	穴径Φ0.4	穴深 0.38	備考
1	T-1	Φ0.44	0.36	
2	T-2	Φ0.44	0.36	
3	T-3	Φ0.44	0.40	
4	T-4	Φ0.45	0.46	
5	G-1	Φ0.43	0.40	
6	G-2	Φ0.44	0.38	
7	G-3	Φ0.45	0.40	
8	G-4	Φ0.44	0.38	
9	A-1	Φ0.44	0.32	
10	A-2	Φ0.44	0.42	
11	A-3	Φ0.45	0.40	
12	A-4	Φ0.44	0.38	

単位:mm	検査	照査	承認
-------	----	----	----

No. 17

尺寸法検査記録

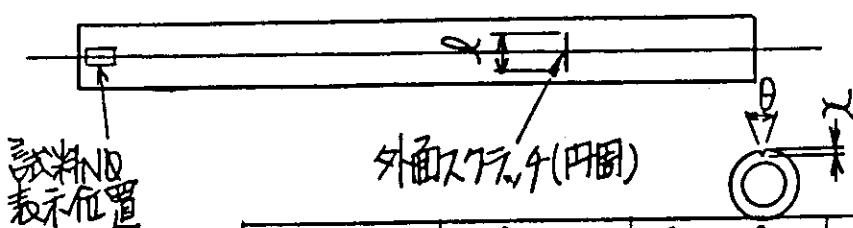
品名	ダブルジルコイド管	顧客	日本原子力研究所東海研究所	
部品名	外面寸法(平行)			
作番	47G19701			
図面番号	決定図	検査年月日	昭和 63年 12月 12日	
試料NO	深さ x	角度θ	長さ l	備考
	0.15~0.20	15°~20°	5	左記寸法 目標値
1 T-1	0.20	良	良	
2 T-2	0.22	良	良	
3 T-3	0.20	良	良	
4 T-4	0.18	良	良	
5 G-1	0.20	良	良	
6 G-2	0.18	良	良	
7 G-3	0.22	良	良	
8 G-4	0.26	良	良	
9 A-1	0.26	良	良	
10 A-2	0.16	良	良	
11 A-3	0.18	良	良	
12 A-4	0.16	良	良	

単位: mm	検査	照査	承認
	至	至	認

No. 18

寸法検査記録

品名	キス付ルル加口管	顧客	日本原子力研究所東海研究所
部品名	外側スラブ(円周)寸法		
作番	417G19701		
図面番号	決定図	検査年月日	昭和 63年 12月 12日



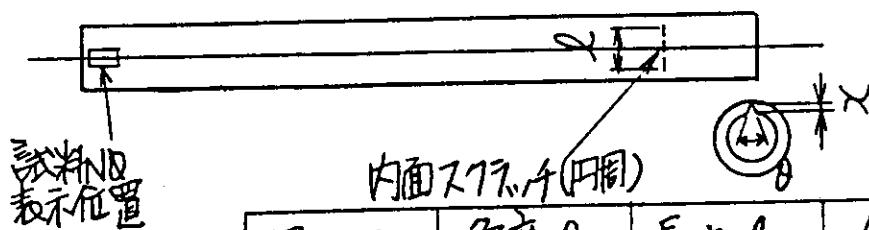
	試料NO	深さX	角度θ	長さL	備考
		0.15~0.20	15°~20°	5	左端は設計目標値
1	T-1	0.16	良	良	
2	T-2	0.14	良	良	
3	T-3	0.14	良	良	
4	T-4	0.12	良	良	
5	G-1	0.18	良	良	
6	G-2	0.18	良	良	
7	G-3	0.16	良	良	
8	G-4	0.18	良	良	
9	A-1	0.20	良	良	
10	A-2	0.18	良	良	
11	A-3	0.18	良	良	
12	A-4	0.14	良	良	

単位:mm	検査	照査	承認
-------	----	----	----

No. 19

尺寸法検査記録

品名	ガス付ジル加口1管	顧客	日本原子力研究所東海研究所
部品名	内面尺寸(円周)寸法		
作番	47G19701		
図面番号	決定図	検査年月日	昭和 63年 12月 12日



	試料NO	深さX	角度θ	長さl	備考
		0.15~0.20	15°~20°	5	規格値 目標値
1	T-1	0.32	良	良	
2	T-2	0.24	良	良	
3	T-3	0.26	良	良	
4	T-4	0.20	良	良	
5	G-1	0.20	良	良	
6	G-2	0.22	良	良	
7	G-3	0.22	良	良	
8	G-4	0.18	良	良	
9	A-1	0.22	良	良	
10	A-2	0.26	良	良	
11	A-3	0.18	良	良	
12	A-4	0.20	良	良	

検査	照査	承認
単位:mm		

No. 20

キズ位置寸法検査記録

品名	キズ付ジルカロイ管						顧客	日本原子力研究所東海研究所		
部品名	面上キズ位置									
作番	417G19701									
図面番号	決定図						検査年月日	昭和 63年 12月 12日		
<p>L</p> <p>A B C D E F G</p> <p>試験位置 外周 内周 外周穴(穴開)</p>										
No.	試験位置	A	B	C	D	E	F	G	L	
NQ	NQ	60	60	60	60	60	60	40	460	
1	T-1	60	60	58	61	59	60	40	458	
2	T-2	60	60	58	60	58	60	40	458	
3	T-3	60	60	60	60	60	60	40	459	
4	G-1	60	60	59	60	60	60	40	459	
5	G-2	60	60	60	61	59	59	40	459	
6	G-3	60	60	60	61	59	60	40	459	
7	A-1	60	60	60	61	59	60	40	459	
8	A-2	59	60	60	61	60	60	40	459	
9	A-3	60	60	59	60	60	60	40	459	
								検査	照査	承認
単位:mm										

No. 21

穴位置寸法検査記録

品名	キズ付シルカロイ管							顧客	日本原子力研究所東海研究所	
部品名	面 上 キズ位置									
作番	417G19701									
図面番号	決定図							検査年月日	昭和 63 年 12 月 12 日	
No.	試料	A	B	C	D	E	F	G	L	
NQ	40	40	40	40	45	45	40	330		
1	T-4	40	40	40	40	45	45	40	329	
2	G-4	40	40	40	40	45	45	40	329	
3	A-4	40	40	40	40	45	45	40	329	
単位: mm								検査	照査	承認

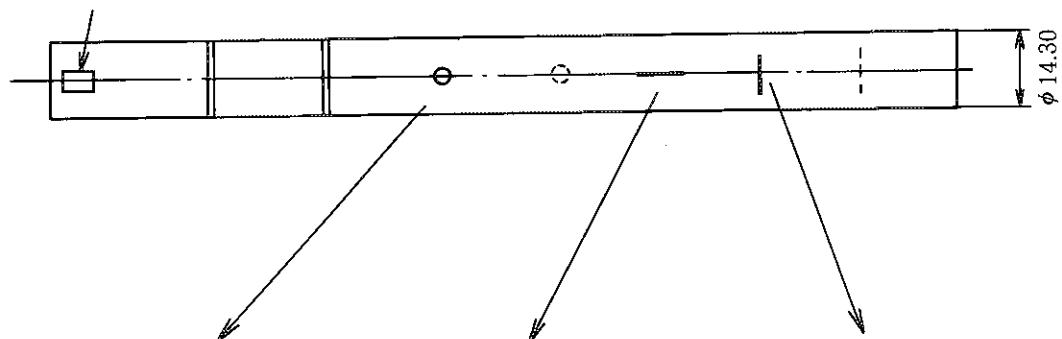
エンジニアリング シート ENGINEERING SHEET

頁 22/
No.

キズ付ジルカロイ管ホール及びスクラッチ写真

試料No. T-1

試料No表示位置



	ホー ル	外面スクラッチ (タテ)	外面スクラッチ (円周)	
写 真				
寸 法	穴径 (設計値φ0.40) 実測値φ0.44	深さ (設計値0.15~0.20) 実測値 0.20	深さ (設計値0.15~0.20) 実測値 0.16	
		角度 (設計値15°~20°)	角度 (設計値15°~20°)	
法	穴深 (設計値0.38) 実測値0.36	幅 実測値 0.28	幅 実測値 0.29	
		長さ (設計値 5) 実測値 5.0	長さ (設計値 5) 実測値 5.0	
備 考			5.00	
	写真倍率: 25倍	検 査	照 査	承 認

エンジニアリング シート ENGINEERING SHEET				頁 23/ No.
キズ付ジルカロイ管ホール及びスクラッチ写真				試料No. G-1
<p>試料No.表示位置</p> <p>$\phi 10.72$</p>				
写 真	ホー ル	外面スクラッチ (タテ)	外面スクラッチ (円周)	
寸 法	穴径 (設計値 $\phi 0.40$) 実測値 $\phi 0.43$	深さ (設計値0.15~0.20) 実測値 0.20	深さ (設計値0.15~0.20) 実測値 0.18	
	穴深 (設計値0.38) 実測値0.40	幅 実測値 0.29 長さ (設計値 5) 実測値 5.0	幅 実測値 0.31 長さ (設計値 5) 実測値 5.0	
備 考	↓			
	5.00			
写真倍率: 25倍		検 査	照 査	承 認

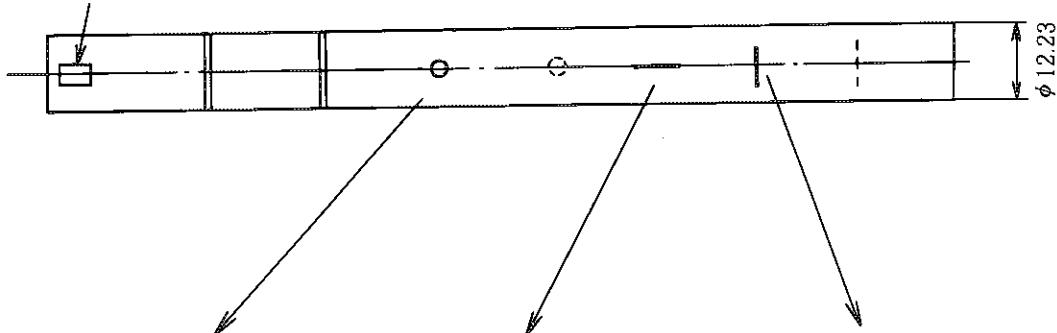
エンジニアリング シート ENGINEERING SHEET

頁 24/
No.

キズ付ジルカロイ管ホール及びスクラッチ写真

試料No. A-1

試料No.表示位置



	ホール	外面スクラッチ (タテ)	外面スクラッチ (円周)
写真			
寸法	穴径 (設計値φ0.40) 実測値φ0.44	深さ (設計値0.15~0.20) 実測値 0.26 角度 (設計値15° ~20°)	深さ (設計値0.15~0.20) 実測値 0.20 角度 (設計値15° ~20°)
	穴深 (設計値0.38) 実測値0.32	幅 実測値 0.31 長さ (設計値 5) 実測値 5.0	幅 実測値 0.30 長さ (設計値 5) 実測値 5.0
備考	↓		
	5.04		
写真倍率: 25倍	検査	照査	承認

エンジニアリング シート ENGINEERING SHEET				頁 25/ No.
キズ付ジルカロイ管ホール及びスクラッチ写真				試料No. T-2
<p>試料No.表示位置</p>				
写 真	ホー ル	外面スクラッチ (タテ)	外面スクラッチ (円周)	
寸 法	穴径 (設計値 $\phi 0.40$) 実測値 $\phi 0.43$	深さ (設計値0.15~0.20) 実測値 0.22	深さ (設計値0.15~0.20) 実測値 0.14	
	穴深 (設計値0.38) 実測値0.36	角度 (設計値15°~20°)	角度 (設計値15°~20°)	
		幅 実測値 0.22	幅 実測値 0.30	
		長さ (設計値 5) 実測値 5.0	長さ (設計値 5) 実測値 5.0	
備 考	↓			
	5.00			
写真倍率: 25倍		検 査	照 査	承 認

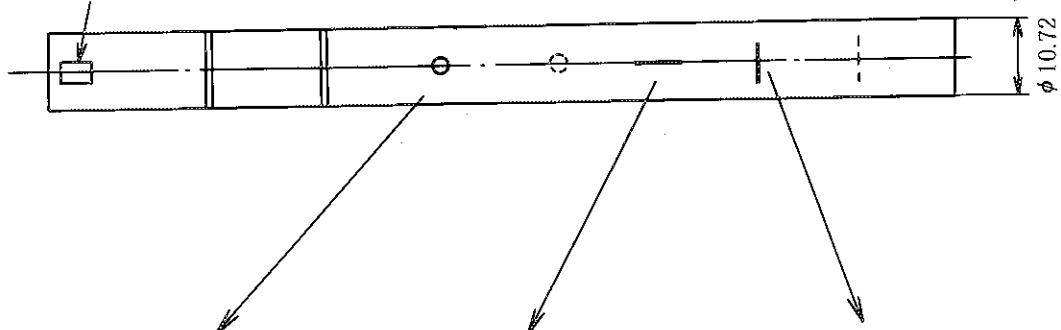
エンジニアリング シート ENGINEERING SHEET

頁 26/
No.

キズ付ジルカロイ管ホール及びスクラッチ写真

試料No. G-2

試料No.表示位置



	ホー ル	外面スクラッチ (タテ)	外面スクラッチ (円周)
写 真			
寸 法	穴径 (設計値Ø0.40) 実測値Ø0.44	深さ (設計値0.15~0.20) 実測値 0.18	深さ (設計値0.15~0.20) 実測値 0.18
		角度 (設計値15°~20°)	角度 (設計値15°~20°)
法 則	穴深 (設計値0.38) 実測値0.38	幅 実測値 0.24	幅 実測値 0.24
		長さ (設計値 5) 実測値 5.0	長さ (設計値 5) 実測値 5.0
備 考	↓		
	5.00		
写真倍率: 25倍	検 査	照 査	承 認

エンジニアリング シート ENGINEERING SHEET		頁 27/ No.			
キズ付ジルカロイ管ホール及びスクラッチ写真		試料No. A-2			
<p>試料No表示位置</p>					
	ホー ル	外面スクラッチ (タテ)	外面スクラッチ (円周)		
写 真					
寸 法	穴径 (設計値 $\phi 0.40$) 実測値 $\phi 0.44$	深さ (設計値0.15~0.20) 実測値 0.16	深さ (設計値0.15~0.20) 実測値 0.18		
	穴深 (設計値0.38) 実測値0.42	角度 (設計値15°~20°)	角度 (設計値15°~20°)		
備 考	幅 実測値 0.33	幅 実測値 0.30			
	長さ (設計値 5) 実測値 5.0	長さ (設計値 5) 実測値 5.0			
		↓	5.02		
写真倍率: 25倍		検 査	照 査	承 認	

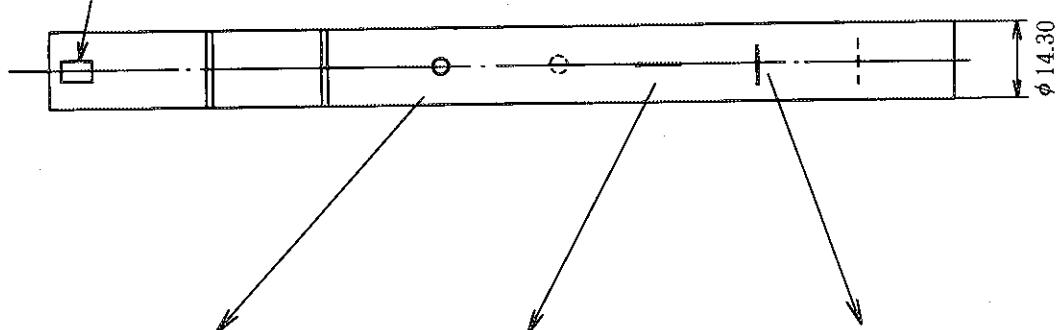
エンジニアリング シート ENGINEERING SHEET

頁 28/
No.

キズ付ジルカロイ管ホール及びスクラッチ写真

試料No. T-3

試料No.表示位置



	ホー ル	外面スクラッチ (タテ)	外面スクラッチ (円周)
写 真			
寸 法	穴径 (設計値φ0.40) 実測値φ0.44	深さ (設計値0.15~0.20) 実測値 0.20 角度 (設計値15° ~20°)	深さ (設計値0.15~0.20) 実測値 0.14 角度 (設計値15° ~20°)
	穴深 (設計値0.38) 実測値0.40	幅 実測値 0.23 長さ (設計値 5) 実測値 5.0	幅 実測値 0.29 長さ (設計値 5) 実測値 5.0
備 考	↓		
	5.02		
写真倍率: 25倍	検査	照査	承認

エンジニアリング シート ENGINEERING SHEET				頁 29/ No.
キズ付ジルカロイ管ホール及びスクラッチ写真				試料No. G-3
<p>試料No表示位置</p>				
写 真	ホー ル	外面スクラッチ (タテ)	外面スクラッチ (円周)	
寸 法	穴径 (設計値φ0.40) 実測値φ0.45	深さ (設計値0.15~0.20) 実測値 0.22 角度 (設計値15°~20°)	深さ (設計値0.15~0.20) 実測値 0.16 角度 (設計値15°~20°)	
	穴深 (設計値0.38) 実測値0.40	幅 実測値 0.30 長さ (設計値 5) 実測値 5.0	幅 実測値 0.28 長さ (設計値 5) 実測値 5.0	
備 考	↓			
	5.00			
写真倍率: 25倍		検 査	照 査	承 認

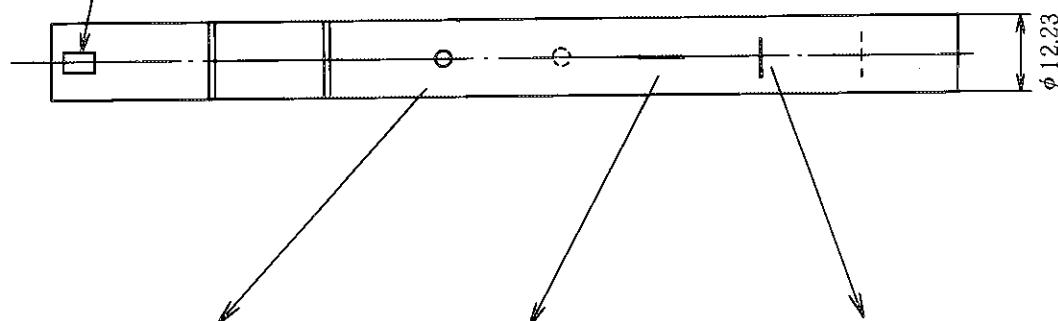
エンジニアリング シート ENGINEERING SHEET

頁 30/
No.

キズ付ジルカロイ管ホール及びスクラッチ写真

試料No. A-3

試料No表示位置



	ホー ル	外面スクラッチ (タテ)	外面スクラッチ (円周)
写 真			
寸 法	穴径 (設計値φ0.40) 実測値φ0.45	深さ (設計値0.15~0.20) 実測値 0.18 角度 (設計値15°~20°)	深さ (設計値0.15~0.20) 実測値 0.18 角度 (設計値15°~20°)
	穴深 (設計値0.38) 実測値0.40	幅 実測値 0.24 長さ (設計値 5) 実測値 5.0	幅 実測値 0.27 長さ (設計値 5) 実測値 5.0
備 考	↓		
	5.04		
写真倍率: 25倍		検査	照査
		査	査
		承認	

エンジニアリング シート ENGINEERING SHEET		頁 31/ No.		
キズ付ジルカロイ管ホール及びスクラッチ写真		試料No. T-4		
<p>試料No表示位置</p> <p>$\phi 14.30$</p>				
写 真	ホー ル	外面スクラッチ (タテ)	外面スクラッチ (円周)	
寸 法	穴径 (設計値 $\phi 0.40$) 実測値 $\phi 0.45$	深さ (設計値0.15~0.20) 実測値 0.18	深さ (設計値0.15~0.20) 実測値 0.12	
	穴深 (設計値0.38) 実測値0.46	角度 (設計値15°~20°)	角度 (設計値15°~20°)	
		幅 実測値 0.27	幅 実測値 0.31	
		長さ (設計値 5) 実測値 5.0	長さ (設計値 5) 実測値 5.0	
備 考	↓			
	5.02			
写真倍率: 25倍		検 査	照 査	承 認

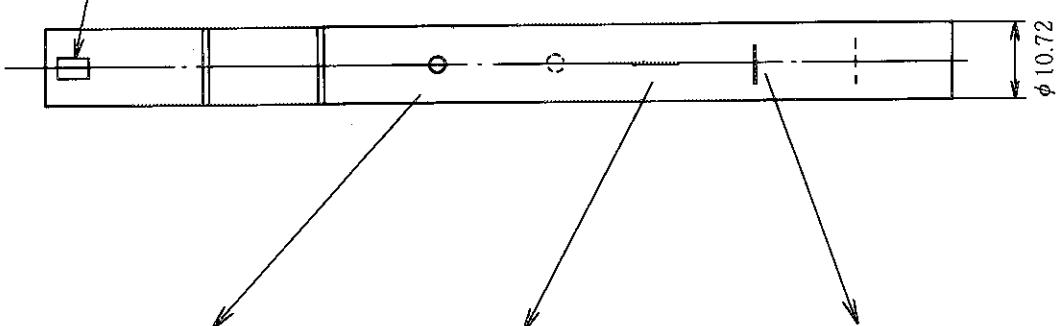
エンジニアリング シート ENGINEERING SHEET

頁 32/
No.

キズ付ジルカロイ管ホール及びスクラッチ写真

試料No. G-4

試料No.表示位置



	ホー ル	外面スクラッチ (タテ)	外面スクラッチ (円周)
写 真			
寸 法	穴径 (設計値Φ0.40) 実測値Φ0.44	深さ (設計値0.15~0.20) 実測値 0.26 角度 (設計値15°~20°)	深さ (設計値0.15~0.20) 実測値 0.18 角度 (設計値15°~20°)
	穴深 (設計値0.38) 実測値0.38	幅 実測値 0.28 長さ (設計値 5) 実測値 5.0	幅 実測値 0.28 長さ (設計値 5) 実測値 5.0
備 考	↓		
	4.98		
写真倍率: 25倍		検 査	照 査
			承 認

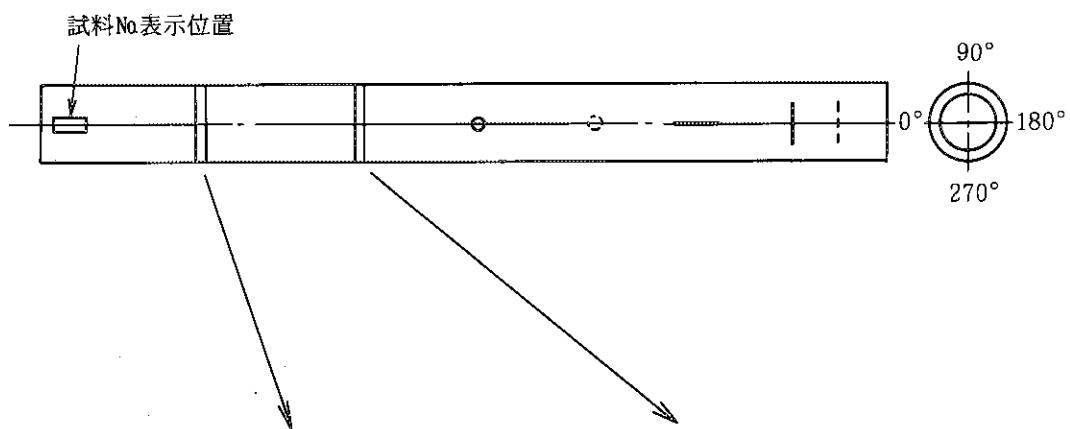
エンジニアリング シート ENGINEERING SHEET				頁 33/ No.
キズ付ジルカロイ管ホール及びスクラッチ写真				試料No. A-4
<p>試料No.表示位置</p>				
写 真	ホー ル	外面スクラッチ(タテ)	外面スクラッチ(円周)	
寸 法	穴径 (設計値φ0.40) 実測値φ0.44	深さ (設計値0.15~0.20) 実測値 0.16	深さ (設計値0.15~0.20) 実測値 0.14	
	穴深 (設計値0.38) 実測値0.38	角度 (設計値15°~20°)	角度 (設計値15°~20°)	
		幅 実測値 0.23	幅 実測値 0.25	
		長さ (設計値 5) 実測値 5.0	長さ (設計値 5) 実測値 5.0	
備 考	↓			
	5.00			
写真倍率: 25倍		検 査	照 査	承 認

エンジニアリング シート ENGINEERING SHEET

頁 34/
No.

キズ付ジルカロイ管リッジ写真

試料No. T-4



	リッジA (0.005)	リッジB (0.015)
写 真		
凸寸法	0.008	0.012
位 置	225°	120°

写真倍率：25倍

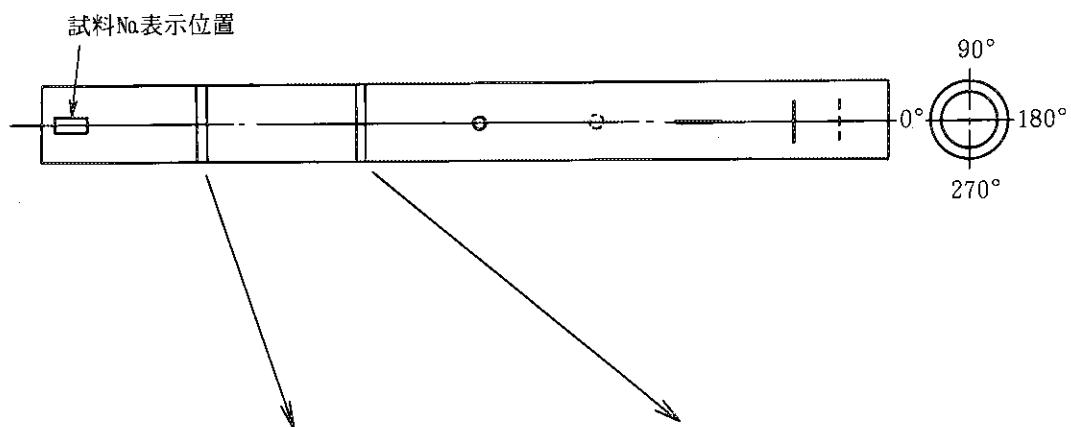
検 査		照 査		承 認	
--------	--	--------	--	--------	--

エンジニアリング シート ENGINEERING SHEET

頁 35/
No.

キズ付ジルカロイ管リッジ写真

試料No. G-1



	リッジA (0.005)	リッジB (0.015)
写 真		
凸寸法	0.006	0.008
位 置	180°	120°

写真倍率：25倍

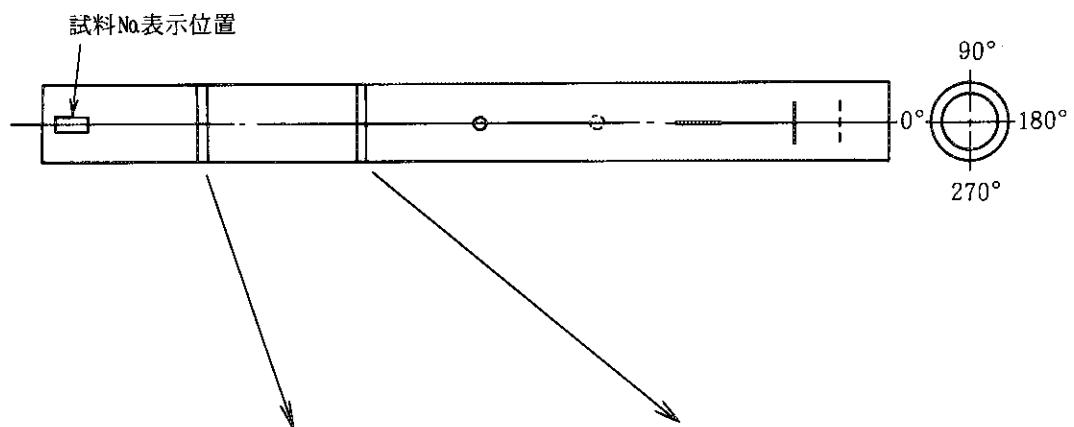
検 査		照 査		承 認	
--------	--	--------	--	--------	--

エンジニアリング シート ENGINEERING SHEET

頁 36/
No.

キズ付ジルカロイ管リッジ写真

試料No. A-1



	リッジA (0.005)	リッジB (0.015)
写 真		
凸寸法	0.006	0.012
位 置	200°	270°

写真倍率：25倍

検 査		照 査		承 認	
--------	--	--------	--	--------	--

No. 37

負数 檢査記録

品名	エス付ジル加1管	顧客	日本原子力研究所東海研究所
部品名	缶上		
作番	417G19701		
図面番号	決定図	検査年月日	昭和 63年 12月 12日

下表の通りであることを確認。

	T型	G型	A型	試験値	判定
N01 相互箱	T-1	G-1	A-1	460	合格
N02 "	T-2	G-2	A-2	460	合格
N03 "	T-3	G-3	A-3	460	合格
N04 "	T-4	G-4	A-4	330	合格

単位：一	検査	照査	承認
------	----	----	----

(キスの作製条件⑨)

38

電子工程之研究報告

昭和63年 11月21日

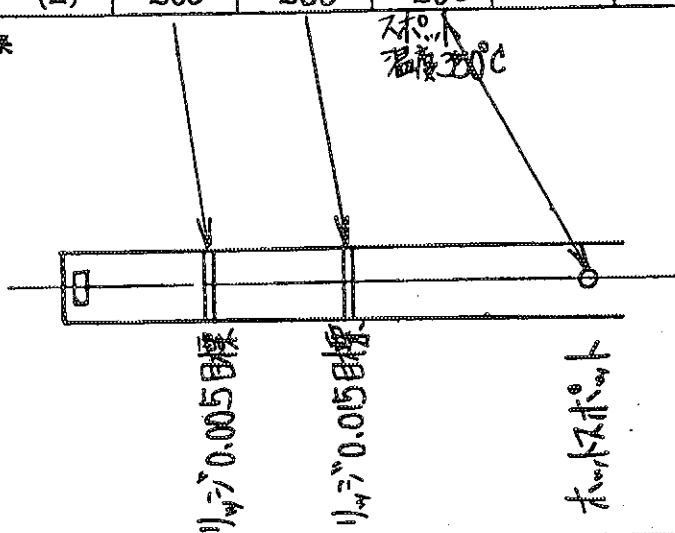
主題 キズ付シルカロイド管(リッジ)(未トス未ト)

西餐·加工方法

(~~NEUT~~ BEEN AT T-1 ~ T-4)

材 料									
機 械 部 品	使 用 機 械	EBW			N V W		使 用 電 子 級	R	S
	使 用 治 具	N D Z					フ ィ ラ メ ン ト	H F -	R F -
	真 空 度 及 時 間	10^{-4} TORR			min		数 量		
		1	2	3	4	5	6	7	
	加 速 電 壓 (K V)	100	100	50					
	電 子 電 流 (mA)	1	1	0.02					
	LENS 宽 度 (mA) (ダイヤル)	450	440	370					
	焦 点	上・表・下 mm	上・表・下 mm	上・表・下 mm	上・表・下 mm	上・表・下 mm	上・表・下 mm	上・表・下 mm	上・表・下 mm
	バイアス (V)								
	パルス巾 (mSEC)								
	パルス周波数 (Hz)			1000					
	加 工 速 度 (mm/min)	4.3sec	4.5sec	3.0sec					
	偏 向 (°)			$34^{\circ}38'$					
	天井-加工材料 距離 (mm)	200	200	200					

附圖及技術界



39

電子ビーム溶接報告

昭和63年 11月21日

本 記		実 験 者
--------	--	-------------

主題 キズ付シル加1管 (1.5")
(ホルダホルト)

溶接・加工方法

(管理NO G-1~G-4)

材 料								
条件	使 用 錐 機	EBW	NVW		使 用 電 子 純	R S		
	使 用 治 具	No2		フ ィ ラ メ ン ト	HF-	RF-		
	真空度及時間	10^{-4} TORR.		min	数 目			
		1	2	3	4	5	6	7
	加速電圧 (KV)	100	100	50				
	電子電流 (mA)	1	1	0.02				
	LENS 電流 (mA) (ダイヤル)	450	470	370				
	焦 点	上・表・下 mm	上・表・下 mm	上・表・下 mm	上・表・下 mm	上・表・下 mm	上・表・下 mm	上・表・下 mm
	バイアス (V)							
	パルス巾 (mSEC)							
件	パルス周波数 (Hz)			1000				
	加工速度 (mm/min)	3.5sec	3.5sec	3.0sec				
	偏 向 (°)			03°±38				
	天井-加工材料 距離 (mm)	200	200	200				
略図及び結果								
<p style="text-align: center;">大さく 温度350°C</p>								

40

電子ビーム溶接報告

昭和63年 11月21日		
承 認		実験者

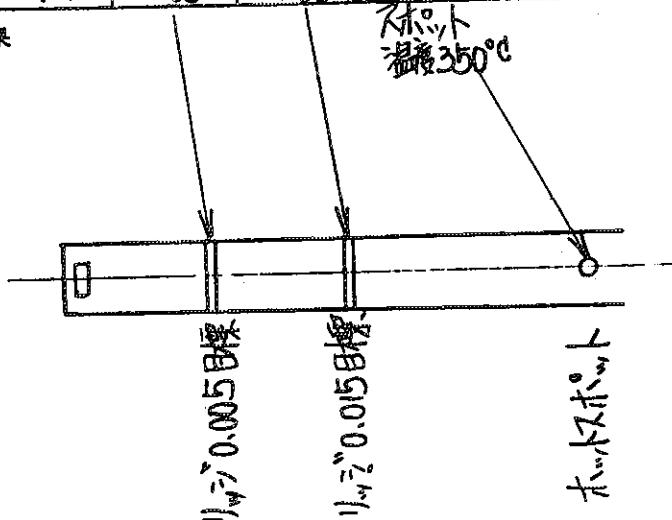
主題 キズ付ジル加1管 (11.7)
(未・スホト)

溶接・加工方法

(管理NO A-1~A-4)

材 料		R S						
条件	使用機械	EBW	NVW	使用電子銃	R	S		
	使用治具	N82		フィラメント	HF-	RF-		
	真空間度及時間	10^{-4} Torr.	min	数 量				
	1	2	3	4	5	6	7	
	加速電圧 (KV)	100	100	50				
	電子電流 (mA)	1	1	0.02				
	LENS 電流 (mA) (ダイヤル)	450	445	370				
	焦 点	上・表・下 mm	上・表・下 mm	上・表・下 mm	上・表・下 mm	上・表・下 mm	上・表・下 mm	上・表・下 mm
	バイアス (V)							
	パルス巾 (mSEC)							
	パルス周波数 (Hz)			100				
	加工速度 (mm/min)	3.5sec	3.5sec	3.0sec				
	偏 向 (mm)			0.3X-0.0 2.0				
	天井-加工材料 距離 (mm)	200	200	200				

略図及び結果



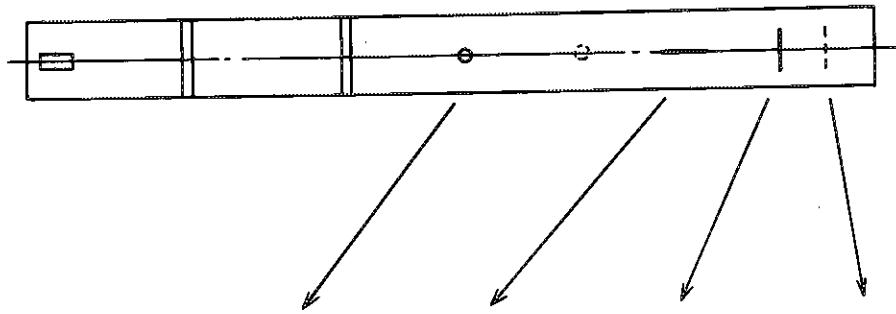
エンジニアリング シート ENGINEERING SHEET

頁 41E
No.

(キズの作成条件データ)

放電加工報告（ホール、スクラッチ）

ジルカロイ管管理No T.G.O 3種全て下記の通りです



条 件	ホール	外周スクラッチ (タ テ)	外周スクラッチ (円 周)	内周スクラッチ (円 周)
電 流 (A)	0.8	0.8	0.8	0.8
電 圧 (V)	12	12	12	12
加工 時 間 (分)	60	67	67	67
加工 速 度 (mg/min)	2	2	2	2
Ton (μ/sec)	1.5	1.5	1.5	1.5
ToFF (μ/sec)	35	35	35	35

検 査		照 査		承 認	
--------	--	--------	--	--------	--