

IASCC 照射試験に係るキャプセルの製作(3) -腐食電位計測用キャプセル- (共同研究)

Fabrication of Irradiation Capsule for IASCC Irradiation Tests (3)
- Irradiation Capsule for ECP Sensor -
(Joint Research)

井手 広史 出雲 寛互 石田 卓也 斎藤 隆 塙 悟史
松井 義典 岩松 重美 金澤 賢治 三輪 幸夫
加治 芳行 塚田 隆 石塚 悅男 河村 弘

Hiroshi IDE, Hironobu IZUMO, Takuya ISHIDA, Takashi SAITO
Satoshi HANAWA, Yoshinori MATSUI, Shigemi IWAMATSU
Yoshiharu KANAZAWA, Yukio MIWA, Yoshiyuki KAJI, Takashi TSUKADA
Etsuo ISHITSUKA and Hiroshi KAWAMURA

大洗研究開発センター
照射試験炉センター

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

IASCC 照射試験に係るキャップセルの製作(3)
—腐食電位計測用キャップセル—
(共同研究)

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター
照射試験炉センター
井手 広史、出雲 寛互、石田 卓也^{※1}、斎藤 隆、塙 悟史^{※2}、
松井 義典、岩松 重美、金澤 賢治^{※1}、三輪 幸夫⁺、
加治 芳行⁺、塙田 隆⁺、石塙 悅男、河村 弘

(2008年1月15日 受理)

軽水炉の炉内構造物材料の応力腐食割れ挙動の評価指標としては、従来用いられてきた溶存酸素濃度や塩素イオン濃度に加え、腐食電位を用いて整理することが一般的に行われる様になってきた。このため、IASCC 照射試験の一環として、酸化鉄型および白金型の腐食電位センサーを用いて、BWR 冷却水の条件下で照射試験を行った。この結果、センサーの構造や構成部材の選定等の改良が必要であることを明らかとした。本報では、これらの試験で使用した腐食電位計測用キャップセルの開発について報告する。

本報告書は、日本原子力研究開発機構(旧日本原子力研究所)と日本原子力発電(株)との共同研究に基づいて実施したものである。

大洗研究開発センター：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

+ 原子力基礎工学研究部門 燃料・材料工学ユニット

※1 出向職員

※2 安全研究センター(ノルウェーエネルギー技術研究所出向中)

Fabrication of Irradiation Capsule for IASCC Irradiation Tests (3)

- Irradiation Capsule for ECP Sensor -

(Joint Research)

Hiroshi IDE, Hironobu IZUMO, Takuya ISHIDA^{*1}, Takashi SAITO, Satoshi HANAWA^{*2},
Yoshinori MATSUI, Shigemi IWAMATSU, Yoshiharu KANAZAWA^{*1}, Yukio MIWA⁺,
Yoshiyuki KAJI⁺, Takashi TSUKADA⁺, Etsuo ISHITSUKA and Hiroshi KAWAMURA

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashi ibaraki -gun, Ibaraki-ken

(Received January 15, 2008)

Dissolved oxygen ions and chlorine ions concentrations have been used as an evaluation index of stress corrosion cracking behavior for light water reactor materials. In addition to these parameters, electrochemical corrosion potential (ECP) is commonly used as the evaluation. Therefore, as a part of IASCC irradiation tests, the irradiation test of the iron oxide type and the platinum type of ECP sensor was carried out under the BWR coolant condition. As a result, it is found that the improvement of ECP sensor is necessary from a viewpoint of the sensor structure and material selection of components. In this report, developed irradiation capsule for ECP sensor is reported.

Keywords: ECP Sensor, Irradiation Capsule, Irradiation Test, IASCC, JMTR

This research was performed by cooperative research with Japan Atomic Power Company.

+ Division of Fuels and Material Engineering, Nuclear Science and Engineering Directorate

^{*1} Research Staff on Loan

^{*2} Nuclear Safety Research Center (temporarily transferred to Institute for Energy Technology of Norway)

目 次

1. 序 論	1
2. 腐食電位とECPセンサー	1
3. 照射キャップセル	2
3.1 照射試料	2
3.2 照射キャップセルの組立て	3
3.3 キャップセルの検査	4
4. 照射試験	4
5. 照射後試験	5
6. 結 論	6
参考文献	6
付 錄 1 製作フローシート及び検査項目一覧表.....	22

Contents

1. Introduction	1
2. Electrochemical corrosion potential and ECP sensor	1
3. Irradiation capsule	2
3.1 Specimens	2
3.2 Capsule assembly	3
3.3 Inspection of capsule	4
4. Irradiation test	4
5. Post irradiation examination	5
6. Concluding remarks	6
References	6
Appendix 1 Manufacture flow chart and Inspection item.....	22

This is a blank page.

1. 序 論

軽水炉の長期利用に対応した構造材料研究の一環として、日本原子力研究開発機構(旧日本原子力研究所)と日本原子力発電(株)との共同研究「ステンレス鋼の多様な条件での照射誘起応力腐食割れ(IASCC)に関する研究」に基づき、JMTRを利用した各種の照射試験を実施した。

IASCCは、放射線照射、腐食や応力などの複雑な要因により発生する現象であり、原子力プラントの長寿命化を図る上で重要な研究課題である。IASCCの照射試験では、沸騰水型原子炉(BWR)の冷却水条件を模擬した高温高圧水をキャップセルに供給し、中性子照射下での「き裂進展試験」及び「き裂発生試験」を実施した。また、試験片の腐食電位を測定するための腐食電位(Electrochemical Corrosion Potential:ECP)センサーを試作し、ECPセンサーの照射試験も実施した。

本報告は、一連のIASCC照射試験のうち、ECPセンサーを照射するための照射キャップセルの製作及び照射試験についてまとめたものである。

2. 腐食電位とECPセンサー

BWRプラントでは、応力腐食割れ(SCC)の抑制を目的として様々な試みが行われている¹⁾。これらの概要を以下に示す。

(1) 水素注入

炉水中の溶存酸素濃度を低減するために数 ppm 程度の水素注入が行われている。しかし、水素注入によって、主蒸気系線量率や配管線量率が上昇するデメリットも報告されている。主蒸気系線量率が上昇するのは、水の酸素原子から生成される放射性窒素(¹³N, ¹⁶N)が揮発性の高い NH₃等となり主蒸気系に移行しやすくなるために生じると考えられている¹⁾。また、配管線量率が上昇するのは、水素注入により炉水雰囲気が還元性になることで、配管表面の酸化物がヘマタイトからスピネルに変化することによって表面酸化物の溶出率が増加するためと考えられている¹⁾。

(2) 水素注入+亜鉛注入

水素注入による線量上昇を抑制するため、米国等では水素注入と併用して亜鉛注入が行われている。亜鉛注入によりステンレスの腐食が抑制されて生成する皮膜が薄くなること、亜鉛がコバルトより競争的に被膜に取り込まれコバルトの被膜取り込みを抑制すること、コバルトの燃料クラッドからの放出を抑えること等が亜鉛による線量上昇の抑制メカニズムとして考えられている¹⁾。

(3) 起動時脱気運転

定期点検等で圧力容器を大気開放にした際、数 ppm 程度まで上昇した溶存酸素濃度を起動前の真空脱気により数十 ppb まで低減させるために実施されている。

(4) 貴金属注入

水素注入による線量率上昇を抑えるため、貴金属注入によって、より少ない水素注入量で腐食電位を低下させることを目的に実施されている。炉水に白金やパラジウムなどの貴金属元素を含んだ溶液を注入し、構造材表面に貴金属元素を取り込ませることにより、ステンレス鋼やニッケル基合金表面に貴金属元素と同様の高い電気化学的触媒活性を与え、それによって少量の水素注入量でも構造材料表

面の腐食電位を大きく低下させることができる¹⁾。

以上の様に溶存酸素濃度を低減させ SCC を低減させる努力が行われている。一方、き裂進展等の応力腐食割れに関する研究では、応力腐食割れの評価指標として冷却水中の溶存酸素濃度や塩素イオン濃度が用いられてきたが、最近では、溶存酸素濃度や塩素イオン濃度に加えて腐食電位を用いて整理することが一般的に行われる様になってきた。腐食電位は、金属材料が高温水中に浸漬された際に示す表面電位であり、金属が腐食溶解することによるアノード電流と酸化性化学種によるカソード電流とがつりあつたところの平衡電位として表され、酸化性化学種の存在量と相関がある¹⁾。しかし、酸化性化学種は水の放射線分解で生成することから炉内の環境に影響されるため、その場環境での腐食電位を測定する必要がある。このため、照射下で使用できる ECP センサーが開発してきた²⁾。

腐食電位は、対象とする材料と電位既知の参考電極間の電位差を測定することにより求められるが、高温高圧水中での腐食電位の測定では参考電極が重要となる。これは、測定結果を熱力学的に意味のある数値に換算するために必要なものであり、ECP センサーの参考電極としては、以下の条件を満たす必要がある³⁾。

- ・熱力学的に正しい動作をすること。
- ・高温高圧水の環境下でも安定性があり、電位の再現性が良いこと。
- ・試験溶液との適合性があること。
- ・耐放射線性があること。

これまで、ECP センサーの参考電極としては、高溶存水素濃度条件(水素水化学条件とも言う、Hydrogen Water Chemistry [HWC])で測定するための白金型、広い範囲の溶存水素濃度条件で測定するための電位検出反応として塩化銀型(Ag/AgCl)、酸化鉄型(Fe/Fe₃O₄)等が利用されてきたが、中性子照射量が高くなると寿命が短くなる問題がある。

このため、IASCC 照射試験の一環として、酸化鉄型および白金型の腐食電位センサーを試作し、BWR 冷却水の条件下で照射試験を行った。

3. 照射キャップセル

3.1 照射試料

腐食電位測定試験に使用したキャップセルは、炉外の水環境制御装置で給水流量、温度、給水圧力を調節できる設計となっている。照射する ECP センサーの設計条件は、水環境制御装置の基本仕様と同様とし、最高使用温度は 320°C、最高使用圧力は 10MPa、照射キャップセルの最大流量は 0.2m³/h とした。

酸化鉄型 ECP センサーは、ジルコニア製センサールームに酸化鉄を封入し、センサールーム内外の酸素濃度差に起因する電位を MI ケーブルを通して計測する構造である。センサールーム以外は金属製で、ジルコニアとの接合は金ロウ付、その外表面はニッケルメッキで被覆されている。酸化鉄型 ECP センサーの構造概念を Fig. 3.1 に示す。

白金型 ECP センサーは、ジルコニア製セラミック端子の両端に 42 合金のパイプとスリーブを接続した構造であり、接合部は金ロウ付、その外表面はニッケルメッキで被覆されている。白金電極は、ジルコニア製セラミック端子のパイプ先端に取り付けた構造である。白金型 ECP センサーの構造概念を Fig. 3.2

に示す。酸化鉄型および白金型の ECP センサーの製作フローシート及び試験検査項目一覧表を付録 1 に示す。

照射試料の種類とキャップセル内の配置位置を Table 3.1 に示す。照射キャップセルには、ECP センサー内部の温度を計測するためのダミーセンサーも設置した。

酸化鉄型 ECP センサーを製作した後、高温水中における炉外性能試験を実施した。試験は、同時に 2 本のセンサーを高温水中低歪速度引張試験装置のオートクレーブ(高圧槽)内部に設置し、BWR 炉内環境を模擬するため 288°C の高温純水中で、同時に設置した銀/塩化銀型外部参照電極の電位を基準として実施した。まず、高温水中における ECP センサーの電位を連続的に測定し、電位の安定性を調べた。センサーを初めて高温水中に暴露した際、最初の 1 日程度は連続的な低下を示したが、その後安定した電位を示し、その電位は計算予測値にほぼ近いことを確認した。

ジルコニアと金属の接合部の耐久性を調べるため、288°C で約 3 時間加熱及び 3 時間冷却の高温水中熱サイクル試験を実施した。これは JMTR 炉内においてセンサーを照射する場合にキャップセル内のセンサーが経験する温度サイクルに比べると十分に過酷な試験である。この温度サイクルをセンサーに 10 回程度与え、その間電位を連続的に計測した結果から、ECP センサーは JMTR 照射サイクルにして 3 サイクル程度の温度変動に対して健全性が確保できることを確認した。

ECP センサーの性能を調べるために高温水中の溶存酸素(Dissolved Oxygen:DO)濃度を 20 ppb から 20 ppm まで変化させて、電位の変化を測定した。この結果、DO を低下させるに伴い、測定電位は理論どおりに低下する傾向を示したことから、製作したセンサーは高温水中において所定の性能を示していることを確認した。

3.2 照射キャップセルの組立て

照射キャップセルは、外筒、内筒および保護管から構成され、内筒には給水管と排水管が接続されている。なお、センサーが破損した場合に鉄粉が系内を循環する恐れがあり、装置を保護する目的で排水管側にフィルター($2 \mu\text{m}$)を設置した。

照射キャップセルは、酸化鉄型センサーと白金型センサーの 2 種類を同時に照射する設計とした。また、照射キャップセル内の ECP 分布を評価するため、キャップセルの上中下 3 箇所にセンサーを装荷する構造とした。キャップセルは外筒と内筒の二重管構造とし、高温高圧水は内筒と仕切管の間を下方に流れ、底部で上昇流となってセンサー間を抜けて上部から排出する設計とした。また、キャップセル装荷位置での核加熱率が少ないことから、予定の照射温度にするためセンサー各段に発熱ブロック(SUS316L)を配置する設計とした。

ECP センサーは、内筒に三段に重ねられており、上段に白金型センサーが 2 個、酸化鉄型センサーが 1 個、中段に酸化鉄型センサーが 2 個及び温度計測用ダミーセンサーが 1 個、下段に白金型 ECP センサーが 1 個、酸化鉄型 ECP センサー 2 個をそれぞれ配置した。キャップセルの組立て図を Fig. 3.3 に示す。また、照射キャップセル内の垂直方向のセンサー及び水温測定用熱電対等の装荷位置を Fig. 3.4 に示す。

3.3 キャプセルの検査

(1) 工場での検査

キャプセルの検査は、JMTR キャプセル等検査基準、承認図、検査要領書に基づいて実施した。検査工程としては、部品検査、中間検査、最終検査 1、最終検査 2、受入検査がある。

部品検査は、キャプセル部品完成時に実施し、材料検査、超音波探傷検査、外観検査、寸法検査等を行った。中間検査は、外筒組立時、内筒組立時、ECP センサー部組時、フルエンスモニタ部組時等に実施し、外観検査、寸法検査、浸透探傷検査等を行った。最終検査 1 は、保護管、スペーサーブロック組立後、保護管部耐圧検査、真直度検査等を行った。最終検査 2 は、完成状態においてヘリウム漏れ検査、絶縁抵抗検査等を行った。受入検査は、キャプセル納入時に実施し、外観検査、標示検査、絶縁抵抗検査、導通検査を行った。キャプセルの製作フローシート及び試験検査項目一覧表を付録 1 に示す。

(2) 原子力機構での検査

原子炉装荷前にキャプセルの給排水管とダンパーチューブを溶接後、耐圧漏洩検査を行った。炉上での検査は、計装付キャプセル作業点検表に基づいて行った。キャプセルを原子炉に挿入後、水環境制御装置を運転して排水管に水圧をかけ、漏洩試験を行った。

4. 照射試験

照射キャプセルは、01M-80A キャプセルとして、JMTR 第 159 サイクル(平成 17 年 5 月 11 日から 6 月 9)で照射された。キャプセルの照射位置は M-4、照射時間は 697 時間であった。キャプセルの照射位置を Fig. 4.1 に示す。また、ガンマ加熱率及び中性子の弹性散乱による発熱を考慮にいれてモンテカルロコード(MCNP)で計算したキャプセル外筒の構造材(SUS316)の核加熱率は 0.75(W/g)であった。各 ECP センサーの平均照射温度及び高速中性子照射量($E < 1\text{MeV}$)を Table 4.1 に示す。また、照射時の溶存酸素及び水素濃度、温度、流量、圧力等の履歴を Fig. 4.2 及び 4.3 に示す。照射下で水温が 180~265°C の範囲において、温度計測用ダミーセンサーの温度は、水温に対して 10~15°C 高い値を示した。

01M-80A キャプセルは、原子炉起動前と原子炉出力 50MW 到達後 5 月 11 日から 5 月 16 日まで給水温度を 200°C に制御して ECP センサーのデータ測定を行った。その後、定常状態まで昇温をして水素添加を実施したところ、5 月 20 日にキャプセルの出入口差圧の増大により流量が低下し、温度が上昇傾向にあるため、加熱器を停止した。このため、所定の照射温度範囲内で制御された期間は、5 月 17 日から 5 月 20 日までであった。

5 月 20 日にキャプセルの出入口差圧の増大により流量が低下した経過を下記に示す。

- (1) 5 月 19 日 13 時半頃、水質を従来の標準水化学条件(Normal Water Chemistry:NWC) ($\text{DO}=170\text{ppb}$) から水素水化学条件(Hydrogen Water Chemistry:HWC) ($\text{Dissolved Hydrogen:DH}=200\text{ppb}$) に変化させるため、ヘリウムによるバブリングを開始。

- (2) 5月20日10時頃、水素注入を開始。
- (3) 5月20日12時頃、HWC条件(DH=200ppb)に到達。
- (4) 5月20日17時頃、キャプセルの流量が低下するとともに、キャプセルの出入口差圧が増大した。このため、運転データを解析したところ、HWC条件に到達した約3時間後の15時頃からキャプセルが接続されている水環境制御装置No.1D系統の流量調節弁開度が徐々に「開」方向へ推移し、17時頃に「全開」となっていることを確認した。
- (5) 5月20日19時頃、キャプセルの流量が回復せず低下し続け、キャプセルの温度が上昇する傾向にあたため、キャプセルの温度調節を行っている加熱器を停止。
- (6) 5月23日、キャプセルの流量は0.08m³/h(5月20日現在)から0.056m³/hに低下し、キャプセル内の水温は5月20日の時点より約10°C上昇。
- (7) 5月23日10時半頃、高温水中の導電率は4.5μS/cm(5月20日23時半現在)から5.5μS/cmと上昇傾向。水中における放射性核種(⁵⁶Mn)濃度も5月20日の時点より約2桁上昇。

この流量低下は、水素添加により発生したクラッド等がキャプセル出口側の流路に設置した装置保護のためのフィルター(2μm)を目詰まりさせた可能性があるため、照射後試験で確かめることにした。流量低下の履歴はFig. 4.3に示されている。試料温度は、流量が低下した影響でサンプリングや流量調整によって大きく変化した。

5. 照射後試験

キャプセルをホットラボで解体し、ECPセンサーの外観観察及び目詰まりを生じたと考えられるフィルターの解体検査を行った。解体前のキャプセルとフィルター部の解体の様子をFig. 5.1～5.2に示す。

ECPセンサーの外観観察の結果をFig. 5.3～5.10に示す。解体時に白金型センサー(UP1)1体の破損が確認された。

Fig. 5.3に、解体時に破損していた白金型センサー(UP1)を示す。本センサーは、ジルコニアが金属との接合部で破断していた。それ以外のECPセンサーについては明らかな破損は観察されなかった。しかし、当初予測していた腐食電位の計測ができなかつことから、ジルコニアと金属の接合部で微小な割れなどが発生していた可能性もあると考えられる。このため、センサーの外観検査に加え、ジルコニアと金属のろう接部の光学顕微鏡観察及び浸透探傷試験を実施した。

外観観察の結果、キャプセル中段に装荷した酸化鉄センサー(MF1)のジルコニアと金属のろう接部を保護するメッキ層が腐食している様子が見られた。このセンサーを浸透探傷試験したところ、現像剤のふき取り中に、ジルコニアが金属の付け根から破損した。この時の外観写真をFig. 5.11示す。ジルコニアの内部を調べるため、ジルコニアをハンマーで粉碎した。この際の破片の写真をFig. 5.12に示す。破面には変色した部位が観察されたことから、き裂が内部まで貫通していたと考えられる。

キャプセル下段に装荷した酸化鉄センサー(LF2)のジルコニア部に観察されたき裂の様子をFig. 5.13に示す。本センサーについては、ろう接部以外でもき裂が確認された。

これらの結果から、異常な電位を示したセンサーにはジルコニアにき裂が生じていたことが明らかとな

った。このき裂により、センサー内に高温水などが侵入することで、センサーの半電池反応の変化や絶縁特性が劣化したために、電位に異常が発生した可能性が考えられる。

フィルターの解体検査結果を Fig. 5.14～5.19 に示す。フィルターのメッシュ部は、全体的に薄い酸化物の層で覆われており、局所的に比較的厚い酸化物の堆積物が観察された。フィルターの目詰まりに関しては、当初、水素導入によってキャップセル内の酸化物が剥離したために発生したと考えていたが、Fig. 5.17 に示すように、フィルター表面の酸化物はそれほど多量に観察されなかった。フィルターの目詰まりの原因は断定できないが、溶解していた金属イオンがフィルター部で析出した可能性もあると考えられる。

6. 結 論

酸化鉄型および白金型の ECP センサーを試作し、BWR 冷却水の条件下で照射試験を行った結果、ECP センサーによる一部の計測は成功したが、フィルターが目詰まりを起こし十分なデータ取得ができなかった。また、照射後の外観観察や浸透探傷試験から、8 個の ECP センサーのうちの 2 つがセラミックス部と金属筒部の接合部で破損したこと、異常な電位を示した ECP センサーにはジルコニアにき裂が生じていたことが明らかとなった。ECP センサーの破損やき裂の原因是不明だが、ジルコニア素材やジルコニアと金属の接合法等、センサー構造の改良も含めて、今後検討する必要がある。また、フィルターの目詰まりを防ぐため、仕様等を再検討する必要があることが明らかとなった。

酸化鉄型 ECP センサーは、製作から照射試験までは約 1 年以上を要し、工場での単体検査、原子力機構の炉外試験、工場でのキャップセル内筒組立て後検査、原子力機構のキャップセル炉内装荷前後の検査を行っている。この間、耐圧検査は 5 回以上、さらに炉外試験では 10 回の熱サイクル試験を実施しており、照射試験にはこれらの履歴を経験させた ECP センサーをそのまま使用した。このため、照射試験前の酸化鉄型 ECP センサーには、負担がかかっていたとも考えられるため、検査や炉外試験の方法等についても再検討する必要がある。

参考文献

- 1) 日本原子力学会編、「原子力水化学ハンドブック」、2000 年。
- 2) R.L.Cowan, S.Hettiarachchi, D.H.Hale and R.J.Law, “Electrochemical Corrosion Potential Monitoring in Boiling Water Reactors”, Proc. 1998 JAIF Int. Conf. Water Chemistry in Nuclear Power Plants, p.419–425, 1998.
- 3) 日本原子力学会編、「原子力発電プラントの水化学管理の実績と将来展望」、1995 年 6 月

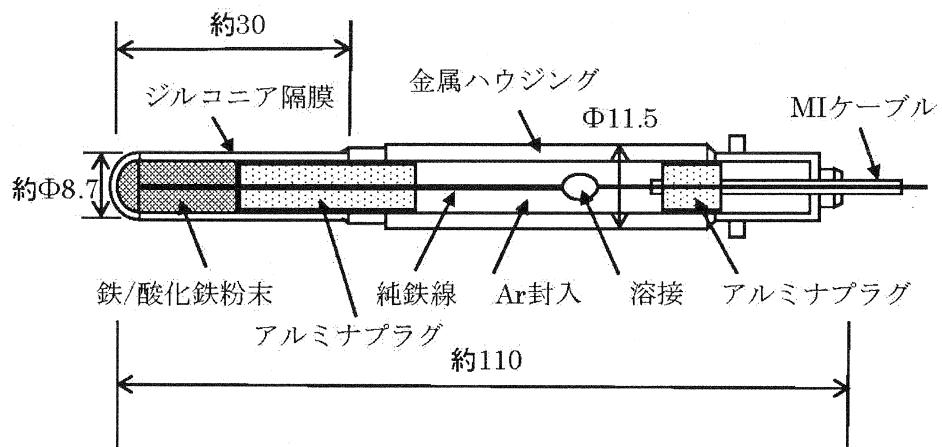


Fig.3.1 酸化鉄型 ECP センサー構造概念図

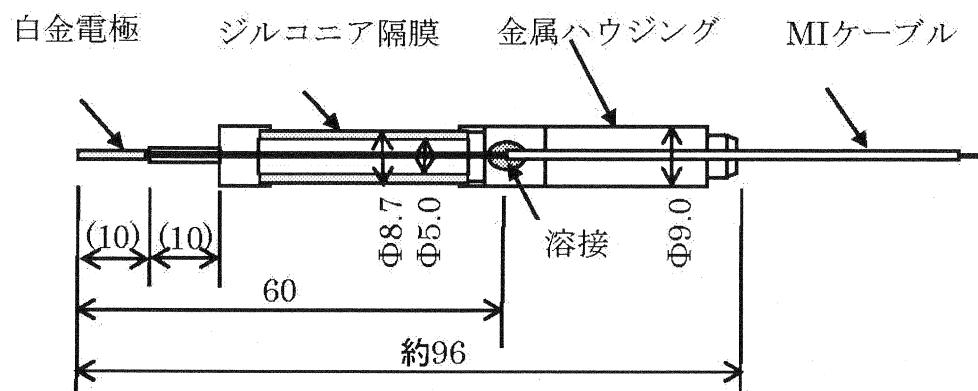


Fig.3.2 白金型 ECP センサー構造概念図

Table 3.1 照射試料の種類とキャップセル内の配置位置

キャップセル内位置	照 射 試 料	
	酸化鉄型 ECP センサー	白金型 ECP センサー
上 段	UF1	UP1、UP2
中 段	MF1、MF2 MF3(温度計測用ダミーセンサー)	なし
下 段	LF1、LF2	LP1

注)表中英記号の意味

U:上段、M:中段、L:下段

F:酸化鉄型 ECP センサー

P:白金型 ECP センサー

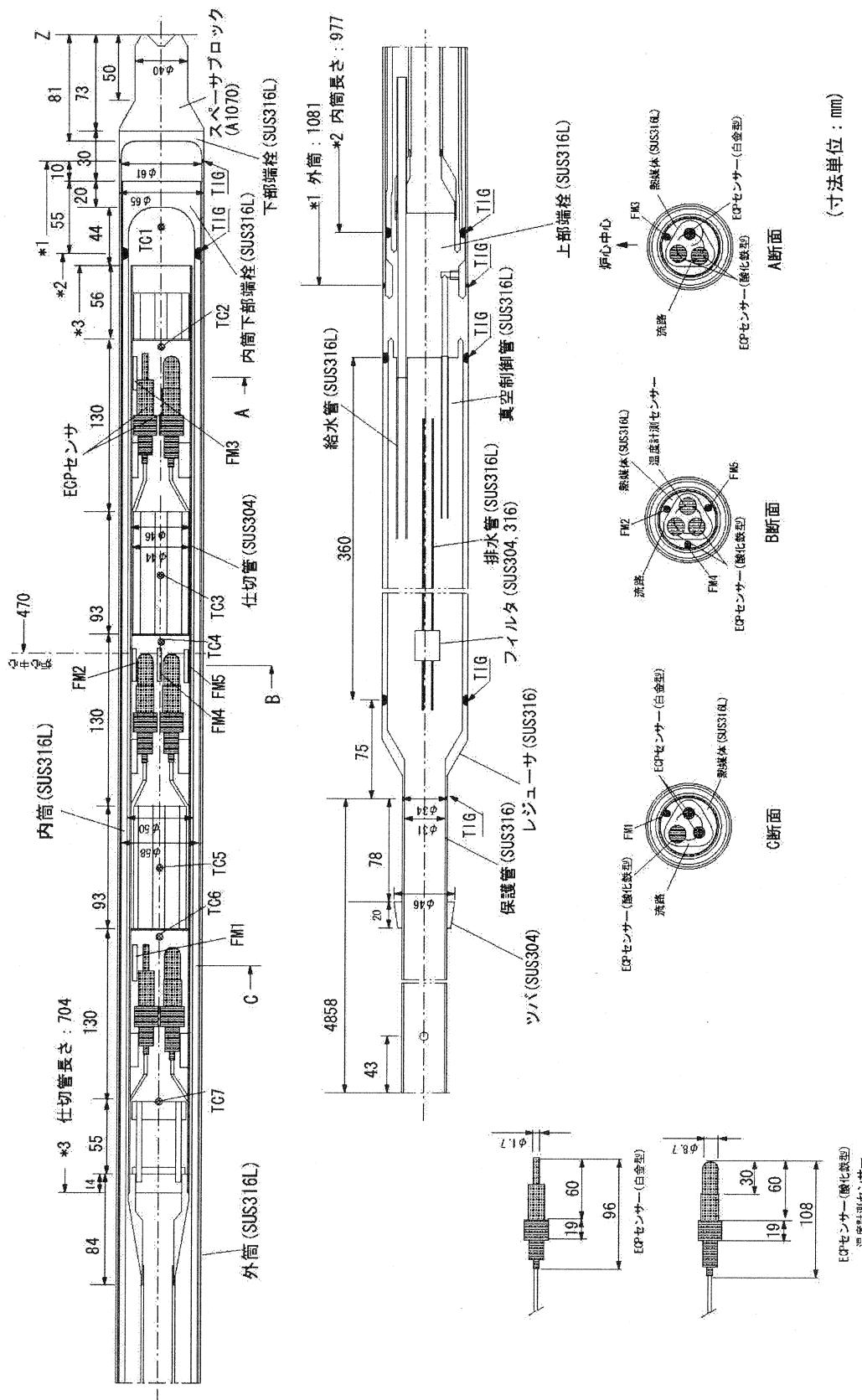


Fig. 3.3 キャップセルの組立図

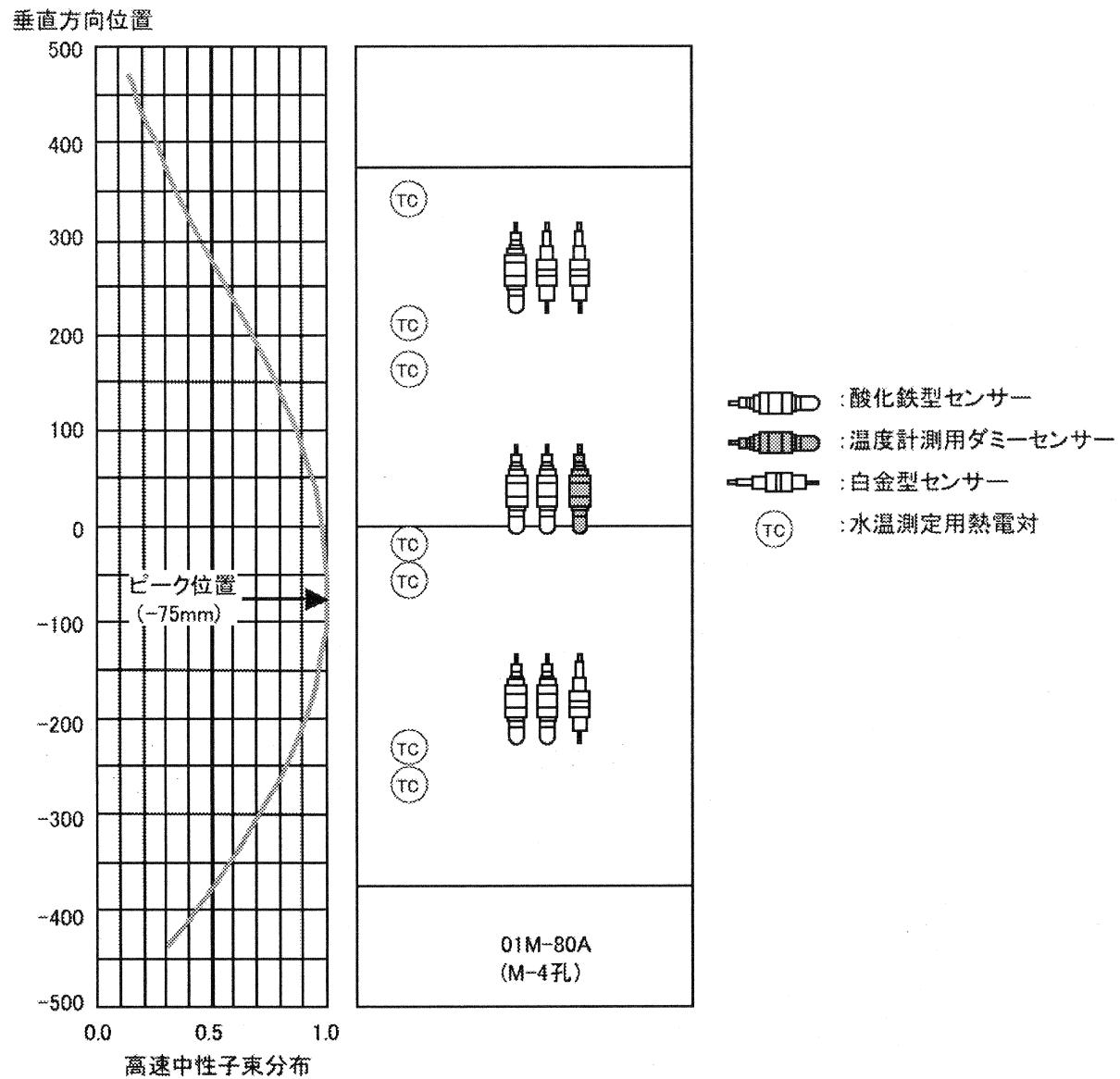


Fig. 3.4 照射キャプセル垂直方向のセンサー及び水温測定用熱電対等の装荷位置

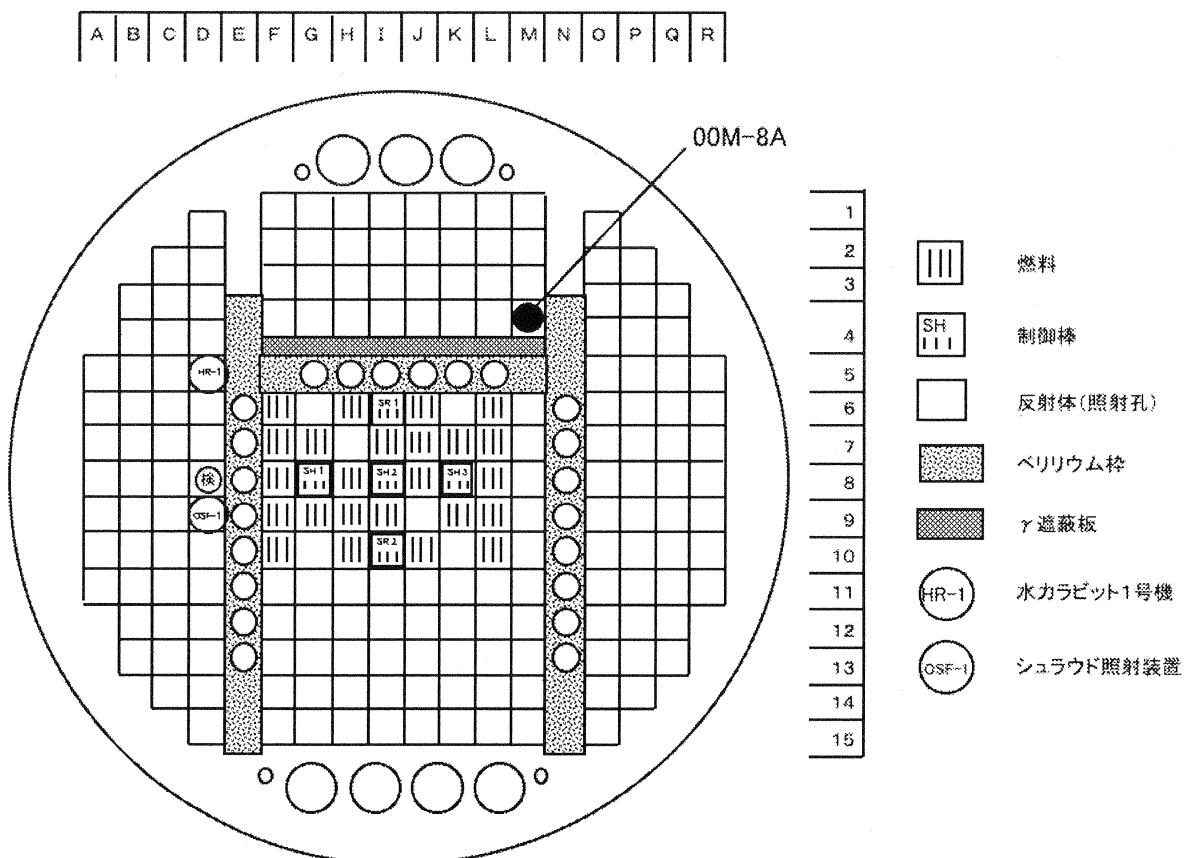


Fig. 4.1 キャプセルの照射位置

Table 4.1 ECP センサーの照射結果

No.	センサー型	センサー推定 平均温度(℃)	高速中性子照射量 (E>1MeV) × 10 ²³ (n/m ²)	照射キャップセルの 装荷位置
UP1	白金	268	2	上段
UP2	白金	268		
UF1	酸化鉄	274		
MF1	酸化鉄	277	3	中段
MF2	酸化鉄	277		
MF3	ダミーセンサー	277		
LP1	白金	263	5	下段
LF1	酸化鉄	274		
LF2	酸化鉄	274		

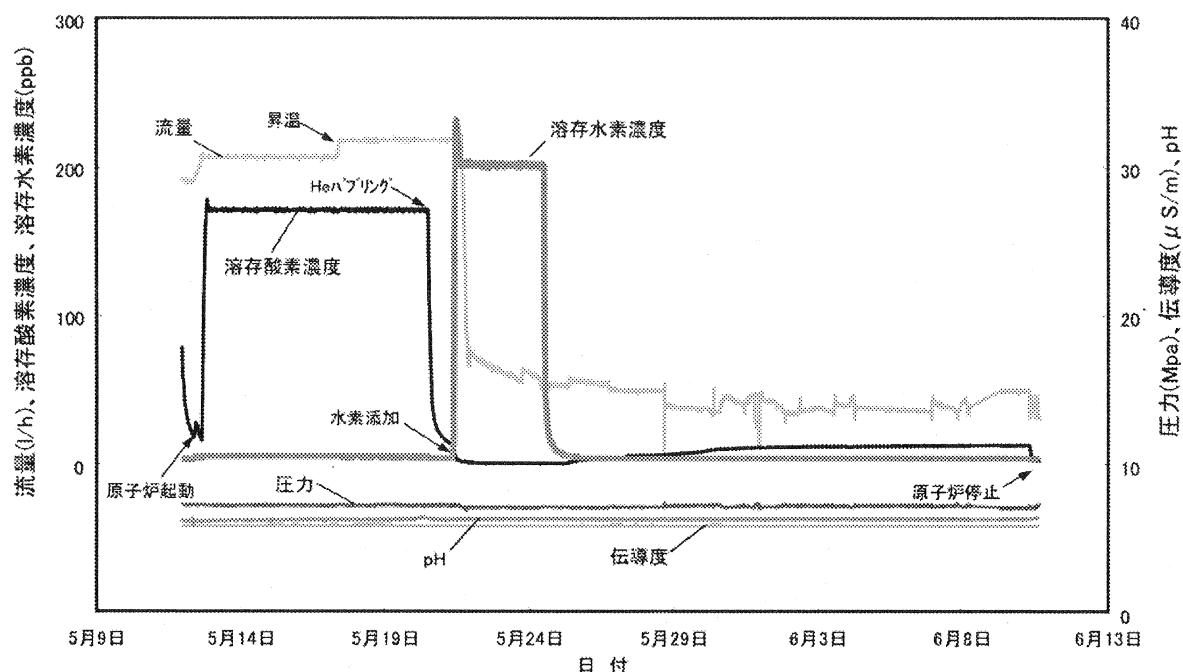


Fig. 4.2 ECP センサーの照射履歴(溶存酸素及び水素濃度等)

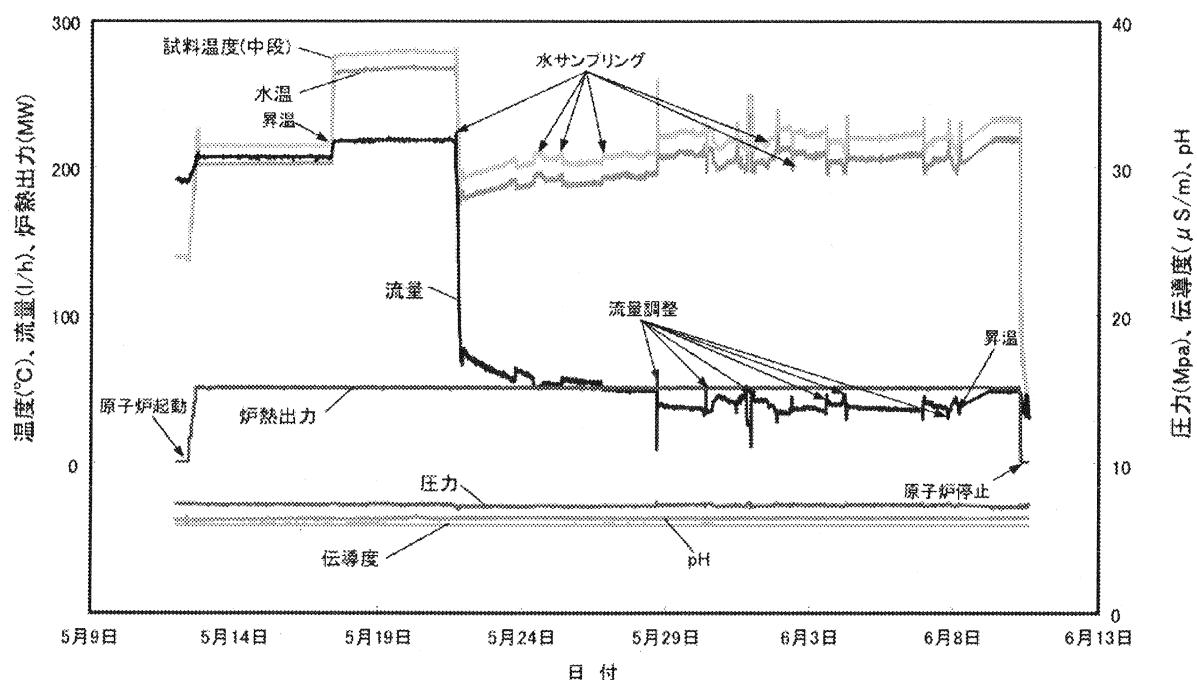


Fig. 4.3 ECP センサーの照射履歴(温度、流量、圧力等)

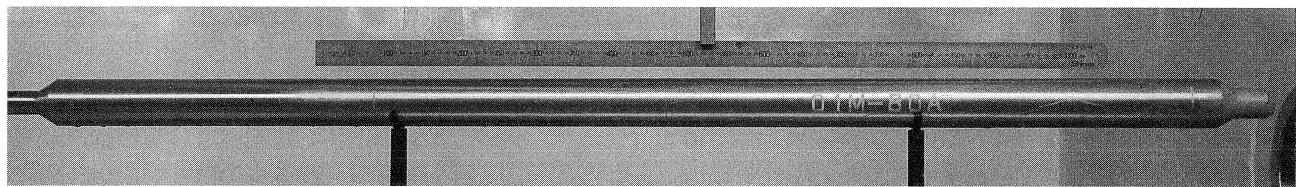


Fig. 5.1 照射キャップセルの外観写真

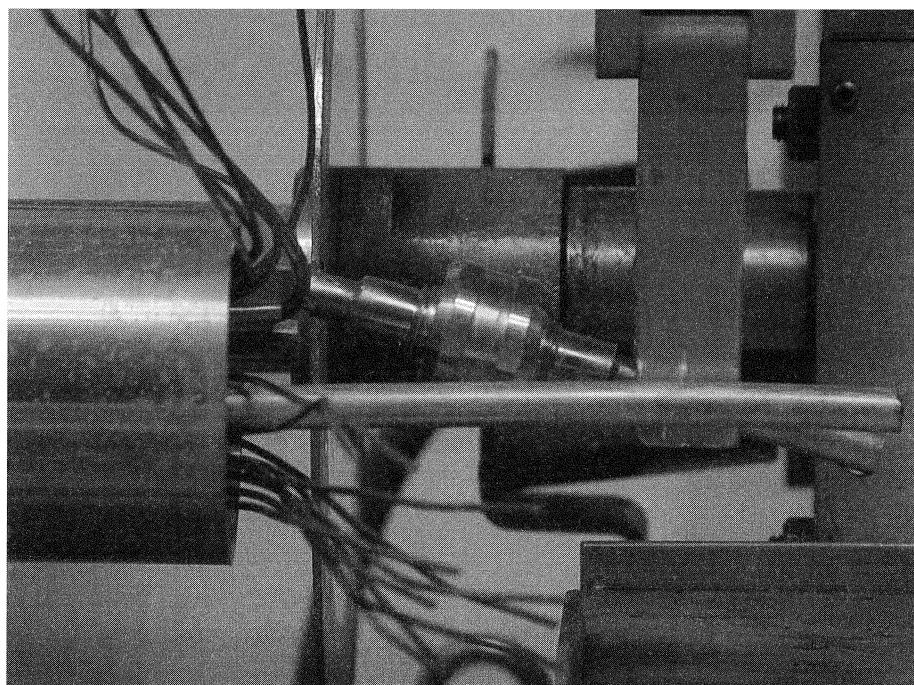


Fig. 5.2 フィルター部の解体

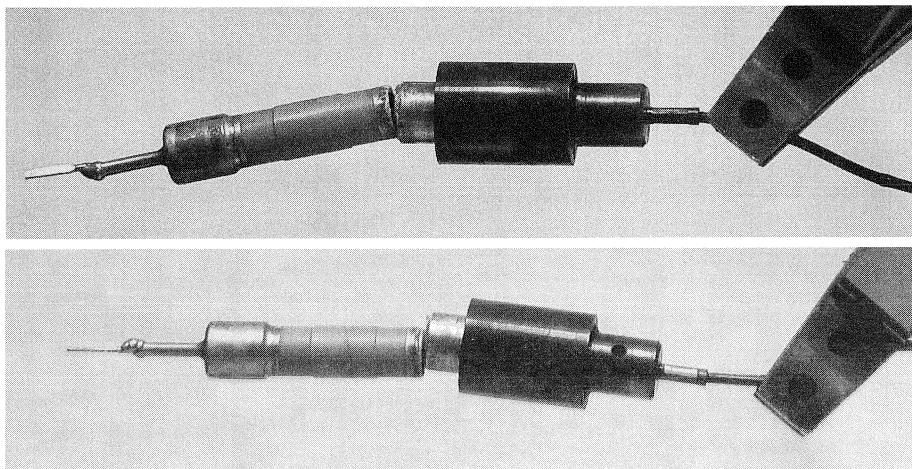


Fig. 5.3 白金型センサーの外観写真(UP1)

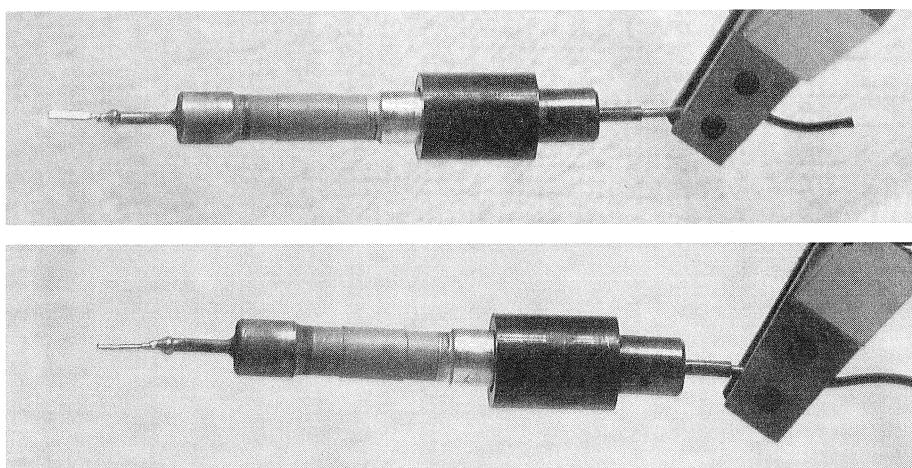


Fig. 5.4 白金型センサーの外観写真(UP2)

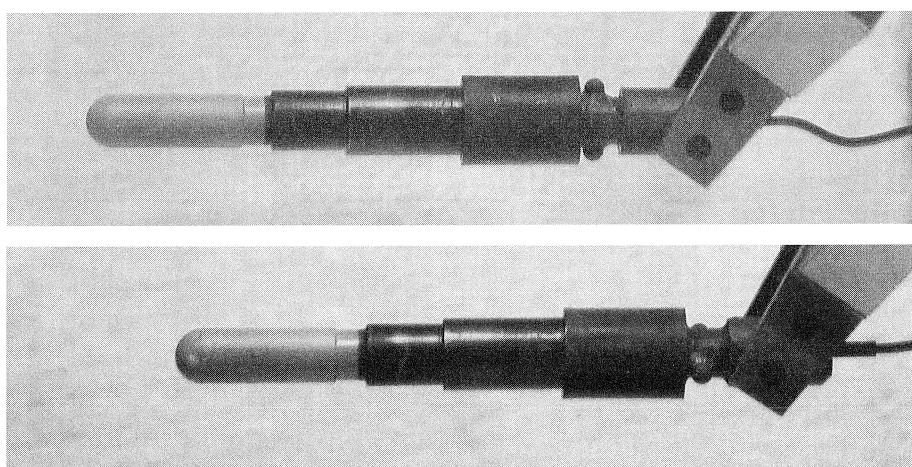


Fig. 5.5 酸化鉄型センサーの外観写真(UF1)

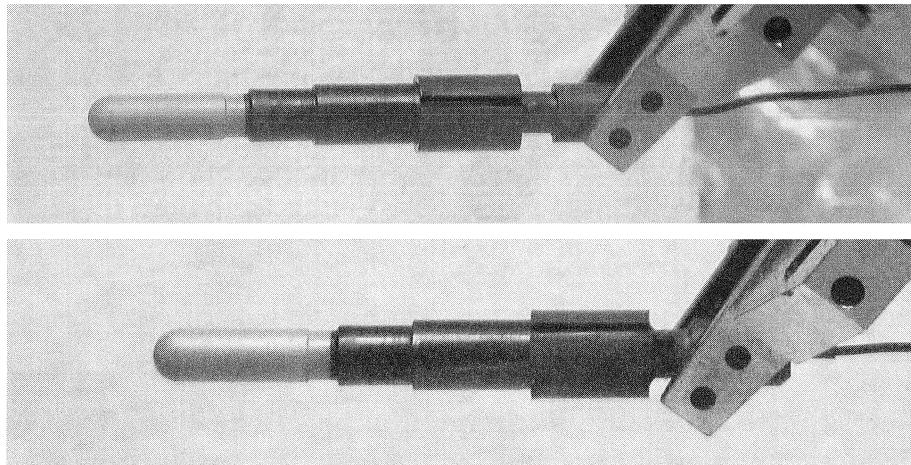


Fig. 5.6 酸化鉄型センサーの外観写真(MF1)

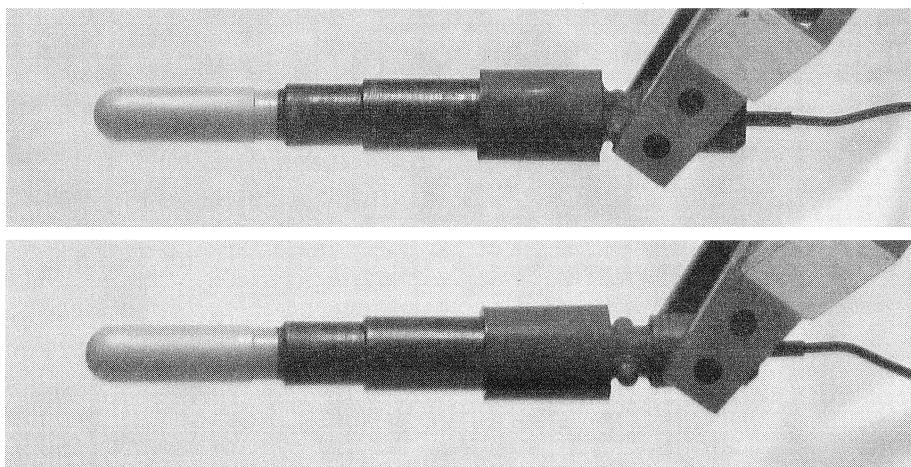


Fig. 5.7 酸化鉄型センサーの外観写真(MF2)

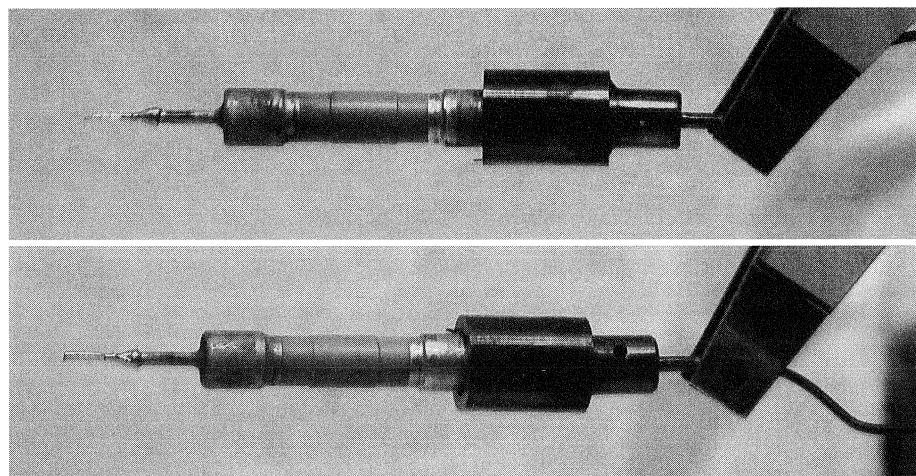


Fig. 5.8 白金型センサーの外観写真(LP1)

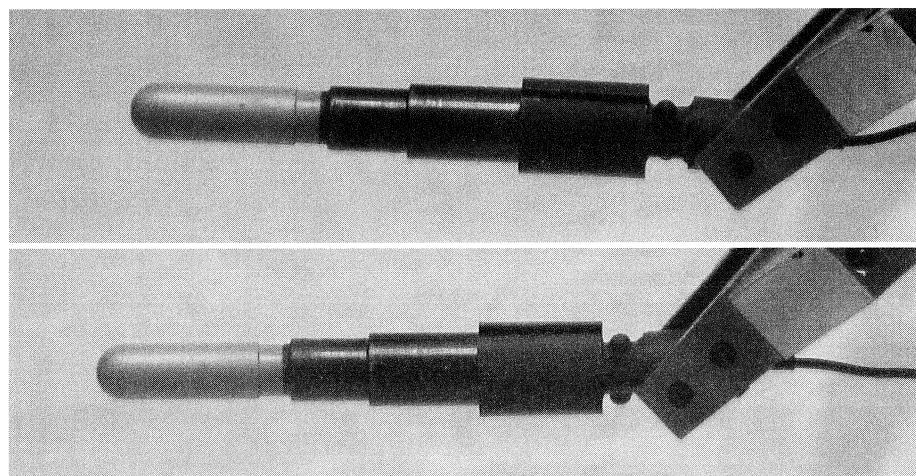


Fig. 5.9 酸化鉄型センサーの外観写真(LF1)

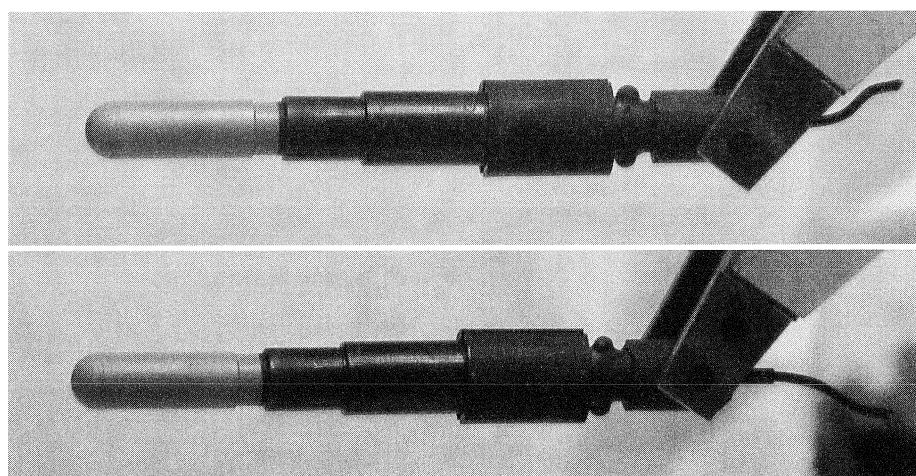


Fig. 5.10 酸化鉄型センサーの外観写真(LF2)

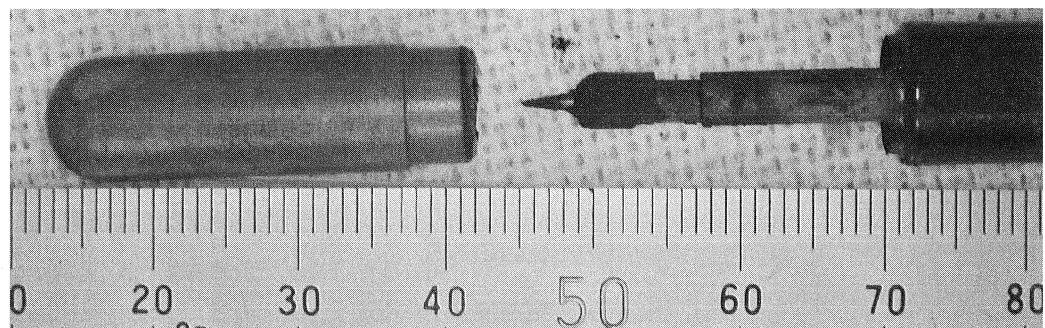


Fig. 5.11 酸化鉄型センサーNo.3 のジルコニアと金属の付け根



Fig. 5.12 酸化鉄型センサーNo.3 のジルコニア隔膜をハンマーで破壊

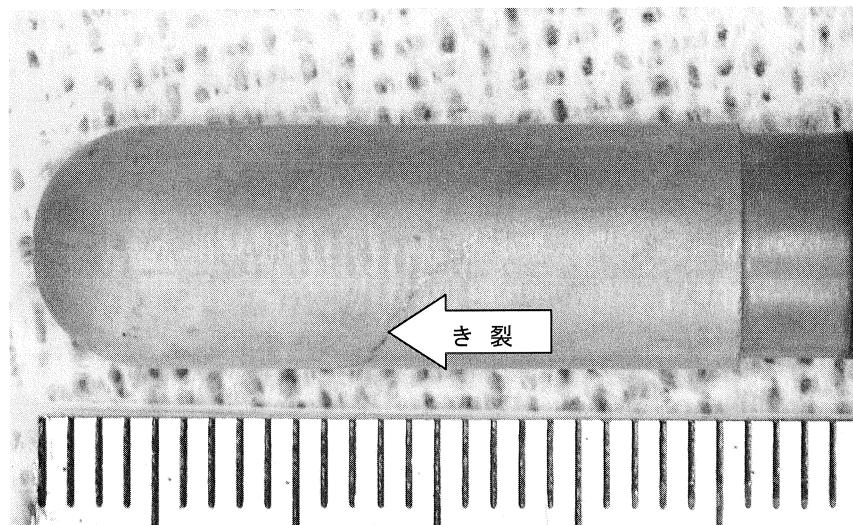


Fig. 5.13 酸化鉄型センサーNo.5 のジルコニア隔膜に生じたき裂

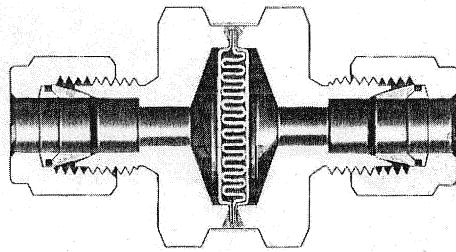
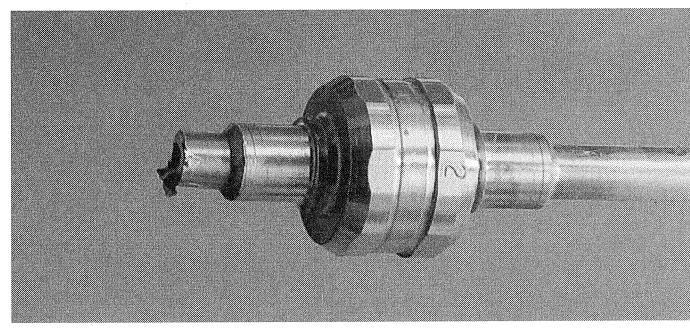


Fig. 5.14 フィルターの外観写真と構造

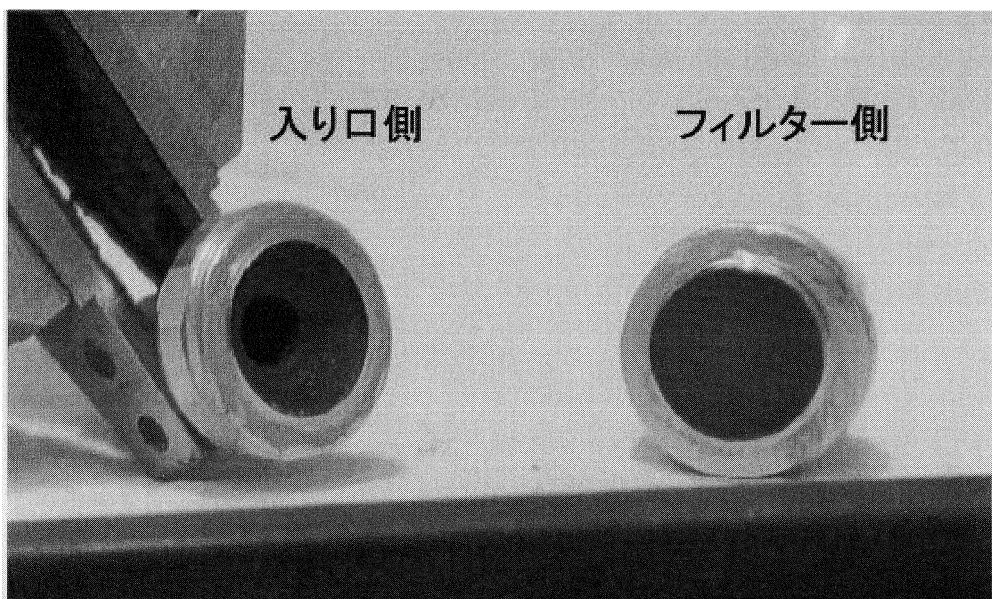


Fig. 5.15 フィルターの断面



Fig. 5.16 フィルターメッシュの光学顕微鏡写真

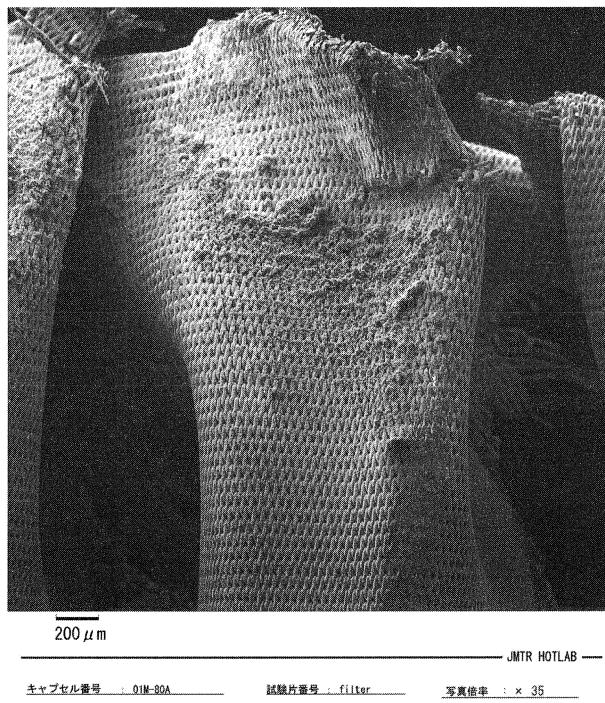


Fig. 5.17 フィルターメッシュの SEM 写真 ($\times 25$)

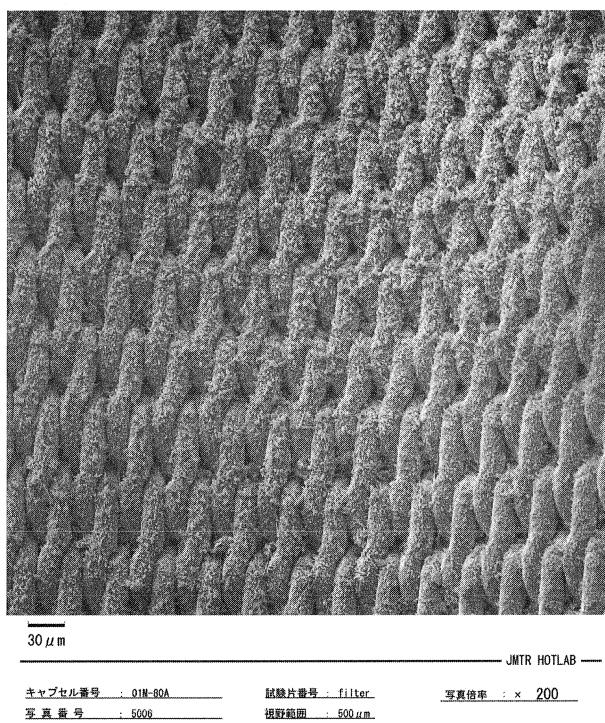


Fig. 5.18 フィルターメッシュの SEM 写真($\times 200$)

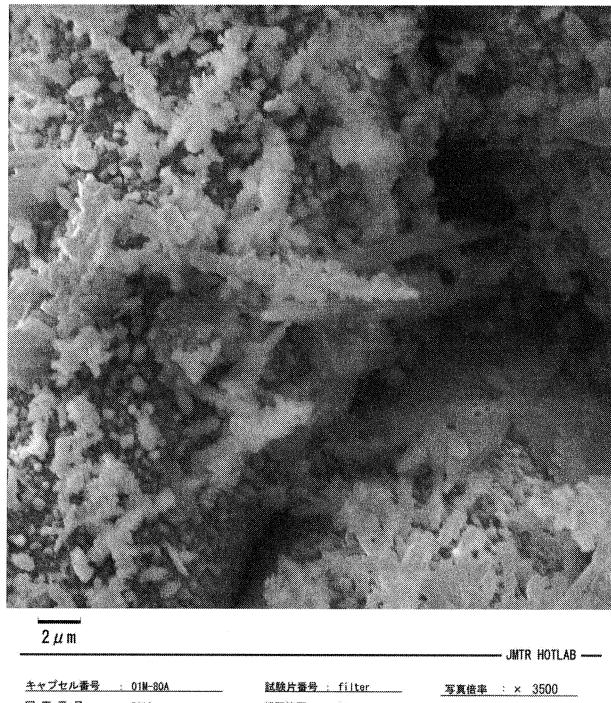


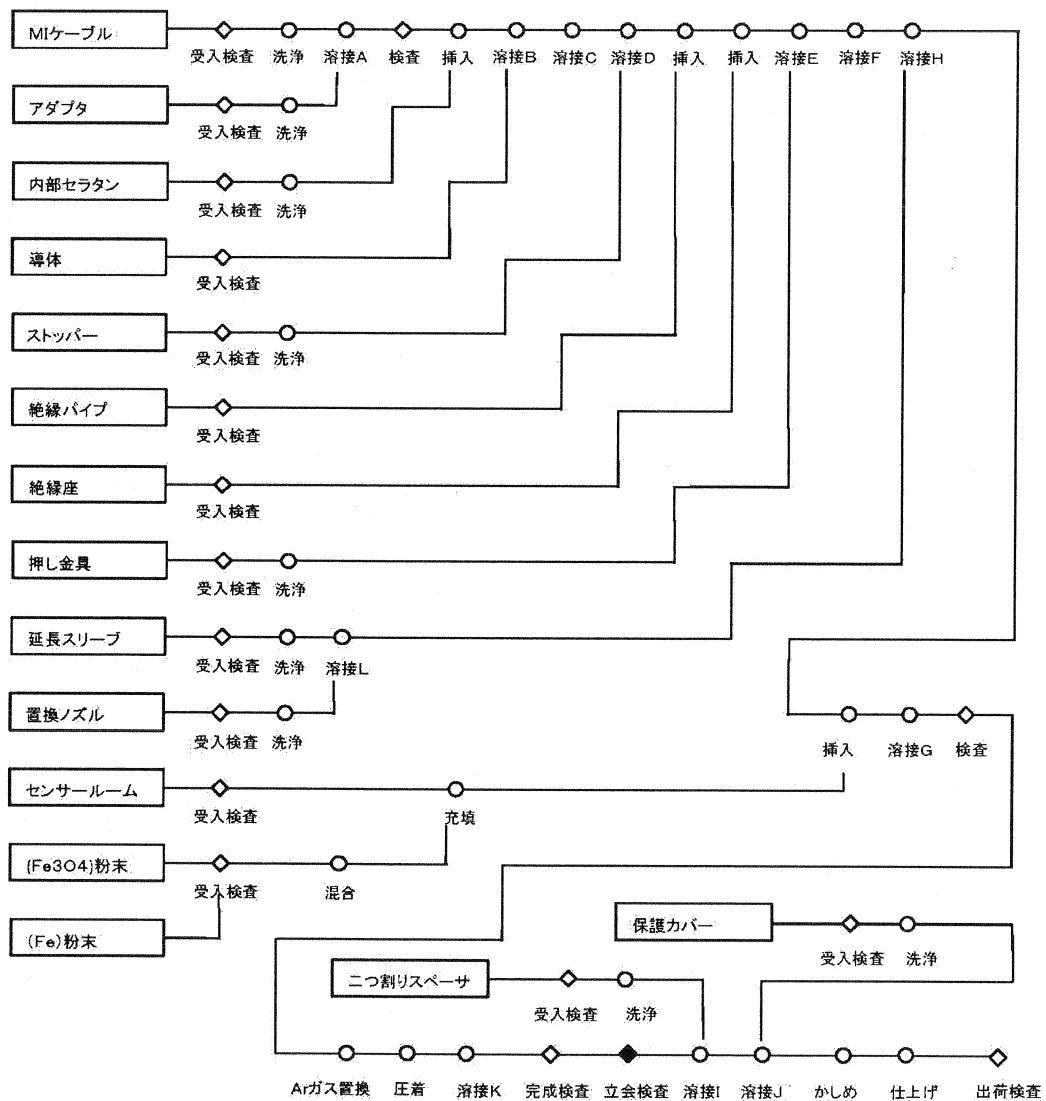
Fig. 5.19 フィルター メッシュの SEM 写真(×3500)

付 錄 1 製作フローシート及び検査項目一覧表

酸化鉄型 ECP センサーの製作フローシート及び検査項目一覧表

白金型 ECP センサーの製作フローシート及び検査項目一覧表

キャプセルの製作フローシート及び検査項目一覧表

**記号説明**

- : 製作、作業
- ◇ : 検査
- ◆ : 立会検査

Fig.A 酸化鉄型 ECP センサーの製作フローシート

Table A 酸化鉄型センサーの製作 検査項目一覧表

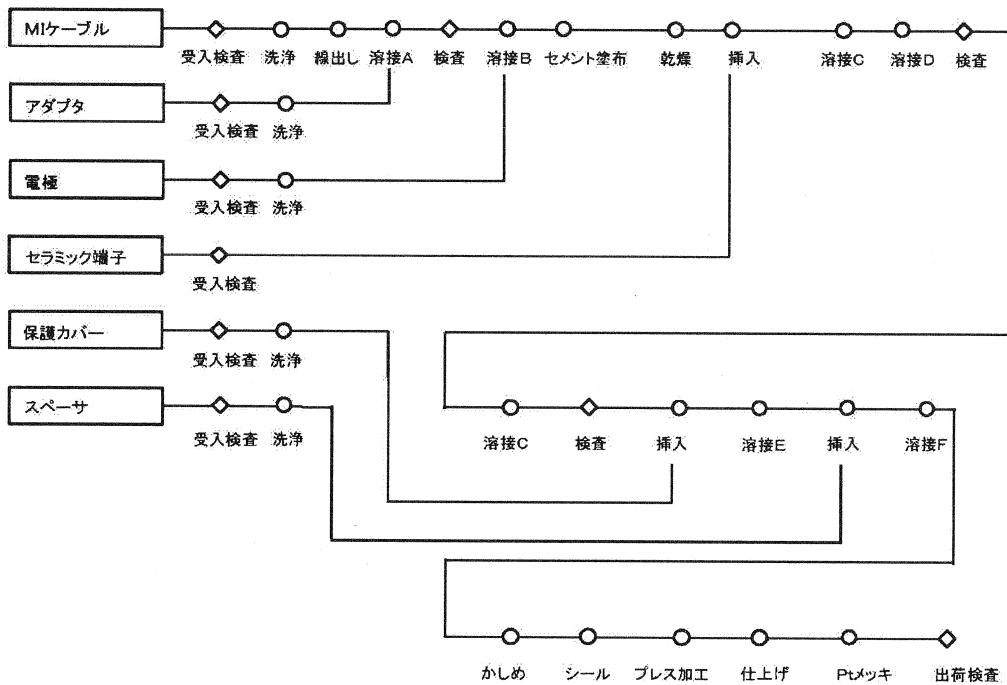
検査項目		材料検査	外観検査	寸法検査	質量検査	員数検査	導通検査	絶縁抵抗検査	耐圧検査	ヘリウム漏れ検査	備考
検査工程											
部品検査		●	●	●	●	●	●	—	—	—	
中間検査	MI ケーブルと アダプタ溶接後	—	—	—	—	—	—	—	●	●	
	スリープと 延長スリープ溶接後	—	—	—	—	—	—	—	●	●	
	Ar ガス置換前後	—	—	—	—	—	—	—	◎	●	◎
完成検査		—	◎	◎	●	◎	—	◎	—	—	
出荷前検査		—	●	—	—	—	—	—	—	—	

記号説明

◎ : 立会検査

● : 記録確認、記録提出

— : 対象外



記号説明

- : 製作、作業
- ◇ : 検査

Fig.B 白金型 ECP センサーの製作フローシート

Table B 白金型センサーの製作 検査項目一覧表

検査項目		材料 検査	外観 検査	寸法 検査	質量 検査	員数 検査	導通 検査	絶縁 抵抗 検査	耐圧 検査	ヘリウム 漏れ 検査	備 考
検査工程											
部品検査		●	●	●	●	●	●	●	—	—	—
中間 検査	MI ケーブルと アダプタ溶接後	—	—	—	—	—	—	—	●	●	
	アダプタと スリーブ溶接後	—	—	—	—	—	—	—	●	●	
	スリーブと 電極溶接後	—	—	—	—	—	—	●	—	●	
完成検査		—	◎	◎	●	◎	—	◎	—	—	—
出荷前検査		—	●	—	—	—	—	—	—	—	—

記号説明

◎：立会検査

●：記録確認、記録提出

—：対象外

01M-80A キャップセル 納立手順(1/5)

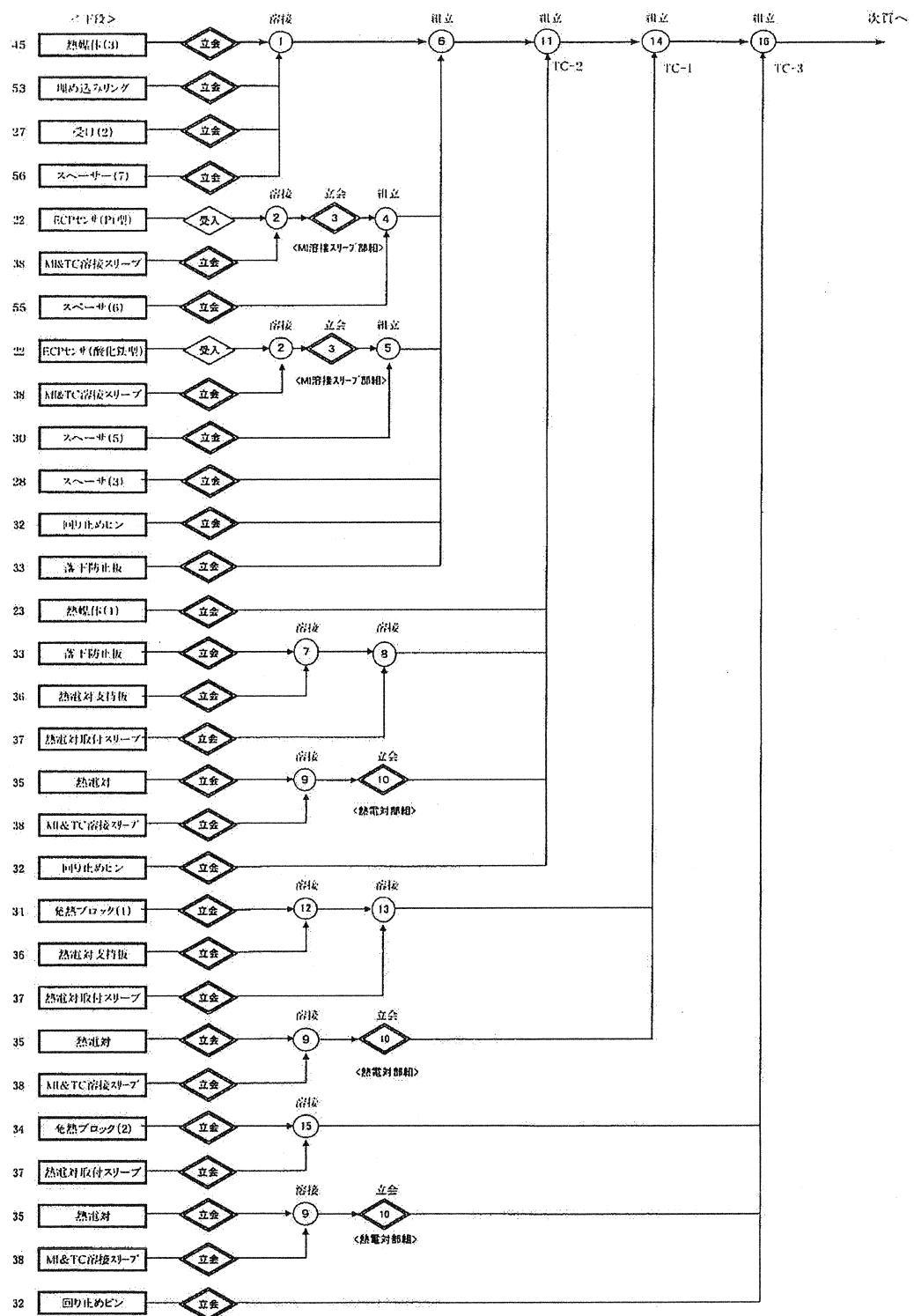


Fig.C キャップセルの製作フローシート(1/5)

01M-80A キャプセル組立手順図 (2/5)

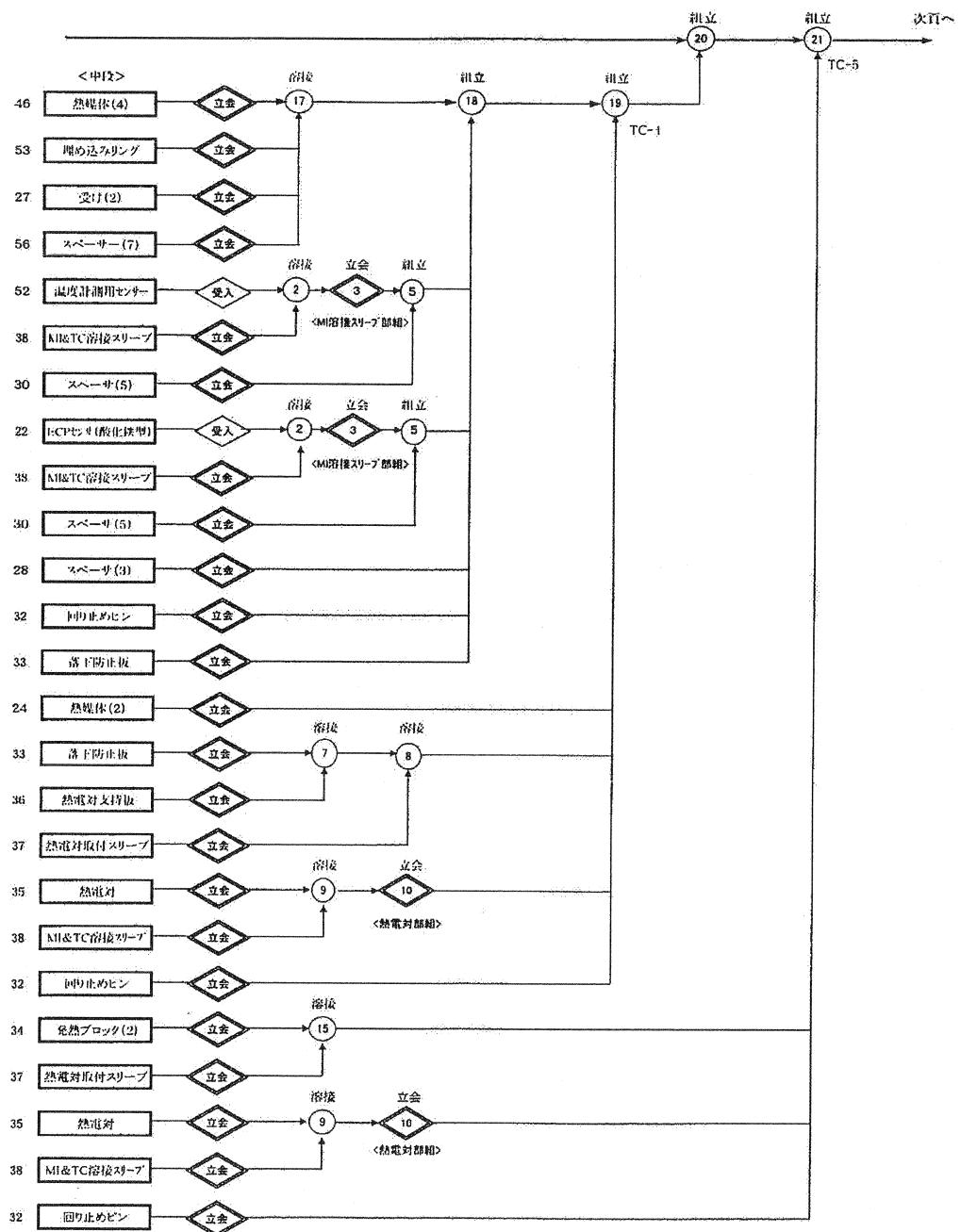


Fig.C キャプセルの製作フローシート(2/5)

01M-80A キャプセル 組立手順図 (3/5)

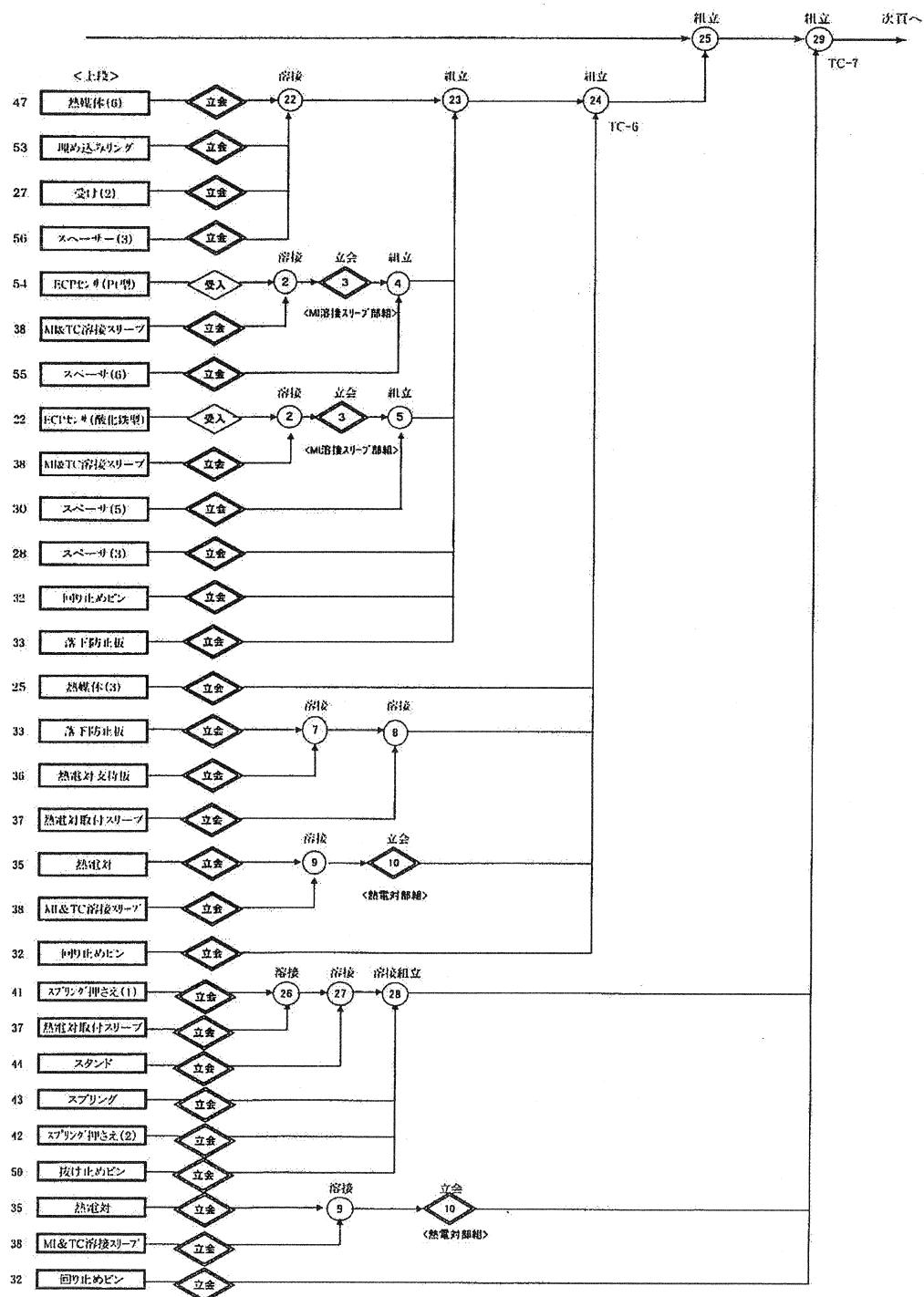


Fig.C キャプセルの製作フローシート(3/5)

01M-80A キャプセル 組立手順図(4/5)

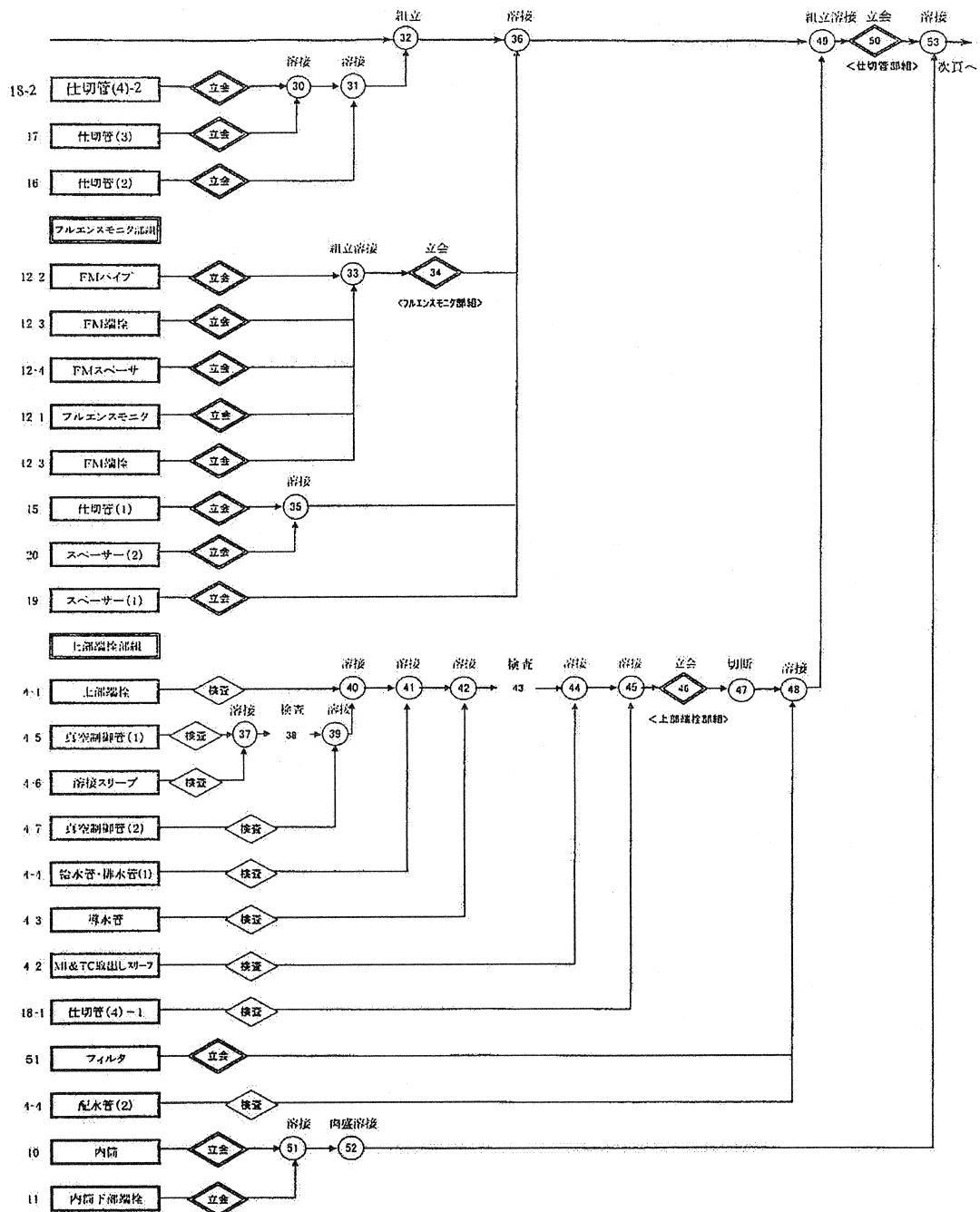


Fig.C キャプセルの製作フローシート(4/5)

01M-80A キャプセル 精立手順図 (5/5)

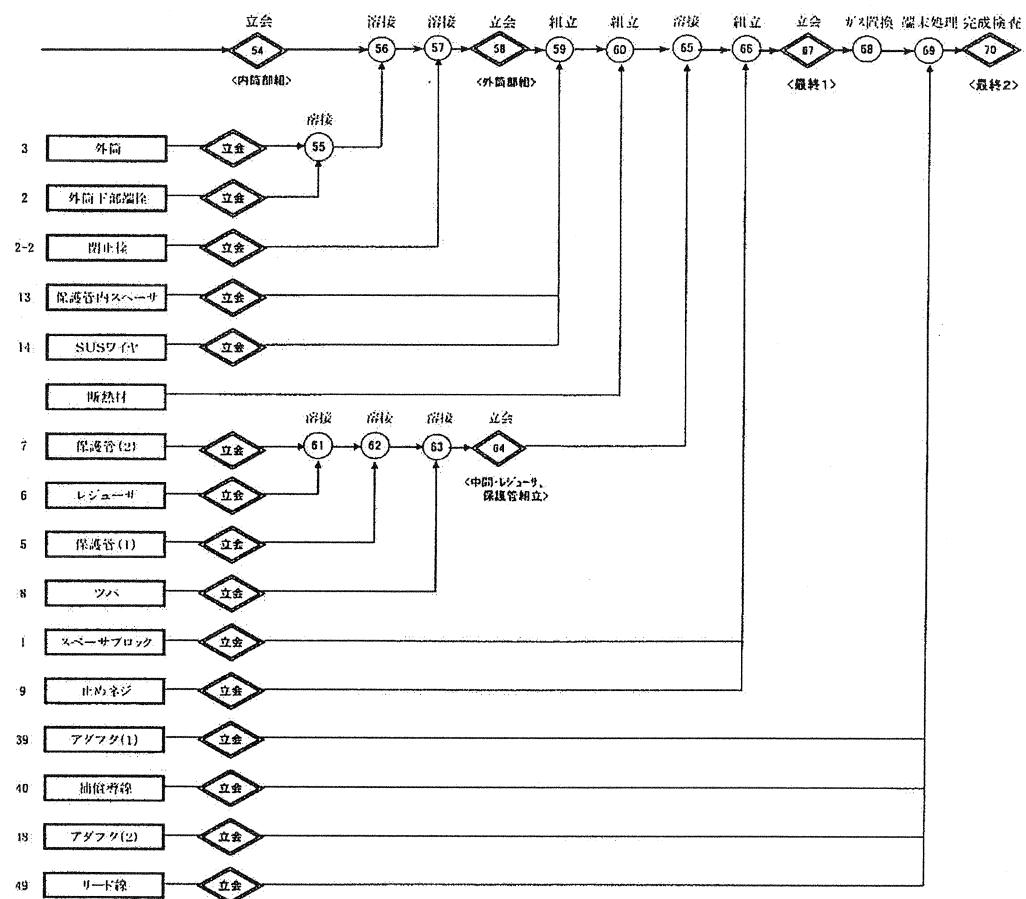


Fig.C キャプセルの製作フローシート (5/5)

Table C キャプセルの製作 検査項目一覧表

検査項目	材料検査	超音波探傷検査	外観検査	寸法検査	真直度検査	標示検査	浸透探傷検査	放射線透過検査	耐圧検査	ヘリウム漏れ検査	保護管部耐圧検査	絶縁抵抗検査	導通検査	質量検査	備考
検査工程															
部品検査	●	●	○	○	○	○	—	—	—	—	—	—	○	○	●
中間検査	真空制御管(1)、溶接スリーブ組立	—	—	○	○	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—
	上部端栓部組	—	—	○	○	—	—	○	●	○	○	—	—	—	—
	フルエンスモニタ部組	—	—	○	○	—	—	○	●	●	●	—	—	—	—
	ECPセンサー部組	—	—	○	○	—	—	○	●	—	●	—	●	—	—
	熱電対部組	—	—	○	○	—	—	○	●	—	●	—	●	●	—
	仕切り管組立	—	—	○	○	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—
	内筒組立	—	—	○	○	—	—	○	●	○	○	—	●	●	—
	外筒組立	—	—	○	○	●	—	○	●	○	○	—	●	●	—
	レジューサ・保護管部組	—	—	○	○	—	○	○	●	—	—	—	—	—	—
最終検査 1	—	—	○	○	○	○	○	○	●	—	—	○	●	●	—
最終検査 2	—	—	○	○	—	—	○	—	—	○	—	○	○	○	—
受入検査 (キャップセル納入時)	—	—	○	—	—	○	—	—	—	—	—	○	○	—	—

記号説明

○ : 立会検査

● : 記録確認 (記録確認又はフィルム確認)

○ : 記録提出

— : 対象外

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	m^3
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	メートル	m^{-1}
密度(質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量)濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率	(数の)1	1

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$m \cdot m^{-1}=1^{(b)}$
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2}=1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
圧力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
功率、放射束	ワット	W	J/s
電荷、電気量	クーロン	C	$s \cdot A$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	W/A
電気容量	フアラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	シemens	S	V/A
磁束密度	テスラ	T	A/V
インダクタンス	ヘンリイ	H	$V \cdot s$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C	Wb/m^2
光束度	ルーメン	lm	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
(放射性核種の)放射能吸収線量、質量エネルギー一分与、カーマ	ベクレル	Bq	Wb/A
線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量、組織線量当量	グレイ	Gy	$m^2 \cdot s^{-2}$
	シーベルト	Sv	J/kg
			$m^2 \cdot s^{-2}$

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもつた量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b) 実際には、使用的する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa·s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N·m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	力ニュートン每メートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg·K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エンタルピー	モル毎ケルビン	J/(mol·K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m·K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m ³	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン每立方メートル	C/m ³	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン每平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール每モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエンタルピー	ジュール每モル每ケルビン	J/(mol·K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン每キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量	グレイ每秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每平方メートル	W/sr	$m^4 \cdot m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每ステラジアン	W/(m ² ·sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{-24}	ヨクタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{-21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{-18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{-15}	ペクタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	$1^\circ=(\pi/180) \text{ rad}$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(\pi/10800) \text{ rad}$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000) \text{ rad}$
リットル	L	$1L=1 dm^3=10^{-3} m^3$
トン	t	$1t=10^3 \text{ kg}$
ネーピー	Np	$1Np=1$
ベル	B	$1B=(1/2) \ln 10 (Np)$

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19} J$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} \text{ kg}$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} m$

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1 海里=1852m
ノット	ト	1 ノット=1 海里每時=(1852/3600)m/s
アール	a	$1 a=1 dm^2=10^{-2} m^2$
ヘクタール	ha	$1 ha=1 hm^2=10^4 m^2$
バル	bar	$1 bar=0.1 MPa=100kPa=1000hPa=10^5 Pa$
オングストローム	Å	$1 Å=0.1 nm=10^{-10} m$
バン	b	$1 b=100 fm^2=10^{-28} m^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 erg=10^{-7} J$
ダイナ	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ボアズ	P	$1 P=1 dyn \cdot s/cm^2=0.1 Pa \cdot s$
ストーカス	St	$1 St=1 cm^2/s=10^{-4} m^2/s$
ガウス	G	$1 G=10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe=(1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx=10^{-8} Wb$
スチル	sb	$1 sb=1 cd/cm^2=10^4 cd/m^2$
ホル	ph	$1 ph=10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1 cm/s^2=10^{-2} m/s^2$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1 cGy=10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem=1 cSv=10^{-2} Sv$
X線単位	X unit	$1 X unit=1.002 \times 10^{-4} nm$
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 nT=10^{-9} T$
ジャンスキー	Jy	$1 Jy=10^{-26} W \cdot m^2 \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fermi	$1 fermi=1 fm=10^{-15} m$
メートル系カラット		$1 metric carat=200 mg=2 \times 10^{-4} kg$
トル	Torr	$1 Torr=(101325/760) Pa$
標準大気圧	atm	$1 atm=101325 Pa$
カリ	cal	
ミクロ	μ	$1 \mu=1 \mu m=10^{-6} m$

