

# IASCC 照射試験に係るキャプセルの製作(1)

## -き裂進展試験用キャプセル-

### (共同研究)

Fabrication of Irradiation Capsule for IASCC Irradiation Tests (1)  
- Irradiation Capsule for Crack Growth Test -  
(Joint Research)

井手 広史 松井 義典 川又 一夫 田口 剛俊 金澤 賢治  
小沼 勇一 渡邊 浩之 井上 修一 出雲 寛互 石田 卓也 斎藤 隆  
加治 芳行 宇賀地 弘和 塚田 隆 石塚 悅男 河村 弘

Hiroshi IDE, Yoshinori MATSUI, Kazuo KAWAMATA, Taketoshi TAGUCHI  
Yoshiharu KANAZAWA, Yuichi ONUMA, Hiroyuki WATANABE  
Shuichi INOUE, Hironobu IZUMO, Takuya ISHIDA, Takashi SAITO  
Yoshiyuki KAJI, Hirokazu UGACHI, 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（1）  
—き裂進展試験用キャップセル—  
(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、松井 義典、川又 一夫、田口 剛俊、金澤 賢治<sup>\*1</sup>、  
小沼 勇一、渡邊 浩之、井上 修一、出雲 寛互、石田 卓也<sup>\*1</sup>、斎藤 隆、  
加治 芳行<sup>+</sup>、宇賀地 弘和<sup>+</sup>、塙田 隆<sup>+</sup>、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に使用されているオーステナイト系ステンレス鋼には、高線量の中性子照射を受けると照射誘起応力腐食割れが発生することが知られており、原子力プラントの高経年化対策のためにはその挙動の解明が重要な課題となっている。これまでの研究では炉内で中性子照射した試料を、照射後試験を行うことにより評価してきたが、IASCC の適切な評価のためには、軽水炉内の環境を模擬した温度、水環境及び照射条件下で試験を行うことが必要である。そこで、照射下での応力腐食割れ試験を行うために、照射下試験用の飽和温度キャップセルを開発した。照射下応力腐食割れ試験には、き裂進展試験、き裂発生試験等があり、本報ではこのうちき裂進展試験を行ったキャップセルについて報告する。

---

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成果についてまとめたものである。

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

Fabrication of Irradiation Capsule for IASCC Irradiation Tests (1)

- Irradiation Capsule for Crack Growth Test -

(Joint Research)

Hiroshi IDE, Yoshinori MATSUI, Kazuo KAWAMATA, Taketoshi TAGUCHI,  
Yoshiharu KANAZAWA<sup>※1</sup>, Yuichi ONUMA, Hiroyuki WATANABE, Shuichi INOUE,  
Hironobu IZUMO, Takuya ISHIDA<sup>※1</sup>, Takashi SAITO, Yoshiyuki KAJI<sup>+</sup>, Hirokazu UGACHI<sup>+</sup>,  
Takashi TSUKADA<sup>+</sup>, 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)

It is known that Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking (IASCC) occurs when austenitic stainless steel components used for light water reactor (LWR) are irradiated for a long period. In order to evaluate the high aging of the nuclear power plant, the study of IASCC becomes the important problem.

The specimens irradiated in the reactor were evaluated by post irradiation examination in the past study. For the appropriate evaluation of IASCC, It is necessary to test it under the simulated LWR conditions; temperature, water chemistry and irradiation conditions

In order to perform in-pile SCC test, saturated temperature capsule (SATCAP) was developed. There are crack growth test, crack propagation test and so on for in-pile SCC test.

In this report, SATCAP for crack growth test is reported.

---

Keywords: 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

## 目 次

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 1.はじめに .....                  | 1  |
| 2.き裂進展試験の概要 .....             | 3  |
| 2.1 き裂進展試験技術 .....            | 3  |
| 2.2 き裂進展試験用キャップセルの開発 .....    | 3  |
| 3.キャップセルの設計 .....             | 4  |
| 3.1 照射試料 .....                | 4  |
| 3.2 計測機器 .....                | 6  |
| 3.3 キャップセル .....              | 8  |
| 3.4 試験片の照射温度予測 .....          | 20 |
| 4.キャップセルの製作 .....             | 22 |
| 4.1 工場での組立 .....              | 22 |
| 4.2 ホットセル内での組立 .....          | 22 |
| 4.3 カナル及び炉上での組立 .....         | 25 |
| 5.検査 .....                    | 31 |
| 5.1 工場での検査 .....              | 31 |
| 5.2 ホットセル内の検査 .....           | 31 |
| 5.3 カナル及び炉上での検査 .....         | 31 |
| 6.照射下におけるキャップセル性能 .....       | 33 |
| 6.1 試験片照射温度 .....             | 33 |
| 6.2 予測温度と評価温度の比較 .....        | 39 |
| 7.結論 .....                    | 40 |
| 謝辞 .....                      | 41 |
| 参考文献 .....                    | 41 |
| 付録 キャップセルの製作フロー図及び検査項目表 ..... | 42 |

## Contents

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introduction .....                                                     | 1  |
| 2. Crack growth test .....                                                | 3  |
| 2.1 Outline of crack growth test technique .....                          | 3  |
| 2.2 Development of capsule for crack growth test .....                    | 3  |
| 3. Design of capsule .....                                                | 4  |
| 3.1 Specimens .....                                                       | 4  |
| 3.2 Instrumentation .....                                                 | 6  |
| 3.3 Capsule .....                                                         | 8  |
| 3.4 Temperature estimation of specimens .....                             | 20 |
| 4. Assembly of irradiation capsule .....                                  | 22 |
| 4.1 Assembling in factory .....                                           | 22 |
| 4.2 Assembling in hot cell .....                                          | 22 |
| 4.3 Assembling on canal and reactor pool .....                            | 25 |
| 5. Inspection .....                                                       | 31 |
| 5.1 Inspection in factory .....                                           | 31 |
| 5.2 Inspection in hot cell .....                                          | 31 |
| 5.3 Inspection on canal and reactor pool .....                            | 31 |
| 6. Performance of capsule under irradiation .....                         | 33 |
| 6.1 Specimens temperature under irradiation .....                         | 33 |
| 6.2 Comparison of estimation and evaluation temperature .....             | 39 |
| 7. Conclusion .....                                                       | 40 |
| Acknowledgements .....                                                    | 41 |
| References .....                                                          | 41 |
| Appendix1 Capsule assembly flow diagram and table of inspection item..... | 42 |

## 1. はじめに

我が国の原子力発電の主力は、今世紀半ば、あるいはより長期に渡って軽水炉が担うことになるとの見通しが原子力政策大綱<sup>1)</sup>で示されており、軽水炉の長期利用に伴う構造材料等の健全性に係わる照射試験が必要とされている。

軽水炉の長期利用に対応した構造材料の健全性確認技術開発としては、経年劣化に関する規格・基準など施設の健全性を評価するための包括的な照射試験データが必要とされており、炉心シュラウド等の炉内構造材については応力腐食割れについて照射環境、水化学条件、力学的条件などの複合条件を考慮した評価手法を確立することが望まれている<sup>2)</sup>。これらのデータを得る方法としては、照射や水環境に係わるパラメータを制御した試験やき裂進展性評価のための照射下試験等がある。照射下試験では、一度照射した試料に特殊な計装を付加して原子炉内に挿入するキャップセルの組立て等を行う必要があるが技術的に困難な点が多い。これらを実施するために「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 : Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking）に関する研究」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）との共同研究に基づいて JMTR を利用した照射試験が実施された。

IASCC は、放射線照射、腐食や応力などの複雑な要因により材料が劣化する現象であり、原子力プラントの長寿命化を図る上で、その挙動の解明が重要な研究課題である。JMTR を用いた IASCC 照射試験では、高度材料環境照射装置を開発し照射試験を行った。この装置は、BWR の冷却水条件を模擬した高温高圧水をキャップセルへ供給するための水環境制御装置、試験片を装荷し原子炉内に挿入される飽和温度キャップセル、原子炉上部に取付けられキャップセルからの計測線及び給排水管を各装置へ分岐する接続ユニット、計測線及び給排水管を接続ユニットから各装置まで接続する案内管等から構成される。飽和温度キャップセルは最大 5 本まで同時に水環境制御装置に接続可能である。図 1 に高度材料環境照射装置の概略構成を示す。

IASCC 照射試験は、照射下試験（き裂進展試験、き裂発生試験）が主要な試験として位置づけられており、2004 年から 2006 年（JMTR 第 150 サイクル～165 サイクル）まで照射試験を実施した。また、IASCC 照射試験では、中性子照射量や照射温度とともに水質も重要なパラメータとなるため、水環境制御装置では給水の温度、圧力に加えて溶存酸素濃度、溶存水素濃度の制御を可能とし、飽和温度キャップセル入口及びキャップセル出口の溶存酸素濃度、溶存水素濃度及び導電率をオンラインで測定した。

本報告は、これらの IASCC 照射下試験のうち、き裂進展試験を行うための飽和温度キャップセルの製作及び照射実績などについてまとめたものである。

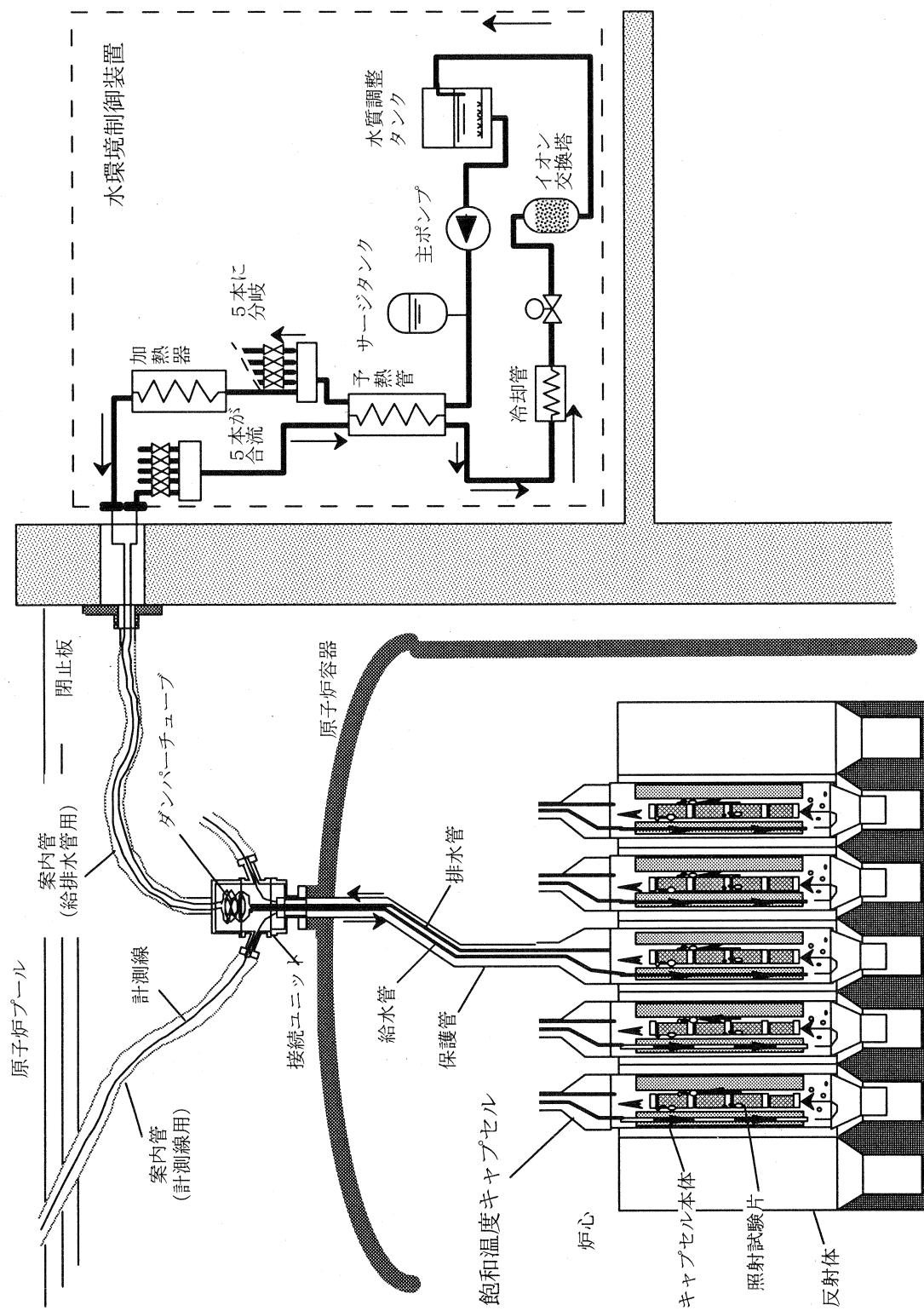


図1 高度材料環境照射装置の概略構成

## 2. き裂進展試験の概要

### 2.1 き裂進展試験技術

本キャプセルで行う試験は、照射下で行うき裂進展試験である。き裂進展試験は、CT (CT : Compact Tension) 試験片に荷重を負荷し、き裂の進展長さをオンラインで測定する試験である。このき裂進展長さの測定には直流式電位差法（6端子法）を用いた。電位差法は外側の端子に一定のパルス電流を流し、内側の端子で電圧を測定し、き裂の進展により変化する電位差を測定するものである。温度補償及び炉内計測での予備という観点から、2組の電位差測定端子を用いている。

試験片への荷重負荷機構は、ベローズを用いて、キャプセル内の高温高圧水とベローズ内のガス圧力の差圧を調整することによりベローズ断面積と差圧から求められる荷重を制御してCT試験片に負荷した。

図2に照射下試験に用いた電位差法（6端子法）及び荷重負荷方法の概念図を示す。

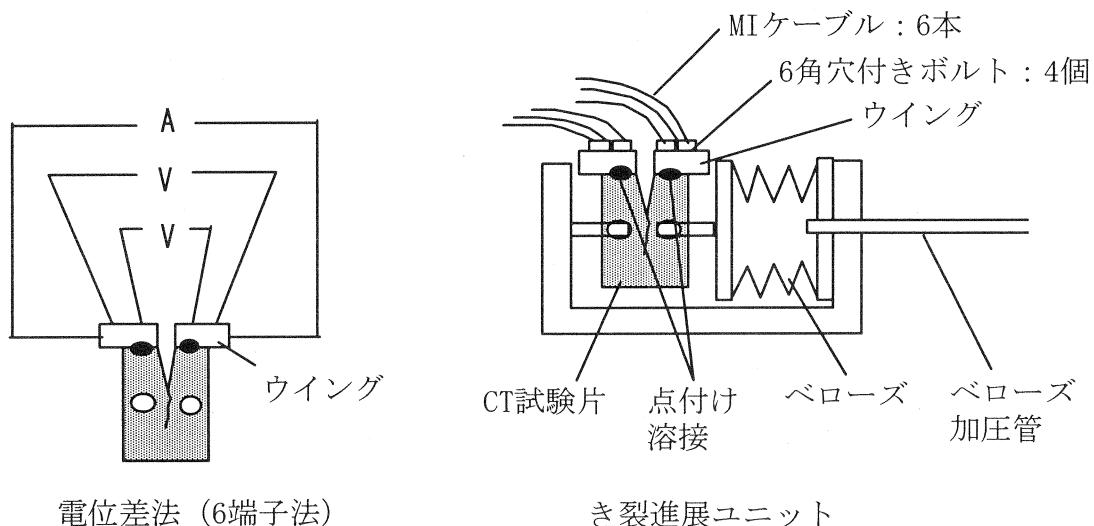


図2 電位差法（6端子法）及び荷重負荷方法の概念図

### 2.2 き裂進展試験用キャプセルの開発

これまでの IASCC 研究では炉内で中性子照射した試料を、ホットセル内において照射後試験としてき裂進展試験を行い評価してきたが、IASCC の適切な評価のためには、軽水炉内の温度、水環境及び照射条件下で照射下試験を行うことも必要である。そのためには、上記の複合する照射環境下においてき裂進展試験を行うことができるキャプセルの開発が必要である。この、照射下き裂進展試験では、予め照射した試験片を試料として用いるために、ホットセル内で試験片の装荷及びキャプセル組立が容易なキャプセルが必要となり、き裂進展試験用キャプセルを開発した。

## 3. キャプセルの設計

## 3.1 照射試料

き裂進展試験に用いたキャプセルは、照射下試験実証用である 00M-8A キャプセル、照射下き裂進展試験用である 00M-9A、10A、12A、13A、05M-3J、4J キャプセルの 7 本である。

き裂進展試験に用いられる照射試料は、0.4T-CT 試験片 ( $B=5.6\text{mm}$ ) (以下 CT 試験片と略す。) であり、00M-8A キャプセルには、未照射の SUS304 鋸歎化材の CT 試験片を装荷した。00M-9A、10A、12A、13A、05M-3J、4J キャプセルには、00M-5A、6A キャプセルを用いて予め照射された SUS304 の CT 試験片を装荷した。照射試料には MI ケーブルを接続するためのウイング (接続ブロック) を取付けるためにボルト穴が設けてある。

図 3 に CT 試験片を、表 1 に SUS304 の化学成分 (ミルシートより抜粋) を示す。

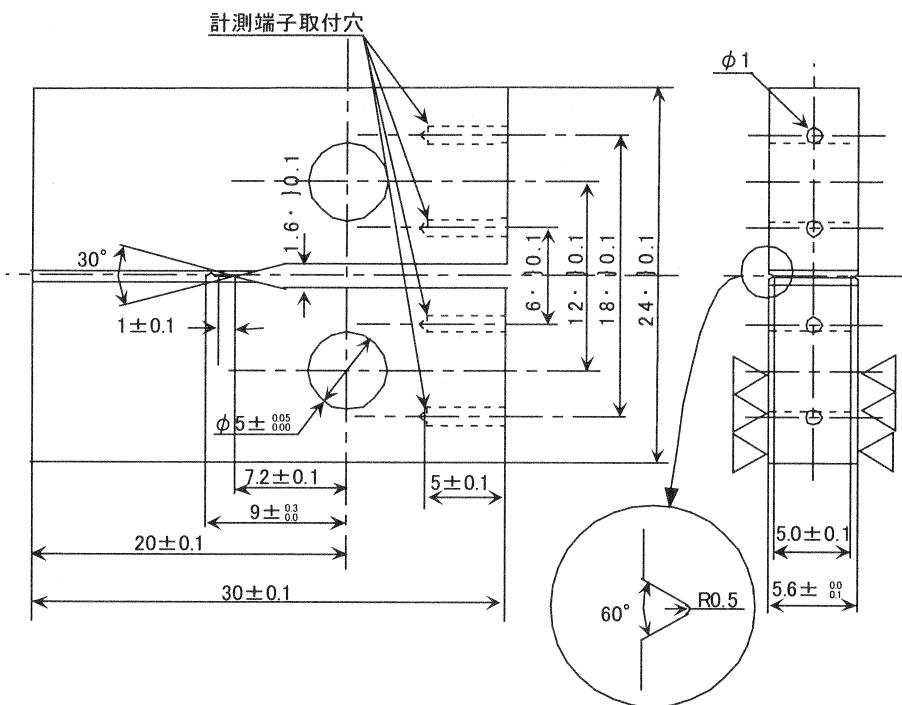


図 3 0.4T-CT 試験片 ( $B=5.6\text{mm}$ )

表1 SUS304の化学成分

| Specification & Type<br>規格・種類                                                                                  |                                       | JIS G 4304 (1987) SUS 304 |                           | Condition & Finish<br>状態・仕様 |                                | PRO. 1                 |                  | Notes *1 Shape (W.W)<br>B : , C :                 |       |  |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------|------------------|---------------------------------------------------|-------|--|--|
| No.                                                                                                            | Part No.<br>部品番号                      | Unit<br>単位                | Spec & Size<br>規格・寸法      | Quantity<br>数量              | Mass<br>kg                     | Inspection No.<br>検査番号 | Part No.<br>部品番号 | Notes *1 Shape (W.W)<br>B : , C :                 |       |  |  |
| 1                                                                                                              |                                       | B                         | 38.100X1000.0             | 1                           | 604                            | 11CB30052              | 62926            | GOOD                                              |       |  |  |
| Chemical Composition in %                                                                                      |                                       |                           |                           |                             |                                |                        |                  |                                                   |       |  |  |
| C                                                                                                              | Si                                    | Mn                        | P                         | S                           | Cr                             | Ni                     | N                | Co                                                | B     |  |  |
| Max                                                                                                            | 0.08                                  | 0.75                      | 2.00                      | 0.030                       | 0.030                          | 18.00                  | 8.00             |                                                   |       |  |  |
| 1                                                                                                              | 0.03                                  | 0.65                      | 1.20                      | 0.024                       | 0.004                          | 18.58                  | 8.93             | 0.02                                              | 0.035 |  |  |
| 174C                                                                                                           | 0.05                                  | 0.65                      | 1.19                      | 0.023                       | 0.004                          | 18.53                  | 9.00             | 0.02                                              | 0.035 |  |  |
| 172C                                                                                                           | 0.05                                  | 0.65                      | 1.19                      | 0.023                       | 0.004                          | 18.54                  | 8.98             | 0.02                                              | 0.035 |  |  |
| Tensile Test                                                                                                   |                                       |                           |                           |                             |                                |                        |                  |                                                   |       |  |  |
| Yield Strength<br>N/mm <sup>2</sup>                                                                            | Tensile Strength<br>N/mm <sup>2</sup> | Elongation<br>%           | Reduction<br>of Area<br>% | Test Method<br>JIS          | Hardness Test<br>Method<br>JIS | Spec No.<br>JIS No.    | GS               | Remarks                                           |       |  |  |
| Min                                                                                                            | 205                                   | 520                       | 4                         | HB                          | 1/4C                           | 1/2C                   |                  | SPEC. NO. PN-8A10160-7<br>チヤクヨウ 250×2 30×3 , 2.5φ |       |  |  |
| Max                                                                                                            | 231                                   | 607                       | 61                        | 187                         | 3.0                            | 3.0                    |                  | 合格                                                |       |  |  |
| 1                                                                                                              |                                       |                           |                           |                             |                                |                        |                  | U1,4, 5                                           |       |  |  |
| Witnessed by 立会者                                                                                               |                                       |                           |                           |                             |                                |                        |                  |                                                   |       |  |  |
| Inspection Attorney 検査機関                                                                                       |                                       |                           |                           |                             |                                |                        |                  |                                                   |       |  |  |
| We hereby certify that the above results are true and correct in every detail.<br>上記の結果は皆実際の結果に合致していることを証明します。 |                                       |                           |                           |                             |                                |                        |                  |                                                   |       |  |  |
| Best Test No. *1 S : 1060°C X 60Hn WQ                                                                          |                                       |                           |                           |                             |                                |                        |                  |                                                   |       |  |  |
| Member of Quality System Section<br>G. H. G. M. K.                                                             |                                       |                           |                           |                             |                                |                        |                  |                                                   |       |  |  |

### 3.2 計測機器

00M-8A キャップセルには、キャップセル内の水温測定の熱電対( $\Phi 1.6$ 、K型)が5対、試験片温度を測定するための熱電対( $\Phi 1.6$ 、K型)を1対、模擬試験片に1対取付けた。また、試験片のき裂進展を測定するための電位差法(6端子法)用のMIケーブル( $\Phi 1.6$ 、シース:SUS316、芯線:銅)をウイング(接続ブロック)に6本取付けた。ウイングは試験片にボルトで固定され、さらに試験片との間を点溶接した。

00M-9A、10A、12A、13A、05M-3J、4J キャップセルでは、キャップセル内の水温測定の熱電対( $\Phi 1.6$ 、K型)を2対、試験片の温度を測定するための熱電対( $\Phi 1.6$ 、K型)を2対取付けた。また、試験片のき裂進展を測定するための電位差法(6端子法)を行うために、MIケーブル( $\Phi 1.6$ 、シース:SUS316、芯線:銅)を各試験片に6本ずつ、合計12本がウイングを介して取付けた。

高温高圧水中でのMIケーブルの先端部の気密処理が困難なため、先端部のシースと芯線を溶接し、先端部にSUS316製ワイヤ付きのSUS製キャップを取り付け溶接を行った。シースと芯線は絶縁されていないが、芯線に電気抵抗の低い銅を用いることにより、芯線で電圧を測定しやすいように考慮している。

また、高速中性子照射量を測定するためのフルエンスモニタをキャップセルの上段に1本、中段に3本、下段に1本の合計5本装荷している。

図4に試験片、フルエンスモニタ及び熱電対の装荷位置と標準となる高速中性子束分布を示す。

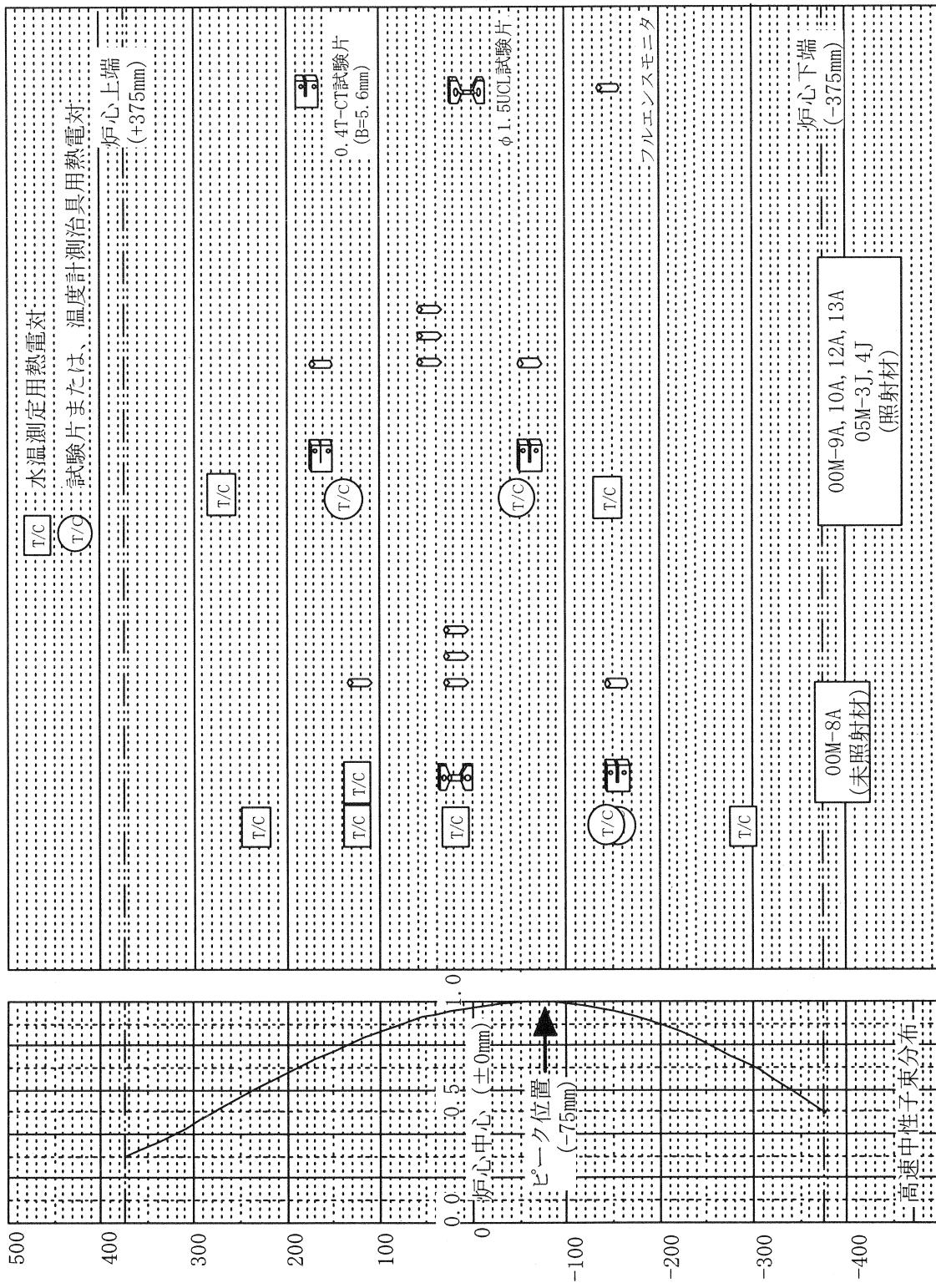


図4 試験片、フルエンスモニタ及び熱電対の装荷位置と標準となる高速中性子束分布

### 3.3 キャプセル

#### (1) キャプセル本体部

通常のキャプセルでは本体部と保護管部は分離できないが、照射下試験用のキャプセルでは、キャプセル本体部と保護管部は分離、接続可能な構造としている。照射下試験では照射済試験片を用いるため、ホットセル内において、キャプセルへの試験片組込み作業が必要となる。そのため、キャプセルと保護管部を分離できる構造とし、キャプセルを短くすることでホットセル内での取扱い制限内での作業を可能としている。キャプセル本体部及び保護管部の接続部分にはメタル0リングを用いたメカニカルシールによる密封構造とした。

図5-1、5-2に00M-8A本体部の全体図、表2に部品表を示す。図6-1、6-2に00M-9A、10A、12A、13A、05M-3J、4J本体部の全体図、表3に部品表を示す。キャプセル本体部は、外筒管、内筒管、仕切り管、上部端栓、き裂進展ユニット等から主に構成される。キャプセル上部から供給された高温高圧水は内筒管と仕切り管の間を通り、キャプセル下部で折り返し、き裂進展ユニット部を上昇し、キャプセル上部から排出される。キャプセル内部にき裂進展ユニットを配置するために以下の工夫をした。

- ・キャプセルの照射孔は核加熱率の少ない反射体領域が設定されたため、外筒管と内筒管の間に真空断熱層を設けた2重管構造とし、熱の流出を防ぐ構造とした。
- ・通常の飽和温度キャプセルでは外径60mm、内径52mmの外筒管を用いているが、真空断熱層を設けるため及びき裂進展ユニットを配置するために外径65mm、内径61mmの外筒管を用いた。
- ・試験片はホットセル内で仕切り管内部のき裂進展ユニットに装荷されるが、試験片装荷後の仕切り管の組立てを容易にするためにボルトにより固定することとした。

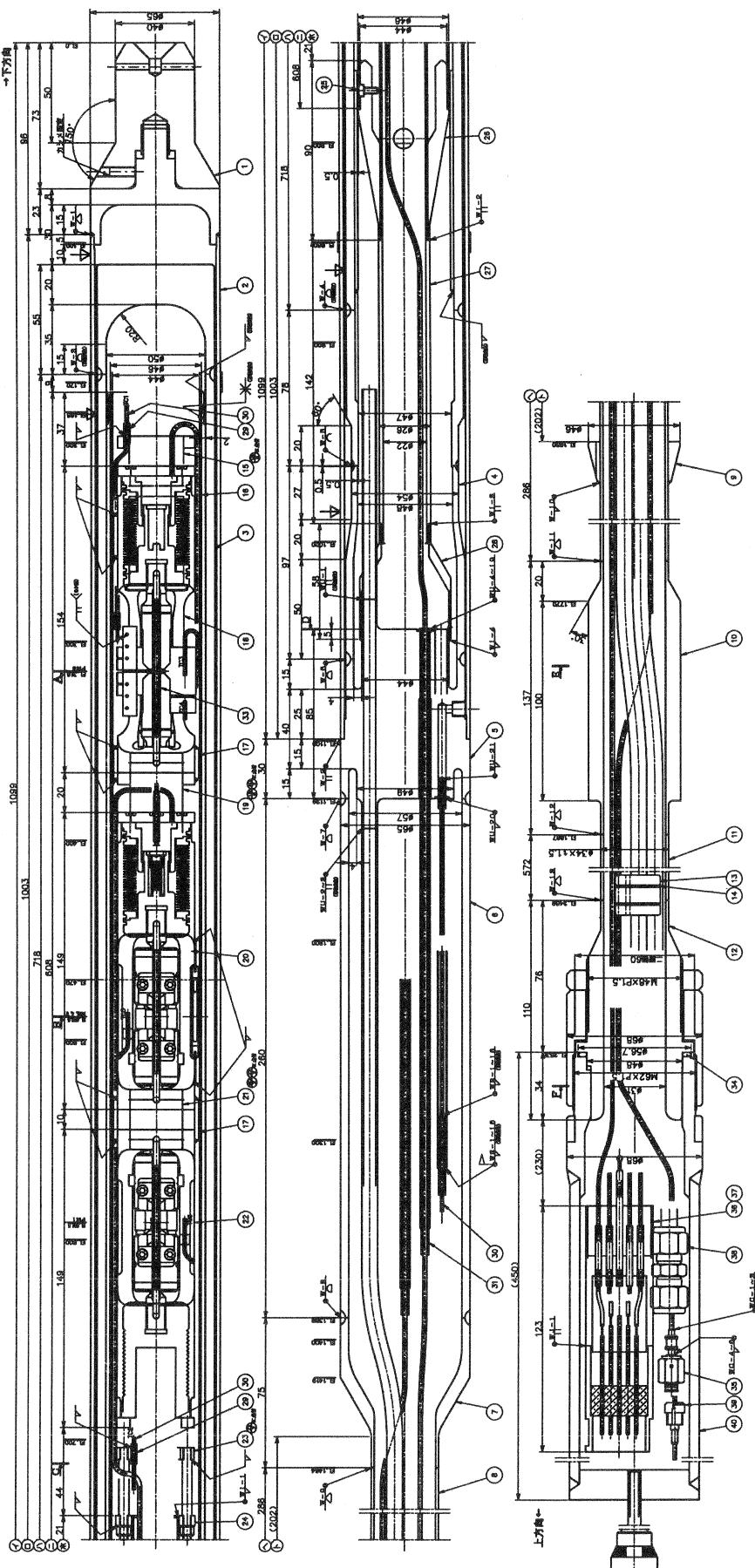


図5-1 00M-8A本体部全体図-1

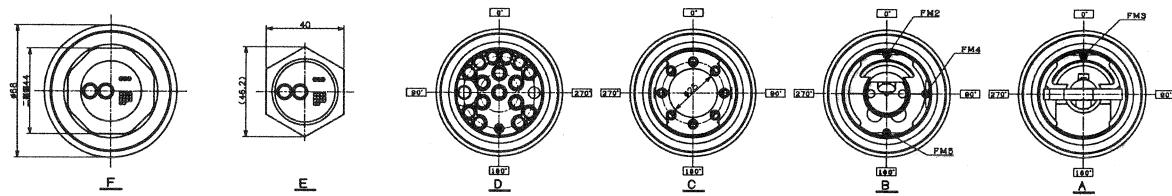


図 5-2 00M-8A 本体部全体図-2

表 2 00M-8A 本体部全体図部品表

| 員数 | 品番 | 部品名            | 材質             |
|----|----|----------------|----------------|
| 1  | 1  | スペーサーブロック      | A1070, SUS304  |
| 1  | 2  | 外筒部組           | SUS316L, 他     |
| 1  | 3  | 内筒部組           | SUS316L, 他     |
| 1  | 4  | 上部内筒           | SUS316L        |
| 1  | 5  | 上部端栓部組         | SUS316L, 他     |
| 1  | 6  | 保護管 (1)        | SUS316L        |
| 1  | 7  | レジューサ (1)      | SUS316L        |
| 1  | 8  | 保護管 (2)        | SUS316         |
| 1  | 9  | ツバ             | SUS304         |
| 1  | 10 | 六角管            | SUS316         |
| 1  | 11 | 保護管 (3)        | SUS316         |
| 1式 | 12 | 接続管部           | SUS316, 他      |
| 2  | 13 | 保護管スペーサ (A)    | SUS304         |
| 1式 | 14 | SUSワイヤ         | SUS304         |
| 1  | 15 | M I ホルダ        | SUS304         |
| 1  | 16 | 仕切り管 (1)       | SUS304         |
| 1式 | 17 | 流路調整金具         | SUS304         |
| 2  | 18 | き裂進展ユニット       | SUS316, 他      |
| 1  | 19 | 接続金具 (1)       | SUS304         |
| 1  | 20 | き裂発生ユニット       | SUS316, 他      |
| 1  | 21 | 接続金具 (2)       | SUS304         |
| 1  | 22 | き裂発生模擬ユニット     | SUS304         |
| 1  | 23 | 接続金具 (3)       | SUS304         |
| 1式 | 24 | 接続金具 (4)       | SUS304         |
| 2  | 25 | 固定ネジ           | SUS304         |
| 1  | 26 | 仕切り管 (2)       | SUS304         |
| 1  | 27 | 仕切り管 (3)       | SUS304         |
| 1  | 28 | 仕切り管 (4)       | SUS304         |
| 2  | 29 | 熱伝対取付スリーブ      | SUS304         |
| 7  | 30 | 熱電対            | SUS316, 他      |
| 1式 | 31 | M I, 加圧管溶接スリーブ | SUS316L        |
| 1式 | 32 | バンド            | SUS304         |
| 5式 | 33 | F M ホルダ部組      | SUS304, 他      |
| 1  | 34 | 金属Oリング         | N1, インコネルX-750 |
| 3式 | 35 | VCRコネクタ        | SUS316, 他      |
|    | 36 | 欠番             |                |
| 1  | 37 | 計装用コネクタ        | SUS304, 他      |
| 2式 | 38 | スエージロック継手      | SUS316         |
| 2式 | 39 | M I 継手         | SUS304, 他      |
| 1式 | 40 | 保護キャップ部組       | SUS304, 他      |

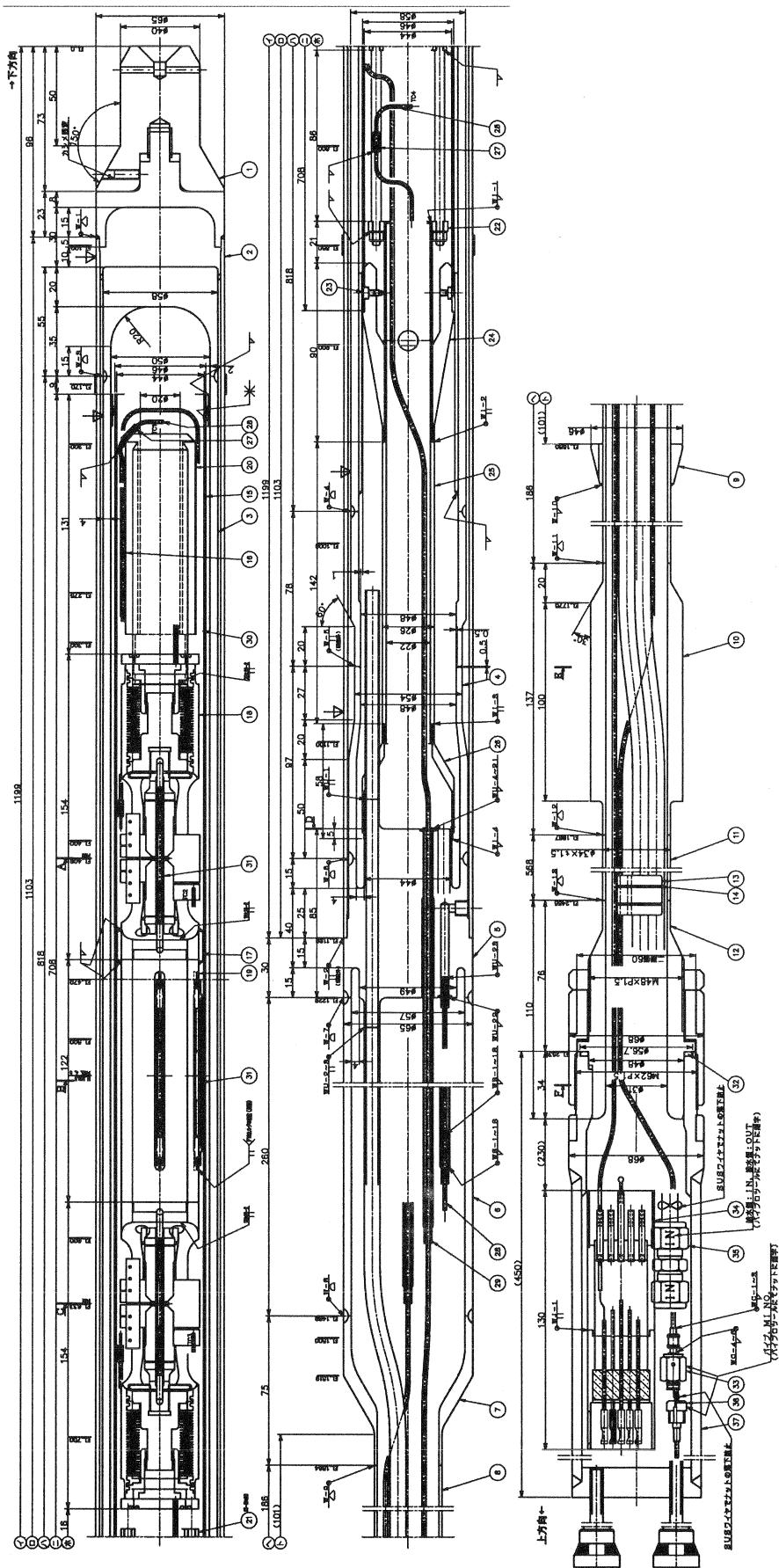


図6-1 00M-9A,10A,12A,13A,05M-3J、4J 本体部

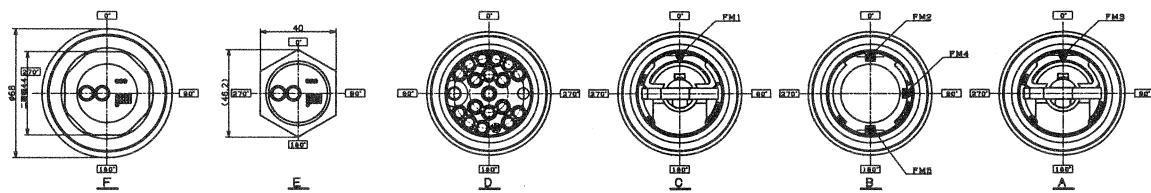


図 6-2 00M-9A,10A,12A,13A、05M-3J,4J 本体部全体図-2

表 3 00M-9A,10A,12A,13A、05M-3J,4J 本体部全体図部品表

| 員数 | 品番 | 部品名          | 材質           |
|----|----|--------------|--------------|
| 1  | 1  | スペーサーブロック    | A1070,SUS304 |
| 1  | 2  | 外筒部組         | SUS316L,他    |
| 1  | 3  | 内筒部組         | SUS316L,他    |
| 1  | 4  | 上部内筒         | SUS316L      |
| 1  | 5  | 上部端栓部組       | SUS316L,他    |
| 1  | 6  | 保護管(1)       | SUS316L      |
| 1  | 7  | レジューサ(1)     | SUS316L      |
| 1  | 8  | 保護管(2)       | SUS316L      |
| 1  | 9  | ツバ           | SUS304       |
| 1  | 10 | 六角管          | SUS316       |
| 1  | 11 | 保護管(3)       | SUS316       |
| 1式 | 12 | 接続管部         | SUS316,他     |
| 2  | 13 | 保護管スペーサ      | SUS304       |
| 1式 | 14 | SUSワイヤ       | SUS304       |
| 1  | 15 | 仕切り管(1)      | SUS304       |
| 1式 | 16 | 絶縁材          | 酸化ジルコニウム     |
| 1式 | 17 | 流路調整金具       | SUS304       |
| 2  | 18 | き製進展ユニット     | SUS316,他     |
| 1  | 19 | 接続金具(1)      | SUS304       |
| 1  | 20 | スペーサ         | SUS304       |
| 1  | 21 | 接続金具(3)      | SUS304       |
| 1式 | 22 | 接続金具(4)      | SUS304       |
| 2  | 23 | 固定ネジ         | SUS304       |
| 1  | 24 | 仕切り管(2)      | SUS304       |
| 1  | 25 | 仕切り管(3)      | SUS304       |
| 1  | 26 | 仕切り管(4)      | SUS304       |
| 2  | 27 | 熱電対取付スリーブ    | SUS304       |
| 4  | 28 | 熱電対          | SUS316,他     |
| 1式 | 29 | M1,加圧管溶接スリーブ | SUS316L      |
| 1式 | 30 | バンド          | SUS304       |
| 5式 | 31 | F Mホルダ部組     | SUS304,他     |
| 1  | 32 | 金属Oリング       | N1,イコネルX-750 |
| 3式 | 33 | VCRコネクタ      | SUS316,他     |
| 1  | 34 | 計装用コネクタ      | SUS304,他     |
| 2式 | 35 | スエージロック継手    | SUS316       |
| 4式 | 36 | M1継手         | SUS304,他     |
| 1式 | 37 | 保護キャップ部組     | SUS304,他     |

## (2) キャップセル保護管部

図 7-1、7-2 にキャップセル保護管部の全体図を、表 4 に部品表を示す。キャップセル保護管部は分離、接続可能な構造とするため、最大Φ68 の保護管を用いた。この部分には、キャップセル本体との接続時に保護管から出し入れする余裕を設けるために、熱電対、MI ケーブル、ベローズ制御管、真空制御管をコイル状に配置している。計装線等の出し入れでコイル部分が絡まらないように各層は巻き方向を逆回転させ配置している。また、給排水管は、接続ユニット内の給排水管のコイル部（熱膨張吸収のためのコイル）を利用して、給排水管を保護管から引出せる構造としている。給排水管、ベローズ加圧管及び真空制御管には保護管より引出すためのワイヤが取り付けてある。キャップセル本体部と保護管部の熱電対及び電圧用の MI ケーブルは、一度に接続できるようにするために、気密コネクタを用いている。電流用の MI ケーブルは、他の計測線にノイズを発生させる可能性があるので 1 本ずつ気密コネクタで接続している。図 8-1、8-2 に 00M-8A 及び 00M-9A, 10A, 12A, 13A, 05M-3J, 4J のキャップセル本体部を含む計測線等の配線図を示す。

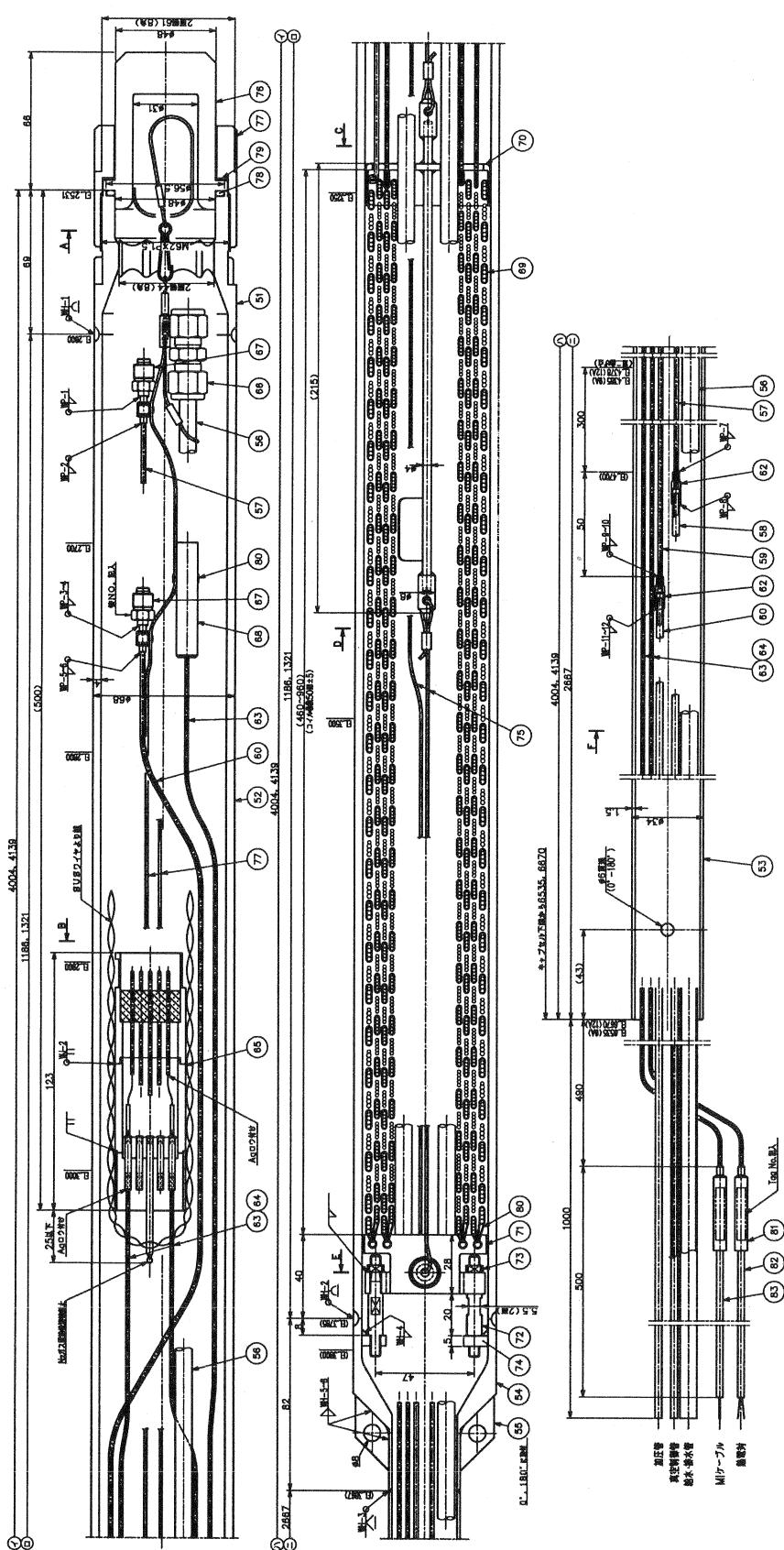


図7-1 保護管部全体図-1

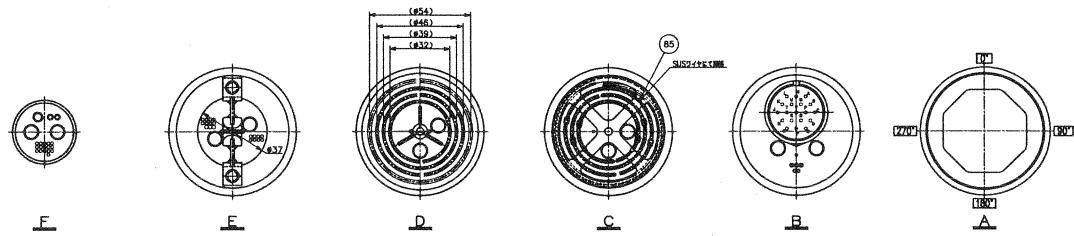


図 7-2 保護管全体図-2

表 4 保護管部品表

| 員数 | 品番 | 部品名       | 材質      |
|----|----|-----------|---------|
| 1  | 51 | 接続管(上部)   | SUS316  |
| 1  | 52 | 保護管(4)    | SUS316  |
| 1  | 53 | 保護管(5)    | SUS316  |
| 1  | 54 | レジューサ(2)  | SUS316  |
| 2  | 55 | 吊り金具      | SUS304  |
| 1  | 56 | 給排水管      | SUS316  |
| 1  | 57 | 真空制御管(1)  | SUS304  |
| 1  | 58 | 真空制御管(2)  | SUS304  |
| 2  | 59 | 加圧管(1)    | SUS316  |
| 2  | 60 | 加圧管(2)    | SUS316  |
| —  | 61 | 欠番        | -----   |
| 2  | 62 | 変換アダプタ(1) | SUS304  |
| 12 | 63 | M1ケーブル    | SUS316他 |
| 4  | 64 | 熱電対ワイヤ    | SUS316他 |
| 1  | 65 | 計装用コネクタ   | SUS304他 |
| 2  | 66 | スエージロック継手 | SUS316  |
| 3組 | 67 | VCRコネクタ   | SUS316他 |
| 4組 | 68 | M1継手      | SUS304他 |
| 1式 | 69 | コイルクランプ   | SUS304  |
| 1組 | 70 | コイルカップ    | SUS304  |
| 1  | 71 | コイルプレート   | SUS304  |
| 2  | 72 | スペーサロッド   | SUS304  |
| 2  | 73 | 四角ナット     | SUS304  |
| 1  | 74 | リング       | SUS304  |
| 1式 | 75 | ワイヤロープ    | SUS304  |
| 1組 | 76 | キャップ      | SUS304  |
| 1  | 77 | 袋ナット      | SUS304  |
| 1  | 78 | Oリング      | パイトン    |
| 2  | 79 | シム        | SUS304  |
| 1式 | 80 | SUSワイヤ    | SUS304  |
| 16 | 81 | アダプタ      | SUS304  |
| 4  | 82 | 補償導線      | ガラス他    |
| 12 | 83 | ソフトケーブル   | ガラス被覆,他 |

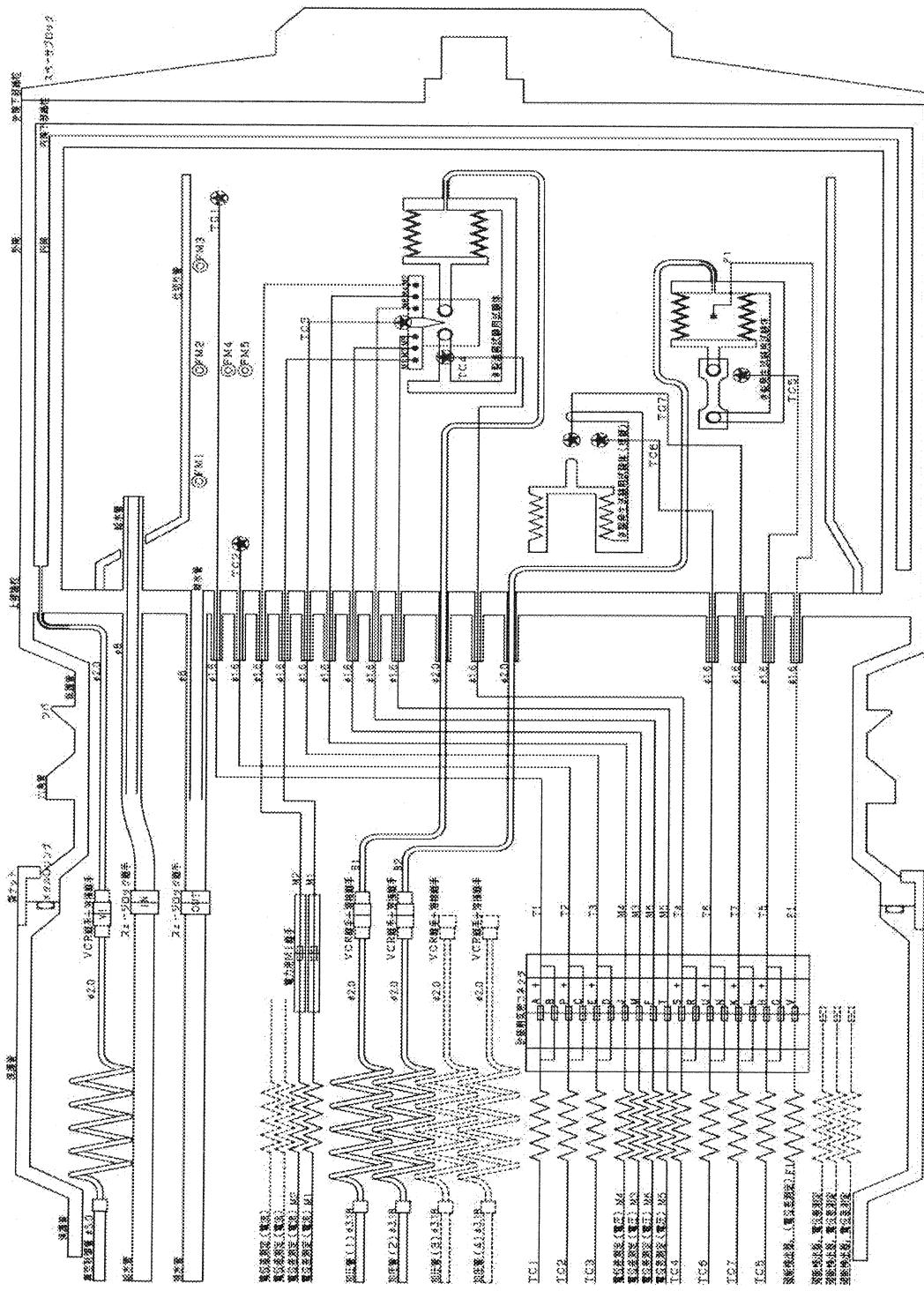


図8-1 00M-8A計測線配線図

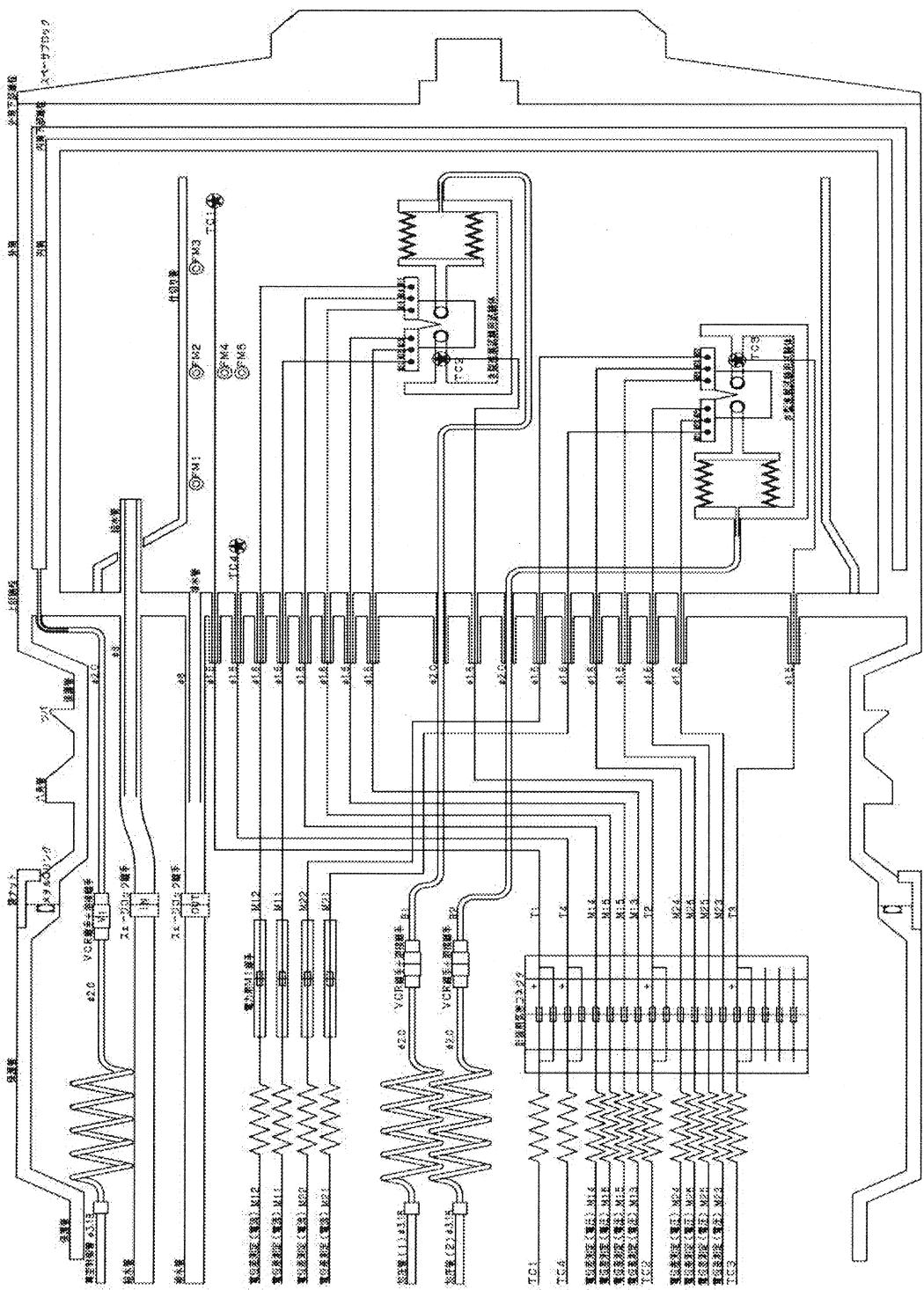


图8-2 00M-9A,10A,12A,13A、05M-3J、4J计测线配线图

## (3) き裂進展ユニット

き裂進展ユニットは、ベースプレート、ベローズ、プルロッド、ウイング、ロッド、試験片等から構成される。試験片はプルロッド及びロッドにより固定される。ウイングにはあらかじめ先端部をプラグした MI ケーブルを点溶接しており、これは、ホットセル内での組立てを行いやすくするためである。ウイングはホットセル内で試験片にボルトで固定され、さらに点溶接を行う。

MI ケーブルの先端は、シースと芯線を絶縁していないため、MI ケーブル同士が接触すると、電位差の測定が精度よくできない恐れがあるため、00M-8A キャプセルでは、ウイングに接続された MI ケーブルの先端部から 30cm 程度を高温大気中で酸化させ酸化被膜処理を行い、シースの抵抗をあげている。00M-9A、10A、12A、13A、05M-3J、4J では、ウイングから 10cm 程度、MI ケーブルに酸化被膜付ジルコニウムのカバーを取り付け、MI ケーブル同士を絶縁している。10cm という値は、今回の MI ケーブルで精度良く測定するために必要な MI ケーブル間の絶縁すべき距離を試験し決定した。試験片とロッドの間にも酸化被膜付ジルコニウムのカバーを取り付け試験片とユニット本体とを絶縁処理をしている。これらの構造を表 5 にまとめる。

ベローズには、イーグル工業社製の 2 重溶接ベローズ DASH12 (外径 33.32mm、内径 20.62mm) を用いた。この 2 重溶接ベローズの特徴は、バネ定数の直線性が極めて良いという特徴があり、1 重溶接ベローズより信頼性が高い。

図 9 にき裂進展ユニットの構造図を示す。また、表 6 にき裂進展ユニットの部品表を示す。

表 5 試験片及び MI ケーブルの接続方法と絶縁処理

| キャプセル名                       | 試験片の絶縁                        | MI ケーブル先端処理                      | 試験片と MI ケーブルの接続方法                    | MI ケーブル間の絶縁                                  | 接地(アース)等                       |
|------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------|
| 00M-8A                       | なし                            | シースと芯線を溶接し、先端をプラグ。SUS ワイヤをプラグに溶接 | ウイングに $\Phi 1.1$ の穴をあけ、SUS ワイヤを通し点溶接 | MI ケーブル先端部から 30cm 程度を高温大気中で酸化被膜処理            | 酸化被膜処理をしてない部分では MI ケーブルが互いに接触  |
| 00M-9A、10A、12A、13A、05M-3J、4J | ロッドと試験片の間に酸化被膜付ジルコニウムカバーを挟み絶縁 | シースと芯線を溶接し、先端をプラグ。SUS ワイヤをプラグに溶接 | ウイングに $\Phi 1.1$ の穴をあけ、SUS ワイヤを通し点溶接 | ウイングから約 10cm まで MI ケーブルに酸化被膜付ジルコニウムカバーを挟み絶縁。 | カバーを取り付けていない部分では MI ケーブルが互いに接触 |

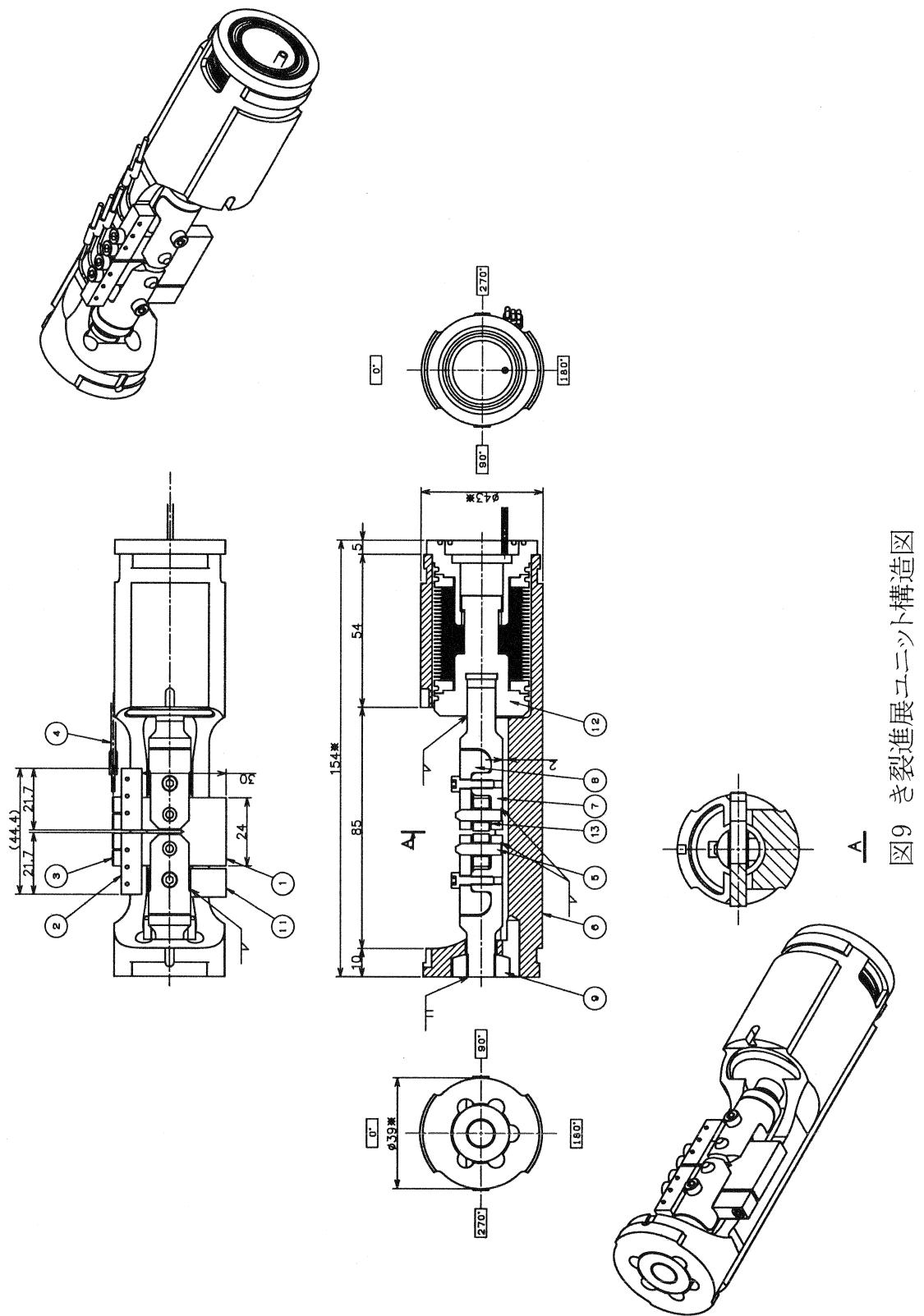


図9 き裂進展ユニット構造図

表 6 き裂進展ユニット部品表

| 品番 | 部品名          | 材質              |
|----|--------------|-----------------|
| 1  | 0.4 T-C T試験片 | SUS304          |
| 2  | ウイング         | SUS304          |
| 3  | 六角穴付ボルト      | SUS304orSUS316L |
| 4  | MIケーブル部組     | SUS316他         |
| 5  | ロッド          | SUS316          |
| 6  | ベースプレート      | SUS316          |
| 7  | プロロッド(1)     | SUS316          |
| 8  | プロロッド(2)     | SUS316          |
| 9  | ナット          | SUS316          |
| 10 | 熱電対          | SUS316          |
| 11 | 熱電対取付ブロック    | SUS316          |
| 12 | ベローズ部組       | SUS316他         |
| 13 | カラー          | Zry-2           |

### 3.4 試験片の照射温度予測

試験片の目標照射温度はBWR炉水温度の288°Cである。試験片の温度計算は飽和温度キャップセル専用の計算コードSATCAP-C<sup>3)</sup>を用いた。このコードはキャップセルの熱挙動を評価し、計算結果をキャップセルの熱設計に利用することを目的に作成された一次元の計算コードである。

00M-8Aの計算条件としては、核加熱率0.75W/g、給水圧力6.5MPa、給水流量0.2m<sup>3</sup>/h、キャップセル下部水温260°Cとした。図10にSATCAP-Cによる水温及び試験片温度予測を示す。計算結果より、試験片近傍の水温は259.5°C、CT試験片の中心温度は270.2°Cである。

00M-9A, 10A, 12A, 13A, 05M-3J, 4Jの計算条件は、00M-8Aと同条件である。図11にSATCAP-Cによる水温及び試験片温度を示す。計算結果より、キャップセル下段の試験片近傍の水温は264.0°C、CT試験片の中心温度は275.9°Cである。

また、キャップセル上段の試験片近傍の水温は269.5°C、CT試験片の中心温度は278.5°Cである。

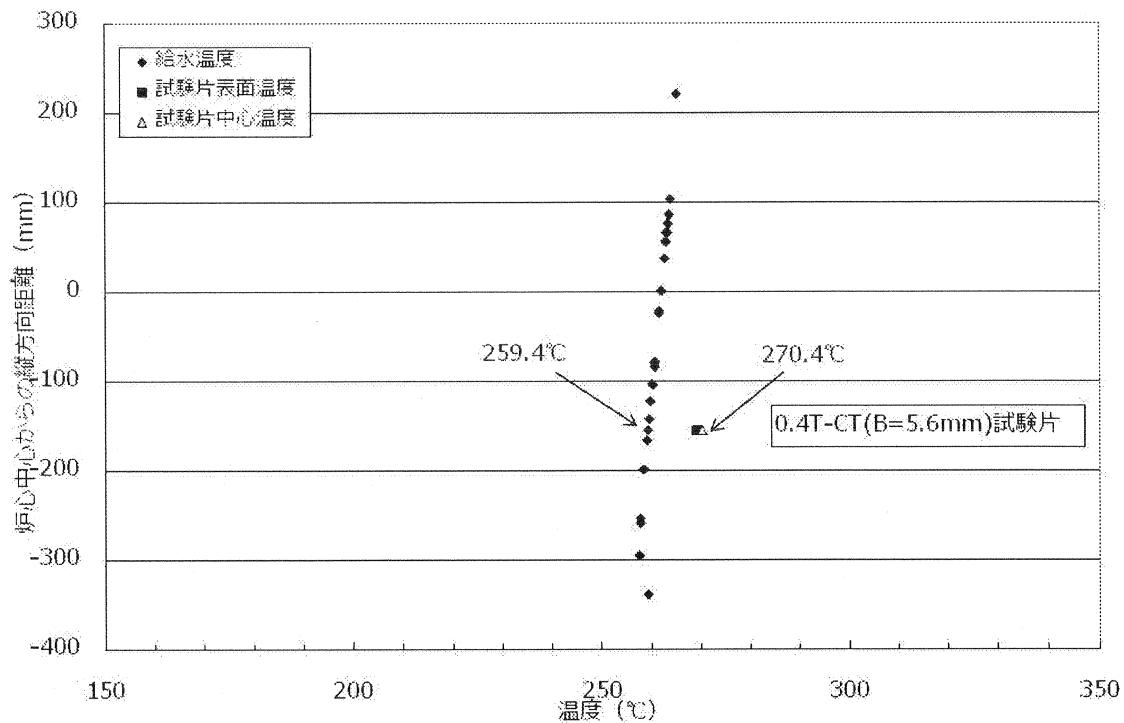


図 10 00M-8A キャプセル水温及び試験片温度予測

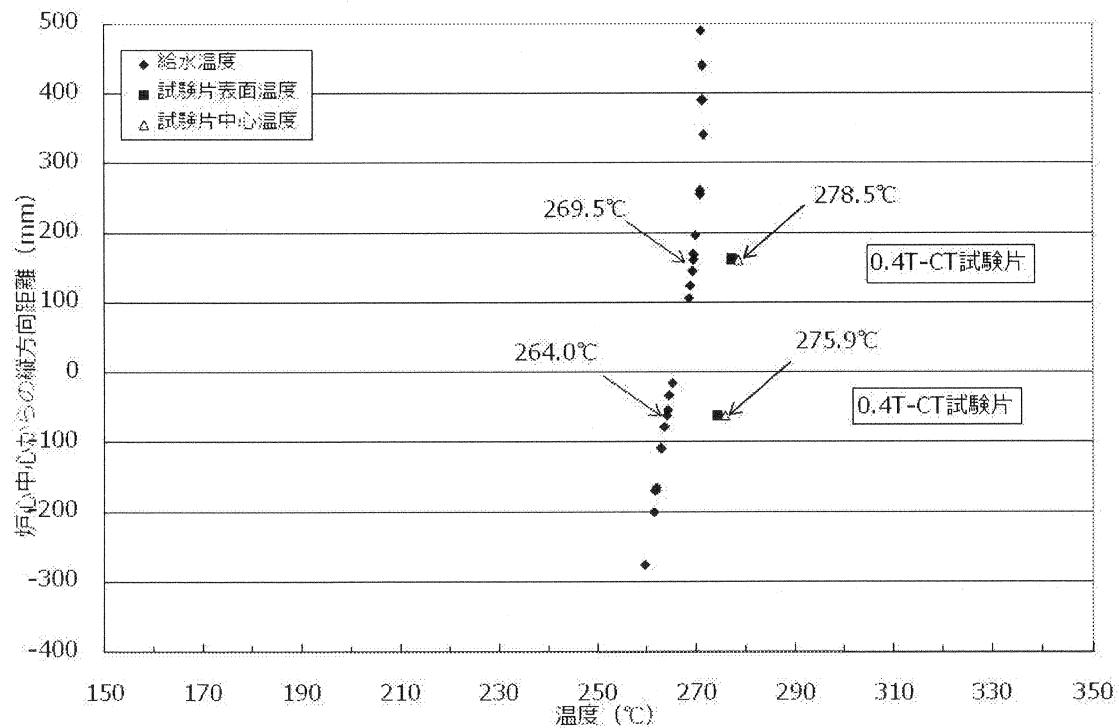


図 11 00M-9A, 10A, 12A, 13A, 00M-3J, 4J キャプセル水温及び試験片温度予測

#### 4. キャップセルの製作

##### 4.1 工場での組立

00M-8A はメーカーで部品製作、一部組立てを行い、キャップセル本体部の組立てを工務技術部工作技術課で行った。00M-9A、10A、12A、13A、05M-3J、4J キャップセルはメーカーで部品製作及びキャップセル組立を行った。

キャップセル組立て時に使用する溶接は、Tig 溶接（溶接ガス：Ar ガス）及びプラズマ溶接（Ar-H<sub>2</sub> ガス）を用いている。

##### 4.2 ホットセル内での組立

ホットセル内でのキャップセルの組立手順を以下に示す。

- (1) CT 試験片の表面の酸化皮膜を除去した後、ウイングを6角穴付ボルトにて固定し、保持治具にて試験体プルロッドの平行確認を行い、セル内組立て用試験治具にてCT 試験片とウイングの接触抵抗を極力小さくするための点溶接を実施。
- (2) 点溶接後、保持治具を取り外した試験体をプルロッド及び止めネジにて固定し、仕切り管を取付けた。試験片（未照射材）組込み時の外観写真を図12-1に示す。
- (3) キャップセルを再装荷溶接装置にて固定し、内筒管を取付け、Φ 54×3mm<sup>t</sup> 部の周溶接をアルゴンガスを溶接ガスとして用いて実施した。
- (4) キャップセルを再装荷溶接装置にて固定し、外筒管を取付け、Φ 65×2mm<sup>t</sup> 部の周溶接をアルゴンガスを溶接ガスとして用いて実施した。内筒管及び外筒管溶接時の写真を図12-2に示す。仕切り管、内筒管及び外筒管組立て時の外観写真を図12-2に示す。

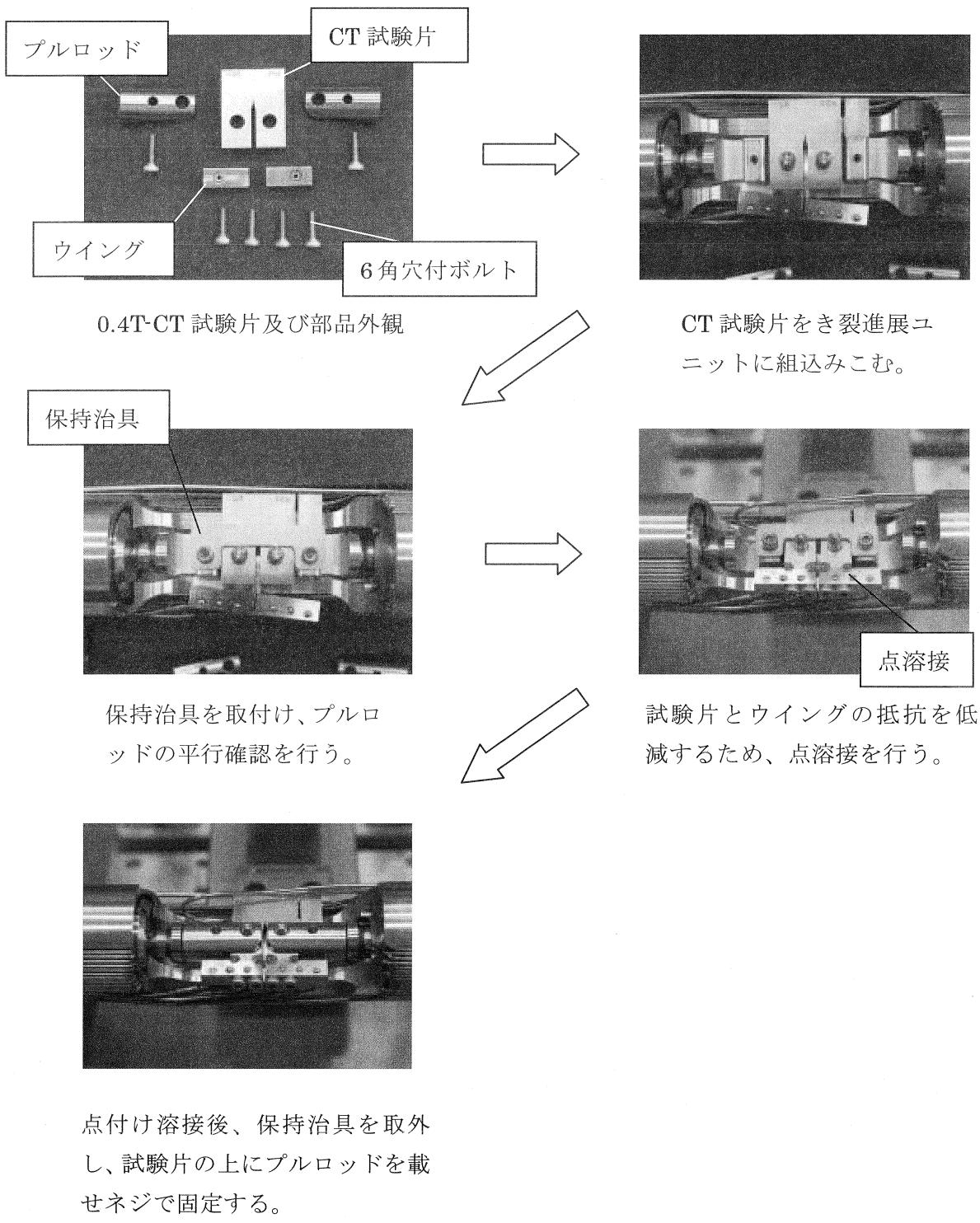
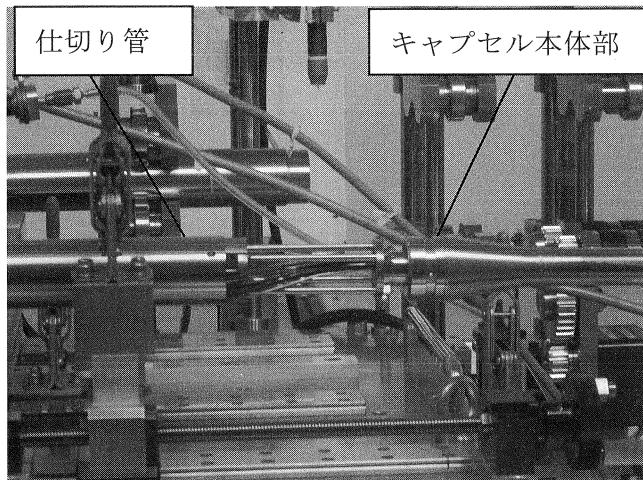
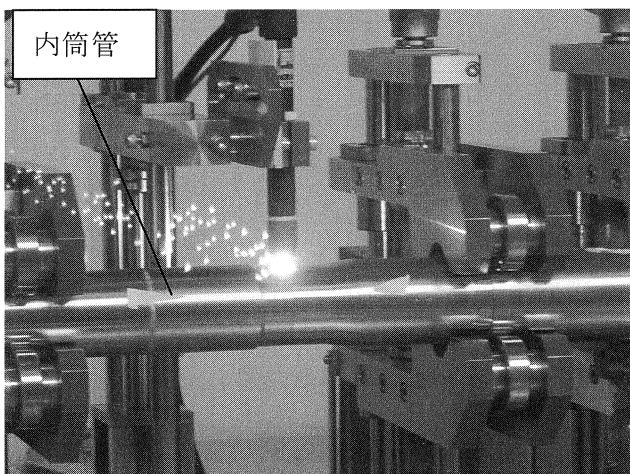
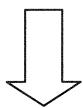


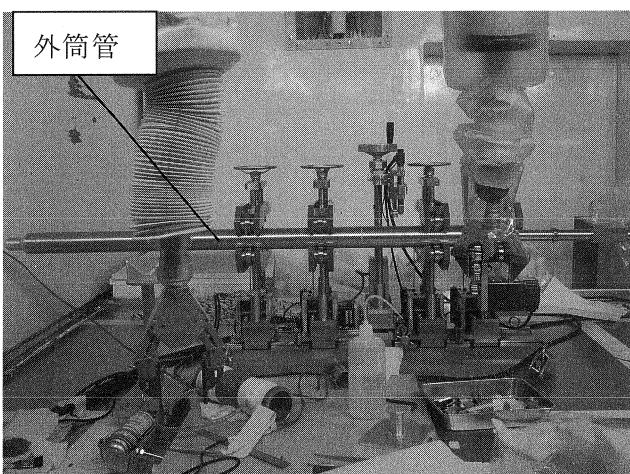
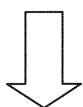
図 12-1 試験片（未照射材）組込み時の外観写真



試験片を取付けた後、仕切り管を  
キャップセル本体部に取付ける。



キャップセルを再装荷溶接装置  
にて固定し、内筒管を取付け、  
周溶接を行う。



キャップセルを再装荷溶接装置  
にて固定し、外筒管を取付け、  
周溶接を行う。

図 12-2 内筒管及び外筒管溶接時の外観写真

#### 4.3 カナル及び炉上での組立

JMTR と JMTR ホットラボはカナル（水路）により連結されている。ホットセルで組立てられたキャプセル本体は、試験片からの放射線を遮へいするために、カナル水中を移動させ、カナルに設置されたキャプセル組立て作業台にて保護管と接続され、その後、原子炉にキャプセルを移動させ、原子炉内に挿入し、配管の接続作業を行う。

カナルでの組立手順を以下に示す。

##### (1) カナルでの照射下キャプセルの保護管接続作業

- ① キャプセル本体をクレーンで吊りカナルのキャプセル作業台にキャプセル本体をセットした。図 13-1 にキャプセル作業台への取付け時の写真を示す。
- ② 接続ユニット付き保護管をクレーンで吊りカナルへ移動した。図 13-2 に保護管移動時の写真を示す。
- ③ キャプセル上部に取付けてあるキャップを取り、キャプセル作業台でキャプセル接続部と保護管接続部の角度を保護管に取付けてあるロープにより調整し、メタル 0 リングを取付けた。図 13-3 にメタル 0 リング取付け時の写真を示す。
- ④ 保護管部から計装類、給排水管、真空制御管、ベローズ加圧管を取り出し、キャプセルのものと接続しキャプセル本体側と保護管側を接続した。図 13-4 に計装線等接続時写真を示す。

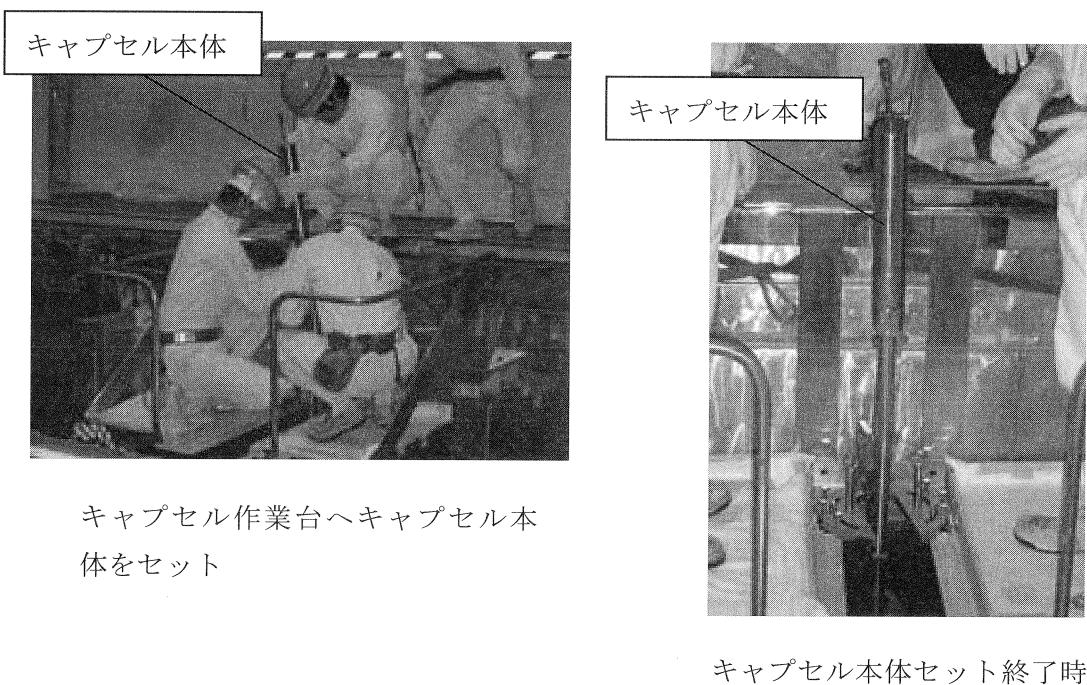


図 13-1 カナル作業台へのキャップセル本体取付け時外観写真

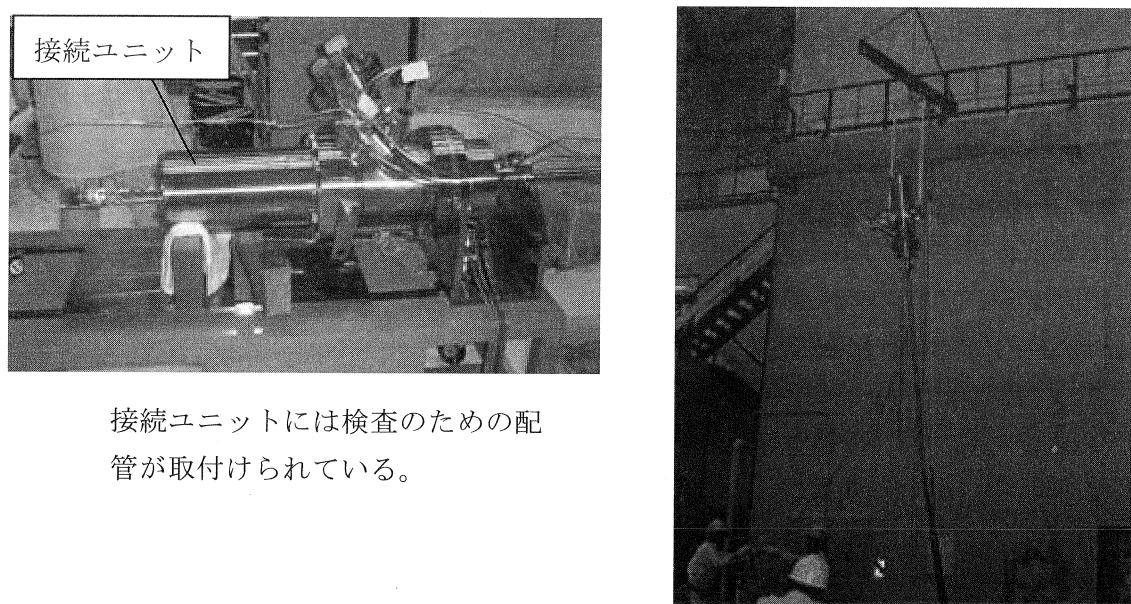
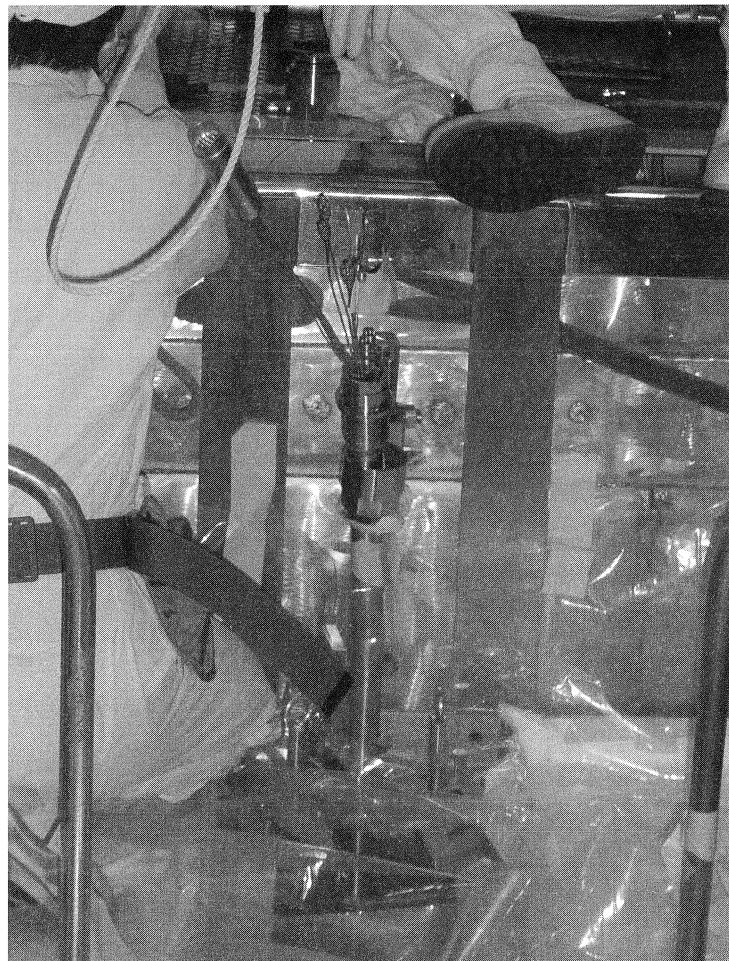
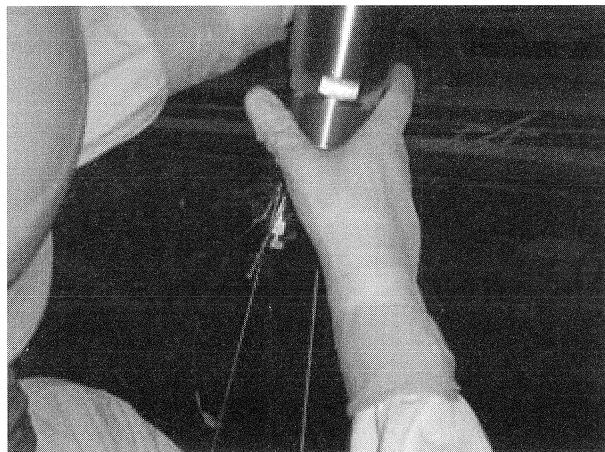


図 13-2 接続ユニット付き保護管移動時外観写真

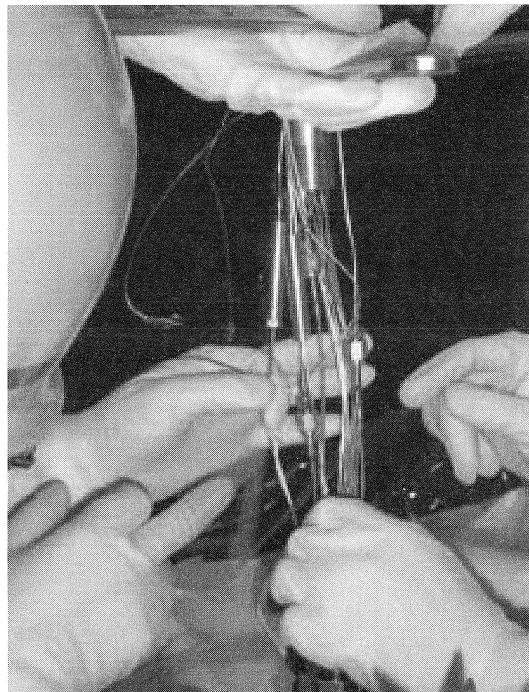


キャップセル作業台でキャップセル接続部を固定し、キャップセルのキャップ  
を外し、メタル0リングを取付け、保護管接続部の角度を調整する。

図 13-3 メタル0リング取付け時外観写真



保護管から給排水管等を引出す



計装線等接続作業中



計装線等接続終了時



保護管接続終了時

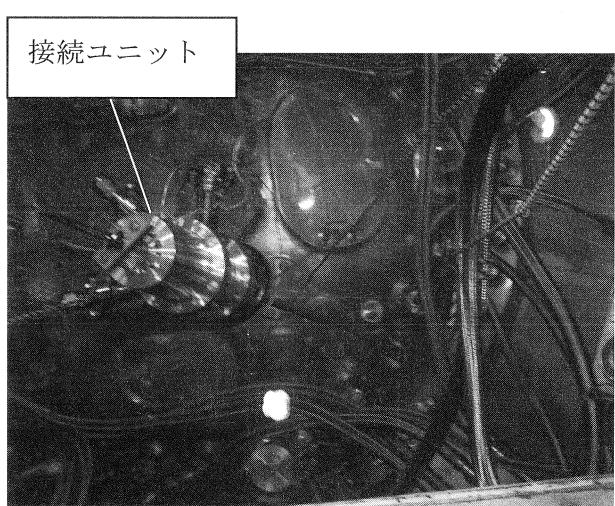
図 13-4 計装線等接続時外観写真

炉上でのキャップセル挿入作業を以下に示す。

(2) 炉上でのキャップセル挿入作業

- ① キャップセルをクレーンで吊り、キャップセル挿入用ノズルから照射孔にキャップセルを挿入する。
- ② キャップセルに保護管固定用のサポートアームを取付ける。
- ③ 接続ユニットと接続ユニットから炉周り装置端子台まで繋ぐ熱電対用案内管及び MI ケーブルを炉周りの測定装置まで繋ぐき裂測定用案内管の接続を行う。
- ④ 热電対用案内管と水環境制御装置中継盤の接続を行う。
- ⑤ 真空制御管、荷重制御管、保護管加圧管の接続を行う。
- ⑥ キャップセル内の空気を抜くためにビニールホースと漏斗を用いてキャップセル内に水張りを行う。
- ⑦ 給排水管用案内管と接続ユニットの給排水管を接続する。
- ⑧ 給排水用案内管を接続ユニットに接続する。

図 14 に炉上作業時の外観写真を示す。



キャプセルをクレーンで吊り、ノズルから  
照射孔にキャプセルを挿入する。



原子炉圧力容器への接続ユニットの  
取付け状態の確認を行う。



給排水管用案内管と接続ユニットの給排水管の接  
続を行う。

図 14 炉上作業時外観写真

## 5. 検査

### 5.1 工場での検査

#### (1) キャップセル本体

キャップセルの検査は、JMTR キャップセル等検査基準、承認図、検査要領書等に基づいて実施した。検査としては、部品検査、中間検査、納入検査がある。

部品検査は、キャッ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、外筒部組、内筒部組、MI ケーブル部組、FM ホルダ部組等に対して実施し、外観検査、寸法検査、浸透探傷検査等を行った。納入検査は、キャッ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。

#### (2) キャップセル保護管部

キャップセル保護管の検査もまた JMTR キャップセル等検査基準、承認図、検査要領書等に基づいて実施した。検査としては、部品検査、中間検査、出荷前検査、納入検査がある。

部品検査は、部品完成時に実施し、材料検査、外観検査、寸法検査等を行った。中間検査は、保護管組立①、加圧管、真空制御管組立、保護管組み立て②に対して実施し、外観検査、寸法検査、浸透探傷検査等を行った。出荷前検査はキャップセル出荷前に行い、外観検査、標示検査等を行った。納入検査は、キャップセル納入時に実施し、外観検査、表示検査、絶縁抵抗検査、導通検査を行った。保護管納入後、保護管の曲げ作業を行い、さらに、接続ユニットと接続作業を行い耐圧検査を行った。

### 5.2 ホットセル内の検査

ホットセル内の検査では、試験片を取付け時、外筒組立て時に中間検査を実施した。

CT 試験片をプルロッドにより固定し、電位差測定用のウイングを 6 角穴付きボルトで固定後、試験片とウイング部を点溶接し、その後、プルロッドを六角穴付きボルトで固定するまでの作業について、構成確認検査及び表示検査を行った。試験片装荷後、仕切り管を六角穴付きボルトで固定し、内筒を溶接した。溶接後、溶接後、外観検査、寸法検査、ヘリウム漏れ検査、耐圧検査及び浸透探傷検査を行った。外筒の溶接後、外観検査、寸法検査、ヘリウム漏れ検査、耐圧検査及び浸透探傷検査を行った。

00M-10A, 13Aについては、ベローズ制御管に保護キャップをつけたままキャップセル内部の耐圧検査を行ってしまったため、ベローズ内圧力は大気圧、ベローズ外圧力（キャップセル内圧力）が12.7MPa (耐圧検査圧力) となり、試験片に過大な荷重が負荷されたおそれがあったので、13A については照射をとりやめた。

### 5.3 カナル及び炉上での検査

カナルでの検査は中間検査及び最終検査を実施した。

中間検査は、ホットセル内で組立てたキャップセル本体と保護管部を接続する。キャップセル本体及び保護管内の計装用コネクタ及び MI コネクタの接続後ベローズ配管 2 本、真空制御管 1

本、給排水管各 1 本を接続し、接続部の耐圧漏えい検査を行った。

最終検査は、保護管の接続終了後、接続部の耐圧漏えい検査、外観検査を行い、導通検査、絶縁検査（熱電対のみ）を行った。

炉上での検査（試験）は計測付キャップセル作業点検表に沿って行う。キャップセルを原子炉に挿入後原子炉を運転圧に加圧し、原子炉圧力容器と大法兰ジ、大法兰ジと接続ユニット、接続ユニットと保護管の各シール部からの漏洩を目視確認。熱電対用案内管及びき裂測定用案内管を接続ユニットに接続し、熱電対等の線間抵抗と絶縁抵抗の測定。熱電対用案内管を水環境制御装置中継盤に引込み、熱電対等の信号線を接続し、線間抵抗及び絶縁抵抗の測定。真空制御管、荷重制御管、保護管加圧管の接続後ガス置換及び漏洩試験。給排水管の接続後給排水管及び荷重制御管の漏洩試験。給排水用案内管の接続、ガス置換及び漏洩試験を行った。

## 6. 照射下におけるキャプセル性能

### 6.1 試験片照射温度

#### (1) 試験片の温度評価方法

00M-8A キャプセルの試験片には試験片温度を測定するために熱電対を取付けた。その測定温度を試験片温度とした。00M-9A, 10A, 12A, 05M-3J, 4J キャプセルの試験片には熱電対を取付けていないため、試験片近傍に取付けてある温度測定治具の温度測定結果と給水温度から試験片温度を求めた。まず、試験片の温度測定治具に取り付けた熱電対の測定結果と給水温度から温度測定治具表面の熱伝達率を求め、この熱伝達率を実効熱伝達率とした。この実効熱伝達率、給水温度、熱伝導率等から試験片評価温度を求めた。

#### (2) 照射試験結果

製作したキャプセルのうち 00M-10A、13A は、ホットラボでの組立検査時に試験片に異常な荷重がかかったおそれがあり、00M-10A については照射依頼者の希望により 1 サイクル (161 サイクル) のみ照射を行い、00M-13A については照射をとりやめた。従って、6 本のキャプセルの照射を行った。各キャプセルの照射サイクル、照射孔、核加熱率及び照射時間を表 7 に示す。

各キャプセルの平均温度、平均水温、平均圧力及び平均流量を表 8 に示す。00M-8A の試験片の評価温度の平均値は 271.6°C、00M-9A 上段の試験片評価温度平均値 274.6°C、下段 271.6°C、00M-10A 上段 275.1°C、下段 273.3°C、00M-12A 上段 275°C、下段 273.6°C、05M-3J 上段 273.9°C、下段 272.9°C、05M-4J 上段 275.7°C、下段 273.0°C となり、いずれのキャプセルの試験片も目標とする照射目標温度 288°C から 20°C 以内に抑えることができた。

水質調整タンク出口水質（キャプセル入口水質）及びキャプセル出口水質をキャプセル毎に表 9-1～9-6 に示す。また、図 15 に各キャプセルの J M T R 炉心装荷位置を示す。

表 7 各キャプセルの照射サイクル、照射孔、核加熱率及び照射時間

| キャプセル名                | 開始サイクル | 終了サイクル | サイクル数 | 照射孔  | 核加熱率(W/g) <sup>*1</sup> | 照射時間(h) |
|-----------------------|--------|--------|-------|------|-------------------------|---------|
| 00M-8A                | 150    | 152    | 3     | M-4  | 0.75                    | 2047.4  |
| 00M-9A                | 155    | 158    | 4     | M-4  | 0.75                    | 2800.4  |
| 00M-10A               | 161    | 161    | 1     | M-4  | 0.75                    | 696.9   |
| 00M-12A               | 157    | 160    | 4     | F-13 | 0.75                    | 2793.9  |
| 00M-13A <sup>*2</sup> | —      | —      | —     | —    | —                       | —       |
| 05M-3J                | 162    | 165    | 4     | M-4  | 0.75                    | 2582.4  |
| 05M-4J                | 162    | 165    | 4     | F-13 | 0.75                    | 2582.4  |

\*1: モンテカルロコード MCNP によりガンマ加熱率及び中性子の弾性散乱による発熱も考慮に入れ計算された発熱率

\*2: 照射中止

表 8 各キャプセルの平均温度、平均水温、平均圧力及び平均流量

| キャプセル名                | 試料名         | 試料刻印 | 平均水温(°C) | 平均中心温度(°C) | 平均圧力(MPa) | 平均流量(m³/h) |
|-----------------------|-------------|------|----------|------------|-----------|------------|
| 00M-8A                | 0.4T-CT 試験片 | -    | 268.3    | 271.6      | 6.60      | 0.22       |
| 00M-9A                | 0.4T-CT 試験片 | A02  | 265.1    | 274.6      | 7.10      | 0.21       |
|                       | 0.4T-CT 試験片 | A03  | 264.0    | 271.6      |           |            |
| 00M-10A               | 0.4T-CT 試験片 | A06  | 268.5    | 275.1      | 6.96      | 0.20       |
|                       | 0.4T-CT 試験片 | A07  | 268.0    | 273.3      |           |            |
| 00M-12A               | 0.4T-CT 試験片 | A75  | 265.6    | 275.0      | 7.00      | 0.21       |
|                       | 0.4T-CT 試験片 | A76  | 265.2    | 273.6      |           |            |
| 00M-13A <sup>*1</sup> | 0.4T-CT 試験片 | A80  | -        | -          | -         | -          |
|                       | 0.4T-CT 試験片 | A81  | -        | -          |           |            |
| 05M-3J                | 0.4T-CT 試験片 | A04  | 270.6    | 273.9      | 7.05      | 0.19       |
|                       | 0.4T-CT 試験片 | A05  | 269.4    | 272.9      |           |            |
| 05M-4J                | 0.4T-CT 試験片 | A77  | 269.3    | 275.7      | 6.97      | 0.21       |
|                       | 0.4T-CT 試験片 | A79  | 268.6    | 273.0      |           |            |

<sup>\*1</sup> : 照射中止

表 9-1 00M-8A オンライン水質計測結果

| 測定項目                | 150cy         |                     | 151cy         |             | 152cy         |             |
|---------------------|---------------|---------------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
|                     | 水質調整タ<br>ンク出口 | キャプセル出口             | 水質調整タ<br>ンク出口 | キャプセル<br>出口 | 水質調整タン<br>ク出口 | キャプセル<br>出口 |
| 導電率<br>( $\mu$ S/m) | 約 6.0         | 150cy 前半<br>約 9.0   | 約 6.0         | 約 6.0       | 約 6.0         | 約 7.0       |
|                     |               | 150cy 後半<br>約 9.0   |               |             |               |             |
| 溶存酸素濃度<br>(ppb)     | 約 170         | 150cy 前半<br>138～164 | 約 170         | 約 170       | 約 170         | 約 190       |
|                     |               | 150cy 後半<br>約 190   |               |             |               |             |
| 溶存水素濃度<br>(ppb)     | 1.2～3.8       | 150cy 前半<br>3.9～4.9 | 2.1           | 2.1         | 2.6           | 5.6～5.8     |
|                     |               | 150cy 後半<br>約 6.0   |               |             |               |             |
| p H                 | 6.3～6.6       | -                   | 6.7           | -           | 6.9           | -           |

表 9-2 00M-9A オンライン水質計測結果

| 測定項目                               | 155cy     |          | 156cy     |          | 157cy     |          | 158cy     |          |
|------------------------------------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
|                                    | 水質調整タンク出口 | キャップセル出口 | 水質調整タンク出口 | キャップセル出口 | 水質調整タンク出口 | キャップセル出口 | 水質調整タンク出口 | キャップセル出口 |
| 導電率<br>( $\mu \text{S}/\text{m}$ ) | 約 6.0     | 7.1~8.7  | 約 6.0     | 約 6.5    | 約 6.0     | 約 8.0    | 約 6.0     | 7.2      |
| 溶存酸素濃度<br>(ppb)                    | 約 170     | 171      | 約 170     | 約 170    | 約 170     | 約 180    | 約 170     | 約 180    |
| 溶存水素濃度<br>(ppb)                    | 約 2.0     | 約 3.0    | 2.0       | 2.7      | 2.2       | 約 4.5    | 2.2       | 4.3      |
| p H                                | 6.5       | —        | 5.8       | —        | 6.2       | —        | 6.2       | —        |

表 9-3 00M-10A オンライン水質計測結果

| 測定項目                               | 161cy     |           |
|------------------------------------|-----------|-----------|
|                                    | 水質調整タンク出口 | キャップセル出口  |
| 導電率<br>( $\mu \text{S}/\text{m}$ ) | 約 6.0     | 11.2~13.6 |
| 溶存酸素濃度<br>(ppb)                    | 約 2000    | 約 2080    |
| 溶存水素濃度<br>(ppb)                    | 5.4       | 9.3~10.1  |
| p H                                | 7.0       | —         |

表 9-4 00M-12A オンライン水質計測結果

| 測定項目                              | 157cy     |          | 158cy     |          | 159cy     |          | 160cy     |          |
|-----------------------------------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
|                                   | 水質調整タンク出口 | キャップセル出口 | 水質調整タンク出口 | キャップセル出口 | 水質調整タンク出口 | キャップセル出口 | 水質調整タンク出口 | キャップセル出口 |
| 導電率<br>( $\mu\text{S}/\text{m}$ ) | 約 6.0     | 約 8.0    | 約 6.0     | 7.1      | 5.7       | ①7.4     | 5.7       | 6.8      |
|                                   |           |          |           |          |           | ②7.0     |           |          |
|                                   |           |          |           |          |           | ③7.2     |           |          |
| 溶存酸素濃度<br>(ppb)                   | 約 170     | 約 180    | 約 170     | 約 185    | ①約 170.0  | ①約 185.0 | ④約 170.0  | ④約 190.0 |
|                                   |           |          |           |          | ②0        | ②1.0     | ⑤0        | ⑤0       |
|                                   |           |          |           |          | ③約 9.0    | ③約 15.0  | ⑥約 50.0   | ⑥約 60.0  |
| 溶存水素濃度<br>(ppb)                   | 2.2       | 約 5.0    | 2.2       | 5.0      | ①約 4.0    | ①約 5.0   | ④3.0      | ④約 5.0   |
|                                   |           |          |           |          | ②200.0    | ②約 225.0 | ⑤約 60.0   | ⑤約 65.0  |
|                                   |           |          |           |          | ③3.0      | ③約 3.5   | ⑥3.0      | ⑥約 4.0   |
| p H                               | 6.2       | —        | 6.2       | —        | 6.2       | —        | 6.2       | —        |

①He+O2 バブリング DO : 170ppb で制御 (水質調整タンク出口) 【期間 : 5/12～5/19】

②He+H2 バブリング DH : 200ppb で制御 (水質調整タンク出口) 【期間 : 5/20～5/23】

③He バブリング DO、DH は成り行き 【期間 : 5/24～6/9】

④DO : 170ppb で制御 (水質調整タンク出口) 【期間 : 6/18～6/24、7/12～7/18】

⑤DH : 50ppb で制御 (水質調整タンク出口) 【期間 : 6/27～7/1】

⑥DO: 50ppb で制御 (水質調整タンク出口) 【期間 : 7/4～7/12】

表 9-5 05M-3J オンライン水質計測結果

| 測定項目                              | 162cy     |          | 163cy     |          | 164cy     |          | 165cy     |          |
|-----------------------------------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
|                                   | 水質調整タンク出口 | キャップセル出口 | 水質調整タンク出口 | キャップセル出口 | 水質調整タンク出口 | キャップセル出口 | 水質調整タンク出口 | キャップセル出口 |
| 導電率<br>( $\mu\text{S}/\text{m}$ ) | 約 6.0     | 約 10.0   | 約 6.0     | 約 9.5    | 約 6.0     | 8.2～9.4  | 約 6.0     | 6.5～8.9  |
| 溶存酸素濃度<br>(ppb)                   | 約 2000    | 約 2100   | 約 2000    | 約 2100   | 約 2000    | 約 2100   | ①約 2000   | ①約 2100  |
|                                   |           |          |           |          |           |          | ②約 0      | ②約 1     |
|                                   |           |          |           |          |           |          | ③約 0      | ③-       |
| 溶存水素濃度<br>(ppb)                   | 6.2       | 12.3     | 約 5.5     | 約 12.0   | 約 5.5     | 約 12.5   | ①約 7      | ①約 15    |
|                                   |           |          |           |          |           |          | ②約 56     | ②約 50    |
|                                   |           |          |           |          |           |          | ③約 100    | ③-       |
| p H                               | 6.9       | —        | 7.0       | —        | 7.0       | —        | 7.0       | —        |

①DO : 2000ppb で制御 (水質調整タンク出口) 【期間 : 7/5～7/15】

②DH : 50ppb で制御 (水質調整タンク出口) 【期間 : 7/24～7/28】

③DH : 100ppb で制御 (水質調整タンク出口) 【期間 : 7/28～8/1】

表 9-6 05M-4J オンライン水質計測結果

| 測定項目                              | 162cy     |         | 163cy     |         | 164cy     |          | 165cy                   |                       |
|-----------------------------------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|----------|-------------------------|-----------------------|
|                                   | 水質調整タンク出口 | キャプセル出口 | 水質調整タンク出口 | キャプセル出口 | 水質調整タンク出口 | キャプセル出口  | 水質調整タンク出口               | キャプセル出口               |
| 導電率<br>( $\mu\text{S}/\text{m}$ ) | 約 6.0     | 約 11.0  | 約 6.0     | 約 9.5   | 約 6.0     | 8.8~10.8 | 約 6.0                   | 6.5~8.9               |
| 溶存酸素濃度<br>(ppb)                   | 約 2000    | 約 2100  | 約 2000    | 約 2100  | 約 2000    | 約 2100   | ①約 2000<br>②約 0<br>③約 0 | ①約 2100<br>②約 1<br>③- |
| 溶存水素濃度<br>(ppb)                   | 6.2       | 10.7    | 約 5.5     | 約 10.0  | 約 5.5     | 約 10.5   | ①約 7<br>②約 56<br>③約 100 | ①約 15<br>②約 50<br>③-  |
| p H                               | 6.9       | -       | 7.0       | -       | 7.0       | -        | 7.0                     | - -                   |

①DO : 2000ppb で制御 (水質調整タンク出口) 【期間 : 7/5~7/15】

②DH : 50ppb で制御 (水質調整タンク出口) 【期間 : 7/24~7/28】

③DH : 100ppb で制御 (水質調整タンク出口) 【期間 : 7/28~8/1】

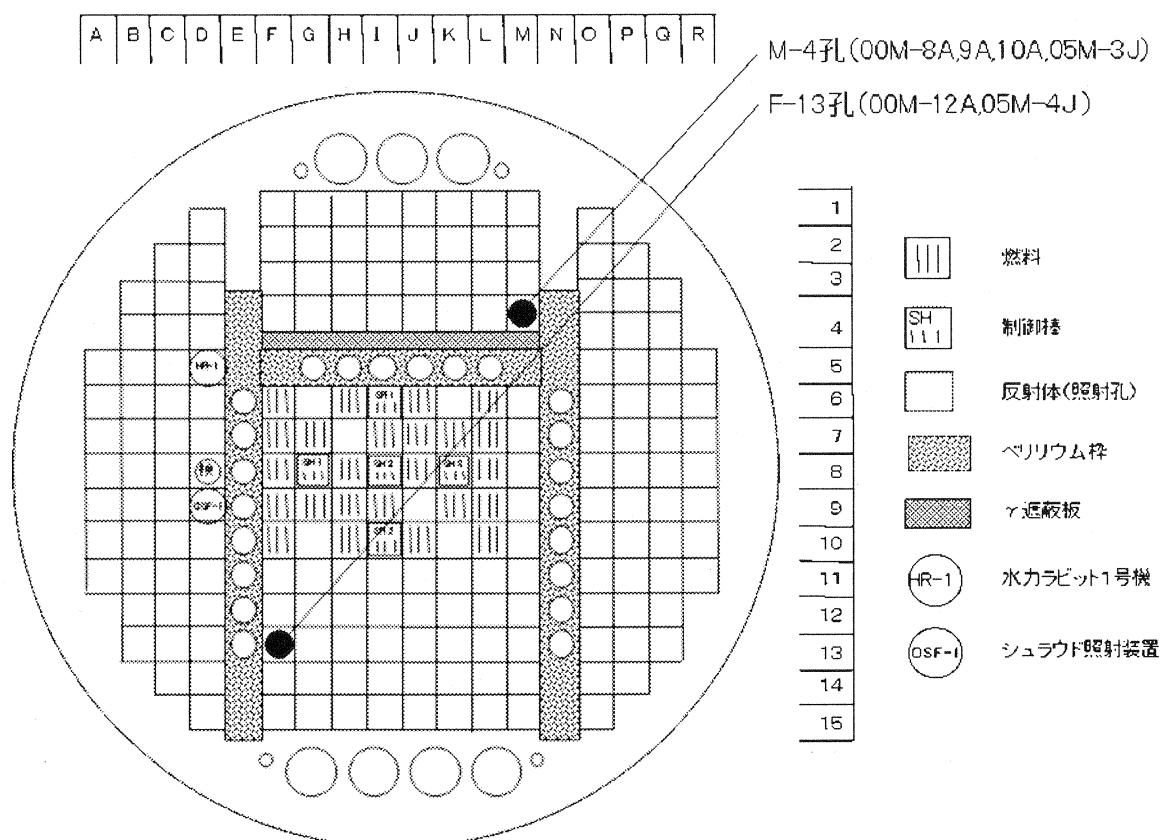


図 15 各キャップセルの JMTR 炉心装荷位置

## 6.2 予測温度と評価温度の比較

表 10 に予測温度と評価温度比較表を示す。予測温度と評価温度の差異については、キャップセル内の構造が複雑であるので、温度予測計算のためのキャップセルのモデル化が難しく、正確な水温評価が困難である。また、熱伝達率の評価も難しいため、試験片の温度評価にもずれが生じたと考えられる。

キャップセル上段の試験片部と下段の試験片部の水温がほとんど変わらないのにもかかわらず、炉中心に近い下段の試験片の評価温度が、上段の試験片より低い理由はキャップセル内部の複雑な構造から、キャップセル下段では上段より、水の流れが乱れていて、より熱伝達率が高く、温度が低くなつたと考えられる。

試験片の温度は水温に大きく依存するため、核加熱率の低い反射体領域での照射では、水温の低下を防ぐ必要がある。そのため、キャップセル構造は、真空断熱層を設けた 2 重管構造とする必要があり、また、水温を調整する炉外装置のポンプ及びヒータ容量に十分な余裕を持たせ、水温が低下する前にキャップセル内に供給する必要がある。

表 10 予測温度と評価温度比較表

| キャップセル名 | 予測温度   |             |                             | 評価温度     |               |                         |
|---------|--------|-------------|-----------------------------|----------|---------------|-------------------------|
|         | 水温(°C) | 試験片中心温度(°C) | 予測に用いた流量(m <sup>3</sup> /h) | 平均水温(°C) | 試験片平均中心温度(°C) | 平均流量(m <sup>3</sup> /h) |
| 00M-8A  | 259.4  | 270.4       |                             | 268.3    | 271.6         | 0.22                    |
| 00M-9A  | 269.5  | 278.5       | 0.20                        | 265.1    | 274.6         | 0.21                    |
|         | 264.0  | 275.9       |                             | 264.0    | 271.6         |                         |
| 00M-10A | 269.5  | 278.5       | 0.20                        | 268.5    | 275.1         | 0.20                    |
|         | 264.0  | 275.9       |                             | 268.0    | 273.3         |                         |
| 00M-12A | 269.5  | 278.5       | 0.20                        | 265.6    | 275.0         | 0.21                    |
|         | 264.0  | 275.9       |                             | 265.2    | 273.6         |                         |
| 05M-3J  | 269.5  | 278.5       | 0.20                        | 270.6    | 273.9         | 0.19                    |
|         | 264.0  | 275.9       |                             | 269.4    | 272.9         |                         |
| 05M-4J  | 269.5  | 278.5       | 0.20                        | 269.3    | 275.7         | 0.21                    |
|         | 264.0  | 275.9       |                             | 268.6    | 273.0         |                         |

## 7. 結 論

照射下試験キャプセルの開発において以下のことが確立された。

- ① ホットセル内において、照射済試験片の装荷作業技術、キャプセルの組立て作業技術の確立
- ② カナルでの保護管とキャプセル本体との接続作業技術の確立
- ③ 照射下キャプセル内での引張試験方法の確立

これらの技術の確立により照射下き裂進展試験を完遂することができた。

試験片温度については給水の温度に大きく依存するために炉外装置の圧力、温度及び流量の制御に十分な余裕が必要であることが分かった。

### 謝 辞

本報告書をまとめる上で、原子炉施設管理部 斎藤順市氏にご助言を頂いた。また、照射試験炉センター照射試験開発課 石川幸治氏にご支援いただいた。

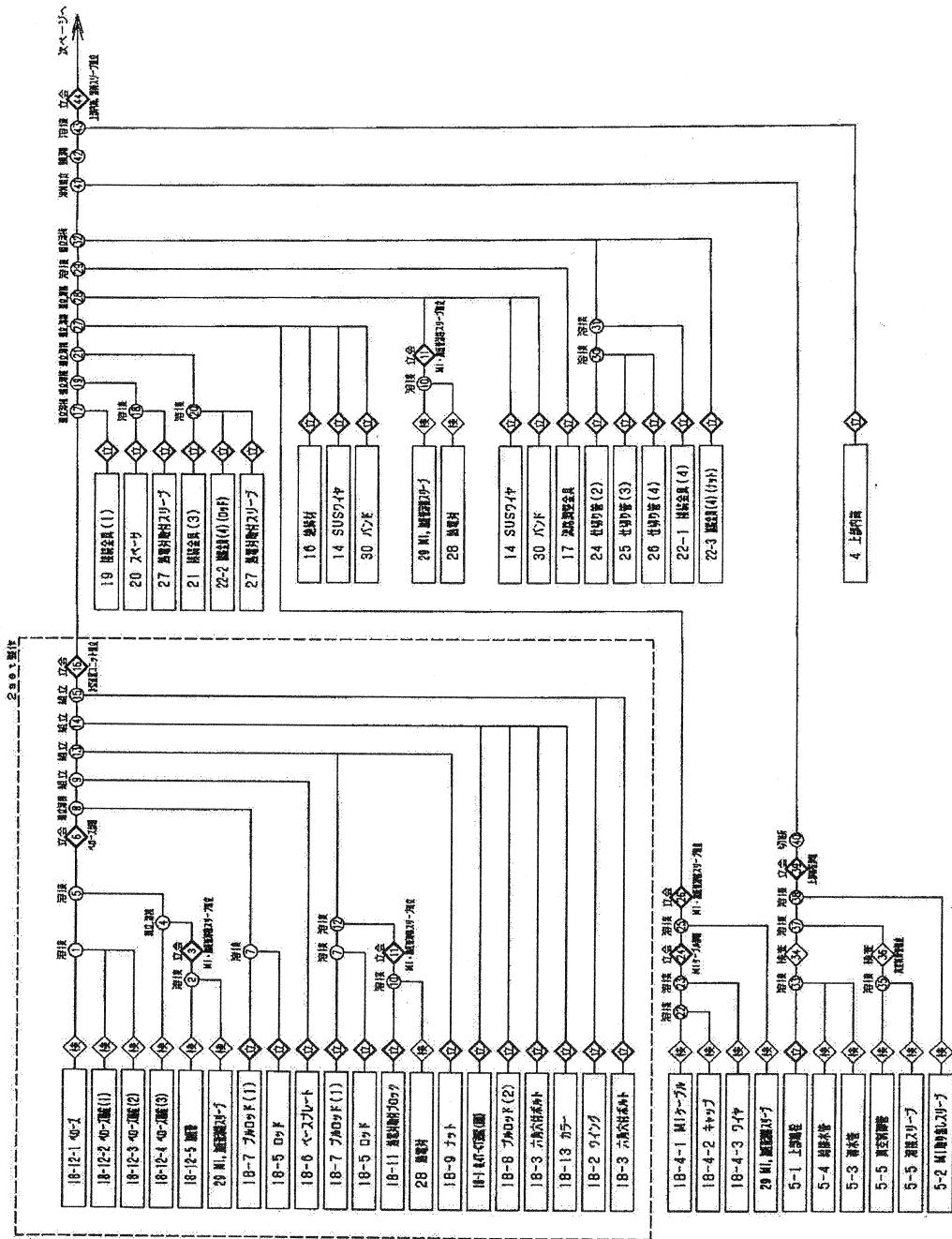
以上記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 原子力委員会、「原子力政策大綱」、平成 17 年 10 月
- 2) JMTR 利用検討委員会（委員長：宅間 正夫）、「我が国における材料試験用原子炉の役割と JMTR のあり方等に関する検討報告書」、平成 18 年 3 月
- 3) 原山泰雄. 他：“SATCAP-C：加圧水注入型式キャップセルの熱設計用プログラム”，JAERI-M 92-149 (1992).
- 4) Y. Kaji et al., Program of In-pile IASCC Testing under the Simulated Actual Plant Condition, Proceedings of ICONE-11, CD-ROM-36119 (2003).

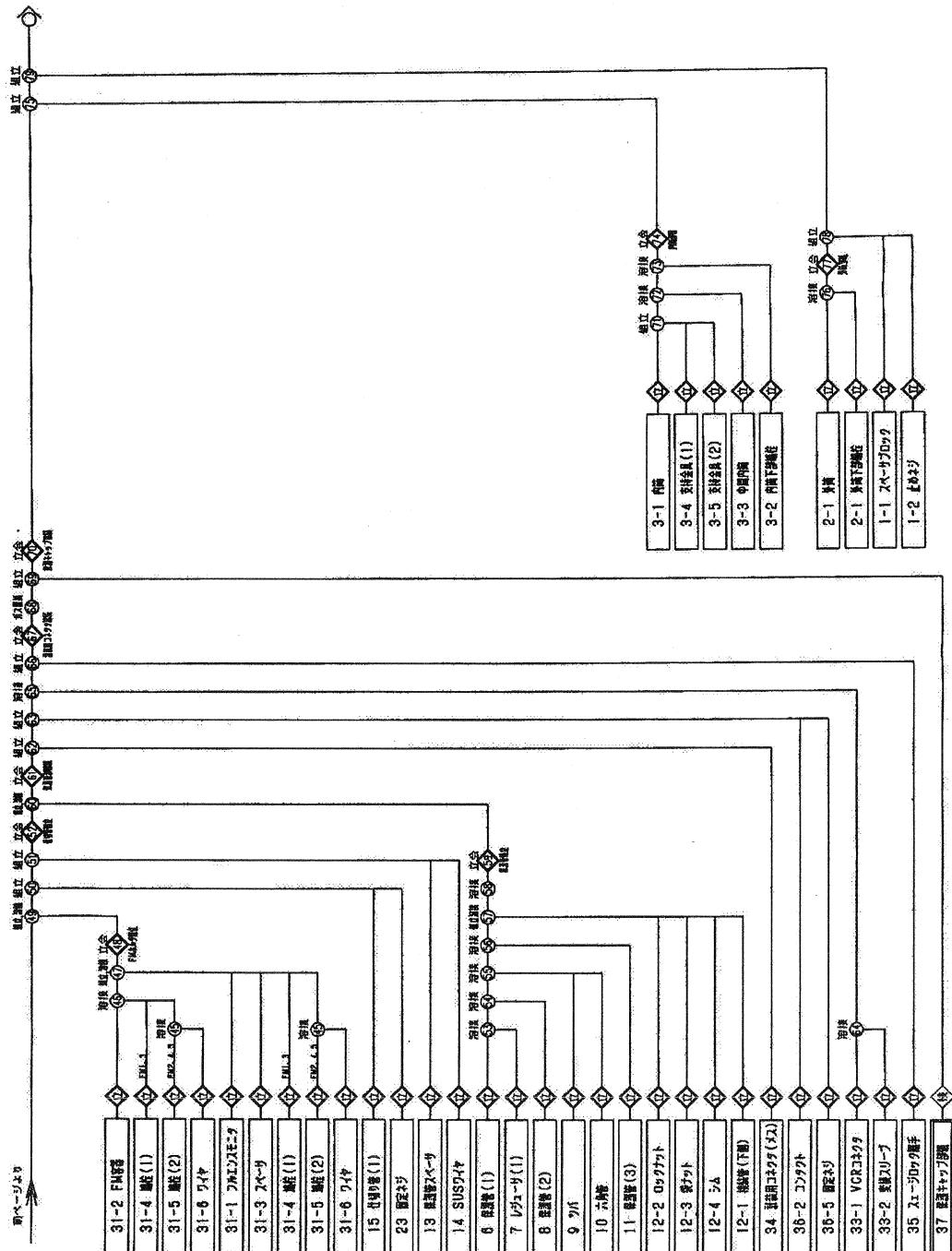
### 付録

通常のキャップセルは、メーカにおいて部品製作、試験片装荷を含むキャップセル組立を行い、JMTR に納入される。しかし、照射済試料を用いるき裂進展試験用キャップセルは、構造が複雑なことから、参考として、メーカでのキャップセルの製作フロー図及び検査項目表を添付する。

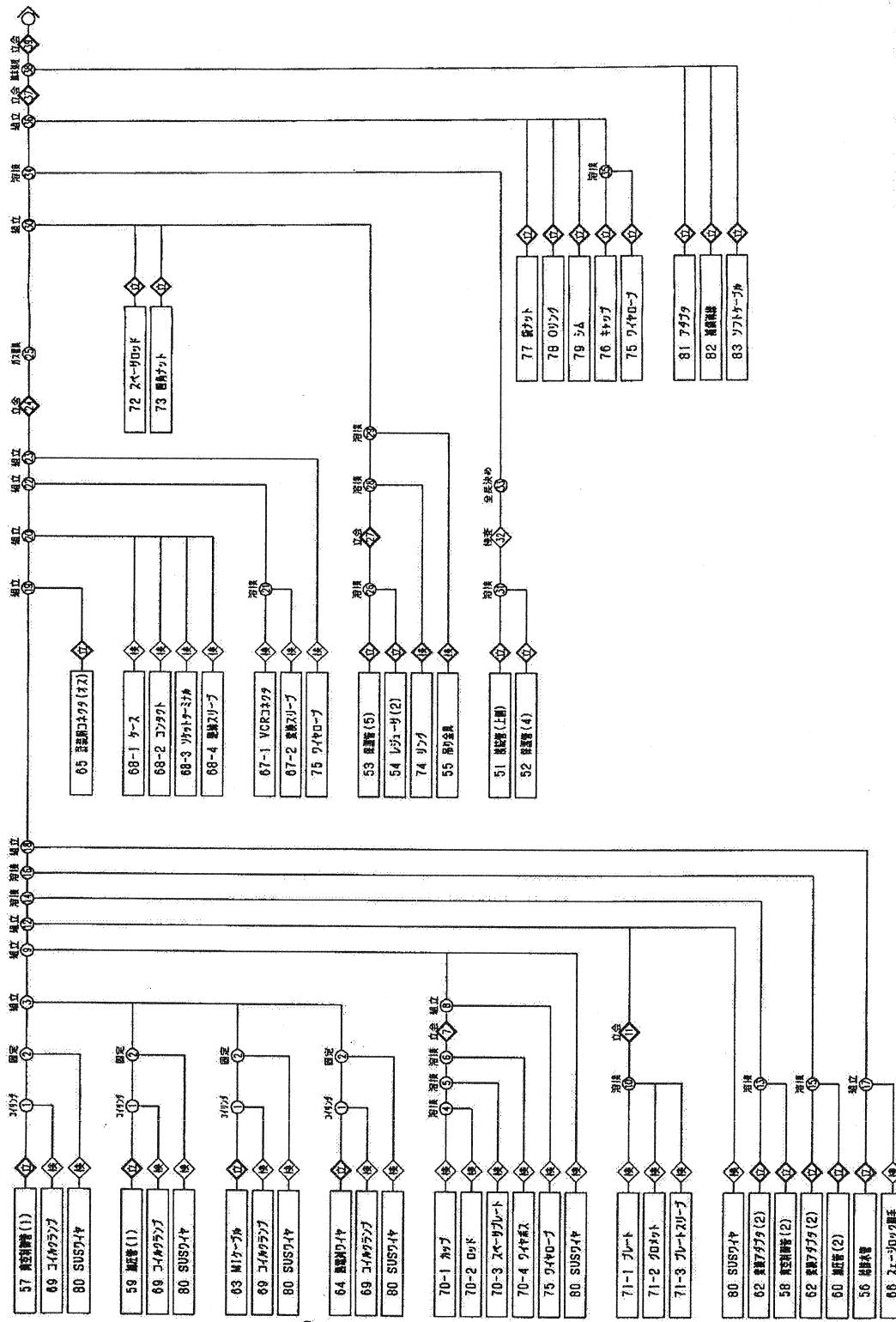


卷之三

## 付録 き裂進展試験用キャプセル(本体部)製作フロー図



付録 き裂進展試験用キャプセル(本体部)製作フロー図 2  
本体部組立手順図(2/2)



付録 き裂進展試験用キャブセル(保護管部)製作フロー図  
保護管部組立手順図(1／1)

## 付録 き裂進展試験用キャップセル（本体部）製作検査項目一覧表

| 検査項目  | 材料検査            | 超音波深傷検査 | 外観検査 | 寸法検査 | 直度検査 | 標示検査 | 浸透探査 | 放射線検査 | 耐圧検査 | 耐漏れ検査 | 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 |
|-------|-----------------|---------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|----------|----------|--------|------|------|----|
| 部品検査  | ●               | ●       | ○    | ○    | ○    | ○    | —    | —     | —    | —     | —        | —        | ○      | ○    | ●    |    |
| 中間検査  | 外筒部組            | —       | —    | ○    | ○    | ○    | ○    | ○     | ●    | ○     | ○        | —        | —      | —    | —    | —  |
|       | 内筒部組            | —       | —    | ○    | ○    | ○    | —    | ○     | ●    | ○     | ○        | —        | —      | —    | —    | —  |
|       | 真空制御管組立         | —       | —    | ○    | ○    | —    | —    | ○     | —    | —     | ○        | —        | —      | —    | —    | —  |
|       | M I ケーブル部組      | —       | —    | ○    | ○    | —    | —    | ○     | —    | —     | —        | —        | —      | —    | —    | —  |
|       | ペローズ部組          | —       | —    | ○    | ○    | —    | —    | ○     | —    | ○     | ○        | —        | —      | —    | —    | —  |
|       | FMホルダ部組         | —       | —    | ○    | ○    | —    | —    | ○     | ●    | ●     | ●        | —        | —      | —    | —    | —  |
|       | 上部端栓部組          | —       | —    | ○    | ○    | —    | —    | ○     | ●    | ●     | ●        | —        | —      | —    | —    | —  |
|       | M I、加圧管溶接スリーブ組立 | —       | —    | ○    | ○    | —    | —    | ○     | ●    | —     | ●        | —        | ●      | ●    | —    | —  |
|       | き裂進展ユニット組立      | —       | —    | ○    | ○    | —    | —    | —     | —    | —     | —        | —        | —      | —    | —    | —  |
|       | 仕切り管組立          | —       | —    | ○    | —    | —    | —    | ○     | —    | —     | —        | —        | —      | —    | —    | —  |
|       | 保護管組立           | —       | —    | ○    | ○    | —    | —    | ○     | ●    | —     | —        | —        | —      | —    | —    | —  |
|       | 保護キャップ部組        | —       | —    | ○    | ○    | —    | —    | ○     | —    | ○     | ○        | —        | —      | —    | —    | —  |
|       | 上部内筒、溶接スリーブ組立   | —       | —    | ○    | ○    | —    | —    | ○     | ●    | ○     | ○        | —        | ●      | ●    | —    | —  |
|       | 保護管部接続          | —       | —    | ○    | ○    | —    | —    | ○     | ●    | ○     | ○        | —        | —      | —    | —    | —  |
|       | 計装用コネクタ組立       | —       | —    | ○    | ○    | —    | —    | ●     | —    | —     | ●        | —        | ○      | ○    | —    | —  |
|       | 保護キャップ接続        | —       | —    | ○    | —    | —    | —    | ●     | —    | —     | —        | ○        | —      | —    | ●    | —  |
| 受入時検査 | —               | —       | ○    | —    | —    | ○    | —    | —     | —    | —     | —        | —        | ○      | ○    | —    | —  |

記号説明) ○: 御立会検査

●: 記録確認

○: 記録提出

- : 対象外

## 付録 き裂進展試験用キャプセル（保護管部）製作検査項目一覧表

| 検査項目  |             | 材<br>料<br>檢<br>查 | 外<br>觀<br>檢<br>查 | 寸<br>法<br>檢<br>查 | 標<br>示<br>檢<br>查 | 浸<br>透<br>探<br>深<br>檢<br>查 | 放<br>射<br>線<br>透<br>過<br>檢<br>查 | 耐<br>壓<br>檢<br>查 | ヘ<br>リ<br>ウ<br>ム<br>漏<br>れ<br>檢<br>查 | 保<br>護<br>管<br>部<br>耐<br>圧<br>檢<br>查 | 絶<br>緣<br>抵<br>抗<br>檢<br>查 | 導<br>通<br>檢<br>查 | 質<br>量<br>檢<br>查 | 備<br>考 |
|-------|-------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|------------------|------------------|--------|
| 部品検査  |             | ●                | ◎                | ◎                | ◎                | —                          | —                               | —                | —                                    | —                                    | ●                          | ●                | ●                |        |
| 中間検査  | 保護管組立①      | —                | ◎                | ◎                | —                | ◎                          | ●                               | —                | —                                    | —                                    | —                          | —                | —                |        |
|       | 加圧管、真空制御管組立 | —                | ◎                | —                | —                | ◎                          | —                               | ◎                | ◎                                    | —                                    | ●                          | ●                | —                |        |
|       | 保護管組立②      | —                | ◎                | ◎                | —                | ◎                          | ●                               | ●                | —                                    | ◎                                    | ●                          | ●                | ●                |        |
| 出荷前検査 |             | —                | ○                | —                | ○                | —                          | —                               | —                | —                                    | —                                    | ○                          | ○                | ○                |        |
| 受入時検査 |             | —                | ◎                | —                | ◎                | —                          | —                               | —                | —                                    | —                                    | ◎                          | ◎                | —                |        |

記号説明) ◎ : 御立会検査 ● : 記録確認 ○ : 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 <sup>(a)</sup>   | rad               | $m \cdot m^{-1}=1^{(b)}$                 |
| 立体角                               | ステラジアン <sup>(a)</sup> | sr <sup>(c)</sup> | $m^2 \cdot m^{-2}=1^{(b)}$               |
| 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                   | $\Omega$          | $m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$ |
| 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 <sup>(d)</sup> | °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            | 力ニュートン毎メートル       | 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 <sup>2</sup>      | $m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$                            |
| 熱流密度、放射照度       | ワット毎平方メートル        | W/m <sup>2</sup>        | $kg \cdot s^{-3}$                                                 |
| 熱容量、エンタルピー      | 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        | 毎ケルビン             |                         |                                                                   |
| 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            | ワット毎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         | ジュール毎立方メートル       | J/m <sup>3</sup>        | $m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$                                    |
| 電界の強さ           | ボルト毎メートル          | V/m                     | $m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$                            |
| 体積電荷            | クーロン毎立方メートル       | C/m <sup>3</sup>        | $m^{-3} \cdot s \cdot A$                                          |
| 電気変位            | クーロン毎平方メートル       | C/m <sup>2</sup>        | $m^{-2} \cdot s \cdot A$                                          |
| 誘電率             | ファラード毎メートル        | F/m                     | $m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$                        |
| 透磁率             | ヘンリー毎メートル         | H/m                     | $m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$                            |
| モルエネルギー         | ジュール毎モル           | J/mol                   | $m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$                        |
| モルエンタルピー        | ジュール毎モル毎ケルビン      | 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)    | クーロン毎キログラム        | C/kg                    | $kg^{-1} \cdot s \cdot A$                                         |
| 吸収線量率           | グレイ毎秒             | Gy/s                    | $m^2 \cdot s^{-3}$                                                |
| 放射強度            | ワット毎スチラジアン        | W/sr                    | $m^4 \cdot m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$ |
| 放射輝度            | ワット毎平方メートル毎スチラジアン | W/(m <sup>2</sup> · 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            |
| アード      | ル   | $1 a=1 dm^2=10^2 m^2$                  |
| 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   | $1 Å=0.1 nm=10^{-10} m$                |
| バーン      | 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  | $1 Mx=10^{-8} Wb$                       |
| スチール   | 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      |      | $1 X unit=1.002 \times 10^{-4} nm$          |
| 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      | fm   | $1 fermi=1 fm=10^{-15} m$                   |
| 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    | $1 \mu=1 \mu m=10^{-6} m$                   |

