JAEA-Technology
2022-040
DOI:10.11484/jaea-technology-2022-040

海外炉を用いた中性子照射試験（1）

ーキャプセル温度制御システムを用いた照射試験の検討ー

（共同研究）

Irradiation Test Using Foreign Reactor (1)
-Study of Irradiation Test with Capsule Temperature Control System-
(Joint Research)

髙部 湧吾　大塚 紀彰　冬島 拓実　佐谷戸 夏紀　井上 修一
森田 寿　Janusz Jaroszewicz　Marek Migdal　小沼 勇一
飛田 正浩　遠藤 泰一　武内 伴照　竹本 紀之

Yugo TAKABE, Noriaki OHTSUKA, Takumi FUYUSHIMA, Natsuki SAYATO, Shuichi INOUE
Hisashi MORITA, Janusz JAROSZEWICZ, Marek MIGDAL, Yuichi ONUMA
Masahiro TOBITA, Yasuichi ENDO, Tomoaki TAKEUCHI and Noriyuki TAKEMOTO

高速炉・新型炉研究開発部門
大洗研究所
環境技術開発センター
材料試験炉部

Department of JMTR
Waste Management and Decommissioning Technology Development Center
Oarai Research and Development Institute
Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development

March 2023
Japan Atomic Energy Agency
日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは国立研究開発法人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。
本レポートの転載等の著作権利用は許可が必要です。本レポートの入手並びに成果の利用(データを含む)は、
下記まで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ウェブサイト（https://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構　JAEA イノベーションハブ　研究成果利活用課
〒 319-1195　茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Reuse and reproduction of this report (including data) is required permission.
Availability and use of the results of this report, please contact
Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2023

JAEA-Technology 2022-040

海外炉を用いた中性子照射試験（1）
－キャプセル温度制御システムを用いた照射試験の検討－
（共同研究）

日本原子力研究開発機構 高速炉・新型炉研究開発部門
大洗研究所 環境技術開発センター 材料試験炉部

髙部　湧吾、大塚　紀彰+、冬島　拓実、佐谷戸　夏紀、井上　修一、森田　寿、
Janusz Jaroszewicz*1、Marek Migdal*1、
小沼　勇一、飛田　正浩*2、遠藤　泰一、武内　伴照、竹本　紀之

（2022 年 12 月 13 日受理）

中性子照射場として中核を担ってきた材料試験炉（Japan Materials Testing Reactor：JMTR）の廃止に伴い、軽水炉の一層の安全性、信頼性・効率性向上のための技術開発や革新的な原子炉開発に必要な国内照射場が喪失され、照射試験炉の運転技術や照射技術の継承や人材育成も困難な状況となった。こうした課題に対処するため、代替手段として中性子照射場を海外炉に求めた照射試験の実施に係る検討を行った。

「ポーランド国立原子力研究センターと日本原子力研究開発機構との間の試験研究炉の研究開発のための共同研究取決め」に基づきポーランド国立原子力研究センター（NCBJ）が所有する MARIA 炉（出力 30MW）を中性子照射場として、JMTR の有する照射技術の一つである温度制御システムを導入した照射試験の実施可否を検討した。その結果、JMTR の設計・製作基準に則って製作済であったキャプセルに対し改造を施すことで照射試験の実現が可能である見通しが得られた。改造後に浸透探傷検査、絶縁導通試験及びキャプセルの使用温度である室温～300℃の範囲における動作試験等を実施し、良好な結果が得られ、MARIA 炉への輸送前準備を完了した。

本研究は日本原子力研究開発機構とポーランド国立原子力研究センターとの共同研究に基づいて実施したものである。

大洗研究所：〒311-1393　茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002 番地
+　安全・核セキュリティ統括本部安全管理部
＊1　ポーランド国立原子力研究センター
＊2　原子力エンジニアリング株式会社

JAEA-Technology 2022-040

Irradiation Test Using Foreign Reactor (1)
- Study of Irradiation Test with Capsule Temperature Control System –
(Joint Research)

Yugo TAKABE, Noriaki OHTSUKA+, Takumi FUYUSHIMA, Natsuki SAYATO,
Shuichi INOUE, Hisashi MORITA,
Janusz JAROSZEWICZ*1, Marek MIGDAL*1, Yuichi ONUMA,
Masahiro TOBITA*2, Yasuichi ENDO, Tomoaki TAKEUCHI and Noriyuki TAKEMOTO

Department of JMTR,
Waste Management and Decommissioning Technology Development Center,
Oarai Research and Development Institute,
Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development,
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received December 13, 2022)

Because of the decommission of the Japan Materials Testing Reactor (JMTR), the domestic neutron irradiation facility, which had played a central role in the development of innovative nuclear reactors and the development of technologies to further improve the safety, reliability, and efficiency of light water reactors, was lost. Therefore, it has become difficult to pass on the operation techniques of the irradiation test reactors and irradiation technologies, and to train human resources. In order to cope with these issues, we conducted a study on the implementation of irradiation tests using overseas reactors as neutron irradiation sites as an alternative method.

Based on the "Arrangement between the National Centre for Nuclear Research and the Japan Atomic Energy Agency for Cooperation in Research and Development on Testing Reactor," the feasibility of conducting an irradiation test at the MARIA reactor (30MW) owned by the National Centre for Nuclear Research (NCBJ) using the temperature control system, which is one of the JMTR irradiation technologies, was examined. As a result, it was found that the irradiation test was possible by modifying the ready-made capsule manufactured in accordance with the design and manufacturing standards of the JMTR. After the modification, a penetration test, an insulation continuity test, and an operation test in the range of room temperature to 300°C, which is the operating temperature of the capsule, were conducted and favorable results were obtained. We have completed the preparations prior to transport to the MARIA reactor.

Keywords: JMTR, Irradiation Test, Temperature Control System, MARIA Reactor

---

This work has been performed in Japan Atomic Energy Agency as joint research "Arrangement between the National Centre for Nuclear Research and the Japan Atomic Energy Agency for Cooperation in Research and Development on Testing Reactor," with National Centre for Nuclear Research.

+ Safety Administration Department, Safety and Nuclear Security Administration Head Office
＊1 National Centre for Nuclear Research
＊2 Nuclear Engineering Co., Ltd.

目　次

1. はじめに ----1
2. 海外炉の選定 ----1
3. MARIA 炉を用いた照射試験 ----2
3.1 MARIA 炉の概要 ----2
3.2 MARIA 炉における照射試験に用いるキャプセル ----2
4. 選定キャプセル及び炉外装置 ----3
4.1 選定キャプセル ----3
4.1.1 キャプセル本体 ----3
4.1.2 計測装置 ----4
4.2 炉外装置 ----7
4.2.1 併用型温度制御装置 ----8
4.2.2 差動トランス用信号処理器 ----9
4.2.3 微小電流計 ----9
4.2.4 ガス供給システム ----10
5. 選定キャプセルの改造 ----11
5.1 熱的仕様の検討 ----11
5.2 機械的仕様の検討 ----15
5.3 選定キャプセルの改造の設計・製作 ----16
5.3.1 計測線の伸長 ----19
5.3.2 専用スペーサの製作 ----20
5.3.3 フレキシブルチューブの取付 ----22
6. 動作確認試験 ----26
6.1 導通・絶縁抵抗測定 ----26
6.1.1 導通・絶縁抵抗測定の目的 ----26
6.1.2 導通・絶縁抵抗測定の手法 ----26
6.1.3 導通・絶縁抵抗測定の結果 ----27
6.2 FP ガス圧力計動作確認 ----27
6.2.1 FP ガス圧力計動作確認の目的 ----27
6.2.2 FP ガス圧力計動作確認の手法 ----28
6.2.3 FP ガス圧力計動作確認の結果 ----36
6.2.4 FP ガス圧力計に対する併用型温度制御装置の電磁ノイズの重畳現象と対処法 ----37
6.3 併用型温度制御装置動作確認 ----39
6.3.1 併用型温度制御装置動作確認の目的 ----39
6.3.2 併用型温度制御装置動作確認の手法 ----39
6.3.3 併用型温度制御装置動作確認の結果 ----44
7. まとめ ----44

8. 今後の計画 ---- 44
謝辞 ---- 45
参考文献 ---- 45

Contents

1. Introduction ---- 1
2. Selection of Foreign Reactor ---- 1
3. Irradiation Test using MARIA Reactor ---- 2
3.1 Summary of MARIA Reactor ---- 2
3.2 Capsule for Irradiation Test at MARIA Reactor ---- 2
4. Selected Capsule and Out-pile Test Equipment ---- 3
4.1 Selected Capsule ---- 3
4.1.1 Capsule Body ---- 3
4.1.2 Measuring Instrument ---- 4
4.2 Out-pile Test Equipment ---- 7
4.2.1 Combination Type Temperature Control System ---- 8
4.2.2 Signal Processor for LVDT ---- 9
4.2.3 Micro-current Ammeter ---- 9
4.2.4 Gas Supply System ---- 10
5. Modification of Selected Capsule ---- 11
5.1 Study of Thermal Safety ---- 11
5.2 Study of Mechanical Safety ---- 15
5.3 Design and Fabrication for Modification of Selected Capsule ---- 16
5.3.1 Extension of Measuring Wire ---- 19
5.3.2 Fabrication of Exclusive Spacer ---- 20
5.3.3 Installation of Flexible Tube ---- 22
6. Operation Test ---- 26
6.1 Insulation Continuity Test ---- 26
6.1.1 Purpose of Insulation Continuity Test ---- 26
6.1.2 Method of Insulation Continuity Test ---- 26
6.1.3 Result of Insulation Continuity Test ---- 27
6.2 Operation Test of FP Gas Pressure Gauge ---- 27
6.2.1 Purpose of Operation Test of FP Gas Pressure Gauge ---- 27
6.2.2 Method of Operation Test of FP Gas Pressure Gauge ---- 28
6.2.3 Result of Operation Test of FP Gas Pressure Gauge ---- 36
6.2.4 Superimposed Electromagnetic Noise Phenomenon of Combination Type Temperature Control System for FP Gas Pressure Gauge and Workaround ---- 37
6.3 Operation Test of Combination Type Temperature Control System ---- 39
6.3.1 Purpose of Operation Test of Combination Type Temperature Control System ---- 39
6.3.2 Method of Operation Test of Combination Type Temperature Control System ---- 39
6.3.3 Result of Operation Test of Combination Type Temperature Control System ---- 44

7. Summary ---- 44
8. Future Plans ---- 44
Acknowledgements ---- 45
References ---- 45

1. はじめに

大洗研究所に設置されている材料試験炉（Japan Materials Testing Reactor：以下「JMTR」という。）は、高速中性子束、熱中性子束ともに最大 4×10^{18} $m^{-2}s^{-1}$ と世界でもトップクラスの照射能力を有し[1)]、1968 年の初臨界以来、約 40 年間にわたって先進照射技術を開発しながら、発電用軽水炉を中心に、新型転換炉、高速炉、高温ガス炉、核融合炉等の燃料及び材料の照射試験、大学を中心とした原子炉材料に係る基礎研究や人材育成、医療用・工業用のラジオアイソトープの製造等に広く活用され、我が国の原子力の平和利用に大きく貢献してきた。しかしながら 2011 年 3 月 11 日の東日本大震災を契機に見直された新規制基準への適合が困難であるとの判断により、2017 年 4 月の施設中長期計画[2)]において廃止検討施設として位置付けられ、2021 年 3 月 17 日には原子力規制委員会より廃止措置計画が認可され、同年 4 月から廃止措置を進めている。

JMTR の廃止決定により、我が国は軽水炉の一層の安全性、信頼性・効率性向上のための技術開発や革新的な原子炉開発に必要な照射場を失い、国内において照射試験を行うことが難しくなっている。また、JMTR 稼働時は照射キャプセル、炉外装置、照射試験及び照射後試験に係る知見及び技術が OJT 等を通して JMTR の熟練職員から若手職員に継承されてきたが、廃止措置への移行によってその技術の継承が困難となるとともに、熟練職員の退職によってこれらの技術等が失われつつある状況である。さらに、これらを基盤的に支える人材の育成も危機的状況となっている。

こうした課題に対処するため、JMTR において実施していた照射試験の代替手段として中性子照射場を海外炉に求めた照射試験の実施に係る検討を行った。

2. 海外炉の選定

海外炉における中性子照射場の選定にあたっては、材料照射試験の経験が豊富であること及び日本原子力研究開発機構（以下「JAEA」という。）との間に取り決めを締結済みで協力関係にある試験研究炉を候補とした。主要な候補を Table 2.1 に示す。このうち、特に MARIA 炉については、同炉を所有するポーランド国立原子力研究センター（National Centre for Nuclear Research：以下「NCBJ」という。）と JAEA との間で、2011 年 1 月 21 日に「ポーランド国立原子力研究センターと日本原子力研究開発機構との間の試験研究炉の研究開発のための共同研究取決め」を締結済みであり、本検討を開始するにあたり最も適する海外炉である。したがって、JMTR の代替手段として当面は MARIA 炉の利用を想定して照射試験実現の可能性について NCBJ と協力して検討を進めた。

Table 2.1 Candidate for test reactor

Name	WWR-K	LVR-15	OPAL	MARIA	RSG-GAS	BR-2	ATR
Output [MW]	6	10	20	30	30	100	250
Country	Kazakhstan	Czech	Australia	Poland	Indonesia	Belgium	USA
Type	Pool	Tank	Pool	Pool	Pool	Tank in pool	Tank
Neutron flux (fast) [n/m^2/s]	4.0×10^{17}	3.0×10^{18}	2.1×10^{18}	1.0×10^{18}	2.3×10^{18}	7.0×10^{18}	1.8×10^{18}
Neutron flux (thermal) [n/m^2/s]	1.0×10^{16}	1.5×10^{18}	2.0×10^{18}	3.5×10^{18}	2.5×10^{18}	1.0×10^{19}	8.5×10^{18}
Moderator	Light water	Light water	Light water	Be, Light water	Light water	Be, Light water	Light water
Coolant	Light water	Light water	Light water	Light water	Light water	Light water	Light water
Main purpose	Fuel/Material Testing RI production Activation analysis	Fuel/Material Testing RI production Activation analysis Nudear transmutation	RI Production Si doping	Fuel/Material Testing RI production Activation analysis Si doping	Material Testing RI production Activation analysis Si doping	Fuel/Material Testing RI production Si doping	Fuel/Material Testing RI production
	Use of beam	Use of beam	Use of beam	Use of beam	Use of beam	—	—
Irradiation hole	Vertical: 38 (Core area: 8)	Vertical: 6 (Core area: 2)	Vertical: 80 (Core area: 0)	Vertical: 13 (Core area: 13)	Vertical: 14 (Core area: 5)	Vertical: 79 (Core area: 40)	Vertical: 70 (Core area: 34)
	Horizontal: 8	Horizontal: 6	Horizontal: 10	Horizontal: 6	Horizontal: 6	—	—

3. MARIA 炉を用いた照射試験

3.1 MARIA 炉の概要 [3)]

MARIA 炉は、NCBJ が所有する 1974 年 12 月に初臨界を達成した照射試験炉であり、放射性同位元素の製造、燃料及び材料の照射試験、中性子ラジオグラフィー等の研究分野で活用されている。軽水を一次冷却材としたプール型炉で、高速中性子束が最大 1.0×10^{18}/m^2/s 、熱中性子束が最大 3.5×10^{18}/m^2/s の照射能力を有している。減速材は軽水とベリリウム、反射体は黒鉛を使用しており、加圧チャンネルに同心の 6 本の燃料集合体が設置されている。燃料チャンネルはベリリウムブロックを含むマトリックスに設置され、アルミニウム容器に入った黒鉛ブロック製の反射体で囲まれている。材料照射を目的とした垂直チャンネル、短時間照射のためのラビットシステム及び 6 箇所の水平中性子ビームチャンネルを備えている。

3.2 MARIA 炉における照射試験に用いるキャプセル

第 1 章で述べたように、本検討は JMTR で行っていた照射試験の代替手段を確保するためのものである。そのため、JMTR における照射技術が導入された製作済みの JMTR 用照射キャプセルを活用した MARIA 炉照射試験を検討した。

はじめに JMTR キャプセル等設計基準 [4)]に基づいて製作され、JMTR キャプセル等検査基準 [5)]で検査して合格とされたキャプセルが NCBJ の基準を満足するか検討した。その結果、NCBJ では技術的に問題は無いとの判断が示され、ポーランド規制当局による確認により認可を得ることができた。これに基づき、製作済みの JMTR 用キャプセルの選定を進め、キャプセル径や MARIA 炉心への装荷位置、照射孔径等を検討した。その結果、気体状の核分裂生成物（Fission Products gas：以下「FP ガス」という。）の圧力を測定するための差動トランス型 FP ガス圧力計（以下「FP ガス圧力計」という。）を照射試料として真空温度制御システムを導入したキャプセルが適すると判断し、MARIA 炉における照射キャプセルに選定した（以下「選定キャプセル」という。）。また、JMTR と MARIA 炉の熱的条件や、照射孔の詳細形状及びキャプセルから炉外装置までの

距離の違いによる影響を考慮し、選定キャプセルに対して一部の改造を実施した。

選定キャプセル及び炉外装置は第 4 章で、改造については第 5 章で詳述する。

4. 選定キャプセル及び炉外装置

4.1 選定キャプセル

選定キャプセルは、酸化物燃料照射試験用キャプセルの燃料試料部に取り付けられる FP ガス圧力計を炉内で長期照射した際の特性評価を行うために製作された計測付キャプセルである。酸化物燃料照射試験用キャプセルは 2009 年に燃料試料の照射挙動解明を目的として選定キャプセルとともに製作された。

4.1.1 キャプセル本体

選定キャプセルの概略を Fig. 4.1 に、選定キャプセルの仕様を Table 4.1 に示す。選定キャプセルは計測付キャプセルの一種であり、外筒、内筒、保護管、ヒータ及び真空制御管等によって構成される。キャプセル内部には複数の計測機器と照射試料である FP ガス圧力計が収められている。FP ガス圧力計と計測機器からは無機絶縁ケーブル（Mineral Insulated cable：以下「MI ケーブル」という。）、アダプタ及びソフトケーブルからなる計測線が入出力用として延びており、これらを炉外装置と接続することで FP ガス圧力計にかかる圧力やキャプセルの温度を測定できる。ヒータ及び真空制御管は照射試料の温度制御用として用いられる。

Fig. 4.1 に示すとおり、照射試料は内筒及び外筒に格納した構造であり、内筒及び外筒の間には僅かな間隙（ギャップ）が設けられ、He ガスが充填されている。ギャップは真空制御管と連続しており、真空温度制御管を介して炉外装置と接続可能である。炉外装置側からギャップ中の He ガスの圧力（真空度）を操作すると内筒 - 外筒間の熱伝達率が変化し、内筒内の照射試料の温度を制御することが出来る。本操作による温度制御を真空温度制御といい、主に目標の温度近傍まで加熱する目的で使用される。一方、ヒータ及び熱電対を用いた温度制御はヒータ温度制御といい、照射試料温度の微調整に用いる。

このような 2 つの温度制御を実行可能な選定キャプセルに対して、照射下で FP ガス圧力計の温度制御を行い、製造時（非照射時）の FP ガス圧力計の温度依存性と比較することで、放射線が FP ガス圧力計に及ぼす影響を評価することが出来る。

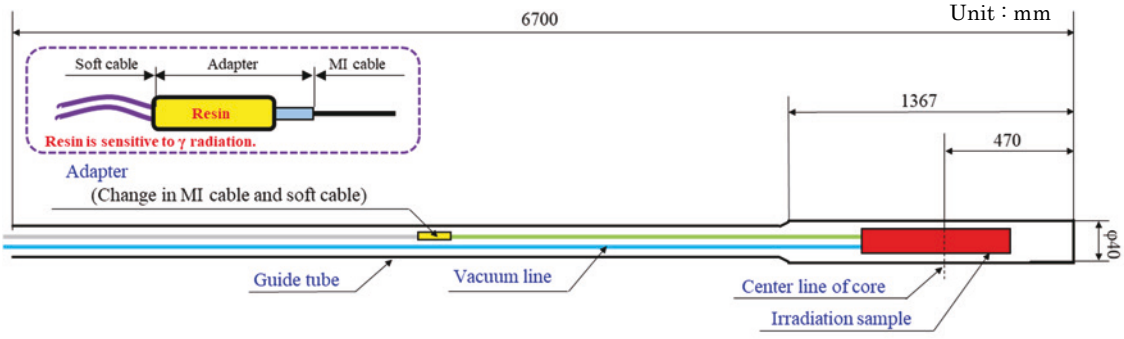


Fig. 4.1 Schematic diagram for calibration capsule of FP-gas pressure gauge

Table 4.1 Specification for calibration capsule of FP-gas pressure gauge

Item		Details
Irradiation sample		Differential transformer FP-gas pressure gauge：2units
Environment	Temperature	～400 ºC
	Fast neutron flux (E > 1 MeV)	1×10^{16} n/m²/s
	Fluence rate	About 1.3×10^{20} n/cm²
Temperature control method		Vacuum control, Heater control
Capsule O.D. (Outer tube)		φ40mm
Capsule length (excluding signal line)		6700mm
Instrumentation		Sheathed thermocouple (Type-K)：9pcs. Self-Powered Gamma-ray Detector (SPGD)：1pcs.
Reactor outside equipment		Combination temperature control device Signal processor for differential transformers Micro ammeter Gas supply system

4.1.2　計測機器

前項で述べたように、選定キャプセルには照射試料である FP ガス圧力計に加え、複数の計測機器が装荷されている。装荷されている計測機器は温度測定用のシース型熱電対、ガンマ線測定用の自己出力型ガンマ線検出器（Self-Powered Gamma-ray Detector：以下「SPGD」という。）である。FP ガス圧力計を含めたこれら計測機器は、JMTR の照射下におけるオンライン計測を目的として開発したものであり、いずれも高い耐熱性及び耐放射線性を有する機器である。以下に各計測機器の概要を記す。

4.1.2.1　差動トランス型 FP ガス圧力計

FP ガス圧力計は、主に FP ガスによる燃料被覆管内の圧力を計測するために開発されたものである。Fig. 4.2 に FP ガス圧力計の構造を示す [6]。FP ガス圧力計は、差動トランス（Linear Variable Differential Transformer：以下「LVDT」という。）と金属製ベローズによって構成されている。LVDT の中心には金属棒（コア）が通っており、その周囲には 2 種類のコイル（1 次コイル及び 2 次コイル）が配置されている。金属ベローズはコアと連結しており、FP ガスの圧力に応じて伸縮し、LVDT 内におけるコアの位置を変化させる。

測定の際は、まず 1 次コイル及び 2 次コイルに電流を印加し、各コイルに電圧を発生させる。FP ガス圧力の変化により、コアの位置が変化すると、電磁誘導によって各コイルの電圧が変化する。コアの位置は FP ガスの圧力によって決まるため、FP ガス圧力計の 1 次コイル及び 2 次コイルの電圧を測定することで、FP ガスの圧力を得ることができる。(Fig. 4.3 参照)。また、FP

ガス圧力計に後述の差動トランス用信号処理器（4.2.2 参照）を接続することで、この電流印加及び電圧をオンラインで計測することが可能である。

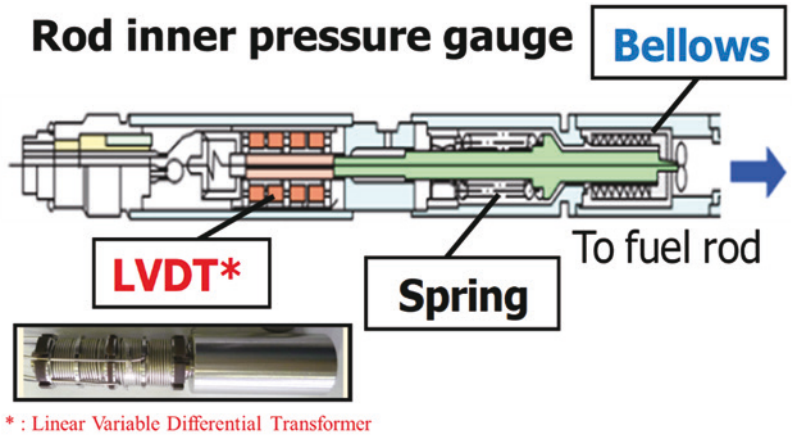


Fig. 4.2 Structure of differential transformer FP-gas pressure gauge

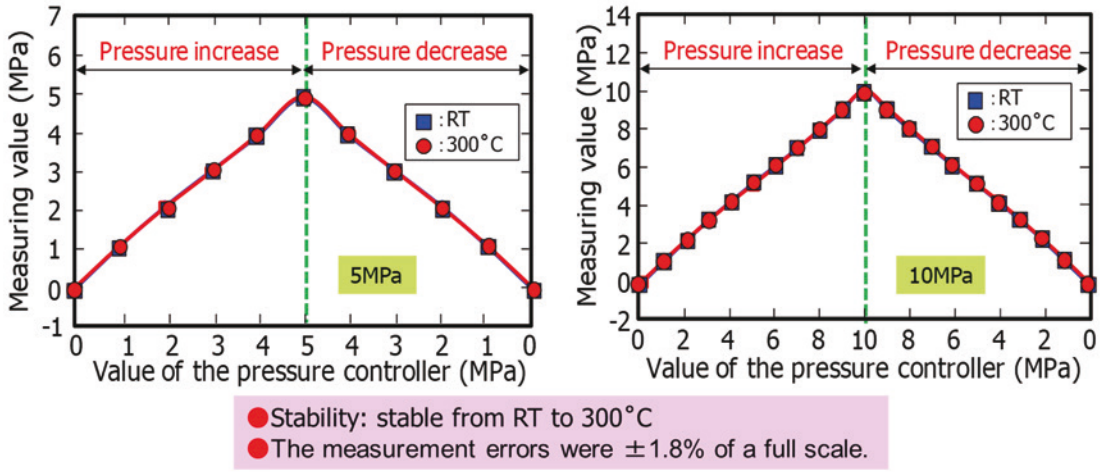


Fig. 4.3 Differential transformer FP-gas pressure gauge

4.1.2.2　シース型熱電対

JMTR において使用実績のある主な熱電対の仕様を Table 4.2 に、使用温度範囲を Fig. 4.4 に示す[6]。JMTR では、熱電対について、照射条件によって、K 型、N 型及び W/Re 型の中から適した起電力の特性や使用温度範囲を持つものを選定し、キャプセルに装荷している。選定キャプセルの使用環境温度が 400℃以下であることから、K 型熱電対を採用しており、それらを 9 本装荷している。

Table 4.2 Specifications of thermocouples used in JMTR

	Type-K	Type-N	Type-W/Re
Temperature range (℃)	～1000	800～1100	1000～1900
Sheath O.D. (mm)	0.5、1.0、1.6	1.0、1.5	1.6
Sheath material	SUS304 SUS316 Inconel 600	SUS316 Inconel 600	Nb-1%Zr Mo
Insulator	MgO	MgO	BeO

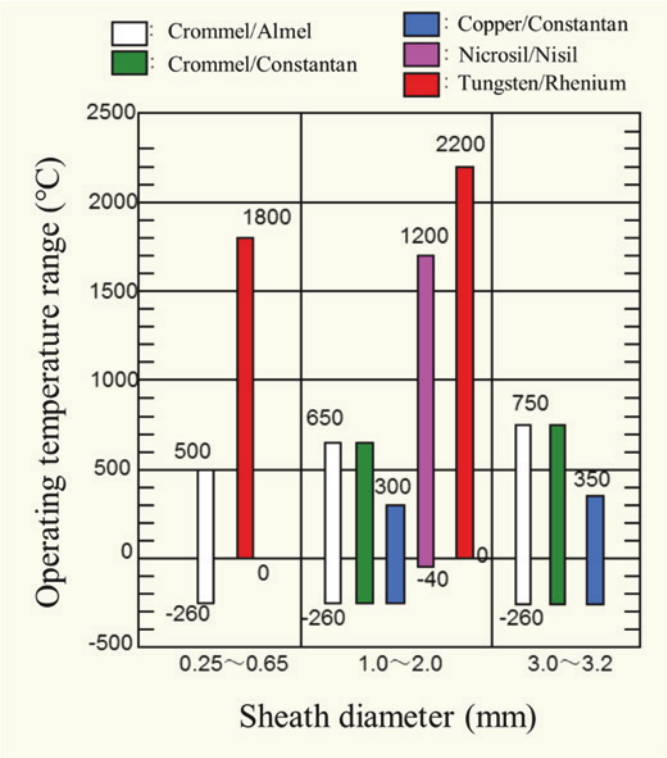


Fig. 4.4 Operating temperature range of thermocouples

4.1.2.3　自己出力型ガンマ線検出器

SPGD とは、検出信号の発生に際して外部からの電源供給を必要としないガンマ線検出器である。Fig. 4.5 に示すように、SPGD はエミッタ、コレクタ、絶縁材及び計測線によって構成され、その構造は比較的単純なものである [6]。このため、直径数ミリ以下のサイズで製作すること及びキャプセル等の狭い空間でも装荷することができる。

SPGD の動作原理のモデルを Fig. 4.6 に示す。エミッタはコンプトン散乱及び光電効果の断面積の大きな鉛でできており、ガンマ線が入射すると微小電流がエミッタとコレクタ間に発生する。この微小電流はガンマ線量率に比例するため、エミッタとコレクタ間で発生した微小電流を微小電流計で計測することにより、ガンマ線量率を求めることができる。上記のとおり、この微小電流はガンマ線によって発生することから、外部電源を必要とせずに計測できる。なお、中性子線

が入射することでも微小電流は発生するが、その寄与はガンマ線によるものと比較すると非常に小さいため、SPGD からはほぼガンマ線の線量率に比例した信号を得ることが出来る。

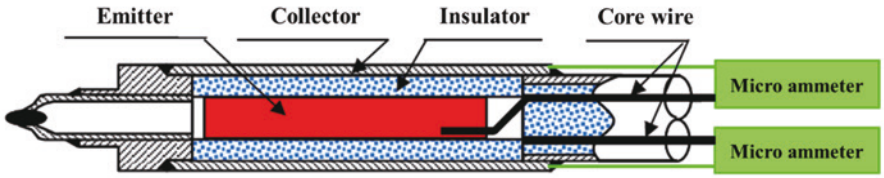


Fig. 4.5 SPGD structure

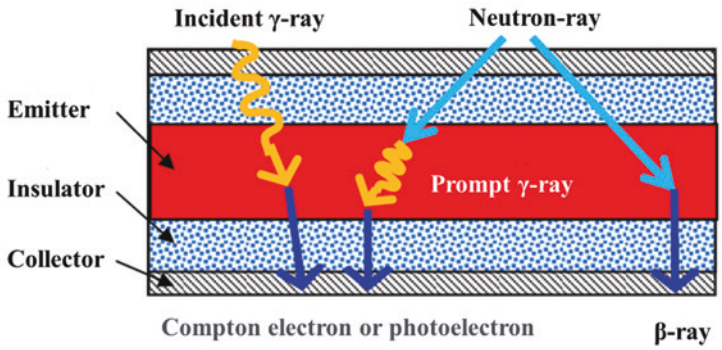


Fig. 4.6 SPGD operating principle

4.2　炉外装置

選定キャプセルの温度制御は、真空制御及びヒータによって行われる。この温度制御は熱電対からの情報を参照し、真空ポンプによる真空度の調整及びヒータの稼働等によって行われる。これら温度制御に必要な制御装置に加え、計測機器用の計測機及び記録装置を内包し、照射試験中の選定キャプセルから出力される様々なデータを記録するものが炉外装置である。選定キャプセル用の炉外装置は、併用型温度制御装置、作動トランス用信号処理機、微小電流計、ガス供給システムからなり、選定キャプセルとの接続例を Fig. 4.7 に示す。併用型温度制御装置は真空温度制御のための真空制御管内 He ガス圧力の制御、ヒータ温度制御のための熱電対信号の取得及びヒータの制御を行う。ガス供給システムは FP ガス圧力計に任意の圧力の He ガスを供給し、その時の圧力データをデータ収集用 PC に送信する。SPGD 及び FP ガス圧力計の出力は、微小電流計及び差動トランス用信号処理器を介してデータ収集用 PC に送信され、試験データとして記録される。また、これらの機器の操作は、PC 上でのアプリケーション操作のみで実行することが可能である。

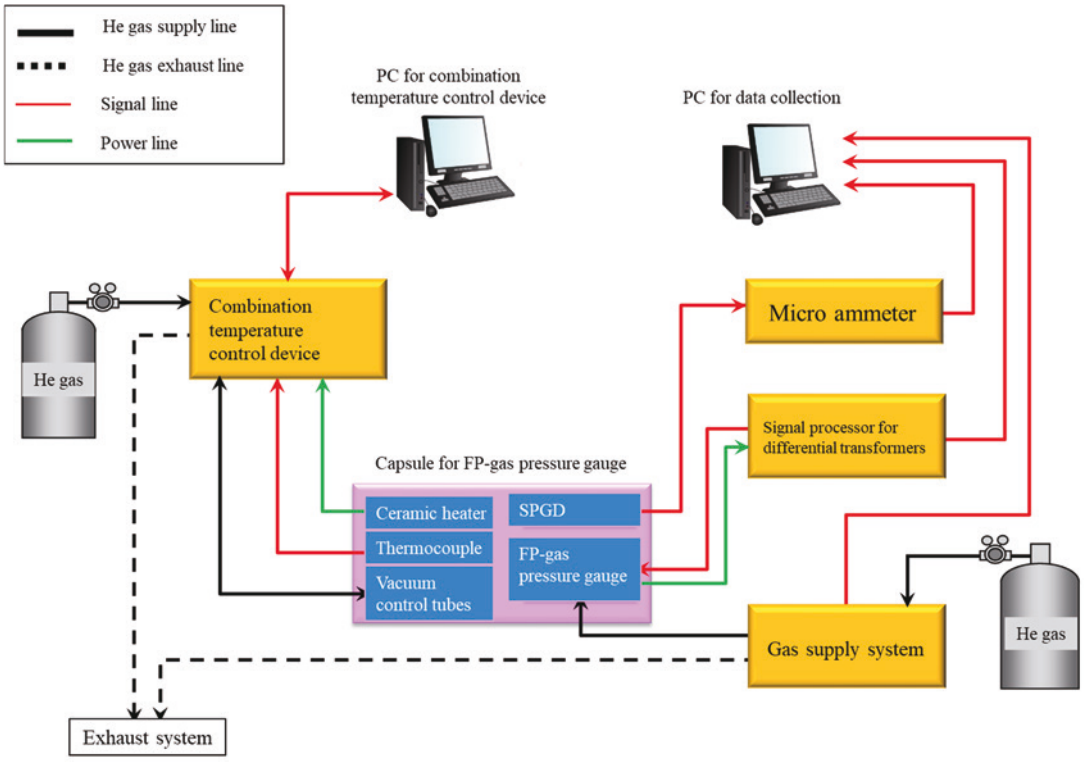


Fig. 4.7 Overview of outside equipment

4.2.1 併用型温度制御装置

併用型温度制御装置を Fig. 4.8 に示す。本装置は、真空温度制御及びヒータ温度制御を行うための機器である。本装置は真空制御用として、真空制御管と接続可能かつキャプセル内の He ガス圧力を操作可能な真空ポンプ、ヒータ温度制御用としてヒータ用温度調節器を有している。キャプセルの熱電対から送られる温度情報は本装置のプロセスコントローラに取り込まれる。このプロセスコントローラは LAN ケーブルによって PC と接続可能であり、操作者は専用のアプリケーションを介した PC 上の操作のみでキャプセルの温度制御が可能である。

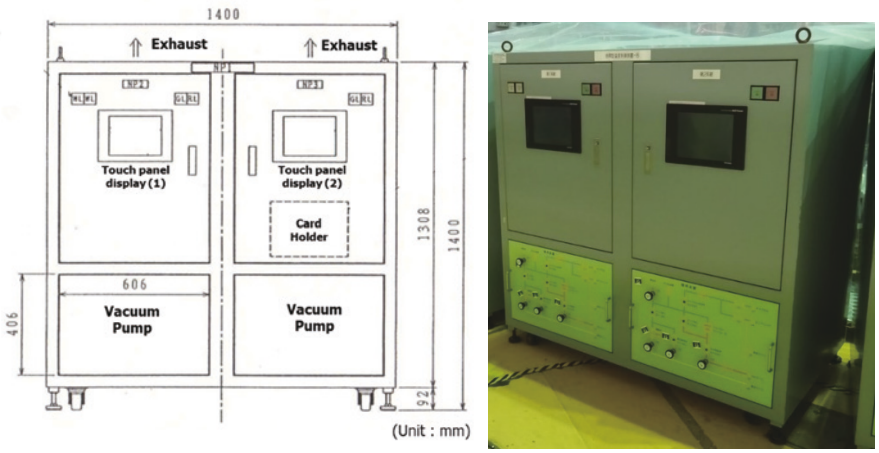


Fig. 4.8 Combination temperature control device

4.2.2　差動トランス用信号処理器

差動トランス用信号処理器は、FP ガス圧力計の LVDT に電流を印加し、1 次及び 2 次電圧の測定が可能な計測機器である。4.1.2.1 に述べたように FP ガス圧力計は LVDT によって圧力を計測するものである。差動トランス用信号処理器の外観を Fig. 4.9 に示す。差動トランス用信号処理器には、アイリス株式会社製 M1010 を用いた。当該信号処理器は、電流の調整機能・出力機能、電圧の測定機能に加え、測定値をアナログ信号として外部出力が可能である。

Fig. 4.9 Signal processor for differential transformers (IRIS Corporation Limited M1010)

4.2.3　微小電流計

Fig. 4.10 に示す微小電流計は、SPGD より出力される電流を測定するためのものである。SPGD の電流値はガンマ線の強度に依存するが、その電流値は数 pA～nA オーダーである。そのオーダーに対応した電流計として、アイリス株式会社製 M1013 を SPGD 計測に用いた。当該電流計は、1 台で 4 本の SPGD の電流値を測定することができる。また、測定した電流値をアナログ信号として外部出力することも可能であるため、炉外装置のデータ収集装置を連携することで、キャプセルに入射するガンマ線の線量率をオンラインで計測することが可能である。

Fig. 4.10 Micro ammeter (IRIS Corporation Limited M1013)

4.2.4　ガス供給システム

Fig. 4.11 に示すガス供給システムは、FP ガス圧力計測定部の圧力を調整するため、He ガスを当該測定部に供給するためのものである。ガス供給システムはデジタル圧力計、バルブ及び配管によって構成され、使用の際は He ガスのボンベと接続して用いる。ガス供給システムを用いることで、2 基の FP ガス圧力計に対し、個別又は同時に He ガスを供給することが可能である。ま

た、供給時の He ガスの圧力はデジタル圧力計に表示されるため、その表示値に従ってバルブの開閉を行うことで、大気圧から最大 4.5 MPa まで He ガスの圧力を調整することが可能である。圧力が 4.5 MPa を超過して加圧しようとした場合、ガス供給システムに設置された安全弁が作動し、系統を保護する。

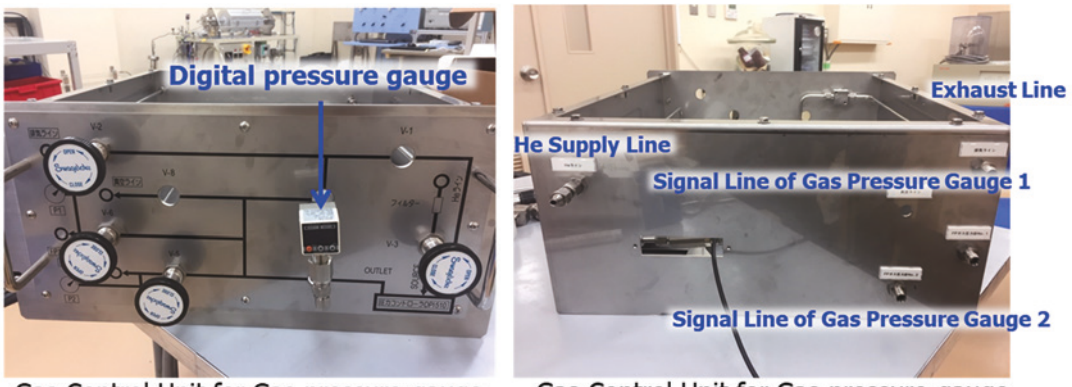


Fig. 4.11 Gas supply system

5. 選定キャプセルの改造

JMTR と MARIA 炉は異なる設計であることから、JMTR 用に製作された選定キャプセルが、MARIA 炉の照射孔への装荷可能か及び炉内環境に耐えられるかについて確認しなければならない。MARIA 炉の熱的条件及び照射孔の仕様に対し、選定キャプセルの熱的仕様及び機械的仕様を比較・評価した。これらの結果を踏まえて大洗研究所から原子力科学研究所へ輸送を行い、キャプセルに必要な改造を実施した。

5.1 熱的仕様の検討

MARIA 炉に選定キャプセルを装荷するためには、選定キャプセルの熱的強度が MARIA 炉内の照射場（炉内環境）に耐えられなければならない。JMTR においてキャプセルの熱的評価に用いる 1 次元熱計算コード GENGTC（General Gap Temperature Calculation）[7]を使用し、選定キャプセルの MARIA 炉内環境における熱的仕様を評価した。

GENGTC は、米国のオークリッジ国立研究所（ORNL）でキャプセルの温度計算用に開発された 1 次元熱計算コードである。このコードは、キャプセルを多層同軸円筒体と仮想した計算モデル（以下「計算モデル」という。）を使用し、照射下におけるキャプセル温度を推定するものである。選定キャプセルの計算モデルを Fig. 5.1 に示す。この計算モデルは、FP ガス圧力計から外筒にかけての選定キャプセルの構造を模擬したものである。このような計算モデルに対し、比熱など材料固有の物性値を与え、さらにガンマ発熱量、熱伝達率等炉内環境のパラメータを割り当てることで、照射下におけるキャプセルの温度を推定することができる。

今回の計算では、NCBJ から提示された炉内環境に関する情報に基づき、ガンマ発熱量を 1.4

W/g とした。MARIA 炉の冷却水流量より、外筒表面の熱伝達率を 2.4 W/cm²/K とした。また、冷却水流量の不足による熱伝達率低下が起きた場合等、より過酷な環境でも選定キャプセルの健全性が担保されるかを確認するため、冷却水流量が 1/2 及び 1/3 に減少したことも想定して熱伝達率を 1.1 及び 0.8 W/cm²/K とした計算も行った。これらの条件下で選定キャプセルのヒータを停止状態から出力 50 W/cm までの範囲で 10 W/cm ずつ計算を行い、キャプセル温度を推定した。

GENGTC より得られた選定キャプセルの温度を Table 5.1 に示す。各表が示すように、熱伝達率が 0.8 W/cm²/K の場合であっても、キャプセル温度は最高 290.8 ℃であり、設計温度である 400 ℃を超過しないことが分かった。これらの結果から、選定キャプセルは MARIA 炉内環境に対し、熱的に設計時に想定していた照射試験を実施できることが確認できた。

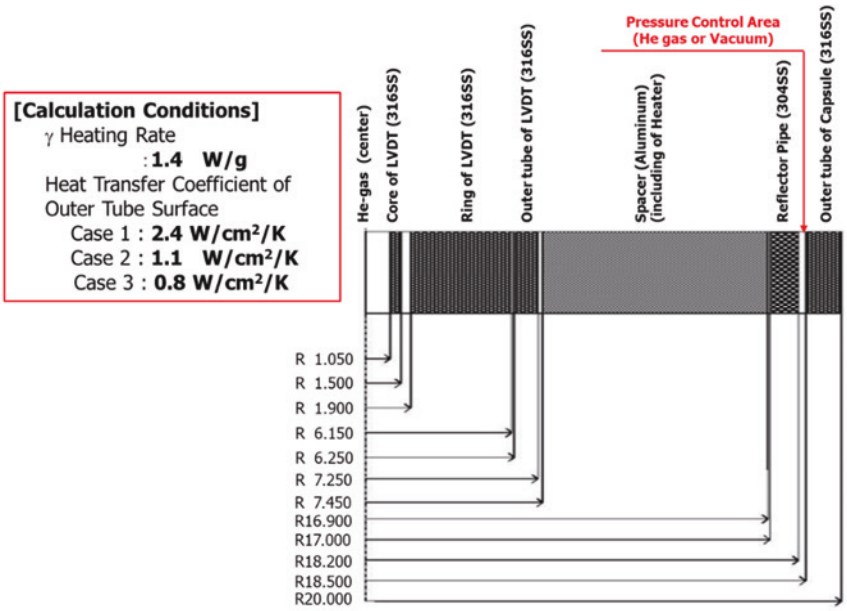


Fig. 5.1 Capsule calculation model with GENGTC

Table 5.1 Calculation result by GENGTC (1/3)

(a) Heat transfer coefficient of outer tube surface : 2.4 W/cm²/K

(Pressure controlled area: He gas atmosphere)

Positions \ Heater Condition		Power of Heater (W/cm)					
		0	10	20	30	40	50
0	He-gas (Center)	217.0	231.9	246.2	259.9	272.7	285.0
1	Core of LVDT (In-side)	217.0	231.9	246.2	259.9	272.7	285.0
2	Core of LVDT (Out-side)	216.9	231.8	246.1	259.9	272.7	285.0
3	Ring of LVDT (In-side)	209.6	224.7	239.0	253.1	265.9	278.2
4	Ring of LVDT (Out-side)	205.0	220.2	234.6	248.6	261.5	273.8
5	Outer tube of LVDT (In-side)	189.8	205.3	220.2	234.3	247.4	260.0
6	Outer tube of LVDT (Out-side)	187.8	203.3	218.2	232.3	245.5	258.1
7	Spacer (In-side)	150.1	166.2	181.7	196.3	210.0	223.0
8	Spacer (Out-side)	148.5	164.4	179.7	194.1	207.6	220.4
9	Reflector Pipe (In-side)	133.1	146.1	158.8	171.0	182.8	193.9
10	Reflector Pipe (Out-side)	130.1	142.5	154.6	166.2	177.4	187.9
11	Outer tube of Capsule (In-side)	56.7	57.8	59.0	60.2	61.3	62.5
12	Outer tube of Capsule (Out-side)	51.4	51.7	52.1	52.4	52.7	53.1

Table 5.1 Calculation result by GENGTC (2/3)

(b) Heat transfer coefficient of outer tube surface : 1.1 W/cm²/K

(Pressure controlled area: He gas atmosphere)

Positions \ Heater Condition		Power of Heater (W/cm)					
		0	10	20	30	40	50
0	He-gas (Center)	219.1	234.4	248.7	262.3	275.7	288.4
1	Core of LVDT (In-side)	219.1	234.4	248.7	262.3	275.7	288.4
2	Core of LVDT (Out-side)	219.1	234.3	248.7	262.2	275.7	288.4
3	Ring of LVDT (In-side)	211.7	227.2	241.6	255.4	268.9	281.6
4	Ring of LVDT (Out-side)	207.1	222.7	237.1	251.0	264.5	277.2
5	Outer tube of LVDT (In-side)	191.9	208.1	222.8	236.9	250.4	263.4
6	Outer tube of LVDT (Out-side)	189.9	206.1	220.8	235.0	248.5	261.5
7	Spacer (In-side)	152.2	168.9	184.5	199.3	213.1	226.6
8	Spacer (Out-side)	150.7	167.2	182.6	197.1	210.7	224.1
9	Reflector Pipe (In-side)	135.2	148.9	162.0	174.2	186.2	197.9
10	Reflector Pipe (Out-side)	132.2	145.3	157.7	169.4	180.8	191.9
11	Outer tube of Capsule (In-side)	59.4	60.9	62.4	64.0	65.5	67.0
12	Outer tube of Capsule (Out-side)	54.1	54.8	55.5	56.2	56.9	57.7

Table 5.1 Calculation result by GENGTC (3/3)

(c) Heat transfer coefficient of outer tube surface : 0.8 W/cm²/K

(Pressure controlled area: He gas atmosphere)

Positions \ Heater Condition		Power of Heater (W/cm)					
		0	10	20	30	40	50
0	He-gas (Center)	220.9	236.2	250.8	264.4	277.8	290.8
1	Core of LVDT (In-side)	220.9	236.2	250.8	264.4	277.8	290.8
2	Core of LVDT (Out-side)	220.9	236.1	250.8	264.3	277.8	290.8
3	Ring of LVDT (In-side)	213.5	229.0	243.7	257.5	271.0	284.0
4	Ring of LVDT (Out-side)	208.9	224.5	239.2	253.1	266.6	279.6
5	Outer tube of LVDT (In-side)	194.0	209.9	224.9	239.0	252.8	265.8
6	Outer tube of LVDT (Out-side)	192.0	207.9	222.9	237.1	250.9	263.9
7	Spacer (In-side)	154.3	171.0	186.6	201.4	215.7	229.0
8	Spacer (Out-side)	152.8	169.3	184.7	199.2	213.4	226.5
9	Reflector Pipe (In-side)	137.3	151.0	164.1	176.6	188.8	200.5
10	Reflector Pipe (Out-side)	134.3	147.4	159.9	171.8	183.5	194.6
11	Outer tube of Capsule (In-side)	61.5	63.3	65.1	66.9	68.7	70.5
12	Outer tube of Capsule (Out-side)	56.2	57.2	58.2	59.2	60.2	61.2

5.2　機械的仕様の検討

MARIA 炉の照射孔では、ベリリウムブロック上部方向から下部方向に向かって冷却水が流れている。MARIA 炉に選定キャプセルを装荷する場合、冷却水中でも安定な姿勢を保つ必要があるが、選定キャプセルの直径は照射孔に対して小径であり、MARIA 炉に装荷した場合、径方向及び軸方向に対して姿勢が不安定である。また、選定キャプセルから炉外装置までの距離が JMTR よりも長いため、保護管及び計測線の長さがそれぞれ、約 1800 mm、約 2000 mm 不足していることが分かった。

これらの課題について NCBJ と協議した結果、対策として以下の 2 つの改造を選定キャプセルに実施した。

① 専用スペーサの取付

照射孔における径方向並びに軸方向への姿勢を安定させるため、選定キャプセルの下部及び上部に Fig. 5.2 に示すような専用スペーサを取り付けた。なお、専用スペーサの構造は、冷却水の循環を妨げないものにした。

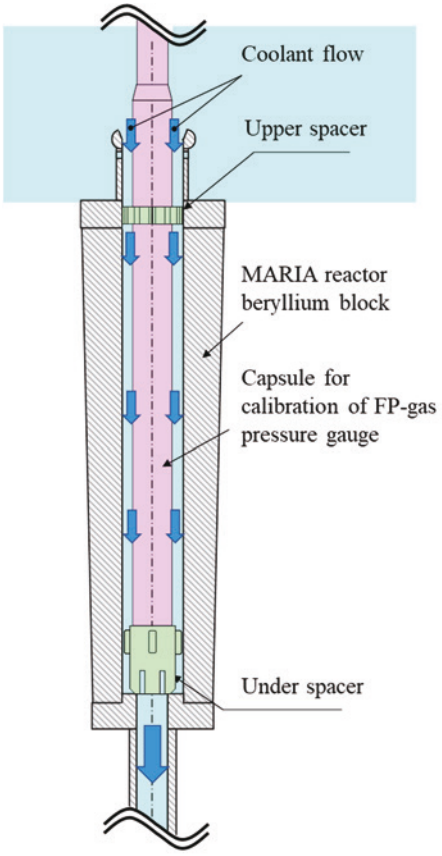


Fig. 5.2 Overview of dedicated

② 保護管及び計測線の伸長

保護管及び計測線の長さの不足への対応として、これらを伸長した。はじめに計測線の一部を切除し、その切除部に新規のアダプタと十分な長さのソフトケーブルを接続して計測線の伸長を行った。MI ケーブルではなく、ソフトケーブルで計測線を伸長させたのは、ソフトケーブルとアダプタがベリリウムブロックより高い位置にあり、この位置では温度及びガンマ線量が低いため、ソフトケーブルを使用できると判断したからである。

次に、Fig. 5.3 のように保護管を切除し、十分な長さのフレキシブルチューブを接続した。選定キャプセルから炉外装置までの距離が長く、両者の接続のためには複数点での曲げが必要となることから、これまでの直管からフレキシブルチューブに変更した。なお、変更したフレキシブルチューブでも、冷却水に対するキャプセルの気密性は確保できる。

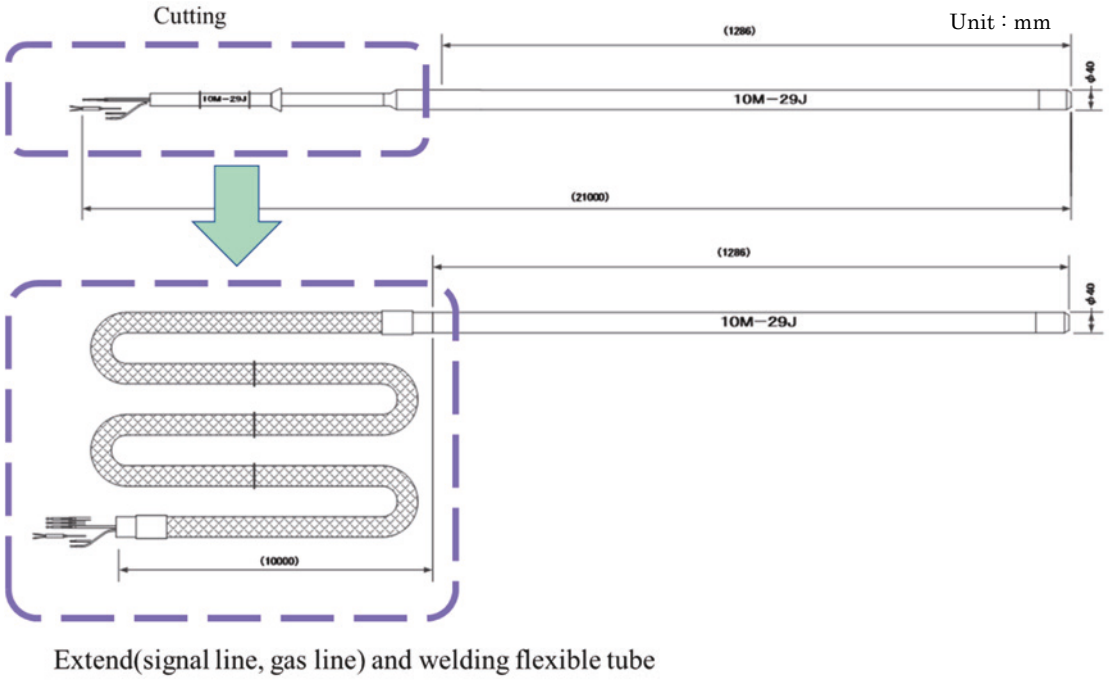


Fig. 5.3 Extension of measuring line and installation of flexible tube

5.3　選定キャプセル改造の設計・製作

計測線の伸長及びフレキシブルチューブへの取替え並びに専用スペーサの取付けについて、その作業性を検討した。結果、選定キャプセルの改造は Fig. 5.4 に示す作業フローに基づいて実施した。

一方、3.2 節でも述べたとおり、MARIA 炉に装荷するキャプセル等の機器は、NCBJ の技術的基準を満足しなければならない。そのため、今回の改造の各工程において検査を実施し、改造した選定キャプセルが NCBJ の技術的基準を満足することを証明する必要がある。NCBJ と検査の方法及び合否の判定基準について協議した。その結果、JMTR キャプセル等検査基準 [5]に基づく検査を実施し、その検査に合格すれば、改造した選定キャプセルは NCBJ の技術的基準を満足するという了承が得られた。

改造にあたり、JMTR キャプセル等検査基準 [5]に基づいた Table 5.2 に示す検査を実施した。最終検査合格後は動作確認試験を実施し、本改造が照射試料である FP ガス圧力計への影響の有無及びその程度について評価した。

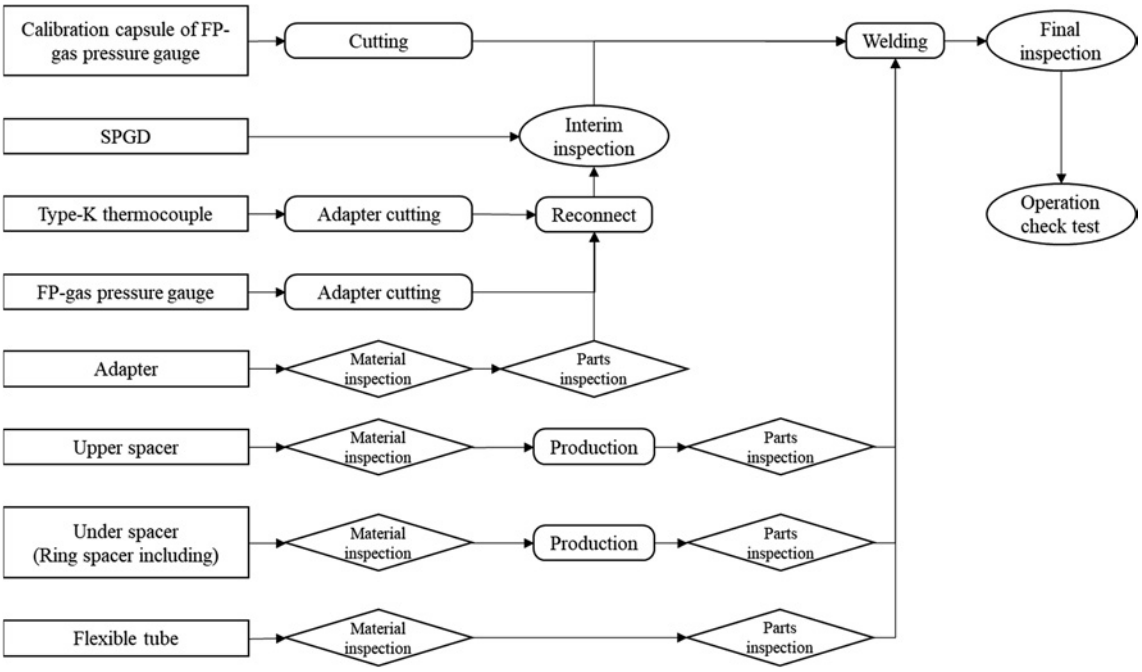


Fig. 5.4 Process flow of capsule modification for calibration of FP gas pressure gauge

Table 5.2 Items for parts inspection, interim inspection, and final inspection

	Inspection target	Material inspection	Appearance inspection	Dimensional inspection	Weight measurement	Pressure resistance inspection	Penetrant inspection	Insulation resistance measurement	Continuity measurement
Parts	Adapter	○	○	○	○	—	—	—	—
	Ring spacer	○	○	○	○	—	—	—	—
	Upper spacer	○	○	○	○	—	—	—	—
	Under spacer	○	○	○	○	—	—	—	—
	Flexible tube	○	○	○	—	○	—	—	—
	Welding rod	○	○	○	—	—	—	—	—
Interim	FP-gas pressure gauge	—	—	○	—	—	—	○	○
	SPGD	—	—	○	—	—	—	○	—
	Thermocouples	—	—	○	—	—	—	○	○
Final	Capsule	—	○	○	○	○	○	—	—
	SPGD	—	—	—	—	—	—	○	○
	Thermocouples	—	—	—	—	—	—	○	○
	FP-gas pressure gauge	—	—	—	—	—	—	○	○

○ : Inspection target, — : Not subject to inspection

5.3.1 計測線の伸長

FP ガス圧力計、SPGD 及び熱電対の計測線を伸長するにあたり、計測線の全長、計測線の一部である MI ケーブル部の長さ及びソフトケーブル部の長さを測定した。次に、伸長が必要な計測線の MI ケーブル部よりアダプタを切除した。切除後、新しく製作したアダプタと十分な長さのソフトケーブルを接続することで、MARIA 炉での照射試験に必要な長さまで計測線を伸長した。

なお、アダプタは製作前後において部品検査を実施し、材料の組成、外観及び寸法に問題が無いことを確認した。

伸長後の計測線は、中間検査として Table 5.2 に示す寸法検査、導通測定及び絶縁抵抗測定（SPGD 除く。）を実施した。各検査結果を Table 5.3 及び Table 5.4 に示す。検査の結果、伸長した計測線の絶縁抵抗等に異常が無く、その長さが仕様を満足することを確認した。また、外観検査においても機能上影響のある傷や打痕等の視認できる異常は認められなかった。以上のことから、選定キャプセルが中間検査の全項目を満足していることを確認した。

Table 5.3 Interim inspection (continuity and insulation resistance measurements) results No.1

Item	FP-gas pressure gauge No.1	FP-gas pressure gauge No.2	SPGD
Length (mm)	Primary side : 17256 Secondary side : 17027	Primary side : 17048 Secondary side : 16988	Cathode : 18072 Anode : 18072
Conduction resistance (Ω)	Primary side : 11.51 Secondary side : 11.36	Primary side : 10.81 Secondary side : 10.45	―
Insulation resistance (MΩ) Core wire - Coating	Primary side : 50000 Secondary side : 30000	Primary side : 50000 Secondary side : 50000	Cathode : 20000 Anode : 20000

― : Not subject to inspection

Table 5.4 Interim inspection (continuity and insulation resistance measurements) results No.2

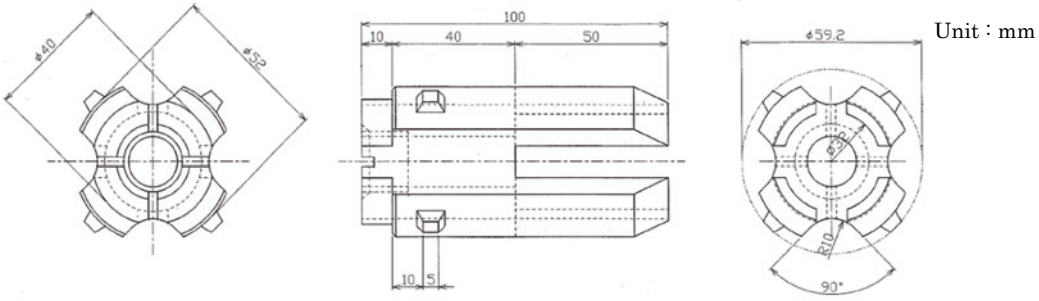
Item	TC-1	TC-2	TC-3	TC-4	TC-5
Length (mm)	18020	18038	18054	18033	18065
Conduction (Ω)	312.7	316.0	314.4	318.2	309.1
Insulation resistance (MΩ)	20 over	20 over	20 over	20 over	20 over
Item	TC-6	TC-7	TC-8	TC-9	Total length of capsule
Length (mm)	18026	18062	17987	18018	22735 (reference)
Conduction (Ω)	315.6	314.9	316.9	249.6	
Insulation resistance (MΩ)	20 over	20 over	20 over	20 over	

5.3.2 専用スペーサの製作

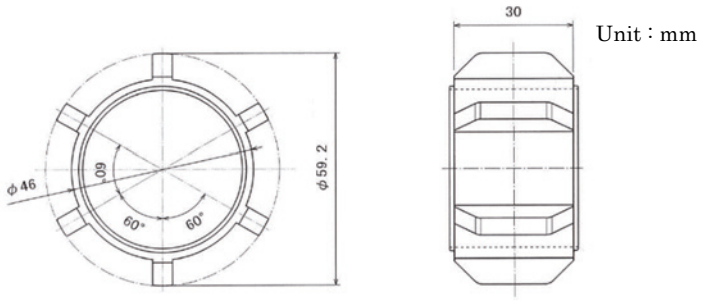
姿勢安定用の専用スペーサとして、上部スペーサ及び下部スペーサを製作した。上部スペーサ及び下部スペーサの概要を Fig. 5.5 に示す。下部スペーサは 4 本の足があり、この足が照射孔底面と接触して選定キャプセルの軸方向に対する姿勢を安定させる。また、径方向に対する姿勢を安定させるため、側面に突起（パッド）を設け、スリットの追加や側面を窪ませることで、下部スペーサが冷却水の流れを阻害しないようにした。上部スペーサは円環状の部品であり、パッドが放射状に設けられている。上部スペーサを選定キャプセル上部に取り付け、下部スペーサと共に選定キャプセルの径方向に対する姿勢を安定させる。

製作した上部スペーサの外観写真を Fig. 5.6 に、下部スペーサの外観写真を Fig. 5.7 に示す。各スペーサの製作に用いた母材は、材料検査を実施し、MARIA 炉に装荷可能な組成であることを確認した。製作後は部品検査として寸法検査を行い、直径等が全て基準値を満足していること、外観検査にて機能上有害な傷が無いこと等を確認した。

計測器等の中間検査後、Fig. 5.6 (b)、Fig. 5.7 (b)に示すように上部スペーサ、下部スペーサを選定キャプセルに溶接した。

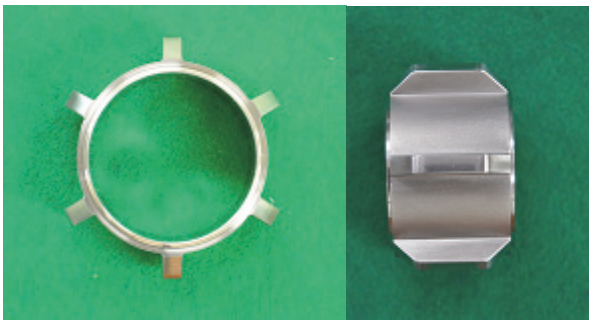


(a) Lower spacer

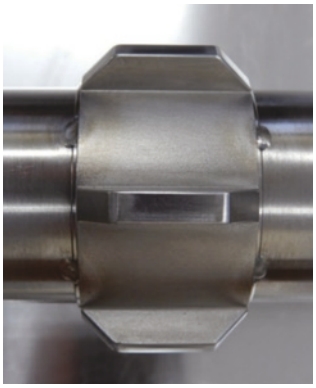


(b) Upper spacer

Fig. 5.5 Upper, lower spacers schematic drawing

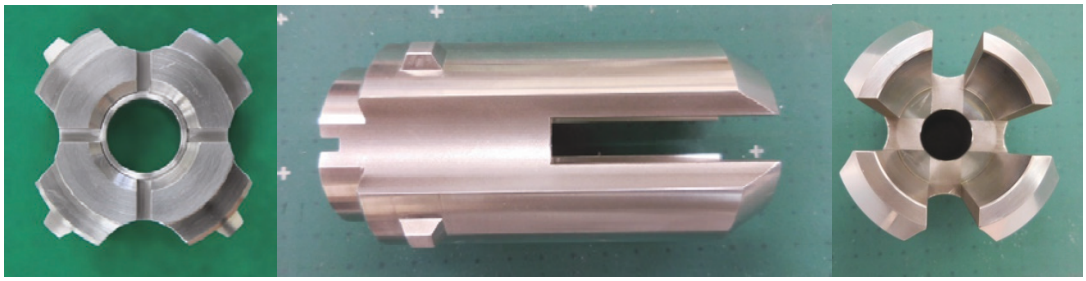


(a) Before welding

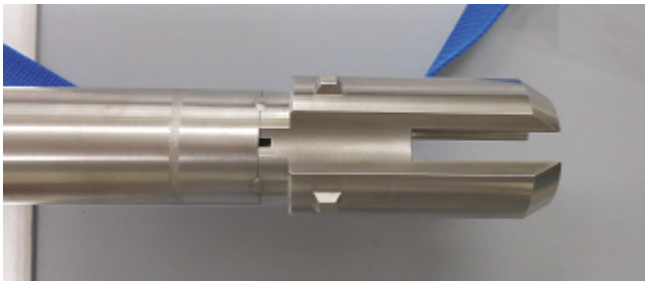


(b) After welding

Fig. 5.6 Fabricated upper spacer



(a) Before welding



(b) After welding

Fig. 5.7 Fabricated under spacer

5.3.3　フレキシブルチューブの取付

本改造で使用したフレキシブルチューブを Fig. 5.8 に示す。フレキシブルチューブは市販品であり、メーカ発行の成績書を参照して材料検査及び部品検査を実施した。計測線の伸長及び専用スペーサの溶接後、フレキシブルチューブに計測線を通し、選定キャプセルと溶接した。フレキシブルチューブ溶接後の選定キャプセルの外観を Fig. 5.9 に示す。フレキシブルチューブ溶接後に、最終検査として外観検査、寸法検査及び重量検査を実施した。各検査の結果を Table 5.5 に示す。外観検査、寸法検査及び重量検査の結果より、フレキシブルチューブ及びスペーサを含む選定キャプセル全体の外観に異常が無く、その寸法及び重量が仕様を満足することを確認した。また、浸透探傷検査を実施し、スペーサ及びフレキシブルチューブの溶接箇所の性状を検査した結果、Fig. 5.10 のようにひび割れ等の不良は確認されなかった。Table 5.6 及び Table 5.7 に FP ガス圧力計及び SPGD（計測線を含む）の導通測定及び絶縁抵抗測定の結果を示す。計測線の導通測定及び絶縁抵抗測定では、フレキシブルチューブ溶接後も測定値が合格値以上であることを確認した。

耐圧検査では、フレキシブルチューブを含むキャプセル内部に 0.15 MPa の窒素ガスを加圧し、選定キャプセルの耐圧性を評価した。その結果、耐圧検査開始から終了までの 30 分間において、窒素ガスの漏は確認されなかった。また、フレキシブルチューブを含む選定キャプセルに変形等が確認されなかったことから、改造後の選定キャプセルの耐圧性に問題が無いことを確認した。

Unit：mm

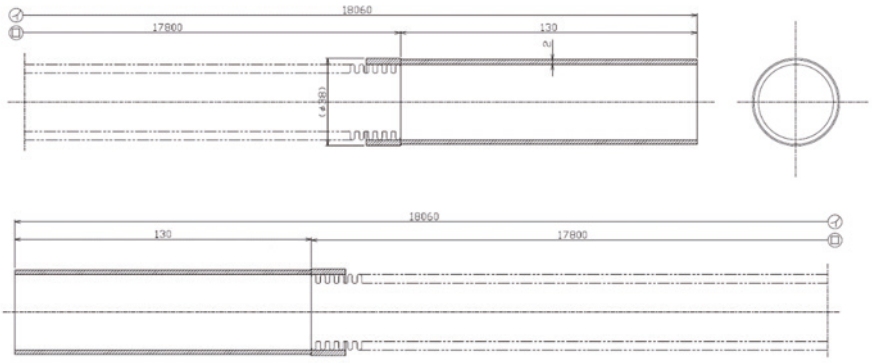
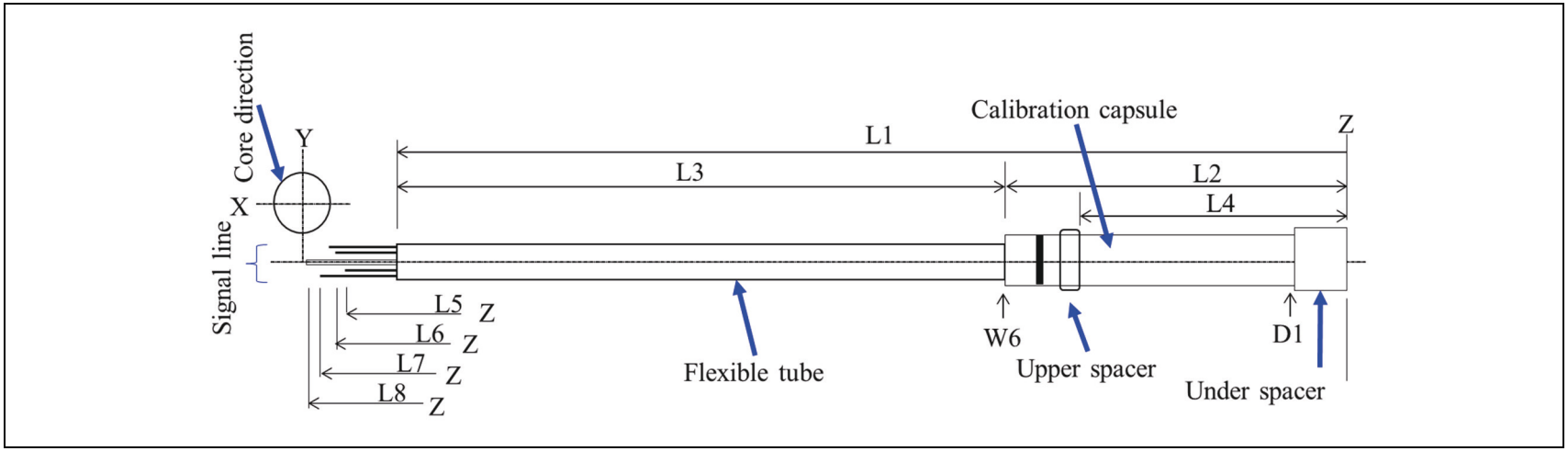


Fig. 5.8 Flexible tube schematic diagram

Fig. 5.9 Capsule after flexible tube welding

Table 5.5 Final inspection (Dimensions, weight, appearance) results



Item		L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	D1
Reference value (mm)		19440^{+8}_{-20}	1100^{+5}_{-15}	17920^{+8}_{-20}	1390^{+5}_{-15}	20000 over	20000 over	20000 over	20000 over	40±0.5
Measured value (mm)	X	19440	1100	17920	1390	21000	22000	22700	22150	39.9
	Y									39.9

External view of weld			Weight	Appearance
Upper spacer	Under spacer	W6	(kg)	
Good	Good	Good	32.94	Good

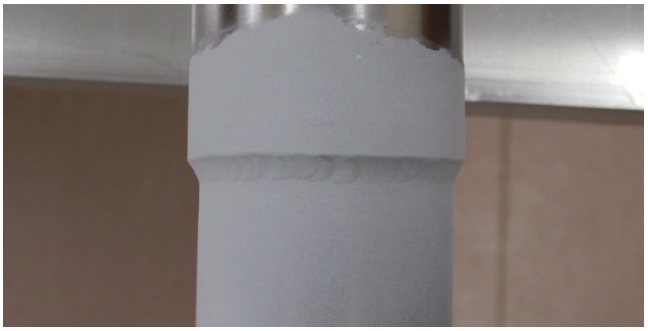


Fig. 5.10 Penetrant test (Capsule - flexible tube)

Table 5.6 Final inspection (continuity and insulation resistance measurements) results No.1

Item		FP-gas pressure gauge No.1	FP-gas pressure gauge No.2	SPGD
Conduction (Ω)		Primary side : 11.7 Secondary side : 11.6	Primary side : 11.0 Secondary side : 10.7	—
Insulation resistance (MΩ)	Core wire - Coating	Primary side : 10000 over Secondary side : 10000 over	Primary side : 10000 over Secondary side : 10000 over	10000 over
	Core wire	10000 over	10000 over	—

— : Not subject to inspection

Table 5.7 Final inspection (continuity and insulation resistance measurements) results No.2

Item	TC-1	TC-2	TC-3	TC-4	TC-5
Conduction (Ω)	311.8	315.3	314.0	317.7	308.7
Insulation resistance (MΩ)	20 over	20 over	20 over	20 over	20 over
Item	TC-6	TC-7	TC-8	TC-9	
Conduction (Ω)	315.0	314.4	316.4	249.0	
Insulation resistance (MΩ)	20 over	20 over	20 over	20 over	

6. 動作確認試験

選定キャプセルの改造に関する最終検査の合格後、FP ガス圧力計の健全性確認を目的とした動作確認試験を実施した。この試験では、①導通・絶縁抵抗測定、②FP ガス圧力計動作確認、③併用型温度制御装置動作確認の 3 項目について確認を行った。

6.1 導通・絶縁抵抗測定

6.1.1 導通・絶縁抵抗測定の目的

選定キャプセルへ装荷されている計測機器等に接続されている計測線は原子炉からのガンマ線や中性子線を受けることによって出力信号にノイズを受ける。ノイズを低減するためには十分な導通・絶縁抵抗が必要である。5 章で示した通り、計測線の伸長を実施し、拠点間での輸送を行っているため、MARIA 炉への輸送前に、計測線の導通・絶縁抵抗値が健全であることを確認するための試験を実施した。

6.1.2 導通・絶縁抵抗測定の手法

Fig. 6.1 に示す試験体系にて測定を行い、計測線の健全性確認を行った。導通測定ではデジタルマルチメータを用いて導通を確認し、断線等の異常がないことを確認した。絶縁抵抗測定では、超絶縁抵抗計を用いて計測線ごとに定められた電圧を印加し、絶縁抵抗値を測定した。

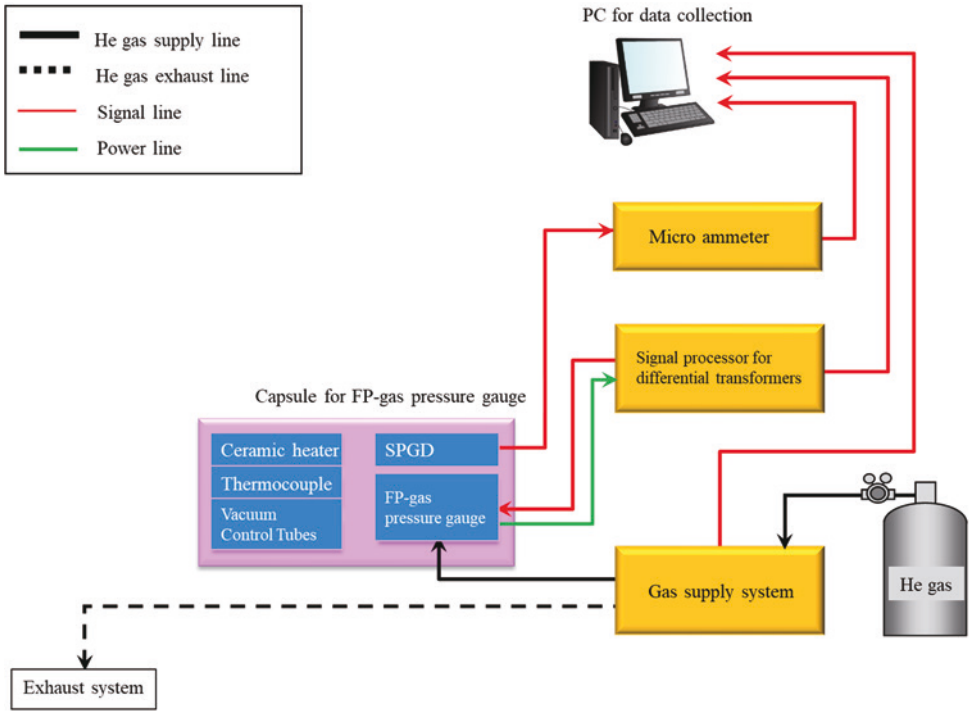


Fig. 6.1 Operation check test system

6.1.3 導通・絶縁抵抗測定の結果

試験結果を Table 6.1 に示す。5.3 節の検査結果との比較により、計測線の伸長等の改造による影響や、拠点間の輸送による影響を受けることなく、計測線の導通・絶縁抵抗値の健全性が維持されていることを確認した。

Table 6.1 Continuity and insulation resistance measurements

Item		Continuity	Insulation resistance
		Ω	Ω
Thermocouple	TC-1	313.7	2.1×10^{11}
	TC-2	315.7	1.4×10^{11}
	TC-3	316.0	1.5×10^{11}
	TC-4	320.0	1.5×10^{11}
	TC-5	309.2	1.5×10^{11}
	TC-6	317.4	1.0×10^{11}
	TC-7	314.9	1.8×10^{11}
	TC-8	317.2	1.8×10^{11}
	TC-9	249.7	1.4×10^{11}
Heater	HTR-1	28.9	7.0×10^{10}
	HTR-2	28.8	1.2×10^{11}
FP gas pressure gauge 1	CP(A1-B1)	12.1	4.7×10^{10}
	CS1(C1-E1)	11.9	3.5×10^{10}
	CC2(D1-E1)	11.9	5.2×10^{10}
FP gas pressure gauge 2	CP(A2-B2)	11.5	5.6×10^{10}
	CS1(C2-E2)	11.1	3.1×10^{10}
	CC2(D2-E2)	11.1	4.5×10^{10}
SPGD	1-1	-	1.4×10^{14}
	1-2	-	1.4×10^{14}

6.2 FP ガス圧力計動作確認

6.2.1 FP ガス圧力計動作確認の目的

FP ガス圧力計は 4.1.2.1 項に示す装置である。FP ガス圧力計内部の金属ベローズは可動部であり、He ガスによって系統が加圧されるとベローズが可動し、移動量に応じた電圧を出力する。キャプセルに装荷して FP ガス圧力計を照射する場合、FP ガス圧力計は地面に対して垂直な姿勢で試験を行うが、保管は水平に倒した状態となる。そのため、可動部の応答が正常に出力されるか懸念があり、動作確認を実施した。

6.2.2 FP ガス圧力計動作確認の手法

Fig. 6.1 に示す試験体系にて動作確認を行い、計測機器は 4.2 項に示したものを使用した。FP ガス圧力計の 1 次コイルへ電流を印加し、He ガスで加圧することによって出力される 2 次コイル電圧を測定する。ガス供給システムを使用し、2 基の FP ガス圧力計に対して He ガスを 0 MPa から 4.5 MPa まで 0.5 MPa 毎にデータを取得した。その際、各圧力計の出力電圧は信号処理器を用いて計測した（Table 6.2 参照）。また、入力 He ガス圧力と計測した出力電圧より、製作時との試験結果を比較した。

Table 6.2 Test conditions for operation check test system

Temperature	Gas	Input pressure (MPa [gauge])
R.T.	He	0.0＋0.1
		0.5±0.1
		1.0±0.1
		1.5±0.1
		2.0±0.1
		2.5±0.1
		3.0±0.1
		3.5±0.1
		4.0±0.1
		4.5±0.1

6.2.2.1 配管・配線等の準備

本試験で使用する機材及びその数量が準備されていることを確認した。また、各機材等に有害な異常（傷、汚れ等）が無いことを確認した。

① 照射キャプセル　：1 台
② 計測盤　：1 台
　LVDT 信号処理機
　SPD 信号処理機
　データ収集・記録・表示用 PC
　ガス圧力制御盤
③ 電源ケーブル　：1 本
④ He ガスボンベ　：1 本
⑤ He ガス用レギュレータ　：1 個
⑥ He ガスライン用フレキ管　：1 本
⑦ FP ガス圧力計用フレキ管　：1 本
⑧ FP ガス圧力計信号ケーブル（1 次側）　：1 本
⑨ FP ガス圧力計信号ケーブル（2 次側：E1,E2）　：2 本

⑩ データ収集用 PC　　：1 台
⑪ データロガー　　：1 台

6.2.2.2　配管・配線接続①（装置側）

計測システムについて Fig. 6.2 に、計測盤について Fig. 6.3 に示す。下記の手順を参照し、各ケーブル及び配管を計測盤等に接続した。

① 電源ケーブル（AC100V）を装置へ接続する。
② He ガスボンベにレギュレータを接続する。
③ レギュレータの流量調整弁に He ガスライン用フレキシブルチューブを接続する。
④ He ガスライン用フレキ管をガス制御盤へ接続する。
⑤ FP ガス圧力計用フレキ管をガス制御盤へ接続する。
⑥ FP ガス圧力計信号ケーブル（1 次側)を LVDT 信号処理器に接続する。
⑦ FP ガス圧力計信号ケーブル（2 次側：E1）を LVDT 信号処理器に接続する。
⑧ FP ガス圧力計信号ケーブル（2 次側：E2）を LVDT 信号処理器に接続する。

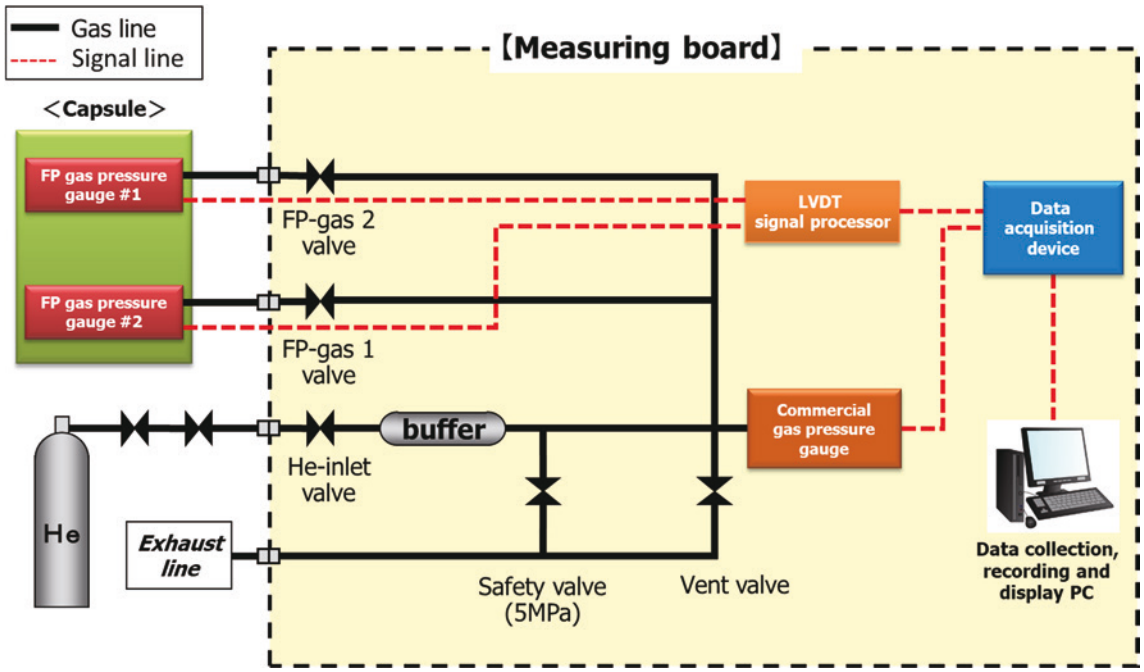


Fig. 6.2 Measurement system of irradiation capsule (Gas system)

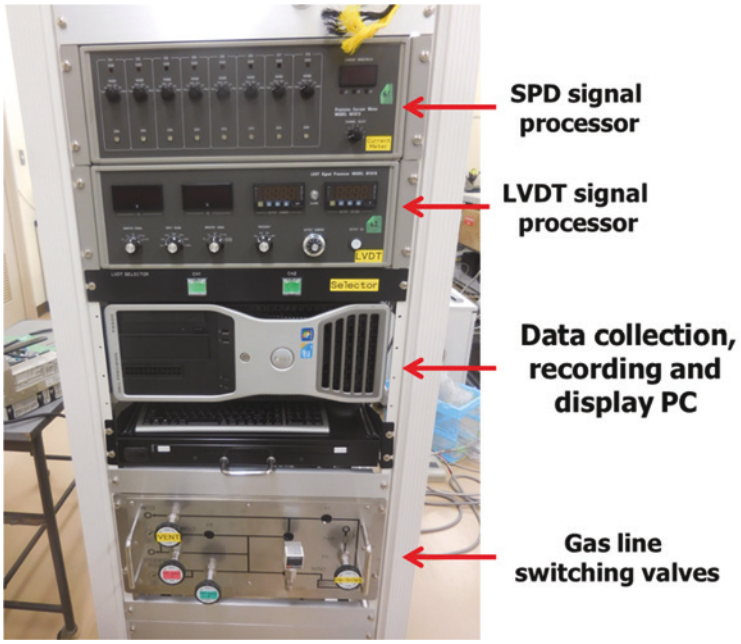


Fig. 6.3 Measuring board

6.2.2.3　配管・配線接続②（キャプセル側）

下記の手順に従い、各ケーブル及び配管を計測盤等に接続した。

① FP ガス圧力計用フレキ管をキャプセルへ接続する。

② FP ガス圧力計信号ケーブル（1 次側）を計測盤側へ接続する。

6.2.2.4　LVDT 信号処理器

下記の手順に従い、LVDT 信号処理器の出力設定を行った。

① 電源ケーブルをコンセントに接続する。

② AC100V 電源盤を【ON】にする。

③ LVDT 信号処理器 POWER スイッチを【ON】にする。

④ 周波数を【1 kHz】に設定する。

⑤ E1 電圧モニタ表示切替スイッチを【E1A】に設定する。

⑥ E2 電圧モニタ表示切替スイッチを【E2A】に設定する。

⑦ 利得切替スイッチを【20 mV】に設定する。

⑧ 出力 ON ボタンを【ON】にする。

⑨ 電流値設定ダイアルにて電流値を【100 mA】に設定する。

6.2.2.5　データロガーの起動、設定

【起動から設定まで】

① ソフト起動後は各種設定がデフォルトの状態となっている。[ファイル]>[波形データ読み出し]から過去の試験データを読み込むことで、過去のデータと収集条件等を呼び出すことがで

きる。

② 入力する CH を選択する（Fig. 6.4 参照）。

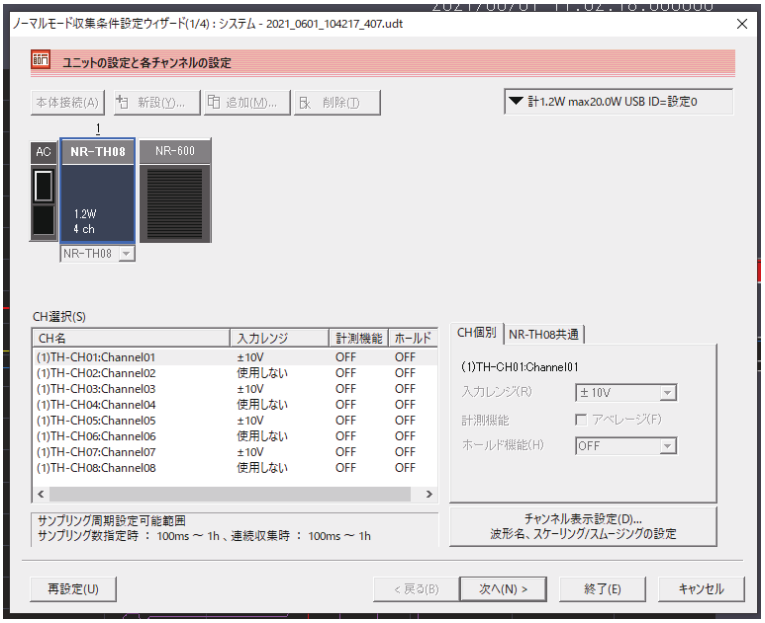


Fig. 6.4 Input channel selection

③ サンプリング周期、保存周期を設定する。ここで、「PC 自動保存」に☑が入っていることを確認する（Fig. 6.5 参照）。

Fig. 6.5 Setting sampling period and data save period

【表示設定について】

① 表示する波形を選択する（Fig. 6.6 参照）。

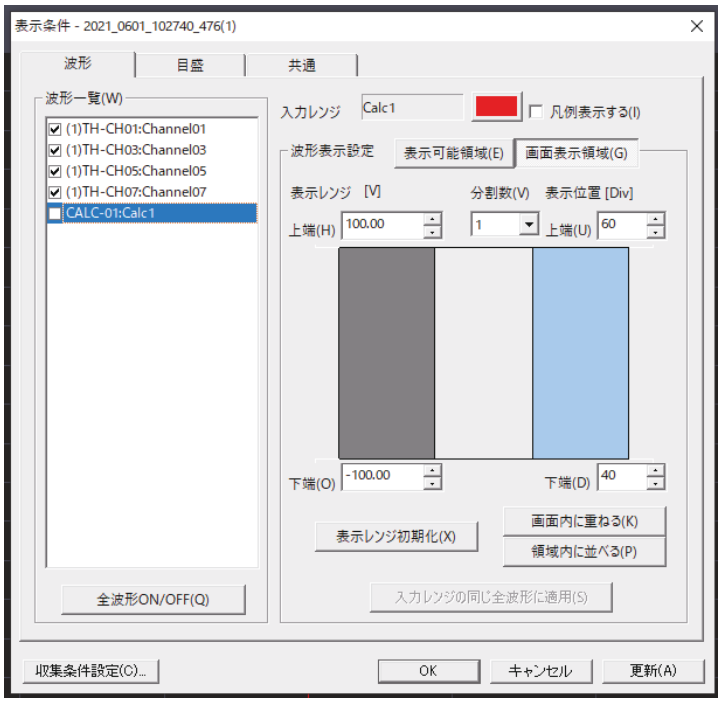


Fig. 6.6 Selection of waveform to display

② 波形の表示範囲を設定する（Fig. 6.7 参照）。

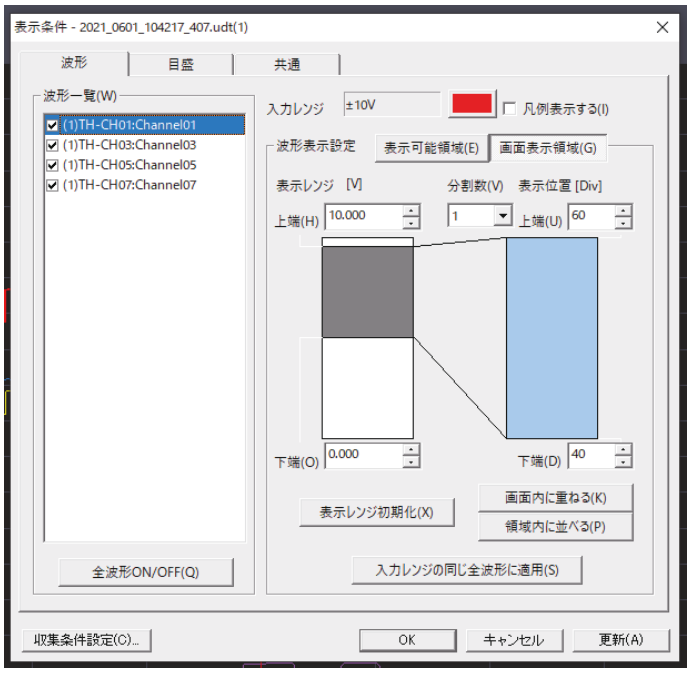


Fig. 6.7 Setting display range of waveform

【自動保存設定について】

① [収集]>[自動保存設定]からデータの自動保存フォルダ、保存形式を選択する（Fig. 6.8 参照）。

Fig. 6.8 Auto save setting

【演算波形設定について】

① [表示]>[演算波形設定]を選択する。

② 係数を設定することで選択した CH の入力値に対する演算結果波形を表示することができる。演算は四則演算しかできないが、Calc2 = A*(Calc1) + B*Y のように演算を組み合わせることで、FP ガス圧力計の E1, E2 からガス圧力に換算した波形を表示することもできる（Fig. 6.9 参照）。

Fig. 6.9 Setting calculation waveform

【データの保存について】

① [Excel 転送/CSV]>[CSV 保存]からファイルを保存する（Fig. 6.10 参照）。

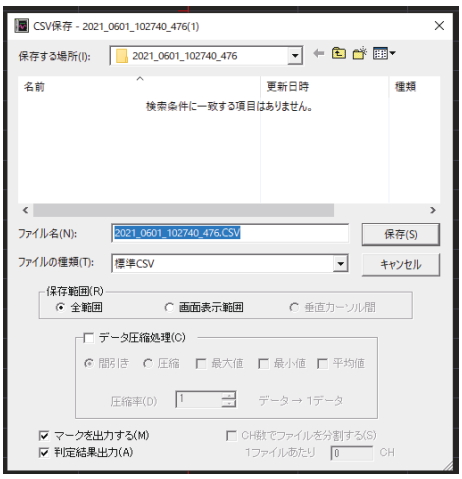


Fig. 6.10 Data storage

6.2.2.6 ガス圧力制御盤の動作確認

下記の手順に従い、FP ガス圧力計ラインへ He ガスを送り、バルブの動作及び配管に漏れ等の問題がないことを確認した。操作するバルブについて Fig. 6.11 に示す。

① He ボンベの元栓を【開】にする。
② Vent が【閉】であることを確認し、減圧弁を【開】にする。
③ He-Inlet を【開】にする。
④ FP-GAS 1 を【開】にする。
⑤ FP-GAS 2 を【開】にする。
⑥ ガス圧力制御盤内で He ガスの漏れが発生していないか、聴音確認を行う。
⑦ 減圧弁を【閉】にする。
⑧ Vent を【開】にする。
⑨ デジタル圧力計が【0 MPa】になるまで減圧する。
⑩ Vent を【閉】にする。

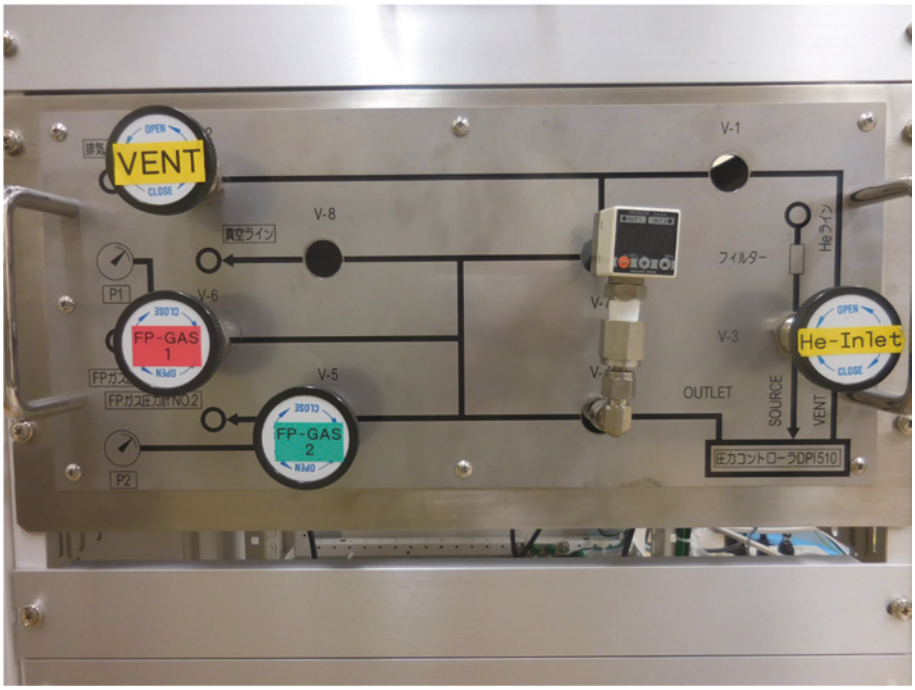


Fig. 6.11 Gas line switching valves

6.2.2.7　動作確認試験

下記の手順に従い、FP ガス圧力計の動作確認試験を行った。

① 【0 MPa】時の LVDT 出力 E1、E2 を記録する。
② デジタル圧力計を確認しながら減圧弁を開け、【0.5 MPa】間隔で LVDT 出力 E1、E2 を記録し、【4.5 MPa】まで昇圧する。
③ 減圧弁を【閉】にする。
④ デジタル圧力計を確認しながら Vent を開け、【0.5 MPa】ずつ降圧し、降圧時の LVDT 出力 E1、E2 を記録する。
⑤ 【0 MPa】時の LVDT 出力 E1、E2 を記録する。
⑥ Vent を【閉】にする

6.2.2.8　停止作業

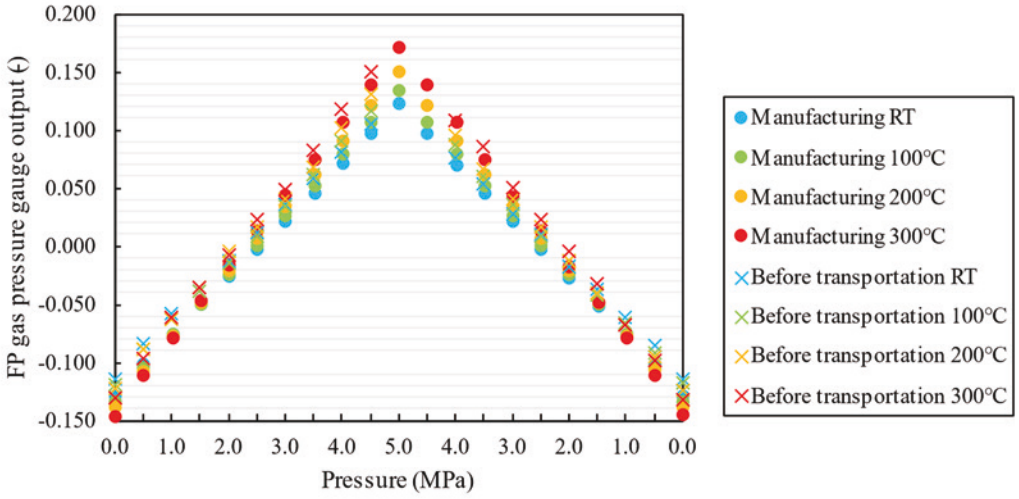
下記の手順に従い、機器の停止を行う。

① He ボンベ元栓を【閉】にする
② 減圧弁及び Vent を【開】にする
③ 減圧弁の 2 次圧力が【0 MPa】になるまで保持する。
④ 減圧弁を【閉】にする。
⑤ ガス圧力制御盤のバルブ全てを【閉】にする。
⑥ LVDT 信号処理機の電流値設定ダイアルを【0 mA】にする。
⑦ 出力 ON ボタンを【OFF】にする。

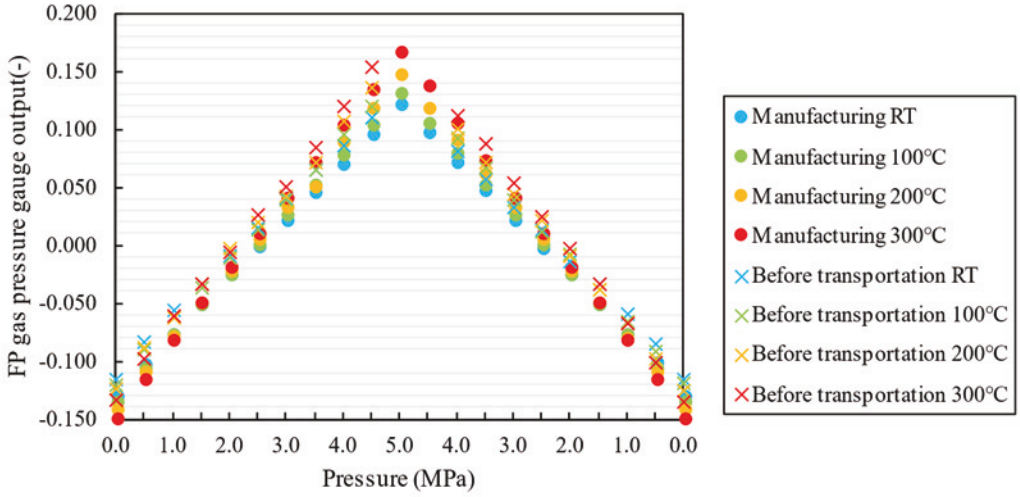
⑧　分電盤の AC100 V 電源を切断する。
⑨　各種ケーブルを取り外す。

6.2.3　FP ガス圧力計動作確認の結果

FP ガス圧力計の動作確認試験の結果を Fig. 6.12 に示す。FP ガス圧力計へ入力した He ガス圧力に対して、圧力計の出力電圧を比較すると、2 基の FP ガス圧力計は製造時と同等の出力電圧を得た。これらのことから、FP ガス圧力計は計測線の伸長等の改造による影響や、拠点間の輸送による衝撃等の影響を受けず、MARIA 炉における照射試験に対して問題が無いことを確認した。



(a) FP-gas pressure gauge No.1



(b) FP-gas pressure gauge No.2

Fig. 6.12 Operation check test results for FP-gas pressure gauge

6.2.4　FP ガス圧力計に対する併用型温度制御装置の電磁ノイズの重畳現象と対処法

FP ガス圧力計の動作確認では、室温のみならずキャプセル内部の温度を上昇させた際のデータも取得する必要がある。そこで、4.2.1 項にて述べた併用型温度制御装置を使用して、キャプセル内部の温度を 50 ℃、100 ℃に制御する 2 パターンのデータを取得した。その際、併用型温度制御装置が発する電磁ノイズが FP ガス圧力計の出力信号に重畳する現象が確認された。本項では、ノイズ重畳現象の対処法について述べる。

Fig. 6.13 及び Fig. 6.14 に併用型温度制御装置を起動する前後の FP ガス圧力計の出力電圧を示す。

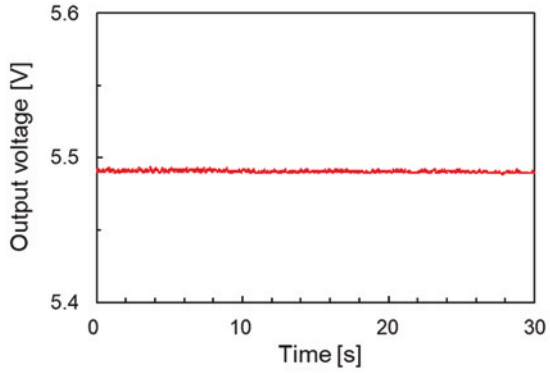


Fig. 6.13 Output voltage of FP gas pressure gauge

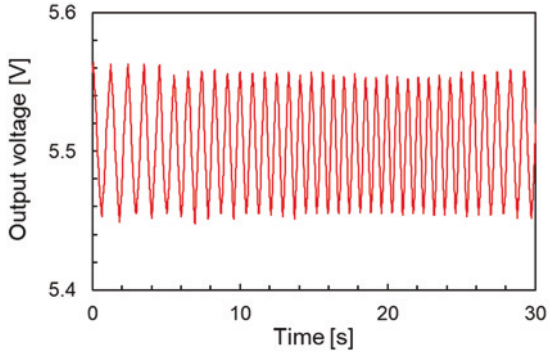


Fig. 6.14 Noise from combined temperature controllers

併用型温度制御装置を起動することにより、FP ガス圧力計の出力電圧にノイズが重畳していることが分かる。この電磁ノイズは周波数 50 Hz であったことから、電源由来のノイズであると考えられる。

併用型温度制御装置からの電磁ノイズの重畳への対策として、以下の 2 つの対策を講じた。

（1）FP ガス圧力計の第 1 種アースへの接続

（2）キャプセル計測線のアルミホイルによる電磁シールド

対策（2）の電磁シールドの様子を Fig. 6.15 に示す。

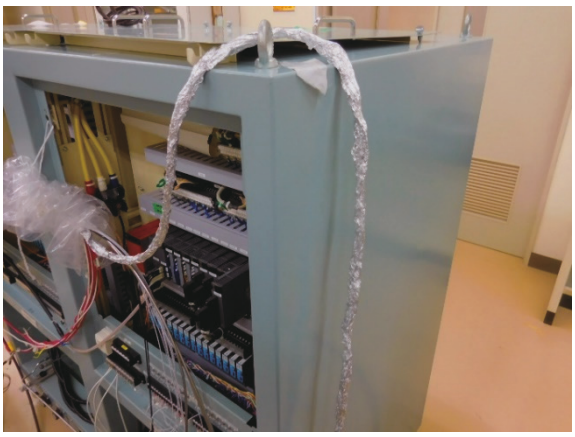


Fig. 6.15 Electromagnetic shielding of measurement lines

これらの対策を講じた後、併用型温度制御装置を起動して FP ガス圧力計の出力電圧を計測した。その結果を Fig. 6.16 に示す。

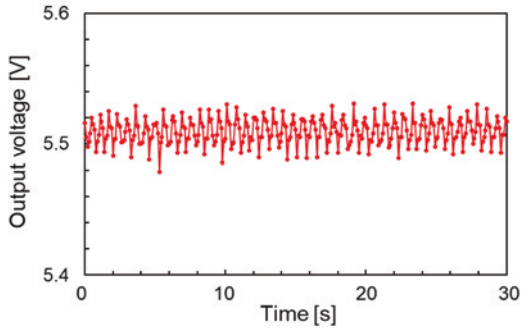


Fig. 6.16 Output voltage after electromagnetic noise suppression measures

Fig. 6.14 が電磁ノイズ対策前の出力電圧、Fig. 6.16 が対策後の出力電圧である。Fig. 6.14 と比較して Fig. 6.16 では出力電圧の変動幅を約 1/5 に低減された。以上のことから、電磁ノイズ重畳対策（1）及び（2）は有効である。

上記の対策（1）及び（2）のほかに、FP ガス圧力計に巻かれているヒータの巻き方を工夫することで電磁ノイズを低減することが可能である。通常巻きコイルは通電すると磁場が形成されるのに対し、無誘導巻きコイルは通電すると磁場の干渉によって相殺され、磁束密度が見かけ上はゼロになる。そのため、ヒータを無誘導巻きにすることで、FP ガス圧力計に重畳する電磁ノイズを低減することができた。

注意事項として、今回の FP ガス圧力計の動作確認試験を実施した大洗研究所照射試験開発棟とは異なる環境においては、FP ガス圧力計に重畳する電磁ノイズは異なる上にアースの状態も異なる。そのため、本項で示した電磁ノイズ対策で同様の効果が得られるとは限らないため、MARIA 炉にて試験を行う際は特性の確認を再度行う必要がある。

6.3　併用型温度制御装置動作確認

6.3.1　併用型温度制御装置動作確認の目的

併用型温度制御装置は試料の周りに設けたガス層の圧力（真空度）を調整する真空温度制御方式と、電気ヒータの出力を調整するヒータ温度制御方式の 2 つでキャプセルの試料温度を制御する。真空温度制御方式の特徴は、構造が簡単で広い温度制御範囲がとれることである。また、ヒータ温度制御方式の特徴は、応答が速く温度の制御精度が高いことである。MARIA 炉における選定キャプセルの照射試験において本装置は、この 2 つの制御方式を併用することにより、試料温度を高精度に制御することができる。正常に動作することを確認するために本装置を用いた選定キャプセルの昇温試験を実施した。

6.3.2　併用型温度制御装置動作確認の手法

①　併用型温度制御装置と構成機器の接続

併用型温度制御装置は、温度制御装置（現場盤）、オペレータステーション（Operator Station：以下「OPS」という。）及びサーバーで構成され、本装置は、温度制御キャプセル、電源設備、ガス供給設備及び真空排気設備と接続して運転する。装置全体の構成図を以下 Fig. 6.17 に示す。

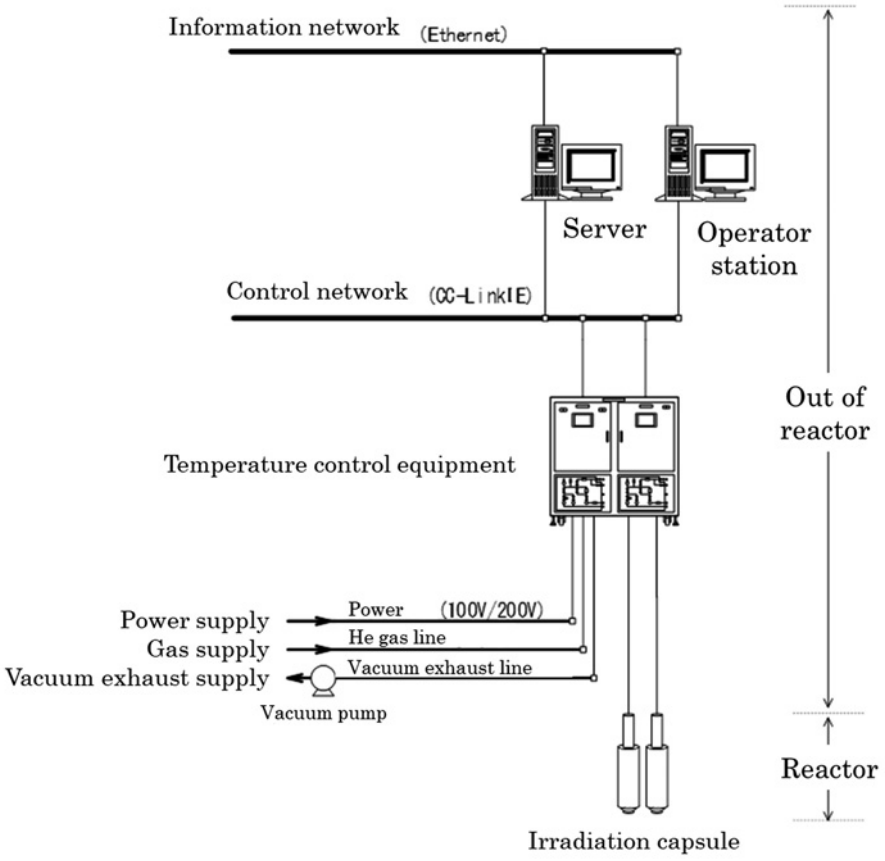


Fig. 6.17 Combination temperature control device and components

② 電源設備との接続

併用型温度制御装置における計装及びヒータ電源入力はそれぞれ 100 V/50 Hz 及び 200 V/50 Hz である。そのため MARIA における各種入力電源（230 V/50 Hz 及び 400 V/50 Hz）は、JAEA が支給するトランスにより変圧して併用型温度制御装置に供給する。計装電源及びヒータ電源トランスの入出力電圧の仕様及び併用型温度制御装置の 100V/200V の接続コネクター/端子台を以下に示す。

・計装電源　　：INPUT　1P2W　230V　⇒　OUTPUT　1P2W　100V
・ヒータ電源　：INPUT　3P4W　400V　⇒　OUTPUT　3P3W　200V

JAEA より支給したトランスの仕様・結線図を以下 Fig. 6.18 及び Fig. 6.19 に示す。

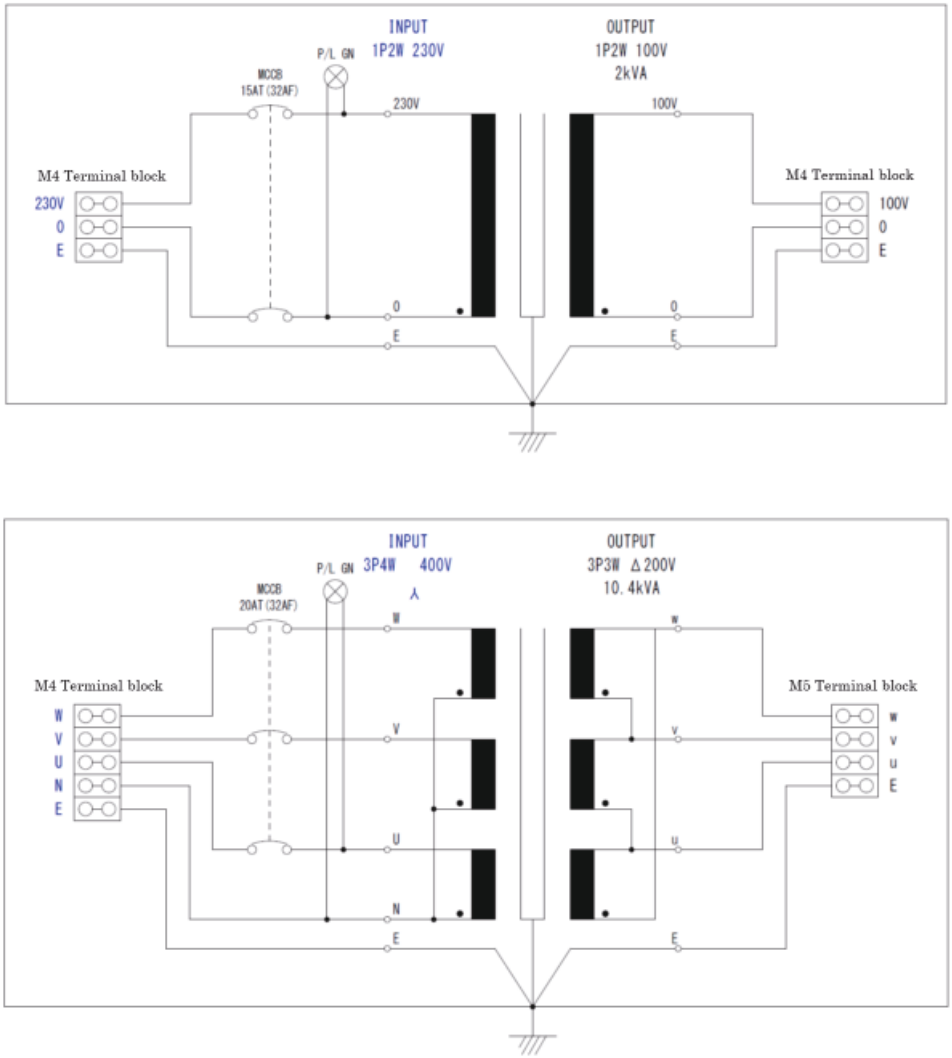


Fig. 6.18 Transformer wiring diagram

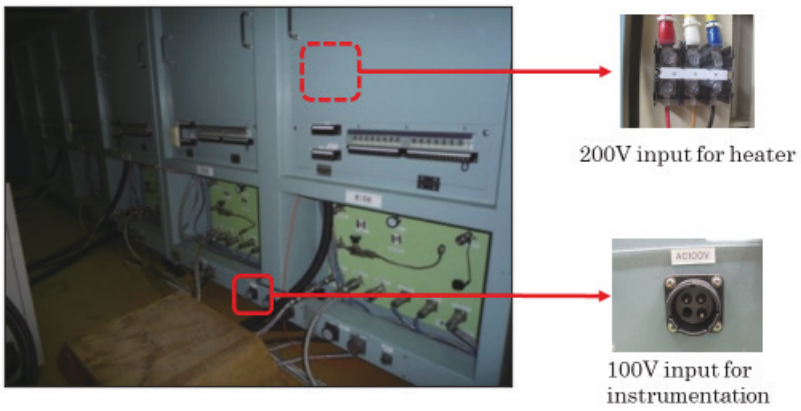


Fig. 6.19 Connection point

③　ガス供給設備、真空排気設備及びキャプセル真空制御管の接続

併用型温度制御装置に接続するキャプセル真空制御管は外径 5 mm×内径 4 mm であり S ジョイント（外径 1/4 インチから外径 5 mm の変換接手）により接続を行う。また、真空排気管及び He 供給管は、3P-V 及び 2P-V のクイックコネクターオス型（日東工器株式会社製）に 3S-V 及び 2S-V のクイックコネクタメス型（日東工器株式会社製）により接続する。NCBJ 側で 3S-V 及び 2S-V のクイックコネクタメス型（日東工器株式会社製）が用意できない場合は、併用型温度制御装置側の 3P-V 及び 2P-V のクイックコネクターオス型（日東工器株式会社製）を取外して配管同士を Rc3/8 ネジ及び Rc1/4 ネジで接続する。

真空制御管、真空排気管及び He 供給管の接続図を以下 Fig. 6.20 に示す。

Fig. 6.20 Vacuum line and He gas line

④　温度測定用熱電対及びヒータ線の接続

温度制御キャプセルと併用型温度制御装置は、温度測定用熱電対（最大本数 15 対）及びヒータ線（最大本数 5 対）の接続が可能である。温度測定用の熱電対の種類は、K 型（旧 CA）及び W/Re 型、E 型（旧 CRC）及びニクロシル・ニシル熱電対が計測可能である。5 系統の内、1 系統あたりのヒータ電流は、概ね 12A～13A 以下（最大値 15 A）で使用する。

併用型温度制御装置と温度測定用熱電対及びヒータ線の接続を以下 Fig. 6.21 に示す。

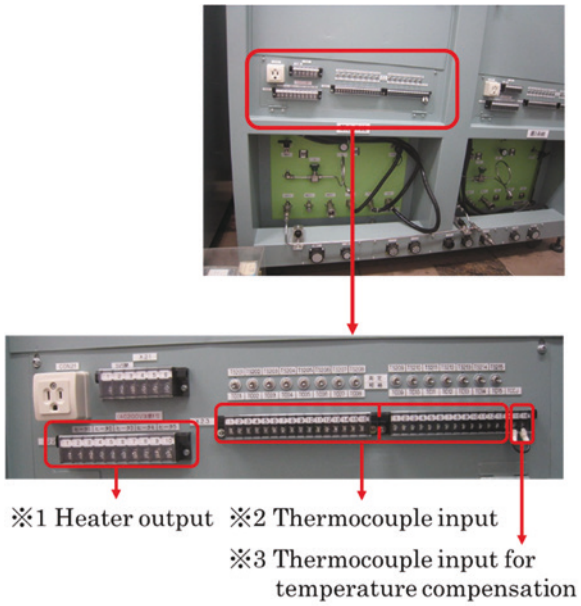


Fig. 6.21 Terminals and Connections

※1 ヒータ出力端子台は、No.1・No.2 にヒータ 1 系統、No.3・No.4 にヒータ 2 系統、No.5・No.6 にヒータ 3 系統、No.7・No.8 にヒータ 4 系統、No.9・No.10 にヒータ 5 系統がそれぞれ対応する。

※2 熱電対入力端子台（左側と右側の 2 つに分離）は左側の No.1 から No.16 に TC01 から TC08 が対応し、右側の No.1 から No.14 に TC09 から TC15 が対応する（奇数番号は＋極、偶数番号は－極）。なお、端子台上部のスナップスイッチにより測定（計測する）、短絡（測定しない）を選択する。

※3 温度補償用熱電対は「TCCJ（No.15、No.16）」端子より入力し、温度補償を必要としない場合は「TCCJ（No.15、No.16）」端子を短絡する。

⑤　繋ぎ込み後の確認検査

1)　キャプセル真空制御管のリーク試験

真空制御管接続後、OPS の He ガス圧力指示値が約 400 kPa における 30 分間の平均漏えい率が 100 Pa/min 以下であることを確認した。

2)　真空ラインの真空到達度試験

真空ライン接続後、OPS の圧力指示値が 20 Pa 以下であることを確認した。

3) ヒータ線の健全性確認

ヒータ線接続後、OPS にてヒータ電流値を徐々に上げて（1 A 以下とすること）ヒータ電流が流れることを確認した。

4) 熱電対の健全性及び極性確認

熱電対接続後、OPS にてヒータ電流値を徐々に上げて（1 A 以下とすること）各熱電対の温度指示を確認した。

⑥ He ガス供給設備について

1) 真空温度キャプセル 1 本当たりの最大流量は 20mL/min であり、JMTR 1 サイクル（30 日）の消費量は実績から約 0.85 m^3 である。運転準備に使用するガスも含めて 1 本当たり 1 m^3 あれば十分である。

2) JMTR の真空温度制御装置に供給される He ガスは 400 kPa である。JAEA の He ガス供給設備を以下に示す。

- He ガスボンベ 25 本（容量 7m^3/ 1 本、15MPa）組のカードルが 3 基
- ボンベの元圧を確認するための圧力計（0～25MPa）
- 元圧を 0.6MPa に減圧するための減圧弁
- 減圧後の圧力を確認するための圧力計（0～2MPa）
- アキュームレータ（200ℓ、設計圧力 1.96MPa）、安全弁（作動圧力 1.96MPa）
- 0.6MPa の圧力を 0.04MPa に減圧するための減圧弁
- 減圧後の圧力を確認するための圧力計（0～1MPa）
- He ヘッダー（40A sch20s）
- 手動弁（多数）
- 装置とヘッダーを接続するためのフレキ（両端に日東工器株式会社製の SP カプラを使用）
- 配管

⑦ 真空排気設備について

真空温度キャプセルの温度制御中におけるガスギャップ圧力（真空制御管圧力）は 0.5～50 kPa の範囲である。真空排気の能力は、キャプセル 1 本当たり He ガス 10 mL/min を流した状態で、キャプセルのガスギャップ圧力に比べて十分に低ければ問題は無い。JMTR の真空排気設備を以下に示す。

- ロータリーポンプ（容量 950L/min）2 台
- ピラニ真空計、真空度計
- 電源 3 φ 200 V
- 真空ポンプ出入口弁、大気導入弁
- オイルミストラップ
- 真空ヘッダー（内径 53.5 mm、長さ 26 m）

・装置とヘッダーを接続するためのフレキ（両端に日東工器株式会社製の SP カプラを使用）
・He ガス 400 cc/min（真空温度キャプセル 20 本分）を流した状態で、50 Pa 以下に保てる。
・配管

6.3.3 併用型温度制御装置動作確認の結果

① キャプセル真空制御管のリーク試験結果は、OPS の He ガス圧力指示値 400 kPa における 30 分間の平均漏えい率が 100 Pa/min 以下であることを確認した。具体的には 400.0 kPa に加圧し、30 分経過後の値は 390.5 kPa であった。
② 真空ラインの圧力指示値が 20 Pa に到達したことを確認した（基準は 20 Pa 以下）。
③ 室温から 300 ℃までの昇温試験を行い、2 系統のヒータ線及び熱電対 9 対の健全性を確認した。

7. まとめ

JMTR 照射キャプセルを用いた海外炉での照射試験、照射技術の伝承及び人材育成の実現のため、MARIA 炉での照射試験に向けた検討を行った。

1 次元熱計算コード GENGTC を用いた熱的評価を行った結果、選定キャプセルが MARIA 炉の炉内環境において想定していた照射試験を実施できることを確認した。

MARIA 炉への装荷及び炉外装置の接続のため、選定キャプセルに姿勢保持用のスペーサの取付け、計測線及び保護管の伸長といった改造が必要であることが分かった。そこで、2 種類のスペーサをキャプセルの下部及び上部に溶接し、さらに計測線の伸長及び従来よりも長いフレキシブルチューブ型の保護管の溶接を行った。溶接等の後に行った検査の結果、溶接部を含むキャプセル全体に異常が無いことを確認した。また、選定キャプセルの照射試料である FP ガス圧力計の動作確認試験の結果、製造時と変わらない性能を示したため、上記の改造による当該圧力計への影響が無いことを確認した。これらの結果、MARIA への装荷に向けた選定キャプセルの改造は問題なく完了した。

8. 今後の計画

今回改造したキャプセルは、JAEA の関係部署及び関係省庁との調整の後、炉外装置とともに NCBJ へ輸送を行っている。輸送後は、Fig. 8.1 に示す照射試験を MARIA 炉にて行う予定である。輸送した選定キャプセル及び炉外装置を用いて Fig. 4.7 に示した試験体系を MARIA 炉にて組み立て、複数の He ガス圧力及び温度変化を FP ガス圧力計に入力し、MARIA 炉内環境下における FP ガス圧力計の出力電圧特性を温度毎に取得する。また、製造時と MARIA 炉内環境で得

た出力電圧特性を比較し、放射線が FP ガス圧力計の出力電圧特性に与える影響を温度毎に評価する予定である。

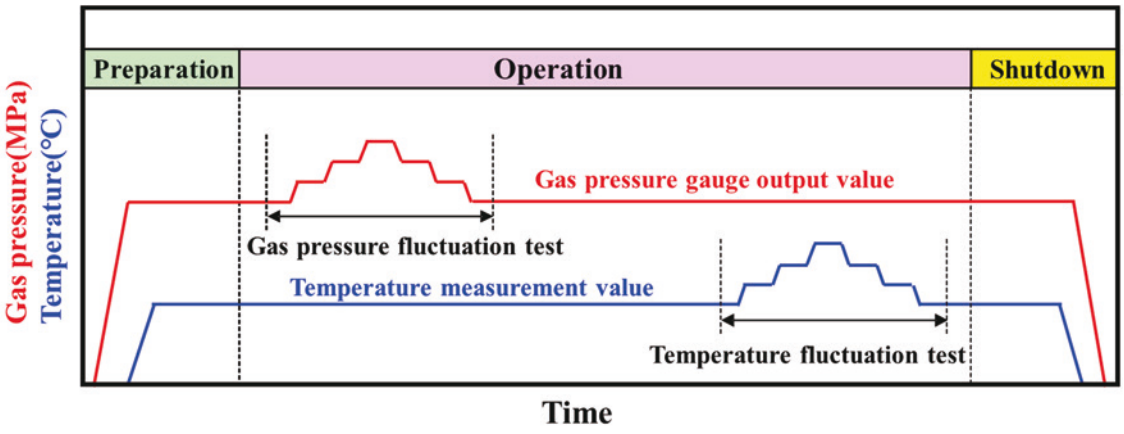


Fig. 8.1 Plan for irradiation test using MARIA

謝辞

本件のキャプセルの改造を実施するにあたり、原子力科学研究所 工務技術部 工作技術課の石川和義主査並びに齋藤隆技術指導員（株式会社千代田テクノル）には、有意義なご助言を頂きました。また、本報告書をまとめるにあたり、材料試験炉部 土谷邦彦部長に有意義なご助言を頂きました。以上の方々に、深甚なる謝意を表します。

参考文献

[1] 材料試験炉部, 「JMTR 運転管理活動報告（2010 年度）」, JAEA-Review 2011-054 , (2011), 30p.

[2] 日本原子力研究開発機構,「施設中長期計画」, https://www.jaea.go.jp/about_JAEA/facilities_plan/ (参照：2022 年 12 月 1 日).

[3] National Centre for Nuclear Research, “The MARIA research reactor”, https://www.ncbj.gov.pl/en/o-nas/maria-research-reactor (参照：2022 年 12 月 1 日).

[4] 日本原子力研究開発機構,私信, (2011).

[5] 日本原子力研究開発機構,私信, (2011).

[6] 照射試験炉センター, 「JMTR 照射試験・照射後試験に関する技術レビュー」, JAEA-Review 2017-016 , (2017), 170p.

[7] 野村 靖, 染谷 博之, 伊藤 治彦, 「照射キャプセル熱計算コード GENGTC の機能整備と 2 次元計算への改良」, JAERI-M 92-163, (1992), 66p.

This is a blank page.