

海外炉を用いた中性子照射試験 (2)

—キャプセル温度制御システムを用いた照射試験の実施—

(共同研究)

Irradiation Test Using Foreign Reactor (2)

— Study of Irradiation Test with Capsule Temperature Control System —

(Joint Research)

大森 崇純 冬島 拓実 佐谷戸 夏紀 斎藤 長月

高部 湧吾 遠藤 泰一 井上 修一 Grzegorz Wojtania

Marek Migdal 武内 伴照 竹本 紀之

Takazumi OMORI, Takumi FUYUSHIMA, Natsuki SAYATO, Nagatsuki SAITO

Yugo TAKABE, Yasuichi ENDO, Shuichi INOUE, Grzegorz WOJTANIA

Marek MIGDAL, Tomoaki TAKEUCHI and Noriyuki TAKEMOTO

大洗原子力工学研究所

環境技術開発部

Department of Waste Management and Decommissioning Technology Development

Oarai Nuclear Engineering Institute

June 2026

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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
原子力科学研究所 プロモーション・オフィス 科学技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4
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
Library, Institutional Repository and INIS Section, Promotion Office,
Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

海外炉を用いた中性子照射試験 (2)
—キャプセル温度制御システムを用いた照射試験の実施—
(共同研究)

日本原子力研究開発機構 大洗原子力工学研究所 環境技術開発部

大森 崇純、冬島 拓実、佐谷戸 夏紀、斎藤 長月、高部 湧吾*1、遠藤 泰一+、
井上 修一、Grzegorz Wojtania*2、Marek Migdal*2、武内 伴照、竹本 紀之

(2026 年 4 月 10 日受理)

材料研究、RI 製造などの中性子照射研究の中核を担っていた材料試験炉 (Japan Materials Testing Reactor : JMTR) の廃止が決定された。それに伴い、国内で照射試験及び照射試験炉の運転技術や照射技術の継承を行うことが困難な状況となっている。こうした課題に対処するため、海外の照射炉を用いて JMTR の照射機能の一部を代替する JMTR 代替照射を開始することとなった。

その足掛かりとして「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 30 MW) を中性子照射場として選定し、JMTR の有する照射技術の一つである温度制御システムを有する併用型温度制御装置を MARIA 炉に導入し、照射試験を実施した。

本照射試験の結果、150 日間を超える照射期間を経ても今回導入した併用型温度制御装置及び JMTR 型照射試験システムは問題なく稼働し、キャプセル内の熱電対温度や照射時における LVDT 及び SPGD からの出力をオンラインで計測しながら試験を行うことができることを確認した。さらに、JMTR の照射試験技術である照射キャプセルの一定温度制御において、材料照射試験におけるニーズの高い 300°C で実施し、温度変化の大きくなる原子炉出力上昇時には±6.3°C の範囲、出力降下時には±26.0°C の範囲で制御することができた。

これらの結果から、JMTR の照射試験技術である照射温度制御を伴った照射試験が MARIA 炉においても実施可能であり、代替照射場として提供しうることが確認できた。

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。

大洗原子力工学研究所：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002 番地

+ 原子力科学研究所 研究基盤技術部

*1 大洗原子力工学研究所 環境技術開発部 (2026 年 1 月迄在籍)

*2 ポーランド国立原子力研究センター

Irradiation Test Using Foreign Reactor (2)
- Study of Irradiation Test with Capsule Temperature Control System – (Joint Research)

Takazumi OMORI, Takumi FUYUSHIMA, Natsuki SAYATO, Nagatsuki SAITO,
Yugo TAKABE*¹, Yasuichi ENDO⁺, Shuichi INOUE, Grzegorz WOJTANIA*²,
Marek MIGDAL*² Tomoaki TAKEUCHI and Noriyuki TAKEMOTO

Department of
Waste Management and Decommissioning Technology Development
Oarai Nuclear Engineering Institute
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received April 10, 2026)

Japan Materials Testing Reactor (JMTR), which served as the core facility for neutron irradiation research including materials research and radioisotope production, has been decommissioned. As a result, it has become difficult to continue conducting irradiation tests domestically, as well as to transfer the operational expertise and irradiation technologies associated with test reactors, to address these challenges, it was decided to initiate JMTR alternative irradiation, in which foreign irradiation reactors are utilized to partially substitute for JMTR's irradiation capabilities. As a first step, 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 MARIA reactor (30 MW) owned by the National Centre for Nuclear Research (NCBJ) was selected as the neutron irradiation facility, a temperature control system, which is one of JMTR's irradiation technologies, was introduced into the MARIA reactor, and irradiation tests were conducted.

The results of this irradiation test confirmed that the combination of the newly introduced temperature control device and the JMTR irradiation test system operates without issues even after an irradiation period exceeding 150 days, it was also demonstrated that the tests could be conducted while continuously measuring the thermocouple temperature inside the capsule during irradiation, as well as the output of the LVDT and SPGD.

Furthermore, regarding the constant temperature control of the irradiation capsule at 300°C constant temperature control test, which is highly demanded in materials irradiation testing, was conducted, during reactor power increases, when temperature fluctuations become significant, temperature control was maintained within $\pm 6.3^\circ\text{C}$, while during power decreases, it was controlled within $\pm 26.0^\circ\text{C}$. These results indicate that irradiation testing with irradiation temperature control system developed by JMTR, can also be performed in the MARIA reactor, it was confirmed that it can be offered as an alternative irradiation field.

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.

+ Department of Research Infrastructure Technology Development, Nuclear Science Research Institute

* 1 Formerly Department of Waste Management and Decommissioning Technology Development, Oarai Nuclear Engineering Institute, until January 2026.

* 2 National Centre for Nuclear Research (NCBJ)

目 次

1. はじめに	1
2. JMTR 代替照射試験	1
3. 照射キャプセルの概要	4
3.1 熱電対及びヒータの選定	8
3.2 照射試料	9
4. 温度制御装置の概要	10
4.1 キャプセルの温度変化因子	11
5. 照射試験結果及び考察	12
5.1 第1回照射試験（2024.7.30-2024.8.9）の概要	14
5.1.1 原子炉出力上昇時における 200°C 一定温度制御試験（2024.8.2）	16
5.1.2 原子炉定格出力運転中における 200°C 一定温度制御試験（2024.8.3）	19
5.1.3 原子炉定格出力運転中における 200°C 一定温度制御試験（2024.8.4-2024.8.5）	21
5.1.4 原子炉定格出力運転中におけるガンマ発熱率確認試験（2024.8.6-2024.8.7）	23
5.1.5 原子炉定格出力運転中におけるガンマ発熱率確認試験（2024.8.7-2024.8.8）	27
5.1.6 原子炉定格出力運転中におけるガンマ発熱率確認試験（2024.8.8-2024.8.9）	31
5.2 第2回照射試験（2025.3.17-2025.3.21）の概要	35
5.2.1 原子炉定格出力運転中におけるガンマ発熱率確認試験（2025.3.18）	37
5.2.2 原子炉出力降下時における 300°C 一定温度制御試験（2025.3.18）	41
5.2.3 原子炉出力上昇時における 300°C 一定温度制御試験（2025.3.21）	44
6. 結論	46
謝辞	47
参考文献	47

Contents

1. Introduction	1
2. Alternative Irradiation Test for JMTR	1
3. Overview of Irradiation Capsules	4
3.1 Selecting Thermocouples and Heaters	8
3.2 Irradiated Sample	9
4. Overview of Temperature Control System	10
4.1 Factors Influencing Capsule Temperature Changes	11
5. Irradiation Test Results and Analysis	12
5.1 Summary of the First Irradiation Test (2024.7.30-2024.8.9)	14
5.1.1 Constant-temperature Control Test at 200°C During Reactor Power Increase (2024.8.2)	16
5.1.2 Constant-temperature Control Test at 200°C During Reactor Rated Power Operation (2024.8.3)	19
5.1.3 Constant-temperature Control Test at 200°C During Reactor Rated Power Operation (2024.8.4-2024.8.5)	21
5.1.4 Reactor Rated Output Operation Gamma Heat Generation Rate Verification Test (2024.8.6-2024.8.7)	23
5.1.5 Reactor Rated Output Operation Gamma Heat Generation Rate Verification Test (2024.8.7-2024.8.8)	27
5.1.6 Reactor Rated Output Operation Gamma Heat Generation Rate Verification Test (2024.8.8-2024.8.9)	31
5.2 Summary of the Second Irradiation Test (2025.3.17-2025.3.21)	35
5.2.1 Reactor Rated Output Operation Gamma Heat Generation Rate Verification Test (2025.3.18)	37
5.2.2 Constant-temperature Control Test at 300°C During Reactor Power Reduction (2025.3.18)	41
5.2.3 Constant-temperature Control Test at 300°C During Reactor Power Increase (2025.3.21)	44
6. Conclusion	46
Acknowledgments	47
References	47

1. はじめに

日本原子力研究開発機構（JAEA）大洗原子力工学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（ $E_n > 1.0 \text{ MeV}$ ）、熱中性子束（ $E_n < 0.683 \text{ eV}$ ）ともに最大 $4 \times 10^{18} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 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日に原子力規制委員会より廃止措置計画が認可された。このため、同年4月から廃止措置を進めているところである。

JMTRの廃止決定により、我が国は発電用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次世代革新炉に係る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にある。さらに、これらの基盤を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、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。）が所有するMARIA炉での照射試験を実施することを検討し、JMTRで運用されていた温度制御試験システムを輸出し³⁾、2024年5月に建屋内への据え付けが完了した。

また、MARIA炉での照射試験を目的として改造されたキャプセルを2024年7月30日に炉内装荷し、2024年8月より照射試験を開始し、2025年10月に照射試験を完了した。

本照射試験の結果、良好な一定温度制御が可能であることが確認され、JMTRの照射試験技術を用いることでMARIA炉においても有効な照射場を提供しうることが確認できた。

本報告書は、JMTRの照射技術である併用型温度制御装置による原子炉運転期間中における一定温度制御結果及びMARIA炉のJ-IX孔におけるガンマ線分布特性についてまとめたものである。

2. JMTR代替照射試験

JMTRの代替照射を実施するにあたり、様々な海外炉を検討したが、NCBJ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」を締結済みであったことから最も適する海外炉であると考え、代替照射を実施する海外炉として、MARIA炉を選定した。

MARIA 炉は、現在ポーランドで唯一運転されている研究用原子炉であり、1974 年に運転を開始して以来、放射性同位元素の製造、燃料や材料の照射試験、中性子ラジオグラフィーなど、幅広い研究分野で活用されている⁴⁾。MARIA 炉は、軽水を一次冷却材としたプール型炉で、高速中性子束 ($E_n > 0.5 \text{ MeV}$) が最大 $1.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、熱中性子束 ($E_n < 0.625 \text{ eV}$) が最大 $3.5 \times 10^{18} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の照射能力を有しており、原子炉定格熱出力は、30 MW である。燃料チャンネルはベリリウムブロックを含む格子に設置され、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、そして 6 箇所 of 水平中性子ビームチャンネルを備え、多様な照射試験が実施されている⁴⁾。MARIA 炉の概要図を Fig. 2.1 に示す。また、MARIA 炉の炉心図を Fig. 2.2 に示す。

本代替照射試験の目的は、高度な材料照射試験を実現する一定温度制御システム、各種のその場計測に応用可能な差動トランス (LVDT) を用いたガス圧力計、温度制御のさらなる高精度化に向けた自己出力型ガンマ線検出器 (SPGD) といった様々な JMTR の照射技術を備えた計測付キャプセルを、海外炉である MARIA 炉において長期間照射し、JMTR と同等の中性子照射場を提供しうるか評価することである。

本稿では、材料照射試験において最も重要なキャプセル温度制御の精度を左右する一定温度制御試験及びヒータを起動せず、キャプセル内に He を大気圧程度まで導入した状態 (以下「ヘリウムダンプ状態」という。) で、温度データを取得する試験 (以下「ガンマ発熱率確認試験」という。) の結果について報告する。

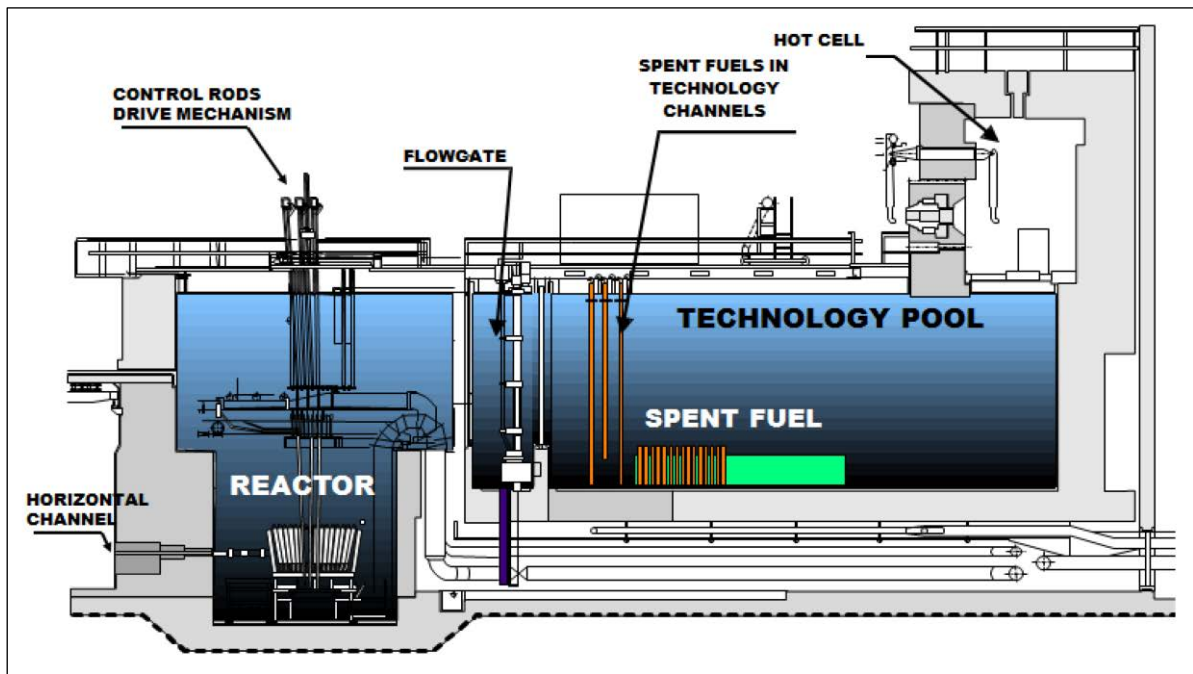


Fig. 2.1 MARIA 炉の概要図⁵⁾

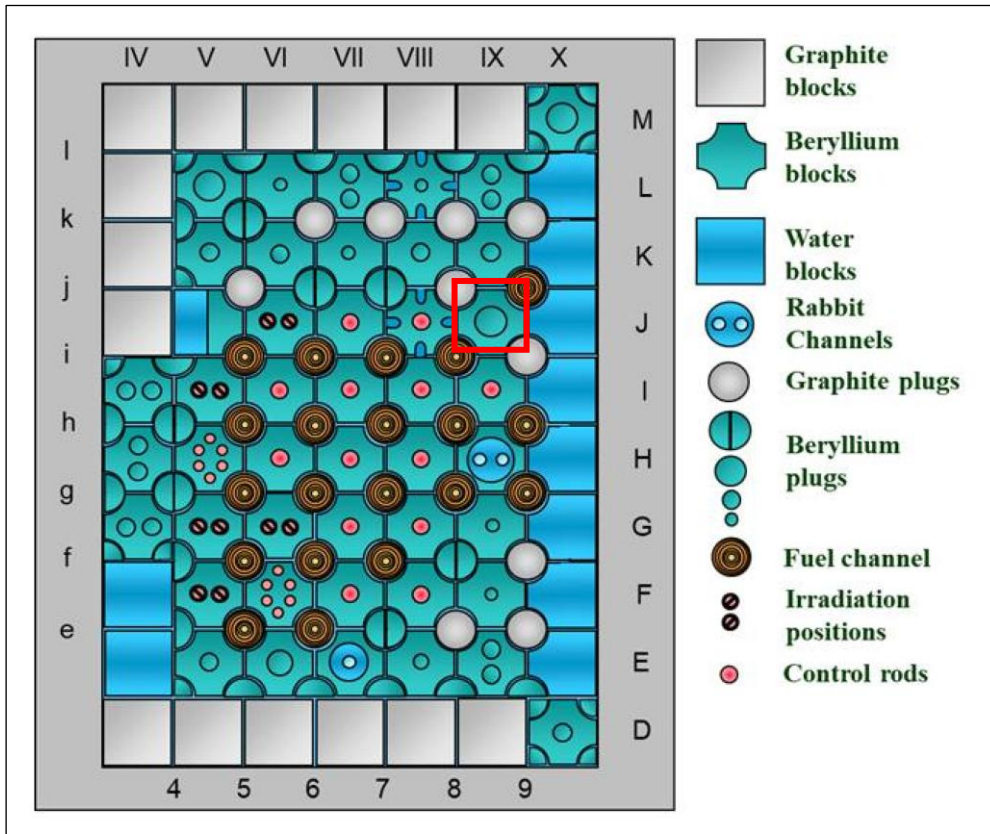


Fig. 2.2 MARIA 炉の炉心図⁵⁾ (赤枠部：本照射試験における照射孔 J-IX)

3. 照射キャプセルの概要

本照射試験を行う照射キャプセルは、「計測付キャプセル」と呼ばれるものであり、外筒、内筒、保護管、ヒータ、熱電対及び真空制御管等によって構成される。キャプセルは熱伝導率を任意で変化させることができるよう内筒と外筒の僅かな隙間にガス層を設けており、ガス層内において、He ガスの充填や真空引きを行うことで、キャプセル全体の温度調整を行う。また、試料外側に設置されたヒータによって、より高精度な温度調整を行う。キャプセル設計時においては、これらの仕様や配置を詳細に検討し、目標温度を達成できるよう検討され、製作されたキャプセルは後述する温度制御装置によって、ヒータ出力やガス層の真空度（熱伝導率）を調整して温度制御が行われる。温度制御は、キャプセル内に装荷されている熱電対から、温度制御を実施する熱電対（制御熱電対）を選択して、その制御熱電対が目標温度となるよう制御される。照射試料としては LVDT 式の FP ガス圧力計（以下「ガス圧力計」という。）及び SPGD が装荷されている。

キャプセルの装荷位置を Fig. 3.1 に、照射中のキャプセル状況を Fig. 3.2 に、炉心から取り出したキャプセルを Fig. 3.3 に示す。また、照射キャプセル内の試料、熱電対及びヒータの配置を、Fig. 3.4 に示す。JMTR における照射を想定した設計値及び MARIA 炉における照射試験条件の比較を Table 3.1 に示す。

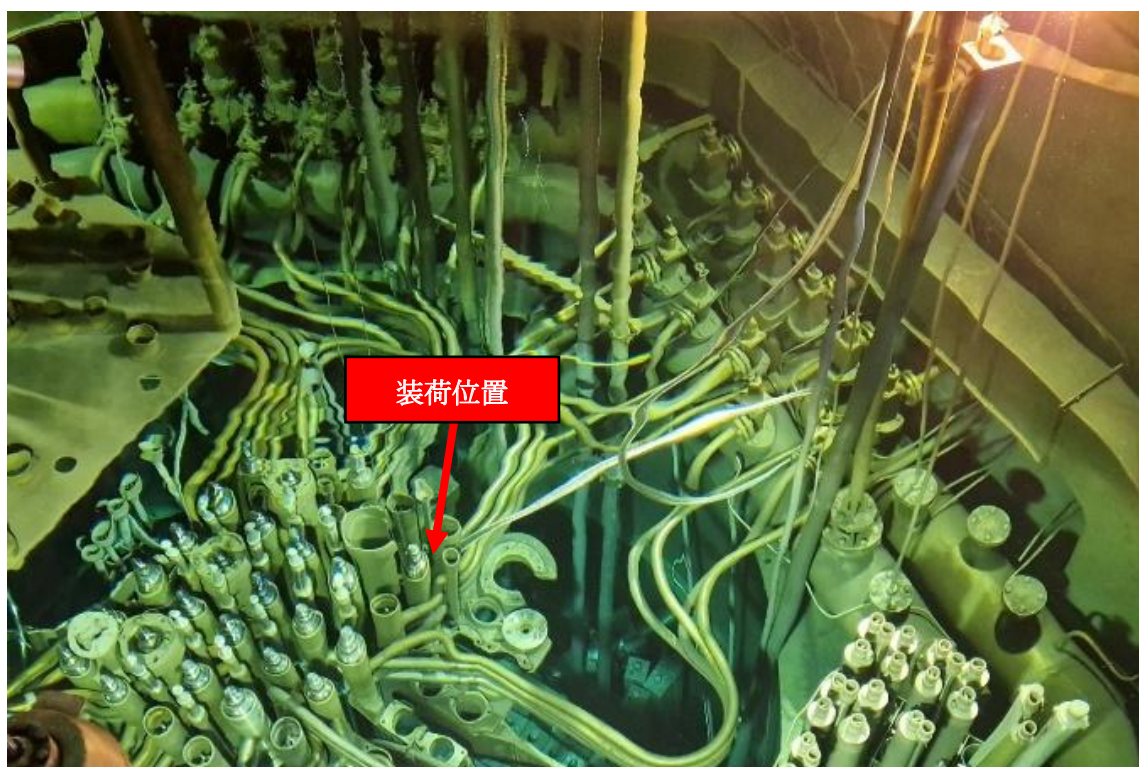


Fig. 3.1 MARIA 炉におけるキャプセルの装荷状況

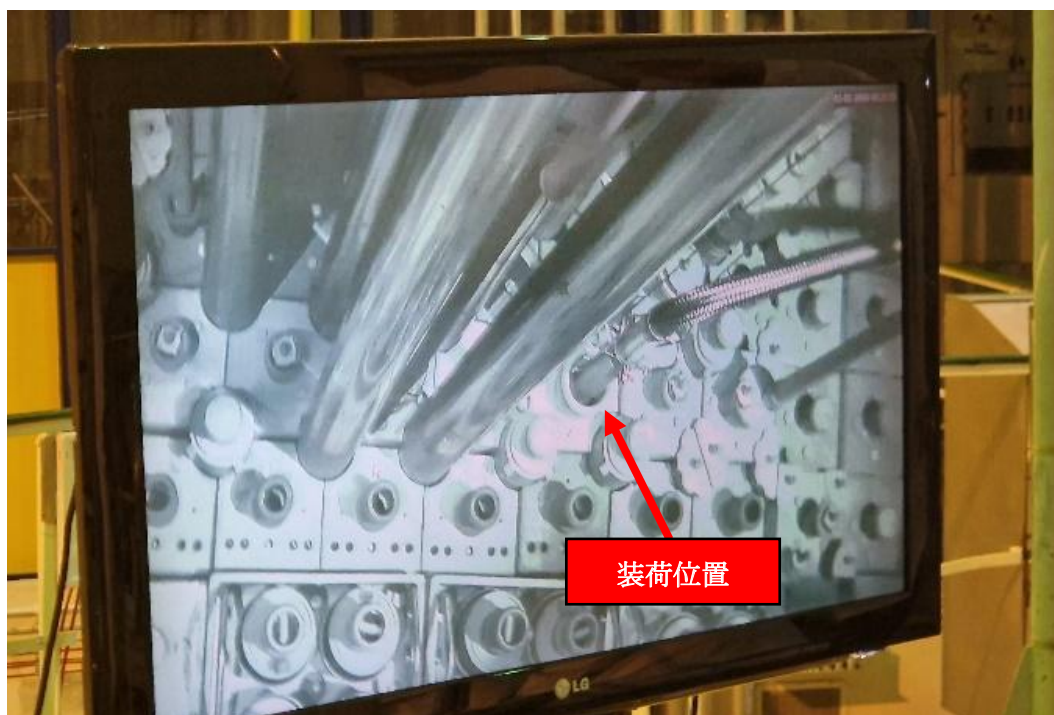


Fig. 3.2 照射中のキャプセル装荷状況

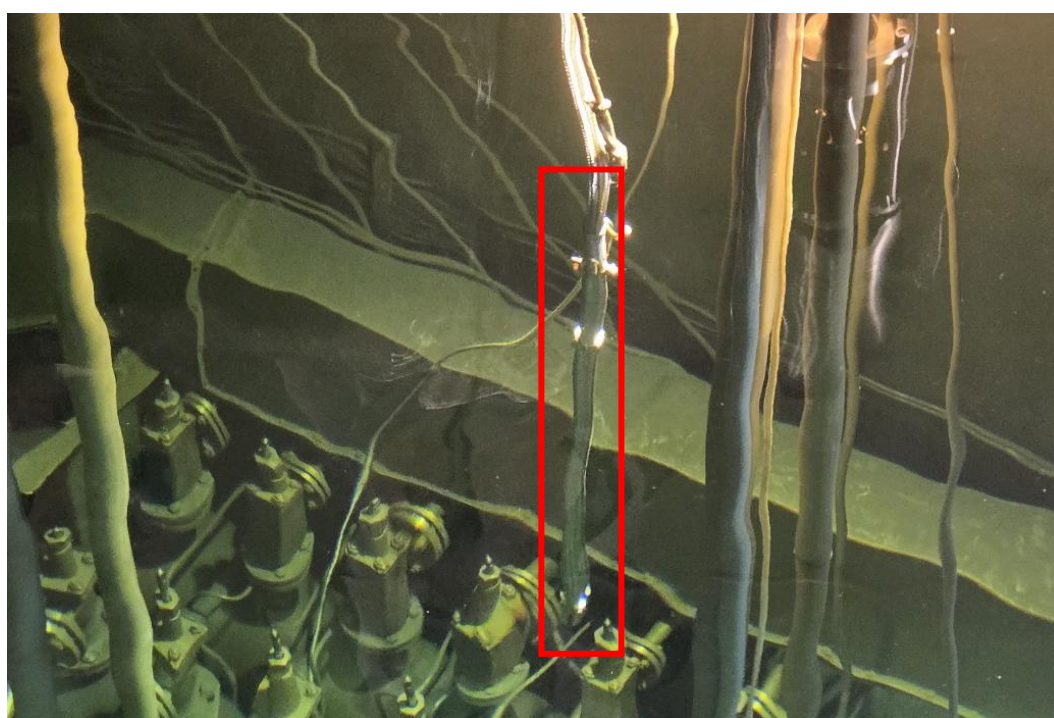


Fig. 3.3 炉心から取り出したキャプセル (赤棒部)

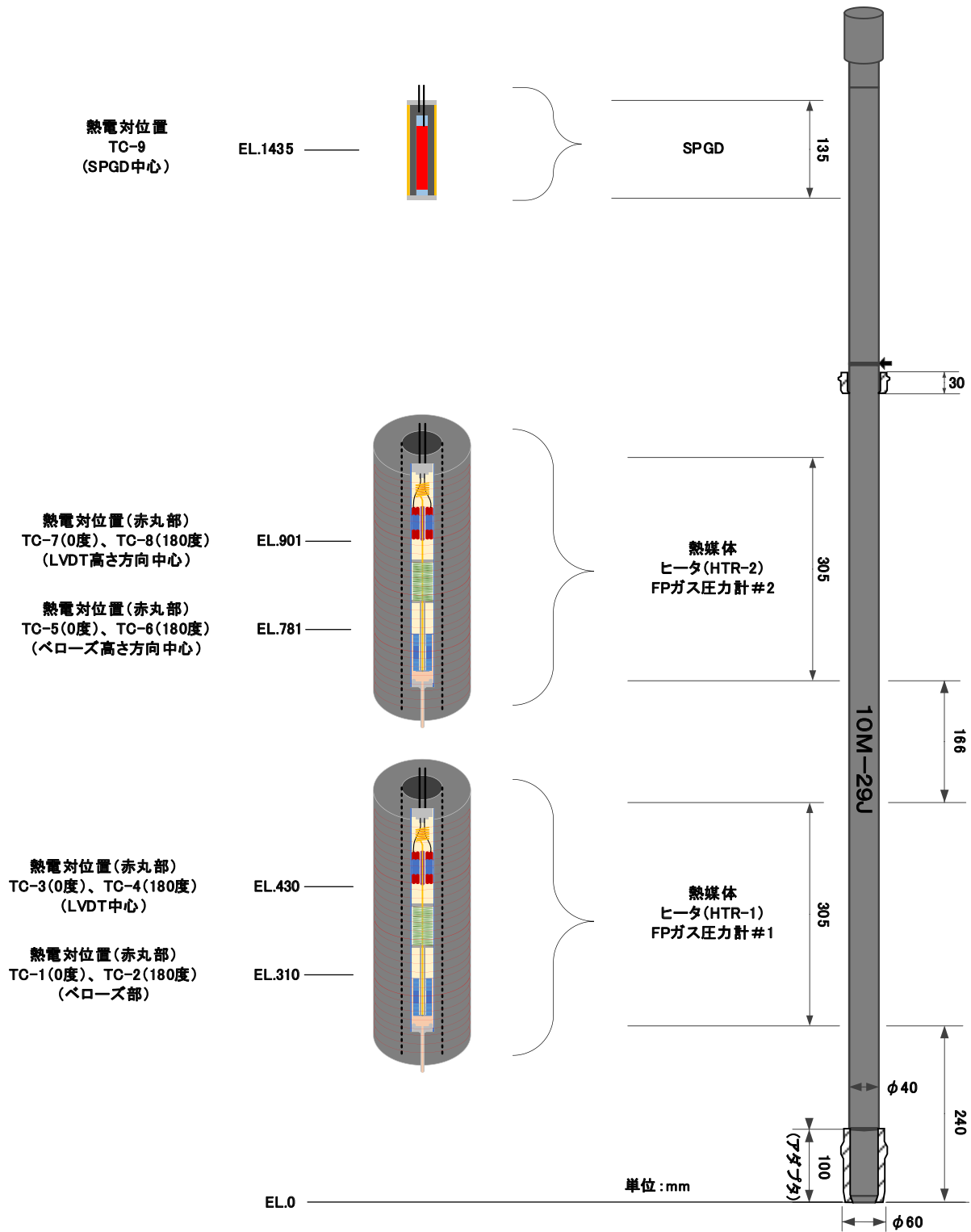


Fig. 3.4 キャプセル内における熱電対及びヒータの配置図

Table 3.1 JMTR 設計値及び MARIA 炉照射条件の比較

		JMTR (設計値)	MARIA 炉 (評価条件・評価値)
照射条件	照射孔	反射体 3 層目付近 (P-11 孔)	J-IX 孔
	冷却条件	軽水、温度 49°C、 外表面熱伝達率 2.33 W/m ² /K	軽水、温度 45°C (評価条件) 外表面熱伝達率 2.40 W/m ² /K (評価条件)
	中性子束密度 (照射孔)	熱中性子束 ($E_n < 0.683$ eV) $3.6 \times 10^{17} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	熱中性子束 ($E_n < 0.625$ eV) ガス圧計 #1 $4.4 \times 10^{17} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (平均値)
			ガス圧計 #2 $3.5 \times 10^{17} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (平均値)
		高速中性子束 ($E_n > 1.0$ MeV) $0.1 \times 10^{17} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	高速中性子束 ($E_n > 0.5$ MeV) ガス圧計 #1 $1.4 \times 10^{17} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (平均値) ガス圧計 #2 $9.2 \times 10^{16} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (平均値)
ガンマ加熱率	1.0 W/g 以下 (ピーク値)	0.35~0.9 W/g (評価値)	
	照射量	高速中性子 : $1.3 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ ($E_n > 1.0$ MeV)	高速中性子 $1.18 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ ($E_n > 0.5$ MeV)

3.1 熱電対及びヒータの選定

照射試験で用いた熱電対は、使用環境温度が室温～400°C 以下であるため、照射試験には K 型熱電対を使用し、9 本(TC-1～TC-9)装荷して照射試料の温度を計測した。本キャプセルの熱電対は、キャプセル下端（以下「EL.」という。）から 310mm のガス圧力計 #1 のベローズ高さ中心における熱媒体部、EL.430 mm のガス圧力計 #1 の LVDT の高さ中心における熱媒体部、EL.781 mm のガス圧力計 #2 のベローズの高さ中心における熱媒体部、EL.901 mm のガス圧力計 #2 の LVDT の高さ中心における熱媒体部に、それぞれ 0 度と 180 度に装荷されている。また、EL.1435 mm の SPGD 部においては、高さ中心位置に装荷されている。

ヒータについては、シースヒータ 2 本(HTR-1, HTR-2)をガス圧力計の周りに装荷されている熱媒体部に巻き付けるような形で装荷される。また、計測機器として、ガス圧力計及び SPGD を装荷している。熱電対の仕様を Table 3.2 に、ヒータの仕様を Table 3.3 に示す。

Table 3.2 熱電対 (TC-1～TC-9) の仕様 (下線は温度制御を行う制御熱電対)

型式	クロメル／アルメル C/A Thermocouple (K 型 JIS K-type)					
シース外径	Φ1.6mm					
材質	SUS316					
絶縁材材質	MgO					
装荷本数	9 本					
装荷位置	本体部	ガス圧力計#1	EL.310mm	ベローズ 高さ中心	0 度	TC-1
					180 度	TC-2
		ガス圧力計#2	EL.430mm	LVDT 高さ中心	0 度	<u>TC-3</u>
					180 度	TC-4
	保護管部	SPGD	EL.781mm	ベローズ 高さ中心	0 度	TC-5
					180 度	TC-6
		SPGD	EL.901mm	LVDT 高さ中心	0 度	<u>TC-7</u>
					180 度	TC-8
SPGD	EL.1435mm	高さ中心			TC-9	

Table 3.3 ヒータ (HTR-1 及び HTR-2) の仕様

型式	低温引出線付きシースヒータ		
シース外径	Φ2.0mm		
材質	インコネル 600 相当		
全体電気抵抗	約 27.6Ω		
発熱部長	3900mm		
引き出し部長	3500mm		
装荷本数	2 本		
装荷位置	HTR-1	ガス圧力計熱媒体部 #1	EL.240mm- EL.545mm (巻き付け幅 305mm) 75mm ピッチ
	HTR-2	ガス圧力計熱媒体部 #2	EL.711mm- EL.1016mm (巻き付け幅 305mm) 75mm ピッチ

3.2 照射試料

ガス圧力計は、キャプセル内のガス圧力のリアルタイム計測を目的とした機器であり、LVDT と金属製ベローズによって構成されている。圧力によって、LVDT 内におけるコアの微小な位置変化により生じた誘導電位差を測定し、あらかじめ校正された値と比較することで、照射中にリアルタイムでガス圧を得ることが可能となる⁶⁾。ガス圧力計は、アルミニウム製の熱媒体内に格納され、ガス圧力計 2 個のそれぞれの熱媒体にヒータが巻き付けられている。制御熱電対は、ガス圧力計 #1 については TC-3 を選択し、ガス圧力計 #2 については TC-7 を制御熱電対として選択して温度制御を実施した。

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るもので、SPGD 内にガンマ線が入射することで、微小な電流が発生する。ガンマ線と発生する微小電流に相関があることから、ガンマ線量率を求めることができる⁶⁾。SPGD については、ヒータ設置部から離れたキャプセル保護管部に設置されているため、温度制御は行わず、TC-9 を用いて温度測定のみ実施した。

なお、本キャプセルは元々 JMTR で照射試験を実施するために製作されたため、既存のキャプセルのままでは、MARIA 炉の照射孔に装荷できない形状であった。そのため、キャプセル上部の EL.1100 mm の位置及び下端部の EL.0 mm の位置にアダプタを溶接し、MARIA 炉の照射孔に適合させる改造を実施した。本改造によって、既存のキャプセル形状から下端部が約 100 mm 直上に移動している³⁾。

4. 温度制御装置の概要

本温度制御装置は、キャプセル内全体の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、局所的な電気ヒータの出力を調整するヒータ温度制御方式によって照射キャプセルの試料温度を制御する併用型の方式を採用している。真空温度制御方式の特長は、構造が簡単で広い温度制御範囲がとれること、ヒータ温度制御方式の特長は、応答が速く温度の制御精度が高いことである。したがって、この2つの制御方式を併用することにより、試料温度を広い範囲で高精度に制御することを可能としている⁷⁾。

この特長により、原子炉の運転状態に関わらず試料を一定温度付近に保つことができ、原子炉材料の照射損傷機構の解明等を目的とした照射試験において、温度変動の影響を極力排除した照射試験データの取得に役立てることができる。

MARIA 炉に設置したキャプセル温度制御装置を Fig. 4.1 に示す。



Fig. 4.1 MARIA 炉に設置したキャプセル温度制御装置（現地の設置状況）

4.1 キャプセルの温度変化因子

キャプセルの温度に寄与する主な因子としては、原子炉内のガンマ線強度、キャプセルに装荷されている電気ヒータ出力及びキャプセル内のガス層の真空度が挙げられる。

原子炉内のガンマ線は、キャプセル構造材や照射試料に吸収される際にエネルギーが熱に変換され、キャプセルの温度を上昇させる。ガンマ線強度は原子炉出力に依存するため、キャプセルの設計段階である程度推測することは可能であるが、出力は運転状態により変わらうため、照射試験における照射試料の高精度な温度均一化のためには電気ヒータ出力と真空度の制御が重要となる。

キャプセル内の電気ヒータは、熱媒体に接触しており、良好な熱伝導によってキャプセル内の局所的な温度を上昇させる。発熱量はヒータに流す電流値で制御できるため応答性は良いが、キャプセル全体でみた発熱量としては大きくないため、キャプセル温度を微調整するために用いられる。キャプセル内のガス層については、気体のうち熱伝導率の高いヘリウム (He) を採用することで、ガス圧が高い際にはキャプセル内の発熱分を効率よく原子炉冷却水へ放熱する。一方、ガス層を減圧して真空に近づければ熱伝導率を低下させることができ、キャプセル内の熱が外部へ逃げにくくなるため、温度が上昇する。しかしながら、一般に気体の熱伝導率は固体に比べて低いうえ、キャプセル内の真空制御管は、構造上の理由から比較的細径のものを使用する必要があるため、電気ヒータに比べて応答性が悪い。一方、ヒータの設置された熱媒体とは異なり、ガス層はキャプセル全体に分布しているため、キャプセル全体の温度制御が可能となる。

したがって、両方の特徴を補うことで、温度制御性が向上する。MARIA 炉に設置した併用型キャプセル温度制御の概要を Fig. 4.2 に示す。

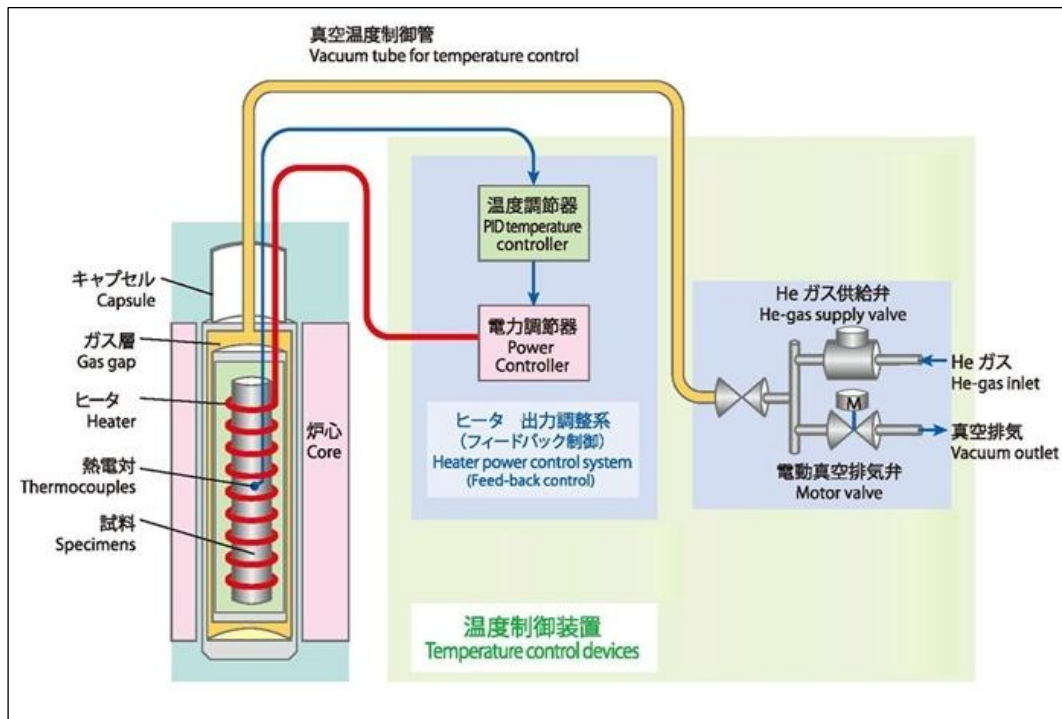


Fig. 4.2 MARIA 炉に設置したキャプセルの温度制御の概要

5. 照射試験結果及び考察

本章では、2024年8月2日から開始し、2025年10月23日に完了した照射試験の一定温度制御結果及びガンマ発熱率評価結果について記載する。筆者を含む当部職員は2024年7月30日～2024年8月9日（以下「第1回照射試験」という。）、2025年3月17日～2025年3月22日（以下「第2回照射試験」という。）に現地に出張し、各種照射データを取得した。

本照射試験において、原子炉の出力変化に伴ってガンマ発熱の変動による温度変化が大きくなる、原子炉の出力上昇時及び原子炉出力降下時における一定温度制御試験を実施した。その結果、原子炉出力上昇時の200°C一定制御試験時には、±5.0°C以内、原子炉出力上昇時における300°C一定制御試験時には、±6.3°C以内で制御できることを確認した。また、原子炉出力降下時の300°C一定制御試験では、±26.0°C以内の温度制御性を確認することができた。

さらに、ガンマ発熱率確認試験を実施し、その温度データから GENGTC-K の評価コード^{8) 9)}を用いて、熱電対が装荷されている、EL.310mm～EL.1435mm の範囲におけるガンマ発熱率を評価した。その結果、本照射試験におけるガンマ発熱率は、最大値が TC-2 の EL.310mm の位置で 0.90W/g、最小値が TC-7 の EL.901mm の位置で 0.35W/g であることを確認した。GENGTC-K の評価コードにおける、LVDT 評価モデルを Fig. 5.1 及びベローズの評価モデルを Fig. 5.2 に示す。

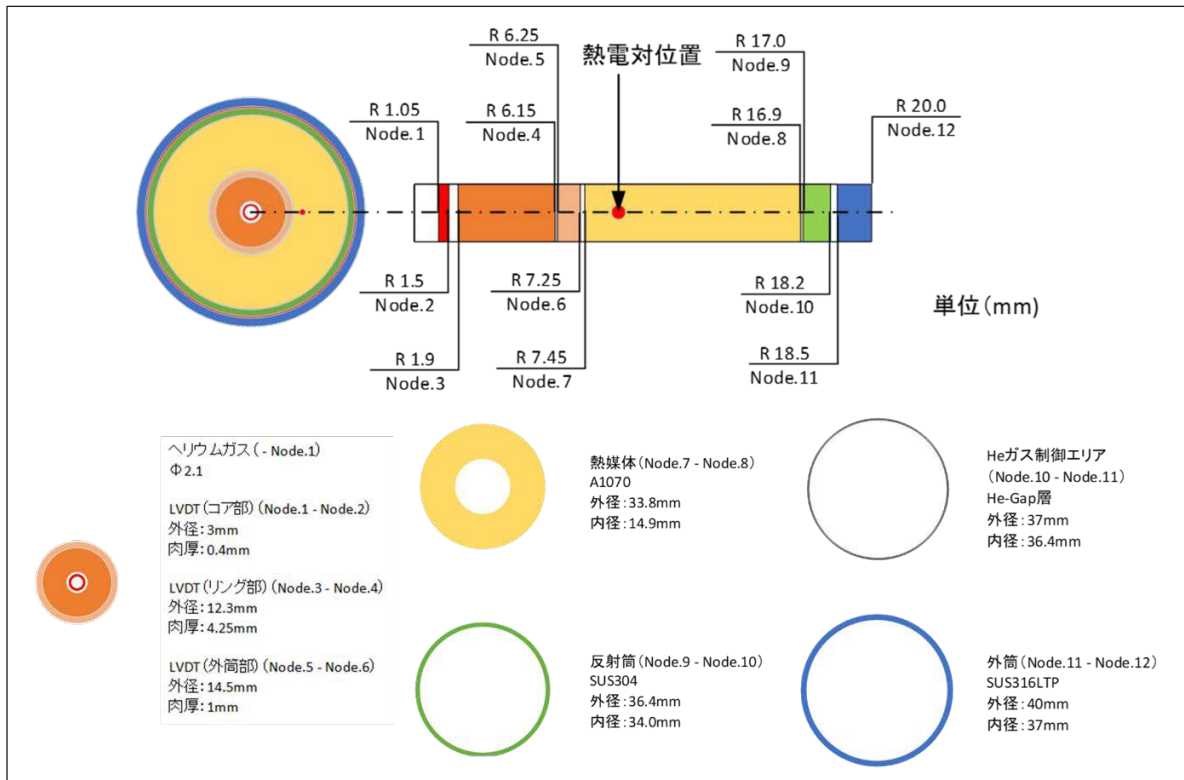


Fig. 5.1 GENGTC-Kによるガンマ発熱率算出に用いる LVDT 評価モデル

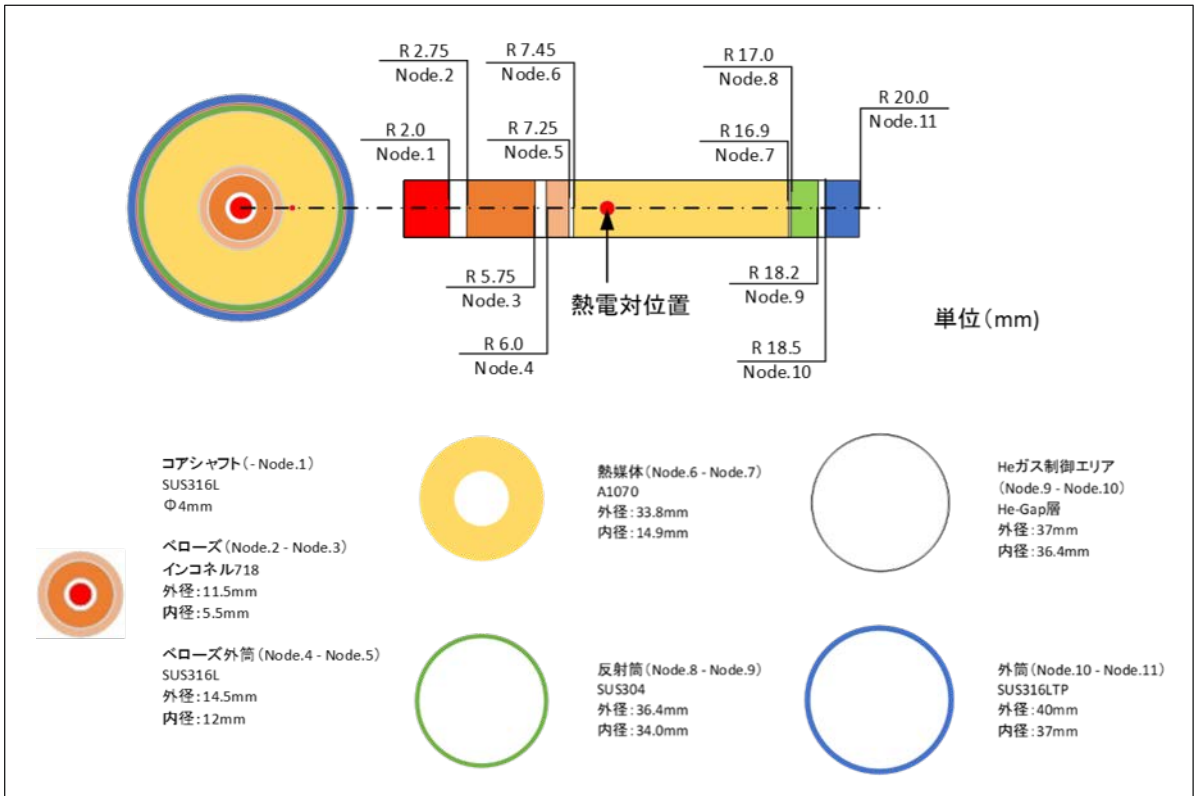


Fig. 5.2 GENGTIC-Kによるガンマ発熱率算出に用いるベローズ評価モデル

5.1 第1回照射試験（2024.7.30-2024.8.9）の概要

2024年7月30日から8月9日までの第1回照射試験においては、原子炉出力上昇時における200°C一定温度制御性を確認するための試験「以下「200°C一定温度制御試験」という。）及び原子炉定格出力運転時におけるガンマ発熱率確認試験を実施した。

試験日ごとの照射試験概要を Table 5.1 に、照射試験時の温度制御装置の基本設定条件を Table 5.2 に示す。

また、第1回照射試験期間中の制御熱電対温度及び原子炉熱出力を Fig. 5.3 に示す。

Table 5.1 第1回照射試験概要（MARIA 炉 2024年-第21サイクル日程 8/2～8/11）

試験日	原子炉の状態	試験内容
7/30	原子炉停止中	照射キャプセル装荷
7/31	原子炉停止中	安全保護回路等の接続
8/1	原子炉停止中	原子炉出力上昇前特性試験
8/2	原子炉出力上昇から定格出力運転	200°C一定温度制御試験
8/3-8/4	原子炉定格出力運転	200°C一定温度制御試験
8/4-8/5	原子炉定格出力運転	200°C一定温度制御試験
8/6-8/7	原子炉定格出力運転	ガンマ発熱確認試験、 ガス圧力計の温度特性試験
8/7-8/8	原子炉定格出力運転	ガンマ発熱確認試験、 ガス圧力計の温度特性試験
8/8-8/9	原子炉定格出力運転	ガンマ発熱確認試験、 ガス圧力計の温度特性試験

Table 5.2 第1回照射試験時における原子炉出力上昇時の温度制御基本条件

MARIA 炉定格運転出力	20MW	
ヒータ制御	制御熱電対	TC-3、TC-7
	温度制御勾配	10°C/分
	制御方法	自動制御
真空制御	制御方法	手動制御

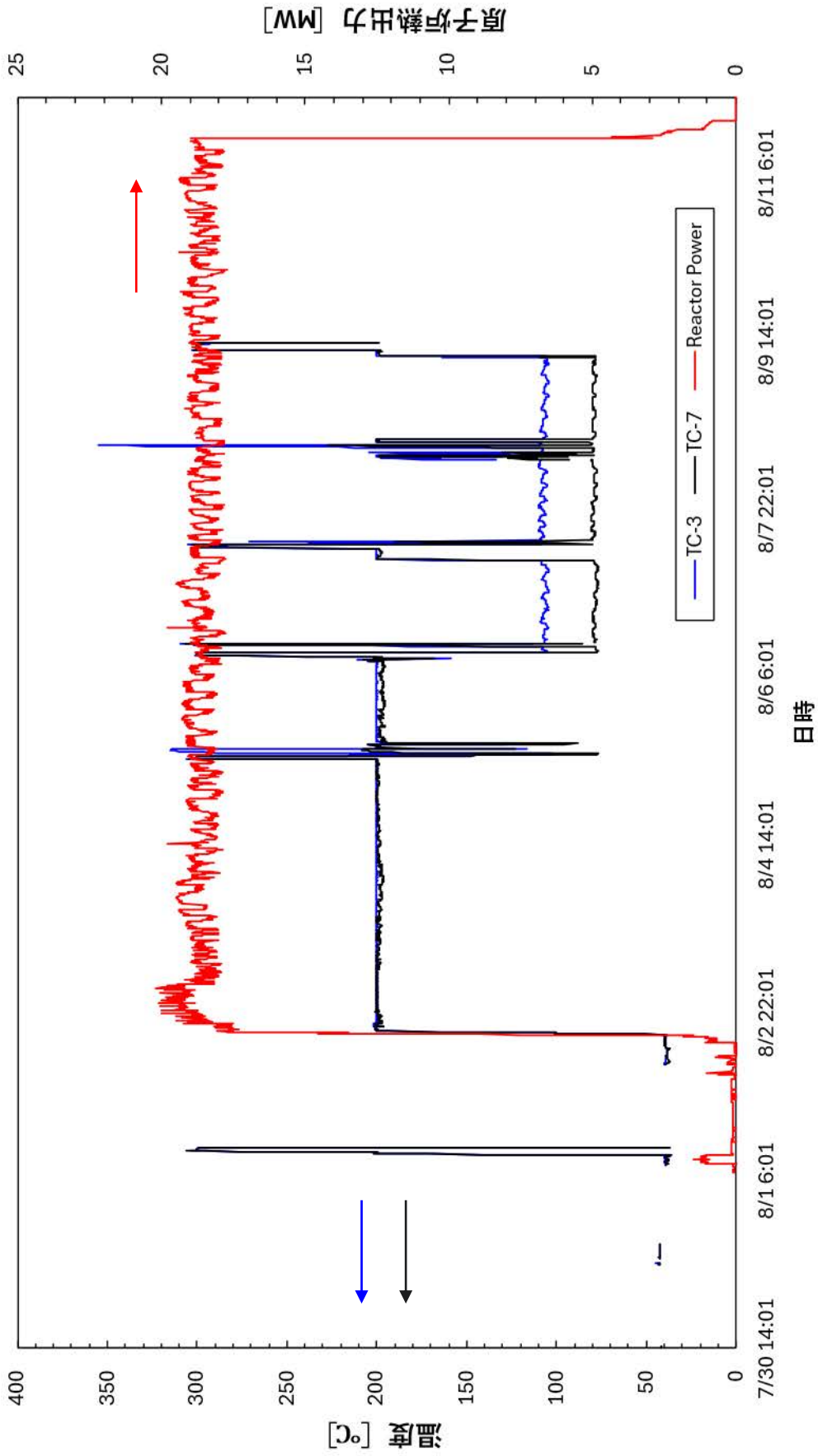


Fig. 5.3 第1回照射試験期間中の制御熱電対温度及び原子炉熱出力

5.1.1 原子炉出力上昇時における 200°C 一定温度制御試験 (2024.8.2)

2024 年 8 月 2 日に原子炉出力上昇時の一定温度制御性を確認するため、200°C 一定温度制御試験を実施した。MARIA 炉の出力上昇シーケンスは、定格運転時の 20 MW 付近まで段階的に炉出力を上昇させるが、この過程においても原子炉熱出力の変化に関わらず、良好な温度制御性が確認された。原子炉出力上昇時における制御熱電対温度及び原子炉熱出力を Fig. 5.4 に示す。また、制御熱電対 TC-3 及び TC-7 の最高温度及び最低温度等を Table 5.3 に示す。

温度制御の方法としては、まず原子炉出力上昇前にあらかじめキャプセル内を 200°C にするため、手動制御によって真空度を調整するとともに、ヒータによる 200°C 自動制御を実施した。その後、原子炉出力上昇時においては、自動制御によってヒータ出力が抑制され、キャプセル内の温度が 200°C より上昇することを抑える。試験開始時には、手動制御による真空度調整においては、ヒータによる温度制御範囲を極力広くするために、ヒータ出力が最大値から若干低い 6 A 程度となるように真空度を 2000 Pa 程度とした。しかしながら、炉出力の増大に伴いガンマ発熱も増加し、それにより制御熱電対温度が上昇することが予想されたため、ヒータ出力が 0A で 200°C を超える可能性があり、ヒータの温度制御範囲を逸脱することを回避するため、原子炉出力が 10 MW に到達する以前に真空度を 4000 Pa 程度にする措置を講じた。ヒータ出力及び真空度の測定結果を Fig. 5.5 に示す。

試験時の照射キャプセル内の温度は、原子炉出力上昇時に、照射キャプセル内の温度上昇はわずかであり、最高でも TC-3 で 203.3°C、TC-7 で 201.8°C であった。また、最低温度でみると TC-3 で 195.6°C、TC-7 で 195.0°C まで温度が下がったところも確認されたが、Fig.5.4 及び Fig.5.5 から分かるように炉出力ではなく真空度を変更した影響による温度変化であるため、原子炉出力上昇時の 200°C 一定温度制御性に問題はないと考える。原子炉出力上昇時における制御熱電対温度の測定結果を Fig. 5.6 に示す。

本結果から、原子炉出力上昇時においては、ヒータの 200°C 一定自動制御を行うことで、照射キャプセル内の温度を±5.0°C の範囲内に維持できることを確認した。

**Table 5.3 2024.8.2 第 1 回照射試験時における原子炉出力上昇時の
制御熱電対温度、ヒータ出力、真空度、制御熱電対の制御範囲
(下線は各熱電対の最高温度及び最低温度)**

測定時刻	TC-3 (°C)	TC-7 (°C)	HTR-1 (A)	HTR-2 (A)	圧力 (PA)	備考
2024/8/2 18:31:25	<u>203.3</u>	201.5	5.0	5.1	1914.4	TC-3 最高温度
2024/8/2 18:40:03	<u>195.6</u>	195.3	5.3	5.4	3367.5	TC-3 最低温度
2024/8/2 18:31:41	203.3	<u>201.8</u>	5.0	5.0	1915.6	TC-7 最高温度
2024/8/2 18:40:19	195.7	<u>195.0</u>	5.3	5.5	3498.1	TC-7 最低温度

制御熱電対制御範囲 (熱電対の最高温度及び最低温度の温度差)	TC-3 (°C)	TC-7 (°C)
	7.7	6.8

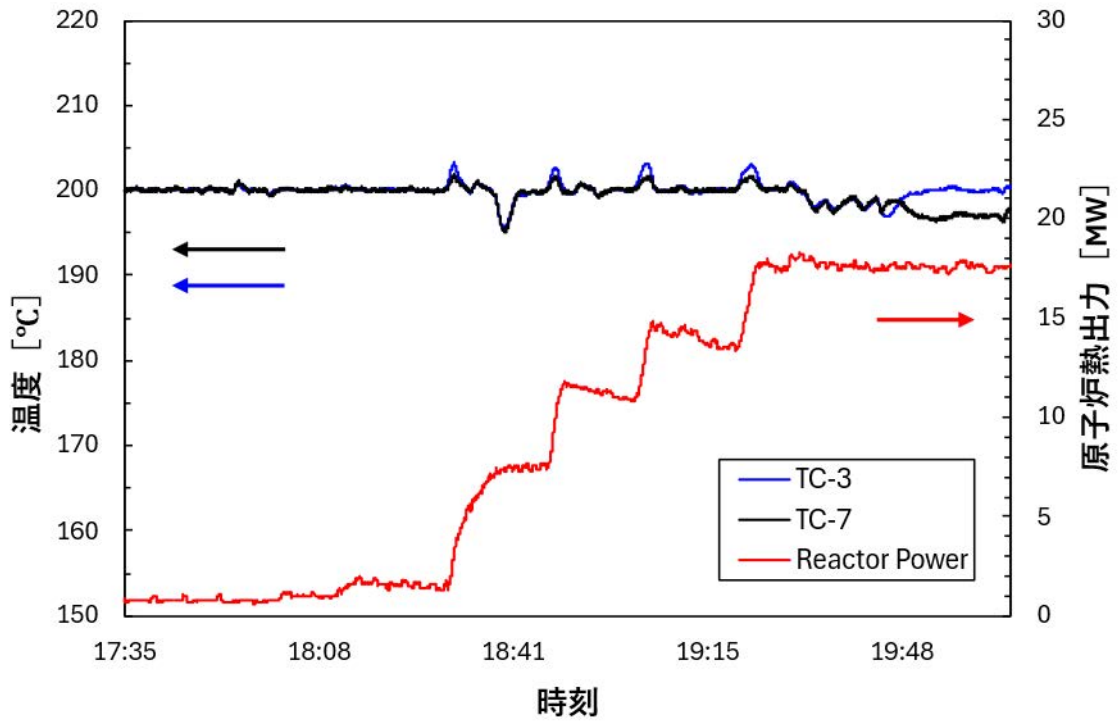


Fig. 5.4 2024.8.2 の第 1 回照射試験時の原子炉出力上昇時における 200°C 一定温度制御試験時の制御熱電対温度及び原子炉熱出力

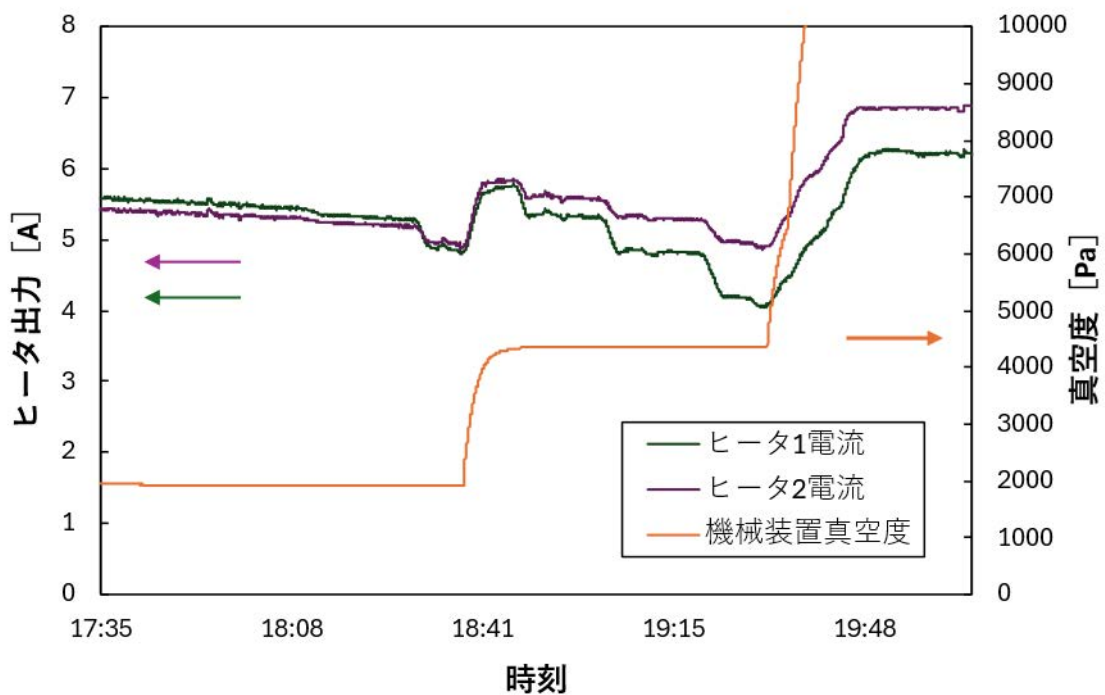


Fig. 5.5 2024.8.2 の第 1 回照射試験時の原子炉出力上昇時における 200°C 一定温度制御試験時のヒータ出力及び真空度

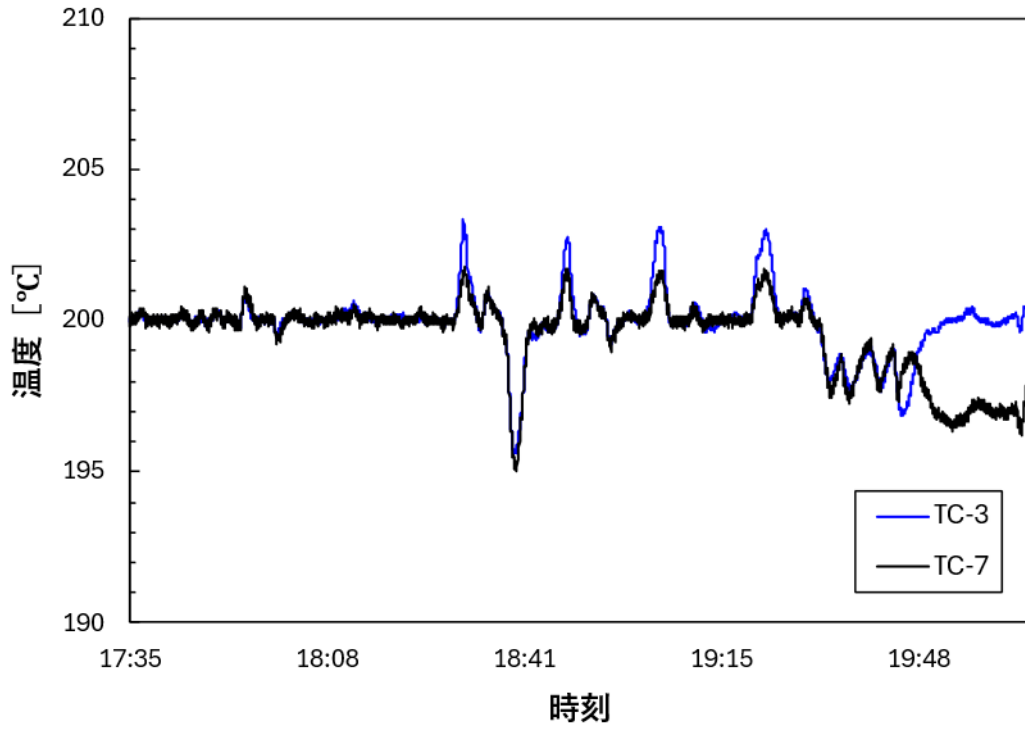


Fig. 5.6 2024.8.2 の第 1 回照射試験時の原子炉出力上昇時における
 200°C 一定温度制御試験時の制御熱電対温度
 (18:41 頃の一時的な温度低下は真空度を手動調整したことによるもの)

5.1.2 原子炉定格出力運転中における 200°C 一定温度制御試験 (2024.8.3)

2024年8月3日0:00から24:00までの期間において、原子炉定格出力運転中における200°C一定温度制御試験を実施した。試験期間中、HTR-1はTC-3を制御熱電対として、HTR-2はTC-7を制御熱電対として、ダンプ状態でヒータ自動制御による温度制御を実施した。

その結果、HTR-1は、ヒータ出力上限に達することなく±0.6°C以内の高精度な温度制御が達成された。一方、HTR-2は、ヒータの出力上限に達したことで、温度を保持するためのヒータの出力が足りなかったため、原子炉出力の微調整に同期した±4.0°Cの温度変化が見られた。この事象から、ヒータ出力制御範囲内に収まるキャプセル設計や真空度の選択をすることで、定格運転中の炉出力変化による温度への影響をヒータ出力自動制御によって補償してより高精度な温度制御が可能であると考えられる。

制御熱電対TC-3及びTC-7の最高温度及び最低温度等をTable 5.4に示す。また、原子炉定格出力運転中の制御熱電対温度及び原子炉熱出力の測定結果をFig. 5.7に、原子炉定格出力運転中のヒータ出力及び真空度の測定結果をFig. 5.8に示す。

**Table 5.4 2024.8.3 第1回照射試験時における 200°C 一定温度制御試験時の
制御熱電対温度、ヒータ出力、真空度、制御熱電対の制御範囲
(下線は各熱電対の最高温度及び最低温度)**

測定時刻	TC-3 (°C)	TC-7 (°C)	HTR-1 (A)	HTR-2 (A)	圧力 (PA)	備考
2024/8/3 5:36:24	<u>200.6</u>	200.6	6.1	6.6	143291.7	TC-3 最高温度
2024/8/3 6:15:24	<u>199.5</u>	199.7	6.1	6.5	143250.0	TC-3 最低温度
2024/8/3 0:27:25	200.1	<u>200.7</u>	6.0	6.7	145000.0	TC-7 最高温度
2024/8/4 6:15:23	200.1	<u>196.0</u>	5.9	6.6	142750.0	TC-7 最低温度

制御熱電対の制御範囲 (熱電対の最高温度及び最低温度の温度差)	TC-3 (°C)	TC-7 (°C)
	1.1	4.7

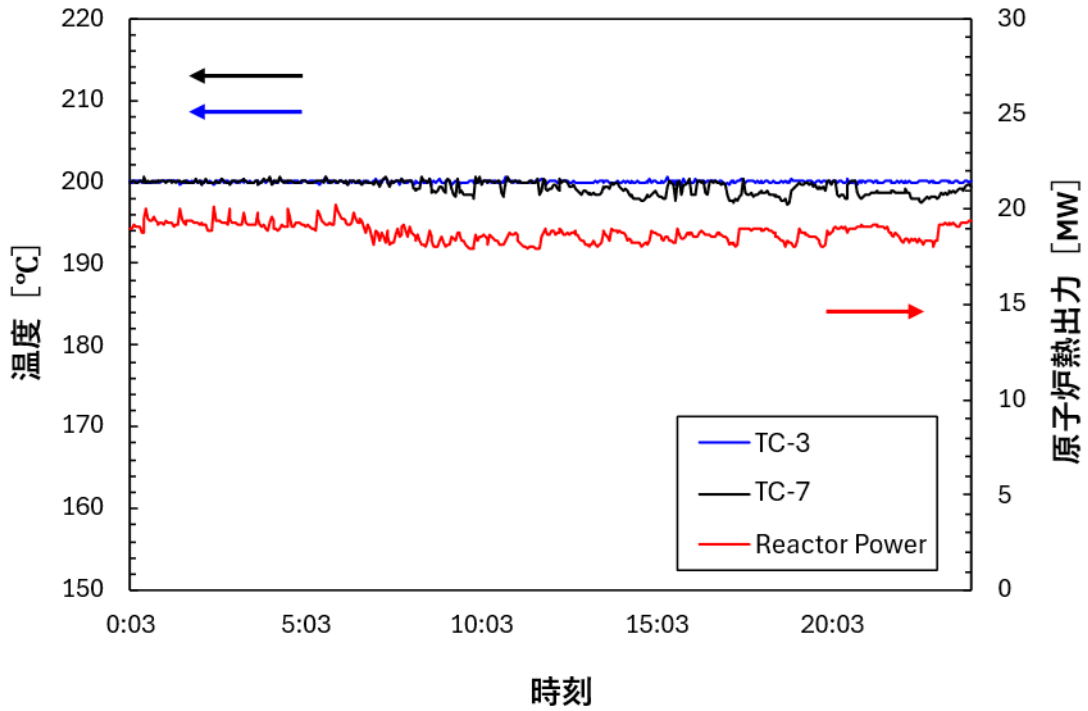


Fig. 5.7 2024.8.3 の第 1 回照射試験時の原子炉定格出力運転中における 200°C 一定温度制御試験時の制御熱電対温度及び原子炉熱出力

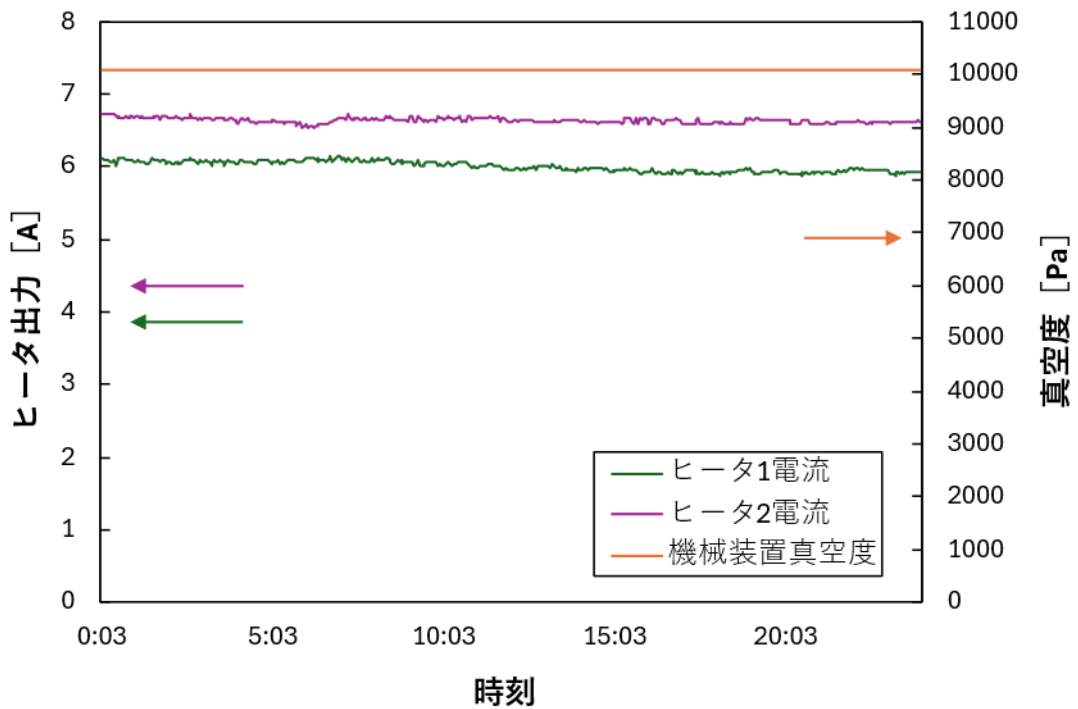


Fig. 5.8 2024.8.3 の第 1 回照射試験時の原子炉定格出力運転中における 200°C 一定温度制御試験時のヒータ出力及び真空度

5.1.3 原子炉定格出力運転中における 200°C 一定温度制御試験 (2024.8.4-2024.8.5)

前日に引き続き、2024年8月4日0:00から24:00までの1日間、原子炉定格出力運転中における200°C一定温度制御試験を実施した。試験期間中、HTR-1はTC-3を制御熱電対として、HTR-2はTC-7を制御熱電対として、ダンプ状態でヒータ自動制御による温度制御を実施した。

その結果、HTR-1は、ヒータ出力上限に達することなく±0.7°C以内の高精度な温度制御が達成された。一方、HTR-2は、前日の試験と同様にヒータの出力上限に達したことで、原子炉出力の微調整に同期した±4.2°Cの温度変化が見られた。

制御熱電対TC-3及びTC-7の最高温度及び最低温度等をTable 5.5に示す。また、原子炉定格出力運転中の制御熱電対温度及び原子炉熱出力の測定結果をFig. 5.9に、原子炉定格出力運転中のヒータ出力及び真空度の測定結果をFig. 5.10に示す。

**Table 5.5 2024.8.4-2024.8.5 第1回照射試験時における 200°C 一定温度制御試験時の
制御熱電対温度、ヒータ出力、真空度、制御熱電対の制御範囲
(下線は各熱電対の最高温度及び最低温度)**

測定時刻	TC-3 (°C)	TC-7 (°C)	HTR-1 (A)	HTR-2 (A)	圧力 (PA)	備考
2024/8/4 6:32:39	<u>200.7</u>	198.2	5.9	6.6	142916.7	TC-3 最高温度
2024/8/4 6:43:47	<u>199.4</u>	198.5	5.9	6.6	142958.3	TC-3 最低温度
2024/8/5 8:53:32	200.6	<u>201.1</u>	5.8	6.6	125375.0	TC-7 最高温度
2024/8/4 6:21:21	200.0	<u>195.8</u>	5.9	6.6	142791.7	TC-7 最低温度

制御熱電対の制御範囲 (熱電対の最高温度及び最低温度の温度差)	TC-3 (°C)	TC-7 (°C)
	1.3	5.3

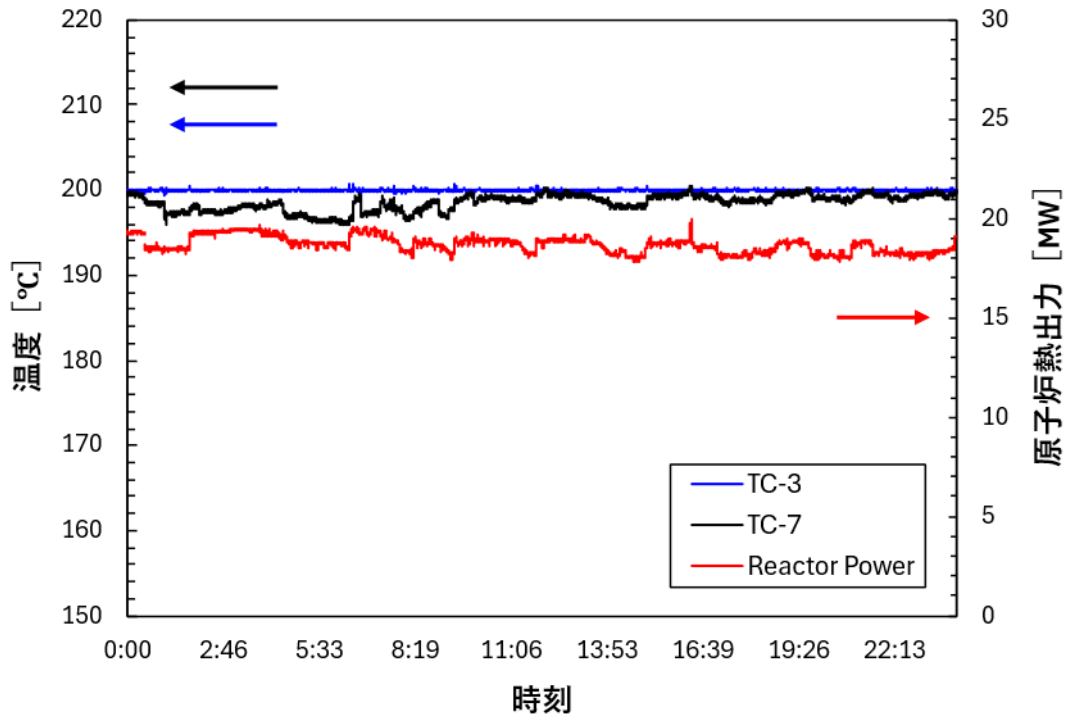


Fig. 5.9 2024.8.4 の第 1 回照射試験時の原子炉定格出力運転中における 200°C 一定温度制御試験時の制御熱電対温度及び原子炉熱出力

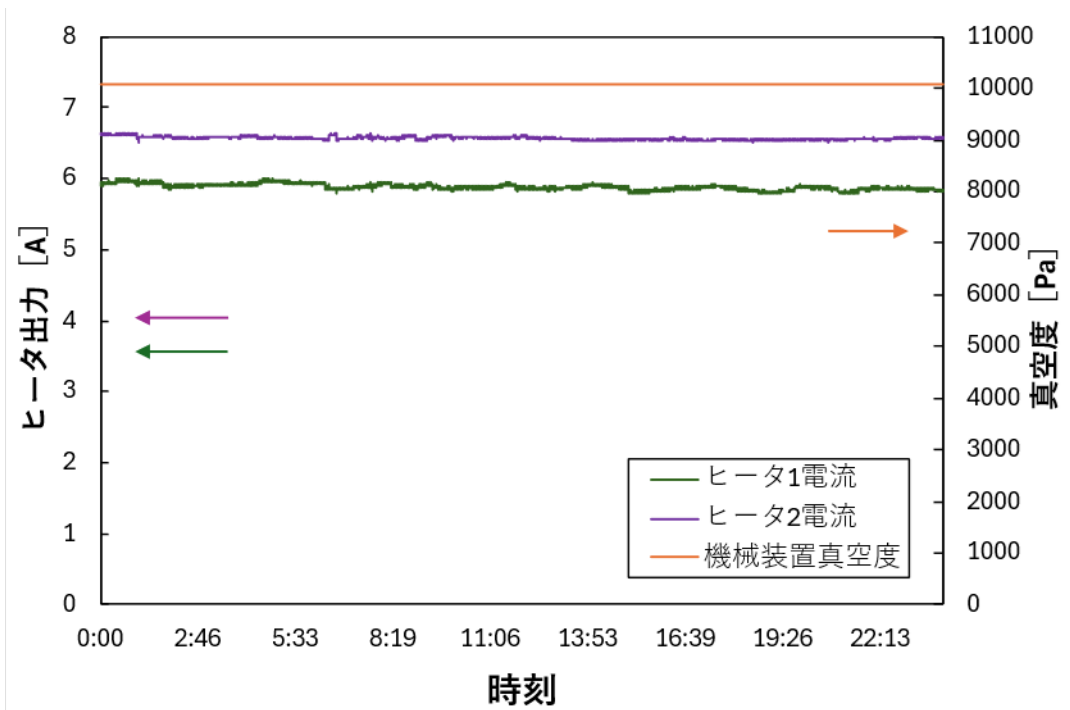


Fig. 5.10 2024.8.4 の第 1 回照射試験時の原子炉定格出力運転中における 200°C 一定温度制御試験時のヒータ出力及び真空度

5.1.4 原子炉定格出力運転中におけるガンマ発熱率確認試験 (2024.8.6-2024.8.7)

2024年8月6日14:30から2024年8月7日9:37までの約19時間、原子炉定格出力運転中においてガンマ発熱率確認試験を実施した。試験期間中は、ヒータOFF、ヘリウムダンプ状態での各熱電対の温度変化及びキャプセル内の温度分布を取得した。各熱電対における最高温度及び最低温度に達した際の熱電対温度、ヒータ出力、真空度及び各熱電対における温度差をTable 5.6に示す。

キャプセル内の温度分布については、それぞれ同一の軸方向位置に、方位は180°反対方向に配置されたTC-1/TC-2、TC-3/TC-4、TC-5/TC-6、TC-7/TC-8の熱電対 (Fig.3.1 参照) が、互いにほぼ同一の温度域において類似の時間的な温度変化を示していることが確認された。原子炉定格出力運転時の熱電対温度の測定結果を Fig. 5.11 に、キャプセル下端からの距離における熱電対の測定結果を Fig. 5.12 に示す。

これらの温度測定結果を用いて GENGTC-K で評価した。評価の結果、上記の期間中においては、キャプセル内のガンマ発熱率は 0.4 W/g から 0.9 W/g 程度に分布していると考えられる。ガンマ発熱率の評価結果について、Fig. 5.13 に示す。

この結果については、MARIA 炉における今後の照射試験においてさらに高精度な温度制御を実現するキャプセル設計の基礎データとして活用できると考えられる。

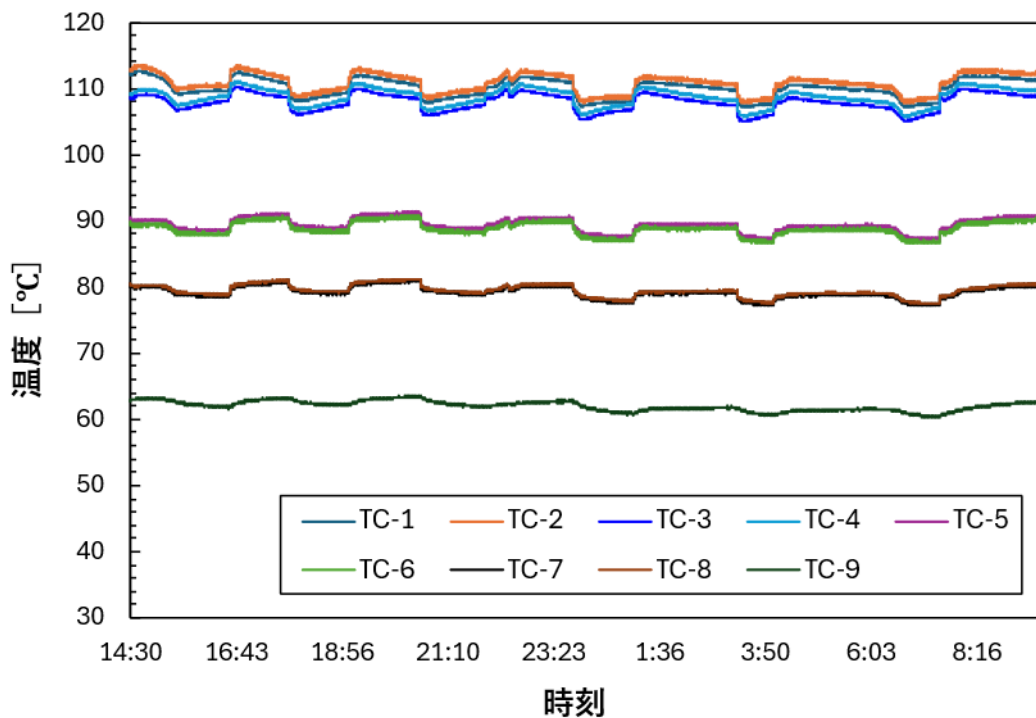


Fig. 5.11 2024.8.6からの第1回照射試験時の原子炉定格出力運転中におけるガンマ発熱率確認試験時の熱電対温度

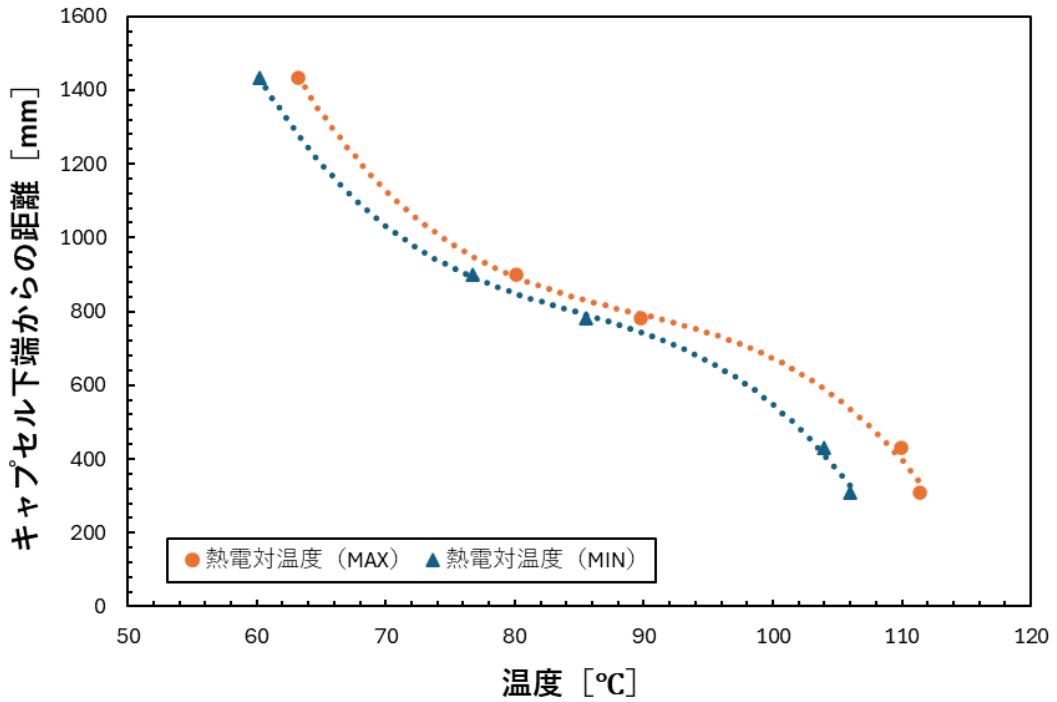


Fig. 5.12 2024.8.6からの原子炉定格出力運転中ガンマ発熱率確認試験時の
 キャプセル下端からの距離における熱電対温度（最大値及び最小値）

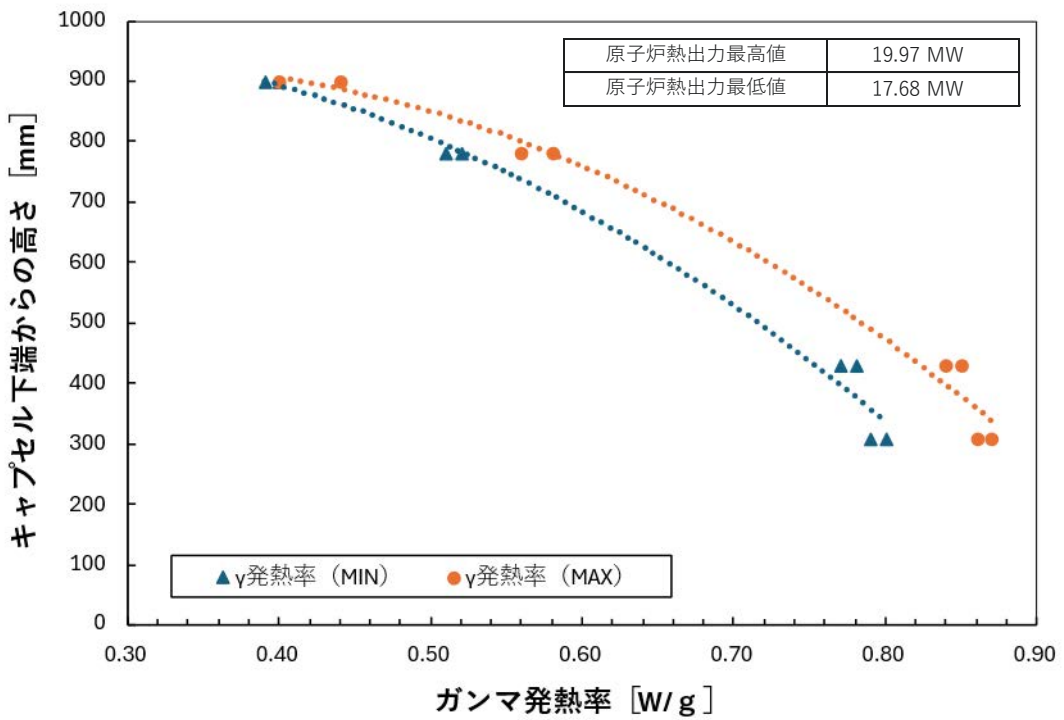


Fig. 5.13 2024.8.6からの第1回照射試験時の原子炉定格出力運転中における
 GENGTC-Kにより算出した期間中のガンマ発熱率（最高値及び最低値）

Table 5.6 2024.8.6-2024.8.7 の第 1 回照射試験時におけるガンマ発熱率確認試験の熱電対温度、真空度、各熱電対における温度差（下線は各熱電対の最高温度及び最低温度）（1/2）

測定時刻	TC-1	TC-2	TC-3	TC-4	TC-5	TC-6	TC-7	TC-8	TC-9	真空度 (Pa)	備考
	(°C) ペロウズ近傍 (EL.310mm)	(°C) ペロウズ近傍 (EL.310mm)	(°C) LVDT 近傍 (EL.430mm)	(°C) LVDT 近傍 (EL.430mm)	(°C) ペロウズ近傍 (EL.781mm)	(°C) LVDT 近傍 (EL.901mm)	(°C) LVDT 近傍 (EL.901mm)	(°C) SPGD 近傍 (EL.1435mm)			
2024/8/6 19:07:47	<u>110.4</u>	111.1	108.8	109.8	89.3	88.4	79.4	79.7	62.2	143291.7	TC-1 最高温度
2024/8/7 2:20:15	<u>106.0</u>	106.9	104.0	104.8	86.9	86.3	77.5	77.9	61.5	142458.3	TC-1 最低温度
2024/8/6 19:02:33	110.2	<u>111.4</u>	108.9	109.8	89.4	88.4	79.5	79.6	62.1	143333.3	TC-2 最高温度
2024/8/7 2:19:55	106.0	<u>106.7</u>	104.0	105.0	87.1	86.3	77.8	77.9	61.6	142458.3	TC-2 最低温度
2024/8/6 19:00:39	110.2	111.2	<u>108.9</u>	109.8	89.2	88.5	79.5	79.7	62.1	143333.3	TC-3 最高温度
2024/8/7 7:10:17	106.1	107.1	<u>104.0</u>	104.9	86.6	86.2	77.1	77.4	60.9	142833.3	TC-3 最低温度
2024/8/6 19:05:23	110.2	111.2	108.8	<u>109.9</u>	89.2	88.6	79.5	79.6	62.3	143291.7	TC-4 最高温度
2024/8/7 2:23:39	106.1	107.1	104.1	<u>104.8</u>	86.9	86.4	77.4	77.9	61.4	142458.3	TC-4 最低温度
2024/8/6 17:12:15	108.7	109.6	106.8	107.7	<u>89.8</u>	88.8	79.9	80.2	63.0	144083.3	TC-5 最高温度
2024/8/7 4:12:19	107.2	108.2	105.7	106.5	<u>86.2</u>	85.8	76.8	77.1	60.4	142541.7	TC-5 最低温度
2024/8/6 17:12:53	108.7	109.4	106.8	107.5	89.4	<u>89.1</u>	79.7	80.1	62.9	144083.3	TC-6 最高温度
2024/8/7 4:17:23	107.0	108.0	105.4	106.4	86.4	<u>85.5</u>	77.1	77.2	60.5	142541.7	TC-6 最低温度

Table 5.6 2024.8.6-2024.8.7 の第 1 回照射試験時におけるガンマ発熱率確認試験の熱電対温度、真空度、各熱電対における温度差（下線は各熱電対の最高温度及び最低温度）(2/2)

測定時刻	TC-1	TC-2	TC-3	TC-4	TC-5	TC-6	TC-7	TC-8	TC-9	真空度 (Pa)	備考
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)		
2024/8/6 17:13:31	108.7	109.5	106.8	107.6	89.4	88.9	<u>80.1</u>	80.1	63.0	144083.3	TC-7 最高温度
2024/8/7 4:09:27	107.3	108.1	105.8	106.6	86.4	85.9	<u>76.7</u>	77.1	60.3	142541.7	TC-7 最低温度
2024/8/6 17:08:23	108.7	109.5	106.8	107.5	89.7	88.9	80.0	<u>80.2</u>	63.1	144125.0	TC-8 最高温度
2024/8/7 4:17:23	107.2	108.1	105.7	106.6	86.3	85.9	76.9	<u>77.0</u>	60.3	142541.7	TC-8 最低温度
2024/8/6 17:24:59	108.6	109.5	106.7	107.5	89.3	88.9	79.8	80.1	<u>63.2</u>	143958.3	TC-9 最高温度
2024/8/7 4:40:33	107.5	108.4	106.0	106.9	86.4	85.8	77.0	77.2	<u>60.2</u>	142583.3	TC-9 最低温度

各熱電対の最高温度 及び最低温度の温度差	TC-1	TC-2	TC-3	TC-4	TC-5	TC-6	TC-7	TC-8	TC-9
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
4.4	4.7	4.9	5.1	3.6	3.6	3.4	3.2	3.0	3.0

5.1.5 原子炉定格出力運転中におけるガンマ発熱率確認試験 (2024.8.7-2024.8.8)

2024年8月7日14:30から2024年8月8日9:40までの約19時間、原子炉定格出力運転中においてガンマ発熱率確認試験を実施した。試験期間中は、ヒータOFF、ヘリウムダンプ状態での各熱電対の温度変化及びキャプセル内の温度分布を取得した。各熱電対における最高温度及び最低温度に達した際の熱電対温度、ヒータ出力、真空度及び各熱電対における温度差をTable 5.7に示す。

キャプセル内の温度分については、それぞれ同一の軸方向位置に、方位は180°反対方向に配置されたTC-1/TC-2、TC-3/TC-4、TC-5/TC-6、TC-7/TC-8の熱電対 (Fig.3.1 参照) が、互いにほぼ同一の温度域において類似の時間的な温度変化を示していることが確認された。原子炉定格出力運転時の熱電対温度の測定結果を Fig. 5.14 に、キャプセル下端からの距離における熱電対の測定結果を Fig. 5.15 に示す。

これらの温度測定結果を用いて GENGTC-K で評価した。評価の結果、上記の期間中においては、キャプセル内のガンマ発熱率は 0.4 W/g から 0.9 W/g 程度に分布していると考えられる。ガンマ発熱率の評価結果について、Fig. 5.16 に示す。

この結果については、MARIA 炉における今後の照射試験に用いるキャプセル設計の基礎データとして活用できると考えられる。

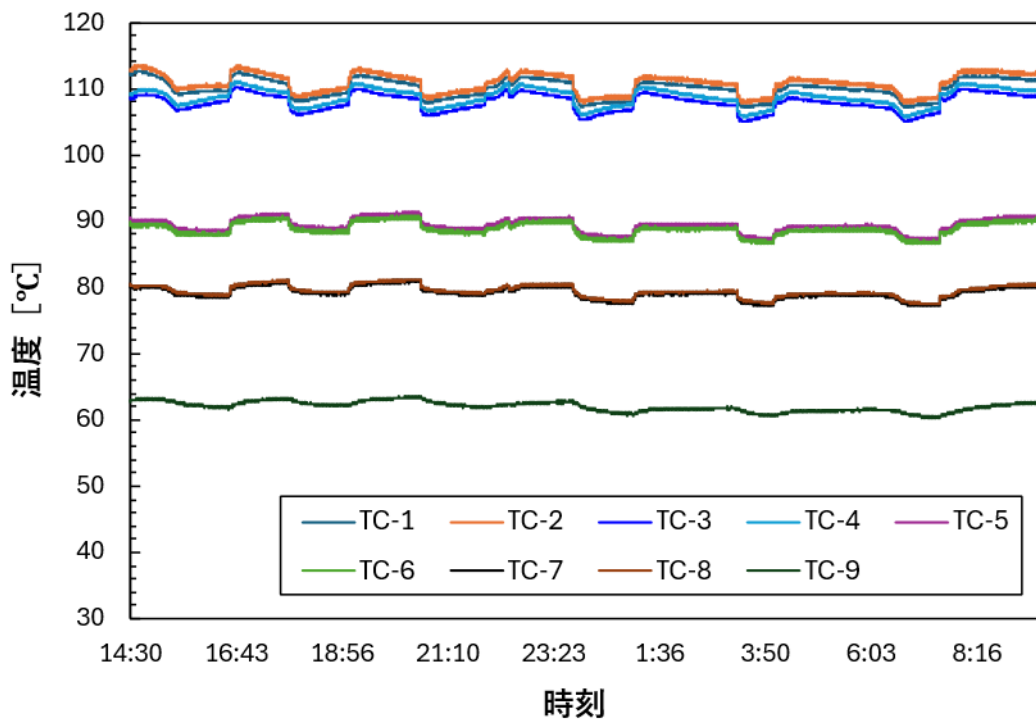


Fig. 5.14 2024.8.7からの第1回照射試験時の原子炉定格出力運転中におけるガンマ発熱率確認試験時の熱電対温度

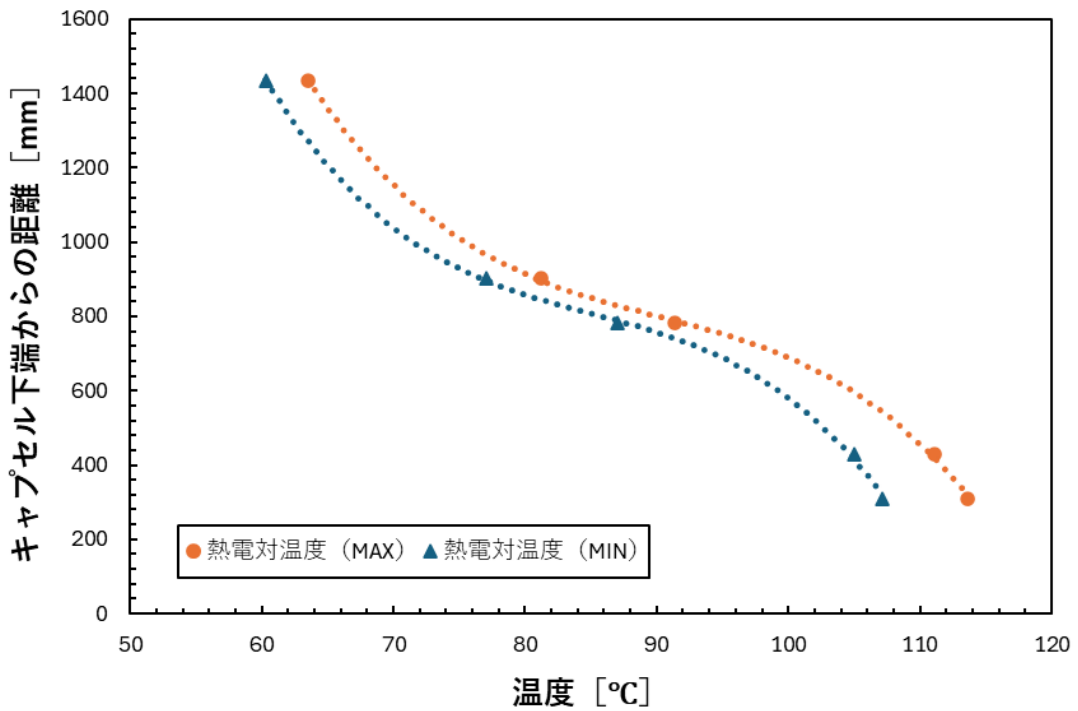


Fig. 5.15 2024.8.7からの原子炉定格出力運転中ガンマ発熱率確認試験時の
 キャプセル下端からの距離における熱電対温度（最大値及び最小値）

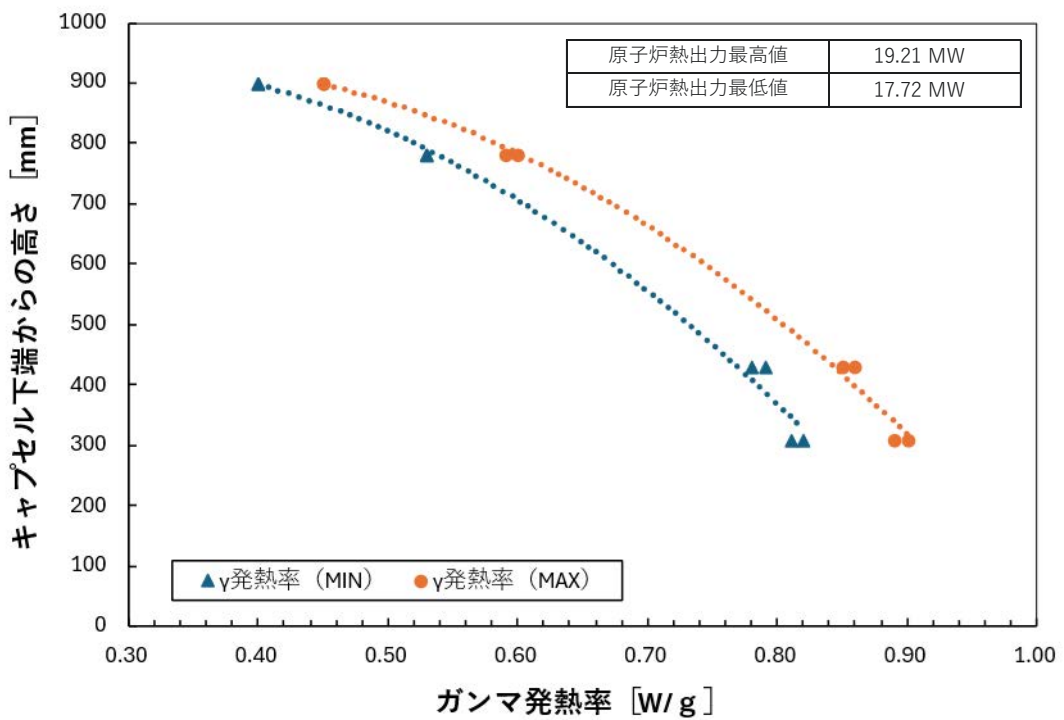


Fig. 5.16 2024.8.7からの第1回照射試験時の原子炉定格出力運転中における
 GENGTC-Kにより算出した期間中のガンマ発熱率（最高値及び最低値）

Table 5.7 2024.8.7-2024.8.8 の第 1 回照射試験時におけるガンマ発熱率確認試験の熱電対温度、真空度、各熱電対における温度差（下線は各熱電対の最高温度及び最低温度）(1/2)

測定時刻	TC-1	TC-2	TC-3	TC-4	TC-5	TC-6	TC-7	TC-8	TC-9	真空度 (Pa)	備考
	(°C) ペローズ近傍 (EL.310mm)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)		
2024/8/7 14:40:05	<u>112.7</u>	113.4	109.0	109.7	90.2	89.5	80.0	80.2	63.0	146041.7	TC-1 最高温度
2024/8/8 3:23:08	<u>107.1</u>	108.0	105.1	105.9	87.7	87.0	77.8	78.0	61.2	144583.3	TC-1 最低温度
2024/8/7 14:41:17	112.7	<u>113.6</u>	109.1	109.8	90.1	89.5	80.1	80.2	63.1	146083.3	TC-2 最高温度
2024/8/8 3:24:26	107.3	<u>107.8</u>	105.1	105.9	87.7	87.2	77.8	78.0	61.2	144583.3	TC-2 最低温度
2024/8/7 16:42:29	112.4	113.4	<u>110.2</u>	111.0	90.4	89.8	80.3	80.4	62.4	145833.3	TC-3 最高温度
2024/8/8 3:23:42	107.2	107.9	<u>105.0</u>	105.8	87.5	87.0	77.7	77.9	61.3	144583.3	TC-3 最低温度
2024/8/7 16:42:01	112.3	113.1	110.2	<u>111.1</u>	90.5	89.9	80.1	80.3	62.3	145833.3	TC-4 最高温度
2024/8/8 6:47:28	107.2	108.1	105.1	<u>105.7</u>	87.4	86.7	77.6	77.8	61.0	144916.7	TC-4 最低温度
2024/8/7 20:28:07	110.7	111.3	108.5	109.3	<u>91.4</u>	90.5	81.0	81.2	63.4	144791.7	TC-5 最高温度
2024/8/8 3:56:14	107.6	108.2	105.9	106.6	<u>87.0</u>	86.9	77.3	77.6	60.6	144708.3	TC-5 最低温度
2024/8/7 20:27:07	110.7	111.3	108.5	109.3	91.0	<u>90.9</u>	81.0	81.2	63.5	144791.7	TC-6 最高温度
2024/8/8 7:09:40	107.6	108.3	105.8	106.5	87.2	<u>86.5</u>	77.3	77.5	60.5	144916.7	TC-6 最低温度

Table 5.7 2024.8.7-2024.8.8 の第 1 回照射試験時におけるガンマ発熱率確認試験の熱電対温度、真空度、各熱電対における温度差（下線は各熱電対の最高温度及び最低温度）(2/2)

測定時刻	TC-1	TC-2	TC-3	TC-4	TC-5	TC-6	TC-7	TC-8	TC-9	真空度 (Pa)	備考
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)		
2024/8/7 20:21:31	ベローズ近傍 (EL.310mm)	110.7	111.3	108.6	109.5	LVDT 近傍 (EL.430mm)	ベローズ近傍 (EL.781mm)	LVDT 近傍 (EL.901mm)	SPGD 近傍 (EL.1435mm)	144833.3	TC-7 最高温度
2024/8/8 7:12:58	107.6	108.5	105.9	106.7	87.4	86.7	77.1	77.5	60.6	144958.3	TC-7 最低温度
2024/8/7 20:30:07	110.5	111.5	108.5	109.2	91.0	90.4	80.9	81.2	63.4	144791.7	TC-8 最高温度
2024/8/8 7:24:26	107.8	108.8	106.2	107.0	87.1	86.7	77.3	77.4	60.4	144958.3	TC-8 最低温度
2024/8/7 20:26:59	110.7	111.3	108.5	109.2	91.1	90.4	80.9	81.2	63.5	144791.7	TC-9 最高温度
2024/8/8 7:24:06	107.8	108.4	106.2	106.9	87.1	86.7	77.2	77.4	60.3	144958.3	TC-9 最低温度

各熱電対の最高温度 及び最低温度の温度差	TC-1	TC-2	TC-3	TC-4	TC-5	TC-6	TC-7	TC-8	TC-9
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
	5.6	5.8	5.2	5.4	4.4	4.4	4.1	3.8	3.2

5.1.6 原子炉定格出力運転中におけるガンマ発熱率確認試験 (2024.8.8-2024.8.9)

2024年8月8日15:00から2024年8月9日9:41までの約19時間、原子炉定格出力運転中におけるヒータ出力 OFF 及びヘリウム充填状態でのガンマ発熱率確認試験を実施した。試験期間中における、各熱電対の温度変化及びキャプセル内の温度分布を評価した。各熱電対における最高温度及び最低温度に達した際の熱電対温度、ヒータ出力、真空度及び各熱電対における温度差を Table 5.8 に示す。

キャプセル内の温度分については、それぞれ同一の軸方向位置に、方位は180°反対方向に配置された TC-1/TC-2、TC-3/TC-4、TC-5/TC-6、TC-7/TC-8 の熱電対 (Fig.5.17 参照) が、互いにほぼ同一の温度域において類似の時間的な温度変化を示していることが確認された。原子炉定格出力運転時の熱電対温度の測定結果を Fig. 5.17 に、キャプセル下端からの距離における熱電対の測定結果を Fig. 5.18 に示す。

これらの温度測定結果を用いて GENGTC-K で評価した。評価の結果、上記の期間中においては、キャプセル内のガンマ発熱率は 0.4 W/g から 0.9 W/g 程度に分布していると考えられる。ガンマ発熱率の評価結果について、Fig. 5.19 に示す。

この結果については、MARIA 炉における今後の照射試験に用いるキャプセル設計の基礎データとして活用できると考えられる。

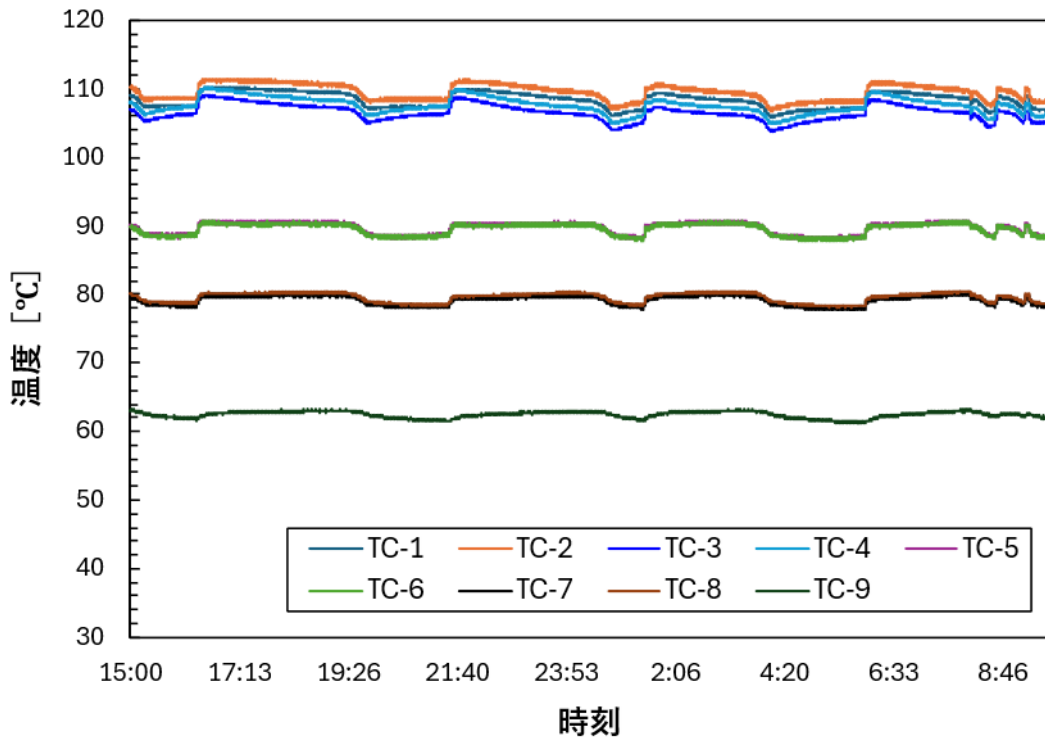


Fig. 5.17 2024.8.8 からの第1回照射試験時の原子炉定格出力運転中におけるガンマ発熱率確認試験時の熱電対温度

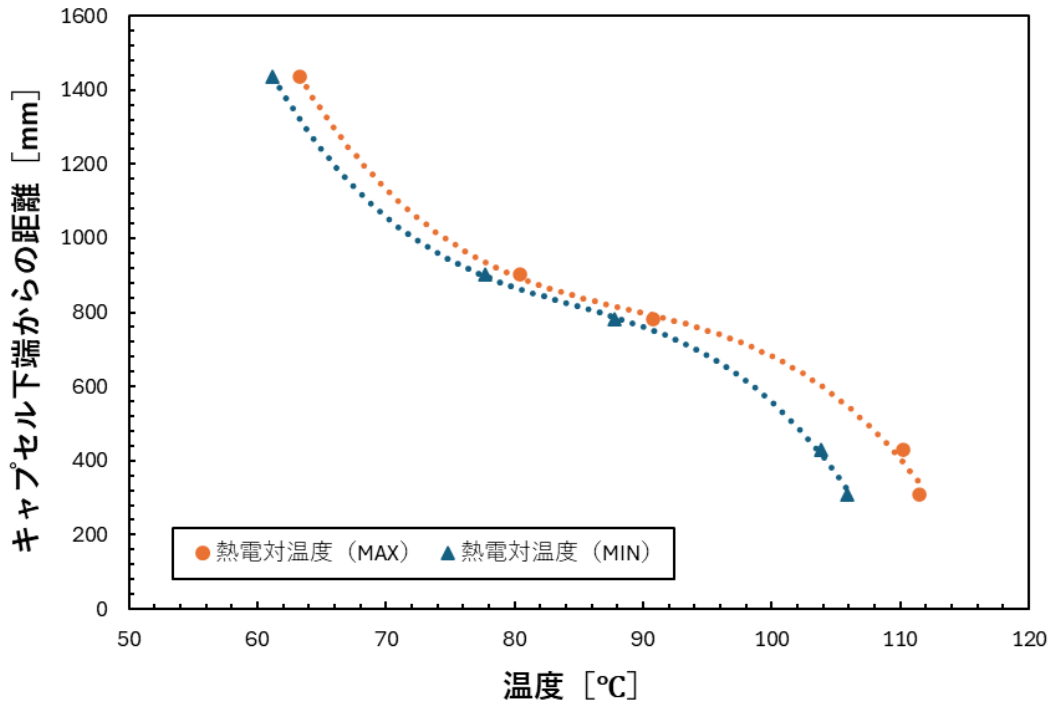


Fig. 5.18 2024.8.8からの原子炉定格出力運転中ガンマ発熱率確認試験時の
 キャプセル下端からの距離における熱電対温度（最大値及び最小値）

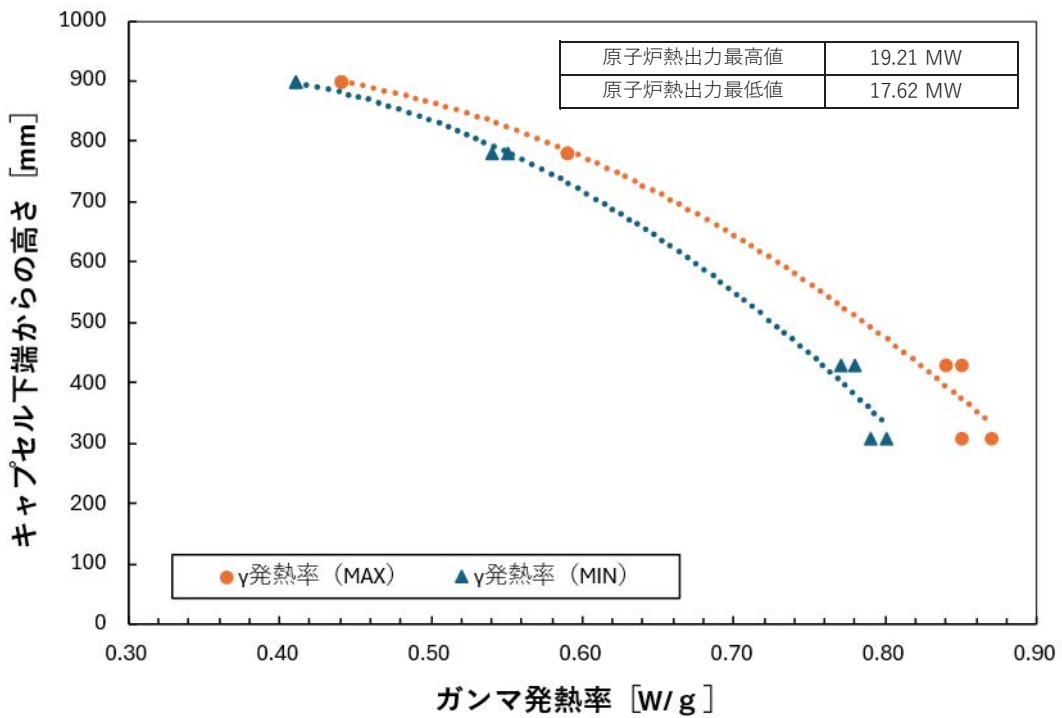


Fig. 5.19 2024.8.8からの第1回照射試験時の原子炉定格出力運転中における
 GENGTC-Kにより算出した期間中のガンマ発熱率（最高値及び最低値）

Table 5.8 2024.8.8-2024.8.9 の第 1 回照射試験時におけるガンマ発熱率確認試験の熱電対温度、真空度、各熱電対における温度差（下線は各熱電対の最高温度及び最低温度）（1/2）

測定時刻	TC-1	TC-2	TC-3	TC-4	TC-5	TC-6	TC-7	TC-8	TC-9	真空度 (Pa)	備考
	(°C) ペロウズ近傍 (EL.310mm)	(°C) ペロウズ近傍 (EL.430mm)	(°C) LVDT 近傍 (EL.430mm)	(°C) ベロウズ近傍 (EL.781mm)	(°C) LVDT 近傍 (EL.901mm)	(°C) SPGD 近傍 (EL.1435mm)	(°C)	(°C)	(°C)		
2024/8/8 16:58:04	<u>110.2</u>	111.3	108.8	109.7	90.5	90.3	79.8	80.1	62.7	149708.4	TC-1 最高温度
2024/8/9 4:05:40	<u>105.9</u>	107.0	103.8	104.8	88.8	88.5	78.6	78.9	62.3	149375.0	TC-1 最低温度
2024/8/8 16:51:46	110.0	<u>111.5</u>	108.7	109.8	90.5	90.2	79.7	80.1	62.8	149791.7	TC-2 最高温度
2024/8/9 4:03:08	106.0	<u>106.8</u>	103.9	104.8	88.9	88.8	78.7	78.9	62.6	149375.0	TC-2 最低温度
2024/8/8 16:34:40	110.0	111.4	<u>109.0</u>	110.1	90.5	90.7	79.9	80.1	62.5	149958.4	TC-3 最高温度
2024/8/9 4:03:56	106.0	107.1	<u>103.8</u>	105.0	89.0	88.8	78.6	78.9	62.6	149375.0	TC-3 最低温度
2024/8/8 16:33:24	110.1	111.3	109.0	<u>110.2</u>	90.5	90.3	79.9	80.2	62.5	149958.4	TC-4 最高温度
2024/8/9 4:04:44	106.0	107.0	103.9	<u>104.8</u>	88.8	88.6	78.5	78.9	62.4	149375.0	TC-4 最低温度
2024/8/9 7:53:13	108.7	109.9	106.6	107.6	<u>90.8</u>	90.7	80.1	80.4	63.0	149625.0	TC-5 最高温度
2024/8/9 5:00:24	106.9	108.2	105.4	106.5	<u>87.9</u>	87.9	78.0	78.4	61.6	149375.0	TC-5 最低温度
2024/8/8 16:34:02	110.1	111.2	109.0	110.1	90.7	<u>90.8</u>	79.7	80.2	62.5	149958.4	TC-6 最高温度
2024/8/9 5:25:50	107.0	108.1	105.7	106.8	88.1	<u>87.8</u>	77.7	78.2	61.4	149416.7	TC-6 最低温度

Table 5.8 2024.8.8-2024.8.9 の第 1 回照射試験時におけるガンマ発熱率確認試験の熱電対温度、真空度、各熱電対における温度差（下線は各熱電対の最高温度及び最低温度）(2/2)

測定時刻	TC-1	TC-2	TC-3	TC-4	TC-5	TC-6	TC-7	TC-8	TC-9	真空度 (Pa)	備考
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)		
2024/8/9 8:05:23	108.5	109.8	106.5	107.5	90.7	90.5	80.3	80.4	63.1	149625.0	TC-7 最高温度
2024/8/9 5:45:52	107.0	108.2	106.0	107.0	88.1	88.3	77.7	78.2	61.3	149416.7	TC-7 最低温度
2024/8/9 8:04:33	108.6	109.8	106.5	107.6	90.5	90.4	80.2	80.4	63.0	149625.0	TC-8 最高温度
2024/8/9 5:26:46	107.0	107.9	105.7	106.7	88.3	88.1	78.1	78.2	61.4	149416.7	TC-8 最低温度
2024/8/8 15:01:22	109.1	110.0	106.9	107.9	90.1	89.8	79.5	80.0	63.3	148625.0	TC-9 最高温度
2024/8/9 5:50:54	107.0	108.0	106.1	107.1	88.5	88.1	78.2	78.3	61.2	149416.7	TC-9 最低温度

各熱電対の最高温度 及び最低温度の温度差	TC-1	TC-2	TC-3	TC-4	TC-5	TC-6	TC-7	TC-8	TC-9
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
	4.3	4.7	5.2	5.4	2.9	3.0	2.6	2.2	2.1

5.2 第2回照射試験（2025.3.17-2025.3.21）の概要

2025年3月17日から3月21日までの照射試験においては、原子炉出力上昇時における300°C一定温度制御試験、原子炉出力降下時における300°C一定温度制御試験及び原子炉定格出力運転時におけるガンマ発熱率確認試験を実施した。

本稿では結果について触れないが、原子炉停止期間中である3/18及び3/19については、ガス圧力計のデータ取得の際に、5分周期の長周期のノイズが確認され、その改善に向けた対応についても実施した。

試験日ごとの照射試験概要についてTable 5.9に示す。また、照射試験における温度制御装置の基本設定条件をTable 5.10に示す。

第2回照射試験期間中の制御熱電対温度及び原子炉熱出力をFig. 5.20に示す。

Table 5.9 第2回照射試験概要
(MARIA炉 2025-第10サイクル日程 3/12～3/18)
(MARIA炉 2025-第11サイクル日程 3/21～3/29)

試験日	原子炉の状態	試験内容
3/17	原子炉定格出力運転	ガンマ発熱確認試験
3/18	原子炉定格出力運転から 原子炉出力降下	300°C一定温度制御試験
3/19	原子炉停止中	ガス圧力計のノイズ改善
3/20	原子炉停止中	ガス圧力計のノイズ改善
3/21	原子炉出力上昇から 原子炉定格出力運転	300°C一定温度制御試験

Table 5.10 第2回照射試験時における原子炉出力上昇時及び出力降下時の温度制御基本条件

MARIA炉定格運転出力	23 MW(上昇時)、20MW(降下時)	
ヒータ制御	制御熱電対	TC-3、TC-7
	温度制御勾配	10°C/分
	制御方法	自動制御
真空制御	制御方法	手動制御

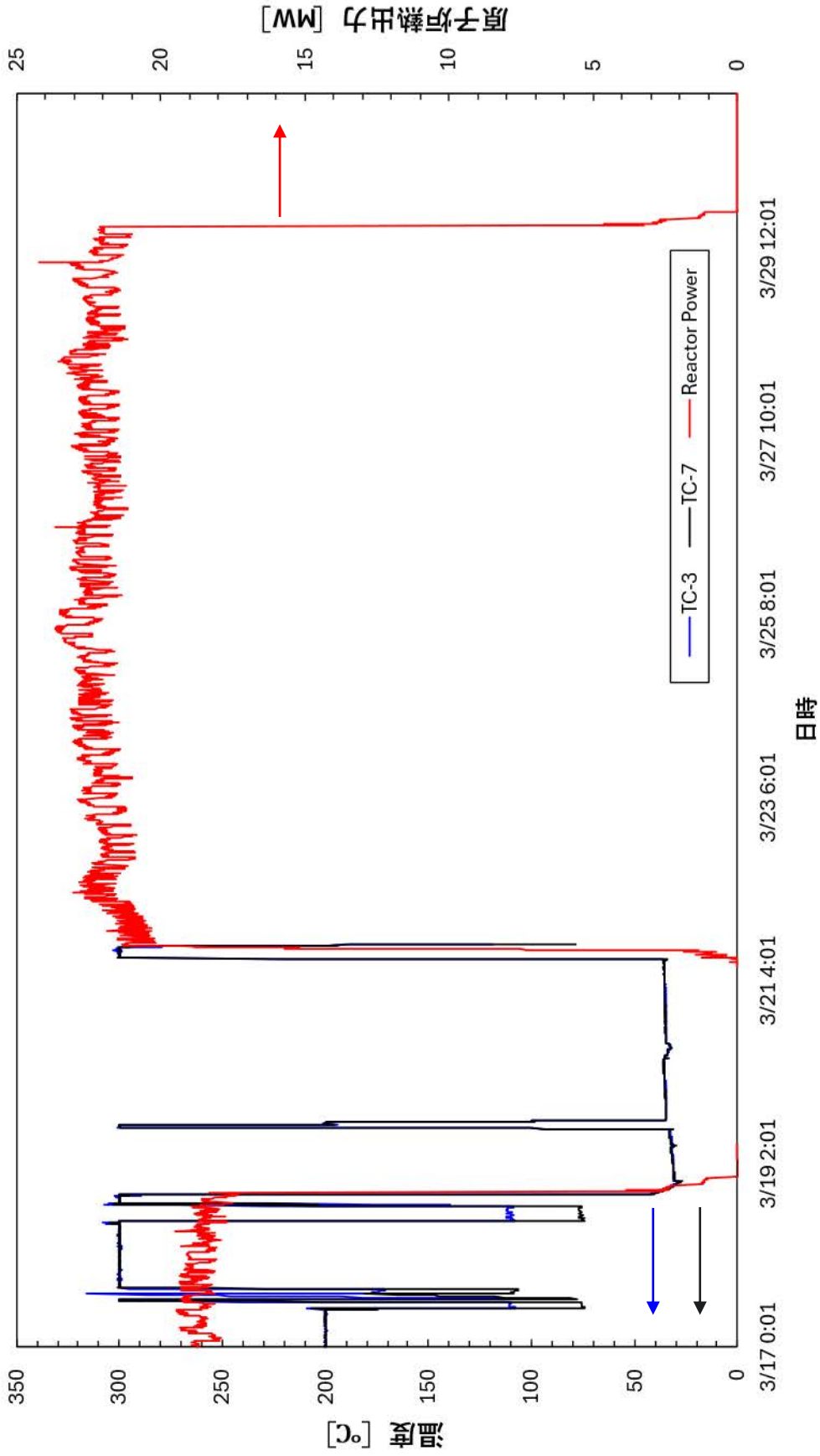


Fig. 5.20 第2回照射試験期間中の制御熱電対温度及び原子炉熱出力

5.2.1 原子炉定格出力運転中におけるガンマ発熱率確認試験 (2025.3.18)

2025年3月18日の11:06から2025年3月18日の14:19までの約3時間、原子炉定格出力運転中においてガンマ発熱率確認試験を実施した。試験期間中は、ヒータ OFF、ヘリウムダンプ状態での各熱電対の温度変化及びキャプセル内の温度分布を取得した。各熱電対における最高温度及び最低温度に達した際の熱電対温度、ヒータ出力、真空度及び各熱電対における温度差を Table 5.11 に示す。

キャプセル内の温度分布については、それぞれ同一の軸方向位置に、方位は180°反対方向に配置された TC-1/TC-2、TC-3/TC-4、TC-5/TC-6、TC-7/TC-8 の熱電対 (Fig.3.1 参照) が、互いにほぼ同一の温度域において類似の時間的な温度変化を示していることが確認された。原子炉定格出力運転時の熱電対温度の測定結果を Fig. 5.21 に、キャプセル下端からの距離における熱電対の測定結果を Fig. 5.22 に示す。

これらの温度測定結果を用いて GENGTC-K で評価した。評価の結果、上記の期間中においては、キャプセル内のガンマ発熱率は 0.35 W/g から 0.90 W/g 程度に分布していると考えられる。ガンマ発熱率の評価結果について、Fig. 5.23 に示す。

この結果については、MARIA 炉における今後の照射試験に用いるキャプセル設計の基礎データとして活用できると考えられる。

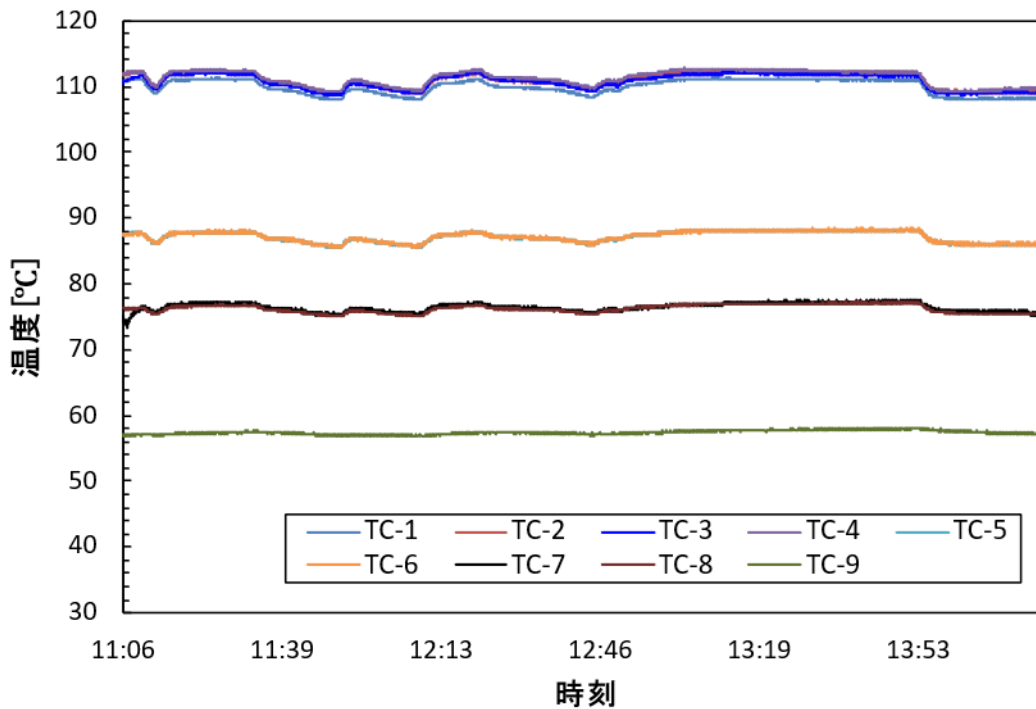


Fig. 5.21 2025.3.18 の第 2 回照射試験時の原子炉定格出力運転中におけるガンマ発熱率確認試験時の熱電対温度

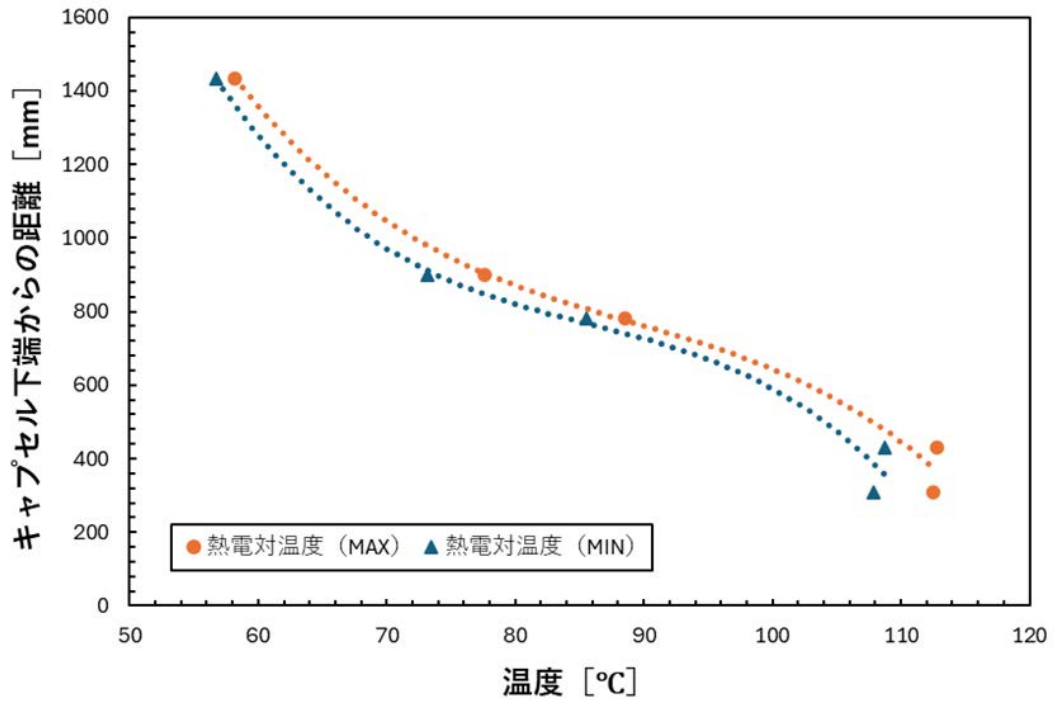


Fig. 5.22 2025.3.18の原子炉定格出力運転中におけるガンマ発熱率確認試験時の
 キャプセル下端からの距離における熱電対温度（最大値及び最小値）

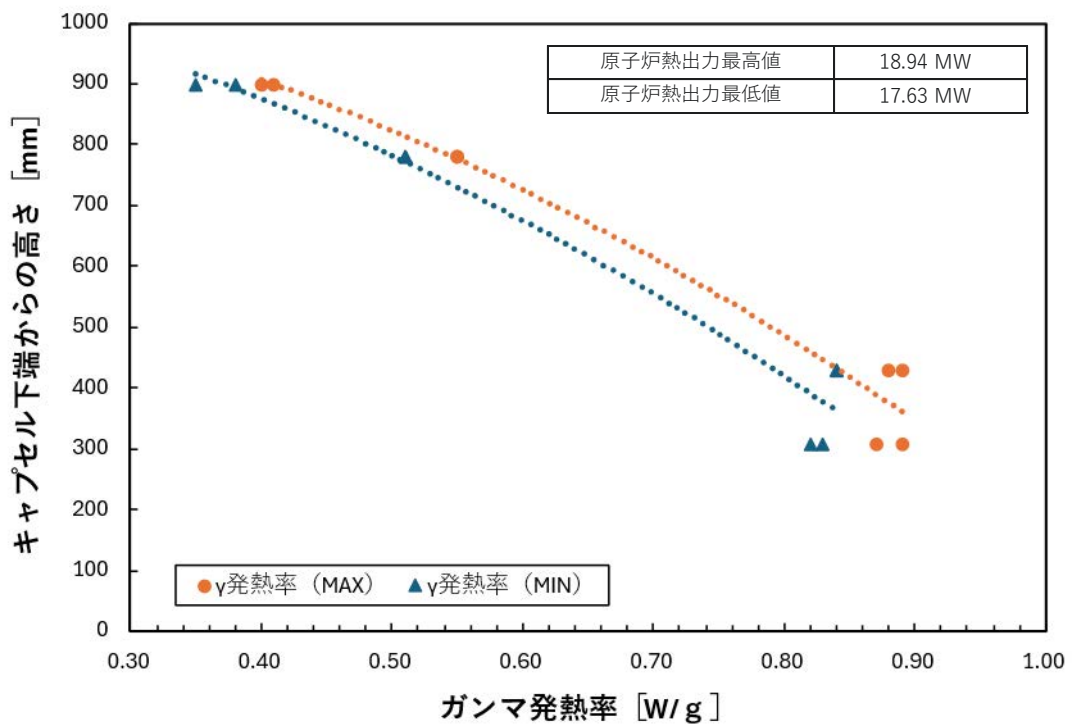


Fig. 5.23 2025.3.18の第2回照射試験時の原子炉定格出力運転中における
 GENGTC-Kにより算出した期間中のガンマ発熱率（最高値及び最低値）

Table 5.11 2025.3.18 の第 2 回照射試験時におけるガンマ発熱率確認試験の熱電対温度、真空度、各熱電対における温度差（下線は各熱電対の最高温度及び最低温度）(1/2)

測定時刻	TC-1	TC-2	TC-3	TC-4	TC-5	TC-6	TC-7	TC-8	TC-9	真空度 (Pa)	備考
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)		
2025/3/18 13:23:49	<u>111.3</u>	112.0	112.1	112.6	88.0	88.2	77.4	77.1	57.9	308541.7	TC-1 最高温度
2025/3/18 11:51:39	<u>107.9</u>	109.1	108.7	109.3	85.6	85.6	75.3	75.2	56.9	308375.0	TC-1 最低温度
2025/3/18 13:17:15	111.1	<u>112.5</u>	112.1	112.5	88.0	88.3	77.1	77.0	57.7	308583.4	TC-2 最高温度
2025/3/18 11:49:55	108.0	<u>108.8</u>	108.7	109.2	85.5	85.8	75.2	75.2	57.0	308416.7	TC-2 最低温度
2025/3/18 13:12:37	111.1	112.4	<u>112.3</u>	112.6	88.0	88.2	77.1	76.9	57.7	308625.0	TC-3 最高温度
2025/3/18 11:51:49	108.0	109.2	<u>108.7</u>	109.3	85.6	85.5	75.1	75.1	56.9	308375.0	TC-3 最低温度
2025/3/18 13:04:09	111.2	112.2	111.9	<u>112.8</u>	87.9	88.1	76.9	76.9	57.6	308666.7	TC-4 最高温度
2025/3/18 11:50:49	108.0	109.3	108.8	<u>109.1</u>	85.7	85.6	75.3	75.2	57.0	308375.0	TC-4 最低温度
2025/3/18 13:34:53	111.1	112.2	111.8	112.3	<u>88.3</u>	88.3	77.3	77.1	57.9	308458.4	TC-5 最高温度
2025/3/18 11:51:11	108.1	109.0	109.0	109.2	<u>85.5</u>	85.7	75.5	75.2	57.0	308375.0	TC-5 最低温度
2025/3/18 13:50:33	111.0	112.0	111.5	112.3	88.1	<u>88.5</u>	77.4	77.2	58.0	308375.0	TC-6 最高温度
2025/3/18 12:08:33	108.1	108.9	108.9	109.4	85.7	<u>85.5</u>	75.4	75.2	56.9	308166.7	TC-6 最低温度

Table 5.11 2025.3.18 の第 2 回照射試験時におけるガンマ発熱率確認試験の熱電対温度、真空度、各熱電対における温度差（下線は各熱電対の最高温度及び最低温度）(2/2)

測定時刻	TC-1	TC-2	TC-3	TC-4	TC-5	TC-6	TC-7	TC-8	TC-9	真空度 (Pa)	備考
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)		
2025/3/18 13:29:25	111.1	112.0	112.0	112.5	88.2	88.2	77.6	77.1	57.8	308500.0	TC-7 最高温度
2025/3/18 11:07:07	110.9	111.6	110.8	111.9	87.5	87.6	73.2	76.3	57.1	308500.0	TC-7 最低温度
2025/3/18 13:50:59	111.1	111.8	111.7	112.2	88.2	88.3	77.5	77.2	58.1	308375.0	TC-8 最高温度
2025/3/18 11:51:51	107.9	108.9	108.8	109.3	85.8	85.8	75.4	75.1	56.9	308375.0	TC-8 最低温度
2025/3/18 13:51:43	111.0	111.9	111.6	112.2	88.1	88.3	77.4	77.1	58.2	308333.4	TC-9 最高温度
2025/3/18 12:07:53	108.0	108.9	109.0	109.5	85.5	85.7	75.5	75.2	56.7	308208.4	TC-9 最低温度

各熱電対の最高温度 及び最低温度の温度差	TC-1	TC-2	TC-3	TC-4	TC-5	TC-6	TC-7	TC-8	TC-9
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
	3.4	3.7	3.6	3.7	2.8	3.0	4.4	2.1	1.5

5.2.2 原子炉出力降下時における 300°C 一定温度制御試験 (2025.3.18)

2025年3月18日に原子炉出力降下時の一定温度制御性を確認するため、300°C一定温度制御試験を実施した。原子炉出力降下時の300°C一定試験においては、MARIA炉の原子炉出力降下は定格運転20MW付近から3~4MW程度まで1~2分程度で急激に出力低下させ、その後はゆるやかに停止状態(0MW)に至る挙動であったが、原子炉熱出力の急激な変化にも関わらず±26.0°Cの範囲で温度制御ができることを確認した。原子炉出力降下時における制御熱電対温度及び原子炉熱出力の測定結果をFig. 5.24に示す。また、制御熱電対TC-3及びTC-7の最高温度及び最低温度等をTable 5.12に示す。

温度制御装置の制御の方法としては、原子炉出力降下に先立ち、キャプセル内を300°Cの環境にするため、ヒータ300°C自動制御を実施した。自動制御を入力したことで、原子炉出力降下時においては、キャプセル内の温度が低下することを抑えるため、ヒータ出力が上昇する。また、この際にヒータの出力増加制御範囲を拡大するために、ヒータ出力が2A程度になるよう、真空度を700Pa程度に手動制御した。ヒータ出力及び真空度の測定結果をFig. 5.25に示す。

試験時の照射キャプセル内の温度は、原子炉出力降下時に、照射キャプセル内の温度は低下したものの最低でも274°Cで留まり、この際に300°Cから5°Cを超えて温度が低下した時間は3分以下であった。原子炉出力降下時における制御熱電対温度の測定結果をFig. 5.26に示す。

これらの結果から、原子炉出力降下時におけるヒータの300°C一定自動制御により、照射キャプセル内の温度を±26.0°Cの範囲内に留めることができることを確認した。

**Table 5.12 2025.3.18の第2回照射試験時における原子炉出力降下時の
制御熱電対温度、ヒータ出力、真空度、制御熱電対の制御範囲 (15:15-17:30)
(下線は各熱電対の最高温度及び最低温度)**

測定時刻	TC-3 (°C)	TC-7 (°C)	HTR-1 (A)	HTR-2 (A)	圧力 (PA)	備考
2025/3/18 17:17:03	<u>303.3</u>	300.3	4.7	5.1	665.6	TC-3 最高温度
2025/3/18 17:14:29	<u>274.0</u>	291.7	4.1	4.9	660.6	TC-3 最低温度
2025/3/18 16:50:13	301.5	<u>300.8</u>	2.0	4.1	668.8	TC-7 最高温度
2025/3/18 17:14:15	275.3	<u>291.3</u>	3.7	4.8	661.3	TC-7 最低温度

制御熱電対制御範囲 (熱電対の最高温度及び最低温度の温度差)	TC-3 (°C)	TC-7 (°C)
	29.3	9.5

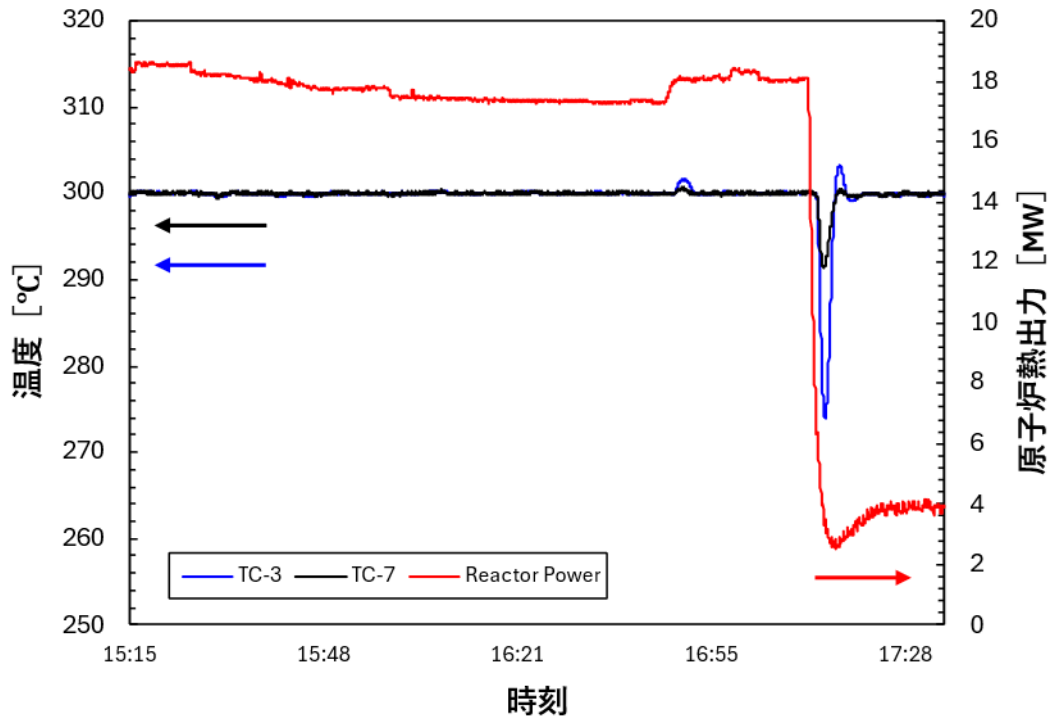


Fig. 5.24 2025.3.18 の第 2 回照射試験時の原子炉出力降下時における
300°C 一定温度制御試験時の制御熱電対温度及び原子炉熱出力

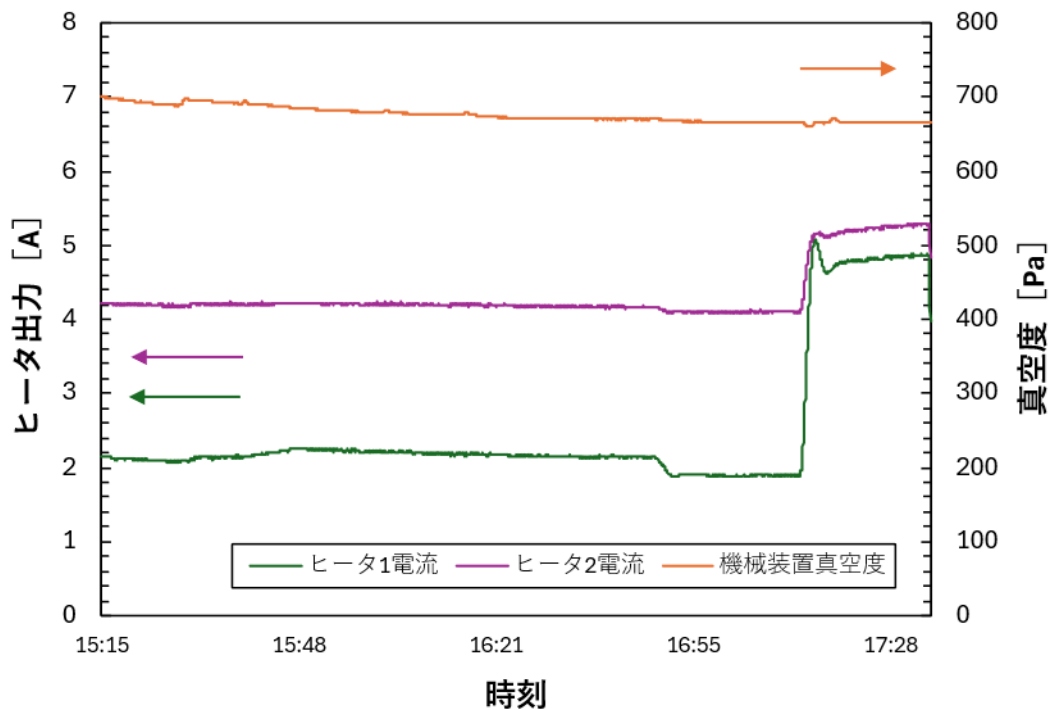


Fig. 5.25 2025.3.18 の第 2 回照射試験時の原子炉出力降下時における
300°C 一定温度制御試験時のヒータ出力及び真空度

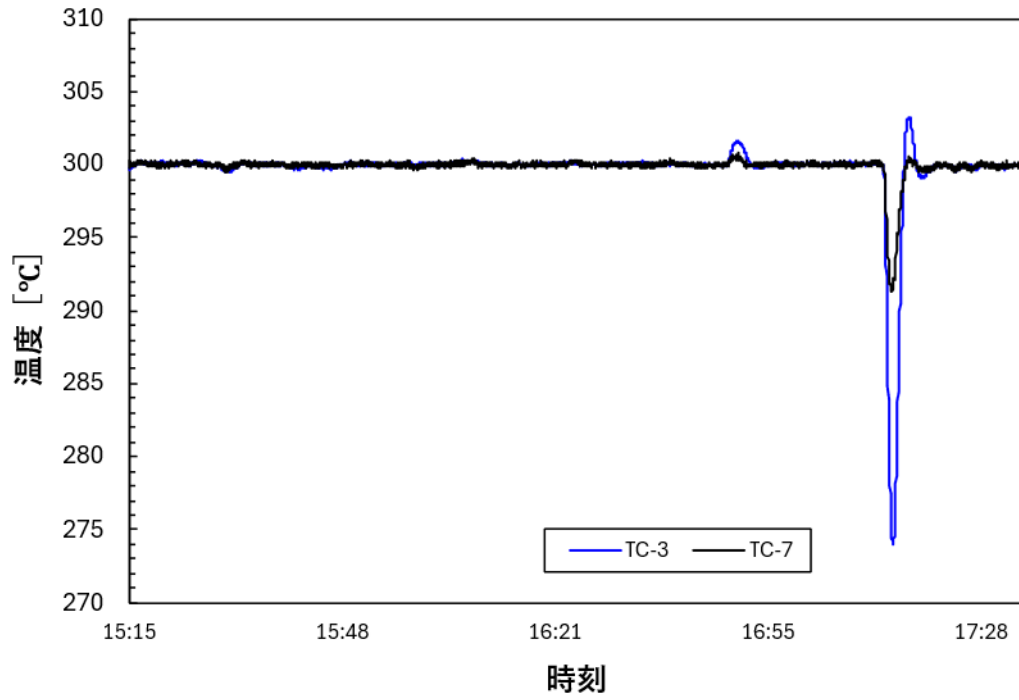


Fig. 5.26 2025.3.18 の第 2 回照射試験時の原子炉出力降下時における
300°C 一定温度制御試験時の制御熱電対温度

5.2.3 原子炉出力上昇時における 300°C 一定温度制御試験 (2025.3.21)

2025年3月21日に原子炉出力上昇時の一定温度制御性を確認するため、300°C一定温度制御試験を実施した。MARIA炉の出力上昇シーケンスは、定格運転時の20MW付近まで段階的に炉出力を上昇させるが、この過程においても原子炉熱出力の変化に関わらず、一定温度制御が維持できることを確認した。原子炉出力上昇時における制御熱電対温度及び原子炉熱出力の測定結果を Fig. 5.27 に示す。また、制御熱電対 TC-3 及び TC-7 の最高温度及び最低温度等を Table 5.13 に示す。

温度制御装置の制御の方法としては、原子炉出力上昇に先立ち、キャプセル内を 300°C の環境にするため、ヒータ 300°C 自動制御を実施した。自動制御を入力したことで、原子炉出力上昇時には、キャプセル内の温度が上昇することを抑えるため、ヒータ出力が抑制される。また、この際にヒータの出力低下制御範囲を拡大するために、ヒータ出力を 6A 程度になるよう、真空度を 700 Pa 程度に手動制御した。ヒータ出力及び真空度の測定結果を Fig. 5.28 に示す。

試験時の照射キャプセル内の温度は、原子炉出力上昇時に、照射キャプセル内の温度はわずかに上昇し、最高でも 306.3°C であった。原子炉出力上昇時における制御熱電対温度の測定結果を Fig. 5.29 に示す。

これらの結果から、原子炉出力上昇時におけるヒータの 300°C 一定自動制御により、照射キャプセル内の温度を±6.3°C の範囲内に維持できることを確認した。さらに 300°C 一定制御時に真空弁開度が 80% で真空度 700 Pa、ヒータ出力が最大 4A であったことから、真空弁開度が 100% までわずかに余裕があることと、本キャプセルにおいては、ヒータの出力上限値が 7A 程度で 3A 程度余裕があることから、真空度をさらに向上させ、ヒータの上限値まで出力を上げることができれば、400°C の一定温度制御も実現できると考えられる。

**Table 5.13 2025.3.21 の第 2 回照射試験時における原子炉出力上昇時の
制御熱電対温度、ヒータ出力、真空度、制御熱電対の制御範囲 (10 : 45-12 : 00)
(下線は各熱電対の最高温度及び最低温度)**

測定時刻	TC-3 (°C)	TC-7 (°C)	HTR-1 (A)	HTR-2 (A)	圧力 (PA)	備考
2025/3/21 11:47:47	<u>306.3</u>	302.1	3.5	4.8	667.5	TC-3 最高温度
2025/3/21 11:49:23	<u>298.5</u>	299.7	3.4	4.9	665.6	TC-3 最低温度
2025/3/21 11:47:37	305.6	<u>302.2</u>	3.5	4.9	666.9	TC-7 最高温度
2025/3/21 11:49:13	298.8	<u>299.4</u>	3.4	4.8	666.3	TC-7 最低温度

制御熱電対制御範囲 (熱電対の最高温度及び最低温度の温度差)	TC-3 (°C)	TC-7 (°C)
	7.8	2.8

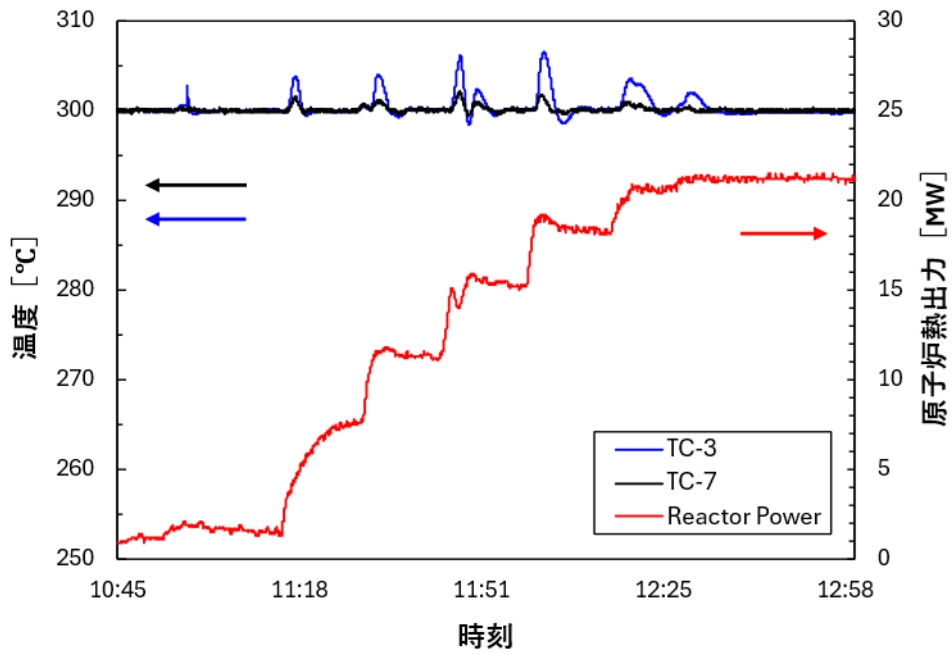


Fig. 5.27 2025.3.21 の第 2 回照射試験時の原子炉出力上昇時における
300°C 一定温度制御試験時の制御熱電対温度及び原子炉熱出力

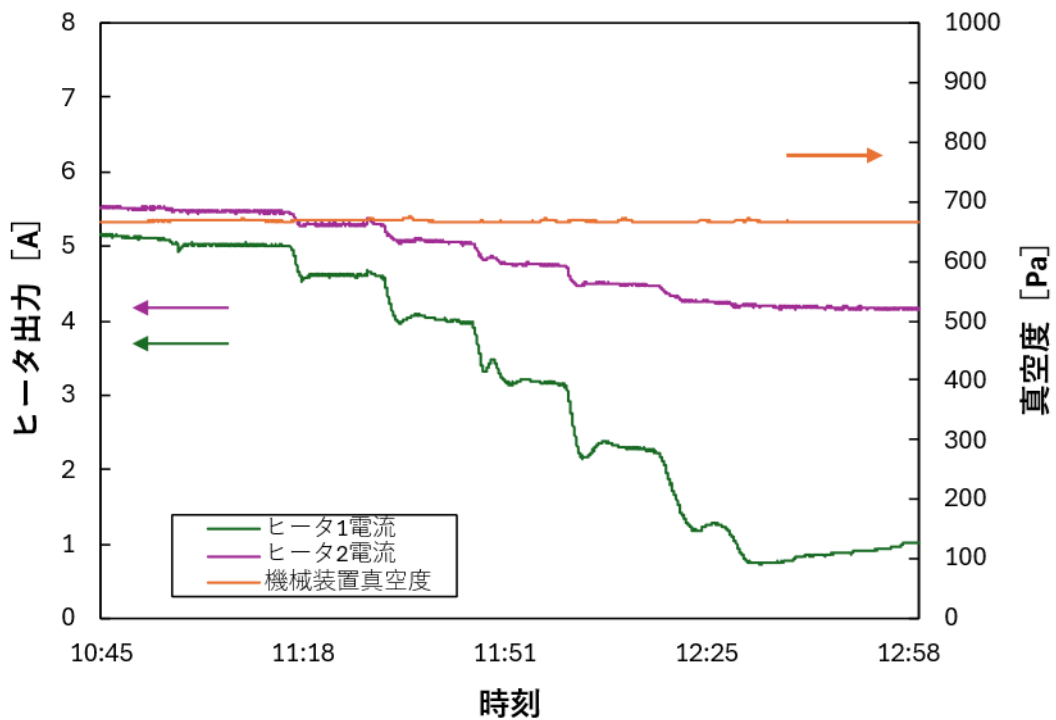


Fig. 5.28 2025.3.21 の第 2 回照射試験時の原子炉出力上昇時における
300°C 一定温度制御試験時のヒータ出力及び真空度データ

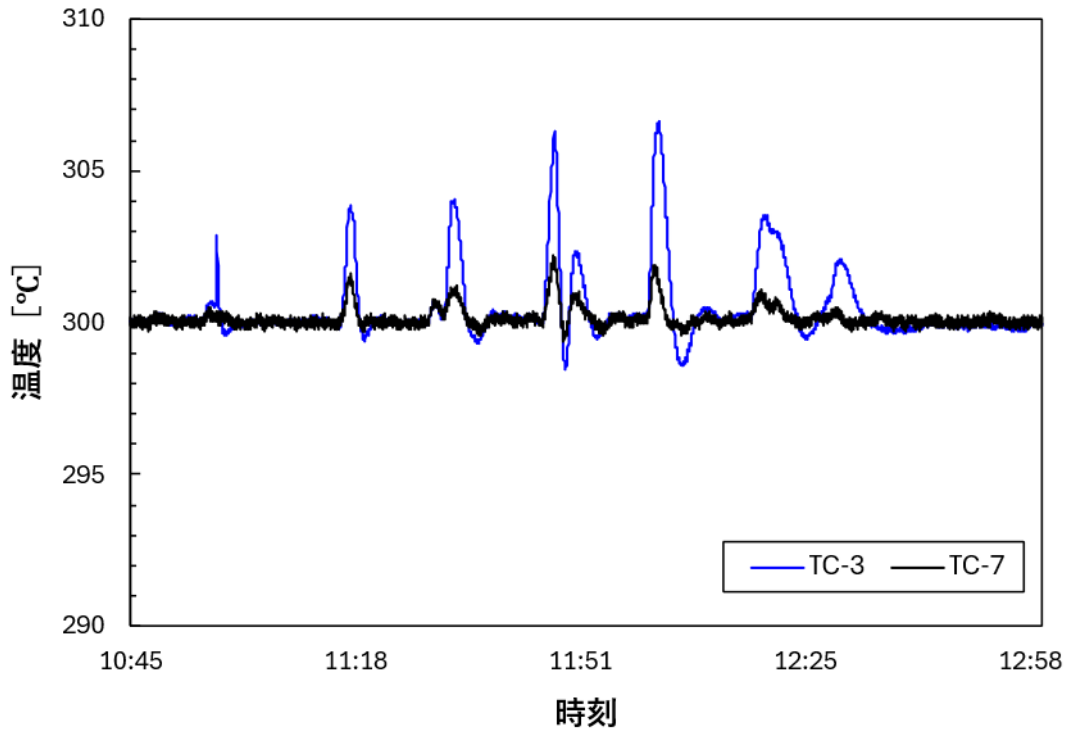


Fig. 5.29 2025.3.21 の第 2 回照射試験時の原子炉出力上昇時における
300°C 一定温度制御試験時の制御熱電対温度

6. 結論

JMTR で運用されていた温度制御試験システム及びポーランド MARIA 炉での照射試験を目的として改造された JMTR 型照射キャプセルに関する輸出及び 2024 年 5 月における試験システムの建屋内への据え付け完了について、前稿で報告した³⁾。本稿では、同キャプセルの炉内装荷及び 2024 年 8 月 2 日から開始し 2025 年 10 月に完了した 150 日間を超える照射試験結果について報告した。

本照射試験において、輸出した温度制御試験システムを用いた原子炉出力上昇時及び下降時における 200°C 一定試験及び 300°C 一定試験を実施した。その結果、原子炉出力上昇時には、目標温度に対して $\pm 6.3^{\circ}\text{C}$ 以内での温度制御を実施でき、原子炉出力降下時には、目標温度に対して $\pm 26.0^{\circ}\text{C}$ 以内で温度制御を実施することができた。

これらの結果から良好な一定温度制御が可能であることが確認され、JMTR の照射試験技術を用いることで MARIA 炉においても有効な照射場を提供しうることが確認できた。

さらに、各熱電対によるキャプセル内温度分布データにより、MARIA 炉におけるガンマ発熱率を試算した結果、第 1 回照射試験及び第 2 回照射試験において、キャプセル内におけるガンマ発熱率は 0.35W/g から 0.90W/g の間で分布していることを確認した。本評価については、今後の MARIA 炉におけるさらに高精度な温度制御を実現するキャプセル設計に資する基礎データとして活用できると考えられる。

これらの結果から、JMTR の照射試験技術である照射温度制御を伴った照射試験が MARIA 炉

においても実施可能であり、今後、本照射試験で得られたデータを基にさらなる設計及び制御方法の検討を行い、温度制御技術等の照射技術継承を継続しながら、材料照射試験をはじめとする炉内照射試験を実施可能な照射場を確立することで、JMTR 代替照射の実現を目指していく。

謝辞

ガンマ発熱率の評価について、原子力エンジニアリング株式会社 飛田正浩氏、温度制御装置の運転について、原子力科学研究所 研究基盤技術部 利用施設管理課 岡田祐次技術副主幹にご助言を頂きました。また、本報告書をまとめるにあたり、土谷邦彦氏（当時、環境技術開発部部長）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, (2012), 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] 高部 湧吾, 大塚 紀彰, 冬島 拓実他, 「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)」, JAEA-Technology 2022-040, (2023),45p.
- [4] National Centre for Nuclear Research, “The MARIA research reactor”, <https://www.ncbj.gov.pl/en/maria-reactor> (参照: 2026 年 4 月 1 日).
- [5] Marek Migdal, Emilia Balcer, Łukasz Bartosik, et al., ”MARIA Reactor Irradiation Technology Capabilities towards Advanced Applications”
- [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] 北島 敏雄, 阿部 新一, 高橋 澄他, 「キャプセル照射温度自動制御装置の整備」平成 12 年度 弥生研究会 (研究炉等の運転・管理及び改良に関する研究会)
- [8] 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.
- [9] 冬島 拓実, 佐谷戸 夏紀, 大塚 薫他, 「1 次元熱計算コード GENGTC の計算手法の改良」, JAEA-Testing 2024-008, (2025),38p.

This is a blank page.

