

## 核データ部会・材料部会合同セッション

### 「材料損傷評価のための核データおよび材料照射研究への活用」

## (3) 試験研究炉を用いた材料照射環境の整備

日本原子力研究開発機構

加治 芳行

[kaji.yoshiyuki@jaea.go.jp](mailto:kaji.yoshiyuki@jaea.go.jp)

### 1. はじめに

原子力機構の材料試験炉 JMTR (Japan Materials Testing Reactor)の廃止決定(平成29年4月)により、軽水炉の安全性向上、信頼性・効率性向上のための技術開発や新型炉開発に必要な照射場が失われ、国内において照射試験が行えなくなっている。また、照射試験炉の照射技術の継承や運転技術を担う人材育成も困難となっており、これらを基盤的に支える大学等における照射研究による人材の教育も危機的状況となっている。

海外においても HBWR (Halden Boiling Water Reactor)を始め多くの高出力照射試験炉が高経年化により相次いで廃止されてきており、現在稼働している多くの照射試験炉も10年後には廃止の可能性が高くなっている。このような中、フランスの JHR (Jules Horowitz Reactor)等の高出力照射試験炉の建設が進められているが、稼働までにはかなりの時間が必要な状況である。また、海外炉の利用に関しては、高額な利用料金、試料の輸出入における煩雑な手続き等が伴うとともに、国内の照射技術・照射後試験技術を担う原子力人材の育成が困難となる等、多くの課題がある。

国内では平成28年度末に決定された「もんじゅ」の廃止措置移行に伴い、「もんじゅ」サイトに中性子ビーム利用を主目的とした10MW出力の研究炉を設置することが決定された。しかし、この研究炉が稼働するまでには10年以上の期間が必要である。

このような状況の中、令和3年2月に運転を再開し、同7月に供用を開始した JRR-3 (Japan Research Reactor-3)は、中性子ビーム利用を主目的としているものの、平成18年以降原子炉圧力容器(RPV)の中性子照射脆化に係る照射試験等を実施した実績があることから、改めて JRR-3 を用いた材料照射環境を整備することとした。

## 2. JRR-3 の概要

平成 22 年 11 月 19 日から定期検査のため運転を停止し、東日本大震災後、新たに策定された新規制基準への適合性の確認、新規制基準への適合のための工事等を行い、令和 3 年 2 月 26 日に 10 年 3 カ月ぶりに運転を再開した。

JRR-3 は熱出力 20 MW、軽水減速冷却、重水反射体を用いたプール型研究用原子炉であり、原子炉建屋 1 階中央に鍵穴型プールを設け、直径約 4.5 m、深さ約 8.5 m の円形部に原子炉を設置している。JRR-3 の主要諸元を表 1 に示す。炉心の大きさは直径約 0.6 m、高さ約 0.75 m であり、標準型燃料要素 26 体、フォロワ型燃料付き制御棒 6 体、照射筒 5 基、ベリリウム反射体等から構成される。これらは格子板上に配列され、その荷重は格子板支持胴を介して原子炉プール底部で支持する構造となっている。

表 1 JRR-3 の主要諸元

項目	内容
炉形式	低濃縮ウラン軽水減速冷却プール型
最大熱出力	20 MW
中性子束	最大熱中性子束： $3 \times 10^{14}$ n/cm <sup>2</sup> ·s 最大高速中性子束： $2 \times 10^{14}$ n/cm <sup>2</sup> ·s
原子炉炉心	構成要素 標準燃料(26 体)、制御棒(フォロワ燃料付 6 本)、照射筒(5 体)、Be 反射体(周辺部)
	炉心寸法 等価直径：約 60 cm、有効高さ：約 75 cm
	反射体寸法 内径：0.6 m、外径：2 m、高さ：1.6 m 2 重円筒の重水タンク

図 1 に JRR-3 照射設備の配置概要を示す [1]。炉心は約 3.4 m<sup>3</sup> の重水が充填された重水タンクに囲まれている。重水タンクは内径 0.6 m、外径 2 m、高さ 1.6 m であり、反射体の役目を果たすと共に高速中性子を減速させ、最大の熱中性子を利用できる場を提供する。この特徴を生かして重水タンク内には垂直、水平方向からそれぞれ 9 本ずつの垂直実験孔、水平実験孔が設けられている。炉心部の垂直照射孔としては、炉心部中央に 1 本 (VT-1)、燃料領域に 4 本 (RG-1~4)、ベリリウム反射体領域に 4 本 (BR-1~4) の合計 9 本が設置されており、原子力材料・燃料の照射試験、ラジオアイソトープ製造を行うことが可能である。

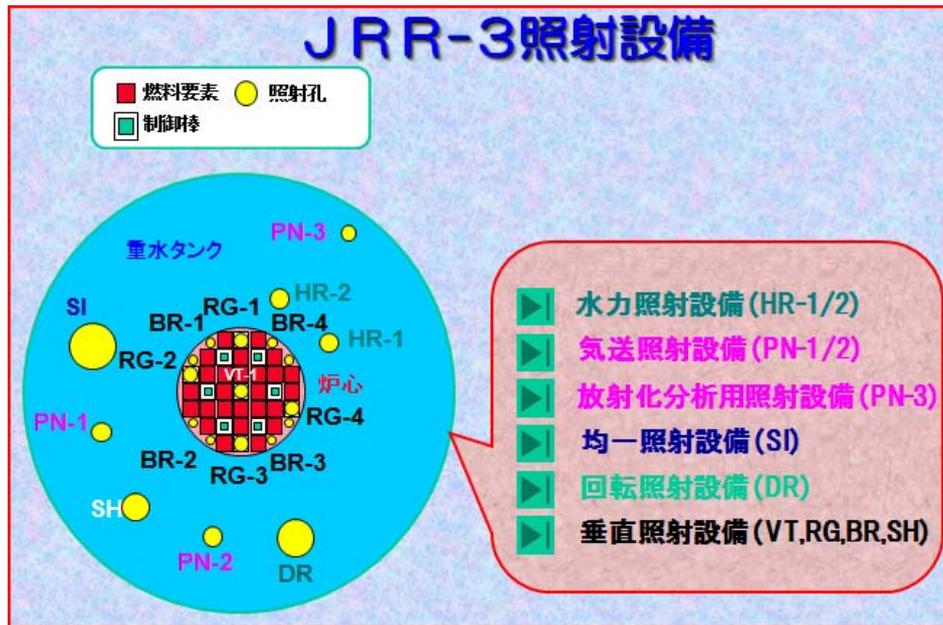


図1 JRR-3 照射設備の配置概要[1]

### 3. 照射試験基盤技術

JRR-3 における材料照射環境整備として、JMTR からキャプセル温度制御装置を JRR-3 に移設し、照射キャプセルの設計技術を継承するとともに、中性子照射量評価等の基盤技術開発を行っている。ここでは、本基盤技術の基本となっている JMTR で開発された一定温度制御キャプセルおよび温度制御装置、中性子照射量評価等の照射試験基盤技術について紹介する。

#### 3.1 一定温度照射キャプセル[2]

原子炉内の構造物は、ウランの核分裂反応によって発生する中性子の照射を受け、中性子と構造物の材料中の原子が衝突することにより、「はじき出し損傷」と呼ばれる材料欠陥が発生する。このはじき出し損傷の程度は中性子のもつエネルギーによって異なり、エネルギーの大きな高速中性子 (> 1 MeV) では中性子によってはじきとばされた材料原子がさらに別の原子をはじき出し、次々と連鎖的な損傷(カスケード損傷)を与える。また、中性子が材料原子と核反応を起こして別の元素に変化し、水素やヘリウムなどのガス元素が形成される。材料に蓄積された照射欠陥等は材料組織に変化をもたらし、材料の機械的性質や物理的特性に変化をもたらす。これらの現象は、中性子照射量、中性子エネルギー、照射速度、照射温度に大きく依存する。

従来の照射試験炉を用いた照射においては、技術的な問題から、原子炉出力が定格出力になった後に温度制御を行うというプロセスを用いており、原子炉運転開始から定格出力になるまでの間、照射試験材料は低温状態で照射されていた。この低温照射の過程で発

生じた照射損傷が残存することが照射損傷基礎過程研究の課題となっており、高い温度制御技術の開発が望まれていた。

JMTR では、低温照射履歴を排除するために「一定温度照射キャプセル」を開発した。キャプセル容器内全体のガス層の圧力を変えることによってガス層の熱伝導率を調節する方法（以下「真空制御方式」という）と局部に内装する電気ヒータでキャプセル内発熱量を調整する方法（以下「ヒータ制御方式」という）を併用し、原子炉起動時から定格出力および定格出力から原子炉停止のそれぞれの期間、一定の照射温度がこのキャプセルで実現される。

キャプセルは、外径 40~65 mm（照射孔サイズによる）、長さ 1 m 弱の円筒容器であり、その中に照射試料が装荷され不活性ガスのヘリウムガスが挿入される。装荷される照射試料およびキャプセル構造材料はガンマ線を吸収することにより発熱し、この熱はキャプセル容器外表面を流れる原子炉一次冷却水により冷却される。発熱は中性子束分布と同じ様に炉心の軸方向でコサイン分布することから熱伝導率が小さいガス（ヘリウム）層の厚さ（1~0.01 mm）をキャプセル軸方向で変えることによって軸方向の温度の均一化を図る。また、照射試料の照射温度制御は、真空制御方式とヒータ制御方式によって行う。

JMTR の照射キャプセル等の設計における熱計算では、ガンマ線による発熱以外に材料の熱伝導率および比熱の温度依存性、輻射熱伝達、対流熱伝達、材料の熱膨張による寸法変化、燃料試料の核分裂発熱等も考慮し、いくつかの計算コードを駆使して目標温度達成を確認している。まず、米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) でキャプセル温度計算用に開発された一次元熱計算コード GENGTC (Generalized Gap Temperature Calculation) [3,4] を用いて熱計算を行い、当たりをつける。その後、照射中や照射後の照射試料の温度分布を精度良く評価するために、3次元有限要素法コード NISA (Numerically Integrated elements for System Analysis) [5,6] を導入し、熱膨張の影響を考慮したキャプセルの温度分布計算を行い、目標温度を達成するようにキャプセル構成部品の材料や寸法の最適化を行う。また、照射後の照射試料の温度評価も熱電対の温度測定結果を参考に 3次元での評価が可能である。

一定温度制御装置の概要を図 2 に示す。通常のキャプセルは、照射試料の周りに電気ヒータとガス層が設けられている。原子炉の低出力時にも照射温度を達成できる様にガス層を大きくし、断熱効果を大きくすることで、運転開始前からヒータの出力とガス層の圧力（真空度）を調整して照射試料を目標温度に制御することが可能となる。

原子炉定格出力時はヒータの出力調整は応答が良いため、通常のフィードバック制御を用いた温度制御で問題ないが、ガス層の圧力調節による温度制御は応答が悪く、照射試料の温度変化を検出した後にガス層圧力を手動で調整するフィードバック方式では高い制御精度が得られない。このため、原子炉出力の変化が大きい原子炉起動時および停止時の出力変化には、真空制御方式のガス層圧力調整系に原子炉の出力信号でガス層の圧力

を先行調整する先行制御回路を組み込み、ヒータ出力のフィードバック制御と併用して照射試料温度を制御する方式を採用した。この制御方式では、原子炉の出力変化に伴う照射試料温度の変化に先行してガス層の圧力を調整するため、配管抵抗による温度の制御遅れを補うことができ、制御精度を高めることが可能となった。

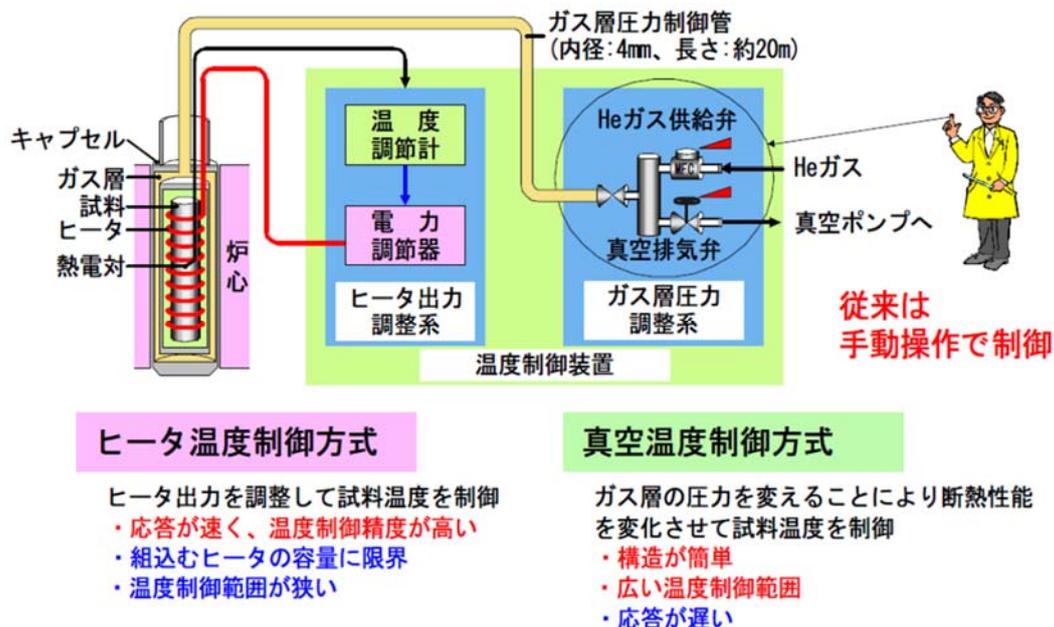


図2 一定温度制御装置の概要

### 3.2 中性子照射量の評価[2]

JMTR における中性子束および中性子照射量の評価は、測定と核計算の組合せによって実施してきた。核計算は、計算モデル（解析モデル）の良否が結果を大きく左右する。このため JMTR 炉心および照射キャプセル内を 3 次元モデル化して計算し、照射試料およびフルエンスモニタ(F/M) 位置での中性子束、中性子スペクトル等の評価していた。

計算コードは 3 次元連続エネルギーモンテカルロ計算コードの MCNP (ver. 4B) [7]を用いていた。使用する核データライブラリは、日本で評価済みである JENDL-3.2 に基づいた MCNP 用の連続エネルギー断面積ライブラリ FSXLIB-J3R2 [8]および米国の評価済み核データライブラリ ENDF/B-III に基づく  $S(\alpha, \beta)$  データライブラリ等を適用していた。

MCNP 計算により出力される計算結果は、炉心の実効増倍係数 ( $k_{eff}$ )、1 線源あたりの指定されたエネルギー領域における中性子束、反応率等の値である。中性子照射量評価では、これら出力結果について 50 MW に規格化した場合の熱中性子束 ( $<0.683$  eV)、高速中性子束 ( $>1.0$  MeV)、 $^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$  反応率および  $^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$  反応率が使用されていた。

照射試料位置の MCNP 計算値の評価精度については、F/M による測定値と MCNP 計算値を比較することによって計算による誤差を求め、検証していた。JMTR を用いた照射試

験のための解析評価では、これまでの結果から、高速中性子束(> 1 MeV)では測定値と比較して±10%程度、熱中性子束(< 0.683 eV)では±30%程度の評価精度となっている[9-11]。

### 3.3 JRR-3 における照射試験基盤技術の現状

3.1.および 3.2.で示した JMTR で培われた一定温度照射キャプセルの設計技術、一定温度制御装置および中性子照射量評価技術を JRR-3 に継承するとともに人材育成に取り組んでいるところである。現在、令和 6 年度以降に JRR-3 を用いた材料照射試験を開始するための準備を進めている。最初の照射キャプセルには多くの熱電対および F/M を設置し、垂直照射孔における照射試験データ（照射温度分布、軸方向の中性子束分布等）を取得する予定である。これらのデータを今後製作する一定照射温度キャプセルの設計・運用にフィードバックさせるとともに、中性子照射量評価手法の高度化にも反映させる予定である。

## 4. おわりに

JRR-3 における材料照射環境整備として、JMTR からキャプセル温度制御装置を JRR-3 に移設し、照射キャプセルの設計技術を継承するとともに、中性子照射量評価等の基盤技術開発を行っている。ここでは、本基盤技術の基本となっている JMTR で開発された一定温度制御キャプセルおよび温度制御装置、中性子照射量評価等の照射試験基盤技術について概説した。

今回紹介した一定照射温度キャプセルおよび温度制御装置等を有する JRR-3 が今後有効に活用され、既存軽水炉の長期運転に係る安全性向上研究や次世代革新炉等に係る基礎基盤研究の一層の進展に寄与することを期待している。

## 参考文献

- [1] 日本原子力研究開発機構 原子力化学研究所 JRR-3 照射設備概要  
<https://jrr3.jaea.go.jp/2/22.htm>
- [2] 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).
- [3] 野村靖他、「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.
- [4] H. C. Roland, “GENGTC, A One-dimensional CEIR Computer Program for Capsule Temperature Calculations in Cylindrical Geometry”, ORNL-TM-1942, (1967) .
- [5] 飛田正浩他、「照射キャプセル設計支援のための 3 次元温度計算用サブプログラムの開発」、JAERI-Tech 2003-042、(2003) 132p.
- [6] 富田健司他、「JMTR キャプセル照射温度評価法の開発：有限要素法「NISA」コード

- による CT 試験片及び 2 分割熱媒体の温度評価」、JAEA-Technology 2008-043、(2008) 21p.
- [7] J.F.Briesmeister (Ed.), “ MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B”, LA-12625-M (1997).
- [8] K. Kosako, F. Maekawa, Y. Oyama, Y. Uno, and H. Maekawa, “FSXLIB-J3R2: A Continuous Energy Cross Section Library for MCNP Based on JENDL-3.2”, JAERI-Data/Code 94-020 (1994).
- [9] 長尾美春、「原子力研究における MCNP の使用経験 5.2 JMTR の炉心計算 — MCNP による全炉心計算—」、JAERI-Review 97-003、(1997)、pp.74-95.
- [10] 長尾美春、「原子力研究における MCNP の使用経験 (II) —分散低減法の検討— 2.4 JMTR の炉心計算」、JAERI-Review 98-010、(1998)、pp.128-195.
- [11] 長尾美春、「第 1 回モンテカルロシミュレーション研究会報文集 2.13 MCNP による JMTR 炉心計算」、JAERI-Conf 2000-018、(2000)、pp.156-167.