



自然対流型キャプセルを模擬した  
炉外試験装置による熱流動試験

Thermal-Hydraulic Tests with Out-of-Pile Test Facility  
Simulating Natural Convection Capsule

稲葉 良知 坂本 太一 山浦 高幸

Yoshitomo INABA, Taichi SAKAMOTO and Takayuki YAMAURA

大洗研究開発センター

照射試験炉センター

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center  
Oarai Research and Development Center

February 2010

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは独立行政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。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 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  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

## 自然対流型キャプセルを模擬した炉外試験装置による熱流動試験

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター  
照射試験炉センター

稲葉 良知、坂本 太一<sup>+\*</sup>、山浦 高幸<sup>+</sup>

(2009年12月22日受理)

材料試験炉 (JMTR) において実施する軽水炉燃料の燃料異常過渡試験では、キャプセル型の照射試験装置を用い、試験燃料の出力過渡による健全性を評価する。照射試験に先立ち、燃料異常過渡試験で用いるキャプセルを模擬し、試験燃料棒に替えて電気ヒーターピンを用いた炉外試験装置を設計・製作した。製作した炉外試験装置を用い、照射試験の成立性調査及び試験方法策定のために必要な試験を行った。

本報告書では、炉外試験装置の概要、試験計画及び自然対流型キャプセルを模擬した試験について述べた。試験の結果、BWR 及び PWR の冷却水圧力条件下で直径 9.5 mm のヒーターピンを用いても、核沸騰から膜沸騰への遷移を起こすことなく線出力 600 W/cm が達成可能であることを確認し、JMTR において被覆管外径 9.5 mm の BWR 燃料及び PWR 燃料を用いた線出力 600 W/cm までの照射試験が可能であることを明らかにした。

---

本報告書は、経済産業省原子力安全・保安院からの受託事業「平成 20 年度軽水炉燃料材料詳細健全性調査」として、(独)日本原子力研究開発機構が実施した成果の一部である。

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

+ 原子炉施設管理部

※ 出向職員 (川崎プラントシステムズ株)

## Thermal-Hydraulic Tests with Out-of-Pile Test Facility Simulating Natural Convection Capsule

Yoshitomo INABA, Taichi SAKAMOTO<sup>+※</sup> and Takayuki YAMAURA<sup>+</sup>

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

(Received December 22, 2009)

Power transient tests for the fuels of light water reactors are to be carried out in the Japan Materials Testing Reactor (JMTR) using capsule-type irradiation test facilities, and the integrity of the fuels is to be investigated by the tests. Prior to the irradiation tests of the fuels, the out-of-pile test facility, which had an electric heater pin instead of a test fuel pin, was designed and fabricated to simulate the capsules used in the power transient tests. Using this facility, necessary tests for the realization of the irradiation tests and the planning of the test methods were carried out.

In the present report, the outline of the out-of-pile test facility, the test plan and the tests simulating natural convection capsule were described. As a result of the tests, it was found that the power of the heater pin with a diameter of 9.5 mm can achieve to 600 W/cm without transition from nucleate boiling to film boiling under BWR and PWR coolant pressure conditions, and it became clear that the irradiation tests up to 600 W/cm of BWR and PWR fuels with their outer cladding diameter of 9.5 mm can be realized in JMTR.

Keywords: Light Water Reactor, Fuel, Power Transient Test, Out-of-Pile Test, Capsule, Natural Convection, Boiling, DNB, Thermal-Hydraulic Behavior

---

This study was conducted under a contract with the Nuclear and Industrial Safety Agency of the Ministry of Economy, Trade and Industry.

+ Department of JMTR Operation

※ Research Staff on Loan (from Kawasaki Plant Systems, Ltd.)

## 目 次

1. 緒 言	1
2. 炉外試験装置の概要	2
2.1 炉外試験装置の構成	2
2.2 試験計画	3
3. 炉外試験	11
3.1 試験方法	11
3.2 試験結果及び考察	11
3.2.1 BWR 条件を模擬した自然対流試験	11
3.2.2 PWR 条件を模擬した自然対流試験	13
4. 結 言	21
謝 辞	22
参考文献	22

## Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Out-of-Pile Test Facility	2
2.1 Structure of Out-of-Pile Test Facility	2
2.2 Test Plan	3
3. Out-of-Pile Tests	11
3.1 Test Methods	11
3.2 Test Results and Discussions	11
3.2.1 Natural Convection Tests Simulating BWR Conditions	11
3.2.2 Natural Convection Test Simulating PWR Conditions	13
4. Concluding Summary	21
Acknowledgements	22
References	22

This is a blank page.

## 1. 緒言

(独) 日本原子力研究開発機構 (以下、原子力機構) では、経済産業省原子力安全・保安院の受託事業である燃料異常過渡試験の実施を計画している。燃料異常過渡試験では、出力急昇条件下で試験燃料を照射する出力急昇試験及び冷却材流量減少による沸騰遷移条件下で試験燃料を照射する過渡沸騰遷移試験があり、異常過渡時における軽水炉燃料の健全性等を調べることを目的としている。そのため、材料試験炉 (Japan Materials Testing Reactor : JMTR) のシュラウド照射設備 (Oarai Shroud Facility-1 : OSF-1) <sup>(1)</sup> に燃料異常過渡試験キャプセル (自然対流型キャプセル、強制対流型キャプセル及びドライアウトキャプセル) を新たに設計・製作して装荷し、照射試験を実施する予定である<sup>(2)</sup>。自然対流型キャプセル及び強制対流型キャプセルは、軽水炉燃料の出力急昇試験を行うための装置である。また、ドライアウトキャプセルは、BWR 燃料の過渡沸騰遷移試験を行うための装置である。

自然対流型キャプセルは、JMTR における 8×8 型 BWR (Boiling Water Reactor : 沸騰水型原子炉) 燃料の出力急昇試験において、沸騰水キャプセル (Boiling Water Capsule : BOCA) として十分な実績を有していることから、従来の沸騰水キャプセルの構造を踏襲して設計される。本キャプセルを用いた試験では、従来の BWR 出力急昇試験と同様に、試験燃料の最高線出力を 600 W/cm とするが、試験燃料を従来型の 8×8 型 BWR 燃料 (燃料被覆管外径 12.27 mm) から 10×10 型 BWR 燃料 (燃料被覆管外径 9.5 mm) に変更する。このため、10×10 型 BWR 燃料の最高熱流束が 8×8 型 BWR 燃料で得られている限界熱流束 (DNB (Departure from Nucleate Boiling : 核沸騰からの離脱) 熱流束) に近づき、核沸騰から膜沸騰へ遷移する可能性がある。

強制対流型キャプセルは、多くの照射実績を有する自然対流型キャプセルの機能に加え、キャプセル内で加圧水を循環させることによって、PWR (Pressurized Water Reactor : 加圧水型原子炉) の冷却条件に近い熱流動環境下で試験燃料を照射できる装置である。また、ドライアウトキャプセルは、過渡的な沸騰遷移 (燃料被覆管表面が液膜 (冷却水) で覆われている状態 (通常の沸騰状態) から、液膜が消失する状態へ移行すること) が生じた場合における BWR 燃料の健全性を調べることができる装置である。強制対流型キャプセル及びドライアウトキャプセルは、これまでの試験実績が無いため、新たに開発される。

以上から、自然対流型キャプセル、強制対流型キャプセル及びドライアウトキャプセルを用いた燃料異常過渡試験に先立ち、照射試験の成立性や試験方法等を炉外で確認するための試験装置 (燃料異常過渡試験キャプセルの性能確認用炉外装置 : 以下、炉外試験装置) が必要である。

本研究では、燃料異常過渡試験キャプセルを模擬し、試験燃料棒に替えて電気ヒーターピンを用いた炉外試験装置を設計・製作し、照射試験の成立性調査や試験方法策定のため、炉外試験装置を用いて各種試験を行った。

## 2. 炉外試験装置の概要

本章では、設計・製作した炉外試験装置の構成及び試験計画について述べる。

### 2.1 炉外試験装置の構成

製作・設置した炉外試験装置の構成を Fig. 2.1 に、外観写真を Fig. 2.2 に示す。炉外試験装置は、模擬キャプセル、模擬キャプセル給水系、強制循環系、模擬炉内管循環系、ガス系（真空・ガス注入系）、圧縮空気系、冷却水系及び計測・制御系から構成される。

#### (1) 模擬キャプセル及び模擬炉内管

模擬キャプセルは、炉内管に挿入された燃料異常過渡試験キャプセルを模擬したものであり、試験燃料棒を模擬した電気ヒーターピン（直径 9.5 mm、絶縁材：窒化ボロン（BN）製）、仕切管、給水用導入管、キャプセル筒、計測器（熱電対及び圧力計）等から構成される。模擬炉内管は、OSF-1 の炉内管を模擬したものであり、模擬炉内管中に模擬キャプセルを挿入する。

模擬キャプセルの構成（キャプセル筒、仕切管及び導入管）を組み替え、自然対流方式と強制対流方式を切り替えることによって、ヒーターピンの冷却条件が選定でき、様々な試験条件に対応した炉外試験が可能である。模擬キャプセルの構成によって、径の違う 2 種類の模擬炉内管を使用する。

キャプセル筒は、外筒及び内筒を持つ二重管構造とすることができ、ガス系により外筒と内筒間をガス雰囲気または真空状態にすることで、ヒーターピンの冷却条件を変更できる。仕切管は、ヒーターピンを自然対流方式で冷却する場合には自然対流を促進させ、強制対流方式で冷却する場合には加圧水の流入側と流出側の混合を防止し、ヒーターピンの冷却条件を変更できる。導入管は、加圧水をヒーターピンの下部まで導入し、加圧水の流入側と流出側の混合を防止し、ヒーターピンの冷却条件を変更できる。

代表的な模擬キャプセルの構成を、Fig. 2.3、Fig. 2.4 及び Fig. 2.5 に示す。

#### (2) 模擬キャプセル給水系

模擬キャプセル給水系は、模擬キャプセルとヒーターピン間に加圧水を供給し、BWR や PWR の環境を模擬するためのものであり、高圧給水ポンプ、給水タンク、アキュムレーター、絞り弁、流量調整弁、冷却器、配管、計測器（温度、圧力及び流量計測用）等から構成される。

燃料異常過渡試験装置では、キャプセル内に加圧水を供給し、排出される水を炉外に設置したガンマ線検出器を用いてモニターすることで、燃料破損を検出する機能を持っており、本系はこれを模擬している。炉外試験装置では、加圧水の給水流量を  $1\sim 10\text{ cm}^3/\text{s}$  の範囲で変更することができる。

#### (3) 強制循環系

強制循環系は、模擬キャプセル内の加圧水を強制循環させ、PWR の環境を模擬するためのものであり、強制循環ポンプ、流量調整弁、加熱器、冷却器、配管、計測器（温度、圧力及び流量計測用）等

から構成される。

(4) ガス系

ガス系は、二重管型の模擬キャプセルにおいて、キャプセル内筒と外筒間にヘリウムガス等を注入し、またはキャプセル内筒と外筒間を真空に引くためのものである。これらにより、ヒーターピンの冷却条件を変更できる。

(5) 模擬炉内管循環系

模擬炉内管循環系は、模擬炉内管と模擬キャプセル間に冷却水を供給し、模擬キャプセルを冷却するためのものであり、循環ポンプ、バッファータンク、流量調整弁、冷却器、配管、計測器（温度、圧力及び流量計測用）等から構成される。

(6) 冷却水系

冷却水系は、冷却器（1）～（5）及び強制循環ポンプに冷却水を供給し、模擬キャプセル給水、強制循環水、模擬炉内管循環水及び強制循環ポンプを水冷するためのものである。

(7) 圧縮空気系

空気系は、水噴霧式冷却器（Fig. 2.1における模擬キャプセル給水系の冷却器（2）及び強制循環系の冷却器（3））に空気を送るためのものである。水噴霧式冷却器は、圧縮空気を使って模擬キャプセル給水系及び強制循環系の冷却器伝熱管に水を噴霧し、水の蒸発潜熱によって効率的に高温水を冷却する。

(8) 計測・制御系

計測・制御系は、炉外試験装置全体の運転状態を総合的に監視し、炉外試験装置を安全に運転・保護するためのものであり、温度、圧力、流量、ヒーター出力等を計測・制御する。また、ヒーターピン表面の膜沸騰等による異常な温度上昇を検知し、ヒーター電源を切るインターロック機能を有する。

模擬キャプセル部の温度測定は熱電対により行い、ヒーター表面部に3箇所（埋め込み式）、加圧水部に10箇所の熱電対を取り付けることができる（Fig. 2.3、Fig. 2.4及びFig. 2.5参照）。炉外試験装置で測定される温度、圧力、ヒーター出力等のデータは、パーソナルコンピューターを用いたデータ収集装置により記録する。

## 2.2 試験計画

炉外試験では、以下の試験を行う計画である。

(1) BWR 条件を模擬した試験

①試験燃料棒細径化の影響確認試験

従来の8×8型BWR燃料（燃料被覆管外径12.27mm）に替えて10×10型BWR燃料（燃料被覆管

外径 9.5 mm) を用いて行う出力急昇試験において、燃料棒が細径化され表面熱流束が増加しても、核沸騰から膜沸騰への遷移 (DNB) を起こさずに線出力 600 W/cm が達成可能であることを確認する必要がある。そのため、直径 9.5 mm の電気ヒーターピンを模擬キャプセルに取り付け、BWR 条件を模擬した炉外試験装置を用い、600 W/cm 超までの出力上昇試験を行う。

#### ②キャプセル給水流量の影響確認試験

燃料異常過渡試験装置では、キャプセルから排出される加圧水を、炉外に設置したガンマ線検出器によりモニターすることで燃料の破損を検出する。キャプセルへの給水流量を  $1 \text{ cm}^3/\text{s}$  から  $10 \text{ cm}^3/\text{s}$  に増大させれば、従来の 150 秒に対して最短 15 秒で燃料破損を検出できる見通しを得ており、燃料破損検出の迅速化を図ることができる。ただし、給水流量の増大に伴い、試験燃料棒表面温度が低下する可能性があるため、炉外試験装置を用い、その影響を評価する。

#### ③出力校正試験用ヒーターピンの材質変更影響確認試験

出力校正試験用キャプセルに使用するヒーターピン絶縁材の材質に関しては、従来の BN から放射化し難い酸化マグネシウム (MgO) に変更する。ただし、MgO の熱伝導率は BN よりも低く、熱を伝え難くなることから、MgO を用いたヒーターピンの限界出力は、BN を用いたヒーターピンよりも低下すると考えられる。そこで、絶縁材を MgO に変更したヒーターピンを模擬キャプセルに取り付けた炉外試験装置を用い、DNB またはヒーター (発熱体) の溶融が生じるまでヒーターピン出力を上昇させ、実現できる最大線出力を調べる。

#### ④沸騰遷移条件の確認試験

BWR 燃料の過渡沸騰遷移試験を実施するため、炉外試験装置を用い、沸騰遷移が生じる条件を調べると共に、試験装置の運転方法を確認する。

### (2) PWR 条件を模擬した試験

#### ①自然対流時における線出力 600 W/cm 到達確認及びキャプセル給水流量の影響確認試験

PWR の圧力条件 (15.5 MPa) では、BWR の圧力条件 (7.2 MPa) に比べて、バーンアウト熱流束が低下する。そのため、従来の BOCA に準ずる構造のキャプセル (自然対流型キャプセル) によって PWR の圧力条件で出力急昇試験を行うと、目標とする最大線出力 600 W/cm 未満において DNB が生じる可能性がある。そこで、炉外試験装置を用い、最も保守的な自然対流による冷却状態でヒーターピン出力を上昇させ、600 W/cm まで DNB が生じないことを確認する。また、模擬キャプセル給水流量の影響も確認する。

#### ②自然対流時における限界出力測定試験

炉外試験装置を用い、ヒーターピン冷却水を PWR の圧力条件 (15.5 MPa) とし、自然対流下において、DNB またはヒーター (発熱体) の溶融が生じるまでヒーターピン出力を上昇させ、ヒーターピンの限界出力を調べる。これにより、自然対流型キャプセルで PWR の冷却条件を模擬できるか①と併せて確認する。

#### ③強制対流時における線出力 600 W/cm 到達確認試験

PWR の圧力条件 (15.5 MPa) では、BWR の圧力条件 (7.2 MPa) に比べて、バーンアウト熱流束が低下する。そのため、従来の BOCA に準ずる構造のキャプセル (自然対流型キャプセル) によって PWR の圧力条件で出力急昇試験を行うと、目標とする最大線出力 600 W/cm 未満で DNB が生じる可能性が

ある。そこで、炉外試験装置を用い、加圧水を強制対流させた状態でヒーターピンの出力を上昇させ、600 W/cm まで DNB が生じないことを確認する。

④強制対流冷却水量の調整によるヒーターピン表面温度の制御試験

強制対流型キャプセルで出力急昇試験を行う場合、コンディショニング時に試験燃料棒表面温度を飽和温度以上に維持するには、循環する冷却水の流量及び温度を制御する必要がある。そこで、炉外試験装置を用い、強制対流させた冷却水の流量調整及び温度調整によってヒーターピン表面温度の制御が可能か調べる。

本報告書では、上記試験項目のうち、自然対流型キャプセルを模擬して実施した（1）①、②及び（2）①の試験結果について述べる。

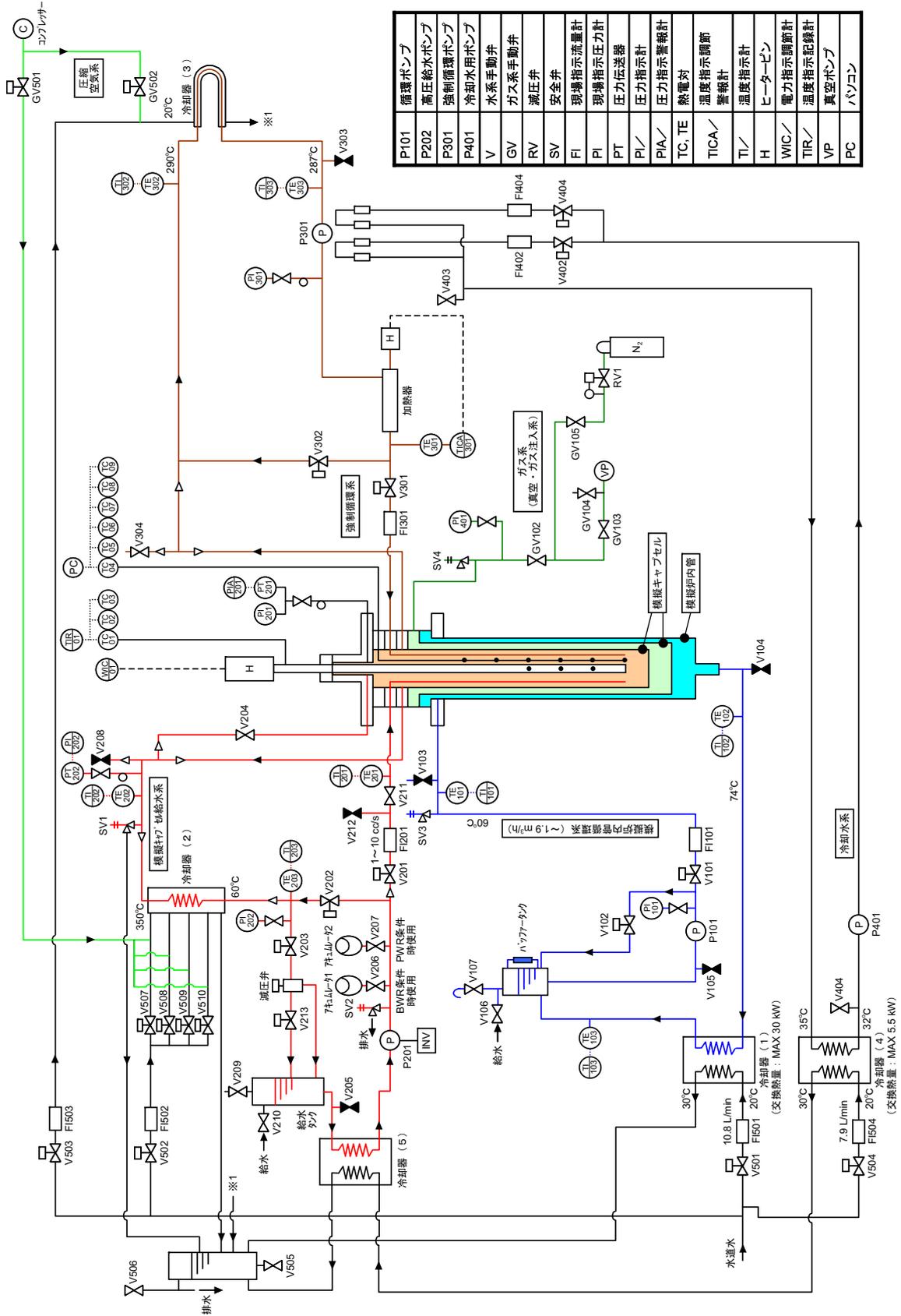


Fig. 2.1 炉外試験装置の構成



Fig. 2.2 炉外試験装置の外観

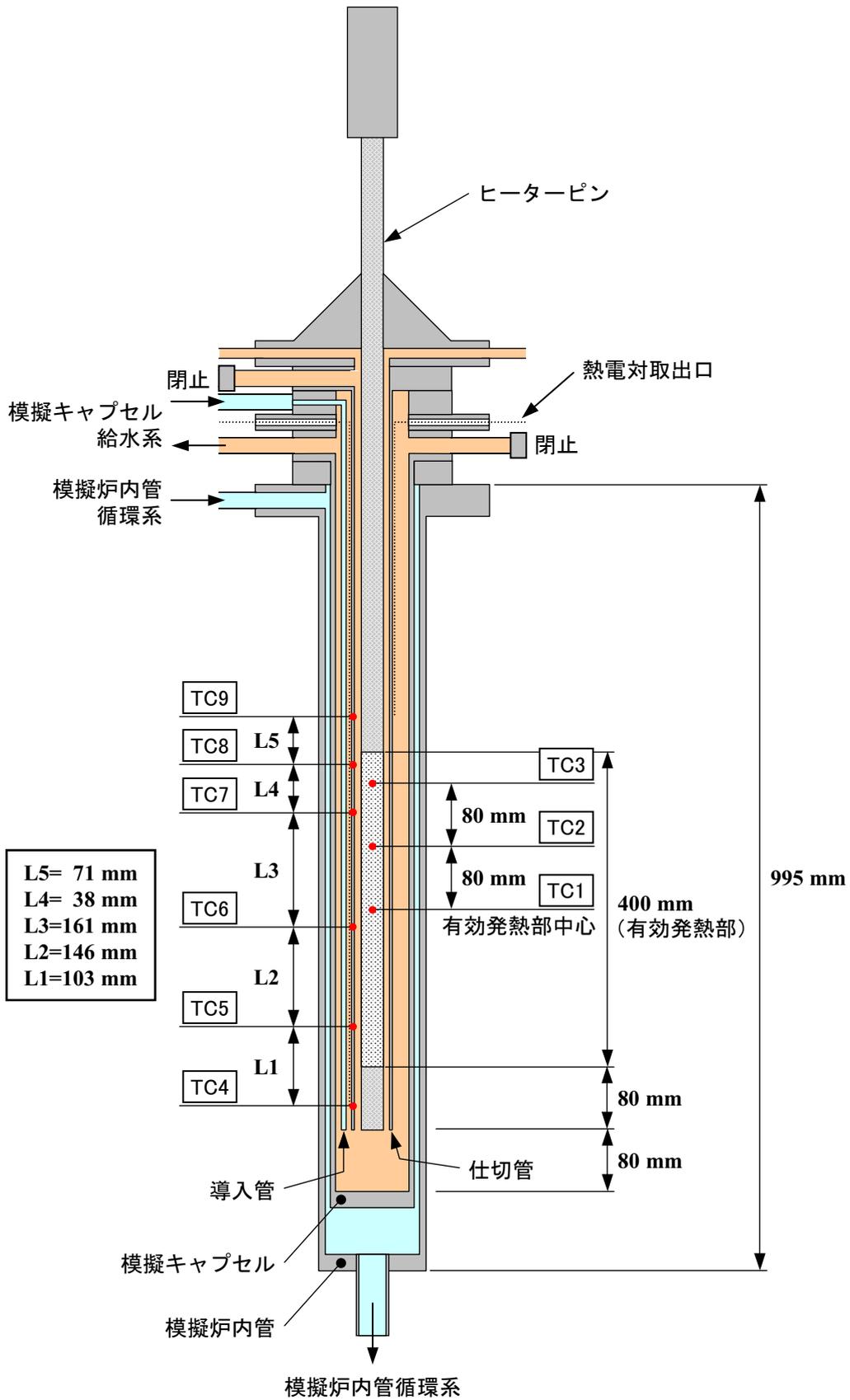


Fig. 2.3 模擬キャプセルの構成例 (1)

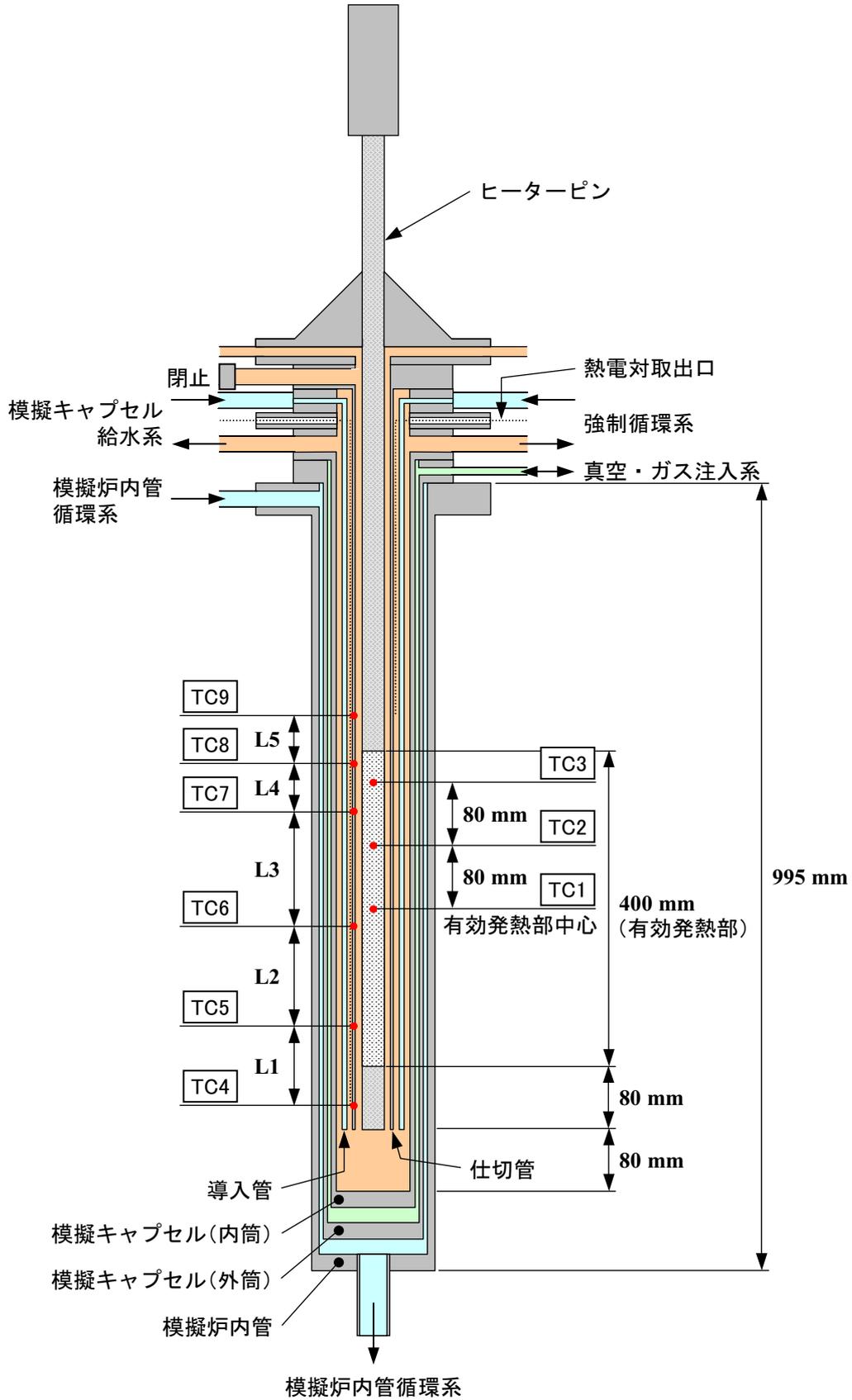


Fig. 2.4 模擬キャプセルの構成例 (2)

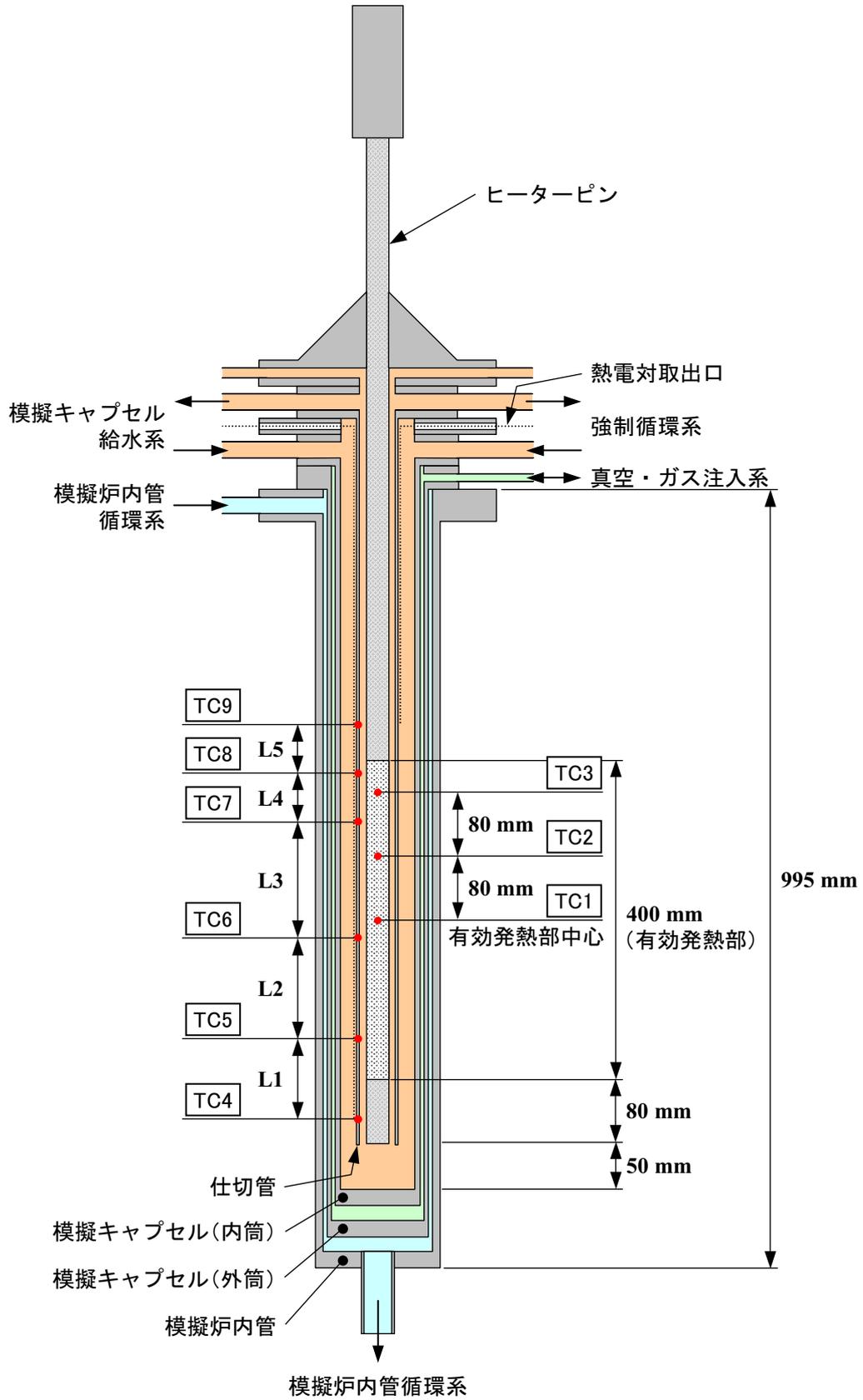


Fig. 2.5 模擬キャプセルの構成例 (3)

### 3. 炉外試験

本章では、炉外試験装置を用いた試験の方法、条件、結果及び考察について述べる。

#### 3.1 試験方法

##### (1) 試験条件

本試験では、2.2節の試験計画で述べた(1)のBWR条件を模擬した①、②及び(2)のPWR条件を模擬した①の試験を実施した。(1)①の試験を試験ケースBWR-1、②の試験を試験ケースBWR-2、(2)①の試験を試験ケースPWR-1とした。各試験の試験ケース及び試験条件を、Table 3.1及びTable 3.2に示す。

##### (2) 試験手順

実施する試験に合わせて模擬炉内管及び模擬キャプセルの組合せを選定し、炉外試験装置に組み込んだ後、以下の手順で試験を実施した。

- ①模擬炉内管循環系を起動する。
- ②模擬キャプセル給水系を起動し、給水流量を $1\sim 10\text{ cm}^3/\text{s}$ に設定する。
- ③模擬キャプセル給水系の給水圧力を所定の圧力(BWR条件またはPWR条件)に昇圧する。
- ④電気ヒーターピンに通電し、ヒーター出力を所定の出力まで徐々に上げる。
- ⑤所定の出力まで到達後、ヒーターピン表面温度を確認してからヒーターピンの出力を下げ、停止操作を行う。ヒーター出力上昇中に、DNBやヒーター(発熱体)の熔融(絶縁低下傾向)が発生した場合には、その時点で停止操作に入る。

#### 3.2 試験結果及び考察

##### 3.2.1 BWR条件を模擬した自然対流試験

###### (1) 試験燃料棒細径化の影響確認試験

(試験ケースBWR-1、模擬キャプセルの構成例(1)使用、Fig. 2.3参照)

試験ケースBWR-1で使用した模擬キャプセルは、模擬炉内管(外径:38 mm、内径:34 mm)、模擬キャプセル筒(外径:32 mm、内径:27 mm)、導入管1本(模擬キャプセルへの給水用)、仕切管(熱電対固定用、外径:16 mm、内径15 mm)等から構成された。熱電対固定用仕切管は、フランジに取り付けたステー2本で構成され、流路を完全に仕切るものではない。本炉外試験では、自然対流下で、ヒーターピン冷却水圧力をBWR条件の7.5 MPa(バーンアウト熱流束が低下して安全側の評価となるよう、7.2 MPaよりもやや高めに圧力を設定)、導入管からの給水(給水温度:約20°C)流量を $1\sim 10\text{ cm}^3/\text{s}$ とし、10×10型BWR燃料の被覆管外径と同じ直径9.5 mmのヒーターピンを用いても、線出力600 W/cmが達成可能であることを確認した。

Fig. 3.1 にヒーターピン線出力の条件を、Fig. 3.2 に最も測定温度が高くなったヒーターピン表面温度（熱電対位置：ヒーターピン下端から 360 mm 上部、TC2）の経時変化を、Fig. 3.3 に最も測定温度が高くなったヒーターピン冷却水温度（熱電対位置：仕切管下端から 266 mm 上部、TC6）の経時変化を示す。ヒーターピン線出力 648 W/cm（本試験の最大線出力）の場合、模擬キャプセルへの給水流量 1 cm<sup>3</sup>/s において、ヒーターピン表面温度は約 320°C に、ヒーターピン冷却水温度は約 278°C に達した。一方、ヒーターピン線出力 600 W/cm の場合、ヒーターピン表面温度は約 318°C に、ヒーターピン冷却水温度は約 273°C となった。ヒーターピン線出力を 600 W/cm から 648 W/cm に増大させても、ヒーターピン表面温度はほぼ一定で、温度が急上昇する傾向は認められなかった。また、ヒーターピン表面温度は、7.5 MPa における水の飽和温度 291°C より 25°C 以上高くなった。以上のことから、直径 9.5 mm のヒーターピンを用いても、DNB を生じずに線出力 600 W/cm が達成できることがわかった。

なお、試験開始から 242 分後頃にヒーターピン線出力等が低下しているのは、電力自動制御盤のインターロック「ヒーター電力高」により、ヒーター電源がトリップしたためである。これは、インターロックの設定値が 24 kW（600 W/cm）のままであったことが原因であり、設定値を変更後、直ちに試験を続行した。

## (2) キャプセル給水流量の影響確認試験

（試験ケース BWR-2、模擬キャプセルの構成例（1）使用、Fig. 2.3 参照）

試験で使用した試験体は、模擬炉内管（外径：38 mm、内径：34 mm）、模擬キャプセル外筒（外径：32 mm、内径：25 mm）、導入管 1 本（模擬キャプセルへの給水用）、仕切管（熱電対固定用、外径：16 mm、内径 15 mm）等から構成されている。

本炉外試験では、自然対流下で、ヒーターピン冷却水圧力を BWR 条件の 7.2 MPa とし、ヒーターピン線出力を 300 W/cm 及び 400 W/cm とすると共に、導入管から模擬キャプセルへの給水流量を 1 cm<sup>3</sup>/s または 10 cm<sup>3</sup>/s とし、それらの影響を調べた。

Fig. 3.4 にヒーターピン線出力の経時変化を、Fig. 3.5 にヒーターピン表面温度（熱電対位置：ヒーターピン下端から 360 mm 上部、TC2）の経時変化を、Fig. 3.6 にヒーターピン冷却水温度（熱電対位置：仕切管下端から 268 mm 上部、TC6）の経時変化を示す。ヒーターピン線出力を 300 W/cm 及び 400 W/cm とした場合、給水流量に関わらずヒーターピン表面温度は約 306°C で一定であり、7.2 MPa における飽和温度 289°C より 15°C 以上高くなった。また、ヒーターピン線出力を 300 W/cm、導入管から模擬キャプセルへの給水流量を 10 cm<sup>3</sup>/s とした場合、ヒーターピン冷却水温度は約 137°C となったが、給水流量を 1 cm<sup>3</sup>/s に変更したところ、ヒーターピン冷却水温度は約 214°C に上昇した。ヒーターピン線出力を 300 W/cm から 400 W/cm に変更し、導入管から模擬キャプセルへの給水流量を 1 cm<sup>3</sup>/s とした場合、ヒーターピン冷却水温度は約 252°C となったが、給水流量を 10 cm<sup>3</sup>/s に変更したところ、ヒーターピン冷却水温度は約 170°C に低下した。このように、給水流量によって、ヒーターピン表面温度はほとんど影響を受けないが、ヒーターピン冷却水温度は影響を受けることがわかった。

### 3.2.2 PWR 条件を模擬した自然対流試験

- ・自然対流時における線出力 600 W/cm 到達確認及びキャプセル給水流量の影響確認試験  
(試験ケース PWR-1、模擬キャプセルの構成例 (1) 使用、Fig. 2.3 参照)

試験で使用した試験体は、模擬炉内管 (外径 : 38 mm、内径 : 34 mm)、模擬キャプセル外筒 (外径 : 32 mm、内径 : 25 mm)、導入管 1 本 (模擬キャプセルへの給水用)、仕切管 (熱電対固定用、外径 : 16 mm、内径 15 mm) 等から構成されている。

本炉外試験では、自然対流下で、ヒーターピン冷却水圧力を 10 MPa から PWR 条件の 15.5 MPa とし、ヒーターピン線出力を 200~600 W/cm の範囲で変化させると共に、導入管から模擬キャプセルへの給水流量を  $1 \text{ cm}^3/\text{s}$  または  $10 \text{ cm}^3/\text{s}$  とし、それらの影響を調べた。

Fig. 3.7 にヒーターピン線出力の条件を、Fig. 3.8 にヒーターピン冷却水圧力の条件を、Fig. 3.9 にヒーターピン表面温度 (熱電対位置 : ヒーターピン下端から 360 mm 上部、TC2) の経時変化を、Fig. 3.10 にヒーターピン冷却水温度 (熱電対位置 : 仕切管下端から 268 mm 上部、TC6) の経時変化を示す。ヒーターピン線出力を 200 W/cm、ヒーターピンの冷却水圧力を 15.5 MPa とし、模擬キャプセルへの給水流量を  $10 \text{ cm}^3/\text{s}$  から  $1 \text{ cm}^3/\text{s}$  に変更した場合、ヒーターピン表面温度は約  $310^\circ\text{C}$  から約  $334^\circ\text{C}$  に、ヒーターピン冷却水温度は約  $100^\circ\text{C}$  から約  $154^\circ\text{C}$  に上昇した。また、ヒーターピン線出力を 300 W/cm、模擬キャプセルへの給水流量を  $10 \text{ cm}^3/\text{s}$  とし、ヒーターピンの冷却水圧力を 10 MPa から 15.5 MPa に増加させた場合、ヒーターピン表面温度は約  $329^\circ\text{C}$  から約  $358^\circ\text{C}$  に上昇したが、ヒーターピン冷却水温度は  $135^\circ\text{C}$ ~ $137^\circ\text{C}$  でほぼ一定であった。この状態から、模擬キャプセルへの給水流量を  $10 \text{ cm}^3/\text{s}$  から  $1 \text{ cm}^3/\text{s}$  に変更したところ、ヒーターピン表面温度は約  $361^\circ\text{C}$  でほぼ変化がなかったが、ヒーターピン冷却水温度は約  $216^\circ\text{C}$  に上昇した。その後、ヒーターピン線出力を 400 W/cm、500 W/cm 及び 600 W/cm へと段階的に増加させ、各線出力ごとに模擬キャプセルへの給水流量を  $10 \text{ cm}^3/\text{s}$  から  $1 \text{ cm}^3/\text{s}$  に変更した。ヒーターピン表面温度は、線出力及び給水流量が変化しても  $364^\circ\text{C}$ ~ $371^\circ\text{C}$  でほぼ一定となり、15.5 MPa における飽和温度  $345^\circ\text{C}$  より  $20^\circ\text{C}$  以上高くなった。その一方、ヒーターピン冷却水温度は、各線出力における給水流量の変化によって、各々約  $169^\circ\text{C}$  から約  $255^\circ\text{C}$  へ、約  $200^\circ\text{C}$  から約  $288^\circ\text{C}$  へ、約  $233^\circ\text{C}$  から約  $320^\circ\text{C}$  へと上昇した。このように、ヒーターピン表面温度は冷却水圧力及び飽和温度に達しない低いヒーターピン線出力では給水流量の影響を受け、ヒーターピン冷却水温度は給水流量の影響を受けることがわかった。

以上のことから、PWR の冷却水圧力条件下において、ヒーターピン線出力を 600 W/cm としても DNB は生じず、ヒーターピン表面の核沸騰及びキャプセル外筒部での熱交換により十分除熱でき、ヒーターピン表面温度はほぼ一定に保たれることを確認した。

以上のまとめとして、試験ケース BWR-1 及び PWR-1 におけるヒーターピン線出力とヒーターピン表面温度 (TC1, TC2 及び TC3) との関係を、Fig. 3.11 に示す。

Table 3.1 試験ケース及び試験条件 1

試験ケース	加圧水圧力	流動条件	ヒーターピン	導入管本数	仕切管	キャプセル筒	模擬炉内管
BWR-1	7.5 MPa	自然対流	BN( $\phi$ 9.5 mm)	1	熱電対固定用( $\phi$ 16 $\times$ 15 mm)	単管( $\phi$ 32 $\times$ 27 mm)	$\phi$ 38 $\times$ 34 mm
BWR-2	7.2 MPa	自然対流	BN( $\phi$ 9.5 mm)	1	熱電対固定用( $\phi$ 16 $\times$ 15 mm)	単管( $\phi$ 32 $\times$ 25 mm)	$\phi$ 38 $\times$ 34 mm
PWR-1	10, 15.5 MPa	自然対流	BN( $\phi$ 9.5 mm)	1	熱電対固定用( $\phi$ 16 $\times$ 15 mm)	単管( $\phi$ 32 $\times$ 25 mm)	$\phi$ 38 $\times$ 34 mm

Table 3.2 試験ケース及び試験条件 2

試験ケース	ヒーターピン線出力*	模擬キャプセル給水流量	強制循環系流量
BWR-1	200, 400, 600, 648 W/cm	1~10 cm <sup>3</sup> /s	—
BWR-2	300, 400 W/cm	1, 10 cm <sup>3</sup> /s	—
PWR-1	200, 300, 400, 500, 600 W/cm	1, 10 cm <sup>3</sup> /s	—

\* : 各線出力で、圧力、温度、流量等の確認を行った。

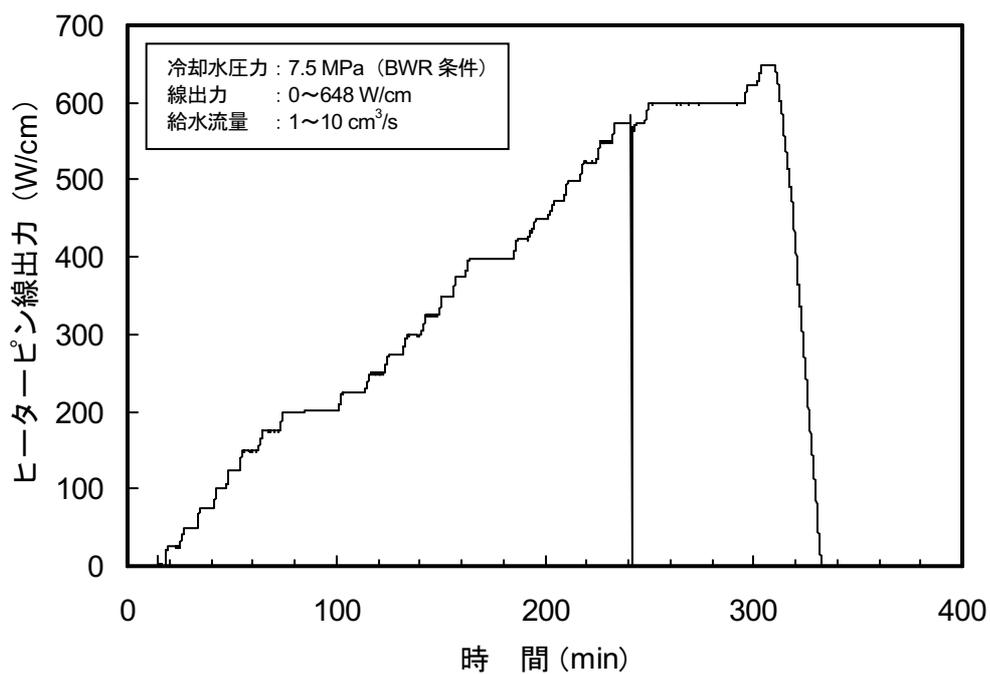


Fig. 3.1 ヒーターピン線出力の条件 (BWR-1)

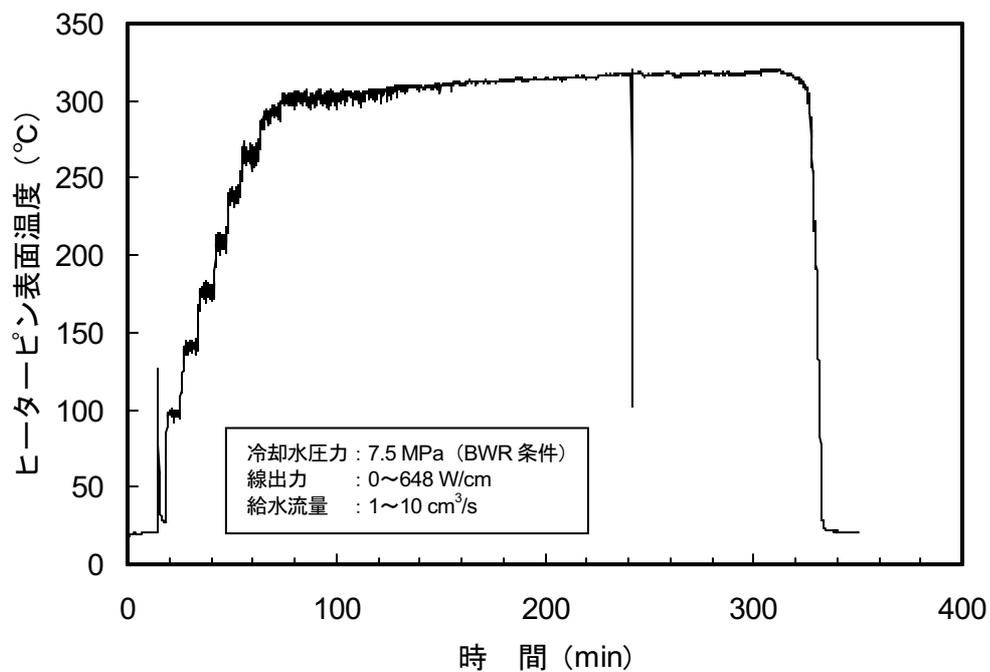


Fig. 3.2 ヒーターピン表面温度の経時変化 (BWR-1)

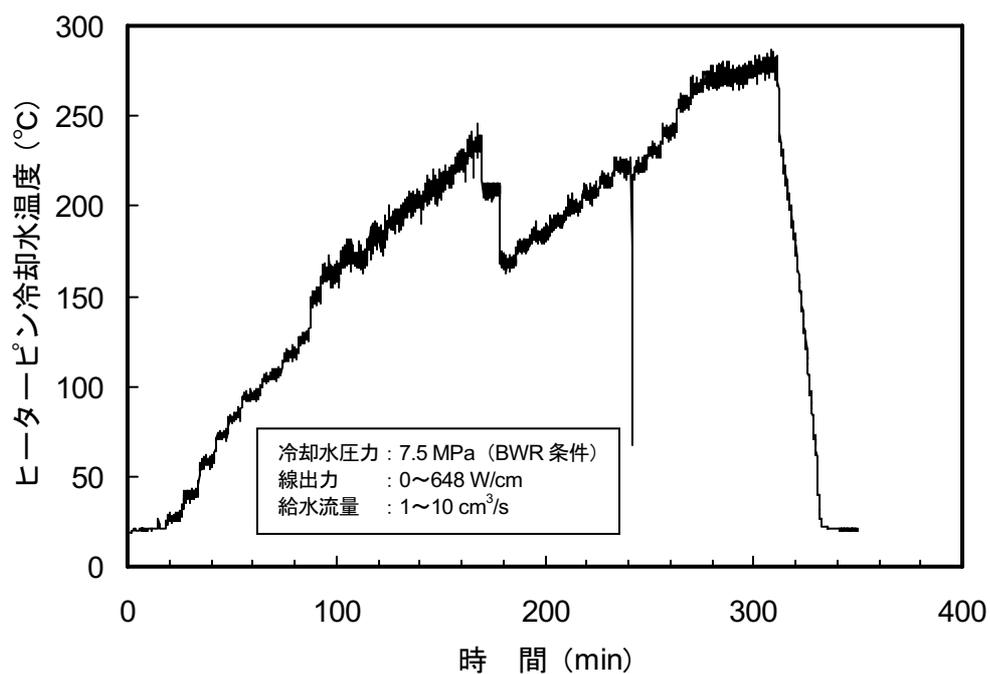


Fig. 3.3 ヒーターピン冷却水温度の経時変化 (BWR-1)

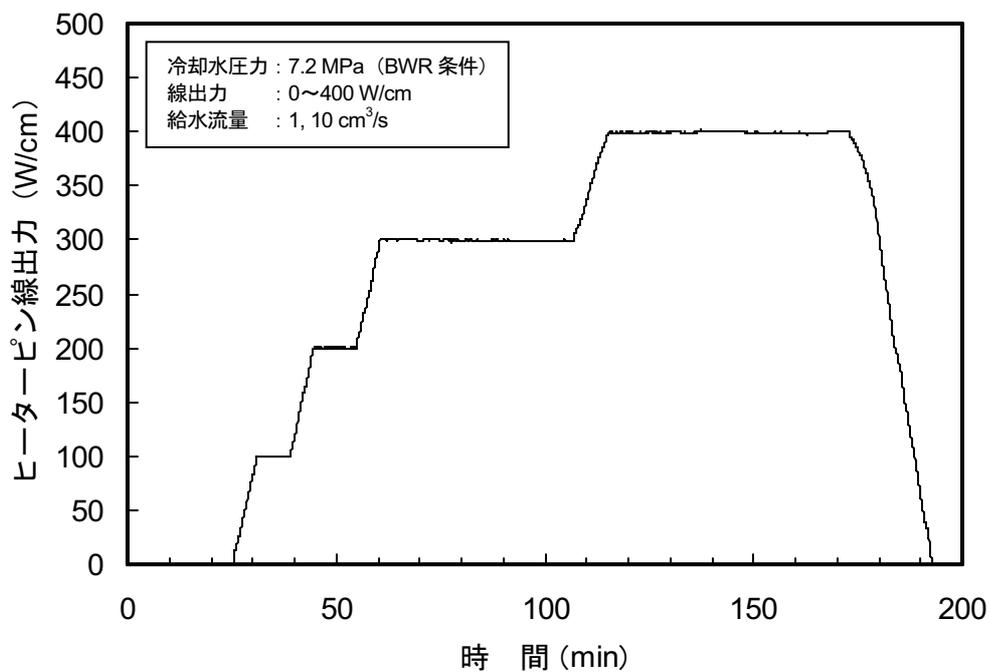


Fig. 3.4 ヒーターピン線出力の条件 (BWR-2)

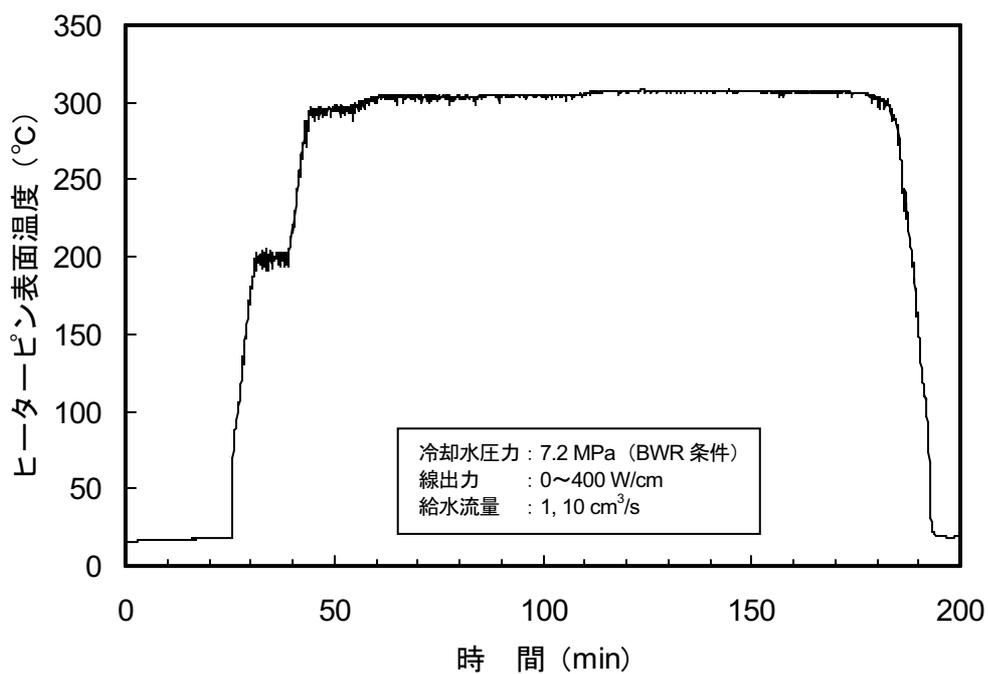


Fig. 3.5 ヒーターピン表面温度の経時変化 (BWR-2)

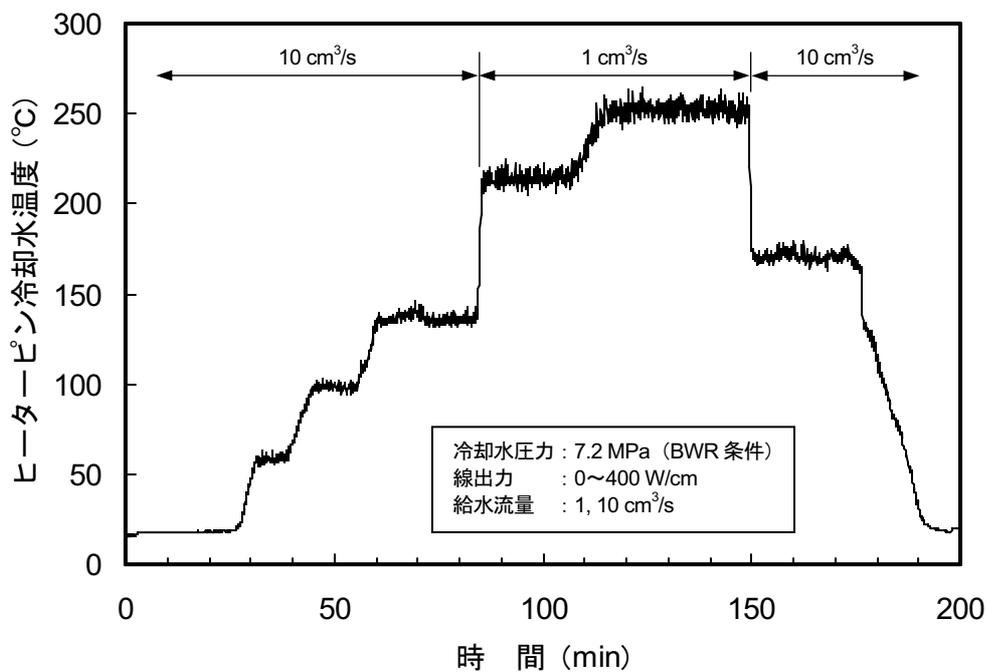


Fig. 3.6 ヒーターピン冷却水温度の経時変化 (BWR-2)

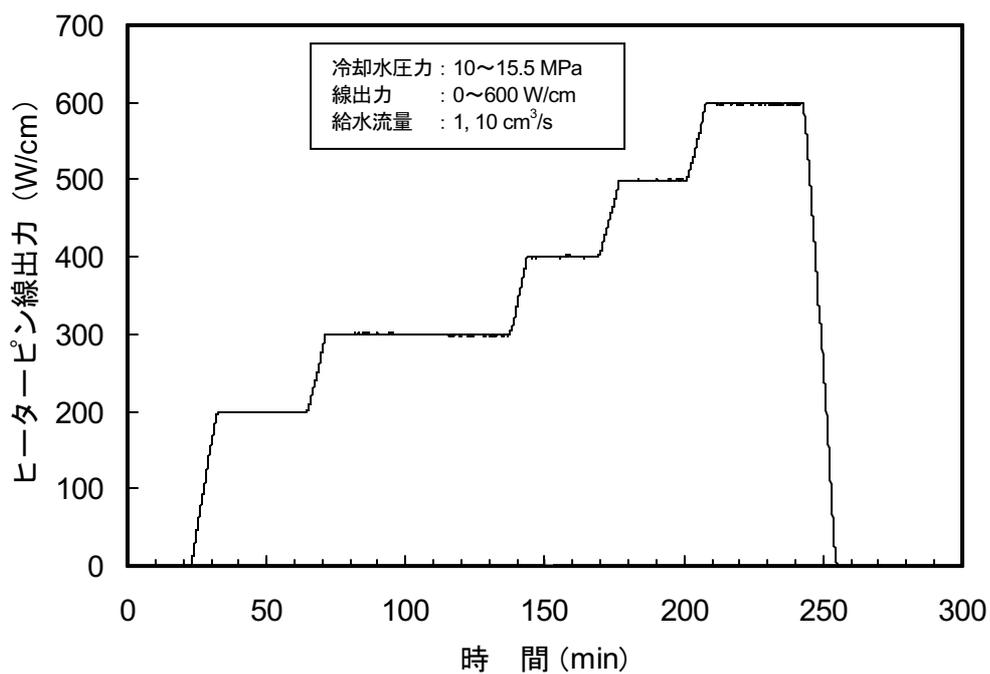


Fig. 3.7 ヒーターピン線出力の条件 (PWR-1)

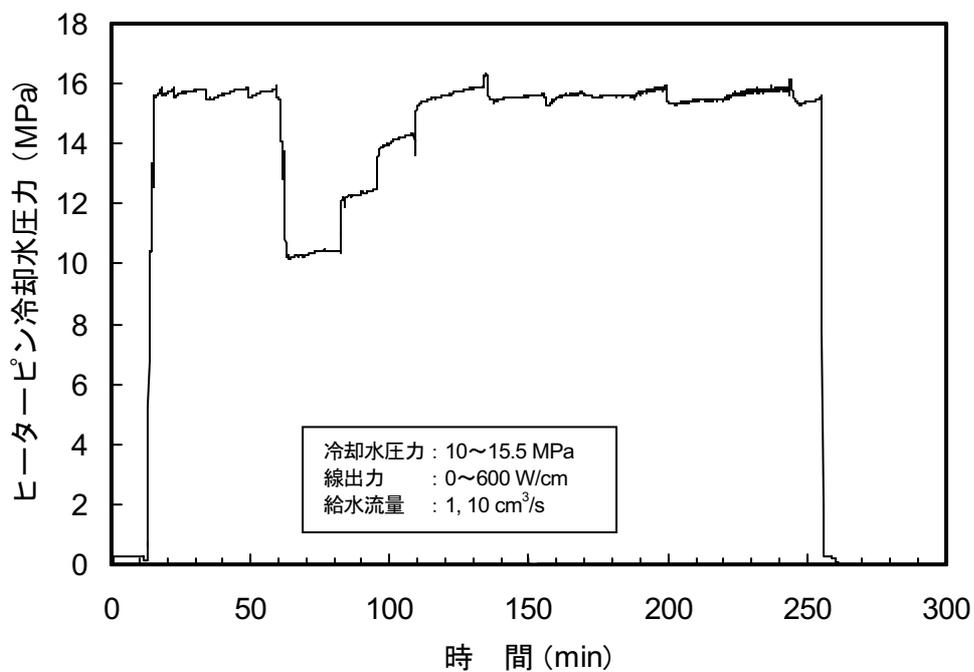


Fig. 3.8 ヒーターピン冷却水圧力の条件 (PWR-1)

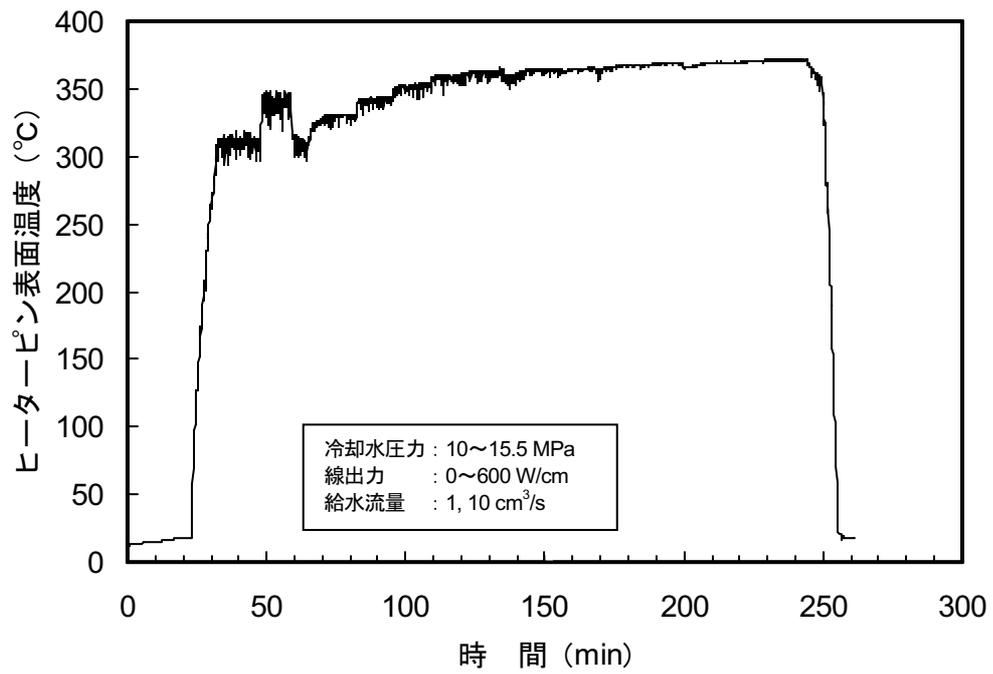


Fig. 3.9 ヒーターピン表面温度の経時変化 (PWR-1)

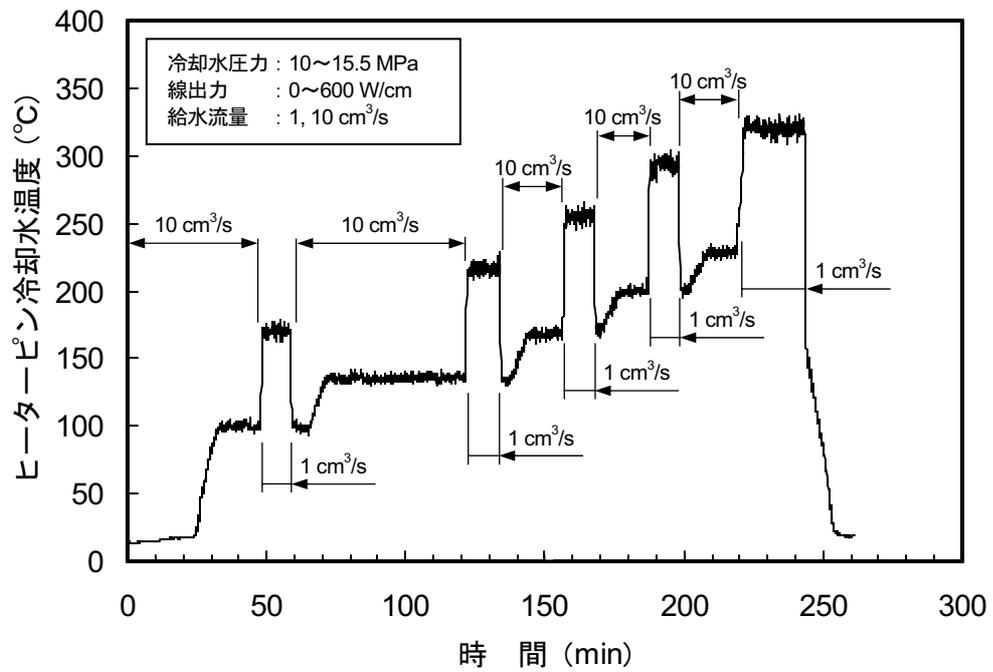


Fig. 3.10 ヒーターピン冷却水温度の経時変化 (PWR-1)

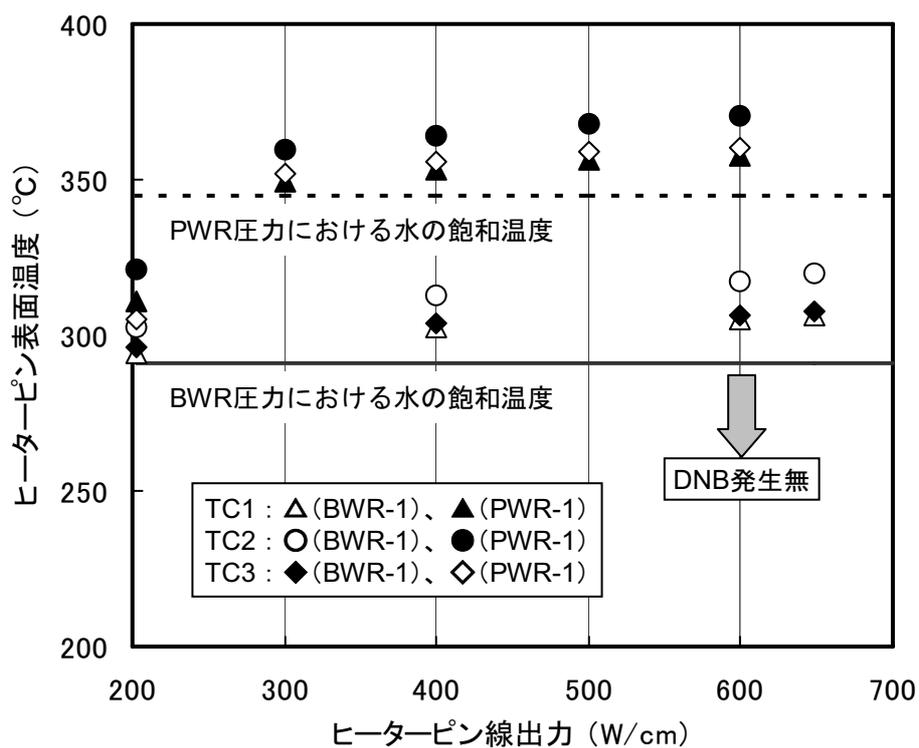


Fig. 3.11 ヒーターピン線出力とヒーターピン表面温度との関係

## 4. 結 言

燃料異常過渡試験で用いるキャプセルを模擬し、試験燃料棒に替えて電気ヒーターピンを用いた炉外試験装置を設計・製作した。製作した炉外試験装置を用い、照射試験の成立性調査や試験方法策定のために必要な試験を行った。

本報告書では、炉外試験装置の概要、試験計画及び自然対流型キャプセルを模擬した試験について述べた。試験の結果、BWR 及び PWR の冷却水圧力条件下で直径 9.5 mm のヒーターピンを用いても、核沸騰から膜沸騰への遷移 (DNB) を起こすことなく最高線出力 600 W/cm が達成可能であることを確認し、JMTR において被覆管外径 9.5 mm の BWR 燃料及び PWR 燃料を用いた線出力 600 W/cm までの照射試験が可能であることを明らかにした。また、模擬キャプセルへの給水流量を 1 cm<sup>3</sup>/s から 10 cm<sup>3</sup>/s とした場合、ヒーターピン冷却水温度には影響するが、冷却水の飽和温度に達しているヒーターピン表面温度には影響しないことを確認した。

今後は、強制対流下での試験を行うと共に、自然対流下での沸騰遷移条件等を調べる予定である。

## 謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、照射試験炉センターの河村弘センター長、石原正博副センター長、石塚悦男研究主幹、土谷邦彦・照射試験開発課長、原子炉施設管理部の新見素二部長、神永雅紀次長及び菅野勝・照射設備整備課長から御指導及び御助言を頂きました。また、炉外試験の実施にあたり、照射設備整備課諸氏には多大な御協力を頂きました。ここに明記し、謝意を表します。

## 参考文献

- (1) 日本原子力研究開発機構：「JMTR：Japan Materials Testing Reactor」, パンフレット, p. 17, 2005.
- (2) T. Nakamura, et al.: “New JMTR Irradiation Test Plan on Fuels and Materials” , Proc. International Symposium on Materials Testing Reactors, Oarai, Japan, 16-17 July 2008, JAEA-Conf 2008-011, pp. 117-122, 2008.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

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

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の) 1	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学では物質濃度 (substance concentration) とよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	1	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光束密度	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
照射度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電表面積	ボルト毎メートル	V/m	kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電束密度, 電気変位	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
透磁率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
モルエネルギー	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
モルエントロピー, モル熱容量	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
吸収線量率	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
放射強度	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
放射輝度	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
酵素活性濃度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = kg s <sup>-3</sup>
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI接頭語

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

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852 m
バロン	b	1 b=100 fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/6000) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フォトル	ph	1 ph=1 cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe≈(10 <sup>3</sup> /4π) A m <sup>-1</sup>

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「Δ」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 f=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> kg
Torr	1 Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 <sup>-6</sup> m

