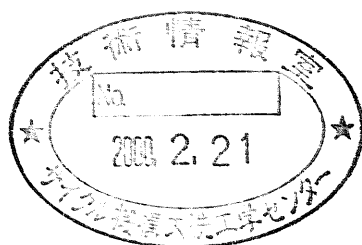


「常陽」炉外材料照射装置 (EXIR) による照射報告 (試験報告書)

1999年12月



核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Sections,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49, Muramatsu, Tokai-Mura, Naka-Gun, Ibaraki-Ken, 319-1194,

Japan

©核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

1999

「常陽」炉外材料照射装置(EXIR)による照射報告

(試験報告書)

安 哲徳*、寺門 誠一**、揃 政敏*
片岡 一*、高津戸 裕司***、宮川 俊一*

要 旨

炉外材料照射装置(EXIR:Ex-Vessel Irradiation Rig)は、高速実験炉「常陽」の安全容器内において、原子炉容器等の構造材料の中性子照射下における単軸クリープ破断強度試験を行うことを目的に開発した、オンライン計測・制御型の照射装置である。

EXIRを用いた照射試験は、平成6年8月の第29サイクルから開始し、平成9年3月の第30サイクルにおいて2つの試験片の破断が検出されたため、照射試験を終了した。照射試験において、試験片の温度、引張荷重、変位データを取得した。

本照射試験を通じて、確認したEXIRの性能および試験片の変位データは、以下のとおりである。

(1) 温度制御

原子炉運転中において試験片の温度を一定に保持することができた。試験片の温度は、設定温度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ の範囲内に保持されており、目標とした制御精度 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ を十分満足する性能であった。

(2) 引張荷重制御

荷重の負荷期間中における引張荷重の制御は、設定荷重値に対して $\pm 8.8\text{N}$ の範囲内に保持されており、制御精度 $\pm 29.4\text{N}$ を十分満足する性能であった。

(3) 変位計測

高速炉用構造材料であるSUS316FR鋼について、中性子照射下における単軸クリープ破断強度試験を行い、その変位データを取得した。変位データの解析は、今後実施される照射後試験結果と合わせ、別途報告される。

* 大洗工学センター 照射施設運転管理センター 照射管理課
** 常陽産業株式会社
*** 大洗工学センター 照射施設運転管理センター 実験炉部 原子炉第2課

Irradiation Report of the Ex-Vessel Irradiation Rig (EXIR) in JOYO

Tetsunori Yasu *, **Seiichi Terakado ****, **Masatoshi Soroi***
Hajime Kataoka *, **Hiroshi Takatsudo *****, **Shun-ichi Miyakawa***

Abstract

The Ex-Vessel Irradiation Rig (EXIR) is the on-line measurement and control irradiation equipment. It was developed to test uniaxial creep rupture strength of the reactor structural material under neutron irradiation condition, and installed between reactor guard vessel and safety vessel of the Experimental Fast Reactor "JOYO".

The irradiation test using EXIR started at the 29th operation cycle in August 1994, and finished at the 30th operation cycle in March 1997 since the burst signals of two test pieces were detected.

Through this irradiation test, performance of EXIR are confirmed and in reactor creep data on SUS316FR were obtained. The results are summarized as follows.

(1) Temperature Conditions

The Temperature of the test pieces was controlled so as to be constant during the reactor operation. Its deviation from target temperature was recorded within $\pm 2^\circ\text{C}$, which sufficiently outperformed the designed accuracy of $\pm 3^\circ\text{C}$.

(2) Tensile load Conditions

The control of the tensile load was retained in $\pm 8.8\text{N}$ range for the set load value, and it was the performance which sufficiently satisfied control precision $\pm 29.4\text{N}$.

(3) Displacement Result

On SUS316FR which was the structural material for fast reactor, uniaxial creep rupture strength test under the neutron irradiation was carried out, and the displacement data were acquired.

The analysis of the displacement data will be reported after post irradiation experiment.

* Irradiation and Administration Section, Irradiation Center, OEC

** JOYO Industry Co. Ltd. ; working for Irradiation Section, Irradiation Management Center, OEC

*** Maintenance Section, Irradiation Center, Experimental Reactor Division, OEC

目 次

1. 緒 言	1
2. 炉外材料照射装置の仕様	2
2.1 概 要	2
2.2 照射装置本体	2
2.3 計測制御装置	3
2.4 計測データの収録	3
2.5 荷重制御方法	4
3. 照射試験	14
3.1 試験目的	14
3.2 照射条件	14
3.3 試験片仕様	15
3.4 照射実績	15
4. 性能評価	40
4.1 試験片の温度制御	40
4.2 試験片の引張荷重制御	40
4.3 試験片の変位	43
5. 結 言	46
6. 謝 辞	47
7. 参考文献	48

表リスト

表2.1	EXIRへ装荷したドシメータの種類	5
表3.1	EXIR照射キャプセルに装荷した試験片仕様	21
表3.2	EXIRによる照射試験の工程	22
表3.3	各運転サイクル毎の照射日数と計算照射量	23

図リスト

図2.1	EXIRの試験装置概念	6
図2.2	EXIRの全体構成	7
図2.3	歪測定用照射キャプセルNo.1	8
図2.4	歪測定用照射キャプセルNo.2	9
図2.5	熱負荷用照射キャプセルNo.3	10
図2.6	差動トランス型変位計の計測フロー	11
図2.7	EXIR圧力調整用Arガス系統図	12
図2.8	EXIRにおける計測・制御方法の概念	13
図3.1	EXIR装荷位置での中性子束分布(計算値)	24
図3.2	EXIRに装荷した試験片	25
図3.3	第28サイクル運転における試験片の温度履歴	26
図3.4	第29サイクル運転における試験片の温度履歴	27
図3.5	特性試験中における試験片の温度履歴	28
図3.6	第30サイクル運転における試験片の温度履歴	29
図3.7	歪測定用照射キャプセルNo.1 荷重負荷用ベローズ圧力の推移	30
図3.8	No.1 試験片の引張荷重履歴	31
図3.9	歪測定用照射キャプセルNo.2 荷重負荷用ベローズ圧力の推移	32
図3.10	No.2 試験片の引張荷重履歴	33
図3.11	No.1 試験片の変位履歴	34
図3.12	No.2 試験片の変位履歴	35
図3.13	No.1 試験片荷重負荷後の変位	36
図3.14	No.2 試験片荷重負荷後の変位	37
図3.15	クリープ歪みと試験時間の関係 (No.1 試験片)	38
図3.16	クリープ歪みと試験時間の関係 (No.2 試験片)	39
図4.1	制御停止時におけるNo.1 試験片への負荷荷重・ベローズ圧力	44
図4.2	制御停止時におけるNo.2 試験片への負荷荷重・ベローズ圧力	45

1. 緒 言

高速実験炉「常陽」を用いて、原子炉構造材料の中性子照射下における単軸クリープ破断強度試験を初めて実施するため、炉外材料照射装置¹⁾²⁾ (E X I R : Ex-Vessel Irradiation Rig)を開発し照射試験を実施した。

これまでの「常陽」における原子炉構造材料のオンライン照射には、炉上部照射プラグリグ (UPR) が用いられてきた。しかし、UPRを用いた照射では、炉上部から試験体の装脱荷を行うために、燃料交換作業等の炉上部作業と干渉して原子炉の稼働率に影響を与えてしまうために、稼働率に影響しない場所での照射が望まれていた。一方、高速炉構造材料の中性子照射下での単軸クリープ破断強度試験をオンラインで実施したいとの要望も出されていた。

これら2つの要求に適応する照射装置として、安全容器内の原子炉容器と黒鉛ブロックとの間隙部を照射場として利用するE X I Rの開発に昭和59年度から着手し、各種のR & Dを経て、平成6年8月の第29サイクル運転から単軸クリープ破断強度試験を開始した。

平成9年4月の第30サイクル運転中において、単軸クリープ破断強度試験を実施していた2つの試験片の破断が検出されたため、第30サイクル運転をもってE X I Rの照射を終了した。

本報告書は、照射試験を通じて得られた試験データとE X I Rの性能についてまとめたものであり、材料試験の観点での成果は、別途構造材料開発担当部署がまとめる報告書を参照願う。

2. 炉外材料照射装置の仕様

2.1 概要

EXIRは、高速炉構造用316鋼材(B添加316FR鋼板)の中性子照射下における単軸クリープ破断強度を評価すべく、「常陽」の安全容器内の原子炉容器と黒鉛ブロックとの隙間部を利用して試験片の温度、荷重条件を一定に制御した状態で、単軸クリープ破断強度試験を行う照射装置である。

EXIRが設置される安全容器内には、炉上部ピット室(RPU室)のM3マンホールから、鋼管製のガイドパイプが敷設されており、その中を通して柔軟なガイドチューブが設置されている。EXIR本体は、このガイドチューブの中に装荷され、照射キャプセルは、炉心の中心付近の高さに配置される。EXIRによる照射試験の概念を図2.1に示す。

EXIRは、図2.2に示すように、気密接続容器と3体の照射キャプセルおよびフレキシブルチューブから成る「照射装置本体」と、照射装置本体の計測制御、圧力調整およびガス置換を行うための「計測制御装置」で構成されている。

なお、EXIRによる照射データの収録と、試験片へ負荷する荷重値の計算については、照射装置運転監視システム(IRISS: Irradiation Rig Integrated Surveillance System)により行うようにした。

2.2 照射装置本体

照射装置本体は、気密接続容器、フレキシブルチューブおよび3体の照射キャプセルから構成されている。

気密接続容器は、気密フランジと気密接続容器外筒から成っている。気密接続容器は、M3マンホール上部に据付けられ、照射キャプセルをガイドチューブ内に保持するとともに、ガイドチューブとのバウンダリを形成する。

フレキシブルチューブは、照射キャプセルの間を接続しているフレキシブルチューブ1と、気密フランジと照射キャプセルNo.3の間を接続しているフレキシブルチューブ2がある。この中に照射キャプセルに接続された計測ケーブルやガス配管が収納されており、それらは気密接続容器を介して運転床(オペフロ)上に引き出される。

EXIRでは3体の照射キャプセルがあり、2体は、単軸クリープ破断強度試験を行うためのキャプセルで、「歪測定用照射キャプセル」(図2.3、図2.4参照)と呼び、残り1体は、試験片を単軸クリープ破断試験と同じ温度に加熱して熱負荷を与えて照射するキャプセルで、

「熱負荷用照射キャプセル」(図2.5参照)と呼ぶ。熱負荷用照射キャプセルで照射した試験片は、照射後にホットラボで比較試験を行うために用いられる。

歪測定用照射キャプセルでは、照射キャプセル内のベローズにガス圧力を負荷することにより試験片に歪みを与えることができる。歪測定用照射キャプセルは、図2.3および図2.4に示したように、2体とも同一の内部構造を持ち、差動トランス型変位計³⁾、およびガス加圧管、ベローズ、ヨークで成る荷重負荷機構、また、電気ヒータ、熱電対で成る加熱部があり、加熱部の中央には、負荷試験片を配してある。図2.6に差動トランス型変位計の計測フローを示す。また、各部の温度計測は、熱電対により行っている。その他、試験片の照射量を評価するためにドシメータを封入したフラックスモニタ管も装着している。表2.1にEXIRへ装荷したドシメータの種類を示す。

熱負荷用照射キャプセルは、図2.5に示したように加熱部を持ち、2本の無負荷試験片とフラックスモニタ管を装荷している。

2.3 計測制御装置

計測制御装置は、遠隔操作により単軸クリープ破断強度試験を行うための計測や荷重制御をするものであり、計測制御盤および圧力操作盤で構成される。

荷重制御のためのEXIR圧力調整用Arガス系統図を図2.7に示す。

計測制御盤は、温度制御部、変位計測部、ガス圧力制御部等から成っている。温度制御部は、電気ヒータにより個別に、かつ広範囲に試験温度(250℃～600℃)を設定できるように、独立した4系統の制御回路を有している。試験片温度を一定に保持するために用いる電気ヒータは、設定温度に対し±3℃の精度で制御される。変位計測部では、試験片の伸び(歪み)を計測し、その信号をIRISSに伝送する。IRISSでは、試験片の伸び(ベローズ変位)データの他、ベローズ温度、ベローズ圧力、およびキャプセル内圧のデータをもとに、試験片の伸びと連動したベローズの反力を考慮しつつ、引張荷重を一定に保持するためのベローズガス圧力を算出して、ガス圧力制御部へ伝達する。ガス圧力制御部は、IRISSで算出したベローズガス圧力値を受信し、指令値と同値になるように圧力操作盤の電磁弁に対して開閉信号を発信する。ガス圧力制御部は2体のベローズに対しガス圧力を個別に設定できるように、独立した制御回路を有している。

圧力操作盤は、歪測定用照射キャプセルのベローズに負荷するためのガス圧力の調節を行うもので、ガス圧力制御部からの制御信号により、ガスの供給系および排気系の電磁弁を開閉して圧力を調整する。

2.4 計測データの収録

EXIRで計測した各種データは、IRISSに収録される。

IRISSに収録される各種データは、以下に示すデータを1分間隔で収録している。

・試験片温度	4点
・フレキシブルチューブ内温度	1点
・ベローズ温度	2点
・変位	2点
・キャプセル内圧力	1点
・ベローズ圧力	2点
・ヒータ出力	4点
・引張荷重	2点
・荷重制御出力	2点
・原子炉出力	1点

2.5 荷重制御方法

EXIRにおける計測・制御方法の概念を図2.8に示す。

ガス圧力を用いて遠隔で荷重制御を行うEXIRの照射キャプセルにおいて、精度良く制御を行うためには、ガス圧力と照射試料に作用する荷重との関係を実測する必要があった。このためには、主要構造部を同一に製作した部分モデルを試作して実験することにより、計測制御に用いる次の演算式を求めた。

$$W = (P - P_c - (g_1 \times D + g_2 \times D^2) / (1 + g_3 \times T)) \times g_4 \times (1 - g_5 \times D)$$

ここで、上記式はベローズ温度およびベローズ変位をパラメータとして、ベローズガス圧力を変えた時の作用荷重との関係式であり、

W ; 作用荷重(N)

P ; ベローズガス圧力(Pa)

P_c ; キャプセル内圧 (N)

D ; ベローズ変位(mm)

T ; ベローズ温度(℃)

g₁ ~ g₅ ; 定数

である。

表 2.1 EXIRへ装荷したドシメータの種類

照射キャプセルNo	フラックスモニタ管(φ4×37mmL)		
	No	ドシメータの種類	Cdの有無*1
歪測定用照射キャプセルNo.1	7	Fe, Ni, Co-Al, Ta, Np, B	無
	8	Fe, Co-Al, Ta, B	有
歪測定用照射キャプセルNo.2	5	Fe, Ni, Co-Al, Ta, Sc, Np, B	無
	6	Sc, Np, B	有
熱負荷用照射キャプセルNo.3	1	Fe, Ni, Co-Al, Ta, Sc, Np, B	無
	2	Sc, Np, B	有
	3	Fe, Ni, Co-Al, Ta, Np, B	無
	4	Fe, Ni, Co-Al, Ta	有

*1: ドシメータ周囲への酸化カドミウム(パウダー)装着の有無を示す。

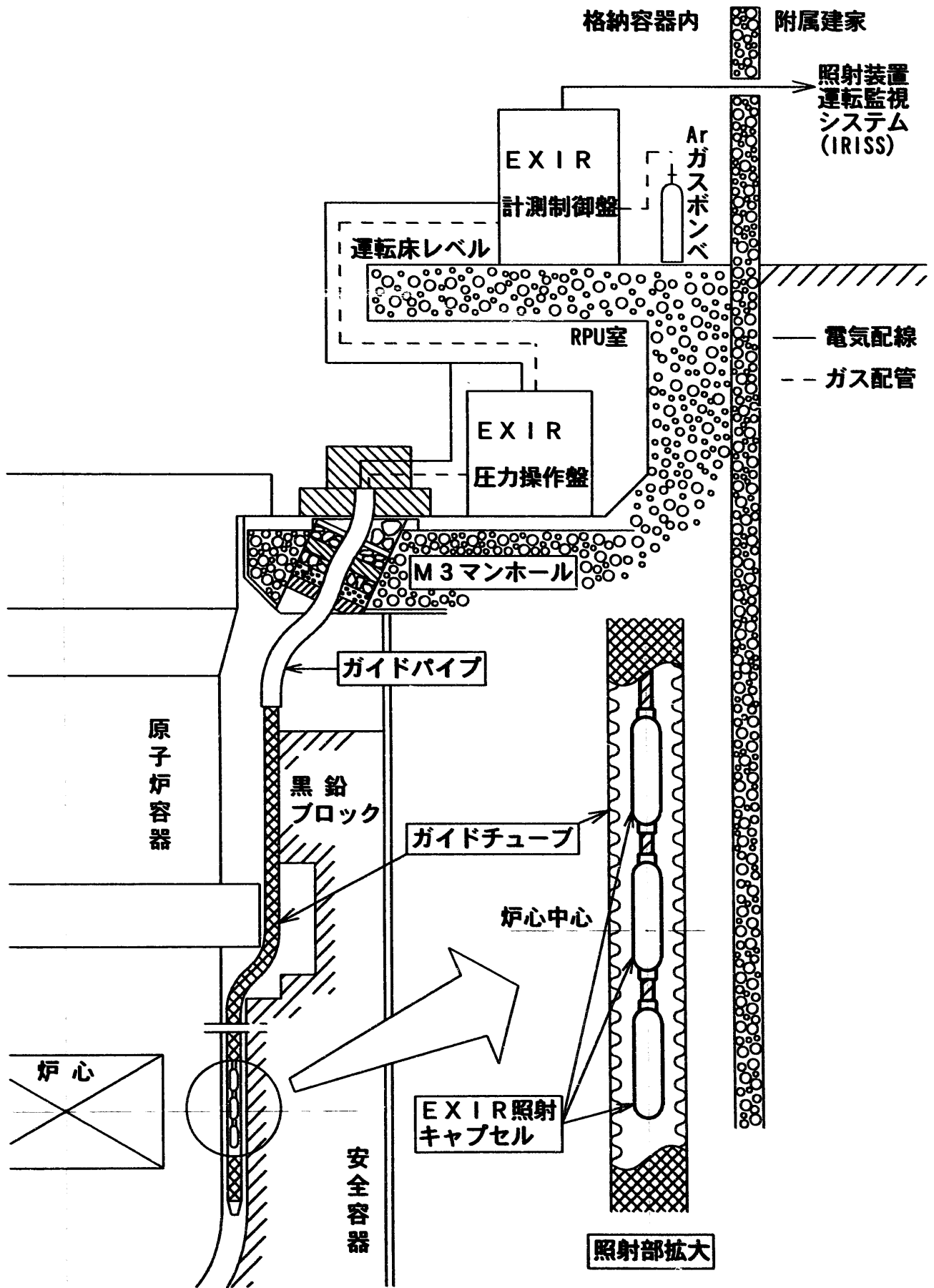
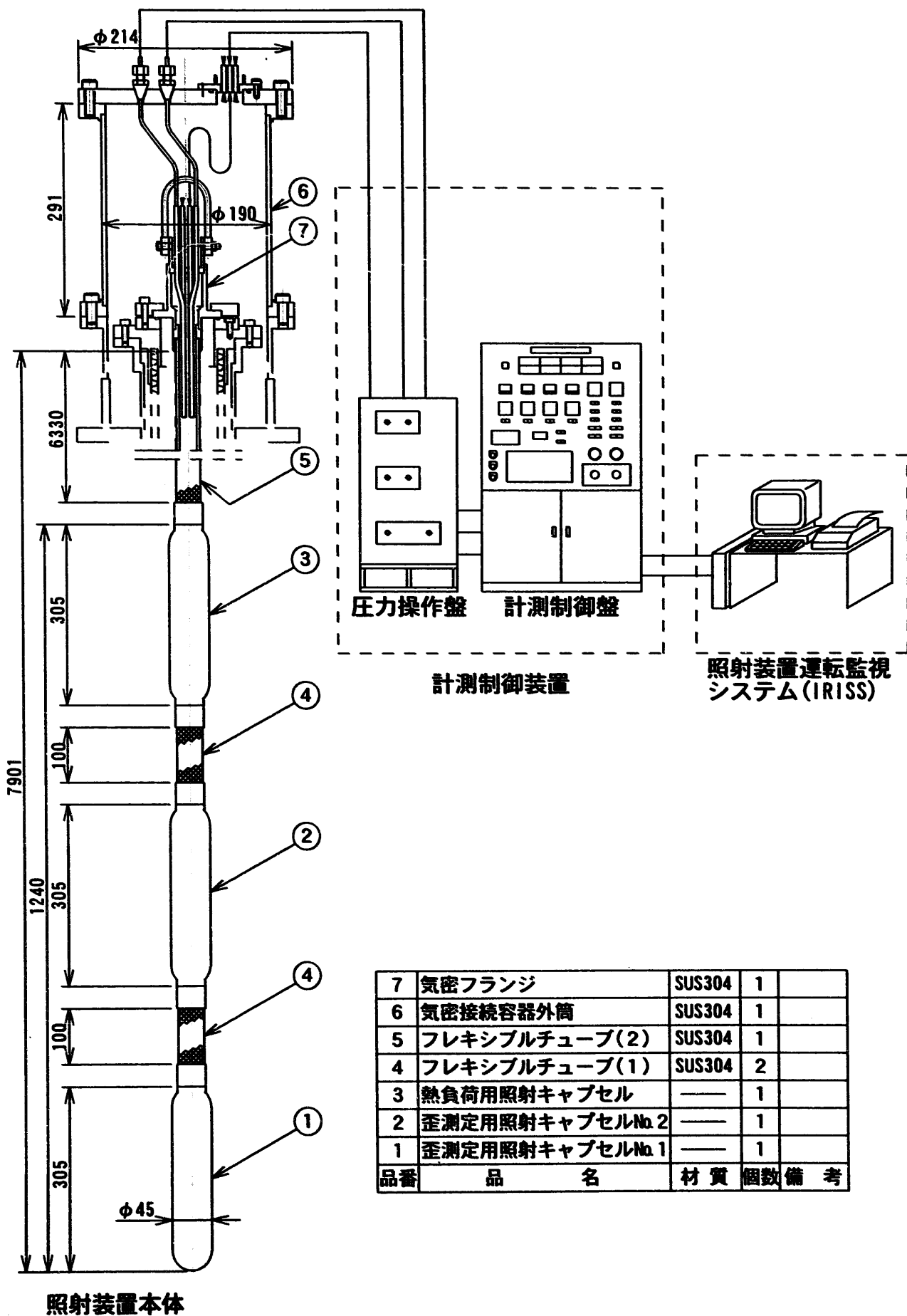
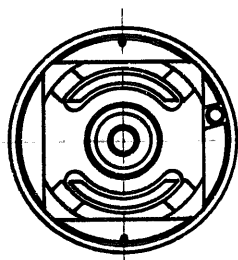
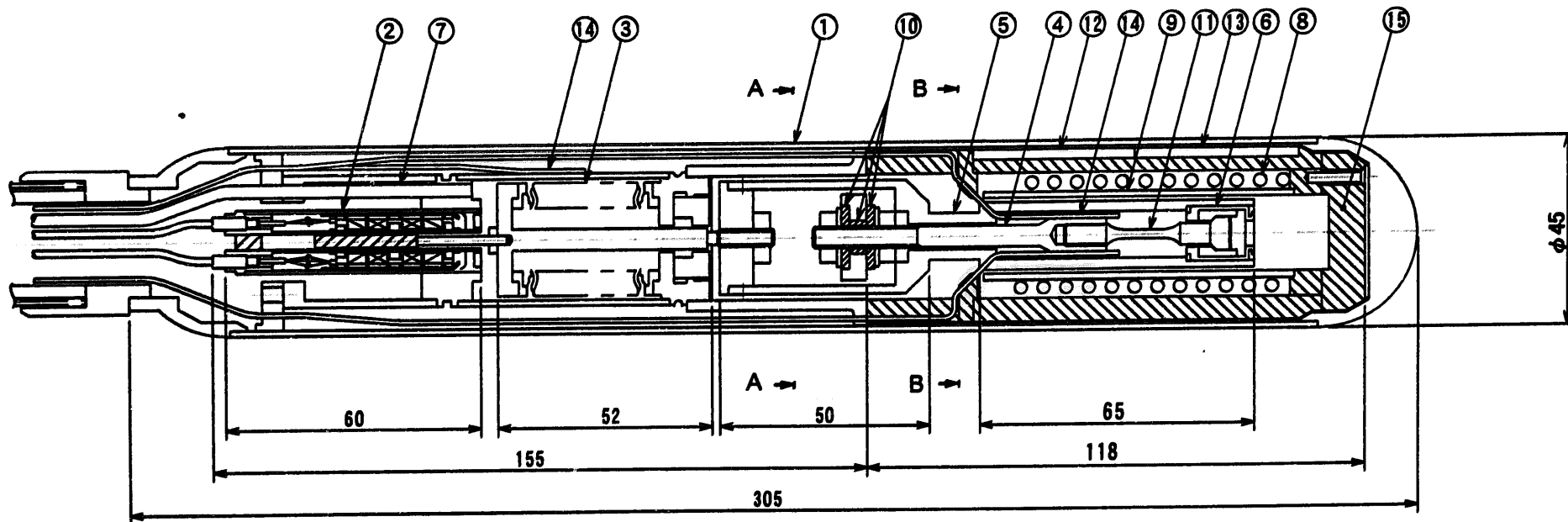


図 2.1 EXIRの試験装置概念

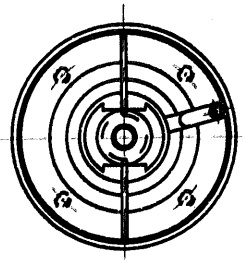


7	気密フランジ	SUS304	1	
6	気密接続容器外筒	SUS304	1	
5	フレキシブルチューブ(2)	SUS304	1	
4	フレキシブルチューブ(1)	SUS304	2	
3	熱負荷用照射キャプセル	—	1	
2	歪測定用照射キャプセルNo.2	—	1	
1	歪測定用照射キャプセルNo.1	—	1	
品番	品名	材質	個数	備考

図2.2 EXIRの全体構成



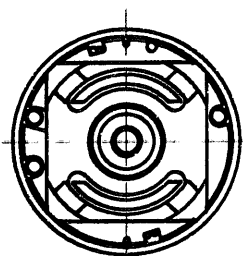
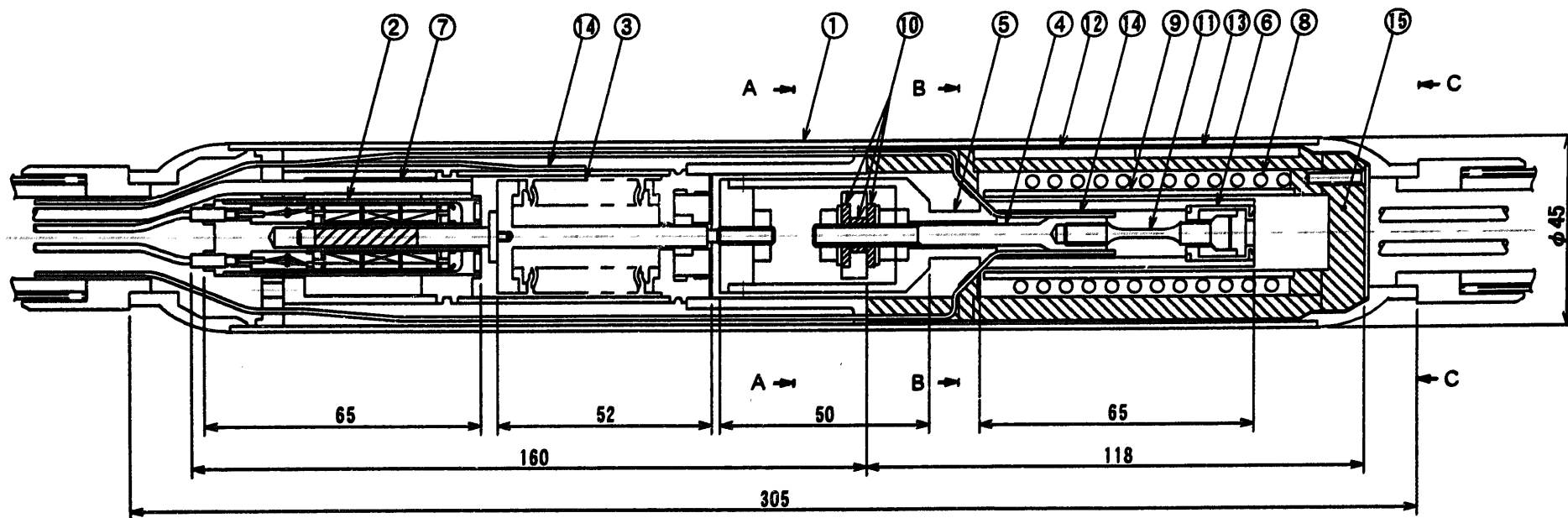
断面A-A



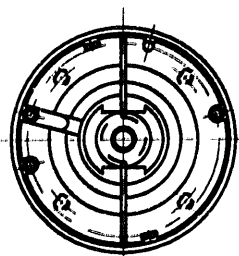
断面B-B

15	炉外筒	ホトベールEQ	1	
14	熱電対	————	3	
13	フラックスモニタ管No.8	————	1	
12	フラックスモニタ管No.7	————	1	
11	試験片(EK4)	SUS316FR	1	B (120ppm) 添加
10	断熱材	ホトベールEQ	3	
9	炉心管	石英	1	
8	電気ヒータ	Ni, Cr	1	
7	ガス加圧管	SUS304TP	1	
6	試験片ホルダー	インコネル718EQ	1	
5	外側ヨーク	インコネル718EQ	1	
4	内側ヨーク	インコネル718EQ	1	
3	ベローズ	————	1	
2	差動トランス型変位計	————	1	
1	キャプセル外筒	SUS304	1	
品番	品名	材質	数量	備考

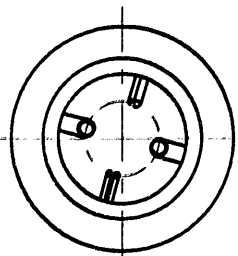
図 2. 3 歪測定用照射キャプセルNo.1



断面A-A



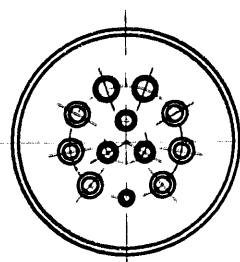
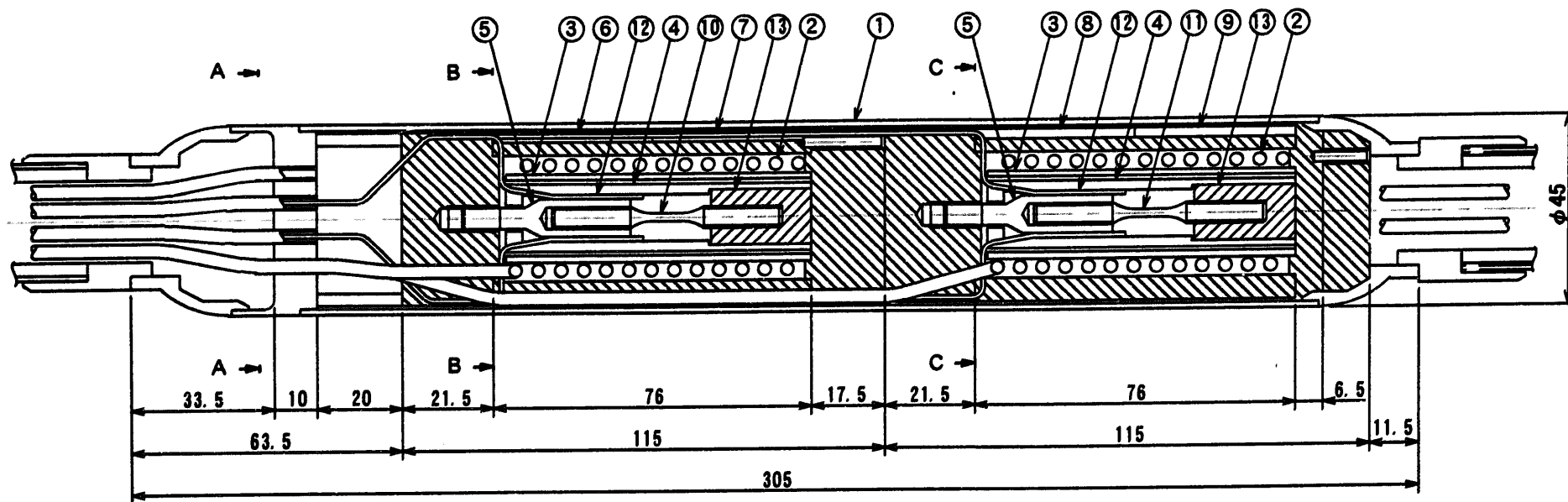
断面B-B



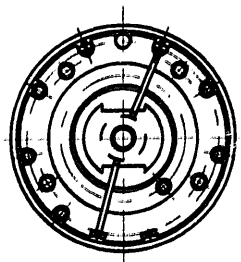
断面C-C

15	炉外筒	ホトベールEQ	1	
14	熱電対	——	3	
13	フラックスモニタ管No.6	——	1	
12	フラックスモニタ管No.5	——	1	
11	試験片(EK1)	SUS316FR	1	B (120ppm)添加
10	断熱材	ホトベールEQ	3	
9	炉心管	石英	1	
8	電気ヒータ	Ni, Cr	1	
7	ガス加圧管	SUS304TP	1	
6	試験片ホルダー	インコネル718EQ	1	
5	外側ヨーク	インコネル718EQ	1	
4	内側ヨーク	インコネル718EQ	1	
3	ベローズ	——	1	
2	差動トランス型変位計	——	1	
1	キャプセル外筒	SUS304	1	
品番	品名	材質	数量	備考

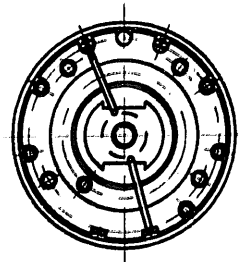
図2.4 歪測定用照射キャプセルNo.2



断面 A-A



断面 B-B



断面 C-C

13	試験片ホルダ	ホトパールEQ	2	
12	熱電対	—	4	
11	試験片(AK1)	SUS316FR	1	B (120ppm) 添加
10	試験片(AK4)	SUS316FR	1	B (120ppm) 添加
9	フラックスモニタ管No.4	—	1	
8	フラックスモニタ管No.3	—	1	
7	フラックスモニタ管No.2	—	1	
6	フラックスモニタ管No.1	—	1	
5	内側ヨーク	インコネル718EQ	2	
4	外側ヨーク	インコネル718EQ	2	
3	炉心管	石英	1	
2	電気ヒータ	Ni, Cr	1	
1	キャプセル外筒	SUS304	1	
品番	品名	材質	数量	備考

図 2.5 熱負荷用照射キャプセルNo.3

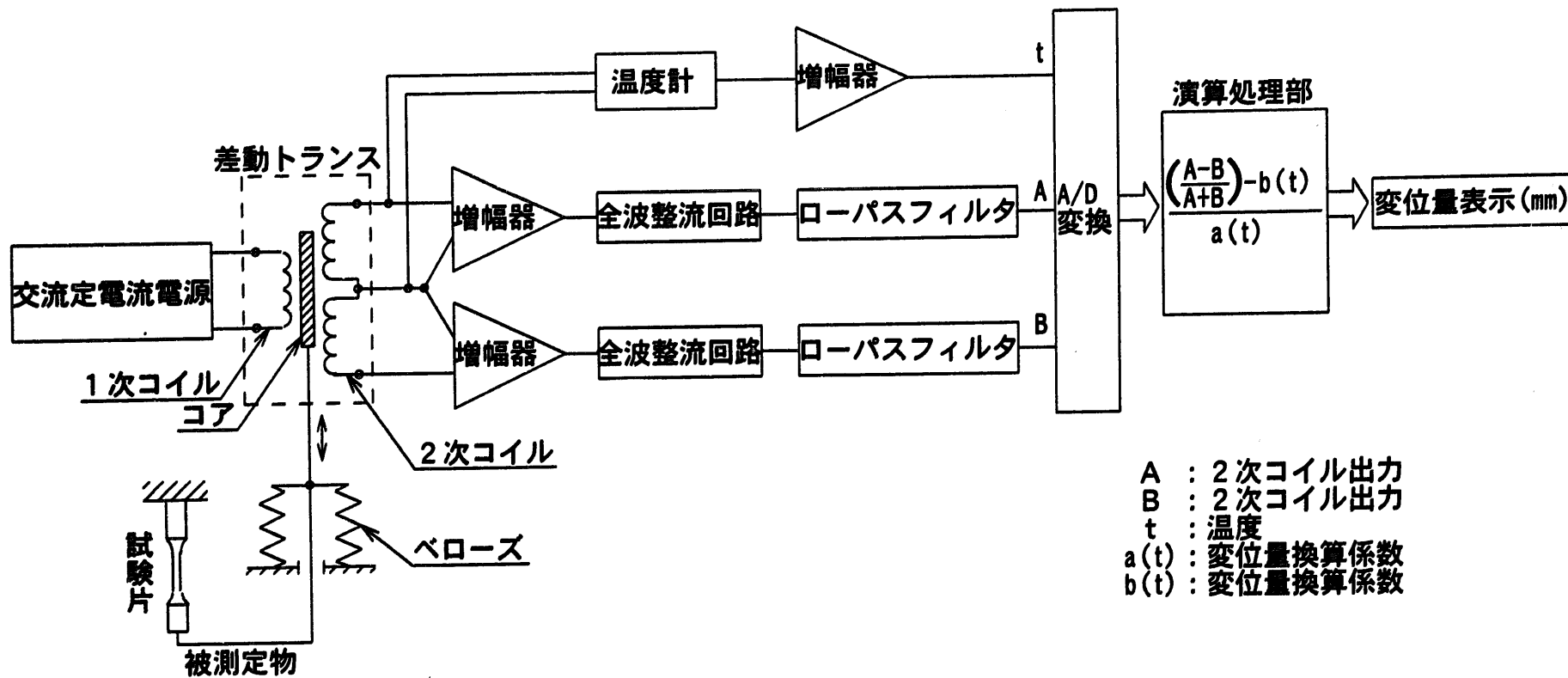


図2.6 差動トランス型変位計の計測フロー

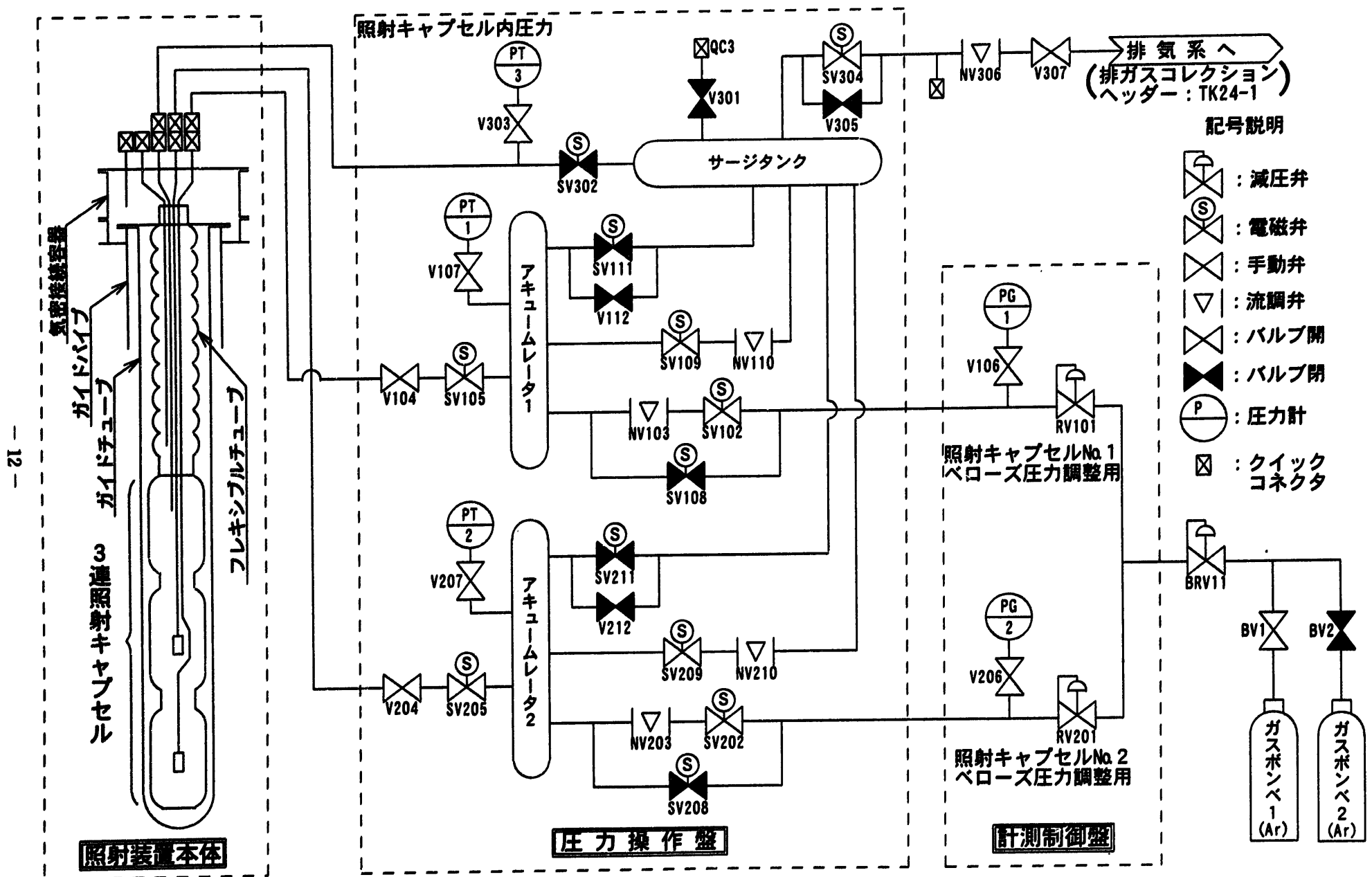


図 2.7 EXIR 圧力調整用 Ar ガス系統図

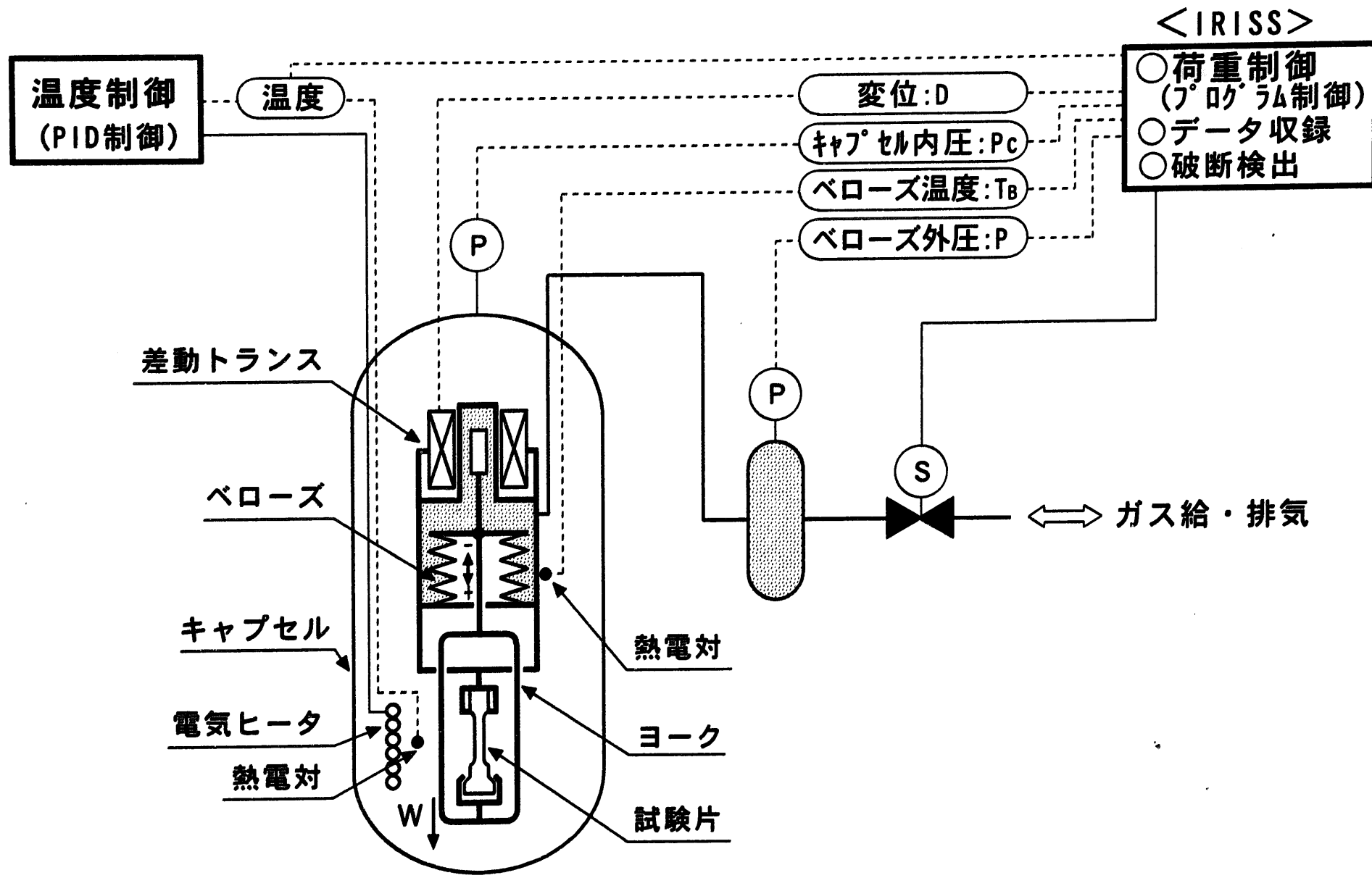


図 2. 8 EXIRにおける計測・制御方法の概念

3. 照射試験

E X I Rを用いた原子炉構造材料の中性子照射下での単軸クリーブ破断試験は、平成6年8月の「常陽」第29サイクル運転から開始した。その後、平成9年3月の第30サイクル運転中に、単軸クリーブ破断強度試験を実施していた2本の試験片の破断が検出されたため、第30サイクル運転をもってE X I Rの照射を終了した。

E X I Rで得られた照射結果について報告する。

3.1 試験目的

本試験は、高速炉構造用SUS316鋼(316FR鋼)の照射によるクリーブ破断強度を評価するため、「常陽」安全容器内のM3マンホールを利用して試験片の温度、荷重を一定に制御した状態で、中性子照射下における単軸クリーブ破断強度試験を初めて実施したものである。

また、照射量および温度条件を同一とした無負荷試験片を照射後、ホットラボでクリーブ破断強度試験を行い、照射下クリーブ破断強度試験の結果と比較することにより、両者の試験条件の違いによるクリーブ破断強度への影響を評価する。この、照射下におけるクリーブ破断強度試験は、照射量(主に熱中性子)の増大により試験片の中で徐々にヘリウム生成量が増加する条件で試験するのに対して、照射後の炉外クリーブ破断強度試験は、当初から照射で生成したヘリウムが存在している試験片を用いて試験する条件にあり、試験片のヘリウム生成条件の違いに着目したクリーブ破断強度への影響を確認するためのものである。

3.2 試験条件

E X I Rによる照射試験の条件を下表に示す。

		歪測定用照射キャプセル		熱負荷用照射キャプセル	
		キャプセルNo 1	キャプセルNo 2	キャプセルNo 3	
試験片温度		600℃	550℃	550℃	600℃
負荷荷重 (応力)		649.2 N ($2.55 \times 10^6 \text{Pa}$)	798.3 N ($3.14 \times 10^6 \text{Pa}$)	—	
予想 中 性 子 束	高速中性子束 ($\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$)	1.5×10^{11}	2.0×10^{11}	1.6×10^{11}	1.3×10^{11}
	熱中性子束 ($\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$)	3.7×10^{11}	4.1×10^{11}	3.9×10^{11}	3.7×10^{11}
	全中性子束 ($\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$)	2.3×10^{12}	2.9×10^{12}	2.6×10^{12}	2.1×10^{12}

3.3 試験片仕様

3.3.1 試験片照射位置の設定

図3.1のEXIR装荷位置での中性子束分布によると、EXIRの照射位置では、軸方向距離が炉心中心位置(0mm)から離れるほど中性子束が低くなる。このような照射場のため、試験片への照射量は照射キャプセルの軸方向設置位置を調整することにより設定することになる。

一方、照射試験上からは、歪測定用照射キャプセルと熱負荷用照射キャプセルに収納したそれぞれ、同一温度の試験片は同じ照射量にしたいとの要求がある。照射キャプセル間をつなぐフレキシブルチューブの長さを短くすれば同じ照射量を得ることができるが、短かすぎると装脱荷時の屈曲空間を通過するときに要する荷重が大きくなることから、模擬試験体で装脱荷が容易であった100mmを最短の条件として検討した結果、各試験片は図3.1中に示す位置に配置することとした。

この配置では、同じ温度で照射する試験片の熱中性子束の差は、1割程度となっている。

3.3.2 試験片の形状

本試験に用いる試験片は、照射キャプセルの寸法、構造上の制約から、JIS規格の試験片を装荷することができないため、細径寸法の試験片を装荷した。細径試験片とJIS試験片との形状効果の相違による影響が考えられたため、炉外において両試験片の比較試験を行った結果、寸法によるクリープ試験への影響はないことが確認された。

歪測定用照射キャプセルに収納する2本の「負荷試験片」と、熱負荷用照射キャプセルに収納する2本の「無負荷試験片」の概略仕様を表3.1に示す。また、その形状を図3.2に示す。

3.4 照射実績

EXIRの装荷から脱荷作業までの全体工程を表3.2に示す。

EXIRは、当初第28サイクル運転から照射を開始する計画であったため、平成5年11月に安全容器内の照射位置に装荷された。その後、運転計画に変更が生じ、第28サイクル運転は約7日間の短い運転期間となったため、照射キャプセルの昇温と試験片の荷重負荷は行わず、無負荷状態での照射を行った。

平成6年8月の第29サイクル運転から、照射キャプセルの昇温と荷重を負荷した単軸クリープ破断強度試験を開始した。第29サイクル運転では、原子炉の計画外停止を2回経験した。1回目の計画外停止は、外部電源喪失によるもので、一時的にEXIR用制御電源の供給も中断された。2回目は、主送風機トリップによる制御棒の一斉挿入であり、この計画外停止

をもって第29サイクル運転が終了した。このため、当初の予定では、原子炉の定格運転中に試験片へ負荷している引張荷重を除荷する手順であったのに対し、第29サイクル運転では原子炉の停止後に除荷を行わざるを得なかった。

平成9年3月に第30サイクル運転による照射を再開したところ、平成9年4月3日22時30分に歪測定用照射キャプセルNo2(以下、照射キャプセルNo2という。)で試験片(以下、No2試験片という。)の破断が検出された。また、平成9年4月17日7時40分には、歪測定用照射キャプセルNo1(以下、照射キャプセルNo1という。)で試験片(以下、No1試験片という。)の破断が検出されたため、第30サイクル運転をもってEXIRの照射を終了した。なお、No1試験片およびNo2試験片のクリープ破断に至るまでの引張荷重負荷時間は、1239時間および921時間であった。

第29サイクル運転と第30サイクル運転の間に実施された特性試験については、第28サイクル運転と同様に運転日数が短いことから照射キャプセルの昇温と試験片への荷重負荷は行わず、無負荷状態での照射を行った。

照射を終了したEXIRについて、第30サイクル運転終了後の平成9年7月1日から3日にかけて脱荷作業を試みたところ、ガイドチューブからの照射キャプセルの引抜き荷重が予想より大きく、試験装置の健全性維持の観点から荷重低減対策を検討する必要性が生じたために、作業を一時延期することとした。

このため、脱荷方法の再検討が行われ、平成9年12月に抗力特性の再現を主眼としたモックアップ試験を行い、脱荷装置の改造と脱荷方法の妥当性を確認した。その後、平成10年5月にEXIRの再脱荷作業を行い、安全容器からの脱荷を終了した。EXIRは、照射位置から脱荷の後、照射後試験に供するためホットラボへ移送された。その後、試験片の破断状況を確認するために、X線撮影を行い両試験片とも平行部において破断していることが確認された。破断状況の詳細結果については、これから行われる照射後試験において確認する計画である。

なお、第28サイクル運転から第30サイクル運転期間までのEXIR装荷位置は、前述のとおり図3.1に示す位置であるが、第31サイクル運転および第32サイクル運転期間は、脱荷の都合上定位置よりも約2.6m引き抜いた位置に引き上げて保持された。

表3.3に各サイクル運転における照射日数と計算照射量⁵⁾を示すが、照射量については、これから行われるドシメータ(表2.1参照)の測定結果により最終評価を行うものとする。

3.4.1 温度履歴

EXIRの照射期間中における各試験片の温度履歴と原子炉出力を図3.3～図3.6に示す。第28サイクル運転および特性試験の各試験片温度をそれぞれ図3.3、図3.5に示す。いず

れのサイクルも原子炉の運転期間が短いことから電気ヒータによる試験片の温度制御は行っておらず、原子炉の運転にともなって安全容器内の雰囲気温度が変化し、この変化に各試験片の温度も追従して変化したものである。

第29サイクル運転中の各試験片温度(図3.4参照)は、設定温度に対して $\pm 2^{\circ}\text{C}$ の範囲内で一定温度に制御することができた。しかし、平成6年9月1日に発生した外部電源喪失により、EXIR用電源の供給も一時的に中断した。この時の制御停止時間は約9分間であった。その間、Na1試験片においては、試験片温度が 600°C から約 446°C まで低下し、制御温度を約25分間逸脱した。Na2試験片においては、試験片温度が 550°C から約 410°C まで低下し、制御温度を約28分間逸脱した。Na3試験片においては、Na3AおよびNa3B試験片温度が 550°C から約 449°C まで、 600°C から約 455°C まで低下し、制御温度を約25分間逸脱した。

次に、第30サイクル運転中の各試験片温度(図3.6参照)は、設定温度に対して $\pm 2^{\circ}\text{C}$ の範囲内で一定温度に制御することができた。しかし、Na2試験片の破断が確認されたため、Na2試験片を継続して昇温しておく必要性がなくなったことから、平成9年4月9日に電気ヒータをOFFにしたところ、Na2試験片の温度の低下とともに照射キャプセルNa1のベローズ温度が約 300°C から約 230°C まで低下する事象が生じた。このため、不具合を回避すべく、Na2試験片の電気ヒータを平成9年4月10日にONにしたところ、照射キャプセルNa1のベローズ温度は設定温度に回復した(4.2項(5)参照)。

その後、Na1試験片の破断を確認したことにより、平成9年4月18日に両方の電気ヒータ(照射キャプセルNa1、Na2)をOFFにした。熱負荷用照射キャプセルNa3A、3Bについては、第30サイクル運転が終了した平成9年5月20日に電気ヒータをOFFにした。

3.4.2 引張荷重履歴

(1) 照射キャプセルNa1

荷重負荷用ベローズ圧力の推移と、試験片の引張荷重履歴をそれぞれ図3.7、図3.8に示す。ここに示した引張荷重は、キャプセル内圧およびベローズガス圧、試験片の伸び、温度に基づく換算値である。

図3.8に示すように、一時的に引張荷重が制御幅から外れているものの、それ以外は、第29サイクル運転および第30サイクル運転ともに設定引張荷重に対して $\pm 8.8\text{N}$ の範囲内で安定した制御をすることができた。

また、照射期間中に荷重制御を中断した期間は、図3.7、図3.8に示したように第29サイクル運転中に2回ある。1回目(図中の①)は、試験片の伸び計測値が瞬間的にクリープ破断検出のための伸び設定値を超えたため、制御系は試験片クリープ破断と判断し、荷重制御を停止およびその状態確認を実施した期間である。この期間においては、荷重制御が停止

しても停止前のベローズガス圧力が保持されるため荷重が負荷され続けるので、試験片の伸びにともないベローズが圧縮されることで、ガス空間容積が増大し引張荷重を制御しているベローズガス圧力が低下するため、引張荷重が徐々に減少しているものである。2回目(図中の②)は、外部電源喪失による原子炉計画外停止後のキャプセル内ガス圧力が、通常値よりも若干高目のガス圧力であったため、原子炉の再起動後による雰囲気温度の上昇に伴ってキャプセル内ガス圧力が上昇し、警報設定値に近づいてしまった。このため、キャプセル内ガス圧力の減圧操作を行った際、キャプセル内圧が負圧になり、IRISSへマイナス値のガス圧を送信したためIRISSはマイナス値での演算が実行できないことから、結果として荷重制御が中断してしまったものである。

(2) 照射キャプセルNo.2

荷重負荷用ベローズ圧力の推移と、試験片の引張荷重履歴をそれぞれ図3.9、図3.10に示す。

照射キャプセルNo.2においても、図3.10に示したように一時的に引張荷重が制御幅から外れた期間があるが、照射キャプセルNo.1と同様に設定引張荷重に対して±8.8Nの範囲内で安定した制御をすることができた。

また、照射期間中に荷重制御を中断した期間は、図3.9、図3.10に示したように第29サイクル運転中に4回ある。図中の①と④は変位計の不具合によるものであり、図中の②は、外部電源喪失に伴う原子炉計画外停止、図中の③は、照射キャプセルNo.1の②と同一の事象によるものである。

3.4.3 変位履歴

試験片への荷重負荷後の変位測定値を図3.11、図3.12に示す。

図3.11、図3.12に示した第29サイクル運転中の変位データは、バラツキ幅が大きなものとなっていたため、第29サイクル運転終了後に原因調査を行った結果と対策を以下に示す。

- ① 変位計信号処理器(2台)用の計測ケーブル(励振電流用、変位信号用)が一括シールド付多芯ケーブルを使用していることから、この部分で差動トランス2台の信号がお互いに干渉していた。このため、一括方式から分割方式に計測ケーブルの変更を行い、電気的干渉とノイズの侵入防止を図った。
- ② 変位計信号処理器(2台)用の信号ケーブル(EXIR本体とを接続しているキャノンコネクタ～信号処理器コネクタ間)の一部に銅線を使用していたことにより、演算処理器の基準接点補償回路がK型熱電対の冷接点を補償するための電圧を発生しているのに対して、接続されている信号ケーブルが銅線なので接続点には熱起電力が発生しない。したがって、演算処理器の雰囲気温度上昇などにより、基準接点補償回路で発生する電圧

だけが増加するので、温度モニタ出力は、演算処理器の温度に依存して変化していた。このため、信号ケーブルの一部に使用した銅線を補償導線に変更し、演算処理器の基準接点補償回路が有効に作動するようにした。

上記①、②の対策を行った結果、第30サイクル運転では、変位データのバラツキ幅が小さくなった。

No1試験片の変位データ(図3.11参照)について、上記の調整作業(両変位計とも実施)を行ったこともあって、第29サイクル運転終了時と第30サイクル運転開始時との間でデータに不連続性が認められる結果となった。第30サイクル運転初期には、試験片予熱温度、引張荷重とも第29サイクル運転時と同値に設定したので、変位は第29サイクル運転終了時と同値(2.234mm)に復帰するものと予想していたが、実際には、1.794mmとなり第29サイクル運転終了時と比べると0.4mm小さい値を示した。なお、第29サイクル運転が終了して荷重を除荷した後の指示値は0.52mmであったが、第30サイクル運転開始時の同条件での指示値は-0.306mmでありズレが生じていた。この結果から見ると、変位計測に影響を与えるベローズガス圧力および設定温度等の試験条件の変化がないことから、変位計測上への影響はないものと考えられる。よって、変位計測器の回路特性が変化したことにより、基準点がシフトした影響によるものと推察される。

No2試験片の変位計(図3.12参照)についても、No1試験片の変位計と同様に調整作業を実施しているが、第29サイクル運転終了時と第30サイクル運転開始時との間でデータの不連続性が認められず、第29サイクル運転終了時とほぼ同値に復帰している。また、No2試験片の変位データについては、第29サイクル運転中に4回の不連続のデータが記録されている。この不連続の原因としては、EXIRの変位計測器の不具合により、伸びデータが欠落したものである。図3.12(図中①～④)では、変位計測器の不具合が生じる直前の伸び量を補正(補正回数1回目以降の伸びデータに加算)して連続性を持たせることとした。この時の補正分のかさ上げ値は、以下のとおりである。

補正回数	1	2	3	4
補正值 (mm)	1.701	1.783	1.868	1.949

図3.11、図3.12に示したNo1試験片およびNo2試験片の伸び変位の読取り値は、不連続であるため、以下の処理を施して図3.13および図3.14に示す連続データに加工した。

① No1試験片

- ・試験片へ引張荷重を負荷した時に発生する弾塑性変位に加えて、荷重負荷機構が持つガタ分相当の移動変位も含まれている。従って、試験片に発生したクリープ変位は、この初期変位1.091mmを差し引いて0mmとして描いた。

- ・ 図3. 13に表示の約500時間頃の変位データの突起部は、計測器不具合に伴う温度効果による影響であることが明らかになったので、カーブ上滑らかにつないだ。
- ・ 第30サイクル運転初期における変位 (1. 794mm) は、第29サイクル運転終了時における読取伸び変位2. 234mm (上記初期値補正後) に等しいものとして、第30サイクル運転の変位データ全体を平行移動した。

② No.2試験片

- ・ No.2試験片の伸びデータは、変位計測器の不具合により4回データが欠落したため、欠落する直前のデータを補正 (加算) して連続性を持たせる処理を行った。
- ・ 試験片へ引張荷重を負荷した時に発生する弾塑性変位に加えて、荷重負荷機構が持つガタ分相当の移動変位も含まれている。従って、試験片に発生したクリープ変位は、この初期変位1. 416mmを差し引いて0mmとして描いた。

図3. 13、図3. 14に示す変位計測値に対して、試験片の標点間長さ (G. L=10mm) を用いて変位 (初期変位量を除く) を歪みに換算したクリープ歪み量の結果を図3. 15、図3. 16に示す。

照射キャプセルNo.1、No.2内に装荷した試験片におけるクリープ速度を以下に示す。

No.1試験片におけるクリープ速度に関して、引張荷重を負荷してから約400時間で定常クリープ領域に達したものと仮定し、図3. 15で示すクリープ特性曲線 (試験時間 \geq 400時間) から取得したクリープ速度は、 $6.71 \times 10^{-3} \% \cdot h^{-1}$ (400時間 \sim 1100時間) であった。

No.2試験片におけるクリープ速度に関しては、第29サイクル運転の計測データに不連続性が生じていることから、図3. 16で示す第30サイクル運転のクリープ特性曲線 (試験時間620時間 \sim 870時間) から取得した結果、クリープ速度は、 $4.64 \times 10^{-3} \% \cdot h^{-1}$ であった。

表 3. 1 E X I R 照射キャプセルに装荷した試験片仕様

キャプセル名称	歪測定用照射キャプセル		熱負荷用照射キャプセル	
キャプセル番号	No. 1	No. 2	No.3A	No.3B
標点部寸法	φ1.8 mm×G.L 10 mm			
材 質	ボロン(120ppm)添加の316FR鋼			
数 量	1本	1本	1本	1本
試験片番号	EK4	EK1	AK1	AK4
試験温度	600℃	550℃	550℃	600℃

表3.2 EXIRによる照射試験工程

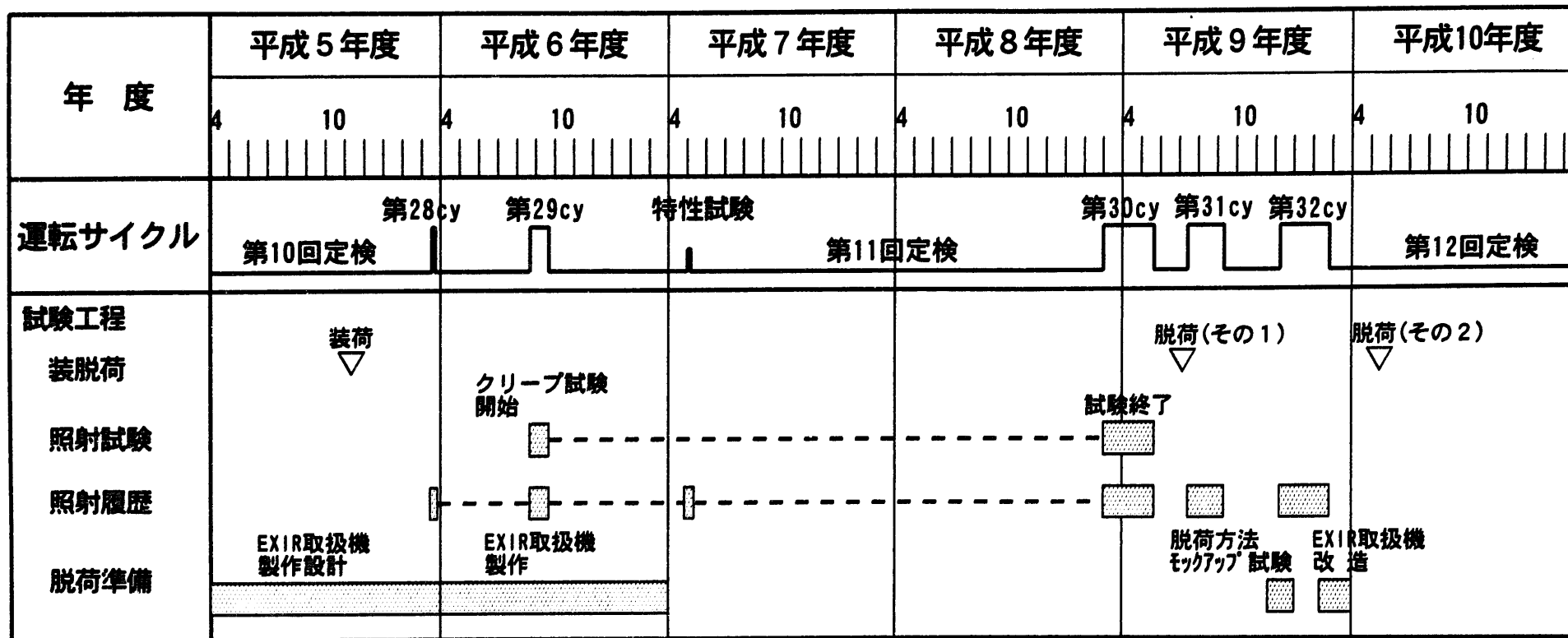


表3.3 各運転サイクル毎の照射日数と計算照射量*4

運転サイクル	28	29	特性試験	30	31*2	32*2	
照射期間	H6. 3. 14~ H6. 3. 26	H6. 8. 23~ H6. 9. 20	H7. 4. 25~ H7. 5. 10	H9. 3. 3~ H9. 5. 20	H9. 7. 14~ H9. 9. 12	H9. 12. 9~ H10. 2. 25	
照射日数 (EFPD)	6. 124	24. 337	1. 633	59. 730	54. 920	68. 960	
荷重負荷時間 (hr) *1	0	600 600	0	639 321	0	0	
中性子 照射量*3 (n/cm ²)	キヤプセルNo.1						
	高速中性子	7.602×10^{16}	3.021×10^{17}	2.027×10^{16}	7.414×10^{17}	1.850×10^{16}	2.322×10^{16}
	熱中性子	1.955×10^{17}	7.771×10^{17}	5.214×10^{16}	1.907×10^{18}	3.146×10^{17}	3.950×10^{17}
	Total	1.278×10^{18}	5.077×10^{18}	3.407×10^{17}	1.246×10^{19}	1.307×10^{18}	1.642×10^{18}
	キヤプセルNo.2						
	高速中性子	1.076×10^{17}	4.275×10^{17}	2.869×10^{16}	1.049×10^{18}	7.437×10^{16}	9.338×10^{15}
	熱中性子	2.258×10^{17}	8.974×10^{17}	6.022×10^{16}	2.203×10^{18}	1.915×10^{17}	2.405×10^{17}
	Total	1.557×10^{18}	6.188×10^{18}	4.152×10^{17}	1.519×10^{19}	7.306×10^{17}	9.173×10^{17}
	キヤプセルNo.3A						
	高速中性子	8.358×10^{16}	3.322×10^{17}	2.229×10^{16}	8.152×10^{17}	4.634×10^{16}	5.819×10^{16}
	熱中性子	2.079×10^{17}	8.262×10^{17}	5.544×10^{16}	2.028×10^{18}	1.330×10^{17}	1.670×10^{17}
	Total	1.358×10^{18}	5.399×10^{18}	3.622×10^{17}	1.325×10^{19}	4.497×10^{17}	6.211×10^{17}
	キヤプセルNo.3B						
	高速中性子	7.160×10^{16}	2.845×10^{17}	1.909×10^{16}	6.983×10^{17}	4.066×10^{16}	5.105×10^{16}
	熱中性子	1.971×10^{17}	7.831×10^{17}	5.255×10^{16}	1.922×10^{18}	1.201×10^{17}	1.508×10^{17}
	Total	1.251×10^{18}	4.971×10^{18}	3.335×10^{17}	1.220×10^{19}	4.461×10^{17}	5.601×10^{17}

* 1 : 上段がNo. 1試験片、下段がNo. 2試験片
 * 2 : 初期の照射位置よりも約2.6m引き抜いた位置
 * 3 : 高速中性子: $E \geq 0.1\text{MeV}$ 、熱中性子: $E \leq 0.41\text{eV}$
 * 4 : 二次元輸送計算コードDORTでの計算値

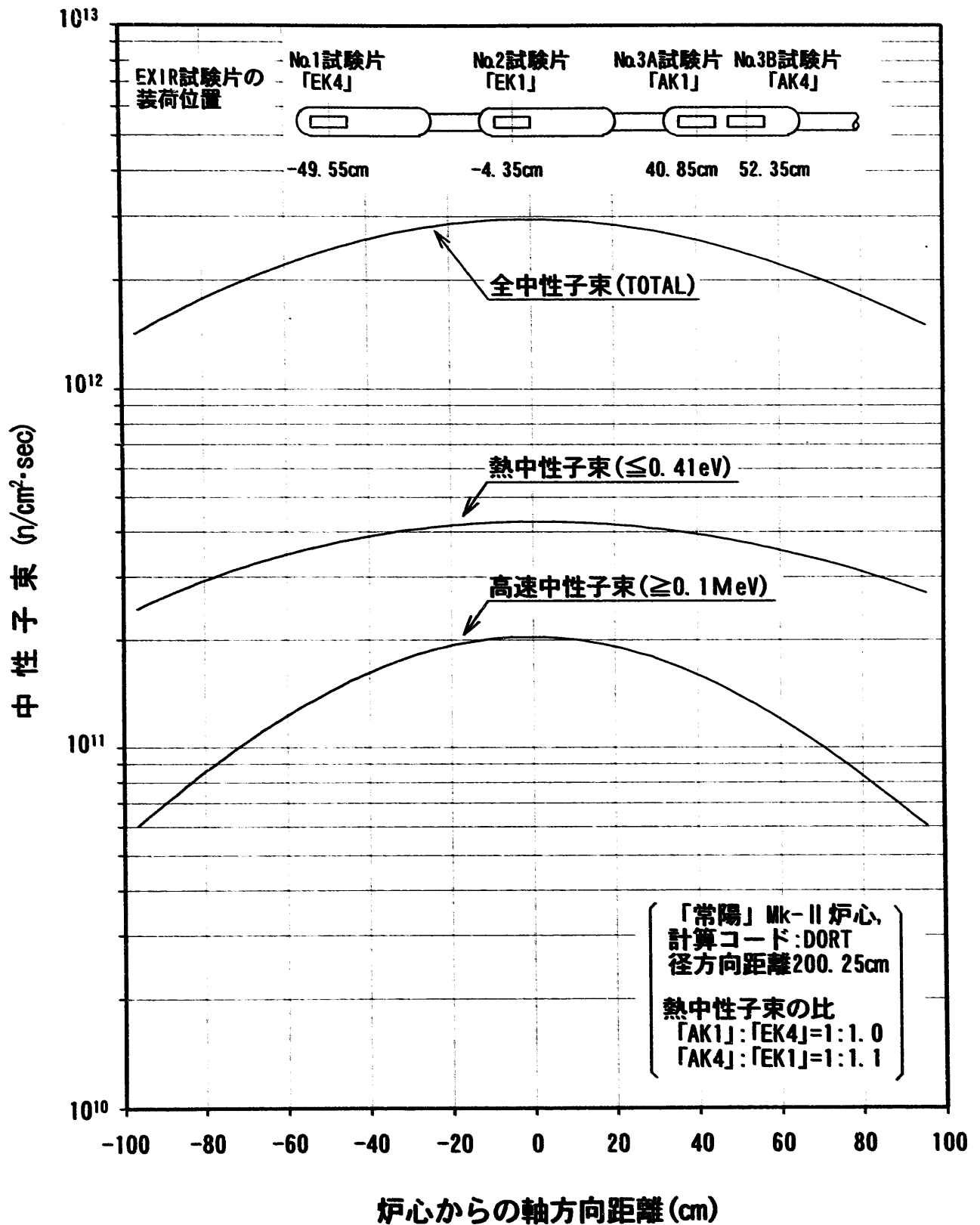
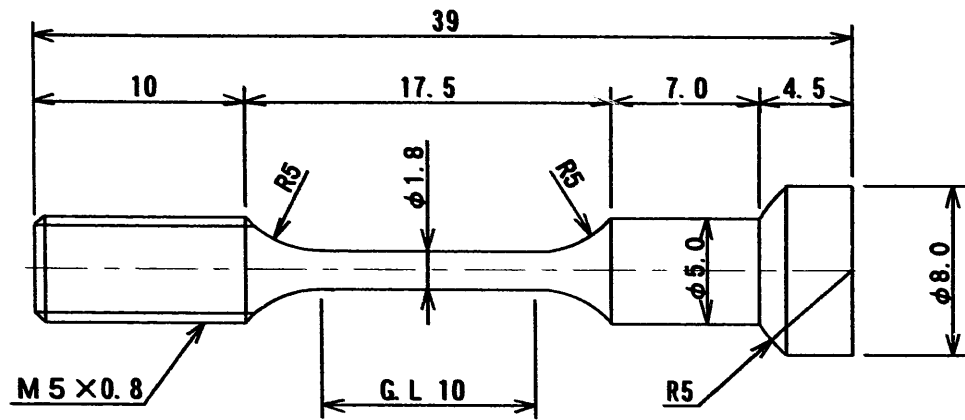
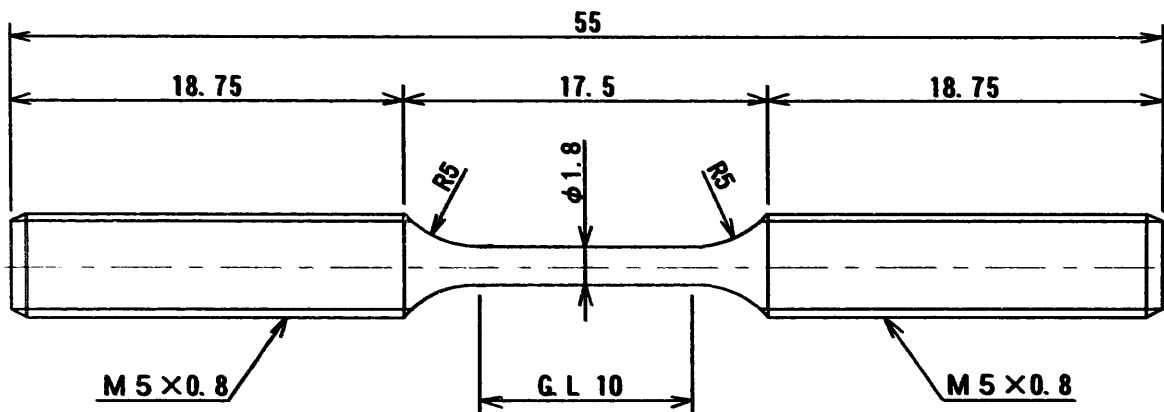


図3.1 EXIR装荷位置での中性子束分布(計算値)



(a) 負荷試験片



(b) 無負荷試験片

[単位 : mm]

注) G. L : 標点間寸法

図 3.2 EXIR に装荷した試験片

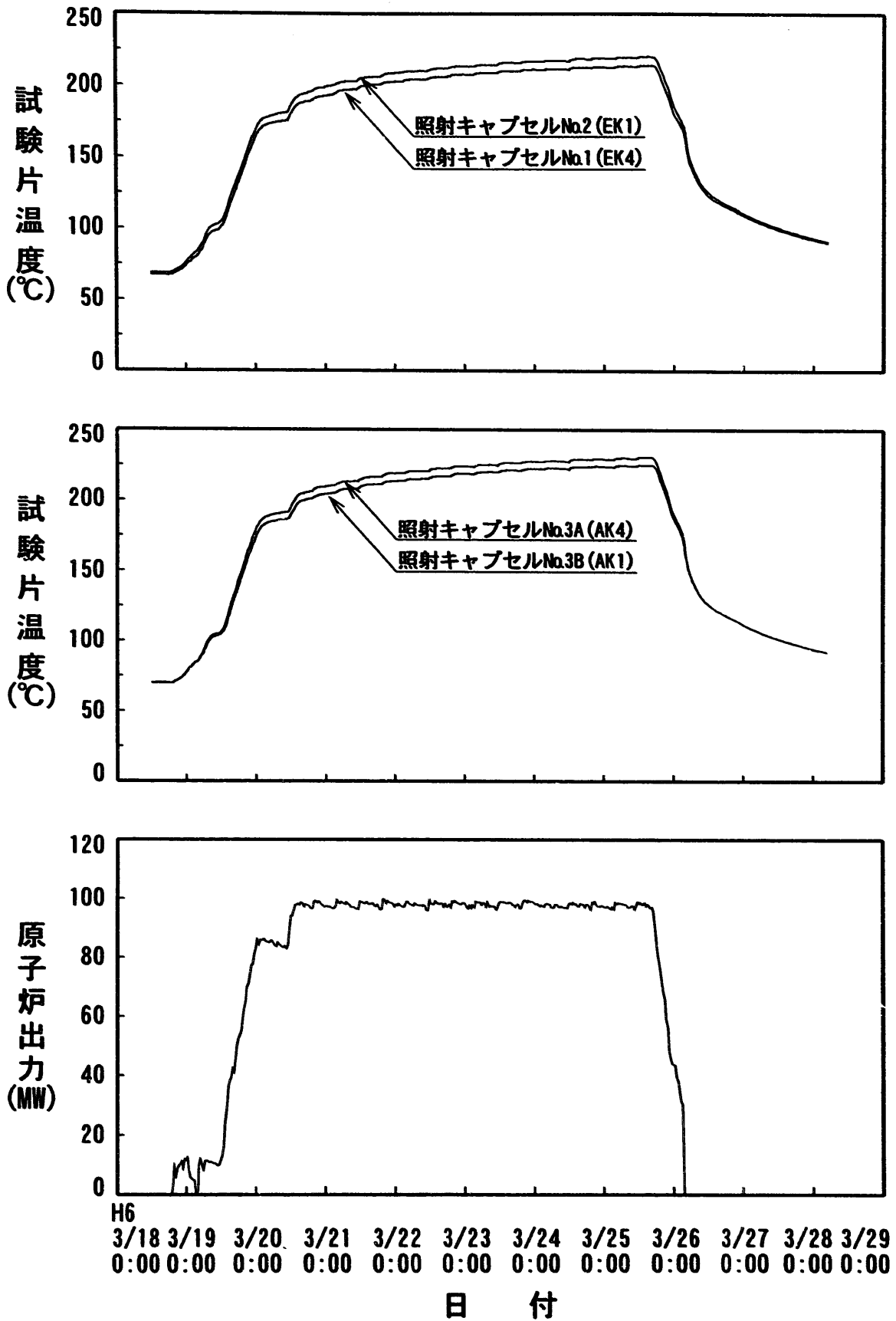


図3.3 第28サイクル運転における試験片の温度履歴

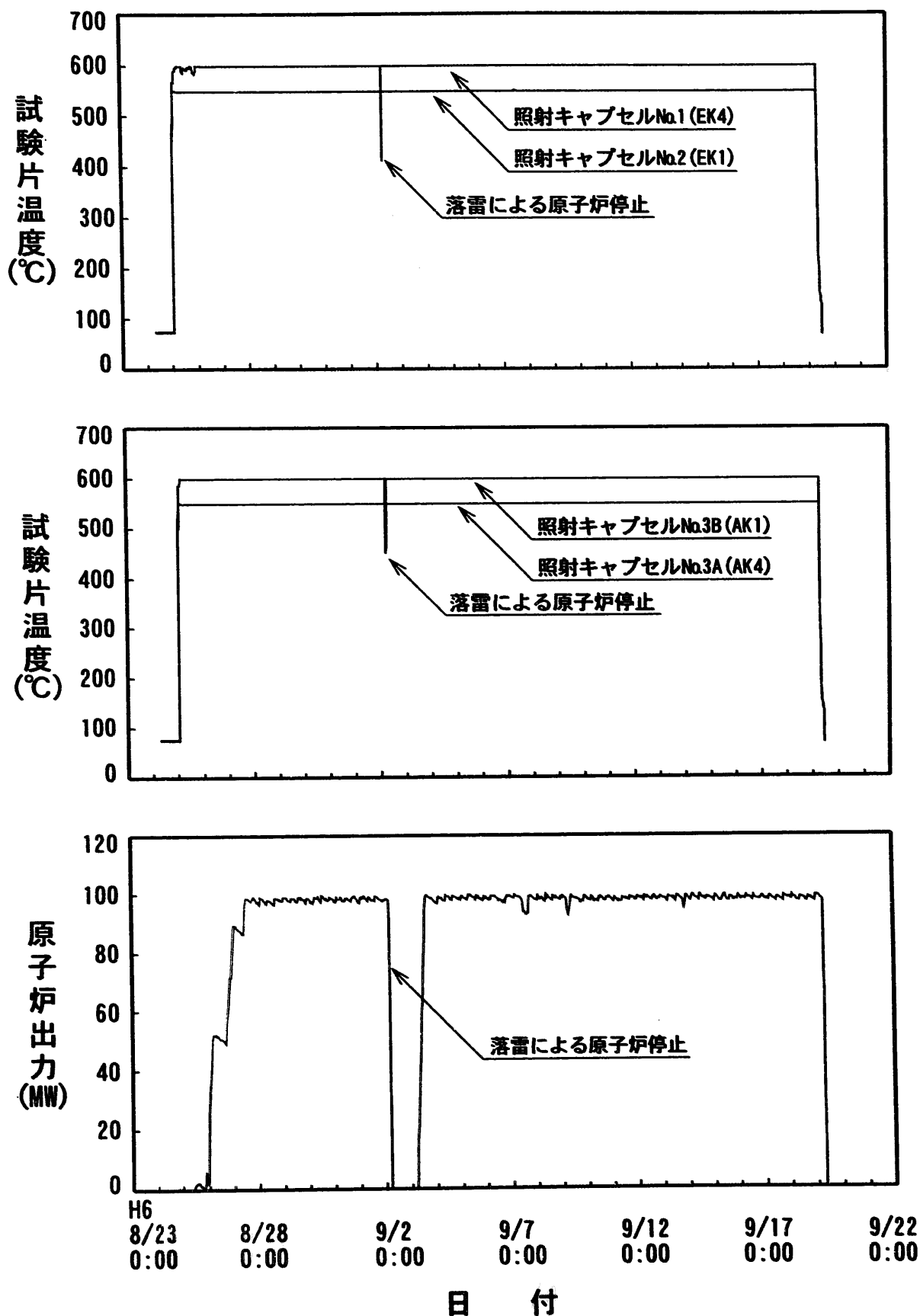


図3.4 第29サイクル運転における試験片の温度履歴

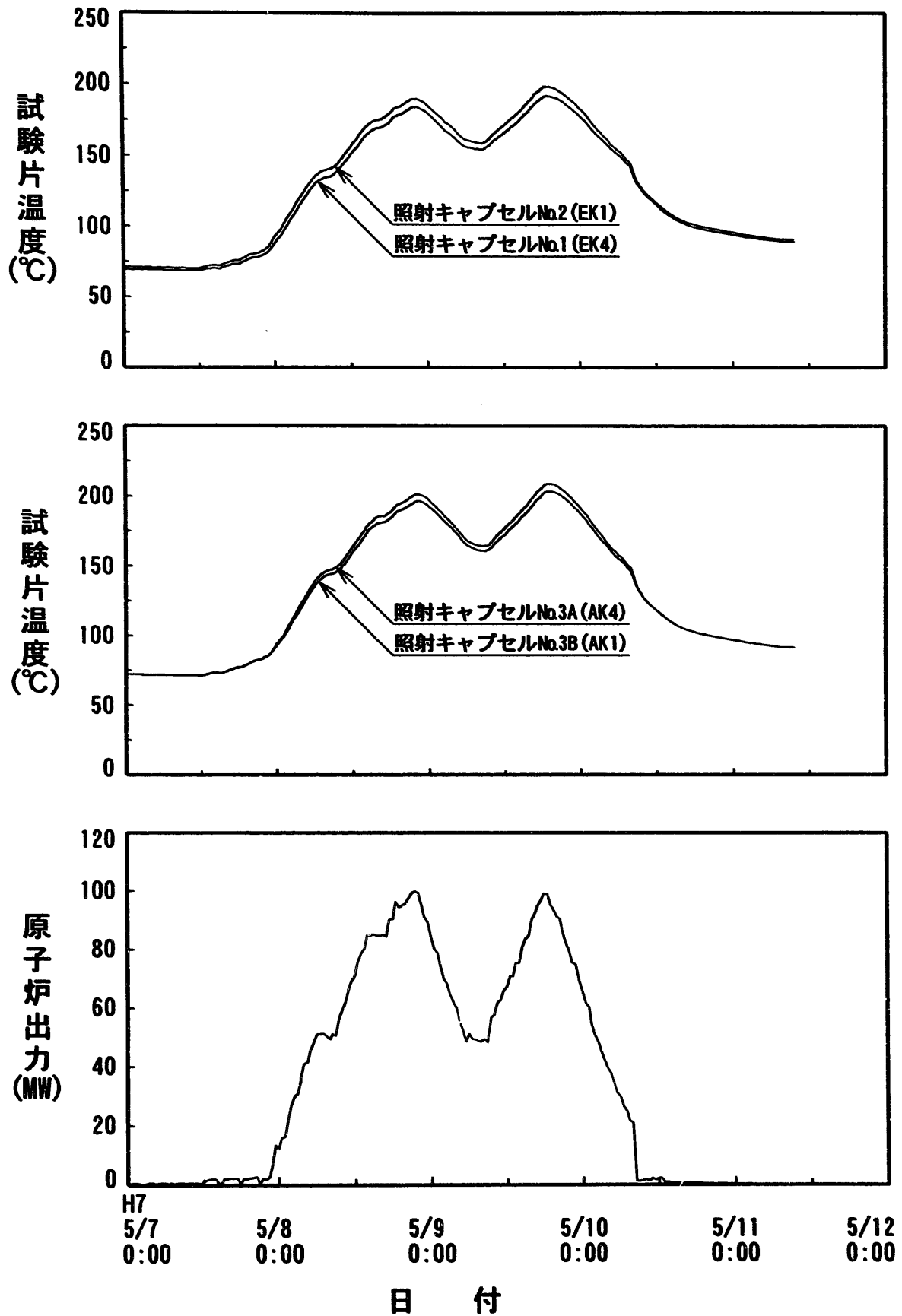


図3.5 特性試験における試験片の温度履歴

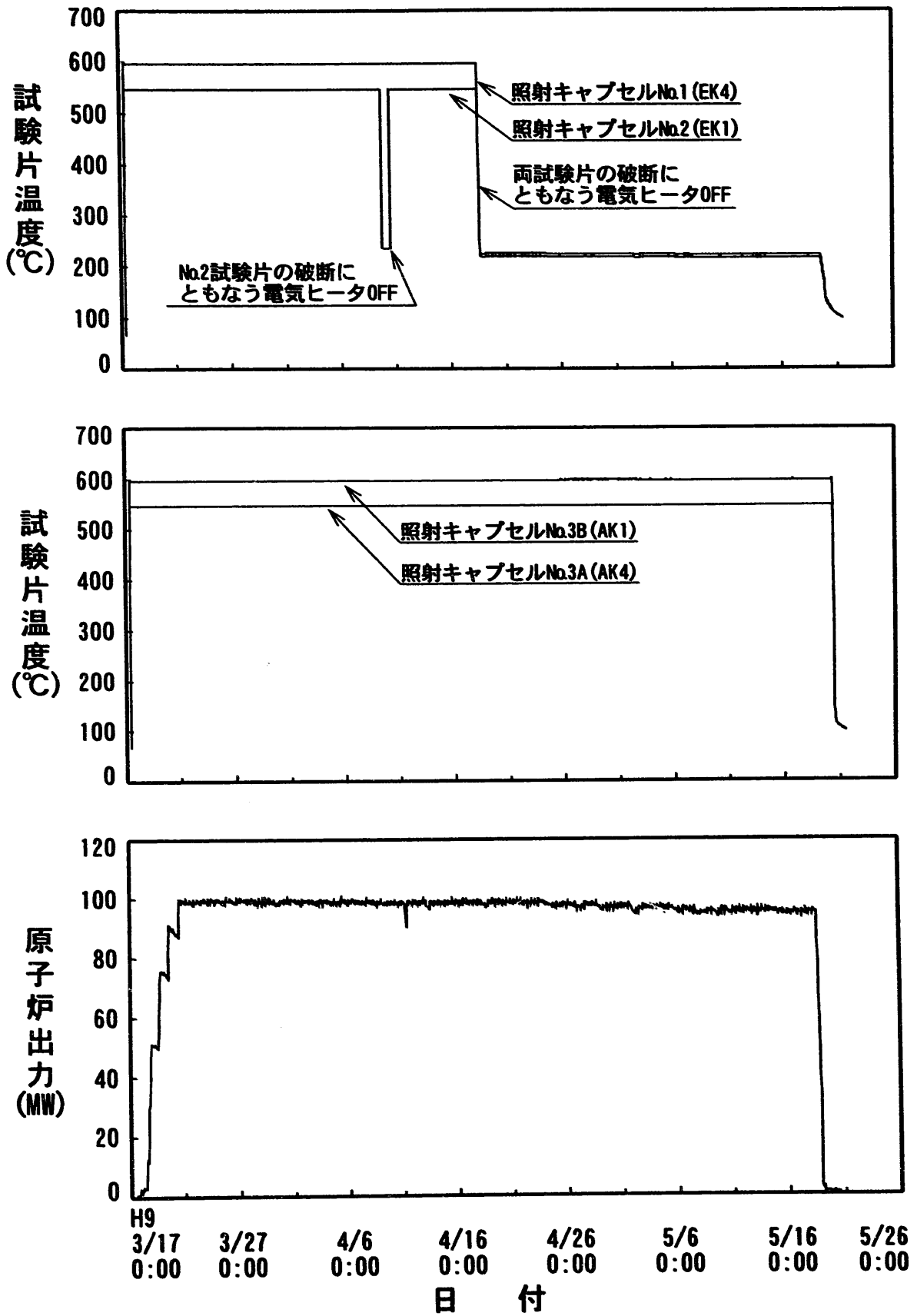


図3.6 第30サイクル運転における試験片の温度履歴

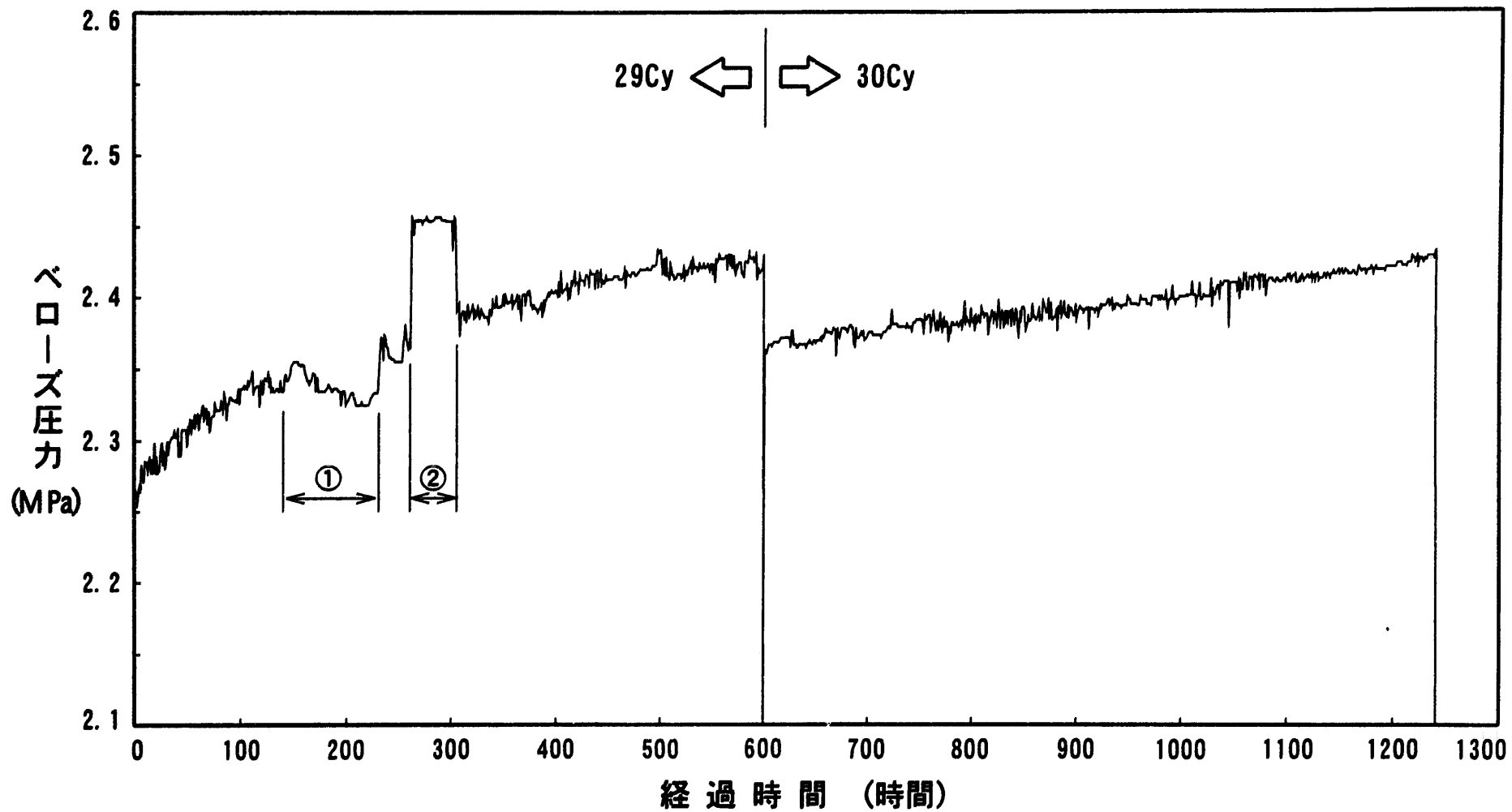


図3.7 歪測定用照射キャプセルNo.1 荷重負荷用ベローズ圧力の推移

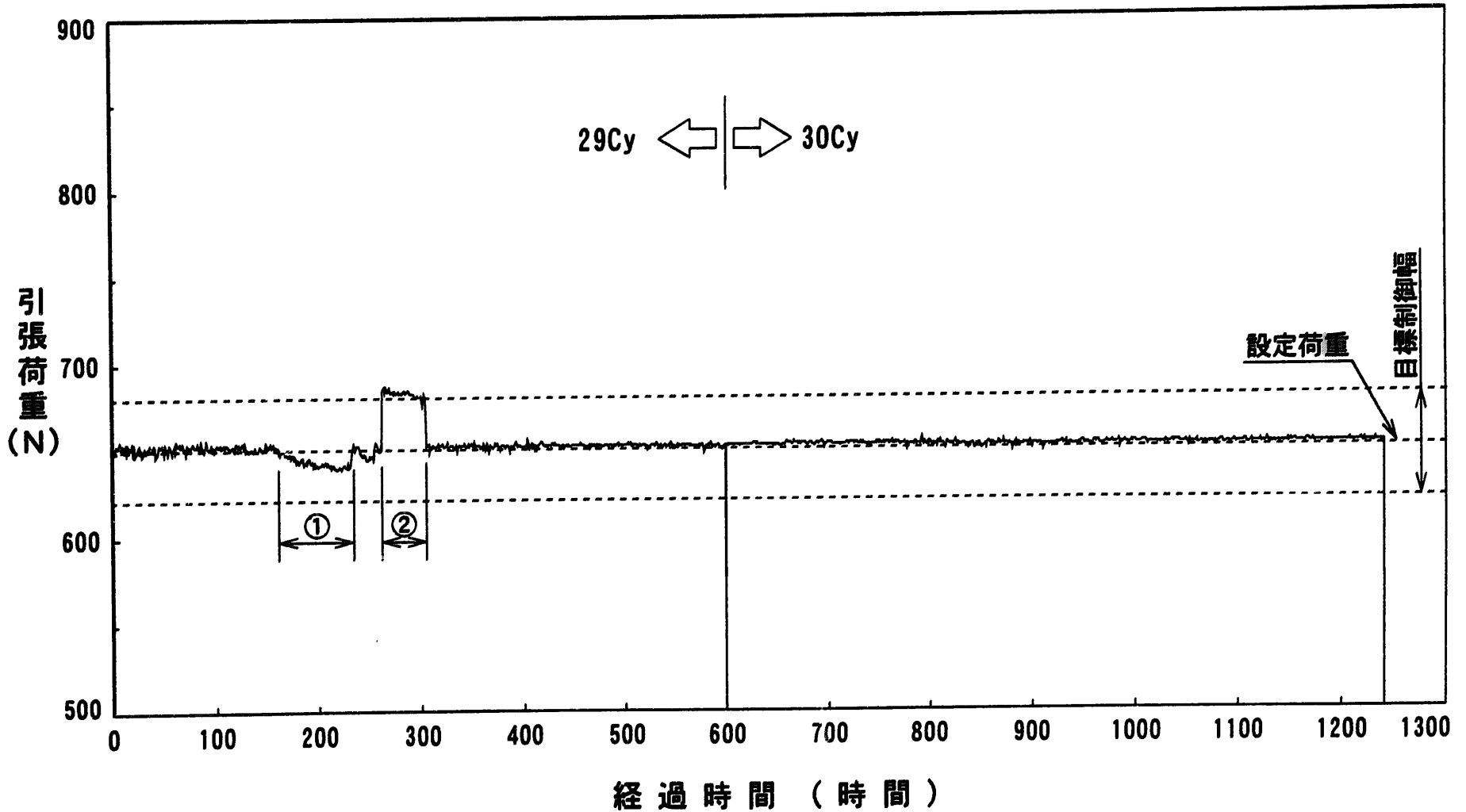


図3.8 No.1 試験片の引張荷重履歴

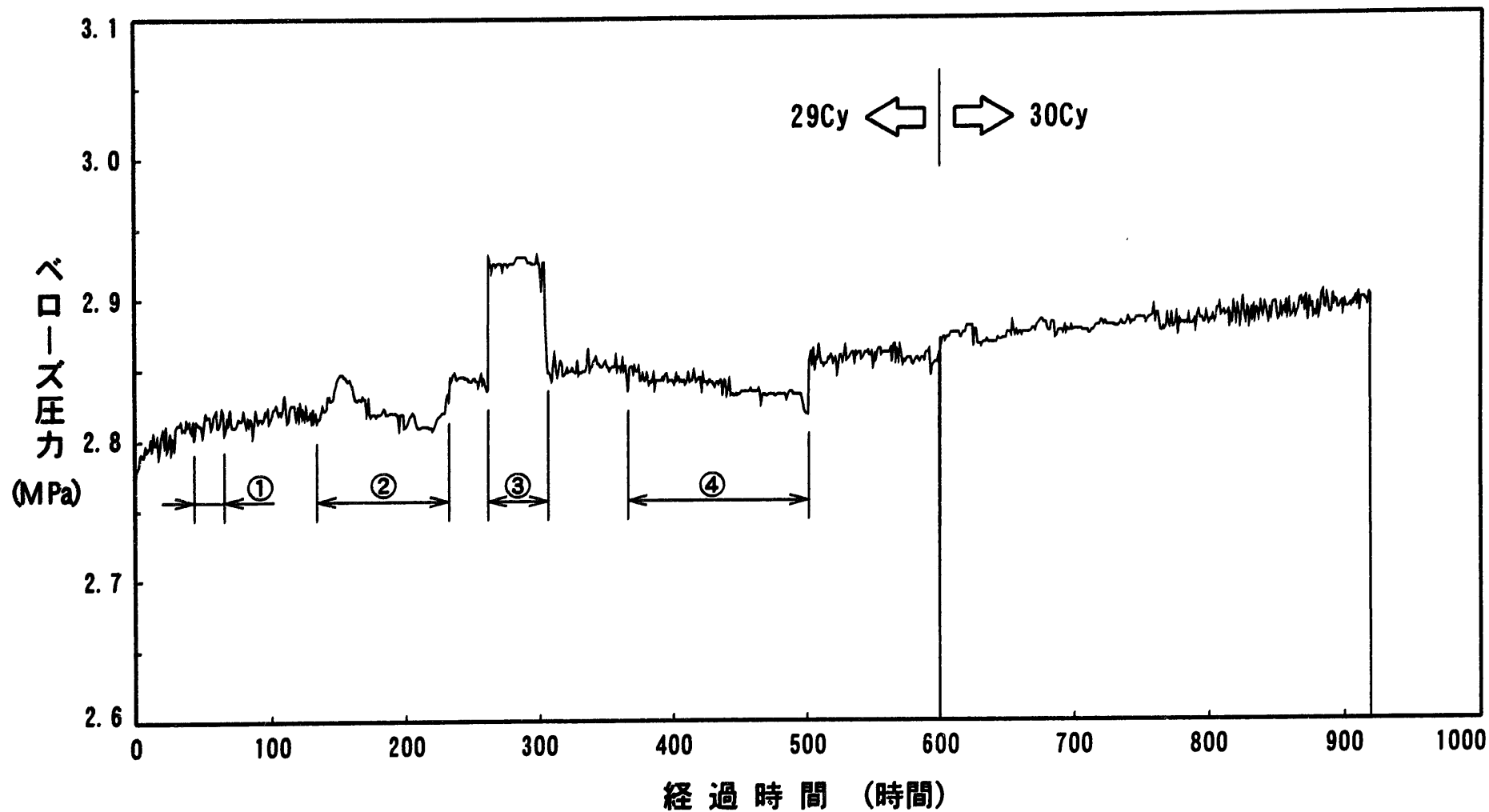


図3.9 歪測定用照射キャプセルNo.2 荷重負荷用ベローズ圧力の推移

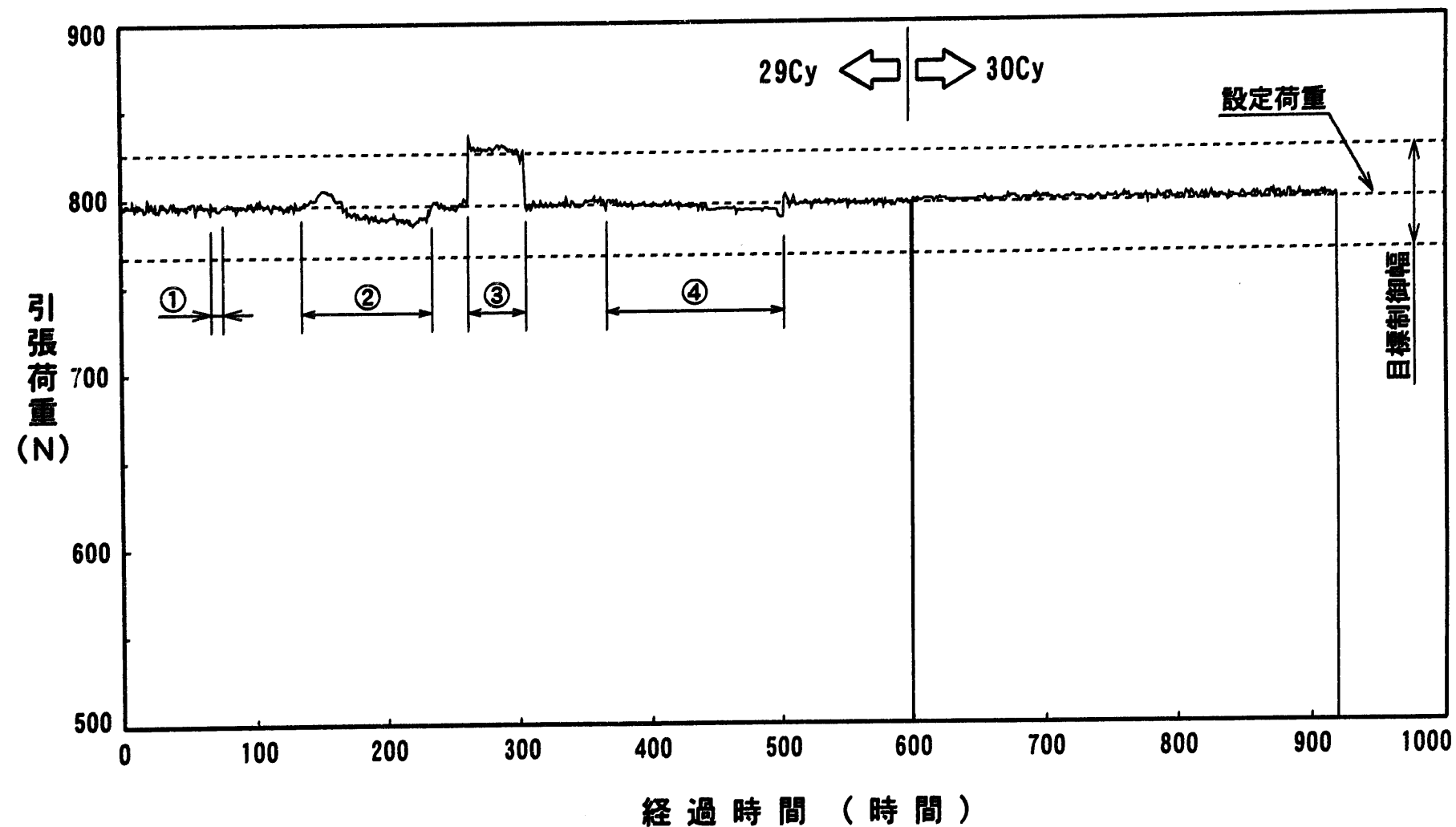


図3.10 No.2 試験片の引張荷重履歴

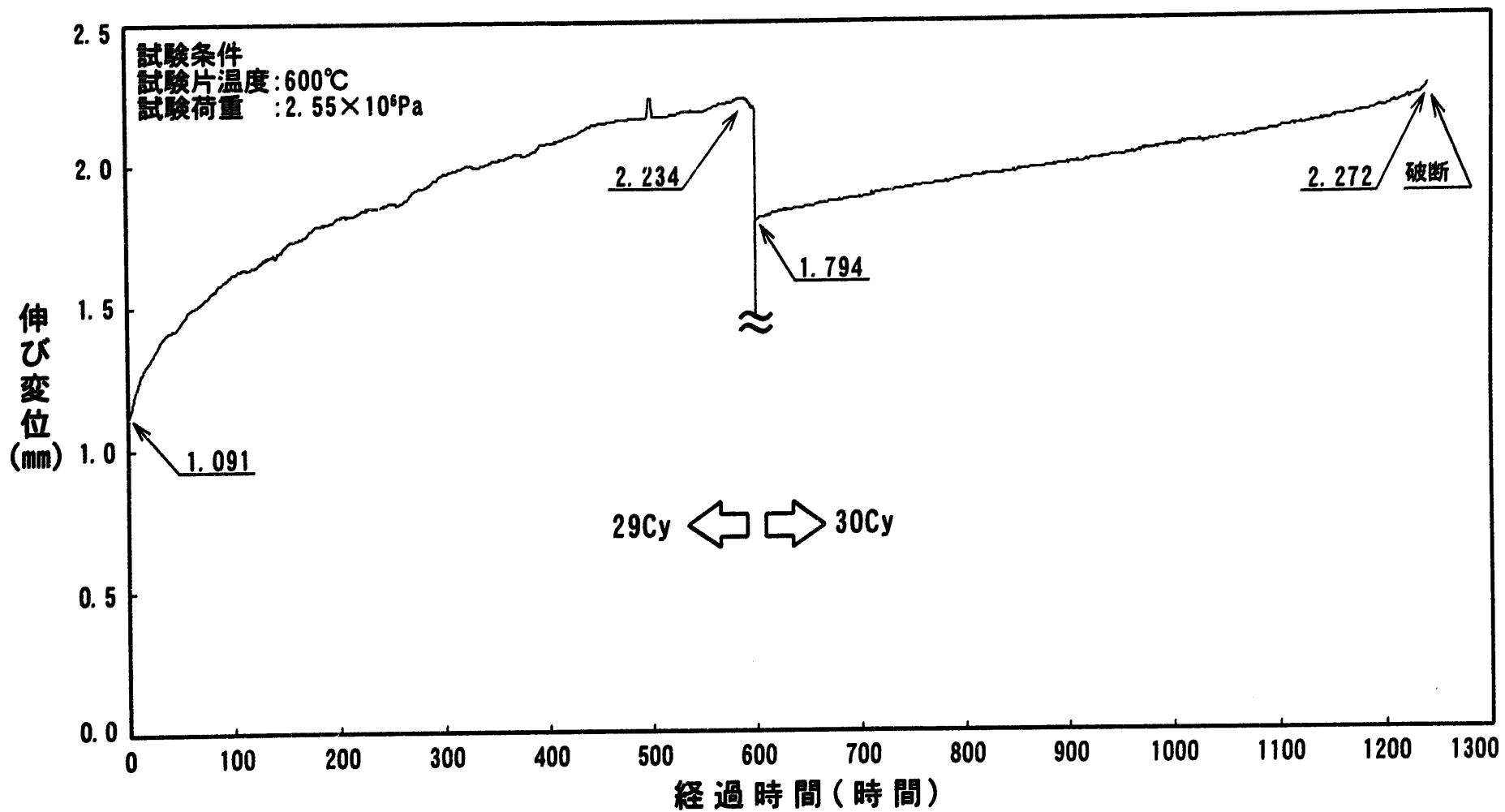


図3.11 No.1 試験片の変位履歴

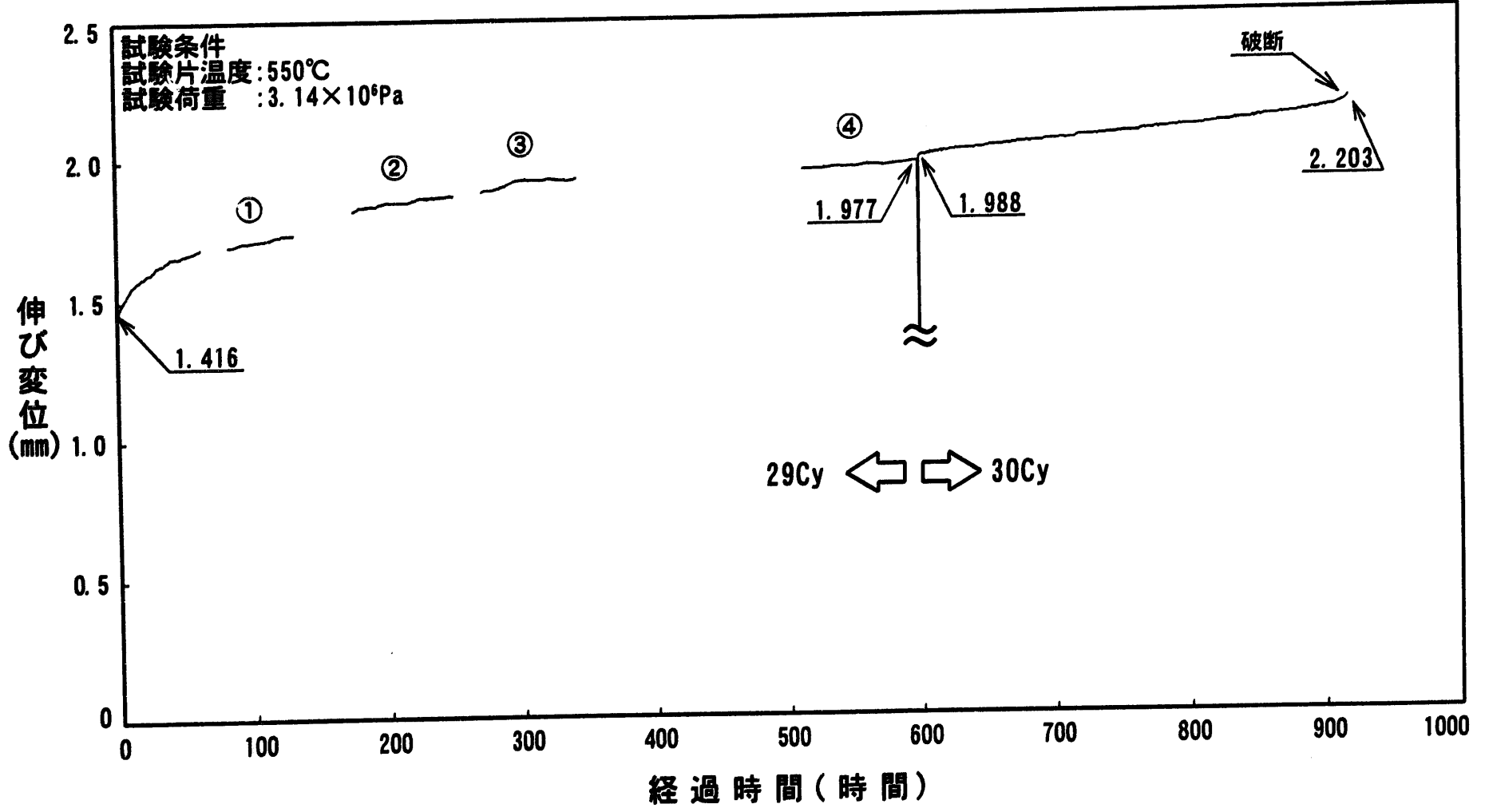


図3.12 No.2 試験片の変位履歴

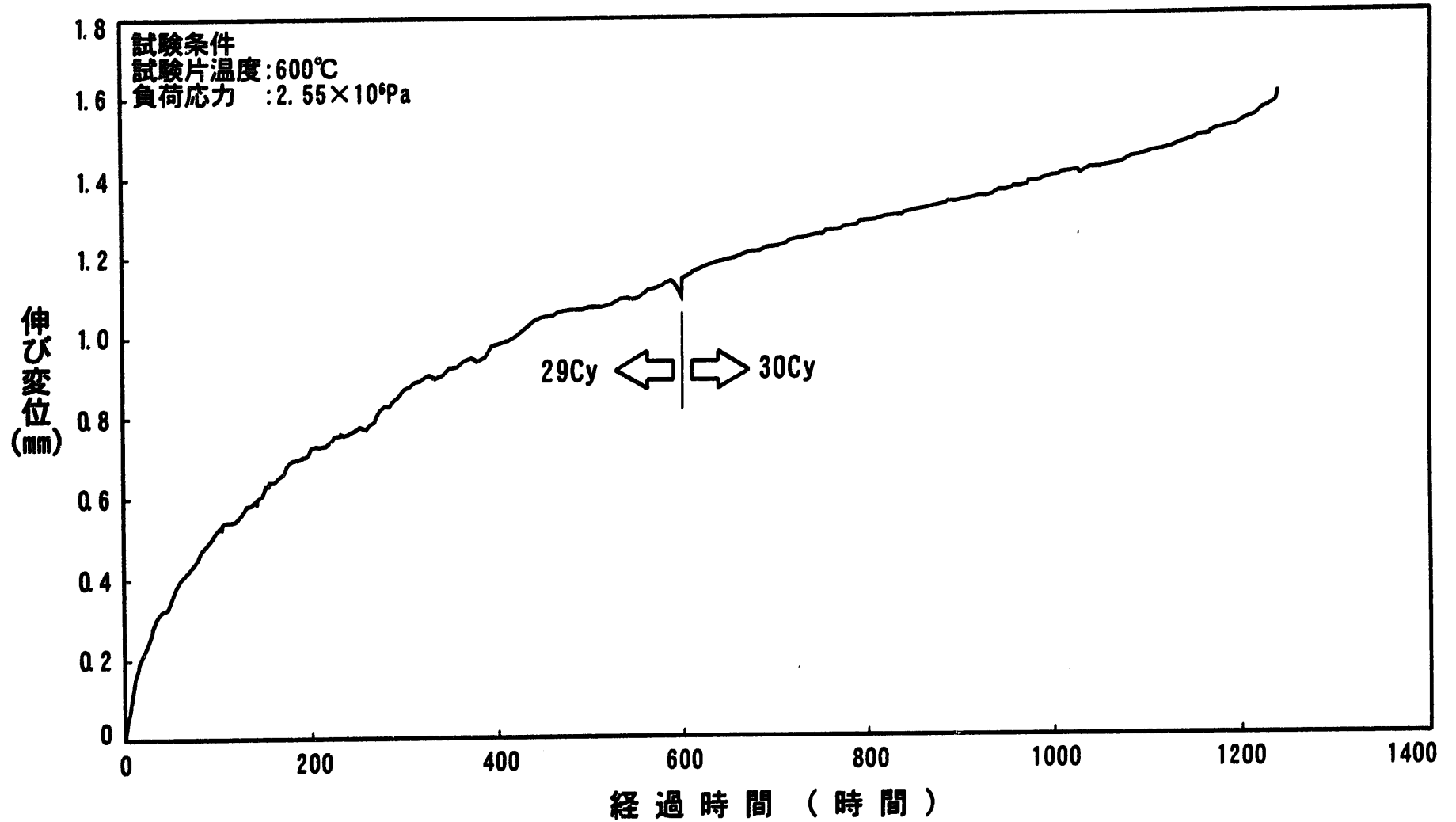


図3.13 No.1 試験片荷重負荷後の変位

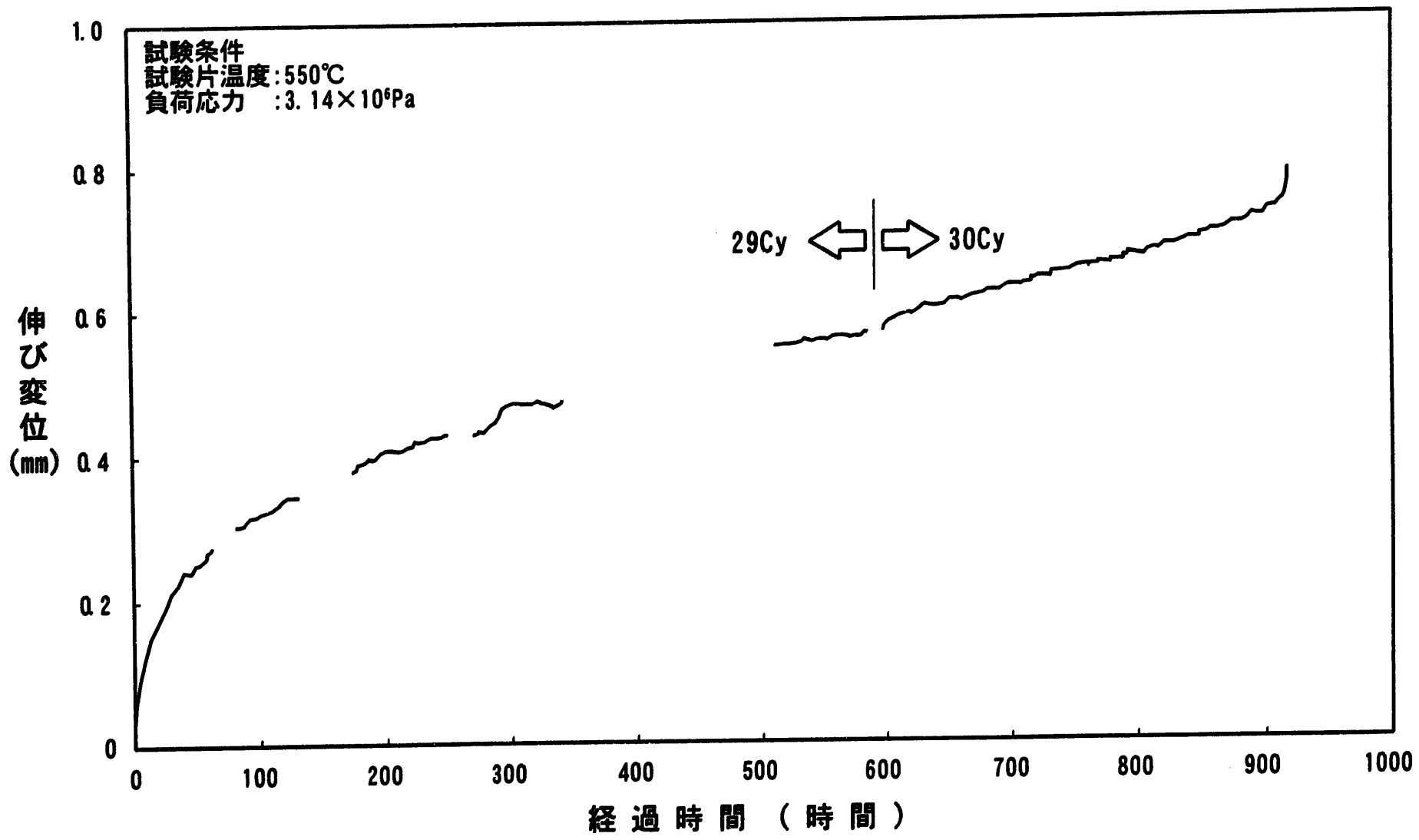


図3.14 No.2試験片荷重負荷後の変位

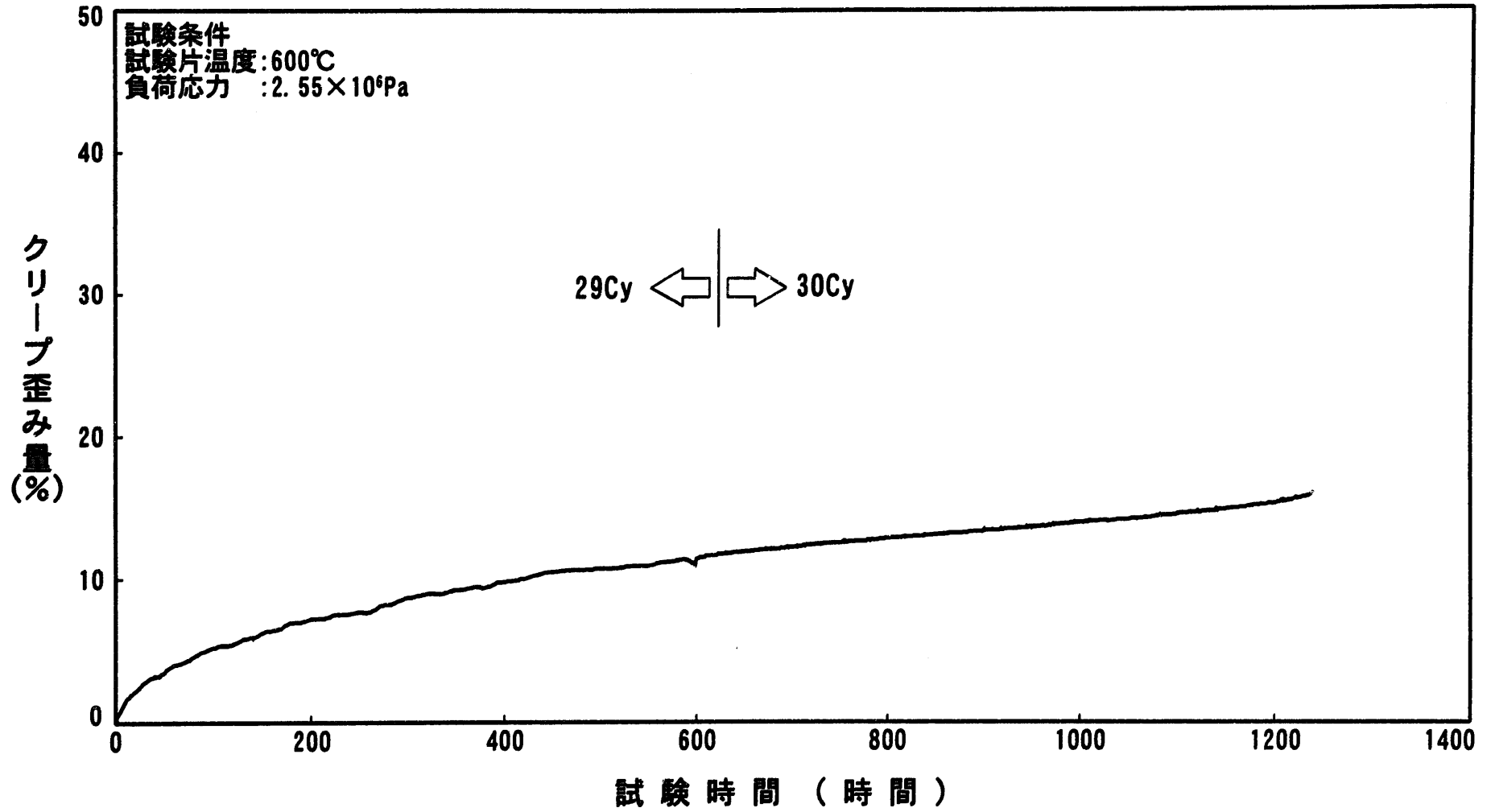


図 3.15 クリープ歪みと試験時間の関係 (No. 1 試験片)

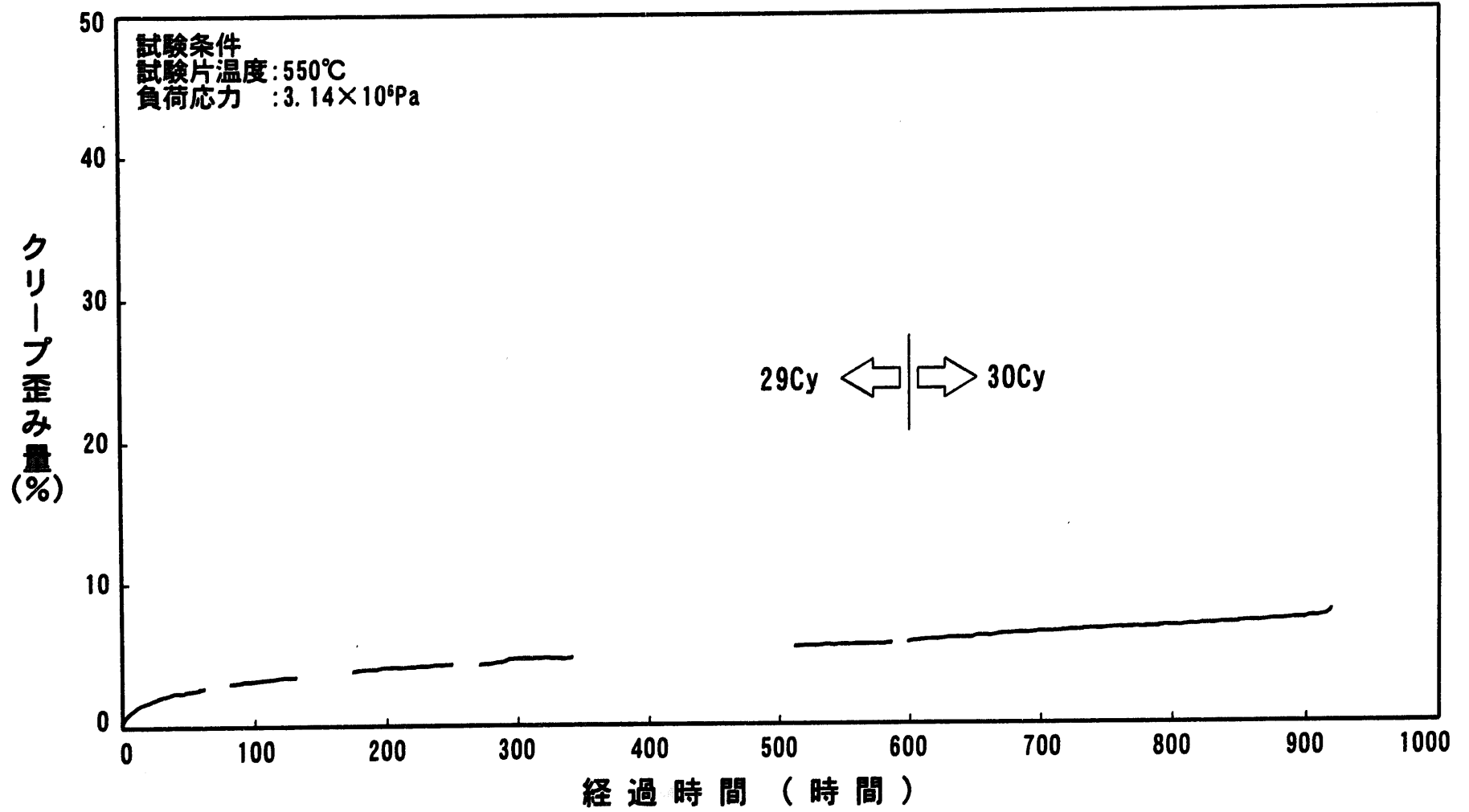


図3.16 クリーブ歪みと試験時間の関係 (No. 2 試験片)

4. 性能評価

第29サイクル運転から第30サイクル運転において照射を行ったE X I Rの温度制御、引張荷重制御および変位計測に関する性能について報告する。

4.1 試験片の温度制御

先に示した図3.4および図3.6の温度履歴をもとに検討、評価した結果を以下に示す。

自動制御中の各試験片温度は、原子炉出力の上昇および下降により照射キャプセル周辺の雰囲気温度が変化する状況において、設定温度に対して $\pm 2^{\circ}\text{C}$ の範囲内に保持されており、目標とした温度制御精度 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ を十分満足する性能であった。

なお、第29サイクル運転中において、外部電源喪失によりE X I R用ヒータ電源の供給が一時的に中断した時には、Na1試験片温度が 600°C から約 446°C 、Na2試験片が 550°C から約 410°C 、Na3A試験片温度が 550°C から約 449°C 、Na3B試験片温度が 600°C から約 455°C まで低下した。その後、電源復電後に設定温度まで回復した後は、電源停電前と同様に安定した温度制御を継続した。

4.2 試験片の引張荷重制御

先に示した図3.7、図3.9の荷重負荷用ベローズ圧力の推移(照射キャプセルNa1、Na2)、図3.8、図3.10の試験片の引張荷重履歴(Na1、Na2試験片)および図4.1、図4.2の自動制御中断時における試験片への負荷荷重・ベローズ圧力(Na1、Na2試験片)をもとに検討、評価した結果を以下に示す。

- (1) 自動制御期間中の引張荷重は、試験片の伸び等に伴う引張荷重の減少を補正し、設定した引張荷重に対して最大で $\pm 8.8\text{N}$ の範囲内に保持されており、引張荷重の制御精度である $\pm 29.4\text{N}$ を十分満足する性能であった。
- (2) 上記(1)に示した設定値と引張荷重の差は、ベローズガス圧力の調整誤差等により生じたものである。また、装置の特性という観点で見れば、照射キャプセルNa1の荷重制御系は設定値に対して高めに、照射キャプセルNa2の荷重制御系は設定値に対して低めに制御する傾向を示した。
- (3) 引張荷重の自動制御が中断している期間(図4.1の①・②、図4.2の①～④)においては、引張荷重測定値と設定値の差が大きくなり、一時的に制御幅を逸脱した。制御精度 $\pm 29.4\text{N}$ を逸脱した時間および引張荷重は以下のとおりである。

① Na1試験片

自動制御中断期間中におけるNa1試験片への負荷荷重は、図4.1に示すとおりである。

図中①の制御中断期間中の負荷荷重は、図からわかるとおり、引張荷重の制御精度 $\pm 29.4\text{N}$ の範囲内に収まるものであった。図中②の制御中断期間中の負荷荷重は、3.4.2(1)にて説明したとおり、キャプセル内ガス圧力の減圧操作によってキャプセル内圧が負圧になり、IRISSはマイナス値での演算が実行できないことから、キャプセル内ガス圧の記録が無い状態となった。このため、この期間における負荷荷重を推測する場合、次の仮定から検討を行った。つまり、キャプセル内圧は、そのガス排出時に接続されたプラント側設備の廃ガスコレクションヘッダと同圧になったものと仮定して計算を行った。廃ガスコレクションヘッダの圧力は常時変動しているが、平均的な値として $2.79 \times 10^4\text{Pa}$ (550mmHg \cdot abs)とした。計算結果は図4.1に示すとおりであるが、②の制御停止期間中においては、最悪の場合、制御精度 $\pm 29.4\text{N}$ の範囲から若干外れ、目標荷重(649.2N)に対して過負荷側に30.4N \sim 38.2Nの荷重を、約42時間(破断時間1239時間)程度過負荷とした。なお、過大荷重を負荷した程度は、一部の圧力値が記録されていないため具体的に特定できないが、目標荷重および破断時間に対して、No1試験片において5 \sim 6%程度の過負荷を、寿命の3%程度の期間負荷した。ただし、使用したガス設備の特性上、図示の荷重以上に負荷されることはない。

② No2試験片

自動制御中断期間中におけるNo2試験片への負荷荷重は、図4.2に示すとおりである。図中①、②、④の自動制御中断期間中の負荷荷重は、制御精度 $\pm 29.4\text{N}$ の範囲内に収まるものであった。図中③の自動制御中断期間中においては、No1試験片と同様に、制御精度 $\pm 29.4\text{N}$ の範囲から若干外れ、目標荷重(798.3N)に対して過負荷側に31.4N \sim 37.3Nの荷重を、約42時間(破断時間921時間)程度過負荷とした。なお、過大荷重を負荷した程度は、一部の圧力値が記録されていないため、具体的に特定できないが、目標荷重および破断時間に対して、No2試験片において4 \sim 5%程度の過負荷を、寿命の5%程度の期間負荷した。ただし、使用したガス設備の特性上、図示の荷重以上に負荷されることはない。

- (4) 第29サイクル運転終了時と第30サイクル運転開始時との間で変位データに不連続性が認められた。しかし、第29サイクル運転の自動制御期間中は、変位計は初期の性能を維持したと考えられ、したがって、その間においては各試験片に正規の荷重が負荷されたと考える。一方、変位データに不連続性が生じた第30サイクル運転での負荷荷重について、評価した結果を以下に示す。

① 第30サイクル運転におけるNo1試験片への負荷荷重

第30サイクル運転初期において、制御用計算機は試験片の変位量を約1.8mmと認識し、ベローズガス圧力 $2.38 \times 10^4\text{Pa}$ を出力している。この時の試験片への換算荷重は653.1N

である。ところで、第30サイクル運転初期の試験片の変位量は、第29サイクル運転終了時と同じであったとすれば、その値は約2.2mmであるから、ベローズガス圧力 2.38×10^6 Paとして計算すると、実際に負荷していた荷重は635.2Nとなる。したがって、第30サイクル運転では過大荷重というよりも、規定荷重に対して14.0N過小の荷重で試験した可能性が極めて高い。

この傾向は、図3.7の照射キャプセルNo1荷重負荷用ベローズ圧力変化からも理解できる。サイクル間で試験片の変位量が変わらなければ、ベローズたわみの抗力も変わらないことから、ベローズ圧力も同じになるはずであるが、図では明らかに小さな値となっている。

② 第30サイクル運転におけるNo.2試験片への負荷荷重

No.2試験片については、第30サイクル運転初期の変位量が1.988mm、第29サイクル運転終了時の変位量が1.977mmで、ほとんど同値である。No.2試験片に関しては、第30サイクル運転においても規定の荷重が負荷されたものとする。No.2キャプセル荷重負荷用ベローズ圧力の変化を示す図3.9のベローズ圧力も、ほとんど同値でつながっていることから判断できる。

- (5) 第30サイクル運転中、照射キャプセルNo.2の試験片が破断したため、電気ヒータをOFF (図3.6試験片温度参照)にしたところ、照射キャプセルNo.2の試験片温度の低下とともに照射キャプセルNo.1のベローズ温度が低下した。この原因を調査した結果、ベローズ温度を計測している熱電対の配線が、照射キャプセルNo.1と照射キャプセルNo.2で逆に接続されていたことが原因であった。

EXIRの負荷荷重は、ベローズのガス圧力、キャプセル圧力、伸び変位およびベローズ温度から換算されるため、熱電対の配線が照射キャプセルNo.1と照射キャプセルNo.2で逆に接続されていたことによる試験片への負荷荷重の影響について、検討した結果を以下に示す。

IRISSで収録された照射キャプセルNo.1のベローズ温度は約289℃(平均値)であり、照射キャプセルNo.2のベローズ温度は約309℃(平均値)であった。誤配線により、このベローズ温度が入れ替わらなければならない。よって、照射キャプセルNo.1が約309℃、照射キャプセルNo.2が約289℃となる。この温度で計算した結果、照射キャプセルNo.1に装荷した試験片への実際の負荷荷重は約0.3099N小さくなり、照射キャプセルNo.2では約0.2942N大きくなることが分かった。また、試験片の破断後、照射キャプセルNo.2の電気ヒータをOFFにした際、照射キャプセルNo.1のベローズ温度が約290℃から約220℃まで低下してしまったが、この時のNo.1試験片での負荷荷重の変動幅は約 ± 1.178 Nであった。ただし、これらの負荷荷重の変動幅は、いずれも引張荷重の制御精度 ± 29.4 Nの範囲内であり、試験片への

影響はないものとする。

4.3 試験片の変位

(1) No.1試験片の変位挙動

第29サイクル運転および第30サイクル運転におけるNo.1試験片の変位挙動は図3.13に示すとおりである。

No.1試験片は、第29サイクル運転において、約1.1mm ($2.234 - 1.091 = 1.143$)のクリープ歪みを生じた。

第30サイクル運転においては、約0.5mm ($2.272 - 1.794 = 0.478$)のクリープ歪みを生じて破断に至った。破断までのクリープ歪みは、両サイクルを合算して約1.6mmであった。

(2) No.2試験片の変位挙動

第29サイクル運転および第30サイクル運転におけるNo.2試験片の変位挙動は、図3.14に示すとおりである。

No.2試験片は、第29サイクル運転において、約0.6mm ($1.977 - 1.416 = 0.561$)のクリープ歪みを生じた。

第30サイクル運転においては、約0.2mm ($2.203 - 1.988 = 0.215$)のクリープ歪みを生じて破断に至った。破断までのクリープ歪みは、両サイクルを合算して約0.8mmであった。

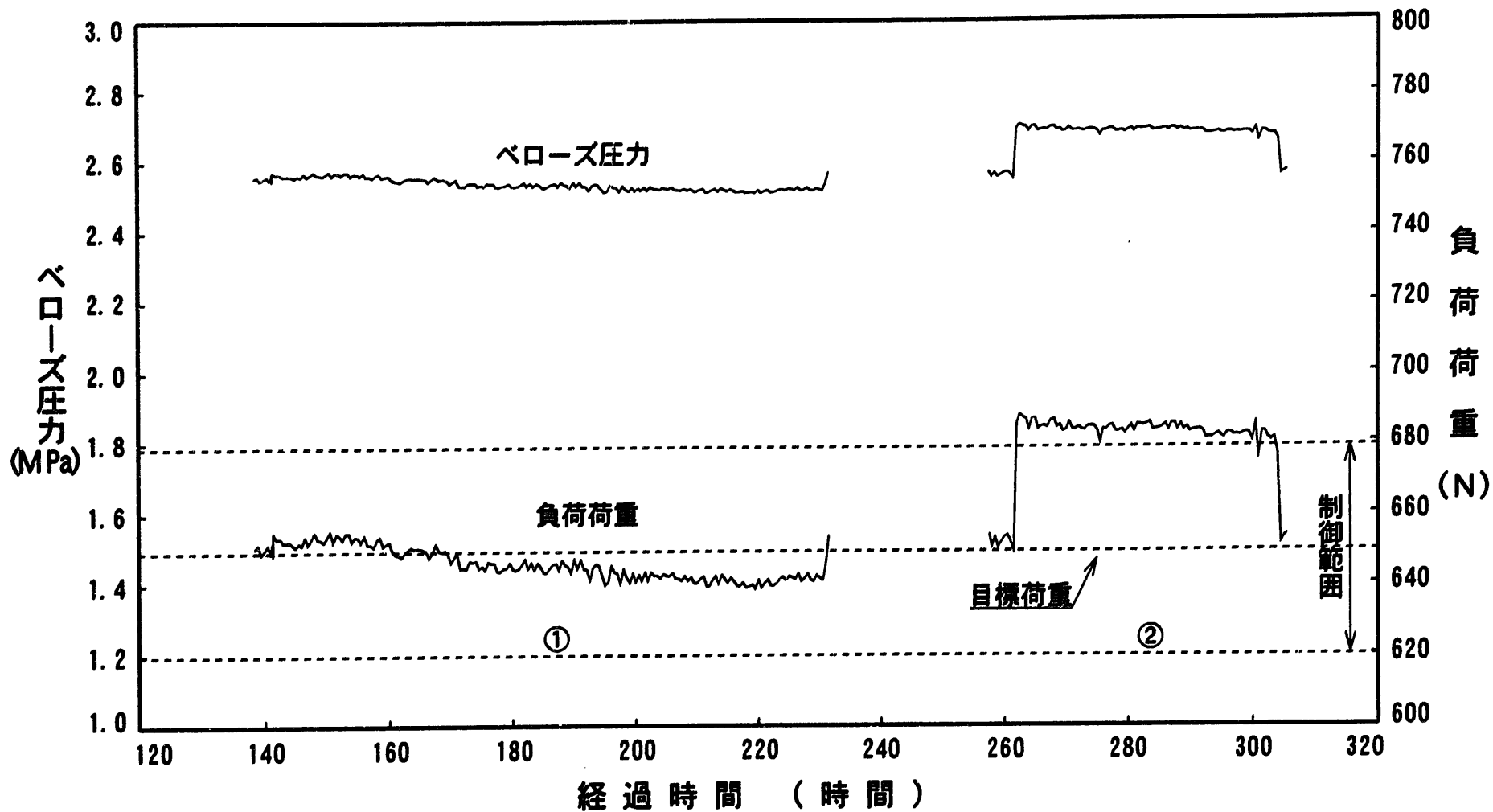


図4.1 制御停止時におけるNo.1 試験片への負荷荷重・ベローズ圧力

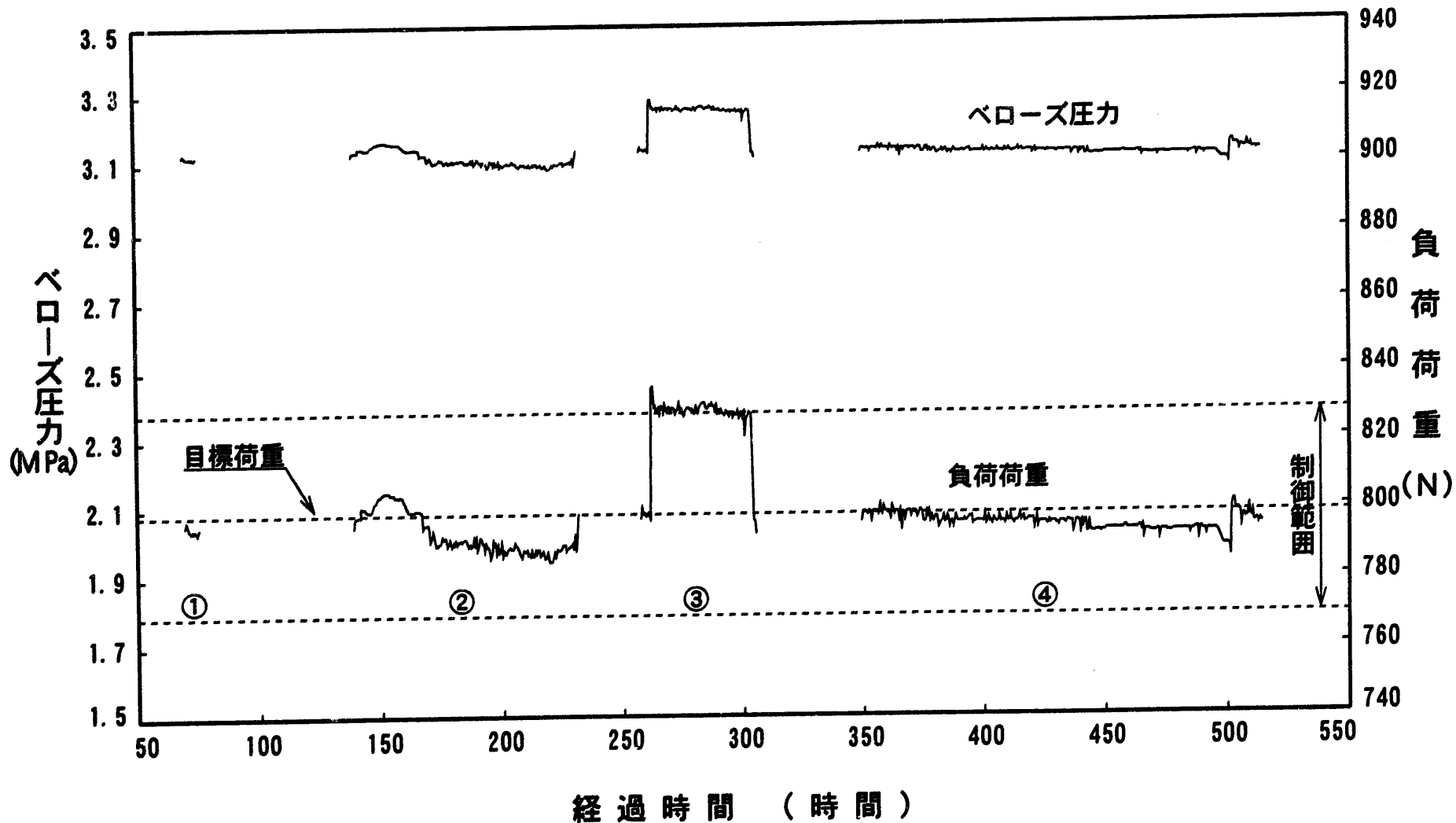


図4.2 制御停止時におけるNo.2 試験片への負荷荷重・ベローズ圧力

5. 結言

EXIRによる原子炉構造材料の中性子照射下における単軸クリープ破断強度試験は、「常陽」第29サイクル運転から第30サイクル運転まで行われた。この間、外部電源喪失によるEXIR用ヒータ電源の供給の一時中断や計測制御装置の不具合等を経験したが、以下に示す性能データが得られた。なお、材料試験の観点での成果は、これから行われる照射後試験において確認する計画である。

(1) 温度制御

自動制御期間中の試験片温度は、原子炉定格運転中はもちろん、原子炉出力の上昇および下降により照射キャプセル周辺の雰囲気温度が変化する状況下においても、設定温度に対し $\pm 2^{\circ}\text{C}$ の範囲内に保持されており、その制御性は目標とした温度制御精度 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ を十分満足する性能であった。

(2) 引張荷重制御

① 自動制御期間中の引張荷重は、設定した引張荷重に対し $\pm 8.8\text{N}$ の範囲内に保持されており、荷重制御性は目標精度 $\pm 29.4\text{N}$ を十分満足する性能であった。

② EXIRで引張破断試験を行った両試験片に対して、過大荷重や高温を負荷した実績がないか検討したところ、過大負荷した可能性が高いことが分かった。過大荷重を負荷した程度は、一部の圧力値が記録されていないために具体的に特定できないが、両試験片とも目標荷重に対して4~6%程度の過荷重を、寿命の3~5%程度の期間負荷した。

なお、No1試験片およびNo2試験片のクリープ破断に至るまでの引張荷重負荷時間は、1239時間および921時間であった。

(3) 試験片の変位挙動

① No1試験片の変位挙動

No1試験片は、第29サイクル運転および第30サイクル運転において、約1.1mmおよび約0.5mmのクリープ歪みを生じて破断した。破断までのクリープ歪みは、両サイクルを合算して約1.6mmであった。また、定常クリープ領域でのクリープ速度は、 $6.71 \times 10^{-3} \% \cdot \text{h}^{-1}$ (試験時間 ≥ 400 時間)であった。

② No2試験片の変位挙動

No2試験片は、第29サイクル運転および第30サイクル運転において、約0.6mmおよび約0.2mmのクリープ歪みを生じて破断した。破断までのクリープ歪みは、両サイクルを合算して約0.8mmであった。また、定常クリープ領域でのクリープ速度は、 $4.64 \times 10^{-3} \% \cdot \text{h}^{-1}$ (試験時間 ≥ 620 時間)であった。

6. 謝辞

試験計画や照射装置の製作において、旧機器構造開発部および旧燃料材料開発部の関係各位に有意義な助言、御協力を戴いた。

照射装置の直接的な製作、調整にあたっては、クールス科学技術㈱の関係各位に御協力を戴いた。

EXIRの据付準備や据付け、照射試験の実施においては、実験炉部内関係者や当課の多くの方々に御協力を戴いた。

ここに記して厚く御礼申し上げる。

7. 参考文献

- 1) 方波見 正己他 : 原子力学会「1993春の年会」要旨集、L24、(1993)
- 2) 動 燃 : 高速増殖炉研究開発の現状
PNC TN1410 93-004, 104(1993)
- 3) 荒 克之他 : 計測と制御, 22(2), 229(1983)
- 4) 荒 克之 : 高温環境用差動変圧器の開発に関する研究
JAERI-M83-181(1983)
- 5) W. A. Rhoades et al. : "The DORT Two-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code", Nucl. Sci. Eng. , 99 [1], (1988)
- 6) 揃 政敏他 : 高速実験炉「常陽」におけるオンライン計測照射技術
日本原子力学会誌 (Vol. 40, No. 2, p. 124~134 (1998))
- 7) 動 燃 : 特集「常陽」20周年 動燃技報 No.104