

JAERI-Tech
2001-040

JP0150723



MRX原子炉容器内装型制御棒駆動装置の
高温水中軸受の開発

2001年 6月

布川 浩*・頼経 勉・今吉 祥
笠原 芳幸*・落合 政昭・石田 紀久

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

MRX原子炉容器内装型制御棒駆動装置の
高温水中軸受の開発

日本原子力研究所東海研究所エネルギーシステム研究部
布川 浩*・頼経 勉・今吉 祥*
笠原 芳幸**・落合 政昭・石田 紀久

(2001年4月2日受理)

改良船用炉 MRX は原子炉容器内装型の制御棒駆動装置 (CRDM) を採用している。このため原子炉容器内の高温高压水中という過酷な環境下 (310°C, 12MPa)において安定に作動する原子炉容器内装型 CRDM の技術的成立性を見通すために、要素技術の研究開発を行ってきた。この中で、効率の良い高温水中軸受の開発は原子炉容器内装型 CRDM の小型化を成立させる上で重要な因子となるものである。

本報告書は、軸受材料の調査検討から始まって、オートクレーブによる材料浸漬試験、小型試験片での各種転がり摩耗試験、実機軸受の試作検討、そして実機軸受による高温水中耐久試験、と行われてきた高温水中軸受の開発の成果についてまとめたものである。

実機高温水中軸受の材料としては、内外輪にステライト No.1、玉にサーメット、保持器にグラファイトを用いた組合せが有望であることが判った。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

* 外来研究員：ニュークリア・デベロップメント株式会社

* 三菱重工業株式会社

** 新型炉技術開発株式会社

Development of Ball Bearing in High Temperature Water for In-vessel Type Control Rod Drive
Mechanism of Advanced Marine Reactor

Hiroshi NUNOKAWA^{*}, Tsutomu YORITSUNE, Shou IMAYOSHI,
Yoshiyuki KASAHARA^{**}, Masa-aki OCHIAI and Toshihisa ISHIDA

Department of Nuclear Energy System
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 2, 2001)

An advanced marine reactor MRX designed by Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) adopts an in-vessel type control rod drive mechanism, which is installed inside the reactor vessel. Since the in-vessel type control rod drive mechanism should work at a severe condition of a high temperature and high pressure water - 310°C and 12MPa -, the JAERI has developed the components, a ball bearing of which especially is one of key technologies for realization of this type mechanism.

The present report describes the development of the ball bearing containing a survey of materials, material screening tests on oxidation in an autoclave and rolling wear by a small facility, a trial fabrication of the full size ball bearing, and endurance test of it in the high temperature water. As a result, it was found from the development that the materials of cobalt alloy for both of the inner and outer races, cermet for the ball, and graphite for the retainer can satisfy the design condition of the ball bearing.

Key words: Control Rod Drive Mechanism, Bearing, Stellite, Cermet, Graphite, Material, Wear

* On leave from Nuclear Development Corporation

* Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

** Advanced Reactor Technology Co., Ltd.

目 次

1.はじめに	1
2.原子炉容器内装型制御棒駆動装置の概要	3
2.1 基本構造及び機能	3
2.2 軸受の設計条件	7
2.3 目標寿命の設定根拠	7
3.開発経緯	8
3.1 概要	8
3.2 オートクレーブ試験	8
3.3 転がり寿命試験	13
3.4 組合せ転がり摩耗寿命試験	18
4.軸受転がり摩耗試験	23
4.1 概要	23
4.2 試験片	23
4.3 試験装置	27
4.4 スクリーニング試験	29
4.5 耐用性試験	65
4.6 評価	66
5.高温水中軸受試験	79
5.1 概要	79
5.2 実機軸受の製作検討	79
5.3 試験体	87
5.4 試験装置	87
5.5 高温水中軸受試験	95
5.6 評価	109
謝辞	109
付録	110

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of an In-vessel Type Control Rod Drive Mechanism	3
2.1 Structure and Function	3
2.2 Design Condition of the Ball Bearing	7
2.3 Basis for Setting the Target of Durability of the Ball Bearing	7
3. History of Ball Bearing Development	8
3.1 Outline	8
3.2 Oxidation Test in a Autoclave	8
3.3 Rolling Durability Test	13
3.4 Rolling Wear Durability Test with Combined Components	18
4. Rolling Wear Test of the Ball Bearing	23
4.1 Outline	23
4.2 Specimen	23
4.3 Test Facility	27
4.4 Screening Test	29
4.5 Durability Test	65
4.6 Evaluation	66
5. Ball Bearing Test in High Temperature Water	79
5.1 Outline	79
5.2 Fabrication of Full Size Ball Bearing	79
5.3 Specimen	87
5.4 Test Facility	87
5.5 Ball Bearing Test in High Temperature Water	95
5.6 Evaluation	109
Acknowledgement	109
Appendix	110

1. はじめに

日本原子力研究所東海研究所原子力船研究開発室においては、改良船用炉 MRX の設計研究と並行して高温高圧水中で使用できる原子炉容器内装型制御棒駆動装置（以下原子炉容器内装型 CRDM と略す）の開発を進めてきた。

MRX は高い安全性と経済性を追求した船用炉で、原子炉容器内装型 CRDM の採用により制御棒飛び出し事故を設計基準内事象から排除すると共に、プラントの小型化を図っている。MRX の概念図を Fig.1.1 に示す。

原子炉容器内装型 CRDM は駆動モータ、ラッチマグネット、ラッチ機構、分割ポールナット、駆動軸、位置検出器、軸受等の主要機器で構成されているが、原子炉容器内に設置することにより PWR 条件下での高温高圧水中という過酷な環境の中で原子炉制御に必要な機能と高い信頼性を発揮する必要がある。

これまで、このような環境条件に適合する制御棒駆動装置は未開発の状況であったことから、高温高圧水中で使用できる原子炉容器内装型 CRDM の各構成機器について、材料選定、試作、性能試験、耐久試験等を実施してきた。

本報告書は、原子炉容器内装型 CRDM の軸受について開発の成果をとりまとめたものである。

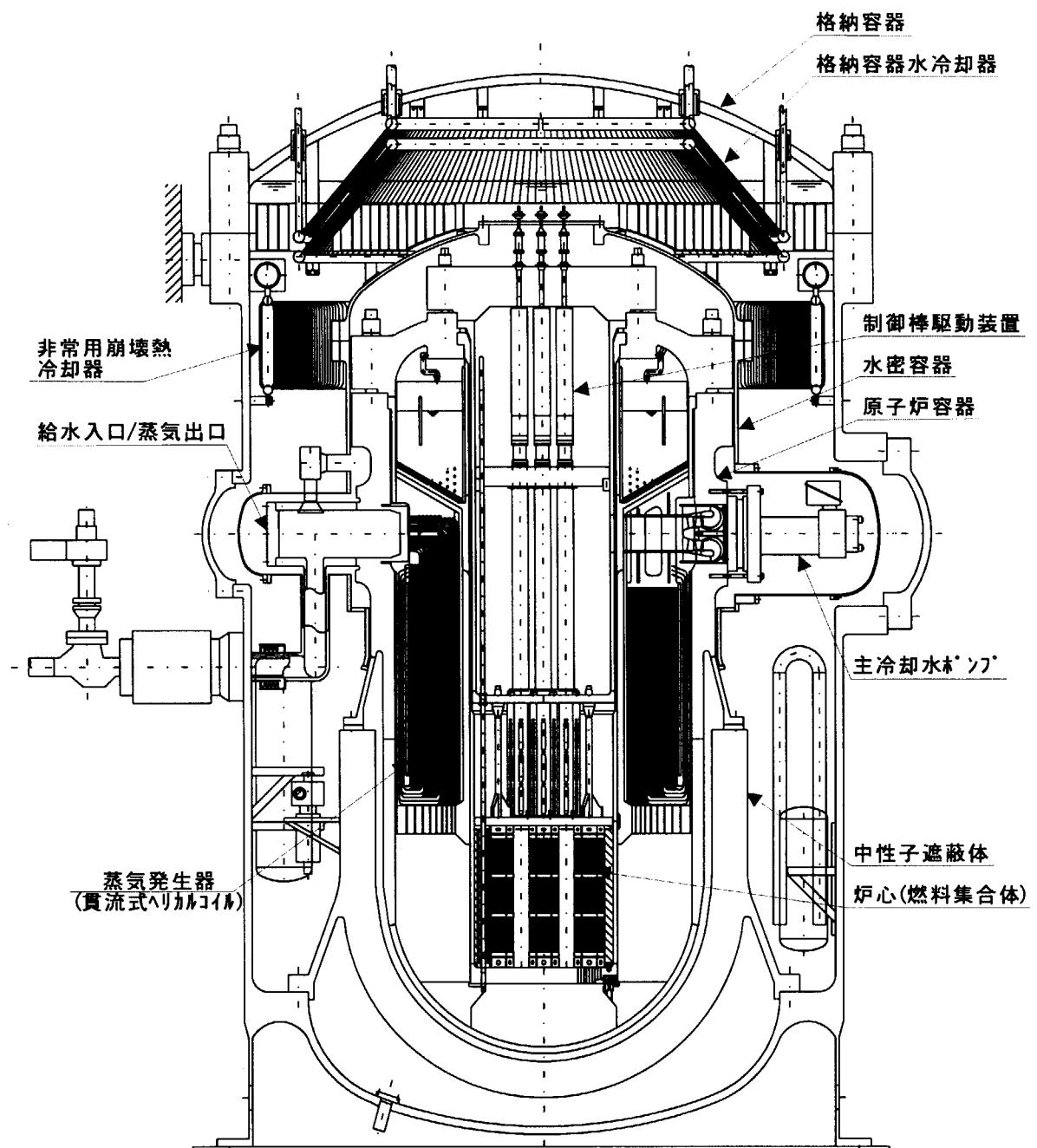


Fig. 1.1 改良船用炉(MRX)の概念図

2. 原子炉容器内装型制御棒駆動装置の概要

2.1 基本構造及び機能

原子炉容器内装型 CRDM は原子炉容器上蓋の内側にボルトで支持固定され、炉内構造物の CRDM 支持板にて径方向を支持されている。Fig.2.1 に全体基本構造を示す。

原子炉容器内装型 CRDM の主な構成機器は、駆動モータ、ラッチマグネット、分割ポールナット、駆動軸、位置検出器、軸受等で、駆動モータの正転、逆転により分割ポールナットを介して駆動軸を上下動させ、制御棒の引抜、挿入を行う。また、スクラムはラッチマグネット電流を切ること（マグネット消磁）により、分割ポールナットが開いて駆動軸を落下させる方式である。このように、本原子炉容器内装型 CRDM は分割ポールナットの開閉動作により駆動軸の切離し、掴み動作を行い、モータ方式によって駆動するという構造システムである。

駆動軸の上下駆動時は、駆動軸、制御棒および分割ポールナット等の自重とスクラムスプリングのばね力を含んだ荷重を、下部軸受で受ける構造としている。

Table2.1 に原子炉容器内装型 CRDM の主要目を示す。

Table 2.1 原子炉容器内装型 CRDM 主要目

項 目	仕 様
駆動方式	電動モータ駆動
ラッチ方式	3分割ポールナット開閉式
使用雰囲気	
温 度	310 ℃
压 力	12 MPa
駆動部寸法	外径 205mm×高さ 1735mm
スクラム方式	重力落下+ばね加速
駆動速度	300 mm/min
駆動力	2.2 kN
駆動ストローク	1400 mm

This is a blank page.

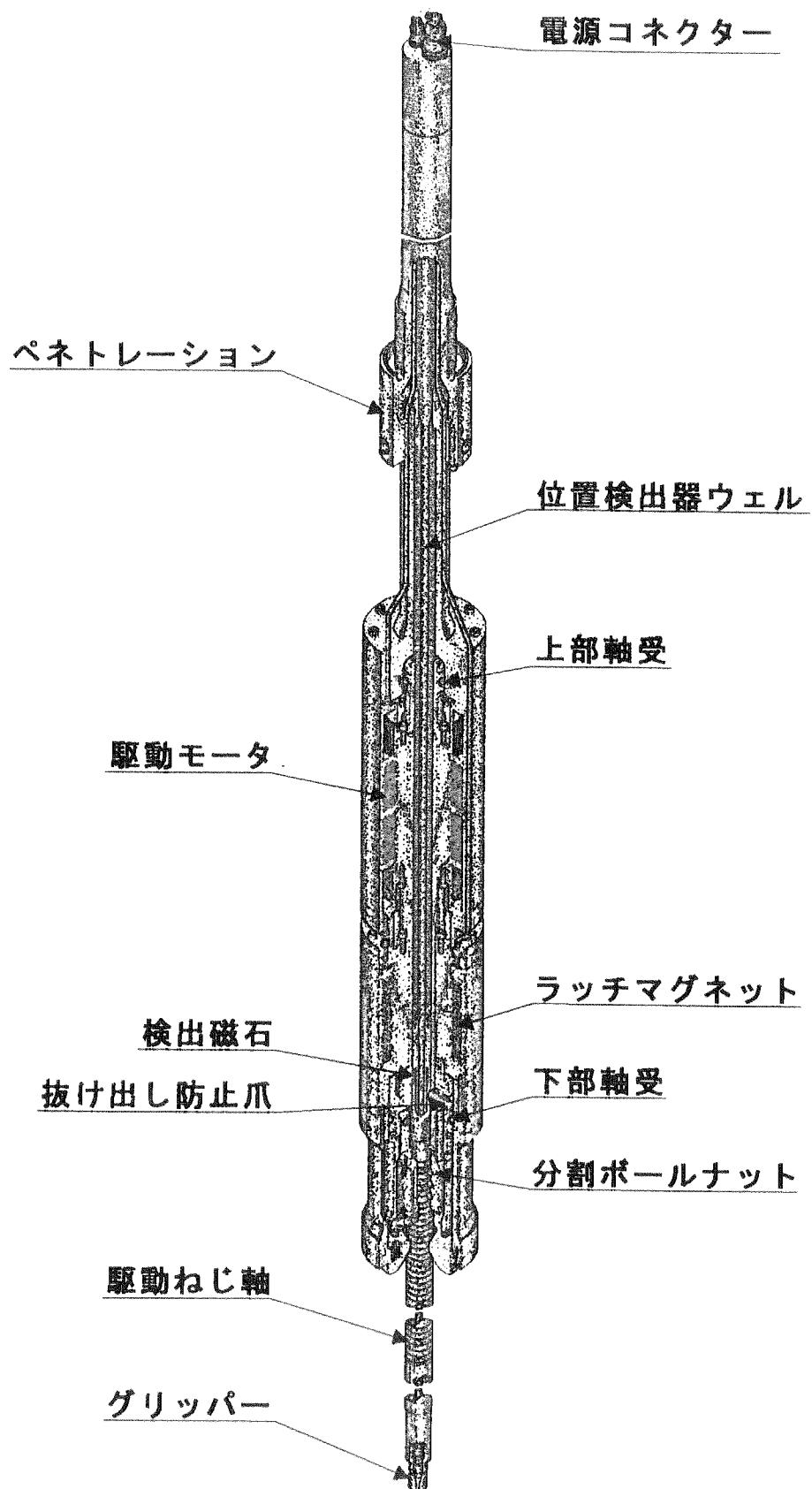


Fig. 2.1 CRDM全体基本構造

This is a blank page.

2.2 軸受の設計条件

原子炉容器内装型 CRDM の軸受は、Fig.2.1 の基本構造図に示すように駆動モータの上部と下部とに設けられる。この内、垂直方向に作用する全荷重は下部軸受で支持され、上部軸受は水平方向の振れ止めのために設置される。軸受の設計条件を Table 2.2 に示す。

Table 2.2 軸受の設計条件

項 目	仕 様
型 式	単列深溝型玉軸受
呼び径 上 部	外径 120mm × 内径 85mm × 厚さ 18mm
下 部	外径 165mm × 内径 120mm × 厚さ 22mm
使用雰囲気 環 境	高温水中
温 度	310 ℃
压 力	12 MPa
回転数	50 rpm
負 荷	2.2 kN
目標寿命回転数	116 万回転

2.3 目標寿命の設定根拠

「むつ」の制御棒動作条件に基づき、大型船舶の稼働時間を設定して寿命を外挿すると、就航条件 4 年の制御棒駆動距離は 1,390m になる。

(付録の「軸受寿命の設定根拠」参照)

よって、MRX (耐用年数 20 年) の制御棒駆動距離は、以下の通りとなる。

$$1,390\text{m} \times 5 = 6,950\text{m}$$

駆動回転数に換算すると、

$$6,950\text{m} \div 0.006\text{m} = 1.16 \times 10^6 \text{ 回転}$$

(但し、ポールねじのリードは 6mm とする。)

である。ちなみにストローク数としては、

$$1,390\text{m} \div 1.4\text{m} = 993 \approx 1,000 \text{ ストローク (4 年)}$$

$$1,000 \times 5 = 5,000 \text{ ストローク (20 年)}$$

(但し、駆動ストロークは 1,400mm とする。)

である。

3. 開発経緯

3.1 概要

原子炉容器内装型 CRDM の小型化を成立させるためには、動力伝達効率の良い動力伝達系(軸受、分割ボールナット)が求められる。即ち、軸受としては玉軸受が必要であり、且つ、高温高圧水中雰囲気での動力伝達効率が十分に信頼性のあることを確認する必要がある。

今まで、水中軸受または高温軸受の研究はなされているが、このような高温高圧水中雰囲気での動力伝達効率に関する研究例は見当たらない。従って、軸受材料の調査検討から始まって実機軸受の製作および高温水中耐久試験までの研究開発が実施されてきた。

高温水中軸受の研究開発の流れを Fig.3.1 に示す。

以下に、実施概要について述べる。

3.2 オートクレーブ試験

1) 試験方法

スクリーニングテストの候補材料の選定にあたっては、一般軸受材料の要求特性に耐食性、耐熱性を考慮した上で、これまでの知見をもとに高温用軸受材料、水中用軸受材料から有望と考えられる 8 種類の材料を選出した。試験片の材料を Table 3.1 に、試験片の形状を Fig.3.2 に示す。

試験には外熱型内容積 8 ℥、SUS316 製のオートクレーブを使用した。概略図を Fig.3.3 に示す。

試験条件を Table 3.2 に示す。

Table 3.1 試験片の材料

番号	金属材料	番号	非金属材料
A	(鉄系)析出硬化系ステンレス鋼 : SUS630	E	サーメット
B	(非鉄系)Ni 基超合金 : ハステロイ C-22	F	セラミックス : 窒化けい素(Si_3N_4)
C	(非鉄系)Co 基超合金 : ステライト No.6B	G	セラミックス : 炭化けい素(SiC)
D	(非鉄系)Co 基超合金 : ヘインズアロイ No.188	H	セラミックス : アルミナ(Al_2O_3)

Table 3.2 浸漬試験条件

項 目	仕 様
温 度	350 ℃
压 力	16.5 MPa
試験時間	500 h 3000 h
水 質	純水 (110~120℃煮沸脱気)

2) 試験結果

浸漬前後の外観観察、腐食度合、曲げ強度を測定した。

[外観観察]

金属材料においては異常は認められなかった。サーメットは表面に付着物が見られ、窒化けい素は浸漬 3000 時間後で表層の剥離が認められた。炭化けい素とアルミナは浸漬前と同様の光沢を示していた。

[腐食度合]

浸漬前後の重量変化を腐食度合として Fig.3.4 に示す。金属材料は 3000 時間後で僅かな重量減少が認められた。窒化けい素においては、500 時間後に $-12.86 \text{mg}/\text{dm}^2 \cdot \text{day}$ 、3000 時間後に $-8.69 \text{mg}/\text{dm}^2 \cdot \text{day}$ の変化が認められ、高温高圧水中で母材もしくは焼結助剤の腐食（浸食）による溶出が明らかとなった。サーメットは何らかの付着（化合物）による重量増加が認められた。炭化けい素とアルミナは良好な耐食性を示した。

[曲げ強度]

非金属材料について曲げ強度試験を実施した。試験結果を Fig.3.5 に示す。サーメット、窒化けい素、アルミナにおいて曲げ強度の低下が見られるが、特に窒化けい素については浸漬前の 1255MPa に対し、浸漬 3000 時間後は 373MPa と約 70% の大幅減少が見られた。一方、炭化けい素は大きな変化は認められず、僅かに上昇傾向を示した。

（本試験結果については 3.3 項においてまとめて評価する。）

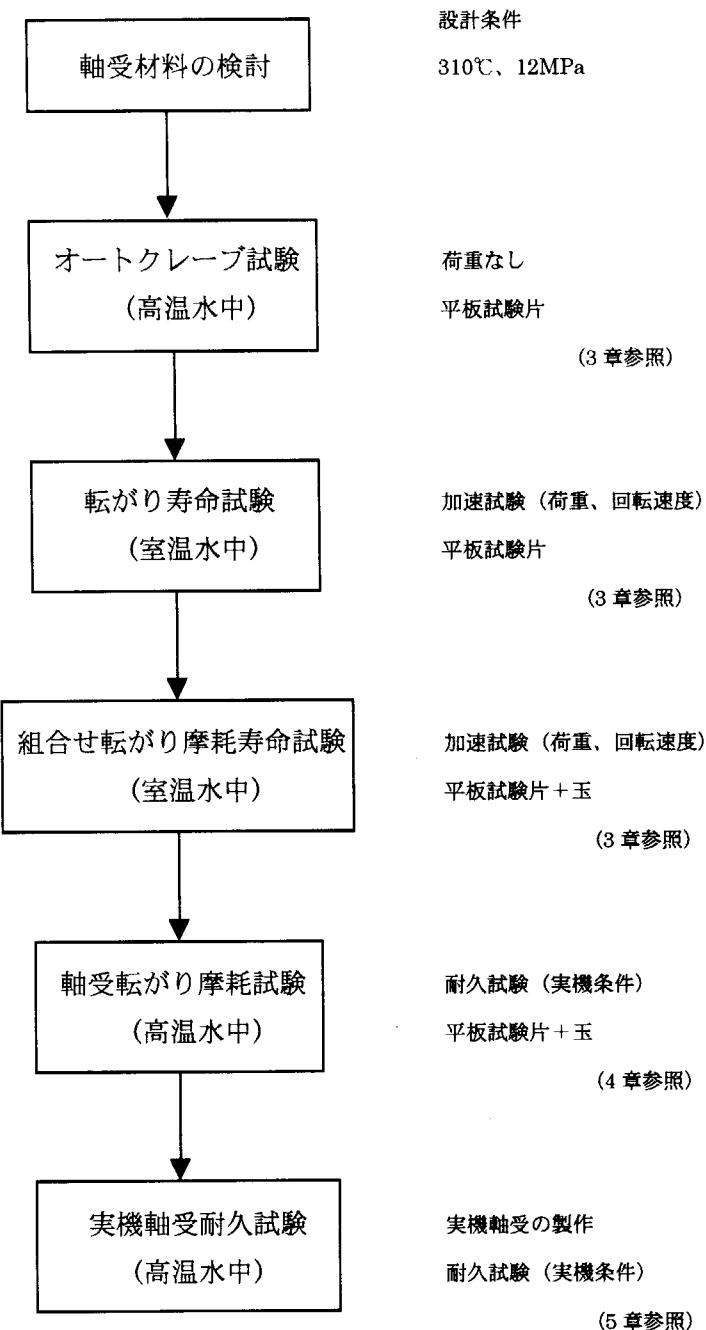


Fig. 3.1 高温水中軸受の開発の流れ

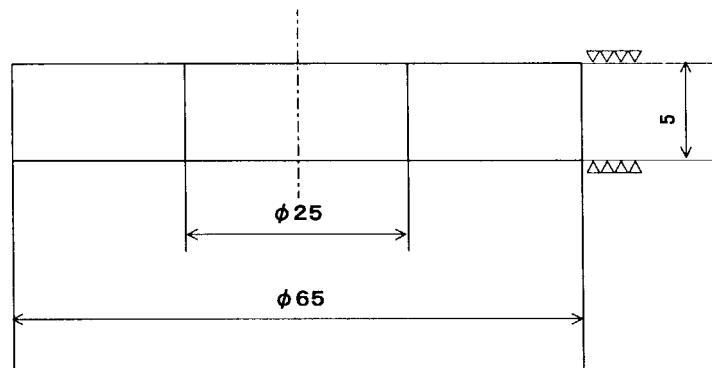


Fig3.2 試験片の形状

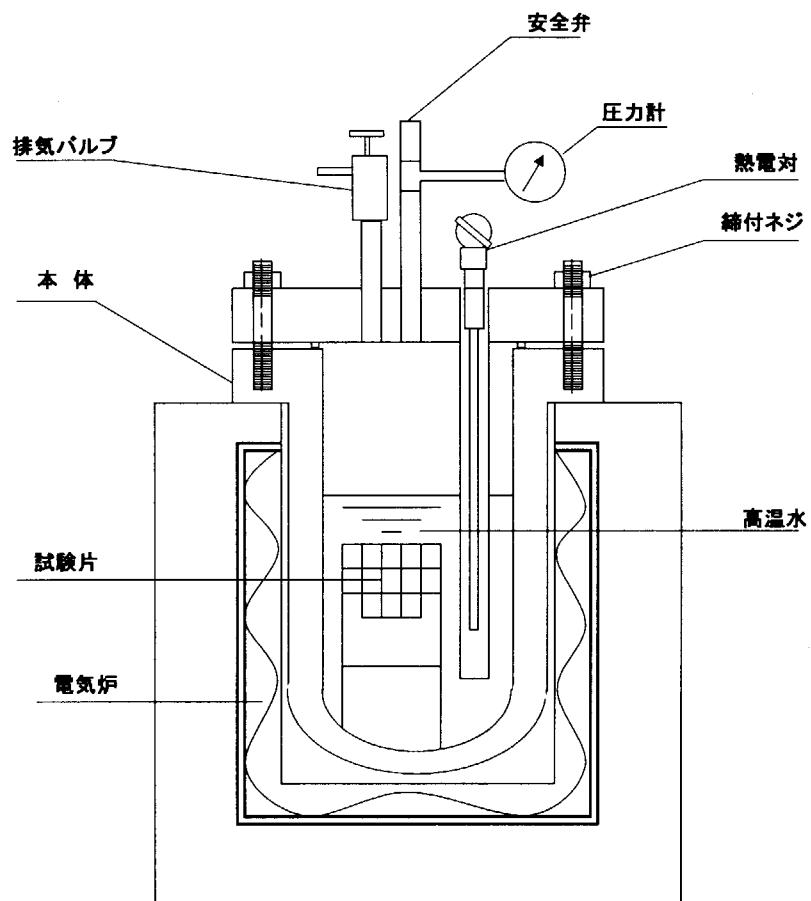


Fig3.3 オートクレーブ概略図

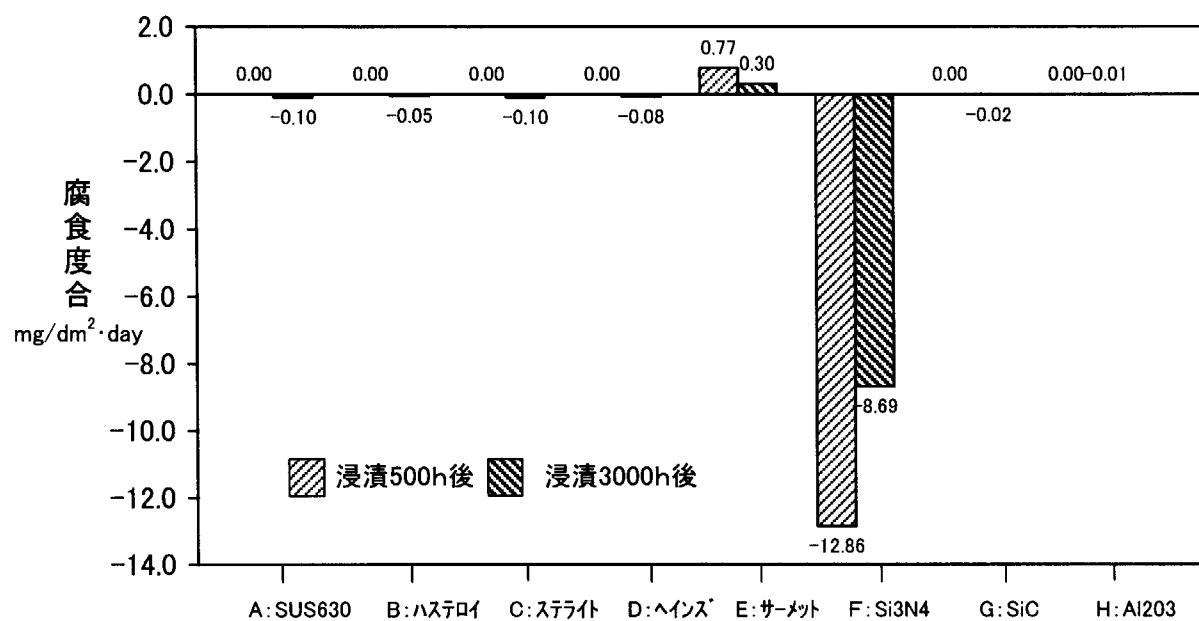


Fig3. 4 腐食度合測定結果

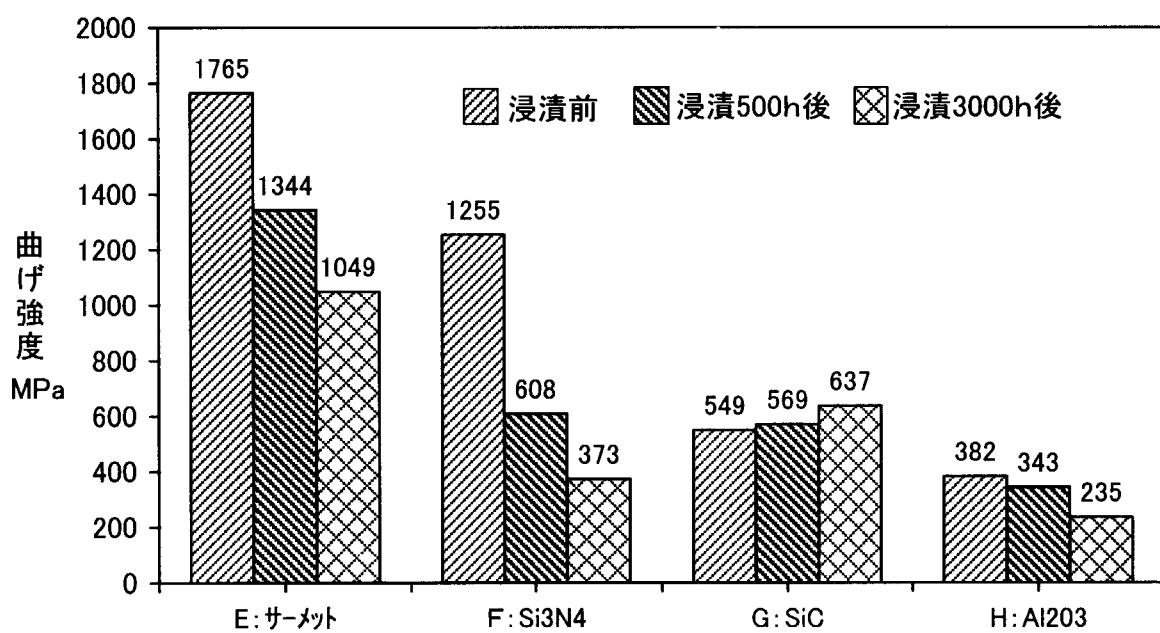


Fig3. 5 曲げ強度測定結果

3.3 転がり寿命試験

1) 試験方法

試験は、一般に森式と呼ばれる Fig.3.6 に示すスラスト型転がり寿命試験装置を使用し、平板試験片の上で玉を繰返し回転させて平板試験片の転がり寿命を評価した。Fig.3.7 に試験装置における試験片の取付け概要を示す。試験片は、前項「3.2 オートクレープ試験」の浸漬前後の平板試験片を用いた。

予備試験として浸漬前及び浸漬 500 時間後の各試験片の油中における転がり寿命試験、本試験として浸漬 3000 時間後試験片の水中転がり寿命試験を行った。

試験条件を Table 3.3 に示す。

Table 3.3 転がり寿命試験の試験条件

	予備試験	本試験
相手材	3/8 " SUJ2 玉 : 3 個	3/8 " Si ₃ N ₄ 玉 : 6 個
保持器	黄銅	フェノール樹脂
潤滑	スピンドル油	蒸留水
荷重	440 N	
回転速度	1200 rpm	
試験時間	MAX. 400 時間	
試験温度	室温	

(注) 荷重と回転速度は、最大接触面圧と周速に換算すると実機条件より厳しく、加速した条件になっている。

2) 試験結果

[予備試験]

特にアルミナにおいて、浸漬前の試験片でも寿命が 1 時間前後と他に比べて極端に短く軸受材料として使用できないことを示した。

損傷形態は全てにおいて摩耗主体であり、窒化けい素においては規定の 400 時間をクリアしたもののが極度の摩耗を伴っていた。

[本試験]

上記予備試験及びオートクレープ試験の結果より、アルミナと窒化けい素の 2 種類は軸受材料として不適合と判断し、試験を省略した。

浸漬 3000 時間後試験片の試験結果を Fig.3.8 に示す。この中で、特にハステロイだけが他に比べ寿命が短い傾向を示した。

3) 評 値

3.2 項のオートクレープによる浸漬試験と、3.3 項の浸漬後試験片を用いた転がり寿命試験の試験結果をまとめて Table 3.4 及び Table 3.5 に示す。

これらの試験結果より、有望な軸受材料として以下を選定した。

- ・金属材料 : SUS 630 (析出硬化系ステンレス鋼)
ステライト No.6B (Co 基超合金)
ヘインズアロイ No.188 (Co 基超合金)
- ・非金属材料 : サーメット
炭化けい素 (セラミックス)

Table 3.4 浸漬試験及び転がり寿命試験結果 (金属材料)

	項目		SUS630	ハステロイ C-22	ステライト No.6B	ヘインズアロイ No.188
浸漬試験	外観	500h	僅かに変色	僅かに変色	僅かに変色	僅かに変色
		3000h	黒色変色	黒色変色	黒色変色	黒色変色
	腐食度合 mg/dm ² · day	500h	ほぼ変化なし	ほぼ変化なし	ほぼ変化なし	ほぼ変化なし
		3000h	-0.10	-0.05	-0.10	-0.08
寿命試験	予備	寿命 (h) 0h	400↑、400↑	31×、170×	400↑、400↑	277×、180×
		500h	400↑、400↑	400↑、83×	370×、379×	287×、159×
	破損形態 (500h)		摩耗主体	摩耗主体 (剥離)	摩耗主体 (剥離)	摩耗主体 (剥離)
	本	寿命(h) 3000h	95×、121×	37×、35×	11×、92×	172×、99×
		破損形態 (3000h)	摩耗主体	摩耗主体 (剥離)	摩耗主体 (剥離)	摩耗主体 (剥離)
総合判定			○	△	○	○

注 1) : 寿命時間で↑は規定時間クリア、×は途中で寿命を示す。

注 2) : 総合判定の○はほぼ良好、△は僅かに劣る、□は劣るを示す。

Table 3.5 浸漬試験及び転がり寿命試験結果（非金属材料）

	項目		サーメット	窒化けい素	炭化けい素	アルミナ
浸 積 試 験	外観	500h	状態変化	変色（脱色）	ほぼ変化なし	ほぼ変化なし
		3000h	状態変化	表面層の剥離	ほぼ変化なし	ほぼ変化なし
	腐食度合 mg/dm ² · day	500h	+0.77	-12.86	ほぼ変化なし	ほぼ変化なし
		3000h	+0.30	-8.69	-0.02	-0.01
	曲げ強度 MPa	0h	1765	1255	549	382
		500h	1344	608	569	343
		3000h	1049	373	637	235
	浸漬液成分	3000h	Si、Mg、Al、Y、Mo、Ti、NH ₃			
	表面分析	3000h	Al、Si、Feの付着	—	—	—
寿 命 試 験	予備 寿命 (h)	0h	400↑、400↑	400↑、400↑	260×、400↑	0.8×、1.2×
		500h	9×、400↑	400↑、400↑	313×、194×	0.3×、0.2×
	破損形態 (500h)	摩耗主体 (剥離)	摩耗主体	摩耗主体 (剥離)	摩耗+剥離	
		寿命 (h) 3000h	120×、88×	—	35×、102×	—
	破損形態 (3000h)	摩耗主体 (剥離)	—	摩耗主体 (剥離)	—	
		総合判定	○	□	○	□

注 1) : 寿命時間で↑は規定時間クリア、×は途中で寿命を示す。

注 2) : 総合判定の○はほぼ良好、△は僅かに劣る、□は劣るを示す。

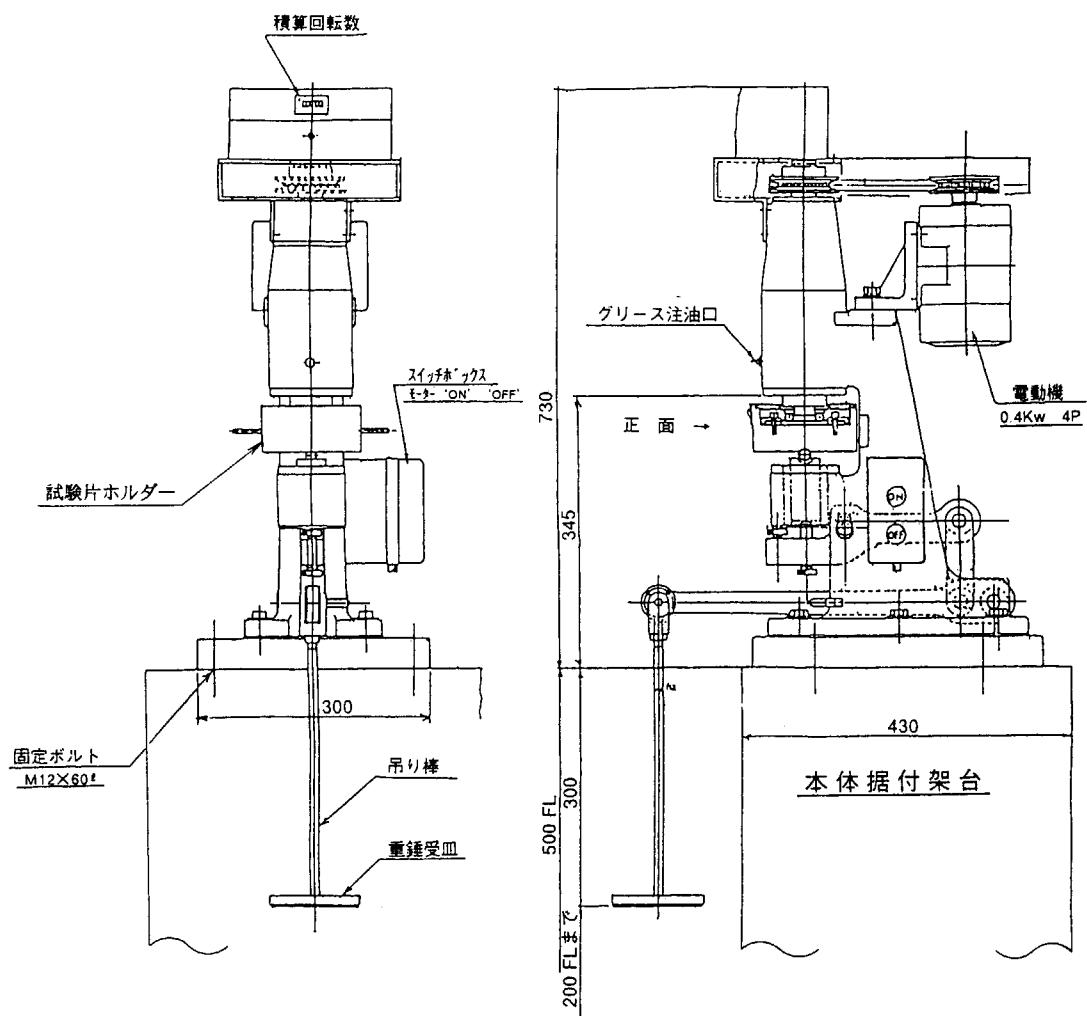


Fig.3.6 スラスト型転がり寿命試験装置

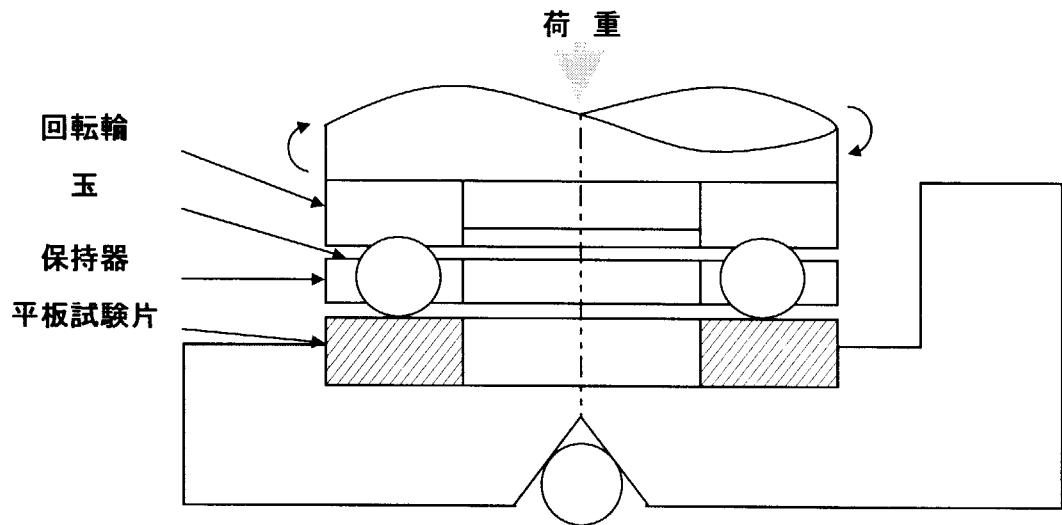


Fig3. 7 試験片取付概略図

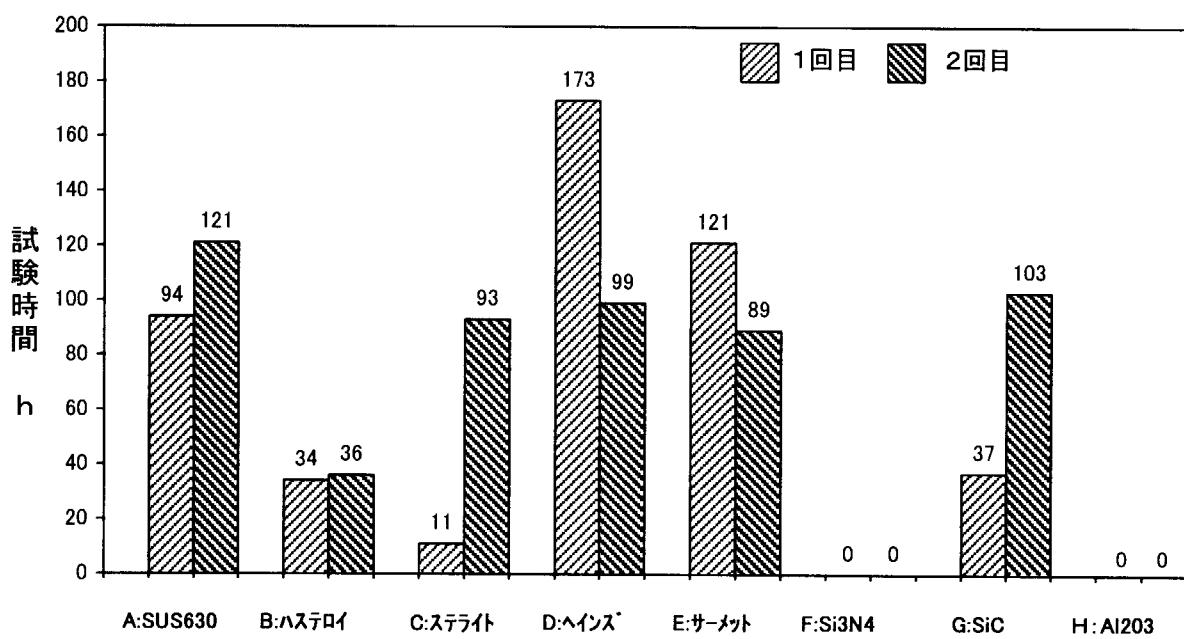


Fig3. 8 転がり寿命試験結果

3.4 組合せ転がり摩耗寿命試験

1) 試験方法

3.3 項の試験結果を踏まえて、さらなる候補材料の検討を行った。軸受の内外輪を想定した平板試験片と試験球を組合せた 6 種類の試験軸受について、転がり摩耗寿命試験を行った。

Table 3.6 に試験軸受の組合せ、Table 3.7 に試験条件を示す。

尚、試験装置及び試験片取付要領は 3.3 項と同様である。

Table 3.6 試験軸受の組合せ

番号	平板試験片	試験球
軸受A	ステライト No.1 (Co 基合金)	ステライト No.12 (Co 基合金)
軸受B	ステライト No.1 (Co 基合金)	SiC (セラミックス)
軸受C	ステライト No.12 (Co 基合金)	ステライト No.3 (Co 基合金)
軸受D	SUS 630 (析出硬化系ステンレス鋼)	SiC (セラミックス)
軸受E	MA-CS (Fe 基合金)	MA プラストハード S (Ni 基合金)
軸受F	サーメット (超硬合金)	SiC (セラミックス)

(注) 軸受D～Fはコバルトフリー材。

Table 3.7 組合せ転がり摩耗寿命試験の試験条件

項目	仕 様
平板試験片	Φ 65mm × Φ 25mm × t 5~10mm
試験球	Φ 3/8 " (9.525 mm) 、 6 個
保持器	SUS304 製
回転輪	Si ₃ N ₄ 製
潤滑	水 (蒸留水)
荷重	440 N
回転速度	1200 rpm
試験温度	室温
試験時間	MAX. 100 時間

2) 試験結果

転がり摩耗寿命試験結果を Fig.3.9 に示す。極度の摩耗、剥離等の異常がなく、規定の 100 時間をクリアしたのは軸受 F の全てと軸受 B の一部だけであった。その他は途中で振動値が大きくなり（初期値の 15 倍）中断した。特に軸受 E は極めて短い寿命であった。

摩耗度合については、試験前後の重量測定結果より摩耗量（体積）を算出した。平板試験片の摩耗度合を Fig.3.10、試験球の摩耗度合を Fig.3.11 に示す。軸受 A の外観は金属光沢を失い、凝着摩耗（金属粉が付着したうろこ状摩耗）が認められた。摩耗度合は、平板で $550 \sim 2300 \times 10^{-2} \text{mm}^3/\text{h}$ 、玉で $1500 \sim 5000 \times 10^{-2} \text{mm}^3/\text{h}$ と比較的高い値を示した。これに比べ、軸受 F の試験球の外観は試験前と同様の光沢が認められ、平板の摩耗量は $10 \times 10^{-2} \text{mm}^3/\text{h}$ 、玉で $80 \sim 100 \times 10^{-2} \text{mm}^3/\text{h}$ と極めて少ない軽微な摩耗であった。軸受 B の平板の外観は、金属光沢を失いアプレッシブ摩耗の様相を呈していたが、玉は光沢を有しており、摩耗量も $90 \sim 130 \times 10^{-2} \text{mm}^3/\text{h}$ と比較的少なかった。

3) 評 価

6 種類の試験軸受（平板試験片と試験球）による水中転がり寿命試験の結果をまとめて Table 3.8 に示す。

これより、金属材料同士の組合せは摩耗度合の比較的高い凝着摩耗を示すことが明らかとなり、軸受 B のような異種材料の組合せ又は軸受 F のようなセラミック材料の組合せが有望と考えられる。よって、軸受材料として以下を選定する。

- 玉 : SiC
- 内外輪 : サーメット、ステライト No.1

一方、分割ボールナットのねじ軸については、ステライトの盛金は可能であるがサーメットで作ることは現状の製造性、強度保証の点で難しい。よって、サーメットの代替として次世代軽水炉の CRDM 構成部品の耐摩耗材として研究された炭化クロムコーティング材につき、同様の転がり摩耗寿命試験を行った。

試験軸受の組合せを Table 3.9 に示す。試験の結果は、先の Table 3.8 に併せて示す。これより、炭化クロムコーティング材（平板試験片）と SiC（試験球）の組合せは、軸受 B よりやや劣る結果であった。よって、分割ボールナット材としては以下の組合せを選定する。

- 玉 : SiC
- ねじ軸 : ステライト No.1

Table3.8 水中転がり摩耗試験結果一覧

試験軸受	組合せ	振動寿命 h	摩耗寿命 h	平板 試験 片			損傷状況			損傷状況			試験 球		
				摩耗深さ μm	粗さ Rz μm	摩耗度合 $10^{-2}\text{mm}^3/\text{h}$	凝着摩耗	凝着摩耗	摩耗度合 $10^{-2}\text{mm}^3/\text{h}$	凝着摩耗	凝着摩耗	摩耗度合 $10^{-2}\text{mm}^3/\text{h}$	粗さ Rz μm	真円度 μm	摩耗度合 $10^{-2}\text{mm}^3/\text{h}$
軸受 A-1	上:平板 下:玉	10	56	160	0.21	550	凝着摩耗	凝着摩耗	550	凝着摩耗	凝着摩耗	凝着摩耗	0.70	23.5	1500
軸受 A-2	ステライト1	8	38	150	0.44	2300	凝着摩耗	凝着摩耗	2300	凝着摩耗	凝着摩耗	凝着摩耗	0.47	29.6	5000
軸受 A-3	ステライト12	8	25	140	0.27	1900	凝着摩耗	凝着摩耗	1900	凝着摩耗	凝着摩耗	凝着摩耗	0.46	35.6	2400
軸受 B-1	ステライト1	13	100	(アフレッシュ)摩耗	110	4.13	90	軽微摩耗(良好)	90	軽微摩耗(良好)	90	軽微摩耗(良好)	0.13	0.35	130
軸受 B-2		15	65	(アフレッシュ)摩耗	90	0.99	40	軽微摩耗(良好)	40	軽微摩耗(良好)	40	軽微摩耗(良好)	0.10	0.94	90
軸受 B-3	SiC	10	72	(アフレッシュ)摩耗	100	0.94	50	軽微摩耗(良好)	50	軽微摩耗(良好)	50	軽微摩耗(良好)	0.11	0.60	110
軸受 C-1	ステライト12	5	20	凝着摩耗	60	0.43	310	凝着摩耗	310	凝着摩耗	310	凝着摩耗	0.38	16.5	1600
軸受 C-2		6	43	凝着摩耗	75	0.85	200	凝着摩耗	200	凝着摩耗	200	凝着摩耗	0.62	9.8	1100
軸受 C-3	ステライト3	5	27	凝着摩耗	55	0.22	520	凝着摩耗	520	凝着摩耗	520	凝着摩耗	0.51	34.5	2200
軸受 D-1	SUS630	6	37	磨耗	35	1.07	90	軽微摩耗(良好)	90	軽微摩耗(良好)	90	軽微摩耗(良好)	0.17	0.67	240
軸受 D-2		6	24	摩耗	15	0.14	90	軽微摩耗(良好)	90	軽微摩耗(良好)	90	軽微摩耗(良好)	0.08	0.65	150
軸受 D-3	SiC	8	29	摩耗	40	0.17	180	軽微摩耗(良好)	180	軽微摩耗(良好)	180	軽微摩耗(良好)	0.12	0.50	120
軸受 E-1	MA-CS	2	13	凝着摩耗	105	2.08	1500	凝着摩耗	1500	凝着摩耗	1500	凝着摩耗	0.76	5.99	3600
軸受 E-2		1	7	凝着摩耗	40	0.61	400	凝着摩耗	400	凝着摩耗	400	凝着摩耗	0.47	6.49	700
軸受 E-3	MAプラスチック	1	6	凝着摩耗	35	0.25	840	凝着摩耗	840	凝着摩耗	840	凝着摩耗	0.19	3.40	1300
軸受 F-1	サーメット	200	100	軽微摩耗(良好)	17	0.08	10	軽微摩耗(良好)	10	軽微摩耗(良好)	10	軽微摩耗(良好)	0.09	0.70	100
軸受 F-2		200	100	軽微摩耗(良好)	10	0.04	10	軽微摩耗(良好)	10	軽微摩耗(良好)	10	軽微摩耗(良好)	0.11	1.66	100
軸受 F-3	SiC	200	100	軽微摩耗(良好)	15	0.08	10	軽微摩耗(良好)	15	軽微摩耗(良好)	15	軽微摩耗(良好)	0.10	0.56	80
試験体 G-1	LC-1C (SUS304)	3	24	摩耗(剥離)	(110)	0.31	980	軽微摩耗(良好)	980	軽微摩耗(良好)	980	軽微摩耗(良好)	0.11	0.60	100
試験体 G-1		1	15	摩耗(剥離)	(150)	1.45	1200	軽微摩耗(良好)	1200	軽微摩耗(良好)	1200	軽微摩耗(良好)	0.10	0.68	120
試験体 G-1	SiC	3	18	摩耗(剥離)	(100)	0.72	610	軽微摩耗(良好)	610	軽微摩耗(良好)	610	軽微摩耗(良好)	0.08	0.39	130
試験体 H-1	LC-1H (SUS304)	11	58	摩耗	105	0.20	330	軽微摩耗(良好)	330	軽微摩耗(良好)	330	軽微摩耗(良好)	0.09	0.37	90
試験体 H-1		4	36	摩耗(剥離)	(110)	1.70	510	軽微摩耗(良好)	510	軽微摩耗(良好)	510	軽微摩耗(良好)	0.08	0.49	120
試験体 H-1	SiC	10	42	摩耗	50	0.44	290	軽微摩耗(良好)	290	軽微摩耗(良好)	290	軽微摩耗(良好)	0.08	0.33	90
試験体 I-1	LC-1H (SUS630)	9	59	摩耗	110	0.25	180	軽微摩耗(良好)	180	軽微摩耗(良好)	180	軽微摩耗(良好)	0.08	0.21	80
試験体 I-1		4	25	摩耗	60	0.85	200	軽微摩耗(剥離)	200	軽微摩耗(剥離)	200	軽微摩耗(剥離)	0.26	7.20	150
試験体 I-1	SiC	8	45	摩耗	100	0.30	170	軽微摩耗(良好)	170	軽微摩耗(良好)	170	軽微摩耗(良好)	0.10	0.69	90

注) 軸受Fの損傷状況、摩耗深さ、粗さ、真円度等は、水中転がり運動寿命試験200時間後の測定値。他は、水中転がり摩耗寿命試験後の一覧。

Table 3.9 試験軸受の組合せ（その2）

番 号	平 板 試 験 片	試 験 球
試験体G	SUS 304 + 炭化クロム (LC-1 C)	SiC (セラミックス)
試験体H	SUS304 + 炭化クロム (LC-1 H)	SiC (セラミックス)
試験体 I	SUS630 + 炭化クロム (LC-1 H)	SiC (セラミックス)

(注) 炭化クロムは PRAXAIR 社製。

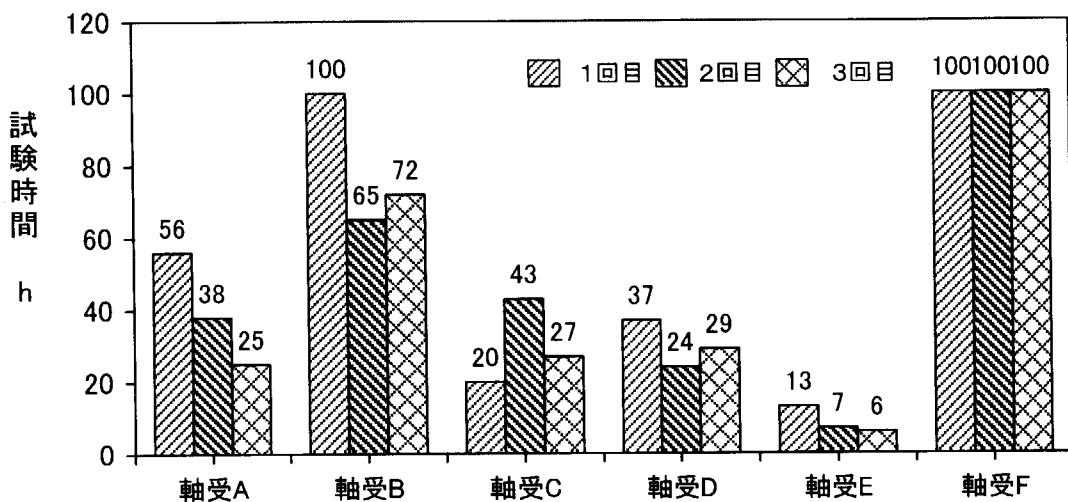


Fig3. 9 水中転がり摩耗寿命試験結果

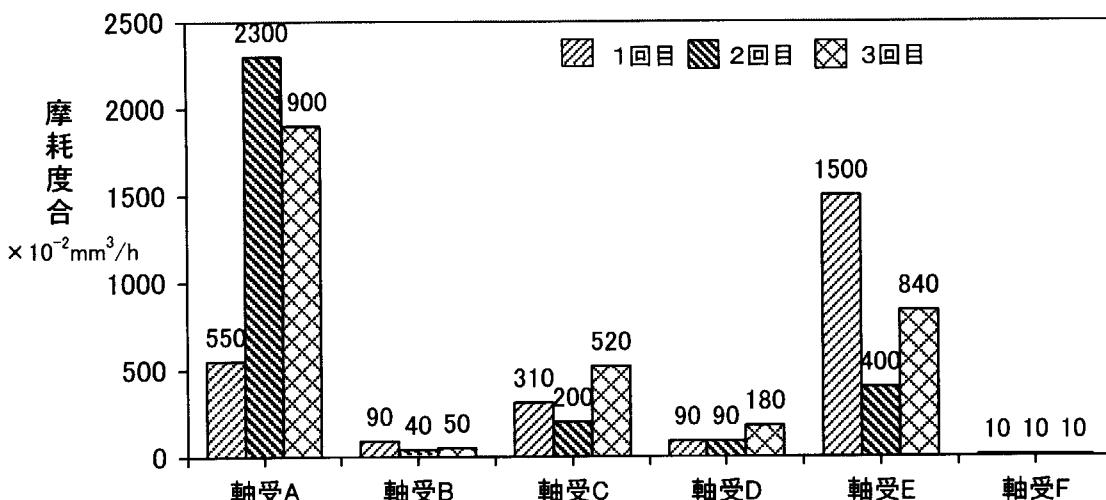


Fig3. 10 平板試験片の摩耗度合

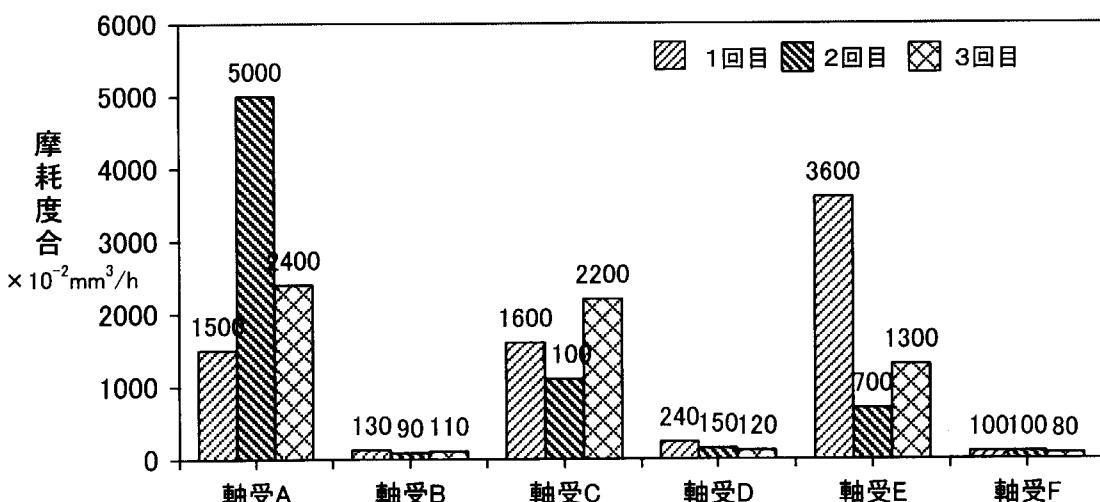


Fig3. 11 試験球の摩耗度合

4. 軸受転がり摩耗試験

4.1 概要

高温水中で要求される耐熱性、耐食性及び耐摩耗性のある軸受を求めて、3章で述べたようなオートクレープによる材料浸漬試験、各種転がり摩耗試験等の開発が行われてきた。その結果、原子炉容器内装型 CRDM の軸受材料としては、玉に炭化けい素、転動面にはサーメット又はステライト No.1 の肉盛処理をしたものが有望であるとの結論を得た。しかし、これらの試験を行った環境は温度、荷重等の組合せ試験条件としては必ずしも実機を模擬したものではない。

そこで、より実機に近い試験条件で試験を行うために、次ぎの開発ステップとして高温高圧水中における負荷状態で、転がり摩耗試験を実施した。

試験は、軸受を構成する内外輪、玉及び保持器について最適な材料の組合せを選択するスクリーニング試験、そして、選択された組合せにつき実機目標寿命回転数に相当する連続回転の耐用性試験を行った。

4.2 試験片

1) 材料の選定

一般に内外輪及び玉材料は、耐摩耗、耐荷重性等の観点から硬質高強度の金属材料やセラミック材料が使用される。また、保持器材料には玉とすべり接触する構造から耐摩耗性、軽量、高強度等が要求され、樹脂材料、金属材料が使用されている。

材料選定にあたっては、原子炉での実績にこだわらず、過去の水中転がり寿命試験の結果を発展させて Table 4.1 に示す候補材料を選出した。これらの内、更に下記事項等を考慮して試験片材料としての絞り込みを行った。

- ・ 内外輪はステライト No.1 盛金品 (HRc50 程度) を主に更に硬い材料を選出する。
- ・ 玉はサーメット材でも製造できることが分かったので、これを加える。
- ・ 保持器は SUS304 とするが、自己潤滑性を期待してグラファイトを加える。
- ・ 安価に供給できる SUS440C を金属ベースの比較試験片として加える。

その結果、試験片として選定した材料を Table 4.1 の中で [] 部で示す。これらの主な仕様を Table 4.2 に示す。

Table 4.1 高温水中軸受の候補材料

	内 外 輪	玉	保 持 器
硬質材	SUS440C SUS630 ステライト盛金 SiC サーメット	SUS440C SiC サーメット	SUS304 SUS630
自己潤滑	SUS440C+金メッキ		グラファイト SUS440C+金メッキ

(注)  部は試験片として選定した材料

Table 4.2 試験片材料の主な仕様

材 料	主 成 分	硬 さ	密 度 (g/cm³)	備 考
SiC (平板、玉)	Si、C	Hv2000 以上	2.98	PWR で実績あり
サーメット (平板、玉)	TiCN-NiCo	Hv1500 以上	6.04	PWR、BWR とも実績なし
ステライト No.1 (平板)	Co、Cr、W、C	HRc50 以上	8.48	PWR で実績あり 転動部に盛金
SUS440C (平板、玉)	Fe、Cr	HRc55 以上	7.70	BWR で実績あり
SUS304 (保持器)	Fe、Cr、Ni	HB170 以上	7.93	PWR で実績あり
グラファイト (保持器)	C	ショア D70 以上	1.81	PWR、BWR とも実績なし 自己潤滑性あり

2) 試験片の形状

試験片は Fig. 4.1 に示すようにスラスト型で、上部の軌道溝を持つ回転輪と下部の平板試験片の間に保持器で等間隔に分離された玉 6 個を挟む構造になっている。従って、玉の接触面圧は回転輪よりも平板試験片の方が大きいことから、この部分の面圧を実機に合わせることで、平板試験片を実機軸受の内外輪相当とした。

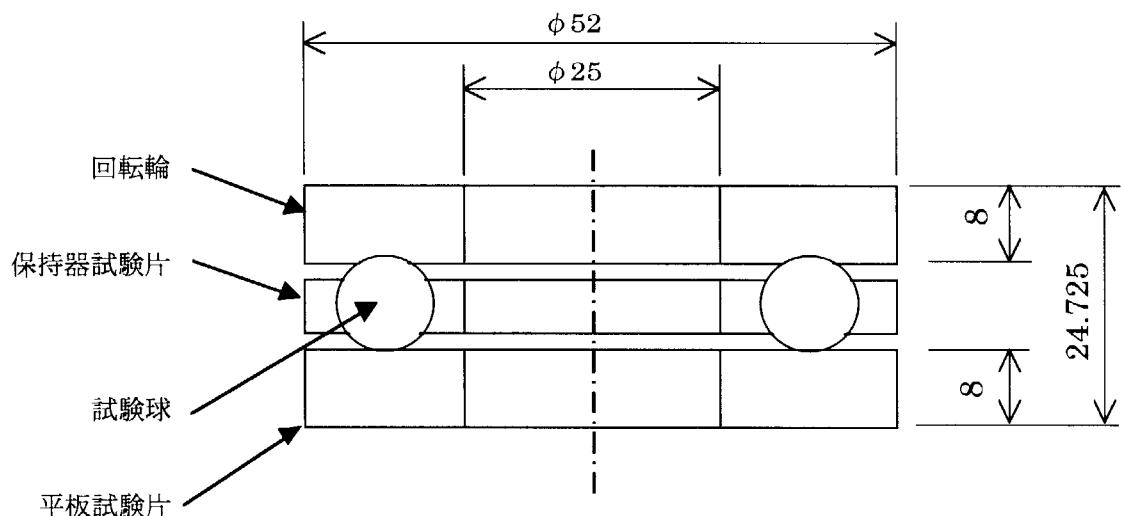


Fig. 4.1 試験片の形状

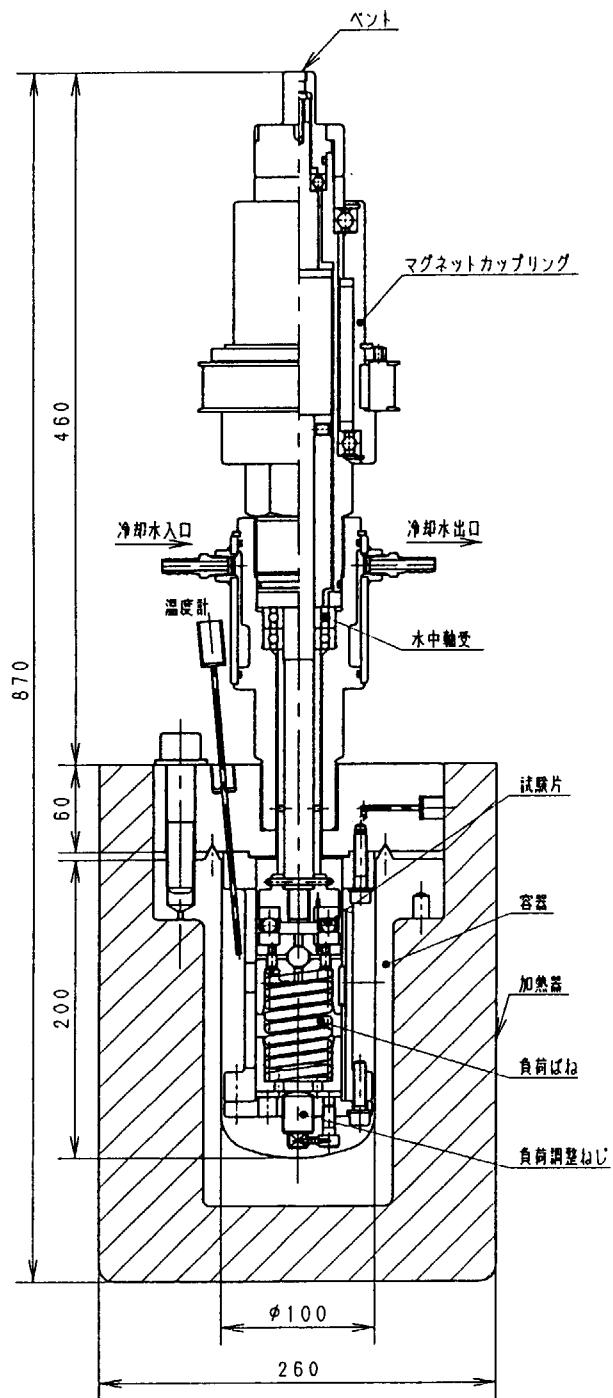


Fig.4.2 試験部組立図

4.3 試験装置

一般軸受のスラスト型寿命試験機を参考に高温水中転がり摩耗試験装置を製作した。試験装置全体の外観を Photo 4.1 に示す。

試験装置は、「圧力容器構造規格」で定めるところの小型圧力容器を用いて、高温高圧水中で #51305 相当の試験片（スラスト軸受）の転がり摩耗試験ができる構造となっている。試験装置の設備仕様を Table 4.3 に示す。また、試験部の組立図を Fig. 4.2 に示す。

Table 4.3 高温水中転がり摩耗試験装置の設備仕様

項目	仕様
型式	小型圧力容器
最高使用温度	320 ℃
最高使用圧力	13 MPa
回転数	50~300 rpm
最高試験荷重	590 N

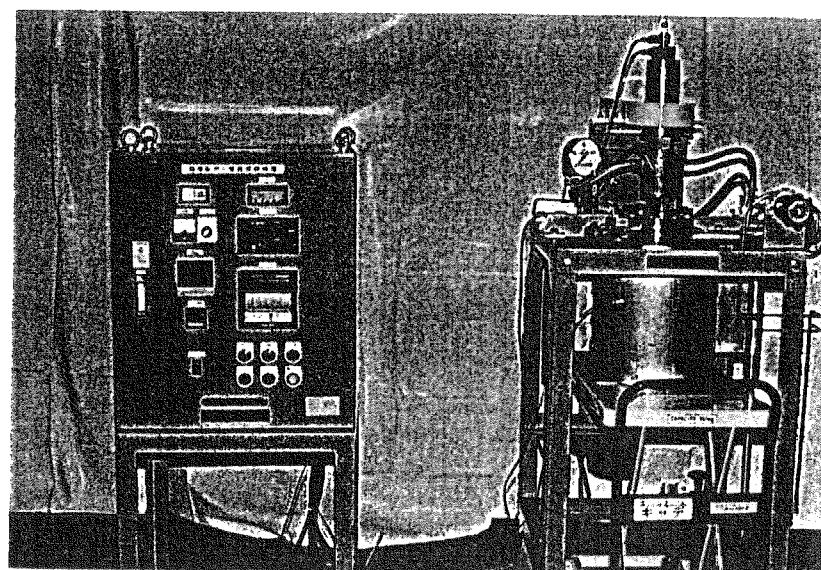


Photo 4.1 高温水中転がり摩耗試験装置

This is a blank page.

4.4 スクリーニング試験

1) 試験方法

試験は、実機を模擬した高温高圧水中において、面圧と周速を実機回転条件に合わせて転がり摩耗試験を行った。予備試験の結果から試験時間は 20 時間、回転トルクは 1.5N·m を上限と規定した。

試験条件を Table 4.4、試験片の組合せを Table 4.5 に示す。

Table 4.4 スクリーニング試験条件

項目	仕様
雰囲気	320°C、12MPa、水中
回転速度	185rpm
周速	0.373m/s
面圧	1900～2700 MPa (組合せ条件で異なる)
試験時間	20 時間

Table 4.5 試験片組合せ一覧

No.	平板試験片 (内外輪)	玉	保持器
1	SUS440C	SUS440C	SUS304
2	SUS440C	サーメット	SUS304
3	SUS440C	SiC	SUS304
4	ステライト	サーメット	SUS304
5	ステライト	SiC	SUS304
6	サーメット	サーメット	SUS304
7	サーメット	SUS440C	SUS304
8	SiC	サーメット	SUS304
9	SiC	SiC	SUS304
10	SUS440C	SUS440C	グラファイト
11	SUS440C	サーメット	グラファイト
12	ステライト	サーメット	グラファイト
13	SiC	SiC	グラファイト

2) 試験結果

スクリーニング試験及び試験後の試験片損傷状況（外観、形状、粗さ、真円度、重量変化等）の検査結果をまとめて Table 4.6-1～13 に示す。また、試験後試験片の外観を Photo 4.2-1～13 に示す。

SUS304 保持器を用いた No.1～No.9 の組合せにおいては、No.3（平板：SUS440C、玉：SiC）、No.5（平板：ステライト、玉：SiC）、No.8（平板：SiC、玉：サーメット）がトルクの規定値（1.5N・m）を超えた為に試験を中断した。No.6（平板：サーメット、玉：サーメット）は転動部と玉の摩耗は比較的少なく良好な結果を示した。

グラファイト保持器を用いた No.10～No.13 の組合せにおいては、全て規定の試験時間を満足し、試験中の回転トルク、振動も全体的に SUS304 保持器を用いたよりも低い傾向を示した。摩耗も比較的軽微なものであった。

3) 評価

平板試験片、玉、保持器について、試験後の重量減少分を単位時間当りの摩耗量（体積）に換算したものを、損傷度合として Table 4.7 に示す。

これより No.6（平板：サーメット、玉：サーメット、保持器：SUS304）、No.10（平板：SUS440C、玉：SUS440C、保持器：グラファイト）、No.11（平板：SUS440C、玉：サーメット、保持器：グラファイト）の損傷度合（合計）は $1\text{mm}^3/\text{h}$ 以下と比較的少ない損傷割合を示していた。よって、平板と玉の材料としてはサーメットが一番良好であることが明らかになった。

また、3 章の転がり寿命試験等において良好な耐食性を示した SiC に関しては、組合せに係わらず顕著な摩耗が認められ、高温水中での動的な状況下での使用が懸念された。

グラファイトについては、保持器を SUS304 からグラファイトに替えたこと（No.1→No.10、No.2→No.11 など）で明らかに損傷度合、回転トルク、振動が減少しており、グラファイトの摩耗特性を向上させる効果が認められた。

以上を踏まえて、各組合せについての総合的な評価結果を Table 4.7 の判定欄に記す。

Table 4.6-1 スクリーニング試験結果一覧（組合せNo.1）

<No.1> ①試験時間：20時間クリア ②トルク：0.2～1N·m ③振動：大					
部品	材 料	項 目	規 格	試 験 前	試 験 後 (20時間後)
平板試験片	SUS440C	外観	_____	良好	転動部摩耗 転動部以外は黒色化
		表面粗さ	Ra 0.1 μm以下	0.03	_____
		形状、mm	_____	_____	幅 2.40 × 深 0.16
		硬さ	HRc55 以上	58	56
		重量、g	_____	98.97	0.24 減少
玉	SUS440C	外観	_____	良好	摩耗
		表面粗さ	Ra 0.08 μm以下	0.02	0.09
		真円度	1 μm以下	0.09	0.7
		硬さ	HRc55 以上	58	55
		圧碎、MPa	_____	_____	_____
		寸法、mm	9.525	9.525	0.059 ~ 0.071 減少
保持器	SUS304	外観	_____	良好	ポケット部摩耗 全体僅かに変色
		重量、g	_____	36.75	0.18 減少

Table 4.6-2 スクリーニング試験結果一覧（組合せNo.2）

<No.2> ①試験時間：20時間クリア ②トルク：0.2～0.4N·m ③振動：大					
部品	材 料	項 目	規 格	試 験 前	試 験 後 (20時間後)
平板試験片	SUS440C	外観	_____	良好	転動部摩耗 転動部以外は黒色化
		表面粗さ	Ra 0.1 μm以下	0.02	_____
		形状、mm	_____	_____	幅 1.75 × 深 0.08
		硬さ	HRc55 以上	58	57
		重量、g	_____	99.03	0.08 減少
玉	サーメット	外観	_____	良好	摩耗
		表面粗さ	Ra 0.08 μm以下	0.02	0.36
		真円度	1 μm以下	0.14	3.0
		硬さ	Hv1500 以上	1600	_____
		圧碎、MPa	_____	300 以上	300 以上
		寸法、mm	9.525	9.525	0.005 ~ 0.012 減少
		重量、g	6個の合計	16.28	0.01 減少
保持器	SUS304	外観	_____	良好	ポケット部摩耗 全体僅かに変色
		重量、g	_____	36.79	0.11 減少

Table 4.6-3 スクリーニング試験結果一覧（組合せNo.3）

<No.3> ①試験時間：15時間中断 ②トルク：0.2～1.5N·m ③振動：大					
部品	材 料	項 目	規 格	試 験 前	試 験 後 (15時間後)
平板試験片	SUS440C	外観	_____	良好	転動部摩耗 転動部以外は黒色化
		表面粗さ	Ra 0.1 μm以下	0.03	_____
		形状、mm	_____	_____	幅 3.20 × 深 0.27
		硬さ	HRc55 以上	58	56
		重量、g	_____	98.94	0.59 減少
玉	SiC	外観	_____	良好	摩耗
		表面粗さ	Ra 0.08 μm以下	0.02	0.71
		真円度	1 μm以下	0.09	27.8
		硬さ	Hv2500 以上	2100	_____
		圧碎、MPa	_____	61.6	75.2
		寸法、mm	9.525	9.525	0.046～0.145 減少
		重量、g	6個の合計	8.24	0.29 減少
保持器	SUS304	外観	_____	良好	ポケット部摩耗 全体僅かに変色
		重量、g	_____	36.72	2.36 減少

Table 4.6-4 スクリーニング試験結果一覧（組合せNo.4）

<No.4> ①試験時間：20時間クリア ②トルク：0.2～1N·m ③振動：大					
部品	材 料	項 目	規 格	試 験 前	試 験 後 (20時間後)
平板試験片	ステライト	外観	_____	良好	転動部摩耗 その他は僅かに変色
		表面粗さ	Ra 0.1 μm以下	0.02	_____
		形状、mm	_____	_____	幅 2.75 × 深 0.20
		硬さ	HRc50 以上	56	_____
		重量、g	_____	104.83	0.36 減少
玉	サーメット	外観	_____	良好	摩耗
		表面粗さ	Ra 0.08 μm以下	0.02	0.22
		真円度	1 μm以下	0.18	9.8
		硬さ	Hv1500 以上	1600	_____
		圧碎、MPa	_____	300 以上	300 以上
		寸法、mm	9.525	9.525	0.008～0.025 減少
		重量、g	6個の合計	16.27	0.06 減少
保持器	SUS304	外観	_____	良好	ポケット部摩耗 全体僅かに変色
		重量、g	_____	36.77	1.16 減少

Table 4.6-5 スクリーニング試験結果一覧（組合せNo.5）

<No.5> ①試験時間：10.8時間中断 ②トルク：0.2～1.5N·m ③振動：大					
部品	材 料	項 目	規 格	試 験 前	試 験 後 (10.8時間後)
平板試験片	ステライト	外観	_____	良好	転動部摩耗 その他は僅かに変色
		表面粗さ	Ra 0.1 μm以下	0.02	_____
		形状、mm	_____	_____	幅 1.75 × 深 0.08
		硬さ	HRc50 以上	57	_____
		重量、g	_____	104.83	0.08 減少
玉	SiC	外観	_____	良好	摩耗(一部光沢あり)
		表面粗さ	Ra 0.08 μm以下	0.02	0.65
		真円度	1 μm以下	0.18	17.3 (1.9)
		硬さ	Hv2000 以上	2300	_____
		圧碎、MPa	_____	82.6	67.9
		寸法、mm	9.525	9.525	0.007 ~ 0.057 減少
		重量、g	6個の合計	8.22	0.07 減少
保持器	SUS304	外観	_____	良好	ポケット部摩耗 全体僅かに変色
		重量、g	_____	36.72	0.17 減少

Table 4.6-6 スクリーニング試験結果一覧（組合せNo.6）

<No.6> ①試験時間：20時間クリア ②トルク：0.2～0.3N·m ③振動：大					
部品	材 料	項 目	規 格	試 験 前	試 験 後 (20時間後)
平板試験片	サーメット	外観	_____	良好	転動部僅かに摩耗
		表面粗さ	Ra 0.1 μm以下	0.02	_____
		形状、mm	_____	_____	幅 0.95 × 深 0.03
		硬さ	Hv1500 以上	1700	_____
		重量、g	_____	78.27	0.02 減少
玉	サーメット	外観	_____	良好	ほぼ良好(光沢あり)
		表面粗さ	Ra 0.08 μm以下	0.02	0.02
		真円度	1 μm以下	0.16	0.11
		硬さ	Hv1500 以上	1500	_____
		圧碎、MPa	_____	300 以上	300 以上
		寸法、mm	9.525	9.525	0.007 ~ 0.011 減少
		重量、g	6個の合計	16.29	0.01 減少
保持器	SUS304	外観	_____	良好	ポケット部摩耗 全体僅かに変色
		重量、g	_____	36.71	0.01 以下

Table 4.6-7 スクリーニング試験結果一覧（組合せNo.7）

<No.7> ①試験時間：20時間クリア ②トルク：0.2～0.6N·m ③振動：大					
部品	材 料	項 目	規 格	試 験 前	試 験 後 (20時間後)
平板試験片	サーメット	外観	_____	良好	転動部摩耗
		表面粗さ	Ra 0.1 μ m以下	0.02	_____
		形状、mm	_____	_____	幅 1.75 × 深 0.08
		硬さ	Hv1500 以上	1700	_____
		重量、g	_____	78.39	0.10 減少
玉	SUS440C	外観	_____	良好	摩耗
		表面粗さ	Ra 0.08 μ m以下	0.02	0.14
		真円度	1 μ m以下	0.13	2.6
		硬さ	HRc55 以上	63	56
		圧碎、MPa	_____	_____	_____
		寸法、mm	9.525	9.525	0.153 ~ 0.225 減少
		重量、g	6個の合計	20.76	1.25 減少
保持器	SUS304	外観	_____	良好	ポケット部摩耗 全体僅かに変色
		重量、g	_____	36.7	0.17 減少

Table 4.6-8 スクリーニング試験結果一覧（組合せNo.8）

<No.8> ①試験時間：12時間中断 ②トルク：0.2～1.5N·m ③振動：大					
部品	材 料	項 目	規 格	試 験 前	試 験 後 (12時間後)
平板試験片	SiC	外観	_____	良好	転動部摩耗
		表面粗さ	Ra 0.1 μ m以下	0.09	_____
		形状、mm	_____	_____	幅 2.40 × 深 0.15
		硬さ	Hv2000 以上	2100	_____
		重量、g	_____	39.75	0.08 減少
玉	サーメット	外観	_____	良好	摩耗
		表面粗さ	Ra 0.08 μ m以下	0.02	0.11
		真円度	1 μ m以下	0.20	6.6
		硬さ	Hv1500 以上	1600	_____
		圧碎、MPa	_____	300 以上	300 以上
		寸法、mm	9.525	9.525	0.068 ~ 0.084 減少
		重量、g	6個の合計	16.29	0.35 減少
保持器	SUS304	外観	_____	良好	ポケット部摩耗 全体僅かに変色
		重量、g	_____	36.70	0.40 減少

Table 4.6-9 スクリーニング試験結果一覧（組合せNo.9）

<No.9> ①試験時間：20時間クリア ②トルク：0.2～0.6N·m ③振動：大					
部品	材 料	項 目	規 格	試 験 前	試 験 後 (20時間後)
平板試験片	SiC	外観	_____	良好	転動部摩耗
		表面粗さ	Ra 0.1 μm以下	0.04	_____
		形状、mm	_____	_____	幅 1.90 × 深 0.10
		硬さ	Hv2000 以上	2300	_____
		重量、g	_____	39.79	0.04 減少
玉	SiC	外観	_____	良好	摩耗（光沢あり）
		表面粗さ	Ra 0.08 μm以下	0.03	0.03
		真円度	1 μm以下	0.12	9.2
		硬さ	Hv2000 以上	2100	_____
		圧碎、MPa	_____	70.5	71.4
		寸法、mm	9.525	9.525	0.049～0.058 減少
		重量、g	6個の合計	8.29	0.11 減少
保持器	SUS304	外観	_____	良好	ポケット部摩耗 全体僅かに変色
		重量、g	_____	36.76	0.03 減少

Table 4.6-10 スクリーニング試験結果一覧（組合せNo.10）

<No.10> ①試験時間：20時間クリア ②トルク：0～0.2N·m ③振動：小					
部品	材 料	項 目	規 格	試 験 前	試 験 後 (20時間後)
平板試験片	SUS440C	外観	_____	良好	転動部僅かに摩耗 転動部以外は変色
		表面粗さ	Ra 0.1 μm以下	0.03	_____
		形状、mm	_____	_____	幅 0.95 × 深 0.02
		硬さ	HRc55 以上	58	56
		重量、g	_____	99.00	0.01 減少
玉	SUS440C	外観	_____	良好	僅かに摩耗
		表面粗さ	Ra 0.08 μm以下	0.02	0.04
		真円度	1 μm以下	0.12	1.9
		硬さ	HRc55 以上	58	56
		圧碎、MPa	_____	_____	_____
		寸法、mm	9.525	9.525	0.009～0.013 減少
		重量、g	6個の合計	20.78	0.01 減少
保持器	グラファイト	外観	_____	良好	ポケット部僅かに摩耗
		重量、g	_____	8.57	0.01 減少

Table 4.6-11 スクリーニング試験結果一覧（組合せNo.11）

<No.11> ①試験時間：20時間クリア ②トルク：0～0.2N·m ③振動：小					
部品	材 料	項 目	規 格	試 験 前	試 験 後 (20時間後)
平板試験片	SUS440C	外観	_____	良好	転動部僅かに摩耗 転動部以外は変色
		表面粗さ	Ra 0.1 μm以下	0.02	_____
		形状、mm	_____	_____	幅 0.65 × 深 0.01
		硬さ	HRc55 以上	58	57
		重量、g	_____	99.04	0.01 減少
玉	サーメット	外観	_____	良好	僅かに摩耗(光沢あり)
		表面粗さ	Ra 0.08 μm以下	0.02	0.03
		真円度	1 μm以下	0.15	0.20
		硬さ	Hv1500 以上	1600	_____
		圧碎、MPa	_____	300 以上	300 以上
		寸法、mm	9.525	9.525	0.008 ~ 0.011 減少
		重量、g	6個の合計	16.28	0.01 減少
保持器	グラファイト	外観	_____	良好	ポケット部僅かに摩耗
		重量、g	_____	8.61	0.02 減少

Table 4.6-12 スクリーニング試験結果一覧（組合せNo.12）

<No.12> ①試験時間：20時間クリア ②トルク：0～0.2N·m ③振動：小					
部品	材 料	項 目	規 格	試 験 前	試 験 後 (20時間後)
平板試験片	ステライト	外観	_____	良好	転動部僅かに摩耗 その他は僅かに変色
		表面粗さ	Ra 0.1 μm以下	0.02	_____
		形状、mm	_____	_____	幅 0.90 × 深 0.02
		硬さ	HRc50 以上	57	_____
		重量、g	_____	105.00	0.03 減少
玉	サーメット	外観	_____	良好	僅かに摩耗(光沢あり)
		表面粗さ	Ra 0.08 μm以下	0.02	0.09
		真円度	1 μm以下	0.15	0.89
		硬さ	Hv1500 以上	1600	_____
		圧碎、MPa	_____	300 以上	300 以上
		寸法、mm	9.525	9.525	0.008 ~ 0.011 減少
		重量、g	6個の合計	16.28	0.01 減少
保持器	グラファイト	外観	_____	良好	ポケット部僅かに摩耗
		重量、g	_____	8.61	0.03 減少

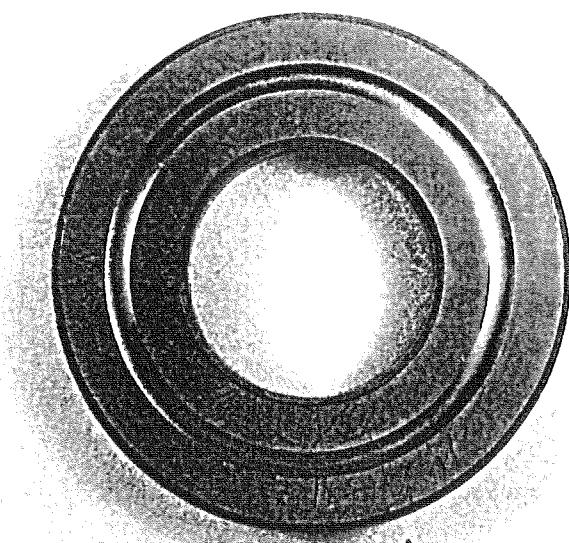
Table 4.6-13 スクリーニング試験結果一覧（組合せ No.13）

<No.13> ①試験時間：20時間クリア ②トルク：0.1 ~ 0.3N·m ③振動：小					
部品	材 料	項 目	規 格	試 験 前	試 験 後 (20時間後)
平板試験片	SiC	外観	_____	良好	回転部摩耗
		表面粗さ	Ra 0.1 μm 以下	0.06	_____
		形状、mm	_____	_____	幅 1.50 × 深 0.06
		硬さ	Hv 2000 以上	2200	_____
玉	SiC	重量、g	_____	39.77	0.02 減少
		外観	_____	良好	摩耗(一部光沢あり)
		表面粗さ	Ra 0.08 μm 以下	0.03	0.10
		真円度	1 μm 以下	0.11	1.6
		硬さ	Hv 2000 以上	2200	_____
		圧碎、MPa	_____	75.1	82.1
		寸法、mm	9.525	9.525	0.052 ~ 0.064 減少
保持器	グラファイト	重量、g	6個の合計	8.25	0.03 減少
		外観	_____	良好	ポケット部僅かに摩耗
		重量、g	_____	8.59	0.04 減少

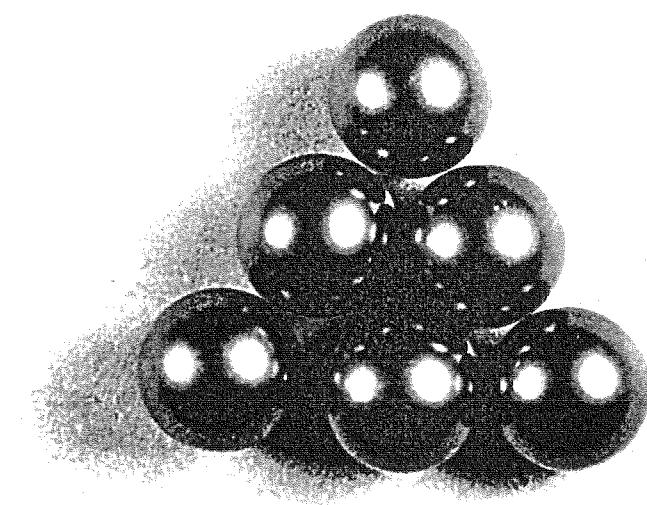
Table4.7 スクリーニング試験結果

No.	組合せ (部品／材料)		試験 時間	トルク N·m	摩耗度合 mm ³ /h	判定 (損傷合計mm ³ /h)	備考
1	平板	SUS440C	20h	0.2~1	1.56	X (4.90)	振動大
	玉	SUS440C			2.21		
	保持器	SUS304			1.13		
2	平板	SUS440C	20h	0.2~0.4	0.52	△ (1.29)	振動大
	玉	サーメット			0.08		
	保持器	SUS304			0.69		
3	平板	SUS440C	15h	0.2~1.5	5.11	X (31.44)	トルクリミット 振動大
	玉	SiC			6.49		
	保持器	SUS304			19.84		
4	平板	ステライト	20h	0.2~1	2.12	X (9.93)	振動大
	玉	サーメット			0.50		
	保持器	SUS304			7.31		
5	平板	ステライト	10.8h	0.2~1.5	0.87	X (5.02)	トルクリミット 振動大
	玉	SiC			2.17		
	保持器	SUS304			1.98		
6	平板	サーメット	20h	0.2~0.3	0.17	△ (0.31)	振動大
	玉	サーメット			0.08		
	保持器	SUS304			0.06		
7	平板	サーメット	20h	0.2~0.6	0.83	X (10.02)	振動大
	玉	SUS440C			8.12		
	保持器	SUS304			1.07		
8	平板	SiC	12h	0.2~1.5	2.24	X (11.27)	トルクリミット 振動大
	玉	サーメット			4.83		
	保持器	SUS304			4.20		
9	平板	SiC	20h	0.2~0.6	0.67	△ (2.71)	振動大
	玉	SiC			1.85		
	保持器	SUS304			0.19		
10	平板	SUS440C	20h	0~0.2	0.06	○ (0.40)	振動小
	玉	SUS440C			0.06		
	保持器	グラファイト			0.28		
11	平板	SUS440C	20h	0~0.2	0.06	○ (0.69)	振動小
	玉	サーメット			0.08		
	保持器	グラファイト			0.55		
12	平板	ステライト	20h	0~0.2	0.25	○ (1.16)	振動小
	玉	サーメット			0.08		
	保持器	グラファイト			0.83		
13	平板	SiC	20h	0.1~0.3	0.34	△ (1.94)	振動小
	玉	SiC			0.50		
	保持器	グラファイト			1.10		

<平板：SUS440C>



<玉：SUS440C>



<保持器：SUS304>

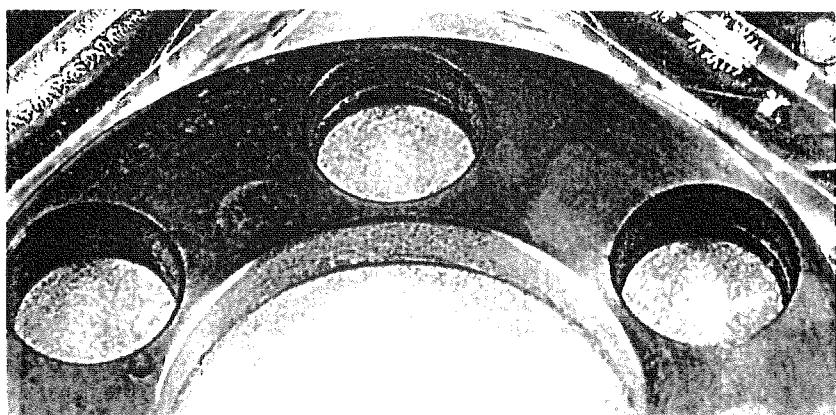
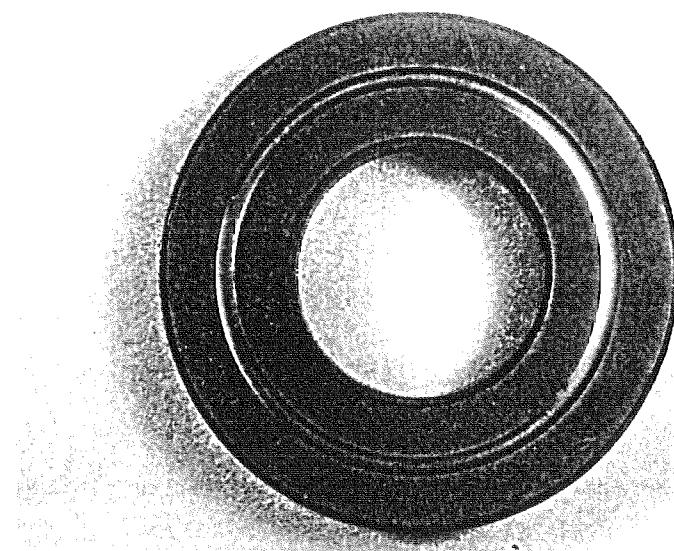


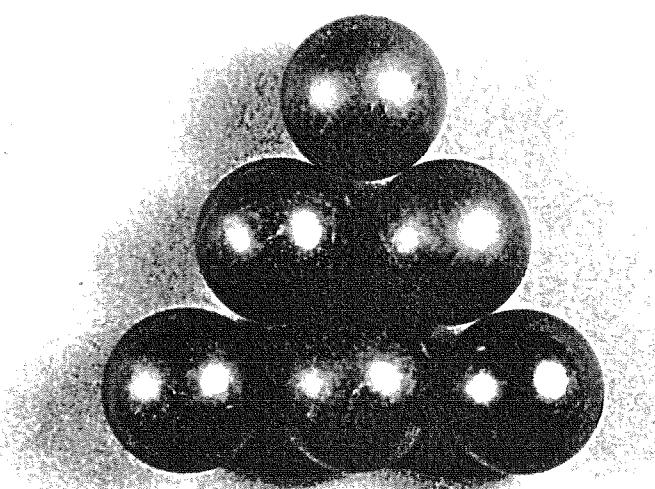
Photo 4.2-1 試験後試験片の外観 (No.1)

This is a blank page.

<平板：SUS440C>



<玉：サーメット>



<保持器：SUS304>

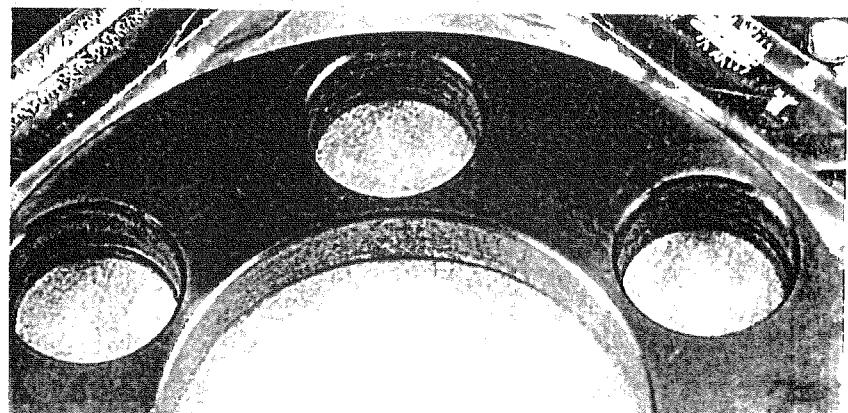
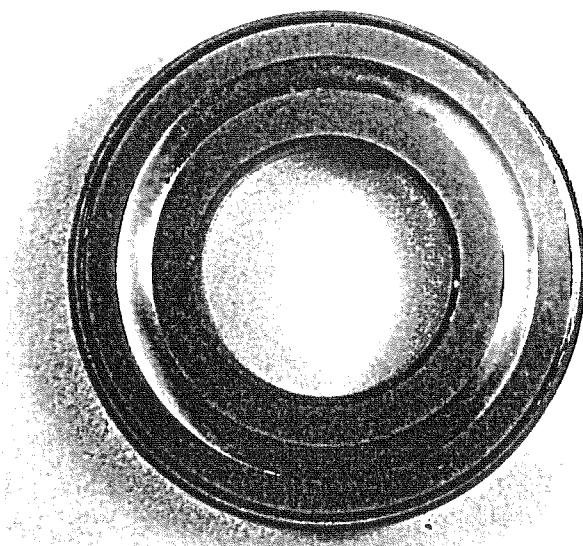


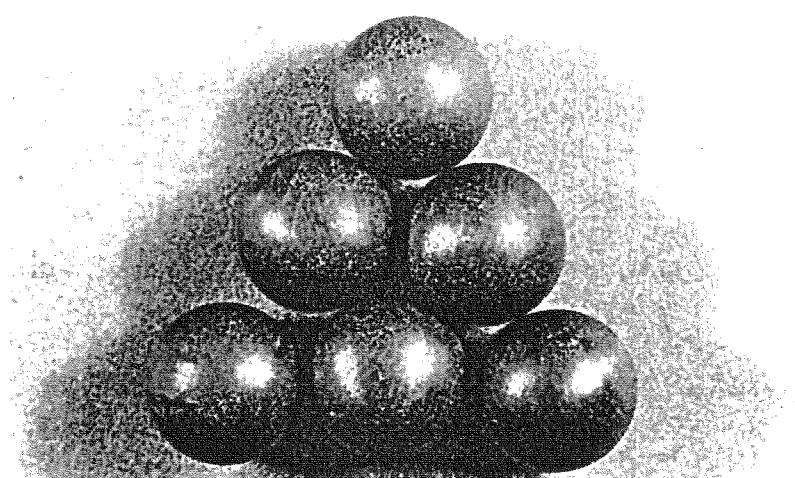
Photo 4.2-2 試験後試験片の外観 (No.2)

This is a blank page.

<平板 : SUS440C>



<玉 : SiC>



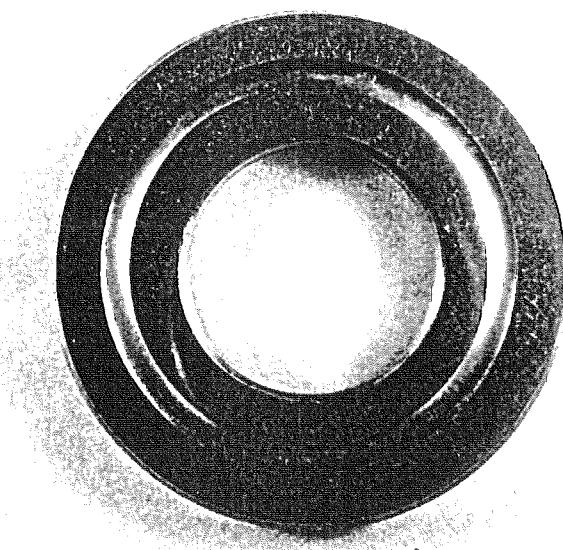
<保持器 : SUS304>



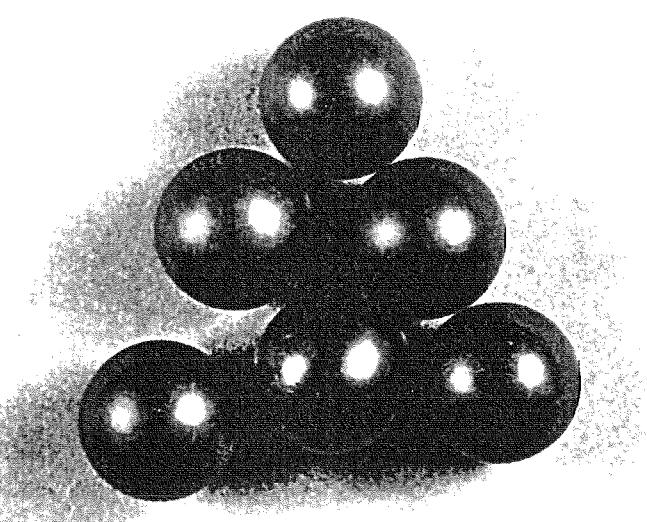
Photo 4.2-3 試験後試験片の外観 (No.3)

This is a blank page.

<平板：ステライト>



<玉：サーメット>



<保持器：SUS304>

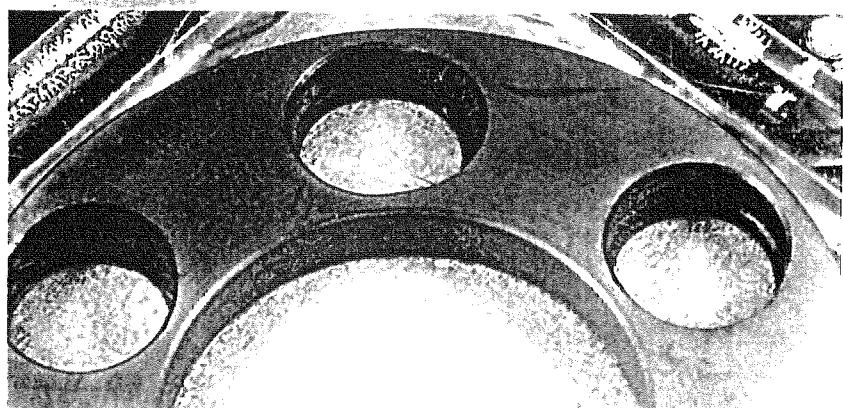
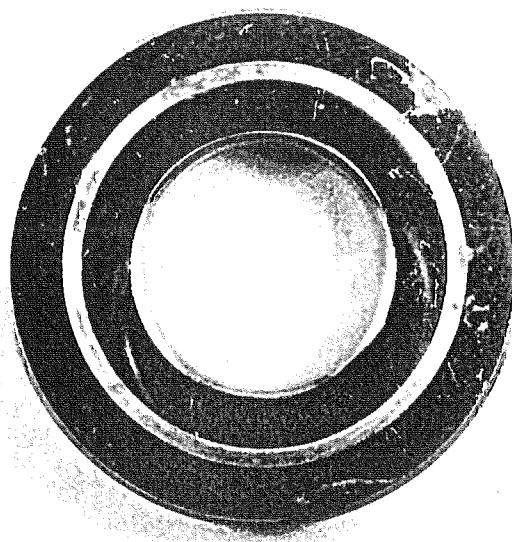


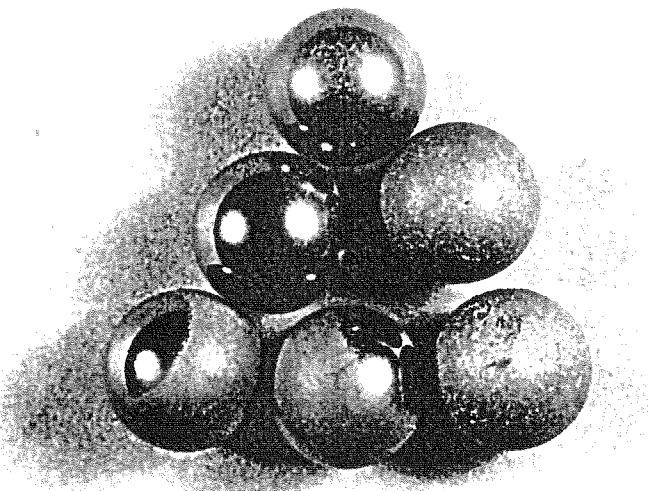
Photo 4.2-4 試験後試験片の外観 (No.4)

This is a blank page.

<平板：ステライト>



<玉：SiC>



<保持器：SUS304>

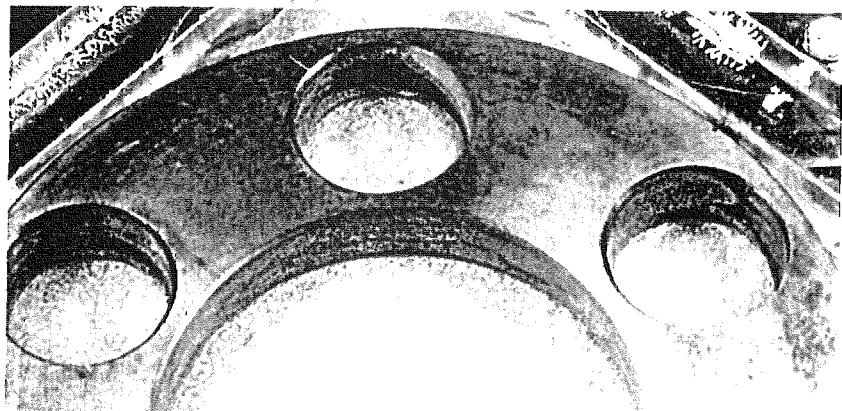
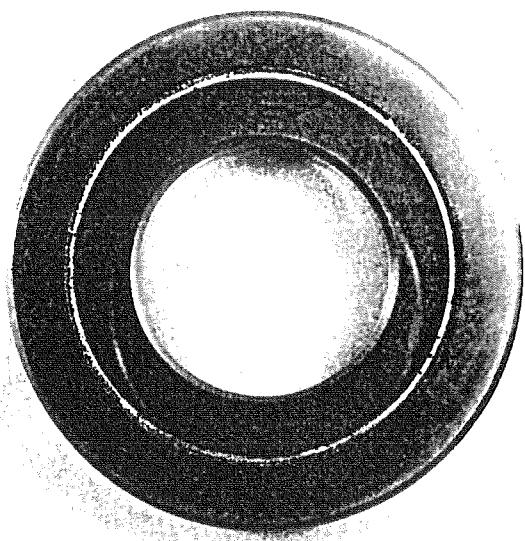


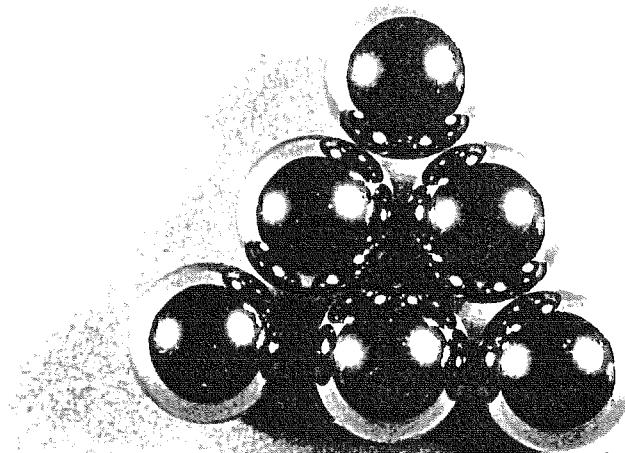
Photo 4.2-5 試験後試験片の外観 (No.5)

This is a blank page.

<平板：サーメット>



<玉：サーメット>



<保持器：SUS304>

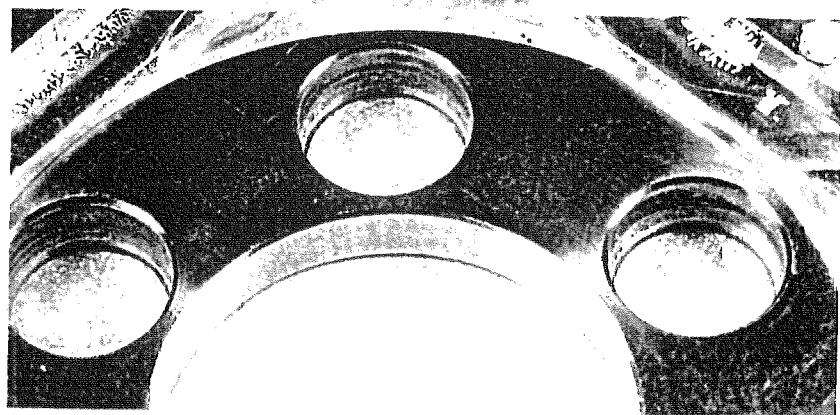
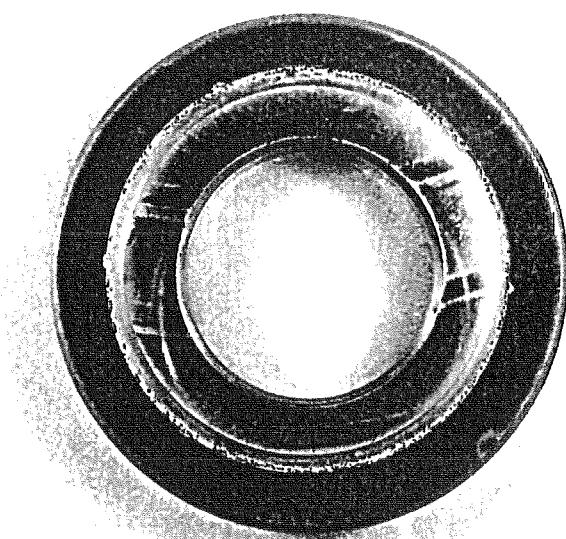


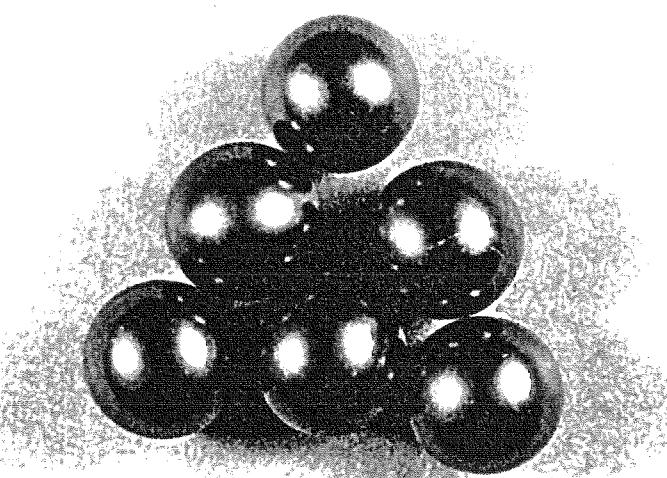
Photo 4.2-6 試験後試験片の外観 (No.6)

This is a blank page.

<平板：サーメット>



<玉：SUS440C>



<保持器：SUS304>

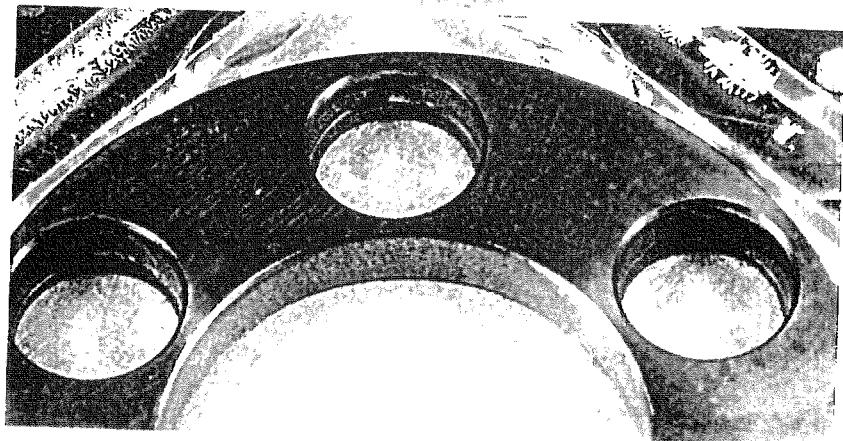
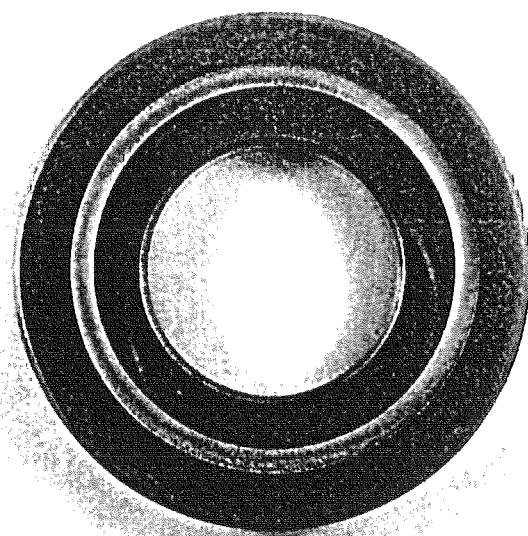


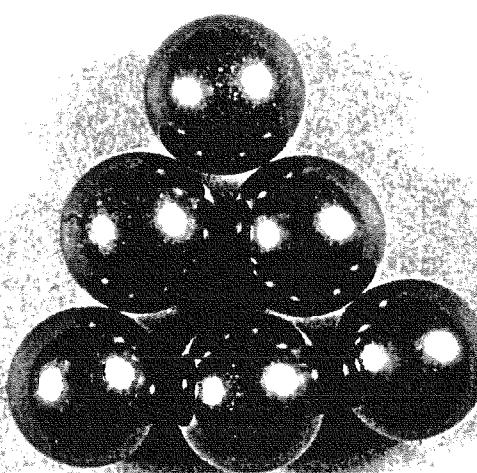
Photo 4.2-7 試験後試験片の外観 (No.7)

This is a blank page.

<平板：SiC>



<玉：サーメット>



<保持器：SUS304>

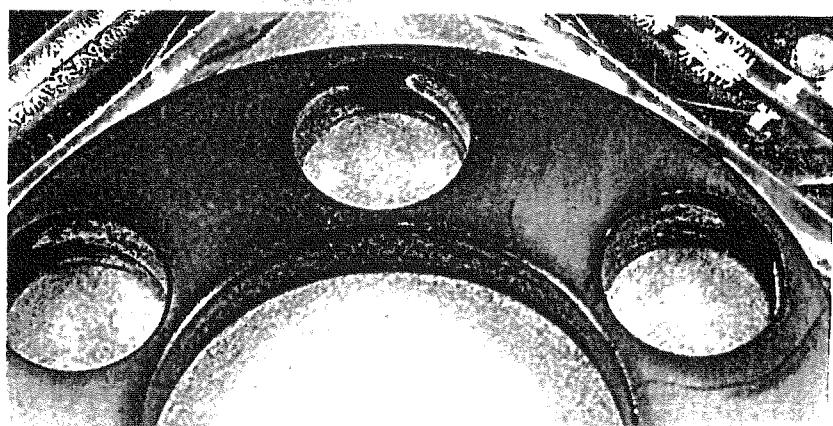
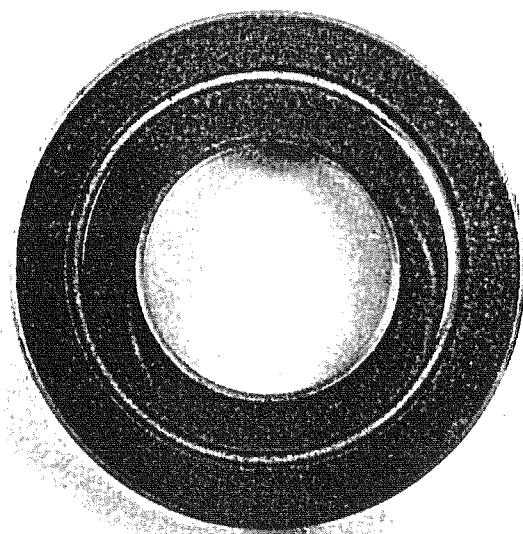


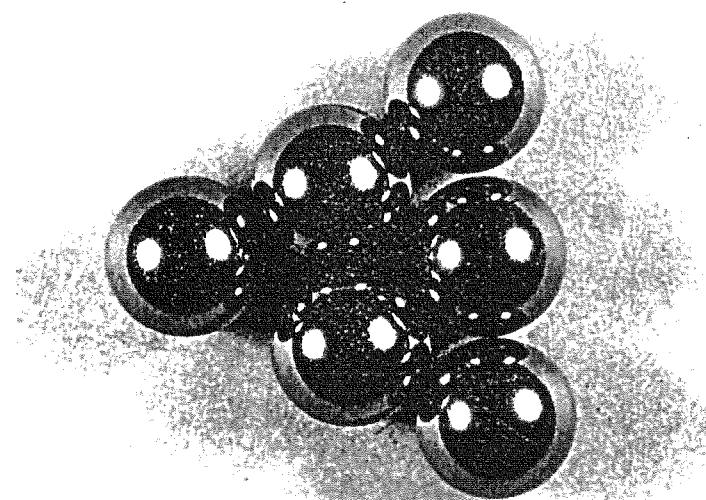
Photo 4.2-8 試験後試験片の外観 (No.8)

This is a blank page.

<平板：SiC>



<玉：SiC>



<保持器：SUS304>

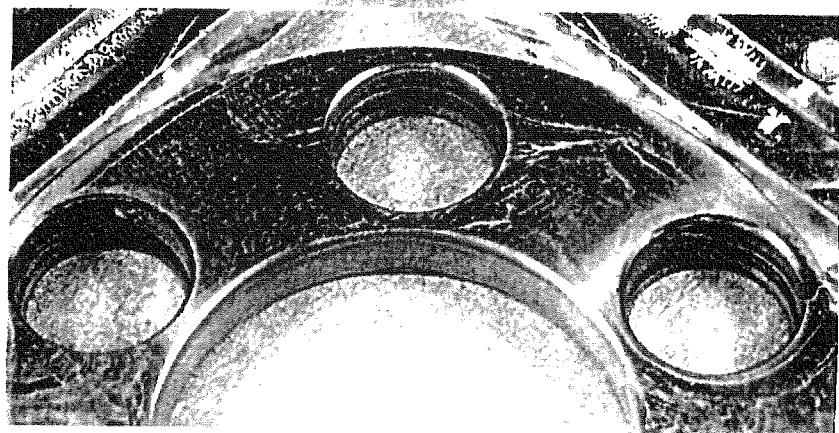
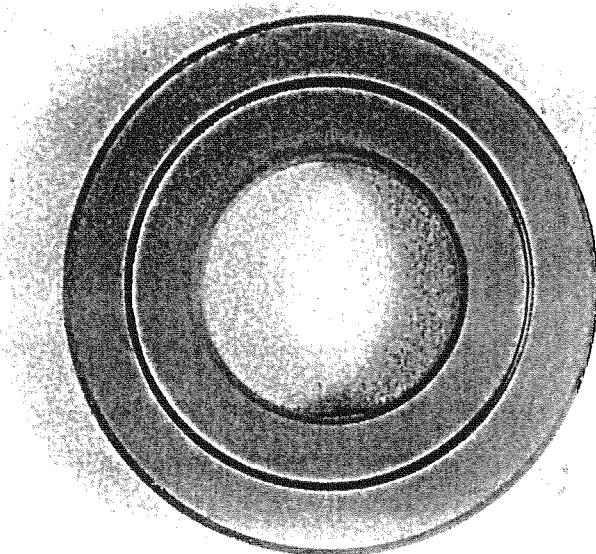


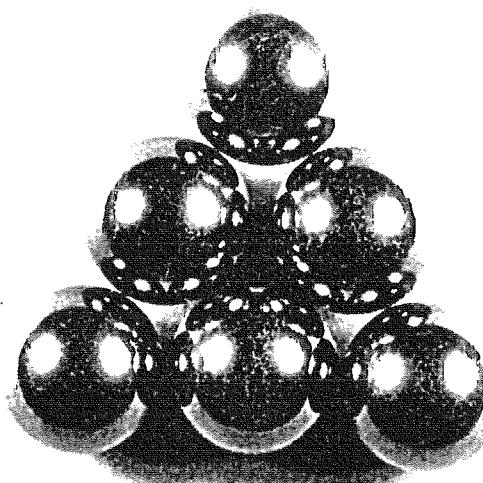
Photo 4.2-9 試験後試験片の外観 (No.9)

This is a blank page.

<平板:SUS440C>



<玉:SUS440C>



<保持器:グラファイト>

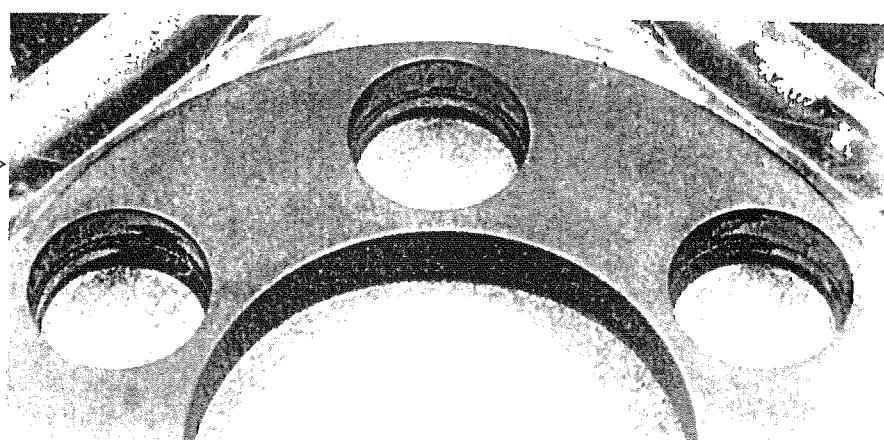
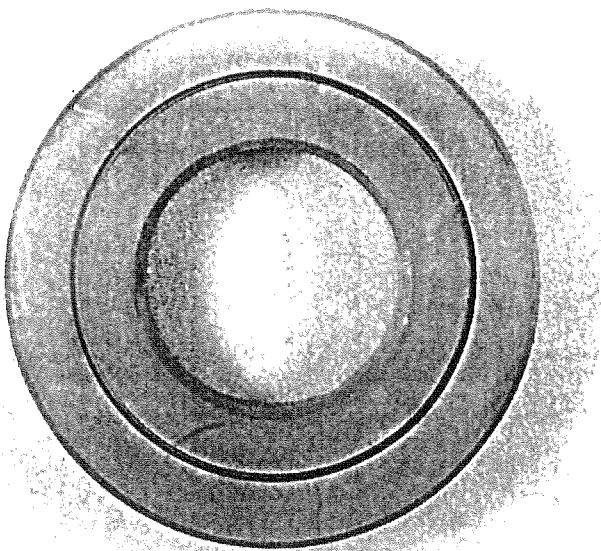


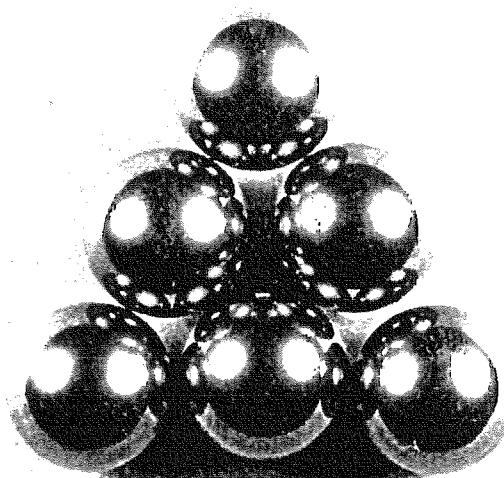
Photo 4.2-10 試験後試験片の外観 (No.10)

This is a blank page.

<平板：SUS440C>



<玉：サーメット>



<保持器：グラファイト>

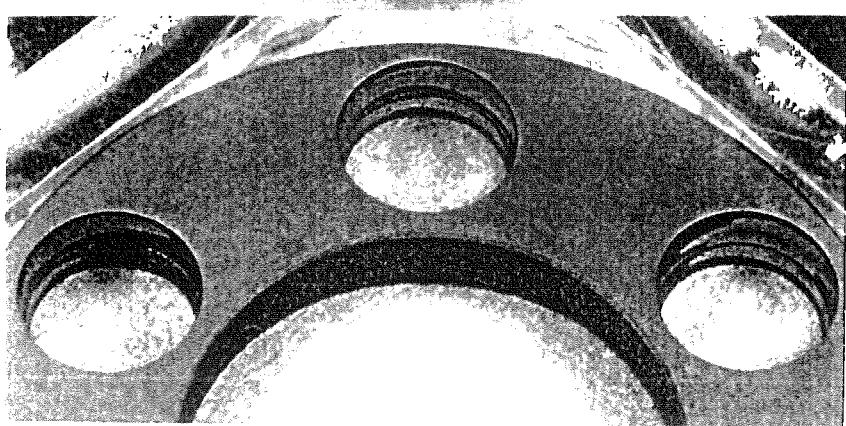
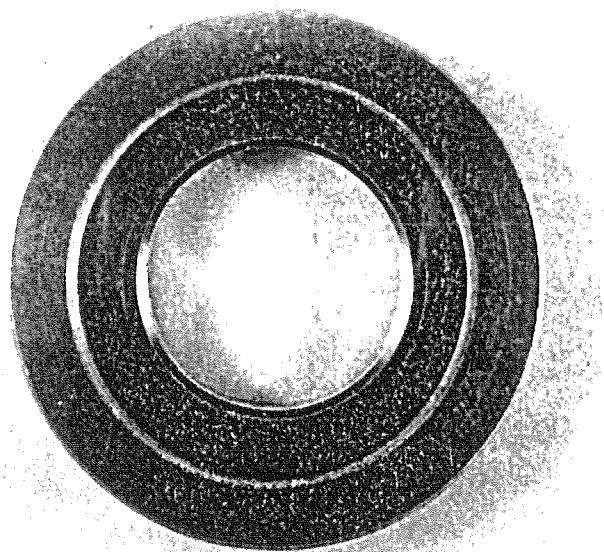


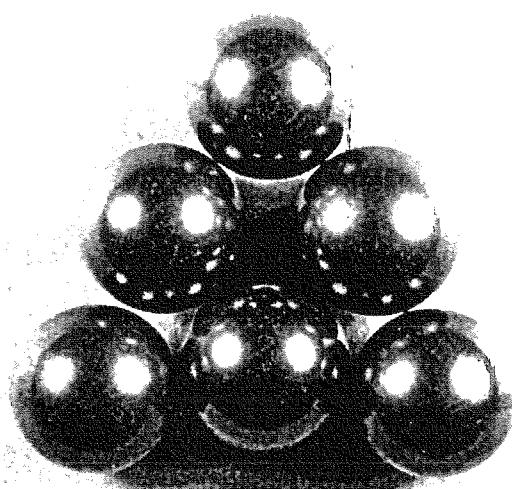
Photo 4.2-11 試験後試験片の外観 (No.11)

This is a blank page.

<平板：ステライト>



<玉：サーメット>



<保持器：グラファイト>

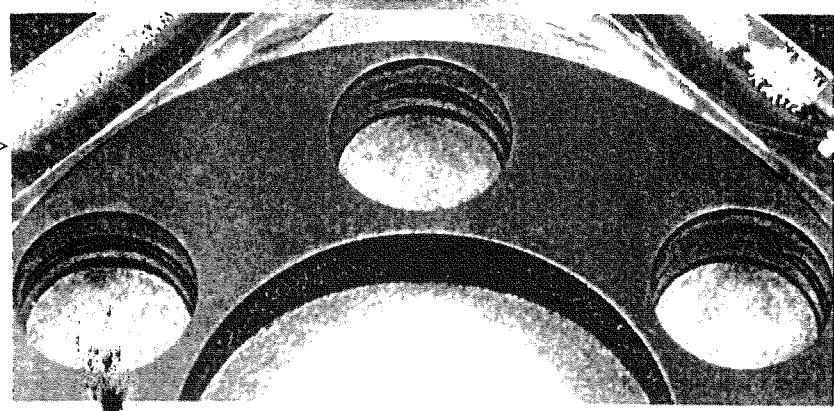
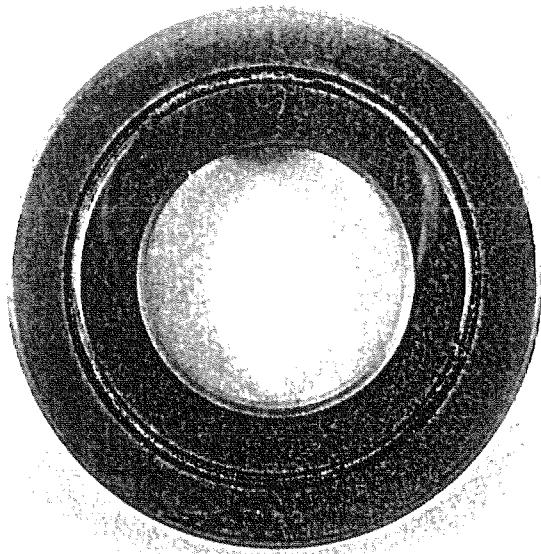


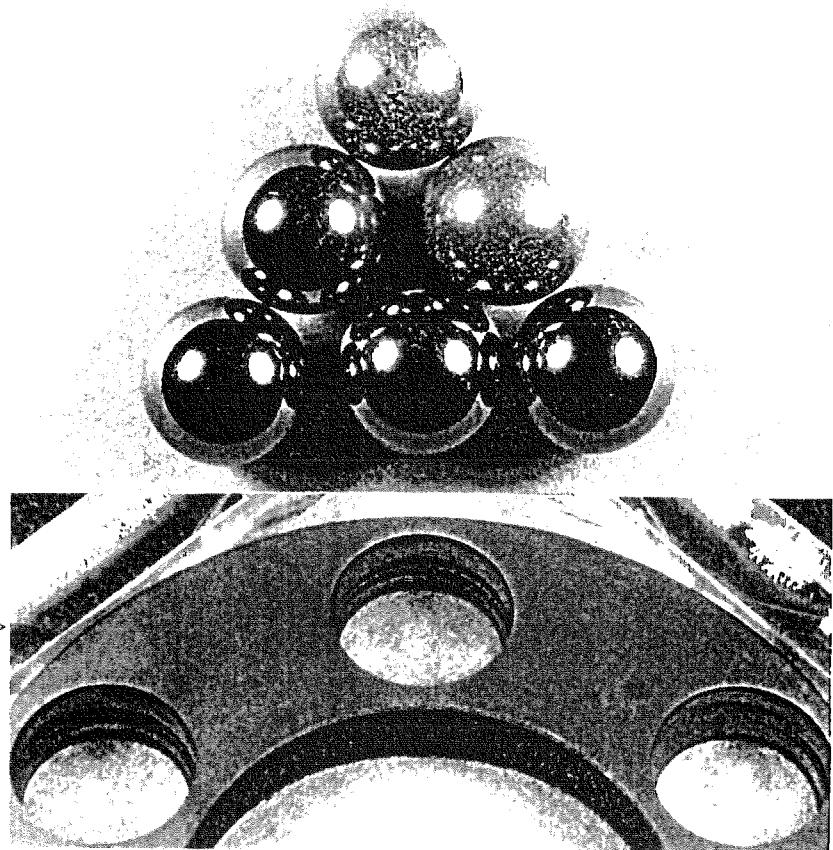
Photo 4.2-12 試験後試験片の外観 (No.12)

This is a blank page.

<平板：SiC>



<玉：SiC>



<保持器：グラファイト>

Photo 4.2-13 試験後試験片の外観 (No.13)

This is a blank page.

4.5 耐用性試験

1) 試験方法

スクリーニング試験の結果より、耐用性試験の試験片は Table 4.8 に示す組合せを選定した。試験時間は、玉が軌道を転動して通過する回数（繰返し数）を基準にして、実機目標寿命に約 50 万回転の余裕をみた総回転数をクリアする条件として設定した。その他については、4.4 項のスクリーニング試験と同様に面圧と周速を実機条件に合わせた。

耐用性試験の試験条件を Table 4.9 に示す。

Table 4.8 耐用性試験の試験片組合せ

No.	平板試験片（内外輪）	玉	保持器
14	サーメット	サーメット	グラファイト
15	SUS440C	サーメット	グラファイト
16	ステライト No.1	サーメット	グラファイト

Table 4.9 耐用性試験の試験条件

項目	仕 様
雰囲気	320 ℃、12 MPa、水中
回転速度	185 rpm
周 速	0.373 m/s
面 圧	1900～2700 MPa (組合せ条件で異なる)
試験時間	384.6 h

2) 試験結果

耐用性試験及び試験後の試験片損傷状況（外観、形状、粗さ、真円度、重量変化等）の検査結果をまとめて Table 4.10-1～3 に示す。また、試験後試験片の外観を Photo 4.3-1～3 に示す。

試験は、3 種類の試験片とともに規定の 384.6 時間を満足した。試験中の回転トルク、振動は比較的低い傾向を示し、異常は認められなかった。

3) 評価

スクリーニング試験と同様に、平板試験片、玉、保持器の損傷度合（試験後の重量減少分を単位時間当たりの摩耗体積量に換算）を Table 4.11 に示す。

これより、No.14、No.15、No.16 の損傷度合（合計）は、各組合せともに $1\text{mm}^3/\text{h}$ 以下の良好な結果を示した。また、試験中の回転トルク（0～0.4 N·m）、振動も低く安定していた。よって、玉の材料にサーメット、保持器材にグラファイト、平板の材料にはサーメット、ステライト No.1、または SUS440C の組合せが良好であることが判った。

4.6 評価

スクリーニング試験及び耐用性試験における平板試験片、玉、保持器の摩耗度合について、Fig.4.3 にまとめて示す。

スクリーニング試験の結果からは、

- ・ 平板、玉の材料はサーメットが良好である。
- ・ SiC は他の材料の組合せより摩耗が大である。
- ・ グラファイトは自己潤滑性を含めた摩耗特性を向上させる効果がある。

また、耐用性試験の結果からは、

- ・ 玉にサーメット、保持器にグラファイト、平板にサーメット、ステライト No.1 または SUS440C の組合せが良好である。

これより、実機設計目標に耐える軸受材料としては、耐食性及び実機構造との整合性（主に熱膨張係数）等を考慮して以下を選定する。

- ・ 内外輪：ステライト
 - ・ 玉：サーメット
 - ・ 保持器：グラファイト

Table 4.10-1 耐用性試験結果一覧（組合せ No.14）

<No.14> ①試験時間：384.6時間クリア ②トルク：0～0.4N·m ③振動：小					
部品	材 料	項目	規 格	試 験 前	試験後 (384.6時間後)
平板試験片	サーメット	外観	_____	良好	転動部摩耗
		表面粗さ	Ra 0.1 μm 以下	0.02	_____
		形状、mm	_____	_____	幅 1.95 × 深 0.10
		硬さ	Hv 1500 以上	1700	_____
		重量、g	_____	78.42	0.14 減少
玉	サーメット	外観	_____	良好	ほぼ良好(光沢あり)
		表面粗さ	Ra 0.08 μm 以下	0.02	0.04
		真円度	1 μm 以下	0.15	0.46
		硬さ	Hv 1500 以上	1600	_____
		圧碎、MPa	_____	300 以上	300 以上
		寸法、mm	9.525	9.525	0.033～0.039 減少
		重量、g	6個の合計	16.28	0.14 減少
保持器	グラファイト	外観	_____	良好	ホケツ部摩耗 全体僅かに変色
		重量、g	_____	8.58	0.22 減少

Table 4.10-2 耐用性試験結果一覧（組合せ No.15）

<No.15> ①試験時間：384.6時間クリア ②トルク：0～0.4N·m ③振動：小					
部品	材 料	項目	規 格	試 験 前	試験後 (384.6時間後)
平板試験片	SUS440C	外観	_____	良好	転動部摩耗 転動部以外は黒色化
		表面粗さ	Ra 0.1 μm 以下	0.02	_____
		形状、mm	_____	_____	幅 1.75 × 深 0.08
		硬さ	HRc 55 以上	58	55.5
		重量、g	_____	99.02	0.08 減少
玉	サーメット	外観	_____	良好	ほぼ良好(光沢あり)
		表面粗さ	Ra 0.08 μm 以下	0.02	0.04
		真円度	1 μm 以下	0.15	0.57
		硬さ	Hv 1500 以上	1600	_____
		圧碎、MPa	_____	300 以上	300 以上
		寸法、mm	9.525	9.525	0.015～0.017 減少
		重量、g	6個の合計	16.29	0.02 減少
保持器	グラファイト	外観	_____	良好	ホケツ部摩耗 全体僅かに変色
		重量、g	_____	8.59	0.09 減少

Table 4.10-3 耐用性試験結果一覧 (組合せ No.16)

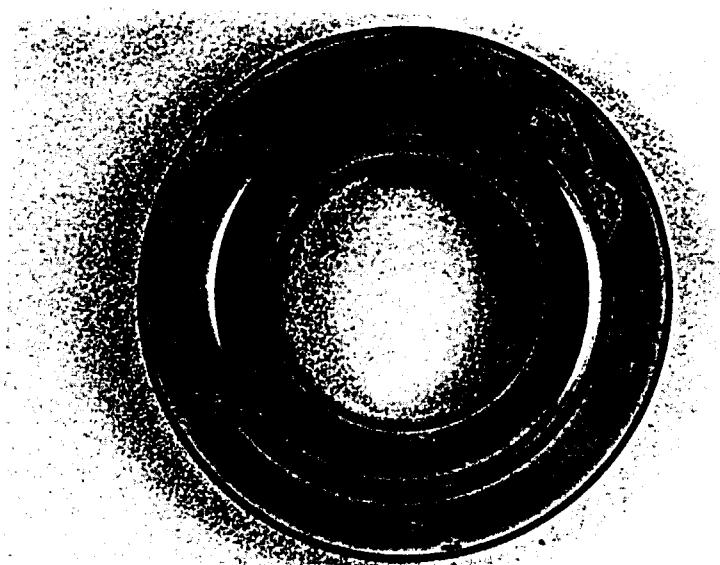
<No.16> ①試験時間 : 384.6時間クリア ②トルク : 0.2 ~ 0.4N·m ③振動 : 小					
部品	材 料	項 目	規 格	試 験 前	試験後 (20時間後)
平板試験片	ステライト	外観	_____	良好	転動部摩耗 玉当たり面腐食跡あり
		表面粗さ	Ra 0.1 μm 以下	0.02	_____
		形状、mm	_____		幅 2.40 × 深 0.15
		硬さ	HRc 50 以上	57	_____
		重量、g	_____	103.59	0.29 減少
玉	サーメット	外観	_____	良好	ほぼ良好(光沢あり)
		表面粗さ	Ra 0.08 μm 以下	0.02	0.07
		真円度	1 μm 以下	0.15	4.9
		硬さ	Hv 1500 以上	1600	_____
		圧碎、MPa	_____	300 以上	300 以上
		寸法、mm	9.525	9.525	0.005 ~ 0.014 減少
		重量、g	6個の合計	16.28	0.04 減少
保持器	グラファイト	外観	_____	良好	ポケット部摩耗 回転輪側面回転輪 当たりによる摩耗
		重量、g	_____	8.59	0.35 減少

Table4.11 耐用性試験結果

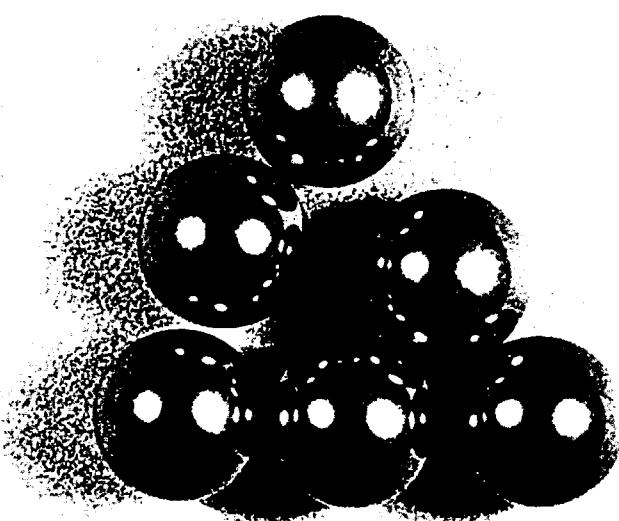
No.	組合せ (部品／材料)		試験 時間	トルク N·m	摩耗度合 mm^3/h	判定 (損傷合計 mm^3/h)	備考
14	平板	サーメット	384.6h	0~0.4	0.06	○ (0.44)	振動小
	玉	サーメット			0.06		
	保持器	グラファイト			0.32		
15	平板	SUS440C	384.6h	0~0.4	0.03	○ (0.17)	振動小
	玉	サーメット			0.01		
	保持器	グラファイト			0.13		
16	平板	ステライト	384.6h	0.2~0.4	0.09	○ (0.62)	振動小
	玉	サーメット			0.02		
	保持器	グラファイト			0.51		

This is a blank page.

<平板：サーメット>



<玉：サーメット>



<保持器：グラファイト>

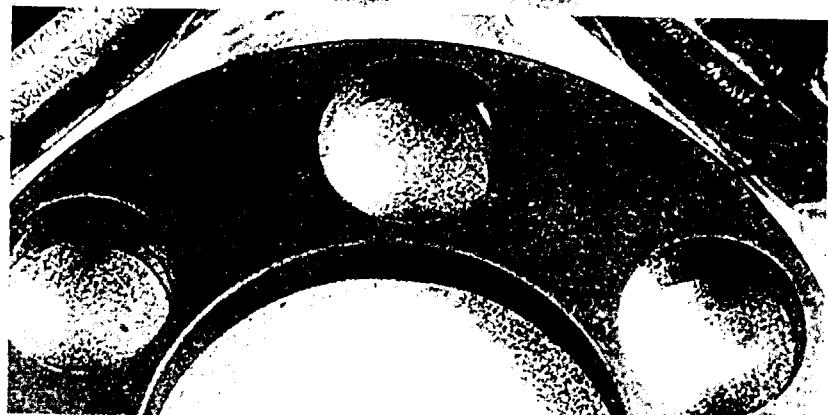
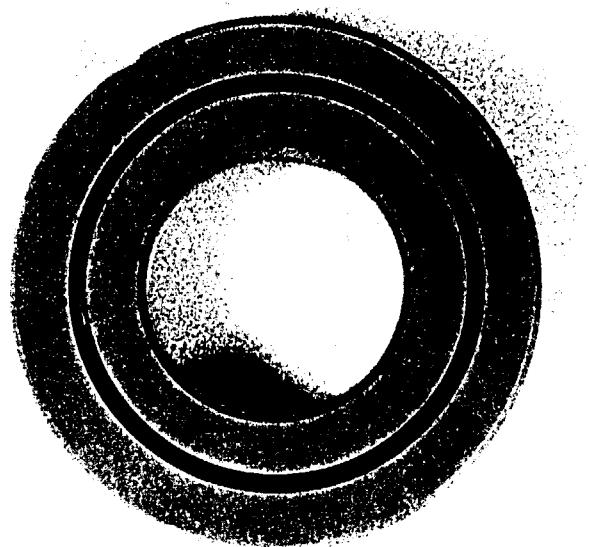


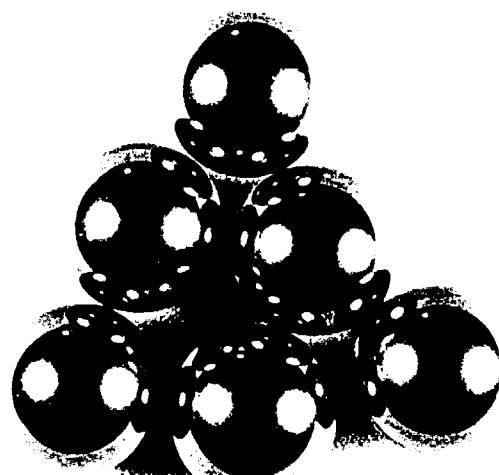
Photo 4.3-1 試験後試験片の外観 (No.14)

This is a blank page.

<平板：SUS 440C>



<玉：サーメット>



<保持器：グラファイト>

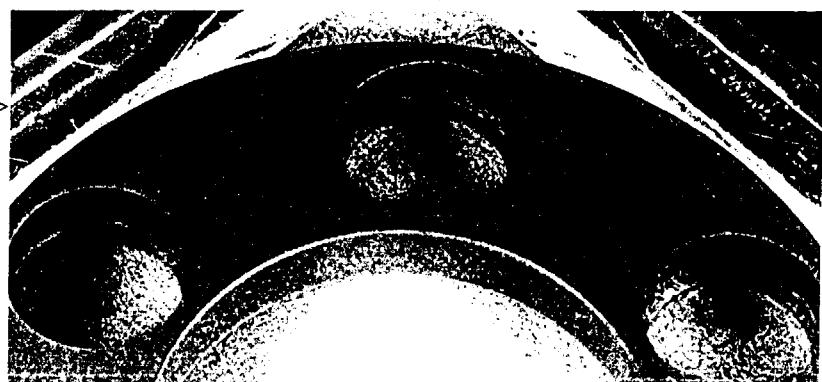
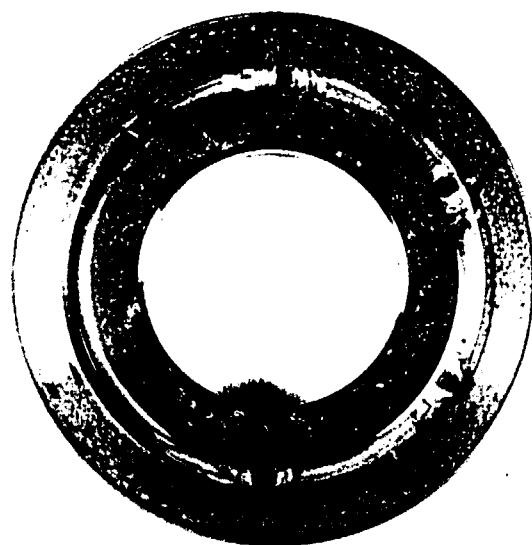


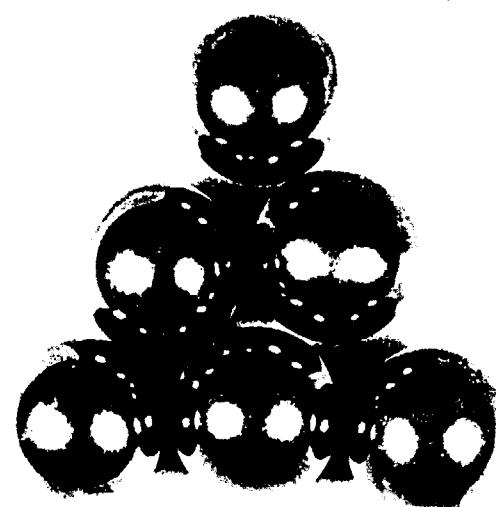
Photo 4.3-2 試験後試験片の外観 (No.15)

This is a blank page.

<平板：ステライト>



<玉：サーメット>



<保持器：グラファイト>

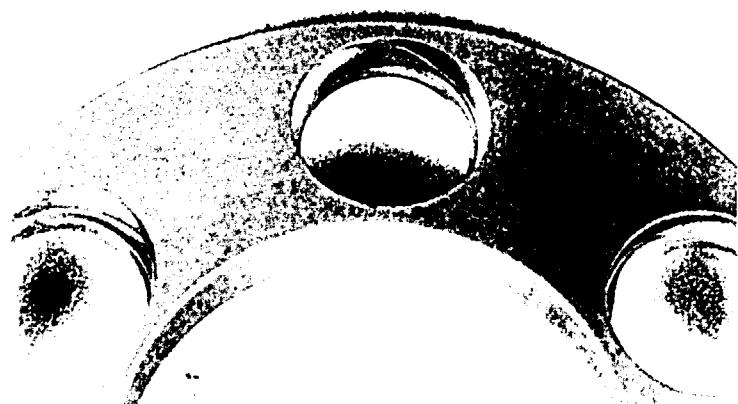


Photo 4.3-3 試験後試験片の外観 (No.16)

This is a blank page.

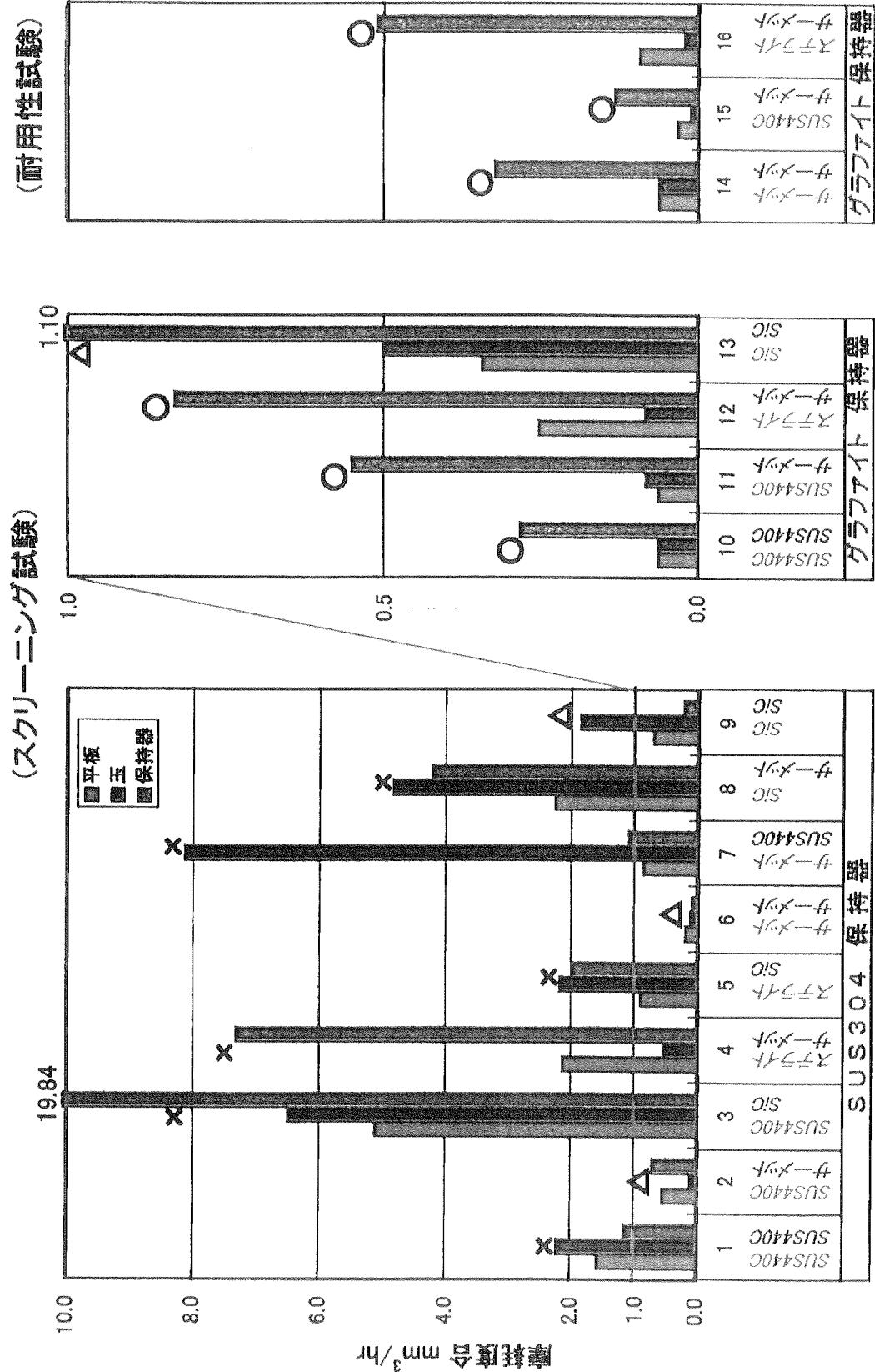


Fig. 4.3 軸受転がり摩耗試験結果

This is a blank page.

5. 高温水中軸受試験

5.1 概要

高温高圧水中で使用できる軸受を開発するため、前章までに述べてきたように材料の調査検討から始まって、オートクレーブ試験、転がり磨耗試験等の種々の開発試験を行ってきた。その結果、実機の雰囲気条件で使用できる軸受としては、現状では内外輪にステライト No.1、玉にサーメット、保持器にグラファイトの組合せが有望であることが分かった。

この結果を受けて実機軸受の構造検討を行い、軸受形式、製造性、取扱い上の安全性等を考慮して実機軸受形状を決定した。

高温水中軸受試験は、以上の検討結果を踏まえて実機形状の軸受を製作し、実機条件の温度、圧力、荷重に合わせて試験を行った。

5.2 実機軸受の製作検討

軸受の構造、特にグラファイト製保持器の構造を中心に以下検討した。設計条件を Table 5.1 に示す。

Table 5.1 実機軸受の設計条件

項目	仕様
使用温度	室温～310°C
雰囲気	加圧軽水
軸受材料	内外輪：SUS316 + ステライト No.1 盛金 玉：サーメット 保持器：グラファイト

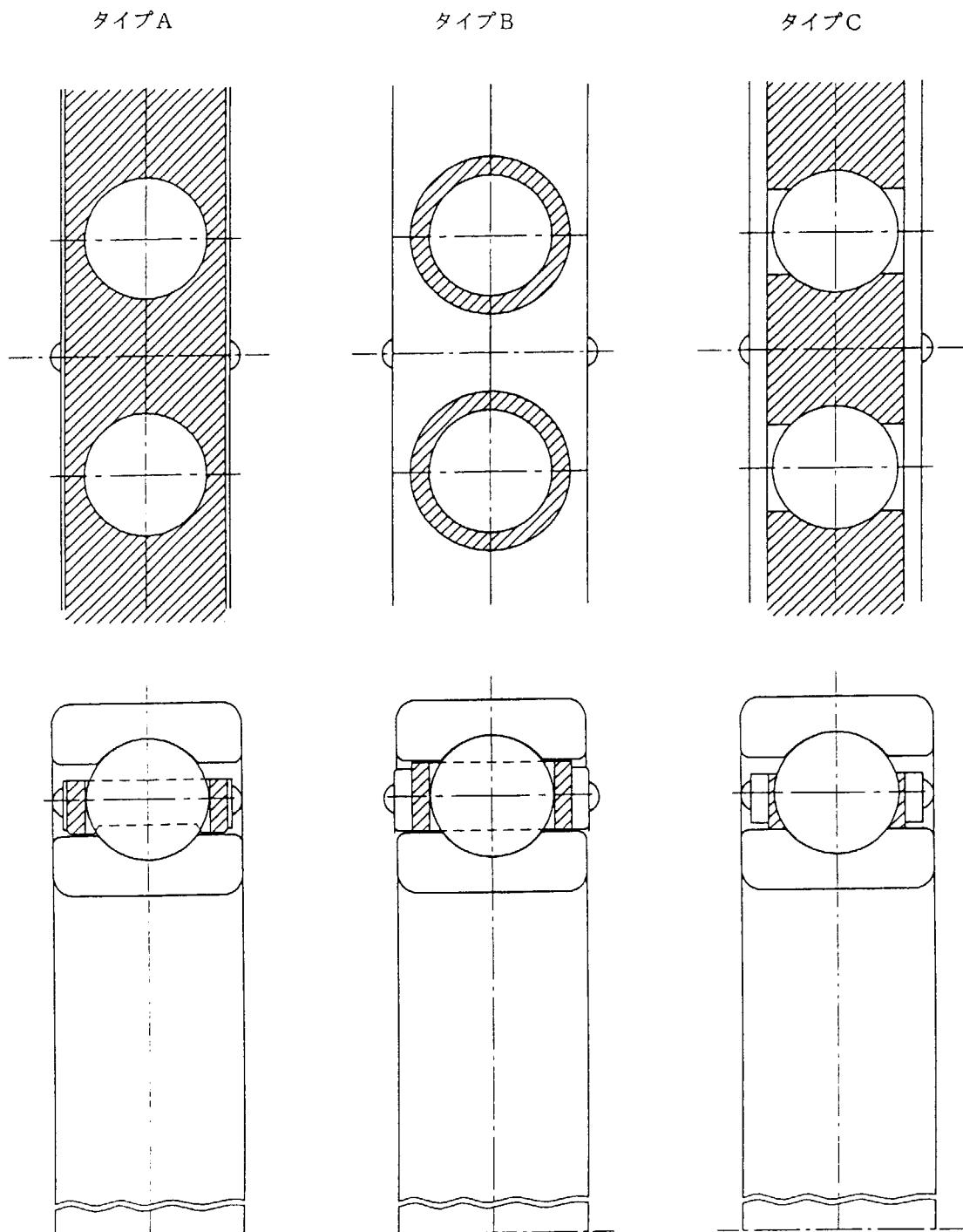
1) 軸受の構造

軸受の形式としては、制御棒駆動機構の荷重条件等から深溝玉軸受とアンギュラ玉軸受が選出される。アンギュラ玉軸受は要求機能上、予圧を掛けて使うことが不可欠であり、玉と内外輪の熱膨張係数が大きく異なることから予圧を一定に保つことが難しい。よって、本制御棒駆動機構の軸受形式は深溝玉軸受を選択する。

Fig. 5.1 に保持器にグラファイトを用いた場合の構造案を示す。これらの特徴と性能比較を Table 5.2 に示す。これよりタイプ A とタイプ B が有望であるが、グラファイトと SUS316 の熱膨張係数が大きく異なるため、熱サイクル試験を行って温度変化による保持器構造の健全性を確認した上で選択することとした。

Table 5.2 保持器構造案の特徴と性能比較 (Fig.5.1 参照)

	タイプA (合わせリング)	タイプB (ハーフシリング)	タイプC (セパレータ)
構 造	上下2つのグラファイトリングで玉玉1つ1つをグラファイト半割シリンドラの中に入れる。金属製側板で補強をはさみ、金属製側板で補強。	玉の間に玉をガイドするグラファイト製クラウンリングではさむ。	玉の間に玉をガイドするグラファイトセパレータを入れ、上下を金属板で補強。
特 徴	保持器本体はグラファイト。上下の金属リングで補強。	保持器本体は金属。ボケット部にグラファイトを設ける。	玉の間にグラファイトをはさみ込む。グラファイトは上下側板で保つ。
性 能	潤滑性	グラファイト量 大 (○) 軽い (○) やや低い (△) 重い (△)	グラファイト量 小 (△) 重い (△) 高い (○) やや高い (○) 軽い (○)
評 価	重 量	(○)	(△)
	強 度	(△)	(△)
	耐久性	(○)	(△)
	製作性	リベット穴の位置決めに注意が必要 (○)	従来製品に類似 (○)
	評 値	(○)	(△)
			組立が難しく入れ溝が必要 (△)



(斜線部分は保持器を示す)

Fig.5.1 深溝玉軸受のグラファイト保持器構造案

2) 热サイクル試験

①試験方法

保持器構造の異なるタイプAとタイプBの2種類の試験体について、温度パターンを変えて実施した。試験条件をTable 5.3に示す。

設計検討をもとに試作した軸受試験体の基本構造をFig.5.3及びFig.5.4、熱サイクル試験装置をFig.5.5に示す。

Table 5.3 热サイクル試験の試験条件

項目	仕様
温 度	320°C
温度パターン	5サイクル (Fig.5.2)
雰囲気	空 気
荷 重	2.5 kN
試験体	内外輪: SUS440C 玉 : SUS440C 保持器: グラファイト

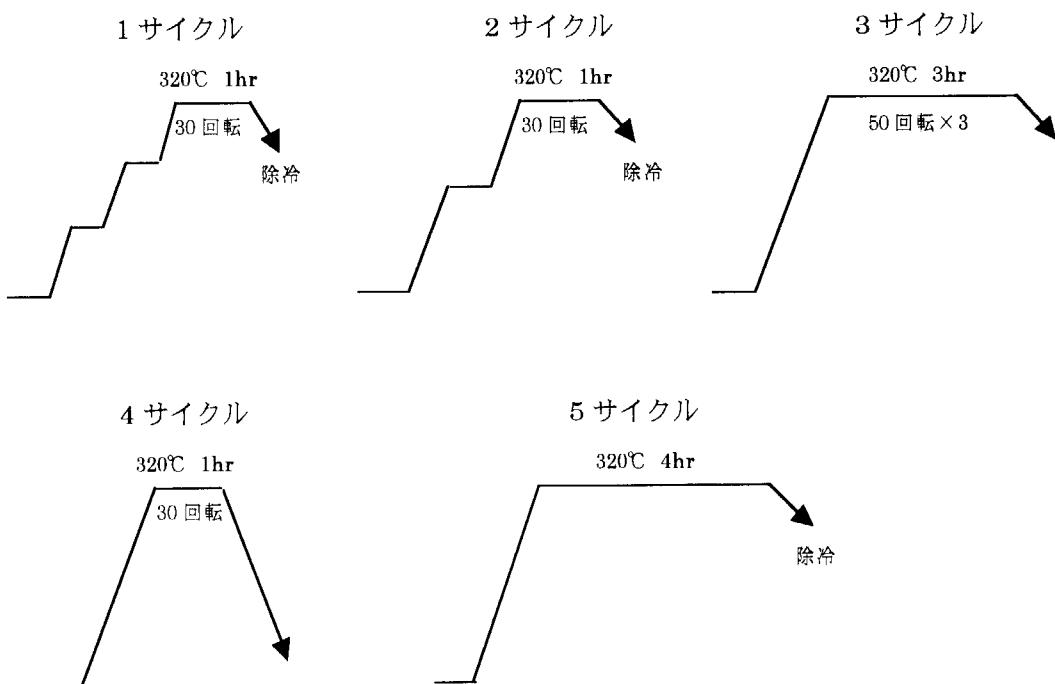


Fig. 5.2 热サイクルのパターン

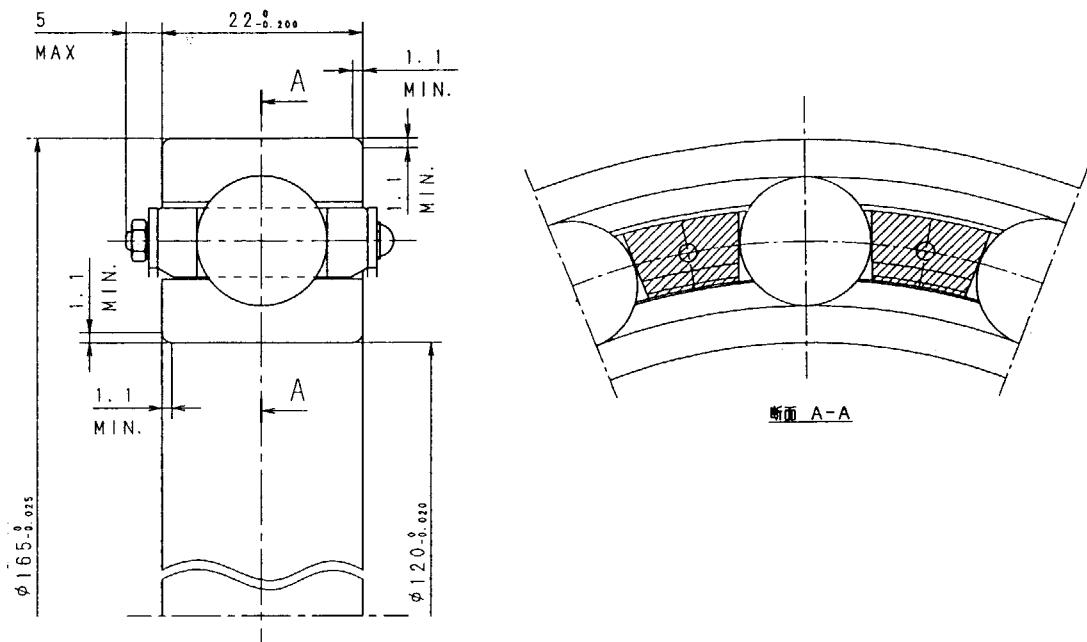


Fig.5.3 タイプ A 軸受試験体

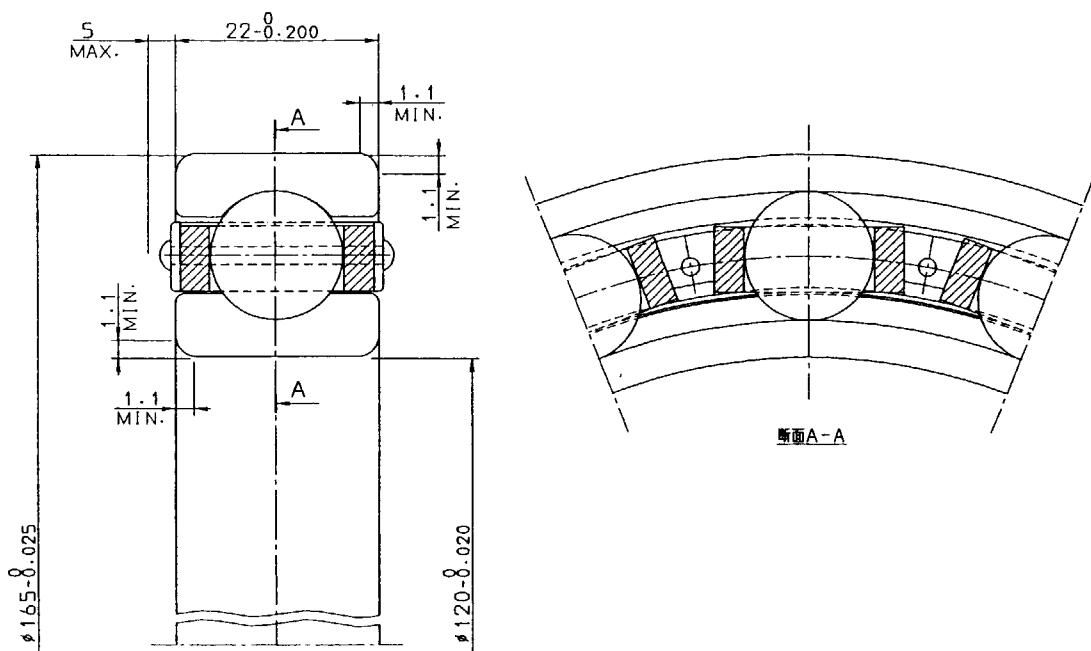


Fig.5.4 タイプ B 軸受試験体

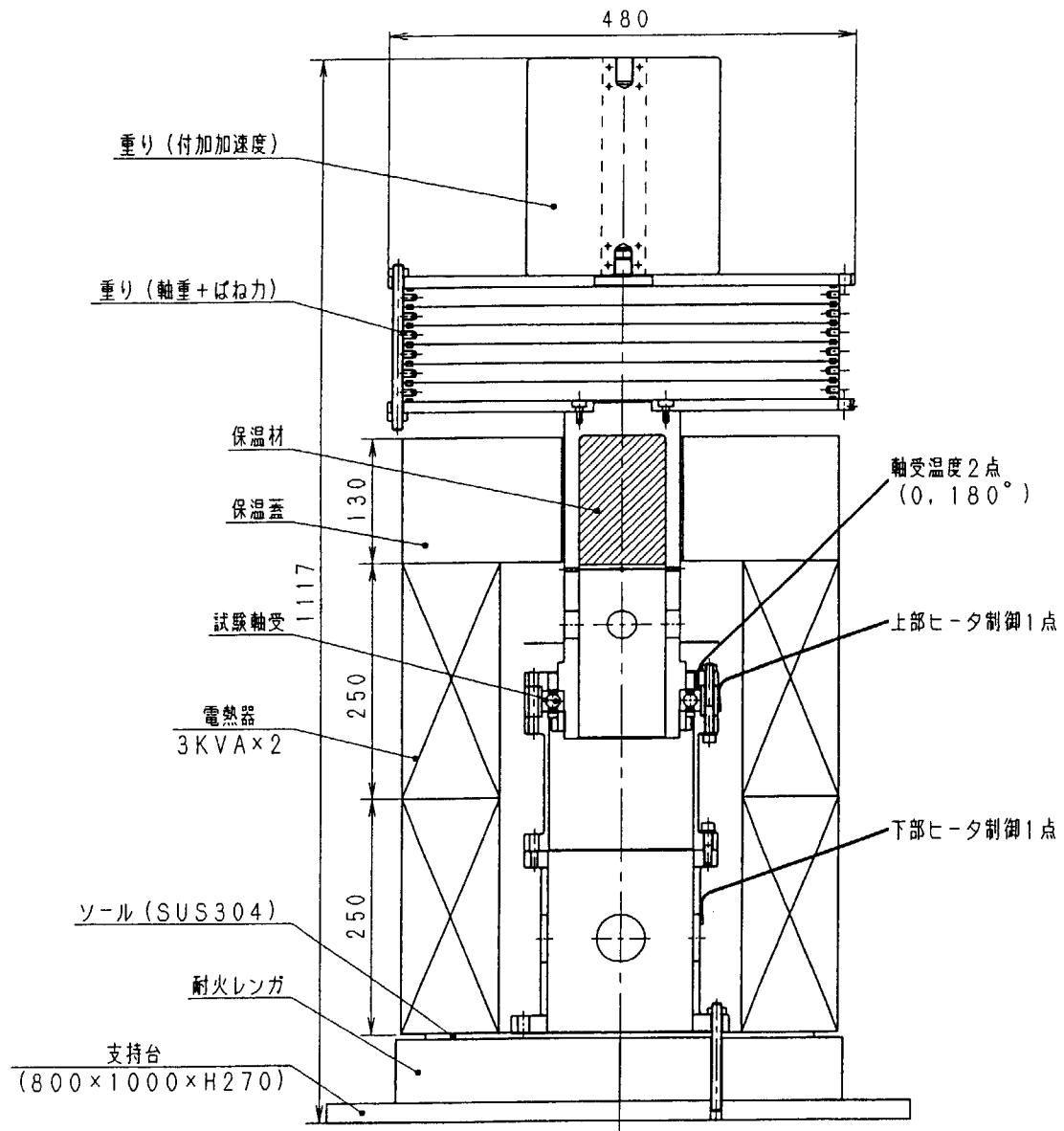


Fig.5.5 軸受熱サイクル試験装置

②試験結果

Table 5.4 にタイプ A とタイプ B のトルク計測データを示す。1 サイクルでは初期トルクに比べ高温でのトルクが増加するが、2 サイクル目からは殆ど変化が見られなかった。回転は最後まで円滑で異常音等は検知されなかった。

試験後検査においても、保持器に割れ等の異常は無く、ボール接触面に若干の摩耗跡が見られたが最大 10μ 程度で不具合は無かった。

③評 價

構造の異なるタイプ A とタイプ B のグラファイト製保持器を組込んだ 2 種類の軸受について、温度変化による保持器構造の健全性においては両者ともに問題はなく、また、その差異も殆ど認められなかった。

よって、保持器の構造は製造組立時の取扱い上の安全性、供用中消耗破損した時の対応性、コスト等を考慮して以下を選定する。

保持器の構造：タイプ B を採用する。

Table 5.4 トルク計測データ

サイクル	タイプ A 軸受			タイプ B 軸受		
	0° 位置温度°C	180° 位置温度°C	トルク N・m	0° 位置温度°C	180° 位置温度°C	トルク N・m
1	27.1	27.3	0.4	16.7	16.5	0.5
	172.2	171.9	0.5	127.4	127.0	0.8
	251.0	250.6	0.8	210.2	210.3	0.8
	321.4 (30 回転後)	320.6	1.4	321.8	320.4 (30 回転後)	1.6
2	28.4	28.2	0.9	17.8	17.6	1.6
	198.2	197.5	1.1	163.1	163.0	1.1
	321.1 (30 回転後)	319.8	1.4	320.6	319.2 (30 回転後)	1.6
	14.4	14.2	1.1	18.6	18.5	1.2
3	321.8 (150 回転後)	320.9	1.3	321.0	319.8 (150 回転後)	1.3
	21.8	21.6	1.2	21.0	20.9	1.5
4	322.2 (30 回転後)	321.2	1.3	321.6	319.0 (30 回転後)	1.4
	36.7	36.2	1.1	11.6	11.7	0.7
5	321.9	320.2	1.2	321.4	320.5	1.3

5.3 試験体

試験体としては、サイズの異なる上部軸受と下部軸受を実機仕様で製作した。Fig. 5.6 に上部軸受、Fig. 5.7 に下部軸受を示す。また、これら上下部軸受の構成図を Fig. 5.8、外観写真を Photo 5.1 に示す。

Table 5.5 に軸受試験体の主要目を示す。

Table 5.5 軸受試験体主要目

	上部軸受	下部軸受
型式	自己潤滑型単列深溝玉軸受	
基本寸法		
内径	85 mm	120 mm
外径	120 mm	165 mm
厚さ	18 mm	22 mm
玉径	10.3188 mm	14.2875 mm
材 料		
内外輪	SUS316 母材にステライト No.1 盛金	
玉	サーメット	
保持器	グラファイト (補強材 SUS304)	

5.4 試験装置

「圧力容器構造規格」で定めるところの第一種圧力容器を試験部として、循環ループ及び加熱装置を設けた高温水中試験装置である。Fig. 5.9 にフローシート、Fig. 5.10 に高温水中試験装置を示す。また、本試験装置の設備仕様を Table 5.6 に示す。

Table 5.6 高温水中試験装置の設備仕様

項目	仕様
型式	円筒ルツボ型
最高使用温度	350°C
最高使用圧力	15 MPa
試験部容積	0.0588 m ³ (内径 224.6mm、高さ 1400mm)
循環流量	5 l/h
加熱器	三相 200V ~ 30kW

符号 ITEM	名 称 TITLE	数 量 No.	材 质 MATERIAL	備 考 NOTE
1	外輪	1	SUS316 ステライト丸1	
2	内輪	1	SUS316 ステライト丸1	
3	玉(10.3188)	1	サーメット	
4	保持器	1組	カーボン/SUS304	

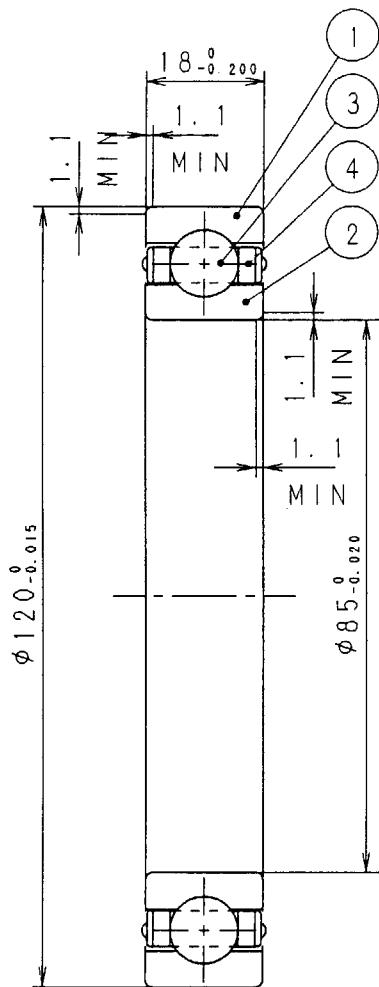


Fig.5.6 上部軸受

序号 ITEM	名 称 TITLE	数 量 No.	材 质 MATERIAL	備 要 NOTE
1	外輪	1	SUS316 ステライト地1	
2	内輪	1	SUS316 ステライト地1	
3	玉(14.2875)	1	サーメット	
4	保持器	1組	カーボン/SUS304	

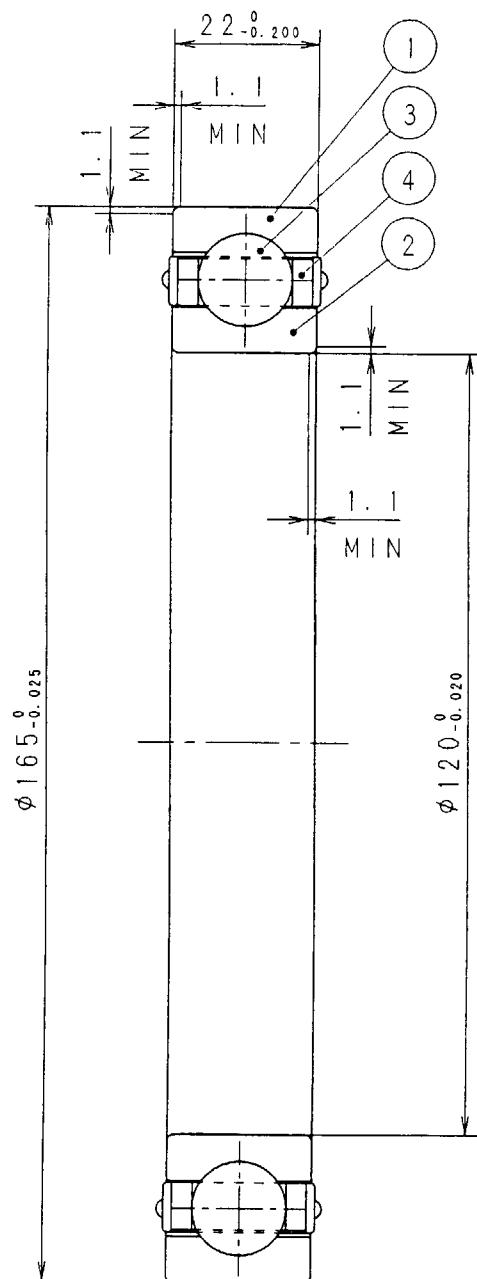


Fig.5.7 下部軸受

This is a blank page.

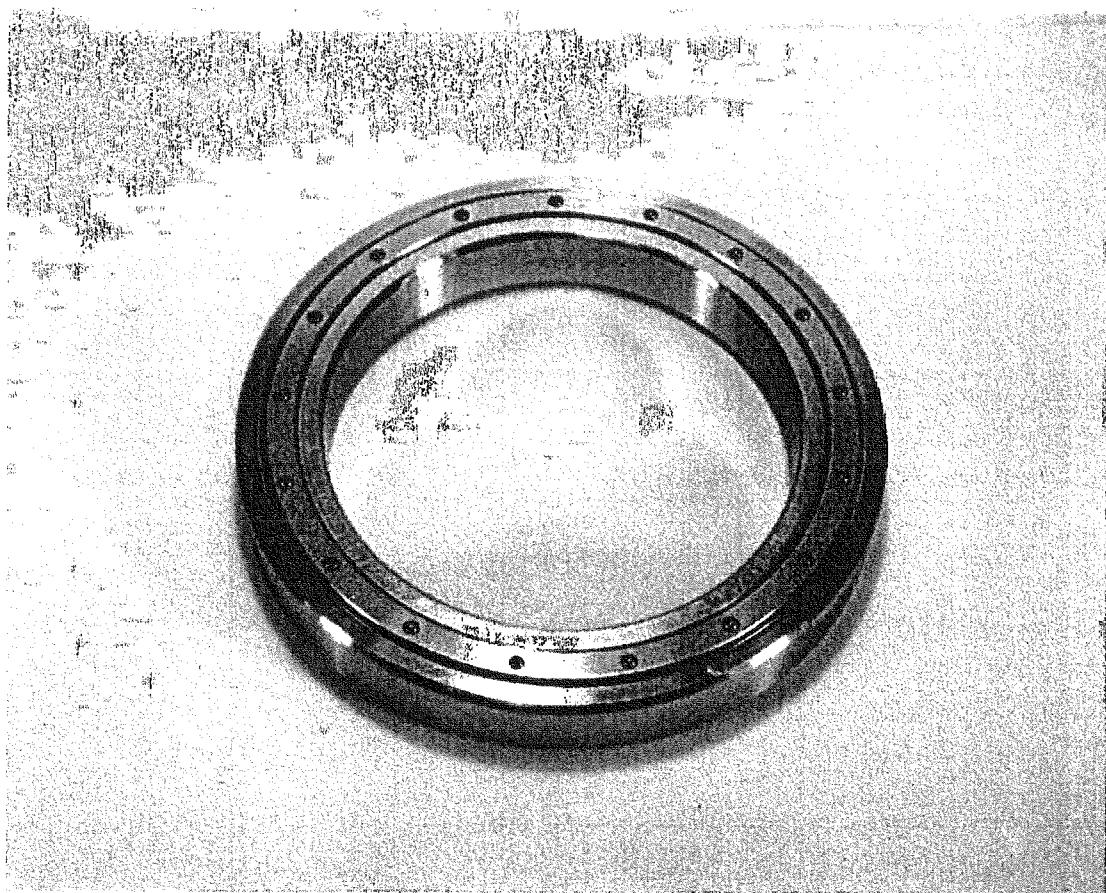


Photo 5.1 軸受試験体外観

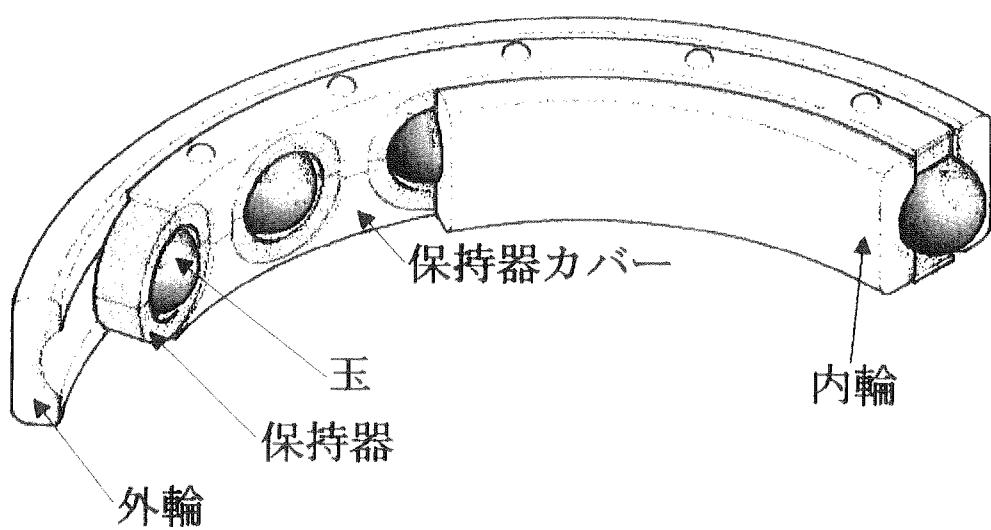


Fig. 5.8 軸受構成図

This is a blank page.

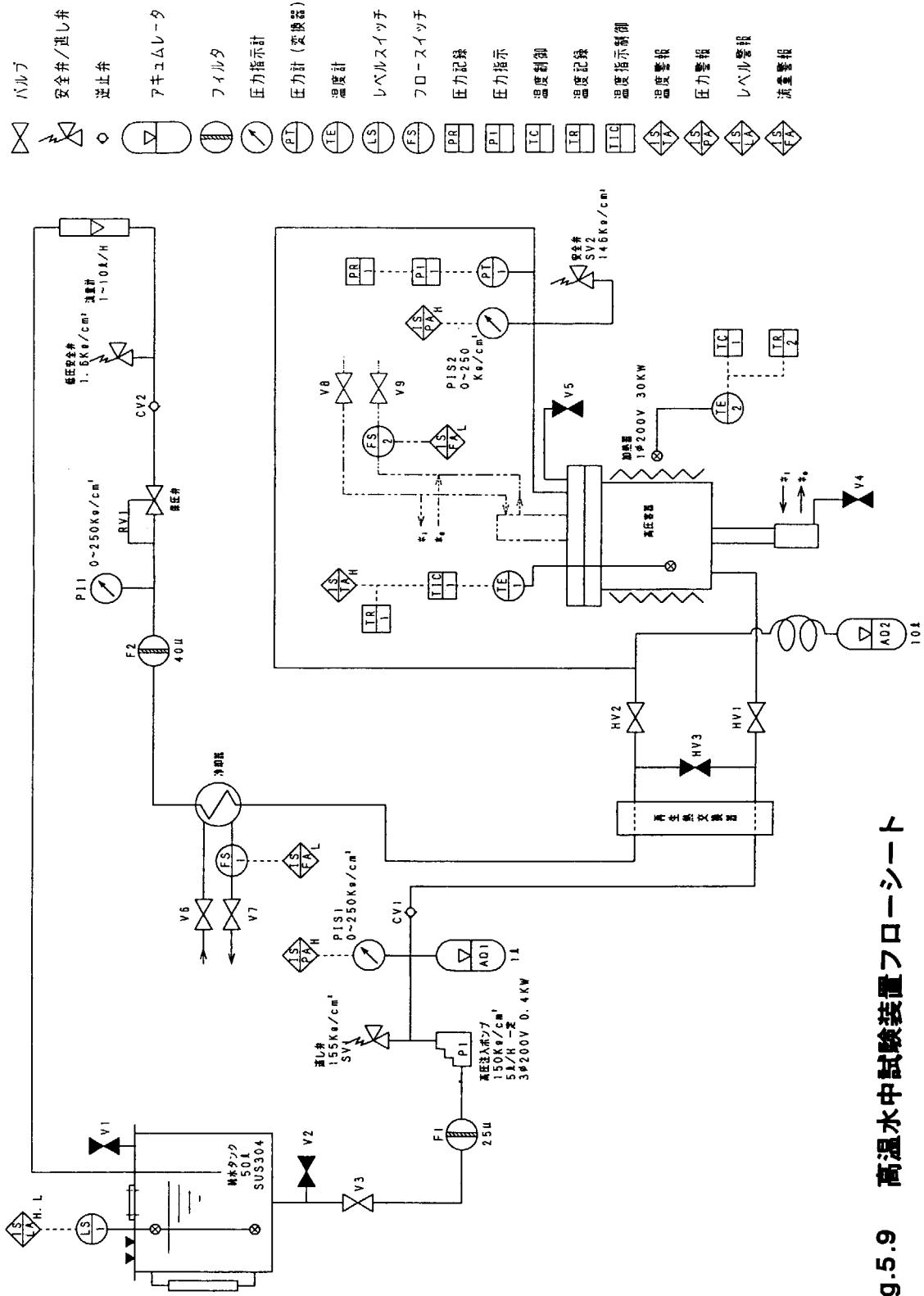


Fig. 5.9 高温水中試験装置フローシート

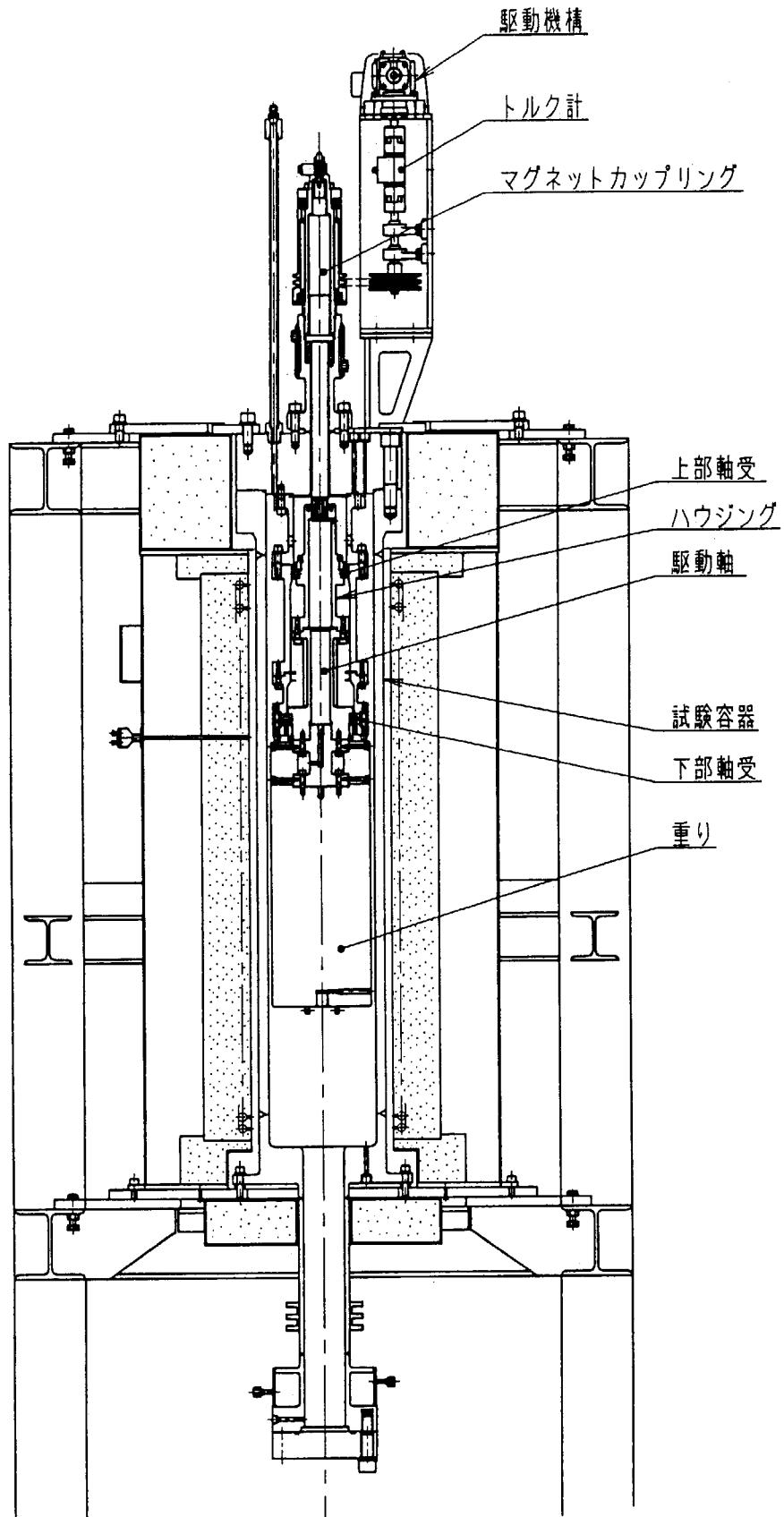


Fig.5.10 高温水中試験装置

5.5 高温水中軸受試験

1) 試験方法

試験体の上部軸受及び下部軸受を実機使用条件に合わせて試験装置に組込み (Fig.5.10 参照) 、高温水中での軸受耐久試験を行った。

軸受は、試験容器の上部に設けた駆動機構 (ギアードモータ) により、V ベルトで連結されたマグネットカップリングを介して回転するが、回転速度は駆動機構の制御の関係から実機の 50rpm に対して 60rpm とした。

試験装置の運転は、平日のみの高温連続運転を基本パターンとして昇温及び降温を行った。軸受の連続回転試験もこれと併行して行い、試験中のトルク測定は規定回転数 (原則 1 万回転又は 2 万回転) 毎に起動トルク及び平均トルクを測定した。試験条件を Table 5.7 に示す。

Table 5.7 高温水中軸受試験の試験条件

項目	仕様
温度	310 ℃
圧力	12 MPa
回転速度	60 rpm (正転)
荷重	1.8 kN
水質	純水 (脱酸素処理)

2) 試験結果

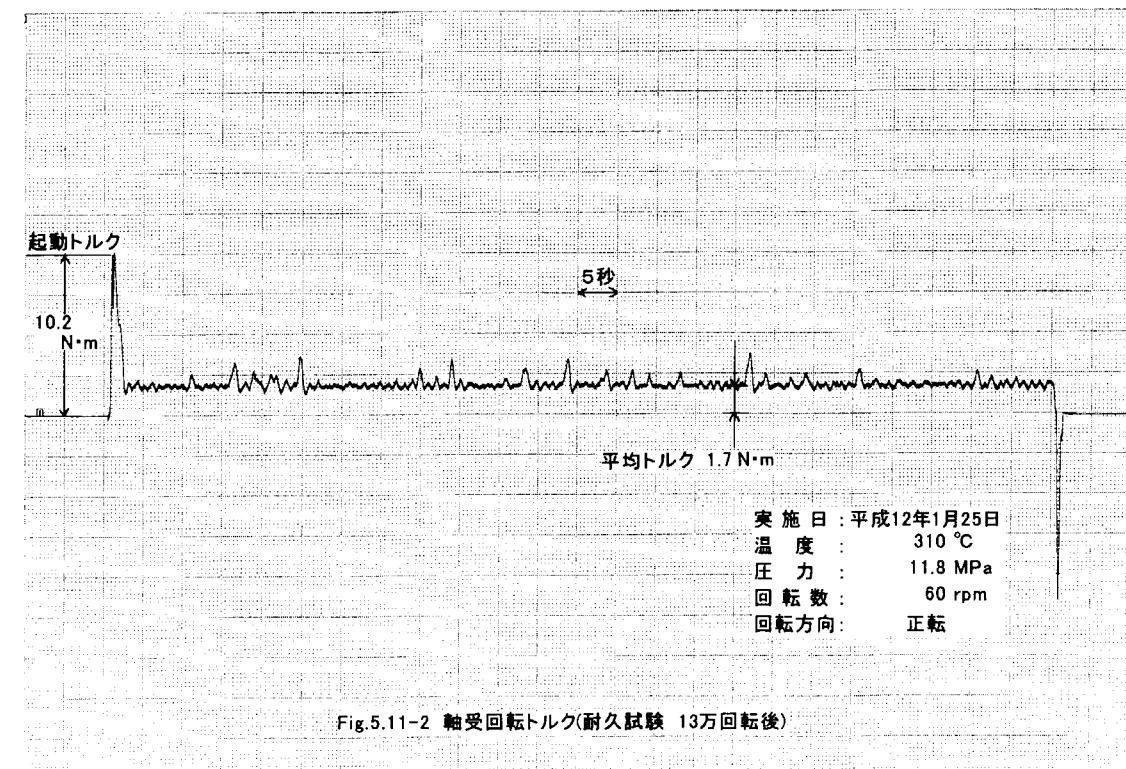
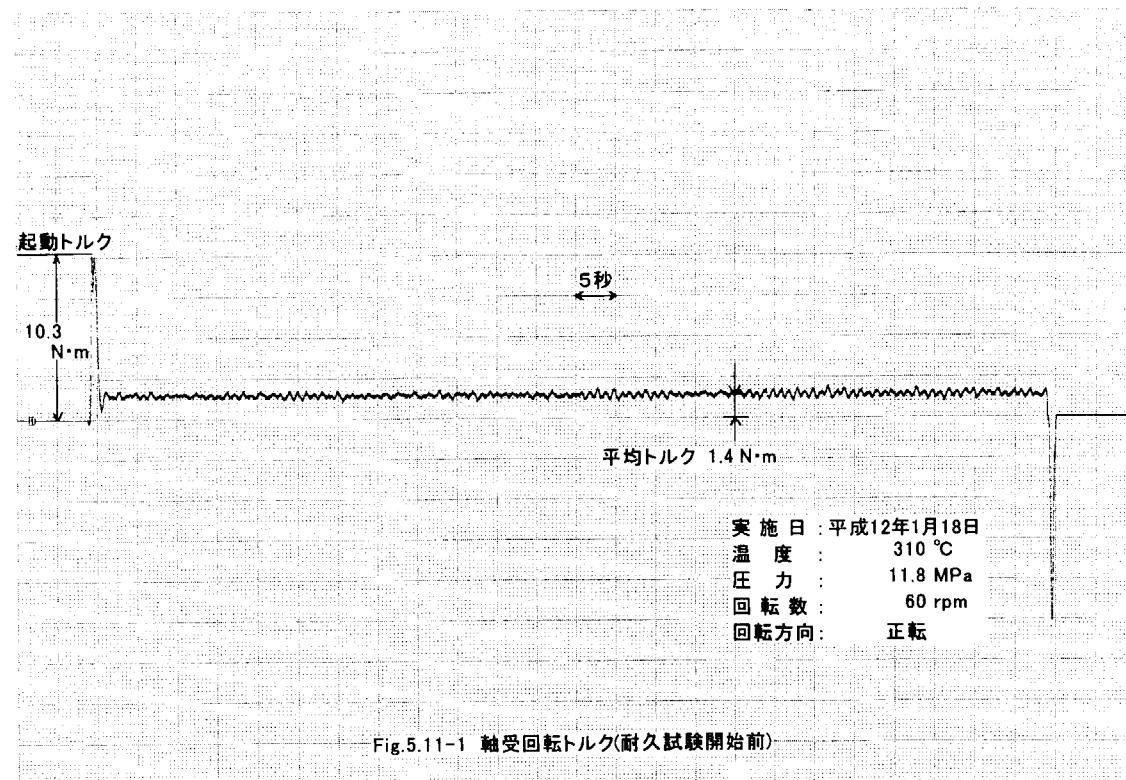
起動トルク及び平均トルク測定データの代表例を Fig. 5.11-1~12 に示す。また、平均トルクの測定結果をまとめて Fig. 5.12 に示す。

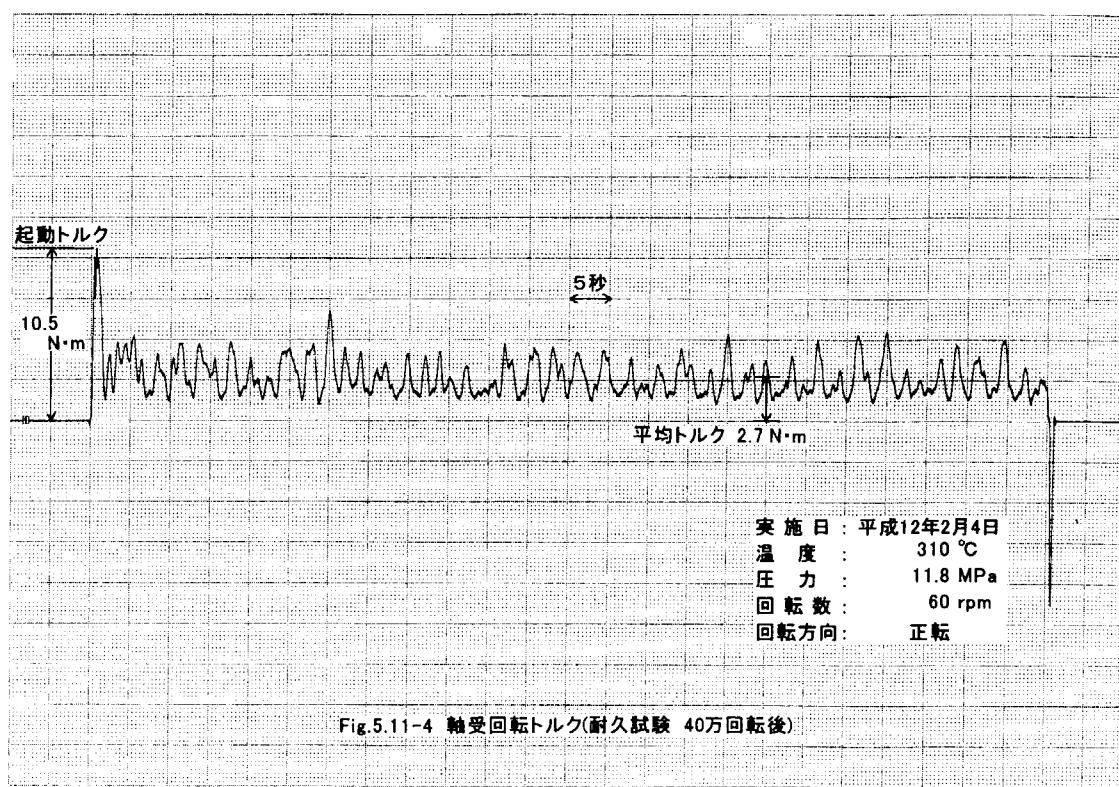
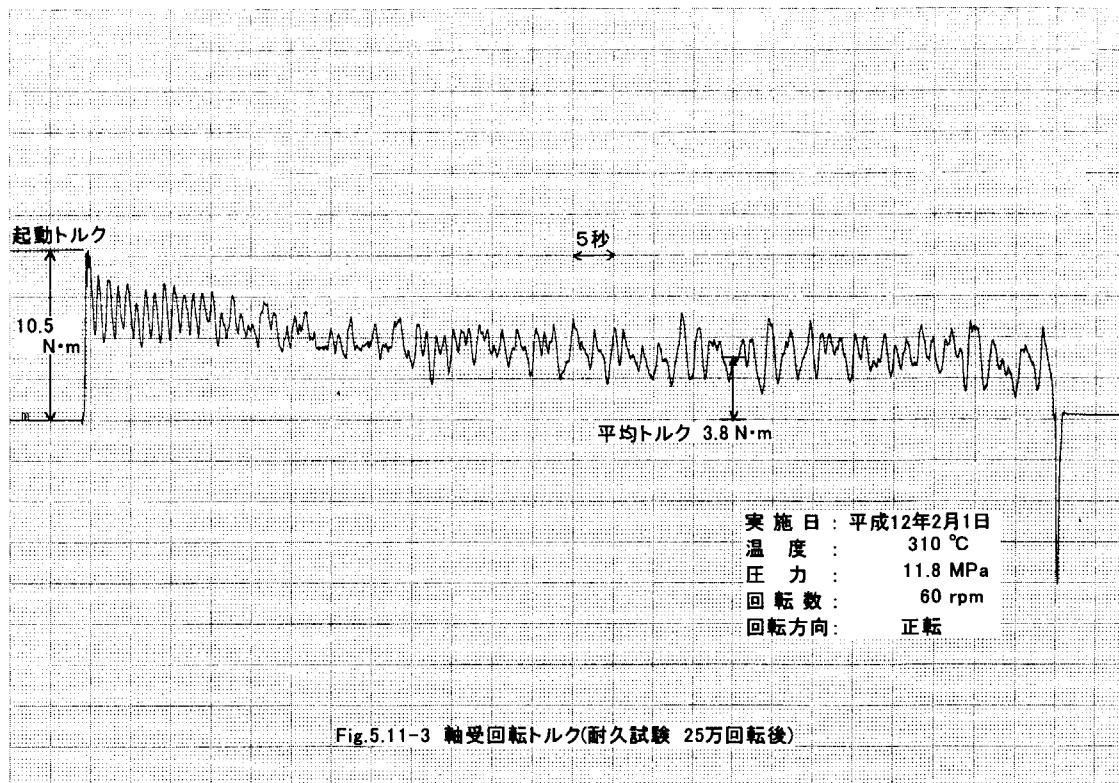
平均トルクは、試験開始前の 1.4N・m をベースに試験回転数が増えるに従い徐々に增加了。110 万回転を超えたあたりから振動が出始めたが、120 万回転過ぎからは少しずつ振動が大きくなると共に平均トルクの急激な增加が認められたため、125 万回転後に平均トルク 5.0N・m を確認して試験を中断した。

試験後の軸受損傷状況 (外観、寸法、真円度等) の検査結果を Table 5.8 にまとめて示す。外観写真については、内外輪、玉及び保持器の一部について Photo 5.2 及び Photo 5.3 に示す。

3) 評価

試験後の軸受においては、内外輪軌道部、玉、保持器の全てに摩耗が認められたものの、クラック等の異常は認められなかった。玉の表面にはグラファイトの転着が認められ、潤滑材としてのグラファイト保持器が十分に機能していることが確認できた。





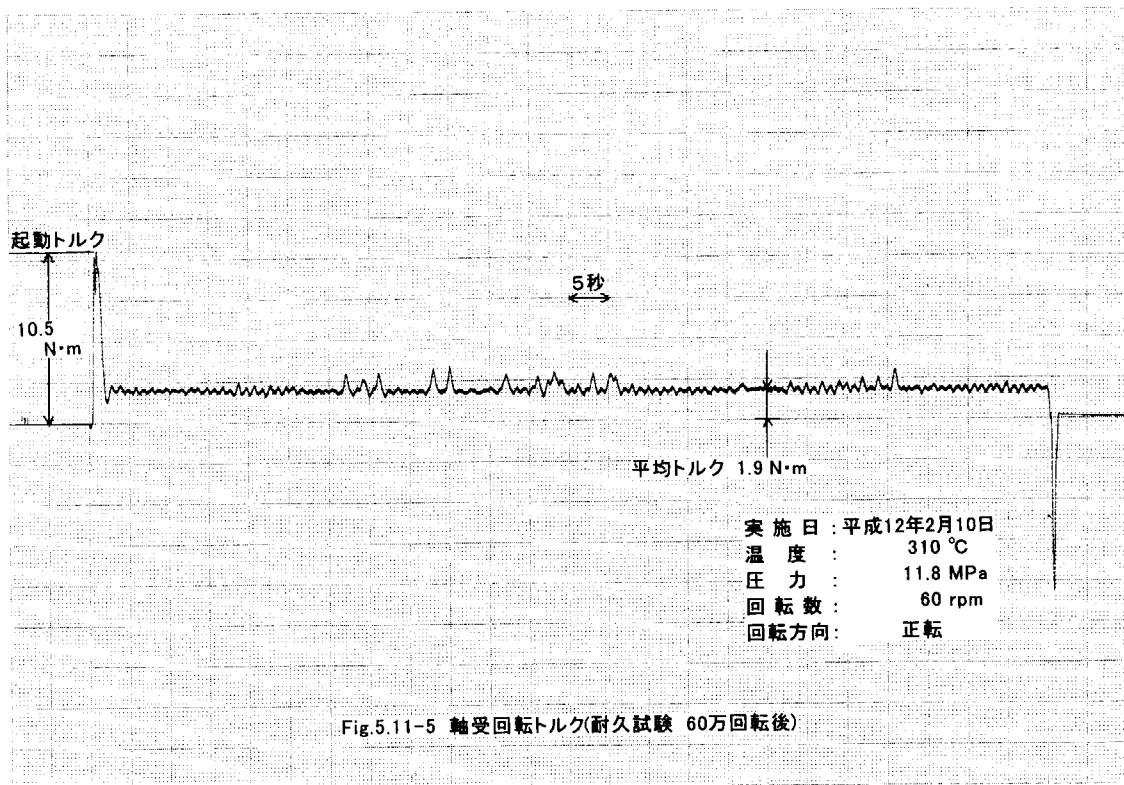


Fig.5.11-5 軸受回転トルク(耐久試験 60万回転後)

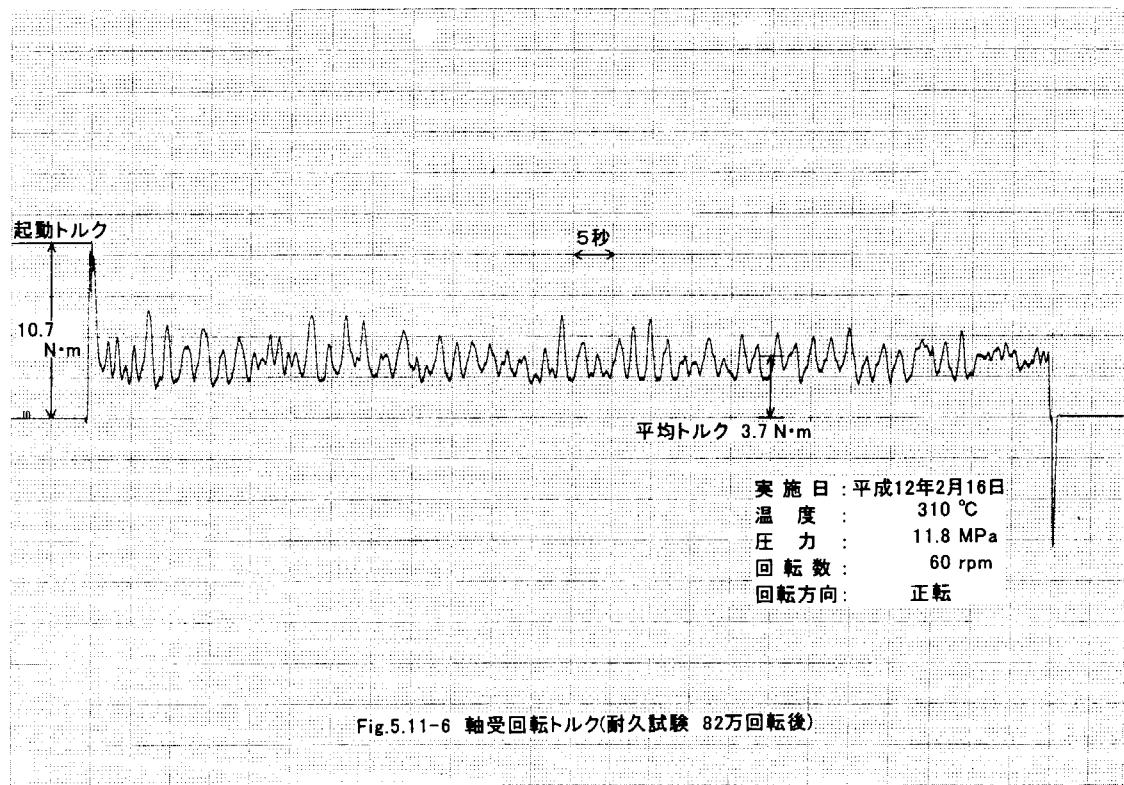
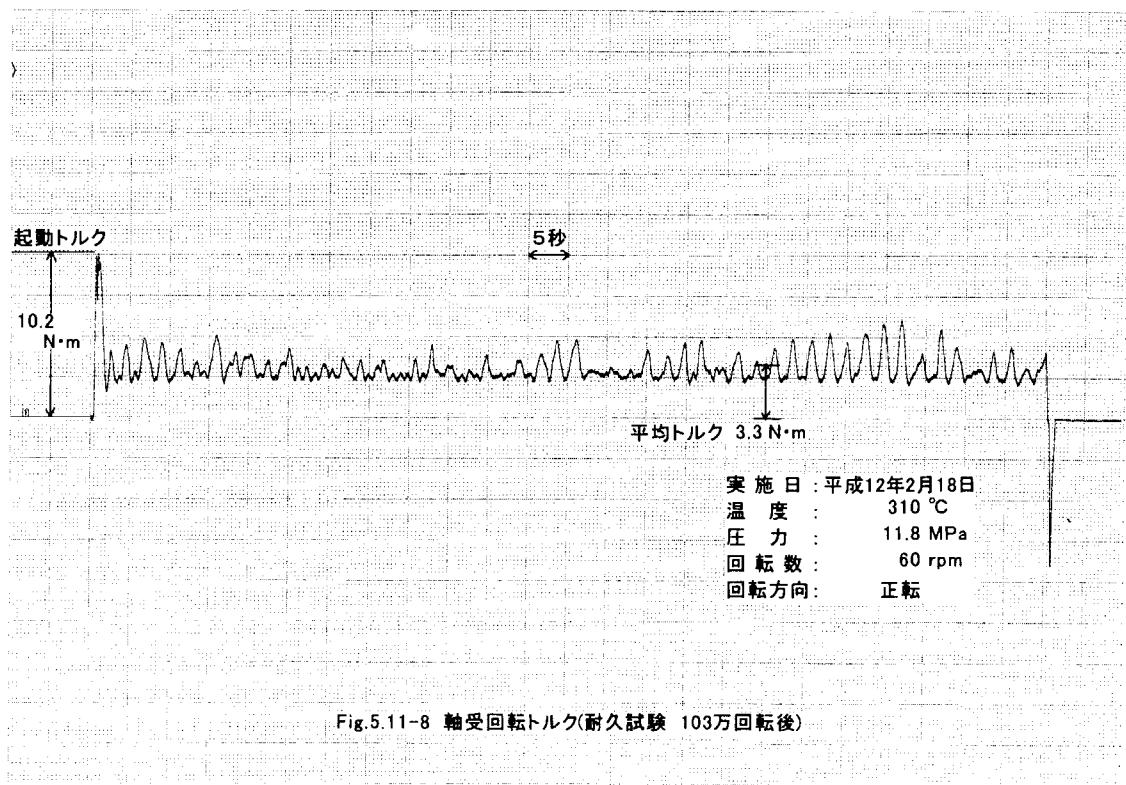
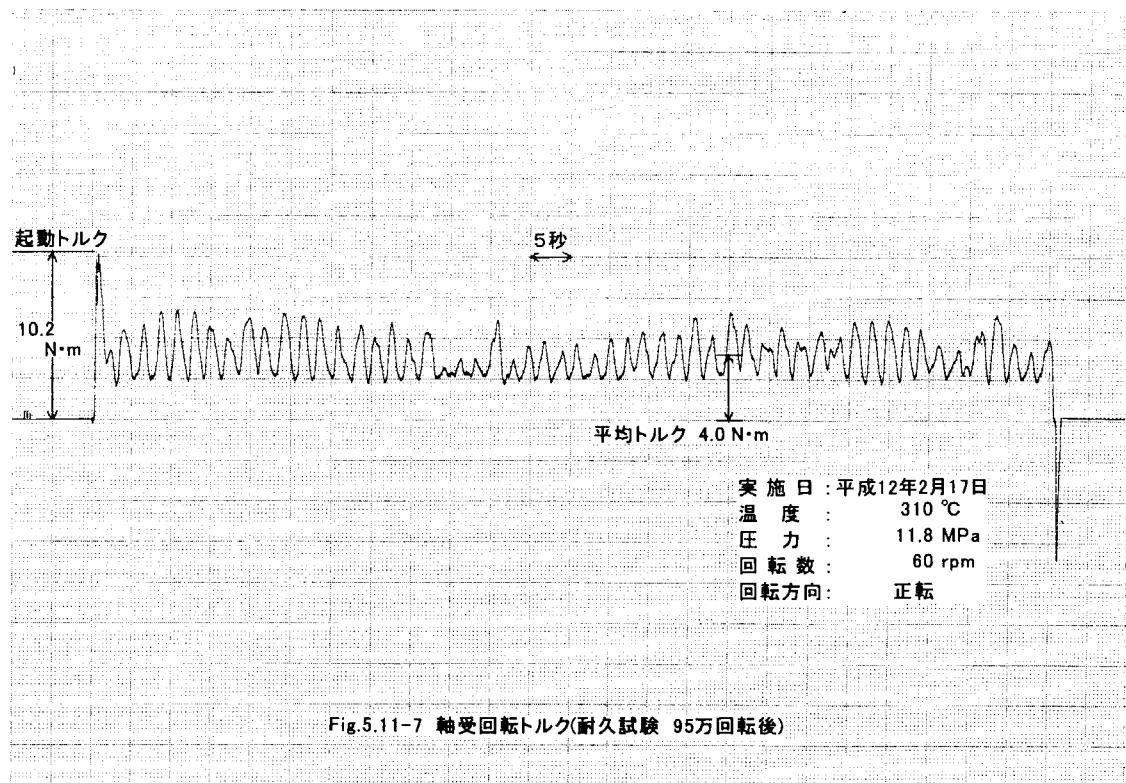
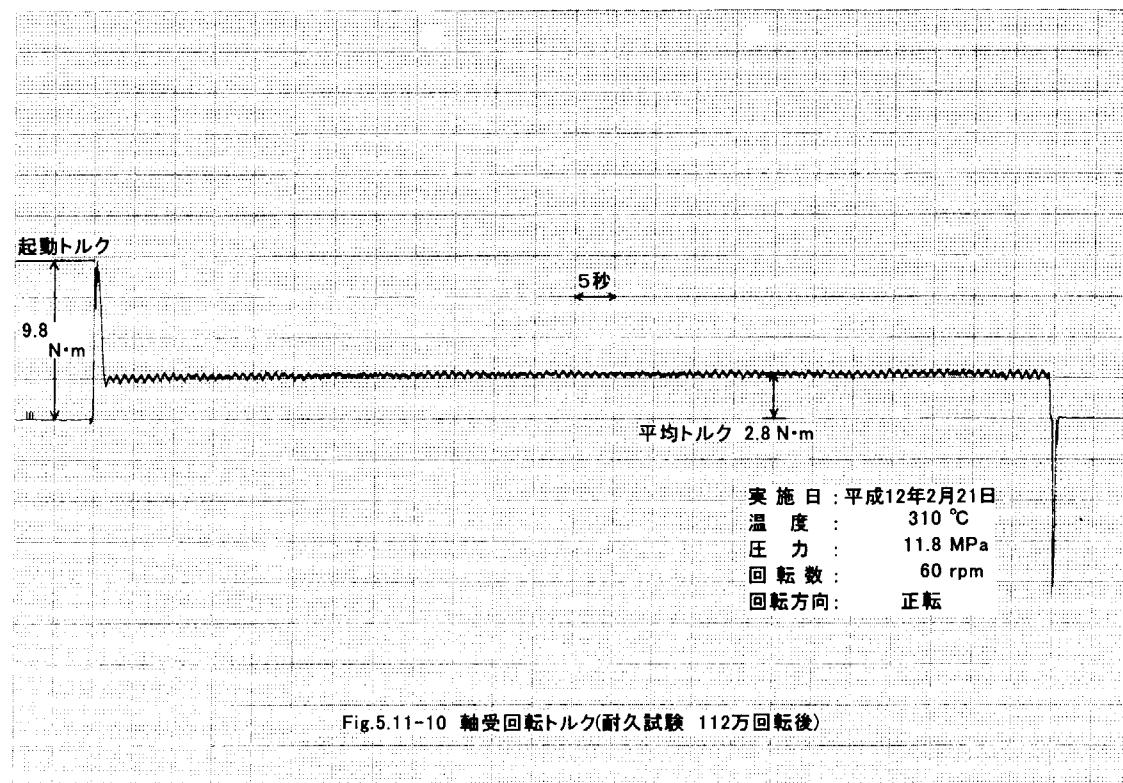
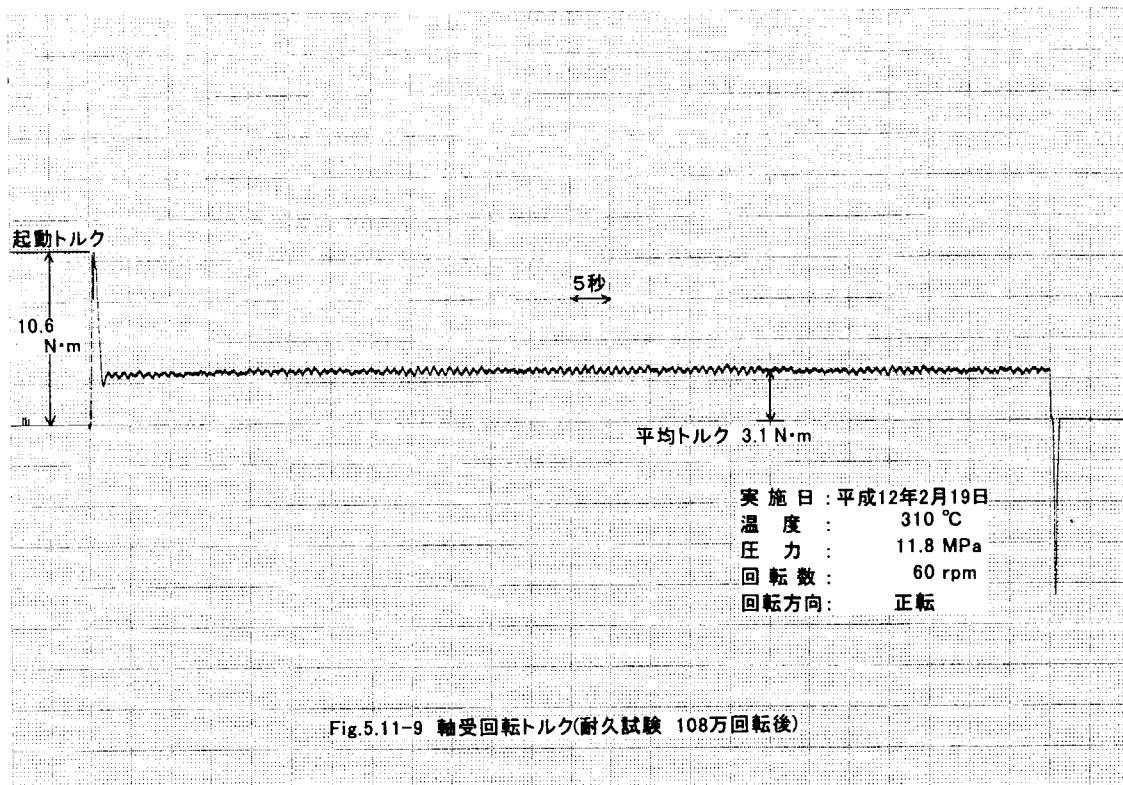
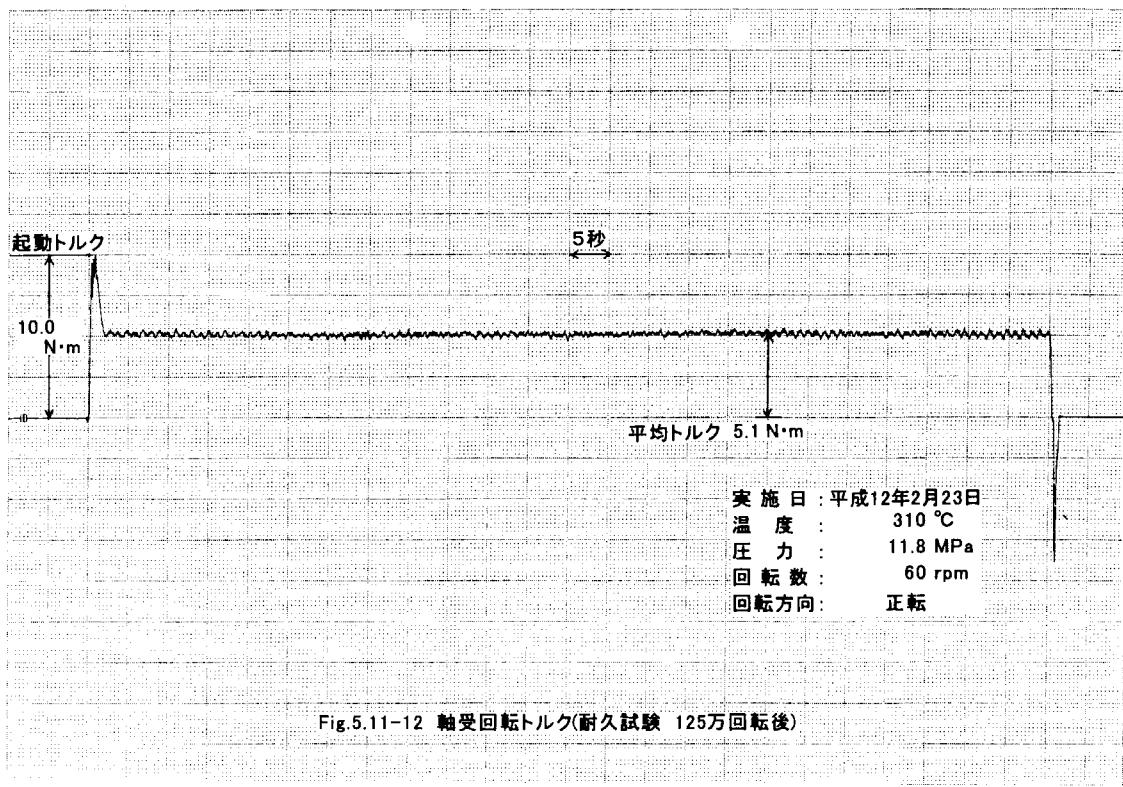
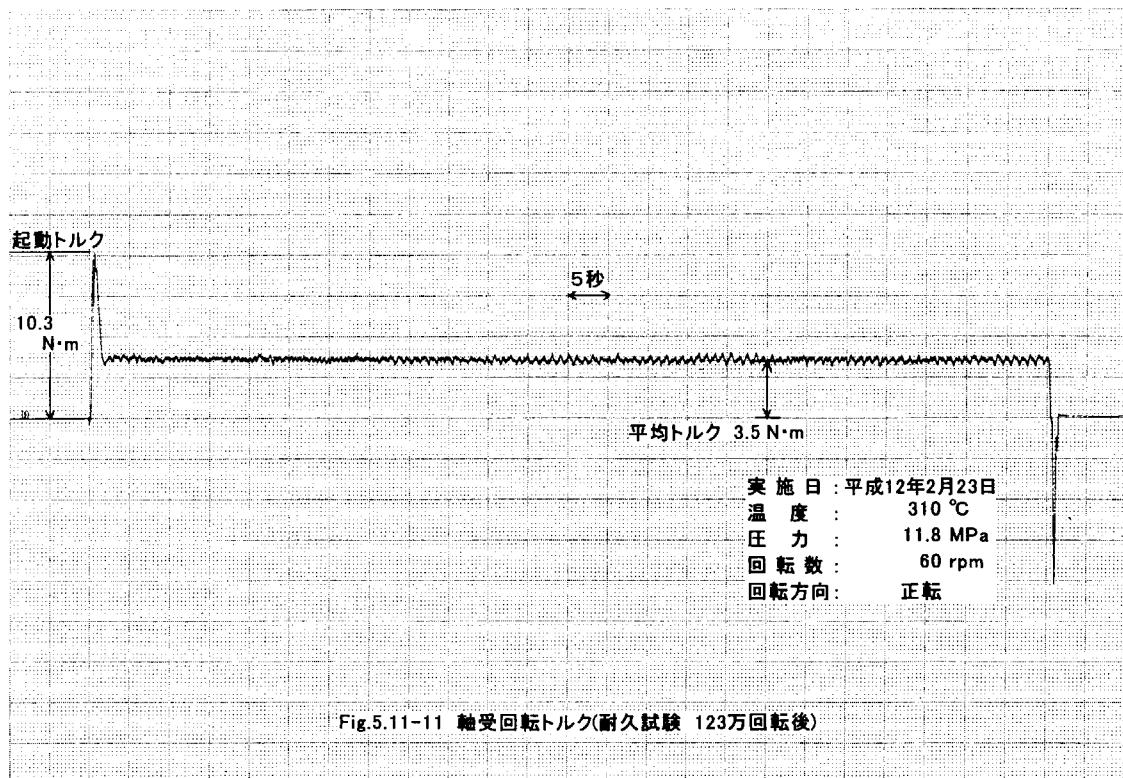


Fig.5.11-6 軸受回転トルク(耐久試験 82万回転後)







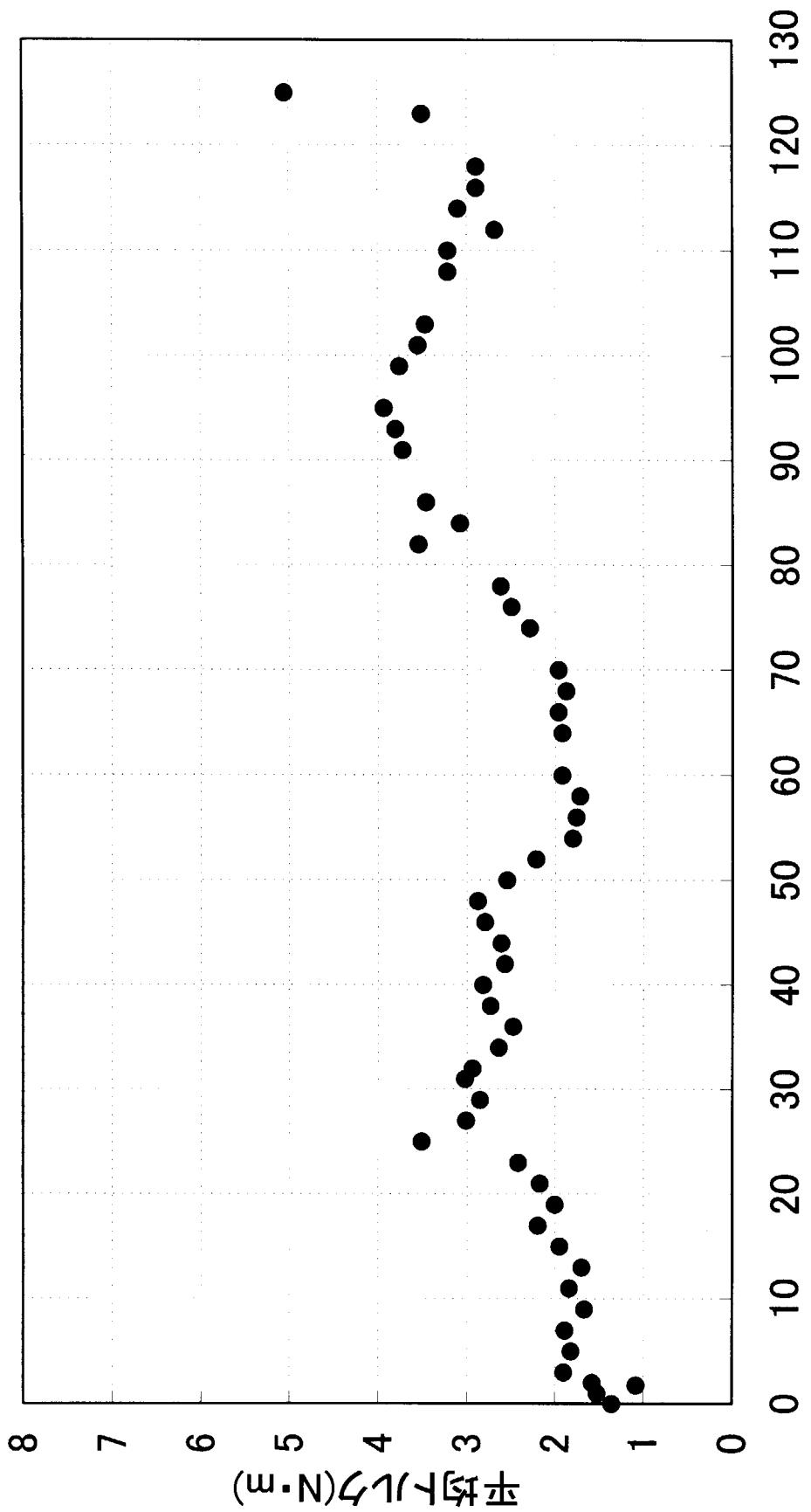


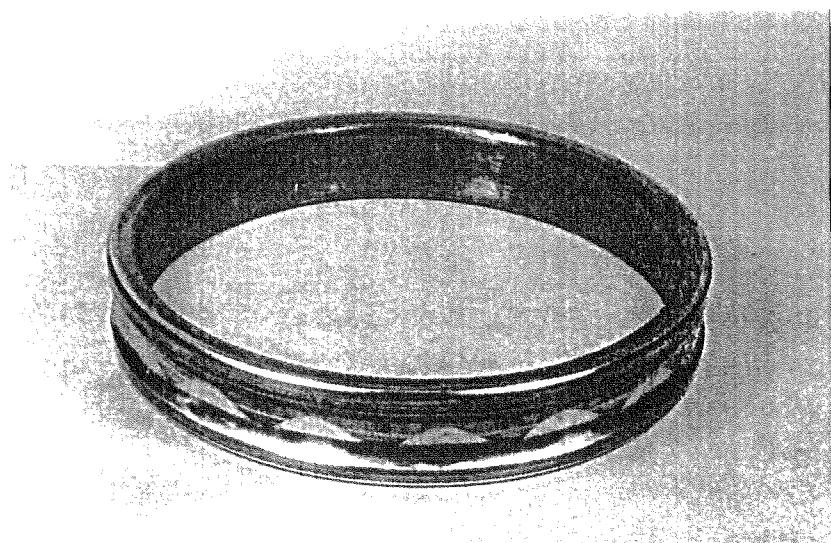
Fig. 5.12 軸受耐久試験結果

Table 5.8 高温水中軸受試験後検査結果（下部軸受）

部品	材質	項目	規格	試験前	試験後
内 輪	SUS316 + ステライト No.1	外観	—	良好	軌道部波状摩耗 肩部軽微摩耗
		表面粗さ	1 μm 以下	0.24 μm	0.22 μm
		寸法	—	—	約 140 μm 摩耗
		真円度	15 μm 以下	2.3 μm	160 μm (山数 16 の波状摩耗)
外 輪	SUS316 + ステライト No.1	外観	—	良好	軌道部摩耗
		表面粗さ	1 μm 以下	0.26 μm	0.20 μm
		寸法	—	—	約 30 μm 摩耗
		真円度	25 μm 以下	7.0 μm	19.2 μm (山数 18 の摩耗)
玉	サーメット	外観	—	良好	カーボン付着
		表面粗さ	0.2 μm 以下	0.04 μm 0.05 μm	0.60 μm 0.80 μm
		寸法	14.288mm	14.288mm	23~29 μm 摩耗 26~31 μm 摩耗
		真円度	5 μm 以下	0.24~0.31	2.98 μm 3.96 μm
保持器	グラファイト	外観	—	良好	ポケット部全面摩耗 端面摩耗
		寸法 (厚さ)	2.410mm	2.410mm	925~1050 μm 摩耗 1015~1068 μm 摩耗
		重量	—	1.18g	0.68g~0.82g

This is a blank page.

<内 輪>



<外 輪>



< 玉 >

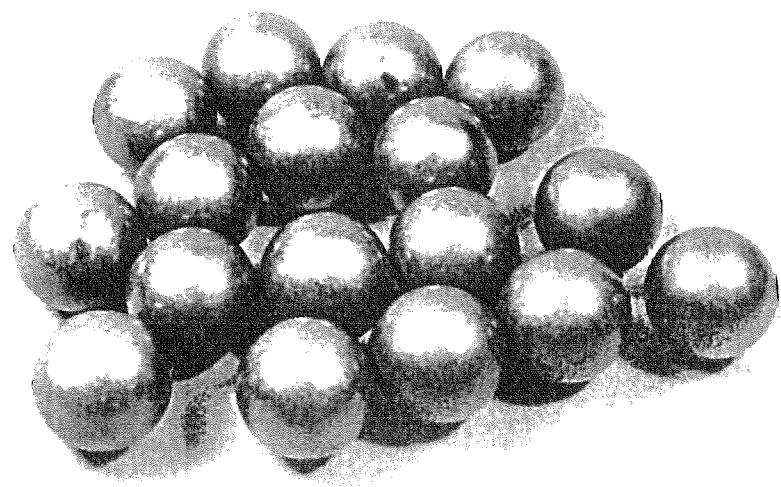
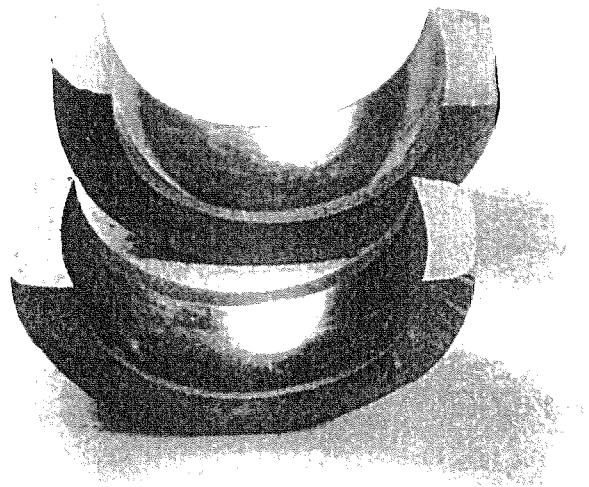


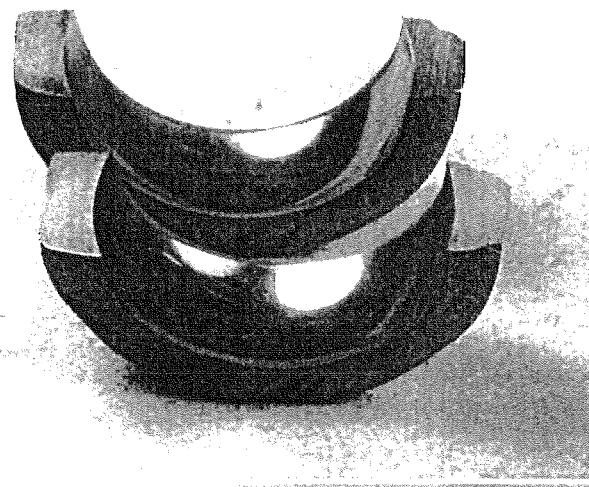
Photo 5.2 下部軸受内外輪及び玉の外觀

This is a blank page.

<保持器 No.16>



<保持器 No.17>



<保持器力バー>

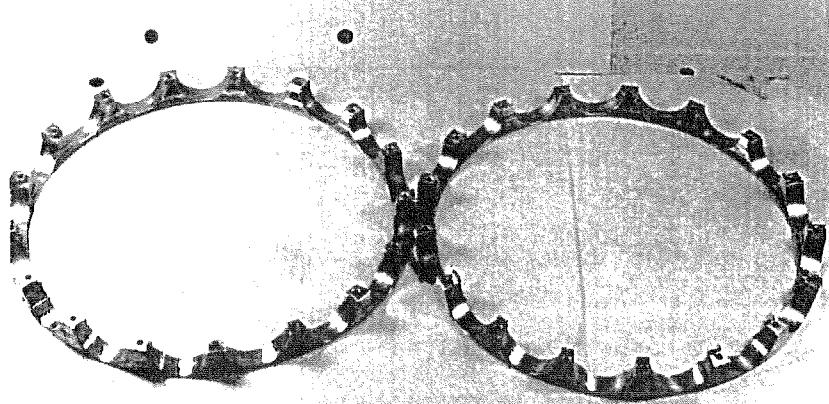


Photo 5.3 下部軸受保持器の外観

This is a blank page.

5.6 評 価

高温水中における軸受耐久試験の結果、総回転数 125 万回転において振動大及び平均トルク増加の傾向が認められたため試験を中断したが、試験後検査において軸受内外輪、玉及び保持器に摩耗は見られるもののクラック等の異常は認められなかった。

以上より軸受材料としては、内外輪に SUS316 のステライト No.1 盛金、玉にサーメット、保持器にグラファイトを用いた組合せが、実機目標寿命回転数（116 万回転）に耐えることが実証された。

謝 辞

本研究開発にあたり、前原子力船研究開発室室長星 薦雄氏に多大な御指導をいただき深く感謝致します。また、原子力船研究開発室藤原節男氏には、本報告書の執筆にあたり有益なご助言をいただきました。ここに深く感謝いたします。

付録 軸受寿命の設定根拠

1. むつ制御棒動作からの外挿

C R D M の寿命設定に際し、大型船舶用原子炉M R X のプラントシミュレーションの条件化（暫定）並びに「むつ」実験航海における制御棒動作データに準拠したC R D M 寿命を外挿する。

1.1 大型船舶稼動時間の設定

1) 稼動条件

- ・就航条件 : 4年 (M R X プラント寿命 20 年に対し燃料交換を考慮)
- ・稼動日数 : 346 日／年 (ドッグ入り等を考慮した年間稼動日数)

$$346 \text{ 日／年} \times 24\text{hr} \times 4 \text{ 年} = 33,216\text{hr} \approx 33,500\text{hr}$$

2) 稼動内訳

稼動に際し、その一連の動作モードは以下に示す状態が想定される。

- ・出 港
- ・平穏海域 (一定出力運転状態)
- ・荒海域
- ・入 港
- ・港内停泊 (低出力運転状態)

これらの動作モードのうち、制御棒の支配的な動作は出港、荒海域並びに入港時の稼動状態が挙げられる。

3) 稼動時間の設定

上記 1)、2)項の稼動条件並びに稼動割合を考慮した各動作モードの所要時間数は、出港 670hr、平穏海域 22,110hr、荒海域 3,350hr、入港 670hr、港内停泊 6,700hr となる。

Table 1 に大型船舶稼動時間内訳および Fig.1 に大型船舶航行条件による運転モードを示す。

1. 2 「むつ」制御棒の動作

1) 実験航海に於ける動作履歴

出港、荒海域、入港時における各々の代表（動作履歴の顕著なケース／制御棒No.は不特定）動作モードを抽出し、動作距離を求める。

Fig.2 に出港時、Fig.3 に荒海域および Fig.4 に入港時の代表動作データを示す。

- ・出 港 : 324mm／130 分 (2.5mm／分)
- ・荒海域 : 110mm／ 22 分 (5.0mm／分)
- ・入 港 : 468mm／130 分 (3.6mm／分)

本データでは、当該制御棒のフルストローク ($1040\text{mm} \times 2$ /往復) 動作距離は加味されないことから、次項 1. 3 項の寿命外挿にて考慮する。

1. 3 「むつ」制御棒動作に準拠した寿命外挿

上記 1. 1 項大型船舶稼動時間の設定および 1. 2 項「むつ」制御棒の動作条件に基づき寿命の外挿をする。

1) 各動作モードにおける動作距離

- ・出 港 : $2.5 \times 10^{-3} \times 670 \times 60 = 100.5\text{m}$
- ・荒海域 : $5.0 \times 10^{-3} \times 3350 \times 60 = 1005.0\text{m}$
- ・入 港 : $3.6 \times 10^{-3} \times 670 \times 60 = 144.7\text{m}$

(1)累計 : 1250 m

2) 一航海時フルストロークを考慮した動作距離

$$346 (\text{日／年}) / 28 (\text{日／航海}) \times 4 \text{ 年} = 49.4 \approx 50 \text{ 回}$$

$$(2) \text{累計 } 50 \text{ 回} \times 1.4\text{m} \times 2 \text{ 往復} = 140 \text{ m}$$

依って、動作距離(1)、(2)の累計加算値より寿命外挿値は 1,390 m になる。

Table 1 大型船舶稼動時間内訳

	燃料交換までの総時間数	割合 (%)	所要時間内訳 (hr)
・出 港		2	670
・平穏海域	346 日/年 × 24hr × 4 年	66	22,110
・荒海域	= 33,216hr	10	3,350
・入 港	≒ 33,500hr	2	670
・港内停泊	燃料交換(1 回/4 年 : IMO 基準)	20	6,700
・所要時間 (hr)	33,500	100	33,500

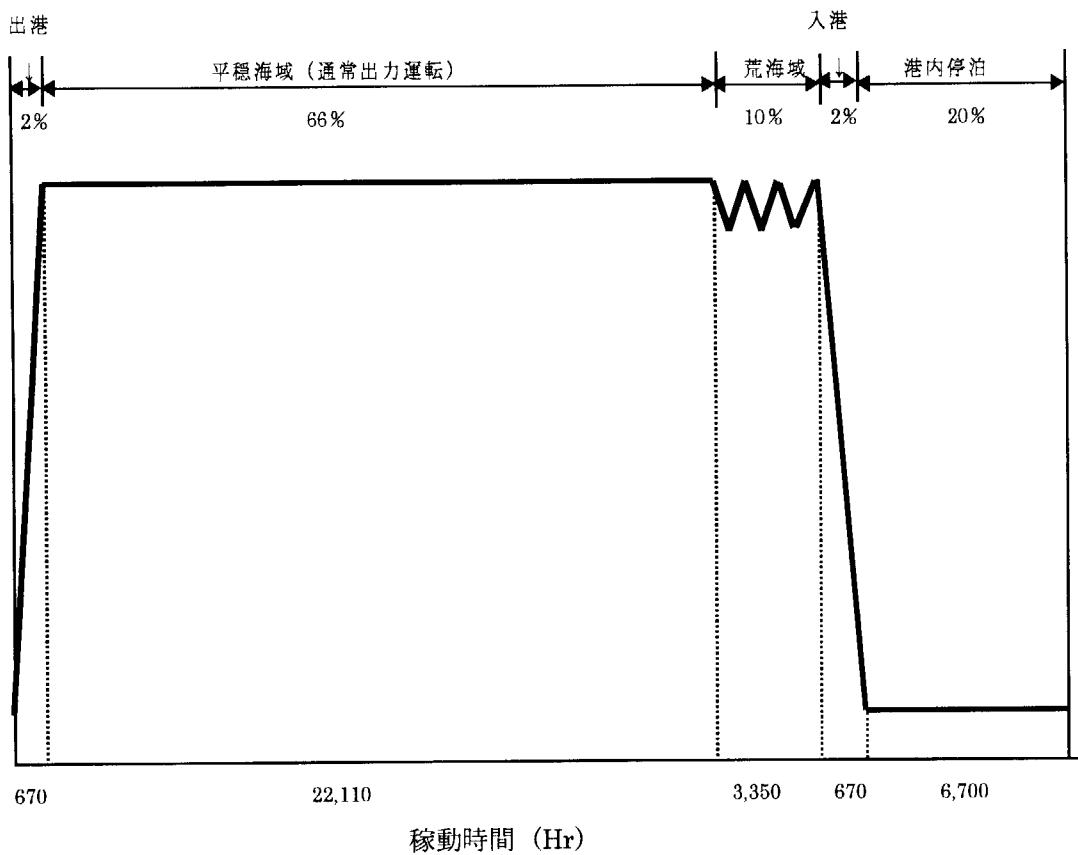
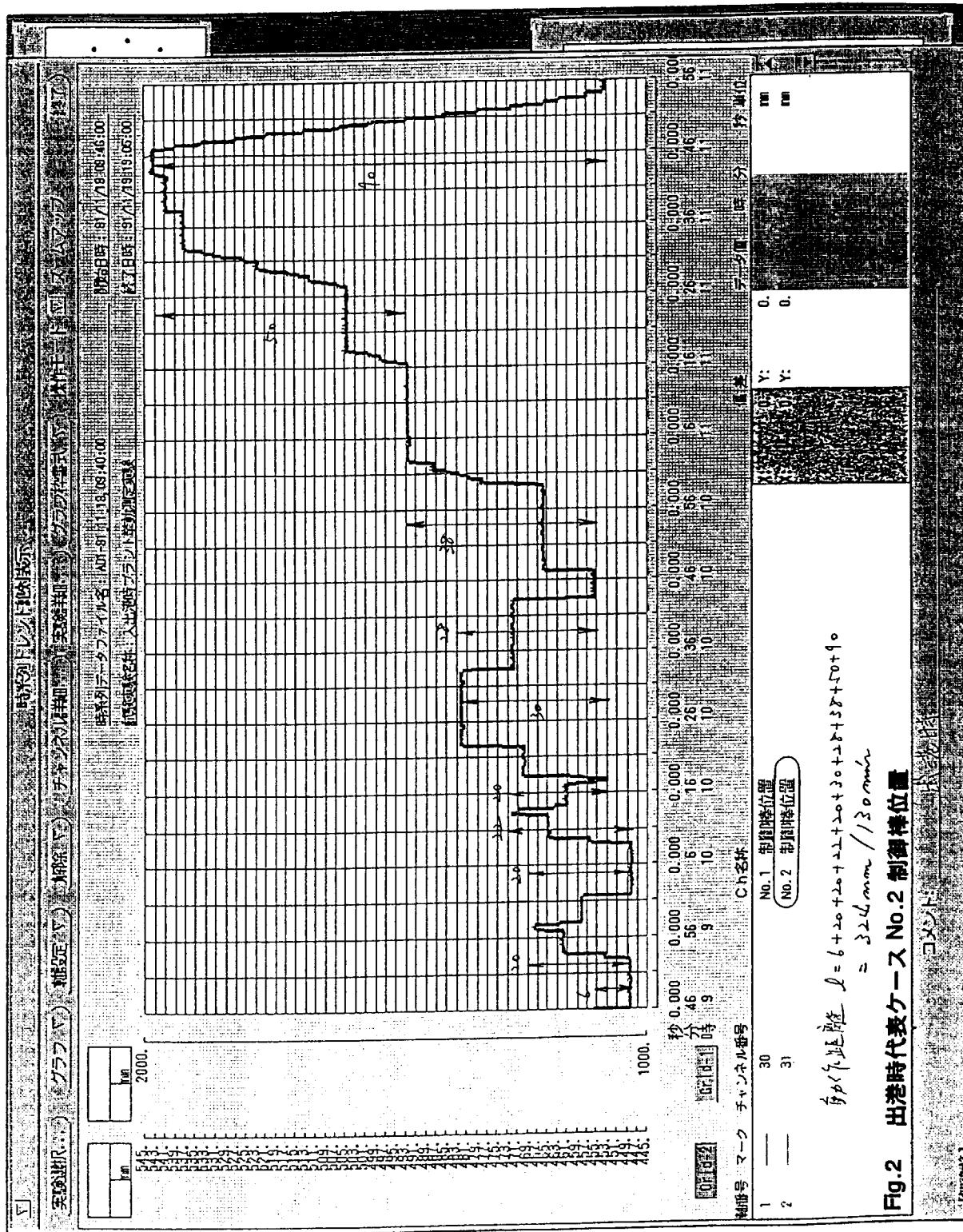


Fig.1 大型船舶航行条件による運転モード



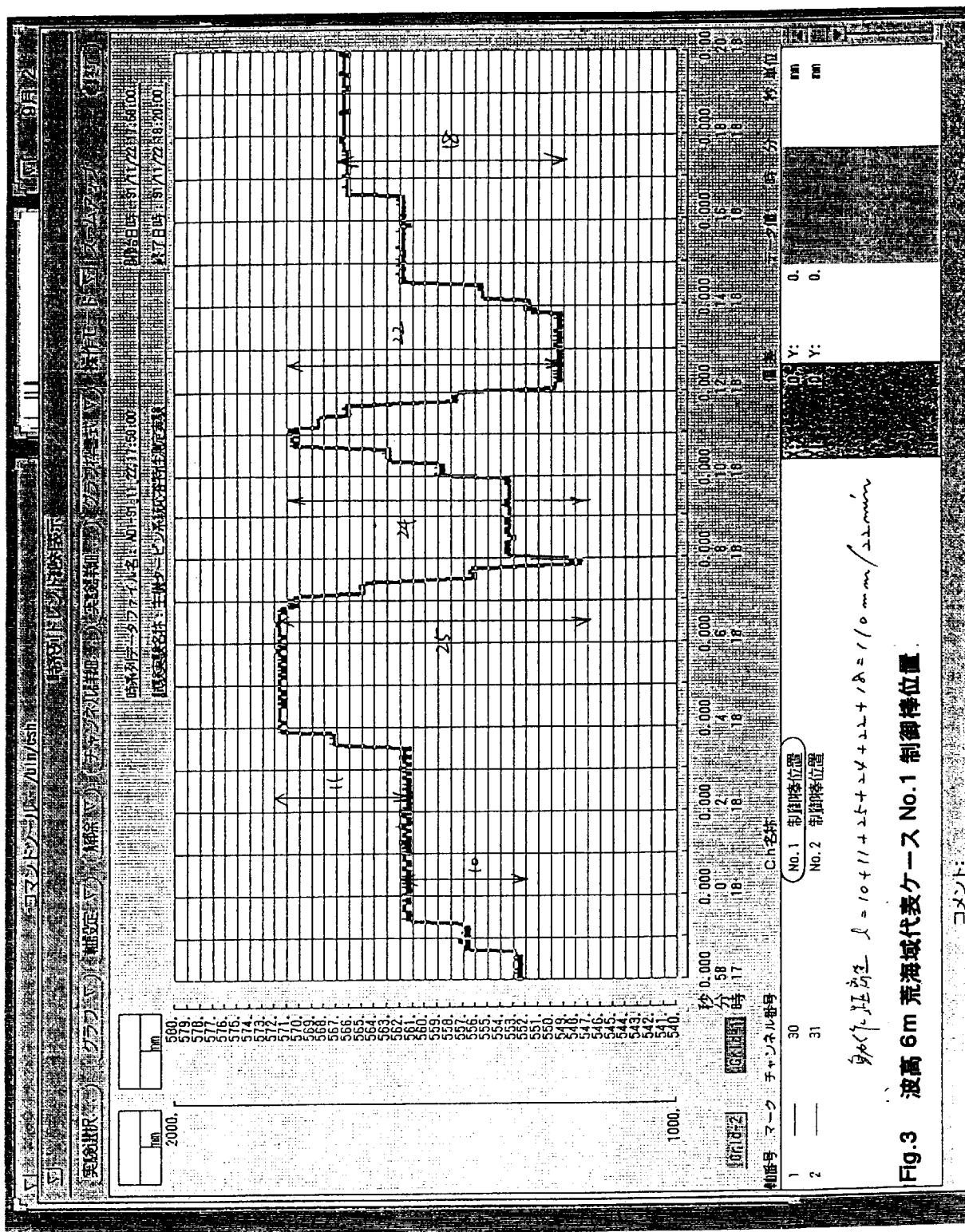


Fig.3 波高 6m 荒海域代表ケース No.1 制御棒位置

This is a blank page.

