

高温・高圧水中における転がり軸受のトライボロジー特性

林田一徳 石田紀久

Tribological Characteristics of Rolling Bearings in High-Temperature, High-Pressure Water

K. HAYASHIDA N. ISHIDA

The Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) is currently working to develop an advanced integral type marine reactor, MRX, for use in ship propulsion or nuclear energy supply. The MRX adopts an in-vessel type control rod drive mechanism (CRDM) which is placed inside the reactor vessel to eliminate the possibility of control rod ejection accidents and to make the reactor compact. Bearings of the CRDM should be able to function in high-temperature, high-pressure (320°C, 11.8MPa) water. In order to survey corrosion resistance, wear resistance and other tribological characteristics of the bearing in such a severe environment, rolling testing using test specimens made of various materials was conducted at a rotational speed of 185min⁻¹ and a load of 440 N in high-temperature, high-pressure water. The test results showed that the combination of cobalt alloy or cermet rings, cermet balls, and a graphite retainer gave superior bearing performance. Graphite and metal oxide are considered to have acted as lubricants and contributed to reduce wear significantly for bearings in high-temperature, high-pressure water.

Key Words: high-temperature, high-pressure water, rolling bearing, wear, graphite, cermet, stellite

1. はじめに

日本原子力研究所(JAERI)では、船舶推進用原子炉として大型船用原子炉MRX(Advanced Marine Reactor)の設計研究を実施している。MRXの制御棒駆動機構(CRDM)は、図1に示すように安全性と経済性の向上のため、原子炉容器内に設置する設計である^{1),2)}。

この制御棒駆動機構は、小型化で微調整できることとの要求から、電気モータ式を採用している。構成要素としては、駆動モータ、転がり軸受、直動要素などがあり、これらは310℃、12MPaの高温水中で使用される設計である。特に、効率の良い転がり軸受およびボールねじが必要とされ、これらは高温水中で長期にわたり安定して使用できるものでなければならない。

しかし、300℃以上の高温水中での転がり摩擦挙動に関する公開されたデータは、筆者らの知る限りでは存在しない。

本報は、幾つかの候補材料で構成した転がり軸受(以下特に指定しない場合は軸受と称す)につき、高温水中転がり摩擦試験を行い、各種候補軸受の転がり摩擦特性を主体としたトライボロジー特性を明らかにしたものである。

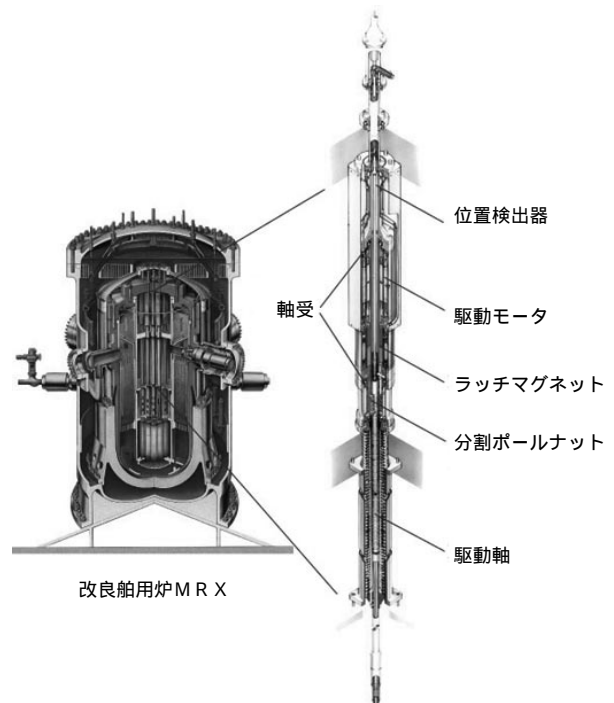


図1 大型船用原子炉MRXの構造
Structure of MRX (Advanced marine reactor)

2. 試験方法

2.1 試験装置

試験に用いた高温水中転がり摩耗試験装置の外観を図2に示す。

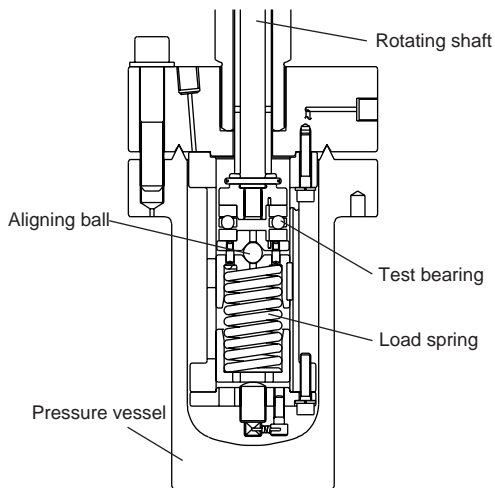


図2 高温水中転がり摩耗試験装置外観

Rolling wear testing apparatus in high-temperature and high-pressure water

この試験装置は、設置場所の制限がないオートクレーブ型小型圧力容器を用いた可搬式の試験装置で、高温(~ 350)、高圧(~ 13MPa)水中で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。試験軸受は、回転導入機構を介して、外部モータにより最大回転速度300min⁻¹までの回転が可能である。荷重は、軸受の下方より調心玉を介し負荷用ばねにて600Nまで負荷できるようになっている。またこの試験装置では、熱電対、圧力ゲージ、ひずみゲージ、加速度型振動計により、温度、圧力、回転トルク、振動の計測が可能で、同時にレコーダへの記録も可能である。

2.2 試験軸受

試験軸受は、図3に示すように51305相当のスラスト型転がり軸受(内径： 25mm、外径： 52mm)とした。試験軸受は、軌道溝を持つ上部の回転輪と軌道溝を持たない平板試験片の間に保持器で等間隔に分離された玉6個(玉径： 9.525mm)を挟む構成になっている。なお、回転輪、平板試験片の表面粗さはRa0.04 μm以下に、玉の表面粗さはRa0.02 μm以下に仕上げたものである。

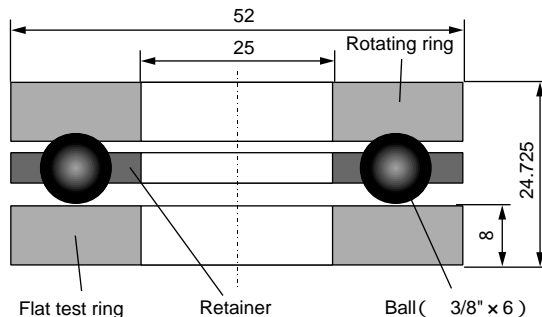


図3 試験軸受
Test bearing

軸受材料としては高温水中での耐食性、耐熱性の面から一部原子炉での使用実績を考慮し、内外輪、玉材料として、SUS440C、ステライト、サーメット(TiCN - NiCo)、セラミックス(SiC)、保持器材料としてSUS304、グラファイトをそれぞれ選定した。なお、ステライトはSUS316基材に肉盛して使用した。

2.3 試験方法

試験条件は、実機CRDMの使用条件を考慮して、装置内雰囲気320、11.8MPaに安定した時点から、試験軸受をMRX軸受の玉転動溝部の周速が同等となる185min⁻¹で回転させ、試験を開始した。試験中は、温度、圧力、回転トルク、振動を計測・記録した。なお、試験中回転トルクが1.5N・mを越えた場合は、事前の予備試験より試験継続不可能と判断し、その時点で試験を中断した。

試験は、表1に示す組合せで、各20時間行った。試験後、各試験片の損傷度合を調査するため、外観観察、重量測定を行った。強度低下を確認するため、サーメット玉とSiC玉に関しては、試験前後の圧碎値測定を、SUS440Cに関しては試験前後の硬さ測定を行った。摩耗度合は、試験前後の重量変化から体積換算し、単位時間当たりの摩耗量として示した。表面(摩耗面)のミクロ観察・分析は、SEM(Scanning Electron Microscope)、EPMA(Electron Probe Micro Analyzer)を用いた。

表1 試験軸受の材料構成
Test bearing components materials

No.	内外輪(平板試験片)	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

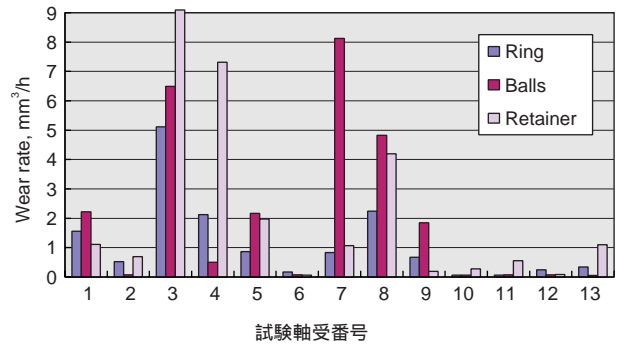


図4 損傷度合

Wear rate in screening tests

回転トルクは、表2から判るようにSUS304保持器を用いた軸受(No. 1 ~ 9)に比べグラファイト保持器を用いた軸受(No. 10 ~ 13)の方が低い傾向を示した。SUS304保持器を用いた軸受の中で No. 3, 5, 8 は、それぞれ15.0時間, 10.8時間, 12.0時間で回転トルクの設定値(1.5N・m)を越えたため、試験を中断した。それ以外は、すべて規定の20時間を問題なく回転した。

3. 試験結果

試験後の外観観察を含めた試験結果をまとめて表2に、摩耗度合を図4にそれぞれ示す。

表2 試験結果
Test results

No.	試験時間, h	トルク, N・m	試験後平板	試験後玉	試験後保持器
1	20.0	0.2 ~ 1.0	転走部摩耗 黒色化 硬さHRC56	摩 耗 硬さHRC55	ポケット部摩耗 わずかに変色
2	20.0	0.2 ~ 0.4	転走部摩耗 黒色化 硬さHRC57	摩 耗 硬さHRC56	ポケット部摩耗 わずかに変色
3	15.0	0.2 ~ 1.5	転走部摩耗 黒色化 硬さHRC56	摩耗大 圧碎値75MPa	ポケット部摩耗 わずかに変色
4	20.0	0.2 ~ 1.0	転走部摩耗 わずかに変色	軽微摩耗 圧碎値>300MPa	ポケット部摩耗 わずかに変色
5	10.8	0.2 ~ 1.5	転走部摩耗 わずかに変色	摩耗大 圧碎値68MPa	ポケット部摩耗 わずかに変色
6	20.0	0.2 ~ 0.3	転走部軽微摩耗 変色無	軽微摩耗 圧碎値>300MPa	ポケット部摩耗 わずかに変色
7	20.0	0.2 ~ 0.6	転走部摩耗 変色無	摩 耗 硬さHRC56	ポケット部摩耗 わずかに変色
8	12.0	0.2 ~ 1.5	転走部摩耗 変色無	軽微摩耗 圧碎値>300MPa	ポケット部摩耗 わずかに変色
9	20.0	0.2 ~ 0.6	転走部摩耗 変色無	摩 耗 圧碎値72MPa	ポケット部摩耗 わずかに変色
10	20.0	0 ~ 0.2	軽微摩耗 黒色化 硬さHRC56	軽微摩耗 硬さHRC56	軽微摩耗 変色無
11	20.0	0 ~ 0.2	軽微摩耗 黒色化 硬さHRC56	軽微摩耗 圧碎値>300MPa	軽微摩耗 変色無
12	20.0	0 ~ 0.2	転走部摩耗 わずかに変色	軽微摩耗 圧碎値>300MPa	軽微摩耗 変色無
13	20.0	0 ~ 0.2	転走部摩耗 変色無	摩 耗 圧碎値76MPa	軽微摩耗 変色無

注記：圧碎値 = 圧碎荷重 / (ボール径)²

試験後試験片(平板, 玉, 保持器)は, 表2, 図4から判るように平板においては玉の転動部, 玉においては玉表面, 保持器においてはポケット部がそれぞれ摩耗していた。摩耗割合は, No. 2(平板: SUS440C, 玉: サーマット, 保持器: SUS304), No. 6(平板: サーマット, 玉: サーマット, 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: サーマット, 保持器: グラファイト), No. 12(平板: ステライト, 玉: サーマット, 保持器: グラファイト)が $1 \text{ mm}^3 / \text{h}$ 以下と比較的少なく, 良好な結果を示した。

平板材料としてSUS440C, サーマット, 保持器材料としてグラファイトを用いた場合に比較的少ない損傷を示した。しかし, SUS440Cの硬さは, 玉の場合試験前HRC63から試験後HRC55~56に, 平板の場合試験前HRC58から試験後HRC56~57に低下しており, 高温水中での強度低下が懸念された。また, 平板試験片に関しては, 転動部以外は黒色化していた。

ステライトは, SUS440Cに比べ若干損傷が大きい傾向を示したが, 平板外観から判るように転動部以外の変色は少なく, 高温水中で優れた耐食性を示した。

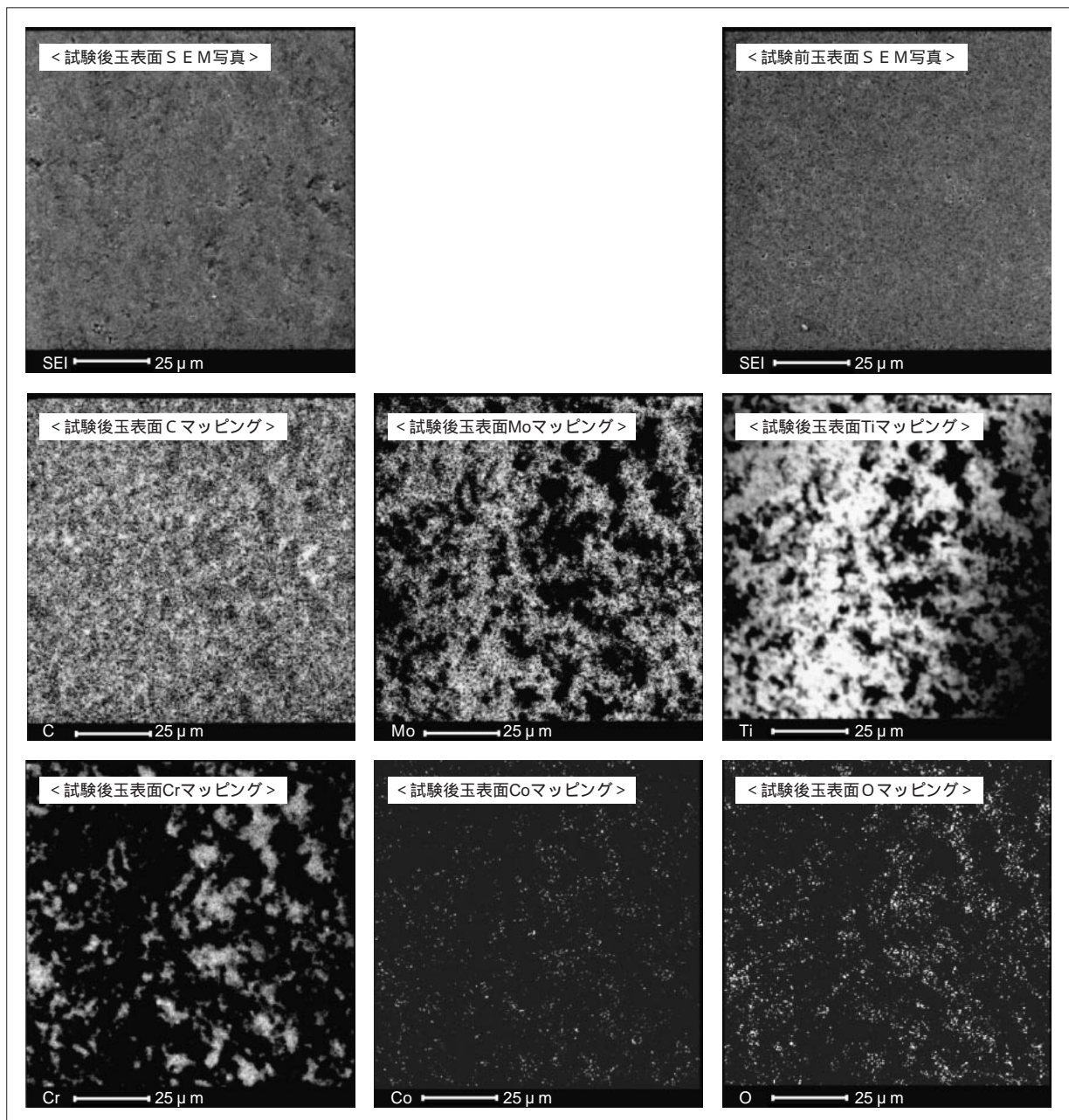


図5 SEM観察, EPMA元素マッピング結果代表例(No. 12サーメット玉)

Typical results of SEM image and EPMA mapping image (No. 12 cermet ball)

サーメットを平板および玉に用いた場合、いずれも最も少ない損傷を示しており、特にグラファイト保持器を用いた場合は、摩耗度合 $0.1\text{mm}^3/\text{h}$ 以下と極めて低かった。また、試験前後のサーメットの圧碎値はいずれも 300MPa 以上で強度面での低下もほとんど認められなかった。

SiCは、顕著な摩耗が認められ、回転トルク上昇に至ったと考えられる。圧碎値も試験前 82MPa から試験後 $68\sim 76\text{MPa}$ と低下していた。これまでの知見では、SiCは高温水中で良好な耐食性を有する材料と認識していたが、今回のような動的な転がり状態(運動)においては、摩耗進行が著しくなることが確認され、SiCの使用は不可能と考えられた。

一方保持器材に関しては、No. 1 - No. 10, No. 2 - No. 11, No. 4 - No. 12, No. 9 - No. 13の比較から判るようにSUS304からグラファイトに替えたことで明らかに損傷度合、回転トルクが減少する傾向を示した。特にSUS304の場合、玉と接触する保持器のポケット部分の摩耗が顕著に認められた。この摩耗粉が研磨剤として作用し、転動面の摩耗を加速したと考えられた。また、SUS304保持器の外観は全面わずかに変色していたのに対し、グラファイト保持器には変色は認められず優れた耐食性に示唆した。

試験後のSEM観察、EPMAの元素マッピング結果代表例を図5に示す。No. 12試験後サーメット玉表面は、SEM写真で見える限り大きな損傷は認められなかった。一方EPMAの元素マッピングでは、試験前に認められなかった酸素(O)とクロム(Cr)がほぼ同様の分布状態で認められており、玉表面にクロム酸化物の存在を示した。また、炭素(C)に関しても、部分的にCが顕著に検出されている部分があり、保持器から移着したグラファイトが存在していることを示した。

4. おわりに

各種候補材を用いた13種(組合せ)の試験軸受を高温水中(320°C , 11.8MPa)で転がり摩耗試験し、以下の結果を得た。

- (1)保持器にSUS304を用いた場合、回転トルクが大きく、各試験片(平板、玉、保持器)の損傷は大きかった。これは、玉と接触する保持器の摩耗粉が転動面に研磨剤として作用し、摩耗を加速したためと考えられる。
- (2)保持器にグラファイトを用いた場合には、No. 11(平板: SUS440C, 玉: サーメット), No. 12(平板: ステライト, 玉: サーメット)の軸受は、

回転トルクが小さく、損傷度合が $0.1\text{mm}^3/\text{h}$ と極めて低く、良好な結果を示した。ただし、SUS440Cを平板に用いた場合には、高温での硬度低下などを今後検討する必要がある。

- (3)保持器にグラファイトを用いた場合の試験後の摩耗部について、SEMおよびEPMA分析を行った結果、Cと金属酸化物の存在が認められ、これらが潤滑剤として働いたため、摩耗を大幅に低減したと考えられる。

参考文献

- 1) T.Kusunoki, et al.: Design of advanced integral-type marine reactor, MRX., Nuclear Eng. and Design 201 (2000) 153-175.
- 2) Y. Ishizaka, et al.: Development of a built-in type control rod drive mechanism (CRDM) for a advanced marine reactor X (MRX)., Proc. ANP' 92 International Conference on Design and Safety of Advanced Nuclear PowerPlant. (1992).

筆 者



林田一徳*
K. HAYASHIDA

石田紀久**
N. ISHIDA

* 総合技術研究所 基礎技術研究所 軸受研究部
** 日本原子力研究所