JAEA-Technology
2006-023

JP0650357

JAEA-Technology

耐放射線モータ駆動装置の高線量率ガンマ線照射下での連続動作試験

Continuous Running Test of Radiation Resistance Motor Driving Equipment under High Gamma Ray Irradiation

小原 建治郎　角舘 聡　八木 敏明　森下 憲雄
柴沼 清

Kenjiro OBARA, Satoshi KAKUDATE, Toshiaki YAGI, Norio MORISHITA and Kiyoshi SHIBANUMA

核融合研究開発部門
ITERトカマク本体開発グループ

Tokamak Device Group
Fusion Research and Development Directorate

March 2006

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に刊行している研究開発報告書です。
本レポート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下さい。
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

This report was issued subject to the copyright of Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about the copyright and reproduction should be addressed to :
Intellectual Resources Section,
Intellectual Resources Department
2-4, Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, JAPAN
Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

©日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency, 2006

JAEA-Technology 2006-023

耐放射線モータ駆動装置の高線量率ガンマ線照射下での連続動作試験

日本原子力研究開発機構
核融合研究開発部門　ITER プロジェクトユニット
小原　建治郎・角舘　聡・八木　敏明[+]・森下　憲雄[+]・柴沼　清

（2006 年 1 月 27 日受理）

国際熱核融合実験炉（ITER：International Thermonuclear Experimental Reactor）の真空容器内に取り付けられるブランケットやダイバータなどの容器内構造物は、専用の遠隔保守装置を使用し定期的に保守・交換される。作業時の真空容器内環境は放射線（ガンマ線）照射環境下で、温度約 50℃、、大気圧の乾燥空気または不活性ガス雰囲気となるため遠隔保守装置の耐久性には種々の要素が求められる。遠隔保守装置の放射線照射環境については、ITER 工学Ｒ＆Ｄ当初に設定された平均線量率 10kGy/h が、その後の詳細な設計及び解析により漸次見直され、現在では 0.5kGy/h 程度とかなり低減されている。しかしながら、遠隔保守装置には最長１年程度の連続運転が計画されているため長期間に渡り故障無く運転できることが望まれる。

このため、ITER 工学Ｒ＆Ｄにおいて日本原子力研究開発機構は、1995 年から遠隔保守装置とその周辺装置を構成すると考えられる約 55 種類の主要な機器・部品について線量率 10kGy/h、目標積算線量を最大 10～100MGy としたガンマ線照射による耐放射線機器・部品の試験開発を進めてきた。

耐放射線モータ駆動装置は上記試験開発結果に基づき、遠隔保守装置の耐放射線駆動源の開発を目的として、耐放射線レベルの異なる各種の機器・部品を使用し、遠隔保守装置の駆動源を模擬して設計、製作した８kgf の重り（模擬負荷）を指令信号によりモータで回転、制御する装置である。ガンマ線照射下での連続動作試験は 2000 年３月から約４年間に渡り実施された。試験では線量率を 3.6kGy/h、目標積算線量を 30MGy 以上とし、動作時のモータ電流及び主要部の温度データの取得、故障事象の把握、並びに耐放射線レベルの異なる機器・部品個々の外観変化（損傷の程度）を観察した。

那珂核融合研究所（駐在）：〒311-0193　茨城県那珂市向山 801-1
＋　量子ビーム応用研究部門　環境・産業応用研究開発ユニット

試験は、故障による途中停止とそれに続く分解点検修理をはさみ２段階に分けて実施された。その結果、第１、第２各段階の停止時までの積算線量は47.6MGy と 23.9MGy、連続動作時間はそれぞれ約 13,200 時間と 6,640 時間となり、最新の ITER 真空容器内線量率の評価値 0.5kGy/h から求められる遠隔保守装置の耐放射線性を充分に満たすことがわかった。なお、耐放射線モータ駆動装置がそれぞれの積算線量で停止した原因は、第１段階では減速機に充填したグリース潤滑剤の硬化、第２段階では電線の絶縁材、特にモータの動力線、信号線の劣化に起因した。

本報告書では耐放射線モータ駆動装置の設計条件と基本仕様、第１段階の照射試験及び第１段階照射試験後の分解点検とその後の再照射試験（第２段階）の結果等について述べる。

JAEA Technology 2006-023

Continuous Running Test of Radiation Resistance Motor Driving Equipment under High Gamma Ray Irradiation

Kenjiro OBARA, Satoshi KAKUDATE, Toshiaki YAGI+, Norio MORISHITA+
and Kiyoshi SHIBANUMA

Division of ITER Project
Fusion Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Naka-shi, Ibaraki-ken, Japan

(Received January 27 , 2006)

The components in the vacuum vessel of ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), e.g. blanket and divertor, are replaced periodically using the dedicated remote handling systems. The environment conditions inside the vacuum vessel during the operation are temperature of 50℃, air or inert gas atmosphere at 1atm under gamma ray radiation ; therefore multiple factors shall be considered for establishment of durability of the remote handling systems. Concerning the dose rate of gamma ray under the anticipated operation of ITER, it was evaluated 10kGy/h at the early stages of ITER EDA (Engineering Design Activity), but presently it decreases down to 0.5kGy/h after detailed design and evaluation have been done.
However, a continual operation for one year at the longest is planned in the remote handling systems, therefore the systems it is desired to be able to operate longer than that.

According to the requirements above, JAEA (Japan Atomic Energy Agency) advanced the development of radiation resistance components, major components of approximately 55 kinds which comprise the remote handling systems and that peripheral devices, since 1995 in ITER EDA. The dose rate and the target accumulation dose for the designated radiation resistance were set

---

+ Environment and Industrial Materials Research Division, Quantum Beam Science Directorate

10kGy/h and 10 - 100MGy, respectively.

On the basis of the development results, the radiation resistance motor driving equipment, which comprised parts with different radiation resistance levels, was designed simulating mechanisms of ITER remote handling systems. The motor driving equipment, the servomotor turns the weight of 8kgf (dummy load) and controls, and continuous running test under high gamma ray irradiation was lasted approximately four years from March, 2000.

Irradiation conditions on the test were ; the dose rate of 3.6kGy/h, the accumulation dose of 30MGy at the minimum. The data were obtained, which are acquired motor electric current, temperatures and the breakdown event under the test conditions. In addition, appearance changes of every component and device were observed. The irradiation test was performed in two stages, which was divided by a breakdown and successive overhaul of the equipment. The achieved accumulation dose and running time in those stages were approximately 47.6MGy/13,200hours and 23.9MGy/6,640hours, respectively. As a result, it has been confirmed that sufficient radiation resistance of the equipment, which is required against a dose rate of 0.5kGy/h at least, corresponding to the atmosphere inside the vacuum vessel, was achieved. Furthermore, the causes of breakdown at the 1st and the 2nd stages are hardening of the grease lubricant filled up in the reduction gear, and deterioration of electric insulation materials of power and signal lines, respectively.

In this report, we describe design conditions and basic specifications of the radiation resistance motor driving equipment, the results of the 1st and the 2nd irradiation tests and the overhaul after the 1st stage irradiation test.

Keywords : ITER, Remote Handling System, Maintenance, Radiation Resistance Component, Radiation Resistance Equipment, Gamma Ray, Servomotor, Grease Lubricant

目　　次

1．背景と目的 1
2．耐放性モータ駆動装置の基本仕様と設計条件 2
2.1 耐放性モータ駆動装置の基本仕様 2
2.2 耐放性モータ駆動装置の設計条件 14
2.3 ガンマ線照射条件 16
3．照射試験結果 20
3.1 第１段階の照射試験 20
3.2 第１段階の照射試験後の分解点検修理 24
3.3 第２段階の照射試験 29
4．考察と課題 31
4.1 第１段階の照射試験 31
4.2 第１段階の照射試験後の分解点検修理 32
4.3 第２段階の照射試験 33
4.4 窒素ガス雰囲気での照射試験 33
5．まとめ 35
5.1 モータ電流の変化について 35
5.2 モータ主要部の温度変化について 35
5.3 故障を防止するための対応 36
謝　　辞 37
参考文献 38

Contents

1. Background and object 1
2. Specifications and design conditions of
radiation resistance motor driving equipment 2
2.1 Specifications of radiation resistance motor driving equipment 2
2.2 Design conditions of radiation resistance motor driving equipment 14
2.3 Gamma ray irradiation conditions 16
3. Irradiation test results 20
3.1 Results of the 1st stage irradiation test 20
3.2 Overhaul after the 1st stage irradiation test 24
3.3 Results of the 2nd stage irradiation test 29
4. Discussions and issues 31
4.1 1st stage irradiation test 31
4.2 Overhaul after the 1st stage irradiation test 32
4.3 2nd stage irradiation test 33
4.4 Gamma ray irradiation test
in nitrogen gas atmosphere at 1atm (reference) 33
5. Conclusions 35
5.1 Change of the motor electric current under the irradiation test 35
5.2 Temperature change of the motor main parts under the irradiation test 35
5.3 Measures in order to prevent breakdown 36
Acknowledgements 37
References 38

List of Tables and Figures

Table 2.1 Main material list of the small-sized radiation resistance AC servomotor. ..10
Table 2.2 Main material list of the reduction gear box. 11
Table 2.3 Main material list of the thermocouples. 11
Table 2.4 Main material list of the limit switchs. 12
Table 2.5 Main material list of the angular bearing. 12
Table 2.6 Main material list of the flexible joint. 12
Table 2.7 Main material list of the cam-follower. 13
Table 2.8 Main material list of the electric connectors. 13
Table 2.9 Main material list of the terminal tables. 13
Table 2.10 Main material list of the electric wires and cables. 14
Table 2.11 Distribution of exposure dose rate on the radiation resistance motor driving equipment during the irradiation test. 19

Table 3.1 Electric insulation resistance changes of the motor before and after the 1st stage irradiation test. 28
Table 3.2 Electric resistance changes between phases of the motor before and after the 1st stage irradiation test. 28
Table 3.3 Induced voltage changes of the motor before and after the 1st stage irradiation test. 28
Table 3.4 Electric resistance changes between phases of the resolver before and after the 1st stage irradiation test. 28

Fig. 2.1 Configuration of radiation resistance motor driving equipment installed in the irradiation cell for the 1st stage irradiation test. 5
Fig. 2.3 Controller and data acquisition system for the radiation resistance motor driving equipment installed outside of the irradiation cell. 5
Fig. 2.2 Dimensions of the radiation resistance motor driving equipment. Unit:mm 6
Fig. 2.4 Arrangement of the radiation resistance motor driving equipment under the irradiation test. 18
Fig. 2.5 Movement of the rotational arm with the dummy load during the irradiation test. 18

Fig. 3.1 Change of motor current and temperature as a function of
accumulation dose on the 1st stage irradiation test. 22
Fig. 3.2 Change of penetration and dropping point of the grease (Type:RG42-1)
as a function of accumulation dose. 22
Fig. 3.3 Appearance change of the radiation resistance motor driving equipment
after the 1st stage irradiation test. 23
Fig. 3.4 Appearance change of the reduction gear box and the resolver
after the 1st stage irradiation test. 26
Fig. 3.5 Appearance of the reduction gear box and the resolver bearings
after the overhaul. 27
Fig. 3.6 Configuration of the radiation resistnce motor driving equipment
installed in the irradiation cell for the 2nd stage irradiation test. 30
Fig. 3.7 Change of motor current and temperatures as a function of
accumulation dose on the 2nd stage irradiation test. 30

Fig. 4.1 Formation of acid from nitrogen gas due to gamma ray irradiation. 34

1．背景と目的

国際熱核融合実験炉（ITER：International Thermonuclear Experimental Reactor）の真空容器内に取り付けられるブランケットやダイバータなどの構造物は、遠隔操作による専用の保守装置（以下、遠隔保守装置）を使用し定期的に保守・交換される［1］。遠隔保守装置運転時の真空容器内環境は、温度約 50℃、大気圧の乾燥空気または窒素などの不活性ガス雰囲気下で放射線（ガンマ線）照射環境となるため遠隔保守装置の耐久性には種々の要素が求められる。遠隔保守装置運転時の放射線環境については、ITER 工学Ｒ＆Ｄ当初に設定された平均線量率 10kGy/h が、その後の詳細な設計及び解析により漸次見直され、現在では 0.5kGy/h 程度とかなり低減されている［2］。しかしながら、遠隔保守装置には、最長１年程度の連続した運転（真空容器内滞在）が求められているため、できるだけ長期間に渡り故障無く運転できることが望まれる。

このため、ITER 工学Ｒ＆Ｄにおいて日本原子力研究開発機構（JAEA、以下原子力機構）は、1995 年から 1999 年にかけて遠隔保守装置とその周辺装置を構成すると考えられる約 55 種類の主要な機器・部品（以下、機器）のガンマ線照射による耐放射線機器（以下、耐放射線性を耐放性とする）の試験開発を進めてきた（本試験開発では、照射線量率を当初の評価値である 10kGy/h とし目標積算線量を 10MGy～100MGy に設定した）［3］。

試験開発に供された機器の仕様は、標準品、改造品、開発品に分類されるが、試験の結果、概略、電気モータ（開発品）、電線・ケーブル（改造品）、ガラス材料（標準品、改造品）は要求耐放性をほぼ満たすことができたが、ボールベアリング（改造品）、潤滑剤（改造品）、ファイバスコープ（改造品）、接着材（標準品）などは中程度、電子機器（標準品）とそれらを搭載した機器（標準品）については要求される耐放性からはほど遠い結果であった。

耐放射線モータ駆動装置（以下、耐放性モータ駆動装置）は、上記試験結果に基づき、耐放性レベルの異なる機器（およそ１MGy～数十 MGy の耐放性）を使用し、ITER 遠隔保守装置の駆動源を模擬して設計・製作した装置で、重さ８kgf の模擬負荷を指令信号によりサーボモータで回転、制御する。高線量率ガンマ線照射下での連続動作試験（以下、照射試験）は、2000 年３月からほぼ４年間に渡り原子力機構の高崎量子応用研究所のコバルト照射施設を使用して実施された。照射試験では積算線量に伴う動作

時のモータ電流及び主要部の温度データの取得、故障事象の把握、並びに機器個々の外見上の変化を観察した（本照射試験では、積算線量を管理するための平均線量率を 3.6kGy/h とし、目標積算線量を 30MGy 以上に設定した）。なお、照射試験は、故障による途中停止とそれに伴う分解修理をはさみ二段階に分けて実施された。

本報告書では耐放性モータ駆動装置の設計条件と基本仕様、第１段階の照射試験及び第１段階照射試験後の分解点検とその後の再照射試験（第２段階）の結果等について述べる。

２．耐放性モータ駆動装置の基本仕様と設計条件

耐放性モータ駆動装置の仕様は種々の条件を基に決められたが、本章では、まずは耐放性モータ駆動装置の概要を把握するため、はじめに基本仕様を述べると共に、耐放性モータ駆動装置本体（制御盤を除いた耐放性モータ駆動装置）の外観写真と外形寸法図、制御盤の写真をそれぞれ Fig. 2.1、Fig. 2.2 及び Fig. 2.3 に示す。また、Fig. 2.4 には模式的配置図を示す。照射セル（以下、セル）内に設置された耐放性モータ駆動装置本体には重さ８kgf の金属製の模擬負荷が取り付けられており（Fig. 2.5 参照）セル外に設置された制御盤からの指令により左右に回転するようになっている。

2.1 耐放性モータ駆動装置の基本仕様

１）基本仕様

・回転範囲　：０°～240°
（模擬負荷を取り付けた回転アームの動作範囲）
・回転速度　：10 rpm（最大）
・駆動方式　：AC サーボモータと
ハーモニックドライブ式減速機
・負荷容量　：10 kgf-m（最大トルク）
・主要構造材　：ステンレス鋼
・概略形状寸法　：幅　660 mm、奥行き　558 mm、
高さ　450 mm
（650 mm：アーム位置直上の場合）

２）耐放性モータ駆動装置本体の主要構成機器

(1) 駆動用モータ

・種　別　　：AC サーボモータ（以下、モータ）
・定格出力　　：約 30W
・定格回転数　　：　1,000 rpm
・速度/位置検出　：レゾルバ方式（以下、レゾルバ）
　　耐放性仕様／エンパイアマグネテクス社製
・主要構造材　　：本体／ステンレス鋼
　　回転子／永久磁石（サマリウム-コバルト系）
　　固定子巻線／ポリイミド被覆銅線
　　引出線他／ポリイミド被覆銅線
　　ベアリング潤滑剤／耐放性グリース

(2) 減速機

・種　別　　：ハーモニックドライブ方式
・減速比　　：1/100
・定格出力トルク　：６kgf-m
・主要構造材　　：本体／軸受け鋼
　　フレクスプライン／軸受け鋼
　　潤滑剤／耐放性グリース

(3) 構造部材

・部材名称　　：モータ取付フランジ、
　　ベース、回転アーム、模擬負荷
・材　料　　：ステンレス鋼

(4) 温度センサ

・種　別　　：Kタイプ熱電対（補償導線付き）
・設置数　　：３箇所

(5) 電線、ケーブル絶縁材

・種　別　　：ポリイミド、
　　PEEK（ポリエーテルエーテルケトン）、
　　ガラス繊維被覆

(6) リミットスイッチ

・主要構成材料　：フレーム／ステンレス鋼
　　接点／白金
　　絶縁材／セラミックス

(7) 端子台

・主要構成材料　：セラミックス

(8) コネクタ

・種　別　　：耐放性コネクタ

3）制御装置主要構成機器

(1) 構成機器

・操作盤

・シーケンスコントローラ

・タッチパネル

・サーボドライバ

・レゾルバ信号変換器

・データ計測表示器　：動作角度及び速度表示器

・データ取得装置

(2) 接続電線、ケーブル絶縁材

・照射セル内～セル外：ポリイミド、PEEK、ガラス繊維被覆

(3) データ計測接続端子

・モータ電圧

・モータ電流

・動作角度

・動作速度

・温　度（3点）

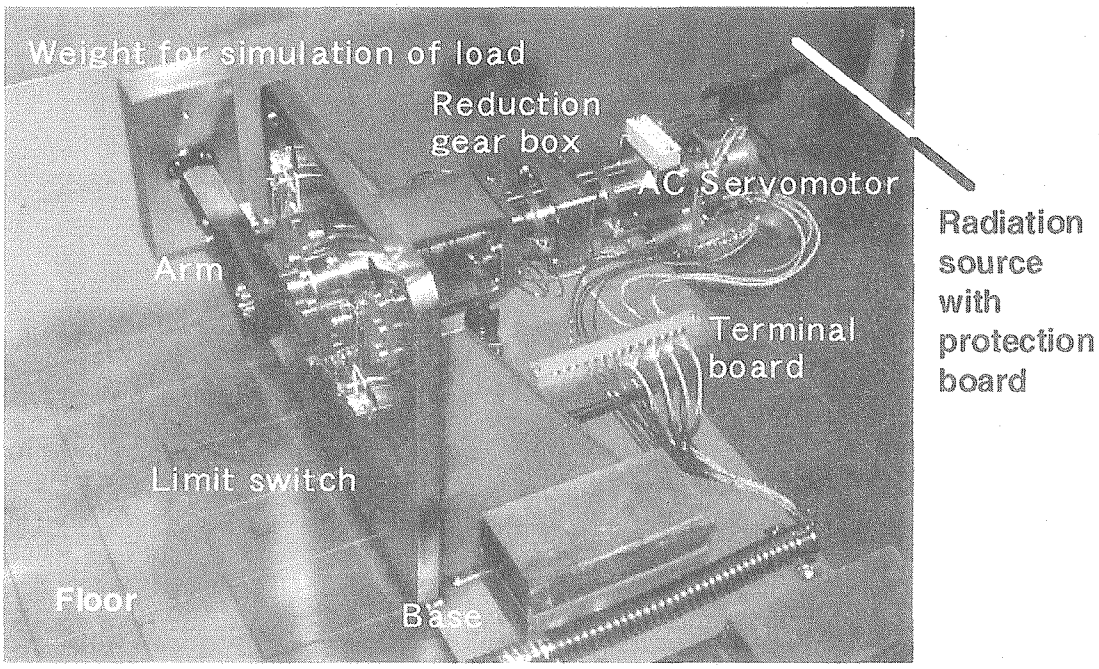
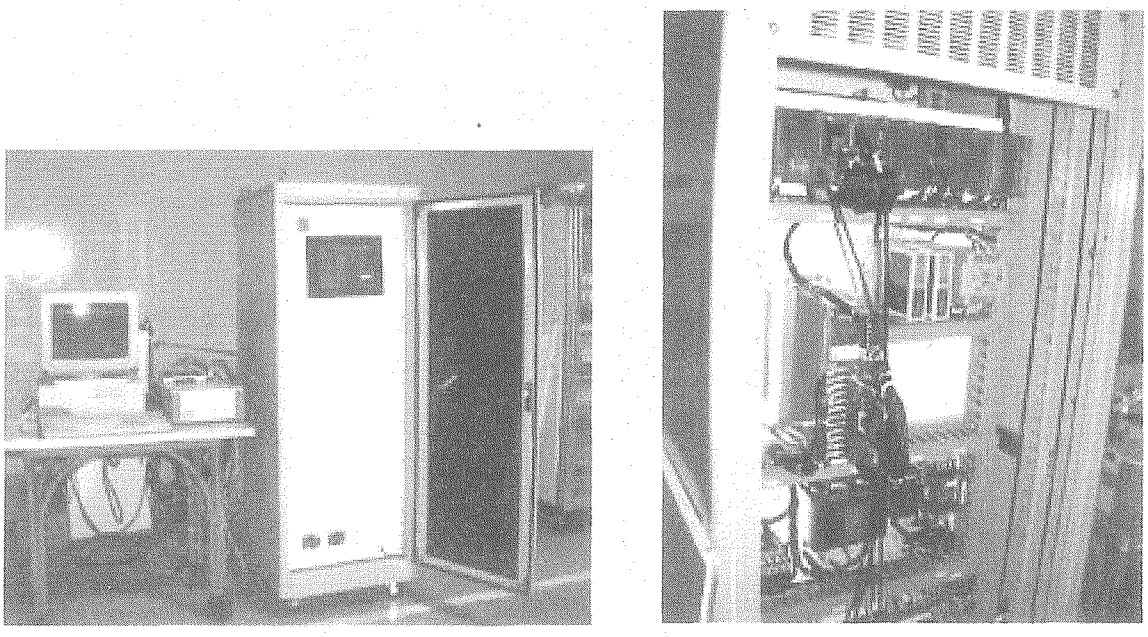


Fig. 2. 1. Configuration of radiation resistance motor driving equipment installed in the irradiation cell for the 1st stage irradiation test.



Controller (Front) Controller (Rear)

Fig. 2. 3. Controller and data acquisition system for the radiation resistance motor driving equipment installed outside of the irradiation cell.

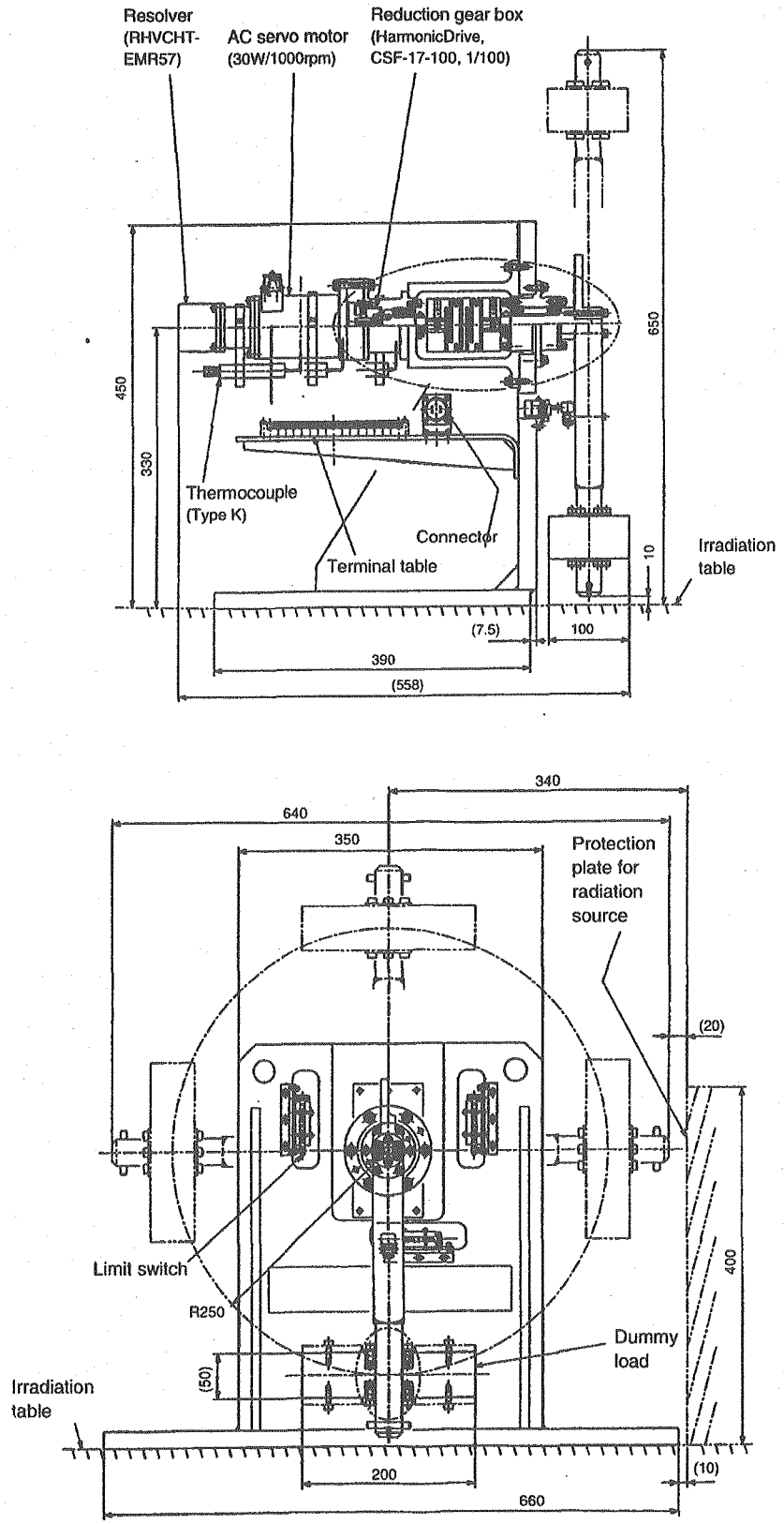


Fig. 2. 2. Dimensions of the radiation resistance motor driving equipment.Unit:mm

4）適用材料

耐放性モータ駆動装置本体を含め、耐放性装置のガンマ線照射による性能の低下（故障）の多くは、耐放性装置を構成する個々の機器・部品の材料の劣化、損傷に起因する。従って、耐放性装置の設計、製作に際しては、装置を構成する機器毎にそれらの構成材料（機器自体が多数の部品（材料）から構成されている）をできるだけ詳細に把握しておくことはきわめて重要である。

以下に 2.1 項で述べた耐放性モータ駆動装置の主要構成機器の構成材料の概要について述べるが、これらの機器の耐放性については 30MGy 以上を目標に設計、製作した。なお、標準品、改造品、開発品の定義については次の通りとした。

標準品　：耐放性仕様ではないが使用されている材料等から一定程度の耐放性があると判断された機器

改造品　：標準品の一部を耐放性仕様に改良した機器で市販されている機器

開発品　：新規に耐放性仕様として特注、試作した機器

（1）サーボモータ（開発品）

サビの発生を防止するため、ハウジングをはじめ多くの部品をステンレス鋼とし、電気絶縁性を要求される部分には耐放性のある高分子材料（ポリイミド、アラミド繊維など）やセラミックス材料（窒化珪素、アルミナなど）を使用した。また、回転子を支持するボールベアリングの潤滑剤の耐放性は特に重要であるが、本モータのベアリングには合成油とベントナイト（又はウレア）で調合した耐放性仕様のグリースを使用した。

また、位置検出器に使用したレゾルバ（米国製）は公称 2 MGy までの耐放性を有するとした報告以外の材料詳細等は不明である。但し、ベアリングについては、開放型の鋼製（SUJ2）ベアリングに同上グリースを充填した。

（2）減速機（改造品）

汎用品（減速機形式：ハーモニックドライブ）に充填されている潤滑グリースを耐放性仕様のグリース（サーボモータのベアリングに充填したグリースに同じ）に替えた。

（3）熱電対（標準品）

熱電対の場合、元々が高温対応となっているため、シース材にステンレス、絶縁材にガラス繊維などを使用している。このため耐放性にも

優れ、標準品の中からの選択が可能である。耐放性モータ駆動装置にはリード線にクロメル／アルメル、リード線の被覆にインコネル（シース）とアルミナ系セラミックスを使用した熱電対を取り付けた。

(4) リミットスイッチ（標準品）

リミットスイッチは種々の分野で使用されているため、それだけに多様な環境条件下で使用できるものが用意されている。試験装置本体に採用したスイッチは基本的にはステンレス鋼とセラミックスで構成されている。

(5) ベアリング（改造品）

モータの項で述べたとおり、耐放性上、特に問題となる潤滑剤に耐放性のあるグリースを使用した。

なお、使用環境の観点からグリースが忌避される場合があり、真空容器内部での使用もそのひとつである。しかしながら、本グリースの持つ長所、例えば、放射線分解によりフッ化水素生成の原因物質であるフッ化物を含まない、安価で使用が容易、劣化の形態は硬化であるため装置への二次的な障害を与えない（固体潤滑の場合、ベアリングの破壊を生じる恐れがある [4])、また硬化したグリースはエタノールで除去できるため機器の再使用が可能であるなど固体潤滑剤にはない長所がある。これらを考慮しグリースを採用した。

(6) 電気コネクタ（改造品）

レセプタクルとプラグのシェルをアルミ合金上に亜鉛メッキを施したものにし、絶縁体にポリイミドとセラミックスを使用した２種類の６ピンコネクタを製作した。

(7) 端子盤（改造品）

端子盤本体と上蓋の組合せをポリイミドと PEEK（ポリエーテルエーテルケトン)、PBI（ポリベンゾイミダゾール）とセラミックス（アルミナ）とした２種類の端子盤を製作した。また、中継端子板、小ネジ、座金にはニッケルメッキした無酸素銅、黄銅、リン青銅を使用した。

(8) 電線／ケーブル（標準品、改造品）

モータの動力・信号線には銅の撚り線にカプトンテープ（ポリイミド）を機械巻きし、シールド材にはスズメッキした銅を使用した。また、レゾルバの信号線には細径の同軸ケーブルを使用したが、導体は銀メッキした軟銅線、絶縁材には熱可塑性ポリイミドと PEEK を使い分けている。また、シールド材にはスズメッキした銅を、端末の圧着端子にはニッケルメッキした無酸素銅を使用した。

Table 2.1～Table 2.10 にモータ、減速機、熱電対、リミットスイッチ、ベアリング、自在継ぎ手、カムフロア、電気コネクタ、端子台、電線／ケーブルそれぞれの構成材料の明細を示す。

Table 2. 1 Main material list of the small-sized radiation resistance AC servomotor.

Component	Component part	Material
Shaft		SUS
Ball bearing	1. Outer ring 2. Inner ring 3. Ball 4. Retainer 5. Shield plate 6. Lubricant	1. SUS 2. do. 3. do. 4. do. 5. do. 6. Grease (Synthetic oil, Bentonite)
Bracket		SS
Stator Coil	1. Coil 2. Insulator 3. Wedge 4. Coil connector 5. Coil end strings 6. Vernish	1. Cu, Ni, Polyimide 2. Alamid fiber 3. do. 4. Polyimide, Si 5. Glass fiber 6. Bismaleimide, Epoxy
Stator core	1. Core 2. Insulation paint	1. Si-Fe 2. Polysiloxane resin
Cable tube		Silicone varnish, Glass
Terminal		Sn-plated Cu
Thermocouple	1. Conductor 2. Insulator of tip	1. Chromel, Almel 2. Polyimide
Flame		SUS
Resolver		Imported product (EP Co., USA)
Bearing for resolver	1. Outer ring 2. Inner ring 3. Ball 4. Retainer 5. Shield plate 6. Lubricant	1. High carbon Fe-Cr 2. do. 3. do. 4. do. 5. do. 6. Grease (Synthetic oil, Bentonite or Urea)
Terminal table	1. Body 2. Upper lid 3. Side lid 4. Screw	1. Polyimide 2. SiN 3. Al2O3 4. Ni-plated bronze
Rotor		Rare earth Co magnet
Spacer		SUS
Adhesive		Acrylic resin
Ring		SUS
Support		SUS
Bolt, Screw		SUS
Washer		SUS
Flexible joint		SUS

Table 2. 2 Main material list of the reduction gear box (Brand name : HarmonicDrive).

Component	Component part	Material
Circular spline		Carbon steel
Flexspline		Ni-Cr-Mo steel
Wave generator		Carbon steel
Hub		Aluminum alloy (Al, Mg)
Insert		Aluminum alloy
WG. bearing		High carbon Fe-Cr
Retainer		Bronze
Washer		Bronze
C-shape ring		Steel
Screw		High carbon steel
Shim plate		SUS
Lubricant		Grease (synthetic oil, Bentonite or Urea)

Table 2. 3 Main material list of the thermocouples.

Component	Component part	Material
Sheath		SUS
Insulator		MgO2
Terminal sleeve		Fe-Ni-Co
Sheath guide		SS
Terminal		Al2O3
Pipe		Ni
Thermocouple	1. Conductor 2. Jacket for conductor 3. jacket	1. Chromel, Almel 2. Al2O3 3. Al2O3, Inconel
Guide tube		SUS
Plate		SUS
Bolt and nut		SUS
Washer		SUS

Table 2. 4 Main material list of the limit switchs.

Component	Component part	Material
Case		Ceramics
Terminal		SUS
Fixed plate		SUS
Receiver plate		SUS
Movable plate		SUS
Contact		Platinum
Screw		SUS
Washer		SUS
Spring		SUS
Push botton		Ceramics
Bush		SUS
Cover		SUS
Holder		SUS
Adhesive		Adhesive for ceramics
Shaft		SUS
Roller		SUS
Bearing		SUS

Table 2. 5 Main material list of the angular bearing.

Component	Component part	Material
Bearing	1. Outer ring	1. High carbon Fe-Cr
	2. Inner ring	2. do.
	3. Ball	3. do.
	4. Retainer	4. Bronze
	5. Shield plate	5. Zinc-plated steel
	6. Lubricant	6. Grease (Synthetic oil, Bentonite or Urea)

Table 2. 6 Main material list of the flexible joint.

Component	Component part	Material
Joint		SUS

Table 2. 7 Main material list of the cam-follower.

Component	Component part	Material
Cam-follower	1. Stud	1. SUS
	2. Outer ring	2. do.
	3. Side plate	3. do.
	4. Roller	4. do.
	5. Retainer	5. do.
	6. Lubricant	6. Grease (Synthetic oil, Bentonite or Urea)

Table 2. 8 Main material list of the electric connectors.

Component	Component part	Material
Connector 1	1. Shell	1. Zinc-plated aluminum alloy
	2. Pin contact	2. Ni-plated and Au-plated Cu alloy
	3. Insulator	3. Polyimide
connector 2	1. Shell	1. Zinc-plated aluminum alloy
	2. Pin contact	2. Ni-plated and Au-plated Cu alloy
	3. Insulator	3. Ceramics

Table 2. 9 Main material list of the terminal tables.

Component	Component part	Material
Terminal table 1	1. Body	1. Polyimide
	2. Upper lid	2. PEEK (Polyether-ether-ketone)
	3. Translation plate	3. Chromel, Alumel
	4. Translation terminal	4. Ni-plated OFHC, Ni-plated bronze
	5. Screw and washer	5. Ni-plated bronze, Ni-plated steel
Terminal table 2	1. Body	1. Polyimide
	2. Upper lid	2. Ceramics
	3. Translation plate	3. Ni-plated OFHC, Ni-plated bronze
	4. Screw and washer	4. Ni-plated bronze, Ni-plated steel

Table 2. 10 Main material list of the electric wires and cables.

Component	Component part	Material
Cable for motor	1. Conductor 2. Jacket 3. Shield	1. Polyimide-coated Cu 2. Polyimide 3. Sn-plated Cu
Coaxial cable for resolver	1. Inner conductor 2. Insulator 3. Outer conductor 4. Jacket 5. Shield	1. Ag-plated Cu wire 2. Polyimide 3. Ag-plated Cu wire 4. PEEK (polyether-ether-ketone) 5. Sn-plated Cu
Wire for thermocouple	1. Conductor 2. Coating material 3. Shield 1 4. shield 2	1. Chromel, Alumel 2. Ceramics 3. Ceramics 4. Inconel
Terminal	1. For thermocouple 2. For others	1. Chromel, Alumel 2. Ni-plated OFHC (oxygen free high conductivity copper)

2.2 耐放性モータ駆動装置の設計条件

1）基本設計

耐放性モータ駆動装置の駆動源については、実機遠隔保守装置の駆動源の使用条件に基づき、以下の通りとした。

・減速機の形式はハーモニックドライブとする。

・減速機には一時的にモータ定格の 100%以上の負荷が加わることから、減速比は 1/100 とする。

・減速機の定格トルクは、2000rpm 相当の等価トルクの 1.25 倍に近いものを選ぶ。

・平均負荷率を上げるため、停止時もモータ定格の約 100%の負荷トルクを加える。

2）耐放性モータ駆動装置の寿命

ガンマ線照射による影響を確認するためには、耐放性モータ駆動装置の設計寿命（ハーモニックドライブあるいはサーボモータのベアリングいずれかの総寿命回転数によるものと仮定）は目標集積線量に達するまでの時間以上動作するように設計されなければならない。前述した遠隔保守装置の当初の目標集積線量は 30MGy 以上（最新の線量率の評価により、現在は 5 MGy）で、その時の線量率は 2.5kGy/h であ

ることから設計寿命は 12,000 時間となるが、今回の検討では、一桁高い線量率での使用も想定し、設計寿命を 20,000 時間とした。
耐放性モータ駆動装置の場合、その寿命は前述の通りハーモニックドライブのウエーブジェネレータ、あるいはモータのベアリングいずれかの総寿命回転数（定格寿命）によって決定されると仮定したが、それぞれの定格寿命は 10^9 回転と 2×10^{10} 回転であることから耐放性モータ駆動装置の繰り返し連続動作時間（運転パターン）はウエーブジェネレータの定格寿命を基に決定した。

3）運転パターンの決定

模擬負荷を装着した回転アームを左右へそれぞれ 180° ずつ回転させる動作を 1 サイクルとする。

・次に 1 サイクルに要するモータの回転数を 100 回転とする。

・これによりハーモニックドライブのウエーブジェネレータの定格寿命までの総サイクル数は 10^7 サイクルとなる。

・安全率を 1.5 としたときの実効総サイクル数は 6×10^6 サイクル。

・実効総サイクル数に達するまでの時間が 20,000 時間を越えないためには、

（2×10^4 時間／6×10^6 サイクル）$\times 3600 = 12$ 秒／サイクル

としなければならない。

以上を基に決定された運転パターン（1 サイクル 12 秒）を Fig. 2.5 に示す。本運転パターンの詳細は以下の通りである。

（1）-90deg.位置から＋方向（右方向）へ 0.1 秒で定格速度（10rpm）まで加速する。
（2）定格速度で 2.9 秒間、＋方向へ回転。
（3）0.1 秒間で減速させ、+90deg.位置で停止（0prm）。
（4）+90deg.位置で 2.9 秒間停止。
（5）+90deg.位置から－方向（左方向）へ 0.1 秒で定格速度（10rpm）まで加速する。
（6）定格速度で 2.9 秒間、—方向へ回転。
（7）0.1 秒間で減速させ、-90deg.位置で停止（0prm）。
（8）-90deg.位置で 2.9 秒間停止。

照射試験では（1）から（8）までの動作を連続して繰り返す。

4）モータのベアリングの寿命評価

ベアリングの寿命を定格疲れ寿命（一定回転速度で使用される場合の寿命：Lh（時間））で評価する。

・$Lh = \{10^6 / (60 \times n)\} \times (c / p)^3$

n：回転速度（1000rpm）

c：基本動定格荷重（3850N）

p：動等価荷重（137.7N）

以上からモータベアリングの寿命は 3.6×10^5 時間となり、ウエーブジェネレータの寿命 1.7×10^5 時間、照射計画時間２万時間に比べ充分に長く問題はない。但し、ベアリング、ウエーブジェネレータそれぞれの寿命は指定された潤滑剤（標準品）を使用し、通常環境下で動作した場合の評価である。

5）耐放性モータ駆動装置の負荷率

耐放性モータ駆動装置の負荷率は以下の通りである。

・最大負荷トルク　：24.3Nm（定格出力トルクの 12.1%）
・最大速度　：10rpm
・平均負荷トルク　：16.2Nm（定格出力トルクの 80%）
・平均速度　：499rpm（定格速度の 50%）

2.3 ガンマ線照射条件

耐放性モータ駆動装置の照射線量率と照射環境については、１章でも述べた通り、照射試験開始当時の線量率評価を基にできるだけ平均 2.5kGy/h に近づけるようにしたが、耐放性モータ駆動装置本体が三次元的な拡がりを持っていることや照射場所（原研機構高崎量子応用研究所、コバルト１棟２セル）の線源配置、照射台の取り合い等に種々の制約があるため、結果として以下の通りとした。

・照射線量率：平均 3.6kGy/h（積算線量管理値）
・温度・湿度：特に制御、管理せず
・雰囲気　：大気（外気取込、排気（ワンスルー方式））

照射線量率は、耐放性モータ駆動装置の構成機器が幅 660mm、奥行き 558mm、高さ 450mm の空間寸法内に分散して配置されているため機器毎に異なり、その範囲はおおよそ１kGy/h～６kGy/h であった。また、線源側に面する線量率に対しその反対側の線量率は、例えばモータの場合、約 1/2～1/6 に減少した。これは、線源からの水平距離の違いにもよるが、本照射試験の場合は装置の構成材料自身の遮蔽による影響が大きい。

Table 2. 11 にアラニン線量計にて測定した耐放性モータ駆動装置各部の照射線量率の測定結果を示す。表の上部に添えてある概念図は、アラニン線量計の取付位置を示した耐放性モータ駆動装置の平面図である。今回の

照射試験での積算線量の管理には線量率 3.6kGy/h を用いたが、この値はモータ周辺での測定結果、具体的には線量計番号 6～11 の測定値の平均値である。

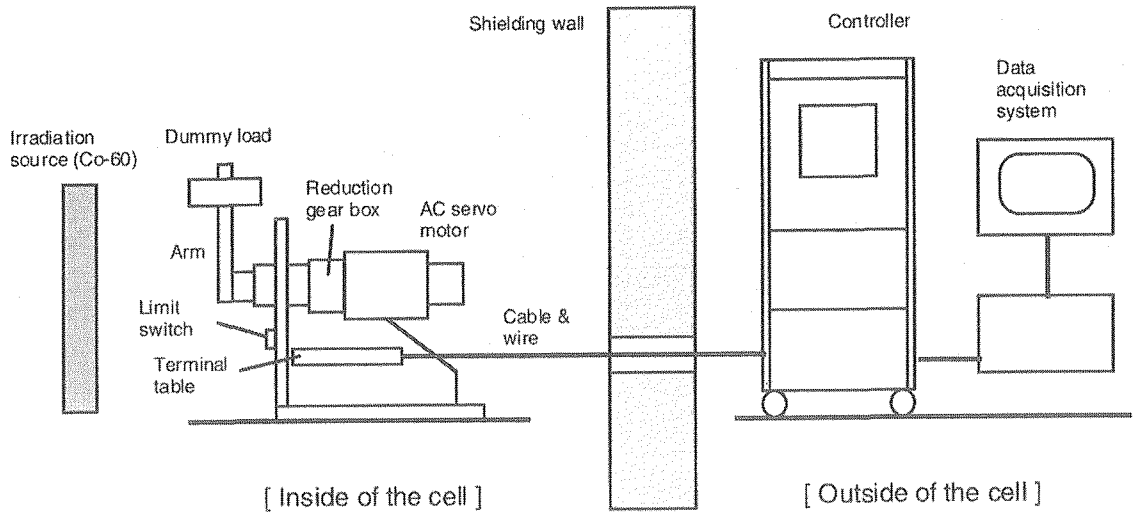


Fig. 2. 4. Arrangement of the radiation resistance motor driving equioment under the irradiation test.

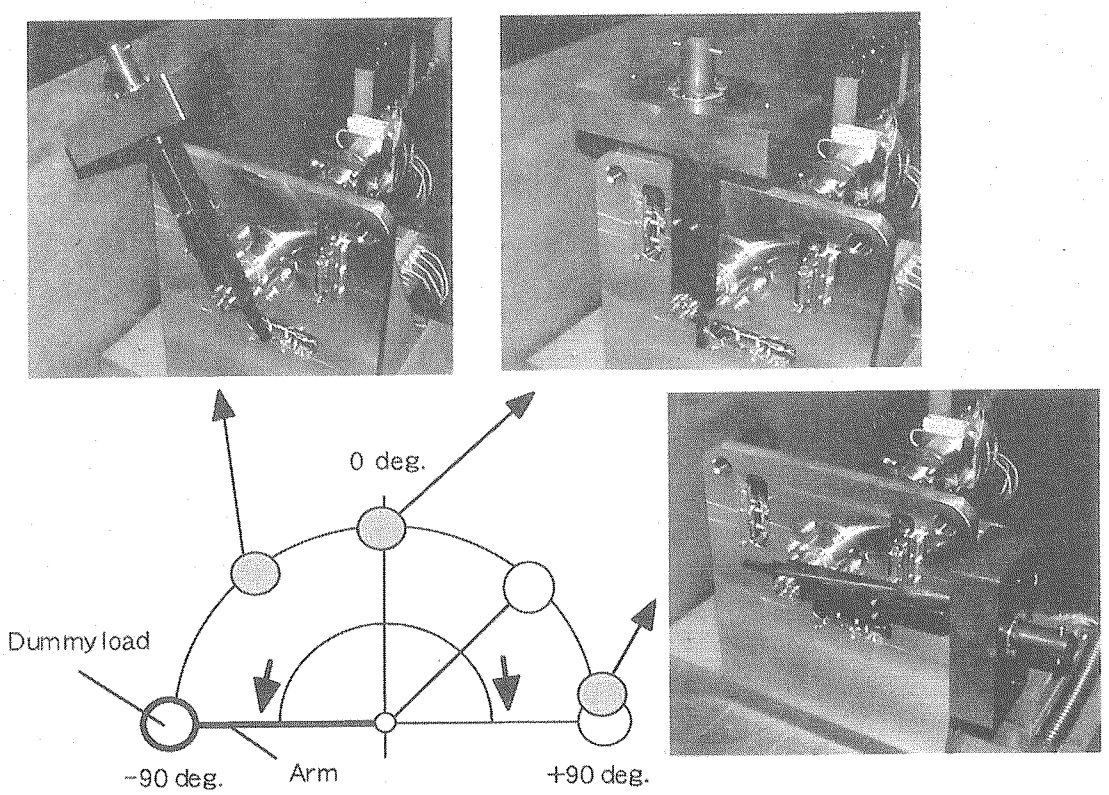
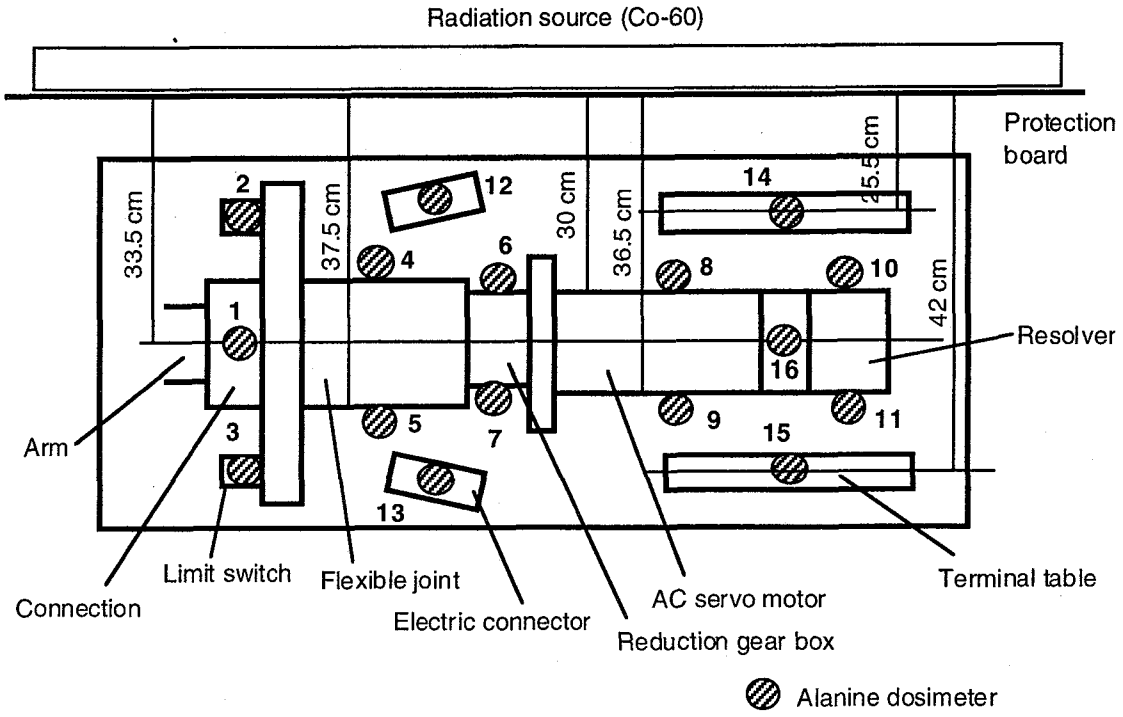


Fig. 2. 5. Movement of the rotational arm with the dummy load during the irradiation test.

Table 2. 11 Distribution of exposure dose rate on the radiation resistance motor driving equipment during the radiation test.



Alanine dosimeter No.	Position of the Alanine dosimeter (cm)		Dose rate (kGy/h)
	Distance from protect. board	Height from floor	
1	33.5	25.0	1.12
2	21.5	38.0	3.31
3	42.0	38.0	4.13
4	30.0	38.0	4.66
5	37.0	38.0	1.83
6*	30.0	38.0	5.05
7*	36.5	38.0	0.96
8*	30.0	35.0	5.91
9*	36.5	35.0	0.99
10 *	30.0	33.0	5.85
11*	36.5	33.0	2.66
12	25.5	22.5	4.93
13	45.0	22.5	3.20
14	25.5	22.5	6.81
15	42.0	22.5	3.26
16	33.5	41.0	4.71

* Mean value of exposure dose rate was calculated using these Alanine dosimeters (No.6, 7, 8, 9, 10, 11).

3．照射試験結果

照射試験は耐放性モータ駆動装置が積算線量 47.6MGy で停止するまで（第１段階）と、その後分解点検修理を実施し、再試験後、積算線量 23.9MGy で同駆動装置が停止するまで（第２段階）の２段階の試験に分けられる。

停止の主な原因は、第１段階では減速機に充填したグリースの硬化、第２段階では電線の絶縁材、特にモータの動力線、信号線の劣化に起因するものであった。各段階の運転時間は第１段階が 13,222 時間、第２段階が 6,639 時間で総運転時間は 19,861 時間である。

3.1 第１段階の照射試験

Fig. 3.1 に第１段階の積算線量の変化に伴う耐放性モータ駆動装置の電流／温度変化を示す。横軸は照射量、左縦軸はモータ電流値、右縦軸は耐放性モータ駆動装置本体各部の温度を示している。それぞれの値は運転開始時の値を１とした相対値で示している。なお、データの収録間隔は収録容量の制限上 30 秒間に１回とした。なお、Fig. 3.1 では積算線量６MGy から 16MGy の間、モータ電流が測定されていないが、これはデータ収録装置の故障による。

電流値は照射開始後増減を繰り返すが、全体としては 38MGy 近辺までは漸減しその後再度増加する傾向を示している。

原因の一つとして、ベアリングや減速機の潤滑剤に使用したグリース（商品名：モレスコハイラッド RG-42-1）の性状変化が考えられる。Fig. 3.2 はグリース単品のガンマ線照射によるちょう度（penetration）と滴点（dropping point）の変化を JIS2220 に準拠した方法により測定した結果である。これらの性状変化の中で最も影響が大きいと考えられるちょう度（硬さ）については、混和ちょう度（worked penetration：測定前に試料を混ぜ合わせる）、不混和ちょう度（unworked penetration：測定前に試料を混ぜ合わせることはしない）共に照射開始直後から次第に上昇（軟化）し 40MGy をピークにその後低下（硬化）する傾向を示すが、これがモータへの負荷変動となり電流値にも影響したと推測される。なおベアリングや減速機内ではグリースは常時混和されていることから、混和ちょう度の結果が不混和ちょう度の結果に比べ実態を反映していると考えられる。滴点については 40MGy から急激に低下する傾向が見られる。

以上から、グリースは照射量 40MGy 近辺を境に基油と増ちょう材の分離

が進行し、グリースとしての性状を失うと共に硬化していくことがわかる。一方、耐放性モータ駆動装置本体各部（モータ固定子巻線、モータベアリング、模擬負荷ベアリング）の温度はモータ電流の変化に比べかなり激しい変化を示し、また各部間に温度差はあまりみられない。

原因の一つとして外気温度の影響が考えられる。すなわち、照射試験ではセル内の大気もガンマ線照射されるため、セル内には大量のオゾンが発生する。このオゾンを排出するためセル内には常時外気を導入・排気しているが、これによりセル内は年間を通して外気温度の影響を直接受けている（夏季と日中は高温、冬期と夜半は低温傾向になる）。結果として耐放性モータ駆動装置にもその影響が及んでいると考えられる。

Fig. 3.3 に 47.6MGy 照射後の耐放性モータ駆動装置本体各部の外見上の変化について示す。顕著な変化としては、模擬負荷を回転アームに取り付けるためのネジと圧着端子にサビが発生した。これらのサビは静置状態では特に故障の原因にはならないが、実機で想定される装置の姿勢の変化による剥離、飛散が生じた場合には駆動部をはじめ各所の故障を誘発すると共に真空容器内汚染の原因となる。

上記総合所見の他、耐放性モータ駆動装置が停止するまでに見られた特徴的な事象として以下の２項目があげられる。

（1）動作中に回転アームの振り位置が次第にずれていった。

（2）サーボエラーの発生頻度が次第に多くなり、自動運転ができなくなった。

これらの事象の原因については、次項で述べる分解点検の結果から減速機とレゾルバのベアリングそれぞれに充填したグリースの硬化によるものであることがわかった。

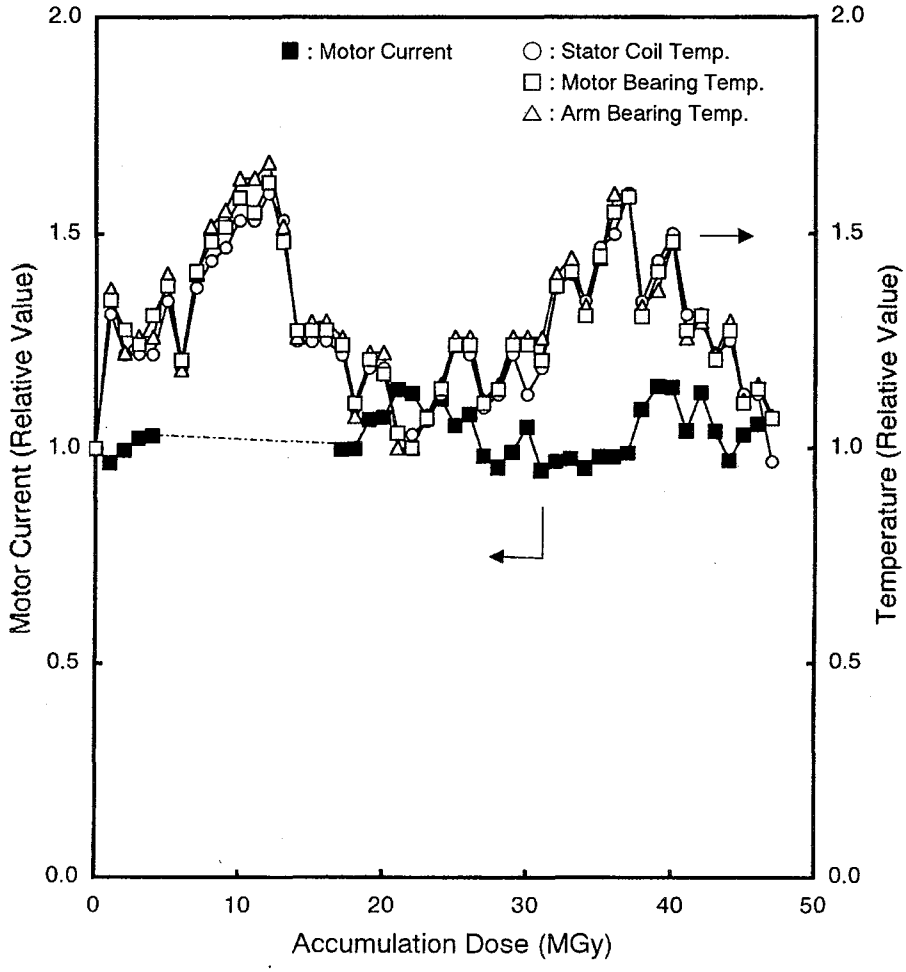


Fig. 3. 1. Change of motor current and temperature as a function of accumulation dose on the 1st stage irradiation test.

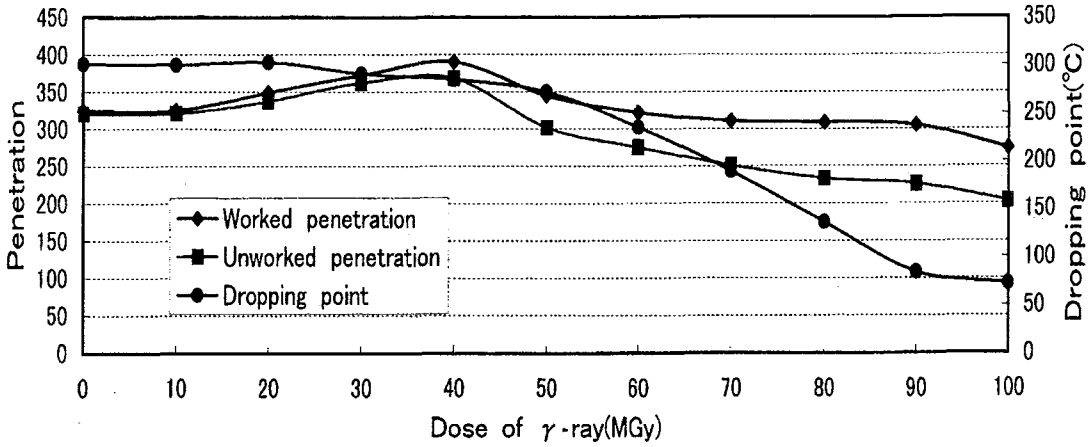
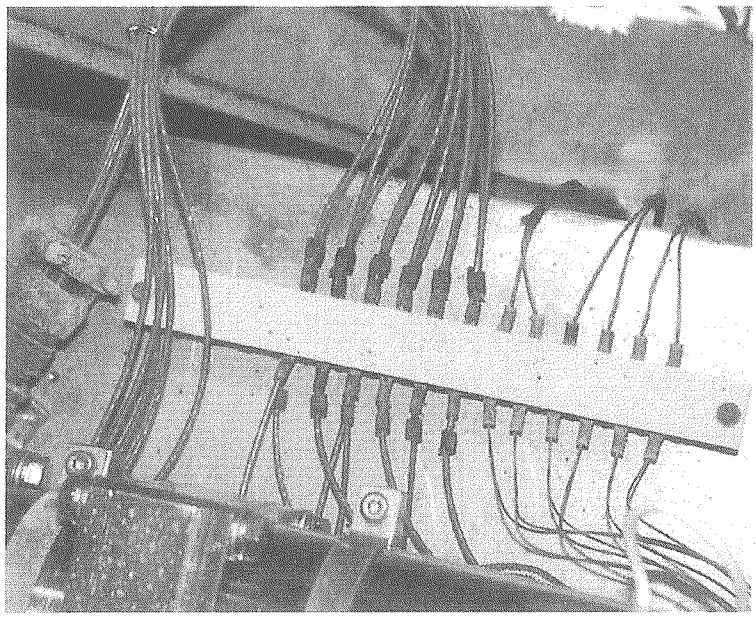
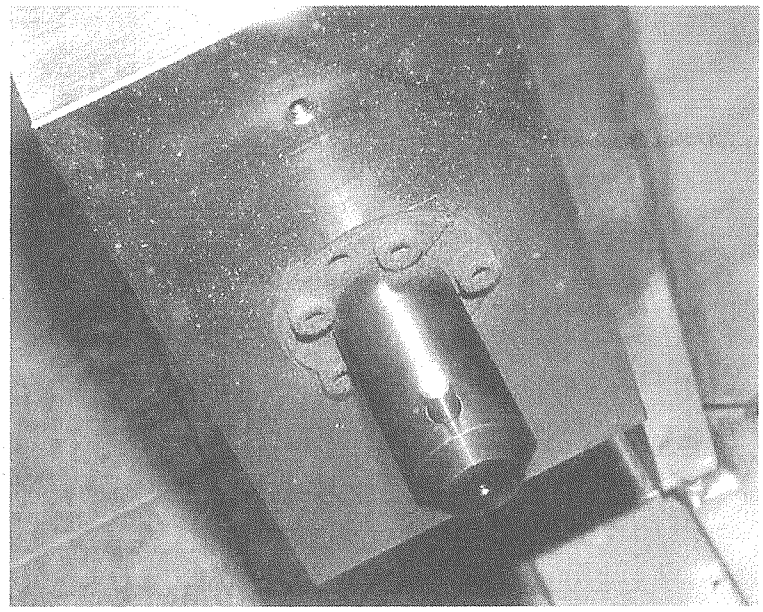


Fig. 3. 2. Change of penetration and dropping point of the grease (Type : RG-42-1) as a function of accumulation dose.



Electric terminals and screws



Screws which lock the dummy load

Fig. 3. 3. Appearance change of the radiation resistance motor driving equipment after the 1st stage irradiation test (accumulation dose of 47.6MGy).

3.2 第1段階の照射試験後の分解点検修理

3.1 項で述べた事象から停止の原因は、減速機の潤滑障害、摩耗等によると推測された。このため、分解点検は主に減速機とモータのレゾルバについて実施した。既に述べた通り、減速機の形式はハーモニックドライブである。ハーモニックドライブは基本的にはウエーブジェネレータ（wave generator)、フレクスプライン (flexspline)、サーキュラスプライン (circular spline）の3種類の機械要素から構成されている。潤滑剤には耐放性グリース（型式：RG42-1）を使用した。

耐放性モータ駆動装置本体の平均積算線量は 47.6MGy であるが、構成機器の設置場所毎の照射線量率が異なるため、例えば、減速機とレゾルバの積算線量について個別の線量計による線量率を基に概算するとそれぞれ 69MGy、64MGy となりかなりの積算線量であることがわかる。

Fig. 3.4 に分解後の状態を示す。モータの出力軸と接続されたウエーブジェネレータの中心部のグリースの色は照射前の白色から褐色に、またフレクスプラインとの接合部は黒灰色に変色していると共に硬化が認められた。特に、摺動面であるウエーブジェネレータのベアリング内部やフレクスプライン、サーキュラスプラインの歯面には硬化したグリースが固着し、潤滑の役目を全く果たしていないような状態であった。変色の違いは機械的摩耗の程度と積算線量（正確には照射線量率が異なる）の違いによると考えられる。

これらの部品をエタノールで溶解洗浄し、目視によって確認した結果、フレクスプラインの歯に多少の摩耗が、またウエーブジェネレータのベアリングでは、新グリース充填後も回転時にわずかな抵抗はあったが再使用はできると判断された。

減速機と回転アーム間の状態確認は、減速機をはずし、ベアリングの回転抵抗のみとなる状態で行ったが、問題となるようなガタツキは見られなかった。

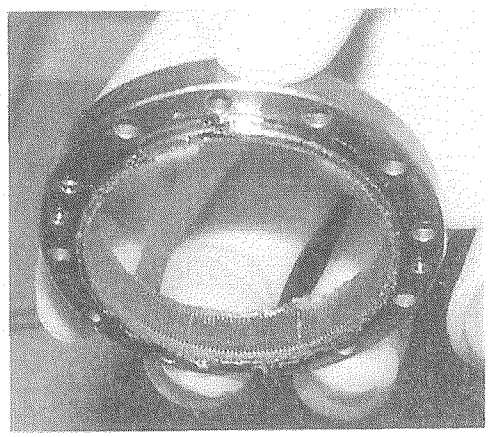
モータとレゾルバの接続部については、やはり減速機をはずした状態でモータ単体、レゾルバ単体それぞれの回転抵抗の有無を確認、レゾルバに回転抵抗が見られたためレゾルバを分解、目視点検した。その結果、レゾルバの回転軸の両端に装着されていた2個のベアリングのグリースは一部飛散し、共に黒く変色、硬化していた。これら2個のベアリングをステンレス製のシールド付きのベアリングに交換し、新しいグリースを封入した。

電気的な確認については、モータについては絶縁抵抗、相間抵抗、誘起電圧についてそれぞれ測定した。また、レゾルバについては相間抵抗を測定した。その結果、再使用上、特に問題のないことがわかった。Table3.1～3.4 に測定結果を示す。

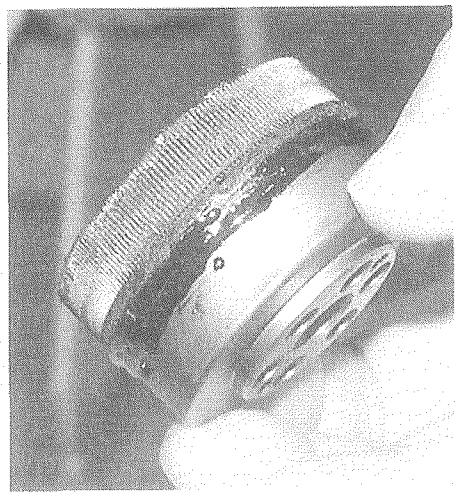
電気的点検では、上述した測定の他、ポリイミドテープによる絶縁を施した電線の一部にわずかな剥離が観察されたが、この時点では絶縁上の不具合は認められなかった。

以上に基づき、新しい耐放性グリース（型式：RG42-1）を充填した減速機（Fig. 3.5 充填後の状態参照）とレゾルバベアリングを再度耐放性モータ駆動装置本体に組み込み、動作試験を行った。その結果、作業前に見られた　①動作中の回転アームの振り位置のズレ　②サーボエラーの発生頻度の増加による自動運転不能　は再現されず、正常に動作することが確認された。またこれらの事象の原因については、それぞれ次のように推測される。

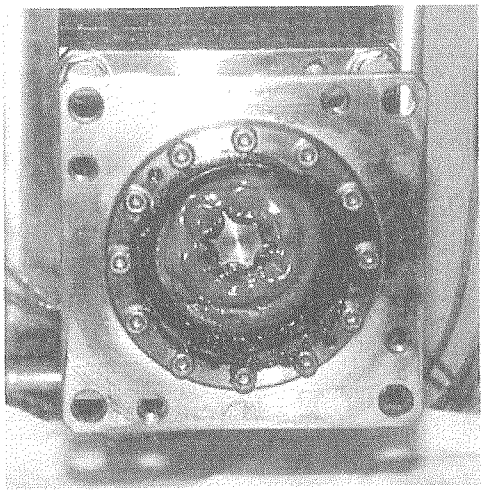
①については、硬化したグリースが減速機のフレクスプライン、サーキュラスプラインの歯に詰まり、動作中に噛み合い位置が次第にずれ、結果としてアームの振り位置がずれていった。また、②については、硬化したグリースが抵抗となり、モータが回しきれなくなったために発生したと考えられる。



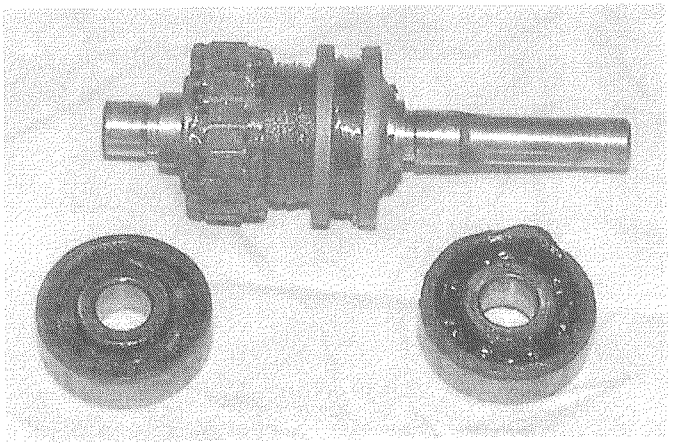
Circular spline of the HarmonicDrive.



Flexspline of the HarmonicDrive.

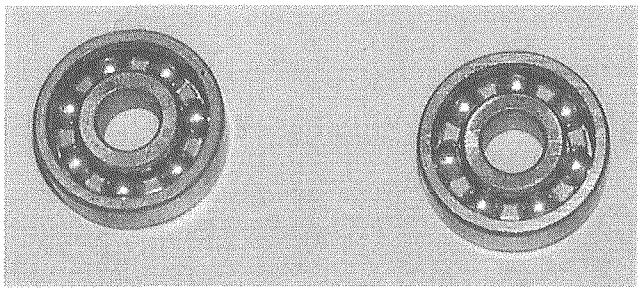


A part of the gear connected to the motor.

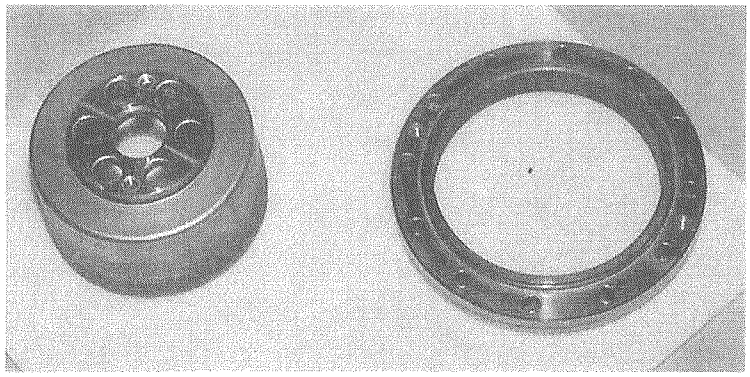


Ball bearings of the resolver.

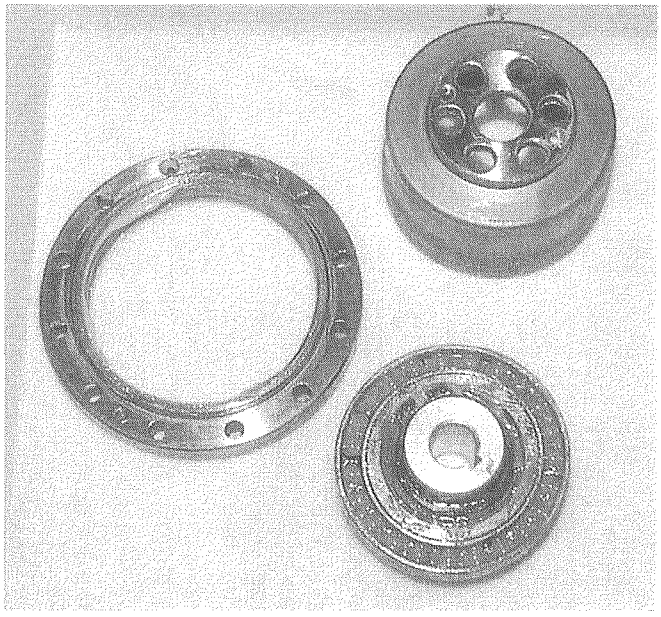
Fig. 3. 4. Appearance change of the reduction gear box and the resolver after the 1st stage irradiation test.



Ball bearings which are inserted into the both ends of the resolver rotational axis.



Flexspline (left) and Circular spline (right) of the HarmonicDrive.



Wave generator, Flexspline and Circular spline of the HarmonicDrive which fill up the new grease.

Fig. 3. 5. Appearance of the reduction gear box and the resolver bearings after the overhaul.

Table 3. 1 Electric insulation resistance changes of the motor before and after the 1st stage irradiation test (DC 500V/1min.).

Terminal	After 1st step test	Before 1st step test
U	75.3 MΩ	over 100 MΩ
V	77.0 MΩ	over 100 MΩ
W	72.3 MΩ	over 100 MΩ

Table 3. 2 Electric resistance changes between phases of the motor before and after the1st stage irradiation test.

Phase	After 1st step test	Before 1st step test
U - V	4.1 Ω	3.965 Ω (20℃)
V - W	4.1 Ω	.3.964 Ω (20℃)
W - U	4.1 Ω	3.963 Ω (20℃)
U - E	∞	-
V - E	∞	-
W - E	∞	-

Table 3. 3 Induced voltage changes of the motor before and after the 1st stage irradiation test (unit : V).

rpm	U - V		V - W		W - U	
	After	Before	After	Before	After	Before
200	3.2	3.44	3.2	3.43	3.2	3.43
400	6.7	6.89	6.7	6.88	6.7	6.88
600	10.2	10.35	10.2	10.33	10.2	10.33
800	13.7	13.82	13.7	13.78	13.7	13.78
1000	17.2	17.27	17.2	17.23	17.2	17.23

Table 3. 4 Electric resistance changes between phases of the resolver before and after the 1st stage irradiation test.

Phase	After 1st step test	Before 1st step test
R1 - R2	24.4 Ω	24.3 Ω
S2 - S4	73.9 Ω	73.3 Ω
S1 - S3	73.6 Ω	73.1 Ω

3.3 第2段階の照射試験

Fig. 3.6 に分解点検終了後、照射セル内に再度設置された耐放性モータ駆動装置本体の状態を示す。また、Fig. 3.7 に第2段階の積算線量の変化に伴う耐放性モータ駆動装置本体の電流／温度変化を示す。第1ステップ同様（Fig. 3.1）横軸は照射量、左縦軸はモータ電流値、右縦軸は耐放性モータ駆動装置本体各部の温度を示している。それぞれの値は運転開始時の値を1とした相対値で示している。データの収録間隔は第1ステップ同様収録容量の制限上 30 秒に1回である。なお、モータ固定子巻線の温度は積算線量 5 MGy 以降、センサーの故障により測定不能となった。

モータ電流、温度共に動作開始直後から第1段階の結果に比べ変化が激しい。これは、今回の分解点検がレゾルバのベアリングと減速機に限定して実施され、モータ本体や回転アームのベアリングは除外されたことに起因すると考えられる。モータ本体や回転アームのベアリング内のグリースの劣化も充分に想定されたが、先の分解点検では減速機やレゾルバのベアリングに比べ回転抵抗が特段に大きくなかったことや作業工程上の制約もあり、これらのベアリングについては分解点検を実施しなかった。

この結果、耐放性モータ駆動装置本体としての機械的調和（機械的馴染み）がとれず、これが動作開始直後の激しい変化を招いたと推定される。

この激しい変化は積算線量 12MGy まで続き、その後 23.9MGy で停止するまでは緩やかな変化となっている。

積算線量 23.9MGy の時点で漏電ブレーカが作動し、耐放性モータ駆動装置は停止した。漏電の原因は、照射線源近傍に配線されたモータの動力線、信号線の極度の絶縁劣化、剥離によるものであった。これらの電線の絶縁は、ポリイミド製テープを機械巻きしたもので、熱成形によって処理したポリイミド製絶縁被膜に比べ耐久性に劣る。

応急的な処置では絶縁性能は回復せず、また、第1段階を含めた照射量の積算が目標に達していたため第2段階での照射試験はこの時点で終了し、耐放性モータ駆動装置をセルから撤去した。

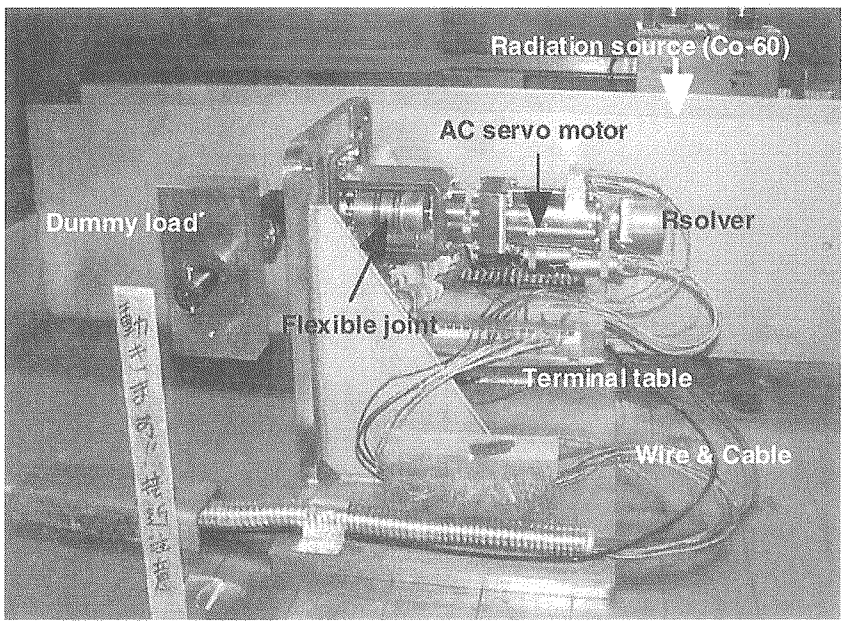


Fig. 3. 6. Configuration of the radiation resistance motor driving equipment installed in the irradiation cell for the 2nd stage irradiation test.

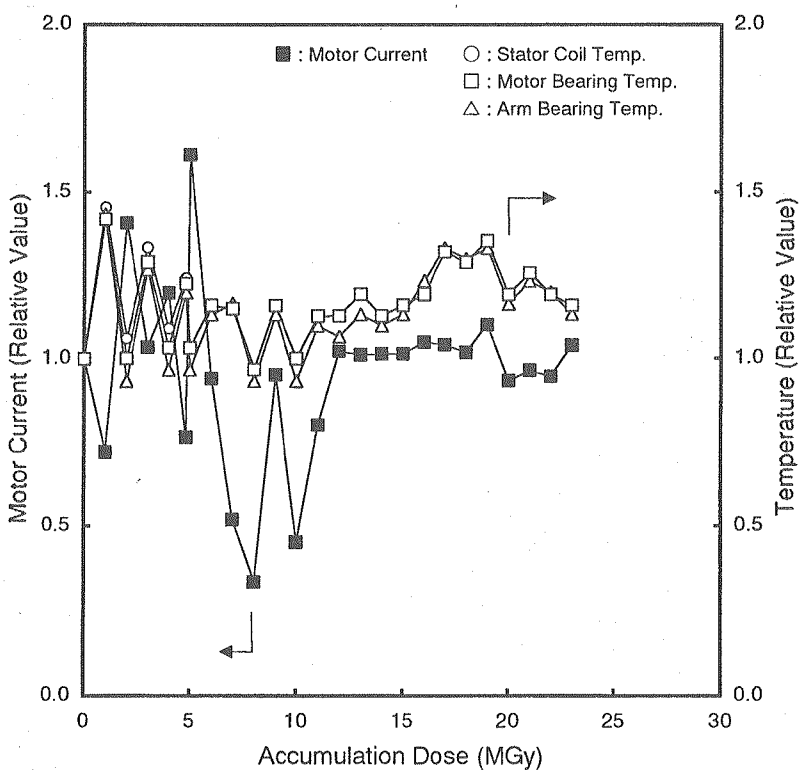


Fig. 3. 7. Change of motor current and temperature as a function of accumulation dose on the 2nd stage irradiation test.

4．考察と課題

ITER の遠隔保守装置の駆動源の設計思想を基に、耐放性機器によって設計、製作した耐放性モータ駆動装置の高線量率ガンマ線照射下での照射試験を実施した。以下、段階毎の考察と課題について述べる。

4.1 第1段階の照射試験

第1段階での積算線量と運転時間はそれぞれ 47.6MGy と 13,222 時間であった。この間、特に問題となる故障はなかったが、最終的には潤滑剤に使用したグリースの硬化により耐放性モータ駆動装置は停止した。

グリースの硬化を予測させる現象として、回転アームの実動作位置と制御盤上のモニター表示との位置ズレ、及び位置ズレによると考えられるサーボエラーの発生があげられる。これは前述した通り、硬化したグリースが減速機の歯を目詰まりさせ、動作中に噛み合い位置が次第にずれた結果と考えられる。

酸化アルミニウムや窒化アルミニウム製の機器がガンマ線照射によって変色し、脆くなった。セラミックスが必ずしも耐放性に優れているとは限らない。使用に際しては充分に検討しなければならない。

また、鉄や銅合金を使用した一部の部品（ネジ、座金類、圧着端子、電気コネクタのハウジング）には程度の違いはあるものの比較的早い段階でサビが生じた。今回の試験ではサビが直接の原因となる故障は生じなかったが、剥離、飛散による真空容器内汚染（結果としてプラズマ中に流入する不純物となる）や分解点検時の障害要因となると考えられるため、材料選択には相応の配慮が求められる。

上記対策の一つとして、真空容器内面を長期間大気に曝すことによる不純物としての水や酸素の吸蔵、吸着を防止するため、ITER の遠隔保守装置を窒素などの不活性ガス中で使用することが計画されている。しかしながら、ガンマ線照射下、窒素ガス雰囲気での使用があらたな腐食を引き起こす可能性のあることが別の実験からわかった。不活性ガスとして窒素ガスを使用するためには事前の充分な検討が望まれる（参考までに本実験の概要を 4.4 項で後述する）。

4.2 第1段階の照射試験後の分解点検修理

分解点検修理では耐放性モータ駆動装置の電気絶縁点検と減速機及びレゾルバのベアリングに充填したグリースの入れ替えを行った。

使用したグリースは耐放性仕様であり、供給メーカではちょう度が±50程度変化した場合を劣化の判断基準としている。Fig. 3. 2によれば、ちょう度が375から275に変化する積算線量は、おおよそ35MGyから100MGyの範囲であり、グリースの性状としては照射開始直後から40MGyまでは次第に軟化し、それ以降は積算線量の増加に伴い硬くなる傾向を示している。一方、耐放性モータ駆動装置がグリースの硬化によって停止したときの平均積算線量は47.6MGyであるが、減速機とレゾルバ個々の積算線量は3.2項で述べたようにそれぞれ69MGyと64MGyと推定され、グリースのちょう度としては約300となる。この結果は、グリースが多少軟化、あるいは硬化していても基油が駆動部に油膜を形成、付着していれば潤滑機能を示すものと考えることができる。なお、硬化したグリースのちょう度については、元々の充填量が少ないためサンプルが必要量確保できず測定することができなかった。

グリース潤滑剤の長所のひとつは、固体潤滑剤の摩耗に比べ、グリースの硬化が駆動機構に与える影響（ベアリング部品や歯車の摩耗、飛散、駆動機構の破壊）が小さく、硬化したグリースはエタノールで洗浄、除去できることである。また、使用が簡単で安価なことも大きな特長である。しかしながら、微量の油蒸気やグリースの滴下が真空の質の低下、あるいはプラズマ生成への障害となるようなシステムへの適用に際してはその適用については充分な検討が必要である。

電気的な点検では、モータの絶縁抵抗、相間抵抗、誘起電圧、レゾルバの相間抵抗を測定したが、いずれの測定項目とも照射前後の測定値に大きな変化はなく、また、照射線源近傍に敷設された電線の一部に絶縁材の剥離が認められたが、静置状態での使用では特に問題はなかった。剥離した絶縁材はポリイミドであり、100MGy程度の耐放性を持つと考えられたが薄手のポリイミドテープを機械巻きしたものであるためこのような結果になったと考えられる。目標とする耐放性の程度にもよるが、実機の設計、製作では熱成形処理した被膜タイプの絶縁材を適用すべきと考える。

4.3 第2段階の照射試験

第2段階での積算線量と運転時間はそれぞれ23.9MGyと6,639時間であり、第1段階の試験との合計では積算線量が 71.5MGy、運転時間は 19,861 時間となる。これらの値は、現在設定されているITER真空容器内線量率と遠隔保守装置の運転時間から算出される耐放性（積算線量）を充分に満たしている。

停止は漏電ブレーカの作動によるものであり、その原因は電線、ケーブルの絶縁劣化である。第1段階の試験結果でもふれたが、照射線源近傍の電線の劣化は第2段階の試験では更に進行し、手を触れただけで剥離するような状態であった。ほとんどの電線、ケーブルとも同様の状態であったため、いずれがリークの主因かは特定できなかった。

先に述べた耐放性機器の試験開発のために試作された電線、ケーブルの耐放性については、例えば、アルミナ繊維を絶縁材に使用した3芯ケーブルでは75MGy [4]、ポリイミドやSSシールド、ジャケットにPEEKを使用した1芯同軸ケーブルでは100MGy [4]、外形0.5mmの導体にポリイミドで被覆した電線の場合、耐電圧は照射前に比べ若干落ちるが 70MGy 以上使用できる結果が報告されている [4]。
これら電線、ケーブルの仕様を今回の耐放性モータ駆動装置に応用できれば上述したような問題は生じなかったと推測されるが、予算上の制約もあって実現できなかった。

4.4 窒素ガス雰囲気での照射試験

前述した機器・部品のガンマ線照射による耐放性試験・開発 [3] の一環として、ポテンショメータや差動トランスなどの計測器を室温、1気圧窒素ガス中でガンマ線照射した。その結果、ステンレス鋼を除く一部の金属表面に著しい腐食酸化物が発生、付着した。
本腐食酸化物の生成メカニズムとしては、窒素ガス中に残存していた H_2O や O_2 がガンマ線照射によってOやOHなどの反応性に富んだラジカルとなり、これらが N_2 と反応して硝酸（HNO_3）を生成し金属表面を腐食したと推測された。
本推測の手がかりを得るため以下のような予備実験を行った。
セル外の窒素ガスボンベから排出した窒素ガスをガラス容器1（非照射）内の水酸化ナトリウム（NaOH）溶液中を通し照射セル内の別のガラス容器2

（照射）内に導入した。導入された窒素ガスはガンマ線を照射された後、ガラス容器２内の水酸化ナトリウム溶液中を通過しセル内に排気された。この過程で仮に硝酸が生成されればその一部は水酸化ナトリウム溶液中に溶解し、溶液中の水素イオン濃度（pH）を増加させる。

・Fig. 4. 1 に試験結果を示す。照射前に pH = 9 に調整した水酸化ナトリウム溶液の pH は照射２時間後には 3.5（8.8）、５時間後には３（8.4）、25 時間後には２（6.5）となり（() 内は無照射時の値）、あきらかに酸が生成されていることがわかる。この酸が硝酸であるかどうか特定するためには別の測定が必要であるが器材の制約上特定はできなかった。また、その生成条件についても今後明らかにしなければならないと考えている。しかしながら、真空容器内壁への酸素や水分の付着を防止する目的で、真空容器内を窒素ガス雰囲気にするためには事前に充分な検討が必要である。

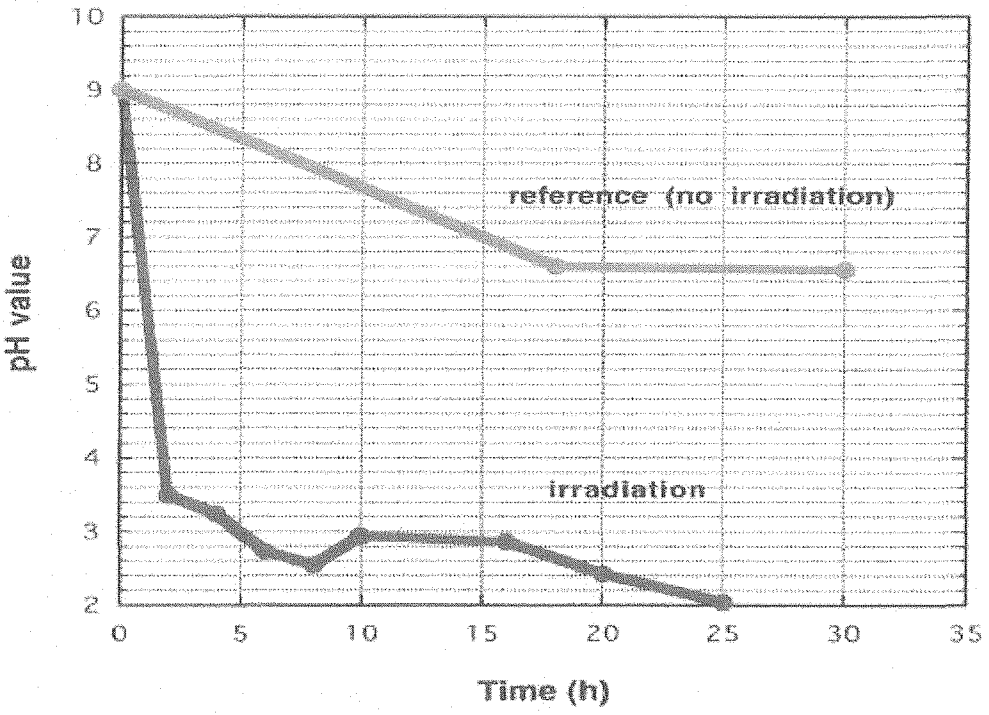


Fig. 4. 1. Formation of acid from nitrogen gas due to gamma ray irradiation.

5．まとめ

本試験の目的は、耐放射線レベルの異なる機器によって構成された（標準品、改造品、開発品各仕様が混在）耐放性モータ駆動装置のガンマ線照射下での耐放射線性の確認と動作時の挙動（具体的には動作時のモータ電流と主要部の温度変化、故障箇所と状態）の観察、測定であった。結果として、現在の照射線量率 0.5kGy/h で１年間運転したときのおおよその照射量５MGy をはるかに越える耐放射線性を示した。以下、動作時の挙動それぞれの観察、測定結果についてまとめる。

5.1 モータ電流の変化について

動作時のモータ電流については、第１段階の場合、運転開始時の電流値を１としたその後の変動幅は±10％程度であった。また、停止直前に急激に上昇するような兆候は示さなかった。一方、分解点検終了後の第２段階では、運転開始直後から積算線量約 11MGy までは最大±60％程度の変動を示したものの、その後はほぼ運転開始時の電流値と同じ値で推移する。

この原因としては、第１段階の場合は耐放性モータ駆動装置全体が調整・整備された状態で運転開始されたが、第２段階では事前に実施された分解点検が減速機とレゾルバのベアリングに限定されたため、これらと他の機械駆動部、例えばモータや回転アームのベアリングとの間で機械的な馴染みがとれなかったため、結果として負荷変動が生じたものと考えられる。また、停止直前に電流値の急激な変化が生じない原因としてはグリースの硬化が緩やかであったためと推測される。

以上から、電流値の変動によって耐放性モータ駆動装置の状態をある程度監視することはできるが、耐放性モータ駆動装置の照射損傷による運転限界（この場合、グリースの硬化）を把握することは難しいと云える。将来の実機の事前保守については、線量率と照射時間（運転時間）の管理が重要である。

5.2 モータ主要部の温度変化について

主要部の温度変化としてモータ固定子巻線、モータ回転子ベアリング及び回転アームベアリングそれぞれの温度を測定した。これら各部の温度はガンマ線照射による上昇とは別に、基本的には負荷変動によるモータ電流と

潤滑性能の変動により、一定の時間遅れをもって変化すると考えられる。第１段階の場合、各部間の温度に大差はなく、モータ電流の変化に追従しているようにも見えるが、3.1 項で述べたように外気温度の影響による照射セル内の温度変化の影響も考えられる。一方、第２段階の場合は、特に照射開始から 11MGy までのモータベアリングと回転アームベアリングそれぞれの温度変化は電流値の変動に追従している。その原因は、これら２箇所のベアリングは分解点検をしなかったため相応の潤滑障害があり、摩擦を増大させていたと推測される。

以上から、ベアリング温度と電流値には相応の関係があり、耐放性モータ駆動装置の状態、特に機械駆動部の潤滑性能（摩擦状態）監視に有効であることがわかった。

5.3 故障を防止するための対応

前述の通り、耐放性モータ駆動装置は減速機とベアリング及び電線の照射損傷（故障）により停止した。故障の状態は、減速機とベアリングの場合はそれぞれに充填したグリースの硬化であり、電線の場合は絶縁材の剥離であった。

構成機器の多くに金属、セラミックス、ポリイミドを使用した耐放性モータ駆動装置本体の材料構成のなかで、合成油を基油としたグリース潤滑剤の硬化と機械巻きしたポリイミドテープの劣化は予測できた事象ではある。しかしながら同仕様のグリースは、分解点検の対象となった減速機とレゾルバ以外の機器にも使用されているが、それらについて何ら処置を講じなくても第２段階の運転を開始できた。これはそれぞれのベアリングの線量率（積算線量）や負荷条件の違いによりグリースの硬化の程度が異なっていたためと考えられる。

また、電線、ケーブルは多くの箇所に使用されており、例えばモータの固定子巻線の一部には、ポリイミドに比べ耐放性がそれほど高くもないエポキシを塗布しているが、本箇所が耐放性モータ駆動装置停止の直接の原因となった形跡はみられない。これは、その箇所がモータ内部に位置するため線量率が低いことと静置状態にあることが原因していると考えられる。また、ポリイミドテープを機械巻きした絶縁体に過度の損傷が見られたことは、材料の耐放性とは別に適用形態にも配慮が必要であるとを示してい

る。
以上から、耐放射線レベルの異なる多くの機器から構成される装置は、実機遠隔保守装置のように更にその寸法が大きく、形状が複雑になるにつれ構成機器毎の線量率の違いが拡大していくと予測される。その結果として、機器単体レベルでの耐放射線性の低いものが必ずしも装置の使用限界を決定する要因になるとは考えられない。そのためには、よりきめ細かな機器毎の積算線量の管理が求められるが、例えば、着色酸化アルミニウム被膜線量計［5]、［6］を使用して機器の内外部の照射量（線量率）を測定し、事前保守のための管理データとすることも考えられる。

以上を基に、耐放射線性が求められる実機遠隔保守装置の設計では、機器・部品をはじめ、電線・ケーブルを保守交換の容易な構成単位（モジュール）とし、機能別に耐放射線レベルを設定、耐放射線と標準仕様の機器を区分けして使用することを提案する。これにより、遠隔保守装置のイニシャルコストの低減化が図れると共に、点検、保守（修理、交換）作業が合理的に行えると考える。

謝　辞

本試験・開発では、多くのご支援を賜った核融合研究開発部門・ITER プロジェクトユニット、常松ユニット長をはじめ、量子ビーム応用研究部門・半導体／高分子材料耐放射線性評価研究グループ、伊藤グループリーダ他グループの方々に心から感謝いたします。

参考文献

[1] T. Honda, et. al., : "Remote handling systems for ITER," Fusion Engineering and Design 63-64, p.507-518 (2002).

[2] "DESIGN DESCRIPTION DOCUMENT (DDD)," Remote Handling Equipment, WBS 23, Chapter 1 : N 23 DDD 66 01-07-06 R0.2.

[3] K. Obara, et. al., : "High Gamma Rays Irradiation Test of Critical Components for ITER In-Vessel Remote Handling System," JAERI-Tech 99-003, February, (1999).

[4] JAERI-Tech 99-003, February (1999).

[5] K. Obara, et. al., : "Development Colored Alumilite Dosimeter for High Radiation Use," Proc. RADECS 2000 Workshop, Louvain-la-Neuve, September 11-13, p. 214-218 (1999).

[6] 小原建治郎他 : "着色酸化アルミニウム被膜線量計の開発". JAERI-Tech 2003-035, 3月, (2003).