

JAERI-M

90-216

原子炉におけるシリコンゴム製
Oリングの放射線劣化の評価

1990年12月

池島 義昭・伊藤 政幸・白石 忠男
佐藤 隆一・田中 黙・市橋 芳徳

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

JAERI-M 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、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 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。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1990

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

原子炉におけるシリコンゴム製Oリングの放射線劣化の評価

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

池島 義昭・伊藤 政幸⁺・白石 忠男
佐藤 隆一⁺⁺・田中 勲・市橋 芳徳

(1990年11月8日受理)

放射線環境下で、しかも実機状態で長期間にわたって使用した有機材製Oリングの機械的性質に関して評価したデータは稀少なものである。

シリコンゴム製Oリングは、常に透過放射線に曝される JMTR の原子炉圧力容器内において、OWL-2 炉内管との耐圧・気密を兼ねたシール材として 13 年間にわたって使用され、その間に 3.46 kGy の吸収線量を受けたものである。

本報告は、実機で使用したシリコンゴム製Oリングと、供用期間中に受けたと推定される吸収線量までガンマ線を使って加速照射したものについて、放射線劣化に加えて長期使用が及ぼす経年劣化等への影響を評価したものである。

実機のような使用環境では、シリコンゴム製Oリングは吸収線量にして約 300 kGy に達するまで使用可能であり、同 O リングの使用寿命は 40 年と推定される。

新 OWL-2 炉内管用として採用したエチレン・プロピレンゴム製Oリングは、シリコンゴムに較べて耐放射線性に優れており、使用寿命は約 3 倍となる。

Evaluation of Radiation-induced Degradation of Silicon "O" Ring

Yoshiaki IKESHIMA, Masayuki ITO⁺, Tadao SHIRAISHI
Ryuichi SATO⁺⁺, Isao TANAKA and Yoshinori ICHIHASHI

Department of JMTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received November 8, 1990)

Currently there is too few available data on mechanical properties of an "O" ring made of organic material, which is used over an extensive period of time under actual Nuclear Reactor environmental conditions.

The "O" rings which were evaluated were made of Silicon Rubber, and are used to provide water tightness. The "O" rings also served as a pressure boundary within the nozzle of the in-reactor tube in the Water Loop-2 (OWL-2) at the JMTR in Oarai, Ibaraki. The "O" rings were subjected to a constant penetrating radiation (up to 3.46 kGy) over a period of thirteen (13) years.

The effects on the mechanical properties of a Silicon Rubber "O" Ring were evaluated after having been used over an extensive period of time in an actual in-reactor tube within a radiation environment; a full thirteen years in durations. In making comparison of the properties of other Silicon Rubber "O" Rings. It was also found that these other "O" rings were subject to Gamma Rays for a shorter period, but with the same amount of radiation as the "O" rings in the reactor were supposedly to have received.

The evaluation showed that a Silicon Rubber "O" Ring could have been

+ Department of Development, Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment

++ Department of Administrative Services

used for a period, as much as forty (40) years even with a (absorbed) dose of about 300 kGy, before the life expectancy of such an "O" ring is fully met.

It was also discovered that the mechanical properties of an Ethylene Propylene "O" Rings (currently used in the new OWL-2 in-reactor tube) were much superior to those of the Silicon Rubber "O" Rings. The Ethylene Propylene "O" Rings had a live expectancy which was about three times that of a Silicon Rubber "O" Rings.

Keywords: JMTR, In-pile Water Loop, OWL-2, "O" Ring, Silicon Rubber "O" Ring, EPDM "O" Ring, Radiation-induced Degradation of "O" Ring

目 次

1. まえがき	1
2. Oリングの使用概要	2
2.1 JMTRの概要	2
2.2 OWL-2 の概要	2
2.3 Oリングの役割	2
3. Oリングの使用履歴	8
3.1 概 要	8
3.2 Oリングの使用環境	8
3.3 原子炉圧力容器における照射線量測定	8
3.4 Oリングの使用温度測定	11
3.5 まとめ	11
4. Oリングの機械的性質に関する評価	19
4.1 概 要	19
4.2 供試試料	19
4.3 Oリングの引張試験	19
4.4 Oリングの圧縮試験	21
4.5 まとめ	21
5. あとがき	26
謝 辞	27
参考文献	27
付録 I Oリングの照射線量計算	28
付録 II Oリングの耐放射線性等に関する文献	35
付録 III Oリングの実証試験	39

Contents

1. Introduction	1
2. Description of Utilization of "O" Ring	2
2.1 General Description of JMTR	2
2.2 General Description of OWL-2	2
2.3 Function of "O" Ring	2
3. History of Usage of "O" Ring	8
3.1 Description	8
3.2 Environment under Which "O" Ring Used	8
3.3 Dose Measurement of Reactor Pressure Vessel	8
3.4 Temperature Measurement of "O" Ring in Service	11
3.5 Summary	11
4. Evaluation of Mechanical Properties of "O" Ring	19
4.1 Description	19
4.2 Specimens Tested	19
4.3 Tensile Test of "O" Ring	19
4.4 Compression Test of "O" Ring	21
4.5 Summary	21
5. Summary and Conclusions	26
Acknowledgement	27
References	27
Appendix I Dose Calculation for "O" Ring	28
Appendix II Literatures on Radiation Resistance of "O" Ring	35
Appendix III "O" Ring Verification Test	39

1. まえがき

JMTR (Japan Materials Testing Reactorの略) は、軽水減速・冷却タンク型で、熱出力 50 MWの材料試験炉である^{1), 2)}。

OWL-2 (Oarai Water Loop No.2 以下「OWL-2」という。) は、JMTRに1971年9月 動力炉国産化技術の確立と発展に寄与することを目的として設置されて以来、高温・高圧のインパイプループとして各種の燃料・材料試料の照射試験に使用してきた³⁾。

しかし、1983年3月OWL-2炉内管は、一部に貫粒型応力腐食割れ (TGSCC; Trans-granular Stress Corrosion Cracking) を起こしたため、再発防止対策⁴⁾を講じて新OWL-2 炉内管を作成し、1986年11月から照射試験を再開した。

シリコンゴム製Oリング^{*1}は、JMTRの原子炉圧力容器内においてOWL-2炉内管とのシール材として、原子炉一次冷却水の耐圧と漏洩防止を兼ねて取り付けられたもので、同炉内管が故障して取り出すまでの13年間にわたって使用してきた。

この間、シリコンゴム製Oリングは、原子炉及びOWL-2からの透過放射線、照射運転に伴うOWL-2一次冷却水の温度上昇による影響、さらに温度上昇によって発生する炉内管のしうう動等の影響を受ける環境で使用してきた。

本報告書は、シリコンゴム製Oリングの取り付けられていた近傍における照射線量と温度測定を行い、その測定結果を基にして計算により線量を求める等供用期間中の使用履歴を明らかにした。さらに、実機で使用したシリコンゴム製Oリングとガンマ線を使って加速照射した同材質のOリングとについて、長期間使用が及ぼす機械的性質への影響を評価したものである。

新OWL-2炉内管に採用したエチレン・プロピレンゴム製Oリング^{*2} (Ethylen-propylene Dieneterpolymers, 以下「EPDM製Oリング」という。)^{5), 6)}は、事前の調査でシリコンゴム製Oリングに較べて耐放射線性に優れ、かつ疵等の付きにくいという結果が得られているが、これらについてもガンマ線 (⁶⁰Co) による加速照射後、機械的性質についてシリコンゴム製Oリングとの比較を行い、その優位なことを確認した。

* 1 シリコンゴム製Oリング (Silicone Rubber) : 主鎖がシロキサン結合で構成されたもので、側鎖にメチル基、フェニル基、ビニル基等の有機置換基を持った線状重合体からなる合成ゴムの一種をいう (JIS K 6200-76 ゴム用語)。

* 2 エチレン・プロピレンゴム製Oリング : エチレン (60 ~ 70 %) とプロピレン (30 ~ 40 %) の共重合体をEPM (Ethylen-propylene Copolymers) という。エチレン、プロピレン、ジエン成分の三元重合したターポリマーをEPDMという。EPDMはEPMの特性を失わずにいおう加硫ができるよう少量の不飽和物を側鎖に導入したものである。EPMとEPDMを総称してEPR (Ethylen-propylene Rubber) という (JIS K 6200-76 ゴム用語)。

2. Oリングの使用概要

2.1 JMTTR の概要

原子炉圧力容器は Fig. 2.1-1 に示すとおり、全高 9.5 m、胴部径 3 m のオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304L) の溶接構造でできており、その内部には炉心が収められている。

原子炉圧力容器内は、常に炉心からの透過放射線に対する遮蔽を目的として、水質管理された純水 (pH 5.5 ~ 7.0, 導電率 $2 \mu\text{S}/\text{cm}$ 以下, 溶存酸素濃度約 12 ppm)⁷⁾ によって満たされているほか、原子炉運転中は 1.5 MPa ($15 \text{ kg}/\text{cm}^2 \text{ G}$) に加圧されている。

原子炉運転中の炉心部は、流量約 $6000 \text{ m}^3/\text{h}$ の原子炉一次冷却水によって冷却されている。この冷却水流路は、原子炉圧力容器中央胴部の入口配管から同容器内に入り、炉心部を下向きに流れたのち、出口配管を経由して再び入口配管に戻る閉回路となっている。

原子炉圧力容器の上・下部には、材料試験炉として多数の照射設備が取り付け可能なようにノズルが設けられている。

2.2 OWL-2 の概要

OWL-2 は、原子炉冷却系とは別に独立した冷却系を備えたインパイル水ループであり、原子炉圧力容器内に据え付けられた炉内管と、炉内管に接続して冷却水の循環、温度、圧力等の調節を目的とした炉外冷却系から構成されている。

OWL-2 炉内管は Fig. 2.2-1 に示すとおり、耐圧管と外套管の二重管構造からなる公称直径 6 in, 全長約 11 m の ONCE-THRU 型の直管であり、原子炉圧力容器の上蓋ノズル、炉心格子位置、同容器の下蓋ノズルを貫通している。

照射運転中の高温・高圧の OWL-2 一次冷却水は、炉内管内を上向きに流れながら、炉心領域で発生する照射試料や構造材による核発熱を除去したのち、炉外冷却系機器に戻る閉回路で循環する。

運転中の原子炉一次冷却水温度は最高 50°C , OWL-2 一次冷却水温度は最高 285°C となるため、耐圧管と外套管の間隙には熱伝導率の小さいガスを加圧・充填することにより熱的絶縁を確保して、OWL-2 一次冷却水の影響を受けて高温となる耐圧管が原子炉一次冷却水に直接触れるのを避ける方式としている。また、耐圧管と外套管の温度差から生ずる伸びの調節は、耐圧強度を兼ね備えたベローズによって行われている。

JMTTR 及び OWL-2 の主要性能を Table 2.2-1 に示す。

2.3 Oリングの役割

原子炉圧力容器の下蓋ノズルと OWL-2 炉内管とのシール部構造は、Fig. 2.1-1 に示すとお

りである。下蓋ノズルとOWL-2炉内管の間にOリングを3段に装填し、その外側からグランドパッキンによって締め付けることにより、原子炉一次冷却水の漏洩防止と圧力バウンダリとしての耐圧機能を果たしている。

各段のOリングは、供用期間中原子炉及びOWL-2からの透過放射線に曝されてきたほか、運転に伴う一次冷却水の影響を受けて矩形状の温度変化を受け続けたことになる。

原子炉圧力容器の真下におけるOWL-2炉内管の取り付け状況をPhoto. 2.3-1に、実機で使用したシリコンゴム製Oリングの外観をPhoto. 2.3-2に示す。

Table 2.2-1 Engineering Data of JMTR and OWL-2

JMTR	
Thermal output	50 MW
Primary coolant temperature (max)	50 °C
Pressure inside pressure vessel	1.4 MPa
Primary coolant flow rate	6000 m³/h
Primary coolant material	demineralized light water
OWL-2	
Operation modes	Pressurized mode and boiling mode
Primary coolant temperature (max)	270 °C (P-mode), 285 °C (B-mode)
Primary circuit pressure	7.3 MPa
Primary coolant flow rate (max)	1100 kg/min
Primary coolant material	demineralized light water

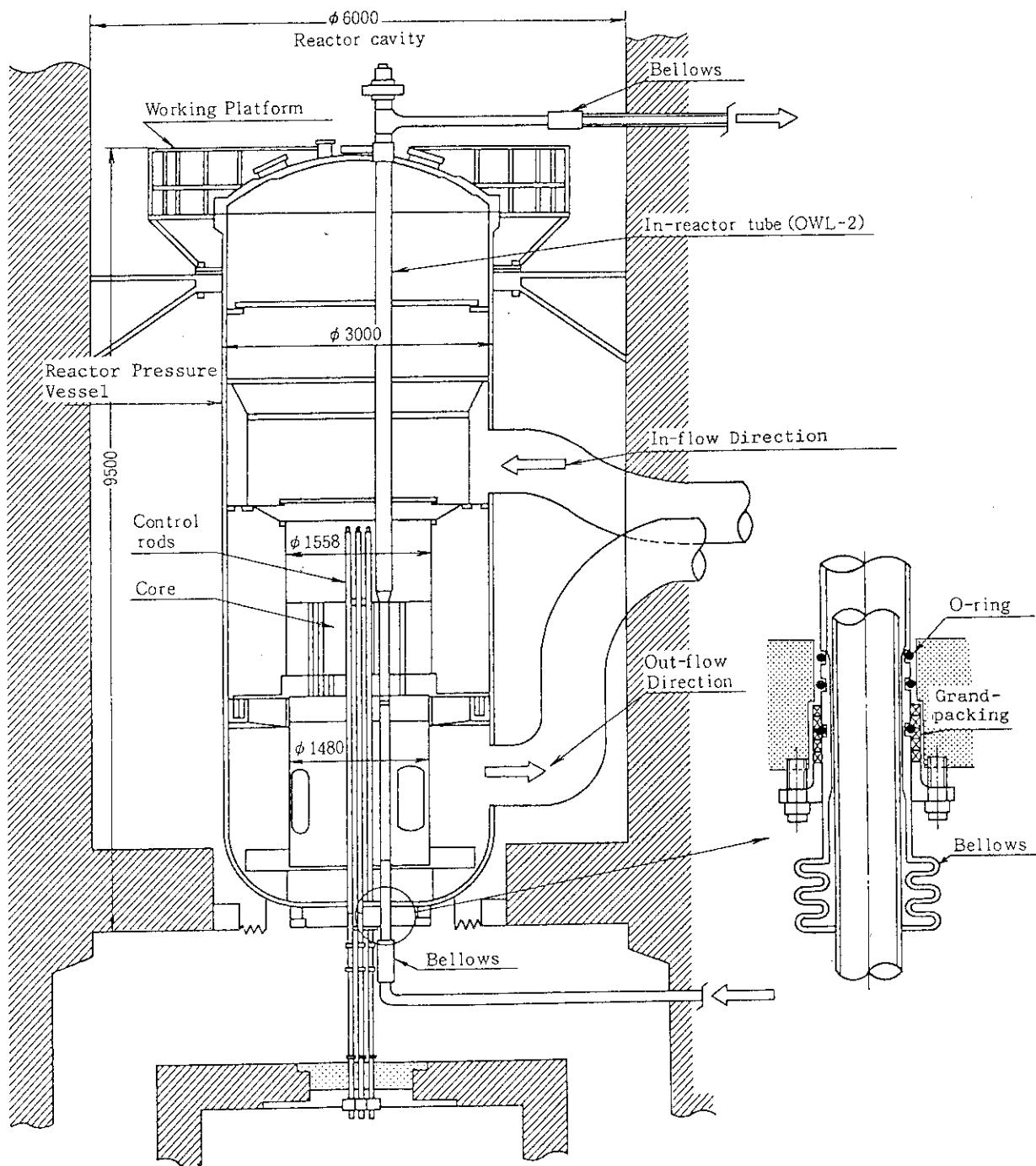


Fig. 2.1-1 Arrangement of OWL-2 in-reactor tube in JMTR

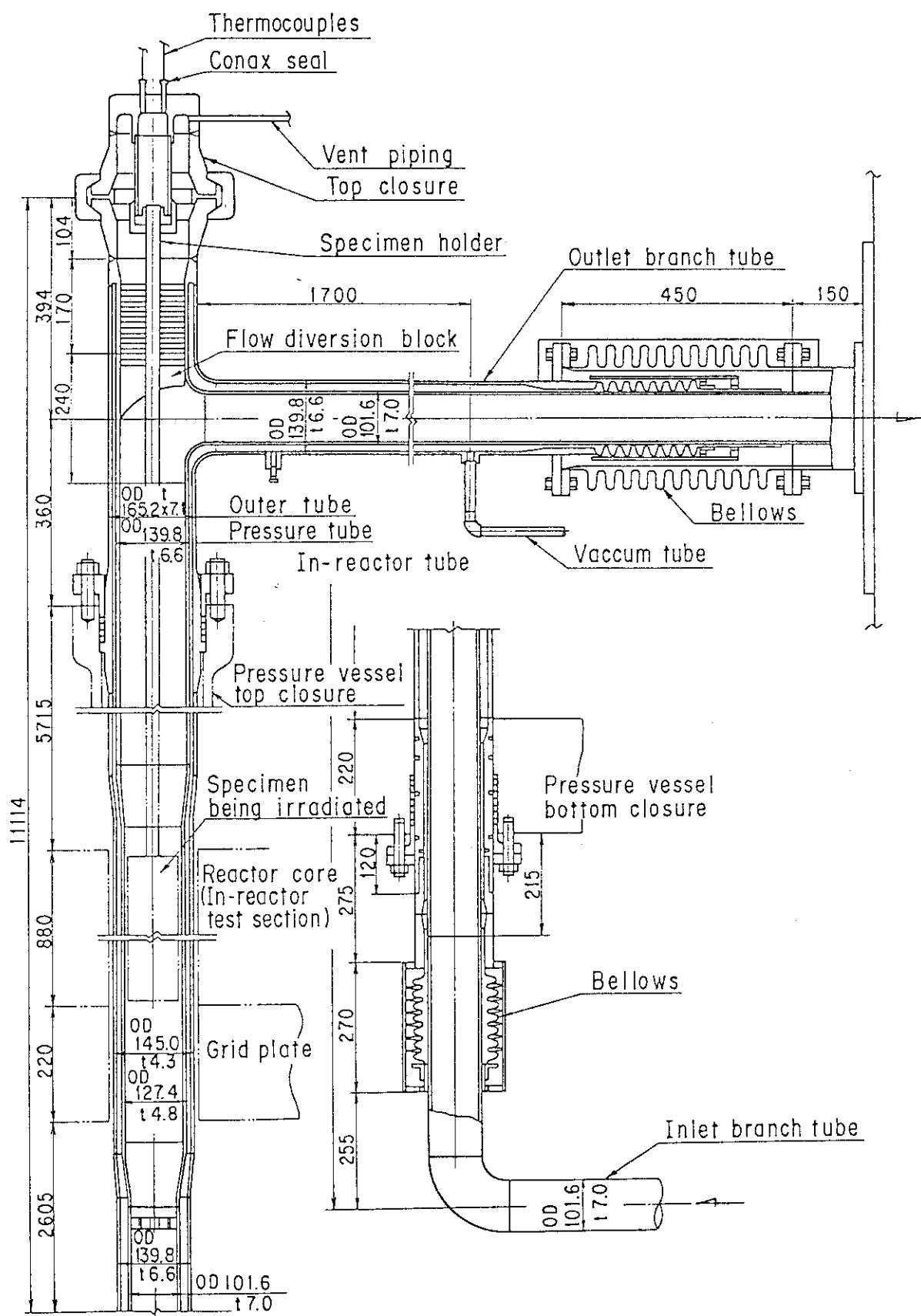


Fig. 2.2-1 Detailed axial sectional view of OWL-2 in-reactor tube

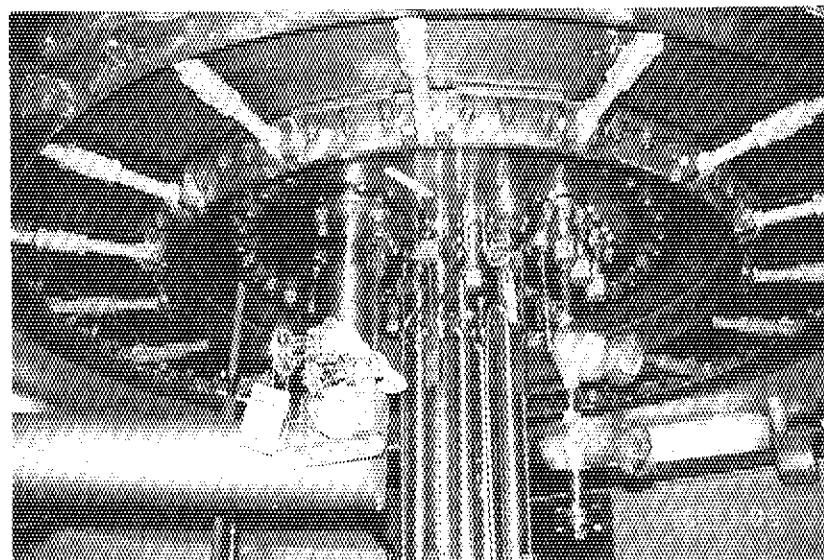


Photo. 2.3-1 View of the reactor pressure vessel bottom through which OWL-2 in-reactor tube mounted

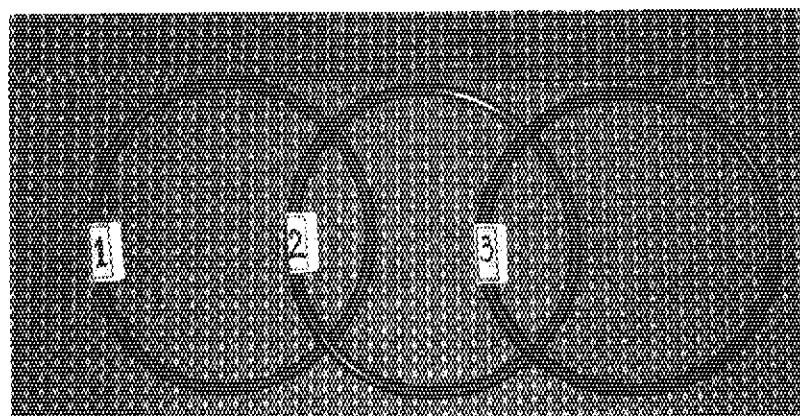
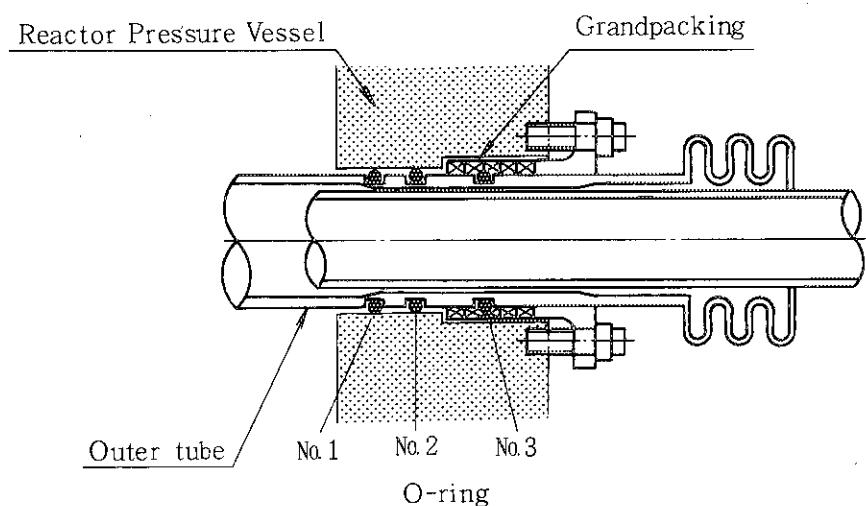


Photo. 2.3-2 Appearance of the silicon rubber "O" rings used in actual machine

3. Oリングの使用履歴

3.1 概要

Oリングの機械的性質を評価するうえで、重要な環境因子を占める供用期間中の照射線量及び使用温度を事前に明らかにしておく必要がある。

実機の場合には、Oリング取り付け部を直接に測定することが構造上から不可能なため、現在まで正確な測定データが得られていなかった。

このため、JMTR第80サイクル運転時を利用して、原子炉圧力容器の真下における照射線量と、Oリング取り付け部の近傍にあたるOWL-2炉内管の表面温度の測定を行い、その測定結果を使って遮蔽計算コードによりOリング取り付け位置における照射線量率を算定した。遮蔽計算コードによる計算結果を付録Iに示す。

3.2 Oリングの使用環境

JMTRの運転は年間5サイクルを原則としている。1サイクルの標準的運転パターンは、前・後半サイクルとも約12日間として、途中に燃料交換のための原子炉停止期間が設けられている。

OWL-2の照射運転はJMTRの運転工程に合わせて行われる。代表的な原子炉運転とOWL-2の関係は、Fig.3.2-1 第80サイクル運転実績に示すとおりである。

シリコンゴム製Oリングの1971年9月の供用開始から、OWL-2炉内管の故障に伴い取り出した1984年10月までの13年間にわたる原子炉及びOWL-2の運転経歴をTable 3.2-1に示す。

3.3 原子炉圧力容器における照射線量測定

(1) 目的

Oリングの取り付け部は、原子炉一次冷却水の出口側に位置するため、原子炉運転中に炉心領域を通過する際生成した短半減期の放射性核種⁷⁾ (¹³N, ¹⁶N, ²⁴Na, ²⁷Mg, ⁴¹Arなど) からのものと、OWL-2一次冷却水⁸⁾からの透過放射線による照射を受け続けたことになる。

さらに、原子炉停止中は、原子炉圧力容器の底部及びOWL-2の一次系配管内部に沈着・付着したクラッド^{9), 10)}からの透過放射線による照射等が考えられる。

(2) 測定方法

照射線量の測定は、原子炉圧力容器の真下に透過するガンマ線に着目して、原子炉運転中に放射線熱蛍光線量計 (Thermoluminescence Dosimeter, 以下「TLD」という。) とアラニン線量計¹¹⁾の2種類を使って実施した。

原子炉圧力容器における測定個所を Fig. 3. 3 - 1 に示す。

イ. 線量計 ; TLD 被ばく検出用素子, 型番: UD-170L, 種類: BeO,

松下電器産業(株) 製

アラニン線量計(アミノグレイ), 日立電線(株) 製

ロ. 測定開始日; 1987年11月25日

ハ. 測定終了日; 1988年2月16日

ニ. 測定時間 ; 原子炉運転 267 時間

原子炉停止 1677 時間

(3) 測定結果

イ. TLD による測定結果

TLD による測定結果は次に示すとおりである。

単位: C/kg.(R)

測定位置	集積線量
A	4.90×10^{-1} , (1.90×10^3)
B	5.16×10^{-1} , (2.00×10^3)
C	4.90×10^{-1} , (1.90×10^3)
D	4.90×10^{-1} , (1.90×10^3)
平均	4.97×10^{-1} , (1.93×10^3)

TLD の平均集積線量は 4.97×10^{-1} C/kg, (1.93×10^3 R) となる。しかし、TLD による測定は 11.1 日間に及んだことから、測定期間中の TLD 被ばく検出用素子自体のフェーディングを考慮して読取線量の補正(フェーディング補正係数は $\sum_{i=1}^{11.1} = 9.87$ とする。)を行った。また、TLD 被ばく検出用素子はステンレス鋼製フランジ(材厚20mm)の下側に取り付けた関係上、フランジによる減衰等を考慮すると、TLD の真の集積線量すなわち照射線量は 7.96×10^{-1} C/kg, (3.10×10^3 R) となる。

ロ. アラニン線量計による測定結果

アラニン線量計による測定結果は次に示すとおりである。

単位: C/kg.(R)

測定位置	集積線量
1	8.77×10^{-1} , (3.40×10^3)
2	6.19×10^{-1} , (2.40×10^3)
3	9.29×10^{-1} , (3.60×10^3)
4	8.77×10^{-1} , (3.40×10^3)
5	9.03×10^{-1} , (3.50×10^3)
6	7.74×10^{-1} , (3.00×10^3)
平均	8.30×10^{-1} , (3.22×10^3)

アラニン線量計による測定条件等は TLD の場合と同じとしたが、測定位置は Fig. 3.3-1 に示すとおりフランジの上側で行った。

アラニン線量計の集積線量すなわち照射線量は、平均で 8.30×10^{-1} C/kg, (3.22×10^3 R) となる。

(4) 考察

原子炉圧力容器真下における照射線量は、TLD による測定結果が 7.96×10^{-1} C/kg, (3.10×10^3 R), アラニン線量計が 8.30×10^{-1} C/kg, (3.22×10^3 R) となり、両者で大差ない値が得られた。

原子炉停止中の圧力容器真下における照射線量率は、電離箱型サーベイメータによる測定の結果、最高で 2.87×10^{-9} C/(kg・s), (4.00×10^{-2} R/h) となる。これより、TLD 及び アラニン線量計による測定は、原子炉運転中と停止中にわたって実施された関係上、停止中の寄与を除いた原子炉運転中の照射線量率を求めるとき、TLD が 8.17×10^{-7} C/(kg・s), (1.14×10^1 R/h), アラニン線量計が 8.46×10^{-7} C/(kg・s), (1.18×10^1 R/h) となる。

圧力容器真下における照射線量率は、原子炉運転中に較べて停止中は激減している。これは原子炉及び OWL-2 の一次系配管内部に沈着・付着したクラッドからの影響は殆ど無視することができ、原子炉運転中に炉心領域で生成した短半減期で、かつガンマ線エネルギーの大きい放射性核種による影響が支配的であると言える。

3.4 Oリングの使用温度測定

(1) 目的

Oリングの使用温度は原子炉の運転中と停止中で異なる。停止中はOWL-2も停止状態にあり、原子炉一次冷却水温度とほぼ等しく20~25°Cと見做すことができる。

一方、原子炉運転中は、炉心で発生した核発熱を原子炉一次冷却水によって除去する方式であるため、水温は最高50°Cになる。このときOWL-2も照射運転状態にあり、OWL-2一次冷却水の影響を受けてOリングの使用温度が高くなると予想されることから、第3.3項と同様に原子炉運転中を利用して熱電対による温度測定を実施した。

(2) 温度測定方法及び結果

Oリングの使用温度を直接に測定することは、Oリング取り付け部の構造上から不可能なため、Fig.3.3-1に示すとおり、近傍に2対、さらに少し距離を離して4対のK熱電対

(素線径:0.32mm, エナメル被覆、外径:0.65mm, ガラスウール被覆)を取り付けて、その測定結果から類推することにした。

K熱電対による温度測定結果はFig.3.4-1に示すとおりである。OWL-2の照射運転開始とともに上昇傾向を示して、加圧水型の運転条件になった時点でT/C No.1~2は最高53.5°C, No.3~6は最高103.2°Cに達した。

(3) 考察

T/C No.1~2が53.5°Cと低い温度を示した。これは測定位置にあたるOWL-2炉内管の二重管構造部に窒素ガスを加圧・充填{ガス圧力 1.4×10^{-2} MPa (1.4 kg/cm^2)}したことにより、熱的絶縁が有効に図られていることを示している。

有限要素法による二次元軸対象物体の温度分布解析が可能な「HEAT」プログラム¹²⁾を用い、縦方向の入熱がないものと仮定して計算した結果をFig.3.4-2に示す。

外套管の表面温度は、加圧水型の照射運転条件を想定して計算した場合、いづれもOWL-2一次冷却水の温度に較べて低く51.0~51.1°Cであり、実測値とほぼ一致する結果が得られた。

T/C No.3~6の温度は、No.1~2に較べ高い値を示した。これは高温となった耐圧管からペローズを介して外套管側に伝熱され、さらに外套管自身の熱伝導による影響と考えられる。しかし、Oリングの取り付け部温度は、原子炉一次冷却水の温度が最高でも50°Cであるため、外套管の温度勾配からみて低温側に位置しており、T/C No.1~2の最高温度指示値53.5°Cを上回ることはないものと考えられる。

3.5 まとめ

今回のTLD及びアラニン線量計による測定結果、さらには計算コードによる計算結果等によって明らかになったシリコンゴム製Oリングの使用履歴をまとめると、次のとおりである。

(1) 原子炉圧力容器真下における照射線量

TLDの測定値 : 7.96×10^{-1} C/kg, (3.10×10^3 R/h)

アラニン線量計の測定値 : 8.30×10^{-1} C/kg, (3.22×10^3 R/h)

(2) シリコンゴム製 O リングの供用期間

原子炉の運転期間 : 2.31×10^4 時間

原子炉の停止期間 : 8.99×10^4 時間

(3) 原子炉圧力容器真下における照射線量率

原子炉運転中 :

TLD の測定値 : 8.17×10^{-7} C/(kg・s), (1.14×10^1 R/h)

アラニン線量計の測定値 : 8.46×10^{-7} C/(kg・s), (1.18×10^1 R/h)

計算コードによる計算値 : 9.24×10^{-7} C/(kg・s), (1.29×10^1 R/h)

原子炉停止中 :

電離箱型サーベイメータ : 2.87×10^{-9} C/(kg・s), (4.00×10^{-2} R/h)

(4) シリコンゴム製 O リング取付位置における照射線量率(計算値)

No. 1 O リング : 1.24×10^{-6} C/(kg・s), (1.73×10^1 R/h)

No. 2 O リング : 1.19×10^{-6} C/(kg・s), (1.66×10^1 R/h)

No. 3 O リング : 1.10×10^{-6} C/(kg・s), (1.54×10^1 R/h)

(5) シリコンゴム製 O リングの供用期間中に受けた吸収線量(計算値)

No. 1 O リング : 3.46 kGy, (3.46×10^5 Rad)

No. 2 O リング : 3.33 kGy, (3.33×10^5 Rad)

No. 3 O リング : 3.09 kGy, (3.09×10^5 Rad)

(6) シリコンゴム製 O リングの供用期間中の使用温度(測定値)

No. 1 ~ No. 3 O リング : 53.5 °C以下

Table 3.2-1 Operation History of JMTR and OWL-2 (1/2)

サイクル NO.	J M T R		O W L - 2			
	運転期間	運転時間 (h)	運転モード	一次系圧力 (MPa)	一次系温度 (°C)	一次系流量 (kg/min)
12	71.10.28 ~ 11.30	648.96	性能試験	—	—	—
13	72. 1.13 ~ 2.10	533.47	P	7.3	270	600
14	72. 3.10 ~ 4. 6	525.50	P	7.0	260	500
			B	7.0	285	125
15	72. 5. 5 ~ 6. 1	569.23	P	7.0	270	500
16	72. 6.25 ~ 7.22	524.54	P	7.0	270	500
17	72.10. 7 ~ 11. 2	529.01	P	7.0	255	400
			B	7.0	285	200
18	72.11.16 ~ 12.14	592.13	P	7.0	255	400
			B	7.0	285	250
19	73. 1.14 ~ 2.10	524.64	P	7.0	260	500
20	73. 3. 2 ~ 3.31	467.90	P	7.0	255	350
			B	7.0	285	200
21	73. 5.12 ~ 6. 9	510.19	P	7.0	255	350
			B	7.0	285	200
22	73. 7. 2 ~ 7.14	244.13	P	7.0	255	400
			B	7.0	285	200
23	中 止	—	—	—	—	—
24	73.11.19 ~ 12.15	446.35	P	7.0	260	500
25	74. 1.24 ~ 2.18	430.99	P	7.0	260	500
26	74. 3.11 ~ 3.18	158.93	—	自然循環運転		
27	74. 5.13 ~ 5.26	177.02	—	自然循環運転		
28	中 止	—	—	—	—	—
29	中 止	—	—	—	—	—
30	74.12.10 ~ 12.23	233.14	P	7.0	270	500
31	75. 1.28 ~ 2.22	520.70	—	自然循環運転		
32	75. 3.17 ~ 4.11	520.37	P	7.0	255	400
			B	7.0	285	200
33	75. 5.29 ~ 6.17	288.58	P	7.0	255	400
			B	7.0	285	200
34	75.12.10 ~ 76. 1.22	520.85	P	7.0	225	500
			B	7.0	280	250
35	76. 2.17 ~ 3.13	529.30	P	7.0	225	500
			B	7.0	280	250
36	76. 4. 5 ~ 4.30	450.38	P	7.0	250	500
			B	7.0	285	220
37	76. 5.24 ~ 6.18	526.22	P	7.0	255	500
			B	7.0	285	220
38	77. 1.12 ~ 2. 6	520.46	P	7.3	270	300
39	77. 3. 8 ~ 3.29	426.43	P	7.3	270	300
40	77. 5.13 ~ 6. 7	508.99	P	7.3	270	300
41	中 止	—	—	—	—	—
42	77.12.13 ~ 78. 1.26	473.81	P	7.3	270	300
43	78. 2.25 ~ 3.13	230.11	P	7.0	255	500
			B	7.0	285	200

Table 3.2-1 Operation History of JMTR and OWL-2 (2/2)

サイクル N.O.	J M T R		O W L - 2			
	運転期間	運転時間 (h) * 1	運転モード * 2	一次系圧力 (MPa)	一次系温度 (℃)	一次系流量 (kg/min)
4 4	78. 6.12 ~ 7. 8	509.38	—	7.3	270	300
4 5	79. 1.13 ~ 2.16	506.40	P	7.3	270	300
4 6	79. 3.29 ~ 4.24	466.99	P	7.3	270	300
4 7	79. 6.18 ~ 7.13	509.04	P	7.3	270	300
4 8	79. 11.12 ~ 12. 7	512.16	P	7.3	270	300
4 9	80. 1.18 ~ 2.10	462.34	P	7.3	270	300
5 0	80. 3. 4 ~ 3.29	497.42	P	7.3	270	300
5 1	80. 5.16 ~ 6. 7	400.66	P	7.3	270	300
5 2	80.12.15 ~ 81. 2. 1	475.15	P	7.3	260	400
5 3	81. 2.28 ~ 3.24	450.10	P	7.3	260	400
5 4	81. 5. 9 ~ 6. 3	520.70	P	7.3	260	400
5 5	81. 9.24 ~ 10.19	519.26	P	7.3	260	400
5 6	81.11.16 ~ 12.10	457.92	P	7.3	260	400
5 7	82. 1.19 ~ 2.13	467.62	P	7.3	260	400
5 8	82. 3.13 ~ 4. 7	520.75	P	7.3	260	400
5 9	82. 6.12 ~ 7. 7	525.17	P	7.3	260	400
6 0	82.11.21 ~ 12.15	465.26	P	7.3	260	400
6 1	83. 1.26 ~ 2.18	468.67	P	7.3	260	400
6 2	83. 3.16 ~ 3.17	13.2	P	7.3	260	400
6 3	83. 5.28 ~ 6.22	458.45	—	7.3	260	400
6 4	84. 1.14 ~ 2. 7	275.95	—	7.3	260	400
6 5	84. 3. 6 ~ 3.31	488.83	—	7.3	260	400
6 6	84. 5. 8 ~ 6. 2	525.89	—	7.3	260	400

* 1 : OWL-2炉内管の据え付けから取り出すまでのJMTR停止期間の合計は、 8.99×10^4 時間となる。また、JMTRの運転時間の合計は 2.31×10^4 時間となる。

* 2 : 運転モードのうち、Pは加圧水型、Bは沸騰水型を示す。

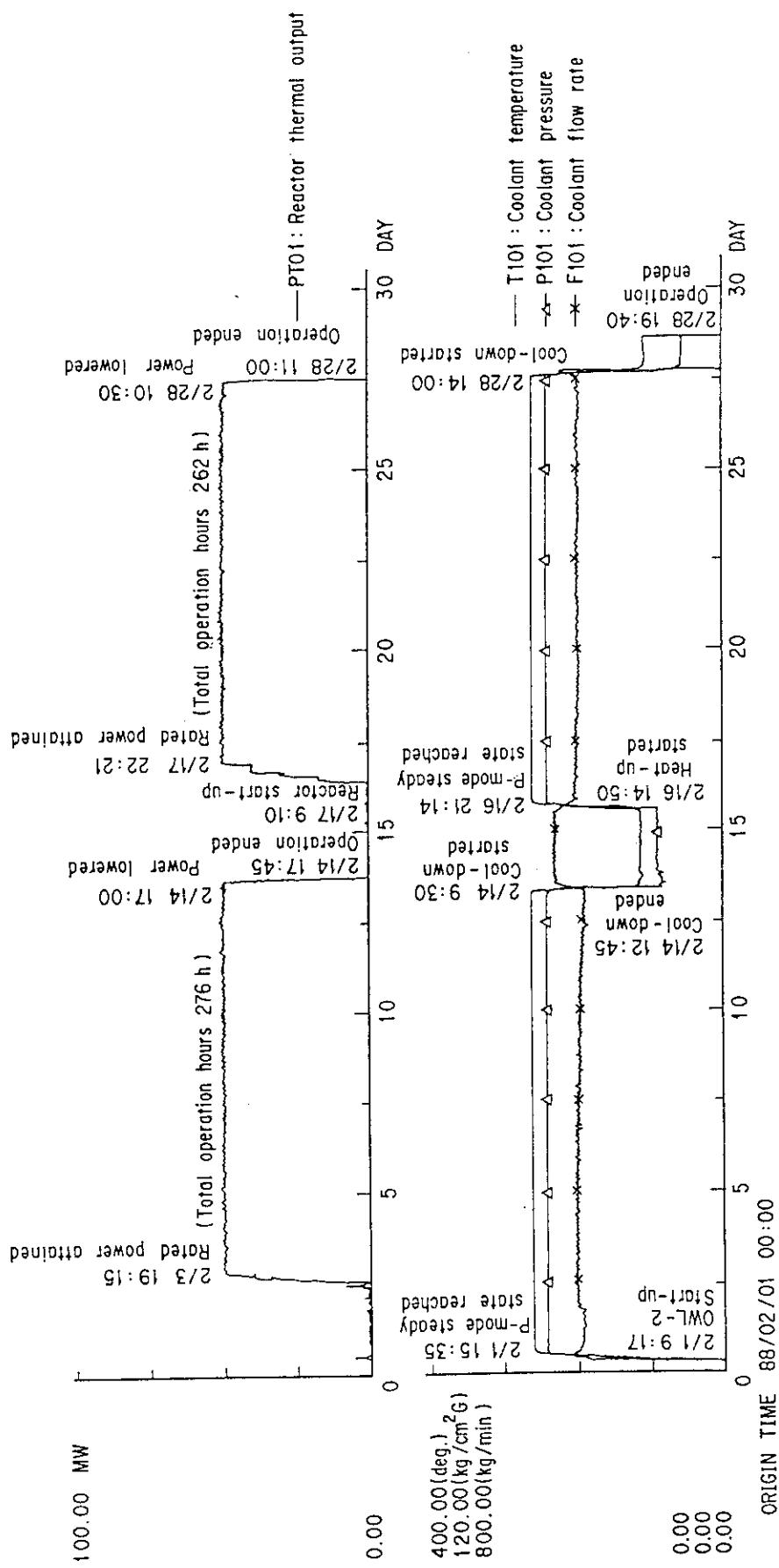


Fig. 3.2-1 Operation log of No. 80 JMTR operation period

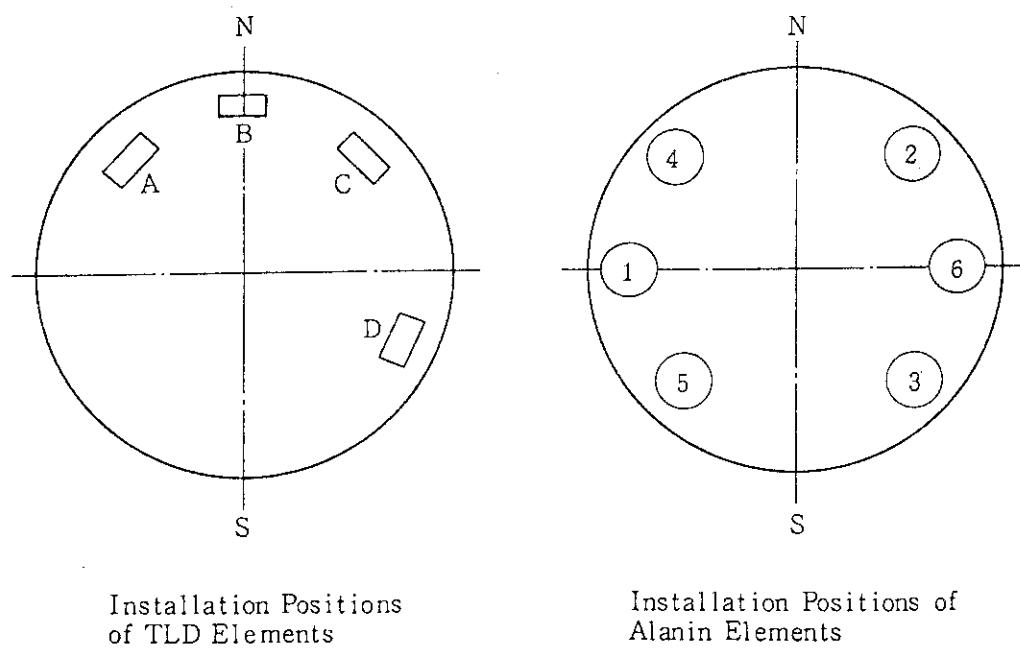
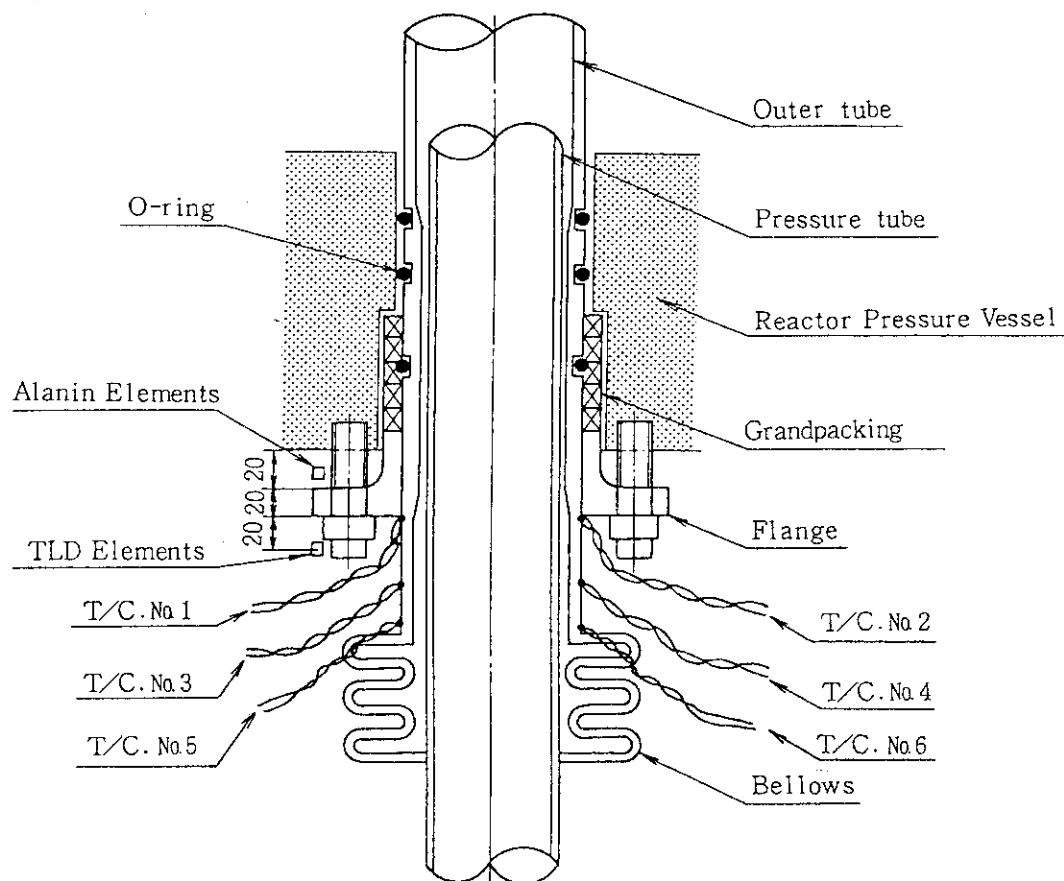


Fig. 3.3-1 Measurement locations on reactor pressure vessel

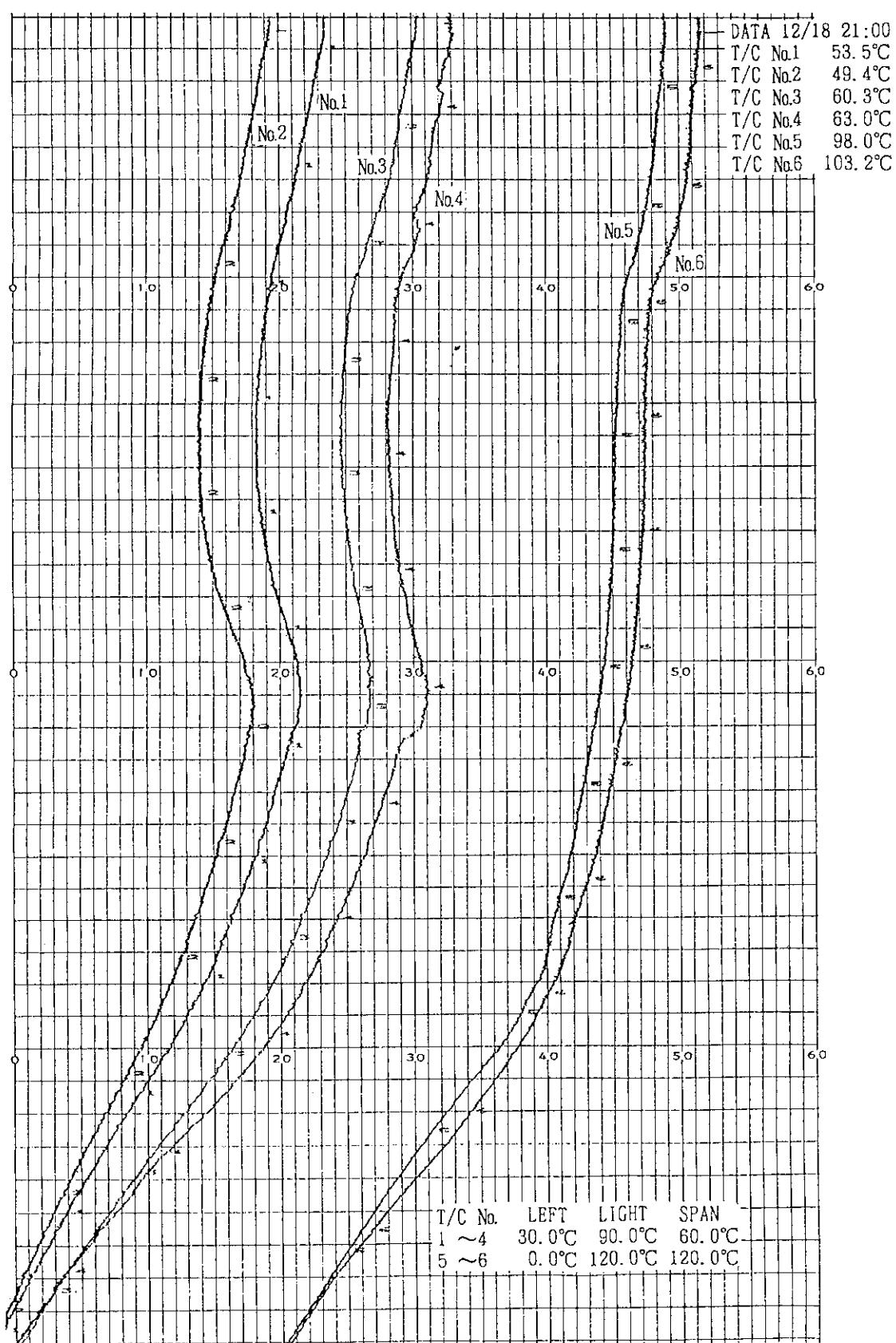


Fig. 3.4-1 Temperature measurement records at locations where "0" rings mounted

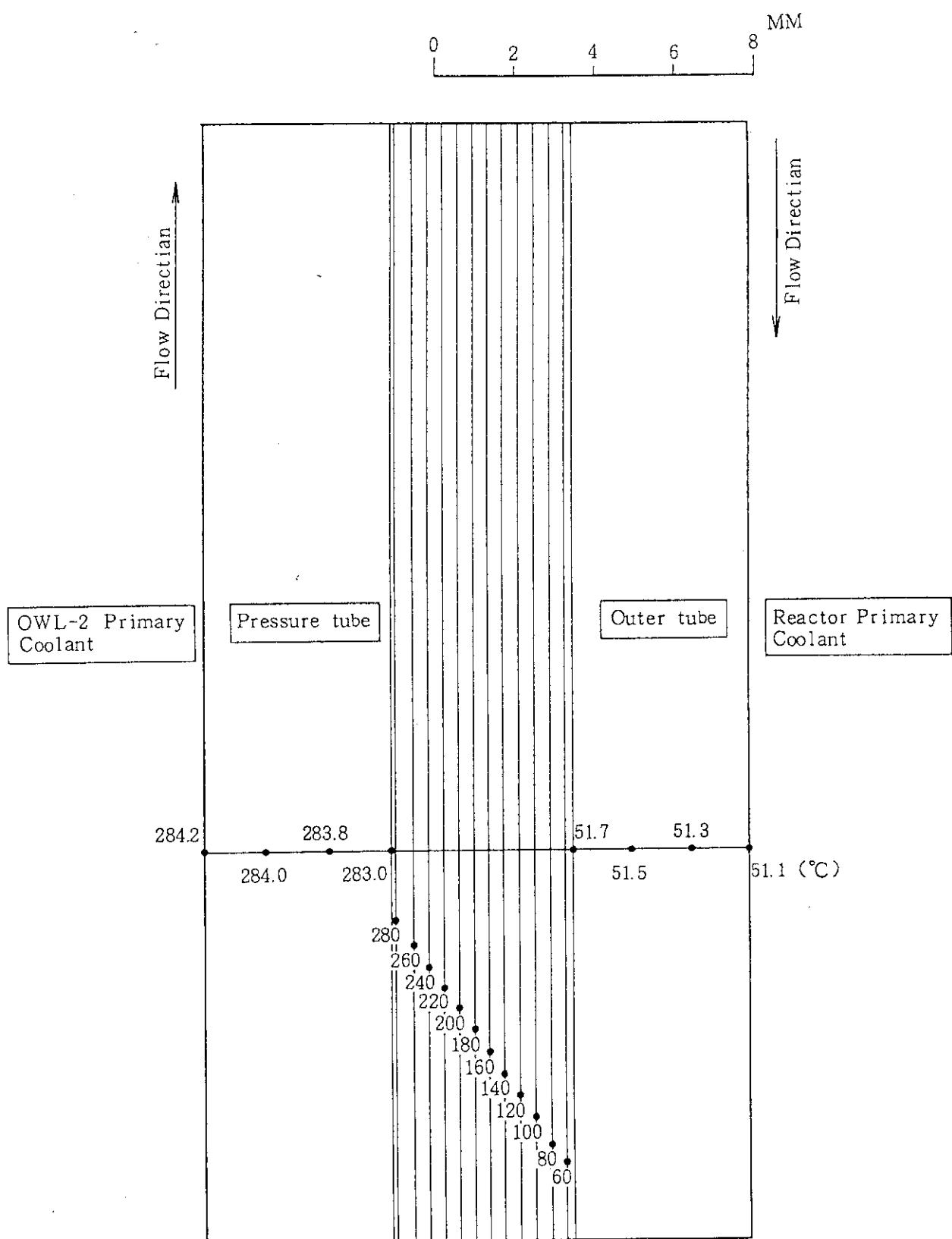


Fig. 3.4-2 Temperature distribution across the OWL-2 in-reactor tube in B-mode operation

4. Oリングの機械的性質に関する評価

4.1 概 要

Oリングの使用寿命を支配する要因としては硬さ、引張り強さ、伸び等が挙げられる。

シリコンゴム製Oリングの実機供用期間中に受けた吸収線量は、最高で 3.46 kGy ($3.46 \times 10^5 \text{ Rad}$)に達することが明らかとなった。これより実機で使用したシリコンゴム製Oリングの機械的性質の劣化を評価するため、同じ材質のOリングとEPDMについて、供用期間中に受けた吸収線量に相当する線量をガンマ線を使って加速照射することにより、その相互の比較を行った。

なお、実機で使用したシリコンゴム製Oリングは、OWL-2炉内管が高い誘導放射能を帶びていたため、同炉内管から取り外す際に2分割している関係上、各試験に使用したOリングも総て分割して各種試験を実施することにした。

4.2 供試試料

(1) 試 料

試験に使用したシリコンゴム製Oリングはできるだけ試験条件を合わせるという観点から同じメーカー、材質のものを使用することにした。

各Oリングの仕様は次に示すとおりである。

イ シリコンゴム製Oリング：JIS B 2401, 日本バルカ－No.5640-P130

ロ EPDM製Oリング : JIS B 2401, 日本バルカ－No.640-P130 (Hs70)

(2) 放射線照射

ステンレス鋼の容器に精製水を満たし、その中にシリコンゴム製及びEPDM製のOリングを棒状に伸ばして入れたあと、外的な劣化要因となる酸素等の影響を避けるうえから密封状態とした。さらに、同容器全体を 70°C の恒温槽内に入れ、外部からガンマ線（線源： ^{60}Co 、照射線量率 $5 \times 10^5 \text{ Rad/h}$ ）により最高 $3.70 \times 10^3 \text{ kGy}$ までの照射を行った。

4.3 Oリングの引張試験

(1) 試験方法

実機使用、未照射、ガンマ線照射した3種類のOリングについて、室温での引張試験を実施した。

引張速度は 500 mm/min 、チャック間距離 50 mm として、1ケースについて7～8本を試験し、チャックによる摺み部の切れや滑りがないと判断される3～4本のデータから、JIS K 6301の方法により加重平均値を算出した。

(2) 試験結果

シリコンゴム製及びEPDM製Oリングの照射後の試験結果をFig. 4.3-1~6に示す。試験した線量範囲が広いため、線量は片対数表示とし、シリコンゴムを白丸、EPDMを黒丸で示す。なお、図中的一点鎖線は実機で使用したOリング（シリコンゴム）についての最大値と最小値を示す。

イ. 照射に伴うモジュラスの変化

Fig. 4.3-1に照射に伴う20%モジュラスの変化を示す。線量と共にモジュラスは高くなり、照射に伴う架橋密度の増加をうかがわせる。この傾向はシリコンゴムの方が著しく、20%モジュラスが未劣化試料の2倍の値になる線量は200kGyであるのに対して、EPDMの場合には2000kGyである。

一方、実機試料における最大値は図中線量の40kGyに相当する。そのため、実機における劣化は短時間のガンマ線照射をした場合より1桁高い吸収線量に相当する劣化を受けた可能性がある。

この原因としては、原子炉が稼働中に受けた熱と13年間にわたる経時変化と考えられる。このように実機における劣化の最大見積はガンマ線を短時間で40kGy照射した変化に相当するが、この時の20%モジュラスは元の値の1.3倍となった。そこで、EPDMについて20%モジュラスが未照射試料の1.3倍となる線量を図から求めると500kGyとなる。この線量はシリコンゴムの約10倍であり、照射劣化に対してはEPDMの方が優れていることを示している。

ロ. 照射に伴うヤング率の変化

Fig. 4.3-2に照射に伴うヤング率の変化を示す。比較的低線量側ではシリコンゴムとEPDMの間に大きな差異は認められないが、百kGy以上ではシリコンゴムの方が照射に伴いヤング率が高くなる。

次に、20%モジュラスの場合と同じ手法で両試料の比較を行う。実機では劣化の最大値に相当する線量は200kGyであり、この線量でヤング率は元の値の2.3倍になった。そこで、EPDMのヤング率が2.3倍になる線量を図から求めると400kGyとなり、この線量はシリコンゴムの2倍である。

ハ. 破断伸び

Fig. 4.3-3に照射に伴う破断伸びの変化を示す。実機のデータは広い範囲にあるが、最も低いのは75%である。短時間でガンマ線照射を実施すると100kGyでこの値に達する。

実機で長時間使用された場合には使用中に受けた線量よりも、熱や経時変化による劣化が伸びの低下に著しく現れ、実際には3.46kGyであるにもかかわらず100kGy相当の劣化が進行していることを意味する（但し、実機試料のデータは図に見られるように広く分布しており、ここでは実機試料データの中で最も劣化が激しい試料について考察している。）。

一方、EPDMの場合伸びが75%になる線量は600kGyであり、シリコンゴムの6倍となり、EPDMの方が耐放射線性に優れていることが判る。

ニ. 破断強度

Fig. 4.3-4に線量と破断強度との関係を示す。シリコンゴムは数千kGyに至るまで破

断伸びは殆ど変化しない。実機試料のデータ範囲も短時間でガンマ線照射した結果とほぼ一致する。

EPDMの場合には100kGyを越えると破断伸びの値は低下し始めるが、シリコンゴムと同じ値となるのは約5000kGyにおいてである。

4.4 Oリングの圧縮試験

(1) 試験方法

Oリングを平板で挟み、1分間で0.83mm(Oリング直径の15%)圧縮し、この状態を10分間保持する。圧縮を完了したときの応力(但し、Oリングの線長10mmあたりとする。)を圧縮応力(Compression Force) F_0 、10分後の応力の値を F_{10} とし、その比 F_{10}/F_0 を保持率とする。

(2) 試験結果

イ. 圧縮応力

Fig. 4.3-5に照射に伴う圧縮応力の変化を示す。いずれの試料も線量と共に応力の値は大きくなり、照射に伴う架橋密度の増加を反映している。

圧縮応力については実機試料間のばらつきは少なく、また実機試料における劣化の最大値は30kGy相当であり、比較的低い値を示した。

照射に伴う圧縮応力の変化は百kGyを越えると、EPDMに較べてシリコンゴムの方が大きくなる。

ロ. 応力の保持率

先に述べた応力の保持率をFig. 4.3-6に示す。未照射の場合にはシリコンゴムの方が高い保持率を示す。この事実は一般にEPDMのコンプレッションセットが低いことと対応している。線量と共に両試料の保持率は高くなるが、この原因は照射に伴う架橋密度の上昇によるものである。

Oリングとして使用する場合には保持率は高い方が、その性能が優れていると考えられる。しかし、ある材料と同じ配合割合のOリングについて比較すると、保持率が高くなることは架橋密度が高くなることを意味し、必然的に伸びの低下とそれに伴う脆さの増加をもたらす。

そこで、実機で使用した試料データの最大値に注目し、その値に達する吸収線量を求める500kGyになる。これは13年間の長時間にわたって圧縮状態で使用してきたため、実際に照射された線量よりもはるかに大きい劣化が進んだものと考えられる。

EPDMについて同じ保持率に達する線量を求める1000kGyという値が得られた。

4.5 まとめ

実機で使用されたOリングは、13年間にわたって受けた線量を短時間に高線量率で照射したものに較べて劣化(老化)程度が大きく、放射線以外の熱や圧縮による経年劣化が無視できない。

また、材料をシリコンゴムから EPDM に替えると耐放射線性が向上し、劣化の度合を軽減できることも明らかになった。

次に、実機で使用されたシリコンゴム製Oリングを引き続き同じ状態で使用した場合の余寿命の推定を試みる。測定した機械的性質のなかで照射に伴って特性が低下している破断伸びについて評価する。

実機で使用した試料の中で最も低い伸びの値は Fig. 4.3-3 より 75% であり、同等の劣化をもたらす吸収線量は 100 kGy となる。

ところで、高線量率のガンマ照射によって破断伸びが 50% となった場合を O リングの使用寿命と仮定する。^{*1)} この時の線量は約 300kGy となり、先の 100kGy の 3 倍の線量にあたり、実機と同じ状態で使用した場合の余寿命は 26 年と推定される。

この余寿命の推定方法で最も重要な点は、伸び 50% をもって O リングの使用寿命とするところである。実機で使用された O リングを機械的な試験以外に目視、あるいは手で折り曲げて観察したところ、破断伸びが 75% の試料についても十分な柔軟性があり、さらに短時間に高線量率で照射し、破断伸びが 50% になった試料についても同様であった。

したがって、本報のような使用状態では少なくとも破断伸びが 50% になるまでは使用可能と考えられる。

シリコンゴムを EPDM に替えた場合、伸び 50% に達する線量は 1000kGy となり、使用寿命はシリコンゴムの 3 倍と推定される。

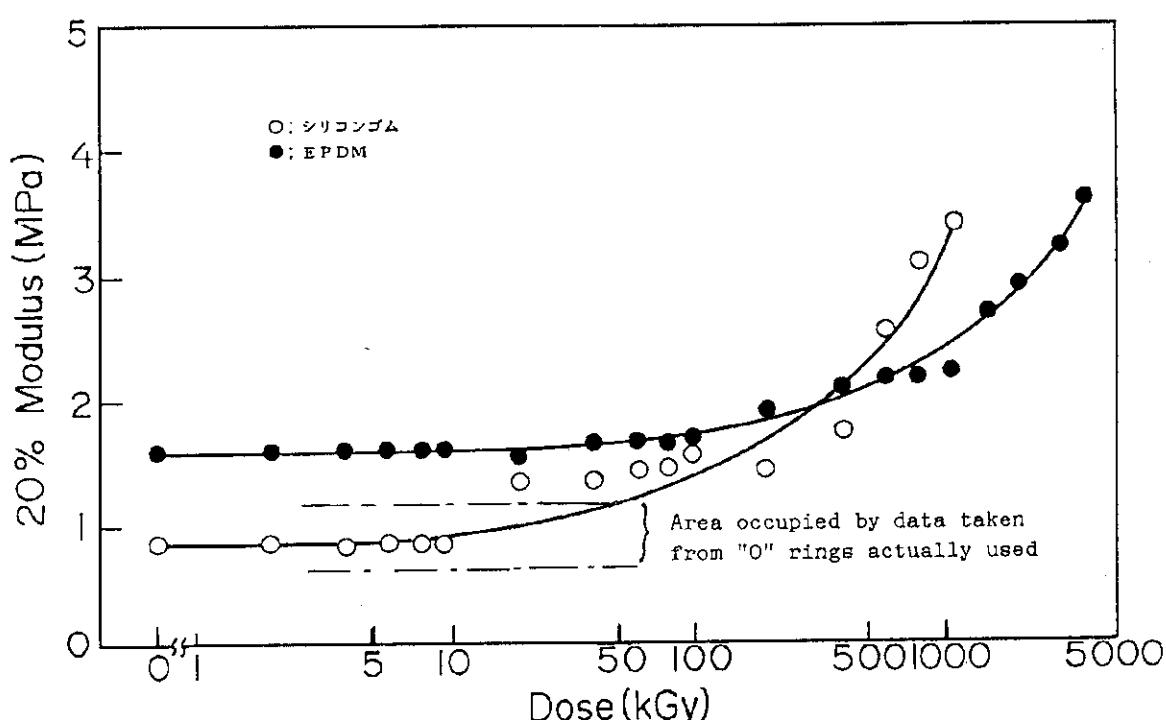


Fig. 4.3-1 Change of 20% modulus with dose

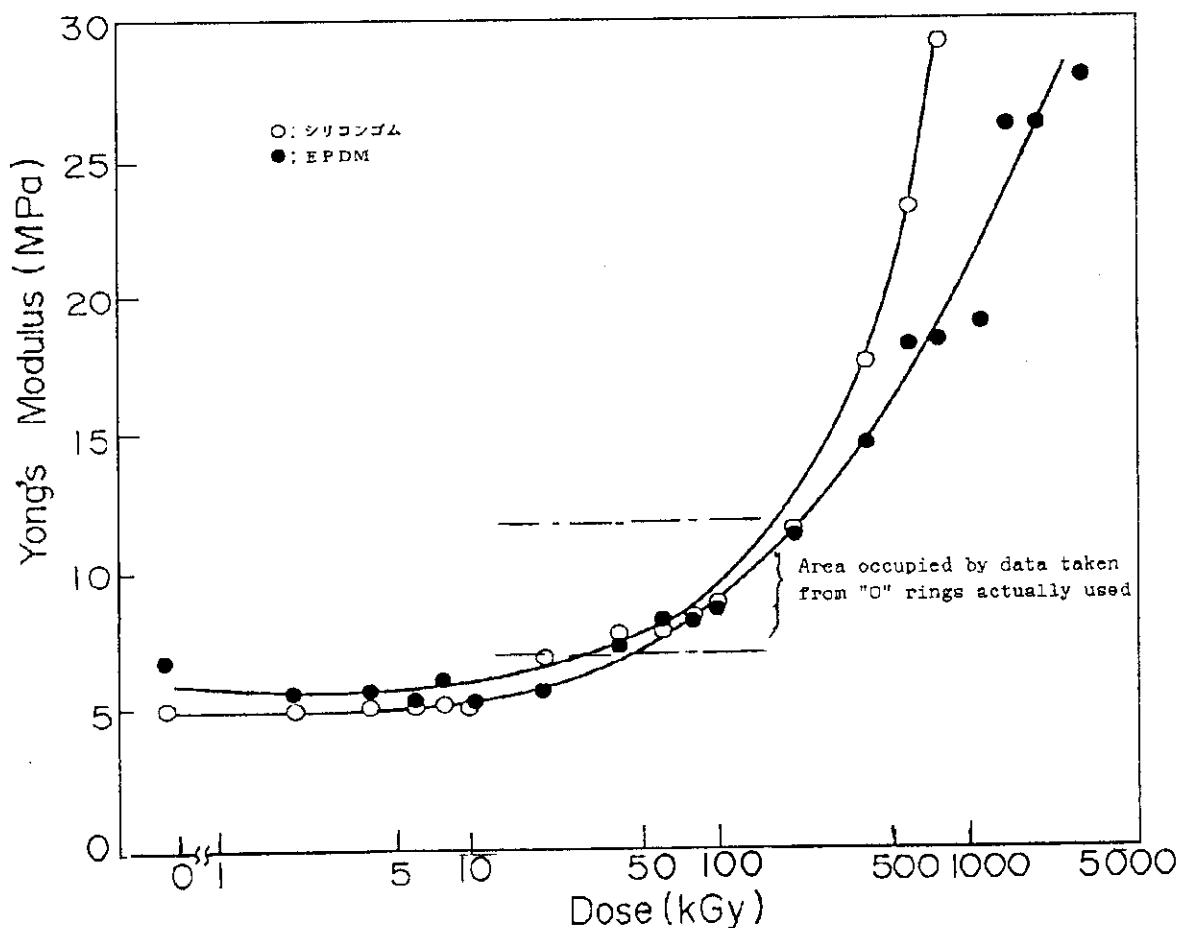


Fig. 4.3-2 Change in Young's Modulus of "O" rings with dose

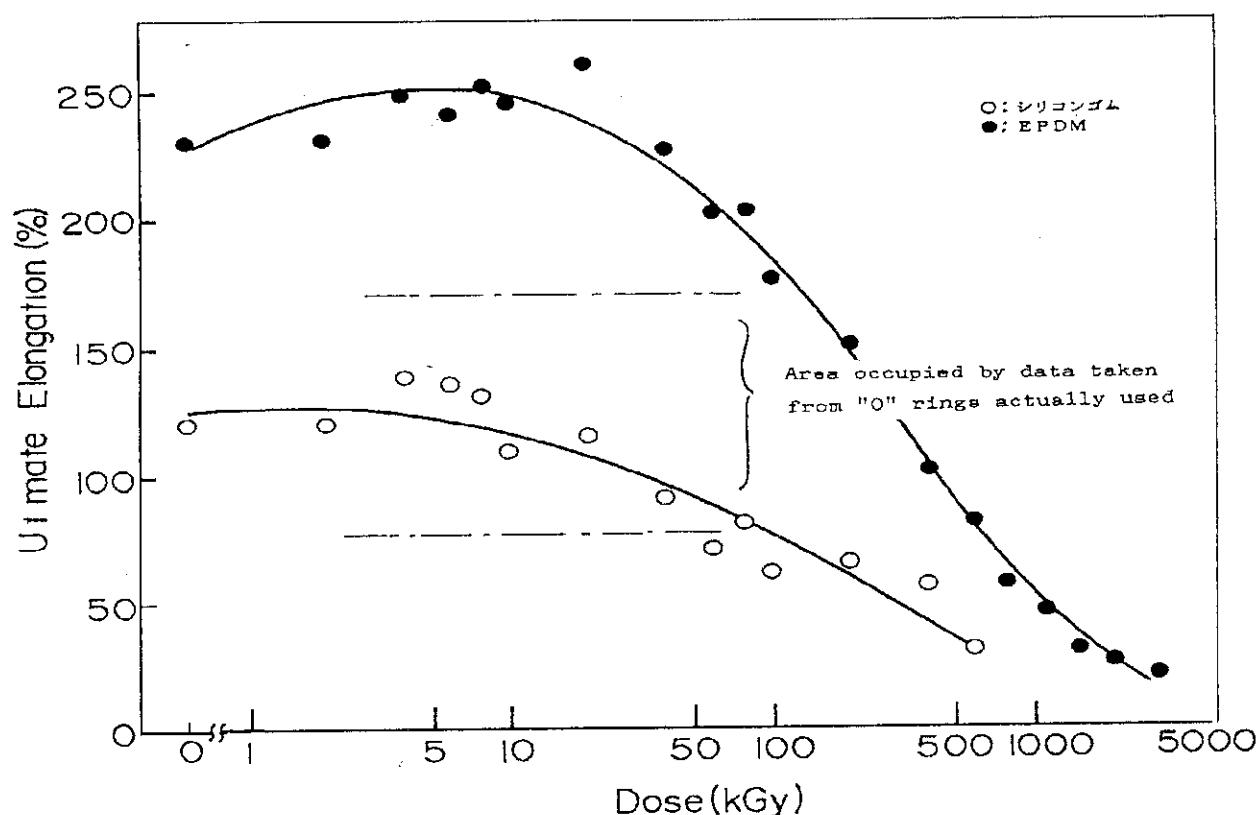


Fig. 4.3-3 Change in ultimate elongation of "O" rings with dose

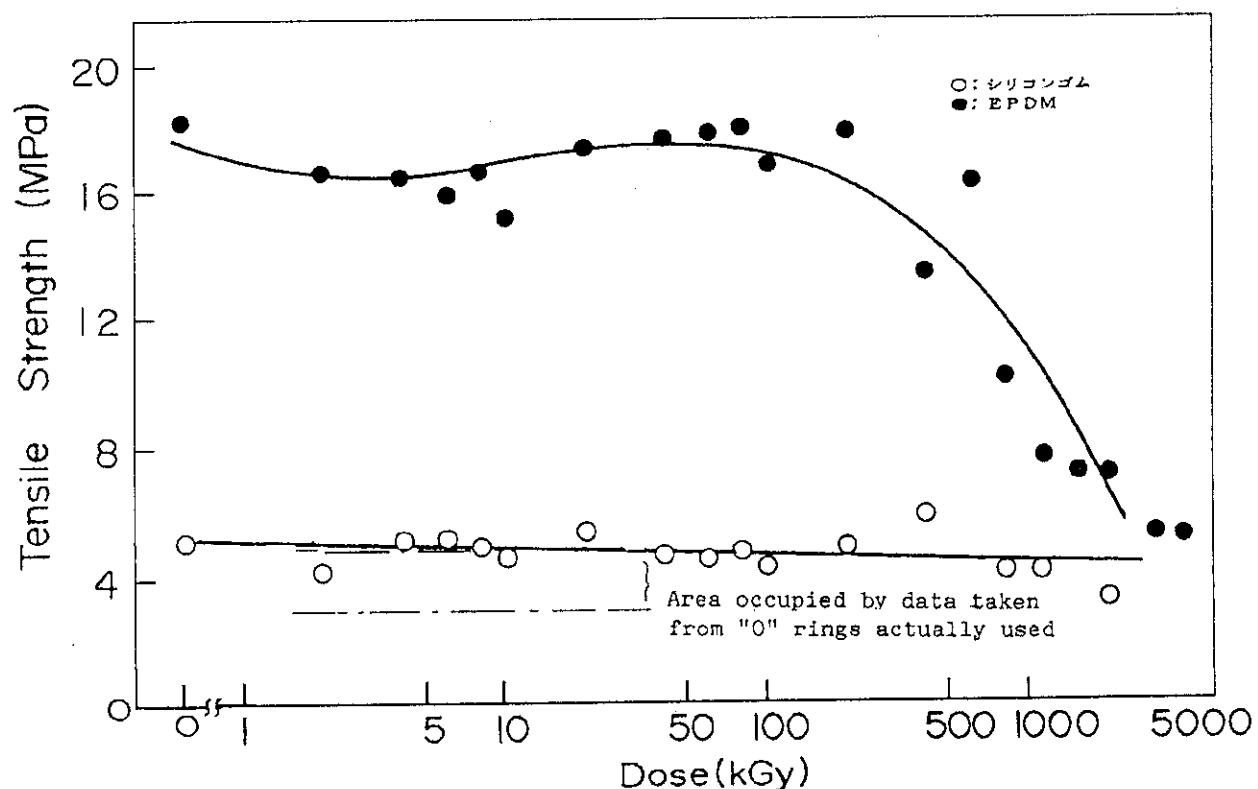


Fig. 4.3-4 Change in tensile strength of "O" rings with dose

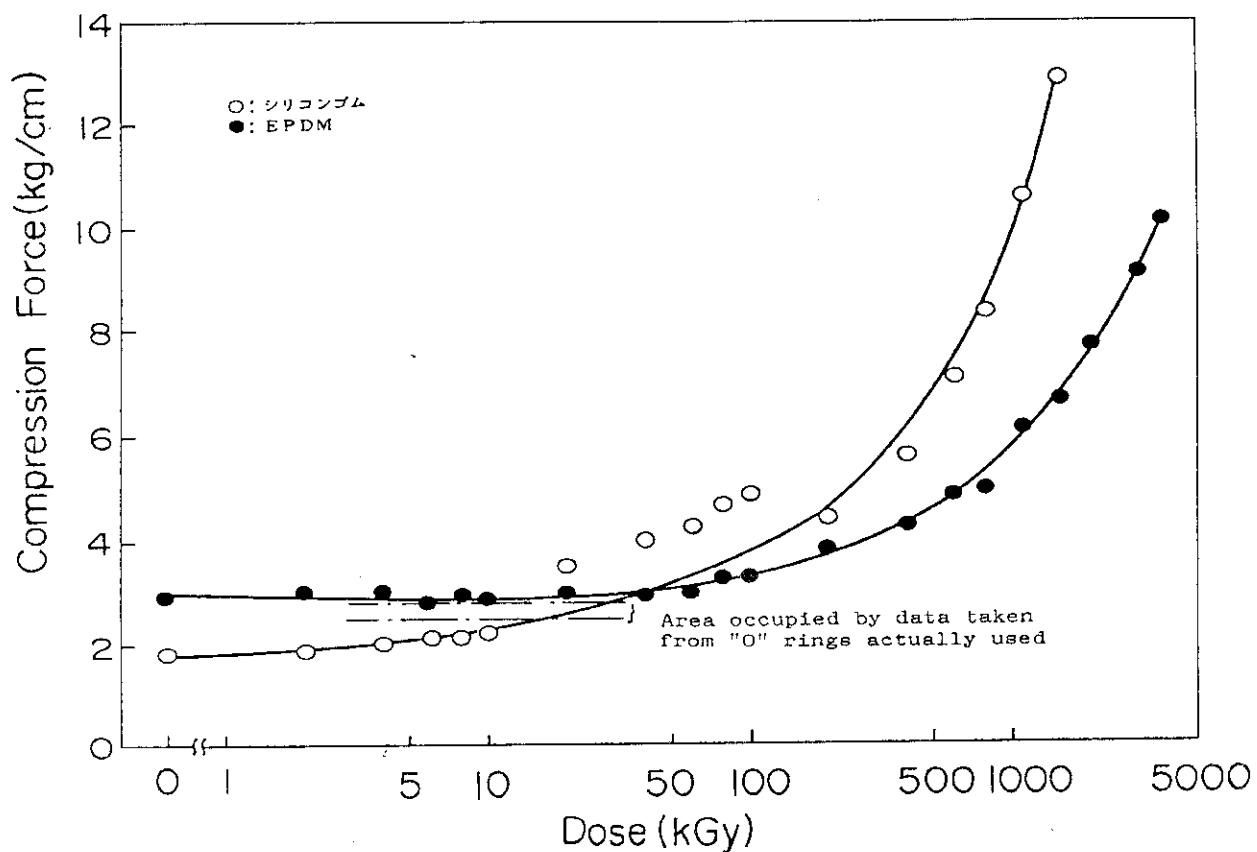


Fig. 4.3-5 Change in compression force of "O" rings with dose

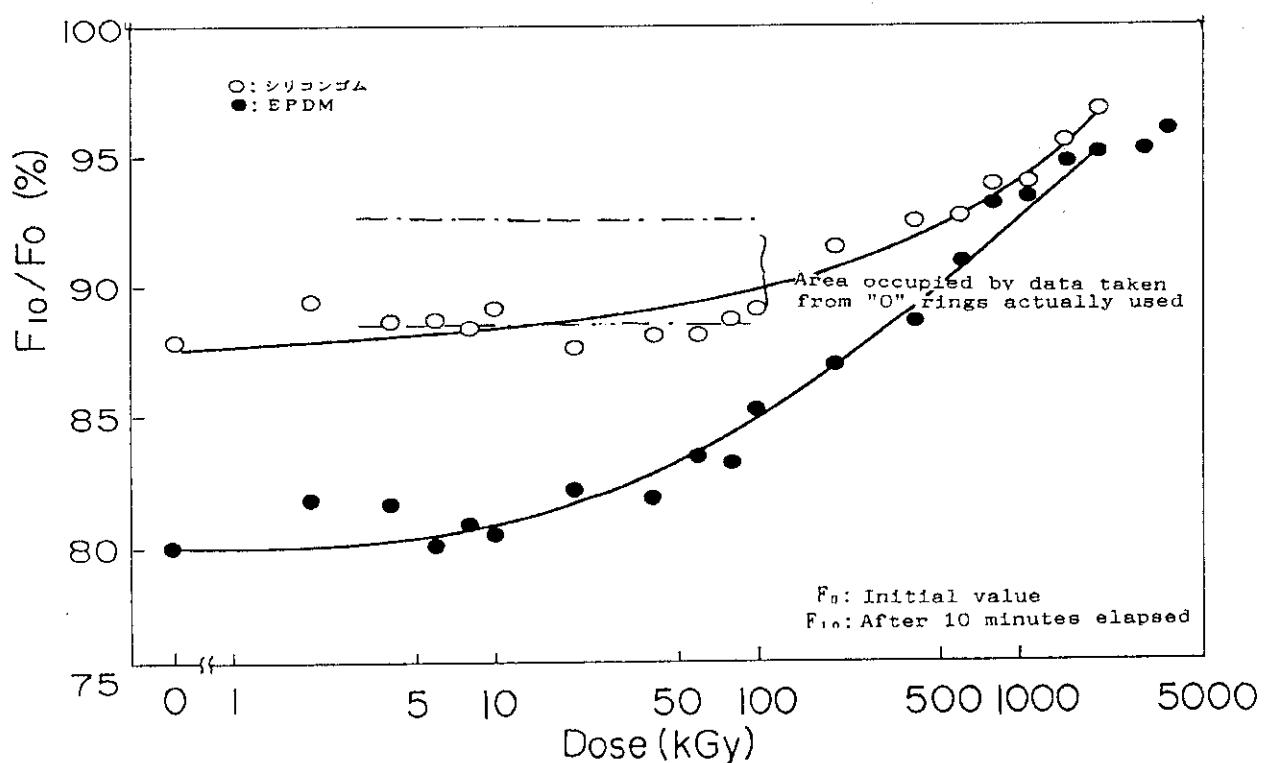


Fig. 4.3-6 Change in retention of "O" rings with dose

5. あとがき

シリコンゴム製Oリングの13年間にわたる実機供用期間中は、原子炉及びOWL-2の運転に伴い約20°C~53.5°Cの範囲で約400回の矩形状の温度変化と、それに伴う線膨張差により軸方向のしうう動（最大しうう動距離；5.3mm），さらには吸収線量にして最高3.46kGyの照射を受けたことになる。

EPDM製Oリングの採用にあたっては、事前にOWL-2炉内管で使用実績のあるシリコンゴムに較べて機械的性質に優れていることを文献調査及び実機構造を模擬した試験装置により確認し決定したが、その後の評価試験においても同様に耐放射線性に優れていることが立証される等最適な材料選択であったと言える。主な調査・試験結果は次に示すとおりである（Oリングの耐放射線性等に関する文献の抜粋を付録-IIに、実証試験に関する記録を付録-IIIに示す。）。

- (1) シリコンゴム製Oリングの破断伸びはガンマ線を使って加速照射したOリングの100kGyに相当する劣化進行が見られる。
- (2) ガンマ線加速照射したシリコンゴム製Oリングの破断伸びが50%となる吸収線量は約300kGyである。実機と同じような使用環境では破断伸びが50%になるまでは少なくとも使用可能であり、40年でこの線量に達する（使用寿命：40年）。
- (3) 同様に、EPDM製Oリングの破断伸びが50%となる吸収線量は約1000kGyであり、使用寿命はシリコンゴムの約3倍となる。
- (4) 75°Cの熱空気及び熱水・水蒸気中における耐久性は、シリコンゴム及びEPDMとも使用条件を満足する。しかし、熱空気環境ではEPDMはシリコンゴムに較べて耐熱性に劣り、125°Cを越えての使用に不適である。
- (5) 実証試験の結果、しうう動に対するOリング表面疵の発生はEPDMの方が少なく、かつ浅いこと等から使用環境に適している。

以上のとおり、シリコンゴム製Oリングの実機供用期間中に受けた吸収線量は、使用可能な線量と文献等で一般的に言われている値に較べて少なく、線量上は余裕のあるものであった。しかし、実機で使用したOリングは、ガンマ線を使って加速照射したものに較べて、Oリングの使用寿命の支配的要因である硬さ、引張り強さ、伸びに劣化の進行していることが明らかとなった。この劣化進行の原因としては、ガンマ線照射による影響（放射線劣化）の他に、供用期間中の経年劣化（熱的影響、圧縮による影響、酸化による影響）等が挙げられるが、長期使用が及ぼす機械的性質への影響について貴重な評価データを得ることができた。

今後、新OWL-2炉内管用として1986年8月から実機に組み込み使用しているEPDM製Oリングは、OWL-2の廃止処置に伴い取り出す計画となっている。さらに、その後にはJMTR原子炉圧力容器のシール材として、再度EPDM製Oリングの使用を予定しており、引き続き長期間使用したものとの評価データ入手することができることから、高吸収線量領域でのデータの補足を行い、本報告書を補完していく計画である。

謝　　辞

Oリングの評価試験にあたり、多大な御協力と御指導を戴いた伊丹宏治氏（現：実用燃料試験室長），川上和市郎氏（開発部次長）をはじめとする高崎研究所技術開発課の関係各位，中田宏勝氏（現：軽水炉将来技術開発計画開発チーム，サブリーダ・課長）に深く感謝します。

透過放射線の測定にあたっては稻田征二氏（原子炉第1課長代理），藤岡克氏（現：放射線影響協会），酒井俊也氏をはじめとする放射線管理課の関係各位，TLDの較正をして戴いた高田功氏（現：放射線高度利用研究推進室），試験の実施にあたり全面的な御協力を戴いた佐藤均氏（現：ホット・ラボ課長代理），鈴木忍氏を始めとする照射第2課関係各位，齋藤隆氏（照射第1課）に心から謝意を表します。

参　考　文　献

- 1) JMTR Project "Conceptual Design of the Japan Materials Testing Reactor," JAERI-1056, Mar, 1964
- 2) H. NAKATA, et al "IRRADIATION FACILITIES IN JMTR," JAERI-M82-119, Sep, 1982
- 3) 池島義昭他, "インパイル・ループOWL-2と照射試験," JAERI-M89-043, Mar, 1989
- 4) 池島義昭他, "OWL-2炉内管の貫粒型応力腐食割れ対策(THSI溶接残留応力改善法の確性試験報告)" JAERI-M 87-041, Mar, 1987
- 5) 栗原福次他, "活用ガイド 高分子材料," オーム社
- 6) 左村義隆 "高分子の耐放射線性," バルカー・レビュー, Vol, 15, No.10, 1971
- 7) 戸根弘人他, "JMTRの水化学," JAERI-1213, Dec, 1970
- 8) 比佐 勇他, "JMTR水・ガス分析報告書(昭和62年度後期)," 内部資料, Jul, 1988
- 9) 井上正他, "放射能蓄積抑制と除染, その1, 高温・高压ループ配管における化学除染前後の放射性クラッドの解析," 電力中央研究所報告, 280016, Dec, 1980
- 10) H. KANBE, et al "Deposition of a Radiationactive Corrosion Product in a High-Pressure and High-Temperature Water Loop and its Decontamination," Nuclear Technology, Vol, 60
- 11) 小嶋拓治 "アラニン線量計の開発" Isotope News, May, 1987
- 12) 岡本旦夫他, "軸対称体および2次元構造の温度分布解析プログラム(HEAT)," 石川島播磨重工業(株)作成, 1982

謝 辞

Oリングの評価試験にあたり、多大な御協力と御指導を戴いた伊丹宏治氏（現：実用燃料試験室長），川上和市郎氏（開発部次長）をはじめとする高崎研究所技術開発課の関係各位，中田宏勝氏（現：軽水炉将来技術開発計画開発チーム，サブリーダ・課長）に深く感謝します。

透過放射線の測定にあたっては稻田征二氏（原子炉第1課長代理），藤岡克氏（現：放射線影響協会），酒井俊也氏をはじめとする放射線管理課の関係各位，TLDの較正をして戴いた高田功氏（現：放射線高度利用研究推進室），試験の実施にあたり全面的な御協力を戴いた佐藤均氏（現：ホット・ラボ課長代理），鈴木忍氏を始めとする照射第2課関係各位，齋藤隆氏（照射第1課）に心から謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) JMTR Project "Conceptual Design of the Japan Materials Testing Reactor," JAERI-1056, Mar, 1964
- 2) H. NAKATA, et al "IRRADIATION FACILITIES IN JMTR," JAERI-M82-119, Sep, 1982
- 3) 池島義昭他, "インパイル・ループOWL-2と照射試験," JAERI-M89-043, Mar, 1989
- 4) 池島義昭他, "OWL-2炉内管の貫粒型応力腐食割れ対策(THSI溶接残留応力改善法の確性試験報告)" JAERI-M 87-041, Mar, 1987
- 5) 栗原福次他, "活用ガイド 高分子材料," オーム社
- 6) 左村義隆 "高分子の耐放射線性," バルカー・レビュー, Vol, 15, No. 10, 1971
- 7) 戸根弘人他, "JMTRの水化学," JAERI-1213, Dec, 1970
- 8) 比佐 勇他, "JMTR水・ガス分析報告書(昭和62年度後期)," 内部資料, Jul, 1988
- 9) 井上正他, "放射能蓄積抑制と除染, その1, 高温・高压ループ配管における化学除染前後の放射性クラッドの解析," 電力中央研究所報告, 280016, Dec, 1980
- 10) H. KANBE, et al "Deposition of a Radiationactive Corrosion Product in a High-Pressure and High-Temperature Water Loop and its Decontamination," Nuclear Technology, Vol, 60
- 11) 小嶋拓治 "アラニン線量計の開発" Isotope News, May, 1987
- 12) 岡本旦夫他, "軸対称体および2次元構造の温度分布解析プログラム(HEAT)," 石川島播磨重工業(株)作成, 1982

付録 I O リングの照射線量計算

1. 概 要

シリコンゴム製 O リングの取り付け位置における照射線量は、ガンマ線及び中性子線の遮蔽計算用コード QAD-CG¹⁾を用いて計算により求めた。

計算にあたっては、原子炉圧力容器を計算モデル化して、原子炉圧力容器の真下における照射線量を求め、その値と TLD 及びアラニン線量計による測定結果を照合して、計算モデルの適切なことを確認したうえ、各 O リングの照射線量率を算定した。

2. 計算方法

ガンマ線の遮蔽計算では、点滅衰核透視法 (Point-kernel Ray-tracing) を用いた。これは、線源内のある点から測定点までの透視線 (Line of Sight Path) に沿って、散乱されないと見做して計算したエネルギー変換に、散乱光子によるビルドアップ係数を乗じて、測定点での照射線量率を計算する方法である。

原子炉におけるガンマ線の線源は、体積線源の形態を示しているため、これを微小体積に分割することにより、微小体積線源を点線源の集合しているものと見做して、ガンマ線のエネルギー毎に全体積にわたって積分して照射線量率を求めた。

単位体積あたり、エネルギー (E) の光子を S (個/秒) 放出している体積線源における、ある測定点でのガンマ線の照射線量率は次式で表される。

$$D(\vec{r}) = K \int_V \frac{S(\vec{r}') B(\mu |\vec{r} - \vec{r}'|, E) \exp(-\mu |\vec{r} - \vec{r}'|)}{4\pi |\vec{r} - \vec{r}'|^2} dV$$

ここで、

- \vec{r} : 測定点
- \vec{r}' : 体積線源中の点線源の位置
- V : 線源の体積
- μ : エネルギー (E) における全滅衰係数
- $|\vec{r} - \vec{r}'|$: 測定点と点線源位置の距離
- $B(\mu |\vec{r} - \vec{r}'|, E)$: 照射線量率のビルドアップ係数
- K : 照射線量率の換算係数

3. 線源の評価

シリコンゴム製 O リングの取り付け位置における照射線量率の評価計算においては、ガンマ線

の線源として、

- (1) 炉心からの FP によるガンマ線及び二次ガンマ線
- (2) 原子炉一次冷却水中の放射性核種によるガンマ線

を考慮した。

炉心からの FP によるガンマ線及び二次ガンマ線の評価計算は、原子炉熱出力（定格）50 MW の運転条件を仮定し、ORIGEN-JR コード²⁾により行った。ガンマ線強度の計算結果を Table A-1 に示す。

原子炉一次冷却水中のガンマ線については、¹⁶N の放射能濃度が他の放射性核種に較べて非常に高く支配的であることと、6 ~ 9 MeV のガンマ線を放出することなどから¹⁶Nだけに注目し他の放射性核種は無視した。

しかし、TLD 及びアラニン線量計による測定を実施した第 80 サイクル運転時の分析結果によると、¹⁶N は短半減期核種であるため検出されていなかった。このため、¹⁶N の検出されている JMTR 特性試験のデータを基にして、双方で検出されている⁴¹Ar の放射能濃度から比例計算によって求めた。JMTR 特性試験のデータ³⁾を Table A-2 に、¹⁶N の核データ⁴⁾を Table A-3 に示す。

$$C = \frac{9.3 \times 10^1 \times 6.5 \times 10^{-3}}{4.3 \times 10^{-3}} = 1.41 \times 10^2 (\mu\text{Ci}/\text{cm}^3)$$

ここで、

9.3×10^1 : JMTR 特性試験の炉一次冷却水中 ¹⁶N 放射能濃度 $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$

4.3×10^{-3} : JMTR 特性試験の炉一次冷却水中 ⁴¹Ar 放射能濃度 $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$

6.5×10^{-3} : 第 80 サイクル運転の炉一次冷却水中 ⁴¹Ar 放射能濃度 $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ ⁵⁾

4. 計算体系のモデル

シリコンゴム製 O リングの取り付け位置における照射線量の評価計算を行うためには、原子炉本体及びOWL-2 を計算モデル化し、遮蔽体系の幾何学的条件、遮蔽媒質の物質データ、線源モデル等を決める必要がある。Fig. A-1 に計算で用いた遮蔽計算モデルを示す。

FP によるガンマ線及び二次ガンマ線の線源体である炉心は、ウラン-アルミニウム分散型合金をアルミニウム合金で被覆した板状燃料であり、原子炉一次冷却水流路は外側のチャンネル部で若干広くなっている改良 ETR 型が使われている。

燃料板表面は大量の原子炉一次冷却水が流速約 10 m/s で流れているため、計算では炉心を純水の媒質として扱い、さらに炉心下部から一次冷却水出口までを原子炉一次冷却水中の主要な放射性核種である¹⁶N の線源領域とした。なお、この領域には各種配管及び制御棒駆動機構等が取り付けられているが、原子炉一次冷却水の占める割合が高いことから純水領域と見做した。

5. 計算結果及び考察

原子炉運転中の圧力容器真下における照射線量率は、QAD-CG コードによる計算結果と、TLD 及びアラニン線量計による測定結果とは Table A-4 に示すとおりよく一致しており、計算モデルの適切なことを確認した。

各 O リングの取り付け位置での照射線量率は、炉心に近づく程原子炉圧力容器の構造材及び媒質（純水）による遮蔽効果の影響が小さくなり、最高で $1.24 \times 10^{-6} \text{ C}/(\text{kg} \cdot \text{s})$, ($1.73 \times 10^1 \text{ R}/\text{h}$) に達することが判った。なお、各 O リングの取り付け位置におけるガンマ線エネルギーは Table A-5 からも判るとおり、 ^{16}N (ガンマ線エネルギー : $6.13 \times 10^0 \text{ MeV}$) が支配的である。

本計算モデルでは、原子炉圧力容器の構造材及び各種配管の放射化生成核種によるガンマ線や、炉下室のコンクリート壁による散乱及び原子炉圧力容器と生体遮蔽コンクリートの間壁からのダクトストリーミングの効果は考慮していないが、これらの影響は少ないものと思われる。

参考文献

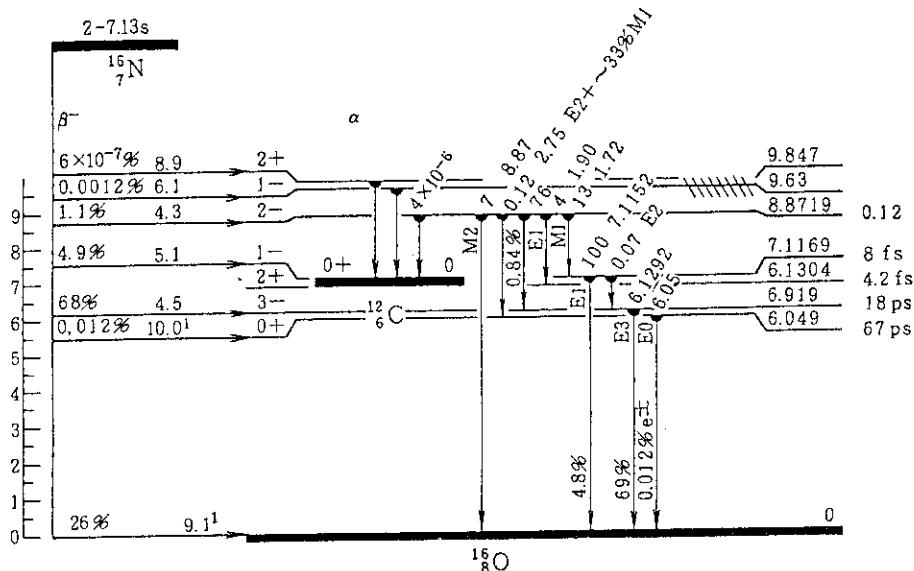
- (1) V. R. Cain, Bechtel Computer Code - NE007, "A Users Manual For QAD-CG" 1977.
- (2) K. Koyama, et al "ORIGEN-JR Computer Code for Calculating Radiation Sources and Analyzing Nuclide Transemutation" JAERI-M 8299, 1979.
- (3) 戸根弘人他, "JMTR の水化学" JAERI-1213, Dec, 1970.
- (4) E Browne, et al "Table of Radioactive Isotope" Lawrence Berkeley Laboratory University of California, 1986.
- (5) 比佐 勇他, "JMTR 水・ガス分析報告書(昭和 62 年度後期)" 内部資料, Jul, 1988.

Table A-1 Gamma Ray Intensity of Source (Reactor Core)

Midpoint energy (MeV)	Gamma Ray Intensity (Photons/s)
3.00×10^{-1}	1.12×10^{17}
6.30×10^{-1}	2.10×10^{17}
1.10×10^0	9.28×10^{16}
1.55×10^0	5.51×10^{16}
1.99×10^0	9.88×10^{15}
2.38×10^0	1.20×10^{16}
2.75×10^0	5.81×10^{15}
3.25×10^0	4.30×10^{15}
3.70×10^0	6.98×10^{14}
4.22×10^0	2.15×10^{15}
4.70×10^0	1.04×10^{15}
5.25×10^0	2.45×10^{14}

Table A-2 Radioactive Nuclide Concentration in Reactor Primary Coolant³⁾

Nuclide	Concentration in Reactor Primary Coolant ($\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$)	Reactor
¹⁶ N	9.3×10^{-1}	¹⁶ O (nf, p) ¹⁶ N
¹⁷ N	1.9×10^{-1}	¹⁷ O (nf, p) ¹⁷ N
¹⁸ O	2.0×10^{-1}	¹⁸ O (n, γ) ¹⁹ O
²⁴ Na	3.1×10^{-1}	²³ Na(n, γ) ²⁴ Na, ²³ Na(n, γ) ²⁴ Na
²⁷ Mg	2.0×10^0	²⁷ Al(nf, p) ²⁷ Mg, ²⁷ Al(nf, p) ²⁷ Mg
²⁸ Al	2.2×10^0	²⁷ Al(nf, γ) ²⁸ Al, ²⁷ Al(nf, γ) ²⁸ Al
³¹ Si	1.2×10^{-7}	³⁰ Si(n, γ) ³¹ Si
³⁷ S	3.6×10^{-11}	³⁶ S (n, γ) ³⁷ S
⁴¹ Ar	4.3×10^{-8}	⁴⁰ Ar(n, γ) ⁴¹ Ar
⁵¹ Cr	2.6×10^{-6}	⁵⁰ Cr(n, γ) ⁵¹ Cr
⁵⁶ Mn	5.5×10^{-4}	⁵⁵ Mn(n, γ) ⁵⁶ Mn
⁵⁹ Fe	1.9×10^{-8}	⁵⁸ Fe(n, γ) ⁵⁹ Fe
⁶⁰ Co	1.0×10^{-7}	⁵⁹ Co(n, γ) ⁶⁰ Co
⁶⁴ Cu	9.0×10^{-7}	⁶³ Cu(n, γ) ⁶⁴ Cu
⁶⁵ Ni	3.5×10^{-6}	⁶⁴ Ni(n, γ) ⁶⁵ Ni
⁶⁶ Cu	8.3×10^{-7}	⁶³ Cu(n, γ) ⁶⁶ Cu
⁷¹ Zn	8.0×10^{-10}	⁷⁰ Zn(n, γ) ⁷¹ Zn

Table A-3 Nuclear Characteristics of $^{16}\text{N}^4)$ 

Photons (^{16}N)		
γ mode	γ (keV)	γ (%) t
$\gamma E2$	986.39 ₁₄	0.00338
$\gamma(M1)$	1754.9 ₅	0.103
$\gamma E1$	1954.6 ₈	0.03410
$\gamma E2 + \sim 33\% M1$	2741.1 ₅	0.8918
$\gamma M2$	2822.2 ₉	0.00135
$\gamma E3$	6129.224	68.8
$\gamma E2$	6915.5 ₆	0.0347
$\gamma E1$	7115.20 ₁₄	4.73
$\gamma M2$	8869.2 ₅	0.083

t 2.9% uncert(syst)

Continuous Radiation (^{16}N)			
E_{bin} (keV)	$\langle \beta \rangle$ (keV)	$\langle \beta \rangle$ (keV)	(%)
0-10	β^-	0.00096	0.0185
	IB	0.066	
10-20	β^-	0.00340	0.0225
	IB	0.065	0.45
20-40	β^-	0.0168	0.055
	IB	0.129	0.45
40-100	β^-	0.169	0.234
	IB	0.38	0.58
100-300	β^-	3.00	1.42
	IB	1.16	0.65
300-600	β^-	18.0	3.88
	IB	1.51	0.35
600-1300	β^-	157	16.0
	IB	2.7	0.30
1300-2500	β^-	699	36.88
	IB	2.7	0.154
2500-5000	β^-	933	28.6
	IB	2.2	0.065
5000-7500	β^-	558	9.0
	IB	0.73	0.0124
7500-10419	β^-	325	3.88
	IB	0.088	0.00110

 ^{16}N (7.132 s)Mode : β^- , $\beta-\alpha$ (0.001205%)

△ : 5682.128 keV

SpA : 9.42×10^{10} Ci/gProd : $^{15}\text{N}(d,p); ^{16}\text{O}(n,p)$
 $^{19}\text{F}(n,\alpha); ^{15}\text{N}(n,\gamma)$ ^{16}N (7.589 μ s)Mode : IT, $\beta-$ (0.000338%)

△ : 5802.224 keV

SpA : 1.017×10^{12} Ci/gProd : $^{15}\text{N}(d,p)$ Delayed Alphas (^{16}N)

α (keV)	α (%) t
1282.4 ₅	4.68×10^{-8}
185221	0.00120*
20143	6.511×10^{-7}

t 4.2% uncert(syst)
*broad peakPhotons (^{16}N) $\langle \tau \rangle = 120$ keV

γ mode	γ (keV)	γ (%)
γ	120.1 s	100

Table A-4 Dose Rates at Locations Where "O" Rings Are Mounted

Unit: C/(kg·s), (R/h)

Locations for Which dose rate evaluated	Calculated values through QAD-CG		
	Reactor Core ^{*1}	Lower portion of Reactor Core ^{*2}	Total
No. 1 O リング	7.25×10^{-7} (1.01×10^1)	5.14×10^{-7} (7.17)	1.24×10^{-6} (1.73×10^1)
No. 2 O リング	7.00×10^{-7} (9.77)	4.90×10^{-7} (6.84)	1.19×10^{-6} (1.66×10^1)
No. 3 O リング	6.55×10^{-7} (9.14)	4.49×10^{-7} (6.27)	1.10×10^{-6} (1.54×10^1)
圧力容器真下の 照射線量率 ^{*3, 4}	5.60×10^{-7} (7.82)	3.64×10^{-7} (5.08)	9.24×10^{-7} (1.29×10^1)

* 1 : 炉心からのFPによるガンマ線及び二次ガンマ線

* 2 : 原子炉一次冷却水の放射性核種によるガンマ線

* 3 : TLDによる測定結果 : 8.17×10^{-7} C/(kg·s), (1.14×10^1 R/h)* 4 : アラニン線量計による測定結果 : 8.46×10^{-7} C/(kg·s), (1.18×10^1 R/h)Table A-5 Contribution of Gamma-ray Energy from ^{16}N
at Location Where "O" Rings Are Mounted

Gamma-ray Energy (MeV)	Abundance (%)	Radiation intensity C/(kg·s), (R/h)
9.86×10^{-1}	3.38×10^{-3}	1.13×10^{-13} (1.58×10^{-6})
1.76×10^0	1.03×10^{-1}	2.32×10^{-11} (3.23×10^{-4})
1.96×10^0	3.41×10^{-2}	1.10×10^{-11} (1.54×10^{-4})
2.74×10^0	8.92×10^{-1}	7.31×10^{-10} (1.02×10^{-2})
2.82×10^0	1.35×10^{-3}	1.15×10^{-13} (1.60×10^{-6})
6.13×10^0	6.88×10^1	3.33×10^{-7} (4.64×10^0)
6.92×10^0	3.47×10^{-2}	2.04×10^{-10} (2.85×10^{-3})
7.12×10^0	4.73×10^0	2.97×10^{-8} (4.15×10^{-1})
8.87×10^0	8.30×10^{-2}	7.38×10^{-10} (1.03×10^{-2})

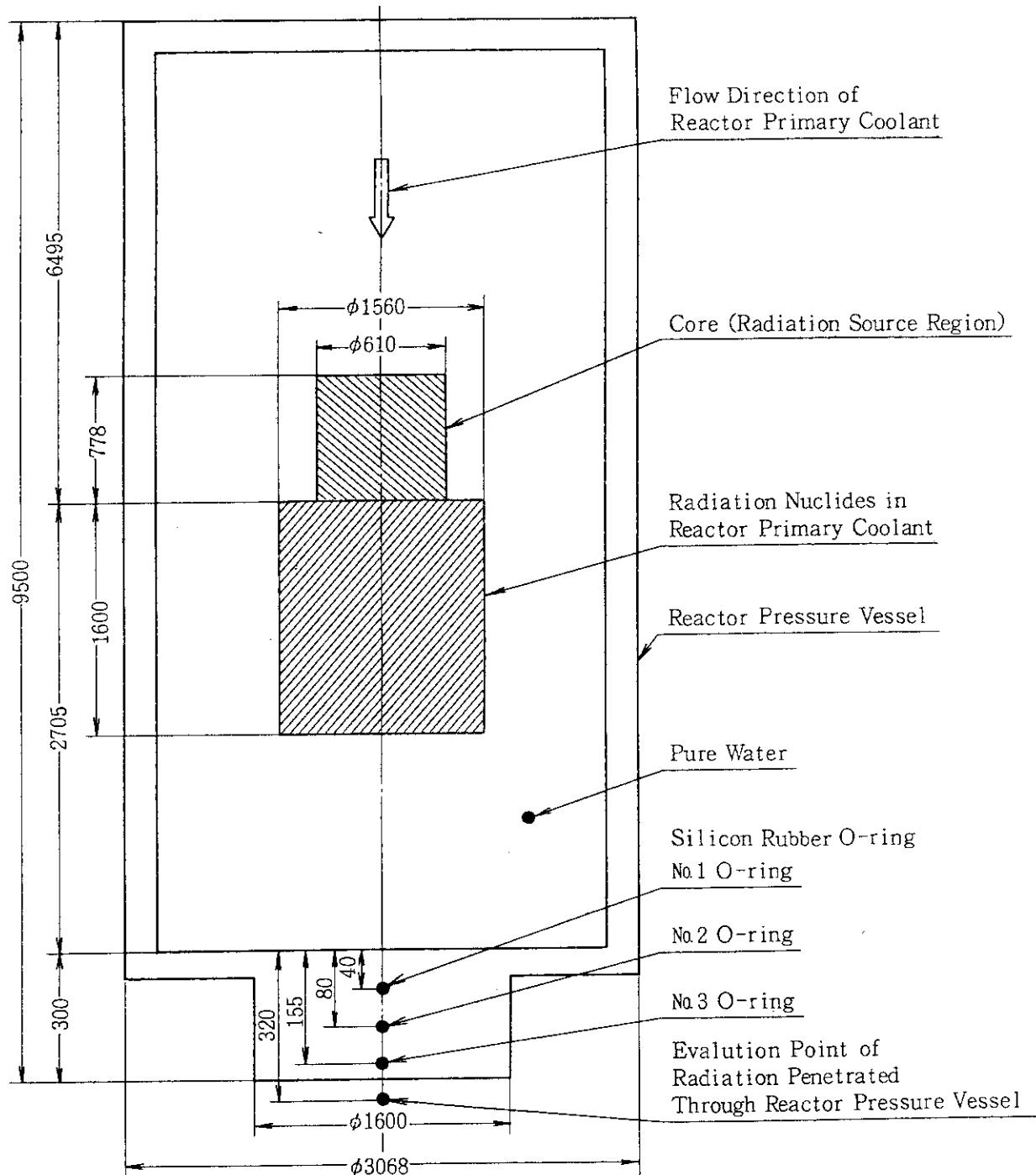


Fig. A-1 Shield calculation model

付録II Oリングの耐放射線性等に関する文献

1. 耐放射線性

- (1) 技術サービスセンター技術資料“各種ゴム材料の耐放射線性”バルカーレビュー,
PS185-3057

製品番号	材質	許容吸収線量(kGy)
No. 640 - NBR	ニトリルゴム	1×10^2
No. 640 - EPDM	エチレンプロピレンゴム	5×10^2
No. 4640	フッ素ゴム	1×10^1
No. 5640	シリコンゴム	8×10^1

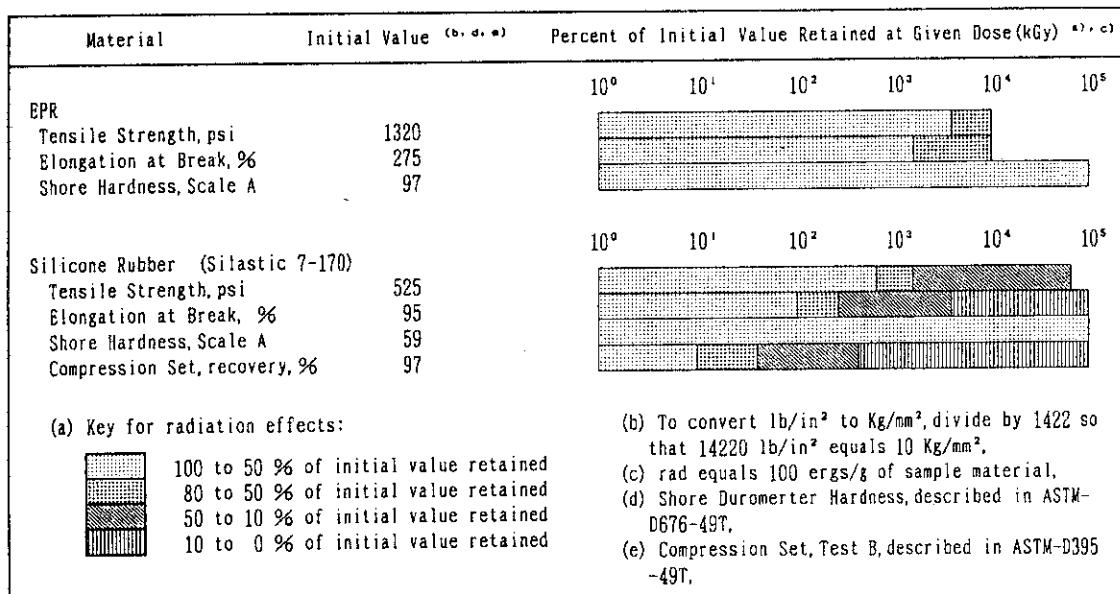
- (2) Bruce, M, B, et al "Radiation Effects on Organic Materials in Nuclear Plants Final Report" EPRI-NP2129, Nov, 1981.
〔早川直宏「原子炉用有機材料の照射効果(翻訳)」内部資料, Nov, 1982〕

材質	放射線損傷に対するしきい値 ^{*1)}	備考
シリコンゴム	5×10^0 (kGy)	—
EPDM	1×10^1 (kGy)	動的シールには 10^2 (kGy) 以上では使用しない。

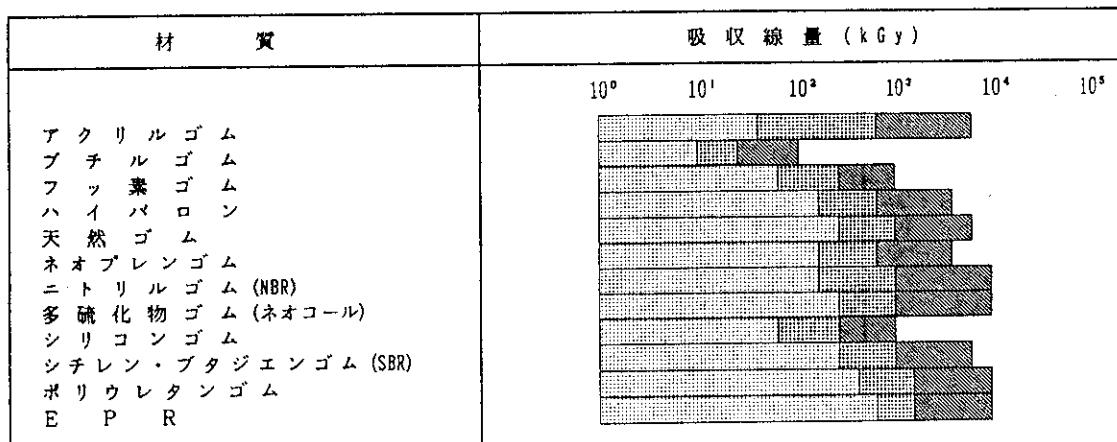
* 1 : しきい値 ; この線量以下では有機材料の損傷、主に機械的性質の変化が起こらないといわれている値であり、許容吸収線量と同義語である。

(3) W. W. Parkinson, et al "The Use of Plastics and Elastomers in Nuclear Radiation" Nuclear Engineering and Design, Vol. 17, 247, 1971

Effects of Radiation on Rubbers



(4) R. Harrington, "Relative Radiation Resistance of Elastomers and Other Materials" Rubber Age, Vol. 83, 1958



注: 弹性体に対する放射線効果(損傷程度)

(5) 左村義隆 “高分子の耐放射線性” バルカーレビュー, Vol. 15, No. 10, 1971

各種ゴムの放射線(コバルト-60)を照射した後、硬さ、引張り強さ、伸びについて試験した結果を次に示す。

試験項目 吸収線量	常態			5×10^1 (kGy)			1×10^2 (kGy)			1×10^3 (kGy)		
	硬さ	引張強さ kg/cm ²	伸び (%)	硬さ	引変強化強率 kg/cm ²	伸び	硬さ	引変強化強率 kg/cm ²	伸び	硬さ	引変強化強率 kg/cm ²	伸び
SBR(スチレンブタジエンゴム)	74	173	260	+2	+6.3	0	—	—	—	+10	-10	-70
NBR(ニトリルゴム)	73	245	500	+3	+10	-20	+3	+14	-20	+13	-6	-80
FPM(フッ素ゴム)	68	192	323	+3	+9	-20	+5	-3	-52	+21	+10	-84
シリコンゴム	54	79	473	+4	+8	-14	+11	-12	-46	+35	-28	-89
ブチルゴム	80	99	530	0	-35	-21	—	—	—	(測定不可能)		
ハイパロンゴム	64	194	393	+3	+16	-15	+6	+18	-23	+21	+8	-74
EPDM	66	153	300	+2	+24	+20	+2	+9	-6	+15	-30	-67
ネオプレンゴム	50	179	580	+1	+2	-21	+4	+4	-23	+21	-60	-88
ウレタンゴム	90	334	490	-3	-9	-3	-1	-23	-4	-3	-67	-65
天然ゴム	44	133	640	+2	-10	+3	—	—	—	+12	-65	-45

2. 熱空気中での耐久性

竹延清次郎 “各種ゴムコンパウンドの耐熱、耐水蒸気試験結果” バルカーレビュー, Vol. 21, No. 3, 1977

ゴムの種類 温度条件	50℃	75℃	100℃	125℃	150℃	175℃	200℃
	総合判定						
クロロブレンゴム(J0070)	○	○	×	—	—	—	—
NBR(ニトリルゴム)(B0070)	○	△	×	—	—	—	—
ウレタンゴム(R0070)	○	○	○	×	—	—	—
ウレタンゴム(VB590)	○	○	△	×	—	—	—
EPDM(H0170)	○	○	○	×	—	—	—
FPM(D0270)	○	○	○	○	○	○	○
シリコンゴム(E0750)	○	○	○	○	△	△	×
ブチルゴム(F0070)	○	○	△	×	—	—	—
アクリルゴム(L0170)	○	○	△	×	—	—	—

注： ○：優、△：良、×：可、

3. 热水・水蒸気中の耐久性

竹延清次郎 “各種ゴムコンパウンドの耐熱、耐水蒸気試験結果” バルカーレビュー、Vol, 21, No. 3, 1977

温度条件 ゴムの種類	50℃	75℃	100℃	125℃	150℃	175℃	200℃
	総合判定						
クロロブレンゴム (J0070)	○	△	×	—	—	—	—
N B R (ニトリルゴム) (B0070)	○	○	×	—	—	—	—
ウレタンゴム (R0070)	○	×	—	—	—	—	—
ウレタンゴム (VE590)	○	×	○	○	△	×	×
E P D M (H0170)	○	○	—	—	—	—	—
F P M (D0270)	○	○	×	—	—	—	—
シリコンゴム (E0750)	○	○	○	×	—	—	—
ブチルゴム (F0070)	○	○	○	△	×	—	—
アクリルゴム (L0170)	○	△	△	×	—	—	—

注： ○：優、△：良、×：可、

付録III Oリングの実証試験

1. 概 要

Oリングは実機供用期間中の温度変化に伴う線膨張差と、原子炉圧力容器への据え付け時のしゅう動に備えて、表面に疵の生じにくい材質のものを使用する必要がある。

したがって、事前に原子炉圧力容器と同一寸法・構造である模擬原子炉圧力容器での実証試験を実施した。

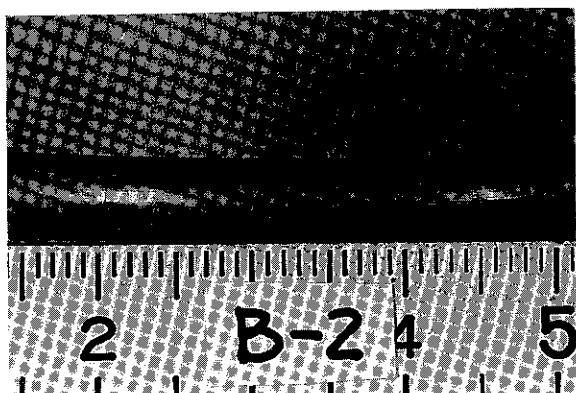
2. 実証試験の方法及び結果

シリコンゴム製及びEPDM製Oリングについて、しゅう動を加えた後の疵の発生状況を調べた。

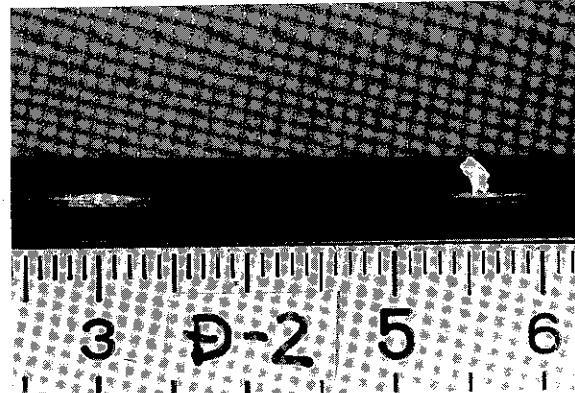
しゅう動による疵は、シリコンゴムの方がEPDMに較べて全般的に深く、かつ多く発生していることが明らかとなった。

これはシリコンゴムの方が機械的強度が劣ることと、しゅう動にも弱いことを裏付けるものであり、EPDMの方が実機使用環境に適していると判断される。

Oリングの実証試験記録をTable C-1に、試験後の外観写真をPhoto. C-1に示す。



シリコンゴム製Oリング
(作動回数5回)



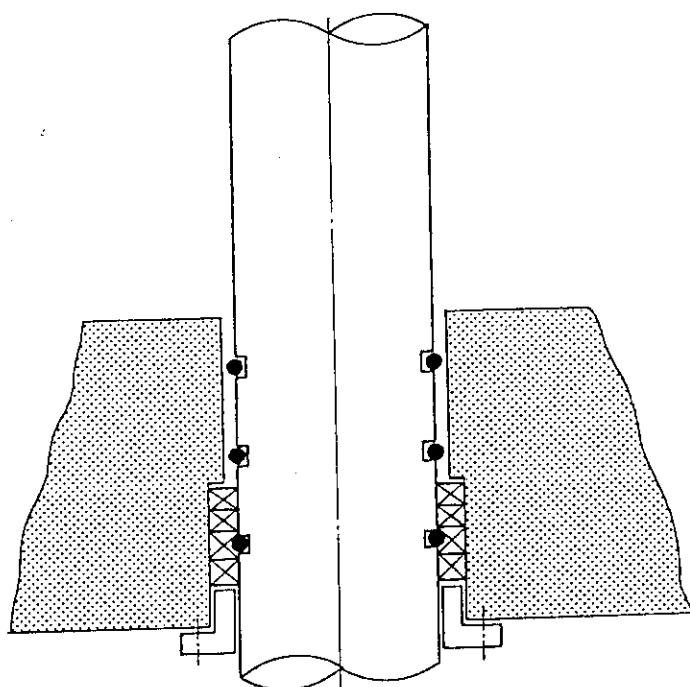
EPDM製Oリング
(作動回数5回)

Photo. C-1 Appearance of an "O" Ring after being subjected to verification test

Table C-1 Outline of "O" Ring Verification Test

試験内容

- (1) 試験年月日： 1986, 7, 14
- (2) 試験方法： OWL-2炉内管をDR PVで引上・下げるを行い、 Oリング表面の疵発生の状況について観察した。
- (3) 試験Oリング： シリコンゴム製Oリング；バルカ-5640-P130, JIS B 2401
EPDM 製Oリング；バルカ-640-EPDM-P130, JIS B 2401
(Hs 70)相当
- (4) 略 図：



Oリング種類	シリコンゴム製Oリング		EPDM 製Oリング	
引上・下回数	1回	5回	1回	5回
OリングNo 1	A-1	B-1	C-1	D-1
OリングNo 2	A-2	B-2	C-2	D-2
OリングNo 3	A-3	B-3	C-3	D-3