

J A E R I - M

88-178

原子炉用電線類の健全性試験法に関する研究
—SEAMATE-IIを用いた絶縁材料のLOCA時の劣化の研究—

1988年9月

日馬 康雄・岡田 漱平・八木 敏明・伊藤 政幸
中瀬 吉昭・吉川 正人・田中 進・川上和市郎
吉田 健三・町 末男・田村 直幸

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）で複写による実費領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, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

原子炉用電線類の健全性試験法に関する研究
-SEAMATE-IIを用いた絶縁材料の
LOCA時の劣化の研究-

日本原子力研究所高崎研究所開発部

日馬 康雄・岡田 濑平・八木 敏明・伊藤 政幸
中瀬 吉昭⁺・吉川 正人・田中 進・川上和市郎
吉田 健三・町 末男⁺⁺・田村 直幸

(1988年8月29日受理)

原子力発電所用電線・ケーブル(1E級)に関する現行の健全性試験法の妥当性の評価に資することを目的として、電線ケーブルの被覆・絶縁材料の劣化に及ぼす同時法及び逐次法LOCA模擬試験の照射及び蒸気暴露条件の影響を原子炉用電線材料健全性試験装置(SEAMATE-II)を用いて系統的に調べた。

環境に空気が存在しない場合は同時法と逐次法の劣化はほぼ等しいが、同時法LOCA模擬環境で空気が存在すると、線量率、環境温度が材料の機械的、電気的性質の劣化や吸水膨潤に大きな影響を与え、逐次法の劣化に比べて劣化が大きい。過渡温度条件、スプレイ、事前劣化条件などは劣化に大きな影響を与えないことを明らかにした。また、逐次環境では、前照射時の線量率、照射雰囲気ならびに蒸気環境温度が劣化に影響を与え、特に、蒸気環境に空気が存在すると、これらの影響が顕著になること、事前劣化条件やスプレイは同時環境におけるのと同様に劣化に大きな影響を与えないことを明らかにした。

Methodology Study on Qualification Testing of Wire and Cable
for Nuclear Power Plant
- Study on Degradation of Insulating Materials
under LOCA Environments by Using SEAMATE-II -

Yasuo KUSAMA, Sohei OKADA, Toshiaki YAGI, Masayuki ITOH
Yoshiaki NAKASE⁺, Masato YOSHIKAWA, Susumu TANAKA
Waichiro KAWAKAMI, Kenzo YOSHIDA, Sueo MACHI⁺⁺
and Naoyuki TAMURA

Department of Development
Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Watanuki-cho, Takasaki-shi, Gunma-ken

(Received August 29, 1988)

In order to evaluate validity of the present qualification methodology of class 1E electric wires and cables used for nuclear power plants, effect of irradiation and steam exposure conditions in both simulated simultaneous and sequential LOCA tests on the degradation of insulating and jacketing materials of wires and cables have been investigated by using the Simulated Environmental Apparatus for Material TESting-II (SEAMATE-II).

In LOCA environments without air, degradation of the materials were almost the same for simultaneous and sequential methods. In air-containing simultaneous LOCA environments, the remarkable dose rate and steam temperature effects were found on mechanical and electrical properties and water sorption of the materials, and the larger damage was observed compared with those in the sequential environments. Increasing and decreasing rate of temperature in a transient period, spray and aging conditions had small effects on degradation of the materials. In sequential LOCA environments, pre-irradiation dose rate and environments

+ Osaka Laboratory for Radiation Chemistry

++ Department of Development

affected strongly on the degradation, and these effects became obvious under the presence of air in steam/spray exposure. Further, aging conditions and spray were shown to have small effects on the degradation.

Keywords: SEAMATE-II, LOCA, Qualification Methodology, Simultaneous Method, Sequential Method, Mechanical Properties, Electrical Properties, Water Sorption, Irradiation Conditions, Steam Exposure Conditions

目 次

1. 緒言	1
2. 経緯	2
2.1 1960年代の動き	3
2.2 1970年代の動き	5
2.3 1980年代の動き	7
3. 実験計画	14
3.1 実験目的	14
3.2 実験方法	14
3.2.1 試料	14
3.2.2 実験装置	15
3.2.3 LOCA模擬環境	15
3.2.4 測定方法	16
4. 実験結果及び考察	28
4.1 同時法	28
4.1.1 暴露期間（線量率）の影響	28
4.1.2 環境温度の影響	46
4.1.3 空気存在の影響	83
4.1.4 昇温、降温速度の影響	95
4.1.5 過渡温度条件の影響	122
4.1.6 スプレイの影響	131
4.1.7 事前劣化条件の影響	151
4.1.8 シート状試料とケーブルの劣化挙動の比較	166
4.2 逐次法	173
4.2.1 前照射線量、線量率の影響	173
4.2.2 前照射温度ならびに雰囲気の影響	220
4.2.3 蒸気環境温度の影響	251
4.2.4 空気添加量の影響	279
4.2.5 スプレイの影響	293
4.2.6 事前劣化条件の影響	307
4.2.7 プロフィルと一定温度の比較	318
4.3 同時法と逐次法の比較	330
4.3.1 放射線照射、蒸気環境暴露の複合効果	330
4.3.2 機械的性質についての同時・逐次の比較	340
4.3.3 電気的性質ならびに吸水膨潤についての同時・逐次の比較	357

5. 結言	371
5.1 放射線・蒸気環境同時暴露における劣化について	371
5.2 放射線・蒸気環境逐次暴露における劣化について	372
5.3 同時法と逐次法の比較	373
謝 辞	374
付録 1 SEAMATE-II 実験データ打出し例	375
付録 2 本研究関連発表文献リスト	379

Contents

1. Introduction	1
2. Background and History	2
2.1 Activities in 1960's	3
2.2 Activities in 1970's	5
2.3 Activities in 1980's	7
3. Experimental Program	14
3.1 Experimental Purpose	14
3.2 Experimentals	14
3.2.1 Samples	14
3.2.2 Experimental Apparatus	15
3.2.3 Simulated LOCA Environments	15
3.2.4 Measuring Methods	16
4. Results and Discussion	28
4.1 Simultaneous LOCA Tests	28
4.1.1 Effects of Exposure Period or Dose Rate	28
4.1.2 Effects of Environment Temperature	46
4.1.3 Effects of Presense of Air	83
4.1.4 Effects of Heating and Cooling Rate	95
4.1.5 Effects of Transient Temperature Conditions	122
4.1.6 Effects of Spray	131
4.1.7 Effects of Aging Conditions	151
4.1.8 Comparison of Degradation of Sheet Samples with Cable Samples	166
4.2 Sequential LOCA Tests	173
4.2.1 Effects of Pre-irradiation Dose and Dose Rate	173
4.2.2 Effects of Pre-irradiation Temperature and Atmosphere ...	220
4.2.3 Effects of Temperature in Steam Environments	251
4.2.4 Effects of Amounts of Air Added	279
4.2.5 Effects of Spray	293
4.2.6 Effects of Aging Conditions	307
4.2.7 Comparison of Degradation under Profile and Constant Temperature Exposure	318
4.3 Comparison of Simultaneous Tests with Sequential Tests	330
4.3.1 Combined Effects of Radiation and Steam Exposure	330
4.3.2 Comparison of Degradation of Mechanical Properties in Simultaneous Tests with Sequentials Tests	340

4.3.3 Comparison of Degradation of Electrical Properties and Water Sorption in Simultaneous Tests with Sequential Tests	357
5. Conclusion	371
5.1 Degradation in Simultaneous Exposure to Radiation and Steam Environments	371
5.2 Degradation in Sequential Exposure to Radiation Followed by Steam Environments	372
5.3 Comparison of Simultaneous Test Method with Sequential Test Method	373
Acknowledgement	374
Appendix 1 Example of Output Data Sheet of SEAMATE-II Experiments .	375
Appendix 2 Lists of Paper Published on This Work	379

1. 緒言

昭和49年、米国で原子力発電所用電気機器及び電線ケーブル類に関するIEEE規格の制定があり、わが国でも軽水炉用電線ケーブルのLOCA時の健全性に関する研究が必要とされた。日本原子力研究所では、これまでの高分子材料に関する放射線化学の研究と大線源による照射技術の経験を生かし、この課題に対応することとし、52年に大テーマ「高分子材料の耐放射線性の試験研究」を設け、「高温高湿照射劣化実験装置（SEAMATE-Ⅰ）」による予備的研究に着手した。54年には原子炉用電線材料健全性試験装置（SEAMATE-Ⅱ）を完成させ、現行試験法（推奨案）の妥当性の評価に資することを目的として、電線ケーブル並びにモデル配合及び実用配合の被覆・絶縁材の試験試料を電線メーカー6社から提供を受け試験研究を開始した。56年度からは、本研究は国の原子炉施設等安全性研究年次計画に組み込まれた。また、原子力施設用有機材料研究委員会並びに同委員会の電線ケーブル健全性試験法研究計画及び評価専門部会が設けられ、本研究の計画策定、結果の評価はそこで討議を踏まえて行われてきた。

一方、電気学会は昭和53年に原子力技術委員会の下に原子力発電所用電線・ケーブル調査専門委員会を設け試験法に関する検討を行い、57年に「原子力発電所用電線・ケーブルの環境試験法に関する推奨案」を提出した。この推奨案はそれまでに得られているデータ並びに諸外国の状況を踏まえて、設定されたもので、必ずしも十分なデータに基づいたものではなく、その後の研究に委ねられている項目も多くあった。

この様な事情のなかで、57年において日本原子力研究所の長期事業計画が策定され、その計画に沿って、58年度から大テーマ「原子炉用電線類の健全性試験法に関する研究」に改められ、原子炉用電線類のLOCA時並びに通常運転時の試験法に関する研究が進められてきた。

本報告はその間SEAMATE-Ⅱを用いて行われた電線材料のLOCA模擬環境下の劣化に及ぼす暴露条件の影響を調べた結果をまとめたものである。

2. 経緯

原子力発電所用電線・ケーブル類の健全性（以下、「健全性」と略す）に関する研究は、当然のことながら、原子力開発と軌を一にして進展してきた。それは次のように3つの段階に分けることができる。まず、1960年代には、世界各国で軽水炉の建設が始まり、我が国においても原研における国産一号炉の臨界に引き続き、原子力発電が開始された。また、1960年代後半からは、原研において軽水炉の工学的安全性の研究が開始された。この頃から、原子炉施設の動脈であり神経であるとも言える電線・ケーブル類が、原子炉の安全性に深く関わっているという認識はあったが、原子炉事故時をも含めた健全性に関する系統立った研究はまだ開始されておらず、絶縁材料と電離放射線との相互作用に関する基礎的な研究が中心であった。従って、この時期は健全性研究の揺籃期であったと言える。

1970年代に入って、原子炉施設における有機材料の重要性に対する認識の高まりに伴い、それまで有機高分子材料の開発研究を進めてきた原研高崎研究所を中心に、高速炉の制御用ケーブルの使用限界線量の評価試験など、絶縁材料の放射線劣化と炉の安全性とを結び付けた研究が開始された。この頃我が国においては、2度に及ぶ石油危機が大きく影響して、原子力発電の実用化が飛躍的に拡大する一方、安全性に対する要求が一段と高度なものになりつつあった。このような中で1974年、米国電気学会（以下、IEEEと略す）から、原子力発電所用1E級（安全系）電気機器の品質認定に関し、冷却材喪失事故（LOCA；Loss of Coolant Accident）時をも含めた要求事項を定めたIEEE Std. 323-1974¹が出され、さらに翌年、米国ブラウンズフェリー（Browns Ferry）原子力発電所でケーブル火災が発生したことは、原子炉施設の安全における電線・ケーブル類の重要性を再認識させることとなった。このような状況に鑑み原研では、高崎研究所開発試験場（現開発部）技術開発課に正式に健全性研究のテーマを発足させ、本格的にこれに取り組むこととなった。また、（社）電気学会（以下、「電気学会」と略す）では、これと相前後して、健全性に関する調査・検討を開始した。1970年代は、原子力開発にとっても健全性研究にとっても激動の時代であったと言うことができる。

1980年代に入って我が国では、徐々に蓄積されつつあった原研などの実験データをもとに、電気学会を中心にして、原子力発電所用電線・ケーブル類の環境試験法の策定作業が進み、1982年に電気学会から推奨案²が出された。また、この頃までにフランス及び西独においても、試験法の形が整えられてきた。我が国の推奨案は、IEEE Std. 323-1974に準拠したものであるが、

また同時に、同 S t d . の問題点をも指摘している。その中では、電線・ケーブル類が放射線と蒸気に同時に曝露される L O C A 環境を模擬するのに、放射線照射と蒸気曝露とを別々に切り離して与える試験法（逐次法）を行うことの妥当性や、蒸気中の酸素の影響について言及し、ともに今後の研究が必要であるとしている。1983年には、研究の進展や、スリーマイル島原子力発電所2号機（T M I - 2）事故の経験などを反映して改訂された I E E E S t d . 3 2 3 - 1 9 8 3³が出されたが、この問題は依然解決されていない。原研では、これらの問題を解決するため、それまでの研究に引き続き、放射線と蒸気と、さらに場合によっては空気との同時曝露環境と同等で、しかも可能な限り同種の劣化反応が進行するような逐次法による試験条件を見出すべく研究を進めてきた。また、これと並行して、このような複合環境における劣化についてのデータベースを構築し、その結果を試験法に反映させるための調査活動が、電気学会を中心に進められた。1980年代は、健全性試験法の信頼性の向上に向けてあらゆる努力がなされてきたと言える。今後これが、信頼性のさらに高い新しい試験法の確立として結実することが期待される。

以上、健全性に関わる研究・活動の流れを概観したが、各年代毎に、その内容の詳細をまとめ、以下に述べる。

2. 1 1960年代の動き

1962年（昭和37年）9月、原研において、我が国の大出力炉である研究3号炉（J R R - 3），引き続いて翌年8月には動力試験炉（J P D R）がそれぞれ臨界に達し、同年10月26日には、J P D Rにおいて我が国初の原子力発電に成功した。これ以降我が国においても商業用原子炉の建設が始まり、1966年（昭和41年）7月には原電東海炉、1970年（昭和45年）3月には原電敦賀炉、11月には関電美浜1号機、さらに翌年3月には東電福島1号機がそれぞれ営業運転を開始した。このような原子力開発の進展に伴い、原研においては軽水炉の安全性研究が積極的に進められた。それは、1956年（昭和31年）の原研設立直後における、原子炉の熱工学的研究及び燃料・材料の照射研究に端を発し、J P D Rの高出力化に伴う国産燃料の健全性試験及びJ P D R圧力容器上蓋内面クラッドの亀裂発生が契機となって、冷却性能低下時の冷却材挙動と燃料棒熱負荷限界を求める安全性研究及び反応度投入時の燃料健全性限界を求める安全性研究へと発展し、さらに1967年（昭和42年）に設置された原子炉工学部安全工学研究室における、冷却材喪失事故（L O C A）を対象としたR O S A計画及び反応度事故を対象とした研究（後のN S R R計画）や、通常運転時及び事故時における安全性評価を目的とした燃料などの照射研究並びに構造材

料の照射脆化及び疲労の研究へと発展して行った。

このように、この頃の安全性研究の対象となる材料は、あくまで金属・無機材料が主であり、有機材料については、原子炉の有機減速材としての可能性の検討として、ポリフェニル化合物の分解性などが研究されたに過ぎない。また、1963年（昭和38年）に発足した高崎研究所では、主として有機高分子材料の研究が行われたが、放射線重合法による合成や、放射線グラフト重合による改質の研究が中心であった。しかしながら、ここで得られた放射線分解などに関する基礎的な知見は、後に健全性研究にとっても重要な意味を持つようになる。

この頃電気学会では、1961年（昭和36年）から1965年（昭和40年）にかけて、絶縁材料照射専門委員会が設置され、電気絶縁材料に及ぼす放射線の影響について国内外の研究状況を調査し、技術報告Ⅰ部74号（基礎編）、79号（応用編）⁴にまとめた。この応用編では、放射線による絶縁材料の改質とともに、放射線による絶縁材料の劣化も取り上げられ、「原子炉施設での使用の場合の要望」という一項が設けられている。ここでは、原子炉、ホットケーブ、加速器施設における電気機器の使用環境に関する調査結果を述べた上、原子力関係の電気機器については、『故障が起こるまで使用していると、大きな事故を起こすことになる。それゆえ、各種の電気材料について、耐久性の使用限界を決めておくと便利である。』と述べている。

このように、この頃既に我が国では、電線・ケーブル類を含む電気機器が、原子炉の安全性に深く関わっているという認識はあった。しかしながらまだ、耐放射線性試験法をどのようにすべきか、特に、燃料棒その他の金属・無機材料については既に始められていたような原子炉事故時をも含めた健全性をどのように評価すべきかというところまで検討が進んでいたとは言いがたい。

国外では、1960年代なかば頃から既に、IEC（International Electrotechnical Commission；国際電気標準委員会）の第15技術委員会（絶縁材料部門；TC15）の小委員会SC15Bを中心に、有機絶縁材料の耐放射線性の試験法についての検討が始まっていた。しかしながら、この検討結果が正式文書（CO(Central Office)文書）として世に出てくるのは（IECTC15SC15B40, 41），IEEE Std. 323に遅れること3年、1977年のことである⁵。米国では、1968年以来、米国電気学会（IEEE）が、多くの学識経験者を集め、原子力発電所施設で使用する電気機器及びケーブル類の信頼性の向上と安全性の確保のための性能を認定する型式試験法の基準化を進めるべ

く検討を行った^{6,7}。

2. 2 1970年代の動き

1971年（昭和46年）から、原研高崎研究所では、動燃事業団の高速炉「常陽」の開発に関連し、油圧防振器作動油や制御用ケーブルの使用限界線量の評価試験を、動燃事業団の受託研究及び日立電線（株）との共同研究として開始した⁸。原研東海研究所においては、1970年（昭和45年）に、軽水炉冷却材喪失事故模擬試験装置（ROSA-I）が完成したが、1971年の米国における非常用炉心冷却系（ECCS）問題を発端として安全性研究への要請が高まり、翌年原子炉安全性研究炉（NSRR）の建設に着手するなど、安全性研究はさらに活発化して行った。

1974年（昭和49年），米国電気学会から，原子力発電所用1E級（安全系）電気機器の品質認定に関する一般的な要求事項を定めたIEEE Std. 323-1974が出された。個々の具体的な適用については、ケーブル用のStd. 383, バルブ操作器用のStd. 382, モーター用のStd. 334, ベネットレーション用のStd. 317などの派生規格が定められ、試験方法が詳しく規定されている。これら派生規格によって認定された機器は、Std. 323の要求事項を満足する。また、米国原子力規制委員会（NRC）は、Std. 323に従って品質認定された機器は安全審査に合格したものとみなしている。この規格の第1の特徴は、型式試験を重視し、その方法として、放射線を他の環境曝露と切り離して照射する逐次法の試験手順を定めたことである。試験は、老化試験、振動試験、設計基準事故（DBE：Design Basis Event）模擬試験の順に行い、DBEの試験条件のうちの放射線は、老化試験に含めて一緒に与えてもよいとした。この考え方は、放射線と、蒸気曝露などの他の事故環境を、別々に分けて与えても（逐次法），同時に与えても（同時法），その効果は変わらないという仮定に基づいている。第2の特徴は、DBE時の格納容器内の環境の模擬条件として、付録にLOCAの温度／時間プロファイルを付けたことである。この付録は規格に含まれないという但し書にも拘らず、この模擬条件があたかもStd. 323で定められた条件であるかのように受け取られてしまった。また、試験条件は使用条件に裕度を持たせて決めるここと、例えば温度は15°F上乗せすること、事故初期を模擬する過渡的温度ピーク（熱衝撃）は2回与えた方がよいことなどが定められている⁹。

このIEEE Std. 323-1974は、各国の品質認定に関わる動きに大きなインパクトを与えた。我が国でも、原研高崎研究所において、このStd.

が出された同じ年に、早くも L O C A 環境下試験に合格する 1 E 級ケーブルの開発を目指して、日立電線との共同研究が開始され、各電線メーカーも独自の研究を開始した。さらに、原研高崎研究所では、藤倉電線（株）との共同研究により、絶縁材料の耐放射線性を電気的性質の変化から評価する方法を開発し、材料の耐放射線性を明確に表すための試験法の検討に入った。このことは、耐放射線性材料の開発を目指す一方で、そのような耐放射線性を評価する試験法の開発という領域に、さらに一步踏み込んだことを意味する。また電気学会は 1975 年（昭和 50 年），絶縁材料技術委員会の下に絶縁材料放射線試験調査専門委員会を設置し、電気絶縁材料及び電気機器・ケーブルの耐放射線試験法の動向について調査・検討を開始した。その結果は、電気学会技術報告 II 部第 86 号¹⁰として、1979 年（昭和 54 年）に出版された。ここでは、IEEE Std. 323 及び 383 の問題点を指摘し、その後の検討課題についての方向付けを行っている。

1975 年（昭和 50 年）以降、我が国では 2 度に及ぶ石油危機が大きく影響して、原子力発電の実用化が飛躍的に増大する一方、安全性に関する要求を一段と高度なものに変えて行った。1976 年（昭和 51 年），原子力委員会原子炉施設等安全研究専門部会は、「原子炉施設等安全研究年次計画」をとりまとめ、安全性研究に関わる国と民間の実施分担を明示した上、工学的安全性研究を積極的に推進することとした。このような時期に、米国ブラウンズフェリー（Browns Ferry）原子力発電所でケーブル火災が起こったことは、原子炉の安全におけるケーブルなどの電気機器の重要性を再認識させることとなった。この事故は、ケーブルペネトレーションのリークテストに用いたローソクの炎が、充填材の発泡ポリウレタンに燃え移り、さらにケーブル束に延焼して火災に至ったものであり、多重防護の思想で設計されている原子炉の安全保護系でも、簡単なケーブル火災により幾つかの多重系統が同時に破損または停止し、コモンモードフェイラー（Common Mode Failure）に至る危険性を想起させるものであった¹¹。

このような情勢の中で、1976 年（昭和 51 年）原研高崎研究所では、開発試験場（現開発部）に「軽水炉電線絶縁材料の耐放射線性の開発研究についての検討会」を設け、研究の方向付けに関する検討が進められた。さらに翌年には、高崎研究所のきもいりで、高崎研運営委員、法責委員（当時住友原子力（株））の指導のもとに、東京電力、関西電力、中部電力とケーブル 6 社及び電力中央研究所などからの参加を得て、「原子力発電所用電線絶縁材料の技術基準に関する研究調査会（通称法責委員会）」が懇談会形式で発足し、電線・ケーブルの要求性能の明確化、試験法の標準化、試験機関（設備）の公有化または共有化などを中心に検討が進められた¹²。この活動は、電気学会の絶縁材料放射線試験調査専門

委員会の活動と密接な関係を保ちながら進められ、ほゞ同じ構成メンバーにより、1978年（昭和53年），電気学会原子力技術委員会の下に原子力発電所用電線・ケーブル調査専門委員会の発足を見ることになった。この専門委員会により、原子力発電所用電線・ケーブル類の環境試験法方法ならびに耐延焼性試験方法に関する推奨案の策定作業が進められ、1982年（昭和57年）に、電気学会技術報告II部第139号として出版された。

原研高崎研究所では、このような動きの中で、1977年（昭和52年）、「高分子材料の耐放射線性の試験研究」のサブテーマとして「軽水炉電線等の耐放射線性試験に関する技術の開発」を発足させて、圧力容器電線導入部の構造、スプレイ機構及び温度制御法などを工学的に検討できる小型の「高温高湿照射劣化実験装置（SEAMATE-I）」を作製した⁶。翌年大テーマ「原子炉用電線ケーブル類の健全性試験に関する研究」の発足とともに、上記実験装置により得られた工学的データをもとに、放射線、高温水蒸気及びスプレイに試料を同時に曝露し、LOCA時を模擬することのできるCo-60中心線源方式の装置（SEAMATE-II）¹³⁻¹⁶の製作に着手した。同装置は1979年（昭和54年）に完成し、それ以降、健全性試験法に関する研究が本格的に始められることとなった。

2.3 1980年代の動き

1979年（昭和54年）3月、ちょうど上記SEAMATE-IIの建設中に、米国スリーマイル島原子力発電所2号炉（TMI-2）の事故が起こった。この事故は、その後の軽水炉の安全性研究に対して少なからぬ影響を与えた。それまでは、LOCAというのはあくまでDBE（Design Basis Event）であり、万が一それに近い事故が起こったと仮定した場合でも、緊急冷却系（ECCS）などの安全系が機能して炉が停止しさえすれば良いのであって、格納容器内の電線・ケーブル類にまでこの安全系の考え方を拡張するのは、いたずらに冗長な設計を招くだけだという見方もあった。しかしながら、TMI-2事故以来、冷却材配管のギロチン破断に引き続く大量の冷却材の喪失というDBEとしてのクラシックなLOCAを想定するだけでなく、クラシックなLOCAほどではないにしても、TMI-2の場合のように、冷却材配管の閉鎖などによって起こり得るLOCAに近い事故（small LOCA）の際に、格納容器内機器と制御側との間に情報・動力のやりとりが可能であること、例えば原子炉圧力容器内の温度・圧力などが正確に把握できること等の重要さが改めて認識された。実際TMI事故の場合は、電線・ケーブル類を含む情報伝達系が機能を保っていたために、圧力容器内における水素爆発の状況等を把握することができたわけで、電線・ケーブル類に対する品質保証の要請の大切さが確認された形となった。また一方では、LOCAの

想定を超える事故（炉心が損傷を受ける事故；いわゆるシビアアクシデント）時の安全性を評価する必要性も認識されるようになった。1980年（昭和55年）に出された、バルブ操作器用の IEEE Std. 382-1980¹⁷では、DBEとしてLOCAだけでなくMSLB（Main Steam Line Break）も考慮されている。ここに一例として示されたPWR-MSLBの時間／温度プロファイルのピーク温度は、Std. 323-1974の付録に示されたLOCAのそれより100°Cも高く256°Cとなっている。但し、放射線の線量は通常時70Mrad，MSLB時30Mradと，Std. 323-1974の通常時50Mrad，LOCA時150Mradの半分になっている。

原研高崎研究所では、このような背景のもとに、同時法と逐次法との比較や、蒸気中の空気混在の影響など、健全性試験法に関する研究が精力的に進められた。この間、1981年（昭和56年）には、高崎研の諮問機関として、各界有識者から成る原子力施設用有機材料研究委員会が設置され、健全性試験法の研究計画の策定並びに結果の評価は、同委員会のもとに設けられた電線ケーブル健全性試験法研究計画専門部会及び評価専門部会での討議を踏まえて行われることとなった。

電気学会では、原研高崎研究所などから出つた実験データに関する検討を踏まえて、健全性試験法の策定作業が進み、1982年（昭和57年），前述したように、電気学会推奨案が出された。この推奨案では、環境試験は、熱劣化、放射線照射、屈曲浸水耐電圧試験の順で行う「通常運転時の劣化に対する試験」と、熱劣化、通常運転時とLOCA時の和に相当する放射線照射、蒸気曝露、屈曲浸水耐電圧試験の順で行う「LOCA時に対する試験」とから成り、熱劣化は121°Cで168時間、また放射線照射は常温大気中で1MR/h以下で行うこととなっている。また、蒸気曝露はアレニウス法などで評価して決定した条件により加速してもよいが、期間は3日以上であること、飽和水蒸気を用いてもよいこと、蒸気曝露中に定格電圧の課電及び許容電流に相当する通電を行うこと、PWR用ケーブルについては化学液噴霧を蒸気曝露の最初の24時間行うことなどとなっている。この試験法は、基本的にはIEEE Std. 323-1974に準拠したものであるが、また同時に、推奨案の「解説」の中で同Std. の問題点をも指摘している。即ち、放射線と蒸気とが同時に存在するLOCA環境を、それらを別々に切り離して与える逐次法で模擬することの妥当性、熱劣化と放射線照射の順序、及び放射線照射と蒸気曝露の順序の妥当性、加速試験による蒸気曝露期間短縮の妥当性、蒸気中の空気混在の影響などである。同推奨案では、これらの課題については、今後の研究や知見の蓄積が必要であるとしている。

この頃迄に、フランス及び西独においても試験法の形が整えられてきた。フランスの試験法は C E A (原子力庁), E D F (フランス電力庁), フラマトム (F R A M A T O M E : 原子炉機器メーカー) の3者で構成された部会で作成され, Vieillissement (老化: 仏語), Irradiation (照射), Seism (振動・地震), Accident (事故: L O C A) の順で環境試験を行うため、頭文字をとって V I S A 試験と呼んでいる。I E E E S t d . と異なり、L O C A プロファイルも含めて具体的な方法が明記されている。I E E E S t d . との対比のため、ここでその内容に関して少し詳しく述べる。通常運転時の劣化に対する試験に相当する老化試験は、熱老化、腐食性のチェックのために行う温湿試験、及び放射線老化から成る。熱老化は、I E C - 6 8 , 2 - 2 に基づき、1 3 5 °C, 9 5 0 時間を基準として行い、温度を1 0 °C上げる毎に期間を半分にできる。温湿試験は、相対湿度8 0 %以上で5 5 ± 2 °Cに保つ試験を4 8 時間以内、2 サイクル以上行う。放射線老化は、0 . 0 5 ~ 0 . 1 5 M r a d / h の線量率、7 0 °C大気中で、2 5 M r a d ± 1 5 %まで照射する。ここで特徴的なのは、照射中の酸素の消費を補い、またバーオキサイドの蓄積を防ぐため、比較的低い線量率で、且つ比較的高い温度で照射を行う点である。この7 0 °Cという温度は、機器の仕様における環境温度の5 0 °Cに、格納容器内のコーナーなどでの局所的な温度上昇分1 0 °Cを見込み、さらに1 0 °Cのマージンを加えたものもある。次の振動・地震試験は、I E C - 6 8 , 2 - 6 に準拠し、1 0 ~ 5 0 0 H z の周波数で行う振動試験と、フランス規格U T E - C - 2 0 - 4 2 0 に準拠した地震試験から成る。最後の事故模擬試験は、7 0 °C, 0 . 1 5 ~ 0 . 7 5 M r a d / h で6 0 M r a d まで照射する事故模擬照射試験と、それに引き続いて行われる事故模擬蒸気曝露試験から成る。この蒸気曝露試験の方法もフランスに独自のものである。まず、加熱空気によって5 0 °C、2日間の予備加熱を行う。次に、過熱蒸気により1回目の熱衝撃を与える。ピーク温度に達したら飽和水蒸気温度に保つ。この期間は1 0 分~数1 0 分程度で、試験される機器の仕様による。ピーク温度も同様であるが、1 5 8 °Cとか1 8 0 °Cとか、かなり高い温度である。次いで、2日間程度の自然放熱による冷却を行った後、2回目の前記と同様の熱衝撃を与える。その後、ケミカルスブレイ及び空気を導入して温度・圧力を調節しながら4日間の徐冷を行う。ここまでがL O C A 試験に相当するもので、A D R (A c c i d e n t D e R é f é r é n c e) と呼ばれる。最後に、p o s t - L O C A の加速試験として、大気圧の空気を共存させた一定温度(1 0 0 °C程度)の蒸気に1 0 ~ 1 4 日間曝露する。これはp o s t - A D R と呼ばれ、温度及び期間は試験される機器の仕様による。この試験法で特徴的なのは、炉の事故時には空気の存在が見込まれ、それは機器の腐食の観点からも、ポリマーの酸化劣化の観点からも重要な要素であるという認識に基

づいて、蒸気中に空気を導入している点である。

西独では、プラントメーカーが試験した結果を第三者が審査する。主要メーカーであるKWU (Kraftwerk Union) 社の社内規格は次のようにになっている。まず、熱老化はアレニウス法により加速試験を行う。電力ケーブルでは、135°C, 26日間の試験が約31年の認定寿命に相当するとされている。次いで、0.05 Mrad/hの線量率で、室温大気中で5Mradまで照射する放射線老化試験を行った後、最高160°Cの温度プロファイルで24時間の事故環境模擬蒸気曝露試験を行う。その後で、0.05Mrad/hで20Mrad照射する事故環境模擬放射線照射試験を行う。最後に、90°C 1気圧で12日間スプレイに曝露する腐食・スプレイ試験を行う。ここで特徴的なのは、蒸気曝露試験の後に放射線照射を行っていることである。また、フランスの場合と同様、照射は比較的低い線量率で行っているが、線量は比較的低い。これは、高線量率で照射してもよいが、線量の方にかなりの裕度を持たせるという米国の考え方と対照的である。

この間米国では、研究の進展やTMI-2事故などの経験をもとにIEEE Std. 323-1974の改訂作業が進められ、1983年（昭和58年）になって、改訂版のStd. 323-1983が出された。主要な改訂内容は以下の通りである。第一に、1974年版の付録のLOCA模擬時間／温度プロファイルが、『付録は規格には含まれない』という但し書にも拘らず規格そのものとして利用されている事態を改善するため、付録を全文削除した。模擬環境条件はユーザーが用意し、これに裕度を加えた条件で試験するが、裕度を加える方法は、ピーク温度に裕度を持たせるか、付加ピークを与えるかのいずれかでよいことになった。また、事故初期の過渡温度ピークに続く時間／温度プロファイルを模擬するために加速加熱試験を行ってもよいことが明記された。ここには、事故環境は炉型毎に信頼できる計算コードを用いて決定し、さらに裕度を加えるべきであるというNRCの思想が現れている。ただ、付録が削除された現在、これを具体的にどのように行うかとなるとはなはだ不便であるが、これに対しては、前述のIEEE Std. 382-1980のMSLBのプロファイルや、裕度に関する考え方を記したNRC規則10CFR50.49¹⁸、さらには、事故時の環境条件を求めるための計算コードを炉型毎に定め、また格納容器内外の放射線環境（ソースターム）の計算方法を定めたNRC Regulatory Guide 1.89¹⁹などを援用することができる。第二の変更点は、格納容器内だけでなく、原子力発電所に設置された全ての1E級機器が適用範囲に含まれるようになったことである。1E級でない機器でも、それが故障すると1E級機器の機能を阻害するおそれのある場合は、品質保証を要請している。しかし、対象が無制限

に拡大するのを防ぐために、D B E時に影響を受ける「厳しい環境」と、影響を受けない「穏やかな環境」とを定義し、後者に含まれる機器に対しては型式試験などによって品質保証することは要求していない。第三の変更点は、老化が重大な損傷を生じる場合は、型式試験中に老化を含めなければならないとした点である。老化処理は、使用環境で予想されるよりも高いレベルのストレスを与えて加速してもよく、また、いくつものストレスが重なる時は、それらを逐次的に与えてもよいとした。

このように、IEEE Std. 323-1983では、いくつかの変更がなされたが、電気学会の推奨案が指摘している逐次試験の妥当性や、蒸気中の酸素の影響については言及しておらず、この問題は依然課題として残されている。原研高崎研究所では、1週間程度の環境曝露実験による同時法と逐次法との比較や、同じく1週間程度の同時法による蒸気環境温度、空気圧、昇降温速度、スプレイの有無などの影響を調べる実験、さらには、線量率効果（期間効果）を調べるために、蒸気中に空気を含まない場合と含む場合とのそれぞれについて同時環境3ヶ月曝露実験などを実施してきた。そして、これら同時法のデータに基づき、『放射線と蒸気と、さらに場合によっては空気との同時曝露環境と同程度の劣化を与え、しかも可能な限り同種の劣化反応が進行するような、そしてできるだけ短縮して行えるような逐次法による試験条件』を見出すべく、逐次法の諸条件を変えて、数多くの実験を重ねてきた。

電気学会では、このような放射線と蒸気、あるいは放射線と熱などの複合環境における劣化についてのデータベースを構築し、その結果を試験法に反映させるべく、1984年（昭和59年）から、絶縁材料放射線複合劣化調査専門部会を設置し調査活動を行った。その結果は電気学会技術報告II部第233号²⁰として、1986年（昭和61年）に出版された。この活動は、同年から3ヶ年の予定で設置された耐放射線性誘電・絶縁材料調査専門部会に引き継がれた。

このようにこれまで、健全性試験法の信頼性の向上に向けて、各方面で多大な努力がなされてきた。今後これが、我が国における信頼性のさらに高い新しい試験法の確立として結実し、原子力の安全性向上に貢献することが期待される。

1, 2章の引用文献

1. IEEE Std.323-1974,"IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations",IEEE(1974)
2. "原子力発電所用電線・ケーブルの環境試験法ならびに耐延焼性試験法に関する推奨案", 電気学会技術報告(Ⅱ部) 第139号(1982)
3. IEEE Std.323-1983,"IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations",IEEE(1983)
4. "絶縁材料照射専門委員会報告(応用編)" ,
電気学会技術報告(Ⅰ部) 第79号(1967)
5. 矢作吉之助, "電気絶縁材料の耐放射線試験の現状について" ,
電気学会絶縁材料研究会資料, EIM-77-52(1977)
6. 栗山将, "原子力発電所用ケーブル開発の現状" ,
日本原子力学会誌, Vol.20, No.1pp21-29(1978)
7. 栗山将, "原子力産業に要求される高分子材料" , JAERI-M 9412(1981)
8. 栗山将, 早川直宏, 中瀬吉昭, "高分子絶縁材料の耐放射線性" ,
JAERI-M 6751(1976)
9. 吉田健三, "絶縁材料の耐環境試験法の国内外の現状" ,
電気学会全国大会 S. 4-1(1984)
10. 絶縁材料の放射線劣化と耐放射線性試験法の現状」, 電気学会技術報告(Ⅱ部) 第86号(1979)
11. 中瀬吉昭, "軽水炉と高分子材料" , JAERI-M 9584(1981)
12. 矢作吉之助, "絶縁材料放射線試験調査専門委員会報告" ,
第10回絶縁材料シンポジウム(1977)
13. 田中進, 中瀬吉昭, 日馬康雄, 伊藤政幸, 岡田漱平, 吉田健三, "原子炉用電線材料健全性試験装置(SEAMATE-II)の工学データ・1(急昇温実験)" , JAERI-M 9361(1981)
14. 田中進, 中瀬吉昭, 岡田漱平, 伊藤政幸, 日馬康雄, 吉田健三, "原子炉用電線材料健全性試験装置(SEAMATE-II)の工学データ・2(圧力容器内温度の制御特性実験)" , JAERI-M 9699(1981)
15. 岡田漱平, 中瀬吉昭, 笠原佑倅, 田中進, 伊藤政幸, 日馬康雄, 吉田健三, "原子炉用電線材料健全性試験装置(SEAMATE-II)課通電系の構成と性能" , JAERI-M 9706(1981)
16. K.Yoshida, Y.Nakse, S.Okada, M.Ito, Y.Kusama, S.Tanaka, Y.Kasahara, S.Machi, "Degradation of Insulating Polymer Materials under LOCA(Loss of Coolant Accident) Conditions",
Radiat.Phys.Chem., 18 pp689-700(1981)

17. IEEE Std.382-1980,"IEEE Standard for Qualification of Safety-Related Valve Actuator",IEEE(1980)
18. 10CFR50.49,"Environmental Qualification of Electric Equipment for Nuclear Power Plants",NRC(1983)
19. Regulatory Guide 1.89,"Environmental Qualification of Electric Equipment for Nuclear Power Plants",NRC(1982)
20. 「複合環境下における絶縁材料の放射線劣化」, 電気学会技術報告（II部）第233号(1986)

3. 実験計画

3.1 実験目的

高崎研究所では、昭和54年(1979)8月に、原子炉用電線ケーブル類の冷却材喪失事故（L O C A）時における健全性を品質保証するための試験法に関する研究を行うことを目的として、原子炉用電線材料健全性試験装置 S E A M A T E - II (Simulated Environmental Apparatus for MAterial TEsting- II)を製作し¹⁻⁴、同時試験法と逐次試験法の比較、L O C A模擬試験期間の短縮条件並びにL O C A時の環境における空気存在の影響を調べることとし、Table 1に示す実験計画に基づき研究を進めた。これら研究項目の主なものは以下の通りである。

同時法L O C A模擬環境試験法に関しては

- 1)線量率(暴露期間)の影響
- 2)蒸気環境温度の影響
- 3)昇温・降温速度の影響
- 4)スプレイの影響
- 5)蒸気環境への添加空気の圧力の影響

また、実際の試験法に採用されている逐次法(放射線とその他の環境を逐次与える方法)に関しては

- 1)前照射における線量の影響
- 2)線量率の影響
- 3)照射温度ならびに照射雰囲気の影響
- 4)蒸気環境暴露時の環境温度の影響
- 5)添加空気の圧力の影響
- 6)スプレイの影響

3.2 実験方法

3.2.1 試料

試料は昭和電線電纜、住友電工、日立電線、藤倉電線、古河電工、三菱電線工業の各社(以下電線6社と言う)から提供された600V級ケーブルおよび電線・ケーブル用絶縁、被覆材料の配合の異なる厚さ1mmのシートである。シート状試料はクロロスルホン化ポリエチレン(ハイパロン)4種(CSM1⁺, CSM2⁺, CSM3, CSM4と略記), エチレンプロピレンゴム3種(EPR1⁺, EPR3, EPR4), 架橋ポリエチレン1種(XLPE1⁺), クロロブレン(ネオブレン)3種(CR1, CR2⁺, CR3), シリコーンゴム2種(SIR1, SI

R 2) の合計 13 種類である。これらの試料のうち番号に * 印を付したものは標準的配合の試料（モデル配合と呼ぶ）である。これらの配合を Table 2 に示す。これら以外のシート状試料は原子炉用に試作された実用配合の試料（実用配合と呼ぶ）で、配合は発表されていない。これらの試料の機械的性質の測定用には JIS4 号ダンベルに切り抜いたものを、また、電気的性質の測定用には 80×80mm ないし 100×100mm のシート状試料を用いた。

ケーブルは PWR 用には難燃性エチレンプロピレンゴム絶縁ハイパロン被覆ケーブル（略号 F R - P H），BWR 用には難燃性エチレンプロピレンゴム絶縁ネオプレン被覆ケーブル（略号 F R - P N）である。いずれも、電線メーカーが原子炉用に試作したものである。

3.2.2 実験装置

本報告書にまとめた全ての実験は原子炉用電線材料健全性試験装置 (SEAMATE-II) を用いて行った。本装置のフローダイアグラムを Fig.1 に示す。装置は圧力容器ならびに蒸気ボイラとスプレイ液の循環系およびケーブルの課通電系から構成されている。装置の主要諸元を Table 3 に、圧力容器の概略を Fig.2 に示す。

試料ケーブルは直径 400mm のマンドレル上に巻き付け圧力容器に入れ、ベネットレーションを通じて課通電系に接続した。LOCA 模擬環境暴露中は課通電を行うとともに絶縁抵抗、漏れ電流などを測定した。シート状試料を用いる実験では、試料をステンレス製のネットに入れ、マンドレル状に取り付け LOCA 模擬環境に暴露した。一部の実験では圧力容器内に外部の空気ポンベから空気を導入した。

放射線の線量率の均一度は、マンドレル上で 1.03～1.15 であった。線量率は 20OKCi、30OKCi の線源を用いた場合、それぞれ 10.9KGy/h および 2.1KGy/h である。

3.2.3 LOCA 模擬環境

実験は以下に述べる同時法（放射線とその他の環境を同時に与える同時環境）と逐次法（放射線照射とその他の環境を逐次的に与える環境）の 2 通りの方法を行った。Fig.3（同時法）と Fig.4（逐次法）に PWR および BWR の LOCA 模擬環境を試料に与えるために用いた LOCA 模擬温度プロファイルを示す。

(1) 同時法

同時法の実験は上で述べた SEAMATE-II 装置を使用し、シート状試料はステンレス製のネットに入れ、またケーブル状試料は照射線量の均一をはかるためにマンドレルに巻き付けたものを圧力容器内に装荷して、事前劣化や種々の LOCA 模擬環境に暴露した。なお、事前劣化は IEEE Std 323-1974 に示された空气中、120°C、7 日間の熱老化を行った後、ガンマ線を 0.5MGy 照射する方法⁵を採用した、また、

PWRおよびBWR LOCAとも事前劣化したものとしていないものの双方を、LOCA模擬環境に曝露した。LOCA模擬環境下における照射線量はPWR LOCAでは最大1.5MGy, BWR LOCAでは最大0.26MGy照射とした。

(2)逐次法

逐次法では、先ずLOCA模擬照射を行い、その後蒸気環境等の他の環境に試料を暴露した。前段の放射線照射は試料をガラスクロスで包み、ステンレス製のネットに入れて空気中室温でコバルト60のガンマ線を用いて行った。

なお、LOCA模擬照射における線量はPWR条件では1.5MGy, BWR条件では0.26MGyであるが、事前劣化を施す試料については、PWR条件では前述と同様の熱劣化を行ったあと、事前劣化相当分の0.5MGyとLOCA模擬照射相当分の1.5MGyの合計2.0MGy, BWR条件では同じく0.76MGyとした。LOCA模擬環境試験の後段の蒸気暴露は同時法実験と同様に試料をステンレス製のネットに入れ、SEAM ATE-II圧力容器に装荷して種々の条件で行った。

3.2.4 測定方法

引張試験および絶縁抵抗測定に先立ち、試料はLOCA模擬環境に暴露後、大気雰囲気中で約2週間位放置乾燥操作を行った。

(1)引張試験

引張試験機（インストロン1130型および島津DCS700型）を用い、引張速度500mm/min, 室温で測定した。応力一歪曲線から、100%モジュラス(M100), 破断強度(T_b)および破断伸び(E_b)を求めた。測定は、4検体について行い、単純平均した値と、JISK6301に従って加重平均した値の2通りを求めた。

(2)絶縁抵抗測定

測定にはYHP社製4329A高絶縁抵抗計および16008A抵抗測定用セルを用いた。このセルによって、試料は金属板電極とガードリング付きの伝導性ポリマー電極との間にはさまれ、両極に軽く压しつけられた形で測定が行われる。測定に際して、表面に汚れのある試料についてはアセトンでふき取るなどしたが、金属膜を蒸着するなどの特殊な処理は特にを行わなかった。測定は、絶縁抵抗の1分値を計るとともに、10分以上にわたって、電圧(500V直流)印加後の絶縁抵抗(漏れ電流)の時間的变化(以下「も挙動」と言う)を調べた。

(3)重量ならびに面積測定

同時法実験では、LOCA模擬環境暴露後2日目の重量およびサイズを測定し、

実験前の重量およびサイズと比較した値(%)で示した。

逐次法実験では暴露後2日目以外に暴露直後、暴露後4時間、暴露後1日目の値もあわせて測定した。

なお、本研究における実験条件ならびに実験結果はデータベースとして保存するため一定の入力フォーマットに従い記録した。データの打ち出し例は巻末の付録2に示す。

関連文献

1. 田中進、中瀬吉昭、日馬康雄、伊藤政幸、岡田漱平、吉田健三，“原子炉用電線材料健全性試験装置(SEAMATE-II)の工学データ1(急昇温実験)”，
JAERI-M 9361(1981)
2. 田中進、中瀬吉昭、岡田漱平、伊藤政幸、日馬康雄、吉田健三，“原子炉用電線材料健全性試験装置(SEAMATE-II)の工学データ2(圧力容器内温度の制御特性)
JAERI-M 9699(1981)
3. 岡田漱平、中瀬吉昭、笠原佑侍、田中進、伊藤政幸、日馬康雄、吉田健三，“原子炉用電線材料健全性試験装置(SEAMATE-II)課通電系の構成と性能”，
JAERI-M 9706(1981)
4. K.Yoshida, Y.Nakase, S.Okada, M.Ito, Y.Kusama, S.Tanaka, Y.Kasahara, S.Machi, "Degradation of Insulating Polymer Materials under LOCA(Loss of Coolant Accident) Conditions",
Radiat. Phys. Chem. Vol. 18, No.3-4, pp 689-700(1981)
5. "IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations", IEEE Std.323-1974, IEEE Inc, New York, (1974)

Table 1 Experimental Program

実験番号	期 間	LOCA 条 件	実 驟 目 的
S4D01	54.11.12~11.16	同時,P/B 共用条件	試運転
S3D02	12. 5~12. 8	同時,P/B 共用条件	試運転
S3D03	12.17~12.20	同時,P/B 共用条件	試運転
W1W04	55. 1.16~ 1.23	同時,P/B 共用条件	試運転
S1D05	1.28~ 1.29	同時,PCR,LOCA前半のみ	後半温度の影響
S6D06	2. 1~ 2. 7	同時,PCR,後半102°C一定	後半温度の影響
S6D07	2.20~ 2.26	同時,PCR,後半120°C一定	後半温度の影響
S6D08	3. 4~ 3.10	同時,PCR,後半130°C一定	後半温度の影響
S6D09	3.13~ 3.19	同時,PCR,後半85°C一定,*	後半温度の影響
S1D10	4.11~ 4.12	同時,BWR,LOCA前半のみ	後半温度の影響
S1D11	4.14~ 4.15	同時,BWR,LOCA前半のみ	後半温度の影響
S6D12	4.16~ 4.21	同時,BWAR,後半85°C一定	後半温度の影響
S6D13	4.23~ 4.28	同時,BWR,後半85°C一定,*	後半温度の影響
S6D14	5. 9~ 5.14	同時,BWR,後半102°C一定	後半温度の影響
S6D15	5.21~ 5.26	同時,BWR,後半120°C一定	後半温度の影響
S6D16	5.30~ 6. 4	同時,BWR,後半130°C一定	後半温度の影響
S1W17	6.18~ 6.25	同時,PCR	同時法と逐次法の比較
S1W18	7. 2~ 7. 9	逐次,R	逐次法の照射のみ
S1W19	7.10~ 7.17	逐次,逆逐次,SC	蒸気暴露のみ
S1W20	7.18~ 7.25	逆逐次,R	逆逐次法の照射のみ
S1W21	9. 5~ 9.11	同時,BWR	同時法と逐次法の比較
S1W22	9.19~ 9.25	逐次,R	逐次法の照射のみ
S1W23	9.30~10. 6	逐次,SW	蒸気暴露のみ
W1M24	10.16~11.22	同時,PCR,1.7KGy/h	線量率効果(1ヶ月試験)
W1W25	12.10~12.15	同時,PCR,10KGy/h	線量率効果(1週間試験)
S6D26	56. 1.19~ 1.31	同時,PCR	材料の劣化の経時変化
S1D27	2.13	同時,PCR	熱衝撃繰り返しの影響(標準)
S1D28	2.16	同時,PCR	遅い加熱速度(LOCA前半)
S1D29	2.18	同時,PCR	速い冷却速度(LOCA前半)
S5D30	2.19~ 2.24	同時,PCR	LOCA後半

Table 1 (continued)

実験番号	期 間	LOCA 条 件	実 驗 目 的
S1W31	56. 3. 5~ 3.17	同時,BWR	材料の劣化の経時変化
S1W32	4. 9~ 4.15	同時,PCOR,1.7KGy/h	酸素効果予備実験
S10D33	4.27~ 5.13	同時,SCR,120°C,1.7KGy/h	経時変化(温度効果)
S10D34	5.18~ 5.28	同時,SCR,120°C,9.6KGy/h	経時変化(温度効果)
S10D35	6. 2~ 6.13	同時,SCR,140°C,9.6KGy/h	経時変化(温度効果)
S10D36	6.22~ 7. 2	同時,SCR,100°C,9.6KGy/h	経時変化(温度効果)
W1W37	7.10~ 7.17	同時,PCAR	同時法と逐次法の比較
W1W38	7.24~ 7.31	逆逐次,SCA	蒸気暴露のみ
W1W39	8. 3~ 8.25	逐次,逆逐次,R	逐次と逆逐次の照射のみ
W1W40	8.27~ 9. 3	逐次,SCA	蒸気暴露のみ
S8D41	9.24~10. 2	SCA,120°C一定	経時変化(蒸気暴露のみ)
W8D42	10.12~10.22	同時,BWR	同時法標準条件
W8D43	10.30~11. 6	同時,BWAR	空気の影響
W8D44	11.13~12. 1	逐次,R→BWA	空気の影響
S8D45	12. 8~12.15	同時,BR,水スプレイなし	スプレイの影響
S8D46	57. 1.19~ 1.27	同時,SCR	S10D34の再実験
W1W47	2. 3~ 2.10	同時,PCR	S1W17の再実験(標準条件)
S8D48	2.17~ 2.25	同時,SCAR,100°C	経時変化(温度効果)
S8D49	3. 8~ 3.16	同時,SCAR,120°C	経時変化(温度効果)
S8D50	4. 9~ 4.19	同時,SCAR,140°C	経時変化(温度効果)
S8D51	5. 6~ 5.14	同時,SCAR,0.13MPa	経時変化(空気圧効果)
S8D52	5.24~ 6. 1	同時,SCAR,0.25MPa	経時変化(空気圧効果)
S1W53	6. 8~ 6.16	同時,PR	スプレイの影響
S1W54	6.22~ 6.30	同時,PCR	スプレイの影響
S10D55	7. 6~ 7.16	同時,PCR,SCR,1.48KGy/h	線量率効果
S1W56	7.28~ 8. 4	同時,BWR	各種事前劣化の影響
S8D57	8.16~ 8.24	同時,SCAR,1.48KGy/h	線量率効果
W1W58	10. 6~10.14	同時,PCR	各種事前劣化の影響
W3M59	11.13~ 3.18	同時,PCR,SCR,0.6KGy/h	線量率効果(3ヶ月試験)
W3M60	58. 4. 6~ 8. 2	同時,PCAR,SCAR,0.6KGy/h	線量率効果(3ヶ月試験)

Table 1 (continued)

実験番号	期 間	LOCA 条 件	実 驗 目 的
W10D61	58. 8.10~ 8.22	同時, PCOR, 0.01MPa (O ₂)	酸素と空気の影響の比較
W10D62	8.30~ 9. 8	同時, PCAR, 0.05MPa (Air)	酸素と空気の影響の比較
S9D63	9.10~ 9.19	同時, PWR	各種事前劣化の影響
W9D64	10. 8~10.17	同時, PCR	各種事前劣化の影響
S11D65	59. 1.18~ 2. 2	逐次, SC, 120°C	蒸気温度の影響
S11D66	2. 8~ 2.25	逐次, SC, 140°C	蒸気温度の影響
W9D67	2.29~ 3. 9	逐次, PC	逐次法標準条件
S11D68	4. 2~ 4.17	逐次, SC, 160°C	蒸気温度の影響
S11D69	4.23~ 5.12	逐次, SCA, 160°C	蒸気温度の影響
S11D70	5.28~ 6.12	逐次, SCA, 140°C	蒸気温度の影響
S11D71	6.18~ 7. 3	逐次, SCA, 120°C	蒸気温度の影響
S11D72	7. 9~ 7.26	逐次, SCA, 0.13MPa	蒸気中の空気分圧の影響
S11D73	8.20~ 9. 6	逐次, SCA, 0.25MPa	蒸気中の空気分圧の影響
W10D74	9.11~ 9.20	逐次, PCA, 空気含有蒸気	逐次法標準条件
S11D75	10. 1~10.18	逐次, SC, (0.25, 0.5MGy)	前照射の線量の影響
S11D76	10.26~11.15	逐次, SC, (1.0, 2.0MGy)	前照射の線量の影響
S11D77	11.20~12.11	逐次, SCA, (0.25, 0.5MGy)	前照射の線量の影響
S11D78	60. 1.16~ 1.31	逐次, SCA, (1.0, 2.0MGy)	前照射の線量の影響
S11D79	2.13~ 2.28	逐次, SC, 1KGy/h, (0.25, 2.0MGy)	前照射の線量率の影響
W10D80	3. 5~ 3.19	逐次, SCA, 0.5MPa	蒸気中の空気分圧の影響
S11D81	4. 9~ 4.26	逐次, SC, 1KGy/h, (0.75, 1.5MGy)	前照射の線量率の影響
S11D82	5. 7~ 5.24	逐次, SC, (R; 70°C-5KGy/h)	前照射条件の影響
S11D83	5.28~ 6.12	逐次, SC, (R; 70°C-5KGy/h)	前照射条件の影響
S11D84	6.25~ 7.12	逐次, SC, (R; O ₂ 中, 0.45KGy/h)	前照射条件の影響
S11D85	7.23~ 8. 9	逐次, SCA, 1KGy/h, (0.25, 1.5MGy)	前照射条件の影響
W10D86	9. 3~ 9.18	逐次, SCA, 0.45KGy/h, (1.5MGy)	前照射条件の影響
S11D87	9.25~10.11	逐次, SCA, (R; O ₂ 中, 1KGy/h)	前照射条件の影響
S11D88	10.17~11. 1	逐次, SC, (R; O ₂ 中, 9.7KGy/h)	前照射条件の影響
W9D89	11.14~11.26	逐次, BWA, SWA, (R; 70°C-5KGy/h)	前照射条件の影響
W11D90	12. 9~12.26	逐次, SCA, (R; O ₂ 中, 70°C)	前照射条件の影響

Table 1 (continued)

Table 2 Recipe of the (model) samples

	Hypalon 1* (CSM1*)	EPR 1 (ERI*)
Hypalon 40		100
PbO	40	ZnO
Methylnaphthalene resin	15	Polymer of 2,2,4-trimethyl-1,2-dihydro-quinoline) 1.5
Aromatic oil	15	
Wax (Mixture of waxes)	5	Clay
m-phenylene-bis-maleimide	1	Paraffinic oil
NBC (Nickel dibutyl dithiocarbamate)	3	Paraffine
TRA (Dipentamethylene thiuram tetrasulfide)	0.75	Vinyl-tris(methoxyethoxy) silane
DM (2-Benzothiazolyl disulfide)	1	PbO (Red lead) paste
FEF carbon	20	Coloring agent (HTC-S carbon)
Hard clay	20	DCP (Dicumyl Peroxide)
		Neoprene 2* (CR2*)
		Neoprene N
Hypalon 2* (CSM2*)		Carbon black (HTC-S)
Hypalon 40	100	ZnO
PbO	40	MgO
FEF carbon	5	Blend of phenyl-1-naphthylamine and N,N'-diphenyl-p-phenyldiamine
MT carbon (Medium thermal furnace black)	22	Stearic acid
Whitetex clay	40	process oil
Aromatic oil	15	Ethylenethiourea
Kenflex A (Condensation Product of aromatic solvent and formaldehyde)	20	Crosslinked * polyethylene 1 (XLPEI*)
Paraffine (140°F)	6	Low density polyethylene
NBC (Nickel dibutyl dithiocarbamate)	3	DCP (Dicumyl peroxide)
MBTS (Dibenzothiazyl disulfide)	1	4,4'-Thiobis-(6-tert-butyl-m-cresol)
Dipentamethylene thiuram tetrasulfide	1	
HVA 2 (N,N'-m-phenylenedimaleimide)	1	

Table 3 Specification of Apparatus

Size of Pressure Vessel	700I.D x 1300H
Maximum Pressure	25 kg/cm ² G
Maximum Temperature	250°C
Size of Mandrel	400I.D x 600
Quick Heating Time	20 to 150 within 10 sec (designed) " " 4 sec (measured)
Maximum Steam Supply	10,000 kg/h
Rate of Chemical Spray	0-5 lit./min
Amount of Co-60 Source	30 kci and 200 kci
Capacity of Electrical Loading	600V and 90A
Number of Cable Loaded	9 Cables (3 conductors)
Dose Rate	2.5 and 10 kGy/h (designed)
Dose Rate Uniformity	1.1 (designed)
Uniformity Ratio of Dose Rate	
Vertical	1.04 - 1.14 (for 200kci) 1.04 - 1.15 (for 30kci)
Radical	1.03 - 1.06 (for 200kci) 1.07 - 1.15 (for 30kci)
Air Equivalent Dose Rate at Cable Position	
200kci	10.9 kGy/h (without cooling water)
"	9.5 kGy/h (with cooling water)
30kci	2.1 kGy/h (without cooling water)

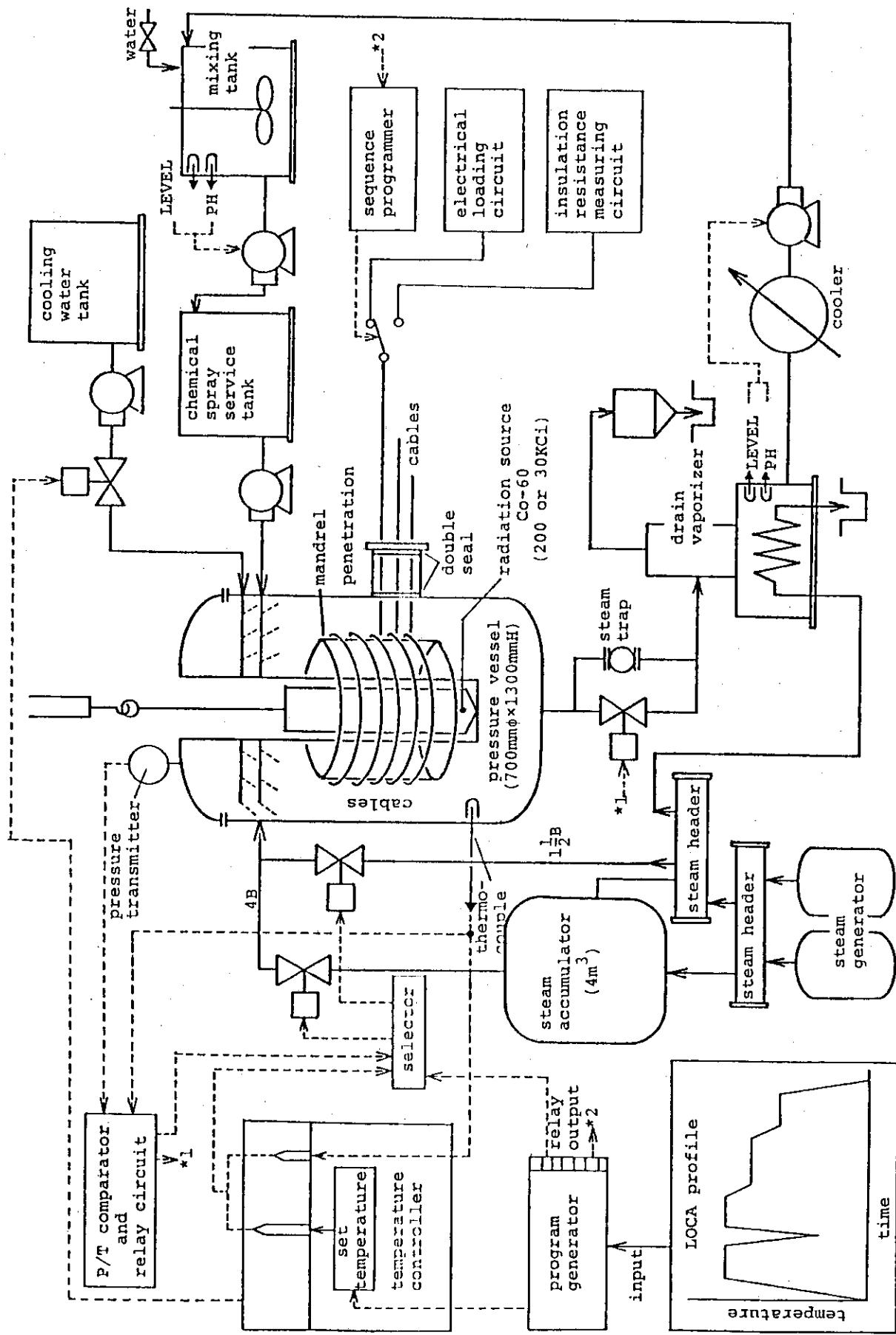


Fig.1 FLOW DIAGRAM OF SEAMATE-II

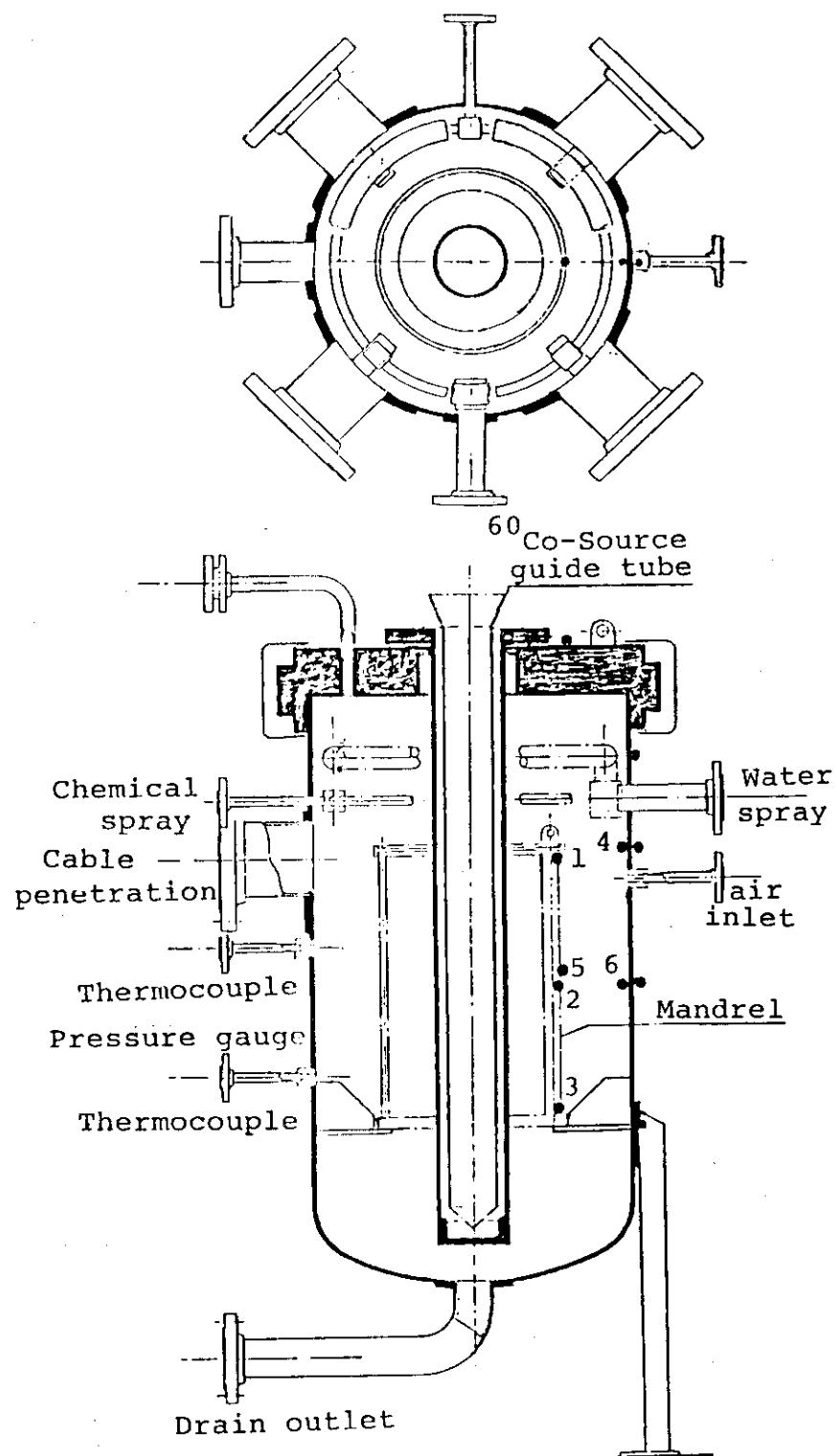


Fig.2 Cross Section of Pressure Vessel

1,2,3 Thermocouples on Mandrel

4,6 " on the wall
of pressure vessel

5 " inside of
Cable

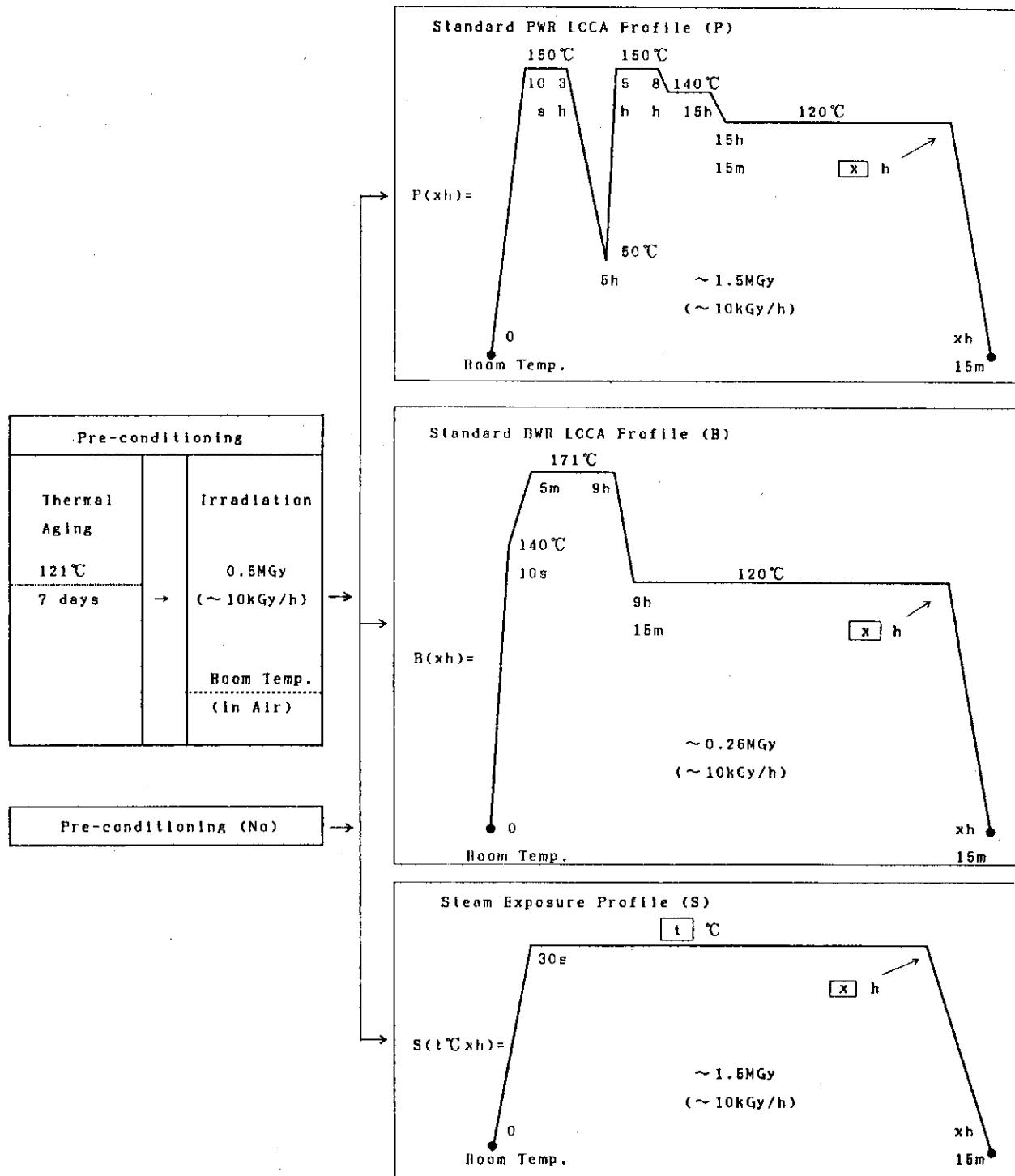


Fig.3 Temperature profiles for simultaneous conditions applied for PWR and BWR LOCA simulation.

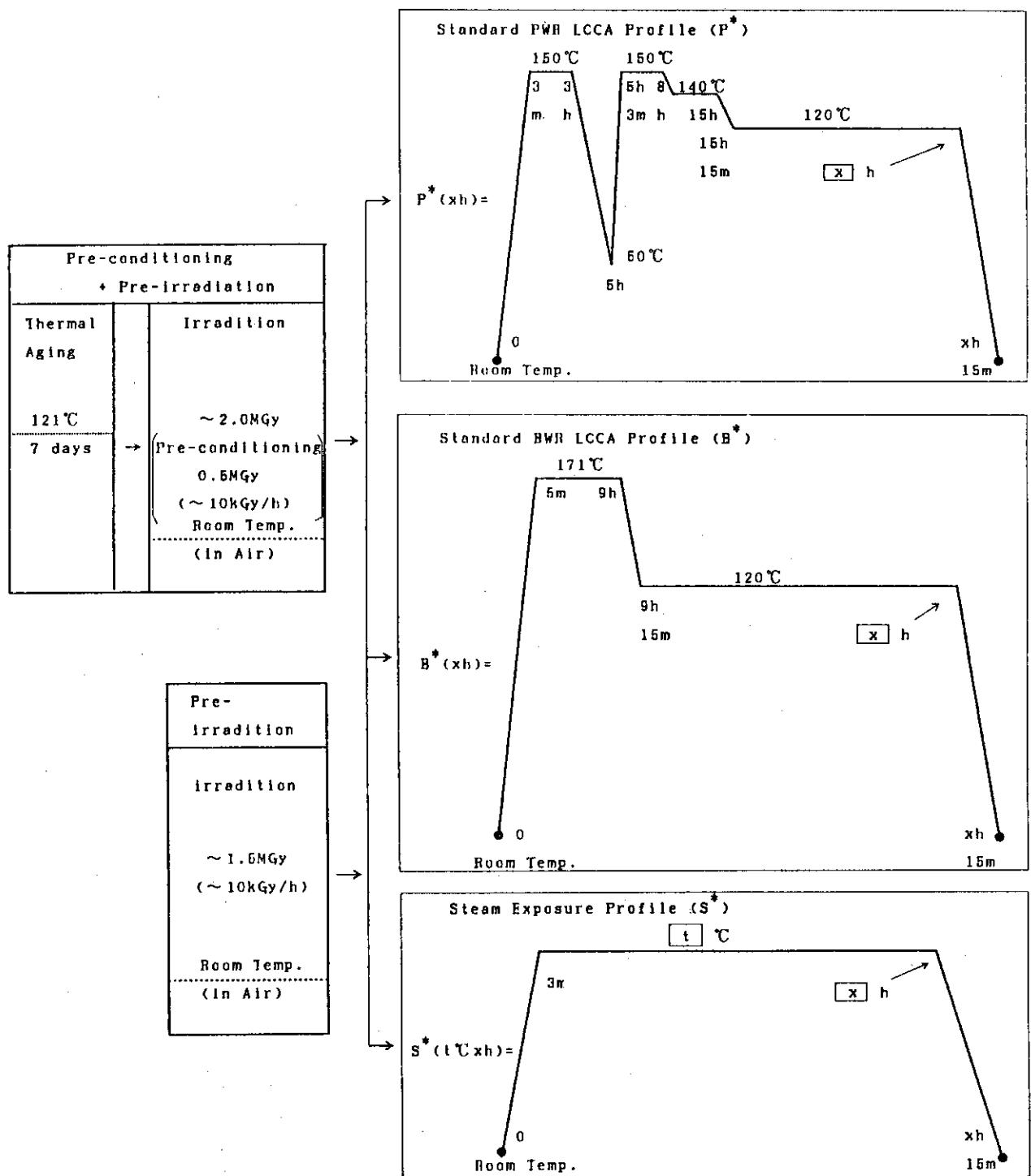


Fig.4 Temperature profiles for sequential conditions applied for PWR and BWR LOCA simulation.

4. 実験結果及び考察

4.1 同時法

4.1.1 暴露期間（線量率）の影響

原子力発電所の安全系に使用されている機器はプラント寿命とされている40年の末期にLOCA（冷却材喪失事故）が起こったとしても、その機能を全うすることが要求されており、そのため必要な性能を検証するために品質認定試験を行うことが定められている。LOCA時に想定される放射線、高温の水蒸気、スプレイ、空気などの複合環境はPWRで約1年、BWRで約100日と想定されている^{1,2}が、このような長期間にわたり試験を行うことは装置の設備や運転上の制約のみならず、健全性に関するデータの収集を著しく制限する。そこでこれらの試験を比較的短時間でかつ正確に行う条件を確立する必要がある。試験期間の短縮に当たっては、複合環境下において絶縁抵抗の劣化に影響を与える種々の環境因子について、どの因子がどのような影響を与えるかを知ることが必要である。同時法の試験期間を短縮する場合問題となる因子としては、放射線の線量率と熱劣化の温度があげられる。放射線については、LOCA期間に与えられる線量がBWRで0.26MGy(100日)、PWRで1.5MGy(1年)と推定されており、これを短縮して与えるためには線量率を高める必要がある。一方、熱劣化についてはLOCA期間の大半を占めるpost-LOCA時の温度がBWRでは93°C程度、PWRでは75°Cと推定されており^{1,2}、期間短縮にあたっては劣化の温度依存性を考慮して温度を高めるなどの考慮が必要となる。本項ではこれらの因子の中で、線量率の影響について検討する³⁻⁶。

(1) 実験方法

事前劣化ならびにLOCA模擬環境暴露

LOCA模擬環境はSEAMATE-II(3.2.2参照)を用い、IEEE Std 323, 383-1974^{1,2}のAppendixに示されたPWR用のプロファイルに従い行った。 γ 線の線量率は3種類(7~10kGy/h, 1.5kGy/h, 0.6kGy/h)変えて試験した。ただし、中位の線量率ではBWR条件に相当する0.26MGy迄暴露した。初期の過渡温度条件の期間は線量率が異なっても同じにし、後半のpost-LOCAに当たる部分の温度は120°C一定にした。なお、LOCA試験に先だって与えることとされている40年相当の通常運転時の劣化(事前劣化)として、熱老化(空気中、121°C, 7日間)の後空気中、高線量率下(10kGy/h以下)で0.5MGy照射した後LOCA模擬環境に暴露した。本実験では比較のため事前劣化なしの試料も同時に暴露した。

また、実際の原子炉の格納容器内にはBWRで約5%の酸素を含む窒素が、P

WRでは大気圧の空気が存在することを考慮し、プロフィルの各温度における飽和水蒸気圧に0.05MPa分の空気を添加した状態で照射し、劣化を比較した。

(2) 結果及び考察

1) 機械的性質に及ぼす暴露期間(線量率)の影響

ハイパロン(CSMと表す)：Fig. 5および6に4種類のハイパロンの中からモデル配合試料(CSM1*)と実用配合試料(原子炉ケーブル用難燃配合：CSM3)のLOCA模擬環境暴露したときの強度と伸びの保持率を示す。実験は事前劣化を与えたものと事前劣化なしの両方について行っているが、ここでは単純化のため事前劣化なしの場合のみを示す。事前劣化ある場合も傾向的にはほぼ同じである。どちらの試料も、線量の増加と共に強度、伸びの保持率が低下する。低下の割合は暴露期間が長いほど(線量率が低いほど)大きくなっている、環境に空気が存在するとこの傾向が著しい。図中に示したエラーバーは同じ条件で行った実験のバラツキの範囲を示す。また、モデル配合試料は実用配合試料に比べ暴露期間の影響をより大きく受けすることがわかる。これらの結果はハイパロンが放射線劣化すると同時に熱によっても劣化することを示していると同時に、空気の存在は劣化を著しく促進させることを示している。環境に空気がない場合とある場合の劣化機構については後述するが、空気が存在すると、酸化による主鎖切断が起こるためと考えられる³⁾。

エチレンプロピレンゴム(EPRと表す)：Fig. 7, 8にモデル配合試料(EPR1*)ならびに実用配合試料(EPR3)の強度、伸びの保持率を示す。EPRの強度は環境に空気が存在していない場合には暴露期間(線量率)の影響を受けず、また線量が増加しても殆ど変化しない。一方、伸びは線量の増加とともに低下するが、この場合も強度と同様暴露期間の影響を受けないことがわかる。しかしながら、環境に空気が存在すると強度も伸びも線量の増加に伴って低下し、明らかに暴露期間の影響がみられる。特にモデル配合試料でその傾向が著しく、空気存在下の長期間暴露の場合には著しい軟化、溶解が起こり、途中から機械的性質の測定が出来なくなった。これに対し、実用配合試料ではモデル配合試料ほど暴露期間の影響を受けないが、やはり線量が多くなると測定出来なくなるなど劣化が著しい。これらの結果は、EPRでは熱劣化に対しては極めて安定であるが、酸化劣化に対しては弱いことを示す。環境に空気が存在している場合の劣化機構については後述するように、酸化劣化による主鎖切断が支配的であることが示唆される³⁾。一方、飽和水蒸気環境下では強度変化がなく伸びが線量とともに低下するが暴露期間の影響を受けないことから、劣化は主として放射線架橋によると考えることができる。

架橋ポリエチレン（X L P E）：Fig. 9に架橋ポリエチレンの強度と伸びの保持率を示す。架橋ポリエチレンはL O C A模擬環境に暴露すると伸びの変化がより大きい。この場合も環境に空気がない場合とある場合でその傾向が著しく異なり、空気が存在していない場合は暴露期間の影響は小さく、しかも暴露期間が長い方が劣化が少ない傾向を示す。一方、環境に空気が存在すると強度も伸びも暴露期間の影響を受ける。特に、伸びは空気存在下では、ある線量から急激に低下し、その後の変化が少ない劣化曲線を示すが、この急激な低下を示す線量は低線量率ほど低くなる傾向を示す。一方、このような傾向は環境に空気が存在していない場合には顕著でなく、明らかに劣化機構が異なっていることを示唆している³。

クロロブレン（C R）およびシリコーンゴム（S I R）：クロロブレンやシリコーンゴムについても前述の材料と同様にP W RのL O C A時に想定される環境に暴露すると劣化が著しく、特に低線量率下では暴露期間の途中で測定が出来なくなるため、ここにはデータを示していない。クロロブレンについては比較的低い線量で伸びの著しい低下を示すだけでなく熱劣化速度も他の材料に比べて著しく大きく、暴露期間の影響は主として熱劣化に依存すると考えられる。また、環境の空気は熱劣化を促進するため、空気存在下での暴露期間の影響は放射線と熱による酸化などの相乗効果により著しく大きくなると考えられる。

シリコーンゴムについても同様に比較的低線量で著しく伸びが低下するが、熱的には極めて安定であり暴露期間の影響は比較的小さいが、長期間の暴露により試料の溶失がみられる。その理由はL O C A模擬期間の全期間実施したケミカルスプレイ液（P H約10.5）による加水分解によるものと考えられる。一方、環境の空気の有無は劣化に殆ど影響を与えないことから、酸化劣化に対しては極めて安定であることがわかる。したがって、伸びの低下の原因は主として放射線架橋によるものと考えられる。

以上シリコーンゴムを除く材料については、空気存在下ではいずれも暴露期間の影響がみられるだけでなく、ハイパロン、クロロブレンなどについては空気が存在していない場合にも影響がみられることがわかった。

2)劣化の反応速度論的解析

先に示したように、絶縁材料のL O C A模擬環境下劣化について多くの材料に線量率の影響（暴露期間の影響）がみられ、また、環境に空気が存在するか否かによって劣化挙動が異なることがわかった。試験期間の短縮を考える場合、

I) 酸素（あるいは空気）の含量も含めて、個々の炉型にあった仮想事故を忠実に模擬し、

II) しかも、安全サイドに立っていることが保証された上で短時間でなければならない。

という問題があるが、これらの問題を解決するために、劣化の数式化ないしは劣化の一般則が必要となる。そこで機械的特性値の変化の数値的な解析を試みた⁵。その詳細については省略するが反応速度論を基礎とし、回帰分析的手法により、実験データ (t_i, P_i) [特性値 P と時間 t との実験値の組み] から減衰の速度定数と次数とを $-dP/dt = KP^n$ の式を用いて求めた結果の一例を示す。

Fig.10にEPRについて空気を含まない場合の線量率効果ならびに空気圧の効果を求めた結果を示す。この図から特性値（ここでは伸びの初期値に対する値 e/e_0 ）の減衰の次数 n は空気がある場合とない場合で異なり、別種の反応が支配的であることが示唆された。また、次数 n や K の値の意味を確かめるため伸びの残率を横軸に、強度の残率を縦軸にとり、暴露中の各時間毎にプロットしたもの（伸び一強度軌跡と呼ぶ）を用いて、どのような反応が支配的であるかについて検討した。Fig.11はモデル配合のEPRについて示したものであるが、環境に空気がない場合は架橋が、環境に空気があると切断が優先的に起こることが示唆された⁶。

3) 電気的性質に及ぼす暴露期間（線量率）の影響

Fig.12にモデル配合のEPRの絶縁抵抗の初期値に対する比の値を示す。図の上側はLOCA模擬環境に空気が存在していない場合を、下側はプロフィルの各段階における飽和水蒸気圧 + 0.05 MPa の空気を添加した場合を示す。また、図中の丸、三角、四角はそれぞれ高線量率、中線量率、低線量率の場合を示す。モデル配合EPRでは環境に空気が存在していないと絶縁抵抗の低下は少なく、線量率の影響は殆どみられない。一方、環境に空気があると絶縁抵抗の低下が大きく、線量率の影響が顕著にみられる。

Fig.13に実用配合のEPRの結果を示すが、先に示したモデル配合の試料とほぼ同様の挙動を示し、環境に空気が存在すると顕著な線量率効果がみられる。

Fig.14に架橋ポリエチレンの結果を示す。EPRと同様、環境に空気が存在していない場合には絶縁低下は比較的少なく、線量率の影響も小さい。一方、環境に空気が存在すると絶縁低下が大きくなり、線量率の影響がEPRに比べさらに顕著にみられるようになる。このことは絶縁低下が酸化劣化と密接な関係を持つことを示唆している。一般に高分子物質を空気中で照射すると線量率効果がみられる場合が多いが、これらは材料中への酸素の拡散速度と放射線酸化による酸素消費速度のバランスによって起こると考えられている。したがって、蒸気環境に空気が存在していると酸化劣化が進行し、絶縁材料中に極性基など酸化生成物が生じ、これらが水をとり込むことによって絶縁低下が起こると考えられる。特に

低線量率下では酸素拡散が容易であるため、試料の内部まで酸化が進行し大巾な絶縁低下を生じると考えられる。

Fig.15にシリコーンゴムの結果を示す。シリコーンゴムは熱的には極めて安定であるが、前述したように、長時間L O C A模擬環境に暴露するとケミカルスブレイ液による加水分解が起こり、測定が出来なくなるため、長期間の実験データが得られていないが、限られたデータから類推するとシリコーンゴムは酸化劣化に対して安定で、線量率の効果はほぼないということができる。

Fig.16には参考として、被覆材のハイパロンの結果を示す。ハイパロンは被覆材であるため、絶縁抵抗は重要な特性ではないが、絶縁材料と同様L O C A模擬環境暴露により絶縁抵抗が低下する。しかも、この材料では蒸気環境に空気が存在していない場合にも或程度の低下を示しており、E P Rや架橋ポリエチレンに比べ、極性物質が生成し易いことを示している。また、環境に空気があると著しい線量率効果を示し、低線量率下では大巾な絶縁低下を示す。このことは、ハイパロンについても、他の絶縁材料と同様に酸化により極性物質が大量に生成することを示すものである。絶縁低下を示したこれらの材料は、いずれも吸水膨潤を示すが、特に空気存在下、低線量率の場合には、通常のゴム材料では考えられない程の大量の水分（その量はしばしば自己の2倍にも達する）のとり込が観測されている。水分のとり込は単に極性物質の付加による親水性の向上のみでは説明できず、劣化により生じた多数のポイド中に物理的にとり込まれたものや、充填物の酸化したものや、含塩素ポリマーの放射線照射により生じた塩酸による吸水などによると考えられる。いずれにしても絶縁材料にとって吸水は好ましくないということがわかった。一方、絶縁低下を示さなかったシリコーンゴムについては、吸水は起こらず、加水分解によって重量減少が起こるなど、他の材料とは挙動が異なっていることが明らかになった。

(3) まとめ

同時法における暴露期間（線量率）の影響はシリコーンゴムを除き、蒸気環境に空気が存在していない場合には比較的小さい。特に熱的に安定なE P Rについては暴露期間の影響は殆どない。一方、蒸気環境に空気が存在すると暴露期間（線量率）の影響が顕著にみられ、低線量率下で機械的性質、電気的性質のいずれも顕著に低下する。このことは、空気存在下のL O C A模擬環境における劣化が酸化劣化により進行していることを示すものである。

これらの結果から、シリコーンゴムのように線量率効果を示さない材料や飽和水蒸気によるL O C A模擬環境暴露の場合には線量率効果はあまり重要ではなく、L O C A時に想定される線量のみを与えるとよいと考えられるが、蒸気環境に空気が存在している場合には、線量率の効果は極めて重要であり、試験期間の短縮

に当たってはこの点を考慮しなければならない。特に原子炉格納容器内に空気が存在している場合には線量率効果を考慮しなければならない。

関連文献

1. IEEE Std. 323-1974,"IEEE Standard for Qualifying Class I E Equipment for Nuclear Power Generating Stations", IEEE(1974)
2. IEEE Std 383-1974,"IEEE Standard for Type Test of Class I E Electric Cables, Field Splices, and Connections for Nuclear Power Generating Stations", IEEE(1974)
3. 日馬康雄, 伊藤政幸, 岡田漱平, 中瀬吉昭, 吉田健三, "電線材料のL O C A 模擬環境劣化におよぼす暴露期間の影響", 電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-81-93(1981)
4. 日馬康雄, 八木敏明, 岡田漱平, 伊藤政幸, 吉川正人, 吉田健三, "L O C A 模擬環境下における絶縁材料の劣化速度に及ぼす線量率の効果 (I)", 同上 EIM-83-115(1983)
5. 岡田漱平, 吉川正人, 伊藤政幸, 日馬康雄, 八木敏明, 吉田健三, "L O C A 模擬環境下における絶縁材料の劣化の反応速度論的解析", 同上 EIM-82-111(1982)
6. 岡田漱平, 日馬康雄, 伊藤政幸, 八木敏明, 吉川正人, 吉田健三, "絶縁材料のL O C A 模擬環境下における劣化に及ぼす線量率の効果 (II)", 同上 EIM-83-116(1983)

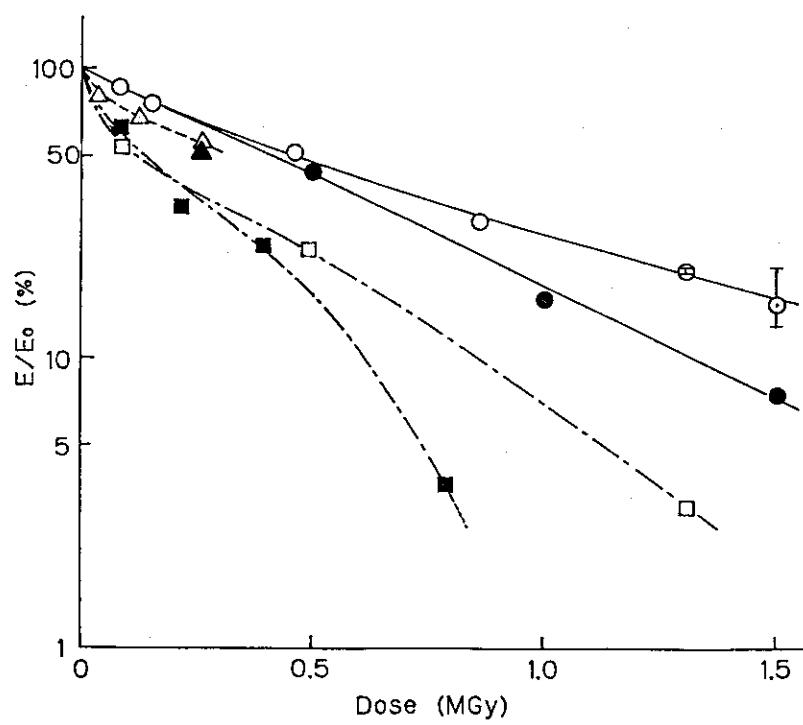
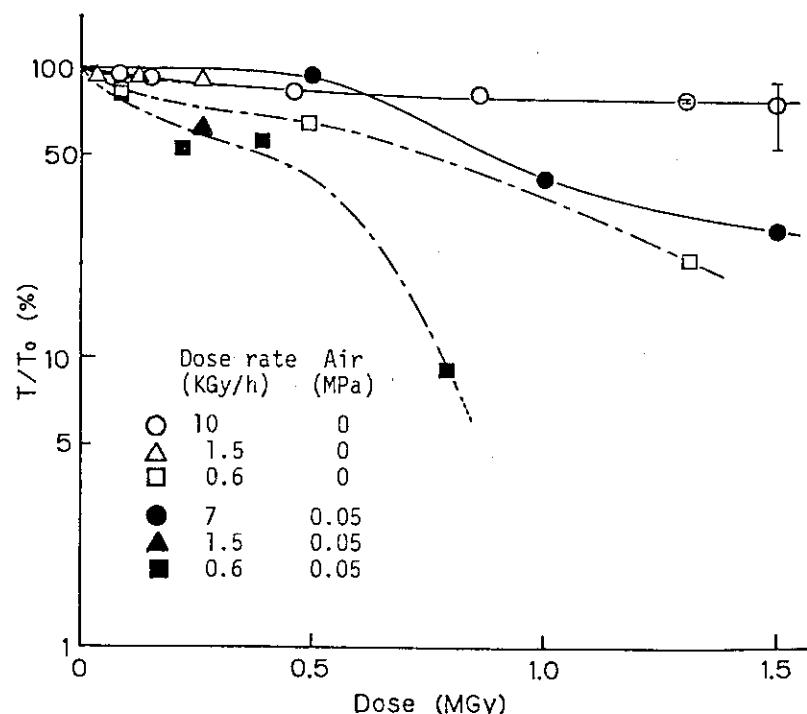


Fig. 5 Effect of dose rate on mechanical properties of Hypalon 1* (CSM 1*) under simultaneous PWR LOCA environments.

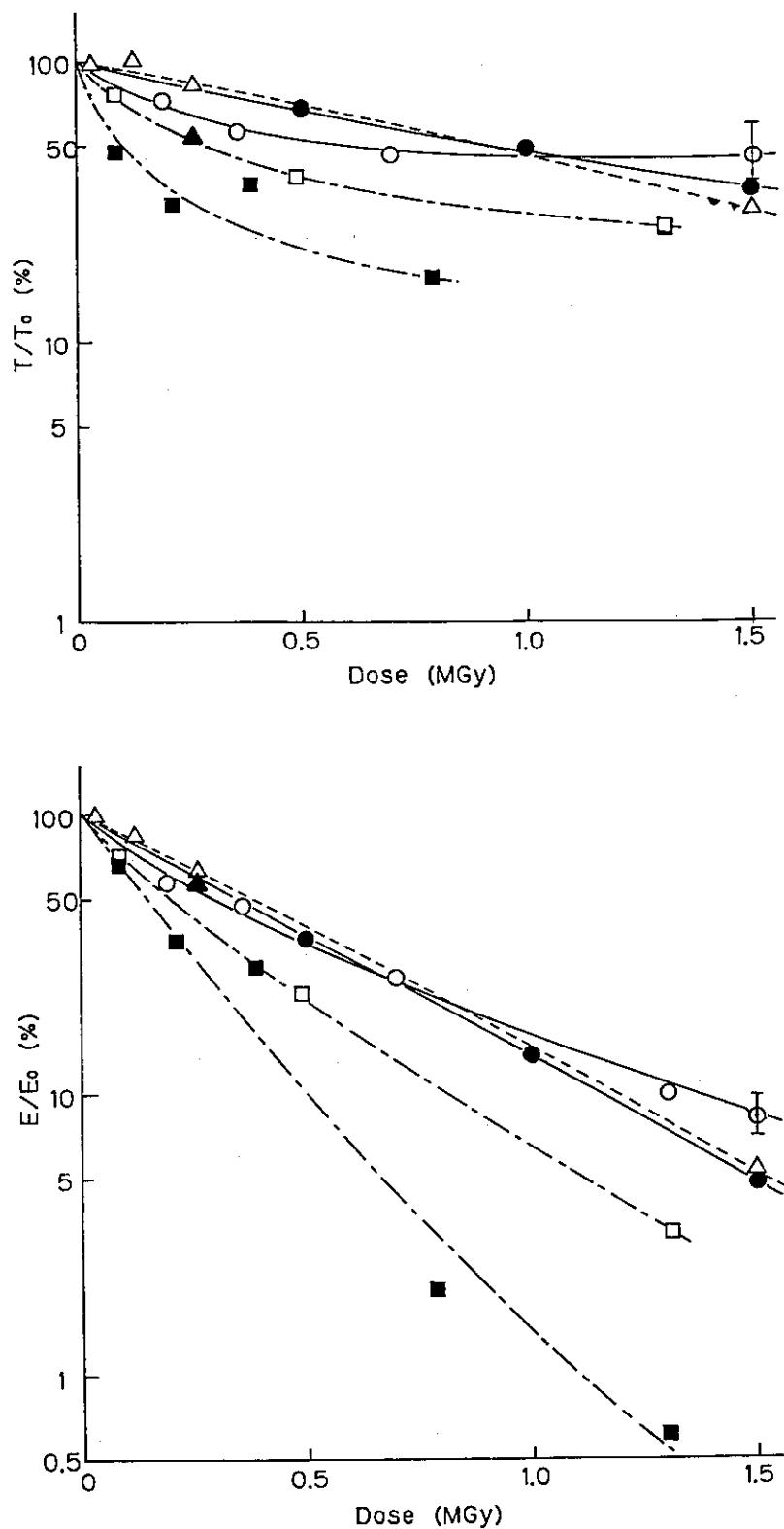


Fig. 6 Effect of dose rate on mechanical properties of Hypalon 3 (CSM 3) under simultaneous PWR LOCA environments.

Symbols are the same as in Fig. 5

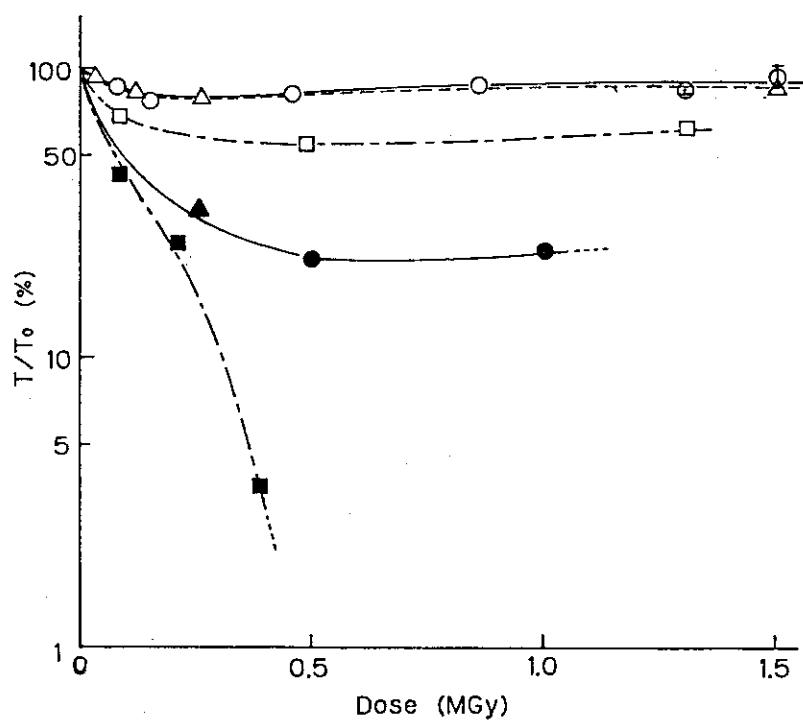
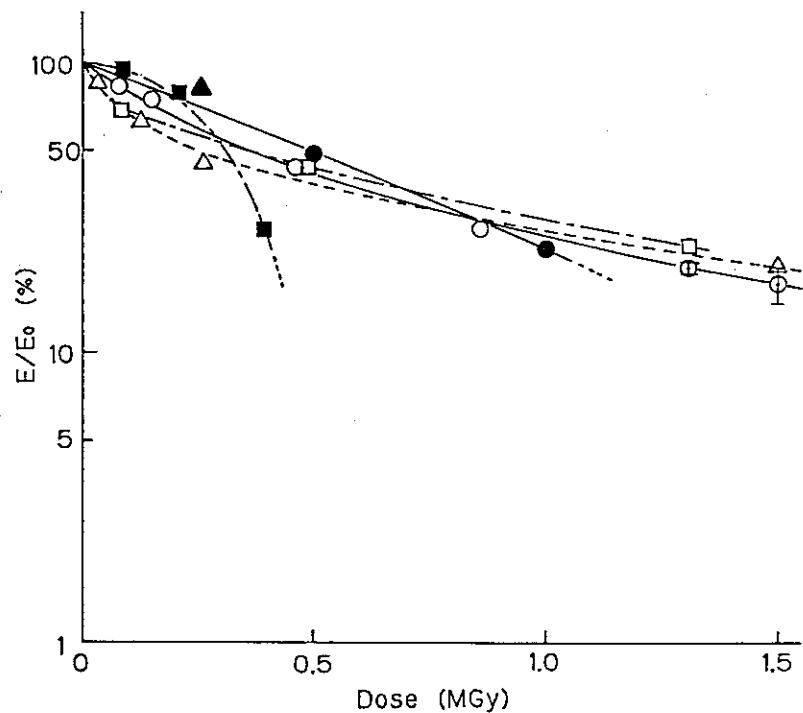


Fig. 7 Effect of dose rate on mechanical properties of ethylene-propylene rubber 1* (EPR 1*) under simultaneous PWR LOCA environments.
Symbols are the same as in Fig. 5

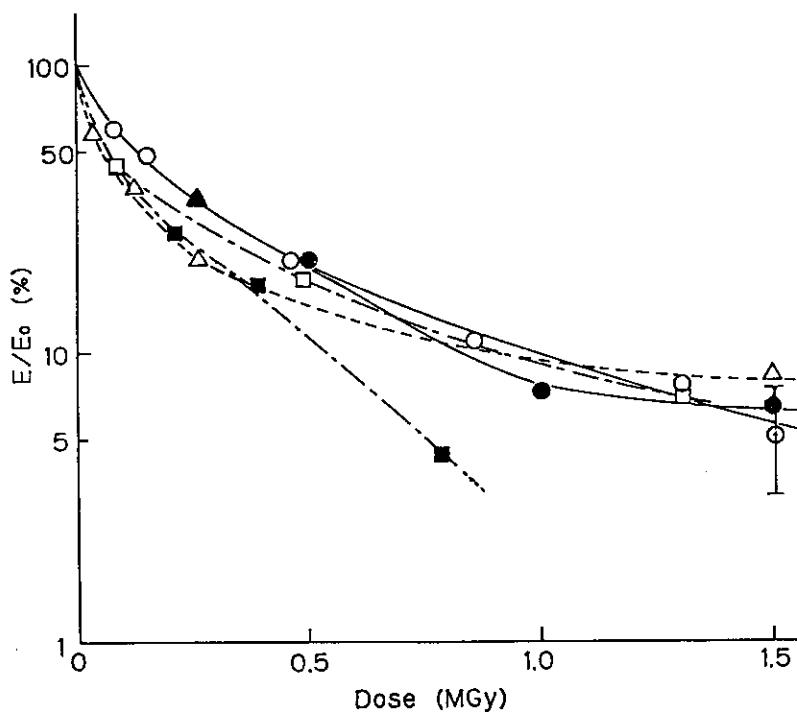
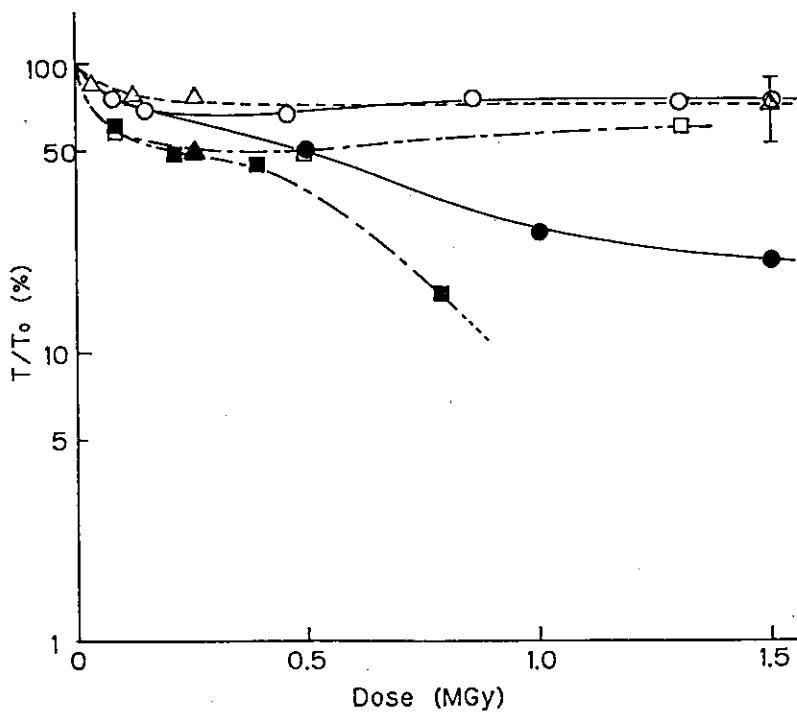


Fig. 8 Effect of dose rate on mechanical properties of ethylene propylene rubber 3 (EPR 3) under simultaneous PWR LOCA environments.

Symbols are the same as in Fig. 5

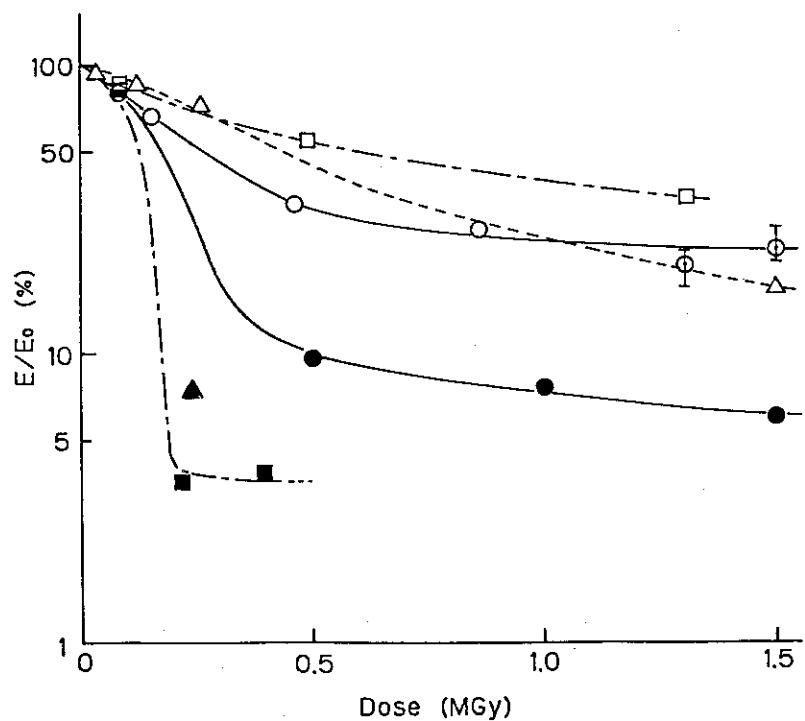
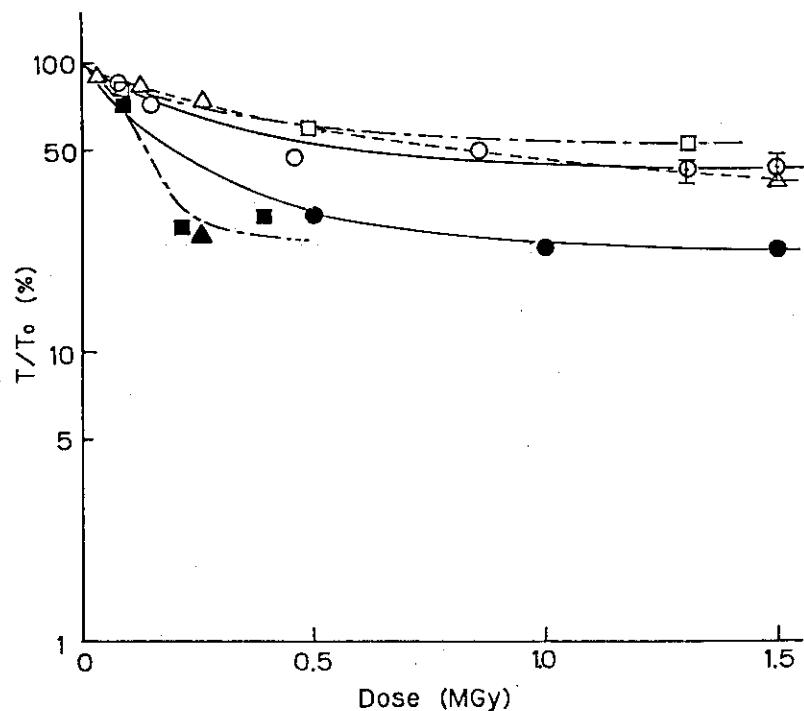
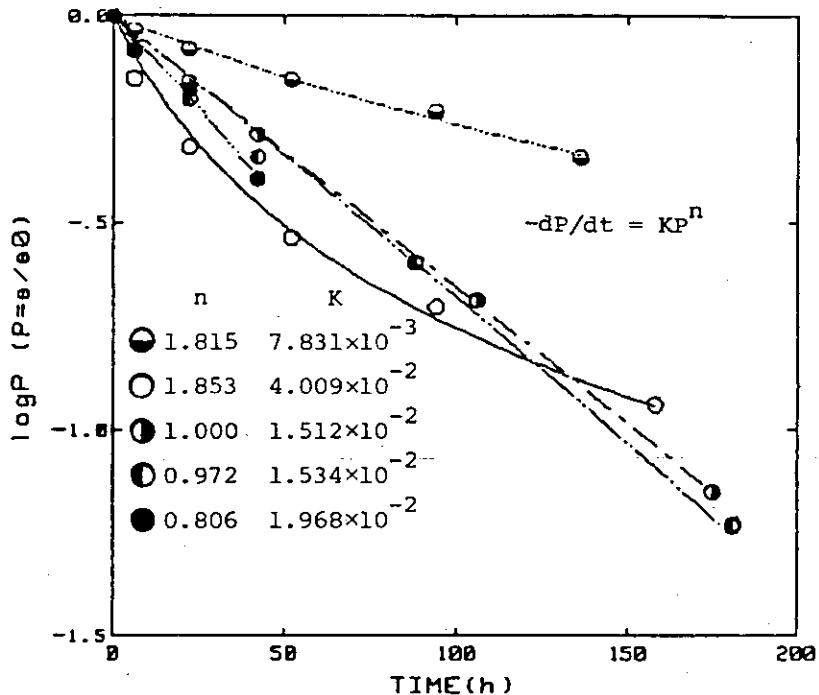


Fig. 9 Effect of dose rate on mechanical properties of crosslinked polyethylene 1* (XLPE 1*) under simultaneous PWR LOCA environments.

Symbols are the same as in Fig. 5



Symbol	●	○	◐	◑	●	
Temperature (°C)	120					
Dose Rate (Mrad/h)	0.174	0.956	0.858	0.829		
Air Partial Pressure (atg)	0	0.5	1.3	2.5		
Time and Dose Point Number	0	0 hours, 0 Mrad (Original)				
	1	6h, 1.0Mrad	6h, 5.7Mrad	6h, 5.1Mrad	6h, 5.0Mrad	
	2	22h, 3.8Mrad	22h, 21.0Mrad	22h, 18.9Mrad	22h, 18.2Mrad	
	3	52h, 9.0Mrad	52h, 49.7Mrad	42h, 36.0Mrad	42h, 34.8Mrad	
	4	94h, 16.3Mrad	94h, 89.9Mrad	106h, 90.9Mrad	88h, 73.0Mrad	
	5	136h, 23.6Mrad	158h, 151.0Mrad	175h, 150.2Mrad	181h, 150.0Mrad	

Fig. 10 Effect of dose rate and amount of air on elongation of EPR in simulated LOCA environments.

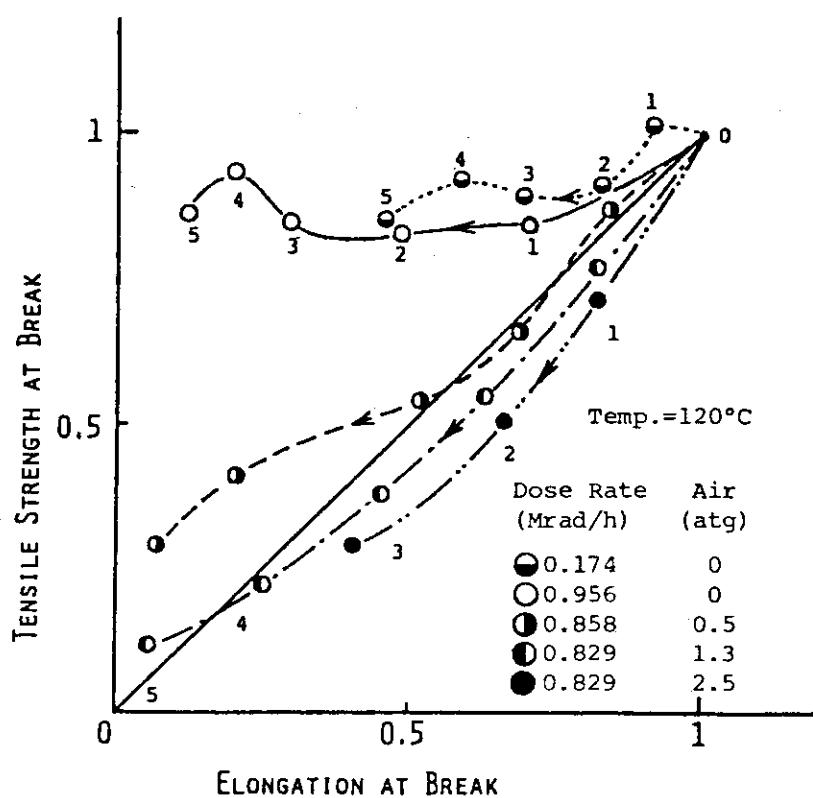


Fig. 11 Elongation-Strength trajectory of EPR under various simultaneous PWR LOCA conditions.
Symbols are the same as in Fig. 10

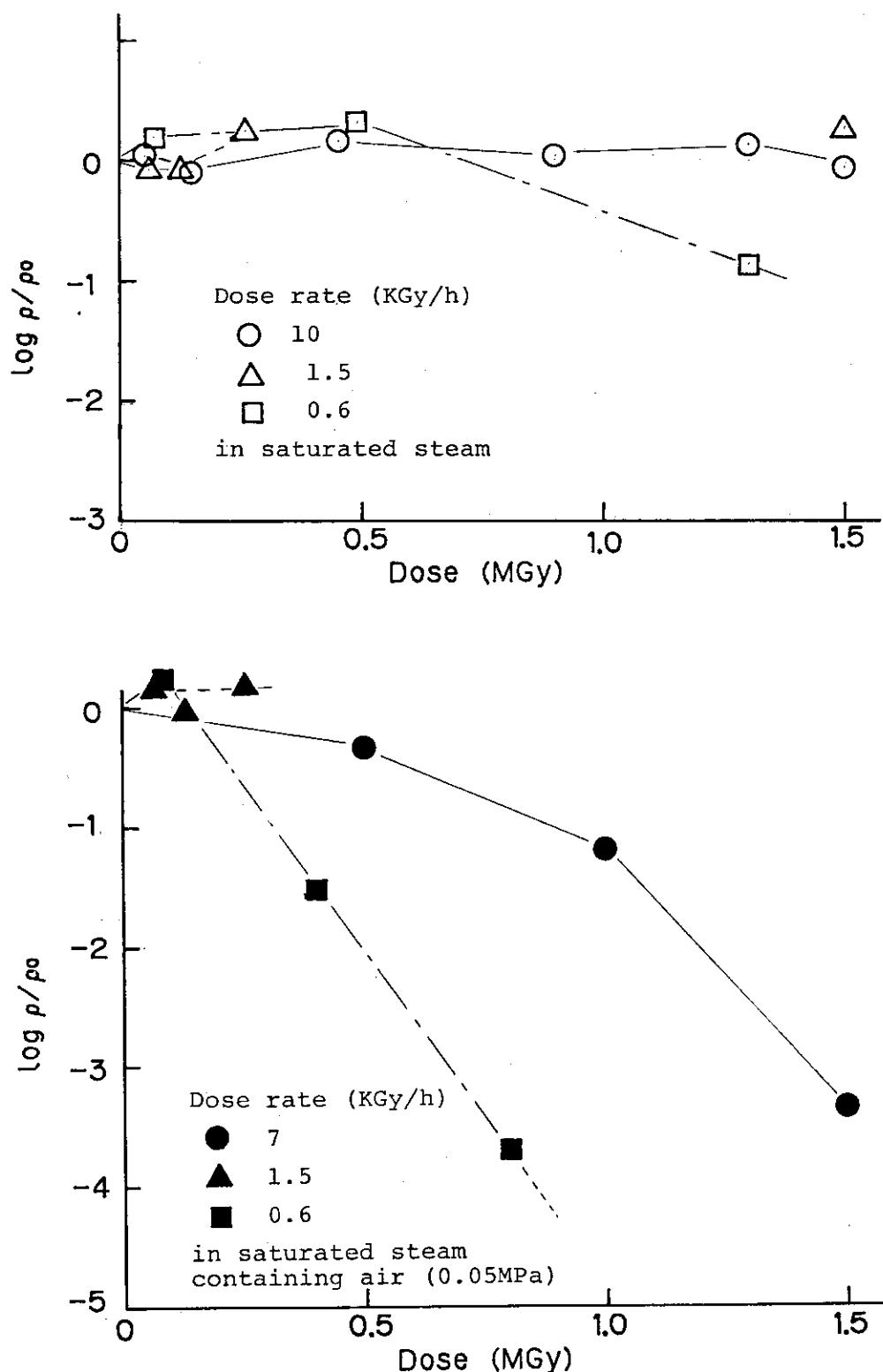


Fig. 12 Effect of dose rate on insulating resistance of EPR 1* under simultaneous PWR LOCA environments.

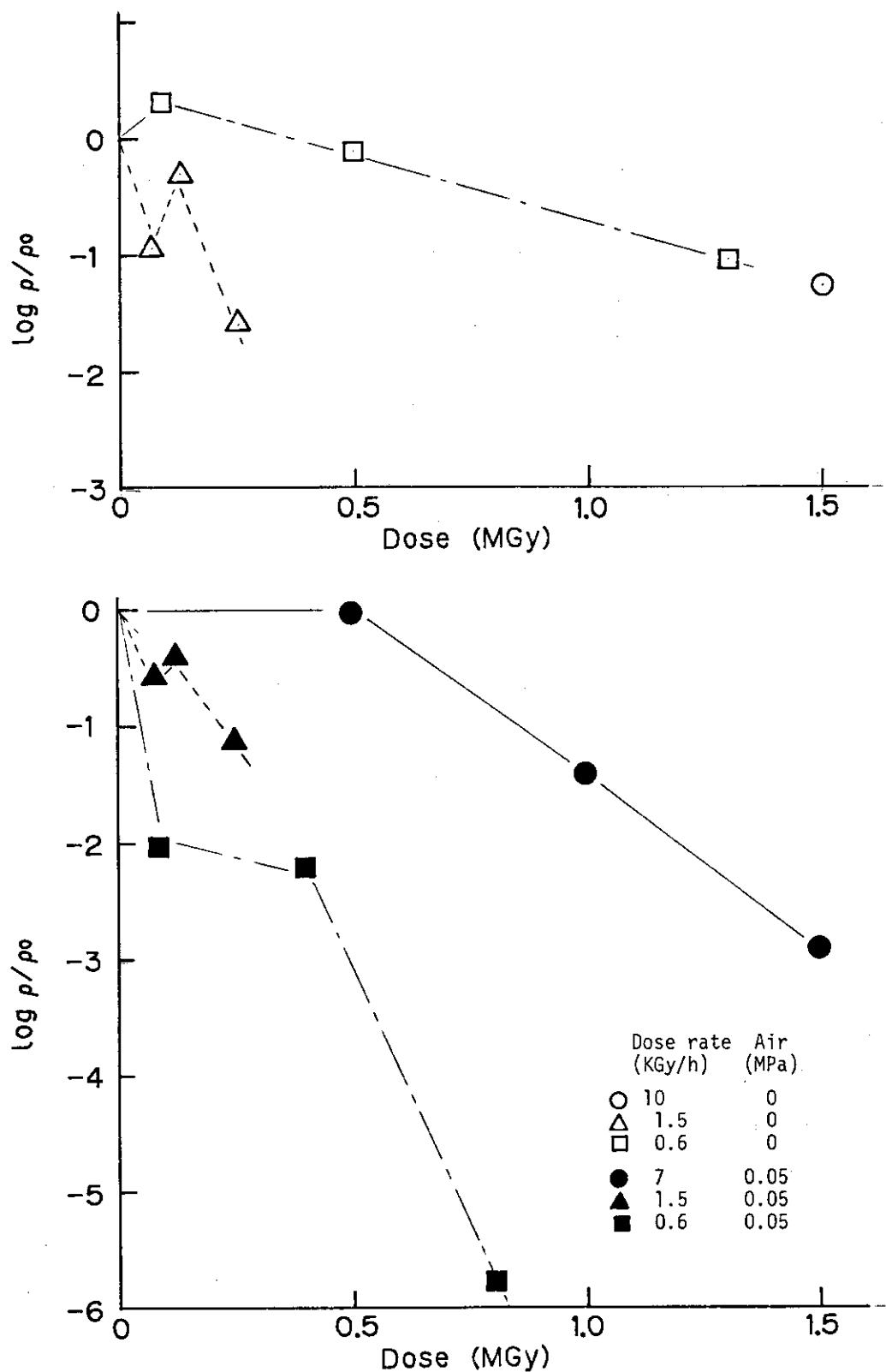


Fig. 13 Effect of dose rate on insulating resistance of EPR 3 under simultaneous PWR LOCA environments.
Symbols are the same as in Fig. 12

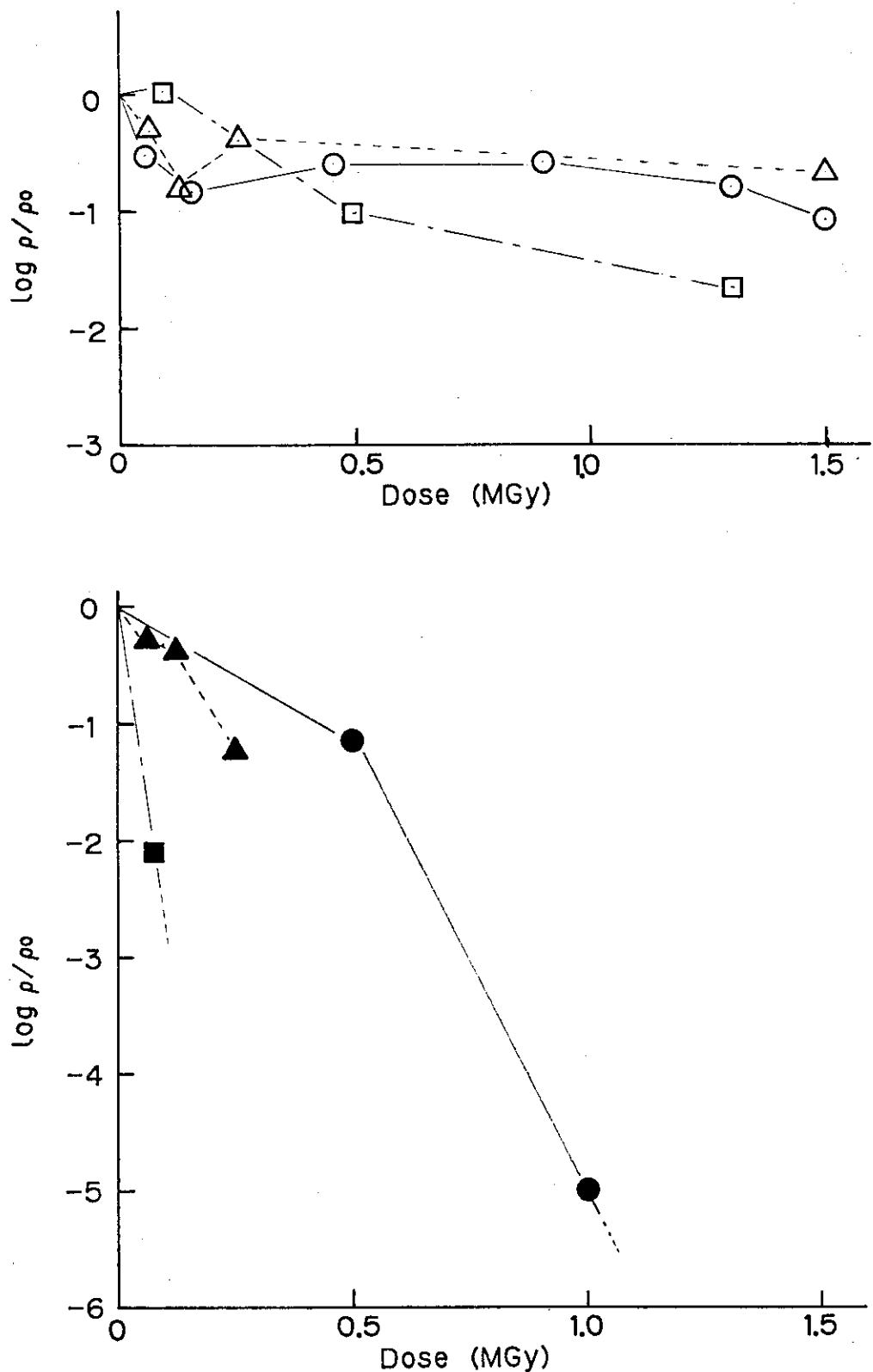


Fig. 14 Effect of dose rate on insulating resistance of XLPE 1* under simultaneous PWR LOCA environments.
Symbols are the same as in Fig. 12

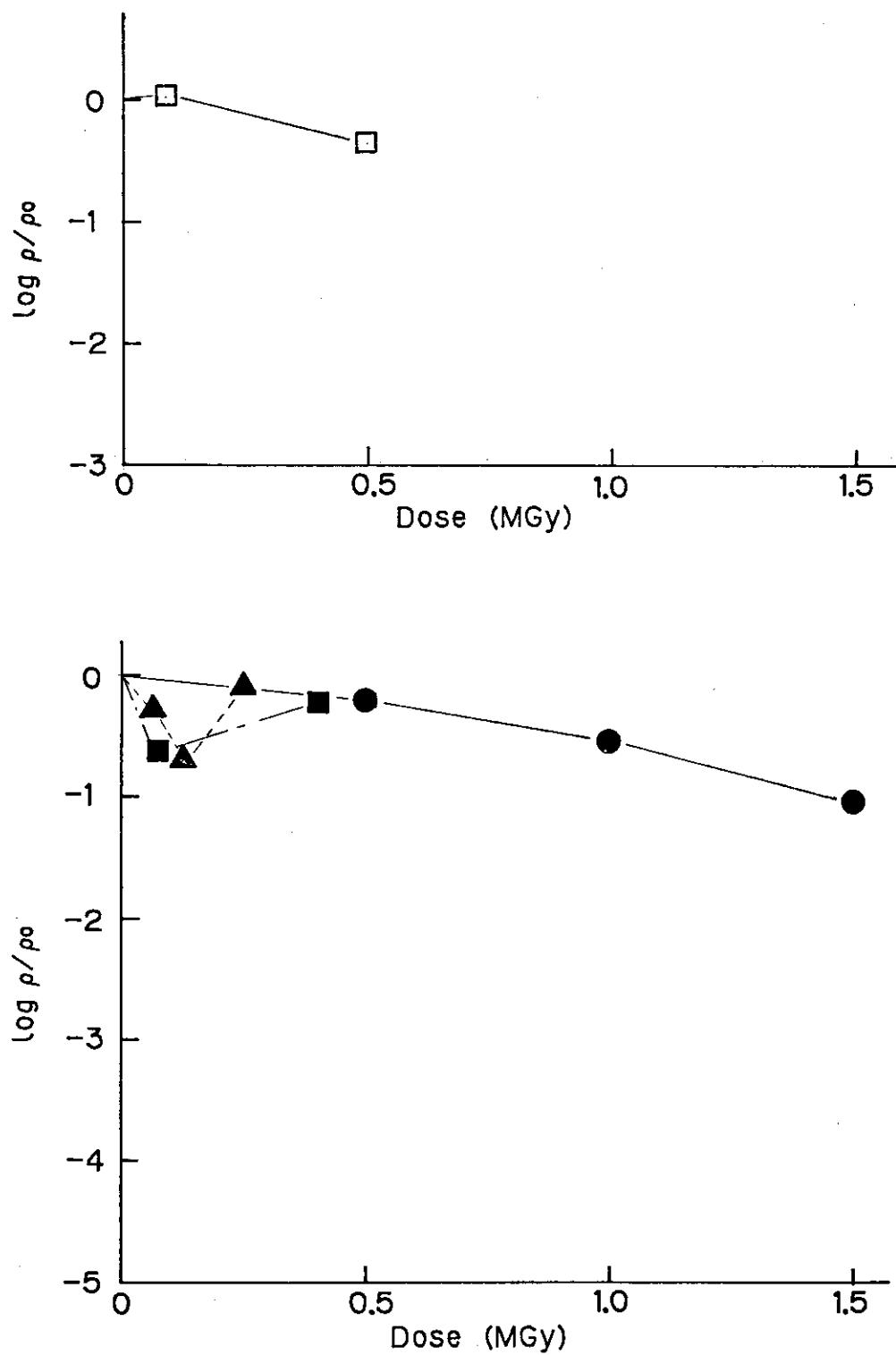


Fig. 15 Effect of dose rate on insulating resistance of silicone rubber 1 (SIR 1) under simultaneous PWR LOCA environments.

Symbols are the same as in Fig. 12

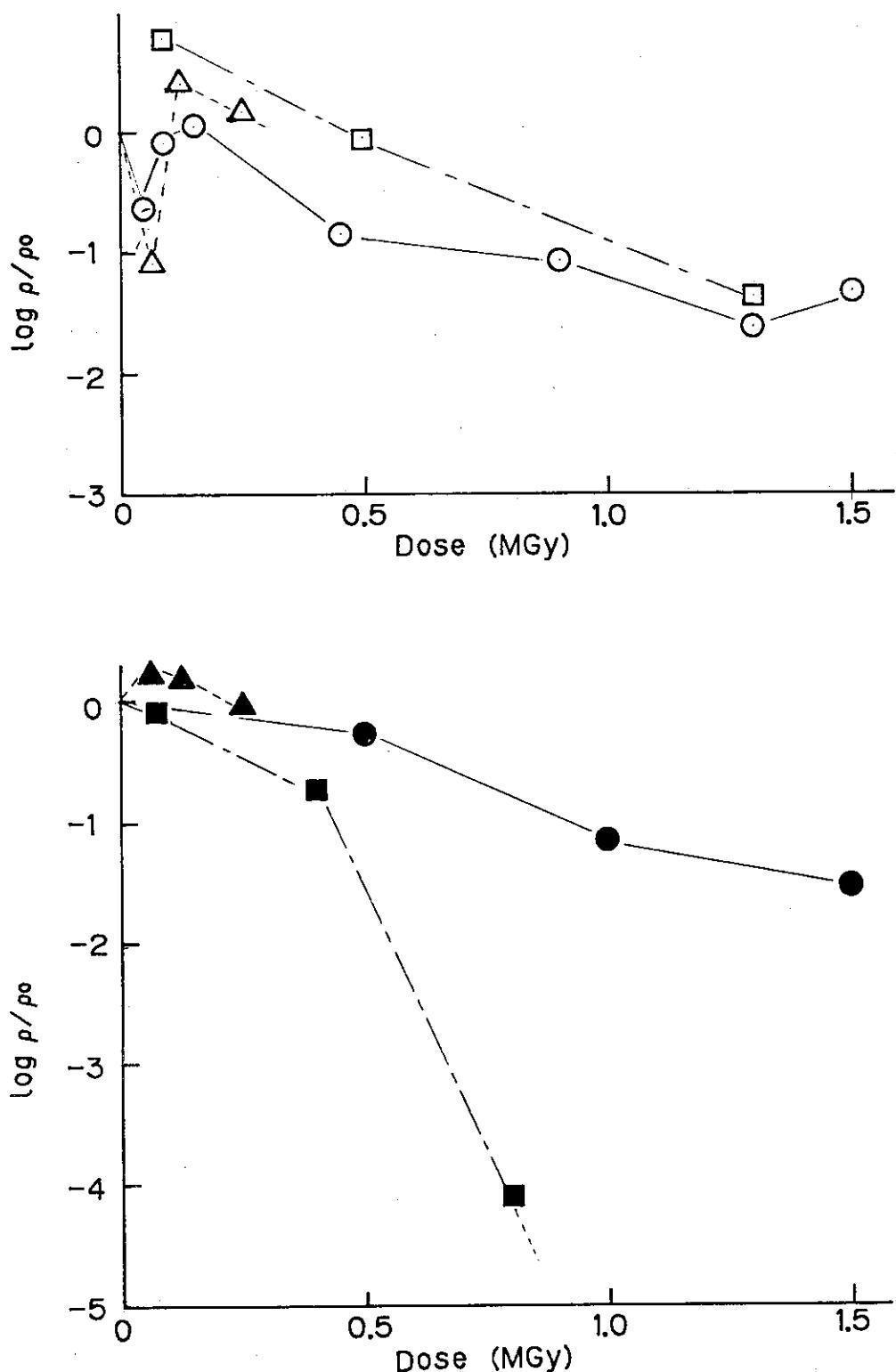


Fig. 16 Effect of dose rate on insulating resistance of CSM 1* under simultaneous PWR LOCA environments.
Symbols are the same as in Fig. 12

4.1.2 環境温度の影響¹⁻³

(1) 実験方法

実験の目的、実験条件、環境暴露方法、試料ならびに物性測定方法などの詳細ならびに実験番号等は3.2にまとめて示した。

(2) 結果及び考察

『飽和水蒸気によるL O C A模擬環境下における環境温度の影響』

1) 機械的性質

L O C A模擬環境暴露は試験用標準シート (Standard Sheet sample: S Sと略す) 13種類全部について行ったが、ここでは各材料毎に引張試験による破断時の伸びと強度の結果の代表例を示す。

伸びの変化

Fig.17に被覆材のハイパロンについて代表的な結果を示した。図中の実線はL O C A試験に先立って与えることとされている40年間相当の通常運転時の劣化を与えない新品について得られた値を、破線は事前劣化を与えた後L O C A模擬環境暴露した場合を示す。本実験での事前劣化の照射は9.6および8.6kGy/hで行った。環境温度は100, 120, 140°C, 線量率は100, 140°Cの場合が9.6kGy/h, 120°Cの場合は8.6kGy/hで若干異なる。その理由は120°Cの実験は若干時間を置いたため、Co-60線源が減衰したことによる。したがってL O C A模擬環境暴露時間は100および140°Cの場合158h, 120°Cの場合は175hと若干長くなった。

図には2種類のハイパロンの伸びの相対値(初期値をE_{b0}, 劣化後の値をE_bとしたときのE_b/E_{b0} × 100(%)で示す)の変化を線量(L O C A模擬環境暴露時間に線量率を乗じて得られる値)に対してプロットした。なお事前劣化した場合(破線)のデータには、事前劣化の線量を加算していない。

伸びの変化は、大部分の試料でCSM1⁺ (モデル配合試料) の様にゆるやかな下に凸の曲線を示すが、直線的に変化するものもある。実用配合試料のCSM3もモデル配合試料とほぼ同様な劣化曲線を示すが、伸びの低下はやや大きい。温度の影響は120°Cと140°Cの間ではそれほど大きくないが、100°Cと120°Cの間ではやや大きくなる場合が多い。

Fig.18に代表的な絶縁材料のエチレンプロピレンゴム(E P R)の結果の例を示す。E P Rの場合もモデル配合試料(EPR1⁺), 実用配合試料(EPR3)とともに直線にならず、暴露時間とともに勾配がゆるくなる下に凸の曲線を示す。伸びの変化に及ぼす温度の影響はモデル配合の試料では殆ど認められない。一方、実用配合試料では温度の影響が認められるが、温度が高い方が伸びの低下が少ない。

Fig.19に架橋ポリエチレン(X L P E)の結果を示した。架橋ポリエチレンは事前劣化の有無により伸びの低下の挙動が異なる。事前劣化なしの場合は他の材料とほぼ同じような曲線となり、温度依存性はあまりないが、事前劣化があると、低線量で一旦伸びが急低下した後、線量を増やしても変化しない領域があり、その後再び線量とともに低下するなど複雑な挙動を示す。また、100°Cでの伸びの低下の挙動は120, 140°Cの場合と著しく異なり、しかも伸びの値は低い。これに対して120°Cと140°Cではほとんど差が認められなかった。

Fig.20に3種類のクロロブレン(C R)の結果を示した。クロロブレンは試料によって劣化挙動が異なる。CR1(実用配合)とCR2*(モデル配合)はごく低線量のところを除き、伸びがほぼ直線的に低下するが、CR3(実用配合)の伸びの低下はむしろハイパロンに類似の挙動を示し、線量増加につれ曲線の勾配は少しずつ小さくなる。温度の影響は若干認められ、高温ほど伸びの低下が大きくなる。特にCR1の事前劣化したものに温度の影響が顕著に認められた。

Fig.21にシリコーンゴム(S i R)の結果を示す。伸びの低下はやや下に凸の曲線を示す。温度の影響は測定値がばらついているため、はっきりしないが、比較的小さいと思われる。また、この試料では事前劣化の有無による劣化挙動の違いは認められなかった。

以上、飽和水蒸気によるL O C A模擬同時環境における伸びと線量(暴露期間)の関係について述べた。寿命を定める尺度として種々の提案がなされているがその方法は確定していない。例えばIECでは伸びが初期値の50%になった時点を寿命とするよう提案しているが、機械的性質は伸びの絶対値が50%になる時期を寿命とすべきであるという意見もある。ここでは、データが最も多く相互比較をしやすい時点、即ち、伸びの保持率が30%になる線量を劣化の目安にして各材料の温度依存性を調べた。Table 4にその結果を示した。クロロブレン、シリコーンゴム、E P Rの一部は事前劣化のみで伸びが初期値の30%以下となるため、事前劣化ありの場合にデータは得られなかった。また、同表に示した線量の値には事前劣化時の線量は含まれていないので、事前劣化がある場合の全線量は表中の値に0.5MGyを加えた値になる。

強度の変化

伸びと同様に強度についても初期値に対する比、 $T_b/T_{b0} \times 100(\%)$ の値を示す。

Fig.22にモデル配合ならびに実用配合のハイパロンの強度の変化の例を示す。伸びに比べると強度の低下は著しく少ない。温度の影響は事前劣化のないものでは比較的小く、100°Cと120°Cの間ではほとんど認められない。これに対し、事前劣化したものでは、温度の影響が明瞭に認められ、高温ほど低下する。

Fig.23にモデル配合ならびに実用配合のE P Rの結果を示す。E P Rの強度は

L O C A 模擬環境に暴露してもほとんど低下せず、温度依存性もほとんど認められない。特にモデル配合の試料（EPR1⁺）で事前劣化したものでは、温度依存性は全くみられず、強度は線量とともに増加する。この傾向は実用配合の試料でも同様であるが、図に示した以外の試料では L O C A 模擬環境暴露の初期に低下を示す場合もみられたが、この場合でも低下の割合は伸びに比べて少なく（たかだか30%以内）、やはり線量とともに回復する傾向を示した。

Fig.24に架橋ポリエチレンならびにシリコーンゴムの結果を示す。架橋ポリエチレンは事前劣化のない場合は初期にやや低下が大きく、その後はゆるやかに低下する。ただし、120°Cの結果は複雑で、全体として温度の影響ははっきりしない。事前劣化した場合は一応一様な傾きで低下するが、やはり100°Cのデータが複雑な傾向を示し、温度の影響ははっきりしない。このことは、120°C付近がポリエチレンの融点であることと何らかの関連があることを示唆するものである。

シリコーンは試料により若干傾向が異なるが、L O C A 模擬環境暴露による強度の低下は比較的小さい。温度の影響については、事前劣化したものについては若干みられ、高温ほど強度低下が大きい。これに対し、事前劣化がないものでは温度依存性はほとんどなく、試料により劣化曲線の形が異なる。

Fig.25にクロロプロレンの結果を示す。クロロプロレンの強度の劣化挙動は試料により、また、事前劣化の有無によって著しく異なる。事前劣化なしの場合、強度低下が少ないものもあるし、逆に線量に伴って強度が増加するものもある。いずれの試料にも温度依存性がみられ高温ほど強度が低下する。一方、事前劣化した場合、いずれの試料も明らかな強度低下を示すが、低下の傾向は試料によって著しく異なる。また、温度の影響もみられるが、試料によって120°Cと140°Cが逆転するなど劣化挙動は伸びに比べてさらに複雑である。

2) 電気的性質

L O C A 模擬環境温度が絶縁抵抗に及ぼす影響を調べるために8×8cmのシート状試料を用いて絶縁抵抗測定を行った。Fig.26～28に体積固有抵抗の初期値に対する比の値の対数を示す。図の左側は事前劣化後L O C A 模擬環境暴露した場合、右側は事前劣化なし（新品）をL O C A 模擬環境暴露した場合を示す。

Fig.26はハイパロンの結果を示す。いずれの試料も事前劣化により約1桁から3桁の絶縁低下を示す。これらはL O C A 模擬環境に暴露すると一旦回復するが、その後はモデル配合と実用配合で異なり、前者では殆ど変化しないのに対し、後者では線量とともに低下し、低下の割合は温度が高いほど大きくなる。特に140°Cの環境暴露では、ある線量以上で測定器の限界以下（ $7.2 \times 10^6 \Omega$ ）になるほど絶縁低下が極めて大きい。これに対してモデル配合の試料では暴露温度の影響はほとんどなく、事前劣化したものではL O C A 模擬環境暴露初期に回復した値を保

持している。また、事前劣化したものでは線量にともなって若干低下を示すが、その割合は実用配合の試料に比べて著しく小さい。このような劣化挙動の違いを生じる原因としては、配合の違いが考えられる。即ち実用配合（原子炉用）では難燃化が義務づけられており、多くの場合、ハロゲンを含む難燃化剤が配合されている。これらの難燃化剤は高温での放射線照射により、酸化生成物やハロゲン化水素などを生じ絶縁抵抗を低下させると考えられる。

Fig.27にEPRならびに架橋ポリエチレンの結果を示す。EPRの場合も電気的性質に関してはハイパロンと同様、配合依存性があり、モデル配合試料は事前劣化、LOCA模擬環境暴露のいずれによっても絶縁低下せず、環境温度の影響もみられないが、実用配合の試料では、事前劣化による絶縁低下は少ないが、LOCA模擬環境暴露では環境温度が高くなるほど絶縁低下が大きくなる。特に事前劣化して140°Cの環境に暴露すると大巾に低下する。その理由はハイパロンと同様、配合に依存すると考えられ、難燃化は絶縁抵抗の低下に密接な関連を持つことがわかる。

架橋ポリエチレンは、事前劣化により約1桁程度の低下を示し、LOCA模擬環境に暴露すると140°C以外は初期にわずかに回復傾向を示した後は大きな変化を示さない。これに対し、140°Cでは初期に低下を示した後はやはり大きな変化を示さない。一方、事前劣化なしの場合は高温の環境に暴露すると絶縁低下を示すなど、事前劣化の有無で劣化挙動が異なる。その理由は明らかではないが、事前劣化の照射により架橋が進行し、吸水が妨げられるためではないかと思われる。

Fig.28にクロロブレンならびにシリコーンゴムの結果を示す。まず、クロロブレンであるが、この材料はもともとハイパロンと同様に被覆材として用いられるため、絶縁抵抗は重要でないこと、また、材料的には分子内に大量の塩素を含むため、放射線照射により塩化水素を生じ易く、絶縁抵抗は他の材料に比べもともと低いことがわかっているが、いずれの試料も事前劣化で大巾な絶縁低下を示す。LOCA模擬環境に暴露すると、事前劣化で低下した絶縁抵抗は一旦回復し、その後の暴露で再び低下するケースが多いが、事前劣化なしの場合は低下したり回復したりする。事前劣化した場合、環境暴露の初期に回復するのは、事前劣化で生じた大量の導電性物質が、蒸気環境暴露時の蒸気やスプレイにより抽出されるためではないかと思われる。環境温度の依存性についてはCRIにのみ若干みられるが、この場合も温度の順にはならないなど、温度依存性についてははっきりしない。

シリコーンゴムは事前劣化、LOCA模擬環境暴露のいずれによっても大巾な絶縁低下は示さないし、環境温度の影響もあまりはっきりしないなど電気的には比較的安定な材料であることがわかる。

クロロブレンおよびシリコーンゴムについては線量が比較的低いところまでし

かデータがないが、その理由はこれらの材料はもともとハイパロン、EPRなどに比べ耐放射線性が低く、低線量で機械的性質が劣化し、使用できなくなることによる。

『空気を含むLOCA模擬環境下における環境温度の影響』

LOCA時の環境は前述したように放射線、高温の水蒸気／スプレイに加えて空気の存在が考えられることから、ここでは空気存在下での環境温度の影響について検討した。事前劣化を与えたものならびに新品を所定の温度の飽和水蒸気に0.05MPaの空気を添加した環境に暴露した。但し100°Cの環境については装置の構造上0.01MPaの空気しか添加できず、添加空気量は120°C、140°Cの場合に比べて少ない。事前劣化は空気中、121°C、7日間熱老化後8.6kGy/hで0.5MGy照射の条件を与えた。LOCA模擬環境における線量率は事前劣化と同じく8.6kGy/h、暴露時間は最大175hである。

1) 機械的性質

伸びの変化

飽和水蒸気によるLOCA模擬環境に暴露したのと同じ試料について結果の代表例を以下に示す。

Fig.29に先に示したのと同じハイパロンの試料の伸びの保持率を示す。飽和水蒸気環境暴露の場合に比べモデル配合の試料（CSM1⁺）では環境温度の影響が顕著で、高温ほど劣化が大きい。また、劣化は線量とともにほぼ直線的に増大し、事前劣化の有無の影響はみられない。これに対して実用配合の試料は劣化挙動が複雑で2種類の試料のうち1種類はモデル配合試料にほぼ類似の劣化挙動を示したが、ここに示した試料（CSM3）では劣化曲線はかなり複雑で環境温度の影響ははっきりしない。また、事前劣化の有無により劣化曲線の形が異なるなど劣化挙動は複雑である。実用配合試料間での劣化挙動の違いは酸化劣化に対する挙動の違い、即ち酸化防止剤等の配合の違いによると思われる。LOCA模擬環境に空気が存在するなど条件が厳しくなると個々の試料の特性がはっきりしてくることがわかる。

Fig.30にEPRの結果を示す。モデル配合試料（EPR1⁺）では事前劣化の有無にかかわらず100°C以外は上に凸の曲線を示すが、実用配合試料では事前劣化の有無で曲線の形がかなり異なる。ここに示した試料では事前劣化なしの場合は下に凸、事前劣化がある場合は初期に回復を示し、劣化挙動はS字型に近くなる。さらにここに示さなかったもう1種類の実用配合試料（EPR4）は事前劣化なしの場合はモデル配合試料に、事前劣化を与えると図に示した実用配合試料に類似の劣化曲

線を示すなど事前劣化の有無や配合の違いにより劣化挙動が異なるが、環境温度の影響はいずれもはっきりしない。

Fig.31に架橋ポリエチレンならびにシリコーンゴムの結果を示す。架橋ポリエチレンについては、事前劣化の有無は劣化曲線の形にはあまり影響を与えないが、空気存在の影響は極めて大きく、劣化曲線の形は飽和水蒸気環境暴露の場合の様に下に凸の減衰曲線ではなく、温度が高くなるにつれ、ある線量で急激な低下を示す。しかも、その線量は温度が高いほど低くなることがわかる。100°Cの場合にはこの傾向は顕著でなく、事前劣化なしのものではほぼ単調に減少している。

シリコーンゴムは試料により値は若干異なるが、劣化傾向はほぼ同じで、事前劣化がない場合は下に凸、事前劣化がある場合は100°Cでは同じく下に凸、それ以上の温度では上に凸の劣化曲線を示し、線量が少ないところでは温度が高い方が伸びの保持率は大きいが、線量が増すとその差がなくなることがわかった。

Fig.32にクロロブレンの代表例を示す。モデル配合試料(CR2*)は事前劣化の有無で曲線の形は異なるが、いずれの場合にも環境温度の影響が顕著にみられる。これに対して、実用配合試料ではモデル配合試料に近い挙動を示すもの(CR1)と、ここに示したようにモデル配合試料とは異なった挙動を示すもの(CR3)がある。この試料については環境温度の影響は事前劣化した場合に若干みられるのみではっきりしない。このようにクロロブレンについても配合により劣化挙動がかなり異なることがわかる。

強度の変化

Fig.33にハイパロンの結果の代表例を示す。モデル配合試料では事前劣化の有無に関係なく環境温度の影響が顕著であるが、実用配合の試料は試料により若干異なり、CSM4はモデル配合に似た挙動を示すが、例として示したCSM3は蒸気環境暴露の途中の段階では温度の影響がみられるものの線量が増加すると120°Cと140°Cでほぼ同じ値を示すようになるなど温度の影響は小さくなる。

Fig.34にEPRの例を示す。モデル配合試料では温度の影響が顕著で、事前劣化したものは140°Cの環境暴露により著しく劣化し、途中から測定が出来なくなつた。一方、実用配合試料の強度の変化はやや複雑で、事前劣化なしの場合、100°Cの環境に暴露すると一旦低下した後時間とともに増加するのに対し、事前劣化したものでは100°Cでは殆ど変化しないが、より高い温度では線量とともに低下する。図から明らかなように、この試料では120°Cと140°Cはほぼ同じ値を示すなど、モデル配合試料に比べて温度の影響は小さい。しかしながら、これらの結果を伸びの場合と比べると、いずれの試料についても環境温度の影響がはっきりと認められ、空気存在下ではEPRの強度は温度の影響を受けやすいことがわかった。

Fig.35に架橋ポリエチレンとシリコーンゴムの結果を示す。架橋ポリエチレン

では伸びの場合ほど顕著でないが、空気が存在すると、強度もある線量まで急激に減少し、その後はゆるやかに低下する傾向を示し、やはり温度の影響を受ける。このように架橋ポリエチレンではL O C A環境に空気がある場合とない場合で劣化挙動が著しく異なり、空気が存在すると劣化が大きく、温度依存性があることがわかった。

一方、シリコーンゴムは飽和水蒸気環境暴露の場合と同様に環境温度の影響は比較的小さく、線量が増加すると高温での劣化がやや大きくなる程度であった。

Fig.36にクロロプロレンの結果の例を示す。伸びの場合同様実用配合試料(CR1)はここに示したモデル配合の試料(CR2*)に類似の劣化挙動を示し、事前劣化の有無にかかわらず高温ほど強度低下が大きい。ただし事前劣化の有無により劣化曲線の形は著しく異なっている。一方、実用配合試料(CR3)では劣化曲線の形は事前劣化の有無にはあまり影響を受けず、環境温度の影響は空気が存在していない場合に比べ著しく大きい。

ここで飽和水蒸気環境暴露の場合と同様に、伸びの温度依存性について検討する。Table 5に先に示したのと同様、伸びが初期値の30%になる線量を示す。クロロプロレン、シリコーンゴムおよびEPRの大部分は事前劣化により伸びが著しく低下してしまうため、初期値の30%になる線量を求めることができなかった。

ハイパロンは事前劣化の有無によらず、温度の上昇につれて伸びが初期値の30%になる線量(30%値)は低下し、明瞭な温度依存性を示す。この結果は120°Cと140°Cで30%値があまり変わらなかった飽和水蒸気環境暴露の場合と対照的で、空気存在の影響が高温ほど顕著であることを示す。30%値自体はCSM3を除き、空気が存在していない場合とそれほど違いはないが、空気の効果がより高線量側で顕著になるためであろう。

EPRは試料によって温度依存性が異なる。モデル配合の試料では30%値は温度が低い方が小さく、EPR4では逆に温度が高い方が小さい。温度依存性は概して大きくなく、空気が存在しても温度の影響をあまり受けない。しかしながら先に示したように、強度については著しい温度依存性がみられ、空気存在下では環境温度の影響があるということができる。モデル配合の試料EPR1で事前劣化ありの場合、温度が高い方が30%値が大きくなるが、これは空気の存在下では酸化劣化により切断が起こり伸びが保持される結果になったためで、強度、モジュラスは低下していることから、全体としては高温での劣化が大きくなる傾向を示す。

架橋ポリエチレンは空気が存在すると顕著な温度依存性を示す。これは伸びが急激に減少する線量が高温ほど小さくなることに起因する。空気の存在は伸びを著しく低下させるため、30%値は空気が存在していない場合に比べ極端に小さくなる。

クロロプロレンは空気が存在すると明瞭な温度依存性を示す。特に140°Cでの伸び

の低下は著しく、温度依存性が極めて大きい。

シリコーンゴムは100°Cと120°Cの間では30%値は変化するが、120°Cと140°Cでは大差がなく、温度依存性は空気が存在していても概して小さいことがわかった。

2) 電気的性質

Fig.37~39に絶縁抵抗の結果を示す。図の表記方法は先に示した図と同じである。

Fig.37にハイパロンの結果を示したが、モデル配合の試料の1種類(CSM1⁺)を除き、いずれの試料の絶縁抵抗も温度依存性を示し、特に実用配合試料では温度の影響が著しい。特に140°Cの環境に暴露すると5~6桁の絶縁低下を示し、空気の存在の影響が大きい。

Fig.38にはEPRならびに架橋ポリエチレンの結果を示した。EPRでは先に示した飽和水蒸気環境暴露では温度依存性を示さなかったモデル配合の試料を含めて、全試料に温度依存性がみられる。特にEPR3では事前劣化がある場合140°Cでは5桁以上の低下もみられ、空気存在下での絶縁低下は空気が存在していない場合に比べて著しく大きい。

架橋ポリエチレンについても空気存在下では明瞭な温度依存性がみられ140°Cではやはり5桁以上の低下を示すなど、空気の存在は環境温度の影響を大きくしていることがわかる。

Fig.39にクロロブレンならびにシリコーンゴムの結果を示す。クロロブレンの絶縁低下は飽和水蒸気環境暴露の場合と同様はっきりしないものが多いが、CR3については若干見られ、高温での絶縁低下が大きくなっている。一方、シリコーンゴムは絶縁低下は少なく、±1桁程度で温度依存性は飽和水蒸気環境暴露の場合同様はっきりせず、空気の存在の影響はないといえる。

『L O C A模擬環境暴露温度ならびに空気の存在が膨潤挙動に及ぼす影響』

L O C A模擬環境に暴露するとケーブルは水蒸気やスプレイ液の吸収により膨潤する。多量に水を含んだケーブルは絶縁不良になったり、ジャケットが破裂したりするなど、その機能上好ましくない挙動を示す。吸水膨潤に及ぼす環境条件の影響については、他の節でも詳細に触れるので、ここでは環境温度と空気存在の影響について代表例を示す。但し、ここで示す吸水は試料のL O C A模擬環境暴露後2日目の重量と実験前の重量の比較から求めた値であり逐次法の項で述べるL O C A模擬環境暴露直後の値とは意味が異なるので、相対値としての意味しかないが、傾向を知ることはできる。

Fig.40にハイパロンの重量変化の例を示す。ハイパロンは一般にL O C A模擬環境に暴露すると大きな吸水を示すが、100°Cと140°Cを比較すると高温での吸水

が大きいこと、また、空気の存在は温度が高いほど吸水を増大させることがわかる。一方、実用配合試料では100°Cでもかなりの膨潤を示すが、140°Cでは空気がない場合ある線量から吸水が加速度的に増大し、空気存在下では頭打ちを示す。その理由は他の章でも述べたように、空気存在下では試料の表面の一部が酸化劣化により溶解し見かけ上重量が増加しなくなるためであり、吸水量そのものは増加していることが他の実験から確認されている。このように、環境温度ならびに空気の存在は吸水を助長する。

Fig.41にEPRの例を示す。モデル配合試料では空気の有無にかかわらず、また、環境温度が高くなても吸水せず重量はわずかではあるが減少する。これに対し実用配合試料では温度が高いほど、また、空気存在により吸水し重量が増加する。ここでも空気存在下である線量以上で頭打ちがみられるが、その理由はハイパロンと同様、溶失により重量増加が相殺されたためである。

Fig.42に架橋ポリエチレンならびにシリコーンゴムの結果を示す。架橋ポリエチレンは100°Cでは空気の有無に関係なく重量増加は示さないが、120°Cでは空気が存在すると吸水膨潤する。この場合にもハイパロンやEPRと同様に溶失による頭打ちがみられるが、環境温度ならびに空気の存在は吸水を促進する。

シリコーンゴムはこれまでの実験から、LOCA模擬環境に暴露するとむしろ重量減少を示すことがわかっているが、100°Cでは重量変化は殆どなく、140°Cではわずかではあるが重量減少を示す。その理由としてはこれまでにも述べたように、アルカリ性のスプレイ液による加水分解によると考えられる。

Fig.43にクロロブレンの例を示す。モデル配合試料、実用配合試料とともに大きな吸水を示し、高温ほど重量が増加する。特に実用配合試料では温度依存性が顕著である。一方、環境の空気は吸水にはあまり影響を与えないようにみえるが、空気存在下では表面の一部が酸化劣化し溶失することが認められており、実際の吸水量はさらに大きくなると推定される。

(3) まとめ

5種類の絶縁・被覆材料について同時法LOCA模擬環境下の劣化挙動に及ぼす環境温度の影響について調べた結果、以下の点が明らかになった。

1) 飽和水蒸気環境中ではEPR、シリコーンゴムの伸びの環境温度依存性は殆どなく、ハイパロン、クロロブレンは高温で劣化する。一方、架橋ポリエチレンの伸びも温度依存性を示すが、その傾向は逆で低い温度の方が低下が大きくなる。

2) 同様に飽和水蒸気環境中の強度については、温度依存性は伸びの場合ほど大きくなく、EPR、シリコーンゴム、架橋ポリエチレンでは温度依存性ははつきりしない。一方、ハイパロンやクロロブレンには温度依存性が認められ、高

温ほど強度が低下する場合が多い。

3) 空気を含む水蒸気環境中では、ハイパロン、クロロブレン、架橋ポリエチレンの伸びは著しい環境温度依存性を示す。これらの材料では劣化曲線の形そのものが変わり、高温ほど劣化の加速度が大きくなる。EPRは温度が高くなると低線量域で伸びの回復現象が現れる。これが温度上昇による伸びの低下を見かけ上打ち消すため、結果的には顕著な温度依存性を示さない。しかし、強度の低下には大きな温度依存性が見られる。シリコーンゴムは100°Cと120°Cの間では温度の影響がみられるが120°Cと140°Cの間では殆どない。

4) 飽和水蒸気環境中の絶縁低下については、ハイパロン、EPR、架橋ポリエチレンには温度依存性がみられ、高温ほど低下が大きくなる傾向を示すが、配合依存性を示す。クロロブレンは事前劣化による絶縁低下は大きいが、環境暴露時の温度依存性ははっきりしない。シリコーンゴムは事前劣化でも蒸気環境暴露でも大巾な絶縁低下は示さず、温度依存性もまた小さい。

5) 空気が存在する環境では、ハイパロン、EPR、架橋ポリエチレンに著しい温度依存性がみられ、高温では大巾に絶縁抵抗が下がる。クロロブレンは温度依存性がはっきりせず、シリコーンゴムは絶縁低下そのものが小さい。

6) 吸水膨潤については、ハイパロン、クロロブレンは吸水しやすい。温度が高いほど、また空気がある方が膨潤率が高くなる。シリコーンゴム、架橋ポリエチレンは、120°Cまでは重量変化が少ないが、140°Cになると若干重量減少を示すようになる。EPRはモデル配合では重量減少を示すが、実用配合では高温ほど、また空気がある方が膨潤する。

関連文献

1. 日馬康雄、八木敏明、伊藤政幸、岡田漱平、吉川正人、吉田健三、"L O C A 模擬環境下における絶縁材料の劣化速度に及ぼす空気の影響," 電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-82-108(1982)
2. 日馬康雄、伊藤政幸、岡田漱平、吉田健三、中瀬吉昭、町末男、"電線ケーブル絶縁材料の劣化におよぼすL O C A後半温度の影響," I. 機械的性質 同上 EIM-80-96(1980)
3. 岡田漱平、中瀬吉昭、伊藤政幸、日馬康雄、吉田健三、町末男、"電線ケーブル絶縁材料の劣化におよぼすL O C A後半温度の影響," II. 電気的性質 同上 EIM-80-97(1980)

Table 4 Exposure Dose to Decrease Elongation to 30%
 of Initial Value under LOCA Environments
 with Saturated Steam (Expressed in MGy)

Type of polymer	Sample name	With aging			Without aging		
		100°C	120°C	140°C	100°C	120°C	140°C
Hypalon	CSM 1*	0.46	0.19	0.29	1.32	0.75	0.78
	CSM 2*	0.39	0.14	0.14	1.35	1.03	0.83
	CSM 3	0.41	0.29	0.15	1.11	0.80	1.02
	CSM 4	0.60	0.35	0.31	1.24	0.92	0.99
Ethylene-propylene rubber	EPR 1*	0.35	0.35	0.25	0.88	0.92	0.68
	EPR 3	-	-	-	0.16	0.12	0.25
	EPR 4	-	-	-	0.52	0.52	0.80
Chloroprene	CR 1	-	-	-	0.32	0.26	0.22
	CR 2*	-	-	-	0.37	0.26	0.32
	CR 3	-	-	-	0.38	0.32	0.38
	SIR 1	-	-	-	0.23	0.28	0.19
	SIR 2	-	-	-	0.11	0.14	0.08
Cross-linked polyethylene	XLPE 1*	0.22	0.76	0.80	0.86	1.05	0.97

Table 5 Exposure Dose to Decrease Elongation to 30%
 of Initial Value under LOCA Environments
 Containing Air (Expressed in MGy)

Type of polymer	Sample name	With aging			Without aging		
		100°C	120°C	140°C	100°C	120°C	140°C
Hypalon	CSM 1*	0.62	0.36	0.29	1.09	0.88	0.64
	CSM 2*	0.53	0.40	0.23	1.22	0.85	0.63
	CSM 3	-	-	0.20	0.65	0.81	0.60
	CSM 4	0.53	0.55	0.41	1.30	1.08	0.71
Ethylene-propylene rubber	EPR 1*	0.28	0.65	0.75	0.89	1.02	1.11
	EPR 3	-	-	-	0.28	0.39	0.33
	EPR 4	-	-	-	0.82	0.76	0.65
Chloroprene	CR 1	-	-	-	0.23	0.23	0.10
	CR 2*	-	-	-	0.40	0.24	0.15
	CR 3	-	-	-	0.54	0.36	0.27
Silicone rubber	SIR 1	-	-	-	0.19	0.46	0.46
	SIR 2	-	-	-	0.15	0.23	0.23
Cross-linked polyethylene	XLPE 1*	0.27	0.30	0.02	0.37	0.25	0.13

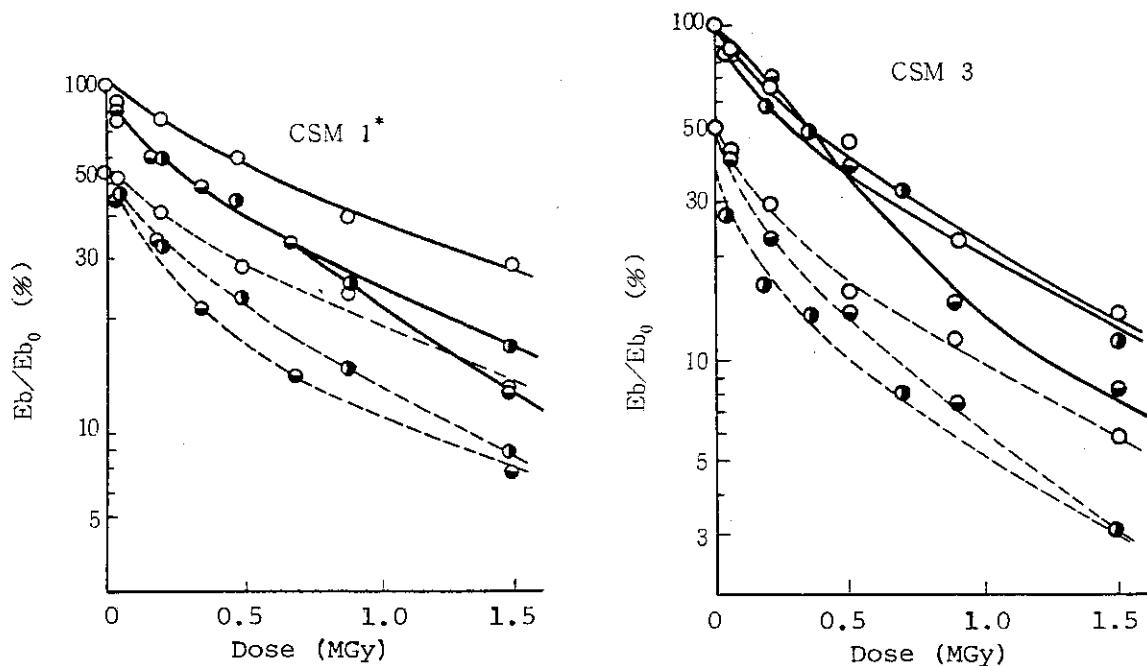


Fig. 17 Change of elongation in simulated LOCA environments with saturated steam (Hypalon:CSM).

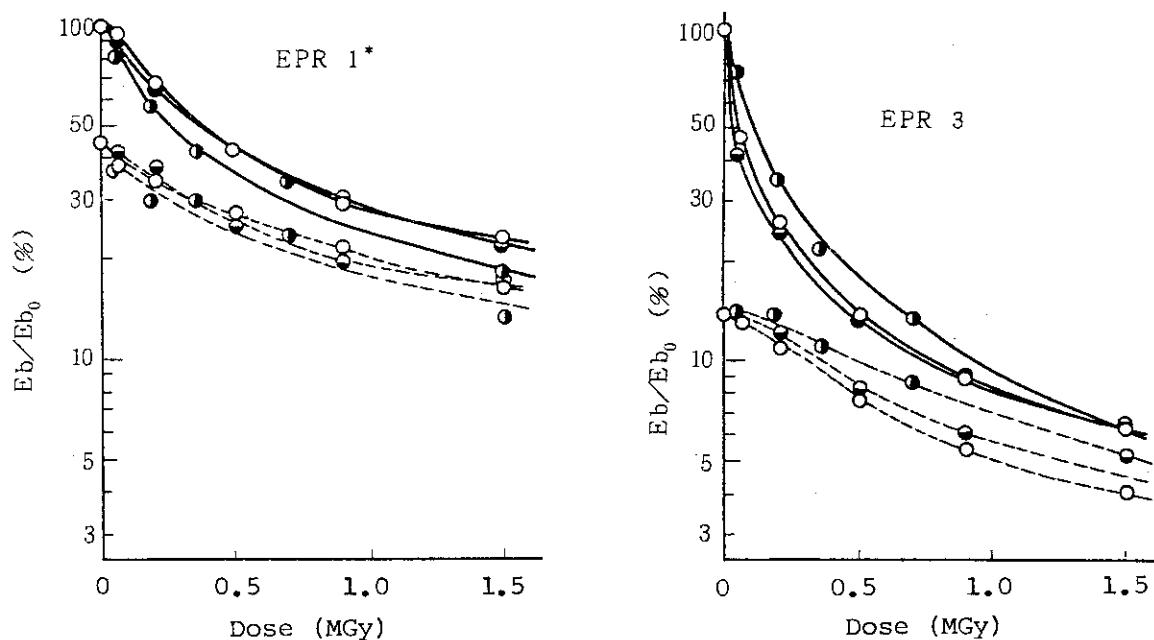


Fig. 18 Change of elongation in simulated LOCA environments with saturated steam (Ethylene-propylene rubber:EPR).

(Notations are the same as in Fig. 17)

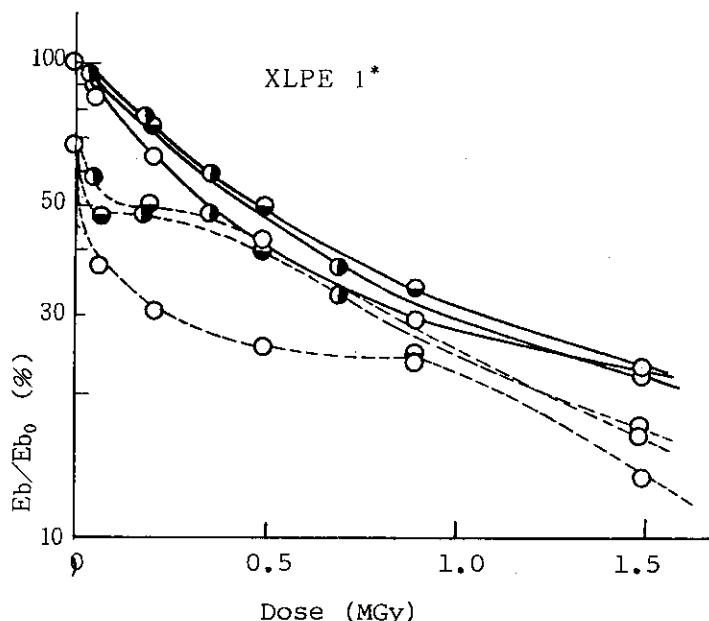


Fig. 19 Change of elongation in simulated LOCA environments with saturated steam (Cross-linked polyethylene:XLPE).
(Notations are the same as in Fig. 17)

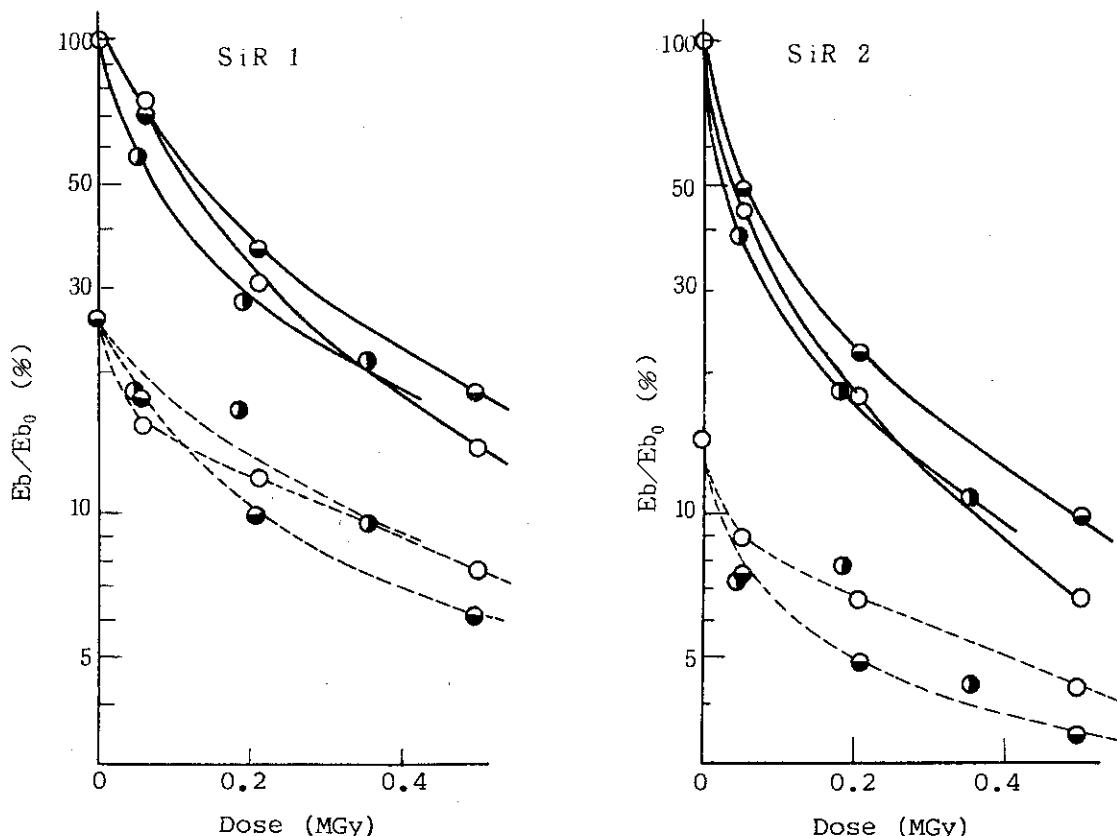


Fig. 21 Change of elongation in simulated LOCA environments with saturated steam(Silicone rubber:SIR).
(Notations are the same as in Fig. 17)

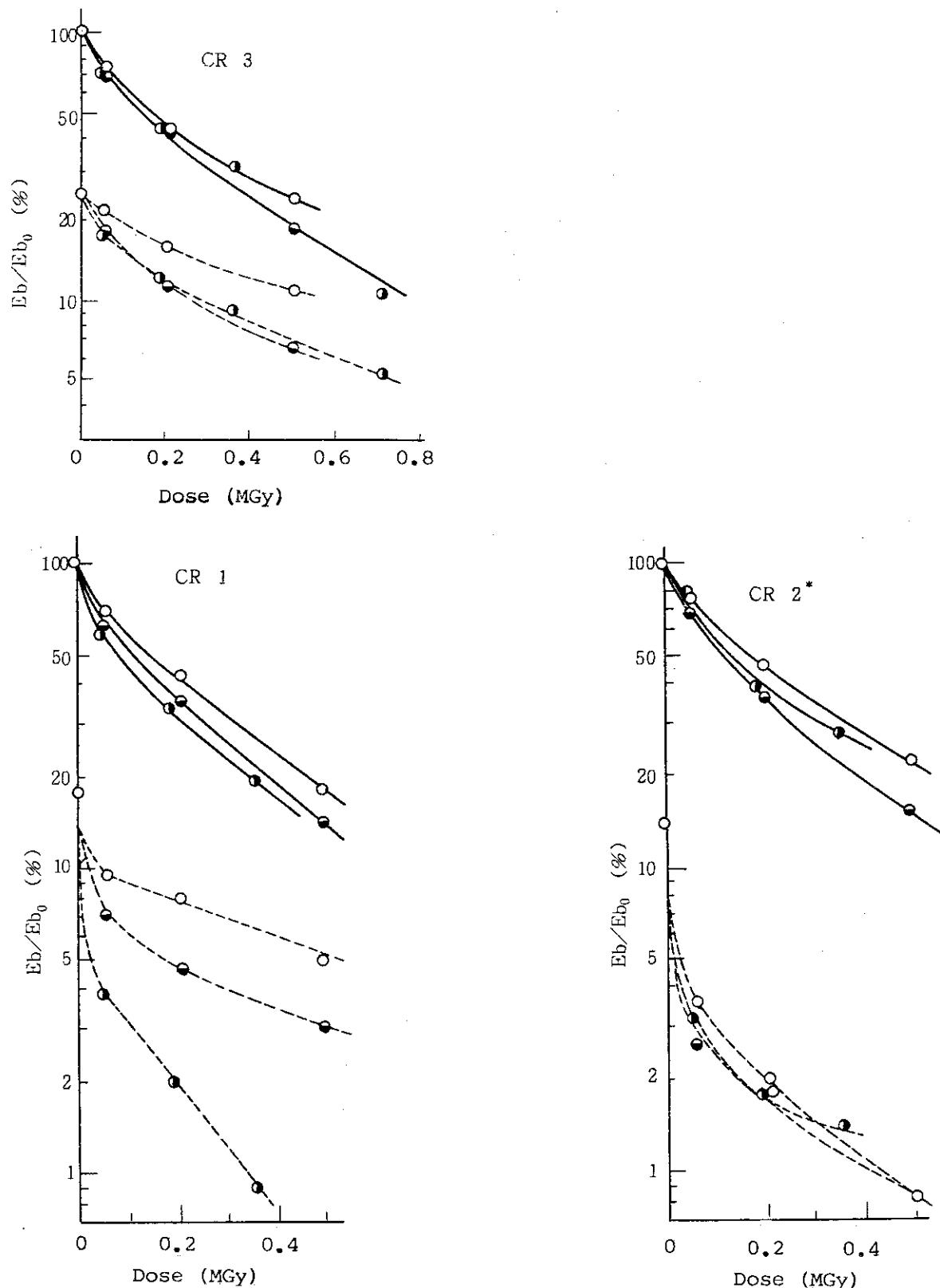


Fig. 20 Change of elongation in simulated LOCA environments with saturated steam (Chloroprene rubber:CR).

(Notations are the same as in Fig. 17)

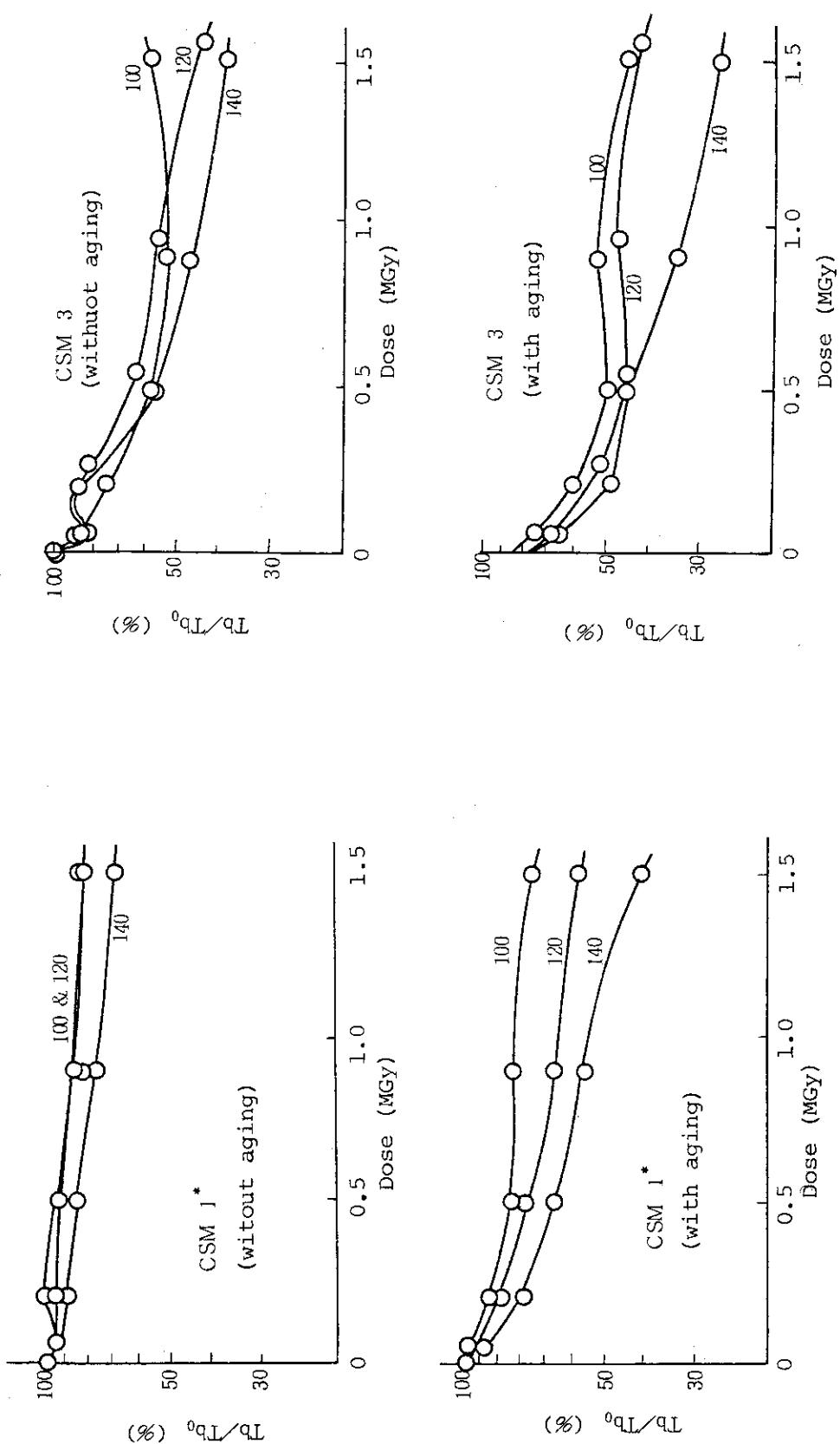


Fig. 22 Change of tensile strength in simulated LOCA environments with saturated steam (Hypalon:CSM).
(Figures on every curves indicate LOCA temperature in °C)

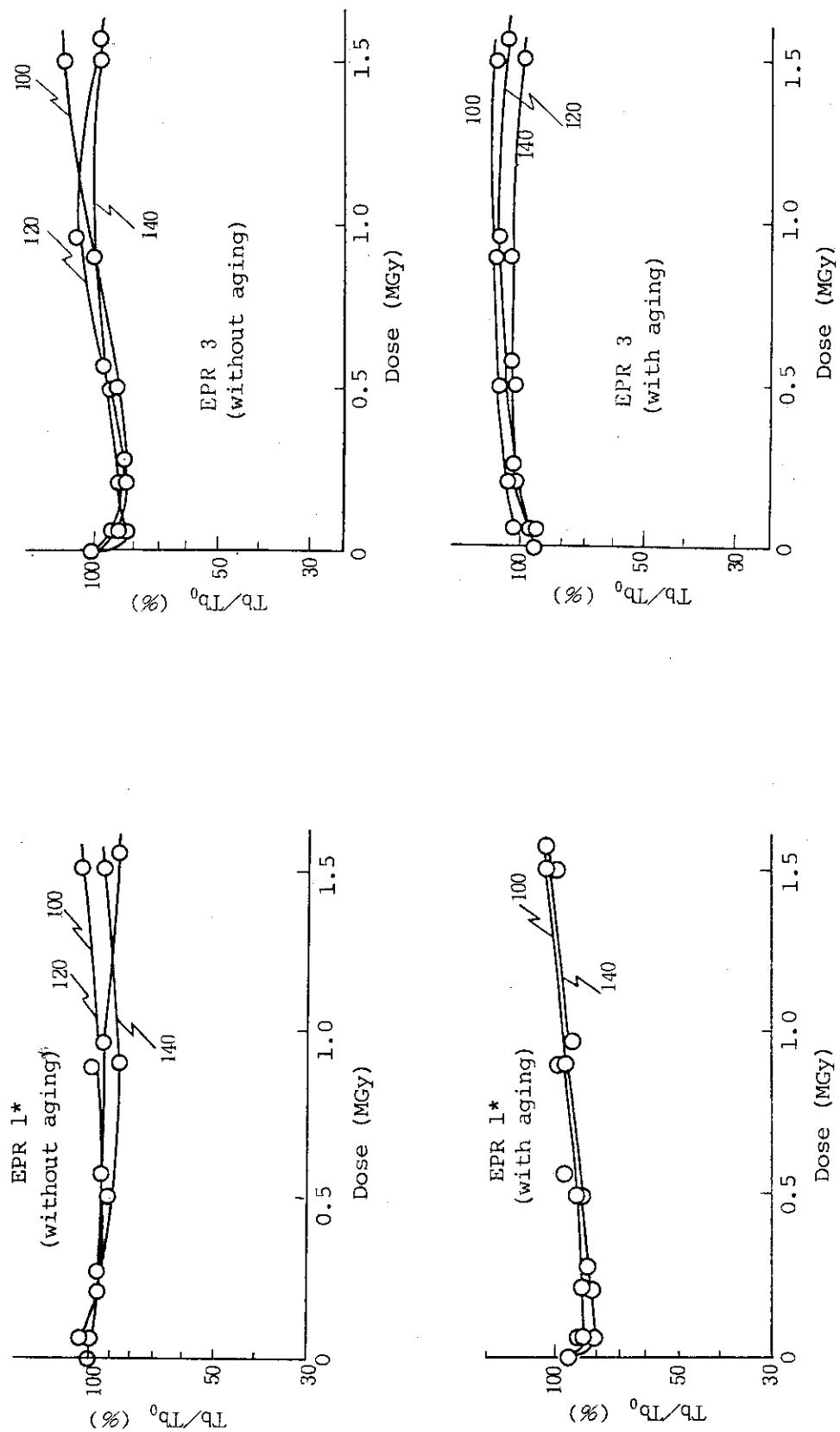


Fig. 23 Change of tensile strength in simulated LOCA environments with saturated steam (EPR).
(Figures on every curves indicate LOCA temperature in °C)

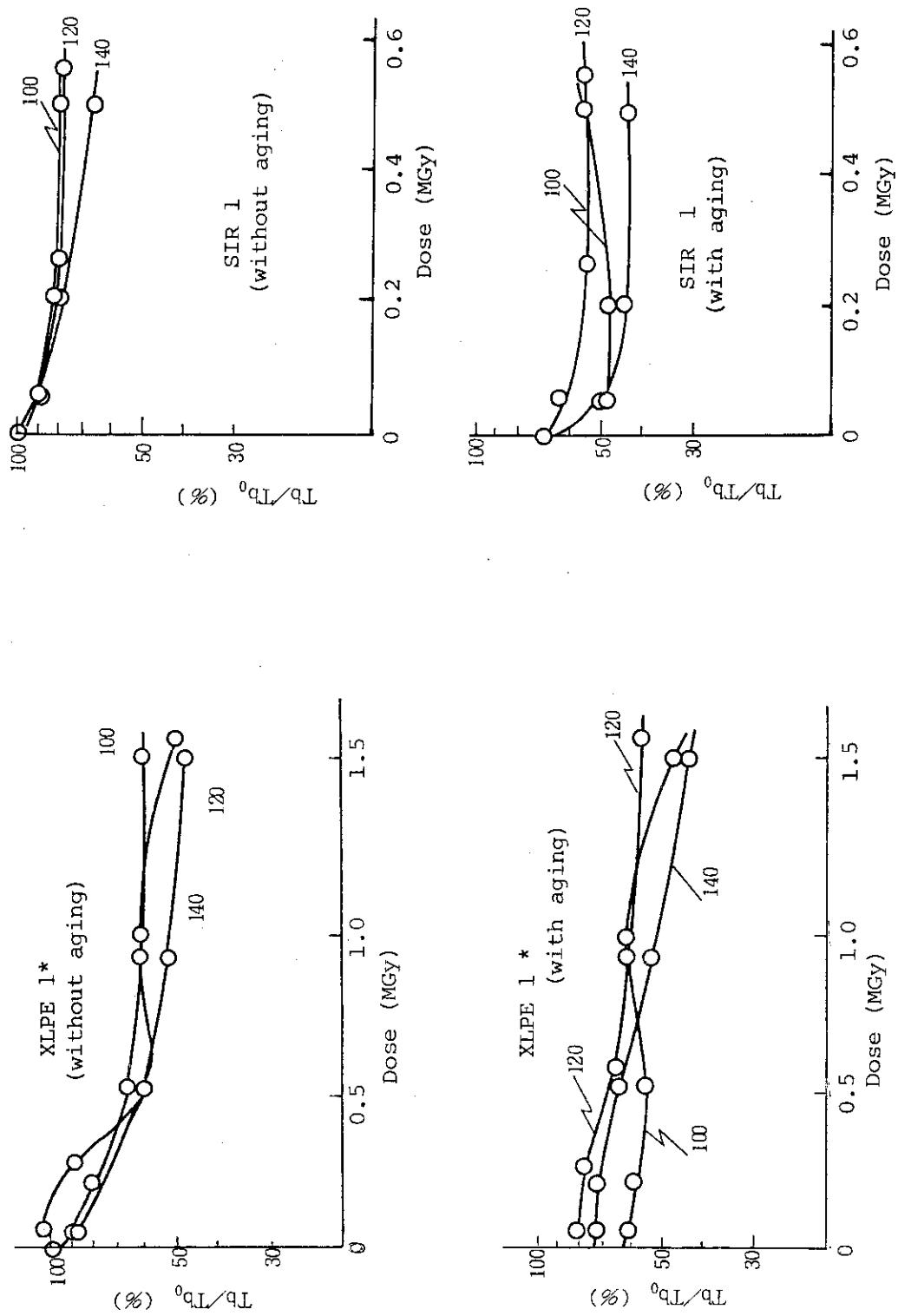


Fig. 24 Change of tensile strength in simulated LOCA environments with saturated steam (XLPE and SIR).
(Figures on every curves indicate LOCA temperature in °C)

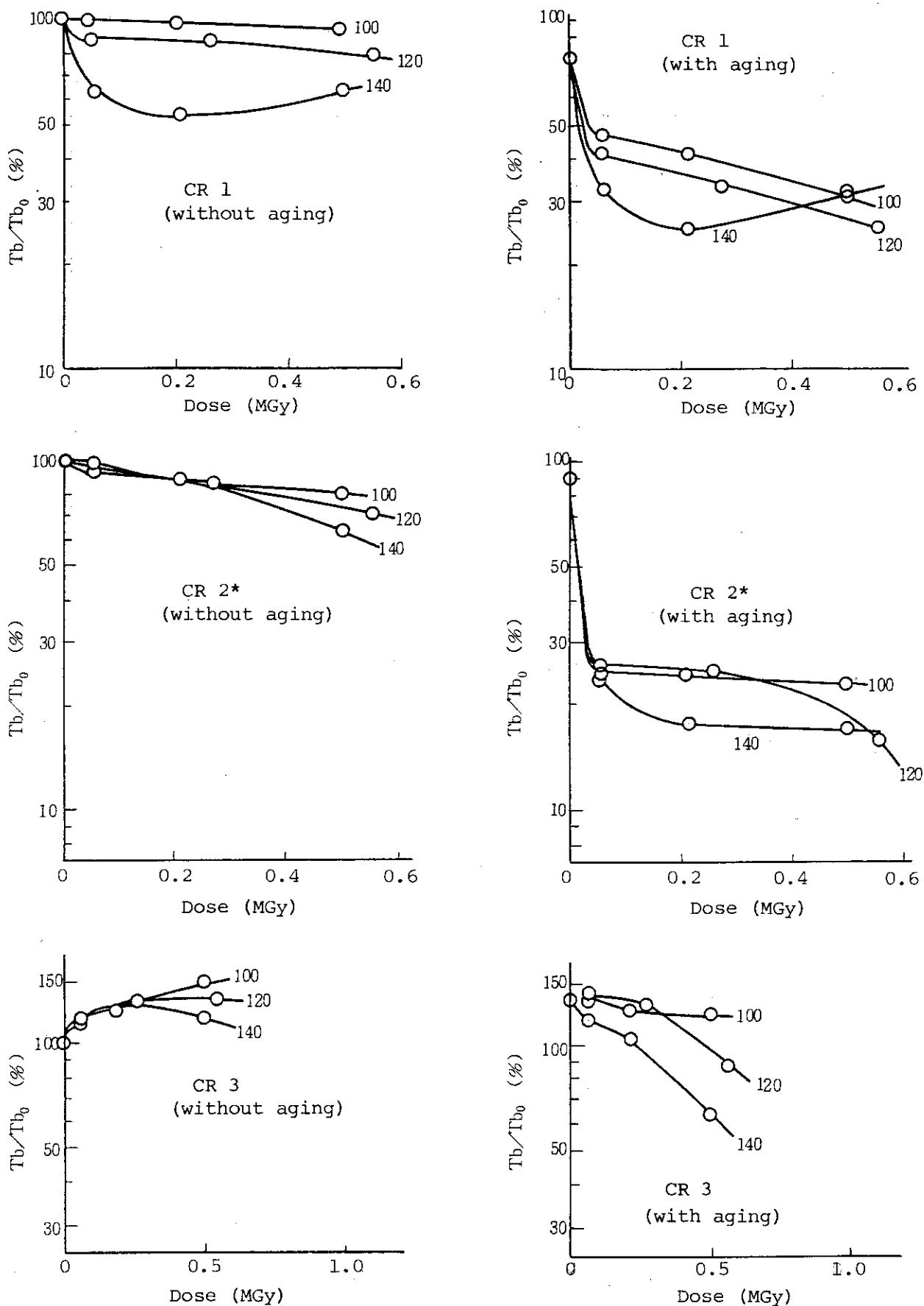


Fig. 25 Change of tensile strength in simulated LOCA environments with saturated steam (CR).

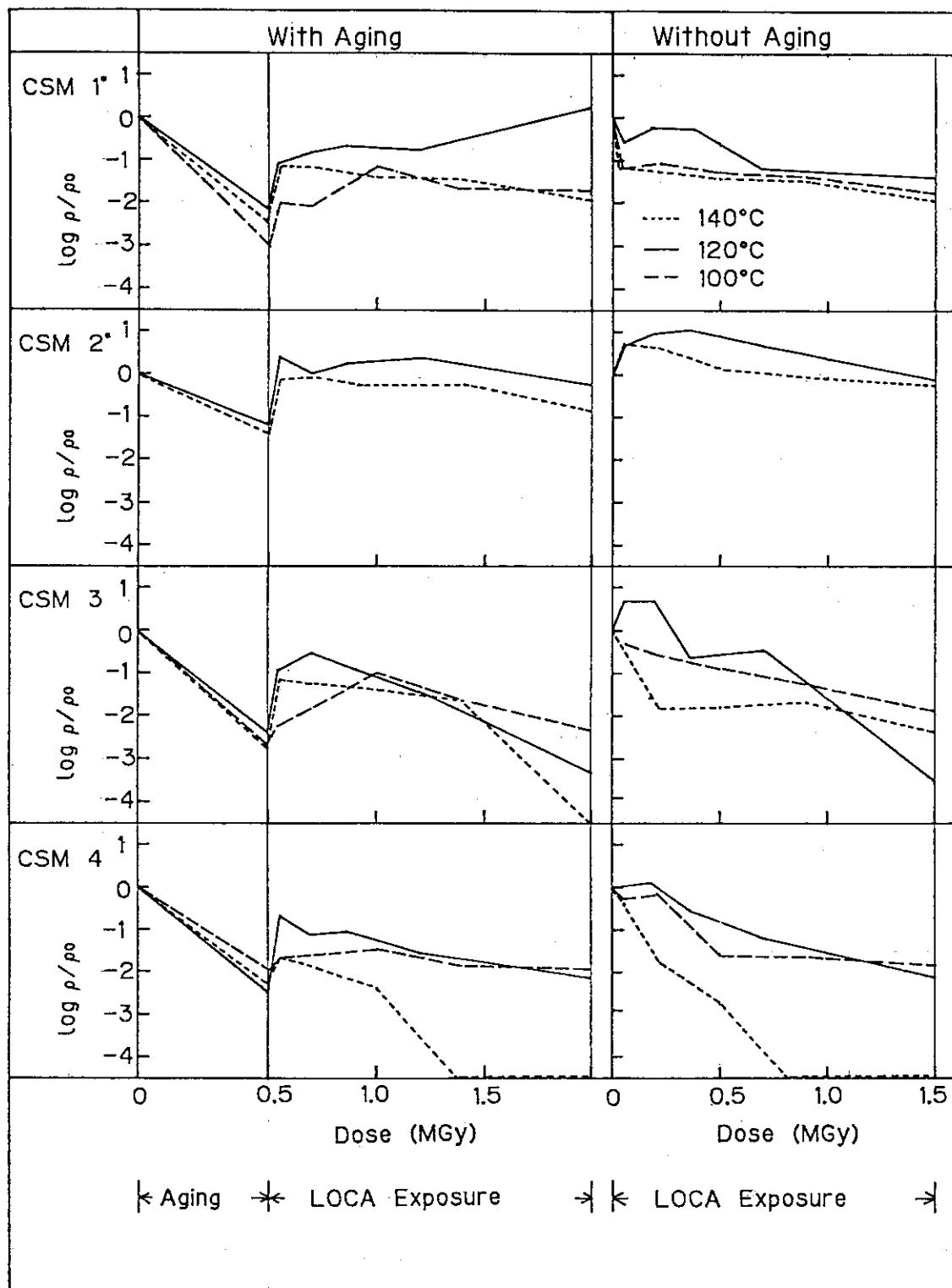


Fig. 26 Effect of LOCA temperature on relative volume resistivity of CSM under saturated steam environments.

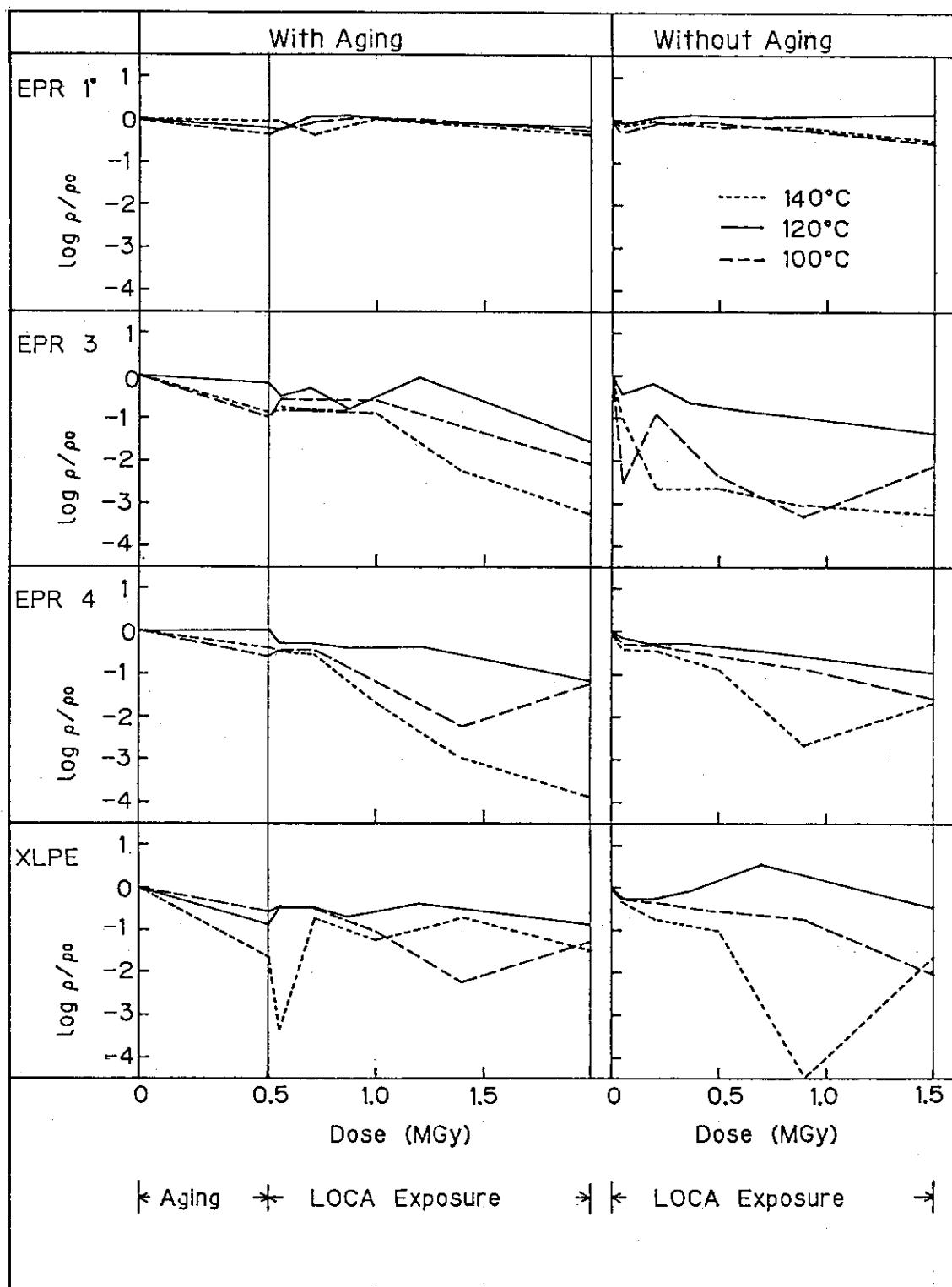


Fig. 27 Effect of LOCA temperature on relative volume resistivity of EPR and XLPE under saturated steam environments.

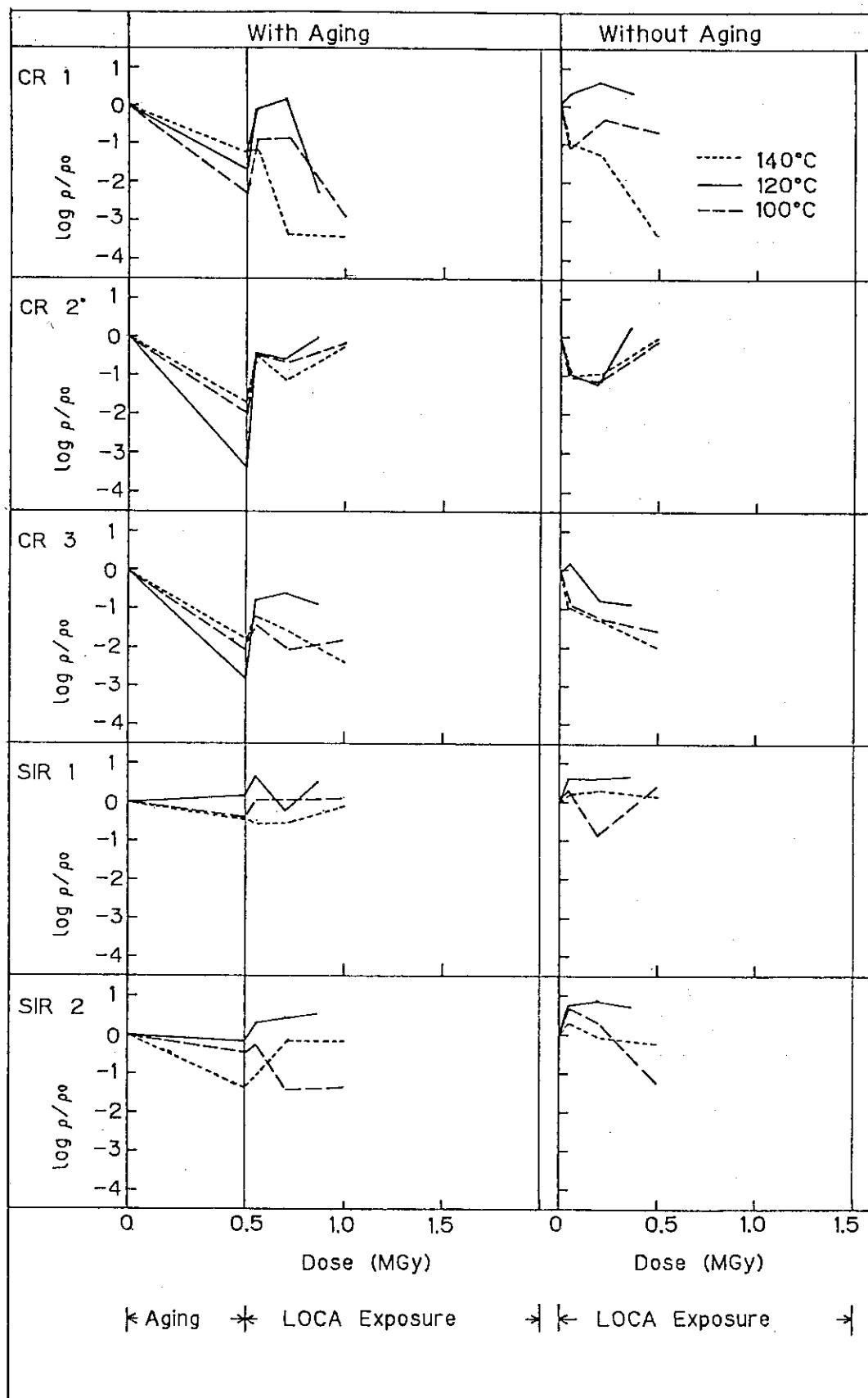


Fig. 28 Effect of LOCA temperature on relative volume resistivity of CR and SIR under saturated steam environments.

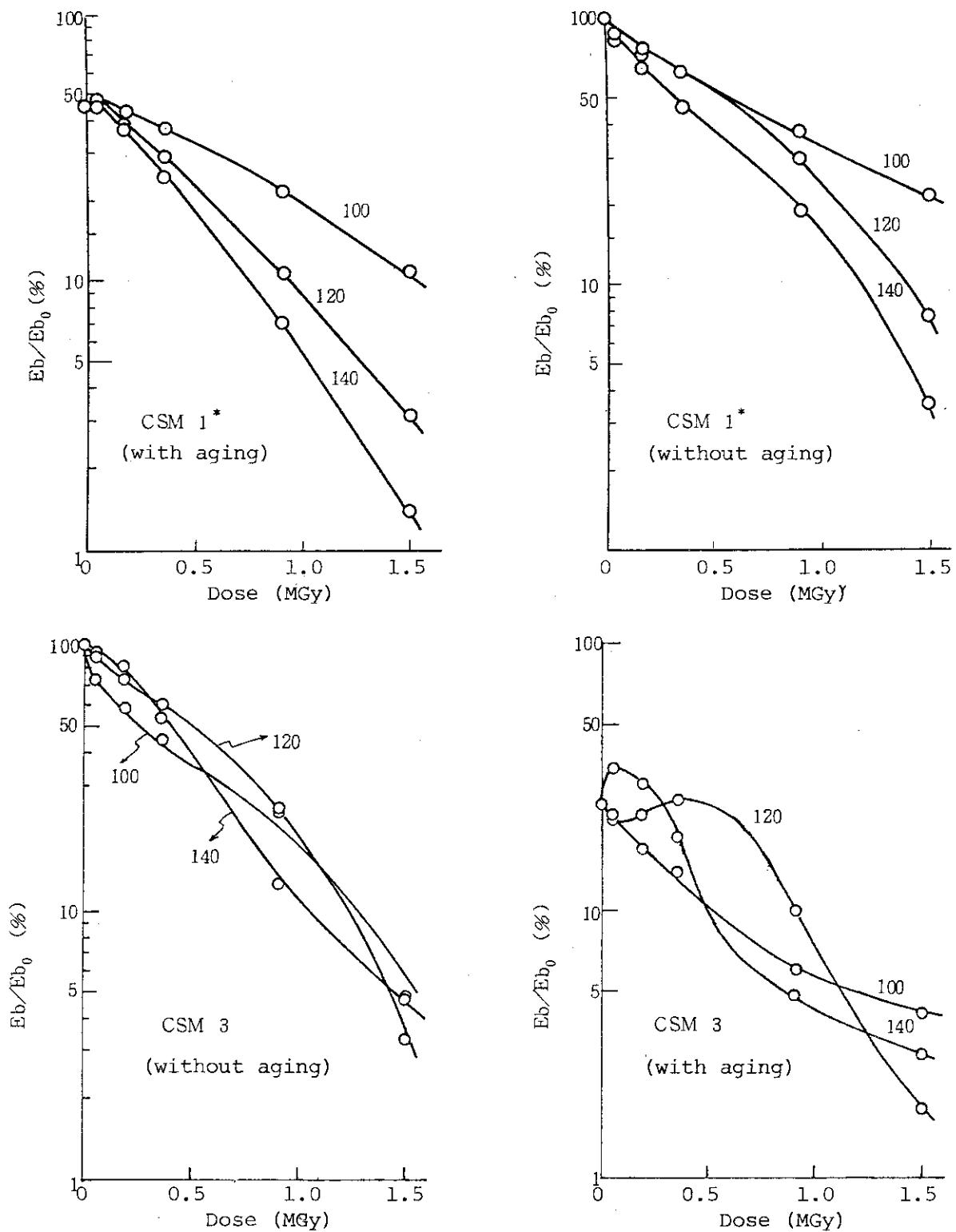


Fig. 29 Change of elongation in simulated LOCA environments containing air (Hypalon:CSM).

(Figures on every curves shows LOCA temperature in °C).

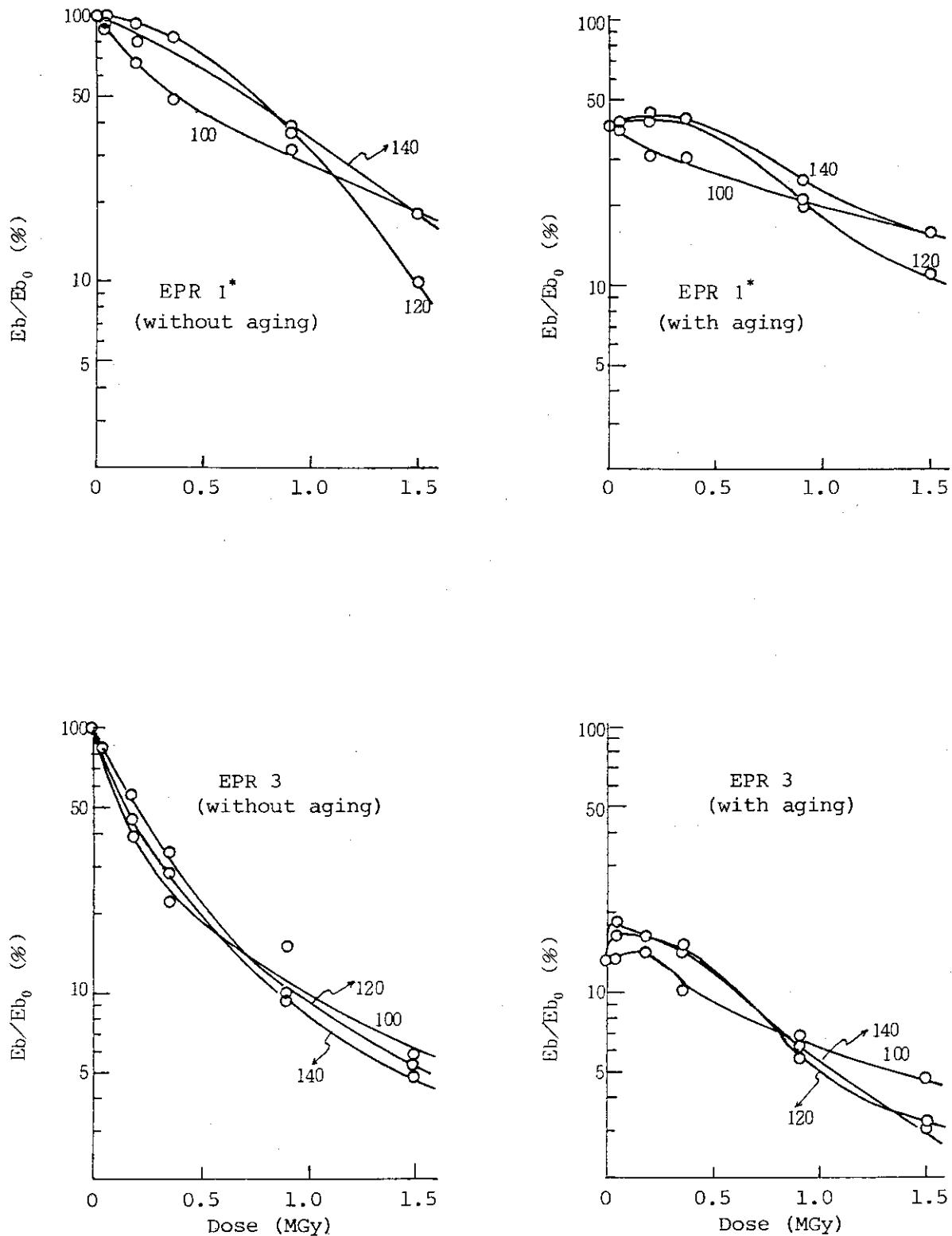


Fig. 30 Change of elongation in simulated LOCA environments containing air (Ethylene propylene rubber:EPR).
(Figures on every curves shows LOCA temperature in °C).

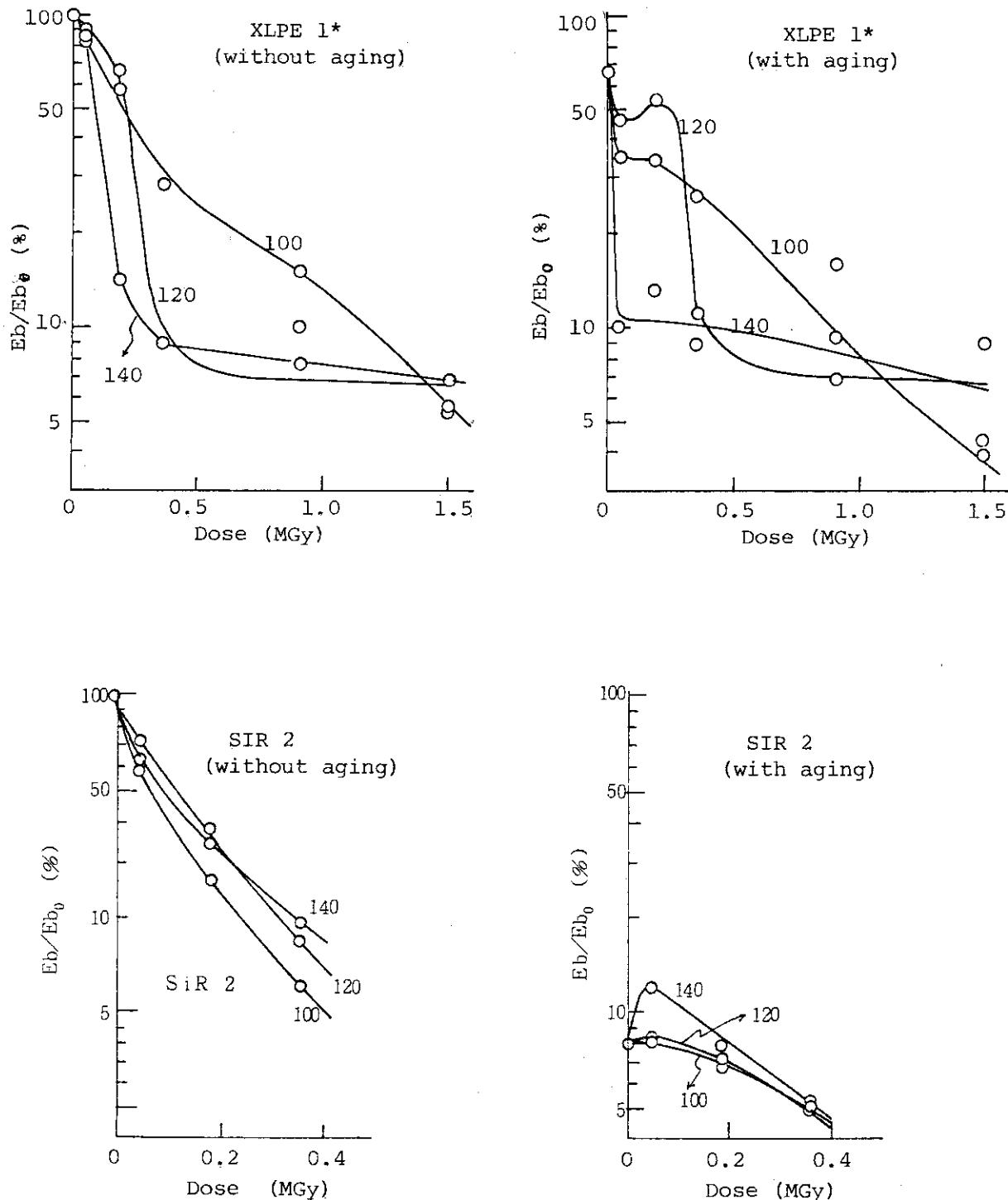


Fig. 31 Change of elongation in simulated LOCA environments containing air (Cross-linked polyethylene:XLPE and Silicone rubber:SIR).

(Figures on every curves shows LOCA temperature in °C).

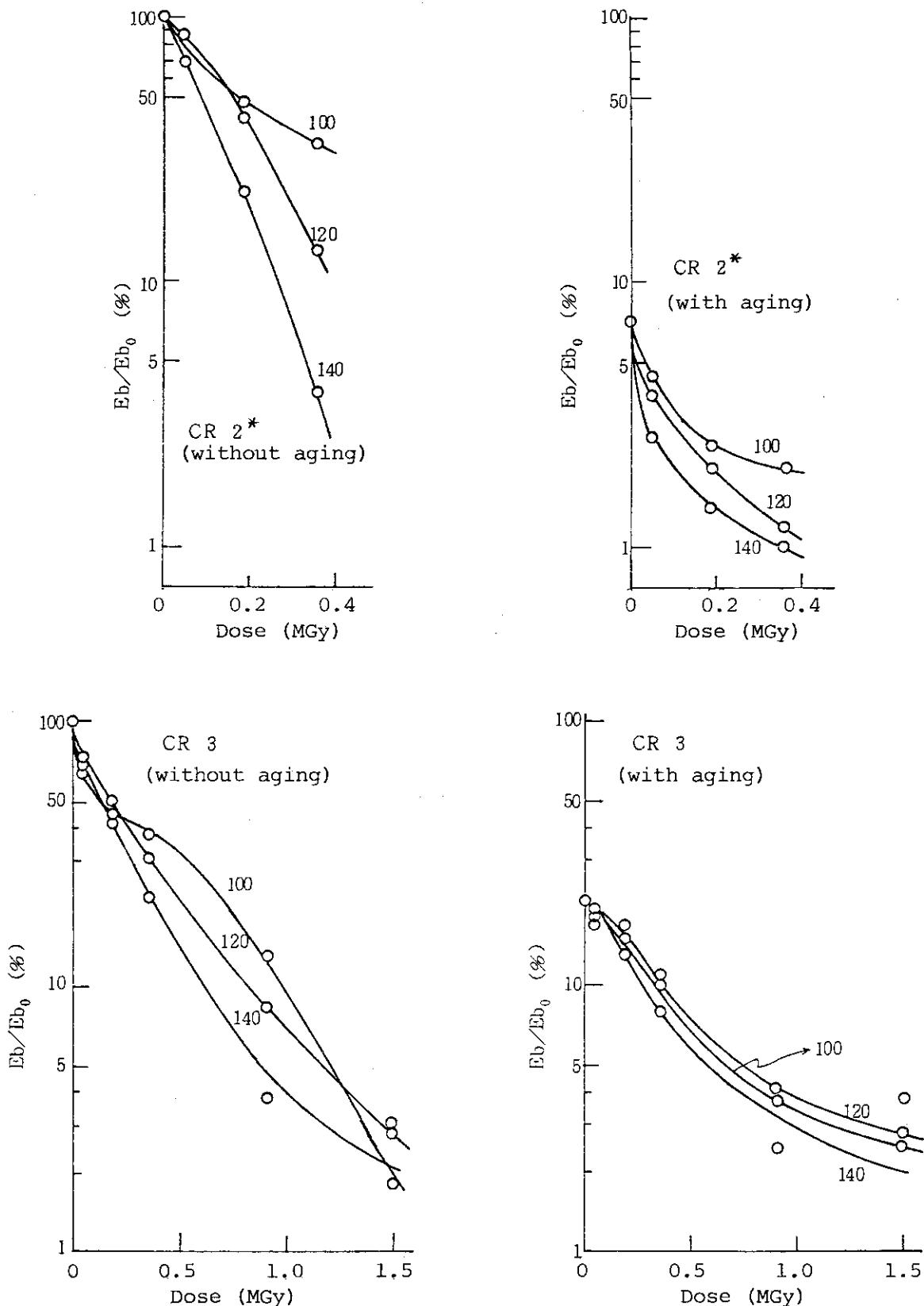


Fig. 32 Change of elongation in simulated LOCA environments containing air (Chloroprene:CR).
 (Figures on every curves shows LOCA temperature in °C).

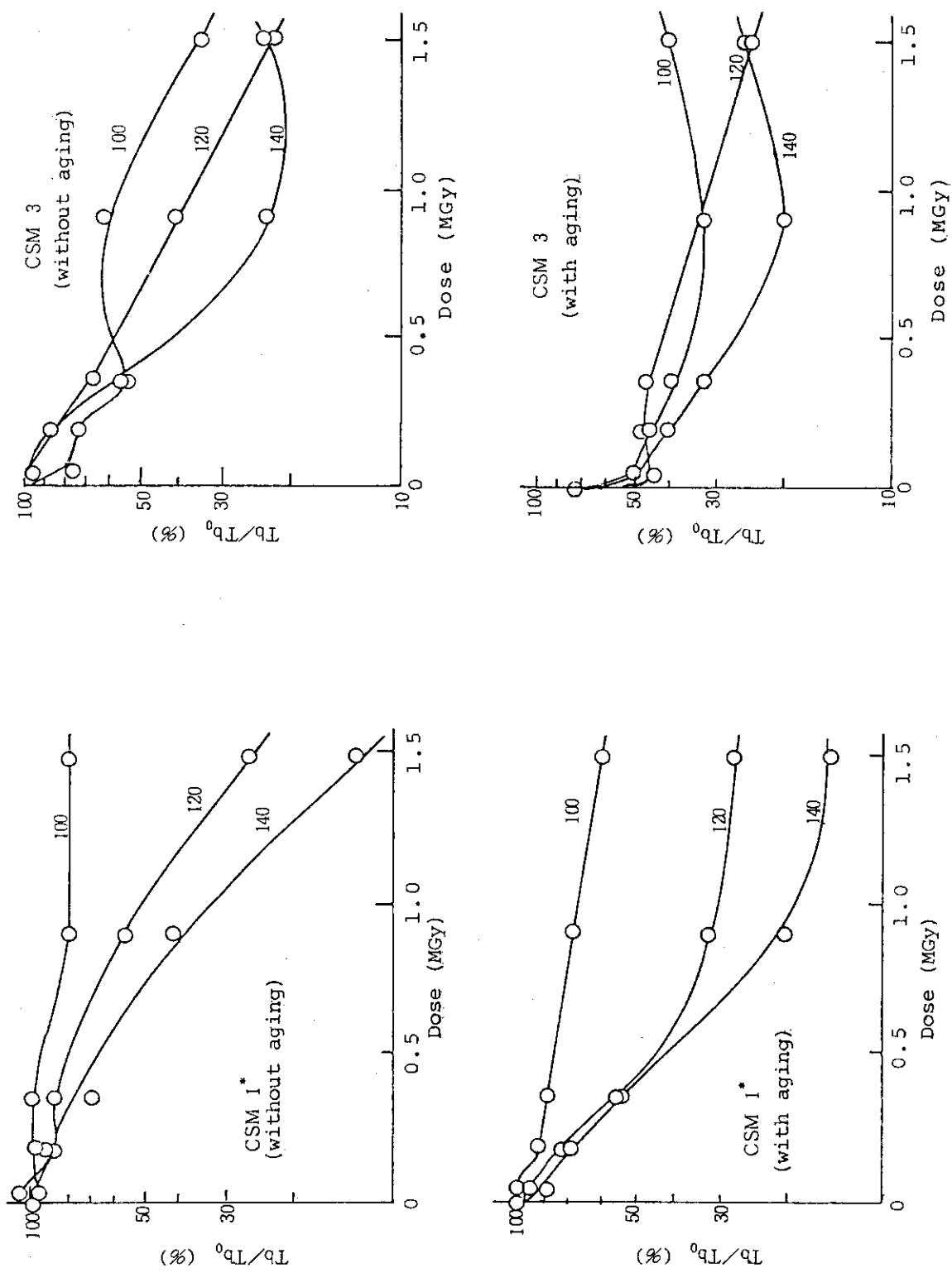


Fig. 33 Change of tensile strength in simulated LOCA environments containing air (CSM).
(Figures on every curves show LOCA temperature in °C).

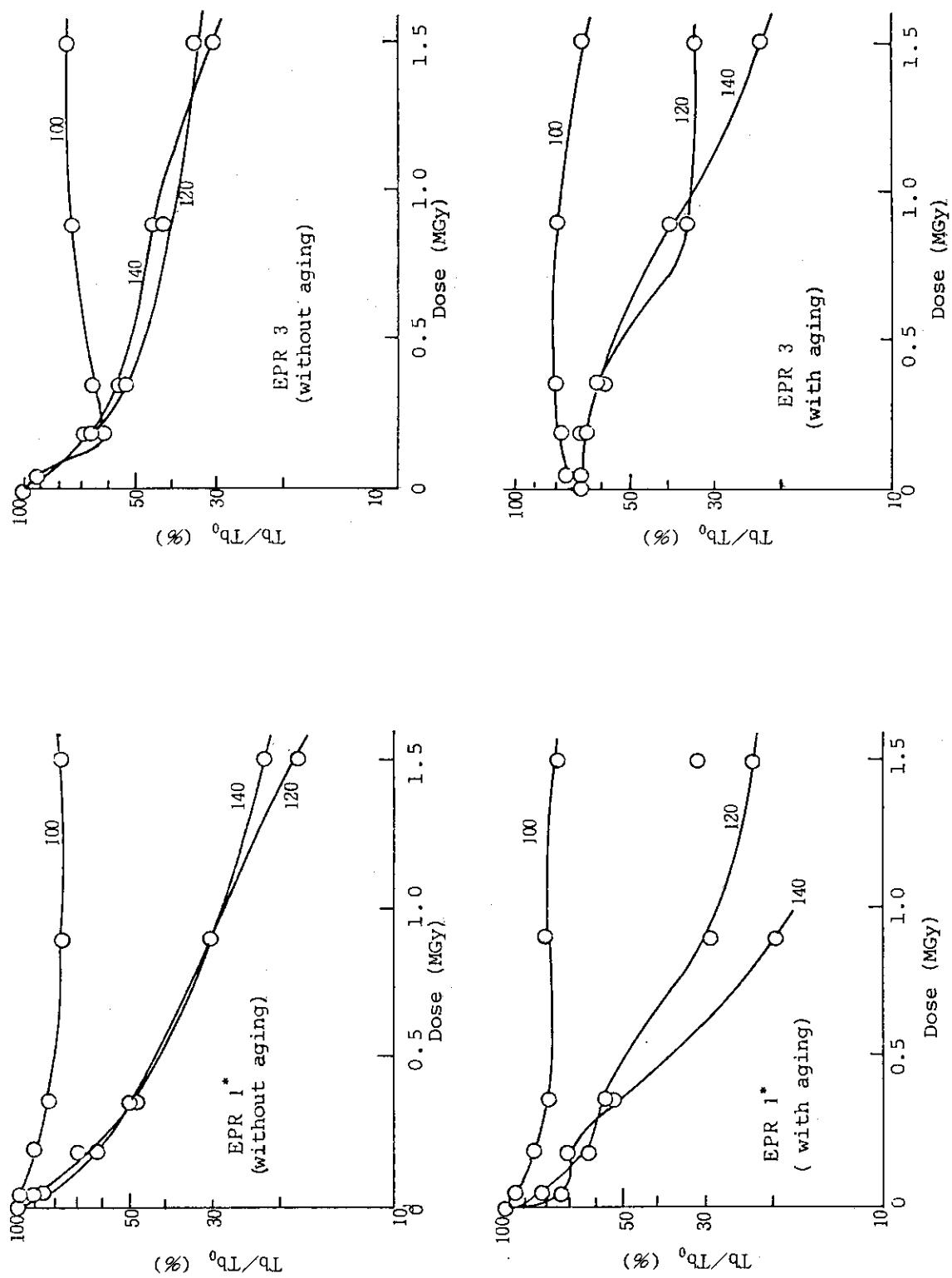


Fig. 34 Change of tensile strength in simulated LOCA environments containing air (EPR).
(Figures on every curves show LOCA temperature in °C).

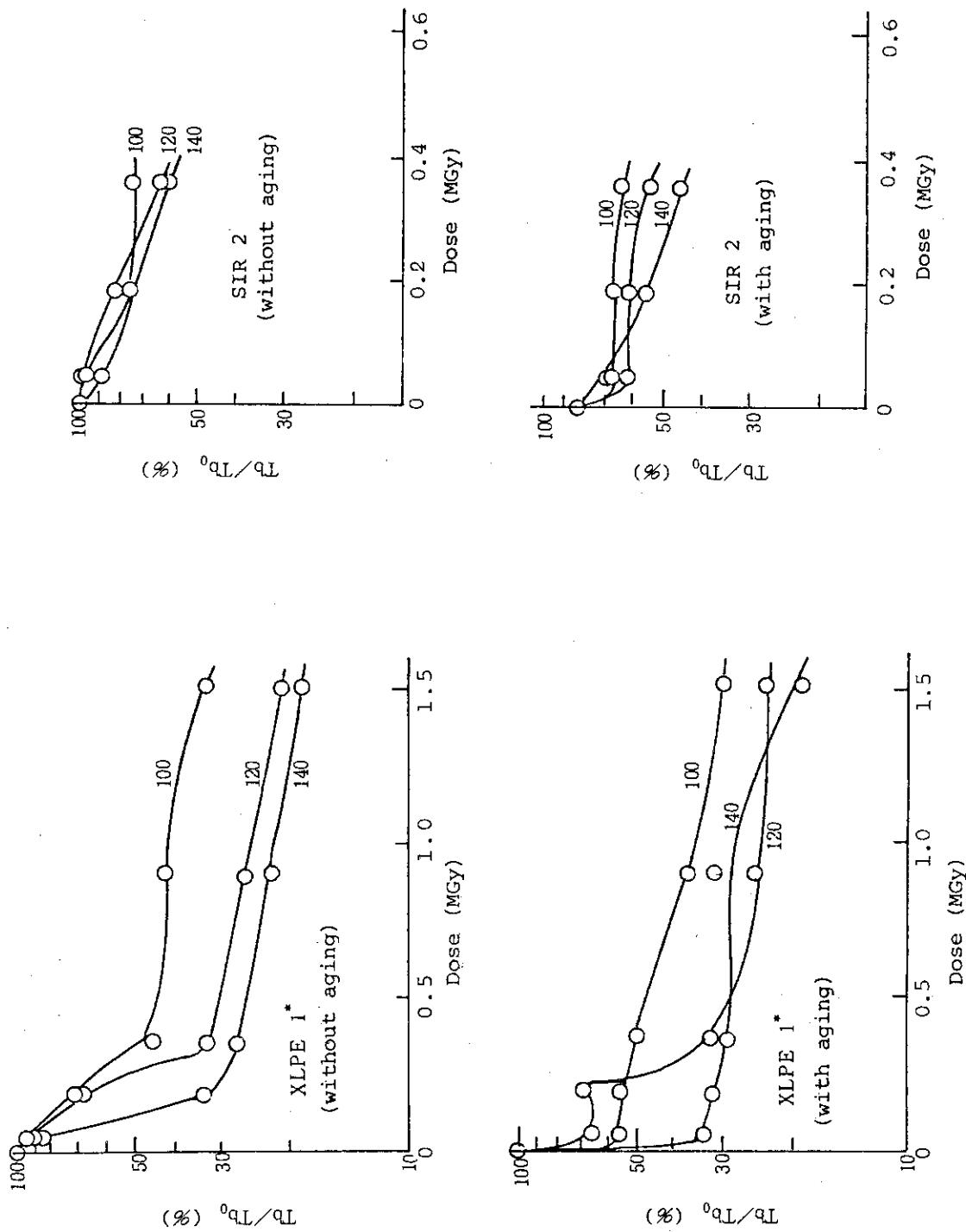


Fig. 35 Change of tensile strength in simulated LOCA environments containing air (XLPE and SIR).
(Figures on every curves show LOCA temperature in °C).

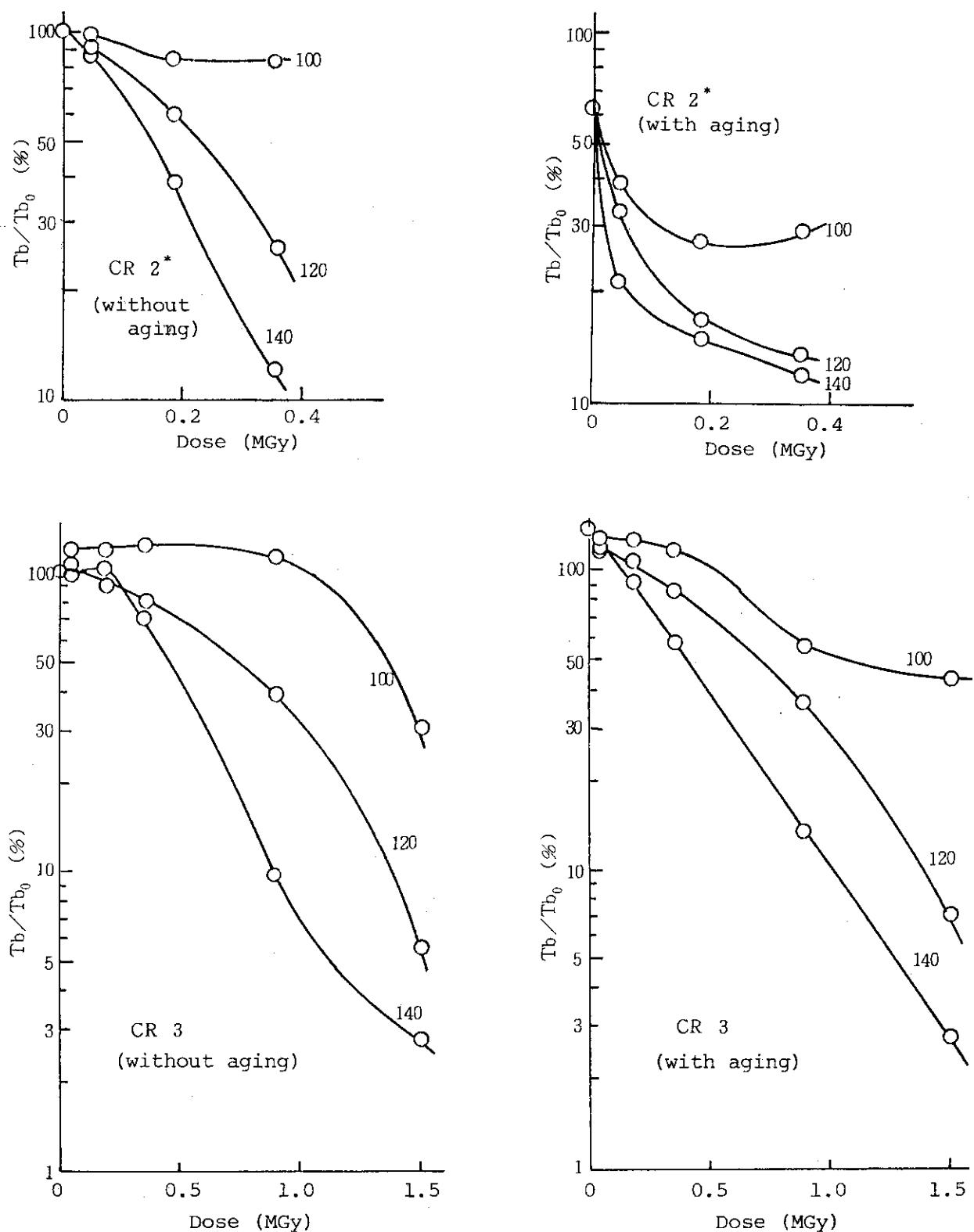


Fig. 36 Change of tensile strength in simulated LOCA environments containing air (Chloroprene:CR).
 (Figures on every curves shows LOCA temperature in °C).

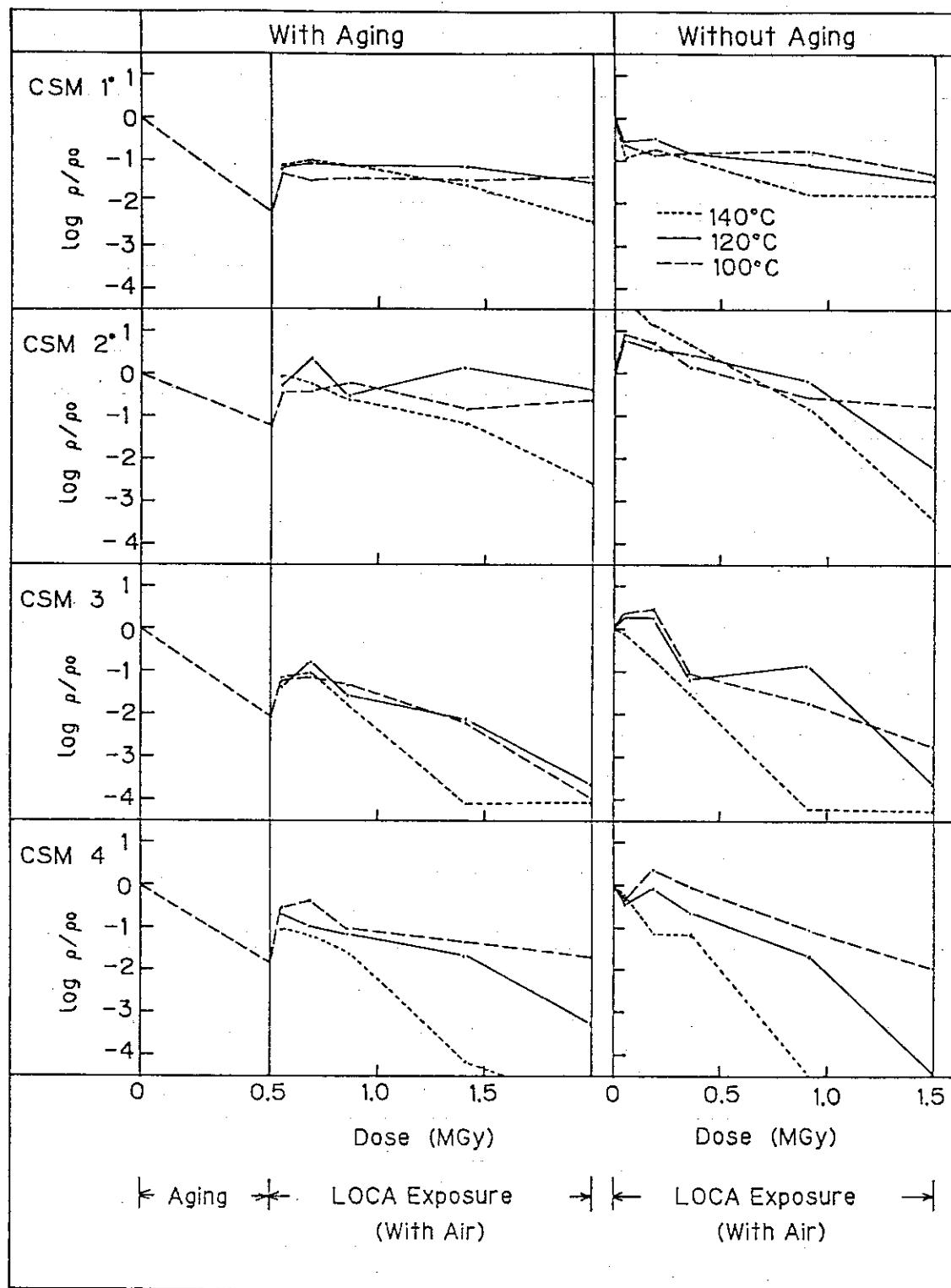


Fig. 37 Effect of LOCA temperature on relative volume resistivity of CSM under saturated steam environments with air.

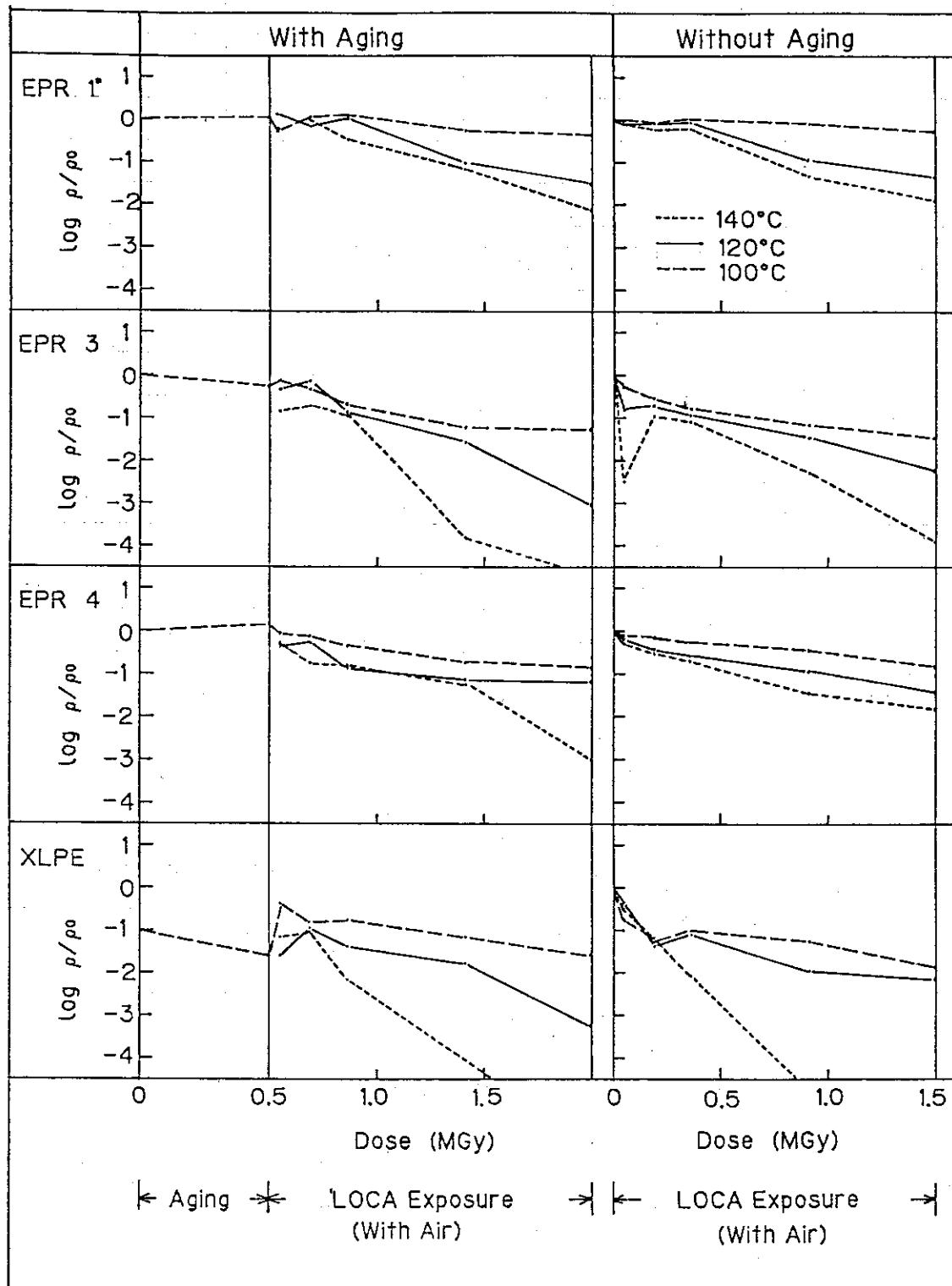


Fig. 38 Effect of LOCA temperature on relative volume resistivity of EPR and XLPE under saturated steam environments with air.

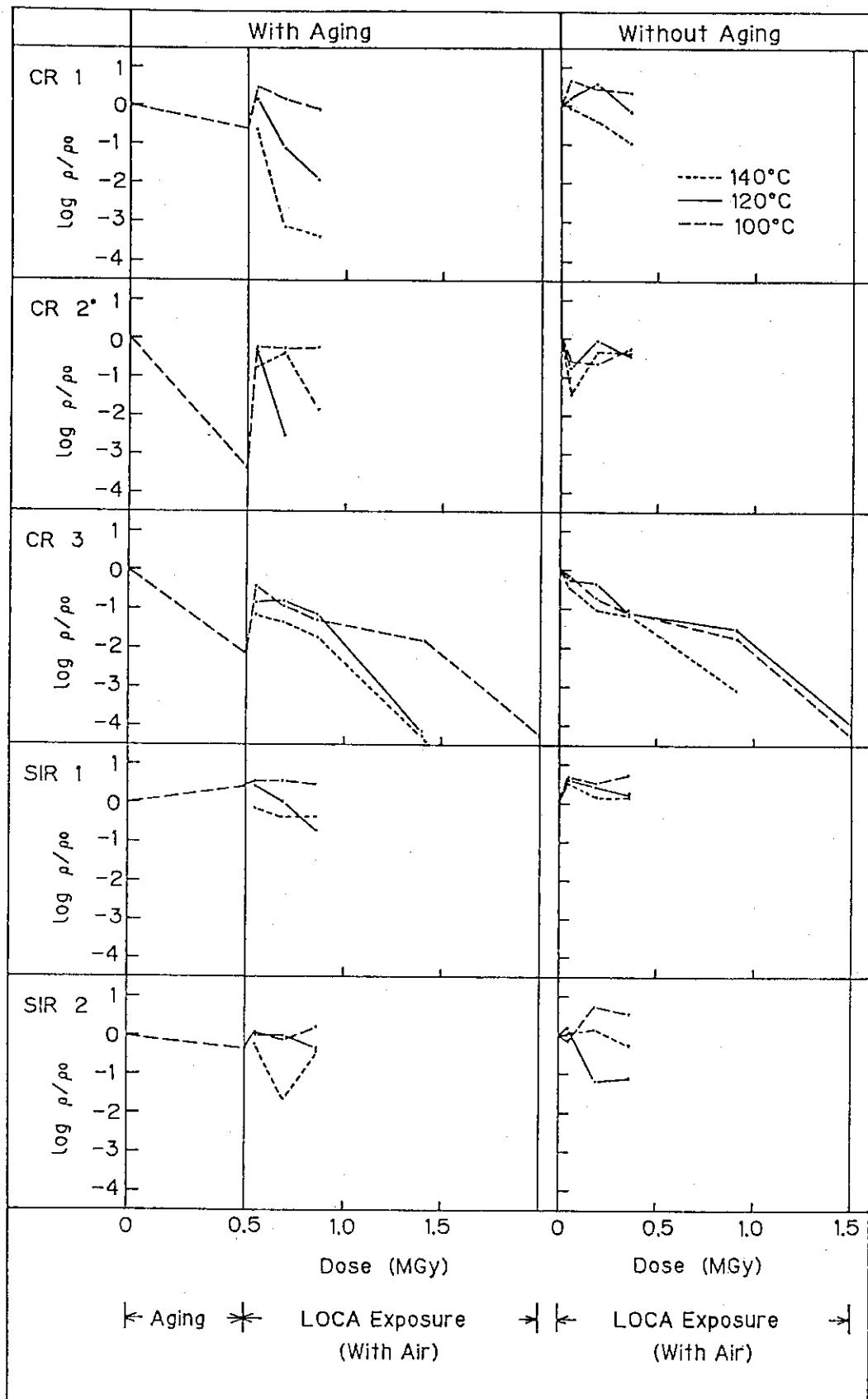


Fig. 39 Effect of LOCA temperature on relative volume resistivity of CR and SIR under saturated steam environments with air.

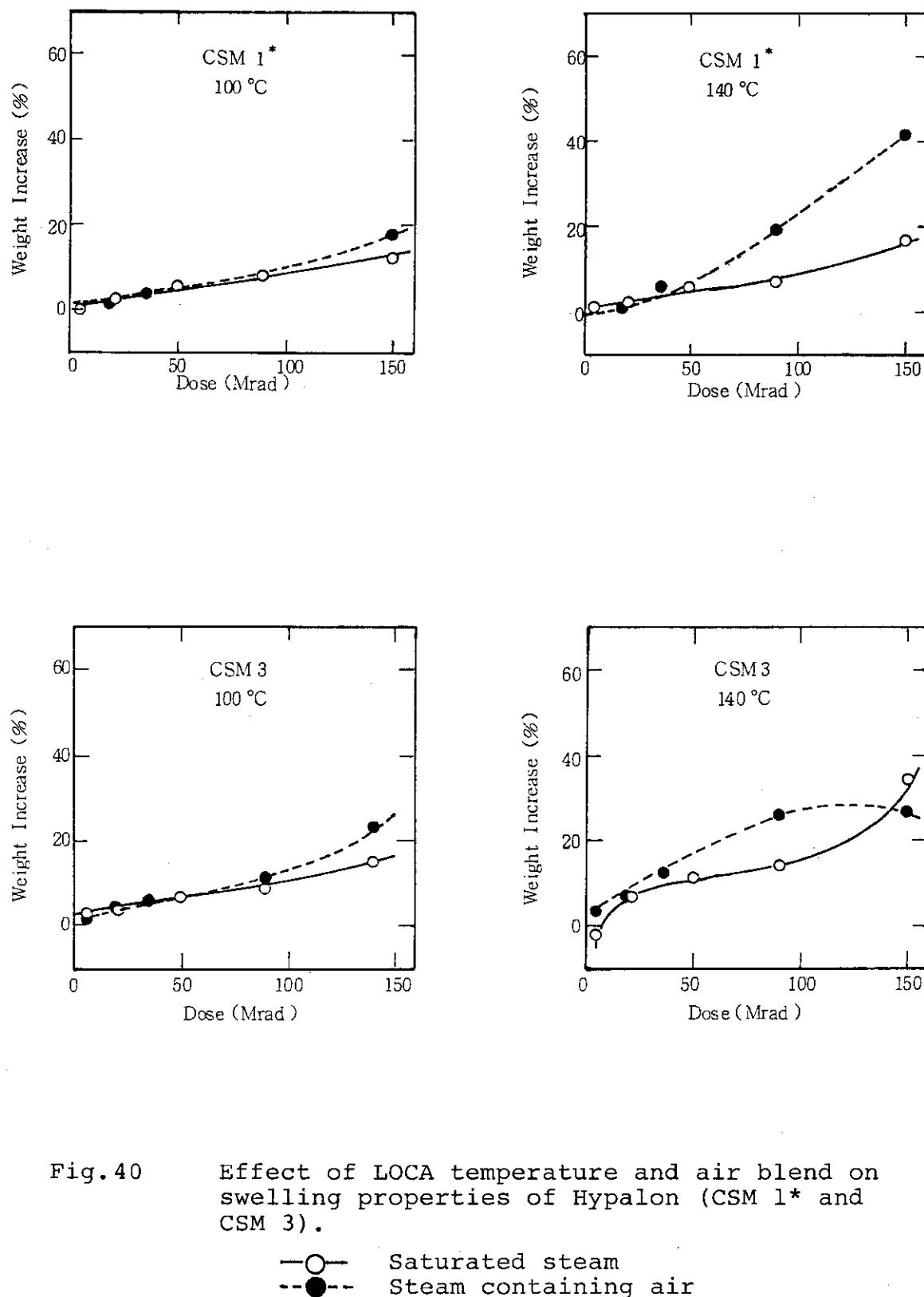


Fig. 40 Effect of LOCA temperature and air blend on swelling properties of Hypalon (CSM 1* and CSM 3).

—○— Saturated steam
 -●--- Steam containing air

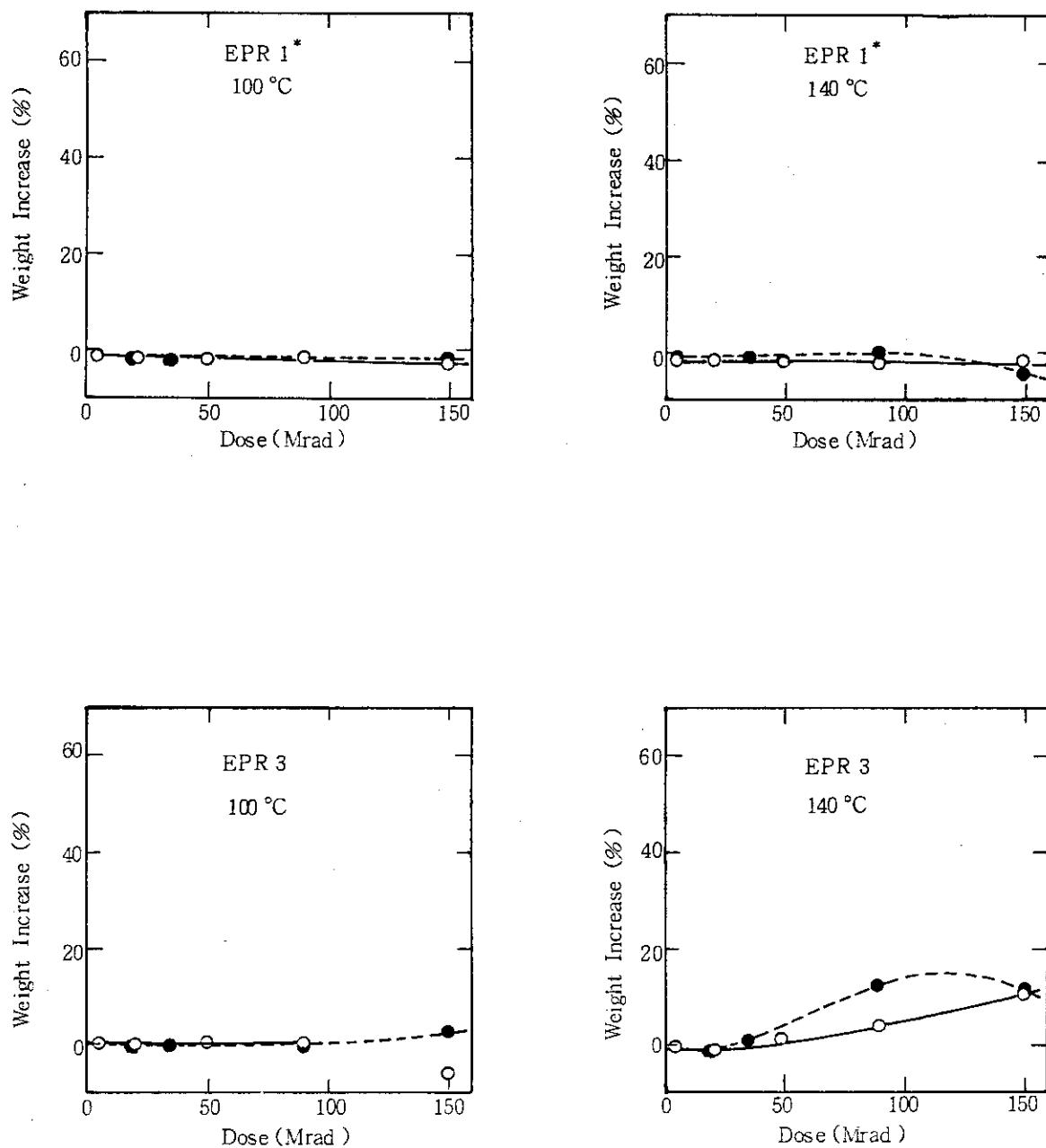


Fig. 41 Effect of LOCA temperature and air blend on swelling properties of EPR (EPR 1* and EPR 3).
(Notations are the same as in Fig. 40)

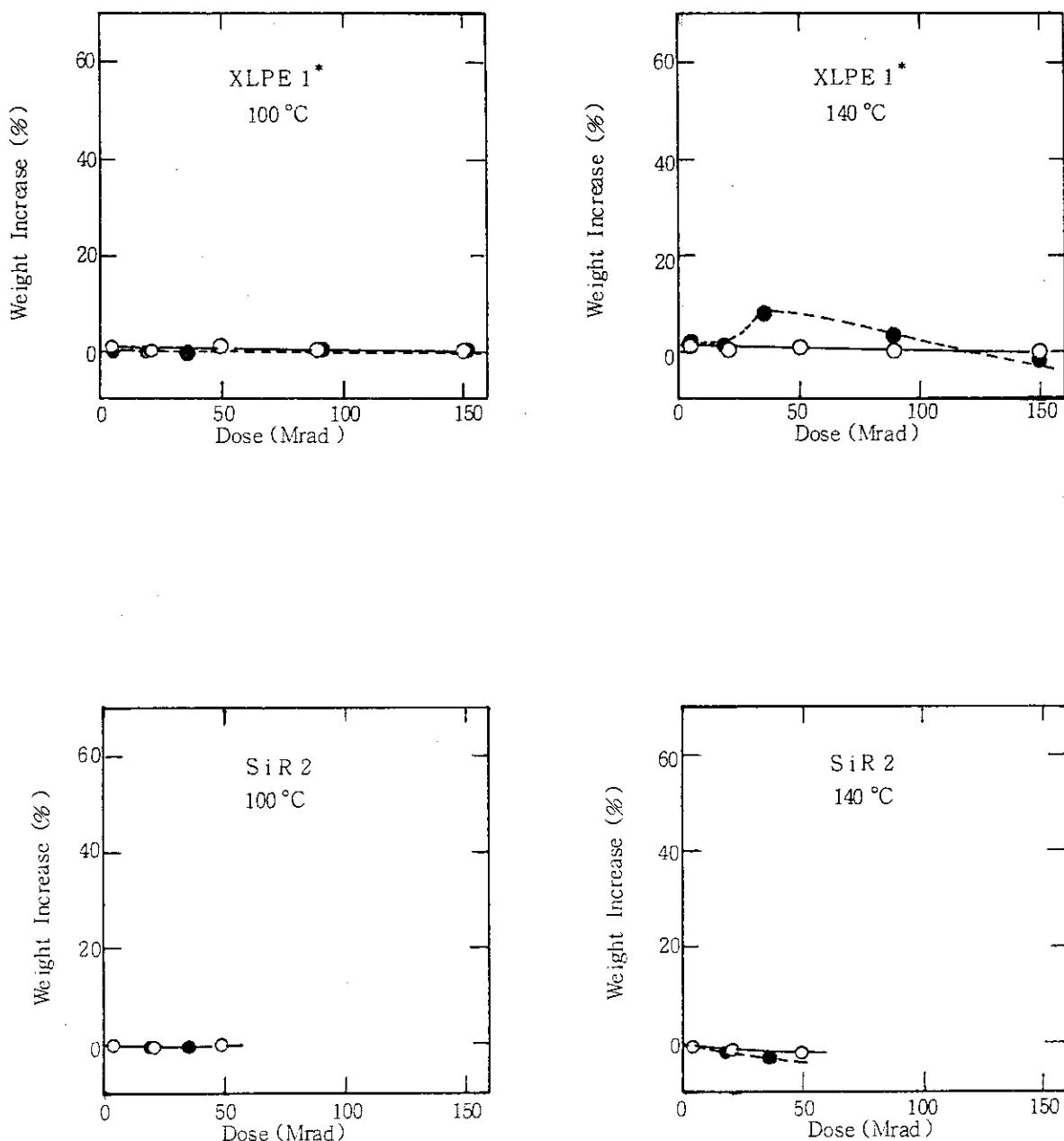


Fig. 42 Effect of LOCA temperature and air blen on swelling properties of Cross-linked polyethylene (XLPE) and Silicone rubber (SIR).

(Notations are the same as in Fig. 40)

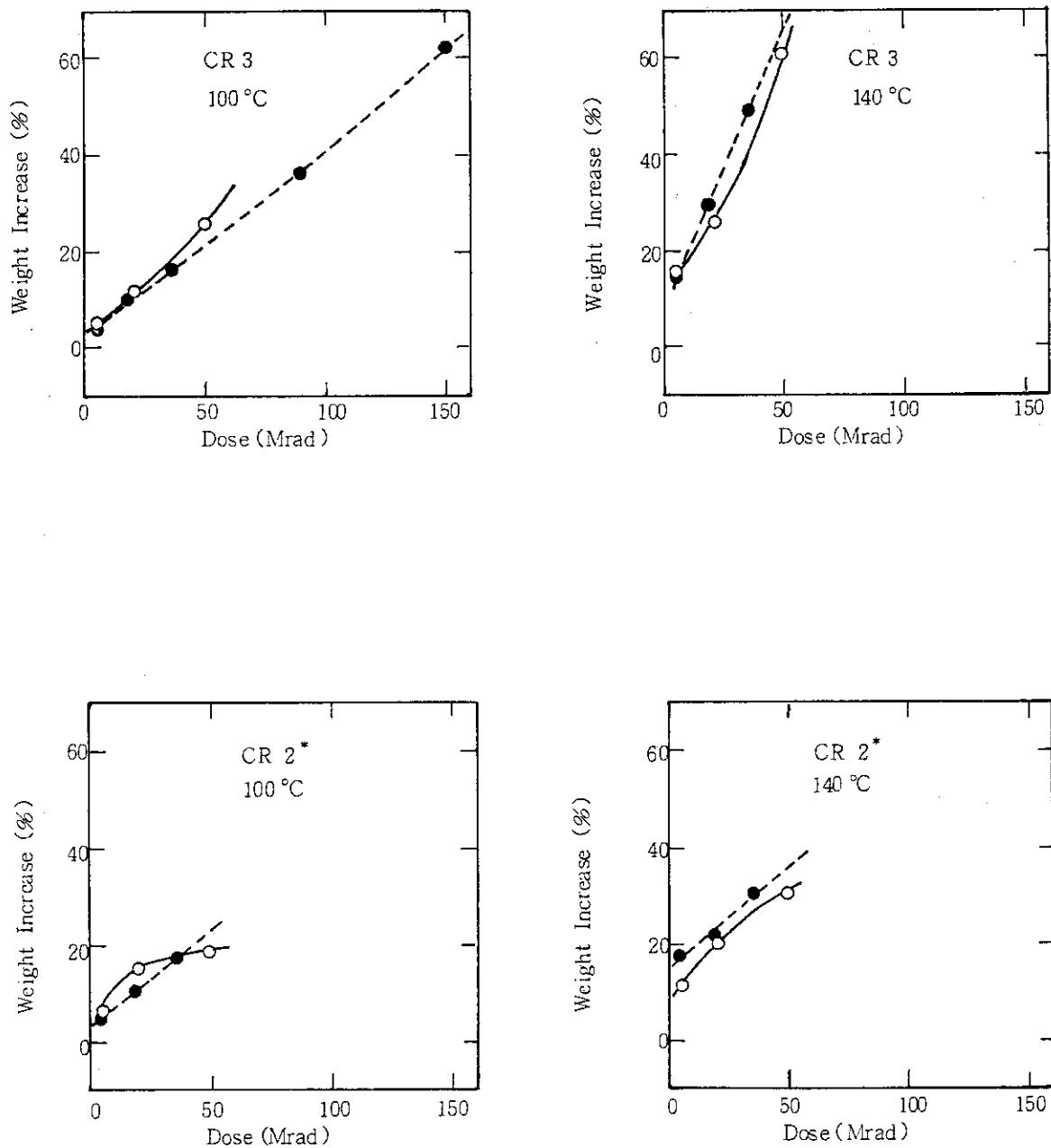


Fig. 43 Effect of LOCA temperature and air blend on swelling properties of Chloroprene (CR 3 and CR 2*).

(Notations are the same as in Fig. 40)

4.1.3 空気存在の影響¹

(1) 実験方法

実験の目的、実験条件、環境暴露方法、試料ならびに物性測定方法などの詳細ならびに実験番号等は3.2に示したが、環境温度を120°C一定とし、このときの飽和水蒸気圧に対してそれぞれ0, 0.05, 0.13および0.25MPaの空気を添加した。事前劣化ならびにL O C A模擬環境暴露時の線量率は8.3~8.6kGy/hである。

(2) 結果及び考察

1) 機械的性質

Fig.44にモデル配合ならびに実用配合のハイパロンの強度と伸びの保持率を示した。図の結果は事前劣化なしにL O C A模擬環境に暴露した場合のデータで、事前劣化がある場合は強度はほぼ同じような傾向を示す。伸びは劣化の傾向は同じであるが事前劣化により低下した分だけ低い値を示した。モデル配合の試料も実用配合の試料も、環境の空気量の増加とともに強度、伸びの低下が大きくなるが、劣化曲線の形は空気を含まない場合と空気を含む場合で異なる。前者ではほぼ直線的ないしは下に凸の劣化曲線となるが、後者は時間とともに劣化が促進され、上に凸の曲線になる。このことは空気が存在する系では放射線酸化により酸化防止剤などが消費されより劣化が促進されるためと考えられる。空気量の影響はモデル配合試料では強度に、実用配合試料では伸びにより明瞭に認められた。

Fig.45にモデル配合ならびに実用配合のE P Rの結果を示す。E P Rは配合により若干空気の影響が異なっており、同じ実用配合であっても空気の影響がやや小さいもの(EPR4)もみられたが、いずれの試料についても空気の影響は強度に強く現れることがわかった。特にモデル配合試料では空気の影響が著しく、空気量が0.25MPaになると途中から測定出来なくなるなど、E P Rの機械的性質に及ぼす空気の影響は極めて大きい。

Fig.46に架橋ポリエチレンの結果を示す。架橋ポリエチレンは強度にも伸びにも空気量の影響がみられるが、特に伸びは著しく空気量の影響を受ける。空気が存在していない系では強度も伸びも線量とともにほぼ単調な減少を示すが、系内に空気が存在するとある線量で急激な減少を示すようになる。また、急激な減少を示す線量は空気量が増加するにしたがい低線量側へ移動する傾向がある。この現象は前節の環境温度の影響を検討した際、温度を上げると急激な減少を示す線量が低線量側に移動する現象と同じで、いずれも酸化劣化と密接な関連を持つと考えられる。最も空気添加量が多い場合は酸化劣化により低分子化した部分がスプレイにより溶解し、L O C A模擬環境暴露の途中で機械的性質の測定が出来なくなるなど劣化が著しいことがわかった。

Fig.47にクロロブレンの代表例を示す。クロロブレンも環境中の空気の影響を

強く受け、ここに示した以外の試料では環境暴露時間が約1/3をこえると測定出来なくなつた。また、クロロブレンは事前劣化の有無により空気の影響の程度が異なり、一般に事前劣化なしのものの方が空気の影響を受けやすい。このことはクロロブレンでは事前劣化の熱および放射線照射により著しく架橋が進行し、酸素拡散が悪くなることに起因していることを示す。

Fig.48にシリコーンゴムの結果を示す。シリコーンゴムでは強度には添加空気の影響が若干見られ、空気量が多いとやや低下が大きくなる。一方、伸びについては空気が存在していない場合の低下が大きく、空気があると伸びの保持率が若干高くなる。シリコーンゴムはもともと酸化劣化に対して極めて安定な材料であり、伸びの低下は主として放射線架橋により起こると考えられるが、環境に空気が存在すると架橋を阻害するため、伸びの低下が抑えられるためであろう。

2) 電気的性質

蒸気環境における空気の存在は絶縁材料の機械的性質に著しい影響を与えることが明らかになったが、環境の空気は酸化劣化を促進するため、電気絶縁抵抗を低下させることも予想される。本項では絶縁抵抗に及ぼす添加空気量の影響について述べる。各絶縁材料のL O C A模擬環境暴露中の絶縁抵抗の経時変化を測定した結果の中から代表的な結果について以下に示す。

Fig.49に事前劣化を与えずにL O C A模擬環境に暴露した試料の環境暴露の途中（約1/4を経過した時点：ステップC）の段階ならびに環境暴露の最終段階ステップEにおける体積固有抵抗の初期値に対する比の値の対数を示す。図中の試料名の後の（）内の数字は同一素材で配合の異なる試料の数を示しており、棒グラフの値はこれらの試料の平均値を示す。上記のステップCならびにステップEでの環境暴露時間ならびに線量はそれぞれ42時間、175～181時間並びに0.35～0.36, 1.50～1.51MGyである。また、図中の×印は材料が著しく劣化し、絶縁抵抗が測定できなかつたことを示す。

図から明らかなように、シリコーンゴムを除き、どの材料についても添加空気の影響がみられ、空気量が増加すると絶縁抵抗の低下が大きくなる。特に最終ステップでは空気量が多いと劣化が著しいため測定値が得られなかつたもの（E P R, X L P E）がみられる。また、シリコーンゴムやクロロブレンでは最終段階に至る前に機械的性質が著しく劣化してしまうため、絶縁抵抗測定ができなかつた。また、絶縁抵抗はL O C A模擬環境暴露時間が長くなるほど低下しており、明らかに酸化劣化に起因していることを示す。これらの材料のうち、シリコーンゴムはL O C A模擬環境暴露による絶縁低下を示さず酸化劣化に対して安定であることを示している。

Fig.50に事前劣化した後L O C A模擬環境暴露した場合の絶縁抵抗の結果を示

す。いずれの試料も事前劣化のない場合と同じ傾向を示すが、空気の影響が認められる材料では、事前劣化により絶縁低下がさらに大きくなっていることがわかる。また、シリコーンゴムは事前劣化があると事前劣化なしの場合に比べ、測定値のばらつきが大きくなり、条件によって1桁以上の低下を示す場合が認められた。

3) 吸水膨潤

これまで述べたように、絶縁・被覆材料の中にはL O C A模擬環境に暴露すると著しく吸水し重量増加を示すものがある。吸水は材料中に生成した酸化生成物や極性物質によって起こると考えられるので、環境の空気が影響を与えることが予想できる。本節では吸水膨潤に与える添加空気量の影響について示す。

Table 6にL O C A模擬環境の最終ステップまで暴露を行った試料の環境暴露後2日目の重量変化を示す。クロロブレンの一部ならびにシリコーンゴムは劣化が著しいため最終ステップに至る前に測定が出来なくなった。表中の数値で負の値は、L O C A模擬環境暴露により重量が減少したことを示す。表から、E P Rの多くは、環境の空気量が増すと重量減少を示すが、それ以外の材料では環境の空気が増すと重量増加、即ち吸水が大きくなっている。

Fig.51に事前劣化しないでL O C A模擬環境に暴露した場合の各材料の重量変化を示す。図から、ハイパロンは環境中の空気量が増加するにつれて重量が増加することがわかる。特にモデル配合試料でこの傾向が顕著である。これに対し、E P Rのうち2種類と架橋ポリエチレンは空気量の増加とともに著しく重量が減少する。このことは蒸気環境中の空気により酸化劣化が進行し、試料の表面が軟化、溶失し重量を減少させるが、これが吸水を大巾に上まわったためと考えられる。EPR4では重量減少がみられないが、この試料は酸化防止剤等が大量に配合されているため、酸化劣化による溶失が少ないと推定される。クロロブレンは一部の試料しか測定できなかつたが、試験した材料中最も吸水し易く、環境の空気は吸水を助長していることがわかる。一方、シリコーンゴムは最終ステップのデータがないが、途中の段階でのデータを比較すると環境中の空気の影響は殆どなく、わずかに重量が減少する。

Fig.52に事前劣化を与えた後L O C A模擬環境に暴露した場合であるが、全体の傾向は事前劣化のない場合とほぼ同じであるが、E P Rの重量減少はさらに大きくなる。また、クロロブレンは事前劣化なしの方が重量増加が大きい。その理由は前項でも述べたように、事前劣化により架橋が進行し、吸水が物理的に制限されることによると考えられる。

上に述べたように、L O C A模擬環境に暴露すると絶縁材料のあるものは著しく吸水し、重量が増加するが、一部の試料では酸化劣化により溶失が起り、重

量が減少するものもある。しかし、上に示したデータはL O C A模擬環境暴露後2日目のデータであるが、後述するように環境暴露直後に測定すると、さらに大きな吸水を示し溶失による重量減少分を上まわる場合もある。このような大量の吸水は単に酸化生成物により化学的にとりこまれた水分だけでは到達できず、もっとマクロな吸水、例えば材料中のボイドなどに保持される水分もあることを示している。事実、L O C A模擬環境暴露後の重量の経時変化を観察すると、初期に著しく減少し平衡に達することが認められており、この平衡水分量は分子内に塩素を含む材料のハイパロンやクロロブレンで大きく、E P Rや架橋ポリエチレンでは小さい。また、環境条件で酸化劣化が起こると考えられる場合に大きいなどの事実から、酸化生成物による化学的にとりこまれた水と推定される。これに對して、初期に減少していく水分はボイド内などに物理的にとりこまれた水分であると考えられる。架橋ポリエチレンやE P Rはこの物理的にとりこまれた水分が多く、環境暴露後急激に重量が減少するため、2日目の測定では重量減少を示すが、環境暴露直後に測定するとハイパロン、クロロブレンなどと同様に重量増加を示す場合もある。また、吸水には配合依存性もみられ、一般には難燃化すると大きな吸水を示す。

(3) まとめ

シリコーンゴムは機械的にも電気的にも空気の影響を殆ど受けず酸化劣化に対して安定であるが、E P R、架橋ポリエチレン、ハイパロン、クロロブレンなどの絶縁・被覆材料の機械的ならびに電気的性質はL O C A模擬環境に空気が存在すると、著しい影響を受け空気量とともに劣化が大きくなる。また、ハイパロン、クロロブレンは環境の空気量が増加するにつれて吸水膨潤が増大する。E P Rは酸化劣化が著しく進み、軟化溶解が起り重量が減少する。以上、L O C A模擬環境に空気が存在すると劣化が著しく促進されることから、L O C A時に空気の存在が想定される場合には、品質認定試験の条件に空気の存在を考慮する必要がある。

関連文献

1. 日馬康雄、伊藤政幸、岡田漱平、八木敏明、吉川正人、吉田健三、"ケーブル用高分子材料のL O C A模擬環境下の劣化に及ぼす添加空気の圧力の影響、" 第17回絶縁材料シンポジウム予稿集 IV-3, pp137~140(1984.9)東京

Table 6 Effect of Amount of Air in Simulated LOCA Environments on the Weight Change of Insulating Materials.

Sample name	Without aging (Air in MPa)			With aging (Air in MPa)		
	0	0.05	0.13	0.25	0	0.05
CSM 1*	5.6	21.7	36.3	46.9	12.7	27.6
CSM 2*	2.4	24.8	23.6	48.5	7.9	28.0
CSM 3	16.8	20.6	24.2	25.5	25.5	24.6
CSM 4	27.7	44.5	48.8	51.1	36.8	43.4
EPR 1*	-1.6	-1.9	-29.5	-55.5	-2.7	-5.8
EPR 3	7.5	4.8	-28.1	-71.0	5.2	-0.6
EPR 4	4.9	6.4	3.0	4.8	4.3	3.6
XLPE 1*	0	-1.0	-27.7	-80.0	0	1.0
CR 1	-	-	-	-	-	-
CR 2*	-	92.5	76.6	120.9	-	73.3
CR 3	-	-	-	-	-	-
SIR 1	-	-	-	-	-	-
SIR 2	-	-	-	-	-	-

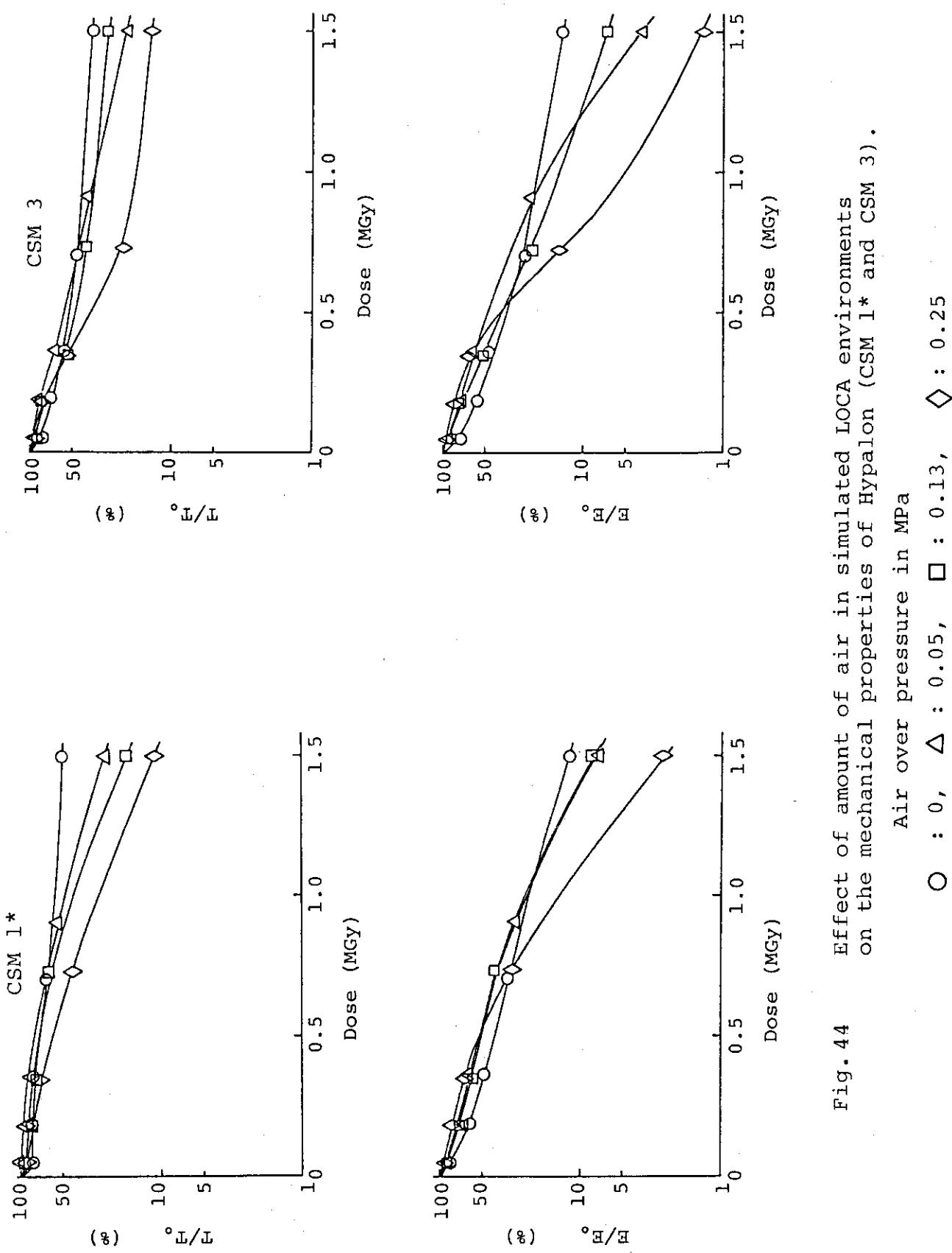


Fig. 44 Effect of amount of air in simulated LOCA environments on the mechanical properties of Hypalon (CSM 1* and CSM 3).

Air over pressure in MPa

○ : 0, Δ : 0.05, \square : 0.13, \diamond : 0.25

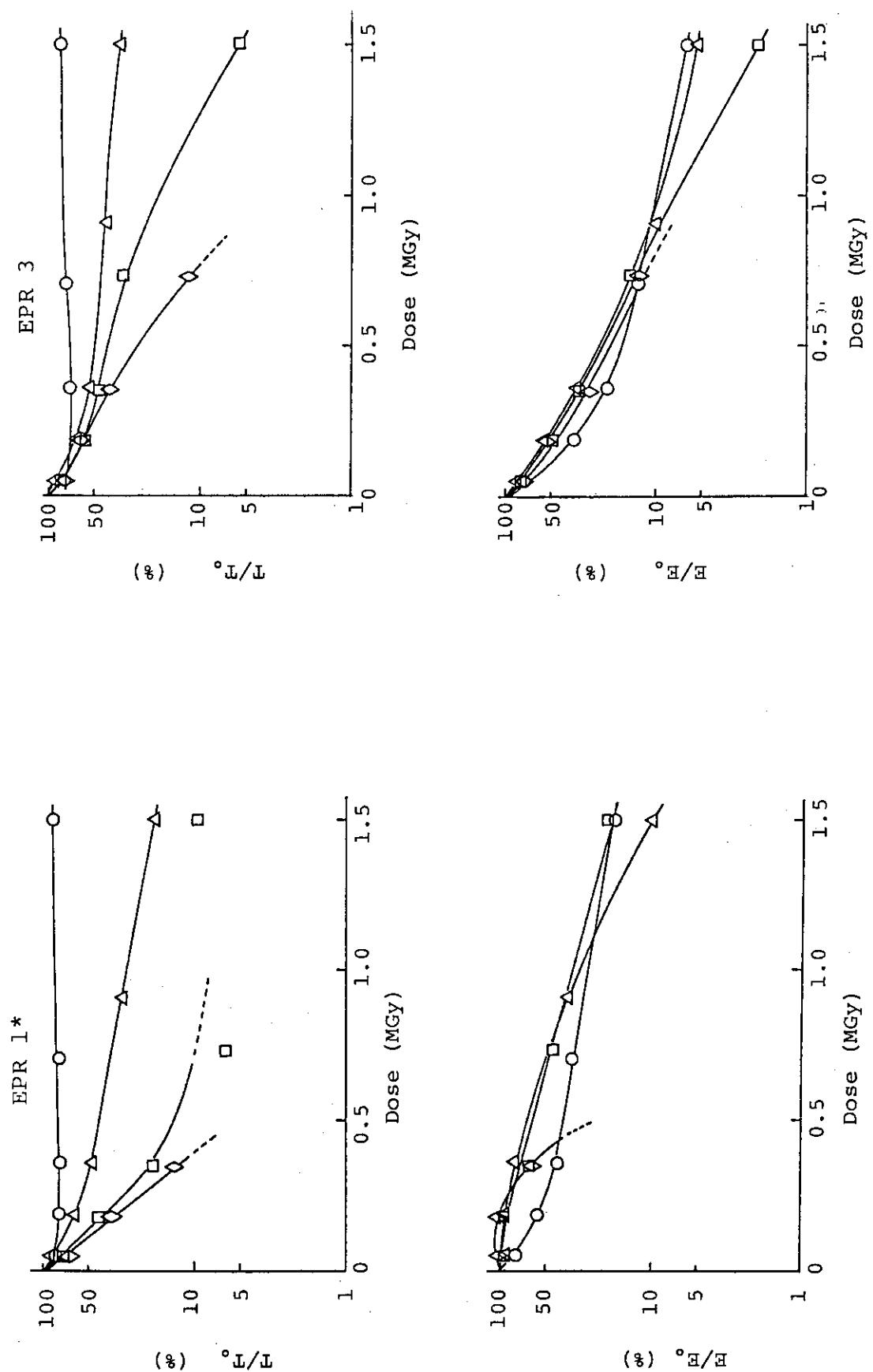


Fig. 45 Effect of amount of air in simulated LOCA environments on the mechanical properties of EPR (EPR 1* and EPR 3). Notations are the same as in Fig. 44

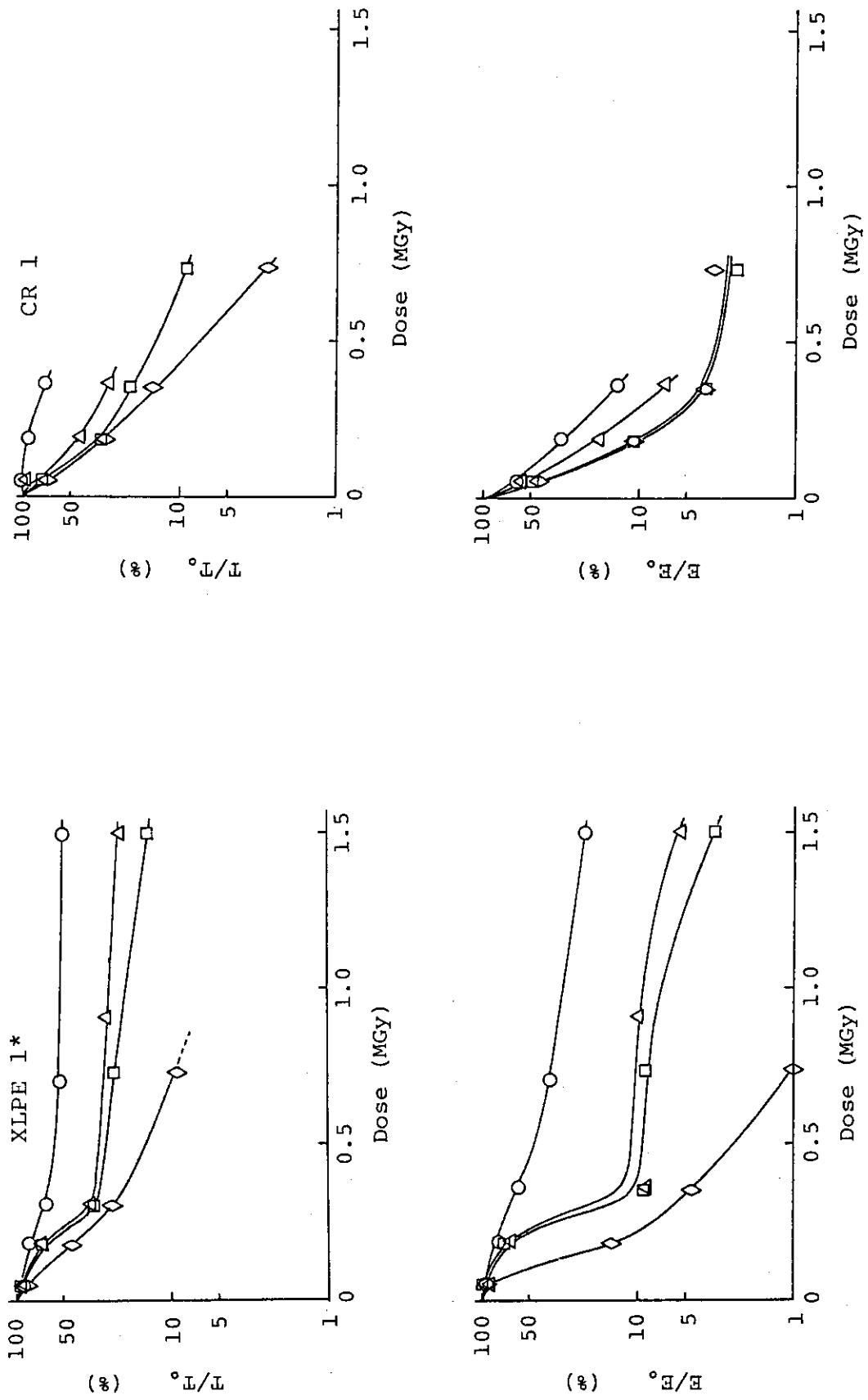


Fig. 46 Effect of amount of air in simulated LOCA environments on the mechanical properties of Cross-linked polyethylene (XLPE).

Notations are the same as in Fig. 44

Fig. 47 Effect of amount of air in simulated LOCA environments on the mechanical properties of Chloroprene (CR).

Notations are the same as in Fig. 44

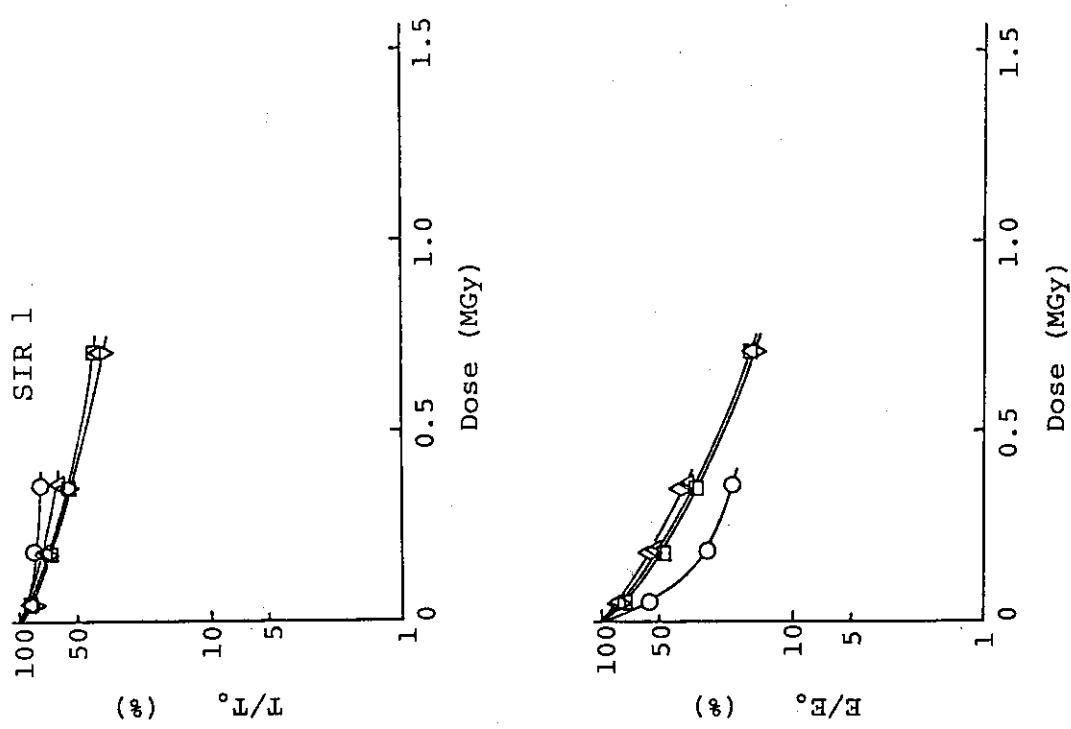


Fig. 48 Effect of amount of air in simulated LOCA environments on the mechanical properties of Silicone rubber (SIR).

Notations are the same as in Fig. 44

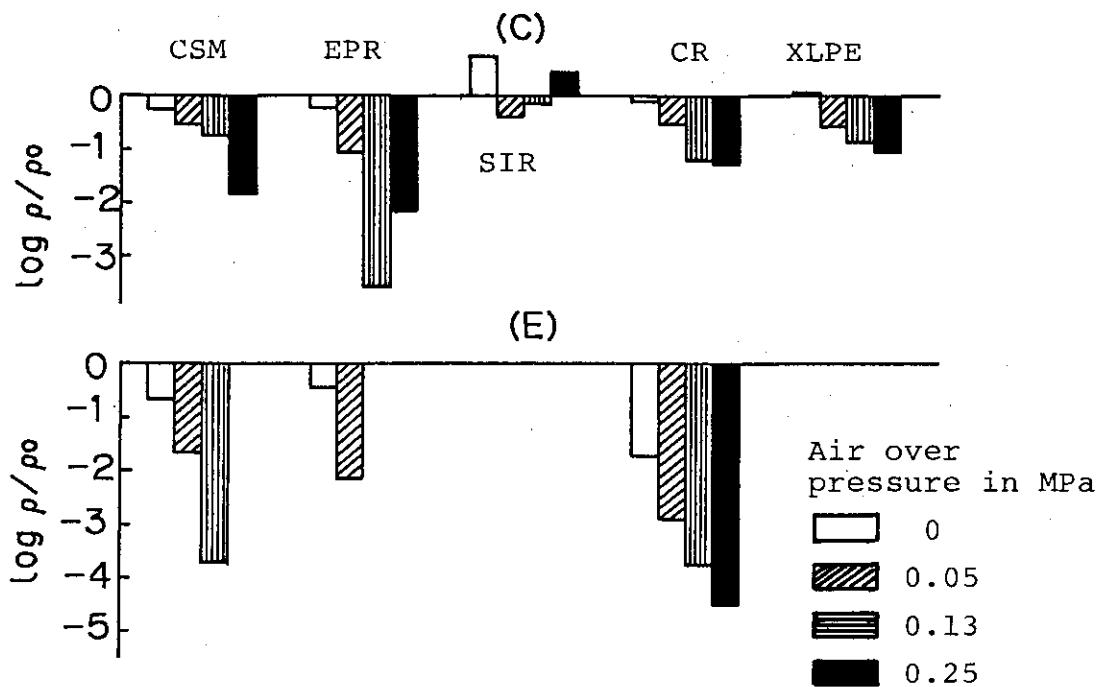


Fig. 49 Effect of amount of air in simulated LOCA environments on the volume resistivity of insulating materials (without aging).

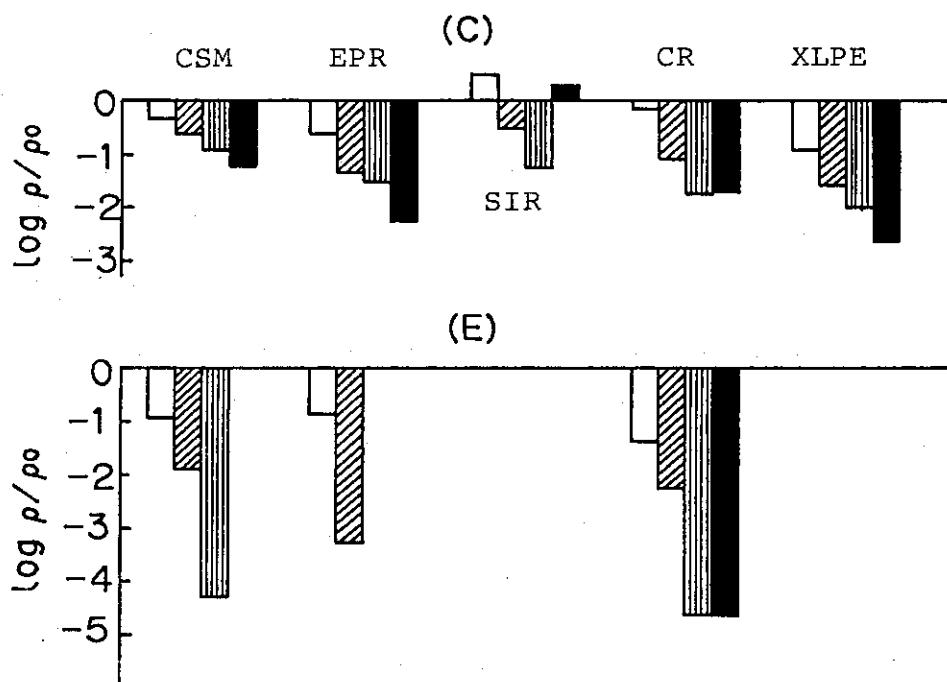


Fig. 50 Effect of amount of air in simulated LOCA environments on the volume resistivity of insulating materials (with aging).

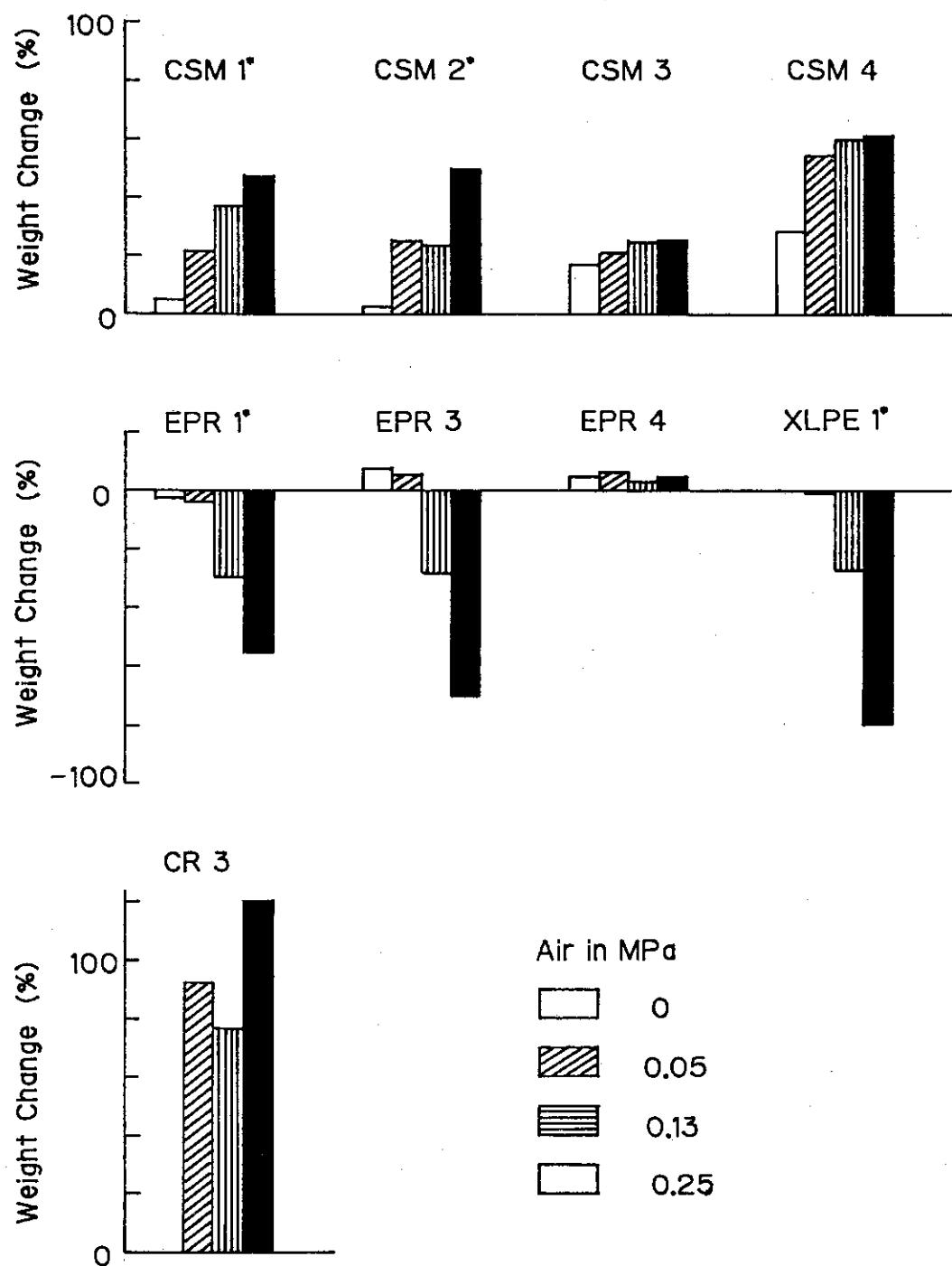


Fig. 51 Effect of amount of air in simulated LOCA environments on the weight change of various kinds of insulating materials (without aging).

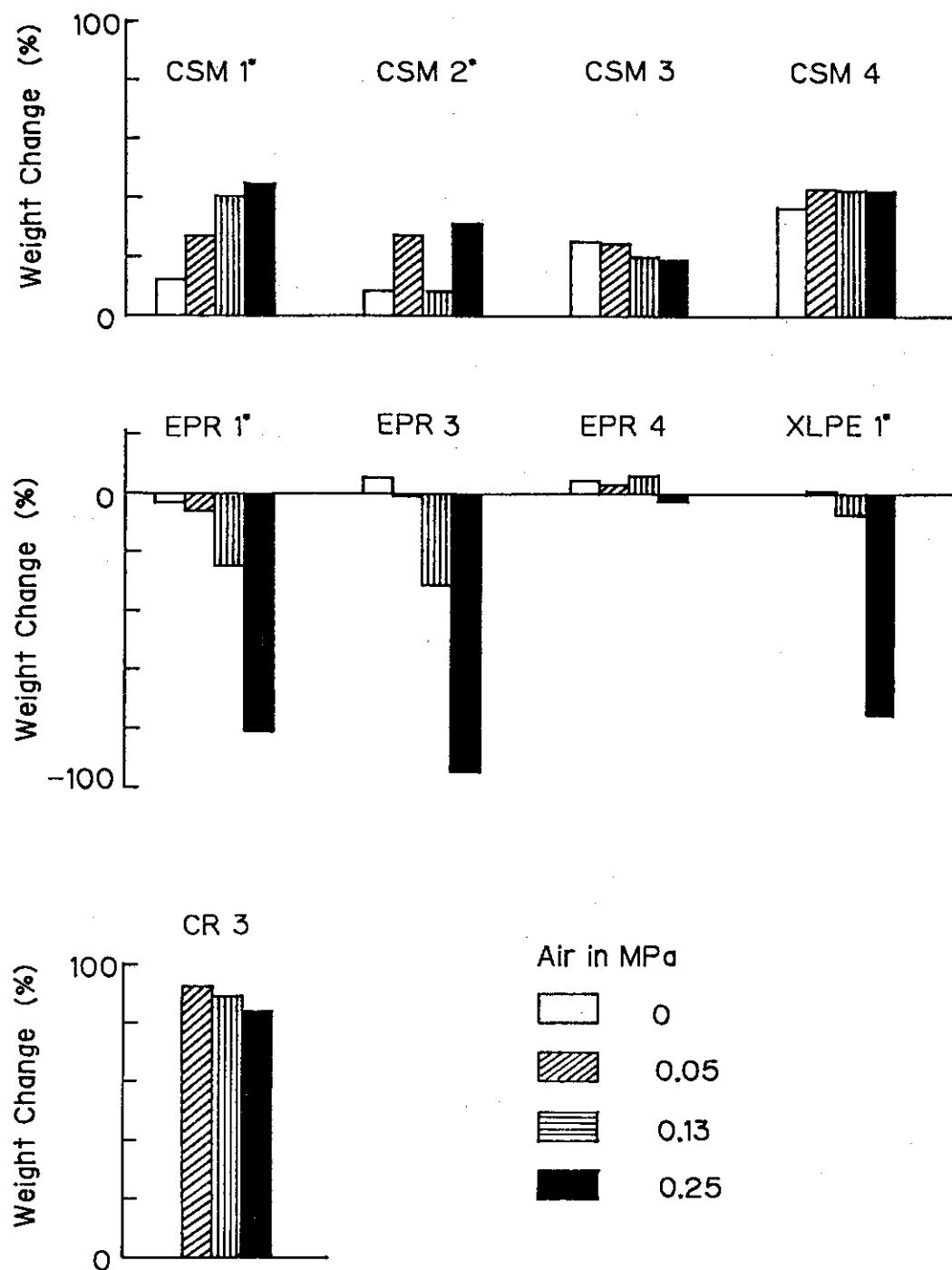


Fig. 52 Effect of amount of air in simulated LOCA environments on the weight change of various kinds of insulating materials (with aging).

4.1.4 昇温、降温速度の影響

LOCAシミュレーションによると、その初期に格納容器内は蒸気によって急速に温度が高くなる。そこでIEEE Std.323-1974¹のAppendixには10秒間で室温から150°Cまで昇温すると述べられている。

しかし、もし急昇温が試験体の劣化に何等の効果を持たないとすれば、試験としては急昇温を加える必要はない。田中らは先にSEAMATE-IIを用いて蒸気の投入速度と昇温速度の関係を求めた²。これによると試験容器内の温度を10秒間で室温から150°C迄上昇させるためには多量の蒸気を必要とし、それを達成するためには大型のボイラ、あるいはアキュムレータが必要であることを明らかにした。そこで、昇温速度がゴム材料の劣化に影響をおよぼすか否かを検討する。また、降温速度についてもその速度が劣化に影響をおよぼすとすれば、試験はそれを精度良く行う必要があるが、影響がなければ降温速度の精度は不要となるので、この点についても検討した^{2,3}。

(1) 実験方法

実験はFig.53に示すA, B, Cの三つの環境で行った。

- A(標準条件とよぶ)はIEEEStd.323-1974のAppendixに述べられている温度プロファイルである。
- B(緩慢昇温)は一時間かけて昇温を行った。
- C(急速降温)では昇温速度はAと同じとして、150-50°Cの間の降温を10分間で行う急速降温プロファイルである。

用いた試料は試験用標準シート試料並びに電線ケーブルと同配合のシート状試料及びその他の試料であり、それらの機械的性質の初期の値をTable 7に示す。環境暴露の実験において、A, B, Cの各々について事前劣化をも含めて全プロファイルを加えてから試料の性質を測定して比較するとLOCA(stationary)の部分による劣化が激しく、LOCA(Transient)における温度履歴の効果を観察するのは困難と考えられるので、プロファイルの一部を加えた試料についてもその性質を測定した。

試料に加えられた履歴は図、表に以下に示す略号によって示される。

- b : 事前劣化(121°Cで7日間の熱処理後、0.44MGyを室温空气中で照射する、線量率は10kGy/hである。) + LOCA(Transient部分のみ)
- b' : LOCA(Transient部分のみ)
- 5 : 事前劣化 + LOCA(TransientとStationary)
- 8 : LOCA(TrassientとStationary)

(2) 結果と考察

Table 8 に履歴 b の試料の機械的性質を示す。結果は表の左から標準条件、緩慢昇温、急速降温の順に記す。同様に、Table 9,10,11の各々に履歴 b', 5, 8 の結果を示す。Table 12a,12b,12c,12d には履歴 b, b', 5, 8 に対応する試料について面積変化率と重量変化率とを示す。

機械的性質の劣化について、緩慢昇温および急速降温と標準条件とを比較した。試料毎に伸びと破断強度の保持率について標準条件と緩慢昇温とを比較した結果をFig.54～Fig.58に示す。Fig.59～Fig.63には同じく、各試料毎に標準条件と急速降温との比較結果を示す。

標準条件と緩慢昇温あるいは急速降温とを比較すると、一部の値は完全には一致していないが、未照射試料相互の物性値のばらつきを考慮すれば、有意差があるとは言いがたい。特に、プロフィル全体を加えた履歴5においてはいずれも標準条件における結果と良く一致している。

したがって、LOCA環境による劣化に対して昇温速度と降温速度は影響を及ぼさないと判断できる。以上は機械的性質の中で伸びと破断強度とを観察値として比較した結果である。

次ぎに機械的性質の指標の一つである破断エネルギー (Toughness) を観察値として比較する。ここで破断エネルギーは伸びと破断強度とを掛け合わせた値で示した。Fig.64,65,66 に破断エネルギー (Toughness) の保持率を各試料について示す。履歴5に注目すれば、三条件での結果は良く一致する。

LOCA環境による劣化の別の指標として、吸水と蒸気ケミカルスプレイによる抽出の競合の結果としての重量変化と試料の面積変化が考えられる。この結果をFig.67,68に示す。履歴5, すなわち事前劣化にLOCAを加えた場合の結果がFig.67である。事前劣化がない場合（履歴8）の結果をFig.68 に示す。

本測定において誤差、あるいはばらつきを生ずる原因として、重量の変化の場合には実験終了後圧力容器から取り出して重量を測定する迄の時間が必ずしも一定にはできず、水分の揮発の程度が試料によって多少は異なることが考えられる。面積の測定については、吸水によって試料が多少歪んでおり、また通常のスケールを用いて寸法を測定しているので有効数字は2桁である。この点を考慮すれば標準条件に対して緩慢昇温も急速降温も有意な差を与えるとは認められない。

体積固有抵抗値の変化はTable 13,14 に示す。各欄の数値は未劣化試料との体積固有抵抗値の差であり、この値が負であるのは絶縁抵抗の低下を意味する。なお、試料番号0が未劣化試料の体積固有抵抗値の対数である。事前劣化を含む全LOCA模擬環境を加えた場合（実験略称 S5D30の中の劣化条件コードhrtrip,

hruplp, hrdnlpであり, 各々標準条件, 緩慢昇温, 急速降温を示す)には, 絶縁体については上記三条件による絶縁性能の低下は少なくかつ, 条件毎の差はほとんどない。

(3) まとめ

本節では, 空気の存在しない状態のLOCAプロファイルと放射線とを同時に加え, この条件下で昇温速度と降温速度とがゴム材料の劣化に影響を及ぼすか否かを検討し, その影響は無視しうることを示した。

昇温, 降温の際の熱履歴はLOCA全体の熱履歴に較べて極めて少なく, 無視しうる程度である。これは仮想事故であるLOCA環境に近いと考えられる空気を入れた状態にした場合でも同様に考えることができる。

関連文献

1. IEEE Std. 323-1974, "IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations", IEEE(1974)
2. 田中進, 中瀬吉昭, 日馬康雄, 伊藤政幸, 岡田漱平, 吉田健三, "原子炉用電線材料健全性試験装置(SEAMATE-II)の工学データ1(急昇温実験)
JAERI-M 9361(1981)
3. Y.Kusama, S.Okada, M.Yoshikawa, T.Yagi, Y.Nakase, T.Seguchi and K.Yoshida, "Methodology Study for Qualification Testing of Wire and Cable at LOCA Condition", Proceedings of the U>S> Nuclear Regulatory Commission NUREG/CP-0041 5, pp330-360(1982)

Table 7 Initial Mechanical Properties of Polymer for Cable

Sample	Properties	M_{100} (Kg/cm ²)	Tb (Kg/cm ²)	Eb (%)	H
Hypalon	1*	28	211	597	53
	2*	28	173	561	58
EPR	1*	16	83	503	53
	6*	39	154	760	67
XLPE	1*	101	265	617	98
Silicone	4	12	97	618	50
Hypalon	3	44	221	642	69
	8	45	198	600	69
EPR	3	21	86	817	65
	10	31	100	973	74
Sheath (Hypalon)	103	57	212	624	60
	105	65	174	427	65
Core (EPR)	109	23	57	652	-
	111	31	72	1252	-

Table 8 Mechanical Properties of the Aged Samples Tested
Under Various LOCA Conditions (Stage No. b)

Profiles Stage No. b	Standard Condition				Slow Heating				Rapid Cooling			
	M ₁₀₀	T _b	E _b	H	M ₁₀₀	T _b	E _b	H	M ₁₀₀	T _b	E _b	H
Hypalon 1*	53	161	302	73	53	151	283	76	54	178	335	71
2*	75	155	257	82	73	133	228	84	73	166	267	80
EPR 1*	37	71	184	65	37	74	188	67	38	74	195	65
6*	53	89	283	77	54	90	277	76	53	94	307	76
XLPE 1*	103	140	220	98	100	186	316	98	106	187	322	98
Silicone 4	-	60	111	76	-	54	91	76	49	66	146	73
Hypalon 3	60	89	194	78	59	85	192	75	54	109	271	75
8	83	124	180	82	87	130	178	80	73	159	270	79
EPR 3	70	87	202	80	73	77	148	85	72	76	146	84
10	53	71	222	82	54	73	213	80	50	71	251	82
Sheath (Hypalon) 103	67	142	296	70	54	106	279	66	70	181	360	66
A* Core (EPR)	117	152	157	80	124	161	152	79	114	171	191	76
B* Core (EPR)	67	72	254	-	70	80	313	-	67	80	321	-
Sheath (Hypalon) 105	49	60	259	-	49	60	256	-	48	60	285	-
(B*) Core (EPR)	93	186	293	71	98	204	305	71	83	165	293	69
(B*) Core (EPR)	132	196	203	79	124	174	182	79	139	184	168	80

A*: Aged as sheath and core (be separated before aging)

B*: Aged as cable (be separated after aging)

Table 9 Mechanical Properties of the Unaged Samples Tested
Under Various LOCA Conditions (Stage No. b')

Properties Stage No. b'	Standard Condition				Slow Heating				Rapid Cooling				
	M ₁₀₀	T _b	E _b	H	M ₁₀₀	T _b	E _b	H	M ₁₀₀	T _b	E _b	H	
Hypalon	1*	36	194	488	70	38	200	491	70	36	196	516	67
	2*	42	132	378	78	48	180	404	75	44	176	423	74
EPR	1*	21	77	373	60	22	78	357	60	22	76	389	59
	6*	37	119	580	72	39	113	545	72	38	126	605	71
XLPE	1*	98	215	480	98	94	194	456	98	98	221	484	98
Silicone 4	25	93	390	68	27	92	354	69	23	91	396	66	
Hypalon	3	46	165	506	73	50	175	494	74	46	181	532	72
	8	60	156	420	80	57	156	416	79	59	166	424	76
EPR	3	48	131	620	79	46	139	662	77	46	123	613	76
	10	38	116	779	78	38	107	734	77	38	110	758	75
Sheath	103	18	66	545	65	17	58	533	60	21	71	578	60
(Hypalon) 105	32	66	306	75	32	69	323	72	30	61	300	70	
Core	109	18	41	820	-	17	38	777	-	17	42	811	-
(EPR)	111	27	66	1064	-	26	59	999	-	27	64	1048	-
Sheath	103	23	91	602	63	24	80	562	67	18	76	597	65
(Hypalon) 105	37	84	362	74	36	85	381	72	36	86	385	70	
Core	109	16	41	874	-	16	39	820	-	16	40	881	-
(EPR)	111	16	41	874	-	16	39	820	-	16	40	881	-

Table 10 Mechanical Properties of the Aged Samples Tested
Under Various LOCA Conditions (Stage No. 5)

Properties Stage No. 5	Standard Condition				Slow Heating				Rapid Cooling			
	M ₁₀₀	T _b	E _b	H	M ₁₀₀	T _b	E _b	H	M ₁₀₀	T _b	E _b	H
Hypalon 1*	-	124	93	82	-	121	78	85	-	128	90	83
2*	-	126	70	88	-	118	62	92	-	115	71	87
EPR 1*	-	82	93	71	-	89	85	74	-	76	101	73
6*	78	82	108	80	-	82	93	83	78	82	113	79
XLPE 1*	110	144	153	96	106	142	152	98	96	120	150	96
Silicone 4	-	63	19	92	-	71	24	93	-	69	22	95
Hypalon 3	-	64	40	83	-	62	38	80	-	72	55	82
8	-	158	45	95	-	156	48	94	-	129	52	94
EPR 3	-	85	54	88	-	87	60	86	-	84	67	87
10	-	83	57	85	-	81	58	86	-	81	66	85
Sheath 103 (Hypalon) 105	-	24	40	82	-	20	32	80	-	25	50	80
Core 109 (EPR) 111	-	33	90	-	-	33	76	-	-	32	96	-
Sheath 103 (Hypalon) 105	-	35	58	83	-	43	61	85	-	41	82	78
Core 109 (EPR) 111	-	70	43	93	-	64	42	89	-	58	83	95

Table 11 Mechanical Properties of the Unaged Samples Tested
Under Various LOCA Conditions (Stage No. 8)

Profiles Stage No. 8	Standard Condition				Slow Heating				Rapid Cooling			
	M ₁₀₀	T _b	E _b	H	M ₁₀₀	T _b	E _b	H	M ₁₀₀	T _b	E _b	H
Hypalon 1*	134	164	120	82	113	155	136	83	108	166	149	81
2*	146	154	104	88	153	159	106	84	142	153	110	85
EPR 1*	-	69	100	69	-	75	96	70	60	70	116	70
6*	65	72	125	77	66	72	120	77	67	76	127	76
XLPE 1*	100	122	139	96	97	115	124	95	93	104	132	96
Silicone 4	-	71	24	92	-	74	24	95	-	79	35	90
Hypalon 3	-	81	65	81	-	83	65	80	-	87	80	78
8	-	151	65	92	-	133	72	90	-	126	84	86
EPR 3	74	76	107	84	73	78	133	84	68	74	138	83
10	-	78	58	85	-	73	62	84	-	75	75	83
Sheath 103 (Hypalon) 105	-	26	55	80	-	26	56	75	-	26	74	75
Core 109 (EPR) 111	-	67	50	90	-	57	43	90	-	56	59	85
Sheath 103 (Hypalon) 105	-	46	81	78	-	42	88	80	-	41	82	76
Core 109 (EPR) 111	-	69	64	92	-	59	87	86	-	58	83	85

Table 12a Weight and Area Changes of the Aged Samples Tested Under Various LOCA Conditions (Stage No. b)

LOCA Conditions	Standard Condition		Slow Heating		Rapid Cooling	
Samples	Weight Change (%)	Area Change (%)	Weight Change (%)	Area Change (%)	Weight Change (%)	Area Change (%)
Hypalon 1*	-	-	0	-1.0	1.1	-1.0
2*	-	-	-1.7	-2.5	-1.6	-3.0
EPR 1*	-	-	-1.3	-3.0	-1.9	-1.0
6*	-	-	-1.1	-3.0	-1.7	-5.0
XLPE 1*	-	-	-1.1	-9.8	-1.1	-6.9
Silicone 4	-	-	-0.8	-1.5	-0.7	-2.0
Hypalon 3	-	-	3.5	0	4.6	-0.5
8	-	-	1.4	-1.0	2.7	-1.0
EPR 3	-	-	-1.8	0	-1.2	0
10	-	-	0	-2.5	0	-4.0

Table 12b Weight and Area Changes of the Unaged Samples Tested Under Various LOCA Conditions (Stage No. b')

LOCA Conditions	Standard Condition		Slow Heating		Rapid Cooling	
Samples	Weight Change (%)	Area Change (%)	Weight Change (%)	Area Change (%)	Weight Change (%)	Area Change (%)
Hypalon 1*	-0.6	-2.0	-0.6	0	-0.6	-3.0
2*	-1.5	-2.0	-1.7	-2.0	-0.9	-2.5
EPR 1*	-1.6	-2.0	-1.3	-2.0	-1.3	-2.0
6*	-1.2	-1.0	-0.8	-3.0	-0.6	-1.0
XLPE 1*	0	-5.4	0.7	-5.9	0	-8.8
Silicone 4	-0.7	-0.5	-0.8	-1.5	0	0.5
Hypalon 3	1.0	1.0	-1.1	1.0	0	0
8	-0.6	-1.5	0	-1.0	0	2.0
EPR 3	-1.2	-0.5	0	1.0	-1.2	-1.0
10	0	-4.0	-0.6	-4.0	-0.6	-2.5

Table 12c Weight and Area Changes of the Aged Sample Tested Under Various LOCA Conditions (Stage No. 5)

LOCA Conditions	Standard Condition		Slow Heating		Rapid Cooling		
	Samples	Weight Change (%)	Area Change (%)	Weight Change (%)	Area Change (%)	Weight Change (%)	Area Change (%)
Hypalon 1*	1*	7.4	3.0	8.6	4.0	6.9	2.5
	2*	3.9	2.0	6.5	3.0	3.2	0.5
EPR	1*	-2.7	-3.0	-1.6	-3.0	-2.6	-2.5
	6*	-2.5	-2.0	-1.8	-2.5	-1.9	-4.0
XLPE	1*	0.5	-3.0	-0.5	-3.0	-1.1	-4.0
Silicone 4		-4.7	-4.0	-3.5	-4.5	-4.5	-4.5
Hypalon 3	3	25.9	12.9	30.9	15.6	26.7	11.3
	8	10.7	4.6	10.7	5.1	10.0	3.0
EPR	3	-2.2	-2.0	-1.7	-1.0	-2.3	-0.5
	10	5.5	1.0	5.6	0	6.2	0

Table 12d Weight and Area Changes of the Unaged Samples Tested Under Various LOCA Conditions (Stage No. 8)

LOCA Conditions	Standard Condition		Slow Heating		Rapid Cooling		
	Samples	Weight Change (%)	Area Change (%)	Weight Change (%)	Area Change (%)	Weight Change (%)	Area Change (%)
Hypalon 1*	1*	2.9	0	2.8	0	3.4	1.0
	2*	0	-2.0	0.8	-2.0	0	-3.0
EPR	1*	-2.0	-3.0	-2.1	-3.0	-2.0	-4.0
	6*	-1.1	-2.0	-0.9	-4.0	-0.6	-1.0
XLPE	1*	-1.0	-7.9	0	-8.3	0	-7.9
Silicone 4		-3.0	-3.0	-2.8	-3.0	-3.0	-3.0
Hypalon 3	3	19.6	8.2	13.3	4.0	10.7	3.0
	8	6.3	2.5	3.2	1.0	4.0	1.0
EPR	3	-1.8	-2.0	-1.8	-1.0	-1.8	-3.0
	10	6.6	0	5.4	0	5.0	-2.0

Table 13 The effect of heat shock on the deterioration of samples.
 PWR LOCA模擬 初期過渡環境熱衝撃における加熱速度及び冷却速度の影響 < S1D27 ~ S5D30 >
 (事前照射、本実験とも 1.0 Mrad/h)

実験結果	試験記号	劣化条件コード	試料名	EPR-1	EPR-3	XLP-E	Hypalon-1	Hypalon-2	Hypalon-3
S1D27 ~S5D30	0 Original	H/R(43.5M)/P(**1)CR(8M)	(16.19) —	(16.38) —	(17.50) —	(14.75) —	(11.90) —	(13.78) —	
S1D27	hrtr	H/R(43.5M)/P(**1)CR(8M)	—	—	—	—	—	—	
S1D28	hrup	H/R(43.5M)/P(**2)CR(8M)	0.16	-0.88	-0.69[W]	-0.92	0.31[sU](dV)	-0.64(T)	
S1D29	hrdn	H/R(43.5M)/P(**3)CR(8M)	0.15	-0.75	-0.44V	-0.71(sdv)	0.45(sdv)	-1.16(C)	
S1D27	ostr	P(**1)CR(8M)	0.04	-0.84	-0.59	0.00	0.73(V)	-0.09	
S1D28	oop	P(**2)CR(8M)	0.11	-0.78	-0.62	-0.04	0.54(V)	-0.01	
S1D29	oodn	P(**3)CR(8M)	-0.07	-0.59	-0.49	-0.12(sdv)	0.68[sU](dV)	0.08(sdv)	
S5D30	hrtrlp	H/R(43.5M)/P(**1)CR(130.5M)	0.11	-0.94	-0.58	-1.70[sUBB](sI)	-0.30[sUBB](sI)	-1.57[sUBB](I)	
	hruplp	H/R(43.5M)/P(**2)CR(130.5M)	0.23	-1.16	-0.49	-1.65[sU]	-0.36[sU](sI)	-3.01[sUBB](I)	
	hrdnlp	H/R(43.5M)/P(**3)CR(130.5M)	0.15	-0.96	-0.81[sW]	-1.38[sUBB]	-0.23[sB]	-3.08[sU](I)	
	ostrlp	P(**1)CR(130.5M)	-0.28	-1.21	-0.56[U]	-1.53[sB]	-0.44[sB]	-2.50[sB](I)	
	ooplp	P(**2)CR(130.5M)	0.19	-1.03	-1.34[sUB]	-1.19[sB]	-0.13	-1.58[sB](I)	
	oodnlp	P(**3)CR(130.5M)	-0.08	-0.85[sB]	-0.94[sB]	-1.54[sB]	-0.14[sB]	-2.14[sB]	

* 1 : 0 ~ 10sec (室温→150°C), 10sec ~ 3h (150°C→定), 3h ~ 5h (150°C→50°C), 5h ~ 5h 10sec (50°C→150°C), 5h 10sec ~ 8h (150°C→定).

* 2 : 0 ~ 1h (室温→150°C), 1h ~ 4h (150°C→定), 4h ~ 6h (150°C→50°C), 6h ~ 7h (50°C→150°C), 7h ~ 10h (150°C→定), 10h ~ 10h 15min (150°C→室温); 室温は1h ~ 4h, 7h ~ 10h.

* 3 : 0 ~ 10sec (室温→150°C), 10sec ~ 3h (150°C→定), 3h ~ 3h 10min (150°C→50°C), 3h 30min ~ 4h 45min (50°C附近に保持), 5h ~ 5h 10sec (50°C→150°C), 5h 10sec ~ 8h (150°C→定), 8h ~ 8h 15min (150°C→室温); 室温は0 ~ 8h.

* * 1, * * 2, * * 3 : それぞれ * 1, * 2, * 3 のプロファイルの終に次のプロファイルを追加: 0 ~ 30sec (室温→140°C), 30sec ~ 7h (140°C→定), 7h 15min ~ 122h 30min (120°C→定), 15min で室温まで降温

Table 14 The effect of heat shock on the deterioration of samples. (Continued)

実験略称	試料記号	劣化条件コード	試料名	EPR-6	Silicone-4	EPCore-5'	HPSheath-5
S1D27 ~S5D30	O	Original		(16.18)	(15.73)	(16.16)	(13.36)
S1D27	hrtr	H/R(43.5M)/P(*1)CR(8M)	—	—	—	—	—
S1D28	hrup	H/R(43.5M)/P(*2)CR(8M)	-1.11	0.37	-0.08	-0.40(I)	
S1D29	hrdn	H/R(43.5M)/P(*3)CR(8M)	-0.67	0.67(V)	-0.16(V)	-0.67(C)	
S1D27	ootr	P(*1)CR(8M)	-1.11	0.39(V)	-0.07	0.36	
S1D28	oop	P(*2)CR(8M)	-1.27	0.41(V)	-0.02	0.31	
S1D29	oodn	P(*3)CR(8M)	-0.72	0.78	-0.08	0.24	
S5D30	hrtr1p	H/R(43.5M)/P(**1)CR(130.5M)	-1.13	0.60	-0.68[sB](V)	-1.29[sB](I)	
	hrup1p	H/R(43.5M)/P(**2)CR(130.5M)	-1.16	0.24[sU]	-0.69[sB]	-1.19[sUSB](I)	
	hrdn1p	H/R(43.5M)/P(**3)CR(130.5M)	-1.06	0.23	-0.74[sUSB]	-0.97[sUSB](I)	
	ootr1p	P(**1)CR(130.5M)	-1.46	-0.02	-0.70	-0.89(sI)	
	oop1p	P(**2)CR(130.5M)	-1.53	0.27[sU]	-0.57	-0.77	
	oodn1p	P(**3)CR(130.5M)	-1.63	-1.80[sU]	-0.87[sB]	-1.55(sI)	

* 1 ~ 3, ** 1 ~ 3 : 前の表と同じ。

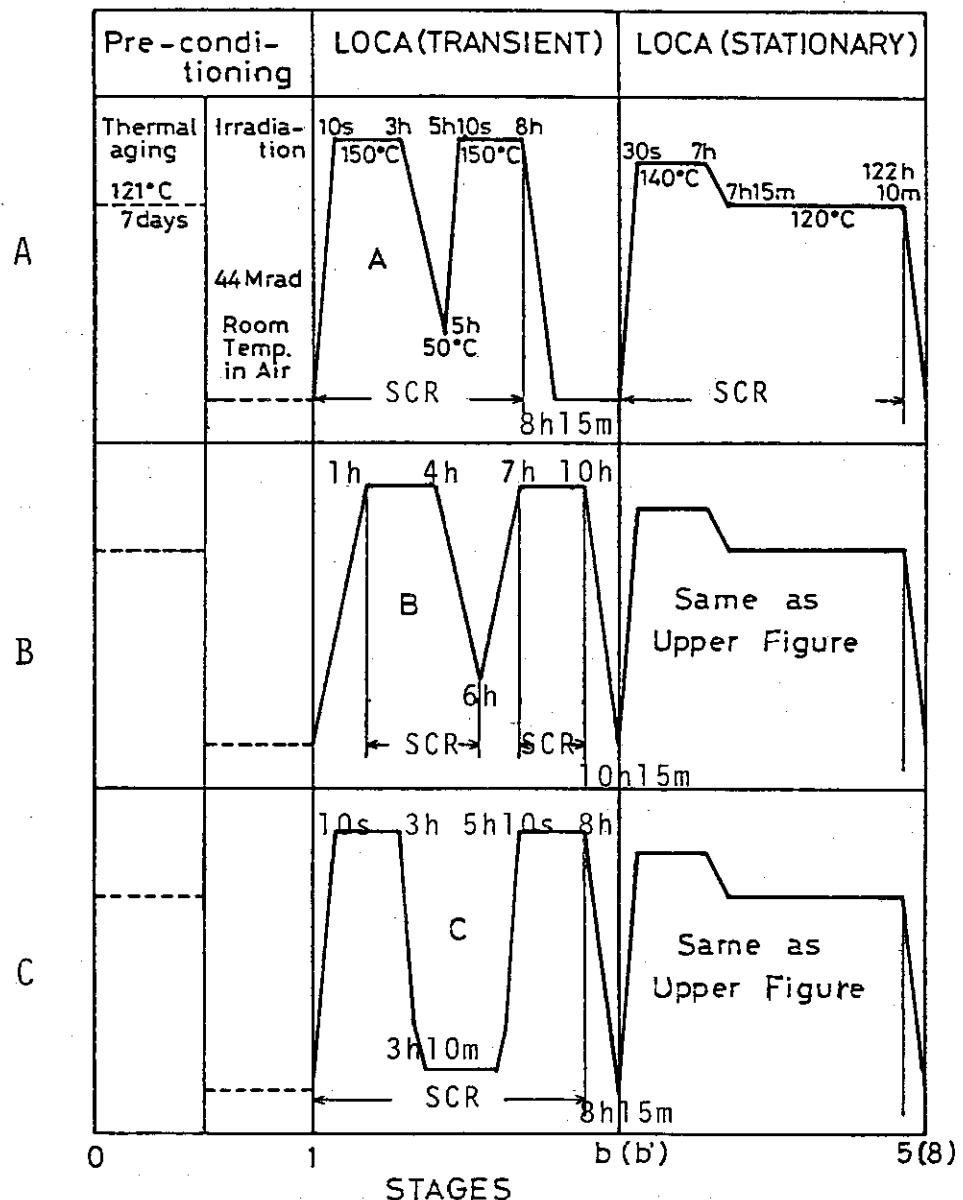


Fig.53 Simulated LOCA conditions applied for PWR LOCA test.

- A: Standard condition recommended by IEEE Std 323(1974),
- B: Slow heating condition,
- C: Rapid cooling condition

SCR : Steam

Chemical splay(2.31/min)

Radiation(1 Mrad/h)

b: Pre-conditioning + LOCA(TRANSIENT)

Aging condition { b':LOCA(TRANSIENT)

5:Pre-conditioning + LOCA(TRANSIENT+STATIONARY)

8:LOCA(TRANSIENT+STATIONARY)

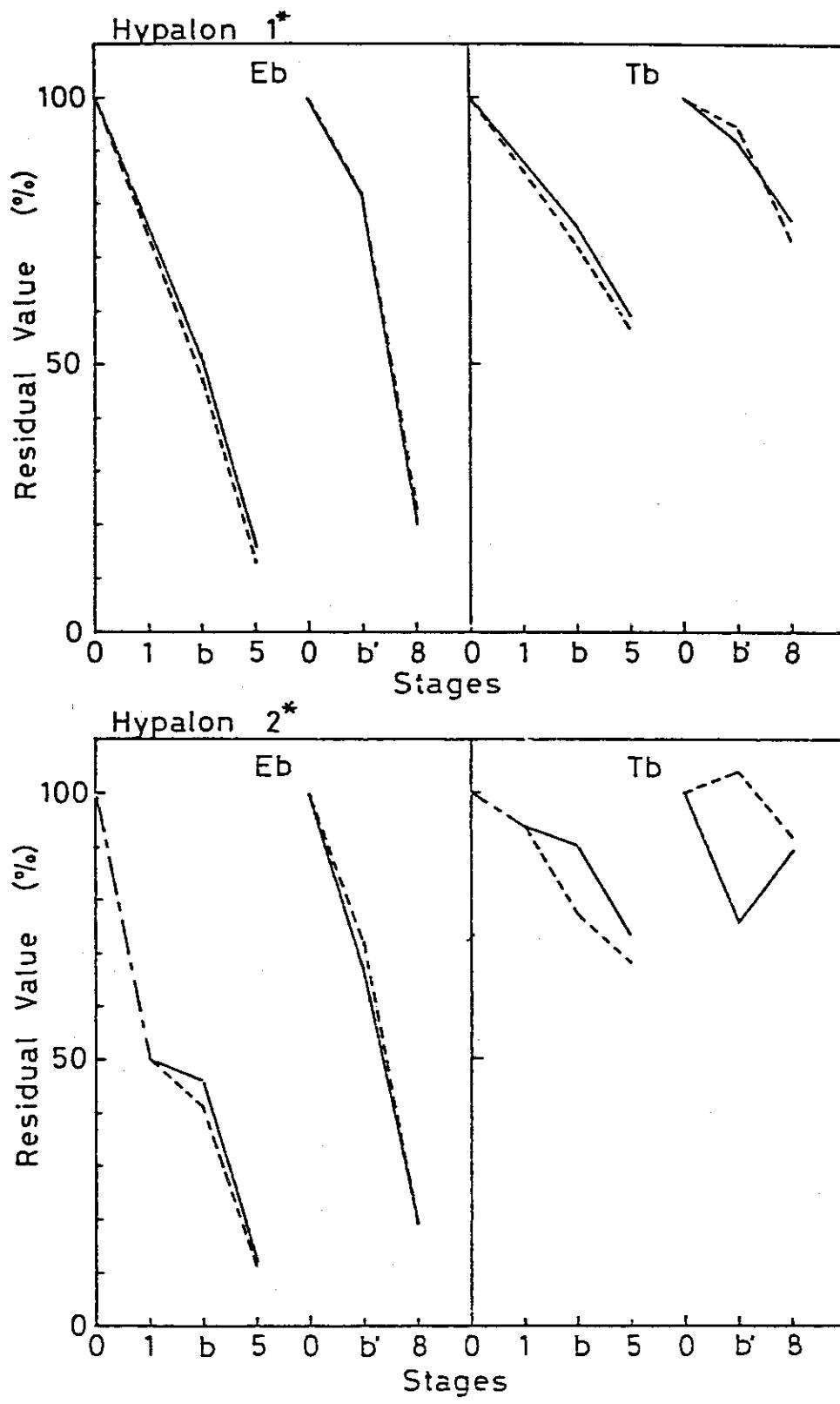


Fig.54 Residual elongation(Eb) and strength(Tb) at break of the Hypalons 1* and 2* tested under standard and slow heating conditions.

— Standard condition, - - - Slow heating

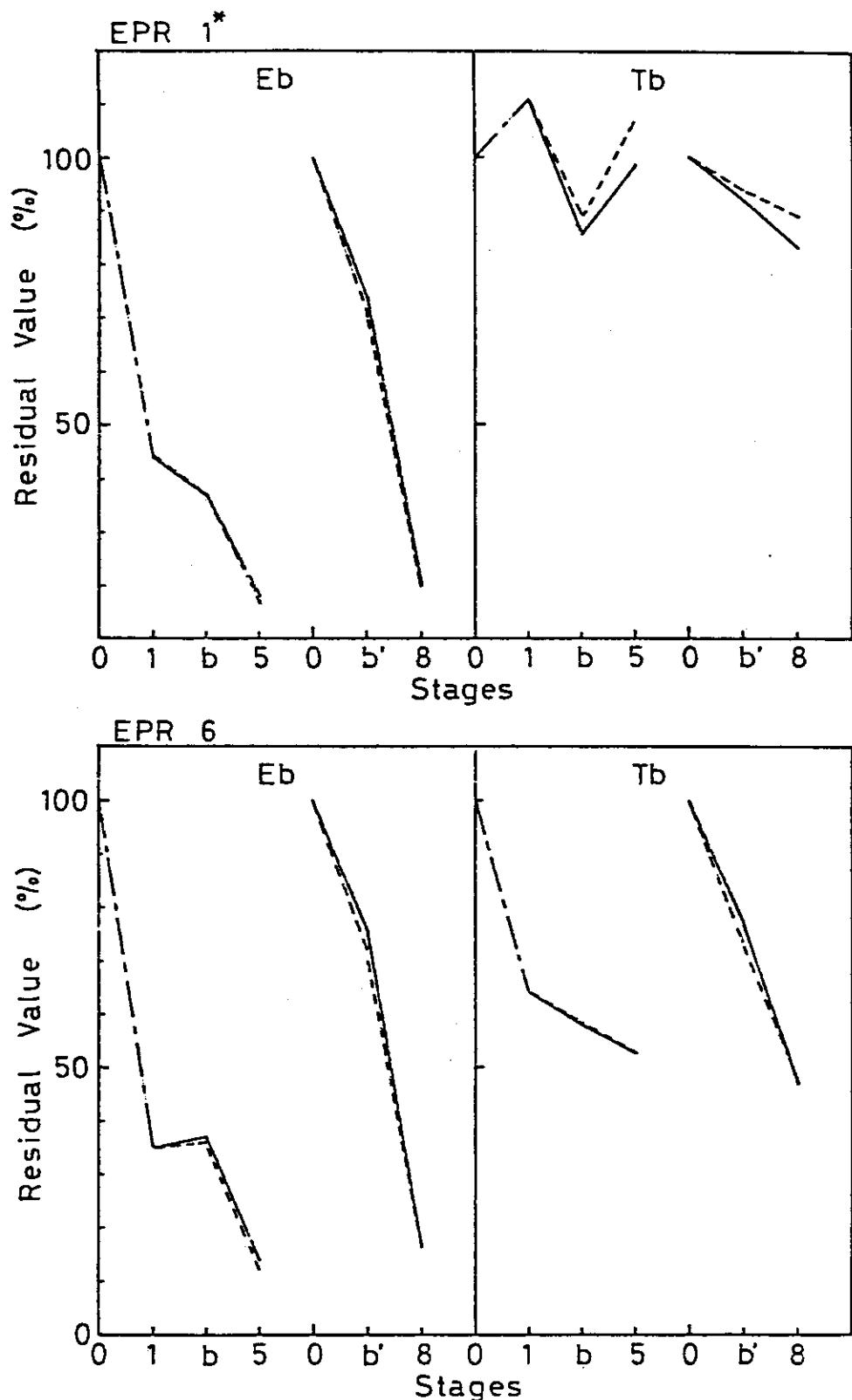


Fig.55 Residual elongation and strength of the EPR 1* and 6 tested under standard and slow heating conditions.

(Captions are the same as Fig.54)

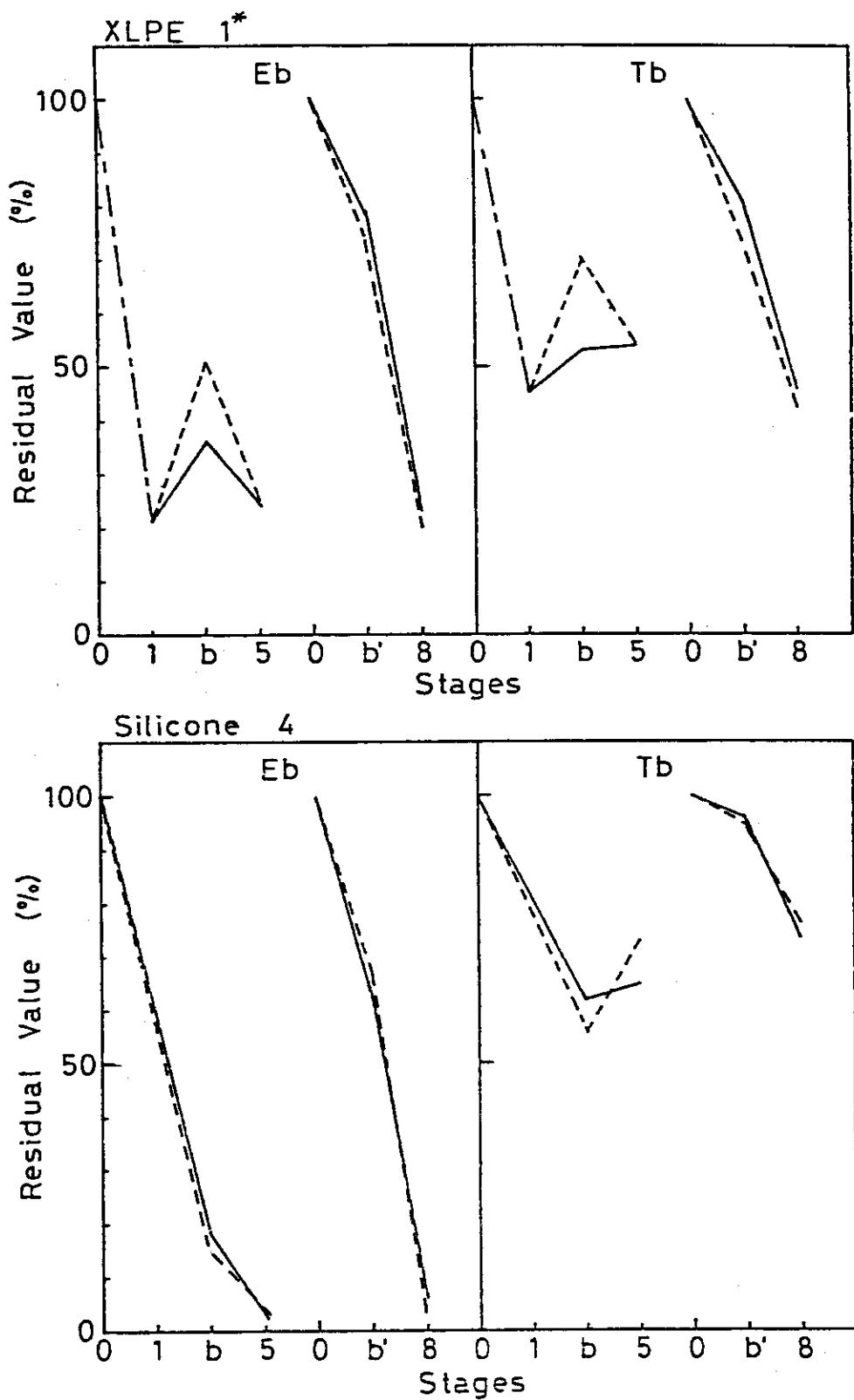


Fig.56 Residual elongation and strength of the crosslinked polyethylene (XLPE 1*) and silicone rubber (SiR 4) tested under standard and slow heating conditions.

(Captions are the same as Fig.54)

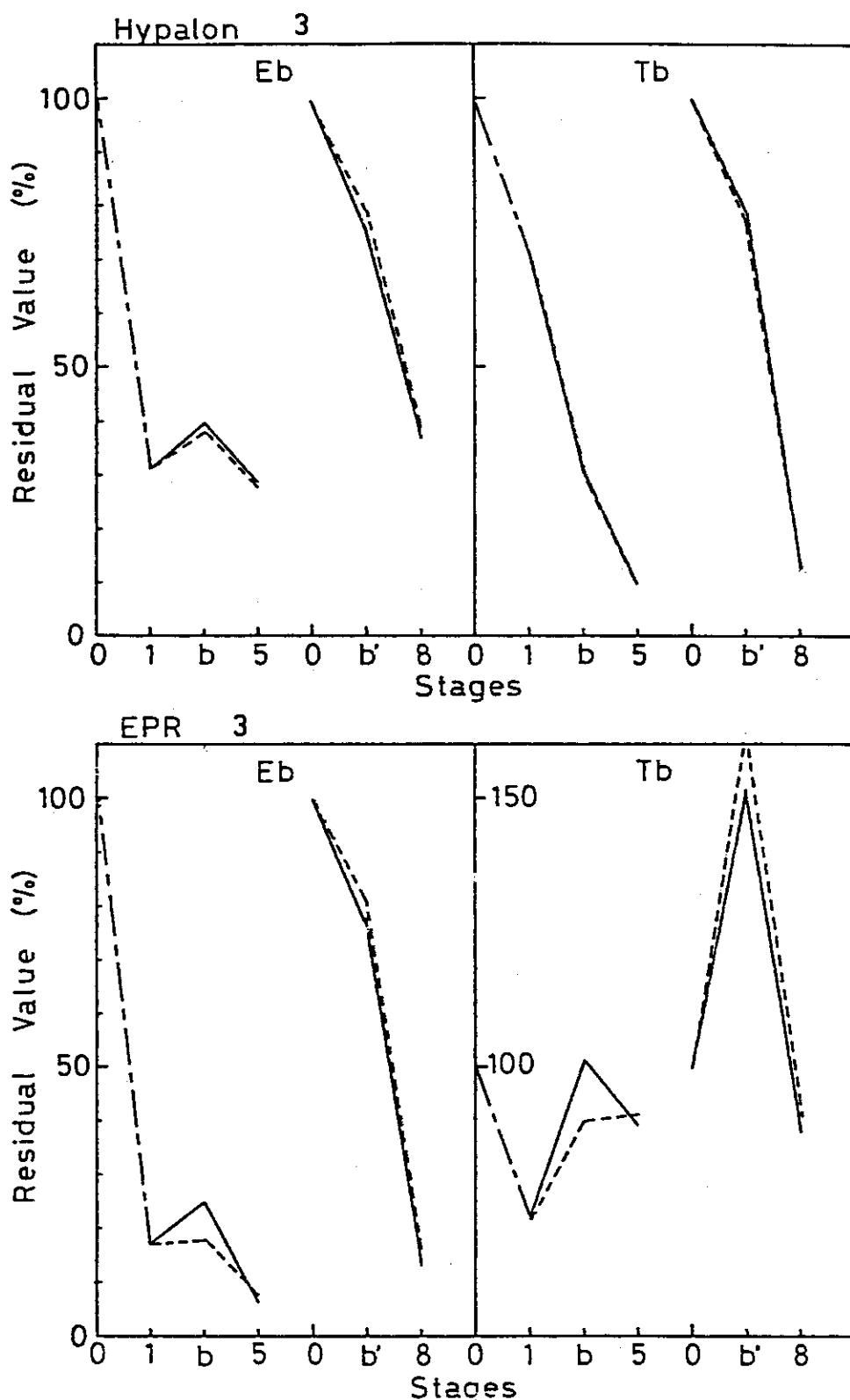


Fig.57 Residual elongation and strength of the cable samples (Hypalon 103 and EPR 109) under standard and slow heating conditions.

(Captions are the same as Fig.54)

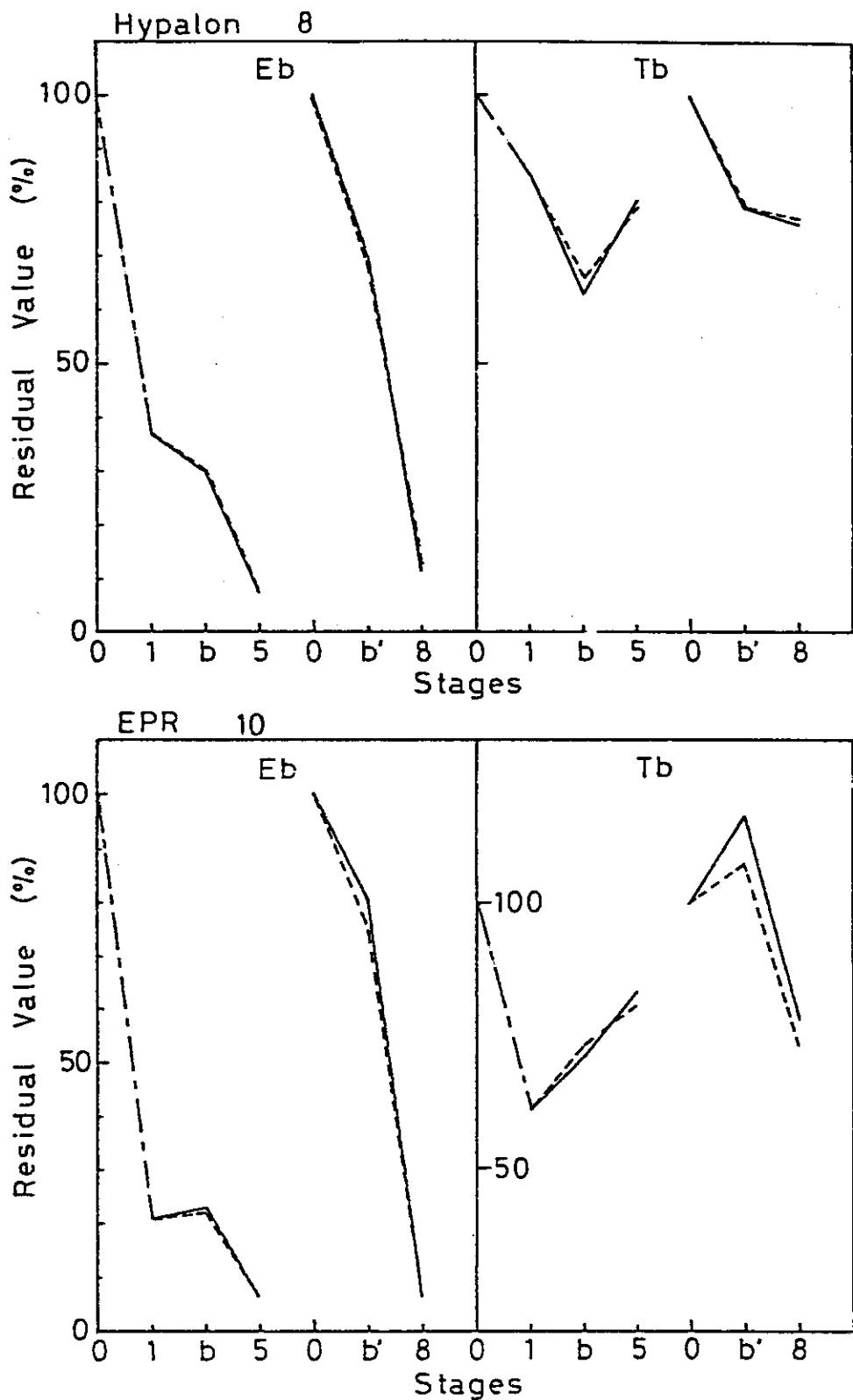


Fig.58 Residual elongation and strength of the cable samples (Hypalon 105 and EPR 111) under standard and slow heating conditions.

(Captions are the same as Fig.54)

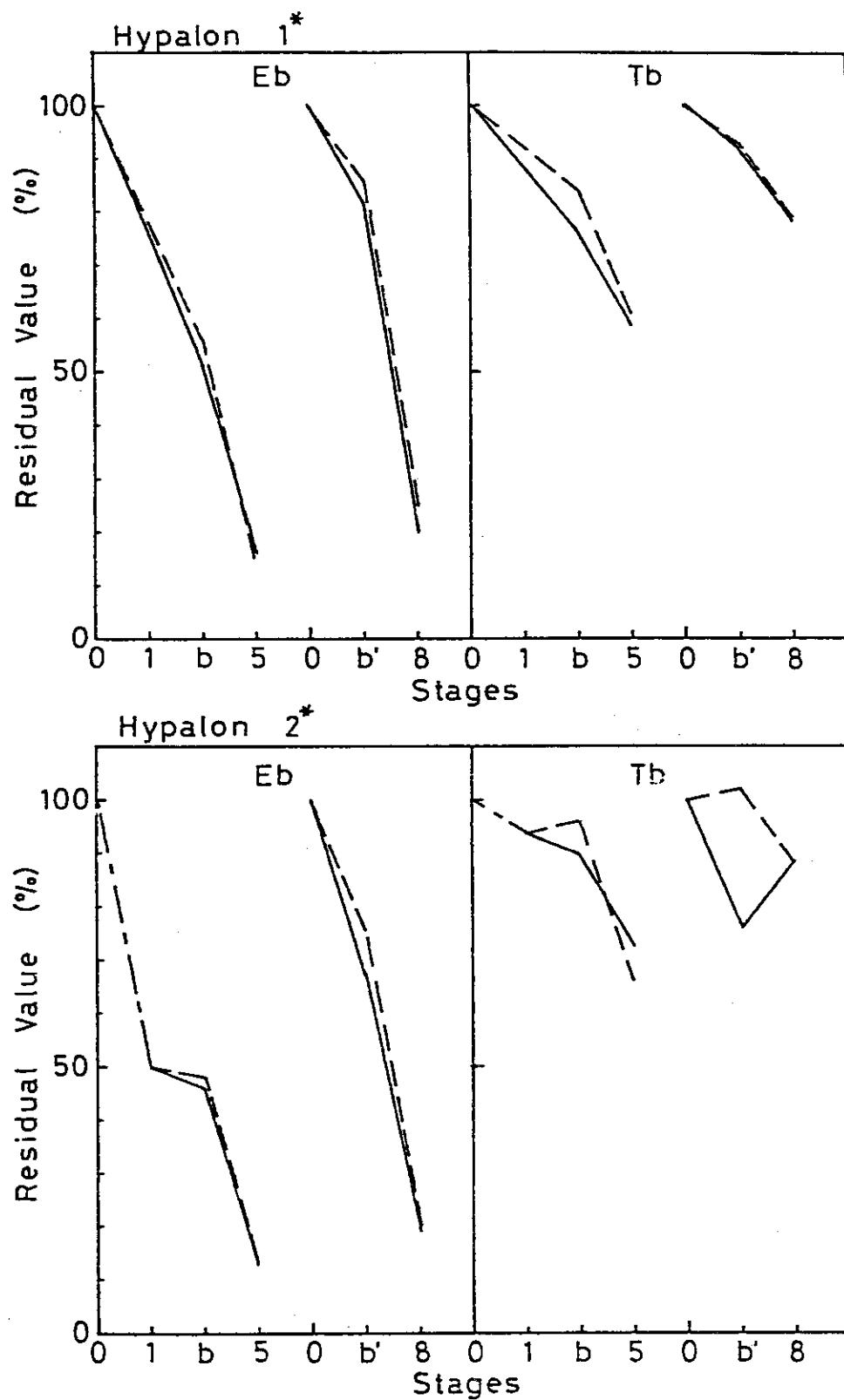


Fig.59 Residual elongation and strength of the Hypalons 1* and 2* tested under standard and rapid cooling conditions.

— Standard condition, - - Rapid cooling

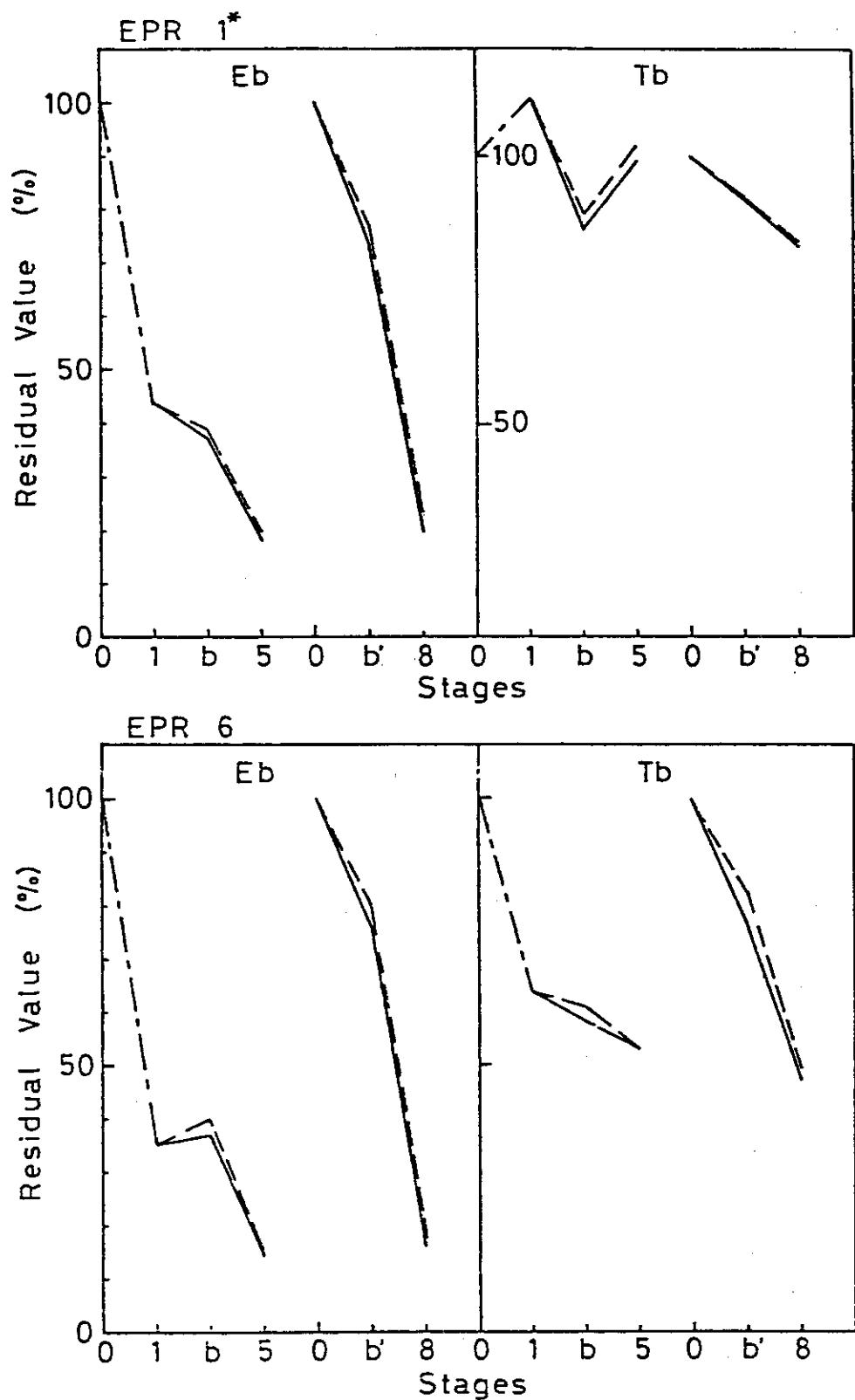


Fig.60 Residual elongation and strength of the EPRs 1* and 6 tested under standard and rapid cooling conditions.

(Captions are the same as Fig.59)

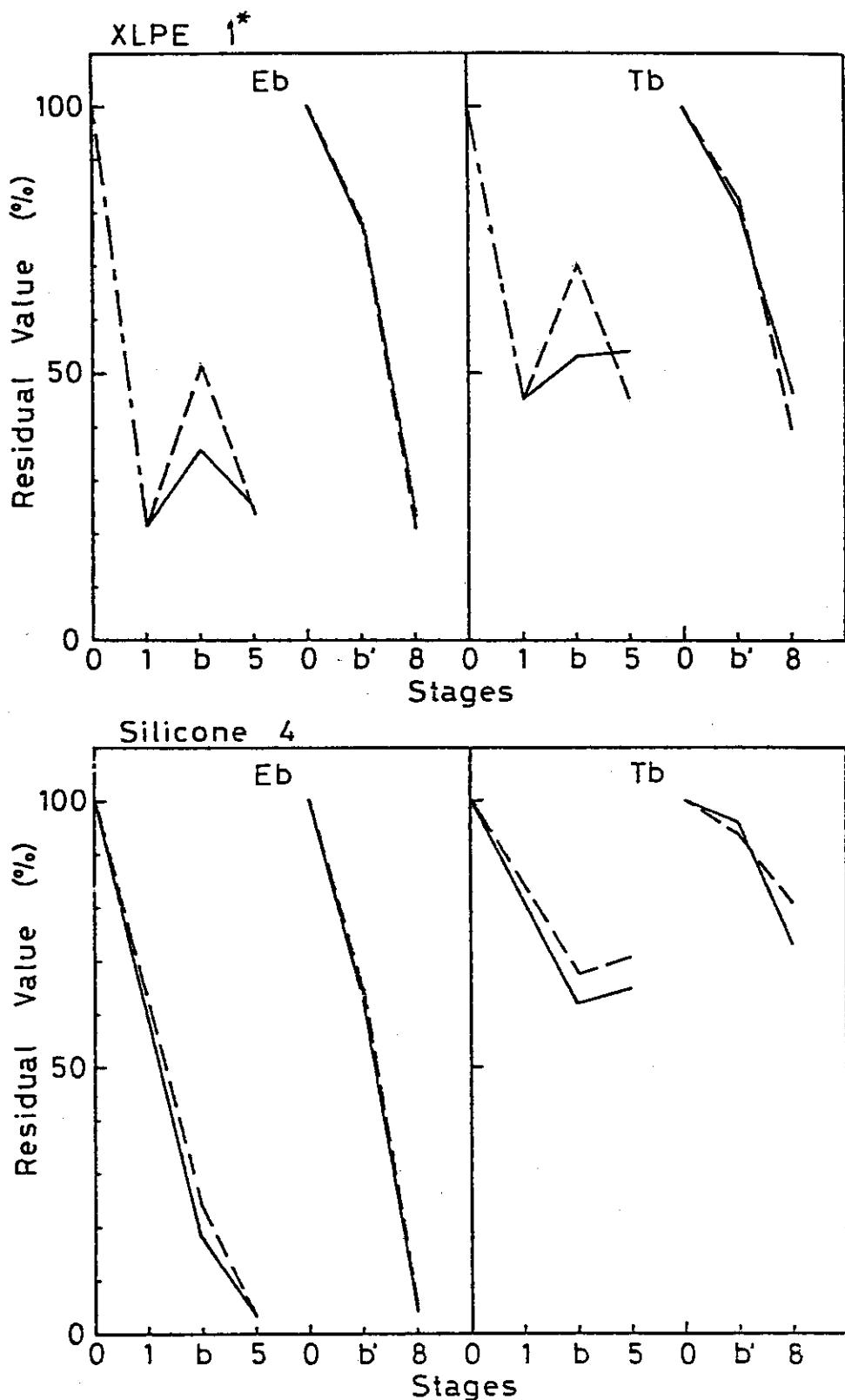


Fig.61 Residual elongation and strength of the XLPE 1* and Silicone 4 tested under standard and rapid cooling conditions.

(Captions are the same as Fig.59)

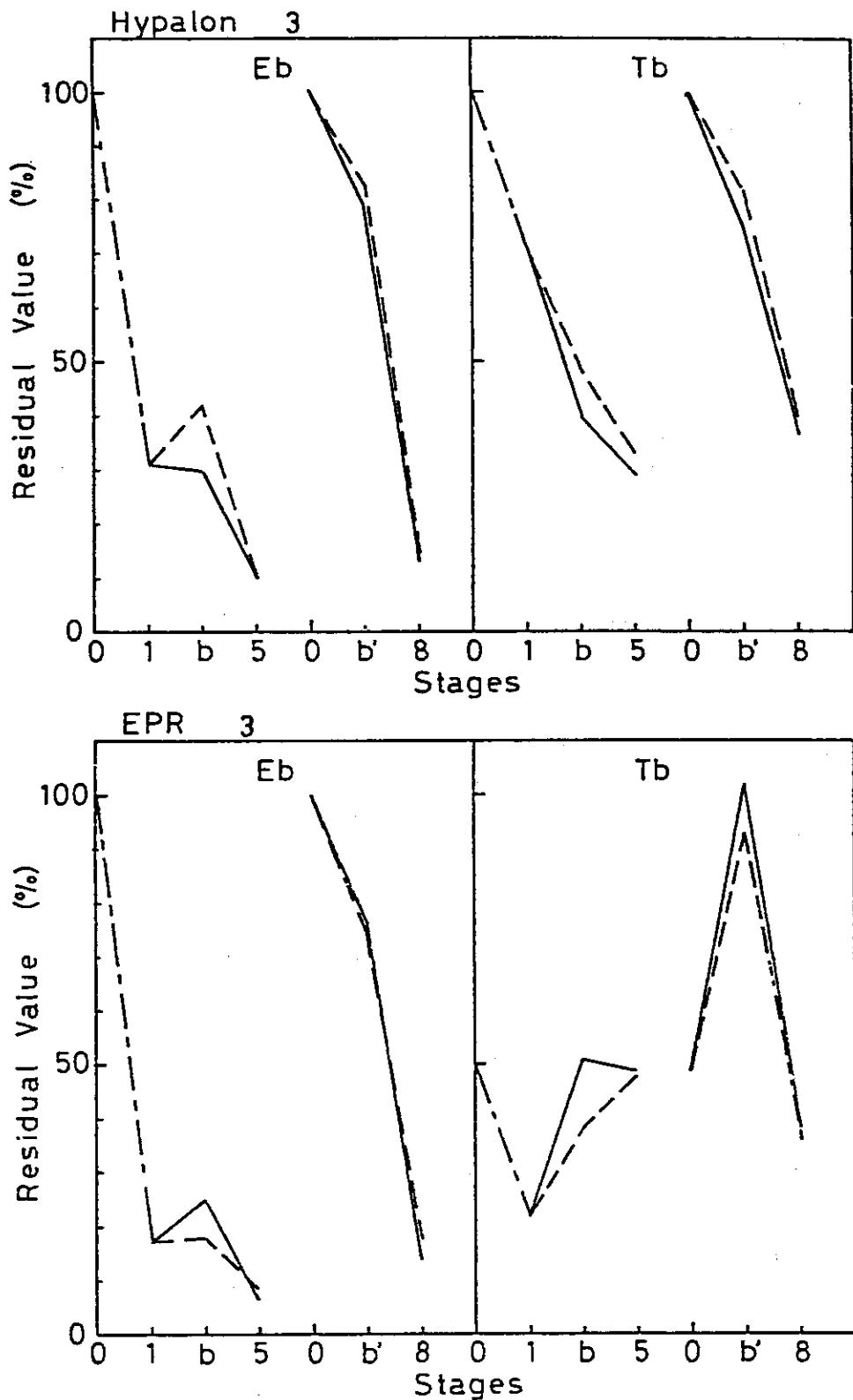


Fig.62 Residual elongation and strength of the cable samples (Hypalon 103 and EPR 109) tested under standard and rapid cooling conditions.

(Captions are the same as Fig.59)

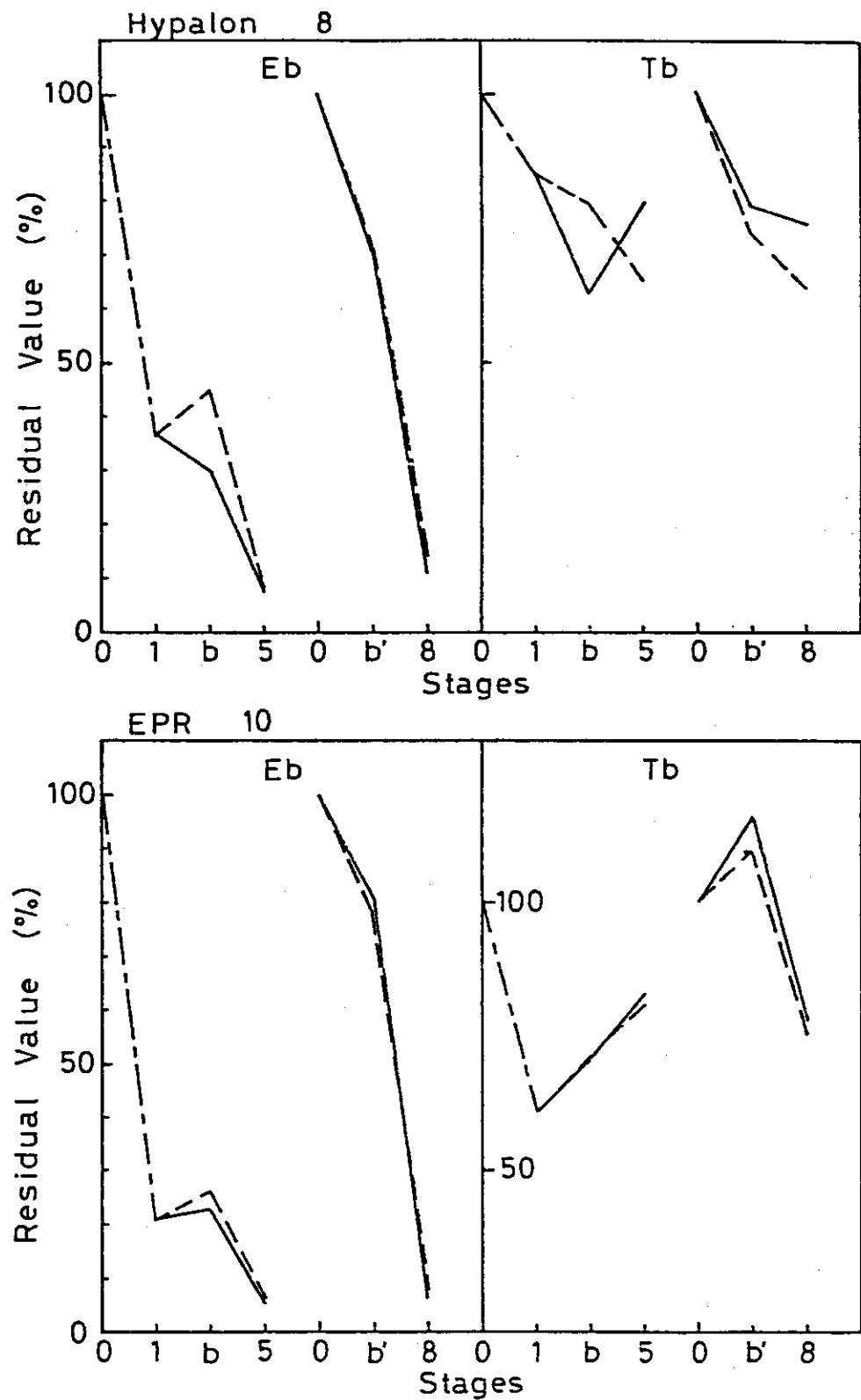


Fig.63 Residual elongation and strength of the cable samples (Hypalon 103 and EPR 109) tested under standard and rapid cooling conditions.

(Captions are the same as Fig.59)

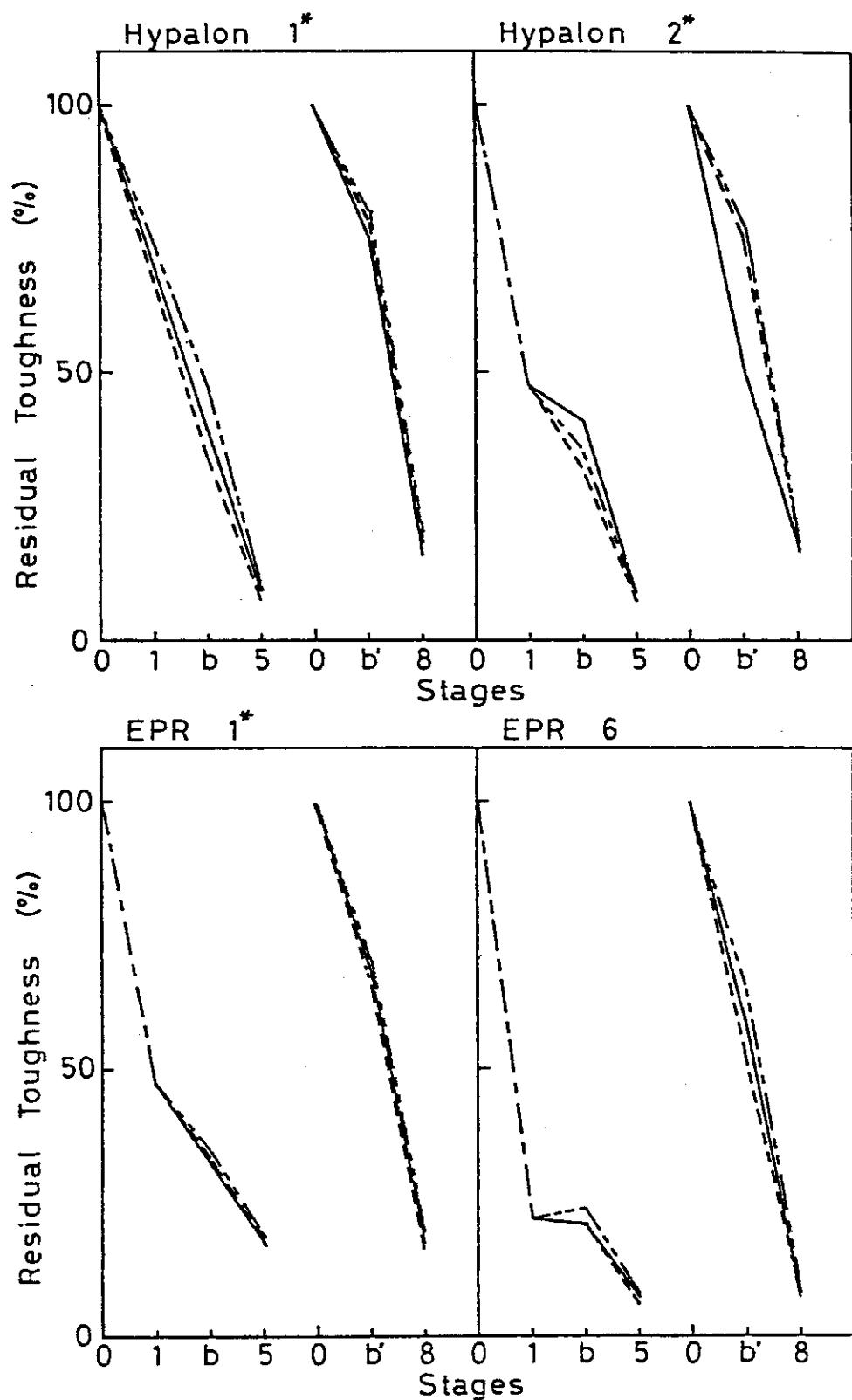


Fig.64 Residual toughness of the Hypalons and EPRs under various LOCA conditions.

— Standard condition, ---Slow heating,
- - - Rapid cooling

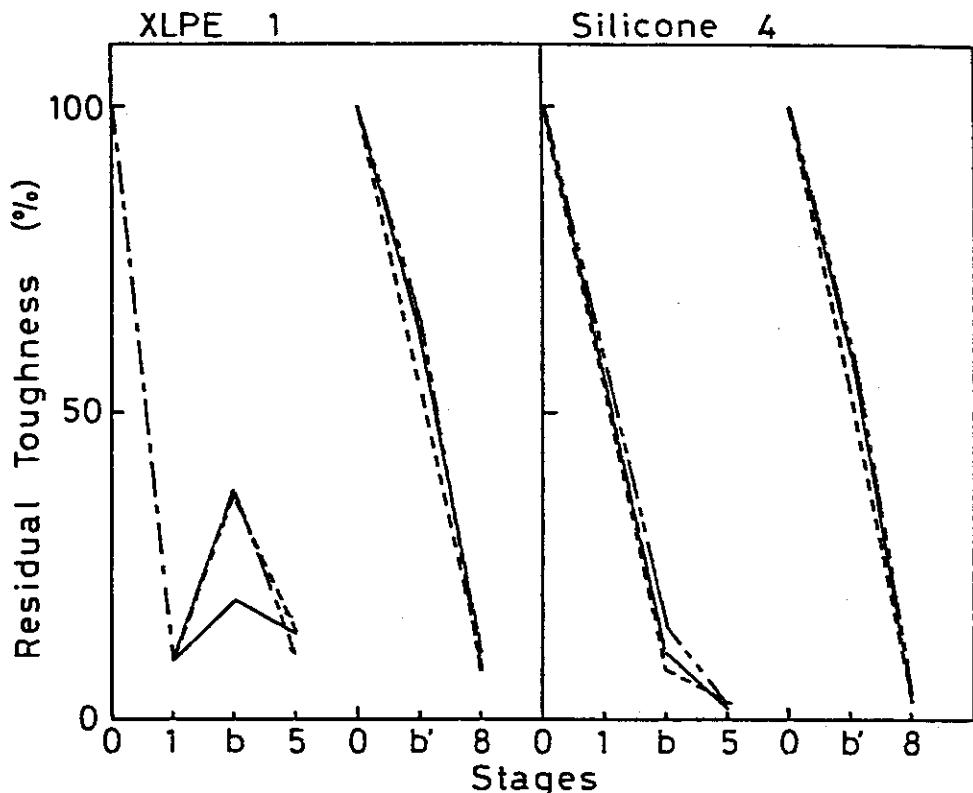


Fig.65 Residual toughness of the XLPE and Silicone under various LOCA conditions.

(Captions are the same as Fig.64)

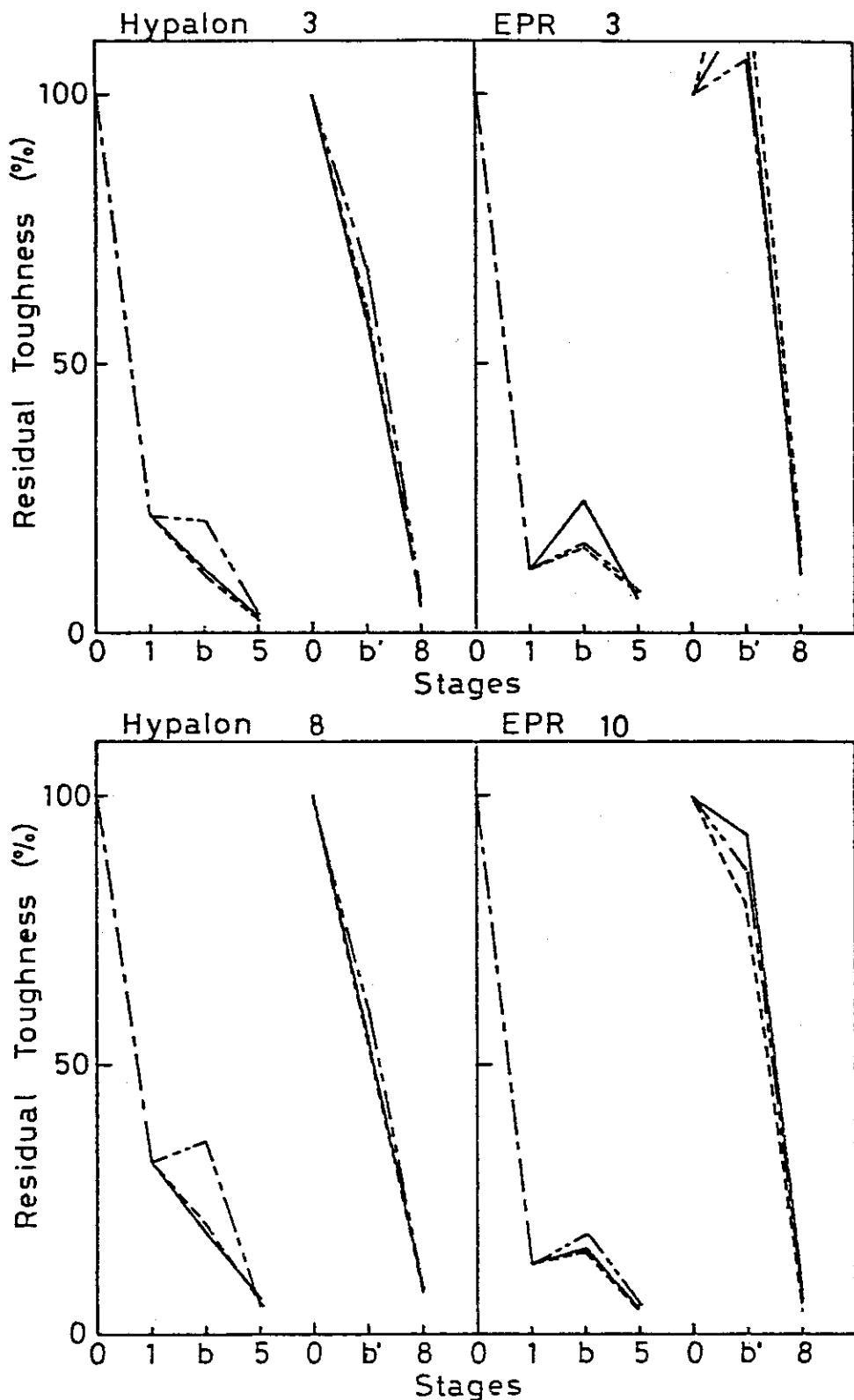


Fig.66 Residual toughness of the cable samples under various LOCA conditions.

(Captions are the same as Fig.64)

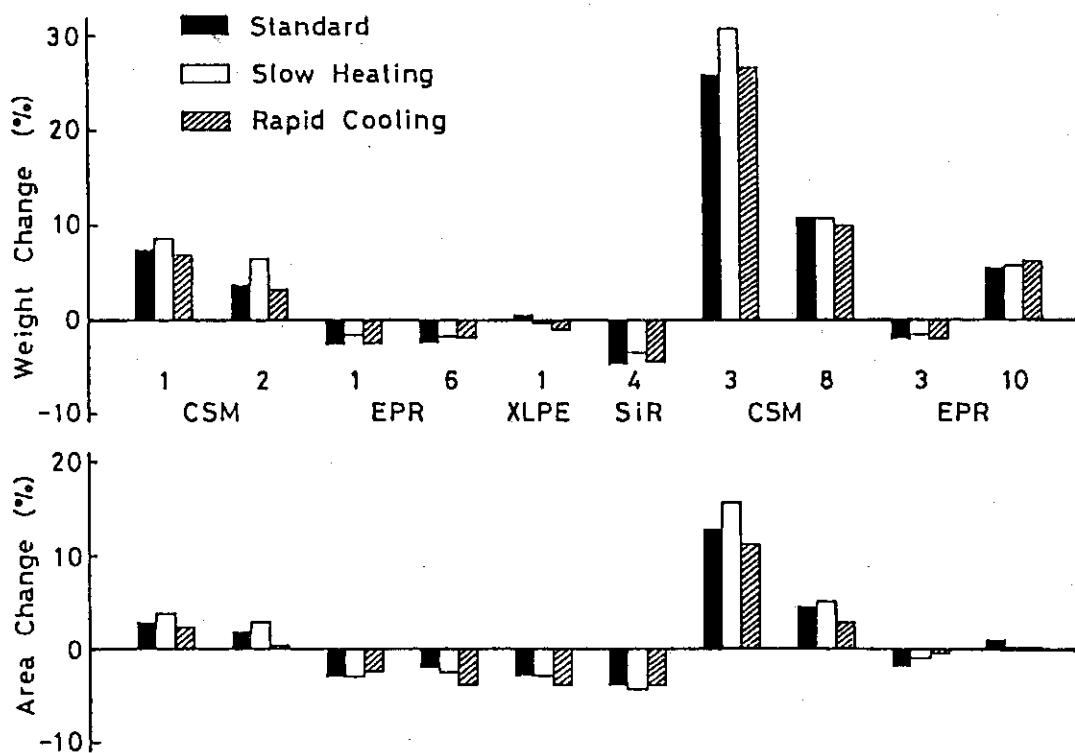


Fig. 67 Weight and area changes of the aged samples under various LOCA conditions.

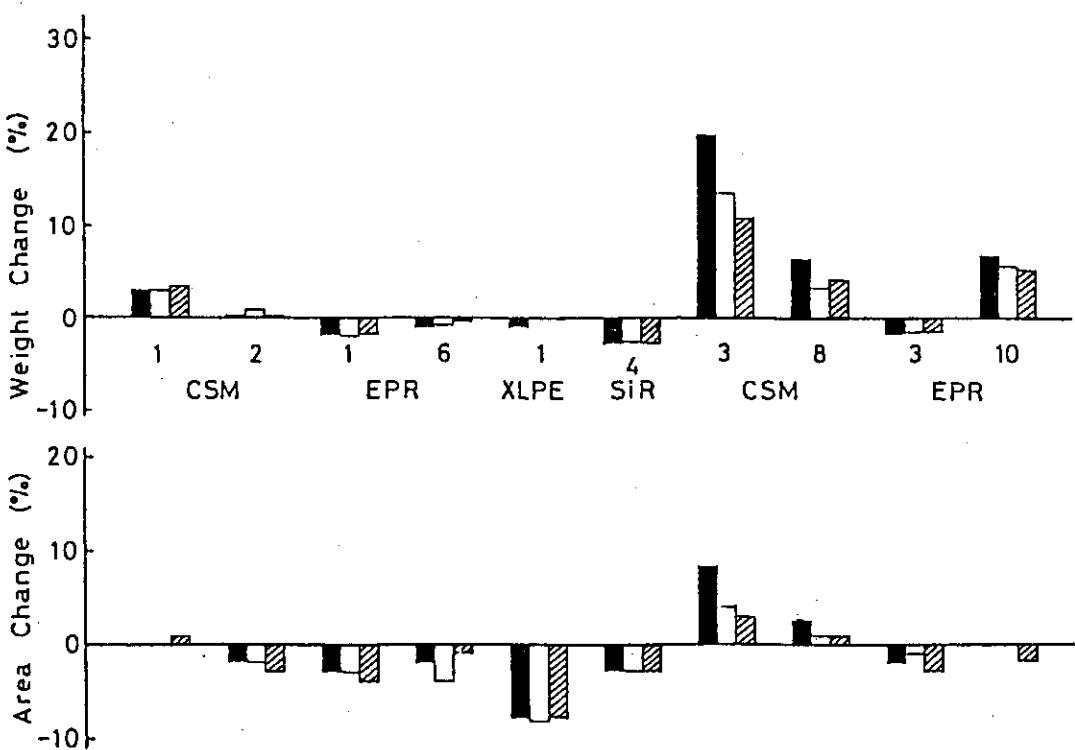


Fig. 68 Weight and area changes of the unaged samples under various LOCA conditions.

(Captions are the same as Fig. 67)

4.1.5 過渡温度条件の影響

IEEE Std 323-1974¹のAppendixに示されたPWRのLOCA時の模擬環境プロフィルでは安全上必要な裕度を保証するため、温度は+15°F(8°C)、圧力はゲージの+10%，放射線は+10%（事故時の線量）、電圧は±10%，時間としては設計基準事故に続く必要運転時間の+10%，環境の過渡状態については初めの過渡状態とピーク温度での滞留を少なくとも2回加えるなどが規定されている。したがってこれまで行ってきた実験ではPWR条件に関しては最高温度の150°Cに至る過程を2回与えるプロフィルを用いたが、過渡温度条件が絶縁材料の劣化にどのような影響を及ぼすかは極めて重要である。そのため、本節ではPWR用LOCA模擬環境に於ける初期の過渡温度条件を2回および1回与えたときの劣化に与える影響について検討する²。

(1) 実験方法

試料

試験用標準シート試料13種類のうちからモデル配合のハイバロン2種類、EPR3種類（モデル配合1および実用配合2種類）および架橋ポリエチレン1種類を用いた。

LOCA模擬環境プロフィル

本実験に使用したPWR用LOCA模擬環境プロフィルをFig. 1に示す。図中のγならびにCはそれぞれ、γ線照射ならびにケミカルスプレイの実施を示す。また、LOCA模擬環境暴露に先立って事前劣化を与えた試料と事前劣化なしの試料について試験した。この場合の事前劣化条件は空気中121°C、7日間熱老化後、空気中室温で10kGy/hのγ線を0.44MGy照射した。プロフィルに示したA～Hのステップは劣化の経時変化を見るための実験も併せて行っているため、途中で一旦温度を下げ試料の一部をとり出したことを示す。プロフィル(II)は初期の過渡温度条件の影響をみるために最高温度(150°C)に至る急昇温過程を1回のみとした場合(AA'，GG'FF')で、これらのステップのうちGG'およびFF'はプロフィル(I)のDD'およびCC'に対応する。但し、急昇温過程を1回とすると、1回分の線量が不足となるので、その分120°Cの過程を延長し、線量が等しくなるようにした。

(2) 結果及び考察

1) 機械的性質

Table 15ならびに16に事前劣化したものとしないものをLOCA模擬環境プロフィル(Fig.69)に暴露したときの各ステップにおける強度と伸びの保持率を示す。

ステップFF'ならびにGG'は初期の急昇温過程を1回のみ与えた場合であり、これに対応するのはステップCC'ならびにDD'である。LOCA模擬環境暴露時間はFF'（CC'）で15時間、GG'（DD'）で46時間、線量は事前劣化がある場合は0.59MGyおよび0.90MGy、事前劣化がない場合には0.15ならびに0.46MGyとなる。

Fig.70にステップC(F)における事前劣化なしおよび事前劣化した試料の強度と伸びの保持率を示す。棒グラフの上側は急昇温過程を2回与えた場合、下側は1回のみの場合を示す。事前劣化がない場合には架橋ポリエチレン、EPR4以外は急昇温過程の回数は殆ど影響を与えていない。架橋ポリエチレンでは若干影響がみられ、急昇温過程が1回の方が強度も伸びも劣化が少ないが、EPR4では逆に急昇温過程を2回与えた方が劣化がやや少ない。同様に事前劣化したものについても、架橋ポリエチレンには若干急昇温過程の回数の影響がみられるが、他の試料は殆ど影響を受けない。ただEPR1についてでは強度低下は2回与えた方がやや大きく伸びの低下は1回の方がやや大きいなど、わずかではあるが劣化挙動の異なるものもみられた。しかしながら、全体としては架橋ポリエチレンを除き、急昇温過程の回数の影響は小さい。

図には同様にステップD(G)における強度と伸びの保持率を示す。まず事前劣化がない場合、架橋ポリエチレンにわずかに違いがみられる外は急昇温過程の回数の影響はみられない。これに対し、事前劣化したものでは、CSM1と架橋ポリエチレンに影響がみられ、急昇温過程を2回与えた方が劣化が大きくなる。しかしながらこれら以外の試料ではその影響はステップC(F)に比べてさらに小さくなることがわかった。先に示したEPR1の例のように強度と伸びで異なった挙動を示す試料もあることから、急昇温過程の回数がどの程度劣化に影響するかを数値的にみるため、強度と伸びならびにこれらの積より算出したタフネスの残率について、通常の急昇温過程を2回与えた場合の値を基準にし1回の場合との比を求めTable 17に示した。AはステップC、BはステップDでの値を比較したものである。タフネス(Tn)の比は架橋ポリエチレンを除き1.0に近い値を示すものが多いことから急昇温過程の回数の影響が小さいことがわかるが、架橋ポリエチレンでは比の値が1.5~3.2と大きく、明らかに影響がみられた。特に事前劣化ありで比較的長時間暴露した場合に影響が強く現れている。その理由は明らかではないが、この試料はモデル配合であり、もともと多くの添加剤を含んでおらず、耐熱性がやや悪いため、急昇温過程、特に、150℃での照射を2回与えると著しく劣化すると考えられる。また、事前劣化があるとより影響が出るのは、事前劣化により酸化防止剤等が大部分消費されてしまうためであろう。

2) 電気的性質

Table 18に事前劣化なしおよび事前劣化後L O C A模擬環境に暴露した絶縁材料の体積固有抵抗の初期値に対する比の値の対数を示す。初期の急昇温過程を2回与えた場合C (C') , D (D') に対応する急昇温過程を1回与えた場合F (F') , G (G') を比較すると、両環境下における絶縁抵抗の低下は多くの場合ほとんど同じであり、最も違いがみられたものでも1桁をこえることはない。また、急昇温過程を2回与えた方がわずかでも絶縁低下が大きくなったケースも半数以下であり、急昇温過程の絶縁抵抗に与える影響はあまりないことがわかった。

3) 吸水膨潤

吸水膨潤に影響を与えるのは主として酸化劣化である事はすでに述べたが、吸水に影響を与える因子として急昇温過程における高温度での照射が考えられる。Table 19に各ステップにおける試料の重量増加率を示す。この表から、L O C A模擬環境プロフィルの各ステップでの比較、C (C') とF (F') , D (D') とG (G') を行うと、ほとんどの試料について吸水による重量変化率の差はわずかであり、急昇温過程の繰り返しの影響は機械的、電気的性質の場合と同様に極めて小さいことがわかる。機械的に若干影響がみられた架橋ポリエチレンについても、重量増加は殆どなく、急昇温過程の繰り返しの影響はみられない。

(3) まとめ

PWR用L O C A模擬環境における初期の急昇温過程の繰り返しが劣化に与える影響は、架橋ポリエチレン以外の試料については機械的性質、電気的性質、吸水膨潤のいずれに対しても殆ど見られない。架橋ポリエチレンでは機械的性質に影響がみられ、急昇温過程を繰り返し与えると劣化が大きくなる。

関連文献

1. IEEE Std. 323-1974,"IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations", IEEE(1974)
2. 日馬康雄, 伊藤政幸, 岡田漱平, 中瀬吉昭, 吉田健三, "電線材料のL O C A模擬環境劣化におよぼす過渡温度条件の影響", 電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-81-94(1981)

Table 15 Effect of rapid heating on mechanical degradation of insulating materials (with aging).

Step Sample	A		B		C		D	
	Tb/Tbo	Eb/Ebo	Tb/Tbo	Eb/Ebo	Tb/Tbo	Eb/Ebo	Tb/Tbo	Eb/Ebo
CSM 1*	77	57	75	52	73	48	58	28
CSM 2*	73	45	62	35	65	37	62	25
EPR 1*	89	41	86	37	80	38	86	32
EPR 3	78	18	77	21	74	18	81	12
EPR 4	73	28	70	29	65	23	76	18
XLPE 1*	57	40	69	55	46	29	43	22

Step Sample	E		F		G		H	
	Tb/Tbo	Eb/Ebo	Tb/Tbo	Eb/Ebo	Tb/Tbo	Eb/Ebo	Tb/Tbo	Eb/Ebo
CSM 1*	72	20	75	45	74	33	60	14
CSM 2*	62	16	66	33	67	24	54	11
EPR 1*	88	23	89	36	87	27	88	17
EPR 3	95	9.1	78	16	86	10	86	6.5
EPR 4	86	11	78	24	70	14	74	8.3
XLPE 1*	49	23	56	35	68	44	43	19

Table 16 Effect of rapid heating on mechanical degradation of insulating materials (without aging).

Step Sample	A' Tb/Tb。 Eb/Eb。		B' Tb/Tb。 Eb/Eb。		C' Tb/Tb。 Eb/Eb。		D' Tb/Tb。 Eb/Eb。	
CSM 1*	93	94	95	86	92	76	83	52
CSM 2*	92	91	89	80	87	74	80	49
EPR 1*	93	89	86	84	77	75	82	44
EPR 3	87	73	76	60	69	49	67	21
EPR 4	90	82	74	62	68	54	75	31
XLPE 1*	70	66	86	81	72	67	47	33

Step Sample	E' Tb/Tb。 Eb/Eb。		F' Tb/Tb。 Eb/Eb。		G' Tb/Tb。 Eb/Eb。		H' Tb/Tb。 Eb/Eb。	
CSM 1*	82	30	91	72	89	50	79	21
CSM 2*	73	25	87	70	90	48	86	21
EPR 1*	88	27	89	67	80	42	89	19
EPR 3	76	11	65	36	70	18	74	7.8
EPR 4	83	14	83	54	78	26	81	9.8
XLPE 1*	50	27	92	78	55	41	46	21

Table 17 Ratio of mechanical properties of A (under single transient) to B (double transient) in simulated LOCA environments.

(A) values obtained at step C

Sample	Tb		Eb		Tn	
	F'/C'	F/C	F'/C'	F/C	F'/C'	F/C
CSM 1*	1.11	1.03	0.95	0.94	1.05	0.96
CSM 2*	1.00	1.02	0.95	0.89	0.95	0.91
EPR 1*	1.16	1.11	0.89	0.95	1.03	1.05
EPR 3	0.99	1.05	0.74	0.89	0.72	0.94
EPR 4	1.22	1.20	1.00	1.04	1.22	1.26
XLPE 1*	1.28	1.22	1.16	1.21	1.49	1.47

(B) values obtained at step D

Sample	Tb		Eb		Tn	
	G'/D'	G/D	G'/D'	G/D	G'/D'	G/D
CSM 1*	1.07	1.28	0.96	1.18	1.03	1.50
CSM 2*	1.13	1.08	0.98	0.96	1.10	1.04
EPR 1*	0.98	1.01	0.96	0.84	0.93	0.85
EPR 3	1.05	1.06	0.86	0.83	0.90	0.95
EPR 4	1.04	0.92	0.84	0.78	0.87	0.72
XLPE 1*	1.17	1.58	1.24	2.00	1.45	3.16

Table 18 Effect of rapid heating on volume resistivity of insulating materials under simulated LOCA environments.

Sample	Step (without aging)				Step (with aging)			
	C'	F'	D'	G'	C	F	D	G
CSM 1*	0.05	-0.09	-0.85	-0.72	-0.50	-0.83	-0.86	-1.18
CSM 2*	1.07	0.37	0.37	0.40	0.85	0.29	0.16	-0.05
EPR 1*	-0.11	0.11	0.16	-0.02	0.34	0.23	0.18	-0.12
EPR 3	-0.59	-0.22	-0.44	-0.34	-0.18	0.30	-0.13	-0.23
EPR 4	-0.84	-0.90	-1.19	-1.19	-0.78	-0.79	-1.26	-0.97
XLPE 1*	-0.84	-0.59	-0.60	-0.65	-0.73	-0.51	-0.71	-0.48

Table 19 Effect of rapid heating on weight change of insulating materials under simulated LOCA environments.

Step Sample	C (with aging)	F	D	G	C'	F'	D'	G'
					(without aging)			
CSM 1*	-0.6	-0.6	1.7	0	-1.2	-0.6	-0.6	-0.6
CSM 2*	-0.8	-3.1	0	0	-2.3	-	-2.3	-
EPR 1*	-2.3	-2.3	-2.3	-2.8	-2.0	-2.2	-2.1	-2.0
EPR 3	-1.2	-1.7	-1.7	-1.7	-1.2	-1.1	-1.2	-1.1
EPR 4	2.2	1.6	5.3	5.1	0.5	0.6	3.6	3.5
XLPE 1*	0.9	0	0	0	0	-1.0	0	-0.9

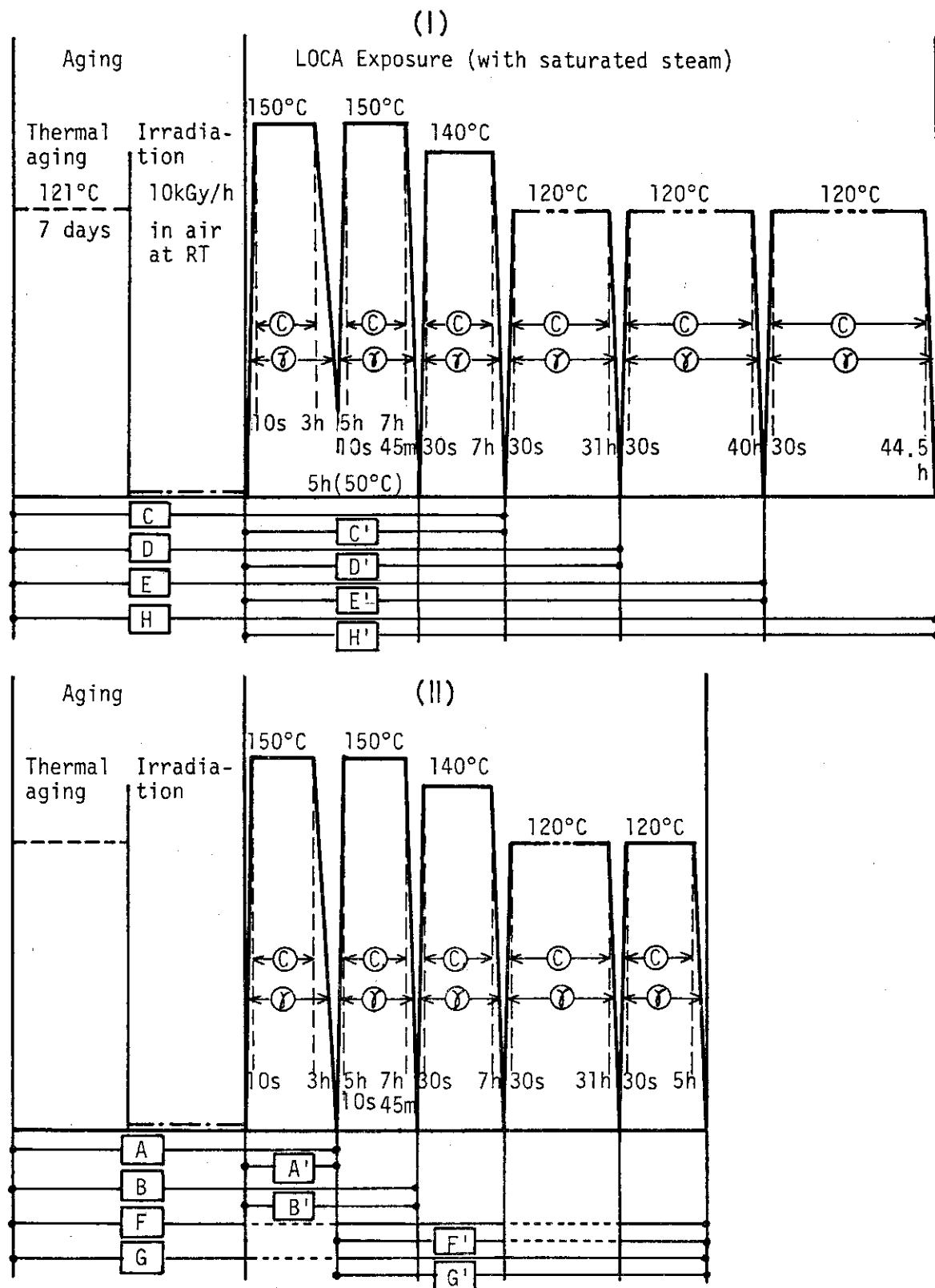


Fig.69 Simulated LOCA environments for PWR with Saturated steam (simultaneous).

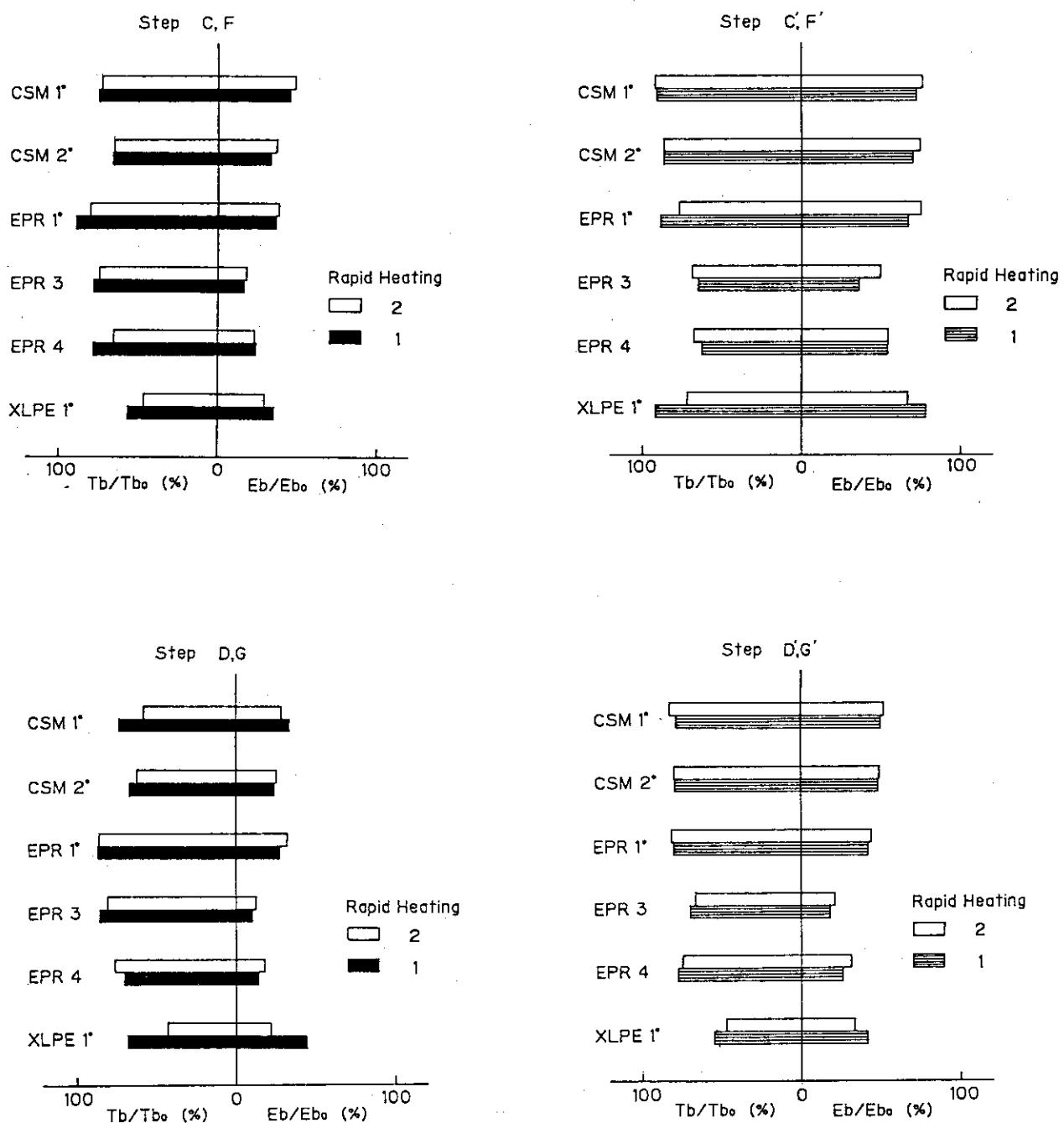


Fig.70 Effect of rapid heating on mechanical degradation of insulating materials.

4.1.6 スプレイの影響

原子炉の格納容器内は仮想事故であるLOCA時には高温の水蒸気、放射線、スプレイに曝されることになる。したがってその事故に対応する試験方法としてはこれらを模擬した環境を与えればよい。

しかし電線ケーブルの試験を考えた場合、その劣化に影響をおよぼさない劣化因子は試験法の簡略化の上で省略することも可能であると考えられる。本節ではLOCA模擬環境での電線材料の劣化に対してスプレイがどの程度の影響を持つかを調べた²⁻⁵。

(1) 実験方法

PWR, BWRの各々のLOCA模擬環境についてスプレイがある場合と、ない場合の両者を比較した。Fig.71,72に各々のプロファイルを示す。ここで、PWRについては線量が多いので、いったん圧力容器の温度を下げ一部の試料を取り出して測定に供し、比較的低線量での劣化のデータをも得た。なお本節の実験においては圧力容器に空気は導入しなかった。スプレイはBWRは水スプレイ、PWRはケミカルスプレイであり、この組成はIEEE Std 323, 383-1974¹に準拠した。また、物性の測定は前節と同様である。

(2) 結果と考察

1) 機械的性質

Table 20~22にBWR LOCA模擬環境でスプレイの有り、なしの比較に供した試料について未劣化(Original), 事前劣化(Aged)後の性質ならびにLOCA模擬環境暴露後の機械的性質を示す。同様に、Table 23~27にPWR条件下における結果を示す。

Fig.73にBWR LOCA模擬環境に暴露した試験用標準シート試料の100%モジュラスの値を示す。図中棒グラフの上に示した数値はショナー硬度の値を示す。モジュラスについては、スプレイの有り、なしによる一般的な傾向は認められない。また、硬度についても大きな違いは見られない。

Fig.74~76はLOCA模擬環境暴露においてスプレイ有りの場合となしの場合の破断強度並びに伸びの保持率を示す。棒グラフ群の上の二つはエージングなしの場合を、下の二つはエージング後LOCA模擬環境に暴露した場合を示すが、スプレイ有無の影響は試料により、また、エージングの有り、なしにより異なる。エージングなしの試料では、強度についてはハイパロンの大半がスプレイなしの方が若干保持率が高く、EPR,XLPEでは違いがみられない。また、伸びについてはスプレイの有無による違いはCSM 4, XLPE 1*, CR 1などを除き比較的小さい。一方、エージングした試料では、XLPEを除き、殆どの試料にスプレイの影響が見られスプ

レイなしの場合の伸びの保持率が高い。しかしながら、試料の中には強度と伸びが反対の傾向を示すものもあることから劣化の指標として強度と伸びの両方に関係する破断エネルギー(Toughness)を比較した結果をFig.77,78に示す。図の左側はエージングあり、右側はエージングなしの場合を示すが、これらの図から、エージングを行った試料ではごく一部の試料を除き、スプレイの実施により破断エネルギーの低下が大きくなる。エージングなしの場合、ハイパロンの大半およびEPRではスプレイなしの方が劣化が大きい傾向を示しており、スプレイは劣化に大きな影響は与えていないことがわかる。これらの結果から、エージングしたものについてはスプレイは劣化を促進するが、エージングしていないものに対しては、スプレイは必ずしも劣化を促進しないことを示している。

Fig.79~83にPWR用LOCA模擬環境において、スプレイを実施した場合としない場合の強度、伸び、タフネスの保持率を示す。PWR条件の場合にはエージングの有無による劣化挙動の違いは比較的少ないが、試料によっては若干見られるものもある。エージングしたものでは、ハイパロン、シリコーンゴムなどにはスプレイは劣化を促す。しかしながら、EPRやXLPEなどではスプレイの影響は見られない。一方、エージングしてない試料では、一部の試料にスプレイの影響があり、スプレイ下での劣化が小さくなるものもある。Fig.82,83に示したタフネスの結果から、エージングなしの方が劣化が大きくなるものが多いなど、スプレイは必ずしも劣化を促進させるとは限らない。

2) 電気的性質

Table 28および29にBWR用条件ならびにPWR用条件においてスプレイを実施した場合としない場合の体積固有抵抗の変化を示す。表中の値は体積固有抵抗の初期値に対する比の対数で示してある。値が負の場合は絶縁抵抗が低下したことを示す。Table 28のBWR条件では、水スプレイは事前劣化(エージング)の有無に係わらず絶縁抵抗を低下させる。特に、架橋ポリエチレン、シリコーンゴムでは影響が大きい。

一方、Table 29に示したPWR条件では、EPRはいずれもスプレイがあると絶縁低下が大きいが、架橋ポリエチレンやシリコーンゴムではBWR条件の場合と異なり、スプレイがある方が絶縁低下が少ないという結果になったが、その理由については明らかではない。これらの事実から、水スプレイは電気的性質の劣化を促進するが、ケミカルスプレイは必ずしも劣化を促進するとは限らない。

3) 吸水膨潤

Table 30,31にBWR条件下で水スプレイがある場合とない場合の重量ならびに面積変化を、Table 32~35に同じくPWR条件下でスプレイがある場合とない場合

の重量ならびに面積変化を示した。これまでに述べたように、絶縁材料をLOCA模擬環境に暴露するとシリコーンゴム以外の試料の大半は吸水し、重量ならびに面積が増加するが、スプレイの有無の影響を調べた結果、BWR, PWRいずれの場合にもシリコーンゴムを除く多くの試料がスプレイの実施により吸水し、重量ならびに面積増加が大きくなる傾向を示す。しかしながら、試料の中にはスプレイを実施した方が重量増加も面積増加も小さいものも見られるなど、吸水挙動は複雑である。また、シリコーンゴムについては、スプレイの実施により重量が減少するが、この場合面積変化は殆どないことから表面の加水分解が主な原因と考えられる。

(3) まとめ

LOCA模擬環境に空気が存在しない状態でスプレイの効果を検討した結果、

- 1) BWR条件における水スプレイの影響は材料の種類、配合、事前劣化の有無により異なり、事前劣化がある場合には劣化を促進させるが、事前劣化がない場合には、一部の試料を除き大きな影響を与えない。

同様に、PWR条件下におけるケミカルスプレイも材料の機械的性質に影響を与えるが、その影響はやはり事前劣化の有無により異なり、事前劣化したものでは一部の試料を除きスプレイは劣化を促進させるのに対して、事前劣化していないものについては必ずしも劣化を促進させるとはいえない。

- 2) 電気的性質については、水スプレイとケミカルスプレイでその影響が異なり、水スプレイの場合には事前劣化の有無に係わらず絶縁材料の絶縁抵抗を低下させる。特に、架橋ポリエチレンやシリコーンゴムでその影響が顕著である。一方、ケミカルスプレイの場合には、EPRについては事前劣化の有無に係わらず絶縁低下を促進させるが、上記の架橋ポリエチレンやシリコーンゴムに対しては絶縁低下を少なくする方向に働くなど、ケミカルスプレイは必ずしも電気的性質の劣化を促進させない。

3) 吸水膨潤

水スプレイはシリコーンゴム以外の吸水膨潤を促す。一方、ケミカルスプレイも水スプレイ同様、実用配合のEPR、クロロプロレンなどの吸水膨潤を促すが、試料の中にはスプレイを実施すると重量増加も面積増加も少なくなるものもあり、吸水挙動は複雑であること、また、シリコーンゴムについては、水スプレイ、ケミカルスプレイ共に重量減少を促すこと。さらに、水スプレイとケミカルスプレイによる膨潤を比較すると、放射線量が少ないBWR条件下（水スプレイ）の方が膨潤する。

以上の結果から、BWR, PWRのいずれのLOCA模擬環境下においてもスプレイの実施は材料の劣化になんらかの影響を及ぼす。とくに40年相当の経年劣化を与えたものに対してはその劣化を促進させることが多い。BWR用条件については、飽和水蒸気環境ということで現行の試験法推奨案では省略可とされているが、飽和水蒸気環境下であってもスプレイの影響が認められることから、模擬環境からスプレイを省略することは望ましくないと考えられる。さらに、現実の環境では空気の存在が予想され、放射線と熱による酸化劣化反応による活性基の生成により、吸水などがさらに促進されることも考えられる。

関連文献

1. IEEE Std. 323-1974, "IEEE Standard for Qualifying Class I E Equipment for Nuclear Power Generating Stations", IEEE(1974)
2. 八木敏明, 日馬康雄, 伊藤政幸, 岡田漱平, 吉川正人, 吉田健三, "放射線照射したゴム材料の沸騰スプレイ液中における膨潤挙動", JAERI-M 83-072(1983)
3. 吉川正人, 瀬口忠男, 日馬康雄, 吉田健三, "絶縁用EPRの水中照射による電気絶縁抵抗の変化", 電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-85-160(1985)
4. 八木敏明, 日馬康雄, 伊藤政幸, 岡田漱平, 田村直幸, 川上和市郎, "放射線照射したシリコーンゴムの薬液中における劣化", 同上 EIM-85-161(1985)
5. 八木敏明, 日馬康雄, 伊藤政幸, 岡田漱平, 川上和市郎, "絶縁材料のLOCA模擬環境下における吸水特性の変化", 同上 EIM-86-129(1986)

Table 20 Some mechanical properties data of polymeric cable materials used for BWR LOCA simulation tests
(Original and Aged samples)

No	Original				Aged				
	Sample	M ₁₀₀ (kg/cm ²)	Tb (kg/cm ²)	Eb (%)	H	M ₁₀₀ (kg/cm ²)	Tb (kg/cm ²)	Eb (%)	H
CSM	1*	23	204 (208)	667 (671)	63	81	197 (203)	292 (307)	80
	2*	35	190 (196)	530 (534)	72	122	216 (219)	255 (258)	88
	3	46	208 (210)	610 (615)	70	119	173 (176)	194 (200)	86
	4	68	171 (183)	358 (380)	78	164	180 (183)	125 (129)	90
EPR	1*	17	79 (81)	482 (487)	57	43	85 (86)	197 (201)	68
	3	18	80 (82)	1029 (1041)	62	50	69 (70)	186 (188)	78
	4	34	85 (92)	448 (465)	71	53	57 (58)	108 (120)	82
XLPE	1*	103	241 (247)	550 (562)	99	118	254 (262)	383 (397)	99
	1	18	139 (142)	727 (739)	61	—	134 (136)	86 (88)	92
CR	2*	26	202 (209)	484 (495)	66	—	184 (193)	61 (63)	94
	3	23	139 (141)	742 (764)	67	137	211 (214)	182 (186)	85
	SiR	1	15	95 (100)	469 (494)	51	—	64 (70)	92 (100)
	2	10	89 (90)	888 (894)	45	—	58 (64)	69 (76)	80

* formulation-known model materials

Table 21 Some mechanical properties data of polymeric cable materials after BWR LOCA simulation tests under spray and without spray conditions (Unaged samples)

Run No	W8D42				S8D45				
	Spray				Without Spray				
Sample	M ₁₀₀ (kg/cm ²)	Tb (kg/cm ²)	Eb (%)	H	M ₁₀₀ (kg/cm ²)	Tb (kg/cm ²)	Eb (%)	H	
CSM	1*	51	170 (176)	281 (291)	73	46	152 (159)	299 (305)	74
	2*	54	178 (182)	295 (299)	73	57	151 (154)	285 (291)	77
	3	42	121 (123)	321 (325)	66	42	102 (104)	284 (298)	70
	4	44	79 (80)	190 (200)	62	36	117 (124)	307 (320)	61
EPR	1*	22	58 (59)	296 (304)	60	27	64 (65)	223 (228)	62
	3	28	47 (49)	271 (295)	70	30	49 (50)	244 (255)	70
	4	40	47 (51)	172 (183)	74	44	52 (54)	164 (174)	75
XLPE	1*	102	151 (162)	281 (305)	98	95	169 (177)	350 (366)	98
	1	—	39 (42)	63 (70)	66	61	119 (124)	189 (194)	71
	2*	—	61 (63)	60 (62)	76	—	131 (138)	95 (100)	79
	3	53	54 (58)	101 (106)	57	66	74 (79)	112 (116)	65
SiR	1	42	43 (46)	103 (111)	70	—	61 (63)	92 (98)	77
	2	49	54 (59)	113 (125)	78	—	63 (69)	83 (92)	81

Table 22 Some mechanical properties data of polymeric cable materials after BWR LOCA simulation tests under spray and without spray conditions (Aged samples)

Run No	W8D42				S8D45				
	Spray				Without Spray				
Sample	M ₁₀₀ (kg/cm ²)	Tb (kg/cm ²)	E _b (%)	H	M ₁₀₀ (kg/cm ²)	Tb (kg/cm ²)	E _b (%)	H	
CSM	1*	—	62 (64)	91 (92)	70	65	89 (94)	132 (134)	
	2*	67	80 (86)	117 (120)	69	71	140 (149)	183 (192)	
	3	57	57 (60)	99 (102)	69	50	70 (75)	138 (149)	
	4	—	51 (54)	76 (80)	66	45	59 (69)	106 (122)	
EPR	1*	33	52 (54)	153 (156)	60	38	75 (77)	187 (193)	
	3	43	55 (56)	154 (157)	73	58	67 (68)	125 (134)	
	4	—	51 (52)	78 (79)	77	54	55 (56)	104 (109)	
	XLPE 1*	106	147 (161)	214 (243)	96	106	147 (158)	223 (241)	
CR	1	—	33 (35)	8 (9)	85	—	49 (51)	18 (19)	
	2*	—	43 (48)	5 (5)	94	—	68 (73)	9 (9)	
	3	—	57 (61)	50 (52)	65	—	67 (70)	53 (54)	
	SiR	1	—	30 (34)	36 (43)	81	—	44 (47)	62 (66)
	2	—	47 (51)	37 (40)	84	—	54 (58)	47 (50)	
								85	

Table 23 Some mechanical properties data of polymeric cable materials used for PWR LOCA simulation tests (Original and Aged samples)

Run No	Original				Aged				
	M ₁₀₀ (kg/cm ²)	Tb (kg/cm ²)	E _b (%)	H	M ₁₀₀ (kg/cm ²)	Tb (kg/cm ²)	E _b (%)	H	
CSM	1*	25	215 (220)	694 (697)	66	62	221 (226)	363 (366)	
	2*	36	192 (194)	555 (561)	73	83	193 (197)	274 (276)	
	3	50	195 (199)	629 (631)	74	103	159 (165)	209 (215)	
	4	47	203 (208)	594 (601)	77	123	201 (208)	236 (245)	
EPR	1*	18	80 (81)	504 (514)	60	34	68 (68)	195 (196)	
	3	15	85 (89)	1215 (1227)	62	43	58 (59)	178 (184)	
	4	36	95 (98)	479 (485)	74	57	62 (64)	139 (143)	
	XLPE 1*	109	270 (280)	563 (583)	99	112	162 (179)	236 (269)	
CR	1	19	139 (140)	844 (854)	65	111	123 (128)	109 (114)	
	2*	27	181 (183)	496 (503)	67	—	184 (191)	45 (47)	
	3	16	131 (135)	1068 (1073)	66	65	152 (157)	251 (259)	
	SiR	1	6	101 (103)	541 (548)	53	62	70 (73)	114 (118)
	2	12	90 (91)	783 (804)	50	—	67 (68)	79 (81)	

Table 24 Some mechanical properties data of unaged samples tested under spray and without spray conditions (Step 3 in PWR LOCA profile)

Run No	S1W54				S1W53				
	Sample	Spray			Without Spray			H	
		M ₁₀₀ (kg/cm ²)	Tb (kg/cm ²)	Eb (%)	H	M ₁₀₀ (kg/cm ²)	Tb (kg/cm ²)	Eb (%)	
CSM	1*	63	174 (181)	257 (263)	77	72	179 (181)	234 (236)	78
	2*	84	160 (162)	208 (212)	82	84	156 (163)	207 (212)	82
	3	90	114 (118)	144 (149)	85	115	140 (146)	139 (143)	86
EPR	4	85	178 (180)	248 (251)	83	119	190 (195)	202 (206)	85
	1*	35	64 (67)	166 (172)	67	33	68 (70)	179 (185)	65
	3	45	69 (71)	153 (156)	74	41	60 (62)	154 (157)	73
XLPE	4	57	65 (66)	137 (139)	82	59	71 (73)	156 (159)	89
	1*	96	162 (169)	271 (278)	97	97	167 (174)	288 (299)	97
	3	—	89 (96)	74 (78)	85	—	106 (109)	77 (81)	89
CR	2*	—	92 (95)	44 (46)	87	—	134 (147)	60 (65)	89
	3	76	140 (146)	169 (177)	73	67	118 (119)	162 (165)	74
	SiR	1	—	58 (62)	56 (60)	83	—	65 (69)	55 (56)
	2	—	68 (70)	49 (50)	88	—	65 (71)	44 (48)	87

Table 25 Some mechanical properties data of aged samples tested under spray and without spray conditions (Step 3 in PWR LOCA profile)

Run No	S1W54				S1W53				
	Sample	Spray			Without Spray			H	
		M ₁₀₀ (kg/cm ²)	Tb (kg/cm ²)	Eb (%)	H	M ₁₀₀ (kg/cm ²)	Tb (kg/cm ²)	Eb (%)	
CSM	1*	99	137 (142)	136 (139)	83	127	186 (191)	147 (152)	84
	2*	124	131 (136)	107 (108)	87	134	166 (171)	131 (136)	88
	3	105	110 (113)	102 (102)	85	—	135 (140)	81 (85)	90
EPR	4	100	124 (126)	126 (130)	83	145	176 (181)	131 (135)	88
	1*	43	66 (67)	144 (146)	69	52	70 (70)	129 (130)	70
	3	70	72 (73)	102 (105)	79	—	68 (69)	84 (86)	81
XLPE	4	—	66 (67)	80 (82)	84	—	74 (75)	78 (83)	86
	1*	101	270 (280)	563 (583)	99	105	122 (130)	144 (160)	97
	3	—	46 (49)	11 (12)	91	—	59 (61)	18 (19)	92
CR	2*	—	58 (65)	6 (6)	96	—	82 (95)	5 (5)	98
	3	—	79 (86)	58 (63)	80	—	120 (131)	82 (87)	79
	SiR	1	—	49 (53)	34 (37)	86	—	46 (49)	29 (30)
	2	—	58 (62)	34 (37)	89	—	61 (67)	28 (31)	91

Table 26 Some mechanical properties data of aged samples tested under spray and without spray conditions
(After PWR LOCA simulation tests)

Run No	S1W54				S1W53				
	Spray				Without Spray				
	Sample	M ₁₀₀ (kg/cm ²)	T _b (kg/cm ²)	E _b (%)	H	M ₁₀₀ (kg/cm ²)	T _b (kg/cm ²)	E _b (%)	H
CSM	1*	154	158 (163)	101 (105)	87	—	152 (157)	95 (96)	87
	2*	—	155 (159)	79 (81)	91	—	170 (177)	93 (96)	91
	3	—	99 (101)	43 (44)	89	—	117 (123)	50 (51)	90
	4	—	103 (105)	93 (94)	76	—	117 (122)	88 (90)	81
EPR	1*	79	75 (79)	98 (100)	74	—	62 (66)	80 (84)	74
	3	—	76 (80)	72 (75)	82	—	67 (70)	66 (69)	83
	4	—	73 (74)	75 (76)	86	—	76 (77)	64 (66)	87
XLPE	1*	101	133 (136)	159 (163)	96	102	109 (111)	111 (114)	95
	1	—	129 (136)	19 (21)	97	—	116 (121)	16 (18)	97
CR	2*	—	27 (31)	1 (2)	98	—	23 (24)	1 (1)	99
	3	—	56 (61)	38 (40)	81	—	66 (72)	41 (45)	83
	1	—	36 (38)	15 (17)	91	—	51 (55)	23 (25)	91
SiR	2	—	32 (33)	8 (8)	95	—	66 (67)	18 (18)	95

Table 27 Some mechanical properties data of unaged samples tested under spray and without spray conditions
(After PWR LOCA simulation tests)

Run No	S1W54				S1W53				
	Spray				Without Spray				
	Sample	M ₁₀₀ (kg/cm ²)	T _b (kg/cm ²)	E _b (%)	H	M ₁₀₀ (kg/cm ²)	T _b (kg/cm ²)	E _b (%)	H
CSM	1*	—	111 (115)	65 (67)	87	—	150 (153)	86 (88)	87
	2*	—	95 (99)	42 (44)	91	—	154 (168)	79 (82)	91
	3	—	85 (86)	20 (21)	90	—	97 (98)	38 (39)	90
	4	—	69 (75)	40 (41)	82	—	71 (74)	51 (54)	83
EPR	1*	—	76 (79)	83 (86)	75	—	65 (68)	86 (89)	74
	3	—	66 (71)	43 (45)	86	—	66 (69)	48 (51)	85
	4	—	76 (78)	44 (46)	87	—	87 (91)	55 (58)	89
XLPE	1*	109	109 (112)	99 (104)	95	—	103 (109)	90 (99)	95
	1	—	49 (56)	4 (5)	97	—	76 (84)	5 (6)	99
CR	2*	—	15 (16)	2 (2)	97	—	30 (36)	0.7 (0.8)	99
	3	—	38 (38)	21 (21)	82	—	35 (36)	23 (24)	79
	1	—	24 (25)	8 (8)	93	—	55 (58)	19 (20)	93
SiR	2	—	31 (32)	7 (7)	96	—	55 (58)	12 (12)	96

Table 28 Effect of water spray on volume resistivity of the insulating materials under BWR LOCA simulation test

実験略称	試料記号	劣化条件コード	試料名	EPR-1	EPR-3	EPR-4	XLPE
S8D42	0	Original	(16.19)	(16.38)	(16.02)	(17.50)	
W8D45	5	+B(166h)WR(27M)	0.03	-0.86	-0.62(V)	-1.25(V)	
	8	B(166h)WR(27M)	-0.05(U)	-1.05	-0.68	-0.81	
S8D45	H+R	H/R(50MS4h)	0.00	-0.29	-0.06	-0.47	
	5	+B(161h)R(26.2M)	0.26	-0.55(sV)	-0.28	-0.37(sV)	
	8	B(161h)R(26.2M)	0.01	-0.57	-0.40	-0.43	

+ = H/R(50MS4h)
W: water spray

実験略称	試料記号	劣化条件コード	試料名	Silicone-1	Silicone-2
W8D42	0	Original	(15.01)	(15.66)	
W8D45	5	+B(166h)WR(27M)	-2.04	-1.62	
	8	B(166h)WR(27M)	-0.33	-0.23	
S8D45	H+R	H/R(50MS4h)	-1.49(C)	-1.94	
	5	+B(161h)R(26.2M)	-1.86	-0.65	
	8	B(161h)R(26.2M)	0.83	0.16	

+ = H/R(50MS4h)

Table 29 Effect of chemical spray on volume resistivity of the insulating materials under PWR LOCA simulation tests

実験略称	試料記号	劣化条件コード	試料名	EPR-1	EPR-3	EPR-4	XLPE	Silicone-1	Silicone-2
SIW53 ~SIW54	0	Original	(15.99)	(15.52)	(15.78)	(17.27)	(15.62)	(16.53)	
	H+R	H/R(49.7M60h)	-0.01	-0.36	-0.18	-0.82	-0.30	-1.63	
SIW53	a	+P(69h)R(57.2M)	0.42[sW]	0.18	-0.16	0.18[B]	-0.02(I)	-0.80[sF]	
	b	+P(18lh)R(150M)	0.30[S]	-0.68	-0.78	-0.79[B]	-0.16[sF]	-1.08	
	a'	P(69h)R(57.2M)	0.19[W]	0.20	-0.39	-0.46[B]	0.09[sF]	-0.57	
	b'	P(18lh)R(150M)	0.29	-0.47	-0.82	-0.84[sU](sC)	-0.04[F]	-1.03	
SIW54	a	+P(69h)CR(57.2M)	0.23	-0.61	-0.68	-0.32[W]	0.16[F]	-0.74[sW]	
	b	+P(18lh)CR(150M)	0.20	-1.10	-1.48(sC)	-0.61[sWsB]	-0.07[sF]	-0.72[sFsN]	
	a'	P(69h)CR(57.2M)	0.24	-0.44	-0.81	-0.15[W]	0.13	-0.94	
	b'	P(18lh)CR(150M)	-0.07	-2.13(*1)	-1.18	-0.74[sW]	0.20	-1.10[BW]	

c:chemical spray
* 1 : レンジ切換に追随しない。

Table 30 Weight and area changes of the unaged samples after BWR LOCA simulation tests

Sample	Weight Change (%)		Area Change (%)	
	Spray	Without Spray	Spray	Without Spray
CSM	1*	4.1	0.6	-1.0
	2*	10.5	6.6	4.0
	3	18.6	21.5	4.0
	4	43.2	33.7	13.4
EPR	1*	-0.7	-0.7	-3.0
	3	0.6	-0.6	-4.0
	4	3.4	3.2	0
XLPE	1	4.0	1.0	-6.9
	2	42.2	33.3	24.3
CR	2*	51.2	27.5	36.9
	3	120.6	82.9	45.2
	4	1.1	4.2	3.0
SiR	1	-1.5	-1.6	-4.0
	2	-1.5	-1.6	-1.0

Table 31 Weight and area changes of the aged samples after BWR LOCA simulation tests

Sample	Weight Change (%)		Area Change (%)	
	Spray	Without Spray	With Spray	Without Spray
CSM	1*	34.6	22.1	13.4
	2*	52.5	38.4	32.2
	3	23.7	31.6	7.1
	4	52.6	42.3	26.6
EPR	1*	-1.1	-1.7	-3.0
	3	1.8	-1.2	-2.0
	4	5.5	3.4	0
XLPE	1*	6.1	2.1	-3.0
	1	25.2	33.5	14.5
	2	40.8	35.6	32.2
CR	3	123.4	102.6	45.2
	4	1.1	1.9	-1.0
	2	-2.3	-0.9	-4.9
SiR	1	-	-	0
	2	-	-	-

Table 32 Weight and area changes of the unaged samples at step 3 in the PWR LOCA simulation test

Sample	Weight Change (%)		Area Change (%)	
	With Spray	Without Spray	With Spray	Without Spray
CSM	1*	-1.3	-2.0	-2.0
	2*	-1.4	-1.9	-2.0
	3	1.5	-0.5	-1.0
	4	1.0	-1.0	-2.0
EPR	1*	-2.6	-0.7	-2.0
	3	0	-2.0	-3.0
	4	1.1	-0.5	-1.0
XLPE	1*	0	1.0	-3.0
	1	20.7	4.3	6.1
CR	2*	20.6	4.2	15.6
	3	28.7	33.7	12.4
	1	-3.4	0	-2.0
SiR	2	-3.6	-1.6	-2.0

Table 33 Weight and area changes of the aged samples at step 3 in the PWR LOCA simulation test

Sample	Weight Change (%)		Area Change (%)	
	With Spray	Without Spray	With Spray	Without Spray
CSM	1*	0.6	-3.3	-2.0
	2*	0.8	-4.4	-2.0
	3	6.6	-2.1	-1.0
	4	9.5	-1.1	0
EPR	1*	-2.0	-2.6	-3.0
	3	-1.8	-2.5	-3.0
	4	1.4	-0.5	0
XLPE	1*	-1.1	0	0
	1	25.6	10.5	9.2
CR	2*	28.0	13.8	21.0
	3	53.6	23.0	28.8
	1	-3.3	-2.0	-3.0
SiR	2	-3.1	-0.9	-4.0

Table 34 Weight and area changes of the unaged samples after PWR LOCA simulation test

Sample	Weight Change (%)		Area Change (%)	
	With Spray	Without Spray	With Spray	Without Spray
CSM	1*	0	0.6	-2.0
	2*	-0.7	4.3	-2.0
	3	9.7	7.0	2.0
	4	27.6	14.1	8.2
EPR	1*	-2.6	-2.1	-3.0
	3	5.1	2.6	2.0
	4	4.3	3.0	0
XLPE	1*	1.0	0	-5.9
	1	18.6	11.0	11.3
	2*	38.2	45.8	31.1
CR	3	86.4	62.0	42.7
	1	-5.7	-1.9	-3.0
SiR	2	-5.7	-3.7	-3.0

Table 35 Weight and area changes of the aged samples after PWR LOCA simulation test

Sample	Weight Change (%)		Area Change (%)	
	With Spray	Without Spray	With Spray	Without Spray
CSM	1*	5.4	5.4	2.0
	2*	6.0	-3.2	3.0
	3	12.4	11.3	3.0
	4	33.2	11.4	14.5
EPR	1*	-3.4	-2.7	-2.0
	3	5.0	-1.3	2.0
	4	5.3	2.2	2.0
XLPE	1*	-1.1	0	-3.0
	1	9.9	9.1	3.0
	2*	24.7	23.2	19.9
CR	3	81.8	69.7	36.9
	1	-13.2	-2.6	-4.9
SiR	2	-4.2	-2.6	-4.0

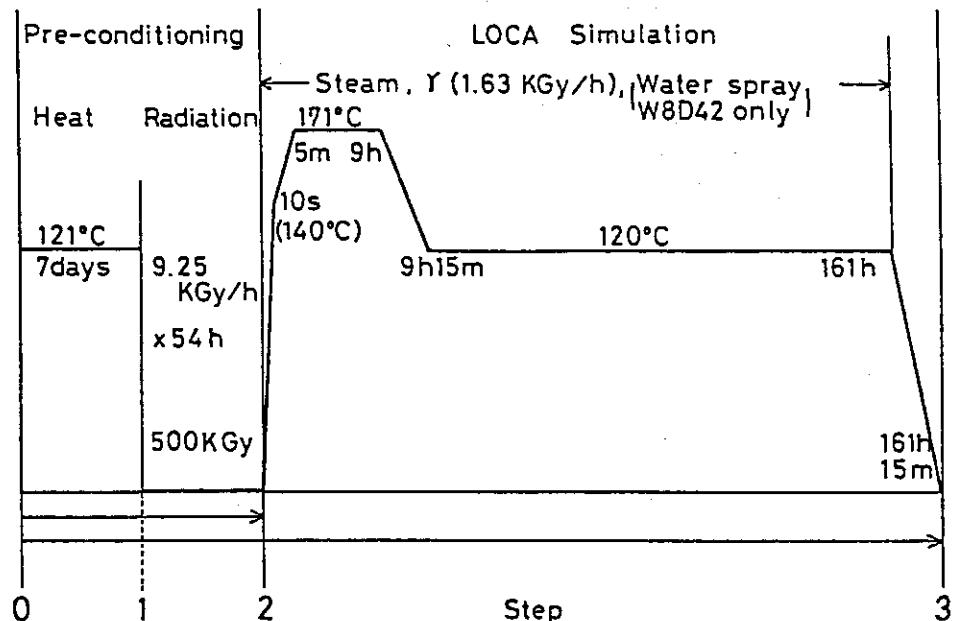


Fig. 71 Simulated LOCA profile used for BWR LOCA test.

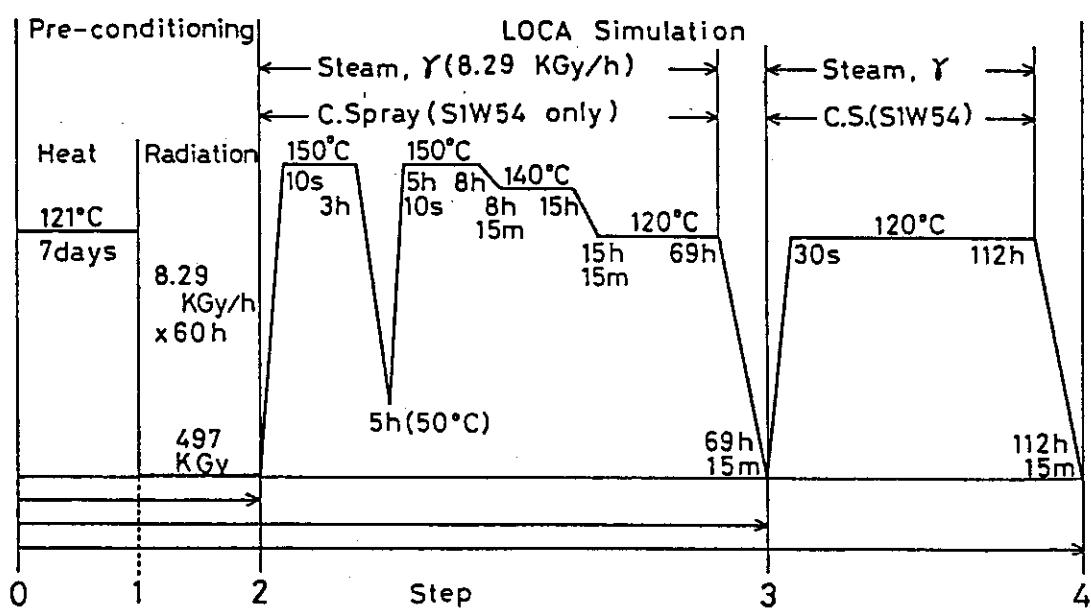


Fig. 72 Simulated LOCA profile used for PWR LOCA test.

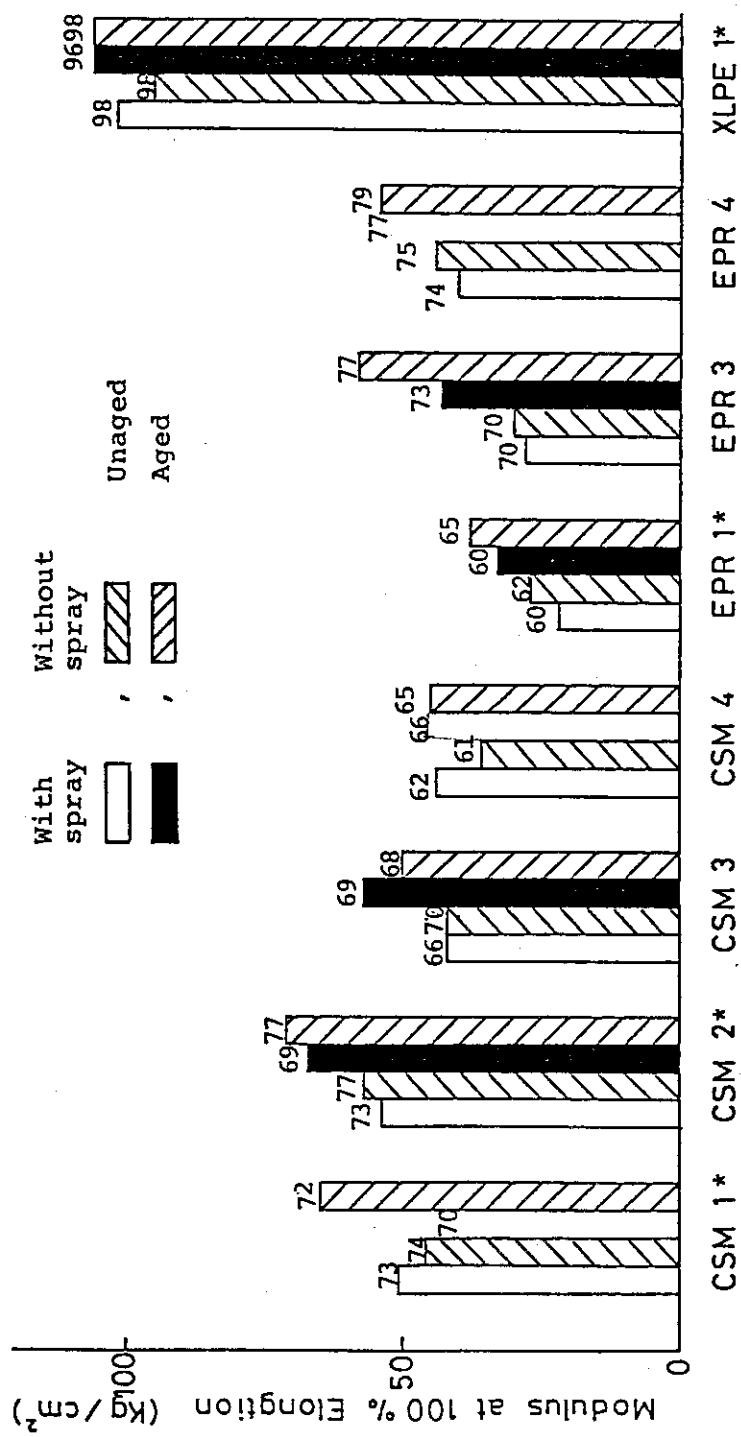


Fig. 73 Modulus at 100% elongation and hardness of the typical insulating materials after BWR LOCA simulation test.

Numbers on the bars show hardness of the samples.

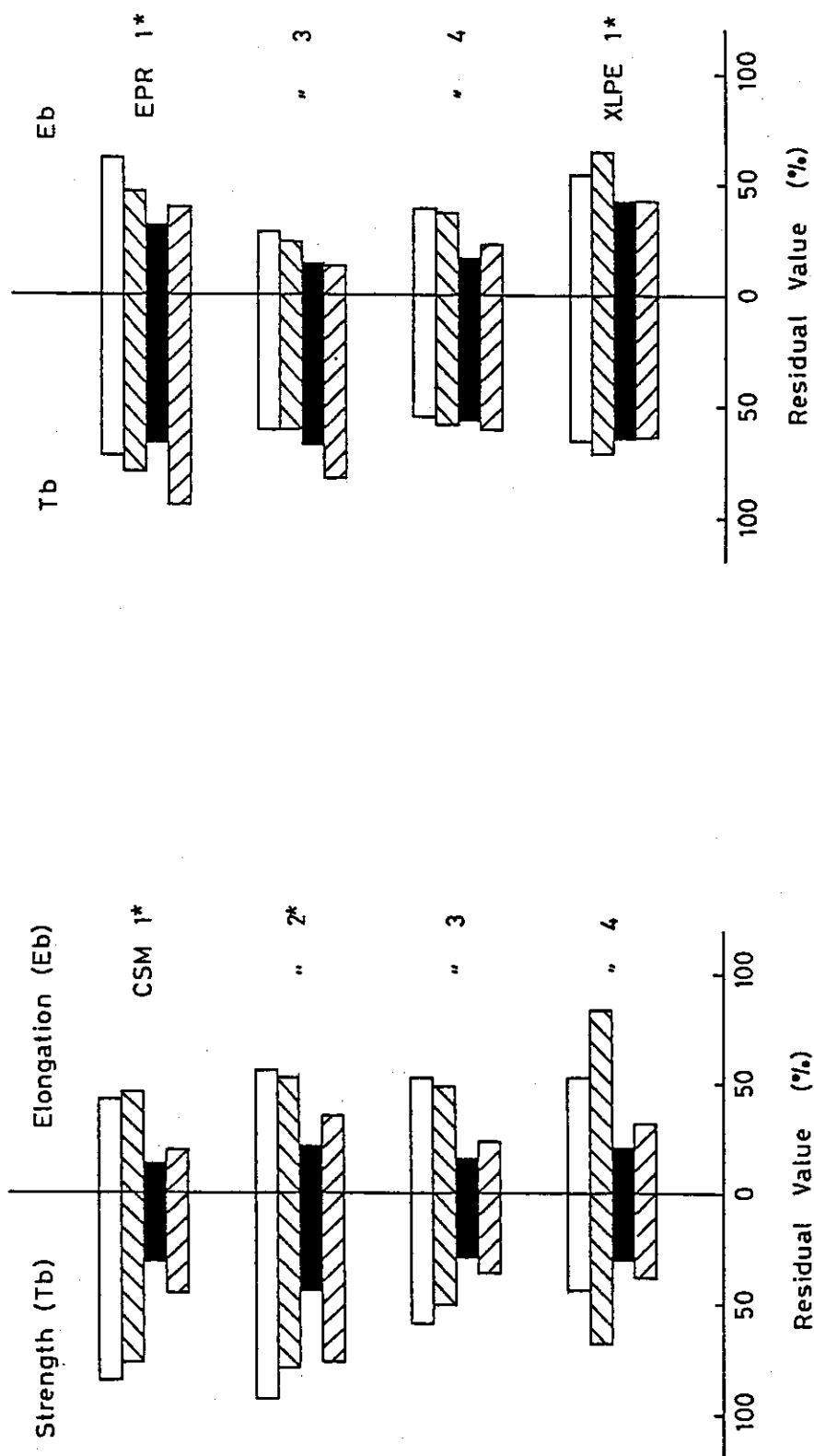


Fig. 74

Effect of spray on strength (T_b) and elongation (E_b) at break of Hypalon (CSM) in BWR LOCA simulation tests.

- Unaged sample tested under spray,
- ▨ " " without spray,
- Aged samples tested under spray,
- ▨ " " without spray.

Fig. 75 Effect of spray on strength (T_b) and elongation (E_b) at break of Ethylene-propylene rubber (EPR) and Cross-linked polyethylene (XLPE) in BWR LOCA simulation tests.

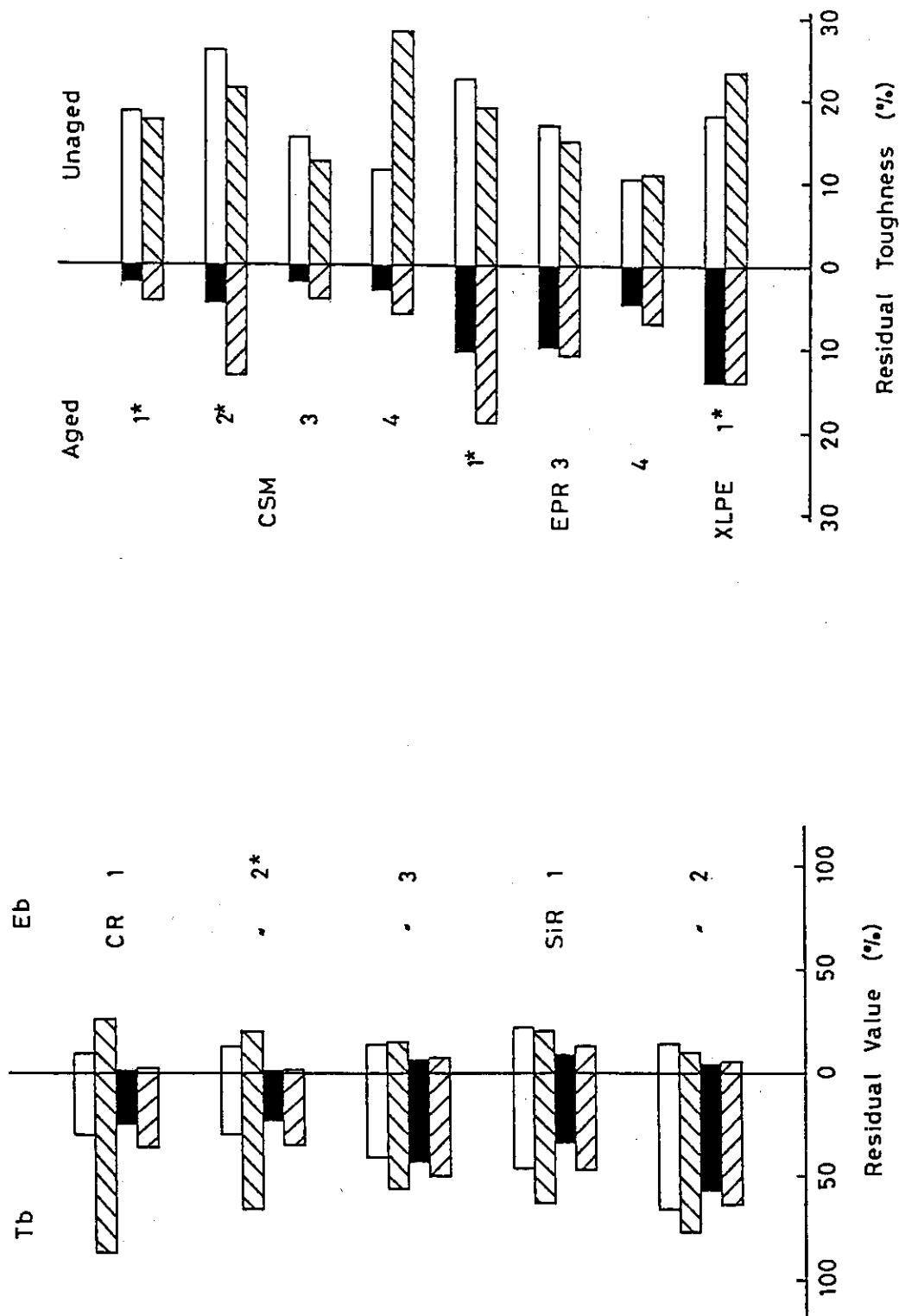


Fig. 76 Effect of spray on T_b and E_b of Chloroprene (CR) and Silicone rubber (SIR) in BWR LOCA simulation test.

Fig. 77 Effect of spray on toughness of CSM, EPR and XLPE in BWR LOCA simulation test.

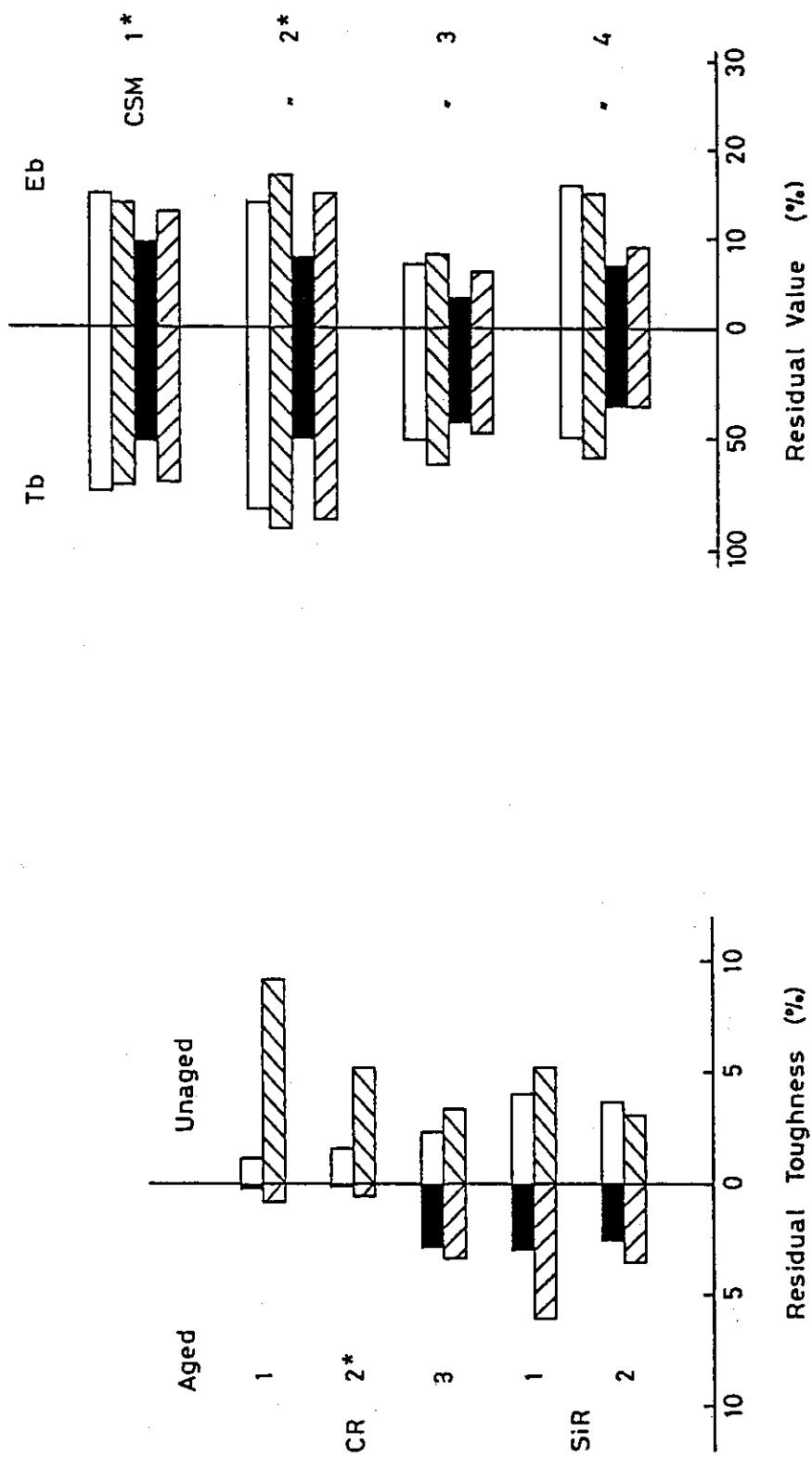


Fig. 78 Effect of spray on toughness of CR and SIR in BWR LOCA simulation test.

Fig. 79 Effect of chemical spray on T_b and E_b of Hypalon after PWR LOCA simulation test.

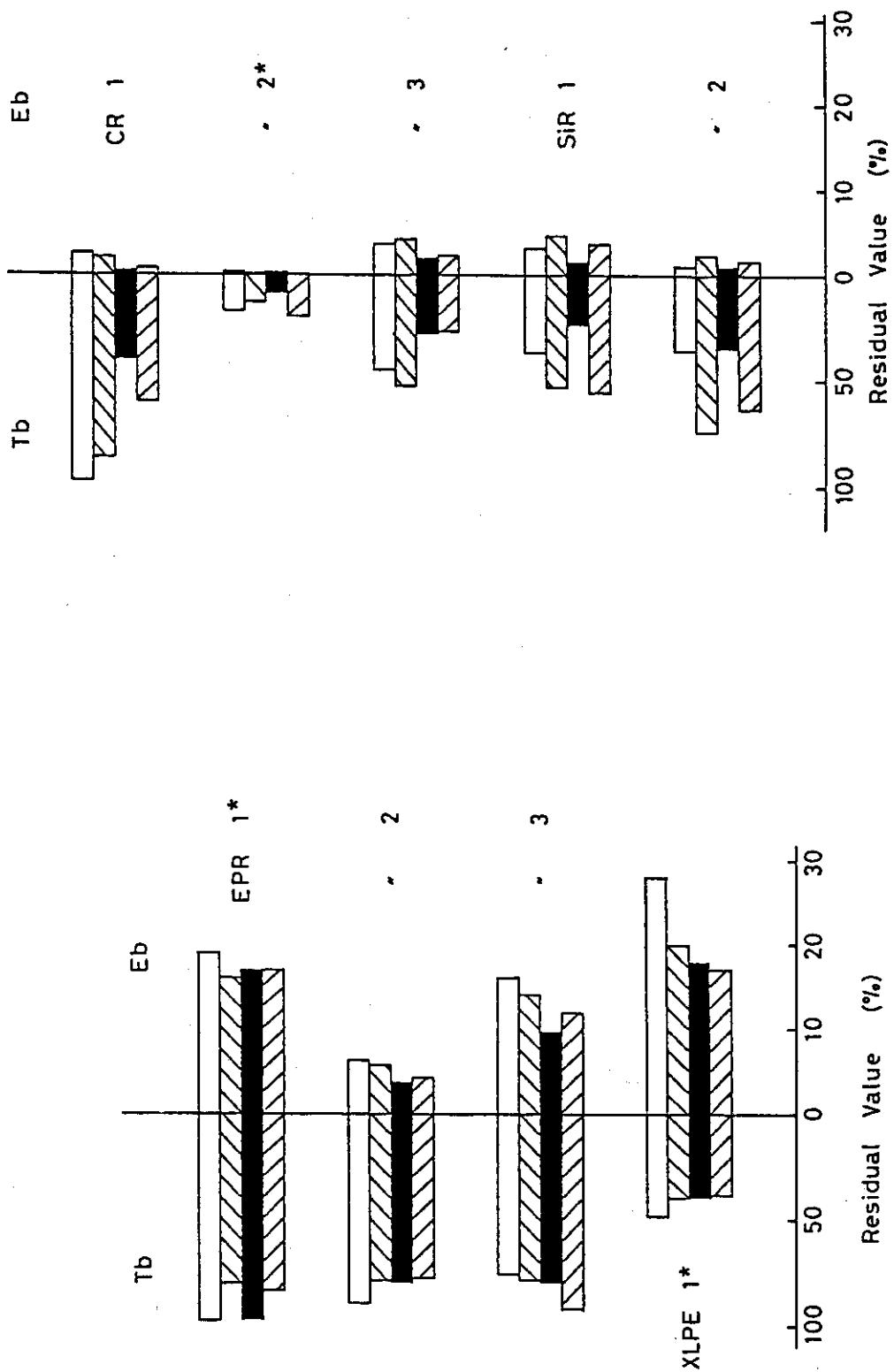


Fig. 80 Effect of chemical spray on Tb and Eb of EPR and XLPE after PWR LOCA simulation test

Fig. 81 Effect of chemical spray on Tb and Eb of CR and SIR after PWR LOCA simulation test.

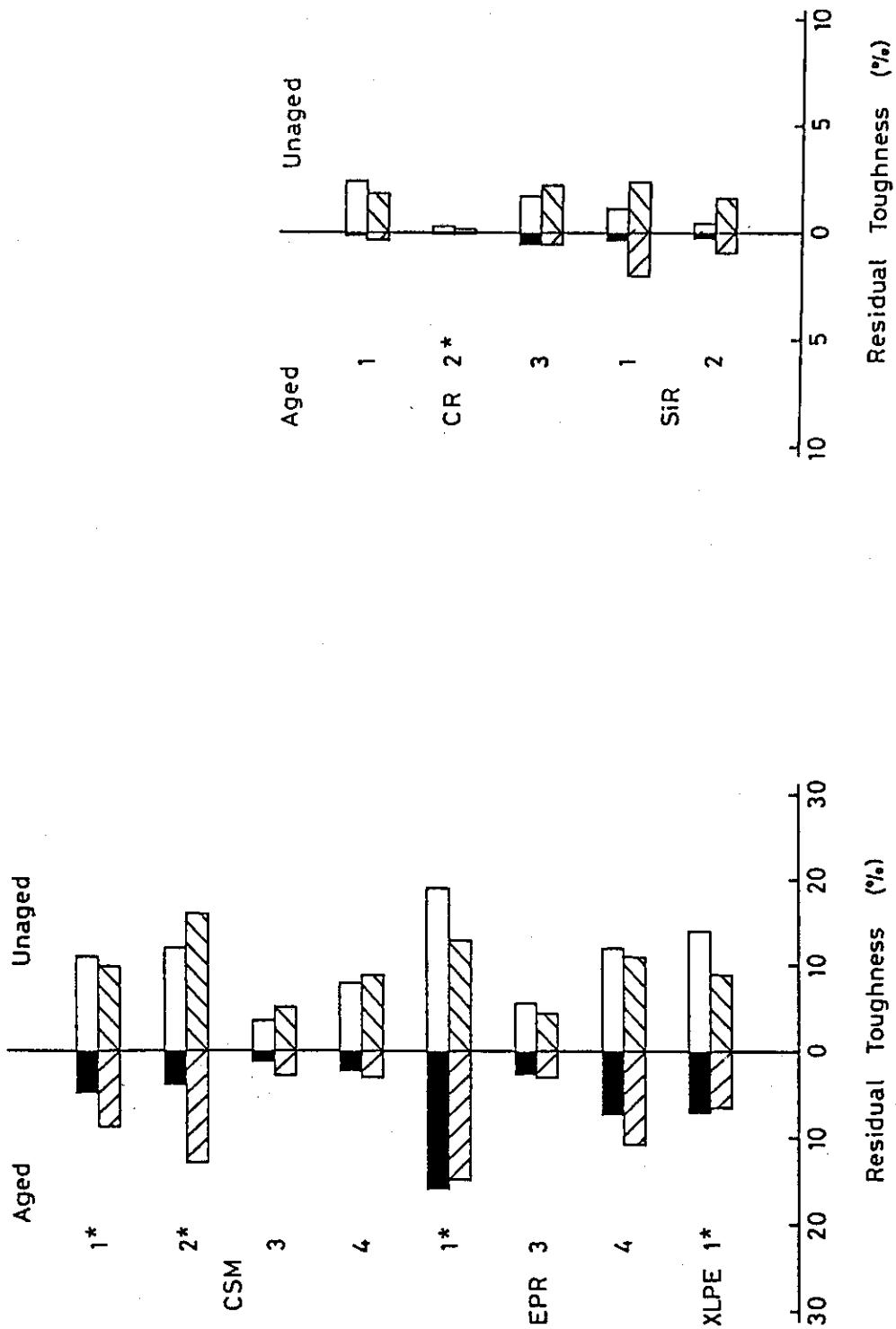


Fig. 82 Effect of chemical spray on toughness of CSM, EPR and XLPE after PWR LOCA simulation test.

Fig. 83 Effect of chemical spray on toughness of CR and SiR after PWR LOCA simulation test.

4.1.7 事前劣化条件の影響

品質認定試験ではL O C A模擬試験に先だって40年間の通常運転時に相当する劣化（事前劣化）を予め与えなければならぬとされている。通常運転時の劣化を促進して与える方法として、40年相当の熱老化（わが国の試験法推奨案¹では121°C, 7日間）を与えた後放射線照射（通常空気中, 10kGy/h以下で0.5MGy）する逐次法が採用されているが、現実の環境はより低い温度（～65°C）で低線量率（1 Gy/h以下）の同時環境への長時間暴露であり、このような環境の下では酸素の拡散が充分であることから、試料内部まで酸化劣化が起こっていると考えられる。また同時環境における相乗効果や逐次法の順序効果などについての研究から²⁻⁴、現実の環境を模擬するにあたり、現行の事前劣化条件は種々の問題があることが指摘されている。本節では種々の条件で事前劣化を与えた絶縁・被覆材料を空気を含まないL O C A模擬環境に暴露し、劣化におよぼす事前劣化条件の影響について検討する⁵。

(1) 実験方法

試料：試験用標準シート試料13種類を用いた。その内訳は先に示したので省略する。

事前劣化ならびにL O C A模擬環境条件：事前劣化の条件ならびに表記方法を以下に示す。事前劣化の照射は試料内部まで酸化させるため酸素加圧下法により行った⁴⁾。

H（熱老化：空気中, 121°C, 7日間）

R（放射線照射：空気中, 室温でγ線を10kGy/h以下の線量率で0.5MGy照射）

H→R（上記の熱老化後放射線照射）試験法推奨案の条件

R O x（酸素加圧下（0.5MPa）, 室温, 4kGy/hで0.5MGy照射）

H→R O x（上記の熱老化後酸素加圧下照射）

R O x→H（酸素加圧下照射後熱老化）

L O C A模擬環境プロフィルをFig.84に示す。AはBWR用, BはPWR用の標準的なL O C A模擬同時環境を示す。図中のCはケミカルスプレイの実施を, Wは水スプレイの実施を示す。

引張試験ならびに絶縁抵抗, 吸水率などの測定は前節までと同様に行った。

(2) 結果および考察

1) 機械的性質におよぼす事前劣化条件の影響

Fig.85に3種類のE P Rの事前劣化段階およびL O C A模擬環境暴露時の強度と伸びの保持率の平均値を標準偏差とともに示した。図中のL O C A模擬環境暴

露時の劣化を示した部分で半分ぬりつぶした印はBWR用LOCA模擬環境暴露(Fig.84A)の場合を、全部ぬりつぶした印はPWR用LOCA模擬環境(Fig.84B)に暴露した場合を示す。事前劣化の段階では伸びに若干事前劣化条件の影響がみられるが、強度には殆ど影響しない。LOCA模擬環境に暴露すると、BWR用環境暴露では、強度に若干影響が見られ、通常の事前劣化(試験法推奨案の条件: H→R)を与えたものの劣化が最も少なく、酸素加圧下照射後熱老化(ROx→H)したもののが最も大きい。また、PWR用環境暴露では強度に及ぼす事前劣化条件の影響は必ずしもはっきりしないが、試験法推奨案以外の条件では標準偏差が大きくなっている、試料により劣化挙動が大きく異なることを示す。一方、伸びについてはいずれの条件でも似た値を示すなど、事前劣化条件の影響は殆どない。

Fig.86に架橋ポリエチレンの結果を示す。試料は1種類のみであるので標準偏差は示していない。事前劣化段階では強度、伸びのいずれにも事前劣化条件の影響が見られ、ROx→H、ROxなどの劣化が大きくなる傾向が見られた。LOCA模擬環境暴露しても事前劣化の影響が認められるが、事前劣化段階に比べその影響は小さくなる。ROxのみを与えた場合の劣化が最も大きく、特にPWR用環境下では著しく劣化し測定が出来なくなるなど、照射後熱老化すると劣化が最も大きくなるものが多いという従来の報告とは異なった結果となった。その理由は酸素加圧下照射より大量に生じた酸化生成物などが引き続き与える熱老化により熱分解による揮散や安定化するためであろう。

Fig.87に2種類のシリコーンゴムの結果を示す。シリコーンゴムは配合により劣化挙動が異なるが、その違いは伸びに顕著である。事前劣化段階では伸びに若干事前劣化条件の影響があるが、他の試料と異なり試験法推奨案の条件での劣化が最も大きい。また、環境条件を与える順序については、H→ROxの劣化が最も少ない。一方、LOCA模擬環境暴露すると事前劣化段階とほぼ同じ傾向を示すが、P、Bいずれの条件でもその影響は小さくなり、特にPWR条件では伸びが極端に減少し、事前劣化条件の違いによる劣化に有意差は認められなくなる。

Fig.88に4種類のハイパロンの結果を示す。事前劣化段階では事前劣化条件の影響がみられ、強度はH→ROxの場合が、伸びはROx→Hの場合最も低下が大きい。しかしながら、LOCA模擬環境暴露すると、事前劣化条件の違いによる劣化挙動の差は目立たなくなり、強度については試験法推奨案の条件で事前劣化したもののがやや小さい以外は大差がみられなくなる。また、伸びではBWR条件の場合ROx→Hがやや劣化が大きい程度で事前劣化条件の影響ははっきりしなくなる。このことはLOCA模擬環境暴露による劣化が大きいため、事前劣化でみられた劣化の程度の違いはこの中に含まれてしまうことを示している。

Fig.89に3種類のクロロブレンの結果を示す。事前劣化段階で強度はH→R O Xが最も低下するがR O X→Hと試験法推奨案の条件では大差がない。これに対し、伸びではR O X→Hの低下が著しいなど事前劣化条件の影響は複雑である。一方、LOCA模擬環境に暴露すると、劣化は極めて大きくなり、推奨案の条件以外では3種類の試料の一部が測定出来なくなるなど、酸化劣化がLOCA時の劣化に重大な影響を与えることが分かった。

2) 電気的性質における事前劣化条件の影響

Fig.90にEPRならびにXLPEの体積固有抵抗の結果を示す。事前劣化段階では熱老化のみおよび高線量率下照射のみのデータも示した。EPRについては3種類の試料について得られた値の範囲を、XLPEについては1種類の試料について得られた値を示す。

EPRは事前劣化段階では絶縁抵抗の低下は殆どないが、LOCA模擬環境暴露により最大2桁程度の低下を示す。しかしながら事前劣化条件の影響はあまりなくPWR用条件下で若干見られるのみである。*印をつけたものは、この条件で測定が出来なくなったモデル配合の試料(EPR1*)の値を除いた値で、事前劣化条件としてはH→R O Xの順が最も劣化が大きいことになる。

XLPEでは事前劣化段階で熱老化のみでは絶縁低下は殆どしないのに対し、高線量率照射で約1桁、酸素加圧下照射では約3桁と最も低下が大きい。H→RとR O X→Hとはほぼ同程度の低下を示し、H→R O Xはやや大きな低下を示す。LOCA模擬環境暴露するとBWR用条件ではR O X→Hがやや低く、全体としては事前劣化条件の影響は小さくなるのに対し、PWR用条件では事前劣化段階での劣化挙動の差が保持される。このようにXLPEではLOCA模擬環境暴露前に酸素加圧下で照射を行う条件(H→R O X, R O X)の場合の劣化が大きく、照射による酸化生成物がケミカルスプレイと反応し絶縁低下に影響を与えることが示唆される。一方、照射後熱老化すると、これら酸化生成物が揮散または分解し安定化するため、その後劣化に寄与しなくなるためと推定される。

Fig.91にSIRおよびCSMの結果を示す。シリコーンゴムは熱老化により絶縁低下を示すが、高線量率照射による低下は少ない。一方、R O X→Hの場合の低下は他の条件による低下に比べて小さいなど、酸化条件には比較的安定である。これらをLOCA模擬環境暴露すると、BWR条件ではH→R O Xの場合が、PWR条件ではR O X→HおよびH→R O Xの場合の低下が大きくなり、事前劣化段階での劣化はLOCA模擬環境暴露時の劣化に反映していないことがわかる。

ハイパロンでは、事前劣化段階では条件によって劣化の程度が多少異なり、熱老化のみでは低下が少なく、R O Xの場合が最も低下する。LOCA模擬環境暴露すると、事前劣化条件の影響は殆ど見られなくなるが、試料間の劣化挙動の違

いが大きくなる。特にBWR条件では絶縁抵抗が初期値を超えるものが現れるなど劣化の差が大きい。この原因はハイパロンではモデル配合の試料と実用配合試料で電気的な劣化挙動が著しく異なるためであり、配合に起因していると考えられる。

Fig.92に3種類のクロロブレンの結果を示す。クロロブレンは事前劣化の熱老化のみでも1~3桁程度の絶縁低下を示すが、その他の条件ではほぼ同程度(約1桁)の低下を示す。LOCA模擬環境暴露すると推奨案の条件以外では一部の試料が測定出来なくなるなど劣化が著しい。

3) 吸水膨潤における事前劣化条件の影響

Table 36に種々の条件で事前劣化を与えた13種類の絶縁被覆材料を同時法のBWR用ならびにPWR用LOCA模擬環境に暴露したときの重量変化率を示す。但し重量はLOCA模擬環境暴露1日~2日後の重量を初期値と比較したものである。これまでにも示したようにハイパロン、クロロブレンなどの材料はLOCA模擬環境暴露により著しく吸水し重量が増加する。また、一般にPWR用条件下よりBWR用条件下の方が吸水が著しい。その理由は先に述べたようにプロファイルの最高温度(最高圧力)がBWR条件の方が高いこと、またスプレイが水であるため浸透圧の関係で水の進入が容易であること、さらにLOCA模擬環境における線量が少ないため、架橋による物理的な吸水が抑制されにくことなどによる。事前劣化条件の影響については試験法推奨案の条件の場合が最も少ない場合が多く、最も吸水が大きいのは酸素加圧下照射のみを与えた場合又は熱老化後酸素加圧下で照射した場合で、吸水に関してはROx→Hは必ずしも最も厳しい条件ではない。特にXLPEではROxでは劣化が著しく、試料表面の酸化溶失が起こり重量減少を示すなど吸水の面からもROxが最も厳しい条件になっている。

一方、シリコーンゴムについては殆どの場合重量減少を示すが、この場合はアルカリ性スプレイ液を用いるPWR条件下での重量減少がより大きいが、事前劣化条件の影響はほぼないということができる。

(3) まとめ

事前劣化条件が絶縁材料の機械的性質の劣化に及ぼす影響について、EPRを除き、事前劣化条件の影響が見られる場合が多いが、これらをLOCA模擬環境暴露すると事前劣化段階での劣化挙動の違いは小さくなるか、殆ど見られなくなる場合が多い。また、照射後熱老化の条件が必ずしも最も大きな劣化を与えるとは限らず、クロロブレンなどの材料では酸化劣化のみの場合大きな影響を与えることが明らかになった。

絶縁抵抗に関しては、事前劣化の段階では、XLPE, SiR, CSMに事前劣化の影響が見られるが、EPR, CRでは事前劣化の影響は見られない。これらの材料をLOCA模擬環境暴露するとEPR, CSMでは事前劣化の影響ははつきりしなくなるが、XLPE, SiR, CRなどには若干影響が見られる。また、事前劣化段階で一部の材料の機械的性質に見られたROx→Hが最も劣化するという事例は見られない。

吸水膨潤については、一般に酸化劣化と密接な関係があり、試験法推奨案の条件に比べ、酸素加圧下照射を行うと著しく大きくなるものが多い。事前劣化を与える順序としては酸素加圧下照射のみの場合の吸水が最も大きく、次いでH→ROxとなっており、絶縁抵抗の挙動に類似している。その理由は絶縁低下や吸水の原因となる酸化生成物の生成量は酸素加圧下照射すると大きくなること、そしてこれらはその後熱老化を加えることにより揮散または安定化することを示唆している。

関連文献

1. 電気学会技術報告Ⅱ部第139号（昭和57年11月）
2. L.L.Bonzon, F.J.Wyant, L.D.Bustard and K.T.Gillen, "Status Report on Equipment Qualification Issues Research and Resolution", NUREG/CR-4301, SAND85-1309(1986)
3. 濑口忠男, 荒川和夫, "電線絶縁材料の放射線と熱の複合効果", 電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-80-94(1980)
4. 濑口忠男, 荒川和夫, "電線絶縁材料の低線量率における放射線酸化劣化," 同上 EIM-81-91(1981)
5. 日馬康雄, 八木敏明, 伊藤政幸, 岡田漱平, 川上和市郎, "絶縁材料のLOCA模擬環境下劣化におよぼす事前劣化条件の影響", 同上 EIM-87-150(1987)

Table 36 Effect of aging conditions on weight change of the insulating and jacketing materials

Conditions Sample	H BWR	→ R PWR	ROX BWR	→ H PWR	H BWR	→ ROX PWR	BWR	ROX PWR
CSM 1*	46.3	12.8	58.2	36.5	94.7	32.7	82.9	47.2
CSM 2*	42.5	34.7	100.0	36.7	75.2	36.5	101.7	36.5
CSM 3	19.8	25.2	37.5	20.3	40.0	35.2	28.3	26.3
CSM 4	58.1	46.7	58.9	68.8	76.1	84.2	50.5	82.4
EPR 1*	-1.4	0	6.2	11.9	2.0	2.1	2.0	1.1
EPR 3	0	10.5	6.9	9.1	3.7	-17.9*	5.1	18.8
EPR 4	4.3	7.0	13.7	6.1	12.4	20.7	9.4	2.7
XLPE 1*	7.4	0	4.1	15.9	19.6	2.8	28.4	-21.2*
CR 1	25.8	16.3	66.1	12.7	94.6	75.4	199.1	123.8
CR 2*	38.3	25.9	138.3	112.0	87.4	184.6	122.1	121.2
CR 3	202.4	60.3	125.1	89.4	321.3	230.5	285.2	198.4
SIR 1	4.1	-6.9	1.3	-2.3	3.0	-1.1	0.7	-12.0
SIR 2	-1.7	-7.7	-3.3	-4.0	-1.6	-4.0	-5.1	-4.2

* a part of the sample is lost by washing with spray solution

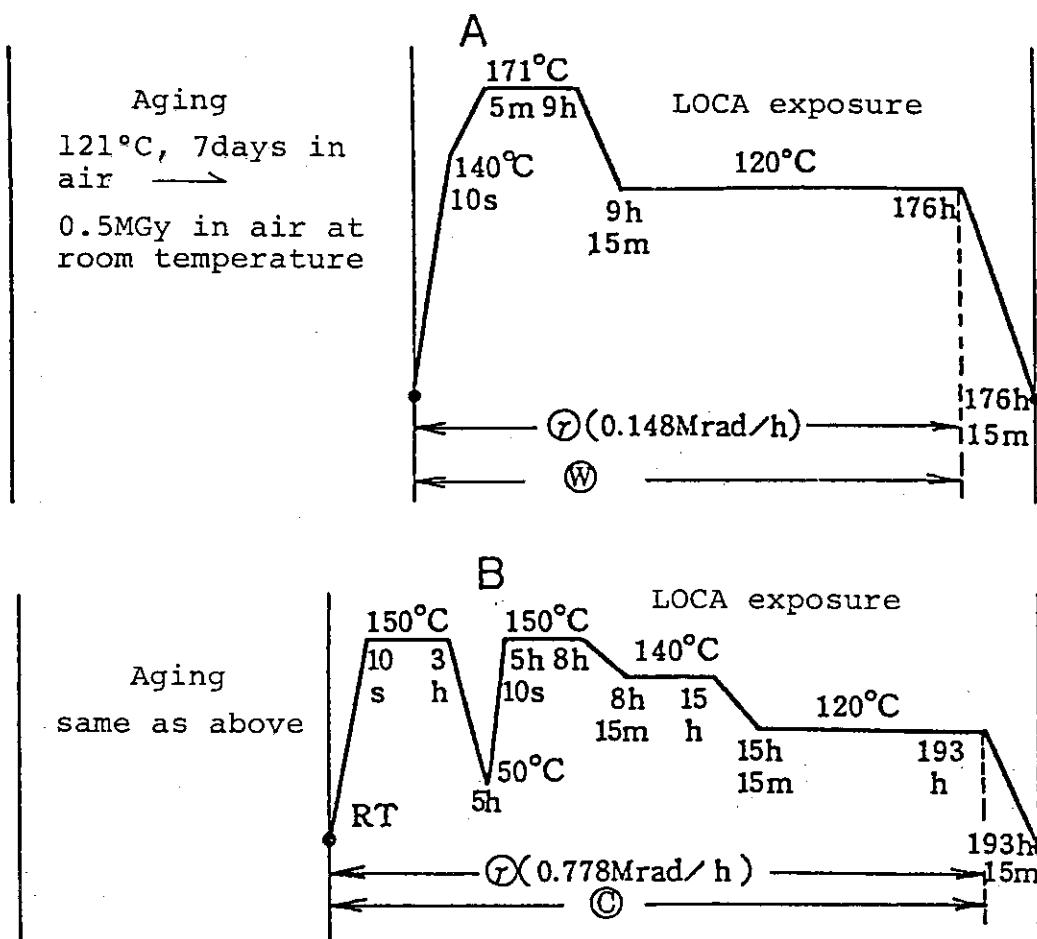


Fig. 84 Temperature profile of BWR and PWR LOCA environments (simultaneous)

A: BWR Condition, B: PWR Condition

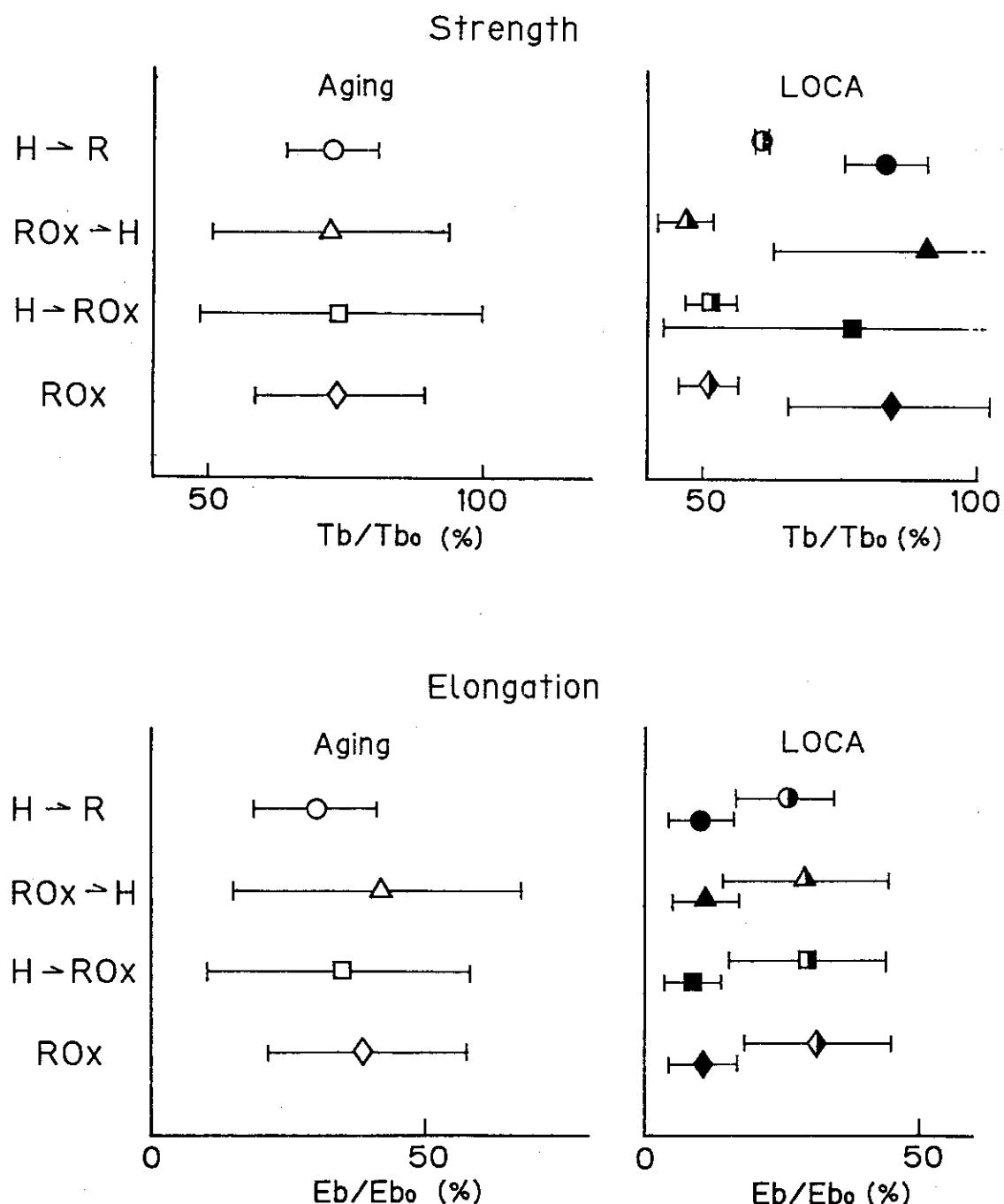


Fig. 85 Effect of aging conditions on mechanical properties of EPR in the following LOCA exposure.

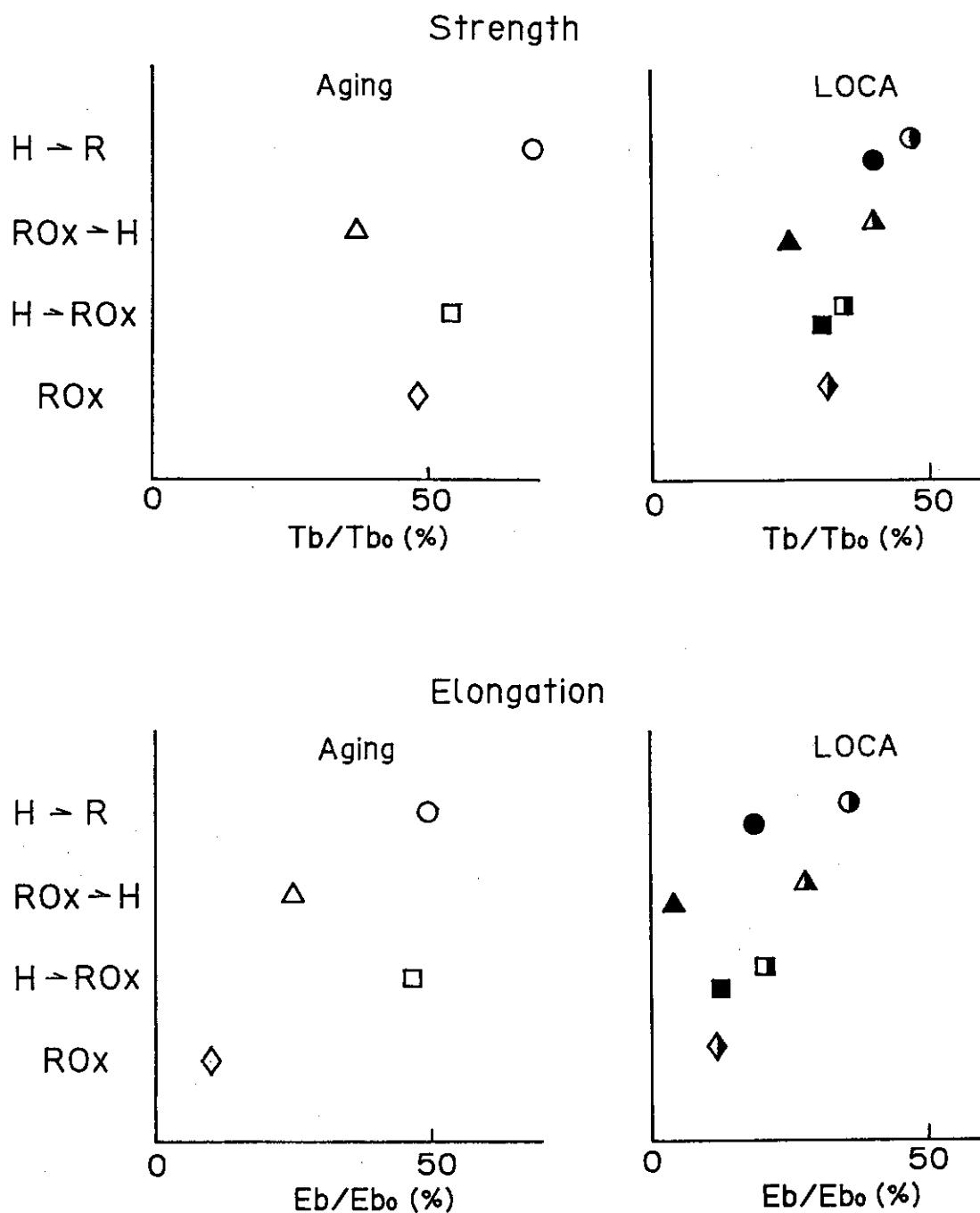


Fig. 86 Effect of aging conditions on mechanical properties of cross-linked polyethylene in the following LOCA exposure.

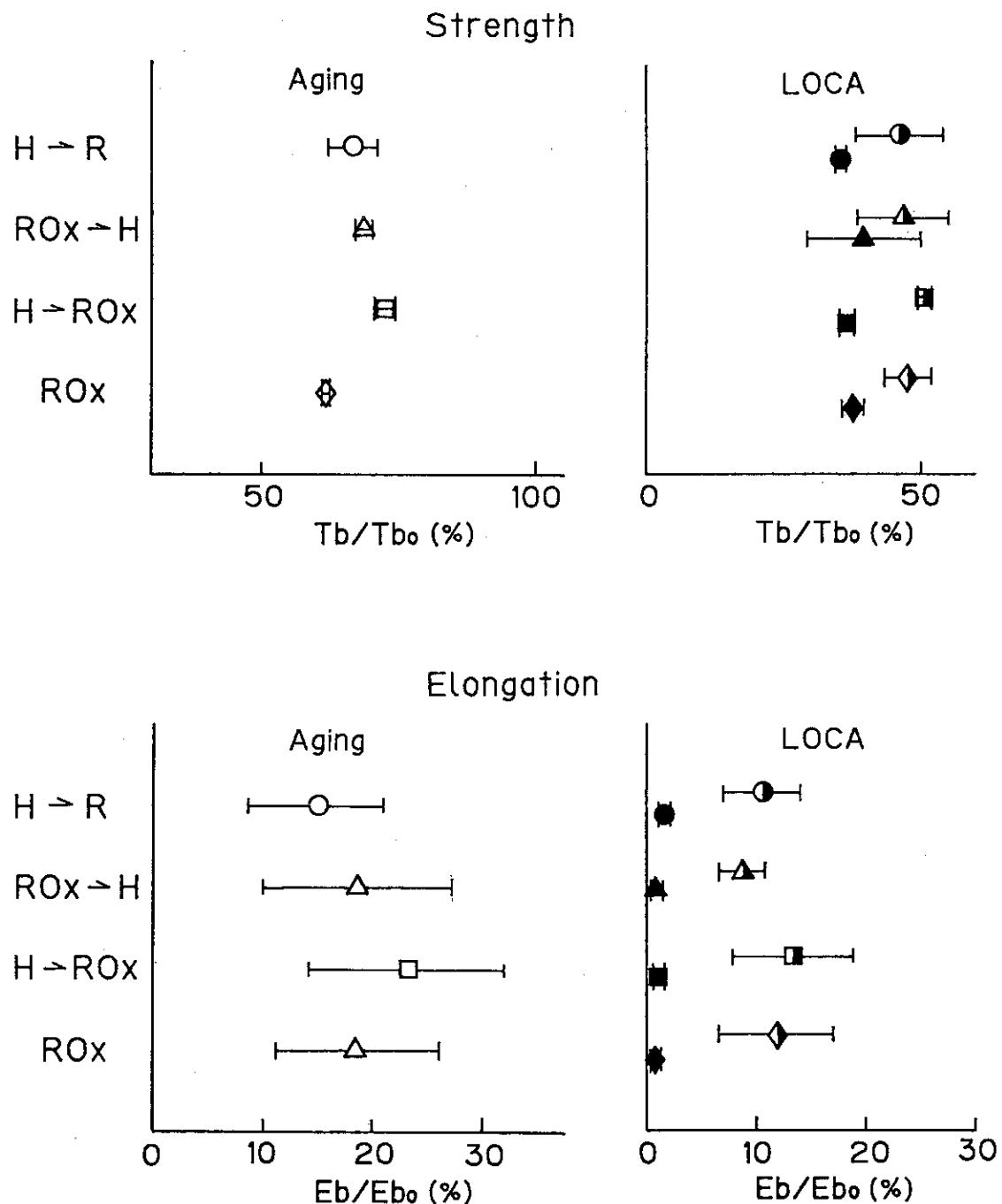


Fig. 87 Effect of aging conditions on mechanical properties of silicone rubber in the following LOCA exposure.

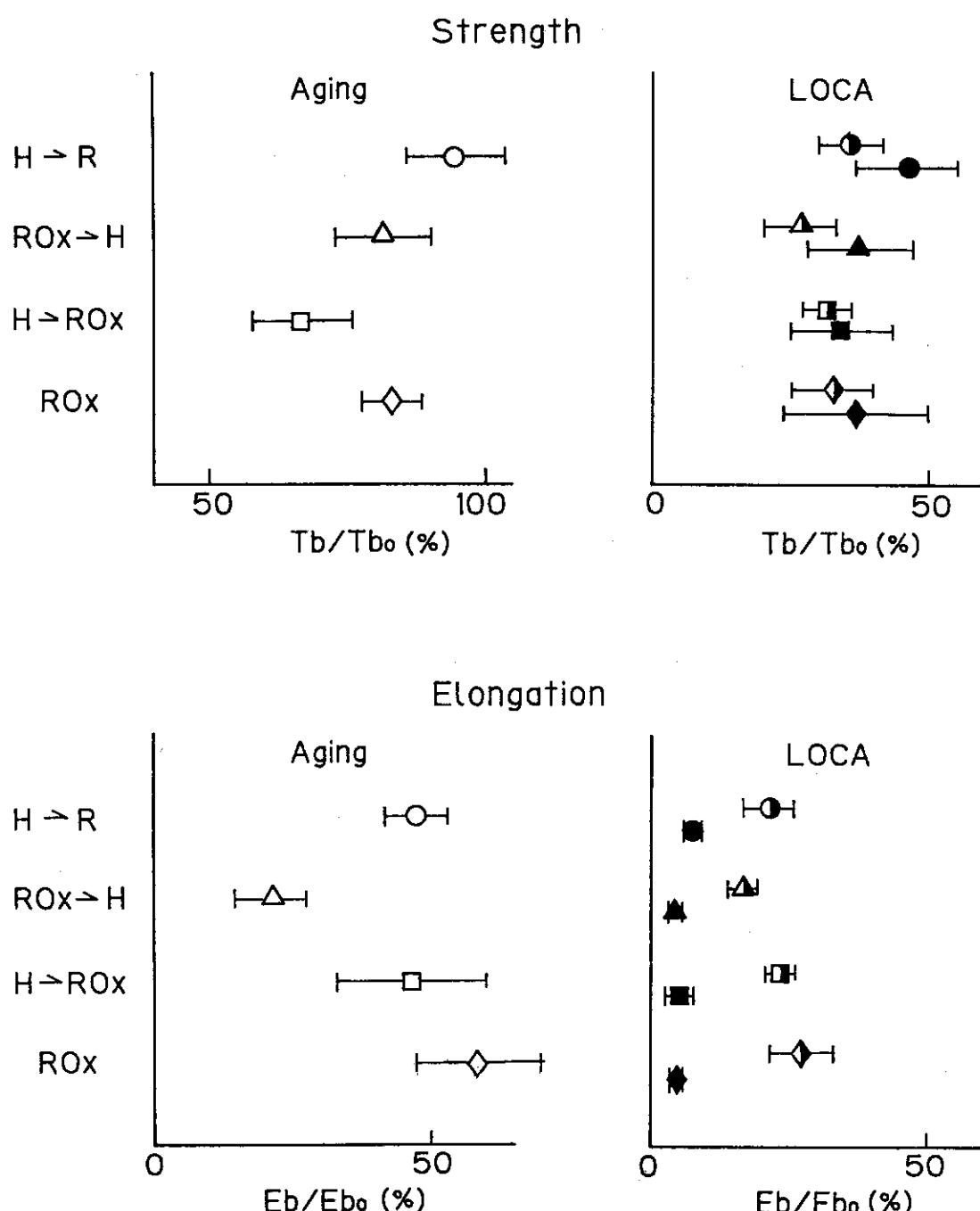


Fig. 88 Effect of aging conditions on mechanical properties of Hypalon in the following LOCA exposure.

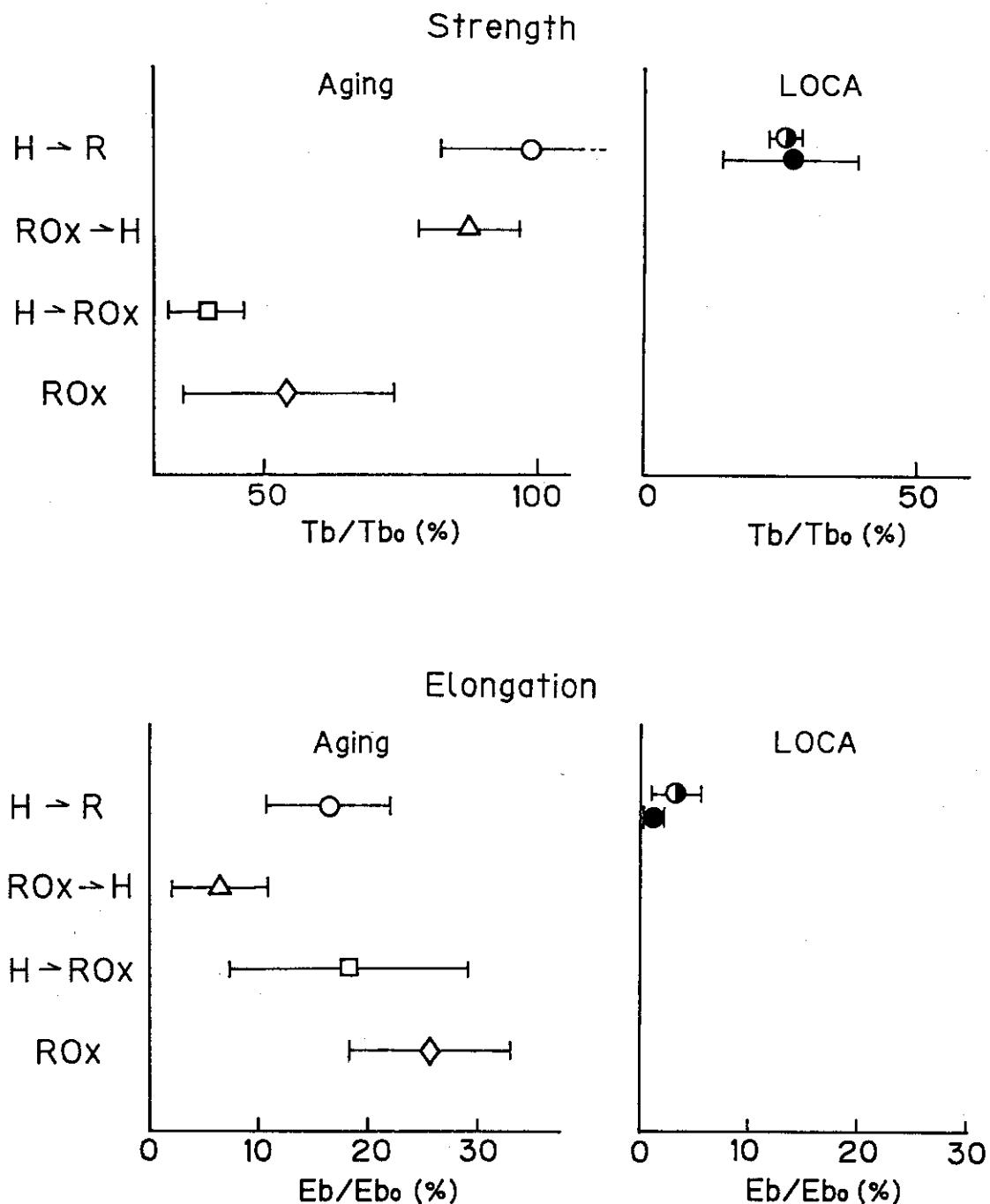


Fig. 89 Effect of aging conditions on mechanical properties of chloroprene in the following LOCA exposure.

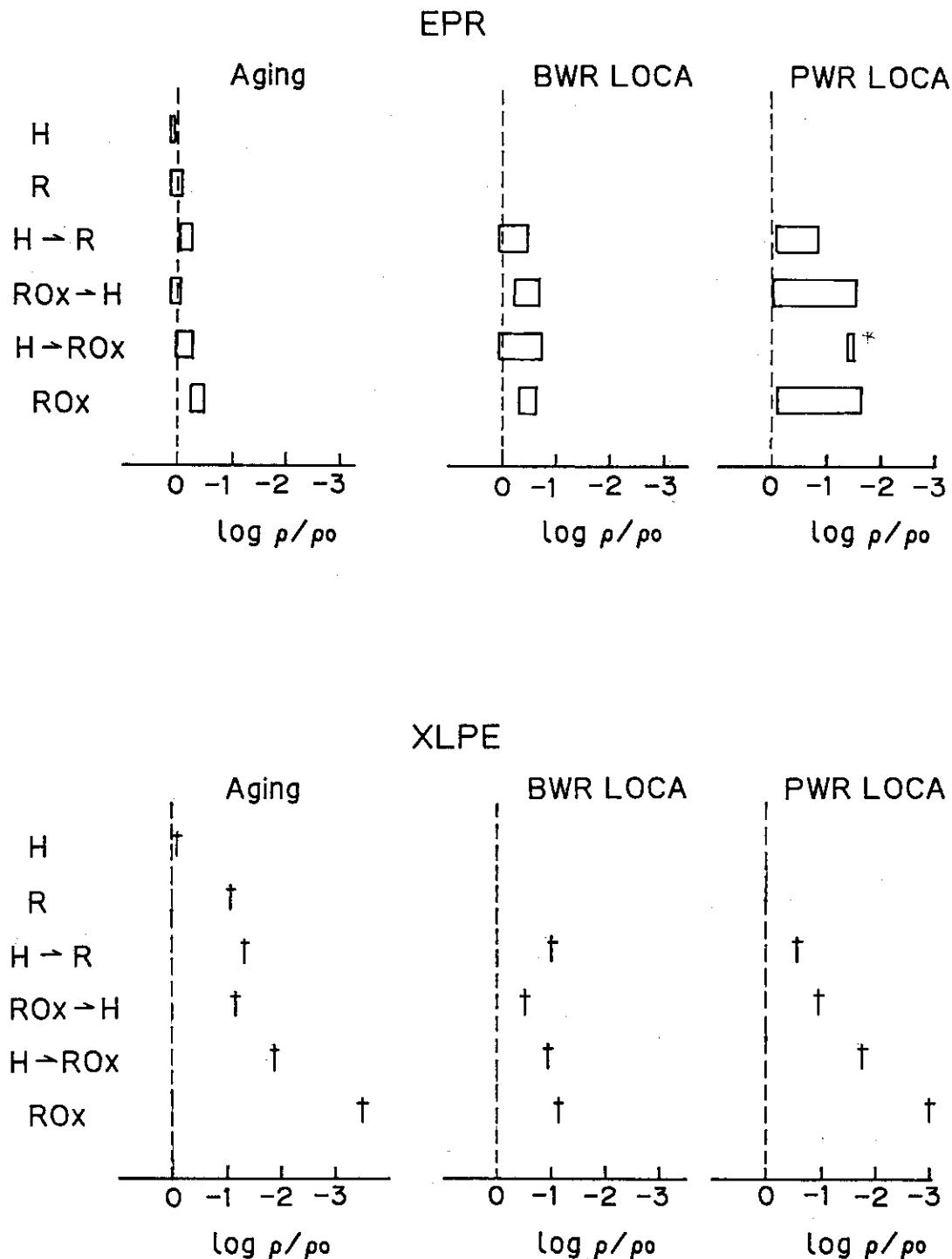
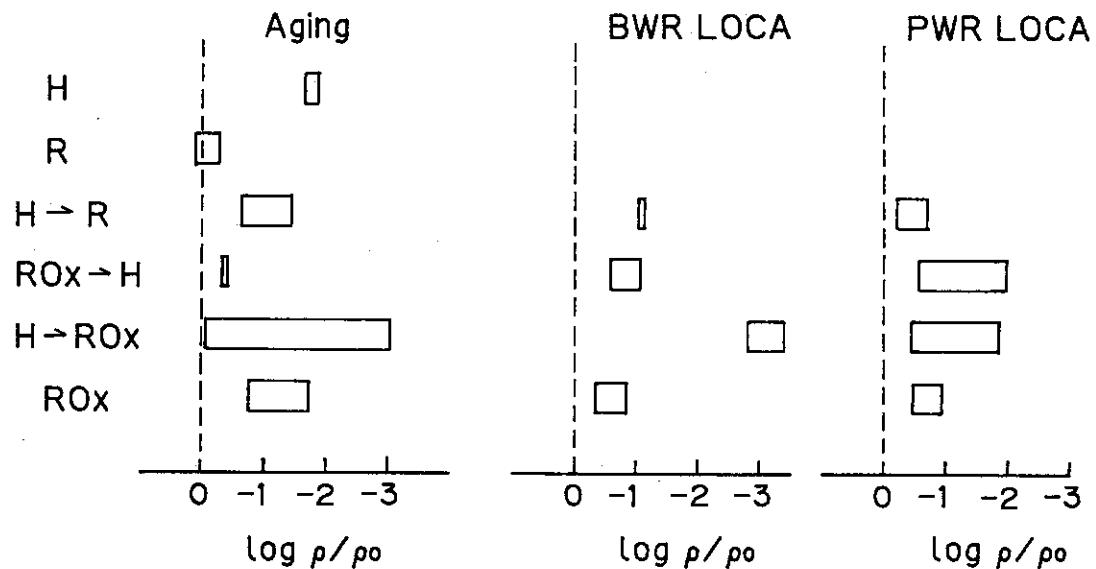


Fig. 90 Effect of aging conditions on volume resistivity of EPR and cross-linked polyethylene in the following LOCA exposure.

SIR



CSM

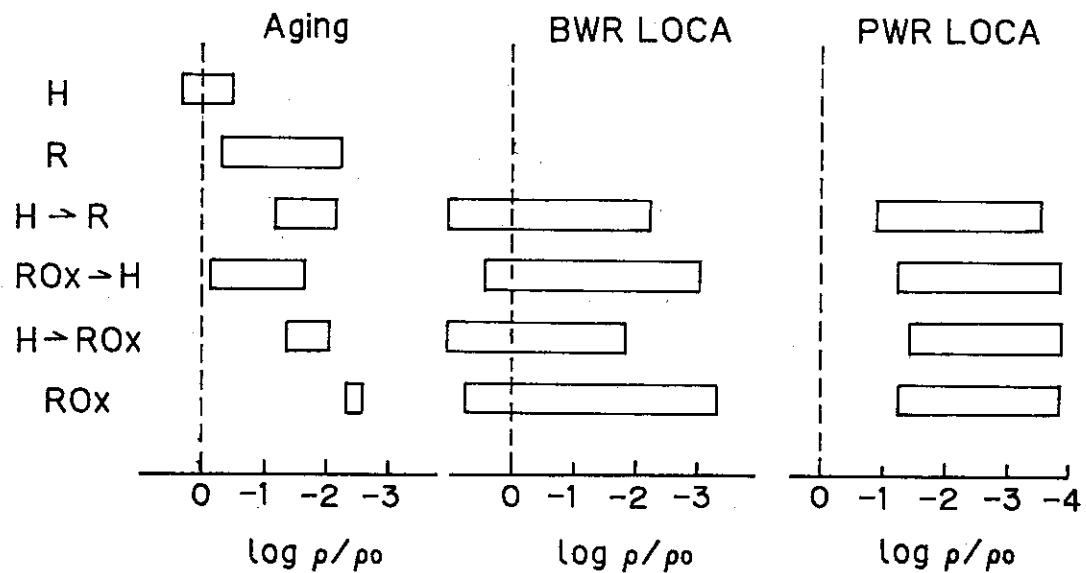


Fig. 91 Effect of aging conditions on volume resistivity of silicone rubber and Hypalon in the following LOCA exposure.

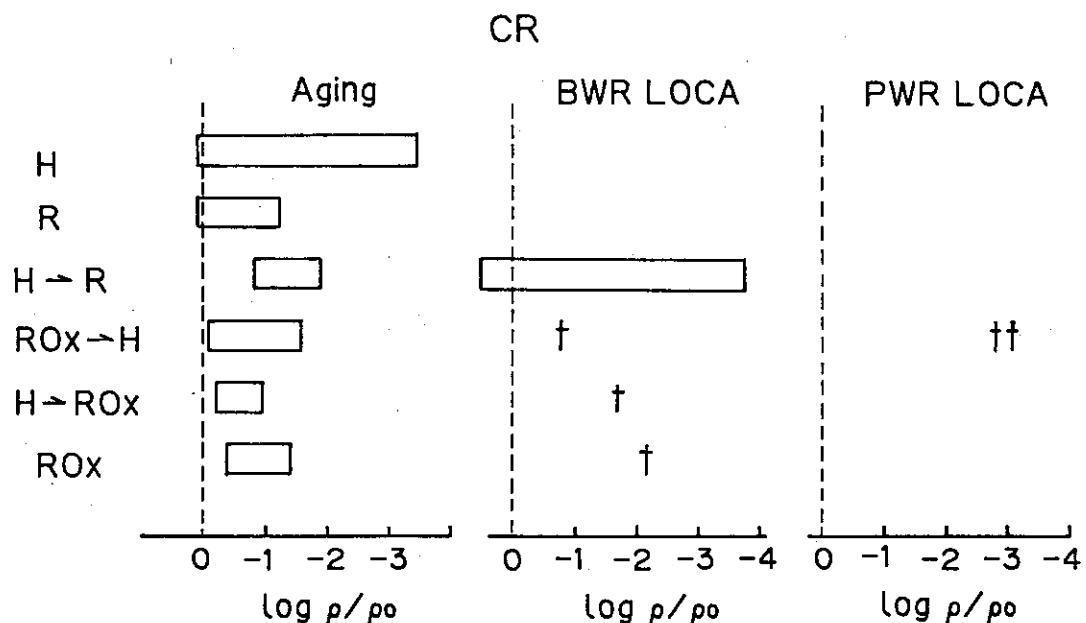


Fig. 92 Effect of aging conditions on volume resistivity of chloroprene in the following LOCA exposure.

4.1.8 シート状試料とケーブルの劣化挙動の比較

試験法の妥当性を考える上では、材料の劣化に及ぼす環境条件の影響を正確に把握することが不可欠である。このような観点から、絶縁材料に与える環境条件の影響についてはシート状の試料を用いて行って来た。一方、試験法推奨案によれば通常運転時ならびに事故時に対する認定試験はケーブルで行うこととされている。ケーブルの場合、絶縁体はシースにより覆われており、事故時の環境に直接触れないため、シースによる保護効果が考えられる。そこで本節ではケーブルのシース、コアと全く同じ配合のシート状試料をケーブルと同時に事故模擬環境に暴露し、劣化挙動を比較した結果について述べる¹⁾。

(1) 実験方法

試料：P Hケーブル（ハイパロン被覆、E P R絶縁）ならびに、そのシース、コアと全く同じ配合のシート状試料（厚さ約1 mmに調整）を用いた。ケーブル試料については、6 m長のケーブルをマンドレルに巻いたものならびにケーブルを予め解体し、シースからはダンベル状の試験片を、絶縁体からは芯線の導体を取り除いたチューブ状の試験片を調整し、これらを同時に試験した。

LOCA模擬環境暴露：LOCA模擬環境条件は同時法並びに逐次法でPWRプロファイルを用い、試験期間は1週間ならびに1ヶ月とした。また、電気的性質に関しては逆逐次法並びに蒸気環境暴露や放射線照射のみの場合の値も比較のため示した。機械的性質の測定はこれまでと同様に行つたが、ケーブル試料に関しては、長い今までLOCA模擬環境に暴露したものは、環境暴露後のケーブルを解体し、試験片を採取したものについて測定した。また予め解体し試験片の状態で環境暴露したものはそのまま測定に供した。尚ケーブル試料の強度は試験片数個の環境暴露前の断面積を求め、これを基準として算出した。伸びについては引張試験機のチャック間の距離から計算により求めた。測定は環境暴露後2週間以上放置、風乾してから行った。

(2) 結果及び考察

Table 37にシート状試料ならびにケーブルのシース、コアの強度と伸びの値を示す。シースはハイパロン、コアはE P Rである。この表から明らかのように、配合は全く同じであってもシートとケーブルの値は異なる場合が多い。その理由は強度に関しては、断面積の評価がシートとケーブルで異なることが原因の1つと考えられるが、最も大きな理由は、製造方法の違いによると考えられる。即ち、シート状試料では圧縮成型するのに対し、ケーブルでは長手方向に射出しながら成型するため、前者では方向性がないのに対し、後者では長手方向に伸張が加わ

り、成型時の歪みが残る可能性がある。また、絶縁体については管状であり、やはり内部歪みが残留している可能性が考えられる。また、さらに加硫時間、方法なども異なることが考えられ、これらが強度、伸びの違いに現れたものと思われる。しかしながら、配合については全く同じに調整されていると考えられているので、熱や酸素に対する挙動は極めて近いと考えられる。一般にシートとケーブルを比較するとシースではケーブル試料の伸びが低めになっており、コアでは高めになっている。

Fig.93に6種類のPHケーブルのシースならびにシースと同じ配合のハイパロンのシート状試料の事前劣化段階ならびにLOCA模擬環境暴露時の強度と伸びの保持率を標準偏差とともに示した。図中○印はケーブルのシースと同じ配合のシート状試料、△印はケーブルのシースから予め試験片を採取した場合を、□印はケーブル状で環境暴露した場合を示す。事前劣化段階では三者それぞれ値が異なるが、LOCA模擬環境暴露するとシート状試料とケーブルから予め試験片を採取した場合が近い値を示し、ケーブル状で試験した場合の劣化が著しく少ない。特に、強度についてはこの傾向が顕著であった。これらの相違は環境暴露状況の違い、即ちシートならびに予め試験片を採取した場合は試料の全体が蒸気やスプレイなどに直接暴されるのに対し、ケーブル状での試験では外側のみがこれらの環境に暴されるためと考えられる。一方、予め採取した試験片とシート状試料は、厚さや形態が多少異なっても、環境暴露条件はほぼ同じとなるため類似の劣化挙動を示すと考えられる。

Fig.94にコアのEPRについての結果を示す。事前劣化段階ならびにLOCA模擬環境暴露のいずれにおいても強度には環境暴露時の形状の影響はみられないが、伸びについてはケーブル状で試験したもののが著しく少ないとわかる。このことは先にシースについて示したように、絶縁体はシースにより蒸気やスプレイから保護されていることを示している。一方、シート試料と予め採取したものではほぼ近い値を示しており、配合が同じで、環境暴露時の状況が同じであればほぼ同様の劣化を示すことがわかった。

Fig.95に絶縁抵抗の結果を示す。図中の白い棒グラフはケーブルのコアと同じ配合のEPRシートの結果で+印は事前劣化有りの場合を示す。斜線を引いた棒グラフはケーブルのままでLOCA模擬環境に暴露した場合で、この場合ケーブルの端末はペネットレーションを通して圧力容器の外に引き出している。また、網目の棒グラフはケーブルの端末を熱収縮チューブでシールして圧力容器に入れて試験した場合を示す。図から明らかのように同時環境においても逐次環境においてもケーブルのままで端末を圧力容器外に引き出したものの絶縁低下がシート状試料に比べて小さく、機械的性質同様シースによる保護効果があることが分かった。また、端末を圧力容器内に入れた場合はシールの隙間から水蒸気やスプレイ

液が侵入して絶縁低下を促進したものと考えられる。

(3) まとめ

以上の結果から、シート状試料の劣化はケーブルから予め試験片を採取したものの劣化とほぼ等しく、配合が同じであり、環境暴露時の状況が同じであれば、シートの劣化挙動からケーブルの劣化が類推できる。しかしながら、ケーブル状で暴露すると絶縁体のみならずシース自体も劣化が少なくなる傾向を示す。しかし、この場合、もしケーブルのシースが何らかの原因により亀裂や脱落などを生じるとシース、コア共に環境に直接暴露されることになり、先に示したシート状試料の結果に近づくことになる。したがって、ケーブルと同じ配合のシート状試料で試験を行っておけばケーブルでは充分安全側になることから、シート状試料の結果は極めて有用な情報になり得ることがわかる。

電気的性質に関するシートとケーブルの劣化を比較すると、機械的性質同様シースによる保護効果、特にスプレイや吸水などに関する保護効果が認められ¹⁾、この点についてもシート状試料の結果は最も厳しい状況における劣化の推定を行うことになると考えられる。

関連文献

- 岡田漱平、吉川正人、伊藤政幸、日馬康雄、八木敏明、吉田健三、”絶縁材料の電気特性の変化に対するL O C A 模擬場験の影響”，

電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-82-109(1982)

Table 37 Comparison of mechanical properties of sheet sample to cable sample exposed to simulated LOCA environments.

Sample	Sheath				Core			
	Tb (Kg/cm ²)	Sheet (Kg/cm ²)	Cable (Kg/cm ²)	Tb (%)	Sheet (Kg/cm ²)	Cable (Kg/cm ²)	Tb (%)	Sheet (Kg/cm ²)
A	189	472	147	460	98	746	51	907
B	247	624	218	574	103	626	82	779
C	221	642	212	624	86	817	57	652
D	167	646	139	411	86	553	64	852
E	198	600	174	427	100	973	74	1232
F	185	428	209	339	80	529	46	780
\bar{x}	201	569	183	473	92	707	62	867
σ_x	26	86	32	98	8.5	156	12.6	181

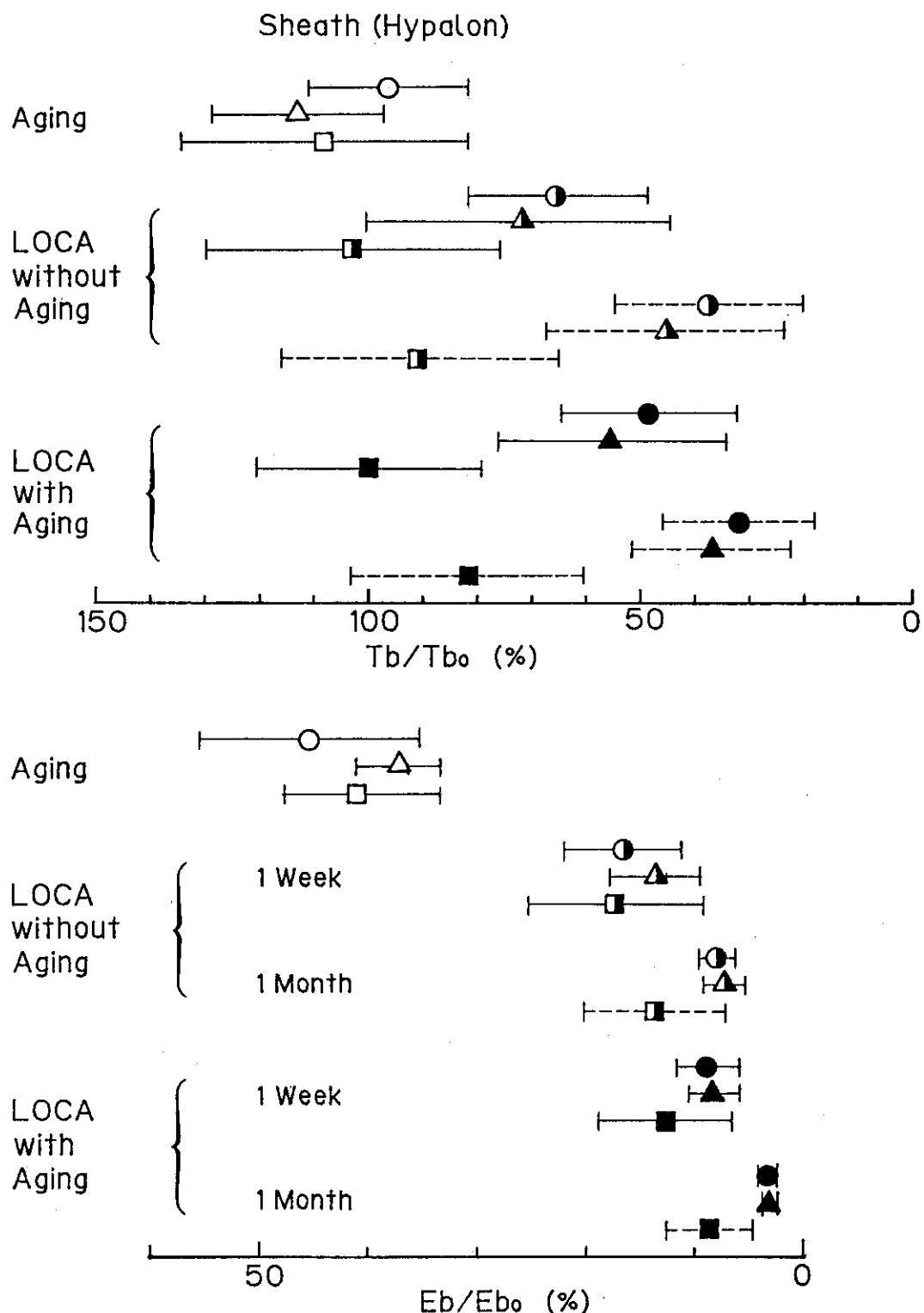


Fig. 93 Comparison of mechanical properties of sheet sample to cable sample exposed to simulated LOCA environment.

- ● sheet samples (same material as cable sheath)
- △ ▲ cable sample obtained from cable sheath
- ■ cable sheath obtained from exposed cable

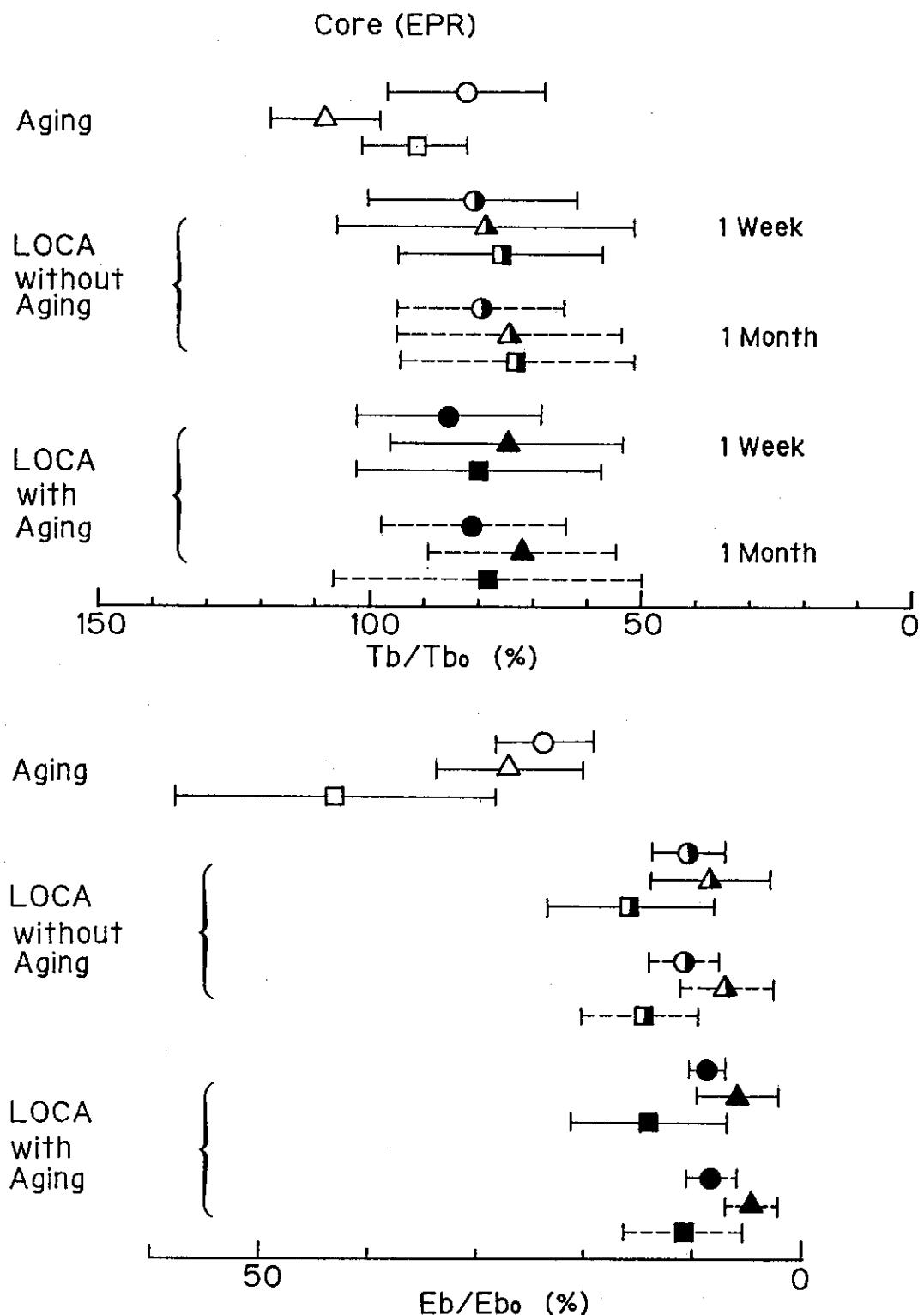


Fig. 94 Comparison of mechanical properties of sheet sample to cable sample exposed to simulated LOCA environment. (Core: EPR)

- ● ● sheet samples (same material as cable core)
- △ ▲ ▲ cable sample obtained from cable core
- ■ ■ cable core obtained from exposed cable

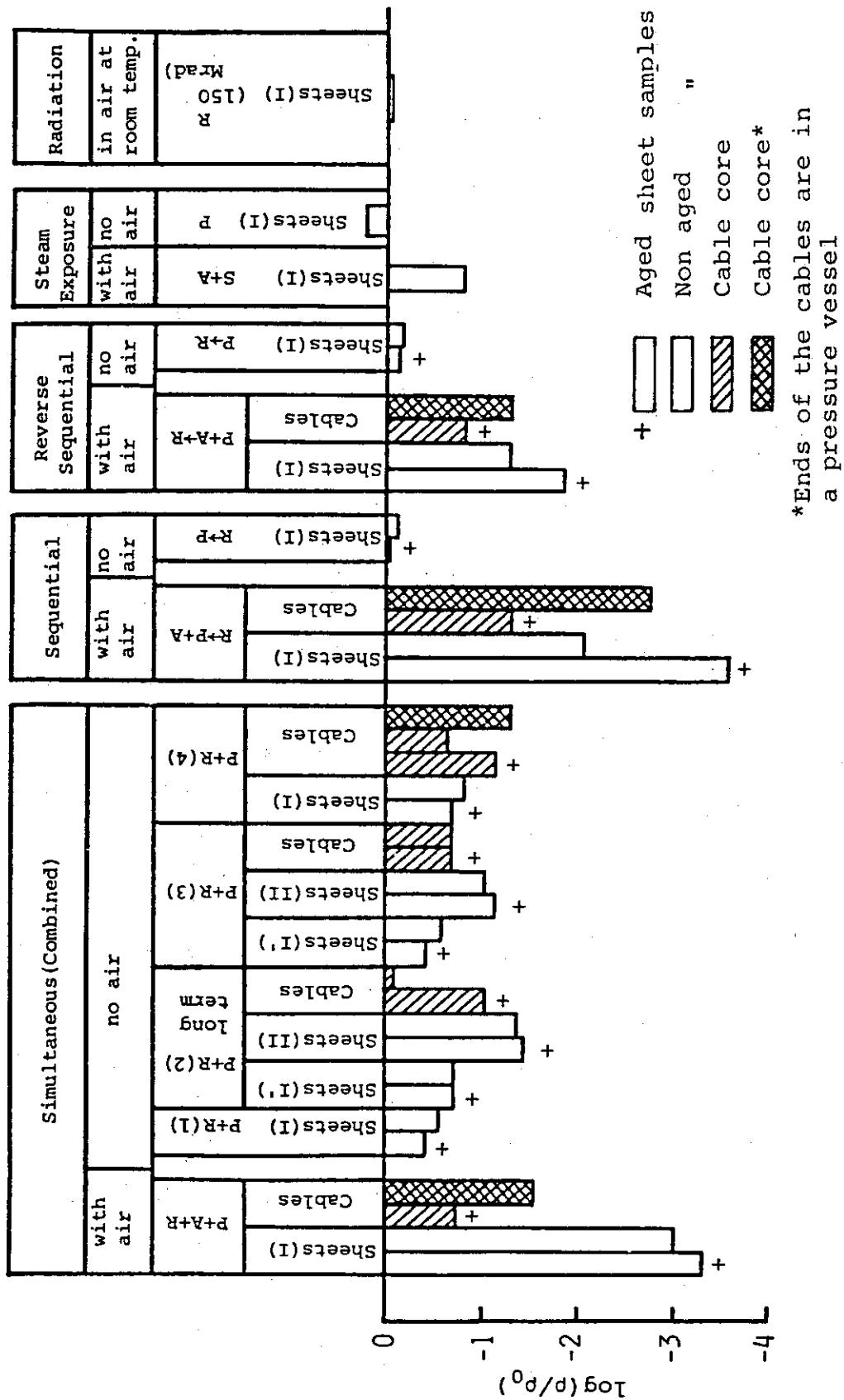


Fig. 95 Comparison of volume resistivity of sheet sample to cable sample exposed to simulated LOCA environments (Core: EPR).

4.2 逐次法

4.2.1 前照射線量、線量率の影響

想定事故であるLOCA時の環境を模擬する方法としてわが国の試験法推奨案をはじめ、米国、仏などの試験法では放射線とその他の環境を逐次与える方法（逐次法）が採用されている。これら逐次法では蒸気環境暴露に先立って放射線照射を行うが、わが国の推奨案ではその条件として空气中で10kGy/h以下で行うこととされている。

一方、想定されるLOCA環境は放射線と高温の水蒸気、スプレイなどの同時環境で、その期間はPWRで約1年、BWRで100日であり、その間の放射線の線量率はごく初期の段階を除き10kGy/hに比べて著しく低い。特に、PWRではLOCA期間中の大部分の線量は100Gy/hのオーダーの線量率で照射されると想定されている。

一般に有機高分子材料を空气中で照射すると酸素が充分に存在すれば酸化劣化を生じ、主鎖の切断等の反応が起こるが、真空中あるいは高線量率下の照射では試料の内部では酸化劣化は起こらず架橋が進行すると考えられ、劣化の線量率依存性が予想される。したがって、前述の長期間の同時環境における劣化を逐次法により模擬する場合、反応はできる限り同じにすることを考慮して、試験条件を検討すべきであり、線量率の影響が重要であると考えられる。本節では逐次法前照射における線量ならびに線量率が劣化にどのような影響を及ぼすかについて検討する。

(1) 実験方法

照射は全て室温空气中で行い、120°C一定の飽和水蒸気ならびに空気を含む水蒸気、ケミカルスプレイの環境に暴露し、劣化の経時変化を調べた。

(2) 結果及び考察

試験した5種類の絶縁・被覆材料の配合の異なる13種類の試料の結果の中から各素材毎に代表的な結果について述べる。

1) 機械的性質

Fig.96~101に各種の材料を室温、空气中で種々の線量率下で0~2.0MGyまで照射したときの強度と伸びの保持率を示した。

Fig.96はモデル配合のハイパロンの結果を示す。ハイパロンはどの試料もほぼ同様の劣化挙動を示し、強度に関しては線量率の影響は殆どなく、また、線量が増加しても変化しない。これに対し、伸びは線量とともに低下し、線量が高くなるにつれて若干線量率の影響がみられるようになり、低線量率下で照射するとや

や低下が大きくなる。

Fig.97にモデル配合のEPRの結果を示す。EPRは配合により若干劣化挙動が異なる。このEPRでは照射により強度も伸びも低下するが、強度の低下に比べて伸びの低下がより大きい。線量率の影響は強度にみられ、低線量率下で照射すると低下が大きくなる。

Fig.98に実用配合のEPRの例を示す。この試料では強度は線量とともに複雑な劣化挙動を示すが、線量率の影響は顕著でない。これに対し、伸びは線量とともに単調に低下する。また、線量率の影響がみられ、低線量率下で照射すると低下が大きい。この傾向はもう1種類の実用配合試料でもほぼ同様である。

Fig.99に架橋ポリエチレンの結果を示す。この試料では強度、伸びのいずれにも線量率の影響がみられ、ある線量で急激に低下し、その後はあまり変化しない。線量率の影響はこの急激に低下する線量に影響を与え、低線量率下で照射すると急激な低下を示す線量がより小さい方へ移動する。また、急激な低下後の値も低線量率ほど低くなっている、線量率依存性が極めて顕著である。

Fig.100にモデル配合のクロロプロレンの結果を示す。クロロプロレンは試料によって異なった挙動を示し、ここに示したものでは強度にも伸びにも線量率の影響が顕著にみられるが、この他の試料では強度には線量率の影響は殆どみられず、伸びにみられるのみであった。

Fig.101にシリコーンゴムの結果を示す。シリコーンゴムも試料によって若干劣化挙動が異なるが、ここに示したものでは線量率の影響が伸びにわずかにみられるが、強度については殆どなく、もう1種類の試料については強度、伸びのいずれにも線量率の影響はみられない。

以上、照射のみの段階においては、いずれの試料も線量とともに伸びが低下し、架橋ポリエチレン、クロロプロレンなどに線量率の影響がみられた。

次に、照射後蒸気環境暴露した際の劣化挙動について述べる。まず線量の影響がその後の蒸気環境暴露時の劣化にどの様な影響を与えるかを調べるために、室温、空気中高線量率下で0.25, 0.50, 1.0および2.0MGy照射し、120°Cの飽和水蒸気ならびに空気を含む蒸気環境に暴露したときの機械的性質を示す。

Fig.102にモデル配合のハイパロンを上記の線量照射した後蒸気環境暴露したときの結果を示す。左側は飽和水蒸気環境、右側は空気を含む蒸気環境に暴露した場合を示す。蒸気環境に空気が存在している場合も、存在しない場合も蒸気環境暴露の初期に強度、伸びが急激に低下し、その後はゆるやかに低下する下に凸の曲線を示す。線量が増加すると低下の割合は大きくなる。環境に空気がない場合はある時間以降はあまり低下しないが、空気があると線量の増加とともに勾配が大きくなっている、蒸気環境暴露時の空気が劣化を助長していることがわかる。

Fig.103にモデル配合のEPRの結果を示す。線量の影響は強度には殆どみら

れず、伸びに顕著である。この試料では蒸気環境暴露のごく初期に強度が若干低下するが、伸びは暴露時間によって殆ど変化せず、環境に空気があるなしに係わらず線量に応じてほぼ一定値を示す。即ち、蒸気環境暴露による劣化（熱老化）はしないことが分かる。蒸気環境暴露の初期にみられた強度の低下と伸びの回復は、照射により生じたラジカルなどが熱により分解または安定化するためであると考えられる。

Fig.104 には実用配合のEPRの結果を示したが、このEPRでも線量の影響は伸びにみられ線量の増加につれて伸びの値が小さくなるが、蒸気環境暴露の初期の伸びの低下に加え、その後の蒸気暴露によって低下する。特に環境に空気が存在すると線量の増加に伴って熱劣化が進行することがわかる。このことは、この試料が先に示したモデル配合試料に比べ酸化劣化し易いことを示唆している。

Fig.105 に架橋ポリエチレンの結果を示す。架橋ポリエチレンはFig.99に示したように、ある線量で強度、伸びが急激に低下し、その後はあまり変化しないという特異な挙動を示したが、ここでも線量が低い場合と高い場合とで異なった劣化曲線を示した。即ち、強度、伸びの急激な低下が起こる以前の線量、ここでは、0.5MGy以下では蒸気環境暴露の初期に伸びが低下するが、これ以上の線量では照射により低下した伸びが蒸気暴露により回復する。また環境に空気が存在すると、一旦回復した伸びは時間とともに再び低下するなど、他の材料と劣化挙動が異なる。

Fig.106 にクロロブレンの結果の一例を示す。クロロブレンは試料により劣化挙動が若干異なるが、一般に線量が増すと伸びが急激に低下する。ここに示した例では2.0MGy照射後蒸気環境に暴露すると50時間で1%以下になるなど伸びの低下が最も大きい。また、蒸気環境の空気は強度、伸びの低下を促進することがわかる。

Fig.107 にシリコーンゴムの結果を示す。シリコーンゴムについても線量の影響は伸びにみられるが、蒸気環境暴露による低下はごくわずかであり、また、蒸気環境中の空気の有無は殆ど影響を与えないことがわかる。

以上、逐次法前照射時の線量は材料の伸びに影響を与え、ハイパロン、クロロブレンなどの材料では線量の増加に伴って、蒸気暴露時の熱劣化速度が大きくなる。一方、モデル配合EPRやシリコーンゴムでは、線量の影響は蒸気暴露の初期にのみみられるが、その後の熱劣化には殆ど影響を与えないことがわかった。

次に線量率が材料の劣化に与える影響について検討する。

Fig.108 にモデル配合のハイパロンについて、種々の線量率下で1.5MGy照射した後120°Cの飽和水蒸気+ケミカルスプレイおよび空気を含む飽和水蒸気+ケミカルスプレイの環境に暴露したときの強度と伸びの保持率を示す。この図には次節で述べる照射雰囲気をかえて照射を行った場合のデータも含まれているが、これ

らについては次節で詳細に述べる。ここに示した図は蒸気環境暴露時の熱劣化における前照射時の線量率の影響であるが、ここでは便宜上単に線量率効果と呼ぶことにする。この試料は先に示したように照射のみの段階で伸びに若干線量率の影響がみられた試料であるが、蒸気環境に空気がない場合は強度に線量率の影響がみられ、伸びには全くみられない。一方、環境に空気が存在すると強度、伸びに線量率の影響がみられ、低線量率で前照射したもののが熱劣化速度が大きくなる傾向を示す。この傾向は他のハイパロン試料にもみられるが、実用配合試料では、環境に空気がない場合にも伸びの劣化速度に線量率の影響がみられ、環境に空気があると線量率の影響はより顕著になる。

蒸気環境暴露時の劣化は主として熱劣化によると考えられるが、この熱劣化に与える線量率の効果をより詳細に検討するため、前照射を終わった段階の伸びを基準にし伸びが半分になる時間を線量率に対してプロットしたものをFig.109 a, bに示す。aは環境に空気がない場合、bは環境に空気が存在している場合である。これらの図から、ハイパロンでは試料により線量率の影響がないように見えるもの(CSM4)を除き、 $10\text{ kGy/h} \sim 5\text{ kGy/h}$ の間では線量率の影響がみられ、これ以下では線量率の影響は殆どなく、一定の劣化速度を示す。環境に空気が存在すると線量率の影響がより顕著になる傾向を示す。

次にEPRについて線量率の影響を検討する。Fig.110にモデル配合のEPRの結果を示す。この試料は照射の段階では強度に若干線量率の影響がみられた試料である。環境に空気がない場合には蒸気環境暴露のごく初期にのみ線量率の影響がみられ、その後は一定値を示すのに対し、環境に空気が存在すると線量率の影響は初期により顕著になるとともに、その後の蒸気暴露中の低下速度にも若干影響を与えるようになる。この傾向は実用配合の試料でもほぼ同様であり、EPRは照射のみでは顕在化しない線量率の影響が蒸気暴露により顕在化することから、照射により生成した酸化物などの分解による二次的な劣化要因が示唆される。

Fig.111 a, bにハイパロンの場合(Fig.109)と同様のプロットを示す。但し、EPRでは伸びの低下がハイパロンに比べ小さいため、縦軸は伸びが照射段階の70%に達する時間とした。EPR 1について高線量率側では伸びの低下が殆どなくE~0.7Eの値が得られなかつたが、他の試料については明らかに線量率依存性がみられ、低線量率ほど劣化速度が大きい。EPR 3の線量率依存性はEPR 4に比べはるかに大きい。このような違いの要因としては酸化生成物の生成量の違い、即ち酸化防止剤等の配合の違いによるところが大きいと考えられる。また、環境の空気は劣化速度を大きくしているなど、酸化劣化の影響を受けやすいことがわかる。

Fig.112に架橋ポリエチレンの結果を示す。架橋ポリエチレンは照射の段階で大きな線量率依存性がみられた試料であるが、蒸気環境に暴露すると線量率の影

影響ははっきりしなくなる。伸びについては、蒸気環境暴露で回復を示す度合に線量率の影響がみられ、低線量率で照射したものほど回復が大きい傾向を示す。また、環境の空気はこれらの傾向をやや助長するようであるが、その影響は比較的小さい。架橋ポリエチレンでは蒸気暴露により伸びが回復するため先に示したハイパロンやEPRのようなプロットが出来ないので熱劣化速度の線量率依存性は示していない。

Fig.113 にモデル配合のクロロブレンの結果を示す。先に示した様に、この試料は照射段階ではかなりはっきり線量率の影響がみられた試料であるが、蒸気環境暴露すると劣化の程度は線量率の順にならず、劣化挙動はかなり複雑である。E~0.5Eを線量率に対してプロットすると、環境に空気がある場合もない場合も1本の直線にならないだけでなく、ある線量率を境に直線の勾配が逆になるなど単純な解釈は出来ないことがわかった。

Fig.114 にシリコーンゴムの結果を示す。シリコーンゴムは前照射の段階では線量率の影響が殆どなかったが、蒸気環境暴露時の劣化にも線量率の影響は殆どみられない。但し、環境に空気がある場合には、強度、伸びに若干ではあるが線量率の影響がみられるが、全体としてシリコーンゴムは線量率の影響を受けにくい。その理由としてはシリコーンゴムはもともと試料内に酸素拡散が容易に起こるため、実験した範囲の線量率では酸素が充分供給されていると予想されること、また分子内に酸素分子を含み酸化劣化に対して安定であるためなどの点があげられる。

2) 電気的性質

逐次法前照射における線量、線量率が絶縁抵抗にどのような影響を及ぼすかを調べるために、絶縁材料のシートを用いて体積固有抵抗を測定した。以下その結果について述べる。ここでは5種類の絶縁・被覆材料のうち絶縁材料3種類についてのみその代表的な結果を示す。まず前照射線量の影響について述べる。

Fig.115a, b にモデル配合のEPRの結果を示す。a は蒸気環境に空気がない場合を、b は蒸気環境に空気が存在している場合を示す。この図で左半分に示したのは前照射のみの段階、右半分は種々の線量前照射したものと120°C一定の蒸気環境に暴露した場合の値を示す。縦軸は体積固有抵抗の初期値（未照射のものの値）に対する比の値の対数を示している。この図から明らかのように、このEPR試料では照射による絶縁抵抗の変化はごくわずかであり、かつ蒸気環境暴露してもその値は殆ど変化しないことがわかる。実用配合のEPRもほぼ同様の傾向を示すがEPR4の試料のみ照射のみ2.0MGy与えると3桁以上の低下を示し蒸気環境に暴露すると初期値に近くまで回復する。しかしながら、この試料は蒸気環境に空気があると1桁以内の低下を示すなど環境の空気の影響を若干受ける。

Fig.116 a, b に架橋ポリエチレンの結果を示す。絶縁抵抗は線量の増加とともに低下し、2.0MGyで約3桁程度の低下を示す。しかし、その後蒸気環境暴露を行うと、初期において絶縁抵抗は回復し、その後あまり変化せず破断伸びの挙動と類似している。環境に空気がある場合もほぼ同じでやはり回復を示すため、蒸気環境暴露したときの低下は2桁以内となる。

Fig.117 a, b にシリコーンゴムの結果を示す。シリコーンゴムは前照射量により不規則な変化を示す。照射のみの段階ではほぼ線量の増加に伴って絶縁抵抗が低下するが、その後の蒸気暴露では、前照射量の小さいもの(0.25, 0.50MGy)は暴露時間に応じて低下して行く(点線で示した照射なしの蒸気暴露のみでも低下する)。一方前照射量の大きなもの(1.0, 1.5, 2.0MGy)では、その後の蒸気暴露ではあまり変化しない。シリコーンゴムは熱のみ(例えば空气中121°C, 7日間の熱老化)によって絶縁低下を起こすという報告¹⁾があるが、線量が少ない場合は蒸気環境の熱の影響が大きいと考えられ、線量が大きい場合には架橋の進行が著しく、熱の効果が抑制されたためではないかと考えられる。また、環境の空気は絶縁低下には殆ど影響を与えていないことがわかった。

次に絶縁抵抗に及ぼす前照射時の線量率の影響について述べる。絶縁材料の絶縁低下の原因はこれまでにも述べたように放射線酸化により生成する極性物質であると考えられている。したがって線量率の影響を受けることが予想される。以下に空气中、室温で線量率を変え前照射を行った試料を飽和水蒸気環境ならびに空気を含む蒸気環境に暴露したときの絶縁抵抗の変化を示す。

Fig.118 a, b にモデル配合のEPRの結果を示す。a は種々の線量率で前照射した試料を120°Cの空気を含む蒸気環境に暴露した場合を、b は同じく飽和水蒸気環境に暴露した場合を示す。この場合の前照射線量は1.5MGyである。前述したように、前照射のみでは絶縁低下はわずかであるが、空気を含む蒸気環境に暴露すると高線量率下(10kGy/h)で照射したものは低下を示さないが、1kGy/h, 0.45kGy/hで照射したものは暴露時間とともに低下を示すなど線量率の影響がみられる。しかしながら低下が最も大きかったのは中線量率(1kGy/h)の場合であり、最も低い線量率(0.45kGy/h)での低下は比較的少ないという結果になった。一方、蒸気環境に空気が存在しない場合(b)には線量率の影響は顕在化しないなど、環境の空気の存在によって著しく劣化挙動が異なる。

Fig.119 a, b に実用配合のEPRの結果を示す。実用配合試料では蒸気環境に空気がない場合にも線量率の影響がみられ、低線量率下で前照射すると著しく劣化するため試料の溶失が生じ、蒸気暴露の途中から測定不能となる。この傾向は環境に空気があるとさらに顕著になり最も低い線量率下で前照射したものは蒸気暴露したとたんに測定が出来なくなるなど酸化劣化の影響が著しい。もう1種類の実用配合試料もほぼ同様の劣化挙動を示しモデル配合試料に比べ、線量率の影

影響がより大きい。

Fig.120 a, b に架橋ポリエチレンの結果を示す。前照射段階では、低線量率と高線量率で顕著な差はない。その後の蒸気暴露による絶縁低下は、予想に反して、低線量率照射の方が高線量率照射の場合より低下が少ない。その理由は明らかではない。

Fig.121 a, b にシリコーンゴムの結果を示す。前照射により低下した絶縁抵抗が蒸気環境暴露により若干回復する。この傾向は前照射の線量率に関係なくみられる。しかし、その他の傾向についてはデータもばらついており、挙動は複雑で配合によっても異なり、前照射時の線量率が劣化に及ぼす影響については系統的にはっきりしたことはいえない。また、環境の空気の存在も大きな影響を与えない。

3) 吸水膨潤

これまでの実験から、絶縁材料は酸化劣化が起こると吸水することが明らかになっていることから、吸水に与える線量、線量率について検討する。吸水膨潤の値は先に同時法のところで示したのと同様に、未処理の重量に対する変化量で表すが、重量の測定は蒸気環境暴露直後の値を測定した。したがって同時法のところで示した値（環境暴露後 2 日目の値）に比べて概して大きな値を示す。

Fig.122 にモデル配合のハイパロンを空气中、 10 kGy/h で種々の線量前照射し、飽和水蒸気ならびに空気を含む蒸気環境に暴露したときの重量変化を示す。図に示した値は環境暴露前後の重量変化を示しており、その内訳は吸水による重量増加と溶失等により重量減少したものをオーバーオールで表したものである。図中の白抜きの印は飽和水蒸気環境暴露時の重量変化を、黒ぬりの印は空気を含む蒸気環境暴露時の値を示す。図から明らかなように吸水量は前照射線量の増加とともに著しく増加する。蒸気環境の空気は吸水を助長するが、その影響は前照射線量の増加につれて顕著になる。

Fig.123 に実用配合のハイパロンの結果を示す。モデル配合の試料に比べ吸水による重量増加は小さい。環境の空気は暴露時間が長くなると吸水を助長する。ハイパロンは蒸気環境暴露により一般にかなり吸水するが、モデル配合試料に比べ、難燃化されているにもかかわらず実用配合試料の吸水が小さいことがわかる。

Fig.124 にモデル配合の E P R の結果を示す。この試料は前照射線量が少ないと重量減少を示す。このことは照射による極性物質の生成量が極めて少なく、吸水も殆ど起こらないのに対し、蒸気環境暴露時のスプレイにより添加物の一部が抽出され、全体としては重量が減少することを示している。蒸気環境の空気は吸水を助長するが、線量が最も大きい 2.0 MGy では頭打の傾向がみられる。このことは線量が増すと、表面付近の酸化劣化が進み、表面の一部がスプレイにより溶失

するためであると考えられる。

Fig.125 に実用配合のEPRの結果を示す。この試料では線量が増加すると急速に吸水量が増加する。モデル配合の試料と異なり、線量が少ないところでも、わずかではあるが吸水を示すなどモデル配合試料に比べ吸水し易いことがわかる。一方、環境の空気は吸水を助長し、線量が多いところでは蒸気環境暴露に伴って加速度的に増加する。

Fig.126 に架橋ポリエチレンの結果を示す。架橋ポリエチレンも前照射線量に伴って吸水が増加するが、低線量では環境に空気がない方が若干吸水量が大きいのに対し、線量が多いと環境の空気により吸水が著しく助長される。

Fig.127 に実用配合のクロロプロレンの結果を示す。吸水量は線量率に伴って増加せず、蒸気環境に空気が存在していない場合には 0.5MGy のとき最も大きくなるのに対し、蒸気環境に空気があると、線量が少ない方が吸水量が大きい。特に 0.25MGy の場合、吸水は蒸気暴露時間に対しほぼ直線的に増加しており頭打ちの傾向はみられない。

Fig.128 にモデル配合の試料の結果を示したが、吸水はさらに大きくなる。しかしながら蒸気環境に空気がない場合には、線量に伴って一旦吸水が増加し、さらに線量が増すと頭打ちを示すようになり、その結果、暴露時間が長くなると吸水量は 0.5MGy が最大となる。一方、環境に空気が存在していると、蒸気環境暴露の初期の吸水速度は線量が多い方が大きいがすぐ頭打ちを示し、暴露時間が長くなると吸水量は逆転する。このような現象はクロロプロレンに共通してみられる²⁾が、その原因としてはクロロプロレンは放射線照射や熱により容易に架橋が進行し、形状が変化しにくくなるために吸水が物理的に制限される要因と、酸化劣化の進行により吸水が促進されること、また酸化層の生成により酸素の拡散速度が低下するなどの要因のかねあいによって起こると考えられる。即ち、線量が少ないと吸水に関与する極性物質の量が少ないので初期の吸水速度は小さいが、同時に架橋の度合も低いため大量の水分を物理的にとり込むことが可能である。したがって、蒸気環境に空気があると、酸素の拡散により内部の酸化が進行し、それに伴って吸水が促進される。一方、線量が多いと試料表面の酸化が進むため蒸気暴露の初期の吸水速度は大きいが、表面付近の酸化層によって酸素の拡散速度が低下すると同時に、照射による架橋の進行により吸水は物理的に制限されることにより頭打ちを生じると考えられる。

Fig.129 にシリコーンゴムの結果を示す。シリコーンゴムはこれまでに示したように蒸気環境暴露により重量が減少するが、ごく初期には重量増加がみられる。重量増加は線量が少ないほど大きい。線量が多くなると重量増加はほとんどみられなくなり蒸気環境暴露の初期から重量減少を示すようになる。シリコーンゴムの重量増加は添加物の酸化による吸水が考えられるが、重量減少はシリコーンゴ

ム自身のアルカリ性ケミカルスプレイ液等による加水分解による減少とともに、添加物、充填物等の酸化による低分子化に伴ってスプレイによる抽出が起こることに起因すると考えられる。

次に吸水に及ぼす前照射における線量率の影響について検討する。吸水は試料の酸化劣化と密接な関連を持つと考えられるので、前照射を種々の線量率下で1.5MGy行い120°Cの飽和水蒸気ならびに空気を含む蒸気環境に暴露し、重量の変化を調べた。

Fig.130 にモデル配合ハイパロンの結果を示す。左側は蒸気環境に空気が存在していない場合、右側は空気が存在している場合を示す。吸水による重量増加は前照射の線量率が低いほど大きくなる傾向を示すが、最も低線量率0.45kGy/hは1kGy/hの場合と初期においては同じか、やや上回っているが、暴露時間が長くなると吸水量はかえって小さくなっている。このことは最も低い線量率で照射したものは酸化劣化が試料全体に起こっているため吸水の絶対量が大きくなることが予想されるが、これと同時に表面の溶失が起こることから見かけの吸水量は頭打ちになると考えられる。特に環境に空気があると溶失による重量減少分が増加するため頭打ちが早く現れると考えられる。

Fig.131 に実用配合のハイパロンの結果の例を示したが、モデル配合試料ほど吸水は大きくないもののやはり線量率の影響がみられ低線量率では初期の吸水速度が大きく、やはり溶失によると思われる頭打ちがみられる。

Fig.132 にモデル配合のEPRの結果を示す。この試料も線量率が低くなるにつれて吸水が増加する傾向を示すが、最も低い線量率下の吸水がやや低めになっている。その理由はこの条件では溶失が起こっていることが別の実験から確かめられている。蒸気環境の空気は吸水を助長するが、その程度はあまり大きくない。

Fig.133 に同じく実用配合のEPRの結果を示す。やはり線量率の低下とともに初期の吸水速度は増加の傾向を示すがここでも最も低線量率の場合には頭打ちがみられるだけでなく、さらに蒸気環境暴露すると逆に重量減少を示す。また、重量減少は環境に空気が存在するとより早く出現し1kGy/hでもみられるなど空気の影響を受けやすいことがわかる。

Fig.134 に架橋ポリエチレンの結果を示す。架橋ポリエチレンもEPRと同様、線量率が低くなると吸水量は増加の方向を示すが、さらに低線量率になると溶失により頭打ちや重量減少がみられるなど低分子化が起こる。環境の空気は吸水を助長するとともに表面の酸化劣化をも促進させるため、著しい溶失を起こし、最も低い線量率下では途中で測定出来なくなるなど劣化が著しい。

Fig.135 に実用配合のクロロブレンの結果を示す。クロロブレンは試料によってかなり劣化挙動が異なり配合依存性が大きいと考えられるが、この試料では、蒸気暴露の初期に吸水が起こった後はあまり吸水が進行しないように見える。線

量率の影響はあまり大きくなく、吸水量そのものも頭打ちを示す場合が多い。蒸気環境に空気が存在すると一定時間以降は重量減少に転じるなど劣化が進行されるようである。

Fig.136 にモデル配合のクロロブレンの結果を示す。この試料では環境に空気がある場合とない場合でかなり吸水挙動が異なる。即ち空気の存在の影響を受ける。環境に空気がないと、 $10\text{ kGy/h} \sim 1\text{ kGy/h}$ の範囲では線量率の影響はほとんどみられないが、 0.45 kGy/h では急激な吸水量の増加がみられる。一方、環境に空気が存在すると初期の吸水速度には明らかに線量率の影響がみられるが時間が長くなると溶失による重量減少が目立つようになり、酸化劣化が重大な影響を与えることがわかる。このようにクロロブレンでは吸水と同時に溶失の影響が大きいこと、さらに先に述べたように架橋による物理的な吸水の制限などが複雑に作用し合うため、吸水挙動は極めて複雑になる。

Fig.137 にシリコーンゴムの結果を示す。シリコーンゴムは重量減少を示すことはこれまでにも述べたが、この重量減少はアルカリスプレイ液による加水分解ならびに添加物の酸化劣化による溶失などが主な原因である。重量減少に対する前照射時の線量率の影響は環境に空気がない場合には明瞭ではないが、低線量率での減少がやや大きいように見える。また、環境に空気が存在している場合には一応線量率が低くなるにつれ重量減少が大きくなる傾向を示すことがわかった。しかしながら線量率の効果はそれほど大きくなく、主に添加物に対する線量率効果であると考えられる。以上、一般的には酸化劣化と吸水は密接な関係があり、低線量率下では吸水が大きくなる。また、蒸気環境の空気は吸水を助長する方向に作用するが、酸化劣化が大きく進むと表面の低分子化による溶失を生じ見かけの吸水が頭打ちないしは低下するが、溶失分の補正を行うと暴露時間に伴って増加していることがわかった。

(3) まとめ

逐次法の前照射時の線量、線量率が蒸気環境暴露時の劣化に及ぼす影響については以下のようにまとめることができる。

1) 機械的性質に関しては、劣化は前照射線量の増加に従って大きくなる。線量の影響は一般に伸びに顕著である。特に照射により架橋が優先的に起こる試料（クロロブレン、シリコーンゴム等）では伸びの低下が著しい。一方、線量率の影響は前照射の段階では架橋ポリエチレン、クロロブレンの一部を除き顕著でないが、線量の増加に伴って伸びに影響がみられる場合があり、低線量率下での低下がやや大きくなる。架橋ポリエチレンや、クロロブレンの一部の試料では強度、伸びのいずれにも線量率の影響がみられ、低線量率下での劣化が大きくなる。

蒸気環境暴露の段階では、線量の増加により、熱劣化速度が影響を受けるもの

は少なく、環境に空気が存在していない場合には前照射段階での伸びにみられた線量の影響がそのまま反映されるものが多い。なお、クロロブレンの一部では、蒸気暴露時の劣化速度が線量の増加とともに大きくなり、架橋ポリエチレンでは線量によって伸びの劣化挙動が異なるなどの現象もみられた。一方、環境に空気があると、線量の増加に伴って熱劣化速度が増加の傾向を示すものが現れるなど線量の影響がより顕著になる。前照射時の線量率の影響は蒸気環境暴露時の劣化速度に影響を与える場合が多く、特にEPRには顕著にみられ、低線量率照射による劣化が大きい。また環境の空気はその傾向を助長する。

2) 電気的性質に関しては、EPRを除き前照射線量の増加とともに絶縁抵抗が低下し、絶縁低下に線量の影響がみられるが、EPRを含め、これらを蒸気環境暴露すると一部の試料では絶縁抵抗の回復がみられ、線量の影響ははっきりしなくなるものが多い。特に架橋ポリエチレンは伸びの挙動と同様蒸気環境暴露による回復が著しく線量の影響はわずかになる。これに対しシリコーンゴムの挙動は複雑で、線量によって絶縁抵抗の劣化挙動が異なる。これらの現象は放射線と熱の効果の両方の兼ね合いで起こるものと考えられる。環境の空気は前照射を空气中、高線量率下で行った場合には絶縁低下に殆ど影響を与えない。一方、線量率の影響については、一般に低線量率下で照射すると絶縁低下が大きくなる。なお、これらを蒸気環境に暴露するとさらに低下を示すものと、一部回復を示すものがあり、これらは試料中の照射により生成した酸化物質の蓄積と溶出に関連すると考えられる。また、蒸気環境の空気は試料の酸化劣化を促進するため、表面の溶失などを起こすが、これらもやはり絶縁抵抗に複雑な影響を与えることがわかった。

3) 吸水膨潤については、シリコーンゴムを除き、一般に線量の増加とともに、また線量率の低下とともに増加の傾向を示し、環境の空気は吸水を助長するなど絶縁抵抗同様、試料の酸化劣化と密接な関連を持つ。しかしながら、酸化劣化がさらに進むと、試料の表面の部分が低分子化し、スプレイなどにより溶失するため、見かけ上吸水が頭打ちになったり、減少を示す場合もある。この場合にも単位試料当たりの吸水量そのものは増加することが確認された。また、吸水には物理的吸水と化学的な吸水が考えられ、前者は材料の架橋密度に、後者は素材及びその配合に大きく依存することがわかった。

一方、シリコーンゴムは多くの場合、重量減少を示すが、この重量減少はゴム自体のスプレイによる加水分解が主な原因と考えられ、重量減少にみられる線量や線量率、環境の空気の影響は、添加物ないしは充填物の酸化劣化による溶出等に起因するものと考えられ、素材自体に対する線量、線量率の影響は殆どないと

考えられる。

関連文献

1. 岡田漱平, 伊藤政幸, 日馬康雄, 中瀬吉昭, 吉田健三, " L O C A 模擬環境下における絶縁材料の電気的性質の変化", 電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-81-92(1981)
2. 八木敏明, 日馬康雄, 伊藤政幸, 岡田漱平, 吉川正人, 吉田健三, " 放射線照射したゴム材料の沸騰スプレイ液中における膨潤挙動", JAERI-M 83-072(1983)
3. Y.Kusama, T.Yagi, S.Okada, M.Ito, M.Yoshikawa, K.Yoshida, N.Tamura and W.Kawakami, "Progress on Qualification Testing Methodology Study of Electric Cables", Proceedings of the U.S. Nuclear Regulatory Commission NUREG/CP-0082(1987)
4. 八木敏明, 日馬康雄, 伊藤政幸, 岡田漱平, 川上和市郎, " 絶縁材料のL O C A 模擬環境下における吸水特性の変化", 電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-86-129(1986)

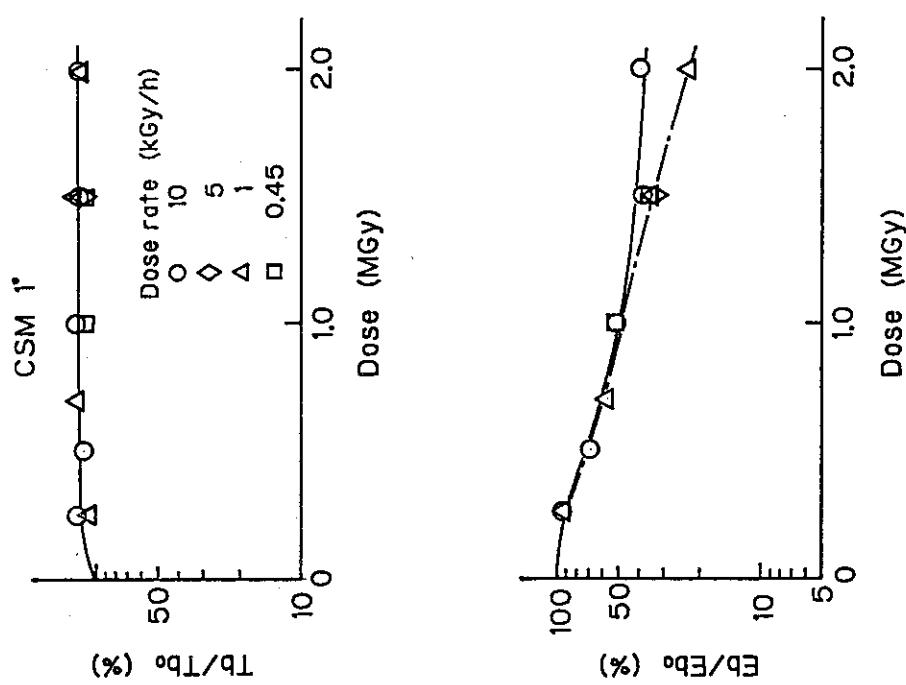


Fig.96 Effect of dose and dose rate on mechanical properties of Hypalon 1* irradiated in air at room temperature.

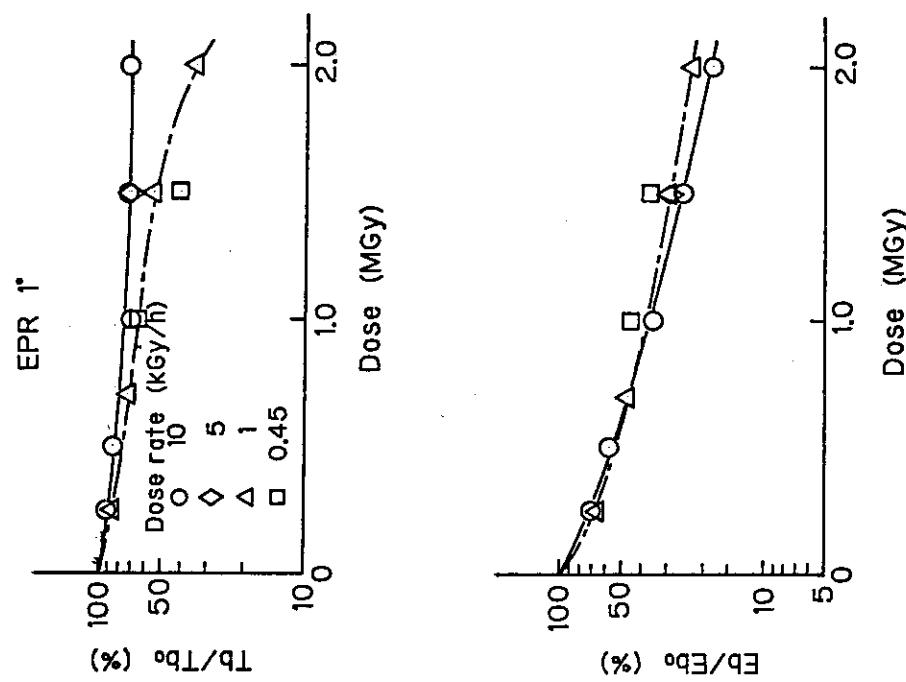


Fig.97 Effect of dose and dose rate on mechanical properties of EPR 1* irradiated in air at room temp.

Fig.97 Effect of dose and dose rate on mechanical properties of EPR 1* irradiated in air at room temp.

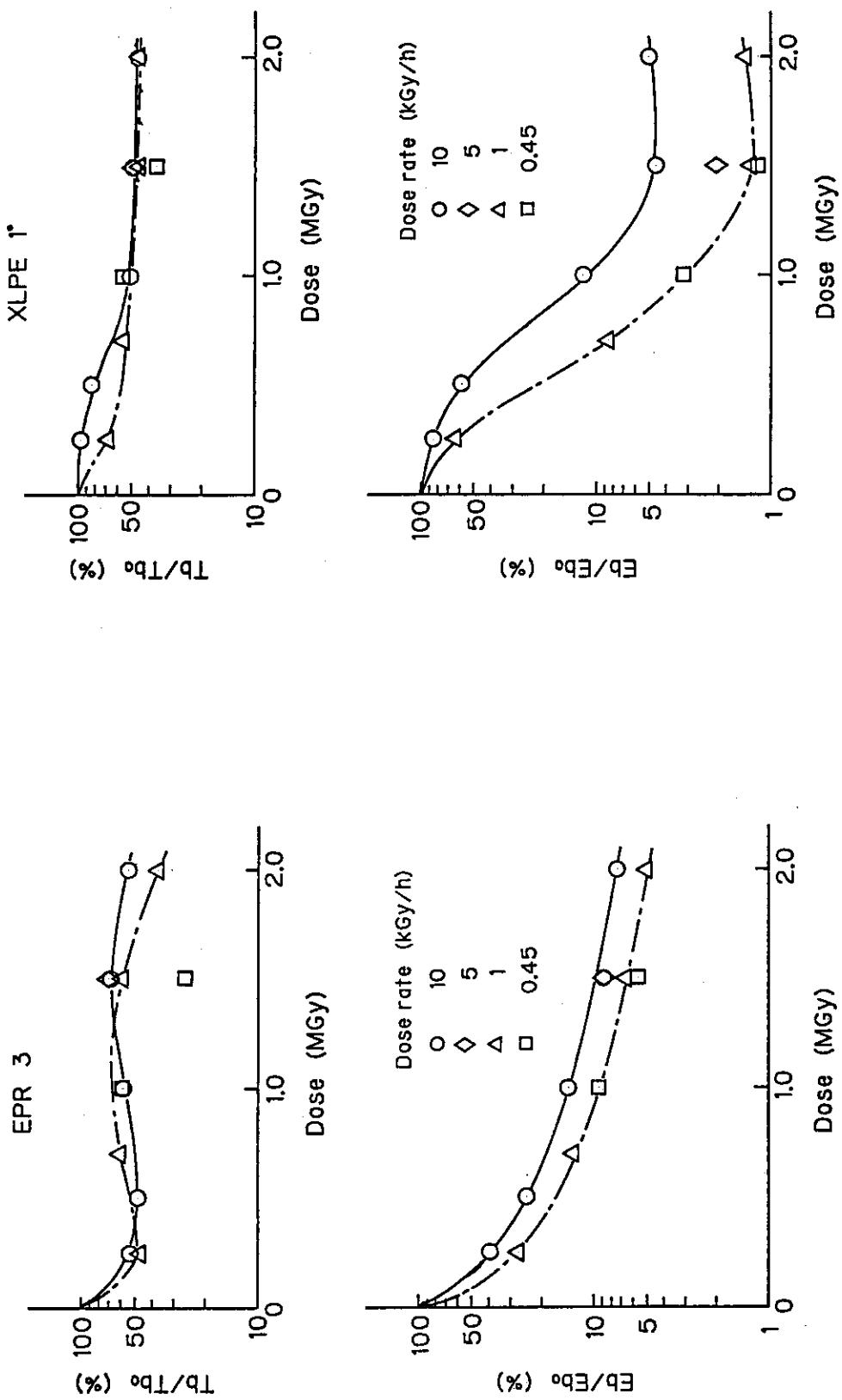


Fig.98 Effect of dose and dose rate on mechanical properties of EPR 3 irradiated in air at room temp.

Fig.99

Effect of dose and dose rate on mechanical properties of cross-linked polyethylene irradiated in air at room temperature.

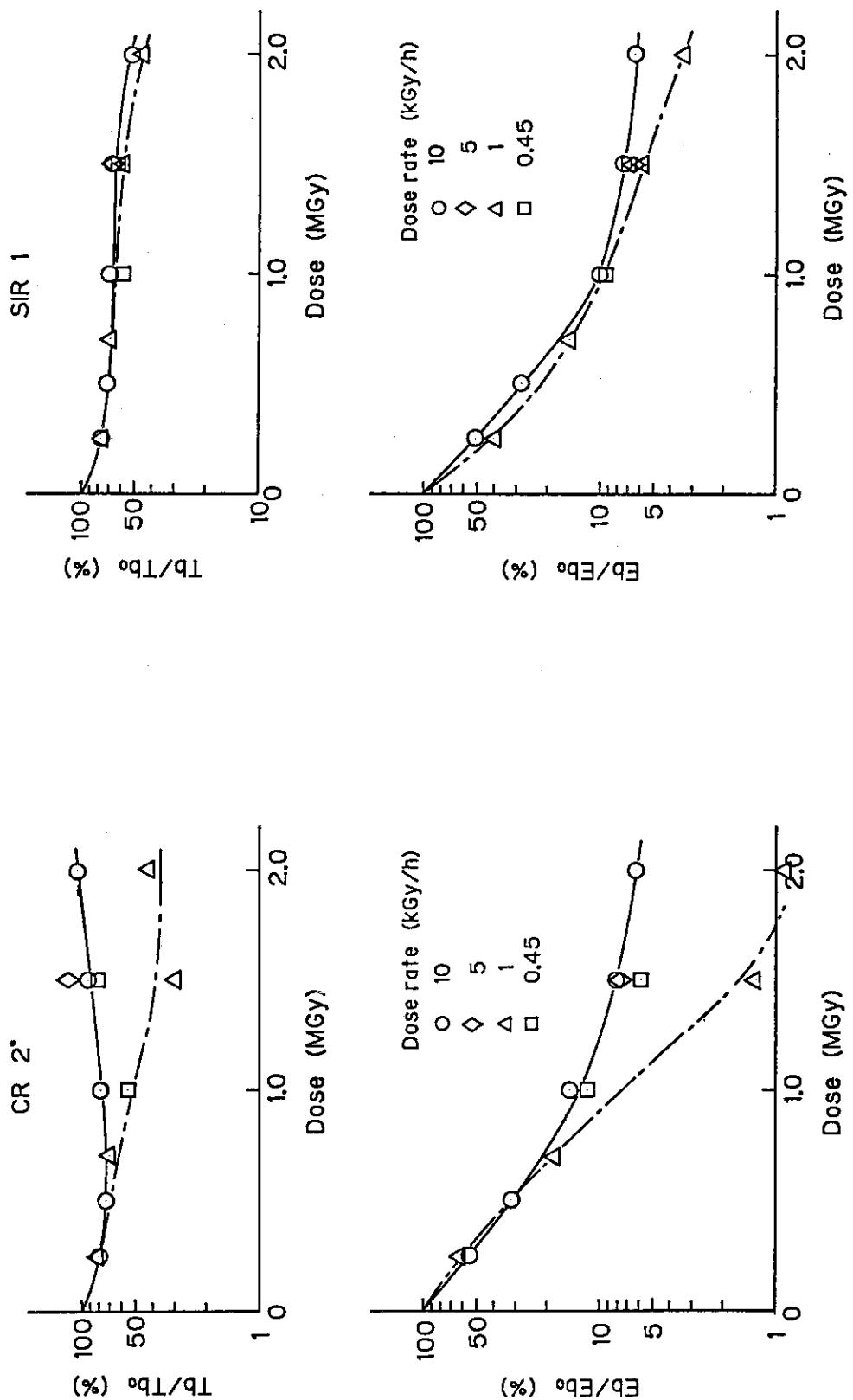


Fig.100 Effect of dose and dose rate on mechanical properties of chloroprene 2* irradiated in air at room temperature.

Fig.101 Effect of dose and dose rate on mechanical properties of silicone rubber 1 irradiated in air at room temperature.

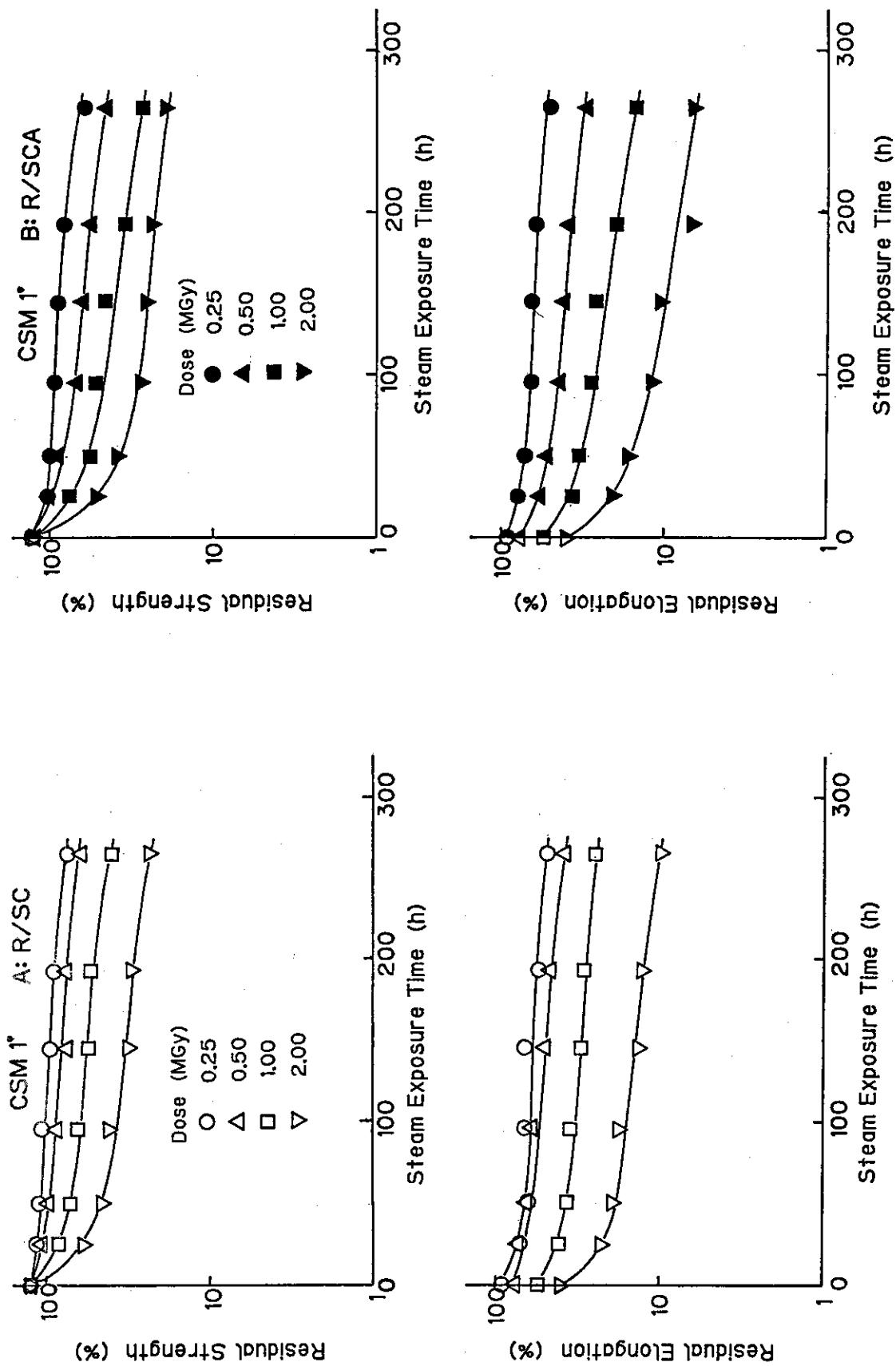


Fig.102 Effect of pre-irradiation dose in sequential LOCA test on mechanical properties of CSM 1* exposed to saturated steam (R/SC) and saturated steam containing air (R/SCA).

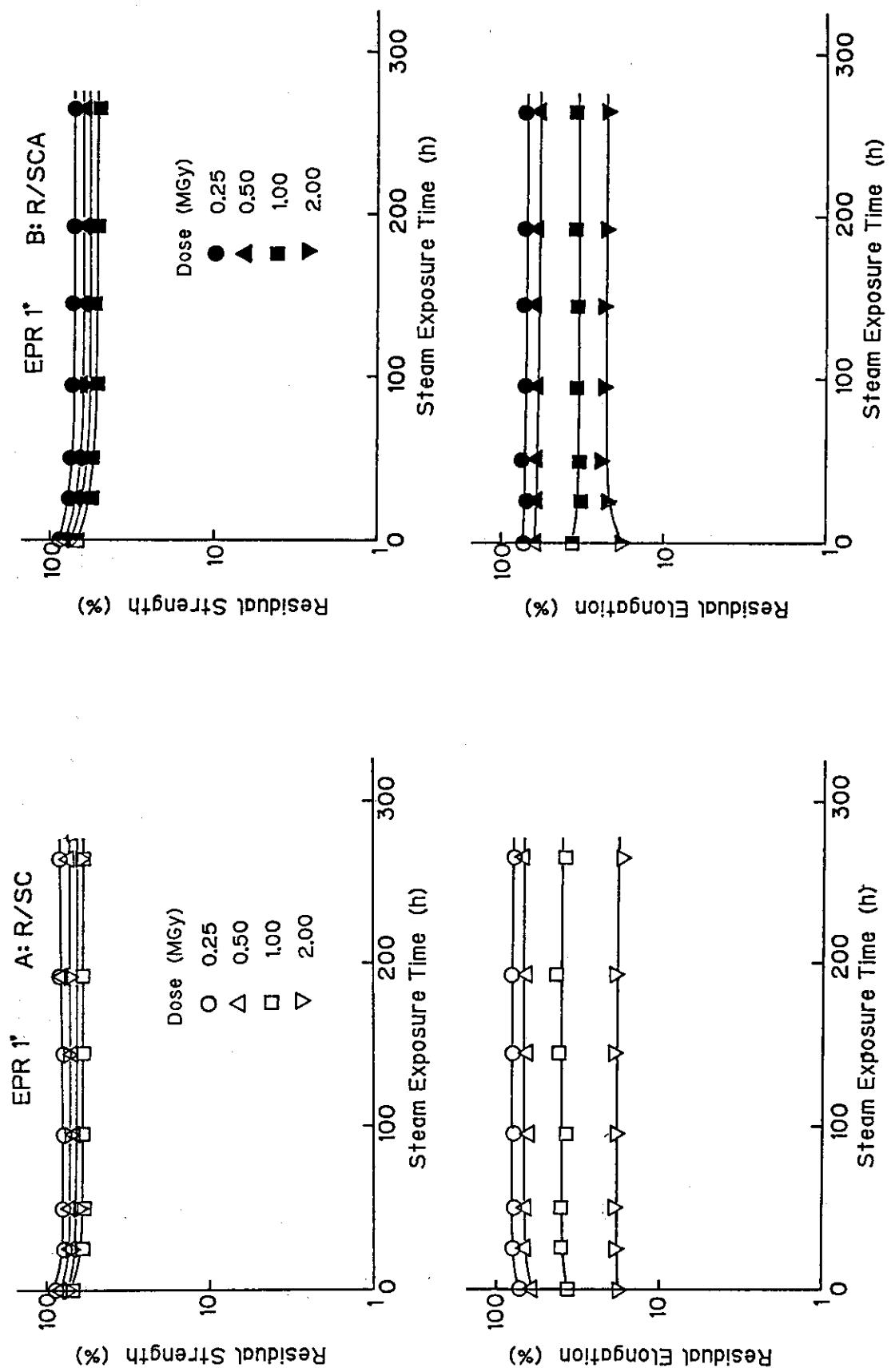


Fig.103 Effect of pre-irradiation dose in sequential LOCA test on mechanical properties of EPR 1* exposed to saturated steam (A:R/SC) and saturated steam containing air (B:R/SCA).

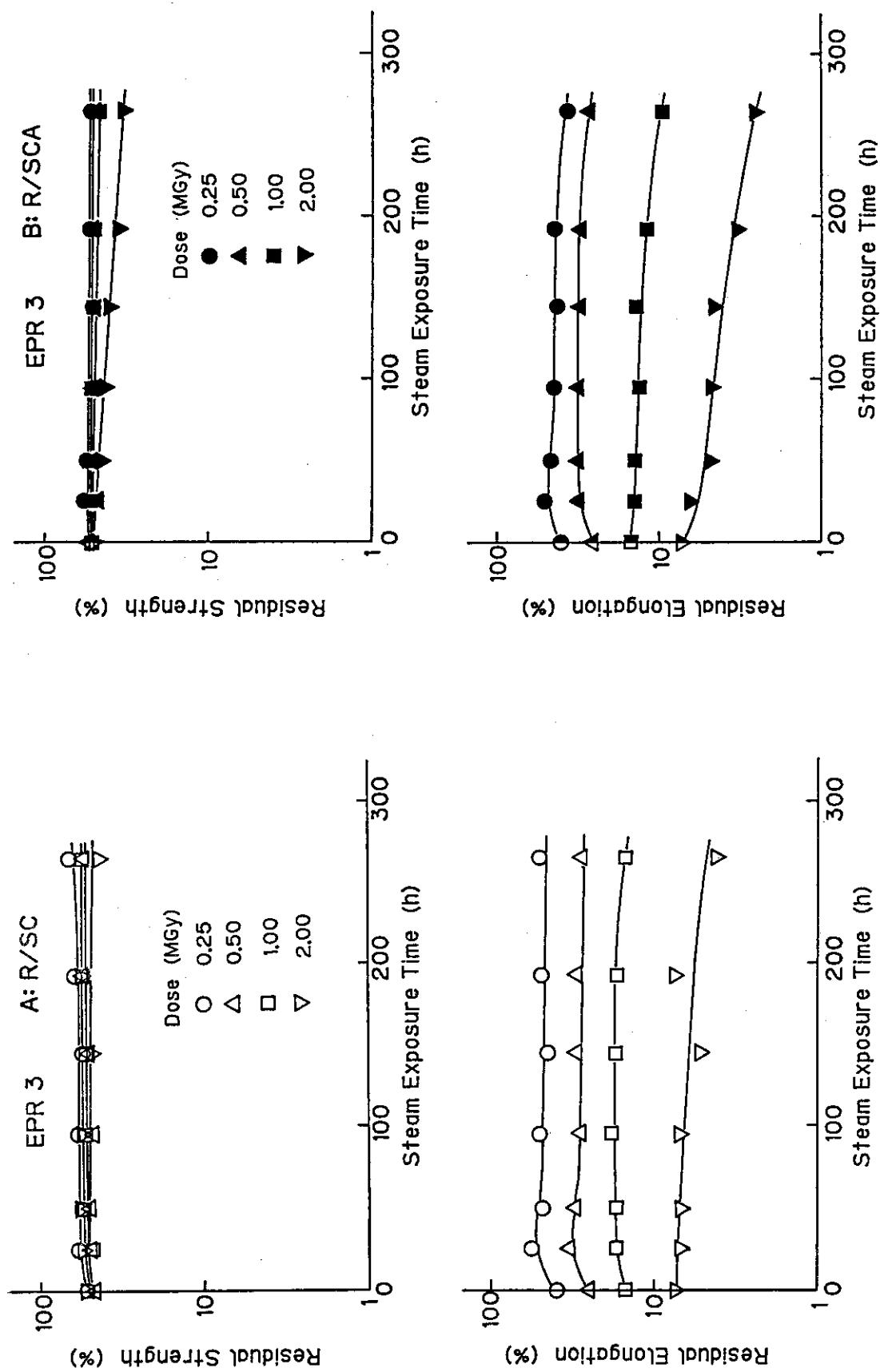


Fig. 104 Effect of pre-irradiation dose in sequential LOCA test on mechanical properties of EPR 3 exposed to saturated steam (A:R/SC) and saturated steam containing air (B:R/SCA).

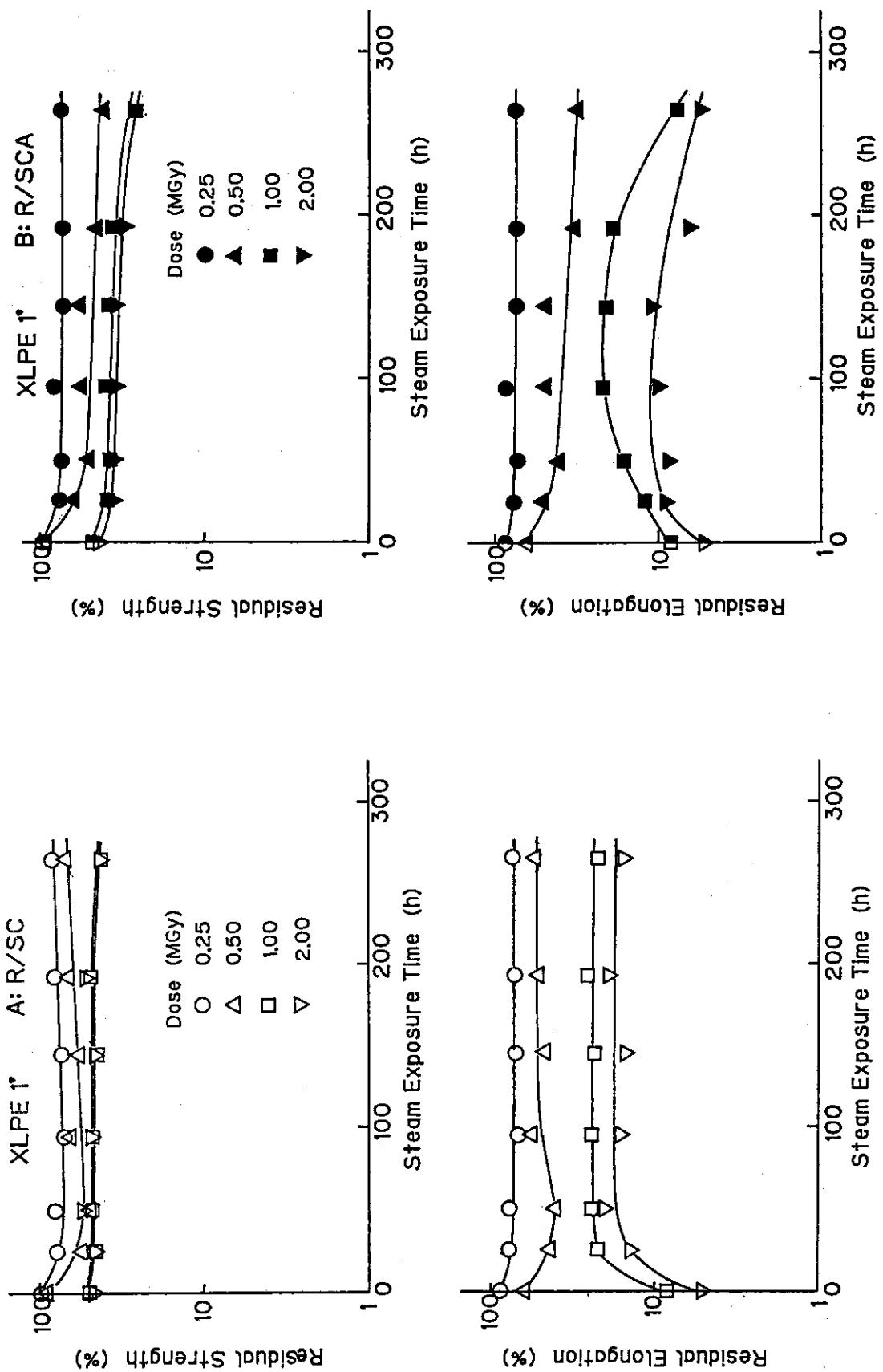


Fig.105 Effect of pre-irradiation dose in sequential LOCA test on mechanical properties of XLPE 1* exposed to saturated steam (A:R/SC) and saturated steam containing air (B:R/SCA).

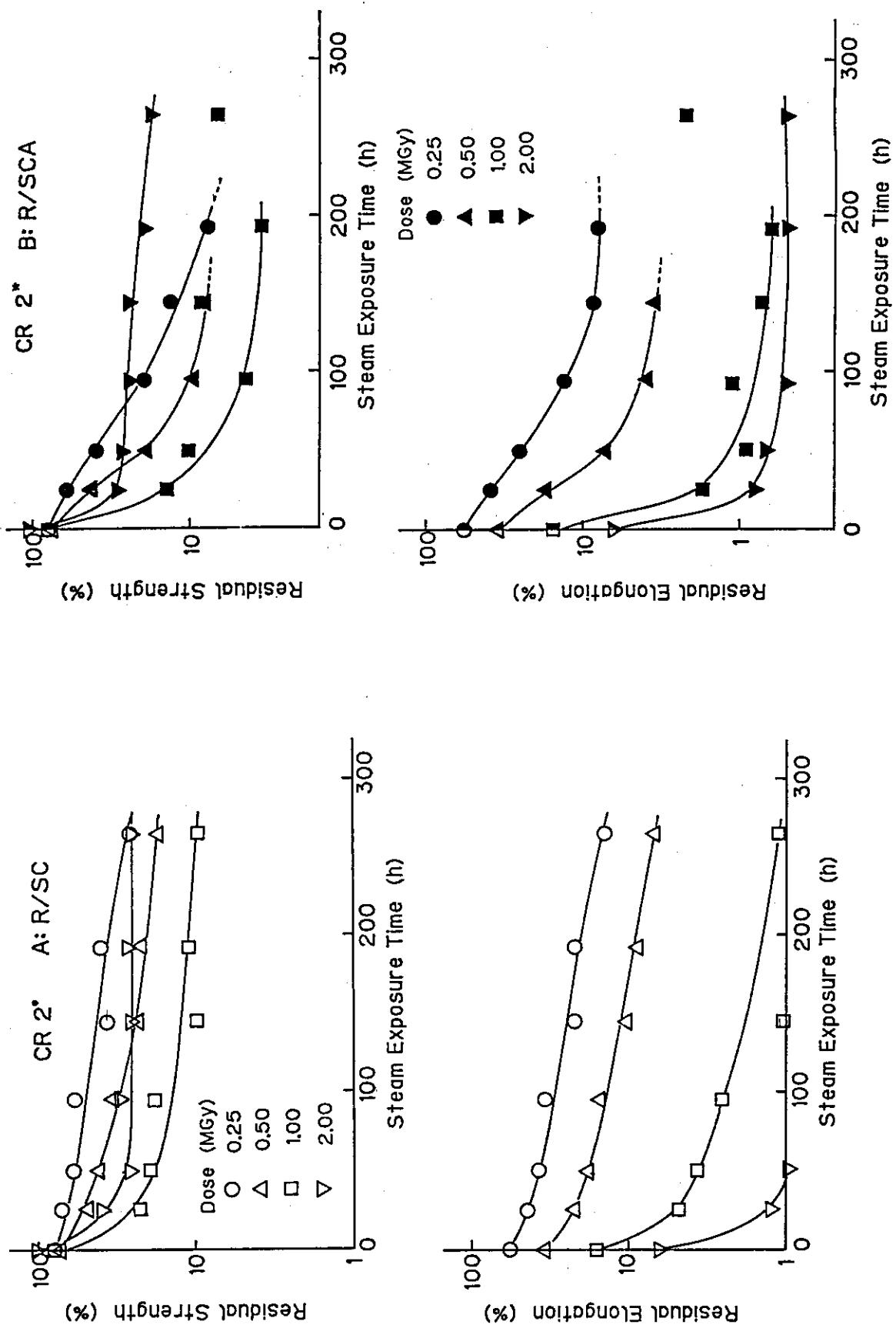


Fig.106 Effect of pre-irradiation dose in sequential LOCA test on mechanical properties of CR 2* exposed to saturated steam (A:R/SC) and saturated steam containing air (B:R/SCA).

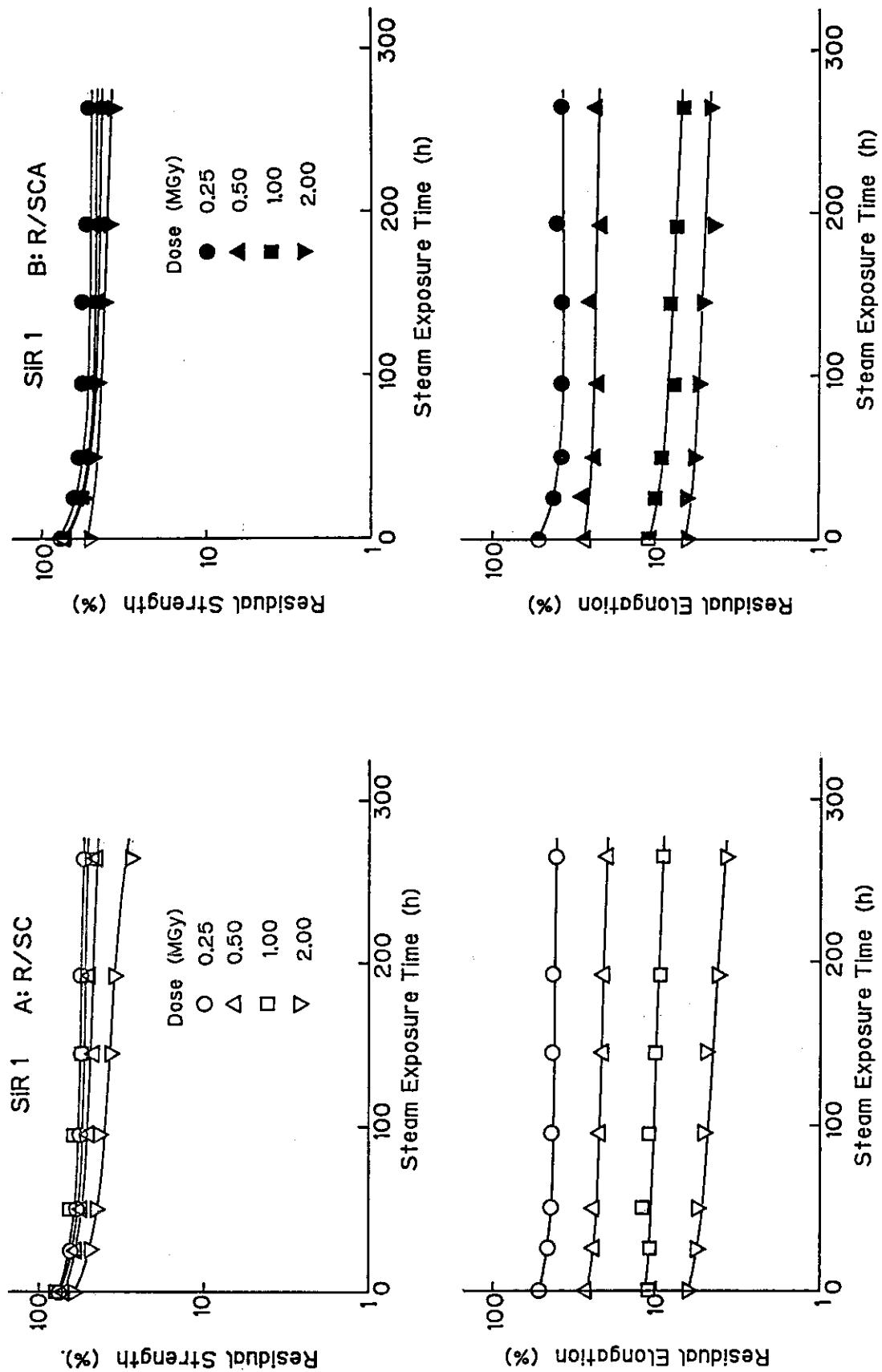


Fig.1.07 Effect of pre-irradiation dose in sequential LOCA test on mechanical properties of SIR 1 exposed to saturated steam (A:R/SC) and saturated steam containing air (B:R/SCA).

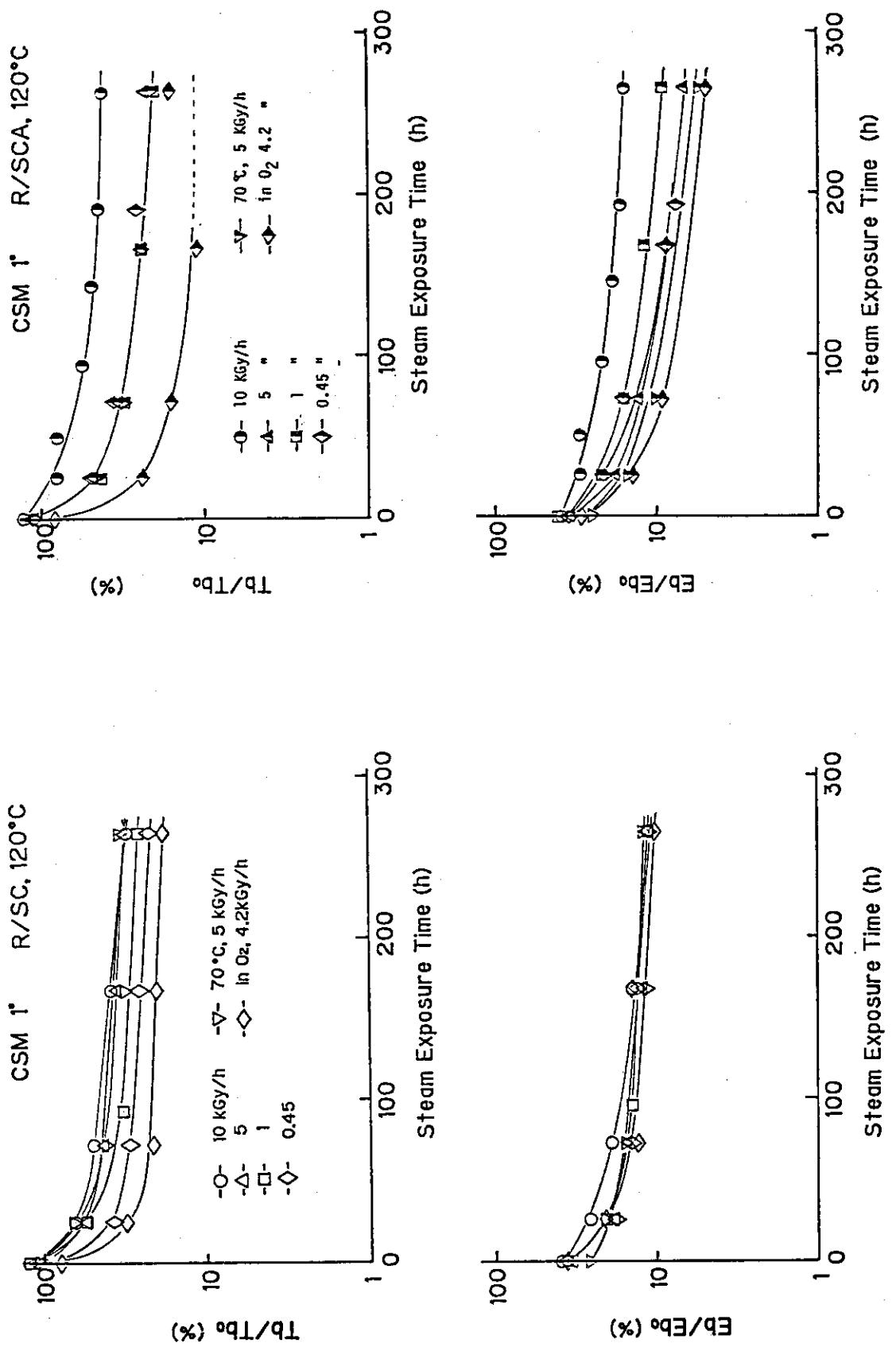


Fig. 108 Effect of pre-irradiation dose rate on mechanical properties of CSM 1* under steam spray exposure (in saturated steam: R/SC and in saturated steam containing air: R/SCA)

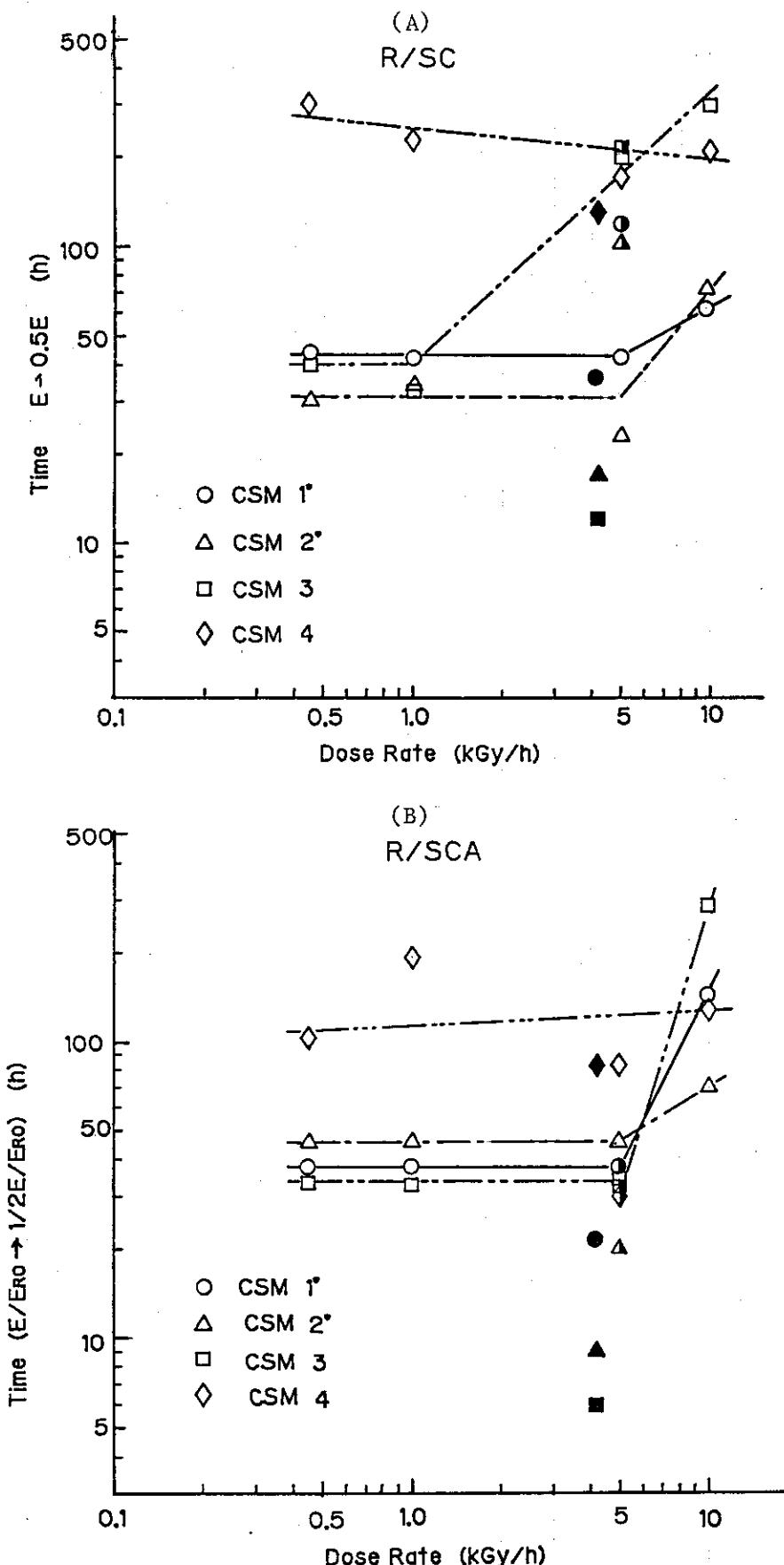


Fig.109 Effect of dose rate on thermal degradation of Hypalon under steam spray exposure

A: in saturated steam, B: in saturated steam with air

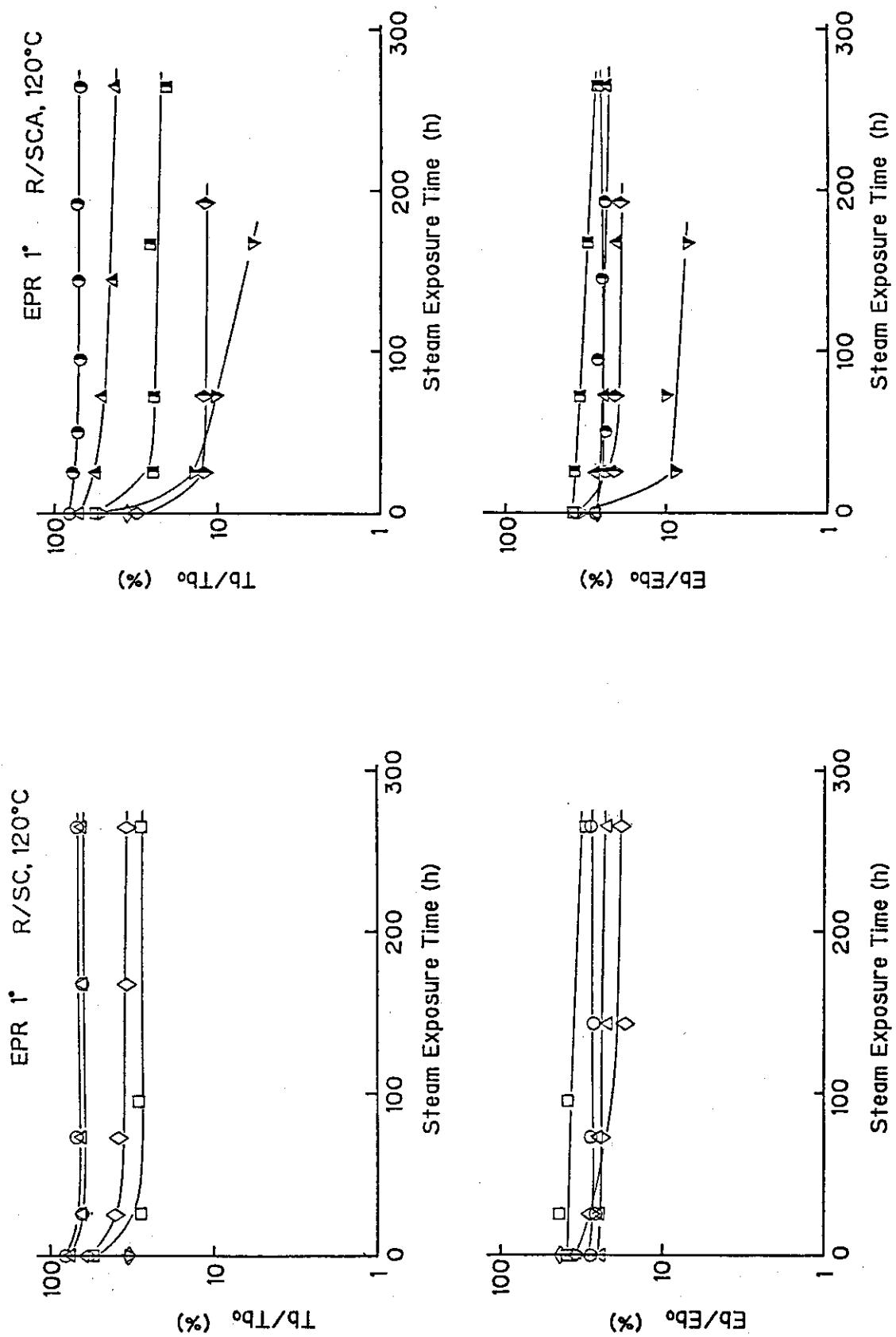


Fig.110 Effect of pre-irradiation dose rate on mechanical properties of EPR 1* under steam spray exposure.

Notations are the same as in Fig.108

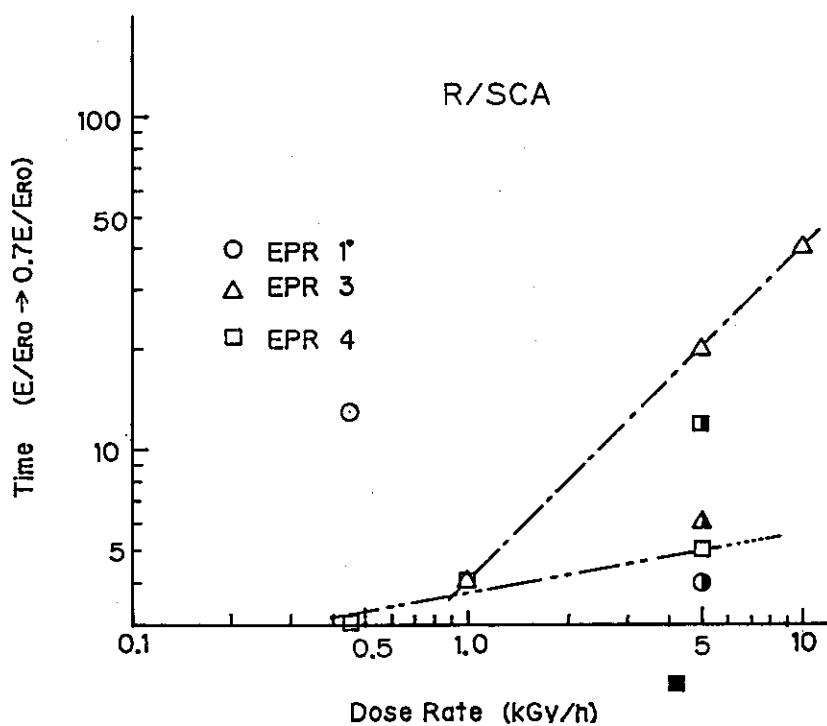
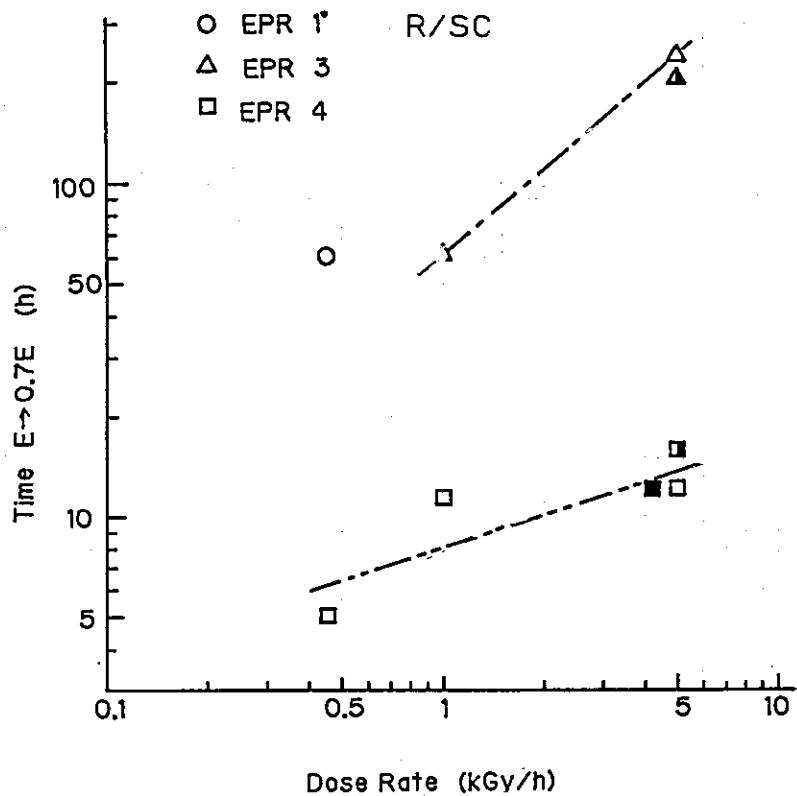


Fig.111 Effect of dose rate on thermal degradation of EPR under steam spray exposure
Notations are the same as in Fig.109

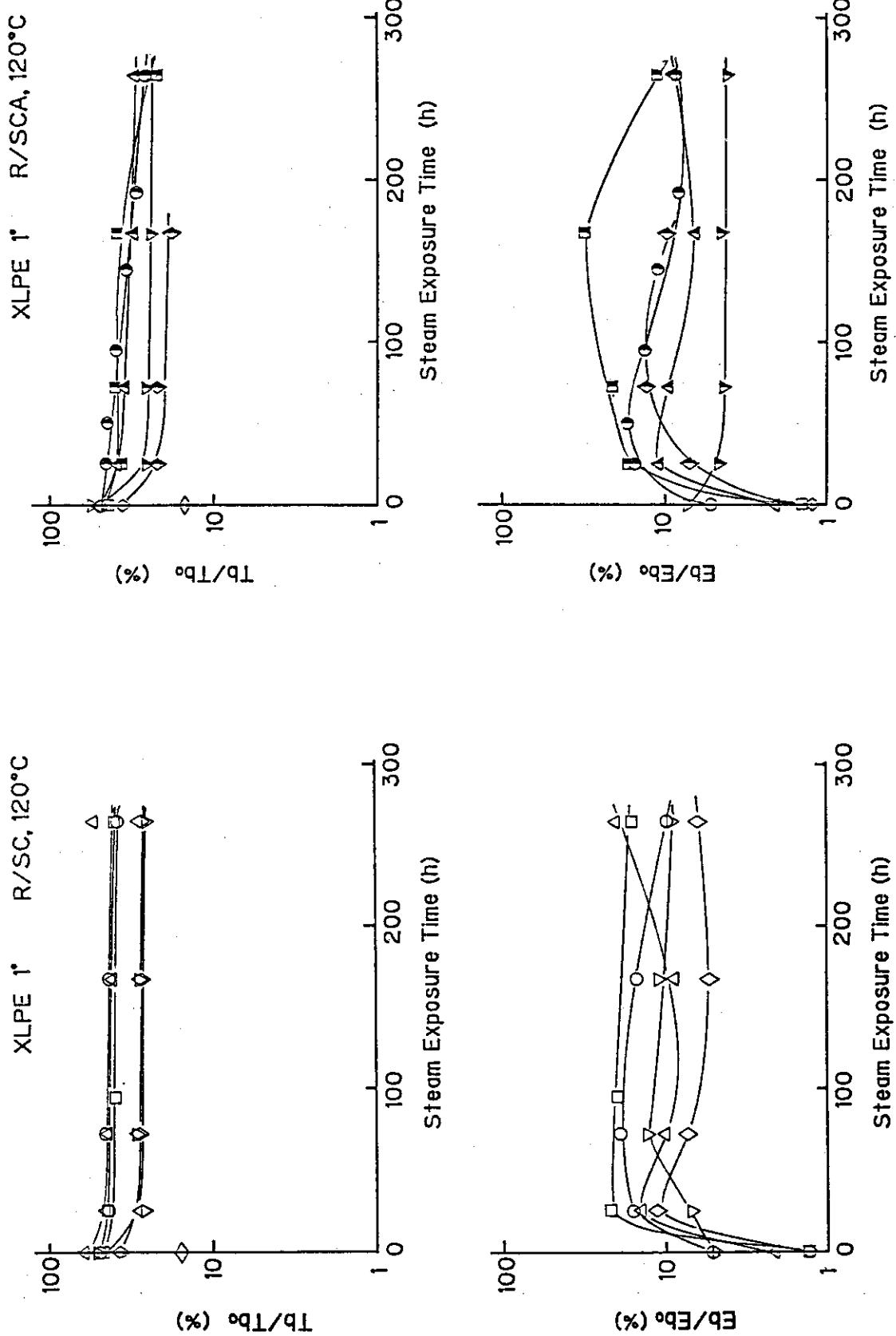


Fig.1112 Effect of pre-irradiation dose rate on mechanical properties of XLPE 1* under steam spray exposure.

Notations are the same as in Fig.108

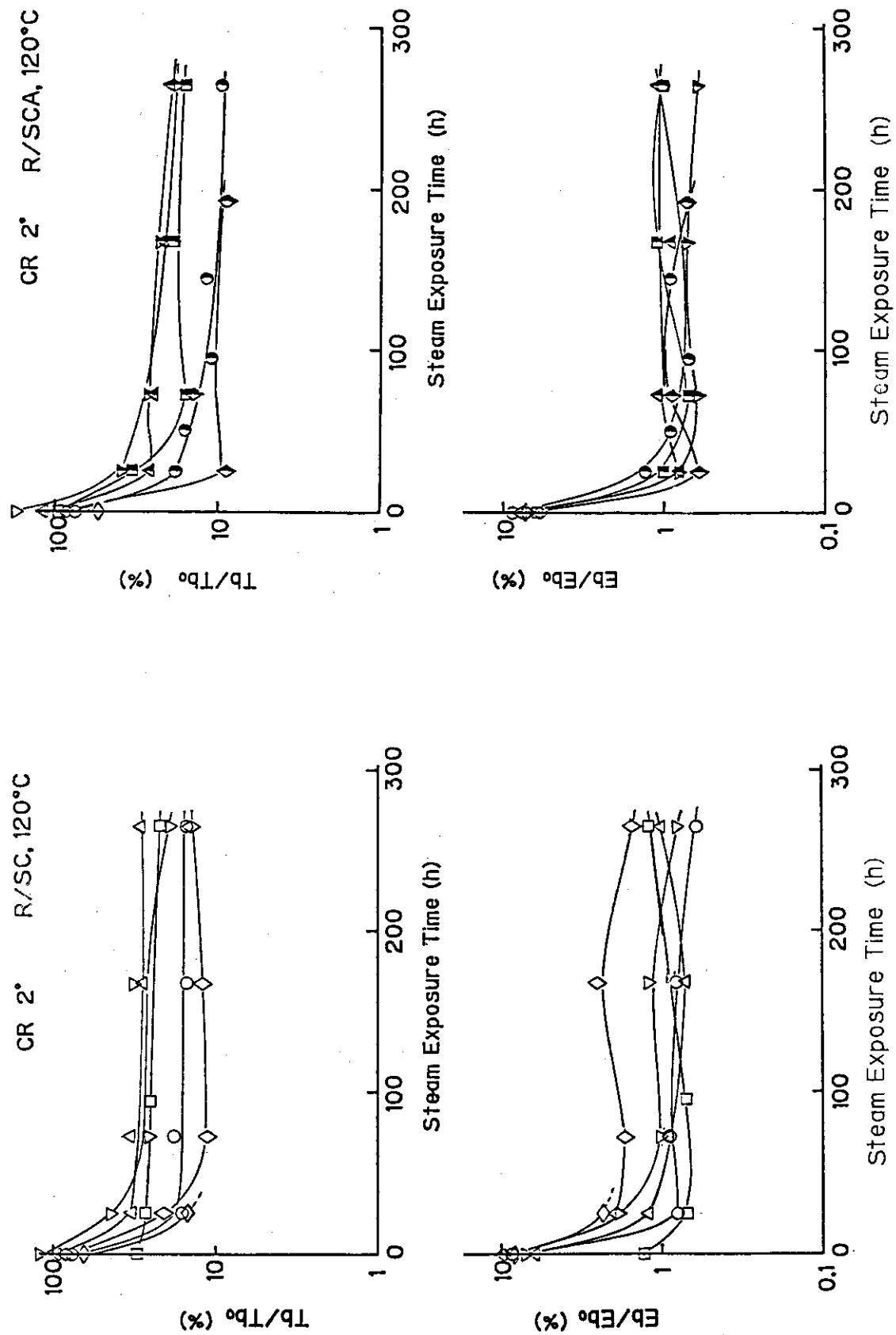


Fig.113 Effect of pre-irradiation dose rate on mechanical properties of CR 2* under steam spray exposure.

Notations are the same as in Fig.108

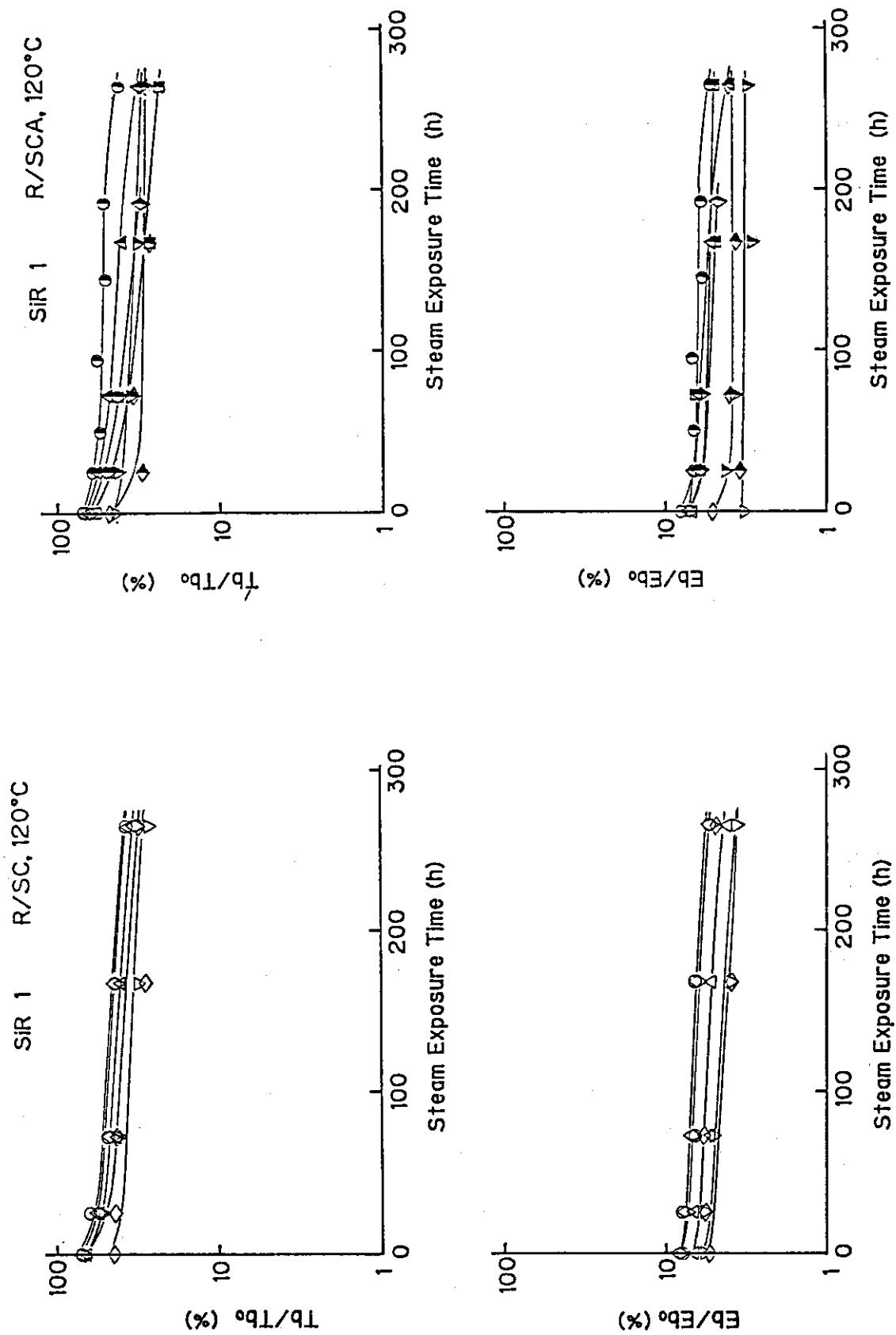


Fig. 114 Effect of pre-irradiation dose rate on mechanical properties of SIR 1 under steam spray exposure
"Notations are the same as in Fig. 108

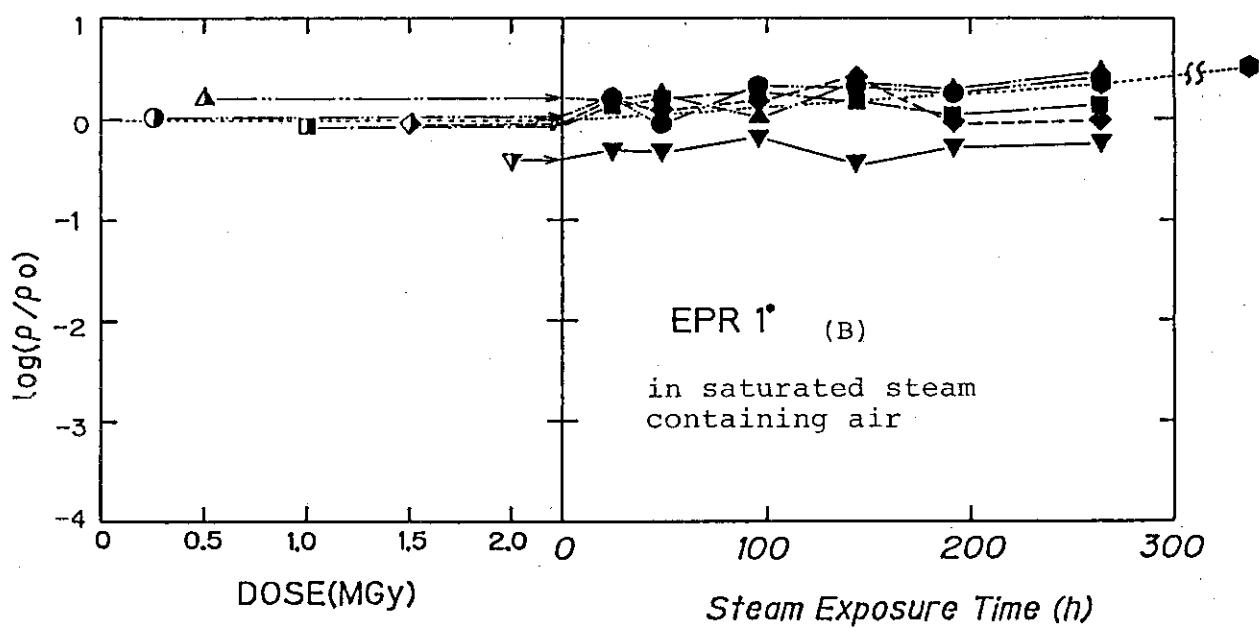
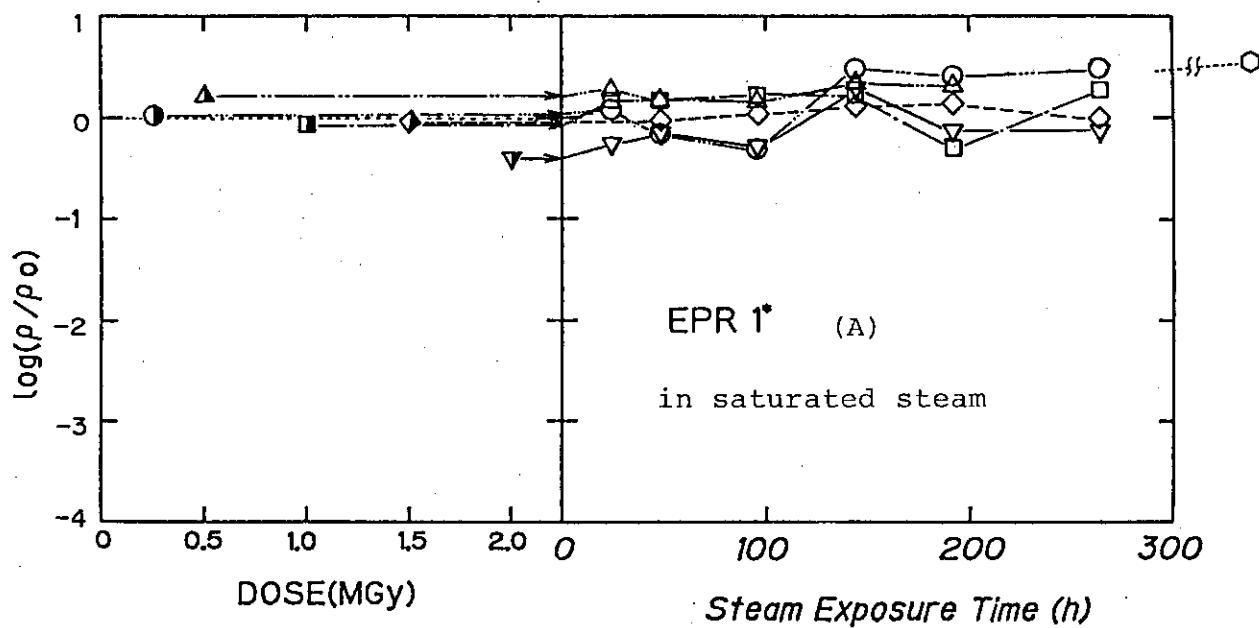


Fig.115 Effect of pre-irradiation dose in sequential LOCA test on volume resistivity of EPR 1*.

A: in saturated steam, B: in saturated steam with air

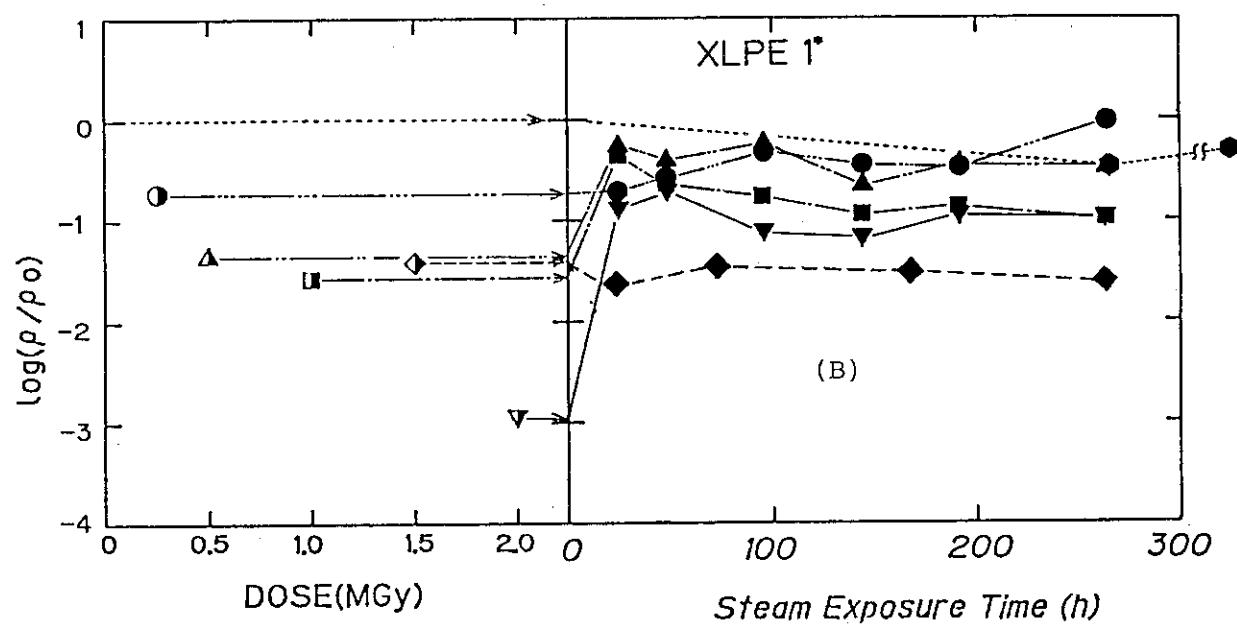
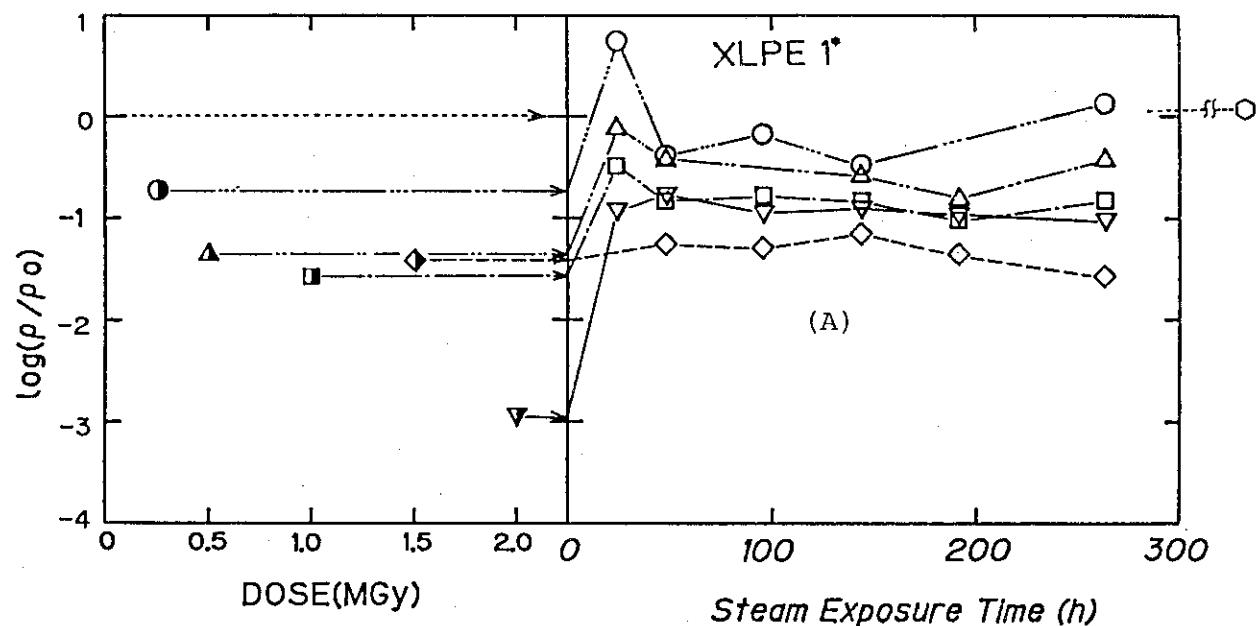


Fig.116 Effect of pre-irradiation dose in sequential LOCA test on volume resistivity of XLPE 1*.

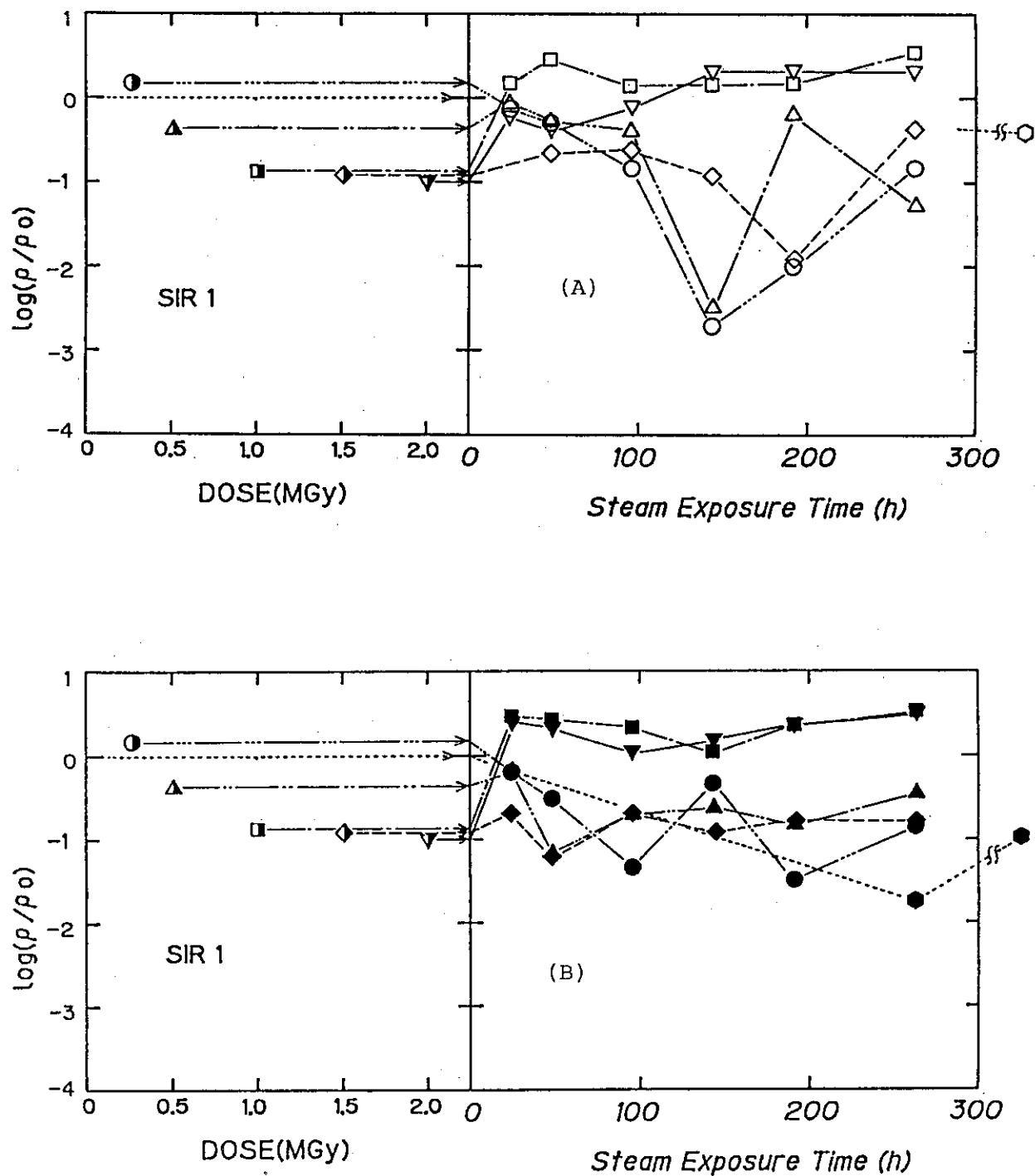


Fig.117 Effect of pre-irradiation dose in sequential LOCA test on volume resistivity of SIR 1.

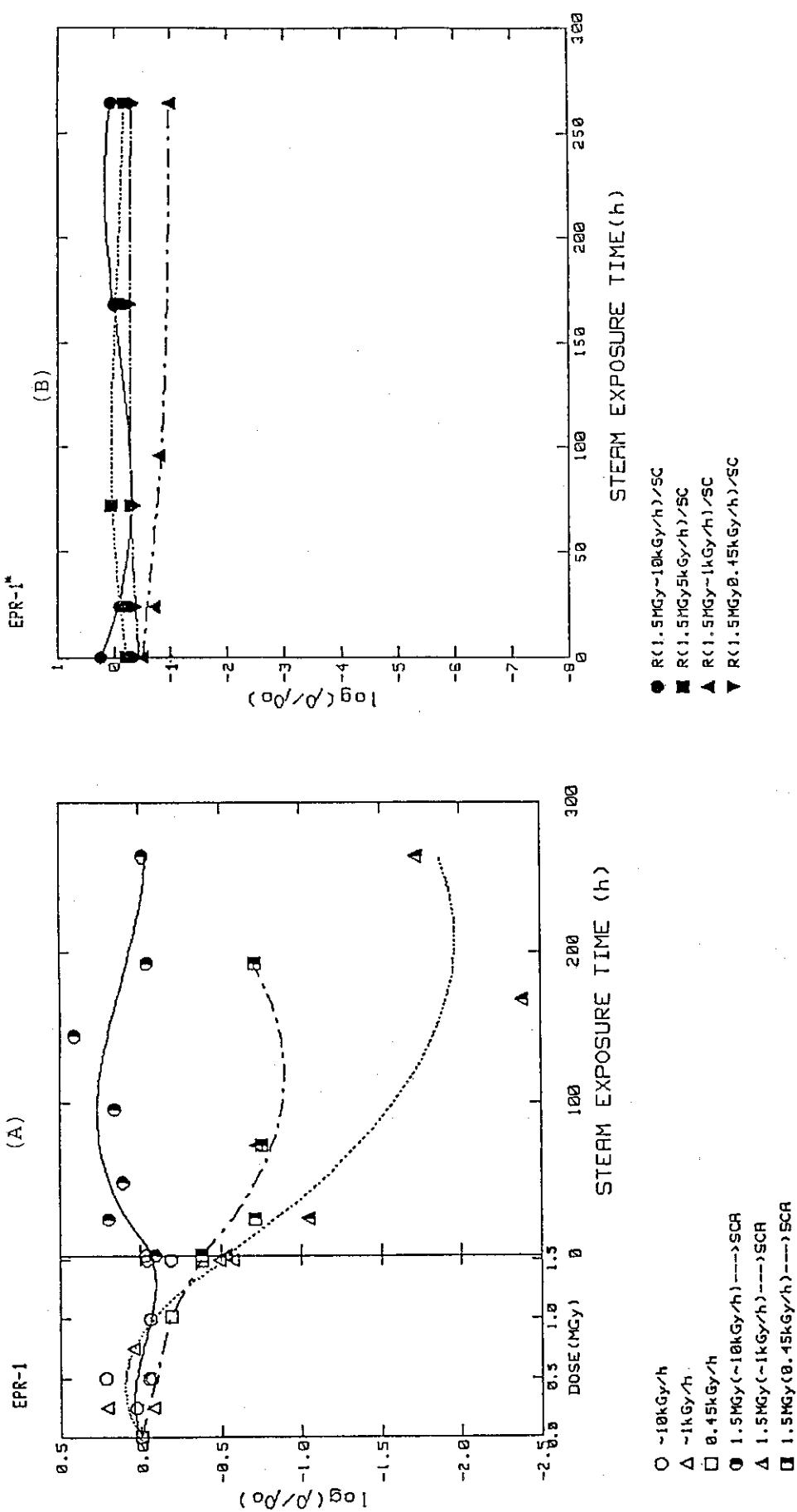


Fig.118 Effect of pre-irradiation dose rate on volume resistivity of EPR 1* under steam spray exposure.
(A: in saturated steam, B: in saturated steam containing air)

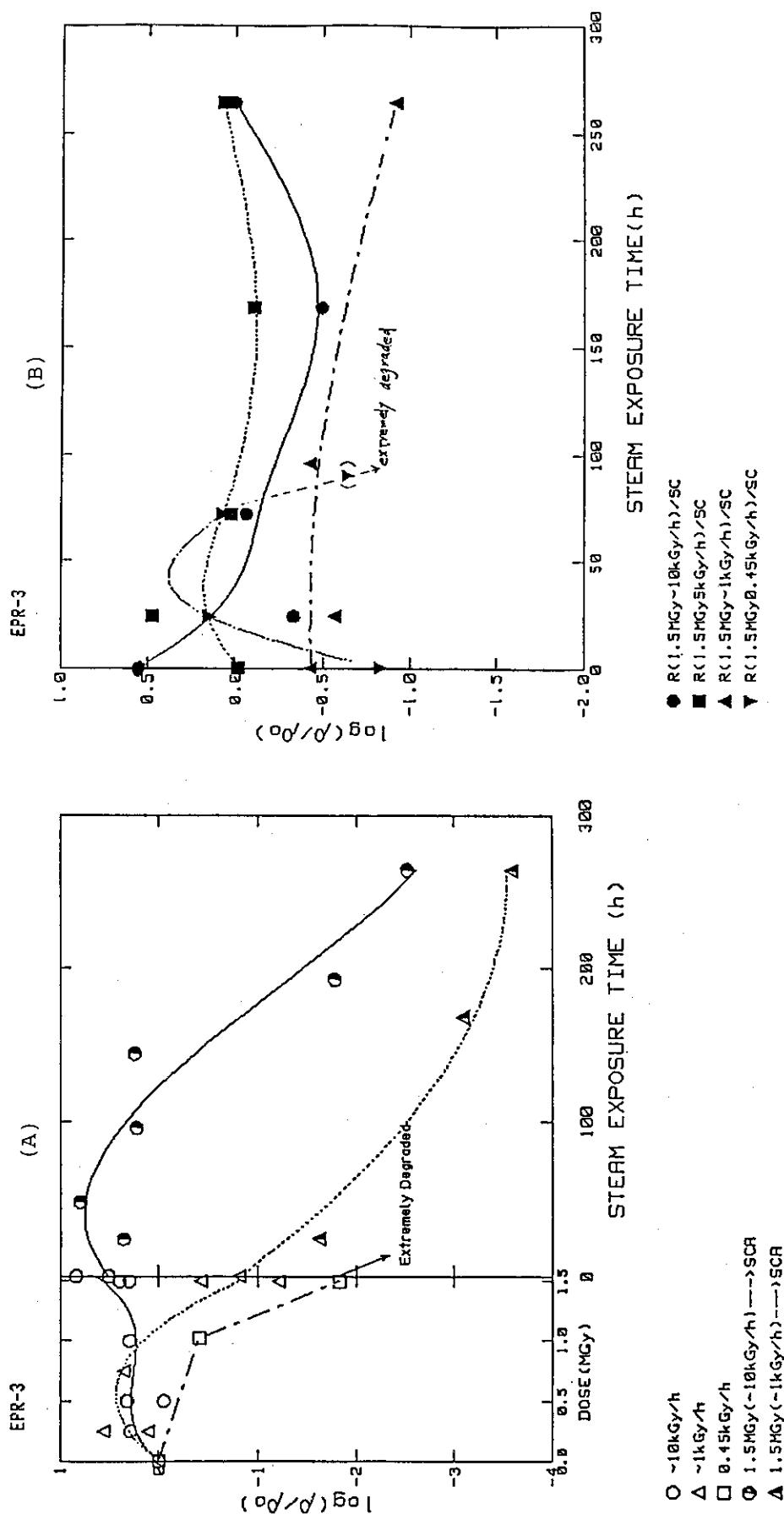


Fig.119 Effect of pre-irradiation dose rate on volume resistivity of EPR 3 under steam spray exposure.
Notations are the same as in Fig.118

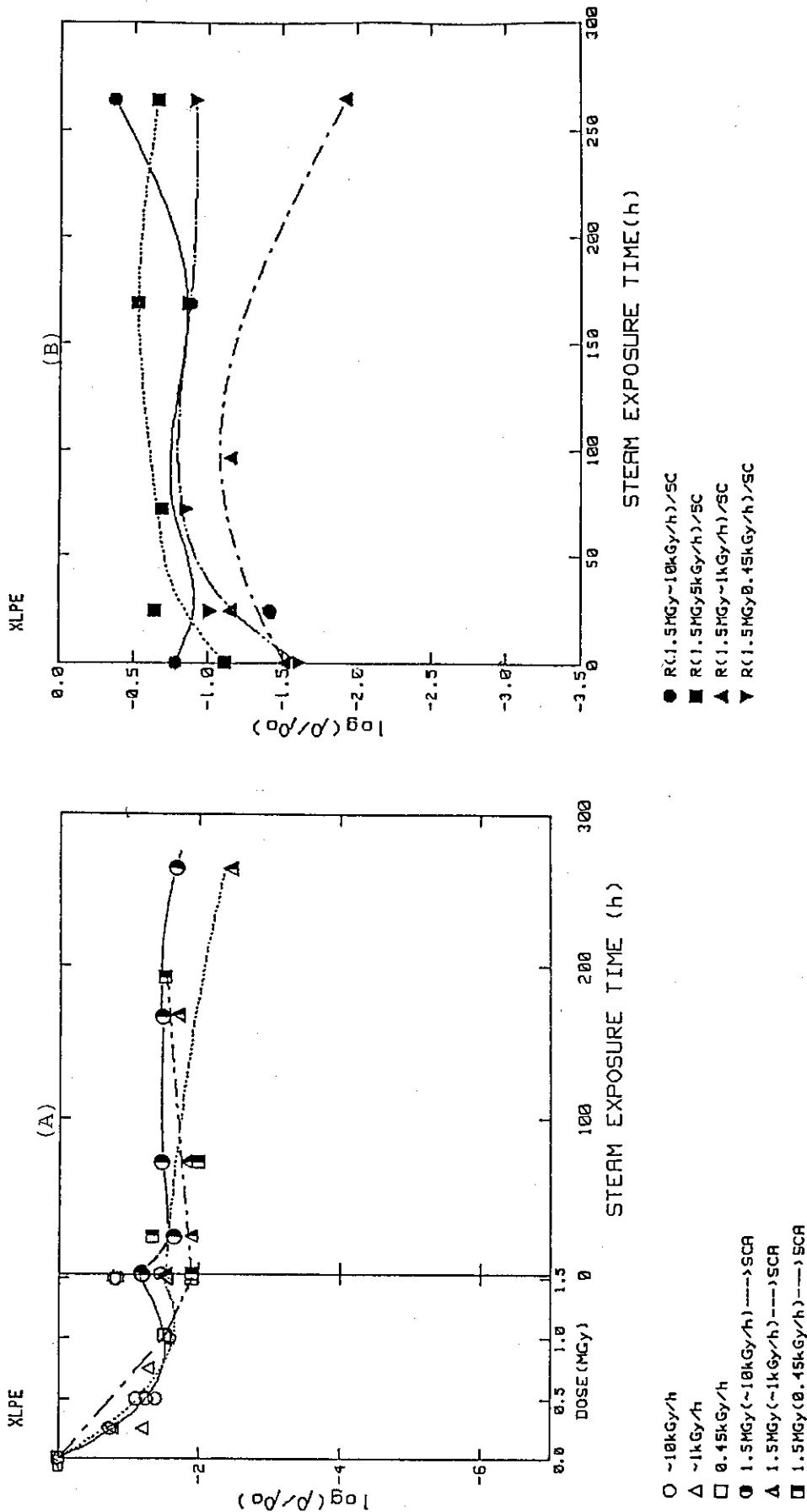


Fig.120 Effect of pre-irradiation dose rate on volume resistivity of XLPE 1* under steam spray exposure.

Notations are the same as in Fig.118

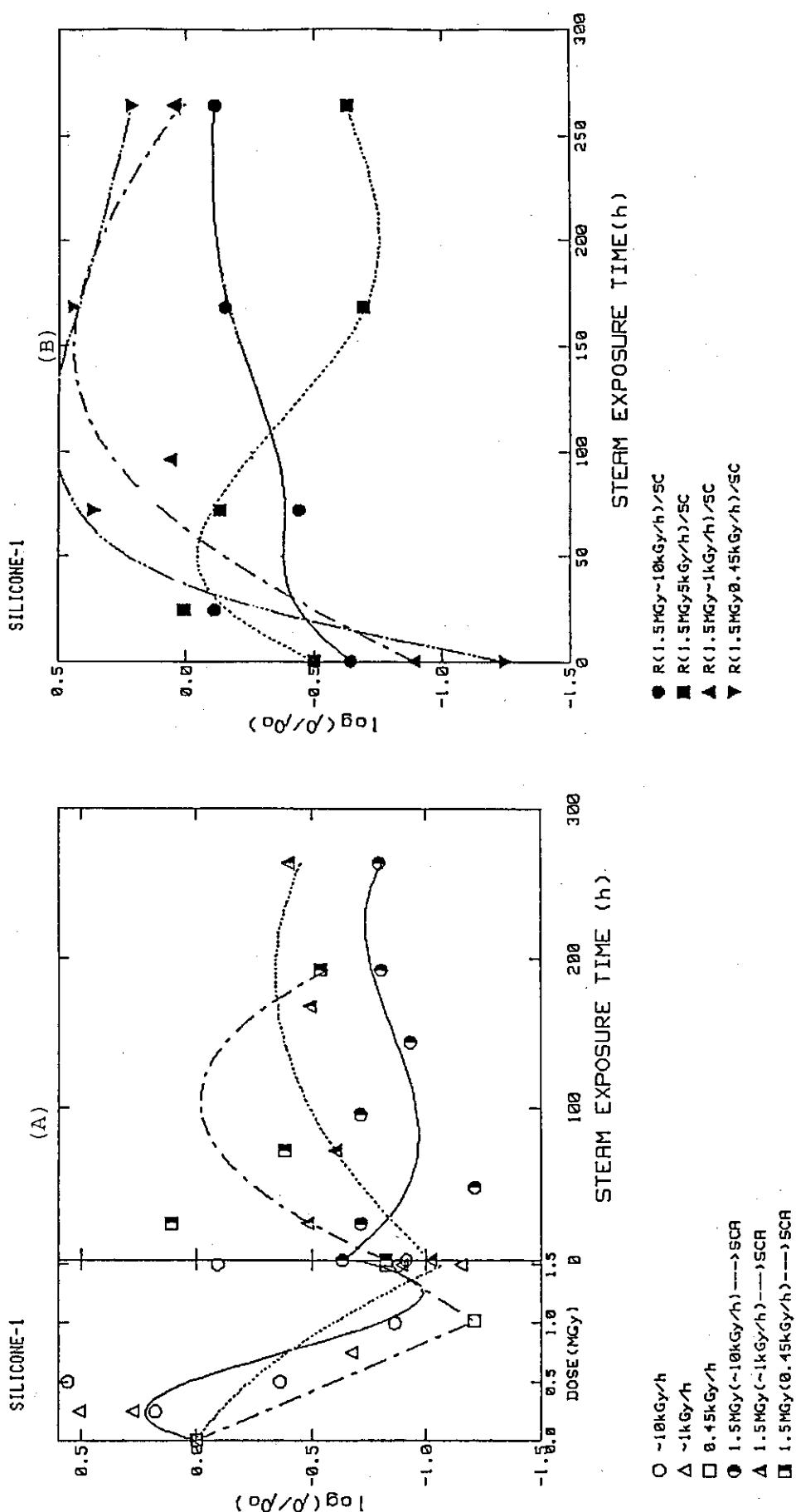


Fig.121 Effect of pre-irradiation dose rate on volume resistivity of SIR 1 under steam spray exposure.

Notations are the same as in Fig.118

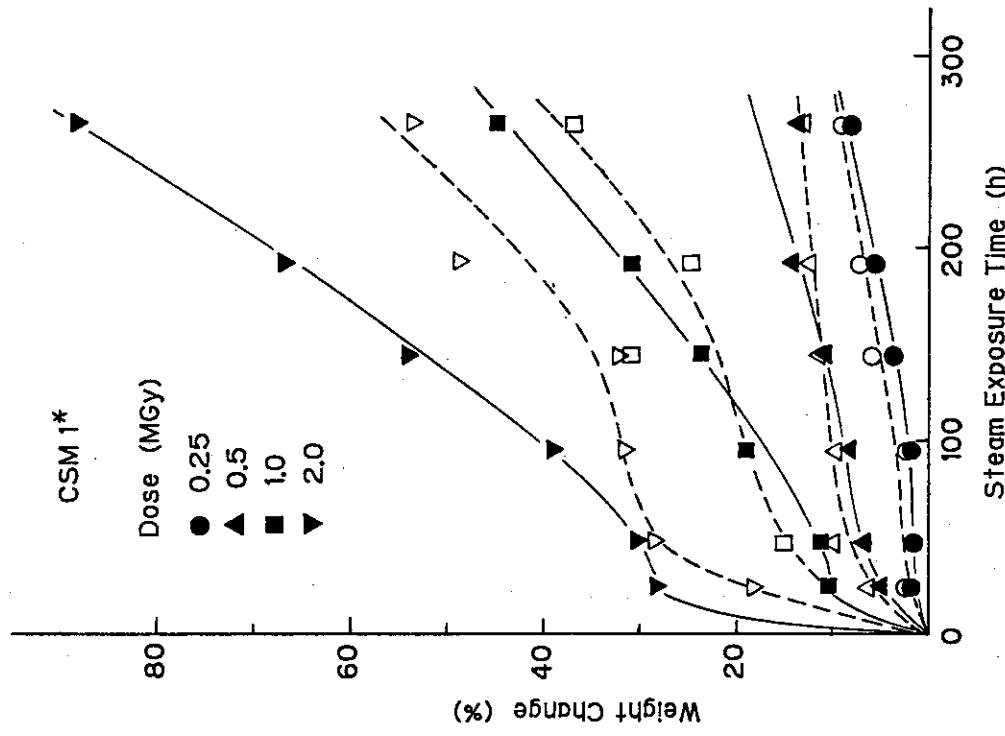


Fig. 122 Effect of pre-irradiation dose on weight change of CSM 1* under steam spray exposure.

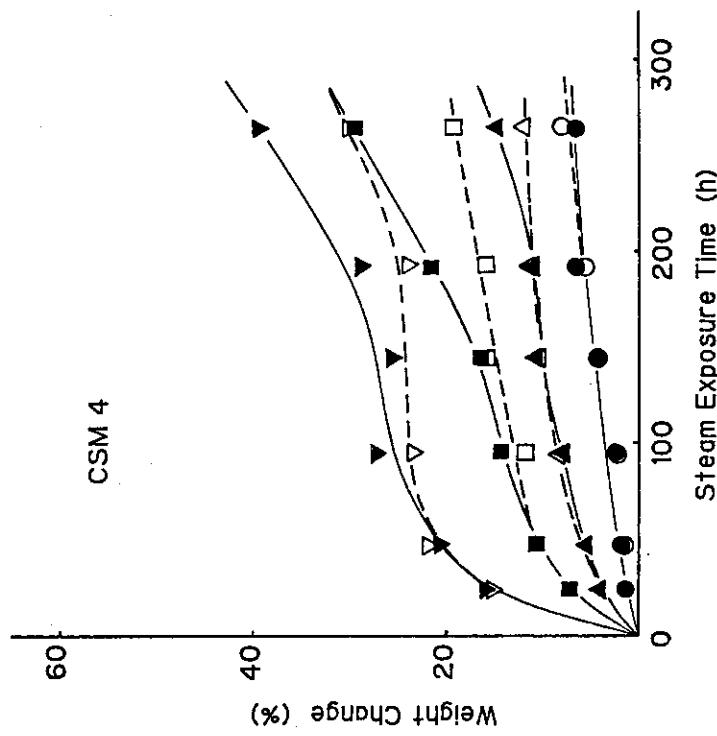


Fig. 123 Effect of pre-irradiation dose on weight change of CSM 4 under steam spray exposure.

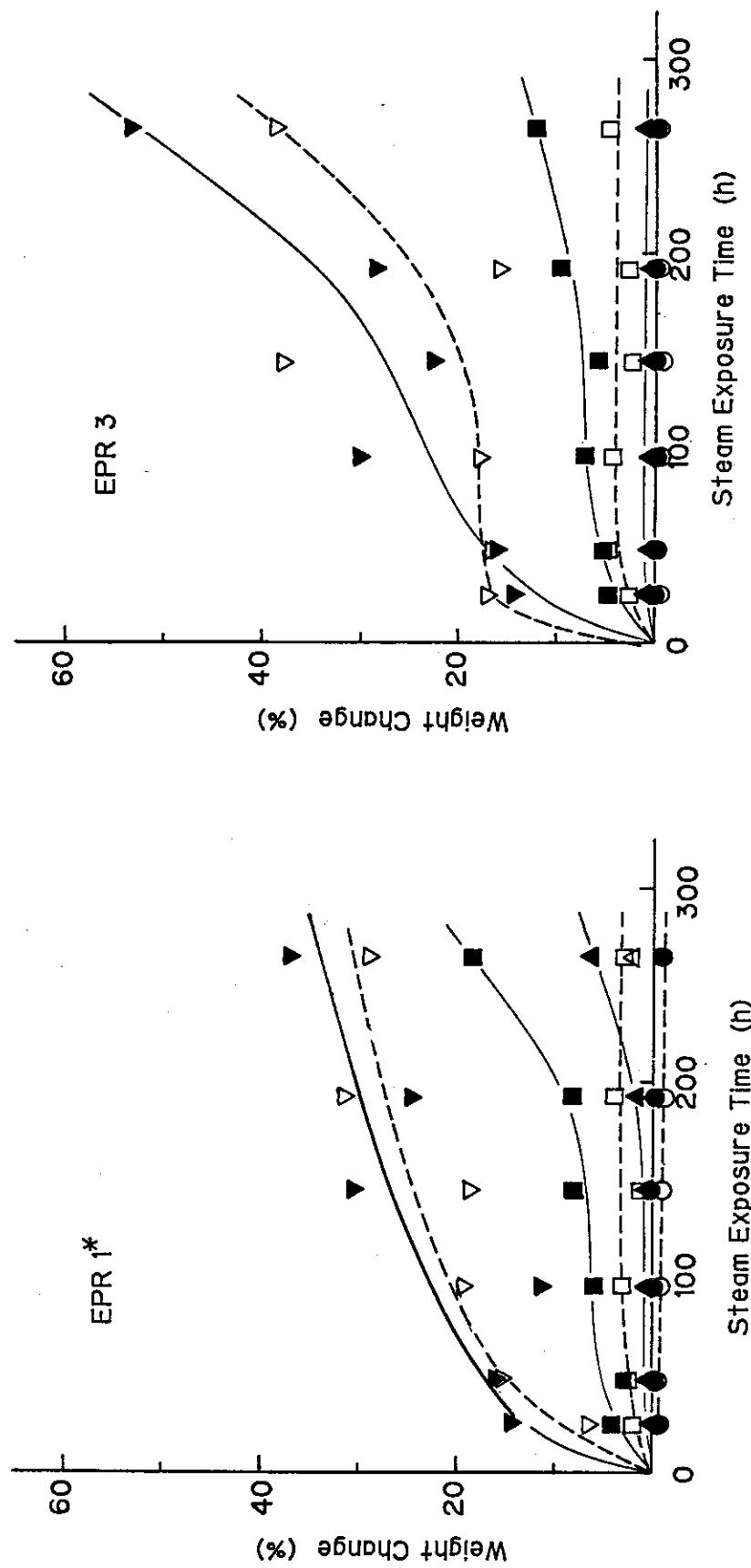


Fig.124 Effect of pre-irradiation dose on weight change of EPR 1* under steam spray exposure.

Fig.125 Effect of pre-irradiation dose on weight change of EPR 3 under steam spray exposure.

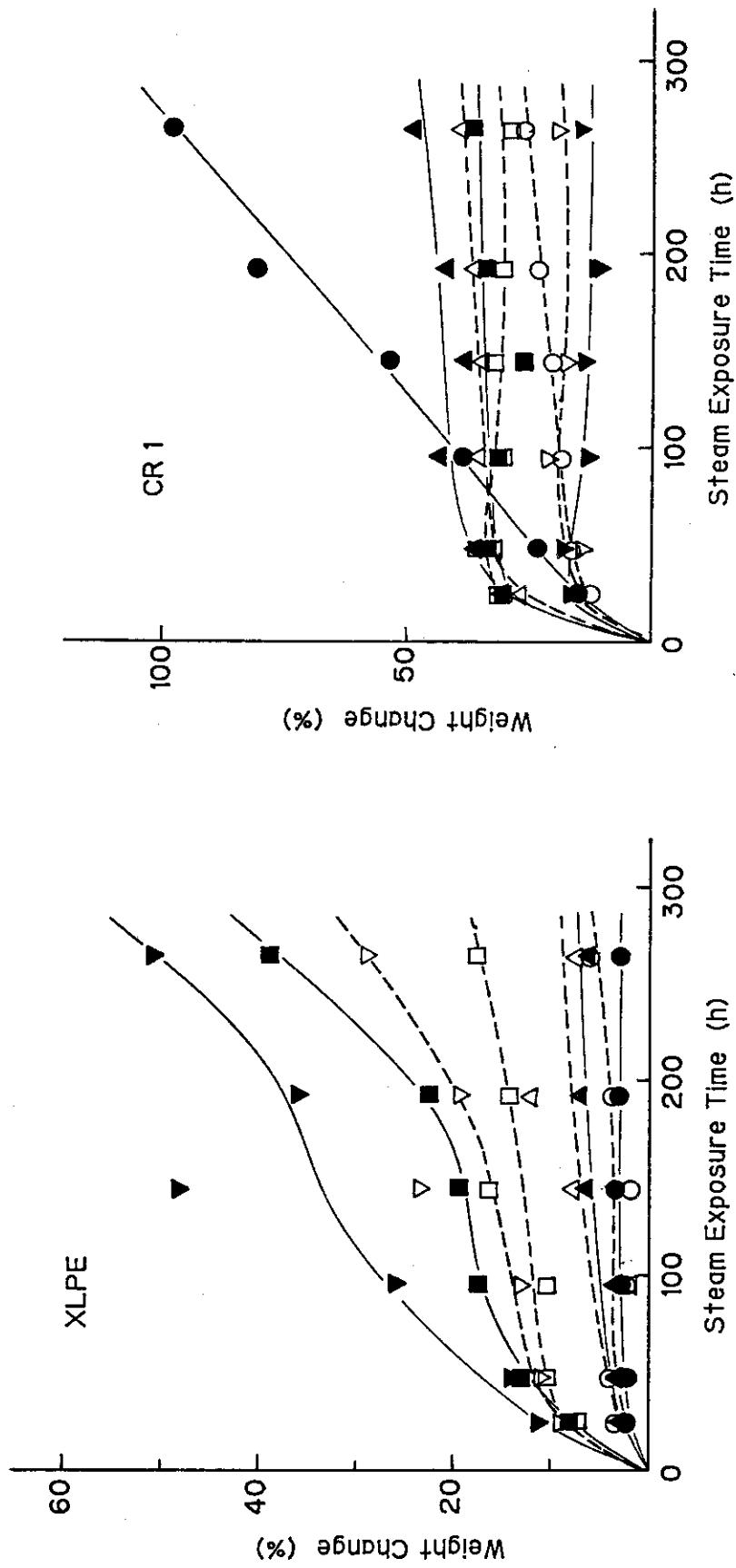


Fig.126 Effect of pre-irradiation dose on weight change of XLPE 1* under steam spray exposure.

Fig.127 Effect of pre-irradiation dose on weight change of CR 1 under steam spray exposure.

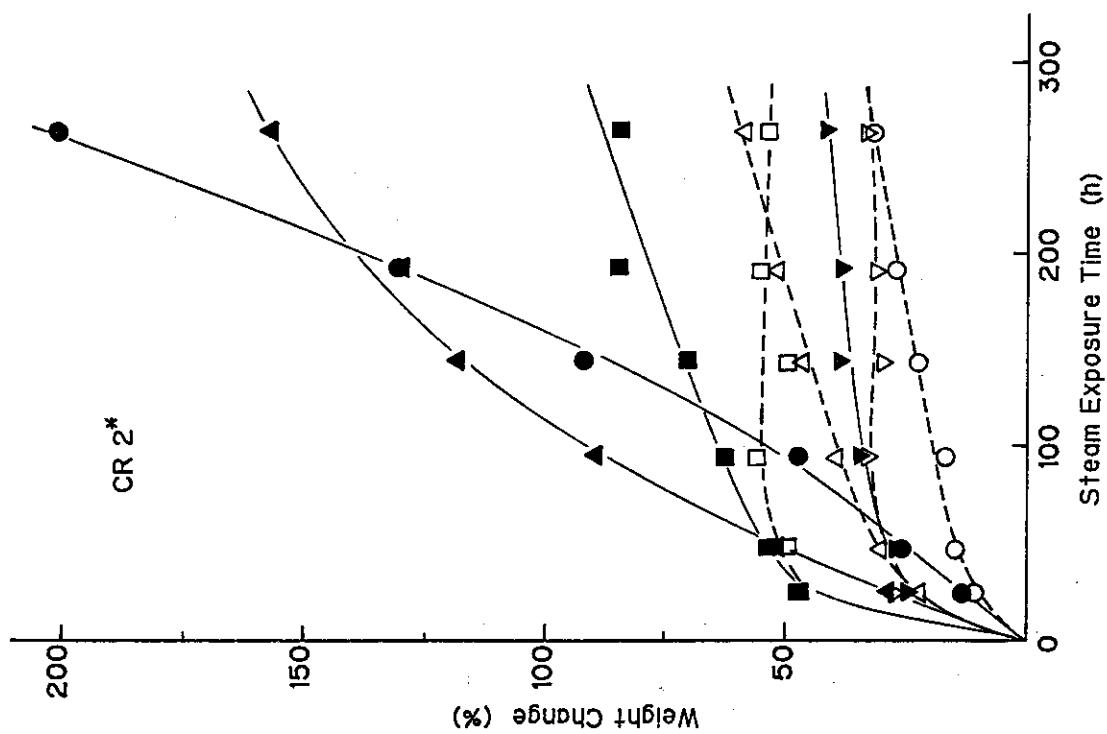


Fig.128 Effect of pre-irradiation dose on weight change of CR 2* under steam spray exposure.

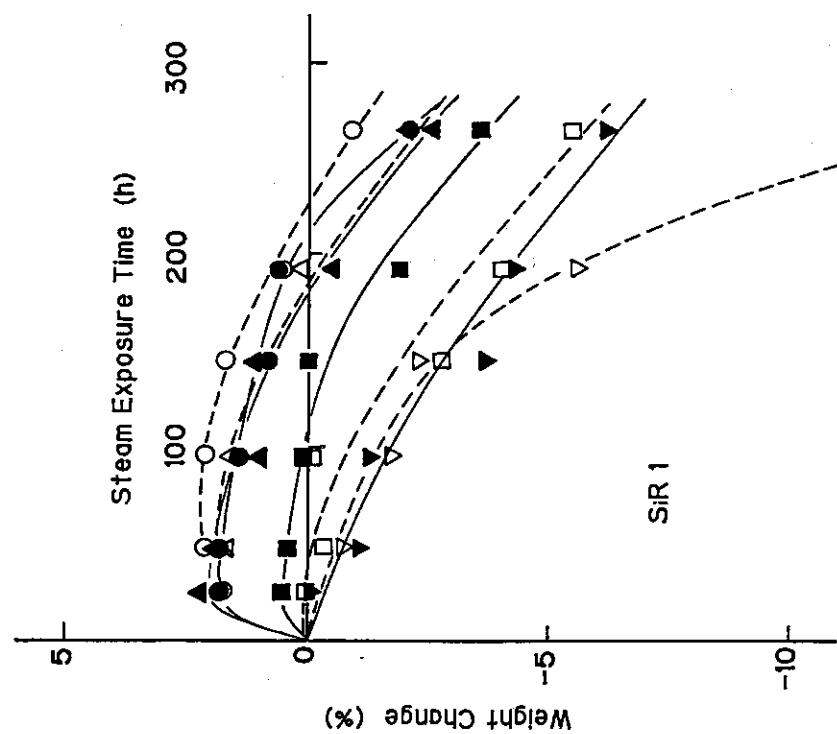


Fig.129 Effect of pre-irradiation dose on weight change of SIR 1 under steam spray exposure.

Effect of pre-irradiation dose on weight change of SIR 1 under steam spray exposure.

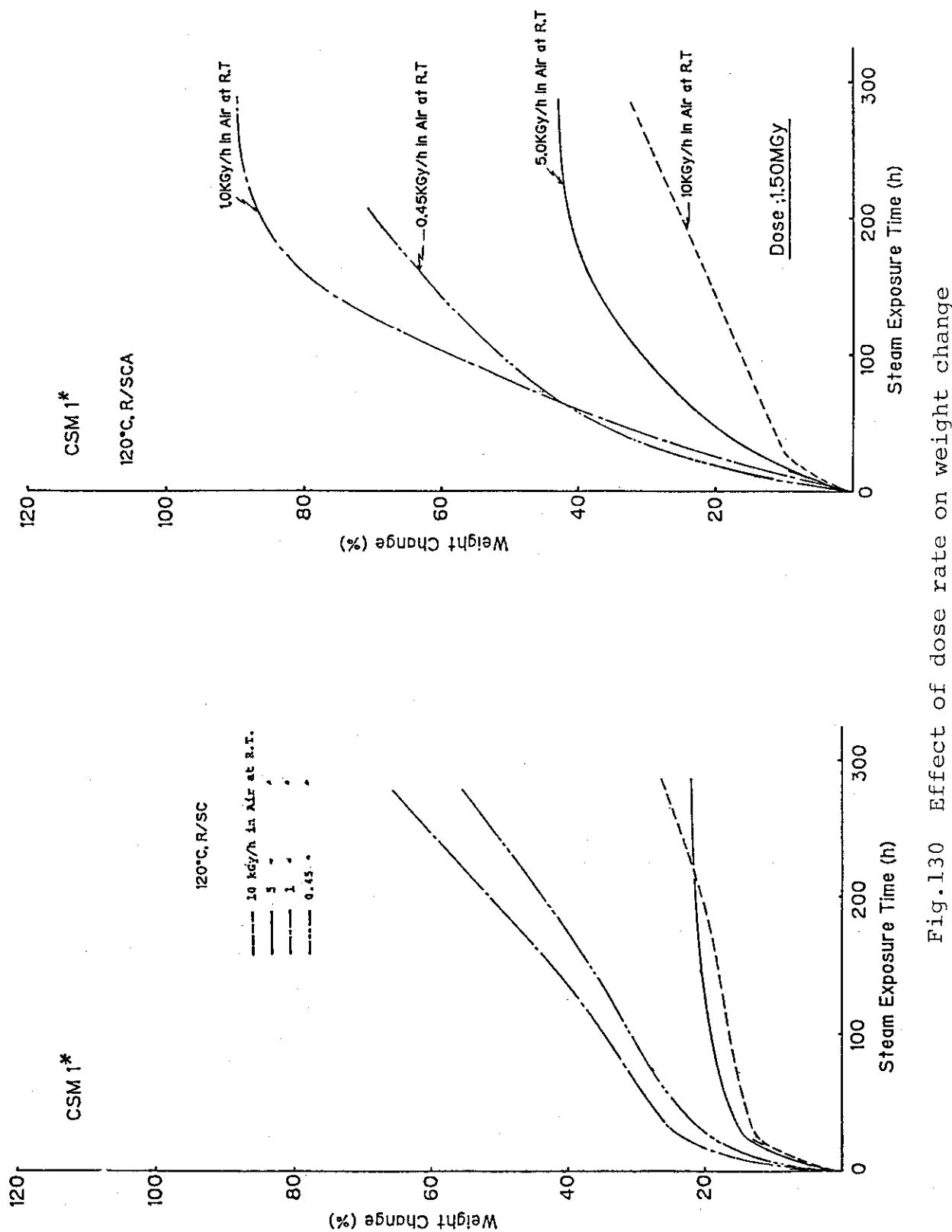


Fig.130 Effect of dose rate on weight change of CSM 1* under steam spray exposure.

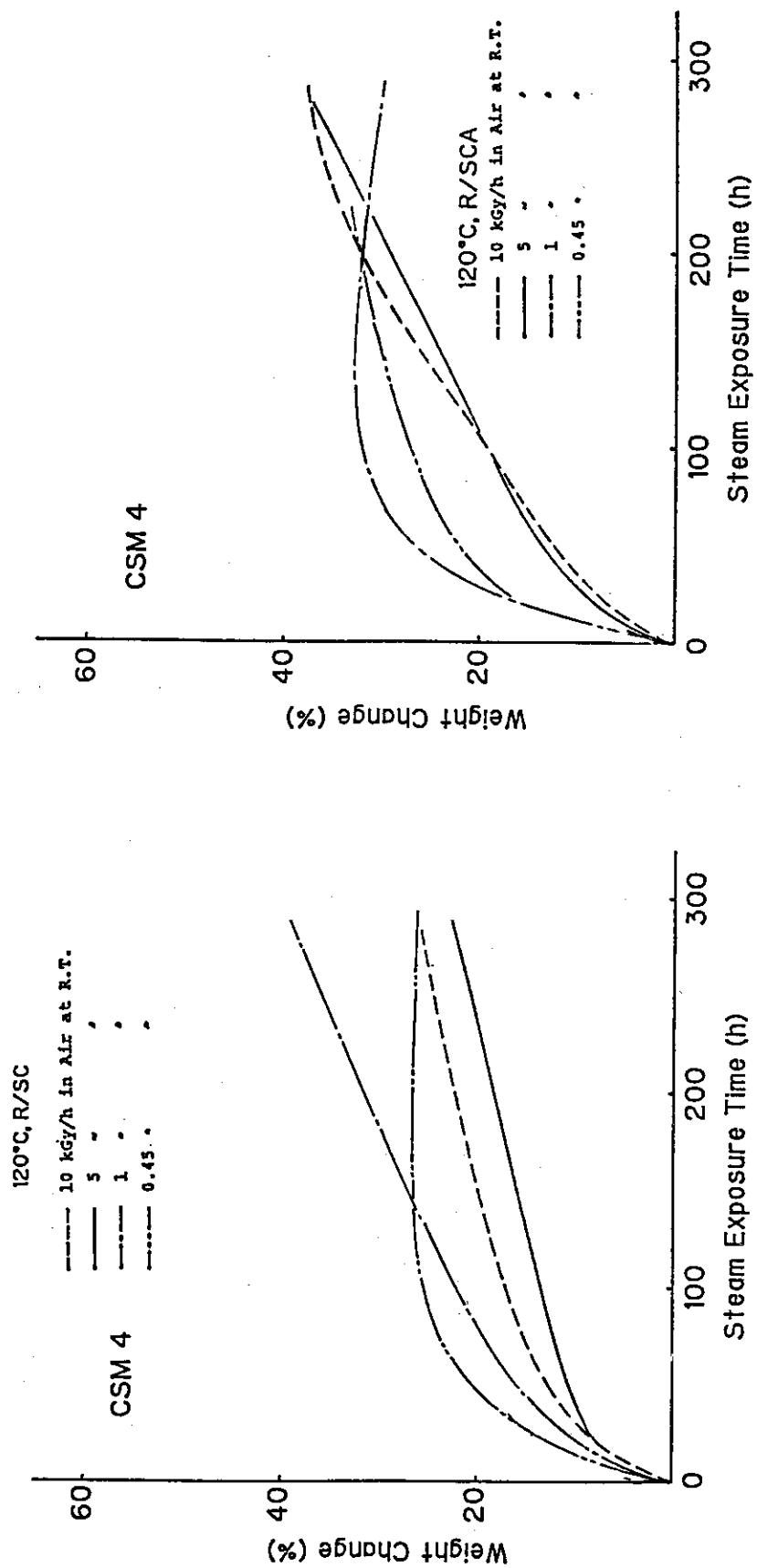


Fig.131 Effect of dose rate on weight change of CSM 4 under steam spray exposure.

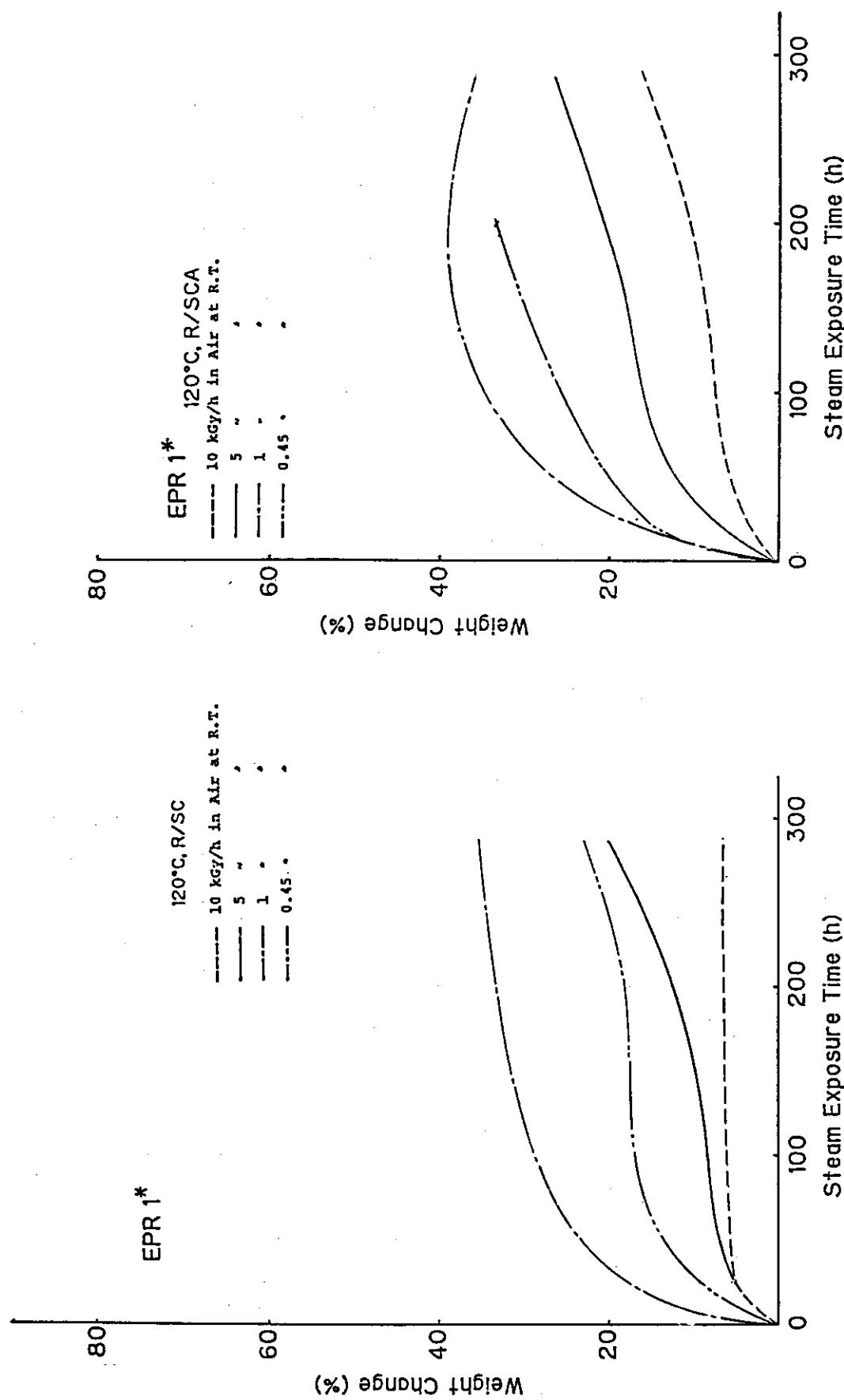


Fig. 132 Effect of dose rate on weight change of EPR 1* under steam spray exposure.

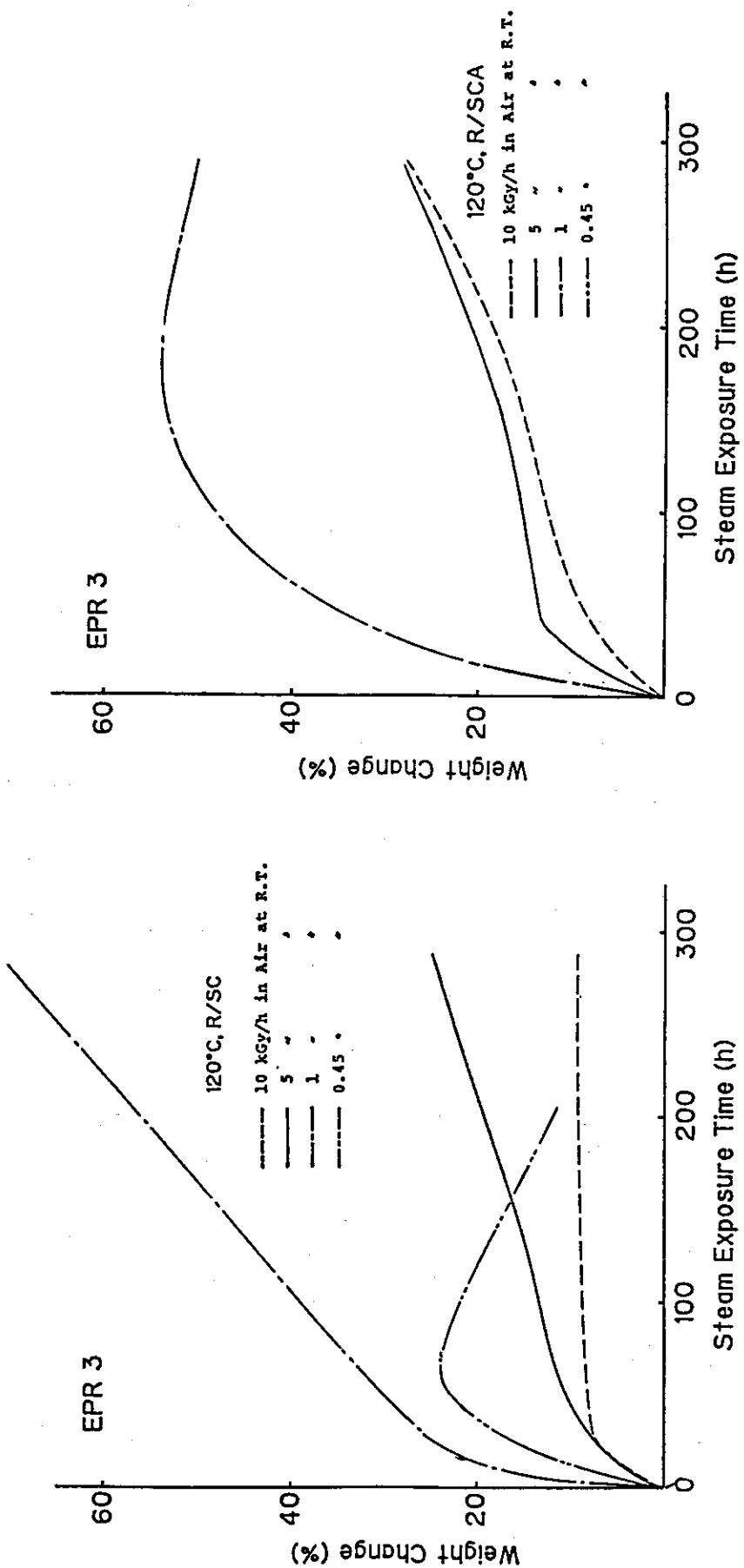


Fig. 133 Effect of dose rate on weight change of EPR 3 under steam spray exposure.

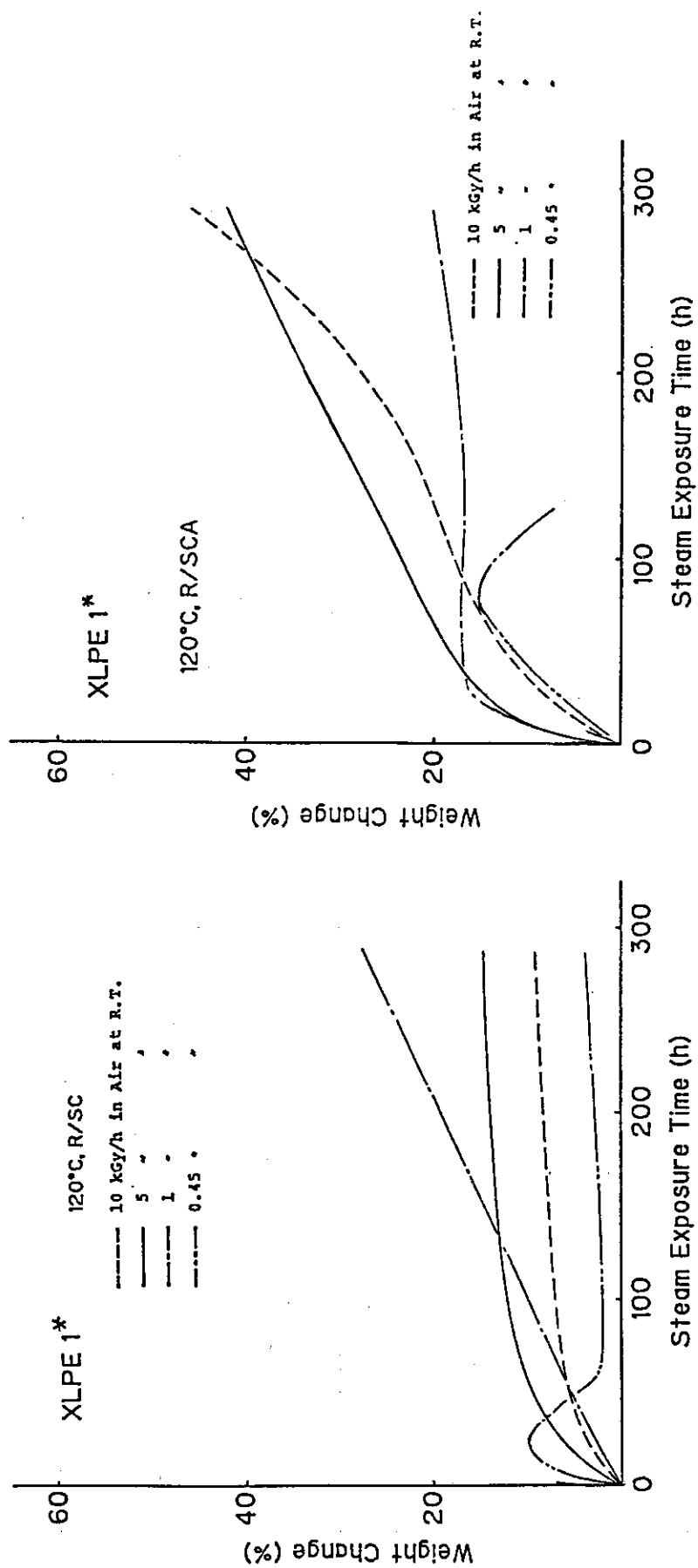


Fig. 134 Effect of dose rate on weight change of XLPE 1* under steam spray exposure.

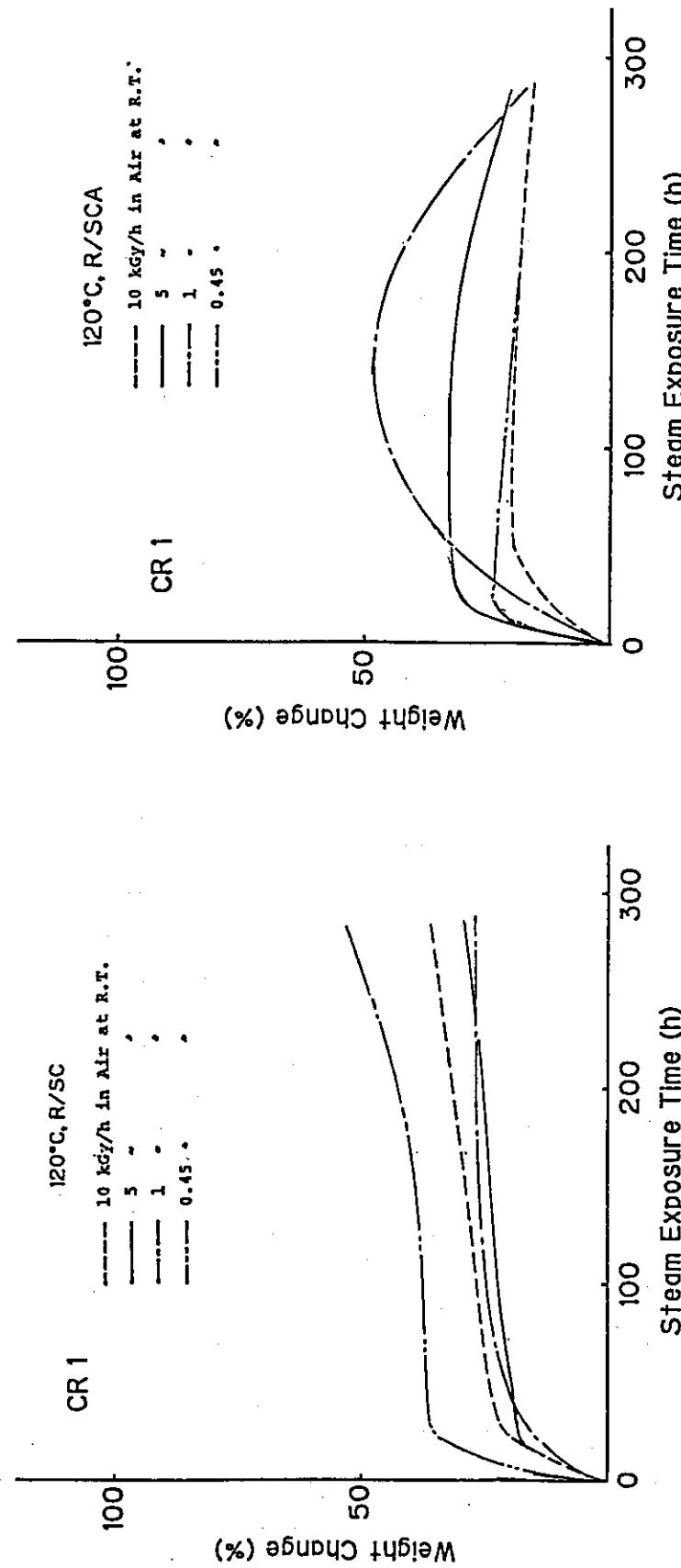


Fig. 135 Effect of dose rate on weight change of CR 1 under steam spray exposure.

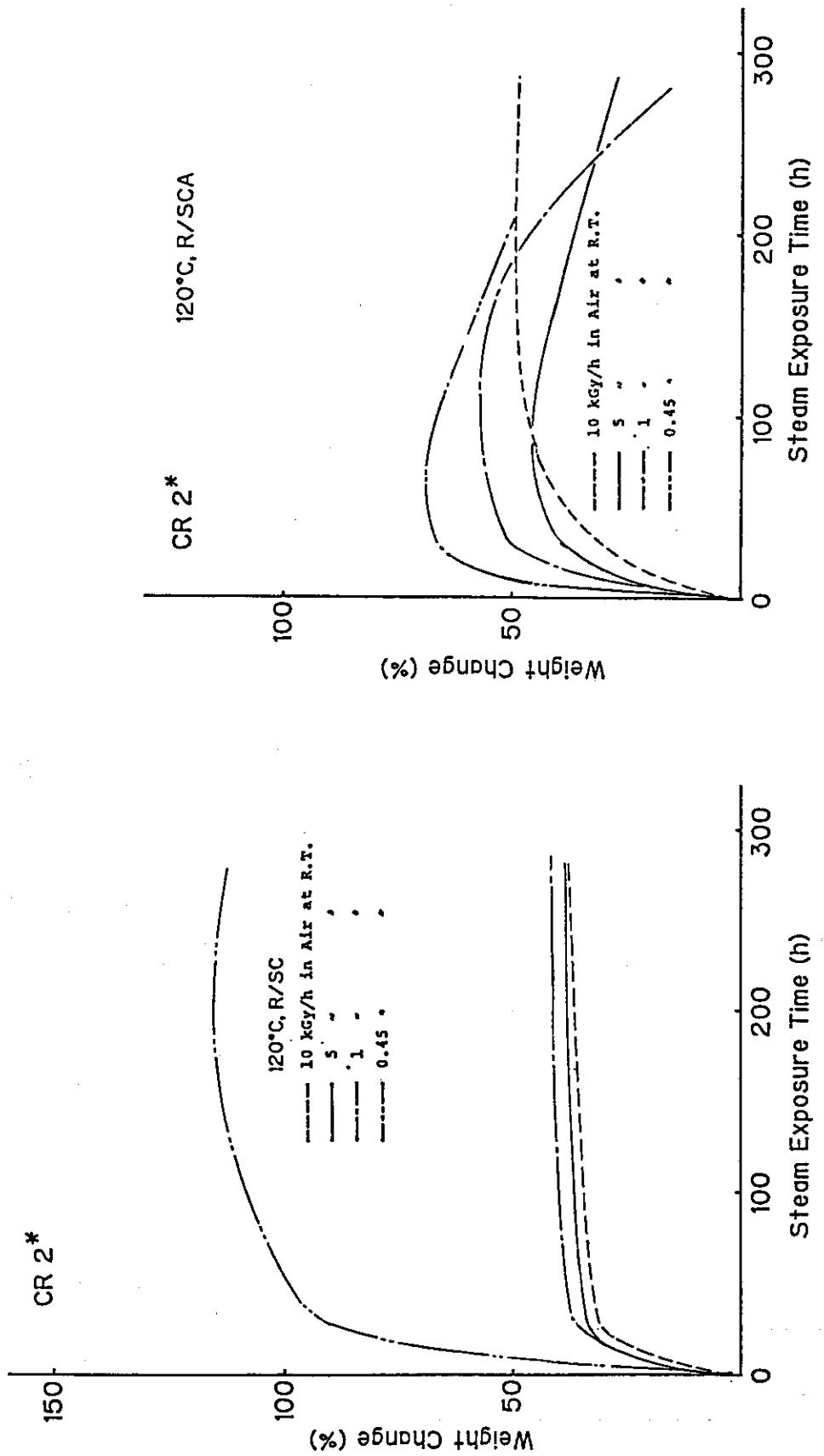


Fig.136 Effect of dose rate on weight change of CR 2* under steam spray exposure.

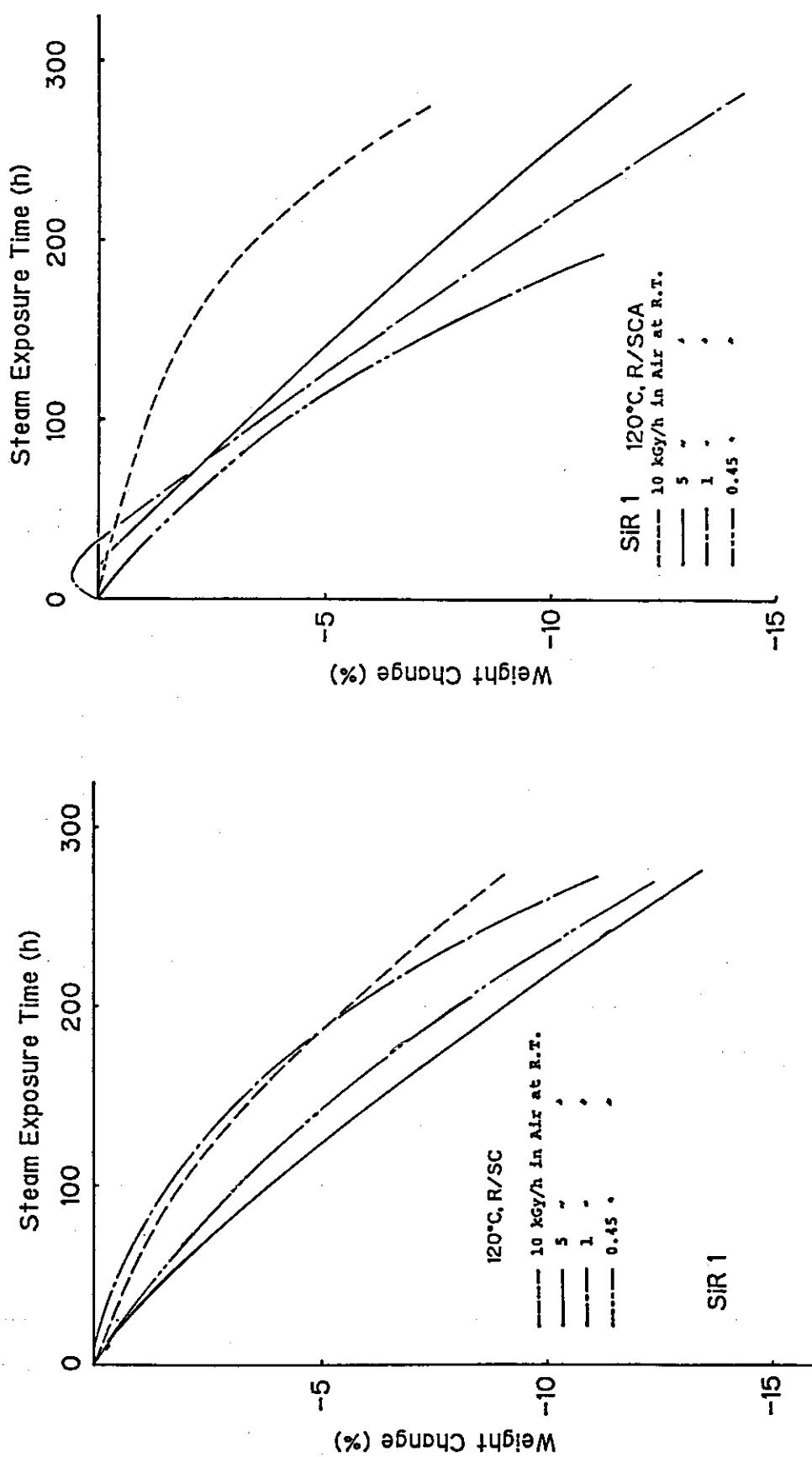


Fig. 137 Effect of dose rate on weight change of SIR 1 under steam spray exposure.

4.2.2 前照射温度ならびに雰囲気の影響

4.2.1に示したようにLOCA環境はPWRで約1年、BWRで約100日と想定されているが、このような長期間の同時環境下の試験を行うことは種々の制約があり、試験期間の短縮、即ち促進試験条件が必要になる。LOCA期間に想定される放射線の線量はPWRでは1.5MGy、BWRで0.26MGyであり、促進条件下ではかなりの高線量率下で試験を行わなければならない。一般に、高線量率下で照射すると、酸素の拡散が十分でないため、試料の表面のみが酸化されるが、現実の環境は低線量率、長期間であるため酸素の拡散が十分に行われ、試料の内部まで酸化すると考えられる。したがって、試験期間を短縮するためには、高線量率下で試料内部まで酸化するような条件を設定する必要がある。そのためには、酸素の拡散速度を大きくすれば良いが、その方法として、酸素加圧下照射や照射時の温度をあげる方法などが提案されている。

本節では逐次法前照射時（逐次法の前段の照射を以後こう呼ぶ）の温度ならびに雰囲気が絶縁材料の劣化に与える影響を調べ、現実により近い環境（低線量率下）における劣化との比較を行うことにより、促進試験条件を検討した。

（1）実験方法

試料としては試験用標準シート試料13種類を用いた。前照射は空気中で5kGy/hのγ線を用い、室温、50°C、70°Cおよび90°Cで行った。また、酸化雰囲気として、室温、酸素加圧下(0.5MPa)、4kGy/hならびに室温、空気中、0.45kGy/h(前節参照)で行った。前照射後の試料は120°Cの空気(0.05MPa)を含む蒸気環境に暴露し、劣化の経時変化を調べた。

（2）結果および考察

『前照射段階における照射温度の影響』

1) 機械的性質

Table 38に前照射段階における機械的性質を示す。この表には比較のため、前節で示した線量率を変えた実験の中から最も低線量率の場合のデータ(0.45kGy/h)を併記した。LOCA時に想定される線量率は、PWR LOCAの場合、初期の過渡温度期間を除くと大部分の期間は約0.1~3kGy/hであることから、0.45kGy/hのデータを実際の環境に近い条件として比較に用いた。Table 38からハイパロンは前照射温度の上昇により強度、伸びのいずれも低下するが、低下の割合は比較的小さく、全体として前照射温度の影響は小さい。これに対して、酸素加圧下で前照射すると、強度低下がやや大きくなるが、伸びの低下はむしろ抑えられる。また、低線量率下照射では、やはり強度低下がやや大きく、伸びは室温、高線量率下照射の場合に近い値を示す。

EPR では、前照射温度が高くなると、モデル配合試料の強度が著しく低下するのに対して、実用配合試料では比較的前照射温度の影響は小さい。一方、酸素加圧下照射では、いずれの試料も著しい強度低下を示すが、伸びについては個々の試料で異なっており、モデル配合の試料では伸びの低下がむしろ少ないのに対して、実用配合試料、特にEPR 3 では低下が著しい。低線量率下で照射したものは酸素加圧下で照射したものとほぼ同程度の劣化を示した。

架橋ポリエチレンは照射温度に対して特異な挙動を示す。即ち、照射温度が50°C 以下と70°C 以上で伸びの挙動が異なり、高温では伸びの低下が少ない。一方、強度については照射温度の影響は見られない。これに対して酸素加圧下で照射すると強度、伸びのいずれも著しく低下する。低線量率下で照射すると強度低下はやや大きいが、伸びは室温、50°C 照射の場合とほぼ同程度であり、酸素加圧下照射の場合と劣化挙動が異なる。

クロロブレンは、試料によって劣化挙動が異なるが照射温度が高くなると強度、伸びが低下するものが多く、特に90°C になると伸びが著しく低下する。一方、酸素加圧下で照射すると強度は著しく低下するものが多いが、伸びの低下はむしろ抑えられる。このような現象は酸化劣化の進行によりある程度切断が起こると生じることが報告されている¹。同様に低線量率照射でも強度が下がる試料が多いが、伸びは保存されている場合が多く、照射温度をあまり高くすると熱劣化が加わり劣化が大きくなり過ぎる傾向を示す。

シリコーンゴムは照射温度の影響を比較的受けにくく、また、酸素加圧下や低線量率下で照射すると伸びの低下が若干少なくなる傾向を示すなど、酸化劣化に対しては安定であることがわかる。

2) 電気的性質

Table 39に前照射段階における体積固有抵抗の初期値に対する比の対数の値を示す。EPRでは前照射温度が高くなるにつれて絶縁抵抗が低下する。また、酸素加圧下や低線量率下で照射すると大きな絶縁低下を示しており、絶縁低下が酸化の程度や酸化層の厚さなどと関連することが示唆される。絶縁抵抗から見ると酸素加圧下に近い値を示すのはモデル配合試料では70°C、実用配合試料では90°Cの場合であるが、低線量率下照射による絶縁低下は70°Cと90°Cのほぼ中間の値を示しており、前照射温度を上げることにより電気的には同程度の劣化を与えることが出来る。

架橋ポリエチレンでもこの傾向は同じであり、照射温度を上げることにより低線量率下照射と同程度の劣化を与えることが出来る。

絶縁材料でもシリコーンゴムでは、前照射温度を上げると絶縁低下は変化しないかやや小さくなる傾向を示すのに対して、酸素加圧や低線量率照射では、ある

程度の低下が見られ、この場合には、前照射温度を上げることは必ずしも、酸化雰囲気を模擬することにならない。

参考として示したハイパロンでは、前照射温度は絶縁低下に大きな影響を与えない。また、酸化雰囲気で照射しても EPRなどに比べて絶縁低下が小さいことから、ハイパロンの絶縁低下は主として放射線照射による分解成生物である塩酸などの蓄積によるものであることが示唆される。

放射線照射時の線量率と酸化領域の関係については森田らの報告があり、EPRについては1mm厚のシートの場合室温空气中で100Gy/h以下であればほぼ内部まで酸化することが報告されている。一方、熱劣化においても試料の表面の酸化が進行し、不均一な酸化層を形成すること、また、温度を高くしても、内部まで均一に酸化せず表面の酸化度が上昇するなどの事実が報告²されていることから、酸素の拡散を上げるために照射温度を上げ過ぎないよう注意する必要がある。

『蒸気環境暴露時の劣化におよぼす前照射温度の影響』

1) 機械的性質

Fig.138～145に種々の条件で前照射した後、120℃の空気を含む蒸気環境に暴露した絶縁・被覆材料の強度と伸びの保持率を示す。図中▼印及び○印はそれぞれ、酸素加圧下照射ならびに低線量率照射の場合を示す。

Fig.138およびFig.139にハイパロンの結果を示す。ハイパロンではモデル配合と実用配合で若干異なり、モデル配合では、前照射温度は蒸気環境暴露時の劣化にほとんど影響を与えていないが、実用配合試料では伸びに若干影響を与え、高温で前照射すると低下が大きくなる。また、モデル配合試料では酸素加圧下で照射すると著しい強度低下を示すが、実用配合試料では伸びの低下が大きくなり、温度を上げて照射した場合と近い値を示す。一方、低線量率で照射したものは、室温から70℃の範囲で照射したものとほぼ同程度の劣化を示す場合が多く、酸素加圧下照射の場合より劣化は少ない。

Fig.140～142に EPRの結果を示す。EPRは前照射段階では前照射温度の影響は大きくなかったが蒸気環境暴露すると試料により劣化挙動が異なる。モデル配合の試料では強度、伸びの両方に照射温度の影響が顕著に見られ、温度が高くなると劣化が著しい。特に、90℃で前照射したものは蒸気環境暴露により直ちに劣化し、測定が出来なくなった。酸素加圧下照射の場合もこれと同様の挙動を示すが、低線量率で照射したものは、強度については70℃で照射したものに、伸びについては50℃以下で照射したものに近く、酸素加圧下や90℃で照射したものとは劣化の程度が著しく異なる。次に実用配合の試料 EPR 3では前照射温度の影響は比較的小さく、70℃の場合の伸びの低下がやや大きいのに対して、酸素加圧下および低線量率照射したものは蒸気環境暴露により著しく劣化し、測定出来なくなった。

同じ実用配合の試料でも EPR 4では照射温度の影響は強度、伸びのいずれにも見られるが、強度は高温で照射するほど低下し、伸びは高温で照射するほど保存される。また、酸素加圧下や低線量率で照射したものも蒸気環境暴露に耐えるが、いずれの場合もごく初期のデータが得られたのみで劣化が著しいことがわかる。このような複雑な劣化挙動は EPRが酸化劣化にきわめて敏感であることを示していると同時に、試料内部の酸化状態が個々に異なっていることを示唆している。

Fig.143 に架橋ポリエチレンの結果を示す。架橋ポリエチレンでは前照射温度の影響は強度には殆ど見られず、伸びに見られるが、温度領域により劣化挙動が異なる。即ち、照射温度が低いと、照射による伸びの低下が大きいが、蒸気環境に暴露すると回復するのに対して、高温で照射したものは照射による伸びの低下は少ないが、回復は示さず、蒸気環境暴露により低下する。また、酸素加圧下照射したものは蒸気環境暴露により著しく劣化し、測定出来なくなるが、低線量率照射したものは強度の低下はやや大きいものの伸びの劣化挙動は低い温度で照射したものと殆ど同じである。

Fig.144 にクロロブレンの結果を示す。クロロブレンも試料により劣化挙動が異なるが、前照射温度が高くなると伸びの低下が大きくなるものが多い。一方、低線量率下で照射したものはある程度温度を上げて照射したもの（例えば70°Cで照射した場合）に近いが、酸素加圧下で照射したものは蒸気環境暴露により測定出来なくなるものが多いなど劣化が著しい。

Fig.145 にシリコーンゴムの結果を示す。シリコーンゴムも試料間で若干劣化の傾向が異なるが全体としては前照射温度の劣化に与える影響は小さい。また、酸素加圧下照射や低線量率照射した場合も劣化の程度はほぼ同じであり、酸化劣化の影響を受けにくいことがわかる。

2) 電気的性質

Fig.146~150に種々の条件で前照射した後蒸気環境暴露した試料の体積固有抵抗の変化を示した。図中のシンボルは機械的性質の場合と同様である。Fig.146, 147 にEPRおよび架橋ポリエチレンの結果を示す。モデル配合のEPRでは前照射温度が絶縁低下に与える影響は比較的小さいが、機械的劣化には影響を与えるため、90°Cの場合の劣化が大きく測定値が得られなかった。また、酸素加圧下照射の場合は機械的な劣化が大きいため、途中で測定出来なくなるが、絶縁低下はそれほど大きくなく低線量率照射は室温、高線量率照射の場合と大差がない。これに対して、実用配合の試料では前照射温度の影響が見られ、高温で照射したものほど大きな絶縁低下を示す。酸素加圧下照射および低線量率照射した場合は絶縁抵抗以前に機械的に劣化するものがあり、特に EPR 3では蒸気環境暴露すると測定が出来なくなるなど温度を上げて照射した場合と劣化挙動が著しく異なる。架橋ポ

リエチレンも同様に、前照射温度が高いほど絶縁低下するが、酸素加圧下照射では測定出来なくなつた。また、低線量率照射は室温の場合よりやや低下が大きく、50°C, 70°Cとほぼ同程度の低下を示した。

Fig.148 にシリコーンゴムの結果を示す。シリコーンゴムは前照射の段階では絶縁低下に若干照射温度の影響が見られ、酸素加圧や低線量率での絶縁低下が大きかつたが、蒸気環境暴露時の劣化は照射温度や雰囲気の影響を殆ど受けない。

Fig.149,150 に参考としてハイパロンの結果を示す。ハイパロンではいずれの試料も前照射温度の影響が見られ、高温で照射するほど絶縁低下が大きい。また、酸素加圧や低線量率下で照射したものは70°C, 90°Cで照射したものに近い絶縁低下を示す。

3) 吸水膨潤

Fig.151,152 にハイパロンの重量変化を示す。モデル配合と実用配合では吸水挙動が異なる。モデル配合の試料は前照射温度が高くなると吸水が増加し、70°Cの場合に最も大きな値を示す。また、酸化雰囲気で照射したものはさらに大きな吸水を示し、特に、酸素加圧下照射したものは最も大きな吸水を示した。一方、実用配合試料はモデル配合試料に比べて吸水が少なく、前照射温度の影響も小さい。初期の吸水速度は酸素加圧下照射したものが最も大きい。

Fig.153~155 にEPRの結果を示す。EPRについては、いずれの試料にも前照射温度の影響が見られるが、その内容は個々に異なる。EPR 1*とEPR 3は照射温度が高いと吸水が大きくなるが、EPR 4では逆になる。また、低線量率照射したものは頭打ちがみられ、酸素加圧下照射したものは初期の吸水速度が大きくなるなど、吸水に関しては高温照射と酸化雰囲気での照射は必ずしも同様の結果を与えないことがわかる。

Fig.156 は架橋ポリエチレンの吸水について示したものである。吸水データは室温照射の場合を除きばらつきが大きく一定の傾向を示さないが、酸化が進む条件では大きくなると思われる。

Fig.157,158 はクロロプロレンの結果の例を示す。クロロプロレンは試料により著しく吸水挙動が異なる。CR 2*では早くから頭打ちを示し、その後は見かけ上吸水が減少する。CR 3ではいずれの照射条件でも吸水は時間とともに増加する。また、前者では温度の影響ははっきりしないが後者では前照射温度の上昇に伴ってむしろ吸水が減少する。両者に共通なのは酸化雰囲気で照射すると蒸気暴露の初期に大きな吸水を示すことである。これらの現象はクロロプロレンが熱により架橋し易いことと、架橋が進行すると物理的に吸水が抑えられることならびに劣化が進むと溶失などによる重量減少が起こるなどの現象が複雑に関連しているためと考えられる³⁾。

Fig.159 にシリコーンゴムの結果を示した。シリコーンゴムは吸水ではなく重量減少を示すが、この重量減少は前照射条件や雰囲気の影響をあまり受けない。このことは、シリコーンゴムの重量減少は照射による劣化に起因するのではなく、主としてアルカリ性のスプレイ液による加水分解に起因しているためと考えられる。

(3) まとめ

1) 前照射段階

機械的性質に関しては、架橋ポリエチレン、シリコーンゴムを除き、概して前照射温度が高くなると強度、伸びの低下が大きくなる傾向を示す。また、酸素加圧下照射すると強度は大きいが、伸びの低下はむしろ少ない場合が多い。低線量率下照射したものも酸素加圧下で照射したものに比較的近い劣化挙動を示すものが多く、前照射段階では多くの材料についてこれら二つの方法は似た劣化を与えることがわかる。一方、架橋ポリエチレンは特異な挙動を示し、前照射温度が低いと伸びが著しく減少するのに対して、高温で照射すると伸びの減少が少ない。また、酸素加圧下照射では、伸びが極端に減少する。低線量率の場合も強度、伸びの低下がみられるが、酸素加圧下ほどではなく、劣化の様子が異なる。シリコーンゴムは前照射温度の影響を殆ど受けず、酸化雰囲気に対しても安定である。

電気的性質については、EPR、架橋ポリエチレンでは前照射温度の上昇に伴って絶縁低下が大きくなり、70°C付近で酸素加圧下ないしは低線量率下照射したものに近い値を示すが、シリコーンゴムは前照射温度の影響はあまりなく、酸素加圧下や低線量率下での劣化を模擬出来ない。

2) 蒸気環境暴露時の劣化に及ぼす前照射温度の影響

機械的性質に関しては、ハイパロン、EPRの一部の試料では前照射温度を上げると低線量率下照射の場合の劣化に近づくが、酸素加圧下照射の場合は蒸気環境暴露により著しい劣化を示すものが多く、低線量率下の劣化を酸素加圧下照射により模擬するのは難しい。一方、シリコーンゴムのように前照射条件の影響を受けないものもある。

電気的性質に関しては、EPR、架橋ポリエチレンでは前照射温度が高くなると絶縁抵抗の低下が大きくなり、低線量率照射による劣化はある程度照射温度を上げることにより模擬出来るが、酸素加圧下照射した場合は絶縁抵抗以前に機械的劣化が大きくなるケースが多く、低線量率下照射の場合と劣化が内容的に異なる可能性がある。シリコーンゴムは電気的性質においても前照射温度の影響を受け

ない。

吸水膨潤については、一般に、前照射温度の上昇により増加するものが多く、酸素加圧下照射や低線量率下照射すると著しい吸水を示すことから、酸化劣化と関連を持つと考えられる。一部の試料では酸化が進み過ぎると、溶失がおこり、吸水は見かけ上減少する。一方、シリコーンゴムでは重量減少が見られるが、これはアルカリ性スプレイ液による加水分解であり、前照射条件の影響は受けない。

以上、実環境（試料内部まで酸化がおこる条件）での劣化を模擬方法として、前照射時の温度を上げることにより、低線量率下の劣化を模擬出来るのは、照射温度をあげることにより酸素の拡散速度のみをあげることが可能な場合であり、ハイパロン、EPRなどの材料については適用が可能であると考えられるが、架橋ポリエチレンのように照射温度に対して特異な挙動を示すものやクロロブレンなど熱劣化の影響が大きいものについてはその適用に注意を必要とする。

関連文献

1. 森田洋右, 川上和市郎, "電線絶縁材料の放射線及び熱酸化劣化の検討", 電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-87-146(1987)
2. 岡田漱平, 日馬康雄, 伊藤政幸, 八木敏明, 吉川正人, 吉田健三, "絶縁材料のL O C A模擬環境下における劣化に及ぼす線量率の効果(Ⅱ)", 同上 EIM-83-116(1983)
3. 八木敏明, 日馬康雄, 伊藤政幸, 岡田漱平, 吉川正人, 吉田健三, "放射線照射したゴム材料の沸騰スプレイ液中における傍受か挙動", JAERI-M 83-072(1983)
4. Y.Kusama, T.Yagi, S.Okada, M.Ito, M.Yoshikawa, K.Yoshida, N.Tamura, W.Kawakami, "Progress on Qualification Testing Methodology Study of Electric Cables", Proceedings of U.S. Regulatory Commission NUREG/CP-0081(1986)
5. W.Kawakami, Y.Kusama, T.Yagi, K.Arakawa, M.Ito, S.Okada, M.Yoshikawa, K.Yoshida, N.Tamura, "Progress on Qualification Testing Methodology Study of Electric Cables", Proceedings of U.S. Regulatory Commission NUREG/CP-0090(1987)

Table 38 Mechanical properties of the insulating and jacketing materials
irradiated under various conditions

	5kGy/h at Room Temp.			50°C			70°C			90°C			4kGy/h at RT in Oxygen			0.45kGy/h at RT		
	Tb/Tbo	Eb/Ebo	Tb/Tbo	Eb/Ebo	Tb/Tbo	Eb/Ebo	Tb/Tbo	Eb/Ebo	Tb/Tbo	Eb/Ebo	Tb/Tbo	Eb/Ebo	Tb/Tbo	Eb/Ebo	Tb/Tbo	Eb/Ebo	Tb/Tbo	Eb/Ebo
CSM 1*	118	34	96	23	108	26	97	16	81	33	106	36						
CSM 2*	117	32	122	28	103	27	104	21	79	28	97	30						
CSM 3	81	11	66	8.7	83	8.8	74	6.1	79	15	77	13						
CSM 4	124	27	128	23	124	26	117	15	103	23	107	24						
EPR 1*	74	26	56	30	38	34	25	25	35	40	51	36						
EPR 3	69	8.6	81	6.8	72	8.5	74	8.2	38	5.1	39	5.2						
EPR 4	104	14	112	8.6	89	9.6	79	11	82	10	92	9.0						
XLPE 1*	56	2.1	51	1.4	54	6.0	55	7.9	16	0.2	37	1.3						
CR 1	55	3.4	36	1.8	83	6.0	44	1.3	38	8.7	62	4.2						
CR 2*	109	7.0	112	5.2	146	7.0	90	3.1	59	7.8	84	7.7						
CR 3	168	9.5	166	7.7	148	6.8	123	4.5	88	8.8	99	8.2						
SIR 1	67	6.6	44	3.9	55	4.5	57	4.5	46	5.2	65	7.6						
SIR 2	58	2.5	59	1.9	55	2.2	35	0.9	55	2.8	70	3.1						

Table 39 Volume resistivity of the insulating materials
irradiated under various conditions

	5kGy/h in air at RT	← 50°C	← 70°C	← 90°C	4kGy/h in O ₂ at RT	0.45kGy/h in air at RT
EPR 1*	-0.24	-0.66	-0.92	-1.70	-0.87	-0.41
EPR 3	-0.07	-0.13	-0.60	-0.87	-0.94	-1.33
EPR 4	-0.67	-0.72	-1.46	-1.86	-2.40	-1.15
XLPE 1*	-1.06	-1.41	-1.66	-1.99	-2.71	-1.75
SIR 1	-0.78	-0.17	-0.43	0.08	-1.46	-1.04
SIR 2	-0.56	-1.05	-0.91	-0.81	-1.52	-1.13
CSM 1*	-2.80	-2.82	-2.40	-2.44	-3.00	-2.75
CSM 2*	-0.68	-0.67	-0.58	-0.32	-0.87	-0.74
CSM 3	-2.15	-2.45	-1.90	-2.19	-2.64	-2.03
CSM 4	-2.00	-2.01	-2.13	-2.47	-2.56	-2.42

values in this table show $\log \rho/\rho_0$; ρ_0 : initial value

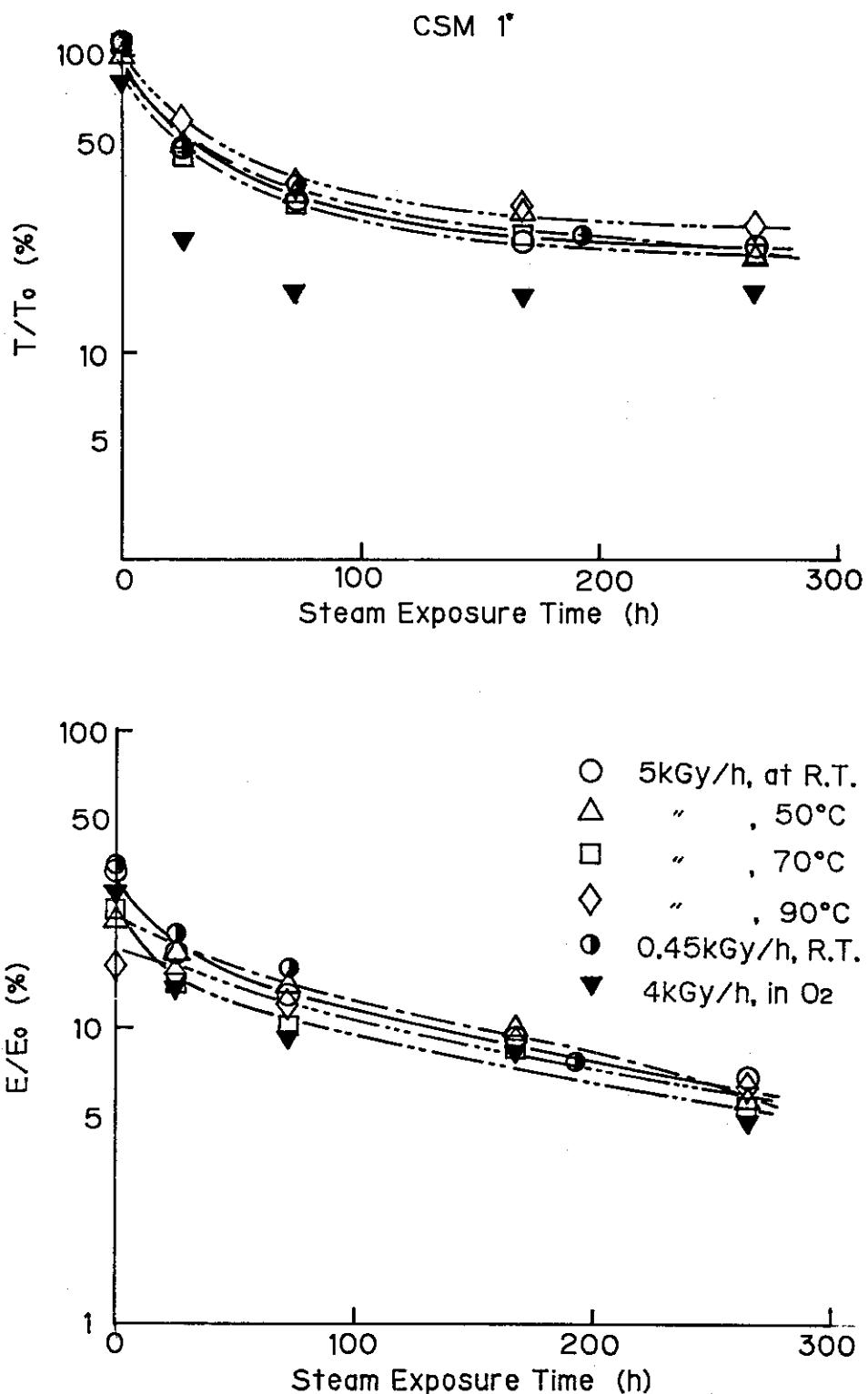


Fig.138 Effect of pre-irradiation conditions on mechanical properties of Hypalon 1* exposed to steam/spray environments including air.

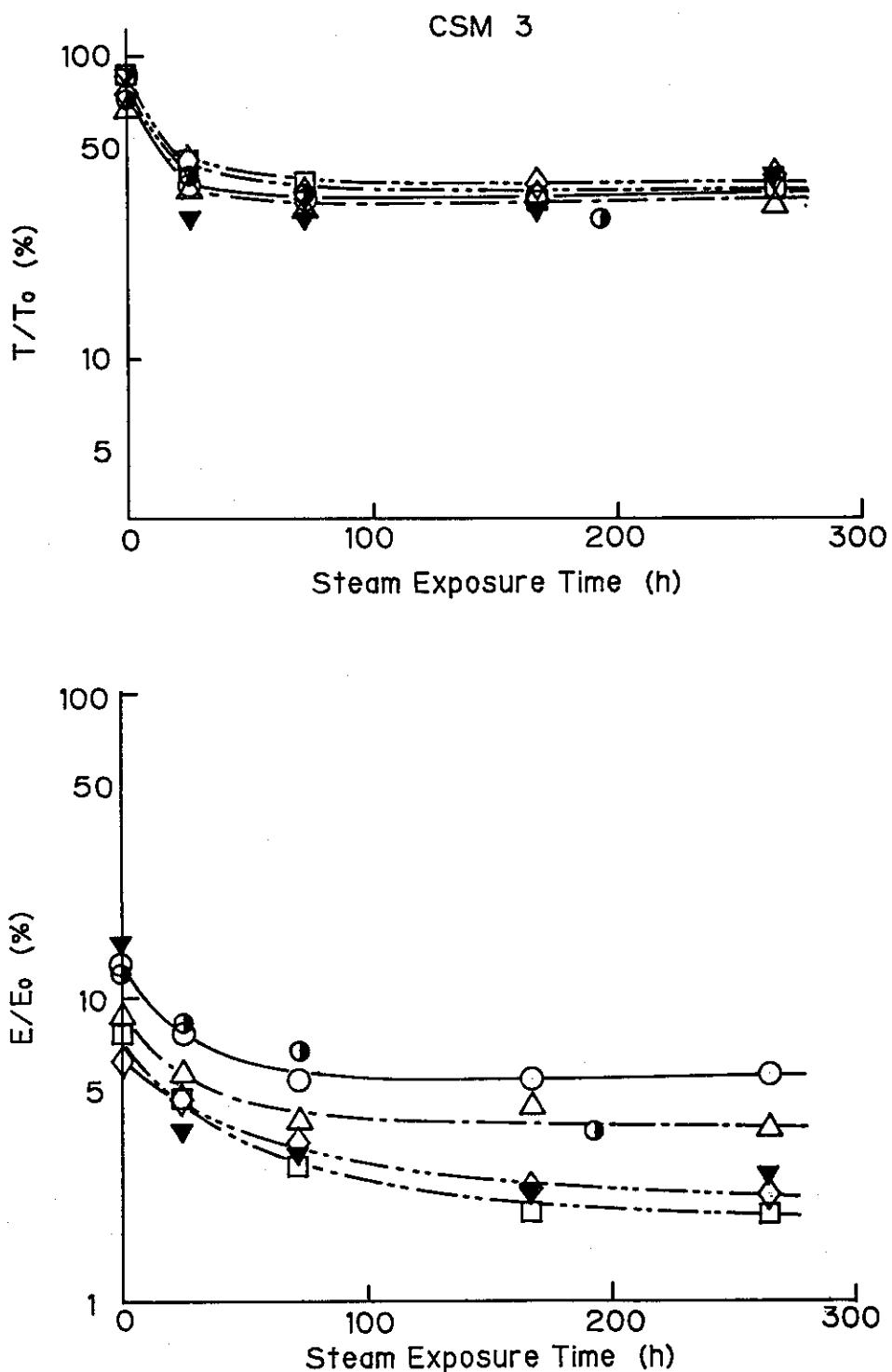


Fig.139 Effect of pre-irradiation conditions on mechanical properties of Hypalon 3 exposed to steam/spray environments including air.

• Symbols are the same as in Fig.138

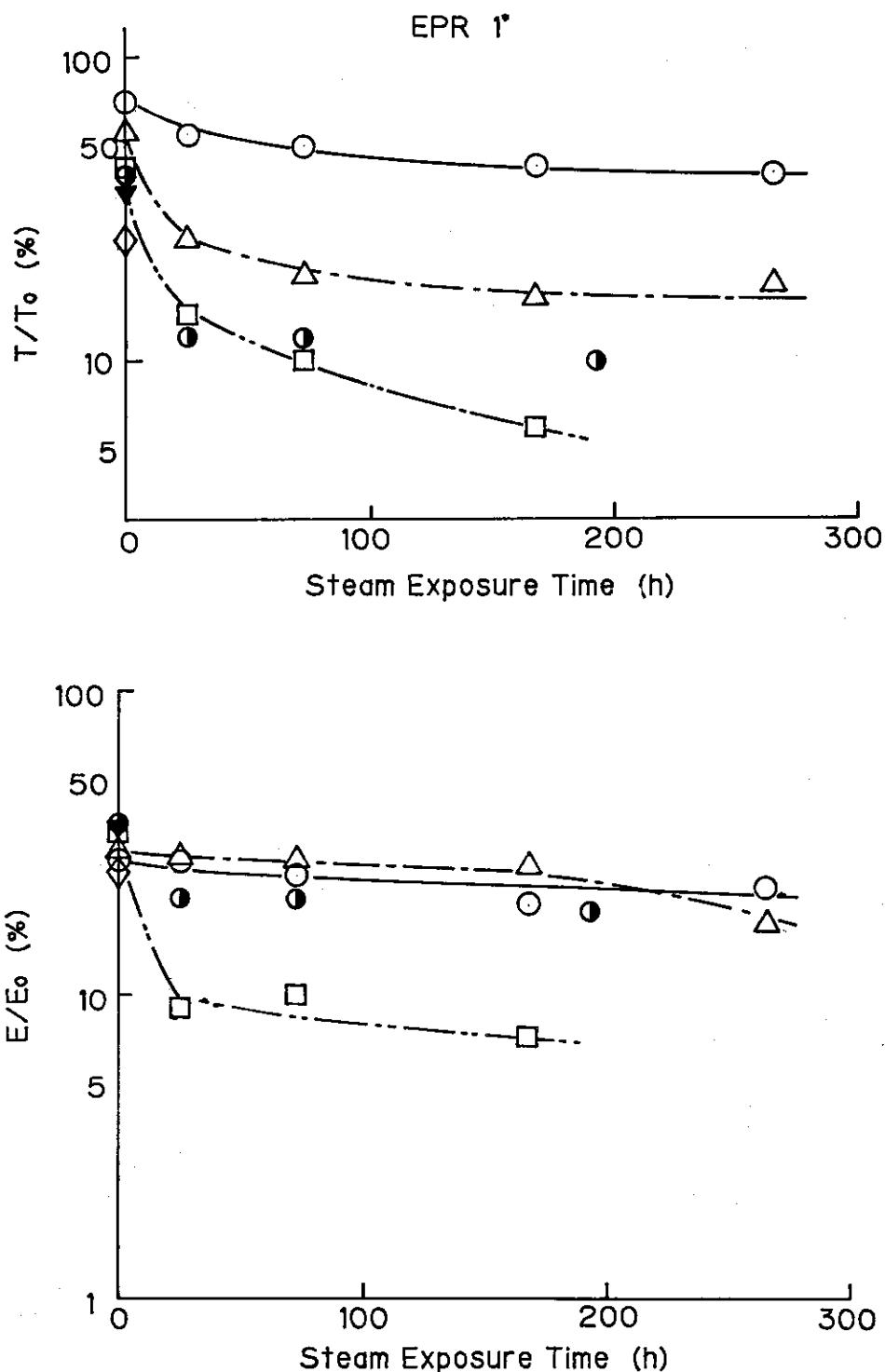


Fig.140 Effect of pre-irradiation conditions on mechanical properties of EPR 1* exposed to steam/spray environments including air.

Symbols are the same as in Fig.138

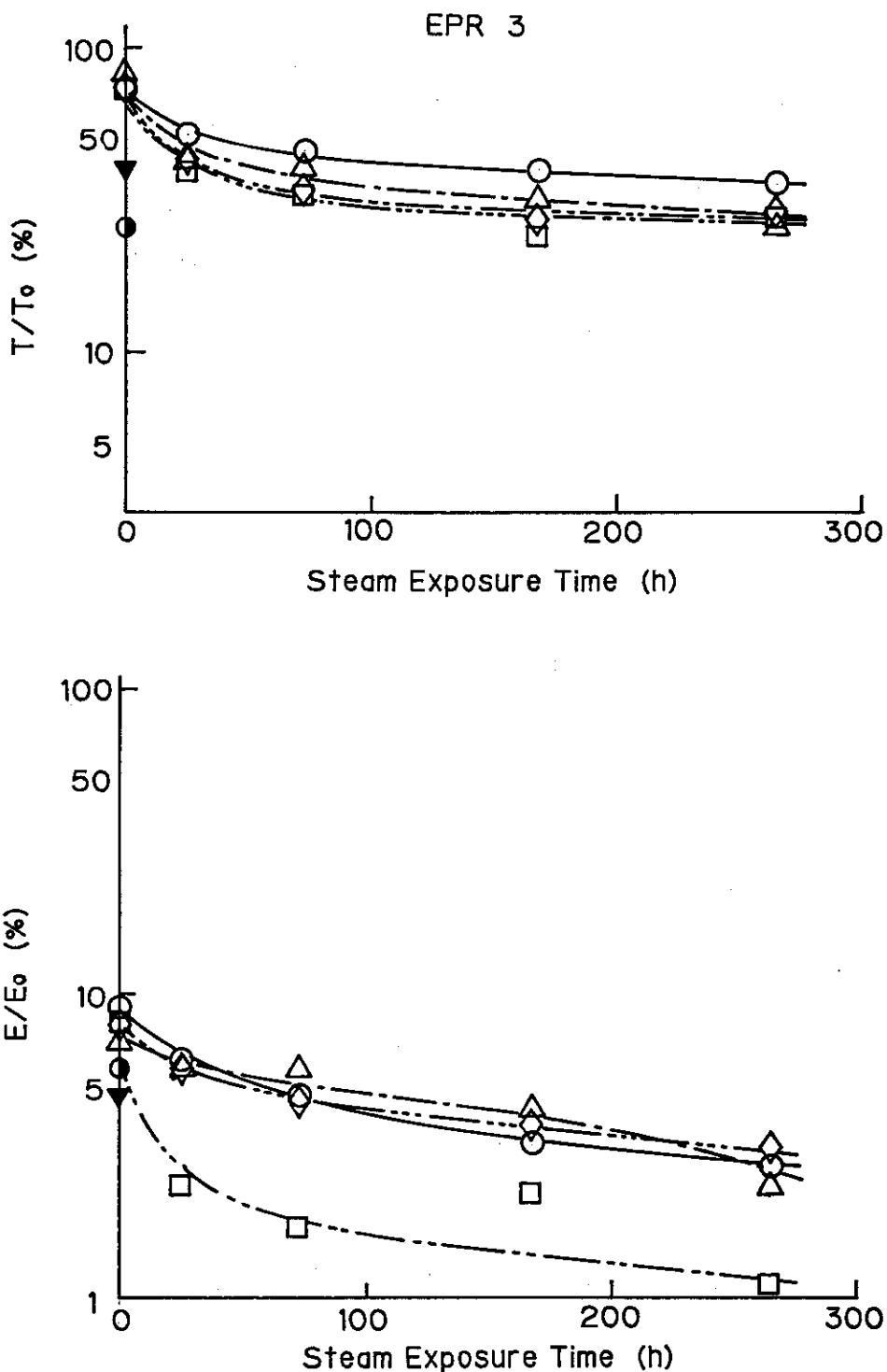


Fig.141 Effect of pre-irradiation conditions on mechanical properties of EPR 3 exposed to steam/spray environments including air.

Symbols are the same as in Fig.138

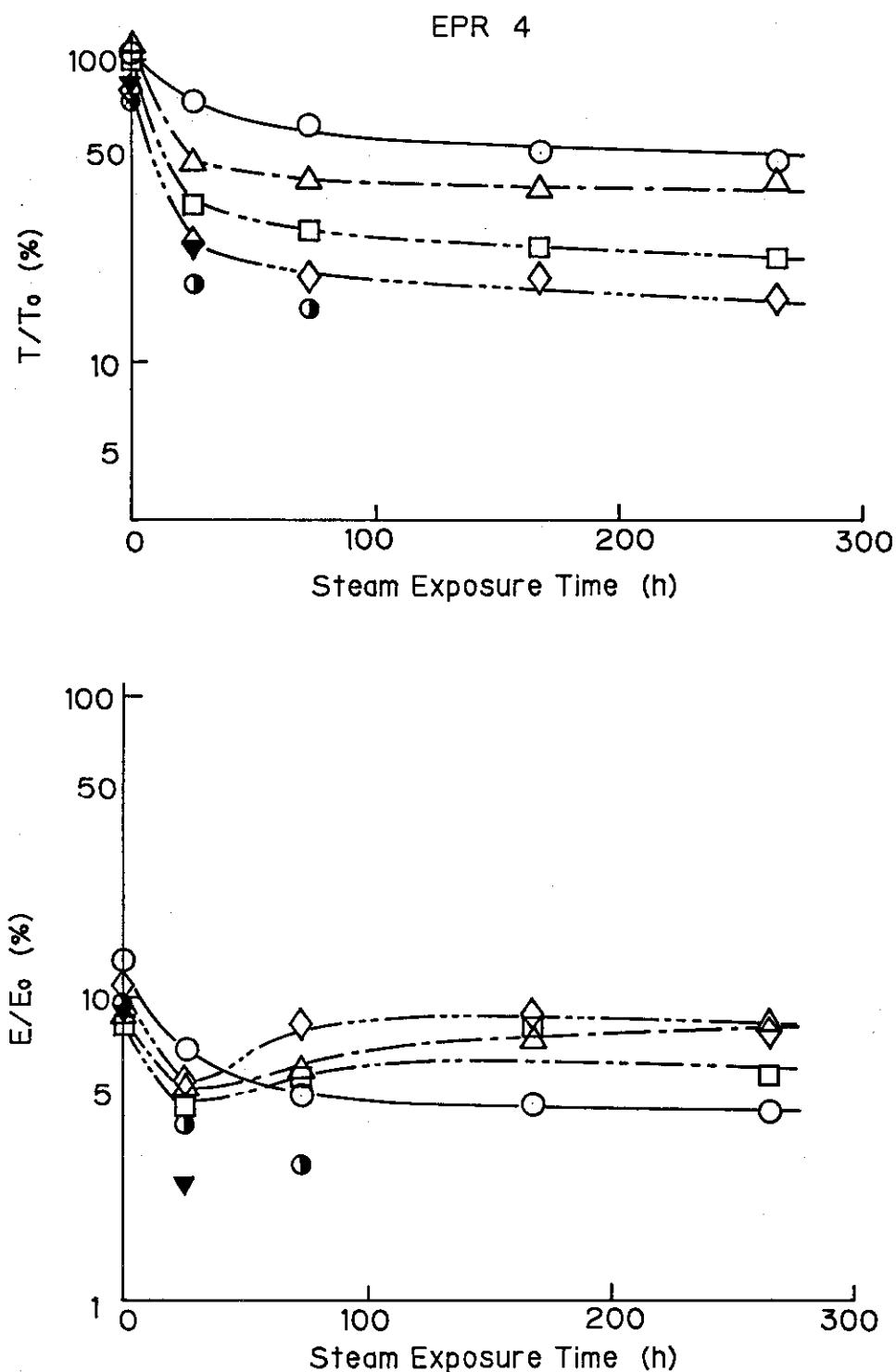


Fig.142 Effect of pre-irradiation conditions on mechanical properties of EPR 4 exposed to steam/spray environments including air.

Symbol are the same as in Fig.138

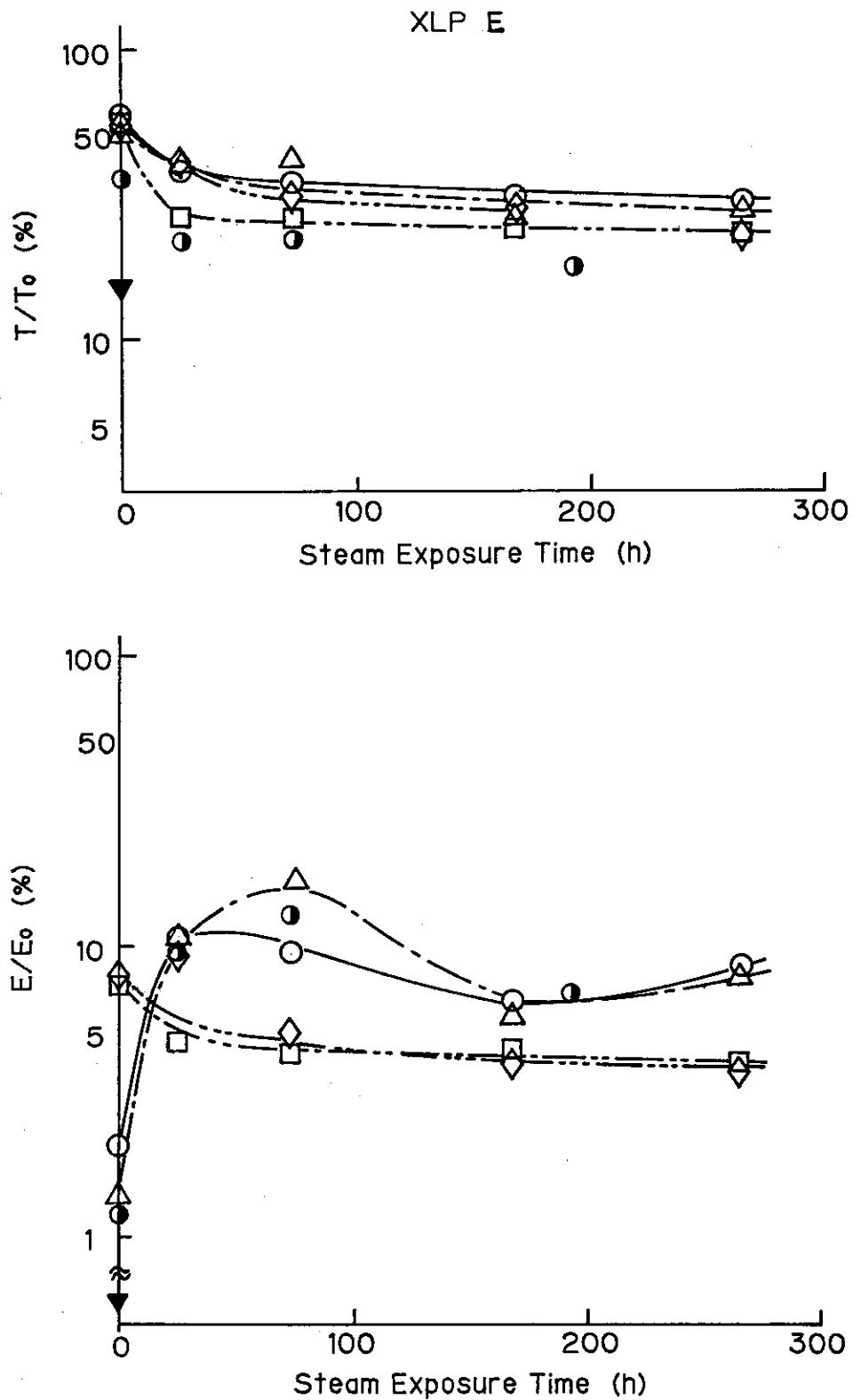


Fig.143 Effect of pre-irradiation conditions on mechanical properties of XLPE 1* exposed to steam/spray environments including air.

Symbols are the same as in Fig.138

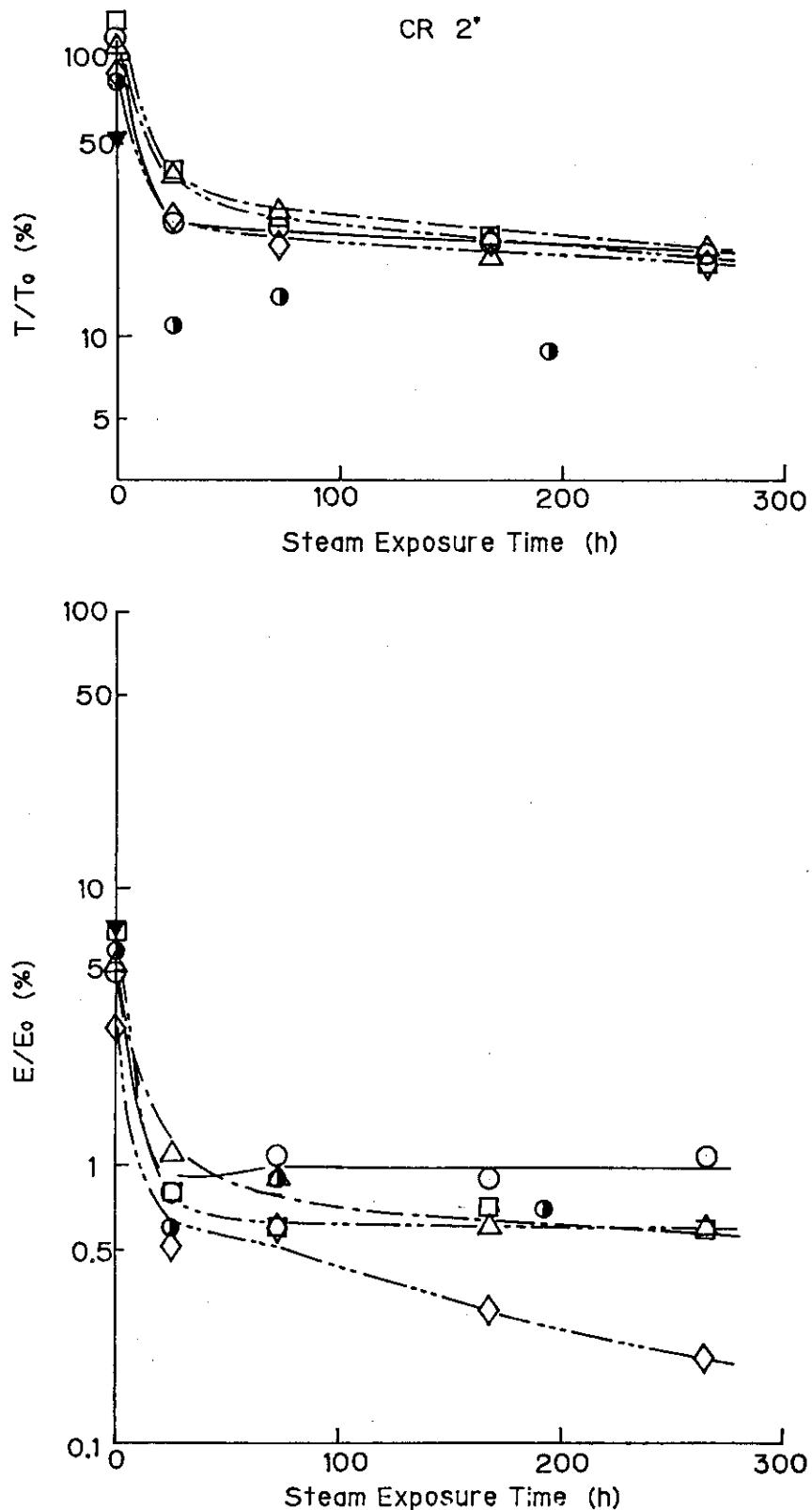


Fig.144 Effect of pre-irradiation conditions on mechanical properties of CR 2* exposed to steam/spray environments including air.

Symbols are the same as in Fig.138

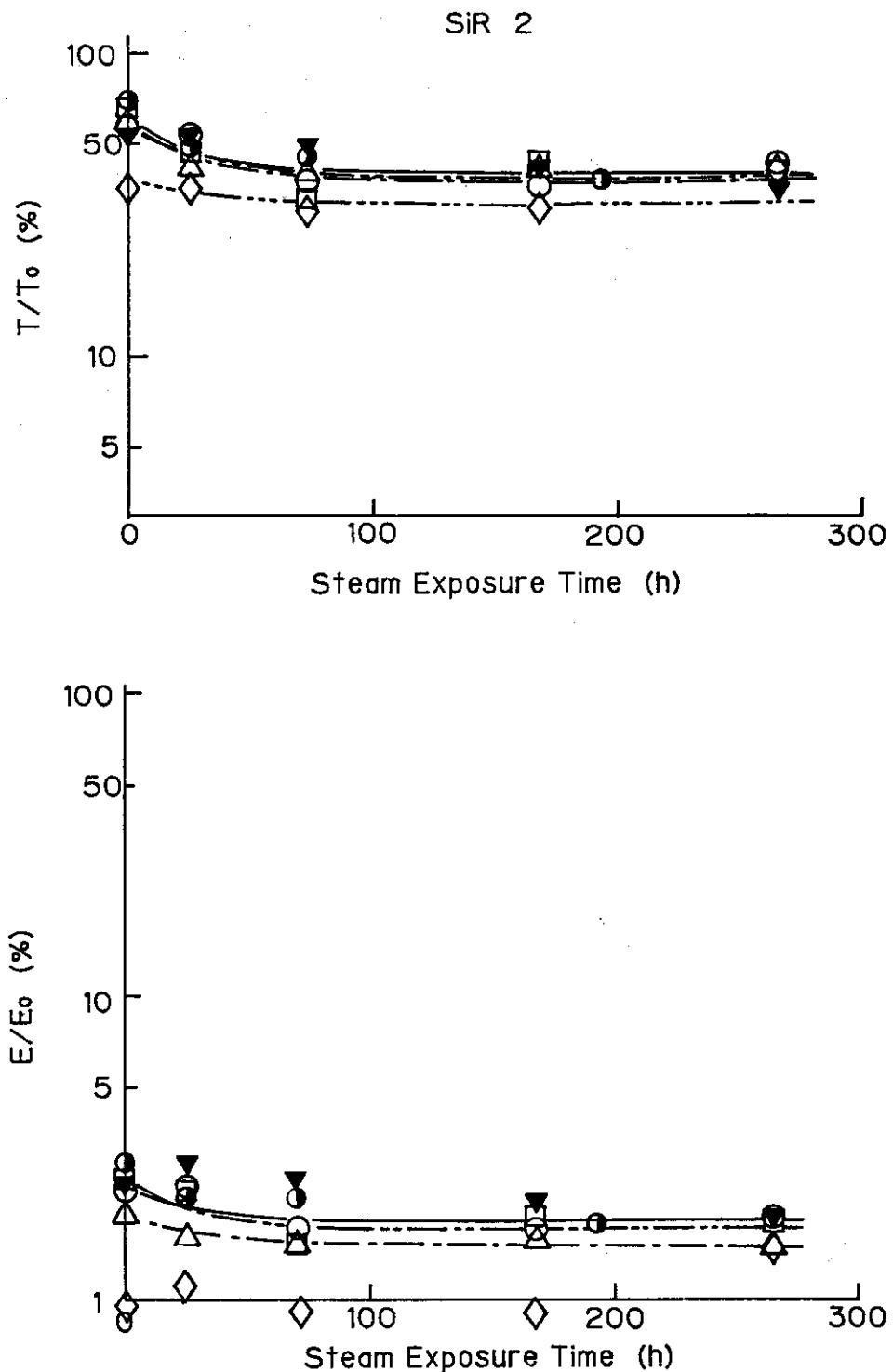


Fig.145 Effect of pre-irradiation conditions on mechanical properties of SIR 2 exposed to steam/spray environments including air.

Symbols are the same as in Fig.138

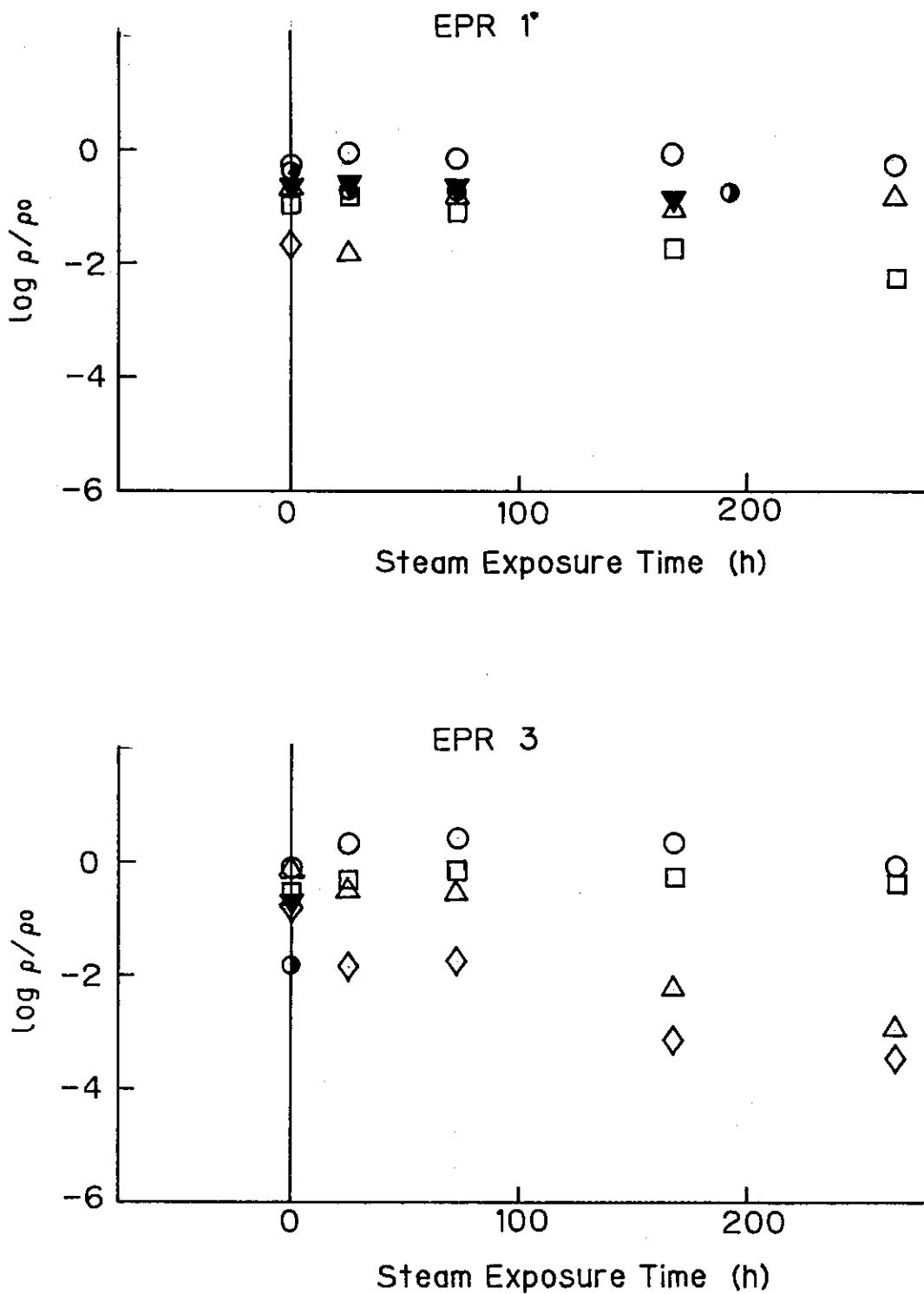


Fig.146 Effect of pre-irradiation conditions on volume resistivity of EPR 1* and EPR 3 exposed to steam/spray environments including air.

Symbols are the same as in Fig.138

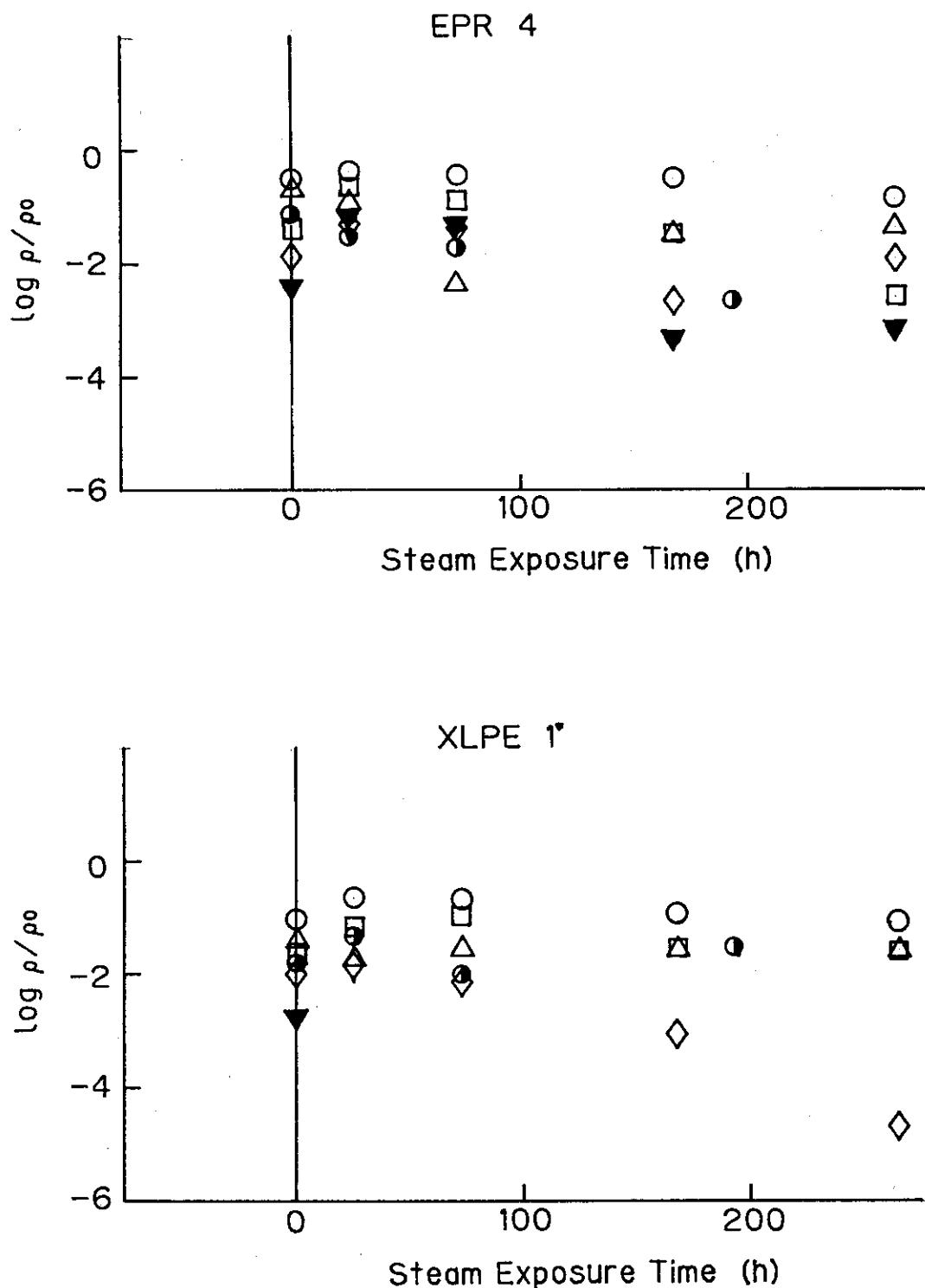


Fig.147 Effect of pre-irradiation conditions on volume resistivity of EPR 4 and XLPE 1* exposed to steam/spray environments including air.

Symbols are the same as in Fig. 138

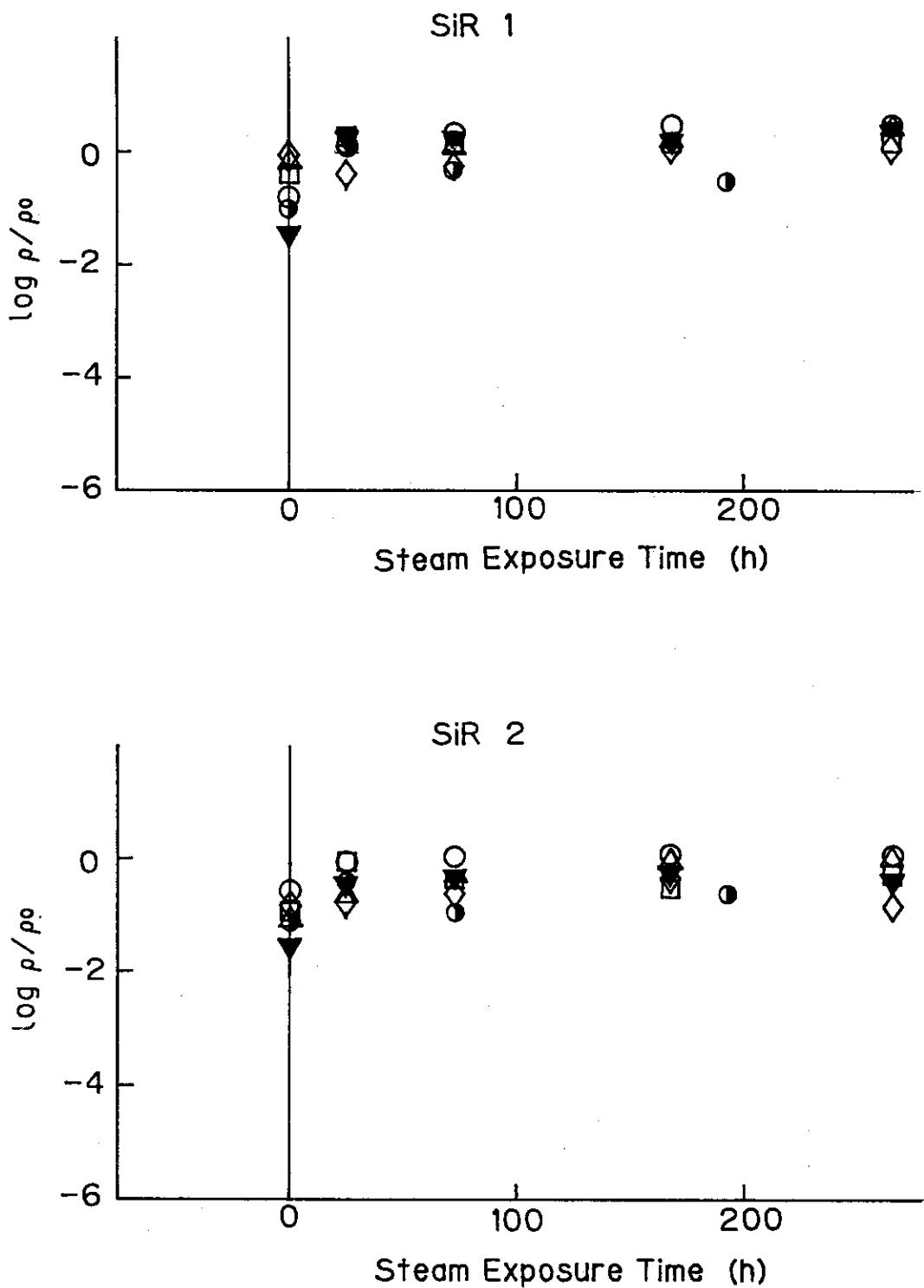


Fig.148 Effect of pre-irradiation conditions on volume resistivity of SIR 2 and SIR 3 exposed to steam/spray environments including air.

Symbols are the same as in Fig.138

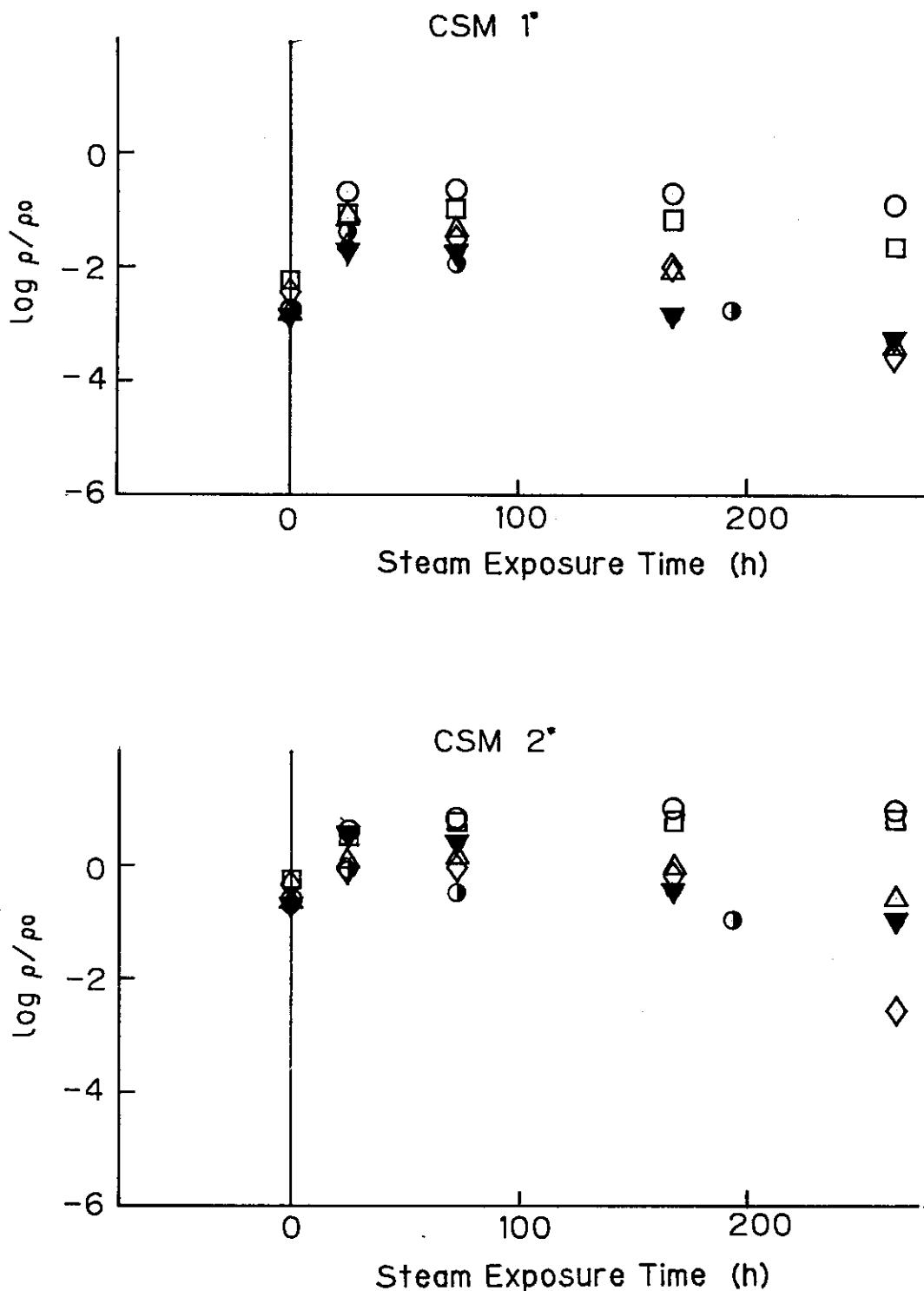


Fig.149 Effect of pre-irradiation condition on volume resistivity of CSM 1* and CSM 2* exposed to steam/spray environments including air.

Symbols are the same as in Fig.138

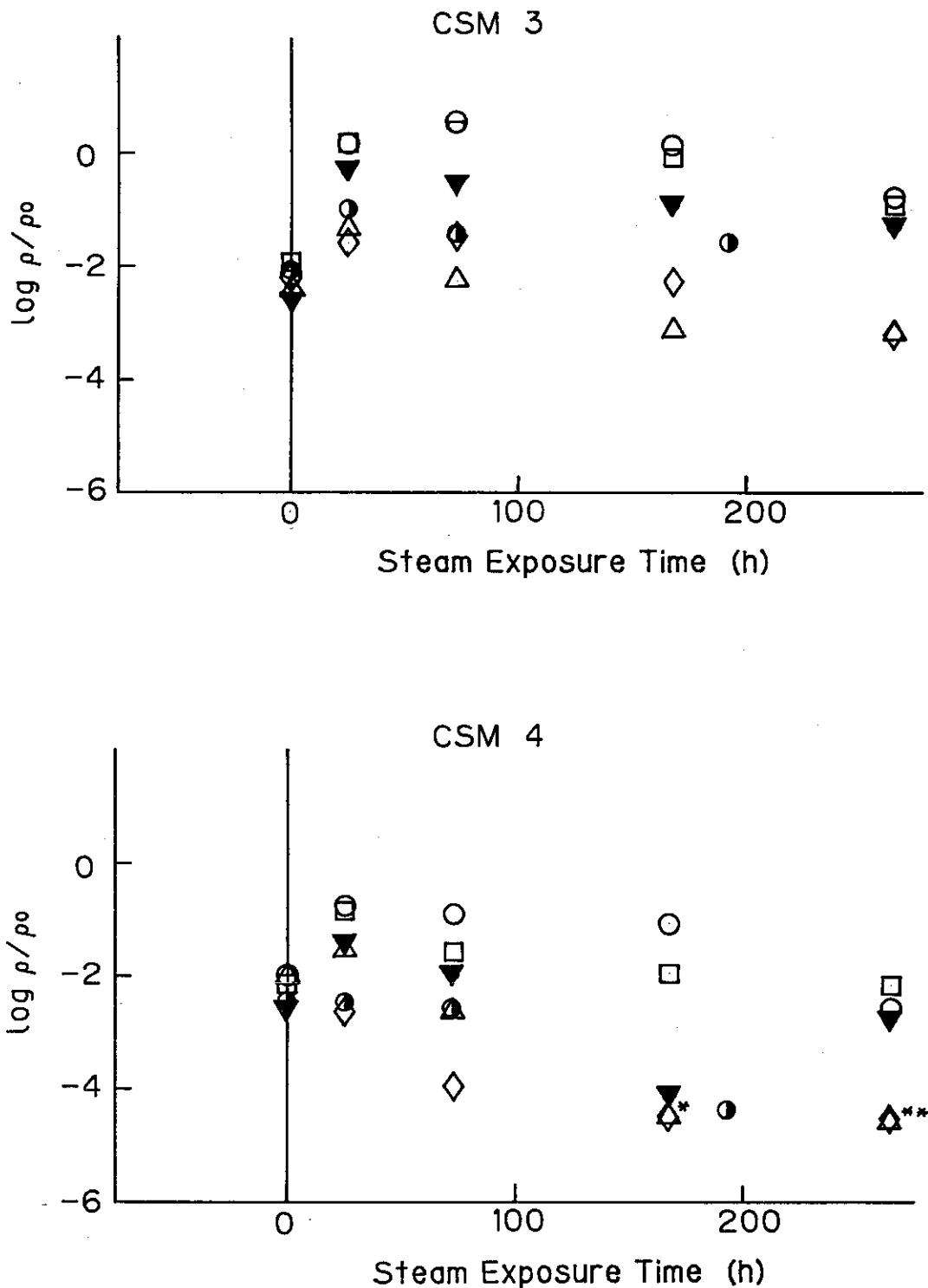


Fig.150 Effect of pre-irradiation conditions on volume resistivity of CSM 3 and CSM 4 exposed to steam/spray environments including air.

Symbols are the same as in Fig.138

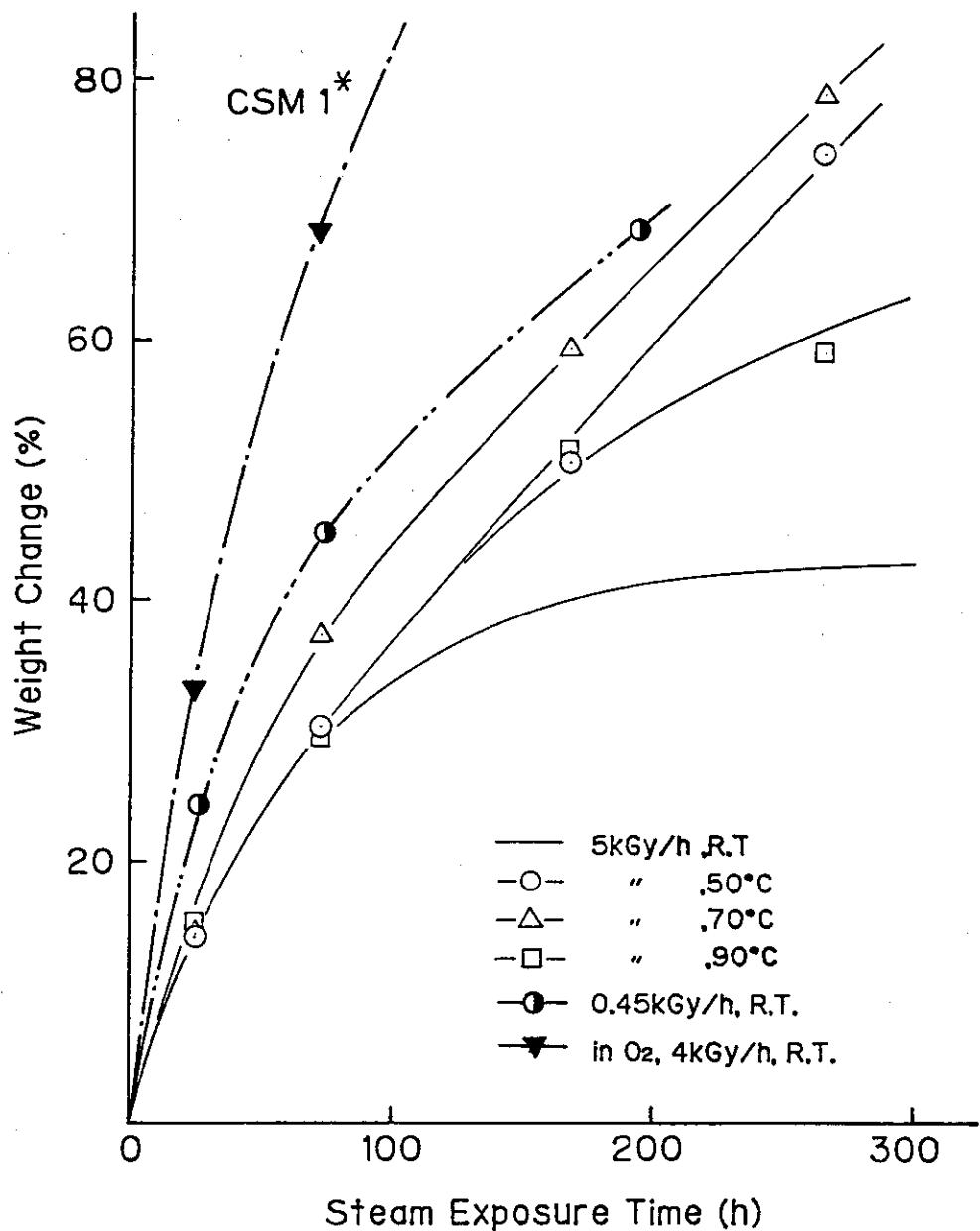


Fig.151 Effect of pre-irradiation conditions on water sorption of CSM 1* exposed to steam/spray environments including air.

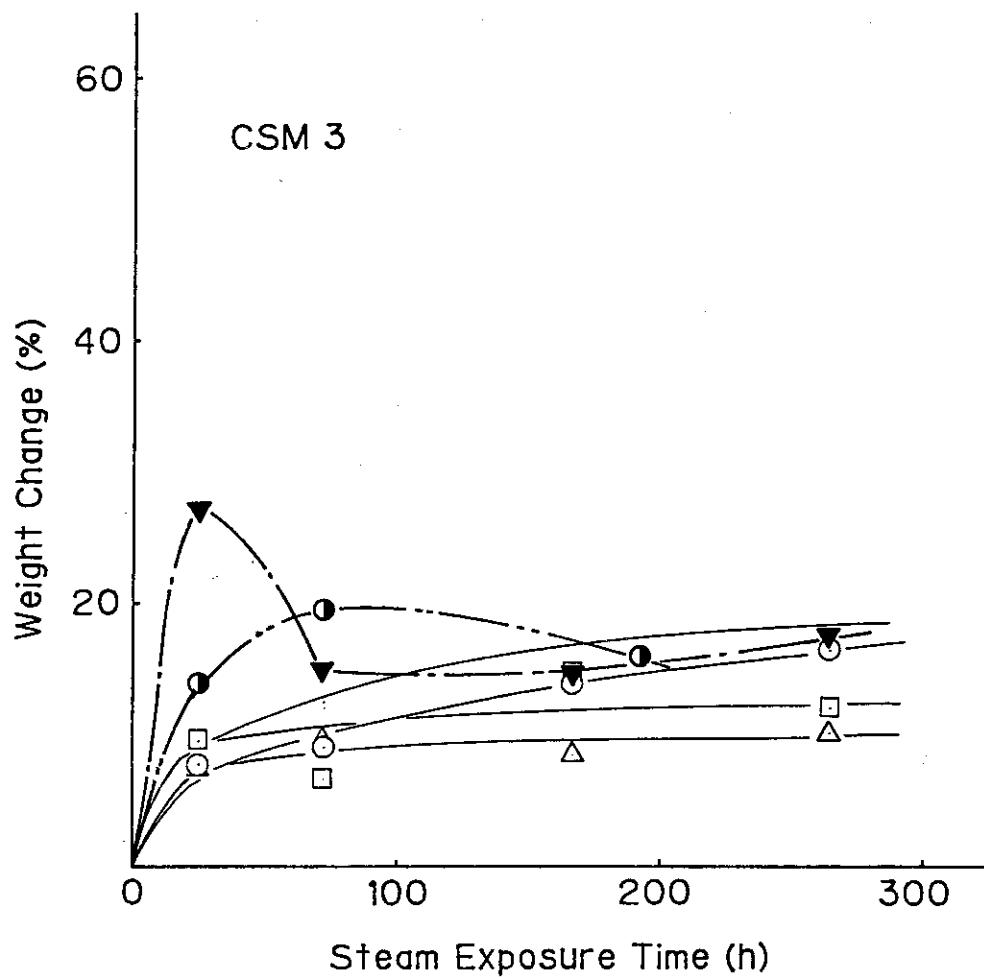


Fig.152 Effect of pre-irradiation conditions on water sorption of CSM 3 exposed to steam/spray environments including air.

Symbols are the same as in Fig. 151

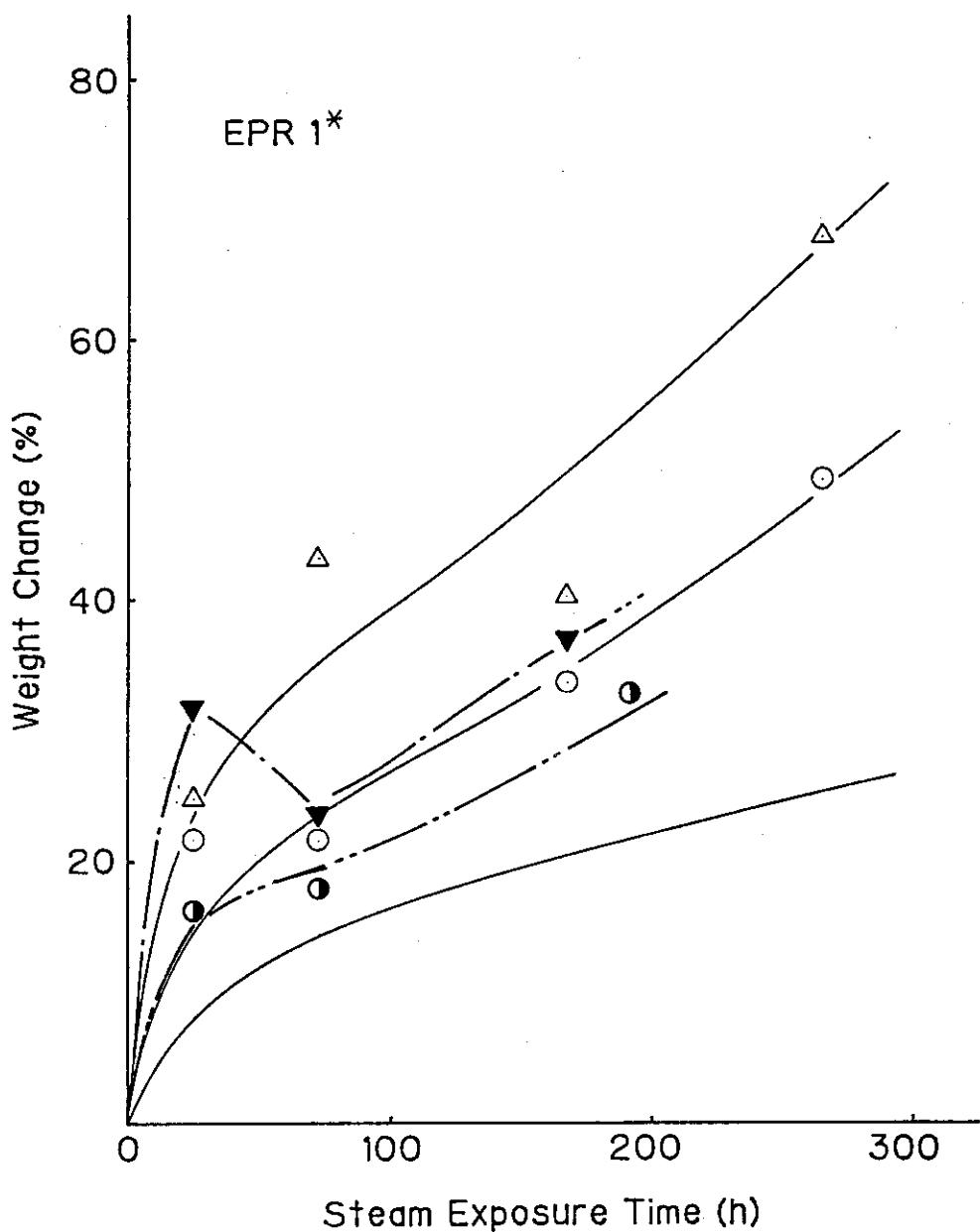


Fig. 153 Effect of pre-irradiation conditions on water sorption of EPR 1* exposed to steam/spray environments including air.

Symbols are the same as in Fig.151

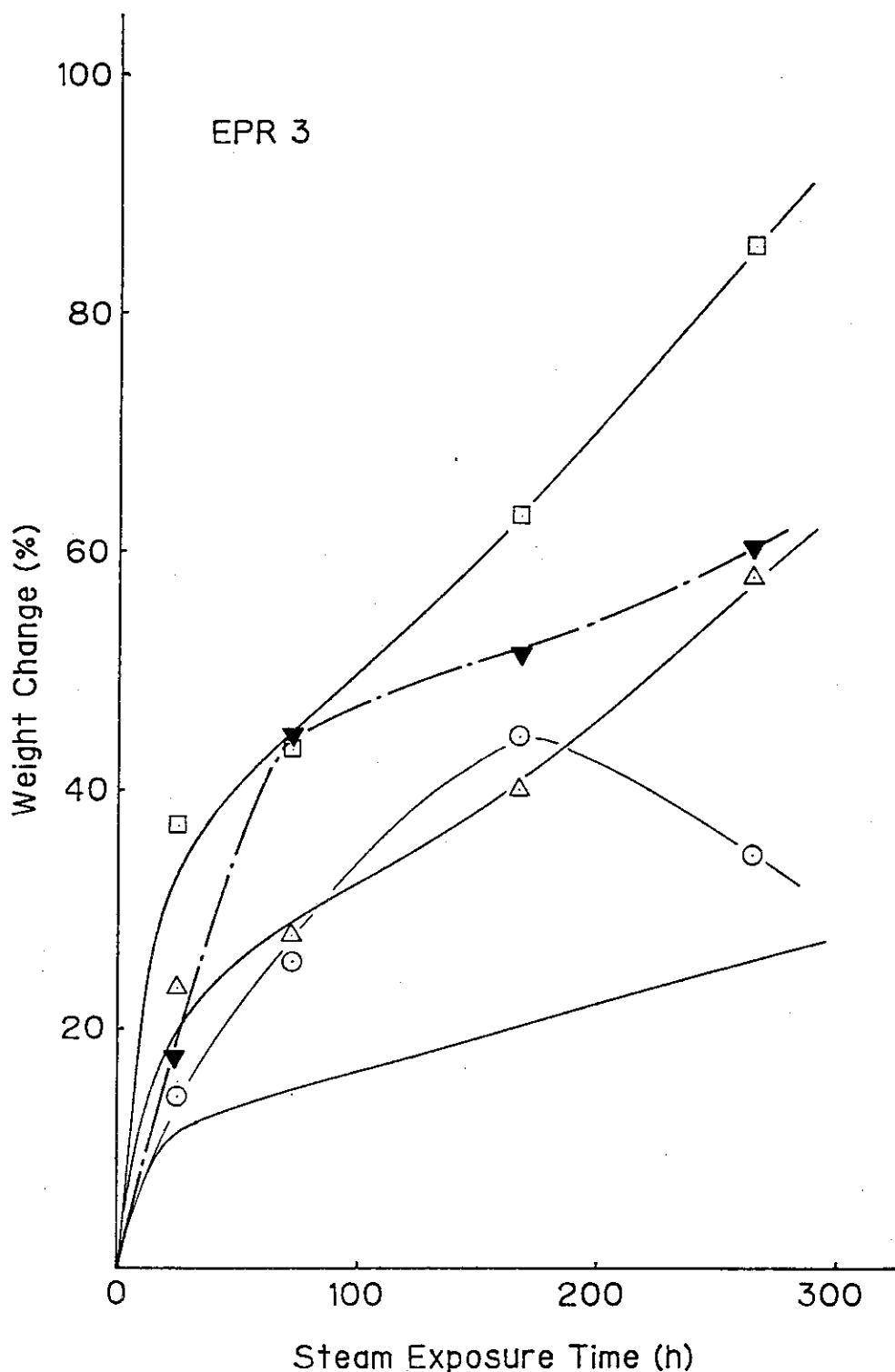


Fig.154 Effect of pre-irradiation conditions on water sorption of EPR 3 exposed to steam/spray environments including air.

Symbols are the same as in Fig.151

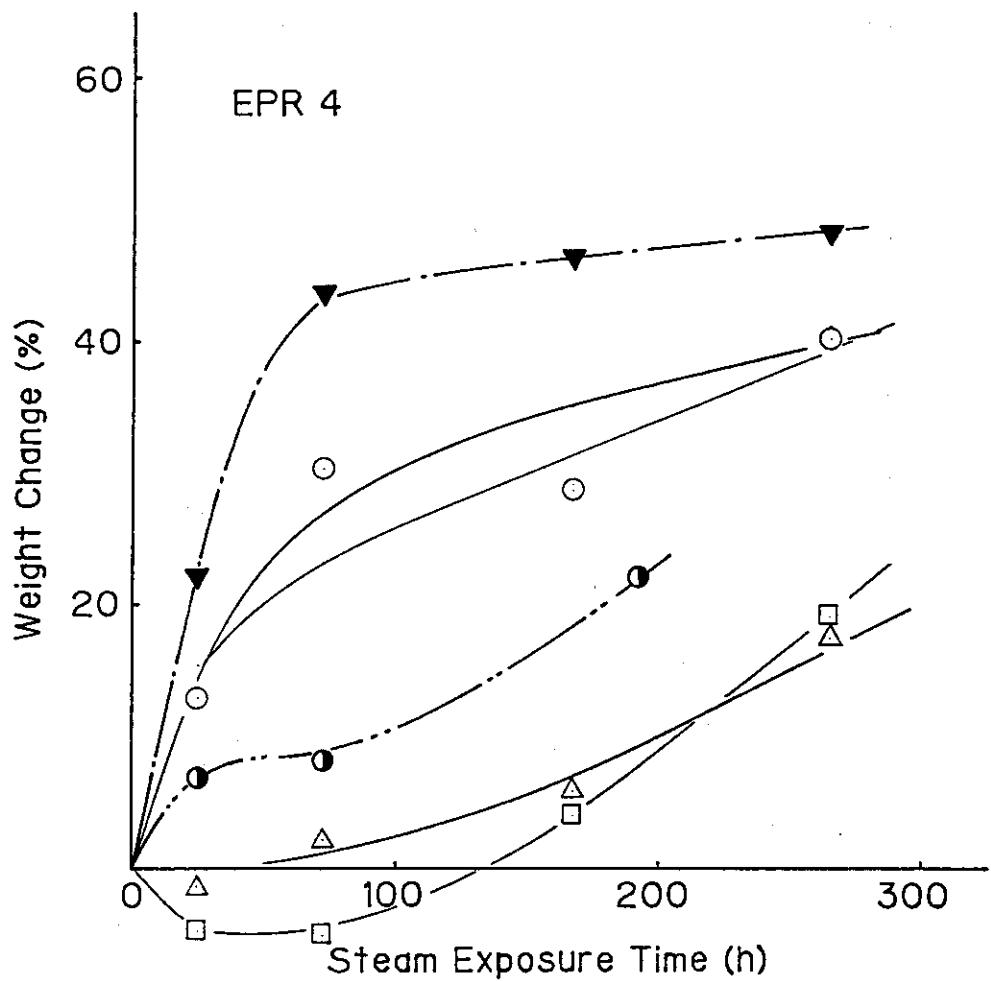


Fig.155 Effect of pre-irradiation conditions on water sorption of EPR 4 exposed to steam/spray environments including air.

Symbols are the same as in Fig.151

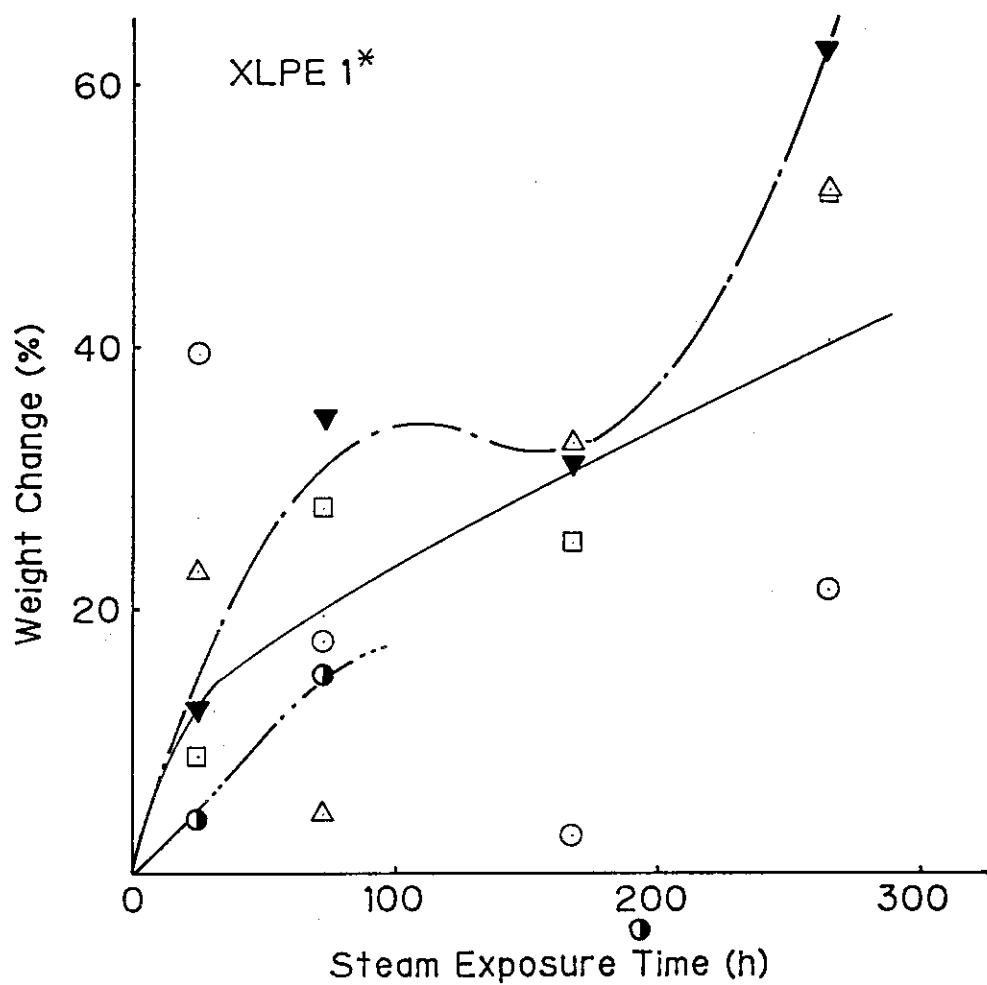


Fig.156 Effect of pre-irradiation conditions on water sorption of XLPE 1* exposed to steam/spray environments including air.

Symbols are the same as in Fig.151

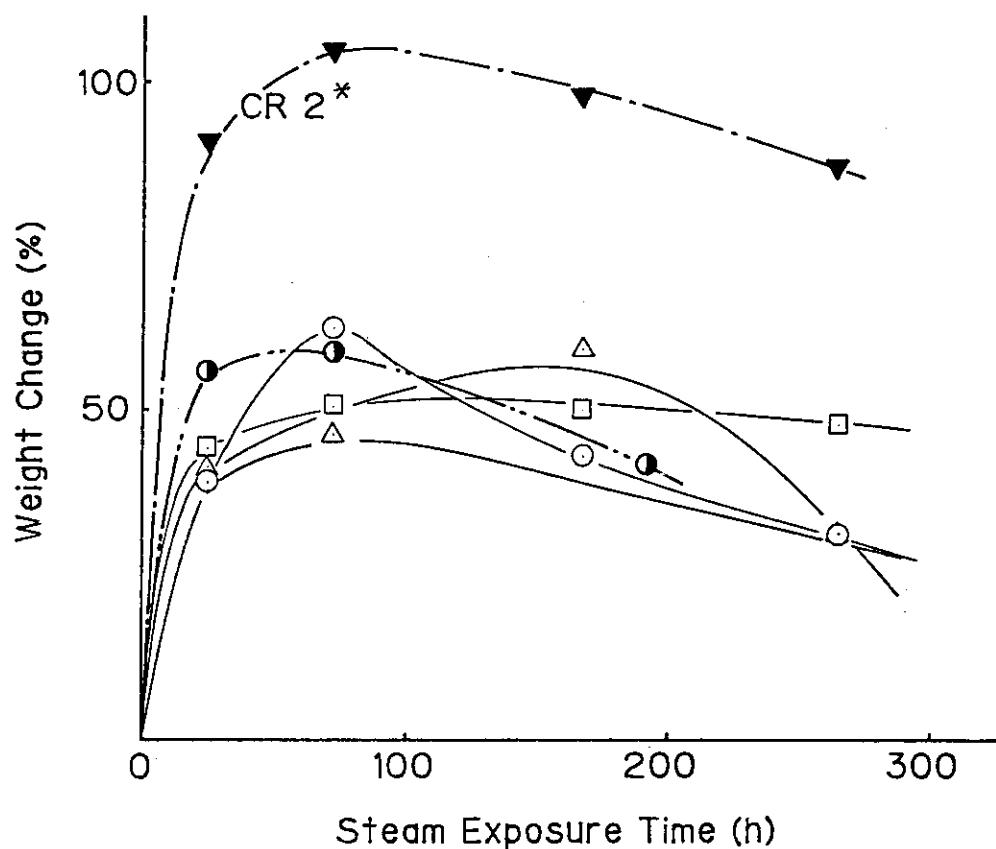


Fig.157 Effect of pre-irradiation conditions on water sorption of CR 2* exposed to steam/spray environments including air.

Symbols are the same as in Fig.151

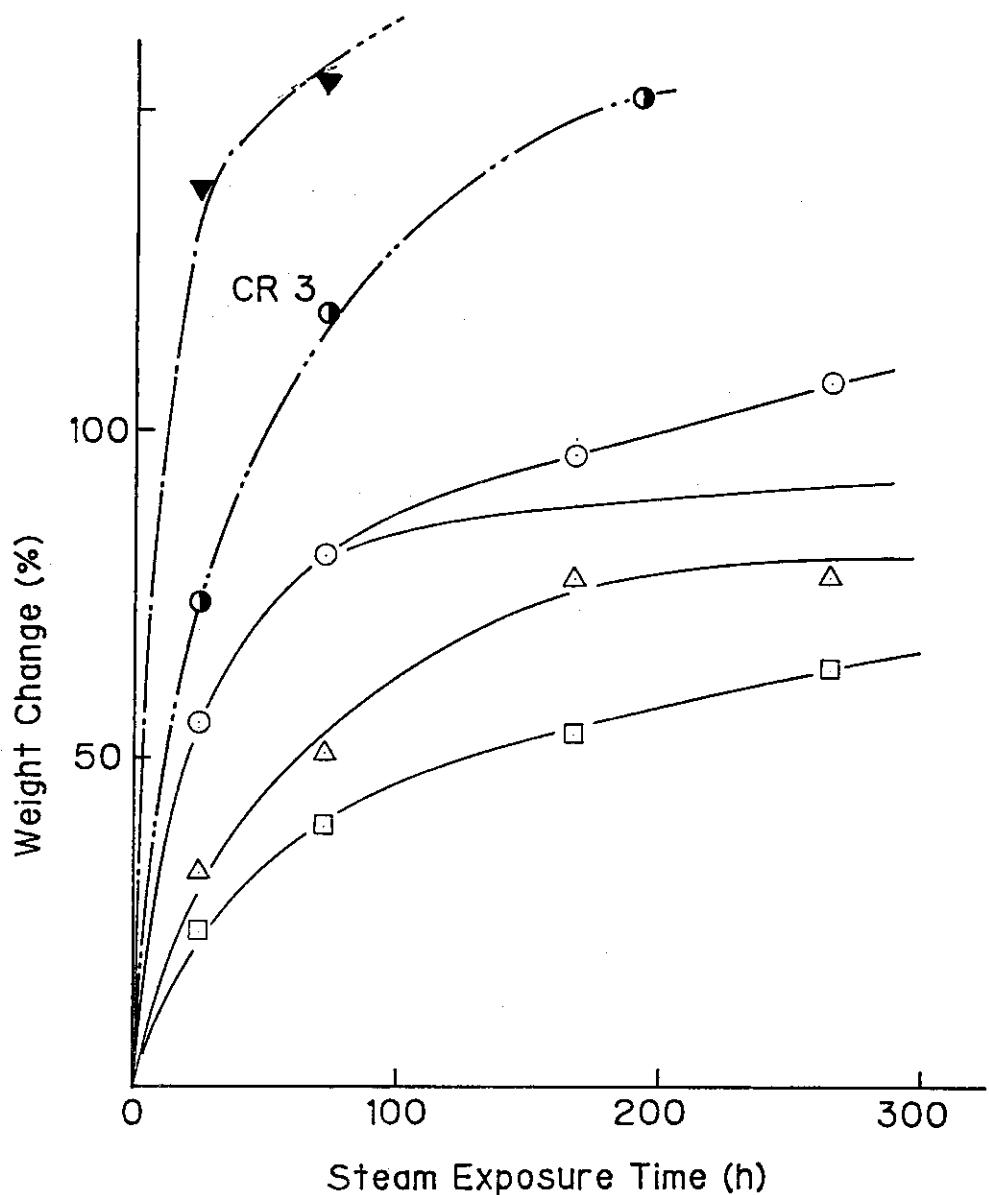


Fig.158 Effect of pre-irradiation conditions on water sorption of CR 3 exposed to steam/spray environments including air.

Symbols are the same as in Fig.151

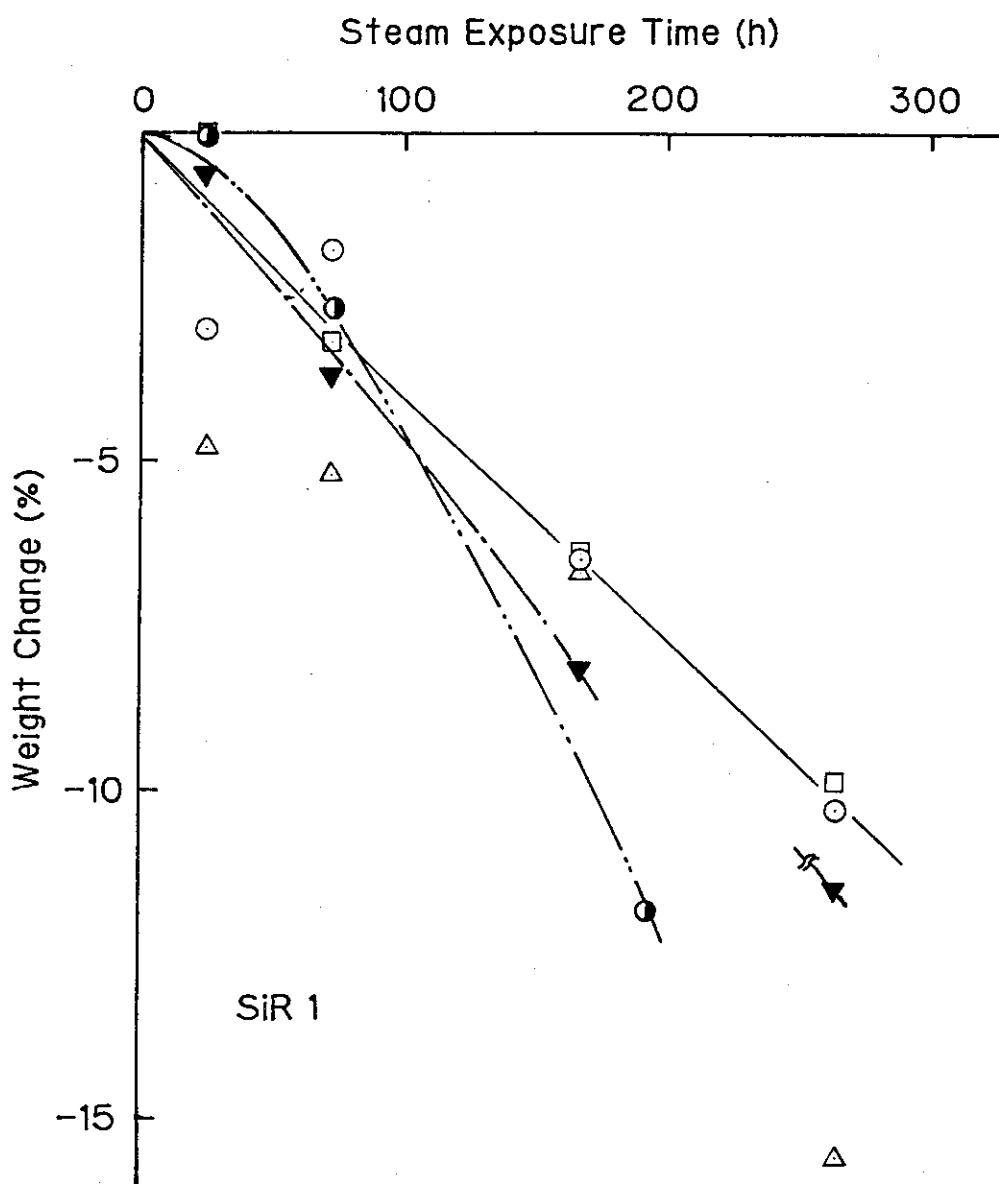


Fig.159 Effect of pre-irradiation conditions on water sorption of SIR 1 Exposed to steam/spray environments including air.

Symbols are the same as in Fig.151

4.2.3 蒸気環境温度の影響

L O C A 模擬環境試験の試験期間を短縮するため、同時法において劣化に影響を与える種々の因子のうち環境温度の影響について検討した結果、ハイパロン、クロロブレン等の材料は温度依存性が大きいことが分かった。ここでは逐次法における蒸気暴露の環境温度を変えて劣化速度に与える影響を調べた。

(1) 実験方法

高線量率(10KG/h)下、室温、空気中で1.5MGy前照射した試料を空気を含まない場合と空気を含む場合のそれぞれについて蒸気暴露時の温度を120°C、140°Cおよび160°Cと変化させた環境に暴露し、劣化の経時変化を調べた。

(2) 結果と考察

逐次法 L O C A 模擬環境下（飽和水蒸気環境中および空気を含む水蒸気環境中）における各ゴム材料（照射試料および未照射試料）の劣化挙動（機械的性質、電気的性質および吸水率）によよぼす環境温度の影響について、絶縁、被覆材料 1 3 種類の中から各素材毎に代表的な結果を示す。

1) 機械的性質

照射試料

Fig.160～168 に機械的性質の強度と伸びの保持率の例を示す。図の左側は蒸気暴露環境に空気を含まない場合、右側は各温度での飽和水蒸気に0.05MPaの空気を添加した場合を示す。また各図中の印はそれぞれ120°C (○, ●), 140°C (△, ▲), 160°C (□, ■) の場合を示す。

Fig.160,161にハイパロンの結果を示す。ハイパロンの場合は空気を含まない環境では比較的似た劣化挙動を示し、蒸気暴露によって強度、伸びのいずれも低下する。また環境温度が高い程劣化が大きくなる傾向を示す。劣化挙動は比較的単純で、蒸気暴露の初期に劣化がやや大きい下に凸の曲線を示す。一方、蒸気暴露時に空気が存在していると試料によって劣化挙動が若干異なる。モデル配合の試料(Fig.160)では、強度、伸びのいずれにも温度の影響が現われ、温度が高くなると著しく劣化する。一方、実用配合の試料(Fig.161)では、温度の影響は伸びに強く現われ、伸びを著しく低下させる。

Fig.162,163 に E P R の結果を示す。環境に空気が存在していない場合には、強度も伸びも温度の影響は小さく、また暴露期間の影響もほとんど受けないなど、蒸気暴露に対しては比較的安定な挙動を示す。

蒸気暴露環境に空気が存在すると、温度の影響は強度に現われるようになり、環境温度が高くなると暴露時間の長い領域で強度の低下が大きくなる。しかしな

がら、伸びは環境温度を120°C～160°Cの範囲で変えてもほとんど一定の値を保持する。EPRの場合はモデル配合、実用配合に係わらず環境に空気が存在する場合においても環境温度の影響は比較的小さい。これは前照射が高線量率、室温、空气中照射のため、試料の酸化が十分でないこととEPRが熱に対し比較的安定な材料であるためと思われる。

Fig.164に架橋ポリエチレンの結果を示す。架橋ポリエチレンは環境に空気が存在しない場合、強度は蒸気暴露の影響を殆ど受けず、伸びはむしろ回復する現象を示し、これら回復現象は環境温度が高いほど大きくなるなど他のポリマーと異なる劣化挙動を示す。

一方、蒸気暴露環境に空気が存在する場合、強度は暴露時間と共に低下し、環境温度が高い程低下の割合は大きくなる。伸びは蒸気暴露によって一旦回復した後、再び低下し、強度と同様に温度が高いほど低下が大きい。この様に架橋ポリエチレンは空気を含む蒸気環境に曝されると熱による酸化劣化が起こることを示している。蒸気暴露の初期に見られる伸びの回復は、放射線照射により生じた切断箇所が熱により再結合するなどアーニール効果によると考えられる。

Fig.165,166にクロロブレンの結果を示す。実用配合の試料(Fig.6)では空気の無い場合、逆の温度効果を示す。即ち、環境温度が高い方が強度の保持率が高く、また蒸気暴露の初期に低下した後はほぼ一定値を示す。これに対し空気が存在すると、強度の方はほとんど環境温度に影響を受けない。伸びは各温度とも蒸気環境に暴露すると著しく低下し、値そのものが数%程度に小さくなるため比較出来ない。

モデル配合試料(Fig.166)は環境に空気が存在してもしなくても、蒸気暴露の初期に強度と伸びが著しく低下するが、その後はほぼ一定値を示し、はっきりした温度の影響が見られない。クロロブレンの場合、LOCA模擬照射(1.5MGy)条件がこの材料にとっては厳しすぎるため、照射の段階で劣化が限界に達してしまったためと考えられる。

Fig.167,168にシリコーンゴムの結果を示す。シリコーンゴムの場合は蒸気暴露時の空気の有無に関係なく強度、伸びとも明らかな温度依存性を示し、伸びより強度にその影響が強く見られる。シリコーンゴムはケミカルスプレイ等高温のアルカリ水溶液中では加水分解を起こし著しく試料が溶失する事が知られているため、これら機械的性質の低下の原因は表面からの加水分解による試料の溶失の影響と思われる。

未照射試料

未照射試料を空気が存在する場合としない場合において環境温度を変えて暴露したときの強度および伸びの残率の変化をFig.169～176に示す。図中、実線は空

気なし140°C, 破線は空気有り140°C, 一点鎖線は空気なし160°C, 二点鎖線は空気有り160°Cの場合をそれぞれ示す。

Fig.169,170にハイパロンの結果を示す。モデル配合(Fig.169)の場合は環境温度の影響も空気の有無の影響も見られ、環境温度が高いほど、また、空気が存在すると劣化が大きく強度および伸びが低下する。実用配合の場合も環境温度および空気の有無の影響が表れ、空気が存在しない場合の影響は大きくないが、環境に空気が存在する場合はその影響が大きく、特に160°Cでは著しく劣化する。

Fig.171,172にEPRの結果を示す。EPRは温度に対して比較的安定な材料である。未照射試料を蒸気暴露した場合、環境の空気の有無に関係なく、強度および伸びの低下は小さい。しかし、モデル配合試料で環境温度が160°Cの様に高い場合は蒸気環境暴露の最終段階では測定が出来ない程劣化する。

Fig.173に架橋ポリエチレンの結果を示す。架橋ポリエチレンの場合は環境の空気の影響が極めて大きく、また、環境に空気が存在すると機械的性質におよぼす温度の効果が著しい。環境に空気が存在しない場合、160°Cにおいても強度、伸びの低下がほとんどないのに対し、空気が存在すると強度、伸びのいずれも低下し、特に伸びは著しく低下する。

Fig.174,175にクロロブレンの結果を示す。クロロブレンは他の材料より環境温度および空気の有無の影響を大きく受け、強度、伸びが大きく低下する。

Fig.176にシリコーンゴムの結果を示す。シリコーンゴムはいずれの試料も空気の有無の影響は殆ど見られない。環境温度の影響は140°Cの場合は強度、伸びともあまり変化しないが、160°Cの場合は強度も伸びも暴露時間に対してほぼ直線的に低下する。

2) 電気的性質

照射試料

LOCA模擬逐次法における蒸気環境温度が絶縁材料の絶縁劣化に及ぼす影響を調べるため、環境に空気を含む場合と含まない場合について、環境温度を120°C, 140°C, 160°Cと変化させ、試料の体積固有抵抗を測定した。代表的な結果をFig.177~184に示す。

Fig.177,178にEPRの結果を示す。図中左側は蒸気環境に空気を含まない場合、右側は空気を含む場合を示す。モデル配合の場合(Fig.177)、空気を含まない環境下では環境温度が120°C~160°Cの範囲で変化しても絶縁抵抗の低下はほとんどなく明らかな温度依存性は見られない。蒸気環境に空気を含む場合は環境温度が160°Cと高い領域のみ絶縁抵抗の低下が見られ温度の影響が現れる。実用配合の場合(Fig.178)は蒸気環境の空気の有無に関係なく各環境温度とも温度依存性がみられ暴露温度および期間に依存して絶縁抵抗が低下する。特に環境温度が160°Cの

場合は温度の影響が著しい。

Fig.179 に架橋ポリエチレンの結果を示す。架橋ポリエチレンの場合、温度の影響は蒸気環境の雰囲気により著しく異なり、空気なしの環境では蒸気温度160°Cの長時間暴露(200時間以上)以外は絶縁抵抗の低下はあまり見られない。しかし、蒸気環境に空気を含む場合は120°Cの環境温度においても顕著な温度の影響が現れ、暴露期間の短い領域から大きな絶縁低下が起こる。

Fig.180 にシリコーンゴムの結果を示す。シリコーンゴムの場合は蒸気環境の空気の有無に関係なく160°C以下の温度領域では温度依存性がない。しかし、環境温度が高い領域(160°C)で長時間暴露(150時間以上)を行うと試料の溶失が著しく測定が出来なくなる。

未照射試料

未照射試料を120°C～160°Cの環境温度で暴露したときの暴露期間に対する絶縁抵抗の変化をそれぞれの試料について示す。

Fig.181,182 にEPRの結果を示す。EPR 1の場合、空気なしの環境では温度依存性は見られない。空気を含む環境では160°Cで100時間以上暴露すると試料が軟化し測定出来なくなるが、それ以外は温度の影響が小さい。EPR 3の場合には蒸気環境の空気の有無に関係なく環境温度が高い領域でのみ温度の影響が現れ絶縁抵抗が低下する。

Fig.183 に架橋ポリエチレンの結果を示す。架橋ポリエチレンの場合、空気のない環境では暴露時間が200時間以上に長くなると温度の影響が出てくる。一方、蒸気環境に空気が存在する場合は温度の影響が著しく現れる。このように空気は絶縁抵抗を低下させる方向に作用する。

Fig.184 にシリコーンゴムの結果を示す。シリコーンゴムの場合は環境の空気の有無に関係なく似た挙動を示し、かつ、温度の影響は小さい。

3) 吸水膨潤

LOCA模擬照射(室温空气中1.5MGy)および事前劣化後LOCA模擬照射を行った試料の蒸気暴露時間に対する重量変化をFig.185～192にそれぞれの試料について示す。左側の図は環境に空気が存在していない場合、右側の図は空気存在下での結果を示す。また、○、●；△、▲；□、■はそれぞれ120°C、140°C、160°Cの場合を示す。ここに示した値は全てLOCA模擬環境に曝したあと1日経過後の値である。

Fig.185,186 にハイパロンの結果を示す。モデル配合の試料(Fig.185)では比較的似た膨潤挙動を示し、20°Cでは空気の有無に関係なく暴露時間が約100時間以後は一定の値を示す。一方、140°Cでは一旦頭打ちになった後再び重量が増加する。

さらに温度が160°Cになると蒸気暴露によって急激な重量増加がみられ、さらに時間が経つと逆に重量が減少するピーク現象を示す。この重量減少は表面の劣化が進み試料の表面部分が溶出するためで、環境に空気が存在する方が重量減少が早く始まる。実用配合の試料(Fig.186)は蒸気暴露環境への空気の有無により重量の増加傾向が若干異なり、温度が高くなると、一定時間後には重量減少を示す。120°Cでは空気の影響は小さいが、環境温度が高くなるにつれ差が大きくなる。

Fig.187,188 にEPRの結果を示す。モデル配合のEPR(Fig.187)では温度が低い場合は空気存在の有無による影響はほとんど見られないが、環境温度が160°Cになると空気存在下で膨潤が著しくなる。実用配合の試料も温度の影響が見られ環境温度が高くなる程大きくなる。

Fig.189 に架橋ポリエチレンの結果を示す。架橋ポリエチレンの場合は環境の空気の有無の影響を著しく受け、どの環境温度においても環境に空気が存在すると著しい吸水膨潤が起こる。

Fig.190,191 にクロロブレンの結果を示す。クロロブレンの場合、事前劣化の有無や空気存在の有無および環境温度の影響は比較的小さい。吸水挙動も環境条件によらず蒸気暴露の初期に大きな吸水を示すが、その後暴露期間を長くしても吸水量はほとんど一定の値または試料の溶失のため低下してくる。

Fig.192 にシリコーンゴムの結果を示す。シリコーンゴムは事前劣化の影響も空気の有無による影響もほとんど見られず、同じような重量減少挙動を示す。しかし環境温度を高くするほど試料の重量減少は大きくなり、特に160°Cの高温で暴露を行うとアルカリ性スプレイのため加水分解を起こし試料の大半が溶失してしまう。

(3) まとめ

これまでの結果から各材料の機械的性質、電気的性質ならびに吸水膨潤などに対する蒸気暴露環境温度の影響は次のように要約できる。

1) ハイパロンについてはLOCA模擬環境の空気の有無に関係なく照射試料および未照射試料とも環境温度の影響が見られ、強度および伸びとともに高温程劣化が進む。

吸水膨潤に関しては試料の配合の違いにより吸水量は異なる（モデル配合試料が実用配合試料に比べより吸水膨潤する）が、一般に環境温度が高いほど、また、環境に空気が存在すると膨潤速度および膨潤量が大きくなる。特に高温で蒸気暴露が進むと劣化による表面の溶失も起こる。

2) EPRについては飽和水蒸気暴露および未照射試料の場合は機械的性質につ

いては環境温度の影響は殆んど無い。電気的性質は160°Cの環境で長時間暴露したとき低下が大きくなる。照射試料で空気存在下の暴露では伸びは殆ど影響を受けないが強度に影響が現れ高温程低下する。絶縁抵抗も高温程低下が大きい。

吸水膨潤に関しては環境に空気が存在すると高温での膨潤が著しいなど、環境温度の影響が認められる。

3) 架橋ポリエチレンについては環境に空気が無い場合、強度は環境温度の影響をほとんど受けない。伸びは高温ほど回復を示す。絶縁抵抗は高温ほど低下する。一方、環境に空気が存在する場合は高温での強度の保持率が低くなり、一旦蒸気暴露の初期に回復した伸びが暴露時間とともに低下する。絶縁抵抗は蒸気環境暴露のごく初期で著しく低下する。未照射試料は環境に空気が存在する場合、機械的性質および電気的性質ともL O C A模擬照射を行った試料より著しく環境温度の影響を受ける。

吸水膨潤に関しては環境の空気の有無で吸水挙動が異なり、環境に空気が存在すると環境温度の上昇とともに著しく吸水膨潤する。

4) クロロブレンについては未照射試料では大きな温度効果を示し、環境温度が高い程劣化が大きく、かつ環境に空気が存在するとその傾向はさらに大きくなる。一方、照射試料の場合は蒸気環境の空気の有無に関係なく温度効果は小さい。

吸水膨潤に関しては事前劣化や空気の有無の影響が見られるが環境温度の影響は比較的小さい。

5) シリコーンゴムについては照射および未照射試料とも環境温度の影響は140°Cまでは機械的性質、電気的性質ともあまり変わらないが、それ以上高くなると、強度、伸びおよび絶縁抵抗とも低下が大きくなる。

吸水膨潤に関してはシリコーンゴムはL O C A模擬環境に曝すと重量減少を示す。試料の重量減少は環境温度の影響を著しく受け、温度の上昇とともに試料の劣化は大きくなる。

関連文献

1. 日馬康雄、八木敏明、岡田漱平、伊藤政幸、吉川正人、吉田健三、"逐次法L O C A模擬試験における蒸気環境暴露温度が絶縁材料の劣化に与える影響"、電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-84-135-(1984)
2. 日馬康雄、八木敏明、伊藤政幸、岡田漱平、川上和市郎、"L O C A模擬逐次法における前照射条件および蒸気環境条件が絶縁材料の劣化におよぼす影響"、I. 機械的性質 同上 EIM-86-130-(1986)

3. 岡田漱平, 日馬康雄, 八木敏明, 伊藤政幸, 川上和市郎, " L O C A 模擬逐次法における前照射条件および蒸気環境条件が絶縁材料の劣化におよぼす影響" ,
II. 電氣的性質 同上 EIM-86-131-(1986)
4. 岡田漱平, 日馬康雄, 八木敏明, 伊藤政幸, 川上和市郎, 田村直幸, " L O C A 模擬逐次法における前照射条件が絶縁材料の劣化に及ぼす影響" ,
同上 EIM-85-164-(1985)
5. 八木敏明, 日馬康雄, 伊藤政幸, 岡田漱平, 吉川正人, 吉田健三, " 放射線照射したゴム材料の沸騰スプレイ液中における膨潤挙動" ,
JAERI-M 83-072(1983)
6. 八木敏明, 日馬康雄, 伊藤政幸, 岡田漱平, 田村直幸, 川上和市郎, " 放射線照射したシリコーンゴムの薬液中における劣化" ,
同上 EIM-85-161-(1985)

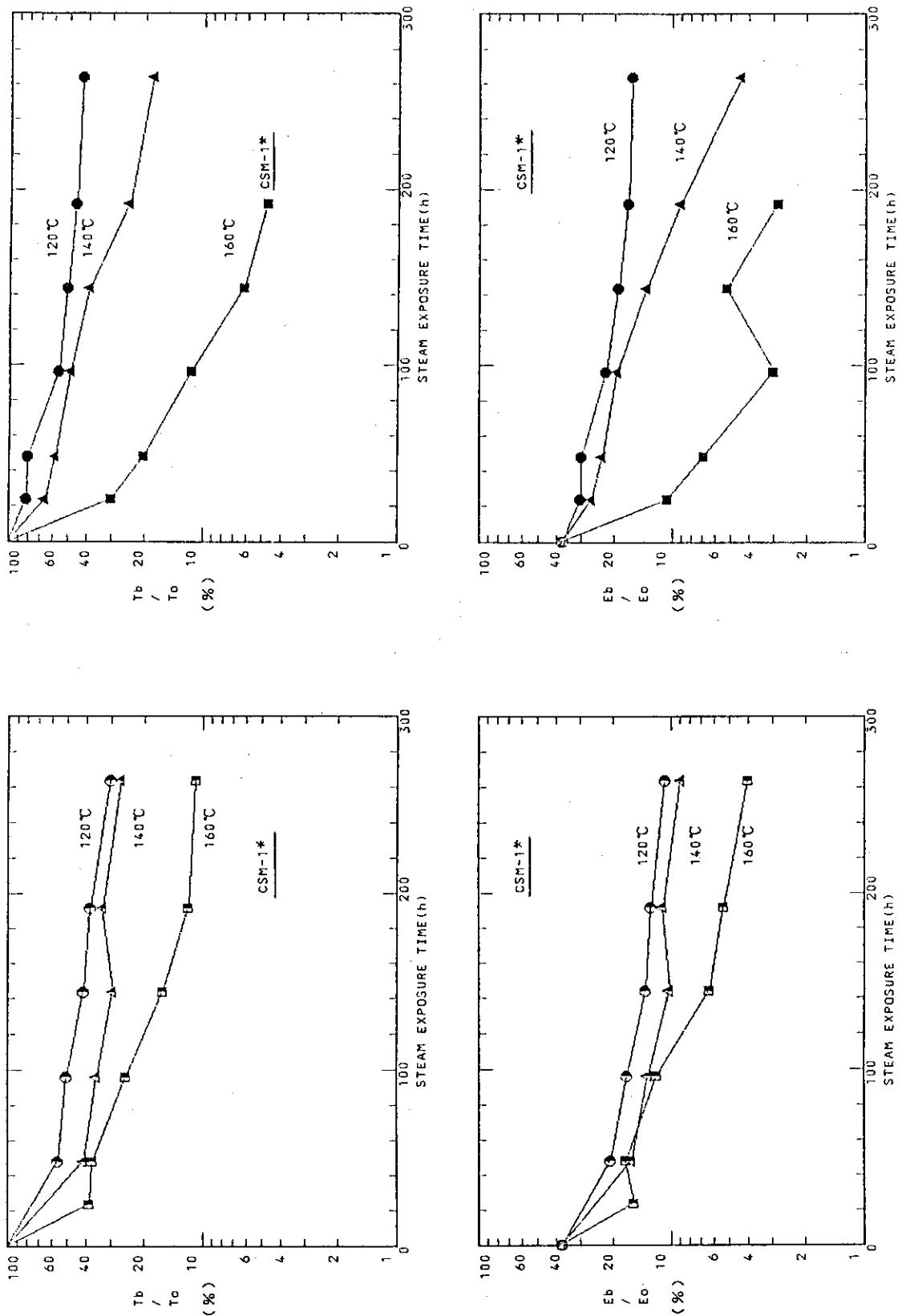


Fig. 160 Effect of steam temperature on mechanical properties of CSM1 (1.5MGy at 10Kgy/h) under simulated LOCA environment. (●, ▲, ■); with air (○, △, □); without air

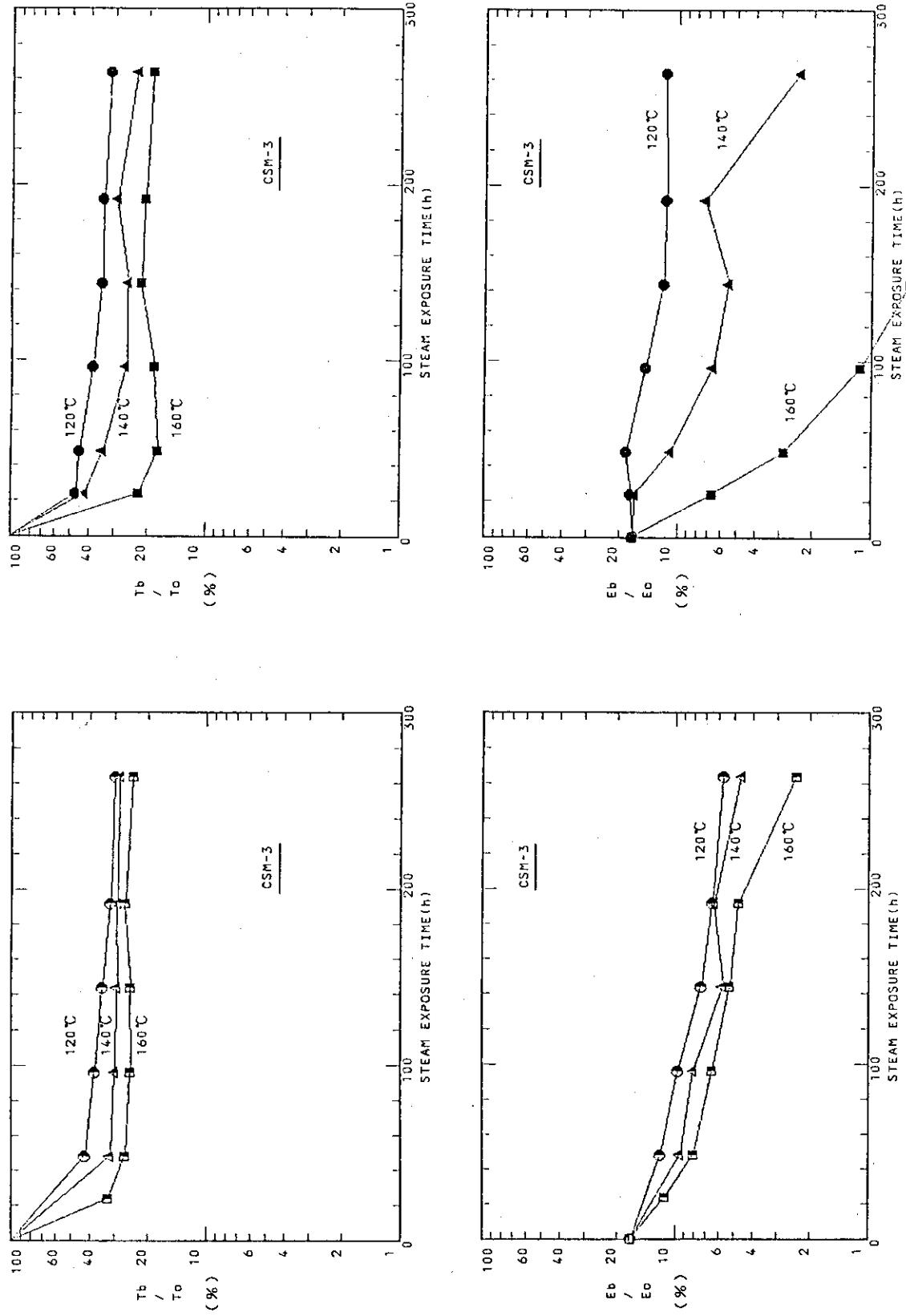


Fig.161 Effect of steam temperature on mechanical properties of CSM3(1.5MGy at 10KGy/h) under simulated LOCA environment.
(Symbols are the same as in Fig.160)

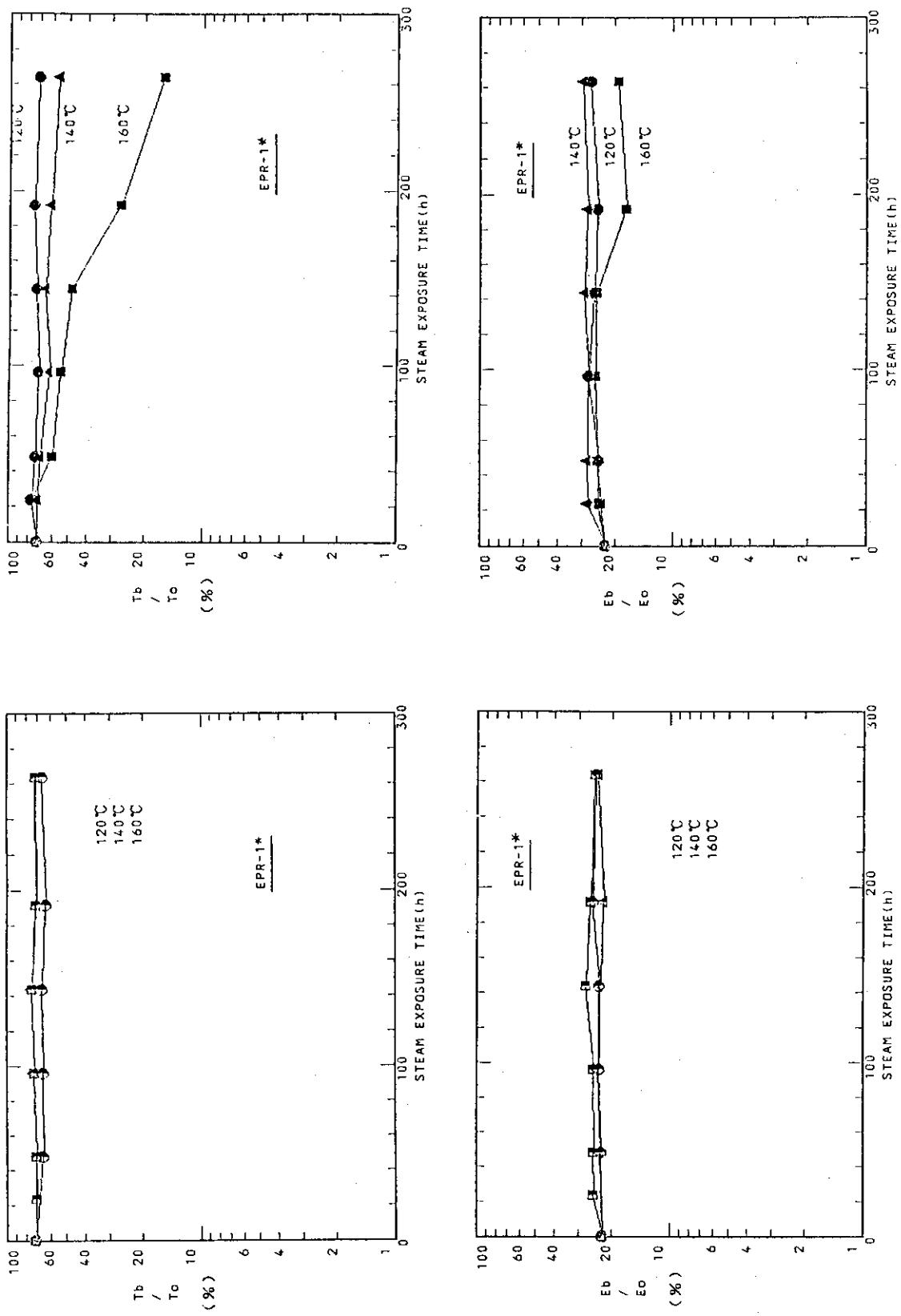


Fig.162 Effect of steam temperature on mechanical properties of EPR1 (1.5MGy at 10Kgy/h) under simulated LOCA environment.
(Symbols are the same as in Fig.160)

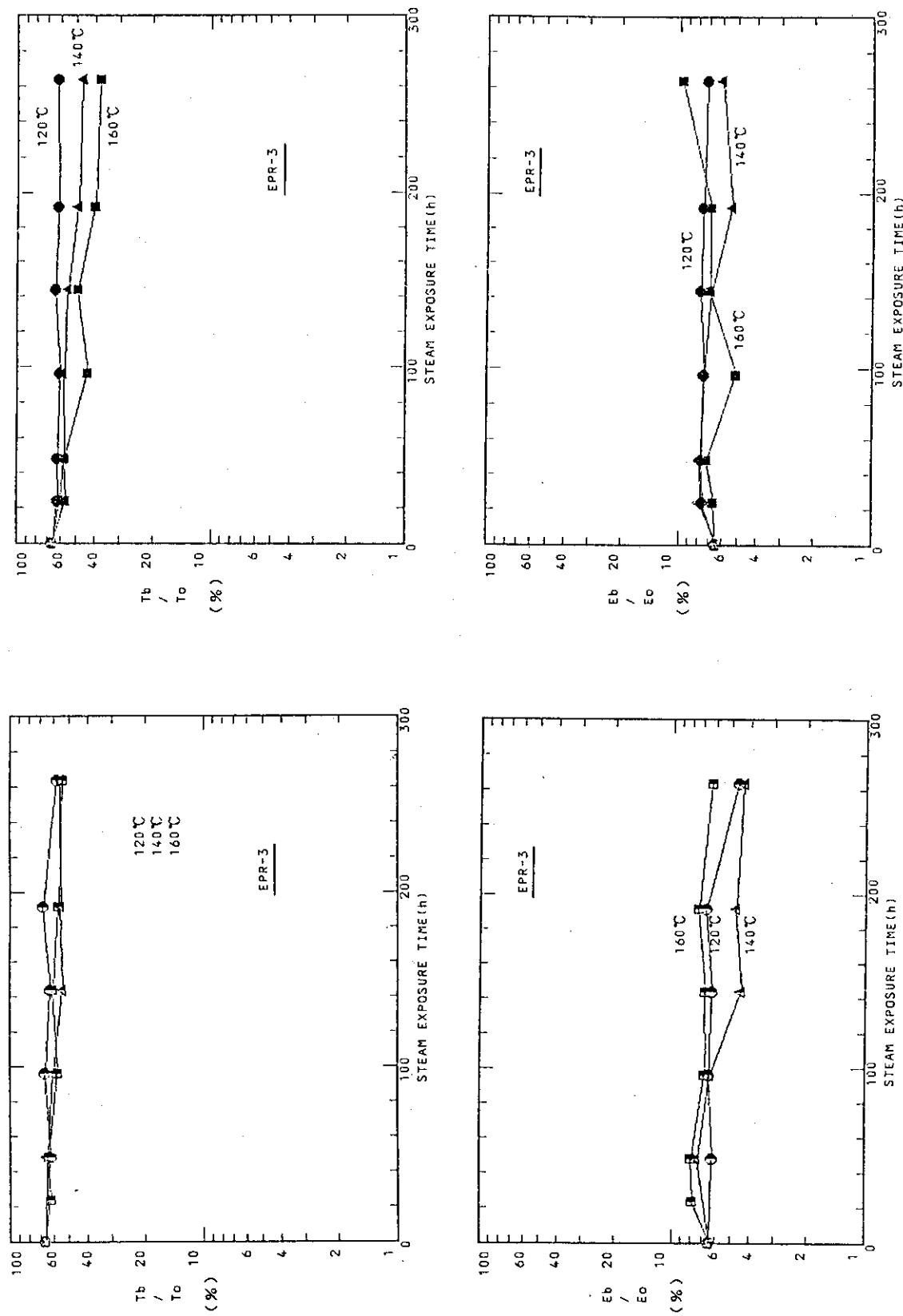


Fig.163 Effect of steam temperature on mechanical properties of EPR3(1.5MGy at 10KGy/h) under simulated LOCA environment.
(Symbols are the same as in Fig.160)

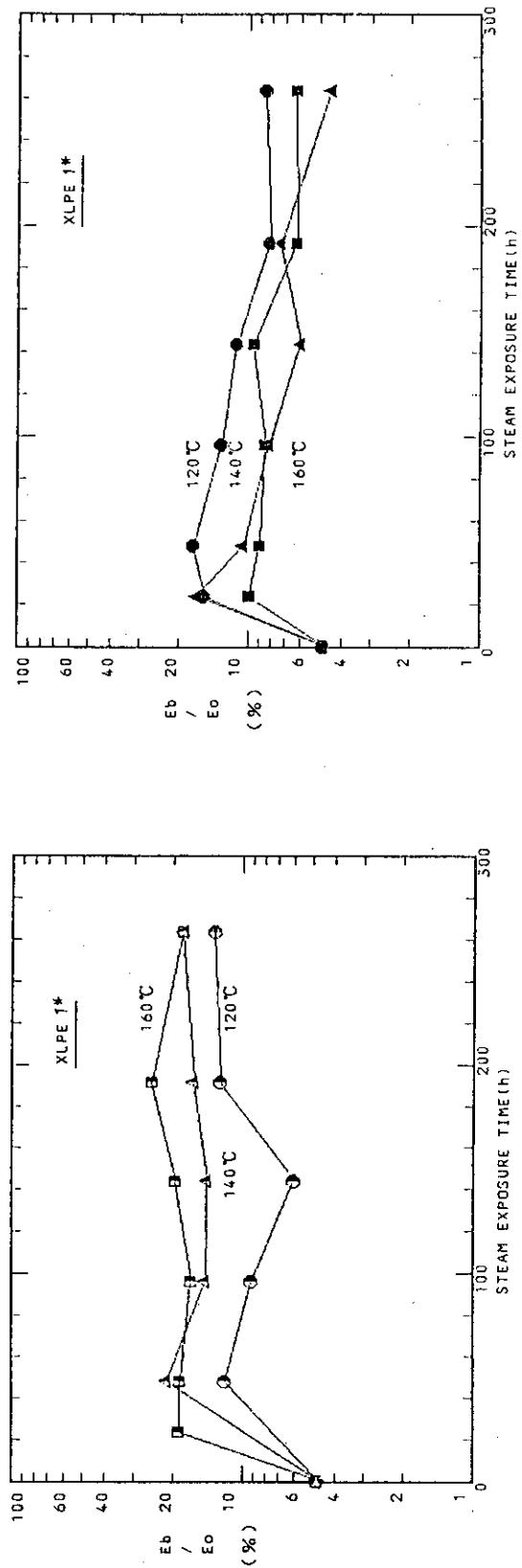
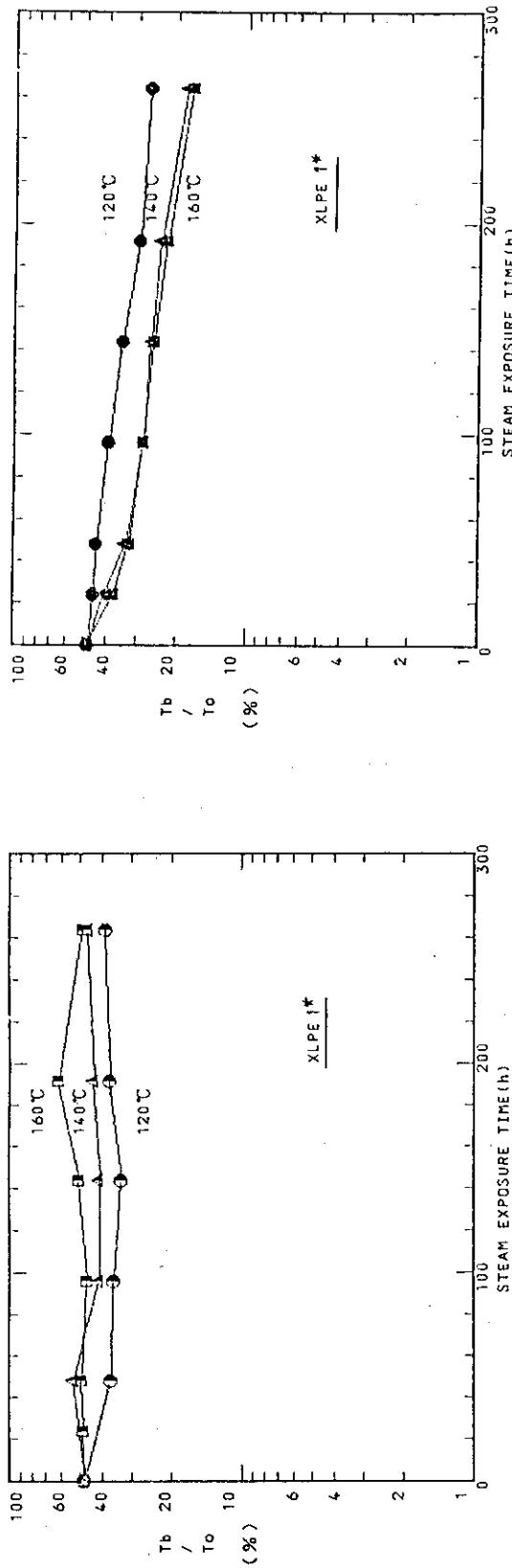


Fig.164 Effect of steam temperature on mechanical properties of XLPE1 (1.5MGy at 10KGy/h) under simulated LOCA environment.
(Symbols are the same as in Fig.160)

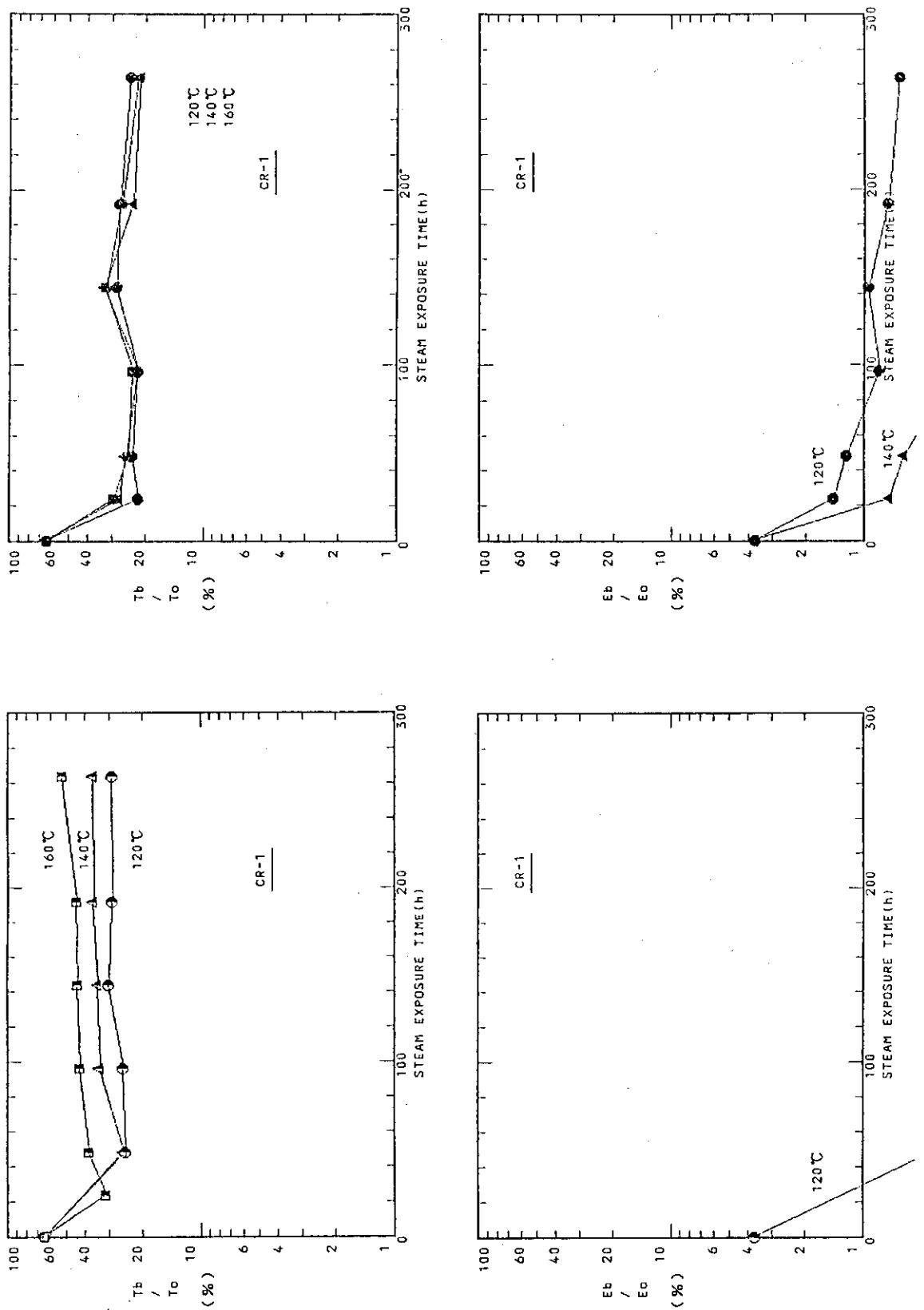


Fig.165 Effect of steam temperature on mechanical properties of CR1(1.5MGy at 10Kgy/h) under simulated LOCA environment.
(Symbols are the same as in Fig.160)

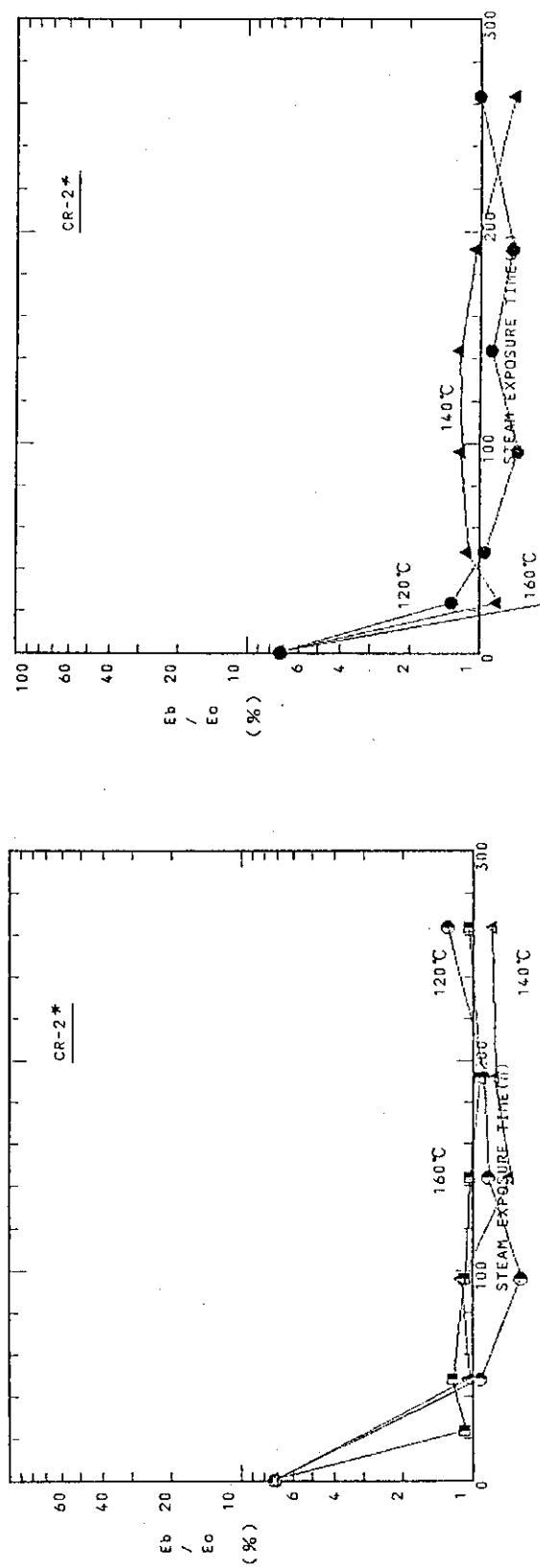
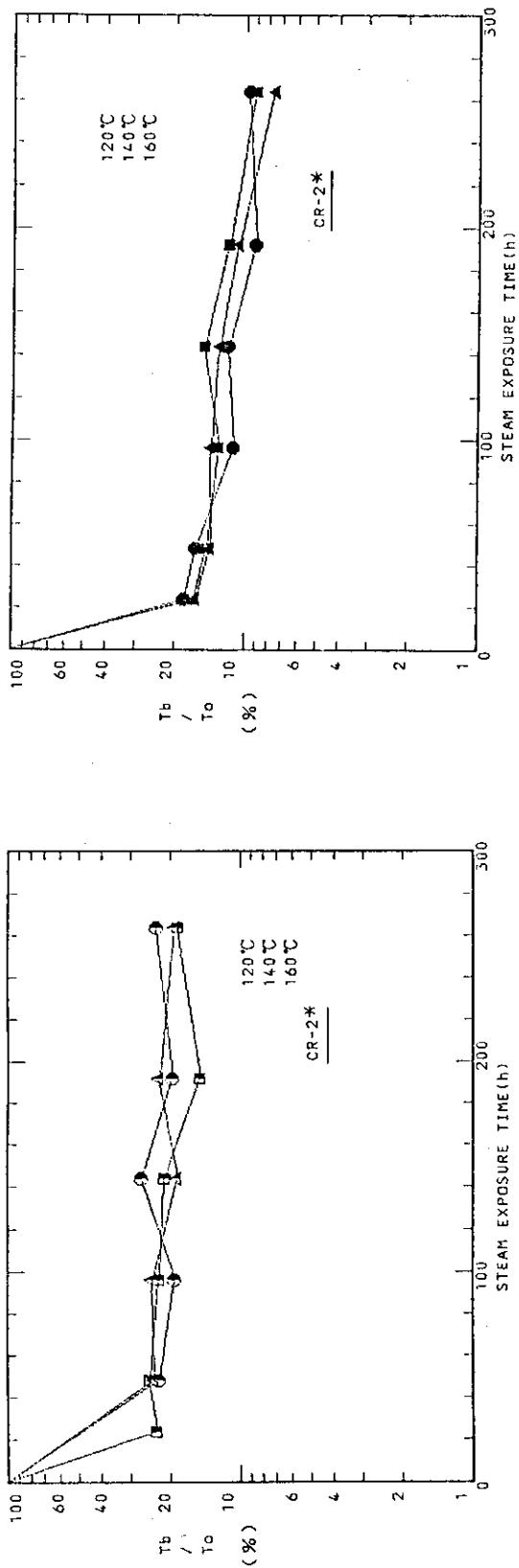


Fig.166 Effect of steam temperature on mechanical properties of CR2 (1.5MGy at 10KGY/h) under simulated LOCA environment.
(Symbols are the same as in Fig.160)

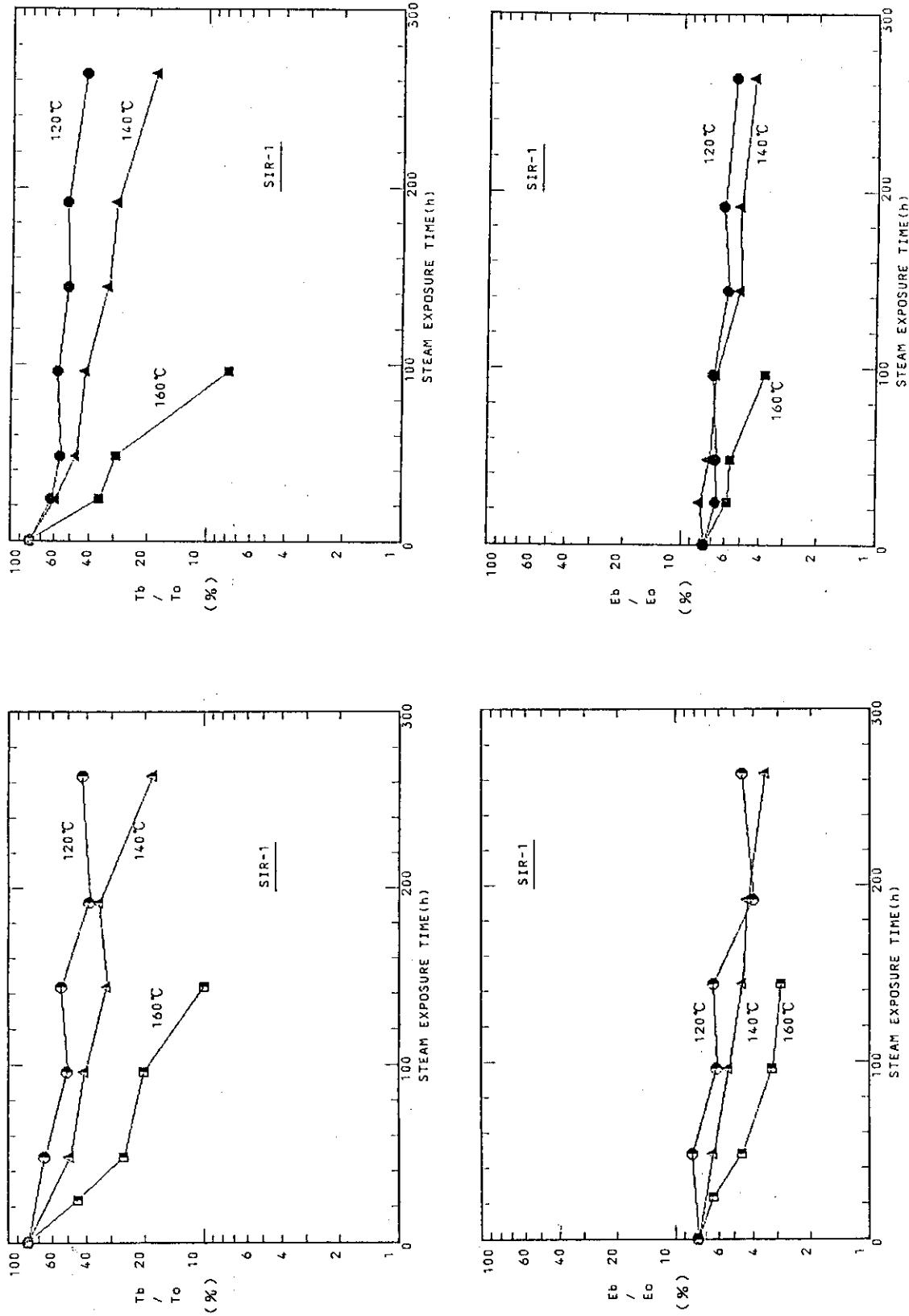


Fig.167 Effect of steam temperature on mechanical properties of SIR1(1.5MGy at 10kGy/h) under simulated LOCA environment.
(Symbols are the same as in Fig.160)

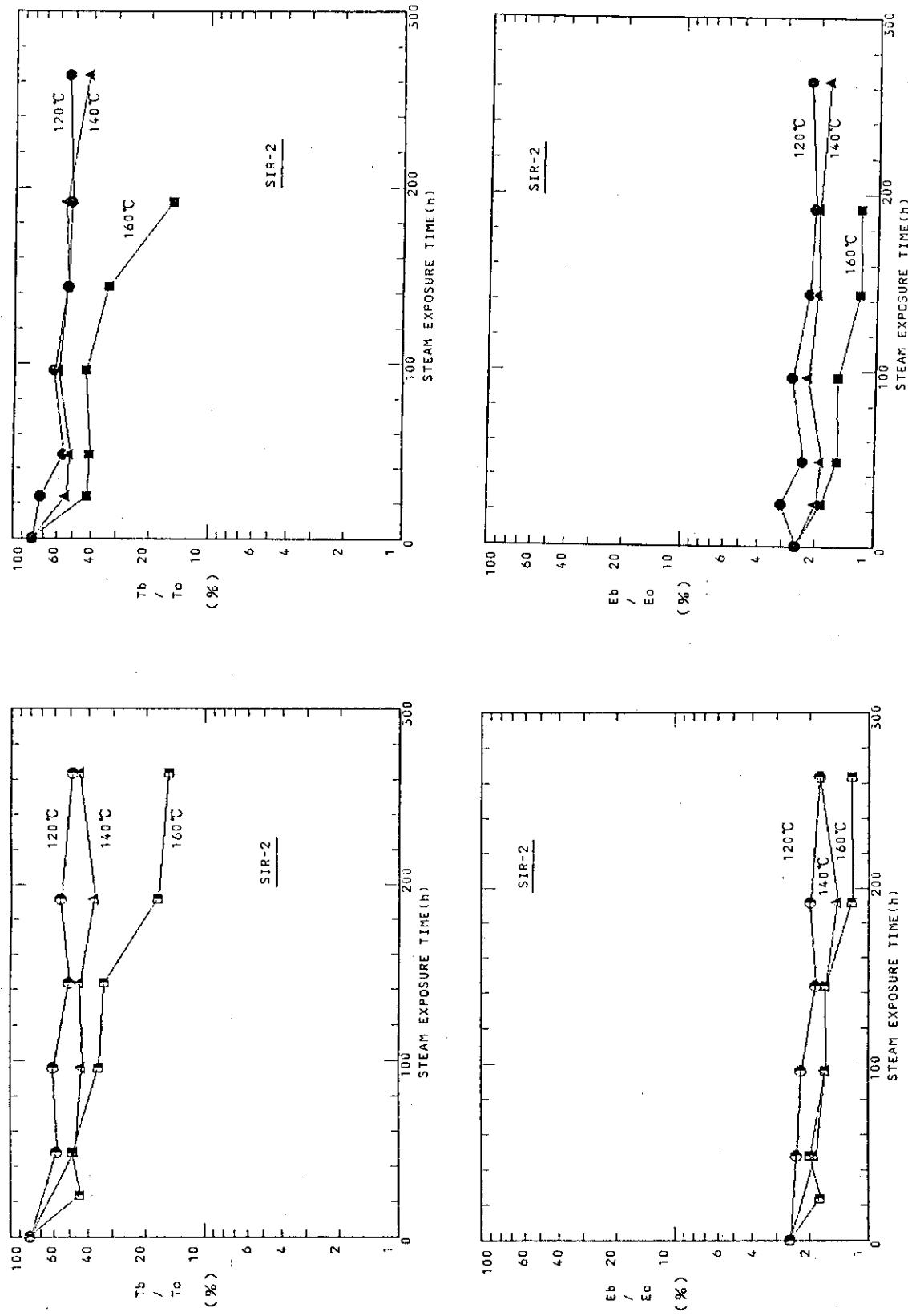


Fig. 168 Effect of steam temperature on mechanical properties of SIR2(1.5MGy at 10KGY/h) under simulated LOCA environment.
(Symbols are the same as in Fig.160)

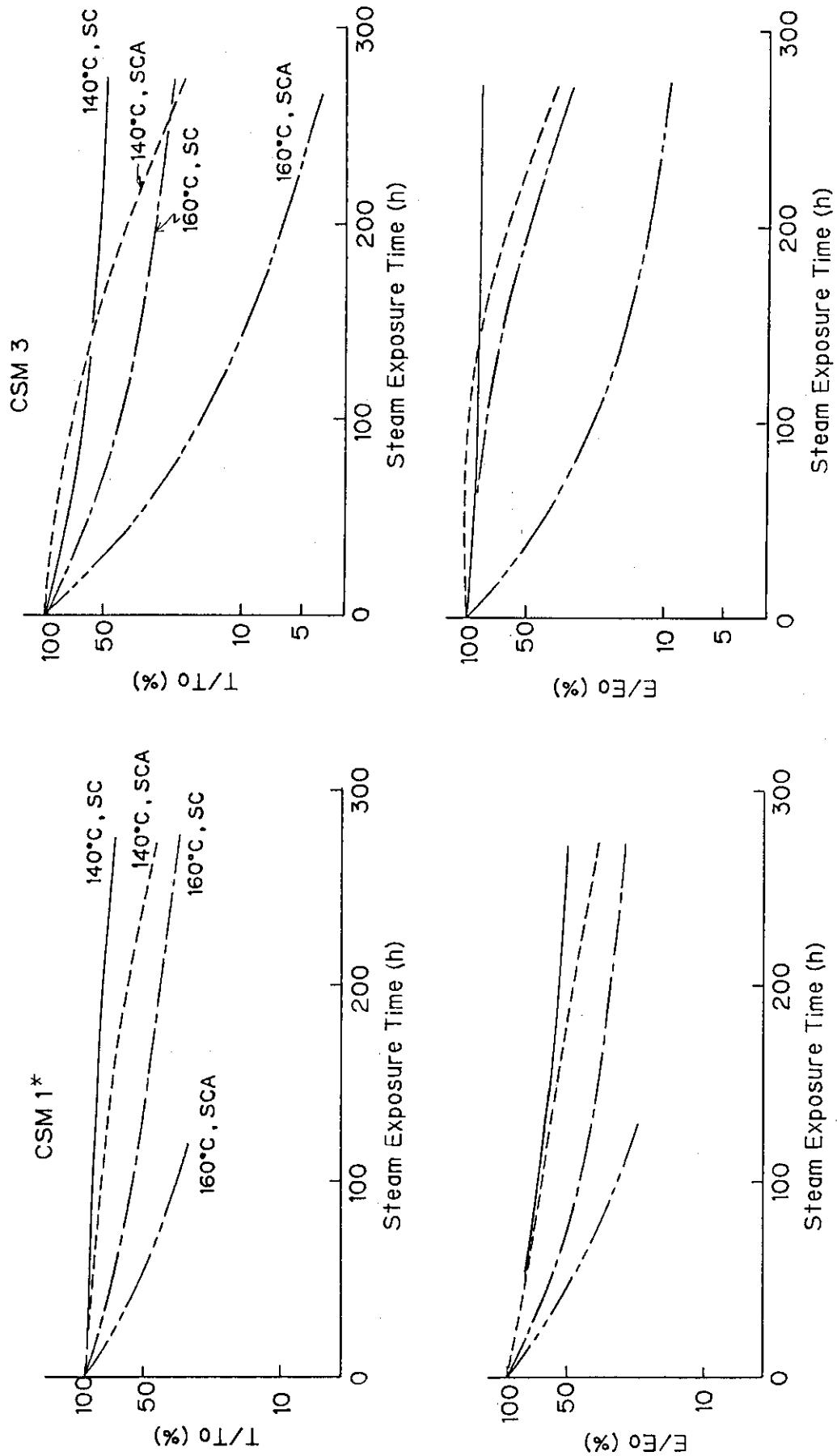


Fig. 169 Effect of steam temperature on mechanical properties of CSM1 (unirradiated) under simulated LOCA environment without air(SC) with air(SCA)

Fig. 170 Effect of steam temperature on mechanical properties of CSM3(unirradiated) under simulated LOCA environment. without air(SC) with air(SCA)

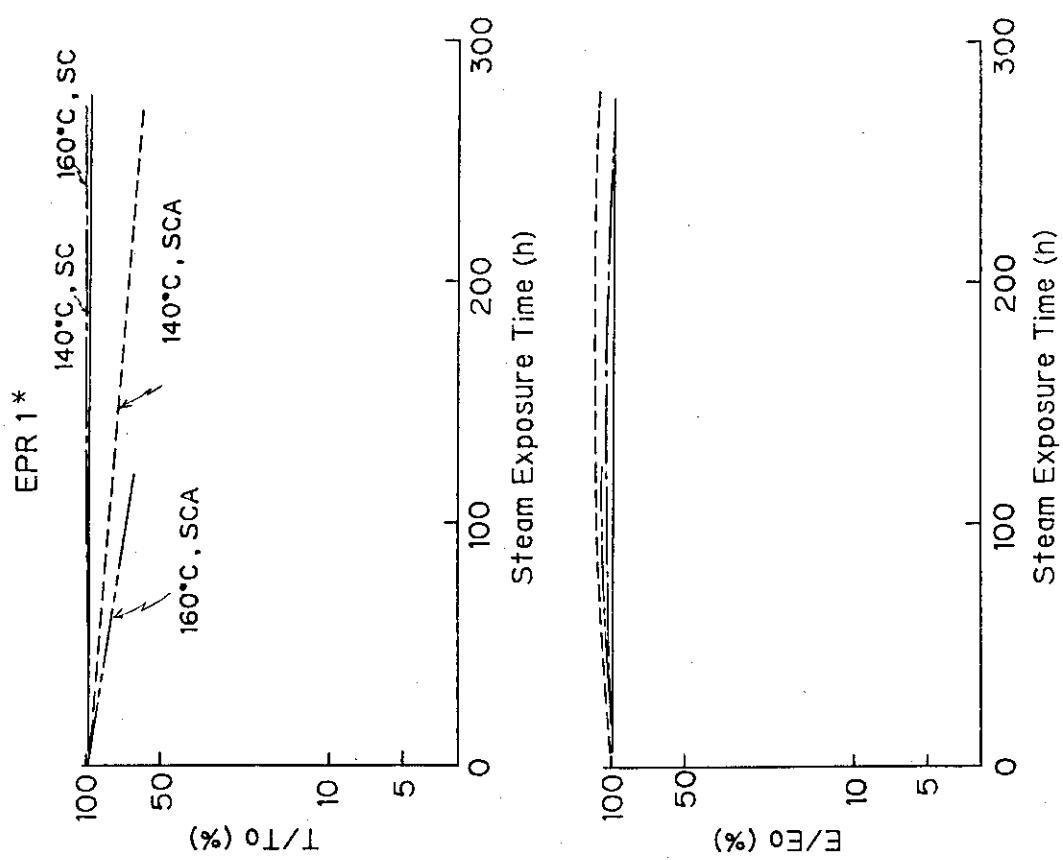


Fig. 171 Effect of steam temperature on mechanical properties of EPR1 (unirradiated) under simulated LOCA environment without air(SC) with air(SCA)

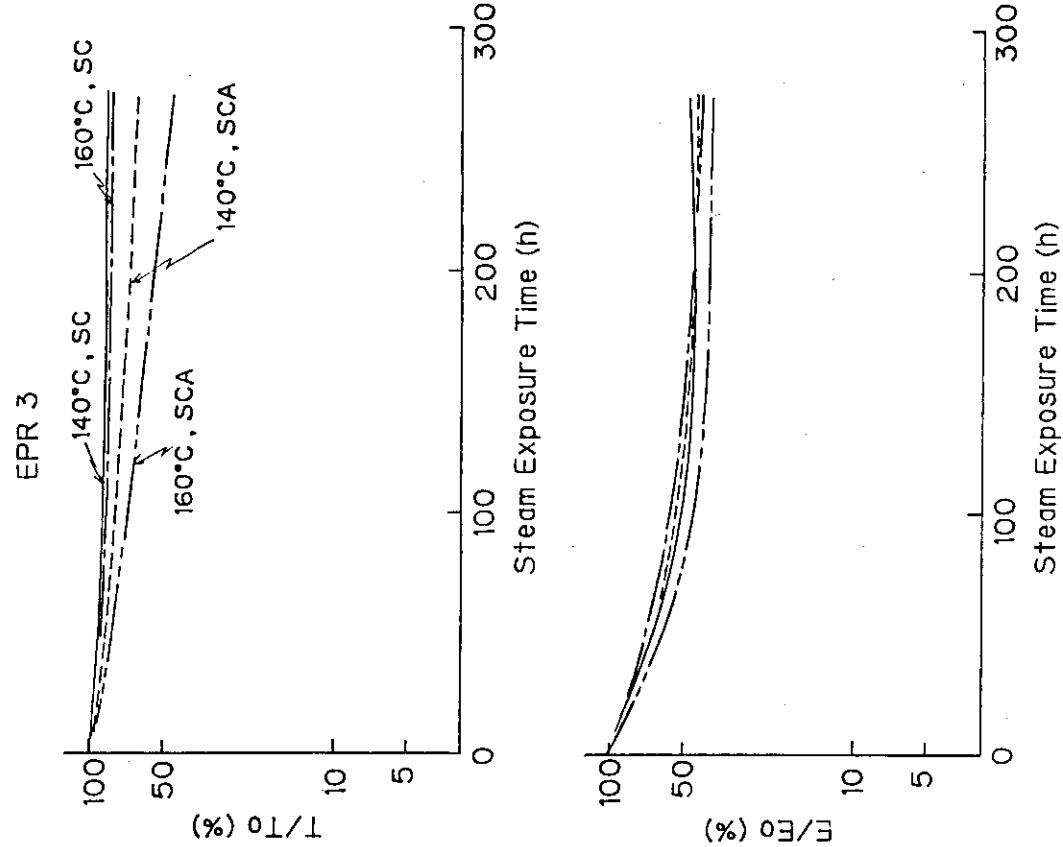


Fig. 172 Effect of steam temperature on mechanical properties of EPR3 (unirradiated) under simulated LOCA environment without air(SC) with air(SCA)

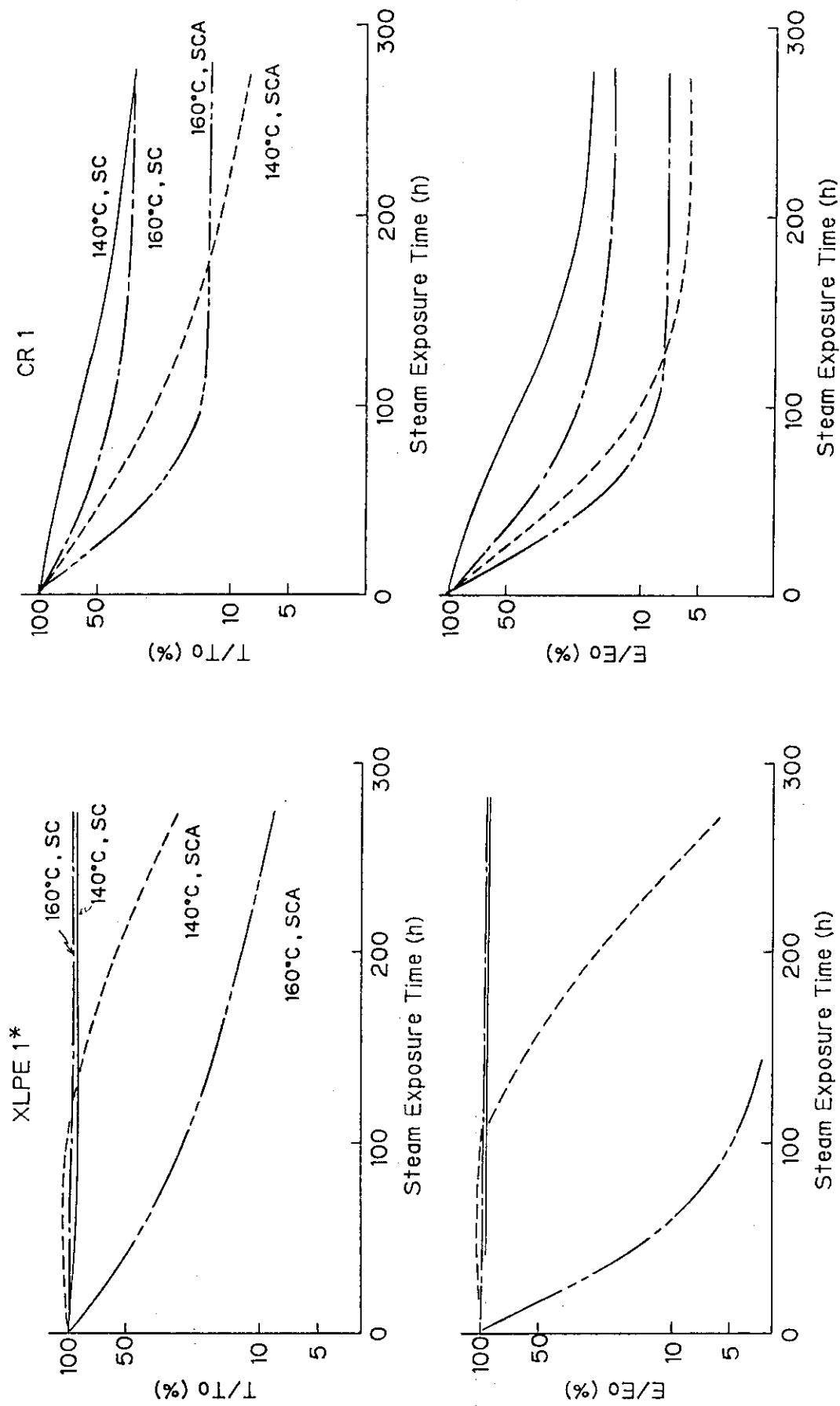


Fig. 173 Effect of steam temperature on mechanical properties of XLPE1 (unirradiated) under simulated LOCA environment without air(SC) with air(SCA)

Fig. 174 Effect of steam temperature on mechanical properties of CR1 (unirradiated) under simulated LOCA environment.

without air(SC) with air(SCA)

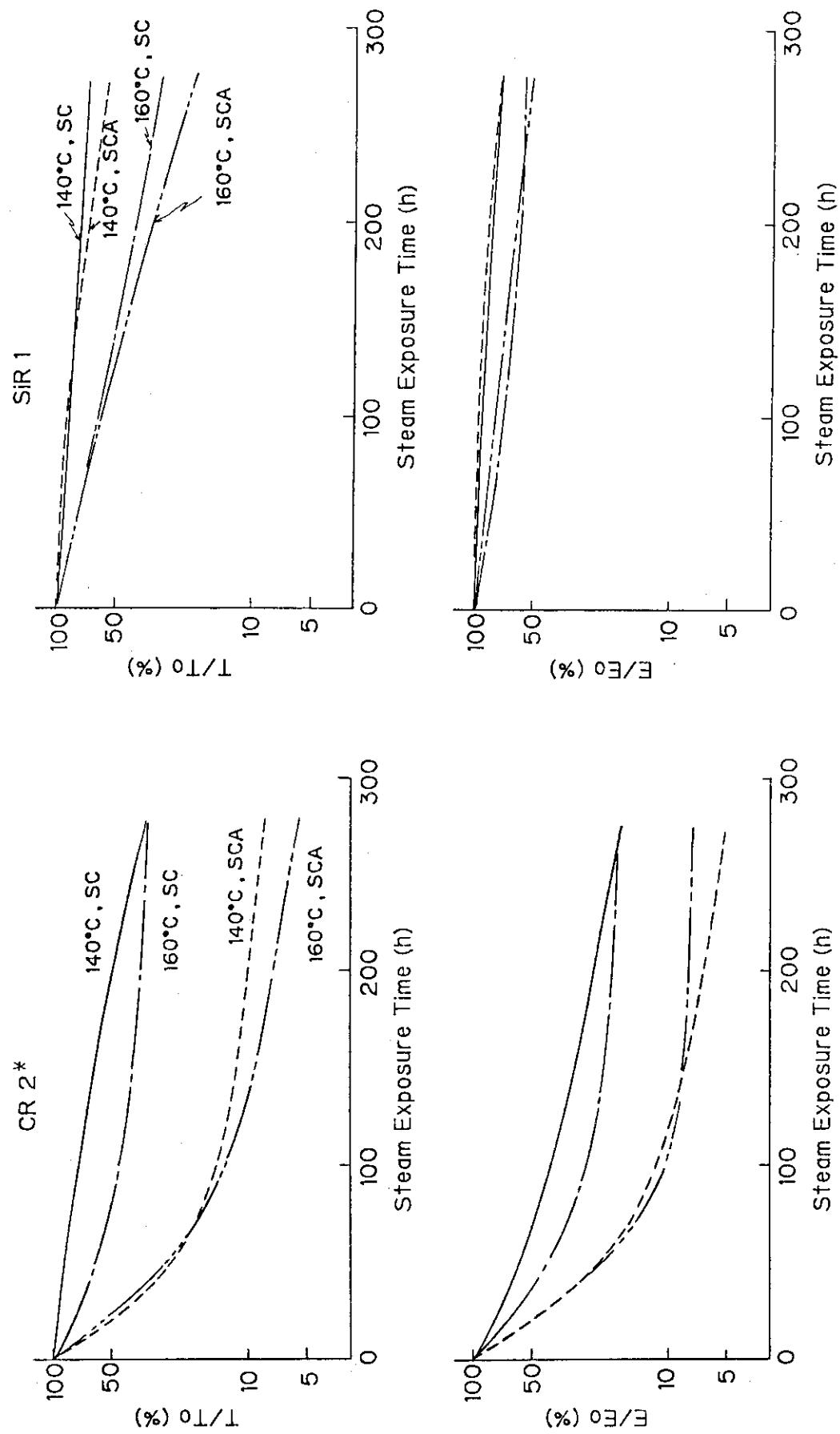


Fig. 175 Effect of steam temperature on mechanical properties of CR2 (unirradiated) under simulated LOCA environment without air(SC) with air(SCA)

Fig. 176 Effect of steam temperature on mechanical properties of SiR1(unirradiated) under simulated LOCA environment. without air(SC) with air(SCA)

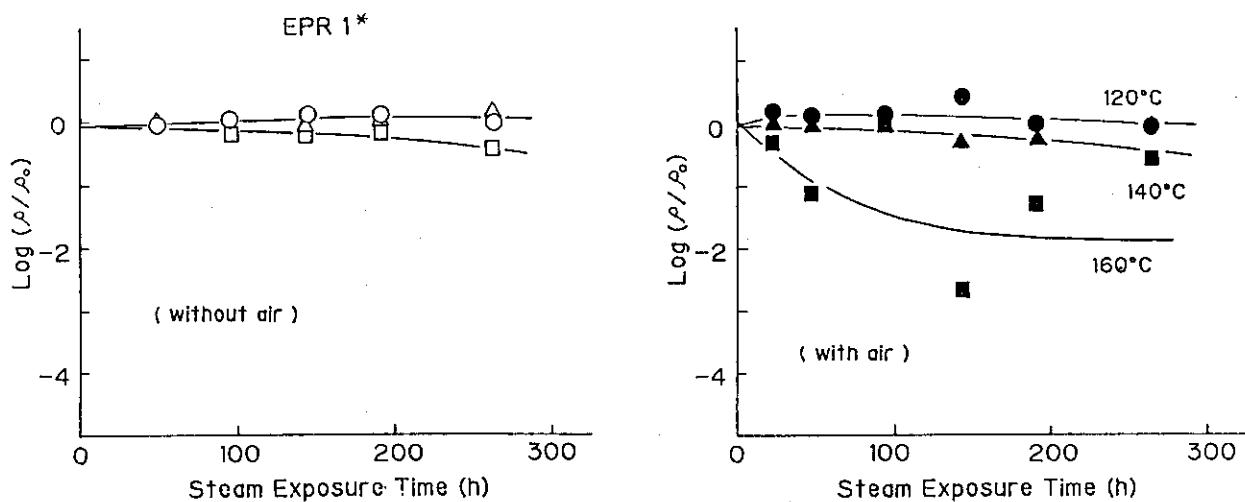


Fig.177 Effect of steam temperature on volume resistivity of EPR1
(1.5MGy at 10KGy/h) under simulated LOCA environment.

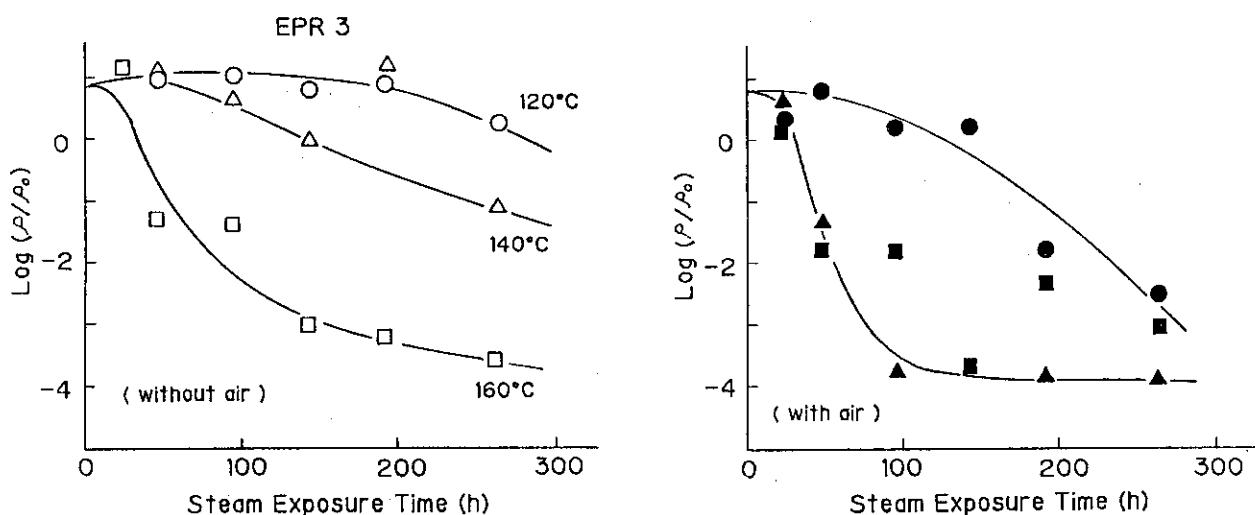


Fig.178 Effect of steam temperature on volume resistivity of EPR3
(1.5MGy at 10KGy/h) under simulated LOCA environment.

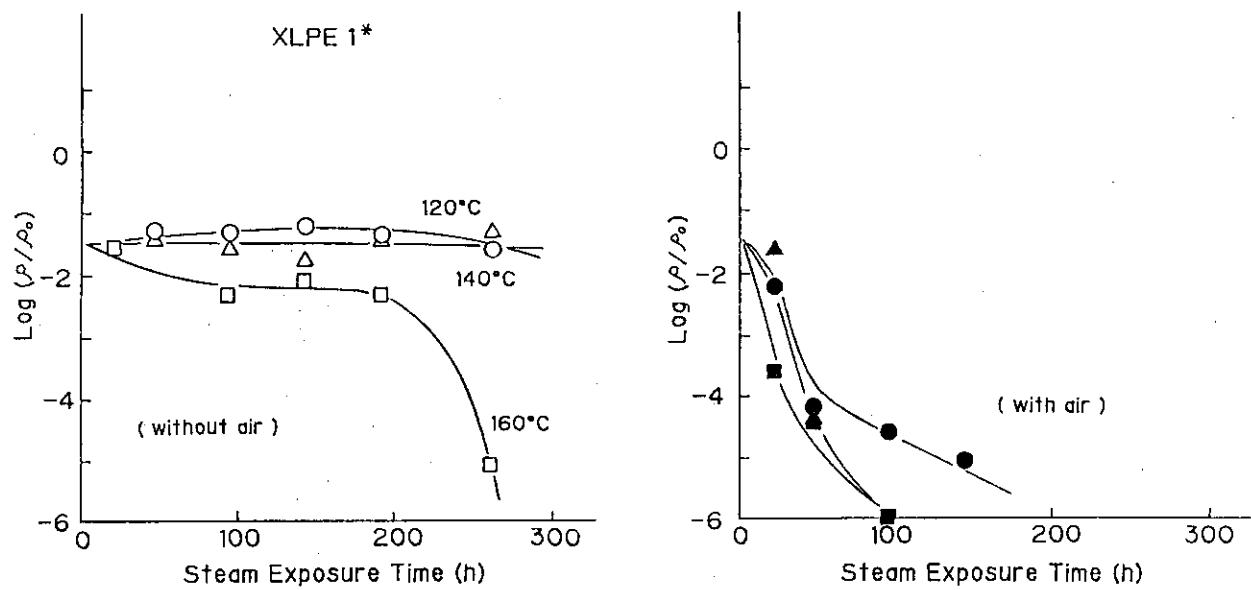


Fig.179 Effect of steam temperature on volume resistivity of XLPE1 (1.5MGy at 10KGy/h) under simulated LOCA environment.

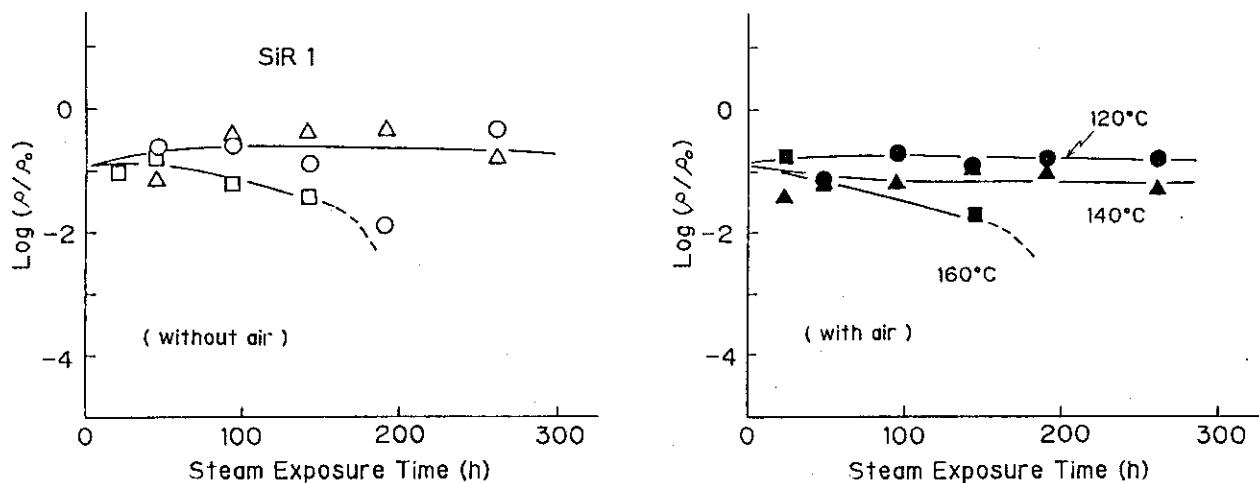


Fig.180 Effect of steam temperature on volume resistivity of SIR1 (1.5MGy at 10KGy/h) under simulated LOCA environment.

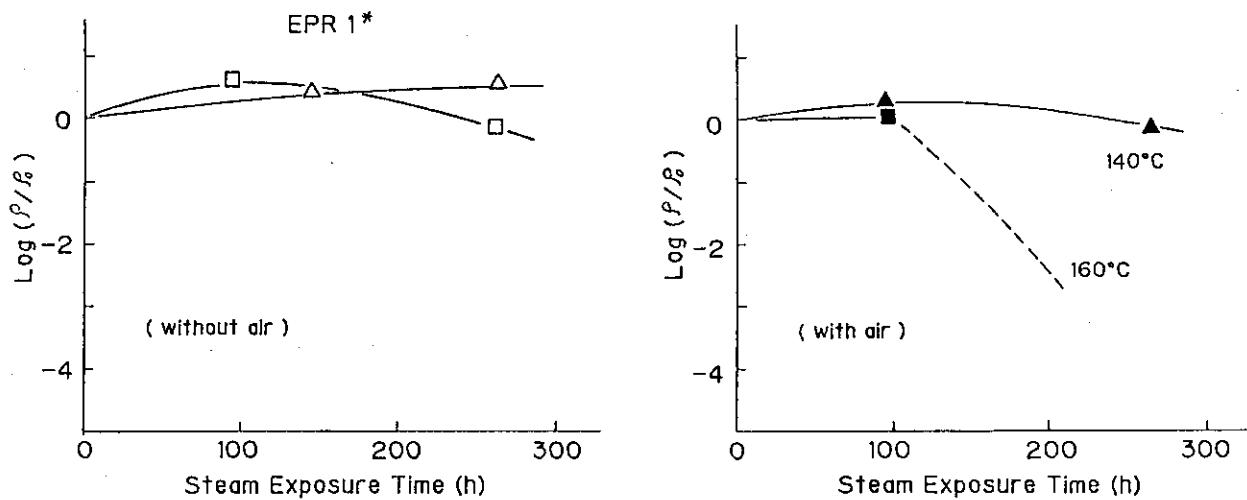


Fig.181 Effect of steam temperature on volume resistivity of EPR1
(unirradiated) under simulated LOCA environment.

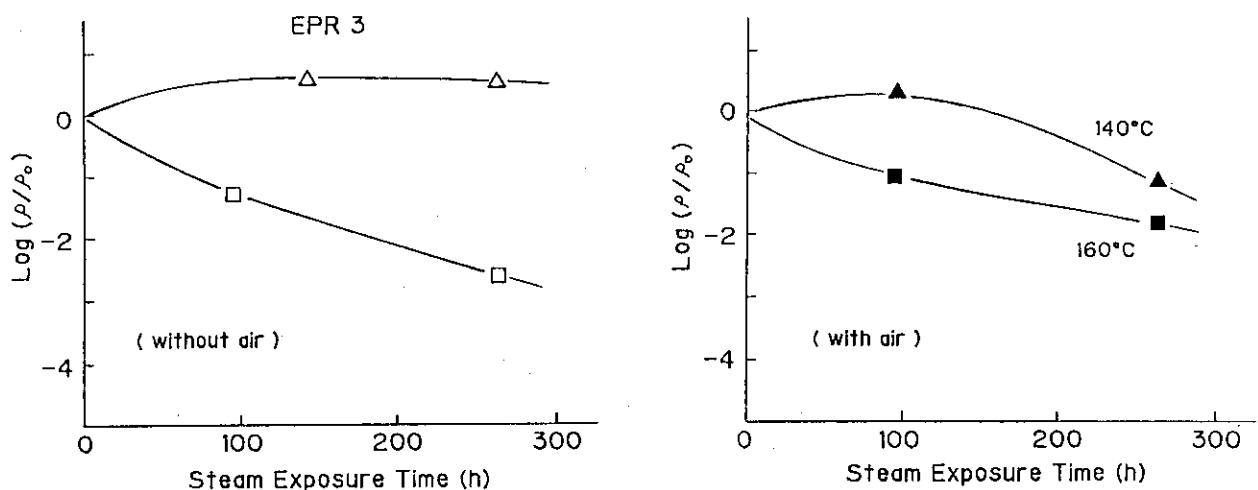


Fig.182 Effect of steam temperature on volume resistivity of EPR3
(unirradiated) under simulated LOCA environment.

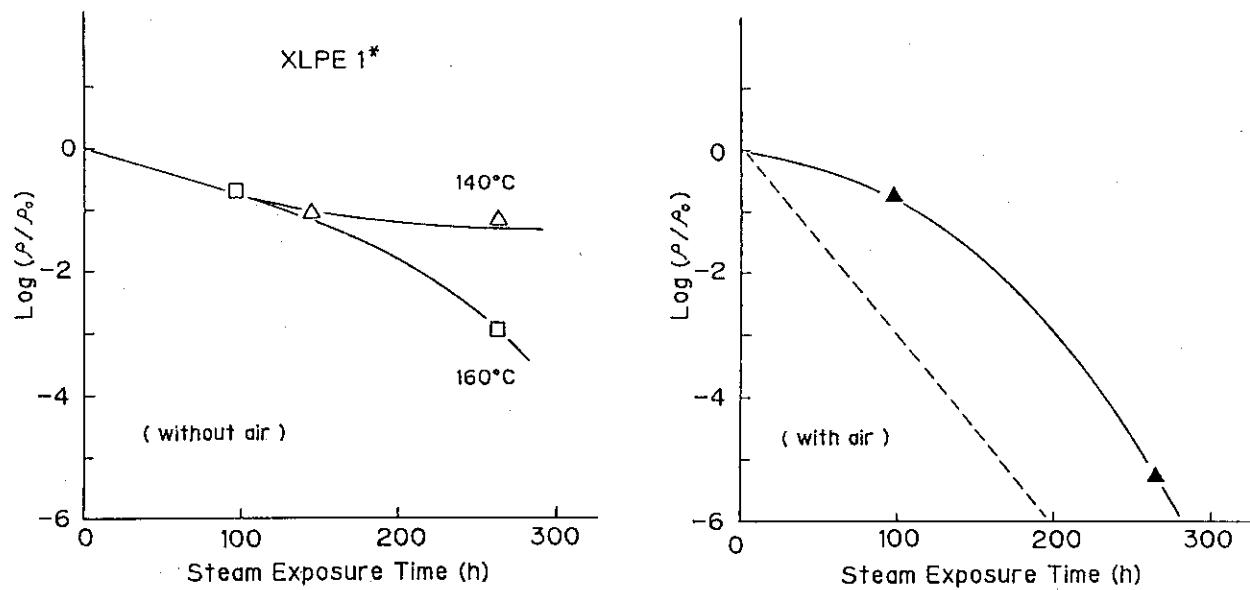


Fig.183 Effect of steam temperature on volume resistivity of XLPE1 (unirradiated) under simulated LOCA environment.

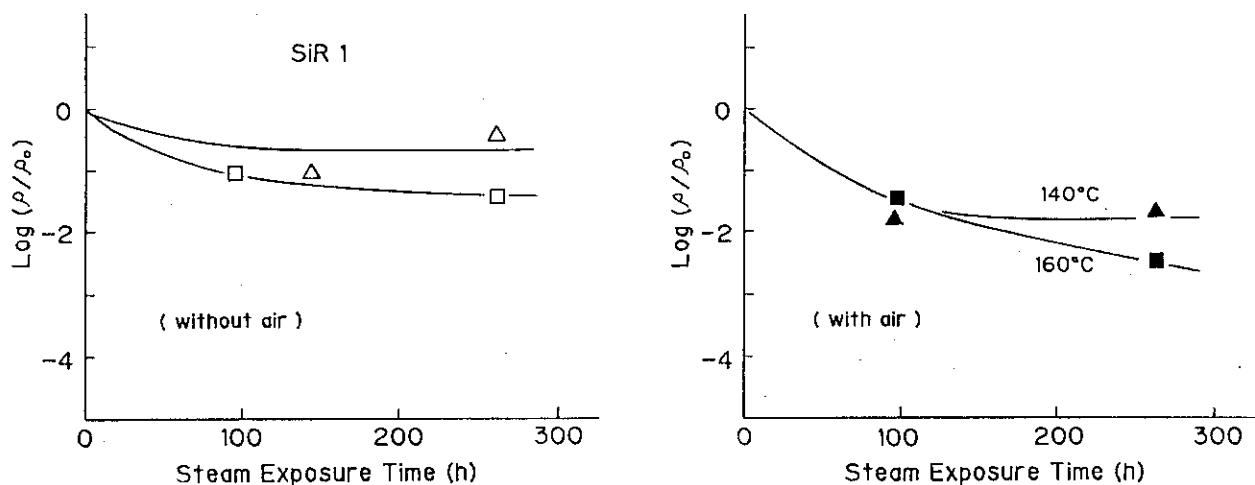


Fig.184 Effect of steam temperature on volume resistivity of SiR1 (unirradiated) under simulated LOCA environment.

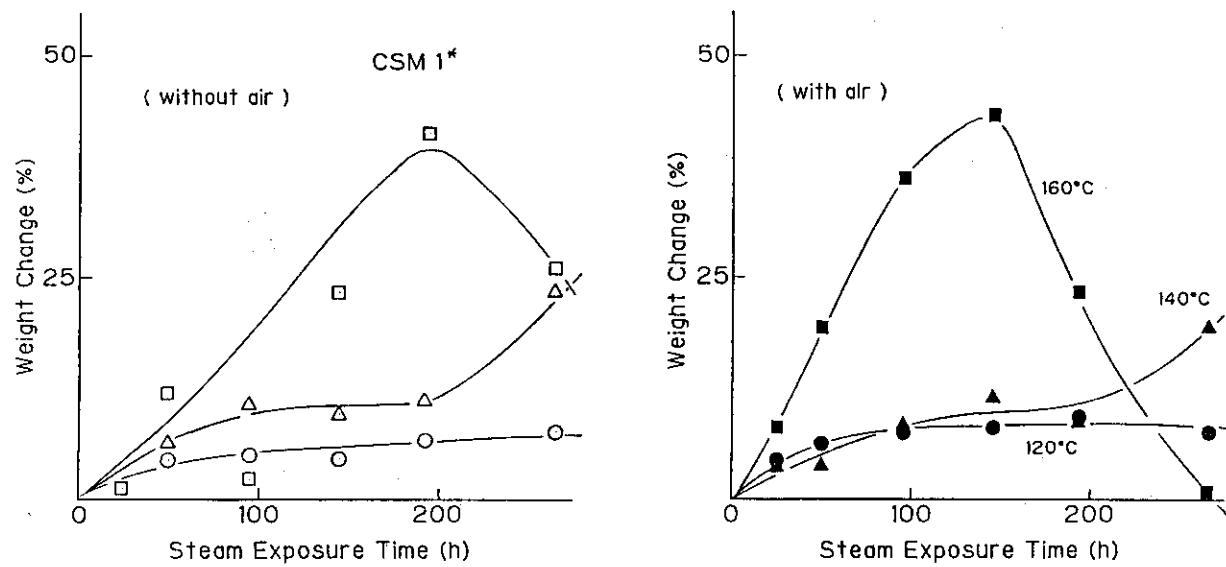


Fig.185 Effect of steam temperature on water sorption of CSM1 (1.5MGy at 10KGy/h) under simulated LOCA environment.

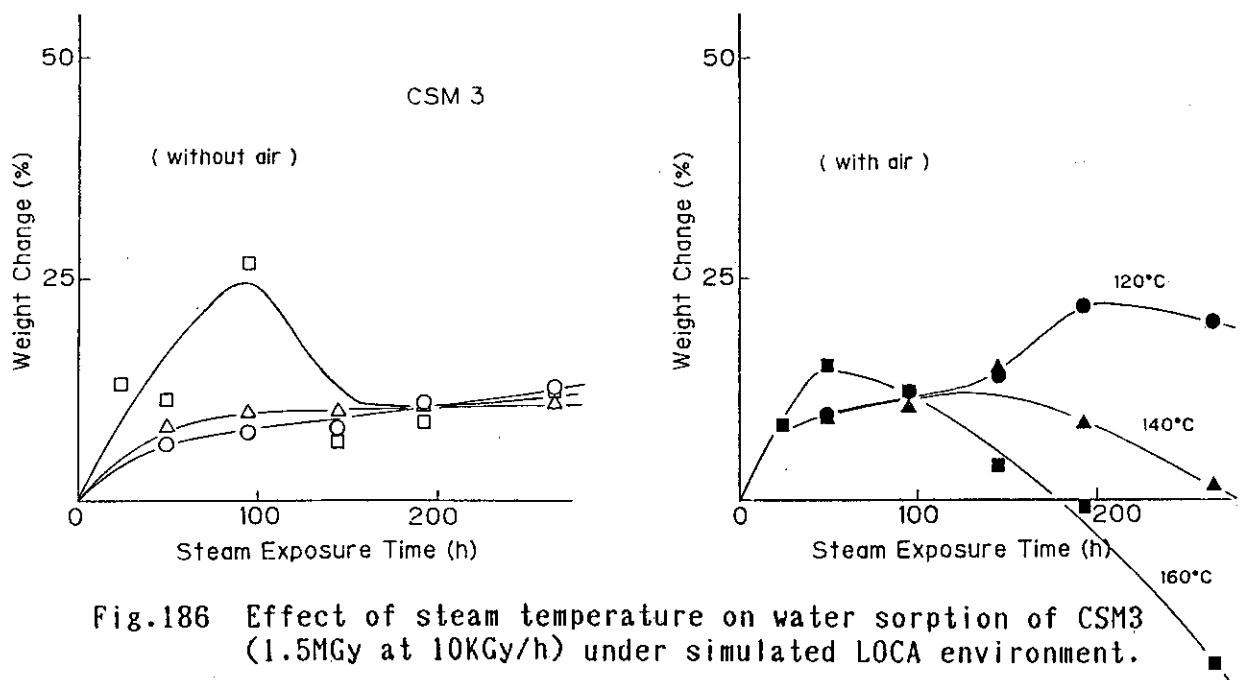


Fig.186 Effect of steam temperature on water sorption of CSM3 (1.5MGy at 10KGy/h) under simulated LOCA environment.

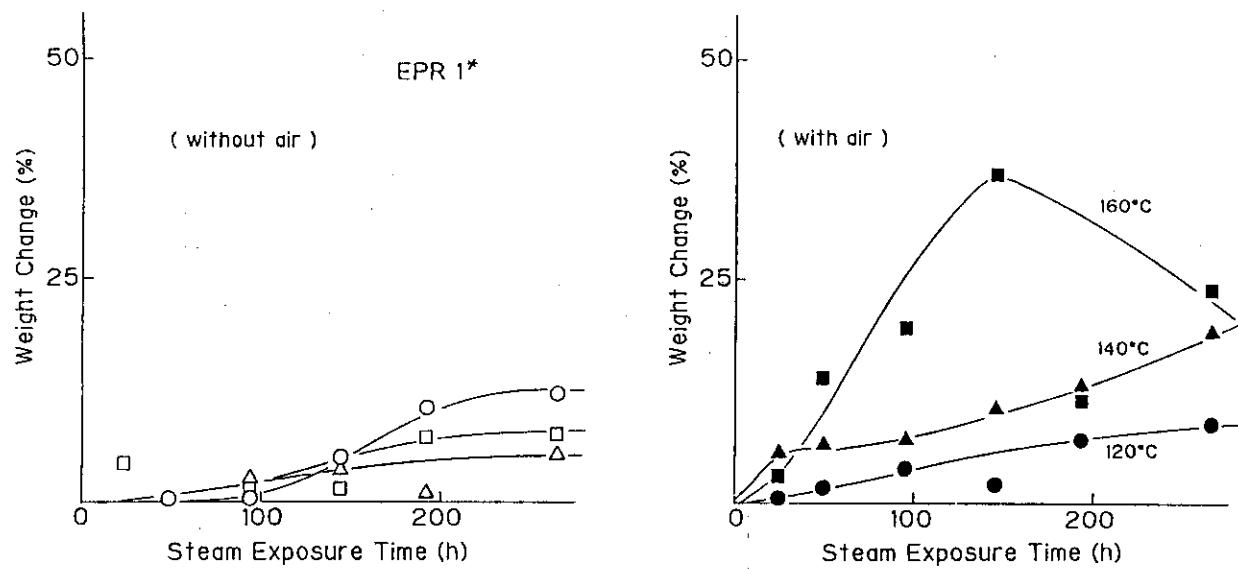


Fig.187 Effect of steam temperature on water sorption of EPR1 (1.5MGy at 10KGy/h) under simulated LOCA environment.

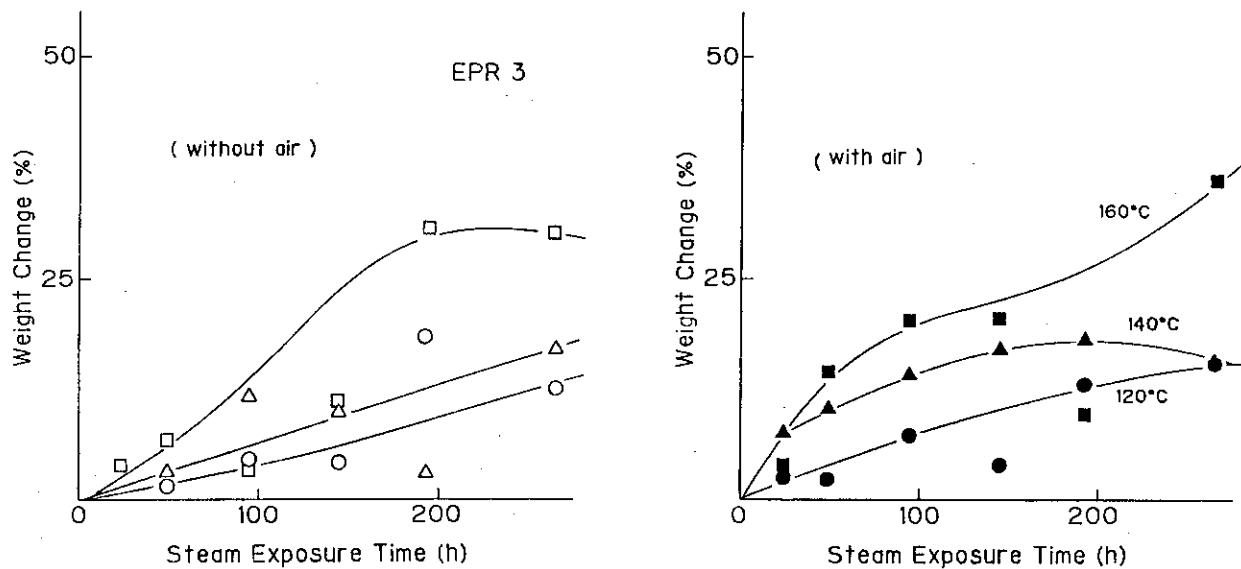


Fig.188 Effect of steam temperature on water sorption of EPR3 (1.5MGy at 10KGy/h) under simulated LOCA environment.

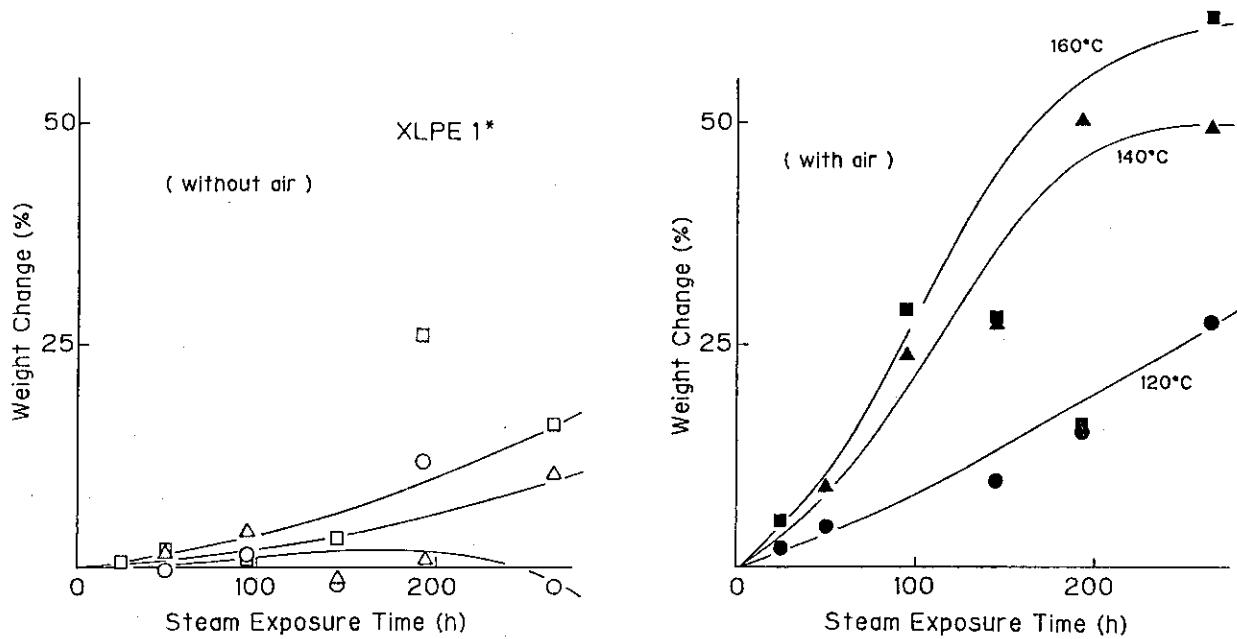


Fig.189 Effect of steam temperature on water sorption of XLPE1
(1.5MGy at 10KGy/h) under simulated LOCA environment.

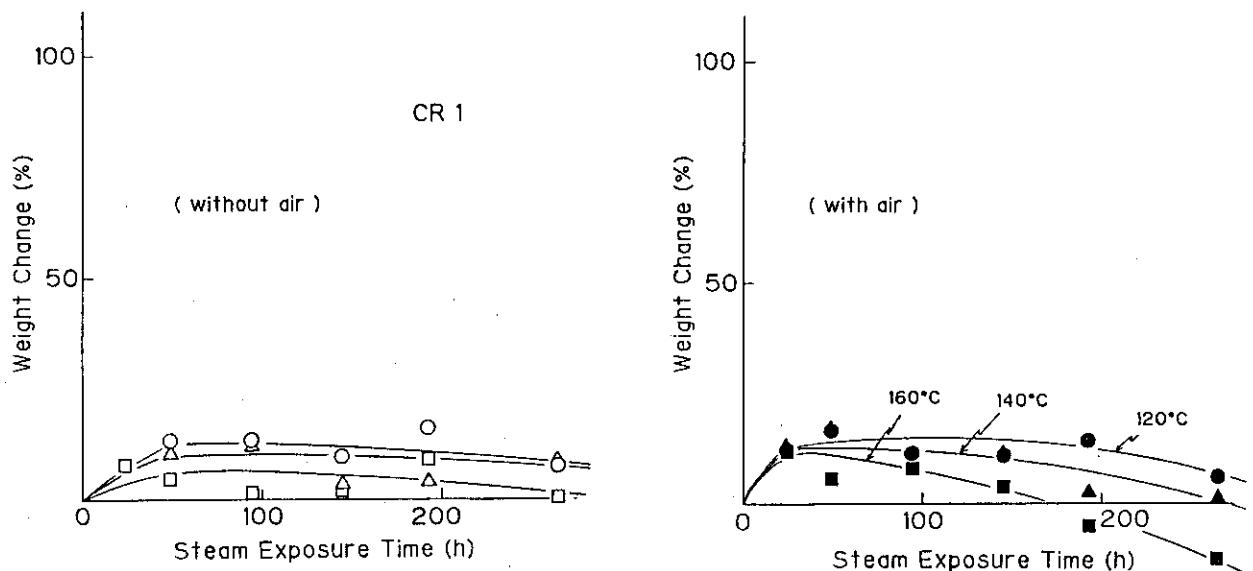


Fig.190 Effect of steam temperature on water sorption of CR1
(1.5MGy at 10KGy/h) under simulated LOCA environment.

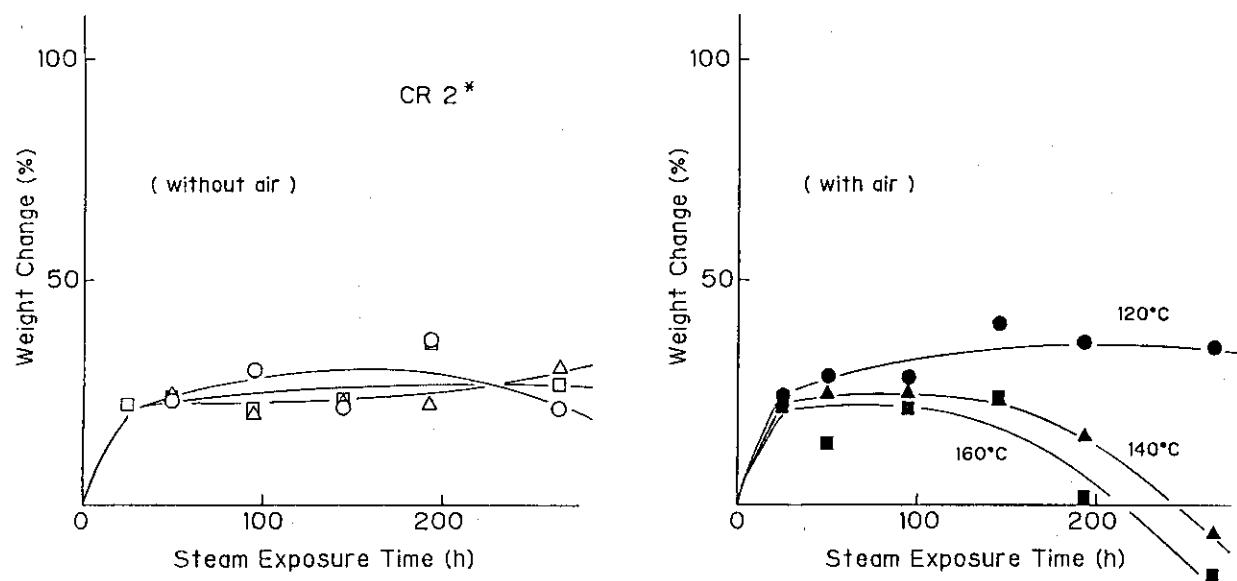


Fig.191 Effect of steam temperature on water sorption of CR2 (1.5MGy at 10KGy/h) under simulated LOCA environment.

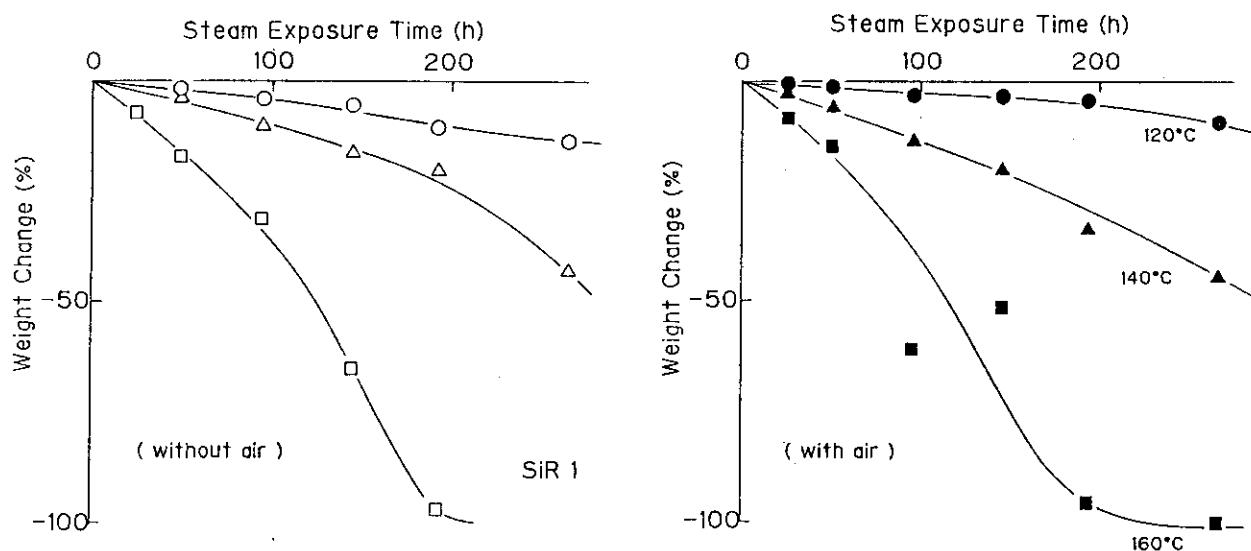


Fig.192 Effect of steam temperature on water sorption of SIR1 (1.5MGy at 10KGy/h) under simulated LOCA environment.

4.2.4 空気添加量の影響

4.1.3 に示したようにLOCA模擬同時環境に空気が存在すると絶縁材料の劣化が著しく促進されることが明らかになった。本節では、逐次法の蒸気環境に空気の分圧を変えて添加した場合の絶縁材料の劣化に及ぼす影響を機械的性質、電気的性質および吸水膨潤の変化から調べた。

(1) 実験方法

逐次法の前照射を室温、空气中、約 $10\text{kGy}/\text{h}$ で 1.5MGy 与えた試料を、 120°C の飽和水蒸気環境並びに飽和水蒸気に空気を分圧でそれぞれ $0.05, 0.13, 0.25$ および 0.5MPa 添加した環境に暴露した。

(2) 結果及び考察

1) 機械的性質

絶縁、被覆材料13種類のうち代表的な結果を示す。Fig.193,194 にハイパロンの結果を示す。強度、伸びは初期値に対する残率で示した。ハイパロンの場合はモデル配合(Fig.193)、実用配合(Fig.194)とも添加空気圧に対し強度、伸びとも似た挙動を示す。添加空気圧が 0.25MPa まではいずれの試料についても添加空気の圧力の影響が見られず、暴露期間に対し同じ劣化曲線を示す。しかし空気添加圧が 0.5MPa になると強度や伸びが著しく低下し空気圧の影響が見られるようになる。

Fig.195,196 にEPRの結果を示す。EPRもハイパロンと同じ傾向を示し、モデル配合および実用配合とも空気分圧 0.25MPa までは強度、伸びとも添加空気の影響を殆ど受けない。空気圧が 0.5MPa と高くなるとモデル配合は強度が、実用配合は強度、伸びともに低下が大きくなる。

Fig.197 に架橋ポリエチレンの結果を示す。架橋ポリエチレンの場合は、ハイパロン、EPRと異なり強度にも伸びにも添加空気の圧力の影響が見られ、添加空気圧が高いほど劣化する。ただし伸びについてはいずれの条件下でも蒸気暴露の初期に回復現象が見られるが、暴露期間が長くなると低下してくる。空気分圧が高い場合(0.5MPa)は試料の劣化が著しく、200時間以上蒸気暴露を行うと試料の溶失が大きくなり測定出来なくなる。

Fig.198,199 にクロロブレンの結果を示す。クロロブレンの場合は蒸気暴露以前のLOCA模擬照射(1.5MGy)がかなり厳しいため、前照射段階で機械的性質がかなり低下する。したがって蒸気環境における空気の影響は見かけ上小さいが、空気の添加圧が高くなるほど、また暴露期間が長くなるほど試料は著しく劣化し、200時間以上で測定出来なくなる。

Fig.200 にシリコーンゴムの結果を示す。シリコーンゴムの場合は蒸気暴露の

空気分圧を0~0.5MPaの範囲で変えても強度、伸びには全く空気添加の影響を受けない。また蒸気暴露による強度、伸びの低下も少なく、初期に少し低下するがその後暴露期間を変えても一定の値を示す。シリコーンゴムの伸びの低下の主たる原因是L O C A模擬の照射による架橋の進行が考えられる。

2) 電気的性質

L O C A模擬逐次法における蒸気環境への添加空気圧力が絶縁材料の絶縁劣化におよぼす影響を添加空気圧0~0.5MPaの範囲で調べた。絶縁体として用いられる試料について結果をFig.201~204にそれぞれ示す。

Fig.201,202にE P Rの結果を示す。E P R 1は蒸気暴露時間が短い場合は、それほど顕著な空気圧力依存性を示さないが暴露時間が長くなると、空気を過剰に加えた場合著しく軟化、溶失し、測定が出来なくなる。E P R 3においても高温では試料表面の軟化、溶失が見られるがE P R 1程激しくない。E P R 3は空気圧力依存性に関しては興味深い結果を示す。空気を0.05MPa添加した場合は、添加しない場合に比べて著しく絶縁抵抗が低下するが、空気圧を増していくと逆に低下が小さくなる。この原因についてははっきりしたことは分からぬ。L O C A環境下でのE P R等の絶縁低下は、極性基の生成とそれによる水の導入に起因すると考えられているが¹、過剰に空気を加えた場合、極性基がさらに酸化されて分解し、その分解生成物が蒸気によって抽出されてしまうため水が保持されにくくなるのかも知れない。この分解の程度が激しいと、電気的特性の劣化は抑制されるが、試料の軟化、溶失は促進されると思われる。

Fig.203に架橋ポリエチレンの結果を示す。架橋ポリエチレンの場合は先のE P R 3と極めて良く似た圧力依存性を示す。但し、空気圧を高くして長い時間蒸気暴露を行うと試料表面の溶失が激しくなる。

Fig.204にシリコーンゴムの結果を示す。シリコーンゴムの場合は空気圧を0~0.5MPaの範囲で変化させても絶縁抵抗の変化は小さく、空気圧の影響はないと言える。

3) 吸水膨潤

L O C A模擬環境下のような厳しい条件下においては各種ゴム材料は吸水することがこれまでの実験で知られている。ここでは各代表的試料について高線量率下で1.5MGy照射した後、120℃の一定温度で空気圧を0~0.5MPaまで変化したときの吸水率におよぼす添加空気圧の影響を調べた結果を示す。

Fig.205,206にハイパロンの結果を示す。モデル配合試料(Fig.205)では添加空気圧が著しく高くなる(0.5MPa)と暴露期間の短い領域でも著しく吸水膨潤する。しかし、実用配合試料(Fig.206)では添加空気圧を高くしても特に大きな膨潤を示

すことはない。その原因是明らかではないが実用配合試料には酸化防止剤が多量に配合されているためではないかと考えられる。

Fig.207,208 に E P R の結果を示す。E P R 試料の場合、モデル配合試料(Fig.207)は添加空気圧が高くなると蒸気暴露の初期に著しい吸水膨潤を示すが、蒸気暴露時間が長くなると試料表面が溶失を起こす。実用配合試料(Fig.208)は大きな溶失は見られず、添加空気圧を高くすると吸水膨潤も大きくなる。

Fig.209 に架橋ポリエチレンの結果を示す。架橋ポリエチレンは添加空気圧の増加に伴い顕著な吸水膨潤の増加がみられる。しかし、添加空気圧が0.5MPaと著しく大きくなると蒸気暴露の初期の段階から重量減少を示す。これは添加空気圧が高いと試料の溶失が著しいためである。

Fig.210,211 にクロロブレンの結果を示す。クロロブレンの場合、実用配合試料(Fig.210)では添加空気圧の影響は比較的小さく、蒸気暴露期間を長くしてもほとんど変化しない。モデル配合試料は架橋ポリエチレンと似た吸水パターンを示す。

Fig.212 にシリコーンゴムの結果を示す。シリコーンゴムの場合は蒸気暴露すると重量が減少するが、環境への空気添加圧の影響は小さく重量の減少は蒸気暴露時間に依存する。

(3) まとめ

以上の結果から、逐次法における蒸気環境への添加空気圧の影響は添加空気圧が0.25MPa以下の場合、架橋ポリエチレンとクロロブレンの機械的性質に影響を与えるが他のハイパロン、E P R およびシリコーンゴムについては影響を与えない。しかし、添加空気圧が著しく高く(0.5MPa)なるとシリコーンゴム以外は強度および伸びの低下が大きくなる。一方、同時法では4.1.3で述べたように空気添加量と共に劣化が増大しており、逐次法で試験条件を考える場合には注意を要する。

電気的性質の影響はシリコーンゴムには現れないがE P R 3 および架橋ポリエチレンには見られる。しかしこの場合の依存性は、空気を添加すると、空気を添加しない場合に比べて絶縁低下は大きくなるが、空気圧を高くしていくと低下の程度が小さくなるという奇妙な結果を示す。

吸水膨潤は添加空気圧が増加すると一般に大きくなる傾向を示す。しかし、添加空気圧が著しく大きい場合は試料の溶失も大きくなる。

関連文献

1. 岡田漱平, 吉川正人, 伊藤政幸, 日馬康雄, 八木敏明, 吉田健三, " L O C A 模擬環境下における絶縁材料の劣化の反応速度論的解析" ,
電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-82-109(1982)
2. 岡田漱平, 日馬康雄, 八木敏明, 伊藤政幸, 川上和市郎, 田村直幸, " L O C A 模擬逐次法における前照射条件が絶縁材料の劣化に及ぼす影響" ,
同上 EIM-85-164(1985)

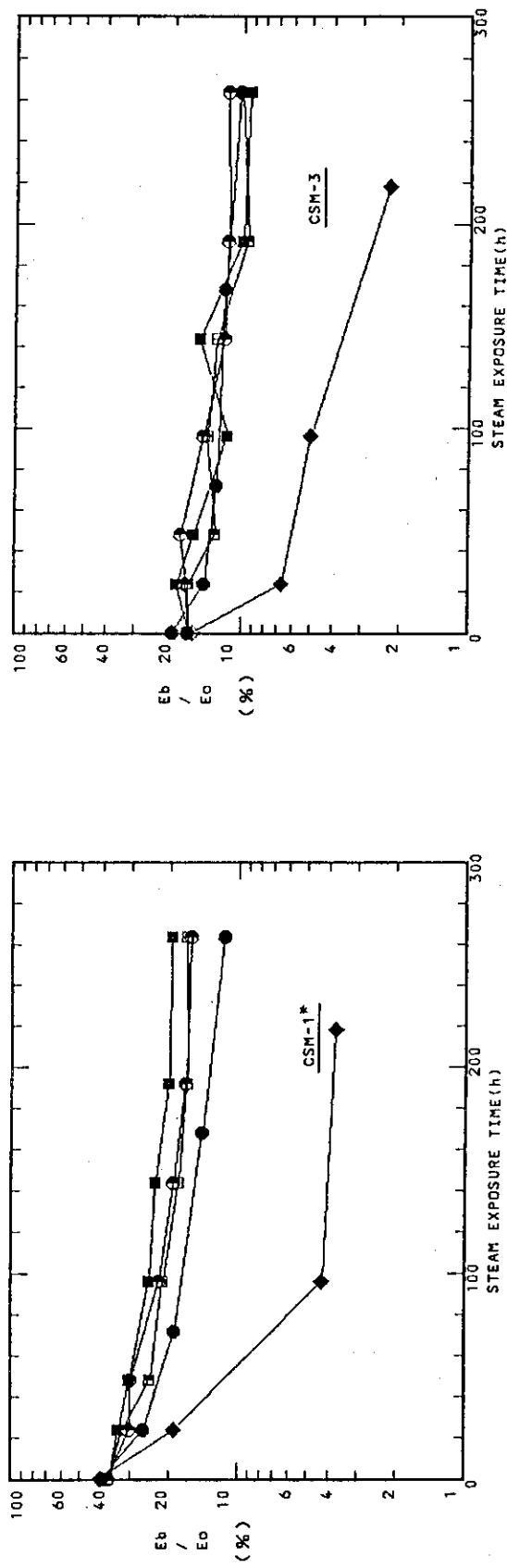
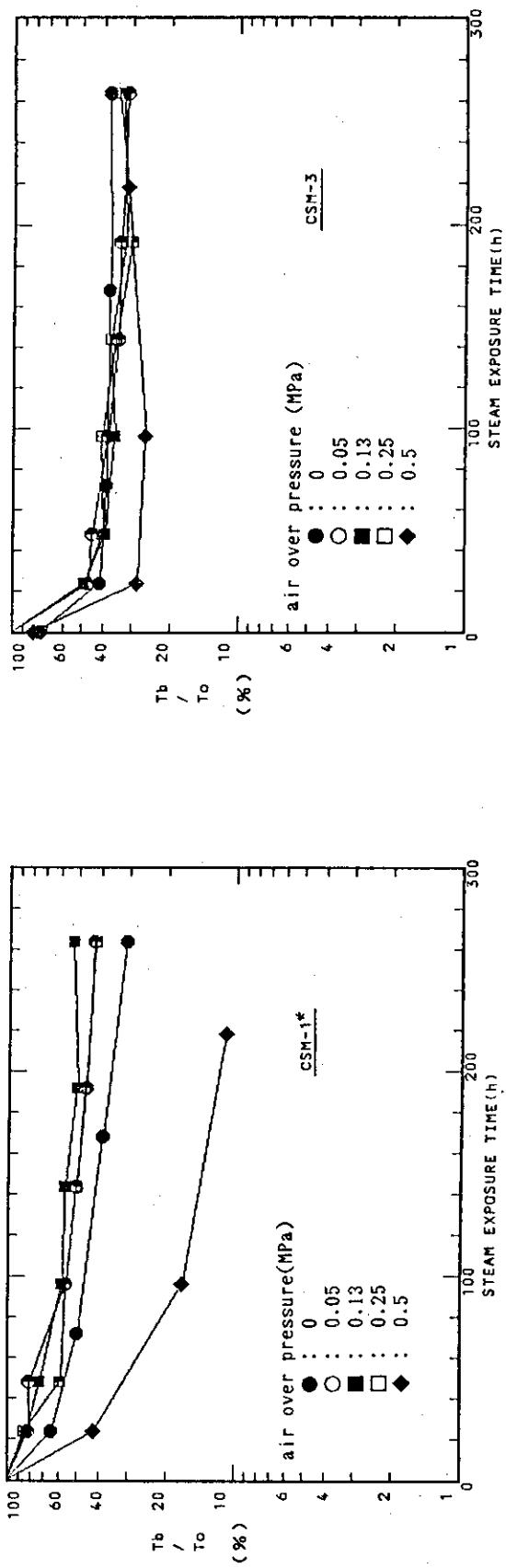


Fig.193 Effect of amount of air in sequential LOCA conditions on mechanical properties of CSM1 .

Fig.194 Effect of amount of air in sequential LOCA conditions on mechanical properties of CSM3 .

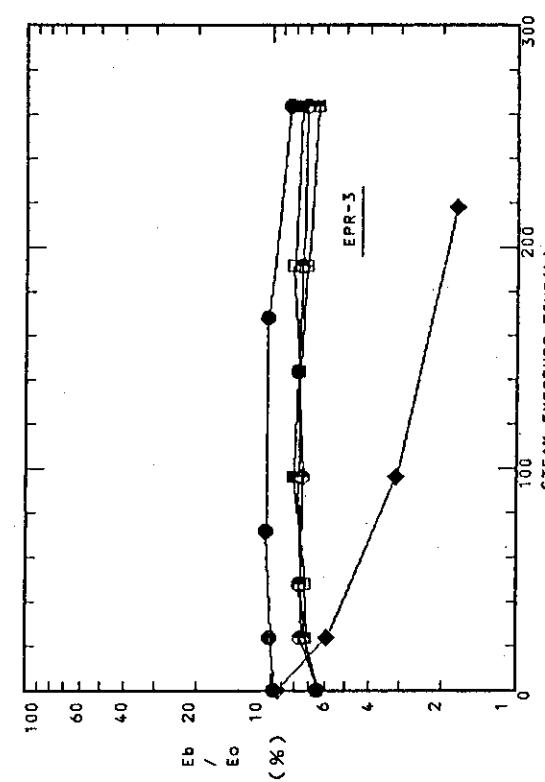
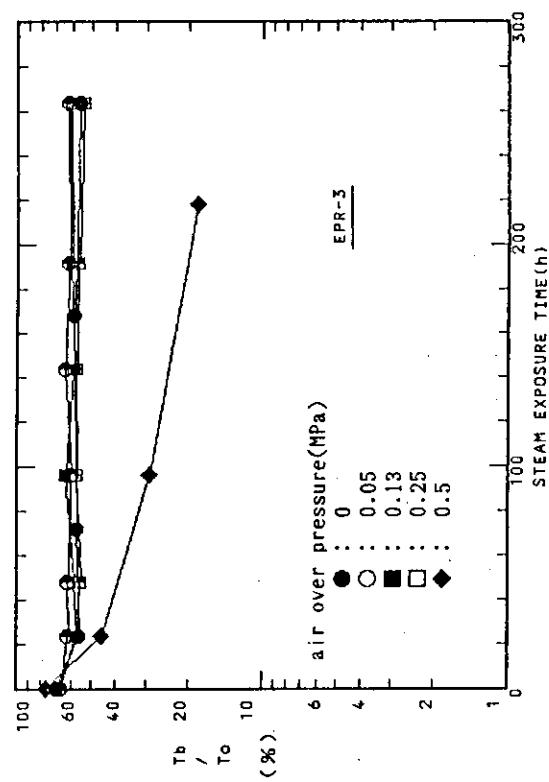
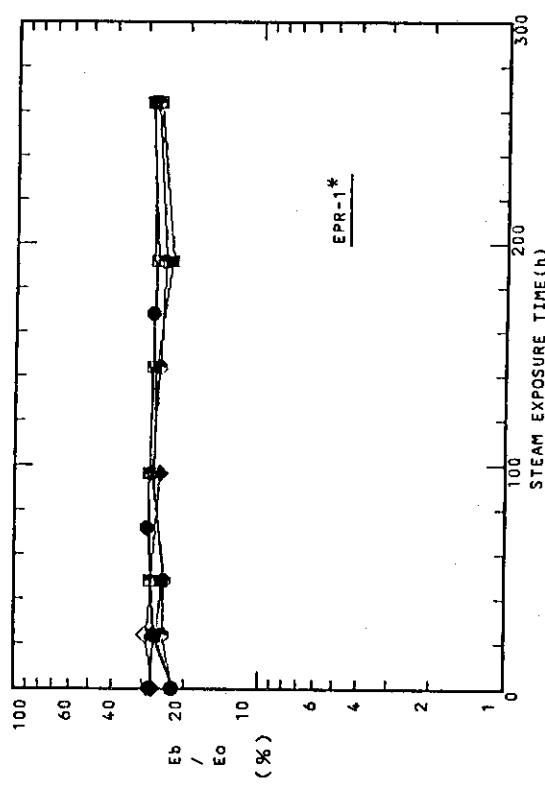
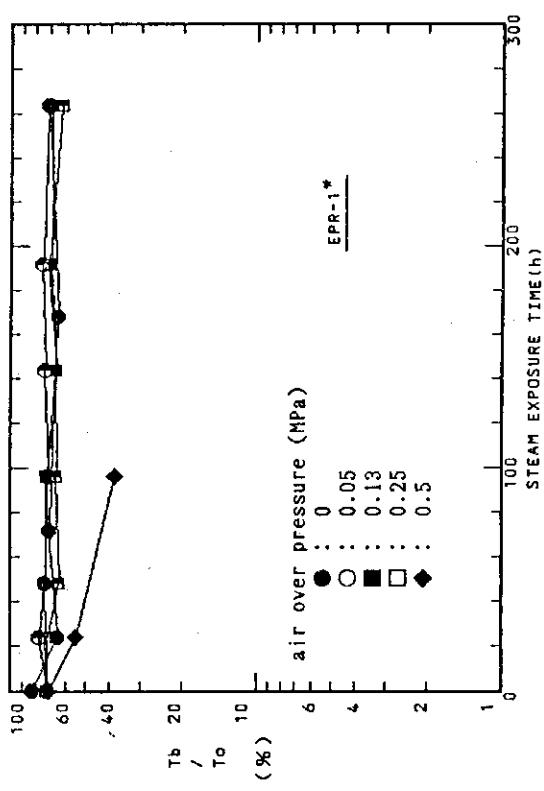


Fig.195 Effect of amount of air in sequential LOCA conditions on mechanical properties of EPR1 .

Fig.196 Effect of amount of air in sequential LOCA conditions on mechanical properties of EPR3 .

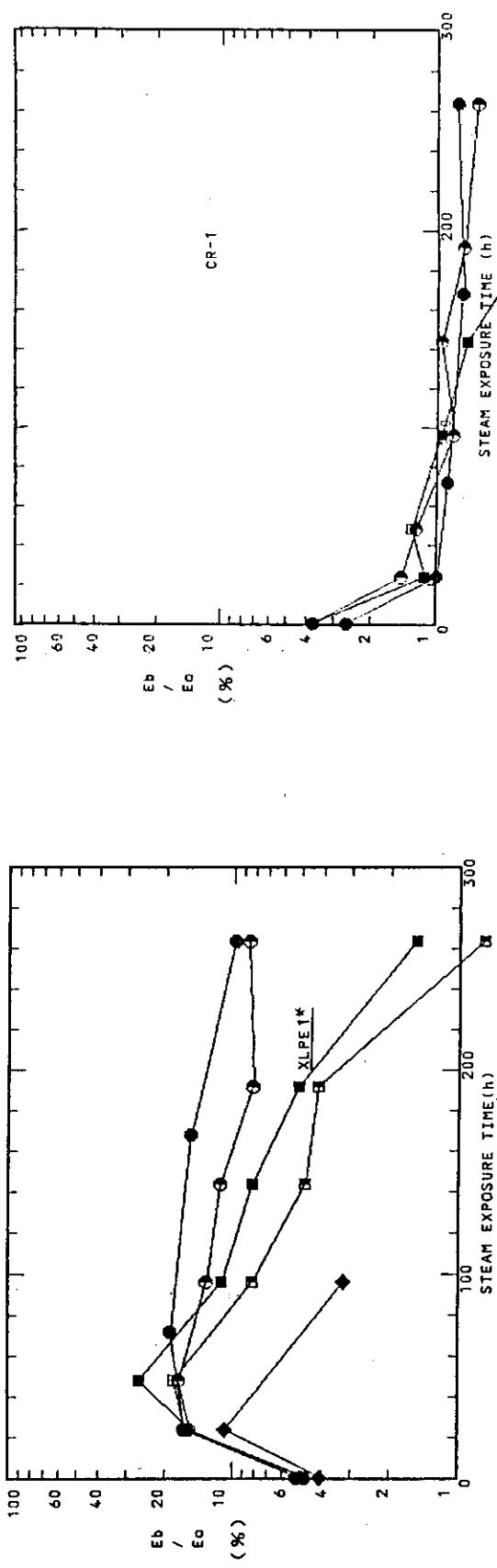
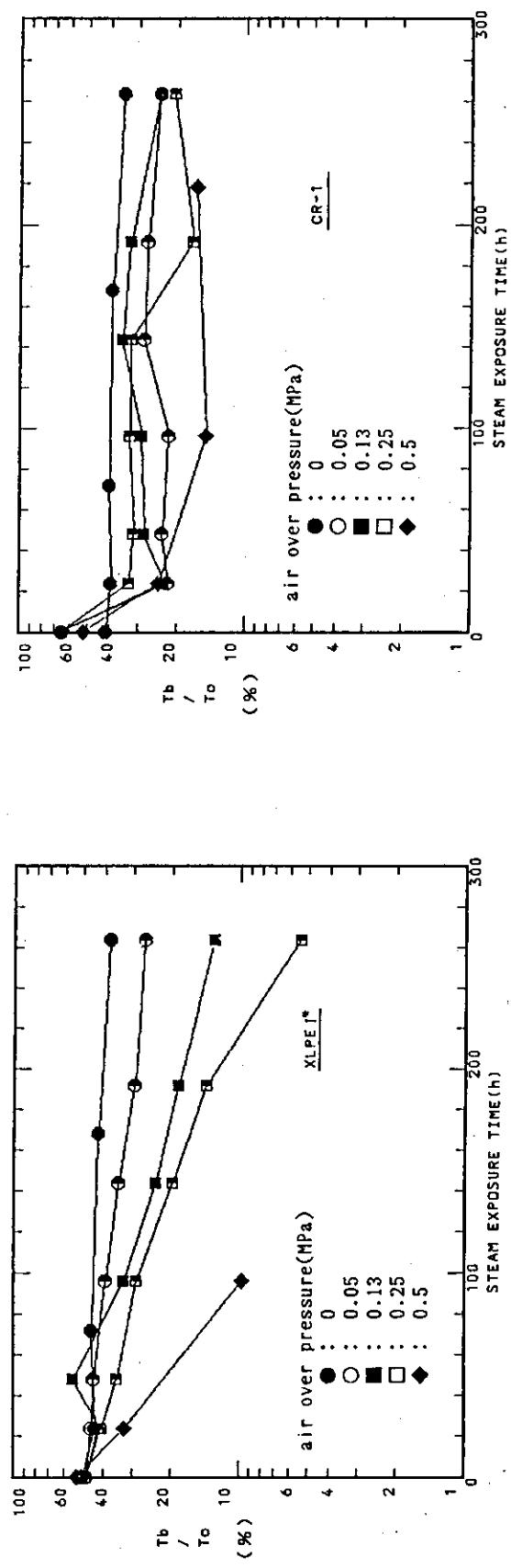


Fig.197

Effect of amount of air in sequential LOCA conditions on mechanical properties of XLPE1.

Fig.198 Effect of amount of air in sequential LOCA conditions on mechanical properties of CR1.

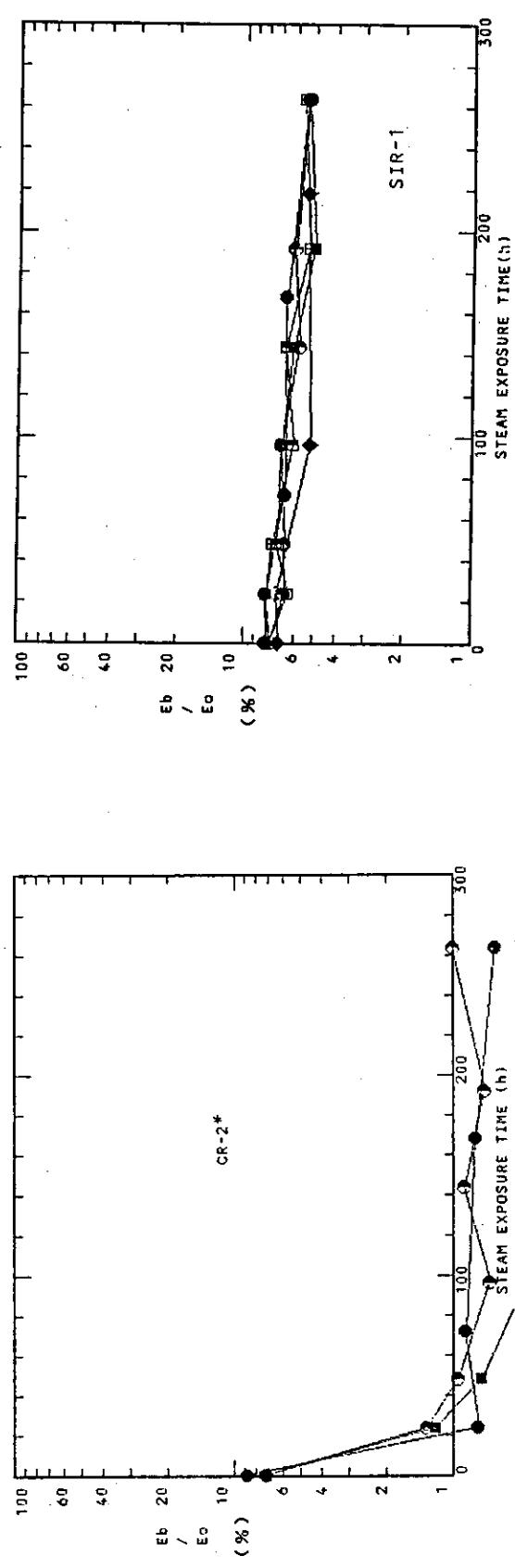
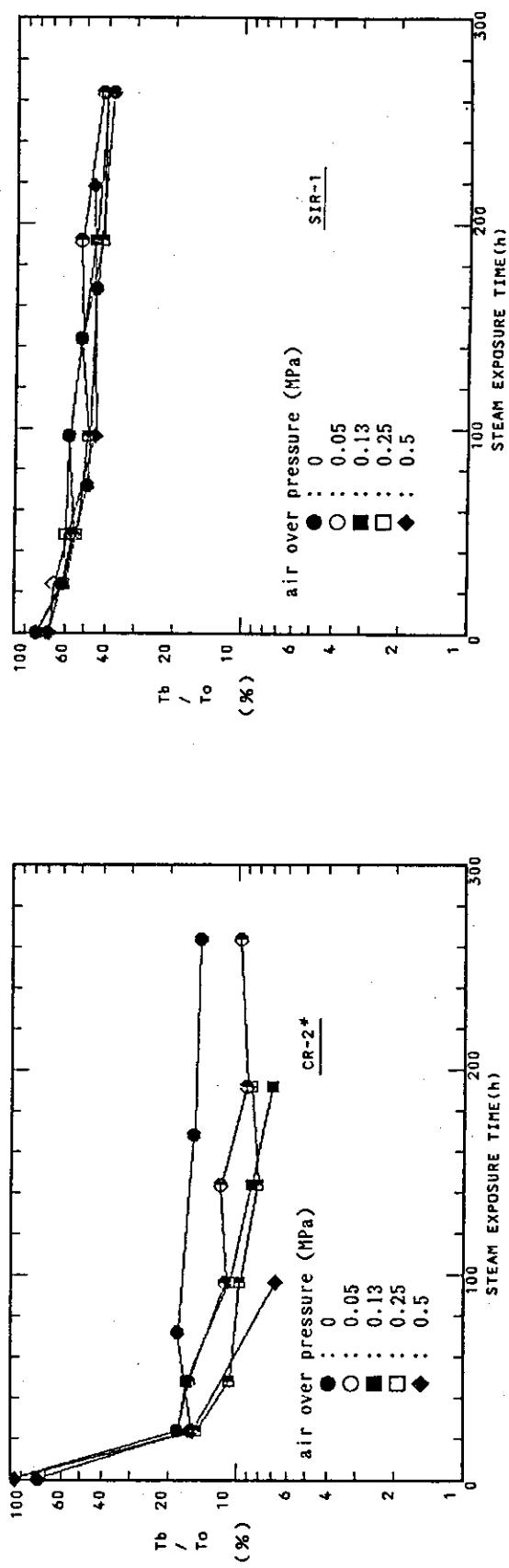


Fig.199 Effect of amount of air in sequential LOCA conditions on mechanical properties of CR2.

Fig.200 Effect of amount of air in sequential LOCA conditions on mechanical properties of SIR1.

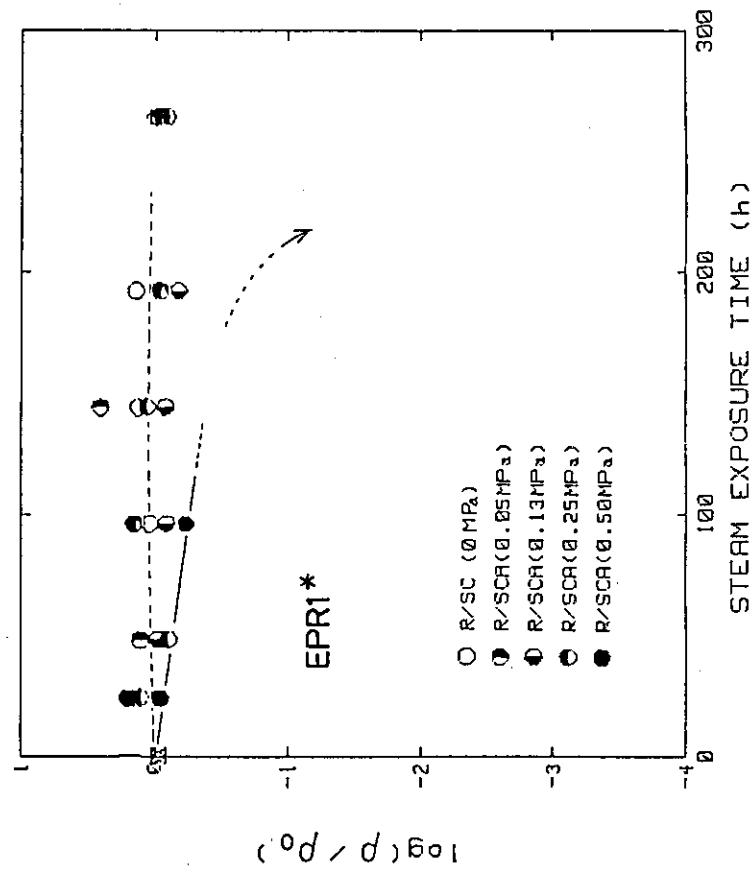
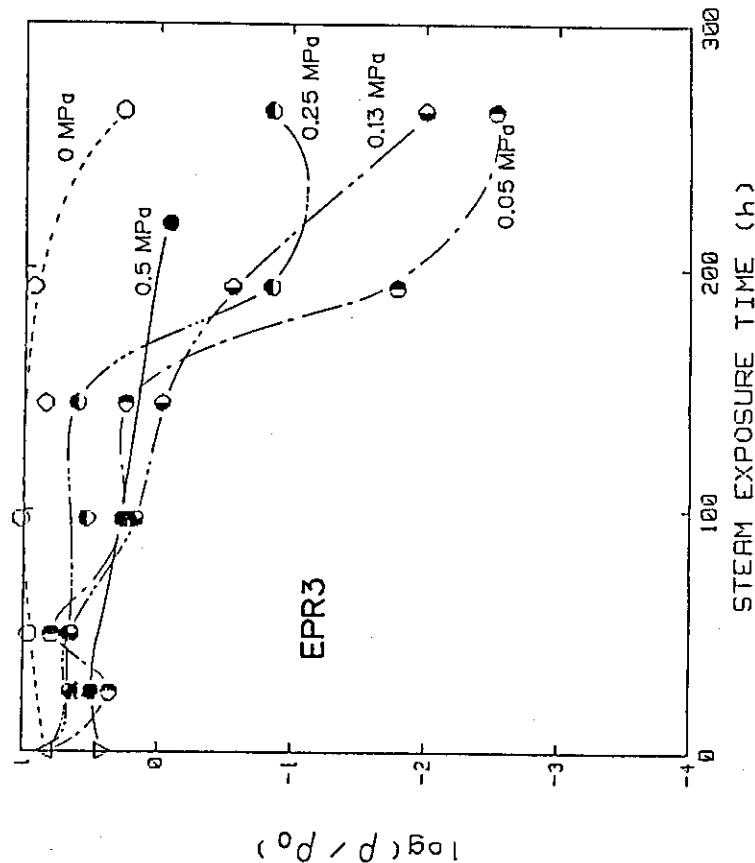


Fig.201 Effect of amount of air in sequential LOCA conditions on volume resistivity of EPR1 .

Fig.202 Effect of amount of air in sequential LOCA conditions on volume resistivity of EPR3 .

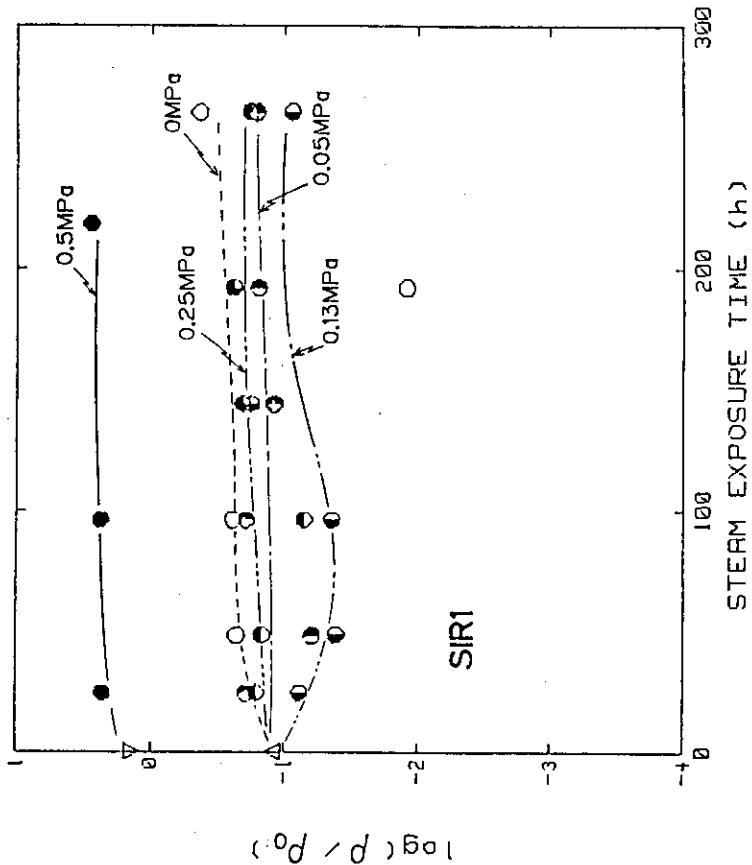


Fig.203 Effect of amount of air in sequential LOCA conditions on volume resistivity of XLPE1.

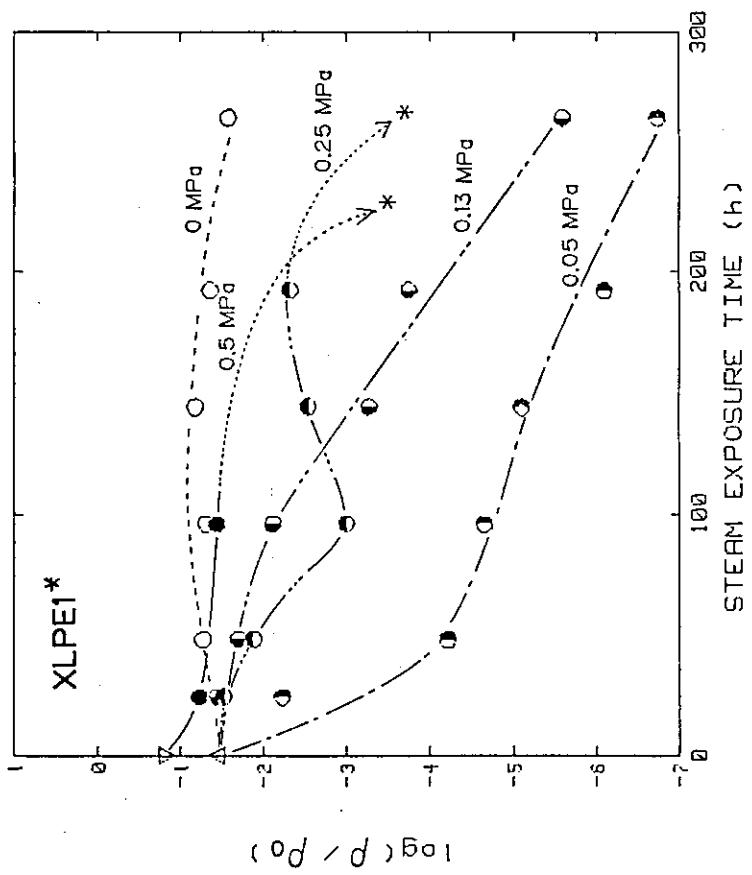


Fig.204 Effect of amount of air in sequential LOCA conditions on volume resistivity of SIRI.

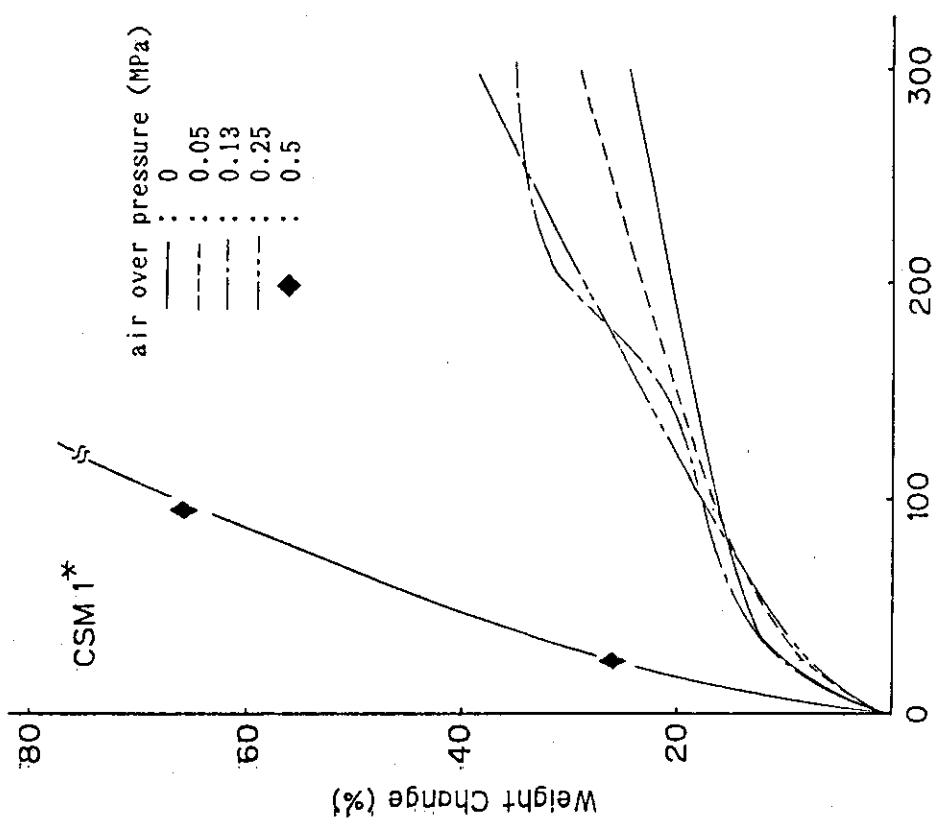


Fig.205 Effect of amount of air in sequential LOCA conditions on water sorption of CSM1 .

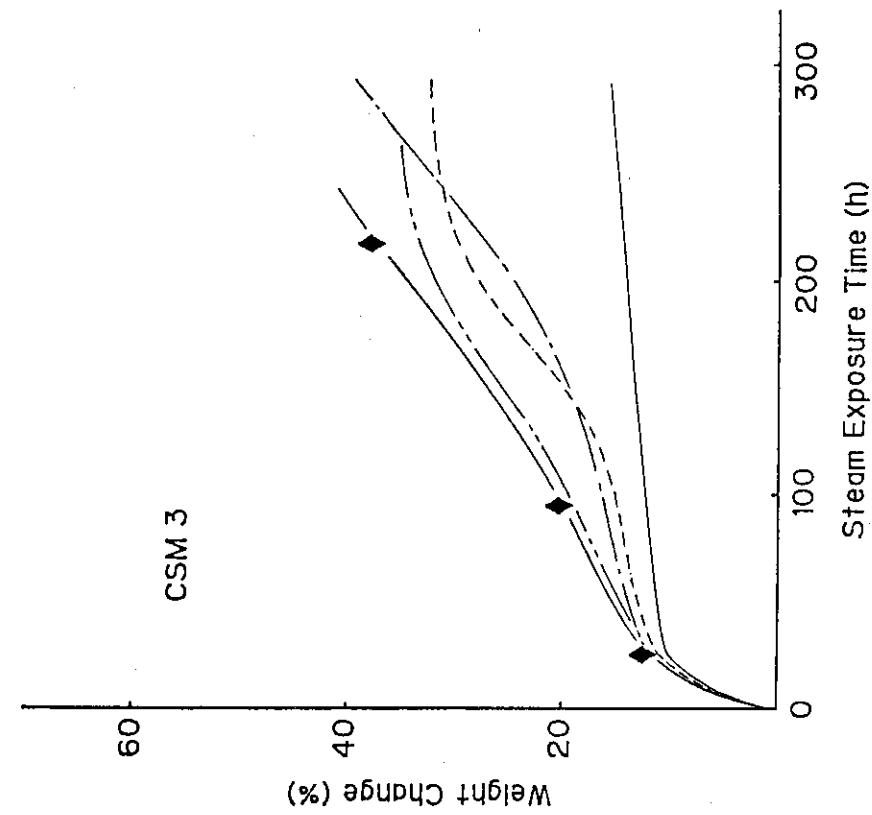


Fig.206 Effect of amount of air in sequential LOCA conditions on water sorption of CSM3 .

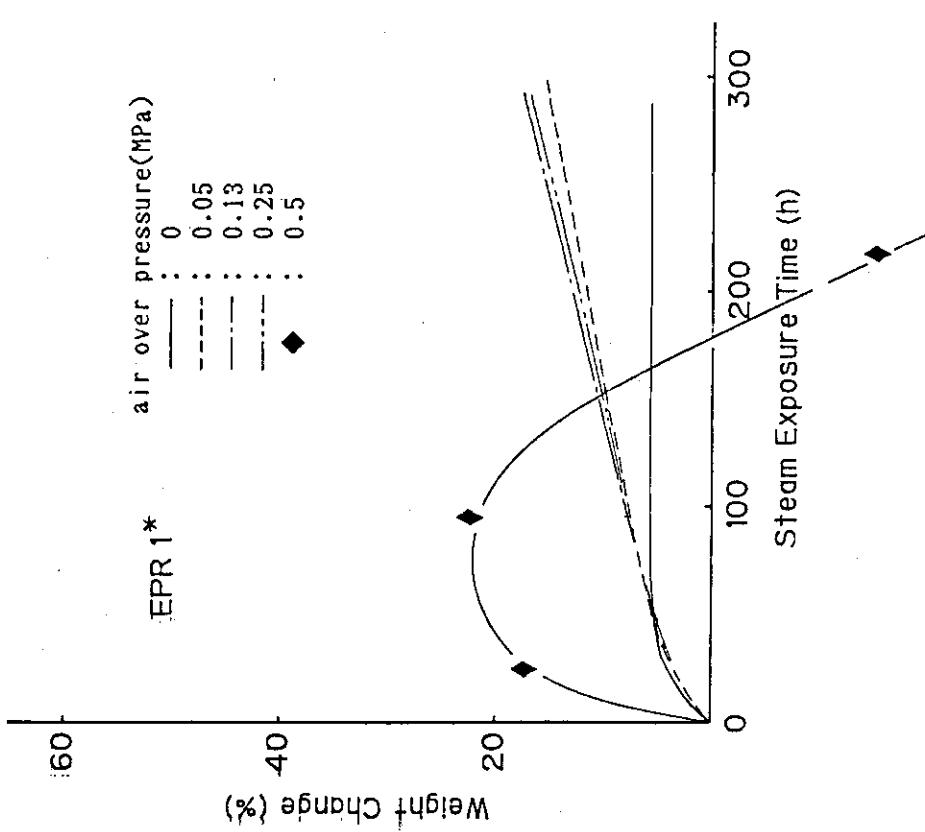


Fig.207 Effect of amount of air in sequential LOCA conditions on water sorption of EPR1 .

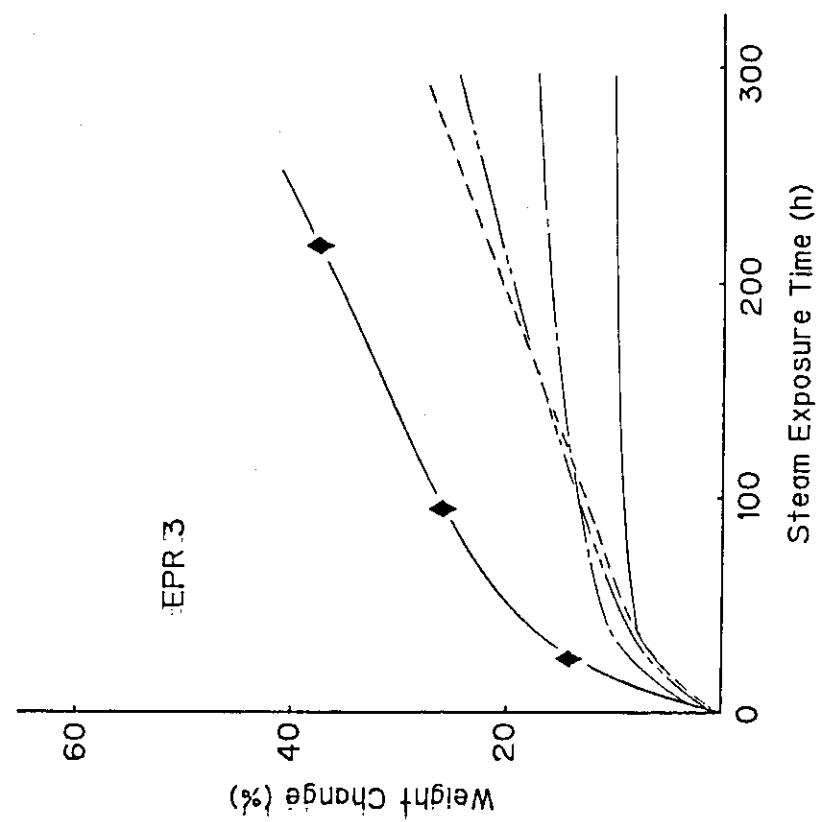


Fig.208 Effect of amount of air in sequential LOCA conditions on water sorption of EPR3 .

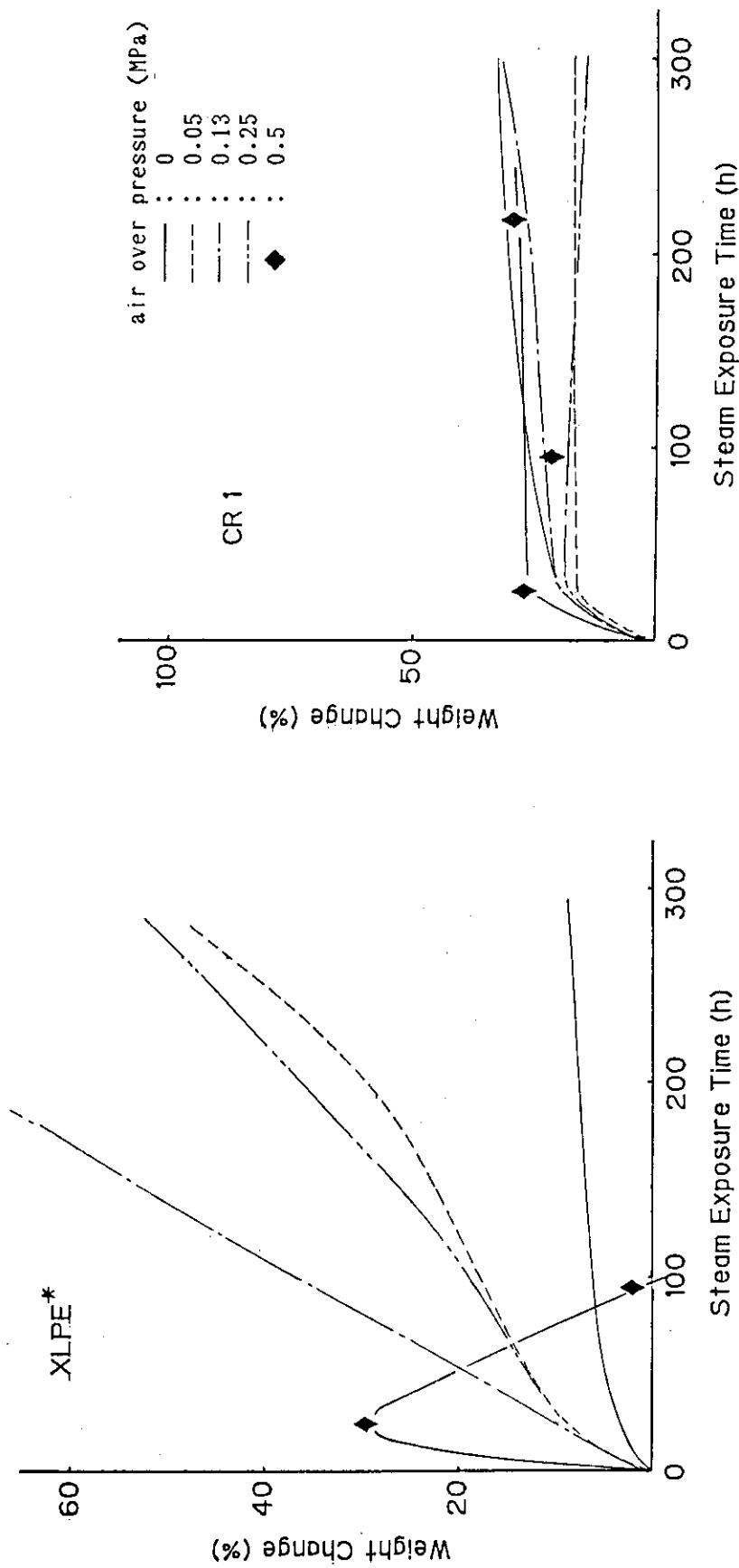


Fig.209 Effect of amount of air in sequential LOCA conditions on water sorption of XLPE1

Fig.210 Effect of amount of air in sequential LOCA conditions on water sorption of CR1.

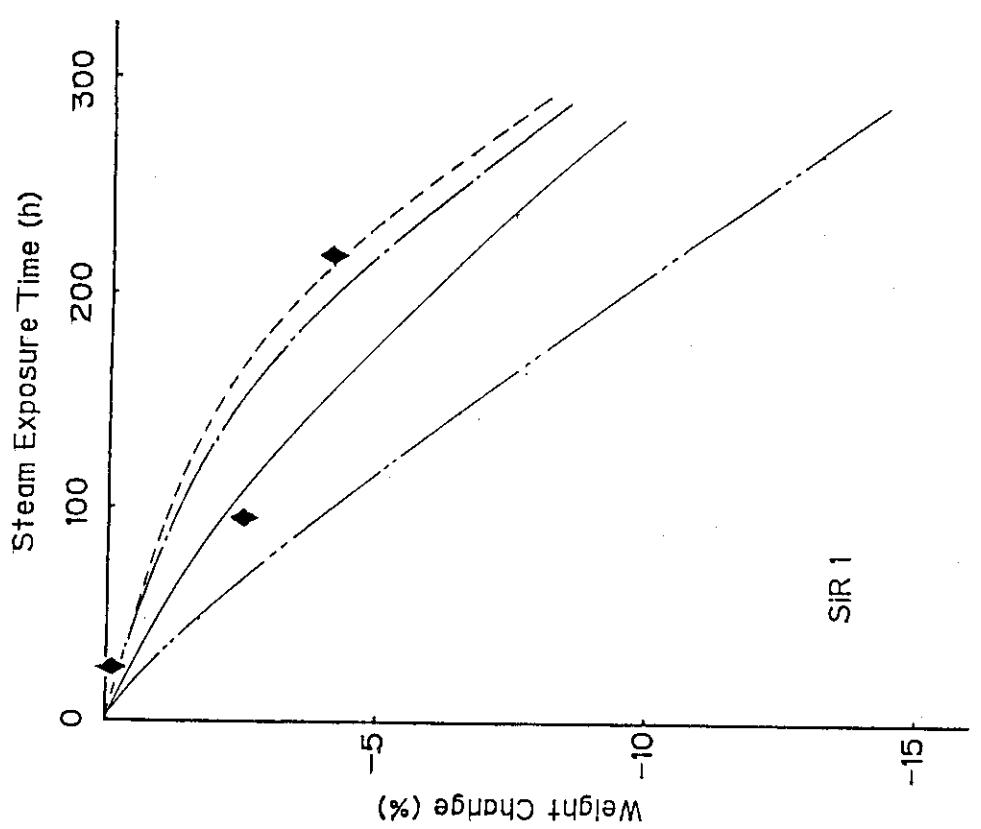


Fig.211 Effect of amount of air in sequential LOCA conditions on water sorption of CR2 .

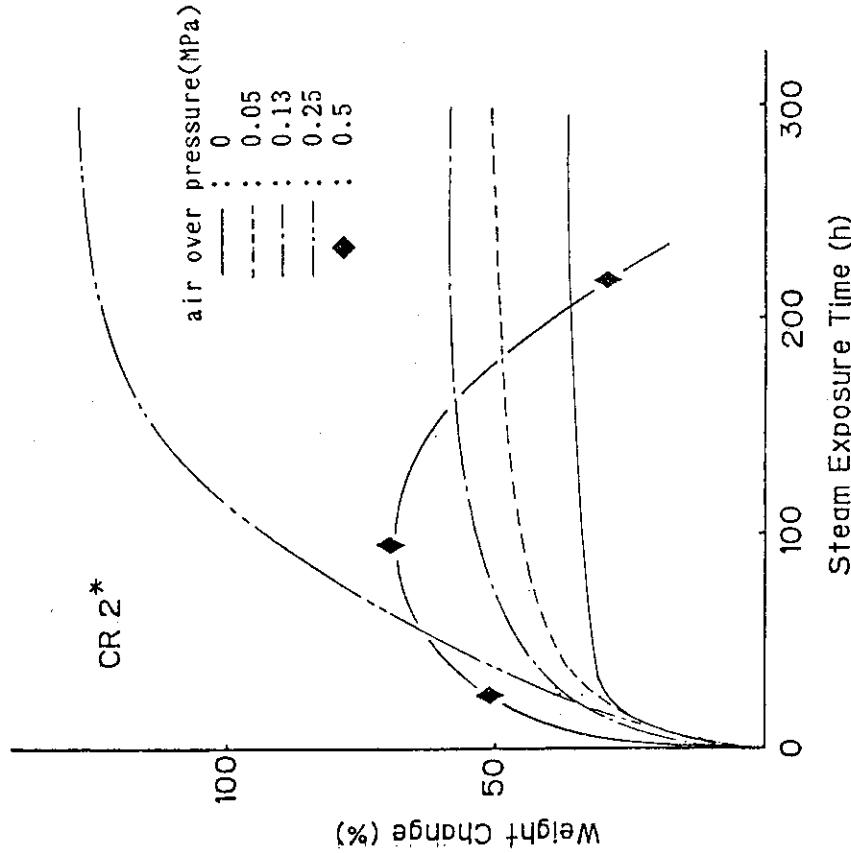


Fig.212 Effect of amount of air in sequential LOCA conditions on water sorption of SIR1 .

4.2.5 スプレイの影響

(1) 実験方法

高線量率(10kGy/h)下、室温、空气中で1.5MGyおよび70°C、空气中、5kGy/hで1.5MGy照射した試料を120°C、空気を含むL O C A模擬環境下に暴露し、各試料の機械的性質、電気的性質、吸水率におよぼすスプレイの影響を調べた。試験した配合の異なる13種類の試料の中から各素材毎に代表的な結果を示す。

(2) 結果および考察

1) 機械的性質

ハイパロン、E P R、架橋ポリエチレン、クロロブレンおよびシリコーンゴムの各試料について引張試験結果の内、強度と伸びの残率を蒸気暴露時間に対してプロットした結果をFig.213～220にそれぞれ示す。図中点線(10KGy/h)および一点鎖線(70°C,5KGy/h)はスプレイありの場合の結果を示す。

Fig.213,214にハイパロンの結果を示す。モデル配合、実用配合ともスプレイの影響は主に伸びにみられ、スプレイを行うと低下が大きくなる。しかし低下の割合は試料の配合により若干異なり実用配合（難燃配合された試料）でその影響が若干大きい。また、前照射条件では70°Cで照射した物の方が高線量率室温空气中で照射した物よりスプレイの有無の影響がより顕著に現れるものがあり、前照射段階での試料の酸化劣化の程度がその後の蒸気暴露中の劣化に関連するものと思われる。

一方、強度に関してはモデル配合、実用配合ともスプレイの影響は小さい。また前照射条件を70°Cで行ってもスプレイの有無の影響はあまり大きく見られない。

Fig.215,216 E P Rの結果を示す。E P Rは試料の配合によって挙動が異なる。モデル配合の試料(Fig.215)ではスプレイを行わない方がスプレイを行った物より強度、伸びとも低下が大きく、特に70°Cで照射したものは、スプレイ存在下では168時間迄測定可能であるが、スプレイなしでは蒸気暴露を行うと試料の軟化が著しく測定出来なくなる。

実用配合試料のE P R(Fig.216)では、強度にはスプレイの影響はほとんど見られないが、伸びはスプレイを行う方が低下が大きく、特に70°Cで照射した場合はその傾向がさらに大きくなる。

Fig.217に架橋ポリエチレンの結果を示す。架橋ポリエチレンは強度、伸びのいずれもスプレイ存在の方が劣化が大きくなる傾向にある。照射条件の違いは伸びに大きく見られ、高線量率下で照射した場合はその後の蒸気暴露により顕著な回復現象を示すが、スプレイがあると暴露時間とともに再び低下する。一方、スプレイなしでは回復した伸びはそのまま保持される。また、70°Cで照射した場合

は、蒸気暴露の初期に顕著な回復現象は見られないが、スプレイを行わない時は暴露時間とともに徐々に回復するのに対し、スプレイ存在下では回復現象が見られないなど、スプレイは劣化を大きくする方向に作用している。

架橋ポリエチレンの場合、スプレイそのものによる材料の劣化は小さいが、表面に生じた酸化部分を洗い流すことによって、蒸気環境の空気の影響を受けやすくなるものと考えられる。

Fig.218,219 にクロロブレンの結果を示す。クロロブレンは配合によらず前照射段階で強度、伸びの低下が大きく、特に伸びは初期値の10%程度まで減少する。またその後に続く蒸気暴露によって、スプレイの有無に関係なく強度、伸びともさらに低下する。クロロブレンの場合は高線量率下での照射および70°Cでの照射とも大きく低下するためスプレイの影響を比較する事は難しい。

Fig.220 にシリコーンゴムの結果を示す。シリコーンゴムは他のゴム材料に比べ試料内への酸素の拡散が容易なため照射条件が異なっても、強度、伸びの変化はあまり大きくなない。また、スプレイの有無による影響も小さい。

2)電気的性質

前項と同様な前照射条件および空気を含む蒸気環境に曝したときの絶縁抵抗におよぼすスプレイの影響を測定した。ここではケーブル用絶縁、被覆材料の内、特に絶縁体として用いられる絶縁材料3種類（EPR、架橋ポリエチレン、シリコーンゴム）についてのみ、その代表的な結果をFig.221～224にそれぞれ示す。

Fig.221,222にEPRの結果を示す。モデル配合の試料（Fig.221）では高線量率室温空气中で照射した場合は、スプレイの有無による影響はないが、70°C空气中照射の場合は影響が見られ、特にスプレイなしの場合は蒸気暴露を150時間以上行うと試料の軟化が起り測定出来なくなる。実用配合の試料（Fig.222）は前照射条件に関係なくスプレイの影響は見られない。EPRの場合、絶縁抵抗の低下はモデル配合、実用配合とも高線量率室温空气中照射より70°C空气中照射で行った方が大きな値を示す。

Fig.223 に架橋ポリエチレンの結果を示す。架橋ポリエチレンの場合は前照射条件およびスプレイの有無の影響はほとんど見られず蒸気暴露を長く行ってもほぼ一定の値を示す。

Fig.224 にシリコーンゴムの結果を示す。シリコーンゴムの場合も、いずれの条件とも、蒸気暴露による回復傾向および絶縁低下の度合が誤差範囲内で一致し、スプレイの影響は見られない。

3)吸水膨潤

ゴムは元来吸水しないイメージが強いが、LOCA模擬環境の様な厳しい条件

下では著しく吸水膨潤することがこれまでの研究で明らかになった¹。これら吸水膨潤挙動はケーブルの機械的性質および電気的性質の低下の原因になる²。ここでは試料の吸水に関係の深いスプレイの有無の影響を調べた。代表的な結果をFig. 225～232に示す。

Fig.225,226にハイパロンの結果を示す。モデル配合の試料(Fig.225)はスプレイなしの方が重量増加が顕著である。特に70℃で照射した物の吸水は大きな値を示す。これに対して、実用配合の試料(Fig.14)は挙動が異なりスプレイ有りの方が吸水が大きい。また、前照射条件の影響をみると高線量率照射の方が70℃照射より吸水は大きな値を示す。

Fig.227,228にE P Rの結果を示す。モデル配合の試料(Fig.227)は蒸気環境暴露の初期の吸水速度はスプレイ有りの方が大きいが、長時間暴露するとスプレイなしの方がむしろ大きくなる。実用配合の試料(Fig.228)は吸水挙動に対するスプレイの有無の影響は小さく、ほぼ同程度の吸水速度を示す。吸水に及ぼす前照射条件の影響は70℃で照射した物の吸水率が高線量率で照射した物より大きく、酸化劣化と吸水が関連していることを示す。

Fig.229に架橋ポリエチレンの結果を示す。架橋ポリエチレンの場合、高線量率下で照射し、スプレイなしで暴露すると吸水は小さいが、スプレイを行うと暴露時間と共に吸水は大きくなる。一方、70℃で照射したものは著しい吸水を示すが、スプレイの有無による影響は小さい。

Fig.230,231にクロロプロレンの結果を示す。モデル配合、実用配合とも試料の吸水に及ぼすスプレイの有無の影響は小さい。また前照射条件の違いによる影響もあまり大きくない。クロロプロレンの場合は前照射段階(1.5MGy照射)で試料が硬化するため試料の物理的制約により吸水量は暴露時間に対し一定の値を示す。

Fig.232にシリコーンゴムの結果を示す。シリコーンゴムはアルカリ性スプレイ液により加水分解を起こすため重量減少を示す³。したがってスプレイの有る場合が無い場合に比べ重量減少は大きい。

(3) まとめ

逐次法L O C A模擬環境により絶縁、被覆材料におよぼすスプレイの有無の影響を調べた結果、機械的性質に関してはスプレイの有無の影響が見られる場合が多いが。スプレイにより、機械的性質に有害な酸化生成物が取り除かれる場合には、劣化がむしろ抑制され、スプレイ有りの方が必ずしも厳しくない。しかし蒸気環境の空気の影響を受ける架橋ポリエチレンの場合は表面の酸化が著しく進み、これらがスプレイにより洗い流されるため、表面は常に酸化雰囲気に曝され、そのため劣化はむしろ進むと考えられる。

前照射条件の影響はより酸化される雰囲気で照射した場合の方がスプレイの影

響は大きく、劣化も大きくなる。

電気的性質の場合は一部の試料（70℃空気中前照射したモデル配合EPR）を除いてはスプレイの有無による影響は小さい。

吸水に関してはスプレイなしの方が吸水が大きい場合とスプレイが有る方が吸水する場合があるが、一定の傾向を示さないが、概して酸化性物が蓄積していると考えられる場合には吸水しやすい。

関連文献

1. 八木敏明, 日馬康雄, 伊藤政幸, 岡田漱平, 吉川正人, 吉田健三, "放射線照射したゴム材料の沸騰スプレイ液中における膨潤挙動", JAERI-M 83-072(1983)
2. 岡田漱平, 吉川正人, 伊藤政幸, 日馬康雄, 八木敏明, 吉田健三, "絶縁材料の電気的性質の変化に対するLOCA模擬条件の影響", 電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-82-109(1981)
3. 八木敏明, 日馬康雄, 伊藤政幸, 岡田漱平, 田村直幸, 川上和市郎, "放射線照射したシリコーンゴムの薬液中における劣化", 同上 EIM-85-161(1985)
4. 日馬康雄, 八木敏明, 伊藤政幸, 岡田漱平, 川上和市郎, "LOCA模擬逐次法における前照射条件および蒸気環境条件が絶縁材料の劣化に及ぼす影響", I. 機械的性質 同上 EIM-86-130(1986)
5. 岡田漱平, 日馬康雄, 八木敏明, 伊藤政幸, 川上和市郎, "LOCA模擬逐次法における前照射条件および蒸気環境条件が絶縁材料の劣化に及ぼす影響", II. 電気的性質 同上 EIM-86-131(1986)
6. Y.Kusama, T.Yagi, S.Okada, M.Ito, M.Yoshikawa, K.Yoshida, N.tamura, W.Kawakami, "Progress on Qualification Testing Methodology Study of Electric Cables", Proceedings of U.S. Nuclear Regulator Commission NUREG/CP-0082(1987)

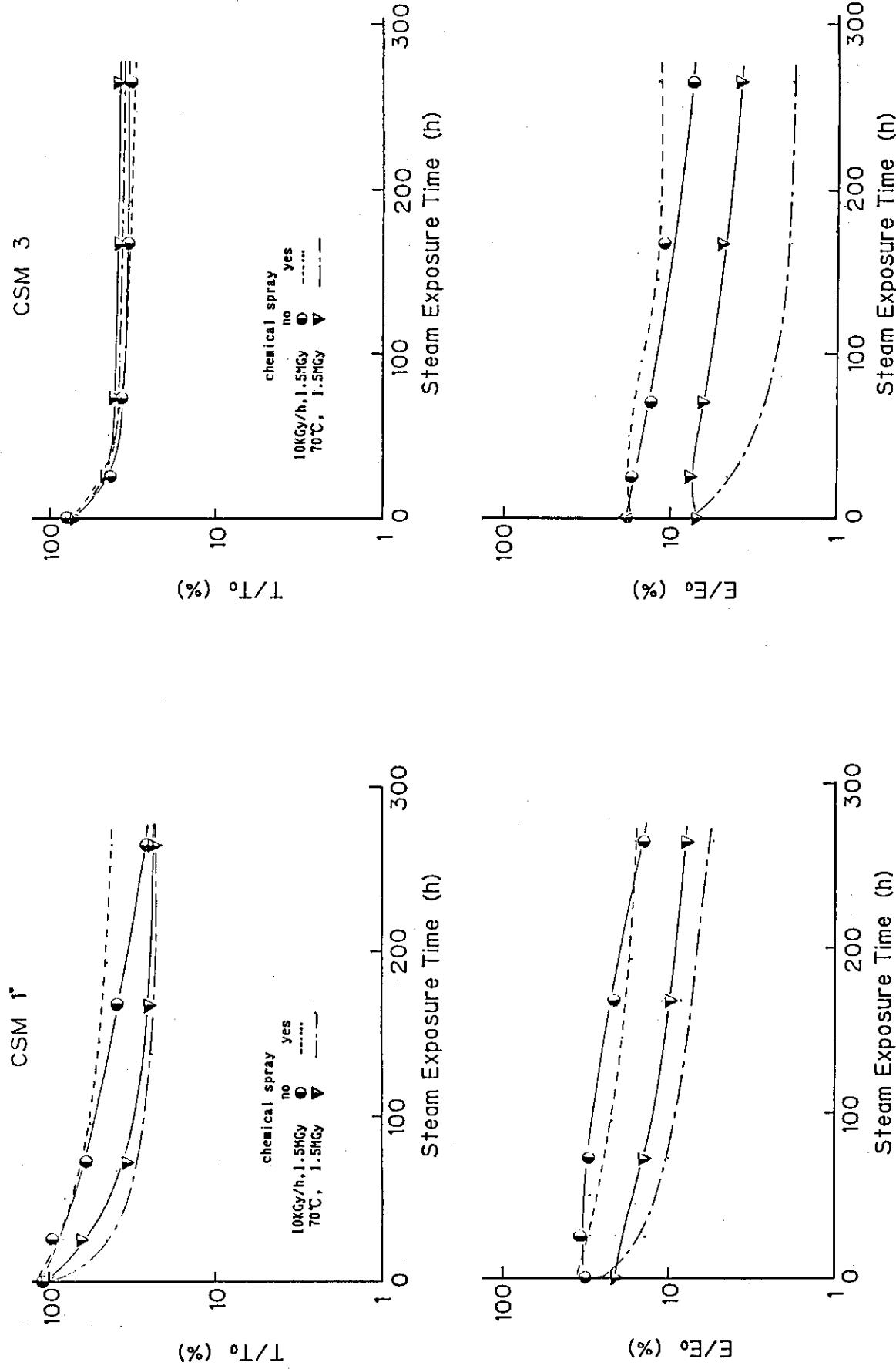


Fig. 213 Effect of chemical spray on mechanical properties of CSM1 in sequential LOCA conditions.
 Fig. 214 Effect of chemical spray on mechanical properties of CSM3 in sequential LOCA conditions.

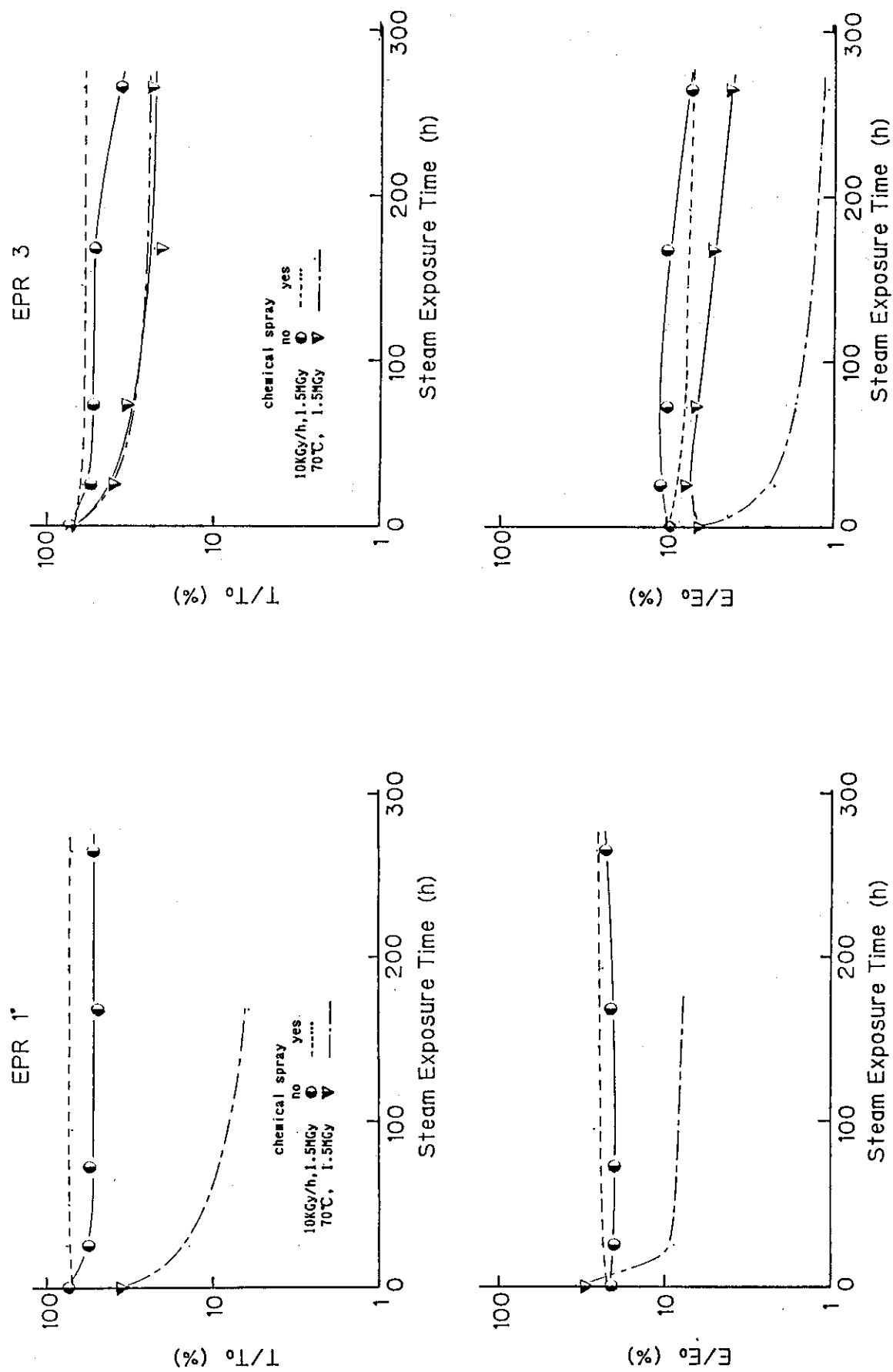


Fig.215 Effect of chemical spray on mechanical properties of EPR1 in sequential LOCA conditions.

Fig.216 Effect of chemical spray on mechanical properties of EPR3 in sequential LOCA conditions.

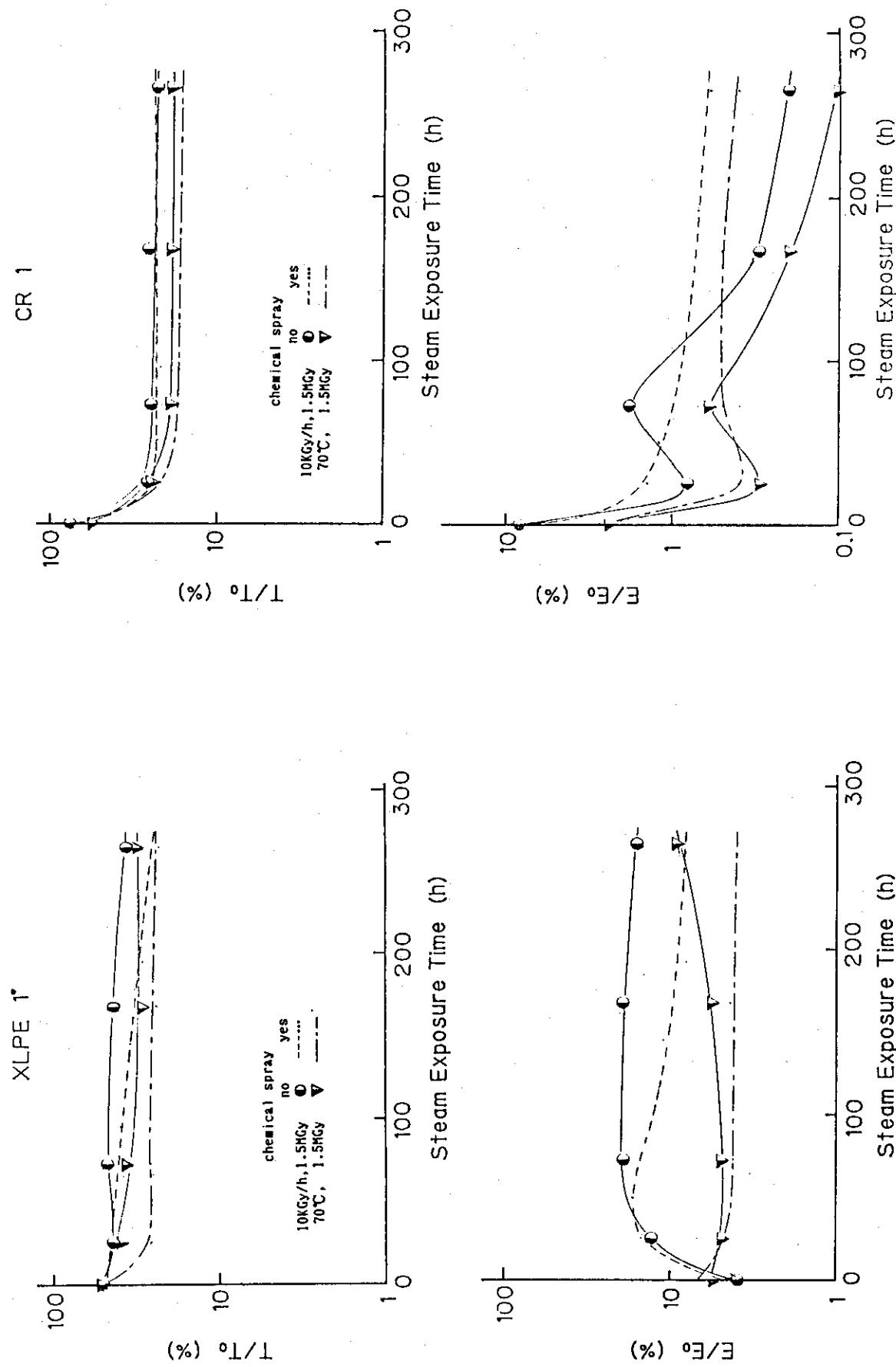


Fig.217 Effect of chemical spray on mechanical properties of XLPE1 in sequential LOCA conditions.
Fig.218 Effect of chemical spray on mechanical properties of CR1 in sequential LOCA conditions.

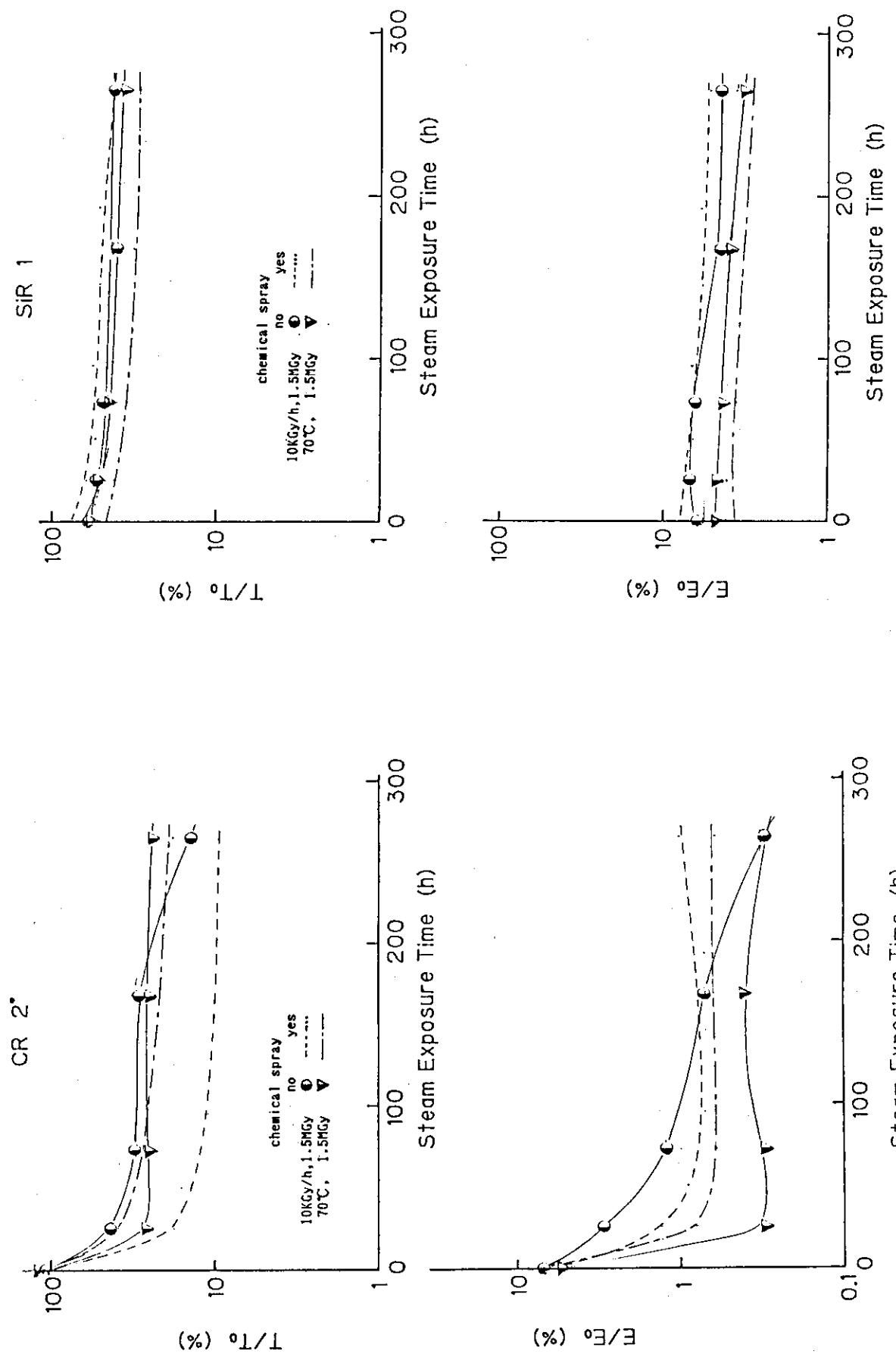


Fig.219 Effect of chemical spray on mechanical properties of CR2 in sequential LOCA conditions.

Fig.220 Effect of chemical spray on mechanical properties of SiR1 in sequential LOCA conditions.

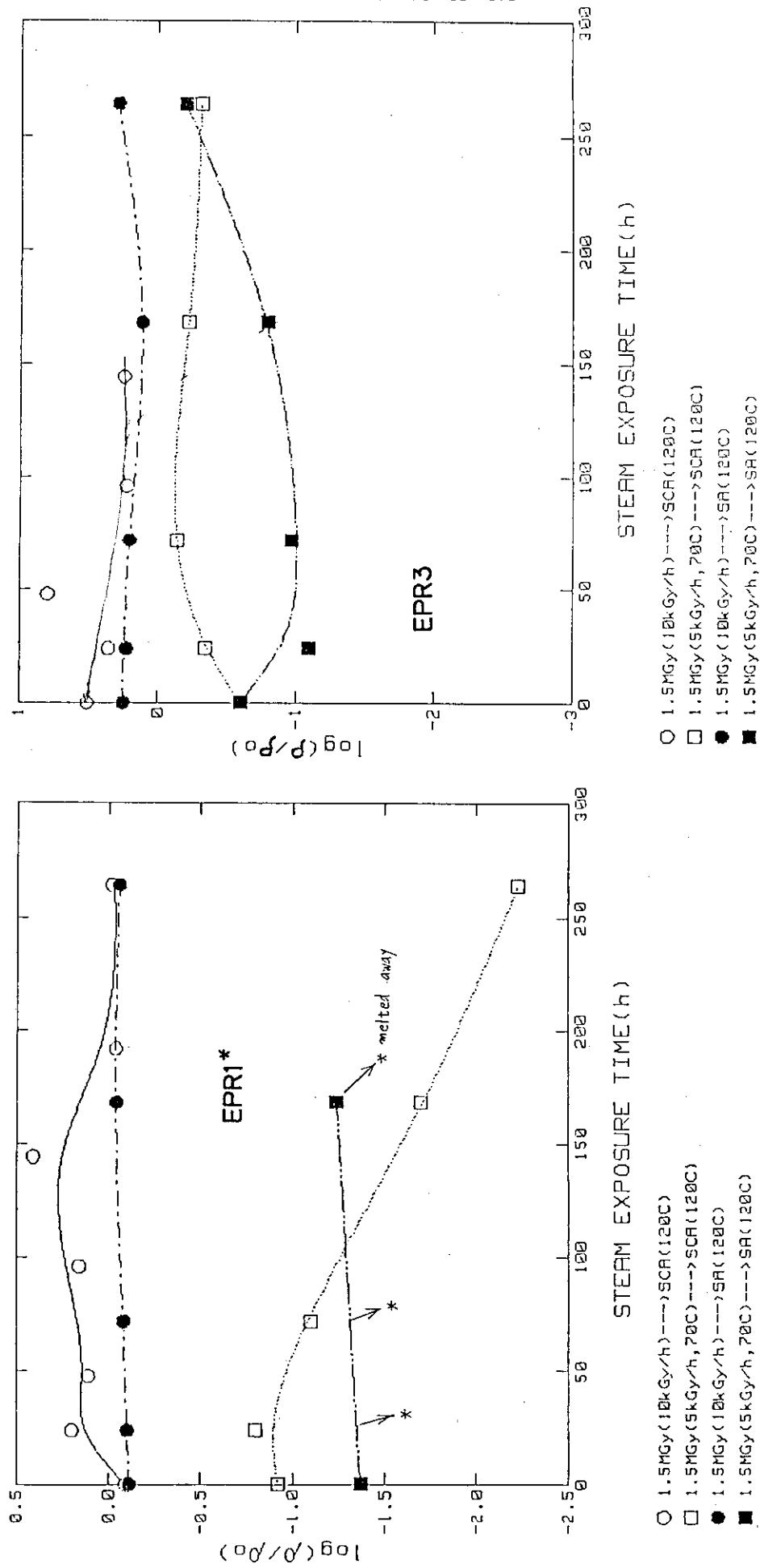


Fig.221 Effect of chemical spray on electrical properties of EPR1 in sequential LOCA conditions.

Fig.222 Effect of chemical spray on electrical properties of EPR3 in sequential LOCA conditions.

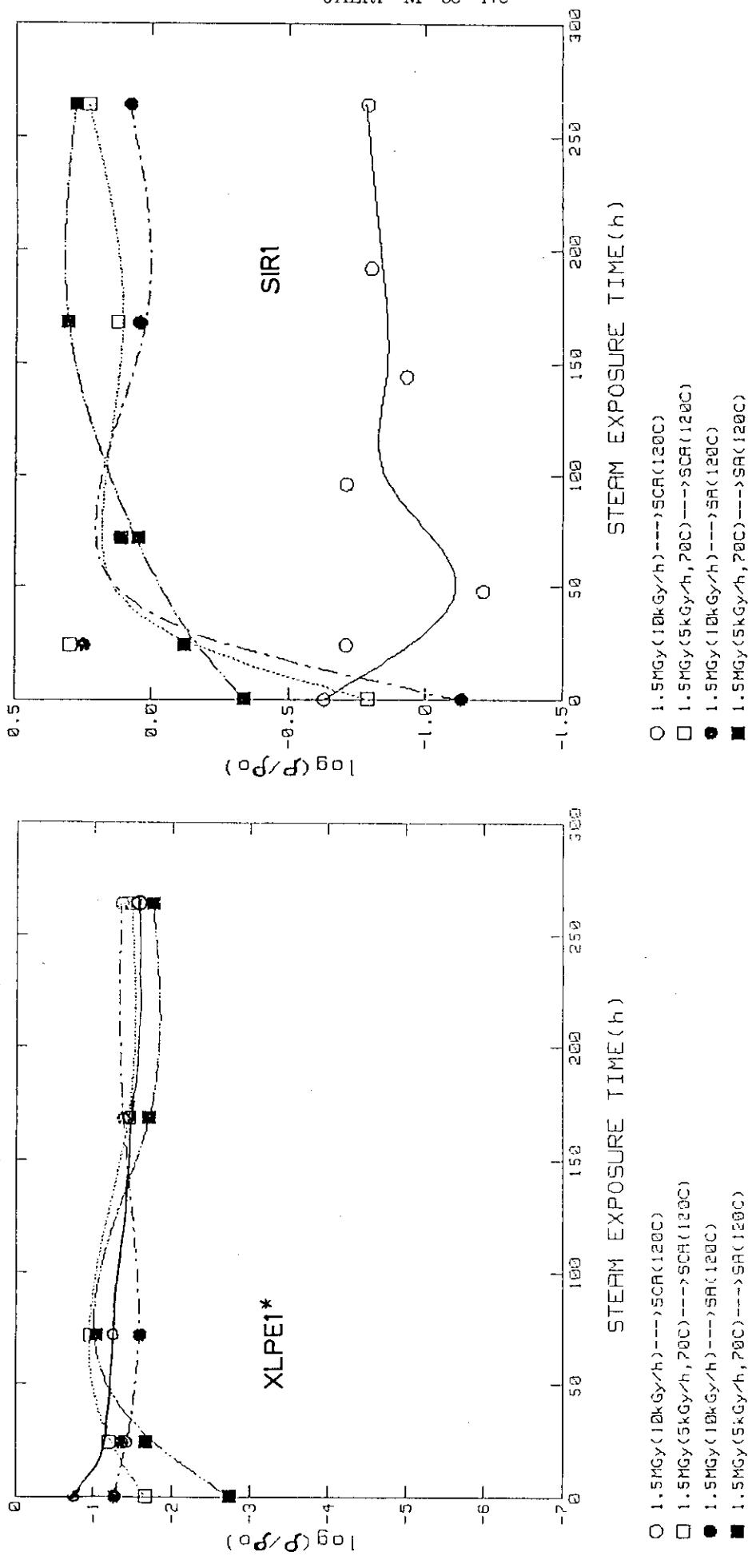


Fig.223 Effect of chemical spray on electrical properties of XLPE1 in sequential LOCA conditions.
Fig.224 Effect of chemical spray on electrical properties of SIR1 in sequential LOCA conditions.

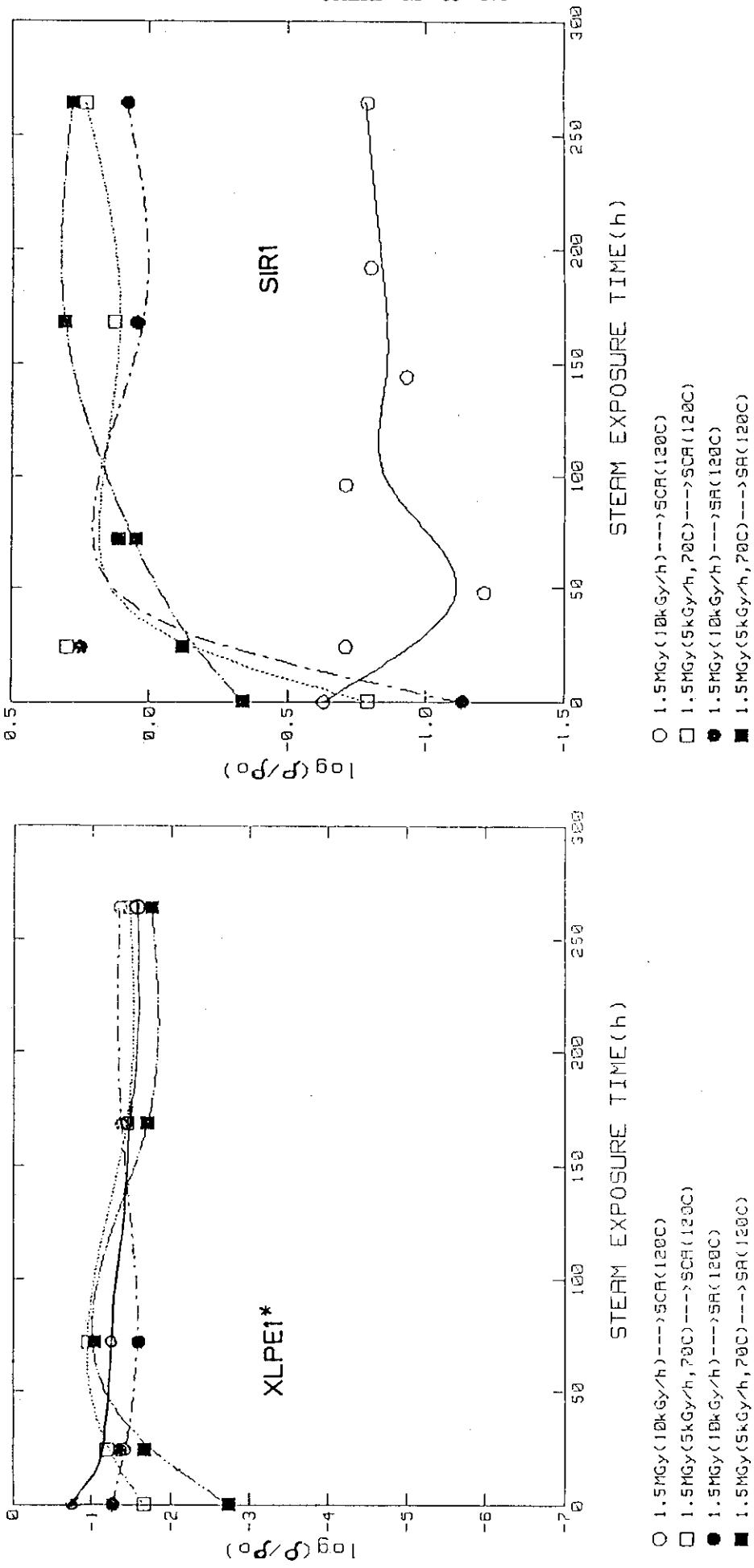


Fig.223 Effect of chemical spray on electrical properties of XLPE1 in sequential LOCA conditions. Fig.224 Effect of chemical spray on electrical properties of SIR1 in sequential LOCA conditions.

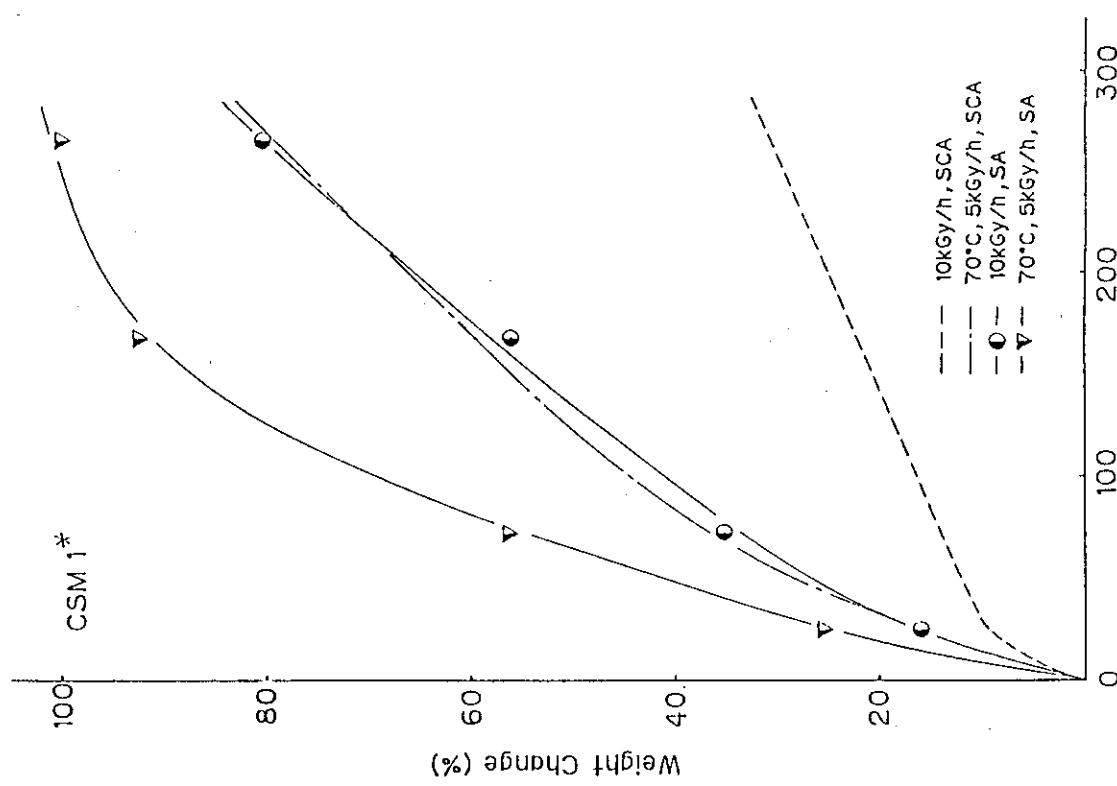


Fig.225 Effect of chemical spray on water srption of CSM1 in sequential LOCA conditions.

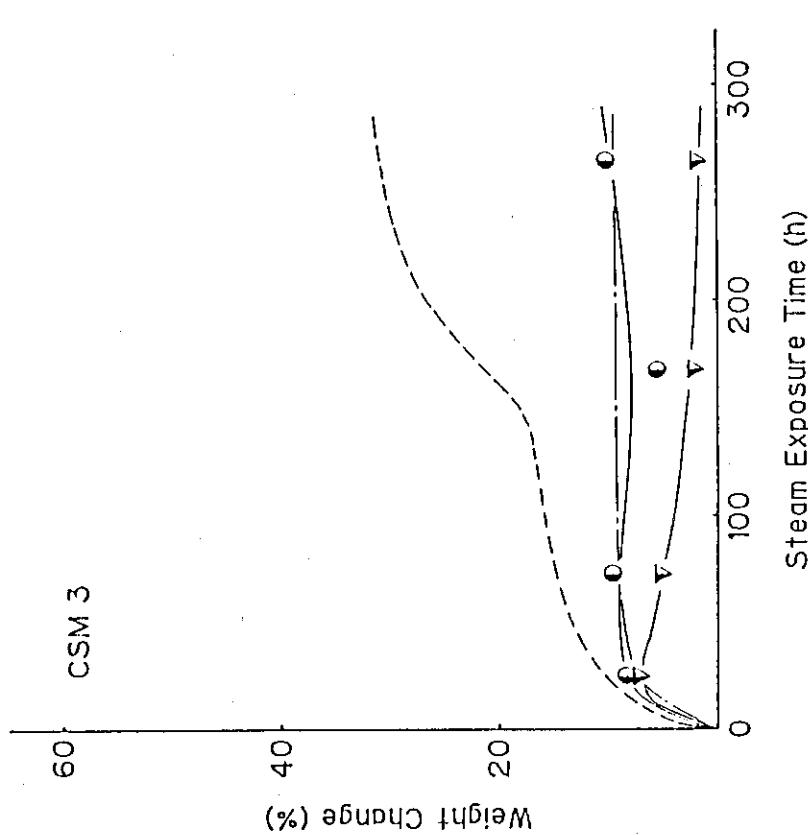


Fig.226 Effect of chemical spray on water srption of CSM3 in sequential LOCA conditions.

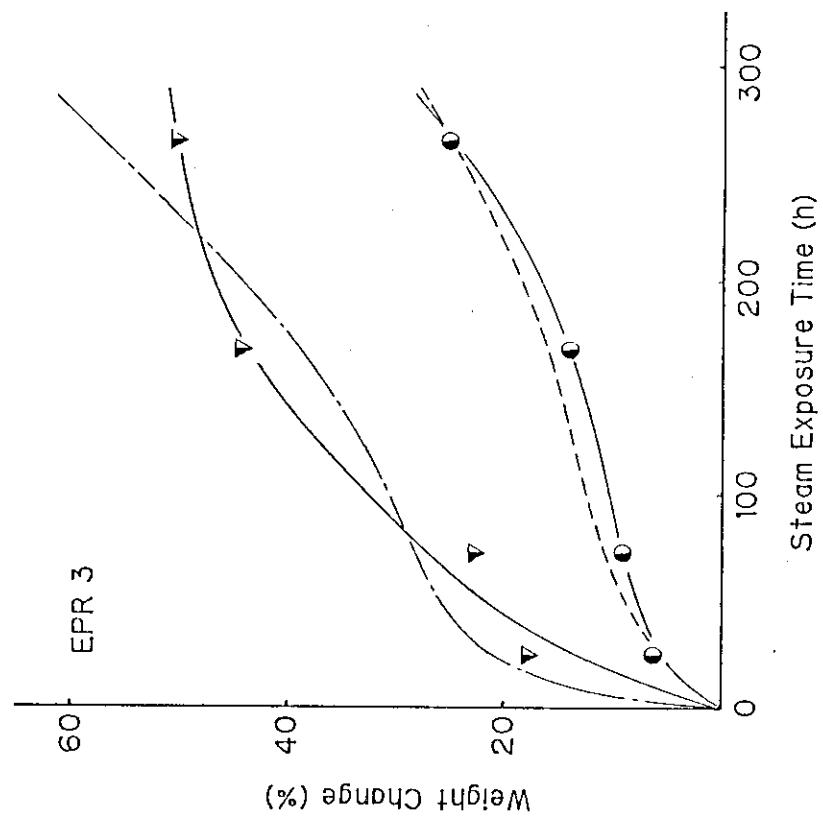
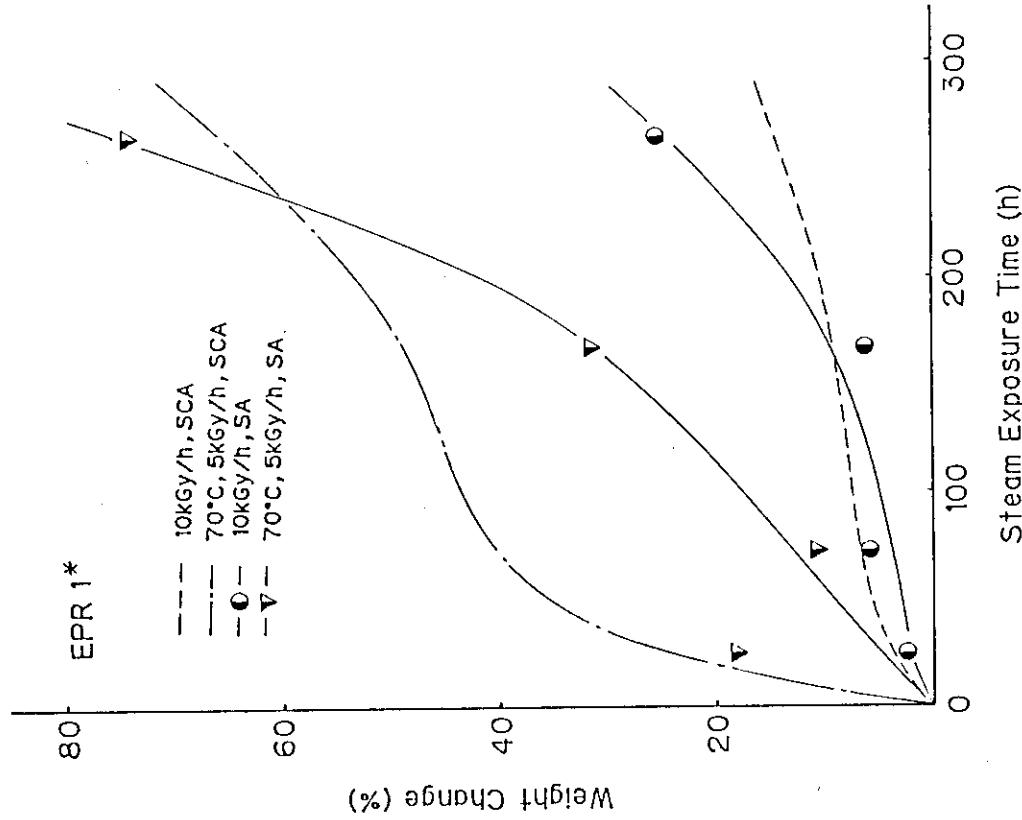


Fig.227 Effect of chemical spray on water sorption of EPR1 Fig.228 Effect of chemical spray on water sorption of EPR3
in sequential LOCA conditions.

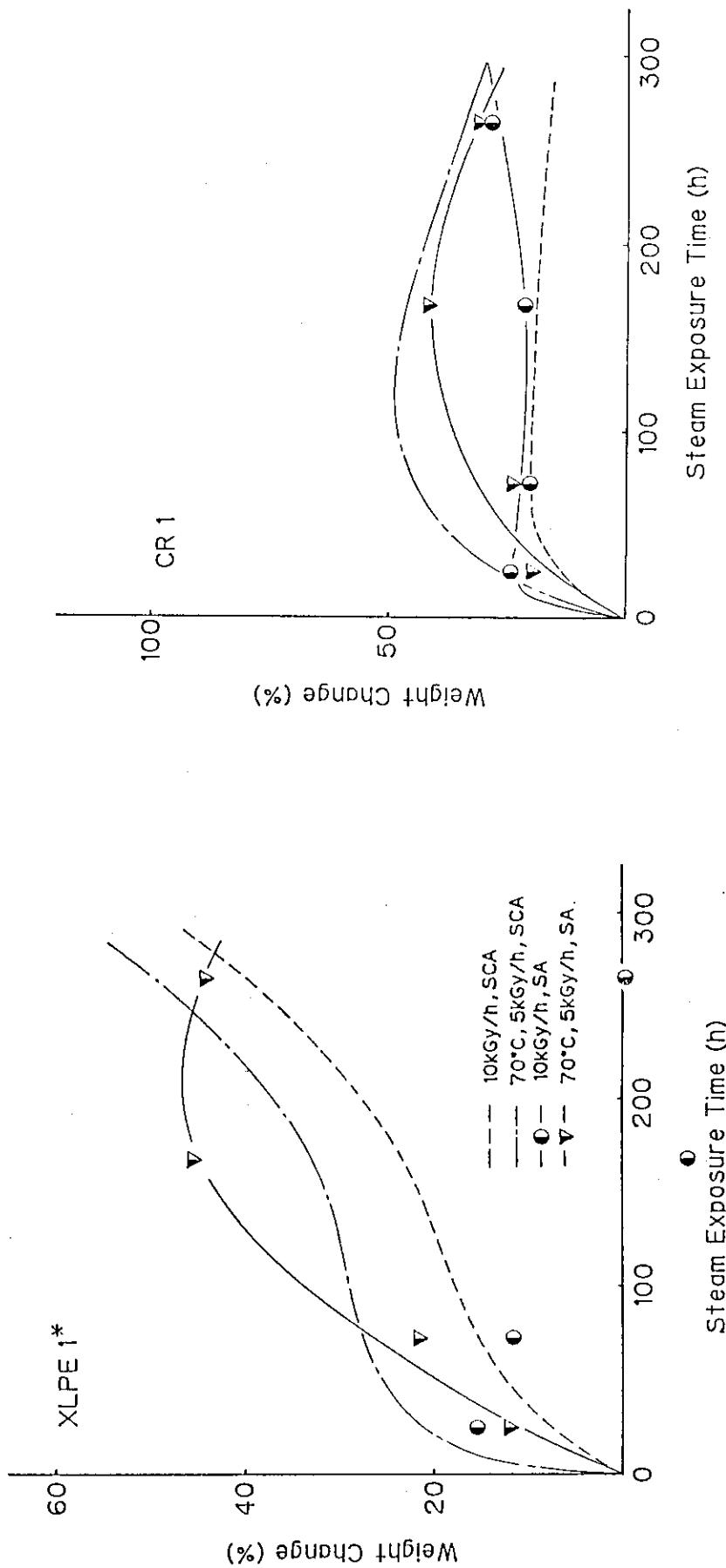
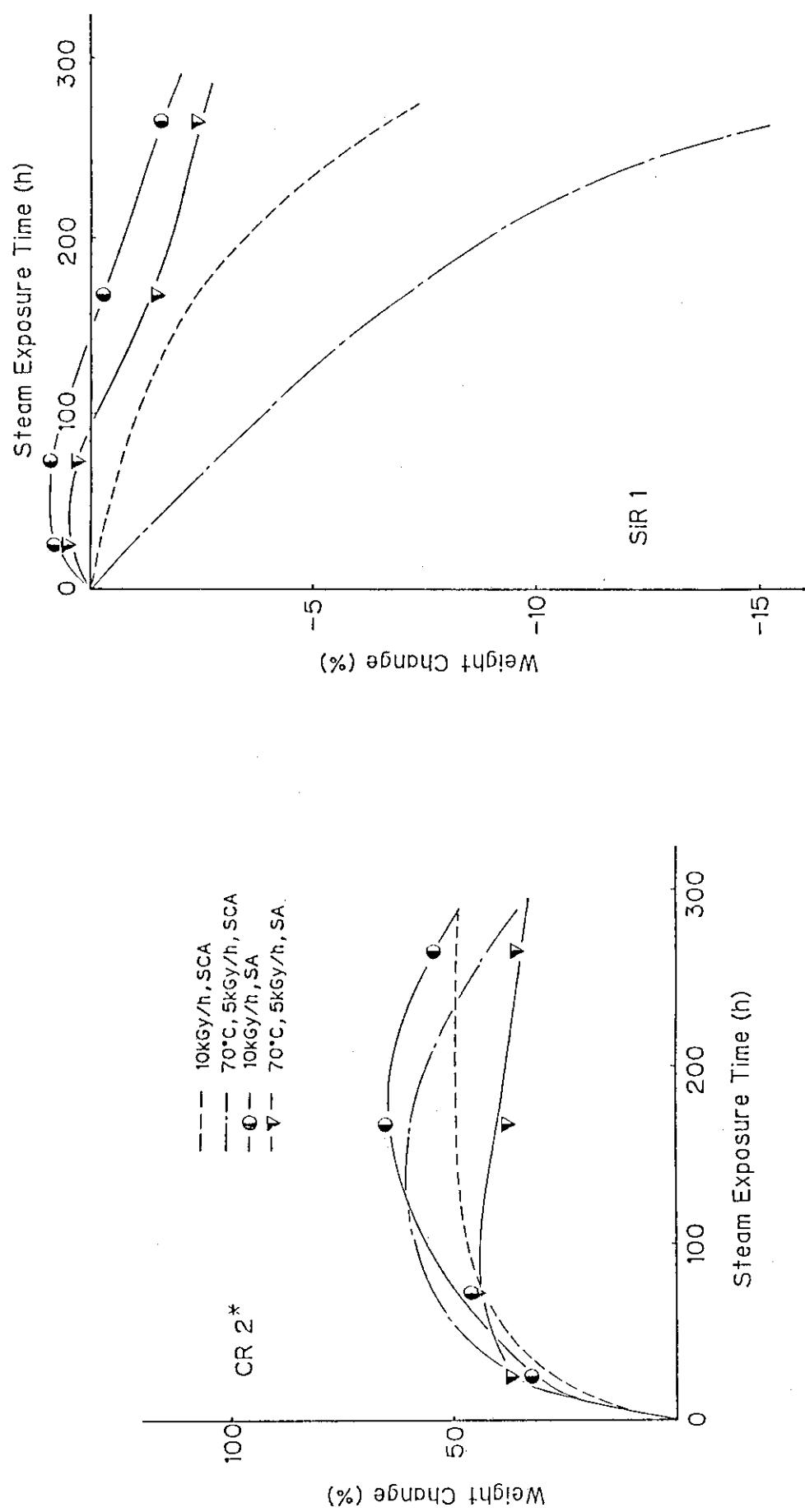


Fig.228 Effect of chemical spray on water sorption of XLPE1 Fig.230 Effect of chemical spray on water sorption of CR1 in sequential LOCA conditions.



4.2.6 事前劣化条件の影響

4.1.7に述べたように40年間の通常運転時の劣化に相当する劣化を予め与える場合、現実の環境に最も即した条件を考慮しなければならない。基本的な考え方は、40年という長期間、低線量率下の熱老化では、試料の内部まで酸化劣化が進むことであり、これらを模擬する方法としては、酸素加圧下照射¹ないしは温度を上げて（酸素の拡散速度を上げて）照射する方法などが提案されている^{2,3}。一方、事前劣化を同時環境でなく、逐次的に与える場合の順序としては、酸化条件での照射後熱老化する順序が、劣化のメカニズム上からも現実の劣化に近いという報告⁴もみられる。このような観点から、逐次法LOCA模擬試験法についても事前劣化条件の影響を検討する。本節では現行試験法推奨案⁵⁾で用いられている事前劣化の条件と、その順序を逆にした場合の比較ならびに推奨案の条件および酸素加圧下照射後熱老化による事前劣化を与えた試料をBWR, PWR用LOCA模擬逐次環境に暴露して劣化を比較した。

(1) 実験方法

試料：試験用標準シート試料（SS）13種類を用いた。

事前劣化条件

1. 熱老化（空気中, 121°C, 7日間）→放射線照射（空気中, 室温, 10kGy/hで0.5MGy）
2. 放射線照射（同上）→熱老化（同上）
3. 酸素加圧下照射（室温, 酸素加圧(0.5MPa), 4kGy/hで0.5MGy）→熱老化（空気中, 121°C, 7日間）

LOCA模擬環境暴露

上記の事前劣化を与えたシート状試料を逐次法によるBWR, PWR用LOCA模擬条件に暴露した。逐次法の前照射条件は空気中, 10kGy/hでBWR条件では0.26MGy, PWR条件では1.5MGy照射し、それぞれ空気を含むBWR, PWR用蒸気環境に暴露した。蒸気環境プロフィルは3.2.3に示した標準的なBWR, PWR用条件を用いた。

(2) 結果及び考察

1) 事前劣化における順序の効果

Fig.233に事前劣化を試験法推奨案の条件（熱→放射線）で与えた場合と、その逆の順番（放射線→熱）に与えたときの機械的性質の強度と伸びの保持率を示した。白い棒グラフは通常の事前劣化、黒の棒グラフは逆の順序で事前劣化を与

えた場合である。ハイパロンとクロロブレンの一部は放射線照射後熱老化の順に与えた方が劣化が大きくなるが、EPRや架橋ポリエチレンでは順序の影響は小さいか、殆どみられない。

Fig.234 に絶縁抵抗に対する事前劣化の順序の影響を示す。EPRを除く試料の全てについて、通常の事前劣化を与えると1桁～3桁の絶縁低下を示す。これに対し、事前劣化の順を逆に与えたものでは絶縁低下は著しく少なく、殆どの試料で1桁以内か、逆に初期値より絶縁抵抗が高くなるものがみられ、電気的には事前劣化の順序を逆にすると劣化が少ない方向になる。EPRについては事前劣化では殆ど絶縁抵抗は低下しないが、傾向としては他の試料と同様に逆の順序で与えると絶縁抵抗が良くなる方向を示すものが多い。これらの現象は先に述べたように、絶縁低下の原因と考えられる照射により生成した極性物質の熱による分解、揮散などが起こるためであろう。したがって、機械的性質については放射線照射→熱老化の順がやや厳しく、電気的性質については熱→放射線の順が厳しいことがわかる。

2) LOCA模擬環境暴露時の劣化に及ぼす事前劣化条件の影響

前項で事前劣化の順序について検討したが、現実の環境における劣化を考慮して、事前劣化の照射を酸化雰囲気で行い、通常の条件で行ったものと比較した。

Fig.235 は試験法推奨案の条件ならびに酸素加圧下照射後熱老化したときの機械的性質を示す。EPRとシリコーンゴムとクロロブレンの一部を除き、酸素加圧下照射後熱老化したものの劣化が大きくなっている。特に架橋ポリエチレンではこの傾向が顕著である。一方、EPRでは配合によって傾向が異なり、シリコーンゴム、クロロブレンの一部では事前劣化条件の違いによる差はほとんどない。

次に、上記の事前劣化を与えた後LOCA模擬環境に暴露したときの劣化に与える事前劣化条件の影響について示す。Fig.236 に上記の事前劣化を与えた後空気を含むBWR (A) ならびにPWR (B) 用LOCA模擬環境に暴露したときの機械的性質を示す。これらの図で架橋ポリエチレン以外の試料は同一素材で配合の異なる複数の試料の平均値を示している。図からBWR条件に暴露した際にハイベロン、クロロブレン、シリコーンゴムは酸素加圧下照射後熱老化による事前劣化を与えると劣化が大きくなるのに対し、架橋ポリエチレンは逆に試験法推奨案の条件での劣化が大きくなる。また、EPRでは強度と伸びで傾向が逆になるなど事前劣化条件の影響が若干見られる。

これに対し、PWR条件に暴露すると強度も伸びも低下は大きくなり、事前劣化条件の影響は殆どなくなる。このことはPWR条件ではLOCA模擬環境暴露時の劣化が大きいため、事前劣化段階でみられた劣化挙動の違いが目立たなくな

るためである。

Fig.237 には同じく絶縁抵抗の結果を示した。棒グラフの上側（白）は試験法推奨案による事前劣化を与えた場合、下側（黒）は酸素加圧下照射後熱老化した場合を示す。また、棒グラフの長さは複数の試料の値の範囲を示す。この図から絶縁材料の絶縁低下は比較的小さく、BWR, PWRいずれのLOCA模擬環境に暴露しても事前劣化条件の影響は殆どみられない。ハイパロン、クロロブレンなどの被覆材の絶縁抵抗はLOCA模擬環境暴露で著しく低下するが、これらについても事前劣化条件の影響は殆どないといえる。

3) 吸水膨潤に与える事前劣化条件の影響

Table 40 にBWR用LOCA模擬環境に暴露したときの吸水による重量変化を、同じくTable 41 にPWR用LOCA模擬環境に暴露したときの重量変化を示す。Table 40 からBWR条件下では吸水に対する事前劣化条件の影響が明らかにみられ、酸化雰囲気で照射を行うと大きな吸水を示す場合が多い。PWR条件でも一般に、酸化雰囲気で照射したもののが重量増加が大きい傾向を示すが、その程度は配合によって異なり、実用配合のハイパロン等では事前劣化条件の影響は目立たない。

4.1.7 で述べたが、酸素加圧下照射のみを行いLOCA模擬環境に暴露すると著しい吸水がみられるが、照射後熱老化を与えることにより機械的性質の劣化は助長されるが、吸水や電気的性質の劣化に関与する極性基や酸化生成物の熱による分解、再結合、揮散などが起こり、照射のみの場合に比べ吸水が抑制されることを示唆している。

(3) まとめ

事前劣化の条件の影響はLOCA時の線量が少ないBWR条件の場合に機械的性質に若干見られ、酸素加圧下照射後熱老化の条件で事前劣化を与えると劣化がやや大きくなるものが多い。絶縁抵抗についてもBWR条件下では事前劣化条件の影響が若干みられるが、LOCA時の線量が多いPWR条件下では、事前劣化における劣化の程度の違いは全体の劣化に包含され明らかでなくなる。

以上、先に示したように、事前劣化条件の影響は、事前劣化段階では材料の機械的、電気的性質の劣化に影響を与える場合が多いが、LOCA模擬環境暴露により、その違いは小さくなるか殆どなくなる。しかしながら材料の中には酸化劣化が物性に大きな影響を与える場合もあり、現実の環境（低線量率、長期間暴露）における劣化を忠実に模擬するためには、酸化劣化についての考慮が必要である。

関連文献

1. 瀬口忠男, 吉田健三, "酸素加圧下照射による電気絶縁材料の促進劣化"
電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-82-113(1982)
2. 伊藤政幸, 八木敏明, 岡田漱平, 日馬康雄, "逐次法L O C A模擬試験における放射線照射条件の検討", 同上 EIM-85-163(1985)
3. 伊藤政幸, 八木敏明, 岡田漱平, 吉田健三, 川上和市郎, 日馬康雄, "エラストマーの放射線劣化の時間加速試験法の検討",
同上 EIM-87-148(1987)
4. L.L.Bonzon, F.J.Wyant, L.D.Bustard and K.T.Gillen, "Status Report on Equipment Qualification Issues Research and Resolution", NUREG/CR-4301(1987)
5. 電気学会技術報告第Ⅱ部第139号(1982)
6. 日馬康雄, 八木敏明, 伊藤政幸, 岡田漱平, 川上和市郎, "絶縁材料のL O C A模擬環境下劣化におよぼす事前劣化条件の影響",
電気学会絶縁材料研究会 EIM-87-150(1987)

Table 40 Effect of aging condition on water sorption of insulating
and jacketing materials under simulated BWR LOCA environments

Aging conditions		in air 121°C → at RT.			0.5 MGy in air in oxygen → 121°C 7 days			0.5 MGy in air 7 days		
Stage	Sample	A (24 h)	B (120 h)	C (216 h)	A (72 h)	B (164 h)	A (72 h)	B (164 h)	C (216 h)	D (164 h)
C S M	1*	44.6	73.9	90.8	112.9	162.8				
	2*	44.2	64.4	96.9	38.3	85.8				
	3	12.8	17.1	26.2	33.5	28.0				
	4	25.3	30.5	34.6	44.1	49.7				
E P R	1*	0.4	6.5	10.6	29.5	36.3				
	3	2.7	2.8	4.4	9.8	11.6				
	4	14.1	21.1	24.3	36.5	56.2				
	X L P E	34.3	52.6	85.5	36.7	70.5				
C R	1*	18.5	20.8	29.2	24.3	79.6				
	2*	33.9	52.3	56.1	87.6	100.0				
	3	113.0	166.7	169.6	103.6	118.9				
	1	-2.9	-0.9	-3.3	3.9	3.0				
S I R	2	-1.4	-12.7	-5.3	2.0	1.3				

Table 41 Effect of aging condition on water sorption of insulating
and jacketing materials under simulated PWR LOCA environments

Aging conditions		in air, 121°C → 0.5MGy in air oxygen at RT		0.5MGy in air, 121°C → 7 days	
Stage	Sample	A (120 h)	B (216 h)	A (120 h)	B (216 h)
CSM	1*	53.0	56.3	84.5	106.5
	2*	14.2	17.2	28.4	42.0
	3	15.2	13.3	13.4	14.7
	4	20.7	19.2	19.2	22.8
EPR	1*	16.5	38.5	17.4	23.9
	3	28.5	29.9	26.0	43.5
	4	38.4	43.9	45.7	50.6
	XLPE	1*	25.5	24.1	10.9
CR	1	12.0	12.7	14.5	12.2
	2*	22.0	17.2	29.5	31.6
	3	78.0	86.5	66.0	67.6
	1	-7.6	-13.3	-8.5	-18.4
SiR	2	-4.7	-7.5	-4.0	-4.8

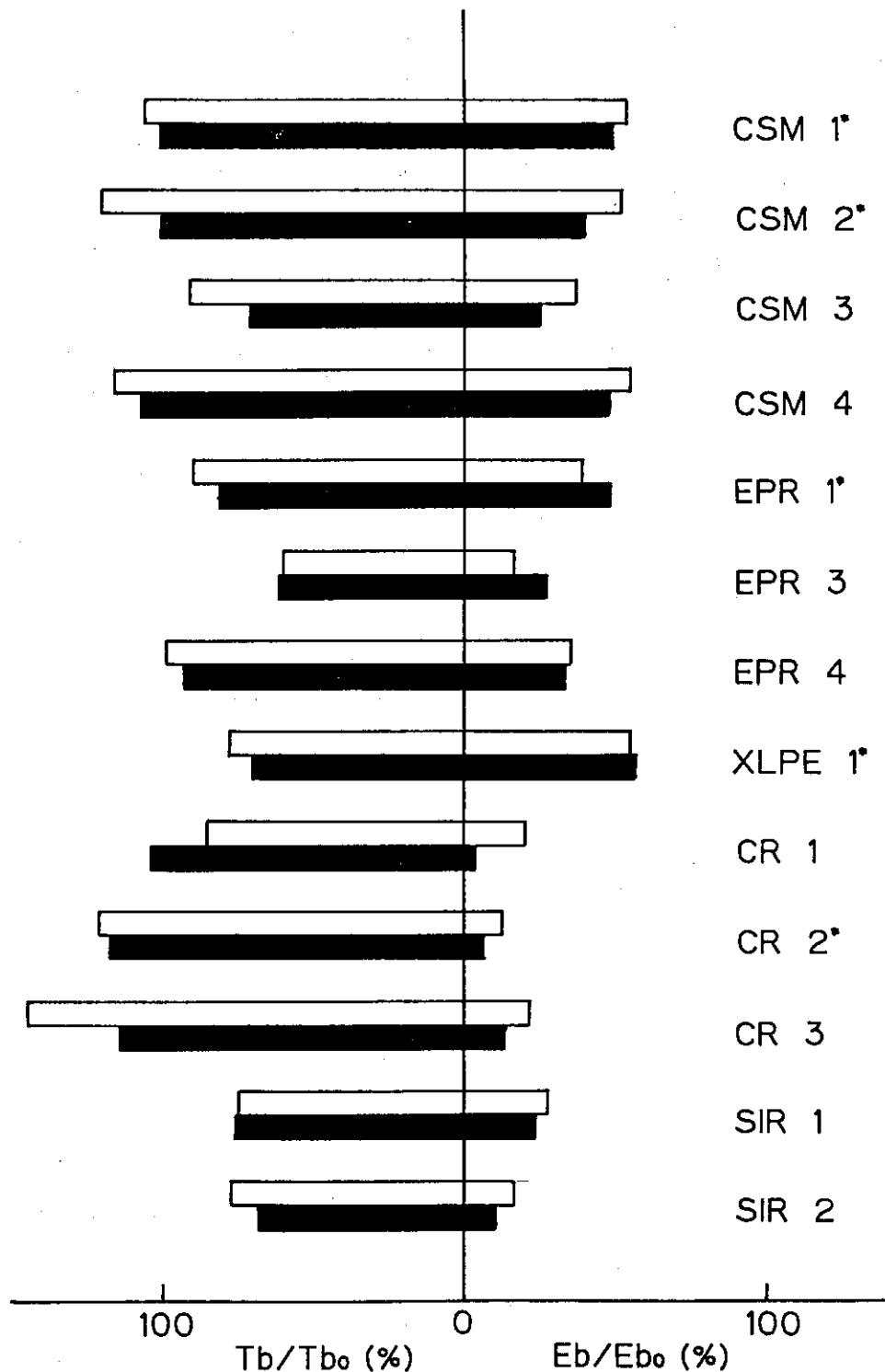


Fig.233 Effect of order in aging on mechanical properties of insulating and jacketing materials.

□ in air 121°C, 7 days → 0.5 MGy in air at RT
 ■ 0.5 MGy in air at RT → in air 121°C, 7 days

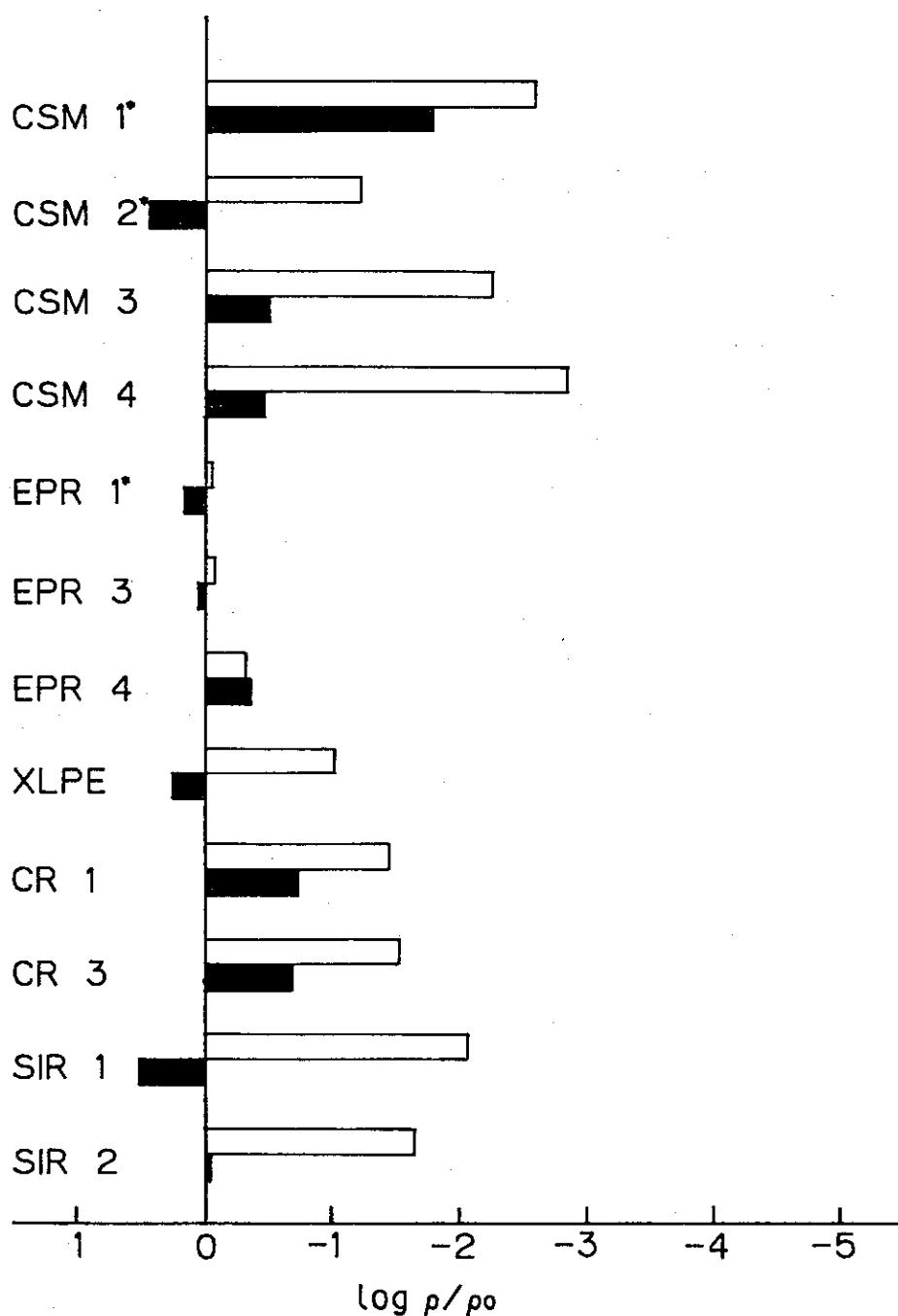


Fig. 234 Effect of order in aging on volume resistivity of insulating and jacketing materials.

Notations are the same as in Fig. 233

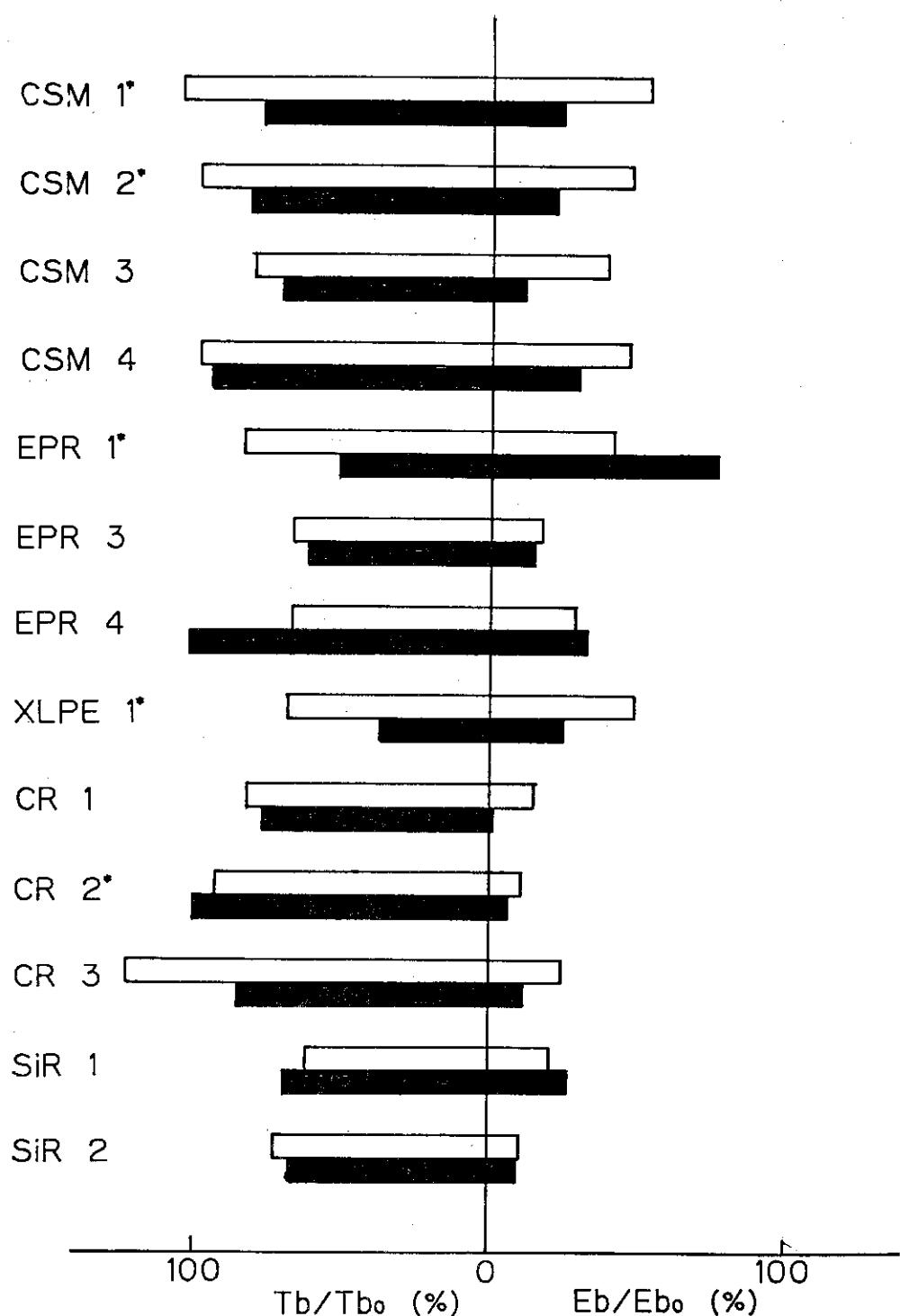


Fig.235 Effect of aging condition on mechanical properties of insulating and jacketing materials.

[White Bar] in air 121°C, 7 days → 0.5 MGy in air at RT
 [Black Bar] 0.5 MGy in oxygen (0.5MPa) → 121°C, 7 days

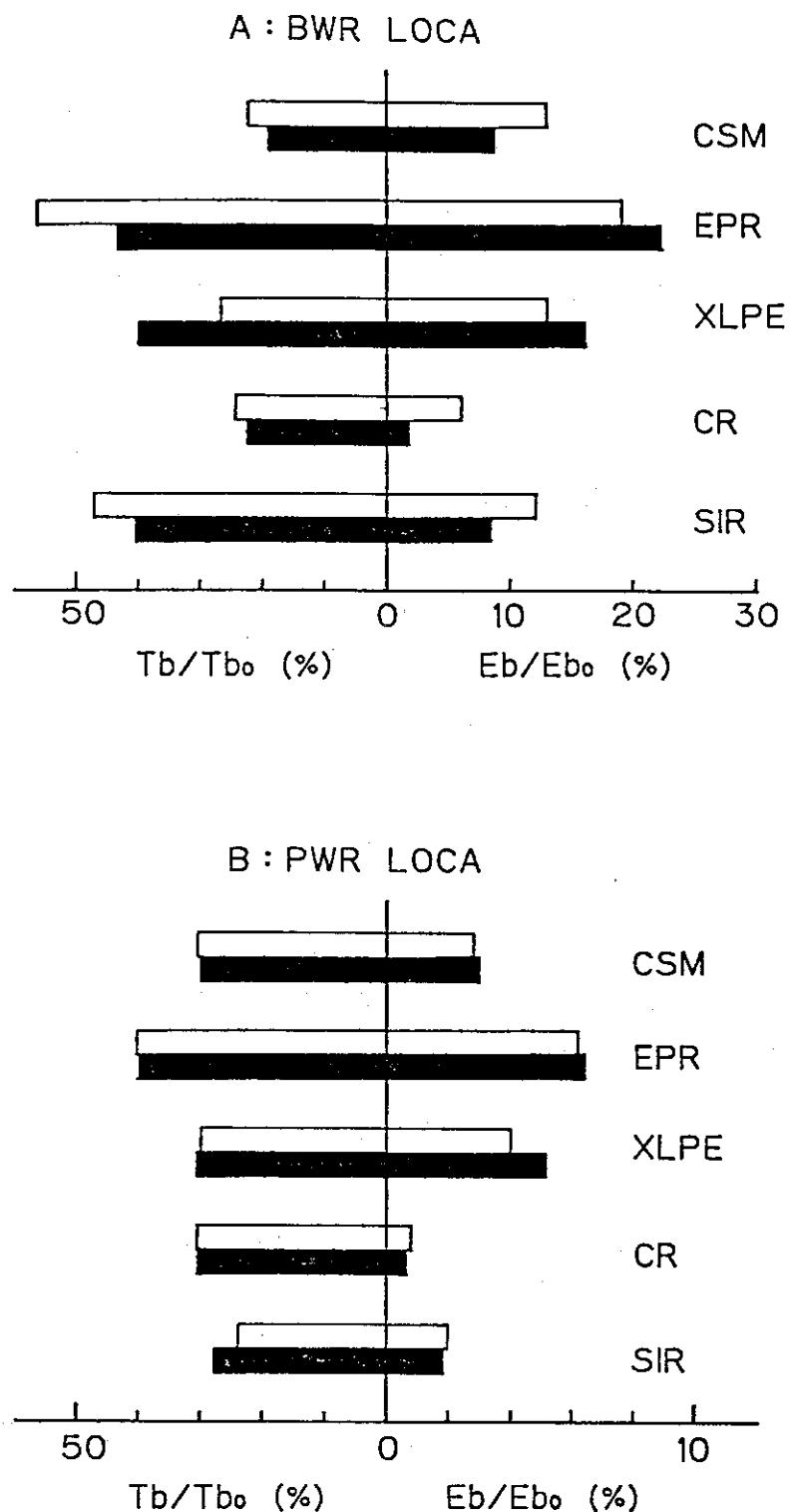


Fig. 236 Effect of aging condition on mechanical properties of insulating and jacketing materials under simulated BWR(A) and PWR(B) LOCA environments.

Notations are the same as in Fig. 235

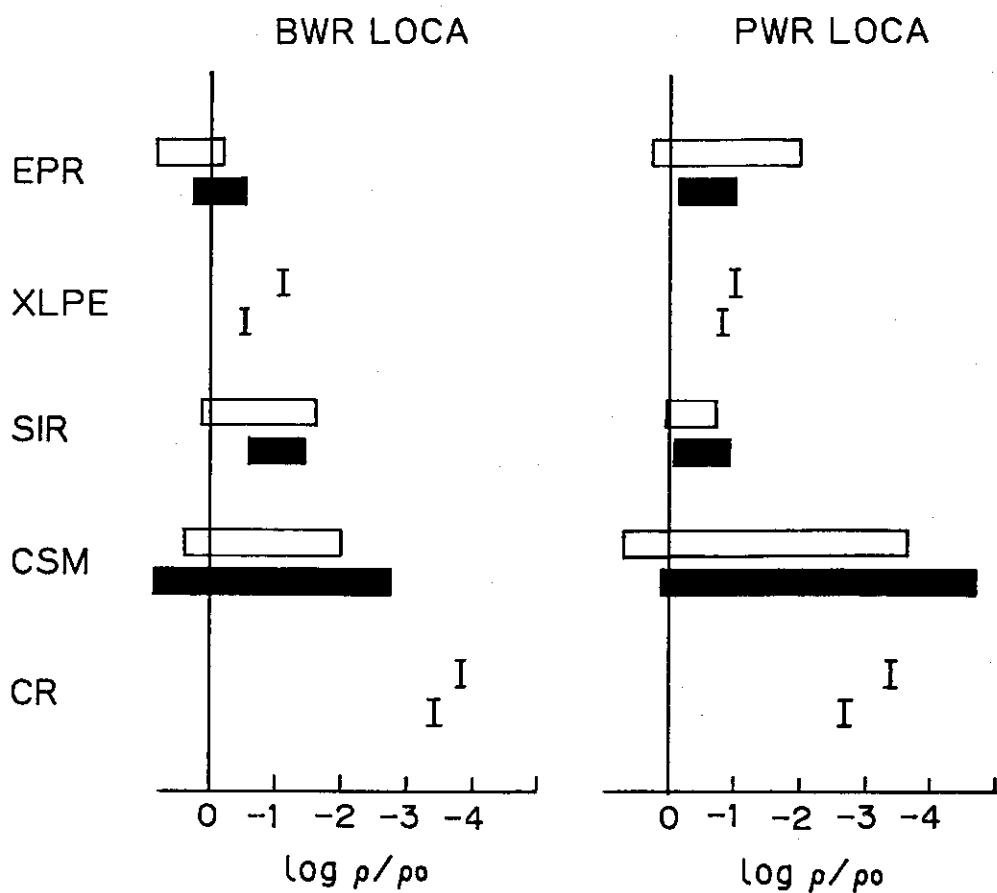


Fig.237 Effect of aging condition on volume resistivity of insulating and jacketing materials under simulated BWR and PWR LOCA environments.

Notations are the same as in Fig. 235

4.2.7 プロフィルと一定温度の比較

4.1.5で同時法における過渡温度条件の影響について検討した結果、PWR条件下における初期の急昇温過程の繰り返しは一部の試料を除き劣化に大きな影響を与えないことが明らかになった。また4.1.4に示したように昇温速度、降温速度もまた劣化に大きな影響を与えないことがわかった。品質認定試験における初期の急昇温過程を省略出来れば試験装置の簡略化が可能であり、大巾な設備費の節約ができる。また、劣化のメカニズムを考える場合に一定温度で試験を行うことが出来れば、データの取り扱いが単純化できる。本節では急昇温過程を含むプロフィルに暴露した場合の劣化と一定温度の環境に暴露したときの劣化を比較する。

(1) 実験方法

予め照射した試験用標準シート試料をPWR用LOCA模擬環境プロフィルで初期の急昇温過程以降の温度は120°C一定、および初期の急昇温なしに120°C一定の蒸気環境に暴露し、機械的性質ならびに電気的性質を比較した。プロフィルおよび一定温度の環境への暴露時間は約10日程度で、環境に空気がある場合とい場合について比較した。

(2) 結果及び考察

機械的性質

Fig.238にハイパロンをPWR用のLOCA模擬環境プロフィルならびに120°C一定の蒸気環境に暴露したときの強度と伸びの保持率を示す。図中の白丸および黒丸印は120°C一定の環境に暴露したものでそれぞれ空気なしおよび空気ありの場合を、白三角および黒三角はプロフィルでそれぞれ空気なしおよび空気ありの環境に暴露した場合の結果を示す。また、図中の値は4種類のハイパロン試料の平均値と標準偏差を示す。図から明らかなように、蒸気環境に空気が存在していない場合には、プロフィルと一定温度の環境に暴露した場合の劣化はほぼ等しく、急昇温過程があることにより劣化が促進されることはない。一方、環境に空気が存在すると、プロフィル下での伸びの低下がやや大きくなっていることがわかる。このことは短時間であっても初期の高温の期間(150°C)での酸化劣化があることを示している。

Fig.239にEPRの結果を示す。EPRについてもハイパロン同様、環境に空気がない場合はプロフィルと一定温度で劣化に違いはみられないが、環境に空気があるとプロフィル下での強度の低下がやや大きくなる。この場合も初期の急昇温過程における酸化劣化の影響が若干あることを示している。すでに示したようにEPRでは酸化劣化が起こると強度低下が起こることから、この場合も高温過程での酸化劣化が起こっていることを示す。

Fig.240 に架橋ポリエチレンの結果を示した。やはり空気がない環境では初期高温過程の影響は殆どないが、環境に空気があると、先に示したハイパロン、EPRと異なり、高温過程を与えた場合の強度、伸びの低下はむしろ少なくなっている。その理由は明らかではないが、前照射時に生じた活性種などの熱アニール効果によるものではないかと思われる。

Fig.241 にクロロブレンの結果を示した。この図も3種類の試料の平均値を示したが、試料による劣化挙動の違い、特に伸びの劣化挙動が大きく異なっていることがわかる。しかしながらプロフィルと一定温度での劣化は、環境に空気がある場合もない場合もほぼ同じであり、初期高温過程の影響はないといえる。

Fig.242 にシリコーンゴムの結果を示した。シリコーンゴムでは蒸気環境に空気があってもなくても、初期高温過程がある場合の伸びの低下がわずかに大きくなっている。また、強度についても環境に空気があると、プロフィル下での劣化がやや大きいが、その違いはわずかである。

体積固有抵抗

Fig.243 に絶縁材料のEPRの結果を示す。蒸気環境に空気があってもなくても、プロフィル下での絶縁低下がやや少なく、特に環境に空気が存在しているとこの傾向が顕著であった。このことは先にポリエチレンの機械的性質のところで述べたのと同様、逐次法前段の照射時に生じた酸化物等の初期高温過程におけるアニール効果によると考えられる。

Fig.244 に架橋ポリエチレンの結果を示す。この場合には空気のあるなしで傾向が逆になっており、かなり複雑なメカニズムが予想されるが、その原因については今のところ明らかではない。

Fig.245 にシリコーンゴムの結果を示す。機械的性質同様プロフィルと一定温度での絶縁低下に大差はみられず、また、空気のあるなしも殆ど影響を与えないことがわかる。これらの事実からシリコーンゴムにとって初期の高温過程は殆ど影響を与えないということができる。

Fig.246 に参考として被覆材料のハイパロンの結果を示す。ハイパロンはEPRとほぼ同様の挙動を示し、環境に空気があってもなくても、プロフィル下での絶縁低下が少ない傾向を示した。その理由についてはEPRのところで述べたのと同様である。

(3) まとめ

PWR用条件を用いて初期の急昇温過程を含むプロフィルと一定温度での劣化を比較した結果、蒸気環境に空気が存在していない場合にはいずれの試料についても機械的性質の劣化はプロフィルと一定温度でほぼ同じで、初期高温過程の影

響はほぼないということができる。また、電気的性質については、架橋ポリエチレン、ハイパロンに若干影響がみられるが、その他の試料についてはプロフィルと一定温度での劣化はほぼ同じであった。

一方、蒸気環境に空気があると、ハイパロンの伸び、EPR、シリコーンゴムの強度がプロフィル下でやや低下が大きくなるが、その差はわずかであるのに対し、架橋ポリエチレンでは強度、伸びの低下がやや小さくなることがわかった。また、絶縁抵抗についてはシリコーンゴムを除くと、プロフィル下での低下が少ない傾向を示すなど初期高温過程でのアニール効果などが示唆される結果となつた。全体としてはプロフィルと一定温度での劣化の違いは架橋ポリエチレン以外ではあまり大きくなく、試験期間が長期にわたる場合には、さらに影響が小さくなると考えられる。

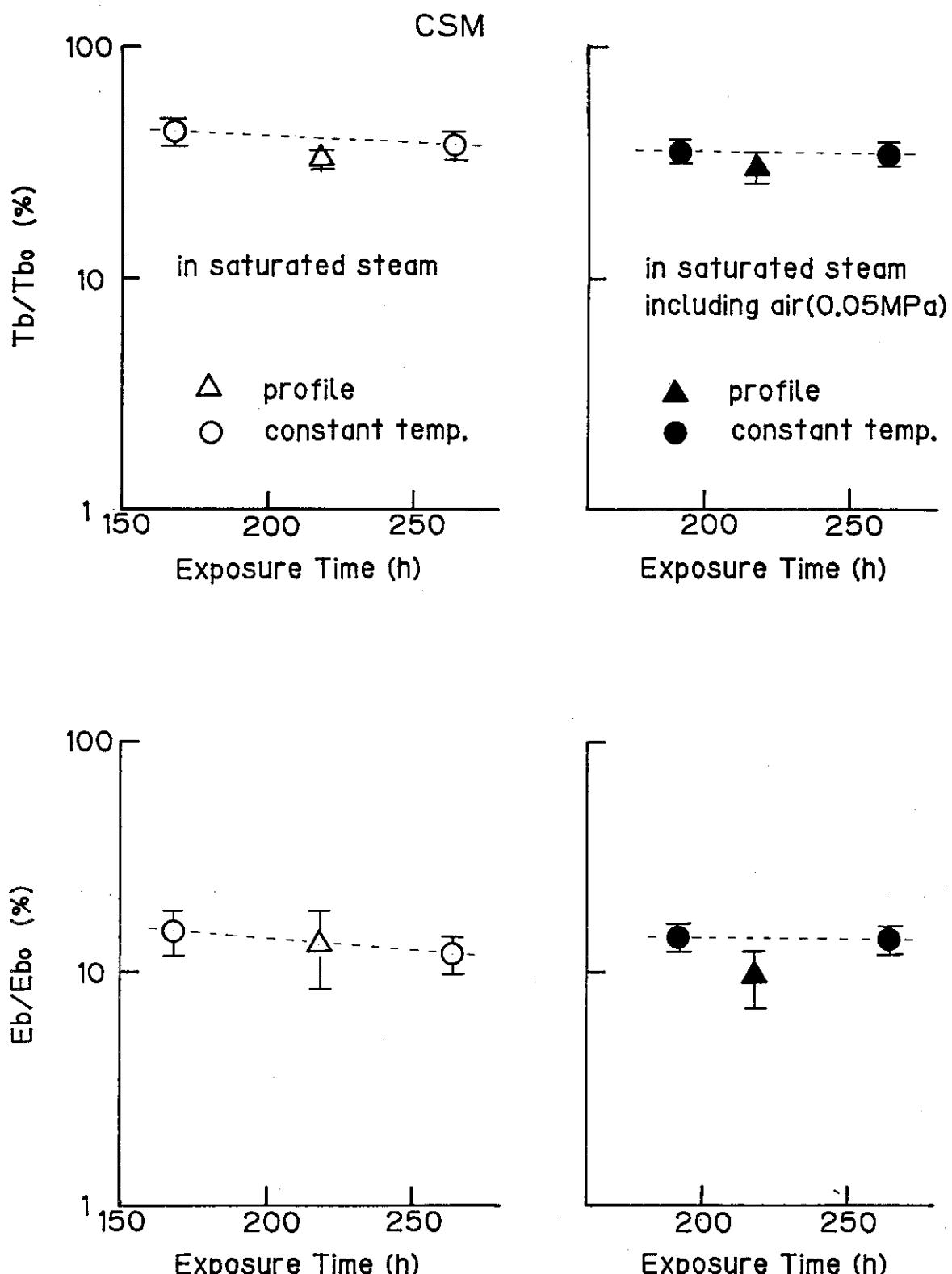


Fig. 238 Comparison of mechanical properties degradation of Hypalon exposed to profile and constant temperature LOCA environments.

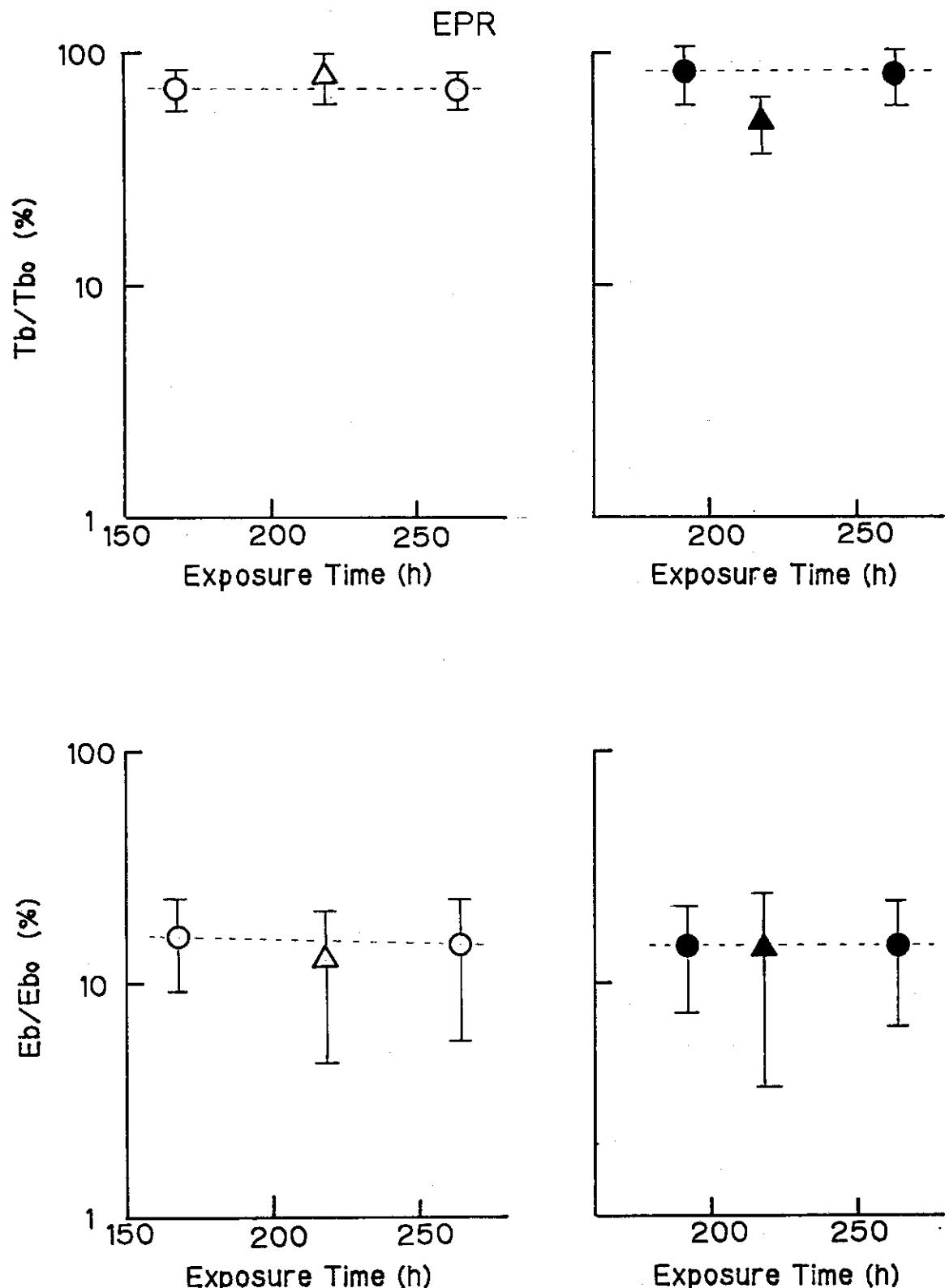


Fig. 239 Comparison of mechanical properties degradation of EPR exposed to profile and constant temperature LOCA environments.

Notations are the same as in Fig. 238

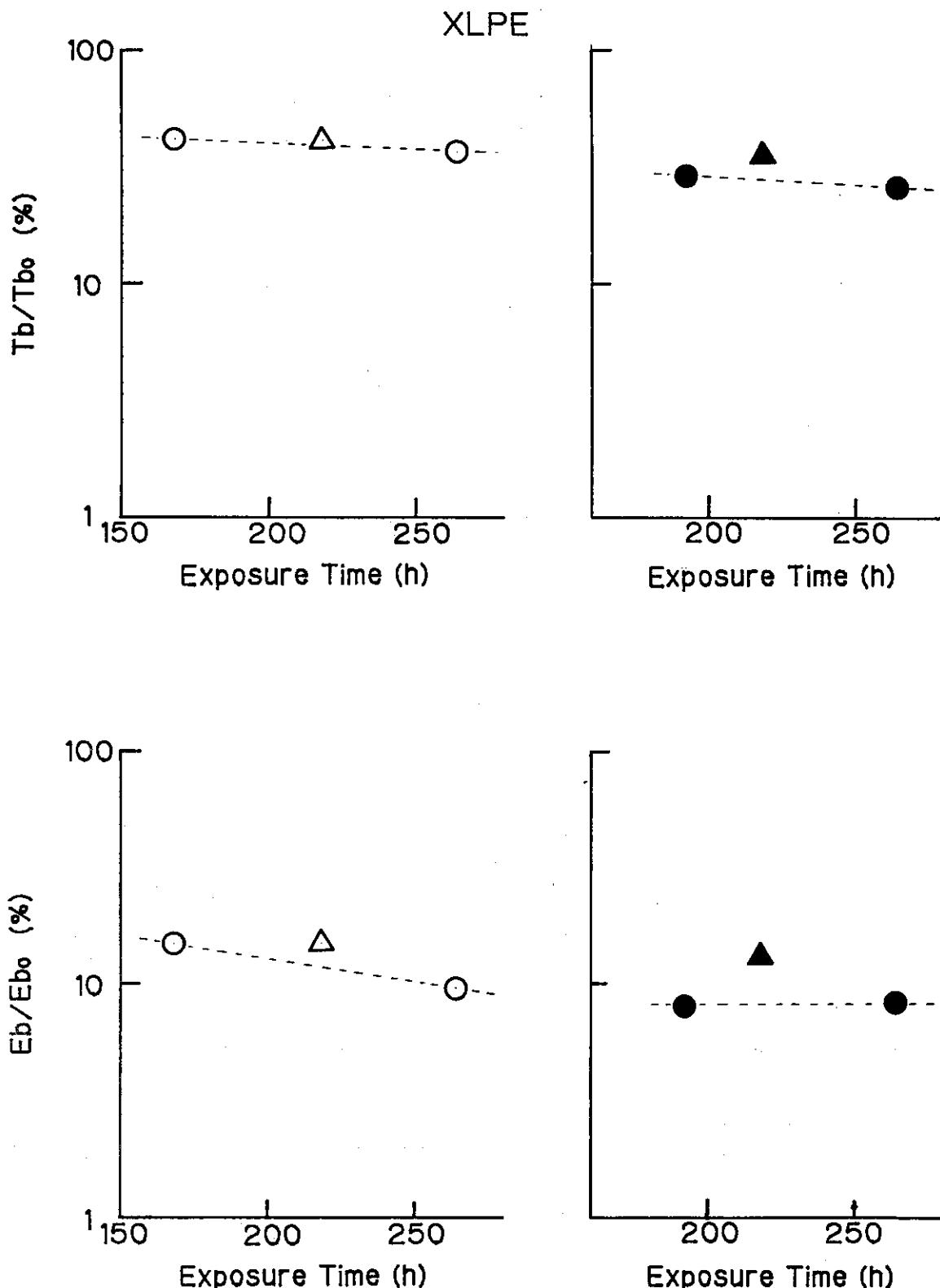


Fig.240 Comparison of mechanical properties degradation of crosslinked polyethylene exposed to profile and constant temperature LOCA environments.

Notations are the same as in Fig.238

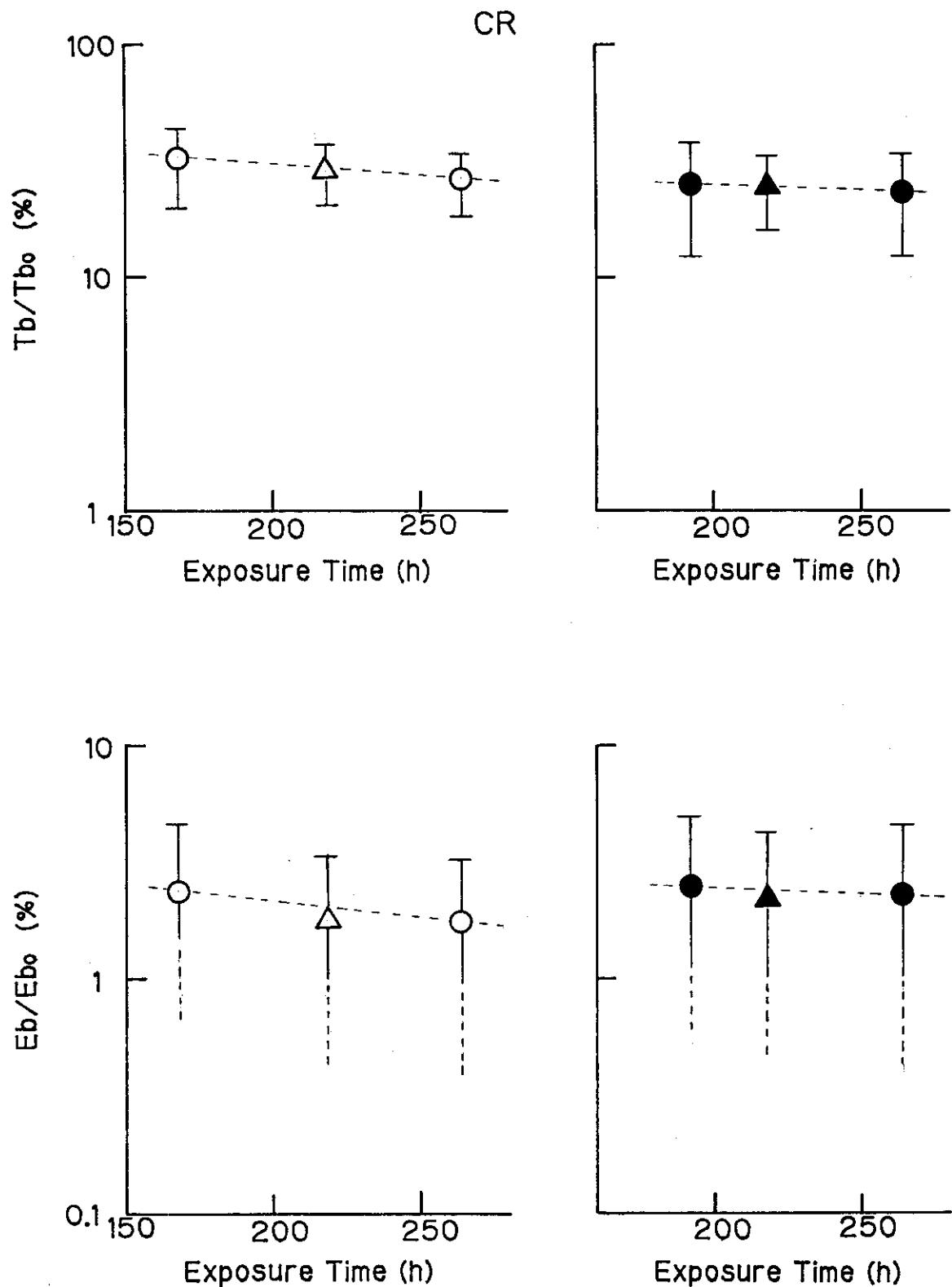


Fig. 241 Comparison of mechanical properties degradation of chloroprene exposed to profile and constant temperature LOCA environments.

Notations are the same as in Fig. 238

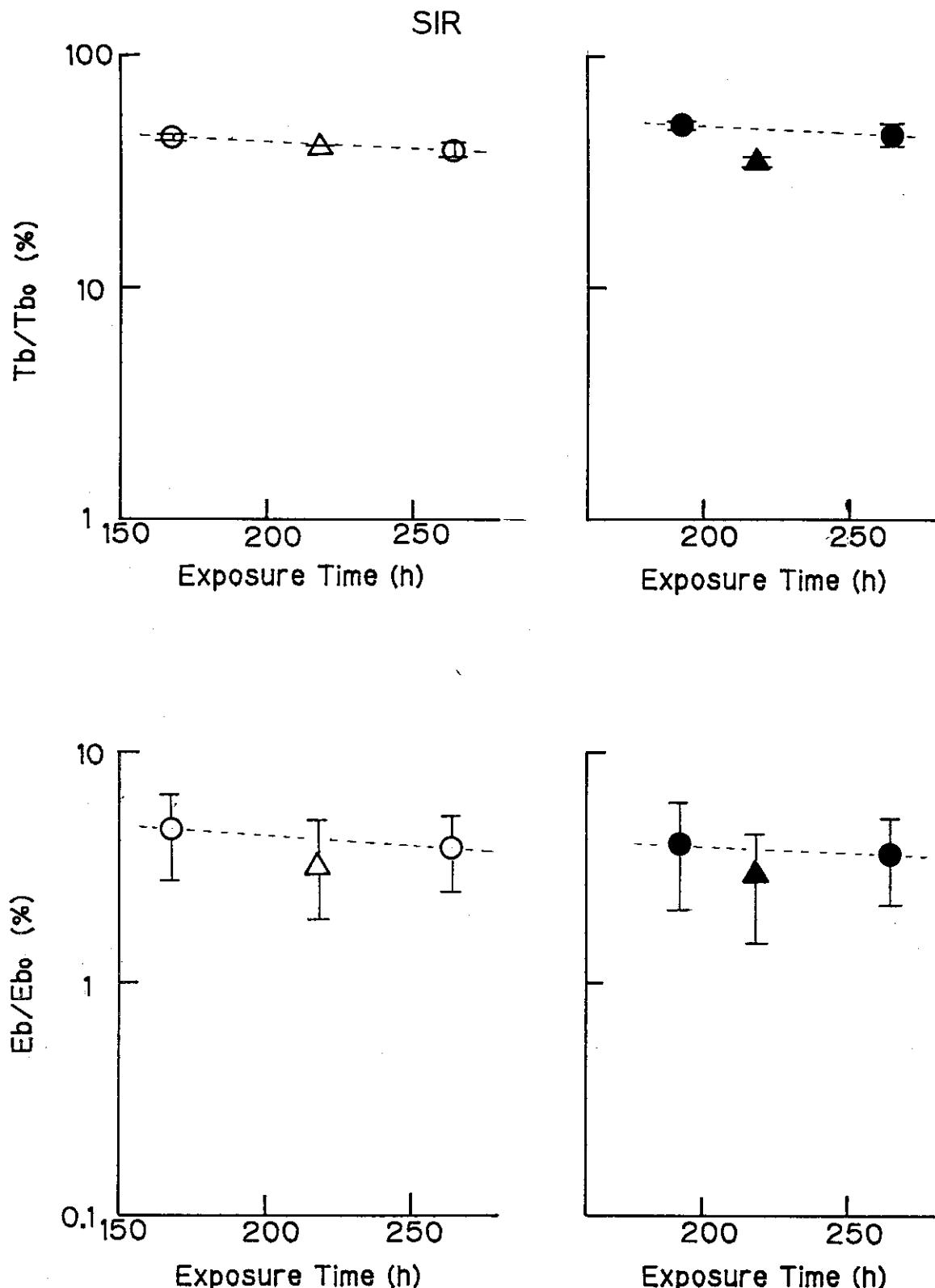


Fig.242 Comparison of mechanical properties degradation of silicone rubber exposed to profile and caonstant temperature LOCA environments.

Notations are the same as in Fig.238

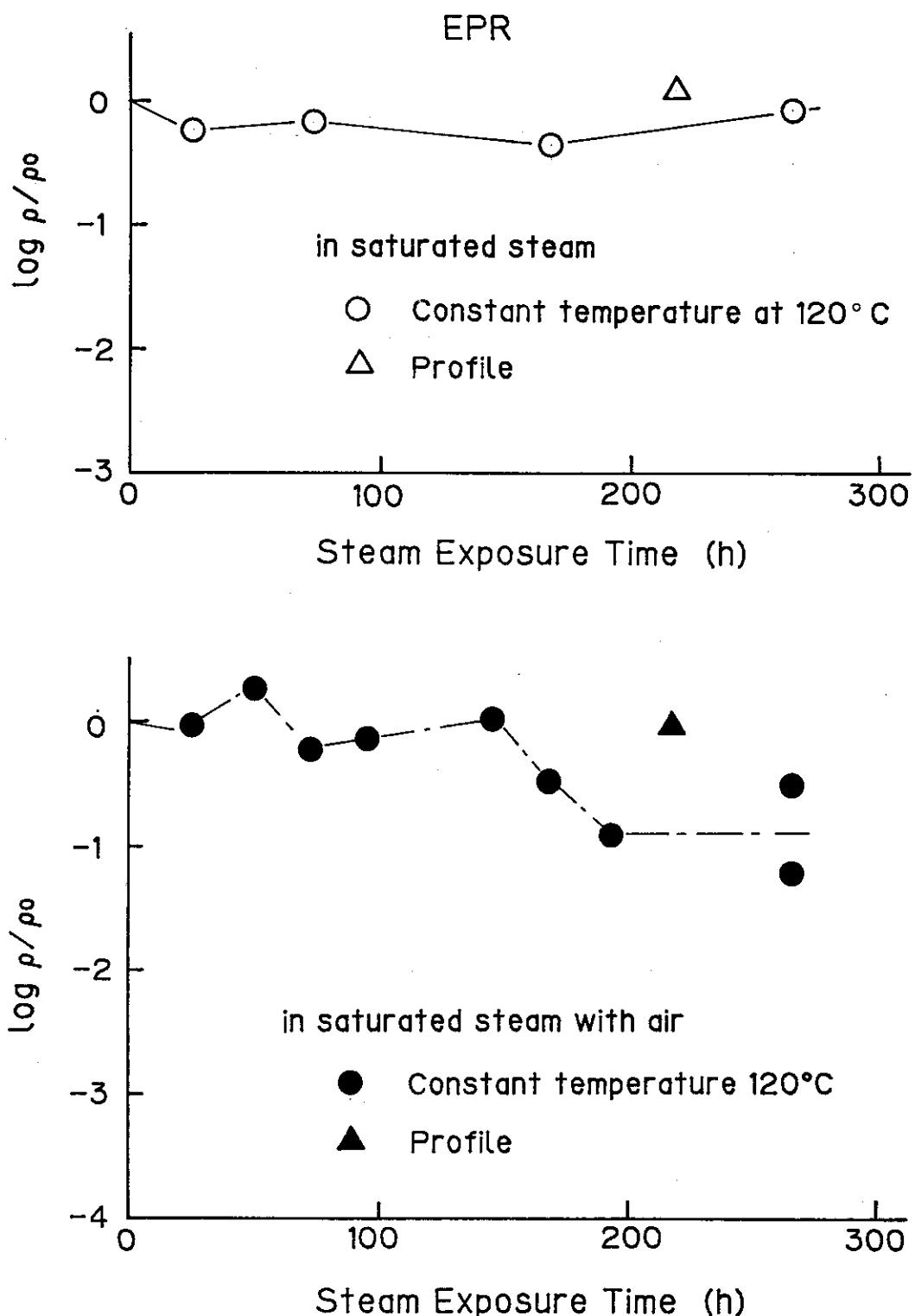


Fig.243 Comparison of electrical property degradation of EPR exposed to profile and constant temperature LOCA environments.

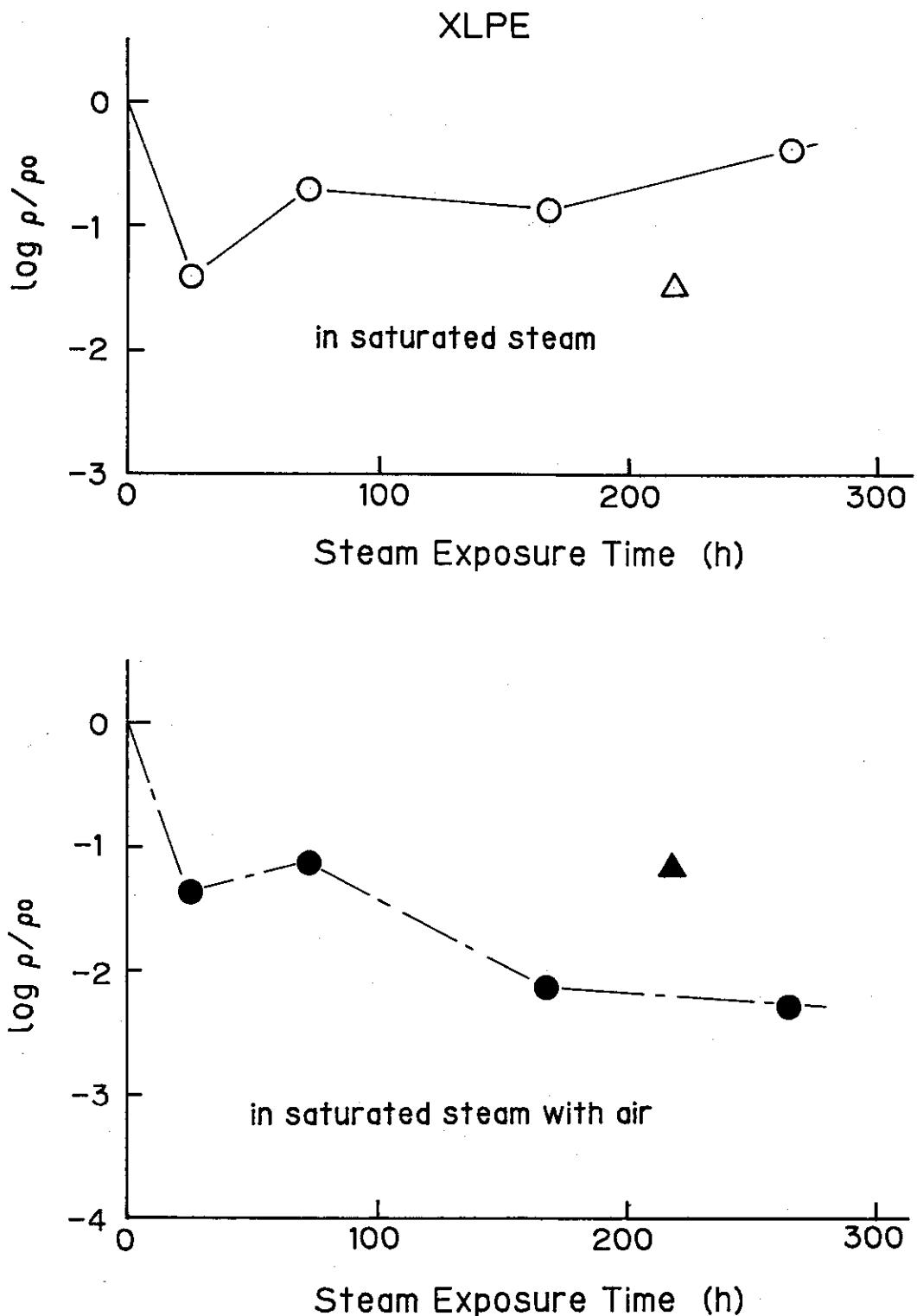


Fig.244 Comparison of electrical property degradation of crosslinked polyethylene exposed to profile and constant temperature LOCA environments.

Notations are the same as in Fig.243

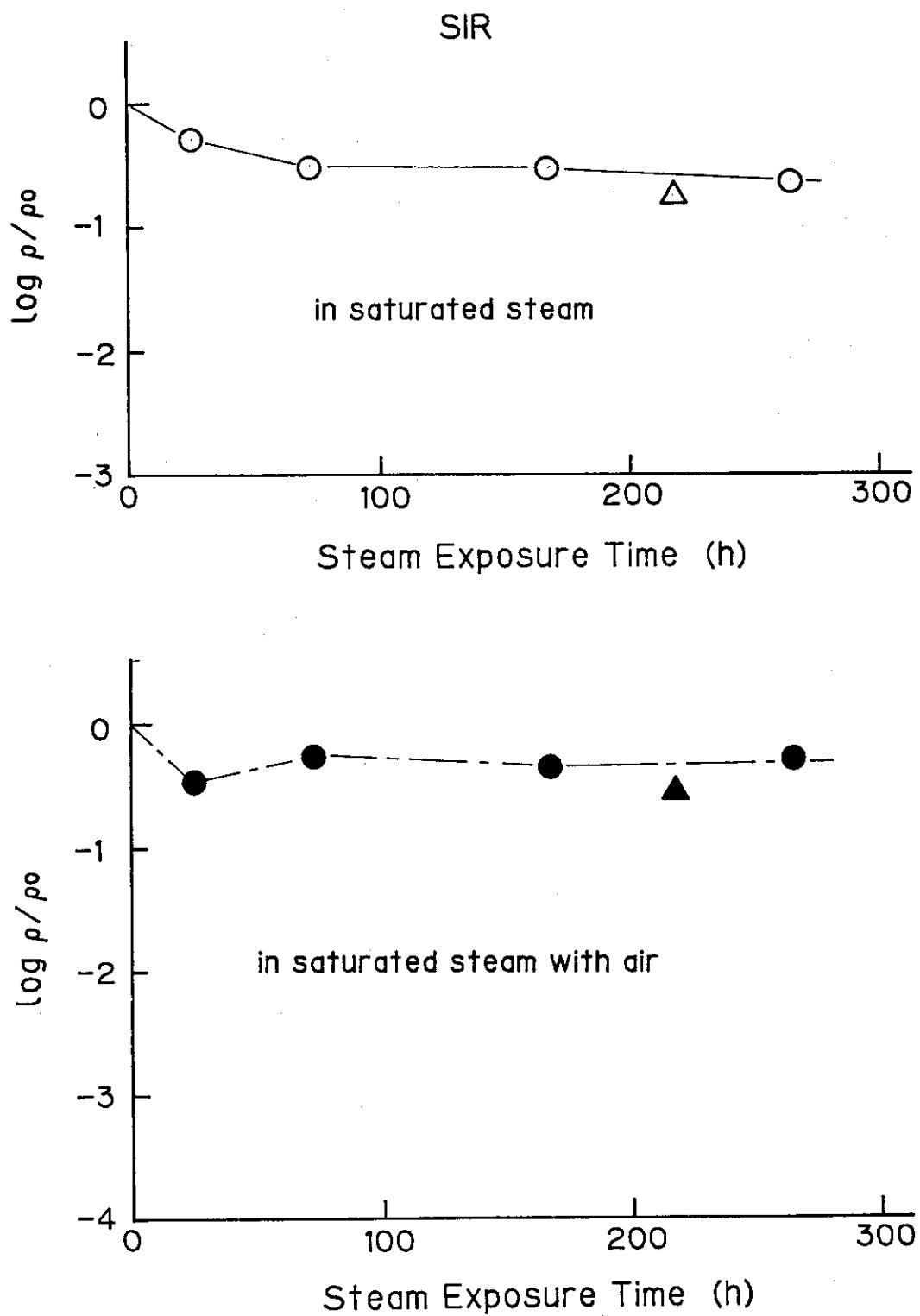


Fig.245 Comparison of electrical property degradation of silicone rubber exposed to profile and constant temperature LOCA environments.

Notations are the same as in Fig.243

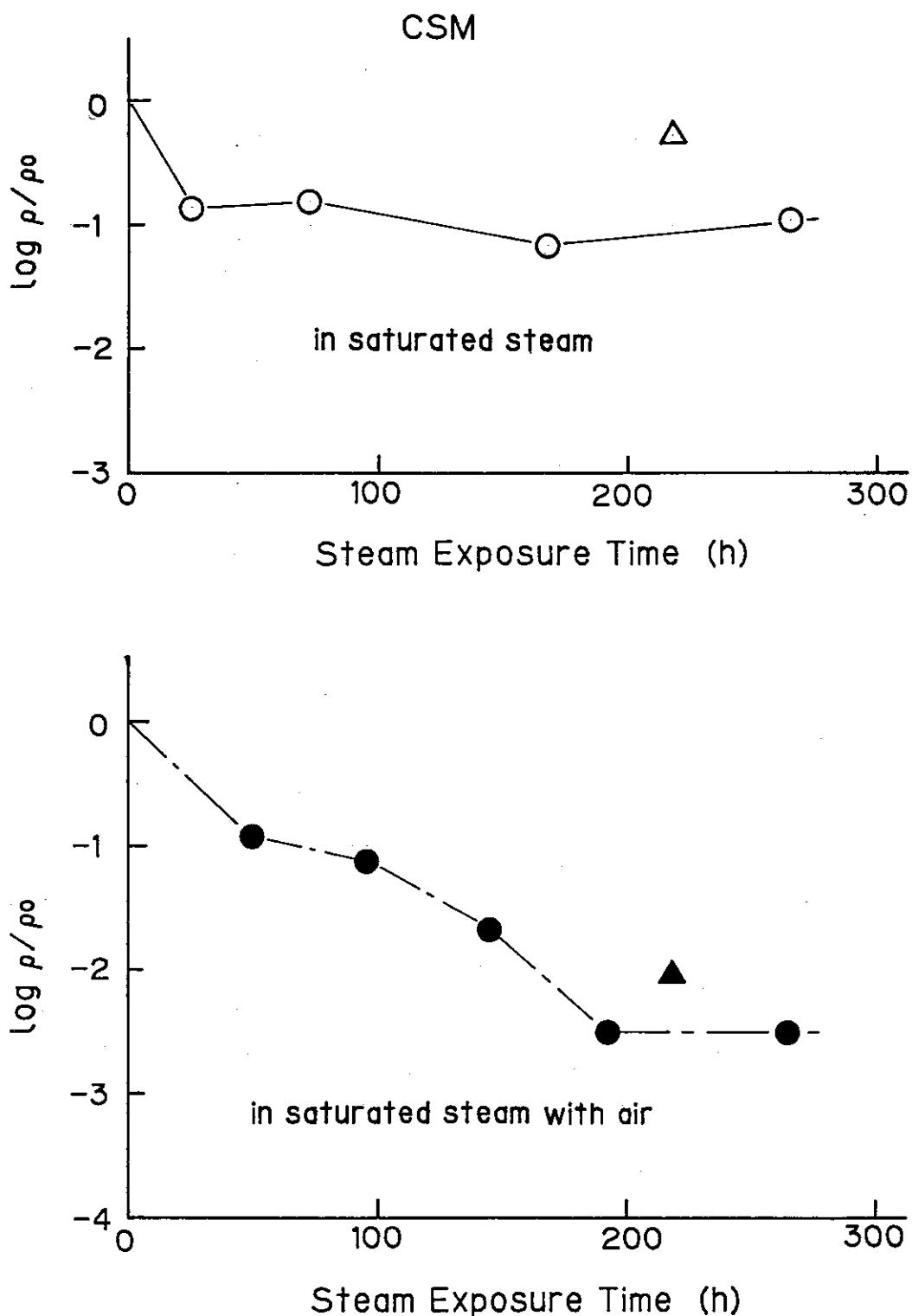


Fig. 246 Comparison of electrical property degradation of Hypalon exposed to profile and constant temperature LOCA environments.

Notations are the same as in Fig. 243

4.3 同時法と逐次法の比較

すでに述べたように、原子炉の想定事故であるLOCA時には、格納容器内の電線ケーブル類は放射線、高温の水蒸気／スプレイ、空気などの複合環境にさらされるが、安全系に使用されるケーブル、機器部品など（IE級機器部品）にはその機能検証のための品質認定試験が課されている。これら品質試験の条件は各国に於て、原子炉の型式などに応じて定められているが、わが国においては先に示した電気学会の試験法推奨案¹が唯一の基準であり、この試験法では米国のIEEのStd²や仏のVISA試験³などと同様に放射線とその他の環境を逐次与える逐次法が採用されている。しかしながら実際の事故環境は放射線を含む同時環境であり、これらを逐次的に与えたときの等価性が問題になる。そこで本節では、複合環境下における劣化挙動について相乗効果の有無ならびに同時法と逐次法の劣化を比較し、同時環境における劣化に等価な劣化を与える逐次法試験条件の検討を行う。

4.3.1 放射線、蒸気環境暴露の複合効果

放射線と熱の同時環境における絶縁材料の劣化に関しては多くの材料について相乗効果が認められ、これらが酸化劣化と重要な関連を持つことが報告されている^{4~9}。一方、原子炉の事故時に想定されるような放射線と熱に加えて、さらに水蒸気、スプレイ、空気などの環境因子を含む複合環境化での劣化は極めて複雑であることが予想されるが、これらについては未だ十分な解明がなされていない。また、複合環境下における劣化を、環境因子をそれぞれ個別に与える逐次法で模擬する場合には、相乗効果の有無ないしはその程度が重要である。ここでは、絶縁材料の複合環境下における劣化について相乗効果を検討した結果を示す。

(1) 実験方法

複合環境下における劣化挙動に相乗効果が有るか否かを調べるために、放射線照射（空气中10kGy/h）、蒸気環境暴露（120°C一定、飽和水蒸気ならびに空気存在下）をそれぞれ個別に与えた場合と、これらを同時に与えた場合の劣化を調べた。また、上記の放射線と蒸気環境を逐次与えた場合の劣化挙動についても調べた。

試料はこれまでの実験に用いたものと同様に、試験用標準シート試料である。

(2) 結果及び考察

1) 放射線照射による絶縁材料の劣化

Fig.247 に5種類の絶縁・被覆材料（EPR、架橋ポリエチレン、シリコーンゴム、ハイパロン及びクロロブレン）の厚さ約1mmのシート状試料に室温、空気中でγ線（10kGy/h）を照射した時の破断強度、伸びならびに絶縁抵抗（体積固有

抵抗)の保持率を示す。いずれの試料も放射線照射により伸びが著しく低下するが、強度についてはEPR、架橋ポリエチレン、シリコーンゴムなどは照射により低下するが、ハイパロンやクロロブレンでは低下しない。また絶縁抵抗については架橋ポリエチレンとハイパロンは照射により低下するが、EPRやクロロブレン、シリコーンゴムは照射のみでは殆ど低下を示さない。

2) 蒸気環境暴露のみによる劣化

Fig.248に温度を変えて蒸気環境暴露したハイパロンとEPRの機械的性質の変化の例を示す。ハイパロンは蒸気環境温度が高くなるにつれ、強度も伸びも低下するが、EPRでは強度は低下するが、伸びの変化は少なく、全体としてハイパロンに比べ蒸気環境暴露による劣化は少ない。一方、蒸気環境の空気は劣化を促進しており、温度が高くなると著しい劣化を生じることがわかる。

Table 42に絶縁抵抗の結果を示す。シリコーンゴム以外は蒸気環境温度が高くなるにつれ、絶縁抵抗が低下する。また、架橋ポリエチレンは環境に空気が存在すると低下が著しい。一方、シリコーンゴムは空気の影響を比較的受けないが、温度が高い方が低下が少ない傾向を示す。これらの現象は、EPRや架橋ポリエチレンでは温度が高くなるにつれ、また、環境に空気が存在すると酸化劣化が促進され吸水が起こるのに対して、シリコーンゴムは酸化劣化に対しては安定であるが、高温では絶縁低下に寄与すると考えられる充填物等の酸化物がゴム部分の加水分解により溶出するためと考えられる。

3) 放射線と熱の相乗効果

一般に材料の特性に影響を与える二つ以上の因子があり、これらをそれぞれ個別に与えたときの変化に単純な加成性が成立せず、特性の変化が両者の和より大きくなる場合、相乗効果があることが多い。また、両者の和がこれらを同時に与えた場合よりも小さい場合には、相殺効果があると言える。例えば、原子炉格納容器内の環境では、低線量率の放射線と周囲温度の二つの因子により相乗効果が予想される。放射線と熱の相乗効果については岡本、Clough、伊藤、貴家の研究があり、熱と放射線を同時に与えると相乗効果により劣化が促進されることが報告されている^{4~7,9}。また、八木らは照射試料の熱老化を検討した結果、照射による熱老化の促進(相乗効果)が認められたことを報告している⁸⁾など、一般に相乗効果により、劣化が促進される場合が多い。

Fig.249~251に放射線と蒸気環境を同時に与えた場合とこれらを個別ないしは逐次的に与えた場合の劣化を伸びを指標として示した。放射線は10kGy/h、蒸気環境は120°C一定で空気がない場合とある場合の両方について調べた。図中の白丸、黒丸は蒸気環境暴露のみによる劣化で、それぞれ空気がない場合とある場合

を、三角印は放射線照射のみの場合の劣化を示す。実線及び一点鎖線はこれらを同時に与えた場合（同時環境暴露）の実測値で空気がない場合とある場合を示す。図中の破線は放射線と蒸気環境を個別に与えた場合の劣化の和（計算値）を示す。また、四角印は放射線照射後蒸気環境暴露した場合（逐次環境暴露）の実測値を示す。

Fig.249 はハイパロンの結果であるが、同時環境による劣化（実線及び一点鎖線）は放射線と蒸気環境を個別に与えた場合の和（破線）より大きく、明らかに相乗効果が認められた。また環境の空気はこの傾向を助長していることがわかった。一方、環境暴露を逐次的に行った場合、放射線照射後の熱劣化速度は照射しない場合のそれに比べて大きく、Clough, 八木らの云う相乗効果があることがわかった。

Fig.250 はE P Rの結果を示したものであるが、この場合は同時環境に空気がある場合とない場合で劣化曲線の形が異なる。空気存在下での初期に伸びが保存されているのは酸化劣化による切断がある程度進むことにより見かけ上伸びが保存される現象のためであり、強度から見るとやはり相乗効果により劣化が促進されていることが確認されている。一方、逐次暴露による相乗効果はこの試料についてはみられない。

Fig.251 に架橋ポリエチレンの結果を示す。同時環境暴露による相乗効果はごく初期に見られるが、長時間暴露すると伸びの低下は単独の環境暴露の劣化の和より小さくなる。特に、空気がないとその傾向が著しい。空気が存在していても最終的には同時法の劣化が少なく、相乗効果はみられない。逐次暴露では、照射による伸びの低下は蒸気環境暴露で回復し、空気存在下では時間とともに低下するが、空気がないと回復したままになる。このような現象が同時環境でも起こっているものと考えられる^{10, 11}。

Fig.252 にE P Rについて放射線と蒸気環境の同時暴露および逐次暴露による誘電損率と体積固有抵抗の変化の例を示す。〔〕内は体積固有抵抗の変化値 $10 \ g \rho / \rho_0$ (ρ_0 : 初期値) を示す。E P Rは室温、空气中、高線量率下で照射 (R) しても、またその後空気を含まない蒸気環境に暴露 (R → P) しても絶縁抵抗は殆ど変化せず誘電損率もわずかに大きくなるのみである。一方、同時環境暴露の場合には、空気を含まない場合 (P + R) でも 1 柄程度の絶縁低下と同時に低周波領域での誘電損率の増大がみられる。これは水分子の導入、保持に起因しており、これらが絶縁低下の原因と考えられる。特に、空気が存在するとこの現象が著しい。同時環境においてこのような現象がおこる原因として、第一に高温における照射であること、第二には照射時の水の存在が考えられるが、単純な組成のE P Rを用いて室温水中照射を行った結果、単に水中浸漬や空气中照射したのみでは誘電損率の低周波領域での増大はみられず、室温であっても水中で照射

すると増大が観測され、同時環境暴露に酷似した結果を与えた¹²。

このことから、同時暴露における水分子の導入、保持の必要条件は水と放射線が同時に存在することであり、これらもまた相乗効果とみなすことができる。この場合、温度は必ずしも必要ではないが、酸化劣化の進行に関与する酸素拡散や水分子の侵入のし易さは温度が上がればさらに助長されるであろう。この場合の水の役割は、照射によって生じたポリマーラジカルなどの活性種と水の相互作用によって、親水性の高い構造で安定化させるためではないかと考えられる。また、ポリマーラジカルと水分子あるいは水の放射線分解生成物との化学反応が親水性の構造に寄与しているとも考えられる。

(3) まとめ

放射線を含む複合環境下における絶縁材料の劣化について、多くの材料について同時環境における劣化が、それぞれの環境を個別に与えた場合の和よりも大きくなる現象即ち相乗効果があることがわかった。また、放射線を照射した後に蒸気環境など熱劣化させると照射していない場合よりも熱劣化速度が大きくなる現象もみられ、これもまた相乗効果とみなすことが出来る。したがって、複合環境下における劣化を、それぞれの環境を個別に与える逐次法により模擬する場合には、相乗効果の有無とその程度を知ることが極めて重要である。

関連文献

1. IEEE Std 323-1974, 383-1974
2. "原子力発電所用電線、ケーブルの環境試験方法ならびに耐延焼試験方法に関する推奨案" 電気学会技術報告Ⅱ部第139号 (1983)
3. "原子力発電用絶縁材料の耐放射線性および環境試験法の現状" 同上 Ⅱ部第214号 (1986)
4. 岡本信一、竹谷千加士、早川力、岩田聖二、片山史郎, "難燃ケーブルに対する温度と放射線の影響", 電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-79-93(1972)
5. 伊藤政幸, "化学応力緩和における熱と放射線の相乗効果", 日本ゴム協会誌第54巻第4号243頁 (1980)
6. R.L.Clough and K.T.Gillen, "Combined-Environment Aging Effects: Radiation-Thermal Degradation of Polyvinyl Chloride and Polyethylene" J. of Polym. Sci. Poly. Chem. Ed. Vol.19, 2041(1981)
7. R.L.Clough and K.T.Gillen, "Investigation of Cable Deterioration Inside Reactor Containment", Nuclear Technology Vol.59, 344(1982)
8. 八木敏明、瀬口忠男、吉田健三, "電線絶縁材料の放射線酸化と熱劣化の複合効果", 電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-82-116(1982)

9. 貴家恒男, 濑口忠男, 荒川和夫, 早川直宏, "放射線・熱の複合劣化を受けたEPRの誘電的・力学的性質",

電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-82-118(1982)

10. 日馬康雄, "絶縁材料の放射線効果",

電気情報関連学会連合大会資料 2-116(1985)

11. 日馬康雄, 岡田漱平, 八木敏明, 伊藤政幸, 川上和市郎, 田村直幸, "LOC
A模擬逐次法における前照射条件が絶縁材料の劣化に及ぼす影響",

電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-85-162(1985)

12. 岡田漱平, 吉川正人, 伊藤政幸, 日馬康雄, 八木敏明, 吉田健三, "絶縁材料
の電気的特性の変化に対するLOC A模擬条件の影響",

同上 EIM-82-109(1982)

Table 42 Effect of temperature in steam spray exposure
on volume resistivity of insulating and
jacketing materials.

	Saturated Steam			Saturated Steam with Air (0.05MPa)		
	120°C	140°C	160°C	120°C	140°C	160°C
1*	0.55	0.62	-0.08	0.37	-0.13	-
EPR 3	0.35	0.52	-2.68	0.46	-1.08	-1.81
4	-0.01	-0.11	-3.31	-0.12	-0.51	-1.46
XLPE 1*	-0.21	-1.17	-2.90	-0.44	-5.22	-7.95
SIR 1	-2.14	-0.44	-1.43	-1.69	-1.65	-2.48
2	-3.17	-0.53	-1.20	-2.45	-1.02	-1.24

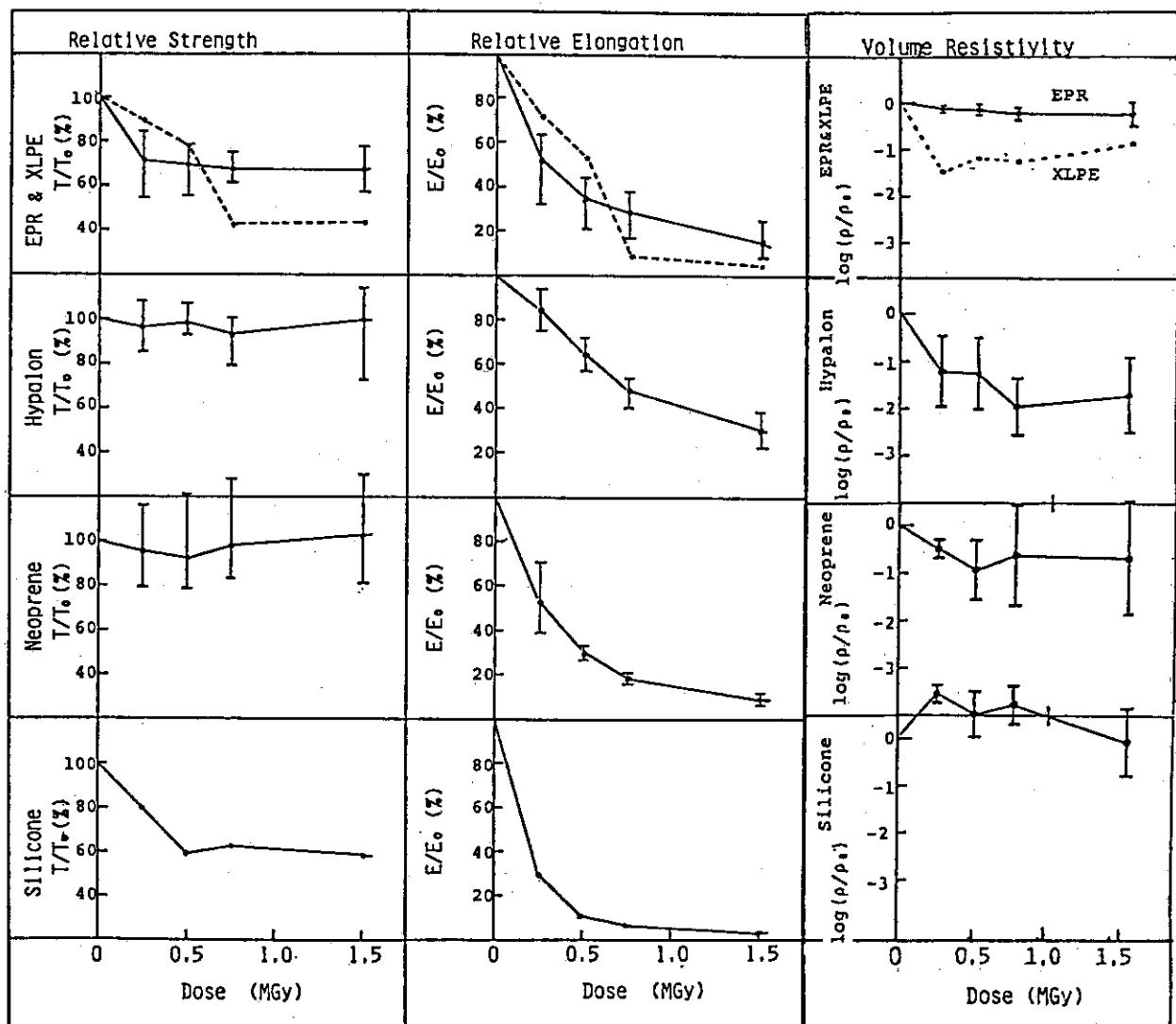


Fig. 247 Mechanical and electrical properties of insulating and jacketing materials irradiated in air at room temperature.

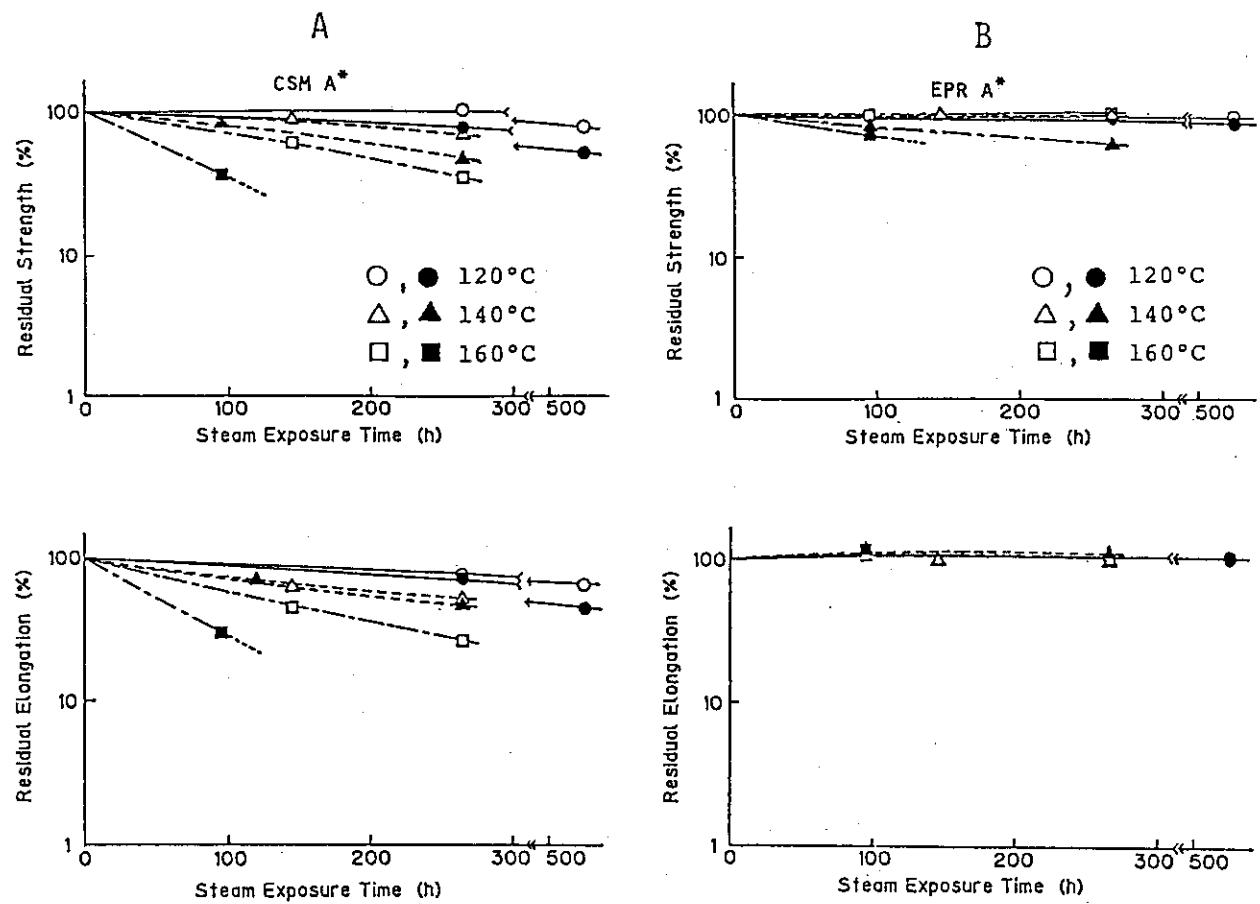


Fig. 248 Effect of temperature in steam spray exposure on mechanical properties of Hypalon 1* (CSM 1*) and EPR 1*.

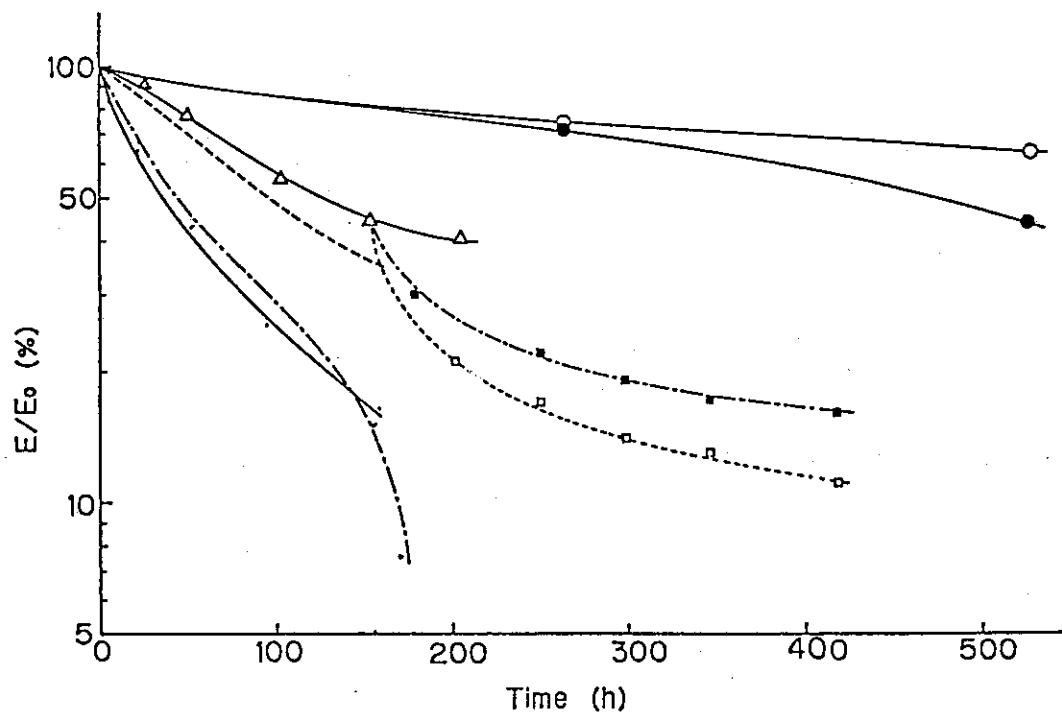


Fig.249 Ultimate elongation of Hypalon exposed to various environments.

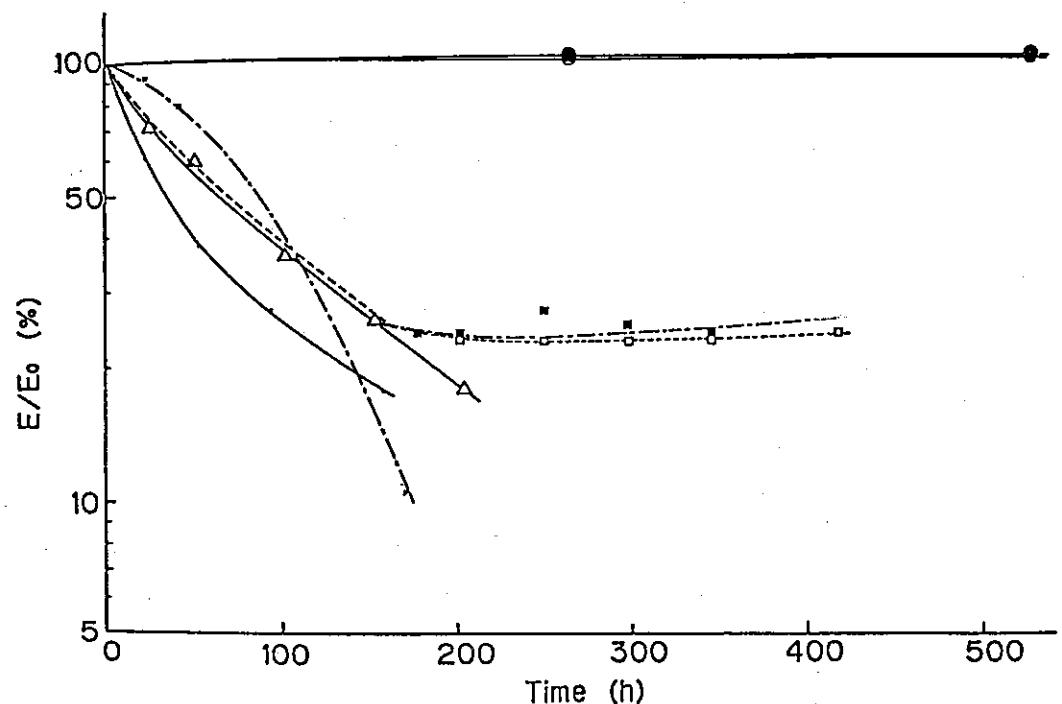


Fig.250 Ultimate elongation of ethylene propylene rubber (EPR) exposed to various environments.

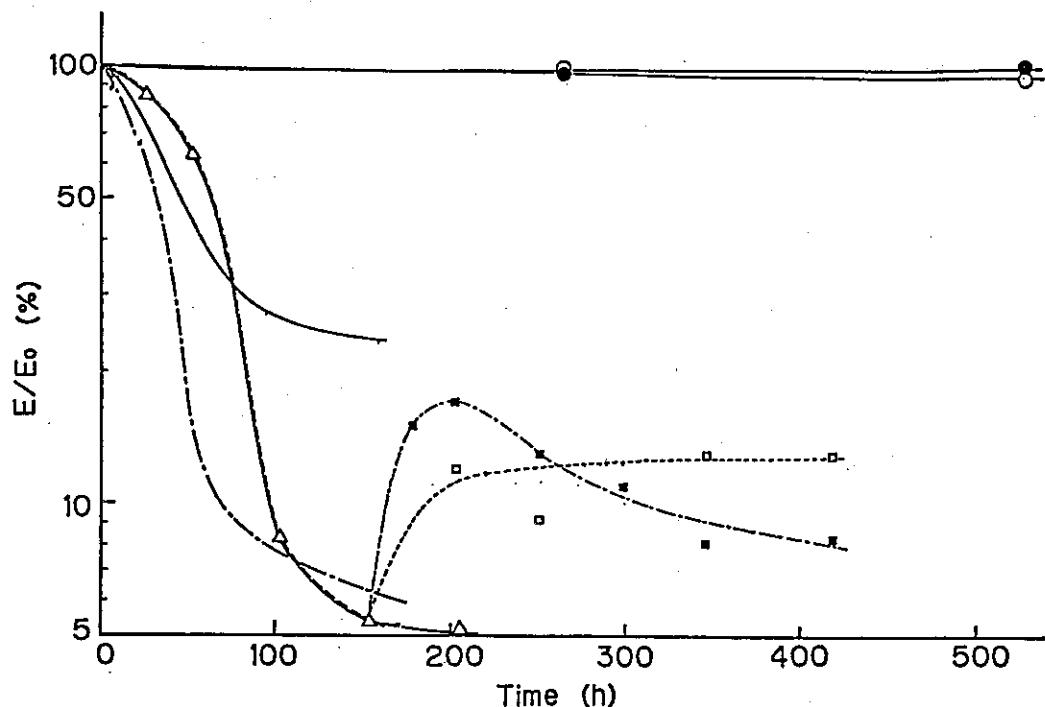


Fig. 251 Ultimate elongation of cross-linked polyethylene (XLPE) exposed to various environments.

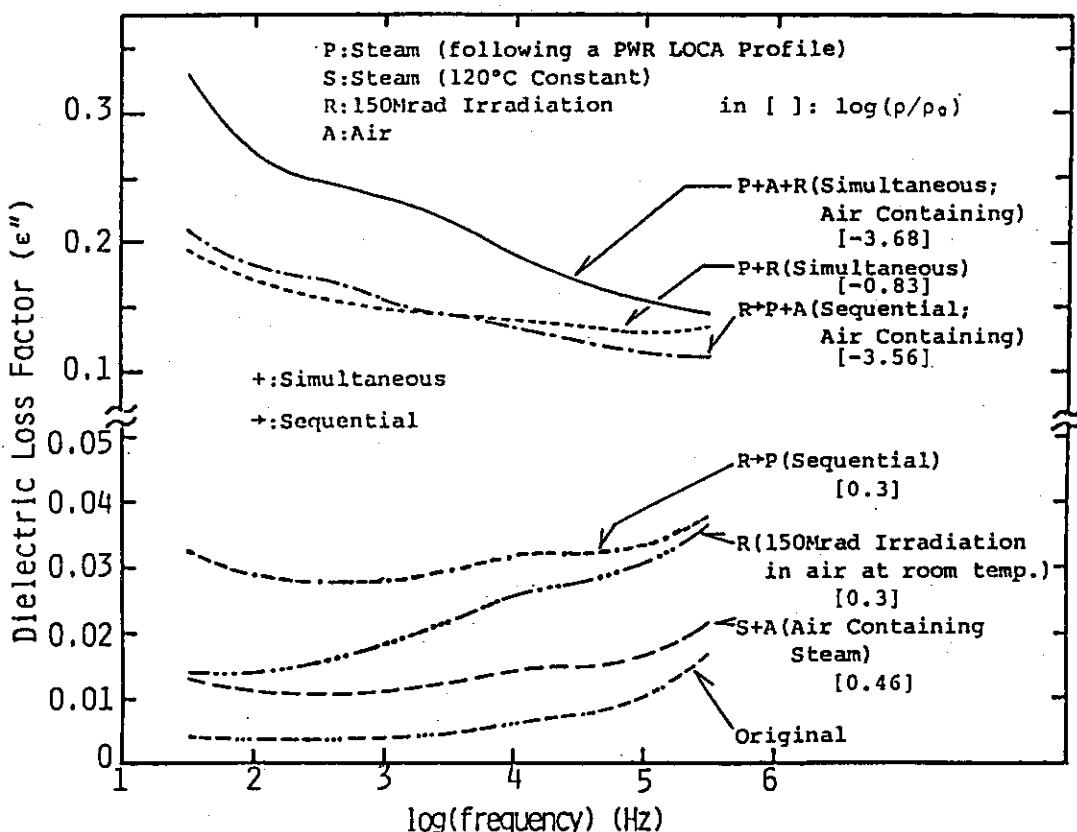


Fig. 252 Dielectric loss factor of EPR exposed to various environments including simulated LOCA conditions.

4.3.2 機械的性質についての同時・逐次の比較

4.3.1 に示したように複合環境下では多くの材料について相乗効果がみられ、同時環境における劣化が、それぞれの環境を個別に与える逐次環境暴露の劣化を上回る現象が認められた。また、架橋ポリエチレンの様に、照射後蒸気環境に暴露すると伸びが回復し、結果として同時環境暴露の場合の方が伸びの保持率が大きいものもあることがわかった。そこで本節では5種類の絶縁・被覆材料について空気が存在しない場合と空気存在下で同時ならびに逐次環境に暴露したときの機械的性質について比較を行う。

(1) 実験方法

原子炉のLOCA時に想定される実際の環境はPWRで約1年、BWRで約100日とされているが、ここでは短縮化条件として全暴露期間が約1週間～10日程度とした。そのためプロファイルの後半温度を120°Cとした。放射線の線量率はPWR条件の場合10kGy/h程度、BWR条件で1.5～2kGy/h程度である。また、逐次環境暴露の場合は上記の線量率でそれぞれ1.5および0.26MGy照射後、同時法の場合とほぼ同期間の蒸気環境暴露を行った。

事前劣化は試験法推奨案の条件（空气中121°C、7日間熱老化後空气中10kGy/h以下の線量率で0.5MGy照射）で与えた。また、事前劣化の影響を見るため、事前劣化していない試料（新品）を同時に試験した。

(2) 結果及び考察

Table 43a, b にPWR条件による同時法・逐次法・逆逐次法（逐次法の照射→蒸気暴露の順を逆にし蒸気暴露→照射の順に与えたもの）LOCA模擬環境に暴した場合の機械的性質の強度と伸びの保持率を示した。

Table 44a, b には同じくBWR条件による同時法・逐次法・逆逐次法（この場合は一部の試料：モデル配合試料のみ）の強度、伸びの保持率を示した。

表中でSaturated Steamは蒸気環境に空気を含まない場合を、Saturated Steam with airはプロファイルの各段階における飽和水蒸気圧+0.05MPaの空気を注入した場合を示す。また、スプレイはPWR条件ではケミカルスプレイ液を、BWR条件では水スプレイを蒸気環境暴露の全期間実施した。表aは事前劣化を行った後LOCA模擬環境暴露した場合を、bは事前劣化なしに暴露した場合を示す。

「PWR条件下での同時・逐次・逆逐次の比較」

Table 43a, b 及びFig.253, 254にPWR条件下での同時・逐次・逆逐次の比較を示す。Fig.253 は強度の保持率を、Fig.254 は伸びの保持率を示す。図中の隣合った二つの棒グラフは左側は事前劣化後LOCA模擬環境に暴露した場合を、

右側は事前劣化なしの場合である。また、棒グラフの長さは複数の試料について得られた値の平均値±標準偏差を示す。ここに示した結果ではハイパロンは4種類、EPR、クロロブレンはそれぞれ3種類の試料の結果である。LOCA模擬条件は左から右へ順に同時法空気なし、同時法空気存在、逐次法空気なし、逐次法空気ありおよび逆逐次法空気なしの環境に暴露した場合を示す。図から明らかなように強度については逆逐次法空気なしの場合が同時法空気なしと同じかより劣化が少なくなつておらず同時法の劣化を模擬するのには不十分であることがわかる。同時法空気なしと逐次法空気なしを比較するとどの試料も後者の方が低下が大きく、一応安全側であることがわかる。一方、環境に空気があると同時法による劣化が最も大きくなり、逐次法空気存在の環境では同程度の劣化を生じないことがわかる。

事前劣化は逆逐次法以外ではあまり影響を与えないが事前劣化なしの方が強度低下がやや少ない傾向を示す。架橋ポリエチレンとシリコーンゴムについては図に示していないが、前者では劣化の順番はSim(Air) > Seq(Air) > Sim(Sat) ≥ RevSeq(Sat), Seq(Sat)となっており、やはり同時法空気存在の劣化を逐次法で模擬した場合安全側にはならないことがわかる。次にシリコーンゴムについてはSeq(Air), Seq(Sat), Sim(Sat)はほぼ同程度の劣化を示しSim(Air)の場合の劣化がやや少なく、他の試料と異なった結果を示した。

次に伸びについてみると、強度に比べて全体として劣化が大きく、環境暴露の方法による劣化の違いは大きくないが、ここに示した例では同時法空気存在下での低下が最も大きく、逆逐次法の劣化が少ない傾向は同じであった。一方、伸びに関しては事前劣化の影響がみられ、事前劣化がないと伸びの低下が少ない。架橋ポリエチレンとシリコーンゴムについては表から前者では、空気がない場合には事前劣化の有無にかかわらずSeq(Sat) ≥ Sim(Sat)であるが、空気存在下では事前劣化の有無により異なり、事前劣化ありではSeq(Air) ~ Sim(Air)であるが事前劣化なしではSim(Air) ≥ Seq(Air)となっており、事前劣化なしの場合空気の影響が大きいことがわかる。一方、シリコーンゴムについては事前劣化のある場合は伸びの低下が著しく、いずれの条件でもほぼ同じような値を示すのに対し、事前劣化なしの場合には環境に空気が存在している方が低下が少ない傾向を示す。この場合も低下が大きかったのはSim(Sat)であった。

「BWR条件下での同時・逐次・逆逐次の比較」

Table 44a, b 及びFig.255, 256にBWR条件下での同時・逐次・（逆逐次）の比較を示す。

Fig.255 の強度について、BWR条件では事前劣化の影響がみられるものが多く、事前劣化ありの場合の低下が大きい傾向を示す。特にハイパロンではこの傾

向が著しい。また同時・逐次の比較では、クロロブレン以外は空気存在下の同時法の劣化がやや大きいもののPWR条件の場合ほど劣化の程度に違いはみられない。このことはBWR条件ではLOCA模擬環境時の線量が少ないためであろう。しかしながらクロロブレンでは傾向がはっきり出ており、空気あり同時法LOCA模擬環境下での劣化が大きいことを示す。

表から架橋ポリエチレンとシリコーンゴムについてみると架橋ポリエチレンでは一般に逐次法での強度低下がやや大きく、この場合は空気存在の影響はほとんどみられない。

一方、シリコーンゴムはデータが少ないが、事前劣化がある場合とない場合で多少異なり、事前劣化がない場合同時法空気なしの低下がやや少ないと、事前劣化がある場合はいずれの条件でも大差はなく、全体として環境暴露の方法による劣化挙動の違いは小さい。

Fig.256 の伸びについては、強度以上に事前劣化の影響が大きく、いずれも事前劣化なしの場合の低下が少ない。このことは先に述べたように、BWR条件ではLOCA時の線量が少なく、伸びの低下に事前劣化における照射が大きく寄与していることを示す。BWR条件下ではハイパロン、クロロブレンは同時法空気存在での低下が最も大きい傾向を示すが、EPRではいずれの環境でも大きな違いはみられず、同時法の劣化と逐次法の劣化はほぼ同程度であることがわかる。

次に表から、架橋ポリエチレンでは逐次法による伸びの低下が大きく、また空気の影響は逐次法の場合に大きい。この試料では逆逐次法はどちらかと云うと逐次法に近い値を示しており、全体として逐次法の方がやや厳しい結果になっている。これに対しシリコーンゴムでは、事前劣化の影響も、環境暴露の方法の影響も比較的小さく、劣化は主として放射線量のみに依存すると考えられる。

以上の結果から、同時・逐次・逆逐次の比較について次のような結論が得られる。

架橋ポリエチレン、シリコーンゴムを除き、同時環境に空気が存在すると強度、伸びの低下が最も大きくなる。特にLOCA時の線量が大きいPWRの条件での傾向が著しい。このことは放射線酸化劣化が重要な役割を果していることを示唆するものであり、これらの試料については逐次法で同時法を模擬すると安全側にならない。

一方、架橋ポリエチレンの場合は一般に逐次法の劣化が同時法と同じかやや厳しいことから、同時法の劣化を逐次法で模擬しても安全側になる可能性が大きい。またシリコーンゴムについては事前劣化や環境条件の影響が比較的小さく、劣化は放射線量のみによると考えられることからこの場合も同時法の劣化を逐次法で模擬しても著しい非安全側にはなり得ない。

しかしながら、ここで問題になるのは、現実の事故環境は前述したように長期

間であることから、空気存在下の同時環境では放射線酸化の影響が著しく大きくなると考えられる。事実4.1.1で示したように現実の事故環境により近いと考えられる同時法長期間空気存在下での試験（3ヶ月）結果から、殆どの材料は著しい劣化を示しており、本節で比較した短期間の空気存在下の同時法に比べさらに劣化が大きい。したがってこのような環境における劣化を短時間の逐次法で模擬するにあたってはその条件を考慮し安全側になるよう条件を決定する必要がある。そこで以下に逐次法のどの環境が劣化に影響を与えるかをレーダーチャートにより比較し、長期間の同時環境における劣化を短時間の逐次法で模擬する際の条件について検討する。

Fig.257 にハイパロンならびにEPRを種々の逐次法試験条件下で試験したときの伸びの保持率をレーダーチャートを用いて示した。図中の実線は蒸気環境に空気を含む場合、破線は空気を含まない場合を示す。伸びの値は初期値に対する比の値（残率）で示しており、円の中心に向かって劣化が大きくなることを示す。蒸気環境暴露時間は264時間、スプレイはケミカルスプレイを全期間実施した。また、図中にSim-C, Sim-Dで示した同心円は同時法空気存在下での1週間及び3ヶ月試験の際の劣化の程度を示したものである。これらの図では架橋ポリエチレンの場合を除き、試験した複数試料の平均値を示した。

ハイパロンでは劣化に影響を与える因子は線量、線量率、前照射雰囲気ならびに蒸気環境温度が劣化に影響を与えることがわかる。特に高温の蒸気環境に空気が存在すると劣化が著しい。同時環境における劣化との比較では、長時間の同時環境暴露（Sim-D）の劣化を短時間の逐次法で模擬しようとする場合、ここに示された逐次法の試験条件ではまだ不十分であることがわかる。そこで同時法長期間暴露と同程度の劣化を与えるためには、前照射を酸化雰囲気で行い、さらに蒸気環境温度を高くするなどの方法が有効であろう。

EPRについては、線量、前照射時の雰囲気、温度ならびに蒸気中の空気などが影響を与える。特に酸化雰囲気での前照射は著しい影響を与えており、十分酸化される雰囲気で前照射を行うことにより同時法長期間の劣化と同程度の劣化を与えることも可能である。

Fig.258 に架橋ポリエチレンならびにクロロブレンの結果を示す。クロロブレンの場合は劣化が著しく、蒸気環境暴露時間が長時間になると測定不能になる場合が多く比較が出来ないため、蒸気暴露時間は24時間のところで比較した。したがって蒸気環境暴露の影響は他の試料に比べ小さいことが予想される。

まず架橋ポリエチレンについては線量、線量率、前照射雰囲気、蒸気環境温度や蒸気環境における空気の存在が影響を与える。特に酸素加圧下照射後蒸気環境暴露すると著しく劣化し測定不能となる。図中に示したSim-Cは同時法短期間の結果で、この試料は同時法長期間暴露すると試料の一部が溶解し測定値が得られな

かった。

クロロブレンは他の材料に比べ照射により著しく伸びが減少するため、PWRの条件である1.5MGyは線量が過大でありはっきりした傾向はわからないが、他の材料同様、線量、線量率、前照射雰囲気などが劣化に大きな影響を与えると考えられる。

Fig.259 にシリコーンゴムの結果を示す。シリコーンゴムの劣化は主として放射線の線量によって決まることはすでに述べたが、この図から線量以外の因子は殆ど影響を与えていないことがわかる。ただし、蒸気環境温度が著しく高くなると劣化し測定不能になるが、これは高温のケミカルスプレイ液による加水分解が起こることを示しており、温度条件の設定にはこの点に留意する必要がある。

(3) まとめ

以上、機械的性質について同時・逐次・逆逐次の比較を行った結果、次のように結論できる。

- 1) 同時法空気なしの短期間の環境における劣化と逐次法空気なし短期間の劣化を比較すると、逐次法の劣化が同程度かやや大きいことから、同時法の劣化を逐次法で模擬した場合安全側になり得る。
- 2) 同時法空気存在と逐次法空気存在を比較すると相乗効果により同時法の劣化が大きくなる場合が多く、逐次法により同時法の劣化を模擬する際には蒸気環境温度を高める、前照射を酸化雰囲気で行うなどの工夫が必要である。特に同時法空気存在下の長期間暴露における劣化を模擬するのに短期間の逐次法では環境条件の設定が難しい。
- 3) 逆逐次法では一般に同時法、逐次法に比べ劣化が著しく少ない場合がみられ、本試験法で試験を行うことは多くの材料で安全側にならず、試験法としては適当でない。
- 4) 架橋ポリエチレンは一般に逐次法による劣化が同時法に比べやや厳しく、同時環境における劣化を逐次法で模擬できると考えられるが、同時法空気存在下での長期間試験では酸化に起因する劣化が著しく、逐次法で劣化を模擬するためには、試験条件の設定が重要である。
- 5) シリコーンゴムの劣化は主として放射線の線量に依存していることから、同時法の劣化を逐次法で模擬できるが、高温の蒸気環境暴露では加水分解が起こり劣化するため、蒸気環境温度の設定には注意を要する。

関連文献

1. 中瀬吉昭, 吉田健三, 日馬康雄, 伊藤政幸, 岡田漱平, 町末男, "電線ケーブル絶縁材料のL O C A環境劣化における同時法と逐次法の比較,"
電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-80-98(1980)
2. Y.Kusama, S.Okada, M.Yoshikawa, M.Ito, T.Yagi, Y.Nakase, T.Segichi, K.Yoshida,"Methodology Study for Qualification Testing of Wire and Cable at LOCA Condition", Proceedings of U.S. Nuclear Reguratory Commission NUREG/CP-0041(1983)
3. M.Ito, Y.Kusama, T.Yagi, S.Okada, M.Yoshikawa, K.Yoshida,"Progress on Qualification Testing Methodology Study of Electric Cables", Proceedings of U.S. Nuclear Reguratory Commission NUREG/CP-0058(1985)
4. 日馬康雄, 岡田漱平, 八木敏明, 伊藤政幸, 吉田健三, 田村直幸, "絶縁材料の劣化に及ぼす放射線・蒸気環境の複合効果",
電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-85-162(1985)
5. 日馬康雄, 八木敏明, 伊藤政幸, 岡田漱平, 川上和市郎, "L O C A模擬逐次法における前照射条件および蒸気環境条件が絶縁材料の劣化に及ぼす影響",
同上 EIM-86-130(1986)
6. Y.Kusama, T.Yagi, S.Okada, M.Ito, M.Yoshikawa, K.Yoshida, N.Tamura, W.Kawakami,"Progress on Qualification Testing Methodology Study of Electric Cables", Proceedings of U.S. Nuclear Reguratory Commission NUREG/CP-0082(1987)

Table 43 a Mechanical properties of insulating and jacketing materials exposed to various PWR LOCA environments.

Materials a (aged samples)	Simultaneous						Sequential						Reverse Sequential	
	Tb/Tb _o	Eb/Eb _o	Saturated steam	Saturated steam with air	Tb/Tb _o	Eb/Eb _o	Tb/Tb _o	Eb/Eb _o	Saturated steam with air	Tb/Tb _o	Eb/Eb _o	Tb/Tb _o	Eb/Eb _o	
CSM 1*	54	9.3	28	2.9	39	9.9	26	4.8	91	14				
CSM 2*	56	8.1	19	3.1	47	7.9	38	3.3	99	9.7				
CSM 3	37	4.0	30	2.0	29	5.2	30	2.2	67	8.4				
CSM 4	36	8.1	26	3.6	28	9.6	33	3.8	53	12				
EPR 1*	93	17	19	9.9	62	20	58	17	54	18				
EPR 3	74	3.8	25	3.3	39	4.1	37	3.7	74	6.8				
EPR 4	84	10	46	5.8	61	6.3	52	5.7	57	9.7				
XLPE 1*	39	19	23	7.1	42	15	32	6.6	40	3.1				
CR 1	42	0.5	24	0.8	40	0.4	27	0.3	49	0.3				
CR 2*	11	0.4	10	0.4	38	0.7	21	0.4	36	0.5				
CR 3	28	2.5	9.9	2.6	37	3.6	28	1.9	103	5.0				
SIR 1	34	2.2	40	3.2	32	3.2	29	3.2	45	3.2				
SIR 2	36	1.0	51	1.5	29	0.9	33	1.2	43	1.5				

Table 43-b (non aged samples)

Materials	Simultaneous				Sequential				Reverse Sequential	
	Saturated steam		Saturated steam with air		Saturated steam		Saturated steam with air		Saturated steam	Saturated steam
	Tb/Tbo	Eb/Ebo	Tb/Tbo	Eb/Ebo	Tb/Tbo	Eb/Ebo	Tb/Tbo	Eb/Ebo	Tb/Tbo	Eb/Ebo
CSM 1*	77	16	30	7.8	38	15	34	11	102	28
CSM 2*	80	15	32	7.7	45	11	39	8.2	116	19
CSM 3	47	8.2	29	4.4	28	9.5	30	6.1	77	14
CSM 4	48	16	28	8.2	33	19	25	8.4	93	20
EPR 1*	95	18	17	12	54	24	49	25	87	20
EPR 3	75	5.1	30	5.6	41	5.8	42	5.9	69	9.3
EPR 4	77	15	59	9.9	67	8.3	63	7.5	63	8.4
XLPE 1*	44	24	21	5.2	47	18	38	13	49	7.1
CR 1	61	1.4	21	2.3	25	0.5	25	0.6	77	1.8
CR 2	15	0.5	7.9	0.7	17	0.8	14	0.8	101	1.6
CR 3	35	3.2	5.5	3.1	39	4.4	29	3.9	125	6.6
SIR 1	41	3.1	46	5.8	34	4.1	29	6.2	41	3.3
SIR 2	43	1.4	47	2.1	38	1.6	36	1.4	49	2.0

Table 44 a Mechanical properties of insulating and jacketing materials exposed to various BWR LOCA environments.

a (aged samples)

Materials	Simultaneous				Sequential				Reverse Sequential	
	Tb/Tb _o	Eb/Eb _o								
CSM 1*	36	19	20	10	25	17	27	10	28	16
CSM 2*	46	25	27	16	43	26	37	17	38	19
CSM 3	26	16	25	12	18	19	24	9.3	-	-
CSM 4	42	28	29	13	33	33	39	19	-	-
EPR 1*	66	34	47	42	58	44	67	40	51	40
EPR 3	63	15	54	14	50	13	60	7.1	-	-
EPR 4	60	20	58	13	55	19	59	11	-	-
XLPE 1*	59	41	59	39	43	23	46	15	40	18
CR 1	28	1.6	14	1.0	17	1.0	40	0.4	-	-
CR 2*	16	1.4	3.4	3.2	20	0.9	18	0.8	13	0.9
CR 3	39	6.0	21	7.2	54	9.3	51	8.5	-	-
SIR 1	43	11	41	10	-	-	40	11	-	-
SIR 2	48	5.1	56	3.5	37	4.0	53	4.3	-	-

Table 44- b (non aged samples)

Materials	Simultaneous				Saturated steam with air				Sequential			
	Tb/Tb _o	Eb/Eb _o	Tb/Tb _o	Eb/Eb _o	Tb/Tb _o	Eb/Eb _o	Tb/Tb _o	Eb/Eb _o	Tb/Tb _o	Eb/Eb _o	Tb/Tb _o	Eb/Eb _o
CSM 1*	84	54	74	45	56	50	62	36				
CSM 2*	90	59	64	49	62	57	46	34				
CSM 3	52	57	41	51	37	72	47	64				
CSM 4	52	63	40	44	42	72	65	58				
EPR 1*	68	54	38	75	63	75	68	66				
EPR 3	60	30	52	35	59	28	89	29				
EPR 4	70	52	52	31	58	43	62	26				
XLPE 1*	69	60	67	63	47	37	49	23				
CR 1	40	14	6.3	7.9	15	5.4	13	1.4				
CR 2*	40	13	4.8	3.0	15	7.2	3.4	7.3				
CR 3	44	19	14	13	71	22	74	18				
SIR 1	59	24	43	27	-	-	39	25				
SIR 2	59	15	47	13	44	16	37	7.4				

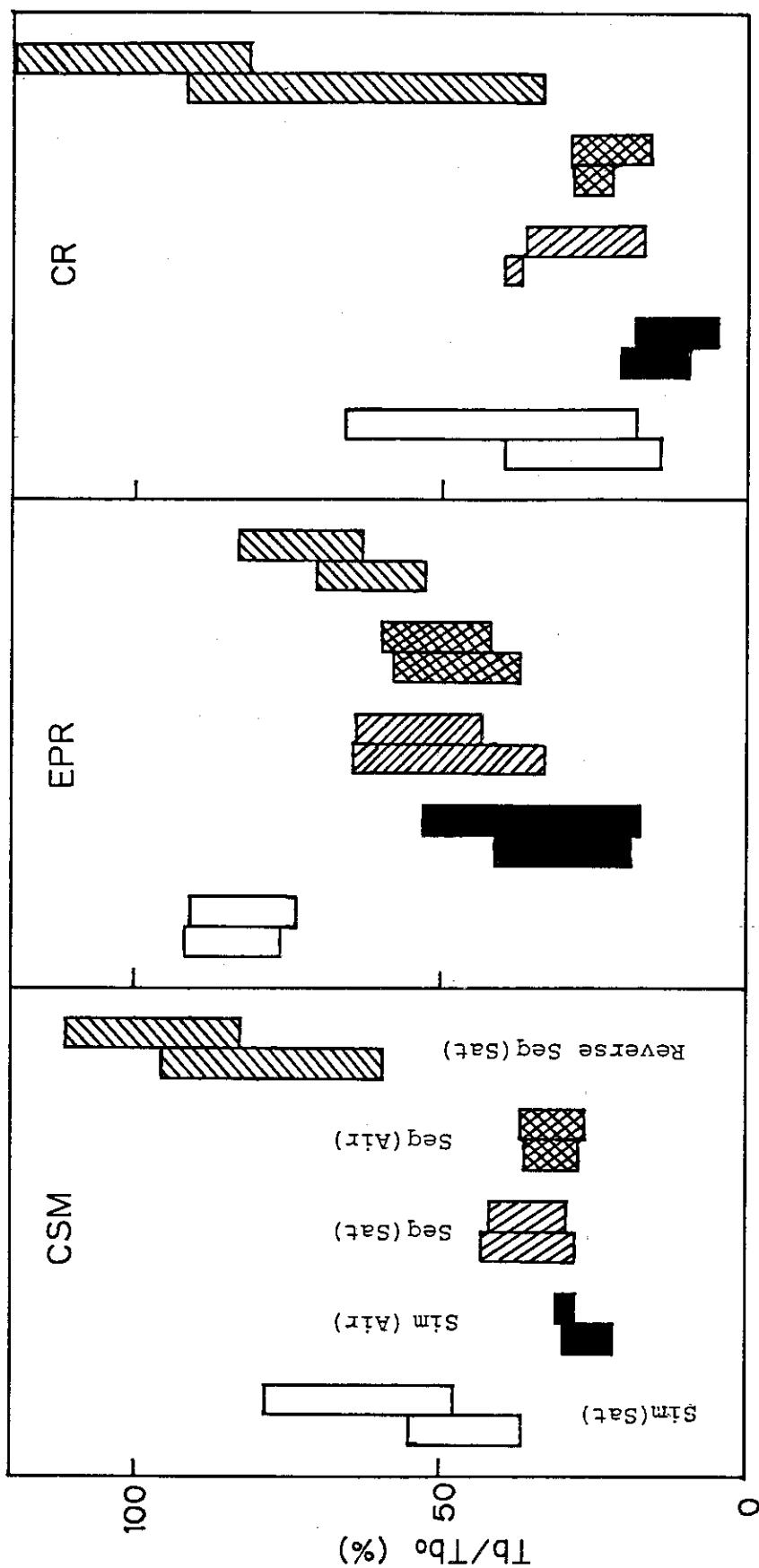


Fig. 253 Ultimate strength of insulating and jacketing materials exposed to various PWR LOCA environments.

Note: Bar in the left side show value for aged samples

Bar in the right side show value for non aged samples

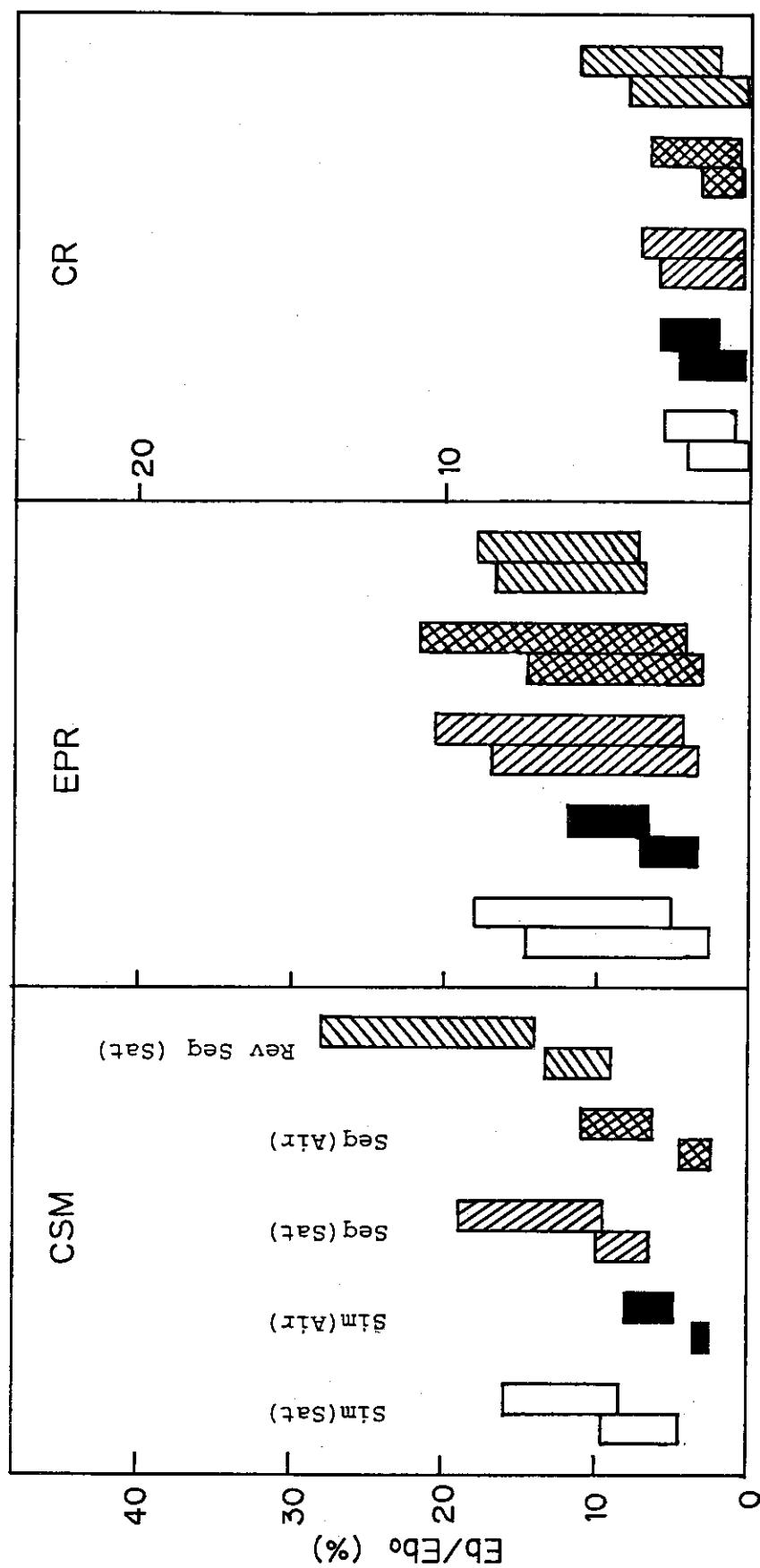


Fig. 254 Ultimate elongation of insulating and jacketing materials exposed to various PWR LOCA environments.

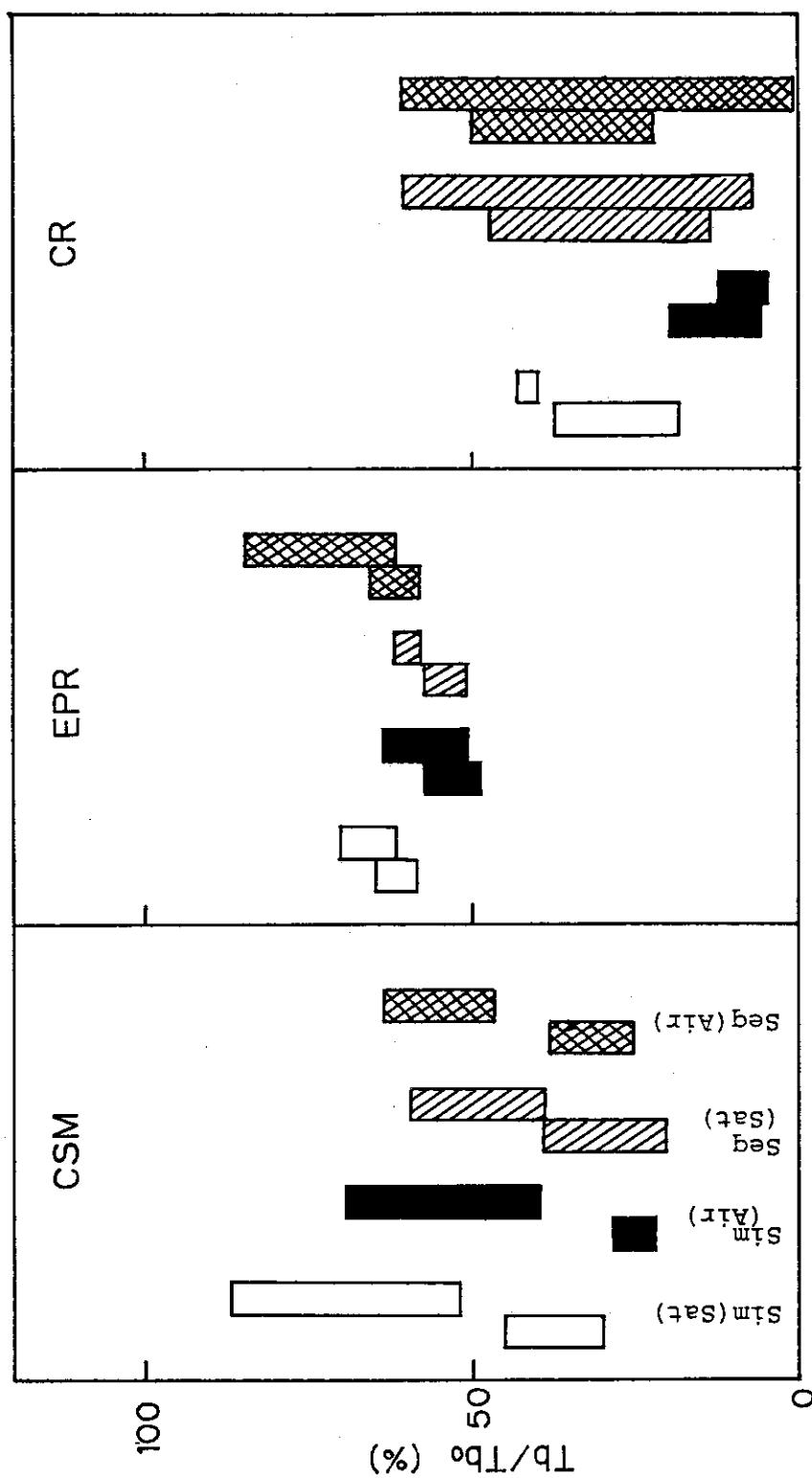


Fig. 255 Ultimate strength of insulating and jacketing materials exposed to various BWR LOCA environments.

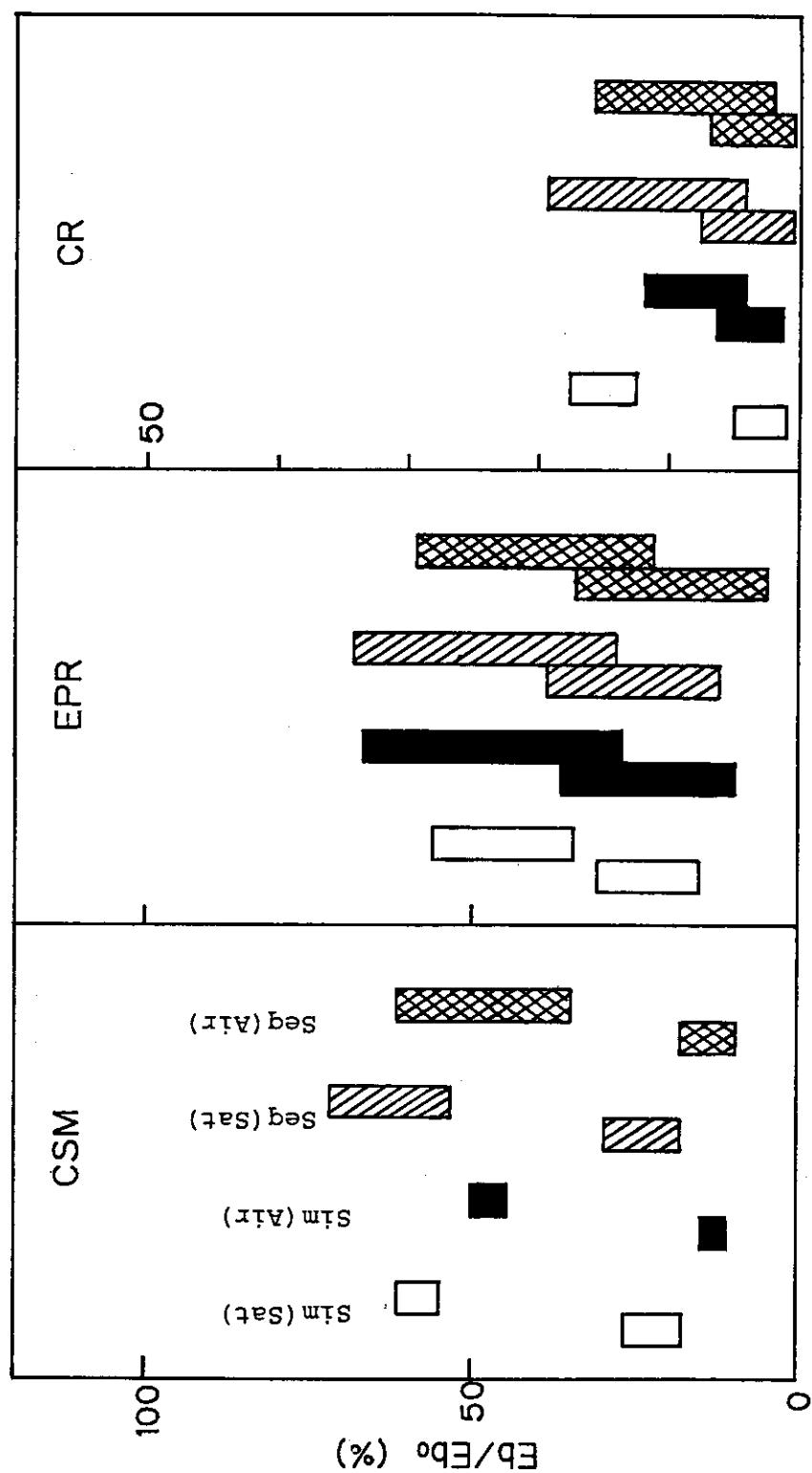


Fig. 256 Ultimate elongation of insulating and jacketing materials exposed to various BWR LOCA environments.

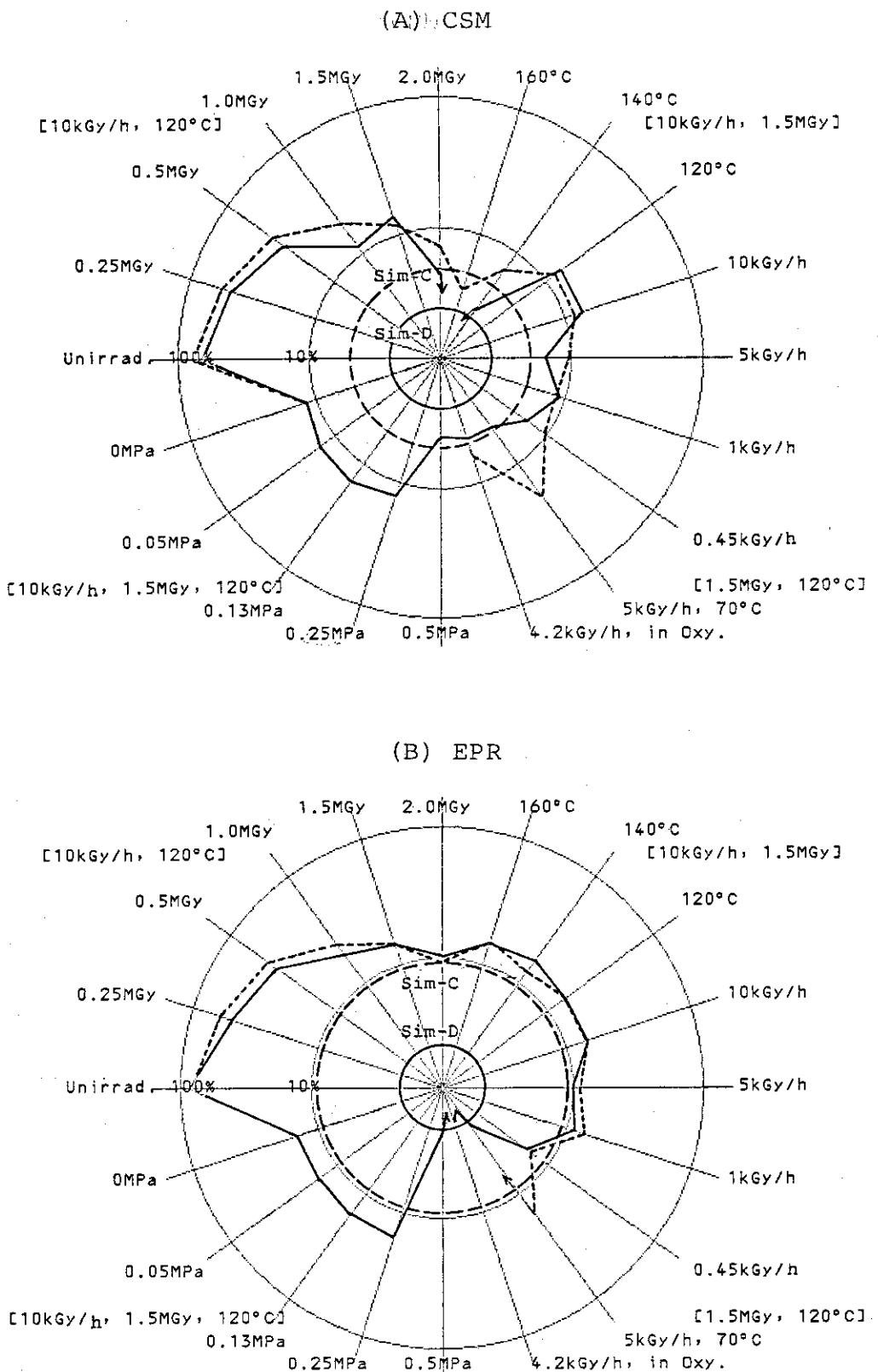
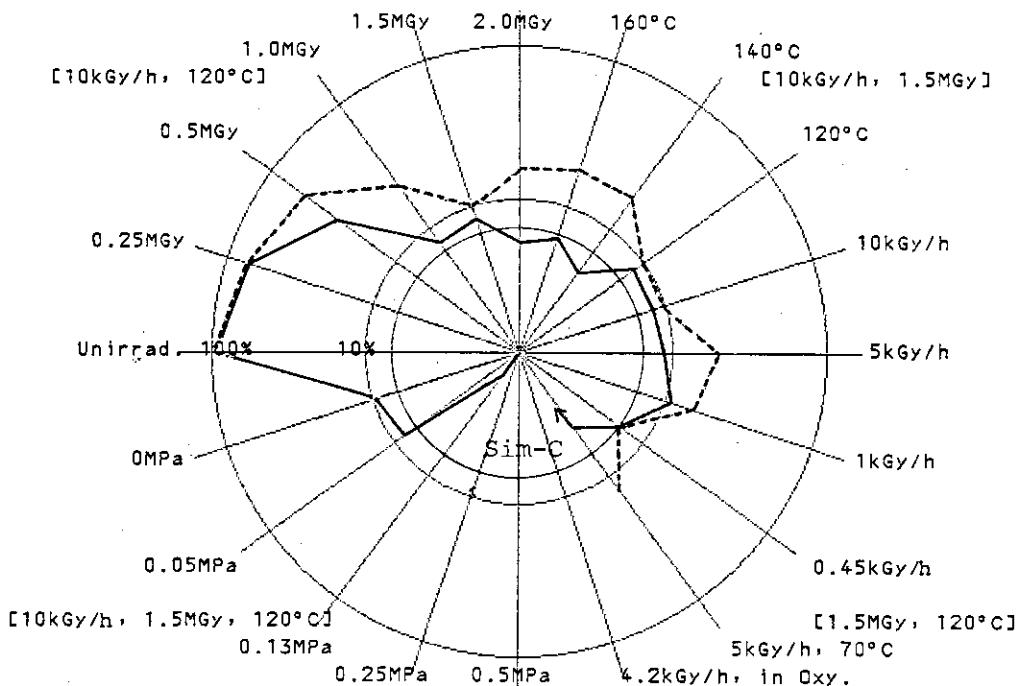


Fig.257 Ultimate elongation of Hypalon (A) and EPR (B) exposed to various sequential LOCA environments.

(A) XLPE



(B) CR

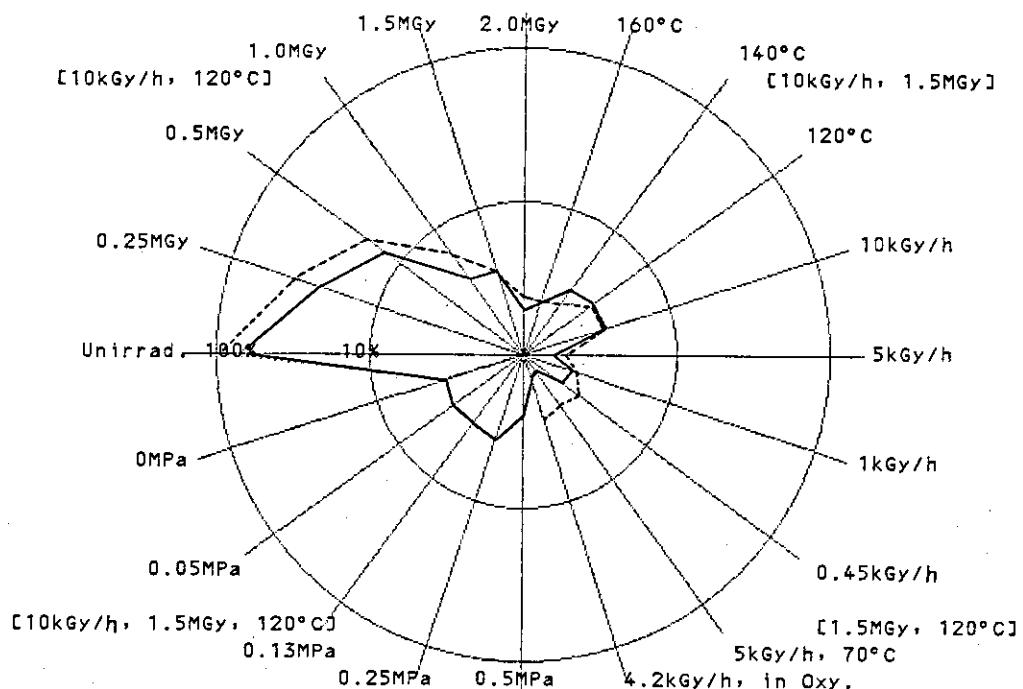


Fig.258 Ultimate elongation of XLPE (A) and CR (B) exposed to various sequential LOCA environments.

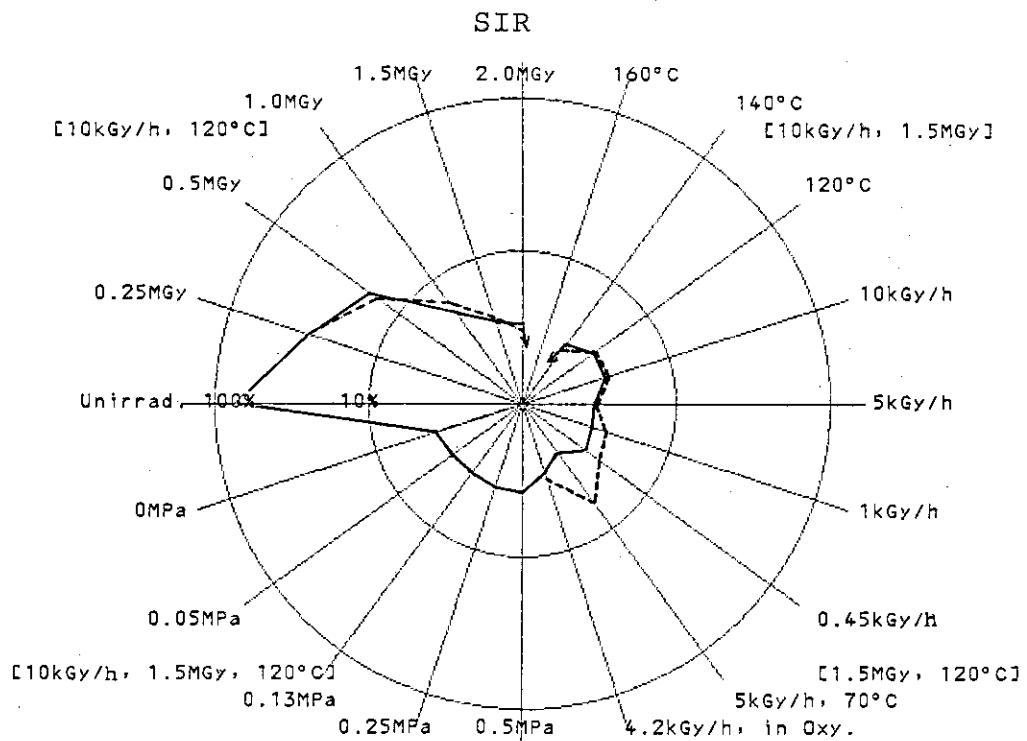


Fig.259 Ultimate elongation of SIR exposed to various sequential LOCA environments.

4.3.3 電気的性質ならびに吸水膨潤についての同時・逐次の比較

4.3.2 で機械的性質について同時・逐次・逆逐次法による劣化を比較した結果、多くの材料について同時環境で空気が存在すると劣化が著しくなり、これらの劣化を通常の逐次法で模擬するには条件の設定に注意しなければならないことが明らかになった。本節では電気的性質の絶縁抵抗について同時・逐次の比較を行う。尚逆逐次法については機械的性質のところで述べたように、現実の環境に近いと考えられる同時法の劣化に比べ劣化が少なく、試験法としては安全側にならないと考えられるので本節では議論の対象から除いた。

(1) 実験方法

実験に用いた試料及び実験方法は4.3.2 と同様であるので実験条件等については省略する。また、絶縁抵抗の測定方法はこれまでと同様に行った。

(2) 結果及び考察

Table 45a ~ e に本節で比較検討に用いた全データを示す。尚表中EPcore, EP sheath とあるのは、EPR 絶縁ハイバロン被覆の電線（PHケーブル）のコアならびにシースと同配合のシート状試料で、難燃性配合のものである。表中の値は体積固有抵抗の初期値に対する比の対数を示している。また、〔 〕内の表記は 500 V を印加した際の $V_t - I_t$ 挙動を示したもので、表記方法については別項を参照されたい。表中には参考のため被覆材料のハイバロン、クロロブレンについてのデータも記載してあるが以下結果については絶縁材料のみについて記す。

Fig.260 に 3 種類の絶縁材料ならびに PH ケーブルのコアと同配合の試料（6 社提供 6 種類）の結果を示す。棒グラフは機械的性質の場合と同様に、同じ種類のものについては左側は事前劣化がある場合、右側は事前劣化なしの場合を示す。また棒グラフ群は左から順に同時法空気なし Sim(Sat), 同時法空気存在 Sim(Air), 逐次法空気なし Seq(Sat) および逐次法空気存在 Seq(Air) を示す。図中架橋ポリエチレン以外は複数試料の平均値 ± 標準偏差を、架橋ポリエチレンは試料が 1 種類であるため同種の実験で得られた値の平均値 ± 標準偏差を示してある。いずれの試料も空気を含まない同時法では絶縁低下は少ないが、同時環境に空気があると著しく低下することがわかる。特に架橋ポリエチレンでは低下が著しくまた実験毎のデータのバラツキも大きくなっている。EPR 試料（モデル配合を含む）と EPcore は類似の傾向を示すが、逐次環境に空気が存在すると試料間での劣化挙動の違いが大きくなる。この図から明らかなように EPR については空気を含む同時法による劣化を空気を含む逐次法で模擬可能であると思われるが、架橋ポリエチレンやシリコーンゴムについては条件を考慮する必要があることがわかる。

そこで機械的性質の場合と同様に、レーダーチャートを用いて逐次法のどの条

件が劣化に影響を与えるかを検討した結果を以下に示す。

Fig.261 a, b に E P R ならびに架橋ポリエチレンの絶縁抵抗の変化を示す。この図も機械的性質と同様に円の中心に向かって低下が大きくなることを示しており、最も低下した場合は 6 枝になることを示している。また同心円で示した Sim-C, Sim-D は同時法空気存在下 1 週間および 3 ヶ月の場合の劣化を示す。

E P R の絶縁抵抗に影響を及ぼすのは蒸気環境温度と前照射時の霧囲気ならびに温度である。この図から空気を含む長期間の同時環境暴露時の劣化は大きく、短期間の逐次法で模擬するには酸化霧囲気での照射を行った後高温の蒸気環境に暴露するなどの方法が必要である。

次に架橋ポリエチレンの結果であるが、架橋ポリエチレンの絶縁抵抗には蒸気環境温度、前照射時の霧囲気、さらに蒸気環境への添加空気の量が影響を与える。即ち酸化劣化が起こる条件で著しく低下することがわかる。

Fig.262 a にシリコーンゴム、262 b に参考としてハイパロンの結果を示す。シリコーンゴムの絶縁抵抗については蒸気環境温度が影響を与えるが、放射線については線量が少ないほど絶縁低下が大きくなっている。この傾向は先に述べたように、シリコーンゴムは熱老化で絶縁低下し、照射によって回復する現象と同様の現象である。したがってシリコーンゴムの絶縁低下は主として熱によるもので、線量率、照射霧囲気、蒸気環境の空気など酸化劣化に関連した因子は殆ど影響を与えないことがわかる。熱による絶縁低下のメカニズムについては不明である。

最後に参考として示したハイパロンであるが、ハイパロンでは蒸気環境温度、蒸気環境の空気、前照射霧囲気などの酸化劣化に関連ある因子が影響を与えることがわかる。これらの現象は 4.3.1 で述べたように、材料内部に生じた活性種などと水の反応によって親水性の高い構造が生じたことによるものであり、材料の吸水膨潤とも関連を持つと考えられる。

Fig.263, 264, 265 に E P R, 架橋ポリエチレンおよびハイパロンの吸水膨潤の結果を示す。これらの図では円の外周に向かって吸水が増加することを示しているが、E P R では蒸気環境温度、線量率、照射霧囲気が、架橋ポリエチレンでは上記に加えて蒸気環境の空気も吸水を助長することを示しており、酸化劣化により敏感であることがわかる。同様にハイパロンでも蒸気環境温度や線量率、照射霧囲気などが吸水に影響を与えていることがわかる。これらの結果から吸水は酸化劣化と密接な関係を持ち、吸水により絶縁抵抗の低下が生じることがわかる。

シリコーンゴムの絶縁抵抗が環境条件の影響を受けないのは、酸化劣化に対し安定であるため、吸水しないことが原因であると考えられる。

(3) まとめ

絶縁抵抗について同時・逐次の比較を行った結果、多くの材料について同時法

空気存在下での低下が最も大きく、これらを短時間の逐次法で模擬するためには環境温度を上げる、前照射時に酸化劣化するなどの条件を設定するなどの考慮が必要である。さらに長時間の空気を含む同時環境における劣化を短時間の逐次法で模擬するためにはさらに厳しい条件が必要となる。

絶縁抵抗の低下は酸化劣化による吸水と密接な関係を持つことがわかったことから、現実の環境で起こっている劣化を出来るだけ忠実に模擬するためには、前照射時に酸化劣化が起こる条件で、さらに蒸気環境暴露時にも酸化が進行する条件が望ましい。

関連文献

1. 岡田漱平, 伊藤政幸, 日馬康雄, 中瀬吉昭, 吉田健三, "LOCA模擬環境下における絶縁材料の電気的性質の変化", 電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-81-92(1981)
2. Y.Kusama, S.Okada, M.Yoshikawa, M.Ito, T.Yagi, Y.Nakase, T.Seguchi, K.Yoshida, "Methodology Study for Qualification Testing of Wire and Cable at LOCA Condition", Proceedings of the U.S. Nuclear Regulatory Commission NUREG/CP-0041 Vol.5 pp330(1983)
3. 岡田漱平, 吉川正人, 伊藤政幸, 日馬康雄, 八木敏明, 吉田健三, "絶縁材料の電気的特性の変化に対するLOCA模擬条件の影響", 電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-82-109(1982)
4. 岡田漱平, 日馬康雄, 伊藤政幸, 八木敏明, 吉川正人, 吉田健三, "絶縁材料のLOCA模擬環境下における劣化に及ぼす線量率の効果(II)", 同上 EIM-83-116(1983)
5. 吉川正人, 濑口忠男, 吉田健三, "高分子材料の電気絶縁抵抗に対する放射線酸化と水蒸気の影響", 同上 EIM-83-121(1983)
6. 岡田漱平, 日馬康雄, 吉川正人, 伊藤政幸, 八木敏明, 吉田健三, "LOCA模擬環境下での絶縁材料の絶縁低下と機械的性質の劣化との相関—同時法における空気存在の影響ー", 同上 EIM-84-134(1984)
7. 吉川正人, 濑口忠男, 吉田健三, "放射線劣化した高分子材料の絶縁抵抗に対する熱と水の効果", 同上 EIM-84-136(1984)
8. 吉川正人, 濑口忠男, 日馬康雄, 吉田健三, "絶縁用EPRの水中照射による電気絶縁抵抗の変化", 同上 EIM-85-160(1985)
9. 岡田漱平, 日馬康雄, 八木敏明, 伊藤政幸, 川上和市郎, 田村直幸, "LOCA模擬逐次法における前照射条件が絶縁材料の劣化に及ぼす影響", 同上 EIM-85-164(1985)

10. S.Okada, Y.Kusama, M.Ito, T.Yagi, M.Yoshikawa, K.Yoshida, N.Tamura,"W.Kawakami,"Progress on Qualification Testing Methodology Study of Electric Cables", Proceedings of the U.S. Nuclear Reguratory Commission NUREG/CP-0071 (1985)
11. 岡田漱平, 日馬康雄, 八木敏明, 伊藤政幸, 川上和市郎, "L O C A模擬逐次法における前照射条件および蒸気環境条件が絶縁材料の劣化に及ぼす影響 II. 電気的性質 電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-86-131(1986)
12. Y.Kusama, T.Yagi, S.Okada, M.Ito, M.Yoshikawa, K.Yoshida, N.Tamura, W.Kawakami,"Progress on Qualification Testing Methodology Study of Electric Cables", Proceedings of the U.S. Nuclear Reguratory Commission NUREG/CP-0081 (1986)

Table 45-a Change in volume resistivity of insulating materials under various LOCA environments

実験番号	試料記号	劣化条件コード	試料名	EPR-1	EPR-3	PER-4	XLPE
S1W17 ~S1W20	0	Original	(16.15)	(15.59)	(16.11)	(17.01)	
S1W17	+Sim(Sat) 1	+P(175h) CR(1.5MGy)	0.05	-0.51	-0.81(V)	-0.09	
S1W19	+Seq(Sat) 1	+R(1.5MGy175h) / P(175h) C	0.34	0.09	-0.54	-1.09	
S1W17	Sim(Sat) 1	P(175h) CR(1.5MGy)	0.11	-0.83	-0.95	-2.90(I)	
S1W19	Seq(Sat) 1	R(1.5MGy175h) / P(175h) C	-0.34	0.30	-0.34(sV)	-1.97(V)	
W1W37 ~W1W40	0	Original	(16.19)	(16.38)	(16.02)	(17.50)	
W1W37	+Sim(Air) 1	+P(162h) CA(0.05MPa) R(1.5MGy)	-3.48[UG](C)	-4.59[U]	-1.88	-6.13[UY]	
W1W39(2) W1W40	+Seq(Air) 1	+R(1.5MGy162h) / P(162h) CA(0.05MPa)	-4.63[G](C)	-3.27[G]	-2.83[sG](C)	-2.07[XW]	
W1W37	Sim(Air) 1	P(162h) CA(0.05MPa) R(1.5MGy)	-3.91[UC]	-3.68[U](C)	-1.45[sG]	-3.85[Y](C)	
W1W39(2) W1W40	Seq(Air) 1	R(1.5MGy162h) / P(162h) CA(0.05MPa)	-1.07[SUG]	-3.56[G](I)	-1.51[sG]	-2.81[XW]	
W10D62 ~W9D64	0	Original	(15.99)	(15.52)	(15.78)	(17.27)	
W10D62	+Sim(Air) 2	+P(216h) CA(0.05MPa) R(1.5MGy)	-1.60[sFUG]	-1.92[dU]	-1.64	-6.69[UBRY]	
W10D62	Sim(Air) 2	P(216h) CA(0.05MPa) R(1.5MGy)	-3.36[UWG]	-2.93[usT](sv)	-1.16[sB]	-6.66[UBRY](CsY)	
W9D64	+Sim(Sat) 2	+P(218h) CR(1.5MGy)	-0.36	-0.50[usU]	-0.18	-0.73	
W9D64	Sim(Sat) 2	P(218h) CR(1.5MGy)	-0.34	-0.96	-0.39	-0.92	
W9D67	0	Original	(15.97)	(14.91)	(15.71)	(17.78)	
W9D67	+Seq(Sat) 2	H/R(2.0MGy200h) / P*(218h) C	0.10	0.70	-0.15	-1.52	
W9D67	Seq(Sat) 2	R(1.5MGy150h) / P*(218h) C	0.05	0.43	-0.18	-1.51	
W10D74	0	Original	(16.01)	(15.37)	(15.75)	(17.27)	
W10D74	+Seq(Air) 2	H/R(2.0MGy206.8h) / P*(218h) CA(0.05MPa)	-0.91[WT]	-0.38[sT]	-0.34[sW]	-0.75[sUW]	
W10D74	Seq(Air) 2	R(1.5MGy154.5h) / P*(218h) CA(0.05MPa)	-0.03[T]	0.11[sW]	-0.14[sW]	-1.16[UW]	

S1W17~19: +H/R(0.5MGy58h); W1W37~40: +H/R(0.5MGy54h); W10D62: +H/R(0.5MGy72h); W9D64: +H/R(0.5MGy72.6h);

P*: 3分で150℃まで昇温させるPWR用プロファイル

Note: Values are shown as $\log \rho/\rho_0$, where ρ_0 is the value for original samples.

Table 45-b Change in volume resistivity of insulating materials under various LOCA environments

実験略称	試験記号	劣化条件コード	試料名	Hypalon-1	Hypalon-2	Hypalon-3	Hypalon-4
SIW17 ~SIW20	0	Original	(13.80)	(13.73)	(13.68) (I)	(13.73)	(13.73)
SIW17	+Sim(Sat)1	+P(175h)CR(1.5MGy)	-1.77	-1.57	-2.69	-3.19 (I)	
SIW19	+Seq(Sat)1	+R(1.5MGy175h)/P(175h)C	0.31(V)	0.79(V)	0.48(sV)	-2.85	
SIW17	Sim(Sat)1	P(175h)CR(1.5MGy)	-1.93	0.10	-2.90	-2.93 (I)	
SIW19	Seq(Sat)1	R(1.5MGy175h)/P(175h)C	0.54	0.98(V)	-0.04(V)	-2.35 (I)	
WIW37 ~WIW40	0	Original	(14.75)	(13.90)	(13.78)	(14.69)	
WIW37	+Sim(Air)1	+P(162h)CA(0.05MPa)R(1.5MGy)	-2.80 [sU]	-4.08 [R](I)	<-4.18 [U]	<-4.99 [UW]	
WIW39(2) WIW40	+Seq(Air)1	+R(1.5MGy162h)/P(162h)CA(0.05MPa)	-2.86 [UW]	<-4.20 [U] (I)	<-4.18 [A]	<-5.19 [UW]	
WIW37	Sim(Air)1	P(162h)CA(0.05MPa)R(1.5MGy)	-2.30 [R]	<-4.10 [R]	<-4.18 [W]	<-5.09 [UW]	
WIW39(2) WIW40	Seq(Air)1	R(1.5MGy162h)/P(162h)CA(0.05MPa)	-1.86 [UsW]	-0.96 [U] (IV)	<-4.16 [UW] (sI)	<-5.09 [sUsW]	
WIOD62 ~WI9D64	0	Original	(13.80)	(14.11)	(13.12)	(13.35)	
WIOD62	+Sim(Air)2	+P(216h)CA(0.05MPa)R(1.5MGy)	-2.43 [UT]	-3.99 [sUT] (sI)	<-3.55 [sT]	<-3.75 [TU]	
WIOD62	Sim(Air)2	P(216h)CA(0.05MPa)R(1.5MGy)	-1.52 [UT]	-3.50 [dT] (sI)	<-3.53	<-3.80 [TU]	
W9D64	+Sim(Sat)2	+P(218h)CR(1.5MGy)	-1.05 [sU]	-0.94 [U] (sI)	<-3.55 [sWsY]	-2.79 [sB]	
W9D64	Sim(Sat)2	P(218h)CR(1.5MGy)	-0.73	-1.01 [sU]	<-3.52 [L]	-1.35 [UsT] (I)	
W9D67	0	Original	(13.78)	(13.50)	(12.96)	(14.29)	
W9D67	+Seq(Sat)2	H/R(2.0MGy200h)/P*(218h)C	0.42 [sWsU]	0.78 [sU]	-0.35 [sUsWsT]	-1.34 [sUsT] (sI)	
W9D67	Seq(Sat)2	R(1.5MGy150h)/P*(218h)C	0.42 [sUW]	0.77 [sUsBr]	-0.36 [W]	-1.94 [sW]	
WIOD74	0	Original	(14.49)	(13.44)	(12.66)	(14.55)	
WIOD74	+Seq(Air)2	H/R(2.0MGy206.8h)/P*(217h)CA(0.05MPa)	-2.11 [UWT] (I)	-0.60 [UT] (sV)	-1.17 [UWT]	-3.75 [UWT] (I)	
WIOD74	Seq(Air)2	R(1.5MGy154.5h)/P*(218h)CA(0.05MPa)	-1.62 [UWT] (I)	-0.33 [UWT]	-2.26 [UWT] (sV)	-3.99 [UWT] (I)	

SIW17~19: +=H/R(0.5MGy58h); WIW37~40: +=H/R(0.5MGy54h); W9D64: +=H/R(0.5MGy72.6h); P*: 3分 \times 150°Cまで昇温させるPWR用プロファイル

Table 45-c Change in volume resistivity of insulating materials under various LOCA environments

実験略称	試験品記号	劣化条件コード	試験名	Neoprene-1	Neoprene-2	Neoprene-3	Silicone-1	Silicone-2
SIW17 ~SIW20	0	Original	(12.46)	(13.16) (I)	(13.10)	(15.30)	(16.71)	
SIW17 +Sim(Sat)1	+P(175h)CR(1.5MGy)		測定不能 [Nv]	-1.75(I)	-2.76(C)	-0.15	-1.29	
SIW19 +Seq(Sat)1	+R(1.5MGy175h)/P(175h)C	<-2.76	-1.44(IV)	-0.22	-1.75	-0.73		
SIW17 Sim(Sat)1	P(175h)CR(1.5MGy)	<-2.76	-3.46	-2.47(C)	0.04	-1.69		
SIW19 Seq(Sat)1	R(1.5MGy175h)/P(175h)C	-2.08(C)	-0.06	-0.35	-0.40	-0.95		
WIW37 ~WIW40	0	Original	(12.89)	(13.16) (I)	(13.68)	(15.01)	(15.66)	
WIW37 +Sim(Air)1	+P(162h)CA(0.05MPa)R(1.5MGy)	<-3.49[QUM]	<-3.66[QUM]	<-4.18[RW]	-0.93[Usw]	-1.99[su](C)		
WIW39(2) WIW40	+Seq(Air)1	+R(1.5MGy162h)/P(162h)CA(0.05MPa)	<-3.39[Fw]	<-2.53[WBM](V)	<-4.18[W]	-1.21[QW]	-0.45[W]	
WIW37	Sim(Air)1	P(162h)CA(0.05MPa)R(1.5MGy)	<-3.39[QUFWB]	測定不能 [QUFWB]	<-4.18[QwW]	-0.68[sUsW]	-0.33[sU]	
WIW39(2) WIW40	Seq(Air)1	R(1.5MGy162h)/P(162h)CA(0.05MPa)	<-3.39[Fsu]	<-3.04[QUBB](sIV)	<-4.18[W]	-0.88[W]	-0.65[W]	
WIOD62 ~W9D64	0	Original	(12.45)	(12.06)	(12.49)	(15.62)	(16.53)	
WIOD62 +Sim(Air)2	+P(216h)CA(0.05MPa)R(1.5MGy)	測定不能 [HU]	<-2.98[UTW]	-2.16[BW]	-3.20[sB]			
WIOD62	Sim(Air)2	P(216h)CA(0.05MPa)R(1.5MGy)	<-3.03[FTW]	測定不能 [QH]	測定不能 [QU]	-1.06[B]	-2.35[Br]	
W9D64 +Sim(Sat)2	+P(218h)CR(1.5MGy)	-2.14[WHI](CI)	<-3.01[UWTF]	-0.36[sB]	-0.92[sUSBW]			
W9D64	Sim(Sat)2	P(218h)CR(1.5MGy)	<-2.88[WUHF]	測定不能 [URF]	<-3.09[UT]	-0.19[sUBRB]	-0.56[sUB]	
W9D67	0	Original	(11.40)	(12.18)	(13.34)	(16.45)	(16.02)	
W9D67 +Seq(Sat)2	H/R(2.0MGy200h)/P*(218h)C	<-1.79[HdW]	<-2.67[HdW]	<-3.83[QdWdt]	-1.01	-0.16		
W9D67	Seq(Sat)2	R(1.5MGy150h)P*(218h)C	<-1.91[dWH]	0.91[sWBr]	<-3.86[sudW]	-0.97	-0.54[sNsBr]	
WIOD74 0	Original	(12.60)	(10.31)	(13.12)	(15.56)	(16.50)		
WIOD74 +Seq(Air)2	H/R(2.0MGy206.8h)/P*(218h)CA(0.05MPa)	<-3.16[UWT]	<-3.58[UWT]	-0.31[Usw]	-1.30[sU]			
WIOD74	Seq(Air)2	R(1.5MGy154.5h)/P*(218h)CA(0.05MPa)	-3.20[UWT](sV)	測定不能 [UWT]	-0.16[sUW]	-0.98[W]		

SIW17~19: +=H/R(0.5MGy58h); WIW37~40: +=H/R(0.5MGy54h); W9D64: +=H/R(0.5MGy72.6h); P*: 3分で150°Cまで昇温させるPWR用プロファイル

Table 45-d Change in volume resistivity of insulating materials under various LOCA environments

実験略称	試料記号	劣化条件コード	試料名		EPCore-1	EPCore-2	EPCore-3	EPCore-4	EPCore-5	EPCore-6
			°	℃						
SWL7 ~SWL20	0	Original	—	—	—	—	—	—	—	—
SWL7	+Sim(Sat)1	+P(175h)CR(1.5MGy)	—	—	—	—	—	—	—	—
SWL9	+Seq(Sat)1	+R(1.5MGy175h)/P(175h)C	—	—	—	—	—	—	—	—
SWL7	Sim(Sat)1	P(175h)CR(1.5MGy)	—	—	—	—	—	—	—	—
SWL9	Seq(Sat)1	R(1.5MGy175h)/P(175h)C	—	—	—	—	—	—	—	—
W1W37 ~W1W40	0	Original	—	—	—	—	—	—	—	—
W1W37	+Sim(Air)1	+P(162h)CA(0.05MPa)R(1.5MGy)	—	—	—	—	—	—	—	—
W1W39(2) W1W40	+Seq(Air)1	+R(1.5MGy162h)/P(162h)CA(0.05MPa)	—	—	—	—	—	—	—	—
W1W37	Sim(Air)1	P(162h)CA(0.05MPa)R(1.5MGy)	—	—	—	—	—	—	—	—
W1W39(2) W1W40	Seq(Air)1	R(1.5MGy162h)/P(162h)CA(0.05MPa)	—	—	—	—	—	—	—	—
W10D62 ~W9D64	0	Original	(16.24)	(16.21)	(16.05)	(15.52)	(15.76)	(15.78)	(15.79)	(15.79)
W10D62	+Sim(Air)2	+P(216h)CA(0.05MPa)R(1.5MGy)	-2.07 [sT]	-4.60 [sU]	-1.92 [dU]	-2.00 [sU]	-0.85	-1.64	-1.64	-1.64
W10D62	Sim(Air)2	P(216h)CA(0.05MPa)R(1.5MGy)	-2.70 [sT] (sV)	-3.48 [UT] (sV)	-2.93 [sT] (sV)	-1.67 [T]	-0.52	-1.16 [sB]	-1.16 [sB]	-1.16 [sB]
W9D64	+Sim(Sat)2	+P(218h)CR(1.5MGy)	-1.79 [sT]	-1.76 [sU]	-0.50 [sU]	-1.18	-0.12	-0.18	-0.18	-0.18
W9D64	Sim(Sat)2	P(218h)CR(1.5MGy)	-1.70 [sW]	-1.66 [V]	-0.96	-1.13	0.16	-0.39	-0.39	-0.39
W9D67	0	Original	—	—	—	—	—	—	—	—
W9D67	+Seq(Sat)2	H/R(2.0MGy200h)/P*(218h)C	—	—	—	—	—	—	—	—
W9D67	Seq(Sat)2	R(1.5MGy150h)/P*(218h)C	—	—	—	—	—	—	—	—
W10D74	0	Original	(15.28)	(15.54)	(15.37)	(16.00)	(15.92)	(15.75)	(15.75)	(15.75)
W10D74	+Seq(Air)2	H/R(2.0MGy206.8h)/P*(218h)CA(0.05MPa)	-0.05 [WT]	-1.06 [UsN] (V)	-0.38 [ST]	-5.93 [WT] (IV)	-1.40 [sW]	-0.34 [sW]	-0.34 [sW]	-0.34 [sW]
W10D74	Seq(Air)2	R(1.5MGy154.5h)/P*(218h)CA(0.05MPa)	0.20 [WT]	-1.99 [UsN]	0.11 [sW]	-1.95 [sU]	-0.37	-0.14 [sW]	-0.14 [sW]	-0.14 [sW]

S1W17~19: + $H/R(0.5MgY58h)$; W1W37~40: + $H/R(0.5MgY54h)$; w964: + $H/R(0.5MgY72.6h)$; P*: 3分で150℃まで昇温させるPWRHプロファイル

Table 45-e Change in volume resistivity of insulating materials under various LOCA environments

実験番号	試料記号	劣化条件コード	試料名	HPSheath-1	HPSheath-2	HPSheath-3	HPSheath-4	HPSheath-5	HPSheath-6
S1W17 ~S1W20	0	Original		—	—	—	—	—	—
S1W17	+Sim(Sat)1	+P(175h)CR(1.5MGy)		—	—	—	—	—	—
W1W19	+Seq(Sat)1	+R(1.5MGy175h)/P(175h)C		—	—	—	—	—	—
S1W17	Sim(Sat)1	P(175h)CR(1.5MGy)		—	—	—	—	—	—
S1W19	Seq(Sat)1	R(1.5MGy175h)/P(175h)C		—	—	—	—	—	—
W1W37 ~W1W40	0	Original		—	—	—	—	—	—
W1W37	+Sim(Air)1	+P(162h)CA(0.05MPa)R(1.5MGy)		—	—	—	—	—	—
W1W39(2)	+Seq(Air)1	+R(1.5MGy162h)/P(162h)CA(0.05MPa)		—	—	—	—	—	—
W1W40	Sim(Air)1	P(162h)CA(0.05MPa)R(1.5MGy)		—	—	—	—	—	—
W1W37	Seq(Air)1	R(1.5MGy162h)/P(162h)CA(0.05MPa)		—	—	—	—	—	—
W1W39(2)	W1W40	Original	(13.79)	(13.83)	(13.12)	(13.20)	(12.80)	(13.35)	
W1D62 ~W9D64	+Sim(Air)2	+P(216h)CA(0.05MPa)R(1.5MGy)	-4.38[UT]	-1.85[UT]	<-3.55[UT]	-0.97[sUT]	<-3.26[UT]	<-3.75[TU]	
W1D62	Sim(Air)2	P(216h)CA(0.05MPa)R(1.5MGy)	-4.21[sUT](1)	-1.34[T](sI)	<-3.53	-1.09[UT]	<-3.23[T]	<-3.80[TU]	
W9D64	+Sim(Sat)2	+P(218h)CR(1.5MGy)	-1.11(sU)	-0.60	<-3.55[sWSY]	-0.35[UsT](IC)	<-3.26	-2.79[sB]	
W9D64	Sim(Sat)2	P(218h)CR(1.5MGy)	-1.23(sU)(sI)	-0.50(sU)	<-3.52[L]	-0.65[U]	-2.80	-1.35[UsT](I)	
W9D67	0	Original	—	—	—	—	—	—	—
W9D67	+Seq(Sat)2	H/R(2.0MGy200h)/P*(218h)C	—	—	—	—	—	—	—
W9D67	Seq(Sat)2	R(1.5MGy150h)/P*(218h)C	—	—	—	—	—	—	—
W10D74	0	Original	(13.66)	(13.72)	(12.66)	(14.16)	(12.94)	(14.55)	
W10D74	+Seq(Air)2	H/R(2.0MGy206.8h)/P*(218h)CA(0.05MPa)	-1.11[T]	-2.85[sUT](I)	-1.17[UWT]	-1.58[sUT](I)	-1.15[UWT](I)	-3.75[UWT](I)	
W10D74	Seq(Air)2	R(1.5MGy154.5h)/P*(218h)CA(0.05MPa)	-1.05(sUWT)	-0.44(sUWT)	-2.26[UWT](sV)	-1.59[UWT]	-0.08[UWT]	-3.99[UWT](I)	

S1W17~19: +=H/R(0.5MGy58h); W1W37~40: +=H/R(0.5MGy54h); W9D64: +=H/R(0.54MGy72.6h); P*: 3分で150°Cまで昇温させるPWR用プロファイル

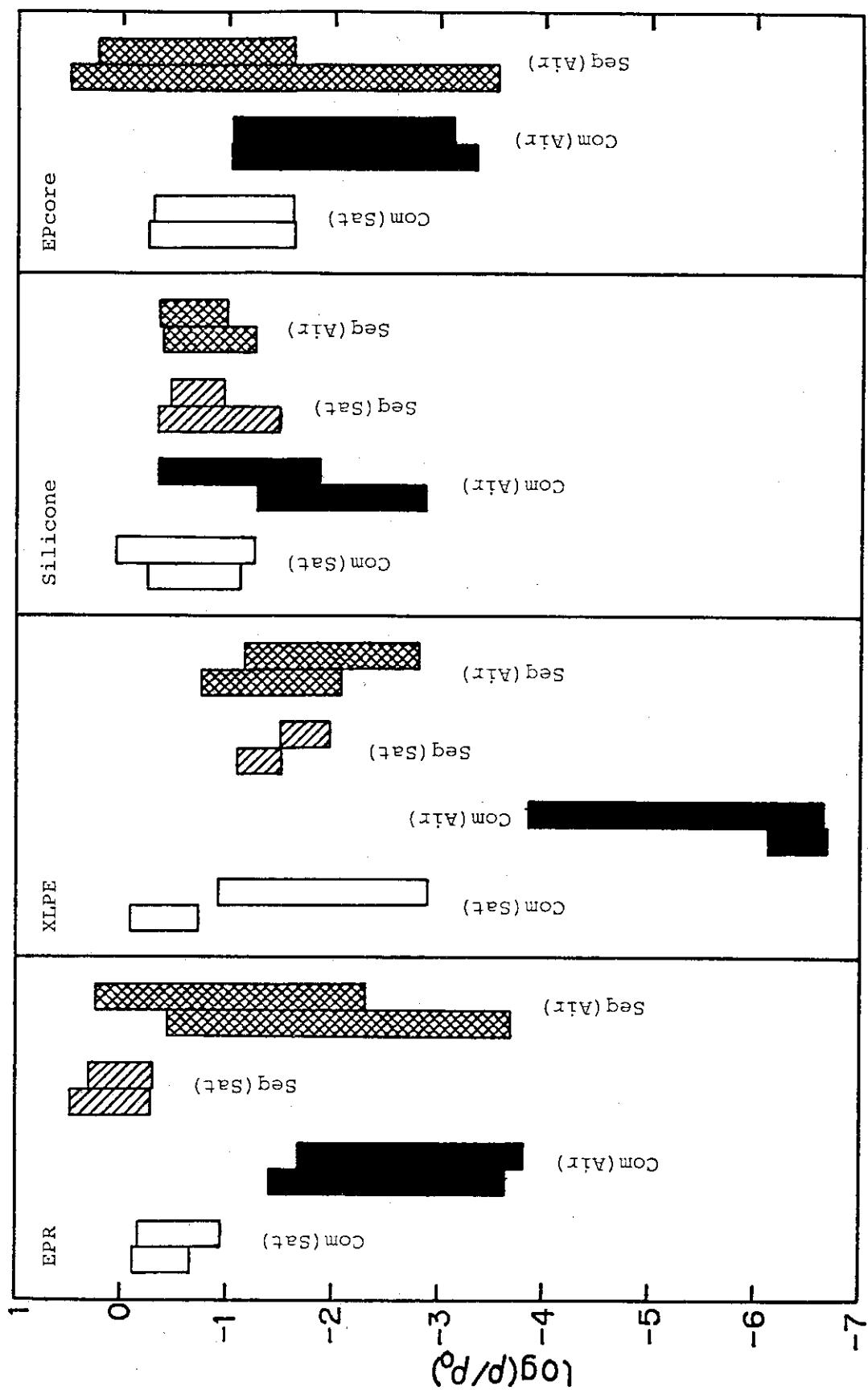


Fig. 260 Ultimate volume resistivity of insulating materials exposed to various PWR LOCA environments.

Note : Bar in the left side show value for aged samples
 Bar in the right side show value for non aged samples

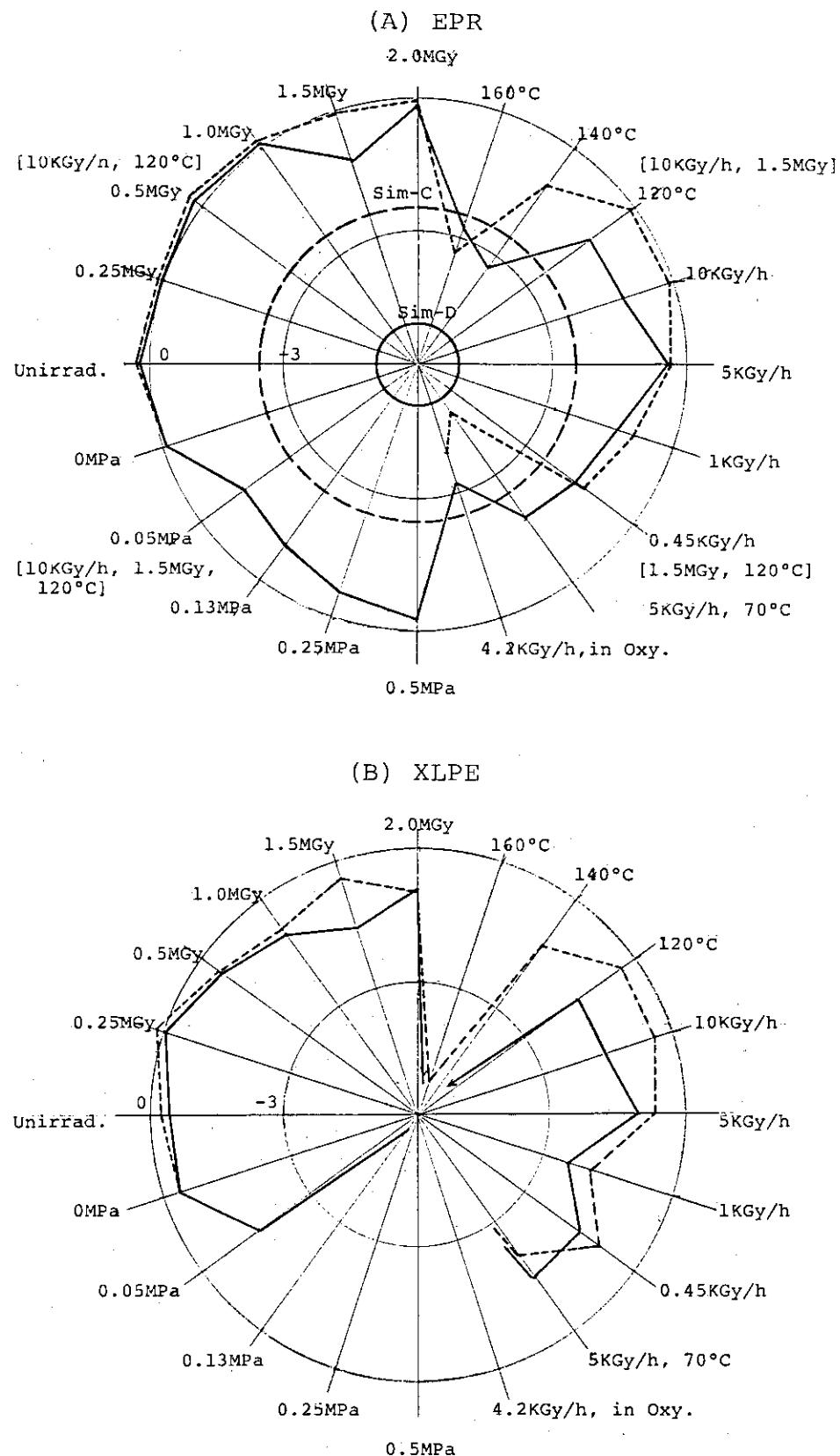
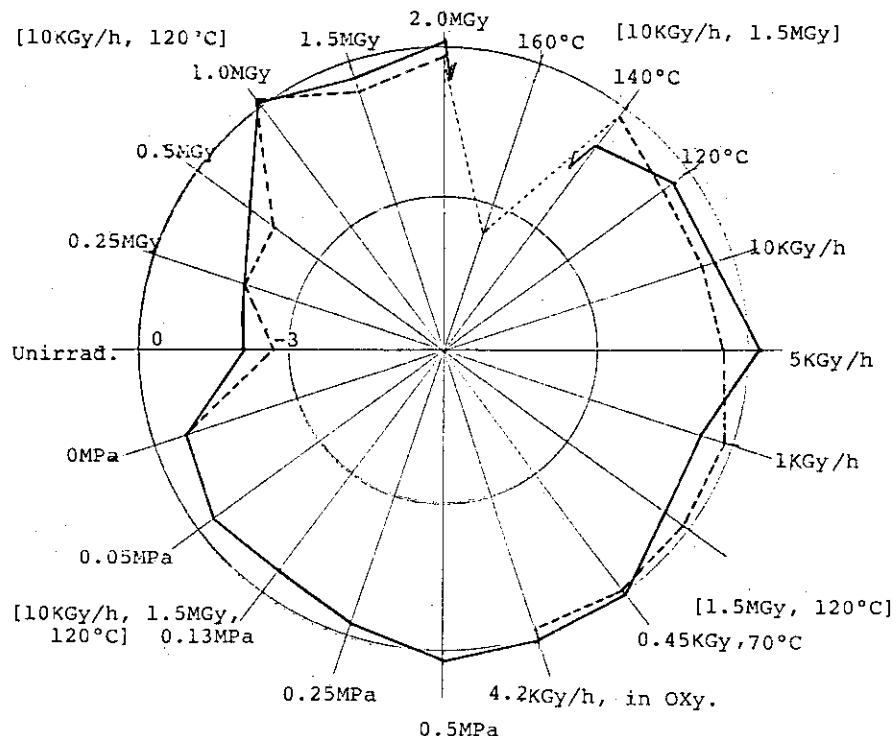


Fig. 261 Ultimate volume resistivity of EPR (A)
XLPE (B) exposed to various sequential LOCA
environments.

(A) SIR



(B) CSM

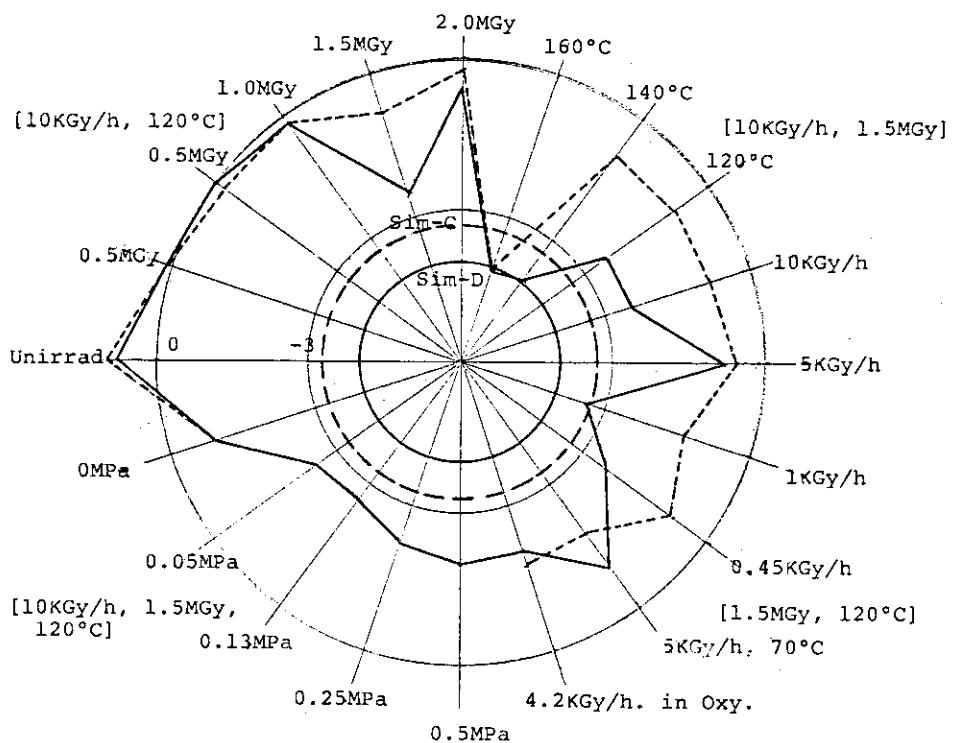


Fig.262 Ultimate volume resistivity of SIR(A) and CSM(B) exposed to various sequential LOCA environments.

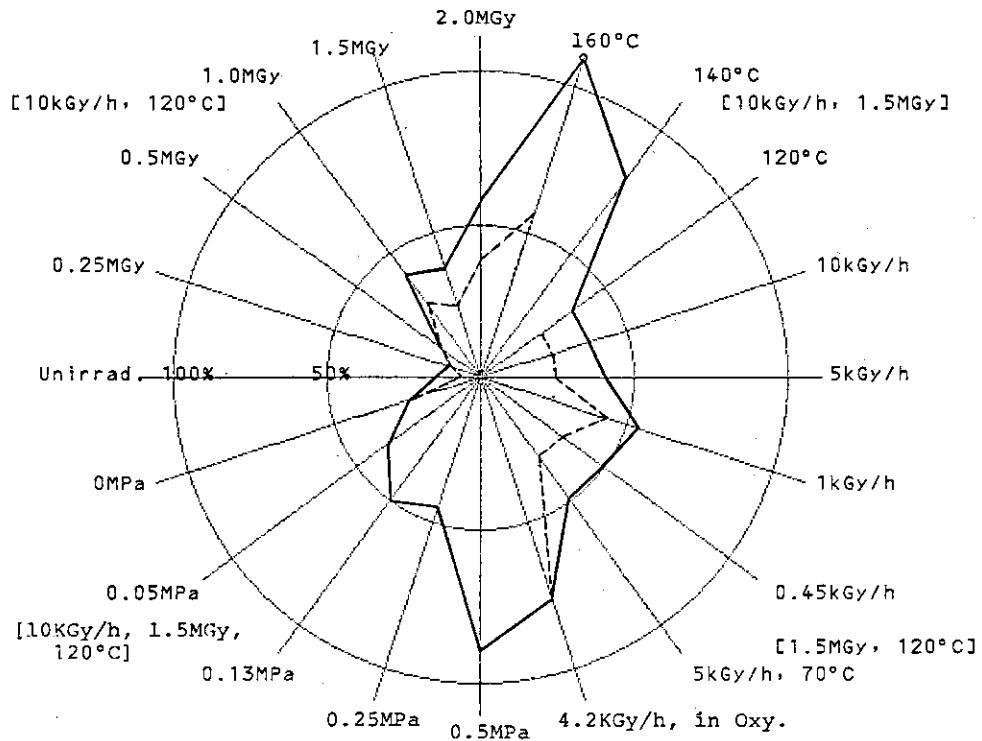


Fig.263 Water sorption of EPR under various sequential LOCA environments.

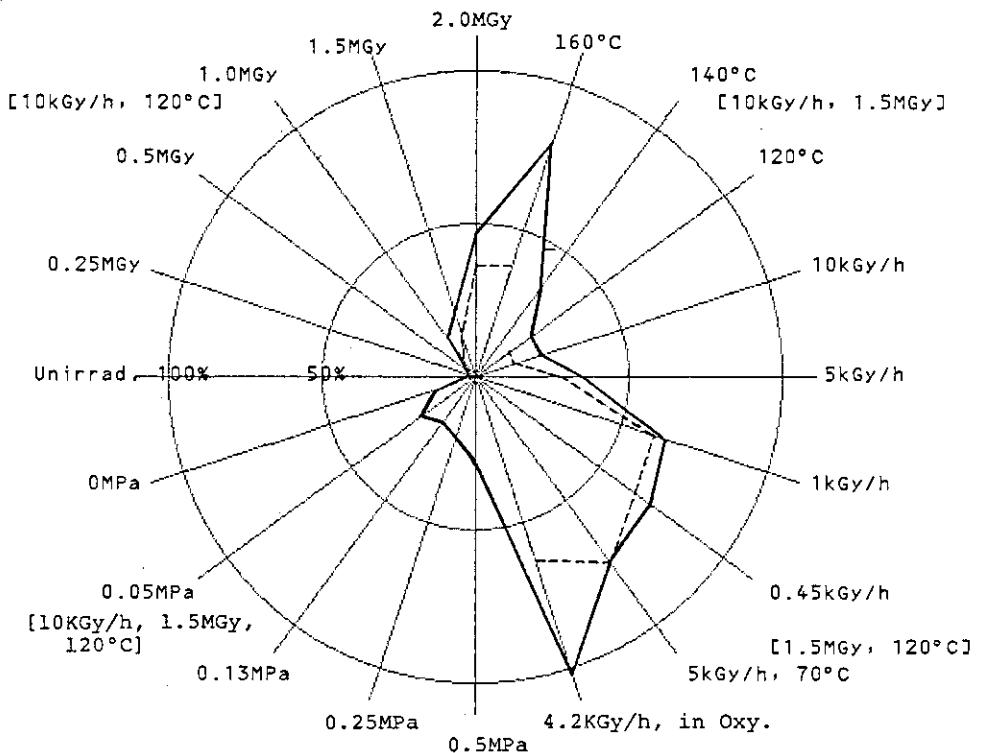


Fig.264 Water sorption of Hypalon under various sequential LOCA environments.

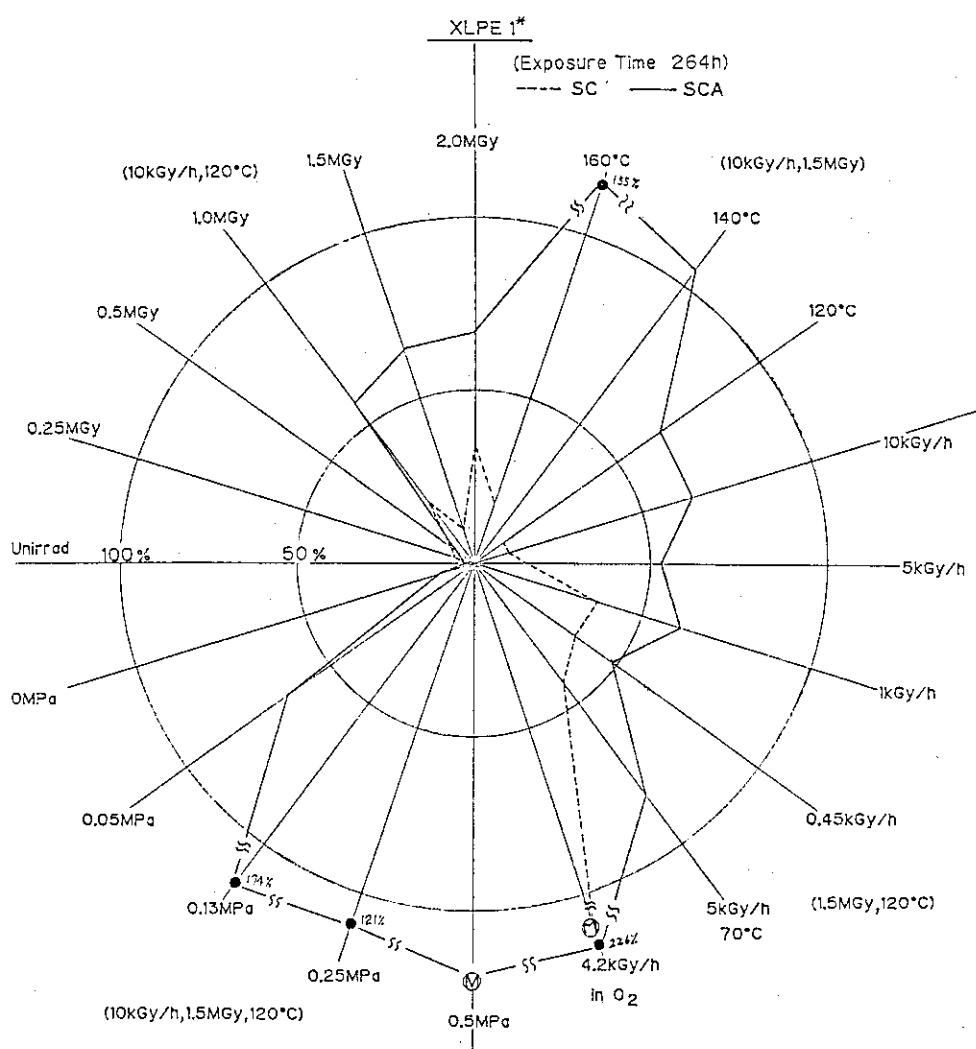


Fig.265 Water sorption of XLPE under various sequential LOCA environments.

5. 結言

現行試験法（推奨案）の妥当性の評価に資することを目的として、原子炉用電線材料健全性試験装置（SEAMATE-II）を用いて、原子炉用電線の被覆・絶縁材試料並びにケーブルについて、LOCA模擬環境下の劣化に及ぼす同時法並びに逐次法試験条件の影響を調べてきた。同時法については、暴露期間（線量率）1週間～3カ月、蒸気環境温度（120～160°C）、空気添加量（0～0.5MPa）、事前劣化法などの影響、逐次法では線量（0～2MGy）、線量率（0.5～10kGy/h）、照射の雰囲気（空気中、酸素加圧下）、照射温度（室温～90°C）などの照射条件、環境温度（120～160°C）、空気添加量（0～0.5MPa）などの蒸気暴露条件及び事前劣化法の影響を検討し、以下のことを明らかにした。

5.1 放射線・蒸気環境同時暴露における劣化について

(1) 暴露期間（線量率）の影響

空気を含まない環境では、LOCA環境暴露期間（線量率）の影響は比較的小さいが、環境に空気を含む場合には、シリコーンゴムを除いていずれの材料にも影響が見られ、低線量率下では機械的性質、電気的性質のいずれも顕著な低下を示す。

(2) 暴露環境温度の影響

空気を含まない環境では、架橋ポリエチレンで高温の方が伸びの低下が大きい傾向を示す外は、機械的性質の劣化の温度依存性は少ない。絶縁低下については、ハイパロン、エチレンプロピレンゴム及び架橋ポリエチレンは高温で低下が大きくなる傾向が見られるが、他の材料は依存性を示さない。吸水膨潤は高温ほど大きいが、シリコーンゴム、架橋ポリエチレン及びモデル配合のエチレンプロピレンゴムは高温で溶失が起るため重量低下を示す。

空気を含む環境では、いずれの材料にも機械的性質の劣化に温度の影響が見られるが、ハイパロン、クロロブレン、架橋ポリエチレンは伸びに、ハイパロン、エチレンプロピレンゴム、クロロブレン、架橋ポリエチレンは強度に顕著な影響が見られる。絶縁低下は、ハイパロン、エチレンプロピレンゴム、架橋ポリエチレンに顕著な影響が見られ、吸水膨潤ではハイパロン、クロロブレン及び実用配合のエチレンプロピレンゴムが大きく、また高い温度依存性を示す。

(3) 暴露環境中の空気量の影響

シリコーンゴムは機械的にも、電気的にも空気の影響を受けず、酸化に対して安定であるが、エチレンプロピレンゴム、架橋ポリエチレン、ハイパロン、クロロブレンの機械的・電気的性質の低下は空気量の影響を受ける。ハイパロン、クロロブレンの吸水膨潤も空気量の影響を受ける。また、エチレンプロピレンゴムは空気量が多くなると溶失が起り重量減少が見られる。

(4) 事前劣化のLOCA環境暴露中の劣化への影響

事前劣化段階では、機械的性質、絶縁低下が事前劣化の方法により影響される材料があるが、これをLOCA模擬環境に暴露すると劣化挙動の違いは殆ど観測されなくなる。吸水膨潤は酸化劣化と密接な関係があり、酸素加圧下照射のみで熱劣化を与えない場合の値が最も大きい。

(5) シート状試料とケーブル材料／ケーブルの劣化

シート状試料の劣化とケーブルから予め採取した試験片の劣化は、同様の劣化挙動を示すが、ケーブル状で暴露すると絶縁体のみならず被覆材の劣化も少なくなる傾向が見られる。

5.2 放射線・蒸気環境逐次暴露における劣化について

(1) 逐次法前照射における線量・線量率の影響

照射段階では、機械的性質の劣化は前照射線量の増加に伴って大きくなり、線量の影響は概して伸びに顕著に見られる。線量率の影響は架橋ポリエチレン及びクロロプロレンに見られ、他の材料では顕著ではない。電気的性質に関しては、エチレンプロピレンゴムを除き線量とともに低下する。また、低線量率で照射した場合の方が劣化が大きい。

蒸気環境暴露の段階では、環境に空気が存在しない場合には、照射段階の機械的性質の劣化がそのまま反映され、蒸気暴露により劣化が進むことはない。環境に空気がある場合には、線量が大きい程、また低線量率で照射される程、蒸気暴露時の劣化も大きい。電気的性質に関しては、酸化生成物の蓄積と溶出とが関連していると考えられ、蒸気環境に暴露すると回復するものもある。

吸水膨潤については、シリコーンゴムを除き線量が大きいほど、また、線量率が低いほど増加する。

(2) 逐次法蒸気暴露における温度の影響

ハイパロン及びシリコーンゴムは空気の有無に関係なく、高温ほど機械的性質の劣化及び吸水膨潤は増大する。その他の材料は、環境に空気がない場合は、温度の影響は小さいが、環境に空気がある場合は、機械的性質、絶縁抵抗及び吸水膨潤は温度の影響を受け、高温ほど劣化が大きい。

(3) 逐次法蒸気暴露における空気量の影響

空気量が少ない場合は、架橋ポリエチレン及びクロロプロレンの機械的性質に影響が現れる。空気量が増すとシリコーンゴムを除き、全ての材料で影響が認められるようになる。電気的性質については、シリコーンゴムは空気量の影響を受けないが、エチレンプロピレンゴムの一部、架橋ポリエチレンでは空気を添加すると絶縁低下が大きくなるが、添加量が大きくなると逆に絶縁低下が小さくなる現象が見られる。また、吸水膨潤については、大きな影響が見られ、空気量が多い

ほど吸水膨潤が増大し、また材料によっては溶失も見られる。

(4) 事前劣化のLOCA環境暴露中の劣化への影響

事前劣化の影響は、LOCA時の線量が少ないBWR条件の場合に機械的性質に若干見られるが、PWR条件でははっきりしなくなる。

5.3 同時法と逐次法の比較

(1) 放射線照射と蒸気暴露の複合効果

放射線照射（空気中、10kGy/h）、蒸気環境暴露（120°C、飽和水蒸気及び空気存在下）をそれぞれ別々に与えた場合とこれらを同時にあたえた場合の機械的性質の劣化を比較すると、同時環境における劣化は、それぞれ別々に与えた場合の和より劣化が大きくなり、相乗効果が見られる。

(2) 機械的性質の劣化の比較

蒸気環境に空気がない場合には、同時法の劣化と逐時法の劣化はほぼ等しいが、蒸気環境に空気がある場合には同時法の劣化は逐次法に比べて大きく、特に、長時間の同時法の劣化は逐次法に比べて著しい。

(3) 電気的性質の劣化の比較

多くの材料について、同時法空気存在下では絶縁抵抗の低下が逐次法空気なし、または逐次法で蒸気環境に空気が存在している場合に比べて大きい。

謝辞

本研究推進に当たり御指導と有益な御助言を頂いた故矢作吉之助早稲田大学教授をはじめ原子力施設用有機材料研究委員会の方々に感謝致します。

本研究の遂行にあたり、終始、御指導ならびにはげましをいただいた重松友道、小林昌敏、中村熙栄、大島裕之助、武久正昭高崎研究所歴代所長ならびに本研究において照射業務を担当された照射施設課の方々に感謝致します。

また、本研究を実施するに当たり試料の提供並びに終始熱心な御討論を頂いた昭和電線電纜、住友電工、日立電線、藤倉電線、古河電工、三菱電線の各社に感謝するとともに、本研究に用いた電線ケーブル健全性試験装置(SEAMATE-II)の運転・保守に尽力された針谷工事並びに物性測定を担当された群馬環境技研の方々に感謝致します。

付録 1 SEAMATE-II データ打出し例

SEAMATE-II による実験条件並びに実験データは、同時法、逐次法を含め3枚のフロッピディスクケットに全てが収められている。独自に作成したプログラムによって、線量率や照射温度などの照射条件や蒸気曝露条件などいくつかの選定条件を入力し、それらを満足する実験シリーズの実験番号(ファイル名)群を探索することができる。また、その実験番号の詳細な実験条件を表示したり、実験データを数値表示したり、グラフ表示することができる。

Table A1 は上記プログラムにより、実験番号S11D33+の詳細な実験条件を出力した例である。これにより、同時法、逐次法の区別、シート試料かケーブル試料の区別、事前劣化条件、LOCAの照射条件、蒸気曝露条件を知ることができる。ここで、データ組数は測定された機械的電気的性質あるいは吸水関係のデータの数である。前者は試験前、事前劣化終了後及びLOCA模擬環境曝露時の各取りだし時間での測定値とを含み、後者はLOCA模擬環境曝露時の各取りだし時間での測定値のみを含む。

Table A2は同時法実験”S10D33+”の中の材料CSM-1(ハイパロン-1)のデータを出力した例である。蒸気曝露時間毎の100%モジュラス(M100)、強度、伸び、硬度、絶縁抵抗、また吸水に関連して、放置時間毎の重量変化及び面積変化が示されている。ここで、Orはオリジナル値、H/Rは事前劣化後の値を意味する。

Table A3は逐次法実験S11D71+の詳細な実験条件を出力した例である。

Table A4はS11D71+の実験データの内CSM-1のデータを出力した例である。一方、データのグラフ表示では、強度、伸び、100%モジュラス、絶縁抵抗及び吸水率と蒸気曝露時間との関係を示すことができる。また、これらについて材料間や実験条件の間の比較表示もできる。本文中のFig.161~168, Fig.191~199はこれを用いて表示したものである。

Table A.1 Experimental Condition (Simultaneous)

実験番号：	S10D33+
試験法：	同時法
試料：	シート試
事前劣化：	有
事前熱劣化条件:	: 温度(℃) 121 : 時間(h) 168
照射条件:	: 温度(℃) RT : 露囲気 空気中 : 線量率(kGy/h) 1.74 : 照射時間(h) 45.4 : 線量(MGy) 0.079
LOCA 照射:	有
LOCA 照射条件	: 線量率(kGy/h) 1.74 : 照射時間(h) 136 : 線量(MGy) 0.236
LOCA 蒸気暴露条件:	一定温度
	: 温度(℃) 120 : 露囲気 蒸気
機械的電気的性質:	: 添加量(MPa) : スプレイ
吸水関係:	化学 : データ組数 7 : データ組数 4

Table A.2 Experimental Data (Simultaneous)

シート材料名: CSM-1

曝露時間(h)	Or	H/R	6	22	52	94	136
照射線量(MGy)	0	0.079	0.01	0.038	0.09	0.163	0.236
M100(kg/cm ²)	23.0	35.0	39.0	42.0	48.0	55.0	63.0
強度(kg/cm ²)	208.0	213.0	211.0	210.0	184.0	192.0	183.0
伸び(%)	671.0	591.0	534.0	501.0	390.0	357.0	296.0
硬度	63	67	68	68	70	71	73
絶縁抵抗(Ω.cm)	14.75	12.27	13.99	13.81	14.35	14.37	-
重量変化(%)			曝露時間(h)				
放置時間(h)	Or	H/R	6	22	52	94	136
48			0.0	0.6	0.5	0.0	0.6
336			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
面積変化(%)			曝露時間(h)				
放置時間(h)	Or	H/R	6	22	52	94	136
48			-2.0	-1.0	-1.0	-2.0	-2.0
336							

Table A.3 Experimental Condition (Sequential)

実験番号：	S11D71+
試験法：	逐次法
試料：	シート試
事前劣化：	有
事前熱劣化条件：温度(℃)	121
: 時間(h)	168
照射条件：温度(℃)	RT
: 霧囲気	空気中
: 線量率(kGy/h)	10
: 照射時間(h)	50.5
: 線量(MGy)	0.51
L O C A照射：	有
照射条件：温度(℃)	RT
: 霧囲気	空気中
: 線量率(kGy/h)	10
: 照射時間(h)	150.1
: 線量(MGy)	1.5
蒸気暴露条件：	一定温度
: 温度(℃)	120
: 空気添加量(MPa)	0.05
: スプレイ	化学
機械的電気的性質：データ組数	9
吸水関係： データ組数	6

Table A.4 Experimental Data (Sequential)

シート材料名: CSM-1

暴露時間(h)	Or	H/R	0	24	48	96	144	192	264
M100(kg/cm ²)	28.0	83.0	175.0	-	-	-	-	-	-
強度(kg/cm ²)	194.0	236.0	212.0	139.0	123.0	109.0	85.0	89.0	83.0
伸び(%)	600.0	293.0	127.0	93.0	90.0	80.0	54.0	58.0	62.0
硬度	67	77	88	82	83	82	84	83	83
絶縁抵抗(Ω·cm)	13.78	12.15	13.81	13.76	13.66	13.50	12.40	13.16	
重量変化(%)			曝露時間(h)						
放置時間(h)	Or	H/R	0	24	48	96	144	192	264
0	0.0	0.0	11.5	12.6	16.2	20.0	25.5	27.9	
4	0.0	0.0	7.2	8.7	11.0	14.2	16.7	16.6	
24	0.0	0.0	5.9	7.3	9.7	10.5	13.2	12.6	
336	0.0	0.0	3.1	3.6	4.8	5.3	5.1	6.4	
面積変化(%)			曝露時間(h)						
放置時間(h)	Or	H/R	0	24	48	96	144	192	264
0			3.8	3.8	5.1	5.1	7.6	7.6	
4									
24			1.3	1.3	3.8	2.5	3.8	3.8	
336			-1.3	0.0	0.0	1.3	0.0	0.0	

付録 2 本研究関連発表文献リスト

1. 岡田漱平, 伊藤政幸, 中瀬吉昭, 栗山将, " 絶縁材料の熱劣化及び照射劣化の短時間試験法 ", 電気学会絶縁材料原子力合同研究会資料 EIM-78-84(1978)
2. 岡田漱平, 伊藤政幸, 中瀬吉昭, 栗山将, " 原子力発電所用電線絶縁材料の劣化試験法 ", 日本原子力学会誌, Vol.21, No.10 pp808-814(1979)
3. I.Kuriyama, N.Hayakawa, Y.Nakase(JAERI) and J.Ogura, H.Yagyu, K.Kasai (Hitachi cable Co. Ltd.), "Effect of Dose Rate on Degradation Behavior of Insulating Polymer Materials", IEEE Transactions on Electric Insulation Vol. EI-14 No.5, pp272-277, October 1979
4. 日馬康雄, 伊藤政幸, 岡田漱平, 吉田健三, 中瀬吉昭, 町末男, " 電線ケーブル絶縁材料の劣化におよぼすL O C A後半温度の影響 ", I. 機械的性質 電気学会絶縁材料原子力合同研究会資料 EIM-80-96(1980)
5. 岡田漱平, 中瀬吉昭, 伊藤政幸, 日馬康雄, 吉田健三, 町末男, " 電線ケーブル絶縁材料の劣化におよぼすL O C A後半温度の影響 ", II. 電気的性質 同上 EIM-80-97(1980)
6. 中瀬吉昭, 吉田健三, 日馬康雄, 伊藤政幸, 岡田漱平, 町末男, " 電線ケーブル絶縁材料のL O C A環境劣化における同時法と逐次法との比較 ", 同上 EIM-80-98(1980)
7. 中瀬吉昭, 伊藤政幸, 栗山将, " イオウ加硫エチレン・プロピレンゴムの耐放射線性 (第2報 実用配合試料) 電気学会論文誌A 101巻5号 pp279-284(1981)
8. 伊藤政幸, " 化学応力緩和における熱と放射線の相乗効果 ", 日本ゴム協会誌 第54巻 第4号243-248(1980)
9. K.Yoshida, Y.Nakase, S.Okada, M.Ito, Y.Kusama, S.Machi, "Degradation of Insulating Polymer Materials under LOCA(loss of coolant accident) Conditions", Radiat. Phys. Chem. Vol.18, No.3-4, pp689-700(1981)
10. Y.Nakase and M. Ito, "Radiation Resistance of Ethylene-propylene Terpolymer", IEEE Transaction of Electrical Insulation Vol. EI-16 No.6, pp528-532(1981)
11. M.Ito, S.Okada, I.Kuriyama, "The deterioration of mechanical properties of chloroprene rubber in various conditions", Journal of Material Science 16, pp10-16(1981)
12. 伊藤政幸, " 熱と放射線によるゴムの化学応力緩和における温度と線量率の等価性 ", 日本ゴム協会誌 第54巻 第10号652-655(1981)

13. 田中進, 中瀬吉昭, 日馬康雄, 伊藤政幸, 岡田漱平, 吉田健三, "原子炉用電線材料健全性試験装置(SEAMATE-II)の工学データ1(急昇温実験)"
JAERI-M 9361(1981)
14. 田中進, 中瀬吉昭, 岡田漱平, 伊藤政幸, 日馬康雄, 吉田健三, "原子炉用電線材料健全性試験装置(SEAMATE-II)の工学データ2(圧力容器内の温度制御特性実験)"
JAERI-M 9699(1981)
15. 岡田漱平, 中瀬吉昭, 笠原佑偉, 田中進, 伊藤政幸, 日馬康雄, 吉田健三, "原子炉用電線材料健全性試験装置(SEAMATE-II) 課通電系の構成と性能",
JAERI-M 9706(1981)
16. 岡田漱平, 伊藤政幸, 日馬康雄, 中瀬吉昭, 吉田健三, "LOCA模擬環境下における絶縁材料の電気的性質の変化",
電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-81-92(1981)
17. 日馬康雄, 伊藤政幸, 岡田漱平, 中瀬吉昭, 吉田健三, "電線材料のLOCA模擬環境劣化におよぼす暴露期間の影響", 同上 EIM-81-93(1981)
18. 日馬康雄, 伊藤政幸, 岡田漱平, 中瀬吉昭, 吉田健三, "電線材料のLOCA模擬環境劣化におよぼす過渡温度条件の影響", 同上 EIM-81-94(1981)
19. 日馬康雄, 八木敏明, 伊藤政幸, 岡田漱平, 吉川正人, 吉田健三, "LOCA模擬環境下における絶縁材料の劣化速度に及ぼす空気の影響",
同上 EIM-82-108(1982)
20. 岡田漱平, 吉川正人, 伊藤政幸, 日馬康雄, 八木敏明, 吉田健三, "絶縁材料の電気的特性の変化に対するLOCA模擬条件の影響",
同上 EIM-82-109(1982)
21. Y.Kusama, M.Ito, S.Okada, Y.Nakase and K.Yoshida, "Effect of a Simulated LOCA Testing Period on Durabilities of Insulating and Jacketing Materials for Reactor Cables", IEEE Annual Report of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena
82CH 1772-1 pp234(1982)
22. 岡田漱平, 吉川正人, 伊藤政幸, 日馬康雄, 八木敏明, 吉田健三, "LOCA模擬環境下における絶縁材料の劣化の反応速度論的解析",
電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-82-111(1982)
23. Y.Kusama, S.Okada, M.Yoshikawa, M.Ito, T.Yagi, Y.Nakase, T.Seguchi and K.Yoshida, "Methodology Study for Qualification Testing of Wire and Cable at LOCA Condition", Proceedings of the U.S. Nuclear Regulatory Commission NUREG/CP-0041 5 pp330-360(1982)

24. Y.Nakase and I.Kuriyama,"Radiation Resistance of Ethylene-Propylene Rubbers Cured by Peroxide", IEEE Transactions of Electrical Insulation Vol. EI-18 No.1, pp78-81(1983)
25. 日馬康雄, 八木敏明, 岡田漱平, 伊藤政幸, 吉川正人, 吉田健三, " L O C A 模擬環境下における絶縁材料の劣化速度に及ぼす線量率の効果 (I)
電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-83-115(1983)
26. 岡田漱平, 日馬康雄, 伊藤政幸, 八木敏明, 吉川正人, 吉田健三, " 絶縁材料のL O C A 模擬環境下における劣化に及ぼす線量率の効果 (II)
同上 EIM-83-116(1983)
27. 八木敏明,瀬口忠男,吉田健三, " 電線・ケーブルの放射線酸化と熱劣化による組み合わせ劣化", 同上 EIM-83-120(1983)
28. 吉川正人,瀬口忠男,吉田健三, " 高分子材料の電気絶縁抵抗に対する放射線酸化と水蒸気暴露の影響", 同上 EIM-83-121(1983)
29. 伊藤政幸,日馬康雄,八木敏明,岡田漱平,吉川正人,吉田健三, " 絶縁用エチレンプロピレンゴムの種々の環境下における放射線劣化", 同上 EIM-83-122(1983)
30. 伊藤政幸, " 放射線照射によってゴムの破断伸びが低下する原因について", 同上 EIM-83-129(1983)
31. 八木敏明,日馬康雄,伊藤政幸,岡田漱平,吉川正人,吉田健三, " 放射線照射したゴム材料の沸騰スプレイ液中における膨潤挙動", JAERI-M 83-072(1983)
32. 日馬康雄,伊藤政幸,岡田漱平,八木敏明,吉川正人,吉田健三, " ケーブル用高分子材料のL O C A 模擬環境下の劣化に及ぼす添加空気の圧力の影響", 電気学会絶縁材料シンポジウム予稿集 IV-3 pp137-140(1984)
33. 岡田漱平,日馬康雄,吉川正人,伊藤政幸,八木敏明,吉田健三, " L O C A 模擬環境下での絶縁材料の絶縁低下と機械的性質の劣化との相関
一同時法における空気存在の影響ー^{電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-84-134(1984)}
34. 日馬康雄,八木敏明,岡田漱平,伊藤政幸,吉川正人,吉田健三, " 逐次法L O C A 模擬試験における蒸気環境暴露温度が絶縁材料の劣化に与える影響", 同上 EIM-84-135(1984)
35. 吉川正人,瀬口忠男,吉田健三, " 放射線劣化した高分子材料の絶縁抵抗に対する熱と水の効果", 同上 EIM-84-136(1984)

36. 吉田健三, 日馬康雄, 伊藤政幸, 岡田漱平, 八木敏明, 吉川正人, "エチレンプロピレンゴムの同時法および逐次法L O C A模擬環境下の劣化挙動について", 電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-84-137(1984)
37. 伊藤政幸, "放射線照射したエチレンプロピレンゴムのケミルミネッセンスとケモレオロジー", 日本ゴム協会誌第58巻 第7号 461-467(1984)
38. K.Yoshida, T.Seguchi, S.Okada, M.Ito, Y.Kusama, T.Yagi and M.Yoshikawa, "Progress on Qualification Testing Methodology Study of Electric Cables", Proceedings of the U.S. Nuclear Regulator Commission NUREG/CP-0048 5 pp283-297(1984)
39. 日馬康雄, "絶縁材料の放射線効果", 電気情報関連学会連合大会講演要旨集Part 2 pp116-119(1985)
40. M.Ito, Y.Kusama, T.Yagi, S.Okada, M.Yoshikawa and K.Yoshida, "Progress on Qualification Testing Methodology Study of Electric Cables", Proceedings of the U.S. Nuclear Regulator Commission NUREG/CP-0058 5 pp351-371(1985)
41. S.Okada, Y.Kusama, M.Ito, T.Yagi, M.Yoshikawa, K.Yoshida, N.Tamura and W.Kawakami, "Progress on Qualification Testing Methodology Study of Electric Cables", ibid. NUREG/CP-0071(1985)
42. 吉川正人, 瀬口忠男, 日馬康雄, 吉田健三, "絶縁用E P Rの水中照射による電気絶縁抵抗の変化", 電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-85-160(1985)
43. 八木敏明, 日馬康雄, 伊藤政幸, 岡田漱平, 田村直幸, 川上和市郎, "放射線照射したシリコーンゴムの薬液中における劣化", 同上 EIM-85-161(1985)
44. 日馬康雄, 岡田漱平, 八木敏明, 伊藤政幸, 吉田健三, 田村直幸, "絶縁材料の劣化に及ぼす放射線・蒸気環境の複合効果", 同上 EIM-85-162(1985)
45. 伊藤政幸, 八木敏明, 岡田漱平, 日馬康雄, "逐次法L O C A模擬試験における放射線照射条件の検討", 同上 EIM-85-163(1985)
46. 岡田漱平, 日馬康雄, 八木敏明, 伊藤政幸, 川上和市郎, 田村直幸, "L O C A模擬逐次法における前照射条件が絶縁材料の劣化に及ぼす影響", 同上 EIM-85-164(1985)
47. 岡田漱平, "複合環境下における材料の劣化とその評価法の問題点", 日本放射線化学会, 第2回放射線化学セミナー予稿集pp4-21(1986)

48. 伊藤政幸, 日馬康雄, 岡田漱平, 八木敏明, 吉田健三, "エチレンプロピレンゴムの放射線劣化の温度依存性の検討", 電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-86-126(1986)
49. 八木敏明, 日馬康雄, 伊藤政幸, 岡田漱平, 川上和市郎, "絶縁材料のL O C A模擬環境下における吸水特性の変化", 同上 EIM-86-129(1986)
50. 日馬康雄, 八木敏明, 伊藤政幸, 岡田漱平, 川上和市郎, "L O C A模擬逐次法における前照射条件および蒸気環境条件が絶縁材料の劣化におよぼす影響" I . 機械的性質 同上 EIM-86-130(1986)
51. 岡田漱平, 日馬康雄, 八木敏明, 伊藤政幸, 川上和市郎, "L O C A模擬逐次法における前照射条件および蒸気環境条件が絶縁材料の劣化におよぼす影響" II . 電気的性質 同上 EIM-86-131(1986)
52. Y.Kusama, T.Yagi, S.Okada, M.Ito, M.Yoshikawa, K.Yoshida, N.Tamura and W.Kawakami, "Progress on Qualification Testing Methodology Study of Electric Cables", Proceedings of the U.S. Nuclear Regulator Commission NUREG/CP-0081(1986)
53. 八木敏明, 瀬口忠男, 吉田健三, "電線絶縁材料の加速熱劣化と放射線酸化の複合劣化", JAERI-M 86-043(1986)
54. W.Kawakami, Y.Kusama, T.Yagi, K.Arakawa, M.Ito, S.Okada, M.Yoshikawa K.Yoshida and N.Tamura, "Progress on Qualification Testing Methodology Study of Electric Cables", Proceedings of the U.S. Nuclear Regulator Commission NUREG/CP-0090(1987)
55. 伊藤政幸, 八木敏明, 岡田漱平, 吉田健三, 川上和市郎, 日馬康雄, "エラストマーの放射線劣化の時間加速試験方法の検討", 電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-87-148(1987)
56. 日馬康雄, 八木敏明, 伊藤政幸, 岡田漱平, 川上和市郎, "絶縁材料のL O C A模擬環境下劣化におよぼす事前劣化条件の影響", 同上 EIM-87-150(1987)
57. 八木敏明, 日馬康雄, 伊藤政幸, 川上和市郎, "応力下で照射した電線絶縁材料の機械的特性の変化", 同上 EIM-87-151(1987)