

JAERI-M
9166

原子炉用黒鉛材料のガンマ線照射下に
おけるヘリウム中水蒸気との反応

1980年11月

今井 久・藤井貴美夫・野村真三・黒沢 武・佐々木泰一

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

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問合せは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

原子炉用黒鉛材料のガンマ線照射下におけるヘリウム中水蒸気との反応

日本原子力研究所東海研究所燃料工学部

今井 久・藤井貴美夫・野村 真三・

黒沢 武・佐々木泰一

(1980年10月9日受理)

4種類の原子炉用黒鉛材料のCo-60ガンマ線照射下におけるヘリウム中水蒸気との反応挙動を、 1.25×10^6 R/hrの線量率下、30~243°Cの温度範囲および0.6~2.3%の水蒸気濃度範囲で調べた。

放射線による誘起反応速度は黒鉛材料の銘柄毎に異なるが、1.2%の水蒸気濃度では $\sim 10^{-9}$ g/g·hrの大きさであった。各黒鉛材料の反応速度とそれらの比表面積、気孔率および含有不純物との間に関連性は見出せなかつたが、類似の組織構造をもつ7477と7477PTは同じ程度の反応速度を示した。また放射線誘起反応速度の反応温度依存性および水蒸気濃度依存性は共に低く、反応の活性化エネルギーとして約1Kcal/mol、反応次数として0.16が得られた。

実験結果に基づき、放射線照射下の高温反応に対する放射線誘起反応の寄与の程度を推定した。

Reaction of Nuclear Graphites with Water Vapor in Helium under Gamma Ray
Irradiation

Hisashi IMAI, Kimio FUJII, Shinzo NOMURA, Takeshi KUROSAWA and Yasuichi SASAKI
Division of Nuclear Fuel Research, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received October 9, 1980)

The reaction of four kinds of nuclear graphites with water vapor in helium were carried out under Co-60 gamma ray irradiation of 1.25×10^6 R/hr, at temperatures $30 - 243^\circ\text{C}$ and at concentrations 0.6 - 2.3 volume percent.

Radiation induced reaction rate of the graphites were found to be in the order of 10^{-9} g/g.hr at the concentration 1.2 volume percent, showing some differences between the graphites. There was no closed relation between the reaction rate of the graphites and their specific surface area, as well as their porosity. Impurity contained in the graphite gave little effect on the radiation induced reaction rate, although the impurity accelerated the thermal reaction rate. 7477 and 7477PT graphites, which have a similar structure in texture, showed the same rate in magnitude.

A very low energy of activation for the reaction, about 1 Kcal/mol was obtained in the study. The influence of water vapor concentration on the reaction rate was scarcely observed in the concentrations used in this experiment. Contribution of the radiation induced reaction rate to whole reaction rate at 1000°C was discussed.

Keywords : Nuclear Graphite, Reaction with Water Vapor, Gamma Ray, Radiation Induced Reaction, Reaction Rate, Activation Energy, Order of Reaction

目 次

1. まえがき	1
2. 実 験	1
2.1 材 料	1
2.1.1 黒鉛材料	1
2.1.2 反応ガス	2
2.2 使用装置	2
2.2.1 反応装置	2
2.2.2 照射用ガラスアンプルと実験操作	3
2.2.3 Co-60 ガンマ線源	3
2.3 反応装置による実験の操作	3
3. 結果と考察	3
3.1 反応速度	3
3.1.1 アンプル照射	3
3.1.2 反応装置	4
4. 放射線誘起反応の寄与	6
5. 結 論	6
謝 辞	7
参考文献	7

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Experiment	1
2.1 Material	1
2.1.1 Graphite	1
2.1.2 Gas	2
2.2 Apparatus.....	2
2.2.1 Apparatus for reaction	2
2.2.2 Glass ampoule and its procedure	3
2.2.3 Co-60 gamma irradiation source	3
2.3 Procedure.....	3
3. Results and discussion	3
3.1 Reaction rate	3
3.1.1 Glass ampoule	3
3.1.2 Apparatus	4
4. Contribution of radiation induced reaction	6
5. Conclusion	6
Acknowledgements	7
References	7

1. まえがき

近年、黒鉛材料は高温の構造材として腐食性ガス下の環境でも使用されるようになってきている。このため構造材料として基本的に重要である機械的性質や、その他の物性に与える腐食の影響を確認することはきわめて重要な事項となっており、その原因をなす腐食反応挙動について幾多の研究が進められてきた。ガス冷却黒鉛減速型原子炉においても、炉心で使用される黒鉛構造物の腐食が避けられない現象であるだけに、原子炉内の腐食挙動について研究が進められている。^(1, 2, 3)

原子炉内における黒鉛材料の腐食性ガスによるガス化反応速度は、炉外における反応試験の結果より増加することが知られている。この原因には黒鉛結晶の高速中性子などによる放射線損傷や、核分裂生成物による黒鉛表面汚染など黒鉛側に起因する場合と、腐食性ガスが放射線のエネルギーを吸収して活性化し、反応速度を増加せしめる場合がある。特に高温ガス冷却型原子炉の冷却材ヘリウム中に存在する腐食性ガスは、腐食性ガスが単独で存在する時より格段に活性化効率が上昇することが知られている。^(2, 4) 原子炉内ではこれら黒鉛とガスに起因する効果が共存して作用し、炉内の腐食反応速度を形成するわけであるが、個々の効果を独立に測定しても炉内の腐食反応速度を推定することができる。⁽⁵⁾ 腐食性ガスの活性化は原子炉内の電離性放射線によって誘起されるが、なかでもガンマ線からのものが吸収エネルギーの80%以上を占めている。⁽⁵⁾ その意味からもガンマ線照射下の腐食反応は重要な試験項目の一つとなっているが、ヘリウム中水蒸気による腐食反応の報告はきわめて少ない。^(1, 6)

本報告はガンマ線照射下のヘリウム中水蒸気による原子炉用黒鉛材料の腐食反応に関する試験研究である。4種類の黒鉛材料について、腐食反応試験を $1.25 \times 10^6 \text{ R/hr}$ のガンマ線照射下で実施した。反応温度は $30 \sim 243^\circ\text{C}$ 、水蒸気濃度は0.6～23容積パーセントである。

2. 実験

2.1 試料

2.1.1 黒鉛材料

実験に使用した黒鉛材料はフランスの Le Carbone Lorraine 社によって製造された微粒等方性材料 7477、及びその高純度製品の 7477 PT、国産の微粒等方性材料 IG-11、そしてイギリスの Anglo Great Lakes 社製準等方性材料の SM1-24 である。これら黒鉛材料ブロックから、一辺が 1～2mm 長さの立体体形状の黒鉛粒子群をつくった。黒鉛粒子は特級の四塩化炭素によって超音波洗浄し、大気中 120°C で一昼夜乾燥した後、約 100 g を石英ガラスの炉心管に充てんした (Fig. 1)。各黒鉛材料の見掛け密度、真密度、反応用炉心

管内充てん密度、B E T表面積及び含有灰分量をTable 1に示した。こゝで真密度は学振法⁽⁷⁾に従ってブタノールを使用して測定した。またB E T表面積は-77°Cにおけるアルゴンガスの吸着量から求めた。

2.1.2 反応ガス

反応ガスであるヘリウム中水蒸気は、一定温度に保たれた蒸溜水中にヘリウムをバブリングさせることによって調製した。こゝで希望濃度の水蒸気は水温を調節する方法で得た。ヘリウム中の水蒸気濃度は次の様にして定めた。市販の6ナイン級高純度ヘリウムを実験条件と同じ流速(15 ml/min)で流して水蒸気を添加し、その水蒸気量をMg(ClO₄)に吸収させてひよう量し、使用したヘリウム量から計算した。この実験で使用した腐食反応装置の恒温槽の温度と水蒸気濃度との関係をFig. 2に示した。なお、Shawの露点計による濃度測定も同時に実施したが、重量法による結果より高い値を示した。実験には重量法によって求めた数値を使用し、Shaw露点計は濃度変化のモニターとしてのみ使用した。

2.2 使用装置

腐食反応試験は反応装置一式をCo-60照射室に設置し、反応ガスを流しながら行なったが、またパイレックスガラスの照射アンプルに黒鉛材料と反応ガスを封入して照射する方法も使用した。

2.2.1 反応装置

反応装置の系統図をFig. 3に示した。全装置はガス供給、流量調節、加湿部、反応用電気炉及びガス放出装置から構成され、これにガス分析のためのガスクロマトグラフが附属する。各装置間はパイレックスガラス管、銅管またはステンレスのフレキシブル管によって連結されている。この中をほぼ一気圧の反応ガスが流れ、最後に水銀を使用した放出装置から大気中に放出される。反応ガスの予熱装置は特に設けなかつたが、反応ガスは炉心管の側管を上から下へ通過する間に予熱され、炉心管の底部から反応領域に流入する(Fig. 1参照)。Fig. 3の左側の斜線に囲まれた部分が照射用ケーブで、中央部の台上の中心に位置する細長い形状のものがCo-60ガンマ線源である。Fig. 4の写真に示した様に照射ケーブには反応用の電気炉のみを持ち込み、電気炉の操作はケーブ外から行なつた(Fig. 5)。このための照射ケーブ内の配線には日立電線(株)の耐放射線ケーブルMLFC-IIを使用し、また電気炉の水冷管にはステンレスフレキシブル管を用いた。使用した電気炉は真空理工(株)製の赤外線瞬間加熱装置で温度制御はアルメル・クロメル熱電対で行なつた。なお、ガス流量の調節には大倉電機(株)のMFC-I型質量流量計を使用した。ガスクロマトグラフは柳本製作所(株)のHID及びFID装備のG80型で、FID側にはCO及びCO₂を分析するためにNi触媒カラムを取り付けた。このガスクロマトグラフの両ガスに対する検出下限はHIDで0.5 vpm、FIDでは0.05 vpmであった。

2.2.2 照射用ガラスアンプルと実験操作

静的雰囲気下の反応に使用したガラスアンプルの写真を Fig. 6 に示した。アンプルの主要部分はパイレックスガラスで、その他銅管、スエージロック及び開閉バルブから成る。アンプル下方の太い部分に黒鉛試料を充てんした後、アンプルにテープヒーターを巻きつけて、真空引きしながら約 300 °C で一昼夜加熱し、試料の脱ガス処理を行なった。冷却後 2.1.2 で述べた方法で調製した反応ガスを 1.2 気圧まで封入した。このアンプルを Co - 60 ガンマ線で一定時間照射した後、アンプル内のガスをアンプルの肩から斜め上に突き出している細管先端のゴム板シールから注射器で抜き取り、生成ガスをガスクロマトグラフで分析した。この実験は常温のみで行なった。

2.2.3 Co - 60 ガンマ線源

照射には日本原子力研究所・東海研究所・原子炉化学部の 45 KCi Co - 60 ガンマ線源を使用した。線源は直径が 14 cm、高さが 40 cm のステンレス製の円筒容器に格納されている。この寸法であるため空間線量率の上下方向分布は、容器の下方 8 cm から 25 cm まではほど均一である。なお、ガンマ線の空間線量率は線源の所管課室である固体化学研究室で測定した値を使用した。⁽⁸⁾

2.3 反応装置による実験の操作

黒鉛試料は腐食反応に先立ち、 10^{-4} torr の真空中、1000 °C で約 4 時間加熱し、試料に吸着しているガスを除去した。反応実験はまず、非照射下で所定温度に保持された試料部分に反応ガスを導入し、15 ml/min の流量でガスを流しながら出てくるガスを分析して非照射下の挙動を確認した。次にガンマ線源を所定の場所へ設置して反応を開始し、生成ガス量を定期的に分析した。腐食反応速度は炭素を含む反応生成物の濃度とガスの流量から計算で求めた。

3. 結果と考察

3.1 反応速度

3.1.1 アンプル照射

常温で照射した 7477 黒鉛材料のアンプル内ヘリウムから CO₂ と、その約 20% 濃度の CO が検出された。アンプル中の水蒸気濃度は 1.2 容積パーセントである。H₂ の生成も考えられたが、ガスクロマトグラフの検出限界以下の濃度であった。これらガスの分析値から計算で求めた 7477 黒鉛材料の重量損失を照射線量の関数として Fig. 7 に示した。重量損失と照射線量は直線を示し、この結果から計算される黒鉛試料の単位重量・時間当りの反応速度は 1.0×10^{-8} g/g · hr であり、後述の反応装置を使用した実験で得た反応速度の約 4 倍である。

った。この値については、反応前の黒鉛試料の吸着ガスの脱着処理が不十分で、残留したガスがガンマ線の照射によって脱着し、アンプル中のCO₂やCO濃度を高めたため、大きな値となつたことが考えられる。黒鉛材料をガンマ線照射すると吸着ガスの脱着が常温でも起ることが確認されている。⁽⁹⁾こゝで使用した黒鉛試料はアンプルの材質上の制約から300°Cで脱着ガス処理を実施しているが、反応装置を使用した実験では1000°Cで反応前の加熱処理を行なっている。

3.1.2 反応装置

実験は熱による反応を避け、放射線による誘起反応のみをより明確に検出するために30～243°Cで実施した。⁽⁵⁾放射線誘起反応は温度の影響を受けない反応であるから、上記の温度範囲でも高温における反応速度を知るためには十分である。

常温の非照射下でも反応部分を通過してくるヘリウム中にごく少量のCO₂が見出されたが、照射を開始すると同時にCO₂が増加し、またCO₂の20%程度のCOが新しく生成し、照射を停止すると両ガスとも照射前の状態に戻った。アンプル照射の場合同様、こゝでもH₂の生成が考えられるが、ガスクロマトグラフで検出できなかった。これはH₂の分析に使用するHIDガスクロマトグラフの感度がFIDより約一桁劣るためと考えられる。各黒鉛材料の反応温度30°C、水蒸気濃度1.2容積パーセント、 1.25×10^6 R/hr下の腐食反応挙動をFig. 8～11に示した。こゝで腐食反応速度はCO₂及びCO濃度の分析値とガス流量から次式によって計算した。

$$R (\text{g/g} \cdot \text{hr}) = \frac{72C}{10^4} \times \frac{1}{2.24 \times 10^4} \times \frac{1}{W}$$

こゝでRは反応速度、CはCO₂の増加濃度とCO濃度の合計値で単位はvpm、またWは黒鉛試料の全重量(g)である。

当実験では反応速度を放射線化学反応で通常使用されるG(-C)値でなく、単位重量・時間当たりの重量減少で示した。これは固・気相の放射線化学反応では反応に関与するガス量を正確に定めることができること、及び単位重量・時間当たりの重量減少での表示の方が、腐食反応という目的に合致すると考えたからである。

当初の予備的な実験を除き、反応時間は50時間以上としたが、これは照射によってなお脱着するかもしれない吸着ガスの影響をできるだけ少くしたいと考えたからである。また同じ様な考え方から時間とともに変動する反応速度の中で、最も低い値をその材料の反応速度として採用した。

反応挙動の一連の図からわかるように反応温度30°C、水蒸気濃度1.2容積パーセント、ガンマ線線量率 1.25×10^6 R/hr下の反応速度はきわめて小さく、 $2.3 \sim 3.7 \times 10^{-9}$ g/g·hrで銘柄による相違がみられた。同一銘柄についての反応速度の分散は7477PTの場合、 $2.3 \sim 2.6 \times 10^{-9}$ g/g·hrで生成ガス濃度値が低く、誤差がはいりやすい実験としては一致が良かった。

この実験では、各材料の反応速度と比表面積及び気孔率との間に、特に関連性を見出すこと

ができなかった。例えばSM I-24黒鉛材料の比表面積は $1.30\text{ m}^2/\text{g}$ で7477PTの $0.39\text{ m}^2/\text{g}$ の3.3倍であるが、反応速度は1.4倍に過ぎない。また、この実験で使用された黒鉛材料の気孔率は21~23容積パーセントとほぼ等しいが、反応速度は最高1.6倍の相違を示しており、その間に関連性を見出すことはできなかった。同様な結果は微量のCH₄を含むCO₂との放射線化学反応でも観察されており、黒鉛材料の特性の中で $0.05\sim 2\mu\text{m}$ の気孔容積のみが反応速度に影響したことが報告されている。⁽¹⁰⁾一方、非常に良く類似した組織構造をもつ7477と7477PTはFig. 8と9に示した様に同程度の放射線誘起反応速度を示した。7477PTは7477を高純度化した材料で、両者の持つ特性は含有灰分量を除いてきわめて良く類似している。しかしこの含有不純物量の相違のために熱による反応速度は大きく相違し、1000°Cの反応速度は7477の方が7477PTより約6倍も大きい。ここで得られた結果は放射線誘起反応がいわゆる黒鉛表面の活性点というものに全く関与しない反応であることを示しており、黒鉛の組織構造にのみ依存するものであることを示している。各材料の反応速度をまとめてTable 2に示した。

3.2 反応速度の温度依存性

反応速度の温度依存性は7477PT黒鉛材料を使用し、反応温度30~243°C、水蒸気濃度1.2容積パーセント、ガンマ線線量率 $1.25 \times 10^6\text{ R/hr}$ 下で測定した。得られた結果のアレニウス図形をFig. 12に示す。反応の活性化エネルギーは約1Kcal/molであった。この値は温度範囲は異なるが熱反応の活性化エネルギー8.7Kcal/molと比較すると問題にならない低い値である。これは放射線エネルギーを吸収したガスがきわめて高いエネルギー状態にあるため、反応温度の変化が活性化したガスのエネルギー状態に何の影響も与えないためと理解される。1Kcal/molという値はわずかに起る熱反応のためではないかと考えられる。

3.3 反応速度の水蒸気濃度依存性

反応速度の水蒸気濃度依存性も7477PT黒鉛材料を使用して測定した。反応温度は30°C、線量率は $1.25 \times 10^6\text{ R hr}$ 、ヘリウム中濃度は0.6~2.3容積パーセントである。得られた結果をFig. 13に示した。実験水蒸気濃度範囲における反応速度は濃度が変化してもほとんど変化せず、反応の次数として0.16の値が得られた。この値は非照射黒鉛材料や照射済み黒鉛材料の熱反応の次数、0.5や1.0と比較すると大分小さく、放射線によって活性化されるガス濃度が、実験水蒸気濃度範囲でほとんど変化していないことを示すものである。全く同じ様な結果がインパイルループを使用したCO₂の放射線分解でも得られたことが報告されている。⁽¹¹⁾

4. 放射線誘起反応の寄与

高温の放射線下で進行する反応の反応速度は熱による反応速度に放射線による誘起反応の速度を加えることによって得ることができる。⁽⁵⁾ 例えば、7477PT黒鉛材料の反応温度1000°C、0.6容積パーセントの水蒸気による反応速度は 1.0×10^{-3} g/g・hr 程度である。これとほど等しい0.6容積パーセントの水蒸気濃度で得られた 1.25×10^6 R/hr ガンマ一線下の放射線誘起反応速度は 2.5×10^{-9} g/g・hrであり、実に1000°Cの熱反応速度の 10^{-5} 倍以下である。したがって当実験の反応条件では放射線誘起反応速度は全反応速度に何の影響も与えることはない。実際の原子炉の炉心環境ではガンマ一線線量率は当実験条件より2桁程度大きく、したがって放射線によって誘起される反応速度も増加するが、きびしく見積もっても1000°Cの全反応速度に対する放射線誘起反応の寄与は10%以下と考えられる。したがって原子炉内の水蒸気による腐食反応は、中性子照射による黒鉛材料の反応性増加にのみ考慮を払い、照射済み黒鉛材料の熱反応速度に注目すれば良い。

5. 結論

当腐食反応試験によって次のような事実が明らかになった。

- (1) 原子炉用黒鉛材料7477, 7477PT, IG-11及びSMI-24の放射線誘起反応速度は銘柄によって異なり、30°C、ヘリウム中水蒸気濃度1.2容積パーセント、 1.25×10^6 R/hr の線量率下で $2.3 \sim 3.7 \times 10^{-9}$ g/g・hr の範囲にあった。
- (2) 放射線誘起反応速度と黒鉛材料の比表面積、気孔率及び含有不純物量との間に関連性は見出されない。しかし類似の組織構造を持つ7477と7477PTは反応速度も同程度の値を示し、放射線誘起反応速度が黒鉛の組織構造と関連があることを示した。
- (3) 放射線誘起反応速度の温度依存性はきわめて小さく、30~243°Cの間での活性化エネルギーは約1Kcal/mol であった。これは活性化されたガスのエネルギー準位がきわめて高いことを示すものである。
- (4) ヘリウム中水蒸気濃度0.6~2.3容積パーセントにおける放射線誘起反応速度の濃度依存性はきわめて小さく、反応の次数として0.16が得られた。これは水蒸気濃度が変化しても活性化されるガス濃度がほとんど変化しないことを示すものである。

謝 詞

本実験中、実験の進行に色々と御配慮を載き、また有益な助言を賜わりました燃料工学部下川純一部長に感謝致します。また、本実験に色々と御協力下さいました原子炉化学部・固体化学研究室の長山尚氏、大久保隆氏に深く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) L. Valette and Van Massenhove, Second Conference on Industrial Carbons and Graphite, Society of Chemical Industry, London, p 337 (1966)
- (2) M. R. Everett, D. V. Kinsey and E. Römberg, Chemistry and Physics of Carbon, Vol. 3, 289 (1968)
- (3) T. B. Copestake and N. S. Corney, Third Conference on Industrial Carbons and Graphite, Society of Chemical Industry, London, p 339 (1971)
- (4) W. P. Jesse and J. Sadauskis, Physical review, Vol. 88, 417 (1952)
- (5) R. E. Nightingale, Nuclear Graphite, Academic Press, 387 (1962)
- (6) A. C. Collins, D. A. Dominey and T. Swan, CEGB-RD/B/N1588, (1970)
- (7) 赤松秀雄, 中川鶴太郎, 炭素, 第5巻, 59 (1956)
- (8) 長山 尚, 大久保 隆, 私信
- (9) JAERI-M 8848, 今井 久, 藤井貴美夫, 野村真三, 黒沢 武, 佐々木泰一, (1980)
- ⑩ P. Campion, R. Lind, R. J. Blanchard and C. Koch, Proceedings of the Fourth London International Carbon and Graphite Conference, p 459 (1976)
- ⑪ P. L. Walker, Jr., Frank Rusinko, Jr., and L. G. Austin, Advances in Catalysis, Vol. 11, 133 (1959)
- ⑫ H. Cowen and R. Lind, TID-7597, p 46 (1960)

Table 1 Characteristics of graphites used for
study under gamma ray irradiation

Graphite	Apparent Density (g/cm ³)	Butanol Density (g/cm ³)	Tap Density in Reaction Tube (g/cm ³)	Specific Surface Area (m ² /g)	Ash (ppm)
7477PT	1.74	2.155	0.97	0.39	5
7477	1.75	2.149	0.99	0.38	1000
IG-11	1.78	2.177	1.00	0.89	40
SM1-24	1.76	2.219	0.99	1.30	200

Table 2 Rate of reaction of graphite with water vapor under gamma ray irradiation

Brand	Reaction rate	(10 ⁻⁹ g/g · hr)	
	Temperature 30 °C	Temperature 132 °C	Temperature 243 °C
7477PT	2.3, 2.5, 2.6	3.0	4.6
7477	2.6	—	—
IG-11	3.7	—	—
SM1-24	3.4	—	—
Remarks	Dose rate : 1.25×10^6 R/hr		
	Concentration of water vapor : 1.20 vol. %		

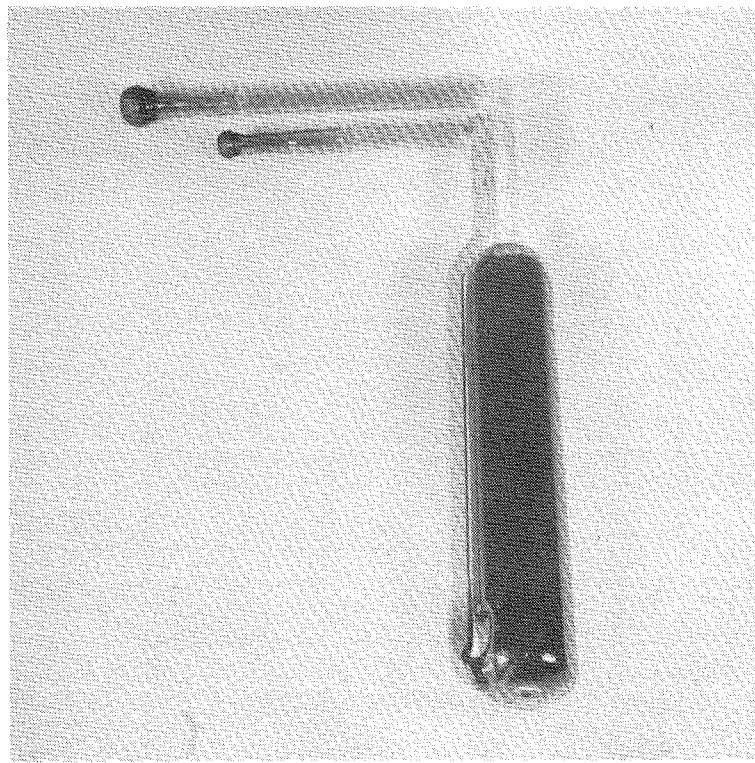


Fig. 1 Reaction tube used in this experiment

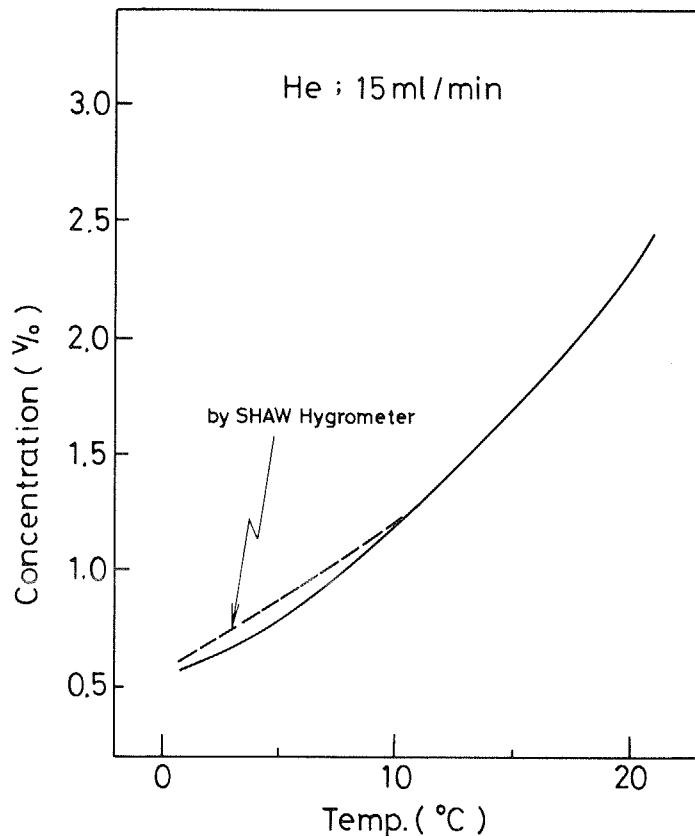


Fig. 2 Relationship between concentration of water vapor and temperature of thermostat

- 1. Graphite
- 2. Infrared Image Furnace
- 3. Stainless Flexible tube
- 4. Radiation Resistant Cable
- 5. Thermocouple
- 6. Co-60
- 7. Water(Flexible tube)
- 8. Wall
- 9. Controller (Temperature)
- 10. Gas Chromatograph
- 11. SHAW Moisture Meter
- 12. Vacuum Pump
- 13. Thermostat
- 14. Mass flow Controller
- 15. Vacuum Gauge

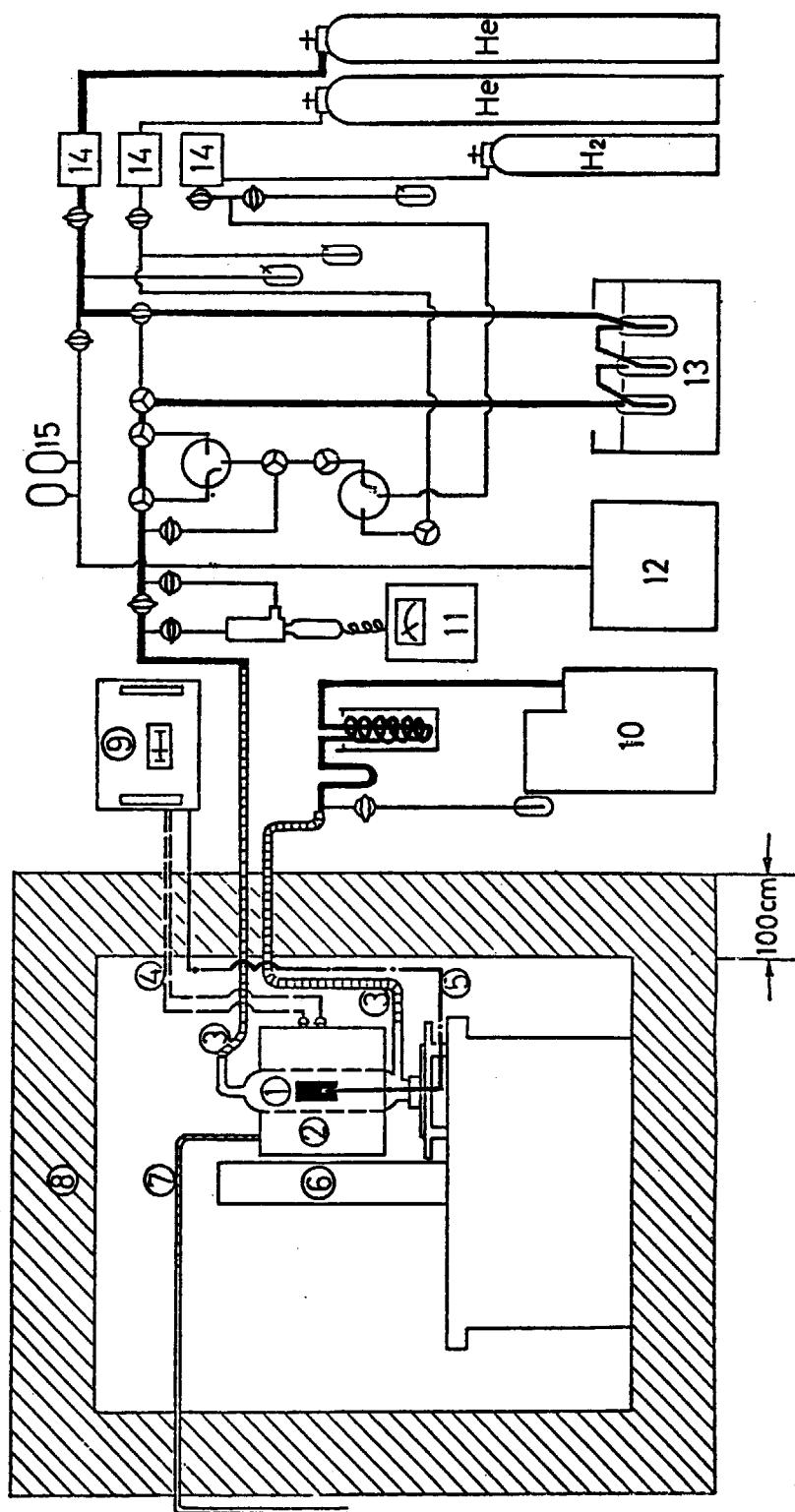


Fig. 3 Schematic Diagram of Apparatus for Corrosion Study under γ -ray Irradiation

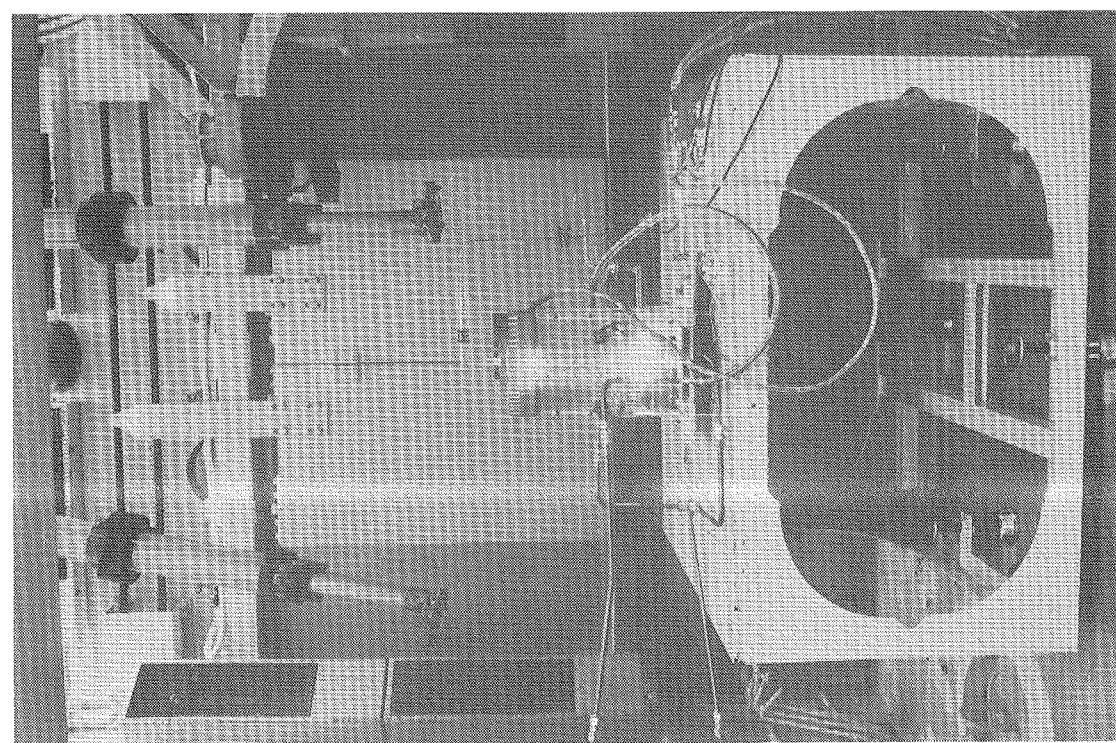


Fig. 4 Reaction furnace in Co-60 gamma ray irradiation cave

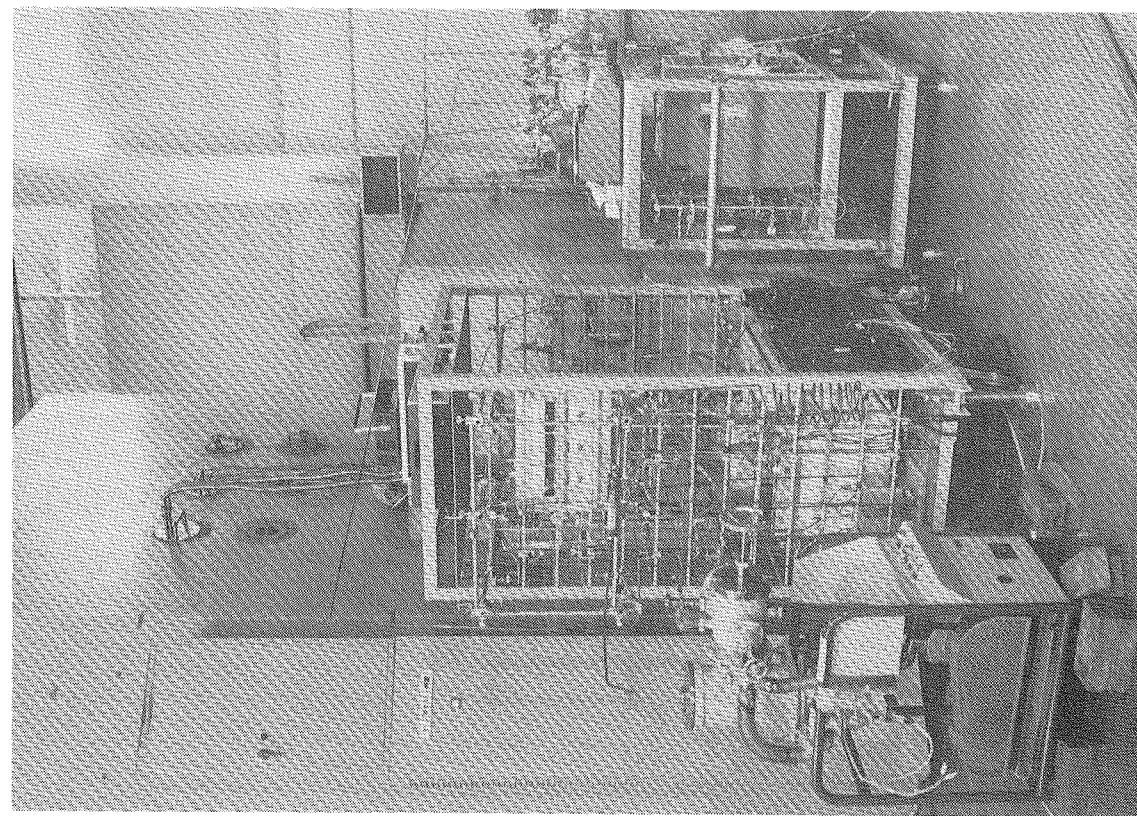


Fig. 5 Main parts of the apparatus outside the irradiation cave

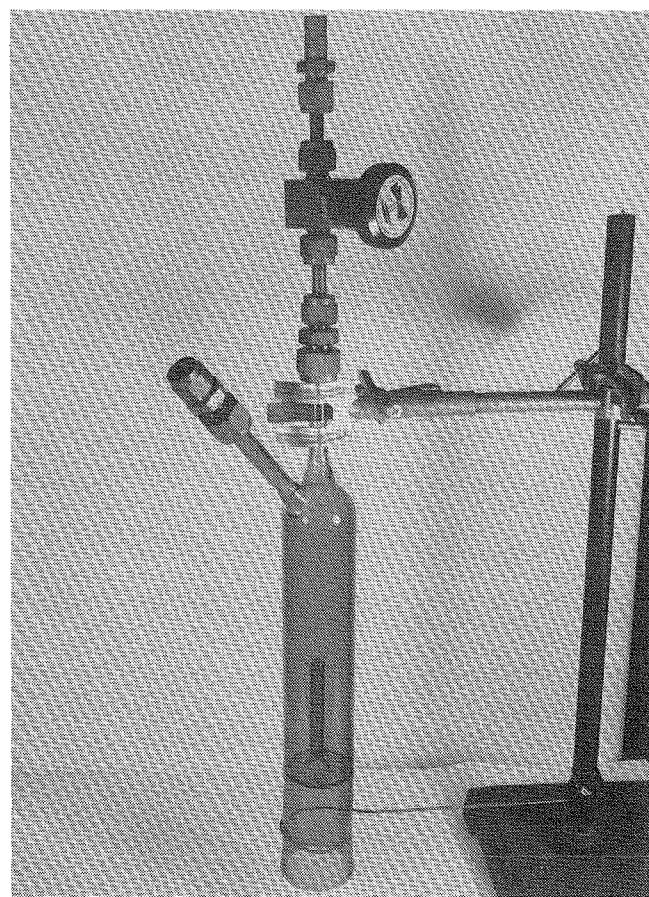


Fig. 6 Glass-ampoule for irradiation

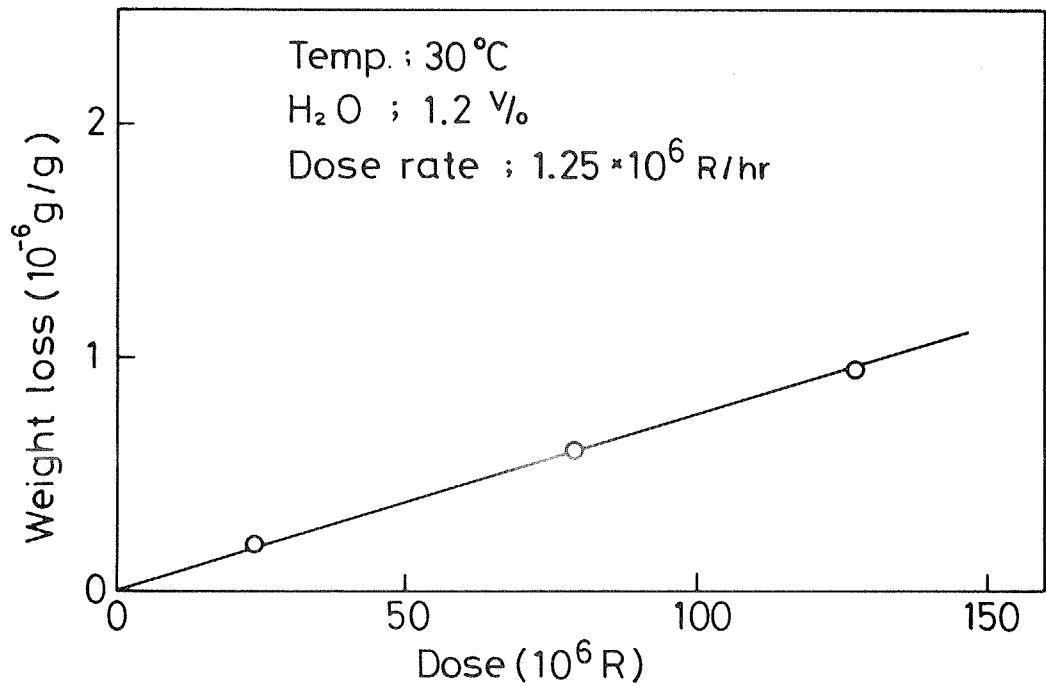


Fig. 7 Weight loss of 7477 graphite as a function of dose

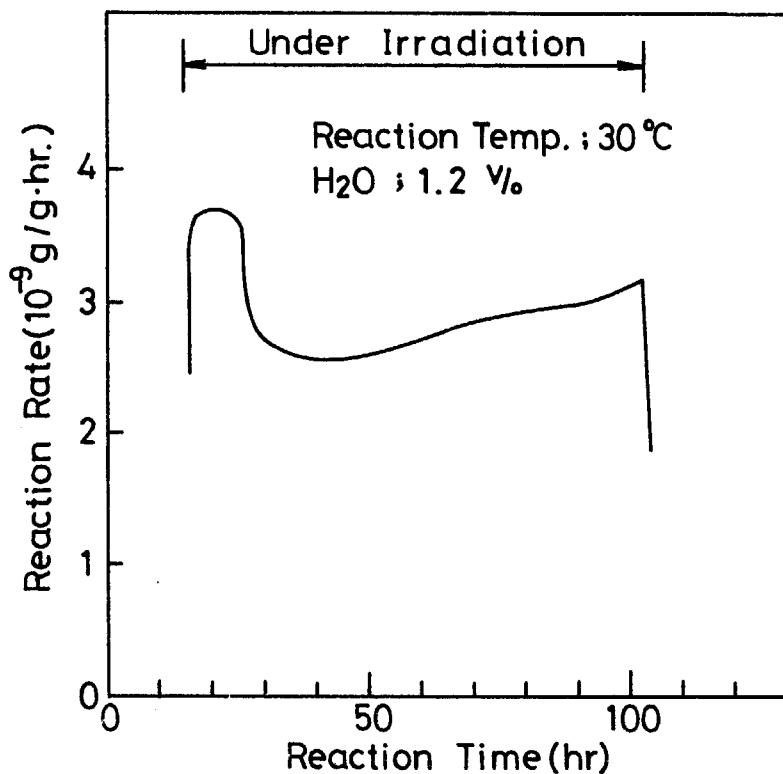


Fig. 8 Reaction of 7477 graphite with water vapor of 1.2% in helium at 30°C under irradiation of $1.25 \times 10^6 \text{ R/hr}$

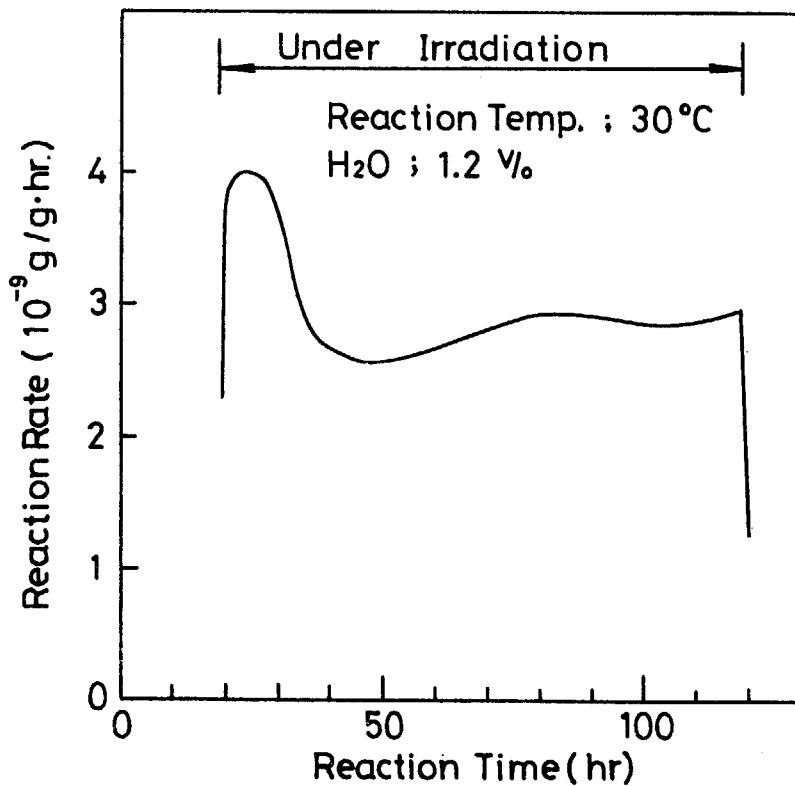


Fig. 9 Reaction of 7477PT graphite with water vapor of 1.2% in helium at 30°C under irradiation of $1.25 \times 10^6 \text{ R/hr}$

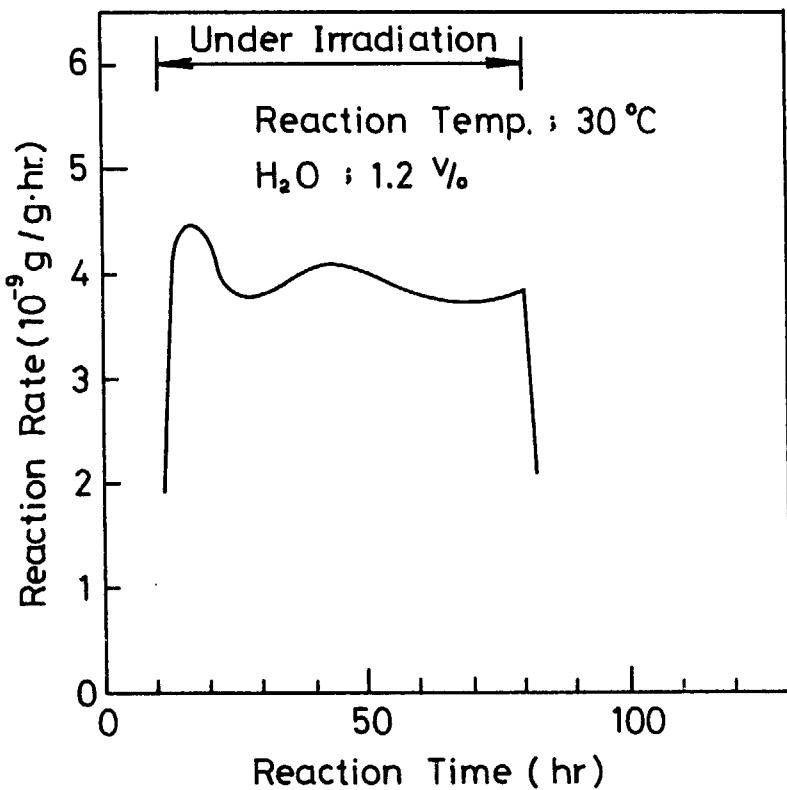


Fig. 10 Reaction of IG-11 graphite with water vapor of 1.2 % in helium at 30°C under irradiation of 1.25×10^6 R/hr

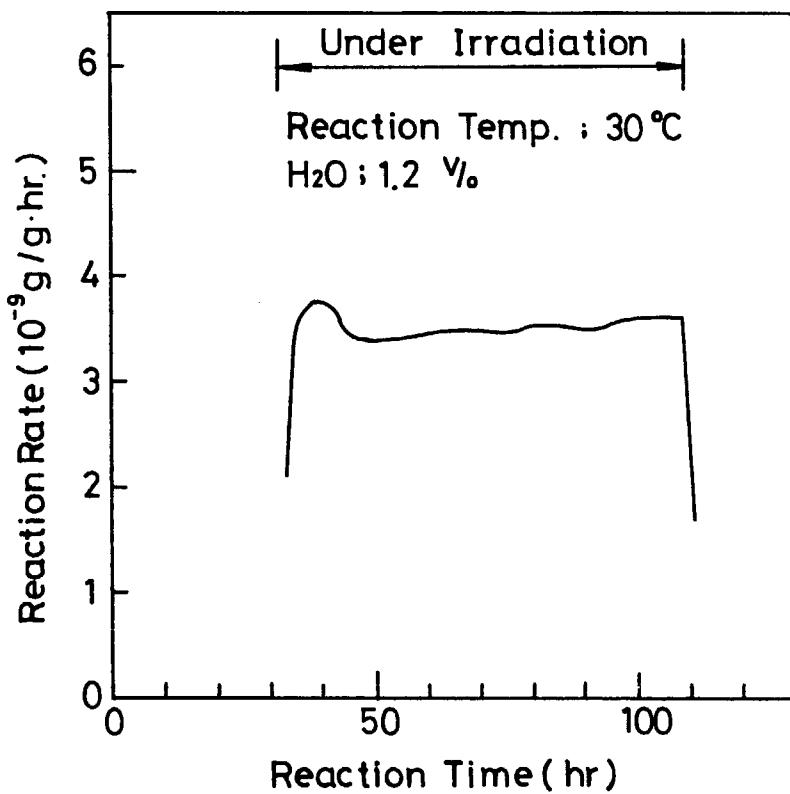


Fig. 11 Reaction of SM1-24 graphite with water vapor of 1.2 % in helium at 30°C under irradiation of 1.25×10^6 R/hr

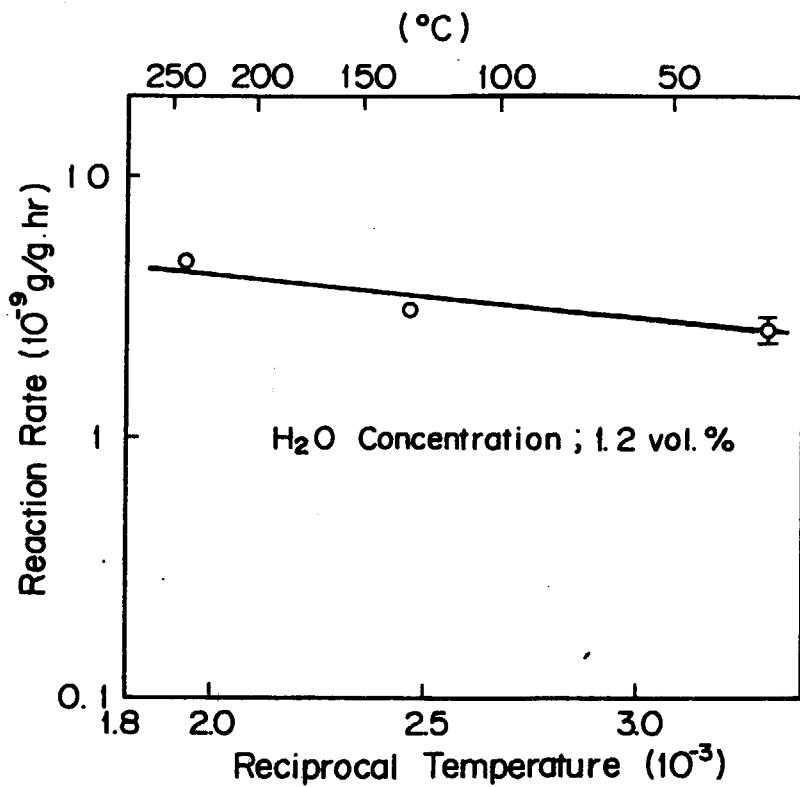


Fig. 12 Dependence of reaction rate on temperature in reaction under gamma ray irradiation

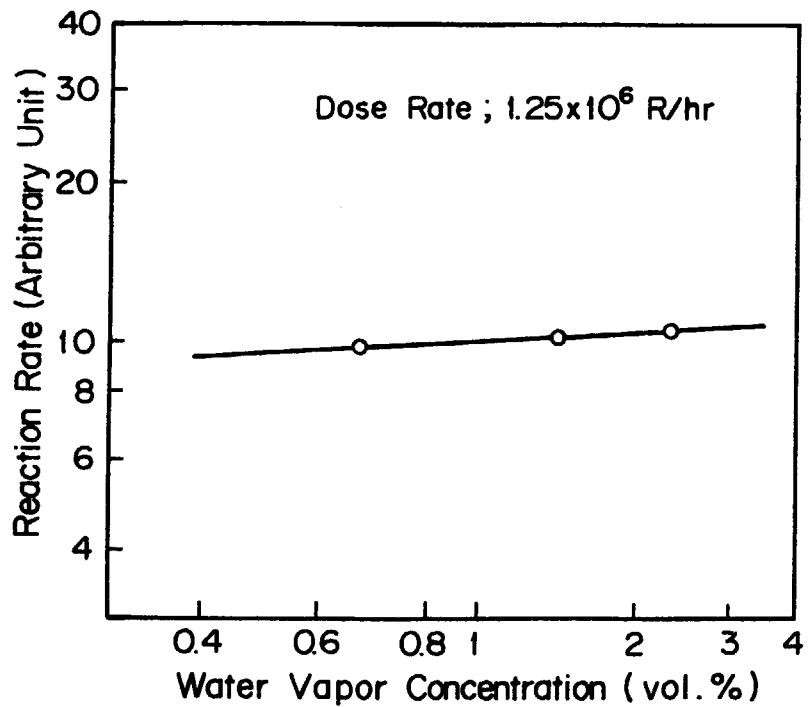


Fig. 13 Dependence of reaction rate on concentration of water vapor in helium