

JAERI-Tech
2003-068



JP0350400



γ線照射下における硝酸溶液中の
ヨウ素種存在割合の測定

2003年8月

岡川 誠吾*・永井 斉*・阿部 仁・田代 信介

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公開している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

γ線照射下における硝酸溶液中のヨウ素種存在割合の測定

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター燃料サイクル安全工学部
岡川 誠吾*・永井 斉**・阿部 仁*・田代 信介†

(2003年6月16日受理)

再処理施設における臨界事故時に、核燃料溶解液から放出されるヨウ素の放出機構を解明するには、様々な溶液条件でのヨウ素の酸化還元特性を調べる必要がある。本研究では硝酸濃度、1 M、3 M 溶液中で同特性に対するγ線照射の影響を調べるとともに、有機ヨウ素種の生成に関係する有機種とγ線照射効果について簡単な検討を行った。

γ線を照射しない場合、硝酸濃度 1 M 溶液では大部分のヨウ素が I_3^- で存在したのに対して、硝酸濃度が 3 M 以上では I_2 まで酸化された。照射線量 4 C/kg 以上のγ線照射をすると硝酸濃度に関係なく、 I_3^- は存在しなかった。照射線量 120 C/kg のγ線照射では硝酸濃度に関係なく、ヨウ素は IO_3^- まで酸化された。照射線量 4800 C/kg のγ線照射を行うと、硝酸濃度 1 M 溶液では、大部分が IO_3^- であったのに対して、硝酸濃度 3 M 溶液では大部分が I_2 となり還元が進んだ。この溶液中では、硝酸がγ線照射によって部分分解して生成したと考えられる亜硝酸イオンの存在を確認した。

使用した有機種とγ線照射の結果、有機ヨウ素種の生成は確認できなかった。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

† 本報告書に関する問合せ先

※ 経済産業省 原子力・保安院に出向中

* 2003. 3. 31 までプロセス安全研究室に在籍

** 2000. 3. 31 までプロセス安全研究室に在籍

Measurement of the Iodine Species in Nitric Acid Solution
under the Irradiation of γ -ray

Seigo OKAGAWA, Hitoshi NAGAI, Hitoshi ABE* and Shinsuke TASHIRO †

Department of Fuel Cycle Safety Research
Nuclear Safety Research Center
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 16, 2003)

To study the release mechanism of iodine from the dissolver solution in the nuclear fuel reprocessing plants to the atmosphere at criticality accidents, the characteristics of redox of iodine species in various solutions must be examined. In the present work, the effect of γ -ray irradiation on the redox reaction was examined in the nitric acid solution of 1M and 3M. The present work also deal with formation of organic species of iodine by γ -ray irradiation.

Without irradiation, most of iodine in 1M nitric acid solutions were exist in the form of I_3^- . In 3M nitric acid solutions, iodine was oxidized to I_2 . When the solutions were irradiated by γ -ray with exposure of more than 4 C/kg, I_3^- was disappeared regardless of nitric acid concentration. At exposure of 120 C/kg, iodine was oxidized to IO_3^- . At exposure of 4800 C/kg, iodine was exist in the form of IO_3^- in 1M nitric acid solution. On the other hand, iodine in 3M nitric acid solution was reduced to I_2 at the same exposure. In the irradiated solution, nitrous acid was found, which would be produced from nitric acid by γ -ray irradiation.

The formation of organic species of iodine by γ -ray irradiation was not detected under the conditions selected in the present work.

Keywords : Iodine, Redox, γ -ray, Nitric Acid, Fuel Reprocessing Plant, Source Term, Volatility, Organic Iodine

† To whom correspondence should be addressed.

※ On loan to Nuclear and Industrial Safety Agency, Ministry of Economy Trade and Industry

目 次

1. はじめに	1
2. 実験	1
2.1 実験装置	1
2.2 試薬	2
2.3 実験方法	2
2.3.1 γ 線未照射実験	2
2.3.2 γ 線照射実験	3
2.3.3 γ 線照射による有機ヨウ素の生成	3
2.4 ヨウ素種の分離および定量	3
3. 結果および考察	4
3.1 γ 線未照射実験	4
3.2 γ 線照射実験	4
3.3 γ 線照射による有機ヨウ素の生成	5
4. 結 論	6
謝 辞	6
参考文献	7

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental	1
2.1 Experimental Devices	1
2.2 Reagents	2
2.3 Experimental Procedure	2
2.3.1 Non-irradiation Experiments	2
2.3.2 Irradiation Experiments	3
2.3.3 Formation of Organic Iodine Species	3
2.4 Separation and Quantitative Analysis of Iodine Species	3
3. Results and Discussions	4
3.1 Non-irradiation Experiments	4
3.2 Irradiation Experiments	4
3.3 Formation of Organic Iodine Species	5
4. Conclusion	6
Acknowledgment	6
References	7

1. はじめに

再処理施設の核燃料を溶液系で取扱う系統(例えば核燃料溶解槽内)で臨界事故が発生した場合には、放射性物質が気相へ放出され、それは槽ベント系へ移行していくと予想される。原研では NUCEF (Nuclear Fuel Cycle Safety Engineering Facility) の TRACY (過渡臨界実験装置) を使用して、再処理施設の臨界事故時における安全性研究の一環として放射性物質の移行に関する実証試験を行っている。

臨界事故を想定した場合に気相に放出されるであろう放射性核種のうち、環境および公衆に影響を与える可能性の大きい核種としては放射性ヨウ素が挙げられる。ヨウ素の化学種としては、揮発性を有する有機ヨウ素や分子状ヨウ素(I_2)の他、非揮発性のヨウ素イオン(I^-)やヨウ素酸イオン(IO_3^-)、三ヨウ素イオン(I_3^-)などのイオンも存在する。

溶液中でのヨウ素が示す化学的性質は、ヨウ素がとる化学形態によって大きく異なる。ヨウ素の化学形態は、溶液中の雰囲気によって酸化還元条件の影響を受ける。ヨウ素の酸化還元特性に影響を及ぼす因子の一つには、硝酸の濃度や γ 線の照射効果などが考えられる。ヨウ素の施設内閉じ込めの観点からは、様々な条件の下で溶液中のヨウ素種存在割合を測定し、酸化還元特性を明らかにすることが重要となる。

再処理施設における溶解槽内硝酸濃度条件(平均 5 mol/dm^3 (M)) のヨウ素の酸化還元特性に関しては、亜硝酸によるヨウ素イオンの酸化速度⁽¹⁾、亜硝酸によるヨウ素酸イオンの還元反応速度⁽²⁾、模擬使用済核燃料溶液中のヨウ素挙動⁽³⁾、硝酸ウラニル触媒によるヨウ素の光酸化⁽⁴⁾等の報告がある。また、原子炉事故時を対象とした pH 2.0 ~ 9.0 の範囲におけるヨウ素に対する放射線の照射効果についても報告⁽⁵⁾されている。しかし再処理抽出工程で使用されるような硝酸濃度条件でのヨウ素挙動に対する γ 線の放射線の照射効果については報告されていない。そこで本研究では、平均 3 M の硝酸濃度条件を対象として、ヨウ素の硝酸濃度に対する酸化還元特性を調べる実験と、同特性に対する γ 線照射効果を調べるための γ 線照射実験、さらに有機ヨウ素の生成挙動に対する γ 線照射の影響を調べる実験を行った。

2. 実験

2.1 実験装置

実験は溶液の調整および ^{60}Co γ 線照射とヨウ素種の分離操作に分けられる。図 1 に実験の流れと装置の関係を示した。

^{60}Co γ 線照射装置: Atomic Energy of Canada Limited, Radiochemical Company 社製
model GC 220、照射線量率: $120 \text{ C/(kg}\cdot\text{h)}$ (図 2 参照)

照射容器 : 容積: 200 cm^3 、ガラス製 (図 3 参照)

揮発性ヨウ素分離装置: 流量計、照射容器、0.1 M NaOH トラップ(2段)、
: 乾燥剤(過塩素酸マグネシウム)、
: 液体窒素冷却コールドトラップで構成した。(図4参照)

ガスクロマトグラフ: 柳本製作所製 model G-3800
分離カラム: DOP5%添着セライト、カラム温度: 80 °C

イオンクロマトグラフ: DIONEX 社製 model 2000i/SP
分離カラム: HPIC-AS1、
溶離液: 4.5×10^{-3} M 炭酸ナトリウム溶液と 2×10^{-3} M 炭酸水素ナ
トリウム溶液の混合液

放射能測定装置: MCA:ORTEC-NORLND 社製 model 5600
NaI 検出器: BICRON 社製 model 2MW2/2

上記放射能測定装置の検出器部分にフローセルを装着して、ガスクロマトグラフおよびイオンクロマトグラフから溶出した試料を導入し、 ^{131}I の放射能を測定した。

なお、溶液中の亜硝酸濃度は、イオンクロマトグラフ(分離カラムは HPIC-AS10、検出器は電気伝導度セル)を用いて測定した。

2.2 試薬

ヨウ化セシウム(CsI) (純度: 99.9%)は1級試薬、その他は特級試薬を使用した。

標識用 ^{131}I としては、ヨウ化ナトリウム(Na^{131}I)溶液(キャリアフリー、放射能濃度: 319 MBq/cm^3)を希釈して使用した。

2.3 実験方法

ヨウ素は、再処理施設で溶解時に99%が除去されて 1×10^{-5} M程度の濃度で存在すると言われている。イオンクロマトを使用した予備試験の結果、ヨウ素濃度 1×10^{-5} M以下ではカラムがイオン交換樹脂として作用しヨウ素が溶離しないことがわかった。したがって、実験の精度を上げるためにヨウ素濃度 1×10^{-4} Mを選んだ。

2.3.1 γ 線未照射実験

γ 線未照射実験は、以下の条件で行い、ヨウ素種存在割合を測定した。

全ヨウ素濃度	: 1×10^{-4} M
硝酸濃度	: 1 M, 3 M
放置時間	: ~ 6時間
実験温度	: 室温

試料の調製では、共栓付き三角フラスコに純水と所定の硝酸濃度に達する量の濃硝酸を加え、次に CsI 溶液⁽⁶⁾とトレース量の Na^{131}I 溶液を加えかく拌した。所定の時間暗所に放置し、その後、ヨウ素種の分離操作を行いヨウ素種存在割合を測定した。なお、試料の調製は実験条件を変更する度に行った。

2.3.2 γ 線照射実験

γ 線照射実験は、以下の条件で γ 線の照射時間とヨウ素種存在割合の関係を測定した。

全ヨウ素濃度	: 1×10^{-4} M	
硝酸濃度	: 1 M, 3 M	
γ 線照射時間	: ~ 40 時間	照射線量 : ~ 4800 C/kg
照射後の放置時間	: ~ 72 時間	
実験温度	: 室温	

試料の調製は γ 線未照射実験と同様に行い、容器を ^{60}Co γ 線照射装置に挿入し試料溶液を所定時間照射した。なお、試料の調製は実験条件を変更する度に行った。

また γ 線照射後の溶液中でのヨウ素種の化学形態の時間変化を観察するため、20分間と24時間 γ 線を照射した溶液を照射後72時間放置し、その間のヨウ素種存在割合の経時変化を測定した。なお、照射線量率は 120 C/(kg \cdot h)であり、 t 分間の照射は照射線量 $2t$ C/kgとなる。

2.3.3 γ 線照射による有機ヨウ素の生成

有機ヨウ素同定実験は、以下の条件で γ 線の照射時間とヨウ素種存在割合の関係を測定した。

全ヨウ素濃度	: 1×10^{-4} M	
硝酸濃度	: 3 M	
γ 線照射時間	: 2 \sim 20 分間	照射線量 : 4 \sim 40 C/kg
添加した有機物	: 1×10^{-3} M 酢酸 30%リン酸トリブチル(TBP) 100 ppm ドデカンおよび飽和量ドデカン	
実験温度	: 室温	

試料の調製では、照射容器に純水、CsI溶液、トレース量の Na^{131}I 溶液および有機物を入れ、揮発性ヨウ素分離装置に取り付け、ヘリウムを 100 cm 3 /minで1時間通気して不純ガス(^{131}Xe)の追い出しを行った後に、所定の硝酸濃度に達する量の濃硝酸を加えた。 γ 線照射実験は、照射容器を ^{60}Co γ 線照射装置に挿入し試料溶液を所定時間照射した。

なお、試料の調製は実験条件を変更する度に行った。

2.4 ヨウ素種の分離および定量

ヨウ素種の分離および定量操作は図1に示した。試料溶液 10 cm 3 を分液ロートに取り、同量の四塩化炭素を加え1分間振とうする。両相を分離した後もう一度同じ操作を行い、ヨウ素種のうち、 I_2 と“その他のヨウ素種”を抽出分離する^(7,8)。“その他のヨウ素種”とは、 I^- 、 I_3^- 、 IO_3^- 以外のヨウ素種であり、有機ヨウ素であるとの報告例^(7,8)もあるが、詳細は不明である。この四塩化炭素に無水硫酸ナトリウムを約 1 g程度を加え、よく振って水分を除去した後、放射能測定装置で ^{131}I の放射能を測定し、ヨウ素濃度を I_2 と“その他のヨウ素種”の混合種として定量する。さらに 0.1 Mチオ硫酸ナトリウム溶液を加

えて1分間振とうし、 I_2 を逆抽出する。四塩化炭素相中の水分を除去した後、 ^{131}I の放射能を測定し、四塩化炭素中の“その他のヨウ素種”を定量する。この“その他のヨウ素種”の定量結果を I_2 と“その他のヨウ素種”の混合種の定量結果から差し引くことで、 I_2 の量を算出する^(7,8)。

I_2 と“その他のヨウ素種”を抽出した後の水相の一部をイオンクロマトグラフに注入して、水相中に残った I^- 、 I_3^- および IO_3^- を分離計測する。ただし、分離カラム(HPIC-AS1)を使用した場合 IO_3^- と I_3^- は、同じ保持時間で溶出したため、この方法では分離定量することはできなかった。

そこで、図5に示す Castleman⁽⁷⁾らの方法によって、同一水相中の IO_3^- を定量し、イオンクロマトグラフでの IO_3^- と I_3^- の合計の定量結果からこの IO_3^- の量を差し引くことで I_3^- の量を求めた。

有機ヨウ素生成実験では、上記の方法操作を行う前に、試料溶液が入った照射容器を揮発性ヨウ素分離装置に取り付け、高純度ヘリウムを $100\text{ cm}^3/\text{min}$ で1時間通気し、溶液中の有機ヨウ素を追い出す。この際 I_2 の一部は水溶液から気相へ移る。 I_2 を有機ヨウ素と分離するために水酸化ナトリウムトラップをコールドトラップの前に設けて捕集する。コールドトラップには有機ヨウ素種のみを捕集し、これをガスクロマトグラフの試料導入部に接続する。ヒートガンで約 $60\text{ }^\circ\text{C}$ に加熱し、有機ヨウ素をガスクロマトグラフに導入して有機ヨウ素種を分離し、フローセルを通過する ^{131}I の放射能を測定した。

水酸化ナトリウムトラップに捕集した I_2 は瞬時に NaI となり、揮発性を失うためバイアル瓶に水酸化ナトリウム溶液の一定量を採取し放射能測定装置によって ^{131}I の γ 線を測定し定量する。

溶液中の各ヨウ素種の存在割合は、試料調製時に加えた全ヨウ素量で規格化することで、百分率として表した。

3. 結果および考察

3.1 γ 線未照射実験

γ 線未照射実験結果を表1に示す。 γ 線未照射実験は、硝酸濃度が 3 M 以上の条件では、ほとんどのヨウ素は I_2 の化学形で溶液中に存在した。このことは、硝酸濃度が 3 M の場合でも硝酸添加後30分間以内で I_3^- から I_2 への酸化が十分進行することを意味する。それに対して硝酸濃度が 1 M の場合は、 I_3^- から I_2 への酸化が徐々に進行し、硝酸添加後6時間が経過しても78%が I_3^- であった。

また、硝酸濃度が 3 M の条件では時間が経過すると IO_3^- の生成が認められた。

3.2 γ 線照射実験

γ 線照射時間に対する各ヨウ素種存在割合を表2と図6に、また照射後の溶液を長時

間放置し、溶液中のヨウ素種存在割合の時間変化を測定した結果を表3に示す。

硝酸濃度が1 Mの場合、ヨウ素の酸化は未照射実験に比べてさらに進行し、照射時間30分後には IO_3^- の割合は約100%となり、さらに時間が経過してもヨウ素種の割合には変化が見られなかった。それに対して硝酸濃度が3 Mの実験では、照射5時間までは硝酸濃度1 Mの場合よりも早い速度でヨウ素の酸化が進行し、 IO_3^- の割合は照射10分の時点で約78%、20分の時点でほぼ100%となった。しかし照射時間がさらに長くなると逆に IO_3^- から I_2 への還元が進行し、照射40時間の時点では、ほぼ95%が I_2 として存在することがわかった。また、照射後の溶液中でのヨウ素種存在割合は、照射20分間の系では、放置時間が経過しても IO_3^- の存在割合が92%以上で推移しているのに対して、照射24時間の系では照射停止直後を除いて I_2 が93%以上を占めている。なお γ 線照射実験においては I_3^- は検出されなかった。

γ 線照射によるヨウ素の酸化還元挙動は硝酸の放射線分解による亜硝酸の影響が大きいと考えられる。硝酸濃度3 Mで γ 線照射5時間以降の IO_3^- から I_2 への還元現象を調べるために、 γ 線照射時間に対する亜硝酸濃度変化を測定した。結果を図7に示す。照射時間の経過とともに溶液中の亜硝酸は増加し、その濃度は照射1時間で全ヨウ素濃度の約20倍にもなることがわかった。硝酸濃度、照射時間の増加とともに生成する亜硝酸の還元力によって IO_3^- の還元が進行したものと考えられる⁽²⁾。

以上の知見から、臨界事故時のヨウ素の挙動を推定すると次のようであると考えられる。初めに核分裂によってヨウ素が生成し、極短時間で $\text{I}^- \rightarrow \text{IO}_3^-$ になる。この時点ではヨウ素の大部分が溶液内に留まるが、高放射線場に曝された硝酸の一部が分解して亜硝酸を生成し、徐々に $\text{IO}_3^- \rightarrow \text{I}_2$ になって気相へ放出が始まるものと考えられる。

ヨウ素の溶液内への閉じ込めや溶液からの追い出しを考慮する場合、溶液中でのヨウ素種の揮発性が重要な問題となる。 γ 線照射、未照射いずれの場合でも、硝酸濃度が3 Mの溶液条件では、ヨウ素と硝酸が共存してから数時間後ではヨウ素は結果的に主に揮発性種である I_2 として溶液中に存在する一方、硝酸濃度が1 M以下であれば、ヨウ素は非揮発性種として溶液中に存在した。即ち、 γ 線照射の有無に関わらず、溶液の硝酸濃度が溶液中のヨウ素の揮発性に大きく影響する。硝酸濃度が低い場合には、 γ 線を照射した場合であっても、非揮発性の化学種の存在割合が多くなる。

3.3 γ 線照射による有機ヨウ素の生成

実験結果を表4に示す。 γ 線の照射下で、有機酸や有機物の分解によって生成される有機ヨウ素としてヨウ化メチルを測定したが今回の実験条件ではヨウ化メチルは検出されなかった。この原因として、今回の実験では密閉した照射容器を用いたため、生成されたヨウ化メチルが再び γ 線照射によって分解された可能性が考えられる。

4. 結 論

今回の実験の結果、以下のような知見を得た。I⁻の硝酸溶液を γ 線照射をすると、極短時間で $I^- \rightarrow IO_3^-$ になる。この時点ではヨウ素の大部分が溶液内に留まるが、硝酸濃度3 Mでは γ 線照射によって硝酸濃度3 Mでは硝酸の一部が分解して亜硝酸を生成し、徐々に $IO_3^- \rightarrow I_2$ になった。 γ 線照射下での、ヨウ素の主要な化学種は、硝酸濃度1 Mでは IO_3^- 、3 Mでは I_2 であることを明らかにした。

さらに、今回の有機物共存系での γ 線照射の実験ではヨウ化メチルの生成は認められなかったが、今後さらに溶液条件、照射条件を変えるなどして、化学的性質を含め詳細に検討する必要がある。

謝 辞

本稿の作成に関して、日本原子力研究所旧燃料サイクル安全工学部長 内藤俣孝氏、(財)放射線照射振興協会 桜井勉氏、旧エアロゾル安全工学研究室長 村田幹生氏、同研究室 西尾軍治氏、成富満夫氏には細部に渡るご指導を頂き、心より感謝いたします。

参考文献

- (1) 江口 彌、谷垣昌敬、武藤邦夫、土屋博嗣、”亜硝酸によるヨウ素イオンの酸化速度”、化学工学論文集、15(6), 1109 (1989).
- (2) 谷垣昌敬、木村将弘、土屋博嗣、江口 彌、”亜硝酸によるヨウ素酸イオンの還元反応速度”、原子力学会誌、34(1), 84 (1992).
- (3) Sakurai. T., Takahashi. A., Ishikawa. N. and Komaki. Y., “The Behavior of Iodine in a Simulated Spent-Fuel Solution”, Nucl. Technol., 85, 206 (1989).
- (4) Sakurai. T., “Photooxidtion of Iodine Catalyzed by Uranyl nitrate”, J. Nucl. Sci. Technol., 33(3), 266 (1996).
- (5) Lin. C. C., “Chemical Effects of Gamma Radiation on Iodine in Aqueous Solution”, J. Inorg. Nucl. Chem., 42, 1101 (1980).
- (6) 成富満夫、”原子炉事故時における放射性ヨウ素の物理的・化学的挙動について”、保健物理、22, 189 (1987).
- (7) Castleman. A.W. Jr., Tang. I.N. and Munkelwitz. H.R., “The Chemical States of Fission-Product Iodine Emanating into a High Temperature Environment”, J. Inorg. Nucl. Chem., 30, 5 (1968).
- (8) 山本克宗、岡川誠吾、横内猪一郎、戸根弘人、伊丹宏治、”高温高压水ループ中の放射性ヨウ素の分析法の検討”、JAERI-M 7801 (1978).

表 1 未照射実験結果

全ヨウ素濃度： 1×10^{-4} M

硝酸濃度：1 M

経過時間 (min)	測定結果 (%)				
	I ⁻	I ₃ ⁻	I ₂	IO ₃ ⁻	その他の ヨウ素種
30	ND	97.0	2.3	0.6	0.1
60	ND	95.1	4.2	0.6	0.1
120	ND	91.7	8.0	0.2	0.1
240	ND	84.4	15.0	0.5	0.1
360	ND	77.9	21.6	0.4	0.1

硝酸濃度：3 M

経過時間 (min)	測定結果 (%)				
	I ⁻	I ₃ ⁻	I ₂	IO ₃ ⁻	その他の ヨウ素種
30	ND	0.0	96.6	0.9	2.5
60	ND	1.8	93.3	1.4	3.5
120	ND	6.4	89.6	2.3	1.7
240	ND	9.0	87.2	4.2	3.6
360	ND	7.8	88.1	3.2	0.9

* ND : 検出されず

表2 ヨウ素種に対する γ 線照射の影響全ヨウ素濃度： 1×10^{-4} M

硝酸濃度：1 M

照射時間 (min)	測定結果 (%)				
	I ⁻	I ₃ ⁻	I ₂	IO ₃ ⁻	その他の ヨウ素種
5	ND	ND	62.7	19.0	18.3
10	ND	ND	45.8	43.8	10.4
20	ND	ND	13.3	82.6	4.1
30	ND	ND	0.1	99.7	0.2
60	ND	ND	0.2	99.8	0.0
300	ND	ND	0.3	99.6	0.1
960	ND	ND	1.4	98.5	0.1
1440	ND	ND	0.3	99.6	0.1
2400	ND	ND	0.5	99.4	0.1

硝酸濃度：3 M

照射時間 (min)	測定結果 (%)				
	I ⁻	I ₃ ⁻	I ₂	IO ₃ ⁻	その他の ヨウ素種
2	ND	ND	74.9	12.5	12.6
5	ND	ND	46.4	42.6	11.0
10	ND	ND	15.4	78.2	6.4
20	ND	ND	0.1	99.8	0.1
60	ND	ND	0.1	99.9	0.0
120	ND	ND	0.1	99.8	0.1
300	ND	ND	0.1	99.7	0.2
960	ND	ND	44.7	54.1	1.2
1440	ND	ND	67.7	31.0	1.3
2400	ND	ND	94.7	3.7	1.6

*ND：検出されず

表3 γ 線照射後のヨウ素種経時変化全ヨウ素濃度： 1×10^{-4} M

硝酸濃度：3 M

照射時間：20min

経過時間 (min)	測定結果 (%)				
	I ⁻	I ₃ ⁻	I ₂	IO ₃ ⁻	その他の ヨウ素種
0	ND	ND	0.1	99.8	0.1
1440	ND	ND	2.1	97.6	0.3
2880	ND	ND	4.5	94.9	0.6
4320	ND	ND	7.9	91.8	0.6

照射時間：1440 min

経過時間 (min)	測定結果 (%)				
	I ⁻	I ₃ ⁻	I ₂	IO ₃ ⁻	その他の ヨウ素種
0	ND	ND	67.7	31.0	1.3
1440	ND	ND	93.3	4.8	1.9
2880	ND	ND	93.8	4.3	1.9
4320	ND	ND	95.5	2.4	2.1

*ND：検出されず

表4 γ 線照射による有機ヨウ素生成実験全ヨウ素濃度: 1×10^{-4} M

硝酸濃度: 3 M

有機種: なし

照射時間 (min)	測定結果 (%)					
	I ⁻	I ₃ ⁻	I ₂	IO ₃ ⁻	その他の ヨウ素種	CH3I
2	ND	ND	67.2	30.3	2.5	ND
5	ND	ND	40.9	58.4	0.7	ND
10	ND	ND	15.9	83.8	0.3	ND
20	ND	ND	0.5	99.2	0.3	ND

有機種: 1×10^{-3} M 酢酸

照射時間 (min)	測定結果 (%)					
	I ⁻	I ₃ ⁻	I ₂	IO ₃ ⁻	その他の ヨウ素種	CH3I
2	ND	ND	60.8	37.1	2.1	ND
5	ND	ND	35.8	63.0	1.2	ND
10	ND	ND	7.6	91.2	1.2	ND
20	ND	ND	0.3	98.6	1.1	ND

有機種: 30%TBP-n ドデカン 100 ppm

照射時間 (min)	測定結果 (%)					
	I ⁻	I ₃ ⁻	I ₂	IO ₃ ⁻	その他の ヨウ素種	CH3I
2	ND	ND	73.6	18.8	7.6	ND
5	ND	ND	50.1	45.0	4.9	ND
10	ND	ND	18.7	78.2	3.1	ND
20	ND	ND	0.5	96.4	3.1	ND

有機種: 30%TBP-n ドデカン飽和溶液

照射時間 (min)	測定結果 (%)					
	I ⁻	I ₃ ⁻	I ₂	IO ₃ ⁻	その他の ヨウ素種	CH3I
2	ND	ND	78.7	18.8	7.5	ND
5	ND	ND	50.4	36.6	13.0	ND
10	ND	ND	19.2	71.7	9.1	ND
20	ND	ND	0.3	98.2	1.5	ND

*ND: 検出されず

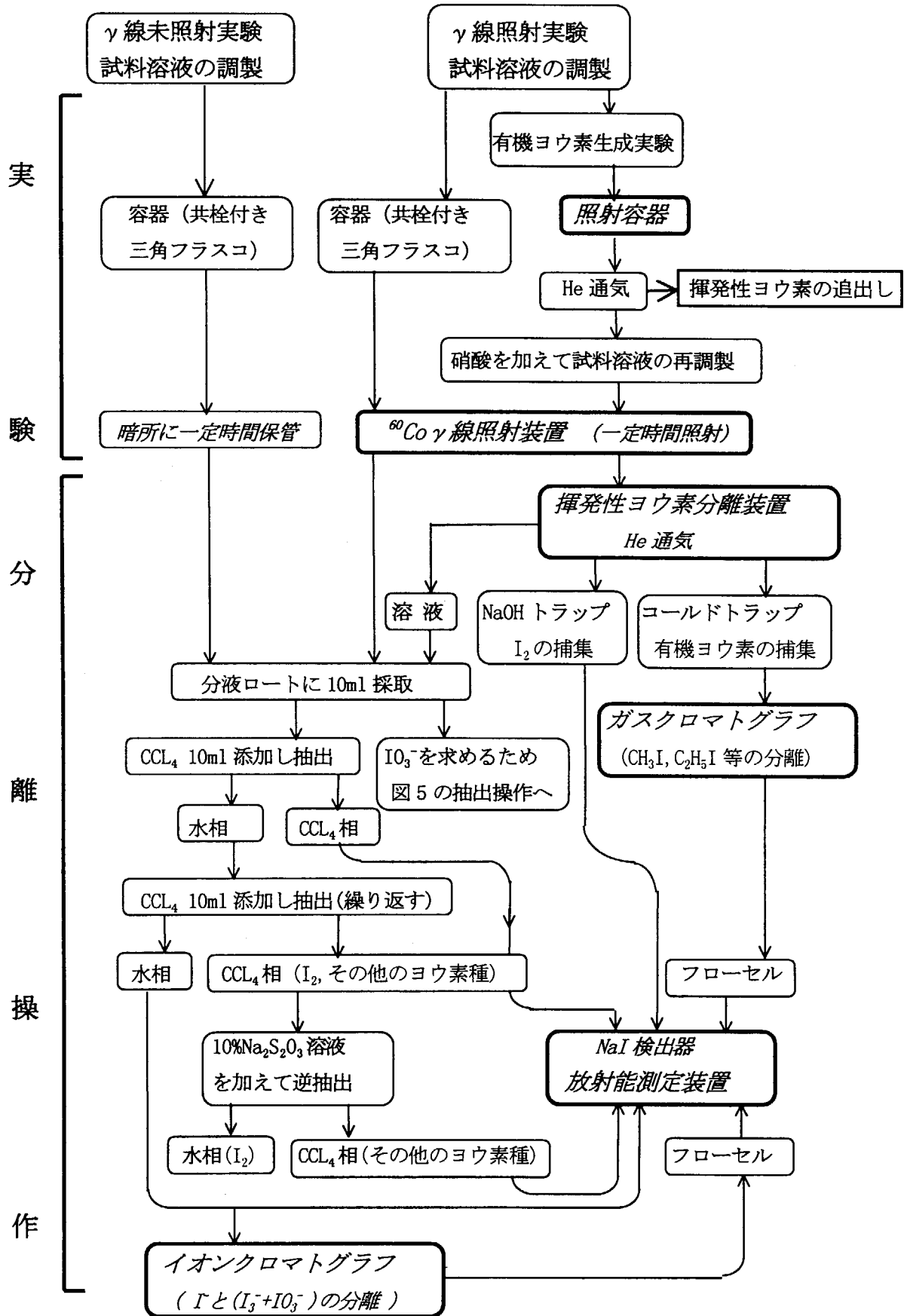


図1 実験の流れと装置の関係

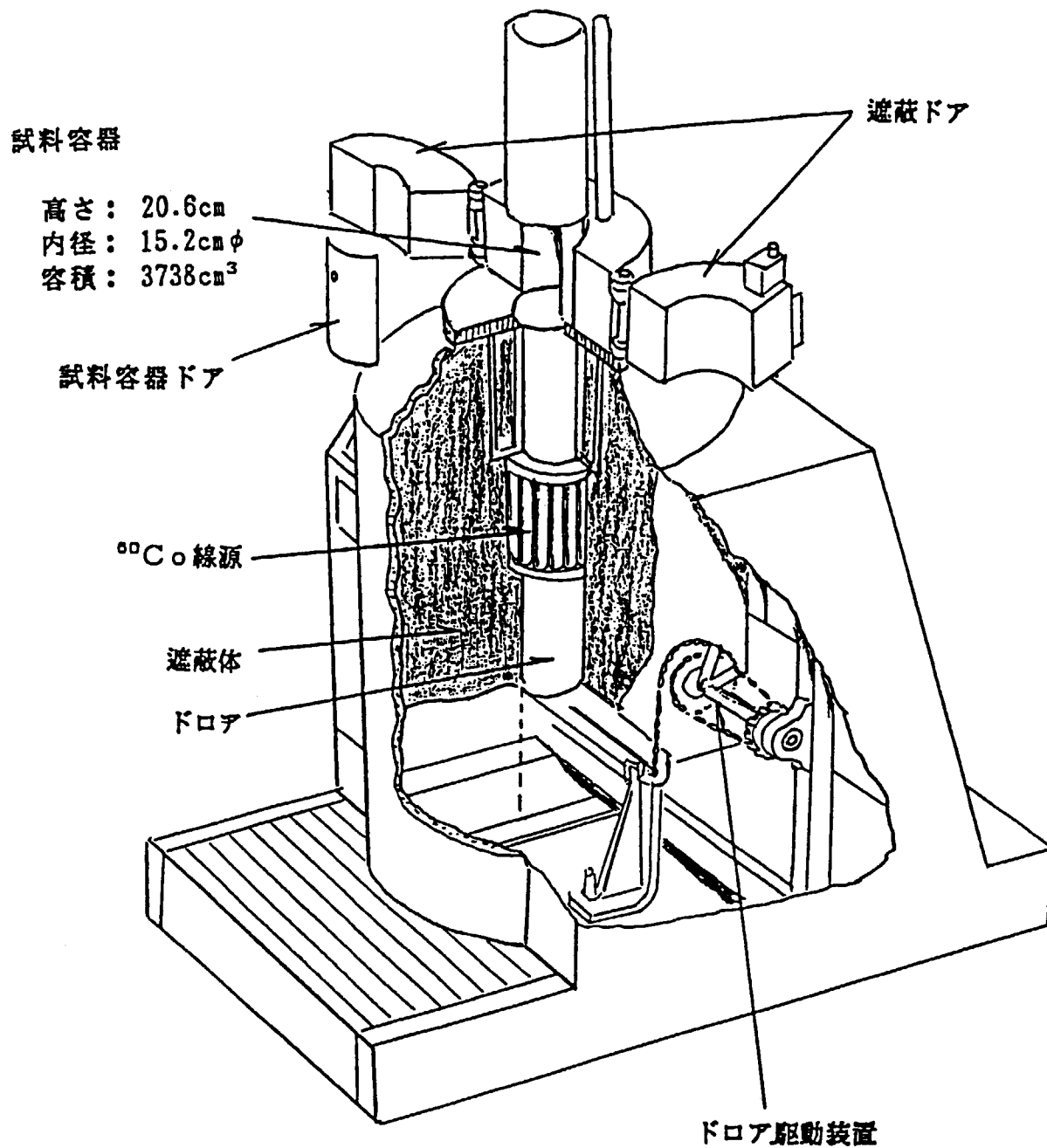


図2 γ線照射装置

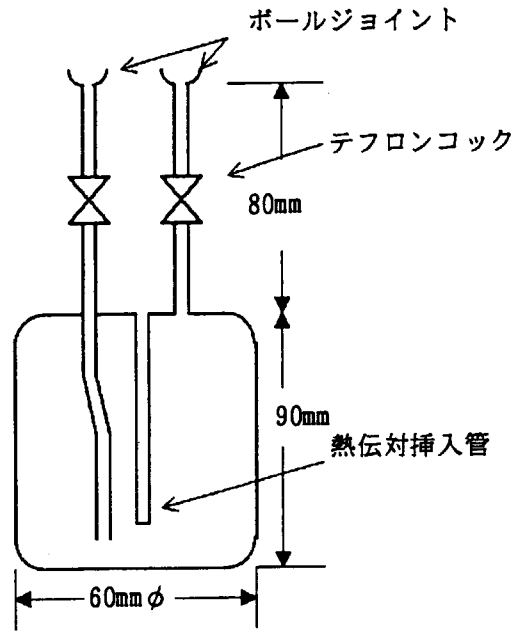


図3 照射容器

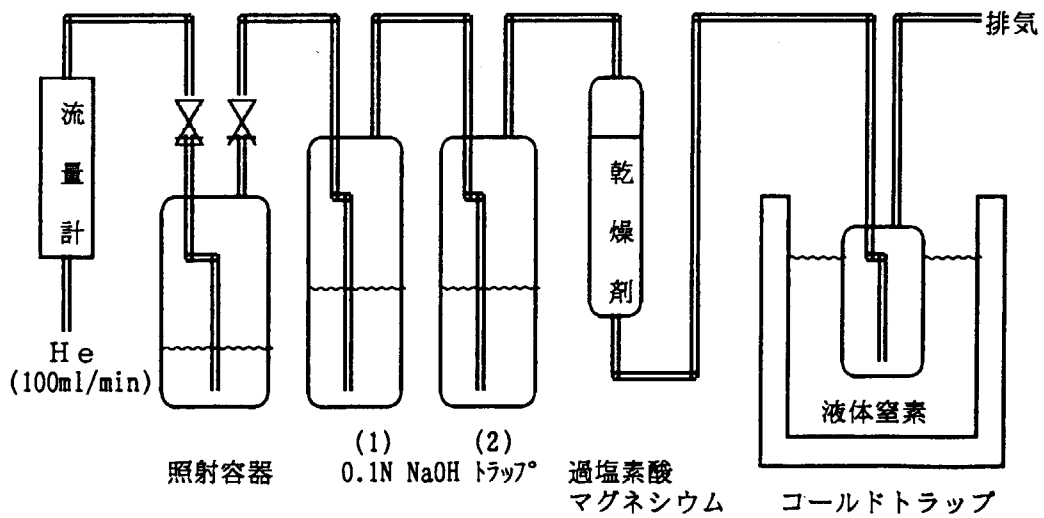


図4 揮発性ヨウ素分離装置

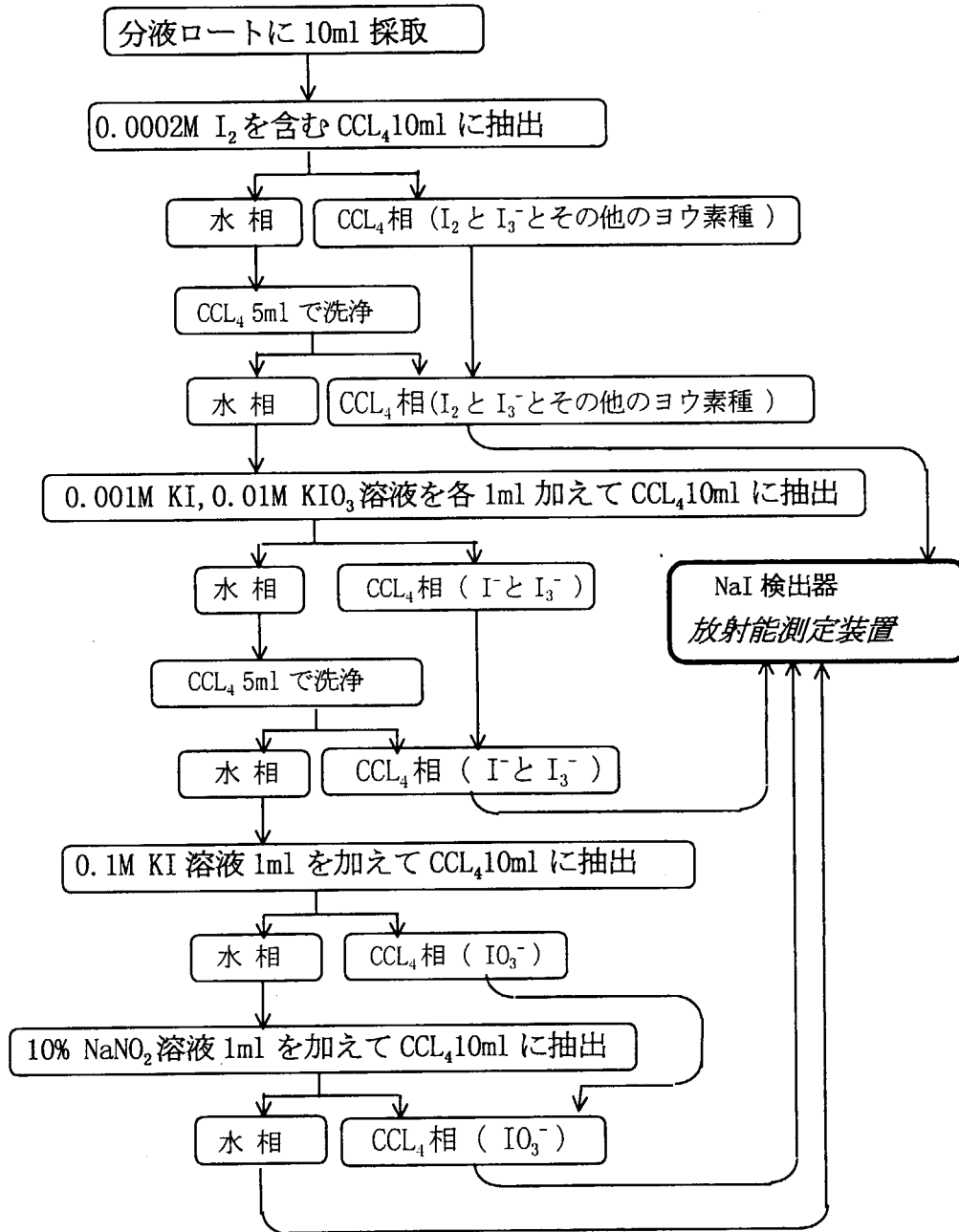


図 5 IO_3^- を求めるための抽出操作

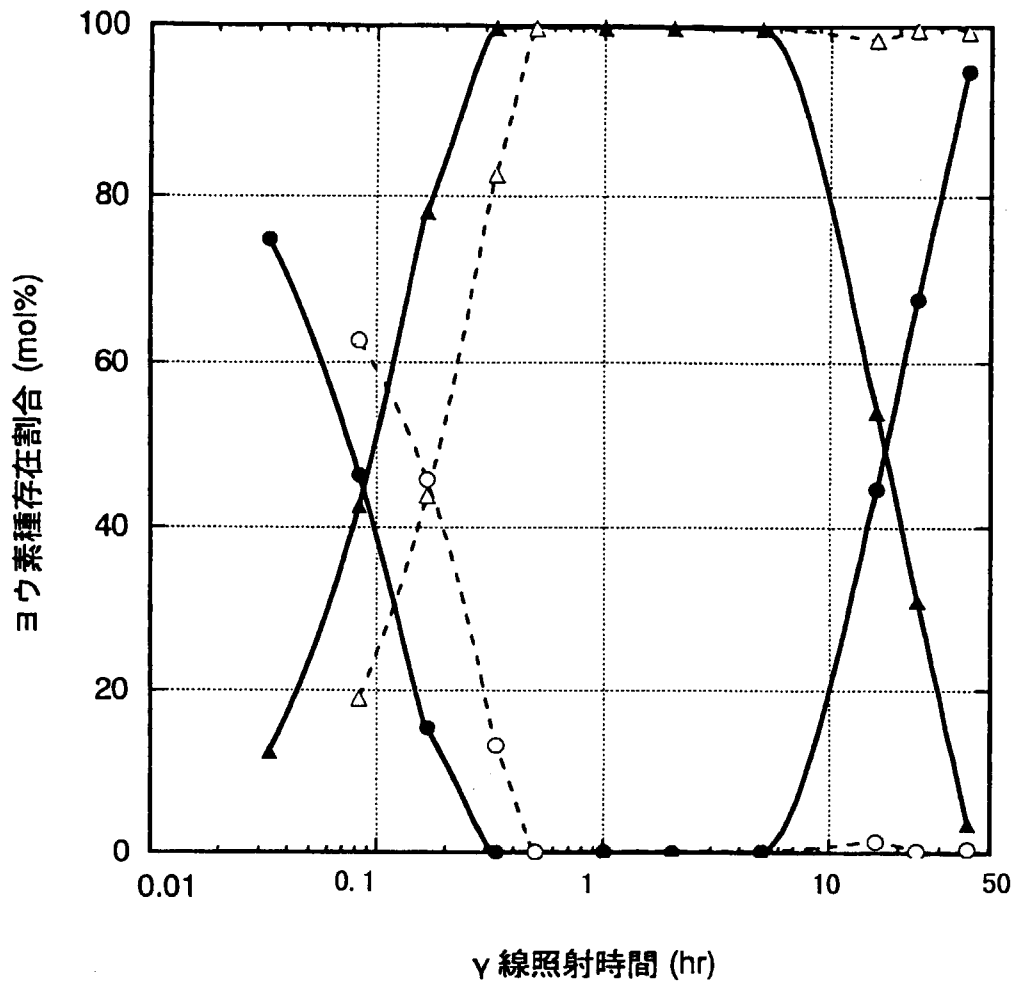


図6 γ線照射時間とヨウ素種存在割合の関係

全ヨウ素濃度 = 1×10^{-4} M

硝酸濃度 : 1 M、○ : I₂、△ : IO₃⁻

硝酸濃度 : 3 M、● : I₂、▲ : IO₃⁻

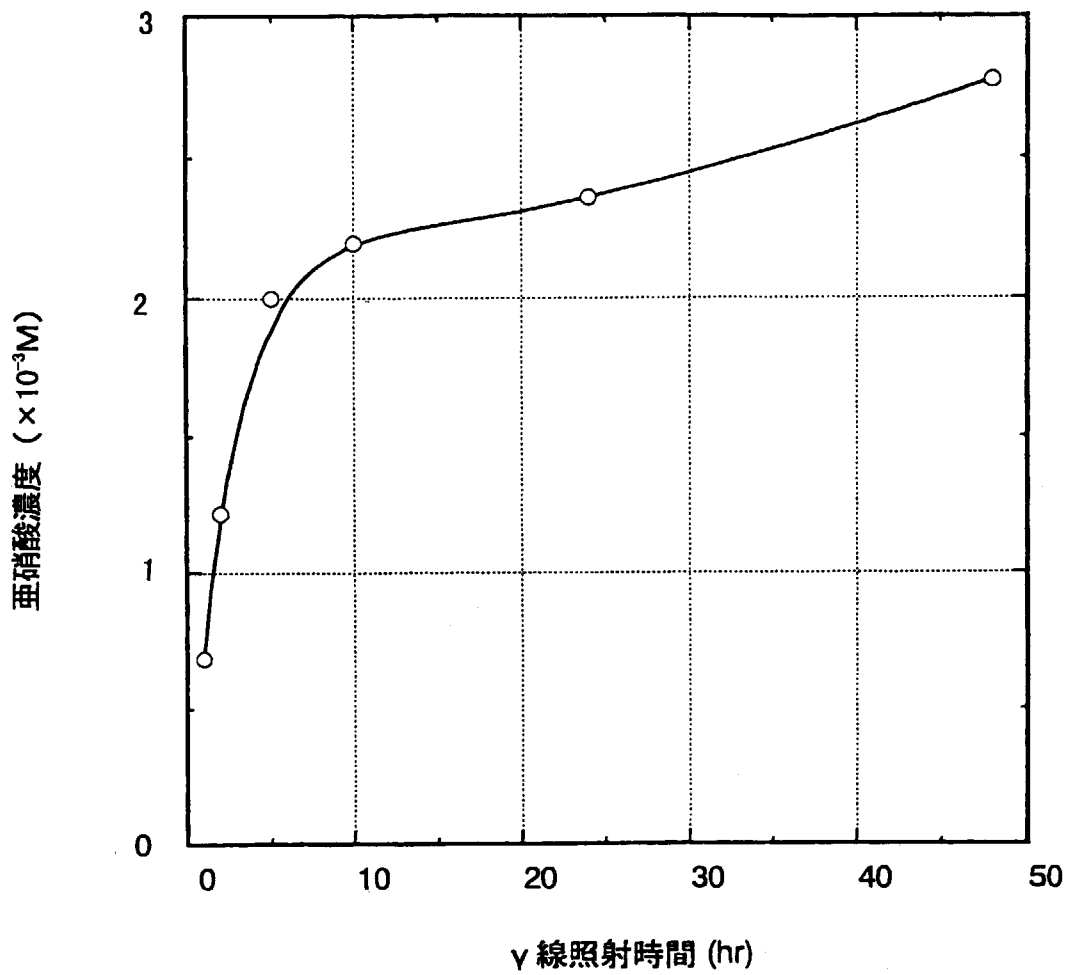


図7 γ 線照射時間と亜硝酸生成の関係

全ヨウ素濃度 : $1 \times 10^{-4} \text{ M}$

硝酸濃度 : 3 M

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J

1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m

1 b = 100 fm = 10⁻²⁸ m

1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa

1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²

1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq

1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg

1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy

1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s(N·s/m²) = 10 P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St(ストークス)(cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ¹⁹	1.63377 × 10 ²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

- 1 cal = 4.18605 J (計量法)
 = 4.184 J (熱化学)
 = 4.1855 J (15 °C)
 = 4.1868 J (国際蒸気表)
- 仕事率 1 PS (仏馬力)
 = 75 kgf·m/s
 = 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

Y線照射下における硝酸溶液中のヨウ素種存在割合の測定

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています。