

JAERI-Tech
2000-055



JP0050830



ホルミウム-166m 線源の調製

2000年9月

岩本 清吉・竹内 紀男・小野間 克行・根本 正弘*

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。

入手の問い合わせは、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、お申し越してください。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, 2000

編集兼発行 日本原子力研究所

ホルミウム-166m 線源の調製

日本原子力研究所東海研究所研究炉部
岩本 清吉・竹内 紀男・小野間 克行・根本 正弘*

(2000年8月4日受理)

放射能測定のための二次標準器として使用される電離箱の長期安定性を確認するために、従来のRa-226に代わる、半減期1200年のHo-166m基準線源を開発した。

照射した酸化ホルミウムの粉末を塩化ホルミウム ($^{166m}\text{HoCl}_3$) 溶液とし石英ガラス容器に小分けし、乾燥および焼結作業により再び化学的に安定な酸化ホルミウム ($^{166m}\text{Ho}_2\text{O}_3$) に転換した後ステンレス容器に封じ込め、さらにチタンカプセルに入れてプラズマ溶接を行い完全に密封化した。こうして放射能約1.2MBq、放射性核種純度99.4%の基準線源(150φ×270mm)10個の調製に成功した。

報告では原子炉照射後のターゲット分析、ターゲット溶解と線源調製、線源の密封化試験および放射能測定について述べる。

Preparation of Holmium-166m Sealed Source

Seikichi IWAMOTO, Norio TAKEUCHI, Katsuyuki ONOMA and Masahiro NEMOTO *

Department of Research Reactor
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 4, 2000)

The Ho-166m reference sources having a half-life of 1200 years, to be replaced with the conventional Ra-226, have been developed for the purpose of monitoring long term stability of ionization chambers used for the secondary standard instrument of radioactivity measurements.

The powder of irradiated holmium oxide (Ho_2O_3) was dissolved to the holmium chloride solution (HoCl_3) and subdivided into the small fused silica containers. The solutions were converted to the chemically stable holmium oxide again by drying and sintering process and they were contained in the stainless steel inner capsules which were further sealed in the titanium outer capsules completely by plasma welding. Ten sealed reference sources ($15\phi \times 27\text{mm}$) of radioactivity of around 1.2 MBq and radionuclidic purity of 99.4% for each were successfully prepared in this method.

In the present report, the procedures of target analysis after reactor irradiation, dissolving of the target and preparation of the sources, sealing test of capsulation and radioactivity measurement are described.

Keywords : Sealed Source, Holmium-166m, Ionization Chamber, Reference Source

* Tokyo Nuclear Service Co., Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. ターゲットの製作	2
3. 原子炉照射とターゲット分析	2
3.1 原子炉照射と生成量評価	2
3.2 放射性核種純度と生成量測定	3
4. ターゲット溶解と線源調製	4
4.1 ターゲット溶解	4
4.2 電気炉による蒸発乾固および乾燥、焼結	4
4.3 線源の密封化	5
5. 線源の密封化試験	6
5.1 等級試験	6
5.2 漏出試験	6
6. 放射能測定	7
7. まとめ	8
謝辞	8
参考文献	8

Contents

1. Introduction	1
2. Target Preparation	2
3. Reactor Irradiation and Target Analysis	2
3.1 Reactor Irradiation and Yield Evaluation	2
3.2 Radionuclidic Purity and Yield Measurement	3
4. Target Dissolution and Source Preparation	4
4.1 Target Dissolution	4
4.2 Evaporation, Solidification, Drying and Sintering by Electric Furnace	4
4.3 Source Sealing	5
5. Sealing Test of the Sources	6
5.1 Classification Test	6
5.2 Leakage Test	6
6. Radioactivity Measurement	7
7. Summary	8
Acknowledgement	8
References	8

1. はじめに

アイソトープ開発室では γ 線スペクトル測定装置の校正用線源としてホルミウム-166m線源の開発を行ってきた。ホルミウム-166mは半減期が1200年と非常に長く、また80keVから800keVにわたって多数の γ 線を放出するのでマルチガンマ線源として低・中エネルギー領域の校正に有効な核種である。

当室では純粋なホルミウム-166mの生成をめざし、ターゲットの選定と原子炉照射の検討、照射済試料のイオン交換分離による化学処理技術の開発をすすめてきた。この開発により放射核種純度99.4%の塩化ホルミウム溶液($^{166\text{m}}\text{HoCl}_3$)を得ることに成功した。さらにこの溶液を放射能絶対測定法である $4\pi\beta-\gamma$ 同時計数測定法で測定し、プラスチック製コイン状密封校正線源として開発し頒布してきたところである。

一方日本における標準測定機関である電子技術総合研究所では「放射能トレーサビリティの確立」のための研究がすすめられ、放射能二次標準器として高気圧型電離箱システムの開発が行われている。このシステムに使用する基準線源として単純な β 崩壊で化学的に安定な放射性核種としてホルミウム酸化物($^{166\text{m}}\text{Ho}_2\text{O}_3$)が注目され開発検討対象となっている。従来、電離箱の線源としてはラジウム線源(Ra-226)が広く用いられてきたが、 γ 線エネルギーの高い成分が多く被曝するなど扱いにくいこと、9段階の崩壊を経て安定な鉛になるがその途中で希ガスであるラドン(Rn-222)を発生しその漏洩が問題になるなどの欠点をもっていたことも新たな線源開発を必要とする背景となっていた。1)

こうした背景から当室では今までの技術を基に化学的に安定な酸化ホルミウム線源($^{166\text{m}}\text{Ho}_2\text{O}_3$)の開発を進めてきたところである。

照射した酸化ホルミウム粉末は飛散による汚染防止と均一に溶解するために塩化ホルミウム($^{166\text{m}}\text{HoCl}_3$)溶液とした。この溶液を石英ガラス容器に小分けし、電気炉を用いて蒸発乾固および乾燥、焼結作業を行い、再び化学的に安定な酸化ホルミウム($^{166\text{m}}\text{Ho}_2\text{O}_3$)に転換させた。次に焼結した酸化ホルミウム入り石英ガラス容器をステンレス製インナーカプセルに封じ込め、さらにチタン製 OUTERカプセルに挿入し、プラズマ溶接によって完全に密封化した。こうして放射能約1.2MBq、放射性核種純度99.4%の基準線源を10個調製することに成功した。なおこの開発に用いたホルミウム試料は研究炉JRR-2で1年間、長期照射したものである。

従ってここにその概要をまとめ今後の参考に寄与したいと考えるものである。

2. ターゲットの製作

ホルミウムは関東化学製酸化ホルミウムを使用し、石英アンブル内に封入した。酸化ホルミウム量は石英アンブル一本あたり約 100mgとした。この石英アンブルを溶封後、アルミ箔で巻きアルミカプセルに挿入した。カプセルはヘリウムガスで置換した後、電子ビーム溶接を行った。ヘリウムガス置換、溶接作業、健全性試験であるHe漏洩検査、X線検査等は原研技術部工作課において実施した。

こうして製作したターゲットは総数 3本であり、1991年に 1本、1993年に 2本である。ターゲットの酸化ホルミウム量は以下のとおりである。

受付日	受付番号	カプセル名称	工作課作番	試料量(Ho ₂ O ₃)
1991.5	J-7303	V1R-60	RM-4419	109.0 mg
1993.1	225	V1R-61	RM-4632-1	127.5
1993.1	226	V1R-62	RM-4632-2	105.1

3. 原子炉照射とターゲット分析

3. 1 原子炉照射と生成量評価

照射は東海研究所 JRR-2 の中央実験孔 VT-1 を利用した。当時 JRR-2 は 1 サイクル 265.5 時間で年間 10 サイクルの運転を行っていた。第一回の照射は 1991 年 5 月より開始し 1992 年 12 月に照射終了した。また第二回目は 1993 年 1 月に照射開始し、12 月に終了した。この二回目にはターゲット 2 本を同時に照射した。

照射時間は一回目、二回目とも同じく 10 サイクルで総時間数 2655 時間であった。

第一回目の期間が長引いたのは照射途中において原子炉冷却系の故障が発生し、その修理のため約一年間休止が余儀なくされたためである。

原子炉照射による生成量評価は、ホルミウム-166m が $^{165}\text{Ho}(n, \gamma)^{166\text{m}}\text{Ho}$ の核反応によって生成されるので以下のように求められる。2), 3), 4)

$$A = Nf\sigma \left\{ 1 - (1/2)^{t/T} \right\}$$

A : 照射終了時における放射能

N : ターゲット中に存在する放射化対象核種原子数

$$N = a n / 100$$

(a : 対象核種の同位体存在度 (%)、n : 対象核種を含む元素の原子数)

f : 線束密度 ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)

σ : 核反応断面積 (b)

t : 照射時間

T : 半減期

^{165}Ho の存在比 100%

このようにして求めた生成量は酸化ホルミウム 100mg に対し約 6MBq 程度となった。

3. 2 放射性核種純度と生成量測定

照射直後の放射線量は長時間照射のため高く JRR-2 の使用済燃料貯蔵プールにおいてそれぞれ数カ月冷却した後アイソトープ製造棟へ搬入した。その後カプセルを開封し石英サンプルを取り出し貯蔵箱で保管した。

この時点でホルミウム-166m を抽出しようとするれば、不純物除去のため化学処理の必要性があったが、さらに冷却期間を置くことにした。このため第一回目の照射試料は1993年 5月より、第二回目照射の 2本については1994年 3月よりそれぞれ貯蔵保管し、実際に線源調製作業を開始したのが2000年 3月である。この結果数年間の冷却期間をおいたことになり、短・中寿命の放射性核種が消滅した。

放射性核種純度の測定は γ 線スペクトル測定装置を用いて行った。Fig.1 に示すように γ 線スペクトル測定装置による測定ではコバルト-60 およびユーロピウム-154の他に不純物は確認されなかった。これらコバルト-60 およびユーロピウム-154の存在割合はそれぞれ 0.14%、0.43% と極めて少なく測定上、問題にならない値であった。

またホルミウムの生成量は電離箱で測定した。測定結果は下記の通りである。前 3. 1 項の生成量評価の計算値と比較してみると同じオーダーでありほぼ評価どおりであるといえる。

試料	測定値	放射能量	校正定数
試料 1 (試料番号47)	7.33	4.002 MBq	0.546
試料 2 (試料番号48)	6.99	3.817	※溶液および
試料 3 (試料番号49)	9.02	4.925	ガラスの場合

電離箱測定時設定ダイヤル：500 (303室#3セル, at 3/13.10:50)

校正定数については資料 1参照

電離箱：キャピンテック製 CRC-15R

4. ターゲット溶解と線源調製

4. 1 ターゲット溶解

照射済酸化ホルミウムは粉末状態で石英アンブルに入っており、このままの状態では石英アンブルを切断すれば飛散による汚染の懸念があった。このためコールド試験を行った結果、石英アンブルをポリビンに挿入しポリビンをペンチで啜え押しつぶす方式を採用した。この方式により外部に酸化ホルミウムの粉末が飛散する懸念がなくなり汚染の心配もなくなった。

こうして押しつぶし粉末状態の酸化ホルミウムの入ったポリビンに塩酸を注入した。この操作により酸化ホルミウムは化学反応を生じ溶解し塩化ホルミウム溶液となった。この処理によって粉末状態から液体となり飛散する恐れがなくなった。加える塩酸濃度はコールド試験の結果、酸化ホルミウムが最も溶解する 3モル溶液とした。塩酸を加え24時間放置後溶液はピンク色状態に変わり、コールド試験で溶解が確認された状態と同色になったことを確認した。

この溶液を一部採取して電離箱で測定し放射能濃度を求めた。放射能濃度より線源の放射能強度を決定し、石英容器へ分ける作業を行った。線源一個の放射能強度を 1.2MBq と決め、溶液量 0.275ml で 9個、残量で 1 個の計10個に配分した。

4. 2 電気炉による蒸発乾固および乾燥、焼結

石英容器に小分けした塩化ホルミウム溶液を蒸発乾固させ、さらに塩化ホルミウムから再び酸化ホルミウムにするための焼結作業についてコールド試験を繰り返し行い最適条件を求めた。使用した電気乾燥炉の能力は 2kW (100V×20A)、最高使用温度1100℃、温度コントローラの最小調整範囲は 0.1℃である。

今回のホルミウム-166m は半減期が1200年と非常に長いため使用機器が汚染しないことを重点に考慮し、Fig. 2に示すように石英ボードに塩化ホルミウムの入った石英容器を乗せ石英燃焼管に入れる方式とした。これはホルミウム試料が蒸発乾固や焼結作業時に、放射性ガスとなった状態でも外部に漏洩しない構造としたからである。

4. 2. 1 コールド試験

コールド試験では、試料の蒸発、乾固、焼結作業を繰り返し行っても試料が突沸しない最適条件を求めた。

1) 蒸発乾固

試料の蒸発、乾固作業時に少量でも水分が閉じ込められてしまうと次の段階の乾燥、焼結作業時でさらに温度を上げたときに試料中に残った水分が逃げようとしていわゆる水蒸気爆発が起き、その結果突沸現象を生じさせる。このため蒸発、乾固させるときは完全に試料中の水分を取り除くことが大事である。コールド試験の結果、試料を 110℃～150℃ の温度で蒸発、乾固させることにより水分が完全に取り除かれることを確認できた。

2) 乾燥

試料を蒸発乾固させた後、長時間同じ温度で放置しておくで試料の表面が固まる。この固まった状態で試料の温度を上げると固まった部分がフタとなり突沸することがある。今回のコールド試験でもこうした突沸現象が何回か生じた。このため試料をある程度蒸発乾固し水分が無くなった時点ですみやかに昇温し、次の乾燥作業を行うことが必要である。

具体的には前項の条件で 1時間程度蒸発乾固させた試料を 200℃に昇温して引き続き乾燥作業に入ることである。蒸発乾固させた試料は全体的に鉛色であるがこの鉛色が無くなるまで乾燥することが突沸させない条件である。

3) 焼結

前項で述べたように充分蒸発乾固および乾燥させた試料では突沸現象は殆ど起きないので、温度を一気に 550℃に上げて行った結果、問題はなく焼結作業が終了した。この焼結作業により塩化ホルミウムは化学的に安定な酸化ホルミウムの状態になった。なお吸引ポンプの吸引流量は空気の流れが確認できる最小限の流量に設定した。

4. 2. 2 ホット作業

コールド試験結果をふまえて Fig. 3, 4に示すようにホット作業を実施した。

1) 蒸発乾固および乾燥

塩化ホルミウム溶液を石英容器に小分けしものを 150℃で 1時間蒸発乾固させた。次に 200℃で約 2時間程乾燥させ塩化ホルミウム試料の鉛色が無いことを確認し、引き続いて 250℃、300℃で各々30分程乾燥作業をつづけた。

2) 焼結

乾燥作業を終了した塩化ホルミウム試料を 550℃で30分間焼結作業を行った。焼結作業終了後のサーベイにより石英燃焼管内に微小の汚染が認められた。このため石英燃焼管を洗浄し除染した。他に汚染はなく順調に焼結作業を終了することができた。

4. 3 線源の密封化

Fig. 5, 6, 7 に示すように石英容器には化学的に安定な酸化ホルミウムが焼結されており、この石英容器をステンレスインナーカプセルに挿入し、上部へアルミナ粉末を充填させた後、上蓋をねじこみ密封化した。さらにこれをチタン製のアウトカプセルに挿入し、プラズマ溶接によって完全に密封化した。

なおアウトカプセルの側面には印字機を使用し、製品番号、等級、元素記号、放射能量、研究所略号等についての印字作業を行った。

5. 線源の密封化試験

密封化された線源の試験は日本工業規格による「密封放射線源 等級と試験方法（J I S Z 4 8 2 1）」にもとづいて行った。密封線源の等級別試験条件を資料 2で示す。試験内容は等級試験および漏出試験であり以下その試験内容を記す。

5. 1 等級試験

等級試験としてはダミー線源を用いて温度試験、圧力試験、衝撃試験、パンク試験を行いそれぞれの試験終了毎に高温発泡試験を行い健全性を確認した。なお振動試験については行わなかった。従って今回の線源の等級はC-3 4 4 1 4と表示した。5)

5. 1. 1 温度試験

温度試験は等級 3を適用し、線源をドライアイス中で20分間、電気炉で 180℃に昇温し 1時間保持した後変形の有無がないことを目視確認し、高温発泡試験を行った。

5. 1. 2 圧力試験

圧力試験は等級 4を適用し線源に25kPa および 7MPa の絶対圧で 5分間ずつ 2回加圧した後変形の有無がないことを目視確認し、高温発泡試験を行った。

5. 1. 3 衝撃試験

衝撃試験は等級 4を適用し線源に 2kgの鋼製ハンマを 1mの高さから落下させた後変形の有無がないことを目視確認し、高温発泡試験を行った。

5. 1. 4 パンク試験

パンク試験は等級 4を適用し線源に50g のピン付けハンマを 1mの高さから落下させた後変形の有無がないことを目視確認し、高温発泡試験を行った。

5. 2 漏出試験

漏出試験は放射能に着目した試験として湿式ふきとり試験、煮沸浸せき試験、室温浸せき試験を行った。また放射能によらない試験として高温液体発泡試験を行った。

5. 2. 1 湿式ふき取り試験

線源カプセルの外部表面をアルコール液で湿らしたガーゼをもちいて十分に拭き取り放射能を測定した。この結果いずれの線源においても汚染は認められなかった。

5. 2. 2 煮沸浸せき試験

線源カプセルを 100℃の温水で10分間煮沸した後、常温の水で冷却し再び 100℃の温水で10分間煮沸する操作を 3回繰り返した。こうした操作後、使用した温水の放射能を測定した。この結果放射能漏洩は認められなかった。

5. 2. 3 室温浸せき試験

線源カプセルを常温水に浸せきし 168時間（7日間）以上放置した。その後浸せきした常温水の放射能を測定した結果、放射能漏洩は認められなかった。

5. 2. 4 高温液体発泡試験

線源カプセルを90℃以上の水槽に液面下 5cm以上の深さに浸せきし、線源カプセルからの発泡の有無を 1分間以上観察した。この結果いずれの線源においても発泡は無いことを確認した。

6. 放射能測定

密封化試験に合格したのち電離箱で放射能を測定した。結果は以下のとおりである。

試料No	測定値	放射能量	校正定数
99201	1.899	1.225 MBq	0.645 ※チタンの場合
99202	1.971	1.271	
99203	1.986	1.281	
99204	1.99	1.284	
99205	1.786	1.152	
99206	1.884	1.215	
99207	1.945	1.255	
99208	1.687	1.088	
99209	2.01	1.296	
99210	0.744	0.480	

電離箱測定時設定ダイヤル：500（303室#3:at4.19,15:50）

電離箱：キャピンテック製 CRC-15R

なお前3. 2項のターゲットの生成量測定値をもとに回収率を計算すると 92.6 %であり充分回収できたと評価できる。

7. まとめ

電離箱の基準線源として従来のラジウム-226線源に替わり、半減期が1200年という長寿命核種であり且つ化学的に安定な酸化ホルミウム-166m の線源開発に成功したことは、今後のトレサービリティ確立にとって大きく寄与できるものであると考える。

しかもホルミウム-166m が研究炉で長期間照射した国産試料であり、この試料の比放射能値が46MBq/g. Hoと市販されている外国製品の 33MBq/g. Ho と比べても高く良質の製品であると評価でき、この点も意義があるといえよう。

今後は開発した酸化ホルミウムを用いて γ 線スペクトル測定装置用の校正線源調製が次の目標になると考える。しかし放射線測定分野における基準線源調製やトレサービリティ確立の課題はアイソトープ製造技術を持ち、さらに $4\pi\beta-\gamma$ 同時計数測定法などの絶対測定技術を基礎とした測定技術の維持なしには不可能である。これら一連の技術が今後とも途絶えることのないよう願うものである。

謝辞

線源調製にあたりターゲット製作でご指導頂いた照沼久寿男氏（（財）放射線利用振興協会）、ターゲットの処理方法でご助言頂いたアイソトープ開発室製造開発課の小林勝利氏、本石章司氏、反田孝美氏、プラズマ溶接作業を担当して頂いた東京ニュークリアサービス株式会社の河内幸正氏、藤枝一也氏、鈴木一寿氏各位に感謝致します。

またホルミウム試料を長期にわたって照射管理して頂いた研究炉部利用課および旧JRR-2管理課関係者各位に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 桧野良穂他：Ho-166m 基準線源の作成と標準電離箱システム
第35回理工学における同位元素研究発表会要旨集 p75, 1998
- 2) アイソトープ手帳 改定9版 日本アイソトープ協会
- 3) 放射線データブック 地人書館
- 4) Table of Radioactive Isotopes, 1986 by John Wiley & Sons, Inc.
- 5) 日本工業規格 密封放射線源 等級及び試験方法 JIS Z 4801, (1999)

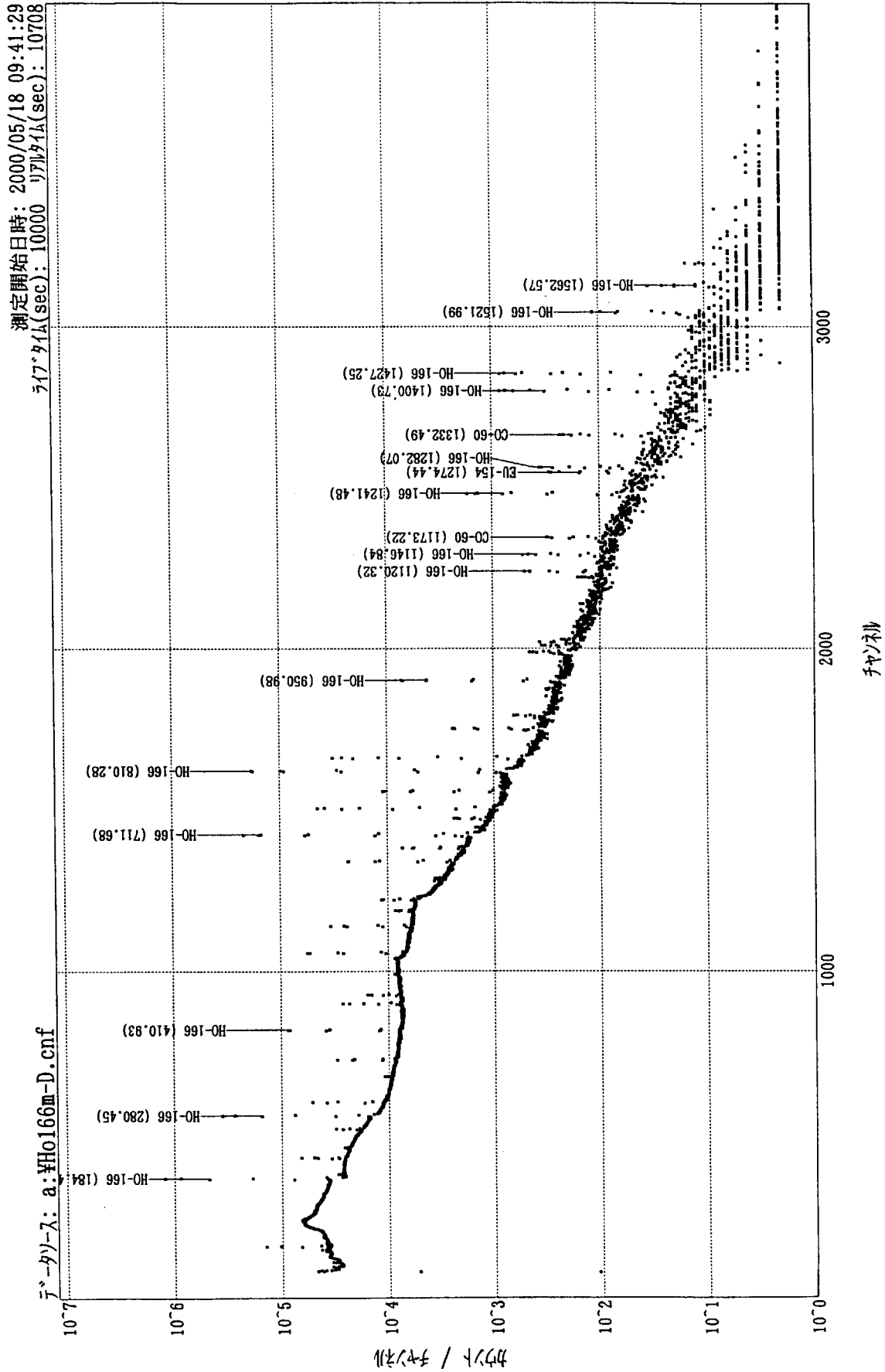


Fig.1 γ 線スペクトル測定装置による照射試料測定データ

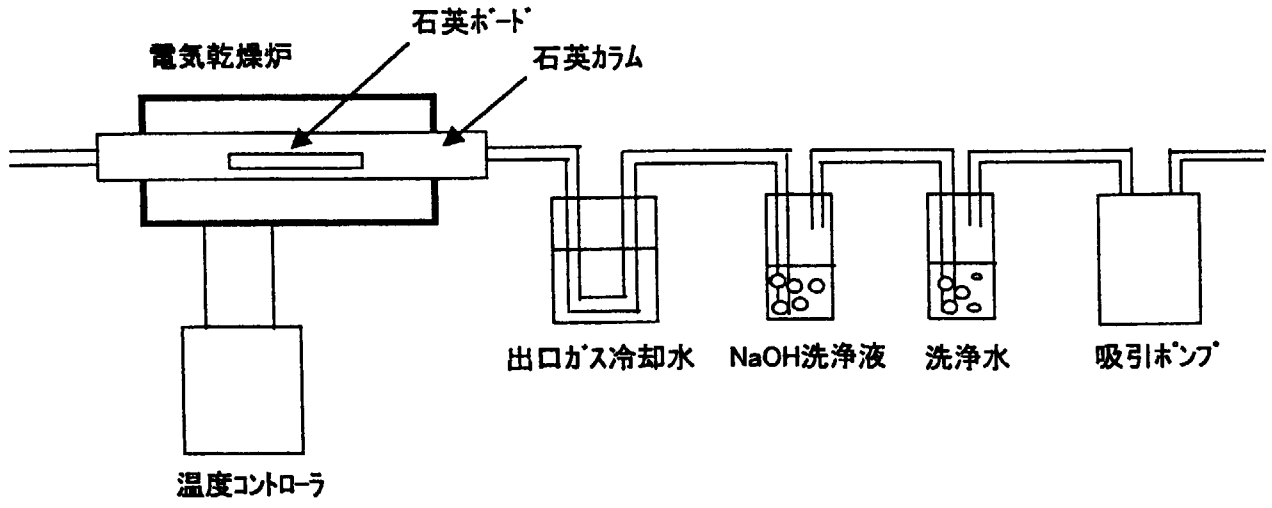


Fig. 2 電気炉による蒸発乾固および乾燥、焼結作業構成図

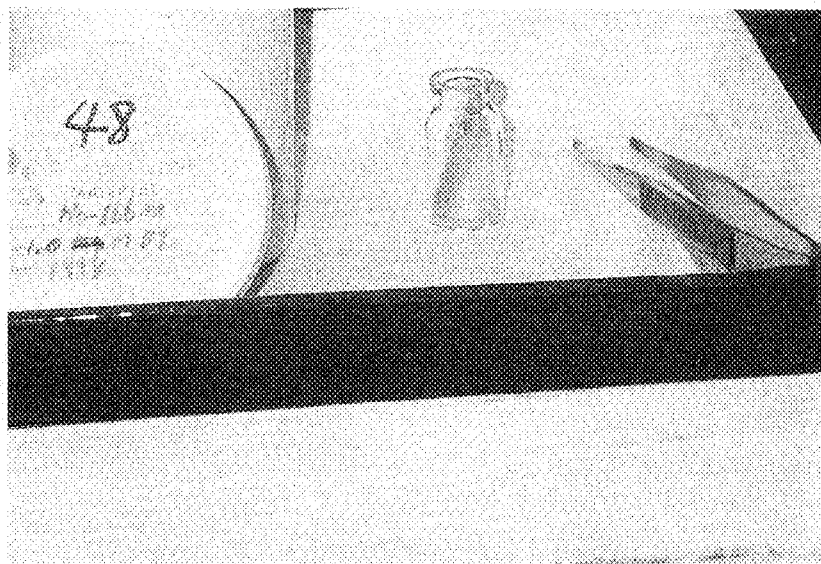


Fig. 3 照射済石英アンプル

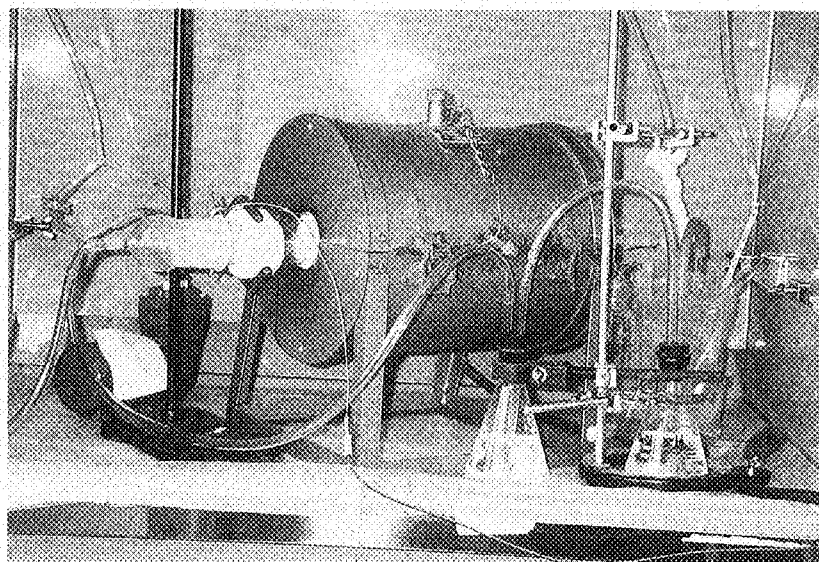


Fig. 4 電気炉による乾燥・焼結

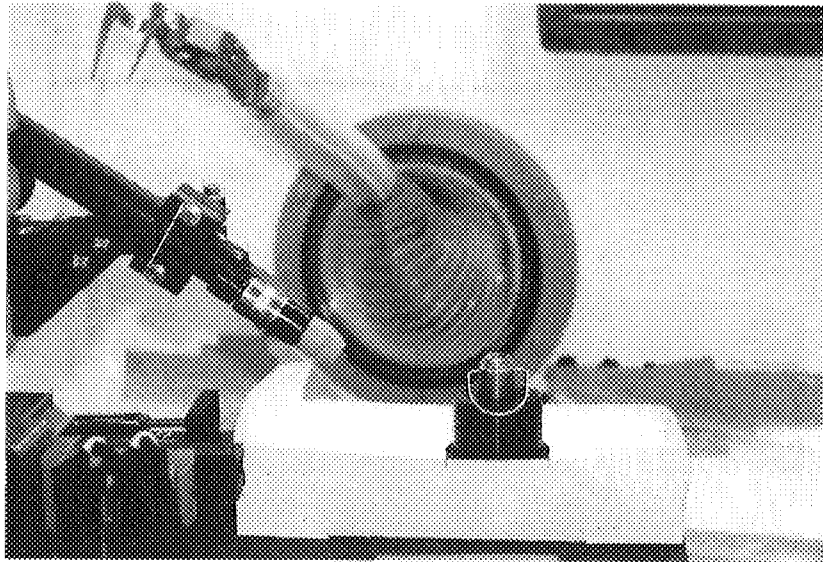


Fig.5 プラズマ溶接

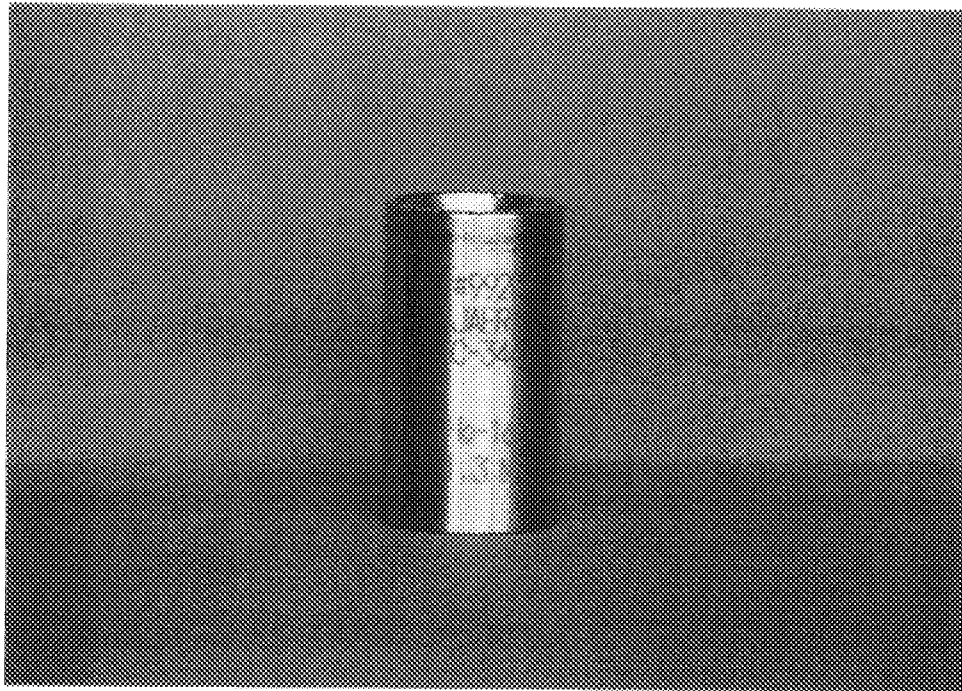
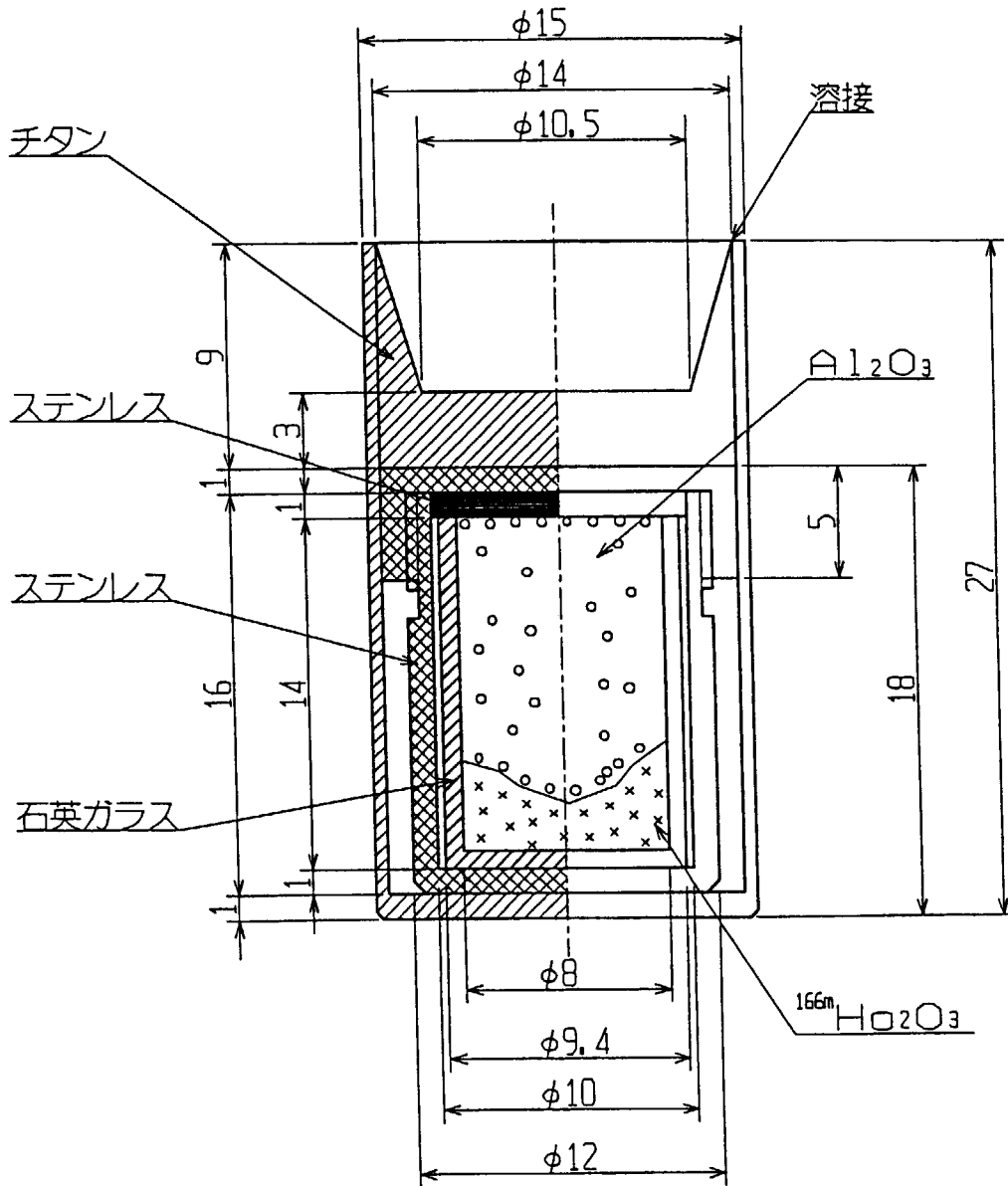


Fig.6 Ho-166m線源

Ho-166m密封線源



単位 : mm

Fig.7 ホルミウム線源寸法図

付録

資料1 電離箱 (CRC-15R) におけるホルミウム-166m の校正定数決定について

キャピンテック社製電離箱 (CRC-15R) の校正定数は名古屋大学の協力を得て次のようにして求めた。2)

- ①まず 数MBq/g の塩化ホルミウム溶液を準備しこれを原液とする
- ②この原液から約 2mlをガラスバイアル (通称名: ペニシリン瓶) に採取し正確な重量を測定する
- ③同じくこの原液から約 100倍の希釈液をつくる
- ④希釈液から約10mgの溶液を採取、精秤した後乾燥させる
- ⑤ $4\pi\beta-\gamma$ 同時計数法により放射能絶対測定をおこない放射能濃度を求める
(今回は不確かさ 0.3% で放射能濃度を求めることが出来た)
- ⑥前②項のガラスバイアル中の放射能値を原液の正確な採取量、希釈後の放射能濃度、および希釈倍率から求める
- ⑦前②項のガラスバイアルの放射能をキャピンテック社製電離箱 (CRC-15R) にて測定する
- ⑧前⑥項、⑦項の測定結果からガラスバイアル入りの溶液の場合の校正定数を求める
- ⑨ステンレスおよびチタンの二重容器の場合も前⑦項と同様にして測定し校正定数を求める
- ⑩以上のようにして以下のように校正定数を得た

ガラスバイアル入り溶液の場合	0.645
ステンレス、チタン二重容器 入り溶液の場合	0.546

資料2 密封線源の等級別試験条件 (JIS Z 4801)

Z 4821 : 1999

付表1 密封線源の等級別試験条件

等級	1	2	3	4	5	6	X ⁽¹⁾
試験項目							
温度	無試験	-40 ℃ (20 min) +80 ℃ (1 h)	-40 ℃ (20 min) +180 ℃ (1 h)	-40 ℃ (20 min) +400 ℃ (1 h) 熱衝撃400 ℃→20 ℃	-40 ℃ (20 min) +600 ℃ (1 h) 熱衝撃600 ℃→20 ℃	-40 ℃ (20 min) +800 ℃ (1 h) 熱衝撃800 ℃→20 ℃	特別試験
圧力	無試験	25 kPa (絶対圧) →大気圧	25 kPa (絶対圧) →2 MPa (絶対圧)	25 kPa (絶対圧) →7 MPa (絶対圧)	25 kPa (絶対圧) →70 MPa (絶対圧)	25 kPa (絶対圧) →170 MPa (絶対圧)	特別試験
衝撃	無試験	1 mから50 g	1 mから200 g	1 mから2 kg	1 mから5 kg	1 mから20 kg	特別試験
振動	無試験	10 min×3回 25~500 Hz 加速度(1) 49 m/s ² (5G)	10 min×3回 25~50 Hz 加速度(1) 49 m/s ² (5G) 及び50~90 Hz 振幅(p-p値)0.635 mm 及び90~500 Hz 加速度(1) 98 m/s ² (10G)	30 min×3回 25~80 Hz 振幅(p-p値)1.5 mm 及び80~2000 Hz 加速度(1) 196 m/s ² (20G)	— ⁽²⁾	— ⁽²⁾	特別試験
バンク	無試験	1 mから1 g	1 mから10 g	1 mから50 g	1 mから300 g	1 mから1 kg	特別試験

注(1) 最大加速度

(2) 等級5及び等級6の試験条件はなく、等級4が最も厳しい試験条件である。

(3) この表に掲げられた試験条件以外の試験が行われた場合は、等級Xで示し、行われた試験条件を9.に示す試験成績書に記載する。

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	
光強度	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GSTローム	Å
バ	b
バ	bar
ガ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラ	rad
レ	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m

1 b = 100 fm = 10⁻²⁸ m²

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、ヘクト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

ホルミウム-166m 線源の調製