

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6358751号
(P6358751)

(45) 発行日 平成30年7月18日(2018.7.18)

(24) 登録日 平成30年6月29日(2018.6.29)

(51) Int.Cl.		F I			
G 2 1 G	4/08	(2006.01)	G 2 1 G	4/08	T
G 2 1 G	1/10	(2006.01)	G 2 1 G	1/10	
G 2 1 K	1/093	(2006.01)	G 2 1 K	1/093	F

請求項の数 7 (全 18 頁)

(21) 出願番号	特願2014-554301 (P2014-554301)	(73) 特許権者	504151365
(86) (22) 出願日	平成25年12月11日(2013.12.11)		大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構
(86) 国際出願番号	PCT/JP2013/083161		茨城県つくば市大穂1番地1
(87) 国際公開番号	W02014/103712	(74) 代理人	100100549
(87) 国際公開日	平成26年7月3日(2014.7.3)		弁理士 川口 嘉之
審査請求日	平成28年12月12日(2016.12.12)	(74) 代理人	100113608
(31) 優先権主張番号	61/746, 839		弁理士 平川 明
(32) 優先日	平成24年12月28日(2012.12.28)	(74) 代理人	100138357
(33) 優先権主張国	米国 (US)		弁理士 矢澤 広伸
(31) 優先権主張番号	特願2012-288140 (P2012-288140)	(72) 発明者	永嶺 謙忠
(32) 優先日	平成24年12月28日(2012.12.28)		日本国茨城県つくば市大穂1番地1 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構内
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 放射性テクネチウム99m含有物質生成方法及び生成装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

負ミュオンを発生する工程と、
前記負ミュオンをルテニウム試料に照射する工程と、
を有する放射性テクネチウム99m含有物質生成方法。

【請求項2】

前記ルテニウム試料は、金属ルテニウム及びルテニウム化合物のうち少なくとも1つを含む
請求項1に記載の放射性テクネチウム99m含有物質生成方法。

【請求項3】

前記ルテニウム試料は、複数の厚さ4mm以下のルテニウム薄板を重ねたものである、
請求項1または2に記載の放射性テクネチウム99m含有物質生成方法。

【請求項4】

負ミュオンを発生するミュオン発生装置と、
前記ミュオン発生装置で発生した前記負ミュオンを照射されるルテニウム試料の保持装置と、
を備える放射性テクネチウム99m含有物質生成装置。

【請求項5】

前記ルテニウム試料は、金属ルテニウム及びルテニウム化合物のうち少なくとも1つを含む

請求項 4 に記載の放射性テクネチウム 99m 含有物質生成装置。

【請求項 6】

前記ルテニウム試料は、複数の厚さ 4 mm 以下のルテニウム薄板を重ねたものである、請求項 4 または 5 に記載の放射性テクネチウム 99m 含有物質生成装置。

【請求項 7】

前記ミュオン発生装置は、

複数の超伝導コイルを有し、全長 6 m 以上であるミュオン生成ビーム光学系部を備える請求項 4 乃至 6 のいずれか 1 つに記載の放射性テクネチウム 99m 含有物質生成装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

10

【0001】

本発明は、放射性テクネチウム 99m 含有物質生成方法に関する。

【背景技術】

【0002】

放射性テクネチウム 99m (^{99m}Tc : テクネチウム 99 核異性体) は、半減期 6.0 時間であり、ベータ線を出さず、140 keV という測定し易いガンマ線を発生する特性を有する。放射性テクネチウム 99m は、この特性を生かして、核医学という医療の一分野を支える重要な放射線元素であり、骨・腎臓・肺・甲状腺・肝臓など身体各部に対するシンチグラムに用いられている。医用に用いられている全放射性元素のうち、80% が ^{99m}Tc であり、現在、 ^{99m}Tc の国内使用量は、1k 6day-Ci/週 (6day-Ci は、分離・精製施設を出荷してから 6 日後の放射エネルギーを示す) に達する。

20

【0003】

これまで、放射性テクネチウム 99m は、専用原子炉に高濃縮ウラン 135 (^{135}U) を挿入し核分裂反応を起こさせ、その結果生ずる半減期 6.7 時間のモリブデン 99 (^{99}Mo) を作り、 ^{99}Mo がベータ崩壊することで、得られてきた (原子炉法)。他に、高強度低エネルギー陽子加速器を用いて、高濃縮モリブデン 100 の ($p, 2n$) 反応によって得られるが、現時点では、医療に使用されている放射性テクネチウム 99m のほぼすべてが、原子炉法によっている。また、我が国で使用されるすべての放射性テクネチウム 99m は、外国の原子炉施設からの輸入に依存している。

【先行技術文献】

30

【特許文献】

【0004】

【特許文献 1】特開 2011-153827 号公報

【特許文献 2】特開 2010-127825 号公報

【特許文献 3】特開 2001-85200 号公報

【特許文献 4】特開平 10-106800 号公報

【特許文献 5】特開 2011-105567 号公報

【特許文献 6】特開 2011-2370 号公報

【特許文献 7】特開 2008-31048 号公報

【特許文献 8】特許 2857349 号公報

40

【非特許文献】

【0005】

【非特許文献 1】J.M. Cuttler, 31st Ann. Conf. Canadian Nucl. Soc. (2010).

【非特許文献 2】B. Scholten et al., Appl. Radia. Isotopes, 51 (1999) 69.

【非特許文献 3】K. Nagamine, "Introductory Muon Science", Cambridge Univ. Press (2003) 1-208.

【非特許文献 4】H. Miyadera et al., Nucl. Instr. 569 (2006) 713.

【非特許文献 5】T. Suzuki et al., Phys. Rev. C35 (1987) 2212.

【非特許文献 6】The Table of Isotopes (8th edition) eds. R.B. Firestone et al. John Wiley (1996).

50

【非特許文献 7】D.F. Measday, Phys. Report 354 (2001) 243.

【非特許文献 8】M. Lifshitz et al., Phys. Rev. C22 (1980) 2135.

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

近年になって、これまで放射性テクネチウム 99m の親核モリブデン 99 を供給してきた外国の原子炉が老朽化し、運転終了廃止の時期が迫っており、高効率の代替の放射性テクネチウム 99m の生産方法が模索されている。

【0007】

本発明は、放射性テクネチウム 99m 含有物質の生成方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

開示のテクネチウム 99m 含有物質生成方法は、上記課題を解決するために、以下の手段を採用する。

【0009】

第 1 の形態は、負ミュオンを発生する工程と、前記負ミュオンをルテニウム試料に照射する工程とを有するテクネチウム 99m 含有物質生成方法である。

【0010】

第 2 の形態は、さらに、ルテニウム試料は、金属ルテニウム及びルテニウム化合物のうち少なくとも 1 つを含む放射性テクネチウム 99m 含有物質生成方法である。

【0011】

第 3 の形態は、さらに、前記ルテニウム試料は、複数の厚さ 4 mm 以下のルテニウム薄板を重ねたものである、放射性テクネチウム 99m 含有物質生成方法である。

【発明の効果】

【0012】

本発明によれば、放射性テクネチウム 99m 含有物質の生成方法を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0013】

【図 1】図 1 は、本実施形態のテクネチウム 99m 含有物質生成装置の構成例を示す図である。

【図 2】図 2 は、ミュオン生成ビーム光学系部の断面の例を示す図である。

【図 3】図 3 は、500 MeV の陽子と炭素との反応による正パイオン発生微分断面積、パイオンの運動量依存性（実験値）を示す図である。

【図 4】図 4 は、パイオン崩壊によるミュオン発生の様子を示す図である。

【図 5】図 5 は、飛行中パイオンから発生するミュオンの最高運動量と最低運動量のパイオン運動量依存性を示す図である。

【図 6】図 6 は、色々な運動量のパイオンが崩壊する際に、最低から最高までの運動量のミュオンに対する角度の拡がりを示す、崩壊角を示す図である。

【図 7】図 7 は、期待される負ミュオン発生量の計算例を示す図である。

【図 8】図 8 は、負ミュオンによるルテニウム核吸収反応 (1) を示す図である。

【図 9】図 9 は、負ミュオンによるルテニウム核吸収反応 (2) を示す図である。

【図 10】図 10 は、原子番号がルテニウムに近い ^{107}Ag とミュオンとの核吸収反応の割合の実験値又は理論値を示す図である。

【図 11】図 11 は、様々な物質中のミュオンの飛程のミュオン運動量依存性を示す図である。

【図 12】図 12 は、様々な物質中の光の吸収係数の光エネルギー依存性を示す図である。

【図 13】図 13 は、原子炉・低エネルギー陽子加速器・中間エネルギー陽子加速器によ

る放射性テクネチウム99mの生成量と特徴とを示す図である。

【図14】図14は、シミュレーション計算によるミュオン生成ビーム光学系部116の±5%運動量幅の確認を示す図である。

【図15】図15は、シミュレーション計算によるミュオン生成ビーム光学系部116の立体角の確認を示す図である。

【図16】図16は、照射試料分析系の例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0014】

以下、図面を参照して実施形態について説明する。実施形態の構成は例示であり、開示の実施形態の構成に限定されない。

【0015】

〔実施形態〕

(ミュオン)

ミュオンは、素粒子の一種である。ミュオンには、正負の電荷を持つ2種類の粒子がある。正の電荷を有する正ミュオン及び負の電荷を有する負ミュオンの真空中の寿命は、 $2.2 \mu\text{s}$ である。ミュオンの質量は、陽子の1/9倍、電子の207倍である。ミュオンは、宇宙線としても地表に飛来するが、150 MeV以上のエネルギーの陽子等を発生させることのできる粒子加速器を用いて大量に作られる。

【0016】

物質中に止められたミュオンは、主として、周囲の原子と電磁相互作用をするため、正ミュオンを軽い陽子、負ミュオンを重い電子と考えて、ミュオンの物質中での挙動を理解することができる。

【0017】

1 MeV程度以上のエネルギーを有する負ミュオン(重い電子)を物質中に注入し、静止させると、次の現象が起こる。

【0018】

(1) 負ミュオンは、周辺電子をくぐり抜け原子核に近づき、原子核周辺に小さい原子(ミュオン原子)の高励起状態をつくる。

【0019】

(2) 負ミュオンは、ミュオン原子内遷移を経て、1ナノ秒以下の時間で、基底状態に達する。原子番号Zのミュオン原子の基底状態の半径は、 $270/Z \times 10^{-13} \text{ cm}$ であり、 ^{100}Ru (Z = 44) では、 $6.14 \times 10^{-13} \text{ cm}$ である。

【0020】

(3) 質量数Aの原子核の半径は、 $1.2 \times A^{1/3} \times 10^{-13} \text{ cm}$ であり、 ^{100}Ru (Z = 44) の原子核の半径は、 $5.57 \times 10^{-13} \text{ cm}$ である。ミュオン原子の基底状態の半径と原子核の半径とが同程度となるため、核子と負ミュオンとの間に近接距離で働く弱い相互作用が有効となり、素過程($\mu^- + p \rightarrow n + \mu$)の核吸収反応が起こり、負ミュオンの自由崩壊($\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_\mu$)と競争する。 ^{100}Ru (Z = 44) では、弱い相互作用の性質、及び、原子核とミュオンとの原子軌道の波動関数から、95%が核吸収となり、5%が自由崩壊となる。

【0021】

(4) ミュオン核吸収反応に続いて、励起核状態から中性子、陽子等の粒子放出が多岐にわたって起こり、これに応じて、様々な原子核同位体が生じる。負ミュオンによって負の電荷が付加されるため、ユニークな原子核変換・元素変換反応が実現する。

【0022】

ここで、負ミュオンとルテニウムとの核反応によって生じる放射性物質の内、殆どが、寿命が短く短時間で減衰するものか、寿命が長いものである。

以下、負ミュオンをミュオンともいう。

【0023】

(テクネチウム99m含有物質生成装置)

10

20

30

40

50

図1は、本実施形態のテクネチウム99m含有物質生成装置の構成例を示す図である。テクネチウム99m含有物質生成装置100は、ミュオン発生装置110及びルテニウム試料保持部120を含む。ミュオン発生装置110は、陽子加速器112、パイオン/ミュオン生成標的保持部114、ミュオン生成ビーム光学系部116を含む。

【0024】

陽子加速器112は、陽子を加速し、所定の位置を焦点とする陽子ビームを生成する。

パイオン/ミュオン生成標的保持部114は、陽子加速器112で加速された陽子ビームの焦点の位置にパイオン/ミュオン生成標的を保持する。パイオン/ミュオン生成標的として、例えば、直径5cm長さ15cmの円筒形の黒鉛材が使用される。パイオン/ミュオン生成標的は、陽子ビームのパイプとつながる真空中に置かれる。

10

【0025】

ミュオン生成ビーム光学系部116は、パイオン/ミュオン生成標的に陽子ビームが照射されることで発生したパイオンを、閉じ込め輸送し、出射する。パイオンの一部は閉じ込め輸送の際にミュオンに変化するので、ミュオン生成ビーム光学系部116は、ミュオンビームを出射することができる。パイオン/ミュオン生成標的の周囲に、2基のミュオン生成ビーム光学系部116が陽子ビームに対し左右対称に設置されてもよい。

【0026】

ルテニウム試料保持部120は、ミュオン生成ビーム光学系部116で集光されたミュオンビームの焦点の位置にルテニウム試料を保持する。

【0027】

ルテニウム試料は、例えば、(1)金属ルテニウム、(2)ルテニウム酸化物、(3)硝酸ルテニウム、(4)硫酸ルテニウム、(5)その他のルテニウム化合物、または、これらの混合物である。ルテニウム試料は、これらに限定されるものではない。ルテニウム試料は、例えば、金属ルテニウム及びルテニウム化合物のうち少なくとも1つを含むものであってもよい。ルテニウム試料は、少なくとも、ルテニウムを含む試料である。

20

【0028】

ルテニウム試料は、例えば、複数のルテニウム薄板を重ねたものである。ルテニウム薄板の厚さは、0.4cm以下である。

【0029】

ルテニウム試料に含まれるルテニウムは、天然ルテニウムであっても、特定の1つの質量数のルテニウムであっても、特定の複数の質量数のルテニウムを含むものであってもよい。ルテニウム試料に含まれるルテニウムは、例えば、質量数100のルテニウムを他の質量数のルテニウムと比べて多く含むものでもよい。質量数100のルテニウムを多く含むルテニウム試料を用いることで、テクネチウム99mを多く含むテクネチウム99m含有物質を生成することができる。

30

【0030】

(陽子加速器)

陽子加速器112の例として、エネルギー500MeV、電流300 μ A、磁場8Tの中型超電導陽子サイクロトロンが挙げられる。当該中型超伝導陽子サイクロトロンを陽子加速器112として使用した場合、毎秒 2.2×10^{11} 個のミュオンが得られる。

40

【0031】

テクネチウム99mを適切なサイズのRu試料内に生成するためには、cm厚の領域にミュオンを止めることが必要である。そのために、150MeV/cの運動量を有するパイオンをミュオン生成ビーム光学系部116に取り込み、ミュオンに変換する。図3に示すように、150MeV/cのパイオンを効率よく生成するには、500MeV程度の陽子が適切である。

【0032】

また、原理確認用の陽子加速器112として、例えば、エネルギー250MeV、電流0.8 μ Aのがん治療用陽子加速器が使用されうる。

【0033】

50

エネルギーがパイオンの質量 140 MeV に比べて十分高い陽子加速器が、陽子加速器 112 として、使用されうる。

【0034】

(ミュオン生成ビーム光学系部)

図2は、ミュオン生成ビーム光学系部の断面の例を示す図である。ミュオン生成ビーム光学系部 116 は、常伝導磁気コイル 152、複数の超伝導磁気コイル 154、放射線シールド 156、磁気シールド 158 を含む。

【0035】

ミュオン生成ビーム光学系部 116 の全長(ビーム進行軸方向の長さ)は、例えば、6 m である。パイオンの静止時の寿命は 26 ns であるが、パイオンの運動による相対論的効果で寿命が伸びる。パイオンの崩壊長 L (cm) と運動量 P (MeV/c) との関係は、 $L = 5.593 P$ である。パイオンの崩壊長は、パイオンの強度が $1/e$ になる長さである。従って、 150 MeV/c のパイオンの崩壊長は、8.4 m である。また、 150 MeV/c のパイオンは、6 m の飛行で 51% がミュオンになり、10 m の飛行で 71% がミュオンになる。

【0036】

ミュオン生成ビーム光学系部 116 では、ビーム進行軸(図2の横方向)と直角方向にビームが拡がるようにする運動を、ビーム進行軸方向にかけた磁場によって、軸の周りの回転運動に変えることによって、パイオン/ミュオンの大立体角捕獲と閉じ込め輸送を実現する。 150 MeV/c のパイオンを 22度の角度で 20 cm の半径で捕獲し、閉じ込めるためには、ビーム進行軸方向に最大 1 テスラの磁場があればよい。複数の円形コイルによりビーム進行軸方向の磁場を発生させ複数回収束させることで、1つのコイルを使用する場合に比べてコイルの大きさを小さくすることができる。ビーム進行軸方向は、パイオン/ミュオン標的からルテニウム試料への方向である。

【0037】

常伝導磁気コイル 152 は、パイオン/ミュオン生成標的保持部 114 に保持されるパイオン/ミュオン生成標的に最も接近している。常伝導磁気コイル 152 は、円形コイルである。常伝導磁気コイル 152 により、円形コイルによるビーム進行軸方向の磁場が発生する。常伝導磁気コイル 152 は、ミュオン生成ビーム光学系部 116 の入口に設置される。常伝導磁気コイル 152 は、例えば、半径 20 cm で、パイオン/ミュオン標的からの角度が 22度になるように設置される。常伝導磁気コイル 152 に代えて、超伝導コイルが使用されてもよい。

【0038】

超伝導磁気コイル 154 は、ミュオン生成ビーム光学系部 116 に取り込まれたパイオン/ミュオンを収束する。直径 1 m の超伝導磁気コイル 154 は、ビーム進行軸方向に、最大 1 テスラの磁場を発生する。図2の例では、ミュオン生成ビーム光学系部 116 は 11基の超伝導磁気コイル 154 を含む。超伝導磁気コイル 154 により、円形コイルによるビーム進行軸方向の磁場が発生する。超伝導磁気コイル 154 に代えて、常伝導コイルが使用されてもよい。

【0039】

放射線シールド 156 は、ミュオン軌道の内側及び外側に設置される。即ち、ミュオンは、内側の放射線シールド 156 と外側の放射線シールド 156 との間を通過する。ミュオン軌道の内側の放射線シールドは、例えば、ミュオン軌道の外側から伸びるステンレス線によって吊るされる。

【0040】

磁気シールド 158 は、超伝導磁気コイル 154 からの磁場を系外に漏洩させないために設置される。

【0041】

図14は、シミュレーション計算によるミュオン生成ビーム光学系部 116 の $\pm 5\%$ 運動量幅の確認を示す図である。図14では、色々な運動量のパイオン/ミュオンに対して

10

20

30

40

50

、シミュレーション計算で得られる取り込み立体角を縦軸に示す。

【 0 0 4 2 】

図 1 5 は、シミュレーション計算によるミュオン生成ビーム光学系部 1 1 6 の立体角の確認を示す図である。図 1 5 では、最小（最大）立体角で取り込まれたパイオン/ミュオンが取る軌道が、下側（上側）の曲線で示されている。

【 0 0 4 3 】

陽子加速器 1 1 2 で生成された陽子ビームがパイオン/ミュオン生成標的に照射されると、パイオンが発生する。ミュオン生成ビーム光学系部 1 1 6 は、パイオン/ミュオン生成標的で生成されたパイオンを常伝導磁気コイル 1 5 2 側から取り込む（図 2 の左側）。取り込まれたパイオンは、常伝導磁気コイル 1 5 2 及び超電導磁気コイル 1 5 4 により閉じ込め輸送され、閉じ込め輸送される際にパイオンのうちの一部がミュオンに変化し、出射する（図 2 の右側）。ミュオンビームの焦点の位置には、ルテニウム試料が設置される。ルテニウム試料は、ルテニウム試料保持部 1 2 0 によって保持される。ルテニウム試料に、ミュオンビームが照射されることで、ルテニウムとミュオンとによる核反応が生じる。

【 0 0 4 4 】

図 3 は、5 0 0 M e V の陽子と炭素との反応による正パイオン発生の微分断面積、パイオンの運動量依存性（実験値）を示す図である。測定立体角は 0 . 5 ステラジアンである。図 3 のグラフの横軸は運動量であり、縦軸は微分断面積である。

【 0 0 4 5 】

図 4 は、パイオン崩壊によるミュオン発生の様子を示す図である。図 4 は、静止パイオンからの等方的ミュオン発生のベクトル表示と、飛行中の異方的ミュオン発生のベクトル表示とを示す。

【 0 0 4 6 】

図 5 は、飛行中パイオンから発生するミュオンの最高運動量と最低運動量のパイオン運動量依存性を示す図である。図 5 のグラフの横軸はパイオンの運動量であり、縦軸はミュオンの運動量である。図 6 は、色々な運動量のパイオンが崩壊する際に、最低から最高までの運動量のミュオンに対する角度の拡がりを示す、崩壊角を示す図である。図 6 のグラフの横軸はミュオンの運動量であり、縦軸は崩壊角である。

【 0 0 4 7 】

図 7 は、期待される負ミュオン発生量の計算例を示す図である。

電流 3 0 0 μ A の陽子強度は、素電荷 $1 . 6 0 \times 1 0^{-19}$ クーロンを使用して、毎秒 $1 . 9 \times 1 0^{15}$ (= J) となる。エネルギー 5 0 0 M e V の陽子が標的の炭素に衝突し、運動量 1 5 0 M e V / c の正パイオンが発生する立体角 0 . 5 ステラジアンに対する微分断面積の運動量依存性は、図 3 に示すようになる。負パイオンと正パイオンとの断面積の比は、1 / 7 である。運動量 $\pm 5 \%$ で 1 5 0 M e V / c (6 5 M e V) の負パイオンが生まれる断面積は、立体角 1 ステラジアン、運動量幅 $\pm 5 \%$ で取り込んだとすると、 $0 . 4 8 \times 1 0^{-27} \text{ cm}^2$ (=) である。1 2 c m 厚の炭素の原子数は、 $2 . 4 \times 1 0^{23} \text{ cm}^{-2}$ (= n t) である。これらの 3 つの値の積 (J \cdot \cdot n t) から、ミュオン生成ビーム光学系部に取り込まれるパイオンの強度は、毎秒 $2 . 2 \times 1 0^{11}$ となる。

【 0 0 4 8 】

このパイオンが 6 . 0 m 飛行するうちに、5 1 % のパイオンがミュオンに変わるので、ミュオン生成ビーム光学系部の出口での負ミュオンの強度は、毎秒 $1 . 1 \times 1 0^{11}$ となる。パイオン・ミュオン変換の結果、図 6 に示すように、ミュオンが有する運動量（エネルギー）は、7 0 M e V / c (2 1 M e V) - 1 5 5 M e V / c (8 2 M e V) となる。このとき、図 6 に示すように、崩壊角が 2 0 度以内に収まるため、パイオンはすべてミュオン生成ビーム光学系部に取り込まれる。パイオンからミュオンに変化する割合は、パイオンの静止時の寿命 2 6 n s の相対論的補正から、求まる。例えば、ミュオン生成ビーム光学系部を陽子ビームの方向に対して、直角に 2 基配置することにより、負ミュオンの強度

10

20

30

40

50

は、毎秒 2.2×10^{11} 個となる。このとき、ミュオン生成ビーム光学系部は、鏡映対称に置かれる。

【 0 0 4 9 】

(負ミュオンによるルテニウム核吸収反応)

図 8 及び図 9 は、負ミュオンによるルテニウム核吸収反応を示す図である。図 8 及び図 9 では、負ミュオンによる、ルテニウム 96、ルテニウム 98、ルテニウム 99、ルテニウム 100、ルテニウム 102、ルテニウム 104 との、核吸収反応が示される。ルテニウム 96、ルテニウム 98、ルテニウム 99、ルテニウム 100、ルテニウム 102、ルテニウム 104 は、天然に存在するルテニウムである。

【 0 0 5 0 】

ルテニウム試料に入射され、ルテニウム試料中に静止したすべての負ミュオンは、物質中の原子核の周りにミュオン原子を作る。ルテニウムの場合、95%以上の負ミュオンが、ミュオンと原子核との間の弱い相互作用によって、原子核に吸収され、図 8 及び図 9 に示す核反応を起こす。

【 0 0 5 1 】

図 8 及び図 9 において、ルテニウムと負ミュオンとの核反応で発生する主な放射性元素のうち、主な半減期が 6 時間程度の放射性元素は、 ^{99m}Tc のみである。他の放射性元素は、半減期が 6 時間と比べて非常に短い放射性元素、半減期が 6 時間と比べて非常に長い放射性元素、若しくは、生成割合が小さい放射性元素である。

【 0 0 5 2 】

負ミュオン核吸収反応には、中性子を発生する反応に加えて、陽子やアルファ粒子を発生する反応があることが知られている。

【 0 0 5 3 】

図 10 は、原子番号がルテニウムに近い ^{107}Ag によるミュオン核吸収反応の割合の実験値又は理論値を示す図である。図 10 の実験値又は理論値において、例えば、 ^{107}Ag によるミュオン核吸収反応で、51%が 1 個の中性子を放出し、25%が 2 個の中性子を放出し、0.23%が 1 個の陽子を放出する。図 10 において、中性子放出の割合は実験値であり、陽子放出の割合は理論値である。ここでは、 ^{107}Ag によるミュオン核吸収反応のうち、割合の大きい、中性子放出 1 個 (51%)、2 個 (25%)、3 個 (12%) を有効とする。ルテニウムとミュオンとの核吸収反応は、 ^{107}Ag とミュオンとの核吸収反応と同様であるとみなすと、ルテニウムによるミュオン核吸収反応は、中性子放出 1 個 (51%)、2 個 (25%)、3 個 (12%) となる。例えば、ルテニウム 100 の負ミュオン核吸収反応では、51%が放射性テクネチウム 99m を生ずる。

【 0 0 5 4 】

天然ルテニウムを含むルテニウム試料に対して、毎秒 2.2×10^{11} 個のミュオンが照射されると、次の式のように、毎秒 3.3×10^{10} 個の放射性テクネチウム 99m が生成される。ここで、天然ルテニウムにおける、 ^{102}Ru 、 ^{101}Ru 、 ^{100}Ru の存在比は、それぞれ、0.32、0.17、0.13 である。

【 0 0 5 5 】

【数 1】

$$\begin{aligned} N_{Tc99m} &= N_{\mu^-} \times \left[{}^{102}\text{Ru}(\mu^-, 3n) + {}^{101}\text{Ru}(\mu^-, 2n) + {}^{100}\text{Ru}(\mu^-, n) \right] \\ &= 2.2 \times 10^{11} \times [0.32 \times 0.12 + 0.17 \times 0.25 + 0.13 \times 0.51] \\ &= 3.3 \times 10^{10} \end{aligned}$$

【 0 0 5 6 】

このとき、放射性テクネチウム 99m の永続平衡値 (生成・崩壊が同時に進行する際の原子数) は、 1.0×10^{15} ($= 3.3 \times 10^{10} / 3.19 \times 10^{-5}$) である。

【 0 0 5 7 】

天然ルテニウムを含むルテニウム試料に対して、毎秒 2.2×10^{11} 個のミュオン照射

10

20

30

40

50

を12時間行うことで、 2.5×10^{10} Bq / 12 hの累積放射線強度を有する放射性テクネチウム99mが得られる。さらに、これを12回繰り返すことで、6日間で、合計 3.0×10^{11} Bqの放射線強度を有する放射性テクネチウム99mが得られる。

【0058】

ルテニウムとしてルテニウム100のみを含むルテニウム試料(以下、ルテニウム100試料という)に対して、毎秒 2.2×10^{11} 個のミュオンが照射されると、次の式のように、毎秒 1.1×10^{11} 個の放射性テクネチウム99mが生成される。

【0059】

【数2】

$$\begin{aligned} N_{Tc99m} &= N_{\mu^-} \times [{}^{100}Ru(\mu^-, n)] \\ &= 2.2 \times 10^{11} \times [0.51] \\ &= 1.1 \times 10^{11} \end{aligned}$$

10

【0060】

このとき、放射性テクネチウム99mの永続平衡値は、 3.4×10^{15} ($= 1.1 \times 10^{11} / 3.19 \times 10^{-5}$)である。

【0061】

また、ルテニウム100試料に対して、毎秒 2.2×10^{11} 個のミュオン照射を12時間行うことで、 8.5×10^{10} Bq / 12 hの累積放射線強度を有する放射性テクネチウム99mが得られる。さらに、これを12回繰り返すことで、6日間で、合計 1.0×10^{12} Bqの放射線強度を有する放射性テクネチウム99mが得られる。

【0062】

ルテニウム試料に含まれるルテニウムが、負ミュオン核吸収反応により、放射性テクネチウム99mに原子核変換されることにより、放射性テクネチウム99m含有物質が得られる。

【0063】

将来、さらなる生産量の増大を図るには、(1)陽子加速器の強度の増大(300 μ A (0.15MW) 3mA (1.5MW)、10倍)、(2)ミュオン生成ビーム光学系部の改良による運動量アクセプタンスの増大(1.5倍)、(3)ミュオン生成ビーム光学系部の長さの延長(6m 10m、1.4倍)等を行うことが考えられる。これらの増強により、ルテニウム100試料を用いると、 1.8×10^{12} Bq / 12 hの放射線強度を有する放射性テクネチウム99mが得られる。

30

【0064】

ルテニウム試料に照射されるミュオンのエネルギーが高いと、ミュオンはルテニウムを通り抜けてしまう。一方、ルテニウム試料に照射されるミュオンのエネルギーが低いと、ミュオンはルテニウムの原子核近傍に到達しない。したがって、ルテニウム試料に照射されるミュオンのエネルギーが高すぎても低すぎても、放射性テクネチウム99mの生成効率が下がる。

40

【0065】

図11は、様々な物質中のミュオンの飛程のミュオン運動量依存性を示す図である。ここでは、図11の横軸は、運動量(エネルギー)であり、縦軸は、飛程に対応する厚さに密度を掛けた量である。

【0066】

図12は、様々な物質中の光の吸収係数の光エネルギー依存性を示す図である。図12の横軸は、エネルギーであり、縦軸は、吸収長である。

【0067】

図11及び図12のグラフにおいて、ルテニウム(Ru)は、鉄(Fe)と錫(Sn)

50

との中間の値をとるとする。

【0068】

チャンネルのパイオン運動量アクセプタンスを $150 \text{ MeV}/c \pm 5\%$ と設定すると、運動量（エネルギー） $70 \text{ MeV}/c$ （ 21 MeV ）から $155 \text{ MeV}/c$ （ 82 MeV ）のミュオンが、輸送され、ルテニウム試料に照射される。すべてのミュオン（運動量（エネルギー） $70 \text{ MeV}/c$ （ 21 MeV ）から $155 \text{ MeV}/c$ （ 82 MeV ）のミュオン）をルテニウム試料中に止めるには、図11のミュオンの飛程から 0.4 cm から 2.8 cm であるので、ルテニウム試料の厚さは 2.8 cm 以上であることが好ましい。ここで、ルテニウム試料の厚さは、ビーム進行軸における厚さである。

【0069】

一方、テクネチウム99mの生成は、 140 keV のガンマ線を検出することで確認される。 140 keV のガンマ線は、テクネチウム99mが崩壊するときに放出する放射線である。図12のグラフから、 140 keV で、FeとSnとの中点をルテニウムの値とすると、 $4 \text{ g}/\text{cm}^2$ である。よって、テクネチウム99mが崩壊する際に発生する 140 keV のガンマ線を検出するには、ルテニウムの密度 $12.45 \text{ g}/\text{cm}^3$ を使用して、ルテニウム試料の厚さが 0.4 cm 以下であることが求められる。従って、例えば、 2 mm （ $=0.2 \text{ cm}$ ）厚のルテニウム試料を14枚の多重薄板状にして標的とする。

【0070】

1つの薄板状のルテニウム試料（ルテニウム薄板）の厚さは、 140 keV のガンマ線を測定できる厚さ（ 0.40 cm ）以下であることが好ましい。また、照射されるすべてのミュオンをルテニウム試料中に止めるためには、ルテニウム試料の厚さは 2.8 cm 以上であることが好ましい。よって、照射されるミュオンのエネルギーに基づいて、複数の 0.4 cm 以下のルテニウム薄板を重ねて、 2.8 cm 以上の多重薄板状にしたルテニウム試料とすることが好ましい。またミュオンビームは直径 5 cm 程度に収束されるため、ルテニウム試料は直径 5 cm 厚さ 2.8 cm 程度の大きさになる。

【0071】

（照射試料分析系）

図16は、照射試料分析系の例を示す図である。

【0072】

ミュオン照射によるテクネチウム99mの生成状態をモニタするために、テクネチウム99m含有物質生成装置100に連結して、照射試料分析系が用意される。照射試料分析系は、放射線シールド、遠隔操作系、Ge検出器を含む。放射シールドは、Ge検出器を覆い、外部からの放射線をシールドする。遠隔操作系終端部は、ミュオンが照射されたルテニウム試料から1つのルテニウム薄板を取り出し、放射シールド内のGe検出器に輸送する。Ge検出器は、ミュオンを照射されたルテニウム試料から発生する 140 keV のガンマ線を計測する。

【0073】

（テクネチウム99mの収率）

一般に放射能がミュオン照射等によって連続的に作られる場合、生成される放射性核の半減期の数倍の時間がたてば、毎秒作られる数と崩壊してゆく数とが等しくなる。

【0074】

【数3】

$$R_0 = \lambda N_1$$

【0075】

ここでルテニウム核のミュオン核吸収によるテクネチウム99m生成について考えると、 R_0 はミュオン核吸収によるTc99mの生成頻度（長時間後のTc99mの崩壊頻度）、 λ はTc99m核の崩壊定数（ $=3.19 \times 10^{-5} / \text{s} = \ln 2 / \text{半減期}$ ）、 N_1 は長時間後のTc99mの原子核数である。

。

10

20

30

40

50

【 0 0 7 6 】

【 数 4 】

$$\text{Tc99mの含有量} = \frac{R_0}{\lambda N_0} [g]$$

【 0 0 7 7 】

ここで、 N_0 はTcの 1 g 当たりの原子核数 ($= 6.02 \times 10^{23} / 98.9 = 6.09 \times 10^{21}$) である。

R_0 を $1.1 \times 10^{11} / s$ とし、Tc99mの含有量は 0.55 μg となる。

【 0 0 7 8 】

ここで直径 5 c m 厚さ 2 . 8 c m のルテニウム試料からこのTc99mを創るとすれば、Tc99mの収量 (Tc99mの含有量と試料の質量との比) は次のようになる。

【 0 0 7 9 】

【 数 5 】

$$\frac{0.55 \mu g}{3.14 \times (5/2)^2 \times 2.8 \times 12.45 g} = \frac{0.55 \times 10^{-6}}{680} = 8.1 \times 10^{-10}$$

【 0 0 8 0 】

(医用の放射性テクネチウム 9 9 m)

ルテニウム試料として、例えば、三酸化ルテニウムが使用され得る。三酸化ルテニウムにミュオンを照射すると、三酸化ルテニウムと三酸化テクネチウムとの混合物が生成される。この三酸化テクネチウムの中には、放射性テクネチウム 9 9 m を含む三酸化テクネチウムが存在する。当該混合物内の三酸化ルテニウムはすべて安定であることから、当該混合物に含まれる放射性物質は、放射性テクネチウム 9 9 m を含む三酸化テクネチウム及びテクネチウム 9 9 を含む三酸化テクネチウムである。放射性テクネチウム 9 9 m を医用として用いるには、生成物に、他の放射性物質が含まれることは好ましくない。本実施形態の方法によれば、他の放射性物質をほとんど含むことなく、放射性テクネチウム 9 9 m を含む過テクネチウム酸イオンを得ることができる。

ルテニウム試料として、例えば、三酸化ルテニウム (RuO_3) を用いる。照射後の試料から高純度のテクネチウム 9 9 m を含有する水溶液を得るには、例えば、以下のような操作が行われる。すなわち、照射後のサンプルを減圧処理容器に入れ、減圧下、310 ~ 320 の範囲に加熱し、昇華物を得る。減圧は、通常、10パスカル ~ 100パスカルの範囲であればよい。該得られる昇華物は、通常、ルテニウム酸化物の含有量が0.01%以下の酸化テクネチウム (Tc_2O_7) である。この操作は、テクネチウム 9 9 m を含有する酸化テクネチウム (Tc_2O_7) の気体が生じる温度が約310 (常圧下) であるのに対して、三酸化ルテニウムの気体が生じる温度が約400 (常圧下) であることを利用している。次に前記昇華物に高濃度の水酸化ナトリウム水溶液を加え、昇華物を完全に溶解させた後、塩酸水溶液を加え、pHを4 ~ 8の範囲に調整する。該得られる水溶液は、過テクネチウム酸イオン (TcO_4^-) を含有する水溶液である。水酸化ナトリウムのモル濃度は、4M ~ 8M程度であればよい。次に、この過テクネチウム酸イオン (TcO_4^-) を含有する水溶液を上層に吸着材と下層にイオン交換樹脂が充填されたカラムを通し、カラムを通過してくる水溶液を採取する。該吸着材は、過テクネチウム酸イオン (TcO_4^-) を含有する水溶液に含まれる [$^{99}TcO_4^-$] イオンを吸着除去するものであり、通常、活性アルミナや活性炭が用いられる。この操作では、 [$^{99}TcO_4^-$] イオンと同量の [$^{99m}TcO_4^-$] イオンも吸着除去されるので、前記過テクネチウム酸イオン (TcO_4^-) を含有する水溶液に含まれる [$^{99}TcO_4^-$] イオンの含有量を予めガンマ線スペクトロメータ等により測定しておき、除去する [$^{99}TcO_4^-$] イオンの量に見合うだけの吸着材の充填量が適宜決められる。前記イオン交換樹脂は、吸着材による吸着除去が難しい金属イオン種を除去するものであり、通常、ポリスチレン系イオン交換樹脂が用いられる。以上

10

20

30

40

50

の操作により、過テクネチウム酸水溶液に含有される ^{99m}Tc の放射能が総放射能の99.985%以上である過テクネチウム酸水溶液が得られる。

【0081】

(その他)

放射性テクネチウム 99m 含有物質生成装置100におけるミュオン発生装置は、上記の例に限定されるものではなく、ミュオンを発生する他の装置によるものであってもよい。

【0082】

(実施形態の作用、効果)

放射性テクネチウム 99m 含有物質生成装置100は、ミュオンを発生させ、ターゲットとしてのルテニウム試料に照射する。ルテニウム試料にミュオンが照射されると、ルテニウム試料中のルテニウムとミュオンとの核反応により、ルテニウム試料は、放射性テクネチウム 99m を含む物質(放射性テクネチウム 99m 含有物質)となる。

10

【0083】

ミュオン1個あたりの天然ルテニウムからの放射性テクネチウム 99m 生成率は15%と、中性子や陽子を用いた原子核反応に比べて高い。また、ミュオンを作る効率を向上することで、全体の生成効率を上げることができる。ミュオン1個あたりの質量数100のルテニウムからの放射性テクネチウム 99m 生成率は、51%である。よって、質量数100のルテニウムを多く含むルテニウム試料が使用されることで、全体の生成効率上がる。即ち、質量数100のルテニウムを多く含むルテニウム試料が使用されることで、より多くの放射性テクネチウム 99m を得ることができる。

20

【0084】

陽子加速器として、エネルギー500MeV、電流300 μA 、磁場8Tの中型超電導陽子サイクロトロンが使用された場合、天然ルテニウムを含むルテニウム試料から、毎秒 3.3×10^{10} 個の放射性テクネチウム 99m が生成される。ルテニウムとしてルテニウム100のみを含むルテニウム試料から、毎秒 1.1×10^{11} 個の放射性テクネチウム 99m が生成される。

【0085】

本実施形態の方法によれば、放射性テクネチウム 99m 以外の放射性元素をほとんど含まない放射性テクネチウム 99m 含有物質を得ることができる。

30

【0086】

図13は、原子炉・低エネルギー陽子加速器・中間エネルギー陽子加速器による放射性テクネチウム 99m の生成量と特徴とを示す図である。本実施形態の方法によれば、エネルギー500MeV、電流300 μA 、磁場8Tの陽子加速器を用いることにより、原子炉法と同程度の高効率で放射性テクネチウム 99m を生産することができる。

【0087】

本実施形態の放射性テクネチウム 99m 含有物質生成装置によるミュオン発生効率は、 $10^{-4} \mu / \text{proton}$ であり、さらなる改善が期待できる。したがって、ミュオン発生効率に依存する放射性テクネチウム 99m の生成効率の改善も期待できる。

【0088】

ルテニウムとミュオンとの核反応で生じる放射性物質は、実質的に、放射性テクネチウム 99m のみである。従って、ルテニウム試料として選択される物質の化学的状態及び物理的状態の自由度が高い。即ち、ルテニウム試料として、例えば、金属ルテニウム或いはルテニウム酸化物、硝酸ルテニウム、硫酸ルテニウム等のルテニウム化合物を用いて、ルテニウムとミュオンとの核反応を生じさせることにより、医用に用いることのできる放射性テクネチウム 99m を得ることができる。

40

【0089】

ルテニウム試料として、複数の厚さ0.4cm以下のルテニウム薄板が使用されることで、放射性テクネチウム 99m 含有ルテニウム試料に含まれるテクネチウム 99m がから発生する140keVのガンマ線をルテニウム試料の外から検出することができる。

50

【0090】

本実施形態の方法によれば、病院等に設置される低エネルギー陽子加速器によっても、骨・腎臓・肺・甲状腺・肝臓など身体各部に対するシンチグラムに用いられる放射性テクネチウム99mが、生成され得る。

【0091】

本実施形態の方法で生成される放射性テクネチウム99m含有物質は、医療応用を阻害する放射線は発生しない。従って、放射性テクネチウム99mの生成作業が極めて容易になる。

【0092】

また、本実施形態の方法によれば、原子炉や濃縮ウラン235を使用しないため、ウラン核分裂特有の長寿命放射性廃棄物が生成されない。また、高強度低エネルギー陽子加速器を用いる場合でも、試料中や試料周辺の残留放射能の問題が発生しない。

10

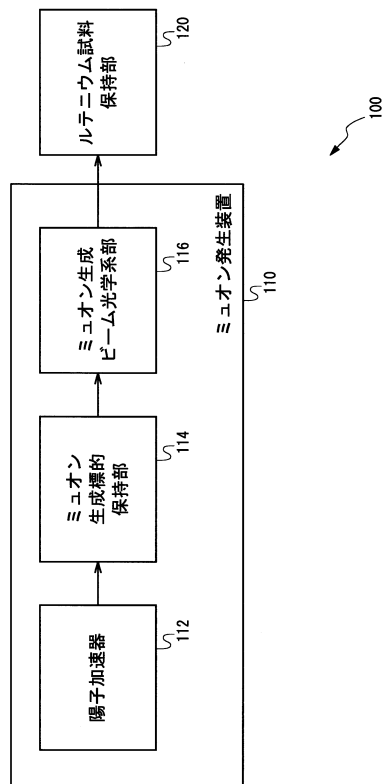
【符号の説明】

【0093】

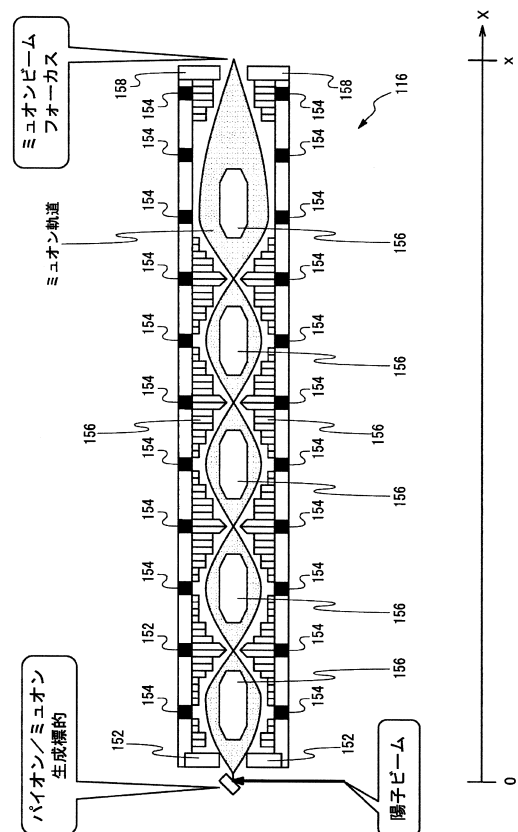
- 100 放射性テクネチウム99m含有物質生成装置
- 110 ミュオン発生装置
- 112 陽子加速器
- 114 パイオン/ミュオン生成標的保持部
- 116 ミュオン生成ビーム光学系部
- 120 ルテニウム試料保持部
- 152 常伝導磁気コイル
- 154 超伝導磁気コイル
- 156 放射線シールド
- 158 磁気シールド

20

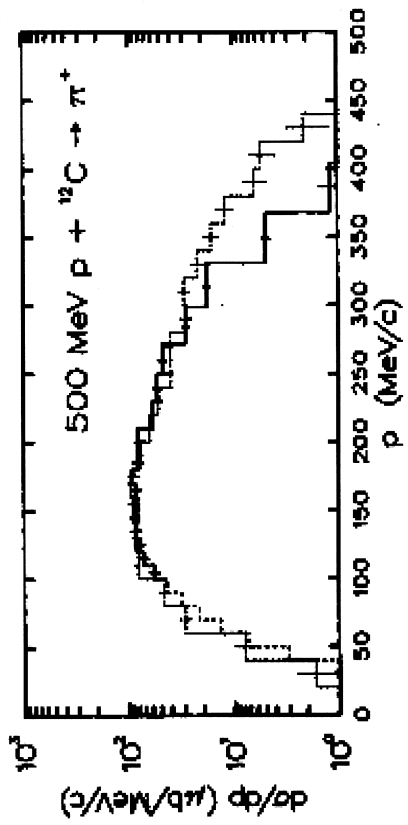
【図1】



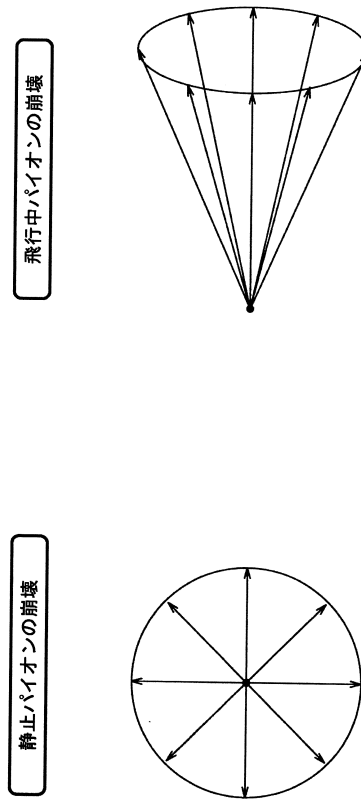
【図2】



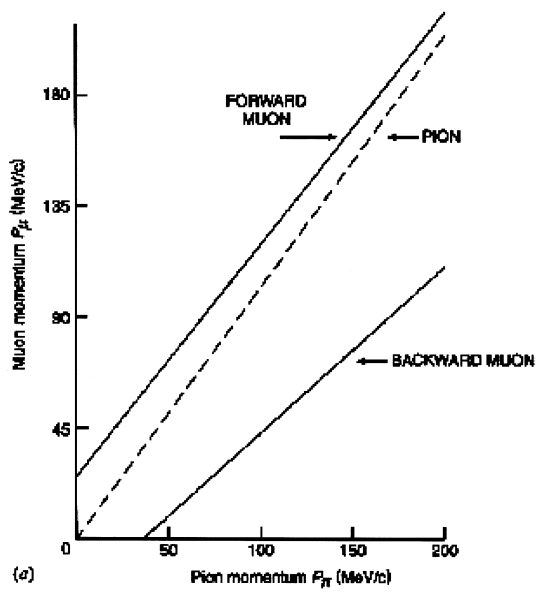
【 図 3 】



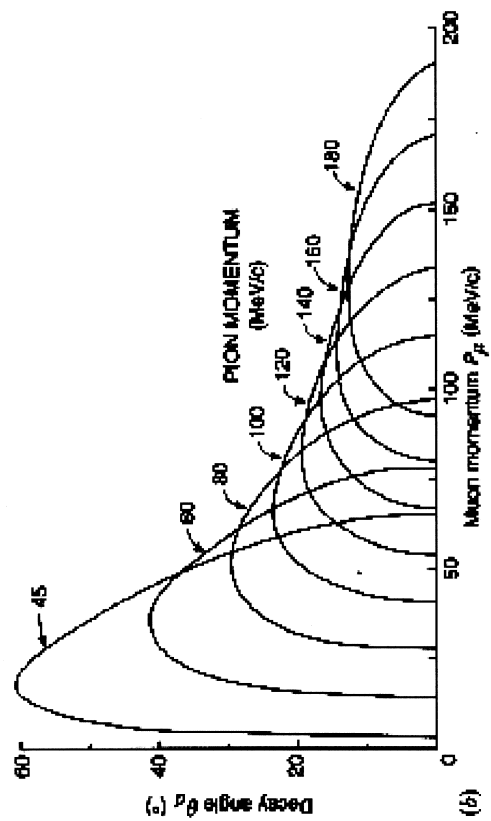
【 図 4 】



【 図 5 】



【 図 6 】



【 7 】

π^- production cross section N.J. DiGiacomo PRC 31(85)292
 500 MeV p, ^{12}C , π^+ , θ_L ; $-180^\circ \sim +180^\circ$, $\sim +180^\circ$, $\Delta\Omega$, ~ 0.5 sr
 $d\sigma/dp$ ($\mu\text{b}/\text{MeV}/c$) = 80~90 for 100~200 MeV/c
 $\sigma_{\pi^+}/\sigma_{\pi^-}$ = 7 for 500 MeV p on ^{12}C
 π^- intensity produced by 12 cm C captured by 1 sr and 150 ($\pm 5\%$)
 $N_{\pi^-} = 300x(0.63x10^{13}) \times 12x10^{-30} \times 20x(1/0.5)$
 $= 1.9x10^{15} \times 0.48x10^{-27} \times 2.4x10^{23} = 2.2x10^{11}$

μ^- intensity after 6.0m decay section for 150MeV/c π^-
 for full capture of pion-to-muon decay
 $N_{\mu^-} = N_{\pi^-} \times [1 - \exp(-600/(5.6x150))] = 2.2x10^{11} \times 0.51 = 1.1x10^{11}$
 By setting two muon channels at opposite sides
 $N_{\mu^- \text{ double}} = 2.2x10^{11}$

【 9 】

Product of (μ^- , xn) Reaction of Ru Isotopes(cont'd)

^{99}Ru (μ^-, n) ^{99}Tc (6+, 4.2x10⁵y, 0.397MeV β^-) $^{99}\text{Ru}(0^+)$
 (12.76%) ($\mu^-, 2n$) ^{97m}Tc (1/2-, 90d, 0.0965MeV γ) ^{97}Tc (9/2+, 2.6x10⁵y, EC) $^{97}\text{Mo}(5/2^+)$
 + ^{97}Tc (9/2+, 2.6x10⁵y, EC) $^{97}\text{Mo}(5/2^+)$
 ($\mu^-, 3n$) ^{96m}Tc (4+, 52m, 0.0342MeV γ) $^{96}\text{Mo}(0^+)$
 + ^{96}Tc (7+, 4.3d, EC, many γ) $^{96}\text{Mo}(0^+)$
 ^{98}Ru (μ^-, n) ^{97m}Tc (1/2-, 90d, 0.0965MeV γ) ^{97}Tc (9/2+, 2.6x10⁵y, EC) $^{97}\text{Mo}(5/2^+)$
 (1.87%) + ^{97}Tc (9/2+, 2.6x10⁵y, EC) $^{97}\text{Mo}(5/2^+)$
 ($\mu^-, 2n$) ^{96m}Tc (4+, 52m, 0.0342MeV γ) $^{96}\text{Mo}(0^+)$
 + ^{96}Tc (7+, 4.3d, EC, many γ) $^{96}\text{Mo}(0^+)$
 ($\mu^-, 3n$) ^{95m}Tc (1/2-, 61d, [(95.8%)EC+(0.31%) β^-]) ^{95}Tc (20.0h, EC, many γ) ^{95}Mo
 + (3.9%) β^- $^{95}\text{Mo}(5/2^+)$
 ^{96}Ru (μ^-, n) ^{95m}Tc (1/2-, 61d, [(95.8%)EC+(0.31%) β^-]) ^{95}Tc (20.0h, EC, many γ) ^{95}Mo
 (5.54%) + (3.9%) β^- $^{95}\text{Mo}(5/2^+)$
 + ^{95}Tc (9/2+, 20.0h, EC, many γ) $^{95}\text{Mo}(5/2^+)$
 ($\mu^-, 2n$) ^{94m}Tc (2+, 53m, 2.47MeV β^+ +EC, many γ) $^{94}\text{Mo}(0^+)$
 + ^{94}Tc (6.7+, 293m, 1.05+0.82MeV β^+ , many γ) $^{94}\text{Mo}(0^+)$
 ($\mu^-, 3n$) ^{93m}Tc (1/2-, 43m, [(18%)EC, many γ] ^{93}Mo (5/2+, >100Y)
 + (82%) β^- ^{93}Mo (9/2+, 2.7h, EC+ β^+ , many γ) ^{93}Mo)
 + ^{93}Tc (9/2+, 2.7h, EC + β^+ , many γ) $^{93}\text{Mo}(5/2^+)$

【 8 】

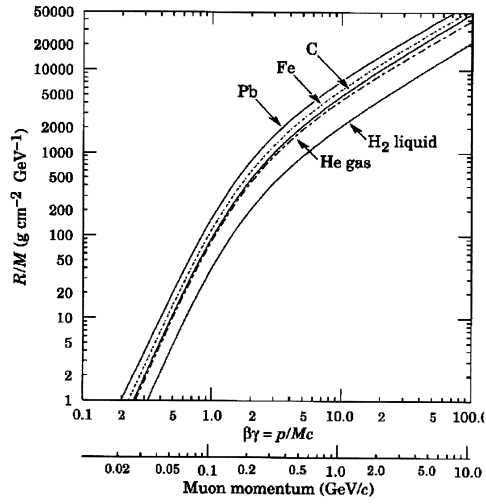
Product of (μ^- , xn) Reaction of Ru Isotopes

^{104}Ru (μ^-, n) ^{103}Tc (? , 50s, 2.2+2.0MeV β^- ; many γ) ^{103}Ru (5/2+, 39.4d,
 (18.62%) [0.214MeV β^- ; many γ] ^{103m}Rh (7/2+, 56.1m, 0.03975MeV γ) ^{103}Rh (1/2-)
 + 0.225MeV β^- ; many γ] ^{103}Rh)
 ($\mu^-, 2n$) + ^{102m}Tc (5?, 4.4m, (98%)1.80+2.55+3.30MeV β^- ; many γ) ^{102}Ru (0+)
 + ^{102}Tc (1+, 5.3s, 4.15+3.4+2.2MeV β^-) ^{102}Ru
 ($\mu^-, 3n$) ^{101}Tc (9/2+, 14.3m, 1.32+1.07MeV β^- ; many γ) ^{101}Ru (5/2+)
 (μ^-, n) ^{101}Tc (9/2+, 14.3m, 1.32+1.07MeV β^- ; many γ) ^{101}Ru (5/2+)
 (31.55%) ($\mu^-, 2n$) ^{100}Tc (1+, 15.8s, 3.38+2.88+2.2MeV β^- ; many γ) ^{100}Ru (0+)
 ($\mu^-, 3n$) ^{99m}Tc (1/2-, 6.02h, 0.142MeV γ) ^{99}Tc (9/2-, 2.14x10⁵y, 0.29MeV β^-) ^{99}Ru
 + ^{99}Tc (9/2-, 2.14x10⁵y, 0.29MeV β^-) ^{99}Ru (5/2+)
 ^{101}Ru (μ^-, n) ^{100}Tc (1+, 15.8s, 3.38+2.88+2.2MeV β^- ; many γ) ^{100}Ru (0+)
 (17.06%) ($\mu^-, 2n$) ^{99m}Tc (1/2-, 6.02h, 0.142MeV γ) ^{99}Tc (9/2-, 2.14x10⁵y, 0.29MeV β^-) ^{99}Ru
 + ^{99}Tc (9/2-, 2.14x10⁵y, 0.29MeV β^-) ^{99}Ru (0+)
 ($\mu^-, 3n$) ^{98}Tc (6+, 4.2x10⁵y, 0.397MeV β^-) ^{98}Ru (0+)
 ^{100}Ru (μ^-, n) ^{99m}Tc (1/2-, 6.02h, 0.142MeV γ) ^{99}Tc (9/2-, 2.14x10⁵y, 0.29MeV β^-) ^{99}Ru
 (12.60%) + ^{99}Tc (9/2-, 2.14x10⁵y, 0.29MeV β^-) ^{99}Ru (5/2+)
 ($\mu^-, 2n$) ^{98}Tc (6+, 4.2x10⁵y, 0.397MeV β^-) ^{98}Ru (0+)
 ($\mu^-, 3n$) ^{97m}Tc (1/2-, 90d, 0.0965MeV γ) ^{97}Tc (9/2+, 2.6x10⁵y, EC) $^{97}\text{Mo}(5/2^+)$
 + ^{97}Tc (9/2+, 2.6x10⁵y, EC) $^{97}\text{Mo}(5/2^+)$

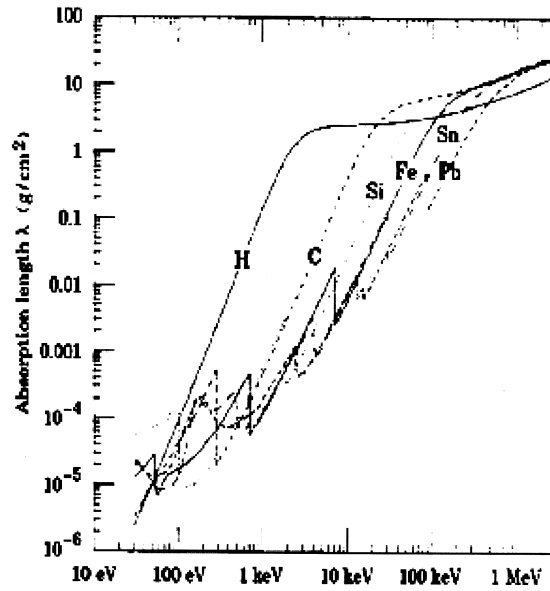
【 10 】

^{107}Ag 6(9) ($\mu^-, 0n$) (μ^-, n) ($\mu^-, 2n$) ($\mu^-, 3n$) ($\mu^-, 4n$) ($\mu^-, p+xn$) ($\mu^-, p+xn$)
 51(18) 25(18) 12(11) 6(6) 2.3x10⁻¹ 1.8x10⁻¹

【 図 1 1 】



【 図 1 2 】

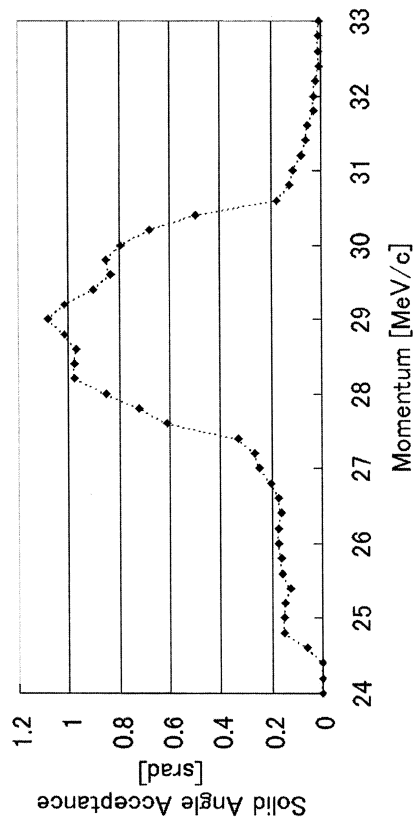


【 図 1 3 】

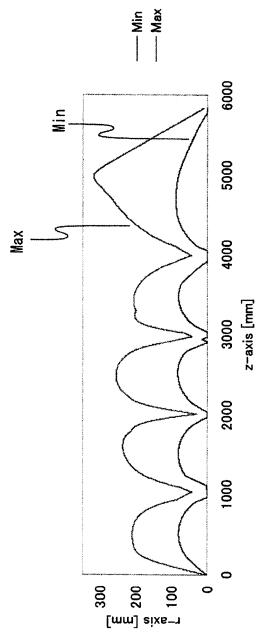
方式	エネルギー源	⁹⁹ Mo生成量/s ⁹⁹ Tc崩壊量/6d	^{99m} Tc生成量/s ⁹⁹ Tc崩壊量/6d
原子炉核分裂 2.2 MW CANDU [2]	0.027 mg/s (14 g/144 h) ²³⁵ U (82 GJ/1g ²³⁵ U) 0.786x10 ¹⁷ fission (175 MeV/fission)	4.8x10 ¹⁵ /s (6.11/100 fission) 3.7x10 ¹⁵ Bq/6d (崩壊率0.0105/h)	4.4x10 ¹⁴ /s (崩壊率比:0.0105/0.115) 4.4x10 ¹⁴ Bq/6d
陽子核反応 ¹⁰⁰ Mo(p,2n) ^{99m} Tc [3]	24 MeV, 0.2 μ A	0.17x10 ⁹ μ A/s (p,2n)反応率: 0.6x GBq/ μ A-h 8.6x10 ¹⁰ μ A/6d	
ミュオン核吸収 (天然Ru)	500MeV陽子300 μ A 加速陽子: 1.3x10 ¹⁵ /s μ 強度: 2.2x10 ¹¹ /s	3.3x10 ¹⁰ /s (0.15/ μ -) 2.5x10 ¹⁰ Bq/6d	
ミュオン核吸収 (濃縮 ¹⁰⁰ Ru)		1.1x10 ¹¹ /s (0.51/ μ -) 1.0x10 ¹² Bq/6d	

放射性テクネチウム99異性体生成法の概念的比較

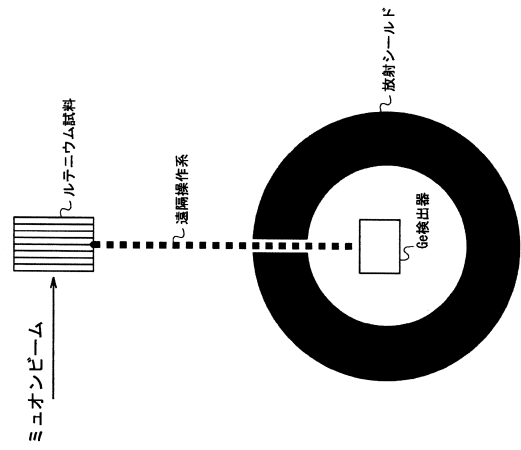
【 図 1 4 】



【 図 15 】



【 図 16 】



フロントページの続き

審査官 藤本 加代子

(56)参考文献 特開平07-239397(JP,A)

永嶺 謙忠, ミュオン(中間子)を用いた物性研究, 放射光, 日本, 日本放射光学会, 1998年2月, Vol.11, No.1, pp.24-29

Kase T. and KONASHI K., Transmutation of 99Tc with the Use of an Accelerator, Nuclear Science and Engineering, 米国, American Nuclear Society, 1994年11月, Vol.118, No.3, pp.153-159

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G21G 4/08

G21G 1/10

G21K 1/093

JSTPlus(JDreamIII)