



Title	130Teおよび128Teの二重ベータ崩壊半減期
Author(s)	高岡, 宣雄
Citation	大阪大学, 1968, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/29408">https://hdl.handle.net/11094/29408</a>
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">＜a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"&gt;https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed</a> >大阪大学の博士論文について <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">&lt;/a&gt;</a> をご参照ください。

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

氏名・(本籍)	高岡宣雄
	たか おかのぶ お
学位の種類	理学博士
学位記番号	第 1460 号
学位授与の日付	昭和 43 年 3 月 28 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 2 項該当
学位論文名	$^{130}\text{Te}$ および $^{128}\text{Te}$ の二重ベータ崩壊半減期
論文審査委員	(主査) 教授 緒方 惟一
	(副査) 教授 若槻 哲雄 教授 堀江 忠男 教授 杉本 健三
	助教授 森田 正人

## 論文内容の要旨

Mass number 130(128) の isobars の energy levels を比較すると,  $^{130}\text{I}(^{128}\text{I})$  の ground state は  $^{130}\text{Te}(^{128}\text{Te})$  のそれよりも 0.407 MeV (1.268 MeV) だけ高いので,  $^{130}\text{Te}(^{128}\text{Te})$  は  $^{130}\text{I}(^{128}\text{I})$  を経て  $^{130}\text{Xe}(^{128}\text{Xe})$  へ successive に  $\beta$ -decay できない。しかし  $^{130}\text{Te}(^{128}\text{Te})$  と  $^{130}\text{Xe}(^{128}\text{Xe})$  との energy 差は 2.543 MeV (0.872 MeV) あるので,  $^{130}\text{Te}(^{128}\text{Te})$  が同時に 2 個の電子を放出して  $^{130}\text{Xe}(^{128}\text{Xe})$  へ decay することが可能である。この崩壊は二重ベータ崩壊 (double  $\beta$ -decay) と呼ばれる。

2  $\beta$ -decay の decay probability はその際に放出される 2 個の電子に伴って 2 個の neutrinos が放出されるかされないかで, 約  $10^5$  倍だけ異なる。テルルの場合には次のように予想されている。

Transition	$(T_{1/2})_{\text{nor}}$ (years)	$(T_{1/2})_{2\nu}$ (years)
$^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$	$1 \times 10^{16 \pm 2}$	$5 \times 10^{21 \pm 2}$
$^{128}\text{Te} \rightarrow ^{128}\text{Xe}$	$1 \times 10^{19 \pm 2}$	$4 \times 10^{26 \pm 2}$

現在まで得られている  $^{130}\text{Te}$  の 2  $\beta$ -decay half-life の実験結果を次に示す。

Authors	Method	$(T_{1/2})_{\text{exp}}$ (years)
1. Inghram and Reynolds ('50)	M. S.	$5 \times 10^{20}$
2. Fremlin Walter ('51)	N. E.	$> 1.3 \times 10^{16}$
3. Hayden and Inghram ('53)	M. S.	$1 \times 10^{21}$
4. Takaoka and Ogata ('66)	M. S.	$8.2 \times 10^{20}$
5. Kirsten, Gentner, Schaeffer ('67)	M. S.	$6 \times 10^{20}$
6. Present work ('67)	M. S.	$8.0 \times 10^{20}$

又  $^{128}\text{Te}$  の 2  $\beta$ -decay half-life に関して得られている実験結果は次に示す如くである。

Authors	Method	( $T_{1/2}$ ) <sub>exp</sub> (years)
1. Inghram and Reynolds ('50)	M. S.	$>8 \times 10^{19}$
2. Fremlin and Walter ('52)	N. E.	$>1.3 \times 10^{16}$
3. Takaoka and Ogata ('66)	M. S.	$>3 \times 10^{22}$
4. Present work ('67)	M. S.	$>6 \times 10^{22}$

今回の実験において、 $^{130}\text{Te}$ ( $^{128}\text{Te}$ ) の  $2\beta$ -decay half-life を求めるために、地質学的に古いテルル鉱物から抽出した Xe を高感度質量分析計で分析した。使用した鉱物は次の5つの産地からのものである。

Mine	Mineral	Age (years)
1, 大谷鉱山	$\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{S}$	$9.3 \times 10^7$ (porphyrite, K-Ar)
2, 諏訪鉱山	$\text{Bi}_2\text{Te}_3$	$9.0 \times 10^7$ (biotite, K-Ar)
3, 河津鉱山	Te	? ( $3 \times 10^6$ )
4, 蓮台寺鉱山	Te (?)	? ( $3 \times 10^6$ )
5, 手稲鉱山	Te	? ( $6 \times 10^6$ )

鉱物からのガス抽出に際して2つの異なった加熱様式を採用した。すなわち、加熱温度を約  $200^\circ\text{C}$  から約  $1200^\circ\text{C}$  まで数時間のうちに連続的に上げて、Te 鉱物中のガスをすべて一度に抽出して精製してアンプルに封入する方法と、もう一つは加熱温度を階段状に上げて1時間一定温度に保つ方法 (stepwise heating) である。stepwise heating において、各温度で抽出されたガスは精製され温度毎にそれぞれのアンプルに封入して分析試料とした。

$^{130}\text{Xe}$ -excess の定量は  $^{128}\text{Xe}$ -spike を使用した同位体希釈法を用いて行われた。この方法は試料 Xe の chemical fractionation による error を生じないという利点をもっている。大谷及び諏訪テルル鉱の age はそれぞれのテルル鉱と地質学的に近親関係にある、K 含有鉱物を使用して K-Ar 法に従って求めた。又テルル鉱物中のテルル濃度はそれぞれの試料について重量分析して決定された。各鉱山からのテルル鉱物に対して得られた Xe anomaly の結果は次の通りである。

(a) 大谷テルル鉱からの Xe-anomalies:  $^{129}\text{Xe}$ ,  $^{130}\text{Xe}$  及び  $^{131}\text{Xe}$  に大きな excess が見出された。これらの excesses は、stepwise heating において、 $600^\circ\text{C}$  で急激に表われた。 $^{130}\text{Xe}$ -excess 量は平均  $(1.32 \pm 0.09) \times 10^{-11}$  ccSTP/g  $^{130}\text{Te}$  であった。鉱物の age は porphyrite を使用して K-Ar 法から  $(9.30 \pm 0.28) \times 10^7$  年と決定された。この porphyrite 脈はテルル鉱を含んだ石英脈を切ったり、あるいは石英脈によって切られたりしているので、テルル鉱の生成時期と porphyrite の生成時期とは大きくは異ならないと考えられる。テルルを多く含む石英脈は porphyrite 脈を切ることが多い。

見出された  $^{130}\text{Xe}$ -excess がすべて  $^{130}\text{Te}$  の  $2\beta$ -decay products かどうか議論された。 $^{130}\text{Xe}$ -excess に寄与するかも知れない nuclear process として次のものが考えられる。

- (a) atmospheric xenon contamination
- (b) spontaneous fission
- (c) neutron-induced fission

- (d) charged particle-induced fission and reaction
- (e)  $^{130}\text{Te}$  の successive single  $\beta$ -decay
- (f)  $^{128}\text{Te} (\alpha, 2n) ^{130}\text{Xe}$
- (g)  $^{133}\text{Cs} (n, \alpha) ^{130}\text{I} \xrightarrow{\beta} ^{130}\text{Xe}$
- (h)  $^{130}\text{Te} (\nu_l, l^-) ^{130}\text{I} \xrightarrow{\beta} ^{130}\text{Xe} \quad (l^- = e^-, \mu^-)$
- (i) 予期せざる xenon anomaly

考察の結果上述の各 process からの寄与は小さく、問題の  $^{130}\text{Xe}$ -excess はすべて  $^{130}\text{Te}$  の  $2\beta$ -decay products と考えられた。従って  $^{130}\text{Te}$  の  $2\beta$ -decay half-life は  $(T_{1/2})_{\text{exp}}^{130}\text{Te} = (8.37 \pm 0.62) \times 10^{20}$  年と得られた。 $^{128}\text{Xe}$  の小さな excess と  $^{130}\text{Xe}$ -excess との比及び  $^{130}\text{Te}$  の half-life から、 $^{128}\text{Te}$  の  $2\beta$ -decay half-life として  $(T_{1/2})_{\text{exp}}^{128}\text{Te} = 6 \times 10^{22}$  年が得られた。しかし  $^{128}\text{Xe}$ -excess は小さくて  $^{125}\text{Te}(\alpha, n) ^{128}\text{Xe}$  のような他の nuclear process からの寄与が考えられ又測定の限界にも近いので、この  $^{128}\text{Xe}$ -excess をもってすべてが  $^{128}\text{Te}$  の  $2\beta$ -decay products とするのは危険である。従ってこの値は lower limit を与えると考えられる。

$^m\text{Xe}$ -excess/ $^{130}\text{Xe}$ -excess ( $m=129, 131$ ) 比は平均 0.47 ( $m=129$ ) 及び 0.30 ( $m=131$ ) であったが、この比はテルル濃度の増加と共に減少する傾向にあるようだ。又  $^{129}\text{Xe}$ -excess/ $^{131}\text{Xe}$ -excess 比はテルル濃度の増加と共に増加するようだ。

(b) 諏訪テルル鉱からの Xe-anomalies:  $^{130}\text{Xe}$  にはっきりと excess が見出された。この excess は大谷の場合と異り  $400^\circ\text{C} - 600^\circ\text{C}$  の割合に広い温度範囲にわたって現われた。 $^{130}\text{Xe}$ -excess 量は  $(1.39 \pm 0.07) \times 10^{-11}$  ccSTP/g  $^{130}\text{Te}$  であった。鉱物の age は biotite を使用して、 $9.0 \times 10^7$  年と決定された。この値は諏訪鉱山のある阿武隈山地の age とよく一致し、テルル鉱の生成は阿武隈山地の形成と深い関係があると地質学者によって信じられている。大谷の場合と同様見出された  $^{130}\text{Xe}$ -excess が  $^{130}\text{Te}$  の  $2\beta$ -decay products であるということが議論された。 $^{130}\text{Te}$  の half-life は  $(T_{1/2})_{\text{exp}}^{130}\text{Te} = (7.71 \pm 0.38) \times 10^{20}$  年と得られた。 $^{130}\text{Xe}$  以外に  $^{129}\text{Xe}$  と  $^{131}\text{Xe}$  とに小さな excess が存在した。 $^{129}\text{Xe}$ -excess/ $^{130}\text{Xe}$ -excess = 0.06,  $^{129}\text{Xe}$ -excess/ $^{131}\text{Xe}$ -excess = 2 であった。

(c) 河津テルル鉱からの Xe-anomalies:  $^{130}\text{Xe}$  に小さな excess が見出された。その量は  $4 \times 10^{-13}$  ccSTP/g  $^{130}\text{Te}$  であった。鉱物の age は地質学的考察から  $1.3 - 2.5 \times 10^7$  年と仮定された。しかし、 $^{130}\text{Te}$  の half-life を  $8 \times 10^{20}$  年とすると、 $^{130}\text{Xe}$ -excess 量からテルル鉱物の Xe age は  $3 \times 10^6$  年になる。この差は鉱物生成後の変成作用のためかも知れない。

(d) 蓮台寺テルル鉱からの Xe-anomalies: stepwise heating において、 $400^\circ\text{C} - 900^\circ\text{C}$  で小さな  $^{130}\text{Xe}$ -excess が見出された。 $400^\circ\text{C}$  と  $500^\circ\text{C}$  でははっきりと現われた。 $^{130}\text{Xe}$ -excess 量は  $4 \times 10^{-13}$  ccSTP/g  $^{130}\text{Te}$  であった。鉱物の age は地質学的考察から  $1.3 - 2.5 \times 10^7$  年と仮定されたが、 $^{130}\text{Xe}$ -excess から鉱物の Xe age は  $3 \times 10^6$  年となった。河津の場合と同様、この差は鉱物生成後における変度作用に基づくのかも知れない。

(e) 手稲テルル鉱からの Xe-anomalies: stepwise heating に依らずに加熱抽出した Xe 中には  $^{130}\text{Xe}$ -excess を見出すことができなかったが、stepwise heating で抽出した Xe 中に小さな  $^{130}\text{Xe}$ -excess が見出された。 $400^\circ\text{C}$  で現われた  $^{130}\text{Xe}$ -excess は最も大きく、この温度は中性子照射した金

属テルルからの Xe 中の  $^{131}\text{Xe}^*$  ( $^{130}\text{Te} (n, \gamma) ^{131}\text{Te} \xrightarrow{\beta, \beta} ^{131}\text{Xe}^*$ ) の出現温度と一致した。 $^{130}\text{Xe}$ -excess 量は  $9 \times 10^{-13}$  ccSTP/g $^{130}\text{Te}$  で、鉱物の age は地質学的考察から  $0.1 - 6.3 \times 10^7$  年と仮定された。 $^{130}\text{Xe}$ -excess と  $^{130}\text{Te}$  の half-life とから、鉱物の Xe age として  $6 \times 10^6$  年が得られた。この値は仮定された age の範囲内に入る。

以上の結果から得られる half-life についての結論は次の通りである。 $^{130}\text{Te}$  の  $2\beta$ -decay half-life は、大谷テルル鉱及び諏訪テルル鉱を使用して得た値の平均として、

$$T_{1/2} = (8.0 \pm_{0.9}^{0.4}) \times 10^{20} \text{年}$$

が得られた。ここで記された error は平均値に対する偏差 ( $\pm 0.4$ ) と porphyrite (biotite) の Ar-age とテルル鉱物の Xe-age との差 (約500万年と見積った) とある。 $^{128}\text{Te}$  の half-life に関して  $T_{1/2} \geq 6 \times 10^{22}$  年が得られた。

上に得られた  $^{130}\text{Te}$  の experimental half-life と先に述べた theoretical half-life とを比較して、 $^{130}\text{Te}$  の  $2\beta$ -decay は主に two-neutrino decay であると結論できる。No-neutrino decay の decay probability への寄与は次のように estimate される。

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{eff}}^{(\text{meas})} &= \alpha^2 \lambda_{\text{nov}}^{(\text{theo})} + (1 - \alpha^2) \lambda_{2\nu}^{(\text{theo})} \\ \therefore \alpha^2 &= (\lambda_{\text{eff}} - \lambda_{2\nu}) / (\lambda_{\text{nov}} - \lambda_{2\nu}) \\ &\simeq (\lambda_{\text{nov}} / \lambda_{2\nu})_{\text{exp}} / (\lambda_{\text{nov}} / \lambda_{2\nu})_{\text{theo}} \end{aligned}$$

ここで

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{eff}}^{(\text{meas})} &= \frac{0.69}{8.0 \times 10^{20}} \\ \lambda_{\text{nov}} &= \frac{0.69}{1 \times 10^{16}} \\ \lambda_{2\nu} &= \frac{0.69}{5 \times 10^{21}} \end{aligned}$$

故に

$$\alpha^2 = 2 \times 10^{-5}$$

理論的には、neutrinoless  $2\beta$ -decay の存在と lepton-conservation の破れとは identical なので、lepton-conservation の成立しない  $\beta$ -decay interaction amplitude の limit は

$$\alpha \leq 5 \times 10^{-3}$$

で与えられる。

$^{129}\text{Xe}$ -excess/ $^{131}\text{Xe}$ -excess 比の anomaly は (1)  $^{129}\text{Te}$  及び  $^{130}\text{Te}$  の epithermal-neutron capture 又は (2)  $^{130}\text{Te}$  の ( $\mu^-$ , n) 反応及び  $^{128}\text{Te}$  及び  $^{130}\text{Te}$  の thermal-neutron capture によって定性的に理解できる。 $^m\text{Xe}$ -excess/ $^{130}\text{Xe}$ -excess ( $m=129, 131$ ) 比がテルル濃度の増加と共に減少する傾向にあるのは、 $^{128}\text{Te}$  及び  $^{130}\text{Te}$  の neutron-capture とテルルの他の isotopes 及び impurities による neutron-capture との間の competition process と考えるならば理解されよう。又  $^{129}\text{Xe}$ -excess/ $^{131}\text{Xe}$ -excess 比がテルル濃度の減少と共に減少する傾向にあることは、 $^{126}\text{Te}$  及び  $^{128}\text{Te}$  の ( $\alpha$ , n) 反応を考えることによって定性的に理解される。ここで  $\alpha$  粒子は鉱物中の微量のウラン及

びトリウムの  $\alpha$ -decays によって供給されると考える。

## 論文の審査結果の要旨

質量数偶数の同重核には核電荷（偶数）が2異なり、ともに安定とみられるものが幾組か存在している。しかし、このような関係にある両核の質量に差異があるときには、質量大なる方は同時に2箇の電子を放出して他へ遷移する可能性のあることが早くより理論的に指適されていた（1935）。しかし、この種の遷移（二重 $\beta$ -崩壊）においては、その崩壊にあたり中性微子を伴なわないか、又2箇の中性微子も同様に放出されるかにより、理論的にはその半減期が約 $10^5$ 異なることが計算されている。予想される半減期は中性微子を伴なわない崩壊確率大なる場合でも $10^{15-20}$ 年程度で、この現象の実在の実験的確認を得ることさえ従来非常に難とされ、1949~1951 Inghram が質量分析法により  $^{130}\text{Te} \xrightarrow{2\beta} ^{130}\text{Xe}$  崩壊の結果と思われる  $^{130}\text{Xe}$  過剰を15億年程度の非常に古い Te 鉱物中で発見し

て以来、昨1967年まで全くポジティブの結果が得られていなかった。昨年質量分析法により Kirsten 等が ( $^{130}\text{Te} \xrightarrow{2\beta} ^{130}\text{Xe}$ )、又計数法により Wu 等が ( $^{48}\text{Ca} \xrightarrow{2\beta} ^{48}\text{Ti}$ ) 新しい結果を発表、二重 $\beta$ 崩壊現象の存在がほぼ確実であることを示すと同時に、その崩壊は2箇の中性微子を伴っているようであることを明らかにした。

高岡君は1962年以来、同位体稀釈法を用いて極微質量分析法により二重 $\beta$ 崩壊の研究を行ない、 $^{130}\text{Te} \xrightarrow{2\beta} ^{130}\text{Xe}$  現象の実在を確認、その半減期の算定を行なって二重 $\beta$ 崩壊は中性微子を伴う崩壊であることを明らかにした。

実験方法は Te 鉱物中に内包されているガスを加熱抽出し、Xe ガスを可能な限り精製分離し、極微質量分析法により Xe 同体比の測定を行ない、大気 Xe を標準として過剰 Xe 量を求めた。一方、試料鉱物の年代決定はいわゆる K-Ar 法で行なっている。高岡君はガス抽出法として、従来の高温において一挙に行なうときには、鉱物より抽出される Xe の大部分が大気 Xe 成分のもので、過剰がそれらにおおわれる難点をさけるため、抽出温度 $300^\circ\text{C} \sim 1100^\circ\text{C}$ 間で $100^\circ\text{C}$ 毎に分別抽出を行ない、その各成分についての測定を行なった。この分別抽出の結果、比較的若い Te 鉱物 ( $< 1 \times 10^8$ 年) を試料としたにもかかわらず、従来の方法では過剰の発見が殆んど不可能と思われるものに対しても測定可能となった。

又、この分別抽出法は  $^{130}\text{Xe}$  過剰は非常に狭い温度帯で殆んど全量抽出されることを明らかにし、この過剰が Te に密接に関連をもつことも、同試料を中性子照射し、これにより抽出される  $^{131}\text{Xe}$  過剰が同温度帯で抽出されることから明らかにした。

又同君は  $^{130}\text{Xe}$  過剰が  $^{130}\text{Te} \xrightarrow{2\beta} ^{130}\text{Xe}$  以外の過程によりつくられる可能性について種々検討し、何れも量的に問題となり得ないことを確かめ、少なくとも実験誤差内において、過剰  $^{130}\text{Xe}$  は  $^{130}\text{Xe}$  の二重 $\beta$ 崩壊産物と結論、その半減期の算定を行なって、 $T_{1/2} = (8.0^{+0.4}_{-0.9}) \times 10^{20}$  年を得た。これによ

り  $^{130}\text{Te}$  二重  $\beta$  崩壊は 2 箇の中性微子を伴う過程であり、無中性微子過程があるとしても前過程の千分の一以下であるという結論を得ている。

$\text{Te}$  鉱物よりの抽出  $\text{Xe}$  中には 130 以外に、128, 129, 131 の過剰があるが、これらの過剰の解析は今後に残された問題である。

以上高岡君の研究は、実験方法において、分別抽出法をはじめて二重  $\beta$  崩壊研究に用い、比較的若く少量の試料での研究を可能にした点、又別分抽出法と中性子照封法とにより  $^{130}\text{Xe}$  過剰が  $\text{Te}$  をその根源としていることを動かし得ないものとした点、又  $^{130}\text{Xe}$  過剰に寄与し得ると考えられる諸要因を定量的に検討して測定された  $^{130}\text{Xe}$  過剰は少くとも誤差内で  $^{130}\text{Te}$  二重  $\beta$  崩壊産物であることをはじめて明確に結論づけたこと等は、この領域の研究としては最初であり、又その研究結果は  $\beta$  崩壊の理論にも大きな寄与をもたらすものとして、理学博士の学位論文として十分価値あるものといえる。