

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23600001

研究課題名(和文)軌道電子に影響を受ける半減期変化の系統的研究

研究課題名(英文)Electron-capture decay rate of  ${}^7\text{Be}$  encapsulated in fullerene cages

研究代表者

大槻 勤(Ohtsuki, Tsutomu)

京都大学・原子炉実験所・教授

研究者番号：50233193

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：軌道電子捕獲崩壊[EC崩壊]は、核位置に存在する軌道電子を核内核子に取り込んで崩壊する現象で、その確率は核位置での電子密度に比例する。本研究の目的は加速器による量子ビーム(陽子や電子)を用いて ${}^7\text{Be}$ を製造し、温度・化学形・結晶形等の因子を変えて、半減期を大きく変化させることである。 ${}^7\text{Be}@C_{60}$ の温度変化(室温と5K)で半減期変化をみる実験をおこなった。その結果、室温のベリリウム金属中 ${}^7\text{Be}$ と5Kに冷却された $C_{60}$ 内の ${}^7\text{Be}$ の半減期を比較すると1.5%以上も短くなることを見出した。 $C_{60}$ 、 $C_{70}$ を特殊な環境下での ${}^7\text{Be}$ の半減期測定を行い、大きな半減期変化を実現させるに至った。

研究成果の概要(英文)：The decay rate of  ${}^7\text{Be}$  electron capture (EC) was measured in  $C_{60}$  and  $C_{70}$  and Be metal with a reference method. The half-life of  ${}^7\text{Be}$  endohedral  $C_{60}$ ,  $C_{70}$  ( ${}^7\text{Be}@C_{60}$ ,  $C_{70}$ ) was found to be  $52.49 \pm 0.04$  days for He temperature. These values are almost 1.5% shorter than that of  ${}^7\text{Be}$  in Be metal at room temperature. The result is a reflection of the different electron wave-functions for  ${}^7\text{Be}$  inside  $C_{60}$ ,  $C_{70}$  compared to when  ${}^7\text{Be}$  is in Be metal. The magnitude of the average charge-transfer from the L(2s) electrons of the  ${}^7\text{Be}$  atom play an important role in such variation in the decay constant in the environments.

研究分野：放射化学

キーワード：半減期 放射性ベリリウム フラーレン 自動測定 崩壊定数 放射性金属ベリリウム

### 1. 研究開始当初の背景

放射性壊変は本来原子核に基づく現象であり、その壊変は確率的なもので多くの場合原子核を取り巻く核外軌道電子とは無関係と思われてきた。これは原子と原子核の大きさの比や原子核内の核子間の結合力は核と電子または原子間の結合力などが大きく隔たっていて、原子核の現象と核外電子の現象は互いに孤立系であるとして近似しても一般的には不都合は少ないからである。しかしいくつかの例では、わずかではあるが、化学状態の変化や加圧下で壊変定数、いわゆる半減期が変化することが認められていた。現在知られているその壊変形式は、ベータ壊変のひとつの形式である軌道電子捕獲壊変 [EC壊変] である。この壊変の場合、小さいとはいえ原子核の体積がゼロではないため、電子雲の核位置での重なりが無視できないので、EC壊変において半減期に差異が現れる。EC壊変は核位置に存在する軌道電子（主に 1s や 2s 電子）を原子核に取り込んで壊変し ( $p+e^- \rightarrow n+\gamma$ )、その壊変確率は軌道電子の核位置における密度に依存するからである。この可能性はセグレ (E. Segre) やドーデル (DaudeI) らによって 1947 年に予言され、彼らの手で半減期 53 日の EC 壊変する放射性ベリリウム ( ${}^7\text{Be}$ ) を用いて実験的にみごとに明らかにされた ( , )。

### 2. 研究の目的

軌道電子捕獲崩壊 [EC (electron capture) 崩壊] は、核位置に存在する軌道電子を核内核子に取り込んで崩壊する現象で、その確率は核位置での電子密度に比例する。代表的な EC 崩壊核種である放射性ベリリウム ( ${}^7\text{Be}$ ) 原子では、核に近い 1s や 2s の電子雲は周りの環境の影響を最も受けやすい。 ${}^7\text{Be}$  原子を特殊な環境に置いて 1s や 2s 電子を制御できると、 ${}^7\text{Be}$  の半減期も制御可能となる。本研究では量子ビーム (陽子や電子) を用いて  ${}^7\text{Be}$  を製造し、化学形・結晶形・温度等 ( , ) の因子を変えて、どれだけ半減期を変化させることができるかに挑戦する。

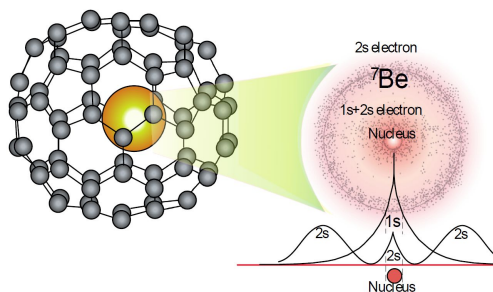


図 1 : C70 の K 殻 (1s) と L 殻 (2s) 電子の動径分布関数

### 3. 研究の方法

籠状構造の分子フラレン内は真空状態

と予測され、 ${}^7\text{Be}$  のような EC 壊変核種を内包させて測定した半減期は化学状態に関係しない孤立系のものであろうと予測をたてた (予測は図 1 中に C70 の K 殻 (1s) と L 殻 (2s) 電子の動径分布関数として示してある)。まずこの興味から、EC 壊変核種  ${}^7\text{Be}$  を用いて実験計画がたてられた。そしてついに C60 や C70 内に存在する  ${}^7\text{Be}$  の半減期測定のために、核反応にともなう原子の反跳を利用して C60 や C70 内に  ${}^7\text{Be}$  原子を内包させることができた。実際の実験では  ${}^7\text{Be}$  が C60 や C70 とベリリウム金属内に存在する場合に、その半減期に差異が観測されるかどうか調べられた。

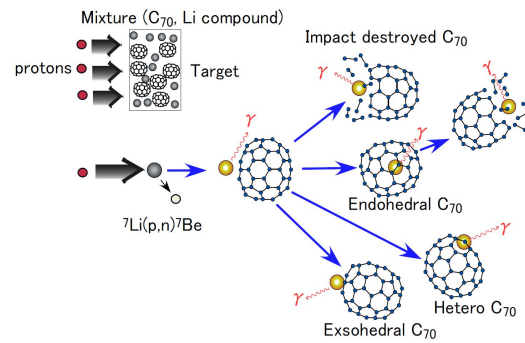


図 2 : C70 とリチウム化合物の混合体内で起こる様々なプロセス

EC 壊変核種  ${}^7\text{Be}$  の半減期が、おかれた化学的環境によって変化するかを調べるためには、異なった試料 (化学形や結晶構造) 内で同じ測定条件において比較測定することが重要である。まず、C60 内に  ${}^7\text{Be}$  を内包させるためにリチウム化合物 ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) と C60 や C70 を二硫化炭素 ( $\text{CS}_2$ ) 内で均一に混合し、溶媒を取り除いた試料をアルミニウム箔で包み、サイクロトロンからの 16MeV の陽子を照射した。標的物質内では、 ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  反応が起き、この核反応では中性子や即発線の放出を伴うので、核反応生成物の  ${}^7\text{Be}$  は反跳を受ける。この反跳エネルギーによって動く  ${}^7\text{Be}$  原子と C60 や C70 は標的物質内で原子分子衝突を起こす。 ${}^7\text{Be}$  は反跳により、ごくわずかではあるが C60 や C70 ケージを壊すことなく籠内に内包化される ( ~ )。Be 原子が C60 や C70 に内包可能であることは、第一原理を用いた分子動力学 (MD) シミュレーションによっても確かめられている。標的物質 (C70 とリチウム化合物の混合体) 内においてどのようなプロセスで内包化が起きるのか、図 2 に示した。陽子照射の後、高速液体クロマトグラフ装置 (HPLC) を用いて  ${}^7\text{Be}$  原子が内包された C60 を分離抽出し、半減期の測定試料として用いた。比較試料を調製するために、ベリリウム金属 (10 X 0.3t の円盤状のもの) を石英管内に真空封入し、電子ライナックで 50MeV に加速された電子を Pt 板と電子掃引マグネットを利用し制動放射線に変換して照射した。50MeV の電子線が試料に直接照射されて、ベ

リリウム金属の結晶構造が大きく破損するおそれがあるためである．この照射によって核反応  ${}^9\text{Be}(\gamma, 2n){}^7\text{Be}$  が起こり、ベリリウム金属内に均一に分布する  ${}^7\text{Be}$  試料を作製することができる．照射されたベリリウム金属 ( ${}^7\text{Be}$  ドープ) を真空中に保ちながら、電気炉内 1150 (融点 1270 ) で約 1 時間放置することにより、放射線損傷を受けたベリリウム金属格子 (*hcp* 構造) を回復させる．

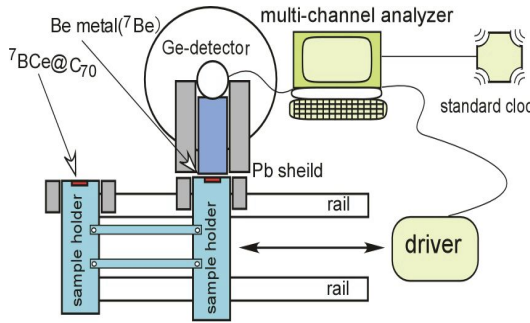


図 3：半減期自動測定装置

調製された二つの試料を半減期自動測定装置 [  ${}^7\text{Be}$  内包 C60 とベリリウム金属それぞれの試料を取り付けたアームが Ge- 線検出器の前に交互に移動する装置：図 3 ] に取り付け、 ${}^7\text{Be}$  の壊変後、 ${}^7\text{Li}$  の第一励起状態から放出される 478keV ( ) の線を測定する．測定では、Ge- 線検出器からのシグナルは、波高分析装置 (ADC) を通して、線スペクトルとしてコンピュータに送られて保存される．正確な時間間隔で測定を行うために、電波時計を用いて日本標準時間を受信する時刻修正システムを測定用コンピュータに導入した．各試料の測定時間は 6 時間 [ 21480 秒 (5 時間 58 分 00 秒) ] にセットし、120 秒を試料の移動時間と数秒程度の ADC の不感時間 (dead time) ] とした．測定は少なくとも 150 日以上連続して行い、線スペクトルをひとつの試料につき 300 回以上取得した．測定は  ${}^7\text{Be}$  内包 C60 試料を、室温 (293K) と  ${}^7\text{Be}$  の分子運動を止めるために冷却 (5K) して、それぞれ 2 回ずつ行われた．また、同様に C70 とベリリウム金属内に  ${}^7\text{Be}$  ドープし、半減期測定実験が行われた．

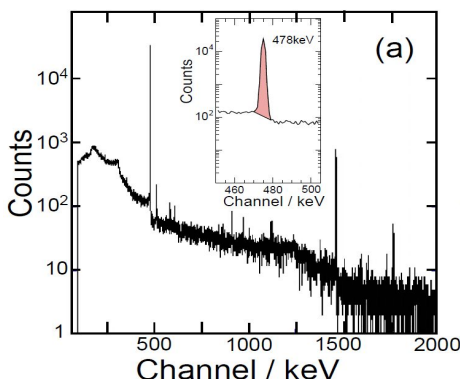


図 4：C70 中の  ${}^7\text{Be}$  のガンマ線スペクトル

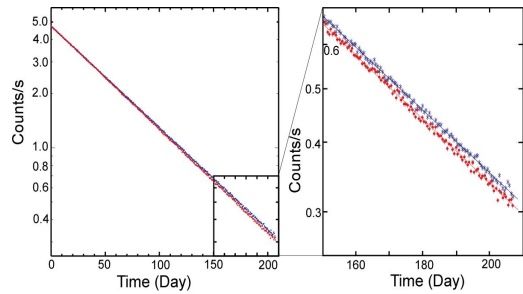


図 5：測定経過日数に対する C70 中の  ${}^7\text{Be}$  の放射性壊変の様子

#### 4. 研究成果

図 4 中に例として C70 に  ${}^7\text{Be}$  が内包された試料において取得された典型的な線スペクトルを示す．大きな線のピークは  ${}^7\text{Be}$  ( ${}^7\text{Li}$  第一励起状態) の 478keV と自然放射線である  ${}^{40}\text{K}$  の 1461keV のみであることが分かる．Ge- 線検出器で得られた線解析の手法は確立されていて、目的である  ${}^7\text{Be}$  の 478keV の光電ピーク面積は高精度で解析できる．図 5 に  ${}^7\text{Be}$  が内包された C70 を 5K に冷却した場合と  ${}^7\text{Be}$  が室温で金属 Be 内に存在する場合における、 ${}^7\text{Be}$  の放射性壊変の様子を測定経過日数の関数として示した．ここでは測定開始時の計数率 [ 図 5 の縦軸 (カウント/秒) ] を 4.8cps に規格化し、ふたつの壊変曲線を直接比較できるようにプロットした．また、150 日から 210 日のプロット部分を拡大して、壊変速度の違いが分かるようにしてある．これらの壊変曲線を指数関数で解析した結果、C70 内と金属 Be 内での  ${}^7\text{Be}$  の半減期は、それぞれ  $52.42 \pm 0.04$  日及び  $53.25 \pm 0.04$  日と求められた．また、図 6 に室温 (293K) と冷却 (5K) でくり返し測定された半減期の比較を示す．驚くことに、本実験で求められた 5K における C60 内の  ${}^7\text{Be}$  の半減期は、その室温測定による半減期よりも 0.34% も短くなり、さらに、293K のベリリウム金属内の半減期より 1.5% 短いことが分かった．そしてこの値は、これまでのさまざまな化学形や高圧下で測定されたものの半減期よりも大きな変化が認められた (C70 の実験結果は投稿準備中)．

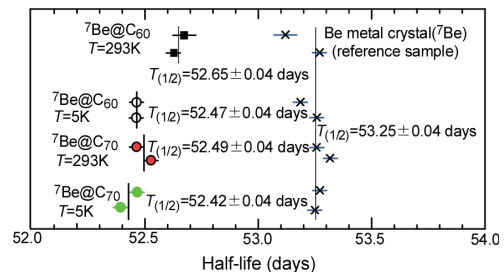


図 6：室温 (293K) と冷却 (5K) でくり返し測定された半減期の比較

実験的に核位置における軌道電子の密度

比は L(2s)/K(1s)軌道電子捕獲比として測定される。今日、値に多少ばらつきはあるものの、さまざまな環境下(物質内)での  ${}^7\text{Be}$  の L/K 捕獲比が報告されつつある( )。これらの差異は Be 原子がおかれた環境の影響(化学形や結晶構造、圧力、温度)の違いによって、L/K 捕獲比(つまり L 殻と K 殻の核位置での電子密度比)が変化していることを示唆している。Be 原子の化学結合には 2s(場合によっては 2p)の軌道電子が用いられるので、Be 原子よりも電気陰性度の大きい原子、たとえば F 原子が結合すると 2s (2p)の混成軌道の電子は Be 原子から奪われて、最終的に  ${}^7\text{Be}$  の核位置に分布する 2s 電子密度が減少する。EC 壊変の確率は捕獲すべき核位置の軌道電子の密度に依存するので、この場合には  ${}^7\text{Be}$  の壊変定数は小さくなり半減期は長くなると考えられる。

では、今回の実験結果はどのように説明できるか。C60 内での  ${}^7\text{Be}$  原子の安定位置を求める計算を行い、その核位置での電子密度の理論的導出を行った。まず、本計算では密度汎関数法(DFT)に準備された一般化密度勾配近似法(GGA)に基づいた第一原理による電子状態の計算コード DMOL3 を用いて C60 と  ${}^7\text{Be}$  原子の全エネルギー計算を行ったところ、C60 中心、5 員環の下、6 員環の下、単結合の下が Be 原子の安定点であり、この中でも C60 中心が最も安定であることが分かった。これは Shigeta ら( )の予測でも裏付けられた。また C60 内のこれらの安定点について、温度 0K における Be 原子の核位置での電子密度が求められた。比較のために、0K の孤立系 Be 原子と金属 Be 内での核位置の電子密度の計算結果も行った。その結果、C60 中心において Be 原子の核位置の電子密度は最大となり、また、孤立系 Be 原子の核位置での電子密度とほぼ等しいことが分かった。この理論計算において導出された金属 Be 内と C60 中心の Be 原子の電子密度の差は約 1.6%であり、実験的に求められた差 1.5%(図6より)とほぼ一致している。孤立系 Be 原子は K 殻(1s)及び L 殻(2s)において(1s<sup>2</sup>2s<sup>2</sup>)の簡単な電子構造を持つ。当初のくろみどおり、C60 の内部は真空と考えられ、 ${}^7\text{Be}$  はほぼ孤立原子として存在し、得られた C60 内の  ${}^7\text{Be}$  の半減期は、(1s<sup>2</sup>2s<sup>2</sup>)の Be 原子の核位置での電子密度を反映していると考えるのが妥当であろう。また、理論的に導出された孤立系 Be 原子の L(2s)と K(1s)殻の軌道電子の核内への捕獲比(L/K 捕獲比)は約 10%程度であり、この値は F 原子と化学接合する場合に比較してはるかに大きい。さらに図6に見られるような半減期の温度依存性(293K と 5K)はどのように理解するのか考えてみよう。293K における C60 内の  ${}^7\text{Be}$  原子は熱運動をしているであろう。われわれは理論的に C60 中心が最も安定であることを見いだしているので、Be 原子を C60 中心に置き温度をパラメータとした Boltzmann 分布関数を解いて 293K での熱運動

を考慮した核位置での電子密度を見積もった。この結果、温度 0K において C60 中心の Be 原子の核位置での電子密度は 36.016 e-/<sup>3</sup>であったが、293K における電子密度は 35.899 e-/<sup>3</sup>と求められた。この計算結果の差は 0.33%であり、実験結果の差 0.34% [52.47 日(5K)と 52.65 日(293K)]と比較すると非常に良い一致がみられた。低温(すくなくとも 0K~5K 程度)において Be 原子は C60 中心に位置して(1s<sup>2</sup> 2s<sup>2</sup>)の殻構造をもっているが、温度が上がるにつれて熱運動により、C60 中心から 5 員環の下、6 員環の下、単結合の下などの準安定点の間の閾エネルギーを超えて Be 原子の移動が起こるようになる。Be L(2s)殻の電子は C60 ケージの電子と混成軌道をつくるため Be 原子から奪われて、その分、核位置での電子密度が減少する。図7には理論的に求められた C60 中心と単結合下における K(1s)殻と L(2s)殻の波動関数の分布を示す。C60 中心では Be 原子の軌道電子は対称性が保たれ C60 の C の軌道電子と相互作用はしないが、単結合の下での 2s 電子は C60 ケージの C の電子とスピン相互作用を介して準位の縮退が解け、ひろがりをもつようになる。半減期の温度依存性(293K と 5K)は Be 原子の C60 中心と準安定点の間の熱運動によるポテンシャル移動の割合を示すものと理解できる。

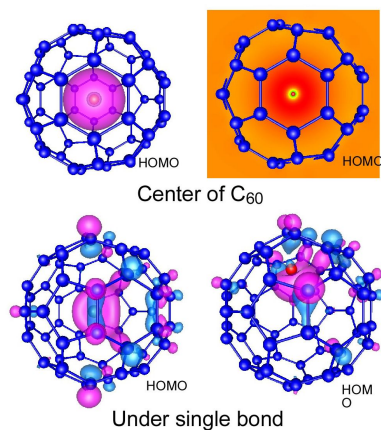


図7：理論的に求められた C60 中心と単重結合下における K(1s)殻と L(2s)殻の波動関数の分布

われわれは C60 や C70 内において希ガスのように対称に分布した電子構造をもつ Be 原子の電子構造(1s<sup>2</sup>2s<sup>2</sup>)をつくりだし、その半減期を知ったことにならないか。これまで地球上では困難とされてきた現象の発見と理解が手にとどくようになるなど、近年の新物質の発見や技術と理論の進展はめざましい。そして、このように原子核の現象と核外電子の相互作用の研究をも可能にしてくれるようになった。それによって電子状態や化学状態の知見が核現象を通じて調べられるよう

になり、放射性壊変に伴う一見無関係な現象も化学的性質を考慮することにより、その体系化が可能になりつつある。

これまでに半減期変化の研究は多くなされてきたが( ~ , 化学形や金属状態をしっかりと明確にした実験は少ない。今後の研究では、“未検の化学形, 金属結晶形において, 温度等のパラメータを変えて半減期変化を系統的に調べる”という研究に進展させる予定である。具体的には電子を剥ぎ取る力が最大のフッ素と  ${}^7\text{Be}$  が化学結合する  ${}^7\text{BeF}_2$  について半減期をしらべ, 電気陰性度の大きさと  $1s, 2s$  電子の原子核位置での電子密度の関連を導出する。さらに, 超伝導転移する金属ニオブ(Nb)内で,  ${}^7\text{Be}$  の半減期変化を室温と 5K で調べ, 全電子第一原理計算手法を用いて  ${}^7\text{Be}$  の置かれたポテンシャルと, 核位置での電子密度を求める。実験・理論両面から, 化学形や金属結晶形, および温度による核外電子状態などの環境変化が EC 崩壊に及ぼす影響を調べ, 半減期を大きく変化させる条件を探る。このようにまだ興味ある研究が多く残されていて, さらにこれら半減期制御は今問題になっている核廃棄物の処理にも通じる大きなテーマである。

#### < 引用文献 >

- E. Segre, Possibility of altering the decay rate of a radioactive substance. Phys. Rev. 71, 1947, 274-275.
- E. Segre, C. E. Wiegand, Experiments on the effect of atomic electrons on the decay constant of  ${}^7\text{Be}$ . Phys. Rev. 75, 1949, 39-43.
- H. W. Johlige, D. C. Aumann, H. J. Born, Determination of relative electron density at beryllium nucleus in different chemical combinations, measured as changes in electron-capture half-life of  ${}^7\text{Be}$ . Phys. Rev. C2, 1970, 1616-1622.
- W. K. Hensley, W. A. Bassett, J. R. Huizenga, Pressure-dependence of radioactive decay constant of beryllium-7, Science 181, 1164-1165(1973), L. Liu, C. A. Huh, Earth and Planetary Sci. Lett. 180, 2000, 163-165.
- T. Ohtsuki, K. Masumoto, K. Sueki, K. Kikuchi, Observation of radioactive fullerene families labeled with  ${}^{11}\text{C}$ , J. Am. Chem. Soc. 117, 1995, 12869-12870.
- T. Ohtsuki, K. Masumoto, K. Ohno, Y. Maruyama, Y. Kawazoe, K. Sueki, K. Kikuchi, Insertion of Be atoms in  $\text{C}_{60}$  fullerene cages:  $\text{Be@C-60}$ , Phys. Rev. Lett. 77, 1996, 3522-3524.
- T. Ohtsuki, K. Ohno, K. Shiga, Y. Kawazoe, Y. Maruyama, K. Masumoto, Insertion of Xe and Kr atoms into

$\text{C}_{60}$  and  $\text{C}_{70}$  fullerenes and the formation of dimers, Phys. Rev. Lett. 81, 1998, 967-970.

R. B. Firestone, V. S. Shirley, C. M. Baglin, S. Y. Frank Chu, J. Zipkin, C. M. Lederer and V. S. Shirley, Eds. Table of Isotopes, 8th Ed. Vol. I (John Wiley & Sons, Inc., 1996).

P. A. Voytas, C. Ternovan, M. Galeazzi, D. McCammon, J. J. Kolata, P. Santi, D. Peterson, V. Guimaraes, F. D. Becchetti, M. Y. Lee, T. W. O'Donnell, D. A. Roberts, S. Shaheen, Direct measurement of the L/K ratio in Be-7 electron capture., Phys. Rev. Lett. 88, 2002, 012501.

Y. Shigeta, H. Saito, Synthetic Metals 135, 2003, 765-766.

A. Ray, P. Das, S. K. Saha, S. K. Das, A Effect of host medium on the L/K ratio in Be-7 electron capture., Phys. Rev. C66, 2002, 012501.

M. Jaeger, S. Wilmes, V. Kollé, G. Staudt, P. Mohr, Precision measurement of the half-life of  ${}^7\text{Be}$ , Phys. Rev. C 54, 1996, 423-424.

E. B. Norman, G. A. Rech, E. Browne, R. M. Larimer, M. R. Dragowsky, Y. D. Chan, M. C. P. Isaac, J. R. McDonald, A. R. Smith, Influence of physical and chemical environments on the decay rates of  ${}^7\text{Be}$  and  ${}^{40}\text{K}$ , Physics Letters B519, 2001, 15-22.

L. G. Liu, C. A. Huh, Effect of pressure the decay rate of Be-7., EARTH AND PLANETARY SCIENCE LETTERS 180, 2000, 163-167.

J. A. Tossell, Does the calculated decay constant for  ${}^7\text{Be}$  vary significantly with chemical form and/or applied pressure?, Earth and Planetary Sci. Lett. 195, 2002, 131-139.

C. B. Li, S. H. Zhou, Z. Y. Liu, Q. Y. Meng, J. Z. Hou, X. M. Li, Y. Y. Fu, Q. G. Wen, S. Y. Hu, Search for Decay Rate Variation of  ${}^7\text{Be}$  in Pt and Al., Chinese Physics Letters 27, 2010, 12301.

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 8 件)

H. Kikunaga, K. Takamiya, K. Hirose, T. Ohtsuki, Comparison of the decay constant of  ${}^{51}\text{Cr}$  with metal, oxide, and chromate chemical states., J. Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 303, 2015, 1581-1583. (査読有), DOI:10.1007/s10967-014-3570-7.

K. Nishio, H. Ikezoe, S. Hofmann, F. P. Heßberger, D. Ackermann, S. Antalic, Y. Arimoto, V. F. Comas, Ch. E. Düllman, A. Gorshkov, R. Graeger, S. Heinz, J. A. Heredia, K. Hiro

se, J. Khuyagbaatar, B. Kindler, I. Kojouharov, B. Lommel, H. Makii, R. Mann, S. Mitsuoka, Y. Nagame, I. Nishinaka, T. Ohtsuki, A. G. Popeko, S. Saro, M. Schädel, A. Türler, Y. Wakabayashi, Y. Watanabe, A. Yakushev, A. V. Yeremin, Study of heavy-ion induced fission for heavy-element synthesis, EPJ Web of Conferences 66, 2014, 03065. (査読有), <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20146603065>.

Y. Kasamatsu, K. Toyomura, N. Shiohara, T. Yokokita, Y. Komori, A. Kino, T. Yoshimura, N. Takahashi, H. Haba, Y. Kudou, H. Kikunaga, T. Mitsugashira, T. Ohtsuki, K. Takamiya, A. Shinohara, Corrosion Behavior of Zr, Hf, and Th with Sm Hydroxide for Chemical Study of Element 104, *Rf. Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences*, Vol. 14, No. 2, (2014) 7-11. (査読有), <http://www.radiochem.org/j-online142.html>.

K. Nishio, H. Ikezoe, S. Hofmann, D. Ackermann, Y. Aritomo, V. F. Comas, Ch. E. Düllmann, S. Heinz, J. A. Heredia, F. P. Heßberger, K. Hirose, J. Khuyagbaatar, B. Kindler, I. Kojouharov, B. Lommel, M. Makii, R. Mann, S. Mitsuoka, I. Nishinaka, T. Ohtsuki, S. Saro, M. Schädel, A. G. Popeko, A. Türler, Y. Wakabayashi, Y. Watanabe, A. Yakushev, A. Yeremin, Study of Heavy-ion Induced Fission for Heavy Element Synthesis, *Nuclear Data Sheets* 119, 2014, 299-302. (査読有), DOI: 10.1016/j.nds.2014.08.082.

S. Chiba, K. Nishio, H. Makii, Y. Aritomo, I. Nishinaka, T. Ishii, K. Tsukada, M. Asai, K. Furutaka, S. Hashimoto, H. Koura, K. Ogata, T. Ohtsuki, T. Nagayama, Surrogate Reactions Research at JAEA/Tokyo Tech. *Nuclear Data Sheets* 119, 2014, 229-232. (査読有), DOI: 10.1016/j.nds.2014.08.063.

J. Khuyagbaatar, K. Nishio, S. Hofmann, D. Ackermann, M. Block, S. Heinz, F. P. Heßberger, K. Hirose, H. Ikezoe, B. Kindler, B. Lommel, H. Makii, S. Mitsuoka, I. Nishinaka, T. Ohtsuki, Y. Wakabayashi, S. Yan, Evidence for hindrance in fusion between sulfur and lead nuclei. *Physical Review C* 86, (2012) 064602, (査読有), <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.86.064602>.

K. Hirose, T. Ohtsuki, Y. Shibasaki, N. Iwasaki, J. Hori, S. Sekimoto, K. Takamiya, H. Yamashita, K. Nishio, Y. Kiyonagi, Fission cross-section measurements of  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{242\text{m}}\text{Am}$ , and  $^{245}\text{Cm}$  with lead slowing-down neutron spectrometer., *Journal of*

*Nuclear Science and Technology*, 49, 2012, 1057-1066. (査読有), DOI: 10.1080/00223131.2012.730895.

K. Nishio, S. Mitsuoka, I. Nishinaka, H. Makii, Y. Wakabayashi, H. Ikezoe, K. Hirose, T. Ohtsuki, Y. Aritomo, S. Hofmann, Fusion probabilities in the reactions  $^{40,48}\text{Ca}+^{238}\text{U}$  at energies around the Coulomb barrier. *Physical Review C* 86, 2012, 034608. (査読有), <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.86.034608>.

[学会発表](計 5 件)

T. Ohtsuki, Half-life measurements of beryllium-7 in metals., Xth International conference on methods and applications of radioanalytical chemistry, 4/12-17, 2015, Sheraton Kona Keauhou Resort, Hawaii, USA.

T. Ohtsuki, Half-life measurements of  $^7\text{Be}$  in metals., 4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan. Volume 59, Number 10, October 7-11, 2014; Waikoloa, Hawaii, USA.

T. Ohtsuki, Half-life measurements of  $^7\text{Be}$  in metals., 5th International Symposium on Nuclear Analytical Chemistry, Jan. 20-24, 2014, Bhabha Atomic Research Center, Trombay, Mumbai, India.

T. Ohtsuki, Half-life measurements of  $^7\text{Be}$  in several metals., 5th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry, Sept. 22-27, 2013, Kanazawa Bunka Hall, Kanazawa, Japan.

T. Ohtsuki, Half-life measurements of beryllium-7 in metals., IXth International conference on methods and applications of radioanalytical chemistry, Mar. 25-30, 2012, Sheraton Kona Keauhou Resort, Hawaii, USA.

[図書](計 1 件)

大槻勤, 放射化学辞典, 印刷中.

6. 研究組織

(1) 研究代表者: 大槻勤  
京都大学・原子炉実験所・教授  
(Ohtsuki Tsutomu)  
研究者番号: 50233193