



北海道大学

2023年9月1日

(n,γ)反応に関する研究 真鍮の質量分析

ブタチーム

背景と目的

講義内で行ったこと

2つの試料に対して、中性子放射化分析法によりそれぞれ構成元素を特定した。

▶ 応用することで、Sampleの質量を推定することができるのではないか。

目的

SampleBの質量を推定

SampleA



質量0.05 g

SampleB



質量??? g



理論

- 中性子減速材内の平均中性子束： ϕ (1/cm² /s)
- 中性子減速材内に設置された試料に含まれる放射化の対象となる原子核の数： N
- その原子核の実効放射化断面積： σ (cm²)
- 放射線原子核の壊変定数： λ (1/s)
- 照射開始から時間 t_1 (s)だけ経過したときに試料に誘導される放射能： $A(t_1) = \phi N \sigma (1 - \exp(-\lambda t_1))$ (1/s)
- 照射から停止から時間 t_2 (s)だけ経過したときに試料から放出される放射能： $A(t_2) = A(t_1) \exp(-\lambda t_2)$



SampleA (Au)の各パラメーター

照射される時間 t_1	: 900 (s)
金の測定までの時間 t_{2Au}	: 83880 (s)
測定時間 t_3	: 180 (s)
金の重さ m_{Au}	: 0.05 (g)
アボガドロ定数 N_A	: 6.02×10^{23} (mol ⁻¹)
Mol質量 M	: 196.97 (g·mol)
^{197}Au の実効放射化断面積 σ_{thermal}	: 9.865×10^{-23} (cm ²)
$\sigma_{\text{resonance}}$: 1.571×10^{-21} (cm ²)
^{198}Au の壊変定数 λ	: 2.97×10^{-6} (1/s)
t_2 (s) 経過時の放射能 $A(t_2)$: 4768 (Bq)



中性子束の推定

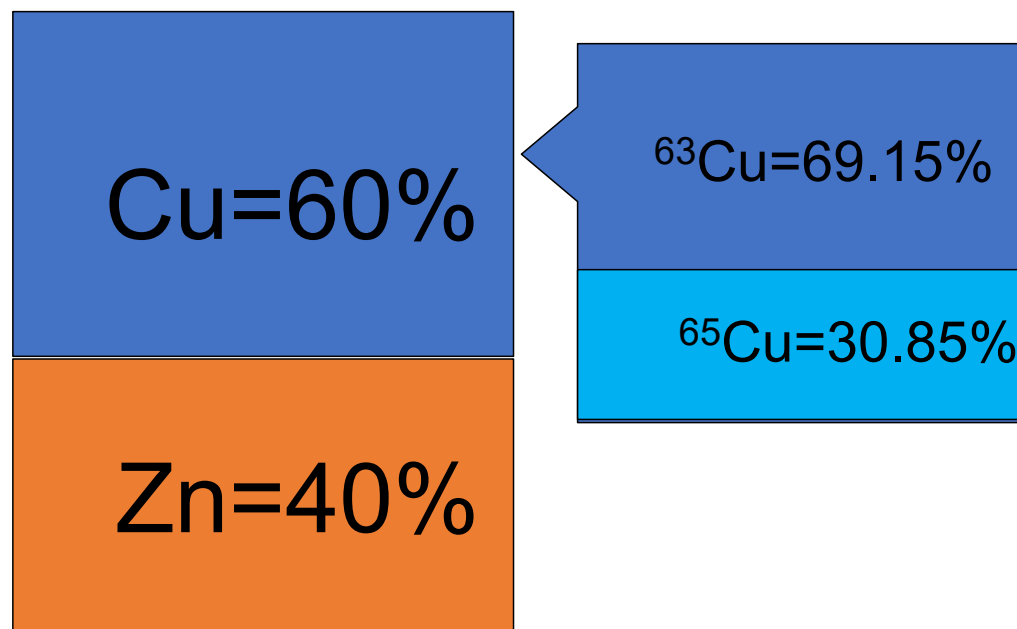
$$\begin{aligned} \phi &= \frac{A(t_2) / t_3}{\frac{m_{\text{Au}} * N_A}{196.97} * (\sigma_{\text{thermal}} + \sigma_{\text{resonance}}) * (1 - \exp(-\lambda t_1)) \exp(-\lambda t_{2\text{Au}})} \\ &= \frac{4768/180}{\frac{0.05 * 6.02 * 10^{23}}{196.97} * (9.865 * 10^{-23} + 1.571 * 10^{-21}) * (1 - \exp(-2.97 * 10^{-6} * 900)) \exp(-2.97 * 10^{-6} * 83880)} \\ &= 49893.76078 (1/\text{cm}^2 / \text{s}) \end{aligned}$$



真鍮サンプルの質量の推定

真鍮サンプルの質量を推定する

$$\begin{aligned}\text{Abs}({}^{63}\text{Cu}) &= 60\% * 69.15\% \\ &= 41.49\%\end{aligned}$$



^{63}Cu の質量を推定する

照射される時間 t_1	: 900s
Cuの測定までの時間 $t_{2\text{Cu}}$: 84420s
測定時間 t_3	: 180s
アボガドロ定数 N_A	: $6.02 \times 10^{23} (\text{mol}^{-1})$
Mol質量 M	: 63.546 (g·mol)
^{63}Cu の実効放射化断面積 σ_{thermal}	: ??? (cm ²)
$\sigma_{\text{resonance}}$: ??? (cm ²)
^{63}Cu の壊変定数 λ	: ??? (1/s)
t_2 (s) 経過時の放射能 $A(t_2)$: 5016 (Bq)
試料に照射された中性子束 φ	: 49893 (1/cm ² /s)



実効放射化断面積 σ を求める

JENDLE-4.0より、 ^{29}Cu の実効放射化断面積を調査した。

$^{29}\text{Cu}-63$

MT	Reaction	0.0253-eV	Maxwellian Average	g-factor	Resonance Integral	14-MeV	Fiss. Spec. Average
1	(n,total)	9.651 (b)	10.32 (b)	1.069	–	2.949 (b)	3.666 (b)
2	(n,elastic)	5.144 (b)	5.807 (b)	1.129	–	1.485 (b)	2.839 (b)
4	(n,inelastic)	(E-thr = 680.4 keV)				555.9 (mb)	790.5 (mb)
16	(n,2n)	(E-thr = 11.03 MeV)				489.7 (mb)	86.87 (μb)
22	(n,na)	(E-thr = 5.869 MeV)				16.43 (mb)	4.345 (μb)
28	(n,np)	(E-thr = 6.223 MeV)				310.5 (mb)	609.2 (μb)
32	(n,nd)	(E-thr = 14.73 MeV)				–	5.591 (nb)
102	(n, γ)	4.507 (b)	4.510 (b)	1.000	5.009 (b)	727.3 (μb)	10.73 (mb)
103	(n,p)	0.000 (b)	0.000 (b)	–	118.3 (mb)	46.15 (mb)	25.29 (mb)
104	(n,d)	(E-thr = 3.963 MeV)				7.503 (mb)	7.291 (μb)
107	(n,a)	0.000 (b)	0.000 (b)	–	9.816 (mb)	37.00 (mb)	555.5 (μb)

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{thermal}} &= 4.507 \times 10^{-24} \text{ (cm}^2\text{)} \\ \sigma_{\text{resonance}} &= 5.009 \times 10^{-24} \text{ (cm}^2\text{)}\end{aligned}$$

^{64}Cu の壊変定数 λ を求める

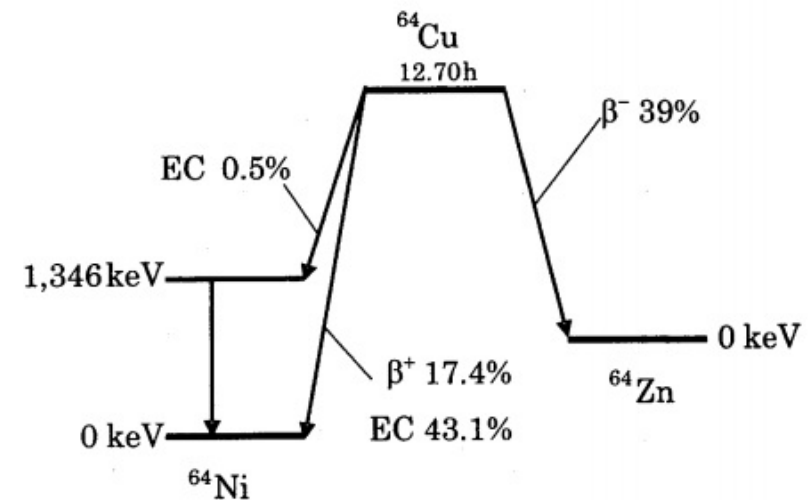
$$T_{\text{半減期}} = 12.7\text{h} = 45720\text{s}$$

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{\text{半減期}}}$$

$$\lambda = \frac{0.693}{45720}$$

$$\lambda = 1.51575 \times 10^{-5} (1/\text{s})$$

^{64}Cu の壊変図



^{63}Cu の質量を計算する

$$N^{63}_{\text{Cu}} = \frac{A(t_2) / t_3}{\varphi * (\sigma_{\text{thermal}} + \sigma_{\text{resonance}}) * (1 - \exp(-\lambda t_1)) \exp(-\lambda t_{2\text{Cu}})}$$

$$= \frac{5016 / 180}{49893.76078 * (4.507 * 10^{-24} + 5.009 * 10^{-24}) * (1 - \exp(-1.51575 * 10^{-5} * 900)) \exp(-1.51575 * 10^{-5} * 84420)}$$

$$= 1.55738 \times 10^{22}$$

$$m_{63\text{Cu}} = \frac{N^{63}_{\text{Cu}} * 63.546}{N_A}$$

$$= \frac{1.55738 * 10^{22} * 63.546}{6.02 * 10^{23}}$$

$$= 1.643395207\text{g}$$



真鍮の質量を計算する

$$\begin{aligned} m_{\text{真鍮}} &= \frac{m^{63}_{\text{Cu}}}{\text{Abs}(63\text{Cu})} \\ &= \frac{1.643395207}{41.49\%} \\ &= 3.960942896\text{g} \end{aligned}$$



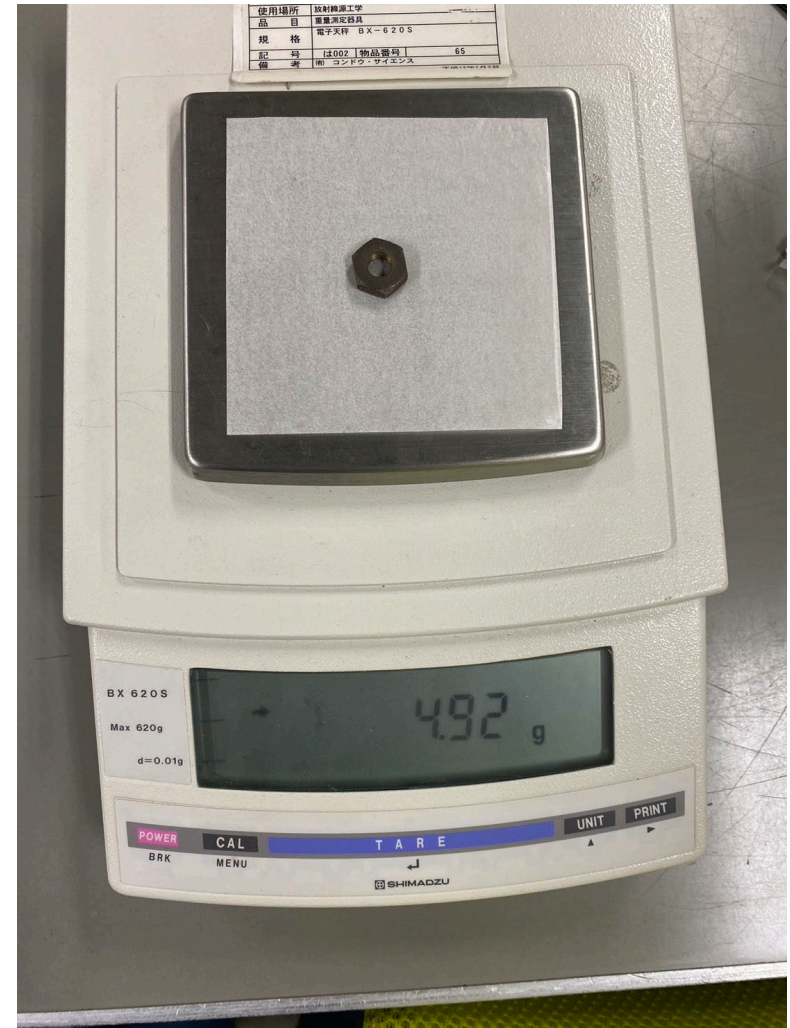
実測値との比較

$$m_{\text{真鍮(推定)}} = 3.960942896\text{g}$$

$$m_{\text{真鍮(実際)}} = 4.92\text{g}$$

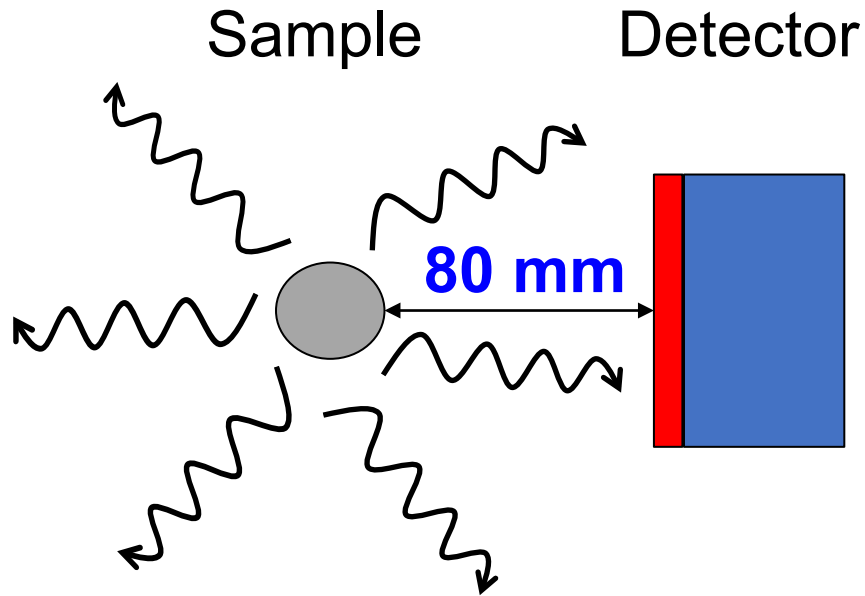
$$\text{誤差率} = \frac{3.960942896 - 4.92}{4.92}$$

$$= -19.49\%$$



なぜ誤差が生じた

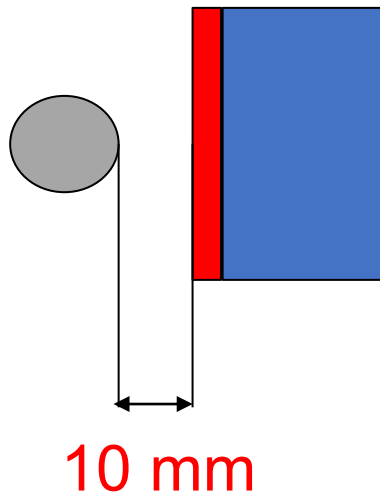
検出器で捉えられていない γ 線が存在しており、カウントが低い値が出ている。



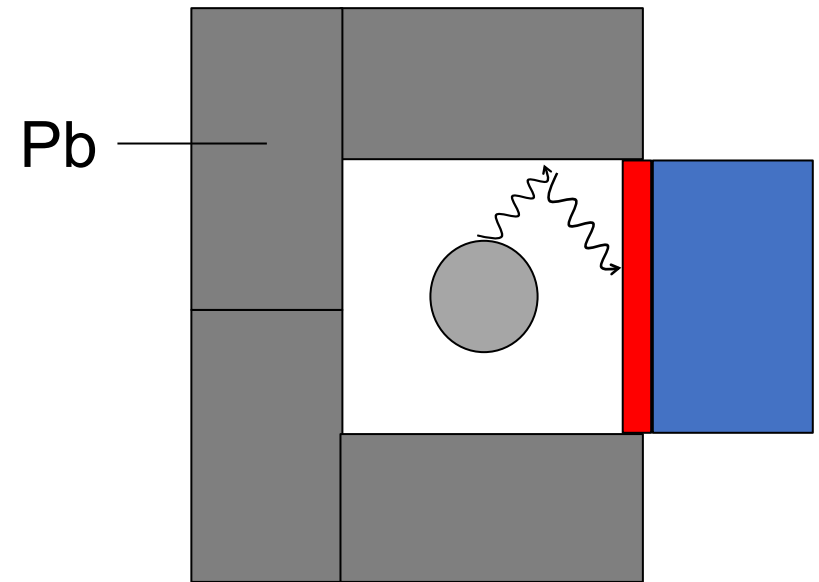
誤差低減に向けた施策

- ① SampleとDetectorの距離を近づけて立体角を小さくする。

Sample Detector



- ② Sampleの周りにPbを設置してγ線を反射させる。



実験の体系と測定資料

試料を鉛で覆った際の
測定体系 (SampleB)



- バックグラウンド
- SampleA (Au試料)
- SampleB (真鍮試料)

の3つについて測定を行った。

全て測定時間は3分間。



中性子束の推定

SampleAを用いて中性子束の推定を行った。

$$\phi = \frac{A(t_2)/t_3}{\frac{m_{\text{Au}} * N_A}{196.97} * (\sigma_{\text{thermal}} + \sigma_{\text{resonance}}) * (1 - \exp(-\lambda t_1)) \exp(-\lambda t_2)}$$

$$= \frac{9431/180}{\frac{0.05 * 6.02 * 10^{23}}{196.97} * (9.865 * 10^{-23} + 1.571 * 10^{-21}) * (1 - \exp(-2.97 * 10^{-6} * 900)) \exp(-2.97 * 10^{-6} * 185460)}$$

$$= 133441.5783 (1/\text{cm}^2 / \text{s})$$



^{63}Cu の質量を計算する

$$\begin{aligned}
 N^{63}\text{Cu} &= \frac{A(t_2) / t_3}{\varphi * (\sigma_{\text{thermal}} + \sigma_{\text{resonance}}) * (1 - \exp(-\lambda t_1)) \exp(-\lambda t_{2\text{Cu}})} \\
 &= \frac{4028/180}{133441.5783 * (4.507 * 10^{-24} + 5.009 * 10^{-24}) * (1 - \exp(-1.51575 * 10^{-5} * 900)) \exp(-1.51575 * 10^{-5} * 183960)} \\
 &= 2.11414\text{E}+22
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 m^{63}\text{Cu} &= \frac{N^{63}\text{Cu} * 63.546}{N_A} \\
 &= \frac{2.11414 * 10^{22} * 63.546}{6.02 * 10^{23}} \\
 &= 2.230909403 \text{ g}
 \end{aligned}$$



真鍮の質量を計算する

$$\begin{aligned} m_{\text{真鍮}} &= \frac{m^{63}_{\text{Cu}}}{\text{Abs}(63\text{Cu})} \\ &= \frac{2.230909403}{41.49\%} \\ &= 5.376980967 \text{ g} \end{aligned}$$



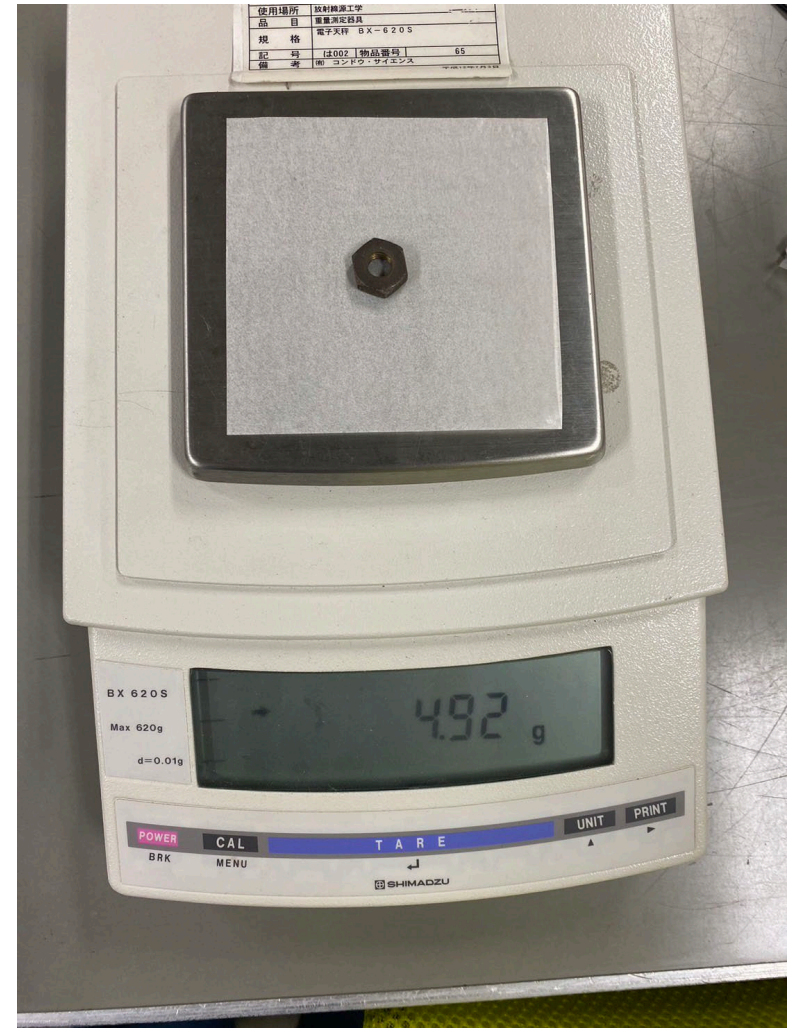
実測値との比較

$$m_{\text{真鍮(推定)}} = 5.376980967 \text{ g}$$

$$m_{\text{真鍮(実際)}} = 4.92 \text{ g}$$

$$\begin{aligned} \text{誤差率} &= \frac{5.376980967 \text{ g} - 4.92}{4.92} \\ &= +9.28\% \end{aligned}$$

▶ 誤差の低減に成功！！！！



誤差の原因

$$\phi = \frac{A(t_2)}{\frac{m_{\text{Au}} * N_A}{196.97} * (\sigma_{\text{thermal}} + \sigma_{\text{resonance}}) * (1 - \exp(-\lambda t_1)) \exp(-\lambda t_{2\text{Au}})}$$

$$N_{\text{Cu}}^{63} = \frac{A(t_2)_{\text{Cu}} * \frac{m_{\text{Au}} * N_A}{196.97} * (\sigma_{\text{thermal}} + \sigma_{\text{resonance}}) * (1 - \exp(-\lambda t_1)) \exp(-\lambda t_{2\text{Au}})}{A(t_2)_{\text{Au}} * (\sigma_{\text{thermal}} + \sigma_{\text{resonance}}) * (1 - \exp(-\lambda t_1)) \exp(-\lambda t_{2\text{Cu}})}$$

$$m_{\text{真鍮}} = \frac{A(t_2)_{\text{Cu}} * \frac{m_{\text{Au}} * N_A}{196.97} * (\sigma_{\text{thermal}} + \sigma_{\text{resonance}}) * (1 - \exp(-\lambda t_1)) \exp(-\lambda t_{2\text{Au}}) * 63.546 * \text{Abs}(63\text{Cu})}{A(t_2)_{\text{Au}} * (\sigma_{\text{thermal}} + \sigma_{\text{resonance}}) * (1 - \exp(-\lambda t_1)) \exp(-\lambda t_{2\text{Cu}}) * N_A}$$

$$m_{\text{真鍮}} = \frac{A(t_2)_{\text{Cu}} * m_{\text{Au}} * (\sigma_{\text{thermal}} + \sigma_{\text{resonance}}) \exp(-\lambda t_{2\text{Au}}) * 63.546 * \text{Abs}(63\text{Cu})}{196.97 * A(t_2)_{\text{Au}} * (\sigma_{\text{thermal}} + \sigma_{\text{resonance}}) * \exp(-\lambda t_{2\text{Cu}})}$$

$$m_{\text{真鍮}} \propto \frac{A(t_2)_{\text{Cu}} * \text{Abs}(63\text{Cu})}{A(t_2)_{\text{Au}}}$$



結論・まとめ

- 中性子放射化分析法の応用により、9%の誤差で質量を推定することに成功した。
- なんで+側に誤差が出たんだらろう.....????
 - ▶ 時間があれば皆さんと考えたいです！！

