

CCONE-FRITの開発と 東北大学RARiSにおける ^{64}Cu 製造量の評価

酒井聖矢 (理研仁科センター)

2026年8月27日

第4回瀬戸内ニュートリノ研究会(OLivES 2026)@豊島エスポワールパーク

本研究はJST/ERATO(課題番号JPMJER2304)の助成を受けたものである。

関口三体核力(TOMOE)プロジェクト



TOMOEプロジェクトの班構成

A班：三体核力の決定



関口仁子(京都大)

C班：冷却原子実験



堀越宗一(大阪公立大)



D班：応用科学展開



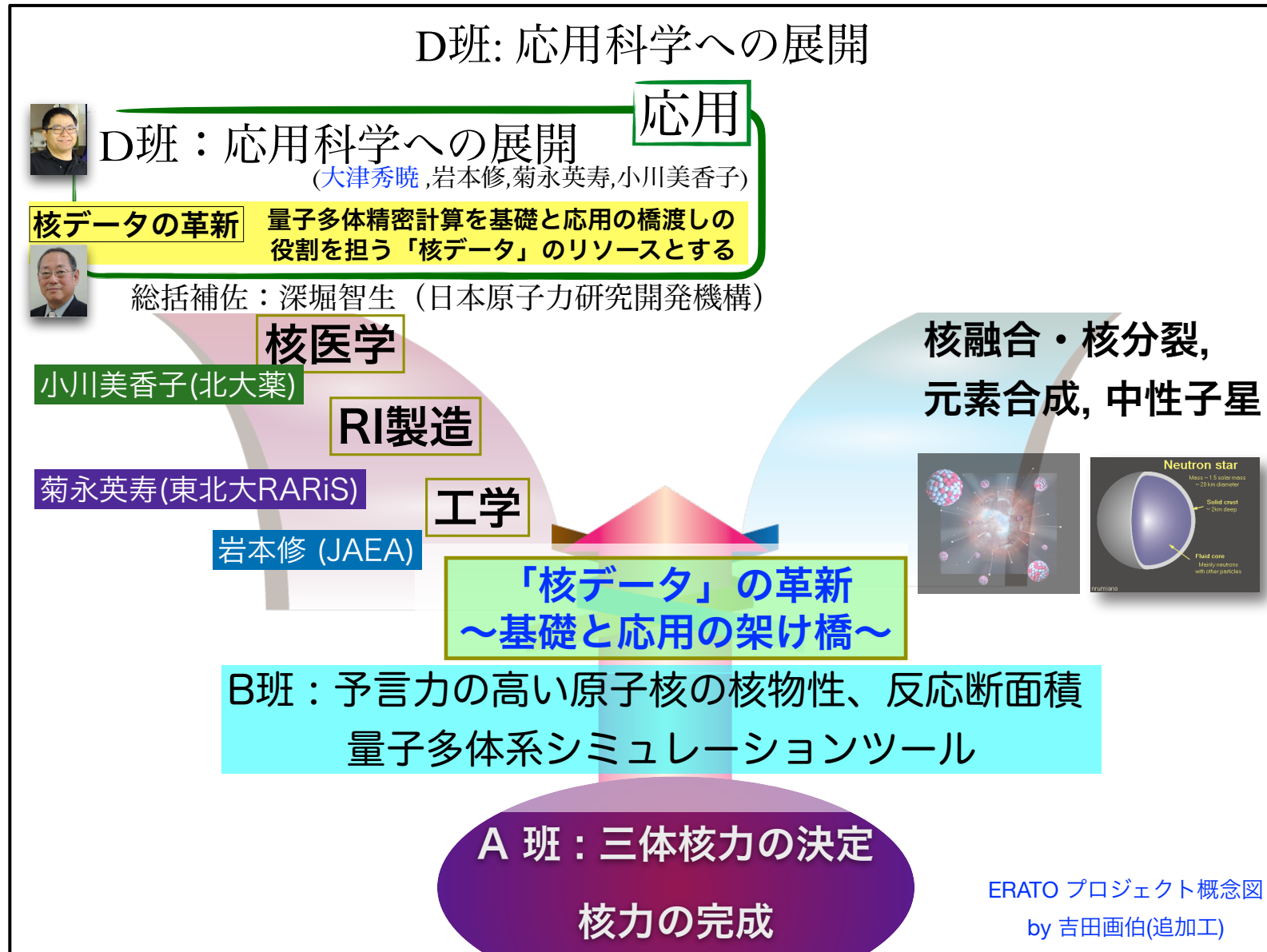
大津秀暁(理研)

B班：量子多体精密計算



中務孝(筑波大)

D班：応用科学展開



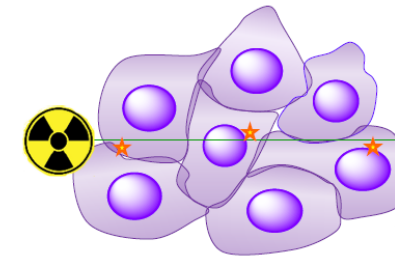
D班：応用科学展開



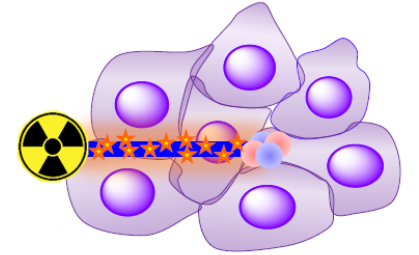
オージェ電子放出核種

- オージェ電子放出核種を用いた核医学治療が注目されている^[1,2]
- ^{64}Cu (半減期：12.7時間^[3])
 - β^- 崩壊(38.5%), 電子捕獲(44.0%), β^+ 崩壊(17.5%)^[4]
 - 治療(Therapy)と診断(Diagnosis)を同時に行う
セラノスティクス(Theranostics)を実現できると期待^[5]
- ^{77}Br (半減期：2.38日^[3])
 - 電子捕獲(99.3%), β^+ 崩壊(0.7%)^[6]
 - 核医学治療に用いる α 線放出核種として需要が急速に高まっている
 ^{211}At と同じ第17族(ハロゲン)元素^[7]
 - α 線とオージェ電子の生物学的効果の違いの理解に有効

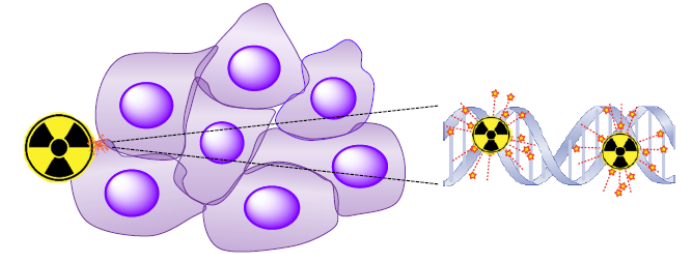
β ray



α ray



Auger electron



[1] D. Filosofov *et al.*, Nucl. Med. Biol. **94-95**, 1 (2021)

[2] H. Obata, Ph.D. Thesis, Hokkaido University (2023)

[3] <https://www.ndc.jaea.go.jp/CN14/index.html>

[4] IAEA Radioisotopes and Radiopharmaceuticals Series No. 7, IAEA, Vienna (2022)

[5] M. Fani *et al.*, Pharmaceuticals **2017**, 10(1), 30

[6] <https://www.benchchem.com/product/b15183775#half-life-and-decay-products-of-bromine-77>

[7] Y. Feng and M. R. Zalutsky, Nucl. Med. Biol. **100-101**, 12 (2021)

^{64}Cu , ^{77}Br をはじめ、応用科学分野で有用な核種の
最適な生成経路を効率良く検討したい...



CCONE-FRIT

- 目的核種の最適な生成経路の検討に資する核反応計算コードCCONE^[1,2]ベースのフレームワークを開発
 - **CCONE-FRIT**(読み：コーンフリット)
 - **CCONE**-based framework for results of irradiating targets
- 何が分かる？
 - CCONEを用いて複数の入射粒子と標的の組み合わせに対して核種生成断面積を計算
 - 目的核種の生成断面積が最大となる反応
 - 核種生成断面積 + 阻止能(SRIM^[3])
 - 目的核種のthick target yield(TTY)^[4]※が最大となる反応
 - 目的核種製造時に生成されうる不要な核種
 - 実験データや評価済み核データライブラリとの整合性

[1] O. Iwamoto, J. Nucl. Sci. Technol. **44**, 5 (2007)

[2] O. Iwamoto *et al.*, Nucl. Data Sheets **131**, 259 (2016)

[3] J. F. Ziegler *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **268**, 1818 (2010)

[4] N. Otuka and S. Takács, Radiochim. Acta **103**, 1 (2015)

※ 無限厚さの標的に入射粒子を1個照射した時に生成される目的核種の個数

^{77}Br の生成断面積

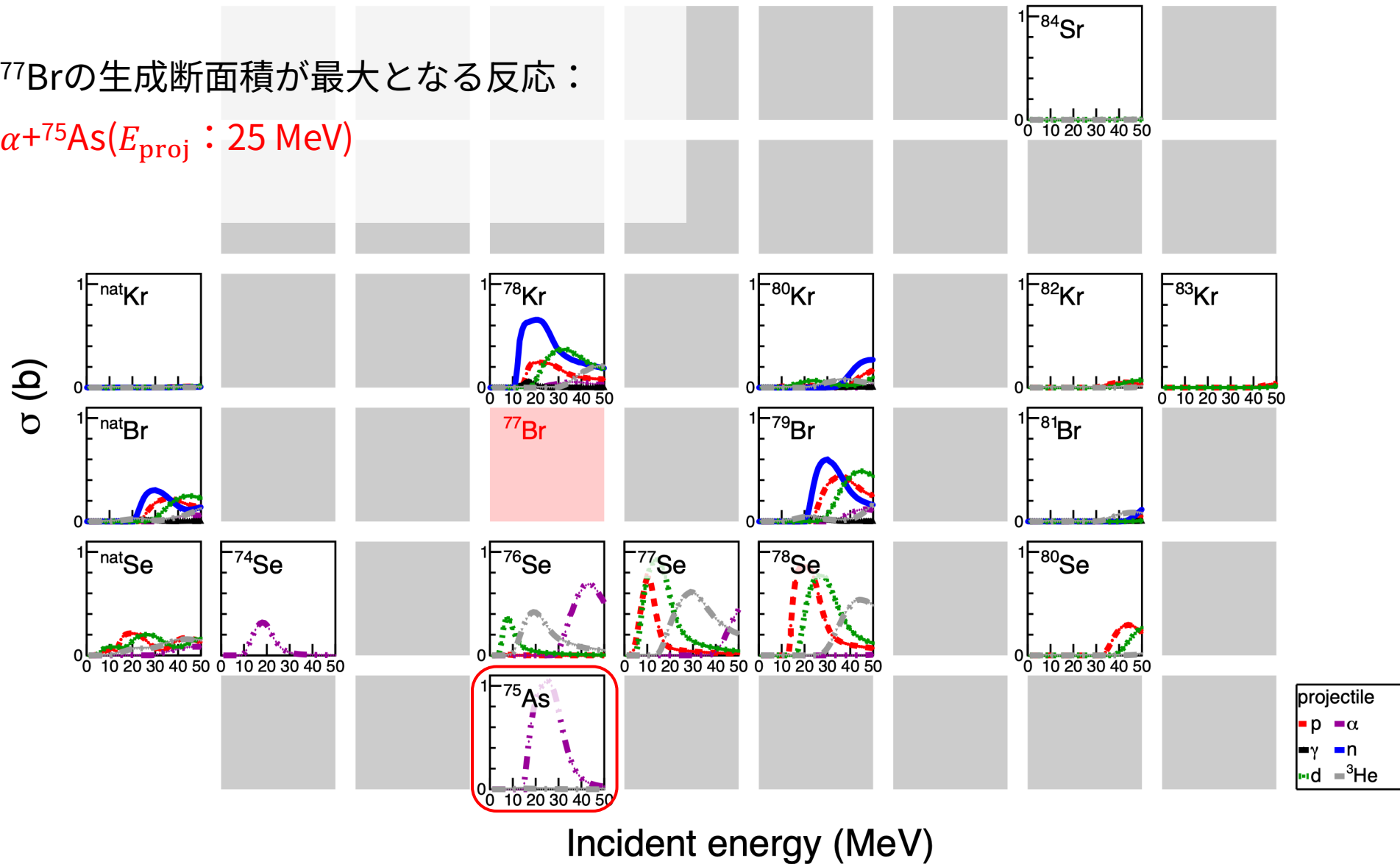
- 以下の条件で ^{77}Br の生成断面積が最大となる反応を調査
 - **入射粒子**： $p, \alpha, \gamma, n, d, t, ^3\text{He}$
 - 実用上使用するのが難しい三重水素(t)は除外
 - **入射エネルギー(E_{proj})**：1-50 MeV
 - **標的**：As, Se, Br, Kr, Rb, Srの天然元素標的および同位体濃縮標的
 - 天然元素標的：天然存在比に基づく標的
 - **^{77}Br の生成断面積の閾値**：1 mb

^{77}Br の生成断面積

Production cross-section for ^{77}Br

- ^{77}Br の生成断面積が最大となる反応：

$\alpha + ^{75}\text{As} (E_{\text{proj}} : 25 \text{ MeV})$



^{77}Br のTTY

- 以下の条件で ^{77}Br のTTY※が最大となる反応を調査
 - **入射粒子**：p, α , γ , n, d, t, ^3He
 - SRIMの制約により荷電粒子に限定
 - **入射エネルギー(E_{proj})**：1-50 MeV
 - **標的**：As, Se, Br, Kr, Rb, Srの天然元素標的および同位体濃縮標的
 - **^{77}Br の生成断面積の閾値**：1 mb
- TTY(y)

$$y = \int_0^{E_{\text{proj}}} \frac{\sigma(E)}{S(E)/\rho} dE$$

$$S(E) = -\frac{dE}{dx}$$

$\sigma(E)$ ：核種生成断面積(cm^2)

$S(E)$ ：線阻止能(MeV cm^{-1})

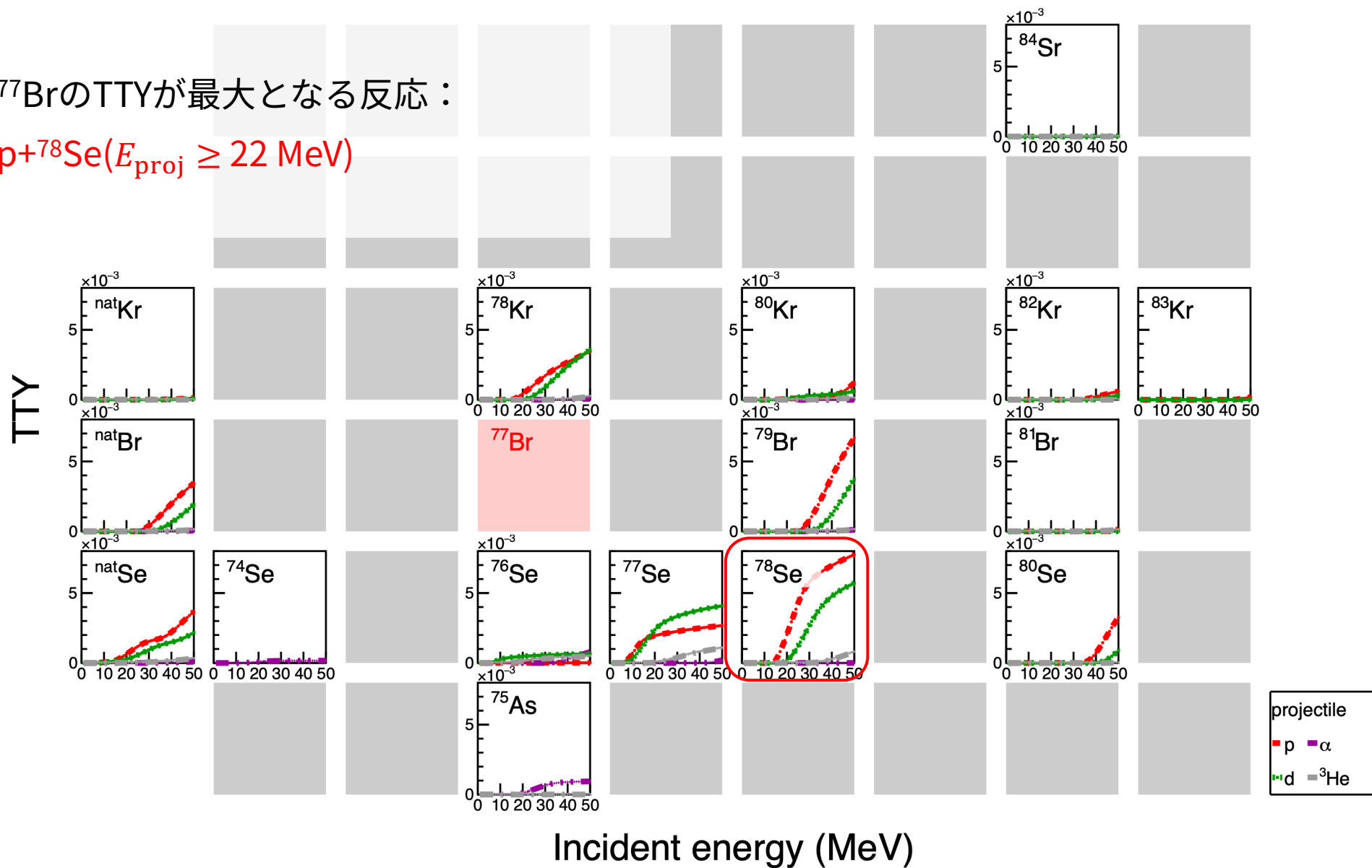
ρ ：標的の数密度(cm^{-3})

^{77}Br のTTY

TTY for ^{77}Br

- ^{77}Br のTTYが最大となる反応：

$p+^{78}\text{Se}(E_{\text{proj}} \geq 22 \text{ MeV})$



p+⁷⁸Seで生成されうる全ての残留核

- 以下のいずれかの条件を満たす場合、
p+⁷⁸Seで生成されうる全ての残留核の生成断面積(CCONE)を図示
 - 核種生成断面積(CCONE)の最大値 > 100 mb
 - E_{proj} : 1-50 MeV
 - 核反応実験データベースEXFOR^[1,2]に実験値が存在
- EXFOR、評価済み核データライブラリ(JENDL-5^[3], JEFF-3.3^[4], TENDL-2023^[5])から取得した核種生成断面積も図示

[1] <https://www-nds.iaea.org/exfor/>

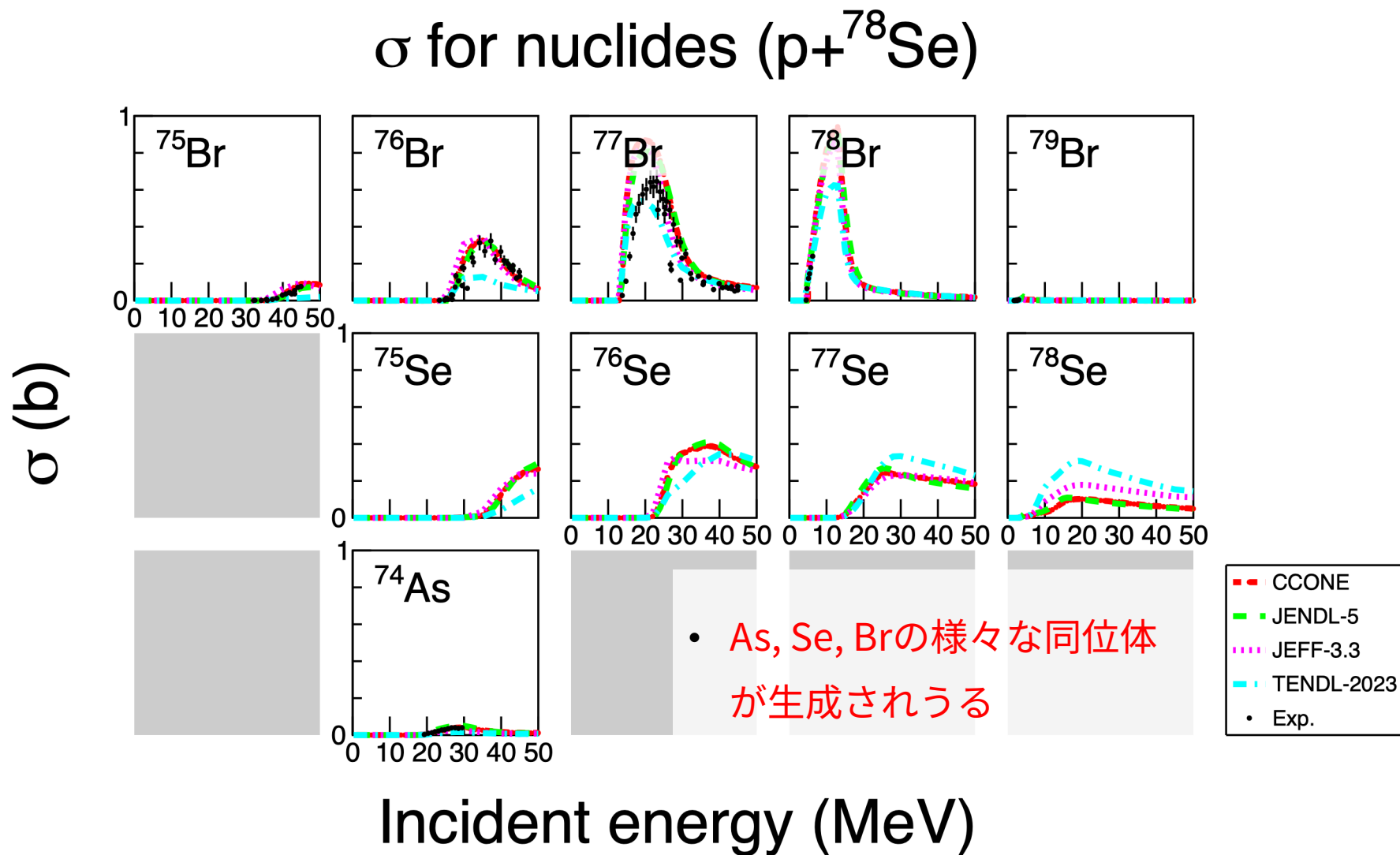
[2] N. Otuka *et al.*, Nucl. Data Sheets **120**, 272 (2014)

[3] O. Iwamoto *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol. **60**, 1 (2023)

[4] A. J. M. Plompen *et al.*, Eur. Phys. J. A **56**, 181 (2020)

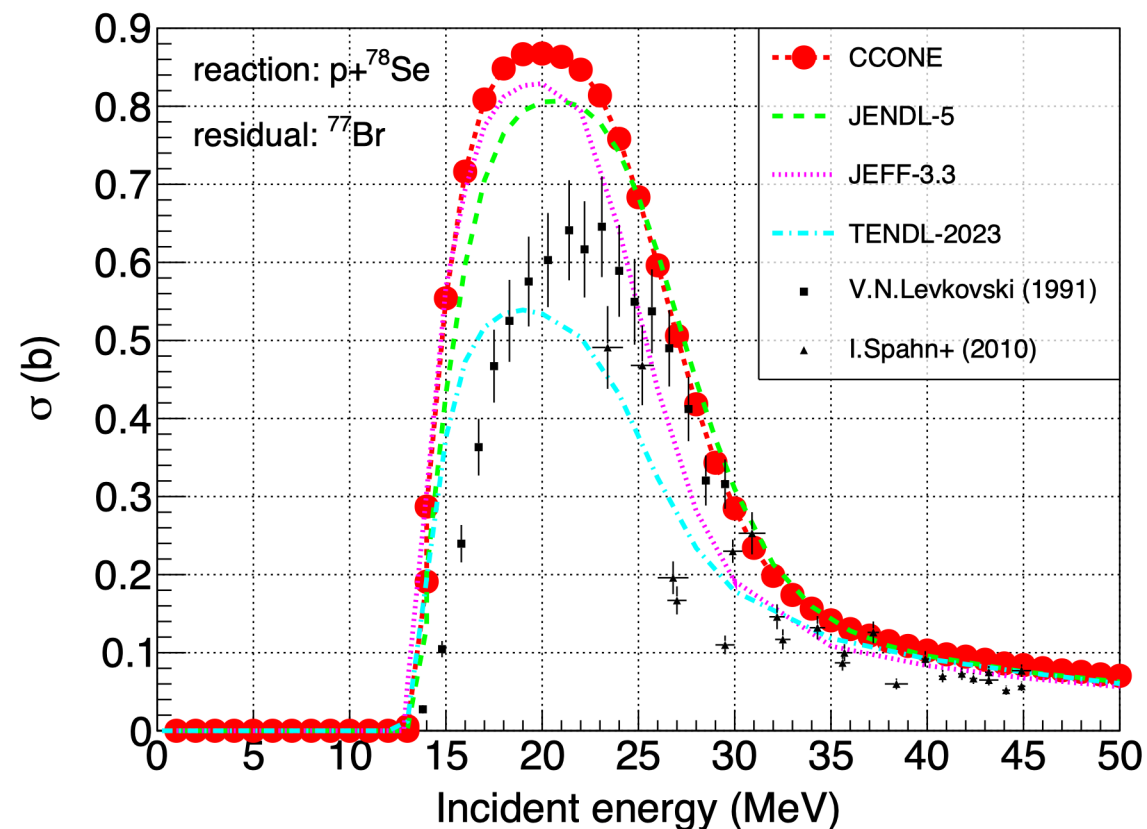
[5] A. J. Koning *et al.*, Nucl. Data Sheets **155**, 1 (2019)

p+⁷⁸Seで生成されうる全ての残留核



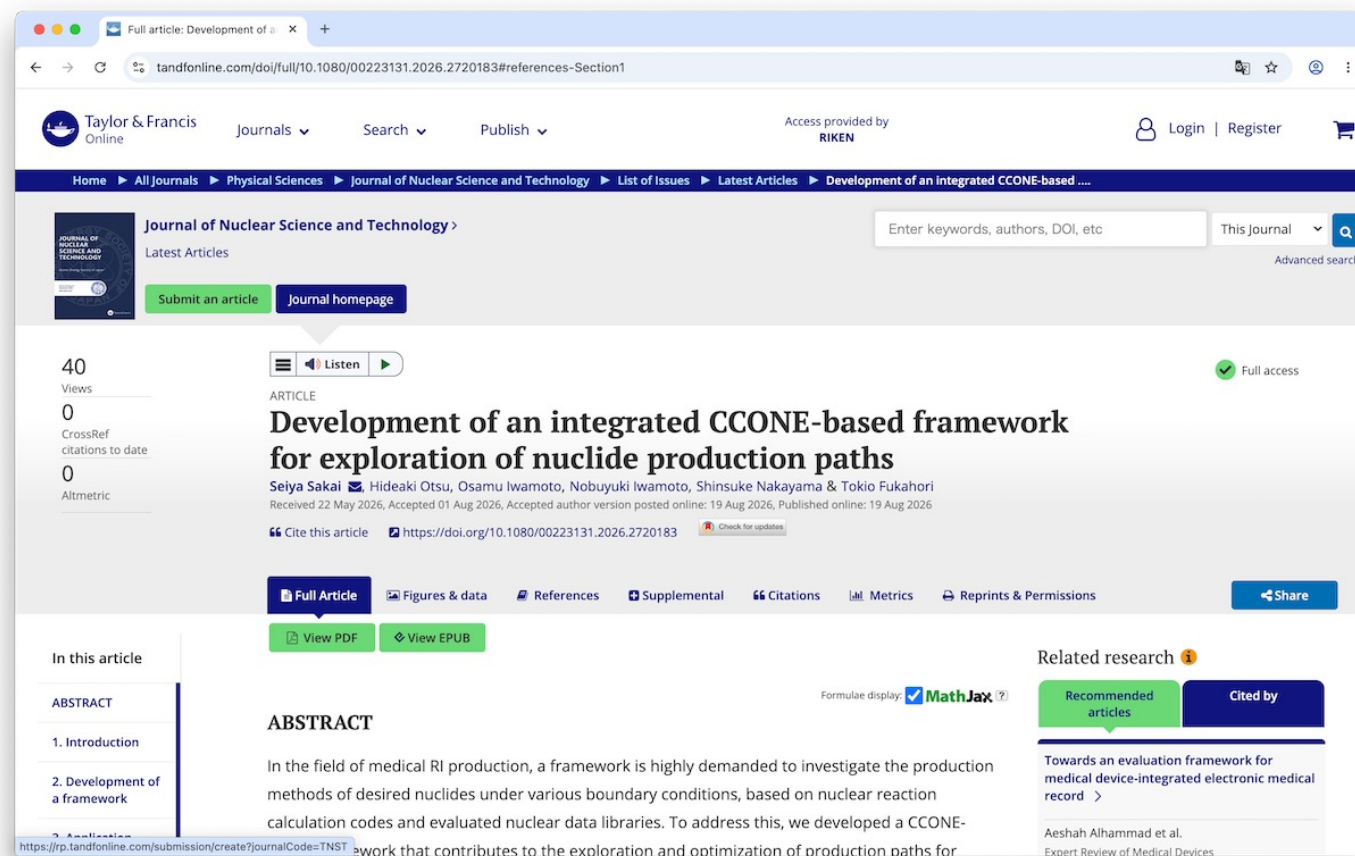
実験データとの整合性

- $p+^{78}\text{Se}$ による ^{77}Br の生成断面積
 - 実験データと比べてCCONEは...
 - ピークの位置が2-3 MeV低い？
 - ピークが~200 mb高い？
- CCONEのモデルパラメータ調整によって ^{77}Br および
不要な核種の生成断面積がどのように変化するか
確認予定



CCONE-FRITの論文

- 2026年8月1日にAccept
 - S. Sakai *et al.*, “Development of an integrated CCONE-based framework for exploration of nuclide production paths”, J. Nucl. Sci. Technol. ??, ?? (2026)
<https://doi.org/10.1080/00223131.2026.2720183>

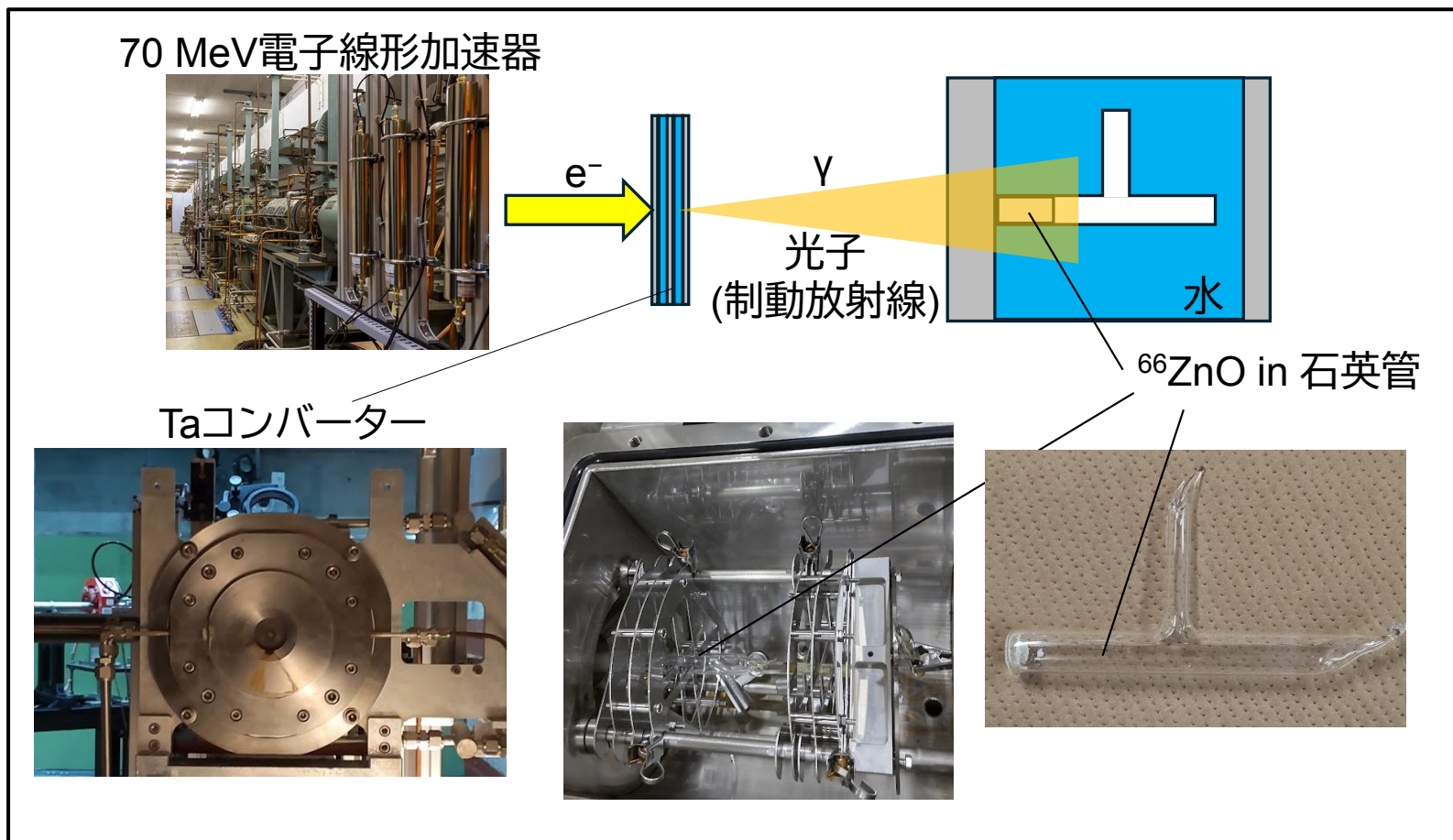


CCONE-FRITの機能拡張

- 目的核種の最適な生成経路の検討に資する核反応計算コードCCONEベースのフレームワークを開発
 - **CCONE-FRIT**(読み：コーンフリット)
 - **CCONE**-based framework for results of irradiating targets
- 何が分かる？
 - CCONEを用いて複数の入射粒子と標的の組み合わせに対して核種生成断面積を計算
 - 目的核種の生成断面積が最大となる反応
 - 核種生成断面積 + 阻止能(SRIM)
 - 目的核種のthick target yield(TTY)が最大となる反応
 - 目的核種製造時に生成されうる不要な核種
 - 実験データや評価済み核データライブラリとの整合性
 - 連続エネルギースペクトルを持つ入射粒子に対する収量
 - **東北大学RARiS三神峯事業所(RARiS三神峯)での制動放射線による ^{64}Cu 製造量の評価**

RARiS三神峯での ^{64}Cu 製造

- 電子ビーム(55.7 MeV)をTaコンバータに照射して制動放射線に変換
→ 制動放射線を ^{66}ZnO 標的に照射($^{66}\text{Zn}(\gamma, x)^{64}\text{Cu}$)
- 照射後の ^{66}ZnO を化学分離 → 北海道大学へ供給



RARiS三神峯での ^{64}Cu 製造量の評価

- ^{64}Cu 製造量、制動放射線スペクトル、励起関数の関係は以下の通り

$$\frac{A_0}{fN_t(1 - e^{-\lambda t})} \times 2.66 \times 10^{-28} M = \int_0^{E_0} F(k, E_0) \cdot \sigma(k) dk$$

- ^{64}Cu 反応収率(実験から求まる量)

- A_0 : ^{64}Cu 製造量(EOB) (MBq)
- f : 平均電流 (μA)
- N_t : ^{66}ZnO 標的 (mg)
- t : 照射時間 (h)
- $\lambda (= \ln 2 / T_{\text{half}})$: 崩壊定数 (h^{-1})
- T_{half} : ^{64}Cu の半減期 (= 12.7 h)
- M : ^{66}ZnO のモル質量
(= 81.4 g mol $^{-1}$)

- 制動放射線スペクトル

- PHITS^[1,2]を用いて取得
 - ジオメトリを用意
(RARiS三神峯での実験セットアップを再現)
 - 電子ビームを照射
 - ^{66}ZnO 標的における制動放射線スペクトルを取得

- 励起関数

- CCONE
- 評価済み核データライブラリ

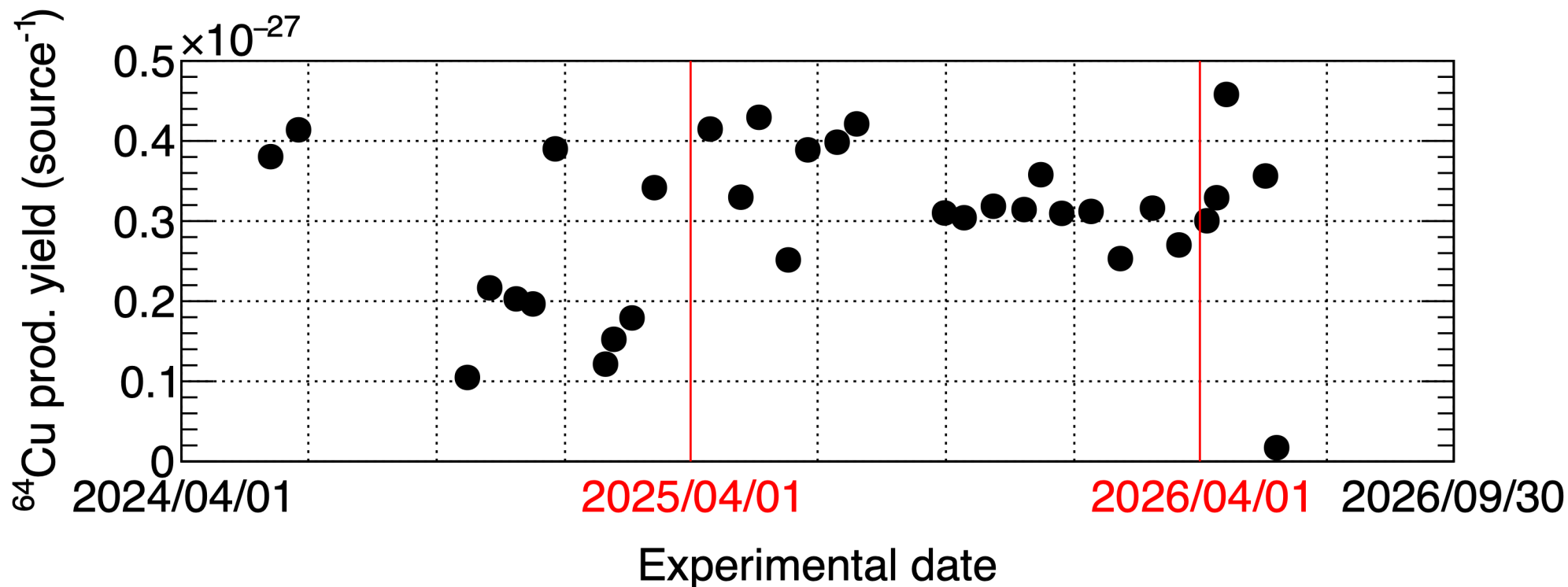
- E_0 : 電子ビームのエネルギー (= 55.7 MeV)

RARiS三神峯での ^{64}Cu 製造量の評価

- ^{64}Cu 製造量、制動放射線スペクトル、励起関数の関係は以下の通り

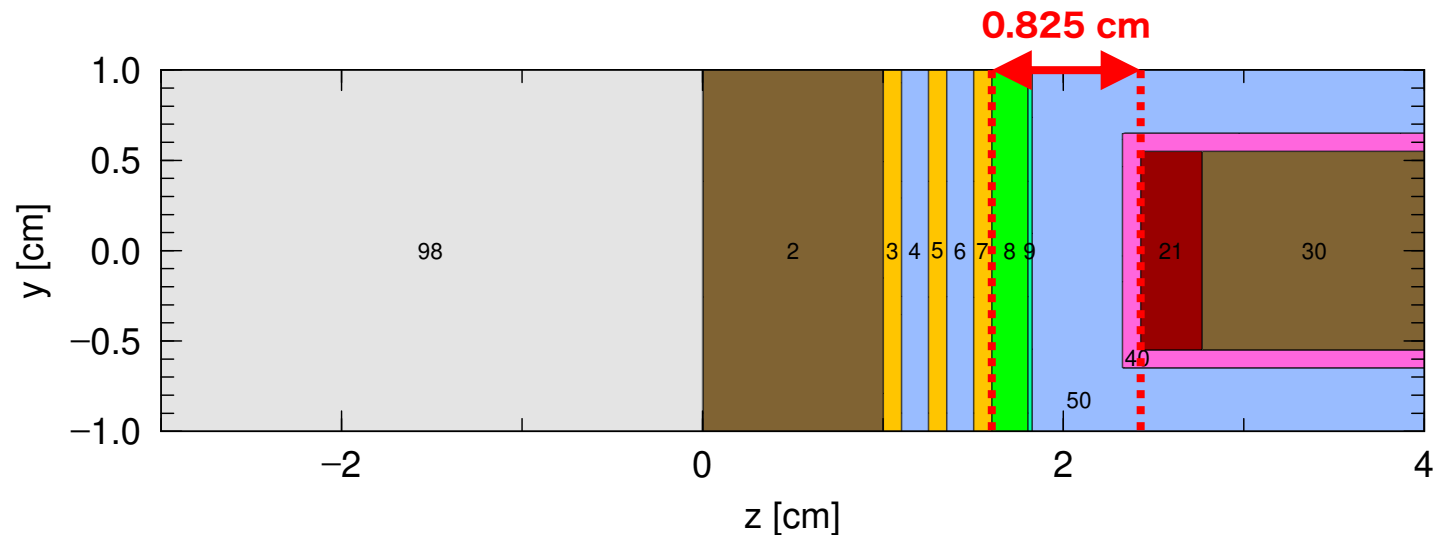
$$\frac{A_0}{fN_t(1 - e^{-\lambda t})} \times 2.66 \times 10^{-28} M = \int_0^{E_0} F(k, E_0) \cdot \sigma(k) dk$$

- ^{64}Cu 反応収率が安定していない → ^{64}Cu 反応収率を大きく変化させる要因は？



実験セットアップ

- 2024年度前半の実験セットアップ
(PHITSで再現)



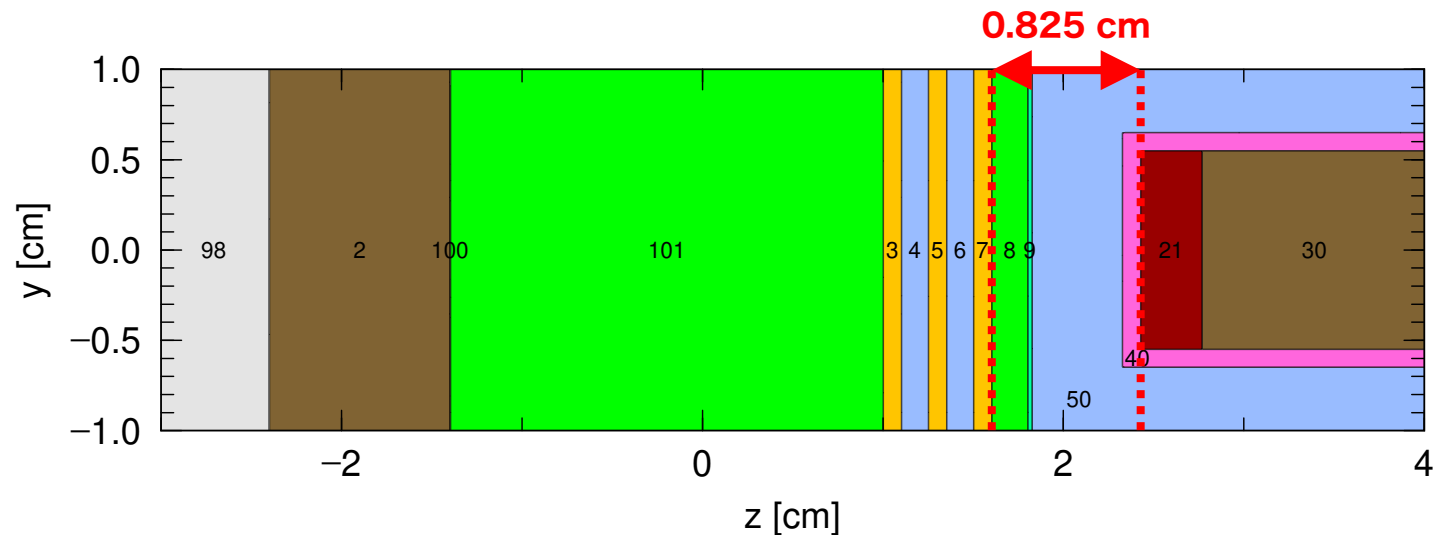
セル番号	物質名	厚さ (cm)
98	真空	-
1	真空窓	0.003
2	Heガス	1

セル番号	物質名	厚さ (cm)
3	Taコンバータ	0.1
4	冷却水	0.15
5	Taコンバータ	0.1
6	冷却水	0.15
7	Taコンバータ	0.1
8	空気	0.2
9	SUS-316L (ステンレス材)	0.025

セル番号	物質名
21	ZnO標的 [※]
30	封入Heガス
40	SiO ₂ 管
50	冷却水

実験セットアップ

- 2024年度後半の実験セットアップ
(PHITSで再現)
 - 真空窓と空気が追加



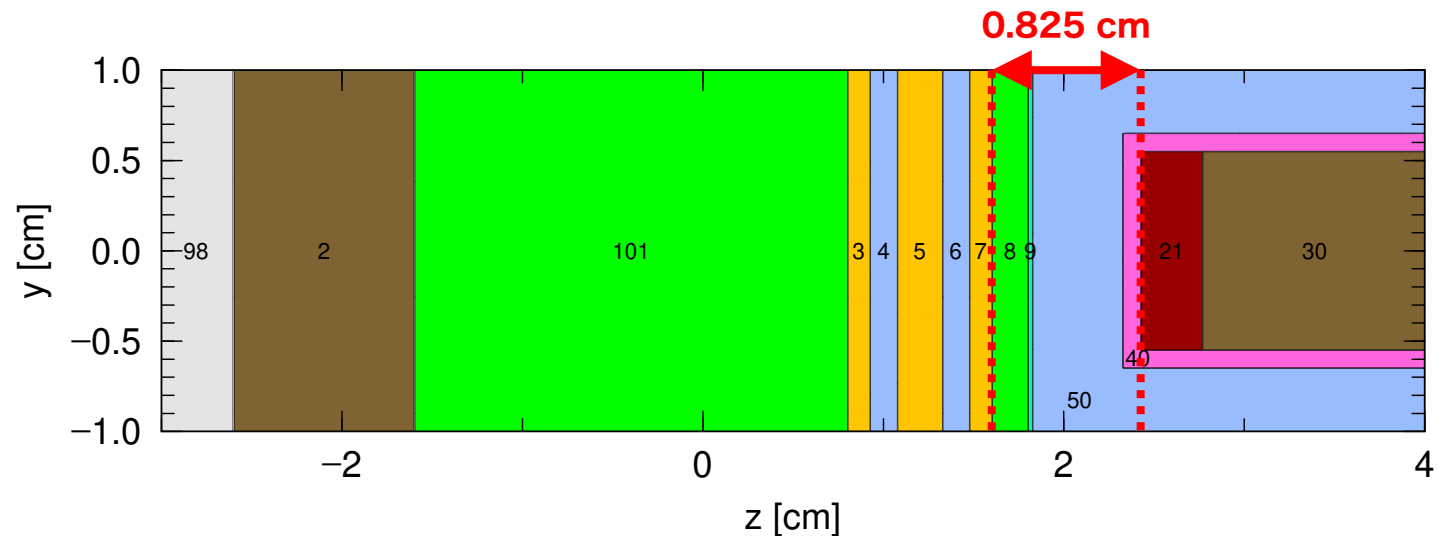
セル番号	物質名	厚さ (cm)
98	真空	-
1	真空窓	0.003
2	Heガス	1
100	真空窓	0.002
101	空気	2.4

セル番号	物質名	厚さ (cm)
3	Taコンバータ	0.1
4	冷却水	0.15
5	Taコンバータ	0.1
6	冷却水	0.15
7	Taコンバータ	0.1
8	空気	0.2
9	SUS-316L (ステンレス材)	0.025

セル番号	物質名
21	ZnO標的 [※]
30	封入Heガス
40	SiO ₂ 管
50	冷却水

実験セットアップ

- 2025年度以降の実験セットアップ
(PHITSで再現)
 - Taコンバータの総厚さが変化
(総厚さ：3 mm → 5 mm)



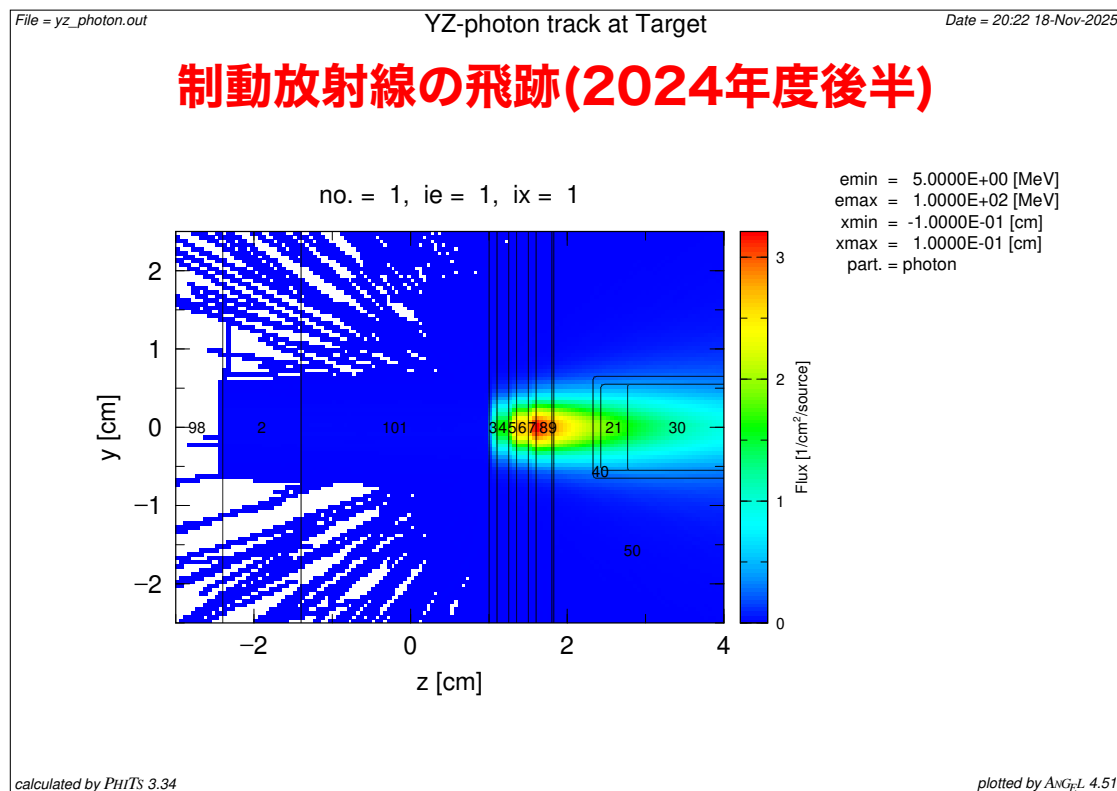
セル番号	物質名	厚さ (cm)
98	真空	-
1	真空窓	0.003
2	Heガス	1
100	真空窓	0.002
101	空気	2.4

セル番号	物質名	厚さ (cm)
3	Taコンバータ	0.125
4	冷却水	0.15
5	Taコンバータ	0.25
6	冷却水	0.15
7	Taコンバータ	0.125
8	空気	0.2
9	SUS-316L (ステンレス材)	0.025

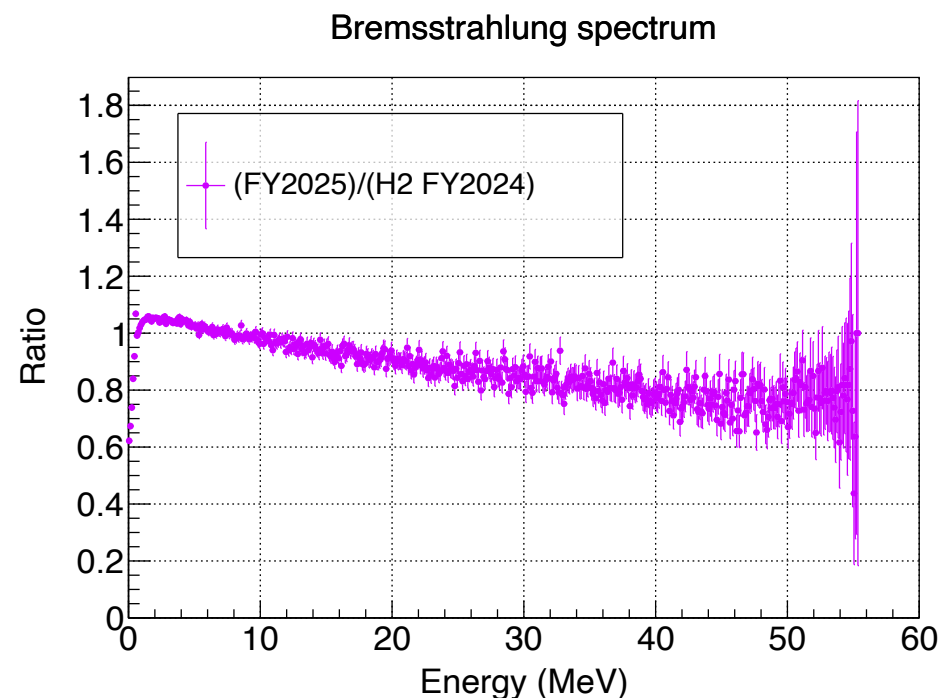
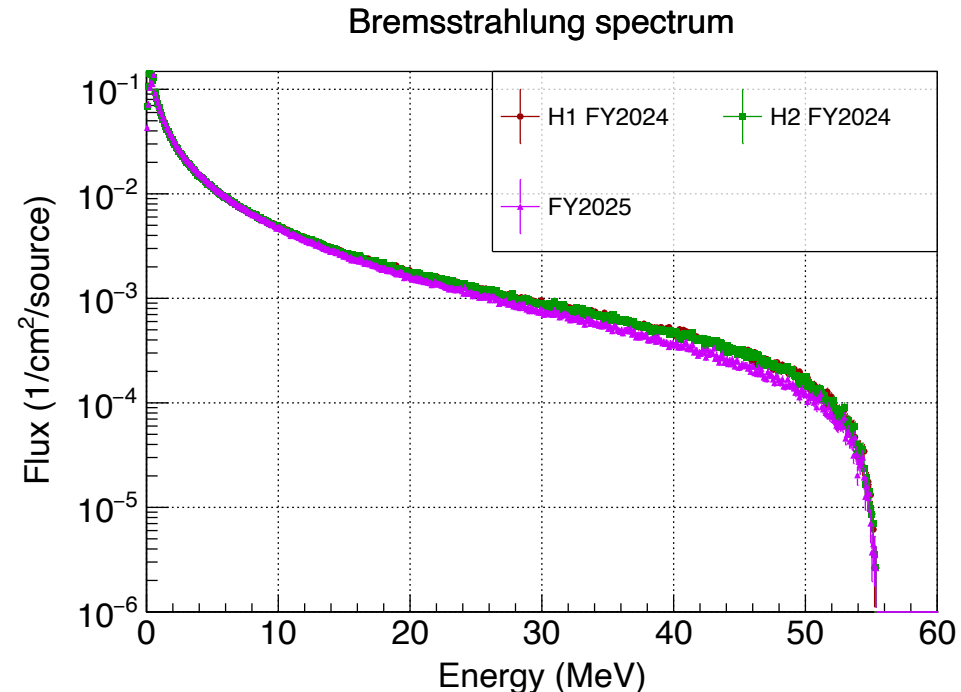
セル番号	物質名
21	ZnO標的 [※]
30	封入Heガス
40	SiO ₂ 管
50	冷却水

実験セットアップ

- ZnO標的における制動放射線スペクトル
 - 2025年度以降では高エネルギー制動放射線の数が減少
 - 高エネルギー制動放射線の立体角が減少

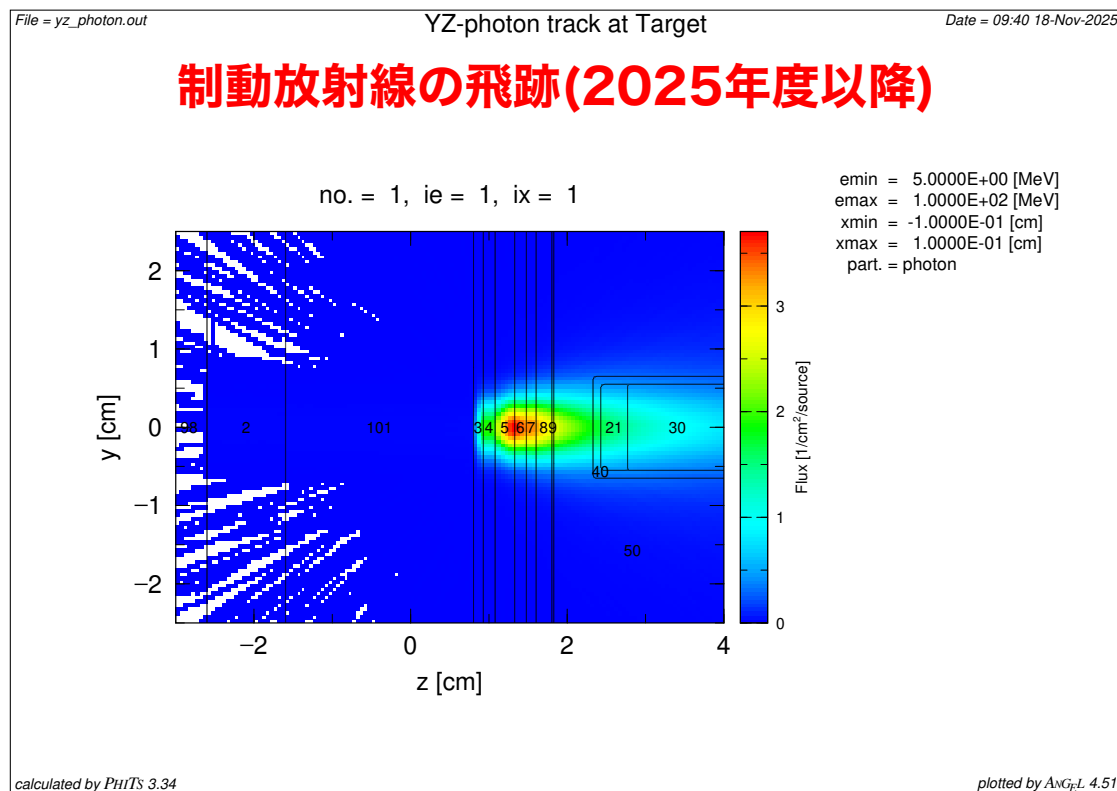


24

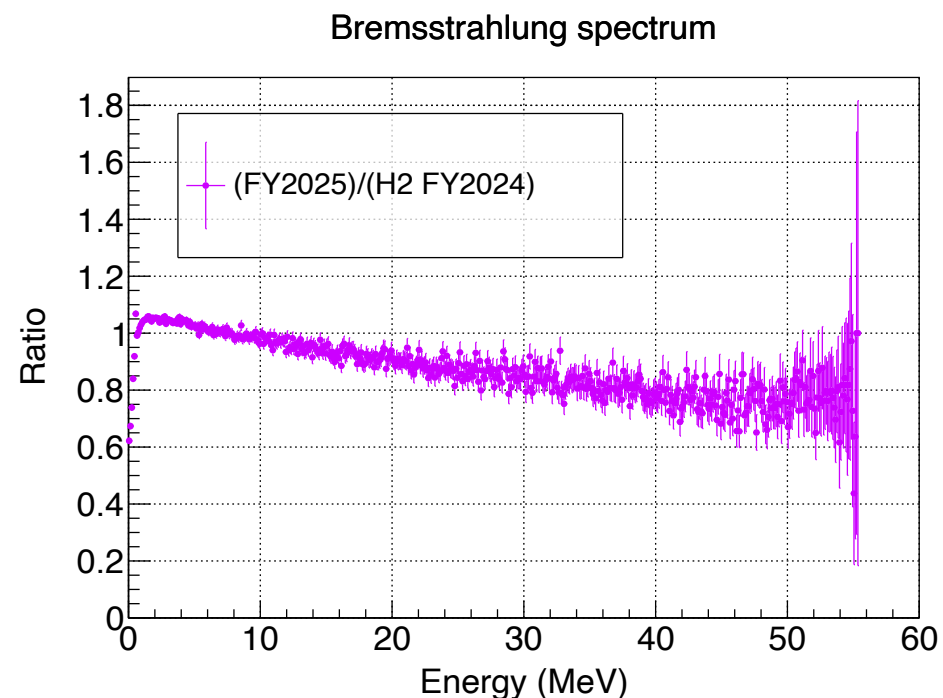
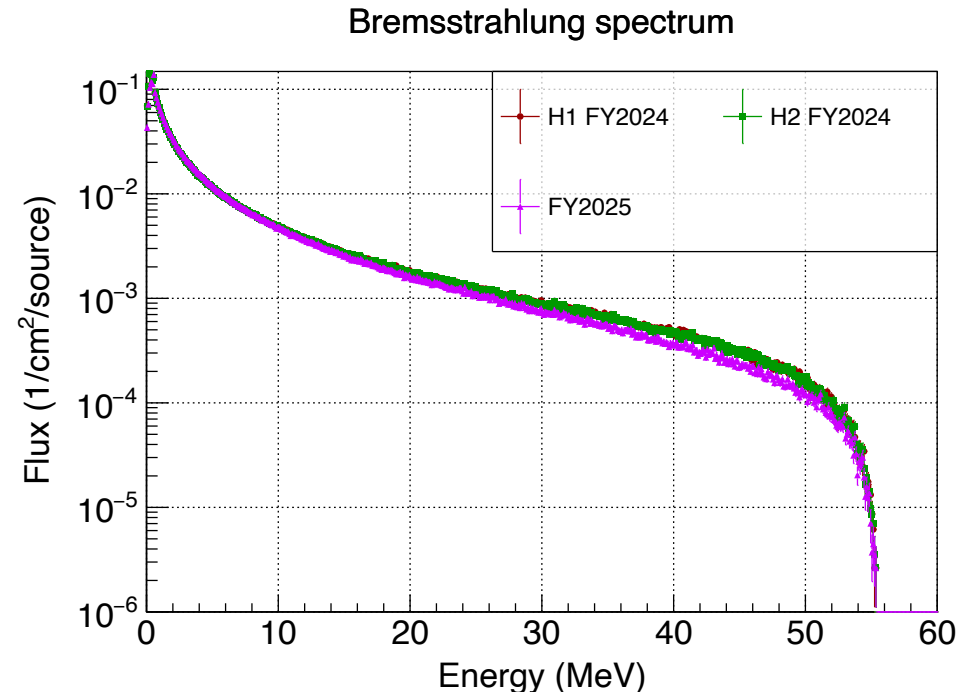


実験セットアップ

- ZnO標的における制動放射線スペクトル
 - 2025年度以降では高エネルギー制動放射線の数が減少
 - 高エネルギー制動放射線の立体角が減少



25

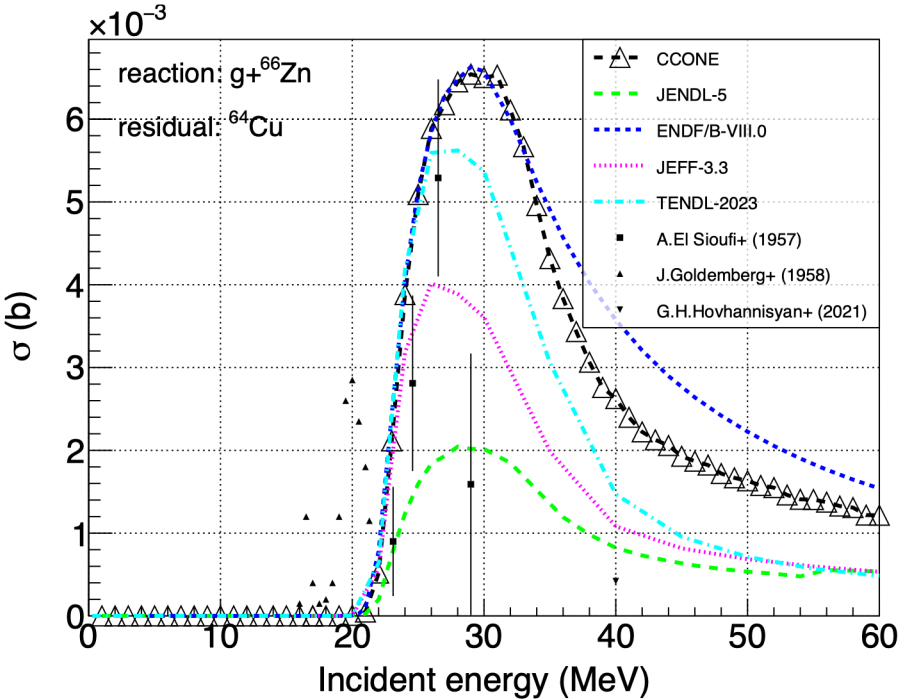
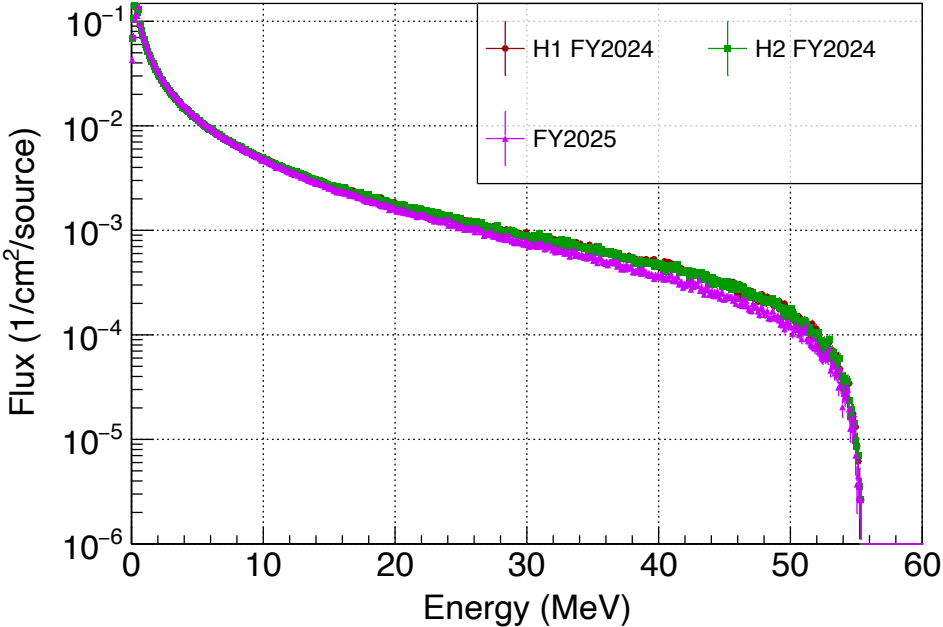


実験セットアップ

- ^{64}Cu 反応収率($\int_0^{E_0} F(k, E_0) \cdot \sigma(k) dk$)を計算
→ 2024年度後半 → 2025年度以降で ^{64}Cu 反応収率が15-16%減少

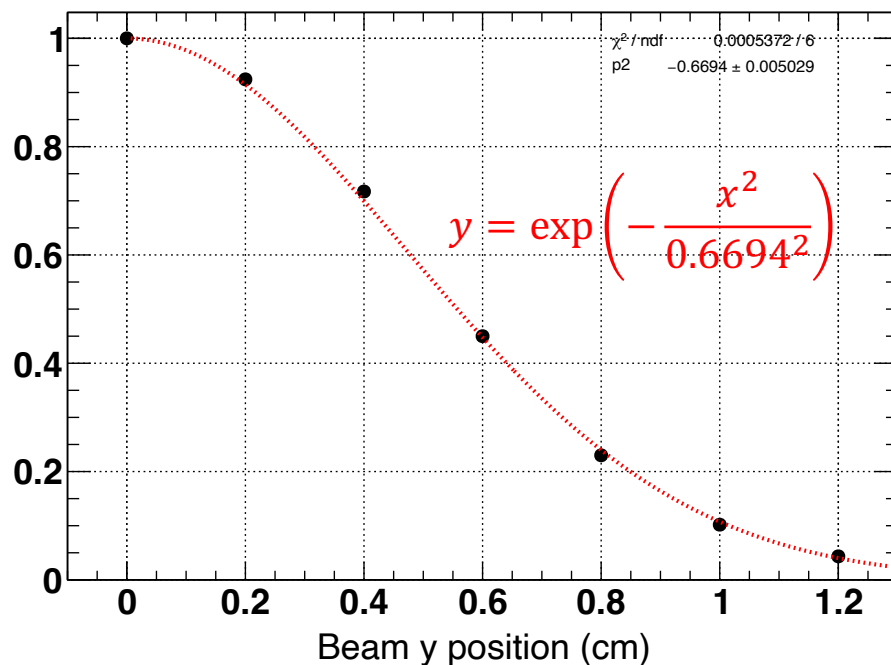
励起関数	^{64}Cu 反応収率 ($10^{-28} \text{ source}^{-1}$)		
	2024年度前半	2024年度後半	2025年度以降
CCONE	8.35	8.30	7.00
JENDL-5	2.64	2.62	2.21
ENDF/B-VIII.0 ^[1]	9.10	9.04	7.59
JEFF-3.3	4.95	4.92	4.18
TENDL-2023	6.96	6.92	5.88

[1] D. A. Brown *et al.*, Nucl. Data Sheets **148**, 1 (2018)

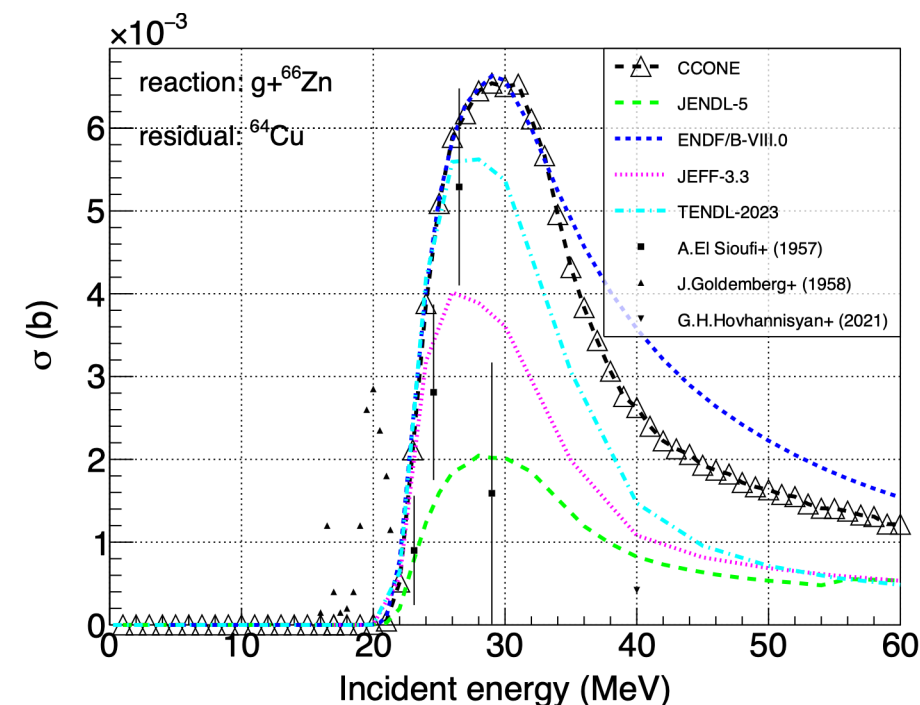
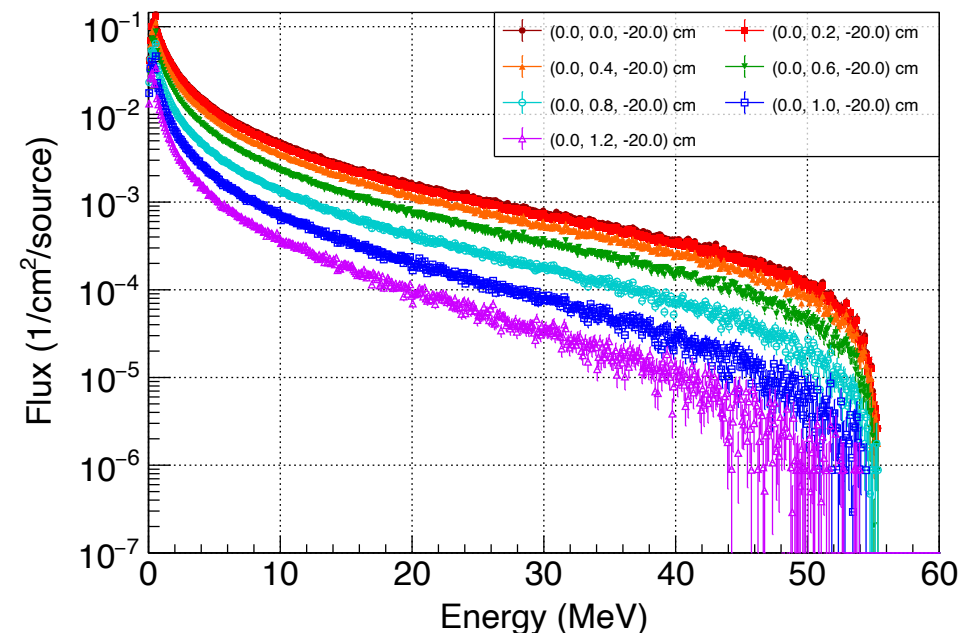


ビームと標的の相対位置

- PHITS(2025年度以降)で電子ビームの位置をずらしてZnO標的における制動放射線スペクトルを取得
 - ^{64}Cu 反応収率($\int_0^{E_0} F(k, E_0) \cdot \sigma(k) dk$)を計算(励起関数: CCONE)
 - ~5.6 mmずれると ^{64}Cu 反応収率が半分に
(ZnO標的の半径: 5.5 mm)



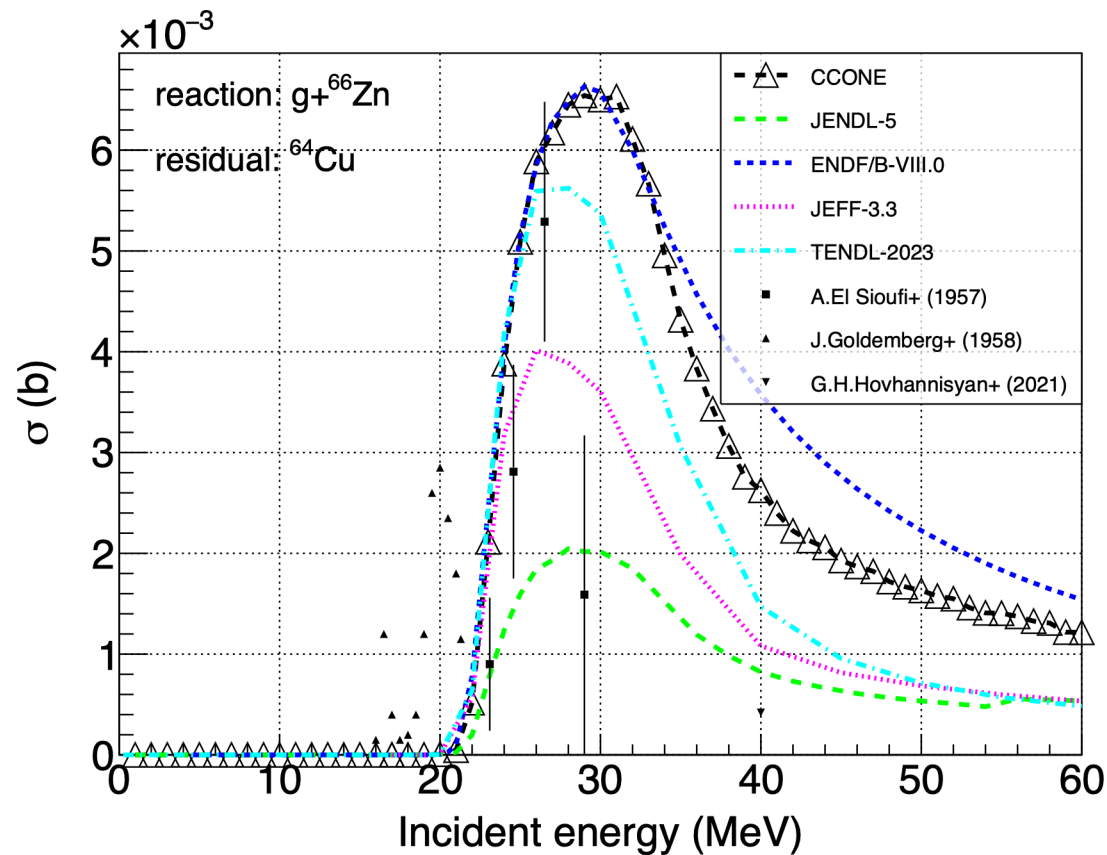
Bremsstrahlung spectrum



^{64}Cu 反応収率

- 2026/4/20の実験値($4.58 \times 10^{-28} \text{ source}^{-1}$)が最大
 - ビームと標的の相対位置にずれがなかったと仮定し、 ^{64}Cu の励起関数を評価
 - **JEFF-3.3**が実験値に最も近い

励起関数	^{64}Cu 反応収率 ($10^{-28} \text{ source}^{-1}$)	実験値に対する比
CCONE	7.00	1.53
JENDL-5	2.21	0.48
ENDF/B-VIII.0	7.59	1.66
JEFF-3.3	4.18	0.91
TENDL-2023	5.88	1.28



ビームと標的の相対位置にずれがあった場合でも評価したい...
 ^{64}Cu と副生成物の比を用いるのはどうか？



$\gamma + {}^{66}\text{Zn}$ で生成されうる全ての残留核

- 以下のいずれかの条件を満たす場合、

$\gamma + {}^{66}\text{Zn}$ で生成されうる全ての残留核の生成断面積(CCONE)

をCCONE-FRITで図示

- 核種生成断面積(CCONE)の最大値 $> 1 \text{ mb}$

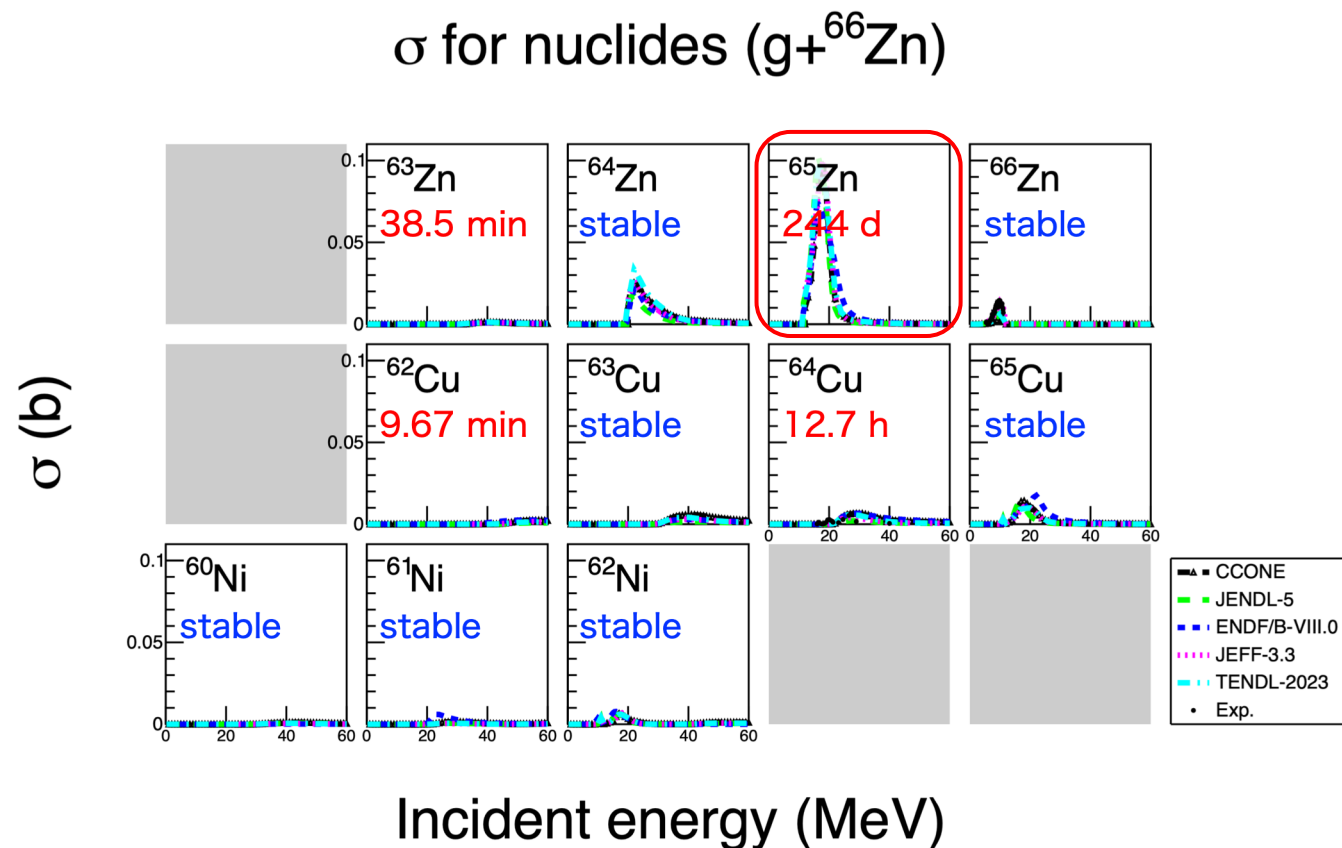
- E_{proj} : 1-60 MeV

- EXFORに実験値が存在

→ Ni, Cu, Znの様々な同位体が生成

→ ${}^{65}\text{Zn}$ が使いそう？

- 核種生成断面積が大きい
- 半減期が長い
- 計算値・ライブラリ値の差が小さい

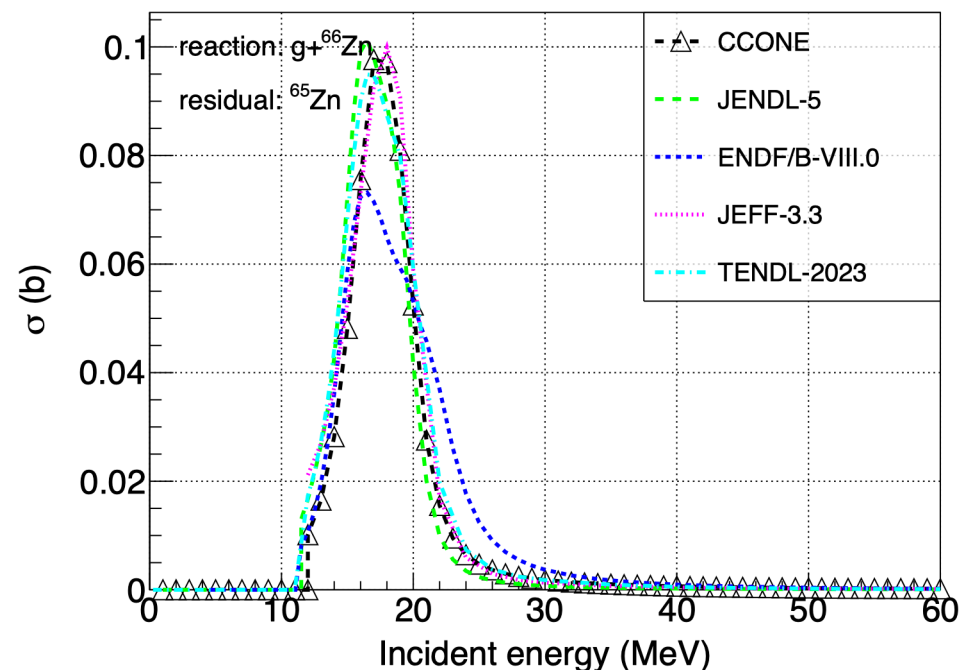
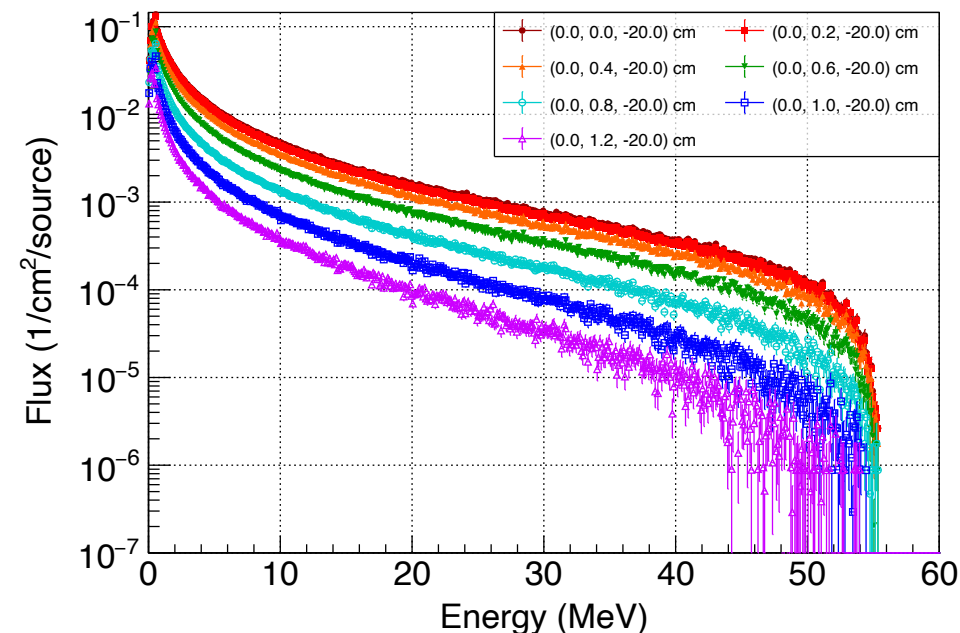


64Cuと65Znの比

- 65Zn反応収率($\int_0^{E_0} F(k, E_0) \cdot \sigma(k) dk$)を計算
(2025年度以降、**励起関数**：CCONE)
→ 64Cuと65Znの比(64Cu/65Zn)を計算
→ **~6 mmずれても6%程度の誤差に抑えられる**

電子ビームの位置 (cm)	64Cu反応収率 (source ⁻¹)	65Zn反応収率 (source ⁻¹)	64Cu/65Zn
(0, 0, -20)	7.00×10^{-28}	1.16×10^{-26}	0.0603
(0, 0.2, -20)	6.47×10^{-28}	1.08×10^{-26}	0.0599
(0, 0.4, -20)	5.02×10^{-28}	8.51×10^{-27}	0.0590
(0, 0.6, -20)	3.15×10^{-28}	5.58×10^{-27}	0.0565
(0, 0.8, -20)	1.61×10^{-28}	3.07×10^{-27}	0.0524
(0, 1, -20)	7.13×10^{-29}	1.54×10^{-27}	0.0463
(0, 1.2, -20)	3.04×10^{-29}	7.62×10^{-28}	0.0399

Bremsstrahlung spectrum

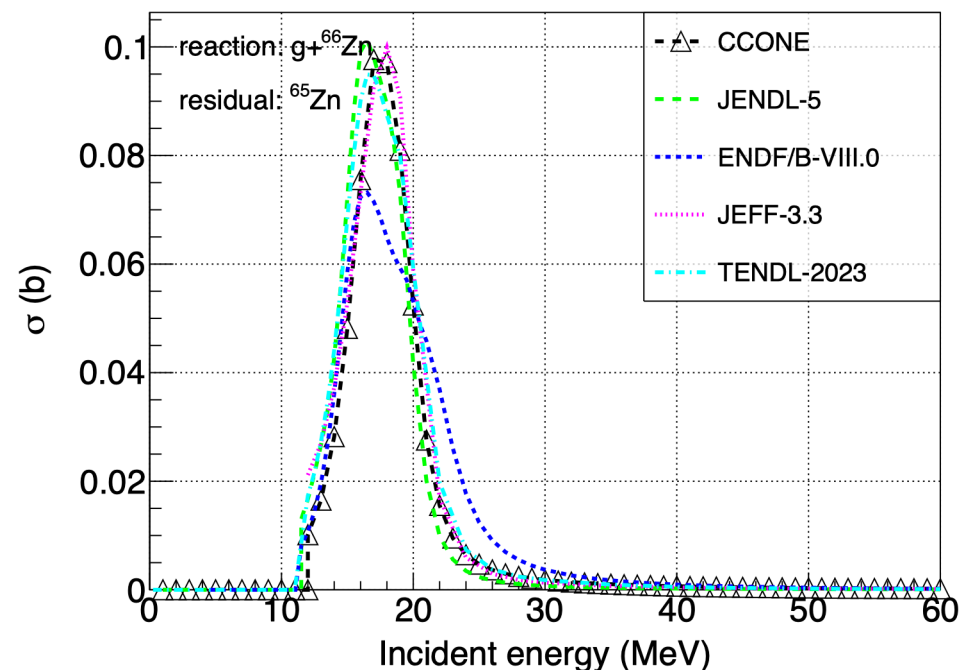
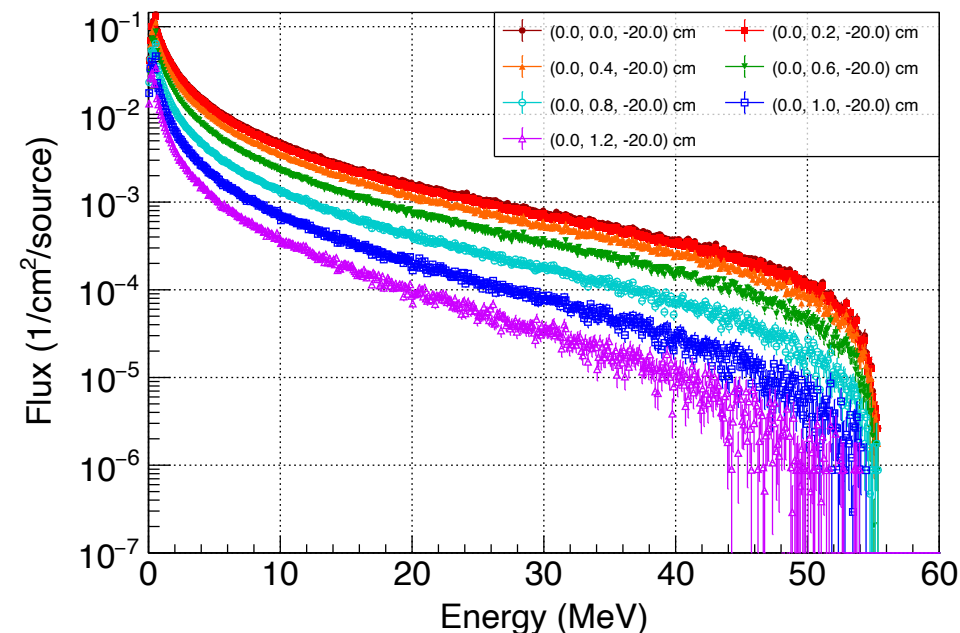


^{64}Cu と ^{65}Zn の比

- $^{64}\text{Cu}/^{65}\text{Zn}$ を各評価済み核データライブラリで計算
 → ずれが~8 mm以内であれば(CCONEとENDF/B-VIII.0を除いて)
 取り得る値の範囲が被らない

電子ビームの位置 (cm)	$^{64}\text{Cu}/^{65}\text{Zn}$ (CCONE)	$^{64}\text{Cu}/^{65}\text{Zn}$ (JENDL-5)	$^{64}\text{Cu}/^{65}\text{Zn}$ (ENDF/B-VIII.0)	$^{64}\text{Cu}/^{65}\text{Zn}$ (JEFF-3.3)	$^{64}\text{Cu}/^{65}\text{Zn}$ (TENDL-2023)
(0, 0, -20)	0.0603	0.0169	0.0622	0.0332	0.0417
(0, 0.2, -20)	0.0599	0.0168	0.0616	0.0331	0.0415
(0, 0.4, -20)	0.0590	0.0164	0.0607	0.0325	0.0411
(0, 0.6, -20)	0.0565	0.0157	0.0580	0.0313	0.0394
(0, 0.8, -20)	0.0524	0.0145	0.0536	0.0291	0.0366
(0, 1, -20)	0.0463	0.0128	0.0472	0.0261	0.0327
(0, 1.2, -20)	0.0399	0.0109	0.0403	0.0228	0.0284

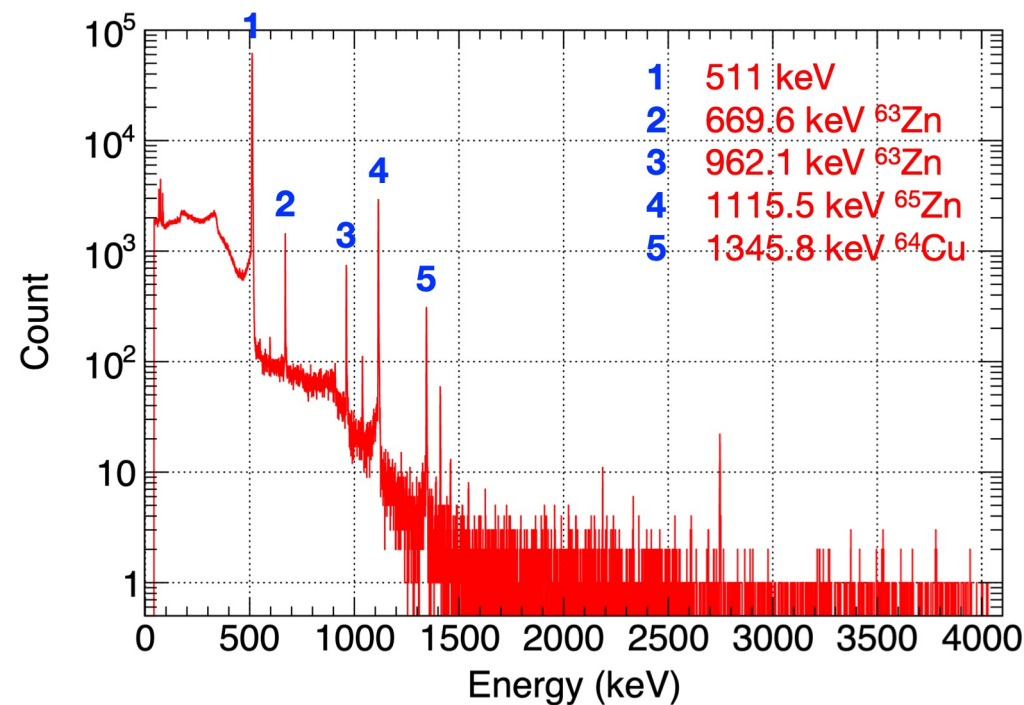
Bremsstrahlung spectrum



^{64}Cu と ^{65}Zn の比

- ^{64}Cu 製造(2026/3/17)
 - 照射後の ^{66}ZnO を塩酸で溶解
 - 化学分離前のサンプル(50 μL)のガンマ線スペクトルをGe検出器で取得
 - $^{64}\text{Cu}/^{65}\text{Zn}$ を導出
 - $^{64}\text{Cu}/^{65}\text{Zn} = 0.0355$
 - JEFF-3.3が実験値に最も近い

電子ビームの位置 (cm)	$^{64}\text{Cu}/^{65}\text{Zn}$ (CCONE)	$^{64}\text{Cu}/^{65}\text{Zn}$ (JENDL-5)	$^{64}\text{Cu}/^{65}\text{Zn}$ (ENDF/B-VIII.0)	$^{64}\text{Cu}/^{65}\text{Zn}$ (JEFF-3.3)	$^{64}\text{Cu}/^{65}\text{Zn}$ (TENDL-2023)
(0, 0, -20)	0.0603	0.0169	0.0622	0.0332	0.0417
(0, 0.2, -20)	0.0599	0.0168	0.0616	0.0331	0.0415
(0, 0.4, -20)	0.0590	0.0164	0.0607	0.0325	0.0411
(0, 0.6, -20)	0.0565	0.0157	0.0580	0.0313	0.0394
(0, 0.8, -20)	0.0524	0.0145	0.0536	0.0291	0.0366
(0, 1, -20)	0.0463	0.0128	0.0472	0.0261	0.0327
(0, 1.2, -20)	0.0399	0.0109	0.0403	0.0228	0.0284



^{64}Cu と ^{65}Zn の比

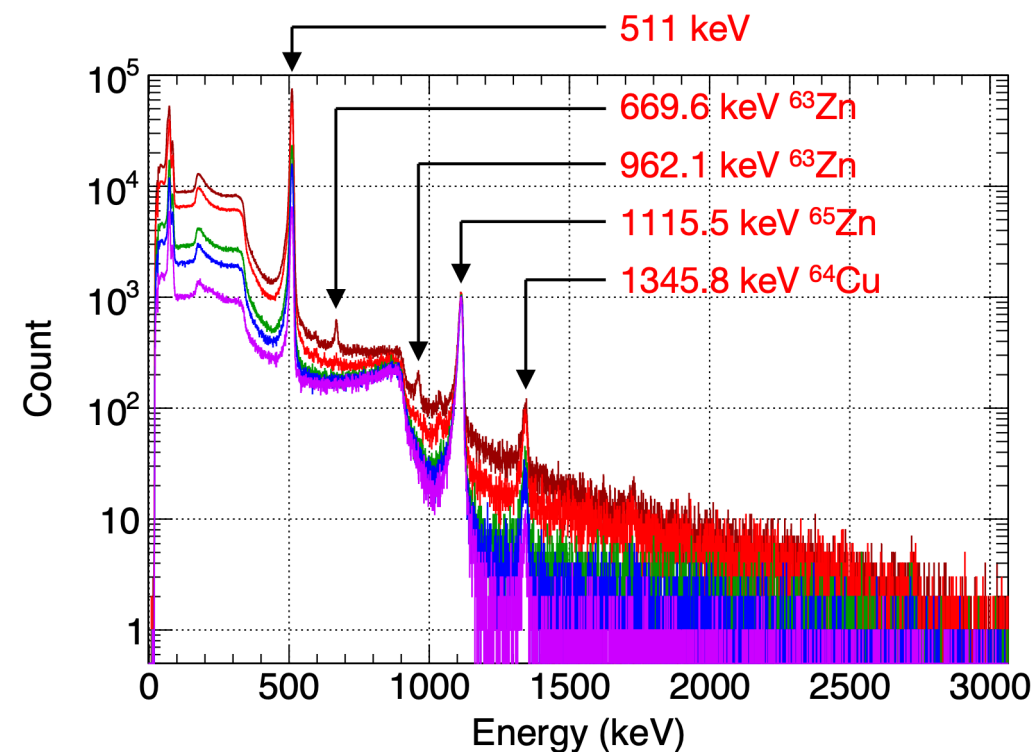
- ^{64}Cu 製造(2026/3/17)
 - 照射後の ^{66}ZnO を塩酸で溶解
 - 化学分離前のサンプル(50 μL)のガンマ線スペクトルをCZT(CdZnTe)検出器で取得



^{64}Cu と ^{65}Zn の比

- ^{64}Cu 製造(2026/3/17)
 - 照射後の ^{66}ZnO を塩酸で溶解
 - 化学分離前のサンプル(50 μL)のガンマ線スペクトルをCZT(CdZnTe)検出器で取得
 - $^{64}\text{Cu}/^{65}\text{Zn}$ を導出
 - $^{64}\text{Cu}/^{65}\text{Zn} = 0.0382 \pm 0.0032$
 - TENDL-2023が実験値に最も近い

電子ビームの位置 (cm)	$^{64}\text{Cu}/^{65}\text{Zn}$ (CCONE)	$^{64}\text{Cu}/^{65}\text{Zn}$ (JENDL-5)	$^{64}\text{Cu}/^{65}\text{Zn}$ (ENDF/B-VIII.0)	$^{64}\text{Cu}/^{65}\text{Zn}$ (JEFF-3.3)	$^{64}\text{Cu}/^{65}\text{Zn}$ (TENDL-2023)
(0, 0, -20)	0.0603	0.0169	0.0622	0.0332	0.0417
(0, 0.2, -20)	0.0599	0.0168	0.0616	0.0331	0.0415
(0, 0.4, -20)	0.0590	0.0164	0.0607	0.0325	0.0411
(0, 0.6, -20)	0.0565	0.0157	0.0580	0.0313	0.0394
(0, 0.8, -20)	0.0524	0.0145	0.0536	0.0291	0.0366
(0, 1, -20)	0.0463	0.0128	0.0472	0.0261	0.0327
(0, 1.2, -20)	0.0399	0.0109	0.0403	0.0228	0.0284



まとめ

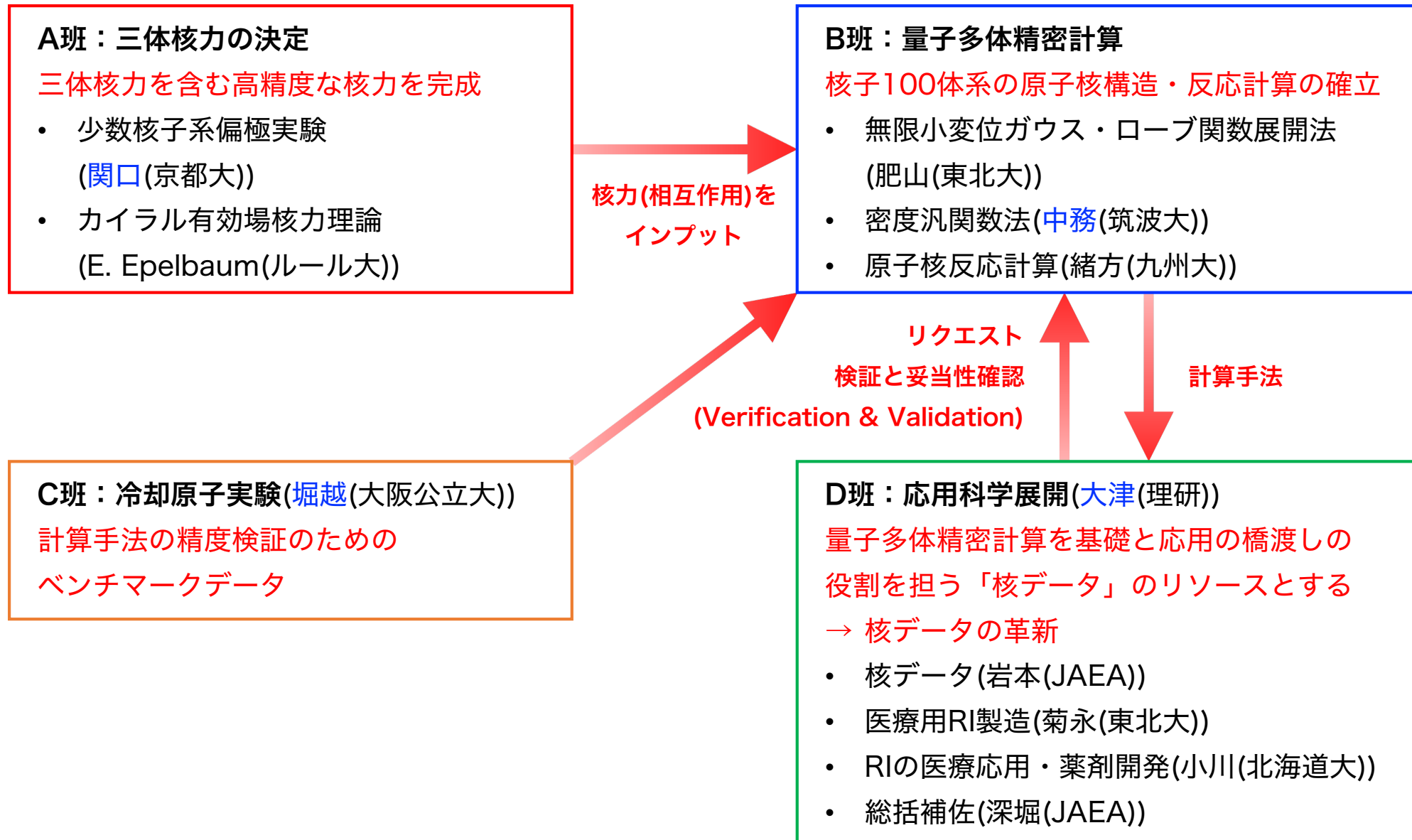
- 目的核種の最適な生成経路の検討に資するCCONEベースのフレームワーク(CCONE-FRIT)を開発した
- CCONE-FRITを用いてRARiS三神峯における ^{64}Cu 製造量の評価を行っている
 - 実験セットアップ・ビームと標的の相対位置が ^{64}Cu 反応収率に大きく影響
 - 絶対値評価：JEFF-3.3に軍配
 - 相対値($^{64}\text{Cu}/^{65}\text{Zn}$)評価：JEFF-3.3, TENDL-2023に軍配

予定等

- CCONE-FRITの機能拡張とサーバーベース化
- ^{64}Cu 製造量の評価における系統誤差の見積もり
- 東北大学RARiS青葉山事業所において ^{77}Br 製造を実施中
 - ^{77}Br 製造量の評価
 - CCONEのモデルパラメータ調整による ^{77}Br および不要な核種の生成断面積の変化を確認
- 医療用RIに関する評価済み核データライブラリ(TOMOE Medical Nuclear Data Library)の構築
- 基礎科学への展開

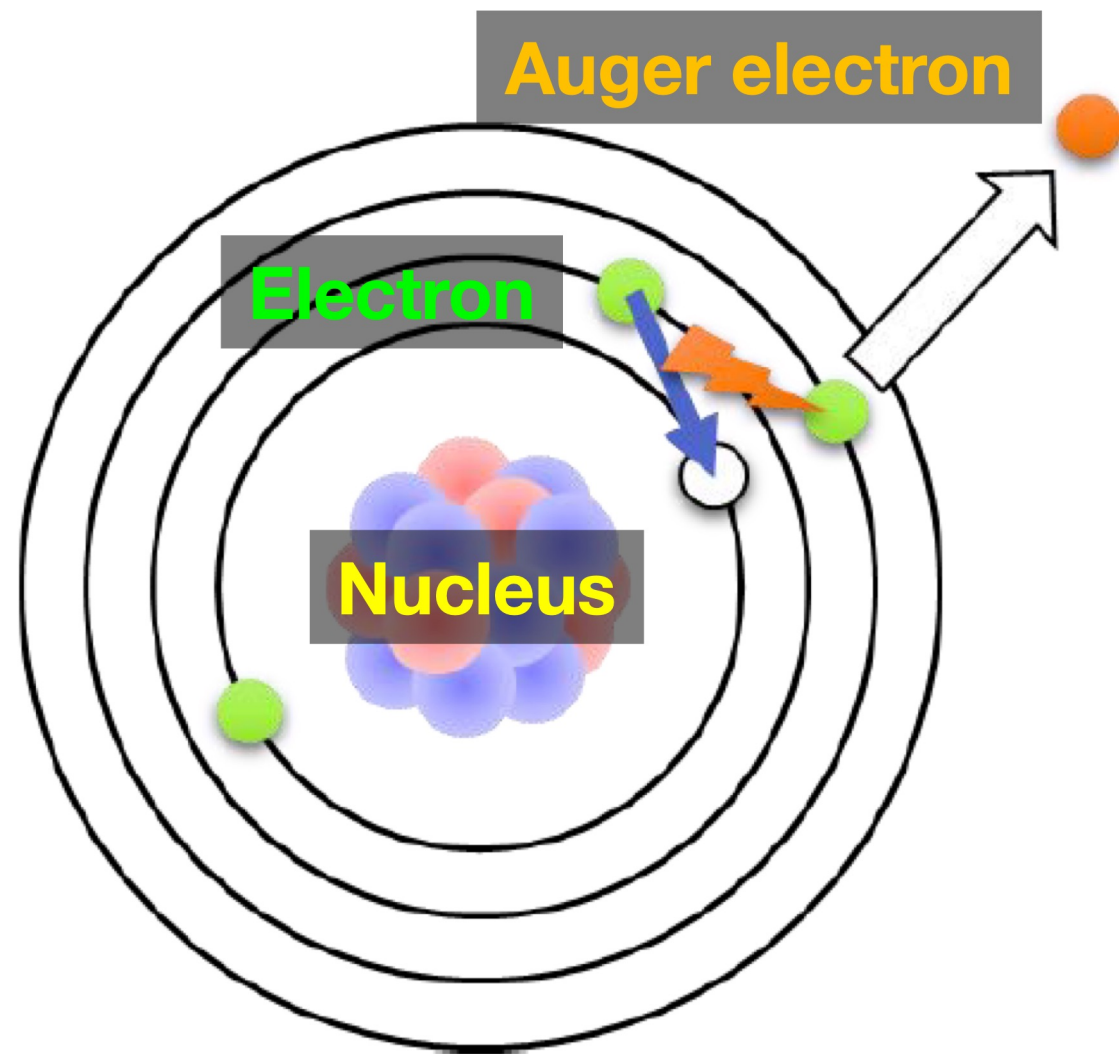
バックアップ

TOMOEプロジェクトの班構成



オージェ電子

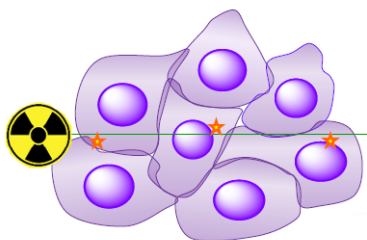
- 内殻電子の空孔形成に伴い放出される低エネルギー (eV-keV, 特性X線と同等のエネルギー) の電子
- 電子捕獲(EC, Electron Capture)や内部転換(IC, Internal Conversion)するRIが放出
- オージェ電子放出核種を用いた核医学治療が注目されている



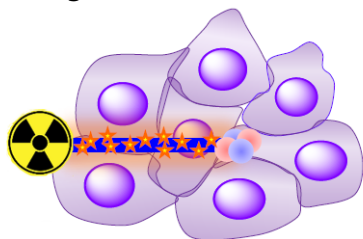
オージェ電子放出核種

- オージェ電子放出核種を用いた核医学治療が注目されている^[1,2]
 - ナノスケールの範囲内で高いエネルギーを付与できる
 - 的確に標的化できれば理論上副作用のない治療が可能
 - α 線放出核種と比べて娘核がさらに崩壊することが少ない

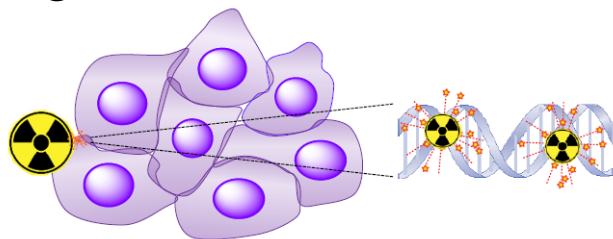
β ray



α ray



Auger electron



	β ray	α ray	Auger electron
Energy	50-2300 keV	5-9 MeV	eV-keV
Range	0.05-12 mm	40-100 μ m	2-500 nm
Linear energy transfer	0.2 keV/ μ m	80 keV/ μ m	4-26 keV/ μ m
Range / tumor cell size (50 μ m)	1-240	0.8-2	4×10^{-5} -0.01
Cytotoxicity	○	◎	△

CCONE-FRITの今後の機能拡張

- 目的核種を生成可能な入射粒子・標的の自動探索
- 化合物標的のTTY計算への対応
- 生成粒子のエネルギー・角度分布の比較
- 残留核の放射能に基づく評価・比較
- 二乗平均平方根誤差(root-mean-square error, RMSE)、 χ^2 などによる定量評価と不確かさ評価

反応収率

$$\begin{aligned}
 \frac{A_0 \times 10^3}{fN_t} \frac{\text{kBq}}{\mu\text{A} \cdot \text{mg}} &= \frac{10^3 \text{ s}^{-1}}{10^{-6} \text{ C s}^{-1} \cdot 10^{-3} \text{ g}} \\
 &= 10^{12} \frac{1}{\text{C} \cdot \text{g}} \\
 &= 10^{12} \frac{1}{\frac{1 \text{ C}}{1.602 \times 10^{-19} \text{ C source}^{-1}} \cdot \frac{1 \text{ g}}{M \text{ g mol}^{-1}}} \quad (\because M (\text{g mol}^{-1}): \text{ZnO のモル質量}) \\
 &= 1.602 \times 10^{-7} M \text{ source}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \\
 &= 2.66 \times 10^{-31} M \text{ source}^{-1}
 \end{aligned}$$

$$\therefore \frac{A_0 \times 10^3}{fN_t} \frac{\text{kBq}}{\mu\text{A} \cdot \text{mg}} = \frac{A_0 \times 10^3}{fN_t} \times 2.66 \times 10^{-31} M \text{ source}^{-1}$$

$$\frac{A_0 \times 10^3}{fN_t t} \frac{\text{kBq}}{\mu\text{A} \cdot \text{mg} \cdot \text{h}} = \frac{A_0 \times 10^3}{fN_t t} \times 2.66 \times 10^{-31} M \text{ source}^{-1} \text{ h}^{-1}$$

$$\frac{A_0 \times 10^3}{fN_t t} \frac{t}{1 - e^{-\lambda t}} \frac{\text{kBq}}{\mu\text{A} \cdot \text{mg} \cdot \text{h}} \cdot \text{h} = \frac{A_0 \times 10^3}{fN_t (1 - e^{-\lambda t})} \frac{\text{kBq}}{\mu\text{A} \cdot \text{mg}} = \frac{A_0 \times 10^3}{fN_t (1 - e^{-\lambda t})} \times 2.66 \times 10^{-31} M \text{ source}^{-1}$$

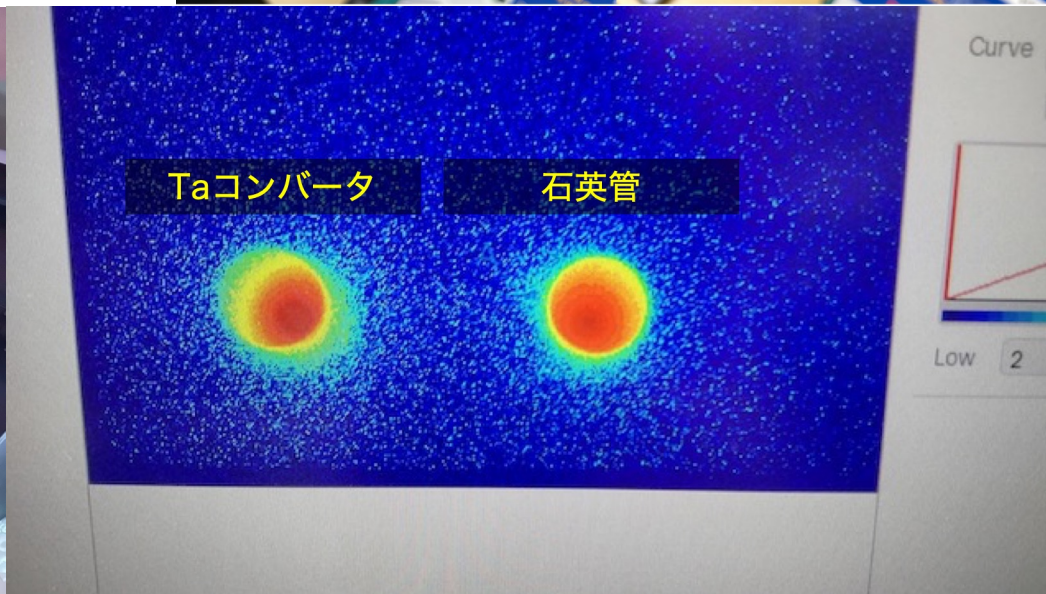
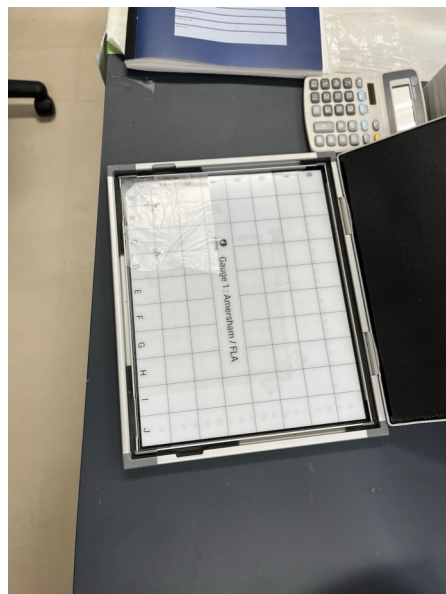
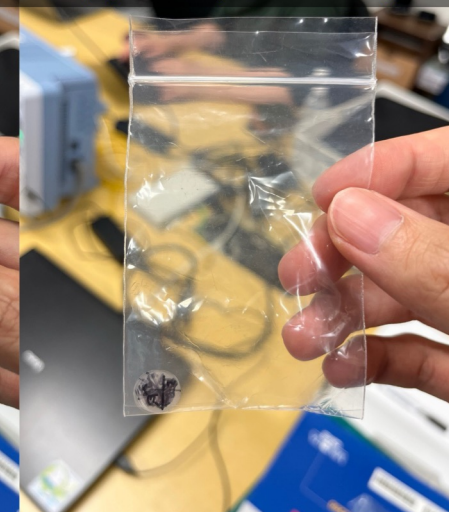
イメージングプレート測定

- (2025/5/14に)直径15 mmのOHPフィルムをTaコンバータと石英管に貼り付けてビームを照射
→ イメージングプレートで測定

OHPフィルム(Taコンバータ用)
(6/10撮影, 直径15 mm)

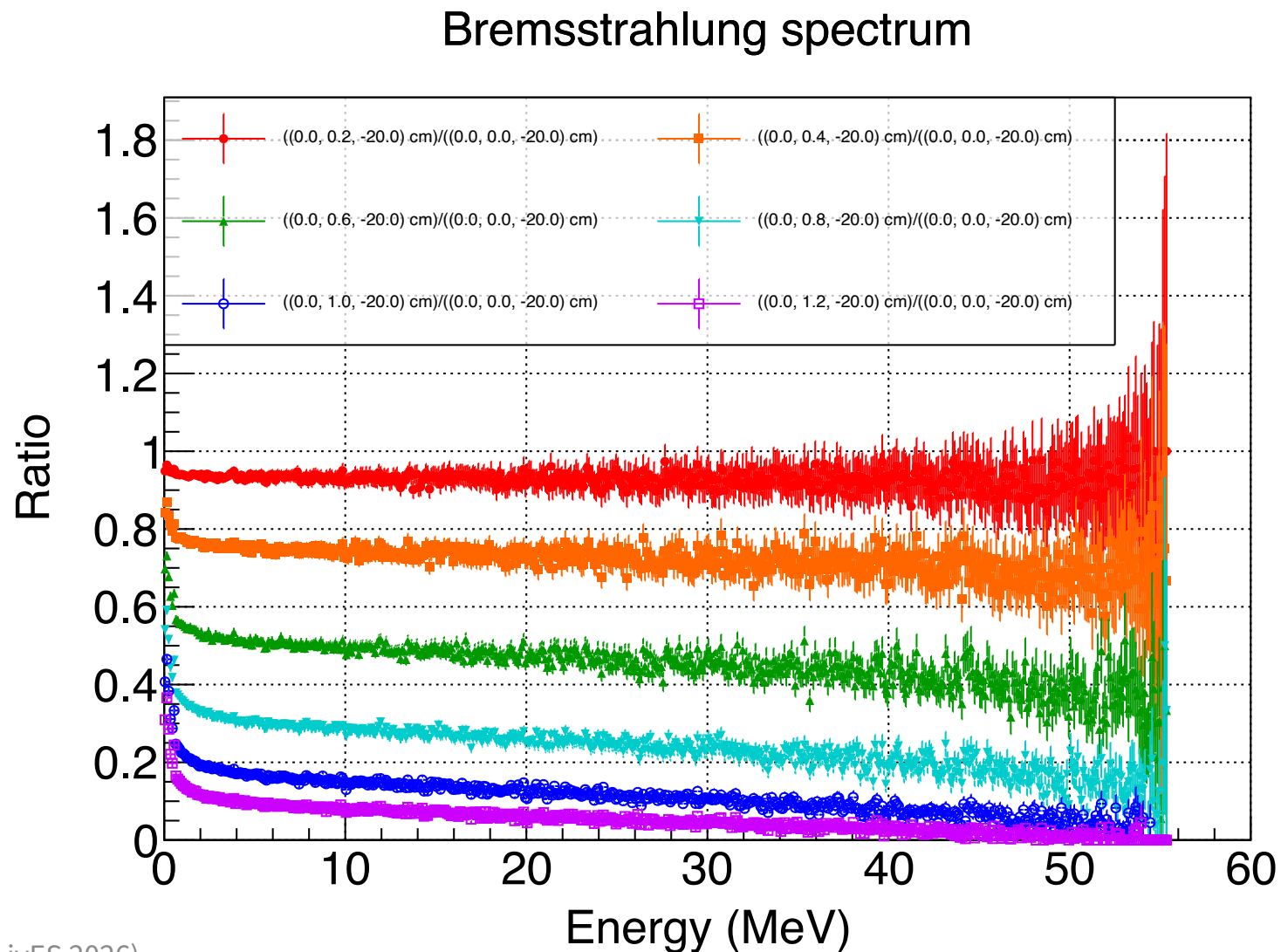


OHPフィルム(石英管用)
(6/10撮影, 直径10 mm)



ビームと標的の相対位置

- ビーム位置(0, 0, -20) cmでの ^{66}ZnO 標的における制動放射線スペクトルに対する比



^{64}Cu と ^{65}Zn の比

$$\frac{A_{0,\text{Cu}}}{fN_t(1-e^{-\lambda_{\text{Cu}}t_{\text{irra}}})} \times 2.66 \times 10^{-28} M = \int_0^{E_0} F(k, E_0) \cdot \sigma_{\text{Cu}}(k) dk \quad \text{--- ①}$$

$$\frac{A_{0,\text{Zn}}}{fN_t(1-e^{-\lambda_{\text{Zn}}t_{\text{irra}}})} \times 2.66 \times 10^{-28} M = \int_0^{E_0} F(k, E_0) \cdot \sigma_{\text{Zn}}(k) dk \quad \text{--- ②}$$

①/②より

$$\frac{A_{0,\text{Cu}}}{A_{0,\text{Zn}}} \left(\frac{1-e^{-\lambda_{\text{Cu}}t_{\text{irra}}}}{1-e^{-\lambda_{\text{Zn}}t_{\text{irra}}}} \right)^{-1} = \frac{\int_0^{E_0} F(k, E_0) \cdot \sigma_{\text{Cu}}(k) dk}{\int_0^{E_0} F(k, E_0) \cdot \sigma_{\text{Zn}}(k) dk} \quad \text{--- ③}$$

$$\text{ここで、} A_{\text{Cu}} = A_{0,\text{Cu}} \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t_{\text{elap}}}{T_{\text{half,Cu}}}}, A_{\text{Zn}} = A_{0,\text{Zn}} \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t_{\text{elap}}}{T_{\text{half,Zn}}}} \text{より}$$

$$\frac{A_{\text{Cu}}}{A_{\text{Zn}}} = \frac{A_{0,\text{Cu}} \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t_{\text{elap}}}{T_{\text{half,Cu}}}}}{A_{0,\text{Zn}} \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t_{\text{elap}}}{T_{\text{half,Zn}}}}}$$

$$\frac{A_{0,\text{Cu}}}{A_{0,\text{Zn}}} = \frac{A_{\text{Cu}}}{A_{\text{Zn}}} \left\{ \frac{\left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t_{\text{elap}}}{T_{\text{half,Cu}}}}}{\left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t_{\text{elap}}}{T_{\text{half,Zn}}}}} \right\}^{-1} \quad \text{--- ④}$$

また、 $\text{cps}_{\text{Cu}} = A_{\text{Cu}} I_{\gamma,\text{Cu}} \varepsilon_{\text{Cu}}$, $\text{cps}_{\text{Zn}} = A_{\text{Zn}} I_{\gamma,\text{Zn}} \varepsilon_{\text{Zn}}$ より

$$\frac{\text{cps}_{\text{Cu}}}{\text{cps}_{\text{Zn}}} = \frac{A_{\text{Cu}} I_{\gamma,\text{Cu}} \varepsilon_{\text{Cu}}}{A_{\text{Zn}} I_{\gamma,\text{Zn}} \varepsilon_{\text{Zn}}}$$

$$\frac{A_{\text{Cu}}}{A_{\text{Zn}}} = \frac{\text{cps}_{\text{Cu}}}{\text{cps}_{\text{Zn}}} \left(\frac{I_{\gamma,\text{Cu}}}{I_{\gamma,\text{Zn}}} \right)^{-1} \left(\frac{\varepsilon_{\text{Cu}}}{\varepsilon_{\text{Zn}}} \right)^{-1} \quad \text{--- ⑤}$$

④に⑤を代入して

$$\frac{A_{0,\text{Cu}}}{A_{0,\text{Zn}}} = \frac{\text{cps}_{\text{Cu}}}{\text{cps}_{\text{Zn}}} \left(\frac{I_{\gamma,\text{Cu}}}{I_{\gamma,\text{Zn}}} \right)^{-1} \left(\frac{\varepsilon_{\text{Cu}}}{\varepsilon_{\text{Zn}}} \right)^{-1} \left\{ \frac{\left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t_{\text{elap}}}{T_{\text{half,Cu}}}}}{\left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t_{\text{elap}}}{T_{\text{half,Zn}}}}} \right\}^{-1} \quad \text{--- ⑥}$$

③に⑥を代入して

$$\frac{\text{cps}_{\text{Cu}}}{\text{cps}_{\text{Zn}}} \left(\frac{I_{\gamma,\text{Cu}}}{I_{\gamma,\text{Zn}}} \right)^{-1} \left(\frac{\varepsilon_{\text{Cu}}}{\varepsilon_{\text{Zn}}} \right)^{-1} \left\{ \frac{\left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t_{\text{elap}}}{T_{\text{half,Cu}}}}}{\left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t_{\text{elap}}}{T_{\text{half,Zn}}}}} \right\}^{-1} \left(\frac{1-e^{-\lambda_{\text{Cu}}t_{\text{irra}}}}{1-e^{-\lambda_{\text{Zn}}t_{\text{irra}}}} \right)^{-1} = \frac{\int_0^{E_0} F(k, E_0) \cdot \sigma_{\text{Cu}}(k) dk}{\int_0^{E_0} F(k, E_0) \cdot \sigma_{\text{Zn}}(k) dk}$$

参考文献

- [1](#) ERATO関口三体核力プロジェクト, “プロジェクトの紹介”
- [2](#) D. Filosofov *et al.*, Nucl. Med. Biol. **94-95**, 1 (2021)
- [3](#) H. Obata, Ph.D. Thesis, Hokkaido University (2023)
- [4](#) WWW Chart of the Nuclides 2014
- [5](#) IAEA Radioisotopes and Radiopharmaceuticals Series No. 7, IAEA, Vienna (2022)
- [6](#) M. Fani *et al.*, Pharmaceuticals **2017**, 10(1), 30
- [7](#) BENCHCHEM, “Bromide ion Br-77”
- [8](#) Y. Feng and M. R. Zalutsky, Nucl. Med. Biol. **100-101**, 12 (2021)
- [9](#) O. Iwamoto, J. Nucl. Sci. Technol. **44**, 5 (2007)
- [10](#) O. Iwamoto *et al.*, Nucl. Data Sheets **131**, 259 (2016)
- [11](#) J. F. Ziegler *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **268**, 1818 (2010)
- [12](#) N. Otuka and S. Takács, Radiochim. Acta **103**, 1 (2015)
- [13](#) Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR)
- [14](#) N. Otuka *et al.*, Nucl. Data Sheets **120**, 272 (2014)
- [15](#) O. Iwamoto *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol. **60**, 1 (2023)

参考文献

- [16](#) A. J. M. Plompen *et al.*, Eur. Phys. J. A **56**, 181 (2020)
- [17](#) A. J. Koning *et al.*, Nucl. Data Sheets **155**, 1 (2019)
- [18](#) Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS)
- [19](#) T. Sato *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol. **61**, 1 (2023)
- [20](#) D. A. Brown *et al.*, Nucl. Data Sheets **148**, 1 (2018)