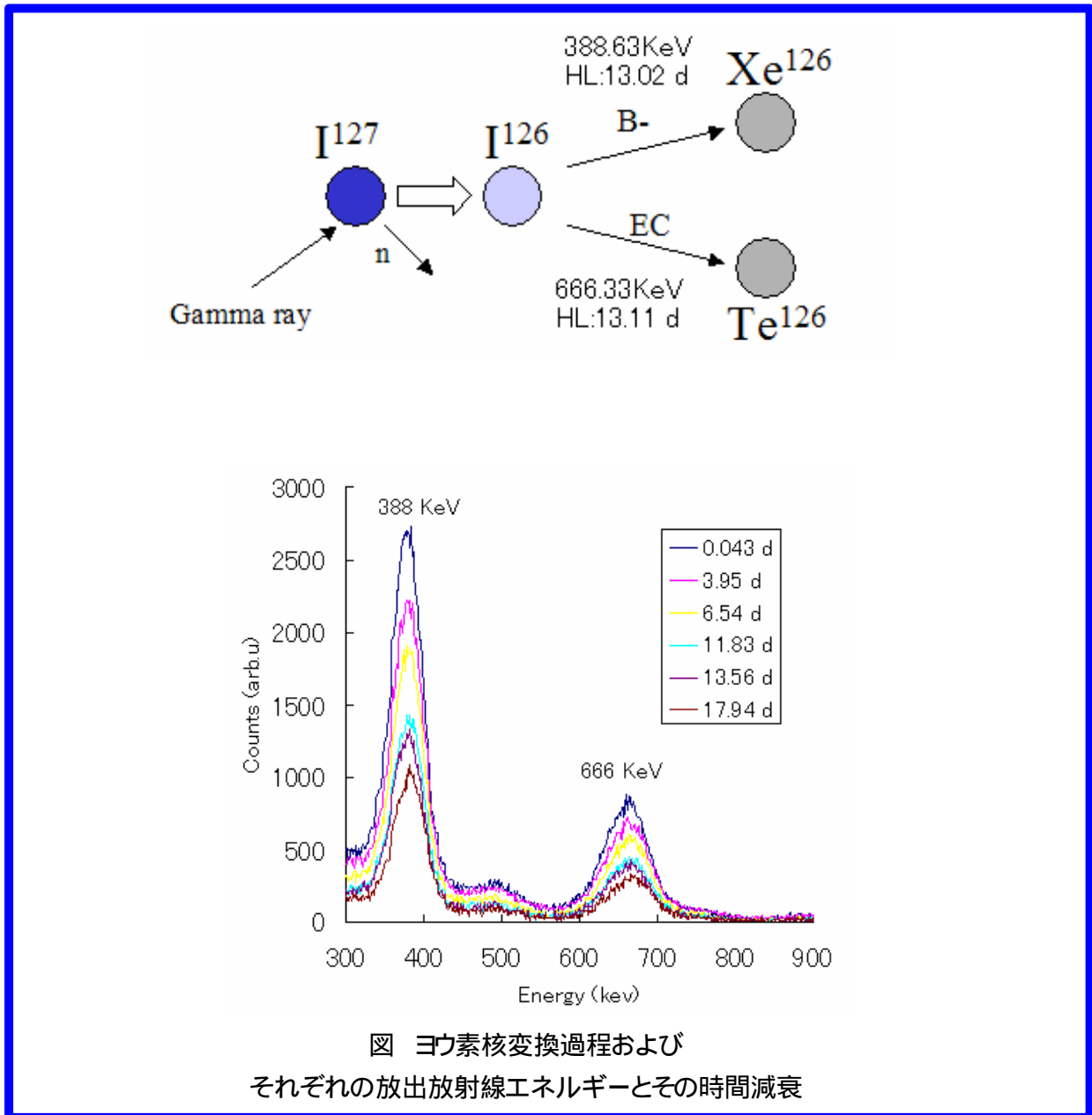


# レーザーコンプトンガンマ線の核反応への応用

レーザーエネルギー研究チーム

今崎一夫、李大治



研究の目的 :テラヘルツ放射源開発基礎研究

今後の応用 発展 :テラヘルツ放射源開発

連絡先 :TEL 06-6879-8789FAX 06-6878-1568

E-mail lidazhi@ile.osaka-u.ac.jp

# レーザーコンプトンガンマ線の核反応への応用

レーザーエネルギー研究チーム

今崎一夫、李大治

## 1. はじめに

化石燃料の大量消費に伴い地球温暖化が進みつつあることが広く認識されはじめている。これにより原子力エネルギー利用が重要視されている。この時排出されるヨウ素 129 は長寿命を持ち且つ地層処分が困難な核種である。

この核変換をめざして、レーザーコンプトン線発生とそれを用いた核反応研究を兵庫県立大ニュースバルSR加速器装置で実施している。我々はスーパーキャビティを用いた高効率線発生を提案してきている。これらの研究により実用的な核変換装置が成立する可能性が期待できる。

## 2. ガンマ線スペクトラム

小型固体レーザーを用いた場合のニュースバルにおける典型的なレーザーコンプトン線スペクトルを図1に示す。

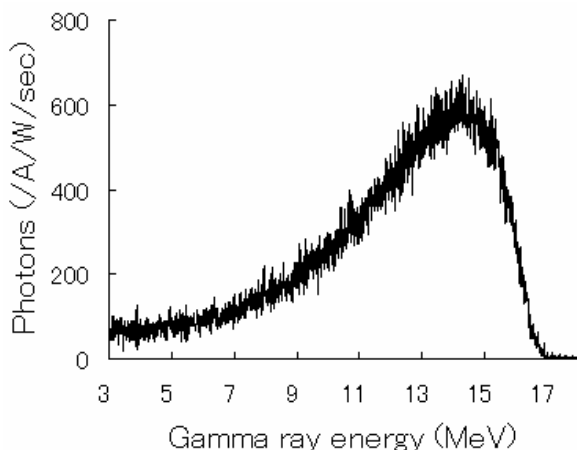


図1 線スペクトル

15MeV にピークがある典型的なコンプトン線波形で

ある。このような線を用いて核反応実験を行っている。レーザーはYAGレーザー(波長1.06 $\mu$ m)を用いており、電子エネルギーは1GeVである。電流量は最大で200mAであった。(1)

## 3. 核変換反応

単位体積当りの核反応量は

$$R = N_0 s_g(E) I(E, z) \quad (1)$$

で表される。ここで $N_0$ は単位体積あたりのターゲットでの原子数、 $s_g(E)$ は巨大核共鳴の反応断面積、 $I(E, z)$ は線強度、 $E$ は線のエネルギーでターゲット中での相互作用で変化する。これを円筒型ターゲットとしてこの形状について積分すると

$$\tilde{R} = \int R dV = N_0 \int s_g(E) I(E, z) dV \quad (2)$$

また線は直進しその経路において

$$I(E, z) = x s_L(E) e^{-mz} \quad (3)$$

と表される。 $x$ は電子ビームと光子数のそれぞれの特性に関連する因子で、 $s_L(E)$ はコンプトン散乱断面積、 $m$ は全線形透過係数で、

$$m = m_{pE}(E) + m_C(E) + m_{pp}(E) + m_{pN}(E) \quad (4)$$

となる。

ここで

$$m_{pE} = s_{pE}(E) N_0$$

$$\begin{aligned} m_c &= s_c(E)ZN_0 \\ m_{pp} &= s_{pp}(E)N_0 \\ m_{pN} &= s_{pN}(E)N_0 \end{aligned}$$

で表される。また  $Z$  は原子数、また  $s_{pe}(E)$ 、 $s_c(E)$ 、 $s_{pp}(E)$ 、 $s_{pN}(E)$  はそれぞれ光電子、コンプトン散乱、対創成、光中性子発生のそれぞれの断面積を示す。これにより(1)式は

$$\tilde{R} = N_0 \int_0^b \int_0^a s_L(E) s_g(E) e^{-\mu x} \cdot 2\pi r dr dz. \quad (5)$$

となる。

またレーザーコンプトン光子エネルギーを表すために次のような簡易式を用いた。[6]

$$E = \frac{E_m}{1 + \left(\frac{q}{q_0}\right)^2} \quad (6)$$

$$q = \arctan\left(\frac{r}{L}\right)$$

また

$$E_m = \frac{x}{1+x} E_b$$

$$q_0 = \frac{mc^2}{E_b} \sqrt{x+1}$$

$$x = \frac{4E_b u_0}{m^2 c^4}$$

ここで  $E_m$  は 線エネルギーのの最大値、 $L$  は相互作用点からターゲット表面までの距離、 $E_b$  は電子にエネルギー、 $u_0$  はレーザー光子エネルギーである。このとき入射された 線は

$$F = \int I(E,0) ds = x \int_0^a s_L(E) \cdot 2\pi r dr. \quad (7)$$

となる。ここで最終的に光子あたりの核変換効率が求まり

$$h = \frac{\tilde{R}}{F} = \frac{N_0 \int_0^b \int_0^a s_L(E) s_g(E) e^{-\mu x} \cdot 2\pi r dr dz}{\int s_L(E) \cdot 2\pi r dr} \quad (8)$$

この式から明らかなようにターゲットだけではなく、電子ビームのエネルギーも含めたコンプトン散乱の特性にも依存する。

金( $^{197}\text{Au}$ ) ターゲットにおける核反応率の計算を行った。相互作用点から 15.35 m 離れた場所での値である。 $s_L(E)$ はクライン仁科の式による。 $s_{pe}(E)$ 、 $s_c(E)$ 、 $s_{pp}(E)$  および  $s_{pN}(E)$  は文献 5 と同様である。この結果を図2、3、4にそれぞれ示す。

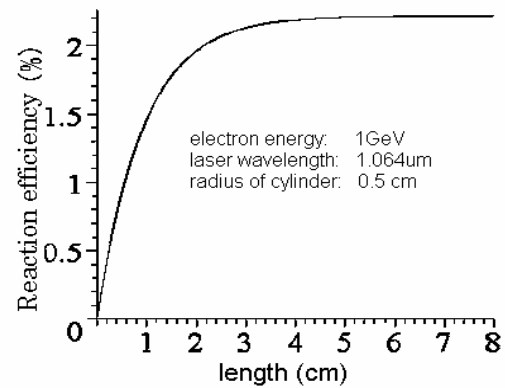


図2 核反応率・ターゲット長

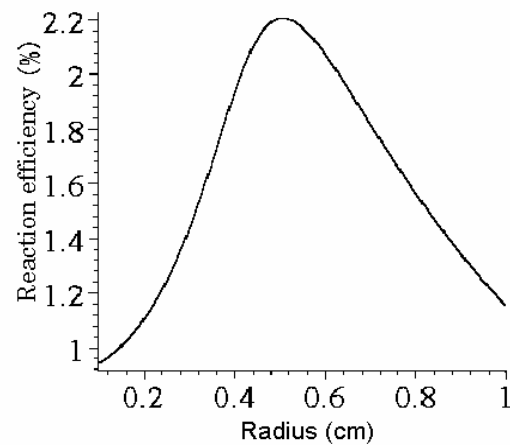


図3 核反応率・ターゲット半径

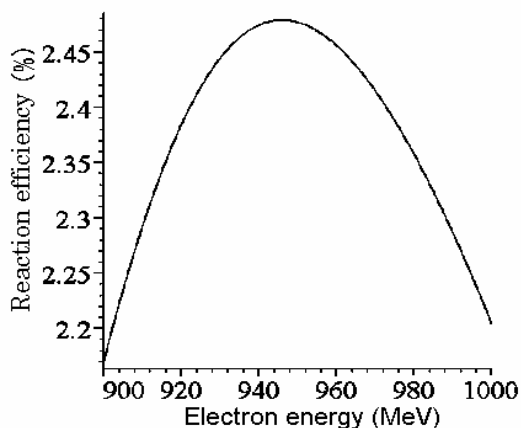


図4 核反応率・電子エネルギー

#### 4. 核反応実験

##### 4.1 重核ターゲット (2)

核反応実験を行った。このような核は4式のそれぞれの核反応過程において、断面積が比較的大きく解析しやすい。特に金は同位体がなくこのため単純に核反応プロセスが決定できる。このため金の円筒状ターゲットを用いた。

<sup>197</sup>Au ターゲット原子核は 線核反応より 中性子を放出して <sup>196</sup>Au になる。( , n) 反応である。この <sup>196</sup>Au は不安定で放射性崩壊を通じて当然 <sup>196</sup>Pt および <sup>196</sup>Hg になる。<sup>196</sup>Au から <sup>196</sup>Pt の変換が確率的にはるかに大きく、この崩壊が主として起こり 355.73 keV の 線を放出する。これは NaI(Tl) 検出器で検出される。照射され活性化された金ターゲットにおいて、反応原子核数は照射終了時において

$$N_0 = \frac{\Delta N e^{t}}{1 - e^{-\lambda t}}$$

となる。ここで  $N_0$  は未崩壊の原子核数、 $N$  は  $t$  の間隔における崩壊数、 $\lambda$  は崩壊定数、そして  $t$  は照射終了時から計測開始時までの時間間隔である。

実験では2種類の円柱型金ターゲットを用いた。長さが5cmで半径が0.25および0.5cmであった。両方とも8時間の照射を行った。これらに対し活性化計測を同

様の条件で、線のスペクトルをモニターしながら行った。図5にモニター波形を示す。

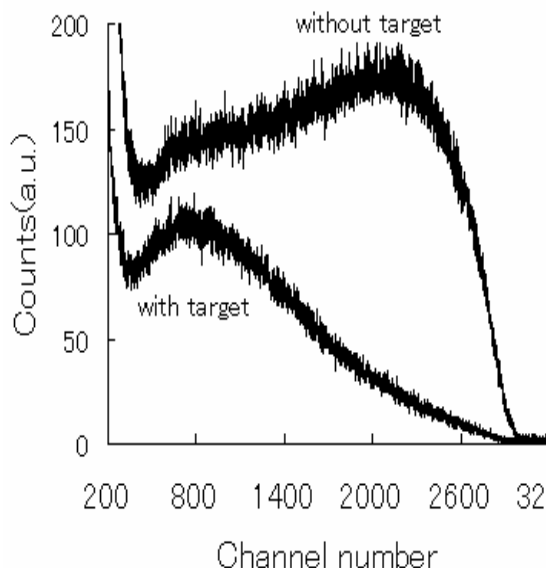
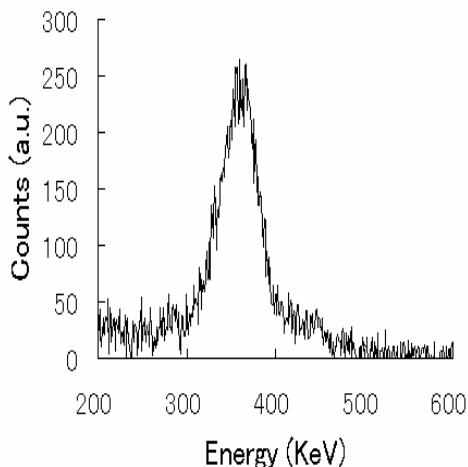


図5 レーザーコンプトン 線エネルギー計測 (金ターゲットのある場合とない場合)

このときの金ターゲットの崩壊 線 355.73keV の 線は図6のように得られている。



線のカウント量により放射化の収量が求まり、この結果と光子数より反応率が算出される。実際にはターゲット内の崩壊 線は自己吸収がある。この円柱ターゲット内での崩壊における放射線の損失はEGS4コードを用い

て算出している。これにより最終的に核反応率が得られる。これを図7に示す。ここで実線は理論より求めたものである。

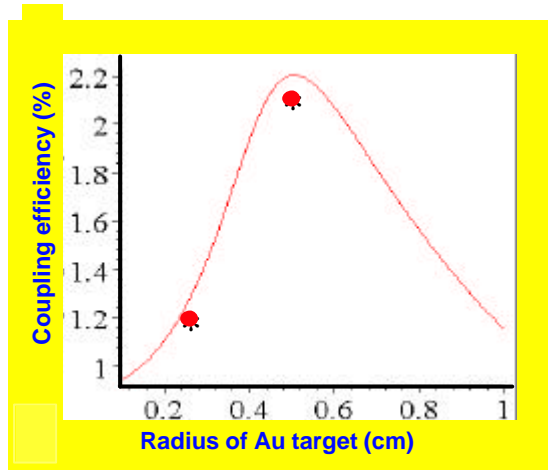


図7 ターゲット径 実験値(点)と理論値(実線)

#### 4.2 NaI ターゲット

ヨウ素 129はFPとして原子炉より排出される。これは沸点が低いためにガラス固化体に入れることができない。また長寿命である。このヨウ素 129を対象にして核変換研究を進めている。しかし定量的な核消滅データベースを作るためにはいろいろな問題が出てくるので模擬核としてヨウ素 127を用いた。簡便に実験を行うため NaI をターゲットとして実験を行っている。Naは核反応率が小さいためノイズの小さい実験を行える。

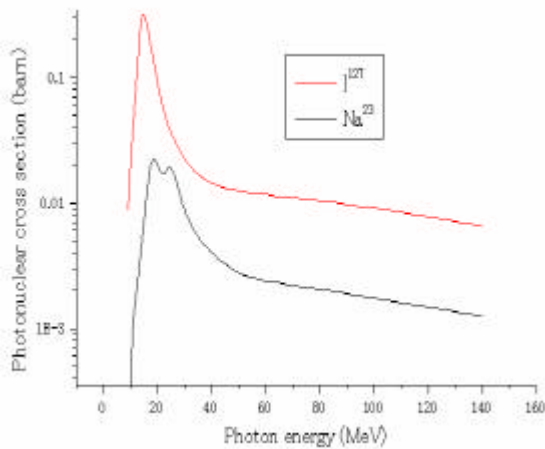


図8 NaIにおけるそれぞれの核反応率

ヨウ素 127は核変換反応によりヨウ素 126を経て、Xe126およびTe126へと変わる。この時の変換(崩壊)

により発生する特性放射線を計測した。この放射線エネルギーは全くこの核変換と一致する。またこの特性時間計もこの変換時定数と一致する。これらの結果を図9および図10に示す。

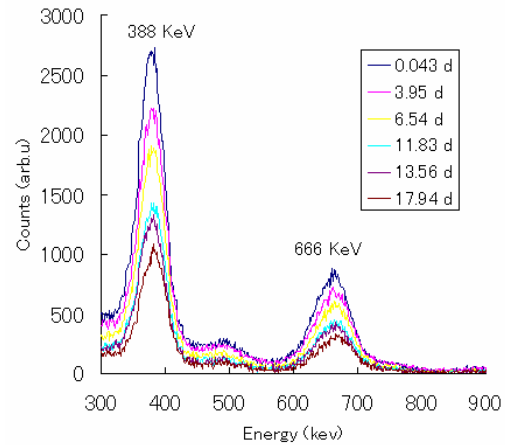


図9 ヨウ素核変換とそれに伴う放射線

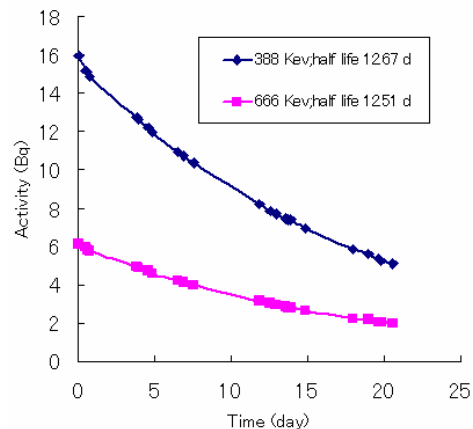


図10 放射線減衰特性

#### 5.まとめ

ニュースパル蓄積リングにおいて 17MeV 線を発生しこれを用いた核反応実験を行った。結果は理論的な解析とよく一致している。現状技術に立脚した核変換実用化の可能性が期待できる。

#### 参考文献

- [1] D. Li, K. Imasaki, S. Miyamoto, The Review of Laser Engineering 32, 211 (2004)
- [2] D. Li, K. Imasaki, M. Aoki, J. Nucl. Sci. and Tech. 39, 1247 (2002)