背景

- 京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)における
 ADS (Accelerator-Driven System)の成立性に関する研究
- ▶ 100 MeVの陽子ビームをWターゲットに入射させた 中性子源を使用

目的

▶ 中性子源の評価:

核破砕反応から発生する高エネルギー中性子の測定

- Biを用いた放射化法による反応率測定
- 有機液体シンチレータを用いた中性子のエネルギースペクトルの測定

高エネルギー中性子測定

➢ Biを用いた放射化法

 10~90 MeVの中性子と 閾値反応

長所:g線の高い場でも測定が可能 短所:高線量場

▶ 有機液体シンチレータ

・ 1 MeV以上の中性子が測定可能

長所:エネルギー分解能が高い 短所:g線の高い場で測定が困難 表 ²⁰⁹Biの半減期と閾値

反応	閾値 [MeV]	半減期
²⁰⁹ Bi (n,3n) ²⁰⁷ Bi	14	38.3 y
²⁰⁹ Bi (n,4n) ²⁰⁶ Bi	23	6.24 d
²⁰⁹ Bi (n,5n) ²⁰⁵ Bi	30	15.31 d
²⁰⁹ Bi (n,6n) ²⁰⁴ Bi	38	11.22 h
²⁰⁹ Bi (n,7n) ²⁰³ Bi	45	11.76 h
²⁰⁹ Bi (n,8n) ²⁰² Bi	54	1.67 h
²⁰⁹ Bi (n,9n) ²⁰¹ Bi	62	1.77 h
²⁰⁹ Bi (n,10n) ²⁰⁰ Bi	71	36.45 m
²⁰⁹ Bi (n,11n) ¹⁹⁹ Bi	78	27.12 m
²⁰⁹ Bi (n,12n) ¹⁹⁸ Bi	88	11.85 m

・閾値の異なる10の反応

・閾値が約8 MeV間隔

1. Biを使用した放射化法の実験体系



51.0 mm

図1. 国立がん研究センターにおける実験体系

50.5 mm

加速器運転条件

- 陽子ビームエネルギー:150, 190, 235 MeV
- ビーム電流:1nA
- ビーム径:40 mmf

実験条件

 SS: 2 mm

50.5 mm

- ターゲット:W(21, 27, 36 mm x 50 mmf)
- 放射化法:Bi(3 mm x 50 mmf)



図2. ガフクロミックフィルムで確認した陽子ビーム形状

放射化したBiのg線スペクトル測定結果

▶ 150 MeV陽子入射後の放射化したBiのg線スペクトル測定結果



閾値90 MeVの²⁰⁹Bi (n,12n)¹⁹⁸Biまでの反応を確認

反応率測定結果·数值計算結果

150, 190, 235 MeV陽子入射の時のBi箔の測定結果と 数値計算結果の比較

	表 Biの反応率のC/E ^{※)}		核データ:ENDF/B-VI, LA	
反応	150 [MeV]	190 [MeV]	235 [MeV]	
²⁰⁹ Bi (n, 4n) ²⁰⁶ Bi	1.32±0.11	1.33±0.02	1.02±0.01	
²⁰⁹ Bi (n, 5n) ²⁰⁵ Bi	2.01±0.19	1.36±0.03	0.84±0.02	
²⁰⁹ Bi (n, 6n) ²⁰⁴ Bi	0.95±0.08	0.90±0.02	0.68±0.01	
²⁰⁹ Bi (n, 7n) ²⁰³ Bi	1.11±0.10	1.13±0.02	0.76±0.01	
²⁰⁹ Bi (n, 8n) ²⁰² Bi	1.00±0.12	1.00±0.02	1.00±0.01	
²⁰⁹ Bi (n, 9n) ²⁰¹ Bi	1.24±0.12	1.21±0.05	1.12±0.08	
²⁰⁹ Bi (n,10n) ²⁰⁰ Bi	0.95±0.08	1.21±0.03	1.19±0.02	
²⁰⁹ Bi (n,11n) ¹⁹⁹ Bi	_	1.53±0.07	1.26±0.04	
²⁰⁹ Bi (n,12n) ¹⁹⁸ Bi	0.98±0.09	1.34±0.10	1.24±0.08	

実験と数値計算結果の差異の相対標準偏差は20%

^{※)} J. Nucl. Sci. Technol, **47**, 1090-1095 (2011)

2. 有機液体シンチレータを使用した実験体系

加速器運転条件

陽子エネルギー:100 MeV ビーム強度:0.2 pA

実験解析手順

- 1. 中性子とg線の弁別
- 2. 中性子の応答関数の作成
- 3. 中性子スペクトル



中性子とg線との弁別



図1. 発光量と信号の立ち上がり時間の2次元分布

図2. 中性子・g線の発光量分布

100 MeV陽子入射によって生じるWターゲットから発生する中性子とg線を弁別



➢ SCINFUL-OMDを用いて0.5~100 MeVまでの中性子の 応答関数を作成

水素や炭素の弾性散乱及び 非弾性散乱以外の反応も考慮



測定·計算結果

UMGコードを用いて、測定した発光量分布と応答関数から 中性子スペクトルを算出し、数値計算と比較 _{核データ: ENDF/B-VI.6, LA150}



Biの反応率の実験と数値計算結果との比較

		Reaction	Threshold [MeV]	C / E
		²⁰⁹ Bi (n, 3n)	14.4	
	2 (17 3 M)	209 Bi (n, 4n)	22.5	1.00
陽子ビーム(100 MeV)	2 - 1, 1, 1, 1, 1, 1, 3 	209 Bi (n, 5n)	29.6	0.94 ± 0.01
		209 Bi (n, 6n)	38.1	0.88 ± 0.01
		209 Bi (n, 7n)	45.4	0.96 ± 0.01
₩		209 Bi (n, 8n)	54.2	1.66 ± 0.02
	λ	209 Bi (n, 9n)	61.7	
wターゲット	Bi (3 mm x 50 mmf)	²⁰⁹ Bi (n, 10n)	70.9	
(10 mm x 80 mmf)		²⁰⁹ Bi (n, 11n)	78.5	
		209 Bi (n, 12n)	87.9	

計算コード: MCNPX 2.5.0,

核データ: ENDF/B-VI, JENDL/HE-2007

- 8n反応を除き、45 MeVまでの反応率の実験値と数値計算結果の
 差異は10 %程度
- ▶ 有機液体シンチレータ、Biを用いた放射化法から45 MeVの中性子 を確認



- 1.100,150,190,235 MeV陽子入射によって発生する高エネル ギー中性子の測定では、Biを用いた放射化法を使用することで 90 MeVまでの異なる閾値反応による反応率の実験と数値計算 の差が20%程度
 - ▶ 核破砕反応で生じる高エネルギー中性子との反応率の評価
- 2.100 MeV陽子入射では、有機液体シンチレータ、およびBiの 放射化法の結果から45 MeVまでの連続エネルギーの中性子 のエネルギースペクトルが測定可能
 - 「有機液体シンチレータと放射化法を組み合わせることで中性子スペクトルの測定精度の向上、ADS研究の 精度の評価

²⁰⁹Bi(n,xn)^{210-x}Bi反応の断面積



²⁰⁹Biの反応断面積 ENDF/B-VI

測定に用いた有機液体シンチレータ

<有機液体シンチレータの特性> 溶媒:キシレン(C₈H₁₀) 溶質:ナフタレン(C₁₀H₈) 炭素原子数に対する水素原子数割合: 1.212 密度:0.874 g/cm³ <利点> 水素の含有率が高い 大容量の検出器により検出効率が高い エネルギー分解能が高い

有機液体シンチレータによる中性子計測では、 荷電粒子が検出器の外へ漏れ出ない大きさ の検出器サイズを選定する必要がある

100 MeV陽子入射によって発生する高 エネルギー中性子の測定に直径5 inch、 長さ5 inchの検出器を使用

検出器内の荷電粒子の飛程



