

学士論文

重イオン核破砕反応による
不安定核ビーム生成に関する研究

東京工業大学理学部中村研究室所属

06B14104 高橋好太郎

指導教官 中村隆司

平成 22 年 2 月 24 日

概要

2007年、理化学研究所に不安定核ビーム生成の新施設 RIBF (RIKEN RI Beam Factory) が完成し、300MeV/u を超えるエネルギーの RI ビームを得られるようになった。この新施設で高エネルギー RI ビームの生成実験 $^{48}\text{Ca}+^9\text{Be}$ が行われたが、生成断面積は従来施設での測定結果を一桁から二桁も上回るということが分かった。本研究の目的は、この実験値と予測値のずれの原因を探り、より信頼性の高い生成量の予測コードを構築することにある。本論文では断面積の増加の原因が、ターゲットの厚さに起因する多段階の破碎反応の効果にあるものと仮定し、その効果を検証する。具体的には、 ^{48}Ca ビーム+ ^9Be ターゲットの場合について、多段階反応の影響を考慮した計算を実行するプログラムを作成し、その実行結果を検証する。

また、断面積の Q_g 関数 (反応前後の質量差) への依存性も調べ、高エネルギー重イオンビームによる生成断面積について考察する。

目次

第 1 章 序	3
1.1 不安定核の物理	3
1.2 不安定核ビームの生成と核種ごとの分離	3
1.2.1 フラグメンテーション	4
1.2.2 運動量分布	5
1.2.3 ビームラインでの分離	6
1.3 実効断面積の増加現象	8
第 2 章 研究の概要及びその手法	9
第 3 章 計算プログラムの概要とその実行結果	10
3.1 多段階反応のモデルとアルゴリズム	10
3.2 実行結果	12
3.2.1 生成断面積と多段階反応の効果を含む実効断面積の出力結果	12
3.2.2 多段階反応の各反応段階の生成量	13
3.2.3 多段階反応のターゲット厚さによる効果	14
3.2.4 ビームの核種による生成量の内訳	15
第 4 章 考察	16
4.1 多段階反応の効果	16
4.2 Q_g での生成断面積のプロット結果について	17
第 5 章 まとめと展望	18
付録 A 生成断面積	19
付録 B 3.2.4 プロット図続き	20

第1章 序

1.1 不安定核の物理

不安定核は、安定核にない殻構造の破れや中性子ハロー・スキンの出現など特異な性質を示すことが近年の研究により判明しつつある。こうした特異現象を理解することで安定線から束縛限界までの原子核の統一的な理解をすることが、現代の原子核物理学のモチベーションの一つになっている。不安定核の性質を調べるためには、不安定核を人工的に生成し、それをビーム（不安定核ビーム）として用いる手法がとられる。

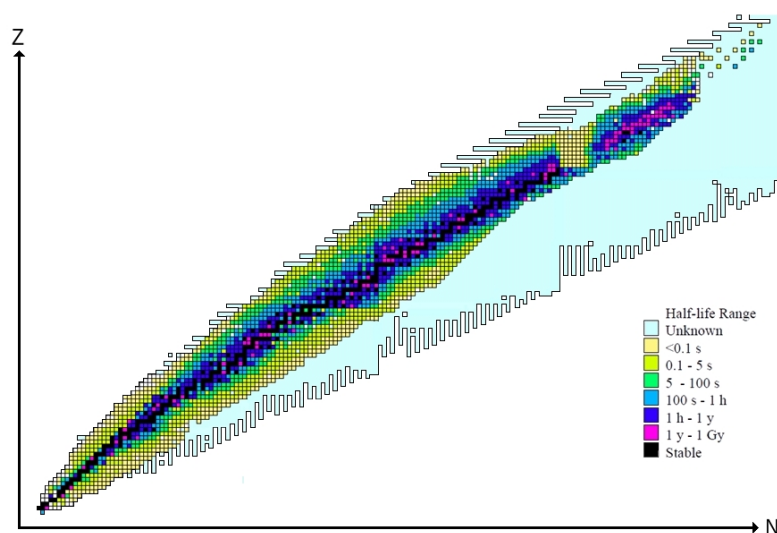


図 1.1: 核図表 (横軸中性子数、縦軸陽子数)

理化学研究所において、2007年に新たなサイクロトロン SRC が設置され、 300MeV/u を超える世界でも最高強度の RI ビームを生成できるようになり、更に広範囲の核種の測定も可能となった。この強力な不安定核ビームによって、不安定核における特異性質の解明が期待される。

1.2 不安定核ビームの生成と核種ごとの分離

2007年に完成した RIBF のビームライン BigRIPS を例に、不安定核ビーム生成のメカニズムと、その分離・測定の概要について述べる。

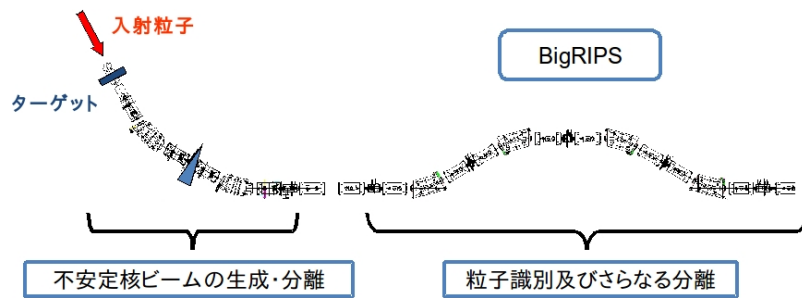


図 1.2: 理化学研究所 (埼玉県和光市) の新しい RI ビーム施設にあるビームライン BigRIPS の見取り図

1.2.1 フラグメンテーション

不安定核ビームを生成する有力な手法には重イオンを加速して標的核に入射させ、反応後の二次ビームとして取り出す方法がとられる。この不安定核生成反応には、主としてフラグメンテーション反応が有力である。

フラグメンテーションとは、入射核が生成核と衝突し、入射核と生成核の重なり合った部分が入射核から削り取られ、残りの部分が何も反応しなかったかの様に、破碎片 (フラグメント) として放出される反応である。

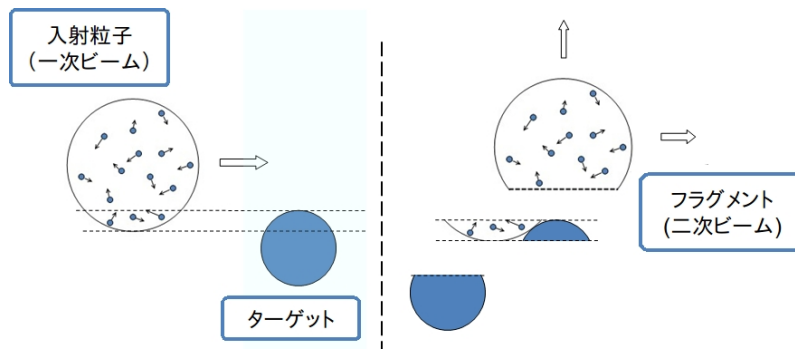


図 1.3: フラグメンテーションのモデル図

図中、入射核を構成していた反応していない部分がフラグメントであり、これが二次ビームとして利用される。

1.2.2 運動量分布

フラグメンテーションによって取り出される二次ビームには、同一の核種であっても運動量について $\exp(-P^2/2\sigma^2)$ の分布を持つことが知られており、1974年に Goldhaber がこの σ が質量によることを示している [1]。

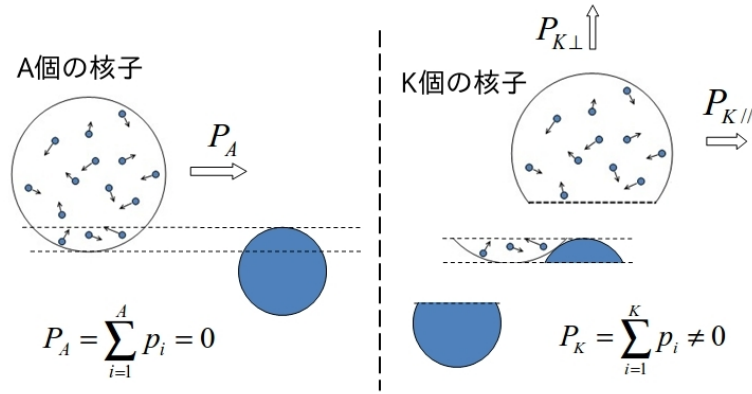


図 1.4: フラグメントモデルの運動量分布を考察するモデル。入射粒子が N 個の核子からなり、フラグメントが K 個の核子からなる場合の図。

入射ビームが N 個の核子からなり、フラグメントは K 個の核子からなるとすると、入射ビームの静止系から見れば入射核の運動量は 0 である。従って、入射核を構成する N 個の核子もつフェルミ運動量 p_i の和は 0 である。

$$P_N = \sum_{i=1}^N p_i = 0 \quad (1.1)$$

この要請から、核子 K 個からなるフラグメントの運動量分布について、下式の形が導かれる。

$$\langle P_K \rangle^2 = \frac{K(A-K)}{A-1} \langle p^2 \rangle \quad (1.2)$$

このように、フラグメンテーションモデルにおいて生成される二次ビーム（フラグメント）は、質量に依存した運動量分布をもつことがわかる。

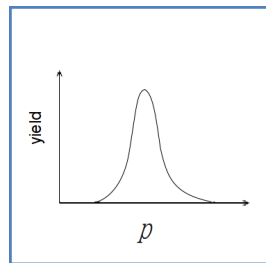


図 1.5: フラグメントモデルの運動量分布は質量に依存したものとなる。図は生成核の運動量分布の概形を示している。

1.2.3 ビームラインでの分離

ターゲットと1次ビームとの反応により生成された不安定核ビームは、双極子磁石とエネルギー減衰板 (Wedge) との組み合わせによって、目的とする核種の純度を高めたビームになる。

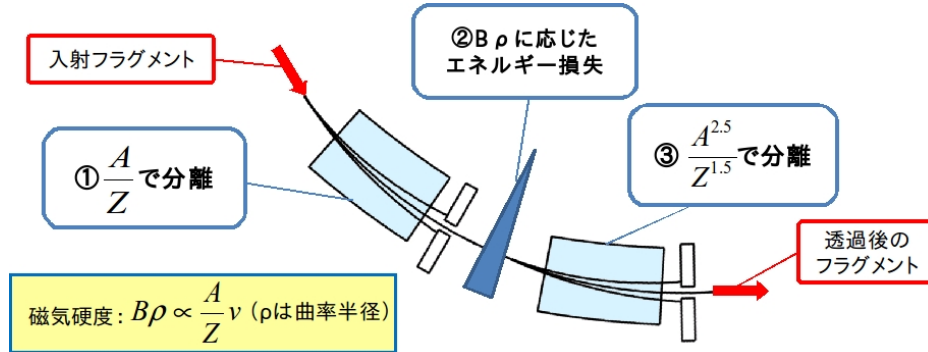


図 1.6: 双極子磁石とエネルギー減衰板による不安定核ビーム分離の概念図。粒子分離の説明のために粒子の運動の奇跡をイメージとして表してある。

これは2つの双極子磁石とエネルギー減衰板による不安定核ビームの核種分離の概念図であるが、このイメージをもとに、不安定核ビームの分離について説明する。

一般に、荷電粒子(質量: m 、電荷: q 、速度: v)は磁場 B のもとで下式の形のローレンツ力を受ける。

$$m \frac{v^2}{\rho} = qvB \quad (1.3)$$

ここで、 ρ はローレンツ力により荷電粒子が描く飛跡の曲率半径である。この式を原子核(質量数: A 、陽子数: Z 、速度: v)に適用し整理すると、以下の表式が得られる。

$$B\rho \propto \frac{A}{Z}v \quad (1.4)$$

つまり、原子核は最初の双極子磁石で A/Z で分離する。

分離したビームはスリットを通してやることで、目的とする粒子の A/Z のビームを得る。

次に、ビームはエネルギー減衰板を通過するが、物質中での荷電粒子のエネルギー損失は Bethe-Bloch の式に従うので、それぞれの核種は Z^2 に比例したエネルギーを失う。

$$-\frac{dE}{dx} \simeq \frac{4\pi N_0 e^2 Z^2}{m_e v^2} \frac{Z'}{A'} \left[\ln \frac{2m_e v^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 \right] \quad (1.5)$$

このエネルギー損失により、 A/Z で分離されなかった核種も、再び双極子磁石を通過する際に $A^{2.5}/Z^{1.5}$ で分離される。再度スリットを通してやることで目的とする核のビームを取り出すことが出来る。

但し、フラグメンテーションによる不安定核ビームは核種ごとに質量に依存した運動量分布を持っているので、双極子磁石通過後の A/Z で分離したビームは下図のように分布する。これにスリットをかけて目的とする核を取り出すので、例えば、赤いラインで示される核を取り出したい場合には、黄緑の線で示されるようにスリットを設定して取り出すことになる。

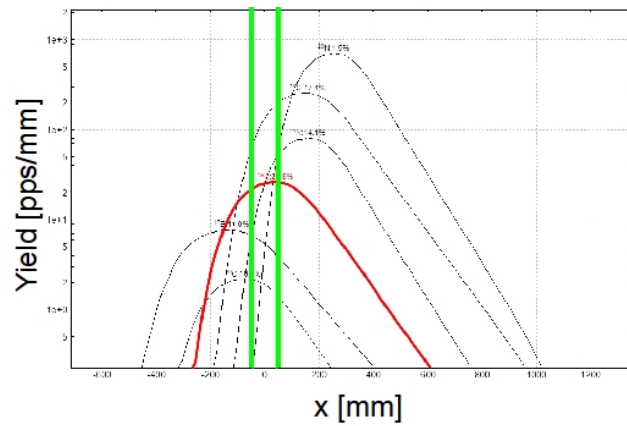


図 1.7: 不安定核の収量の計算に用いられる LISE++ による、スリット面での核種分布を縦軸に収量、横軸に位置を取って出力した結果。磁気硬度による分離と核種ごとの運動量分布により、不安定核ビームはこの様な分布をする。

また、生成された不安定核ビームは、必ずしも生成断面積で計算した量が得られるわけではなく、様々な影響を受けた結果としての値が得られる。

この様々な効果の影響を含む、断面積はしばしば実効断面積 (σ_{eff}) とよばれ、生成断面積と区別される。

1.3 実効断面積の増加現象

RIBF で得られるビーム強度についての情報が web ページ [4] に公開されており、RIBF で行われた高エネルギービーム ($345\text{MeV}/u^{48}\text{Ca} + 3.6\text{g}/\text{cm}^2\ ^9\text{Be}$ の実験での結果が示されている。以下に実効断面積の表を示す。

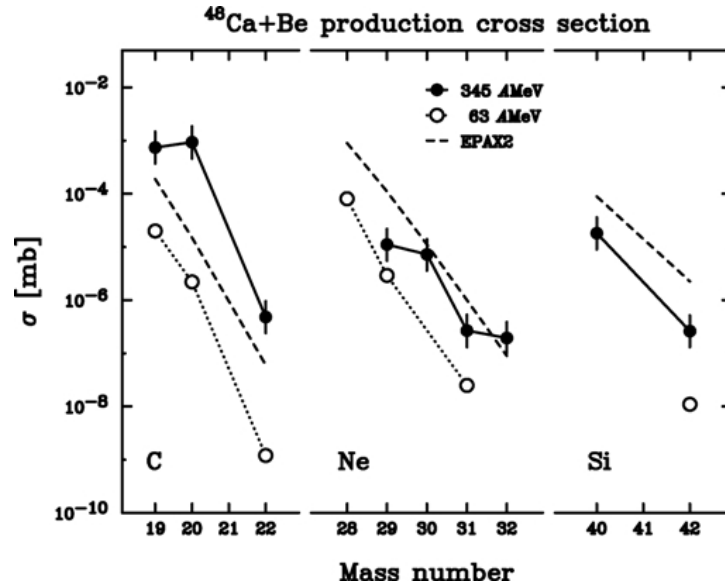


図 1.8: 質量数 vs 断面積 (^{48}Ca ビーム+ ^9Be ターゲット)[4]

これは過去に RIPS(RIKEN) で行われた $63\text{MeV}/u^{48}\text{Ca}$ をビームとする実験での実効断面積とを比較している。すぐに注目されるのは高エネルギーの場合と低エネルギーの場合とで、実効断面積に 1 桁から 2 桁を超えるような差がある点である。生成量が増えるという意味ではデメリットではないが、これは何らかの効果によって実効断面積が増加したものと考えられる。

第2章 研究の概要及びその手法

前述した低エネルギービームの結果と高エネルギービームの実効断面積のずれについて、未だその原因は理解されていない。この原因を探り、より信頼性の高い生成量の予測を目指すことが本研究の目的である。

実験で利用できるビームが高エネルギーの場合と低エネルギーの場合とでは、ビームの収束性などの問題から使用するターゲットの厚さが異なり、高エネルギーの実験ではより厚いものが使用される。この対応から、ターゲット厚さがより厚くなることによって反応性が増した結果として、ターゲット中での多段階反応の効果の影響を仮定できる。そこで本論文では、ターゲット厚さが実効断面積にどのような影響を与えるかを検証することが具体的な目標となる。

検証の内容としては、以下の2点になる。

- 多段階散乱の影響を考慮した計算を実行する

生成断面積の値としてあるテーブルを用意したとき、その断面積のデータからターゲット中で多段階反応の影響を考慮した計算を実行する。本論文では特に、 ^{48}Ca ビーム・ ^9Be ($3.6\text{g}/\text{cm}^2$) ターゲットを用いた場合の多段階散乱の効果を検証する。また、多段階反応の性質上、本来ビームとして使用できない不安定核種についてもビームとして使用した場合の値を得る必要があるので、EPAX2.15 の出力を生成断面積のデータテーブルとして使用する。

- 実験値との比較

理化学研究所でとられた高エネルギー ($345\text{MeV}/\text{u}$, $^{48}\text{Ca}+^9\text{Be}$) の場合の実効断面積と低エネルギー ($^{48}\text{Ca}+^9\text{Be}$) の場合の実効断面積のずれと、EPAX2.15 による生成断面積のデータに基づいて計算した多段階散乱の効果を加味した結果とのずれとを比較する。

更に、 Q_g 関数 (一次ビームと生成核の質量差)[3] について生成断面積は $\sigma \propto \exp(Q_g)$ という依存性をもつことが近年指摘されているので、実験値についても確認してみる。

第3章 計算プログラムの概要とその実行結果

結果

先ず、作成した生成断面積から多段階反応の効果を検討した実効断面積を計算するプログラムのアルゴリズムについて述べる。次に、その実行結果を示す。

3.1 多段階反応のモデルとアルゴリズム

実効断面積を計算するための多段階反応のモデルの設定を説明する。

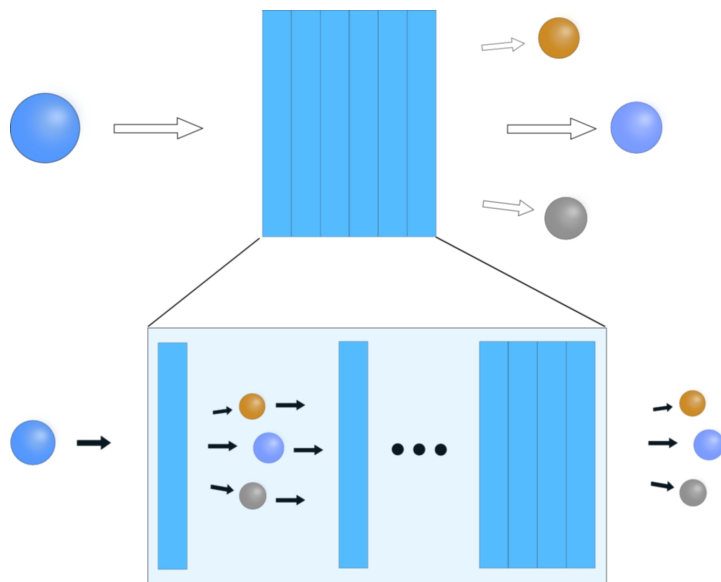


図 3.1: 多段階反応のイメージ図

先ず、多段階反応の仕組みのためにターゲットをいくつかの微小区間に分割する。その各微小区間において、様々の核種から構成されるビームが生成断面積にしたがってフラグメントを生成し、ビーム自体は反応断面積にしたがって微小区間ごとに減少していく、というモデルによって多段階反応の生成過程を再現する。

生成との計算に使用する式は、

$$N_F = N_B \cdot (1 - \exp(-n\sigma x \times 10^{-4})) \quad (3.1)$$

である。(各変数は、ビーム生成量: $N_{Fn}=6.02/A[/math>[g], 入射ビームの数: N_B , 断面積: σ [mb], ターゲットの厚さ: xg/cm^2 という設定になる。) この式は、ある核種が生成される量を表している。$

ここで、微小区間は $0.185\text{g}/\text{cm}^2$ (^9Be 標的で $1[\text{mm}]$) の厚さに設定することで以下の近似式を用いる

$$N_F = N_B \cdot n\sigma x \times 10^{-4} \quad (3.2)$$

この近似は、左辺の \exp を 1 次まで展開したものであり、生成断面積を 1000mb で計算して 3 桁 (0.62% 程度のずれ) の精度であり、今回の計算で使用する断面積は最大のもので $100[\text{mb}]$ のオーダーであるから (反応断面積)、十分な精度を持っている。

基本的にはモデル通り、ビームの数の変数 N_B に初期値を与え、

1. 生成量の変数 N_F に生成量を格納
2. ビームの減少として N_B に減少の式を適用
3. 生成量 N_F をビームの値 N_B に足し合わせる

という計算を各微小ターゲット厚さの $0.18\text{g}/\text{cm}^2$ ずつ実行していく形になる。

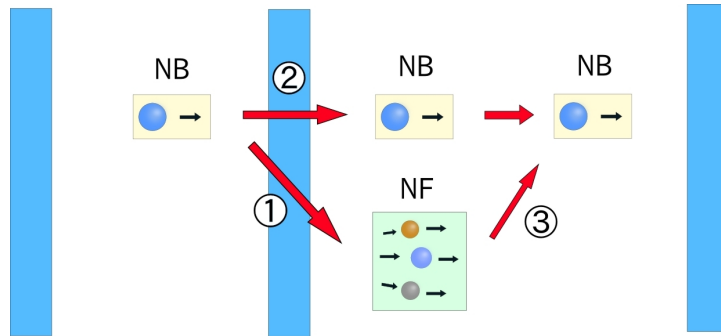


図 3.2: 基本的な微小区間での計算手順

これがアルゴリズムの基本的な構造である。

また、生成断面積の値は EPAX2.15 で計算したものをを用いる。これは ^{48}Ca 以下の核種について全ての生成断面積が必要となるためである。同様にビームの減少に使用する反応断面積も EPAX2.15[2] の生成断面積を足し上げたものを使用している。

3.2 実行結果

3.2.1 生成断面積と多段階反応の効果を含む実効断面積の出力結果

多段階反応の影響を考慮した実効断面積の計算結果を以下に示す。 σ_{EPAX} は EPAX2.15 による生成断面積、 σ_{eff} は実効断面積である。

	A	σ_{EPAX} [mb]	σ_{eff} [mb]	$\sigma_{eff}/\sigma_{EPAX}$
C	18	1.97E-03	1.92E-03	0.974
	19	1.89E-04	1.87E-04	0.988
	20	1.51E-05	1.54E-05	1.02
	22	6.01E-08	7.23E-08	1.20
Ne	28	8.96E-04	8.90E-04	0.993
	29	1.06E-04	1.11E-04	1.05
	30	1.11E-05	1.27E-05	1.15
	31	1.04E-06	1.40E-06	1.34
	32	8.96E-08	1.56E-07	1.74
Si	39	4.94E-04	5.18E-04	1.05
	40	8.55E-05	9.73E-05	1.14
	41	1.44E-05	1.76E-05	1.23
	42	2.25E-06	2.73E-06	1.22

表 3.1: σ_{EPAX} による生成断面積と実効断面積、及びそれらの比 (ターゲットは $3.6\text{g}/\text{cm}^2$)

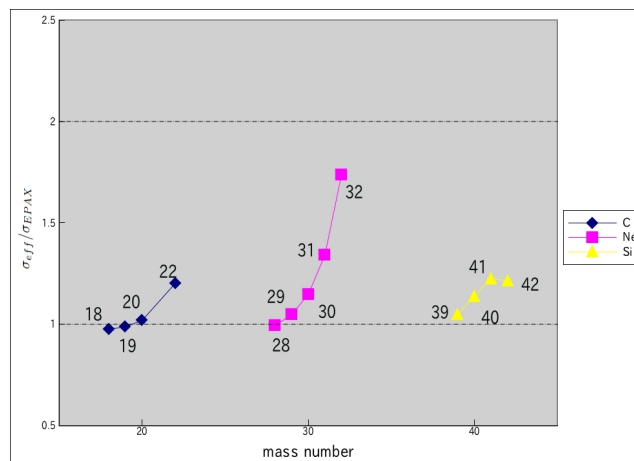


図 3.3: σ_{EPAX} と σ_{eff} 、 $\sigma_{eff}/\sigma_{EPAX}$ をプロットした図 (ターゲットは $3.6\text{g}/\text{cm}^2$)

この結果から、生成核が中性子過剰になるほど多段階反応の効果による増分が多くなっていることが分かる。

3.2.2 多段階反応の各反応段階の生成量

多段階散乱の効果のうち、何段階目の影響でいくら生成されているかという、ある核種の全生成量の内訳を示す。下図は ^{28}Ne から ^{32}Ne について、各反応段階で生成された粒子数について、横軸に反応の段階、縦軸に各段階の生成量と全生成数との比 [%] を取った図である。

A	1 段階	2 段階	3 段階	4 段階
28	85.5	13.8	0.705	0.0171
29	81.0	17.7	1.06	0.0283
30	74.0	24.2	1.73	0.0512
31	63.4	33.6	2.96	0.0987
32	49.0	45.7	5.08	0.191

表 3.2: 各反応段階の全生成量に占める割合 [%](ターゲットは $3.6\text{g}/\text{cm}^2$)

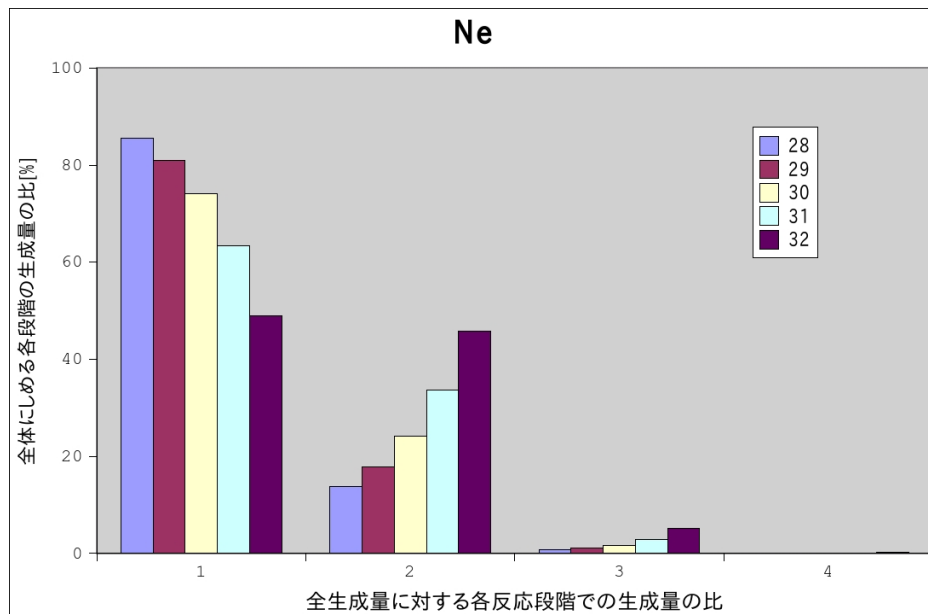


図 3.4: 各反応段階の全生成量に占める割合 (ターゲットは $3.6\text{g}/\text{cm}^2$)

これは Ne について 28→32 までの各段階の反応に於ける生成量を、並べて表示してあるが、中性子過剰な核ほど 2 段階反応の効果で生成されている粒子の割合が多くなっていることがよく分かる。

また、プログラム上では多段階反応として計算しているが、結果としては 2 段階目までの寄与で全生成量の 9 割以上を占めていることが分かる。これは、生成断面積から考えれば 5 回も 6 回も反応するようなルートで生成される確率は極めて小さく、この計算が自然であることを示している。

3.2.3 多段階反応のターゲット厚さによる効果

^{28}Ne と ^{31}Ne について、厚さ 1[mm] 毎の多段階反応の効果をも、横軸にターゲットの厚さ [cm]、縦軸に実効断面積と生成断面積の比をプロットしたものを以下に示す。

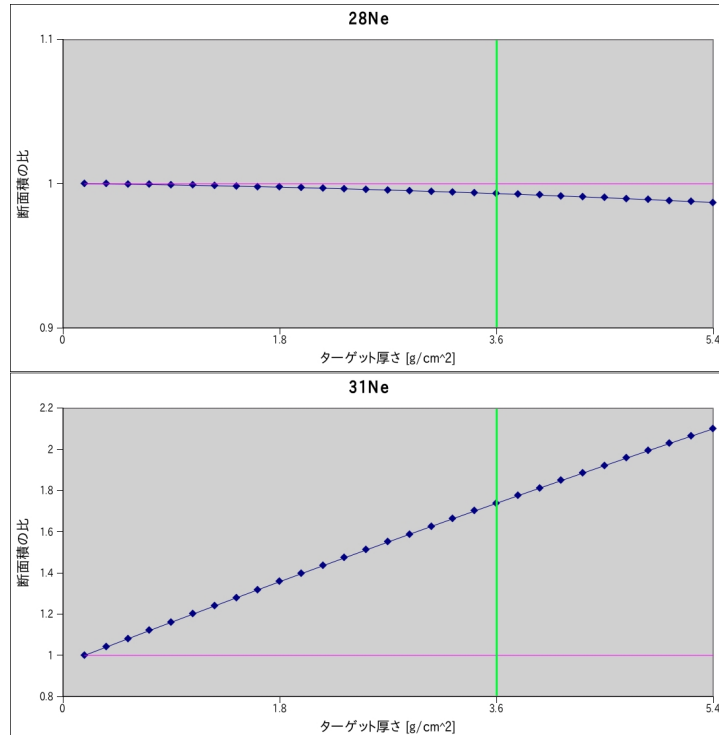


図 3.5: 多段階反応のターゲット厚さによる効果。ピンク色の線は比が 1 の線であり、黄緑色の線は RIBF での実験でのターゲット厚さ ($2\text{g}/\text{cm}^2$) を表している。

プロットが線形になっているので、ターゲットの厚さによる特別の効果は見られない。裏を返せば、多段階反応の効果は生成断面積のテーブルによって決定される、一定の増加率で特徴づけられるといえる。

3.2.4 ビームの核種による生成量の内訳

^{31}Ne について、全生成量と、生成元の核種ごとの生成量の比 [%] のプロットを示す。

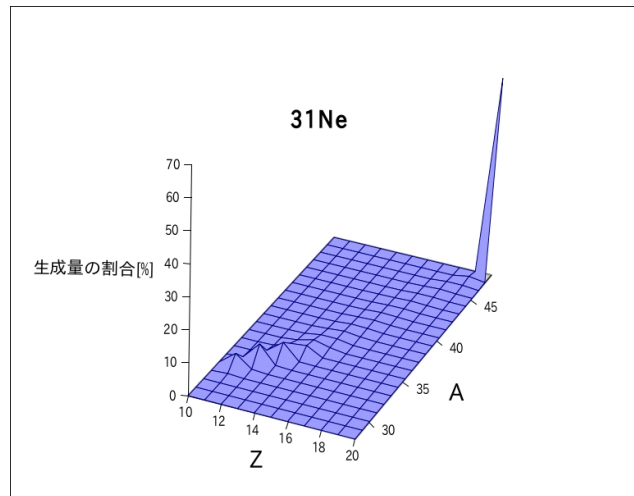


図 3.6: ^{31}Ne の全生成量に対する、ある経路の生成数の比 [%](ターゲット厚さ $3.6\text{g}/\text{cm}^2$)

^{32}Na	4.05%
^{33}Mg	1.13%
^{34}Mg	5.74%
^{34}Al	2.06%
^{35}Al	4.95%
^{35}Si	2.65%
^{36}Si	1.92%

表 3.3: ^{31}Ne 全生成量のうち 1%以上の寄与をしている核種

この図からどの辺りの核種からの生成が全体の生成量に寄与しているかが分かる。残りの (C,Ne,Si) の表は付録にまとめてある。

第4章 考察

4.1 多段階反応の効果

第3章に示した通り、計算結果では多段階反応の効果を含む実効断面積の生成断面積に対する比率は0.9倍から2倍の範囲にとどまり、実験値に見られるような2桁の増加は見られなかった。

この結果は成断面積の値が1[mb]以下のレベルであるのに対して、減少に影響する反応弾面積が100[mb]のオーダーであり、単純に生成ルート毎に生成断面積を足し上げても、反応断面積を2桁も上回ることにはない点と矛盾しない。

結果として、多段階反応の効果は実効断面積の値にそれほど影響しないといえる。

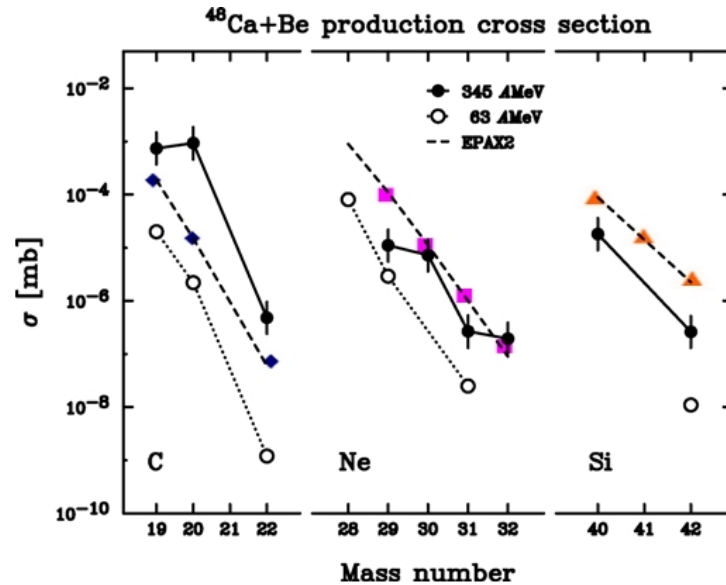


図 4.1: RIBF での実験値のグラフに今回の計算結果 (ターゲットは $3.6\text{g}/\text{cm}^2$) をプロットしたもの。多段階反応の効果は、実験値のような 2 桁のずれを与えるほどの影響がない。

4.2 Q_g での生成断面積のプロット結果について

$$Q_g = ME(Z_p, A_p) - ME(Z_F, A_F) \quad (4.1)$$

で定義される Q_g 関数について (P は入射粒子を、F はフラグメントを表す)、生成断面積が

$$\sigma \propto \exp(Q_g/T) \quad (4.2)$$

という系統性を示すという性質がある。(T はフィットしたときの定数)

先ほど示した実験のデータを Q_g 関数によってプロットしてみると以下ようになる。

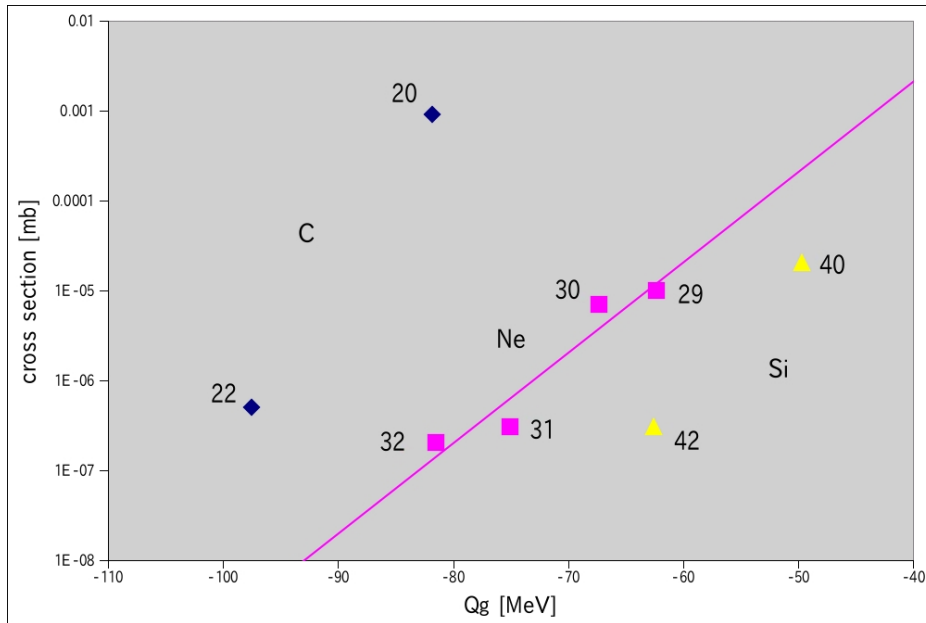


図 4.2: BigRIPS の高エネルギービーム ($^{48}\text{Ca}+^9\text{Be}$) による実験での断面積を Q_g 関数でプロットしたもの。実線は \exp でフィットした直線を表す。mass excess の情報として AME2003 の値を使用している

4 点取れている Ne についてフィットしてみると、逆温度 T の値が 4.35[MeV]、となった。データ点が少ないため、[3] のような系統性の確認は出来なかった。

第5章 まとめと展望

まとめ

- 高エネルギー重イオンビームによる実効断面積の増加は、ターゲット厚さの増加による多段階散乱の影響によるものではない。
- ^{48}Ca ビーム+ ^9Be ターゲットの場合の、EPAX2.15 による生成断面積の値に基づく、多段階散乱の効果を検証した結果、実効断面積と生成断面積の比はほぼ2倍以内に収まった。
- 中性子過剰な核ほど多段階反応の影響を受けやすい(図 3.3 及び図 3.5)。
- Q_g 関数による生成断面積の系統性はデータ点が少ないため、[3] で指摘されている系統性の確認はできなかった。

展望

- 実効断面積の増加の原因を更に探っていく。
- 今回作成したプログラムは、ビームとして設定した ^{48}Ca 以下の (Z,A) の組み合わせの核全てについて、各々をビームとする場合の生成断面積のテーブルを必要とする。このため先にも述べた通り、生成断面積のテーブルを作成するのに EPAX を用いざるを得ない。そのため、中性子過剰領域で大きめに見積もられていると指摘されている部分について、更に補正されたコードが発表されれば、それを利用した新たな生成断面積のテーブルを用いて、より正確な多段階反応の効果を見積もることができる。
- Q_g 関数による系統性の確認は豊富なデータ点を必要とするので、そのようなデータが得られれば、系統性を確認したい。

付録 A 生成断面積

生成断面積とは入射粒子と標的核との1回の反応によって、ある核種が生成される確率を面積として表現した物理的な量である。これを知ることにより、実験において二次ビームがどのような核種についてどれくらいの収量で得られるのかという予測値が得られるので、不安定核の研究において重要である。

生成断面積は、この定義により入射粒子から見た的として説明される。つまり、標的物質中には様々な種類の的が存在し、その的ごとに入射核が当たった場合に生成される核種が決まっ
ていて、それぞれの的は入射粒子から見て重なりあっている部分はないという設定の下でのその的の広さに相当する量として生成断面積を理解できる。

このような「的の広さ」を生成断面積の値とし、ターゲットの厚さが非常に薄い場合の計算から生成断面積の表式が得られる。変数の設定は以下の表に従う。

生成断面積	σ
入射粒子の数	N_B
生成核の数	N_F
ビームが照射される面積	S
ターゲットの厚さ	dx
ターゲットの質量数	A
ターゲットの原子核の単位体積あたりの密度	n

表 A.1: 変数の定義

まず、断面積を合計した広さはビームが照射される面積との比をとると粒子が生成される確率そのものとなる。

$$\frac{\sigma n S dx}{S} = \sigma n dx \quad (\text{A.1})$$

この確率で入射粒子が注目する生成核になるので、入射粒子の減少率は

$$dN_B = -N_B n dx \quad (\text{A.2})$$

の形になる。これを微分方程式として解くと

$$N_B = N_B \exp(-n\sigma x) \quad (\text{A.3})$$

を得る。これが反応断面積の表式になる。後は差を取れば、

$$N_F = N_B (1 - \exp(-n\sigma x)) \quad (\text{A.4})$$

となり、 N_F の表式も得られる。

付録B 3.2.4 プロット図続き

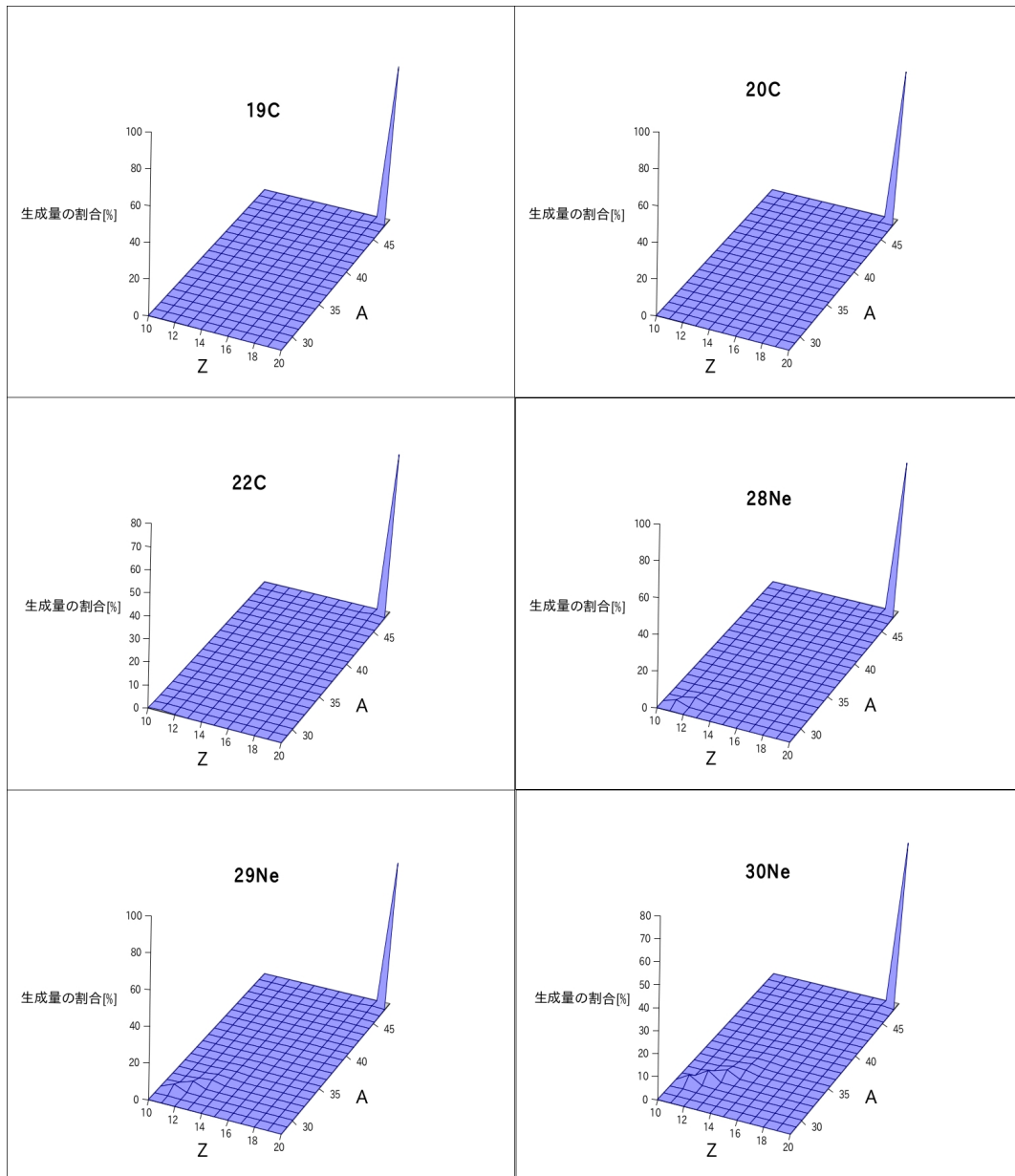


図 B.1: ^{19}C から ^{30}Ne までの結果

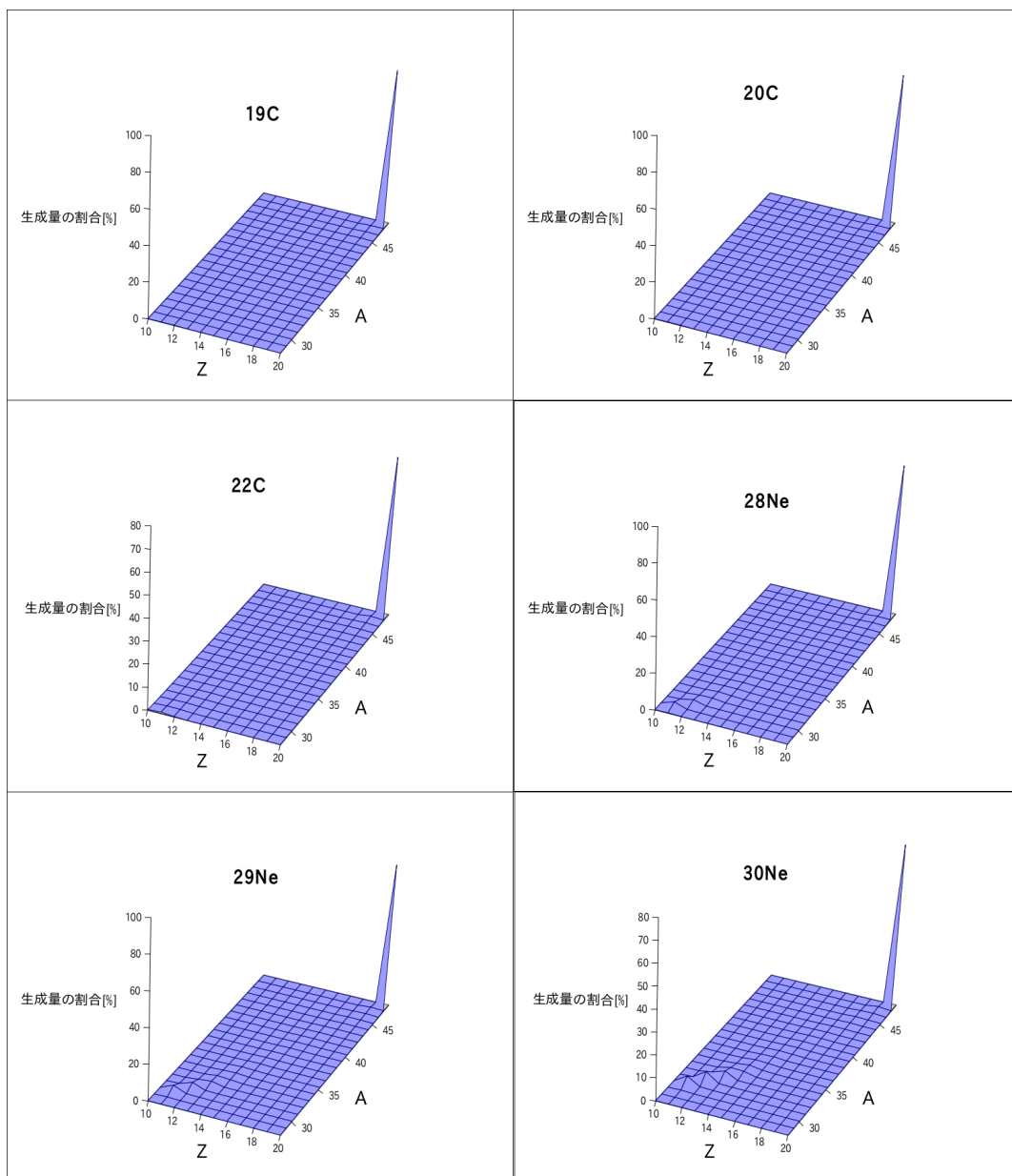


図 B.2: ^{32}Ne から ^{42}Si までの結果

目次

1.1	核図表 (横軸中性子数、縦軸陽子数)	3
1.2	理化学研究所 (埼玉県和光市) の新しい RI ビーム施設にあるビームライン Bi-gRIPS の見取り図	4
1.3	フラグメンテーションのモデル図	4
1.4	フラグメントモデルの運動量分布を考察するモデル。入射粒子が N 個の核子からなり、フラグメントが K 個の核子からなる場合の図。	5
1.5	フラグメントモデルの運動量分布は質量に依存したものとなる。図は生成核の運動量分布の概形を示している。	5
1.6	双極子磁石とエネルギー減衰板による不安定核ビーム分離の概念図。粒子分離の説明のために粒子の運動の奇跡をイメージとして表してある。	6
1.7	不安定核の収量の計算に用いられる LISE++ による、スリット面での核種分布を縦軸に収量、横軸に位置を取って出力した結果。磁気硬度による分離と核種ごとの運動量分布により、不安定核ビームはこの様な分布をする。	7
1.8	質量数 vs 断面積 (^{48}Ca ビーム + ^9Be ターゲット)[4]	8
3.1	多段階反応のイメージ図	10
3.2	基本的な微小区間での計算手順	11
3.3	σ_{EPAX} と σ_{eff} 、 $\sigma_{eff}/\sigma_{EPAX}$ をプロットした図 (ターゲットは $3.6\text{g}/\text{cm}^2$)	12
3.4	各反応段階の全生成量に占める割合 (ターゲットは $3.6\text{g}/\text{cm}^2$)	13
3.5	多段階反応のターゲット厚さによる効果。ピンク色の線は比が 1 の線であり、黄緑色の線は RIBF での実験でのターゲット厚さ ($2\text{g}/\text{cm}^2$) を表している。	14
3.6	^{31}Ne の全生成量に対する、ある経路の生成数の比 [%](ターゲット厚さ $3.6\text{g}/\text{cm}^2$) 15	15
4.1	RIBF での実験値のグラフに今回の計算結果 (ターゲットは $3.6\text{g}/\text{cm}^2$) をプロットしたもの。多段階反応の効果は、実験値のような 2 桁のずれを与えるほどの影響がない。	16
4.2	BigRIPS の高エネルギービーム ($^{48}\text{Ca} + ^9\text{Be}$) による実験での断面積を Q_g 関数でプロットしたもの。実線は exp でフィットした直線を表す。mass excess の情報として AME2003 の値を使用している	17
B.1	^{19}C から ^{30}Ne までの結果	20
B.2	^{32}Ne から ^{42}Si までの結果	21

表 目 次

3.1	σ_{EPAX} による生成断面積と実効断面積、及びそれらの比 (ターゲットは 3.6g/cm^2)	12
3.2	各反応段階の全生成量に占める割合 [%](ターゲットは 3.6g/cm^2)	13
3.3	^{31}Ne 全生成量のうち 1%以上の寄与をしている核種	15
A.1	変数の定義	19

参考文献

- [1] A.S.Goldhaber, Phys. Letters 53B,4 (1974)
- [2] K. Summerer and B. Blank, Phys. Rev. C61, 034607 (2000)
- [3] O. B. Tarasov *et al.*, Phys. Rev. C 75, 064613 (2007)
- [4] <http://www.rarf.riken.go.jp/UsersGuide/BigRIPS/intensity.html>