

## 研究室だより (I)

### 九州大学大学院工学研究科エネルギー量子工学専攻 量子線物理計測研究室

九州大学大学院工学研究科

石橋健二

kisibasi@nucl.kyushu-u.ac.jp

#### 1. 沿革と学科・専攻の状況

本研究室は、昭和 42 年の応用原子核工学科設立以来、永く放射線計測及び安全工学講座でした。この講座は、片瀬教授、和久田教授、それから石橋が担当してきており、放射線の計測及びその安全性に関する教育研究を行ってきました。

近年の大学院重点化並びにそれに関わる学部学科改組では、九州大学の場合、他大学の原子力系学科と違った歩みになりましたので、簡単にご紹介いたします。どの大学も、原子力系学科は工学部の中で教官数・学生数が少なく、大学科制になると埋もれがちなところがあります。原子力を志望する高校生は今でもかなりいますが、10 年～20 年以前のような人数ではありません。このような中で、多くの大学では、原子力系学科は他の大きな学科の中に入って、コースのひとつとして存在することが大勢でした。

九州大学の場合、学内の事情から総合理工学研究科の教官と連携できる幸運がありました。その結果、広く学際教育を行う独立した大学科として改組され、その中で原子力系教育を継続することになりました。平成 10 年度、応用原子核学科（学生定員 40 名）はエネルギー科学科（学生定員 70 名）へ改組され、さらに平成 12 年度からは学生定員 100 名になる予定です。工学部の電気情報学科や機械航空学科に近い学生定員になります。高校生の中には今でも積極的に原子力を志望する学生がいますのでその受け皿になるのはもちろんですが、それだけでは定員は埋りません。今は、高校生に原子力などエネルギー科学の魅力をアピールして、多くの高校生に志望してもらう努力をしています。

大学院では、応用原子核工学専攻は、応用物理学専攻の一部の教官と一緒にになり、エネルギー量子工学専攻として改組されました。

放射線、核反応、核データ関連の研究室として、エネルギー量子工学専攻には、応用原子核物理研究室（的場教授、魚住助教授）と本研究室（石橋、前畑助教授）、総合理工学研究科先端エネルギー理工学専攻には、次世代エネルギーシステム研究室（中島教授、渡辺助教授）があります。これらはすべて、学部教育としてエネルギー科学科を担当しています。

## 2. 構成

本研究室は、現在、石橋のほか、前畑助教授、有馬助手が在籍しています。また、所属は違いますが、執行助手も研究に協力しています。本研究室では、教育・研究のうち 2/3 程度が、核反応または核データに関連しています。現在、学生は、学部・修士課程とも約 4 名/学年、博士課程は 1～2 名/学年の状況です。

## 3. 最近の研究

最近の活動は下記の通りです。題目の(6)以降は、収束しつつある研究です。

- (1)核破碎反応からの中性子生成断面積
- (2)核内カスケード・蒸発模型コード
- (3)高エネルギー核データ
- (4)トリウムサイクル燃料加速器駆動未臨界炉
- (5)極低温を用いた高分解能 X 線検出器
- (6)高エネルギー加速器または核融合炉用の超伝導機器
- (7)原子線型偏極イオン源

以下、(1)～(4)について状況を説明します。

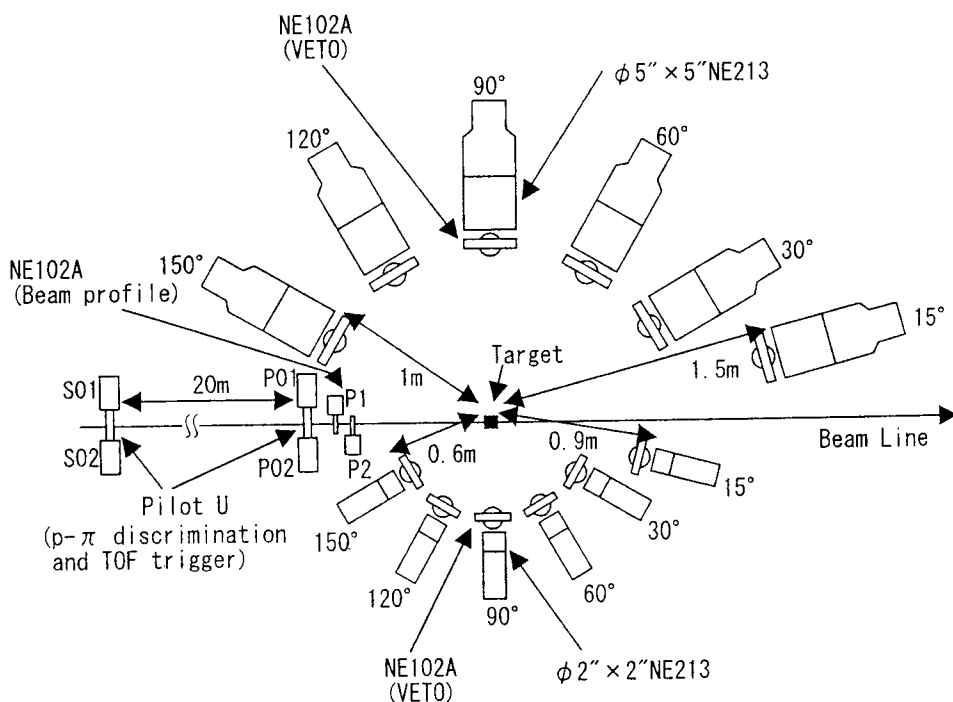


図 1 0.5GeV～3GeV 陽子による中性子生成二重微分断面積実験。飛行距離法で中性子測定を行ったが、短い飛行距離のため低エネルギー中性子測定に重点を置いた。

### 3.1 核破碎反応からの中性子生成断面積

近年、原研を中心とした日本において、さらに世界的にも、大強度高エネルギー陽子加速器の利用が注目を集めており、中性子散乱用の強力中性子源、高レベル放射性廃棄物の核変換処理、長寿命放射性廃棄物を低減できるトリウム燃料の利用などへの応用が期待されています。

本研究室では、高エネルギー陽子入射による原子核からの中性子生成二重微分断面積の測定を行ってきました。日本では、高エネルギー加速器研究機構の 12GeV 陽子シンクロトロン内部ターゲットから 2 次ビームラインで 0.5GeV~3GeV の陽子が利用できるため、そこで実験を行ってきました。図 1 に実験の模式図を示します。このビームラインは、ビーム強度が極めて低いラインです。中性子は、液体シンチレータを使った飛行時間法による測定しましたが、短い飛行距離で測定する制約がありました。これについては、中性子・ガンマ線弁別に 2 ゲート積分法を使用するなどの工夫を行いました。実験の結果、従来からの核内カスケード・蒸発模型計算には核内の核子・核子散乱断面積に問題があり、それがカスケードが発達した際に放出される低エネルギー中性子の収量に効いてくることが分かりました。

同ビームラインではパイ中間子も利用できるため、パイ中間子入射による中性子生成二重微分断面積の測定も行いました。陽子入射とパイ(+ )中間子入射での断面積の相違は、計算結果と近い値が得られています。実験結果はまだ解析中ですが、パイ(+ )中間子入射とパイ(- )中間子入射による中性子生成の比較も行っています。両中間子入射データの比較では計算値の差よりも、実験値の差の方が大きくなっており、計算コードにおけるデルタ粒子の取り扱い問題が残されている可能性があります。

一方、液体シンチレータで、中性子・ガンマ線波形弁別を行ったあとのガンマ線についても解析を行いました。陽子入射では、7 MeV 以下のガンマ線については、実験値は核内カスケード蒸発模型コードの計算値とほぼ一致していますが、炭素のような軽い原子核ターゲットについては明らかな相違がみられました。陽子入射と中間子入射では、中間子入射の方が高エネルギーガンマ線成分が多い実験結果になりましたが、計算値にはあまり出ていません。これから、計算コードのデルタ粒子の分布に問題が残されているようです。

今まで 0 度方向などの最前方中性子は測定していませんでした。今後は、最前方中性子の測定を行っていく予定にしています。

### 3.2 核内カスケード・蒸発模型コード

核内カスケード・蒸発模型コードについては、核内カスケード・蒸発模型コード HETC に励起子モデルを組み込んだ核内カスケード・励起子・蒸発模型コード HETC-3step を作成しました。これは現原研の高田弘氏がベースを作成し、現三菱総研の義澤宣明氏が

実用的なコードに改良したものです。これによって、100MeV 近傍の入射エネルギーでも、HETC がかなり正確に対応できるようになりました。

一方、入射エネルギー3GeV 領域では、フラグメンテーション反応の寄与が大きくなります。核内カスケード・蒸発模型のフレームの中でこれを取り扱うため、核内カスケード・クラグメンテーション・蒸発模型コード HETC-FRG の作成も行いました。図2 に計算過程の模式図を示します。図3 はその典型的な計算結果です。単純な核内カスケード・蒸発模型による計算では  ${}^7\text{Be}$  は生成されませんが、HETC-FRG ではかなり良く再現されていることがわかります。

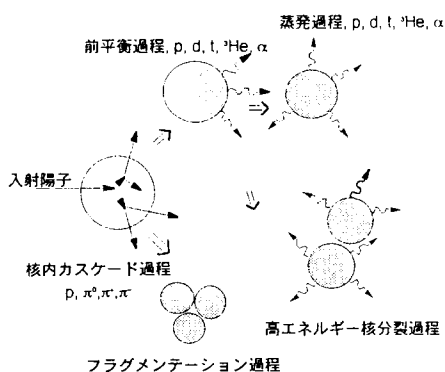


図2 核内カスケード・クラグメンテーション・蒸発模型コードの計算過程

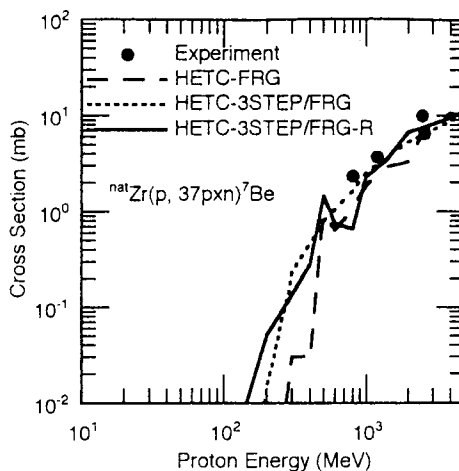


図3 HETC-FRG 等による  ${}^7\text{Be}$  生成断面積。単純な核内カスケード・蒸発模型では  ${}^7\text{Be}$  は生成されない。

### 3.3 高エネルギー核データ

高エネルギー領域の中性子生成二重微分断面積については、運動源模型を用いて経験的にパラメータ化する試みを行ってきました。入射エネルギー3 GeV までについてパラメータ化を行いつつありますが、1GeV を超すと準弾性散乱や準非弾性散乱の効果が顕になってきます。パラメータ化によって入射エネルギーやターゲット質量数に対する系統的なふるまいが定量化できるようになりました。図4 にその例を示します。一方、原研核データセンターの高エネルギーファイル作成にあって、核データ評価の一部も担当していますが、担当学生と一緒に頭を悩ませているところです。

### 3.4 トリウムサイクル燃料加速器駆動未臨界炉

大強度高エネルギー陽子加速器の利用のひとつとして、トリウムサイクル燃料 ( $\text{Th-232}$ 、 $\text{U-233}$ ) を使用した未臨界炉が話題になっています。日本でも GeV 領域で mA ク

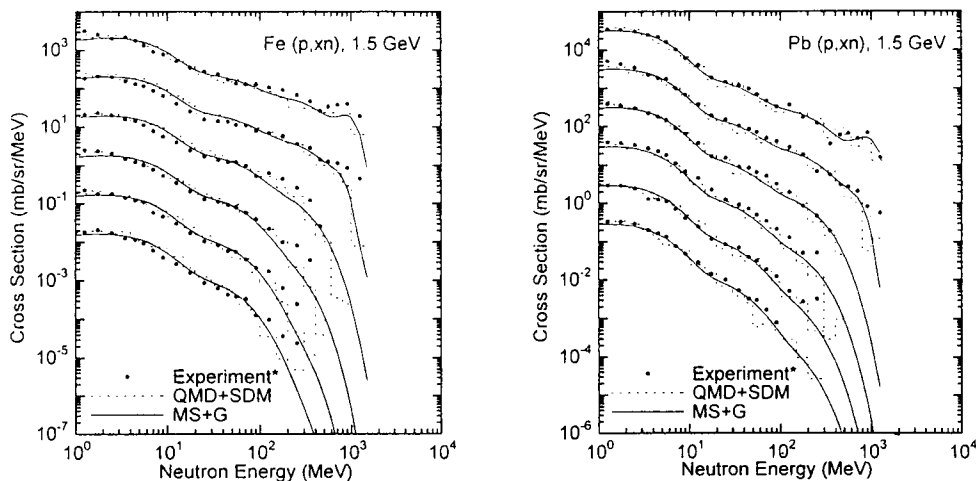


図4 パラメータ化による中性子生成二重微分断面積。黒丸は高エネルギー加速器研究機構での実験結果。実線は運動源模型による系統的パラメータ化の結果。

ラスの加速器にある程度の目処もできつつあるなか、原研消滅処理システム工学研究室の援助を仰ぎながら、固体燃料炉や熔融塩燃料炉のモデル設計を行い、未臨界炉中の高エネルギー中性子の挙動の問題点を調べてきました。図5に未臨界炉の模式図、図6に典型的な計算結果を示します。現状では、固体燃料炉に注目しながら、中性子輸送計算の精度をあげるための方策を検討するとともに、積分実験による実験的検証を計画しています。

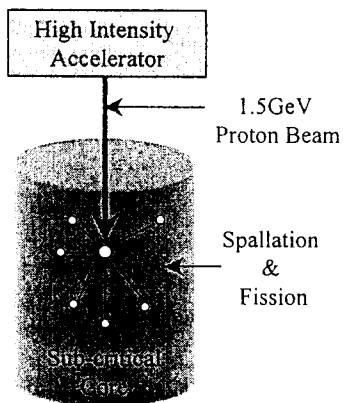


図5 トリウムサイクル燃料加速器駆動未臨界炉の模式図

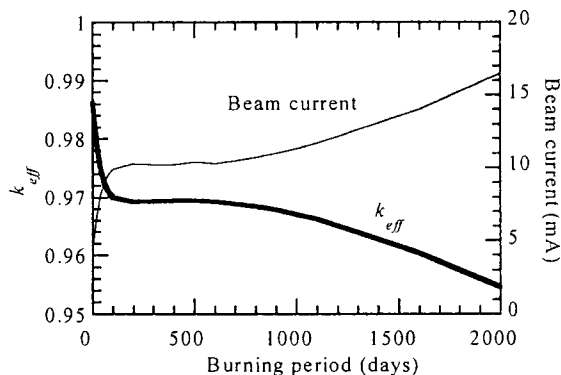


図6 液体 PbBi ターゲット・酸化物燃料による 1500MWt 炉の実効増倍係数および所要ビーム電流の経時変化