

JAERI-Review

98-020



評価済高エネルギー核データのための  
実験データの現状及び信頼性評価手法に関する検討  
—シグマ研究委員会「JENDL 高エネルギー核データ  
ファイル積分テストに関するタスクフォース」報告—

1998年11月

大山幸夫・馬場 譲<sup>\*1</sup>・渡辺幸信<sup>\*2</sup>・河野俊彦<sup>\*2</sup>・沼尻正晴<sup>\*3</sup>・植木紘太郎<sup>\*4</sup>  
小田野直光<sup>\*4</sup>・山野直樹<sup>\*5</sup>・小迫和明<sup>\*5</sup>・林 克己<sup>\*6</sup>・義澤宣明<sup>\*7</sup>・中島 宏  
田中 進・前川藤夫・今野 力・深堀智生・千葉 敏・長谷川明

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Nakagun, Ibarakiken 319-1195, Japan.

評価済高エネルギー核データのための実験データの現状及び信頼性評価手法に関する検討  
－シグマ研究委員会「JENDL高エネルギー核データファイル積分テストに  
関するタスクフォース」報告－

日本原子力研究所東海研究所

大山 幸夫・馬場 譲<sup>\*1</sup>・渡辺 幸信<sup>\*2</sup>・河野 俊彦<sup>\*2</sup>  
沼尻 正晴<sup>\*3</sup>・植木紘太郎<sup>\*4</sup>・小田野直光<sup>\*4</sup>・山野 直樹<sup>\*5</sup>  
小迫 和明<sup>\*5</sup>・林 克己<sup>\*6</sup>・義澤 宣明<sup>\*7</sup>・中島 宏  
田中 進・前川 藤夫・今野 力・深堀 智生  
千葉 敏・長谷川 明

(1998年10月7日受理)

シグマ委員会では近年の加速器利用の進展に伴い、基礎研究、放射性廃棄物の消滅処理研究、核融合炉材料研究、医学診断・治療研究など多岐に渡る分野において共通の基礎データである中高エネルギー領域核データの整備を目的として、JENDL High Energy File（以下JENDL-HEと略記する）の整備作業を実施してきた。その第1版である50MeVまでのJENDL-HEが1998年度に公開される予定となっている。しかしながら、そのデータレビューおよび積分テスト手法が未確立であるのは大きな問題である。JENDL-HEの利用を促すためにも評価値の積分的検証が必須である。このため、シグマ委員会ではJENDL-HEに関する積分評価のためのタスクフォースを1997年度に設置し、問題点の現状を調査・検討し、今後のシグマ委員会における中高エネルギー核データ評価および整備に対する指針を得ることを目的として1年間の調査活動を実施した。本報告書は本タスクフォースの調査検討結果をまとめたものであり、シグマ委員会に対する報告を行うものである。

---

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

\*1 東北大学

\*2 九州大学

\*3 高エネルギー加速器研究機構

\*4 運輸省船舶技術研究所

\*5 住友原子力工業(株)

\*6 日立エンジニアリング(株)

\*7 (株)三菱総合研究所

A Study of Existing Experimental Data and Validation Process  
for Evaluated High Energy Nuclear Data  
- Report of Task Force on Integral Test for JENDL High Energy File  
in Japanese Nuclear Data Committee -

Yukio OYAMA, Mamoru BABA<sup>\*1</sup>, Yukinobu WATANABE<sup>\*2</sup>, Toshihiko KAWANO<sup>\*2</sup>,  
Masaharu NUMAJIRI<sup>\*3</sup>, Kotaro UEKI<sup>\*4</sup>, Naoteru ODANO<sup>\*4</sup>, Naoki YAMANO<sup>\*5</sup>,  
Kazuaki KOSAKO<sup>\*5</sup>, Katsumi HAYASHI<sup>\*6</sup>, Nobuaki YOSHIZAWA<sup>\*7</sup>,  
Hiroshi NAKASHIMA, Susumu TANAKA, Fujio MAEKAWA, Chikara KONNO,  
Tokio FUKAHORI, Satoshi CHIBA and Akira HASEGAWA

Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 7, 1998)

JENDL High Energy File (JENDL-HE) is being produced by Japanese Nuclear Data Committee (JNDC) to provide common fundamental nuclear data in the intermediate energy region for many applications concerning a basic research, an accelerator-driven nuclear waste transmutation, a fusion material study, and medical applications like the radiation therapy. The first version of JENDL-HE, which contains the evaluated nuclear data up to 50 MeV, is planned to release in 1998. However, a method of integral test with which we can validate the high-energy nuclear data file has not been established. The validation of evaluated nuclear data through the integral tests is necessary to promote utilization of JENDL-HE. JNDC set up a task force in 1997 to discuss the problems concerning the integral tests of JENDL-HE. The task force members have surveyed and studied the current status of the problems for a year to obtain a guideline for development of the high-energy nuclear database. This report summarizes the results of the survey and study done by the task force for JNDC.

**Keywords :** High Energy, Nuclear Data, JENDL, Experiment, Evaluation, Benchmark, Integral Test

- 
- \* 1 Tohoku University
  - \* 2 Kyushu University
  - \* 3 High Energy Accelerator Research Organization
  - \* 4 Ship Research Institute, Ministry of Transport
  - \* 5 Sumitomo Atomic Energy Industries, Ltd
  - \* 6 Hitachi Engineering Co. Ltd
  - \* 7 Mitsubishi Research Institute, Inc

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. 微分測定データの調査 .....	3
2.1 基本方針 .....	3
2.2 中性子データ .....	4
2.3 陽子データ .....	18
3. ベンチマーク実験に関する調査・収集 .....	33
3.1 ベンチマーク実験に関する調査・収集の現状 .....	33
3.2 ベンチマーク実験の分類とその定義 .....	33
3.3 ベンチマーク実験の調査・収集の基本方針 .....	35
3.4 ベンチマーク実験の調査結果 .....	36
3.5 調査結果におけるベンチマーク実験の現状 .....	37
3.6 まとめと今後の課題 .....	40
4. 断面積処理法と輸送計算の調査 .....	51
4.1 高エネルギー輸送標準コード体系の整備 .....	51
4.2 高エネルギー核データの特殊性と現状コードとの関係 .....	52
4.3 断面積処理コード .....	55
4.4 JENDL-HEのベンチマークテスト例 .....	58
5. JENDL-HE標準レビュー手法の検討 .....	66
5.1 緒 言 .....	66
5.2 検討対象と方法 .....	66
5.3 積分データによる確認の必要性 .....	67
5.4 検討結果 .....	68
6. 海外の動向調査 .....	69
6.1 ロスアラモスにおける高エネルギー核データ評価活動 .....	69
6.2 SNS計画における高エネルギー群定数利用の現状 .....	74
6.3 各国の高エネルギーファイルの現状 .....	75
7. シグマ委員会及び利用者への提言 .....	77
7.1 各検討グループからの主要な結論 .....	77
7.2 シグマ委員会及び利用者への提言 .....	79
8. 結 言 .....	81
付録1：「高エネルギー核データライブラリーの現状と提言」 （炉物理委員会・高エネルギー粒子工学専門部会） .....	82
付録2：Cに対する陽子入射核種生成断面積のEXFOR検索結果 .....	97

付録 3 : Oに対する陽子入射核種生成断面積のEXFOR検索結果	100
付録 4 : Alに対する陽子入射核種生成断面積のEXFOR検索結果	103
付録 5 : Siに対する陽子入射核種生成断面積のEXFOR検索結果	106
付録 6 : Feに対する陽子入射核種生成断面積のEXFOR検索結果	108
付録 7 : Wに対する陽子入射核種生成断面積のEXFOR検索結果	116
付録 8 : 国内加速器施設及び加速器計画において核データライブラリーが 必要とされる核種に関する調査	117
付録 9 : 高エネルギー核データファイルの要求仕様	122

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Survey of Differential Experimental Data .....	3
2.1 Basic Guideline .....	3
2.2 Neutron Data .....	4
2.3 Proton Data .....	18
3. Survey of Benchmark Experiments .....	33
3.1 Status of Research and Collection of Benchmark Experiments .....	33
3.2 Classification and Definition of Benchmark Experiments .....	33
3.3 Guideline for Research and Collection of Benchmark Experiments .....	35
3.4 Results of Research of Benchmark Experiments .....	36
3.5 Status of Benchmark Experiments in Research Results .....	37
3.6 Summary and Future Task .....	40
4. Investigation of Cross Section Processing Method and Transport Calculation .....	51
4.1 Development of Standard High Energy Transport Code System .....	51
4.2 Discontinuity between High Energy Transport Code System and Low Energy Ones .....	52
4.3 Processing Code .....	55
4.4 Example of Benchmark Test of JENDL-HE .....	58
5. Standard Reviewing Method for JENDL-HE .....	66
5.1 Introduction .....	66
5.2 Target and Methodology .....	66
5.3 Necessity of Validation using Integral Data .....	67
5.4 Research Results .....	68
6. Status of Activities in the Other Countries .....	69
6.1 Activities on High Energy Nuclear Data Evaluation at Los Alamos National Laboratory .....	69
6.2 Status of High Energy Group Constant Usage in SNS Project .....	74
6.3 Status of Evaluated High Energy Nuclear Data Files .....	75
7. Recommendation to JNDC and Users .....	77
7.1 Summary of Conclusions from Subgroups .....	77
7.2 Recommendation to JNDC and Users .....	79
8. Closing Remarks .....	81
Appendix 1 : "Status of High Energy Nuclear Data Library and Proposal" by Subcommittee on High Energy Particle Engineering in Committee of Reactor Physics .....	82
Appendix 2 : Retrieval Results of Proton Induced Isotope Production Cross Section for C from EXFOR .....	97
Appendix 3 : Retrieval Results of Proton Induced Isotope Production Cross Section for O from EXFOR .....	100
Appendix 4 : Retrieval Results of Proton Induced Isotope Production Cross Section for Al from EXFOR .....	103

Appendix 5 : Retrieval Results of Proton Induced Isotope Production Cross Section for Si from EXFOR .....	106
Appendix 6 : Retrieval Results of Proton Induced Isotope Production Cross Section for Fe from EXFOR .....	108
Appendix 7 : Retrieval Results of Proton Induced Isotope Production Cross Section for W from EXFOR .....	116
Appendix 8 : Research for Needs of Nuclear Data Library for the Domestic Accelerator Facilities and Projects .....	117
Appendix 9 : Tentative Specification of High Energy Nuclear Data File .....	122

## 1. 緒 言

シグマ委員会では近年の加速器利用の進展に伴い、基礎研究、放射性廃棄物の消滅処理研究、核融合炉材料研究、医学診断・治療研究など多岐に渡る分野において共通の基礎データである中高エネルギー領域の核データを評価し整備することを目的として、核データ専門部会に高エネルギー核データ評価ワーキンググループ(WG)を設置し、JENDL High Energy File(以下 JENDL-HE と略記する)の整備作業を実施してきた。その第1版である 50MeVまでの JENDL-HE の評価作業が進行中であり、完成後は速やかに公開される予定となっている。

上記 WG では、評価作業と同時に中高エネルギー核データ評価手法の開発、格納フォーマットの整備、利用者調査、データ処理に係る研究活動を実施しているが、これらの研究活動は緒についてから日も浅く、現時点では確立された技術とは言い難い。しかしながら、JENDL-HE 第1版の完成を目前に控えている一方で、そのデータのレビューおよび確認のための積分テスト手法が未確立であるのは大きな問題である。シグマ委員会としては、評価した JENDL-HE の利用を促すためにも評価値の積分的検証が必須であると考える。

JENDL 汎用ファイルにおいては米国の CSEWG に対応する Reactor、Shielding、Fusion Neutronics 積分テスト WG において、標準的なベンチマーク問題が設定され、輸送計算システムも良く整備されており、核データの積分評価手法が確立しているが、中高エネルギー領域については統一的な断面積処理方法および輸送計算法が確立しておらず、また基準となるベンチマーク問題についても選択されていない。そのため、現状では中高エネルギー領域の積分評価は困難である。このように JENDL-HE に関する問題点としては、評価手法の他に、積分評価手法、ベンチマーク問題の設定、定数処理方法、輸送計算手法、利用者の要求など多くの問題を多方面から詳細に検討する必要があり、上記の WG 活動では範囲が広すぎてこれら全てを検討することは不可能である。

そのため、シグマ委員会では JENDL-HE に関する積分評価のためのタスクフォースを 1997 年度に設置し、比較的小人数の第一線の専門家で組織されたメンバーにより、JENDL-HE 評価に係る問題点の現状を調査・検討し、今後のシグマ委員会における中高エネルギー核データ評価および整備に対する指針を得ることを目的として 1 年間の調査活動を実施した。本報告書は本タスクフォースの調査検討結果をまとめたものであり、シグマ委員会に対する提言を行うものである。

調査検討はタスクフォースのメンバーによる議論を踏まえて以下に示すサブグループに分れて実施した。また、炉物理研究委員会・高エネルギー粒子工学専門部会の報告書である「高エネルギー核データライブラリーの現状と提言」についても参

考とした。

- ・微分測定データの調査サブグループ

馬場 譲(東北大)、渡辺 幸信、河野 俊彦(九大)、山野 直樹(住友原子力)、  
深堀 智生(原研)

- ・積分測定ベンチマークデータの調査サブグループ

林 克己(日立エンジ)、中島 宏、田中 進、今野 力、深堀 智生(原研)

- ・断面積処理法と輸送計算法の調査サブグループ

小迫 和明(住友原子力)、植木 紘太郎(船研)、長谷川 明、前川 藤夫、  
今野 力(原研)

- ・標準レビュー手法の調査検討サブグループ

山野 直樹(住友原子力)、義澤 宣明(MRI)、沼尻 正晴(KEK)、深堀 智生(原研)

- ・海外の動向調査サブグループ

小田野 直光(船研)、千葉 敏、深堀 智生(原研)

- ・高エネルギーファイルの仕様検討サブグループ

深堀 智生、大山 幸夫(原研)

本報告書では、第 2 章で微分測定データの調査結果を述べ、第 3 章では積分データであるベンチマーク実験の調査結果を述べた。その中では利用者側から必要とされる核種の調査結果および積分テストを行うための検討課題についてもまとめた。第 4 章では中高エネルギー核データの特殊性とそれに伴う断面積処理法、輸送計算手法およびベンチマーク手法に係るテスト計算結果について述べた。第 5 章ではこれらの調査・検討を踏まえた標準的なレビュー手法の検討結果と必要なタスクについて言及した。第 6 章では海外の動向調査として、主として米国を中心とした開発動向および欧米の高エネルギーファイルの現状をまとめた。第 7 章では本タスクフォースの調査検討により明らかとなったシグマ委員会および利用者グループに対する提言をまとめた。高エネルギーファイルの仕様検討に関しては本タスクフォースの作業範囲ではないとの判断から付録に掲載するに留めた。

## 2. 微分測定データの調査

### 2.1 基本方針

本作業では、中高エネルギー領域における微分断面積測定データを調査し、中高エネルギー核データ評価ならびに評価済ファイル（JENDL-HE）のレビュー作業に必要となる実験データの現状を把握することを目的とする。中高エネルギー核データ評価の対象となっているすべての核種に関する調査・分析を行うには膨大な作業を要する。今回のタスクの作業範囲を、「応用および核データ評価の上でプライオリティが高い主要な核種を選定し、それらの核種に対する微分測定データの現状を調査し、その結果の概要を与えること」に限定する。従って、数値データの組織的な収集作業や核種・反応チャネル毎のデータの詳細な分析は基本的に行わないし、個々のデータの質（核データ評価やベンチマークに適しているかどうか）の問題についても深く議論することはしない。

調査の基本方針をまとめると以下の通りである。

- ・入射粒子 : 中性子と陽子に限定。
- ・標的核核種
  - (1) 中性子 : 調査可能な全主要核種を対象。
  - (2) 陽子 : データ量が膨大になるため、主要 11 核種に限定。
- ・エネルギー領域 : 上限は特に設けず、2 GeV 以上でもデータがあれば調査する。
  - (1) 中性子 : 20 MeV 以上。
  - (2) 陽子 : しきいエネルギー以上。
- ・断面積の分類（基本的には JENDL-HE に格納予定の断面積データ）
  - 1) 全断面積（陽子入射では全反応断面積）
  - 2) 弹性散乱断面積
  - 3) 非弾性散乱断面積（離散的準位への遷移）
  - 4) 中性子及び荷電粒子生成断面積（主に、放出粒子 2 重微分断面積）
  - 5) 放射化／核種生成断面積
  - 6) ガンマ線生成断面積
  - 7) 核分裂断面積
- ・調査方法 : EXFOR による検索を主体に、原子核物理関連のジャーナル（Phys. Rev. C や Nucl. Phys. A）や最近の核データ国際会議の報告書を対象とした文献ベースの検索も併用する。

以下に、本基本方針に従って調査した結果を、中性子データ、陽子データ毎に整理し、評価作業や評価値のベンチマーク用に必要とされる微分データの条件について提言を述べる。

## 2.2 中性子データ

### 2.2.1 緒言

本節では、20 MeV以上における中性子入射反応の実験データをレビューし、その中でJENDL-HE評価やベンチマークテストに有効と考えられる微分データをまとめる。

20-1500 MeV領域での中性子と陽子データに対する調査がA. Koning [1]によって行われており、これによってデータの概況を知ることができる。中性子入射反応についての実験データは陽子入射反応や15 MeV以下の領域に比べ極端に少ないことがまず特徴的である。近年、世界的な中高エネルギー領域への関心の高まりとともに、新しい中性子源設備が整備され、新しい実験が開始されたことによって、中性子実験データはここ10年程度の間にかなりの進展を見せたが、データが質・量ともに不足である点に変わりはない。この原因として、従来工学分野におけるデータニーズが乏しかったことに加え、20 MeV以上の実験に必要となる大型の加速器と中性子源が世界的にみても非常に限られていることが挙げられる。さらに、この領域では単色の中性子源が無く、そのために中性子散乱、放射化・核種生成など単色中性子が望ましい実験が困難であることも挙げられる。また、測定装置に関しても、反応チャンネル数が増え、粒子のエネルギー範囲が広がる分、低エネルギー領域に比べて複雑で高価な装置が必要となることも実験を困難にしている。

従来の実験の中には、核反応機構や核構造の研究など、物理的な興味で行われたものもいくつかある。これらの実験の場合、データが入射エネルギー付近の高エネルギー部と前方角などに限られており、工学的なデータベースとして見た場合には不満足なものも少なくない。

一方、高エネルギー領域での核データでは対象となるエネルギー領域が広く、反応の種類も膨大となる。個々に評価データが必要かどうかについては議論があるにせよ、上述した実験の困難さを考えると評価に必要なデータについて実験値が揃うこととは到底期待できない。従って、評価は主として理論計算に基づいて行われ、実験データの役割はそれらのモデルやパラメータの検証及び系統性や系統式の導出にあると考えられる。また、上のような事情から高エネルギー領域ではいくつもの実験データがあってその中から自然淘汰的にデータがスクリーニングされるということも期待できない。従って、実験データ自体に、self-consistencyチェックの機能を期待できるのが望ましい。それらの点を考えると単発的な実験データよりは

- (1)複数の核種、入射エネルギーについての系統的な実験がある、
- (2)複数の実験者による測定がある

のようなデータが評価にとって有効であろうと考えられる。

中性子入射反応の場合もともと実験データ自体が少ないので、この調査では、(1)、(2)を満たすようなデータに着目し、核種や反応の種類を問わずに利用できるデータをリストアップし、EXFOR No.またはデータへのアクセス経路などを知り得る範囲でまとめることにした。

## 2.2.2 調査の内容

本調査では、基本的にEXFORに収録されているデータを中心に調べた。しかし、雑誌、プロシーディングスなどに発表されながらEXFORに収録されていないものも少なくないので、Phys. Rev. C、Nucl. Phys.、Nucl. Sci. & Eng.の雑誌、核データ国際会議プロシーディングス(Mito、Juelich、Gatlinburg、Trieste)、及び Barashenkov によるcompilation [2]をも調査対象とした。Barashenkov compilation には、EXFORに収録されていない多くの中性子、陽子データ（特に高エネルギー領域での）が文献、数値とともに収録され有益である。

エネルギー範囲は20 MeV以上とし上限は特に切っていないが、カスケード模型が適用困難で中性子データが必要と考えられる数10-100 MeVの領域を中心とした。この領域は最近のデータが多い領域でもある。

ここでは、データを以下の項目に分類し、該当するデータをまとめた。

- 1)全断面積、反応断面積（弹性散乱外断面積）、
- 2)中性子散乱・生成断面積、
- 3)荷電粒子生成断面積、
- 4)放射化・核種生成断面積、
- 5)核分裂断面積、
- 6)ガンマ線生成断面積、
- 7)ドシメトリ、検出器反応断面積。

この分類は、JENDL-HE及び2.1での分類と若干異なるが、記述の重複などを避けるために実験手法に従った便宜的なもので、本質的な違いによるものではない。なお、2)、3)の反応で放出される中性子、荷電粒子は、強いエネルギー角度相関を持って放出されるので、粒子輸送や核外カスケード過程、照射損傷、核発熱などへの寄与をきちんと評価するためには、生成断面積のみならずエネルギー・角度分布を二重微分断面積(DDX)で正確に表現する必要がある。また、粒子は多数のチャンネルから放出されるので、それらのカスケード過程を正確に取り扱って包括的な漏れのないデータとすることが重要と考えられる。

次節以後、この分類に従って上記1)、2)の条件に該当すると思われるデータをピックアップして表にまとめ、EXFOR entry No.または登録されていない場合にはデータの入手に関する情報を掲げる。

## 2.2.3. 調査結果と検討

### 2.2.3.1 全断面積、反応断面積（弹性散乱外断面積）

全断面積は、中性子輸送や遮蔽の計算、核データ評価などにおいて最も基礎となる基本的な物理量である。幸い実験的には、通常の透過実験によって精度良く測定

Table 2.2.1 Experimental data of neutron total cross section

Author	En (MeV)	Nuclei / Element	Ref.	EXFOR
Larson+	1 - 80	C, O, Al, Si, Ca, Cr, Fe, Ni, Cu, Au, Pb	[6]	
Franz +	160 - 575 (22points)	Be, $^{12}\text{C}$ , $^{16}\text{O}$ , Al, V, Mn, Co, Cu, Ag, Ce, Ta, Pb, Bi, $^{238}\text{U}$	[7]	22117
Finlay + (LANSCE)	1- 600 $(\Delta E/E < 1\%)$	Be, C, N, O, $^{19}\text{F}$ , $^{23}\text{Na}$ , $^{27}\text{Al}$ , Si, $^{40}\text{Ca}$ , Cu, $^{90}\text{Zr}$ , $^{93}\text{Nb}$ , Sn, $^{127}\text{I}$ , $^{133}\text{Cs}$ , $^{181}\text{Ta}$ , $^{208}\text{Pb}$ , $^{219}\text{Bi}$	[3]	13569
Dietrich+ (LANSCE)	$(\Delta \sigma/\sigma < 1\%)$	H, $^6\text{Li}$ , $^7\text{Li}$ , $^{10}\text{B}$ , $^{11}\text{B}$ , B, $^{12}\text{C}$ , $^{13}\text{C}$ , N, O, F, P, S, K, Ti, V, Cr, Mn, ( $^{54}\text{Fe}$ , $^{56}\text{Fe}$ ) Fe, Co, Ni, Y, Mo, In, ( $^{182,183,184,186}\text{W}$ ), W, Au, Hg, Pb, (Th), $^{238}\text{U}$	[4]	
Schimmering+	900-2600 (15points)	Be, C, Al, Fe, Ni, Cu, Zn, Ag, Sn, Pb, Bi, U	[5]	Table in Ref. [5]

することができ、EXFORやBarashenkov compilationには300 GeV付近までにわたっていくつかの実験データが見出される。その代表例をTable 2.2.1に示す。この内Finlayらによるデータ[3]をFig.2.2.1に示す。このデータはLANSCE/WNRの核破碎中性子源を使った実験で得られたもので、1%以下のエネルギーBIN幅に対して1%以下の統計精度を達成しており、信頼性は高いと考えられる。Fig.2.2.2に示すようにFranz、Larsonら他のデータ（こちらの方が誤差は大きいが）も概ね一致していることから、現在のところ600 MeVまでの範囲での決定版といえよう。Dietrichらの実験 [4]はFinlayらのデータを補強するためのものでLANLのAPT計画に必要ないくつかの核種についても新たに測定が行われている。それ以上については、Schimmering [5]らがTable 2.2.1のようなデータを与えており、それらをあわせると2.5 GeV程度までのデータが一応揃っている状況にある。

### 2.2.3.2 中性子散乱・生成断面積

Table 2.2.2 に中性子散乱・生成データを示す。(なお、H(n,n) 反応については反跳陽子の測定によって実験が行われるので次節の荷電粒子生成に分類する)。

中性子散乱・生成断面積は、応用上もまた基本的な物理量としても重要であるが、実験データは30 MeVを越えると非常に乏しい。最初に述べたように単色中性子源が存在しないこと、そのため通常のTOF法では二次中性子スペクトルの測定が不可能であることが理由として挙げられよう。そのため、散乱中性子のエネルギースペクトルは、中性子スペクトロメータを用いて測定する必要があるが、散乱中性子收

Table 2.2.2 Experimental data for neutron scattering and emission cross sections above 20 MeV

Institute	En(MeV)	Nuclei / Elements	Ref.	EXFOR
Studsvick	21.5	Be, $^{14}\text{N}$ , $^{16}\text{O}$ , Mg, Al, $^{28}\text{Si}$ , $^{32}\text{S}$ , S, $^{40}\text{Ca}$ , Ca, Cr, $^{52}\text{Cr}$ , Fe, $^{59}\text{Co}$ , $^{58}\text{Ni}$ , $^{89}\text{Y}$ , Ce, $^{206}\text{Pb}$ , Bi	[15-17]	21123, 21152, 22128, 22048, 22127
Ohio Univ.	25.7	V, $^{56}\text{Fe}$ , $^{65}\text{Cu}$ , Nb, Bi	[18]	Table in Ref.
	20-26	$^{6.7}\text{Li}$ , $^{10}\text{B}$ , C, $^{13}\text{C}$ , N, $^{16.18}\text{O}$ , $^{26}\text{Mg}$ , $^{28}\text{Si}$ , $^{32}\text{S}$ , Ca, $^{58}\text{Ni}$ , $^{90.91.92}\text{Zr}$ , Nb, $^{208}\text{Pb}$	[19-23]	21123, 21152, 13161, 13162, 12942
JAERI	21 28	$^{12}\text{C}$ , $^{28}\text{Si}$ , $^{32}\text{S}$	[24,25]	21628, 21629, 22160
Tohoku Univ.	35	$^{12}\text{C}$	[26]	22167
Michigan St. Univ.	30 40	C, $^{28}\text{Si}$ , S, Ca, $^{208}\text{Pb}$	[27]	12701, 12871, 12724
CIAE	37	C, Bi	[9]	
UC Davis	65	C, Si, Ca, Fe, Sn, Pb	[8]	13510
		Fe, Sn, Pb [DDX]	[28]	
Oxford Univ.	96 136	Li, Be, C, N, Al, Cu, Cd, Pb, U $\theta = 2 - 22^\circ$	[29]	21123 21374
UC Davis/ LANL	52.5-225	$^{12}\text{C}$ , $^{40}\text{Ca}$ , $^{208}\text{Pb}$	[11]	Table of Ref. [11]
Wien Univ. / LANL	3.1-57.5	$^{27}\text{Al}(\text{n},\text{n}'\gamma_{1-4})$ $^{207,208}\text{Pb}(\text{n},\text{n}'\gamma_{1-4})$	[12,13]	13643.002

量が少ないので大きなアクセプタンスとダイナミックレンジを有するスペクトロメータと強力な中性子ビームを要するなど実験はかなり困難である。さらに、スペクトロメータのエネルギー分解能が限られているため、弾性散乱、非弾性散乱による中性子の分離も不十分である。このため、弾性散乱データについても非弾性散乱中性子の影響を考慮する必要がある。

Fig.2.2.3に65MeVにおける弾性散乱データ[8]を示す。これは $^7\text{Li}(\text{p},\text{n})$ 反応による準単色中性子と中性子スペクトロメータを用いて測定されたものである。なお、弾性散乱の場合には、非弾性散乱中性子の寄与を補正すれば、 $^7\text{Li}(\text{p},\text{n})$ 中性子源とTOF法によっても測定が可能で、30-40 MeVのデータはこの手法で測定されたものである。

中国原子能研(CIAE)やUppsala大でそれぞれT(d,n)、 $^7\text{Li}(p,n)$ 疑似単色中性子源[9,10]、LANSCEで核破碎中性子源を使った散乱実験[11]が開始されている。

また、離散準位への非弾性散乱断面積もエネルギー分解能の問題から中性子の測定では困難で、唯一のデータは( $n,xy$ )のガンマ線データを用いて得られている[12,13]。但し、次の例からも分かるように、数10 MeV以上では散乱スペクトルは連続中性子に支配され、離散中性子の寄与は小さくなるので、実用上は連続部に比べそれほど問題とはならないであろう。DDXについても状況は同様で、65 MeVにおけるUC Davisのデータが事実上唯一のものと言える。その例をFig.2.2.4に示す。連続成分が支配的であることが分かる。この図には、( $p,p'x$ )のスペクトルも示してある。データのある( $p,p'x$ )のスペクトルを( $n,n'x$ )スペクトルの推定に使えないかを検討するのが目的であるが、形状はかなり近いものの詳細な議論には統計精度を改善することが望まれる。現状では貴重なデータではあるが。

なお、弾性散乱外断面積（反応断面積）もまた、データ評価や遮蔽計算において重要な量であり、いくつかの実験データも報告されている[5,14]。しかしながら、これらの実験値の導出に際してのいくつかの仮定などのためにかなりの不確かさを持つと考えられ、やはり弾性散乱、非弾性散乱に関するデータが蓄積されていくのが望ましいと考えられる。

### 2.2.3.3 荷電粒子生成断面積

Table 2.2.3に荷電粒子生成に関する実験データの現状を示す。この内、H( $n,p$ )反応については、核物理・核工学における最も基本的な量であることから、中間エネルギーにおいて多くの実験が行われた。それらの実験値及びフェーズシフト解析などにより、この反応断面積データは角度分布も含めて最も良く知られたものであり、中間エネルギー領域でも数%以下であるといわれてきた。しかし、最近Uppsalaで行われた実験の結果、従来信じられていた値と10%近く違う実験値が報告された。彼らはスイスPSIのグループも同様な結果を得ているとしており、このデータの重要性を考えると早急に解決されるべきものと考える。H( $n,n$ )反応についての最近の結果をFig.2.2.5に示す。

荷電粒子生成反応のうち、( $n,p$ )、( $n,d$ )反応に関してはGamov-Teller型巨大共鳴や核構造などを興味の対象としてTRIUMF、LANL、Uppsalaなどでいくつか系統的な実験が行われた。しかしこれらの場合、実験データは核物理的に興味のある高エネルギー部や前方角部などに限られ、照射損傷評価に必要な低エネルギー部に関してはデータが無いなどの問題点がある。

広いエネルギーと角度範囲を含むデータはUC Davis のグループ[30]によって最初に測定された。その後、UCL[31]、LANL[32]及び東北大・原研[33]などで大きなダイナミックレンジを有する特別の荷電粒子テレスコープを用いて実験が行われている。

Table 2.2.3 Experimental data for the neutron-induced charged-particle emission cross section

Institute	En(MeV)	Nuclei / Elements	Ref.	EXFOR
UC Davis	25, 40, 65	$^{12}\text{C}$ , $^{14}\text{N}$ , $^{16}\text{O}$ [p,d,t, $\alpha$ ; DDX] H, $^4\text{He}$ , $^6\text{Li}$ , $^7\text{Li}$ , $^9\text{Be}$ , $^{19}\text{F}$ , $^{27}\text{Al}$ , Si, $^{58,60}\text{Ni}$ , $^{90}\text{Zr}$ [(n,p), (n,d) to levels]	[30,34,35]	Priv.comm. 12784, 12786, 12845, 13496
KfK	20.5-48	H	[36]	22207
LANL	5-50	Be, C, $^{27}\text{Al}$ , Si, $^{56}\text{Fe}$ , $^{59}\text{Co}$ , $^{58,60}\text{Ni}$ , $^{93}\text{Nb}$ , $^{197}\text{Au}$ [p,d,t, $\alpha$ ; DDX]	[32,37]	Priv.comm.
UCL (Louvain)	25-72 ,	H, D, C, O, Al, Si [p,d,t, $\alpha$ ; DDX]	[31,38,39] +	Priv.comm. 22303
Tohoku/ JAERI	65, 75	C, Al, Fe [p,d DDX]	[33]	Priv.comm.
Uppsala	97, 162 96	H $^{12}\text{C}$ , $^{54}\text{Fe}$ , $^{56}\text{Fe}$ , Zr, $^{208}\text{Pb}$	[40,41]	22223, 22277
TRIUMF	198, 280	$^6\text{Li}$ , $^{12}\text{C}$ , $^{13}\text{C}$ , $^{20}\text{Ne}$ , $^{64}\text{Ni}$ ,	[42]	13150
LANL	459	H	[43]	13623
LANL	800 MeV	H, $^6\text{Li}$ , $^7\text{Li}$ , Be, $^{27}\text{Al}$ , Cu, $^{64}\text{Ni}$ [(n,d), Forward angle]	[44]	10829

C、O、Alについては複数の研究機関で近接エネルギーにおけるデータが得られており、相互のデータ比較が可能となっている。Fig.2.2.6に $^{12}\text{C}(n,xp)$ 反応の実験値を示す。また、Fig.2.2.7に実験、計算値間の比較を示す。エネルギーの高い部分で実験値間の一致は良好といえるが、低エネルギー部ではかなりの違いがあり様々な観点から検討する必要がある。

#### 2.2.3.4 放射化及び核種生成断面積

Table 2.2.4 に放射化及び核種生成断面積の実験データをまとめた。放射化断面積データは加速器施設における放射化量の評価に必要であるとともに、種々のエネルギー、反応についてのデータがあるので評価データのベンチマークに有用である。そのため、いくつかのグループによって実験が行われ、また新たな実験計画が進められている[45]。

Table 2.2.4 Experimental data for the neutron-induced activation and transmutation cross sections

Institute	En(MeV)	Nuclei / Elements	Ref.	EXFOR
Tohoku/INS/ TIARA/ RIKEN	30-220	$^{12}\text{C}(\text{n},2\text{n})^{11}\text{C}$ , $^{23}\text{Na}(\text{n},2\text{n})^{22}\text{Na}$ , $^{27}\text{Al}(\text{n},2\text{n}\alpha)^{22}\text{Na}$ ,	[46,47,48]	22335.010
	27.5- 38.2	$^{54}\text{Fe}(\text{n},3\text{n})$ , $(\text{n},\text{t})$ $^{59}\text{Co}(\text{n},2\text{n})^{58}\text{Co}$ , $^{59}\text{Co}(\text{n},4\text{n})^{56}\text{Co}$ , $^{nat}\text{Cu}(\text{n},\text{sp})^{56}\text{Mn}$ , $^{60}\text{Co}$ , $^{60}\text{Cu}$ , $^{61}\text{Cu}$ , $^{65}\text{Ni}$ , $^{209}\text{Bi}(\text{n},\text{Nn})$ ; N = 3-12		
Uppsala/ Hannover	78	C,O, Al, Si, Fe, Co, Ni, Cu, Ag (AMS technique)	[45]	
LANL	3-200	$^{27}\text{Al}(\text{n},x\gamma)\text{Al}$ , Mg, Na, Ne, F production	[12,13]	13643
	23-27	$^{207,208}\text{Pb}(\text{n},x\gamma)\text{Pb}$ , Tl, Hg		13644
	14.7-21	$^{12}\text{C}(\text{n},2\text{n})$ , $\text{Fe}(\text{n},2\text{n})$		11303.002 12936.007
Juelich	22.5	C(n, t), $^{54}\text{Fe}(\text{n},\text{t})$ ( $\text{n}, ^3\text{He}$ )		20840
Kurchatova	22- 37.5 17.5-37.5	$^{12}\text{C}(\text{n},2\text{n})$ , $^{16}\text{O}(\text{n},2\text{n})$		40715
LANL/ Ohio Univ.	23-27 22-26	$^{12}\text{C}(\text{n},2\text{n})$		11303

このエネルギー領域で中性子源が単色でないことは、放射化断面積の測定についても困難をもたらしている。すなわち、非単色成分の中性子によって生成されるバックグラウンドを差し引くためには低エネルギー中性子に対する断面積データが必要であり、従って測定は低エネルギー側から順次進めていくことが必要となる。そのため、高エネルギー領域までの一貫したデータを得るには、系統的な実験が極めて重要となる。その点、T.Nakamuraらの測定[46,47]は種々の施設にまたがってはいるが、20 MeVから210 MeV間での範囲にわたって一貫した手法によるもので注目される。Figs.2.2.8に $^{12}\text{C}(\text{n},2\text{n})$ 、 $^{209}\text{Bi}(\text{n},\text{Nn})$ 反応についての結果を示す[47]。後者のデータは、数10 MeVから数100 MeVの領域にわたる中性子スペクトロメータとして期待されているものである。

核変換、核種生成断面積については、LANSCEにおける( $\text{n},x\gamma$ )データから広いエネルギー範囲にわたって多くの情報が得られている [12,13]。

C、Al、Pbについては複数のグループからのデータが報告されており、それを用いて相互比較が可能な状態となっている。Table 2.2.5にこれらのデータをまとめた。

Table 2.2.5 Neutron-induced activation cross section data for C, Al and Pb.

Reaction	Energy (MeV)	Lab	EXFOR No.
$^{12}\text{C}(\text{n},2\text{n})$	23 - 27	LANL	11303.002
	22 - 26	Ohio Univ.	12912.004
	22.8 - 33.6	Hamburg Univ.	20348.002
	21.8 - 38.2	Tohoku Univ.	22335.002
	22.0 - 37.5	Kurchatova	40715.002
$^{12}\text{C}(\text{n},3\text{n})^{10}\text{C}$	90.0	UC Berkley	13651.003
$^{12}\text{C}(\text{n},\text{t})$	22.5	Juelich	20840.005
$^{16}\text{O}(\text{n},2\text{n})$	17.7 - 37.5	Kurchatova	40715.004
$^{27}\text{Al}(\text{n},2\text{n})^{26}\text{Al}$	14.5 - 37.5	LANL	13643.003
	16.2 - 20.2	Harwell	20921.004
$^{27}\text{Al}(\text{n},\text{p})^{26}\text{Mg}$	21.0	(CAR)	11189.005
(n,x) $^{25}\text{Mg}$	10.5 - 375	LANL/Vienna	13643.006
(n,x) $^{24}\text{Mg}$	33.0 - 375		.007
(n,x) $^{23}\text{Na}$	13.5 - 375		.008
(n,x) $^{22}\text{Ne}$	25.0 - 375		.009
(n,x) $^{21}\text{Ne}$	37.0 - 375		.010
(n,x) $^{20}\text{Ne}$	57.5 - 375		.011
(n,x) $^{18}\text{F}$	39.0 - 375		.012
Fe(n,2n)	20.6	Gosudarstvennyj	41102.022
$^{54}\text{Fe}(\text{n},3\text{n})$	27.5 - 38.2	Tohoku Univ.,	22335.010
$^{54}\text{Fe}(\text{n},\text{t})$	27.5 - 38.2	Tohoku Univ.,	22335.009
$^{54}\text{Fe}(\text{n},\text{t})^{52m}\text{Mn}$	22.5	Juelich	20840.037
$^{54}\text{Fe}(\text{n},\text{t})^{52g}\text{Mn}$	22.5		.038
$^{56}\text{Fe}(\text{n},\text{t})^{52}\text{Mn}$	22.5		.040
$^{56}\text{Fe}(\text{n},^3\text{He})$	22.5		21009.041
$^{208}\text{Pb}(\text{n},2\text{n})$	5.75 - 200	LANL/Vienna	
$^{206}\text{Pb}(\text{n},3\text{n})\text{m}$	20.0 - 26.0	Ohio Univ.,	12912.007
$^{208}\text{Pb}(\text{n},3\text{n})$	11.5 - 200	LANL/Vienna	13644.004
$^{207}\text{Pb}(\text{n},6\text{n})$	42.5 - 200		.005
$^{208}\text{Pb}(\text{n},7\text{n})$	42.5 - 200		.006
$^{207}\text{Pb}(\text{n},8\text{n})$	62.5 - 200		.010
$^{208}\text{Pb}(\text{n},9\text{n})$	37.0 - 200		.007
$^{208}\text{Pb}(\text{n},3\text{np})^{205}\text{Tl}$	21.0 - 200		13645.003
$^{208}\text{Pb}(\text{n},5\text{np})^{203}\text{Tl}$	31.0 - 200		.004
$^{208}\text{Pb}(\text{n},7\text{np})^{201}\text{Tl}$	52.5 - 200		.005
$^{208}\text{Pb}(\text{n},\text{np})\text{Tl}$	16.5 - 200		.002

Table 2.2.6 Fission cross section measurements above 20 MeV

Institute	En(MeV)	Nuclei / Elements	Ref.	EXFOR
LANL	0.5-400	$^{238}\text{U}$ $^{232}\text{Th}, ^{233}, ^{234}, ^{236}\text{U}, ^{237}\text{Np}$	[52]	Priv. Comm.
Gatchina/KRI	1-200	$^{232}\text{Th}, ^{235}, ^{238}\text{U}, ^{237}\text{Np}$	[53]	
Uppsala/KRI	70-160	$^{208}\text{Pb}, ^{209}\text{Bi}, ^{238}\text{U}$ $^{232}\text{Th}, ^{235}\text{U}, ^{238}\text{U},$	[54]	22320
UCL/PTB	34, 46, 61	$^{238}\text{U}$	[55]	
IPPE	20.5-21.0	$^{238}\text{U}$		40169
Kurchatova	21.7 - 23.2 22.9 - 23.2	$^{197}\text{Au}$ Pt		41037.007 41037.006
ICP	120-380 380	$^{209}\text{Bi}, ^{235}\text{U}, ^{238}\text{U}$ Pb, Tl, $^{197}\text{Au}$ , Pt, W, $^{232}\text{Th}$		41212
ITEF	1140-7303 2217-8084 3015-3170	$^{235}\text{U}$ $^{235}\text{U}$ $^{239}\text{Pu}$		40156.005 40156.004 40156.006
BRC	22.8-28.2	$^{235}\text{U}, ^{238}\text{U}, ^{239}\text{Pu}$		21685

### 2.2.3.5 核分裂断面積

Table 2.2.6に核分裂断面積測定をまとめた。核分裂断面積データはエネルギー生成の面で加速器炉の核設計に必要なだけでなく、ドシメトリや中性子束測定にも重要である。幾つかのグループによって連続スペクトルの核破碎中性子や $^7\text{Li}(p,n)$ 反応による疑似単色中性子を用いて系統的な測定がなされている。この測定は多重の核分裂箔を装荷した核分裂電離箱を用いて核分裂片収量を求めるこによって行われる。表中のほとんどの測定はback-to-back型核分裂電離箱を用いて $^{235}\text{U}$ に対する相対値を求めており、その絶対値はLANLでH(n,p)を基準に求められた $^{235}\text{U}$ 断面積に規格化されている。従って、今後高エネルギー側における相対測定とともに、絶対値の新たな測定が強く要望される。

核分裂の機構を明らかにする上で有益な、核分裂片のエネルギー、質量、角度分布などに関しても最近幾つかデータが報告された。

Fig.2.2.9に中性子入射の場合と陽子入射の場合の核分裂断面積の比較を示す[49]。 $(n,n'x)$ と $(p,p'x)$ の比較と同様、中性子入射と陽子入射の関係を知るのが目的であるが、エネルギーが200 MeV程度より高くなれば関係付けが可能となることが見出されている[49]。これによって、よりデータ数の多い陽子入射データを利用して中性子

反応の場合を予測することが可能となる。

### 2.2.3.6 ガンマ線生成断面積

ガンマ線生成断面積に関して多くはないが幾つかの実験データが報告されている[12,13,50,51]。中でもLANSCEの強力な核破碎中性子ビームを用いて測定された数MeVから200/400 MeVまでの広範囲にわたる高分解能のガンマ線スペクトルデータが注目される。ガンマ線スペクトルデータから離散準位非弾性散乱、核種生成、核変換などに関する情報が広範囲にわたって求められた。

このようにガンマ線生成データは、遮蔽や核発熱など工学的な分野だけでなく、核反応機構や核構造などにも有益なデータを提供している。

20 MeV以上の中性子に対する離散非弾性散乱の断面積データは、二次中性子スペクトロメータの分解能が不充分であるため、 $\gamma$ 線測定手法でのみ測定が可能である。

### 2.2.3.7 ドシメトリ及び中性子検出器反応断面積

20 MeV以上の領域では、実験の基礎となるドシメトリや中性子検出器反応についてさらに進展が必要である。それには、n-p散乱、核分裂とともに適当な崩壊様式と半減期を有する放射化や核種生成反応が有効であると考えられる。たとえば最近、実験データが揃ってきたBi(n,xn)、Al(n,xn)、Pb(n,xn)などは有力な候補になるものと期待される。他にもドシメトリや中性子測定に適した反応を選択しそのデータを再評価することが有効であろう。

上で指摘したように、H(n,p)に関して問題点も指摘されているが依然として最も良く断面積の知られた反応であることは間違いない。また、核分裂も核分裂計数管の簡便さ、安定性からドシメトリにふさわしいものである。現在までに良質のデータがある400 MeVより高い領域についての核分裂断面積データが期待される。

### 2.2.4. 一般的コメントとまとめ

上で述べたように、20 MeV以上における中性子反応の実験データは非常に乏しく、質的にも不十分と言わざるを得ない状況にある。従来データのニーズがあまりなかったことに加えこのエネルギー領域の適当な中性子源設備が少ないことが大きな要因と考えられる。さらに、単色中性子源が欠如しているため中性子散乱、放射化・核種生成などの実験が困難である。また、過去における実験では物理的興味が動機となったものが少なくなく、これらの場合データが興味のある狭い領域に限られたものが多いことも実験データの内容を狭めている。

しかし、加速器利用の進展などに伴って高エネルギー核データへの関心が高まるとともに、新しい中性子源設備が整備され、幾つかの新しい実験プロジェクトが開始されたことにより、ここ10年程度の間に大きな進展が見られた。これにより、比較可能な実験データや計算の検証に有効なデータなどがある程度蓄積され有効なデ

ータベースが形成している。これを評価とベンチマークに有効に生かすことが先ず重要と考える。

しかしながら、依然としてデータは質・量ともに不十分で、尚いっそうの充実を図る必要がある。これらの実験を進展させるには、大強度と狭いパルス幅を持った適切な中性子源設備が重要であることは、LANSCEにおける活発なアクティビティと卓越した成果からも明らかである。

### 謝辞

本報告をまとめるにあたり、山野直樹（住友原子力）、田中進（原研高崎）両氏に有用な資料を提供していただきました。また、名内泰志、布宮智也（東北大工）両君には文献調査に協力していただきました。ご協力に感謝します。

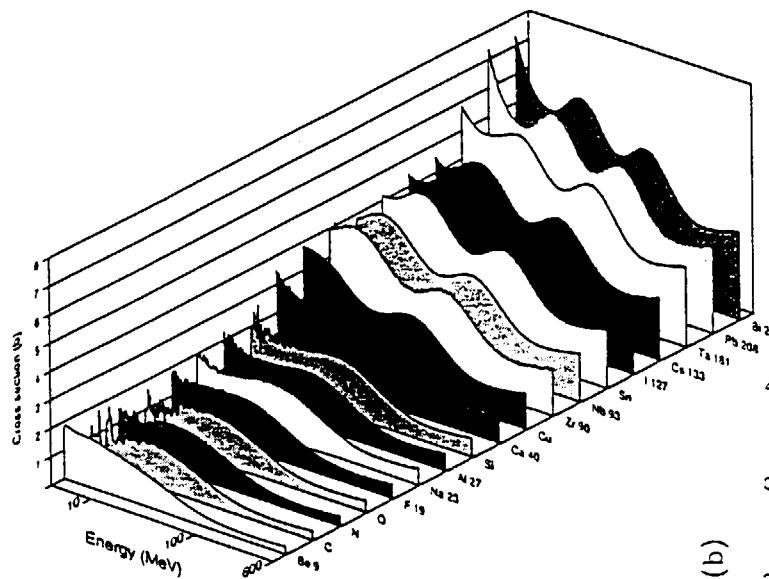


Fig.2.2.1: Experimental data of neutron total cross section [3].

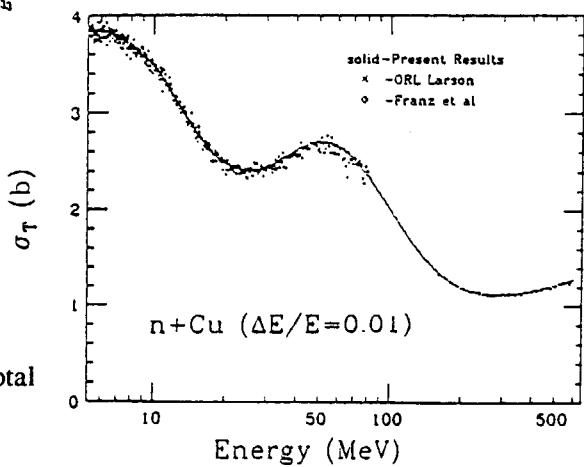


Fig.2.2.2: Comparison of neutron total cross section data [3].

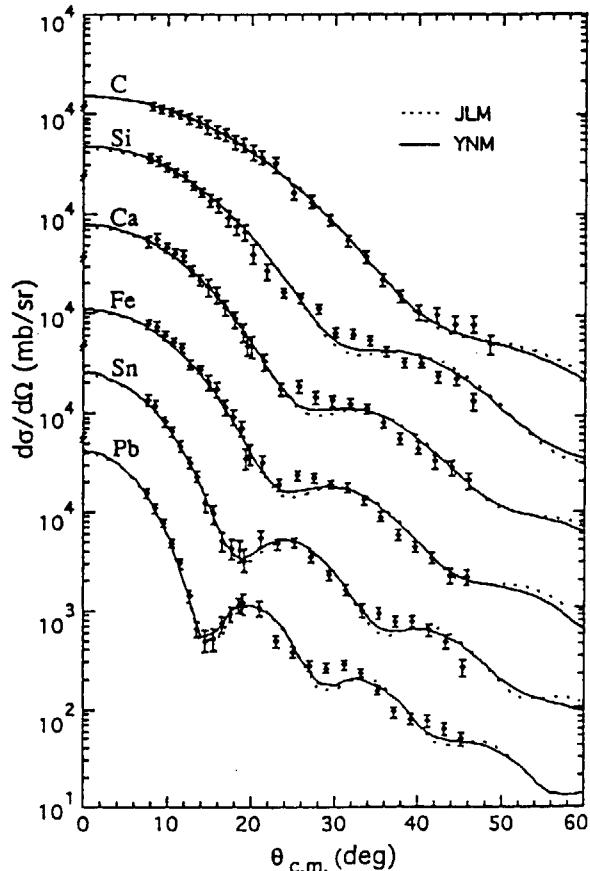


Fig.2.2.3: Neutron elastic scattering cross section [8].

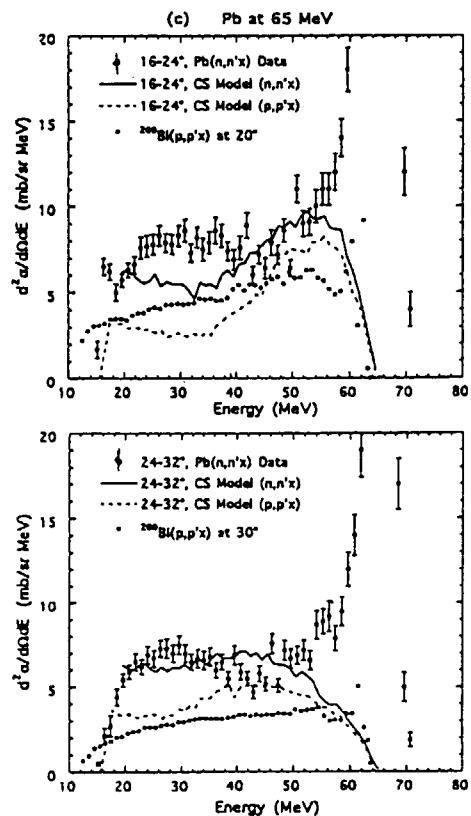


Fig.2.2.4: Neutron emission spectra of Pb [28].

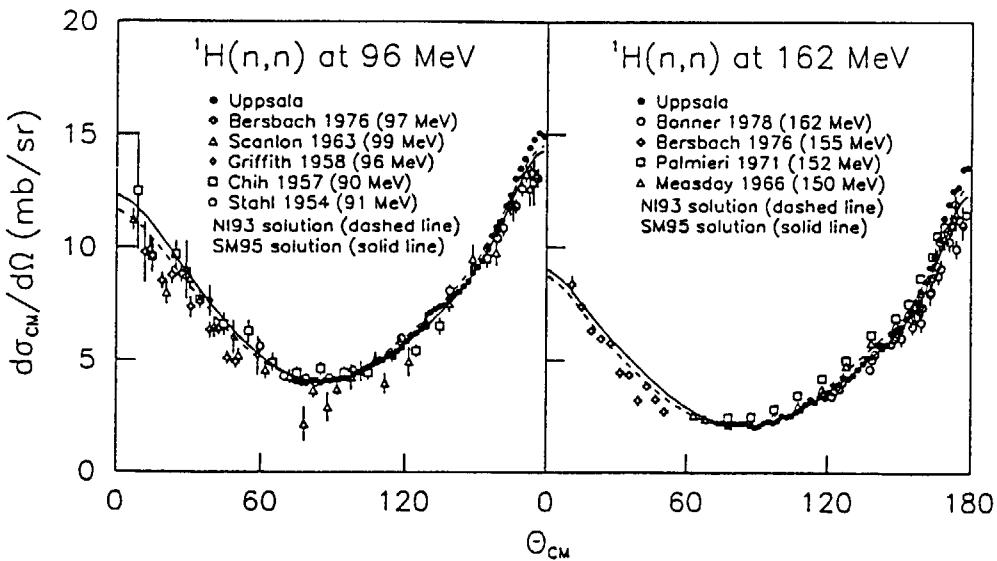
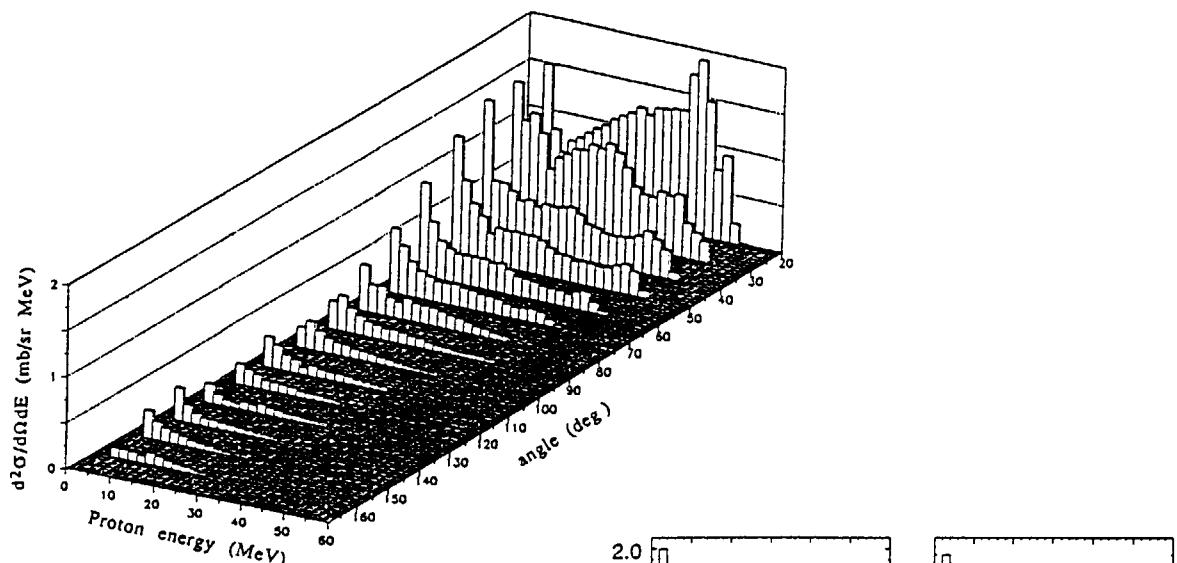
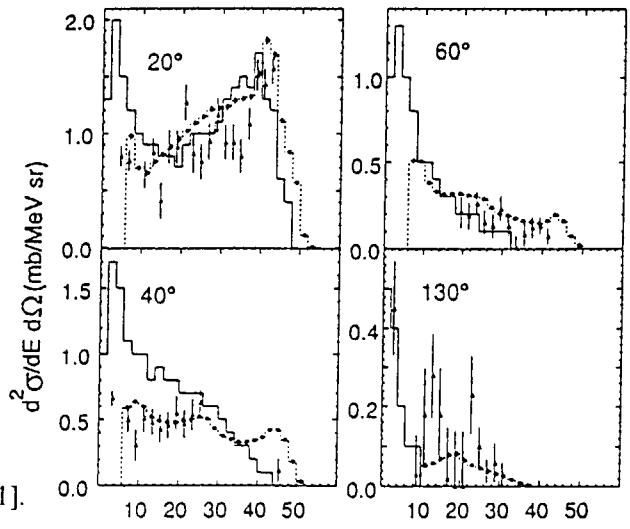


Fig.2.2.5: Neutron scattering cross section of hydrogen [40].

Fig.2.2.6: Double-differential  ${}^{12}\text{C}(n, xp)$  cross section [31].Fig.2.2.7: Comparison of  ${}^{12}\text{C}(n, xp)$  spectra [31].

Open dot; experiment by Ref.[31],

Triangle; experiment by Ref.[30],

Histogram; cascade model calculation.

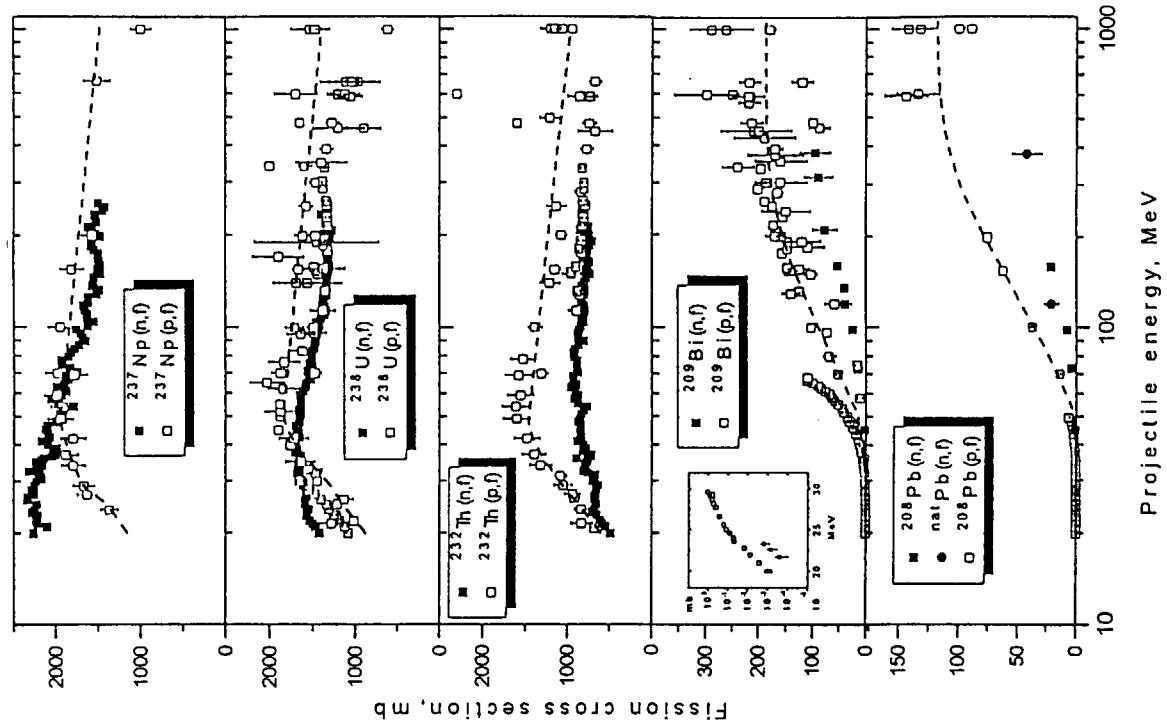
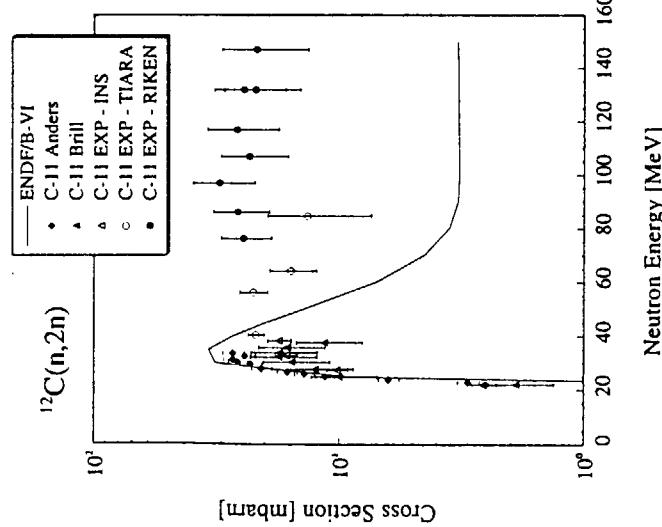
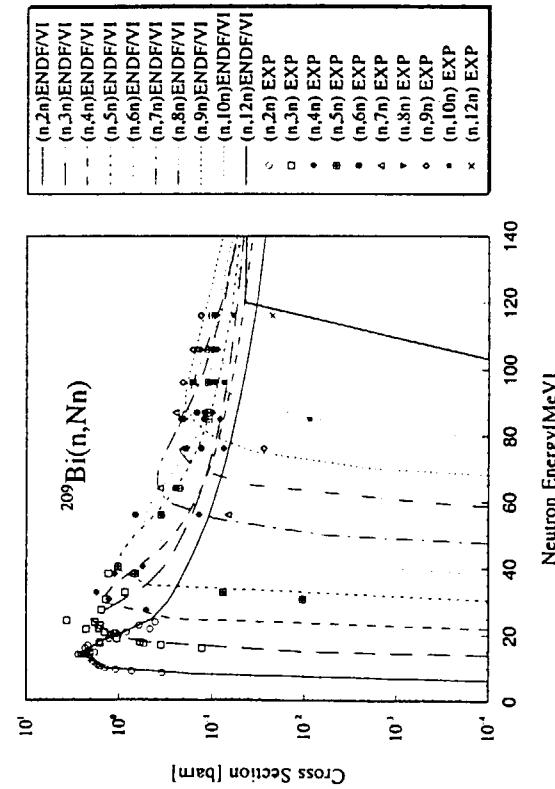


Fig.2.2.9: Comparison of (n,f) and (p,f) cross sections [49].

Fig.2.2.8:  
 $^{12}\text{C}(n,2n)$  and  $^{209}\text{Bi}(n,\text{Nn})$   
cross section [47].

## 2.3 陽子データ

### 2.3.1 緒言

陽子入射反応については、粒子加速器が開発され、原子核反応の実験的研究が始まって以来の膨大な実験データの蓄積がある。中高エネルギー領域の加速器中性子源を有する実験施設は陽子実験が可能な施設に比べかなり限定されるために、陽子データの方が、先述の中性子データに比べて多岐にわたり圧倒的に多いという特徴がある。この状況は、Koning[1]が行った 20~1500 MeV 領域における中性子及び陽子データの調査の結果に示されている。彼の報告書の中では、反応放出粒子毎に分類された断面積データの分布状況のみが示され、2.1 節で分類した断面積毎の現状については特に言及されていない。又、これまで測定された陽子データには、核子である陽子をプローブとして用い、特定の核物理現象を調査したもののが数多く含まれており、核データ評価や評価値のレビューに役立つかどうかという視点で眺めると有用なデータ数はかなり限定されることが予想される。そこで、本調査の目的は、しきいエネルギーから中高エネルギー領域に及ぶ入射エネルギー範囲における陽子微分測定データの現状を調査し、2.1 節で分類された各断面積毎に、その概要を把握することにある。

本調査では、調査対象核種を、加速器駆動消滅処理や陽子線ガン治療に関連した主要核種として、以下に列挙する 11 核種に限定した。



なお、Fe については、天然同位体についても調査を行った。

次に、調査対象にした断面積は以下の 5 項目である。

- 1) 全反応断面積
- 2) 弹性散乱断面積
- 3) 非弾性散乱断面積（離散的準位への遷移）
- 4) 中性子及び荷電粒子生成断面積（主に、放出粒子 2 重微分断面積）
- 5) 放射化／核種生成断面積

ガンマ線生成断面積と核分裂断面積に関しては、今回の調査対象から除外した。なお、核分裂断面積については、深堀ら[56]により行われた中高エネルギー領域の系統式に関する研究が参考になる。

### 2.3.2 調査結果と分析

#### 2.3.2.1 EXFOR エントリー数の分布

まず、EXFOR を使い、上記の 4 つの断面積カテゴリーに入っているデータの検索を行った。その結果を Table 2.3.1 に示す。表において、(p,NON)、(p,EL)、(p,INL)は、それぞれ全反応断面積、弾性散乱断面積、非弾性散乱断面積に対応する。(p,X)は粒子生成断面積に相当し、中性子及び荷電粒子生成断面積（放出粒子 2 重微分断面積を含む）や放射化／核種生成断面積がこの項目にエントリーされる。以下、EXFOR

Table 2.3.1 陽子微分測定データの EXFOR による検索結果  
(データエントリー数の分布)

標的核	全エントリ数	(p,NON)	(p,EL)	(p,INL)[DDX]	(p,X)[DDX]
C-12	362	7	111	157	87 [48]
N-14	26	1	3	5	17 [8]
O-16	333	2	52	236	43 [16]
Al-27	214	6	18	2	188 [72]
Si-28	46	0	10	20	16 [7]
Fe-56	140	3	32	54	51 [10]
Fe-nat	567	2	9	0	556 [20]
Ni-58	296	2	40	99	155 [110]
Zr-90	303	1	49	168 [64]	85 [67]
W-184	2	0	1	1	0
Pb-208	486	3	71	346	66 [56]
Bi-209	69	0	5	1	63 [29]

注) 記号 DDX は、(p,INL) 及び(p,X) エントリーの中に含まれる放出粒子 2 重微分断面積のエントリー数

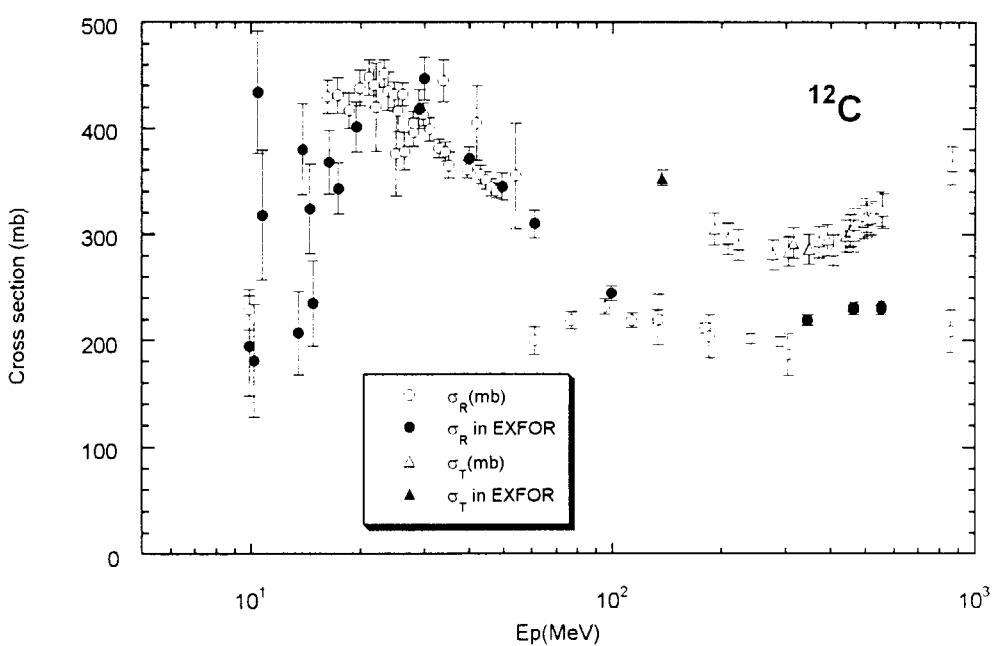


Fig. 2.3.1  $^{12}\text{C}$  に対する陽子入射全反応断面積と全断面積. データは文献[3]のもの. EXFOR に格納されているデータは黒塗りのマークで示される.

検索結果に基づき、文献ベースの検索結果も併せて、各項目の現状を概観する。

### 2.3.2.2 各断面積データの傾向分析

#### a) 全反応断面積データ

Table 2.3.1 の第 3 カラムからわかるように、EXFOR に登録されているデータは少ない。1985 年以前の実験データについては、W. Bauhoff による compilation [57]がある。58 元素のデータが収録されており、データのエントリ数は、全反応断面積が 712、全断面積が 73 である。今回の EXFOR の調査結果と比較すると、文献[57]には、いずれの調査核種について多くのデータが収録されている。両者を比較した結果の 1 例を炭素について Fig 2.3.1 に示す。EXFOR 及び文献[57]に含まれているほとんどのデータが 1980 年以前に測定されたものである。また、古いデータは、概して誤差が大きく、各実験データ間でのばらつきも大きい傾向にある。文献[57]の compilation を利用して、2 つのグループ[58,59]が中高エネルギー領域の全反応断面積に対する系統式を提案しており、実験データがない場合や乏しい場合の核データ評価において、これらの系統式の利用は有効であろう。又、Barashenkov[2]による数値データ (TeX ファイル) ならびに文献の compilation があることも付記しておく。

#### b) 弹性散乱・非弾性散乱断面積データ

これらのデータのエントリ数は、Table 2.3.1 の第 4、5 カラムに示される。かなり膨大な実験データ（特に、 $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{208}\text{Pb}$  の 4 核種）が登録されている。文献ベースの調査をすれば、さらに多くの未登録データの存在が確認できる。以下にこれらのデータの特徴を要約する。

- 同一核種・同一エネルギーでの複数の実験（異なった実験場所や測定者）は乏しい。
- 入射エネルギーの増加とともに角分布は非常に強い前方ピークとなり、最前方角のみデータに限定される。
- 1980 年以前の比較的古いデータが多く含まれている。（特に、200 MeV 以下の微分断面積データ）
- 1980 年代以降の実験データには、偏極物理量（偏極分解能、偏極移行量など）測定データが含まれる場合が多い。この傾向は、加速器や測定器の性能向上や物理的な興味対象の時代的変遷による。偏極物理量は、核データ評価用には直接必要ないが、光学モデル解析でスピン・軌道項を決定する場合や、評価に用いる理論モデルの検証などでは、有用なデータとなる。
- 弹性散乱データについては、これまでの中高エネルギー光学ポテンシャル研究をサーベイすることで、関連文献から有用かつ信頼性のおけるデータを選択できる。例えば、S. Hama ら[60,61]による中高エネルギー領域の光学ポテンシャルに関するグローバルなディラック現象論の仕事や最近行われた 200

MeVまでの核子一核光学モデルに関する専門家会議報告[62]が参考になる。

- 非弾性散乱データについてコメントを一言。Table 2.3.1 の第 5 カラムを見てわかるように、Zr-90 のデータ中には放出陽子 2 重微分断面積データも登録されている。高エネルギーになった場合には、陽子放出スペクトルに占める連続領域の割合が大きくなり、全体に占める離散的準位への非弾性散乱の収量割合は小さくなる。したがって、応用的観点からは、高い励起準位まで含めた多数の非弾性散乱データを考慮せず、放出陽子 2 重微分断面積データで対応することで十分であろう。

#### c) 放出粒子 2 重微分断面積

放出粒子 2 重微分断面積データの多くは、Table 2.3.1 の第 6 カラム ( $p, X$ ) で分類される粒子生成断面積に含まれる。評価に役立ちそうな実験データを EXFOR および文献等から調査した結果を Table 2.3.2 (関連文献リスト含む) および Fig.2.3.2 に整理する。1970 年以降のデータが調査対象となった。Table 2.3.2 の最後カラムには、EXFOR データの有無をマークした。Fig.2.3.2 は、放出粒子を荷電粒子（陽子、重陽子、 $^3$ He、 $\alpha$  粒子）と中性子に分けた場合の測定データの分布状況を調べた結果である。入射エネルギーを横軸に、標的核の原子番号を縦軸にプロットしている。現状を分析した結果を以下にまとめる。

- 前平衡核反応過程に関する核物理研究の進展や工学的応用への必要性から、放出粒子 2 重微分断面積測定について多くの実験が行われてきた。
- Fig.2.3.2 からわかるように、中性子放出データは 200 MeV 以上で系統的なデータが揃っている。これらの測定は、主に 90 年代に入り、工学的応用を念頭にして行われたものである。EXFOR への登録率も高い。
- 一方、軽イオン放出のデータについては、200 MeV 以下の実験データは比較的揃ってきているが、まだ広い質量数範囲という点からは十分とは言えない状況にある。EXFOR への登録率も高くない。200 MeV 以上のデータは非常に限られている。原子核のスピン・アイソスピン応答を調査する目的で、最前方角かつ数 10 MeV 程度の励起エネルギー領域に限定された測定[63-65]（偏極物理量測定が主要なテーマ）がいくつか存在するが、広範な角度領域や放出エネルギー領域をカバーした系統的実験は少ない。中高エネルギー領域の系統的なデータとしては、NAC(南ア)で行われた 100~200 MeV 領域での( $p, p'$ )測定は注目に値する。

#### d) 核種生成断面積および放射化断面積

Table 2.3.1 の第 6 カラムの( $p, X$ )カテゴリに分類される。W-184 を除き、各核種とも、かなり膨大な実験データが存在することがわかる。核種生成断面積および放射化断面積については、Table 2.3.1 の調査とは別途に、C, O, Al, Si, Fe, W, Pb の 7 核種につ

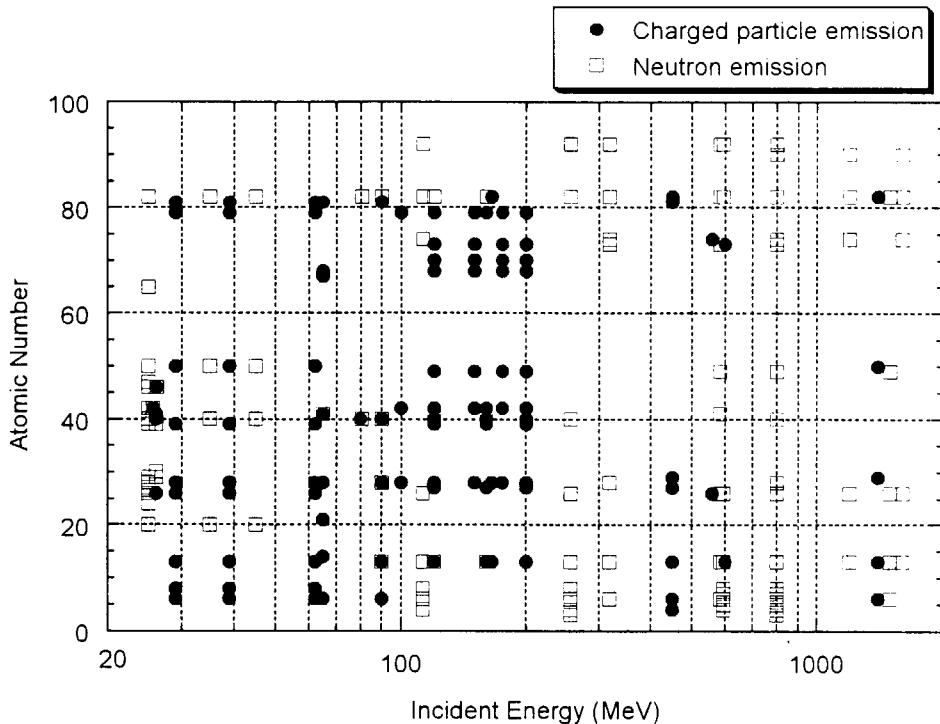


Fig. 2.3.2 陽子入射 DDX データの分布状況. ●は軽イオン放出反応, □は中性子放出反応.

いて天然同位体を含んだ調査[66]が行われた。その調査結果の例を Pb について Table 2.3.3 に示す。なお、他の核種の結果は付録に収録している。これら膨大な数のデータの中から、実際に核データ評価やレビューに使える信頼できるデータを選別する作業が必要である。Table 2.3.3 の右端のカラムには、数値データ選別調査の結果を参考までに示している。データ点数が 2 点以下の場合は断面積の値そのものを示し、3 点以上の場合はデータ点数や element/mass データとして格納されている核種/元素の数を与えており。\*?は使えないと判断したものである。

又、文献調査から得られた有用な情報として、最近行われた中高エネルギー陽子による核種生成断面積測定[67-69]をあげておく。

### 2.3.3 まとめ

EXFOR ならびに原子核物理関連の文献検索に基づき、中高エネルギー領域に着目した陽子微分測定データの現状調査を行った。このエネルギー領域の陽子反応については、中性子反応に比べ、大量のデータの蓄積がある。但し、EXFORへのデータ収録状況に関しては、論文発表と収録間に時間差が見られ、最新データの収録率は必ずしも満足できる状況ではない。従って、新規データ取得に当たっては、ジャー

ナルや主要な研究施設の報告書などの非デジタル情報源や研究者間のネットワークを利用して、使えるデータを定期的にサーベイする作業も不可欠である。

中高エネルギー核データ評価作業が、理論計算主体にならざるを得ない点を考慮すると、微分データの主要な役割は、理論モデルや使用されるパラメータの検証ならびに有用な系統式の導出にあると考えられる。従って、評価作業に必要とされる微分データの条件として、(1)複数のデータが存在し、相互に重大な矛盾を含んでないこと、又、(2)入射・放出エネルギー・角度についての系統的なデータがあることが重要である。この様な観点から、今回の陽子微分データの調査結果を眺めると、膨大な数の実験データの中からこれらの条件を満足しているものはかなり限定されてくる。既存のデータ中から、実際に評価に使えるデータの選別作業ならびにその編集作業が急務であろう。また、広いエネルギー・標的核の質量数領域にわたった系統的な核データ測定が望まれることは言うまでもない。

Table 2.3.2(1) 陽子入射反応に対する DDX 測定の現状 ( $E_p=20 \sim 100$  MeV)

No.	$E_{\text{inc.}}$ (MeV)	Target nuclei	Emitted particles				Outgoing Energies Range (MeV)	Lab. Angles Range (deg)	Laboratory & remarks	Ref.	EXFOR
			p	d	t	$^3\text{He}$					
1	25.6, 26	$^{98}\text{Mo}, ^{106}\text{Pd}$	○				7- $E_{\text{max}}$	30-150	Kyushu-JAERI	WA95	
2	26	$^{54,56}\text{Fe}, ^{90}\text{Zr}, ^{93}\text{Nb}$	○				3- $E_{\text{max}}$	20-150	Kyushu-JAERI	WA97	
3	29, 39, 62	$^{12}\text{C}, ^{16}\text{O}, ^{20}\text{Al}, ^{54}\text{Fe}, ^{56}\text{Fe}, ^{60}\text{Ni}, ^{89}\text{Y}, ^{119}\text{Sn}, ^{197}\text{Au}, ^{209}\text{Bi}$	○	○	○	○	(a few~10)- $E_{\text{max}}$	12-160	ORNL	BE73	○
4	65	$^{12}\text{C}, ^{28}\text{Si}, ^{45}\text{Sc}, ^{88}\text{Ni}, ^{93}\text{Nb}, ^{165}\text{Ho}, ^{166}\text{Er}, ^{209}\text{Bi}$	○	○	○	○	10- $E_{\text{max}}$ for p,d 30- $E_{\text{max}}$ for $^4\text{He}$	20-150	RCNP $A_y(E,\theta)^*$	SA80	○
5	80	$^{90}\text{Zr}$	○				20- $E_{\text{max}}$	24-145	NAC	CO91	○
6	90	$^{12}\text{C}$	○				10- $E_{\text{max}}$	20-75	NAC	FO88	
7	90	$^{27}\text{Al}, ^{58}\text{Ni}, ^{90}\text{Zr}, ^{209}\text{Bi}$	○	○	○	○	2.5- $E_{\text{max}}$ for p, d, $^4\text{He}$ 5.5- $E_{\text{max}}$ for t 11.5- $E_{\text{max}}$ for $^3\text{He}$	20-140	Maryland	WU79	○
8	100	$^{58}\text{Ni}$	○	○	○	○	12.5- $E_{\text{max}}$	15-155	Maryland	WU79	○
9	18, 22, 25	$^{103}\text{Rh}, ^{104,105,106,108,110}\text{Pd}, ^{107,109}\text{Ag}$			○		4- $E_{\text{max}}$	4-159	LLNL	GR76	
10	26	$^{61}\text{Zn}, ^{65}\text{Cu}, ^{89}\text{Y}$			○		4- $E_{\text{max}}$	3.5-159	LLNL	SC83	
11	25	$^{56,52,53}\text{Cr}, ^{54,56,58}\text{Fe}, ^{59}\text{Co}, ^{60}\text{Ni}, ^{63}\text{Cu}, ^{89}\text{Y}, ^{90,91,92,94}\text{Zr}, ^{92,94,95,96,97,98,100}\text{Mo}, ^{110}\text{Pd}, ^{159}\text{Tb}$			○		5.4- $E_{\text{max}}$	3.5-159	LLNL	SC84	
12	25.6	$^{92,94,95,96,97,98,100}\text{Mo}$			○		1- $E_{\text{max}}$	3-177	Hamburg	MO86	
13	26.1	$^{104,105,106,108,110}\text{Pd}$			○		3- $E_{\text{max}}$	3-177	Hamburg	HO91	
14	25, 35, 45	$^{48}\text{Ca}, ^{90}\text{Zr}, ^{120}\text{Sn}, ^{208}\text{Pb}$			○		8- $E_{\text{max}}$	5-160	MSU	BL76	
15	65	$^{93}\text{Nb}$			○		15- $E_{\text{max}}$	0-110	RCNP, $A_y(E,\theta)^*$	SA83	
16	80.5	$^{90}\text{Zr}, ^{208}\text{Pb}$			○		20- $E_{\text{max}}$	30-135	UCF	TR89	○
17	90	$^{27}\text{Al}, ^{58}\text{Ni}, ^{90}\text{Zr}, ^{209}\text{Bi}$			○		5- $E_{\text{max}}$	20-135	Maryland	KA83	○

注)  $A_y(E,\theta)$  : 価値分解能測定データ

Table 2.3.2(2)  $\beta_{\text{D}}$  入射反応に対する DDX 測定の現状 ( $E_p \geq 100 \text{ MeV}$ ) (物理量・ $\gamma$ -半減期 DDX)

No.	$E_{\text{me}}(\text{MeV})$	Target nuclei	Emitted particles					Outgoing energies Range (MeV)	Lab. Angles Range (deg)	Laboratory & remarks	Ref.	EXFOR
			p	d	t	$^3\text{He}$	n					
1	100,120,150 175,200	$^{197}\text{Au}$	○					20-E <sub>max</sub>	15-120	NAC	CO90	
2	100,120,150 175,200	$^{58}\text{Ni}$	○					20-E <sub>max</sub>	15-120	NAC	FO91	○
3	120	$^{90}\text{Zr}$	○					20-E <sub>max</sub>	24-145	NAC	CO91	○
4	100,120,150 175,200	$^{58}\text{Ni}, ^{100}\text{Mo}, ^{197}\text{Au}$	○					20-E <sub>max</sub>	15-120	NAC	RI92	
5	120,160, 200	$^{89}\text{Y}, ^{90}\text{Zr}, ^{92,94,96,98,100}\text{Mo}$	○					20-E <sub>max</sub>	15-160	NAC	RI94	○
6	120,150,175 200	$^{115}\text{In}, ^{167}\text{Er}, ^{173}\text{Yb}, ^{181}\text{Ta}$	○					20-E <sub>max</sub>	15-160	NAC	RI96	
7	120,160, 200	$^{27}\text{Al}, ^{59}\text{Co}, ^{197}\text{Au}$		○				30-E <sub>max</sub>	10-160	NAC	CO96	
8	120,160, 200	$^{59}\text{Co}, ^{197}\text{Au}$		○				30-E <sub>max</sub>	10-160	NAC	CO97	
9	100,165	$^{27}\text{Al}, ^{58}\text{Ni}, ^{60}\text{Ni}, ^{208}\text{Pb}$	○	○	○	○	(2.5 to 8)-E <sub>max</sub>	25-150	IUCF	SE82		
10	200	$^{27}\text{Al}, ^{197}\text{Au}$	○	○	○	○	25-E <sub>max</sub>	14-135	Orsay	MA84		
11	450	Be, C, Al, Co, Bi	○				100-450	30-45, 60	ORNL	WA72		
12	558	Fe, W	○	○			-	10-60	-	BE76		
13	600	$^{27}\text{Al}, ^{181}\text{Ta}$	○				100-E <sub>max</sub>	30-150	SREL	CO81		
14	1400, 2500, 3000, 4500	C, Al, Cu, Sn, Pb	○				40-170	30-120	KEK, Also, $\pi$ beam	SH83		
15	3000, 4000	Al, Pb	○				100-1200	37-90	KEK, Also, $\pi$ beam	EN85		
16	12000	Al, Cu, Ag, Ta	○				7.5-140	90	KEK, $\pi$ emission	SH83		

Table 2.3.2(3)  $\frac{1}{2}^+_1$ 入射反応に対する DDX 測定の現状 ( $E_p \geq 100$  MeV) (中性子生成 DDX)

No.	$E_{\text{nuc}}$ (MeV)	Target nuclei	Emitted particles					Outgoing energies Range (MeV)	Lab. Angles Range (deg)	Laboratory & remarks	Ref.	EXFOR
			p	d	t	${}^3\text{He}$	${}^4\text{He}$					
17	120, 160	${}^{27}\text{Al}$ , ${}^{90}\text{Zr}$ , ${}^{208}\text{Pb}$						20-E <sub>max</sub>	0-145	IUCF	SC90	O
18	256, 800	${}^7\text{Li}$ , ${}^{40}\text{Al}$ , ${}^{95}\text{Zr}$ , ${}^{208}\text{Pb}$						20-E <sub>max</sub>	7.5-150	LANL	ST93	O
19	585	C, Al, Fe, Nb, In, Ta, Pb, U						0.9-E <sub>max</sub>	30-150	PSI	CJ87	O
20	113	Be, C, O, Al, Fe, W, Pb, U						0.5-E <sub>max</sub>	7.5-150	LANL	ME89	O
21	256	Be, C, O, Al, Fe, Pb, U						0.5-E <sub>max</sub>	7.5-150	LANL	ME92	O
22	318, 800	C, Al, Ta, Ni, W, Pb, U						0	-	LANL	ME86	
23	597	Be, B, C, N, O, Al, Fe, Pb, U						0.5-E <sub>max</sub>	30-150	LANL	AM93	O
24	800	Be, B, C, N, O, Al, Fe, Cd, W, Pb						0.3-E <sub>max</sub>	30-150	LANL	AM92	O
25	800, 1500, 3000	C, Al, Fe, In, Pb						1-E <sub>max</sub>	15-150	Kyushu-KEK	IS97	
26	800, 1200, 1600	Al, Fe, W, Pb, Th						2-E <sub>max</sub>	0-150	SATURNE	in progress	

Table 2.3.2 中の参考文献一覧

- [AM92] W.B. Amian, R.C. Byrd, C.A. Goulding, M.M. Meier, G.L. Morgan, C.E. Moss, and D.A. Clark, Nucl. Sci. Eng., **112**, 78 (1992).
- [AM93] W.B. Amian, R.C. Byrd, D.A. Clark, C.A. Goulding, M.M. Meier, G.L. Morgan, and C.E. Moss, Nucl. Sci. Eng., **115**, 1 (1993).
- [BE73] F.E. Bertrand and R.W. Peelle, Phys. Rev. C **8**, 1045 (1973).
- [BE76] S.M. Beck and C.A. Powell, N.A.S.A. technical note, NASA TN D-8119, 1976.
- [BL76] M. Blann, R.R. Doering, Aaron Galonsky, D.M. Patterson, and F.E. Serr, Nucl. Phys. A**257**, 15 (1976).
- [CJ87] S. Cierjacks, Y. Hino, F. Raupp, L. Butth, D. Filges, P. Cloth, and T.W. Armstrong, Phys. Rev. C **36**, 1976 (1987).
- [CO81] K.R. Cordell, S.T. Thornton, L.C. Dennis, R.R. Doering, R.L. Parks, and T.C. Schweizer, Nucl. Phys. A**352**, 485 (1981).
- [CO90] A.A. Cowley, S.V. Förtisch, J.J. Lawrie, D.M. Whittal, F.D. Smit, and J.V. Pichler, Z. Phys. A**336**, 189 (1990).
- [CO91] A.A. Cowley, A. van Kent, J.J. Lawrie, S.V. Förtisch, D.M. Whittal, J.V. Pichler, F.D. Smit, W.A. Richter, R. Lindsay, I.J. van Heerden, R. Bonetti, and P.E. Hodgson, Phys. Rev. C **43**, 678 (1991).
- [CO96] A.A. Cowley, G.J. Arendse, J.W. Koch, W.A. Richter, J.A. Stander, G.F. Steyn, P. Demetriou, P.E. Hodgson, and Y. Watanabe, Phys. Rev. C **54**, 778 (1996).
- [CO97] A.A. Cowley, G.J. Arendse, G.F. Steyn, J.A. Stander, W.A. Richter, S.S. Dimitrova, P. Demetriou, P.E. Hodgson, Phys. Rev. C **55**, 1843 (1997).
- [EN85] H. En'yo, S. Sasaki, T. Nagae, K. Tokushuku, M. Sano, M. Sekimoto, J. Chiba, K. Ichimaru, T. Mori, T. Katsunii, H. Yokota, and R. Chiba, Phys. Lett. **158B**, 681 (1985); PhD Thesis, University of Tokyo (1985).
- [FO88] S.V. Förtisch, A.A. Cowley, J.V. Pichler, D.M. Whittal, J.J. Lawrie, J.C. Van Staden, E. Friedland, Nucl. Phys. A**485**, 258 (1988).
- [FO91] S.V. Förtisch, A.A. Cowley, J.J. Lawrie, D.M. Whittal, F.D. Smit, and J.V. Pichler, Phys. Rev. C **43**, 691 (1991).
- [GR76] S.M. Grimes, J.D. Anderson, and C. Wong, Phys. Rev. C **13**, 2224 (1976).
- [HO91] S. Hößbling, R. Caplat, S. Stamer, R. Langkau, and W. Scobel, Z. Phys. A**338**, 11 (1991).
- [IS97] K. Ishibashi, H. Takada, T. Nakamoto, N. Shigyo, K. Maehata, N. Matsufuji, S. Meigo, S. Chiba, M. Numajiri, Y. Watanabe, and T. Nakamura, J. Nucl. Sci. Technol., **34**, 529 (1997).
- [KA83] A.M. Kalend, B.D. Anderson, A.R. Baldwin, R. Madcy, J.W. Watson, C.C. Chang, H.D. Holmgren, R. W. Koontz, J.R. Wu, and H. Machner, Phys. Rev. C **28**, 105 (1983).
- [MA84] H. Machner, D. Protic, G. Riepe, J.P. Didlez, N. Frascaria, E. Geric, E. Hourani, and M. Morlet, Phys. Lett. **138B**, 39 (1984).
- [ME86] M.M. Meier, D.B. Holtkamp, G.L. Morgan, H. Robinson, G.J. Russell, E.R. Whitaker, W.B. Amian, and N. Paul, Radiation Effects **96**, 73 (1986).
- [ME89] M.M. Meier, D.A. Clark, C.A. Goulding, J.B. McClelland, G.L. Morgan, C.E. Moss, W.B. Amian, Nucl. Sci. Eng., **102**, 310 (1989).
- [ME92] M.M. Meier, W.B. Amian, C.A. Goulding, G.L. Morgan, and C.E. Moss, Nucl. Sci. Eng., **110**, 299 (1992).

- [MO86] E. Mordhorst, M. Trabandt, A. Kaminsky, H. Krause, and W. Scobel, Phys. Rev. C **34**, 103 (1986).
- [RI92] W.A. Richter, A.A. Cowley, R. Lindsay, J.J. Lawrie, S.V. Föritsch, J.V. Pilcher, R. Bonetti, and P.E. Hodgson, Phys. Rev. C **46**, 1030 (1992).
- [RI94] W.A. Richter, A.A. Cowley, G.C. Hillhouse, J.A. Stander, J.W. Koen, R. Lindsay, R.E. Julies, J.J. Lawrie, J.V. Pilcher, and P.E. Hodgson, Phys. Rev. C **49**, 1001 (1994).
- [RI96] W.A. Richter, S.W. Sleyn, A.A. Cowley, J.A. Stander, J.W. Koen, R. Lindsay, G.C. Hillhouse, R.E. Julies, J.J. Lawrie, J.V. Pilcher, and P.E. Hodgson, Phys. Rev. C **54**, 1756 (1996).
- [SA80] H. Sakai, K. Hosono, N. Matsuoka, S. Nagamachi, K. Okada, K. Maeda, H. Shimizu, Nucl. Phys. **A344**, 41 (1980).
- [SA83] H. Sakai, K. Hatanaka, N. Matsuoka, T. Saito, A. Shimizu, T. Motobayashi, and T. Shibata, Phys. Lett. **133B**, 375 (1983).
- [SC83] W. Scobel, L.F. Hansen, B.A. Pohl, C. Wong, and M. Blann, Z. Phys. **A311**, 323 (1983).
- [SC84] W. Scobel, M. Blann, T.T. Komolo, M. Trabandt, S.M. Grimes, L.F. Hansen, C. Wong, and B.A. Pohl, Phys. Rev. C **30**, 1480 (1984).
- [SC90] W. Scobel, M. Trabandt, M. Blann, B.A. Pohl, B.R. Rennington, R.C. Byrd, C.C. Foster, R. Bonetti, C. Chiesa, S.M. Grimes, Phys. Rev. C **41**, 2010 (1990).
- [SE82] R.E. Segel, T. Chen, L.L. Rutledge, Jr., J.V. Maher, John Wiggins, P.P. Singh, and P.T. Debevic, Phys. Rev. C **26**, 2424 (1982).
- [SH83] T.-A. Shibata, K. Nakai, H. En'yo, S. Sasaki, M. Sekimoto, I. Arai, K. Nakayama, K. Ichimaru, H. Nakamura-Yokota, and R. Chiba, Nucl. Phys. **A408**, 525 (1983).
- [ST93] S. Stamer, W. Scobel, B.A. Amian, R.C. Byrd, R.C. Haight, J.L. Ullmann, R.W. Bauer, M. Blann, B.A. Pohl, J. Bisplinghoff, R. Bonetti, Phys. Rev. C **47**, 1647 (1993).
- [TR89] M. Trabandt, W. Scobel, M. Blann, B.A. Pohl, R.C. Byrd, C.C. Foster, R. Bonetti, Phys. Rev. C **39**, 452 (1989).
- [WA72] J.W. Wachter, W.A. Gibson, and W.R. Burris, Phys. Rev. C **6**, 1496 (1972).
- [WA95] Y. Watanabe, A. Aoto, H. Kashimoto, S. Chiba, T. Hasegawa, M. Mizumoto, S. Meigo, M. Sugimoto, Y. Yamanouji, N. Koori, N.B. Chadwick, P.E. Hodgson, Phys. Rev. C **51**, 1891 (1995).
- [WA97] Y. Watanabe, S. Yoshioka, M. Harada, K. Sato, Y. Nakao, H. Ijiri, S. Chiba, T. Fukahori, S. Meigo, O. Iwanoto, N. Koori, to be published in Proc. of Int. Conf. On Nuclear Data for Science and Technology, May 19-24, Trieste, Italy: JAERI-Conf/97-005 (1997) p. 301.
- [WU79] J.R. Wu, C.C. Chang, and H.D. Holmgren, Phys. Rev. C **19**, 698 (1979).

Table 2.3.3 Pb に対する陽子入射核種生成断面積の EXFOR 検索結果

Work no	Z-A	Reaction	Emin (eV)	Emax (eV)	Lab	Yr	comments
50029. 006	PB-206	(P, F), IND, SIG	1. 0000E+09	1. 0000E+09	RI	78	140. 7±7. 5mb
50029. 007	PB-207	(P, F), IND, SIG	1. 0000E+09	1. 0000E+09	RI	78	131. 0±7. 3mb
50029. 008	PB-208	(P, F), IND, SIG	1. 0000E+09	1. 0000E+09	RI	78	88. 8±4. 4mb
50047. 004	PB-208	(P, F), ., SIG	7. 0000E+07	2. 0000E+08	RI	73 *	4points
50047. 005	PB-207	(P, F), ., SIG	7. 0000E+07	2. 0000E+08	RI	73 *	4points
50047. 006	PB-206	(P, F), ., SIG	7. 0000E+07	2. 0000E+08	RI	73 *	4points
50091. 003	PB-0	(P, X) ELEM/MASS, CUM, SIG	6. 6000E+08	6. 6000E+08	DUB	80	
50091. 003	PB-0	(P, X) 81-TL-200, CUM, SIG	6. 6000E+08	6. 6000E+08	DUB	80	103±5mb
50091. 003	PB-0	(P, X) 81-TL-201, CUM, SIG	6. 6000E+08	6. 6000E+08	DUB	80	48±9mb
50091. 003	PB-0	(P, X) 81-TL-202, CUM, SIG	6. 6000E+08	6. 6000E+08	DUB	80	16. 8±2. 8mb
98236. 021	PB-0	(P, X) 3-L1-9., ., SIG	2. 8000E+09	2. 8000E+09	BNL	65	6±1. 5mb
98236. 041	PB-0	(P, X) 6-C-16., ., SIG	2. 8000E+09	2. 8000E+09	BNL	65	1. 16±0. 29mb
98236. 061	PB-0	(P, X) 7-N-17., ., SIG	2. 8000E+09	2. 8000E+09	BNL	65	4. 2±1. 05mb
98240. 002	PB-0	(P, X) 83-B1-206., ., SIG	9. 8000E+06	6. 7100E+07	DAV	87 *	58points
98240. 003	PB-0	(P, X) 83-B1-205., ., SIG	7. 7000E+06	6. 7100E+07	DAV	87 *	59points
98243. 006	PB-0	(P, X) 2-HE-6., ., SIG	1. 0000E+09	2. 8500E+09	BNL	58 *	3points
98286. 006	PB-0	(P, X) 9-F-18., ., SIG	4. 5000E+09	5. 9000E+09	BNL	58	1. 1±0. 275. 1. 4±0. 35mb
98286. 006	PB-0	(P, X) 11-NA-24., ., SIG	4. 5000E+09	5. 9000E+09	BNL	58	7. 2±1. 8. 9. 2±2. 3mb
98293. 019	PB-0	(P, X) 15-P-32., ., SIG	5. 5000E+08	5. 5000E+08	SFU	70	0. 048mb
98293. 019	PB-0	(P, X) 15-P-33, CUM, SIG	5. 5000E+08	5. 5000E+08	SFU	70	0. 088mb
98294. 004	PB-0	(P, X) 7-N-13., ., SIG	9. 4000E+08	2. 9000E+09	BNL	61 *	3points
C0323. 002	PB-208	(P, X) ELEM/MASS, CUM, SIG	1. 1500E+10	1. 1500E+10	PUR	71 *	14isotopes
C0323. 003	PB-208	(P, X) ELEM/MASS, ., SIG	1. 1500E+10	1. 1500E+10	PUR	71 *	4isotopes
98341. 008	PB-0	(P, X) 4-BE-7., ., SIG	3. 0000E+09	3. 0000E+10	BNL	68 *	3points
98341. 009	PB-0	(P, X) 11-NA-22., ., SIG	3. 0000E+09	3. 0000E+10	BNL	68 *	3points
98341. 009	PB-0	(P, X) 11-NA-24., ., SIG	3. 0000E+09	3. 0000E+10	BNL	68 *	3points
98360. 002	PB-0	(P, X) ELEM/MASS, CUM, SIG	3. 9000E+08	3. 0000E+09	BNL	56 *	6points
98360. 003	PB-0	(P, X) ELEM/MASS, ., SIG	3. 9000E+08	3. 0000E+09	BNL	56 *	6points
98360. 004	PB-0	(P, X) 56-BA-133-M, CUM, SIG+Ba135m6. 0000E+08		3. 0000E+09	BNL	56 *	5points
98361. 002	PB-0	(P, X) ELEM/MASS, CUM, SIG	3. 0000E+09	3. 0000E+09	BNL	60 *	5isotopes
98361. 003	PB-0	(P, X) ELEM/MASS, ., SIG	3. 0000E+09	3. 0000E+09	BNL	60 *	5isotopes
98361. 004	PB-0	(P, X) 21-SC-42., ., SIG+(p, x) Sc44	3. 0000E+09	3. 0000E+09	BNL	60	0. 6±0. 3mb
C0362. 006	PB-0	(P, X) ELEM/MASS, CUM, SIG	3. 0000E+09	3. 0000E+09	PUR	66 *	14isotopes
C0362. 007	PB-0	(P, X) ELEM/MASS, CUM, SIG	2. 8000E+10	2. 8000E+10	PUR	66 *	14isotopes
C0362. 008	PB-0	(P, X) ELEM/MASS, ., SIG	3. 0000E+09	3. 0000E+09	PUR	66 *	2isotopes
C0362. 009	PB-0	(P, X) ELEM/MASS, ., SIG	2. 8000E+10	2. 8000E+10	PUR	66 *	2isotopes
o0008. 005	PB-208	(P, F), ., SIG	1. 0000E+09	1. 0000E+09	LIN	81	132±13. 142±14mb
o0037. 005	PB-0	(P, F), BIN, SIG	3. 0000E+08	3. 0000E+08	STR	81	241±40mb
o0037. 005	PB-0	(P, F), TER, SIG	3. 0000E+08	3. 0000E+08	STR	81	10. 8mb
o0048. 004	PB-206	(P, N), 83-B1-206, PAR, SIG	2. 5800E+07	2. 5800E+07	CLU	74	7. 2±1. 0mb
o0048. 005	PB-207	(P, N), 83-B1-207, PAR, SIG	2. 5800E+07	2. 5800E+07	CLU	74	10. 1±1. 6mb
o0048. 006	PB-208	(P, N), 83-B1-208, PAR, SIG	2. 5800E+07	2. 5800E+07	CLU	74	9. 6±1. 2mb
o0081. 007	PB-208	(P, NON), ., SIG total reaction	3. 0000E+07	6. 0800E+07	ORL	71 *	4points
o0149. 005	PB-208	(P, X) 1-H-1., ., SIG	1. 6400E+08	1. 6400E+08	NWU	82	1. 101±0. 165b
o0149. 009	PB-208	(P, X) 1-H-2., ., SIG	1. 6400E+08	1. 6400E+08	NWU	82	133. 7±20. 1mb
o0149. 013	PB-208	(P, X) 1-H-3., ., SIG	1. 6400E+08	1. 6400E+08	NWU	82	39. 6±5. 94mb
o0149. 017	PB-208	(P, X) 2-HE-3., ., SIG	1. 6400E+08	1. 6400E+08	NWU	82	6. 5±0. 975mb
o0149. 021	PB-208	(P, X) 2-HE-4., ., SIG	1. 6400E+08	1. 6400E+08	NWU	82	67. 3±10. 1mb
o0150. 008	PB-208	(P, NON), ., SIG total reaction	2. 8500E+07	2. 8500E+07	HAR	64	1. 865±0. 098b
o0154. 022	PB-208	(P, X) 1-H-3., ., SIG	1. 1170E+08	9. 6100E+09	RI	76 *	15points
o0156. 021	PB-0	(P, PIP+X), SEQ, SIG	5. 8500E+08	5. 8500E+08	VIL	80	86±11mb
o0156. 021	PB-0	(P, PIN+X), SEQ, SIG	5. 8500E+08	5. 8500E+08	VIL	80	41. 5±5. 1mb
o0178. 005	PB-208	(P, N), 83-B1-208, PAR, SIG	2. 5000E+07	4. 5000E+07	MSU	75 *	3points
o0213. 010	PB-0	(P, TOT), ., SIG	2. 2600E+08	5. 4900E+08	CER	72 *	4points
o0221. 003	PB-0	(P, F), BIN, SIG	6. 0000E+08	2. 3000E+10	STR	71 *	5points
o0221. 005	PB-0	(P, F), TER, SIG	6. 0000E+08	2. 3000E+10	STR	71 *	5points
65023. 005	PB-0	(P, N), ., SIG	7. 6000E+06	1. 3900E+07	BRK	67 *	14points
65023. 010	PB-0	(P, 2N), ., SIG	1. 1500E+07	1. 3900E+07	BRK	67 *	6points

## 参考文献

- [1] Koning A.J.: "Review of High Energy Data and Model Codes for Accelerator-based Transmutation", report ECN-C93-005 (1993).
- [2] Barashenkov B.C.: "Cross Section of Interactions of Particles and Nuclei with Nuclei" JINR, Dubna (1983).
- [3] Finlay R.W., et al.: Phys. Rev., C47(1), 237 (1993).
- [4] Dietrich F.S., et al.: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Sci. and Technol, 1997 Trieste, pp.402 (1998).
- [5] Schimmering W., et al.: Phys. Rev., C7, 248 (1973).
- [6] Larson D.C.: BNL-NCS-51245, pp.277 (1980).
- [7] Franz J., et al.: Nucl. Phys., A490, 667 (1988).
- [8] Hjort E.L., et al.: Phys. Rev., C53(1), 237 (1996).
- [9] Tang H., et al.: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Sci. and Technol., 1997 Trieste, pp.429 (1998).
- [10] Olsson, N., et al.: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Sci. and Technol., 1997 Trieste, pp.416 (1998).
- [11] Osborn J.H., JR: Dissertation, Univ. of California, Davis (1995).
- [12] Hitzenberger H., et al.: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Sci. and Technol., Gatlinburg 1994, pp.367 (1994).
- [13] Vonach H., et al.: Phys. Rev., C50(4), 1952 (1994).
- [14] Zanelli C.I., et al.: BNL-NCS-51245, pp.313 (1980).
- [15] Olsson N., et al.: Nucl. Phys., 472, 237 (1987).
- [16] idem., 509, 161 (1990).
- [17] idem., 513, 205 (1990).
- [18] Marcinkowski A., et al.: Nucl. Sci. Eng., 83, 13 (1983).
- [19] Hansen L.F., et al.: Phys. Rev., C38, 525 (1988).
- [20] Finlay R.W. and Rapaport J.: BNL-NCS-51245, pp.375 (1980).
- [21] Taylor R.C., et al.: Nucl. Phys., 401, 237 (1983).
- [22] Meigooni A.S., et al.: Nucl. Phys., 445, 304 (1985).
- [23] Sadowski E.T., et al.: Phys. Rev., C42, 190 (1990).
- [24] Yamanouti Y.: Nucl. Phys., A283, 23 (1977).
- [25] Yamanouti Y., et al.: JAERI-M 89-119 (1989).
- [26] Niizeki T., et al.: Nucl. Instrum. Methods, 287, 455 (1990).
- [27] De Vito: Dissertation, Michigan State Univ., (1979).
- [28] Hjort E.L., et al.: Phys. Rev., C50(1), 275 (1994).
- [29] Salman G.L.: Nucl. Phys., 21, 15 (1960).
- [30] Sabramanian T.S., et al.: Phys. Rev., C28(2), 521 (1983).

- [31] Slypen I., et al.: Phys. Rev., C53(3), 1310 (1996).
- [32] Haight R.C.: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Sci. and Technol., 1997 Trieste, pp.500 (1998).
- [33] Nauchi Y., et al.: ibid., pp. 613 (1998).
- [34] Sabramanian T.S., et al.: Phys. Rev., C34(5), 1580 (1986).
- [35] Brady F.P., et al.: Phys. Rev., C43, 2284 (1991).
- [36] Fink G., et al.: Nucl. Phys., A518, 561 (1990).
- [37] Haight R.C., et al.: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Sci. and Technol., 1997 Trieste, pp.603 (1998).
- [38] Slypen I., Corcalciuc V.C. and Meulders J.P.: Phys. Rev., C51(3), 1304 (1995).
- [39] Meulders J.P., et al.: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Sci. and Technol., 1997 Trieste, pp.508 (1998).
- [40] Olsson N., et al.: Phys. Rev., C45(2), R496 (1992), and Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Sci. and Technol., 1997 Trieste, pp.1230 (1998).
- [41] Rigbom A., et al.: Nucl. Phys., A617, 316 (1997).
- [42] Jackson K.P., et al.: Phys. Lett., B201, 25 (1988).
- [43] Northcliffe, L.C., et al.: Phys. Rev., C47, 36 (1993).
- [44] Riley P.J., et al.: Phys. Rev., C17, 1881 (1978).
- [45] Neumann S., et al.: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Sci. and Technol., 1997 Trieste, pp.379 (1998).
- [46] Kim E., et al.: Nucl. Sci. Eng., 129, 1 (1998).
- [47] Nakamura T., et al.: J. Atomic Energy Society, 40(1), 15 (1998) (in Japanese).
- [48] Uwamino Y., et al.: J. Nucl. Sci. Technol., 31(1), 1 (1994).
- [49] Conde H., et al.: Proc. Int. Conf. Accelerator-Driven Transmutation Technol. and Application (1995 Kalamar).
- [50] Ramakrishnan P., et al.: Nucl. Sci. Eng., 98, 348 (1988).
- [51] Tanabe E., et al.: J. Nucl. Sci. Technol., 31(11), 1133 (1994).
- [52] Lisowski P.W., et al.: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Sci. and Technol., 1988 Mito, pp.91 (1988).
- [53] Fomichev A.V., et al.: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Sci. and Technol., 1997 Trieste, pp.1522 (1998).
- [54] Eismont V.P., et al.: Phys. Rev., C53(6), 2911 (1996).
- [55] Neuhauser W.D., et al.: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Sci. and Technol., 1997 Trieste, pp.1236 (1998).
- [56] 例えば、Fukahori T.: Proc. of the 1990 Symposium on Nuclear Data, Nov. 29-30, 1990, JAERI, Tokai, Japan, JAERI-M 91-032, pp.106 (1991).
- [57] Bauhoff W.: Atomic Data and Nuclear Data Tables, 35, 430 (1986).

- [58] Sihver L., et al.: Phys. Rev., C47, 1225 (1993).
- [59] Wellisch H.P. and Axen D.: Phys. Rev., C54, 1329 (1996).
- [60] Hama S., et al.: Phys. Rev., C41, 2737 (1990).
- [61] Cooper E.D., et al.: Phys. Rev., C47, 297 (1993).
- [62] Proceedings of a Specialists' Meeting on Nucleon-Nucleus Optical Model Up to 200 MeV, 13-15 Nov., 1996, Bruyères-le-Châtel, France, NEA Nuclear Science Committee (1997).
- [63] Swenson L.W., et al.: Phys. Rev., C40, 246 (1989).
- [64] Häusser O., et al.: Phys. Rev., C43, 230 (1991).
- [65] Wakasa T., et al.: Phys. Rev., C55, 2909 (1997).
- [66] 山野直樹、私信 (1998).
- [67] Michel R., et al.: Nucl. Instr. & Meth., B103, 183 (1995).
- [68] Gloris M., et al.: Nucl. Instr. & Meth., B113, 429 (1996).
- [69] Schiek Th. et al.: Nucl. Instr. & Meth., B114, 91 (1996).

### 3. ベンチマーク実験に関する調査・収集

#### 3.1 ベンチマーク実験に関する調査・収集の現状

20 MeV 以上の高エネルギー領域における遮蔽実験データの調査・収集は、日本原子力学会放射線挙動研究専門委員会（現、遮蔽設計法高度化研究専門委員会）及び原研炉物理研究委員会遮蔽専門部会（現、高エネルギー粒子工学専門部会）で、1980 年代前半に開始され、参考文献集の発行や、ベンチマーク実験解析作業結果等が SATIF(Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities) 会合等で報告されている[1-9]。また、米国オークリッジ国立研究所の RSICC(Radiation Safety Information Computational Center) においては、データの数は限られるが、電子媒体のデータベースとしてベンチマーク実験が纏められている[10]。これらに収集されているものは、加速器及びターゲット関連施設設計を目的とした放射線輸送計算手法及び関連データの統合的な精度評価を主眼としたものである。

#### 3.2 ベンチマーク実験の分類とその定義

ベンチマーク実験とは、その目的が必ず設計計算手法の精度検証であるから、先ず簡単に 20 MeV 以上のエネルギー領域における計算手法の現状に触れ、それに基づいてベンチマーク実験を分類する。

このエネルギー領域では、加速器施設におけるターゲットや遮蔽設計などにおいて、加速器で加速された電子、陽子及びイオンなどの一次粒子がターゲットなどに当たり、その反応により生じる二次粒子の挙動を計算することが、主に行われる。これらの計算においては、モンテカルロ法を用いた高エネルギー粒子輸送計算コードや簡易計算法が用いられるが、これらの計算手法では、一次粒子（主に荷電粒子）からその計算を開始できるものが大半である。これは、従来の 20 MeV 以下の領域における原子炉や核融合炉のような中性子源を対象とした計算において、最初から中性子の挙動を計算する設計手法と大いに異なるところである。しかし、実際に厚い遮蔽体の背後や敷地境界における線量当量を決めるのは、遮蔽体を透過した高エネルギー中性子により生成される 100 MeV 以下の中性子であり、これらはモンテカルロ法による計算手法では計算が困難な場合が多い。そのため、中性子と荷電粒子の交換反応があまり結果に影響を及ぼさないエネルギー領域や荷電粒子が十分減衰する厚い遮蔽体内では、従来 20 MeV 以下の低エネルギー領域で用いられてきた Sn 法などによる解析的な手法による中性子のみの計算により、設計される方法も用いられる。この場合、中性子発生源を高エネルギー粒子輸送計算法若しくは systematics によって別途評価し、この計算の線源条件として用いる。

今回の積分テストの対象となる核データについても、従来の 20 MeV 以下の低エネルギーでの使用方法とは異なる。高エネルギー粒子輸送計算コードでは、GeV 以

以下のエネルギー領域で、中性子の全断面積及び弾性散乱断面積に関してのみ核データが使用されている。また、簡易計算式では、パラメータとして減弱距離が用いられ、核データが直接用いられるわけではない。しかし、従来 20 MeV 以下の低エネルギー領域で用いられてきた Sn 法などによる解析的な手法を数百 MeV までのエネルギー領域に拡張して用いる場合に、従来行われてきたように、核データを処理した中性子群定数が使用される。

これまでに集められている実験を、粒子輸送計算手法を検証する立場から分類すると、大きく以下のように分けられる。

#### A. 線源条件に関する実験

Thick Target Neutron Yield (TTY)

#### B. 遮蔽実験

ビームダンプ実験

深層透過実験

側壁遮蔽体実験

ストリーミング実験

スカイシャイン実験

線源条件に関する実験は、荷電粒子入射により体系から放出される中性子を測定したもので、体系が単純で、実験条件が明確である。この主なものは、TTY の測定実験である。TTY の中には、二重微分断面積の測定と同様に角度・エネルギー微分された中性子スペクトルを TOF 法やカウンターテレスコープにより測定するものと、体系から放出される中性子全てを体系全体を包む放射化法やマンガンバス法などで積分的に測定するものがある。この TTY の測定に用いられる体系は、入射粒子がほぼ完全に止まる程度の長さと半径を持ったものである。GeV 以下の領域では、他の遮蔽実験体系と比較して、この体系はそれ程大きなものにはならない。この実験は中性子輸送計算を行うための線源として用いるために、その systematics の導出が行われている。また、この実験体系では、一次粒子の輸送現象と中性子生成断面積の検証が行えるため、高エネルギー粒子輸送計算手法の検証にも用いられる。しかし、GeV エネルギー以上の領域では、体系内で粒子生成力スケードの発達に必要な十分な大きさが体系に必要となり、次に述べるビームダンプ実験の体系にあまり変わらない大きさとなる。

一方、遮蔽実験は、既存の加速器施設を用いたり、実際の遮蔽体に近いものを模擬して行われるため、体系が非常に大きく、複雑であり、線源条件を明確にし難い。そのため、この実験の内、ビームダンプ実験と深層透過実験を除いては、ほとんどの場合が核データの積分テストには適切ではないため、ここでは述べない。ビームダンプ実験は、実際のビームダンプ若しくはターゲットを模擬した体系を用いた実験である。この場合、ビームダンプ本来の用途からして、体系は TTY に比して大きなものとなるが、单一物質で構成された比較的単純な体系で行われている実験があ

り、線源条件も TTY と同様に明確にし易い。しかし、ビームダンプは非常に狭い場所に設置されていることが多いため、体系内部及び表面における中性子束を放射化法により測定しているものが多い。この体系では、一次及び二次粒子の輸送現象と中性子生成断面積の検証が行えるため、高エネルギー粒子輸送計算手法の検証に用いられる。深層透過実験は、厚い遮蔽体を透過した中性子スペクトルなどを測定したものである。この実験においては、陽子を体系に入射した実験はなく、中性子線源によるもののみである。この場合、中性子線源情報も明らかにされているので、高エネルギー粒子輸送計算手法の検証のみならず、20 MeV 以下の低エネルギー領域で用いられてきた Sn 法やモンテカルロ法などによる中性子のみの計算手法の妥当性とそれに用いる核データの検証などにも用いられる。

ベンチマーク実験の必要条件としては、線源条件、幾何条件が明確であること、測定条件が明示されていることがあげられる。これに加えてベンチマーク問題を選択する際の条件の一つに、ベンチマーク実験の質の問題がある。その要素としては、測定値が絶対値で得られていること、複数の測定法で測定されていること、測定値の次元が高いことなどがある。ここで言う測定値の次元とは、位置だけの関数である反応率、線量  $R(r)$  などを一次元とし、エネルギースペクトル  $R(r, E_n)$  などを二次元、角度依存エネルギースペクトル  $R(r, E_n, \theta)$  を三次元などと定義する。この他に、同時に測定している粒子の種類、時間依存性などもこの次元を考慮する上で、重要な要素となる。但し、次元が上がるにつれて、測定が難しくなり、多くの制約があるため、系統的な誤差が大きくなりやすい。

このベンチマーク実験の質を考慮すると、先のベンチマーク実験の分類の中で、中性子スペクトルを測定している深層透過実験と TTY 測定が最もベンチマーク問題として適していることになる。次元としては、角度依存スペクトルを測定している TTY の方がベンチマーク実験として質が高いことになるが、今回の積分テストにおいては、計算手法において核データに対する依存度が高い、中性子線源を用いた深層透過実験がより適していることになる。また、一次元のデータではあるが、体系内の情報を与えるという点で、体系内の反応率分布を測定しているビームダンプ実験は、質が高い。実際、ターゲットの設計などでは、ターゲット内部での核発熱分布など計算するため、これに関連する核データが直接検証できる積分データは重要である。更に、この測定は、解析における境界条件を設定し易いという点においても、ベンチマーク問題に適している。深層透過実験の中には、線量当量を測定しているものもあるが、測定条件、即ち検出器の応答関数が明確でないものが多く、データの信頼性が低い。

### 3.3 ベンチマーク実験の調査・収集の基本方針

これまで行われてきたベンチマーク実験の調査・収集作業は、必ずしも核データそのものの評価に適したもののみが集められているわけではない。そこで、基本的

にはこれらを参考と共に、最近の文献及びデータベースから、ベンチマーク実験を改めて調査した。その後、核データ積分テストに適したもの再整理した。  
具体的な収集作業については、この状況を踏まえて、以下の条件を設定した。

1. JENDL High Energy File(JENDL-HF) は数 GeV 以下予定であることから、20 MeV から数 GeV のデータに絞る。
2. 陽子入射による TTY は、核データの積分テストにも適したものである事から、本作業には TTY データも含める。
3. 1993 年以降を調査する。それ以前の文献は既に調査済みである。

調査対象文献としては、下記一覧について行い、文献のまとめ方は、参考文献[9]に従った。

#### 文献一覧

##### Journal

- (1) Int. J. Appl. Radiat. Isot., (2) Health Phys., (3) Med. Physics., (4) Nucl. Instrum. Methods-A, B, (5) Nucl. Phys. -A, (6) Nucl. Sci. Eng., (7) Particle Accelerators, (8) Phys. Med. Biol., (9) Phys. Rev. C, (10) Radiat. Proc. Dosim., (11) IEEE Trans. Nucl. Sci.

##### Proceedings

- (1) Proc. ICANS, (2) Proc. ICRS8, (3) Proc. SARE Mtg., (4) Proc. SATIF Mtg.

##### その他

##### Reports published by Institutes

##### データベース

- (1) EXFOR, (2) IAEA Data Base, (3) SINBAD

### 3.4 ベンチマーク実験の調査結果

今回の調査による参考文献及びその要約を Table 3.1 に示す。これらは、上記文献から得られたものであるが、EXFOR 等のデータベースで該当するものはなかった。

上記の調査及び、過去の調査結果から、特に今回の積分テストに使用できると思われる実験を Table 3.2 に纏めた。ここでは、先にも述べたように、直接的に核データ評価に寄与し易いとの観点から、中性子スペクトルを測定している実験を中心に選択した。スペクトル測定のデータを 250 MeV で分けてあるのは、高エネルギーファイルの作成精度が、このエネルギーで分類されると予想されるからである。実際、LANL ライブラリーは、150 MeV までのエネルギー範囲で作成されている[11]。また、最近計画されている医療用加速器では、陽子エネルギーの上限値として、250 MeV 近辺を予定している。実際、このエネルギー以下の領域では、厚い遮蔽体などの中性子透過計算において、中性子のみの計算でも、十分な精度で、遮蔽体背後の線量当量などを計算できる。そのため、従来の 20 MeV 以下のエネルギー領域で用いられてきた Sn 法やモンテカルロ法等の設計手法が用いられると思われる所以、250

MeV 以下の精度の良い中性子ライブラリーが求められている。

また、放射化箔法による実験を分けて、Table 3.2 に含めた。放射化箔法による測定データの精度は、それが一次元の量であるため、スペクトル測定によるデータより測定値の系統誤差は少ない場合が多い。そのため、放射化断面積の精度検証も含めた核データの検証に大いに寄与しうると思われる。しかし、現状では、放射化断面積の不確定性が入るため、高エネルギー領域における放射化断面積が確定されるまで、精度が落ちることが懸念される。

### 3.5 調査結果におけるベンチマーク実験の現状

Table 3.2 は、核データ作成における要求精度及び核データの検証精度で分類したが、それはまた図らずも先に述べたベンチマーク実験の分類と同様の分類結果を与えていた。即ち、1 に分類されているものは、1 例を除いて、全て遮蔽体透過実験であり、2 は TTY、3 はビームダンプ実験である。以下に各実験の現状を記す。

#### 3.5.1 遮蔽体透過実験

この表に記載されている遮蔽体透過実験における主な特徴は、実験が行われるにつれて、実験の体系及び測定量が徐々に変化していることと、全て数十 MeV 領域で行われていることである。

INS で行われた実験では、遮蔽体直前におかれた白色中性子源を用いて実験が行われている。この実験体系でも十分に中性子核データの評価は可能であるが、後に述べる実験に比べると、評価に対する情報量は少ない。それは、中性子源が検出器と同じ実験室におかれているため、体系外から回り込むバックグラウンド中性子のために、遮蔽体をあまり厚くできないことと、入射陽子エネルギーがそれ程高くないために、20 MeV 以上の中性子の割合が少ないためである。次に行われた阪大 AVF サイクロotron の実験では、ターゲットと遮蔽体の間にコリメーターが設置され、バックグラウンド中性子の影響が減り、より解析し易い線源条件となっているが、やはり白色中性子源が用いられているため、透過スペクトルは、高エネルギー中性子の減速によるものと、源中性子の透過成分の重ね合わせとなっている。東北大 CYRIC で行われた実験では、 $^7\text{Li}(p,n)$  反応による準単色中性子源を用いることにより、高エネルギー中性子の遮蔽体透過により形成される中性子スペクトルの遮蔽体厚さによる変化が観測されている。原研 TIARA で行われた実験では、コリメートされた $^7\text{Li}(p,n)$  反応による準単色中性子源を用いることにより、ビーム軸と軸以外の透過スペクトルを測定し、弾性散乱の角分布に関する検証も可能としている。

この実験が、数百 MeV 領域で実験が行われていないのは、主に次の理由による。一つは、このエネルギー領域で、スペクトル測定を行う遮蔽実験に適した中性子場が無いことと、今一つはスペクトル測定法の問題である。TIARA のように理想的な遮蔽実験を行うためには、線源と遮蔽体を分ける遮蔽壁及びコリメーターが不可欠

であり、エネルギーが上がると共にその遮蔽壁の厚さは増す。現在、210 MeV までの準単色中性子場は、理研のリングサイクロトンにあるが、線源及びビームダンプが同じ室内にあるため、厚い遮蔽体を用いた遮蔽実験は困難と思われる。また、Li(p, n) 反応が、その反応断面積が大きいために、数十 MeV 領域の準単色中性子源として通常用いられているが、エネルギーが上がると共に、単色ピーク成分の割合がブレイクアップ反応による連続部分に比して減少する。測定法については、液体シンチレーション検出器を用いた unfolding 法が、この種の実験に用いられていることによる。この方法では中性子による反跳陽子を検出器内で全て止める必要がある。TIARA では 5' x5' の円筒形状ものを用いているが、この大きさでは、130 MeV 程度が限界である。これより大きくする場合、位置分解能の低下は避けられず、またビーム径を大きくする必要がある。放射化箔を用いる方法もあるが、感度が低いことから、より強力な中性子源を必要とする。

### 3.5.2 TTY

TTY は Table 3.2 に示した実験の他、Fig. 3.1 に示すようにかなり幅の広いエネルギー及びターゲット核種範囲に対して測定が行われている。その理由は、TTY の測定においては、陽子入射であることと、主に飛行時間法が測定に用いられているために、上記のような線源や測定法における制約がないことによる。TTY の測定法として飛行時間法を用いることができるのは、先にも述べたように、体系が遮蔽実験に比して小さいことから、遮蔽実験でこの測定法を用いる際に問題となる mean emission time の補正が必要ないことによる。但し、GeV 以上の領域でエネルギーが上がり、体系が大きくなった場合に、低エネルギー部の測定値においてこの補正が必要ないかどうか、また、体系全体からの中性子を測定しているかについて確認する必要がある。また、数百 MeV のエネルギー領域における液体シンチレーション検出器の検出効率については、未だ議論があり、実験データの精度に関して再調査を要する。

また、この測定は、陽子入射による中性子生成二重微分断面積測定に比して、測定場所の設定が容易であることも、数多く行われている理由の一つである。即ち、断面積測定では、入射陽子のエネルギーロスが十分小さい程度のサンプルの大きさであり、大半の陽子はサンプルを透過する。そのため、ビームダンプが別に必要となり、そこからのバックグラウンド中性子を低減させなければならない。しかし、TTY の測定の場合には、ターゲット自身がビームダンプであり、その必要はない。このことから、TTY は、中性子生成二重微分断面積測定が行われていないエネルギー・核種領域において、断面積測定データの不足を補う形で使用できると思われる。但し、TTY は、一次粒子である陽子の輸送と中性子生成反応断面積の組み合わせであることから、核データの評価に際しては、高エネルギー粒子輸送計算コードを核データを用いるように修正するか、新たに中性子生成断面積から TTY を作成するコー

ドが必要である。

陽子入射による TTY のデータは、広範囲のエネルギー及びターゲット核種について測定されているが、積分テストに必要な全ての範囲を網羅していない。このため、TTY の systematics は、実験データを補填する意味で必要である。また、遮蔽設計の実用的な観点において、TTY が従来使用してきた中性子輸送計算コードの線源として使用できることから、TTY の systematics は有効である。先にも述べたように、特に、250 MeV 以下の領域における医療用加速器施設の設計において重要である。また、それ以上のエネルギー領域においても、例えば、数 GeV の陽子を用いる強力中性子源を囲む厚い遮蔽体の設計では、数百 MeV 以下の中性子が線量計算において支配的になり、そこではやはり中性子ライブラリーを用いた中性子輸送計算が適用できることから、TTY の systematics が必要とされる。

### 3.5.3 ビームダンプ実験

ここでは、従来からの言い方に従って、ビームダンプ実験としたが、これは、冷中性子源等に用いられるターゲット実験と呼ばれているものを含んでいる。実際、ここに収集された実験には、その両者がある。このような実験では、体系外に漏洩する粒子線分布のみならず、放射線安全や熱設計の観点から放射化量や発熱分布の評価に使用できるデータも求められる。そのため、これらの実験では、体系表面に加えて、体系内における中性子反応率が測定されている。この反応率は、主に中性子束を求めるために測定されているが、これは実験に使用する放射化箔の放射化断面積の精度に非常に大きく依存する。ここで、測定された反応率は観測されるべき中性子束と放射化断面積を掛けて、エネルギー積分したものであるから、広いエネルギー領域における放射化断面積の励起函数が精度よく評価されていることが要求される。

通常、この実験においては、スペクトルインデックスとするために、しきい値の異なる複数の放射化箔が用いられるが、この体系の中性子スペクトルは滑らかな分布を持つため、何れかの反応率が特異な値を持った場合には、その放射化断面積に問題があることを知ることができる。これは、一種の放射化断面積の積分テストである。この考え方をさらに進めて、数百 MeV において準単色中性子場があまり無いことを考え合わせると、スペクトルの良く知られた高エネルギー白色中性子場における、放射化断面積の積分テストは比較的容易に行え、有効であると思われる。

この実験では、現在、高エネルギー粒子輸送計算コードのみが精度検証の対象となっている。しかし、このコードに全断面積や弾性散乱断面積が既に組み込まれているように、このコードの中性子及び陽子核反応計算部分に核データを部分的に組み込み、核データを検証することは可能である。それにより、コード自体を部分的に精度検証することにもなる。但し、これを行うには相当の労力と時間を要するため、核データ組み込み後の計算コードの実用性まで含めた検討が必要と思われる。

### 3.6 まとめと今後の課題

実際、核データの積分テストを行うために、次のステップとしてこれらの実験の数値データ収集を行う必要がある。その際、どのデータが必要であり、どのデータが積分テストとして使えそうか、取捨選択を行わなければならない。この作業は、相当の時間を要するので、次のワーキンググループに託すこととしたい。また、核データ評価にフィードバックするために、このベンチマーク問題の解析を行うグループの結成も、今後考えていくべきことである。

これらの調査結果から、課題として残るのは、以下である。

- 1) Table 3.2 のベンチマーク実験の約半数は、プロシーディングスや未発表のものである。具体的に収集作業を行うに当たっては、原著者に早期の論文作成を促すか、その使用について個別に問い合わせる必要がある。
- 2) 今回、EXFOR 等データベースには該当するベンチマーク実験がなかったため、データベースから数値データが得られていない。データベースの拡充が望まれるところである。実際問題として、既存の遮蔽実験データベースである SINBAD 等に協力することにより、データベースの拡充を図ることは、労力の点からも得策かもしれない。
- 3) 100 MeV 以上のスペクトル測定は、全て TTY であるが、その解析には断面積から TTY を作成するための計算コードが必要である。その解析法は、モンテカルロ法、解析的手法の如何に関わらず、精度検証がなされていなければならない。
- 4) Table 3.2 の実験には比較的近年に行われたものがあり、施設が現存しているところもある。新たなベンチマーク実験を行うことを促すことも可能と思われる。但し、そのためにはベンチマーク解析が必要な核種、エネルギー、反応等を特定する必要がある。

Table 3.1 ベンチマーク実験調査結果

<b>DANIEL 92</b>	
" Neutron Production in Lead Target by High-Energy Light-Mass Heavy Ions,"	
A. V. Daniel et al.	
JINR-1-92-174 (1992)	
1) Accelerator:	synchrophasotron , JINR
2) Projectile:	p(2.0, 2.55 GeV)
3) Target(thickness):	Be, Al, Cu, Cd, Pb
4) Shielding Material:	
5) Geometry:	Cylinder
6) Experimental Method:	TOF
7) Calculation:	SITHA
8) Measured Quantities:	Neutron Spectra
<b>SIEBERS 93</b>	
"Shielding Measurements for 230-MeV Protons"	
J. V. Siebers et al.	
Nucl. Sci. Eng., 115, 13-23(1993)	
1) Accelerator:	Fermi National Accelerator Lab. --> Loma Linda Univ.
2) Projectile:	p(230 MeV)
3) Target(thickness):	Fe
4) Shielding Material:	Concrete
5) Geometry:	-
6) Experimental Method:	Tissue Equivalent proportional Counters
7) Calculation:	HETC-ANISN
8) Measured Quantities:	Dose-Equivalent, LET spectrum
<b>ISHIKAWA 94</b>	
"Neutron Penetration Through Iron and Concrete Shields with the Use of 22.0- and 32.5-MeV Quasi-Monoenergetic Sources"	
T. Ishikawa, Y. Miyama and T. Nakamura	
Nucl. Sci. Eng., 116, 278-290(1994)	
1) Accelerator:	Cyclotron
2) Projectile:	p(25 MeV, 35 MeV)
3) Target(thickness):	Li(2 mm)
4) Shielding Material:	Iron(~40 cm), Concrete(~100 cm)
5) Geometry:	Slab
6) Experimental Method:	NE213, Bonner Ball, PRPC
7) Calculation:	MORSE-CG
8) Measured Quantities:	Neutron Spectra
<b>MEIGO 95</b>	
"Measurements and Spallation Neutrons from a Thick Lead Target Bombarded with 0.5 and 1.5 GeV Protons "	
S. Meigo et. al.	
Proc. of ICANS-XIII p.442-453 (1995)	

1) Accelerator:	12 GeV synchrotron, KEK
2) Projectile:	p(0.5, 1.5 GeV)
3) Target(thickness):	Pb(15 x 15 x 20cm)
4) Shielding Material:	
5) Geometry:	Rectangular
6) Experimental Method:	TOF
7) Calculation:	NMTC/JAERI+MCNP-4A
8) Measured Quantities:	Neutron Spectra
<b>SHIN 95</b>	
"Thick-Target Neutron Yield for Charged Particles"	
K. Shin, K. Miyahara, E. Tanabe and Y. Uwamino	
Nucl. Sci. Eng., 120, 40-54(1995)	
1) Accelerator:	SF Cyclotron in INS, University of Tokyo
2) Projectile:	C+(75 MeV, 120 MeV), O+(153 MeV), alpha(40 MeV)
3) Target(thickness):	C, Al, Cu, Pb
4) Shielding Material:	-
5) Geometry:	-
6) Experimental Method:	NE213 unfolding
7) Calculation:	-
8) Measured Quantities:	Differential Neutron Yields
<b>YUDELEV 95</b>	
"Shielding and Radiation Safety around a Superconducting Cyclotron Neutron Therapy Facility"	
M. Yudelev, R. L. Maughan and K. Dunlap	
Health Physics, 69(1), 130-136(1995)	
1) Accelerator :	Superconducting Cyclotron at Michigan State University
2) Projectiles :	48.5 MeV deuterons
3) Target :	Internal beryllium target
4) Shielding material :	Concrete( average water content of 5.6% by analysis), 75-cm-thick steel beam stop
5) Geometry :	Therapy facility (wall, Door and Duct)
6) Measured quantities :	Dose equivalent rate outside the shielding wall using a BF3 moderated neutron monitor paired with a miniature Geiger-Muller counter, to separate the neutron and gamma components
7) Calculation :	Based on NCRP 51(1977)
<b>BOURGOIS 96</b>	
"Dose Equivalent Measurements at 2.7 GeV Proton Accelerator and Comparison with the Moyer Model"	
L. Bourgois, D. Delacroix, L. Ferrex and L. Masson	
Health Physics, 70(1), 36-40(1995)	

1) Accelerator :	Synchrocyclotron in Saclay-Nuclear-Research-Center
2) Projectiles :	2.7 GeV proton
3) Target :	Cylindrical iron(density: 7.85 g.cm <sup>-3</sup> ) target, 8 cm in diameter with a thickness varying between 1 and 30 cm
4) Shielding material :	Ordinary concrete( density: 2.3 g.cm <sup>-3</sup> ) shielding with a thickness varying between 3.6 and 4.2 cm
5) Geometry :	Measurement were made 3 different values of angle lying between 50 deg. and 100 deg.
6) Measured quantities :	Dose equivalent rate outside the shielding wall using a Anderson and Bran type, Alnor, BF3 REM counter
7) Calculation :	Moyer model

**NAKAO 96**

"Transmission Through Shields of Quasi-Monoenergetic Neutrons Generated by 43- and 68-MeV Protons - I : Concrete Shielding Experiment and Calculation for Practical Application"

N. Nakao et. al.

Nucl. Sci. Eng., 124, 228-242(1996)

1) Accelerator:	AVF Cyclotron at TIARA, JAERI
2) Projectile:	p(43, 68 MeV)
3) Target(thickness):	Li(3.6, 5.2 mm)
4) Shielding Material:	Concrete(25~200 cm)
5) Geometry:	Slab
6) Experimental Method:	Proton Recoil Counter Telescope, TOF, BC501A, Bonner Ball
7) Calculation:	MORSE-CG, DOT3.5, HETC-KFA2
8) Measured Quantities:	Neutron Spectra

**NAKASHIMA 96**

"Transmission Through Shields of Quasi-Monoenergetic Neutrons Generated by 43- and 68-MeV Protons - II : Iron Shielding Experiment and Analysis for Investigating Calculational Method and Cross Section Data"

H. Nakashima et. al.

Nucl. Sci. Eng., 124, 228-242(1996)

1) Accelerator:	AVF Cyclotron at TIARA, JAERI
2) Projectile:	p(43, 68 MeV)
3) Target(thickness):	Li(3.6, 5.2 mm)
4) Shielding Material:	Fe(10~130 cm)
5) Geometry:	Slab
6) Experimental Method:	Proton Recoil Counter Telescope, TOF, BC501A, Bonner Ball
7) Calculation:	MORSE-CG, DOT3.5, HETC-KFA2
8) Measured Quantities:	Neutron Spectra

**NAKAO 97**

"Measurements and Calculations of Neutron Energy Spectra behind Polyethylene Shields Bombarded by 40- and 65-MeV Quasi-Monoenergetic Neutron Source"

N. Nakao, et. al.

J. Nucl. Sci. Technol., 34(4), 348-359 (1997)

1) Accelerator:	AVF Cyclotron at TIARA, JAERI
2) Projectile:	p(43, 68 MeV)
3) Target(thickness):	Li(3.6, 5.2 mm)
4) Shielding Material:	Polyethylene (30.5~183 cm)
5) Geometry:	Slab
6) Experimental Method:	TOF, BC501A, Bonner Ball
7) Calculation:	MORSE-CG
8) Measured Quantities:	Neutron Spectra

**TAKADA 97A**

"Reaction Rate Distribution Measurement and Analysis for 0.895 and 1.21 GeV Proton Bombardment on Thick Tungsten Target"

H. Takada et. al.

Proc. of SARE3, p.255-263 (1997)

1) Accelerator:	Institute of High Energy Physics, Russia
2) Projectile:	p(0.895, 1.21 GeV)
3) Target(thickness):	W(20 x 60 cm)
4) Shielding Material:	
5) Geometry:	Cylinder
6) Experimental Method:	Activation method
7) Calculation:	NMTC/JAERI, LAHET, HERMES
8) Measured Quantities:	Reaction Rate Distribution

**TAKADA 97B**

"Measurement of Reaction Rate Distributions in a Lead Assembly Bombarded with 500 MeV Protons"

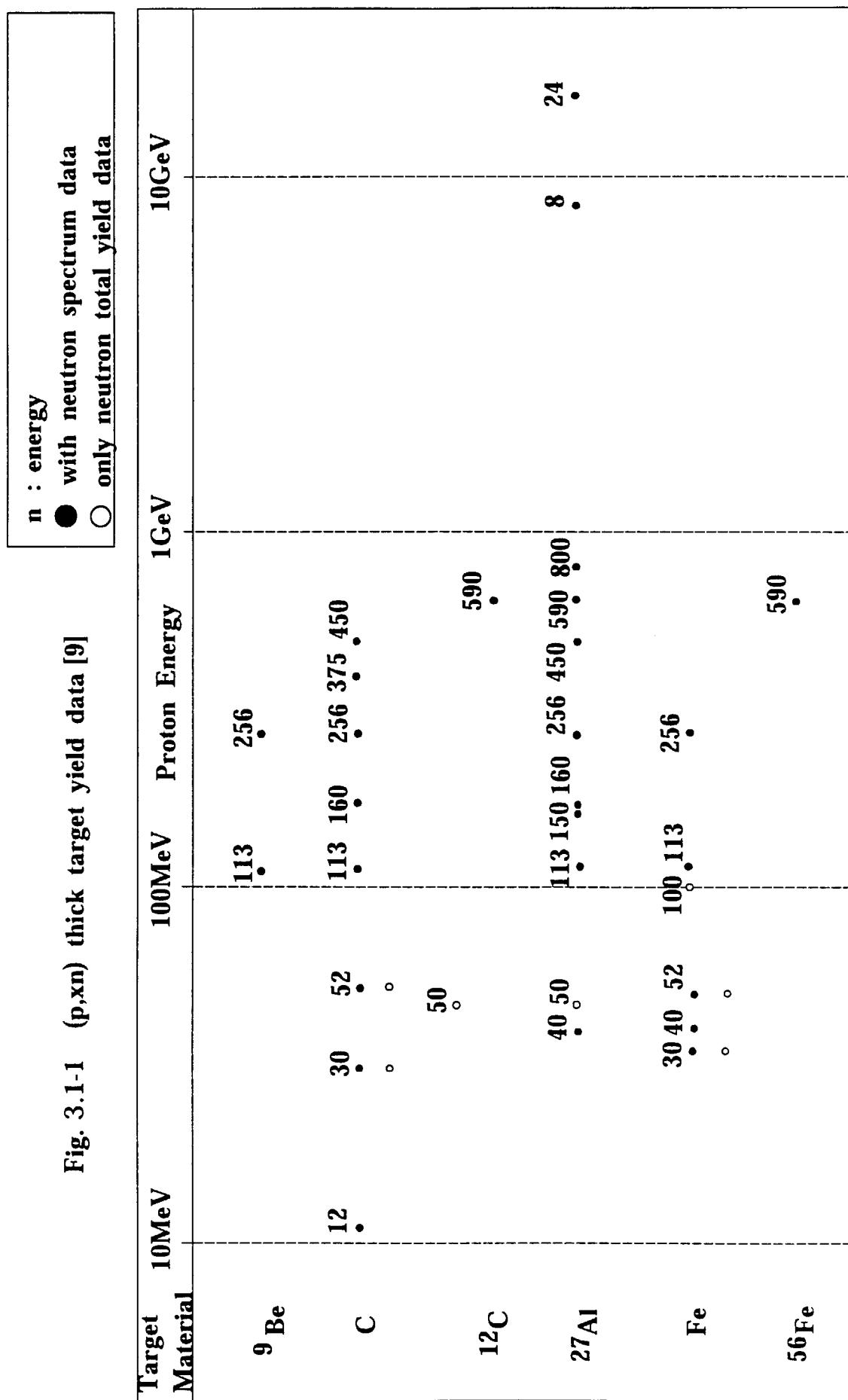
H. Takada et. al.

Proc. of SARE3, p.284-292 (1997)

1) Accelerator:	Booster synchrotron , KEK
2) Projectile:	p(500 MeV)
3) Target(thickness):	Pb(60 x 100 cm)
4) Shielding Material:	
5) Geometry:	Cylinder
6) Experimental Method:	Activation method
7) Calculation:	NMTC/JAERI
8) Measured Quantities:	Reaction Rate Distribution

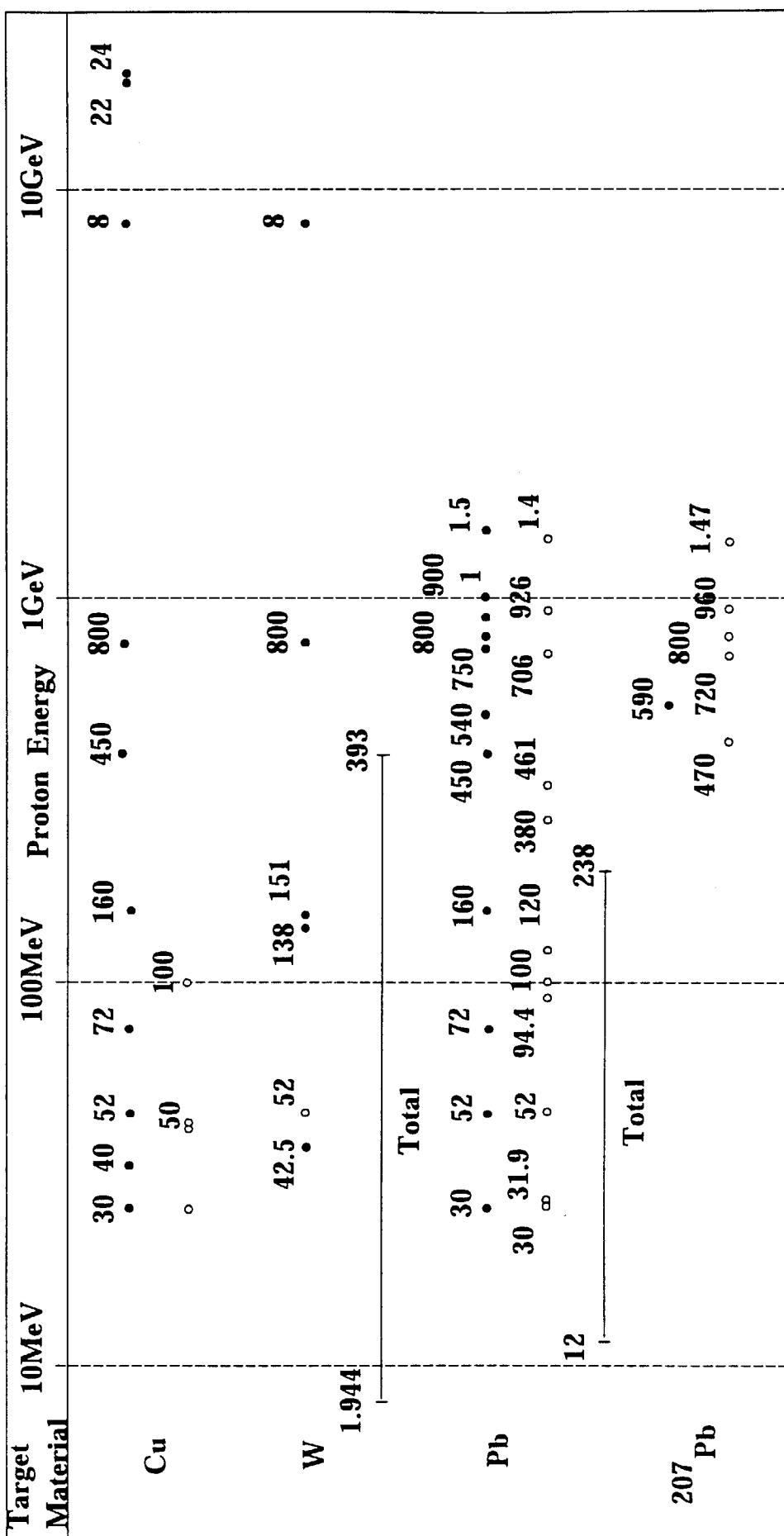
Table 3.2 高エネルギー核データのテストに適當と思われるベンチマーク実験一覧

1. 250MeV 以下のスペクトルが測定されているベンチマーク問題
1) 113, 256 MeVp による TTY 測定 (LANL) [12, 13, 14]
2) 52 MeVp-C による深層透過実験 (INS) [15, 16]
3) 65 MeVp-Cu による深層透過実験 (Osaka-AVF/Kyoto) [17]
4) 22, 32.5 MeVp-Li による深層透過実験 (CYRIC) [ISHIKAWA_94 (Table 3.1)]
5) 43, 68 MeVp-Li による深層透過実験 (JAERI/Tohoku) [NAKAO_96, NAKASHIMA_96, NAKAO_97 (Table 3.1)]
2. 250MeV 以上のスペクトルが測定されているベンチマーク問題
1) 2, 2.55 GeVp による TTY 測定 (JINR) [DANIEL_92 (Table 3.1)]
2) 0.5, 1.5 GeVp による TTY 測定 (KEK/JAERI) [MEIGO_95 (Table 3.1)]
3) 0.8, 1.2, 1.6 GeVp による TTY 測定 (Saclay/JAERI) (未発表)
3. 放射化法によるベンチマーク問題
1) 500 MeVp による鉄ビームダンプ実験 (KEK) [18, 19]
2) 0.9, 1.2 GeVp によるタンクステン体系実験 (ITEP/JAERI) [TAKADA_97A (Table 3.1)]
3) 500 MeVp による鉛体系実験 (KEK/JAERI) [TAKADA_97B (Table 3.1)]



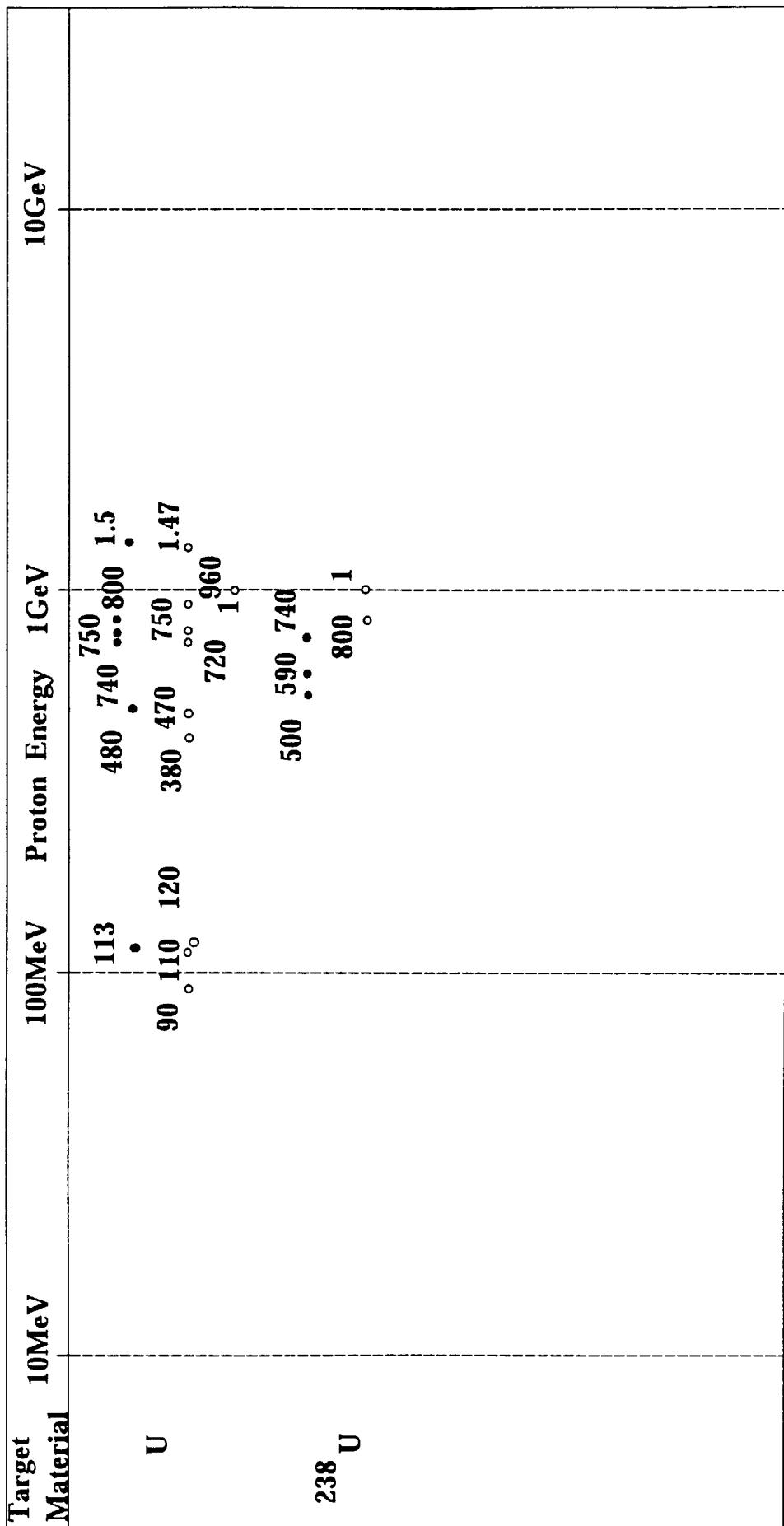
n : energy  
 ● with neutron spectrum data  
 ○ only neutron total yield data

Fig. 3.1-2 (p,xn) thick target yield data [9]



- with neutron spectrum data
- only neutron total yield data

Fig. 3.1-3 (p,xn) thick target yield data [9]



## 参考文献

- [1] Nakamura T., et al.: "Annotated References on Neutron and Photon Production from Thick Targets Bombarded by Charged Particles", *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 32, 471-501 (1985).
- [2] Hirayama H., et al.: "Annotated References of Shielding Experiment and Calculation of High Energy Particles", KEK report 90-18 (1990).
- [3] Hirayama H., et al.: "Accelerator Shielding Benchmark Problems", KEK report 92-17 (1993).
- [4] Hayashi K., et al.: "Accelerator Shielding Benchmark Analysis and Future Items to be solved", OECD Documents SATIF-1 Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities, p.135 (1994).
- [5] Nakashima H., et al.: "Benchmark Problems for Intermediate and High Energy Accelerator Shielding", JAERI-Data/Code 94-012 (1994).
- [6] Nakashima H., et al.: "Accelerator Shielding Benchmark Experiment Analyses", OECD Documents SATIF-2 Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities, p.115 (1995).
- [7] Nakane Y., et al.: "Neutron Transmission Benchmark Problems for Iron and Concrete Shields in Low, Intermediate and High Energy Proton Accelerator Facilities", JAERI-Data/Code 96-029 (1996).
- [8] Nakane Y., et al.: "Intercomparison of Neutron Transmission Benchmark Analyses for Iron and Concrete Shields in Low, Intermediate and High Energy Proton Accelerator Facilities", OECD Documents SATIF-3 Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities, p.151 (1997).
- [9] Hayashi K., et al.: "Survey of Thick Target Neutron Yield Data and Accelerator Shielding Experiments", OECD Documents SATIF-2 Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities, p.41 (1995).
- [10] Hunter H.T., et al.: "SINBAD-A Shielding Integral Benchmark Archive and Database for PC's", Proc. on 8th International Conference on Radiation Shielding, p.795, Arlington, USA, 24-28 April, 1994 (1994).
- [11] Young P.G., et al.: "Neutron- and Proton-Induced Nuclear Data Libraries to 150 MeV for Accelerator-Driven Applications", Proc. Int. Conf. Nucl. Data Sci. Tech., Trieste, Italy, 19-24 May, 1997, pp.1440 (1998).
- [12] Meier M.M., et al.: *Nucl. Sci. Eng.*, 102, 310 (1989).
- [13] Meier M.M., et al.: *Nucl. Sci. Eng.*, 104, 339 (1990).
- [14] Meier M.M., et al.: *Nucl. Sci. Eng.*, 110, 299 (1992).
- [15] Shin K., et al.: *Nucl. Sci. Eng.*, 71, 294 (1979).
- [16] Uwamino Y., et al.: *Nucl. Sci. Eng.*, 80, 360 (1982).

- [17] Shin K., et al.: Nucl. Sci. Eng., 109, 380 (1991).
- [18] Arakita Y., et al.: Nucl. Instrum. Methods, 164, 255 (1979).
- [19] Ban S., et al.: Nucl. Instrum. Methods, 184, 409 (1981).

## 4. 断面積処理法と輸送計算の調査

### 4.1 高エネルギー輸送標準コード体系の整備

#### 4.1.1 輸送標準コード体系のあるべき姿

大山らの、高エネルギーの標準コードへの提言（付録1参照）では、将来を見こした戦略的観点からは物理モデルを改良でき且つ保守の可能な可能なコードシステムを日本独自で持つのが望ましいとしている。その様な標準コード体系としては、許認可にも使えるコードとしてベンチマークテスト、実験との検証等精度保証を行えること、既に実績のあるコードとのベンチマーク計算比較が終了している事、コード保守が確実にできる事、また、将来の高機能化、改良が必要となる場合には、自前コードかライブラリーに互換性のあるコードを使うべきである事、と同時に、標準コードとしては、非定常計算（時間依存）もできる炉心計算コードであるとともに、システム設計のための核熱・構造計算コードとのリンクが可能である必要があるとしている。

これらは、ユーザーサイドの視点からは、いずれももっともなことであり、必須アイテムと考えられる。しかしながら、これを実行するとなると、多くの資金とマンパワーの恒久的な投入が不可欠となり、一つの研究室単位以上のソフトウェア開発部隊が長期間必要となる。

特に、利用系との連携を考えた場合には、設計コードとのリンクは、利用側には必須であろうが、コードの持つべき一般性を排除して、ある特定の目的に特化させてしまう傾向を持ち一般的ではなくなってしまうという恐れもある。そこまで要求されると、コード開発は大変になってしまいし、通常この部分は、利用側の責任範疇であろう。必要とされる物理量が計算され、それが、幾何形状とともに位置、エネルギー、の関数として利用コード側へ渡る事が保証されれば当面は十分であると考える。

#### 4.1.2 高エネルギー輸送計算法開発の重要性

これまで、中性子輸送計算コードとしては、長年の歴史があり、計算法も数多く提案されてきており、それらのうちいくつかは標準的な輸送計算コードとして、多くのユーザーを獲得してきている。解法自体、決定論的手法では、微分型解法として  $S_n$ ,  $P_n$ 、拡散近似等、更に積分型解法(PALLAS[1], BARMUDA[2])があり、シミュレーション手法としては、モンテカルロ法（群モデル、ポイントエネルギーモデル）、簡易計算法として減衰核モデル(QAD[3])や BUILD UP 法がある。しかしながら、中性子輸送についてすら、現在でも解法についての研究が続いている。ましてや、高エネルギー領域についての、荷電粒子を含んだ輸送計算については、現在発展途上であり、輸送計算法解法自体が、研究そのものである。

最近の、計算機能力の驚異的躍進や、他の分野からのソフトウェア技術の転用でこのコード開発分野も新たな挑戦の時代に入っており、従来とは違った展開が今後も

たらされると思われる。輸送コード関連では、コンピューターグラフィックスで最近長足の進歩を見せている、レイトレーシングの技術の転用が注目を集めている。

今後ともこの分野では、研究が日進月歩で発展しており、標準コードとしては、これら研究の進展も合わせて見ていく必要がある。

#### 4.1.3 ソースコード開示の重要性

標準コードとして実用に供されるためには、ソースコードが利用側に開示されていなくてはならない。将来への発展の可能性を残して置くこと、利用に合わせて改変できるようにしておかないと、利用はかなり制限されてしまう。特に、コードの完全性の証明は不可能であり、実際の使用にあたっては、利用側での修正が不可避であるからである。また、利用される計算機の機種に制限をつけるべきではない。

#### 4.1.4 今後の開発整備体勢

いずれにしろ、今後利用側が中心となって、標準コード体系の整備を行う必要がある。核データとのリンクエージは、核データ側との共同作業が不可欠となる。

コード体系の素材としては、LAHET[4], NMTC[5], HETC[6], ATRAS[7], HERMES[8], MVP[9], MCNP[10], MCNPX[11], MARS[12], FLUKA[13], TART97[14]があげられる。これらについては、MCNPX をはじめとして最新のコードについても使用経験も積まれつつある。

標準コード体系としては、複数コードの利用を可とするべきで、使用コードを、一本に絞るべきではない。標準コード体系としては、ルースな複数コードの繋がりからなるようなシステムを考え、それらが中間ファイルを通して結びつく形態を取るのが、現実的と考える。

### 4.2 高エネルギー核データの特殊性と現状コードとの関係

#### 4.2.1 特殊性とその由来

高エネルギー核データとして、現状でのユーザーの利用の形態からは、輸送計算コードと核データ計算コードが一体になった（輸送計算コードに核データ計算コードが組み込まれている）使い方が一般的となっている（NMTC, HETC 等）。

しかしながら、こうした現状は、当初からこうなるべく予定されたものではなく、低エネルギー側の既存の核データライブラリーと放射線輸送コードの利用が、データライブラリーの欠如により完全に 20MeV で途切れていることにより、それより上のエネルギーへの利用（100MeV 程度まで）が当面見込めなかったことから、このエネルギー領域での計算を必要としていたユーザーが、より高いエネルギー領域（GeV 領域）で既に開発され使われていた核内カスケードコードを低エネルギー側へ拡張して使おうということからはじまった、実務的な妥協の産物であると解釈できる。今後、この方向性は、いずれか一方の方式で統一されていくかも知れないが、現時点では、

こうした特殊性が生まれそれがそのまま一般化してしまっている。

#### 4.2.2 核データ評価の者の立場から

核データ評価の立場からは、従来の評価済ファイルのとっていた中性子エネルギー上限 20MeV と言うのは、全くの恣意的なものであり、単に核分裂炉、核融合炉ではこの上限エネルギーで十分であったと言うのみである。ただ、物理的な核データ評価の立場からは、一番難しいのがまたこのすぐ上のエネルギー領域なのである。即ち、一番取り扱いに苦労するのが、20MeV から 100MeV 近辺の、いわゆる中間エネルギー領域の中性子核データの評価である。この付近は、単純な統計モデルによる計算では、表現出来ない領域であり、また実験データも不揃いで、その面からのつめも難しく、そのため核反応の理論に主に頼らざるを得ない。そのため、物理としての核反応理論の観点からも、今一番ホットな議論が沸き起こっている領域である。

特に、この領域では、核反応理論として、統計崩壊を伴った複合核生成モデル、直接過程、中間状態、前複合核モデルといった理論で説明される反応過程のそれぞれが何らかの寄与を及ぼす領域であって、これらの全て、もしくは、これらの競争が極めて重要になってくる。核データの評価で、一番評価の難しい領域である。

現状の、20～100MeV の核内カスケードを内蔵した輸送計算コードでは、このエネルギー領域の核データ作成の為には、核内カスケードに上述の種々の理論を取り入れた拡張を行いこの領域の核データを発生させている。

#### 4.2.3 評価済ライブラリー形式データの重要性

高エネルギー領域では、今は、核内カスケードコードの利用による核データの作成が主流となっている。しかしながら、高エネルギーになるにつれて開いてくる多数のチャンネルをきれいに整理できる方法、およびそれらデータの収納法、引き出し法が完備出来れば、輸送計算の利用系においても、従来の評価済ライブラリー手法も充分適用可能であると考える。

特に、ライブラリー方式の利点は、核データは既に決定されており、核データを輸送計算の計算の進展に応じて生成する必要のないこと、即ち、使われるデータが前もって決定されていると言う所にある。またこの事、断面積がテーブル・ルックアップで利用できると言うことは、計算時間の短縮になる。従って、核データライブラリー形式のデータ利用は、核内カスケード計算コードに比して、著しい計算時間の短縮を実現することになる。

また、長年整備されてきた評価済ファイルの長所は十分明らかで、長い年月の利用の間に蓄積されたフィードバック情報が全て最新の評価済核データライブラリーに反映されていると言う所に大きな特徴がある。その反映された最新のデータは、他のすべてのそのデータを用いる場合にも適用され、その及ぼす範囲は極めて広い。このことは、利用にあたって、ライブラリー形式の核データが良いのか、それとも核内

カスケードを用いた輸送計算コード内に核データを持っているのが良いのか、判断する場合の一つの材料となる。即ち、核内カスケードのコードでは、そのコード内でしか、フィードバックは効かない。他の多くの核データユーザーのためには、そのフィードバックは大きくない。同じコードを使い、同じルーティンを使用している人だけにしかそのフィードバックは効かないからである。このことからも、核データを評価済核データライブラリーとして持つ事の優位性は明らかであろう。

核データ評価の方からは、低エネルギーで確立されたライブラリー方式の評価を現状では進めており、利用側の立場（核内カスケードコードにより現在計算されているので、ライブラリーが出来たとしても、すぐには使われないかも知れない。）とは必ずしも調整されていない部分もあるが、評価を進める上では、低エネルギー側から計算を行うこともあり、一貫した計算手法のもとで 3 GeV までのデータ評価が現在進められている状況にある。

#### 4.2.4 核データベースの整備

高エネルギー核データライブラリーとして、利用側からの要求としては（付録 1 参照）、核種生成断面積の評価、輸送断面積（全断面積、弾性散乱断面積、荷電粒子生成）評価、ドシメトリー反応断面積評価が高位優先度としてあげられている。入射粒子として、中性子、陽子、光子についてのデータが最低限必要としている。これについては、核データ評価側としても順次対応していく事としている。

#### 4.2.5 今後の方向

今後の主導方向は、ユーザー側の標準コード体系整備方法に大きく依存すると考えられる。そのため、利用側と核データ評価側とのクローズコンタクトが不可欠となる。放射線輸送計算用のコードとそれに対応する核データとは、一体のものと考えられ、いわゆる、バター付きパンと同じで不可分のものである。データ＆メソドとが車の両輪としてうまく噛み合わなければ、正確な計算は出来ない。そのため、輸送計算コード整備側と核データ整備側との上手い連係が必要である。

また、長期的なデータの蓄積を考えた場合、評価済核データライブラリーの持っている、フィードバックに対する優位性についても十分考慮することが必要とおもわれる。

データ及びコードの、研究課題としては、モンテカルロ法によるシミュレーションコードのより一層の高度化、決定論的手法による高速解法の開発、核データの Original Format ライブラリーを利用できる（断面積処理を必要としない）Application Code（輸送計算コード）の開発、HILO 等にみられる Adjusted Library の利用、その他簡易計算手法の開発等、この分野まだまだいくらでも新たな開発課題がある。今主流になっている、ポイント・モンテカルロ法（シミュレーション）にしても、群モデル、ポイントエネルギーモデルともどもその優位性をめぐる議論があるものとおもわれる。また、

実体系の遮蔽計算では、数メートルに及ぶ遮蔽体（40 mfp (Mean Free Path)以上の）に対する計算は、モンテカルロ法でも問題を生じ、決定論的手法との間で今後とも議論が続くと思われる。また、10 衍も減衰するような深層透過問題では、測るのも大変で、実測との比較をどうするかといった所にも問題は残っている。従って、設計では、現実をみた計算手法が当然とられるべきで、複雑形状を持つターゲット周りをモンテカルロで計算し、単純形状の外部は、決定論を使うと言う使い分けも必要であろう。いずれにしろ、ここで述べたことは、現在進行中の研究そのものもあり、放射線輸送計算コードの今後の発展に期待したい。

#### 4.3 断面積処理コード

核破碎加速器計画等に伴い、評価済高エネルギー核データファイルの評価活動が近年欧米を中心に開始され、日本でも JENDL High-Energy File (JENDL-HE) の評価が開始されている。本節では、核データファイルを輸送計算コードで使用する断面積ライブラリーに変換するための核データ処理コードによる断面積処理に関して、高エネルギー核データであることに起因する処理上の問題点や課題などの検討結果を述べる。ここでの検討は中性子入射ファイルに限定する（他の粒子入射でも基本事項は同様である）。

この分野では、米国 LANL の活動が最先端を走っており、そこでの方針と成果に強く依存し影響を受けている。例えば、中性子と陽子入射の 150 MeV までの評価済核データファイルが 1997 年に公開され、その処理コードとして NJOY94 [15] が既に公開されている。これらにより作成される断面積ライブラリーを使用可能で、高エネルギー粒子輸送機能を持つ MCNPX コードの開発も進められている。

##### 4.3.1 高エネルギー核データファイルの書式

核データファイルを処理するためには、その書式が明確でありかつ評価された核データがその書式に完全に従っていることが必須である。書式は、ENDF-6 フォーマット [16] を採用することが核データの表現精度からも世界的な趨勢となっている。ここで問題となるのは、広範な ENDF-6 の仕様と任意性に完全に対応した核データ処理コードは存在しないことである。

ENDF-6 の規約の特徴の 1 つに、評価した核データを 1 つ以上的方法で格納できることがある。例えば、ガンマ線生成断面積はガンマ線を生成する中性子反応別とそれらを一括した弾性外断面積による 2 つの方法が可能である。どちらの方法をとるかは評価者に依るため核データファイル中には混在していることになる（この例の場合、どちらでも核データ処理コードで処理可能である）。高エネルギー核データファイル（以下 HEF と略記）でも同様の事例があり、中性子や陽子などの粒子生成データを MT=5 の核種生成と MT=201-207 の粒子生成で与える 2 通りの方法が可能である。前者は LANL 形式、後者は JAERI-BNL 形式（厳密には ENDF-6 規約の一部変更を必要

とする；付録9参照）と呼ばれる。あるエネルギー範囲で両者が同時に与えられた場合には粒子生成が重複することになるため、いずれか一方のみを選択的に処理するようしなくてはならない。従って、核データ処理上の観点からは LANL 形式と JAERI-BNL 形式のどちらかで評価が統一されることが望ましい。どちらの形式も相互変換可能であるが、書式の拡張性（中間子データの格納）の見地から国内では JAERI-BNL 形式が採用され、JENDL-HE に適用されることになっている（LANL 形式への変換プログラムの添付は、国際的な利用を考える場合には必要である）。なお、NJOY コードの NJOY94 以後のバージョンは LANL 形式を処理するように整備・拡張されている。

従来の核データファイルは中性子の上限エネルギーが 20 MeV であり、その範囲で種々のベンチマークテスト等を通じて検証がなされてきた。HEF ではその上限エネルギーを 100 MeV から数 GeV の範囲に引き上げることになる。このため、20 MeV 以下では既存の JENDL-3.2 等の評価をそのまま使用することが、20 MeV 以上に評価作業を集約するために必要である。HEF は、高エネルギーになると反応チャンネルが多数開くため 20 MeV 以下のように個別の反応毎に評価することは現実的ではなく、それらの反応をまとめた粒子生成データを評価することになる。このようにすると 20 MeV を境界にして、それ以下では反応別評価、それ以上では粒子生成評価というように評価形式が異なるため、核データ処理はそれらの整合性を取ったデータ識別と処理が必要になる。また、従来型の評価方法が 50 MeV 程度まで適用される可能性もあるため、境界を 20 MeV に限定せずそのような場合の対応も考慮しておかねばならない。HEF の評価で反応別評価の上限エネルギーが反応毎に異なることは、粒子生成評価との接続上、処理が困難となるため避けるべきである。

#### 4.3.2 輸送計算コード用ライブラリー

高エネルギー領域の粒子輸送計算コードは、核内カスケード反応などが主体であるため外部ファイルの断面積ライブラリーを使用せずに、パラメータフィット等により必要な断面積を内部的に供給してきた。そのため、高エネルギー輸送計算コード用の断面積ライブラリーは存在せず、当然の事ながらその書式も存在しない。但し、HILO86 多群ライブラリー[17]のように 20 MeV 以下の領域で使用されている輸送計算コードにそのまま使用できる従来型の書式を持つものは存在する。ここで留意すべきことは作成すべき断面積ライブラリーの書式が明確でなければ、HEF の処理はできないことである。また、従来型のライブラリー（多群 PL 型、MCNP 型[18]など）以外の書式が必要であれば、それに対応した核データ処理コードの改良も当然必要になる。

既存の高エネルギー輸送計算コードで断面積ライブラリーを使用するためには、そのコードの改造とライブラリー書式の確定が不可欠である。しかし、現在までに国内ではそのような作業の計画すらないようである。そのため、現段階ではこのような処理対応は不要となる。将来、書式が確定された段階で処理コードを改良し対応できる

ようにすることは可能である。

20 MeV 以下の領域（核分裂や核融合）で使用されてきた輸送計算コードを変更なしにもっと高いエネルギー領域へ適用する方法での利用が現状では最も可能性がある。この方法の場合には、二次荷電粒子による中性子・ガンマ線生成と光中性子を無視すれば、従来型ライブラリーをそのまま使用できる。しかし、陽子入射等の問題を単独では計算できないという制約がある。この場合、処理コードのライブラリー作成機能の改良は不要となる。実際に国内でも NJOY94 を用いて、JENDL-HE の第一期試作版 (50 MeV 以下) から作成された MCNP 用ライブラリーや LANL の 150 MeV ファイルから作成された MCNP 用や多群断面積ライブラリーなどがあり、それらを用いたテスト計算等が行われている。

また、MCNPX コードは、従来型の MCNP をベースにして高エネルギー粒子輸送機能をそれに組み込むことにより LANL で開発・整備が進められている。但し MCNPX の公開は早期には期待できない状況である。その断面積ライブラリーの仕様は非公開コードのため不明である (MCNP-4B 用書式と共に部分はかなり多いと思われる)。NJOY の未公開最新版はこれに対応すべく整備作業が進行中である。

#### 4.3.3 処理法

HEF から断面積ライブラリーを作成するための核データ処理コードは、以下の処理要件を満たす必要がある：

- ・ ENDF-6 対応
- ・ 粒子生成データの処理 (MT=5 または MT=201-207)
- ・ HEF に対応した処理の上限エネルギーの引き上げ
- ・ 適切な書式のライブラリーが作成可能。

ENDF-6 の MF=6 (エネルギー角度分布) を実際に取り扱える公開された処理コードは NJOY94 しかない。AMPX コード[19]は対応作業中でありまだ公開されておらず、その他は不明である。国内の MACS-N [20] や RADHEAT-V4 [21] 等の処理コードは対応計画が明らかではない。そのため、HEF 処理に関して現実に使用可能なコードは NJOY94 のみである。

最新の公開版である NJOY94 は、LANL 形式の HEF から MCNP 用ライブラリーと多群断面積ライブラリーを作成できる。当面対象とする入射粒子が中性子と陽子に限定されるのであれば、JAERI-BNL 形式を LANL 形式に変換して NJOY で処理するのが効率的であるかもしれない。

未公開の NJOY の最新版は、MCNPX に対応して中性子と陽子入射に対する HEF の処理機能の拡張が行われ、次段階として光中性子の処理機能の整備が予定されている。これが作成する HEF に関連した断面積ライブラリーの形式は、MCNPX、MCNP、多群断面積の 3 種類である。対応する HEF の粒子生成データの形式は MT=5 の LANL 形式のみである。この最新版の公開時期が不明なことは問題であるが、MCNPX が使

用できない場合にはその公開の緊急性はあまり高くない。

JENDL-HE は、MT=201-207 を使用する JAERI-BNL 形式で粒子生成データの評価がなされている。この形式の MT=201 と 202 を直接処理できるように NJOY94 を改良し MCNP 用ライブラリーを作成できるようにした NJOY94/JHE が整備されている。20 MeV 以下では反応別データを使用し、それ以上では弾性散乱、中性子生成 (MT=201) とガンマ線生成 (MT=202) データを使用する。この処理の場合の処理上の留意点として、JENDL-HE の中性子生成断面積は multiplicity が評価できないため常に 1.0 が与えられており、正味の反応断面積が導出できない。そのため吸収断面積をゼロとして、弾性外断面積を中性子生成反応断面積と見なし、その multiplicity を中性子生成断面積を弾性外断面積で割ったものとして中性子生成量を保存する断面積の取り扱いが必要となる。ガンマ線生成もこの中性子生成に結合した形で処理される。この処理法の概念は、NJOY94 による LANL 形式の処理と同じである。このように処理した JENDL-HE の第一期試作版の Fe-56 の断面積を Fig. 4.3.1 に示す。逆三角形が中性子生成断面積を弾性外断面積で割った中性子 multiplicity である。今後、輸送計算コードでの利用の進展に応じて陽子生成や  $\alpha$  粒子生成などもガンマ線生成と同様の扱いをすることは可能であるが、そのような断面積ライブラリーの書式を先に決めておく必要がある。

JENDL-HE では、核分裂と放射捕獲を 20 MeV までとせず、粒子生成データと同じ上限エネルギーまで与えることが想定されているが、その処理においては弾性外断面積の取り扱いに注意し、取り扱う反応間の重複には最大限注意を払わねばならない。また、中性子以外の粒子入射の核データファイル処理機能についての検討と対応作業も NJOY の最新版の公開が遅れるようであれば必要となるであろう。

#### 4.4 JENDL-HE のベンチマークテスト例

1998 年末を目標に進められている 50 MeVまでの JENDL High Energy File (JENDL-HE) の評価が順調に進行し、1998 年初めにはいくつかの元素に対して MCNP コード [22] 用の輸送断面積ライブラリが作成された。そこで、このライブラリを用いたベンチマーク実験解析を開始し、JENDL-HE のベンチマークテストに着手した。

ベンチマークテストには、Table 4.4.1 に示した日本の 3 施設で行われた遮蔽実験を選んだ。東大の核研及び阪大 RCNP で行われた実験 [23-25] では白色中性子源が使われており、中性子スペクトルに加え 2 次  $\gamma$  線スペクトルも測定されている。原研 TIARA で行われた実験 [26-29] では  $p$ -Li 反応による準単色中性子源が使われているためにベンチマークテストに好都合であり、またビーム軸上に加えて軸上から離れたオフセットの位置でも中性子スペクトルが測定されているため、散乱による 2 次中性子の角度分布まで含めたテストが可能である。これらの実験では炭素・鉄・鉛・ポリエチレン・水・コンクリートの総計 6 種類の材料が使われている。

今回のテスト計算では MCNP コードを用いた。これは輸送断面積が MCNP ライブ

ラリとして与えられたためであるが、MCNP コードの使用にはいくつかの利点がある。第一に、前方性の非常に強い高エネルギー中性子散乱の角度分布の表現にルジャンドル近似を用いず、より評価値に忠実な等確率角度ビンを用いることである。第二に連続エネルギー断面積であるために多群化に伴う不確定性を排除できることである。10 MeV 以上の高エネルギー領域では連続エネルギー表現は必須ではないが、遮蔽計算で重要な低エネルギー中性子まで含めた総合的な評価値のベンチマークテストのためには重要である。

Table 4.4.1 に示したすべての実験に対して、約 60 に及ぶ MCNP 計算の入力データを準備した。供給された MCNP ライブラリには 12 元素に対する輸送断面積が含まれていたが、JENDL-HE 単独で計算が行えたのは 6 材料のうちの鉄のみであった。この他に JENDL-HE の Mg, Al, Si, K, Ca, Fe のデータに 100XS ライブラリ [30] の H 及び O のデータを補ってコンクリートの計算も行った。100XS ライブラリは MCNP-4B コードパッケージに付属していたもので、米国の LANL で約 10 年前に評価された 100 MeV までのデータが収納されている。また参考のために、100XS ライブラリ単独の計算も行った。さらに、すべての実験に対して MORSE コードと HILO86 ライブラリの組合せによる計算が以前に行われており [26-28,31]、JENDL-HE による計算結果との比較が可能である。

計算結果の例として、TIARA で行われた鉄及びコンクリート実験で測定された中性子スペクトルの比較を Figs. 4.4.1-2 にそれぞれ示す。コンクリート体系では JENDL-HE による計算結果と実験値との一致は比較的良好。最も一致の悪い厚さ 150cm のコンクリート遮蔽を透過した 40 MeV 中性子のピーク部分でも計算値は実験値よりも約 50% 大きい程度である。一方、鉄体系では JENDL-HE による計算結果は遮蔽厚さの増加と共に中性子束を過小に計算する傾向が強い。厚さ 100cm の鉄遮蔽の背後では、JENDL-HE による中性子束は実験値の約 1/4 である。

JENDL-HE は従来の 20 MeV までの核データ、つまり JENDL Fusion File や JENDL-3.2、の高エネルギー側への拡張が主目的であるために 20 MeV 以上のデータのベンチマークテストが第一目的であるが、実際に核計算で使われるときには 20 MeV 以下の低エネルギーデータも重要である。そこで、原研 FNS の D-T 中性子源を用いて行われた鉄体系ベンチマーク実験 [32,33] の解析も行った。Fig. 4.4.3 に JENDL-HE 及び JENDL Fusion File (元素に対する評価値を使用) による結果を示す。JENDL Fusion File によるスペクトルは実験値と素晴らしい一致を示しているが、JENDL-HE による計算値は実験値からかけ離れた結果になっている。これは、JENDL-HE では 20 MeV 以下のデータとして使用が奨められていない鉄の同位体に対する評価値を採用したためである。この例が示すように、20 MeV 以上の中性子発生源を用いたベンチマーク実験の他に、核融合及び核分裂炉開発のために蓄積された 20 MeV 以下の中性子発生源を用いた数多くのベンチマーク実験も依然として JENDL-HE のベンチマークテストに対して有効であることが分かる。

最後にまとめとして、JENDL-HE（暫定版）の積分テストを実施し、積分テストが評価データの信頼性確認に重要であることを示した。今後、新しい元素に対して評価が行われ次第、順次ベンチマーク計算を実施し、問題点の摘出を通じてより信頼性の高いJENDL-HEの完成に貢献できることを期待する。

## 参考文献

- [1] Takeuchi, K.: "Study on a Numerical Approach to the Boltzmann Transport Equation for the purpose of Analyzing Neutron Shields," report of Ship Research Institute, vol.9, no.6 (1972) (in Japanese).
- [2] Suzuki, T., et al.: "Development of BERMUDA: A Radiation Transport Code System Part I. Neutron Transport Codes," JAERI-1327 (1992).
- [3] Cain, V.R.: "A Users Manual for QAD-CG, the Combinatorial Geometry Version of the QAD-P5A Point Kernel Shielding Code," NE007, Bechtel Power Corp., (1977).
- [4] Prael, R. and Lichtenstein, H.: "User Guide to LCS: The LAHET Code System", LA-UR-89-3014, LANL (1989).
- [5] Coleman, W.A. and Armstrong, T.W.: "NMTC Monte Carlo Nucleon Meson Transport Code System," ORNL-4606, ORNL (1970).
- [6] Armstrong T.W. and Chandler K.C.: "HETC Monte Carlo High Energy Nucleon Meson Transport Code," ORNL-4744, ORNL (1972).
- [7] Sasa, T., et.al.: "Development ATRAS(Accelerator-based Transmutation Reactor Analysis System)", JAERI-Review 96-012, pp197 (1996).
- [8] Cloth, P., et al.: Juelich Report KFA/Jul-2203 (1988).
- [9] Mori, T. and Nakagawa, M.: "MVP/GMVP: General Purpose Monte Carlo Codes for Neutron and Photon Transport Calculations based on Continuous Energy and Multigroup Methods," JAERI-Data/Code 94-007 (1994).
- [10] Briesmeister, J.F. (Ed.): "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4A," LA-12625 (1993).
- [11] Hughes, H.G., et.al.: "MCNPX - The LAHET/MCNP Code Merger," LA-UR-97-1638 (1997).
- [12] Mokov, V.N.: "The MARS code system user's guide", version 13(95), FERMILAB-FN-628, (1995).
- [13] Fasso, A., at al.: "FLUKA 92 ", Proc. of the Workshop on "Simulating Accelerator Radiation Environments", Santa Fe, Jan. 11-15, 1993.
- [14] Cullen, D.E.: "TART97 A Coupled Neutron-Photon 3-D, Combinatorial Geometry Monte Carlo Transport Code," UCRL-ID-126455, Rev.1, LLNL (1997).
- [15] MacFarlane, R.E.: "The NJOY Nuclear Data Processing System, Version 91," LA-

- 12740-M (1994).
- [16] Rose, P.F. and Dunford, C.L. (ed.): "ENDF-102 Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data File ENDF-6," BNL-NCS-44945 (1990).
  - [17] Alsmiller, Jr. R.G. et al.: "Neutron Photon Multigroup Cross Sections for Neutron Energies  $\geq 400$  MeV (Revision 1)," ORNL/TM-9801 (1986).
  - [18] Briesmeister, J.F. (ed.): "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B," LA-12625-M (1997).
  - [19] Greene, N.M., et al.: "AMPX-77 - A Modular Code System for Generating Coupled Multigroup Neutron-Gamma Cross Section Libraries from ENDF/B-IV and/or ENDF/B-V," ORNL/CSD/TM-283 (1992).
  - [20] Hasegawa, A.: to be published.
  - [21] Yamano, N., et al.: "RADHEAT-V4: A Code System to Generate Multigroup Constants and Analyze Radiation Transport for Shielding Safety Evaluation." JAERI-1316 (1989).
  - [22] Briesmeister, J. F. (Ed.): "MCNPTM - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B", LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory (1997).
  - [23] Uwamino, Y., et al: Nucl. Sci. Eng., 80, 360 (1982).
  - [24] Shin, K., et al.: Nucl. Sci. Eng., 109, 380 (1991).
  - [25] Nakashima, H., et al.: "Benchmark Problems for Intermediate and High Energy Accelerator Shielding", JAERI-Data/Code 94-012 (1994).
  - [26] Nakao, N., et al: Nucl. Sci. Eng., 124, 228 (1996).
  - [27] Nakashima, H., et al.: Nucl. Sci. Eng., 124, 243 (1996).
  - [28] Nakao, N., et al: Nucl. Sci. Eng., 134, 348 (1997).
  - [29] Nakane, Y., et al: "Neutron Transmission Benchmark Problems for Iron and Concrete Shields in Low, Intermediate and High Energy Proton Accelerator Facilities", JAERI-Data/Code 96-029 (1996).
  - [30] Little, R.C.: "Summary Documentation for the 100XS Neutron Cross Section Library (Release 1.0), LA-UR-96-24, Los Alamos National Laboratory (1995).
  - [31] Nakashima, H., et al.: "Accelerator Shielding Benchmark Experiment Analyses", Proc. Specialists' Meeting on Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities, Geneva, Switzerland, Oct. 12-13 (1995).
  - [32] Konno, C., et al.: Fusion Eng. Des., 18, 297 (1991).
  - [33] Maekawa, F. and Oyama, Y.: Nucl. Sci. Eng., 125, 205 (1997).

## Neutron multiplicity

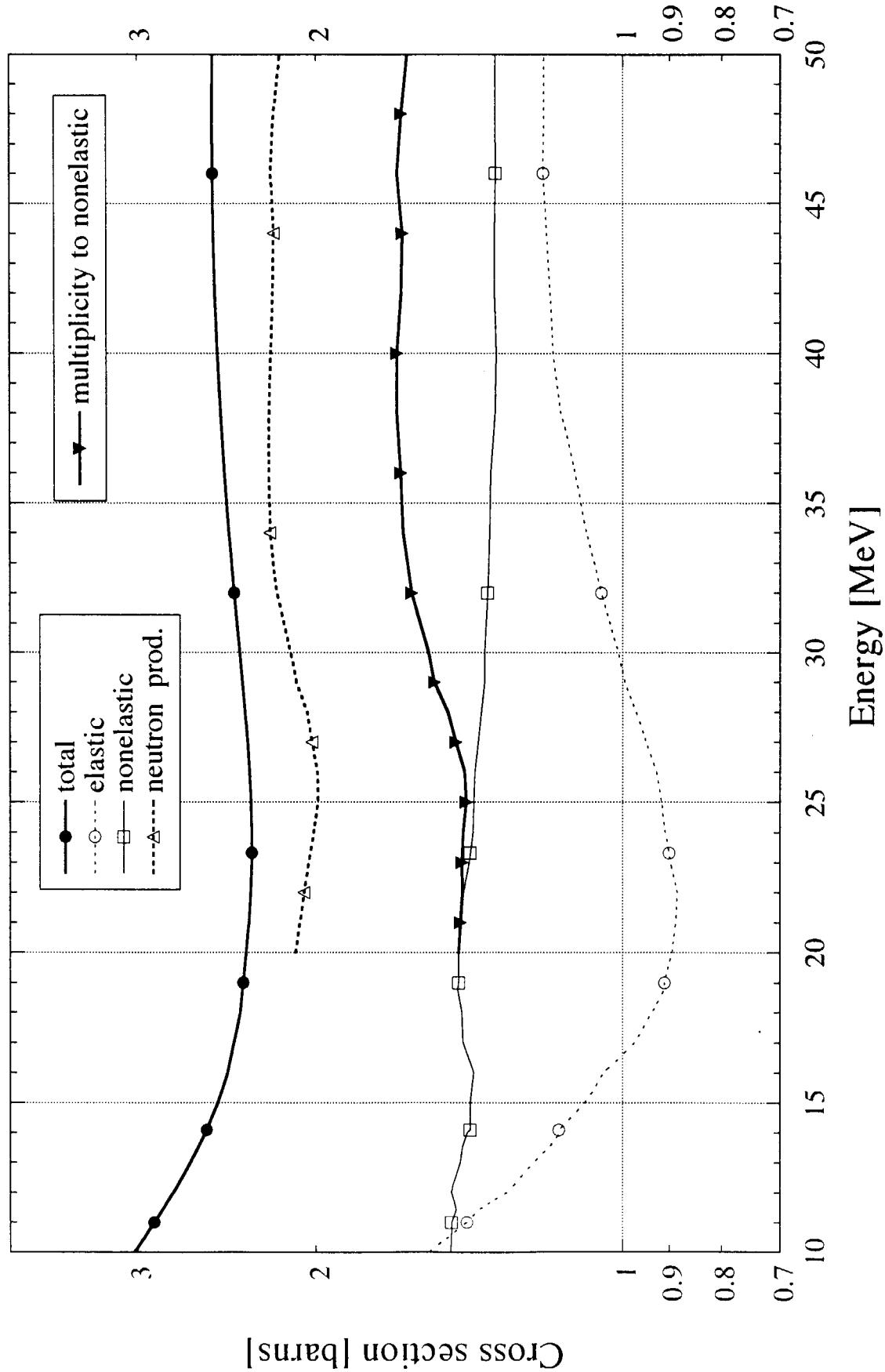


Fig. 4.3.1 Cross sections and neutron multiplicity of Fe-56 (JENDL High-Energy File (Phase-II))

Table 4.4.1 ベンチマークテストのため利用した遮蔽実験

Facility / Institute	INS / Tokyo Univ.	RCNP / Osaka Univ.	TIARA / JAERI
Neutron Source	52-MeV Proton on Graphite	65-MeV Proton on Copper	43- & 68-MeV Proton on Lithium
Source Spectrum	White	White	Quasi-Mono-Energetic
Material	C, Fe, Concrete, Water	C, Fe, Pb, Concrete	Fe, Concrete, Polyethylene
Measured Quantity	Neutron & Photon Spectrum	Neutron & Photon Spectrum	Neutron Spectrum, Fission Rate
References	[23, 25]	[24, 25]	[26-29]

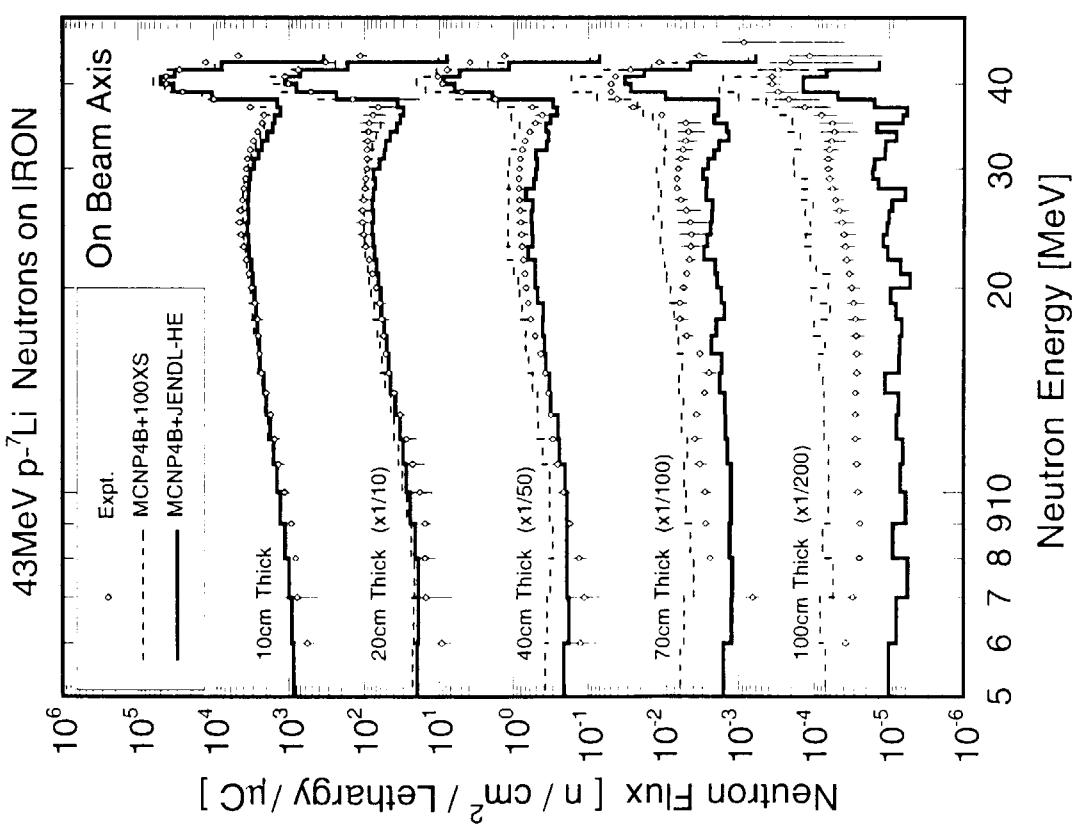


Fig. 4.4.1 TIARAで行った鉄体系実験のビーム軸における中性子スペクトルの実験値と計算値の比較。

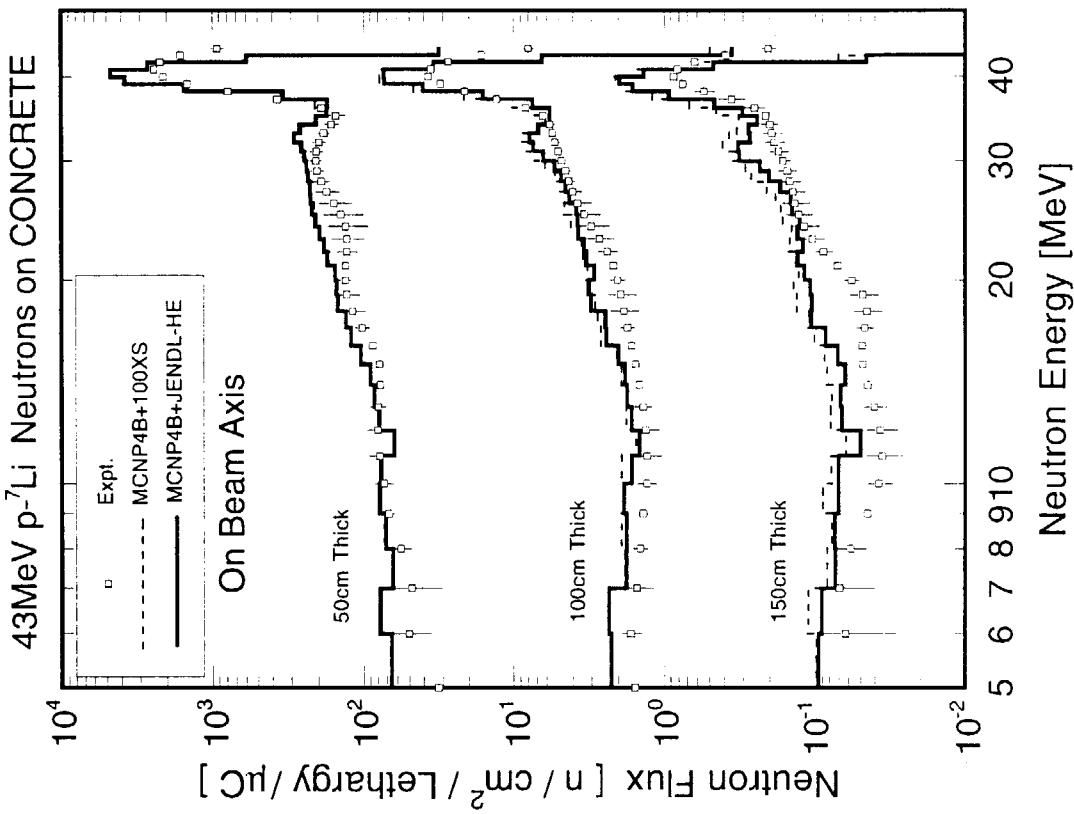


Fig. 4.4.2 TIARAで行ったコンクリート体系実験のビーム軸における中性子スペクトルの実験値と計算値の比較。

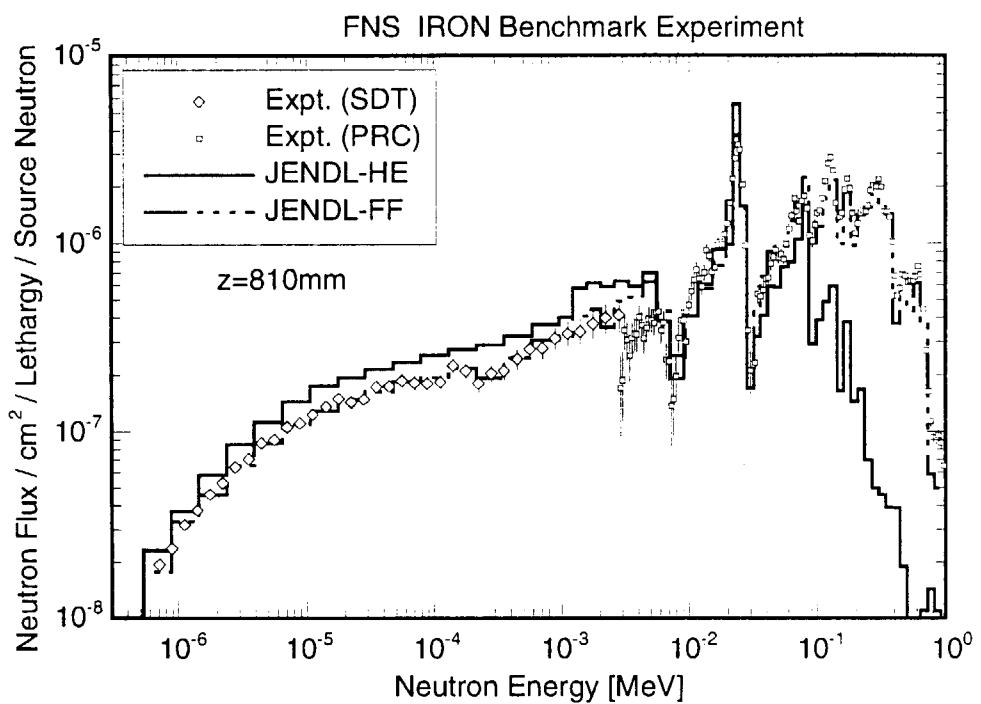


Fig. 4.4.3 FNSで行われた鉄体系ベンチマーク実験において測定された中性子スペクトルとJENDL-HE及びJENDL Fusion File（元素に対する評価値を使用）による計算値の比較。

## 5. JENDL-HE 標準レビュー手法の検討

### 5.1 緒言

JENDL High Energy File (以下 JENDL-HE と略記する) のレビュー手法については、JENDL の評価で蓄積されたような統一された方法がなく、レビュー担当者の知識と経験に基づいて実施されているのが現状である。そのため、レビュー結果は担当者によって精粗があり得るため、品質保証の観点から好ましくなく、早急にレビュー手法を標準化することが望ましいと考えられる。また、ここで記述する「レビュー」は微分データに着目した検討を意味するが、JENDL-HE では以下に述べる理由から、積分データによる検討を意味する「確認(Validation)」を含めた「レビュー&確認(Review & Validation)」という広い観点での検証作業が必要である。以下に現時点で考えられる方法を検討したので報告する。

なお、中・高エネルギー領域の核データについては、微分データ、積分データ両者の量及び質が明確でないと詳細な検討ができない。ここでは、本タスクフォースの他のグループの調査結果を基にした検討を行った。従って、対象とすべき新たなデータ等の知見が得られた場合には、本検討結果は随時改訂するものとする。

### 5.2 検討対象と方法

JENDL-HE として評価されたデータは、大別して以下のように分類される。

- ・全断面積(陽子入射では全反応断面積[total reaction cross section])
- ・弾性散乱断面積
- ・非弾性散乱断面積(discrete/continuum level への遷移)
- ・放出粒子二重微分断面積(  $(n,Xn)$ ,  $(n,Xp)$ ,  $(p,Xp)$ ,  $(p,Xn)$  )
- ・ガンマ線生成断面積(  $(n,X\gamma)$ ,  $(p,X\gamma)$  )
- ・ガス生成断面積(  $(n,Xd)$ ,  $(n,Xt)$ ,  $(n,Xh)$ ,  $(n,X\alpha)$ ,  $(p,Xd)$ ,  $(p,Xt)$ ,  $(p,Xh)$ ,  $(p,X\alpha)$  )
- ・同位体生成断面積(transmutation cross section [element/mass] )

これらのデータを微分データで確認することがレビューの目的である。現時点ではこれら全てを確認することは不可能であるが、少なくとも存在するデータを数値的に検索/取得し、検討するために EXFOR が必須である。JENDL の評価では NESTOR、SPLINT、CRECTJ システム等が既に整備されており、評価値の編集、測定データの検索/表示から作図までを一貫して行うことが可能である。JENDL-HE 評価に於いても同等の機能を有するシステムの整備を早急に行う必要がある。但し、NESTOR では EXFOR を特殊な ISAM ファイルに変換して使用するが、変換作業のための時間的ずれによる最新データの格納遅延があり、portability の観点からも得策ではないので、JENDL-HE 評価用には EXFOR を直接処理する方法に改める。核データセンターは EXFOR のミラーサイトとなり、常に最新の EXFOR を管理できる体制とし、付属す

る EXFOR 検索エンジンを有効に利用する。また、最新データは EXFOR に格納されていない場合があり、この情報を何らかの方法で取得する手段を別途考慮する必要がある。

上記の評価 tool を整備することと同時に、従来の file checker と合わせて、レビュー方法を手順化することにより、レビュー担当者はレビュー作業を効率良く実施することが可能で、かつチェック漏れなどの見落としを最小限に抑えることができる。また、測定データではなくとも systematics が良く評価されているものは最大限レビューに利用すべきである。

### 5.3 積分データによる確認の必要性

JENDL-HE の検証作業では、上記の微分データ等によるレビューは自明であるが、その他に一部の積分データについても積極的に参考にすべきと考える。なぜなら、現時点において、利用者の目的に対応した要求精度を満足するために必要な微分データは不十分である。そのため、微分データと相補的な関係にある積分データに含まれる情報を有効に利用する必要がある。このためには先ずターゲットとなる利用者と、要求精度を確認する必要がある。ここでは、ターゲットとなるシステムを次の通り想定した。

- ・研究用高エネルギー・大強度陽子加速器システム
- ・医療用中高エネルギー陽子加速器システム

前者と後者の違いは、対象領域とするエネルギー範囲が異なることと、粒子強度の違いであり、特に後者では高々 250 MeV までの範囲ではあるが、放射化断面積に関して高い精度が要求されると考えられる。従って、反応のしきいエネルギーから 250 MeV までは放射化断面積の評価値に十分な検討を加える。それ以上のエネルギーでは、放射化断面積の他に粒子生成断面積（ガンマ線生成、ガス生成を含む）の評価値に注意する。輸送計算の精度に直接関与する全断面積、弾性散乱断面積等については前者後者とも同等の配慮が必要である。

微分データがこれらの利用者の要求精度に対して不十分であれば、粒子生成断面積の積分データとして、thick target あるいは medium-range target yields のデータを積極的に利用する。そのためには JENDL-HE として評価したデータよりこれらの積分値を算出する tool を開発する必要がある。輸送計算の精度に関与する全断面積、弾性散乱断面積等を確認する目的には、できるだけ単純な体系で、かつ体系内外のスペクトルが測定されているベンチマークを取得選択する。遮蔽を目的としたベンチマークでは実際の体系を模擬した深層透過体系が多いが、核データを確認する目的には、比較的薄い体系における情報が非常に有効であることを考慮する必要がある。なぜなら、多数回の反応によって形成されるスペクトル情報のみでは、核データの問題点を検討することは困難である場合が多く、少数回の反応によりスペクトルが形成される薄い体系の情報は、この問題点を同定できる可能性が高いためである。

従来の 20 MeV 以下の核データのレビュー作業では、微分データのみによる検討が行われ、積分テストによる核データの確認作業とは独立して実施可能であったが、中高エネルギー領域の核データの検証では、これらの検討が明確に分離できず、微分データと積分データの両者を視野に入れた新たな検証手法が必要である。また、検討に用いる積分データは微分データと同様に信頼できるものを選択する作業が別途必要であり、そのためには再現性が良く、信頼性の高い計算手法の確立が必須である。

#### 5.4 検討結果

以上の検討により、JENDL-HE のレビュー手法及び検証方法の確立のため必要な作業は以下の通りとなる。

- (1) EXFOR ミラーサイト運用管理及び新規データ検索/取得作業  
(新規データの検索/取得には source を定めて定点観測するグループの設置)
- (2) 微分データの検索/取得のための EXFOR 処理 tool の整備作業  
(陽子入射については CHESTOR の改良、中性子入射については NESTOR2 の改良)
- (3) JENDL-HE 編集 tool と微分データを描画するグラフ tool の整備  
(現行の CRECTJ の改良と gnuplot 対応の ascii ファイル出力 tool)
- (4) 上記 tool を用いたレビュー方法の手順化作業  
(systematics の検討等を含めたマニュアル化)
- (5) 積分データの取得/選択と数値ベンチマーク化作業  
(thick/medium-range target yields、transmission experiments)
  - a) 利用者の目的と要求精度の調査作業
  - b) 上記の調査を基にした重要度の高いベンチマークデータの数値化作業
- (6) JENDL-HE ファイルから thick 及び medium-range target yields を算出する tool の整備

これらの作業項目のうち、必要性が高く、かつ緊急性のあるものを選択し、既存 WG または新たな WG をシグマ委員会に設置して作業を実施する。必要があれば、作業計画を立案し、数年間のスケジュールを考慮した予算化措置を考える。また、他の類似する委員会等の活動とも積極的に協力し、特に上記(5)の作業は利用者を主体とする委員会活動として協力を依頼することが望ましいと考えられる。

## 6. 海外の動向調査

### 6.1 ロスアラモスにおける高エネルギー核データ評価活動

ロスアラモスでは、Mark Chadwick を中心にした 150 MeV までの陽子及び中性子入射の高エネルギー核データの評価が進展中である。この評価の手法、現状、MCNPXでの使用についての詳しい解説は、近々 Nuclear Science and Engineering 誌に投稿される予定であり、詳細はそちらを参考にしていただくことにして、本稿では、評価手法と現状、代表的な評価結果についての概略を記することにする。

ロスアラモスの評価は、汎用ライブラリーと放射化ライブラリーに大別され、それぞれかなり共通点はあるにせよ、大ざっぱに言って汎用ライブラリーは GNASH を用いて、放射化ライブラリーは ALICE コードをモンテカルロ版に改良した HMS(Hybrid Monte-Carlo Simulation)-ALICE コードにより行われている。HMS-ALICE については、Phys. Rev., C54, 1341 (1996)を参考にしていただくことにして、ここでは GNASH を用いた汎用ライブラリーの評価について説明する。平成 10 年 4 月の時点で汎用ライブラリーの評価が終了している元素は H, C, N, O, Al, Si, P, Ca, Cr, Fe, Ni, Cu, Nb, W, Pb で、これらの元素については、非常に天然存在比が少ない核種を除いた安定同位体に対する評価が行われた。また、水銀に対する評価も進行中ないしは終了済み、といった phase にある。水銀については、20MeV 以下の中性子ライブラリー部分は原研で最近評価されたデータが使用される予定である。

ロスアラモスで使用している GNASH は、Arjan Koning によって作られた様々な pre-processing 及び post-processing コード群と結合されて、QUICKGNASH と呼ばれるシステムに統合されている。Fig. 6.1.1 に、QUICKGNASH システムのフローを示す。本システムでは、まず pregnash と呼ばれる小プログラムが実行される。このプログラムにはいろいろな光学ポテンシャルや準位密度パラメータ、巨大双極子共鳴パラメータ等が内蔵されており、ECIS 及び GNASH の入力データを生成する。ついで、ECIS96 により、中性子、陽子、重陽子、トライトン、アルファ粒子の透過係数を計算する（ロスアラモスの評価では通常  $^3\text{He}$  放出は無視される）。また、別途 ECIS96 を流して、直接過程による非弾性散乱断面積を計算する。その後、postecis というプログラムによって、ECIS96 の出力を GNASH で読み込む様にフォーマットする。通常、この段階で主要チャンネル（中性子及び陽子）については、全断面積や全反応断面積が実験データと十分の精度で一致しない場合、計算された透過係数に修正を加えておく。これらが終わった後、GNASH (gn8cp3 というロスアラモスバージョン) を実行し、その結果を実験データと比べて、必要があれば GNASH の入力データなり、透過係数、あるいは pregnash の入力までさかのぼって修正を加える。このプロセスを満足のいく結果が得られるまで繰り返す。満足のいく結果が得られたら、GNASH の file 6 の出力を入力データとして gscan というプログラムを実行して、ENDF 形式にフォーマット変換するとともに、コメントファイル、20 MeV 以下の ENDF と結合し、また反跳核(PKA)のスペクトルを付加する。PKA スペクトルの計算方法についても、先に挙げた NSE の論文で解説される予定である。また、gscan は弾性散乱については処理しないので、必要であれば別途、たとえば Koning の postgnash と mingus3 を実行して弾性散乱部分を処理した後、gscan の結果と結合する。もし、PKA スペクトルが不要であれば gscan を実行せず、postgnash、mingus3 を実行するだけで

も良い。基本的にはこれで終わりである。

Chadwick は、核子の光学ポテンシャルとしては、低エネルギーでは ENDF の評価で使われたポтенシャル、高エネルギーでは Madland のポтенシャルを使用することが多い。このポтенシャルは Schwandt のポтенシャルを若干修正したもので、150 MeV 程度までは使える。ただし、個々の核については必ずしも全断面積等を再現していないことがあるので、その場合には、上記の様に、透過係数を修正して用いるようにしている。あるいは、個々の核についてのデータを再現するようなポтенシャルを決定して、pregnash コードに hard-wire するのも手である。それ以外のポтенシャルについては、一般的なものを使用している。すなわち、重陽子 : Lohr-Haeberli ポтенシャル、トライトン : Becchetti-Greenlees ポтенシャル、アルファ粒子 : McFadden-Satchler ポтенシャルである。

いくつかの評価結果を Fig. 6.1.2 以降に示す。Chadwick は実験値を非常に気にしながら評価を行っており、多くの場合、評価値は重要な実験データを良く再現している。

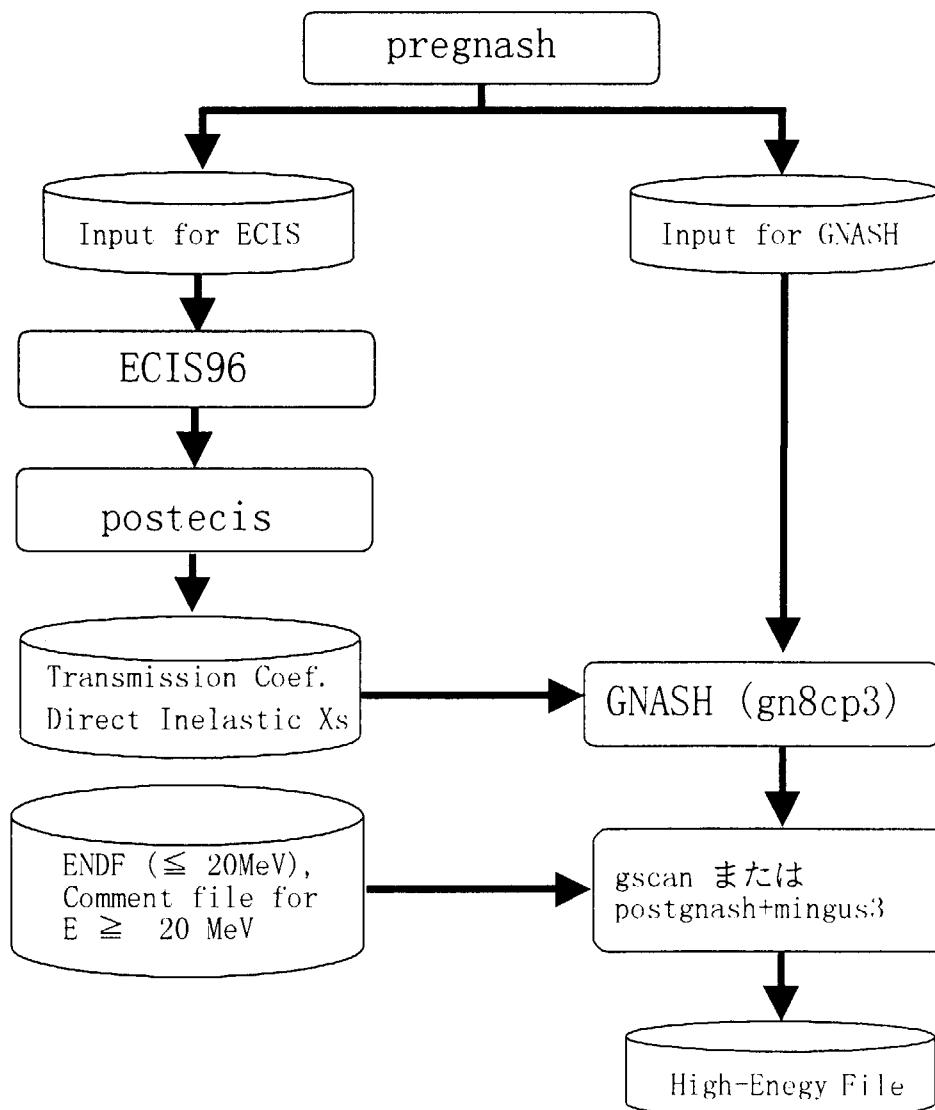


Fig. 6.1.1 QUICKGNASH のフロー図

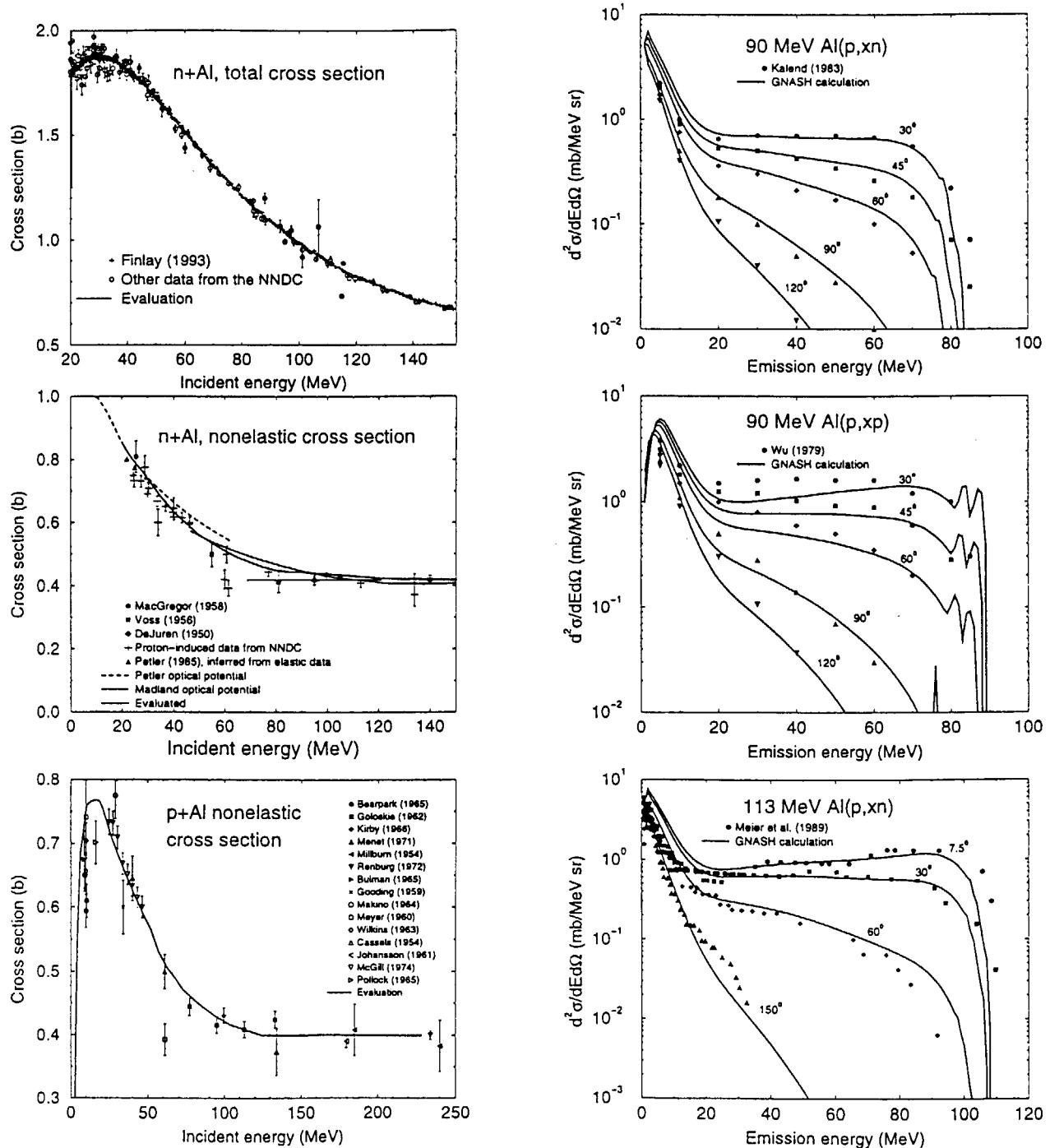


Fig. 6.1.2 Alに対するロスアラモスの評価値

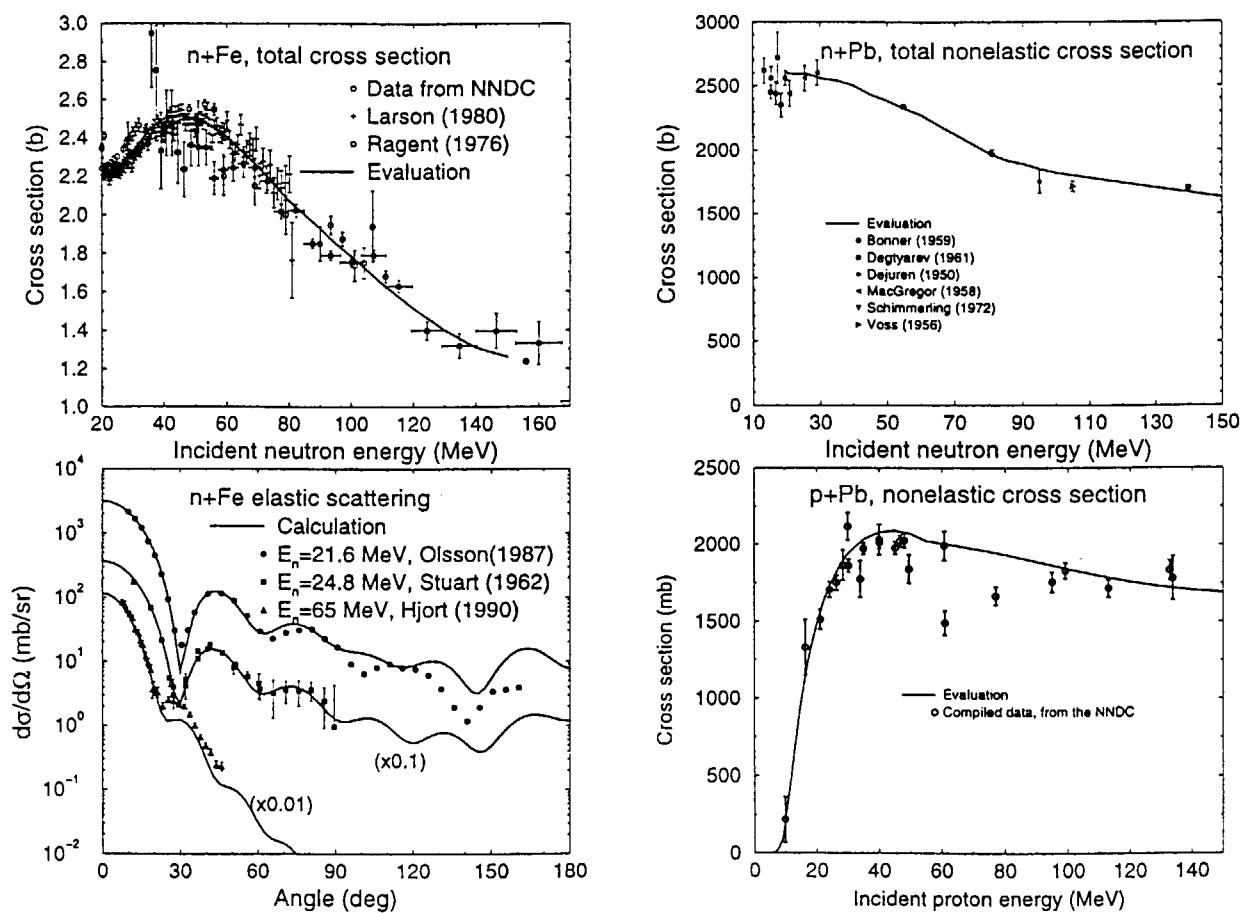


Fig. 6.1.3 鉄（左）及び鉛（右）に対するロスアラモスの評価値

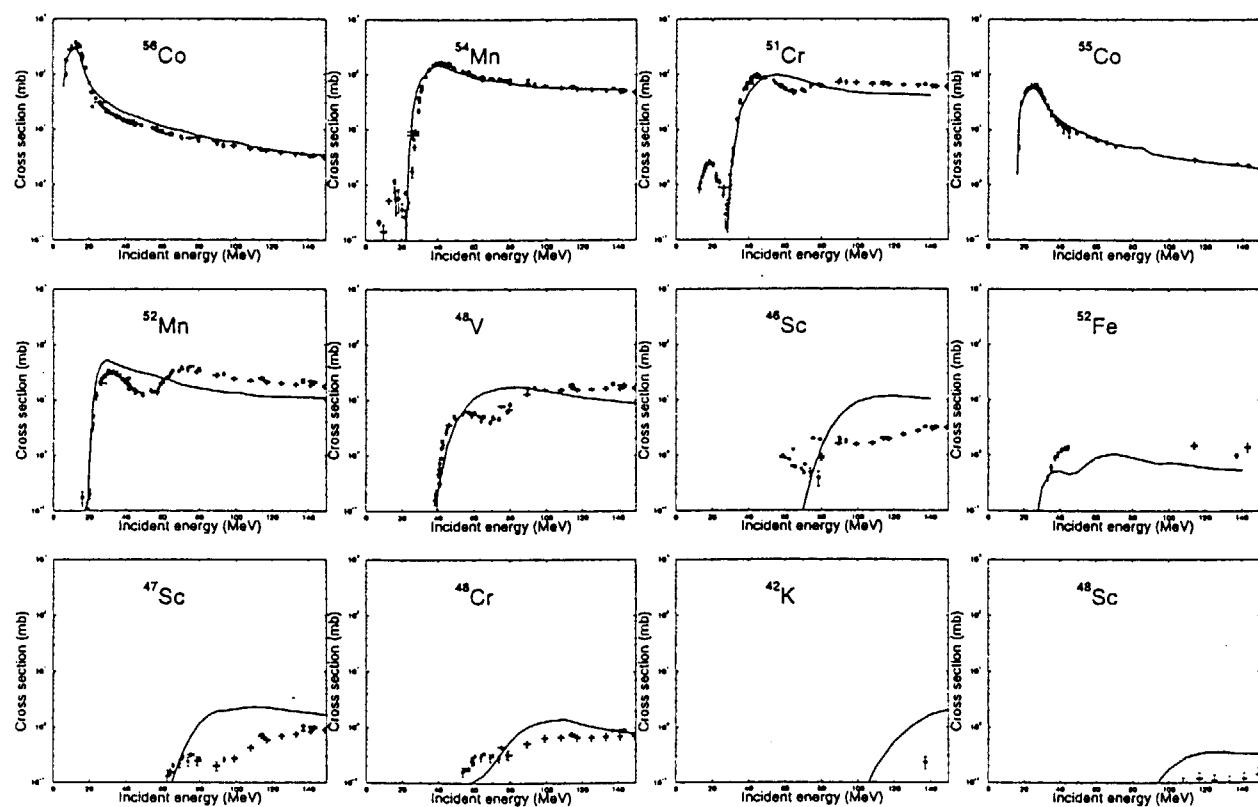


Fig. 6.1.4  $\text{Fe}(\text{p}, \text{x})$  反応における核種生成断面積  
(ロスアラモスの GNASH 計算値)

## 6.2 SNS 計画における高エネルギー群定数利用の現状

### 6.2.1 SNS (Spallation Neutron Source) の遮蔽設計・解析に用いられた群定数

SNS は大強度・大電流の陽子加速器により、1 GeV、1MW のビームを液体水銀ターゲットに入射させ、核破碎反応によって中性子を発生させ、材料研究等中性子科学研究に供する施設である。この施設の概念設計のため、加速器（ライナック、蓄積リング）のトンネル、ビームダンプ、ターゲットステーション、遠隔操作セルの遮蔽設計・解析が行われた。これらの設計と解析には、HETC と ANISN、DORT を組み合わせる方法が用いられた。すなわち、線源項は HETC により計算し、バルク遮蔽計算を ANISN、DORT の discrete ordinates 法による計算コードで計算した。ANISN、DORT の計算で用いた群定数は、DLC119/HILO86 である。HILO86 は 400 MeV までの群定数であるが、375 MeV から 400 MeV までの第 1 群に、400 MeV から 1000 MeV までのエネルギーの寄与を押し込めて計算している。また、設計計算に必要な材料のすべてが HILO86 には含まれていないので（例えば Hg、Cu）、これらの元素については、周期律表の近傍の元素で代用した。

ビームダンプに用いる鉄遮蔽体の必要厚さを求める計算では、ANISN を用いた計算結果と点減衰核法による簡易計算コード CASL (3 GeV までの線量減衰データを ANISN により計算した結果を内蔵している) による結果を比較したところ、非常によく一致した。一方、土盛り遮蔽体の厚さを求める計算では、使用している土の原子数密度の差のために、大きな差が認められる（CASL の計算の方が安全側の評価をする）。実際の設計には、大きな安全裕度を見込んでいるが、用いた計算手法の計算精度に関する詳細な評価はなされていない。

### 6.2.2 現在利用可能な高エネルギー領域における群定数

以下に、現在利用可能な高エネルギー領域における群定数のうち SNS 遮蔽設計・解析に関連するものをまとめた。

DLC-87/HILO 400 MeV まで

DLC-119/HILO86 HILO の改訂版

DLC-187/HILO86R 19.6MeV 以下を JENDL-3 に基づくものに置き換える  
(自己遮蔽因子を含む)

DLC-128/LAHIMACK 800 MeV まで [1,2]

H-1、C、N、O、Al、Si、Ca、Fe、W、Pb

DLC-87/HILO と LANL の high energy neutron multigroup library の組み合わせ

CASL コードに内蔵されている減衰データを作成する際に使用したデータ [3]

3 GeV まで

物質：普通コンクリート、重コンクリート、鉄、鉄鋼、乾燥した土、土壤

なお、これらの群定数の高エネルギー部分は、評価済み核データを処理したものではなく、HETC の thin target setup で計算される二重微分中性子収率から作成したものである。

### 6.2.3 SNS 計画からの核データへの要求

SNS 計画の遮蔽・ニュートロニクスの今後の R&D 項目として、高エネルギーの

核データに関する、群定数の整備があげられている。内容としては、群定数として現在使用している HILO86 に含まれてない、Hg や Cu についてデータを追加するとともに、1 GeV までのデータの拡張を計画している。3 GeV まで拡張された KFA のデータは、使用できる物質が限られており、SNS の設計には不十分である。SNS で必要な高エネルギー群定数を、どの様な方法で用意するかの議論はこれからである。

### 6.3 各国の高エネルギーファイルの現状

高エネルギー関連ファイルは各国で、それぞれの事情に従って整備されている。ここでは、各国の高エネルギーファイルについて、整備状況を概観する。対象とするのは、比較的情報が手に入りやすい、米国及び欧州を中心に、ENDF/B-VI High Energy File (BNL-HE)、Los Alamos National Laboratory High Energy File (LANL-HE)、High Energy File of ECN Petten (ECN-HE)、Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) の IFMIF 用ファイル、ロシアの Waste Incineration Nuclear Data Library (WIND) 及び Medium Energy Nuclear Data Library (MENDL-2)、NEA Data Bank の Barashenkov Compilation 等 WWW からの情報も含めて概観する。各ファイルの概要を Table 6.3.1 にまとめた。

Table 6.3.1 Status and contents of High Energy Files

File Names	Purpose	$E_{in}^{max}$ [MeV]	Target Elements
JENDL HE	IFMIF	n: 50	H, C, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Y, Zr, Mo, W
	General	n,p: 1000	H, Pb, Bi
LANL HE	Accelerator, Radiotherapy	n,p: 150	H, C, N, O, Al, Si, P, Ca, Cr, Fe, Ni, Cu, Nb, W, Pb
ENDF/B-VI HE	Accelerator, Space	n,p: 1000	C (10 GeV), Fe, Pb, Bi
ECN HE	Accelerator,	n,p: 150	Fe, Ni
FZK HE	IFMIF	n: 50	V, Cr, Fe
WIND	Transmutation	n,p: 100	n: U, Np, Pu, p: U
MENDL-2	Transmutation	n: 100	505 isotopes

#### 6.3.1 JENDL 高エネルギーファイル（日本）

JENDL 高エネルギーファイルの現状及び予定に関しては、付録 9 を参照のこと。現状で整備の進んでいる IFMIF 用 JENDL High Energy File の中性子ファイルに関しては、現在、Na-23, Mg-24,25,26, Al-27, Si-28,29,30, K-39, Ca-40,42,43,44,46,48, Ti-46,47,48,49,50, V-51, Cr-50,52,53,54, Mn-55, Fe-54,56,57,58, Ni-58,60,61,62,64, Cu-63,65, Y-89 の 38 核種について、JENDL-FF 及び JENDL-3.2 とのつなぎを終えて、チェック中 ( $En < 50$  MeV) である。

#### 6.3.2 ENDF/B-VI High Energy File (BNL、米国)

C-12, Fe-56, Pb-208, Bi-209 について ENDF/B-VI High Energy File として整備されているが、この 4 核種を除いて今後整備される予定はない。エネルギー上限は C-12 が 10 GeV で、その他は 1 GeV で、ALICE-P をベースとした理論計算を基に評価を行っている。ENDF/B としては、今後、次に述べる LANL ファイルとの関係に依存する。

### 6.3.3 LANL High Energy File (LANL、米国)

エネルギー上限は 150 MeV で加速器関連施設用に作成されている中性子及び陽子入射高エネルギーファイル及び KERMA 因子ファイルである。FKK-GNASH をベースとした理論計算を基に評価を行っている。現状で格納されているのは、H-1, C-12, N-14, O-16, Al-27, Si-28,29,30, Ca, Cr-50,52,53,54, Fe-54,56,57,58, Ni-58,60,61,62,64, Cu-63,65, Nb-93, W-182,183,184,186, Pb-206,207,208 に対するものである。

### 6.3.4 ECN High Energy File (ECN Petten、オランダ)

LANL と同様に、ECIS96 及び GNASH をベースとした理論計算を基に評価を行っている 150 MeV までの陽子及び中性子入射の加速器用ファイルである。現状で、Fe-54,56, Ni-58,60 を格納している。

### 6.3.5 FZK IFMIF File (FZK、ドイツ)

Korovin (Dubna)らの評価を Forschungszentrum Karlsruhe (FZK)で編集した、50 MeV までの IFMIF 用中性子ファイルである。Cr-52, Fe-56, V-51 が格納されている。

### 6.3.6 WIND (IPPE Obninsk、ロシア)

Waste Incineration Nuclear Data Library (WIND)として整備されているのは、100 MeV までの U-232-238, Np-237,239, Pu-236-244 に対する中性子入射反応及び U-238 に対する陽子入射反応である。ファイル名にもあるように廃棄物の消滅処理用に整備されており、中性子入射の 576 反応、陽子入射の 32 反応を格納している。ただし、フォーマットが国際的に標準とされているものと異なるため、直接使用できない。但し、最近このデータを ENDF-6 型式に変換したとの報告がある。

### 6.3.7 MENDL-2 (IPPE Obninsk、ロシア)

Medium Energy Nuclear Data Library (MENDL-2)として整備されている。100 MeV までの 505 核種の放射化断面積を ALICE-IPPE で計算したものが格納されている。これも膨大な量があるが、WIND と同様に、フォーマットが国際的に標準とされているものと異なるため、直接使用できない。但し、最近このデータを ENDF-6 型式に変換したとの報告がある。

### 6.3.8 Barashenkov Compilation (NEA Data Bank)

多くの核種の中性子及び陽子入射に関する全断面積、弹性散乱断面積、弹性散乱外断面積等が表形式で収納してある。実験値のサーベイと思われる。

## 参考文献

- [1] W.B. Wilson, Nuclear Data Development and Shielding Design for Neutrons Below 60 MeV, LA-7159-T, LANL (1978).
- [2] H. Schaal and D. Filges, Combination of the High Energy Libraries LANL and HILO as LAHI - Library for Deep Penetration Calculations, SNQ3J/BH120783, KFA (1983).
- [3] D. Filges, et al., Procedures and Data for Shielding Calculations of Spallation Target Stations and Accelerators in the Medium Energy Range, ESS 94-10-T (1994).

## 7. シグマ委員会及び利用者への提言

高エネルギー核データ積分テストに関するタスクフォースでは、前述の第 2 章から第 5 章で述べられたように、個々の課題について詳細な検討が行われた。本章ではこれら各検討結果から導き出された結論と今後の課題をまとめ、高エネルギー核データの整備に係わる各研究委員会及び利用への提言とする。

### 7.1 各検討グループからの主要な結論

#### 7.1.1 微分測定データの収集

##### 中性子入射実験データ

全断面積に関しては、600 MeV までの LANCSE/WNR の高精度のデータがある。微分断面積に関して、20 MeV 以上における中性子反応の実験データは非常に乏しく、質的にも不十分である。しかし、100 MeV までのデータは、ここ 10 年程度の間に大きな進展が見られた。これにより、比較可能な実験データや計算の検証に有効なデータなどが、ある程度蓄積され有効なデータベースが形成されている。

##### 陽子入射実験データ

EXFOR へのデータ収録状況に関しては、中性子データに比べて幾分充実しているが、最新データの収録率は必ずしも満足できる状況にはない。データは物理的興味の目的が多く、重複が無いため信頼性評価は困難である。従って、実際に評価に使えるデータの選別作業ならびにその編集作業が急務である。

##### 今後の課題

高エネルギー領域では、単色中性子源を得ることが難しく、感度の低い中性子スペクトロメータを使用せざるを得ない。従って、中性子データの取得のためには、大強度と狭いパルス幅を持った適切な中性子源が必要である。また、中性子、陽子入射データとも、広いエネルギー・標的核の質量数領域にわたって、系統的な核データ測定が必要である。

#### 7.1.2 ベンチマーク問題の収集

##### 実験データの現状

陽子入射での実験データは、100 MeV 以上では全て中性子測定または TTY データである。中性子入射では、100 MeV 以下のデータに限られている。

##### データ収集の課題

核データ積分テストに用いるためには、実験の数値データ収集を行う必要がある。

文献データは限られており、原著者から直接入手する必要がある。また、データベース化にあたっては RSIC の SINBAD との協力も考えられる。データベース化の場合、微分データと同様ベンチマーク解析が必要な核種、エネルギー、反応等を特定するとともに、取捨選択が必要である。また、目的に応じて、新たなベンチマーク実験の提言を行うことも必要である。

### 積分テストの課題

荷電粒子輸送を含まない中性子輸送に関しては、MCNP で計算できるが、高エネルギーでは、核データファイルを十分忠実に用いる計算コードが必要である。

### **7.1.3 断面積処理と輸送計算コード**

#### ファイルの書式の現状と課題

核データを処理するためには、ファイルの書式が明確に定められる必要がある。ENDF-6 フォーマットが世界標準となりつつあるが、許される書式全てに対応する処理コードは存在しない。現在 LANL 形式と JAERI-BNL 形式があり、JENDL-HE は中間子データを考慮して後者を採用している。NJOY は今後とも LANL 形式に対応すると思われる所以、JAERI-BNL 形式については変換コードが必要である。

#### 処理コードの現状

JENDL-HE から断面積ライブラリーを作成するための核データ処理コードは、以下の処理要件を満たす必要がある：

- 1) ENDF-6 対応、
- 2) 粒子生成データの処理 (MT=5 または MT=201-207)、
- 3) JENDL-HE に対応した処理の上限エネルギーの引き上げ、
- 4) 適切な書式のライブラリーが作成可能。

しかし、現在、ENDF-6 フォーマットの MF=6 (エネルギー角度分布) を実際に取り扱える公開された処理コードは NJOY94 しかない。AMPX コードは対応作業中でありまだ公開されておらず、その他は不明である。国内の MACS-N や RADHEAT-V4 等の処理コードは対応計画が明らかではない。

#### 輸送計算コードの課題

JENDL-HE ファイルの評価とその利用のためには、JENDL-HE ファイルから作成される断面積ライブラリーを使用する高エネルギー輸送計算コードの存在が不可欠である。そのため、独自の輸送計算コードの開発整備が強く望まれる。

### **7.1.4 標準レビュー手法**

従来のレビューに必要な微分データが十分存在しないため、JENDL-HE 評価デー

タを限られた微分・積分データよりチェックする新たな「レビュー&確認」手法の確立が必要である。このために必要な作業は以下のとおりである。

- (1)EXFOR ミラーサイト運用管理及び新規データ検索/取得作業
- (2)微分データの検索/取得のための EXFOR 処理 tool の整備作業
- (3)JENDL-HE 編集 tool と微分データを描画するグラフ tool の整備
- (4)積分データの取得/選択とデータベース化作業
- (5)JENDL-HE から TTY を算出する tool の整備
- (6)上記 tool を含めた新たな「レビュー&確認」方法の手順化作業  
(systematics の検討等を含めたマニュアル化)

## 7.2 シグマ委員会及び利用者への提言

### 7.2.1 シグマ委員会への提言

高エネルギー核データの評価ファイルに関して、第一ステップとして行うべき作業は、評価データの物理的または書式的なチェックのためのレビューである。このために、以下の作業グループを組織する。

- (1)微分データの取得/選択とデータベース化作業
- (2)レビュー手法の整備
- (3)これを用いたレビュー作業
- (4)新たに測定の必要な微分測定データの提言

### 7.2.2 シグマ及び炉物理両委員会への提言

前項でレビューされた高エネルギー核データ評価ファイルに対して、核データの問題点の摘出を通じてより信頼性の高い JENDL-HE の完成を目指すために、積分テストを行う。このために、以下の手順で作業グループを組織する。

- (1)積分データの取得/選択とデータベース化作業
  - a)利用者の目的とデータの種類及び要求精度の調査作業
  - b)上記の調査を基にした重要度の高いデータの数値化作業
- (2)JENDL-HE ファイルのベンチマーク計算を実施するグループを結成し、以下の手順で実施する。
  - a)まず、250 MeV 前後までの MCNP 型ライブラリーによる積分テストを行う。このために、ライブラリー及び積分データベースを整備する。陽子入射データに関しては、MCNPX 同等コードができるまで、次の 250 MeV 以上と同じ扱いとする。
  - b)250 MeV 以上については、MCNPX の動向を見つつ、JENDL-HE ファイルからの断面積処理を行ったデータを用いる輸送計算手法の検討、そのためのデータ変換処理法、データ形式等の検討を進める。
- (3)遮蔽計算等のために、緊急性と重要性の高い多群断面積について、データ

調整手法を含めた、新たな作成方法を検討し緊急に整備を進める。

### 7.2.3 核データセンターへの提言

以上の提言の内、JENDL-HE 評価データのレビュー手法確立のため作業は核データセンターが主体となって進めるべきである。

(1)EXFOR ミラーサイト運用管理及び新規データ検索/取得作業

(新規データの検索/取得には source を定めて定点観測するグループの設置)

(2)微分データの検索/取得のための EXFOR 処理 tool の整備作業

(陽子入射については CHESTOR の改良、中性子入射については NESTOR2 の改良)

(3)JENDL-HE 編集 tool と微分データを描画するグラフ tool の整備

(現行の CRECTJ の改良と gnuplot 対応の ascii ファイル出力 tool)

## 8. 結 言

JENDL High Energy File (JENDL-HE)第1版の完成を目前に控えている一方で、そのデータレビュー及び確認のための積分テスト手法が未確立であるのは大きな問題である。そのため、シグマ委員会では JENDL-HE に関する積分評価のためのタスクフォースを 1997 年度に設置し、JENDL-HE 評価に係る問題点の現状を調査・検討し、今後のシグマ委員会における中高エネルギー核データ評価および整備に対する指針を得ることを目的として 1 年間の調査活動を実施した。本報告書では、中性子及び陽子入射に対する微分測定データの調査結果、ベンチマーク実験の調査結果（ユーザニーズ、スペクトルデータ、放射化データ）、中高エネルギー核データの特殊性とそれに伴う断面積処理法・輸送計算手法・ベンチマーク手法に係るテスト計算結果、標準的なレビュー手法の検討結果及び必要なタスク、海外の動向調査（主として米国を中心とした開発動向および欧米の高エネルギーファイルの現状）、本タスクフォースの調査検討により明らかとなったシグマ委員会および利用者グループに対する提言をまとめ、シグマ委員会に対する報告を行った。また、炉物理研究委員会・高エネルギー粒子工学専門部会の報告書である「高エネルギー核データライブラリーの現状と提言」についても検討の参考としたので、付録として収録している。

これらの調査結果及び提言が、今後の高エネルギー核データ整備へ向けた活動の参考になれば幸いである。更に言うならば、この提言を基に、必要であればシグマ委員会のワーキンググループを再編成し、ユーザ側との連携を保ちつつ、より効率の良い作業が行われることを期待する。また、高エネルギー核データの整備の結果もたらされる JENDL-HE の有効利用のためには、ライブラリ作成、輸送コードの整備等ユーザからの協力が必須であることも言うまでもあるまい。核データ整備側及びユーザ側の密接な協力及び共同作業を望むものである。

付録 1

平成 10 年 3 月 5 日 (木)  
炉物理委員会  
第 4 回高エネルギー粒子工学専門部会  
資料 No. 4-4-2

## 高エネルギー核データライブラリーの 現状と提言

炉物理委員会・高エネルギー粒子工学専門部会  
高エネルギー核データライブラリー WG

WG メンバー：

大山幸夫（リーダー）、中島宏、深堀智生、小迫和明、佐々敏信、高橋亮人、秦和夫、  
義澤宣明、山野直樹、長谷川明、坂本幸夫、高田弘、前川藤夫、明午伸一、池田裕二郎

オブザーバー：馬場護、井口哲夫、前川洋

## 高エネルギー核データライブラリーの現状と提言

炉物理委員会・高エネルギー粒子工学専門部会  
高エネルギー核データライブラリーWG

### 1. はじめに

高エネルギー核データの評価がシグマ委員会で進み今年度中には、50MeVまでのJENDL High Energy Fileが完成する。しかし、そのフォーマットについてはSG13等では議論されているが、国内では将来それの利用を予定している高エネルギー核データの利用者側（ライブラリー作成者・輸送計算コードの使用者）からの意見が十分反映されているとは言えない。シグマ委員会からも利用者の意見を反映させるよう提言があった。また、IFMIF用のMCNPライブラリー作成を検討したところ現行のENDF/B-VI形式で、中性子生成の粒子多重度の記述等いくつかの問題点が指摘されている。一方、原研では中性子科学研究計画が立ち上がりつつあり、1GeVまでの輸送計算が頻繁に行われるようになると考えられる。従って、この領域まで含めた断面積ライブラリー及び群定数の考え方を、計算手法と関連して現行のものから将来を見据えて議論し整理する必要があるとともに、核データ評価グループへの早期のフィードバックが必要であると思われる。

このような背景をもとに、炉物理委員会・高エネルギー粒子工学専門部会の中に高エネルギー核データライブラリーWGを置き平成8年度10月より検討を進めてきた。当初設定されたWGの目的は、以下の内容と対象について議論し、今後の方向について提言することであった。

#### (1) 検討内容

##### 1) 群定数の考え方

PL-SN計算コードの適用と群定数の考え方

##### 2) 高エネルギーライブラリーの考え方

MCNP型計算コードとNMTC(HETC)型コードを含んだ方向性

検討

##### 3) 以上を満足するフォーマットと要求される核データの評価について

#### (2) 検討対象

##### 1) 群定数ライブラリー

群定数コード(PL-SN計算)とライブラリーの考え方

- 2) 高エネルギーポイントデータライブラリー  
モンテカルロ計算とライブラリーの考え方
- 3) 核データファイルフォーマット  
ライブラリーと核データ評価への要求

本報告は、以上の議論を電子メールを利用して行ない、利用者側から見た高エネルギー核データライブラリーの利用の現状と核データ評価を進める側への利用者側からの提言としてまとめたものである。

## 2. 高エネルギー核計算の現状

### (1) 利用分野とエネルギー

- 1) 加速器ハイブリッド核エネルギーシステムの核設計（中性子源設計を含む）  
中性子科学研究センターで目指す研究施設、実験施設及び加速器駆動消滅処理システム設計を行う際の核計算コードに関連した利用  
陽子エネルギー、中性子エネルギー < 1.5GeV、  
ミュオン核融合などへの利用では最適な陽子エネルギーは < 3GeV

### 2) 加速器施設遮蔽

中性子科学研究計画用加速器、核破碎中性子源、消滅処理加速器、  
大型ハドロン計画等の加速器施設の遮蔽設計コードに関連した利用  
陽子エネルギー < 50 GeV (JHF)  
1-1.5GeV (核破碎中性子源、消滅処理加速器)

### 3) 医療照射・RI 製造

陽子線治療、RI 製造用加速器の患者に対する計画線量設計  
陽子エネルギー < 250MeV  
重イオンについては輸送を考えるかどうかで核データとの関連は異なる。

### 4) 核融合材料照射試験装置 IFMIF

核融合材料開発のための準 14MeV 中性子照射場の設計と照射線量評価のための利用。既にファイル化及びMCNP ライブラリー化が進んでいる  
中性子エネルギー < 50MeV

### (2) 利用形態、計算対象

#### 1) 加速器ハイブリッドシステムの核設計

i) 陽子－中性子（+パイオニア、ガンマ線、荷電粒子）輸送計算  
時間依存輸送を含む場合もある

ii) 核種生成量評価

iii) 誘導放射能評価

iv) 材料損傷評価

v) 燃焼計算（核変換）

vi) 各種結合計算

高エネルギー輸送－臨界計算、核熱計算、

高エネルギー－低エネルギー結合計算

vii) 実験解析用ドシメトリーファイル

対象核種：構造材、MA、核燃料、冷却材（水、液体金属、溶融塩）等の構成  
核種が必要で核種数が多い

## 2) 加速器施設遮蔽

i) 陽子－中性子線源生成

ii) 高エネルギー中性子輸送（深層透過）

iii) ストリーミング（迷路を含む）

iv) スカイシャイン（幾何学的スケールの大きい計算）

v) 線量換算

vi) 放射化核種生成量評価

対象核種：コンクリート、鉄、W、土、線源評価として銅、SS等

## 3) 医療照射・RI 製造

i) 陽子輸送・線量評価

ii) 陽子による核変換

iii) 陽子による生成中性子遮蔽

対象核種：遮蔽材、ファントム（人体）、

RI 製造（陽子による核変換）では各種可能性ある

## 4) 核融合材料照射試験装置 IFMITF

- i) 重陽子 Li 反応断面積
- ii) dpa
- iii) ガス生成率
- vi) 核変換率

対象核種として IFMIF 用 MCNP ライブラリーに収納予定のものをいかに上げる。但し、これ以外にドジメトリーファイルが必要である。

整備済	$^{23}\text{Na}$ , $^{27}\text{Al}$ , $^{39}\text{K}$ , $^{47}\text{Ti}$ , $^{48}\text{Ti}$ , $^{49}\text{Ti}$ , $^{50}\text{Ti}$ , $^{51}\text{V}$ , $^{50}\text{Cr}$ , $^{52}\text{Cr}$ , $^{53}\text{Cr}$ , $^{54}\text{Cr}$ , $^{55}\text{Mn}$ , $^{54}\text{Fe}$ , $^{56}\text{Fe}$ , $^{57}\text{Fe}$ , $^{58}\text{Fe}$ , $^{63}\text{Cu}$ , $^{65}\text{Cu}$ , $^{89}\text{Y}$
収納予定	H, $^6\text{Li}$ , $^7\text{Li}$ , $^{12}\text{C}$ , $^{14}\text{N}$ , $^{16}\text{O}$

### (3) 要求計算精度（暫定値）

- 1) 加速器ハイブリッドシステムの核設計  
核変換量 10%、放射化量 20-30%、臨界度<1%
- 2) 加速器施設遮蔽  
線量 50%、放射化量 50%（取扱規模が大きいため）
- 3) 医療照射・RI 製造  
実情は不明で調査の必要がある。  
線量 5%（測定誤差、位置誤差を含めて多数回照射の合計で、計画線量の±5%を達成することが目標）  
中性子照射は考えない。
- 4) 核融合材料照射試験装置 IFMIF  
輸送断面積 20-30%、核変換・ガス生成 10-20%、最も精度が要求されるのは最終的にはドジメトリーモニターで照射量が値付けされるので、ドジメトリー反応 10%以下が要求される。

### (4) 利用されている計算手法の現状

- 1) 加速器ハイブリッドシステムの核設計
  - i) 消滅処理システム  
ターゲット + 臨界計算  
ATRAS (NMTC+MCNP, NMTC+TWODANT)  
炉心燃焼計算 (一群化コード BURNER)

核発熱(NMTC)

ii)中性子源設計

冷熱中性子特性

NMTC+MCNP,LCS(LAHET+MCNP)

HERMES(HETC-KFA+MORE-CG+EGS4+NDEM)

FLUKA

MCNPX(MCNP (150MeV) +HETC サブルーチン)

## 2) 加速器施設遮蔽

i)バルク遮蔽

簡易計算

Moyer モデル (減弱距離モデル)

高速モンテカルロコード

MARS (1ステップカスケード近似)

FLUKA (各種バイアス)

2次元多群コード

DORT/HILO86 <400MeV

PKN (点線源核コード)

<400MeV

ii)ストリーミング

モンテカルロ計算

詳細メッシュ 2次元多群コード <400MeV

簡易計算

Tesch の式など

iii)スカイシャイン

2次元多群コード <400MeV

SHINE-II <400MeV

中村の式、Stevenson-Thomas の式

iv)放射化物生成

NMTC、HETC 等のカスケードコード

## 3) 医療照射・RI 製造

陽子入射核反応データがあればよい

## 4) 核融合材料照射試験装置 IFMIF

モンテカルロコード MCNP と 50MeV 以下の核データファイルがあれば良い。

### 3. 問題点と課題

#### (1) 高エネルギー粒子輸送モンテカルロコードの現状

i)バイアスの使用	FLUKAのみ可 MARSはLeading particle バイアス
ii)適用エネルギー	3GeVまで NMTC、HETC 3GeV以上 FLUKA、MARS
iii)幾何学入力	CG型 NMTC、 HETC/KFA2 ,FLUKA GG型 LAHET
iv)20MeV以下との 結合	NMTC->MCNP 結合計算 LCS (LAHET +MCNP) MCNPX (MCNPの中で HETC をサブルーチン化) FLUKA,MARS 一体型 HERMES(HETC/KFA2+MORSE)
v)核種生成計算	MARS 不可 HETC、NMTC 精度上の問題あり FLUKA 可 (作成者)

注) 以上の計算コードについては後の参考又は、添付の平山氏のまとめた「ハドロンカスケードコードの歴史と現状」を参照されたい。

#### (2) 問題点

i)核種生成量計算精度が良くない
ii)数百 MeV以下の領域では全断面積及び弾性散乱断面積の精度が十分検証さ れていない。
iii)2次γ線生成の精度が不足 (高エネルギーについて) 高エネルギー電子制動輻射の取り扱い HERMES,FLUKA-->EGS4
iv)パイオン、ミュオン断面積の精度不明 decay や制動輻射の取り扱いを含む
v)軽核の計算精度が悪い
vi)その他 FLUKA 未公開 MCNPX/LCS 未公開

### (3) 米国の現状 (LANLの考え方)

MCNP コードを拡張し、150MeV 以上では LAHET モジュールを call する。150MeV 以下では、MCNP を荷電粒子輸送 ( $p, d, t, He, n, e, e^+, \mu, \gamma, \pi \dots$ ) まで拡張すると同時にそれらのライブラリーを EDNDF6 ベースで作成する。MCNP のユーティリティが利用できる最高のコードシステムとなる可能性は大きい。

### (4) 日本の現状

- i) NMTC/JAERI は 3GeV 以上の拡張を目指して QMD の組込及び  $\Delta$  decay 生成モデル拡張を試みており、QMD が物理モデルとしての独自性となる。
- ii) 幾何学形状が CG 型なので MCNP には線源ファイルとして結合計算をする必要があり、中間ファイルが膨大である。(LAHET、HERMES も同様)
- iii) 20MeV 以下では MCNP を標準として JENDL-FF ファイルから NJOY を使う MCNP ライブラリーへの手順が整備されている。
- iv) MCNP のように標準コードとして LAHET、MCNPX、FLUKA 等を導入できるか。強力なサポート体制を持つ LANL には MCNP 並みの保守体制、QC を期待できるが、今後日本への公開はどうなるか不明。

## 4. 高エネルギーの標準コードへの提言

標準コードは実用的観点では信頼のおけるシステムを導入するのも一法であるが、戦略的観点または将来の付加価値等を考慮すれば、物理モデルを改良でき且つ保守の可能なコードシステムを日本独自で持つのが望ましい。また、核データ評価の観点からは、このようなコードシステムがなければ評価を行うことの意義を見いだすことは難しいよう思える。そこで、以上述べてきた利用の現状をもとに、日本（または原研のみかもしれないが）で確立すべき標準コード体系について以下のように提言する。

- i) 許認可にも使える標準コードとしては、ベンチマークテスト、実験との検証等精度保証を行えることが必要。
- ii) このためには、参照コードとして LCS 等の既に実績のあるコードとのベンチマーク計算比較を行うこと。
- iii) コード保守を確実にできるなら、標準コードは自前でなくても良いとも考えられ

る。

- iv) 核データを含め精度向上のための改良を行うなら、自前コードかライブラリーに互換性のあるコードを使うべきである。
- v) 核エネルギーシステムの設計に対応するには、ユーティリティ（核熱・構造計算コード）と炉心計算との整合性が必要で、しかも非定常計算（時間依存）もできること。

## 5. 核データ評価活動への提言

これまで述べた利用者側の論理を踏まえて、高エネルギー核データの評価活動についてその必要性とどのような核データを優先すべきかの優先度について以下のように提言する。

### (1) 高エネルギー核データライブラリーの必要性

- i) 核種生成評価の高精度化には核データ評価によるライブラリーが必要
- ii) 数百 MeV 以下の断面積の高精度化には核データ評価による輸送断面積（少なくとも全断面積、弹性散乱断面積）が必要。ただし、全断面積、弹性散乱断面積のみをライブラリー化して使えるコード改造が必要
- iii) 今後、数百 MeV 以下のより一般的な利用（医療など）が見込まれるなら、より簡便に使える MCNP だけで計算できるようにする考え方もある。この場合、数百 MeV 以下の ENDF6 型ファイルから MCNP ライブラリーをつくることになる。但し、陽子ビーム入射輸送計算が必要。
- iv) 遮蔽での多群コードは計算時間から見て便利であるため、ライブラリーが欲しいところであるが、ルジャンドル展開を無視してもパイオン等 2 次粒子輸送を無視できるエネルギーまでに限られる。HILO の 400MeV が参考となるが、必ずしも評価済ファイルほどの精度は求められないと思われる。
- v) ベンチマーク実験用のドシメトリー反応断面積はコード検証のためには必須である。
- vi) 高エネルギー加速器施設の放射線管理上のドシメトリー反応断面積（多分 v) と同じ）、また、線量換算係数評価や核発熱評価のための荷電粒子生成データは必要である。

### (2) 高エネルギー核データ評価の優先度

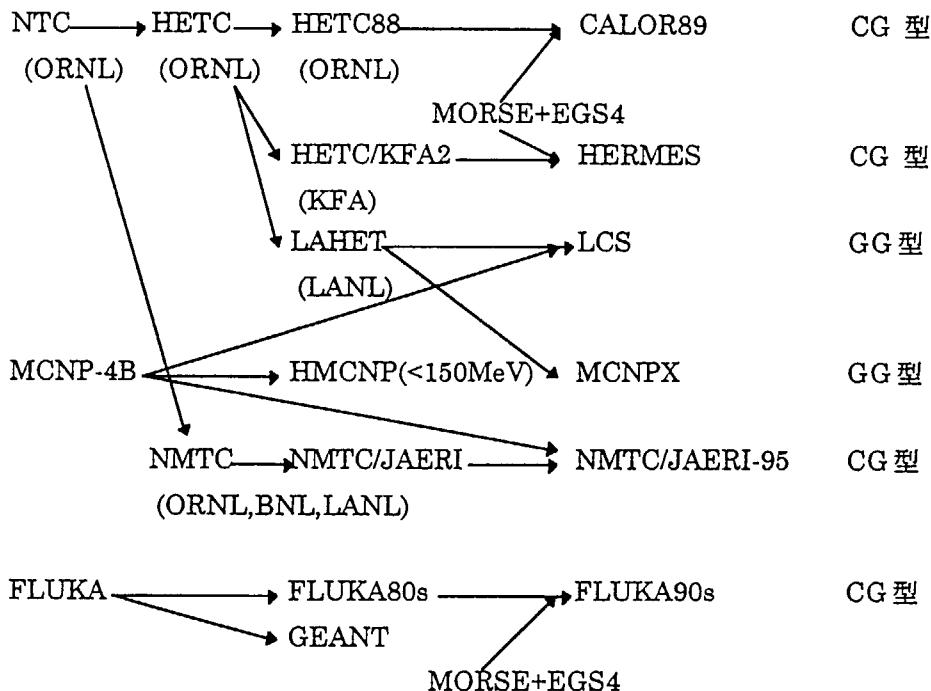
- i) 核種生成断面積ライブラリー

- ii) 数百 MeV以下の拡張輸送断面積ファイル（荷電粒子輸送への対応(DDX)、2 次  
γ線生成データの拡張）
- iii) 実験解析・放射線管理用ドシメトリーファイル

## 6. 今後の方向

利用者側からの提言をまとめたが、特に強調したいのは、高エネルギー核データはこれまでの核データとは違って、輸送計算コードと核データ評価コードが一体になる点であり、基本的な取り組み方が異なって来ることに注意すべきである。今後いかに評価活動側との連携・協力の下に進めていくべきか、或いは評価者側からの意見の反映を含めて継続的な議論の場が必要と思われる。これは、シグマ委員会と炉物理委員会との共同で行うのがふさわしいであろう。

## [参考]

Historical Relation of High Energy Particle Transport Codes

	開発機関	Energy	Model (>20 MeV)	幾何形状	<20MeV 結合
HETC 系列		>3.5 GeV は scaling			
CALOR89	ORNL	<10TeV	Bertini, Q-eff <sup>1</sup> besides Pauli	CG	history list MORSE
HERMES	KFA	<10TeV	Bertini, Q-eff besides Pauli	CG	history list MORSE
LCS	LANL	<10TeV	Bertini or Isabel, pre-eq <sup>2</sup> , Q-eff besides Pauli, Fermi breakup	GG	history list MCNP
MCNPX	LANL	<10TeV	LCS と同じ	GG	MCNP からの call
NMTC/JAERI	JAERI	<3.5GeV $\pi < 2.5GeV$	Bertini or ISOBAR, pre-eq, Q-eff besides Pauli	GG or CG	history list MCNP
FLUKA	INFN	<10TeV	Dual Parton, $\Delta$ decay production, Bertini, pre-eq, Q-eff, Fermi breakup, Refr.&Refl. <sup>3</sup>	CG	一体化(EM を含む)

<sup>1</sup> Q-eff : Quantum effect<sup>2</sup> Pre-eq. : Preequilibrium effect<sup>3</sup> Refr.&Refl. : Refraction and Reflection of particles in nucleus.

# Hadron Cascade Monte Carlo Code

## の歴史と現状

1997年9月25日

平山 英夫

高エネルギー加速器研究機構

### 1 核内カスケードモデルに基づくコードの系列

核内カスケードモデルは、1947年にSerberによって提唱され[1]、その後Goldberger[2]、Metropolis等[3]によって具体的な計算がなされた。その成果は、DubnaのBarashenkovのグループ[4]、BNL/Columbiaのグループ[5]及びORNLのBertiniのグループ[6]によって計算コードとして展開された。

#### 1.1 HETC系列コードの開発

Bertini等によるMECC(Medium Energy Cascade Code)[for examples 7]を基に、HETC系列のコードがORNLで開発されてきた。

1. NTC(~ early 1960's) -  $E_0 \leq 400$  MeV
2. NMTC (~ 1971) -  $E_0 \leq 3$  GeV
3. HETC/RSIC Version (~1973) -  $E_0$  above 3 GeV

Incorporates MECC-7, EVAP IV

NMTCコードは、その後BNL(?)、JAERI(NMTC-JAERI[8])等で独自の改良がなされてきている。

一方、HETCコードは、RSICバージョンから様々な機関で改良が行われてきている。例えば、

1. HETC/ORNL Version - ORNL
2. HETC/SAI Version - SAI (Science Applications, Inc.)
3. HETC-KFA2 - KFA as the parts of HERMES[9] 等がある。
4. LAHET[10] - Los Alamos National Laboratory
5. HETC-3 STEP[11] - Japan MRI, JAERI, Kyushu Univ.

一方、SSCプロジェクトの中でHETCをより高いエネルギー領域に適用する中で核内カスケードモデルの拡張では正しい結果を得ることが出来ない事が明らかになり、高エネルギーでの散乱モデル[12,13]を3 GeV以上のエネルギー領域に導入したHETC93がORNLからカロリメーター解析システムCALORシステム[14]の開発と関連して開発された。

これらのコードは、基本的に20MeV以下の中性子は、MCNP等の中性子・光子のモンテカルロコードと、電磁カスケードについてはEGS4等のモンテカルロコードに接続して計算するシステムになっている。

## 2 粒子生成モデルに基づくコード

核内カスケードモデルに基づくコードとは別に高エネルギー粒子生成モデルを用いた一連のモンテカルロコードが Ranft と CERN の放射線グループによって 1960 年台から開発されてきた。[15] 様々な名前のコード (TRANKA, KASPRO, MAGKA etc.) が作られたが、最終的には FLUKA の名前のコードとして発展してきた。最初の FLUKA[16] は、50 MeV 以上の粒子しか扱う事ができなかったが、FLUKA-87 のリリース前に A. Ferrari 等のグループが加わり低エネルギー領域への拡張を含めた改良を初めとしたコードの大幅な改良が始まり、現在も続いている。高エネルギー領域の粒子生成モデルは、80 年代に、Dual Parton Model が組み込まれていたが、中間エネルギー領域への拡張は、PEANUT(PreEquilibrium Approach to Nuclear Thermalization)[17] の組み込みにより実現している。現在 FLUKA は、電磁カスケードや低エネルギー中性子を含めて、一つのコードで全てを扱う事が出来るようになっているが、ユーザに自由に使わせる状況になっていない問題がある。

## 3 その他のコード

上記のモンテカルロコードは、基本的に発生する 2 次粒子を全て追跡するという意味でアナログモンテカルロコードである。そのため、一般的に多くの計算時間が必要である。一方、平均的なハドロンカスケードの発達を知るには、Leading Particle Biasing などの手法が使える。この様なコードには、CASIM[18] や MARS[19] がある。CASIM は高エネルギー粒子を主な対象とし、粒子生成については、Hagedon-Ranft (HR) モデル [20] に補正を加えて使用している。MARS は、hadron-nucleus 相互作用について、5GeV 以上では半理論式を、5GeV 以下では、Sychev 等の式 [21] を使用している。20MeV 以下の中性子について、多群扱いで計算が出来るようになっているが、MCNP 等に接続する事も試みられている。

## 4 GEANT

上記のコードとは、全く別に高エネルギー物理の分野では GEANT[22] が主に使用されてきた。GEANT は、主として複雑な形状の検出器を効率よく扱うトラッキングのコードで、ハドロンカスケードの部分は、GHEISHA[23] が使用されている。GEANT は、別のカスケードコードを組み込むことが可能で、SSC において速及び低エネルギー中性子の扱いが不可欠になってからは、GEANT-CALOR, GEANT-FLUKA 等の計算が行われている。GEANT については、高エネルギー分野で精力的に改良が取り組まれており、現在は Object-Oriented なプログラムにしていくプロジェクトが進行中である。

## 5 まとめ

これまでに述べた内容は、下記の文献を基に整理したものである。引用した文献全てに目を通したものではなく、あくまで基本となる文献の引用を紹介したものである。従って、引用文献や各コードのバージョンについては必ずしも最新のものとはなっていない。しかし、様々なハドロンカスケードモンテカルロコードの概要を理解する資料として役に立つと思われる。

情報の乏しいロシアや中国でのコードについてはふなかったが、特にロシアについては、注目すべきコードで知られていないものがあるようである。

- a) "Computer Techniques in Radiation Transport and Dosimetry", Edited by W. R. Nelson and T. M. Jenkins, Prenum Press .
- b) "Radiation Levels in the SSC Interaction Regions", Task Force Report, D. E. Groom, Edited. SSC Central Design Group June 10, 1988.
- c) Proceedings of the Workshop on Calorimetry for Supercollider March 13-17, 1989, University of Alabama, Tuscalosa, Alabama
- d) Proceedings of the Workshop on Simulating Accelerator Radiation Environments, January 11-15, 1993 Santa Fe, New Mexico, USA.
- e) MC93, International Conference on Monte Carlo Simulation in High Energy and Nuclear Physics, Tallahassee, Florida, USA 22-26 February 1993.
- f) Second Workshop on Simulating Accelerator Radiation Environment CERN, 9-11 October 1995.
- g) Proceedings of the Third Workshop on Simulating Accelerator Radiation Environments, May 7-9, 1997 KEK, Tsukuba Japan  
*KEK Proceedings 97-5*

## 参考文献

- [1] R. Serber, *Phy. Rev.* **72**, 1114(1947).
- [2] M. L. Goldberger, *Phys. Rev.* **74**, 1268(1948).
- [3] N. Metropolis, R. Bivins, M. Storm, A. Turkevich, J. Miller, and G. Friedlander, *Phys. Rev.* **110**, 185(1958).
- [4] V. S. Barashenkov and V. D. Toneyev, *Vzaimodeystviya Vysokoenergeticheskikh Chastits i Atomnykh Yader 5* Yadrami, Moscow(1972).
- [5] K. Chen, Z. Fraenkel, G. Friedlander, J. R. Grouer, J. M. Miller, and Y. Shimamoto, *Phys. Rev* **166**, 949(1969).
- [6] Hugo W. Bertini, *Phys. Rev.* **188**, 1711(1969).
- [7] H. W. Bertini, M. P. Guthrie, and O. W. Hermann, "Instructions for the Operation of Codes Associated with MECC-3, A Preliminary Version of an Intranuclear-Cascade for Nuclear Reactiona," *ORNL-4564* (May 1971)
- [8] Y. Nakahara and T. Tsutsui, "NMTC/JAERI A Code System for High Energy Nuclear Reactions and Nuclear-Meson Transport Code," *JAERI-M 82-198*,(1982).
- [9] P. Cloth et al., "HERMES, A Monte Carlo Program System for Beam-Material Interaction Studies," *JüI-2203*, Kernforschungsanlage Jülich GmbH(1988).
- [10] R. E. Prael and H. Lichtenstein, "User Guide to LCS: The LAHET Code System," Los Alamos National Lab, *UR-89-3014*, September 1989.

- [11] N. Yoshizawa et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, **32** (1995).
- [12] P. A. Capella and J. Tran Thanh Van, *Phys. Letts.* **93B**, 2(1980).
- [13] P. A. Aarnio et al., CERN TIS Divisional Report, *TIS-RP/106-Rev* (1984).
- [14] T. A. Gabriel, "Codes, Models, and Cross Sections for Use in Analyzing Compensated Calorimeters," *Proceedings of Workshop on Compensated Calorimetry CALT-68-1305*, Pasadena (1985).
- [15] J. Ranft, "33 Years of High Energy Radiation Monte Carlo Calculations in Europe as seen from CERN," in Proceedings SARE2 *CERN/TIS-RP/97-05* (1997).
- [16] J. Ranft and J. T. Routti, "Monte Carlo programs for calculating three-dimensional high-energy (50 MeV - 500 GeV) Hadron cascade in matter," *Comp. Phys. Commun.* **7**, 27-342(1974).
- [17] A. Ferrari and P. R. Sala, "A New Model for Hadronic Interactions at Intermediate Energies for the FLUKA Code," in Proceedings MC93, 277-288(1993).
- [18] A. Van Ginnekin, "CASIM, Program to Simulate Hardronic Cascades in Bulk Matter," Fermilab, *FN-272* (1975).
- [19] N. V. Mokov, "The MARS Code System Users Guide, version 13(95)," Fermilab, *FN-628*(1995).
- [20] R. Hagedon and J. Ranft, *Suppl. Nuovo Cim.* **6**, 169(1968) etc.
- [21] B. S. Sychev, A. Ya. Serov and B. V. Man'ko, *MRTI-799*, Moscow(1979).
- [22] R. Burn et al., "GEANT3", CERN *DD/EE/84-1*(1984).
- [23] H. Fesefeldt, "The Simulation of Hadronic Shower-Physics and Applications," RWTH Aachen *PITHA 85/02* (1985).

## 付録 2 : Cに対する陽子入射核種生成断面積のEXFOR検索結果

Work no	Z-A	Reaction	Emin (eV)	Emax (eV)	Lab	Yr	comments
50018.002	C-12	(P, 2HE3),.SIG	Li-7	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	78 0.4±0.4mb
50018.002	C-12	(P, 2P),.SIG	B-11	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	78 47+9/-11mb
50018.002	C-12	(P, D+A),.SIG	Be-7	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	78 8.2±1.7mb
50018.002	C-12	(P, P+D),.SIG	B-10	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	78 37+8/-10mb
50018.002	C-12	(P, P+3-L1-6),.SIG	Li-6	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	78 0.3±0.5/-0.3mb
50018.002	C-12	(P, HE3+A),.SIG	Li-6	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	78 1.2±0.5mb
50018.002	C-12	(P, P+HE3),.SIG	Be-9	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	78 4.5±1.5/-0.3mb
50018.002	C-12	(P, T+HE3),.SIG	Be-7	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	78 0.9±0.5mb
50020.002	C-12	(P, X) 2-HE-3,.SIG		6.6000E+08	6.6000E+08	DUB	73
50020.002	C-12	(P, X) 1-H-2,.SIG		6.6000E+08	6.6000E+08	DUB	73
50020.002	C-12	(P, X) 2-HE-4,.SIG		6.6000E+08	6.6000E+08	DUB	73
50020.002	C-12	(P, X) 1-H-3,.SIG		6.6000E+08	6.6000E+08	DUB	73
50030.002	C-12	(P, X) ELEM/MASS,.IND.SIG		6.6000E+08	6.6000E+08	DUB	77
50030.007	C-12	(P, X) 2-HE-3,.IND.SIG		6.6000E+08	6.6000E+08	DUB	77
50030.007	C-12	(P, X) 1-H-3,.IND.SIG		6.6000E+08	6.6000E+08	DUB	77
50030.008	C-12	(P, X) 1-H-3,.IND.SIG		6.6000E+08	6.6000E+08	DUB	77
50043.002	C-12	(P, XN+4P),.IND.SIG.,REL	Li-6>9	1.0000E+09	1.0000E+09	RI	76
50043.007	C-12	(P, XN+4P),.IND.SIG.,RAW		1.0000E+09	1.0000E+09	RI	76
50050.002	C-12	(P, 2P),.IND.SIG	B-11	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79 47±9mb
50050.002	C-12	(P, 2P+T+A),.IND.SIG	He-4	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79 10±2mb
50050.002	C-12	(P, D+HE3+A),.IND.SIG	He-4	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79 9.4±3.1mb
50050.002	C-12	(P, P+2D+A),.IND.SIG	He-4	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79 6.7±3.5mb
50050.002	C-12	(P, P+D+A),.IND.SIG	Li-6	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79 7.4±2.9mb
50050.002	C-12	(P, P+HE3),.IND.SIG	Be-9	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79 4.5±1.5mb
50050.002	C-12	(P, P+D),.IND.SIG	B-10	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79 37±8mb
50050.002	C-12	(P, D+A),.IND.SIG	Be-7	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79 8.2±1.7mb
50050.002	C-12	(P, 3P+A),.IND.SIG	He-6	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79 1.9±1.9mb
50050.002	C-12	(P, 2P+A),.IND.SIG	Li-7	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79 11.8±3.6mb
50050.002	C-12	(P, P+2A),.IND.SIG	He-4	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79 37±2.3mb
50050.003	C-12	(P, 2P+D),.IND.SIG	Be-9	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79 1.4±1.2mb
50050.003	C-12	(P, P+3-L1-6),.IND.SIG	Li-6	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79 0.3±0.5/-0.3mb
50050.003	C-12	(P, P+D+HE3),.IND.SIG	Li-7	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79 0.06±0.06mb
50050.003	C-12	(P, HE3+A),.IND.SIG	Li-6	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79 1.2±0.5mb
50050.003	C-12	(P, 3P),.IND.SIG	Be-10	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79 1.3±1.3mb
50050.003	C-12	(P, P+D+T),.IND.SIG	Be-7	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79 0.03±0.03mb
50050.003	C-12	(P, P+T+HE3),.IND.SIG	Li-6	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79 0.03±0.03mb
50050.003	C-12	(P, P+D+T+HE3),.IND.SIG	He-4	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79 0.1±0.1mb
50050.003	C-12	(P, 2HE3),.IND.SIG	Li-7	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79 0.4±0.4mb
50050.003	C-12	(P, T+HE3),.IND.SIG	Be-7	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79 0.9±0.5mb
50065.002	C-0	(P, X) 6-C-11,.CUM.SIG.,REL		1.5000E+08	6.6000E+08	DUB	57
a0518.002	C-12	(P, X) 4-BE-7,.SIG		2.4600E+07	9.6300E+07	TUH	93 * 21points
a0518.002	C-12	(P, X) 4-BE-10,.SIG		2.4600E+07	9.6300E+07	TUH	93 * 21points
a0519.002	C-12	(P, X) 4-BE-7,.SIG		1.6000E+09	1.6000E+09	TUH	93 x
a0530.002	C-12	(P, X) 4-BE-7,.IND.SIG		2.7870E+07	9.4480E+07	UH	91 * 20points
60022.002	C-12	(P, N+P),.UND.SIG.,.EVAL	C-11	5.0000E+07	2.8000E+10	BNL	63
60022.006	C-12	(P, X) 4-BE-7,.SIG.,.EVAL		5.0000E+07	2.8000E+10	BNL	63
60047.002	C-12	(P, G),.SIG		5.0000E+06	1.1000E+07	ORL	55
60076.005	C-12	(P, N+P),.UND.SIG	C-11	8.5000E+06	1.0400E+08	HRV	52 * 42points
60077.002	C-12	(P, N+P),.UND.SIG.,.A	C-11	1.5900E+07	3.2000E+07	BRK	52 * 42points
60077.003	C-12	(P, N+P),.UND.SIG.,.A	C-11	9.3000E+07	3.4000E+08	BRK	52 * 8points
60092.002	C-12	(P, 2P),.CUM.SIG	B-11	4.1000E+07	2.5000E+10	PAR	77 * 5points
60092.002	C-12	(P, N+P),.CUM/UND.SIG	B-10	4.1000E+07	2.5000E+10	PAR	77 * 5points
60094.003	C-12	(P, N+P),.UND.SIG	C-11	5.9100E+08	5.9100E+08	CER	61
60095.002	C-12	(P, N+P),.UND.SIG	C-11	2.0700E+07	5.0500E+07	BNL	63 * 9points
60101.002	C-12	(P, N+P),.UND.SIG.,.A	C-11	1.7000E+08	3.5000E+08	BRK	56
60101.009	C-12	(P, N+P),.UND.SIG.,.A	C-11	3.4000E+08	3.4000E+08	BRK	56
c0056.002	C-0	(P, X) 6-C-11,.SIG		3.8500E+08	3.8500E+08	LVP	68
c0058.002	C-12	(P, N+P),.UND.SIG	C-11	5.0700E+07	1.5860E+08	HRV	66 * 17points
c0059.002	C-0	(P, X) MASS,.SIG		4.5000E+07	1.0000E+08	MRY	76
c0059.003	C-0	(P, X) ELEM/MASS,.SIG		1.0000E+08	1.0000E+08	MRY	76

## 付録 2 : Cに対する陽子入射核種生成断面積の EXFOR 検索結果 (つづき 1)

Work no	Z-A	Reaction		Emin (eV)	Emax (eV)	Lab	Yr	comments
c0060. 002	C-0	(P, X) 6-C-11., SIG		4. 6100E+08	4. 6100E+08	CHI	56	
c0060. 003	C-0	(P, X) 6-C-11., SIG		4. 6100E+08	4. 6100E+08	CHI	56	
c0061. 011	C-12	(P, 2N+P), UND, SIG	C-10	1. 5500E+08	1. 5500E+08	PAR	63	
c0062. 005	C-13	(P, N), SIG		1. 5500E+08	1. 5500E+08	PAR	65	
c0062. 011	C-12	(P, N+P), UND, SIG	C-11	1. 5500E+08	5. 7000E+09	PAR	65	
c0070. 003	C-13	(P, N), SIG		3. 2391E+06	4. 2500E+06	SWR	79	
c0206. 002	C-12	(P, N+P), SIG		2. 8800E+08	3. 8300E+08	LVP	60	
98207. 002	C-12	(P, N+P), SIG		2. 0200E+08	3. 4200E+08	LVP	60	
98207. 003	C-12	(P, N+P), SIG		2. 0200E+08	3. 5200E+08	LVP	60	
98208. 012	C-12	(P, 3N+3P), SIG	Be-7	3. 5200E+08	3. 5200E+08	LVP	60	
98209. 002	C-12	(P, N+P), SIG		5. 9100E+08	5. 9100E+08	CER	61	
98214. 002	C-12	(P, N+P), SIG		4. 2000E+08	2. 9500E+09	BNL	54	
c0216. 002	C-12	(P, N+P), SIG		2. 0000E+09	3. 0000E+09	BNL	58	
c0220. 003	C-12	(P, N+P), SIG	Be-7	5. 7000E+09	5. 7000E+09	BRK	60	
c0220. 004	C-12	(P, N+P+A), SIG		5. 7000E+09	5. 7000E+09	BRK	60	
98221. 002	C-12	(P, N+P), SIG		3. 0000E+09	6. 0000E+09	LRL	60	
98224. 008	C-12	(P, X) 4-BE-7., SIG		6. 2000E+08	2. 9000E+09	BNL	62	
98226. 003	C-12	(P, X) 4-BE-10., SIG		2. 2000E+08	2. 2000E+08	SDC	64	
98226. 004	C-12	(P, X) 4-BE-10., SIG		2. 2000E+08	2. 2000E+08	SDC	64	
98228. 002	C-12	(P, X) 4-BE-9., SIG		1. 5000E+08	6. 0000E+08	CSN	71	3. 2±0. 4, 5. 3±0. 7mb
98228. 003	C-12	(P, X) 4-BE-10., SIG		1. 5000E+08	6. 0000E+08	CSN	71	1. 1±0. 1, 2. 8±0. 4mb
c0231. 002	C-12	(P, N+P), SIG		2. 8000E+10	2. 8000E+10	BNL	62	
98232. 002	C-12	(P, X) 2-HE-6., SIG		2. 8000E+07	4. 4000E+07	MHG	70	
98232. 003	C-12	(P, X) 3-LI-7., SIG		2. 8000E+07	4. 4000E+07	MHG	70	
98232. 004	C-12	(P, X) 4-BE-8., SIG		3. 2000E+07	4. 4000E+07	MHG	70	
98232. 005	C-12	(P, X) 4-BE-9., SIG		3. 2000E+07	4. 4000E+07	MHG	70	
98232. 006	C-12	(P, X) 4-BE-10., SIG		2. 4600E+07	4. 4000E+07	MHG	70	
98232. 007	C-12	(P, X) 6-C-11., SIG		2. 1700E+07	4. 4000E+07	MHG	70	
98233. 002	C-12	(P, X) 3-LI-6., SIG		1. 5000E+08	6. 0000E+08	CSN	72	11. 6±1. 6, 15. 5±2. 2mb
98233. 002	C-12	(P, X) 4-BE-7., SIG		1. 5000E+08	6. 0000E+08	CSN	72	12. 1±1. 2, 11. 0±1. 1mb
98233. 003	C-12	(P, X) 3-LI-7., SIG		1. 5000E+08	6. 0000E+08	CSN	72	9. 2±1. 6, 13. 6±2. 1mb
98234. 002	C-12	(P, X) 4-BE-7., SIG		2. 4500E+07	1. 5500E+08	ORL	67	
98235. 002	C-0	(P, X) 4-BE-7., SIG		2. 2500E+08	7. 3000E+08	USA	60	
98235. 003	C-0	(P, X) 1-H-3., SIG		2. 2500E+08	7. 3000E+08	USA	60	
98235. 004	C-0	(P, X) 4-BE-7., SIG		2. 2500E+08	7. 3000E+08	USA	60	
98235. 005	C-0	(P, X) 1-H-3., SIG		2. 2500E+08	7. 3000E+08	USA	60	
98235. 006	C-0	(P, X) 4-BE-7., SIG		2. 2500E+08	3. 0000E+08	USA	60	
98235. 007	C-0	(P, X) 1-H-3., SIG		2. 2500E+08	3. 0000E+08	USA	60	
98235. 008	C-0	(P, X) 4-BE-7., SIG		2. 2500E+08	7. 3000E+08	USA	60	
98235. 009	C-0	(P, X) 1-H-3., SIG		4. 0000E+08	4. 0000E+08	USA	60	
98236. 003	C-0	(P, X) 3-LI-9., SIG		1. 0000E+09	2. 8000E+09	BNL	65	
98236. 068	C-12	(P, 4P), SIG	Li-9	1. 0000E+09	2. 8000E+09	BNL	65	
98237. 003	C-0	(P, X) 3-LI-9., SIG		1. 5600E+08	1. 5600E+08	PAR	68	
98237. 028	C-12	(P, 4P), SIG	Li-9	1. 5600E+08	1. 5600E+08	PAR	68	
98243. 002	C-12	(P, X) 2-HE-6., SIG		1. 0000E+09	2. 8500E+09	BNL	58	
98247. 002	C-12	(P, X) 3-LI-7., SIG		4. 4000E+07	5. 5000E+08	CSN	65	
98247. 003	C-12	(P, X) 3-LI-6., SIG	+ (P, X) 2-HE-6	4. 4000E+07	5. 5000E+08	CSN	65	
98247. 004	C-12	(P, X) 3-LI-7., SIG	+ (P, X) 4-BE-7	4. 4000E+07	5. 5000E+08	CSN	65	
98255. 002	C-0	(P, X) 4-BE-7., SIG		1. 0000E+09	3. 0000E+09	BNL	58	
c0259. 003	C-0	(P, X) 4-BE-7., SIG		3. 3500E+08	3. 3500E+08	LRL	51	
c0261. 011	C-0	(P, X) 4-BE-7., SIG		2. 8000E+10	2. 8000E+10	BNL	62	
c0315. 002	C-12	(P, X) 6-C-12, PAR, SIG, G		6. 0000E+06	2. 3000E+07	WAU	81	
c0397. 002	C-0	(P, X) 6-C-11., SIG		9. 8060E+07	9. 8060E+07	MCG	64	
c0408. 002	C-12	(18-AR-40, X) ELEM/MASS, SIG		8. 5200E+09	8. 5200E+09	BRK	79	
c0044. 002	C-12	(P, 3N+3P), UND, SIG	Be-7	3. 3500E+07	1. 4920E+08	PAR	61 * 12points	
c0044. 024	C-12	(P, X) 1-H-3., SIG		1. 5000E+08	1. 5000E+08	PAR	61	
c0046. 002	C-12	(P, X) 1-H-1., SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	CLE	75	
c0046. 002	C-12	(P, X) 1-H-2., SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	CLE	75	
c0046. 002	C-12	(P, X) 1-H-3., SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	CLE	75	
c0046. 002	C-12	(P, X) 2-HE-3., SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	CLE	75	

## 付録 2 : C に対する陽子入射核種生成断面積の EXFOR 検索結果 (つづき 2)

Work no	Z-A	Reaction		Emin (eV)	Emax (eV)	Lab	Yr	comments
o0046. 002	C-12	(P, X) 2-HE-4, .SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	CLE	75	
o0048. 002	C-12	(P, N), PAR, SIG	N-12	2. 5800E+07	2. 5800E+07	CLU	74	3. 45 ± 0. 49mb
o0065. 002	C-13	(P, 2N+P), IND, SIG		1. 8200E+07	3. 0600E+07	LVN	89	
o0065. 003	C-13	(P, N), .SIG		5. 2000E+06	3. 0600E+07	LVN	89	
o0073. 023	C-0	(P, X) 4-BE-7, CUM, SIG		1. 3000E+08	3. 9600E+08	CAR	64	
o0077. 027	C-12	(P, 3D), UND, *SIG		5. 0000E+08	2. 9000E+09	CAR	68	
o0081. 002	C-12	(P, NON), .SIG		3. 0000E+07	6. 0800E+07	ORL	71	
o0156. 027	C-12	(P, PIP+X), SEQ, SIG		5. 8500E+08	5. 8500E+08	VIL	80	
o0156. 027	C-12	(P, PIN+X), SEQ, SIG		5. 8500E+08	5. 8500E+08	VIL	80	
o0213. 003	C-12	(P, TOT), .SIG		2. 3100E+08	5. 5200E+08	CER	72	
o0213. 011	C-0	(P, TOT), .SIG, ., CALC		2. 3100E+08	5. 5200E+08	CER	72	
o0217. 020	C-12	(P, INL), PAR, SIG		1. 8200E+08	1. 8200E+08	UPP	57	
o0217. 021	C-12	(P, INL), PAR, SIG		1. 8200E+08	1. 8200E+08	UPP	57	
o0247. 008	C-12	(P, TOT), .SIG		1. 3700E+08	1. 3700E+08	HAR	61	
o0247. 008	C-12	(P, TOT), .SIG		1. 3700E+08	1. 3700E+08	HAR	61	
65001. 008	C-13	(P, N), .SIG		3. 8800E+06	5. 2700E+06	ORL	59	
65050. 002	C-12	(P, G), .SIG		8. 5000E+04	1. 3000E+05	LRL	57	
65051. 002	C-12	(P, P+N), .SIG	C-11	2. 7600E+07	4. 1800E+07	CAN	58 * 31points	
65051. 003	C-12	(P, P+N), .SIG	C-11	1. 8000E+07	3. 1800E+07	CAN	58 * 36points	
65055. 002	C-14	(P, N), .SIG	N-14	6. 8000E+05	1. 4800E+06	ORL	59	

## 付録 3： 0に対する陽子入射核種生成断面積の EXFOR 検索結果

Work no	Z-A	Reaction		Emin (eV)	Emax (eV)	Lab	Yr	comments
50018.005	0-16	(P, P+3-L1-6), SIG	B-10	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	78	4.1±1.7mb
50018.005	0-16	(P, P+4-BE-7), SIG	Be-9	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	78	0.6±0.6mb
50018.005	0-16	(P, P+A), SIG	C-12	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	78	41±7mb
50018.005	0-16	(P, P+T), SIG	N-13	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	78	21+12/-15mb
50018.005	0-16	(P, P+HE3), SIG	C-13	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	78	7.3±7.3mb
50018.005	0-16	(P, 2D), SIG	N-13	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	78	12+7/-9mb
50018.005	0-16	(P, P+2-HE-6), SIG	C-10	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	78	3.6±1.5mb
50018.005	0-16	(P, 2P), SIG	N-15	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	78	56+11/-15mb
50018.005	0-16	(P, P+D), SIG	N-14	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	78	40+14/-17mb
50018.006	0-16	(P, 2HE3), SIG	B-11	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	78	1.0+1.2/-1.0mb
50018.006	0-16	(P, D+A), SIG	C-11	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	78	17±10mb
50018.006	0-16	(P, D+T), SIG	N-12	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	78	0.7+1.1/-0.7mb
50018.006	0-16	(P, D+HE3), SIG	C-12	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	78	12±8mb
50018.006	0-16	(P, T+A), SIG	C-10	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	78	1.9+3.6/-1.9mb
50018.006	0-16	(P, HE3+A), SIG	B-10	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	78	0.8+1.5/-0.8mb
50018.006	0-16	(P, A+3-L1-6), SIG	Be-7	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	78	0.4±0.4mb
50050.008	0-16	(P, D+HE3), IND, SIG	C-12	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	12±8mb
50050.008	0-16	(P, P+3-L1-6), IND, SIG	B-10	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	4.1±1.7mb
50050.008	0-16	(P, P+A), IND, SIG	C-12	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	41±6.2mb
50050.008	0-16	(P, P+D), IND, SIG	N-14	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	40±14mb
50050.008	0-16	(P, P+3A), IND, SIG	He-4	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	27±3mb
50050.008	0-16	(P, 2D), IND, SIG	N-13	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	12±7mb
50050.008	0-16	(P, 2P+A), IND, SIG	B-11	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	11.9±5.7mb
50050.008	0-16	(P, D+A), IND, SIG	C-11	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	17±10mb
50050.008	0-16	(P, 2P), IND, SIG	N-15	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	56±11mb
50050.008	0-16	(P, P+HE3), IND, SIG	C-13	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	7.3±7.3mb
50050.008	0-16	(P, P+T), IND, SIG	N-13	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	21±12mb
50050.009	0-16	(P, P+D+A), IND, SIG	B-10	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	2.6±2.4mb
50050.009	0-16	(P, 3P+A), IND, SIG	Be-10	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	2.2±2.2mb
50050.009	0-16	(P, 3P), IND, SIG	C-14	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	2.6±1.9mb
50050.009	0-16	(P, T+A), IND, SIG	C-10	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	1.9+3.6/-1.9mb
50050.009	0-16	(P, P+HE3+A), IND, SIG	Be-9	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	1.6±1mb
50050.009	0-16	(P, P+2D), IND, SIG	C-12	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	2.0±2mb
50050.009	0-16	(P, P+2-HE-6), IND, SIG	C-10	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	3.6±1.5mb
50050.009	0-16	(P, 2HE3), IND, SIG	B-11	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	1.0+1.2/-1.0mb
50050.009	0-16	(P, 2P+T), IND, SIG	C-12	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	3.3±3.0mb
50050.009	0-16	(P, 2P+D), IND, SIG	C-13	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	2.2±2.2mb
50050.010	0-16	(P, 2P+2A), IND, SIG	Li-7	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	0.5±0.5mb
50050.010	0-16	(P, P+D+2A), IND, SIG	Li-6	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	0.5±0.5mb
50050.010	0-16	(P, P+4-BE-7), IND, SIG	Be-9	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	0.6±0.6mb
50050.010	0-16	(P, HE3+A), IND, SIG	B-10	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	0.8+1.5/-0.8mb
50050.010	0-16	(P, A+3-L1-6), IND, SIG	Be-7	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	0.4±0.4mb
50050.010	0-16	(P, D+2A), IND, SIG	Be-7	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	0.8±0.7mb
50050.010	0-16	(P, 2P+A+D), IND, SIG	Be-9	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	0.5±0.5mb
50050.010	0-16	(P, D+HE3+2A), IND, SIG	He-4	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	0.5±0.5mb
50050.011	0-16	(P, HE3+2A), IND, SIG	Li-6	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	0.4±0.4mb
50050.011	0-16	(P, 2P+3-L1-6), IND, SIG	Be-9	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	0.4±0.4mb
50050.011	0-16	(P, P+D+HE3), IND, SIG	B-11	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	0.3±0.3mb
50050.011	0-16	(P, P+D+T), IND, SIG	C-11	5.0000E+07	5.0000E+07	LPI	79	0.3±0.3mb
50235.002	0-18	(P, N), IND, SIG	F-18	2.3000E+06	1.4710E+07	BNL	79	
50316.008	0-16	(P, P+N), SIG	0-15	1.6700E+07	3.2820E+07	BNL	85	* 15points
50344.002	0-16	(P, X) 4-BE-10, SIG		6.0000E+08	6.0000E+08	KLN	86	1.52±0.12mb
50344.002	0-16	(P, X) 4-BE-7, SIG		6.0000E+08	6.0000E+08	KLN	86	11.0±0.2mb
a0518.003	0-16	(P, X) 4-BE-7, SIG		3.3500E+07	9.8200E+07	TUH	93	* 18points
a0518.003	0-16	(P, X) 4-BE-10, SIG		3.3500E+07	9.8200E+07	TUH	93	* 9points
a0519.004	0-16	(P, X) 4-BE-7, SIG		1.6000E+09	1.6000E+09	TUH	93	11.2±1.0mb
a0530.004	0-16	(P, X) 4-BE-7, IND, SIG		3.3600E+07	9.8990E+07	UH	91	* 18points
a1366.006	0-18	(P, X) 0-NN-1, REL		3.4840E+06	9.9430E+06	ORL	64	
60157.002	0-16	(P, A), SIG	N-13	6.7000E+06	9.2700E+06	KLN	77	* 29points
c0061.016	0-16	(P, N+P), UND, SIG	0-15	0.0000E+00	0.0000E+00	PAR	63	

## 付録 3： 0に対する陽子入射核種生成断面積の EXFOR 検索結果（つづき 1）

Work no	Z-A	Reaction		Emin (eV)	Emax (eV)	Lab	Yr	comments
c0061. 017	0-16	(P, 2N+P), UND, SIG	0-14	1. 5500E+08	1. 5500E+08	PAR	63	0. 9±0. 1mb
c0061. 018	0-16	(P, A), UND, SIG	N-13	1. 5500E+08	1. 5500E+08	PAR	63	4. 5±1. 0mb
c0061. 019	0-16	(P, N+P+A), UND, SIG	C-11	1. 5500E+08	1. 5500E+08	PAR	63	11±1mb
c0061. 020	0-16	(P, 4N+3P), UND, SIG	C-10	1. 5500E+08	1. 5500E+08	PAR	63	1±0. 2mb
c0061. 021	0-16	(P, 5N+5P), UND, SIG	Be-7	1. 5500E+08	1. 5500E+08	PAR	63	4. 5±1mb
c0062. 013	0-16	(P, N+P), UND, SIG	0-15	1. 5500E+08	5. 7000E+09	PAR	65 *	2points
c0062. 016	0-16	(P, N+P), UND, SIG	0-15	1. 9500E+07	1. 5600E+08	PAR	65 *	18points
c0202. 002	0-16	(P, A), ., SIG	N-13	6. 6600E+06	1. 5770E+07	BNL	86 *	37points
98208. 003	0-16	(P, 3N+3P), UND, SIG	0-11	3. 6200E+08	3. 6200E+08	LVP	60	13. 6±1. 43mb
98208. 004	0-16	(P, N+P), UND, SIG	0-15		3. 6200E+08	LVP	60	20. 2±2. 12mb
98208. 005	0-16	(P, 2N+2P), UND, SIG	N-13		3. 6200E+08	LVP	60	1±0. 41mb
c0220. 008	0-16	(P, N+P), ., SIG	0-15	5. 7000E+09	5. 7000E+09	BRK	60	33±2. 2mb
c0220. 009	0-16	(P, 2N+P), ., SIG	0-14	5. 7000E+09	5. 7000E+09	BRK	60	11±1. 5mb
c0220. 010	0-16	(P, 2N+2P), ., SIG	N-13	5. 7000E+09	5. 7000E+09	BRK	60	6±1. 1mb
c0220. 011	0-16	(P, N+P+A), ., SIG	C-11	5. 7000E+09	5. 7000E+09	BRK	60	12±1. 2mb
c0220. 012	0-16	(P, X) 4-BE-7., SIG		5. 7000E+09	5. 7000E+09	LBL	60	10±2. 6mb
c0223. 002	0-16	(P, X) 0-G-0, PAR, SIG		1. 4600E+08	1. 4600E+08	0XF	62	
c0223. 012	0-16	(P, X) 8-0-15., SIG		1. 4600E+08	1. 4600E+08	0XF	62	52±10mb
c0223. 013	0-16	(P, X) 7-N-13., SIG		1. 4600E+08	1. 4600E+08	0XF	62	8. 4±2mb
c0223. 014	0-16	(P, X) 6-C-11., SIG		1. 4600E+08	1. 4600E+08	0XF	62	12. 7±2mb
c0223. 015	0-16	(P, N+P), PAR, SIG	0-15	1. 4600E+08	1. 4600E+08	0XF	62	52mb
98235. 022	0-0	(P, X) 1-H-3., SIG		2. 2500E+08	4. 0000E+08	USA	60 *	3points
98236. 004	0-16	(P, X) 3-LI-9., SIG		1. 0000E+09	2. 8000E+09	BNL	65	0. 106. 0. 128mb
98236. 005	0-18	(P, X) 3-LI-9., SIG		1. 0000E+09	2. 8000E+09	BNL	65	0. 59. 0. 58mb
98236. 023	0-18	(P, X) 6-C-16., SIG		1. 0000E+09	2. 8000E+09	BNL	65	1. 12. 0. 9mb
98236. 043	0-18	(P, X) 7-N-17., SIG		1. 0000E+09	2. 8000E+09	BNL	65	30. 4. 25. 1mb
98236. 063	0-18	(P, 2P), ., SIG	N-17	1. 0000E+09	2. 8000E+09	BNL	65	30. 4. 25. 1mb
98236. 065	0-18	(P, 3P), ., SIG	C-16	1. 0000E+09	2. 8000E+09	BNL	65	1. 12. 0. 9mb
98237. 006	0-16	(P, X) 3-LI-9., SIG		1. 5600E+08	1. 5600E+08	PAR	68	6. 1±0. 8 μ b
98237. 007	0-18	(P, X) 3-LI-9., SIG		1. 5600E+08	1. 5600E+08	PAR	68	
98237. 012	0-18	(P, X) 6-C-16., SIG		1. 5600E+08	1. 5600E+08	PAR	68	
98237. 017	0-18	(P, X) 7-N-17., SIG		1. 5600E+08	1. 5600E+08	PAR	68	
98237. 024	0-18	(P, 2P), ., SIG	N-17	1. 5600E+08	1. 5600E+08	PAR	68	
98237. 026	0-18	(P, 3P), ., SIG	C-16	1. 5600E+08	1. 5600E+08	PAR	68	
c0245. 002	0-16	(P, N+P), ., SIG	0-15	1. 5000E+07	1. 4600E+08	CSN	62 *	19points
c0245. 003	0-16	(P, 2N+2P), ., SIG	N-13	1. 4000E+07	1. 5000E+08	CSN	62 *	20points
c0245. 004	0-16	(P, 3N+3P), ., SIG	C-11	3. 0000E+07	1. 5000E+08	CSN	62 *	15points
c0245. 005	0-16	(P, 5N+5P), ., SIG	Be-7	4. 4000E+07	1. 5000E+08	CSN	62 *	10points
c0247. 005	0-16	(P, X) 4-BE-7., SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	CSN	65	7±1. 5mb
c0247. 006	0-16	(P, X) 3-LI-7., SIG		1. 5500E+08	6. 0000E+08	CSN	65	14±2mb
c0247. 007	0-16	(P, X) 3-LI-6., SIG	+ (P, X) 2-HE-6	1. 5500E+08	6. 0000E+08	CSN	65	
c0247. 008	0-16	(P, X) 3-LI-7., SIG	+ (P, X) 4-BE-7	1. 5500E+08	6. 0000E+08	CSN	65	
98248. 002	0-16	(P, X) 4-BE-7., SIG		7. 0000E+09	7. 0000E+09	NIN	71	9. 1±0. 5mb
98250. 002	0-0	(P, X) 9-F-18., SIG		4. 2000E+08	4. 2000E+08	CHI	52	
98250. 003	0-18	(P, N), ., SIG	F-18	4. 2000E+08	4. 2000E+08	CHI	52	41±10. 25mb
98250. 010	0-0	(P, X) 6-C-11., SIG		4. 2000E+08	4. 2000E+08	CHI	52	31±7. 75mb
98250. 011	0-0	(P, X) 7-N-13., SIG		4. 2000E+08	4. 2000E+08	CHI	52	14±3. 5mb
c0315. 004	0-16	(P, X) 6-C-12, PAR, SIG, G		1. 4000E+07	2. 3000E+07	WAU	81 *	10points
c0315. 005	0-16	(P, INL), PAR, SIG, G		8. 0000E+06	2. 3000E+07	WAU	81	
98395. 002	0-16	(P, X) 3-LI-7., SIG / (P, X) 3-LI-7	1. 3500E+08	1. 9000E+10	CSN	68		
98395. 002	0-16	(P, X) 4-BE-9., SIG / (P, X) 4-BE-7	1. 3500E+08	1. 9000E+10	CSN	68		
98395. 003	0-16	(P, X) 4-BE-10., SIG / (P, X) 4-BE-9	1. 3500E+08	1. 9000E+10	CSN	68		
98395. 003	0-16	(P, X) 5-B-11., SIG / (P, X) 5-B-10	1. 3500E+08	1. 9000E+10	CSN	68		
98395. 004	0-16	(P, X) ELEM/MASS., SIG ?	1. 3500E+05	1. 9000E+07	CSN	68 ?		
98401. 002	0-0	(P, X) 4-BE-7., SIG		3. 0000E+07	8. 5000E+07	MCG	66 *	5points
o0033. 005	0-16	(P, X) ELEM/MASS., SIG, REL	0. 0000E+00	0. 0000E+00	DUB	82		
o0034. 002	0-16	(P, INL), PAR, SIG, G		2. 3700E+07	4. 4600E+07	MSU	81	
o0041. 012	0-16	(P, 5N+6P), CUM/UND, SIG	Li-6	5. 0000E+07	9. 0000E+07	MRY	79 *	5points
o0041. 013	0-16	(P, 4N+6P), CUM/UND, SIG	Li-7	5. 0000E+07	9. 0000E+07	MRY	79 *	5points
o0041. 014	0-16	(P, 4N+6P), IND/UND, SIG	Li-7	9. 0000E+07	9. 0000E+07	MRY	79	9. 7mb

## 付録 3： 0に対する陽子入射核種生成断面積の EXFOR 検索結果（つづき 2）

Work no	Z-A	Reaction		Emin (eV)	Emax (eV)	Lab	Yr	comments
o0041. 014	0-16	(P, 5N+5P), IND/UND, SIG	Be-7	9. 0000E+07	9. 0000E+07	MRY	79	10. 2mb
o0041. 015	0-16	(P, 3N+5P), CUM/UND, SIG	Be-9	5. 0000E+07	9. 0000E+07	MRY	79 *	5points
o0041. 016	0-16	(P, 3N+4P), CUM/UND, SIG	B-10	5. 0000E+07	9. 0000E+07	MRY	79 *	5points
o0041. 017	0-16	(P, 2N+5P), IND/UND, SIG	Be-10	9. 0000E+07	9. 0000E+07	MRY	79	1. 8mb
o0041. 017	0-16	(P, 3N+4P), IND/UND, SIG	B-10	9. 0000E+07	9. 0000E+07	MRY	79	9. 5mb
o0041. 017	0-16	(P, 4N+3P), IND/UND, SIG	C-10	9. 0000E+07	9. 0000E+07	MRY	79	7. 5mb
o0041. 018	0-16	(P, 2N+4P), CUM/UND, SIG	B-11	5. 0000E+07	9. 0000E+07	MRY	79 *	5points
o0065. 004	0-16	(P, X) 6-C-11, IND, SIG		1. 8600E+07	2. 7800E+07	LVN	89 *	4points
o0065. 005	0-16	(P, A), .SIG	N-13	1. 5600E+07	2. 7800E+07	LVN	89 *	5points
o0065. 006	0-16	(P, N+P), IND/UND, SIG	0-15	1. 8600E+07	2. 7800E+07	LVN	89 *	4points
o0073. 024	0-0	(P, X) 4-BE-7, CUM, SIG		1. 3000E+08	3. 9600E+08	CAR	64 *	4points
o0077. 028	0-16	(P, 5N+5P), UND, SIG	Be-7	5. 0000E+08	2. 9000E+09	CAR	68 *	5points
o0078. 002	0-16	(P, X) 4-BE-7, IND, SIG	Be-10	6. 6000E+08	6. 6000E+08	UH	89	11. 3±0. 5mb
o0156. 026	0-16	(P, PIP+X), SEQ, SIG		5. 8500E+08	5. 8500E+08	VIL	80	1. 52±0. 12mb
o0156. 026	0-16	(P, PIN+X), SEQ, SIG		5. 8500E+08	5. 8500E+08	VIL	80	
o0217. 019	0-16	(P, INL), PAR, SIG		1. 7700E+08	1. 7700E+08	UPP	57	
o0247. 010	0-16	(P, TOT), .SIG		1. 3800E+08	1. 3800E+08	HAR	61	
65045. 003	0-16	(P, A), .SIG	N-13	9. 7300E+06	1. 5000E+07	TOK	60 *	32points
65051. 004	0-16	(P, A), .SIG	N-13	6. 2200E+06	1. 5600E+07	CAN	58 *	60points
1043. 002	0-16	(P, A), .SIG	N-13	6. 5100E+06	7. 7100E+06	ALA	73 *	11points

## 付録4：AIに対する陽子入射核種生成断面積のEXFOR検索結果

Work no	Z-A	Reaction	Emin (eV)	Emax (eV)	Lab	Yr	comments	
50030. 007	AL-27	(P, X) 1-H-3, IND. SIG / (He3) ratio	6. 6000E+08	6. 6000E+08	DUB	77	1. 40	
50030. 007	AL-27	(P, X) 2-HE-3, IND. SIG / (He4) ratio	6. 6000E+08	6. 6000E+08	DUB	77	0. 21	
50030. 008	AL-27	(P, X) 1-H-3, IND. SIG / (He3) ratio	6. 6000E+08	6. 6000E+08	DUB	77	1. 40	
50065. 003	AL-27	(P, X) 11-NA-22, CUM. SIG., REL660M	1. 5000E+08	6. 6000E+08	DUB	57	6points	
50065. 003	AL-27	(P, X) 11-NA-24, CUM. SIG., REL660M	1. 5000E+08	6. 6000E+08	DUB	57	6points	
50068. 002	AL-27	(P, X) 0-NN-1, PAR. SIG	2. 2000E+07	2. 2000E+07	FEI	80	194±13mb	
A0100. 013	AL-27	(P, N+3P), CUM. SIG	Na24	4. 6400E+07	1. 9900E+08	KLN	83 *	25points
50151. 002	AL-27	(P, 3N+3P), CUM/UND. SIG	Na22	2. 6580E+07	4. 4800E+07	KLN	79 *	11points
50178. 019	AL-27	(P, 11N+10P), CUM/UND. SIG	Be7	3. 4300E+07	6. 8500E+07	WUR	82 *	11points
50178. 020	AL-27	(P, 3N+3P), CUM/UND. SIG	Na22	2. 9600E+07	6. 8500E+07	WUR	82 *	13points
50178. 021	AL-27	(P, N+3P), CUM/UND. SIG	Na24	3. 4300E+07	6. 8900E+07	WUR	82 *	21points
50271. 002	AL-27	(P, N), . SIG	Si27	2. 2200E+07	2. 2200E+07	FEI	84	192mb
A0340. 002	AL-27	(P, X) 9-F-18, . SIG		2. 5000E+07	9. 9000E+07	RUS	88 *	16points
A0340. 002	AL-27	(P, X) 11-NA-22, . SIG		2. 5000E+07	9. 9000E+07	RUS	88 *	16points
A0340. 002	AL-27	(P, X) 4-BE-7, . SIG		2. 5000E+07	9. 9000E+07	RUS	88 *	16points
50344. 017	AL-27	(P, X) 2-HE-4, . SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	321. 5±2mb
50344. 017	AL-27	(P, X) 4-BE-7, . SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	5. 02±0. 09mb
50344. 017	AL-27	(P, X) 10-NE-20, CUM. SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	23. 69±0. 13mb
50344. 017	AL-27	(P, X) 10-NE-21, CUM. SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	24. 54±0. 18mb
50344. 017	AL-27	(P, N+3P)-G, CUM/UND. SIG	Na24g	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	10. 3±0. 07mb
50344. 017	AL-27	(P, X) 10-NE-22, CUM. SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	28. 89±0. 22mb
50344. 017	AL-27	(P, X) 2-HE-3, (CUM), SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	26. 51±0. 13mb
50344. 017	AL-27	(P, X) 10-NE-22, IND. SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	12. 76±0. 09mb
50344. 021	AL-27	(P, X) 10-NE-20, CUM. SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	23. 7±0. 1mb
50344. 021	AL-27	(P, X) 10-NE-22, CUM. SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	28. 8±0. 2mb
50344. 021	AL-27	(P, X) 4-BE-10, IND. SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	1. 16±0. 07mb
50344. 021	AL-27	(P, X) 10-NE-22, IND. SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	12. 8±0. 1mb
50344. 021	AL-27	(P, X) 10-NE-21, CUM. SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	24. 5±0. 2mb
50497. 002	AL-27	(P, X) 11-NA-22, . SIG		2. 5200E+07	1. 9960E+08	NAC	90 *	57points
A0501. 006	AL-27	(P, X) 4-BE-7, . SIG / (Na22) ratio	1. 0000E+09	1. 0000E+09	RI	90	0. 483±0. 02	
A0509. 004	AL-27	(P, N), . SIG	Si27	5. 8030E+06	6. 3380E+06	KTY	78 *	105points
A0518. 006	AL-27	(P, X) 4-BE-7, . SIG		3. 1600E+07	9. 8500E+07	TUH	93 *	7points
A0518. 006	AL-27	(P, X) 11-NA-22, . SIG		3. 1600E+07	9. 8500E+07	TUH	93 *	7points
A0518. 006	AL-27	(P, X) 11-NA-24, . SIG		6. 2900E+07	9. 3900E+07	TUH	93 *	2points
A0518. 007	AL-27	(P, X) 4-BE-10, . SIG		5. 7100E+07	1. 9950E+08	TUH	93 *	15points
A0518. 007	AL-27	(P, X) 13-AL-26, . SIG		1. 6100E+07	1. 9950E+08	TUH	93 *	22points
A0519. 006	AL-27	(P, X) 4-BE-7, . SIG		1. 6000E+09	1. 6000E+09	TUH	93	8. 65±0. 63mb
A0519. 006	AL-27	(P, X) 11-NA-22, . SIG		1. 6000E+09	1. 6000E+09	TUH	93	13. 1±1. 0mb
A0519. 006	AL-27	(P, X) 11-NA-24, . SIG		1. 6000E+09	1. 6000E+09	TUH	93	12. 3±1. 0mb
60016. 003	AL-27	(P, N+3P), M+/UND. SIG	Na24	2. 7000E+07	8. 6500E+07	MCG	62 *	15points
60022. 003	AL-27	(P, N+3P), M+/UND. SIG, . EVAL		5. 0000E+07	2. 8000E+10	BNL	63	15points
60022. 004	AL-27	(P, N+3P), M+/UND. SIG, . EVAL rel		5. 0000E+07	2. 8000E+10	BNL	63	x
60022. 005	AL-27	(P, X) 9-F-18, . SIG, . EVAL		2. 0000E+08	2. 8000E+10	BNL	63	10points
60073. 017	AL-27	(P, X) 9-F-18, CUM. SIG		4. 0400E+07	6. 0100E+07	ORL	67 *	12points
60073. 018	AL-27	(P, X) 4-BE-7, . SIG		6. 1400E+07	6. 1400E+07	ORL	67	0. 55mb
60073. 019	AL-27	(P, X) 11-NA-22, CUM. SIG		2. 9800E+07	6. 2200E+07	ORL	67 *	19points
60073. 020	AL-27	(P, N+3P), M+, SIG	Na24	3. 3500E+07	6. 1200E+07	ORL	67 *	12points
60076. 002	AL-27	(P, 3N+3P), CUM/UND. SIG	Na22	1. 0000E+05	1. 1500E+08	HRV	52 *	26points
60076. 003	AL-27	(P, N+3P), M+, /UND. SIG	Na24	1. 3400E+07	1. 1800E+08	HRV	52 *	37points
60076. 004	AL-27	(P, 5N+5P), CUM/UND. SIG	F18	2. 1400E+07	1. 1800E+08	HRV	52 *	29points
60082. 002	AL-27	(P, N+3P), CUM/UND. SIG	Na24	4. 0000E+07	8. 5000E+07	MCG	77 *	12points
60085. 025	AL-27	(P, 3P), CUM. SIG	Na25	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	0. 62±0. 15mb
60085. 025	AL-27	(P, N+4P), CUM. SIG	Ne23	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	1. 05±0. 25mb
60085. 025	AL-27	(P, 4P), CUM. SIG	Ne24	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	0. 15±0. 03mb
60085. 025	AL-27	(P, N+P+A), CUM/UND. SIG	Na22	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	15±1. 5mb
60085. 026	AL-27	(P, X) 8-0-19, CUM. SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	0. 8±0. 1mb
60085. 026	AL-27	(P, X) 9-F-20, (CUM), SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	3. 89±0. 8mb
60085. 027	AL-27	(P, X) 4-BE-7, . SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	0. 5±0. 05mb
60085. 109	AL-27	(P, 3P), CUM. SIG	Na25	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	0. 62±0. 15mb
60085. 110	AL-27	(P, N+P+A), CUM/UND. SIG	Na22	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	15±1. 5mb

## 付録4：AIに対する陽子入射核種生成断面積のEXFOR検索結果（つづき）

Work no	Z-A	Reaction		Emin (eV)	Emax (eV)	Lab	Yr	comments
60085. 111	AL-27	(P, 4P), CUM, SIG	Ne24	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	0. 15 ± 0. 03mb
60085. 112	AL-27	(P, N+4P), CUM, SIG	Ne23	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	1. 05 ± 0. 25mb
60085. 113	AL-27	(P, X) 9-F-20, (CUM), SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	3. 89 ± 0. 8mb
60085. 114	AL-27	(P, X) 8-0-19, CUM, SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	0. 8 ± 0. 1mb
60085. 115	AL-27	(P, X) 4-BE-7, , SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	0. 5 ± 0. 05mb
60094. 002	AL-27	(P, N+3P), M+/UND, SIG	Na24	5. 9100E+08	5. 9100E+08	CER	61	11 ± 0. 5mb
60094. 004	AL-27	(P, X) 9-F-18, CUM, SIG		5. 9100E+08	5. 9100E+08	CER	61	8 ± 0. 4mb
60095. 003	AL-27	(P, N+3P), M+/UND, SIG	Na24	3. 7400E+07	5. 0600E+07	BNL	63 *	4points
60095. 004	AL-27	(P, X) 11-NA-22, CUM, SIG		2. 9700E+07	5. 0600E+07	BNL	63 *	5points
60101. 005	AL-27	(P, N+3P), M+/UND, SIG	Na24	3. 5000E+08	3. 5000E+08	BRK	56	11. 1 ± 0. 2mb
60102. 002	AL-27	(P, X) 1-H-3, , SIG		2. 5000E+10	2. 5000E+10	CER	61	67mb
60131. 002	AL-27	(P, N+3P), M+/UND, SIG	Na24	3. 5300E+07	1. 0050E+08	MOG	78 *	11points
98207. 004	AL-27	(P, 5N+5P), , SIG F18/(n+3p) ratio	2. 0200E+08	3. 4200E+08	LVP	60	4points	
98208. 010	AL-27	(P, N+3P), , SIG	Na24	3. 4200E+08	3. 4200E+08	LVP	60	10. 1 ± 0. 38mb
98208. 011	AL-27	(P, 5N+5P), , SIG	F18	3. 4200E+08	3. 4200E+08	LVP	60	6. 8 ± 0. 68mb
98209. 003	AL-27	(P, N+3P), , SIG	Na24	5. 9100E+08	5. 9100E+08	CER	61	11 ± 0. 5mb
C0216. 003	AL-27	(P, N+3P), , SIG	Na24	2. 0000E+09	3. 0000E+09	BNL	58	10. 4 ± 0. 6. 10 ± 0. 6mb
98220. 020	AL-27	(P, X) 12-MG-27, , SIG		5. 7000E+09	5. 7000E+09	LBL	60	0. 1 ± 0. 07mb
98220. 021	AL-27	(P, 4P), , SIG	Ne24	5. 7000E+09	5. 7000E+09	LBL	60	1. 6 ± 0. 6mb
C0220. 022	AL-27	(P, N+P+A), , SIG	Na22	5. 7000E+09	5. 7000E+09	BRK	60	17 ± 1. 3mb
C0220. 023	AL-27	(P, X) 9-F-18, , SIG		5. 7000E+09	5. 7000E+09	BRK	60	7. 68 ± 0. 17mb
98220. 024	AL-27	(P, X) 8-0-15, , SIG		5. 7000E+09	5. 7000E+09	LBL	60	4. 5 ± 1. 8mb
98220. 025	AL-27	(P, X) 7-N-13, , SIG		5. 7000E+09	5. 7000E+09	LBL	60	1. 7 ± 0. 2mb
98220. 026	AL-27	(P, X) 6-C-11, , SIG		5. 7000E+09	5. 7000E+09	LBL	60	6. 0 ± 0. 4mb
C0220. 027	AL-27	(P, X) 4-BE-7, , SIG		5. 7000E+09	5. 7000E+09	BRK	60	8. 3 ± 0. 3mb
C0224. 002	AL-27	(P, N+3P), , SIG Na24/C12(p, np)C	4. 2000E+08	1. 7000E+10	BNL	62	9points	
C0224. 003	AL-27	(P, X) 9-F-18, , SIG/A127(p, n3p)Na	4. 2000E+08	1. 7000E+10	BNL	62	7points	
C0224. 004	AL-27	(P, X) 6-C-11, , SIG/A127(p, n3p)Na	4. 2000E+08	1. 7000E+10	BNL	62	7points	
C0224. 005	AL-27	(P, X) 7-N-13, , SIG/A127(p, n3p)Na	4. 2000E+08	1. 7000E+10	BNL	62	7points	
C0224. 006	AL-27	(P, X) 11-NA-22, , SIG/A127(p, n3p)	2. 0000E+09	2. 9000E+09	BNL	62	2points	
C0224. 007	AL-27	(P, X) 4-BE-7, , SIG/A127(p, n3p)Na	2. 9000E+09	2. 9000E+09	BNL	62	0. 82 ± 0. 04	
98236. 009	AL-27	(P, X) 3-LI-9, , SIG		1. 0000E+09	2. 8000E+09	BNL	65 *	0. 133. 0. 238mb
98236. 027	AL-27	(P, X) 6-C-16, , SIG		1. 0000E+09	2. 8000E+09	BNL	65 *	0. 05. 0. 0654mb
98236. 047	AL-27	(P, X) 7-N-17, , SIG		1. 0000E+09	2. 8000E+09	BNL	65 *	0. 66. 0. 72mb
98237. 011	AL-27	(P, X) 3-LI-9, , SIG		1. 5600E+08	1. 5600E+08	PAR	68	0. 005mb
98237. 022	AL-27	(P, X) 7-N-17, , SIG		1. 5600E+08	1. 5600E+08	PAR	68	0. 012mb
98243. 003	AL-27	(P, X) 2-HE-6, , SIG		1. 0000E+09	1. 9000E+09	BNL	58 *	1. 1. 1. 3mb
98250. 005	AL-27	(P, X) 9-F-18, , SIG		4. 2000E+08	4. 2000E+08	CHI	52	8. 4 ± 1. 26mb
98250. 012	AL-27	(P, X) 11-NA-24, , SIG		4. 2000E+08	4. 2000E+08	CHI	52	10. 8 ± 0. 54mb
98250. 013	AL-27	(P, X) 11-NA-22, , SIG		4. 2000E+08	4. 2000E+08	CHI	52	17 ± 0. 85mb
98250. 014	AL-27	(P, X) 9-F-18, , SIG		4. 2000E+08	4. 2000E+08	CHI	52	8. 4 ± 1. 26mb
98250. 015	AL-27	(P, X) 7-N-13, , SIG		4. 2000E+08	4. 2000E+08	CHI	52	0. 97 ± 0. 0485mb
98250. 016	AL-27	(P, X) 6-C-11, , SIG		4. 2000E+08	4. 2000E+08	CHI	52	2. 8 ± 0. 14mb
98255. 003	AL-27	(P, X) 4-BE-7, , SIG		1. 0000E+09	3. 0000E+09	BNL	58 *	5points
98257. 002	AL-27	(P, N+3P), , SIG	Na24	5. 0000E+07	3. 5000E+08	LRL	56 *	23points
C0259. 004	AL-27	(P, X) 4-BE-7, , SIG		3. 3500E+08	3. 3500E+08	LRL	51	1. 4mb
C0259. 008	AL-27	(P, X) 11-NA-22, , SIG		3. 3500E+08	3. 3500E+08	LRL	51	12mb
C0259. 009	AL-27	(P, X) 9-F-18, , SIG		3. 3500E+08	3. 3500E+08	LRL	51	5. 5mb
C0259. 010	AL-27	(P, X) 6-C-11, , SIG		3. 3500E+08	3. 3500E+08	LRL	51	1. 9mb
C0261. 002	AL-27	(P, X) 4-BE-7, , SIG		2. 8000E+10	2. 8000E+10	BNL	62	7. 9 ± 0. 5mb
C0261. 003	AL-27	(P, X) 6-C-11, , SIG		2. 8000E+10	2. 8000E+10	BNL	62	4. 7 ± 0. 2mb
C0261. 004	AL-27	(P, X) 7-N-13, , SIG		2. 8000E+10	2. 8000E+10	BNL	62	1. 18 ± 0. 07mb
C0261. 005	AL-27	(P, X) 8-0-15, , SIG		2. 8000E+10	2. 8000E+10	BNL	62	3. 5 ± 1. 0mb
C0261. 006	AL-27	(P, X) 9-F-18, , SIG		2. 8000E+10	2. 8000E+10	BNL	62	6. 0 ± 0. 3mb
C0261. 007	AL-27	(P, X) 11-NA-22, , SIG		2. 8000E+10	2. 8000E+10	BNL	62	9. 8 ± 0. 6mb
C0261. 008	AL-27	(P, X) 11-NA-24, , SIG		2. 8000E+10	2. 8000E+10	BNL	62	8. 3 ± 0. 5mb
C0261. 009	AL-27	(P, X) 10-NE-24, , SIG		2. 8000E+10	2. 8000E+10	BNL	62	0. 6mb
C0261. 010	AL-27	(P, X) 12-MG-27, , SIG		2. 8000E+10	2. 8000E+10	BNL	62	0. 067 ± 0. 006mb
98262. 002	AL-27	(P, 2N+3P), , SIG	Na23	1. 5500E+08	1. 5500E+08	CSN	63	23mb
98264. 002	AL-27	(P, N+3P), , SIG	Na24	6. 0000E+08	3. 0000E+09	BNL	55 *	5points

## 付録4：AIに対する陽子入射核種生成断面積のEXFOR検索結果（つづき）

Work no	Z-A	Reaction	Emin (eV)	Emax (eV)	Lab	Yr	comments	
98264.003	AL-27	(P, X) 11-NA-22., SIG/AI27(p, n3p)	3. 9000E+08	3. 0000E+09	BNL	55	8points	
98264.004	AL-27	(P, X) 9-F-18., SIG/AI27(p, n3p)Na	4. 1000E+08	3. 0000E+09	BNL	55	6points	
98264.005	AL-27	(P, X) 8-0-15., SIG/AI27(p, n3p)Na	6. 0000E+08	3. 0000E+09	BNL	55	4points	
98264.006	AL-27	(P, X) 7-N-13., SIG/AI27(p, n3p)Na	4. 1000E+08	3. 0000E+09	BNL	55	5points	
98264.007	AL-27	(P, X) 6-C-11., SIG/AI27(p, n3p)Na	4. 1000E+08	3. 0000E+09	BNL	55	6points	
98264.008	AL-27	(P, X) 4-BE-7., SIG/AI27(p, n3p)Na	1. 0000E+09	3. 0000E+09	BNL	55	4points	
C0265.011	AL-27	(P, X) 4-BE-7., SIG	3. 2700E+07	3. 4300E+07	WWS	63 *	5points	
98401.003	AL-27	(P, X) 4-BE-7., SIG	7. 0000E+07	8. 5000E+07	MCG	66	0. 76±0. 1. 1. 06±0. 14mb	
70020.004	AL-27	(P, N). , SIG	Si27	5. 7700E+06	9. 6300E+06	TOR	80 *	17points
70028.002	AL-27	(P, X) 4-BE-7., SIG		5. 4000E+08	5. 9300E+08	WUR	82	3. 91±0. 15. 4. 34±0. 15mb
70028.003	AL-27	(P, X) 11-NA-22., SIG		5. 4000E+08	5. 9300E+08	WUR	82	14±0. 5. 14±0. 5mb
70053.004	AL-27	(P, X) 11-NA-22., SIG		2. 5810E+07	7. 1020E+07	UBE	79 *	40points
70053.005	AL-27	(P, X) 11-NA-22., SIG		1. 8200E+09	1. 8200E+09	UBE	79	10. 6±0. 5mb
70053.006	AL-27	(P, X) 11-NA-24., SIG		3. 4930E+07	7. 0870E+07	UBE	79 *	6points
70054.002	AL-27	(P, X) 4-BE-7., SIG		4. 0800E+07	9. 8500E+07	JUL	93 *	9points
D4058.002	AL-27	(P, X) 2-HE-4., SIG		7. 6000E+06	2. 3800E+07	JUL	92 *	3points
o0021.002	AL-27	(P, X) 0-NN-1., SIG		2. 2400E+07	2. 2400E+07	FEI	83	212±20mb
o0044.025	AL-27	(P, X) 1-H-3., SIG		1. 5000E+08	1. 5000E+08	PAR	61	10±1. 5mb
o0046.003	AL-27	(P, X) 1-H-1., SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	CLE	75	670mb
o0046.003	AL-27	(P, X) 2-HE-3., SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	CLE	75	80mb
o0046.003	AL-27	(P, X) 2-HE-4., SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	CLE	75	295mb
o0046.003	AL-27	(P, X) 1-H-2., SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	CLE	75	169mb
o0046.003	AL-27	(P, X) 1-H-3., SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	CLE	75	44mb
o0078.004	AL-27	(P, X) 4-BE-7, IND, SIG		6. 6000E+08	6. 6000E+08	UH	89	4. 88±0. 1mb
o0078.004	AL-27	(P, X) 4-BE-10, IND, SIG		6. 6000E+08	6. 6000E+08	UH	89	1. 03±0. 07mb
o0078.004	AL-27	(P, X) 11-NA-24, CUM, SIG		6. 6000E+08	6. 6000E+08	UH	89	11. 3±0. 3mb
o0081.008	AL-27	(P, NON), , SIG		4. 0000E+07	6. 0800E+07	ORL	71	645±35. 499±27mb
o0082.002	AL-27	(P, N+3P), CUM, SIG	Na24	1. 2000E+08	5. 8500E+08	BAT	71 *	4points
o0103.002	AL-27	(P, X) 2-HE-3., SIG		7. 5000E+08	7. 5000E+08	PSI	88	33mb
o0103.002	AL-27	(P, X) 2-HE-3., SIG,, CALC		7. 5000E+08	7. 5000E+08	PSI	88	
o0103.003	AL-27	(P, X) 2-HE-4, IND, SIG		7. 5000E+08	7. 5000E+08	PSI	88	295mb
o0103.003	AL-27	(P, X) 2-HE-4, IND, SIG,, CALC		7. 5000E+08	7. 5000E+08	PSI	88	
o0109.002	AL-27	(P, 8N+10P), IND/UND, SIG	Be10	1. 2000E+10	1. 2000E+10	TOK	93 *	2. 47±0. 16mb
o0109.010	AL-27	(P, N+P)-G, IND/UND, SIG	Al26g	1. 2000E+10	1. 2000E+10	TOK	93 *	20. 1±1. 6mb
o0113.003	AL-27	(P, X) 0-G-0, PAR, SIG		4. 0000E+08	4. 0000E+08	CLE	82 *	15points
o0137.002	AL-27	(P, X) 1-H-1, PAR, SIG		9. 0000E+07	9. 0000E+07	MRY	79	723mb
o0137.003	AL-27	(P, X) 1-H-2, PAR, SIG		9. 0000E+07	9. 0000E+07	MRY	79	93mb
o0137.004	AL-27	(P, X) 1-H-3, PAR, SIG		9. 0000E+07	9. 0000E+07	MRY	79	12mb
o0137.005	AL-27	(P, X) 2-HE-3, PAR, SIG		9. 0000E+07	9. 0000E+07	MRY	79	10mb
o0137.006	AL-27	(P, X) 2-HE-4, PAR, SIG		9. 0000E+07	9. 0000E+07	MRY	79	161mb
o0149.002	AL-27	(P, X) 1-H-1., SIG		1. 6400E+08	1. 6400E+08	NWU	82	460±69mb
o0149.006	AL-27	(P, X) 1-H-2., SIG		1. 6400E+08	1. 6400E+08	NWU	82	49. 2±7. 38mb
o0149.010	AL-27	(P, X) 1-H-3., SIG		1. 6400E+08	1. 6400E+08	NWU	82	8±1. 2mb
o0149.014	AL-27	(P, X) 2-HE-3., SIG		1. 6400E+08	1. 6400E+08	NWU	82	4. 5±0. 675mb
o0149.018	AL-27	(P, X) 2-HE-4., SIG		1. 6400E+08	1. 6400E+08	NWU	82	29. 7±4. 455mb
o0154.024	AL-27	(P, X) 1-H-3., SIG		1. 9270E+08	2. 4800E+10	RI	76 *	16points
o0154.025	AL-27	(P, X) 4-BE-7., SIG		1. 5000E+08	2. 9400E+10	RI	76 *	16points
o0156.025	AL-27	(P, PIP+X), SEQ, SIG		5. 8500E+08	5. 8500E+08	VIL	80	43. 8±5. 4mb
o0156.025	AL-27	(P, PIN+X), SEQ, SIG		5. 8500E+08	5. 8500E+08	VIL	80	9. 8±1. 2mb
o0213.004	AL-27	(P, TOT), , SIG		2. 3400E+08	5. 5400E+08	CER	72 *	4points
65016.002	AL-27	(P, P+N+A), , SIG	Na22	2. 8200E+07	5. 5100E+07	TOK	65 *	30points
65016.003	AL-27	(P, X) 4-BE-7., SIG		2. 8200E+07	5. 5100E+07	TOK	65 *	21points
65021.002	AL-27	(P, N), , SIG	Si27	7. 0000E+06	1. 5000E+07	LRL	67 *	16points
65027.002	AL-27	(P, N), , SIG	Si27	5. 8300E+06	5. 1800E+07	AML	65 *	394points
65027.003	AL-27	(P, N), , SIG	Si27	8. 5100E+06	1. 1200E+07	AML	65 *	260points
65040.002	AL-27	(P, 3P+N)-G., SIG	Na24g	1. 3000E+08	4. 2500E+08	CAR	62 *	5points
65049.005	AL-27	(P, 3P+N)-G., SIG	Na24g	8. 2000E+07	4. 2600E+08	CHI	60 *	9points
65052.002	AL-27	(P, 3P+N)-G., SIG	Na24g	1. 0000E+08	1. 0000E+09	LVP	60 *	14points

## 付録 5 : Si に対する陽子入射核種生成断面積の EXFOR 検索結果

Work no	Z-A	Reaction	Emin (eV)	Emax (eV)	Lab	Yr	comments	
50299. 006	SI-0	(P, X) 12-MG-28., SIG	5. 4500E+07	1. 6490E+08	UPP	79 *	9points	
50299. 009	SI-0	(P, X) 11-NA-24-G, (CUM), SIG	5. 0800E+07	1. 5110E+08	UPP	79 *	4points	
50339. 002	SI-0	(P, X) 4-BE-7., SIG	3. 7500E+07	6. 6400E+07	IJI	87 *	43points	
50339. 002	SI-0	(P, X) 11-NA-22, CUM, SIG	2. 6000E+07	6. 6400E+07	IJI	87 *	58points	
50339. 002	SI-0	(P, X) 11-NA-24, CUM, SIG	2. 6000E+07	6. 6400E+07	IJI	87 *	58points	
A0340. 003	SI-0	(P, X) 9-F-18., SIG	2. 0000E+07	9. 9000E+07	RUS	88 *	12points	
A0340. 003	SI-0	(P, X) 11-NA-22., SIG	2. 0000E+07	9. 9000E+07	RUS	88 *	17points	
A0340. 003	SI-0	(P, X) 4-BE-7., SIG	2. 0000E+07	9. 9000E+07	RUS	88 *	15points	
A0340. 003	SI-0	(P, X) 11-NA-24, SIG	2. 0000E+07	9. 9000E+07	RUS	88 *	15points	
A0340. 003	SI-0	(P, X) 13-AL-28., SIG	2. 0000E+07	9. 9000E+07	RUS	88 *	17points	
A0340. 003	SI-0	(P, X) 13-AL-29., SIG	2. 0000E+07	9. 9000E+07	RUS	88 *	17points	
A0340. 003	SI-0	(P, X) 12-MG-27., SIG	2. 0000E+07	9. 9000E+07	RUS	88 *	14points	
50344. 019	SI-0	(P, X) 2-HE-3, (CUM), SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	38. 14±0. 14mb	
50344. 019	SI-0	(P, X) 2-HE-4., SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	329. 7±0. 9mb	
50344. 019	SI-0	(P, X) 4-BE-7., SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	5. 18±0. 05mb	
50344. 019	SI-0	(P, X) 10-NE-20, CUM, SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	23. 03±0. 05mb	
50344. 019	SI-0	(P, X) 10-NE-21, CUM, SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	20. 74±0. 09mb	
50344. 019	SI-0	(P, X) 10-NE-22, IND, SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	7. 6±0. 09mb	
50344. 019	SI-0	(P, X) 10-NE-22, CUM, SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	26. 02±0. 14mb	
50344. 019	SI-0	(P, X) 11-NA-22, CUM, SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	18. 41±0. 23mb	
50344. 019	SI-0	(P, X) 11-NA-24-G, CUM, SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	4. 94±0. 23mb	
50344. 022	SI-0	(P, X) 4-BE-10, IND, SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	0. 63±0. 05mb	
50344. 022	SI-0	(P, X) 10-NE-20, CUM, SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	23. 03±0. 05mb	
50344. 022	SI-0	(P, X) 10-NE-21, CUM, SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	20. 7±0. 1mb	
50344. 022	SI-0	(P, X) 10-NE-22, IND, SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	7. 6±0. 1mb	
50344. 022	SI-0	(P, X) 10-NE-22, CUM, SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	26. 0±0. 1mb	
50344. 022	SI-0	(P, X) 13-AL-26-G, CUM, SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	13. 0±0. 8mb	
A0517. 012	SI-0	(P, X) 4-BE-10., SIG	5. 8800E+07	1. 1400E+08	KLN	91 *	4points	
A0517. 012	SI-0	(P, X) 13-AL-26., SIG	5. 8800E+07	1. 1400E+08	KLN	91 *	4points	
A0518. 008	SI-0	(P, X) 4-BE-7., SIG	4. 4300E+07	9. 7700E+07	TUH	93 *	24points	
A0518. 008	SI-0	(P, X) 4-BE-10., SIG	4. 4300E+07	9. 7700E+07	TUH	93 *	20points	
A0518. 008	SI-0	(P, X) 11-NA-22., SIG	4. 4300E+07	9. 7700E+07	TUH	93 *	24points	
A0518. 008	SI-0	(P, X) 11-NA-24., SIG	4. 4300E+07	9. 7700E+07	TUH	93 *	18points	
A0518. 008	SI-0	(P, X) 12-MG-28., SIG	4. 4300E+07	9. 7700E+07	TUH	93 *	18points	
A0518. 008	SI-0	(P, X) 13-AL-26., SIG	4. 4300E+07	9. 7700E+07	TUH	93 *	17points	
A0518. 009	SI-0	(P, X) 11-NA-22., SIG	2. 7600E+07	9. 7900E+07	TUH	93 *	29points	
A0518. 009	SI-0	(P, X) 11-NA-24., SIG	2. 7600E+07	9. 7900E+07	TUH	93 *	29points	
A0518. 009	SI-0	(P, X) 12-MG-28., SIG	2. 7600E+07	9. 7900E+07	TUH	93 *	28points	
A0518. 010	SI-0	(P, X) 12-MG-28., SIG	2. 1000E+07	9. 8000E+07	TUH	93 *	16points	
A0518. 010	SI-0	(P, X) 13-AL-26., SIG	2. 1000E+07	9. 8000E+07	TUH	93 *	12points	
A0518. 011	SI-0	(P, X) 11-NA-22., SIG	6. 1000E+07	9. 1300E+07	TUH	93	26. 1±1. 9, 21. 7±1. 5mb	
A0519. 007	SI-28	(P, X) 4-BE-7., SIG	1. 6000E+06	1. 6000E+06	TUH	93	10. 7±0. 8mb	
A0519. 007	SI-28	(P, X) 11-NA-22., SIG	1. 6000E+06	1. 6000E+06	TUH	93	16. 4±1. 2mb	
A0519. 007	SI-28	(P, X) 11-NA-24., SIG	1. 6000E+06	1. 6000E+06	TUH	93	5. 83±0. 45mb	
A0519. 007	SI-28	(P, X) 12-MG-28., SIG	1. 6000E+06	1. 6000E+06	TUH	93	0. 093±0. 014mb	
A0530. 005	SI-0	(P, X) 4-BE-7, IND, SIG	4. 4630E+07	9. 5480E+07	UH	91 *	24points	
A0530. 007	SI-0	(P, X) 11-NA-22, CUM, SIG	3. 4400E+07	9. 6960E+07	UH	91 *	32points	
A0530. 009	SI-0	(P, X) 13-AL-26, CUM, SIG	5. 0190E+07	9. 6970E+07	UH	91 *	4points	
60049. 005	SI-29	(P, 2P), SIG	AI28	2. 1500E+07	2. 1500E+07	ORL	55	110±22mb
98236. 028	SI-0	(P, X) 6-C-16., SIG	1. 0000E+09	1. 0000E+09	BNL	65	0. 023mb	
98236. 048	SI-0	(P, X) 7-N-17., SIG	1. 0000E+09	1. 0000E+09	BNL	65	0. 33mb	
98237. 023	SI-0	(P, X) 7-N-17., SIG	1. 5600E+08	1. 5600E+08	PAR	68	0. 021±0. 005mb	
98252. 011	SI-28	(P, X) 9-F-18., SIG	3. 0000E+08	4. 0000E+08	CMU	70	9. 64±0. 09, 11. 2±0. 25mb	
98252. 012	SI-28	(P, X) 11-NA-22., SIG	3. 0000E+08	4. 0000E+08	CMU	70	18. 5±0. 1, 17. 1±0. 68mb	
98252. 013	SI-28	(P, X) 11-NA-24., SIG	3. 0000E+08	4. 0000E+08	CMU	70	4. 32±0. 28, 4. 36±0. 18mb	
98252. 014	SI-29	(P, X) 9-F-18., SIG	3. 0000E+08	4. 0000E+08	CMU	70	5. 66±0. 042, 7. 31±0. 28mb	
98252. 015	SI-29	(P, X) 11-NA-22., SIG	3. 0000E+08	4. 0000E+08	CMU	70	11. 0±0. 1, 10. 8±0. 14mb	
98252. 016	SI-29	(P, X) 11-NA-24., SIG	3. 0000E+08	4. 0000E+08	CMU	70	7. 17±0. 4, 7. 73±0. 18mb	
98252. 017	SI-30	(P, X) 9-F-18., SIG	3. 0000E+08	4. 0000E+08	CMU	70	5. 09, 7. 5±0. 4mb	
98252. 018	SI-30	(P, X) 11-NA-22., SIG	3. 0000E+08	4. 0000E+08	CMU	70	5. 71, 8. 42±0. 07mb	

## 付録 5： Si に対する陽子入射核種生成断面積の EXFOR 検索結果（つづき）

Work no	Z-A	Reaction	Emin (eV)	Emax (eV)	Lab	Yr	comments	
98252.019	SI-30	(P, X) 11-NA-24., SIG	3.0000E+08	4.0000E+08	CMU	70	11. 1. 13. 1 ± 0. 08mb	
C0253.006	SI-0	(P, X) 11-NA-22., SIG	1.0000E+08	3.0000E+08	CAR	70 *	3points	
C0253.007	SI-0	(P, X) 11-NA-24., SIG	1.0000E+08	3.0000E+08	CAR	70 *	3points	
98267.002	SI-0	(P, X) 13-AL-28., SIG	2.1800E+07	3.8300E+07	TEN	68 *	5points	
98267.003	SI-0	(P, X) 13-AL-29., SIG	2.1000E+07	6.0000E+07	TEN	68 *	10points	
98267.004	SI-0	(P, X) 12-MG-27., SIG	2.9000E+07	5.5500E+07	TEN	68 *	7points	
98267.005	SI-0	(P, X) 11-NA-24., SIG	3.2500E+07	5.9500E+07	TEN	68 *	7points	
98267.006	SI-0	(P, X) 11-NA-22., SIG	4.1200E+07	5.9500E+07	TEN	68 *	4points	
98267.007	SI-0	(P, X) 9-F-18., SIG	4.1500E+07	5.9500E+07	TEN	68 *	4points	
98267.008	SI-0	(P, X) 4-BE-7., SIG	3.1500E+07	5.9500E+07	TEN	68 *	4points	
C0315.010	SI-28	(P, X) 14-SI-28, PAR, SIG, G	4.0000E+06	2.3000E+07	WAU	81 *	20points	
o0073.016	SI-0	(P, X) 11-NA-24, IND, SIG	1.3000E+08	3.9600E+08	CAR	64 *	4points	
o0073.017	SI-0	(P, X) 11-NA-22, CUM, SIG	1.3000E+08	3.9600E+08	CAR	64 *	4points	
o0073.018	SI-0	(P, X) 4-BE-7, CUM, SIG	1.3000E+08	3.9600E+08	CAR	64 *	4points	
o0077.021	SI-0	(P, X) 11-NA-24, CUM, SIG	5.0000E+08	2.9000E+09	CAR	68 *	5points	
o0077.022	SI-0	(P, X) 11-NA-22, CUM, SIG	5.0000E+08	2.9000E+09	CAR	68 *	5points	
o0077.023	SI-0	(P, X) 4-BE-7, , SIG	5.0000E+08	2.9000E+09	CAR	68 *	5points	
o0078.005	SI-0	(P, X) 4-BE-7, IND, SIG	6.6000E+08	6.6000E+08	UH	89	5.39 ± 0.22mb	
o0078.005	SI-0	(P, X) 4-BE-10, IND, SIG	6.6000E+08	6.6000E+08	UH	89	0.63 ± 0.20mb	
o0078.005	SI-0	(P, X) 11-NA-22, CUM, SIG	6.6000E+08	6.6000E+08	UH	89	19.6 ± 0.6mb	
o0078.005	SI-0	(P, X) 11-NA-24, CUM, SIG	6.6000E+08	6.6000E+08	UH	89	5.15 ± 0.19mb	
o0078.005	SI-0	(P, X) 13-AL-26, CUM, SIG	6.6000E+08	6.6000E+08	UH	89	13.0 ± 0.8mb	
o0088.002	SI-0	(P, X) 11-NA-24, CUM, SIG	6.0000E+08	6.0000E+08	KLN	75	4.4 ± 1.1mb	
o0088.003	SI-0	(P, X) 11-NA-22, CUM, SIG	6.0000E+08	6.0000E+08	KLN	75	16.7 ± 3.2mb	
o0088.004	SI-0XI	(P, X) 4-BE-7, IND, SIG	6.0000E+08	6.0000E+08	KLN	75	27.4 ± 6.0mb	
o0094.002	SI-0	(P, X) 4-BE-7., SIG	1.0000E+09	1.0000E+09	CSN	75	7.6 ± 0.8mb	
o0094.002	SI-0	(P, X) 11-NA-22., SIG	1.0000E+09	1.0000E+09	CSN	75	15.7 ± 1.9mb	
o0094.003	SI-0	(P, X) 4-BE-7., SIG	2.0000E+09	2.0000E+09	CSN	75	10.8 ± 1.1mb	
o0094.003	SI-0	(P, X) 11-NA-22., SIG	2.0000E+09	2.0000E+09	CSN	75	15.0 ± 1.5mb	
o0094.004	SI-0	(P, X) 4-BE-7., SIG	3.0000E+09	3.0000E+09	CSN	75	10.6 ± 0.9mb	
o0094.004	SI-0	(P, X) 11-NA-22., SIG	3.0000E+09	3.0000E+09	CSN	75	13.4 ± 1.2mb	
o0094.005	SI-0	(P, X) 4-BE-7., SIG	2.3000E+10	2.3000E+10	CSN	75	10.7 ± 0.9mb	
o0094.005	SI-0	(P, X) 11-NA-22., SIG	2.3000E+10	2.3000E+10	CSN	75	12.3 ± 1.1mb	
o0113.004	SI-28	(P, X) 0-G-0, PAR, SIG	4.0000E+08	4.0000E+08	CLE	82 *	20points	
65040.003	SI-30	(P, 2P), SIG	A129	1.3000E+08	4.2500E+08	CAR	62 *	5points
65040.006	SI-30	(P, 3P), SIG	Mg28	1.3000E+08	4.2500E+08	CAR	62 *	5points

## 付録 6 : Fe に対する陽子入射核種生成断面積の EXFOR 検索結果

Work no	Z-A	Reaction		Emin (eV)	Emax (eV)	Lab	Yr	comments
50048. 003	FE-56	(P, G), . SIG, . REL		4. 2000E+05	2. 9400E+06	KFT	77	x
50068. 055	FE-56	(P, X) 0-NN-1, PAR, SIG		2. 2000E+07	2. 2000E+07	FEI	80	667±43mb
50072. 003	FE-57	(P, N), IND, SIG	Co57	6. 0700E+06	6. 0700E+06	SUL	80	32mb
A0100. 007	FE-0	(P, X) 27-C0-57, IND, SIG		4. 9300E+07	1. 9980E+08	KLN	83 *	19points
A0100. 007	FE-0	(P, X) 27-C0-56, IND, SIG		4. 9300E+07	1. 9980E+08	KLN	83 *	19points
A0100. 007	FE-0	(P, X) 25-MN-54, IND, SIG		4. 9300E+07	1. 9980E+08	KLN	83 *	26points
A0100. 007	FE-0	(P, X) 25-MN-52-G, CUM, SIG		4. 9300E+07	1. 9980E+08	KLN	83 *	26points
A0100. 007	FE-0	(P, X) 24-CR-51, CUM, SIG		4. 9300E+07	1. 9980E+08	KLN	83 *	26points
A0100. 007	FE-0	(P, X) 24-CR-48, CUM, SIG		4. 9300E+07	1. 9980E+08	KLN	83 *	26points
A0100. 007	FE-0	(P, X) 23-V-48, IND, SIG		4. 9300E+07	1. 9980E+08	KLN	83 *	26points
A0100. 007	FE-0	(P, X) 21-SC-48, IND, SIG		4. 9300E+07	1. 9980E+08	KLN	83 *	18points
A0100. 008	FE-0	(P, X) 21-SC-47, CUM, SIG		5. 3460E+07	1. 9980E+08	KLN	83 *	25points
A0100. 008	FE-0	(P, X) 21-SC-46-G, M+, IND, SIG		5. 3460E+07	1. 9980E+08	KLN	83 *	23points
A0100. 008	FE-0	(P, X) 21-SC-44-M, IND, SIG		5. 3460E+07	1. 9980E+08	KLN	83 *	23points
50103. 002	FE-54	(P, G), . SIG	Co55	4. 0000E+06	9. 0000E+06	UFT	87 *	4points
50133. 002	FE-0	(P, X) ELEM/MASS., SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	LAS	76 *	19isotopes
50145. 007	FE-0	(P, X) 27-C0-58-G, M+, SIG		3. 4400E+06	1. 6060E+07	KLN	80 *	5points
50145. 007	FE-0	(P, X) 27-C0-57, IND, SIG		3. 4400E+06	1. 6060E+07	KLN	80 *	6points
50145. 007	FE-0	(P, X) 27-C0-56, IND, SIG		3. 4400E+06	1. 6060E+07	KLN	80 *	5points
50145. 007	FE-0	(P, X) 25-MN-54, IND, SIG		3. 4400E+06	1. 6060E+07	KLN	80 *	1points
50145. 007	FE-0	(P, X) 24-CR-51, CUM, SIG		3. 4400E+06	1. 6060E+07	KLN	80 *	3points
50146. 009	FE-0	(P, X) 27-C0-55, IND, SIG		1. 3430E+07	4. 4530E+07	KLN	79 *	20points
50146. 010	FE-0	(P, X) 27-C0-56, IND, SIG		7. 4100E+06	4. 4530E+07	KLN	79 *	25points
50146. 011	FE-0	(P, X) 27-C0-57, IND, SIG		3. 4400E+06	4. 4530E+07	KLN	79 *	24points
50146. 012	FE-0	(P, X) 27-C0-58-G, M+, SIG		7. 4100E+06	3. 8750E+07	KLN	79 *	21points
50146. 013	FE-0	(P, X) 26-FE-52-G, . SIG		3. 3230E+07	4. 4530E+07	KLN	79 *	7points
50146. 014	FE-0	(P, X) 25-MN-52, IND/M+, SIG		1. 8280E+07	4. 4530E+07	KLN	79 *	17points
50146. 015	FE-0	(P, X) 25-MN-54, IND, SIG		1. 6060E+07	4. 4530E+07	KLN	79 *	19points
50146. 016	FE-0	(P, X) 24-CR-51, CUM, SIG		1. 2550E+07	4. 4530E+07	KLN	79 *	23points
50146. 017	FE-0	(P, X) 23-V-48, CUM, SIG		3. 8750E+07	4. 4530E+07	KLN	79 *	4points
50179. 002	FE-0	(P, X) 27-C0-56, IND, SIG		5. 8000E+06	5. 3000E+07	TRW	79 *	12points
50179. 007	FE-0	(P, X) 25-MN-54, IND, SIG		2. 6300E+07	6. 2500E+07	TRW	79 *	7points
50179. 008	FE-0	(P, X) 27-C0-57, IND, SIG		6. 2000E+06	3. 0200E+07	TRW	79 *	11points
50179. 009	FE-0	(P, X) 27-C0-58-G, IND, SIG		2. 6700E+07	3. 0000E+07	TRW	79 *	2points
50179. 010	FE-0	(P, X) 23-V-48, (CUM), SIG		4. 9400E+07	6. 2700E+07	TRW	79 *	4points
50179. 011	FE-0	(P, X) 25-MN-52-G, (CUM)/M+, SIG		2. 3200E+07	6. 3650E+07	TRW	79 *	10points
50179. 012	FE-0	(P, X) 24-CR-51, (CUM), SIG		3. 9460E+07	6. 3400E+07	TRW	79 *	6points
50182. 002	FE-0	(P, X) 27-C0-56, IND, SIG		1. 5700E+07	3. 8800E+07	DAV	79 *	27points
50182. 003	FE-0	(P, X) 25-MN-52, . SIG		2. 2480E+07	3. 8860E+07	DAV	79 *	21points
50182. 004	FE-56	(P, 2N), IND, SIG	Co55	1. 5630E+07	3. 8900E+07	DAV	79 *	32points
50182. 005	FE-0	(P, X) 27-C0-55, IND, SIG		1. 5660E+07	3. 8900E+07	DAV	79 *	32points
50213. 003	FE-56	(P, N), . SIG, . A	Co56	1. 2000E+10	1. 2000E+10	TSU	83	0. 58±0. 04mb
50213. 004	FE-57	(P, N), . SIG, . A	Co57	1. 2000E+10	1. 2000E+10	TSU	83	14. 9±2. 4mb
50213. 006	FE-56	(P, 2N), . SIG, . A	Co55	1. 2000E+10	1. 2000E+10	TSU	83	0. 17±0. 02mb
50213. 021	FE-57	(P, 2P), . SIG, . A	Mn56	1. 2000E+10	1. 2000E+10	TSU	83	30~35mb
50213. 023	FE-56	(P, N+2P), . SIG, . A	Mn54	1. 2000E+10	1. 2000E+10	TSU	83	29~30mb
50271. 004	FE-56	(P, N), . SIG	Co56	2. 2200E+07	2. 2200E+07	FEI	84	356mb
50271. 004	FE-56	(P, 2N), . SIG	Co55	2. 2200E+07	2. 2200E+07	FEI	84	44mb
50271. 004	FE-56	(P, N+P), . SIG	Fe55	2. 2200E+07	2. 2200E+07	FEI	84	407mb
50293. 002	FE-54	(P, G), . SIG	Co55	4. 0000E+06	9. 0000E+06	KFT	86 *	4points
50339. 003	FE-0	(P, X) 23-V-48, . SIG		7. 1100E+06	6. 4400E+07	IJI	87 *	41points
50339. 003	FE-0	(P, X) 24-CR-51, . SIG		7. 1100E+06	6. 4400E+07	IJI	87 *	60points
50339. 003	FE-0	(P, X) 25-MN-52-G, . SIG		7. 1100E+06	6. 4400E+07	IJI	87 *	56points
50339. 003	FE-0	(P, X) 25-MN-54, . SIG		7. 1100E+06	6. 4400E+07	IJI	87 *	40points
50339. 003	FE-0	(P, X) 27-C0-56, IND, SIG		7. 1100E+06	6. 4400E+07	IJI	87 *	46points
50344. 005	FE-0	(P, X) 4-BE-7, IND, SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	2. 21±0. 05mb
50344. 005	FE-0	(P, X) 11-NA-22, CUM, SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	0. 399±0. 018mb
50344. 005	FE-0	(P, X) 19-K-43, CUM, SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	0. 87±0. 07mb
50344. 005	FE-0	(P, X) 21-SC-44-M, IND, SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	8. 24±0. 06mb
50344. 005	FE-0	(P, X) 21-SO-46-G, IND/M+, SIG		6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	9. 55±0. 18mb

## 付録 6 : Feに対する陽子入射核種生成断面積の EXFOR 検索結果 (つづき 1)

Work no	Z-A	Reaction	Emin (eV)	Emax (eV)	Lab	Yr	comments	
50344. 005	FE-0	(P, X) 21-SC-47, IND, SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	293 ± 34mb	
50344. 005	FE-0	(P, X) 23-V-48, IND, SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	22. 71 ± 0. 28mb	
50344. 006	FE-0	(P, X) 13-AL-26-G, CUM, SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	0. 49 ± 0. 02mb	
50344. 006	FE-0	(P, X) 24-CR-48, . SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	0. 61 ± 0. 12mb	
50344. 006	FE-0	(P, X) 24-CR-51, CUM, SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	44. 3 ± 0. 4mb	
50344. 006	FE-0	(P, X) 25-MN-54, IND, SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	38. 29 ± 0. 24mb	
50344. 006	FE-0	(P, X) 27-CO-56, . SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	1. 187 ± 0. 009mb	
50344. 006	FE-0	(P, X) 27-CO-57, . SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	0. 232 ± 0. 009mb	
50344. 006	FE-0	(P, X) 27-CO-58-G, IND/M+, SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	86	0. 036 ± 0. 006mb	
50404. 004	FE-56	(P, X) 12-MG-28, CUM, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	0. 35 ± 0. 06mb	
50404. 004	FE-56	(P, X) 18-AR-41, CUM, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	0. 37 ± 0. 03mb	
50404. 004	FE-56	(P, X) 19-K-42, IND, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	2. 9 ± 0. 2mb	
50404. 004	FE-56	(P, X) 19-K-43, CUM, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	0. 71 ± 0. 04mb	
50404. 004	FE-56	(P, X) 21-SC-43, CUM, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	1. 7 ± 0. 12mb	
50404. 004	FE-56	(P, X) 21-SC-44-M, IND, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	3. 1 ± 0. 16mb	
50404. 004	FE-56	(P, X) 21-SC-44-G, IND, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	3. 0 ± 0. 15mb	
50404. 004	FE-56	(P, X) 21-SC-46, IND, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	4. 5 ± 0. 2mb	
50404. 004	FE-56	(P, X) 21-SC-47, CUM, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	2. 0 ± 0. 3mb	
50404. 005	FE-56	(P, X) 21-SC-48, IND, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	0. 22 ± 0. 04mb	
50404. 005	FE-56	(P, X) 23-V-48, CUM, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	7. 4 ± 0. 04mb	
50404. 005	FE-56	(P, X) 24-CR-48, IND, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	0. 2 ± 0. 01mb	
50404. 005	FE-56	(P, X) 25-MN-52, IND, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	3. 3 ± 0. 17mb	
50404. 005	FE-56	(P, X) 24-CR-51, CUM, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	18 ± 0. 9mb	
50404. 005	FE-56	(P, X) 25-MN-54, IND, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	23 ± 1. 2mb	
50404. 005	FE-56	(P, X) 25-MN-56, CUM, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	0. 48 ± 0. 03mb	
50404. 005	FE-56	(P, X) 27-CO-56, CUM, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	0. 54 ± 0. 05mb	
50404. 005	FE-56	(P, X) 27-CO-57, CUM, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	0. 18 ± 0. 03mb	
50404. 006	FE-57	(P, X) 12-MG-28, CUM, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	0. 59 ± 0. 07mb	
50404. 006	FE-57	(P, X) 18-AR-41, CUM, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	0. 54 ± 0. 04mb	
50404. 006	FE-57	(P, X) 19-K-42, IND, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	3. 7 ± 0. 3mb	
50404. 006	FE-57	(P, X) 19-K-43, CUM, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	1. 1 ± 0. 06mb	
50404. 006	FE-57	(P, X) 21-SC-43, CUM, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	1. 4 ± 0. 1mb	
50404. 006	FE-57	(P, X) 21-SC-44-M, IND, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	3. 7 ± 0. 2mb	
50404. 006	FE-57	(P, X) 21-SC-44-G, IND, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	2. 9 ± 0. 18mb	
50404. 006	FE-57	(P, X) 21-SC-46, IND, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	6. 1 ± 0. 3mb	
50404. 006	FE-57	(P, X) 21-SC-47, CUM, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	3. 2 ± 0. 5mb	
50404. 007	FE-57	(P, X) 21-SC-48, IND, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	0. 56 ± 0. 06mb	
50404. 007	FE-57	(P, X) 23-V-48, CUM, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	6. 7 ± 0. 04mb	
50404. 007	FE-57	(P, X) 24-CR-48, IND, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	0. 12 ± 0. 01mb	
50404. 007	FE-57	(P, X) 24-CR-51, CUM, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	17 ± 0. 8mb	
50404. 007	FE-57	(P, X) 25-MN-52, IND, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	2. 6 ± 0. 14mb	
50404. 008	FE-57	(P, X) 25-MN-54, IND, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	23 ± 1. 2mb	
50404. 008	FE-57	(P, X) 25-MN-56, CUM, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	18 ± 1mb	
50404. 008	FE-57	(P, X) 27-CO-56, CUM, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	0. 36 ± 0. 04mb	
50404. 008	FE-57	(P, X) 27-CO-57, CUM, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	0. 74 ± 0. 12mb	
50404. 008	FE-57	(P, X) 27-CO-58, IND, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	LEP	88	0. 2 ± 0. 02mb	
50408. 005	FE-0	(P, X) 11-NA-22, . SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	88	0. 42 ± 0. 02mb	
50408. 005	FE-0	(P, X) 11-NA-22, . SIG, . CALC	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	88	x	
50408. 005	FE-0	(P, X) 25-MN-54, . SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	88	48. 48 ± 1. 8mb	
50408. 005	FE-0	(P, X) 25-MN-54, . SIG, . CALC	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	88	x	
50408. 005	FE-0	(P, X) 27-CO-57, . SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	88	0. 25 ± 0. 01mb	
50408. 005	FE-0	(P, X) 27-CO-57, . SIG, . CALC	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	88	x	
50419. 002	FE-58	(P, N), . SIG	Co58	6. 1000E+06	6. 1000E+06	SUL	89	380 ± 30mb
50419. 003	FE-58	(P, N), . SIG	Co58	5. 2000E+06	5. 2000E+06	SUL	89	225 ± 20mb
50435. 002	FE-0	(P, X) ELEM/MASS, . SIG		8. 0000E+08	8. 0000E+08	KLN	89 *	12isotopes
50435. 003	FE-0	(P, X) ELEM/MASS, . SIG		1. 2000E+09	1. 2000E+09	KLN	89 *	16isotopes
50435. 004	FE-0	(P, X) ELEM/MASS, . SIG		2. 6000E+09	2. 6000E+09	KLN	89 *	16isotopes
A0501. 003	FE-54	(P, X) ELEM/MASS, . SIG		1. 0000E+09	1. 0000E+09	RI	90 *	14isotopes
50510. 045	FE-54	(P, A), . SIG	Mn51	9. 5000E+06	2. 7600E+07	KAZ	91 *	21points
50510. 046	FE-56	(P, N), . SIG	Co56	7. 7000E+06	2. 9500E+07	KAZ	91 *	25points

## 付録 6 : Fe に対する陽子入射核種生成断面積の EXFOR 検索結果 (つづき 2)

Work no	Z-A	Reaction		Emin (eV)	Emax (eV)	Lab	Yr	comments
50510. 047	FE-56	(P, 2N), . SIG	Cs55	1. 5800E+07	2. 9500E+07	KAZ	91 *	16points
50510. 048	FE-56	(P, N+A)-M, . SIG	Mn52M	2. 1400E+07	2. 9500E+07	KAZ	91 *	10points
50510. 049	FE-56	(P, N+A)-G, . SIG	Mn52G	2. 0300E+07	2. 9500E+07	KAZ	91 *	11points
50510. 050	FE-57	(P, N), . SIG	Cs57	7. 7000E+06	2. 9500E+07	KAZ	91 *	25points
50510. 051	FE-57	(P, 2N), . SIG	Cs56	1. 3800E+07	2. 9500E+07	KAZ	91 *	18points
50510. 052	FE-57	(P, 3N), . SIG	Cs55	2. 5700E+07	2. 9500E+07	KAZ	91 *	5points
50510. 053	FE-57	(P, A), . SIG	Mn54	7. 7000E+06	2. 4800E+07	KAZ	91 *	20points
50510. 054	FE-57	(P, 2P), . SIG	Mn56	1. 9300E+07	2. 9500E+07	KAZ	91 *	12points
50510. 055	FE-58	(P, N), . SIG	Cs58	7. 7000E+06	2. 9500E+07	KAZ	91 *	25points
50510. 056	FE-58	(P, 2N), . SIG	Cs57	1. 2100E+07	2. 9500E+07	KAZ	91 *	20points
50510. 057	FE-58	(P, 3N), . SIG	Cs56	2. 5700E+07	2. 9500E+07	KAZ	91 *	5points
50510. 058	FE-58	(P, N+A), . SIG	Mn54	1. 8300E+07	2. 9500E+07	KAZ	91 *	13points
A0516. 002	FE-0	(P, X) ELEM/MASS, . SIG	Cs58	1. 6000E+09	1. 6000E+09	TUH	92	0. 113±0. 015mb
A0519. 011	FE-0	(P, X) ELEM/MASS, . SIG		1. 6000E+09	1. 6000E+09	TUH	93 *	19isotopes
60027. 003	FE-56	(P, N), . SIG	Cs56	1. 1100E+07	4. 4600E+07	MIL	74 *	17points
60041. 002	FE-56	(P, N), . SIG	Cs56	4. 8000E+06	3. 9000E+07	HAR	70 *	27points
60041. 003	FE-56	(P, N+P), UND, SIG	Fe55	1. 5000E+07	3. 3200E+07	HAR	70 *	7points
60041. 004	FE-56	(P, 2N), . SIG	Cs55	1. 5600E+07	3. 9000E+07	HAR	70 *	11points
60041. 005	FE-56	(P, N+A), (M), SIG	Mn52M	2. 1600E+07	3. 9000E+07	HAR	70 *	12points
60041. 006	FE-56	(P, N+2P), UND, SIG	Mn54	2. 4600E+07	3. 9000E+07	HAR	70 *	8points
60043. 006	FE-56	(P, N), . SIG	Cs56	6. 0000E+06	1. 3700E+07	TOK	59 *	17points
60043. 007	FE-57	(P, N), . SIG	Cs57	3. 7000E+06	1. 3800E+07	TOK	59 *	13points
60047. 003	FE-54	(P, G), . SIG	Cs55	1. 1000E+07	1. 1000E+07	ORL	55	0. 33mb
60049. 011	FE-54	(P, N+P), (M)/UND, SIG	Fe53M	2. 1500E+07	2. 1500E+07	ORL	55	165mb
60049. 012	FE-57	(P, 2P), . SIG	Mn56	2. 1500E+07	2. 1500E+07	ORL	55	12. 5mb
60050. 006	FE-56	(P, 2N), . SIG	Cs55	2. 1500E+07	2. 1500E+07	ORL	55	105mb
60050. 007	FE-56	(P, N+P), UND, SIG	Fe55	2. 1500E+07	2. 1500E+07	ORL	55	760mb
60068. 016	FE-57	(P, N), . SIG	Cs57	1. 6530E+06	5. 5070E+06	ORL	60 *	67points
60073. 010	FE-0	(P, X) 23-V-48, CUM, SIG		2. 0200E+07	6. 2500E+07	ORL	67 *	25points
60073. 011	FE-0	(P, X) 24-CR-51, CUM, SIG		3. 1900E+07	6. 3100E+07	ORL	67 *	14points
60073. 012	FE-0	(P, X) 25-MN-52, CUM, SIG		2. 2100E+07	6. 2700E+07	ORL	67 *	20points
60073. 013	FE-0	(P, X) 25-MN-54, . SIG		3. 1000E+07	6. 2400E+07	ORL	67 *	14points
60073. 014	FE-0	(P, X) 26-FE-52, . SIG		3. 3900E+07	6. 0700E+07	ORL	67 *	10points
60073. 015	FE-0	(P, X) 27-CO-55, . SIG		1. 3300E+07	6. 0300E+07	ORL	67 *	19points
60073. 016	FE-0	(P, X) 27-CO-56, . SIG		7. 1000E+06	6. 2800E+07	ORL	67 *	23points
60085. 017	FE-0	(P, X) 27-CO-56, (CUM), SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	1. 25±0. 2mb
60085. 017	FE-0	(P, X) 26-FE-53, (M), SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	6. 73±0. 7mb
60085. 017	FE-0	(P, X) 26-FE-52, . SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	0. 8±0. 09mb
60085. 017	FE-0	(P, X) 25-MN-56, CUM, SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	1. 34±0. 25mb
60085. 018	FE-0	(P, X) ELEM/MASS, . SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71 *	9isotopes
60085. 019	FE-0	(P, X) 24-CR-51, CUM, SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	64. 9±7mb
60085. 019	FE-0	(P, X) 24-CR-49, . SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	19. 4±2mb
60085. 019	FE-0	(P, X) 24-CR-48, . SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	1. 37±0. 3mb
60085. 020	FE-0	(P, X) 23-V-53, . SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	0. 37±0. 08mb
60085. 020	FE-0	(P, X) 23-V-52, (CUM), SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	0. 24±0. 2mb
60085. 020	FE-0	(P, X) 23-V-48, . SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	1. 37±0. 15mb
60085. 021	FE-0	(P, X) 21-SC-47, (CUM), SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	3. 26±0. 5mb
60085. 021	FE-0	(P, X) 21-SC-43, CUM, SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	10. 4±1. 5mb
60085. 022	FE-0	(P, X) 19-K-43, CUM, SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	1. 21±0. 25mb
60085. 022	FE-0	(P, X) 19-K-42, . SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	4. 82±0. 75mb
60085. 022	FE-0	(P, X) 19-K-38-G, . SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	0. 97±0. 15mb
60085. 022	FE-0	(P, X) 18-AR-41, CUM, SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	0. 62±0. 07mb
60085. 023	FE-0	(P, X) 17-CL-39, CUM, SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	3. 04±0. 5mb
60085. 023	FE-0	(P, X) 17-CL-38, (CUM), SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	1. 12±0. 2mb
60085. 024	FE-0	(P, X) 13-AL-29, CUM, SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	3. 4±0. 4mb
60085. 024	FE-0	(P, X) 13-AL-28, (CUM), SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	1. 41±0. 25mb
60085. 024	FE-0	(P, X) 11-NA-24, CUM, SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	0. 47±0. 05mb
60085. 078	FE-0	(P, X) 27-CO-56, (CUM), SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	1. 25±0. 2mb
60085. 079	FE-0	(P, X) 26-FE-53, (M), SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	6. 73±0. 7mb
60085. 080	FE-0	(P, X) 26-FE-52, . SIG		5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	0. 8±0. 09mb

## 付録 6 : Fe に対する陽子入射核種生成断面積の EXFOR 検索結果 (つづき 3)

Work no	Z-A	Reaction	Emin (eV)	Emax (eV)	Lab	Yr	comments
60085. 081	FE-0	(P, X) 25-MN-56, CUM, SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	1. 34±0. 25mb
60085. 082	FE-0	(P, X) 25-MN-54, . SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	55. 1±5mb
60085. 083	FE-0	(P, X) 25-MN-52-M, . SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	1. 5±0. 3mb
60085. 084	FE-0	(P, X) 25-MN-52-G, . SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	37. 9±4. 2mb
60085. 085	FE-0	(P, X) 25-MN-50-M, . SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	0. 58±0. 1mb
60085. 086	FE-0	(P, X) 24-CR-51, CUM, SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	64. 9±7mb
60085. 087	FE-0	(P, X) 24-CR-49, . SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	19. 4±2mb
60085. 088	FE-0	(P, X) 24-CR-48, . SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	1. 37±0. 3mb
60085. 089	FE-0	(P, X) 23-V-53, . SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	0. 37±0. 08mb
60085. 090	FE-0	(P, X) 23-V-52, (CUM), SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	0. 24±0. 2mb
60085. 091	FE-0	(P, X) 23-V-48, . SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	1. 37±0. 15mb
60085. 092	FE-0	(P, X) 21-SC-48, . SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	1. 05±0. 4mb
60085. 093	FE-0	(P, X) 21-SC-47, (CUM), SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	3. 26±0. 5mb
60085. 094	FE-0	(P, X) 21-SC-46-M, . SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	0. 13±0. 03mb
60085. 095	FE-0	(P, X) 21-SC-46-G, . SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	11. 7±1. 5mb
60085. 096	FE-0	(P, X) 21-SC-44-M, . SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	9±0. 95mb
60085. 097	FE-0	(P, X) 21-SC-44-G, . SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	12. 8±1. 4mb
60085. 098	FE-0	(P, X) 21-SC-43, CUM, SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	10. 4±1. 5mb
60085. 099	FE-0	(P, X) 19-K-43, CUM, SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	1. 21±0. 25mb
60085. 100	FE-0	(P, X) 19-K-42, . SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	4. 82±0. 75mb
60085. 101	FE-0	(P, X) 19-K-38-G, . SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	0. 97±0. 15mb
60085. 102	FE-0	(P, X) 18-AR-41, CUM, SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	0. 62±0. 07mb
60085. 103	FE-0	(P, X) 17-CL-39, CUM, SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	3. 04±0. 5mb
60085. 104	FE-0	(P, X) 17-CL-38, (CUM), SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	1. 12±0. 2mb
60085. 105	FE-0	(P, X) 17-CL-34-M, . SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	0. 35±0. 05mb
60085. 106	FE-0	(P, X) 13-AL-29, CUM, SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	3. 4±0. 4mb
60085. 107	FE-0	(P, X) 13-AL-28, (CUM), SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	1. 41±0. 25mb
60085. 108	FE-0	(P, X) 11-NA-24, CUM, SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	MTR	71	0. 47±0. 05mb
60093. 005	FE-0	(P, N) , . SIG	3. 6000E+06	5. 5000E+06	LRL	59 *	5points
60096. 005	FE-0	(P, X) 27-CO-55, . SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	LAS	76	0. 49~0. 6mb
60096. 007	FE-0	(P, X) 27-CO-56, . SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	LAS	76	1. 15~1. 57mb
60096. 009	FE-0	(P, X) 27-CO-57, . SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	LAS	76	0. 163~0. 24mb
60096. 011	FE-0	(P, X) 26-FE-52, . SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	LAS	76	0. 63~0. 9mb
60096. 014	FE-0	(P, X) 25-MN-52-G, CUM, SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	LAS	76	10. 0~12. 2mb
60096. 016	FE-0	(P, X) 25-MN-54, IND, SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	LAS	76	32. 2~35mb
60096. 018	FE-0	(P, X) 24-CR-48, . SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	LAS	76	0. 818~0. 95mb
60096. 020	FE-0	(P, X) 24-CR-51, CUM, SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	LAS	76	41. 0~44. 8mb
60096. 022	FE-0	(P, X) 23-V-48, CUM, SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	LAS	76	19. 0~24. 0mb
60096. 024	FE-0	(P, X) 21-SC-44-M, . SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	LAS	76	8. 0~8. 8mb
60096. 026	FE-0	(P, X) 21-SC-46, IND/M+, SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	LAS	76	8. 4~8. 7mb
60096. 028	FE-0	(P, X) 21-SC-47, CUM, SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	LAS	76	2. 6~3. 11mb
60096. 030	FE-0	(P, X) 21-SC-48, IND, SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	LAS	76	0. 445~0. 6mb
60096. 032	FE-0	(P, X) 19-K-42, (CUM), SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	LAS	76	2. 69~3. 53mb
60096. 034	FE-0	(P, X) 19-K-43, CUM, SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	LAS	76	0. 08~1. 03mb
60096. 036	FE-0	(P, X) 12-MG-28, CUM, SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	LAS	76	0. 035~0. 07mb
60096. 038	FE-0	(P, X) 11-NA-22, CUM, SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	LAS	76	0. 28~0. 37mb
60096. 040	FE-0	(P, X) 11-NA-24, CUM, SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	LAS	76	0. 385~0. 51mb
60096. 042	FE-0	(P, X) 4-BE-7, . SIG	5. 9000E+08	5. 9000E+08	LAS	76	1. 8~2. 1mb
60102. 003	FE-0	(P, X) 1-H-3, . SIG	2. 5000E+10	2. 5000E+10	CER	61	94mb
60102. 005	FE-0	(P, X) 18-AR-37, . SIG	2. 5000E+10	2. 5000E+10	CER	61	5. 7mb
60102. 007	FE-0	(P, X) ELEM/MASS, . SIG	2. 5000E+10	2. 5000E+10	CER	61 *	15 isotopes
98226. 002	FE-0	(P, X) 4-BE-10, . SIG	7. 3000E+08	7. 3000E+08	SDC	64	1. 1±0. 3mb
98226. 005	FE-0	(P, X) 25-MN-54, . SIG	7. 3000E+08	7. 3000E+08	SDC	64	32mb
98226. 006	FE-0	(P, X) 24-CR-51, . SIG +Mn51product7. 3000E+08	7. 3000E+08	7. 3000E+08	SDC	64	27mb
98226. 007	FE-0	(P, X) 23-V-49, . SIG +Cr49product7. 3000E+08	7. 3000E+08	7. 3000E+08	SDC	64	30mb
98226. 008	FE-0	(P, X) 22-Tl-44, . SIG	7. 3000E+08	7. 3000E+08	SDC	64	3. 6mb
98226. 009	FE-0	(P, X) 21-SC-46, . SIG	7. 3000E+08	7. 3000E+08	SDC	64	0. 4mb
98226. 010	FE-0	(P, X) 20-CA-45, . SIG	7. 3000E+08	7. 3000E+08	SDC	64	1. 4mb
98226. 011	FE-0	(P, X) 19-K-40, . SIG	7. 3000E+08	7. 3000E+08	SDC	64	8±1mb
98226. 012	FE-0	(P, X) 18-AR-42, . SIG	7. 3000E+08	7. 3000E+08	SDC	64	0. 04mb

## 付録 6 : Fe に対する陽子入射核種生成断面積の EXFOR 検索結果 (つづき 4)

Work no	Z-A	Reaction	Emin (eV)	Emax (eV)	Lab	Yr	comments
98226. 013	FE-0	(P, X) 14-SI-32, . SIG	7. 3000E+08	7. 3000E+08	SDC	64	0. 46mb
98235. 010	FE-0	(P, X) 25-MN-54, . SIG	5. 0000E+08	7. 3000E+08	USA	60	28. 33mb
98235. 011	FE-0	(P, X) 25-MN-52, . SIG	5. 0000E+08	7. 3000E+08	USA	60	16. 13mb
98235. 012	FE-0	(P, X) 19-K-43, . SIG	5. 0000E+08	7. 3000E+08	USA	60	0. 59. 0. 88mb
98235. 013	FE-0	(P, X) 19-K-42, . SIG	5. 0000E+08	7. 3000E+08	USA	60	2. 2. 3. 2mb
98235. 014	FE-0	(P, X) 17-CL-39, . SIG	5. 0000E+08	7. 3000E+08	USA	60	0. 12. 0. 21mb
98235. 015	FE-0	(P, X) 17-CL-38, . SIG	5. 0000E+08	7. 3000E+08	USA	60	0. 47. 0. 83mb
98235. 016	FE-0	(P, X) 17-CL-36, . SIG	7. 3000E+08	7. 3000E+08	USA	60	6. 8mb
98235. 017	FE-0	(P, X) 17-CL-34-M, . SIG	5. 0000E+08	7. 3000E+08	USA	60	0. 38. 0. 59mb
98235. 018	FE-0	(P, X) 17-CL-34-M, . SIG +C138	5. 0000E+08	7. 3000E+08	USA	60	0. 86. 1. 42mb
98235. 019	FE-0	(P, X) 13-AL-26, . SIG	7. 3000E+08	7. 3000E+08	USA	60	0. 47mb
98235. 020	FE-0	(P, X) 11-NA-22, . SIG	7. 3000E+08	7. 3000E+08	USA	60	0. 36mb
98235. 021	FE-0	(P, X) 4-BE-7, . SIG	7. 3000E+08	7. 3000E+08	USA	60	2. 9mb
98244. 004	FE-54	(P, N+P), . SIG	Fe53	4. 0000E+08	3. 0000E+09	PTN	58 * 4points
C0253. 026	FE-0	(P, X) 11-NA-22, . SIG	1. 0000E+08	3. 0000E+08	CAR	70 * 3points	
C0253. 027	FE-0	(P, X) 11-NA-24, . SIG	1. 0000E+08	3. 0000E+08	CAR	70 * 3points	
C0269. 006	FE-56	(P, N+P), . SIG	Fe55	3. 7000E+08	3. 7000E+08	COL	63 63. 9±3. 8mb
C0269. 015	FE-56	(P, N), . SIG	3. 7000E+08	3. 7000E+08	COL	63	0. 92±0. 06mb
C0269. 016	FE-56	(P, 2N), . SIG	3. 7000E+08	3. 7000E+08	COL	63	0. 77±0. 08mb
C0270. 006	FE-0	(P, X) 11-NA-22, CUM, SIG	2. 9000E+10	2. 9000E+10	BNL	64	3. 4±0. 3mb
C0270. 007	FE-0	(P, X) 11-NA-24, CUM, SIG	2. 9000E+10	2. 9000E+10	BNL	64	3. 8±0. 1mb
C0270. 008	FE-0	(P, X) 19-K-42, . SIG	2. 9000E+10	2. 9000E+10	BNL	64	3. 5±0. 1mb
C0270. 009	FE-0	(P, X) 19-K-43, CUM, SIG	2. 9000E+10	2. 9000E+10	BNL	64	1. 1±0. 1mb
C0272. 002	FE-0	(P, X) 27-CO-57, . SIG	1. 4100E+07	4. 5000E+07	BAT	71 * 3points	
C0272. 002	FE-0	(P, X) 27-CO-57, . SIG/Fe (p, x) Mn54	1. 4100E+07	4. 5000E+07	BAT	71 x	
C0272. 003	FE-0	(P, X) 27-CO-56, . SIG	1. 4100E+07	5. 8500E+08	BAT	71 * 8points	
C0272. 003	FE-0	(P, X) 27-CO-56, . SIG/Fe (p, x) Mn54	1. 4100E+07	5. 8500E+08	BAT	71 x	
C0272. 004	FE-0	(P, X) 25-MN-54, . SIG	2. 9500E+07	5. 8500E+08	BAT	71 * 8points	
C0272. 005	FE-0	(P, X) 27-CO-55, . SIG	2. 9500E+07	4. 5000E+07	BAT	71 * 4points	
C0272. 006	FE-0	(P, X) 25-MN-52-G, . SIG	2. 9500E+07	5. 8500E+08	BAT	71 * 7points	
C0272. 007	FE-0	(P, X) 24-CR-51, . SIG	4. 4600E+07	5. 8500E+08	BAT	71 * 5points	
C0272. 008	FE-0	(P, X) 24-CR-48, . SIG	1. 2000E+08	5. 8500E+08	BAT	71 * 3points	
C0272. 009	FE-0	(P, X) 23-V-48, . SIG	4. 4600E+07	5. 8500E+08	BAT	71 * 5points	
C0272. 010	FE-0	(P, X) 21-SC-48, . SIG	4. 4600E+07	5. 8500E+08	BAT	71 0. 0216±0. 0067, 0. 236±0. 076mb	
C0272. 011	FE-0	(P, X) 21-SC-47, . SIG	1. 2000E+08	5. 8500E+08	BAT	71 * 3points	
C0272. 012	FE-0	(P, X) 21-SC-46, . SIG	3. 2000E+08	5. 8500E+08	BAT	71 * 3points	
C0272. 013	FE-0	(P, X) 21-SC-44-M, . SIG	1. 2000E+08	5. 8500E+08	BAT	71 * 3points	
C0272. 014	FE-0	(P, X) 22-Tl-44, . SIG	3. 2000E+08	5. 8500E+08	BAT	71 * 3points	
C0272. 015	FE-0	(P, X) 19-K-43, . SIG	4. 3400E+08	5. 8500E+08	BAT	71 0. 300±0. 096, 0. 7±0. 23mb	
C0272. 016	FE-0	(P, X) 19-K-42, . SIG	4. 3400E+08	5. 8500E+08	BAT	71 1. 7±0. 4, 2. 49±0. 78mb	
C0272. 017	FE-0	(P, X) 11-NA-24, . SIG	5. 8500E+08	5. 8500E+08	BAT	71 0. 266±0. 085mb	
C0272. 018	FE-0	(P, X) 11-NA-22, . SIG	3. 2000E+08	5. 8500E+08	BAT	71 * 3points	
C0275. 002	FE-0	(P, X) ELEM/MASS, . SIG	3. 4000E+08	3. 4000E+08	BRK	52 * 30isotopes	
C0276. 002	FE-0	(P, X) 1-H-3, . SIG, . MSC	1. 6000E+08	6. 2000E+09	BNL	57 * 4points	
C0276. 003	FE-0	(P, X) 18-AR-37, . SIG, . MSC	1. 6000E+08	6. 2000E+09	BNL	57 * 3points	
C0277. 002	FE-0	(P, X) 2-HE-3, . SIG	1. 6000E+08	3. 0000E+09	BNL	59 * 3points	
C0277. 003	FE-0	(P, X) 2-HE-4, . SIG	1. 6000E+08	3. 0000E+09	BNL	59 * 3points	
C0277. 004	FE-0	(P, X) 18-AR-36, . SIG	4. 3000E+08	4. 3000E+08	BNL	59 1mb	
C0277. 005	FE-0	(P, X) 18-AR-37, . SIG	4. 3000E+08	4. 3000E+08	BNL	59 3. 3mb	
C0277. 006	FE-0	(P, X) 18-AR-38, . SIG	4. 3000E+08	4. 3000E+08	BNL	59 8mb	
C0277. 007	FE-0	(P, X) 18-AR-39, . SIG	4. 3000E+08	4. 3000E+08	BNL	59 4. 1mb	
C0277. 008	FE-0	(P, X) 10-NE-21, . SIG	4. 3000E+08	4. 3000E+08	BNL	59 0. 1mb	
98293. 004	FE-0	(P, X) 15-P-32, . SIG	5. 5000E+08	5. 5000E+08	SFU	70 2. 09±0. 17mb	
98293. 004	FE-0	(P, X) 15-P-33, CUM, SIG	5. 5000E+08	5. 5000E+08	SFU	70 1. 16±0. 04mb	
C0315. 011	FE-56	(P, N+P), PAR, SIG, G	Fe55	0. 0000E+00	0. 0000E+00	WAU	81 * 17points
C0315. 012	FE-56	(P, X) 26-FE-55, PAR, SIG, G	1. 5000E+07	2. 3000E+07	WAU	81 * 9points	
C0315. 013	FE-56	(P, INL), PAR, SIG, G	0. 0000E+00	0. 0000E+00	WAU	81 * 56points	
C0315. 014	FE-56	(P, X) 26-FE-56, PAR, SIG, G	0. 0000E+00	0. 0000E+00	WAU	81 * 37points	
C0315. 015	FE-56	(P, X) 27-CO-56, PAR, SIG, G	7. 0000E+06	2. 3000E+07	WAU	81 * 17points	
98327. 002	FE-56	(P, X) ELEM/MASS, . SIG	4. 8000E+06	3. 9000E+07	HAR	70 * 65points	

## 付録 6 : Fe に対する陽子入射核種生成断面積の EXFOR 検索結果 (つづき 5)

Work no	Z-A	Reaction		Emin (eV)	Emax (eV)	Lab	Yr	comments
98329.002	FE-56	(P, N), .SIG	Co56	3.7000E+08	3.7000E+08	LRL	68	1.0±0.08mb
98329.002	FE-56	(P, 2N), .SIG	Co55	3.7000E+08	3.7000E+08	LRL	68	0.71±0.06mb
98329.002	FE-56	(P, N+P), .SIG	Fe55	3.7000E+08	3.7000E+08	LRL	68	58.4±1mb
98329.003	FE-57	(P, N), .SIG	Co57	3.7000E+08	3.7000E+08	LRL	68	1.09±0.09mb
98329.003	FE-57	(P, 2N), .SIG	Co56	3.7000E+08	3.7000E+08	LRL	68	1.09±0.12mb
98329.003	FE-57	(P, 3N), .SIG	Co55	3.7000E+08	3.7000E+08	LRL	68	0.26±0.04mb
98329.003	FE-57	(P, 2N+P), .SIG	Fe55	3.7000E+08	3.7000E+08	LRL	68	24.7±2.3mb
98329.004	FE-58	(P, N), .SIG	Co58	3.7000E+08	3.7000E+08	LRL	68	2.1±0.16mb
98329.004	FE-58	(P, 2N), .SIG	Co57	3.7000E+08	3.7000E+08	LRL	68	3.27±0.14mb
98329.004	FE-58	(P, 3N), .SIG	Co56	3.7000E+08	3.7000E+08	LRL	68	2.17±1.02mb
98329.004	FE-58	(P, 4N), .SIG	Co55	3.7000E+08	3.7000E+08	LRL	68	0.61±0.43mb
98401.006	FE-0	(P, X) 4-BE-7, .SIG		8.5000E+07	8.5000E+07	MCG	66	0.108±0.014mb
D4058.005	FE-0	(P, X) 2-HE-4, .SIG		7.5000E+06	2.3800E+07	JUL	92 *	3points
D4058.008	FE-CMP	(P, X) 2-HE-4, .SIG, .FCT	SS316	7.5000E+06	2.3800E+07	JUL	92 *	3points
o0021.003	FE-56	(P, X) 0-NN-1, .SIG		2.2400E+07	2.2400E+07	FEI	83	653±50mb
o0044.026	FE-56	(P, X) 1-H-3, .SIG		1.5000E+08	1.5000E+08	PAR	61	13±2mb
o0046.004	FE-56	(P, X) 1-H-1, .SIG		6.0000E+08	6.0000E+08	CLE	75	2680mb
o0046.004	FE-56	(P, X) 1-H-2, .SIG		6.0000E+08	6.0000E+08	CLE	75	296mb
o0046.004	FE-56	(P, X) 1-H-3, .SIG		6.0000E+08	6.0000E+08	CLE	75	46mb
o0046.004	FE-56	(P, X) 2-HE-3, .SIG		6.0000E+08	6.0000E+08	CLE	75	59mb
o0046.004	FE-56	(P, X) 2-HE-4, .SIG		6.0000E+08	6.0000E+08	CLE	75	422mb
o0047.002	FE-56	(P, INL), .SIG, G		1.0000E+08	1.0000E+08	MRY	74 *	3points
o0047.003	FE-56	(P, P+A), .SIG, G	Cr52	1.0000E+08	1.0000E+08	MRY	74 *	3points
o0047.004	FE-56	(P, P+2A), .SIG, G	Ti48	1.0000E+08	1.0000E+08	MRY	74 *	3points
o0047.005	FE-56	(P, P+3A), .SIG, G	Ca44	1.0000E+08	1.0000E+08	MRY	74 *	3points
o0047.006	FE-56	(P, N+P), .SIG, G	Fe55	1.0000E+08	1.0000E+08	MRY	74 *	9points
o0057.003	FE-54	(P, TOT), .SIG		2.0900E+07	4.7800E+07	MNA	86 *	7points
o0057.004	FE-56	(P, TOT), .SIG		2.0800E+07	4.7800E+07	MNA	86 *	7points
o0057.005	FE-57	(P, TOT), .SIG		2.0900E+07	4.7800E+07	MNA	86 *	7points
o0073.002	FE-0	(P, X) 27-CO-56, IND, SIG		1.3000E+08	3.9600E+08	CAR	64 *	4points
o0073.003	FE-0	(P, X) 25-MN-54, IND, SIG		1.3000E+08	3.9600E+08	CAR	64 *	4points
o0073.004	FE-0	(P, X) 25-MN-52-G, CUM, SIG		1.3000E+08	3.9600E+08	CAR	64 *	4points
o0073.005	FE-0	(P, X) 24-CR-51, CUM, SIG		1.3000E+08	3.9600E+08	CAR	64 *	4points
o0073.006	FE-0	(P, X) 23-V-48, CUM, SIG		1.3000E+08	3.9600E+08	CAR	64 *	4points
o0073.007	FE-0	(P, X) 15-P-32, IND, SIG		1.3000E+08	3.9600E+08	CAR	64 *	4points
o0073.008	FE-0	(P, X) 4-BE-7, CUM, SIG		1.3000E+08	3.9600E+08	CAR	64 *	4points
o0074.004	FE-0	(P, X) ELEM/MASS, IND, SIG		1.2000E+10	1.2000E+10	TSU	83 *	11isotopes
o0074.005	FE-0	(P, X) ELEM/MASS, CUM, SIG		1.2000E+10	1.2000E+10	TSU	83 *	12isotopes
o0076.002	FE-56	(P, N), .SIG	Co56	6.2400E+06	6.2400E+06	SUL	85	24±1mb
o0076.003	FE-58	(P, N), .SIG	Co58	6.2400E+06	6.2400E+06	SUL	85	690±10mb
o0077.002	FE-0	(P, X) 27-CO-56, IND, SIG		5.0000E+08	2.9000E+09	CAR	68 *	5points
o0077.003	FE-0	(P, X) 25-MN-54, IND, SIG		5.0000E+08	2.9000E+09	CAR	68 *	5points
o0077.004	FE-0	(P, X) 25-MN-52-G, CUM, SIG		5.0000E+08	2.9000E+09	CAR	68 *	5points
o0077.005	FE-0	(P, X) 24-CR-51, CUM, SIG		5.0000E+08	2.9000E+09	CAR	68 *	5points
o0077.006	FE-0	(P, X) 24-CR-48, CUM, SIG		5.0000E+08	2.9000E+09	CAR	68 *	5points
o0077.007	FE-0	(P, X) 23-V-48, CUM, SIG		5.0000E+08	2.9000E+09	CAR	68 *	5points
o0077.008	FE-0	(P, X) 21-SC-47, CUM, SIG		5.0000E+08	2.9000E+09	CAR	68 *	5points
o0077.009	FE-0	(P, X) 21-SC-44-M, IND, SIG		5.0000E+08	2.9000E+09	CAR	68 *	5points
o0077.010	FE-0	(P, X) 15-P-32, IND, SIG		5.0000E+08	2.9000E+09	CAR	68 *	5points
o0077.011	FE-0	(P, X) 11-NA-24, CUM, SIG		5.0000E+08	2.9000E+09	CAR	68 *	5points
o0077.012	FE-0	(P, X) 4-BE-7, IND, SIG		5.0000E+08	2.9000E+09	CAR	68 *	5points
o0078.016	FE-0	(P, X) 4-BE-7, IND, SIG		6.6000E+08	6.6000E+08	UH	89	2.01±0.09mb
o0078.016	FE-0	(P, X) 4-BE-10, IND, SIG		6.6000E+08	6.6000E+08	UH	89	0.58±0.02mb
o0078.016	FE-0	(P, X) 11-NA-22, CUM, SIG		6.6000E+08	6.6000E+08	UH	89	0.40±0.03mb
o0078.016	FE-0	(P, X) 21-SC-44-M, IND, SIG		6.6000E+08	6.6000E+08	UH	89	8.4±0.3mb
o0078.016	FE-0	(P, X) 13-AL-26, CUM, SIG		6.6000E+08	6.6000E+08	UH	89	0.49±0.02mb
o0078.017	FE-0	(P, X) 19-K-43, CUM, SIG		6.6000E+08	6.6000E+08	UH	89	0.95±0.05mb
o0078.017	FE-0	(P, X) 21-SC-46, IND, SIG		6.6000E+08	6.6000E+08	UH	89	9.44±0.37mb
o0078.017	FE-0	(P, X) 21-SC-47, CUM, SIG		6.6000E+08	6.6000E+08	UH	89	2.89±0.11mb
o0078.017	FE-0	(P, X) 24-CR-48, IND, SIG		6.6000E+08	6.6000E+08	UH	89	0.62±0.1mb

## 付録 6 : Fe に対する陽子入射核種生成断面積の EXFOR 検索結果 (つづき 6)

Work no	Z-A	Reaction	Emin (eV)	Emax (eV)	Lab	Yr	comments
o0078. 017	FE-0	(P, X) 23-V-48, IND, SIG	6. 6000E+08	6. 6000E+08	UH	89	22. 7±0. 8mb
o0078. 018	FE-0	(P, X) 24-CR-51, CUM, SIG	6. 6000E+08	6. 6000E+08	UH	89	46. 3±1. 7mb
o0078. 018	FE-0	(P, X) 25-MN-52, CUM, SIG	6. 6000E+08	6. 6000E+08	UH	89	11. 5±0. 6mb
o0078. 018	FE-0	(P, X) 25-MN-54, IND, SIG	6. 6000E+08	6. 6000E+08	UH	89	39. 8±1. 5mb
o0078. 019	FE-0	(P, X) 27-CO-56, IND, SIG	6. 6000E+08	6. 6000E+08	UH	89	1. 36±0. 06mb
o0078. 019	FE-0	(P, X) 27-CO-57, IND, SIG	6. 6000E+08	6. 6000E+08	UH	89	0. 23±0. 01mb
o0078. 019	FE-0	(P, X) 27-CO-58, IND/M+, SIG	6. 6000E+08	6. 6000E+08	UH	89	0. 036±0. 007mb
o0080. 002	FE-0	(P, X) 11-NA-22, CUM, SIG	6. 0000E+08	2. 6000E+09	UH	91 *	5points
o0080. 005	FE-0	(P, X) 4-BE-10, IND, SIG	5. 7000E+07	2. 6000E+09	UH	91 *	14points
o0081. 012	FE-54	(P, NON), , SIG	4. 0000E+07	6. 0800E+07	ORL	71	856±37. 798±32mb
o0081. 013	FE-56	(P, NON), , SIG	4. 0000E+07	6. 0800E+07	ORL	71	991±43. 899±32mb
o0081. 014	FE-57	(P, NON), , SIG	4. 0000E+07	6. 0800E+07	ORL	71	1124±130. 783±120mb
o0081. 015	FE-58	(P, NON), , SIG	4. 0000E+07	6. 0800E+07	ORL	71	1313±130. 1059±90mb
o0082. 003	FE-0	(P, X) 27-CO-56, IND, SIG	1. 4100E+07	5. 8500E+08	BAT	71 *	8points
o0082. 004	FE-0	(P, X) 27-CO-57, IND, SIG	1. 4100E+07	4. 5000E+07	BAT	71 *	3points
o0082. 005	FE-0	(P, X) 27-CO-55, IND, SIG	2. 9500E+07	4. 5000E+07	BAT	71 *	4points
o0082. 006	FE-0	(P, X) 25-MN-54, IND, SIG	2. 9500E+07	5. 8500E+08	BAT	71 *	8points
o0082. 007	FE-0	(P, X) 25-MN-52-G, CUM, SIG	2. 9500E+07	5. 8500E+08	BAT	71 *	7points
o0082. 008	FE-0	(P, X) 24-CR-51, CUM, SIG	4. 4600E+07	5. 8500E+08	BAT	71 *	5points
o0082. 009	FE-0	(P, X) 23-V-48, IND, SIG	4. 4600E+07	5. 8500E+08	BAT	71 *	5points
o0082. 010	FE-0	(P, X) 21-SC-48, IND, SIG	4. 4600E+07	5. 8500E+08	BAT	71 *	2points
o0082. 011	FE-0	(P, X) 24-CR-48, CUM, SIG	1. 2000E+08	5. 8500E+08	BAT	71 *	3points
o0082. 012	FE-0	(P, X) 21-SC-47, CUM, SIG	1. 2000E+08	5. 8500E+08	BAT	71 *	3points
o0082. 013	FE-0	(P, X) 21-SC-44-M, IND, SIG	1. 2000E+08	5. 8500E+08	BAT	71 *	3points
o0082. 014	FE-0	(P, X) 21-SC-46-G, M+/IND, SIG	3. 2000E+08	5. 8500E+08	BAT	71 *	3points
o0082. 015	FE-0	(P, X) 22-TI-44, CUM, SIG	3. 2000E+08	4. 3400E+08	BAT	71	0. 14. 1. 8mb
o0082. 016	FE-0	(P, X) 22-TI-44, CUM, SIG	5. 8500E+08	5. 8500E+08	BAT	71	0. 25±0. 18mb
o0082. 017	FE-0	(P, X) 11-NA-22, CUM, SIG	3. 2000E+08	4. 3400E+08	BAT	71	0. 05. 0. 17mb
o0082. 018	FE-0	(P, X) 11-NA-22, CUM, SIG	5. 8500E+08	5. 8500E+08	BAT	71	0. 26±0. 097mb
o0082. 019	FE-0	(P, X) 19-K-43, CUM, SIG	4. 3400E+08	5. 8500E+08	BAT	71	0. 309±0. 096. 0. 7±0. 23mb
o0082. 020	FE-0	(P, X) 19-K-42, IND, SIG	4. 3400E+08	5. 8500E+08	BAT	71	1. 7±0. 4. 2. 49±0. 78mb
o0082. 021	FE-0	(P, X) 11-NA-24, CUM, SIG	5. 8500E+08	5. 8500E+08	BAT	71	0. 266±0. 085mb
o0085. 002	FE-0	(P, X) 4-BE-9-, SIG /Fe (p, x) Be7	2. 1000E+10	2. 1000E+10	CER	76 x	
o0085. 003	FE-0	(P, X) 4-BE-10, , SIG/Fe (p, x) Be7	6. 0000E+08	2. 1000E+10	CER	76 x	
o0085. 004	FE-0	(P, X) 21-SC-45, , SIG/Fe (p, x) Sc46	6. 0000E+08	2. 1000E+10	CER	76 x	
o0085. 005	FE-0	(P, X) 23-V-49, , SIG /Fe (p, x) V50	6. 0000E+08	2. 1000E+10	CER	76 x	
o0085. 006	FE-0	(P, X) 23-V-51, , SIG /Fe (p, x) V50	6. 0000E+08	2. 1000E+10	CER	76 x	
o0085. 007	FE-0	(P, X) 24-CR-50, , SIG/Fe (p, x) Cr51	6. 0000E+08	2. 1000E+10	CER	76 x	
o0085. 008	FE-0	(P, X) 24-CR-52, , SIG/Fe (p, x) Cr51	6. 0000E+08	2. 1000E+10	CER	76 x	
o0085. 009	FE-0	(P, X) 24-CR-53, , SIG/Fe (p, x) Cr51	6. 0000E+08	2. 1000E+10	CER	76 x	
o0085. 010	FE-0	(P, X) 24-CR-54, , SIG/Fe (p, x) Cr53	6. 0000E+08	2. 1000E+10	CER	76 x	
o0085. 011	FE-0	(P, X) 25-MN-53, , SIG/Fe (p, x) Mn54	6. 0000E+08	6. 0000E+08	CER	76 x	
o0085. 012	FE-0	(P, X) 25-MN-55, , SIG/Fe (p, x) Mn54	6. 0000E+08	6. 0000E+08	CER	76 x	
o0085. 013	FE-0	(P, X) 4-BE-7, IND, SIG	2. 1000E+10	2. 1000E+10	CER	76	11. 4±1. 2mb
o0085. 014	FE-0	(P, X) 11-NA-22, CUM, SIG	2. 1000E+10	2. 1000E+10	CER	76	3. 1±0. 2mb
o0085. 015	FE-0	(P, X) 21-SC-46, IND, SIG	2. 1000E+10	2. 1000E+10	CER	76	6. 0±0. 5mb
o0085. 016	FE-0	(P, X) 23-V-48, CUM, SIG	2. 1000E+10	2. 1000E+10	CER	76	12. 1±1. 3mb
o0085. 017	FE-0	(P, X) 24-CR-51, CUM, SIG	2. 1000E+10	2. 1000E+10	CER	76	25. 1±3. 2mb
o0085. 018	FE-0	(P, X) 25-MN-54, IND, SIG	2. 1000E+10	2. 1000E+10	CER	76	29. 2±2. 7mb
o0085. 019	FE-0	(P, X) 27-CO-56, IND, SIG	2. 1000E+10	2. 1000E+10	CER	76	0. 78±0. 08mb
o0085. 020	FE-0	(P, X) 4-BE-7, IND, SIG, , DERIV	6. 0000E+08	2. 1000E+10	CER	76	2. 01±0. 13. 11. 4±1. 2mb
o0085. 021	FE-0	(P, X) 4-BE-9, CUM, SIG, , DERIV	2. 1000E+10	2. 1000E+10	CER	76	8. 1±1. 2mb
o0085. 022	FE-0	(P, X) 4-BE-10, IND, SIG, , DERIV	6. 0000E+08	2. 1000E+10	CER	76	0. 46±0. 09. 4. 6±0. 8mb
o0085. 023	FE-0	(P, X) 21-SC-45, CUM, SIG, , DERIV	6. 0000E+08	2. 1000E+10	CER	76	27. 9±1. 9. 18. 0±1. 9mb
o0085. 024	FE-0	(P, X) 21-SC-46, IND, SIG, , DERIV	6. 0000E+08	2. 1000E+10	CER	76	8. 45±0. 27. 6. 0±0. 5mb
o0085. 025	FE-0	(P, X) 23-V-49, CUM, SIG, , DERIV	6. 0000E+08	2. 1000E+10	CER	76	38. 0±3. 0. 18. 6±3. 2mb
o0085. 026	FE-0	(P, X) 23-V-50, IND, SIG, , DERIV	6. 0000E+08	2. 1000E+10	CER	76	18. 0±1. 1. 10. 0±1. 6mb
o0085. 027	FE-0	(P, X) 23-V-51, CUM, SIG, , DERIV	6. 0000E+08	2. 1000E+10	CER	76	6. 8±1. 0. 2. 9±0. 6mb
o0085. 028	FE-0	(P, X) 24-CR-50, CUM, SIG, , DERIV	6. 0000E+08	2. 1000E+10	CER	76	27. 2±2. 8. 15. 1±2. 4mb
o0085. 029	FE-0	(P, X) 24-CR-51, CUM, SIG, , DERIV	6. 0000E+08	2. 1000E+10	CER	76	43. 8±1. 7. 25. 1±3. 2mb

## 付録 6 : Fe に対する陽子入射核種生成断面積の EXFOR 検索結果 (つづき 7)

Work no	Z-A	Reaction	Emin (eV)	Emax (eV)	Lab	Yr	comments	
o0085. 030	FE-0	(P, X) 24-CR-52, CUM, SIG,, DERIV	6. 0000E+08	2. 1000E+10	CER	76	69. 6±13. 0, 45. 7±11. 6mb	
o0085. 031	FE-0	(P, X) 24-CR-53, CUM, SIG,, DERIV	6. 0000E+08	2. 1000E+10	CER	76	11. 8±1. 8, 8. 5±1. 7mb	
o0085. 032	FE-0	(P, X) 24-CR-54, IND, SIG,, DERIV	6. 0000E+08	2. 1000E+10	CER	76	3. 4±1. 0, 2. 4±1. 0mb	
o0085. 033	FE-0	(P, X) 25-MN-53, CUM, SIG,, DERIV	6. 0000E+08	6. 0000E+08	CER	76	45. 0±4. 0mb	
o0085. 034	FE-0	(P, X) 25-MN-54, . SIG,, DERIV	6. 0000E+08	2. 1000E+10	CER	76	33. 3±1. 6, 29. 2±2. 7mb	
o0085. 035	FE-0	(P, X) 25-MN-55, CUM, SIG,, DERIV	6. 0000E+08	6. 0000E+08	CER	76	28. 6±7. 0mb	
o0086. 007	FE-0	(P, X) 27-CO-56, IND, SIG	5. 2500E+06	1. 8840E+07	SAC	75 *	56points	
o0086. 008	FE-0	(P, X) 27-CO-55, IND, SIG	1. 5250E+07	1. 8580E+07	SAC	75 *	7points	
o0088. 005	FE-0	(P, X) 27-CO-56, IND, SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	75	0. 68±0. 16mb	
o0088. 006	FE-0	(P, X) 25-MN-54, IND, SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	75	23. 2±5. 1mb	
o0088. 007	FE-0	(P, X) 25-MN-52-G, CUM, SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	75	6. 3±1. 5mb	
o0088. 008	FE-0	(P, X) 24-CR-51, CUM, SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	75	25. 7±5. 7mb	
o0088. 009	FE-0	(P, X) 23-V-48, CUM, SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	75	12. 9±2. 8mb	
o0088. 010	FE-0	(P, X) 21-SC-47, (CUM), SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	75	1. 3±0. 3mb	
o0088. 011	FE-0	(P, X) 21-SC-46, M+, SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	75	5. 5±1. 3mb	
o0088. 012	FE-0	(P, X) 21-SC-44-M, IND, SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	KLN	75	3. 9±0. 9mb	
o0092. 002	FE-56	(P, G), PAR, SIG	Co57	7. 4100E+06	2. 0930E+07	LAS	73 *	15points
o0094. 010	FE-0	(P, X) 4-BE-7, . SIG	1. 0000E+09	1. 0000E+09	CSN	75	4. 0±0. 5mb	
o0094. 010	FE-0	(P, X) 11-NA-22, . SIG	1. 0000E+09	1. 0000E+09	CSN	75	1. 21±0. 16mb	
o0094. 011	FE-0	(P, X) 4-BE-7, . SIG	2. 0000E+09	2. 0000E+09	CSN	75	7. 9±0. 8mb	
o0094. 011	FE-0	(P, X) 11-NA-22, . SIG	2. 0000E+09	2. 0000E+09	CSN	75	2. 58±0. 26mb	
o0094. 012	FE-0	(P, X) 4-BE-7, . SIG	3. 0000E+09	3. 0000E+09	CSN	75	9. 4±0. 8mb	
o0094. 012	FE-0	(P, X) 11-NA-22, . SIG	3. 0000E+09	3. 0000E+09	CSN	75	2. 88±0. 25mb	
o0094. 013	FE-0	(P, X) 4-BE-7, . SIG	2. 3000E+10	2. 3000E+10	CSN	75	11. 7±1. 0mb	
o0094. 013	FE-0	(P, X) 11-NA-22, . SIG	2. 3000E+10	2. 3000E+10	CSN	75	3. 02±0. 25mb	
o0095. 008	FE-0	(P, X) 18-AR-38, CUM, SIG/Ar36ratio6. 0000E+08	2. 4000E+10		GRA	79 x		
o0095. 009	FE-0	(P, X) 18-AR-38, CUM, SIG/Ar39ratio1. 5000E+08	2. 4000E+10		GRA	79 x		
o0095. 010	FE-0	(P, X) 18-AR-38, CUM, SIG/Ar42ratio6. 0000E+08	2. 4000E+10		GRA	79 x		
o0095. 028	FE-0	(P, X) 18-AR-36, (CUM), SIG	6. 0000E+08	2. 4000E+10	GRA	79 *	3points	
o0095. 029	FE-0	(P, X) 18-AR-38, CUM, SIG	1. 5000E+08	2. 4000E+10	GRA	79 *	4points	
o0095. 030	FE-0	(P, X) 18-AR-39, CUM, SIG	1. 5000E+08	2. 4000E+10	GRA	79 *	4points	
o0095. 031	FE-0	(P, X) 18-AR-42, (CUM), SIG	6. 0000E+08	2. 4000E+10	GRA	79 *	3points	
o0096. 018	FE-56	(P, X) 1-H-3, . SIG	5. 1900E+07	5. 1900E+07	TOK	74	523. 5μ b	
o0097. 004	FE-56	(P, X) ELEM/MASS, IND, SIG	5. 0000E+08	5. 0000E+08	TSU	91 *	10isotopes	
o0097. 005	FE-56	(P, X) ELEM/MASS, CUM, SIG	5. 0000E+08	5. 0000E+08	TSU	91 *	11isotopes	
o0098. 003	FE-0	(P, X) 4-BE-7, . SIG	8. 0000E+08	2. 6000E+09	KLN	90 *	3points	
o0098. 010	FE-0	(P, X) 11-NA-22, . SIG	8. 0000E+08	2. 6000E+09	KLN	90 *	3points	
o1003. 004	FE-0	(P, X) 2-HE-4, IND, SIG	7. 5000E+08	7. 5000E+08	PSI	88	452mb	
o1003. 004	FE-0	(P, X) 2-HE-4, IND, SIG,, CALC	7. 5000E+08	7. 5000E+08	PSI	88 x		
o1003. 005	FE-0	(P, X) 2-HE-3, . SIG	7. 5000E+08	7. 5000E+08	PSI	88	52mb	
o1003. 005	FE-0	(P, X) 2-HE-3, . SIG,, CALC	7. 5000E+08	7. 5000E+08	PSI	88 x		
o1004. 004	FE-0	(P, X) 20-CA-41, CUM, SIG	1. 0800E+08	1. 0800E+08	HEB	87	0. 46±0. 16mb	
o1004. 005	FE-0	(P, X) 20-CA-41, CUM, SIG	1. 4900E+08	1. 4900E+08	HEB	87	1. 30±0. 21mb	
o1004. 006	FE-0	(P, X) 20-CA-41, CUM, SIG	2. 0000E+08	2. 0000E+08	HEB	87	3. 09±0. 31mb	
o1004. 007	FE-0	(P, X) 20-CA-41, CUM, SIG	6. 0000E+08	6. 0000E+08	HEB	87	10. 0±0. 4mb	
o1009. 003	FE-0	(P, X) 4-BE-10, IND, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	TOK	93	2. 95±0. 33mb	
o1009. 011	FE-0	(P, X) 13-AL-26-G, IND, SIG	1. 2000E+10	1. 2000E+10	TOK	93	2. 02±0. 22mb	
o10150. 003	FE-56	(P, NON), . SIG	2. 8500E+07	2. 8500E+07	HAR	64	1140±43mb	
o10154. 023	FE-0	(P, X) 1-H-3, . SIG	1. 3830E+08	2. 3900E+10	RI	76 *	13points	
o10159. 002	FE-0	(P, X) ELEM/MASS, . SIG	6. 6000E+08	6. 6000E+08	RI	95 *	29isotopes	
o10159. 003	FE-0	(P, X) 26-FE-53-G, CUM, SIG	6. 6000E+08	6. 6000E+08	RI	95	0. 45mb	
o10163. 002	FE-57	(P, N), IND, SIG	5. 2000E+06	6. 1000E+06	SUL	91	235±30, 330±30mb	
o10184. 010	FE-54	(P, G), IND, SIG	3. 7300E+06	7. 7400E+06	OHO	92 *	4points	
o10184. 011	FE-56	(P, G), IND, SIG	4. 0800E+06	6. 5600E+06	OHO	92 *	4points	
o10184. 012	FE-54	(P, INL), PAR, SIG	3. 7300E+06	7. 7400E+06	OHO	92 *	4points	
o10184. 013	FE-56	(P, INL), PAR, SIG	4. 0800E+06	7. 7400E+06	OHO	92 *	5points	
o10213. 005	FE-0	(P, TOT), . SIG	2. 3000E+08	5. 5200E+08	CER	72 *	8points	
o10243. 002	FE-58	(P, N)-G, IND, SIG	Co58G	6. 1000E+06	6. 1000E+06	SUL	90	340±40mb
o10243. 002	FE-58	(P, N)-M, IND, SIG	Co58M	6. 1000E+06	6. 1000E+06	SUL	90	115±45mb
o10243. 002	FE-58	(P, N)-G, IND/M+, SIG	6. 1000E+06	6. 1000E+06	SUL	90	445±35mb	

## 付録 6 : Fe に対する陽子入射核種生成断面積の EXFOR 検索結果 (つづき 8)

Work no	Z-A	Reaction		Emin (eV)	Emax (eV)	Lab	Yr	comments
o0243. 003	FE-58	(P, N)-G, IND, SIG	Co58G	5. 2000E+06	5. 2000E+06	SUL	90	220±35mb
o0243. 003	FE-58	(P, N)-M, IND, SIG	Co58M	5. 2000E+06	5. 2000E+06	SUL	90	approx. 70mb
o0243. 003	FE-58	(P, N)-G, IND/M+, SIG		5. 2000E+06	5. 2000E+06	SUL	90	265±25mb
65030. 002	FE-54	(P, P+N)-M, . SIG	Fe53M	2. 5100E+07	6. 5300E+07	HLS	67 *	7points
65030. 005	FE-56	(P, P+3N)-G, . SIG	Fe53G	4. 5300E+07	8. 0000E+07	HLS	67 *	7points
65030. 006	FE-56	(P, P+N)-M, . SIG	Fe53M	5. 0200E+07	7. 9800E+07	HLS	67 *	6points
65030. 011	FE-54	(P, P+N)-G, . SIG	Fe53G	2. 0100E+07	2. 8100E+07	HLS	67 *	3points
65038. 002	FE-54	(P, T), . SIG	Fe52	1. 7900E+07	2. 3400E+07	ORL	54 *	16points
S0041. 002	FE-56	(P, 2N), . SIG	Co55	6. 6580E+06	1. 8864E+07	AEP	93 *	22points
S0041. 003	FE-56	(P, N), . SIG	Co56	1. 5946E+07	1. 8864E+07	AEP	93 *	7points
S0041. 004	FE-56	(P, G), . SIG	Co57	4. 6670E+06	1. 8864E+07	AEP	93 *	24points
S0041. 005	FE-56	(P, X) 25-MN-54, . SIG		1. 4381E+07	1. 8864E+07	AEP	93 *	8points

## 付録 7 : W に対する陽子入射核種生成断面積の EXFOR 検索結果

Work no	Z-A	Reaction		Emin (eV)	Emax (eV)	Lab	Yr	comments
50179. 013	W-0	(P, X) 75-RE-183, IND, SIG		1. 7900E+07	5. 7600E+07	TRW	79 *	14points
50179. 014	W-0	(P, X) 75-RE-184-G, IND/(M), SIG		1. 7600E+07	6. 3790E+07	TRW	79 *	15points
50434. 003	W-0	(P, X) ELEM/MASS., SIG		1. 2000E+10	1. 2000E+10	TSU	88 *	72isotopes
98236. 020	W-0	(P, X) 3-LI-9, . SIG		1. 0000E+09	2. 8000E+09	BNL	65	0. 82, 3. 9mb
98236. 040	W-0	(P, X) 6-C-16, . SIG		1. 0000E+09	2. 8000E+09	BNL	65	0. 105, 0. 89mb
98236. 060	W-0	(P, X) 7-N-17, . SIG		1. 0000E+09	2. 8000E+09	BNL	65	0. 393, 3. 4mb
98299. 009	W-186	(P, N+P), . SIG		2. 5000E+08	4. 4000E+08	CAR	61 *	5points
98299. 014	W-186	(P, 2P), . SIG		2. 5000E+08	4. 4000E+08	CAR	61 *	5points
98299. 014	W-186	(P, N+P), . SIG / (p, 2p) Ta185		2. 5000E+08	4. 4000E+08	CAR	61 x	
98389. 006	W-186	(P, N)-G, (M), SIG		1. 3000E+08	3. 9600E+08	CAR	66 *	4points
o0103. 012	W-0	(P, X) 2-HE-4, IND, SIG		7. 5000E+08	7. 5000E+08	PSI	88	710mb
o0103. 012	W-0	(P, X) 2-HE-4, IND, SIG, . CALC		7. 5000E+08	7. 5000E+08	PSI	88 x	
o0103. 013	W-0	(P, X) 2-HE-3, . SIG		7. 5000E+08	7. 5000E+08	PSI	88	52mb
o0103. 013	W-0	(P, X) 2-HE-3, . SIG, . CALC		7. 5000E+08	7. 5000E+08	PSI	88 x	
o0189. 002	W-184	(P, N)-M, . SIG / (p, n) Re184G		3. 8000E+06	2. 6000E+07	IJI	93 x	
65024. 006	W-0	(P, N), . SIG		8. 4000E+06	1. 3500E+07	LRL	68 *	7points
65024. 009	W-0	(P, 2N), . SIG		8. 4000E+06	1. 4400E+07	LRL	68 *	8points
65040. 005	W-186	(P, 2P), . SIG		1. 3000E+08	4. 2500E+08	CAR	62 *	5points
65040. 010	W-186	(P, 3P), . SIG		1. 3000E+08	4. 2500E+08	CAR	62 *	5points

## 付録 8：国内加速器施設及び加速器計画において核データライブラリーが必要とされる核種に関する調査

ベンチマーク解析作業は、多くの労力と時間を要するために、これを効果的に行うためには、ベンチマークを必要とする核種、反応及びそのエネルギー範囲を選定し、ベンチマークの目標とするところを定めてから、その作業に着手するべきである。また、遡って、核データファイル作成等のように長い期間を必要とするものでは、その間幾度かその用途、目的に関して確認が行われるべきものと思われる。そこで、KEK, TIARA, 医療用加速器、中性子科学研究センターで核データライブラリーが必要とされる核種に関する調査を行った。結果を Tables A8.1-3 に示す。これらの結果を纏めると以下のようになる。

### 1. 散乱断面積について

- a. GeV クラスの加速器のターゲット周りの設計は、HETC 及び NMTC 等の高エネルギー粒子輸送計算コード[1, 2, 3, 4]で行われている。これらのコードで使用している断面積の内、核データライブラリーに関連するものは、約 20MeV から 1GeV までの全断面積と、弾性散乱断面積及びその角度分布である。LAHET[1]では個々のデータを用いているが、HERMES[2]及び NMTC/JAERI[4] では、これらの systematics を使用している。これに対して、実際設計に使用される主な核種は H, C, O, Ca, Si, Cr, Ni, Fe, Ta, W, Hg, Pb, Bi である。
- b. GeV クラス及び医療用加速器の厚い遮蔽体の遮蔽計算は、簡易計算式若しくは Sn 輸送計算コードが用いられる。それらに用いられるデータは減弱距離及び群定数セットであり、これらを作成できる土、コンクリートと鉄等の核データが重要となる。精度としては、遮蔽計算精度を含めて、ファクター 2 程度以下が望まれる。

### 2. 核種生成及び放射化断面積について

- a. 加速器周りで使用する核データの主な用途は放射化量を評価するための核種生成断面積であり、量に軽重を付けなければそれはほぼ全核種に及ぶ。特に、空気、加速空洞関連核種 (Nb, Cu 等) の評価が急がれる。加速器周りでは、当然陽子入射も必要である。
- b. 施設建設、管理の観点から、Dosimetry File (< 200MeV) は重要である。核種としては、C, Al, Cu, Co, Au, Fe, Bi である。これらは、ベンチマーク実験解析にも必要とされる。
- c. これらの表には示されていないが、医療照射量の評価、線量評価、材料損傷評価において、2 次荷電粒子スペクトルが重要とされる。対象核種は、人体構成核種及び構造材である。

### 3. 核分裂断面積について

- a. 高エネルギー粒子輸送計算コードでは、高エネルギー核分裂を Atchison や中原の式等を用いて計算している[1, 2, 3]が、これらの精度を検証するために、核分裂断面積若しくはその systematics が、上記の核種の中で重核について必要とされる。
- b. 中性子科学研究センターで計画している加速器炉の炉心は、 $K_{\text{eff}}$  を高く取る未臨界体系であり、その場の中性子スペクトルは、ほとんど高速炉炉心と変わらない。そのため、炉の成立性等を検討するために、現段階では 20MeV 以下の核分裂断面積の精度向上が望まれる。また、炉心特性は核破片ターゲットからの中性子束に大きく依存するため、線源を計算するための 20MeV 以上の輸送断面積はその重要性が高い。更に、高精度の燃焼計算には、20MeV 以上の核分裂断面積も必要とされる。将来的に溶融塩炉を考える場合には、高エネルギー中性子の影響が更に増加する。

### 参考文献

- [1] P. E. Prael et al.: "User Guide to LCS: The LAHET Code System", LA-UR-89-3014 (1989).
- [2] P. Cloth et al. : "A Monte Carlo Program System for Beam-Materials Interaction Studies", Jul-2203 (1988).
- [3] Y. Nakahara, T. Tsutsui : "NMTC/JAERI A Code System for High Energy Nuclear Reactions and Nucleon-Meson Transport Code", JAERI-M 82-198 (1982). [in Japanese]
- [4] H. Takada et al.: "An Upgraded Version of the Nucleon Meson Transport Code: NMTC/JAERI97", JAERI-Data/Code 98-005 (1998).

Table A8.1 250 MeV 陽子線加速器使用材料

加速器構成 ; 入射器 (イオン源、線形加速器)

シンクロトロン

ビーム輸送系

No.	使用材料	核種	使用部位
1	SUS	Fe, Cr, Ni, Mn, Co	真空ダクト 電磁石端板 架台の一部
2	珪素鋼板	Fe, Si	電磁石鉄心
3	銅	Cu	電磁石コイル ガスケット ビームダンパー ライナック電極
4	電磁軟鉄	Fe	電磁石鉄心 架台 ボルト等構造材 盤の筐体
5	絶縁材 ガラステープ セラミックス等	K, Na, C, H, O, Al, etc.	電磁石コイル セラミックスダクト 絶縁構造物 (FRP等)
6	絶縁ゴムホース		電磁石冷却水 電源冷却水
7	フェライト コア	Fe, Co ?	加速空洞
8	タンゲステン線	W	モニター用ワイヤ
9	アルミニウム	Al	真空部材の一部 ライナックの一部
10	銀ろう、ハンダ	Ag, Cu, Pb, In	接着部
11	電源盤内材料		配線、トランジスタ、サイリスタ トランジスタ、スイッチ 等

Table A8.2 中性子科学研究計画、KEK、TIARA 等加速器関連施設で  
核データを必要とする核種

加速器関連	Fe, Cr, Ni, Mn, Co :	SUS の構成材
	Cu:	電極、真空ガスケット、線材
	Al:	ダクト、セラミックスの材料
	Nb, Sn:	超伝導加速空洞
	In:	真空シール
	Ti:	構造材（場合によっては Nb 以上に使う）
	Ag, Au:	多量には使わないが、線材、メッキ材
	Si :	珪素磁極材料など
	Ta, Mo, W:	高融点金属、ビームが当る部分に使う
	Zn:	一部のセラミックス、黄銅
	C, F, Mg:	絶縁材
	K:	ガラス
その他：冷却水不純物、絶縁材（テフロンなど）、ガラスなど割合的には小さくても断面積的に大きそうなもの（Na, Cl, F . . . ）		
ターゲット関連	Hg, W, Ta, Pb, Bi:	ターゲット材
	H, D, O, He:	冷却材
	H, C, O:	減速材
	Gd, Cd:	減速材ポイズン
	B:	デカップラー
	Be, Pb:	反射材
	Fe, Cr, Ni, Mn, Co:	SUS 等構造材
	Si, O, H, Al, Ca, K, Na, Mg, Fe:	生体遮蔽体
加速器消滅処理 関連	W, Pb, Bi:	ターゲット
	U, Pu, Np, Am, Cm:	燃料
	O, N-15, He, Zr:	燃料マトリクス
	Fe, Cr, Ni, Mn, Mo, Na:	構造材・冷却材
遮蔽関連	N, O, Ar:	空気
	H, O:	地下水
	H, O, Si, Al, Fe, Na, K:	土壤
施設管理	C, Al, Cu, Co, Au, Fe, Bi	放射化箔

Table A8.3 核種の量、反応、優先度による分類

Atom	Mass	Element	Users					Cross sections			Priority	Status	
				Acc.	Target	Shield	Dosi.	Tran.	Scat.	Activ.	Fis.		
1	1	H			A	A			H				Done
1	2	D			A				H			H	
2		He		C				A	L			L	
4		Be		A					H	H		H	
5		B		B						L		L	
6	C	C	B			H			H	H		H	
7		N				A			H	H		H	
7	15	N						A	L	L		L	
8	O		A	A			A		H	H		H	
9		F	C							L		L	
11		Na	C	C	C			A	L	L		L	
12		Mg	C	C					L	L		L	
13		Al	A	B	A	H			H	H		H	
14		Si	C	A	A				H	H		H	
17		Cl	C						L			L	
18		Ar			C				L			L	
19		K	C	C	C				L	L		L	
20		Ca		B					H	M		H	
22		Ti	B			M				L		M	
23		V				M				L		L	
24		Cr	B	B				A	M	H		H	
25		Mn	C	C				A		L		L	
26		Fe	A	A	B	H	A	H	H			H	
27		Co	C	C		H			H			H	
28		Ni	B	B		M	A	M	H			H	
29		Cu	A			H			H			H	
30		Zn	C			M			L			L	
40		Zr				M	A	L	L			L	
41		Nb	A			M				M		H	
42		Mo	C			M	A		L			L	
47		Ag	C			M			L			L	
48		Cd		C					L			L	
49		In	C			L			L			L	
50		Sn		C		M			L			L	
64		Gd		C					L			L	
73		Ta	C	A					H	H		H	
74		W	C	A				A	H	H		H	
79		Au	C			H			H			H	
80		Hg		A					H	H		H	
82		Pb		A				A	H	H			Done
83		Bi		A		H	A	H	H			H	
92	235	U						A	M	L	L	M	
92	238	U						A	M	L	L	M	
93	237	Np						C	L	L	L	L	
94	238	Pu						C	L	L	L	L	
94	239	Pu						C	L	L	L	L	
94	240	Pu						C	L	L	L	L	
94	241	Pu						C	L	L	L	L	
94	242	Pu						C	L	L	L	L	
95	241	Am						C	L	L	L	L	
95	243	Am						C	L	L	L	L	
96	243	Cm						C	L	L	L	L	
96	244	Cm						C	L	L	L	L	
96	245	Cm						C	L	L	L	L	

注 Acc.: Accelerator, Dosi.: Dosimetry, Trans.: Transmutation, Scat.: Scattering, Activ.: Activation, Fis.: Fission

A:非常に量の多いもの、B:やや量の多いもの、C:量的に少ないもの

優先度 H:すぐにも必要、M:やや必要、L:急がない

## 付録 9： 高エネルギー核データファイルの要求仕様

### 1. はじめに

高エネルギー核データファイルの利用に関して種々の検討が加えられているが、どのような形での評価済核データファイルが利用者にとって望まれているのか再度確認する意味でこのレポートを記す。詳細なニーズ等は別のレポートに譲り、ここでは核データ評価側からの視点で、高エネルギー核データファイルをどのように整備していくか述べることにする。

基本的に、特定の分野を除いて、今後も、「ENDF フォーマットファイル→処理コード(NJOY 等)→MCNP 等のライブラリ」の図式は必要であると考える。種々の利用分野を考えると、ENDF-6 フォーマットはその配付の普遍性を考慮すれば、元々の核データファイルの標準形として残すべきであり、ここから必要な形に変換すればよい。MCNP+カスケードコードが主な利用コードになったとしても、問題別には他のコードが使われる可能性がある。高エネルギー(100 MeV 以上)輸送計算をカスケード系のコードのみで行う分野があるにしても、粒子スペクトルは他の分野で必要となるため、ファイルに格納する必要がある。たとえ輸送計算に MCNP 系のコードのみ使われるとしても、これを検証するための実験が必要となるであろう。この実験は直接スペクトルを測定する方法及び放射化分析であろうが、後者の場合放射化断面積が必要となり、やはりフルライブラリが必要となる。したがって、やはりコードで限定される物理量だけではなく、従来評価してきた物理量も含めた評価済高エネルギー核データライブラリーが必要となる。

以上述べてきたような核データ評価側からの視点に基づき、以下、格納核種及び整備状況、格納物理量及びフォーマット、精度の考え方及び評価手法、公開の手順について考察する。

### 2. 格納核種及び整備の現状

格納核種と整備の状況を Table A9.1 に示す。この際、優先順位(priority)に関しては、IFMIF 計画及びシグマ委員会 PKA スペクトル WG からの 50 MeV までの要求分は含まれていない。現状では、IFMIF 用の 50 MeV までの中性子ファイルに関して、40 核種に関して評価が終了しており、最終ファイル化を行っている。同ファイルに関して、23 核種が評価中である。これ以外は GeV までのファイルの予定である。天然元素組成に関しては基本的に同位体からの寄与を組み合わせることとし、評価は行わないが、同位体評価の過程で整合性を取るように考慮する。特に、20 MeV 以下の繋ぎに関しては、JENDL Fusion File の経験を十分に反映する（鉄の評価など）。

Table A9.1 に記載されている核種は、122 核種(1<sup>st</sup> priority:42 核種、2<sup>nd</sup> priority:40 核種、3<sup>rd</sup> priority:40 核種)であるが、優先順位に関しては、今後、再検討が必要である。ベン

チマーク問題のあるものは基本的に優先順位を上げ、1<sup>st</sup> priority とする。特に、原研中性子科学研究センター（加速器、消滅処理を含む）、大型ハドロン計画（JHF）等に關して再検討する。

### 3. 格納する物理量及びフォーマット

フォーマットとしては処理コードなどの利用を考えて ENDF-6 フォーマットとする。格納物理量と ENDF-6 フォーマットにおける MF/MT 番号の関係について Table A9.2 に示す。ここで、

- MF=1: コメント及び核分裂関連諸量
- MF=2: 共鳴パラメータ
- MF=3: 断面積
- MF=4: 角度分布
- MF=5: スペクトル
- MF=6: 二重微分断面積

を表す。また、MF=4,5 は MF=6 で記述することもできる。

20 MeV 以下の処理コードをそのまま利用できるようにし、従来の積分テストなどの資産を活用するために、JENDL Fusion File もしくは JENDL-3.2 との結合方法は、JENDL High Energy File の構造に合わせてファイル構造を変更せず、基のままの構造を出来るだけ保って格納する。これにより、レビュー作業は 20 MeV 以上のみに集中できる利点もある。但し、JENDL-3.2 を採用し、 $\gamma$ 線生成データが含まれないは、高エネルギー側から取り込む。天然元素組成に関しては基本的に評価は行わないが、同位体評価の過程で整合性を取るように考慮する。特に、20 MeV 以下の繋ぎに関しては、JENDL Fusion File の経験を十分に反映する（鉄の評価など）。したがって、Table A9.2 のフォーマットは 20 MeV 以上の分だけについて記述している（20 MeV 以下は従来の JENDL と同じ）。

フォーマットについては、NEANSC 評価国際協力ワーキングパーティ (WPEC/SG13) との整合も図るべく努力する。JAERI-BNL と LANL のファイル構造の違いは、基本的に粒子生成反応を MT=201 以降に格納するか、MT=5 に格納するかの差である。したがって、これに関しては相互の変換は簡単なツールを作成するだけ可能であるので、大きな問題とはならない。また、JAERI-BNL ファイル構造では、比較的中間子生成反応などに拡張しやすいという利点がある。ただし、MCNPX が公開されることを考慮するならば、最低限 LANL バージョンも併せて用意する。したがって、このための、変換ツールの作成が必要となる。

### 4. 精度の考え方及び評価手法

評価済高エネルギー核データファイルに対する要求精度の詳細に関しては、他のレポートを参照して頂きたい。ここでは大まかな精度に対する要求に従って、どのように

にファイルを作成するか、すなわち、格納物理量の入射エネルギー領域別の要求精度を概観し、これに対応した評価手法を提案することとする。具体的には、核種生成断面積（ドシメトリ断面積及び放射化断面積）と生成粒子二重微分断面積（輸送断面積）について考察する。

このレポートの最初の部分でも述べたが、輸送断面積に関しては、様々なオプションが考えられる。例えば、

- ・高エネルギー輸送はカスケード系コードで済ませるので、一定のエネルギー以下（150～250 MeV）の輸送断面積だけが必要な場合
- ・カスケード系でない解析的な輸送コード（MCNP、ANISN、DORT、DOT 等）で高エネルギーまで計算したい場合
- ・簡易式を使った解析的な計算を輸送断面積からパラメータを決めて行いたい場合

等が挙げられる。現在、例えば LANL の方式を取るならば、150 MeV までは MCNP でライブラリを用いて計算し、これを超えるエネルギー範囲では比較的精度の保証されているカスケード系の LAHET を使用するということになるであろう。この場合、150 MeV までは要求精度の高い輸送断面積が必要となる。一方、医療照射用加速器を考えると、この切り替えエネルギーは 250 MeV 程度となろう。この切り替えエネルギー(Ex)をどの程度にするかという議論を除けば、Ex 以下まで、有る程度の精度で輸送断面積を格納し、Ex 以上では適当な精度で与えておけばよいことになる。

核種生成断面積に関しては、必要とされる全てのエネルギー領域で、要求精度を満たす核データをファイルに格納しておく必要がある。これは、カスケード系コードが核種生成断面積計算にある種の困難さ（計算時間がかかるため、必要となる入射エネルギー点数が充分にとれない、または、要求精度を満たすのが困難な場合がある）を持つため、核データファイルとして持っておいた方が簡便に利用しやすいという利点があるためである。

以上をまとめて、ここでは、ファイル整備に関して大まかに以下のように提案したいと思う。もちろん、更なる検討が必要であることはいうまでもない。

- ・JENDL High Energy File の上限エネルギーを大ハドロン計画(JHF)の蓄積リンクエネルギーの 3 GeV とする。
- ・核種生成断面積は前平衡-統計模型計算コード ALICE-F（250 MeV までは FKK-GNASH、50 MeV までは SINCROS-II というオプション有り）で評価する。
- ・輸送断面積に関しては、250 MeV までは、上記前平衡-統計模型計算コードで与え、150、250（整合性を確認し、中間子生成を考慮するため）、350、500、700、1000、1500、2000、3000 MeV の 9 点に関して量子論的分子動力学法（QMD）もしくはカスケード系コードで粒子生成二重微分断面積を計算して、格納する。

- ・酸素より軽い核種の評価は 50 MeVまでの IFMIF 用中性子ファイルの評価手法(SCINFUL/DDX, EXFON 等)を踏襲するともに、量子論的分子動力学法(QMD)もしくはカスケード系コードも考慮する。

詳細な格納量に関しては、7.3 を参照のこと。

## 5. 公開の手順

公開の手続きとしては、従来の JENDL と同様な手続きを行うが、一括公開でなく、出来たものから順次 JENDL/HE-1.0, -1.1, ... の様な形で公開していく。それぞれの公開時期などは最終的に高エネルギー核データ評価 WG や JENDL 編集グループと協議の上決定する。

公開目標は、現状で以下のように提案するが、作業の進捗状況に合わせて適宜見直すこととする。

- ・ IFMIF 用中性子ファイル(< 50 MeV、25 元素 63 核種) : 1998.10
- ・ 優先度 1 の核種(< 3 GeV、17 元素 42 核種) : 1999.3
- ・ 優先度 2 の核種(< 3 GeV、12 元素 40 核種) : 2000.3
- ・ 優先度 3 の核種(< 3 GeV、18 元素 40 核種) : 2001.3

ファイルレビューやベンチマークテストの結果修正されたものは、次の公開ファイルに修正版として、再格納する。レビュー及びベンチマークテストに関しては他のレポートを参照していただきたい。

Table A9.1 Nuclide list planned to be stored in JENDL High Energy File

Nuclides	Priority	Status of n-incident File	Status of p-incident File
H-1	1	Compiling (< 1 GeV)	
Li-6	3	Evaluating (< 50 MeV)	
Li-7	3	Evaluating (< 50 MeV)	
Be-9	3	Evaluating (< 50 MeV)	
B-10	3	Evaluating (< 50 MeV)	
B-11	3	Evaluating (< 50 MeV)	
C-12	1	Compiling (< 80 MeV)	
C-13	3		
N-14	1	Evaluating (< 50 MeV)	
O-16	1	Evaluating (< 50 MeV)	
F-19	3		
Na-23	1	Compiling (< 50 MeV)	
Mg-24	2	Compiling (< 50 MeV)	
Mg-25	2	Compiling (< 50 MeV)	
Mg-26	2	Compiling (< 50 MeV)	
Al-27	1	Compiling (< 50 MeV) Evaluating (< 3 GeV)	Evaluating (< 3 GeV)
Si-28	2	Compiling (< 50 MeV)	
Si-29	2	Compiling (< 50 MeV)	
Si-30	2	Compiling (< 50 MeV)	
Cl-35	3		
Cl-37	3		
Ar-35	3		
Ar-38	3		
Ar-40	3		
K-39	2	Compiling (< 50 MeV)	
K-41	2	Evaluating (< 50 MeV)	
Ca-40	2	Compiling (< 50 MeV)	
Ca-42	2	Compiling (< 50 MeV)	
Ca-43	2	Compiling (< 50 MeV)	
Ca-44	2	Compiling (< 50 MeV)	
Ca-46	2	Compiling (< 50 MeV)	
Ca-48	2	Compiling (< 50 MeV)	

Table A9.1 Nuclide list planned to be stored in JENDL High Energy File (continued)

Nuclides	Priority	Status of n-incident File	Status of p-incident File
Ti-46	2	Compiling (< 50 MeV)	
Ti-47	2	Compiling (< 50 MeV)	
Ti-48	2	Compiling (< 50 MeV)	
Ti-49	2	Compiling (< 50 MeV)	
Ti-50	2	Compiling (< 50 MeV)	
V-50	3	Evaluating (< 50 MeV)	
V-51	2	Compiling (< 50 MeV)	
Cr-50	1	Compiling (< 50 MeV)	
Cr-52	1	Compiling (< 50 MeV)	
Cr-53	1	Compiling (< 50 MeV)	
Cr-54	1	Compiling (< 50 MeV)	
Mn-55	2	Compiling (< 50 MeV)	
Fe-54	1	Compiling (< 50 MeV)	
Fe-56	1	Compiling (< 50 MeV)	
Fe-57	1	Compiling (< 50 MeV)	
Fe-58	1	Compiling (< 50 MeV)	
Co-59	2	Evaluating (< 50 MeV)	Evaluating (< 50 MeV)
Ni-58	1	Compiling (< 50 MeV)	
Ni-60	1	Compiling (< 50 MeV)	
Ni-61	1	Compiling (< 50 MeV)	
Ni-62	1	Compiling (< 50 MeV)	
Ni-64	1	Compiling (< 50 MeV)	
Cu-63	1	Compiling (< 50 MeV)	
Cu-65	1	Compiling (< 50 MeV)	
Zn-64	3		
Zn-66	3		
Zn-67	3		
Zn-68	3		
Zn-70	3		
Ga-69	3		
Ga-71	3		

Table A9.1 Nuclide list planned to be stored in JENDL High Energy File (continued)

Nuclides	Priority	Status of n-incident File	Status of p-incident File
Ge-70	3		
Ge-72	3		
Ge-73	3		
Ge-74	3		
Ge-76	3		
As-75	3		
Y-89	3	Compiling (< 50 MeV)	
Zr-90	2	Evaluating (< 3 GeV)	Evaluating (< 3 GeV)
Zr-91	2	Evaluating (< 3 GeV)	Evaluating (< 3 GeV)
Zr-92	2	Evaluating (< 3 GeV)	Evaluating (< 3 GeV)
Zr-94	2	Evaluating (< 3 GeV)	Evaluating (< 3 GeV)
Zr-96	2	Evaluating (< 3 GeV)	Evaluating (< 3 GeV)
Nb-93	2	Evaluating (< 3 GeV)	Evaluating (< 3 GeV)
Mo-92	2	Evaluating (< 50 MeV)	
Mo-94	2	Evaluating (< 50 MeV)	
Mo-95	2	Evaluating (< 50 MeV)	
Mo-96	2	Evaluating (< 50 MeV)	
Mo-97	2	Evaluating (< 50 MeV)	
Mo-98	2	Evaluating (< 50 MeV)	
Mo-100	2	Evaluating (< 50 MeV)	
W-180	1	Evaluating (< 50 MeV, 3 GeV)	Evaluating (< 3 GeV)
W-182	1	Evaluating (< 50 MeV, 3 GeV)	Evaluating (< 3 GeV)
W-183	1	Evaluating (< 50 MeV, 3 GeV)	Evaluating (< 3 GeV)
W-184	1	Evaluating (< 50 MeV, 3 GeV)	Evaluating (< 3 GeV)
W-186	1	Evaluating (< 50 MeV, 3 GeV)	Evaluating (< 3 GeV)
Ta-181	1		
Au-197	1	Evaluating (< 50 MeV)	Evaluating (< 50 MeV)

Table A9.1 Nuclide list planned to be stored in JENDL High Energy File (continued)

Nuclides	Priority	Status of n-incident File	Status of p-incident File
Hg-196	1	Evaluating (< 3 GeV)	Evaluating (< 3 GeV)
Hg-198	1	Evaluating (< 3 GeV)	Evaluating (< 3 GeV)
Hg-199	1	Evaluating (< 3 GeV)	Evaluating (< 3 GeV)
Hg-200	1	Evaluating (< 3 GeV)	Evaluating (< 3 GeV)
Hg-201	1	Evaluating (< 3 GeV)	Evaluating (< 3 GeV)
Hg-202	1	Evaluating (< 3 GeV)	Evaluating (< 3 GeV)
Hg-204	1	Evaluating (< 3 GeV)	Evaluating (< 3 GeV)
Pb-204	1	Evaluating (< 3 GeV)	Evaluating (< 3 GeV)
Pb-206	1	Evaluating (< 3 GeV)	Evaluating (< 3 GeV)
Pb-207	1	Evaluating (< 3 GeV)	Evaluating (< 3 GeV)
Pb-208	1	Evaluating (< 3 GeV)	Evaluating (< 3 GeV)
Bi-209	1	Evaluating (< 3 GeV)	Evaluating (< 3 GeV)
Th-232	3		
U-233	3		
U-234	3		
U-235	1		
U-236	3		
U-238	1		
Np-237	3		
Pu-238	2		
Pu-239	2		
Pu-240	2		
Pu-241	2		
Pu-242	2		
Am-241	3		
Am-242	3		
Am-242m	3		
Am-243	3		
Cm-243	3		
Cm-244	3		
Cm-245	3		
Cm-246	3		

Table A9.2 Physical quantities stored in JENDL High Energy File  
and related MF/MT numbers

MT	MF	Reactions	Comments
1	2,3	Total	Only for neutron
2	2,3,4(6)	Elastic	
3	3	Non-elastic (Total reaction)	Sum. Of MT=4,5,18,102
4	3	Inelastic	Sum. Of MT=51-90
5	3,6	Isotope production	In the case including PKA spectra, LAW=7 is adopted. Otherwise LAW=0.
18	1,2,3,6	Fission	+ FP yield and neutron data (prompt, delayed, spectrum)
51-90	3,4(6, LAW=2), 12,14,15	Discrete inelastic	Basically only below 20 MeV In above case, $\sigma = 0$ .
102	2,3,12,14,15	Capture	Basically only below 20 MeV
201	3,6	Neutron production	No discrete levels <sup>*1</sup> and no fission
202	3,6	Photon production	No discrete + capture level <sup>*2</sup>
203	3,6	Proton production	*3
204	3,6	Deuteron production	*3
205	3,6	Triton production	*3
206	3,6	He-3 production	*3
207	3,6	Alpha production	*3
208	3,6	$\pi^+$ production	If necessary. *3
209	3,6	$\pi^0$ production	If necessary. *3
210	3,6	$\pi^-$ production	If necessary. *3
211	3,6	$K^+$ production	If necessary. *3
212	3,6	$K^0$ production	If necessary. *3
213	3,6	$K^-$ production	If necessary. *3

\*1: Elastic and discrete inelastic scattering reactions are not included in this MT section.

\*2: No inelastic and capture gamma-ray is included in this MT section.

\*3: LAW=1 (Legendre Coeff. or Kalbach-Mann Sys.) or LAW=7 (Table).

# 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放熱束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジemens	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表す場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC開発理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レンントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

## 換算表

力	N(=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665		1	2.20462
4.44822	0.453592		1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P} (\text{ポアズ}) (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} (\text{ストークス}) (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J (計量法)
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>	= 4.184 J (熱化学)
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>	= 4.1855 J (15 °C)
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>	= 4.1868 J (国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>	仕事率 1 PS (仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>	= 735.499 W
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1	

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>		1	100
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1		0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

評価済高エネルギー核データのための実験データの現状及び信頼性評価手法に関する検討  
—シグマ研究委員会「CERNロード高エネルギー核データファイル積分テストに関するタスクフォース」報告—