

解 説 (IV)

## OMEGA計画と核データ

(原研) 西田 雄彦, 水本 元治, 高田 弘, 神野 郁夫,  
中原 康明, 向山 武彦, 菊地 康之

### 1. はじめに

OMEGA計画は、使用済み核燃料の高レベル廃棄物の核種分離・有効利用及び長寿命の超ウラン核種や核分裂生成物の消滅処理の革新的な技術を研究開発する計画で、従来のフェニックス計画が発展する形で原子力委員会により昭和63年に策定され、原研、動燃や電中研を中心に推進されている。また、平成元年には、OMEGAプロジェクト (Options Making Extra Gains of Actinides and fission products) としてOECD/NEAに提案され、技術情報交換の国際協定として認められた。この解説では、この協定に基く研究活動の一環として、消滅処理研究に関連して新たに測定や評価・整備することが必要と考えられる核データをまとめてNEA/DATA BANKに提出したリストを中心にOMEGA関連の核データの状況を紹介する。

原研の消滅処理研究では、陽子加速器や専焼炉を用いた方式について研究開発を進めているが、消滅処理関連の先端技術を開発するには、従来整備されている核データファイルに加え、多種かつ高精度の、荷電粒子や高エネルギー領域に対する核データが要求される。ここでは、大強度陽子加速器 (1.5 GeV, 10 mA級) の開発や高エネルギー陽子ビーム利用TRU消滅処理システムの研究の概要と要求される核データについて述べる。マイナーアクチナイド高速専焼炉の研究の概要については既に報告されているので<sup>1)</sup>、開発の推進のために必要とされる核データリストをまとめるにとどめた。また、最近の消滅処理研究関連核データの入手状況についても簡単に触れる。

### 2. 陽子加速器利用TRU消滅処理システムの研究と核データ

#### 2.1 陽子加速器を用いたTRU消滅処理法の研究

原研の陽子加速器を用いたTRU消滅処理の研究は、次に示す4つのテーマ

- (a)核破碎過程シミュレーションコードの改良開発および消滅処理プラント設計研究用コードシステムの開発・整備
- (b)TRU消滅処理プラントの概念検討・設計研究
- (c)高エネルギー陽子核破碎積分実験
- (d)大強度陽子加速器の開発

について進めている。

周知のように、数 GeV の高エネルギー陽子ビームを TRU ターゲットに入射させると主として核破砕生成物 (Spallation Products) をつくるカスケード反応を起こす。また、同時にトリチウムやヘリウムを含む軽い粒子が放出されるがその大部分は中性子である<sup>2)</sup>。例えば、使用済み核燃料中に生成される TRU の主成分である  $^{237}\text{Np}$  のターゲットを陽子ビームで照射すると、その核破砕数は入射エネルギーと共に増大し、1.5 GeV では約 5 個の  $^{237}\text{Np}$  核が壊される (第 1 図)。また、2 GeV の陽子と  $^{237}\text{Np}$  核や  $^{241}\text{Am}$  核の反応でつくられる核破砕生成物を半減期区分毎に分類したのが第 2 図で、放射性廃棄物として処理処分上問題となるのは 7 と 8 の区分 (1 年以上) であるが、ここに分類される生成核種はトリチウム以外は僅かである<sup>3)</sup>。これらの計算値に基いて核破砕反応だけで TRU を消滅するシステムを考えると、1.5 GeV、300 mA の陽子加速器による核破砕で、年に約 100 kg の TRU が消滅処理でき、これは 1 GWe の軽水発電炉より排出される TRU の約 4 基分に相当する。また余剰中性子をすべてブランケットに吸収させて核分裂物質の生産に充てれば、年に 1~2 トンができる。しかし、この場合は、処理量の採算ベースと考えられる“年 10 基分”の半分以下の処理量で、加速器電力を自給出来るほどの発電量も得られない。また数 GeV、300 mA 級の大強度陽子加速器の実現にはかなり開発期間と技術革新を要すると思われる。一方、第 3 図に核破砕時に発生する中性子数の入射エネルギー変化を鉛より重い幾つかの核種に対して示してあるが、 $^{237}\text{Np}$  核では 1.5 GeV で 1 陽子当り 40 個以上の中性子が得られる<sup>4)</sup>。

このような事情から現在は、多量に得られる破砕中性子を TRU 燃料で構成される未臨界高速炉心に投入し、消滅処理量の増大とエネルギーバランスの向上が期待できる加速器・高速炉心ハイブリッド型消滅処理プラント概念 (第 4 図及び第 1 表) の検討を進めている<sup>5)、6)、7)</sup>。第 5 図はステンレススチールの反射体で包まれた未臨界ターゲット炉部分のモデルを示しており、ナトリウムまたは鉛-ビスマスで冷却される。炉心部分は、ピンバンドル型 TRU 金属燃料で充されている。1.5 GeV の陽子ビームは左手前からタンゲステンターゲットに入射して核破砕中性子を発生し炉心部を駆動する。無論ターゲット部分に TRU を使用した方が中性子発生効率もよく処理量もある程度稼げるが、第 6 図の上図に示したようにターゲット周辺に出力ピーキングが起り、全体としては消滅効率が低くなる。これを避けるためにターゲット部分をタンゲステンで置き換えると出力密度分布が平坦化し (第 6 図下図) 消滅効率が改善される。この消滅処理プラントの特性の解析結果は、第 2 表にまとめてあるが、ナトリウム冷却の場合実効増倍係数 0.92、ビーム電流約 23 mA で 1 GWe PWR 7.6 基分の TRU 処理が可能で、鉛-ビスマスの場合は同じく 5.3 基分が処理可能だが実効増倍係数 0.86、ビーム電流は 7.5 mA でよい。いずれの場合も加速器所要電力の 3 倍以上の電力が生産できる。なお、この消滅処理プラントは未

臨界系でよいことから、安全性や設計上の制約の面で有利である。即ち、

- (1) 反応度制御のための制御・安全棒が不要で、システムが簡素化される。
- (2) 原子炉と同程度の出力密度だが反応度係数に制限がつかない。
- (3) 出力停止は加速器のビームを遮断すればよく、安全設計上の負担が少ない。

以上の解析計算を行うために、第3表に掲げるような計算コード群が開発・整備されており<sup>8)</sup>、コードの相互関連を第7図に示した。粒子のエネルギーが15 MeV以上の領域でおこる核破砕反応及び高エネルギー核子輸送過程は、モンテカルロコードNUCLEUS<sup>9)</sup>・<sup>10)</sup>及びNMT C/JAERI-NMTA<sup>11)</sup>で計算した。15 MeV以下のエネルギーをもつ中性子の分布はファイルを通してモンテカルロコードMORSE-DD<sup>12)</sup>に送られ中性子輸送計算が行われた。MORSEにつながる右半分のルートは核データ準備のためのものである。ACCELやSPACEはSn法による核破砕ターゲットの中性子輸送計算を行うコードシステムである。TRUの燃焼計算には原子炉用のORIGEN2の改良版が使用されたが、核破砕生成物(Spallation Products)の消滅・生成の過程を計算するには、SP用のデータを整備して新たに作成したSPCHAIN<sup>13)</sup>を使う必要がある。

陽子核破砕実験研究では、鉛体系に陽子ビームを入射させる実験を行い、核破砕生成物分布、核破砕中性子のエネルギーや分布を測定するための技術を確認すると共に、測定結果と計算値とを比較し核破砕解析コードの精度の向上を図る<sup>14)</sup>。このため、高エネルギー物理学研究所のブースタ利用施設で500 MeV陽子ビームによる核破砕実験を行う準備を進めており、平成2年度後半に鉛体系照射実験を開始する。第8図には実験用鉛体系全体とビーム投入孔、ターゲット、実験孔、金属カプセル挿入孔の配置が示してある。第1回の照射試料としては、アルミニウム、ニッケル、銅、鉄、金を用い、生成核種は放出ガンマ線の測定によって同定する。

消滅処理工学試験用大強度陽子加速器(Engineering Test Accelerator: 1.5 GeV, 10 mA, 第9図参照)の建設へ向けての技術基盤確立のため、技術開発用陽子加速器(Basic Technology Accelerator: 10 MeV, 10 mA, 第10図参照)のR&Dを行う<sup>15)</sup>。開発の重点項目は加速電流量の増大で、主として加速中の陽子ビームの洩れを少なくする研究が必要である。そのため当面は、①大電流イオン源の開発、②高周波4重極型リニアック(RFQ)の試作・試験、③ドリフトチューブ型リニアック(DTL)の設計・製作、またこれらの試験を実施するための、④RF源モデルの設計・製作を行う。また、加速器要素の概念検討、加速器計算コードの整備等を実施する。

## 2.2 消滅処理システム設計研究に必要とされる核データ

核破砕反応に基くTRUの核種変換法の解析研究では、高エネルギー粒子の核内カスケード及び核外カスケード過程を計算するために、モンテカルロシミュレーションコード

NMTC/JAERI及びNEUCLEUSを使用している。加速器・未臨界炉心のハイブリッド型消滅処理システム解析では、核破碎中性子数の予測精度がシステム全体の効率に大きく影響する。しかし、これらの計算コードに組み込まれている核子-核子反応断面積(中間子を含む)データの多くは、1960年代の測定値で古いため、最近測定されたデータと比較・評価して更新し、計算精度の向上を図る必要がある。検討の対象となるデータを第4表にまとめた。

NMTC/JAERIは、加速器・未臨界炉システムに打ち込まれた高エネルギー陽子によって引き起こされるカスケード過程での原子核内反応計算では、2体衝突近似による核子・核子散乱カスケード過程、粒子蒸発または高エネルギー核分裂過程を忠実に計算するため、非常に計算コストが高くなる。ここで、核子または中間子と原子核との反応断面積が得られていれば、核内カスケード計算を省略して、消滅処理ターゲット炉内の核種変換過程を常識的な計算時間で効率よくシミュレーション出来る。しかし、断面積がカバーしなければならぬエネルギー範囲も数十MeVないし数GeVと広く、反応のチャンネルも多岐にわたるため、測定データは僅かである<sup>16)</sup>。第5表に示すような消滅処理システム解析に関連して必要なターゲットや燃料、被覆材、冷却材を構成する核種についての断面積データが要求される。

核破碎積分実験データに関しては、入射粒子エネルギーが数十MeVないし数GeVの範囲で、厚いターゲットでの核破碎生成物の質量数分布、核破碎中性子のスペクトル、中性子束分布が核破碎コードをチェックするために必要である。この領域での測定値は少ないが、最近では、SINやLANL-KFKでいくつかの高エネルギー陽子に対する測定が行われている<sup>17)・18)・19)・20)</sup>。消滅処理研究としては、当面、ターゲット核種は、Pb, W, <sup>238</sup>U, <sup>237</sup>Np, 入射陽子エネルギーは500MeV, 800MeV, 1.5 GeVでよい。その他、核破碎反応で多くつくられる安定核ラインから離れた中性子欠損核種にはアイソトープ表に登録されていないものもあり、これらに対する崩壊定数や分岐比のデータが望まれる。

## 2.3 大強度陽子加速器開発に必要とされる核データ

高エネルギー、大電流陽子加速器の研究開発は、商業ベース消滅処理プラント用の大強度加速器の設計・建設を行う前に、要素技術開発と技術開発用加速器の建設および工学試験用の大強度加速器の建設の2段階の研究開発を実施する。

### 2.3.1 技術開発用加速器 (BTA:Basic Technology Accelerator, 10 MeV, 10 mA)

BTAは、工学試験用陽子加速器の低エネルギー加速部の開発を主目的としているため平均加速電流は~10mAで、これは現在稼働中の物理実験用加速器の50~100倍の電

流値に相当する。そのため、陽子ビームの僅かの洩れがあっても、加速器構造に誘起される放射能はかなり高くなると予想される。加速器の運転中や保守・管理作業中の被爆を評価するためには、特に、厚いターゲットに対する、しきい値付近のエネルギーの(p,n)反応及び(p,γ)反応に対する正確なデータの入手が必須である。第6表に見られるように、加速器本体を形成するビーム輸送系や構造材のステンレススチール、加速空洞等の構成元素、特に、 $^{nat}\text{Cu}$ 、 $^{nat}\text{Fe}$ 、 $^{nat}\text{Cr}$ 、 $^{nat}\text{Ni}$ 、 $^{27}\text{Al}$ の、熱エネルギーから15MeVの領域における中性子放出断面積 $\sigma_{p,n}(E)$ 、 $\sigma_{p,n}(E,\theta)$ が15%の精度で必要である。

また、加速器本体周辺に存在するものとして、遮蔽用コンクリートや水、空気の $^{14}\text{N}$ 、 $^{16}\text{O}$ にたいしても $\sigma_{p,n}(E)$ が20%の精度で要求される。このエネルギー領域での中性子反応に対する核データは、既に原子炉用および核融合炉用に整備されている核データファイルのJENDL-3、ENDF/B-IV、Vが利用できる。

### 2.3.2 工学試験用加速器 (ETA:Engineering Test Accelerator, 1.5 MeV, 10 mA)

この加速器は、消滅処理用ターゲットの工学試験を実施するために、加速電流10 mAに対して、加速エネルギーは最終目標値の1.5 GeVであるため、陽子ビームとしては大強度である。このビームと加速器構造物との核反応では、複雑なスプレーション反応とそれに引き続いて粒子蒸発反応が起こる。この時、荷電粒子、多くの中性子、ガンマ線が放出され後に核破砕生成物がつくられる。この加速器の実用化のためには、メンテナンスや高エネルギーの放射線遮蔽に関連して、加速器の各構成元素について、高エネルギー(数10 eV~1.5 GeV)の陽子や中性子による粒子放出断面積 $\sigma_{p,\gamma}(E,\theta)$ 及び $\sigma_{n,\gamma}(E,\theta)$ 、放射化断面積 $\sigma_{p,\gamma}(E)$ 及び $\sigma_{n,\gamma}(E)$ 、核破砕生成物の収量が少なくとも30%の精度で得られなければならない。加速器の構成要素は、加速空洞、ビームの輸送系、集束系及びモニター系、エレクトロニクス系等でその主要な構成物質は、銅、アルミニウム、ステンレススチールであり、周辺の物質としては、コンクリート、鉄、鉛の遮蔽材、水や空気も考慮されねばならない。具体的な元素名については、第7表にまとめた。各元素の厚いターゲットの場合に、放出される中性子やガンマ線、生成される長寿命核種の放射能の正確なデータが必要となる。遮蔽計算には、中性子に対する全断面積、2重微分断面積が欠かせない。100MeV~1.5 GeVのエネルギー範囲では利用可能な核データが極めてすくないため、今後体系的な実験やデータの評価作業が期待される。

## 3. 高速専焼炉の研究開発と核データ

専焼炉でTRUを効率よく変換するには、非常に硬いスペクトルを持つ高中性子束が得られる必要がある。これは、 $^{237}\text{Np}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{243}\text{Am}$ 、 $^{244}\text{Am}$ 等のTRU核種のほとんどがしきい値核分裂反応を起こすからである。専焼炉の炉型としては、He冷却TR

U酸化物型, Na冷却TRU金属型, He冷却TRU粒子型などが提案されているが, いずれもTRUが核燃料として使われている。従って, 現在では不十分と言われるTRU核データの精度の向上が要求される。また, TRUの遅発中性子データは, 専焼炉の動特性解析のために必要である。第8表は, TRU専焼炉設計のために必要となる核データをまとめたものである。加速器消滅処理システムのターゲット体系と同様のデータ精度の向上が必要とされる。

#### 4. まとめ

核破碎反応を含む中高エネルギー核データについては測定例が少なく, また測定値の評価も十分行われていないのが現状である。これに関しては, 1986年以来, BNL/NNDCの Pearlstein を中心として, MENDWG (中高エネルギー核データ作業グループ) が非公式に編成され, 1 GeVまでの陽子, 中性子データの評価作業が進められている。評価済みデータはENDF/B-VI高エネルギー核データライブラリーとして1990年より一般公開が開始されている。

高エネルギー陽子を用いたTRU消滅処理システムの設計研究では, 荷電粒子や中間子, 高エネルギー中性子の反応の(核子-核子反応を含めた)核データが必要となるが, これらは, JENDLプロジェクトの収集・評価作業の対象ではなかった。この要請に対応して, JAERI核データセンターは, JENDL-3の完成後に向けて, JNDCと共同で上記データ用特別ファイルの整備活動を開始することに決定している。荷電粒子データの一部や光核反応データの評価は既に始まっている。また, JENDL-3に整備されている重要核種のいくつかについては, 最高エネルギーを50 MeVまで拡張するように計画されている。

TRU専焼炉開発に関する核データの要請については, JENDL-3の範囲で対応できるが, 主な核分裂物質として使われる $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Am}$ 等のTRU核種については, より高い精度のデータが必要である。さらに, TRUの核分裂収量, 遅発および即発中性子の平均数とスペクトル等のデータが要求されるが, これらはJENDL-3では十分に評価されていない。このような状況のもとで, 日本-米国アクチナイドプログラムがJAERIとORNL間で結ばれ, ORNLは原研に核分裂や熱力学に関するデータを提供している。

## 参考文献

- 1) 高野秀機：“TRU消滅処理と核データ -核分裂炉-”，飯島俊吾，深井佑造：“超ウラン元素照射消滅処理と核データ”，核データニュース，No. 31，p.30 (1988).
- 2) 中性子ターゲットシステム研究専門委員会，“スポレーション中性子工学”，日本原子力学会 (1984).
- 3) T. Nishida, Y. Nakahara：“Analysis of produced nuclei and emitted neutrons in nuclear spallation reactions,” Kerntechnik, 50, 193 (1987).
- 4) T. Nishida, I. Kanno, H. Takada, T. Takizuka, Y. Nakahara, M. Mizumoto, Y. Kaneko：“Research of TRU Transmutation System with Proton Accelerator”，Proc. Seminar on Nuclear Data (1989) (Tokai).
- 5) T. Takizuka, I. Kanno, H. Takada, T. Ogawa, T. Nishida, Y. Kaneko：“A Study on Incineration Target System,” Proc. ICENES (1989) (Karlsruhe).
- 6) H. Takada, I. Kanno, T. Takizuka, T. Ogawa, T. Nishida, Y. Kaneko：“A CONCEPTUAL STUDY OF ACTINIDE TRANSMUTATION SYSTEM WITH PROTON ACCELERATOR <1> TARGET NEUTRONIC CALCULATION”，Proc. 2nd Int. Symp. on Advanced Nuclear Energy Research - Evolution by Accelerator -, (1990) (Mito).
- 7) T. Takizuka, H. Takada, I. Kanno, T. Ogawa, T. Nishida, Y. Kaneko：“A CONCEPTUAL STUDY OF ACTINIDE TRANSMUTATION SYSTEM WITH PROTON ACCELERATOR <2> TARGET THERMAL HYDRAULICS”，Proc. 2nd Int. Symp. on Advanced Nuclear Energy Research - Evolution by Accelerator -, (1990) (Mito).
- 8) 中村尚司，他：“高エネルギー粒子による消滅処理の核データ”，日本原子力学会誌，Vol.32., No.6, p.20 (1990).
- 9) T. Nishida, Y. Nakahara：“Mass formula dependence of calculated spallation reaction product distributions,” Kerntechnik, 55, No.3, 147 (1990).
- 10) 西田 雄彦、中原 康明、筒井 恒夫：“原子核スポレーション反応シミュレーションコード開発と1次スポレーション生成物の計算，” JAERI-M 86-116, (1986).
- 11) 中原 康明、筒井 恒夫：“高エネルギー核反応および核子・中間子輸送シミュレーションコードシステム NMT C/JAERI，” JAERI-M 82-198, (1982).
- 12) M. Nakagawa, et al.：“MORSE-DD A Monte Carlo Code Using Multi-Group Double Differential Form Cross Sections,” JAERI-M 84-126, (1984).
- 13) K. Tasaka：“DCHAIN2：A COMPUTER CODE FOR CALCULATION OF TRANSMUTATION OF NUCLIDES,” JAERI-M 8727, (1980).

- 14) W. Amian, N.F. Peek, D.J. Shaddan, G. Sterzenbach : " Production Rates of Spallation and Fission Products in Depleted Uranium and Natural Lead Targets Bombarded by 600 MeV and 1100 MeV Protons", Proc. of ICANS-VII, (1983).
- 15) M.Mizumoto, Nuclear Spallation Study Group I (Accelerator) : "DEVELOPMENT PLAN OF BASIC TECHNOLOGY FOR A HIGH INTENSITY PROTON LINEAR ACCELERATOR," Proc. 2nd Int. Symp. on Advanced Nuclear Energy Research — Evolution by Accelerator —, (1990)(Mito).
- 16) W. Schimmerling : " Neutron-Nucleus Total and Inelastic Cross Sections : 900 to 2600 MeV/c", Phys. Rev. C, Vol. 7, 248 (1973).
- 17) M. M. Meier et al.: " 318 and 800 MeV (p,xn) Cross Section," Proc. Nuclear Data for Basic and Applied Scienc, Santa Fe, New Mexico, May 13-17 (1985).
- 18) S. Cierjacks et al.: " Systematics of Angular-Dependent Neutron Production by 585 MeV Protons on Targets with  $12 \leq A \leq 238$  : Differential Cross Section Measurements," Phys. Rev. C., Vol.36, 1976 (1987).
- 19) M. M. Meier et al.: " Differential Neutron Production Cross Section and Neutron Yields from Stopping-Length Target for 113 MeV Protons," Nucl. Sci. Eng., Vol.102, 310 (1989).
- 20) M. M. Meier et al.: " Neutron Yields from Stopping-Length and near-Stopping-Length Target for 256 MeV Protons," Nucl. Sci. Eng., Vol.104, 339 (1990).



第1表 レファレンス体系設計パラメータ (Wターゲット付き, Na冷却)

冷却材		Na / Pb-Bi
陽子エネルギー		1.5 GeV
炉心 :	長さ	260 cm
	高さ	100 cm
	幅	100 cm
ターゲット :	長さ	60 cm
(タンゲステン)	高さ	100 cm
	幅	10 cm
反射体 :	ステンレススチール	
	厚さ	20 cm
燃料体 :	組成	Np-15Pu-30Zr AmCm-35Pu-10Y
	ボンド	Na
	被覆	HT-9鋼
	スラグ径	4 mm
	被覆外径	5.22 mm
	被覆厚さ	0.3 mm
	ピン長さ	100 cm

第2表 加速器消滅処理プラント (Wターゲット付き) の性能

冷却材	Na	Pb-Bi
実効増倍係数	0.92	0.86
アクチナイド装荷量 (kg)	2866	2013
ビーム電流 (mA)	22.6	7.5
TRU消滅処理量 (kg/年)	202	139
1 GWe LWR 基数分換算	7.6	5.3
発電量 (MWe)	230	75
加速器電力 (MWe)	68	23

第3表 核破碎反応及び消滅処理プロセス計算コード

コード名	計算問題	物理過程	使用されている核および核子データ
NUCLEUS	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 1個の原子核の核破碎</li> <li>・ 入射核子：陽子, 中性子, <math>\pi</math>中間子</li> <li>・ ターゲット核の制限 <math>A=1, 6 \leq A \leq 250</math></li> <li>・ 入射核子エネルギーの上限：3.5 GeV</li> <li>・ <math>\pi</math>中間子に対しては 2.5 GeV</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 核内核子カスケード</li> <li>・ 核子蒸発(<math>n, p, d, t, {}^3\text{He}, \alpha</math>)</li> <li>・ 高エネルギー核分裂</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 核半径</li> <li>・ 核内核子密度分布</li> <li>・ フェルミエネルギー分布</li> <li>・ 核子・核子散乱断面積(<math>p, p</math>) (<math>n, p</math>)に対しては弾性散乱断面積, 微分散乱断面積, 弾性散乱外断面積(1<math>\pi</math>および2<math>\pi</math>生成) (<math>\pi^-, p</math>), (<math>\pi^0, p</math>), (<math>\pi^+, p</math>), (<math>\pi^0, n</math>)に対しては, 弾性散乱断面積, 荷電交換断面積, 微分散乱断面積, 吸収断面積, 弾性散乱外断面積(1<math>\pi</math>生成)</li> </ul>
NMTC/JAERI	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 非均質な巨視的体系内での高エネルギー(<math>\geq 20</math> MeV)核子輸送および核反応</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 原子核の核破碎 (NUCLEUSと同じ)</li> <li>・ 核外核子輸送</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 核および核子データは NUCLEUSと同じ</li> <li>・ 巨視的幾何形状データ</li> </ul>
NMTA/JAERI	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ NMTC/JAERI 出力の編集: 核破碎生成物分布, 発熱分布</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 荷電核子の減速</li> <li>・ 反跳核の運動エネルギー</li> <li>・ 残留核の励起エネルギー</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ NMTC/JAERIの出力</li> </ul>
ACCEL	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ フラチド消滅処理および核分裂性核種増殖用加速器ターゲット・ブランケット体系の設計用計算コードシステム</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 核子輸送計算(<math>\geq 20</math> MeV) (NMTC/JAERI)</li> <li>・ 中性子輸送計算(<math>\leq 20</math> MeV) (MORSE-DD, TWOFRAN-II, 等)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ NMTC/JAERIと同じ</li> <li>・ 中性子輸送計算コードと同じ</li> </ul>
SPCHAIN	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 核破碎生成核種および核分裂生成核種の個数密度の時間変化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 核破碎生成物および核分裂生成物の生成・崩壊</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 核分裂生成核種についてのデータ</li> <li>・ 核破碎生成核種については NUCLEUSおよびSPDで算出する</li> </ul>
SPD	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 核破碎生成核種の半減期の計算</li> <li>・ <math>\beta</math>崩壊, <math>\gamma</math>崩壊のエネルギー</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ <math>\beta^-</math>崩壊</li> <li>・ <math>\beta^+</math>崩壊</li> <li>・ <math>\gamma</math>崩壊</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 質量公式: 宇野・山田 Myers &amp; Swiatecki Wapstra &amp; Cameron</li> </ul>

第4表 核破碎シミュレーションコードの計算精度改善のために再評価が要求される核データ

反応	断面積	エネルギー範囲	精度	備考
(N,N)	*弾性散乱断面積	100 MeV	20 %	核内カスケード
	*微分断面積	~ 1.5 GeV		
	*非弾性散乱断面積 (1 $\pi$ 中間子生成)			
	*非弾性散乱断面積 (2 $\pi$ 中間子生成)			
( $\pi$ ,N)	*弾性散乱断面積	100 MeV	20 %	
	*非弾性散乱断面積 (1 $\pi$ 中間子生成)	~ 1.5 GeV		
	*吸収断面積			
	*荷電交換断面積			

ここで、Nは陽子または中性子、 $\pi$ は $\pi^+$ 中間子、 $\pi^0$ 中間子、 $\pi^-$ 中間子をそれぞれ表わす。

第5表 簡便化された核破碎ターゲット計算のために要求される核データ

反応	断面積	エネルギー範囲	精度	備考
Na	$\sigma_{p, xpyn}(E, \theta)$			*核破碎反応
Fe		100 MeV	30 %	
Zr	$\sigma_{n, xpyn}(E, \theta)$	~ 1.5 GeV		*可能ならば
Y				( $\pi$ , 核子)
W				(核子, $\pi$ )
Pb	$\sigma_{p, xdytza\bar{r}}(E)$			
Bi				
$^{238}\text{U}$	$\sigma_{p, xnf}(E)$			*粒子蒸発反応
$^{237}\text{Np}$		10 MeV	30 %	*高エネルギー核分裂
$^{239}\text{Pu}$	$\sigma_{n, xdytza\bar{r}}(E)$	~ 500 MeV		
$^{241}\text{Pu}$				*可能ならば
$^{241}\text{Am}$	$\sigma_{n, xnf}(E)$			( $\pi$ , $\sigma_{n, xdytza\bar{r}}$ )
$^{243}\text{Am}$				( $\pi$ , $\sigma_{n, xnf}$ )

これらの核種は、ターゲット、燃料、冷却材、被覆材の構成物質である。

第6表 B T A開発のために必要な核データ (10~15MeV)

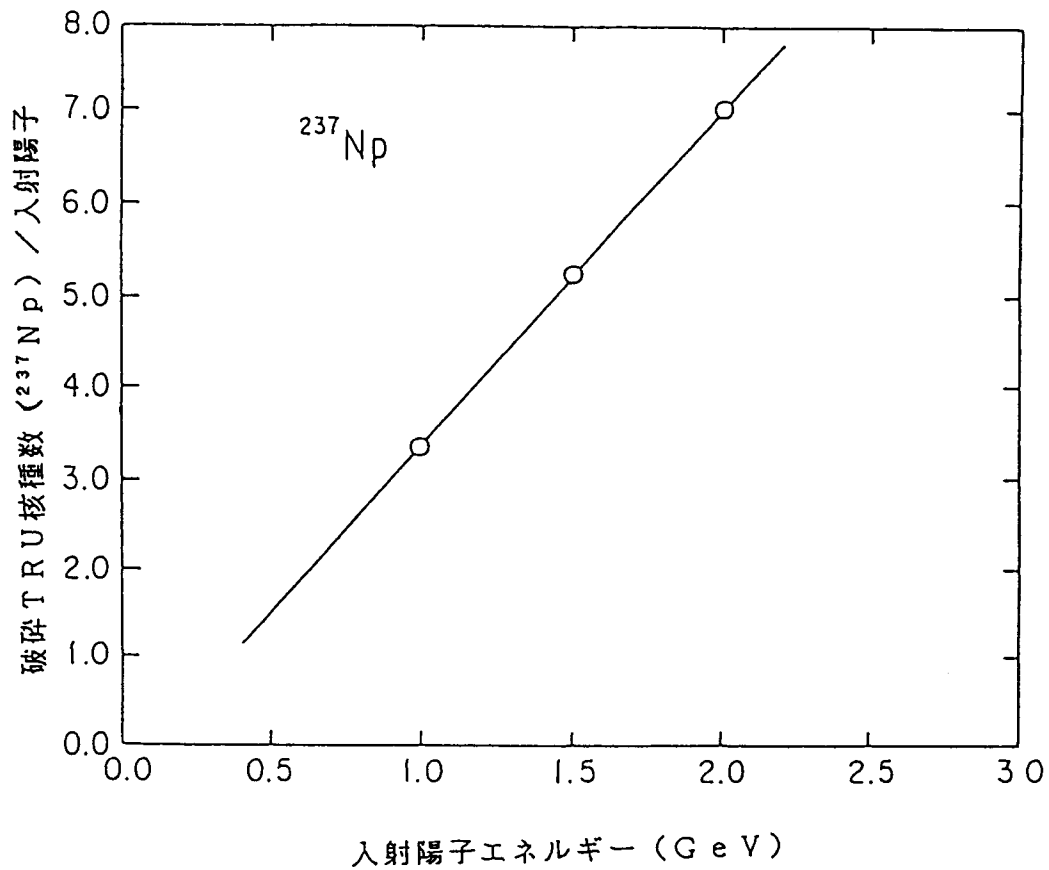
核種	反応断面積	エネルギー範囲	精度	備考
空気、水				
$^{14}\text{N}$	$\sigma_{p,n}(E)$	6.35 - 15 MeV	20 %	中性子放出
$^{16}\text{O}$	$\sigma_{p,n}(E)$	3.77 - 15 MeV	20 %	中性子放出
				続いて起こる中性子捕獲
コンクリート				
$^{16}\text{O}$	$\sigma_{p,n}(E)$	3.77 - 15 MeV	20 %	中性子放出
$^{27}\text{Al}$	$\sigma_{p,n}(E)$	5.80 - 15 MeV	20 %	中性子放出
$^{\text{nat}}\text{Fe}$	$\sigma_{p,n}(E)$	Eth - 15 MeV	20 %	中性子放出
				続いて起こる中性子捕獲
アルミニウムのビーム管				
$^{27}\text{Al}$	$\sigma_{p,n}(E), \sigma_{p,n}(E, \theta)$	5.8 - 15 MeV	15 %	中性子放出
				続いて起こる中性子捕獲
ステンレススチール				
$^{\text{nat}}\text{Cr}$	$\sigma_{p,n}(E), \sigma_{p,n}(E, \theta)$	Eth - 15 MeV	15 %	中性子放出
$^{\text{nat}}\text{Fe}$	$\sigma_{p,n}(E), \sigma_{p,n}(E, \theta)$	Eth - 15 MeV	15 %	中性子放出
$^{\text{nat}}\text{Ni}$	$\sigma_{p,n}(E), \sigma_{p,n}(E, \theta)$	Eth - 15 MeV	15 %	中性子放出
				続いて起こる中性子捕獲
$^{53}\text{Cr}$	$\sigma_{p,\gamma}(E)$	- 15 MeV	15 %	$^{54}\text{Mn}$ の放射化
$^{54}\text{Cr}$	$\sigma_{p,n}(E)$	2.19 - 15 MeV	15 %	$^{54}\text{Mn}$ の放射化
$^{56}\text{Fe}$	$\sigma_{p,\gamma}(E)$	- 15 MeV	15 %	$^{57}\text{Co}$ の放射化
$^{56}\text{Fe}$	$\sigma_{p,n}(E)$	5.43 - 15 MeV	15 %	$^{56}\text{Co}$ の放射化
加速空洞				
$^{\text{nat}}\text{Cu}$	$\sigma_{p,n}(E), \sigma_{p,n}(E, \theta)$	Eth - 15 MeV	15 %	中性子放出
				続いて起こる中性子捕獲
$^{63}\text{Cu}$	$\sigma_{p,n}(E)$	4.21 - 15 MeV	15 %	$^{63}\text{Zn}$ の放射化
$^{65}\text{Cu}$	$\sigma_{p,n}(E)$	2.15 - 15 MeV	15 %	$^{65}\text{Zn}$ の放射化

第7表 E T A開発のために必要な核データ (~1.5 GeV)

核種	反応断面積	エネルギー範囲	精度	備考
	$\sigma_{p, \text{xpyn}}(E, \theta)$	- 1.5 GeV	30 %	中性子放出
	$\sigma_{p, \text{xpyn}\gamma}(E, \theta)$	- 1.5 GeV	30 %	$\gamma$ 線放出
	$\sigma_{p, \text{xpyn}}(E)$	- 1.5 GeV	30 %	放射化
核破砕生成物収量		- 1.5 GeV	30 %	放射化
高エネルギー核分裂生成物収量		- 1.5 GeV	30 %	放射化
(1) 空気、水				
	N, O, Ar			
(2) コンクリート				
	O, Na, Mg, Al, Si, Ca, Mn, Fe			
(3) アルミニウムのビーム管				
	Mg, Al, Zn, Cu			
(4) ステンレススチール				
	Cr, Mn, Fe, Co, Ni			
(5) 加速空洞				
	Al, Cu, Fe			

第8表 アクチノイド専焼炉開発のために必要な核データ

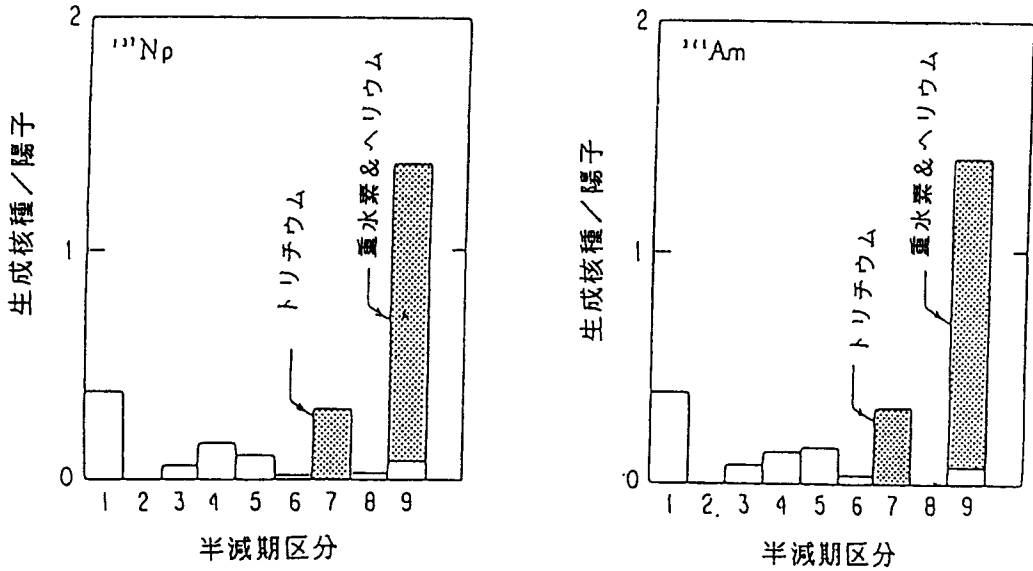
核種	優先度	$\sigma_f$	$\sigma_c$	$\sigma_{n,2n}$	$\sigma_{inel}$	$\nu_p$	$\chi_p$	$\nu_o$	$\chi_d$	$\lambda_d$	$\beta$	核分裂収量	温度依存自己遮蔽因子
Np-237	A	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
Pu-238	A	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
Pu-242	B	o	o			o	o	o	o	o	o	o	
Am-241	A	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
Am-242	B	o	o			o	o	o	o	o	o	o	
Am-242m	B	o	o			o	o	o	o	o	o	o	
Am-243	A	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
Cm-242	C	o	o			o	o	o	o	o	o	o	
Cm-243	C	o	o			o	o	o	o	o	o	o	
Cm-244	A	o	o			o	o	o	o	o	o	o	
Cm-245	B	o	o			o	o	o	o	o	o	o	
Cm-246	C	o	o			o	o	o	o	o	o	o	
Cm-247	C	o	o			o	o	o	o	o	o	o	
Cm-248	C	o	o			o	o	o	o	o	o	o	
Bk-249	C	o	o			o	o	o	o	o	o	o	
Cf-249	C	o	o			o	o	o	o	o	o	o	
Cf-250	C	o	o			o	o	o	o	o	o	o	
Cf-251	C	o	o			o	o	o	o	o	o	o	
Cf-252	C	o	o			o	o	o	o	o	o	o	



第1図  $^{237}\text{Np}$ 核破砕数の入射陽子エネルギー変化

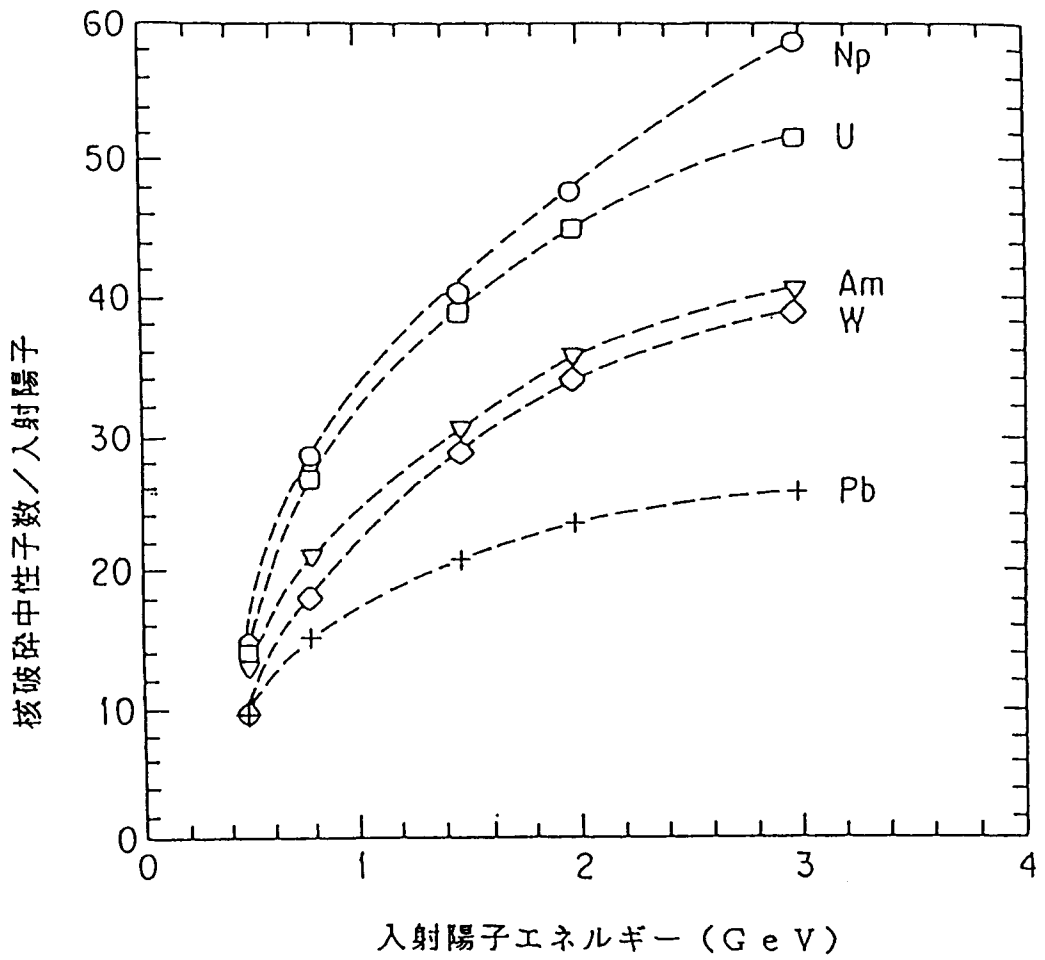
半減期区分

1: 0 秒 ~ $10^{-3}$ 秒	6: 5 日 ~ 1 年
2: $10^{-3}$ 秒 ~ 1 秒	7: 1 年 ~ $10^2$ 年
3: 1 秒 ~ 1 分	8: $10^2$ 年 ~ $10^8$ 年
4: 1 分 ~ 1 時	9: 安定核
5: 1 時 ~ 5 日	

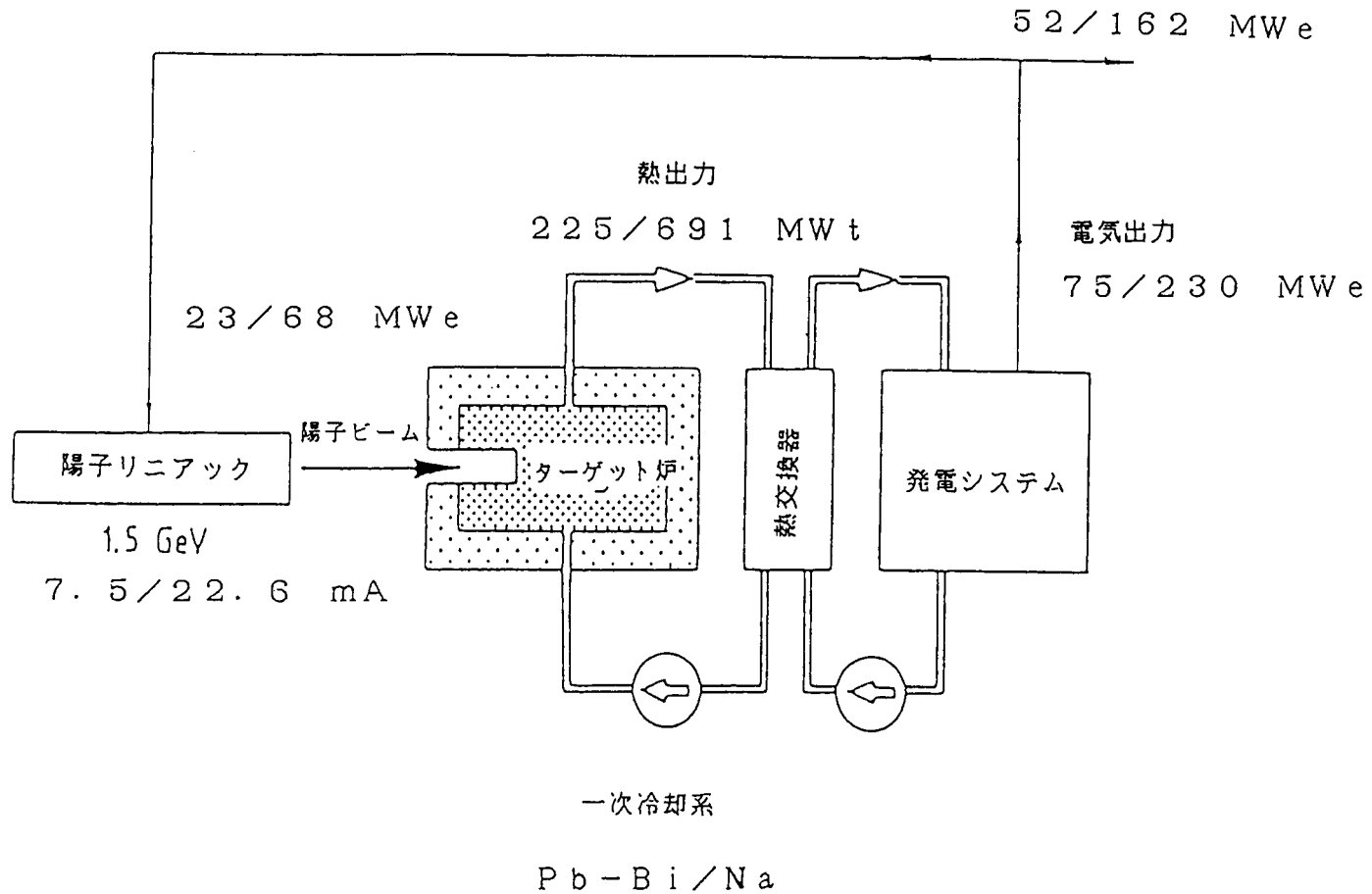


第2図 2 GeV陽子によるTRU ( $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$ )の核破碎生成物の半減期区分分類図

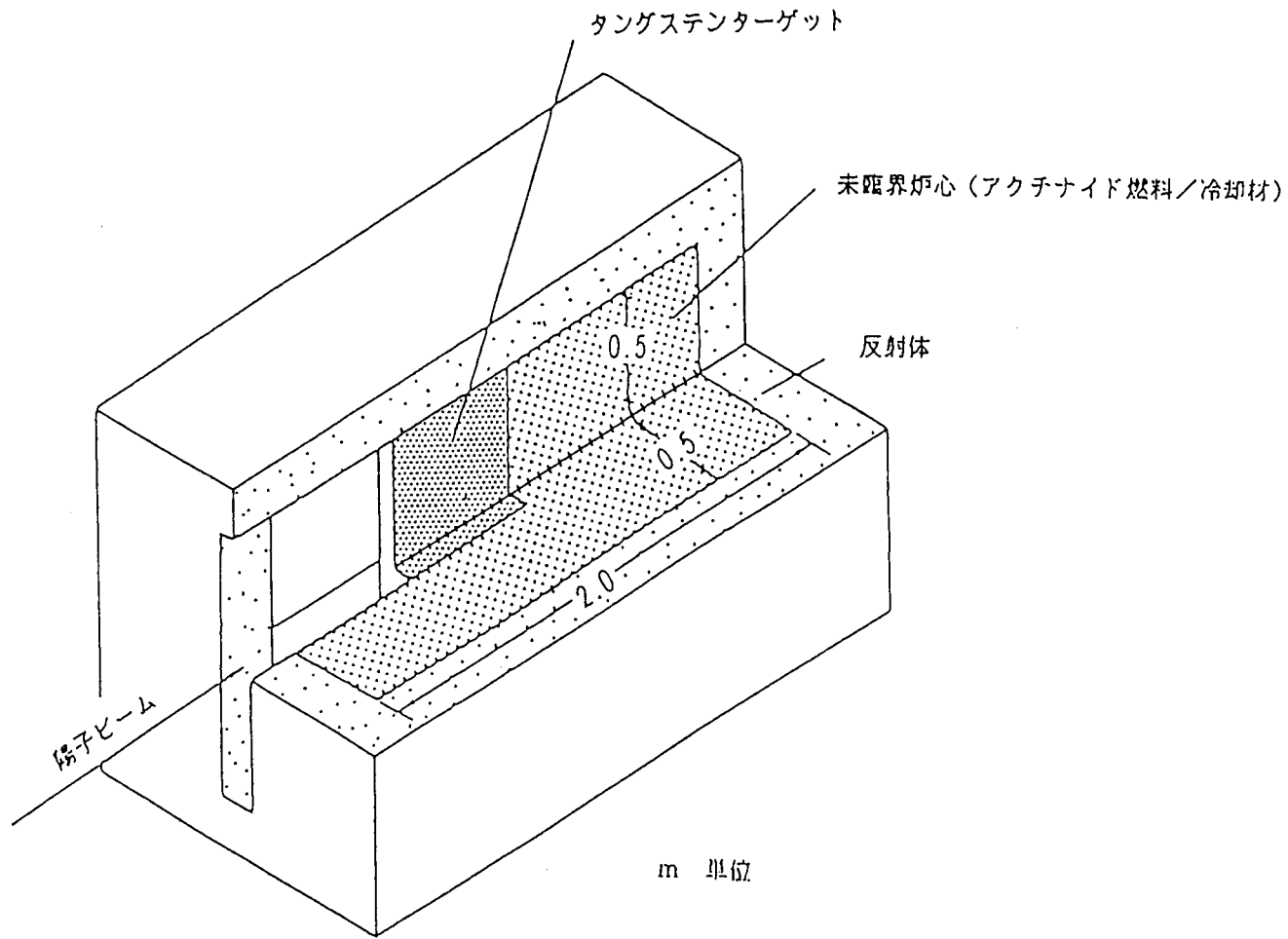




第3図 核破砕発生中性子数の入射陽子エネルギー変化

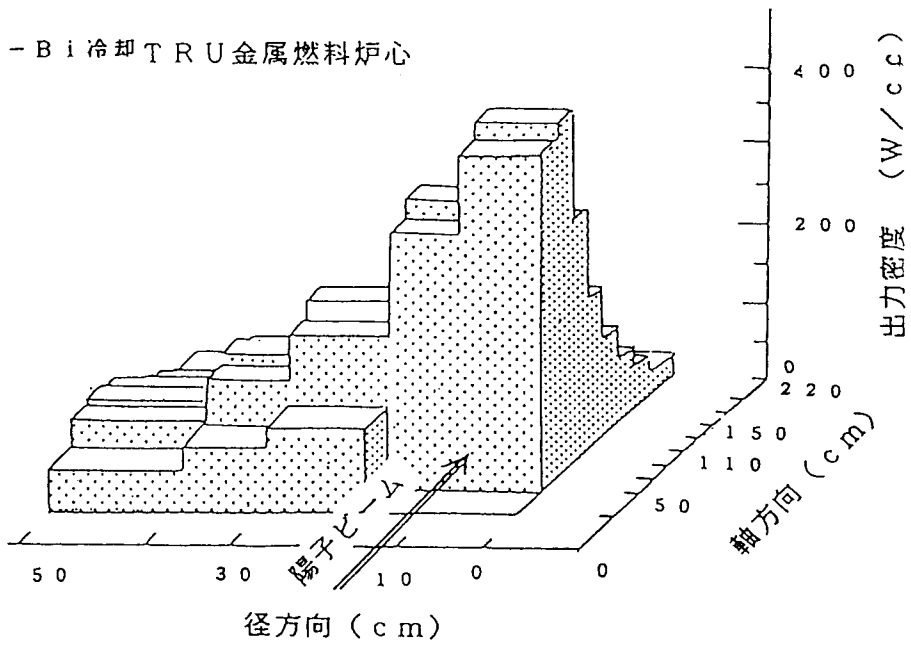


第4図 加速器・未臨界炉ハイブリッド型消滅処理プラント図

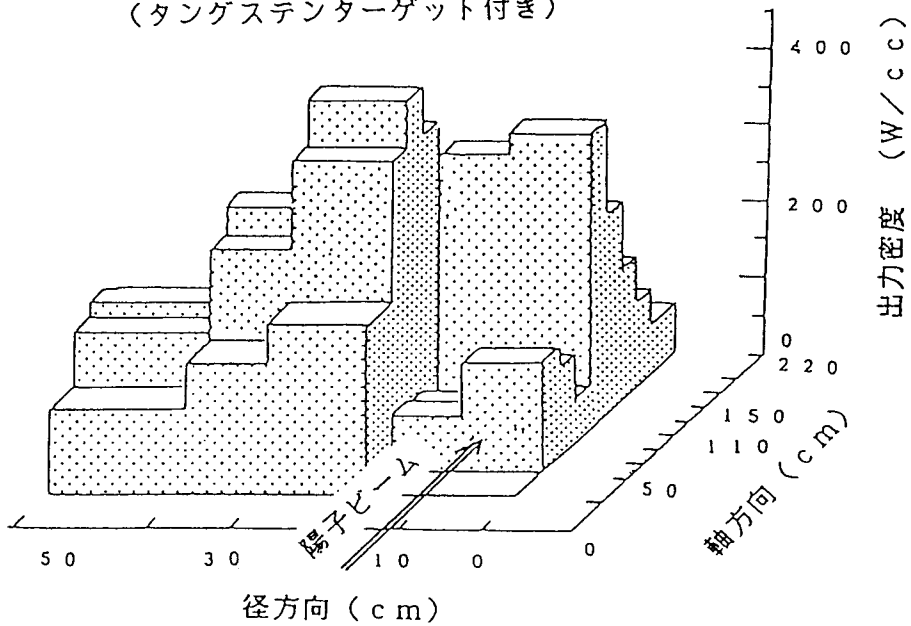


第5図 加速器消滅炉心図 (タングステンターゲット付き)

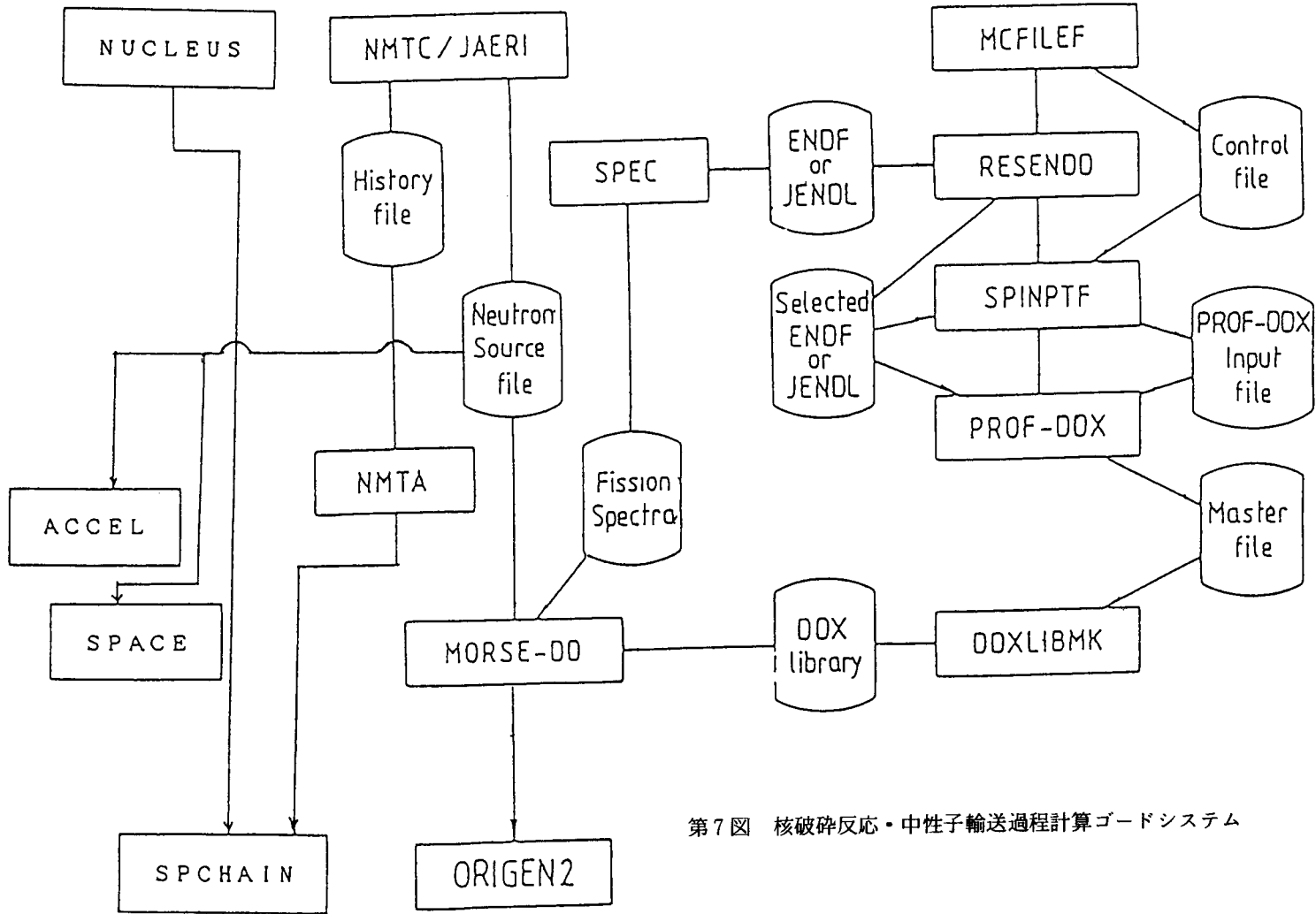
(a) Pb-Bi冷却TRU金属燃料炉心



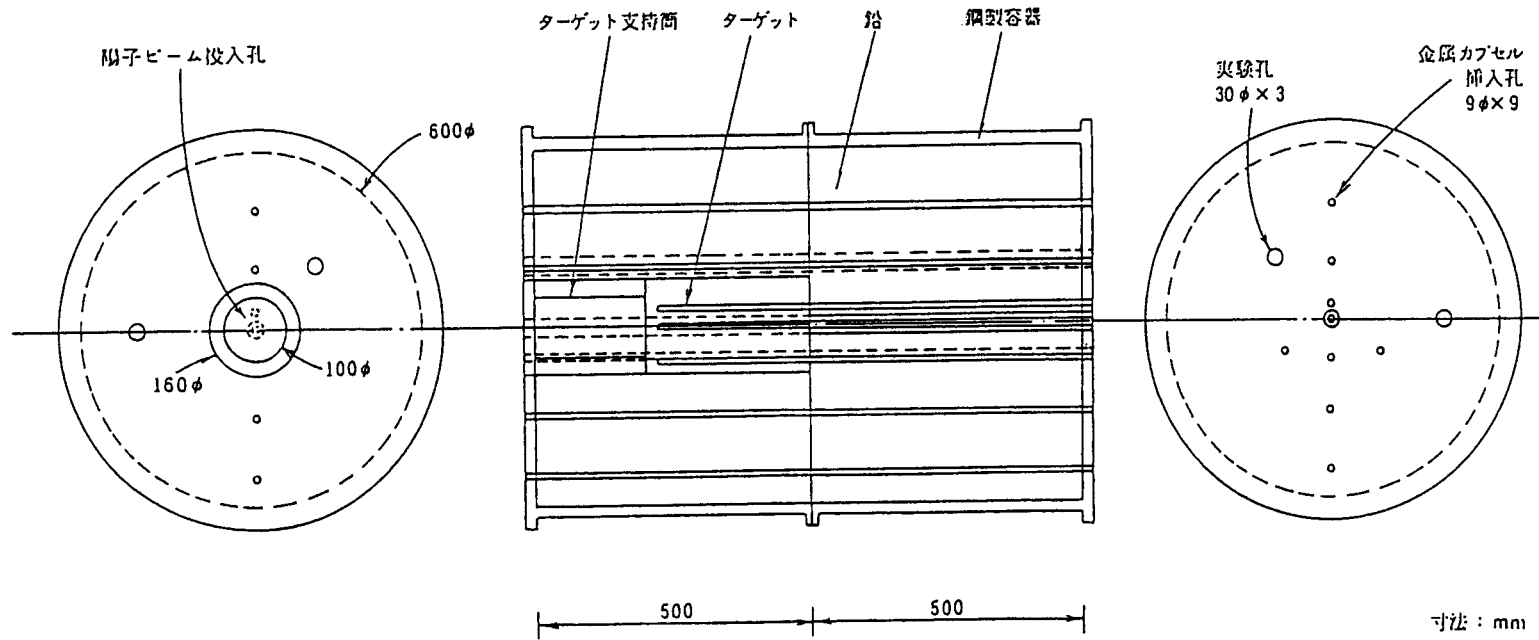
(b) Pb-Bi冷却TRU金属燃料炉心  
(タンゲステンターゲット付き)



第6図 加速器消滅処理炉の出力分布図



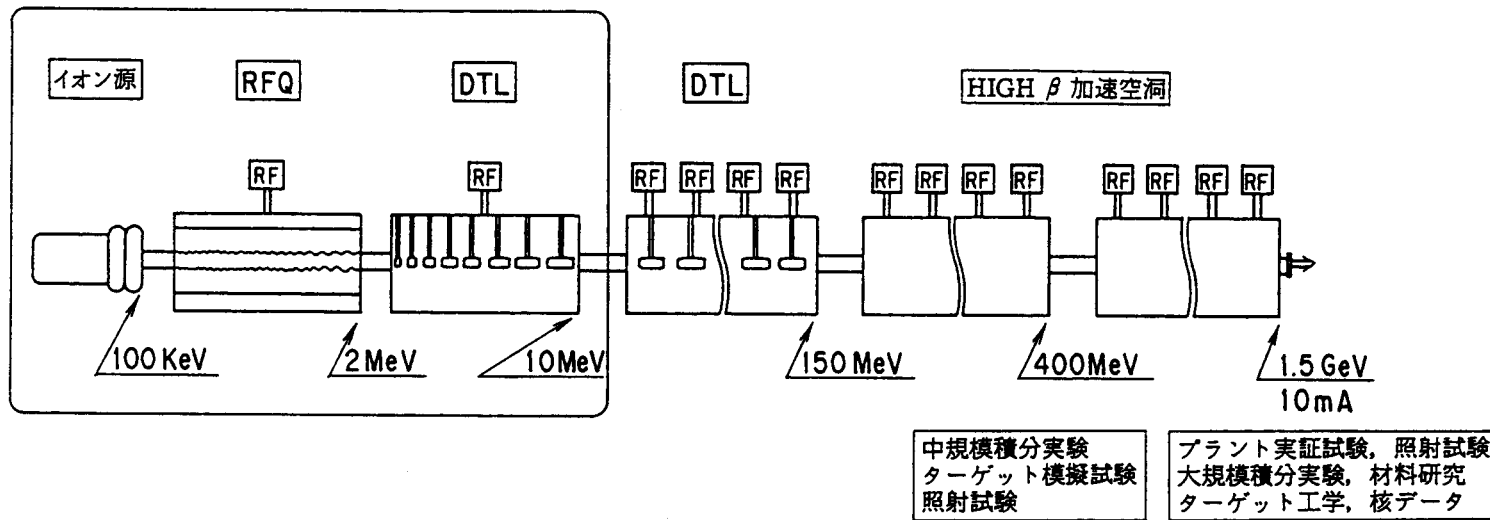
第7図 核破砕反応・中性子輸送過程計算ゴードシステム



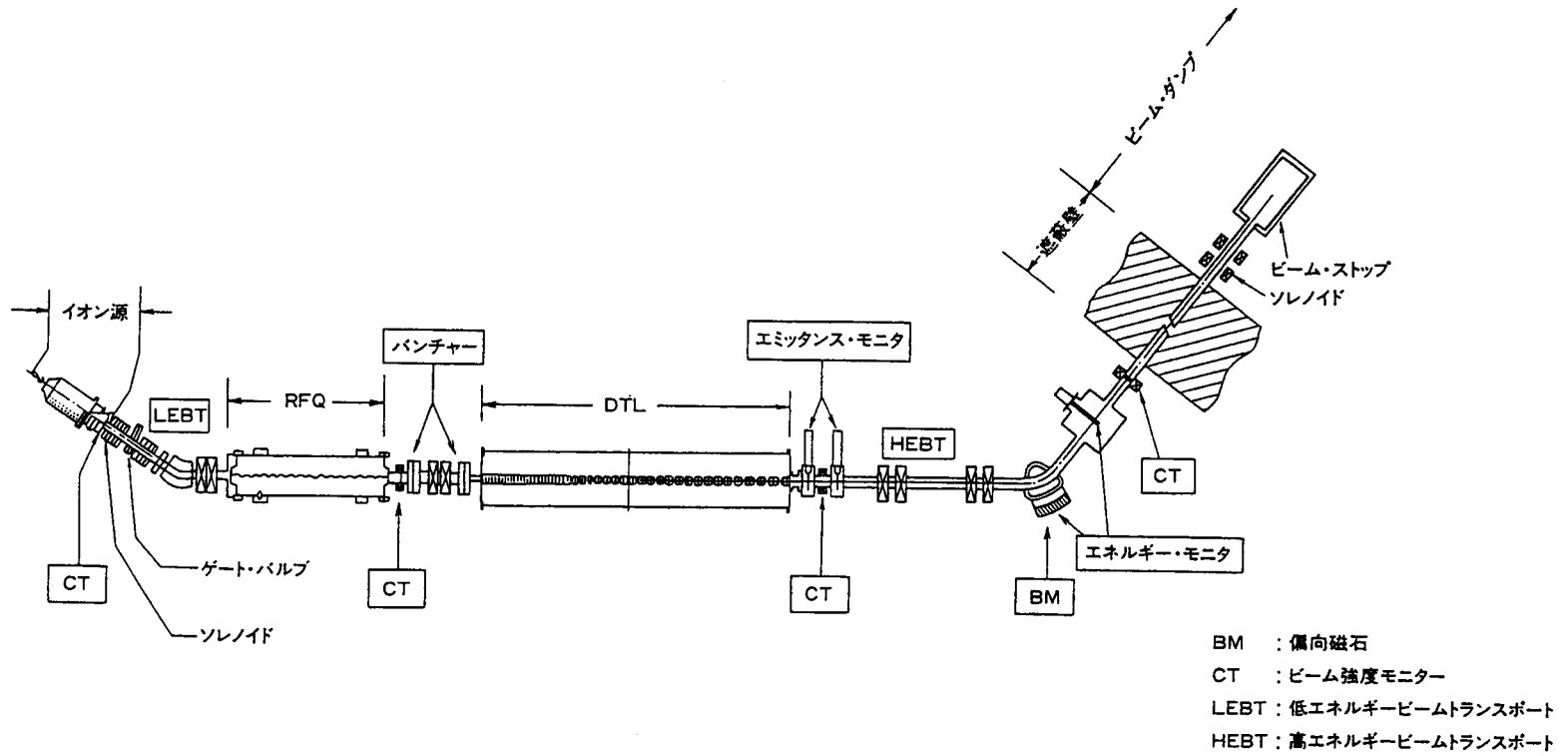
注 陽子ビーム投入孔および金属カプセル挿入孔等は  
すべてSUSライニング施工する。  
鉛体系全体を傾斜角可変の架台上に固定する。

第8図 陽子核破碎実験用鉛体系図

加速器要素技術



第9図 工学試験用加速器



第10図 技術開発用加速器 (10MeV, 10mA)