解説

高出力イオンビーム開発の最前線

(日本原子力研究所) 奥村 義和

核融合炉を目指して開発の進められている大電流負イオン源の開発と、オメガ計画の一環として計画されている大強度線形加速器用の高輝度イオン源の開発を例にとり、高出力イオンビーム発生技術について概説する。

これらの計画はいずれも目標とするビーム出力が数10 MW に達し、現在の高出力イオンビーム応用技術の限界に位置するものである。そのためイオン源に課せられる要求も厳しく、殊に大電流密度のイオンビームを極めて収束性よく発生するという点では従来に例をみない。

I. はじめに

およそ20年前、核融合プラズマを加熱するために開始された高出力イオン源の開発は、それまでのイオン源の常識を根底から覆した。すなわち、従来大電流といってもただか μA , mA であった電流値は今や数 10 A を越え、MW 級で定常運転の可能なイオン源技術が確立されるに至っている。これらの技術は、日本の JT-60、ヨーロッパ連合(EC)の JET、米国の TFTR 等の大型核融合実験装置において、数 10 MW 級の中性粒子入射装置(Neutral Beam Injector: NBI)として実用化されているばかりでなく、工業的にも半導体製造や材料開発などの先端産業に広応用分野を拓いた。

そして現在、核融合実験炉に向けて高出力負イオン源の開発が精力的に実施されている。従来、通常の正イオンに比べて負イオンは大量に生成することが困難であり、また、その加速に関しても同じ電荷を持つ電子を分離する難しさがあることから、高出力のものは不可能と考えられていた。しかしながら、今では 10 A 級の大電流の水素負イオン源が開発されているのをはじめ、300~400 keV の負イオンビームを効率よく、かつ収束性よく静電加速する技術が開発されている。これらの技術革新を背景に、JT-60 においては 500 keV の重水素負イオンビームを用いた NBI を建設中である⁽¹⁾。この装置に用いる負イオン源は直径 2 m、高さ 1.7 m の超大型のものであり、単体で

500 keV, 22 A (11 MW) の負イオンビーム出力を予定している⁽²⁾。

また近年、高エネルギー加速器の大強度化が課題となっている。例えば、「オメガ計画」(Options Making Extra Gains of Actinides and Fission Products: OMEGA)の一環として計画されている核破砕用の大強度陽子加速器⁽³⁾では、工学実証段階で 1.5 GeV, 10 mA, CW の出力が要請されており、これは上述の NBI とあわせて高出力イオンビーム技術の極限に位置するものである。現在、その基盤技術を確立するため技術開発用加速器の開発が進められているが、これに必要な大電流で収束性のよいイオンビームの生成にも高出力イオン源の技術が応用されている。

本稿では、まず高出力イオンビーム生成のための基礎知識として、正、負のイオン生成法と大電流イオンビームの加速法について述べ、その最新の開発例として NBI 用の大電流負イオン源の開発と大強度陽子加速器用の高輝度イオン源開発の現状について概説する。

II. 高出力イオンビーム生成法

1. 大型プラズマ源

高出力のイオンビームを生成するためには、ま

Recent Status of the Development of Intense Ion Beams: Yoshikazu OKUMURA.

(1993年 8月2日 受理)

に必要な領域に、十分な密度のイオンを、安定に、長時間、効率よく生成しなければならない。後述するように、単位面積あたりに引き出し得るイオン電流密度は、空間電荷制限により上限値がある。そこで、高出力のイオンビームを発生させるためには、広い面積からイオンを引き出し、それを収束させる必要がある。核融合用のイオン源では、必要とされる面積は数 $1,000\text{ cm}^2$ 、イオン電流密度は数 $10\sim$ 数 100 mA/cm^2 に及ぶ。このような広い面積に高密度のイオンを生成しようとする場合、現在、最も優れたイオン生成法は多極磁場型プラズマ源であると思われる。

このプラズマ源は、バケットソースとも呼ばれ、第1図に示すように、引き出し電極の面を除く容器の壁をすべて永久磁石で覆ったものである。永久磁石は隣り合う磁石(の列)が互いに異なる極性になるように配置され、磁気カスプ(磁気ラインカスプ)を形成している。プラズマ容器の壁はアノードとして働く。プラズマ容器中に挿入されたカソードからの高速電子や生成されたプラズマは、この磁気カスプによって閉じ込められて電離効率が高められる。壁での磁気カスプの強さは $1\sim 2\text{ kG}$ と非常に強いが、壁から数 cm 内側では磁場は事実上ゼロとなり、その内側でのプラズマ密度の一様性は極めてよい。プラズマ生成効率も高く、低いガス圧でも安定に放電することから、ガス効率も高くできる。プラズマ源の大きさに関しても特に制限はなく、数 cm の小型のものから 1 m を越えるサイズのものまで開発された実績がある。唯一の欠点は、カソードが主放電室中に挿

入されているため、イオン衝撃やアーキングなどにより損傷を受け易いことである。この問題を克服するために、最近では放電容器中にマイクロ波や数 MHz の高周波を入射してプラズマを生成する研究も行われている。

2. 負イオン生成法

負イオンは原子や分子に余剰に電子が付着したものである。最近、日本においては負イオン源の研究が急速に進み、正イオン源に匹敵する負イオン電流値が得られるようになった。これを背景に、核融合や高エネルギー加速器への用途だけでなく、半導体プロセスなどの物性制御に負イオンビームを用いる研究が注目され始めている。負イオンは電子親和力(約 1 eV 程度)分の負のエネルギー状態にあり、まわりからエネルギーを吸収して容易に付着電子を離すため、正イオンのようにイオン注入の際に表面を帯電させたり化学反応を活性化されることがない。そのため、精密なイオン注入加工や原子間結合の制御が可能であり、新しい技術分野が拓ける可能性がある。

大電流の負イオンを生成し得る方法としては以下の3方式がある。

(1) 荷電交換法

正のイオンビームをアルカリ金属の蒸気中を通すことにより、正イオンに2個の電子を付加して負イオンを得る方法で、容易に大電流が得られる反面、構造が複雑であること、得られるビームの収束性が悪いこと、アルカリ金属の取扱いが面倒であること等の致命的な欠点があり、現在ではほとんど研究されていない。記録としては、米国ローレンスバークレイ研究所(LBL)で 10 keV 、 2.2 A の水素負イオンビームを得た実績がある⁽⁴⁾。

(2) 表面生成法

正イオンや中性粒子を、CsやBa等のアルカリ金属で覆って仕事関数を低くした金属表面(コンパクタ)に入射すると、入射粒子自身や吸着している粒子、またスパッタリングされた粒子が表面で電子を得て負イオンの形で出てくる。この負イオンを加速領域に導いてビームとする方式である。負イオンが表面から飛び出す際に横方向のエネルギーを持つことから、本質的にビーム発散角

第1図 多極磁場型プラズマ源の模式図

が大きいという欠点がある。しかし、比較的簡単に多種類の負イオンが生成できる方法であり、用途は多い。入射粒子として Ar 等のスパッタリング比の大きい粒子を用いて、入射される金属(コンパタ)の材質を変えることにより数10 mA に達する金属負イオンを得ることができる⁽⁵⁾。金属のイオンビームを発生しようとする場合、金属蒸気を用いた放電で正イオンをつくるよりも、この方法によって負イオンビームをつくる方が簡便であるともいえる。

(3) 体積生成法

放電室のなかで生じる各種の原子分子反応過程を利用してプラズマ中に高密度の負イオンを生成し、その負イオンを直接引き出す方式である。水素負イオンの場合、負イオンは主として次の2段階反応により生成される。すなわち、まず分子と高速の電子との衝突により振動励起状態の分子がつけられる。

次に、振動励起状態の分子に1 eV 程度の低速の電子が衝突し、電子付着解離によって負イオンが生成される。

最近では、負イオン生成率を高めるために、放電室中に Cs を導入し、表面生成過程も併用する場合もあるが、その場合にも生成された負イオンはたんプラズマ中に滞在するので、便宜上体積生成法の範疇に入れる。

体積生成法では、H のほか Li についても負イオン生成が確認されている。また、半導体プロセスで用いられるガスの中には Si, Cl, O など負イオンになり易いものが多く、今後、それらの負イオンを大量に生成できる可能性もある。

3. 大電流イオンの引き出し

大電流のイオンビームを引き出す場合には多孔型の電極が使用される。これは、単孔からの引き出し電流が空間電荷制限電流 I_s で制限されてしまうからである。つまり、

$$I_s = \frac{\pi \epsilon}{9} \left(\frac{2e}{M} \right)^{1/2} \left(\frac{2a}{d} \right)^2 V^{3/2}$$

ここで、 M : イオンの質量, a : 孔の半径
 d : 電極間距離, V : 引き出し電圧
 ϵ : 真空中の透電率, e : 電荷

で与えられるが、 V は絶縁破壊の制限から上限があり、また電極のアスペクト比 $(2a/d)$ は良好なビーム光学を保つために通常1以下の値が用いられるので、単孔からの最大電流値は、イオンの種類が決まれば、ほぼ自動的に決まってしまう。それならば多数の単孔を平面的に並べて大電流を引き出そうというのが、多孔型電極の発想である。

最近、イオンプレーティングなど工業的な用途に数10～数100 eV 程度の低エネルギーイオンビームが必要とされているが、引き出し電圧が低いと、引き出し得る電流値はわずかなものになってしまう。これを克服するための方法の一つは、アスペクト比を保ったまま a と d を小さくして、単位面積当りの電極孔の個数を増やすことである。実際に、1 mm 以下の微細構造をもつ電極を用いて300 eV でアンペア級のイオンビームも得られている。

III. 核融合用負イオン源の開発

核融合プラズマを加熱するために数10 MW の粒子ビーム装置が開発されている。この装置はイオン源にて高出力イオンビームを生成し、ガス分子等との荷電交換反応により電氣的に中性な粒子ビームに変換した後、プラズマに入射するものであり、NBI と呼ばれる。現在、原研で稼働中の臨界プラズマ試験装置(JT-60)用のNBIにおいては、28台のイオン源を用いて約100 MW (100 keV, 1,100 A)の水素イオンビームを生成して中性化した後、20～30 MW の中性粒子ビームをプラズマ中に入射している⁽⁶⁾。このNBIに使用されているイオン源は、1基当り100 keV, 40 A の水素イオンビームを10 s 間発生できる大容量のものである。このイオン源は水素以外のビーム種も発生可能であり、He, Ne, N, O, Ar, Xe 等について5～20 A のイオンビームを発生した実績がある⁽⁷⁾。今日、正イオン源に関しては100 keV, 数10 A のイオンビームを準定常的に発生する技術が確立しているといえる。

一方、将来の核融合炉においては、大型で高密

度のプラズマの中心まで粒子ビームを打ち込み、プラズマを効率よく加熱するために、高いビームエネルギーが必要となる。特にトカマク型核融合炉においては、加熱のほかに電流駆動や電流分布制御に用いることが期待されており、このためには従来よりも約1桁高い0.5~2 MeVのエネルギーが必要となる。このような高エネルギーになると、従来の正イオンを用いたのではイオンビームから中性粒子ビームへの変換効率(中性化効率)が極端に低下し、システムとして成立しない。そこで高エネルギー領域でも60%以上の中性化効率を持つ負イオンビームを用いることが不可欠となる。

現在、日本、米国、EC、ロシアの4極の国際協力のもとに工学設計とR & Dが進められている核融合実験炉ITERでは1.3 MeV、60 MWの中性粒子ビームを用いたNBIが提案されており、そのためにMeV級で10 A以上の重水素負イオンビームを定常的に生成可能な高出力負イオン源の開発が急務となっている。

1. 大電流負イオン源

この目標に向けて負イオン源の研究が日本を中心に精力的に行われている。負イオン源はサイクロトロンやタンデム加速器の入射器として古くから用いられていたが、その電流値は高々mAオーダーであり、ビームの収束性の観点からも使用に耐えるものではなかった。負イオン源を用いたNBIを現実的に設計することが可能となったのは、水素負イオンの生成法として体積生成法が有効であることが実証され、多極磁場型プラズマ源と多孔型電極を組み合わせるアンペア級の負イオンビームを安定にビーム収束性よく生成できるようになってからである⁽⁶⁾。現在では、10 A級の負イオンビームを十分な電流密度のもとで発生できるまでになっている。

第2図に、原研で開発された大電流負イオン源の断面図を示す。負イオンは多極磁場型プラズマ源中で前述の体積生成過程で生成される。さらにこのイオン源では、プラズマ源に面した1枚目の電極(プラズマ電極)表面をごく少量のCs(~100 mg

第2図 体積生成型負イオン源(原研)⁽⁹⁾
10A, 50keVの水素負イオンビームを発生することができる。

程度)で覆うことによって仕事関数を下げ、表面生成過程も利用することによって 38 mA/cm^2 という高い負イオン電流密度を得ている。生成された負イオンは直径 9 mm の孔434個をもつ多孔型電極によって引き出され、 10 A の水素負イオンが 50 keV まで加速される⁽⁹⁾。この時、負イオンと同じ電荷をもつ電子が同時に引き出されるが、2枚目の電極(引き出し電極)に永久磁石を埋め込み電子を選択的に曲げて取り除く構造となっている。

この負イオン源の運転パルス幅は電源容量の問題から 0.1 s に制限されていたが、同じ基本構造を持つ小型の負イオン源においては実用的な電流密度 ($\sim 10 \text{ mA/cm}^2$) の水素負イオンビーム (50 keV , 0.3 A) が24時間連続生成され、長時間安定に動作することも実証されている⁽¹⁰⁾。

2. 負イオンビームの加速

今後の負イオンビーム開発の最大の課題は、アンペア級の負イオンビームを数 100 keV 以上に加速することである。負イオンに限らず、アンペア級の荷電粒子を 200 keV 以上のエネルギーに加速した例は世界に未だなく、全く新しい技術領域を拓く必要がある。さらに負イオンビームの場合には、電子を抑制しつつ負イオンのみを選択的に加速しなければならないという難しさもある。

加速方式としては、効率を考慮すれば、現段階では静電加速方式しかない。すなわち、高電圧を負イオン生成部と接地電極の間に印加して負イオンを静電的に加速する方式であるが、この場合、電極間の絶縁破壊電圧 $V(\text{kV})$ は距離 $d(\text{mm})$ と $V = Kd^{0.55}$ の関係(実験式: K は $20 \sim 50$)があり、ある電界強度のもとで高電圧を印加するには単ギャップよりも多段のギャップで電圧を分担する方が有利である。また、負イオンと同時に引き出された電子や、負イオンと残留ガスとの相互作用の結果発生した電子を曲げて取り除くためにも、多段にして、磁場によって電子を各段で曲げ処理する必要がある。以上から1段当り $150 \sim 200 \text{ kV}$ の電圧をもつ多段の静電加速系が開発されている。

原研においては、2段の静電加速系をもつ負イオン源を用いて 350 keV , 0.2 A , 1 s の水素負イ

オンビームが得られている⁽¹¹⁾。このイオン源では直径 14 mm の孔9個をもつ多孔型電極を用いており、電流密度は 14 mA/cm^2 に達する。また、米国 LBL では四重極電場によってビームを収束しながら加速する静電四重極(ESQ)加速器が開発されており、日米協力のもとで 0.1 A 級の水素負イオンビームを 200 keV に加速する共同実験が行われている。

何 10 A というビームを MeV 以上のエネルギーに加速できることを原理的に実証するためには、少なくとも 1 A のビームを 1 MeV に加速する必要がある。この原理実証を行うため、新たな試験装置が原研において建設中である。 MeV 級イオン源試験装置と名付けられたこの装置は、 1 MW 出力の Cockcroft-Walton 型電源を有し、5段の静電加速系を持つ負イオン源を用いて 1 MeV , 1 A 級の水素負イオンビームを準定常的に生成することを目指している。

高周波四重極(RFQ)ライナックなどの高周波加速は、 1 MeV 程度のエネルギーにおいては、効率を考えると有利とはいえない。また、現在までに平均電流 0.1 A 以上のビームを加速した実績もない。しかし、後述するように加速器の大強度化の研究が進んでおり、将来的には加速周波数を選べばアンペア級のビーム加速も可能と考えられる。また、ビームローディングを高めて、ダイナミックな加速方式を工夫すれば、効率を大幅に高められる可能性もある。高周波加速を採用できれば、ビームエネルギーを 2 MeV 以上上げて電流駆動効率を高めることができるほか、NBI を格段に小型化できるという大きな利点がある。

3. ビーム収束性

核融合炉において、NBI のイオン源は放射化の問題や保守スペースを確保するため、炉本体から数 10 m 離れた位置に設置され、ビームは細い入射管を通してプラズマ中に入射される。効率のよい入射を行うためにビームの収束性への要求は厳しく、 0.3° 以下の小さなビーム発散角が要求される。通常のイオンビームの発散角は数度であるので、1桁以上高い収束性が要求される訳である。しかも、 10 A を越える大電流のビームを小

さな発散角にそろえるのは容易ではない。

良いビーム収束性を得るには、幾つかの必要条件がある。すなわち、

- (1) 生成されるイオンの熱運動が小さいこと
- (2) 安定な引き出し面が形成されること
- (3) 加速電界の形状と強さが最適化されていること
- (4) ビーム輸送部の空間電荷が中和されていること

である。(1)は負イオン生成法に関わり、(2)に関しては引き出し面近傍のプラズマに不安定性などの振動がないことが重要である。

多極磁場プラズマ源を用いた体積生成型負イオン源の場合、生成される負イオンの運動エネルギーは0.5 eV程度と低く、また強い磁場が存在しないので、静かなプラズマからの引き出しが可能である。さらに、負イオンの場合、正イオンと異なりビーム輸送部の空間電荷の中和が容易である。ビームは残留ガスと衝突してビームプラズマを作るが、負イオンの場合にはビームプラズマ中のイオンの保存時間が長く、低ガス圧でも容易に中和できるからである。したがって、(3)のビーム光学の最適化を行うことによって極めて収束性のよいビームを発生できる。現在では実際に、写真1に示すように、レーザー光線のように高真空中を直進する負イオンビームが得られるまでになっている。最小発散角は 0.1° 以下であり、十分な電流密度のもとでも 0.3° 以下のビーム発散角が得られている。

写真1 ビームターゲット(写真右端)に衝突する負イオンビーム

負イオンビームはレーザー光線のように直進し、ターゲット直前のビーム径は引き出し電極の孔の直径にほぼ等しい。

4. 負イオン NBI 計画

負イオン源開発の最近の目覚ましい進展を背景にして、日本では2つの負イオン NBI 計画が進められている。1つは JT-60 用 500 keV, 10 MW の NBI⁽¹⁾、もう1つは大型ヘリカル装置(LHD)用の 250 keV, 20 MW の NBI 計画である⁽¹²⁾。JT-60 用 NBI は平成4年度から電源や負イオン源の製作が開始されており、世界で初めての負イオン NBI として平成6年度からのビーム入射を目指している。

第3図に、JT-60 用の負イオン源の鳥瞰図を示す。直径が約2 m、高さ約1.7 mの超大型のイオン源である。負イオンは多極磁場型プラズマ源の中で生成され、110 cm×45 cmの領域から3段の静電加速系を用いて22 Aの重水素負イオンビームを500 keVに加速する⁽²⁾。

第3図 JT-60 負イオン NBI 用の負イオン源
500keV, 22Aの重水素負イオン
ビームの出力を予定している。

IV. 大強度加速器用イオン源

「オメガ計画」の一環として、原研では放射性廃棄物の消滅処理に関わる一連の工学試験を行うため、1.5 GeV、平均電流 10 mA の陽子線形加速器である工学試験用加速器(ETA)の建設を計画している。この出力パワーは世界に現存する大強度陽子加速器と比較しても1~2桁高く、これまでに類のない大規模なものとなる。そこで、建設に必要な基礎技術を開発するため、ETAの初段階

に相当する10 MeV, 平均電流10 mA の技術開発用加速器(BTA)の開発を進めている⁽³⁾。

加速器の大強度化に伴い, 加速途中のわずかなビーム損失も, 過大な熱負荷やビームダクトの放射化など深刻な問題を引き起こす。そのため, 大電流のビームをいかに高い透過率を保ったまま加速するかが, ETA などの大強度加速器の建設の鍵となる。このため, まずイオン源において大電流で質の良い陽子ビームを発生することが極めて重要である。

BTA 用のイオン源で目標とする基本性能を第1表に示す。エミッタンスはビーム粒子の位置と進行方向を位相空間中で表わす時にビーム粒子の占める面積であり, ビームの収束性を表わす量である。また, プロトン比は出力される水素イオンビーム中に含まれる陽子の割合である。従来の加速器用イオン源と比較して, エネルギー, 電流値とも格段に大きく, それを定常的に, ビームの収束性よく, かつ高いプロトン比のもとで発生する必要がある。

第1表 BTA イオン源の基本性能

ビームエネルギー	100 keV
ビーム電流	120 mA
デューティー	CW
規格化エミッタンス	0.5 π mm. mrad
プロトン比	90%以上
不純物量	1%以下

第4図に, BTA 用イオン源⁽¹³⁾の断面図を示す。多極磁場型プラズマ源と2段加速系をもつイオン源である。多極磁場型プラズマ源の特徴である一様性の良さ, 放電の安定性, 高いガス効率, 運転の容易さは加速器用のイオン源にとって好都合なものであり, 特に, 収束性のよいビームを得るために, 引き出し面に磁場がなく, 高密度の静かなプラズマを得ることのできる多極磁場型プラズマ源は最適といえる。また, 定常運転のためにも十分な冷却構造をとることができる有利さがある。このイオン源はまた, プロトン比を高めるために引き出し孔以外の放電室全体を強いカスプ磁場で覆い, 水素分子イオンの解離を促進する構造となっている。最高プロトン比は90%に達する見込みであり, このような高いプロトン比は多極磁

場型プラズマ源において初めて得られるものである⁽¹⁴⁾。

第4図 大強度陽子線形加速器(BTA)用の高輝度イオン源

このイオン源は, すでに初期試験⁽¹⁵⁾を終了しており, これまでに 100 keV, 140 mA の水素イオンビームを安定に発生することに成功している。ビーム収束性に関してもビーム発散角 0.5° , エミッタンス 0.5π mm.mrad (90%) という目標を満足する値を得ている。また, プロトン比に関しても85%以上あることが確認されており, 後段の高周波四重極(RFQ)ライナックとの組合せ試験に向けて準備が整っている。

将来的には, 正イオンビームに代えて負イオンビームを用いることも検討に値する。BTA 用のイオン源は磁場形状と電極の一部構造を変更することによって体積生成型負イオン源としても機能するように設計されており, 要求される性能を負イオンビームによって達成できる十分な見通しがある。負イオンビームの場合, イオン温度が低いいためビーム収束性がよく, 引き出し面での電流密度は低くても多孔型電極からのビームを束ねることによりエミッタンスを過大にすることなく大電流化できる。また, 加速器の大電流化に伴い, イオン源から RFQ までの低エネルギービーム輸送部での空間電荷によるエミッタンスの悪化が問題となるが, 負イオンビームの場合には空間電荷の中和が容易であり, レンズなしでも高真空中を輸送することが可能である。負イオンと正イオンを高周波電界の逆位相に乗せて同時加速できる可能性もある。

V. お わ り に

高出力イオンビームの発生技術と開発の現状について概説した。イオンビームは核融合プラズマの加熱や高エネルギー加速器などの科学技術分野への用途に限らず、イオン注入、イオンビーム加工、機能性薄膜製造、新素材開発など工業的に広い応用範囲をもっている。本稿においても、それらの工業的用途を意識しながら負イオン源や大型プラズマ源、高エネルギービーム加速などの新技術について重点的に述べた。

ひと昔前には、想像もできなかったメートル級の大型イオン源、10A級の負イオン源、MeV級のイオンビームが現実のものになろうとしている。これらの技術は、今後とも核融合や高エネルギー加速器の研究開発を支えていくばかりでなく、広く産業界にも応用されて新しい先端的应用分野を拓く可能性をもつものである。今後、産業界からの要請にも耳を傾けながら開発を進めていく必要があると思われる。

— 参 考 文 献 —

- (1) KURIYAMA, M., *et al.* : *Proc. 17th Symp. on Fusion Technology*, Rome, (1992).
- (2) OKUMURA, Y., *et al.* : *Proc. 6th Int. Symp. on Production and Neutralization of Negative Ions and Beams*, Brookhaven, New York, (1992).
- (3) MIZUMOTO, M., *et al.* : *1992 Linear Accelerator Conf. Proc.*, Ottawa, Canada, AECL-10728, 749 (1992).
- (4) HOOPER, E.B., POULSEN, P., PINCOSY, P.A. : *J. Appl. Phys.*, **52**, 7027 (1981).
- (5) MORI, Y., *et al.* : *Nucl. Instrum. Methods*, **A273**, 5 (1988).
- (6) MATSUDA, S., *et al.* : *Fusion Eng. Des.*, **5**, 85 (1987).
- (7) TANAKA, S., *et al.* : *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **B37/38**, 128 (1989).
- (8) 奥村義和 : 核融合研究, **60**, 329 (1989).
- (9) OKUMURA, Y., *et al.* : *Proc. Fusion Technology, Rome*, 1026 (1991).
- (10) OKUMURA, Y., *et al.* : *Rev. Sci. Instrum.*, **64**, 2708 (1992).
- (11) MIZUNO, M., *et al.* : Ref.(2).
- (12) IIYOSHI, A. : *Proc. 13th Symp. on Fusion Engineering*, Knoxville, 1007 (1989).
- (13) OKUMURA, Y., WATANABE, K. : *JAERI-M* 92-024, (1992).
- (14) OKUMURA, Y., HORIIKE, H., MIZUHASHI, K. : *Rev. Sci. Instrum.*, **55**, 1 (1984).
- (15) OGURI, H., *et al.* : *JAERI-M* 92-200, (1992).

☆中性子遮蔽設計ハンドブック☆

「放射線挙動工学」研究専門委員会 成果報告書

1993年4月末発行(限定出版) 発売中

A4判オフセット印刷, 616頁, 会員**6,000円**(定価8,000円), 千600円

◎ご希望の方は学会事務局へ。(03-3508-1261; FAX 03-3581-6128)

原子力施設や放射線取扱施設の遮蔽設計を行う上で、中性子はγ線と並んで重要な放射線である。本学会では1988年に「ガンマ線遮蔽設計ハンドブック」を上梓し、ご好評を頂いた。今般、「放射線挙動工学」研究専門委員会の4年間にわたる活動成果の一部として、本ハンドブックをここに刊行するものである。本書は遮蔽設計の実務に携わるエンジニアを対象として、最近の遮蔽設計例も織り込んで編集されている。設計の現場で直面するであろう様々な問題に対して、本書が的確な指針となることを期待するものである。