

JAERI-M  
87-042

加熱用中性粒子ビームを用いた能動法によるイオン温度測定

1987年3月

三浦 幸俊・松田 俊明・山本 新・前野 勝樹
竹内 浩・星野 克道・河西 敏・河上 知秀
川島 寿人・的場 徹・松本 宏・森 雅博
小田島和男・小川 宏明・小川 俊英・太田 完治*
大塚 英男・仙石 盛夫・荘司 昭朗・鈴木 紀男
玉井 広史・上杉 喜彦・山本 巧・山内 俊彦

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

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公開している研究報告書です。  
入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）  
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城  
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.  
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department  
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,  
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1987

---

編集兼発行	日本原子力研究所
印刷	日立高速印刷株式会社

加熱用中性粒子ビームを用いた能動法によるイオン温度測定

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部

三浦 幸俊・松田 俊明・山本 新<sup>\*</sup>・前野 勝樹<sup>\*\*</sup>  
竹内 浩<sup>\*</sup>・星野 克道・河西 敏・河上 知秀  
川島 寿人・的場 徹・松本 宏・森 雅博  
小田島和男・小川 宏明・小川 俊英・太田 完治<sup>\*</sup>  
大塚 英男・仙石 盛夫・荘司 昭朗・鈴木 紀男  
玉井 広史・上杉 喜彦・山本 巧・山内 俊彦

( 1987年2月13日受理 )

重水素プラズマに水素中性粒子ビームを入射した追加熱実験時に、そのビームライン上で荷電交換反応が増加することを利用した能動法によるイオン温度測定を行なった。測定には、E//B型質量分離中性粒子エネルギー分析装置を用いた。測定系の幾何学的条件より、得られたイオン温度と中性粒子エネルギースペクトラムは、プラズマ中心からの情報ではなく、中心より約1/3外側の情報であった。プラズマのバルクイオンである重水素のエネルギースペクトラムはマックスウェル分布で、イオン温度としては約350 eVから約900 eVまで上昇していた。またこの測定法からは、イオン温度だけでなく、局所的な重水素と水素の密度比、入射しているビーム粒子の密度も、簡単にしかもS/N良くモニタすることができ、中性粒子ビーム入射による追加熱実験時には有効な測定手段であることが確認された。

---

那珂研究所：〒311-02 茨城県那珂郡那珂町大字向山801-1

+ 臨界プラズマ研究部 ++ JT-60試験部

• 三菱電機(株)

Active Ion Temperature Measurement with Heating Neutral Beam

Yukitoshi MIURA, Toshiaki MATSUDA, Shin YAMAMOTO, Masaki MAENO,  
Hiroshi TAKEUCHI, Katsumichi HOSHINO, Satoshi KASAI,  
Tomohide KAWAKAMI, Hisato KAWASHIMA, Tohru MATOBA, Hiroshi MATSUMOTO,  
Masahiro MORI, Kazuo ODAJIMA, Hiroaki OGAWA, Toshihide OGAWA,  
Kanji OTA\*, Hideo OHTSUKA, Seio SENGOKU, Teruaki SHOJI,  
Norio SUZUKI, Hiroshi TAMAI, Yoshihiki UESUGI, Takumi YAMAMOTO  
and Toshihiko YAMAUCHI

Department of Thermonuclear Fusion Research,  
Naka Fusion Research Establishment,  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 13, 1987)

When the heating neutral-beam (hydrogen beam) is injected into a deuterium plasma, the density of neutral particles is increased locally. By using this increased neutral particles, the local ion temperature is measured by the active charge-exchange method. The analyzer is the E//B type mass-separated neutral particle energy analyzer and the measured position is about one third outside of the plasma radius. The deuterium energy spectrum is Maxwellian, and the temperature is increased from 350eV to 900eV during heating. Since the local hydrogen to deuterium density concentration and the density of the heating neutral-beam as well as the ion temperature can be obtained good S/N ratio, the usefulness of this method during neutral-beam heating is confirmed by this experiment.

Keywords: Ion Temperature, Heating Neutral-beam, Active Method,  
Charge-exchange, Hydrogen to Deuterium Concentration.

---

\* On leave from Mitsubishi Electric Co.

## 目 次

1. 序 論 .....	1
2. 測定原理 .....	2
2.1 NB入射系と測定系 .....	2
2.2 測定原理と得られるプラズマに関する情報 .....	2
3. 測定結果 .....	5
3.1 測定位置について .....	5
3.2 能動中性粒子エネルギー Spektrum とイオン温度 .....	7
3.3 中性粒子密度と重水素, 水素の密度比 .....	8
4. 結果の考察 .....	9
5. ま と め .....	10
謝 辞 .....	11
参考文献 .....	12

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Active Charge-Exchange Method .....	2
2.1 NB Injection System and Diagnostics System .....	2
2.2 Active Charge-Exchange Method and Plasma Parameter .....	2
3. Experimental Results .....	5
3.1 Measured Position .....	5
3.2 Active Charge-Exchange Energy Spectrum and Ion Temperature ....	7
3.3 Neutral Density and Hydrogen to Deuterium Concentration .....	8
4. Discussion .....	9
5. Summary .....	10
Acknowledgements .....	11
References .....	12

## 1. 序 論

トカマクプラズマにおけるイオン温度測定は、一般的に受動的な中性粒子エネルギー分析<sup>(1,2)</sup>、不純物イオンのドップラー広がり<sup>(3)</sup>、重水素-重水素の核融合反応により発生する 2.45 MeV の中性子フラックス<sup>(4)</sup>等により行なわれている。しかしながら、実験装置が大型になりますます高温高密度化されたプラズマのイオン温度決定は、上記方法では次第に困難になってくる。なぜなら、受動的な中性粒子エネルギー分析法では、中心で発生する中性粒子がプラズマ外に出る前にイオン化されてしまい得られるエネルギースペクトラムがプラズマ中心の情報を含まなくなるからである。不純物イオンのドップラー広がりを利用する方法においては、不純物によるプラズマの冷却を低減させるために壁材としますます低 Z 材を使用するようになることから、中心のイオン温度を決定するような不純物イオンがいつでも存在するとは限らなくなるからである。中性子フラックスからは、重水素密度をプラズマ全体にわたり知らなくては正確なイオン温度を知ることができないこと等の理由による。

これらの状況から大型装置の高温高密度下におけるイオン温度測定法として、中性子フラックス測定ではそのエネルギー分析を行ないドップラー広がりを利用する方法<sup>(5)</sup>、遠赤外線レーザー散乱を利用する方法<sup>(6)</sup>等が考えられているが、現在まだその初期データが出始めているにすぎない。現実的には、イオン温度を測定するための計測用中性粒子ビームにより、入射中性粒子の微小角散乱を用いてイオン温度を求める方法<sup>(7,8)</sup>と入射中性粒子によりプラズマの局所的な位置における中性粒子密度を増加させ荷電交換反応が増加することを利用した方法<sup>(9,10)</sup>が一般的であり、JT-60, TFTR, JET等の大型装置においても計画されている方法である。

中性粒子入射加熱の時に、計測用中性粒子ビームでなく加熱用中性粒子ビーム(NB)によりイオン温度を測定した例は、PDX<sup>(11)</sup>、D-III<sup>(12)</sup>等である。その方法は完全電離した不純物イオンの再結合放射を利用し、その可視域放射光のドップラー広がりを利用してイオン温度を求める方法であった。ここで述べる方法は、NBを用いることは同様であるが、NB(水素中性粒子ビーム)を重水素プラズマに入射する加熱実験時に、NBライン上で荷電交換反応による中性粒子フラックスが増加していることを利用した方法である。E//B型質量分離中性粒子エネルギー分析装置(E//B型分析器)を用いて、重水素と水素の中性粒子フラックスを分離して同時に測定することにより、局所的な位置でのイオン温度をマックスウェル分布をしている重水素のエネルギースペクトラムより得、入射粒子の分布関数を水素のエネルギースペクトラムより得た。この方法はNBの入射角と測定ポートの有無からどの装置でも簡単にできる訳ではないが、JFT-2Mにおいて行なった結果その有用性が実証できた。

第2節には、能動的な手法であるのでNBライン上で発生する中性粒子フラックス測定の原理と、それから得られるプラズマの情報について述べる。第3節には測定結果を記す。第4節にはその考察について述べ、第5節に今回の測定の成果と問題点をまとめる。

## 2. 測定原理

### 2.1 NB入射系と測定系

JFT-2MにおけるNB入射装置は、入射角38度で、プラズマ電流方向へのNB(Co-inj)と反電流方向へのNB(Ctr-inj)の2つがあり、その最大入射パワーは合計で約2MWである。2つのNBは、A系統(A-line)とB系統(B-line)と呼ばれており、プラズマ電流の方向により、どちらか一方がCo-injとなり、もう一方がCtr-injとなる。この状況を図1に示す。測定系はプラズマ中心に接する接線ポートに、E//B型分析器を取り付けた系である。その測定視野は、A系統のNBラインと角度110.8度(図1に示す $\alpha$ )で、プラズマ中心より約12cmのところまで交わり、B系統のNBラインとは角度29.3度で、プラズマ中心の位置で交わっている。またA、B両系統ともにビーム径〔ガウス分布しているビームパワー分布の1/eになる位置(図1に示されている $w$ )〕は約18cm $\phi$ である。

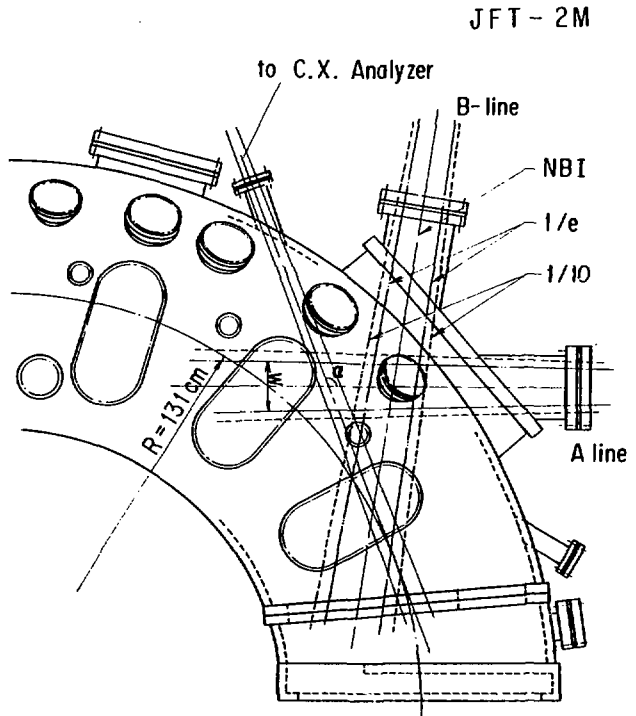
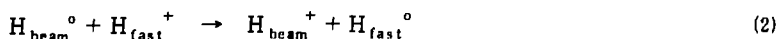


図1 NB入射ラインと測定視野。  
1/e, 1/10はNBパワーがそれぞれ1/e, 1/10になる位置。

### 2.2 測定原理と得られるプラズマに関する情報

NBを入射した時、(1), (2)式の反応で発生する荷電交換中性粒子が増加して測定される。



ここでは、重水素、水素の混合プラズマに水素のNBを入射した場合について考えており、添



字oと+は、それぞれ中性粒子とイオンを示し、beamとfastは、それぞれNB粒子であることと測定される粒子であることを示す。

(1)式あるいは(2)式の反応で、NBラインと測定視野の交差領域で発生するエネルギー $E_i$ の中性粒子フラックス $\Gamma_i^b$ は、イオンの密度とその分布関数をそれぞれ $n_+$ と $g_+(E_i)$ とすると、次式であたえられる。

$$\Gamma_i^b = \nu_o(E_i) n_+ g_+(E_i) w / \sin(\alpha) \quad (3)$$

ここで $w$ と $\alpha$ は、それぞれNBの幅とNB入射ラインと測定視野とが成す角度である。また $\nu_o(E_i)$ は、エネルギー $E_i$ のイオンがNB入射により荷電交換反応を行なう反応率であり次式のようになる。

$$\begin{aligned} \nu_o(E_i) = & \left[ \sum_{j=1,3} \sigma_{cx}(E_{rel}^{i,j}) V_{rel}^{i,j} n_o^j \right] \\ & + \sigma_{cx}(E_{rel}^{i,halo}) V_{rel}^{i,halo} n_o^{halo} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで $\sigma_{cx}$ は荷電交換反応断面積、 $E_{rel}^{i,j}$ と $V_{rel}^{i,j}$ は、それぞれエネルギー $E_i$ のイオンと $j$ 成分のNB粒子との相対エネルギーと相対スピードであり、 $n_o^j$ はプラズマ中での減衰も考えた測定位置における $j$ 成分のNB粒子の密度である。[NBではイオン源より $H^+$ 、 $H_2^+$ 、 $H_3^+$ が引出され、中性化される時はほとんどすべて $H^0$ のNBとなりエネルギーはそれぞれ $E$ 、 $E/2$ 、 $E/3$ となる。JFT-2Mにおけるイオン源では、その成分比を個数比で表すと $N_E : N_{E/2} : N_{E/3} \cong 2 : 2 : 1$ である。] またhaloはハローニュートラルと呼ばれるNB入射により荷電交換反応で発生したイオン温度程度の中性粒子である。 $n_o^{halo}$ はその密度であり、 $E_{rel}^{i,halo}$ と $V_{rel}^{i,halo}$ は、それぞれエネルギー $E_i$ のイオンとハローニュートラルとの相対エネルギーと相対スピードである。

測定はストリッピングセルで中性粒子をイオン化し、そのイオンのエネルギー分析を行なっているため、測定エネルギー $E_i$ の計数率を $C_i^b$ とすると

$$C_i^b = F_i E_i \epsilon_s(E_i) \epsilon_d \Gamma_i^b \exp(-\lambda_i) \quad (5)$$

となる。ここで $\epsilon_s(E_i)$ と $\epsilon_d$ は、それぞれストリッピングセルの効率とイオン検出器の感度であり、 $F_i$ は、測定器の性能と幾何学的なこととで決まる量であり(6)式であたえられる。また $\exp(-\lambda_i)$ は、エネルギー $E_i$ の中性粒子が発生場所からプラズマ外へ出るまでの減衰率であり、単位長さ当たりの $\delta\lambda_i$ が(7)式であたえられる。

$$F_i = \epsilon_c (\Delta\Omega A / 4\pi) (\Delta E_i / E_i) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \delta\lambda_i = & (n_+ \sigma_{cx} V_{rel}^{i,+} + n_e \langle \sigma V \rangle_{ei} + n_+ \sigma_{ii} V_{rel}^{i,+} \\ & + n_j \sigma_{loss} V_{rel}^{i,j}) \delta l / V_i \end{aligned} \quad (7)$$

ここで $\epsilon_c$ は測定器の透過率、 $\Delta\Omega$ は測定系の立体角、 $A$ は測定視野における測定位置の断面積、 $\Delta E_i / E_i$ は測定器のエネルギー分解能である。また(7)式において右辺の第1から4項は、プ

ラズマ中における中性粒子のイオン化率であり、第1項から荷電交換によるイオン化、電子との衝突によるイオン化、イオンとの衝突によるイオン化、不純物との衝突によるイオン化を示し、 $\delta$  は中性粒子がプラズマ外へ出るまでの軌道の単位長さであり、 $V_i$  はエネルギー  $E_i$  の中性粒子のスピードである。

次に(3)式におけるイオンの分布関数  $g_+(E_i)$  が温度  $T$  のマックスウェル分布

$$g_+(E_i) = 2 E_i^{1/2} / (\pi^{1/2} T^{3/2}) * \exp(-E_i/T) \quad (8)$$

とすると(3)~(6)式より  $C_i^b$  は次のようになる。

$$\begin{aligned} C_i^b = & \epsilon_c \epsilon_d (\Delta \Omega A / 4 \pi) (8 / T^3 m_i \pi)^{1/2} n_o^b n_+ \\ & * E_i^2 (\Delta E_i / E_i) \epsilon_s(E_i) \Sigma_{cx}^b \exp(-\lambda_i) \\ & * \exp(-E_i/T) w / \sin(\alpha) \end{aligned} \quad (9)$$

ここで

$$\begin{aligned} \Sigma_{cx}^b = & \{ [\sum_{j=1,3} \sigma_{cx}(E_{rel}^{i,j}) V_{rel}^{i,j} n_o^j] \\ & + \sigma_{cx}(E_{rel}^{i,halo}) V_{rel}^{i,halo} n_o^{halo} \} / (V_i n_o^b) \end{aligned} \quad (10)$$

$$n_o^b = \sum_{j=1,3} n_o^j \quad (11)$$

と定義した。 $\Sigma_{cx}^b$  は、NB入射されている場合の等価的な荷電交換反応断面積であり、 $n_o^b$  は、測定位置におけるNB 3成分の合計密度である。また  $m_i$  は、エネルギー  $E_i$  の中性粒子の質量である。

(9)式における  $C_i^b$  が測定から得られると、それから得られるプラズマに関するいくつかの情報が得られる。それを次の(a)~(c)に示す。

(a) イオン温度(T)

測定エネルギーに依存しない量を定数と考え、(9)式に示される  $C_i^b$  を  $E_i^2 (\Delta E_i / E_i) \epsilon_s(E_i) \Sigma_{cx}^b \exp(-\lambda_i)$  で割ってセミログプロットしたものを、能動中性粒子エネルギー Spektrum ( $f_a^{cx}(E_i)$ ) と定義すると

$$f_a^{cx}(E_i) = 1/n \{ C_i^b / [E_i^2 (\Delta E_i / E_i) \epsilon_s(E_i) \Sigma_{cx}^b \exp(-\lambda_i)] \} \quad (12)$$

となり、(9)式よりマックスウェル分布を仮定すると

$$f_a^{cx}(E_i) = -E_i / T + G \quad (13)$$

となるから、 $f_a^{cx}(E_i)$  をエネルギーに対してプロットすると、その傾よりイオン温度(T)を求めることができる。

(b) 重水素と水素の密度比

E//B型分析器では、重水素と水素を分離して同時に測定しているので、重水素と水素の能動中性粒子エネルギー Spektrum をそれぞれ  $f_{aD}^{cx}(E_i)$  と  $f_{aH}^{cx}(E_i)$  として同時に得るこ

とができる。 $f_{aH}^{cx}(E_i)$  はNB成分が含まれているため温度を決定するのは難しいが、その傾がマックスウェル分布である  $f_{aD}^{cx}(E_i)$  の傾と等しくなるようなエネルギー範囲で温度を決定し(13)式のGを求める。このGを重水素と水素に対し、それぞれ  $G_D$  と  $G_H$  とすると(9)、(13)式より

$$\exp(G_D) = \epsilon_c \epsilon_d (4\Omega A / 4\pi) (8/T^3 m_D \pi)^{1/2} n_o^b n_D \quad (14)$$

$$\exp(G_H) = \epsilon_c \epsilon_d (4\Omega A / 4\pi) (8/T^3 m_H \pi)^{1/2} n_o^b n_H \quad (15)$$

となるので、これらの比を取ること、

$$n_H/n_D = (m_H/m_D)^{1/2} \exp(G_H)/\exp(G_D) \quad (16)$$

より重水素と水素イオンの密度比を求めることができる。

(c) 中性粒子密度とイオン密度

$\epsilon_c$  と  $\epsilon_d$  が較正されていると、イオン温度は(a)により求められるので、(14)式と(15)式より  $n_o^b (n_H + n_D)$  が求められる。ここで  $(n_H + n_D)$  が他の測定(電子密度分布等の測定)より知ることができれば  $n_o^b$  が求められる。また、逆に測定位置における  $n_o^b$  がプラズマ中での減衰から正確に知ることができたならば、 $n_H$  あるいは  $n_D$  の絶対値を求めることができる。

### 3. 測定結果

#### 3.1 測定位置について

2節に記した(5)式の  $C_i^b$  は、NB入射されたことにより測定される計数率である。しかし実際の計測時には、受動的に測定される計数率  $C_i^p$  (プラズマ中に微妙ながら存在するコールドな中性粒子との荷電交換反応でプラズマ外へ出て来る中性粒子の寄与)があり、その和の形でしか測定されない。また  $C_i^b$  も図1に示すように、A、Bの2系統のNBがあるため、同時に入射した場合、A系統NB入射による  $C_{i A-line}^b$  とB系統NB入射による  $C_{i B-line}^b$  の和となる。それゆえトータルの計数率を  $C_i$  とすると、 $C_i$  は次のようになる。

$$C_i = C_{i A-line}^b + C_{i B-line}^b + C_i^p \quad (17)$$

能動中性粒子エネルギー Spektrum と、それから計算されるイオン温度を得るためには、(17)式における右辺の3項をそれぞれ分離しなくてはならないが都合よく

$$C_i \sim C_{i A-line}^b \quad (18)$$

となっているので、その必要がなくなってくる。そのことを以下に示す。(通常の計測用中性粒子ビームを用いた場合は、時間的にモジュレートしたビームを用いて、その分離を行なっている<sup>(13)</sup>)。図2は、NBを3通りの方法により入射した時の、重水素 3.5 keV の計数率  $C_i$  を示す。 $C_i^p$  に関しては、入射ビームが加熱用であるためストリッピングセルのガス圧を約 0.3 m Torr と下げストリッピングの効率を落として使用していることから、 $C_i^b \gg C_i^p$  とすることができ

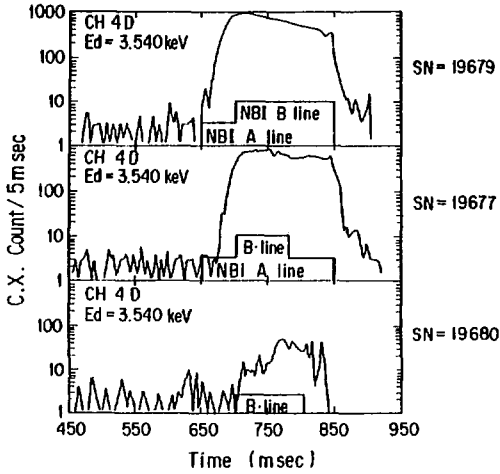


図2 NBを3通りの方法により入射した時の、重水素3.5 keVの計数率。

- (a) A → A + B → off
- (b) A → A + B → A → off
- (c) B → off

る。また  $C_{i A-line}^b \gg C_{i B-line}^b$  となっている主なる原因は、B系統NBラインと測定視野の交差領域で発生する荷電交換中性粒子が測定されるまでにプラズマ中を通過する距離が長いこと、減衰が大きくなることによる。

$\exp(-\lambda_i)$  のパラメータサーベイ (図3) の結果がその様子を示す。ここで  $\exp(-\lambda_i)$  は、

2節における(7)式であたえられるが、第4項における不純物の衝突によるイオン化(不純物との荷電交換反応が主である)は、不純物が少ない場合それほど大きくないと考えられること、また不純物の種類そのプラズマ中での電離状態等によってはすべての断面積が知られていないために計算していない。これらの要因により  $C_i \sim C_{i A-line}^b$  となっていることから、能動法により求められるイオン温度、能動中性粒子エネルギー・スペクトラムは、A, B両系統のNBが入射されている場合でも、A系統NBラインと測定視野の交差領域(約  $a/3$ , ただし  $a$  はプラズマ半径)が測定位置であることを示している。

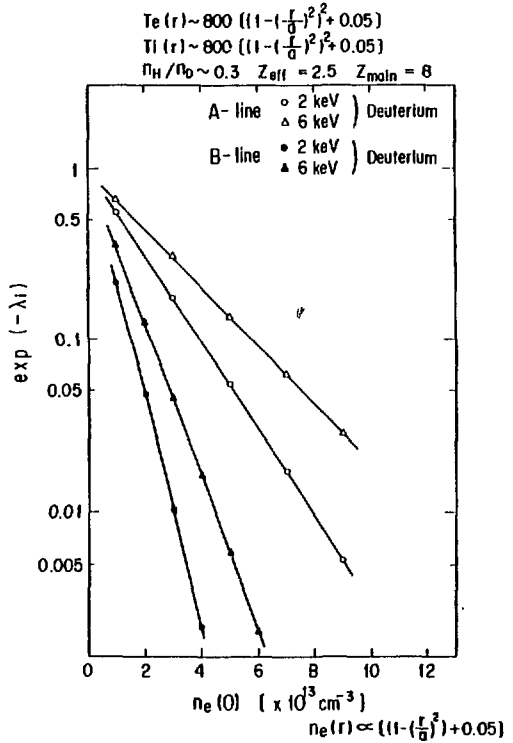


図3  $\exp(-\lambda_i)$  の密度に対する依存性 (計算結果)。(7)式に示される、第4項の不純物によるイオン化は含まれていない。

3.2 能動中性粒子エネルギースペクトラムとイオン温度

トロイダル磁場  $B_t$  が 0.85 T, プラズマ電流  $I_p$  が 240 kA, 線平均の電子密度  $\bar{n}_e$  が, NB 入射前  $1.3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  から, ほぼ入射中直線的に  $3.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  まで上昇している高ベータ実験時に得られた能動中性粒子エネルギースペクトラムを図 4 (a), (b) に示す。図 5 はその時の NB の入射条件であり, A 系統 NB は 650 ms から 200 ms 間入射しており, B 系統 NB は 700 ms より 150 ms 間入射している。両系統 NB とも最大パワーまで立ち上がる時間は約 70 ms である。重水素能動中性粒子エネルギースペクトラムはマックスウェル分布であり, イオン温度は約 350

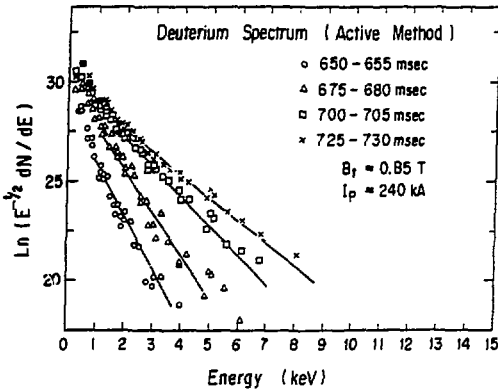


図 4 (a) 重水素能動中性粒子エネルギースペクトラム。

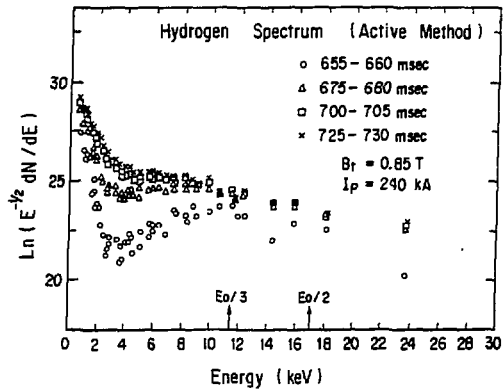


図 4 (b) 水素能動中性粒子エネルギースペクトラム。

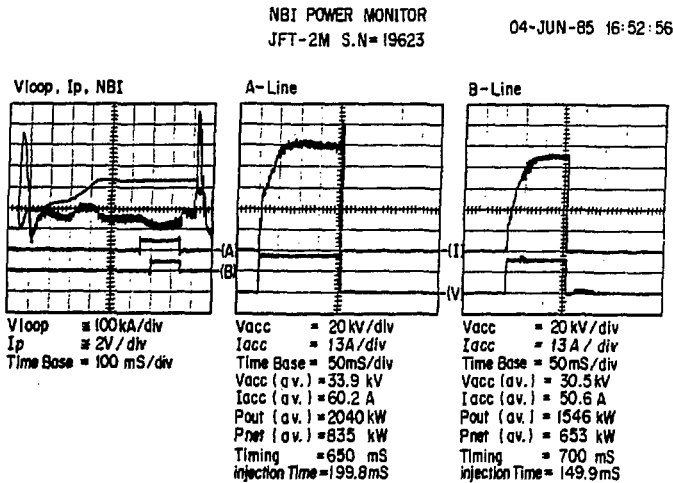


図 5 NB 入射の条件。

eV から 900 eV まで上昇している。水素能動中性粒子エネルギースペクトラムの入射直後には  $E_0/3$ ,  $E_0/2$  のピークが見えるが、パワーを与えながら減速されて、バルクイオンにつながっていく様子が観測される。重水素能動中性粒子エネルギースペクトラムの直線部分より求めたイオン温度の時間変化を図 6 に示す。650 ms ~ 850 ms 以外は、通常の実験的方法で計算したイオン温度である。3.1 に述べたようにストリッピングセルのガス圧を下げているため受動エネルギースペクトラムの高エネルギー部で  $C_i^p$  が小さく、精度はあまり良くないが、連続してつながっている。これは高ベータ実験ゆえ  $B_i$  が低く安全係数が小さいため、中心部では平坦なイオン温度分布をしていると考えられるからである。

### 3.3 中性粒子密度と重水素、水素の密度比

2 節(4), (5)式中の  $\epsilon_c$ ,  $\epsilon_d$ ,  $\Delta\Omega A$  が、現在使用している測定器においては較正されていないので、 $n_0^b n_H$  と  $n_0^b n_D$  の相対的な時間変化だけが測定可能である。

図 7 に  $\ln(n_0^b n_H)$  と  $\ln(n_0^b n_D)$  の時間変化を示す。NB 入射中の重水素能動

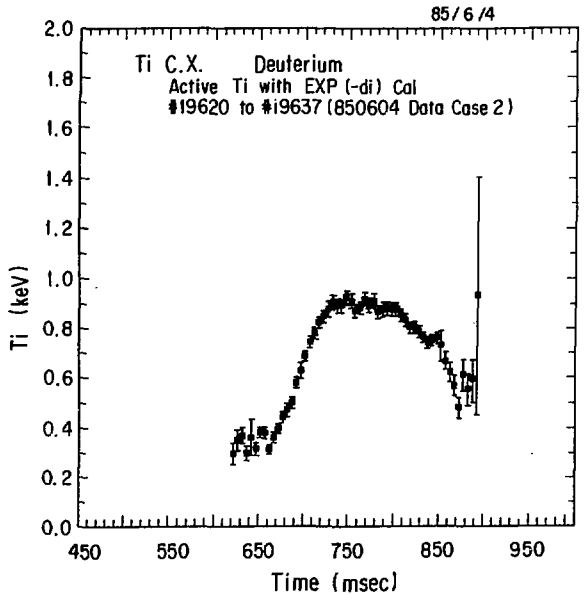


図 6 重水素エネルギースペクトラムより求めたイオン温度の時間変化。

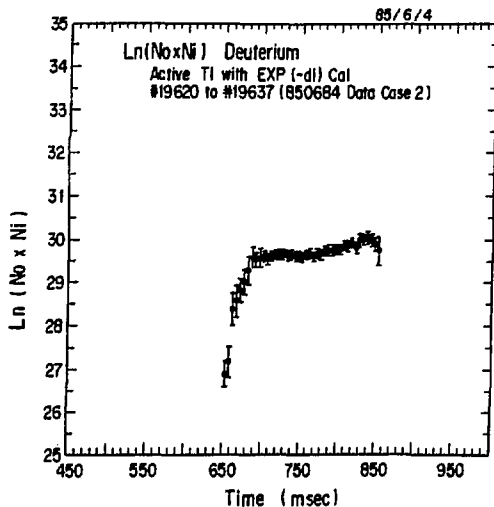


図 7 (a)  $\ln(n_0^b n_D)$  時間変化。

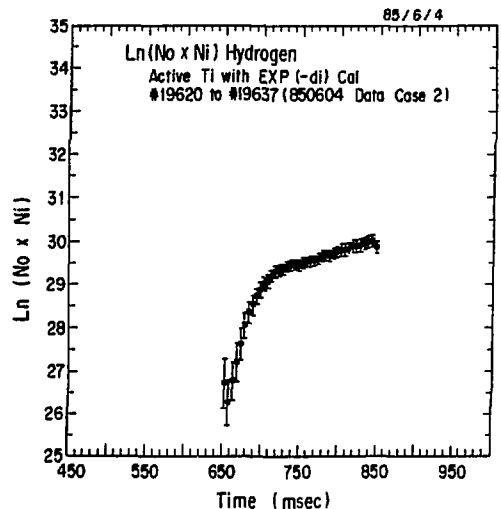


図 7 (b)  $\ln(n_0^b n_H)$  の時間変化。

中性粒子エネルギー・スペクトラムは、マックスウェル分布であるから  $G_D$  を簡単に求めることができる。しかし入射粒子である水素の場合は、NB成分である高エネルギーのテイルが含まれているため、(13)式に従って水素能動中性粒子エネルギー・スペクトラムの傾より温度を求めるエネルギー領域を  $1 \text{ keV} \leq E_i \leq 4 \text{ keV}$  とし、重水素能動中性粒子エネルギー・スペクトラムより得られたイオン温度とあまり差がない領域で温度を決め  $G_H$  を決定した。またこれから得られた重水素、水素イオンの密度比の時間変化を図8に示す。NBによる入射粒子が水素であることと、NB入射ポートよりイオン源から出た水素ガスの流入があるため、水素と重水素の密度比 ( $n_H/n_D$ ) は、約20%から、入射中200 ms間で約60%にまで上昇している。

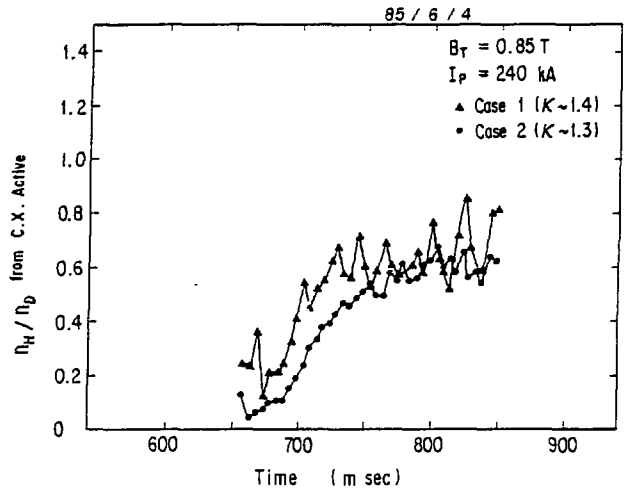


図8 重水素、水素イオンの密度比 ( $n_H/n_D$ ) の時間変化。

#### 4. 結果の考察

能動中性粒子エネルギー・スペクトラムは、受動的な方法と異なり、発生する中性粒子の位置がプラズマ中に局在しているため、プラズマ外へ出るまでの減衰量を計算しなくてはならない。減衰量は図3より高密度になるほど、また低エネルギーになるほど大きくなるのでエネルギー・スペクトラムの傾きがゆるくなることにより、考慮しないでイオン温度を計算すると、図6の場合で900 eVが約1.1 keVになり200 eVの差が生じてしまう。さらにNBが入射される前後の受動的な方法により求めた中心のイオン温度より、NB入射中の  $\sim a/3$  の温度がかけ離れて高くなってしまい考えられない結果になってしまう。減衰量を計算するためには、電子、イオンの密度分布と温度分布が必要になるが、分布は仮定で計算してもイオン温度に表われる誤差は、広い範囲のパラメータサーベイで図6の場合に約30 eV程度であった。図9には能動法と受動法により得られたイオン温度と、その時の中性粒子発生量の関係を示す。○、△は能動法により求めた値であり、●、▲は受動法によるものであるが、両者ともにより相関を示している。

図7に  $\ln(n_0^b n_H)$  と  $\ln(n_0^b n_D)$  の時間変化を示したが、これらにより、 $(n_H + n_D)$  を平均電子密度で代表させ(正確には交差領域のイオン密度であるので、イオンの密度分布とそこでの主なる不純物の電荷数と密度が必要)、 $n_0^b$  をプロットしたものを図10に示す。 $n_0^b$  は時間

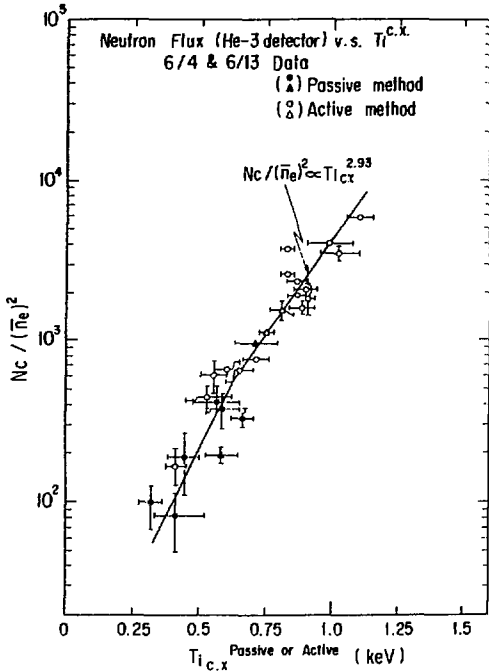


図9 能動法により得られたイオン温度と、その時の中性子発生量の関係を示す。○、△は能動法により求めた値であり、●、▲は受動法により求めた値である。

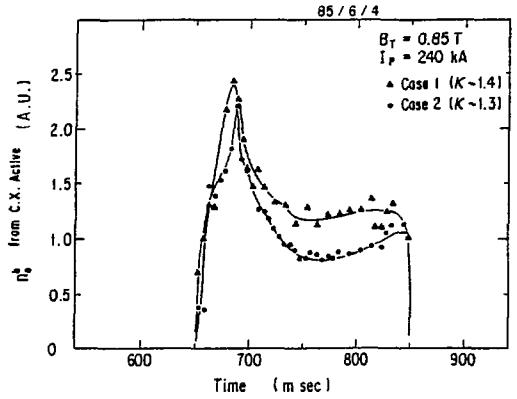


図10  $\ln(n_0^b n_H)$ と $\ln(n_0^b n_D)$ から $(n_H+n_D)$ を平均電子密度で代表させ求めた $n_0^b$ の時間変化。

とともに減少しており、NB粒子の密度、つまり $\sim a/3$ に到達する入射パワーが減少していることが考えられる。その原因としては、密度上昇によりNBがよりプラズマ周辺でイオン化されてしまうことと、入射中にNBラインのドリフト管内における真空度が悪化し再電離等により失われていることが考えられる。

## 5. ま と め

NB入射時にその入射ライン上を、E//B型質量分離中性粒子エネルギー分析器を用いて測定することにより、能動法でイオン温度を得ることができた。またこの計測では計数率が、高エネルギー部まで高く精度を上げることができた。加熱用中性粒子ビームを用いたこのような計測では、ビーム径が大きいので空間分解能を良くできないこと、測定ポイントを自由に選べないことなどの欠点もあるが、得られるプラズマからの情報がイオン温度だけでなく、局所的な重水素と水素の密度比、NBの入射密度等もS/N良くモニタすることができ、NB加熱時には非常に有効な手段であることが確認できた。



## 謝 辞

本研究に対し、終始暖かく見守り勇気づけて下さいました日本原子力研究所核融合研究部小幡行雄前部長（現技術情報部長）、同田中正俊部長、同プラズマ実験研究室田中裕二前室長（現核融合計画室長）、船橋昌昭主任研究員（現プラズマ実験研究室長）の各氏に対して心から感謝します。

さらに装置技術管理室鈴木喜八郎室長、松崎誼係長、谷孝志係長、柴田孝俊係長を始めとする装置技術管理室の人達の御援助に心から感謝いたします。

## 参 考 文 献

- [1] DAVIS S.L., MUELLER D., and KEANE C.J. : Rev. Sci. Instrum. 54 (1983) 315.
- [2] KEILSON G.H. : Oak Ridge National Laboratory Report No. ORNL/TM-7333 (1980).
- [3] SUGIE T., TAKEUCHI H., KASAI S., FUNAHASHI A., and et al. : J. Phys. Soc. Jpn. 44 (1978) 1960.
- [4] BERRY A.L., ENGLAND A.C. LYON J.F., and MOGAN G.L. : Oak Ridge National Laboratory Report No. ORNL/TM-5045 (1975).
- [5] WAGNER F., and et al. : in Proceedings of the 9th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Baltimore, 1982 vol.1 p. 43.
- [6] WOSKOBOINIKOW P., PRADDAUDE H.C., MULLIGAN W.J., COHN D.R., LAX B., and FETTERMAN H.R.. : 6th Int. Conf. Infrared & Millimeter Waves (IEEE, New York, 1981) IEEE CAT. No.81 CH1645-1 MIT.
- [7] ABRAMOV V.G., AFROSIMOV V.V., GLADKOVSKII I.P., KISLYAKOV A.I. and PERRL' V.I. : Soviet Physics-Technical Physics 16 (1972) 1520.
- [8] TAKEUCHI H., MATSUDA T., NISHITANI T., SHIHO M., KONAGAI C., and et al. : Jpn. J. Appl. Phys. 22 (1983) 1717.
- [9] AFROSIMOV V.V., PETROV M.P., SADOYNIKOV V.S. : Sov. Phys.-JETP Letters 18 (1973) 300.
- [10] MEDLEY S.S. : Princeton Plasma Physics Laboratory Rep. PPPL-1770 (1981)
- [11] FONCK R. J. : Rev. Sci. Instrum. 56 (1985) 885.
- [12] GROEBNER R.J., PFEIFFER W., BLAU F.P. BURRELL K.H., FAIRBANKS E.S., and et al. : Nucl. Fusion 26 (1986) 543.
- [13] FONCK R.J., FINKENTHAL M., GOLDSTON R.J., HERNDEN D.L., HULSE R.A., and et al. : Phys. Rev. Lett. 49 (1982) 737.

# 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
仕事率、放射束	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	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	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	
光度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	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	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10<sup>-19</sup> J  
1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> kg

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
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10<sup>-10</sup> m  
1 b = 100 fm<sup>2</sup> = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>  
1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa  
1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>  
1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> Bq  
1 R = 2.58 × 10<sup>-4</sup> C/kg  
1 rad = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy  
1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

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>0</sup>	デシ	d
10 <sup>-1</sup>	センチ	c
10 <sup>-2</sup>	ミリ	m
10 <sup>-3</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-6</sup>	ナノ	n
10 <sup>-9</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、1 eVおよび1 u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わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では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。

## 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

粘度 1 Pa·s (= N·s/m<sup>2</sup>) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>4</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/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>4</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>-2</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) = 4.184 J (熱化学) = 4.1855 J (15 °C) = 4.1868 J (国際蒸気表)
	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>	
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>18</sup>	
	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>	
	4.18605	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>-18</sup>	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	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