

解 説 (I)

## C I A M D A について

(原 研) 中 井 洋 太

### 1. はじめに

C I A M D A は, Computer Index to Atomic and Molecular Collision Data relevant to Fusion Researchの略号であり, 核データの場合のC I N D Aに対応する。

核融合のための原子分子データの重要性が改めて強く認識されたのは1970年半ば頃からである。当時小型であった世界各国のトカマク型のプラズマ実験装置での種々の成果をうけて, 次の段階の臨界プラズマ実験装置(原研J T-60, 米国T F T R, 欧州共同体J E T等)の建設が計画されていた。問題の中心は, 装置の大型化に伴うプラズマ温度の上昇, 密度の増加及び閉じ込め時間の増大のため, プラズマと真空容器の壁その他プラズマと面している材料との衝突によりたたき出された不純物元素がプラズマの中に入り, 高い電荷数に電離されて不純物イオンになることである。

多くの場合この不純物イオンは核融合プラズマに害を与えるので, その根源をさぐり, 性質, 挙動を明らかにし, 制御または除去することが今も続く核融合の中での主要な研究課題の一つである。そして, ここに核融合のための原子分子過程とそのデータの重要性がクローズアップされてきた。

このような背景の下に, 国際的に1974年よりI A E Aを中心にした原子分子データ活動が始まった。すなわち, この年にI A E Aに数か国の核融合及び原子分子データの関係者が集り, Consultant Meetingが開かれ, I A E Aが中心になって, 国際的な核融合のための原子分子データ活動を行うことについての勧告がなされた。その第一歩として, I A E Aは核融合サイドからの原子分子データのニーズ, それに対する原子分子物理側からのデータの現状及び必要なデータの計算や測定に関する問題点と, 両サイドの橋わたしを如何に円滑に進めるかをまとめる目的で, 1976年に英国カラム研究所で100人規模の会合を開いた。この会合の結論の一つに「I A E AのNuclear Data SectionにAtomic and Molecular (A+M) Data Unitをおき, 核融合に必要な原子分子衝突, 原子構造, 表面との相互作用に関する文献を集め, コンピューター化した索引を出版すること」があげられた。1977年にA+M Unit が設けられ, 文献情報誌として, 「International Bulletin on A+M Data for Fusion」が年4回のペースで刊行を始めた。これを基にした文献情報のうち, 原子衝突に関したものをBulletin刊行以前(～1950年)から1979年まで収録し集大成したのが1980年に刊行されたC I A M D A80である。引き続き1980年～1986年分を収録したのがC I A M D A87である。

以下、これらのC I A M D A 80, 87の内容の概要について述べる。

## 2. C I A M D A 80, 87の内容

### 2.1 衝突の種数

2体衝突に限られていて、次のカテゴリーに分類されている

- (1) photon collisions
- (2) electron collisions
- (3) heavy particle collisions

(having atoms and/or molecules as partners)

この中で heavy particle collision は、すべてのエントリーについて、 $A + B$ と $B + A$ の型で2回出てきている。この際、注意すべきこととして、C I A M D A 80では、衝突エネルギーは、 $A + B$ と $B + A$ の両方が出ているため、重心系に変換されているが、87では、変換せず原著論文のエネルギーをそのまま用いている。反応種A, BともC I A M D Aでは原子量順、同じAでは電荷数(陽)の高い方からリストされている。

### 2.2 衝突の過程

TABLE Iに示されるような分類になっている。但しこれは重複していることもある。例えば、“Attachment”と“Detachment”は $A + B$ で、AまたはBに電子が附着するか、脱離するかであり、これらは、Charge transferやIonizationの分類に入ることもある。

### 2.3 衝突に関与する粒子及び原子、分子

核融合に関連した原子衝突が主眼であるため、衝突に関与する粒子及び原子・分子をTABLE IIに示すようにとりあげ、これらを10個に分類している。1～4は、核融合プラズマを構成し、また当然その中に含まれるものである。5は、プラズマ構成粒子の親分子又は生成される分子であり、一方、これらは、プラズマへのビーム入射にも使われる。

6～8は不純物原子(イオンも含まれる)で、このうちとくに多い(重要な)ものは6、以下7、8と分けている。9は関連した原子で、6～8の不純物原子に関するデータを推定または補強するのに必要な原子をあげている。したがってPb以上の重い元素は直接核融合には関連がないとして省いている。

10は、核融合に重要な分子である。主として水素とC, Oの組合せによる分子とヘリウム分子イオン及び最も代表的な分子である $N_2$ が考えられる。

以上の原子・分子種については、とくに不純物に関しては、重要度がその時々の核融合研究の進展や、装置の特徴などで変わることがある。例えば、あるトカマク型装置では、プラズマ診断のために、Ar, Kr, Xeなどの希ガスを導入することを試みているが、そうすると途端にこれらのデータが重要になってくる。

また $N_2$ についてはC I A M D A 80ではとりあげていなかった。核融合装置を含めた真空装置ではリークがない限り、吸着して放出される分子は $O_2$ や炭化水素とされていたためである。し

かし地球上で最も多く存在している最も一般的な分子であり、原子分子の衝突の実験でも最もよく使われているターゲット気体である。筆者は数回の I A E A の会合で C I A M D A に  $N_2$  を入れるように強く主張した。理由は、①  $N_2$  ターゲットに関する原子衝突実験は扱いやすくある面で well establish されている。断面積の絶対測定などでは、 $N_2$  のものを規準にして normalize しているのが多い。② リークのない真空装置を前提にすることができるかという点である。それでやっと、C I A M D A 87 に  $N_2$  が入った。

## 2.4 エネルギー範囲

考えられる衝突についてのエネルギーの一応の上限を TABLE III に示す。

Photon の上限は代表的な重元素不純物 Mo の内殻電離エネルギー 25 keV を目安にして 30 keV としている。電子はプラズマの平均エネルギー 10 keV の maxwell 分布の上限として、100 keV までである。原子分子とそれらのイオンについては中性粒子入射加熱のエネルギーを考慮して 500 keV、その中で He に関しては核融合反応で数 MeV の  $\alpha$  線が発生するので 5 MeV を上限としている。

しかし、実際の C I A M D A のリストには、文献の中のデータのエネルギーを、このようにして切ってしまうのは不自然であるので、そのままにしている。これも核融合の研究の進展で、変わってくるのが当然である。例えば、現在 I A E A を中心にして進められている I T E R の計画では、中性粒子入射加熱のビームエネルギーは  $\sim 1$  MeV である。また、次期装置の中性粒子プローブによるプラズマ診断では、プローブのビームエネルギーは数 MeV のオーダーのものが計画されている。

## 2.5 収録文献

C I A M D A 80 では Journal、大学、研究機関等のレポート類を含めていて、引用された Journal は 364 種類である。収録されている文献数は 1979 年までで 12,816 である。

C I A M D A 87 では、Journal 数は 133 種類で 1980 ~ 1986 年で、文献数は 3,205 である。さらに両方とも巻尾に Author Index が記載されている。TABLE IV に C I A M D A 87 の場合の収録例を示す。

さらに C I A M D A 87 には、とくに、核融合のための原子分子データの必要性が認識され、1970 年過ぎからそのための、各々の目的に応じたコンパクトなデータ集が出版されはじめたので、Major Data References として ① Atomic Structure、② Atomic and Molecular Collision、③ Surface Interaction の 3 項目のデータ集がリストアップされている。全部で 64 編である。自画自讃になるかも知れないが、この中で、原研核データセンター原子分子データ部門および原子分子データ委員会が中心になって発行したデータ集が 6 編含まれている。

## 3. おわりに

以上、C I A M D A 80、87 の内容について概説した。C I A M D A 87 は 80 の経験やユーザーからの意見をとり入れて、内容、スタイルともに改善されて、より使いやすい形になっている。

筆者は、衝突に関するデータ集の作成と、その評価にこのC I A M D Aをフルに利用しているが、いまのところ核融合のための原子衝突の文献集としては一番まとまっており、かつ使い易い。

ただ、難を云えば製本が余りよくなく、とくにC I A M D A 80は酷使をしたので、ボロボロになってしまっている。ボロボロになりやすい製本のもは、コピーをしやすいで止むを得ないと思われるが？

いずれにせよ、原子衝突や、核融合で原子過程に関連した現場の研究者にとっては、図書館へ飾っておくよりも、常に机の上に置いておくべき座右の書であることは筆者の経験から見てあきらかである。

最後に、重要なことをつけ加えておく。原研核データセンターでは、このC I A M D A 80, 87の全内容のMTをI A E Aから入手して、利用できる形になっている。

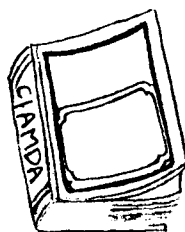
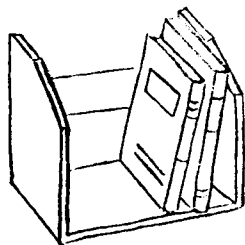


TABLE I. COLLISION PROCESSES INCLUDED IN THE DATA INDEX

Association	Excitation
Attachment	Free-free transitions
Bremsstrahlung	Interchange reaction
Charge transfer	Ionization
De-excitation	Recombination
Detachment	Total absorption and scattering
Dissociation	Total scattering
Elastic scattering	

TABLE II. CLASSIFICATION OF SPECIES OF INTEREST IN A+M COLLISION DATA FOR FUSION

Class	Particles
1	Photons $h\nu$
2	Electrons $e^-$
3	Primary atoms H, D, T
4	Helium He
5	Primary molecules $H_2$ , $H_3^+$ and variations and combinations, with one or more H atoms replaced by D or T
6	Common impurities C, O, Ti, Cr, Fe, Ni
7	Other impurities B, N, Al, Si, V, Mo, W
8	Less common impurities Li, Be, F, Ne, Na, Mg, P, S, Cl, Ar, K, Ca, Sc, Mn, Co, Cu, Zn, Kr, Zr, Nb, Ag, In, Xe, Cs, Ta, Pt, Au, Hg
9	Related atoms Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Tc, Ru, Rh, Pd, Cd, Sn, Sb, Te, I, Ba, Hf, Re, Os, Ir, Tl, Pb
10	Molecules $H_2O$ , OH, $H_3O^+$ , $O_2$ , $CO_2$ , CO, CN, $N_2$ , $He_2^+$ , $HeH^+$ , $HeH_2^+$ , $CH_4$ , $CH_3$ , $CH_2$ , CH and variations and combinations, with one or more H atoms replaced by D or T

TABLE III. COLLISIONS RELEVANT TO FUSION AND THEIR ASSIGNED ENERGY LIMITS

Class	3 Primary atoms (H, D, T)	4 Helium (He)	5 Primary molecules (H <sub>2</sub> , H <sub>3</sub> <sup>+</sup> , D <sub>2</sub> , etc.)	6 Common impurities (C, O, Ti, etc.)	7 Other impurities (B, N, Al, etc.)	8 Less common impurities (Li, Be, F, etc.)	9 Related atoms (Ga, Ge, etc.)	10 Molecules (H <sub>2</sub> O, OH, etc.)
1 Photons	E < 30 keV	E < 30 keV	E < 30 keV	E < 30 keV	E < 30 keV	E < 30 keV	E < 30 keV	E < 30 keV
2 Electrons	E < 100 keV	E < 100 keV	E < 100 keV	E < 100 keV	E < 100 keV	E < 100 keV	E < 100 keV	E < 100 keV
3 Primary atoms	E < 500 keV	E < 5 MeV	E < 500 keV	E < 500 keV	E < 500 keV	E < 500 keV	E < 500 keV	E < 500 keV
4 Helium	—	E < 5 MeV	E < 5 MeV	E < 5 MeV	E < 5 MeV	E < 5 MeV	E < 5 MeV	E < 5 MeV
5 Primary molecules	—	—	E < 500 keV	E < 500 keV	E < 500 keV	E < 500 keV	E < 500 keV	E < 500 keV
6 Common impurities	—	—	—	E < 100 keV	None	None	None	None

TABLE IV EXAMPLE OF DATA INDEX FOR COLLISIONS

Heavy Particle Collisions

Reactants	Process	Energy		Unit	Type	Documentation			Year	First Author	Bib Vol	Bull Vol		
		Min	Max			Source	Ref	Vol					Page	
Li <sup>+</sup> + H <sub>2</sub>	Excitation		600	meV	E	Jour	JCP	71	3770	79	Faubel M.	287	11	
	Excitation	11.1 -	89.4	eV	E	Jour	JP/B	14	679	81	Itob Y.	521	16	
Li <sup>+</sup> + He	Ionization	0.2 -	1.8	keV	E	Rept	6PPN	IPPI-420		79	Yagishita A.	2543	12	
	Ionization		1	keV	E	Jour	PRA	22	118	80	Yagishita A.	1694	14	
	Ionization		2	keV	E	Jour	ZPA	320	81	85	Straten P. v. d.	2516	29	
	Ionization	20 -	500	keV	E	Jour	JP/B	14	2023	81	Biggaard P.	538	17	
	Ionization	0.4 -	88.7	MeV	T	Jour	PL/A	72A	329	79	Gillespie G. H.	1634	11	
	Excitation		1 -	25	keV	E	Jour	JP/B	18	2247	85	Andersen N.	1012	31
	Excitation		1 -	40	keV	T	Jour	JP/B	19	611	86	Wahnon P.	1173	34
	Excitation			2	keV	E	Jour	ZPA	320	81	85	Straten P. v. d.	2516	29
	Charge Transfer		1 -	25	keV	E	Jour	JP/B	18	2247	85	Andersen N.	1012	31
	Charge Transfer		1 -	40	keV	T	Jour	JP/B	19	611	86	Wahnon P.	1173	34
	Charge Transfer			280	keV	E	Jour	NIMB	10-11	231	85	Zucatti S.	1408	33
	Li <sup>+</sup> + Li <sup>+</sup>	Ionization	53 -	240	keV	E	Jour	JP/B	17	1631	84	Watts M. F.	826	25
Ionization		0.02 -	3.5	MeV	T	Jour	JP/B	15	L677	82	Ermolaev A. M.	688	22	
Charge Transfer		17.5 -	700	keV	T	Jour	JP/B	15	L677	82	Ermolaev A. M.	688	22	
Charge Transfer		19 -	88	keV	E	Jour	JP/B	14	3457	81	Peart B.	562	18	
Charge Transfer		53 -	240	keV	E	Jour	JP/B	17	1631	84	Watts M. F.	826	25	
Charge Transfer														