

JAERI-M
83-223

物質中を透過するイオンの阻止能

1983年12月

北川 盈雄*

JAERI-M 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。

入手の間合わせは、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 Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1983

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

物質中を透過するイオンの阻止能

北川 盈雄*

(1983年11月22日受理)

物質中を透過するイオンに対する阻止能の研究は、この20年の間にいくつかの進展をみせた。

高速領域での軽イオン阻止能については、平均イオン化エネルギーの解析が各種固体に対して行われた。また、 Z_1^3 項、Bloch項などの高次補正項を定量的に分離する実験も行われた。陽子及びHeイオンの阻止能の実験式がパラメータ法により高速領域から低速領域にわたって導かれ、またそのテーブル化が行われた。

重イオン阻止能については、有効電荷の理論的解析が行われ、阻止能データを±20~30%の精度で解析することが可能となった。

本報告書は、これらの進展についてまとめたものである。

この報告書は、昭和57年度に日本原子力研究所より湘北短期大学に委託した調査の報告書を改めてまとめたものである。

* 湘北短期大学電子工学科

Stopping Power for Ions in Solids

Mitsuo KITAGAWA*

(Received November 22, 1983)

During these two decades, the researches of the stopping power for ions in solids have made several progresses in the fields of atomic collisions in solids, radiation physics, nuclear fusion and related regions of ion-solid interactions.

In the case of the stopping power for light ions at high energy region, the detailed analyses of the mean ionization energy were performed for many kinds of solids. The experimental analyses of the Z_1^3 and Bloch corrections were also made to measure the higher order contributions quantitatively. The experimental formula and data tables of stopping power for H and He ions covered over the region from low to high energies were derived by use of the parameterization methods.

As far as the heavy ions concern, the theoretical analyses of the effective charge for stopping power were performed, and it turned to be able to analyze the experimental data within the resolution of $\pm 10\sim 20\%$.

Keywords: Stopping Power, Effective Charge, Scaling Rule, Mean Ionization Energy, Z_1^3 -term, Bloch term

This work was supported by a research contract of Japan Atomic Energy Research Institute with North Shore College in fiscal year 1982.

* Department of Electronics, North Shore College, Atsugi, Kanagawa 243, Japan.

目 次

1. 序 論	1
2. 軽イオン阻止能の解析	2
2.1 平均イオン化エネルギー	3
2.2 内殻補正項, Z_1^3 項および Bloch 項	8
3. 阻止能データの実験式および数値テーブル	10
4. 重イオン阻止能と有効電荷	13
4.1 スケーリング則	13
4.2 スケーリング則からのずれ	16
4.3 重イオン阻止能の解析	17
5. 結 論	22
謝 辞	23
文 献	24

Contents

1. Introduction	1
2. Stopping Power for Light Ions	2
2.1 Mean Ionization Energy	3
2.2 Inner Shell, Z_1^3 and Bloch Corrections	8
3. Experimental Formula and Data Table of Stopping Power	10
4. Stopping Power and Effective Charge for Heavy Ions	13
4.1 Scaling Rule	13
4.2 Deviation from Scaling Rule	16
4.3 Analysis of Stopping Power for Heavy Ions	17
5. Concluding Remarks	22
Acknowledgement	23
References	24

1. 序 論

物質中を通過するイオン阻止能の研究は、重イオン科学の基礎テーマであると共に、最近の核融合炉壁材料開発研究、イオン線による物性研究、計算機シミュレーション研究の発展との関連から、プラズマ、粒子線、固体物理、表面物理の各領域にまたがり、近年、学際的研究課題として、その面目を新たにしつつある分野でもある。イオン阻止能とは、入射イオンが物質内での電子や原子との衝突により、単位長さ当たり失なうエネルギーを言うが、実験的には阻止能を阻止物質の原子密度で割った、阻止断面積として定義される場合も多い。

核融合炉壁材料開発研究においては、核融合炉の真空第一壁材料の中性子照射損傷をシミュレートした、重イオン照射実験が行なわれており、損傷分布、損傷断面積を解析するための、重イオン阻止能のより確かな実験式の確立が要請されている。重イオン阻止能と飛程ならびに重イオン有効電荷は、1948年のBohrの総合報告¹⁾でも取り上げられているが、阻止能と飛程に関する定量解析は、1960年前後のFirsov理論²⁾やLindhard, ScharffとSchjøttの理論(以下LSS理論と書く)^{3,4)}の提案にはじまる。日本原子力研究所の委託調査に基づく本報告書では、ここ20年の間に、イオン阻止能研究でどのような解析が問題とされ、どのような進展があり、またどこまで解明されているかについて報告したい。また、イオン阻止能に関する1970年初頭の総合報告⁵⁾および最近の解説^{6,7)}も参照されたい。

入射荷電粒子は物質中を通過する際、各種散乱過程を通してエネルギーを損失する。すなわち、物質内電子の励起、イオン化、金属内伝導帯電子や半導体中の価電子との遠隔相互作用による集団モード(プラズモン)の励起(以上を電子的阻止能と言う)、原子核の反跳を伴うイオン-原子衝突(核的阻止能)、電子捕獲、損失を伴う電荷移行過程、制動放射等である。上記散乱過程の中で、核子当たりのエネルギーが $\sim \text{keV}/\text{amu}$ から数十 MeV/amu のエネルギー領域では、電子励起過程が支配的となる。 GeV/amu オーダに達する相対論的なエネルギー領域では、制動放射、密度効果(散乱の最大衝突径数が原子サイズより十分大きくなることより生ずる)が問題となる。他方、物質内電子の励起が困難となる $\sim \text{keV}/\text{amu}$ 以下の十分に低いエネルギー領域では、イオン-原子衝突による核的阻止能が電子的阻止能を上回る。核的阻止能は、イオン照射損傷における損傷分布、損傷断面積を解析する際の重要パラメータである。

さて本報告書のテーマである軽イオン(電子的)阻止能解析と、重イオン(電子的)阻止能解析の関連を述べておこう。なぜならば、(i)実験データの蓄積に伴う高速領域での陽子やHeイオンの阻止能解析は、平均イオン化エネルギーの5%前後の精度内解析による阻止能データのテーブル作成の段階に入っていること⁷⁾、(ii)陽子に対する阻止能が、有効電荷による重イオン阻止能解析のベースを与えること⁸⁾、(iii)軽イオン阻止能研究の成果が、重イオン阻止能研究の今日的ならびに将来的課題のガイドとなる、からである。

阻止能最大を与える領域から非相対論的高速領域における軽イオン阻止能の解析では、平均イオン化エネルギー⁹⁾、内殻補正項^{10~12)}、 Z_1^3 -項^{13~16)}、Bloch項¹⁷⁾(あるいは Z_1^4 -項と呼ぶ時

もある)の決定が行なわれている(以下 Z_1 , Z_2 はそれぞれ入射イオン, 標的原子の原子番号を表わす)。陽子, He イオン, Li イオンに関する Z_1^3 -項, Bloch 項の測定は, 熱量計による阻止能測定法の開発により行なわれ¹⁸⁾, これらの実験研究を基にした阻止能データのテーブル化が, 軽イオン低速領域とも接続する実験公式の確立を含めて進められている^{19,20)}。

イオン速度が, 原子系の外殻電子, 固体内の価電子や伝導帯電子の速度と同程度($\sim V_0$ ($\cong 2.19 \times 10^8$ cm/s); ボーア速度)となる低速領域では, 阻止能に物質内の電子の結合状態を反映した物理化学的効果が現われる。軽イオン阻止能の Bragg の規則²¹⁾からのずれに関する報告が, H_2 , N_2 , CO , CO_2 , CH_4 などの各種分子ガス²²⁾, MgO , Al_2O_3 , SiO_2 などの金属や半導体の酸化物や $Al-Mg$, $Si-Al$ などの二層合金²³⁾, TaB や TaB_2 などのホウ化物²⁴⁾, 各種有機物や電解溶液²⁵⁾, Ar , CO_2 などの固相と気相²⁶⁾, H_2O などの液相と気相²⁷⁾について行なわれている。特に, ホウ化物, 有機物, 電解溶液に関する実験は1974年以降 Köln 大学のグループにより行なわれたもので, 核反応を用いた逆ドップラー減衰法(IDSA法)による阻止能測定法の開発は注目値する。1962年 Teplova ら²⁸⁾によって最初に観測されて以来, 数多くの実験報告が行なわれている阻止能の Z_1-Z_2 振動も, この物理化学的効果に属する現象である。このような物理化学的効果は, イオン速度がボーア速度のオーダの領域で顕著に現われる。

次に重イオン阻止能について述べよう。重イオン阻止能の研究を複雑化している要因の一つは, エネルギー損失過程に, 阻止物質内電子の電子構造のみならず, イオンの荷電状態が関与する点にある。換言すれば, 重イオン阻止能の研究は, 物質中での重イオン有効電荷の研究と不可分な関係にあると言える。重イオンの有効電荷は, 重イオン阻止能と重イオンと同速度の陽子に対する阻止能との比の平方根により定義される。十分に重いイオンに対するスケールリング則による有効電荷のデータ解析は, 1972年の Br, I, U イオンに関する Brown と Moak の実験⁸⁾により最初になされた。この手法は, 素過程的には, 電子捕獲, 損失断面積により記述される重イオンの平均平衡電荷を, 統計的なスケールリング法で取り扱う手法²⁹⁾と方法論的には同レベルに属するものである。その後の実験研究の進展により, He \sim Ar イオンの原子番号領域のイオンでのスケールリング則からのずれ^{30,31)}が報告され, また重イオン阻止能の実験式の確立とも関連した阻止能データのテーブル作成が, 70年初頭以来, Northcliffe と Schilling³²⁾ (以下 NS テーブルと記す), 杉山³³⁾, Hubert ら³⁴⁾, 最近では Ziegler³⁵⁾ により行なわれている。以下にイオン阻止能解析の今日までの進展を, いくつかの項目に分けて述べてみよう。

2. 軽イオン阻止能の解析

阻止能最大を与える領域から高速領域における軽イオン阻止能の解析は, 量子力学的摂動計算による理論式で定義される, 平均イオン化エネルギー, 内殻補正項, Z_1^3 -項, Bloch 項の決定により行なわれている。理論式は次式で与えられる。

$$S = \frac{4 \pi Z_1^2 Z_2 e^4}{m V^2} (L_0 + Z_1 L_1 + Z_1^2 L_2) \quad (1)$$

もある)の決定が行なわれている(以下 Z_1 , Z_2 はそれぞれ入射イオン, 標的原子の原子番号を表わす)。陽子, He イオン, Li イオンに関する Z_1^3 -項, Bloch 項の測定は, 熱量計による阻止能測定法の開発により行なわれ¹⁸⁾, これらの実験研究を基にした阻止能データのテーブル化が, 軽イオン低速領域とも接続する実験公式の確立を含めて進められている^{19,20)}。

イオン速度が, 原子系の外殻電子, 固体内の価電子や伝導帯電子の速度と同程度($\sim V_0$ ($\cong 2.19 \times 10^8$ cm/s); ボーア速度)となる低速領域では, 阻止能に物質内の電子の結合状態を反映した物理化学的効果が現われる。軽イオン阻止能の Bragg の規則²¹⁾からのずれに関する報告が, H_2 , N_2 , CO , CO_2 , CH_4 などの各種分子ガス²²⁾, MgO , Al_2O_3 , SiO_2 などの金属や半導体の酸化物や $Al-Mg$, $Si-Al$ などの二層合金²³⁾, TaB や TaB_2 などのホウ化物²⁴⁾, 各種有機物や電解溶液²⁵⁾, Ar , CO_2 などの固相と気相²⁶⁾, H_2O などの液相と気相²⁷⁾について行なわれている。特に, ホウ化物, 有機物, 電解溶液に関する実験は 1974 年以降 Köln 大学のグループにより行なわれたもので, 核反応を用いた逆ドップラー減衰法 (IDSA 法) による阻止能測定法の開発は注目に値する。1962 年 Teplova ら²⁸⁾によって最初に観測されて以来, 数多くの実験報告が行なわれている阻止能の Z_1-Z_2 振動も, この物理化学的効果に属する現象である。このような物理化学的効果は, イオン速度がボーア速度のオーダの領域で顕著に現われる。

次に重イオン阻止能について述べよう。重イオン阻止能の研究を複雑化している要因の一つは, エネルギー損失過程に, 阻止物質内電子の電子構造のみならず, イオンの荷電状態が関与する点にある。換言すれば, 重イオン阻止能の研究は, 物質中での重イオン有効電荷の研究と不可分な関係にあると言える。重イオンの有効電荷は, 重イオン阻止能と重イオンと同速度の陽子に対する阻止能との比の平方根により定義される。十分に重いイオンに対するスケールリング則による有効電荷のデータ解析は, 1972 年の Br , I , U イオンに関する Brown と Moak の実験⁸⁾により最初になされた。この手法は, 素過程的には, 電子捕獲, 損失断面積により記述される重イオンの平均平衡電荷を, 統計的なスケールリング法で取り扱う手法²⁹⁾と方法論的には同レベルに属するものである。その後の実験研究の進展により, $He \sim Ar$ イオンの原子番号領域のイオンでのスケールリング則からのずれ^{30,31)}が報告され, また重イオン阻止能の実験式の確立とも関連した阻止能データのテーブル作成が, 70 年初頭以来, Northcliffe と Schilling³²⁾ (以下 NS テーブルと記す), 杉山³³⁾, Hubert ら³⁴⁾, 最近では Ziegler³⁵⁾ により行なわれている。以下にイオン阻止能解析の今日までの進展を, いくつかの項目に分けて述べてみよう。

2. 軽イオン阻止能の解析

阻止能最大を与える領域から高速領域における軽イオン阻止能の解析は, 量子力学的摂動計算による理論式で定義される, 平均イオン化エネルギー, 内殻補正項, Z_1^3 -項, Bloch 項の決定により行なわれている。理論式は次式で与えられる。

$$S = \frac{4 \pi Z_1^2 Z_2 e^4}{m V^2} (L_0 + Z_1 L_1 + Z_1^2 L_2) \quad (1)$$

$$L_0 = \ln \left(\frac{2 m V^2}{I} \right) - \sum_i \frac{C_i}{Z_2} + \ln \frac{1}{1 - \beta^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \quad (2)$$

$$L_1 = \frac{L_0}{Z_2^{1/2}} F(x) \quad \left(x = \frac{V}{Z_2^{1/2} V_0} \right) \quad (3)$$

$$L_2 = \{ \psi(1) - \operatorname{Re} [\psi(1 + iy)] \} / Z_1^2 \quad \left(y = \frac{Z_1 V_0}{V} \right) \quad (4)$$

(1)~(4)式中, m , e , V_0 , V は, 電子の質量, 素電荷, ボーア速度, 入射イオン速度である。(2)式中, I は平均イオン化エネルギーを表わす。第二項は入射イオン速度の減少により内殻電子の励起, イオン化確率が減少する効果に対応し, 内殻補正項と呼ばれる^{10,11)}(i はK, L, Mなどの各殻を表わす)。内殻補正項の理論的定量評価の判定には, 現在, いくつかの論争がある。第3項から第5項は相対論的補正項を示し, $\delta/2$ は密度効果を表わす($\beta = V/c$; c : 光速)³⁶⁾。通常の非相対論的な領域では, これらの項は無視される。(3), (4)式は各々 Z_1^3 -項, Bloch項と表わす。 Z_1^3 -効果は, π^\pm 中間子の飛程解析³⁷⁾により最初に観測された効果であるが, 今日では, 数MeV/amu領域での陽子, Heイオン, Liイオンに対し, Bloch項も含めて観測されている^{7,18)}。(3)式中の $F(x)$ は, Ashley, RitchieとBrandt¹³⁾(フィッティングパラメータを1つ含む), JacksonとMcCarthy¹⁴⁾, HillとMerzbacher¹⁵⁾により計算されている。またLindhard¹⁶⁾により Z_1^3 -項中のプラズモンによる寄与が定性的に議論されており, Z_1^3 項は全体として, JacksonとMcCarthyの値の約2倍の寄与があることが指摘されている。(4)式中の関数 ψ は, デイガンマ関数である。 $y \ll 1$ の時, L_2 は $L_2 \cong -1.2 (V_0/V)^2$ となる。通常は(1)式中の第一項により表わされる式を, Bethe-Blochの公式と呼ぶが, 広義的に(1)式全体に対し当該命名をすることもある。以下に各パラメータに関する今日までの各解析研究の成果をまとめておく。

2.1 平均イオン化エネルギー

平均イオン化エネルギー I の決定は, (1)式で示される軽イオン阻止能解析に関する各パラメータの中でも, 最も詳細に行なわれているものである。60年代のSternheimer⁶⁾, DaltonとTurner³⁸⁾による解析法は, 昔くは十分に重い標的原子に対する平均イオン化エネルギーを $I = I_0 Z_2$ ($I_0 \cong$ 約 10 eV; Bloch定数)と近似するBlochの方法に, 低原子番号標的原子に対する補正を加えたものである。Sternheimerの解析では, 平均イオン化エネルギー I_{adj} を内殻補正項($\beta = 1$ での)を含めた形で定義しており ($\ln I_{adj} = \ln I + \sum_i \frac{C_i}{Z_2} \Big|_{\beta=1}$), 相対論的補正が考慮されている。この種の解析法では, I を Z_2 の解析一次式として近似するため, 標的原子の殻構造を反映した振動は記述されない。平均イオン化エネルギーに関する数値計算は, ChuとPowers³⁹⁾(Hartree-Fock-Slater波動関数(HFS波動関数)を用いた局所プラズマ近似), Ziegler⁴⁰⁾(HFS波動関数及び固体内電子の波動関数を用いた局所プラズマ近似), Dehmerら⁴¹⁾, Inokutiら⁴²⁾(Hartree-Slater波動関数を用いた振動子強度の数値計算)により行なわれている。各解析の強度(I/Z_2), 標的原子の殻構造を反映した振動構造の比較を図1に示す。 I/Z_2 の Z_2 に関する振動のピーク位置とディップ位置は, どの解析においても定性的に一致し

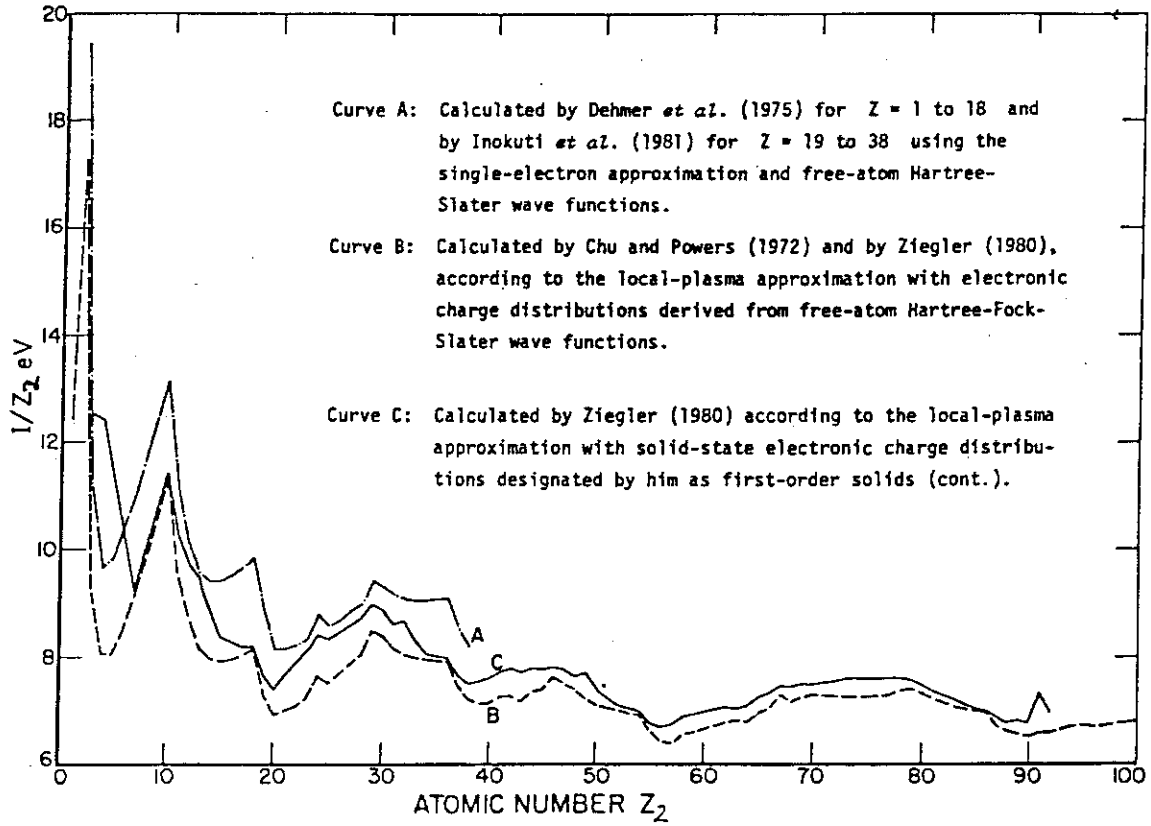


図1. 平均イオン化エネルギー（数値計算）（文献11）

表 I 各種物質に対する平均イオン化エネルギー (単位はeV) (文献6)

Z ₂	Material	NCRP (1961)	Fano (1963)	Bichsel (1968)	Turner <i>et al.</i> (1970)	Bichsel (1972)	Andersen and Ziegler (1977)
1	H ₂ (gas)	...	18.3 ± 2.6	18	18.2	19.2	18.8
1	H (liquid)	20.7	...	...	...	...	...
1	H (saturated compounds)	17.6	15 - 18	...	...	...	...
1	H (unsaturated compounds)	14.8	15 - 18	...	...	...	...
2	He (gas)	...	42 ± 3	42	44.3	41.3	41.7
3	Li (solid)	38	40, 38	...	37.4	39	47.6
4	Be (solid)	67	64	64	61.7	64	62.7
5	B (solid)	...	...	...	...	...	76
6	C (graphite)	78.4	81	78	81.2	78	77.3
6	C (saturated compounds)	77.3	77 - 80	...	...	...	...
6	C (unsaturated compounds)	75.1	77 - 80	...	...	...	...
6	C (highly chlorinated)	64.8	...	...	...	...	...
7	N ₂ (gas)	...	88	...	...	...	86.7
7	N (liquid)	85.1	...	...	...	...	...
7	N (amines, nitrates)	99.5	79 - 102	...	...	...	...
7	N (ring)	76.8	79 - 102	...	...	...	...
7	N (unspecified)	...	...	78	89.6	78	...
8	O ₂ (gas)	...	101	100	...	...	97.7
8	O (liquid)	98.3	...	...	...	...	...
8	O (-O-)	98.5	91 - 101	...	...	...	...
8	O (O=)	88.9	91 - 101	...	...	...	...
8	O (unspecified)	...	...	...	101	93	...
9	F (unspecified)	...	...	...	132	129	139
10	Ne (gas)	...	...	...	...	...	148
11	Na (unspecified)	...	...	...	...	...	156
12	Mg (unspecified)	...	...	...	...	...	162
13	Al (solid)	164	163	164	163	166	165
14	Si (solid)	...	...	170	...	173	172
15	P (unspecified)	...	...	...	...	...	180
16	S (solid)	...	...	...	...	...	...
17	Cl (liquid)	170	...	...	176	...	...
17	Cl (unspecified)	...	...	...	...	...	185
18	Ar (gas)	...	190	184	189	182	194
19	K (unspecified)	...	...	...	...	...	193
20	Ca (solid)	...	...	...	187	191	196
21	Sc (solid)	...	...	...	...	214	218
22	Ti (solid)	...	...	...	224	230	230
23	V (solid)	...	...	...	250	238	239
24	Cr (solid)	...	...	...	...	260	259
25	Mn (solid)	...	...	...	...	275	270
26	Fe (solid)	264	273	...	277	282	280
27	Co (solid)	...	...	...	290	303	296
28	Ni (solid)	...	...	312	312	306	310
29	Cu (solid)	306	315	322	316	319	322
30	Zn (solid)	...	...	...	319	328	320
31	Ga (unspecified)	...	...	...	...	...	324
32	Ge (solid)	...	...	350	...	...	330
33	As (unspecified)	...	...	...	...	...	338
34	Se (solid)	...	...	...	...	...	340
35	Br (unspecified)	...	...	...	...	...	349
36	Kr (gas)	...	360	...	350	358	358
37	Rb (unspecified)	...	...	...	...	...	363
38	Sr (unspecified)	...	...	...	...	...	370
39	Y (unspecified)	...	...	...	...	386	378
40	Zr (solid)	...	...	...	...	...	390
41	Nb (solid)	...	...	...	407	...	406
42	Mo (solid)	...	...	...	422	...	410
43	Tc (unspecified)	...	...	...	...	...	423
44	Ru (unspecified)	...	...	...	...	...	443
45	Rh (solid)	...	...	...	440	...	458
46	Pd (solid)	...	...	...	456	...	466
47	Ag (solid)	462	471	475	466	475	...
48	Cd (solid)	...	...	...	462	...	471
48	Cd (unspecified)	...	...	...	...	...	...
49	In (solid)	...	...	...	481	...	480

表 I (つづき)

Z_2	Material	NCRP (1961)	Fano (1963)	Bichsel (1968)	Turner <i>et al.</i> (1970)	Bichsel (1972)	Andersen and Ziegler (1977)
50	Sn (solid)	517	...	500	486	500	487
51	Sb (solid)	...	...	...	...	...	494
52	Te (unspecified)	...	...	...	...	...	495
53	I (unspecified)	...	...	...	...	...	498
54	Xe (gas)	...	...	...	480	...	497
55	Cs (unspecified)	...	...	...	...	...	490
56	Ba (unspecified)	...	...	...	...	...	483
57	La (unspecified)	...	...	...	...	...	480
58	Ce (solid)	...	...	...	...	...	493
59	Pr (unspecified)	...	...	...	...	...	507
60	Nd (unspecified)	...	...	...	...	...	521
61	Pm (unspecified)	...	...	...	...	...	537
62	Sm (unspecified)	...	...	...	...	...	548
63	Eu (unspecified)	...	...	...	...	...	562
64	Gd (solid)	...	...	...	...	...	564
65	Tb (unspecified)	...	...	...	...	...	585
66	Dy (unspecified)	...	...	...	...	...	600
67	Ho (unspecified)	...	...	...	...	...	623
68	Er (solid)	...	...	...	...	...	640
69	Tm (unspecified)	...	...	...	...	...	652
70	Yb (solid)	...	...	...	...	...	662
71	Lu (unspecified)	...	...	...	...	...	672
72	Hf (unspecified)	...	...	...	...	...	682
73	Ta (solid)	...	...	730	692	707	684
74	W (solid)	750	...	740	704	...	693
75	Re (unspecified)	...	...	...	...	...	698
76	Os (unspecified)	...	...	...	...	...	707
77	Ir (solid)	...	...	...	...	730	...
77	Ir (unspecified)	...	...	...	...	...	735
78	Pt (solid)	...	...	780	711	780	759
79	Au (solid)	...	761	790	760	784	755
80	Hg (unspecified)	...	...	...	...	...	756
81	Tl (unspecified)	...	...	...	...	...	748
82	Pb (solid)	812	788	820	767	813	759
83	Bi (solid)	...	...	...	...	...	765
84	Po (unspecified)	...	...	...	...	...	775
85	At (unspecified)	...	...	...	...	...	785
86	Rn (unspecified)	...	...	...	...	...	793
87	Fr (unspecified)	...	...	...	...	...	796
88	Ra (unspecified)	...	...	...	...	...	799
89	Ac (unspecified)	...	...	...	...	...	808
90	Th (solid)	...	...	...	698	...	...
90	Th (unspecified)	...	...	...	...	...	825
91	Pa (unspecified)	...	...	...	...	...	837
92	U (solid)	945	872	900	856	...	847
	Air (gas)	85	85	...	...	...	...
	Emulsion (solid)	...	323	...	...	...	...
	Methane (gas)	...	45	...	...	...	...

表II 各種物質に対する平均イオン化エネルギー (単位はeV) (文献49)

Z_2	Elements	Nara	50-51) Andersen (Risø)	46) Turner	19) Andersen	40) Ziegler
4	Be	64.0±1.0		61.7	62.7	63
13	Al	167.6±2.8		163	162	162
22	Ti	232.3±4.9	229.8±2.6	224	230	228
23	V	241.8±5.2	239.2±2.8	250	239	237
26	Fe	282.5±6.5	280.6±3.1	277	280	284
27	Co	295.9±6.9	298.8±3.7	290	296	304
28	Ni	312.7±7.5	303.2±3.7	312	310	314
29	Cu	323.5±7.9	319.8±3.2	316	322	330
30	Zn	331.3±8.2	323.1±3.8	319	320	323
40	Zr	401.2±11			378	382
42	Mo	413 ±12		422	406	393
45	Rh	445 ±14		440	443	436
46	Pd	459 ±14		456	458	456
47	Ag	464 ±15	469 ±8	466	466	470
48	Cd	457 ±14		462	471	466
49	In	485 ±15		481	480	479
50	Sn	471 ±15		486	487	512
73	Ta	676 ±26		692	684	682
78	Pt	730 ±29		711	759	760
79	Au	746 ±30	771 ±20	760	755	742
82	Pb	746 ±30	773 ±20	767	759	761

ているが、Dehmerら、Inokutiらによる数値結果は、ChuとPowersおよび、Zieglerの結果に対し、全体的に1～2 eV程度大きな値を与えている。表Iに各元素に対するI値を示す。'77年以前の解析⁴³⁻⁴⁷⁾には、 Z_1^3 -項、Bloch項は含まれていないが、実験データの蓄積による近年のこの種の解析では、5%前後の範囲内のIの決定が議論され、テーブル化されている。国内においては石割ら^{48,49)}によりIの解析が行なわれている。21種類の元素に対する解析結果ならびに各種解析との比較を表IIに示す。(1)式中の第1項に対する、第2項、第3項の寄与が10～20%内のオーダーであることを考えれば、主に単体物質に対する平均イオン化エネルギーIの値は、信頼性の高いものと言える。今後、各種化合物に対する解析が進められるであろう。

2.2 内殻補正項, Z_1^3 項およびBloch項

内殻補正項, Z_1^3 項およびBloch項の決定は、平均イオン化エネルギーの決定程、多くの議論が行なわれているわけではない。この主な理由は、これら3つの項が当該エネルギー領域での軽イオン阻止能解析において、(1)式中の第一項に対し、高次の補正項を与えるため、より高精度の実験が要求されること、および補正項中に複数のパラメータが含まれることによる不確度度に起因する。 Z_1^3 -項、Bloch項を分離する実験は、1977年、Andersenら¹⁸⁾により行なわれた。陽子、Heイオン、Liイオンの3種類のイオンに対する阻止能測定から、(1)式中の L_0 、 L_1 、 L_2 を決定するものである。 L_0 、 L_1 、 L_2 は次式により得られる。

$$\left. \begin{aligned} L_0 &= \ell n \left(\frac{2 m V^2}{1 - \beta^2} \right) - \beta^2 - X_{Li} - 3 (X_H - X_{He}) \\ L_1 &= \frac{5}{2} (X_H - X_{He}) + \frac{3}{2} (X_{Li} - X_{He}) \\ L_2 &= -\frac{1}{2} (X_H - X_{He}) - \frac{1}{2} (X_{Li} - X_{He}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ただし

$$X = \ell n I + \sum_i \frac{C_i}{Z_2} - Z_1 L_1 - Z_1^2 L_2 \quad (6)$$

であり、 X_H 、 X_{He} 、 X_{Li} は各イオンに対する阻止能の測定値を表わす。 L_1 、 L_2 の L_0 に対する寄与は、それぞれ $\frac{1}{10} L_0$ 、 $\frac{1}{100} L_0$ のオーダーである。図2は、(3)式中の換算速度 $x = \frac{V}{Z_2^{1/2} V_0}$ を $x = \frac{V}{Z_2^{P_1} V_0}$ とパラメータ化することにより得られたスケーリング曲線で、理論値 $P_1 = 1/2$ に対し、最適値として $1/3$ が得られている。内殻補正項の決定に関しては議論がある。理論的には、局所プラズマ近似によるBonderupの方法¹⁰⁾と各殻の寄与を量子力学的に計算するBichselの方法¹¹⁾がある。図3に両者の比較を示す。陽子エネルギー1～5 MeV前後のエネルギー領域での実験からは、現在の所、相方の定量的差を判定する結果は得られていない。当該差異の判定には、両者の差が顕著となる5～10 MeVの領域、高原子番号物質での陽子に対する阻止能実験が必要であろう^{7,11)}。他方、陽子阻止能に対する各殻の寄与を、数値波動関数

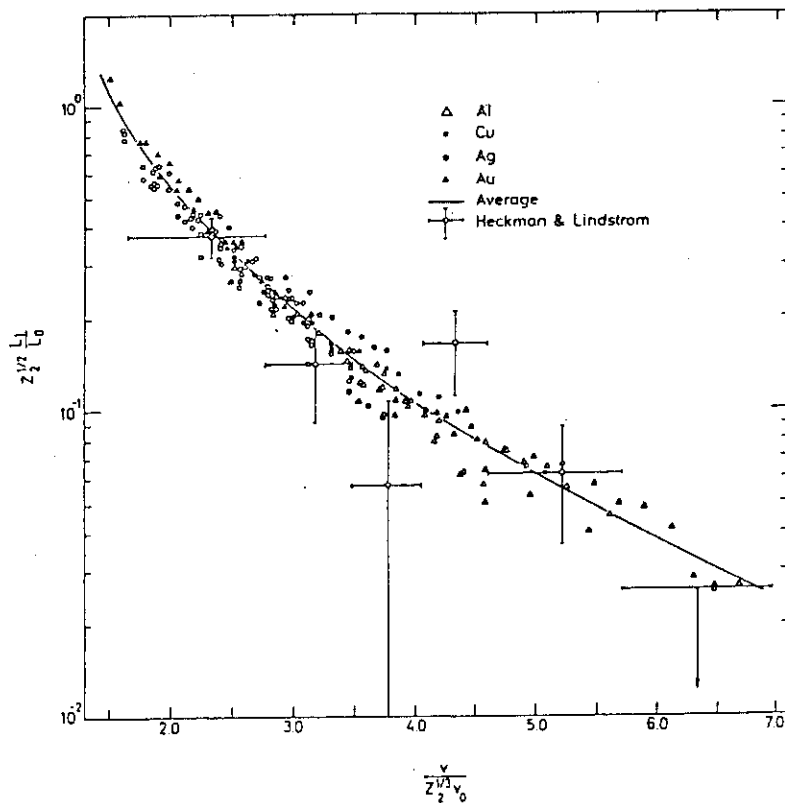


図2 Z_1^3 -項のスケーリング (文献18)

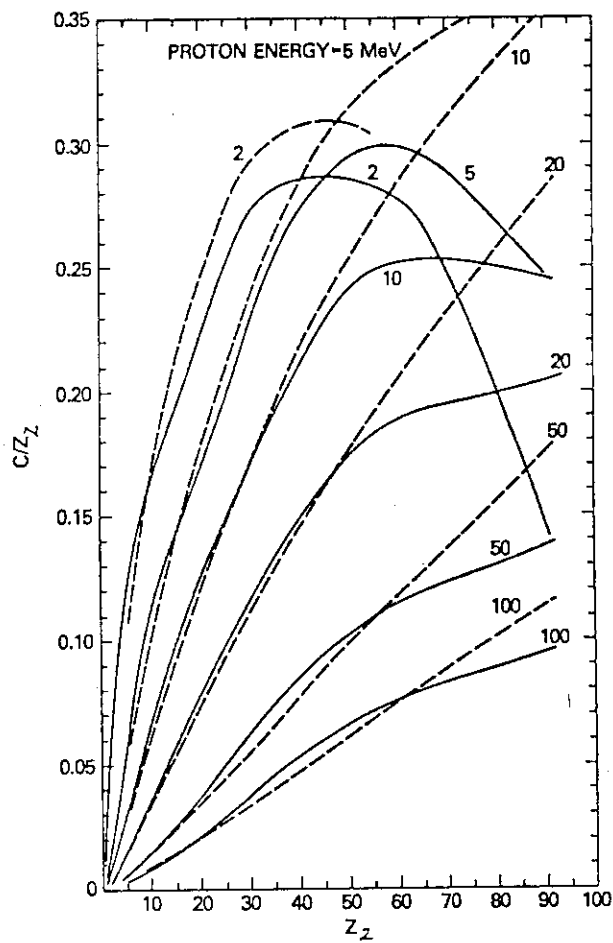


図3 内殻補正項, 実線は Bichsel¹¹⁾, 破線は Bonderup¹⁰⁾の計算を示す (文献11)

を駆使したコンピューター計算により求める手法が McGuire^{12, 52)}によって開発されている。計算は第一ボルン近似の枠内で行なわれており、1 MeV 前後の陽子エネルギー領域では、(1)式の第一項のみによる解析結果との間に差が生じる。このエネルギー領域での Z_1^3 -項、Bloch項の定量評価の解析精度が向上すれば、こうしたコンピューター計算による手法から、内殻補正項を定量的に評価することが可能となるかもしれない。

以上が高次の補正項に対する解析研究の現状である。この節の最初にも述べたことであるが、これらの各補正項の定量的判定は、現在の所、不確定度を持ち、平均イオン化エネルギーの決定ほど十分精度の高いものではない。しかしながら、ここで取り上げているエネルギー領域での軽イオン阻止能の解析は、後述する各種阻止能解析とは異なり、理論式の確定の度合いが高い。この種の軽イオン阻止能解析の成果が、有効電荷による重イオン阻止能解析、各種阻止能データの実験式、および数値テーブルの作成に寄与し、またその成果が多方面で活用されるためにも、計算機研究、ならびにより高精度の実験研究の進展が期待されるものである。

3. 阻止能データの実験式および数値テーブル

阻止能データの実験式および数値テーブルに関する解析は、軽イオン、重イオン、エネルギー領域、あるいは、理論公式の確定の度合い、精度の高い阻止能実験式の確立の要請など、各研究分野が直面している課題に応じて進められている。この章では、有効電荷による重イオン阻止能の解析（第4章）を除いた、各種解析法について述べることにしよう。

外挿法による高速領域から低速領域にわたる阻止能実験式の作成は、Brice (3パラメータ法)^{53, 54)}、Andersen と Ziegler (陽子に対する阻止能; 4パラメータ法)¹⁹⁾、Ziegler (Heイオンに対する阻止能; 5パラメータ法)²⁰⁾により行なわれている。また、各試料物質に対するパラメータの値が、阻止能実験曲線から決定され、テーブル化されている。Briceの方法は、低速領域における Firsov 理論と高速領域における Bethe 理論を3つのパラメータにより結合したものである。阻止能実験式を以下に示す。

$$S = (Z_1 + Z_2) Se(\epsilon) f(a, n) \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} (7)$$

$$Se = \frac{4 \hbar^2}{5m} \left[\epsilon^{1/2} \left(\frac{C_3 \epsilon^3 + C_2 \epsilon^2 + C_1 \epsilon + 21}{3(1 + \epsilon)^3} \right) + (10\epsilon + 1) \arctan \epsilon^{1/2} \right]$$

$$f(a, n) = [1 + (aV/V_0)^n]^{-1}$$

ただし、 $\epsilon = (V/2V_0Z)^2$ 、 $a = V_0T/\ell$ 、 n ; 指数であり、各々 Z 、 T 、 ℓ はイオンの有効電荷、散乱に寄与する軌道電子の周期、イオン-電子間の相互作用半径を表わす。 C_1 、 C_2 、 C_3 は発表当初 (1972年)、 $\{C_1 = 74, C_2 = 83, C_3 = 30\}$ と定められていたが⁵³⁾、1975年に $\{C_1 = 53, C_2 = 30, C_3 = 0\}$ と改訂されている⁵⁴⁾。各種イオン-物質対間の阻止能実験データに対し、3つのパラメータ、 Z 、 a 、 n の値がテーブル化されている。

Andersen と Ziegler¹⁹⁾、および Ziegler²⁰⁾の方法は、中間領域での阻止能実験式を

を駆使したコンピューター計算により求める手法が McGuire^{12, 52)}によって開発されている。計算は第一ボルン近似の枠内で行なわれており、1 MeV前後の陽子エネルギー領域では、(1)式の第一項のみによる解析結果との間に差が生じる。このエネルギー領域での Z_1^3 -項、Bloch項の定量評価の解析精度が向上すれば、こうしたコンピューター計算による手法から、内殻補正項を定量的に評価することが可能となるかもしれない。

以上が高次の補正項に対する解析研究の現状である。この節の最初にも述べたことであるが、これらの各補正項の定量的判定は、現在の所、不確定度を持ち、平均イオン化エネルギーの決定ほど十分精度の高いものではない。しかしながら、ここで取り上げているエネルギー領域での軽イオン阻止能の解析は、後述する各種阻止能解析とは異なり、理論式の確定の度合いが高い。この種の軽イオン阻止能解析の成果が、有効電荷による重イオン阻止能解析、各種阻止能データの実験式、および数値テーブルの作成に寄与し、またその成果が多方面で活用されるためにも、計算機研究、ならびにより高精度の実験研究の進展が期待されるものである。

3. 阻止能データの実験式および数値テーブル

阻止能データの実験式および数値テーブルに関する解析は、軽イオン、重イオン、エネルギー領域、あるいは、理論公式の確定の度合い、精度の高い阻止能実験式の確立の要請など、各研究分野が直面している課題に応じて進められている。この章では、有効電荷による重イオン阻止能の解析（第4章）を除いた、各種解析法について述べることにしよう。

外挿法による高速領域から低速領域にわたる阻止能実験式の作成は、Brice（3パラメータ法）^{53, 54)}、Andersen と Ziegler（陽子に対する阻止能；4パラメータ法）¹⁹⁾、Ziegler（Heイオンに対する阻止能；5パラメータ法）²⁰⁾により行なわれている。また、各試料物質に対するパラメータの値が、阻止能実験曲線から決定され、テーブル化されている。Briceの方法は、低速領域における Firsov 理論と高速領域における Bethe 理論を3つのパラメータにより結合したものである。阻止能実験式を以下に示す。

$$S = (Z_1 + Z_2) Se(\epsilon) f(a, n) \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} (7)$$

$$Se = \frac{4 \hbar^2}{5m} \left[\epsilon^{1/2} \left(\frac{C_3 \epsilon^3 + C_2 \epsilon^2 + C_1 \epsilon + 21}{3(1 + \epsilon)^3} \right) + (10\epsilon + 1) \arctan \epsilon^{1/2} \right]$$

$$f(a, n) = [1 + (aV/V_0)^n]^{-1}$$

ただし、 $\epsilon = (V/2V_0Z)^2$ 、 $a = V_0T/\ell$ 、 n ；指数であり、各々 Z 、 T 、 ℓ はイオンの有効電荷、散乱に寄与する軌道電子の周期、イオン-電子間の相互作用半径を表わす。 C_1 、 C_2 、 C_3 は発表当初（1972年）、 $\{C_1 = 74, C_2 = 83, C_3 = 30\}$ と定められていたが⁵³⁾、1975年に $\{C_1 = 53, C_2 = 30, C_3 = 0\}$ と改訂されている⁵⁴⁾。各種イオン-物質対間の阻止能実験データに対し、3つのパラメータ、 Z 、 a 、 n の値がテーブル化されている。

Andersen と Ziegler¹⁹⁾、および Ziegler²⁰⁾の方法は、中間領域での阻止能実験式を

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{S_{\text{low}}} + \frac{1}{S_{\text{High}}} \rightarrow S = \frac{S_{\text{low}} S_{\text{High}}}{S_{\text{low}} + S_{\text{High}}} \quad (8)$$

より決定するものである。この種の方法は、最初 Varelas と Biersack⁵⁵⁾により提案されたものである。S_{low} および S_{High} は各々、低速領域、高速領域での阻止能を表わし、次の式で記述される。

$$\left. \begin{aligned} S_{\text{low}} &= A_1 E^{A_2} \\ S_{\text{High}} &= \frac{A_3}{E} \ln \left(1 + \frac{A_4}{E} + A_5 E \right) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

A₁～A₅ はそれぞれ、低速領域および高速領域での阻止能公式により記述される係数であるが、陽子に対する阻止能解析では、4パラメータ法 (A₂=0.45, A₁, A₃～A₅ をパラメータとする)、He イオンに対する阻止能解析では5パラメータ法により実験式の確定が行なわれている。E はイオンエネルギーを表わし、エネルギー単位の取り方は、各テーブルにより異なる。各種気体、固体に対するパラメータが、実験データとのフィットにより決定され、テーブル化されている。He イオン、各種固体に対する一例を表Ⅲに示す (この解析では、(9)式中の S_{High}式において E → E/1000 および E の単位は keV として A₁～A₅ の各係数が決定されている)。当該テーブルの定量評価に関する報告が、最近においても行なわれているが^{56, 57)}、この Andersen と Ziegler, Ziegler のテーブルは、陽子、He イオンに関する実験公式として、最も広く引用されているものである。

これらの中間エネルギー領域を記述する実験式の主要な利点は、各イオン-物質対に対する最適値パラメータのテーブル化により、実験曲線を再現する点にある。理論的取り扱いのむずかしい中間エネルギー領域では、この種の解析法は十分な有効性を持つ。

重イオン阻止能を含んだ阻止能データの数値テーブルの作成は、Northcliffe と Schilling³²⁾ (0.0125～12 MeV/amu の各イオン、12種の固体、9種の気体、3種の化合物に対してテーブル化されている)、Hubert ら³⁴⁾ (2.5～12 MeV/amu の各種イオン、18種の固体に対してテーブル化されている)、最近では Ziegler³⁵⁾により行なわれている。また、阻止能研究の興味が軽イオンから重イオンへと移りつつある今日、重イオン阻止能データとこれらのテーブルを比較する実験が行なわれている。NS テーブル、あるいは Ziegler のテーブルとの比較は、Anthony と Lanford⁵⁸⁾、Potter⁵⁹⁾、Ziegler ら⁶⁰⁾により行なわれているが、これらの重イオン阻止能解析は、重イオン阻止能の有効電荷による解析と関連するため、次章で述べることにする。NS テーブル、Hubert らのテーブルとの阻止能値の直接的な比較が、GSI のグループ⁶¹⁾により行なわれている。実験は、C, Al, Ni, Ag, Au 試料中に入射した O, Ar, Cu, Kr, Xe, Pb, U イオンに関するもので、測定値との定量的一致は Hubert らのテーブルの方が良いことが指摘されている。NS テーブル値は、低原子番号阻止物質側で 20～60% 程度のずれを示すのに対し、Hubert らの値は ±10% の範囲内にある。

国内における阻止能解析のための阻止能公式ならびに数値テーブルの作成は、杉山³³⁾により行なわれている。杉山の方法は、理論的ベースとしては Bethe-Bloch の公式を基礎としてい

表Ⅲ 5パラメータ法によるHeイオン阻止能実験式の係数(文献20)

SOLIDS					TABLE 4					SOLIDS				
COEFFICIENTS FOR LOW ENERGY HELIUM STOPPING														
TARGET	A - 1	A - 2	A - 3	A - 4	A - 5	TARGET	A - 1	A - 2	A - 3	A - 4	A - 5			
H[1]	0.9661	0.4126	6.92	8.831	2.582	AG[47]	5.6	0.49	130	10	2.844			
HE[2]	2.027	0.2931	26.34	6.66	0.3409	CD[48]	3.55	0.6068	124.7	1.112	3.119			
LI[3]	1.42	0.49	12.25	32	9.161	IN[49]	3.6	0.62	105.8	0.1692	6.026			
BE[4]	2.206	0.51	15.32	0.25	8.995	SN[50]	5.4	0.53	103.1	3.931	7.767			
B[5]	3.691	0.4128	18.48	50.72	9	SB[51]	3.97	0.6459	131.8	0.2233	2.723			
C[6]	4.232	0.3877	22.99	35	7.993	TE[52]	3.65	0.64	126.8	0.6834	3.411			
N[7]	2.51	0.4752	38.26	13.02	1.892	I[53]	3.118	0.6519	164.9	1.208	1.51			
O[8]	1.766	0.5261	37.11	15.24	2.804	XE[54]	2.031	0.7181	153.1	1.362	1.958			
F[9]	1.533	0.531	40.44	18.41	2.718	CS[55]	14.4	0.3923	152.5	8.354	2.597			
NE[10]	1.183	0.55	39.83	17.49	4.001	BA[56]	10.99	0.4599	138.4	4.811	3.726			
NA[11]	9.894	0.3081	23.65	0.384	92.93	LA[57]	16.6	0.3773	224.1	6.28	0.9121			
MG[12]	4.3	0.47	34.3	3.3	12.74	CE[58]	10.54	0.4533	159.3	4.832	2.529			
AL[13]	2.5	0.625	45.7	0.1	4.359	PR[59]	10.33	0.4502	162	5.132	2.444			
SI[14]	2.1	0.65	49.34	1.788	4.133	ND[60]	10.15	0.4471	165.6	5.378	2.328			
P[15]	1.729	0.6562	53.41	2.405	3.845	PM[61]	9.976	0.4439	168	5.721	2.258			
S[16]	1.402	0.6791	58.98	3.528	3.211	SM[62]	9.804	0.4408	176.2	5.675	1.997			
CL[17]	1.117	0.7044	69.69	3.705	2.156	EU[63]	14.22	0.363	228.4	7.024	1.016			
AR[18]	0.9172	0.724	79.44	3.648	1.646	GD[64]	9.952	0.4318	233.5	5.065	0.9244			
K[19]	8.554	0.3817	83.61	11.84	1.875	TB[65]	9.272	0.4345	210	4.911	1.258			
CA[20]	6.297	0.4622	65.39	10.14	5.036	DY[66]	10.13	0.4146	225.7	5.525	1.055			
SC[21]	5.307	0.4918	61.74	12.4	6.665	HO[67]	8.949	0.4304	213.3	5.071	1.221			
TI[22]	4.71	0.5087	65.28	8.806	5.948	ER[68]	11.94	0.3783	247.2	6.655	0.849			
V[23]	6.151	0.4524	83	18.31	2.71	TM[69]	8.472	0.4405	195.5	4.051	1.604			
CR[24]	6.57	0.4322	84.76	15.53	2.779	YB[70]	8.301	0.4399	203.7	3.667	1.459			
MN[25]	5.738	0.4492	84.61	14.18	3.101	LU[71]	6.567	0.4858	193	2.65	1.66			
FE[26]	5.013	0.4707	85.58	16.55	3.211	HF[72]	5.951	0.5016	196.1	2.662	1.589			
CO[27]	4.32	0.4947	76.14	10.85	5.441	TA[73]	7.495	0.4523	251.4	3.433	0.8619			
NI[28]	4.652	0.4571	80.73	22	4.952	W[74]	6.335	0.4825	255.1	2.834	0.8228			
CU[29]	3.114	0.5236	76.67	7.62	6.385	RE[75]	4.314	0.5558	214.8	2.354	1.263			
ZN[30]	3.114	0.5236	76.67	7.62	7.502	OS[76]	4.02	0.5681	219.9	2.402	1.191			
GA[31]	3.114	0.5236	76.67	7.62	8.514	IR[77]	3.836	0.5765	210.2	2.742	1.305			
GE[32]	5.746	0.4662	79.24	1.185	7.993	PT[78]	4.68	0.5247	244.7	2.749	0.8962			
AS[33]	2.792	0.6346	106.1	0.2986	2.331	AU[79]	3.223	0.5883	232.7	2.954	1.05			
SE[34]	4.667	0.5095	124.3	2.102	1.667	HG[80]	2.892	0.6204	208.6	2.415	1.416			
BR[35]	2.44	0.6346	105	0.83	2.851	TL[81]	4.728	0.5522	217	3.091	1.386			
KR[36]	1.491	0.7118	120.6	1.101	1.877	PB[82]	6.18	0.52	170	4	3.224			
RB[37]	11.72	0.3826	102.8	9.231	4.371	BI[83]	9	0.47	198	3.8	2.032			
SR[38]	7.126	0.4804	119.3	5.784	2.454	PO[84]	2.324	0.6997	216	1.599	1.399			
Y[39]	11.61	0.3955	146.7	7.031	1.423	AT[85]	1.961	0.7286	223	1.621	1.296			
ZR[40]	10.99	0.41	163.9	7.1	1.052	RN[86]	1.75	0.7427	350.1	0.9789	0.5507			
NB[41]	9.241	0.4275	163.1	7.954	1.102	FR[87]	10.31	0.4613	261.2	4.738	0.9899			
MO[42]	9.276	0.418	157.1	8.038	1.29	RA[88]	7.962	0.519	235.7	4.347	1.313			
TC[43]	3.999	0.6152	97.6	1.297	5.792	AC[89]	6.227	0.5645	231.9	3.961	1.379			
RU[44]	4.306	0.5658	97.99	5.514	5.754	TH[90]	5.246	0.5947	228.6	4.027	1.432			
RH[45]	3.615	0.6197	86.26	0.333	8.689	PA[91]	5.408	0.5811	235.7	3.961	1.358			
PD[46]	5.8	0.49	147.2	6.903	1.289	U[92]	5.218	0.5828	245	3.838	1.25			

LOW ENERGY STOPPING VALID 1 KEV - 10 MEV
FOR LOW ENERGY STOPPING FORMULA SEE TABLE 3

STOPPING POWER COEFFICIENTS
FOR STOPPING POWERS FROM ALL
VOLUMES IN THIS SERIES CAN
BE OBTAINED ON IBM-CARDS.
CONSULT THE AUTHOR

るが、LSS理論との低速領域側での接続を考え、入射イオン内電子の自己電離や励起、有効的な電荷数 Z_1^* 、 Z_2^* および有効的な平均イオン化エネルギー I^* を導入した点に特徴がある。年代的には '70年代中期に属する。この方法には、阻止能公式を、入射イオンのエネルギー E 、質量 M 、原子番号 Z_1 、および標的原子の原子番号 Z_2 から決定できる簡便さがある。

以上の阻止能テーブルの解析精度は、重イオン-物質対にも依存するが、最近の重イオン阻止能実験との比較例では、 $\pm 10\%$ 前後のケースから $50\sim 60\%$ 前後のケースの範囲内にある。次に重イオン阻止能の有効電荷による解析について述べることにしよう。

4. 重イオン阻止能と有効電荷

4.1 スケーリング則

物質中を通過する重イオンの荷電状態は、電子捕獲や損失による電荷移行過程を通して決定される。電子捕獲、損失の断面積は、衝突素過程として直接的に定まる量であり、その定量的決定はそれ自体で一つの研究分野を構成する。電荷移行過程は、電子交換を伴うため三体問題に属する衝突過程であり、重イオンのように多電子系が対象となる場合、その解析は複雑困難なものとなる。このため、重イオン阻止能解析は、重イオン加速器の固体研究への応用が現実化するに至って始めて、十分に重いイオンに対する有効電荷の解析から着手された。十分に重いイオンでは、有効電荷の統計的手法に基づくスケーリング解析の妥当性が近似的に成立する。1972年、BrownとMoak⁸⁾は、C, Al, Ni, Ag 試料中に入射したBr, I, Uイオンに対する阻止能測定により、次のような二つの結論を得た。

- (i) 低速領域での重イオン阻止能 S は、LSS理論やFirsov理論により示される、速度に対して線型な $S = bE^{1/2}$ の依存性を示さず、外挿法的には $S = a + bE^{1/2}$ ($a < 0$) の傾向を示し、この傾向は重いイオン程顕著である。ここで E はイオンのエネルギーである。
- (ii) 重イオン阻止能を同速度での陽子に対する阻止能でスケーリングすることにより、有効電荷比 γ がユニバーサルな曲線で表わされる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} S_{Z_1} / S_P &= \frac{\gamma^2 Z_1^2}{\gamma_P^2}, & Z_{\text{eff}} &= \gamma Z_1 \\ \gamma &= 1 - 1.034 \times \exp\left(-\frac{V}{V_0 Z_1^{0.688}}\right) \\ \gamma_P^2 &= (1 - e^{-150 E_P}) \exp(-0.835 e^{-14.5 E_P}) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

である。ここで S_{Z_1} 、 S_P は重イオンおよび陽子に対する阻止能、 Z_{eff} は重イオン有効電荷を表わす。 γ_P は陽子の有効電荷を表わす経験式で E_P は MeV 単位で表わした陽子のエネルギーである。

図4、図5に(i)、(ii)に対応する結果を示す。(i)の効果は、最近においては重イオンのみなら

るが、LSS理論との低速領域側での接続を考え、入射イオン内電子の自己電離や励起、有効的な電荷数 Z_1^* 、 Z_2^* および有効的な平均イオン化エネルギー I^* を導入した点に特徴がある。年代的には '70年代中期に属する。この方法には、阻止能公式を、入射イオンのエネルギー E 、質量 M 、原子番号 Z_1 、および標的原子の原子番号 Z_2 から決定できる簡便さがある。

以上の阻止能テーブルの解析精度は、重イオン-物質対にも依存するが、最近の重イオン阻止能実験との比較例では、 $\pm 10\%$ 前後のケースから $50\sim 60\%$ 前後のケースの範囲内にある。次に重イオン阻止能の有効電荷による解析について述べることにしよう。

4. 重イオン阻止能と有効電荷

4.1 スケーリング則

物質中を通過する重イオンの荷電状態は、電子捕獲や損失による電荷移行過程を通して決定される。電子捕獲、損失の断面積は、衝突素過程として直接的に定まる量であり、その定量的決定はそれ自体で一つの研究分野を構成する。電荷移行過程は、電子交換を伴うため三体問題に属する衝突過程であり、重イオンのように多電子系が対象となる場合、その解析は複雑困難なものとなる。このため、重イオン阻止能解析は、重イオン加速器の固体研究への応用が現実化するに至って始めて、十分に重いイオンに対する有効電荷の解析から着手された。十分に重いイオンでは、有効電荷の統計的手法に基づくスケーリング解析の妥当性が近似的に成立する。1972年、BrownとMoak⁸⁾は、C, Al, Ni, Ag 試料中に入射した Br, I, Uイオンに対する阻止能測定により、次のような二つの結論を得た。

- (i) 低速領域での重イオン阻止能 S は、LSS理論やFirsov理論により示される、速度に対して線型な $S = bE^{1/2}$ の依存性を示さず、外挿法的には $S = a + bE^{1/2}$ ($a < 0$) の傾向を示し、この傾向は重いイオン程顕著である。ここで E はイオンのエネルギーである。
- (ii) 重イオン阻止能を同速度での陽子に対する阻止能でスケーリングすることにより、有効電荷比 γ がユニバーサルな曲線で表わされる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} S_{Z_1} / S_P &= \frac{\gamma^2 Z_1^2}{\gamma_P^2}, & Z_{\text{eff}} &= \gamma Z_1 \\ \gamma &= 1 - 1.034 \times \exp\left(-\frac{V}{V_0 Z_1^{0.688}}\right) \\ \gamma_P^2 &= (1 - e^{-150 E_P}) \exp(-0.835 e^{-14.5 E_P}) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

である。ここで S_{Z_1} 、 S_P は重イオンおよび陽子に対する阻止能、 Z_{eff} は重イオン有効電荷を表わす。 γ_P は陽子の有効電荷を表わす経験式で E_P は MeV 単位で表わした陽子のエネルギーである。

図4、図5に(i)、(ii)に対応する結果を示す。(i)の効果は、最近においては重イオンのみなら

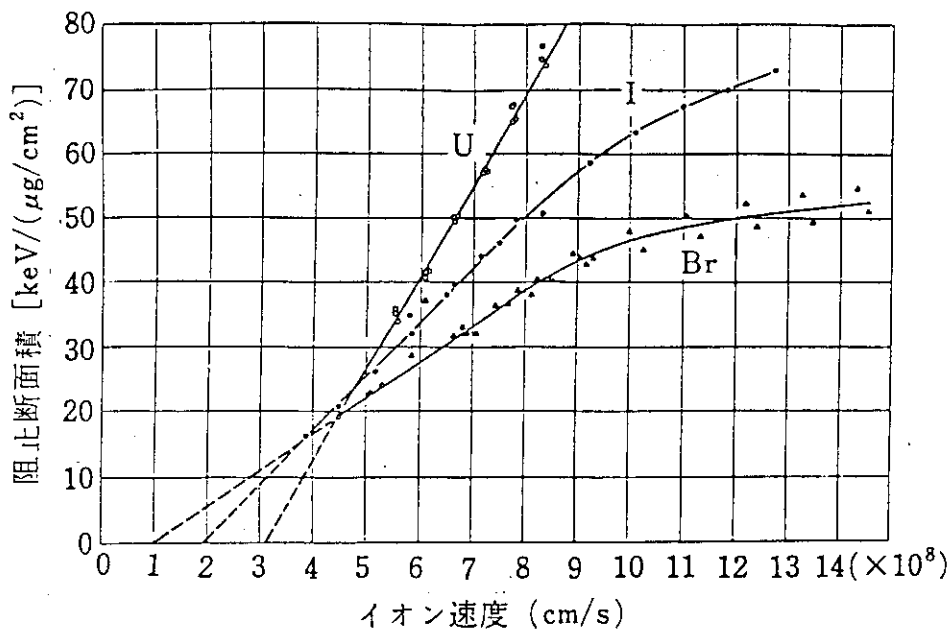


図4 C 試料中に入射した Br, I, U イオンに対する阻止断面積 (文献 8)

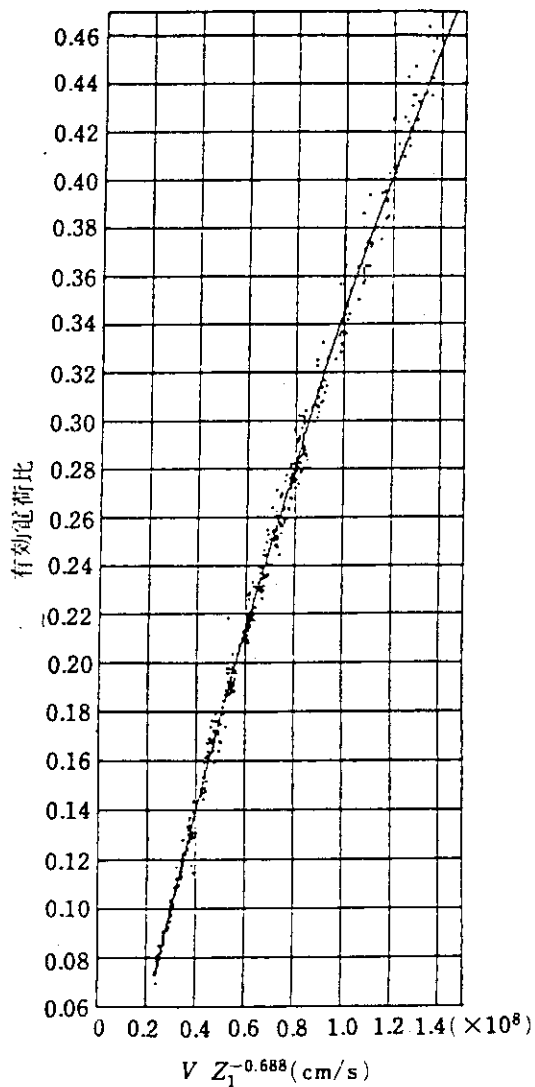


図5 有効電荷比のスケーリング曲線 (文献 8)

ず、He, N, Ne, Arイオンでも観測されている。これは重イオン有効電荷が速度依存性を持つために現われる効果である。 γ の指示部の引数は、イオン速度と標的原子内電子の有効速度間の比と解釈され、この種の解析は、古くはBohrの重イオン荷電状態に関する速度条件⁶²⁾に由来する。BrownとMoakの測定の高エネルギー側の領域をカバーする実験が1980年になりGSIのグループ⁶³⁾により行なわれている。二つのグループの測定データの接続は良く、より高エネルギー側でも、細かな試料依存性を除き、(10)式によるスケーリングが成立する。以上の結論は、有効電荷による阻止能解析に大きな影響を与えた。1975年、Brandtは⁶⁴⁾、Bohrの速度条件を中性原子に対するThomas-Fermi型電子分布に適用し、 $V/V_0 Z_1^{2/3}$ によるスケーリング曲線を数値的に導出している。数値表を表Nに示す⁶⁵⁾。この解析では、実験データから得られるスケーリング曲線にフィットするためのパラメータbが導入されており、 $b=1.26$ あるいは $b=1.33$ （十分に重いイオン）が仮定されている。統計的変分原理に基づくN電子原子系の電子分布により、当該系と中性原子($N=Z_1$)間の、1電子当りの電子の平均速度の差が入射イオン速度にはほぼ等しいと仮定することからもスケーリング曲線が得られることが指摘されている⁶⁶⁾。(10)式と同型の関数

$$\gamma = 1 - A \times \exp\left(-\frac{\lambda V}{V_0 Z_1^\beta}\right) \quad (11)$$

により、 A 、 λ 、 β の一部ないしは全体をパラメータとして扱う解析がPorter⁵⁹⁾、最近ではAnthonyとLanford⁵⁸⁾により行なわれている。この手法の解析については、4.3節で述べる。

表N スケーリング曲線の数値表（文献65）

Z_1^*/Z_1	$v_1/v_0 Z_1^{2/3}$	
	$b=1.26$	$b=1.33$
0.012	0.023	0.024
0.034	0.050	0.053
0.070	0.093	0.098
0.101	0.129	0.136
0.155	0.189	0.100
0.197	0.238	0.251
0.256	0.312	0.330
0.305	0.375	0.396
0.344	0.432	0.456
0.391	0.504	0.532
0.447	0.600	0.633
0.480	0.660	0.697
0.515	0.731	0.771
0.554	0.816	0.862
0.598	0.924	0.975
0.645	1.057	1.116
0.698	1.233	1.302
0.756	1.474	1.556
0.819	1.824	1.928
0.852	2.092	2.208
0.886	2.432	2.567
0.919	2.936	3.098
0.952	3.767	3.977
0.981	5.620	5.932

4.2 スケーリング則からのずれ

十分に重いイオンに対しては、スケーリング則が成り立つのに対し、He~Arイオン程度の原子番号領域のイオンでは、スケーリング則からのずれが現われる。このずれは、イオンの原子番号が小さくなるほど顕著となり、軽イオンに属するHeイオンでは、スケーリング曲線とまったく異なる依存性を示す。図6にSchulzらによる実験結果を示す^{31,67)}。この物理的背景は次のように考えることができる。遠隔衝突部分に対応した衝突過程では、部分的にイオン化された(束縛電子を有した)イオンの電荷を点電荷として扱うことが可能となるが、近接衝突部分では、イオン-電子間の最小衝突径数が、イオン半径と同程度ないしはそれより小さくなるため、阻止能にイオンのサイズ効果が現われる。

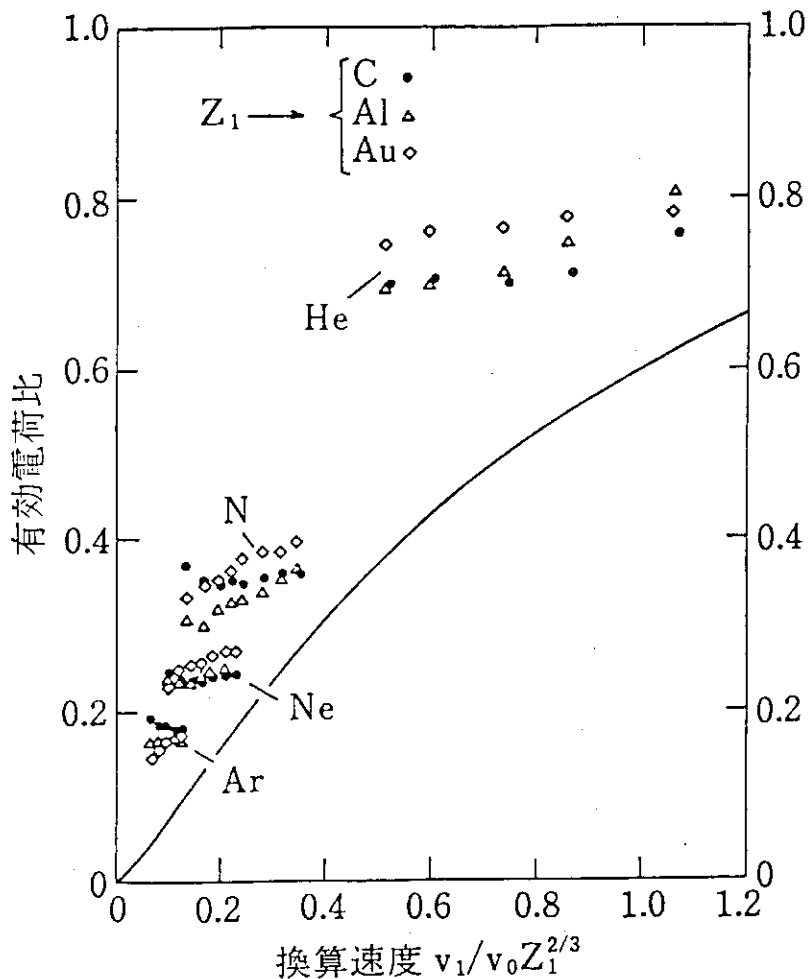


図6 He, N, Ne, Arイオンに対する有効電荷比。実線はスケーリング曲線を表わす(文献31)

他方、古典的統計手法によれば、イオン半径の大きさを表わす、電子分布の広がり平均半径は、 $Z_1^{-1/3}$ に比例する⁶⁸⁾。平均イオン半径は重イオン程小さい。 $Z_1^{-1/3}$ は Z_1 に対し弱い依存性をもつ関数であるが、原子番号、束縛電子数の減少により、電子分布は量子力学的波動関数に

より記述される分布に移行する。たとえば、スレータ則⁶⁹⁾により記述される電子分布の広がり
の平均半径は、古典論よりも強い Z_1 依存性を示す。このため、イオンサイズ効果は軽イオンに
なる程大きくなる。金属試料中に入射した低速イオンに対する、有効電荷のスケーリング則か
らのずれは、Brandt と Kitagawa^{66,70)}によって行なわれている。 r は、

$$\left. \begin{aligned} r &= Q + C(K_F)(1-Q) \ln(1+r^2) \\ C(K_F) &= \frac{\pi K_F}{(1 + \pi K_F) \ln(1 + \pi K_F) - \pi K_F} - \frac{2}{\pi K_F} \\ r &= \frac{2 K_F}{A}, \quad \frac{A}{Z_1^{1/3}} = \frac{1-Q/7}{2 C_0 Q^{2/3}} \quad (C_0 \cong 0.240) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

で与えられる。ここで $Q = N/Z_1$ で N はイオン内に束縛されている電子数を表わす。また(12)式
ではハートリーの原子単位が使われている。 $K_F = (9\pi/4)^{1/3} r_s^{-1}$ で r_s は金属伝導帯電子間
の平均距離を表わす。C, Au, Al 試料中に入射した N, Ne, Ar イオンに関する実験結果との
比較を図7に示す³¹⁾。有効電荷比の r_s -依存性, Z_1 -依存性は定性的に一致している。また
Au 試料に関する測定結果は、理論値よりも強い Z_1 -依存性を示す。

イオンサイズ効果に関する実験は、Datgら⁷¹⁾(B~Fイオン), Golovchenkoら⁷²⁾(F~Cl
イオン)により行なわれている。測定法はチャネリング効果を用いたハイパーチャネル粒子に
よるイオン阻止能の測定である。測定結果から次のような結論が得られている。同電荷数のイ
オン(例えば、C元素の核と、1電子を捕獲したNイオン)の阻止能にイオンサイズ効果が
現われる。この差は、捕獲電子数が2のイオンになるとさらに大きくなる。また、電荷数の自
乗で規格化したイオン核に対する阻止能は一定値を与える。この結果は、Golovchenkoらによ
る実験においても同じである。これは、イオン核に対する阻止能に電荷数の自乗スケールが成
り立つことを示しており、2章でも述べた陽子, Heイオン, Liイオンで観測されている Z_1^3
-項, Bloch項に対する測定結果と矛盾する。 Z_1^3 -項, Bloch項の寄与が互いに相殺すること
などいくつかの議論があるが⁷³⁾、この測定結果の矛盾は、現在のところ解決されていない。

4.3 重イオン阻止能の解析

軽イオン阻止能データの解析, 外挿法による高速領域から低速領域にまで渡る阻止能実験式
による解析, 重イオン阻止能に関する LSS や Firsov 理論の限界, 十分に重いイオンに対して成
立する有効電荷のスケーリング則, He~Ar 程度の原子番号領域でのイオンに対して現われる
スケーリング則からのずれについては、すでに述べた通りである。ここでは、近年の重イオン
阻止能実験研究の進展により、重イオン阻止能データを $\pm 10 \sim 20\%$ 前後の精度で解析するこ
とが可能となっていることを述べることにしよう。

最近、Anthony と Lanford⁵⁸⁾により、重イオン阻止能と有効電荷の解析が行なわれた。実験
は10種の入射イオン(C, Si, Cl, Ti, Fe, Ni, Ge, Br, Nb, I)と5種の試料(C, Al,
Cu, Ag, Au)に関するものである。測定値と NS テーブル, および Ziegler のテーブルとの比

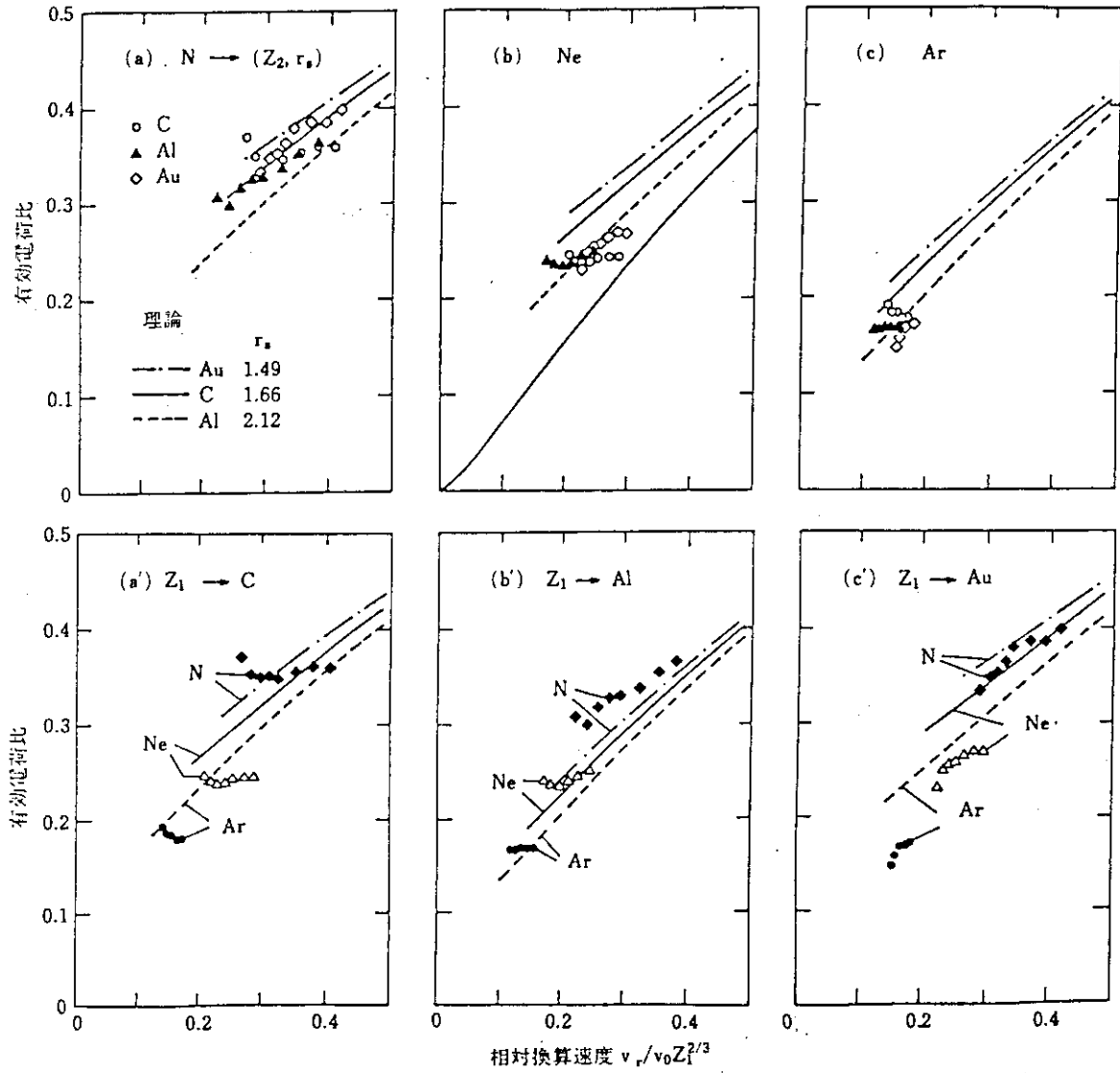


図7 C, Al, Au 試料中に入射した N, Ne, Ar イオンに対する有効電荷比。(b) の実線は図6に同じ(文献31)

較が行なわれており、測定値と各テーブルの数値とのずれは25%内外の範囲内にある。総じて測定結果は、各テーブル値よりも大きな値を与えている。Ag 試料中に入射した各種イオンに対する比較例を図8に示す。

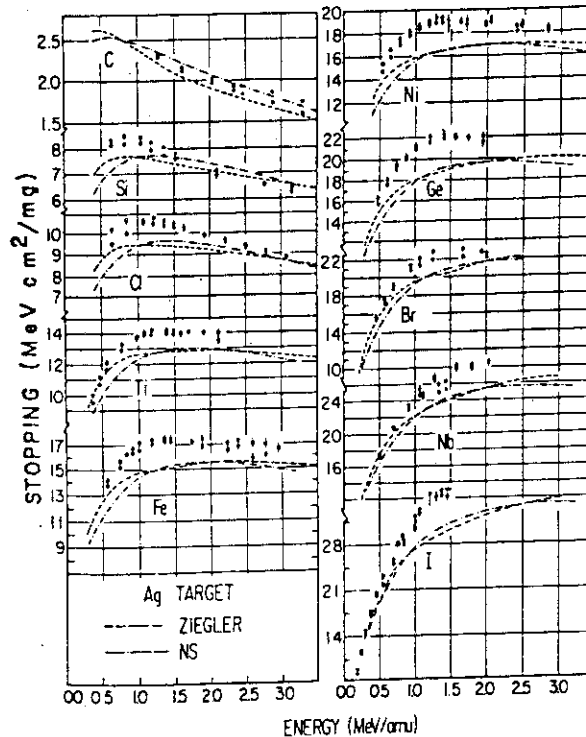


図8 Ag 試料中に入射した各種重イオンの阻止能。破線、一点鎖線はZiegler および NS テーブル値を表わす (文献 58)

有効電荷による解析は、(11)式による方法が採用されている。Brown と Moak による解析は、 $\beta = 0.688$, $A = 1.034$, $\lambda = 1$ の場合に対応する。Anthony と Lanford による方法 (以下 AL 法と記す) では、 $\beta = 2/3$ とし、 A , λ には試料依存性が考慮されており、おのののに対し、 Z_2 の 2 次多項式が仮定されている。またこの解析では、軽イオン阻止能解析においてすでに実験的にも解析が行なわれている、 Z_1^3 -項、Bloch 項の効果が考慮されている。 A , λ に対する最適値は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} A &= 1.16 - 1.91 \times 10^{-3} Z_2 + 1.26 \times 10^{-5} Z_2^2 \\ \lambda &= 1.18 - 7.5 \times 10^{-3} Z_2 + 4.53 \times 10^{-5} Z_2^2 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Ag に関する解析結果、ならびに A , λ の Z_2 依存性を図9, 図10に示す。解析精度は $\pm 10\%$ の範囲内にある。試料依存性を表わすパラメータとして Z_2 を採用することの妥当性、重イオン阻止能に対する Z_1^3 項、Bloch 項の取り扱いの問題点、上記手法とスケーリング則からのずれの構造との関連など、今後の課題を残しながらも、阻止能データ解析の精度向上が得られた点は進展と言えるであろう。なお当論文の著者により、 β についてもパラメータ化する 3-パラメータ法についても議論がなされており、結論として、2-パラメータ法による解析の方が良い結果を与えるということが述べられていることを付記しておく。

陽子に対する阻止能データと(12)式により表わされる有効電荷に基づく重イオン阻止能解析が、Zieglerら⁶⁰⁾により行なわれている。高エネルギー側での内殻電子による寄与を考慮した補正が行なわれている。C試料に関する解析結果を図11に示す。縦軸は、阻止能の計算結果と測定値間の比を表わす。エネルギー1 keV/amuから10 MeV/amuの広範囲の領域にわたり、また実験データも、軽イオンから重イオンにわたる広い範囲から抽出されている。90%前後のデータの解析精度は±20%の範囲内にある。AL法に比べ、解析精度そのものは劣るが、比較対象のエネルギー領域、イオンの種類が広範囲であること、また多くの実験データ数を抽出することによる測定データのばらつきを考慮すれば、必ずしもAL法に劣るとは言えない。「物質中を通過する高速イオンの荷電状態と動的遮蔽」に関する日米セミナーのProceedingsが出版されているので参照していただきたい。

(11)式において、 $A = 1$ 、 $\beta = 2/3$ 、 λ をパラメータとする1パラメータ法による重イオン阻止能解析がPorter⁵⁹⁾により行なわれている。広範なイオンおよび試料に対する解析が行なわれているが、入射イオンと試料の組み合わせに依存したばらつきが大きく、十分な解析精度が得られているとは言えない。

以上のように、BrownとMoakの実験以来行なわれてきた、重イオン阻止能と有効電荷に関する代表的な解析法を、概略的に述べてきた。要約すれば、70年代のBrownとMoak、Brandtによる解析が、十分に重いイオンに対するスケーリング解析であるのに対し、AnthonyとLanford、Zieglerらの解析は、従来はスケーリング則の枠外にあったイオンを含んだ解析と言える。もちろん、±10~20%の範囲内の解析精度は、パラメータの最適化により得られたものであり、解析精度の向上が、スケーリング則からのずれの構造の理論的解明と直接的に結びつくものではない。これは今後の研究課題であろう。しかしながら、阻止能研究の興味が、軽イオンから重イオンへと移りつつある今日、広範囲にわたる重イオン阻止能を、±10~20%の範囲内で解析することが可能となったことは、注目に値することと言える。

最後に、重イオン阻止能の物理化学的効果について簡単に触れておこう。軽イオン阻止能の物理化学的効果に関する実験は、序論でも述べた通りである。阻止能の Z_1-Z_2 振動、各種物質(分子ガス、酸化物、有機物など)に対するBraggの規則からのずれの測定など、多方面にわたって行なわれている。これに対し、重イオン阻止能の物理化学的効果に関する実験は、加速器の大型化を伴うため、必ずしも多いとは言えない。重イオン阻止能の Z_2 -振動⁶³⁾など、今後の実験研究の進展が望まれる。

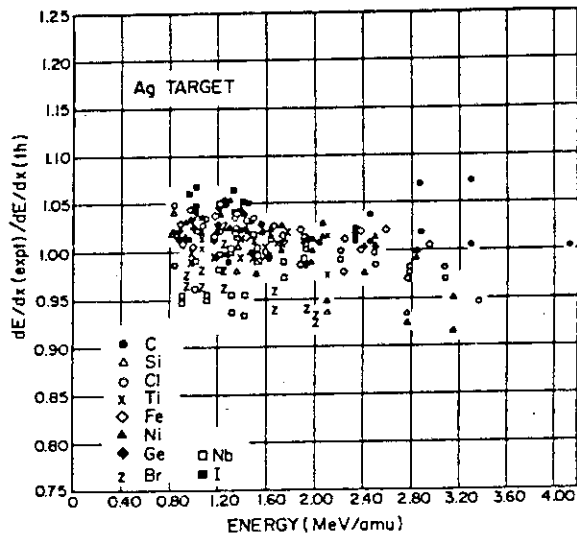


図9 有効電荷解析による阻止能比 (文献 58)

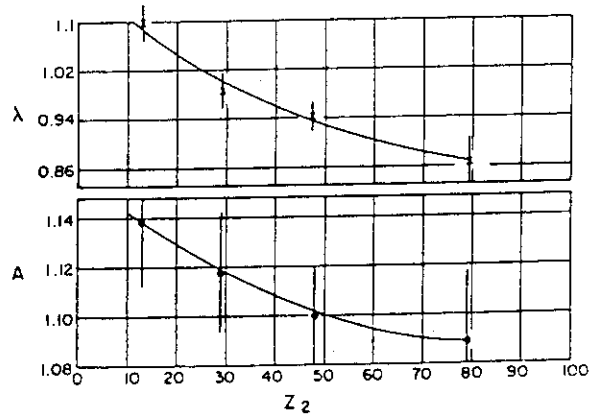


図10 A, λ の Z_2 依存性 (文献 58)

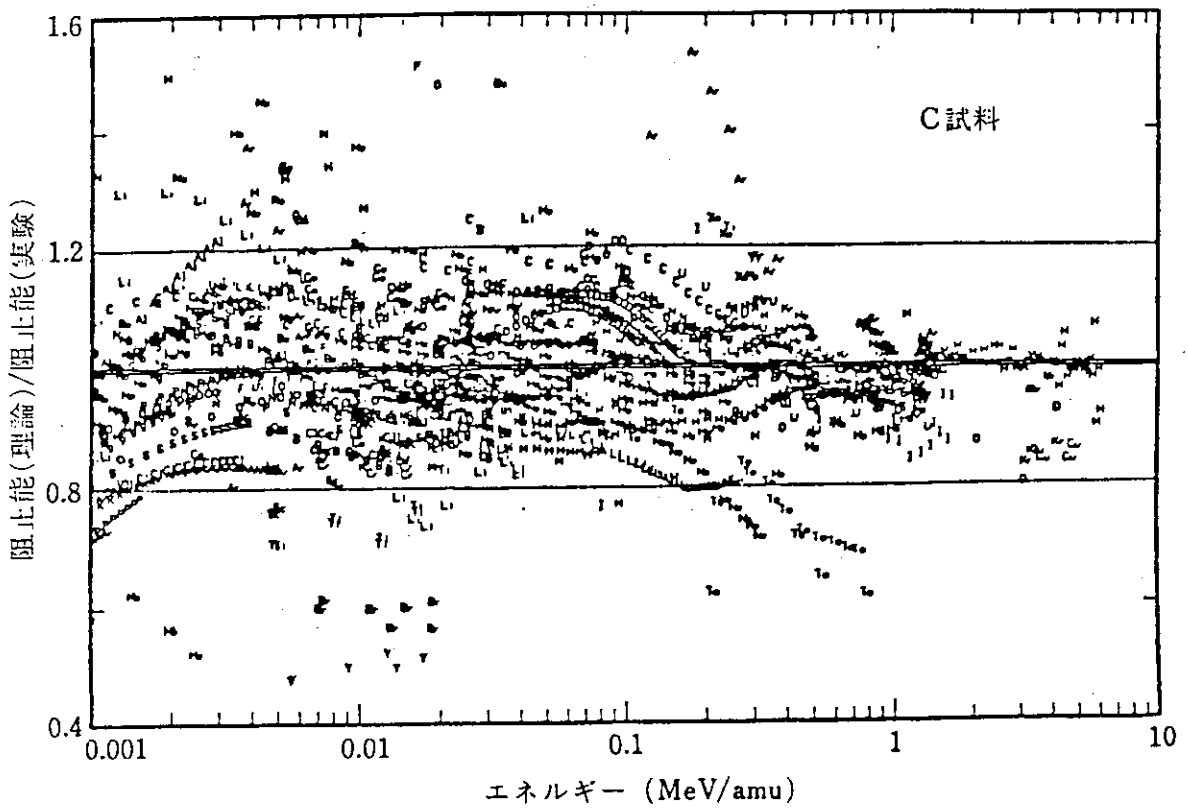


図11 有効電荷解析による阻止能比 (文献 60)

5. 結 論

近年のイオン阻止能の解析は、(i)軽イオン高速領域での平均イオン化エネルギー、内殻補正項、 Z_1^3 -項、Bloch 項などの理論式で定義される物理量の決定という解析法から、(ii)有効電荷のパラメータ化による重イオン阻止能解析、(iii)外挿法による高速領域から低速領域に渡る実験式の確立、(iv)阻止能データの数値テーブルの作成など、各研究分野が直面している課題に応じて進められている。

(i)の軽イオン高速領域での阻止能解析は、(ii)の有効電荷による重イオン阻止能解析のベースを与える。この領域では、阻止能の理論式が、量子力学的摂動論により導出可能である。また、実験データの蓄積があるため、阻止能の解析精度は高い。広義的な Bethe-Bloch の公式の主要項 (1)式の第一項) の解析では、平均イオン化エネルギーの決定が 5%前後の精度で解析されている。各グループによる解析結果は、図 1、表 I、表 II に示されている。今後は、Bragg の規則からのずれとの関連において、各種化合物に対する解析が進められるであろう。

内殻補正項、ならびに Z_1^3 -項、Bloch 項などの補正項に対する解析は、高次の補正項であることもあり、平均イオン化エネルギーの解析ほど精度は高くない。(1)式中の L_0 、 L_1 、 L_2 を分離する実験は、Andersen らによって行なわれている。 L_1 、 L_2 の L_0 に対する寄与は、 $\frac{1}{10} L_0$ 、 $\frac{1}{100} L_0$ のオーダーである。内殻補正項の理論には議論があり、約 5~10 MeV 領域、高原子番号物質での陽子に対する阻止能実験の必要性が指摘されている。また、手法は異なるが、数値波動関数を駆使した計算機研究による補正項の定量化が、今後可能となるかもしれない。計算機研究、ならびにより精度の高い実験研究の進展が望まれる。

(iii)および(iv)の軽イオン阻止能に関する実験式、阻止能データのテーブル作成は、(i)の解析の発展との関連において進められている。代表的なものとして、3パラメータ法による Brice の公式、陽子 (4パラメータ法)、He イオン (5パラメータ法) に対する Andersen と Ziegler、Ziegler のテーブルがあげられる。近年においても当該テーブルの精度判定に関する実験が報告されているが、Andersen と Ziegler、Ziegler のテーブルは、実験データのサンプル数も多く、飛程ならびにイオン照射による損傷分布の解析に際しては、最も広く引用されているものである。実験式としての信頼度は高い。また、イオン阻止能の枠外ではあるが、電子ならびに陽電子の各種物質に対する阻止能テーブルの作成が Berger と Seltzer¹¹⁾ によって行なわれている。重イオン阻止能に対する Northcliffe と Schilling、Hubert ら、杉山、Ziegler のテーブルの解析精度は、(厳密には、イオン-物質対依存性が大きいため、概略的な枠内での判定を余義なくされるが)、近年の実験データとの比較の範囲内では、±10 から 50~60%前後の精度の範囲内にあると言える。

(ii)の重イオン阻止能の有効電荷による解析は、1972年の Brown と Moak の実験にはじまるが、1980年代に入りいくつかの進展を見せた。これは、阻止能研究、特に実験研究の興味が、軽イオン阻止能から重イオン阻止能へと移りつつあることもある。第4章でも述べたことでもあるが、Anthony と Lanford、および Ziegler らによる解析は、70年代のスケールリング則の枠

外にあったイオンを含んだ解析であり、これらの解析により広範囲なエネルギー領域、およびイオンに対する重イオン阻止能を±10～20%の範囲内で解析することが可能となっている。これらの有効電荷による重イオン阻止能解析には、データ蓄積による、陽子やHeイオンなどの軽イオン阻止能データ解析の精度向上という土台があることは言うまでもない。広範なイオン、エネルギー領域に対する解析精度の向上は、低原子番号側でのイオンに対して観測されている、スケーリング則からのずれに関する構造解析研究のガイドとなるばかりでなく、既存の重イオン阻止能テーブルの評価、判定、新たな実験式の作成、テーブル化をうながすものである。また応用方面においては、飛程や重イオン照射による損傷分布の解析精度の向上とも関連する。今後、イオン阻止能の研究が、イオン照射による核融合炉壁材料の開発研究に大きく寄与し、またその成果が多方面で活用されるためにも、重イオン阻止能実験研究の進展が期待されるものである。

謝 辞

本報告書をまとめることをお薦めいただいた、日本原子力研究所東海研究所、小沢国夫博士、岩田忠夫博士に感謝いたします。また、軽イオンおよび重イオン阻止能研究、ならびに計算機研究の現状について、適切な討論、助言をいただいた奈良女子大学理学部の石割隆太郎教授、早稲田大学理工学研究所の道家忠義教授、早稲田大学理工学部の大槻義彦教授に感謝いたします。本委託調査を進めるにあたり、ご配慮をいただいた、湘北短期大学、塚本哲男学長、原田哲夫事務局長にあわせて感謝いたします。

外にあったイオンを含んだ解析であり、これらの解析により広範囲なエネルギー領域、およびイオンに対する重イオン阻止能を±10～20%の範囲内で解析することが可能となっている。これらの有効電荷による重イオン阻止能解析には、データ蓄積による、陽子やHeイオンなどの軽イオン阻止能データ解析の精度向上という土台があることは言うまでもない。広範なイオン、エネルギー領域に対する解析精度の向上は、低原子番号側でのイオンに対して観測されている、スケーリング則からのずれに関する構造解析研究のガイドとなるばかりでなく、既存の重イオン阻止能テーブルの評価、判定、新たな実験式の作成、テーブル化をうながすものである。また応用方面においては、飛程や重イオン照射による損傷分布の解析精度の向上とも関連する。今後、イオン阻止能の研究が、イオン照射による核融合炉壁材料の開発研究に大きく寄与し、またその成果が多方面で活用されるためにも、重イオン阻止能実験研究の進展が期待されるものである。

謝 辞

本報告書をまとめることをお薦めいただいた、日本原子力研究所東海研究所、小沢国夫博士、岩田忠夫博士に感謝いたします。また、軽イオンおよび重イオン阻止能研究、ならびに計算機研究の現状について、適切な討論、助言をいただいた奈良女子大学理学部の石割隆太郎教授、早稲田大学理工学研究所の道家忠義教授、早稲田大学理工学部の大槻義彦教授に感謝いたします。本委託調査を進めるにあたり、ご配慮をいただいた、湘北短期大学、塚本哲男学長、原田哲夫事務局長にあわせて感謝いたします。

文 献

- 1) N. Bohr: K. Dan. Vidensk. Selsk. Mat.-Fys. Medd. 18 (1948) No. 8.
- 2) O.B. Firsov: Sov. Phys.-JETP 36 (1959) 1076.
- 3) J. Lindhard and M. Scharff: Phys. Rev. 124 (1961) 128.
- 4) J. Lindhard, M. Scharff and H.E. Schiøtt: K. Dan. Vidensk. Selsk. Mat.-Fys. Medd. 33 (1963) No. 14.
- 5) 道家忠義: 応用物理 39 (1970) 1086.
- 6) S.P. Ahlen: Rev. Mod. Phys. 52 (1980) 121.
- 7) 石割隆太郎: 応用物理 51 (1982) 286.
- 8) M.D. Brown and C.D. Moak: Phys. Rev. B6 (1972) 90.
- 9) たとえば H.A. Bethe: Ann. Phys. 5 (1930) 325.
- 10) E. Bonderup: K. Dan. Vidensk. Selsk. Mat.-Fys. Medd. 35 (1967) No. 17.
- 11) M.J. Berger and S.M. Seltzer: Stopping Powers and Ranges of Electrons and Positrons; NBSIR 82-2550 (U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Washington DC, 1982).
- 12) E.J. McGuire: Phys. Rev. A26 (1982) 1858.
- 13) J.C. Ashley, R.H. Ritchie and W. Brandt: Phys. Rev. B5 (1972) 2393.
- 14) J.D. Jackson and R.L. McCarthy: Phys. Rev. B6 (1972) 4131.
- 15) K.W. Hill and E. Merzbacher: Phys. Rev. A9 (1974) 156.
- 16) J. Lindhard: Nucl. Instr. and Meth. 132 (1976) 1.
- 17) F. Bloch: Ann. Phys. 16 (1933) 285.
- 18) H.H. Andersen, J.F. Bak, H. Knudsen and B.R. Niesen: Phys. Rev. A16 (1977) 1929.
- 19) H.H. Andersen and J.F. Ziegler: Hydrogen Stopping Powers and Ranges in All Elements (Pergamon, New York, 1977).
- 20) J.F. Ziegler: Helium Stopping Powers and Ranges in All Elemental Matter (Pergamon, New York, 1977).
- 21) W.H. Bragg and L. Kleeman: Phil. Mag. 10 (1905) 318.
- 22) P.D. Bourland and D. Powers: Phys. Rev. B3 (1971) 3635.
- 23) J.S.-Y. Feng, W.K. Chu and M.-A. Nicolet: Phys. Rev. B10 (1974) 3781.

- 24) W. Pietsch, U. Hauser and W. Neuwirth: Nucl. Instr. and Meth. 132 (1976) 79.
- 25) W. Neuwirth, W. Pietsch and R. Krentz: Nucl. Instr. and Meth. 149 (1978) 105.
- 26) W.K. Chu, M. Braum, J.A. Davies, N. Matsunami and D.A. Thompson: Nucl. Instr. and Meth. 149 (1978) 115.
- 27) S. Matteson, D. Powers and E.K.L. Chau: Phys. Rev. A15 (1977) 859.
- 28) J.A. Teplova, V.S. Nikolaev, J.S. Dimitrev and L.N. Fateeva: Sov. Phys.-JETP 15 (1962) 31.
- 29) H.D. Betz: Rev. Mod. Phys. 44 (1972) 74.
- 30) S. Kreussler, C. Varelas and W. Brandt: Phys. Rev. B23 (1981) 82.
- 31) F. Schulz and W. Brandt: Phys. Rev. B26 (1982) 4846.
- 32) L.C. Northcliffe and R.F. Schilling: Nucl. Data, Sect. A7 (1970) 233.
- 33) 杉山治男: 電子技術総合研究所調査報告 第181号 (1974)
- 34) F. Hubert, A. Fleury, R. Bimbot and D. Gardes: IN2P3 Report, CENBG 7821-IPNORC-7807 (1978).
- 35) J.F. Ziegler: Handbook of Stopping Cross-Sections on Energetic Ions in All Elements (Pergamon, New York, 1980).
- 36) J.D. Jackson: Classical Electrodynamics, 2nd edition (Wiley, New York, 1975).
- 37) W.H. Barkas, J.N. Dyer and H.H. Heckman: Phys. Rev. Lett. 11 (1963) 28.
- 38) P. Dalton and J.E. Turner: Health Phys. 15 (1968) 257.
- 39) W.K. Chu and D. Powers: Phys. Lett. 40A (1972) 23.
- 40) J.F. Ziegler: Nucl. Instr. and Meth. 168 (1980) 17.
- 41) J.L. Dehmer, M. Inokuti and R.P. Saxon: Phys. Rev. A12 (1975) 102.
- 42) M. Inokuti, J.L. Dehmer, T. Baer and J.D. Hanson: Phys. Rev. A23 (1981) 95.
- 43) NCRP: Stopping Powers for Use with Cavity Chamber (National Bureau of Standards, Washington DC, 1961).

- 44) U. Fano: Ann. Rev. Nucl. Sci. 13 (1963) 1.
- 45) H. Bichsel: in Radiation Dosimetry 1 (Academic, New York, 1968) p. 157.
- 46) J.E. Turner, P.D. Roecklein and R.B. Vora: Health Phys. 18 (1970) 159.
- 47) H. Bichsel: in A.I.P. Handbook (McGraw-Hill, New York, 1972) p. 8.
- 48) R. Ishiwari, N. Shiomi and N. Sakamoto: Nucl. Instr. and Meth. 194 (1981) 61.
- 49) R. Ishiwari, N. Shiomi and N. Sakamoto: Proc. US-Japan Seminar on "Charge States and Dynamic Screening of Swift Ions in Solids" CONF-820131 (Oak Ridge National Laboratory, 1983).
- 50) H.H. Andersen, H. Simonsen, H. Sørensen and P. Vajda: Phys. Rev. 186 (1969) 372.
- 51) H. Sørensen and H.H. Andersen: Phys. Rev. B8 (1973) 1854.
- 52) E.J. McGuire: Phys. Rev. A22 (1980) 868.
- 53) D.K. Brice: Phys. Rev. A6 (1972) 1791.
- 54) D.K. Brice: Ion Implantation and Energy Deposition Distributions (Plenum, New York, 1975).
- 55) C. Varelas and J.P. Biersack: Nucl. Instr. and Meth. 79 (1970) 213.
- 56) D.C. Santry and R.D. Werner: Nucl. Instr. and Meth. 178 (1980) 523.
- 57) P. Mertens and Th. Krist: Nucl. Instr. and Meth. 194 (1982) 57.
- 58) J.M. Anthony and W.A. Lanford: Phys. Rev. A25 (1982) 1868.
- 59) L.E. Porter: Phys. Rev. B16 (1977) 1812.
- 60) J.F. Ziegler, J.P. Biersack and U. Littmark: Proc. US-Japan Seminar on "Charge States and Dynamic Screening of Swift Ions in Solids" CONF-820131 (Oak Ridge National Laboratory, 1983)
- 61) R. Bimbot, D. Gardes, H. Geissel, T. Kitahara, P. Armbruster, A. Fleury and F. Hubert: Nucl. Instr. and Meth. 174 (1980) 231.
- 62) N. Bohr: Phys. Rev. 58 (1940) 654; 59 (1941) 270.
- 63) H. Geissel, P. Armbruster, T. Kitahara, G. Kraft, H. Spieler and K. Guttner: Nucl. Instr. and Meth. 170 (1980) 217.

- 64) W. Brandt: in Atomic Collisions in Solids (Plenum, New York, 1975) Vol.I, p. 261.
- 65) B.S. Yarlagadda, J.E. Robinson and W. Brandt: Phys. Rev. B17 (1978) 3473.
- 66) M. Kitagawa: in Recent Theoretical (Computational) Developments in Atomic Collisions in Solids (World Scientific Publishing Co., 1983) in press.
- 67) 北川盈雄: 応用物理 52 (1983) 282.
- 68) H. Jensen: ZS. f. Phys. 77 (1932) 713.
- 69) J.C. Slater: Phys. Rev. 36 (1930) 57.
- 70) W. Brandt and M. Kitagawa: Phys. Rev. B25 (1982) 5631.
- 71) S. Datz, J. Gomez del Campo, P.F. Dittner, P.D. Miller and J.A. Biggerstaff: Phys. Rev. Lett. 38 (1977) 1145.
- 72) J.A. Golovchenko, A.N. Goland, J.S. Rosner, C.E. Thorn, H.E. Wegner, H. Knudsen and C.D. Moak: Phys. Rev. B23 (1981) 957.
- 73) J.A. Golovchenko, D.E. Cox and A.N. Goland: Phys. Rev. B26 (1982) 2335.