

放射性崩壊について

KENZOU

2011 年 8 月 7, 10 日

- アリス：こんにちは、Kさん。
- K氏：いやぁ～アリスー、毎日猛暑が続くね。こう暑くっては何もする気になれないけど、そこはまぁ気分をいろいろと変えて勉強に励んでいることと思うけど、いかがかな？
- アリス：いきなりのご挨拶ね。仰るとおり暑くて気分もだれてくるけど、夏は暑いものね。いちいち暑いからってボーっとばかりしてられないわ。
- K氏：恐れ入ります（^^）；　ところで今日は何かな？　随分気合が入っているように見えるけど、放射性物質についての質問の続きかな
- アリス：そうなの。ここで放射性物質の疑問をまとめて解消したいなぁ～とおってお邪魔しにきたの。
- K氏：そうなんだ。OK！わかりました。それじゃレビューをかねて原子構造の話からはじめて放射性崩壊の話へと進めていこうか。
- アリス：お願いします。私の知識も整理できるわ。

目次

1	原子の構造と電子配置	3
1.1	原子の構造	3
1.1.1	原子模型	3
1.2	電子殻と電子配置	5
1.2.1	電子殻	5
1.2.2	電子配置	5
1.3	周期律と周期表	9
2	イオン	10
2.1	イオンの生成とイオン価数	10
2.2	イオン化エネルギーと電子親和力	11
2.2.1	イオン化エネルギー	11
2.2.2	電子親和力	11
3	放射性崩壊現象	12
3.1	放射性物質と放射性核種	12
3.2	放射性崩壊速度	13
3.2.1	半減期	14
3.3	放射能と放射線の単位	14
4	核力と核反応	15
4.1	質量欠損と結合エネルギー	15
4.2	原子核反応	16
4.2.1	原子核反応のルール	17

4.3	核分裂反応と核融合反応	17
4.3.1	核分裂反応	17
4.3.2	核融合反応	17

=====

1 原子の構造と電子配置

1.1 原子の構造

1.1.1 原子模型

物質を構成している最小の粒子を原子という。原子の直径は各元素の種類で異なるが、概略一億分の1 cm 程度（約 10^{-8} cm）で、質量は $10^{-24} \sim 10^{-22}$ g 程度だ。一番簡単な水素原子の場合を例にとると、水素原子の中心には正の電荷を帯びた1個の原子核があり、その周りを負の電荷をもつ電子が回っていて、核と電子の間にはクーロンの法則¹に従う電気力（今の場合は引力）が働いている。。。

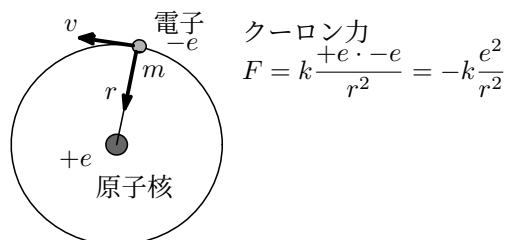


図 1: 長岡・ラザフォードの原子模型

この原子模型は1903年、東京帝国大学の教授だった長岡半太郎博士によって発表²され、その後、1909年、ラザフォードの α 線散乱実験によって原子は中心に正の電荷を帯びた原子核を持つことが確かめられた。この原子模型は後に長岡・ラザフォードの原子模型と呼ばれるようになった。原子核は直径が約1兆分の1 cm 程度で、正の電荷を帯びた陽子と電荷を持たない中性子からできている。そして、陽子の数と電子の数は等しく、原子は電氣的に中性となっている。陽子や中性子の質量（絶対質量）³はほぼ等しく、約 1.67×10^{-24} g だが、電子の質量はそれらに比べて 9.11×10^{-28} g とはるかに軽く、陽子や中性子の約1/1840程度という値だ。つまり、重さで言えば圧倒的に原子核が重いということになる。ここで、後で出てくる用語を簡単に整理しておこう。

- **原子番号**：原子核に含まれる陽子の数。元素記号の左下に書かれる。（例） ${}_6\text{C}$
- **質量数**：陽子の数と中性子の数の和。元素記号の左上に書かれる。（例） ^{12}C
- **同位体**：原子番号が同じで質量数の異なる原子のこと。アイソトープとも呼ばれる。

<元素の表記>		<自然界に存在する同位体>		
			質量数	同位体
$^{12}_{6}\text{C}$	質量数（陽子の数+中性子の数）	水素	1	^1_1H
	元素記号		2	^2_1H
	原子番号（陽子の数）	炭素	12	$^{12}_6\text{C}$
			13	$^{13}_6\text{H}$
		酸素	16	$^{16}_8\text{C}$
			17	$^{17}_8\text{H}$
			18	$^{18}_8\text{H}$

¹ 電荷の間に働く力に関する法則で、力の大きさは各電荷の積に比例し、電荷の間の距離の二乗に反比例するという法則。同じ符号の電荷同士の間では斥力となり、異符号の電荷の間では引力となる。 $F = kq_1q_2/r^2$ 、 q_1, q_2 は荷電粒子の電荷量。 r は粒子間の距離。 k は比例定数。

² 長岡の「土星モデル」と呼ばれ、正電荷を持つ原子核を中心にその回りを数十～数百個の電子がリング状に集まっていっせいに回転するというモデル。

³ 「放射性物質について(2)」のレポートを参照されたい。

- アリス：原子核は陽子と中性子から成り立っているのね。しかも非常に極微なところに詰まっているわけだけど、陽子同士の電気反発力で原子核はバラバラにならないのかしら。また、中性子の存在理由などわかりやすく説明いただける？
- K氏：ウッ！う〜ん。。。そうだね、原子核がバラバラにならないのは陽子と中性子の双方に働く強い引力、これを**核力**と呼んでいるけど、それが働くからなんだ。中性子がなければ核力も働かない。だから陽子同士のクーロン反発力で当然原子核はバラバラになってしまう。量子力学によれば、原子核が安定して存在するためには、陽子の数に対して必要な中性子の数が決まる ことが分かっている。陽子と中性子の数が安定な組み合わせの数でない場合には、原子核は中性子の数を変化させて安定になろうとするんだね。そういったことで、後で話をする α 崩壊や β 崩壊などが起こるんだ。
- アリス：そうなの。核力については以前湯川博士の中間子論に関する啓蒙書を読んだことがあるわ。思い出したけど、陽子と中性子の引き合う力は中間子という粒子を互いに交換することで核力が生じ、核力はクーロン力に比べて約 10 倍と強いけれど、力の及ぶ範囲は非常に狭いという内容だったと思うわ。
- K氏：よく思い出したね。
- アリス：ところで、ラザフォードの α 線散乱実験というのを説明いただけるかしら。
- K氏：うん、ラザフォード以前、原子の構造はどうなっているのか、よく分からなかった。そういう状況の中で、先ほどの長岡モデルが発表され、また、J.J トムソンにより 1904 年に原子は正に帯電した大きな球体の内部を電子が自由に動き回っているという「プランプディング・モデル」が発表されたんだ。具体的には下の絵のようなモデルだね。正負の電荷がつりあって原子全体で電氣的に中性となっている。

J. J. トムソンの原子模型

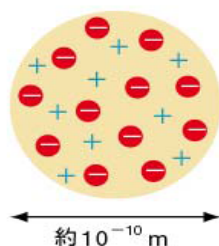


図 2: トムソンの原子模型

1909 年、ラザフォードはラジウムから放射された α 粒子を鉛や金、鉄、アルミニウムなどの薄い金属箔に照射したところ、大部分の α 粒子は金属箔を透過したが、わずかに金属に跳ね返される α 粒子が観測された。これは、 α 粒子から見れば、薄い金属箔はほとんどスカスカだが、所々に α 粒子を跳ね返す小さくて重い塊があるということの意味する。 α 粒子というのは 2 個の陽子と 2 個の中性子からなる高速で走る正の電荷を持った He の原子核のことだね。 α 粒子は電子の質量の 7000 倍以上もあるので、そこらを飛び回っている電子などは蹴散らして進んでいく。なので、 α 粒子を跳ね返す小さな塊は電子とは考えられない。とするとこの小さな塊は何か？ ラザフォードは α 粒子の正の電荷（陽子の電荷）と重くて小さな塊が持つ正の電荷がクーロン斥力で反発しあって α 粒子を跳ね返らせたと考えたわけだ。そして α 粒子が跳ね返される軌跡をニュートン力学を使って計算したところ実験データとぴたりと合うことがわかった。つまり、原子内の正の電荷はトムソンが予想したように原子全体に広がっているのではなく、非常に狭い範囲に塊っているという長岡モデルに軍配が上がったというわけだね。

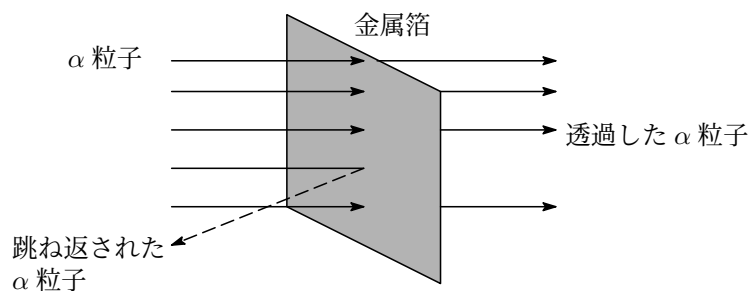


図 3: アルファ粒子散乱実験

- アリス：そうなんだ。
- K氏：これで原子の構造がわかったというのは残念ながら時期尚早なんだね。長岡・ラザフォードの原子模型にはまだまだ不具合があることがわかってきた。このあたりからプランク、アインシュタイン、ボーア等が先鞭をつけた近代物理学（量子物理学）が誕生してくるのだけど、ここではこれ以上立ち入ることはやめておくよ。
- アリス：興味を惹くお話ね。いずれにしても原子模型はその後さらに紆余曲折を経ていくわけね。
- K氏：そうなんだ。ただ、今の段階では原子核の回りを電子がクルクルと回っているという原子模型を考えておこう。しかし、以下の議論では近代物理学が明らかにしていた成果の一部取り入れている、ということはあらかじめ言っておくよ。

1.2 電子殻と電子配置

1.2.1 電子殻

電子は原子核の回りを周回しているが、自由に飛びまわっているのではなく、いくつかの**軌道**に分かれて運動している。これらの軌道を**電子殻**と呼んでいる。電子殻は原子核に近いほうから順に K 殻、L 殻、M 殻、N 殻、… と呼ばれ、それぞれの軌道の電子殻に入ることのできる電子の数は決まっている。K 殻、L 殻、M 殻、N 殻、… をそれぞれ $n = 1, n = 2, n = 3, n = 4, \dots$ とすると、各電子殻に入ることのできる最大収容電子数は $2n^2$ で表わされる。

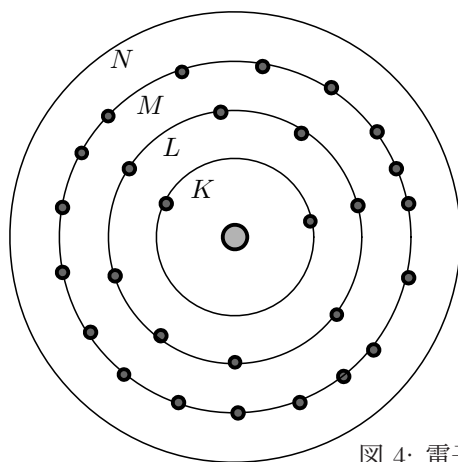


図 4: 電子殻と最大収容電子数

●各電子殻が収納できる最大の電子の数… $2n^2$

$n = 1$: K 殻	$2^1 = 2$ 個
$n = 2$: L 殻	$2 \times 2^2 = 8$ 個
$n = 3$: M 殻	$2 \times 3^2 = 18$ 個
$n = 4$: N 殻	$2 \times 4^2 = 32$ 個
	⋮

1.2.2 電子配置

原子核に一番近い軌道（L殻）の電子はエネルギーが低く、原子核より遠い軌道にいる電子ほどエネルギーが高くなる。原子はエネルギーが低いほうが安定となるので、電子は基本的にエネルギーの低い K 殻から順に

入っていく。原子番号順に並べた各原子の電子配置は下図に示すようになる⁴。

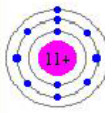
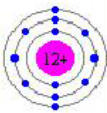
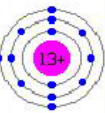
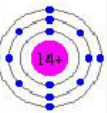
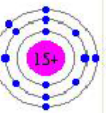
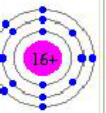
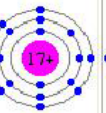
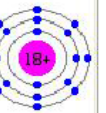
原子番号1～18の原子の電子配置							
							
${}_1\text{H}$							${}_2\text{He}$
							
${}_3\text{Li}$	${}_4\text{Be}$	${}_5\text{B}$	${}_6\text{C}$	${}_7\text{N}$	${}_8\text{O}$	${}_9\text{F}$	${}_{10}\text{Ne}$
							
${}_{11}\text{Na}$	${}_{12}\text{Mg}$	${}_{13}\text{Al}$	${}_{14}\text{Si}$	${}_{15}\text{P}$	${}_{16}\text{S}$	${}_{17}\text{Cl}$	${}_{18}\text{Ar}$

図 5: 原子番号順に並べた原子の電子配置

一番外側の殻にいる電子、つまり最外殻にいる電子を特に**価電子**と呼んで、他の電子と区別している。**価電子**は他の電子に比べてエネルギーが高く、原子との結合（結晶をつくるときなど）や化合物をつくる化学反応で重要な働きをし、**原子の化学的性質を決めるカギ**となる。さらに言えば、**価電子の数によって元素の化学的性質が決まる**。

♣ Q&A

- アリス：電子は原子核の回りをおる軌道に沿って回っているのね。その軌道というのは貝殻の shell(殻)のように幾層にもわたってあるので、それを電子殻 (*electron shell*) と呼んでいるわけね。
- K氏：そうなんだ。少し細かいことを言うと電子殻と電子軌道は少し違うんだけど、ここではまだ気にしないことにしよう。ただ、図.5を見ると、電子の運動は原子核を含む平面上を円周運動しているように見え、原子は広がりはあるけど、10円玉のように薄っぺらいものなの？という疑問が生じかねない。老婆心ながら言っておくと、この図はあくまで実物を表わしているものではなく、概念的なものだということに注意しておいて欲しい。ところで、原子はなぜそのような電子殻構造をもつのか？ということについては量子力学の知識が必要になってくる。ここではそこまで突っ込んだ話はできないので、深く突っ込まないようにしてネ... (汗;)。
- アリス：わかったわ。ところで原子番号の順に各原子の電子を K、L、M、N 殻に入れていった場合、最外殻に入る電子を**価電子**と言ったわね。この価電子の数に注目すると、先ほどの図.5を見ると H、Li、Na は価電子が 1 個、Be (ベリリウム)、Mg は価電子が 2 個、B (ホウ素)、Al は価電子が 3 個、等々となっていることがわかるわね。
- K氏：いいとこ突いているね！ 価電子の数はその元素の化学的性質を決めると言ったけど、そのことが周期律の秘密を表わしているんだね。このあたりの詳しい議論はまた後でしていこう。ところで、各電子殻に電子がフルに詰まった殻があるだろう。このような電子殻を**閉殻**と呼んでいる。電子で満席となっている、つまり電子の入り込める空席のない電子殻のことだね。そして、He とか Ne (ネオン) は最外殻が閉殻となっている。このあたりの状況を再度図示すると下図のようになる。黒丸(電子)で満杯になった殻は閉殻だね。赤丸は価電子を表わす。最外殻が閉殻となっている He や Ne (ネオン) 他の原子と結合せずに**原子の状態**で安定に存在する。

⁴ <http://www2.yamamura.ac.jp/chemistry/chapter1/lecture5/lect1051.html> 参照

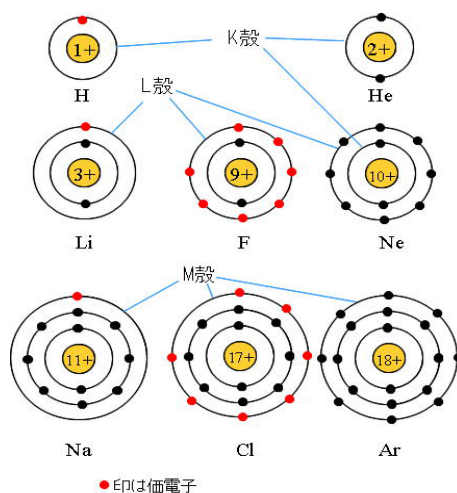


図 6: 閉殻と価電子 (<http://chem-edu.net/structure11.htm> 参照)

- アリス：最外殻が電子で満席になっている状態はエネルギー的に安定状態ということね。ところで、He、Ne、Ar、Kr（クリプトン）などは空気中にごくわずかしかな存在しないので**希ガス**と呼ばれ、希ガスは他の原子と結合せずに原子の状態で安定して存在するというを以前聞いたことがあるわ。図.6 では Ar の最外殻（M 殻）に電子が入れる空席は 18 個あるわけだけど、その内の 8 個しか入っていないわね。ということは最外殻は閉殻になっていないので反応性に富んでいるというか、原子の状態で安定して存在することはできないのではないかしら？
- K 氏：ウッフぉ～ん！ 厳しいところを突いてくるなぁ～。素知らぬ顔してスッと素通りしようと思ったけどそういうわけにもいかないか。いや、実はね、少し込み入った話になるんだけど、K 殻や L 殻、M 殻などの電子殻は副殻といってそれぞれ 1s 軌道、2s、2p 軌道、3s、3p、3d 軌道という、エネルギーレベルの異なる**電子軌道**を持っているんだ。s、p、d 軌道の前につく数字は先ほど出てきた n の数字だね。これを整理すると次のようになる。

	K 殻	L 殻		M 殻		
電子軌道	1s	2s	2p	3s	3p	3d
電子最大収容個数	2	2	6	2	6	10
計	2	8		18		

図 7: 電子殻と電子軌道

ところで Ar だけど、電子の数は全部で 18 個だね。K 殻、L 殻を満席にする電子の数は合計で 10 個だ。18 - 10 = 8 の残り 8 個の電子は M 殻の 3s 軌道と 3p 軌道に入り、3s 軌道と 3p 軌道は満席になる。電子軌道が満席になるので安定状態になるというわけなんだ。価電子は化学反応に大きく関与するといったね。He や Ne は最外殻が閉殻となっているので化学的には非常に安定な状態で存在する。また、Ar は最外殻の電子が 8 個だけど、3s、3p 電子軌道を満席にしているので、これも化学的に非常に安定な状態で存在することになる。このようなことを整理すると、価電子というのは化学反応にあずかる電子のことだから、次の 2 つの条件を満たすとき価電子は存在しない、つまり 0 と数えることができる。

- 最外殻が閉殻となっている場合
- 最外殻の電子が 8 個の場合

- アリス：う～ん、それじゃ Kr（クリプトン）の場合はどうなるのかしら。Kr の原子番号は 36 で電子は 36 個あるわね。K 殻、L 殻、M 殻にそれぞれ 2 個、8 個、18 個入るとして残りの電子は 8 個か。。。
- K 氏：8 個の電子は $n = 4$ の N 殻の 4s 軌道に 2 個、4p 軌道に 6 個入って各軌道は満席になる。
- アリス：そうなんだ。なんとなくわかったわ。それで最外殻の電子が 8 個の場合はその原子は安定、つまり価電子は 0 となるわけね。

- K氏：そうだね。ところで先ほど図.5 で電子は平面上を円運動しているような錯覚にとらわれやすいと
いったけど、ここで実際の電子軌道の姿を紹介しておくけど、ここではイメージとして捉えておけばい
いと思う。まず、電子はある軌跡を描きながら運動しているという捉え方はできないんだ。まるで雲の
ように広がっている感じで、これを**電子雲**といたりする。ということで s 軌道は球状、 p 軌道は x 、 y 、 z
軸上に電子雲が伸びていて、それぞれ p_x 、 p_y 、 p_z 軌道と呼んでいる。 d 軌道は5つの軌道があつて、そ
れぞれ図に示すような形をしているんだ。左から d_{z^2} 、 d_{xz} 、 d_{yz} 、 $d_{x^2-y^2}$ 、 d_{xy} 軌道と呼ばれる。各軌道に
は電子が2個は入れるんだね。

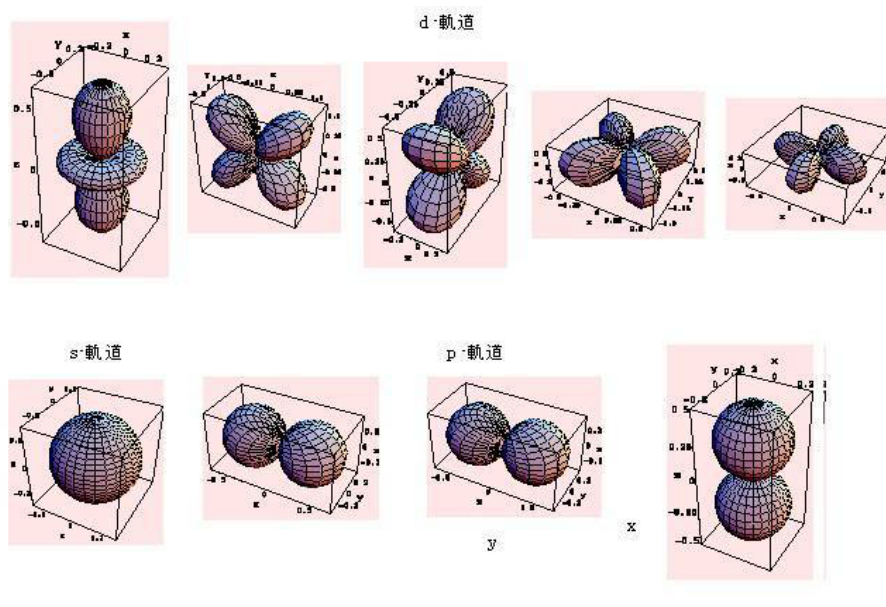


図 8: s , p , d 電子軌道

			K 殻	L 殻	M 殻	N 殻
Z	元素	名称	1s	2s 2p	3s 3p 3d	4s 4p 4d 4f
1	H	水素	1			
2	He	ヘリウム	2			
3	Li	リチウム	2	1		
4	Be	ベリウム	2	2		
5	B	ホウ素	2	2 1		
6	C	炭素	2	2 2		
7	N	窒素	2	2 3		
8	O	酸素	2	2 4		
9	F	フッ素	2	2 5		
10	Ne	ネオン	2	2 6		
11	Na	ナトリウム	2	2 6	1	
12	Mg	マグネシウム	2	2 6	2	
13	Al	アルミニウム	2	2 6	2 1	
14	Si	シリコン	2	2 6	2 2	
15	P	リン	2	2 6	2 3	
16	S	硫黄	2	2 6	2 4	
17	Cl	塩素	2	2 6	2 5	
18	Ar	アルゴン	2	2 6	2 6	
19	K	カリウム	2	2 6	2 6	1
20	Ca	カルシウム	2	2 6	2 6	2
21	Sc	スカンジウム	2	2 6	2 6 1	2
22	Ti	チタン	2	2 6	2 6 2	2
23	V	バナジウム	2	2 6	2 6 3	2
24	Cr	クロム	2	2 6	2 6 4	2
25	Mn	マンガン	2	2 6	2 6 5	2
26	Fe	鉄	2	2 6	2 6 6	2
27	Co	コバルト	2	2 6	2 6 7	2
28	Ni	ニッケル	2	2 6	2 6 8	2
29	Cu	銅	2	2 6	2 6 9	2
30	Zn	亜鉛	2	2 6	2 6 10	2
31	Ga	ガリウム	2	2 6	2 6 10	2 1
32	Ge	ゲルマニウム	2	2 6	2 6 10	2 2
33	As	砒素	2	2 6	2 6 10	2 3
34	Se	セレン	2	2 6	2 6 10	2 4
35	Br	臭素	2	2 6	2 6 10	2 5
36	Kr	クリプトン	2	2 6	2 6 10	2 6

表 1: 原子の電子配列表 (原子番号 36 番まで)

1.3 周期律と周期表

図.5 は元素を原子番号順に並べた表で、これを**周期表**⁵というが、この表で価電子の数を比較すると**価電子の数は周期的に変化することがわかる**。原子の化学的性質を決めるのは価電子だから、周期表では**性質のよく似た元素が周期的に現れる**ということになる。この規則性を**元素の周期律**という。元素の周期表では、化学的性質のよく似た元素が同じ縦の列に並ぶ。周期表の縦の列を左から順に 1 族 (H を除いて**アルカリ金属**と呼ばれる)、2 族 (Be, Mg を除いて**アルカリ土類金属**と呼ばれる) と呼び、同じ族の元素は互いに性質がよく似ているので**同族元素**と呼んでいる。

⁵ 詳細な周期表は適当なテキストを参照されたい。

価電子の数	1	2	3	4	5	6	7	0
	H							He
	↓							↓
元	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
素	↓							↓
	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar

図 9: 周期表

♣ Q&A

- アリス：周期表は 1869 年にロシアの化学者ドミトリ・メンデレーエフによって発表されたものね。メンデレーエフは当時発見されていた 63 種の元素を原子量の順に並べ、化学的性質の似た元素が縦の列にくるよう配列した表を作った。ただ、作った当時はこの表の中にはいくつかの空欄があったのだけど、メンデレーエフはその空欄にはまだ発見されていない元素が収まるはずだと考え、その元素の性質を周期表の上下、左右の関係から予言したのね。この予言はその後見事に的中し、彼の予言したとおりの性質を持つ Ga（ガリウム）や Ge（ゲルマニウム）が発見されたのね。
- K 氏：よくご存知で。。
- アリス：以前、モノの本で読んだことがあるの。
- K 氏：そうなんだ。ところで、次にイオンについての話をやっこう。

2 イオン

2.1 イオンの生成とイオン価数

イオンとは電荷をもつ粒子のことで、イオンには 2 種類ある。電子を放出して正の電荷を帯びた原子（または原子団）を**陽イオン**または**カチオン**といい、電子を受け取って負の電荷を帯びた原子（または原子団）を**陰イオン**または**アニオン**と呼んでいる。§ 1.2.2 で述べたように、原子は希ガスのように最外殻が閉殻となっている場合か、最外殻の電子が 8 個の場合に一番安定している。そこで具体的に表 1 で原子番号 11 の Na 原子の電子配列を見ると、最外殻の電子が 1 個ある。この 1 個の電子を放出すれば電子配列は原子番号 10 の希ガス Ne と同じ電子配列、つまり閉殻となる。同様に、Mg を見ると 2 個の電子を放出すれば電子配列は Ne と同じになる。Al の場合は 3 個の電子を放出すれば Ne と同じ電子配列となる。Na 原子は陽子が 11 個、電子が 11 個で電気的に中性だったが、電子が 1 個なくなると原子は全体として +1 の電荷を帯びることになる。これを Na イオンと呼んで、 Na^+ と書く。同様に Mg や Al のイオンはそれぞれ Mg^{+2} 、 Al^{+3} と書き、これらは正の電荷を持つので**陽イオン**と呼ぶ。

一方、原子番号 8 の O（酸素）の場合を見てみよう。O は、2 個の電子を受けると安定な Ne と同じ電子配列になる。この場合、原子は全体として -2 の電荷を帯びるので O^{-2} と書き、これを酸素イオンと呼んでいる。次に、原子番号 17 の塩素を見てみよう。これは最外殻に 7 個の電子があり、電子を 1 個受け取ると原子番号 18 の Ar と同じ電子配列になる。この場合、電子が 1 個増えたのだから全体として負の電荷を帯びるので Cl^- と書き、これを Cl イオンと呼んでいる。これらは負の電荷を持つので**陰イオン**と呼ぶ。尚、価電子数が 4 個の原子（たとえば C や Si 等）は、電子を放出しても 4 個、受け取っても 4 個ということで、これらの原子はイオンにはなりにくい。

原子がイオンになるときに出入りする電子の数を**イオン価数**（あるいは単に価数）といい、1 価、2 価、3 価と数える。Na イオンは 1 価の陽イオンで、酸素イオンは 2 価の陰イオンとなる。一般的に価電子数が 1 個の原子は 1 価の陽イオン、2 個の原子は 2 価の陽イオン、3 個の原子は 3 価の陽イオンになりやすく、逆に価電子数が 7 個の原子は 1 価の陰イオン、6 個の原子は 2 価の陰イオン、5 個の原子は 3 価の陰イオンになりやすい傾向にある。以上のことを整理すると、

● **価電子の少ない原子**： 価電子を放出して陽イオンになりやすい ($\text{Na} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{e}^-$, $\text{Mg} \rightarrow \text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^-$ 、等)

●**価電子の多い原子** : 価電子を受け取って陰イオンになりやすい ($O+2e^- \rightarrow O^{2-}$, $Cl+e^- \rightarrow Cl^-$ 、等)

○**イオンの電子配置** : 原子番号が近い希ガスの電子配置をとる

尚、これらは1つの原子だけからできたイオンなので**単原子イオン**といい、原子団全体として電荷をもつイオンを**多原子イオン**と呼んでいる⁶。

2.2 イオン化エネルギーと電子親和力

2.2.1 イオン化エネルギー

原子から1個の電子を取り去って1価の陽イオンにするために必要なエネルギーを**イオン化エネルギー**という。これは原子がその電子をどれだけ強く結び付けているのかの目安になる。イオン化エネルギーが小さい原子ほど電子が原子から離れやすく、**1価の陽イオン**になりやすい⁷。周期表の1族のLi、Na、Kなどのアルカリ金属のイオン化エネルギーは小さく、He、Ne、Arなどの希ガスのイオン化エネルギーは大きい。アルカリ金属で

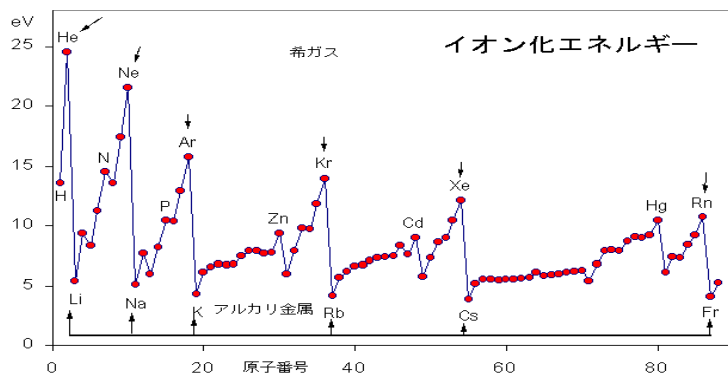


図 10: イオンの生成と電子配列 (Wiki)

最も小さく、希ガスで最も大きくなる周期的な変化が見られることに注意されたい。

2.2.2 電子親和力

原子が1個の電子を受け取って1価の陰イオンになるときに放出されるエネルギーを**電子親和力**という。電子親和力が大きい原子ほど原子が電子を受け取りやすく、**1価の陰イオン**になりやすい。電子親和力の大きなエネルギーを持つ原子ほど電子を取り入れる力が大きいということになる。

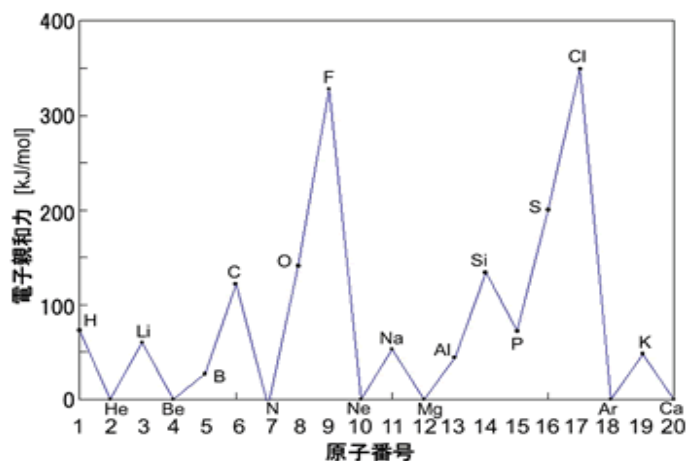


図 11: 電子親和力 (http://www.geocities.jp/science_soul/science/chem/c03.html)

⁶ 例: アンモニウムイオン: NH_4^+ 、硫酸イオン SO_4^{2-} , etc

⁷ 中性原子から取り去る電子が1個目の場合を第1イオン化エネルギー、2個目の電子を取り去る場合を第2イオン化エネルギー、3個目の電子を取り去る場合を第3イオン化エネルギー、等々と呼んでいる。

♣ Q&A ———

- アリス：ある原子の陽イオンや陰イオンへのなりやすさは、その原子のイオン化エネルギーや電子親和力を評価すればわかるのね。
- K氏：そうだね。イオン化エネルギーは外部からエネルギーを与えるというか、電子を原子核のクーロン引力を振り切って遠くへ持っていくのに必要なエネルギーだね。一方、電子親和力は中性の原子と電子とが互いに接近して電子が原子に捕らえられ、陰イオンをつくったときに放出されるエネルギーで、言い換えると陰イオンから電子を引き離して遠くへもっていくのに必要なエネルギーでもあるわけだね。あと、多原子イオンの話とか、分子、分子結合の話などが続くわけだけど、これに深入りすると本題から外れていっちゃう。。分子や分子結合等の話は興味があればまた別の機会にやるとして、この辺でこの話題は切り上げ、いよいよ本題の放射性崩壊の話に入っていこうか。
- アリス：そうね。興味は大いにあるけど、そのお話はまた別の機会に譲るとして本題に入っていただけのかしら。

3 放射性崩壊現象

3.1 放射性物質と放射性核種

放射性物質(radioactive material) とは**放射線をだす物質**のことを言う。**放射線**(radiation) は放射性物質から放出される α 線、 β 線、 γ 線⁸の総称で、放射線を出す能力のことを**放射能**(radioactivity) という。では放射線はどこからがでてくるかという原子核からでてくる⁹。放射線を放出する原子核を**放射性核種**と呼び、自然には270の安定した核種と70の不安定な核種(天然放射性核種)が存在する。また、 α 線や β 線、中性子線などを原子核に当てて人工的に放射性核種が作られるが、この核種を**人工放射性核種**と呼んでいる。

原子核は放射線を出すことで他の原子核に変わったり、その状態(原子核のエネルギー状態¹⁰がより低い状態へ)が変わったりするが、この現象を**放射性崩壊**とか**放射性壊変**、**原子核崩壊**とか単に**崩壊**と呼んでいる。

♣ Q&A ———

- アリス： α 線、 β 線、 γ 線について少し説明していただける？
- K氏：了解。 α 線というのは α 粒子の流れで、 β 線というのは β 粒子の流れなんだね。いずれも高速粒子線だ。一方、 γ 線は粒子線ではなく波長が非常に短い電磁波なんだ。 α 粒子の正体は陽子2個と中性子2個からなるHe原子核で、 β 粒子は電子または陽電子なんだね。陽電子というのは電子とまったく同じ奴だが、正の電荷を持っている点だけが異なっているんだ。 α 線を出しながら崩壊するのを **α 崩壊**といい、同様に **β 崩壊**、 **γ 崩壊**という。 α 粒子は β 粒子に比べて非常に大きいので α 線は紙などに当たると透過しない。 α 線は水中で10 μ m、空気中で数cmで止まる。皮膚で止まるので人体への影響はない。一方、 β 線は α 線より透過力が強く、紙を通り抜けるが、薄いAlの板などは透過しない。空気中で数m、水中で数cmで止まる。大部分は皮膚で止まるので、主に皮膚の被爆が問題となる。体内器官への影響はほとんどない。 γ 線は最も透過力が強く、紙やAlはすり抜け、また皮膚を通して体内組織、器官へ到達し、人体に与える影響は大きい。 γ 線は鉛の板は透過しない。
- アリス：放射性原子核からは α 粒子や β 粒子、あるいは γ 線などが飛び出してきて原子核崩壊していく…つまり、放射性原子核は不安定だからそういうものを放り出して安定状態に向かおうとするわけね。
- K氏：そうなんだ。 α 崩壊や β 崩壊ではHeの原子核や電子、陽電子などの粒子を放出するので、当然元の核種は他の核種に変わる、つまり、原子番号や質量数が変わるわけだね。一方、 γ 崩壊の場合、核

⁸ いずれも高いエネルギーを持ち、このエネルギーは崩壊エネルギーと呼ばれる。

⁹ 宇宙から降り注がれる放射線についてはここでは触れないことにする。

¹⁰ 一番エネルギーの低い状態を基底状態、それより高い状態を励起状態という。

種は変わらない、つまりこの場合は高いエネルギー状態から安定な低いエネルギー状態へと変わる、つまり、興奮している原子核が高エネルギー γ 線をだすことで沈静化していくというイメージだね。

- アリス：なるほど。各崩壊現象の違いはよくわかったわ。ところで β 崩壊では電子や陽電子が飛び出すといわれたけど、原子核には電子や陽電子がなかったのじゃないの？
- K氏：グっふお〜ん !! 。。。万物流転、世の中無常、諸行無常の響きあり... アレ〜ッ !? ...
- アリス：K さん、大丈夫。口から泡を飛ばしながらボソボソ喋っておられるようだけど。
- K氏：いや、失礼 。。。 (汗；) あの β 崩壊はいろいろなモードがあるんだけど、普通 β 崩壊と呼ばれているのは電子と中性微子 (*neutrino*) を放出するケースで、詳しくは β^- 崩壊という。一方、陽電子と中性微子を放出するケースがあるんだが、これを β^+ 崩壊と呼んでいるんだね。 β^- 崩壊では中性子が一役買って、こいつが陽子と電子と中性微子 (ニュートリノ) に姿を変え、核外へ電子と中性微子を放り出す。結果的に陽子が 1 個増えるので原子番号は 1 だけ増加するね。一方、 β^+ 崩壊では陽子が一役買い、これが陽電子と中性微子に姿を変え、陽電子と中性微子を核外へ放り出す。陽子は 1 個減るから原子番号は 1 だけ減少することになる。式で書くと次のようになるんだ。

$$\begin{array}{l} \beta^- \text{崩壊: } n \longrightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e \\ \beta^+ \text{崩壊: } p^+ \longrightarrow n + e^+ + \nu_e \end{array}$$

ここで n は中性子、 p^+ は陽子、 e^- は電子で e^+ は陽電子、 ν_e は中性微子、 $\bar{\nu}_e$ は反中性微子を表わす。

- アリス：先ほど万物流転とかなにやら眩かれていたけど、中性子や陽子が姿を変えることを言っておられたのね。ところで反中性微子って何？
- K氏：電子と電荷の符号だけが異なるものとして陽電子があっただろう。このような粒子を反粒子というけど、中性微子の反粒子は反中性微子なんだ。もっとも、中性微子は電荷が 0 なので反中性微子というネーミングはおかしいと思うかもしれないけど、このあたりの話は素粒子論の知識が必要になるので、ここでは突っ込まないでね (汗；)。同じように陽子には反陽子、中性子には反中性子があるんだ。
- アリス：そうなんだ。ややこしく考えるのはやめて、正があれば負もあると簡単に思っておくわ。
- K氏：余談になるけど、 β 崩壊の理論は 1934 年、イタリアの物理学者フェルミによって発表されたんだね。若き湯川博士はフェルミの β 崩壊に関する論文を読んで非常に刺激を受け、核力の問題に一層没入され、後にノーベル賞を受賞された中間子論を完成されていったということで、このあたりのことは湯川博士の著書「旅人」に書かれている。物理学だけにかかわらないが、学問の進展は歴史的には大変な紆余曲折があるのだね。
- アリス：教科書にあっさり一行で書かれている内容も歴史を紐解くと大変な苦闘の跡がうかがわれるのね。。。。
- K氏：うん。だからわれわれ学徒は、たまにはそのような苦闘の歴史を垣間見る必要もあるんだね。さて、次の話は放射性崩壊速度だ。よく半減期という言葉を目にすると思うけど、そのあたりの話から進めていこう。
- アリス：よろしくお願いしますわ。

3.2 放射性崩壊速度

放射性崩壊速度は特殊な例外を除いて温度や圧力、形状によって影響を受けない。ここでは放射性核種 A が崩壊して安定な核種 B になっていく場合の**崩壊速度**を求めていく。

3.2.1 半減期

放射性原子 (A) の数を N 個とすると、単位時間に崩壊する速度 (dN/dt) はその時点の放射性原子の数に比例するので

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (3.1)$$

と表わせる¹¹。 λ は単位時間に崩壊する割合を示す定数 (**崩壊定数**) で、核種に固有の値を持つ。(3.1) の微分方程式は『社会人のための楽しい物理入門』の第 0 章を参照すれば容易に解けて

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (3.2)$$

が得られる。 N_0 は時刻 0 での A の原子数。ここで後の展開に便利のように (3.2) を変形しておく¹²

$$\ln N = \ln N_0 - \lambda t \longrightarrow \lambda t = \ln \frac{N_0}{N} \longrightarrow t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{N_0}{N} \quad (3.3)$$

A の原子数が半減する ($N = \frac{1}{2} N_0$) までの時間を T とすると、(3.3) より

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.69315}{\lambda} \quad (3.4)$$

が得られる。

この T を**半減期**と呼んでいる¹³。ここで注意して欲しいのは、半減期はもともとあった放射性原子の数 (A の数) には無関係という点だ。**半減期は放射性核種の安定度を示す値**でもあり、半減期が短ければ短いほど不安定な核種ということになる。右の表にいろいろな放射性物質の半減期を上げておく¹⁴。

いろいろな放射性物質の半減期	
放射性物質	半減期
ラドン220	55.6秒
ラドン222	3.8日
ニオブ95	35日
ストロンチウム90	29年
セシウム137	30年
アメリシウム241	430年
炭素14	5715年
アメリシウム243	7400年
プルトニウム239	2.4万年
ウラン233	16万年
テクネチウム99	21万年
ジルコニウム93	153万年
ネプツニウム237	214万年
ヨウ素129	1570万年
カリウム40	約13億年
ウラン238	約45億年

3.3 放射能と放射線の単位

放射能とは先ほども言ったように 放射線を出す能力 のことで、放射能の強さ (放射線を出す能力) を表わす単位として**ベクレル** (Bq) が使われる。1 ベクレルは 1 秒間に 1 個の原子核が崩壊するときに出る放射性物質の単位だ。ベクレルという呼称は、放射線を発見したフランスの物理学者アンリ・ベクレルにちなんでつけられた。

次に、放射線の量を表わす単位だが、これは目的によって使い分けられており、代表的なものとして次の 3 つがある。

- **照射線量** : C/Kg (クーロン/キログラム)

1kg の空気中で放射線の電離作用により生じたイオンの総電荷が 1 クーロンであるときの線量。

- **吸収線量** : Gy (グレイ)

放射線のエネルギーが物質にどれだけ吸収されるかを表す単位で、1Gy は、物質 1 kg あたりの吸収線量が 1 ジュールのエネルギー吸収があるときの放射線量。

- **線量当量** : Sv (シーベルト)

人体に対する放射線の影響の程度を表わす単位で、1Sv は Gy に線質係数をかけたもの。線質係数は α 線では 20Sv、 β 線や γ 線では 1Sv とされている。シーベルトの 1000 分の 1 は mSv (ミリシーベルト)。シーベルトという呼称は放射線防護の研究で功績のあったスウェーデンの物理学者ロルフ・マキシミリアン・シーベルトからきている。ちなみに集団検診で受ける胸部 X 線は 0.3Sv だ。

¹¹ 放射性原子の数は崩壊で単調減少するため、 dN/dt は常に負である。

¹² $\ln$ は自然対数のこと。

¹³ 放射能が半分になるまでの時間。

¹⁴ <http://www.numo.or.jp/pr/booklet/pdf/anzensei12.pdf> 参照。

4 核力と核反応

4.1 質量欠損と結合エネルギー

原子核は陽子と中性子からできており、陽子と中性子はいわゆる**核力の引力効果**¹⁵で結合している。陽子の数(=原子番号)は同じだが中性子の数が異なる原子核を持つ元素の集まりを**同位体**(アイソトープ)¹⁶という。

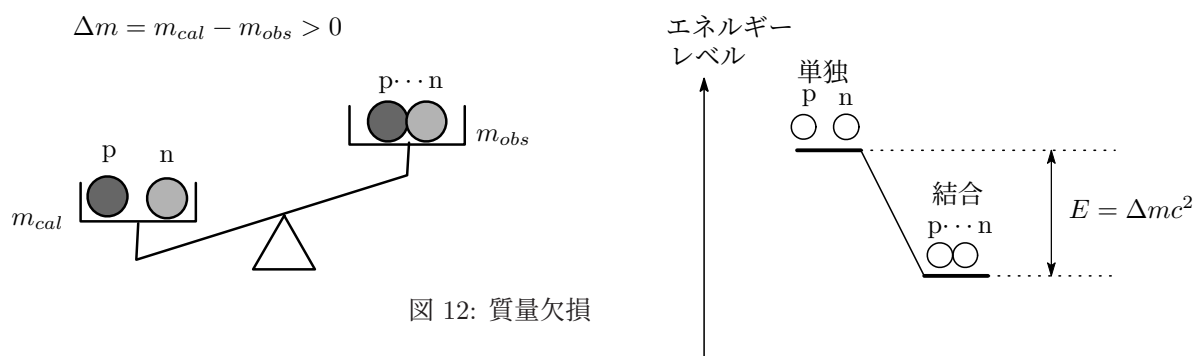
さて、原子質量は原子を構成する各粒子の質量の和だから、 m_p 、 m_n 、 m_e をそれぞれ陽子 (*positron*)、中性子 (*neutron*)、電子 (*electron*) の質量とすると、原子番号 Z の原子質量は

$$m_{cal} = Z(m_p + m_e) + N_n m_p \quad (4.1)$$

と表わせる。ここで N_n は中性子の数。一方、精密に原子質量を測定をした値を m_{obs} とすると、 m_{obs} は常に m_{cal} よりも軽くなっていることが分かった¹⁷。この差を Δm とすると

$$\Delta m = m_{cal} - m_{obs} > 0 \quad (4.2)$$

この Δm を**質量欠損**と呼ぶが、問題は何故質量欠損が起こるのかということだ。ここで登場するのがアインシュタインの**質量とエネルギーの等価原理**($E = mc^2$: c は光速)で、質量欠損分のエネルギー Δmc^2 は原子核中で**核子を相互に結びつける結合エネルギー**に変換されたと解釈できる¹⁸。



そこで、具体的に結合エネルギーの大きさを He 原子について計算してみよう。陽子の質量のところは水素原子の質量(=陽子+電子の質量)と見積もってもいいだろう。水素原子の質量は $1.007825 [\text{amu}]$ 、中性子は $1.008665 [\text{amu}]$ なので

$$\Delta m = 2 \times (1.007825 + 1.008665) - 4.002603 = 0.0303771 [\text{amu}] = 28.30 \text{ MeV} \quad (4.3)$$

となる¹⁹。普通の化学反応のエネルギーは数 eV 程度なので、核力の結合エネルギーはその 1 千万倍という、とてつもなく大きなエネルギーが使われていることになる。この結合エネルギーは原子番号が大きくなるにつれて増大していく²⁰。質量数(陽子と中性の数の和)が A の元素の核子 1 個あたりの結合エネルギーを f とすると

$$f = \frac{\Delta mc^2}{A} \quad (4.4)$$

で与えられる。 f を**核子結合力**と呼んでいる。具体的数値を表 2 にあげておく。

	${}^2_1\text{H}$	${}^3_1\text{H}$	${}^4_2\text{He}$	${}^7_3\text{Li}$	${}^{12}_6\text{C}$	${}^{14}_7\text{N}$
f	1.10	2.81	7.06	5.60	7.70	7.46

表 2: 核子結合力 (MeV) の例

表 13 は核子結合力と質量数の関係をグラフにしたものだ。最初、質量数の増加につれ急激に核子結合力は大きくなり、質量数が 20 から 50 あたりまでは徐々に増加し、50 から 150 あたりまでは約 8.5 MeV 程度で、それより質量数が増すと徐々に小さくなっていく²¹。ウランウム (${}^{238}\text{U}$) に至っては 7.4 MeV と弱くなり、このた

¹⁵ 陽子と中性子の 2 つの核子の間に中間子が交換されることによって核力が生じるというのが湯川博士の提唱した中間子理論。

¹⁶ 同位体は同じ数の電子を持っているので、化学的にはほとんど同じ性質となる

¹⁷ m_{obs} の *obs* は *observe* (観測) から、 m_{cal} の *cal* は *calculation* (計算) からとった

¹⁸ 互いに引き合うエネルギーを絞るために、各核子はスリムになったというイメージかな。。。

¹⁹ 質量数 12 の炭素原子の質量を原子質量単位 ([amu]) で $12 [\text{amu}]$ と定める。 $1 [\text{amu}] = 931.494 \text{ KeV}$ 。『放射性物質について (2)』のレポートも参照されたい。eV はエレクトロンボルトといい、1eV は 1V の電位差がある自由空間内で電子 1 つが得るエネルギー

²⁰ 狭い領域の中で沢山の陽子が犇めき合っていると、陽子同士の斥力は非常に大きなものとなるが、その斥力に抗して結合するためにはそれなりの大きな結合エネルギーが要る。

²¹ 核力が飽和性のあることを示している。

めウラニウム原子核は不安定で崩壊するということになる。-

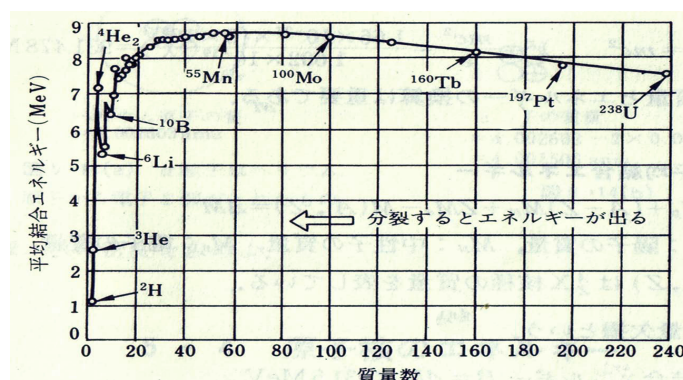


図 13: 核子結合力と質量数

♣ Q&A

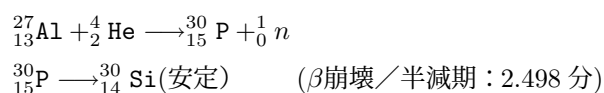
- アリス：重い原子になると原子核が不安定になっていくというのは、結合力より陽子同士の反発力が大きくなるからということね。
- K氏：うん、重い原子になると反発力は質量数 Z の 2 乗に比例して大きくなり、結合力と比肩できる程度になるんだ。このため、核子の結合は弱められるんだね。ところで、**魔法の数**というものがある。それは陽子や中性子の数が 2、8、20、28、50、82、126、184 の時、その原子核は安定になるというものだ。 ${}^4_2\text{He}$ なんかは陽子も中性子もともに 2 個で 2 重の魔法数となるね。He が特に安定なのはこのためだ。
- アリス：電子配置のお話で、最外殻が満席になると安定するという話があったわね。原子核にもなにかそのような殻構造があるのかしら？
- K氏：ドキッ！ なかなか鋭い質問だ。1949 年、アメリカの物理学者メイヤーとドイツの物理学者イェンゼンが独立に原子核の殻構造の存在を見出したといわれているね。2 人はこの功績により 1963 年にノーベル物理学賞を受賞している。原子核の殻構造について興味があれば原子核物理の適当な本を見てね。
- アリス：今のところパスしておくワ。お話を続けていただける？
- K氏：了解。次は原子核反応について話をやっていくよ。

4.2 原子核反応

放射性物質は α 粒子やなど、放射線を出して崩壊していくことは既に述べた。今度は安定した原子に放射線を照射するとどうなるか。1919 年、ラザフォードは窒素原子に α 粒子 (He 原子核) を衝突させる実験を行ったところ、酸素原子と陽子が生成されることを見出した²²。



これは、1 つの原子核にある粒子を衝突させ別種の原子核に変換させるはじめての**原子核反応** (核反応) である。1934 年、ジュリオ=キュリー夫妻は α 粒子を Al (アルミニウム) に照射したところ、 α 粒子の照射をやめても放射線が放出され続ける (β 崩壊) ことを発見した。Al の原子核が α 粒子と原子核反応を起こし、質量数 30 の**放射性リン** (${}^{30}\text{P}$) ができたのだ。これがはじめての**人工放射性核種**の製造例である。



²² 窒素 (N) は質量数 14 でこれに質量数 4 の He 原子核が衝突すると質量数が 18 のフッ素 ${}^{18}\text{F}$ ができるが、すぐに中性子が普通の酸素より 1 つ多い質量数 17 の酸素 (酸素の同位体) と 1 個の陽子になる。

4.2.1 原子核反応のルール

いま、 ${}_b^aX$ という原子核に ${}_d^cY$ という粒子を衝突させて ${}_f^eA$ という原子核が生成されたと同時に ${}_h^gB$ の粒子が放出されたとすると、その反応式は次のように表わせる。

$${}_b^aX + {}_d^cY \longrightarrow {}_f^eA + {}_h^gB \quad (4.6)$$

そうすると反応の前後では元素記号の左上に書かれる質量数と左下に書かれる原子番号は式の左右でつりあっていなければならないので、次の関係が成り立つことが分かる。

$$a + c = e + g \quad (4.7)$$

$$b + d = f + h \quad (4.8)$$

4.3 核分裂反応と核融合反応

4.3.1 核分裂反応

核分裂反応は、重い原子核（不安定な原子核）に陽子や中性子などを当てて核を分裂させ、2つ以上のより軽い元素を作る反応だ。天然ウランには核分裂を容易に起こすウラン 235 と起こさないウラン 238、ウラン 238 が存在している²³が、ウラン 235 に中性子を一つ衝突させると、二つの原子核と幾つかの高速中性子に分裂する。代表的な核分裂反応としては下記のようなものがある。



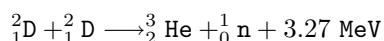
このように、陽子や中性子などの衝突で引き起こされる核分裂を**誘導核分裂**と呼んでいる²⁴。右辺と左辺の核子数は等しいことがわかる²⁵。なお、元素名として Y はイットリウム、I はヨウ素である。核分裂を起こすところの質量の差（質量欠損）に相当するエネルギーが外部に放出されるが、上の過程ではウラン原子 1 個あたり約 200MeV と莫大なエネルギーが放出される。

原子核が分裂してできた核種を**核分裂生成物**とか**核分裂片**といっている。核分裂生成物は一般に様々な核種の混合物で、ウラン 235 の核分裂による主な核分裂生成物として Ce（セシウム）や I（ヨウ素）、Sr（ストロンチウム）などがある。

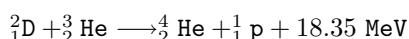
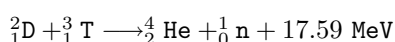
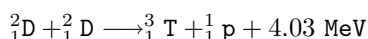
4.3.2 核融合反応

核融合反応は軽い原子核が融合してより重い原子核ができる反応で、**核融合反応**と呼ばれる。核分裂反応の場合と同じく莫大なエネルギーが放出される。太陽や多くの高温の星で進行しており、水素が核融合反応でヘリウムになり、莫大な反応エネルギーが放出されている²⁶。

重水素を ${}_1^2\text{D}$ 、三重水素を ${}_1^3\text{T}$ と書くと、重水素や三重水素のような軽い原子核は次のような核融合反応を起こしやすい。



上記以外に



が起こり、結局 6 個の重水素から 43.24MeV のエネルギーが放出される。

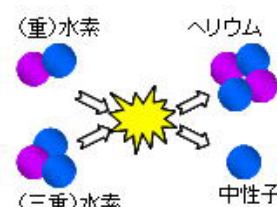


図 14: 核融合反応

²³ 天然ウラン同位体の存在比は ${}^{238}\text{U}$: 99.28 %、 ${}^{235}\text{U}$: 0.71 %、 ${}^{234}\text{U}$: 0.0054 % いずれも放射性があり α 崩壊する。

²⁴ 中性子やその他の粒子による衝撃を受けることなく核分裂が始まるのを自発核分裂という。

²⁵ (4.7) 参照。

²⁶ 水素爆弾は重水素や三重水素など水素の同位元素の原子核が核融合反応をおこして発生するエネルギーを利用したものである。

♣ Q&A ———

- K氏：以上で放射性崩壊について駆け足でお話してきたけど、どうだった。わかりにくい事もあったことだと思うけど、ノートを読み返すなりしてフォローしてもらえるとうれしい。無論、わかりにくい点はいつでも質問してくれればいいよ。さて、最後におまけとして年代測定法のお話を少ししておこう。
- アリス：年代測定法っていうのは化石に含まれる炭素 14 の放射能を測定してその年代を調べるというお話のことかしら。
- K氏：そうだね。なんでそんなものから年代が推定できるのか、不思議に思うかもしれないけど、ちょっと簡単に触れておこう。サンプルに含まれる放射性物質の半減期を T 、崩壊定数を λ として、最初の放射能を N_0 、 t 年後の放射能を N_t とすると (3.2) より

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} \quad (4.10)$$

いま、木の葉の化石に含まれる ^{14}C (←炭素の放射性同位体で、原子核は 6 個の陽子と 8 個の中性子からなる。炭素の内の 0.00000000012 % を占める) の量が現在の木の葉の 25 % であったとしよう。 ^{14}C の半減期を 5700 年とすると (4.10) と (3.4) より

$$\frac{N_t}{N_0} = 0.25 = e^{-\frac{0.693}{T}t} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{5700}}$$

これから t を求めると $t=11400$ 年となるというわけだ。この方法の精度は ± 50 年くらいの精度といわれているね。

- アリス：そうなんだ。今日は勉強になったわ、ありがとう。今日のお話を自分なりに咀嚼してまたわからない事がでたらよろしくお願いします。
- K氏：了解しました。それじゃね〜、気をつけて帰ってね。
- アリス：ありがとう。それじゃさようなら。

■追記・修正

- 2011.08.10：「イオン」のセクションを追記。ファイル容量が大きくなりサーバーが受け付けなくなったので一部図をカット。