

【2006年版】

放射化学  
用語  
辞典

日本放射化学会

# 放射化学用語辞典

日本放射化学会

## まえがき

日本放射化学会は放射化学討論会 50 周年記念事業の一つとして本書「放射化学用語辞典」を出版することとし、記念事業「放射化学用語辞典」編集委員会がその編集の任にあたった。本書には放射化学に関する化学，物理学，生物学，放射線測定技術ならびに原子力などの分野で使われる用語を取り込むこととし、原稿の執筆には 80 名を越える正会員と学生会員があたり、編集委員会がとりまとめた。編集に約 1 年半を費やしたものの、関連用語をすべて網羅できたとはいえ、説明が不十分な箇所や誤った記述があると思われるが、その責任は当編集委員会にある。できるだけ早い時期に改訂版を発刊し、読者ならびに関係者の指摘を得て、さらに内容の充実を図りたいと考えているので、ご意見やお気づきの点は編集委員会までお知らせいただきたい。放射化学の専門家やこれから放射化学に携わろうとする若い人たちにとって、本書が少しでも助けになることを願っている。

最後に、本書の出版に際して寄せられた多くの方々の深い理解と強力な支援に心から謝意を表したい。

平成 18 年 10 月 24 日

日本放射化学会  
放射化学討論会 50 周年記念事業  
「放射化学用語辞典」編集委員会  
工藤 博司  
吉田 善行  
矢板 毅  
目黒 義弘  
北辻 章浩

## 執筆者 (五十音順)

浅井 雅人	(原子力機構)	桐島 陽	(東北大)
天野 良平	(金沢大)	工藤 久昭	(新潟大)
荒殿 保幸	(元原子力機構)	工藤 博司	(元東北大)
池沢 孝明	(新潟大)	久保 謙哉	(国際基督教大)
石川 剛	(新潟大)	河野 信昭	(原子力機構)
市川 隆敏	(原子力機構)	國分 陽子	(原子力機構)
伊藤 泰男	(元東京大)	小林 義男	(理研)
伊庭 毅	(新潟大)	小村 和久	(金沢大)
植頭 康裕	(原子力機構)	齊藤 裕子	(青山学院大)
臼田 重和	(原子力機構)	佐伯 正克	(元原子力機構)
榎本 秀一	(理研)	酒井 陽一	(大同工大)
海老原 充	(首都大東京)	坂本 浩	(元金沢大)
遠藤 和豊	(昭和薬大)	阪間 稔	(徳島大)
大浦 泰嗣	(首都大東京)	坂牧 雅巳	(新潟大)
大古 善久	(産総研)	佐々木隆之	(京都大)
大槻 勤	(東北大)	佐藤 正知	(北海道大)
大森 巍	(元静岡大)	佐藤 宏樹	(新潟大)
岡田 往子	(武蔵工大)	鹿野 弘二	(函館高専)
奥野 健二	(静岡大)	篠原 厚	(大阪大)
尾崎 卓郎	(原子力機構)	篠原 伸夫	(原子力機構)
笠松 良崇	(原子力機構)	柴田 誠一	(京都大)
加治 大哉	(理研)	清水 伸浩	(新潟大)
岸川 俊明	(元熊本大)	清水 亮吾	(新潟大)
北澤 孝史	(東邦大)	鈴木 健訓	(高エネルギー加速器研究機構)
北辻 章浩	(原子力機構)	鈴木 章悟	(武蔵工大)



関根 俊明	(放振協)	榎本 和義	(高エネルギー加速器研究機構)
高橋 嘉夫	(広島大)	三浦 太一	(高エネルギー加速器研究機構)
高部 智正	(大阪大)	三頭 聡明	(東北大)
田上 恵子	(放医研)	目黒 義弘	(原子力機構)
竹内 友之	(新潟大)	百島 則幸	(熊本大)
田代 祐基	(大阪大)	矢板 毅	(原子力機構)
田近 靖博	(新潟大)	八幡 崇	(新潟大)
館盛 勝一	(元原子力機構)	吉田 善行	(原子力機構)
寺田健太郎	(広島大)	米澤 良治	(新潟大)
豊嶋 厚史	(原子力機構)		
中嶋 啓二	(大阪大)		
中田 正美	(原子力機構)		
中田 裕子	(新潟大)		
中塚 敏光	(大阪大)		
中西 孝	(金沢大)		
永目諭一郎	(原子力機構)		
二宮 和彦	(大阪大)		
野田菜摘子	(北海道大)		
橋本 和幸	(原子力機構)		
橋本 哲夫	(新潟大)		
長谷川圀彦	(元静岡大)		
初川 雄一	(原子力機構)		
羽場 宏光	(理研)		
村松 久和	(信州大)		
平井 昭司	(武蔵工大)		

## 本辞典の利用にあたって

- (1) 本辞典で解説する用語（“キーワード”と呼ぶ）のあとに“→”で指示する用語は、当該キーワードの理解を促進するうえで参照されたい他のキーワード、あるいは当該キーワードの内容が記載されている他の同義のキーワードを示します。
- (2) 解説本文中に“\*”を付けた用語は、本辞典でキーワードとして解説されているものです。
- (3) キーワードの配列は次のルールに従っています。
  - ・五十音順に配列する。
  - ・ローマ字およびギリシャ文字の配列は日本語読みに基づく。
  - ・清音，濁音，半濁音の順に配列する。
  - ・「ー（カタカナの長音）」は最上位に配列する。

（例）「EC（イーシー）壊変」は「イエローケーキ」の前に配置。

## RI ミサイル療法 targeted radiotherapy

$\alpha$ 線<sup>\*</sup>、 $\beta$ 線<sup>\*</sup>あるいはオージェ電子<sup>\*</sup>などを放出する放射性同位体<sup>\*</sup>(RI)をがん組織部に送り込み、放射線<sup>\*</sup>の照射によってがん組織を破壊して治療する方法。RIをミサイルのようにがん組織部に送り込むことから「ミサイル療法(missile therapy)」と呼ぶ。ドラッグデリバリーシステム(DDS)を利用する放射線治療<sup>\*</sup>法の一つ。抗原抗体反応、すなわちがん細胞のみを認識するモノクローナル抗体を利用してRIを特定のがん組織や細胞中に送り込む方法を特に放射免疫療法<sup>\*</sup>(radioimmunotherapy)と呼ぶ。

## r 過程 r process

速い(rapid)過程の意。恒星の中心部で起こる原子核<sup>\*</sup>の合成過程を、中性子捕獲反応<sup>\*</sup>の起こりやすさの程度で分類するときの表現で、高頻度すなわち“速く”合成反応が進むときそれをr過程と呼ぶ。通常、恒星中心部での原子核合成<sup>\*</sup>(nucleosynthesis)はゆっくりと進みs過程<sup>\*</sup>(s process)と呼ばれるが、質量の大きな恒星中のように極端に中性子数が豊富な環境下ではr過程が起こる。このような環境下では、中性子捕獲反応で中性子<sup>\*</sup>を取り込む原子核は、ごく短時間内に連続的に多数の中性子を捕獲する。短寿命であるためにs過程では生成しないような原子核も生じることになり、これによって超重元素<sup>\*</sup>を含むすべての原子核の合成が可能になる。超ウラン元素であるアインシュタインウム(Es)とフェルミウム(Fm)は1952年に米国が行った熱核兵器爆発実験の際にr過程によって生成した。

## IAEA ネットワーク分析所

### IAEA network laboratory

核燃料物質<sup>\*</sup>の保障措置<sup>\*</sup>を目的とする

環境試料の分析を実施する機関のうち、高度な分析能力がIAEAにより認定された分析所のこと。各国がIAEA保障措置分析所(IAEA-SAL)を中心にネットワークを組んで試料の分析を分担し、複数の分析所で得られた結果を相互比較して分析結果の信頼性を確保する。東海村の日本原子力研究開発機構原子力科学研究所内にある高度環境分析研究棟(CLEAR)がIAEAに認定されたネットワーク分析所である。

## ICRU 球 ICRU sphere

人体が放射線<sup>\*</sup>場で受ける線量<sup>\*</sup>の基準を決めるために国際放射線単位測定委員会<sup>\*</sup>(ICRU)が定めた球で、密度 $1\text{ g/cm}^3$ 、直径 $30\text{ cm}$ の組織等価物質(酸素 $76.2\%$ 、炭素 $11.1\%$ 、水素 $10.1\%$ 、窒素 $2.6\%$ の質量組成)。ICRUはこの球を放射線場に置いたとき、球の表面から $1\text{ cm}$ の深さでの線量を $1\text{ cm}$ 線量当量<sup>\*</sup>( $\mu\text{Sv}$ )と定義し、線量計<sup>\*</sup>の基準としている。

## アイスキューブ Ice Cube

南極点の地下 $1400\text{ m} \sim 2400\text{ m}$ の深地層に日、米、欧の8カ国の国際協力により建設中の、縦、横、高さがいずれも約 $1000\text{ m}$ の大きさの氷を利用するニュートリノ<sup>\*</sup>の観測装置。スーパーカミオカンデ<sup>\*</sup>の約2万倍の大きさになる。直径 $50\text{ cm}$ の縦穴(80本)の中に、光電子増倍管<sup>\*</sup>を60個ずつ計4800個埋め込んだ検出器で、これまで測定できなかった超高エネルギーニュートリノの観測をめざす。謎とされている超高エネルギー宇宙線の発生活起の解明が期待される。

## アイソトープ電池 isotope battery

放射性核種<sup>\*</sup>の壊変<sup>\*</sup>によって放出されるエネルギーを直接電気エネルギーに変換するか、またはこれを熱源として電気エネルギーに変換する電池。寿命の

長い放射性核種を用いることによってほぼ完全にメンテナンスフリーの電源となり、人工衛星や宇宙ステーション用の電源、あるいは人工臓器稼動用の電源として利用される。 $^{90}\text{Sr}$  (半減期 $^*$ ; 28.8年,  $\beta$ 壊変 $^*$ ),  $^{238}\text{Pu}$  (半減期; 87.8年,  $\alpha$ 壊変 $^*$ ),  $^{242}\text{Cm}$  (半減期; 163日,  $\alpha$ 壊変 $^*$ )などを用いて数百ワット程度までの出力が得られる。2006年1月に米国航空宇宙局(NASA)が打ち上げた冥王星探査機ニューホライズンには、 $^{238}\text{Pu}$ の崩壊熱 $^*$ を利用する宇宙電池が搭載されている。図参照。

#### アクチニウム系列 actinium decay series

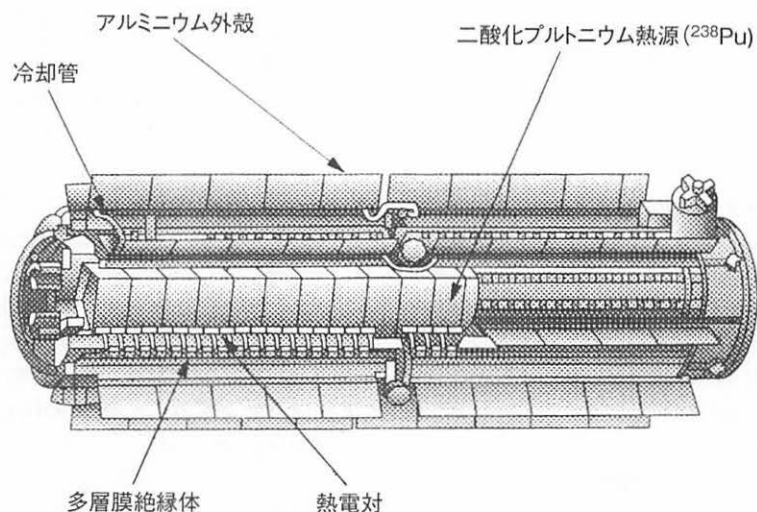
→ウラン系列 →トリウム系列 →ネプツニウム系列 天然放射性核種 $^*$ である $^{235}\text{U}$ を親核種 $^*$ として $\alpha$ 壊変 $^*$ および $\beta$ 壊変 $^*$ を繰り返しながら安定な $^{207}\text{Pb}$ を生成する壊変系列 $^*$ 。系列に含まれる全核種の質量数 $^*$ が4の倍数に3を加えたものであることから、 $(4n+3)$ 系列とも呼ばれる。図参照 (p. 3)。

#### アクチバブルトレーサー activable tracer 放射化 $^*$ することが可能なトレーサー $^*$

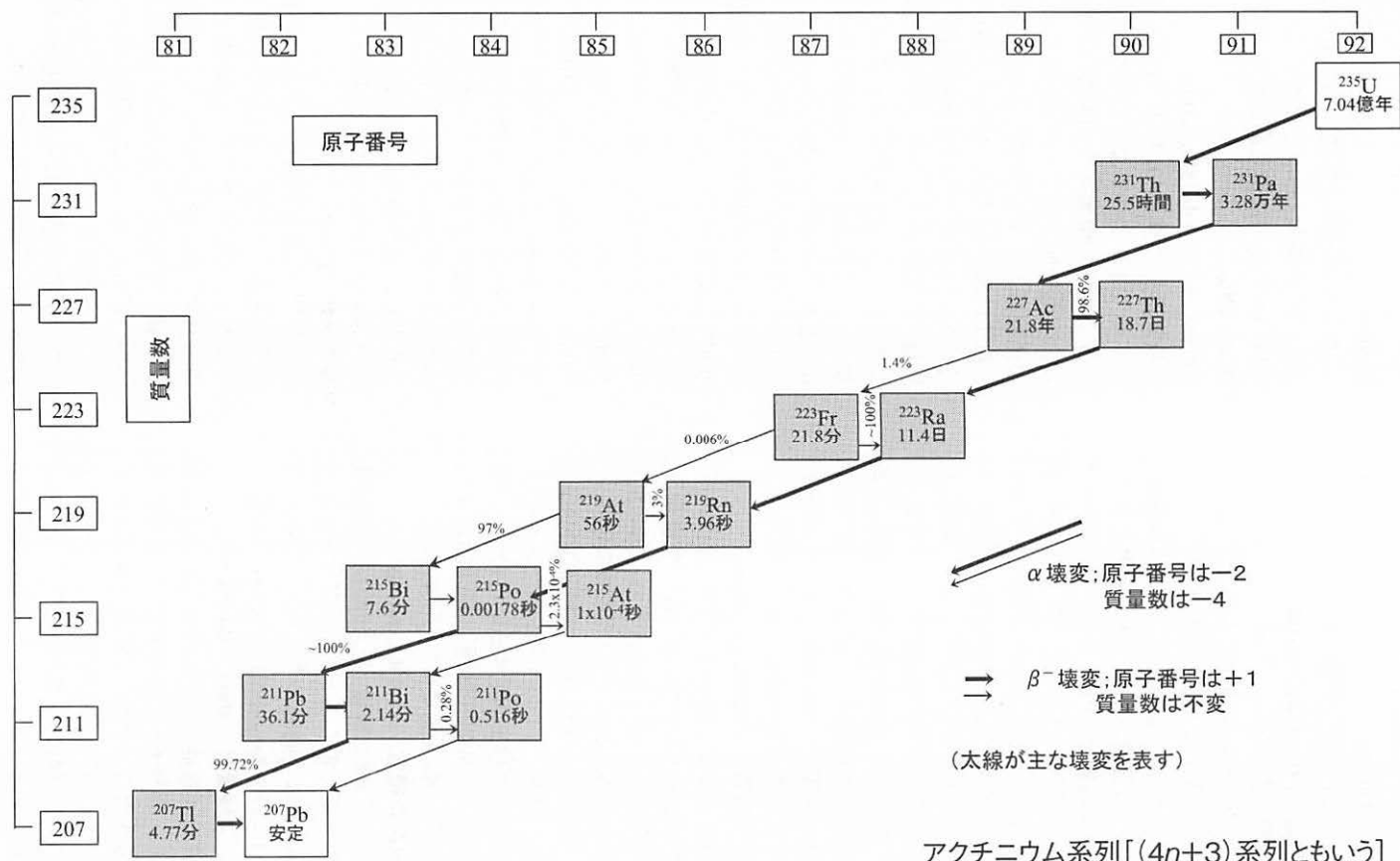
の意。ある物質系の原子 $^*$ や分子の挙動を知ることを目的とするトレーサー法において、放射性核種 $^*$ の代わりに (i) 放射化され易く, (ii) その物質系にはもともと存在せず, かつ (iii) 対象元素あるいは分子の挙動と類似するという3条件を備えた非放射性核種(安定核種)を用いる場合があり、この安定核種をアクチバブルトレーサーと呼ぶ。環境や食品などのように放射性核種を添加することが不都合である物質系にトレーサー法を適用する場合に有効である。上記3条件を満たす安定核種として、 $^{55}\text{Mn}$ ,  $^{79}\text{Ba}$ ,  $^{139}\text{La}$ ,  $^{115}\text{In}$ ,  $^{151}\text{Eu}$ ,  $^{164}\text{Dy}$ ,  $^{165}\text{Ho}$ ,  $^{191}\text{Ir}$ ,  $^{197}\text{Au}$ などがある。

#### 厚み計 thickness meter

放射線 $^*$ が物質に照射された時、放射線の吸収や後方散乱 $^*$ の程度が物質の厚さに依存することを利用して、その物質の厚みを測定する装置。紙やセロハンのように軽い元素 $^*$ からできている薄い物質の厚みを測定するときには、 $^{90}\text{Sr}$  ( $\beta$ 壊変 $^*$ ,  $\beta$ 線 $^*$ の最大エネルギー 0.546 MeV) などから放出される低エネルギーの $\beta$ 線



アイソトープ電池。ニューホライズンに搭載されている宇宙電池



が、また厚い物質には高エネルギーのβ線や<sup>241</sup>Amなどから放出されるγ線\*(59.5および26.3 keV)を用いる。

### 圧力容器 pressurized vessel

→沸騰水型原子炉 →加圧水型原子炉  
軽水型原子力発電炉を構成し、燃料集合体\*を束ねた原子炉\*の中心部、いわゆる“炉心\*”を収納している容器を原子炉圧力容器、略して圧力容器と呼ぶ。例えば電気出力110万kW級の沸騰水(BWR)型発電炉では、直径約5m、高さ約4mの円筒形の炉心を収納するのに、直径約6m、高さ約23mの円筒型の圧力容器が用いられる。圧力容器に代表される原子炉の構造材料は、高温、高圧、高応力、高放射線場など厳しい環境下で使用されるので、健全性を保つため材料の純度が十分に高いことや溶接技術が十分に優れていることが要求される。

### アボガドロ数 Avogadro's number

物質1モルに含まれる原子\*または分子の数で、 $6.0221367 \times 10^{23}$ 個。質量数\*12の炭素(<sup>12</sup>C)12g中に含まれる炭素原子の数と定義される。アボガドロの仮説「同温、同圧、同体積の気体は同数の分子を含む」(1811年)から導かれた基本定数。アボガドロ数を測定するには種々の方法があるが、放射性核種\*から放出されるα粒子\*の数を測定する方法もある。

### ALARAの概念 ALARA concept

「人体の被ばく線量\*を合理的に達成可能な限り低く抑える」ことを基本とする放射線\*被ばく防護の考え方。“ALARA”は“As Low As Reasonably Achievable”の意。

### アラニン線量計 alanine dosimeter

積算吸収線量の測定に用いられる固体線量計。高分子や絶縁体材料に放射線\*が吸収されると電離\*や励起作用によってラジカルが生成し蓄積することを利用する。アミノ酸の一種であるアラニンの結晶中に生成するラジカルは特に安定であ

り、そのラジカル量を電子スピン共鳴\*(ESR)法で測定して吸収線量\*を精度よく求めることができる。10-10<sup>6</sup>Gyの比較的高い線量\*の測定に用いられ、固体線量計としては最も高い精度をもつ。

### アルファ壊変

#### α decay または α disintegration

不安定な原子核\*がα粒子\*(α線\*)を放出することによってより安定な状態に移行する壊変\*現象で、質量数\*が約140以上の重い原子核で主に観測される。この過程はトンネル効果によって起こる。α粒子は陽子\*2個と中性子\*2個から成るので、α壊変で生成する娘核種\*は親核種\*より陽子が2個少なく(原子番号\*が2小さく)、質量数が4小さい。α壊変によって放出されるα線のエネルギーは、核種\*に固有の値をとる。そのため、放出されるα線のエネルギーを測定することによってα線を放出している核種を同定することができる。代表的なα壊変と、放出されるα線のエネルギー(MeV単位)は次のとおり。<sup>238</sup>U → <sup>234</sup>Th (4.196, 4.147), <sup>237</sup>Np → <sup>233</sup>Pa (4.787, 4.770), <sup>239</sup>Pu → <sup>235</sup>U (5.155, 5.143, 5.105), <sup>241</sup>Am → <sup>237</sup>Np (5.486, 5.443, 5.388), <sup>244</sup>Cm → <sup>240</sup>Pu (5.805, 5.763)。α壊変の起こりやすさは壊変エネルギー\*に依存し、壊変エネルギー\*が大きいほど半減期\*は短い。一般的に、より重い原子核から放出されるα線のエネルギーはより高い。

### アルファ線 α ray

原子核\*から放出されるヘリウム原子核。2個の陽子\*と2個の中性子\*の複合体であり+2の電荷を有する。α線を放出する核種\*をα放射体という。α線は物質と強く相互作用するため、α放射体を体内に摂取した場合には細胞などに大きな損傷を与える可能性があるため、超ウラン元素に代表されるα放射体の取り扱いには注意を払う必要がある。

## アルファ線検出器 $\alpha$ ray detector

$\alpha$ 線<sup>\*</sup>の測定に用いる検出器で、 $\alpha$ 線の個数の計測には電離箱<sup>\*</sup>、比例計数管<sup>\*</sup>、GM計数管<sup>\*</sup>、液体シンチレータ<sup>\*</sup>、プラスチックシンチレータ<sup>\*</sup>などを、また $\alpha$ 線スペクトルの測定にはSi半導体検出器<sup>\*</sup>を用いる。

## アルファ線スペクトロメトリー

### $\alpha$ ray spectrometry

核種<sup>\*</sup>から放出される $\alpha$ 線<sup>\*</sup>の放出頻度とエネルギーはその核種に固有であるので、 $\alpha$ 線のエネルギーから核種を同定し、 $\alpha$ 線の個数からその核種の個数を決定することができる。このような $\alpha$ 線のエネルギーとその個数の関係を $\alpha$ 線スペクトルと呼び、それを測定する手法を $\alpha$ 線スペクトロメトリーと呼ぶ。 $\alpha$ 線スペクトルは通常、表面障壁型Si半導体検出器<sup>\*</sup>を用い、検出器への電圧印加用電源、前置増幅器、パルス増幅器、マルチチャンネル分析器などから成る計測システムを用いて測定する。図参照。

## アルファ粒子 $\alpha$ particle

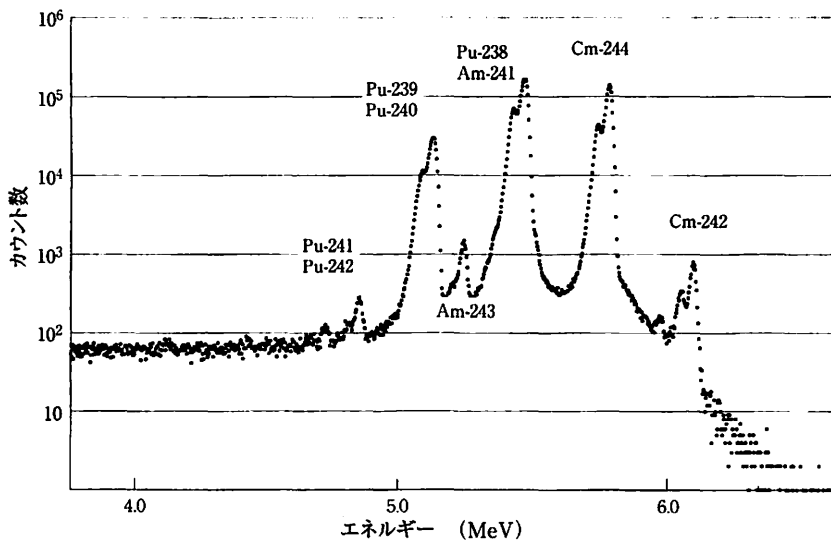
→アルファ線

## 泡検出器 bubble detector

泡箱とも呼ぶ。沸点より高い温度に保った“過熱状態”の水、グリセリン、ゲルの混合物、ポリマー中に分散されたフロンなどの微小液滴に放射線<sup>\*</sup>があたると、過熱状態が破壊されて液体は突沸して音と泡を発する。この音の大きさや泡の数は線量<sup>\*</sup>に依存するので、これらを測定することによって線量を測定できる。このような過熱状態の液滴を収納した線量測定器を泡検出器と呼ぶ。

## アンダーシュート under-shoot

パルスが増幅器のパルス微・積分フィルター回路によって整形され、減衰部分がゼロレベルを越して負になる部分と呼ぶ。他のパルスがその部分に重なると、そのパルスの波高値は低い波高値として分析されるので、これを低減するための対策が必要である。



アルファ線スペクトロメトリー。  
使用済核燃料を溶解した溶液中の超ウラン核種のアルファ線スペクトル。

**アンチコインシデンス測定****anti-coincidence measurement**

→反同時計数

**アンチコンプトン測定****anti-Compton measurement**

ガンマ線分光において、コンプトン散乱<sup>\*</sup>に起因する連続スペクトル領域の成分を低減するため、測定素子を別の大きな測定媒体で取り囲み、各々のパルスを取り出しこれを反同時計数<sup>\*</sup>回路に入れ同時計数<sup>\*</sup>のパルスを除去する測定法。測定素子中でのコンプトン反跳電子でパルスが生じて、そのコンプトン散乱光子による測定媒体でのパルスをほとんど同時に計測するので、測定素子中のこのパルスは計測されずコンプトン領域の成分は除

去され、光電ピークは見分けやすくなる。

**安定同位体 stable isotope**

非放射性すなわち安定な同位体<sup>\*</sup>のこと。<sup>1</sup>H から <sup>83</sup>Bi までの <sup>43</sup>Tc と <sup>61</sup>Pm を除く 81 元素に安定同位体が総計 279 存在する。安定同位体である <sup>2</sup>H や <sup>13</sup>C は反応機構の研究などに広く使われる。

**暗電流 dark current**

光電子増倍管<sup>\*</sup>やマイクロチャンネルプレート<sup>\*</sup>など主として高電圧バイアスをかけて動作させる検出器で、熱的原因や絶縁リークなどによって入力が無くても流れる電流。低エネルギー放射線<sup>\*</sup>測定の際に S/N 比が悪化する原因になる。光電子増倍管の暗電流は、製品のロット、保存状態、使用履歴などによって異なる。

## い

**EC 壊変 electron capture (EC) decay**

原子核<sup>\*</sup>が核外電子を捕獲する壊変<sup>\*</sup>過程 ( $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$ ) で、軌道電子捕獲<sup>\*</sup>ともいう。β 壊変<sup>\*</sup>の一種で、中性子欠損核種で起きる。通常、K 殻の電子<sup>\*</sup>を捕獲する確率が高い。その際、ニュートリノ<sup>\*</sup>の放出に続き、核外電子の再配列によって KX 線が放出され、さらにオージェ電子<sup>\*</sup>が放出される。核外電子の関与する壊変であるため化学効果が起こりやすい。2004 年には C<sub>60</sub> 分子に内包した <sup>7</sup>Be の半減期<sup>\*</sup>(53.3 日)が金属 Be 中に比べて 0.83% 短縮することが観測された。

**イエローケーキ yellow cake**

ウラン精鉱ともいい、ウラン鉱石<sup>\*</sup>(ウラン含有 1% 以下)から粗精錬の過程で大部分の不純物を除いたもので、黄色を呈する 6 価ウラン製品(ウラン含有率は 60% 程度)の総称。製品によって化学組

成、ウラン含有率は異なる。一般に、鉱山でイエローケーキにしてから精製工場に運ばれる。

**イオウ分析計 sulfur analyzer**

低エネルギーの γ 線<sup>\*</sup>または X 線<sup>\*</sup>の透過吸収あるいは蛍光 X 線励起を利用して、石油製品中に含まれるイオウ(S)成分を分析する計測機器。ラジオアイソトープを利用するものは小型、軽量でオンラインでの使用に適しており、石油精製業、ガス事業、電力業界などで、広く使用されている。<sup>59</sup>Fe (200 MBq) 線源からの MnKX 線の利用により ±0.05% 程度の精度で定量でき、原油中の数%の S を分析するのに十分である。

**イオンインプランテーション ion implantation**

イオン注入の意。注入したい粒子をイオン化し、直流もしくは高周波により数 keV から数 MeV に加速して固体基板表



層に注入する。半導体集積回路の作製に利用され、金属、セラミックス、高分子材料などの表層改質法としても注目されている。表層の化学的、電気化学的、電氣的、磁氣的、光学的、物理的、機械的特性を改質することができる。

### イオンクロマトグラフィー ion chromatography

試料中の種々のイオンをイオン交換カラムで分離して高感度、高精度で分析する方法。電解質溶離液に注入した試料溶液中の種々のイオンはイオン交換樹脂との吸着係数の差にもとづいて分離され、別々に溶出する。これを電気伝導度検出器などで検出する。元素分析にも利用でき、陽イオンや陰イオンの化学形分析もできる。

### イオントラップ ion trap

電磁場を用いて荷電粒子<sup>\*</sup>を狭い領域に閉じ込めること。レーザー冷却技術との組合せにより、イオントラップ型量子コンピュータの研究やプラズマ<sup>\*</sup>の基礎物性研究が飛躍的に進展している。

### 異性体シフト isomer shift

→核異性体シフト

### 位置感応型検出器

#### position sensitive detector

位置有感検出器ともいう。円筒型の比例計数管<sup>\*</sup>に抵抗性陽極を用いることによって、放射線<sup>\*</sup>の入射位置を特定することができるようにした検出器。図のよ

うな比例計数管の両側端子から出力信号をとる。入射位置 $X$ で電子なだれ<sup>\*</sup>が生じると、陽極の両端からのパルス波高値 $P_x$ 、および $P_y$ は次式のように電離<sup>\*</sup>が生じた位置の情報を与える。

$$x = P_x / (P_x + P_y)$$

またフォトダイオード検出器に抵抗性電極を用いる一次元および二次元位置感応型検出器があり、有感面積が数 $\text{cm}^2$ 程度、位置分解能が数 $\mu\text{m}$ 、位置の誤差が数 $100\mu\text{m}$ の市販品もある。図参照。

### 一次宇宙線 primary cosmic ray

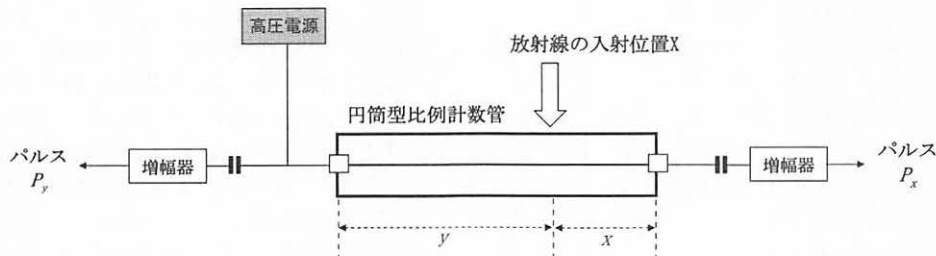
→宇宙線

### 一次放射性核種 primary radionuclide

地球誕生以来存在している非常に寿命の長い天然放射性核種<sup>\*</sup>。壊変系列<sup>\*</sup>をなす $^{238}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ と単独に存在する $^{40}\text{K}$ 、 $^{87}\text{Rb}$ 、 $^{138}\text{La}$ 、 $^{147}\text{Sm}$ 、 $^{176}\text{Lu}$ などがある。

### 1 cm 線量当量 1-cm dose equivalent

→70 $\mu\text{m}$ 線量当量 →3mm線量当量  
放射線<sup>\*</sup>の外部被ばく<sup>\*</sup>の管理に用いる実用的な線量当量<sup>\*</sup>で、身体組織等価球(ICRU球<sup>\*</sup>)の表面からの深さ1cmにおける線量当量を指す。実効線量当量<sup>\*</sup>より簡便かつ安全側に測定することができる量として導入された概念で、1989年に法令に定められた。実効線量および眼と皮膚を除く「頭部および頸部」、「胸部および上腕部」ならびに「腹部および大腿部」の3部位の等価線量<sup>\*</sup>の管理に用いる。



位置感応型検出器の原理

## 遺伝的影響 (放射線障害の)

### hereditary effect

放射線<sup>\*</sup>の人体への影響のうち、被ばくしたヒトの子孫に現れる影響。子孫に伝えられるか否かにかかわらず、体細胞や生殖細胞に遺伝子突然変異あるいは染色体異常<sup>\*</sup>が生じる遺伝学的影響 (genetic effect) とは区別する。現時点では、被ばくしたヒトの子孫に遺伝的影響は認められていないが、動物実験では遺伝的影響が認められている。遺伝子を構成するDNAはヒトも動物も同じであるので、ヒトにも放射線被ばくによる遺伝的影響が発生する可能性があるとして、放射線防護<sup>\*</sup>の基準が定められている。

### ε 値 ε value

半導体中で1個の電子<sup>\*</sup>-正孔対が生成するために必要なエネルギー。その値はSiで3.5 eV, Geで2.9 eVであり、W値<sup>\*</sup>の約1/10と小さい。

### イメージングプレート imaging plate (IP)

輝尽性蛍光体をプレート状にした放射線検出器<sup>\*</sup>。輝尽性蛍光体とは、X線<sup>\*</sup>、電子線、紫外線などの放射線<sup>\*</sup>で蛍光体<sup>\*</sup>を励起した後、発光波長よりも長波長の光を照射すると減衰していた光が一時的に強くなる輝尽発光を示す蛍光体。2次元放射線分布を画像化する計測媒体として、高い感度、広い測定範囲、高い空間分解能などの特長をもつ。あらゆる種類の放射線に高感度であり、測定できる放射線のエネルギー範囲が広いことが知られ、線種弁別方法も種々提案されている。医療分野では、富士写真フィルム工業と化成オプトニクスが開発したBaFBr:Eu<sup>2+</sup>輝尽性蛍光体のIPがX線フィルム<sup>\*</sup>に置き換わって広く普及している。その理由は(1)感度が従来のX線フィルムと比較すると2桁高い、(2)使用前に履歴を消去すれば繰返し使用できる、(3)計測可能強度範囲が広く5桁の範囲で線

量<sup>\*</sup>に比例する(X線フィルムではおよそ3桁程度)などにある。

### 医療照射 medical irradiation

治療目的で人体に放射線<sup>\*</sup>を照射する行為。X線管、ラジオアイソトープ、原子炉<sup>\*</sup>、加速器<sup>\*</sup>などからのX線<sup>\*</sup>、γ線<sup>\*</sup>、電子線、中性子線、陽子線、重粒子線など多様な放射線を利用する。悪性脳腫瘍治療を目的とする<sup>10</sup>B(n, α)<sup>7</sup>Li反応を利用するホウ素中性子捕捉療法<sup>\*</sup>(BNCT)は研究用原子炉<sup>\*</sup>サイトで行われ、陽子<sup>\*</sup>や<sup>12</sup>C重粒子を使う医療照射は放射線医学総合研究所などの加速器施設で行われている。

### インビトロアイソトープ in vitro isotope

血液や尿などに含まれる微量成分を体外で定量するために利用するラジオアイソトープ。具体的には、ホルモンやその他の生理活性物質、腫瘍関連抗原、ウィルスやそれに対する抗体などの検出に使用する<sup>125</sup>Iあるいは血清鉄測定に利用する<sup>59</sup>Feがある。近年、蛍光発光など放射線<sup>\*</sup>以外の検出法を利用するものに置き換えられるようになり、インビトロアイソトープの使用は減少している。

### インビボアイソトープ in vivo isotope

ラジオアイソトープ標識薬剤を人体に直接投与し、その放射能<sup>\*</sup>の組織内分布やその経時変化を測定することにより、各臓器の機能診断や治療をする核医学<sup>\*</sup>診療に使用するラジオアイソトープ。使用方法により3種類に分類できる。(1)γカメラ用アイソトープとしての<sup>99m</sup>Tc, <sup>67</sup>Ga, <sup>123</sup>I, <sup>111</sup>In, <sup>201</sup>Tlなどのγ線<sup>\*</sup>放出核種。半減期<sup>\*</sup>は数時間から4日程度、放出γ線のエネルギーは80~400 keVであり、ヒトに対する放射線被ばく量は高くない。<sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tcジェネレータから得られる<sup>99m</sup>Tcは核特性にも優れており、溶離<sup>99m</sup>TcO<sub>4</sub><sup>-</sup>は還元により種々の<sup>99m</sup>Tc標識薬剤を調製することができ、脳、甲状

腺、骨、心臓、肝臓、腎臓など多くの臓器の機能診断ができることから最も大量に使われている。(2) ポジトロン断層法<sup>\*</sup> (PET) 用アイソトープとしての<sup>11</sup>C, <sup>13</sup>N, <sup>15</sup>O, <sup>18</sup>Fなどの陽電子<sup>\*</sup>放出核種。これらの核種<sup>\*</sup>はサイクロトロン加速器<sup>\*</sup>でつくられ、種々の生体活性物質やその誘導体、薬物薬剤などを直接標識することができる。PETによりヒトの色々な生化学的情報や脳機能の動態挙動を診断する。

その物理的半減期は2分～110分と短いので、病院などの施設毎に製造し、標識化合物<sup>\*</sup>の合成、製剤化および品質管理が行われる。(3) 治療用アイソトープとしての<sup>131</sup>I, <sup>186</sup>Re, <sup>188</sup>Re, <sup>89</sup>Srなどのβ線<sup>\*</sup>放出核種。<sup>131</sup>Iは転移性甲状腺がんや甲状腺機能亢進症の治療に、<sup>131</sup>I-MIBG (3-iodobenzil guanidine) はがんや悪性活性腫などの治療に、<sup>89</sup>Sr<sup>2+</sup>は転移がんの疼痛軽減に利用する。

## う

### 宇宙核物理学 nuclear astrophysics

宇宙の進化と元素<sup>\*</sup>の起源を原子核物理学<sup>\*</sup>によって探る学問。天体核物理学ともいう。わが国でも、加速器<sup>\*</sup>からの安定核ビームや短寿命ラジオアイソトープビームを用いて宇宙の進化に関連する重要な未知の核反応<sup>\*</sup>と極限条件下の原子核<sup>\*</sup>の基本性質を調べ、宇宙の進化と元素創生のメカニズムを明らかにする研究が進められている。

### 宇宙線 cosmic ray

→空気シャワー 宇宙空間に存在する高エネルギーの放射線<sup>\*</sup>。宇宙から地球大気に降り注ぐ宇宙線(一次宇宙線<sup>\*</sup>)と大気中の窒素や酸素の原子核<sup>\*</sup>との衝突で生成する陽子<sup>\*</sup>、中性子<sup>\*</sup>、パイ中間子<sup>\*</sup>、ミュー粒子などの二次粒子(二次宇宙線<sup>\*</sup>あるいは空気シャワー<sup>\*</sup>)とがある。一次宇宙線の大部分は、高エネルギー陽子(約90%)とα粒子<sup>\*</sup>(約10%)から成る。放射線の種類やエネルギーなどを調べることによって宇宙の進化と元素<sup>\*</sup>の起源などが研究されている。毎秒100個程の宇宙線がヒトの体を貫通しており、自然放射線<sup>\*</sup>による被ばくの主な要因(年間被ばく線量2.4 mSvのうち0.39 mSvが

宇宙線による寄与)でもある。

### 宇宙線シャワー cosmic ray shower

→空気シャワー

### 宇宙線起源核種

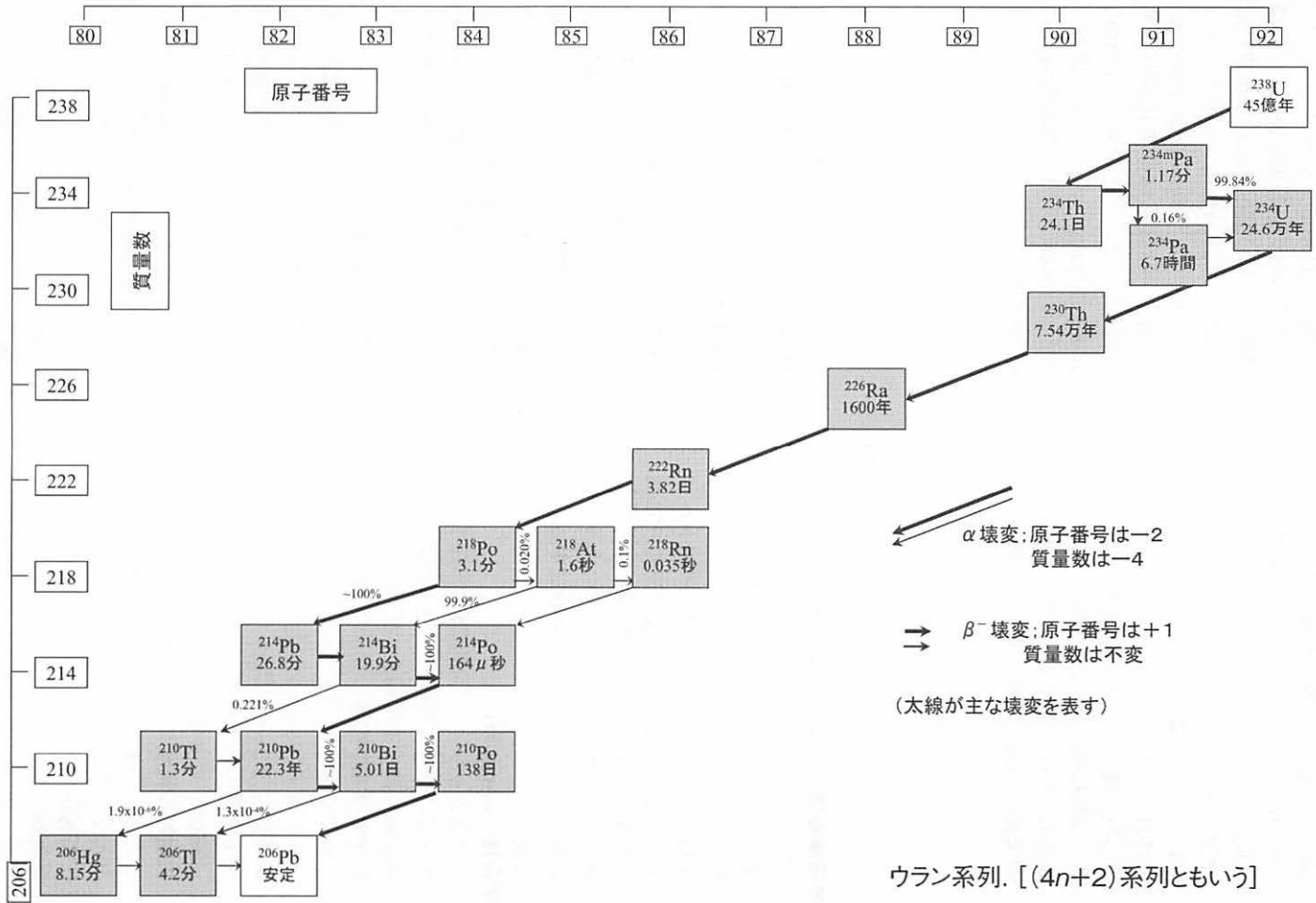
→天然放射性核種

### ウラン系列 uranium decay series

→アクチニウム系列 →トリウム系列→ネプツニウム系列 天然放射性核種<sup>\*</sup>である<sup>238</sup>Uを親核種<sup>\*</sup>として、α壊変<sup>\*</sup>およびβ壊変<sup>\*</sup>を繰り返しながら安定な<sup>206</sup>Pbを生成する壊変系列<sup>\*</sup>。系列に含まれる全核種の質量数<sup>\*</sup>が4n+2 (nは正の整数)で表されることから4n+2系列とも呼ばれる。図参照(p. 10)

### ウラン鉱石 uranium ore

→ウラン資源 ウランを高濃度に含む鉱石。代表的な鉱石として、デービッド鉱石(davidite)、ブランネル石(burannerite)、閃ウラン鉱(ピッチブレンド<sup>\*</sup>, uranite)、人形石(ningyosite)、リンカイウラン石(autunite)、カルノー石(carnotite)、ツヤムン石(tyuyaminite)、メタツヤムン石(metatuyamunite)、フランセビル石(francevillite)、ウラン・トール石(uranothorite)、コフィン石(coffinite)などがある。



↙  $\alpha$  壊変; 原子番号は-2  
質量数は-4

→  $\beta^-$  壊変; 原子番号は+1  
質量数は不変

(太線が主な壊変を表す)

ウラン系列. [(4n+2)系列ともいう]

**ウラン資源 uranium resource**

→ウラン鉱石 核燃料\*として用いるウランの資源(ウラン鉱石\*)。世界最大のウラン資源国はオーストラリア(世界の全ウラン資源量の23%, 106万トン)でこれについてカザフスタン(18%), カナダ(10%), 南アフリカ(9%), アメリカ(8%), ロシア, ナミビア, ニジェールがそれぞれ約5%で, これらの8カ国で世界のウラン資源の80%以上を占める。生産量上位の鉱山はMcArthur River(カナダ, 20%), Ranger(オーストラリア, 11%), Priargunsky(ロシア, 8%)などである。海水中にも1~4 ppb程度含まれ, その回収技術開発も進められている。

**ウラン-トリウム-鉛法**

**uranium-thorium-lead method**

月や隕石の年齢, 岩石の生成年代の決定など宇宙化学や地球化学における年代決定の代表的な方法。天然放射性壊変系列\*の親核種\*である<sup>238</sup>U, <sup>235</sup>Uおよび<sup>232</sup>Thの半減期\*が極めて長いこと(>10<sup>8</sup>年), それぞれの系列が鉛の安定同位体\*<sup>206</sup>Pb, <sup>207</sup>Pb, <sup>208</sup>Pbで終わること, 系列中の娘核種\*の半減期が親核種のそれと比べて十分に短く放射平衡\*が成立していること, および系列外からの鉛同位体は<sup>204</sup>Pbのみであることを利用する。

**ウラン濃縮 uranium enrichment**

→気体拡散法 熱中性子\*に対する核分

裂反応断面積が格段に大きい<sup>235</sup>Uの割合を, 核燃料\*あるいは核兵器\*原料として使用できる濃度にまで高めること。天然に存在するウランは<sup>234</sup>U, <sup>235</sup>U, <sup>238</sup>Uの3種類の同位体\*から成り, それぞれの存在比は0.0055%, 0.7200%および99.2745%である。1940年代に気体拡散法\*(ガス拡散法\*ともいう)が米国で開発され, 現在では濃縮効率が高い遠心分離法\*が実用化されている。分離効率の最も高いレーザー法(原子法, 分子法)は実用化に至っていない。

**ウラン廃棄物 uranium waste**

核燃料サイクル\*施設から排出される廃棄物のうちウランを含むもの。再利用可能な形態で大量に排出されるウラン廃棄物は, 使用済核燃料\*再処理\*施設からの回収ウラン, ウラン濃縮\*施設からの劣化ウラン\*などである。天然ウランには, 燃料となる<sup>235</sup>Uが0.72%しか含まれていないが, 軽水炉\*の使用済核燃料には約1%の<sup>235</sup>Uが残っているため再利用可能である。ただし, このような回収ウランには<sup>232</sup>Uや<sup>236</sup>Uあるいは微量の核分裂生成物\*や超ウラン元素が混入しているため, 天然ウランとは違った取り扱いが必要となる。劣化ウランは高速増殖炉\*などのプルトニウム-ウラン混合酸化物燃料\*(MOX)として利用する。

え

**エアロゾル aerosol**

→大気浮遊塵

**永続平衡 secular equilibrium**

→放射平衡

**エキゾチック原子 exotic atom**

陽子\*(p)と中性子\*(n)から成る原子

核\*と電子\*(e<sup>-</sup>)で構成される通常の原子\*とは異なり, 陽電子\*(e<sup>+</sup>), ミュオン\*(μ<sup>±</sup>), パイオン(π<sup>±</sup>)あるいは反陽子\*( $\bar{p}$ )などを構成要素にもつ原子または原子様粒子。具体的には, ポジトロニウム\*Ps(e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>), ミュオニウム\*Mu(μ<sup>+</sup>e<sup>-</sup>),

ミュオン原子<sup>\*</sup> ( $\pi^+\mu^-$  や  $\alpha^2\mu^-$  など), パイウム  $\text{pium}$  ( $\pi^+e^-$ ), 反水素<sup>\*</sup>  $\bar{H}$  ( $\bar{p}e^+$ ) などがある. 1994年に発見されたエキゾチック分子  $\bar{p}He^+$  は原子と分子の描像をあわせもち, アトムキュル (アトムとモレキュルの合成語) と名付けられた.

### 液体シンチレーションカウンター

#### liquid scintillation counter

発光媒体として有機蛍光体<sup>\*</sup> (シンチレーター<sup>\*</sup>) を用い, 放射線<sup>\*</sup> による蛍光<sup>\*</sup> を光電子増倍管<sup>\*</sup> で計測する計測器. 試料をシンチレーター溶液に溶解するためクエンチングによる計数異常が起こることがあり, 試料の (化学) 状態に注意を要する.  $^3H$  のような低エネルギーの  $\beta$  線を放出する核種<sup>\*</sup> の測定に有用であり絶対測定も可能である.

### 液体シンチレーター liquid scintillator

液体シンチレーションカウンター<sup>\*</sup> 用の有機シンチレーター溶液. 有機化合物の試料にはトルエンやキシレンが溶媒として用いられる. 一方, 界面活性剤を添加することにより多量の水と混和させることができるので, 水溶液試料にも広く用いられる. 光電子増倍管<sup>\*</sup> のエネルギー特性<sup>\*</sup> に応じて適切な蛍光物質や波長移行物質を添加する. 代表的な蛍光物質として PPO (2,5-diphenyloxazole) がある. 波長移行物質としては POPOP [1,4-bis-2-(5-phenyloxazolyl)-benzene] が代表的である. 蛍光物質と波長移行物質を混合したカクテルも市販されている.

### 液滴模型 liquid-drop model

→ワイゼッカーの質量式 →殻模型 N. H. D. Bohr により提唱された原子核<sup>\*</sup> 模型. 核子間に働く核力<sup>\*</sup> は強い短距離力であり飽和性をもつという特性が液体のそれに類似していると考え, 原子核全体を液滴のように取り扱う. 結合エネルギー, 集団運動, 核分裂<sup>\*</sup> 現象などの定性的理解に役立った. 原子番号<sup>\*</sup> と質量

数<sup>\*</sup> を用いて原子核<sup>\*</sup> の全結合エネルギーを表わすワイゼッカーの質量式<sup>\*</sup> はこの模型に基づく. 近年では核子<sup>\*</sup> の運動を独立に取り扱う殻模型<sup>\*</sup>, さらにこれらを統合した統一模型が進歩し, 実験事実の定量的理解が進んだ.

### s 過程 s process

→r 過程 恒星の中心部でゆっくりと進む原子核合成過程で, 遅い (slow) 過程の意.

### エックス線 X ray

電磁放射線の一種. 1895年に W. C. Röntgen がクルックス管を用いる実験中に, 陰極線が陽極やガラス壁にあたると透過性が強く, ある種の化学物質に蛍光<sup>\*</sup> を生じさせる未知の線が放出されていることを発見し X 線と名づけた. その正体は, M. von Laue による結晶回折現象の発見 (1910年代初期) やコンプトン散乱の発見 (1920年代初期) および量子力学の展開により電磁波<sup>\*</sup> であることが判明した.  $\gamma$  線<sup>\*</sup> も同じく電磁放射線であるが, 核外電子の遷移に起因して原子<sup>\*</sup> から放出されるものを X 線, 原子核<sup>\*</sup> から放出されるものを  $\gamma$  線<sup>\*</sup> ということが多い. X 線は紫外線と  $\gamma$  線の間の波長領域 (50 nm から 0.5 nm) にある.

### エックス線エスケープピーク

#### X ray escape peak

$\gamma$  線スペクトロスコープにおいて,  $\gamma$  線のエネルギーから特性 X 線<sup>\*</sup> のエネルギーを差し引いた位置に現れるピーク.  $\gamma$  線の光電効果<sup>\*</sup> にともない発生する特性 X 線が検出器外へ脱出すると, スペクトル上にこのピークが出現する. 同様のピークは, 電子対生成<sup>\*</sup> による  $\gamma$  線エネルギーの損失過程でも起こり, これを光量子エスケープ<sup>\*</sup> ピーク<sup>\*</sup> と呼ぶ.

### エックス線吸収微細構造法

#### X ray absorption fine structure (XAFS)

X 線吸収分光法<sup>\*</sup> の一種. 入射 X 線のエ

エネルギー（波長）を変化させながら物質による吸収率を測定すると、内殻軌道電子<sup>\*</sup>によるK, L<sub>I</sub>, L<sub>II</sub>, . . .などの吸収端が現れる。吸収端から高エネルギー側数百eVの領域にわたって、振動構造をもつなだらかな減衰曲線が観察される。この振動現象は、X線<sup>\*</sup>を吸収した原子<sup>\*</sup>から放出される光電子<sup>\*</sup>の球面波と隣接原子の反射波との干渉効果により発生する。吸収端近傍のスペクトル(XANES, X ray absorption near-edge structure)より対象原子の電子状態(原子価など)を、また30~数百eV領域のスペクトル(XAFS, extended X ray absorption fine structure)より対象原子の周囲の構造(距離, 配位数など)を知ることができる。強力なシンクロトロン放射光<sup>\*</sup>の開発とともに発達してきた局所構造解析法である。図参照。

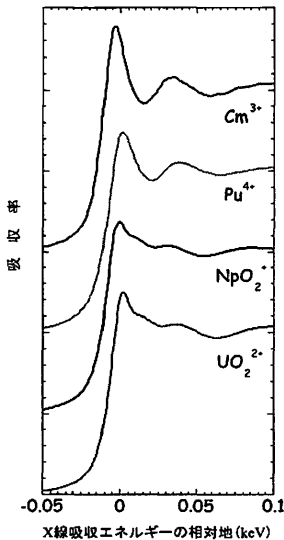
**エックス線フィルム X ray film**

X線<sup>\*</sup>による感光乳剤の黒化を利用する写真フィルムでありイメージング検出

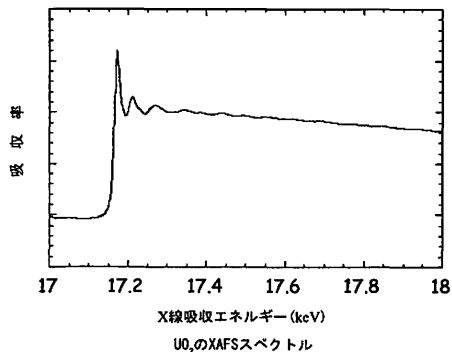
器の一種。医療用レントゲン写真撮影や工業用非破壊検査、あるいは散乱現象を利用するX線回折などに用いられる。トリチウム(<sup>3</sup>H)や<sup>14</sup>Cなどのβ線<sup>\*</sup>放出核種を含む金属や生物試料をX線フィルム<sup>\*</sup>に密着させて露光し、金相試験や生物の生理作用などを調べるオートラジオグラフィー<sup>\*</sup>にも利用される。一般的には、ベースフィルムに感光乳剤として臭化銀をゼラチンに混合した微粒子を塗布したものであるが、用途に応じて様々な微粒子のサイズや塗布厚のものが用いられる。

**NaI(Tl) 検出器 NaI(Tl) detector**

γ線<sup>\*</sup>検出用無機シンチレーターの一種。発光効率を高めるためにNaIに0.1%程度のTlを添加する。他の無機シンチレーターと比べると発光効率、エネルギー分解能<sup>\*</sup>ともに良好である。容積の大きい単結晶製作は容易であるが、吸湿性で機械的あるいは熱的衝撃に弱いという欠点がある。検出効率<sup>\*</sup>を上げるためには、

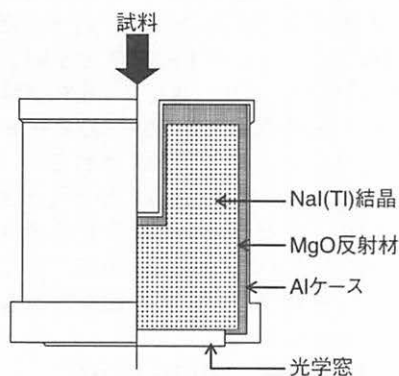


水溶液中のアクチノイドイオンのXANESスペクトル



**X線吸収微細構造法の例**

結晶の中心に井戸状の試料測定孔をもつウェル型検出器が使用される。図参照。



NaI(Tl)検出器(ウェル型)の構造

### エネルギー較正 energy calibration

放射線スペクトルのエネルギー軸を標準線源<sup>\*</sup>を用いて定めること。放射線検出器<sup>\*</sup>で発生した電子<sup>-</sup>・正孔対やシンチレーション光の強度は、適当な電気回路を経て放射線エネルギーに比例した電圧(パルス高)に変換され、波高分析器で分析される。測定結果を較正曲線と比較して放射線<sup>\*</sup>のエネルギーを決定し、未知の核種<sup>\*</sup>を同定することができる。

### エネルギー準位 energy level

→壊変図 原子核<sup>\*</sup>、原子<sup>\*</sup>、分子など量子力学的な系の定常状態、あるいはその状態のエネルギーをさす。エネルギー準位<sup>\*</sup>が異なる状態間の関係を表わすのに、エネルギーの差が高さの差に比例するような水平線を用いたエネルギー準位図を用いる。原子核は陽子<sup>\*</sup>と中性子<sup>\*</sup>が限られた領域に凝縮した有限核子多体系であるので、そのエネルギー準位の特性は原子や分子のそれらとは異なる。原子核のエネルギー準位はそのエネルギー、スピン、パリティ<sup>\*</sup>などで規定され、磁気モーメント<sup>\*</sup>、4重極モーメントなどで

特徴付けられる。高いエネルギー領域にも不連続な準位をもつ準安定状態(共鳴状態)が存在することが、原子核のエネルギー構造の特徴である。放射性核種の壊変図<sup>\*</sup>は親核種<sup>\*</sup>、娘核種<sup>\*</sup>のエネルギー準位などを示す。

### エネルギー特性 energy dependence

放射線検出器<sup>\*</sup>やサーベイメータ<sup>\*</sup>の検出効率<sup>\*</sup>の放射線エネルギー依存特性のこと。特に放射線管理<sup>\*</sup>に用いる線量計<sup>\*</sup>については、線量計の構成材料が人体組織とは異なることによって生じる真の線量<sup>\*</sup>からの線量計指示値のずれのエネルギー依存性を指す。現在では、ICRU球<sup>\*</sup>の1 cm線量当量率<sup>\*</sup>( $\mu\text{Sv/h}$ )に対応する線量計が使われている。

### エネルギー分解能 energy resolution

多くの放射線検出器<sup>\*</sup>では、出力信号は放射線<sup>\*</sup>によって生成するイオン対(電子<sup>-</sup>・正孔対)の数に比例し、その生成数は入射粒子のエネルギーに依存するので、放射線のエネルギーに対応するピーク信号が得られる。このとき生成するイオン対の数の統計的なばらつきが、互いにエネルギーが似通った放射線の弁別能を決める。どの程度のエネルギー差を弁別できるかを表すために、エネルギー $E$ の粒子を測定した値のばらつきの半値幅<sup>\*</sup>(FWHM)が $\Delta E$ であるとき、 $\Delta E$ あるいは $\Delta E/E$ をエネルギー分解能と呼ぶ。半導体検出器<sup>\*</sup>やシンチレーション検出器<sup>\*</sup>などでは、特定のエネルギーにおける半値幅をもってエネルギー分解能を表すことが多い。例えばGe半導体検出器<sup>\*</sup>では、 $^{60}\text{Co}$ の1.33 MeVの $\gamma$ 線<sup>\*</sup>ピークの半値幅を分解能の指標とし、その値は通常1.8 keV程度である。

### エピサーマル epithermal

数eV～数百eVのエネルギー領域をさす。エピサーマル領域にある中性子<sup>\*</sup>を熱外中性子と呼び、この領域に原子核<sup>\*</sup>



との共鳴的な相互作用が起こる。また、ホットアトム<sup>\*</sup>やエキゾチック粒子の化学反応もエピソード領域で起こるものが多い。

#### ft 値 *f<sub>t</sub> value*

原子核<sup>\*</sup>のβ壊変<sup>\*</sup>で放出される電子<sup>\*</sup>の連続エネルギースペクトルを電子エネルギーで積分した量*f*と半減期<sup>\*</sup>*t*との積。通常  $10^3 \sim 10^7$  s であり、その大きさはβ壊変の起こり易さの指標である。*f<sub>t</sub>* 値が小さいほどその遷移は起こり易く、許容遷移であることを示す。禁制遷移の*f<sub>t</sub>* 値は禁止度が高いほど大きい。

#### エマナチオン *emanation*

環境に存在する放射性物質<sup>\*</sup>のうち、気体状のものを表す語。1900年頃に、E. Rutherford と F. E. Dorn がトリウムやラジウムから放射性の気体が放出されていることを発見し、これをエマナチオン（放散物の意）と呼んだ。現在では、ラ

ドンやトロン<sup>\*</sup> ( $^{220}\text{Rn}$ ) であることが明らかになっており、あまり用いられない。放射能泉など、環境での気体放射性物質を包括的に記述する際に用いられることがある。

#### 遠心分離法 *centrifugal separation method*

→ウラン濃縮 →気体拡散法 天然ウランから  $^{235}\text{U}$  を分離濃縮するため工業的に用いられる方法。ウランを気体状の  $\text{UF}_6$  とし、 $^{238}\text{UF}_6$  と  $^{235}\text{UF}_6$  のわずかな質量差を利用する。分離係数が小さいので、前段の濃縮流をさらに濃縮するように分離器を多数段カスケードにつないで、所要の濃縮を達成する。気体拡散法<sup>\*</sup> に比べ、分離係数が大きく電力消費量も少ないという利点はあるが、分離器の回転胴を高速回転させるため高度な技術を要する。わが国では、1992年より日本原燃の濃縮工場で採用されている。

## お

#### オージェ効果 *Auger effect*

電子捕獲やX線照射により、内殻の電子<sup>\*</sup>に空孔が生じた原子<sup>\*</sup>では、より高いエネルギー準位<sup>\*</sup>にある電子がこの空孔に遷移する。そのとき、過剰のエネルギーは特性X線<sup>\*</sup>として放出されるか、あるいは別の電子の放出に使われる。1925年にP. V. Augerが発見した後者の過程をオージェ効果といい、放出される電子をオージェ電子<sup>\*</sup>という。特性X線放出とオージェ電子放出は競合する。オージェ効果は原子番号<sup>\*</sup>の小さな原子、あるいはより外側の軌道に空孔が生じた場合に起きやすく、原子番号の大きい原子では特性X線放出が起きやすい。特性X線放出頻度とオージェ電子放出

頻度の比をオージェ確率と呼ぶ。

#### オージェ電子 *Auger electron*

→オージェ効果 オージェ効果<sup>\*</sup>で放出される電子<sup>\*</sup>。

#### オージェ電子分光

##### *Auger electron spectroscopy (AES)*

オージェ電子<sup>\*</sup>がもつ元素<sup>\*</sup>に固有なエネルギーを測定し、元素を同定する分析法。オージェ電子のエネルギーは比較的低く、物質の表面近傍にある原子<sup>\*</sup>のオージェ電子が測定されるため、試料表面近傍の元素分析に用いられる。オージェ電子スペクトルのピークの形状から、対象元素の化学結合状態も判別できる。オージェ効果<sup>\*</sup>を引き起こすためには、内殻の電子<sup>\*</sup>を“弾き出す”のに十分なエネ

ルギーをもつ電子線やX線<sup>\*</sup>を照射することが多い。これらの照射ビームの径を小さくすることによって数十nm程度の微小領域の元素の分析情報も得られる。

**オートラジオグラフィー autoradiography**  
放射性核種<sup>\*</sup>を含む生体試料や材料に、写真乳剤を塗布したフィルム(X線フィルム<sup>\*</sup>など)を密着して感光させ、試料中の放射能分布を画像(オートラジオグラフ)として可視化する方法。検体そのものが放射線源であることから“オート”が付される。飛程<sup>\*</sup>が短いβ線<sup>\*</sup>は生物試料などに利用され、最近では、X線フィルムよりも感度が高く、放射線強度に対する黒化度のダイナミックレンジの大きいイメージングプレート<sup>\*</sup>も用いられる。同法には、①黒化度からおおまかな放射能分布を求めるマクロオートラジオグラフィー、②動植物剥片試料の細胞内外の放射能分布を微視的に観察するマイクロオートラジオグラフィー、③放射線<sup>\*</sup>の飛跡を観察する飛跡オートラジオグラフィーなどがある。

#### 欧州原子力共同体 (ユーラトム)

##### European Atomic Energy Community (EURATOM)

欧州連合(EU)の一機関。1958年に設立された。加盟国は2004年1月現在、ベルギー、フランス、ドイツ、イタリア、ルクセンブルク、オランダ、イギリス、アイルランド、デンマーク、ギリシャ、スペイン、ポルトガル、フィンランド、スウェーデン、オーストリアの15カ国である。イスプラ研究所(イタリア)、ペテン新素材研究所(オランダ)、ゲール標準物質・測定研究所(ベルギー)、カールスルーエ超ウラン元素研究所(ドイツ)などの研究所をもっている。また、民生用の原子力施設に対し保障措置<sup>\*</sup>の査察を行い、IAEAに報告している。

#### オクロ天然原子炉

#### Oklo natural fossil fission reactor

1979年、アフリカのガボン共和国オクロ鉱床で、<sup>235</sup>Uの同位体存在比が天然ウラン(0.72%)よりも著しく低い場所が発見された。これは黒田和夫博士が予言したように、約20億年前には<sup>235</sup>Uが約3%あり、自然に核分裂連鎖反応<sup>\*</sup>が起こって(天然の原子炉<sup>\*</sup>)、<sup>235</sup>Uが“燃えて”少なくなったためとされた。このような自然発生の原子炉の名残りはオクロ周辺で12カ所見つかっているが、世界の他の地域では見つかっていない。オクロ周辺ではその頃<sup>235</sup>Uの連鎖反応に都合の良い条件が整っていたものと考えられている。オクロ天然原子炉はおよそ60万年の間“燃え”続け、12カ所のうち6カ所の原子炉では約6,000,000 MWのエネルギーが放出されたものと推定されている。この天然原子炉は、<sup>235</sup>Uの量が減少して連鎖反応を停止したが、その後約20億年にわたり、当時の核反応<sup>\*</sup>の状態を良好に保存している。このことは、オクロの核分裂生成物<sup>\*</sup>が地質学的な年代を経て安定に保持されることを示しており、高レベル放射性廃棄物<sup>\*</sup>の地層処分<sup>\*</sup>との関連で重要な知見を提供している。

#### オッペンハイマー・フィリップスの過程

##### Oppenheimer-Phillips process

加速された重陽子<sup>\*</sup>(d)を重い原子核<sup>\*</sup><sup>A</sup>Zに打ち込んだときに起こる現象。<sup>12</sup>C(d,p)<sup>13</sup>C反応を説明するために、1935年にJ. R. Oppenheimerとその弟子Melba N. Phillipsが導入した。低エネルギーでは中性子<sup>\*</sup>が剥ぎ取られて複合核<sup>\*</sup><sup>A+1</sup>Z<sup>\*</sup>が形成されて陽子<sup>\*</sup>が放出される。陽子が原子核に残るためには、クーロン障壁<sup>\*</sup>を乗り越えるだけのエネルギーを与えて複合核を形成させる必要があると説明した。これは、原子核のエネルギー準位<sup>\*</sup>とその性質を調べる道具として重要

になった。最近、常温核融合<sup>\*</sup>を理論化する試みで、低エネルギーの2つの重陽子が互いの中性を内側に接する配置をとり核融合<sup>\*</sup>を促進するというモデルの中でオープンハイマー—フィリップスの過程が参照されたが、この過程によって核融合が促進される効果があったとしてもそれは桁違いに小さい。

**親核種 parent nuclide**

→娘核種 放射性核種<sup>\*</sup>が壊変<sup>\*</sup>するとき、壊変前の核種<sup>\*</sup>を親核種、壊変により生じる核種を娘核種<sup>\*</sup>という。たとえば<sup>226</sup>Raが $\alpha$ 壊変<sup>\*</sup>して<sup>222</sup>Rnを生じるとき、前者が親核種、後者が娘核種である。

**オルトポジトロニウム**

**orthopositronium (*o*-Ps)**

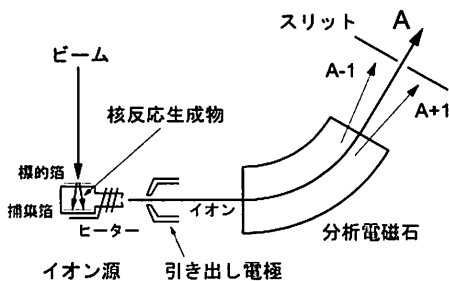
→ポジトロニウム 陽電子<sup>\*</sup>と電子<sup>\*</sup>のスピンの平行(全スピン量子数 $S=1$ )で結合したポジトロニウム<sup>\*</sup>。*o*-Psは、近傍に他の電子がないとき(真空中)は、140 nsの固有の寿命で3つの光子<sup>\*</sup>を出して消滅する。物質中では、周りある電子の波動関数と*o*-Psの中の陽電子の波動関数の重なり積分の大きさに比例した速度で、主として2つの光子を出して消滅する過程(ピックオフ消滅<sup>\*</sup>)によって寿命が短くなる。密度が1 g/cm<sup>3</sup>程度の液体や固体中での*o*-Psのピックオフ消滅の寿命は1~2 nsであるが、原子サイズの空孔が存在すると*o*-Psは空孔に捕捉され、空孔の大きさによって0.5~数十 nsの寿命で消滅する。このことを利用すると、*o*-Psの寿命測定から物質中の空孔の大きさを知ることができる。ポジトロニウムは不対電子を一つもつフリーラジカル<sup>\*</sup>であるので、付加反応、酸化反応、スピン交換反応など、水素原子と類似の化学反応を起こす。そのとき

の*o*-Ps消滅速度は化学反応速度の分だけ大きくなる。

**オンライン同位体分離器**

**isotope separator on-line (ISOL)**

加速器<sup>\*</sup>による照射を継続しながら目的の生成核種を迅速に分離するために用いる装置。ISOLは①加速器ビームのターゲットから生成した核種<sup>\*</sup>を引き出す部分、②引き出された核種を迅速に輸送する部分、③輸送されてきた核種を分離する部分、④分離されたものを集めて測定する部分などから成る。目的とする核種の物理化学的な性質や半減期<sup>\*</sup>などによって輸送する操作は多様であるが、生成した核種をテープに埋め込んでテープを巻き取ることによって輸送するものやHeのジェット気流に乗せて輸送するものなどがある。一般的には、生成した核種をイオンとして取り出して加速、偏向、質量分析など電磁気学的方法を用いて分離する。ISOLを用いると、半減期が数秒程度の核種分析が可能であり、未知の放射性核種<sup>\*</sup>や超重元素<sup>\*</sup>の探索に利用されている。わが国では、京大原子炉、原子力機構東海タンデム加速器、原子力機構高崎研サイクロトロン、東北大学サイクロトロンなどにISOLが設置されている。図参照。



オンライン同位体分離器 (ISOL) の構成

カーマ

kinetic energy released in material (kerm)

$\gamma$ 線や中性子線などの電荷をもたない放射線が人体や物体に与える影響の指標として用いる量。放射線が物質内で反応して生じる二次荷電粒子の初期運動エネルギーの和を物質の質量で除した値で、単位はGy。物質内の微小領域において二次荷電粒子の移動に因る領域内外でのエネルギーの出入りが等しく、かつ制動放射などによる非荷電粒子の再生反応が無視できる場合には、カーマは吸収線量に等しい。放射線の強度を表すのに、空気カーマがよく用いられる。

加圧水型原子炉

pressurized water reactor (PWR)

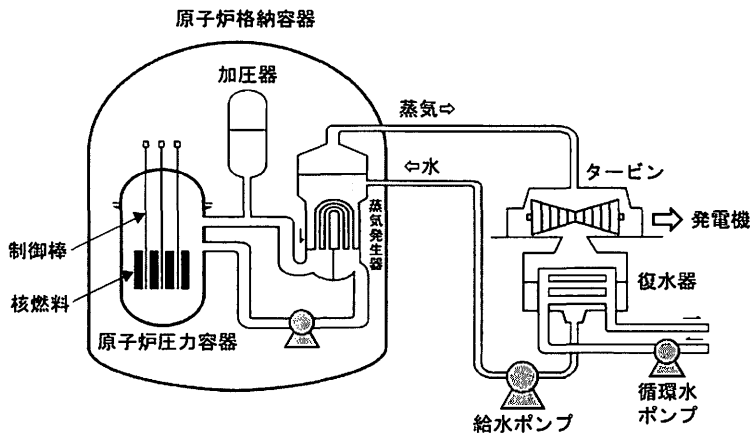
→沸騰水型原子炉 現在普及している2種類の軽水型発電用原子炉(軽水炉)のひとつ。軽水炉では、軽水を中性子減速材および冷却材として用いるが、加圧水型原子炉ではこの水をおよそ160気圧に加圧して炉心で沸騰することなく320℃まで加熱し、熱交換器を通して循環させて再び炉心に戻す。この水のルー

プを一次冷却系という。熱交換器では二次冷却系の水を沸騰させ、タービンを回すための水蒸気を発生する。炉心と熱交換器を循環する一次冷却系は、熱交換器とタービンを循環する二次冷却系から分離されているので、二次冷却系の水の放射性核種による汚染はない。このため、原子炉本体と熱交換器は原子炉格納容器に密封されるが、二次冷却系は格納容器の外にあるタービンとの間を循環する。熱交換器が介在するため発電の効率は沸騰水型原子炉(BWR)より低い。2004年現在、わが国では23基のPWRが稼動している。図参照。

ガイガー-ヌッターの法則

Geiger-Nuttal relationship

1911年にH. W. GeigerとJ. M. Nuttalは $\alpha$ 線の飛程 $R$ と壊変定数 $\lambda$ の間に $\log R = A + B \log(\lambda)$ の関係があることを見出した。 $\alpha$ 粒子にはクーロン力による高いポテンシャル障壁が働くので、古典力学の解釈では $\alpha$ 粒子が核から出てくることは不可能であるが、1928年にG. Gamowらが明らかにしたように、



加圧水型原子炉 (PWR)

量子トンネル効果によってポテンシャル障壁を抜け出る。この過程では、 $\alpha$  粒子のエネルギー  $E$  が高いほど単位時間に障壁にぶつかる頻度は高まりトンネル確率が高くなるので、壊変定数  $\lambda$  は大きくなる。 $\alpha$  粒子の飛程はエネルギーの 1.5 乗に比例することから、飛程  $R$  と壊変定数  $\lambda$  に関する最初の関係式は、トンネル効果から導かれるエネルギー  $E$  と壊変定数  $\lambda$  の関係の別の表現になっている。

### ガイガー放電 Geiger discharge

電離箱<sup>\*</sup>や比例計数管<sup>\*</sup>では、放射線<sup>\*</sup>によって電離<sup>\*</sup>される最初の電子<sup>\*</sup>(一次電子)をそのままあるいは気体増幅<sup>\*</sup>して測定する。比例計数管の電極間電圧をある値より大きくすると、気体増幅が電子なだれ<sup>\*</sup>に転化しイオン化が陽極全体に“さや”状に拡がる。GM 管では、円筒中心に張る陽極の線に極めて細い金属線を用いているので線近傍の電位勾配を大きくすることができ、放電が起きやすい。陽極が“イオンさや”で囲まれると、電場勾配が小さくなるので電子なだれは一時的に弱まるが、この間、陽イオンが陰極に移動して再結合するため紫外線が発生する。これが二次的に放電を引き起こすので、放電が持続する。これをガイガー放電という。

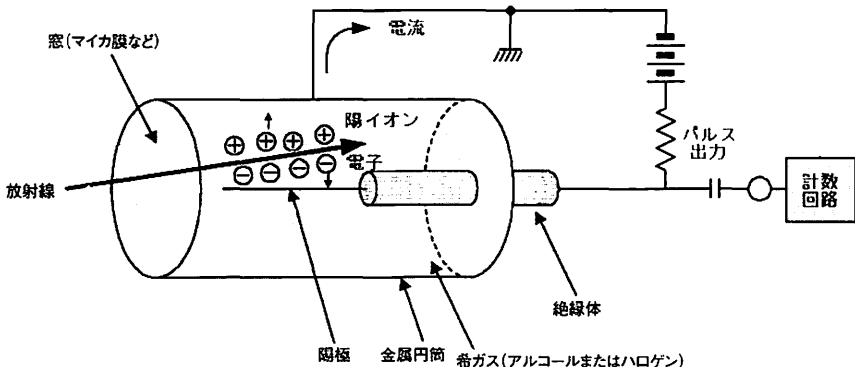
### ガイガーミュラー (GM) 計数管

#### GM counter

1907年に H. W. Geiger が発明し、後に W. Müller によって改良された簡単な構造の放射線検出器<sup>\*</sup>。金属円筒の中心に張った細い線を陽極として近傍の電場勾配を大きくし、ガイガー放電<sup>\*</sup>が起きやすい構造になっている。円筒に対して細線にプラスの高電圧をかけると、放射線<sup>\*</sup>によって管内で引き起こされたイオン化が引き金になってガイガー放電が起る。この放電によって、放射線によるイオン対の数によらず一定の大きさの電気パルスが取り出される。計数管の中には希ガスを封入するが、イオン対の再結合による紫外線の発生を抑えて(クエンチ)放電の持続を妨げる目的でアルコールまたはハロゲンを入れることが多い。GM 計数管では放射線のエネルギー測定はできないが、 $\gamma$ 線<sup>\*</sup>や $\beta$ 線<sup>\*</sup>を高感度で検出できるためサーベイメータ<sup>\*</sup>としても汎用されている。図参照。

#### ガイガーミュラー領域 GM region

放射線<sup>\*</sup>が放射線検出器<sup>\*</sup>に封入されている気体分子と相互作用するとき、検出器を流れる電流が生成するイオン対の数とは無関係に一定になる電圧領域。生成する電子<sup>\*</sup>の数が電流に比例する領域



ガイガーミュラー (GM) 計数管の原理

(比例領域)より高い電圧の領域. 不感時間が長い( $\sim 100 \mu\text{s}$ )という欠点はあるが, 高い気体増幅度のため回路を簡単にすることができ,  $\beta$ 線の測定に向いている. 図参照.

### 回復時間 recovery time

GM 計数管が入射した放射線によって放電動作をした後, 電極周囲の電界が放電前の状態にもどるまでに要する時間のこと. 回復時間の前に次の放射線が入射しても認識されない. 放射線のフルエンスが大きい場合にはこれによる数え落としの補正が必要である.

### 外部被ばく external exposure

→内部被ばく 身体の外部にある線源(放射性物質あるいは放射線発生装置)から放射線を受けること.

### 外部標準チャンネル比法

external standard channel ratio method  
液体シンチレーション計測においてクエンチング効果を補正する方法. 試料に外部から $\gamma$ 線を照射した時にコンプトン散乱で生じる二次電子の連続スペクトルの形状が,  $\beta$ 線スペクトルと同様にクエンチングの影響を受けることを原

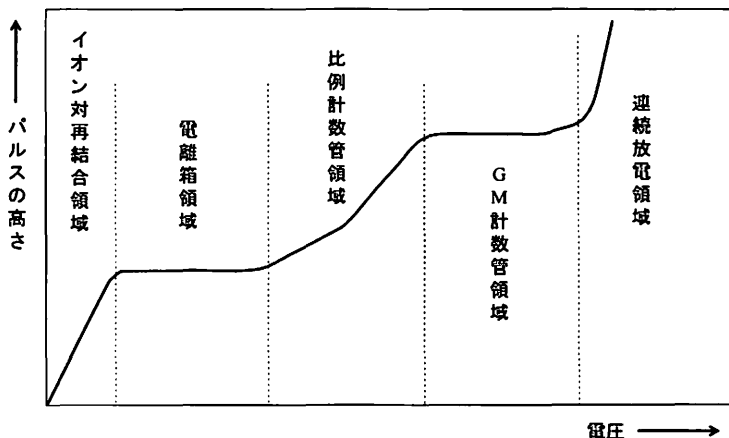
理とする. 測定試料に $\gamma$ 線を照射してコンプトン散乱の度合いをチャンネル毎に求めて作成したクエンチング補正曲線から, 未知試料の計数効率を求める.

### 壊変 decay または disintegration

放射性壊変あるいは崩壊とも呼ばれる. 原子核が粒子放出, 光子放出, 軌道電子捕獲あるいは自発核分裂によって自発的に他の原子核に変化すること.  $\alpha$ 粒子( ${}^4\text{He}^{2+}$ )を放出するものを $\alpha$ 壊変という. 電子( $e^-$ )を放出する過程を $\beta^-$ 壊変というが, 広義には陽電子( $e^+$ )を放出する $\beta^+$ 壊変および軌道電子捕獲(EC, electron capture)を含めて $\beta$ 壊変という. 準安定状態(metastable)にある原子核が光子( $\gamma$ 線)を放出して基底状態に遷移する過程を核異性体転移(IT, isomeric transition)という. 自発核分裂(spontaneous fission)は超ウラン元素などの重い原子核に見られ, 原子核が自発的に二つ, またはそれ以上の原子核に分裂する現象である.

### 壊変エネルギー disintegration energy

→壊変 放射性核種の壊変の際に放出されるエネルギー量.



ガイガーミュラー領域, 計数管に加える電圧とパルス高の関係曲線が, 比例計数管領域や GM 計数管領域を表す.

## 壊変系列 decay series

放射性壊変を繰り返し、安定な核種<sup>\*</sup>になるまで次々に変換していく核種の系列。天然放射性核種<sup>\*</sup>の壊変系列<sup>\*</sup>としてウラン系列<sup>\*</sup>、トリウム系列<sup>\*</sup>およびアクチニウム系列<sup>\*</sup>があり、人工放射性核種<sup>\*</sup>ではネプツニウム系列<sup>\*</sup>が知られている。

## 壊変定数 decay constant

→放射能 放射性核種<sup>\*</sup>が  $N$  個存在するとき、単位時間に壊変<sup>\*</sup>する確率 ( $A$ ) は次式で与えられる。  $A$  は放射能<sup>\*</sup>に相当する。

$$A = \frac{dN}{dt} = \lambda N$$

この比例定数 ( $\lambda$ ) を壊変定数という。放射性核種に固有の値であり、半減期<sup>\*</sup>  $t_{1/2}$  との間には  $\lambda = \ln 2 / t_{1/2} = 0.693 / t_{1/2}$  の関係がある。

## 壊変図 decay scheme

放射性核種<sup>\*</sup>の壊変<sup>\*</sup>の様子を表す図。原子核<sup>\*</sup>のエネルギー準位<sup>\*</sup>、スピン、パリティ<sup>\*</sup>、壊変形式、半減期<sup>\*</sup>、放出される放射線<sup>\*</sup>の種類とエネルギー、分岐比<sup>\*</sup>などが記載される。図参照。

## 壊変率 disintegration rate

放射性核種<sup>\*</sup>の単位時間当たりの壊変<sup>\*</sup>の数 (dps, disintergration per second)。

## 化学クエンチング chemical quenching

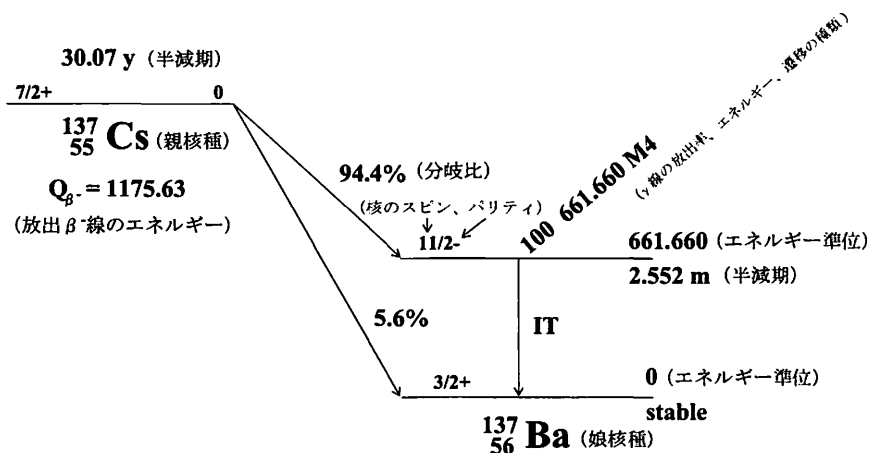
液体シンチレーション計測などにおいて不純物化学種の影響により放射線エネルギーの光への移行が阻害される現象。

## 核医学 nuclear medicine

→放射性医薬品 微量の放射性核種<sup>\*</sup>で標識した放射性医薬品<sup>\*</sup>を静脈注射などによって体内に投与し、その分布状態をイメージに撮像することによって血流、代謝、腫瘍などを診断、あるいは放射線<sup>\*</sup>の作用によって治療する医学の一部門。広義には、X線<sup>\*</sup>および他の電離放射線<sup>\*</sup>の性質や作用を臨床利用する放射線医学 (radiology) も含む。

## 核異性体 nuclear isomer

→核異性体転移 通常、同じ核の励起状態間の遷移寿命は短い ( $< 10^{-10}$  秒) が、励起状態<sup>\*</sup>が準安定 (metastable) で、その寿命が存在を十分確認できるほど長いとき、その励起状態と基底状態を相互に核異性体という。すなわち、原子番号<sup>\*</sup>も質量数<sup>\*</sup>も等しいが、エネルギー準位<sup>\*</sup>



壊変図.  $^{137}\text{Cs} \rightarrow ^{137}\text{Ba}$  の壊変 (エネルギーの単位は keV)。

や半減期<sup>\*</sup>などが異なる2種あるいはそれ以上の核種<sup>\*</sup>を互いに核異性体という。準安定状態にある核種には質量数に m (metastable の意) を付し、基底状態と区別する。<sup>60</sup>Co(半減期 5.27 年)と<sup>60m</sup>Co(半減期 10.5 分)あるいは<sup>80</sup>Br (17.7 分)と<sup>80m</sup>Br (4.42 時間)など多数知られている。

### 核異性体シフト isomer shift

メスバウアースペクトル<sup>\*</sup>(無反跳核  $\gamma$  線共鳴吸収スペクトル)において線源と吸収体の  $\gamma$  遷移エネルギーが等しければ、吸収のピークは相対速度  $v=0$  の位置に現れる。しかし、核異性体<sup>\*</sup>の間で核半径<sup>\*</sup>が異なることや線源と吸収体の核外電子状態(化学状態)が異なることによって、吸収のピークが相対速度ゼロから  $\delta$  だけ離れた位置に現れることがある。この  $\delta$  を核異性体シフトあるいは異性体シフトという。核異性体シフトの観測から、原子<sup>\*</sup>の電子状態や原子価状態を調べることができるので、化学シフトとも呼ばれる。線源の励起準位<sup>\*</sup>を  $(E_c)_s$ 、基底準位<sup>\*</sup>を  $(E_g)_s$ 、吸収体の励起準位を  $(E_c)_A$ 、基底状態を  $(E_g)_A$  とすると  $\delta$  は次式で表わされる。

$$\delta = \{ (E_c)_A - (E_g)_A \} - \{ (E_c)_s - (E_g)_s \}$$

$$= \frac{4}{5} \pi Z e^2 R^2 \frac{\Delta R}{R} \{ |\psi(0)|_A^2 - |\psi(0)|_s^2 \}$$

ここで、 $Z$  は原子番号<sup>\*</sup>、 $e$  は電気素量、 $R$  は核半径、 $\Delta R$  は基底状態の核半径から励起状態の核半径への増加分、 $|\psi(0)|_A^2$  および  $|\psi(0)|_s^2$  はそれぞれ吸収体と線源の核位置に分布する全核外電子密度である。

### 核異性体転移 isomeric transition

→核異性体 壊変形式の一つで、IT とも呼ばれる。核異性体<sup>\*</sup>間で、準安定状態(metastable)にある原子核<sup>\*</sup>が  $\gamma$  線<sup>\*</sup>を放出して基底状態に遷移すること。例えば <sup>60m</sup>Co  $\rightarrow$  <sup>60</sup>Co や <sup>99m</sup>Tc  $\rightarrow$  <sup>99</sup>Tc など。

## 核化学 nuclear chemistry

→放射化学 化学的視点に立って原子核<sup>\*</sup>の反応や構造を研究することを指す。核物理学との厳密な区別はない。核反応<sup>\*</sup>によって生成した放射性核種<sup>\*</sup>の化学的性質の研究を意味することもある。

### 核ガンマ線共鳴 nuclear $\gamma$ ray resonance

→メスバウアー効果

### 核合成 nucleosynthesis

元素合成ともいう。宇宙で核融合<sup>\*</sup>または核反応<sup>\*</sup>により新しい原子核<sup>\*</sup>を生成する過程。主に次の4つの核合成が知られている。(1)ビッグバン<sup>\*</sup>(Big Bang)における核合成。最初の3分間で宇宙のほとんどの<sup>4</sup>Heと<sup>2</sup>Hが合成された。宇宙の質量のおよそ1/4がこのときに作られた<sup>4</sup>Heである。(2)恒星内部での核合成。Li~Feの元素<sup>\*</sup>が合成される。(3)超新星<sup>\*</sup>爆発での核合成。Feより重い元素のほとんどが合成される。(4)宇宙放射線による核合成。高速粒子による核破碎反応<sup>\*</sup>(spallation)によりLiやBなどのいくつかの軽い元素が合成される。

### 核子 nucleon

原子核<sup>\*</sup>を構成する2つのバリオン<sup>\*</sup>、すなわち中性子<sup>\*</sup>と陽子<sup>\*</sup>の総称。陽子はアップクォーク2個とダウルクォーク1個から成り、中性子はアップクォーク1個とダウルクォーク2個から成る。これに対し、ストレンジという重いクォーク<sup>\*</sup>を含んだ重いバリオンをハイペロンと呼び、この粒子を含む原子核をハイパー核と呼ぶ。核子は核の重心のまわりを軌道運動するので角運動量をもち、これを固有スピンという。

### 核磁気共鳴分光

nuclear magnetic resonance spectrometry (NMR)

原子核<sup>\*</sup>のスピンによる磁気共鳴現象を利用する分光法。共鳴に伴う電磁波<sup>\*</sup>の吸収を測定する核磁気共鳴吸収法が最



も一般的である。共鳴周波数は磁場と核種<sup>\*</sup>によって決まるが、核周辺の電子密度の相違によって僅かのずれ(化学シフトやナイトシフト)を生じるため、化学シフトやスピン-スピン結合を観測することによって試料物質の原子配置、電子構造、分子構造などの情報が得られる。<sup>1</sup>HのNMRは有機化合物の分子構造決定に用いられる。最近FT-NMRや二次元NMRが発展し、<sup>13</sup>C、<sup>15</sup>N、<sup>19</sup>F、<sup>31</sup>Pなどの多くの核種のNMR測定が可能となり、また医学ではNMR-CT(MRI)による診断が進歩している。

### 核磁気モーメント

#### nuclear magnetic moment

原子核<sup>\*</sup>の磁気モーメント<sup>\*</sup>。核子<sup>\*</sup>*i*のスピンを $s_i$ 、軌道角運動量<sup>\*</sup>を $l_i$ 、対応する*g*因子<sup>\*</sup>をそれぞれ $g_s, g_l$ とすると、核磁気モーメント $\mu$ は次式で表される。

$$\mu = \sum (g_s s_i + g_l l_i) \mu_N$$

ここで $\mu_N$ は核磁子<sup>\*</sup>。陽子<sup>\*</sup>については $g_s = 5.586$ 、 $g_l = 1$ 、中性子<sup>\*</sup>については $g_s = -3.826$ 、 $g_l = 0$ である。

### 核子結合エネルギー

#### binding energy of nucleon

原子核<sup>\*</sup>を構成している核子<sup>\*</sup>1個当たりの結合エネルギーで、原子核の全結合エネルギーを質量数<sup>\*</sup>で除した値。水素、ヘリウム、リチウムなどの軽い原子核では小さく(1~7 MeV)、質量数60程度の原子核で最大(8~9 MeV)となり、ウランなどの重い原子核で再び小さくなる(7.5~8 MeV)。

### 核磁子 nuclear magneton

原子核<sup>\*</sup>の磁気モーメント<sup>\*</sup>をあらわす物理定数。核ボア磁子ともいう。シンボルは $\mu_N$ 、その値は $5.0507866(17) \times 10^{-27}$  JT<sup>-1</sup>であり、電子<sup>\*</sup>のボア磁子の約1800分の1。

### 核実験 nuclear weapon test

核爆弾を爆発させる実験。第二次世界大

戦中に米国が進めたマンハッタン計画<sup>\*</sup>において、1945年7月16日にニューメキシコ州 Alamogordo で行われたプルトニウム爆弾を用いた実験が人類最初の核実験である。1949年8月29日には旧ソ連もセミパラチンスク(現カザフスタン)でこれを成功させた。地表および地表近くで行う大気圏内核実験、地下深くに設けた坑道の中で行う地下核実験、さらに臨界前核実験(臨界<sup>\*</sup>に達する前に爆発を止め、この段階で得られたデータとコンピュータ・シミュレーションの組み合わせによる実験)がある。大気圏内核実験は膨大な量の放射性降下物<sup>\*</sup>を地上にもたらすため、米国、英国、旧ソ連は1963年に締結された部分的核実験禁止条約<sup>\*</sup>(大気圏内、宇宙、水中での核実験の禁止)に基づき、それ以降は地下核実験のみを行った。その他の国々による実験も、1980年の中国の大気圏内核実験以後はすべて地下核実験となっている。

### 核種 nuclide

原子核<sup>\*</sup>あるいは原子<sup>\*</sup>の種類を表す用語。元素<sup>\*</sup>の種類は通常、原子番号<sup>\*</sup>*Z*(すなわち原子核を構成する陽子<sup>\*</sup>の数)で表されるが、同じ種類の元素でも原子核を構成する中性子<sup>\*</sup>の数が異なる場合がある。このように、原子番号が同じで原子核の質量数<sup>\*</sup>*A*(すなわち陽子と中性子の数の合計)が異なる原子それぞれを核種<sup>\*</sup>といい、 ${}^A_Z X$ (*Z*は略す場合が多い)のように表す。例えば原子番号すなわち陽子の数が19のカリウムには、<sup>39</sup>K(93.2581%)、<sup>40</sup>K(0.0117%)、<sup>41</sup>K(6.7302%)の3種類の核種が存在する。なおカッコ内はそれぞれの核種の天然存在比である。核異性体<sup>\*</sup>を含めると約3000種の核種<sup>\*</sup>が知られており、そのうち天然に存在する安定核種は271種、残りは放射性核種<sup>\*</sup>である。同一の元素に属し*A*が異なる核種を同位体<sup>\*</sup>あるいは同位元素と

いい、 $A$  が等しい核種を同重体<sup>\*</sup> という。

### 核種分離 partitioning

→高レベル放射性廃棄物 高レベル放射性廃棄物<sup>\*</sup>に含まれる放射性核種<sup>\*</sup>を、半減期<sup>\*</sup>ごとあるいは利用目的ごとに分離すること。溶媒抽出法、イオン交換分離法、あるいは沈殿分離法などによって超ウラン元素群 (Np, Am, Cm 等)、Tc および白金族元素群、Sr および Cs 群、その他の核種<sup>\*</sup>の4つの群に分離(群分離<sup>\*</sup>)する技術などが開発されている。

### 核スピン nuclear spin

重心系<sup>\*</sup>に置かれた原子核<sup>\*</sup>の全角運動量<sup>\*</sup>で、全核子<sup>\*</sup>のスピンと軌道核運動量<sup>\*</sup>の和。核のスピンを  $\{I(I+1)\hbar\}^{1/2}$  ( $I$  はスピン量子数) とすると、 $I$  は質量数<sup>\*</sup>が偶数か奇数かによってそれぞれ整数か半整数になる。原子番号<sup>\*</sup>と質量数がともに偶数の核の基底状態では、核スピンは全てゼロである。

### 角相関測定 (陽電子消滅の)

angular correlation (of positron annihilation radiation)

陽電子消滅<sup>\*</sup>で2光子が放出されるとき、重心系<sup>\*</sup>ではエネルギー  $m_e c^2 = 511.0$  keV の2つの光子<sup>\*</sup>は正反対の向きに放出されるが、実験室系では電子対の運動量  $p$  のために微小角  $\theta_z$  ずれる ( $p \sim m_e c \theta_z$ )。このずれを測定することによって、陽電子<sup>\*</sup>と消滅する電子<sup>\*</sup>の運動量分布を求めたり、空孔型の欠陥に捕捉された陽電子やポジトロニウム<sup>\*</sup>の運動量から空孔径を解析することができる。NaI (TI) や BGO などのシンチレーション検出器<sup>\*</sup>の前にスリットを付けて一次元または二次元位置分解能をもたせた検出器一對を数メートル離れて設置し、測定する。3光子放出のときは、3つの光子のエネルギーは  $0 \sim 511$  keV にわたり分布し、それぞれが成す角もそれに応じて分布する。

### 核的阻止能 nuclear stopping power

→阻止能 荷電粒子<sup>\*</sup>が物質中を通過するとき失うエネルギー (阻止能<sup>\*</sup>)のうち、粒子と物質を構成する原子<sup>\*</sup>との弾性衝突によるもの。

### 核燃料 nuclear fuel

原子炉<sup>\*</sup>で用いる燃料物質。中性子<sup>\*</sup>を吸収して核分裂<sup>\*</sup>を起こす物質またはその化合物を指し、一般的には  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  あるいは  $^{239}\text{Pu}$  を含有するウラン金属、ウラン酸化物、ウラン-プルトニウム混合酸化物などである。またトリウム(Th)の核変換<sup>\*</sup>で生成する  $^{233}\text{U}$  も含まれる。工学的な意味では、原子炉に装荷する核燃料またはその化合物と被覆管で構成された燃料棒<sup>\*</sup>、ならびにこれを組み上げた燃料集合体<sup>\*</sup>を指すこともある。

### 核燃料サイクル nuclear fuel cycle

原子燃料サイクルともいう。原子力発電用の核燃料<sup>\*</sup>であるウランの採取から、原子炉<sup>\*</sup>での燃焼、使用済燃料の処理処分までの一連の流れのこと。(1)天然に存在するウラン鉱石<sup>\*</sup>の採掘、ウラン鉱石からのウランの抽出、精錬、ウランのフッ化物への転換、ウラン同位体の濃縮、燃料への成型加工、(2)原子炉装荷と燃焼、(3)使用済核燃料<sup>\*</sup>の中間貯蔵<sup>\*</sup>、再処理<sup>\*</sup>によるウランとプルトニウムの回収、放射性廃棄物<sup>\*</sup>の処理、処分などからなる。再処理で回収した核燃料物質<sup>\*</sup>を再び原子力発電所で燃焼しサイクルを一巡する。使用済核燃料中に残る多量のウランやプルトニウムなどの核燃料物質を再利用することによってウラン資源<sup>\*</sup>の有効利用を図るものであり、長期的なエネルギーの安定供給の確保および放射性廃棄物の適切な処理処分が主目的である。図参照 (p. 25)。

### 核燃料再処理 nuclear fuel reprocessing

使用済核燃料<sup>\*</sup>から  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  などの核燃料物質<sup>\*</sup>を化学的な方法で分離・回

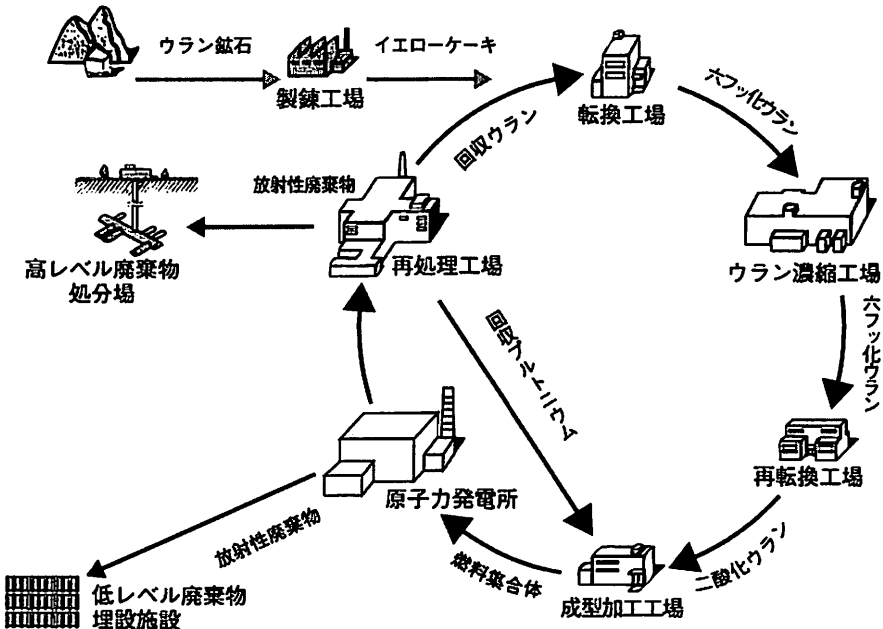
取することで、核燃料サイクル<sup>\*</sup>の基幹をなす。最も代表的な溶媒抽出法に基づく湿式再処理法<sup>\*</sup>では、まず被覆材で密封された使用済核燃料を剪断したのち燃料部分を硝酸で溶解する。得られた硝酸溶液をリン酸トリブチル (TBP) を溶かしたドデカンなどの有機溶媒と振とうして混合し、U と Pu を有機相に移す (抽出する)。ここで、核分裂生成物<sup>\*</sup>の大部分は硝酸溶液中に残る。次に、Pu の酸化数を変えて溶媒との親和性を減少させることにより Pu のみを溶媒中から水溶液中に移し (逆抽出し)、U から分離する。この湿式再処理法をピューレックス法<sup>\*</sup> (PUREX 法) と呼ぶ。青森県六ヶ所村の再処理工場も PUREX 法を採用している。今後の原子力エネルギー利用の進展に備えて、より高度な再処理法開発の研究が進められている。

### 核燃料物質 nuclear fuel material

原子力基本法<sup>\*</sup> (昭和 30 年法律第 186 号) 第 3 条の規定に基づいて制定された「核燃料物質、核原料物質、原子炉<sup>\*</sup>及び放射線<sup>\*</sup>の定義に関する政令」の第 1 条に定義されている原子炉の中で核分裂<sup>\*</sup>を起こし得る物質。すなわち、天然ウラン、濃縮ウラン<sup>\*</sup>、劣化ウラン<sup>\*</sup>、<sup>233</sup>U、Th、Pu およびその化合物ならびにこれらを含む物質のこと。

### 核燃料要素 nuclear fuel element

研究用原子炉<sup>\*</sup>や発電用原子炉<sup>\*</sup>で用いられる核燃料<sup>\*</sup>の構成要素。炉型により用語の使われ方が異なるが、板状燃料を使用する研究炉<sup>\*</sup>では 20 枚程度の燃料板を側板に組み込んだ燃料集合体<sup>\*</sup>を指す。燃料棒<sup>\*</sup>をクラスタ状に束ねて圧力管に挿入する圧力管型炉では 1 本の燃料棒を指す。高温ガス炉<sup>\*</sup>では直径約



核燃料サイクルの構成

5 cm の球状燃料のこと。軽水炉<sup>\*</sup>や高速増殖炉<sup>\*</sup>では、燃料棒を燃料要素と呼ぶこともある。

### 格納容器 reactor containment

原子炉格納容器を指す。原子炉圧力容器<sup>\*</sup>や冷却水循環ポンプなど重要な機器を納める鋼鉄製またはコンクリート製の密閉性と耐圧性の高い容器（実際には建造物）をいう。原子炉施設における事故や故障などの異常時に、放射性物質<sup>\*</sup>が外部に放散するのを防ぎ、原子炉周辺的一般公衆および作業員の安全を確保するために設置する。炉心<sup>\*</sup>から核分裂生成物<sup>\*</sup>が放出された場合でも、環境への漏洩量を十分低い値に抑制できるように設計されている。格納容器の方式には、大型容器だけを設けるドライコンテナ方式と流出した原子炉冷却材を格納容器内のプールに流出させて凝縮させる圧力抑制方式がある。

### 核破砕反応 nuclear spallation reaction

標的の原子核<sup>\*</sup>に、加速した原子核などの高エネルギー粒子を衝突させることにより起こる核反応<sup>\*</sup>の一種で、標的核<sup>\*</sup>が複数の破砕片（生成核、中性子<sup>\*</sup>、陽子<sup>\*</sup>、 $\alpha$ 粒子<sup>\*</sup>など）に崩壊する反応。破砕片には天然には存在しない短寿命核種も含まれる。理化学研究所のRI ビームファクトリーでは、この反応を利用して Ag や Au を標的核にして多種類の生成核を含むいわゆる“マルチトレーサー”を製造しており、生化学、物理学、環境科学分野で利用されている。放射性廃棄物<sup>\*</sup>の処分で課題になる長寿命の超ウラン元素などを核破砕反応で崩壊させ、より短寿命の核種<sup>\*</sup>あるいは安定な核種に変換する方法（transmutation）の開発も進められている。

### 核半径 nuclear radius

原子核<sup>\*</sup>の大きさを表す量。原子核を球形と仮定すると、原子核の半径  $R$  と質

量数<sup>\*</sup>  $A$  の間には  $R = r_0 A^{1/3}$  の関係が成り立つ。ここで  $r_0$  は核子<sup>\*</sup>の半径で原子核の種類によらず  $1.2 \times 10^{-13}$  cm である。

### 核反跳 nuclear recoil

→ホットアトム 特定の核過程の結果として、原子<sup>\*</sup>が運動エネルギーを得ること。この運動エネルギーは反跳エネルギー（recoil energy）と呼ばれ、エネルギー保存則と運動量保存則から求まる。ある放射性核種<sup>\*</sup>がエネルギー  $E_\alpha$  の  $\alpha$  粒子<sup>\*</sup>（質量  $m_\alpha$ ）を放出するとき、娘核すなわち反跳原子（質量  $m_R$ ）が得る反跳エネルギー  $E_R$  は  $m_\alpha E_\alpha / m_R$  となる。 $^{224}\text{Ra}$  ( $E_\alpha = 5.686$  MeV) の壊変生成物  $^{220}\text{Rn}$  の  $E_R$  は 0.102 MeV となり、物質表面から抜け出すのに十分なエネルギーである。(n,  $\alpha$ ), (n, p), ( $\gamma$ , n) などの核反応<sup>\*</sup>でも  $10^4 \sim 10^5$  eV の高いエネルギーが与えられる。(n,  $\gamma$ ) 反応の際の反跳エネルギーは  $10^2 \sim 10^3$  eV であり、ホットアトム<sup>\*</sup>の発生源として有用である。 $\beta$  壊変<sup>\*</sup>の最大反跳エネルギーは高々数 eV である。

### 核反応 nuclear reaction

→原子核反応 → $Q$  値 原子核<sup>\*</sup>が他の粒子や光子<sup>\*</sup>と衝突することによって起こる核励起、弾性散乱<sup>\*</sup>、核変換<sup>\*</sup>などの反応の総称。狭義には、弾性散乱以外の反応を意味する。原子核  $A$  に粒子  $a$  が衝突し、原子核  $B$  と粒子  $b$  が生成する反応を、 $A + a \rightarrow B + b$  または  $A(a, b)B$  のように記す。 $A$  を標的核<sup>\*</sup>（ターゲット）、 $a$  を入射粒子、 $B$  を生成核、 $b$  を放出粒子と呼ぶ。入射粒子として陽子<sup>\*</sup>、重陽子<sup>\*</sup>、中性子<sup>\*</sup>、電子<sup>\*</sup>、 $\alpha$  粒子<sup>\*</sup>、重イオン（He より核電荷の大きい原子核）が、光子として制動放射線<sup>\*</sup>などが用いられる。核反応の過程で放出され、あるいは吸収されるエネルギーを  $Q$  値<sup>\*</sup>といい、 $Q$  値が正の場合は発熱反応、負のときは吸熱反応である。

### 核反応断面積 nuclear reaction cross section

→励起関数 核反応<sup>\*</sup>の起こりやすさを示す値。入射粒子が標的核<sup>\*</sup>と衝突し、目的の核反応が起こる確率。入射粒子から見て、進行方向に垂直な面にある1個の標的核の断面積の大きさが問題になり、断面積が大きい方が反応が起こりやすい。中程度の大きさの原子核<sup>\*</sup>の半径は $10^{-14}$  m 程度なので、 $10^{-28}$  m<sup>2</sup>を単位として1 b (1バーン, barn) と呼ぶ。核反応断面積<sup>\*</sup>は、入射粒子のエネルギーに依存する。入射粒子が標的核と何らかの相互作用を起こすことを表わす全断面積 ( $\sigma_{tot}$ ) は、散乱断面積 ( $\sigma_{sc}$ ) と反応断面積 ( $\sigma_r$ ) の和となる。断面積を求めるには、1) 標的を透過した入射粒子数から、入射粒子の減衰率を算出する方法、2) 生成核の量を測定する方法、3) 放出粒子数を測定する方法などがある。生成核が放射性核種<sup>\*</sup>の場合には放射能<sup>\*</sup>の絶対測定により生成量を容易に求めることができ、2)の方法を放射化学的方法と呼ぶことがある。

**核不拡散条約**

**Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons (NPT)**

正式には「核兵器<sup>\*</sup>の不拡散に関する条約」といい、1970年3月に締結された。締約国は189ヶ国(2003年9月現在)であり、わが国は1970年2月に署名し、1976年6月に批准した。米国、ロシア、英国、フランス、中国の5ヶ国を「核兵器国」と定め、「核兵器国」以外の国の核兵器の保有を防止することを目的とする。主な内容は、1) 核兵器国は核兵器等を他の国に委譲してはならず、また、その製造等の援助を非核兵器国に対し行なわないことを約束する、2) 非核兵器国は核兵器をもたないこと、ならびにIAEAによる保障措置<sup>\*</sup>(核物質<sup>\*</sup>が核兵器等に利用されていないことを確かめる査察)を受けることを約束する、3) すべ

ての締約国は原子力の平和的利用のための権利を有する、4) 各締約国は軍備縮小に関する条約について誠実に交渉を行なう、である。この条約は無期限に延長されることが決っている。

**核物質管理 nuclear material control**

核物質<sup>\*</sup>の盗取、転用などを防ぐために、政府が核物質防護<sup>\*</sup>および核物質の計量管理<sup>\*</sup>などの措置により核物質を管理すること。

**核物質防護 protection of nuclear material**

核物質<sup>\*</sup>の盗難または不法移転および個人または集団による原子力施設の妨害行為に対する防護のこと。国際的取り決めとして核物質防護条約がある。条約締約国は、平和利用のための核物質の国際輸送の際は規定された防護措置をとり、また、核物質防護や秘密情報保護の相互協力義務と核物質に関する犯罪人の処罰義務を負う。国内では原子炉等規制法<sup>\*</sup>により防護が実施されている。防護対象特定核燃料物質を取り扱う事業者はその取扱施設に防護区域を設定し、防護対象特定核燃料物質自体を常時監視下におく。

**核分裂 nuclear fission**

1つの原子核<sup>\*</sup>が2つ(またはそれ以上)の原子核に分裂する現象。1939年にドイツのO. Hahn と F. Strassmann によって発見された。中性子<sup>\*</sup>や荷電粒子<sup>\*</sup>などの照射によりエネルギーを得て核分裂が誘起される場合と、自然に核分裂する場合(自発核分裂<sup>\*</sup>、放射壊変<sup>\*</sup>の一種)がある。核分裂とともに数個の中性子と200 MeV 程度のエネルギーが放出される。適当な条件下では、この放出された中性子を別の原子核に次々とあてて核分裂反応を継続させることができる(連鎖反応)。この連鎖反応を人為的に制御して、放出されるエネルギーを利用するのが原子炉<sup>\*</sup>である。天然で連鎖反応がお

こった形跡(オクロ天然原子炉)も発見されている。

#### 核分裂異性体 nuclear fission isomer

極短寿命で自発核分裂<sup>\*</sup>をする核異性体<sup>\*</sup>。<sup>242m</sup>Am(半減期<sup>\*</sup> 14 ms)や<sup>236m</sup>Pu(半減期 0.03 ns)などUからBkまでに34核種<sup>\*</sup>が知られている。これらの半減期は、複合核<sup>\*</sup>の即発核分裂と比べて異常に長く、普通の自発核分裂と比較すると異常に短い。大きく変形した原子核<sup>\*</sup>では、変形の度合いに対する安定化ポテンシャルがふた山になり、極小も二つある。山と山の間は基底状態より励起した準安定状態となる。この状態にある核種は基底状態とは異なる変形を有し、変形核異性体と呼ばれる。この変形核異性体がポテンシャルの山を超えさらに変形の度合いが増すと核分裂<sup>\*</sup>が起きる。

#### 核分裂障壁 fission barrier

核分裂<sup>\*</sup>過程の途中に存在するエネルギー障壁。質量数<sup>\*</sup>が大きい(>100)原子核<sup>\*</sup>で、 $Q$ 値<sup>\*</sup>が正(発熱反応)であっても自発核分裂<sup>\*</sup>の確率が極めて低いのは、この障壁が存在するためである。N. Bohrら(1939年)は液滴模型<sup>\*</sup>に、またStrutinsky(1967年)は液滴・殻両模型<sup>\*</sup>に基づく計算で、核分裂障壁を定性的あるいは定量的に解釈した。後者によってほとんどの超ウラン元素で障壁の形状が二つ山になることが明らかになり、これにより核分裂異性体<sup>\*</sup>の存在などの合理的な説明が可能になった。

#### 核分裂生成物 fission product (FP)

核分裂<sup>\*</sup>により生成する核種<sup>\*</sup>のこと。核分裂直後の生成核は一次分裂片という。一次分裂片は、高励起状態のため直ちに中性子<sup>\*</sup>や $\gamma$ 線<sup>\*</sup>を放出して安定化するが、これを二次分裂片という。二次分裂片は放射性核種<sup>\*</sup>であることが多く、 $\beta$ 壊変<sup>\*</sup>を何度か経て安定核種あるいは長寿命放射性核種になる。この $\beta$ 壊変す

る核種ならびに $\beta$ 壊変生成物を核分裂生成物と呼ぶ。<sup>235</sup>Uの中性子誘起核分裂の主要な長寿命核分裂生成物として<sup>90</sup>Sr(半減期<sup>\*</sup> 29年)や<sup>137</sup>Cs(半減期 30年)がある。

#### 核分裂性物質 fissile material

核分裂<sup>\*</sup>を起こす核種<sup>\*</sup>を含む物質。一般には、中性子<sup>\*</sup>との核反応<sup>\*</sup>により核分裂を起こす物質を指す。例えば、<sup>235</sup>U、<sup>233</sup>Uおよび<sup>239</sup>Puを含む物質。

#### 核分裂モード nuclear fission mode

核分裂片が生成するまでに原子核<sup>\*</sup>が経る過程の型。質量分割の様子から、少なくとも二つの型が知られている。分裂する原子核の質量のほぼ半分に相当する二つの分裂片ができる場合を対称核分裂<sup>\*</sup>(symmetric fission)といい、質量数<sup>\*</sup>が異なる大きい分裂片と小さい分裂片が生成する場合を非対称核分裂<sup>\*</sup>(asymmetric fission)という。軽アクチノイド核ではこの二つのモードがあることが実験的に証明されており、非対称分裂では核分裂<sup>\*</sup>のしきいエネルギーが低く、原子核がそれほど変形せずに分裂にいたる。対称分裂のしきいエネルギーは高く、核分裂の方向に長くのびた形状で分裂にいたる。

#### 核分裂連鎖反応 fission chain reaction

核分裂<sup>\*</sup>が継続的に起る現象。<sup>235</sup>Uなどの核分裂性物質<sup>\*</sup>が中性子<sup>\*</sup>を吸収して核分裂する場合、1回の核分裂で2~3個の中性子を放出する。この中性子が再び原子核<sup>\*</sup>に吸収されて次の核分裂を起こし、連鎖的に核分裂が続く。この連鎖反応の持続(臨界<sup>\*</sup>)の条件は四因子公式<sup>\*</sup>から求められる。

#### 核兵器 nuclear weapon

核反応<sup>\*</sup>に基づく兵器。原子爆弾<sup>\*</sup>(原爆)、水素爆弾(水爆)、中性子爆弾がある。原爆は<sup>235</sup>Uや<sup>239</sup>Puの核分裂<sup>\*</sup>反応に、水爆は原子爆弾を炸裂させた時の超

高温、高圧の条件下での重水素や三重水素の核融合\*反応による。

### 核兵器用物質条約

#### Fissile Material Cut-Off Treaty (FMCT)

核兵器用核分裂性物質生産禁止条約の略称で、カットオフ条約ともいう。条約の目的は核兵器\*を保有する国の核能力を凍結することであり、そのために核兵器の開発と製造を目的とする高濃縮ウランやプルトニウムの生産を禁止するとともに、そのような核物質を生産することに対する他国による援助を禁止することを義務づけている。1993年の国連総会において交渉を行うことが決められ、交渉の場をジュネーブ軍縮会議とすることが決まった。その後、インドとパキスタンの核実験\*や米中の対立などで交渉がまとまらないままに現在に至っている。

### 核変換 nuclear transformation

→核反応 原子核\*が核反応\*によって別の原子核に変換すること。1919年、E. Rutherford は空気中の<sup>14</sup>Nがα粒子\*によって<sup>17</sup>Oに変換することを明らかにした。これは原子核を人工的に変換した最初の実験として知られている。このとき用いたα粒子は天然放射性核種\*であるラジウムから放出されるものであった。その後、1932年にJ. D. Cockroft と E. T. S. Walton が開発した加速器\*を用いて荷電粒子\*を加速することができるようになり、さまざまな核変換を人工的に起こすことができるようになった。その後原子炉\*が利用できるようになり、核変換はもっぱら加速器や原子炉を用いて行われる。

### 核密度 nuclear density

原子核\*の密度。原子核の種類によらずほぼ一定であり、原子核のなかで陽子\*と中性子\*がほぼ圧縮できない状態に集合していることを示す。核子\*1個あたりの体積は約 $1.4 \times 10^{-44} \text{ m}^3$ 程度、原子核

の密度は $1.2 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$ である。

### 核融合 nuclear fusion

複数の原子核\*が融合し、反応前よりも質量数\*の大きな原子核を生成する反応の総称。一般的には、鉄より軽い原子核同士が融合して重い原子核に変換する発熱反応をいう。通常、原子核同士はクーロン反発のため核融合反応が起こる距離まで接近できないが、高温(数億度)のプラズマ\*状態にある原子核同士はクーロン障壁\*を越えて直接反応できる距離に近づく。高温・高密度の状態では熱核融合反応\*とも呼ばれ、太陽をはじめ恒星のエネルギー源のほとんどが水素の熱核融合反応による。巨大な重力場をもつ太陽の中では、7000万度で $4\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + 2\text{e}^+ + 2\nu + 24.7 \text{ MeV}$  反応が起きる。地上でエネルギー源として利用可能な熱核融合反応として、DT反応( ${}^2\text{H} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{n} + 17.59 \text{ MeV}$ )、DD反応( ${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \text{n} + 3.27 \text{ MeV}$  および  ${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{H} + \text{p} + 4.03 \text{ MeV}$ )、D<sup>3</sup>He反応( ${}^2\text{H} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{p} + 18.34 \text{ MeV}$ )などがある。この中でDT反応の確率が最も高く、核融合の実現をめざしプラズマ核融合\*やレーザー核融合\*の研究が進められている。熱核融合反応とは全く異なる機構で起こる核融合反応としてミュオン触媒核融合\*反応もある。

### 核融合炉 nuclear fusion reactor

→核融合 熱核融合反応\*で発生するエネルギーを利用するための装置で、反応を持続させる機能(炉心)と発生する核エネルギーを取り出す機能(ブランケット)から成る。反応を持続させる方法には、磁場を使って超高温のプラズマ\*を維持する磁気閉じ込めと、強力なレーザー光線やイオンビームを使って超高密度のプラズマを発生させる慣性閉じ込めの二つの方式がある。核融合反応で発生する中性子\*やα粒子\*の運動エネルギー



を熱エネルギーに変換するブランケットは炉心を取り囲むように配置する。核融合炉ブランケットはD-T核融合炉の燃料であるトリチウムを増殖する役割も担っており、増殖ブランケットとも呼ばれる。図参照。

### 確率的影響 stochastic effect

→非確率的影響 放射線\*の人体への影響のうち、障害の発生確率が線量\*の関数であり、かつしきい値がないとみなされる影響。放射線の遺伝的な影響やがん発生がこの種の影響であるとされ、被ばく線量\*の増加とともに発生率が高くなる。国際放射線防護委員会\* (ICRP) は膨大なデータを検討し、単位線量当たりのリスク係数を人体の組織別に定めている。これにより、部分照射や不均等照射に関しても、総リスクに基づく評価が可能になった。

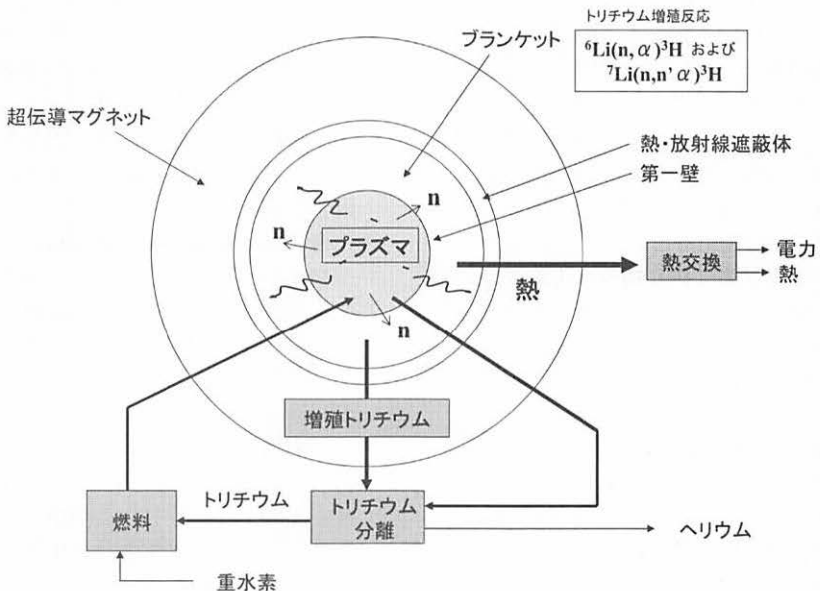
### 核量子数 nuclear quantum number

原子核\*のエネルギー状態は量子化して

おり、その状態を決める量子数を核量子数\*という。核量子数には主量子数、軌道角運動量子数、全角運動量子数がある。原子核の角運動量は、核子\*の運動による軌道角運動量\*に核子固有のスピンを加えた全角運動量\*で表され、これを核スピン\*という。軌道角運動量は $h$ の整数倍であり、核子1個当たりのスピンは $(1/2)h$ であるから、核スピンを $Ih$ と表すと、核子の数すなわち質量数\* $A$ が偶数なら $I$ は整数に、 $A$ が奇数なら $I$ は半整数になる。この $I$ をスピン量子数という。

### 核力 nuclear force

核子\* (陽子\* と中性子\*) の間に働き、原子核\* を形成する力。原子核の直径程度の短い距離 (fm) で作用する強い相互作用の一つであり、電荷に関係せず、2個の粒子間で位置、スピン、荷電などの交換効果を伴う力 (交換力) が支配的である。湯川秀樹の中間子理論によれば



核融合炉の概念



めて、核子が近接したときに働く強い相互作用であることが明らかにされた。

### ガス拡散法 gas-diffusion method

→気体拡散法

### カスケードガンマ線 cascade gamma ray

高いエネルギー準位<sup>\*</sup>にある原子核<sup>\*</sup>が次々と低い準位に遷移するときに連続的に(カスケード状に)放出する複数の $\gamma$ 線<sup>\*</sup>。例えば、 $^{60}\text{Co}$ は $\beta$ 壊変<sup>\*</sup>後、 $^{60}\text{Ni}$ の第2励起準位からの1.33 MeV  $\gamma$ 線放出に引き続き第1励起準位から1.17 MeVの $\gamma$ 線を連続的に放出する。核反応<sup>\*</sup>により生成する励起核<sup>\*</sup>から放出される即発 $\gamma$ 線もカスケード状に放出される。カスケード $\gamma$ 線の角相関を測定することにより、核スピン<sup>\*</sup>やパリティ<sup>\*</sup>などの情報が得られる。

### ガスジェット搬送装置

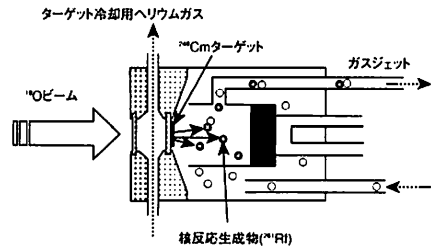
#### gas jet transport system

加速器<sup>\*</sup>や原子炉<sup>\*</sup>において核反応<sup>\*</sup>により生成する核種<sup>\*</sup>を測定系などの実験装置に高効率かつ迅速に輸送する装置。ターゲット後方に気体が入ったチャンバーを配し、核反応により生成し反跳<sup>\*</sup>を受けてターゲットより飛び出す核種をこの中に捕捉する。チャンバーの排気側は長さ数メートルから数十メートルの細いキャピラリーを通して排気ポンプに通じており、排気される気体はキャピラリー内でジェット気流となり、捕捉した生成核種を迅速に搬送する。気体に塩化カリウムなどのエアロゾル<sup>\*</sup>を混入することにより搬送効率の向上が図られている。図参照。

### ガス充填型質量分離装置

#### gas-filled mass separator

加速器<sup>\*</sup>や原子炉<sup>\*</sup>を用いる核反応<sup>\*</sup>によって生成する蒸発残留核種を電磁場により迅速に分離する装置。1958年にCohenとFulmerにより提案され、その後ArmbrusterやGhiorsoらにより改良さ



ガスジェット搬送装置

れてきた。核反応により生成する原子核<sup>\*</sup>は多様な電荷状態をとるので、一つの電荷状態を取り出すだけでは生成核種の回収率は低い。磁場中の容器に低圧のガスを充填しておく、充填ガス分子との衝突を繰り返すことにより、生成核種の電荷が平均化されるので、分離条件を平均電荷に設定すれば回収率を高めることができる。生成断面積が小さい原子核の探査に有効であり、わが国でも理化学研究所で用いられ、2004年の新元素(113番元素)発見に役立った。

### ガスフロー計数法

#### gas-flow counting method

→比例計数管 比例計数管<sup>\*</sup>内に一定の速度でガスを流しながら放射線<sup>\*</sup>を測定する方法。気体として、PRガス<sup>\*</sup>、Qガス<sup>\*</sup>、プロパンなどが用いられる。長時間の使用による充填ガス分子の分解による計数管の性能劣化防止に有効である。この方法では、充填ガスとともに線源試料(気体)を検出器内に導入することも可能で、低エネルギー $\beta$ 線<sup>\*</sup>や内部転換電子などを効率よく検出することができる。

### 加速器 accelerator

電子<sup>\*</sup>や陽子<sup>\*</sup>などを電場で加速し、高い運動エネルギーを与える装置。1930年代に原子核研究のために開発されたが、現在では物性研究、工業利用、医療利用など広い分野で利用されている。

加速のための電場として静電場，高周波電場および磁気誘導の変化による電場が利用される。加速器の種類として粒子を直線的に加速する直線加速器，コッククロフト-ウォルトン型加速器<sup>\*</sup>，バンデグラフ型加速器<sup>\*</sup>，円形運動をさせて粒子を加速するベータトロン<sup>\*</sup>，サイクロトロン<sup>\*</sup>，シンクロトロンなどがあり，加速粒子の種類，加速エネルギー，ビーム強度などにより使い分けられる。

### 加速器駆動核変換システム

**accelerator driven transmutation system (ADS)**

使用済核燃料<sup>\*</sup>の再処理<sup>\*</sup>で生じる高レベル放射性廃棄物<sup>\*</sup>に含まれる長半減期の核分裂生成物<sup>\*</sup>や超ウラン元素を核反応<sup>\*</sup>により短半減期核種や安定核種に変換するため，加速器駆動未臨界炉を用いて核変換<sup>\*</sup>を行うシステム。処分すべき廃棄物の量を低減するかあるいは隔離保存期間を短縮することにより，放射線<sup>\*</sup>のリスクを軽減させる。加速器<sup>\*</sup>から供給される陽子ビームを鉛-ビスマス溶融合金に照射し，核破砕反応<sup>\*</sup>により生成する中性子<sup>\*</sup>を利用する。アクチノイド核種には高速中性子<sup>\*</sup>による核分裂<sup>\*</sup>を利用し，核分裂生成物<sup>\*</sup>には熱中性子捕獲<sup>\*</sup>反応を利用し，未臨界を維持しつつ効率的に核変換を行うシステムが計画されている。

### 加速器質量分析

**accelerator mass spectrometry (AMS)**

加速器<sup>\*</sup>を用いてイオンを高速に加速し，電場や磁場で質量分離し，重イオン検出器などによりイオンを計数すること。電磁場中でのイオンの軌跡は，その質量  $m$  と電荷  $q$  の比 ( $m/q$ ) およびエネルギー  $E$  と電荷の比 ( $E/q$ ) により識別されることを利用するが，イオンを MeV 領域にまで加速すると，イオンのエネルギー損失 ( $dE/dx$ ) が原子番号<sup>\*</sup>  $Z$  の自乗に比例する

ようになり，同重体<sup>\*</sup>をも識別することが可能になる。これにより，加速器質量分析は，通常の質量分析に比べ極めて高い分解能と検出効率<sup>\*</sup>を実現した。この分析法は， $^{10}\text{Be}$ ， $^{14}\text{C}$ ， $^{26}\text{Al}$ ， $^{32}\text{Si}$ ， $^{36}\text{Cl}$ ， $^{129}\text{I}$  および Pu 同位体<sup>\*</sup> など長半減期放射性核種の分析法として有効であり， $^{14}\text{C}$  による年代測定<sup>\*</sup>をはじめ考古学，環境科学，地球科学，医学，生物学など多くの分野で利用されている。炭素 14 年代測定<sup>\*</sup> に用いられる AMS はタンデムバンデグラフ加速器と呼ばれる直流電圧型加速器であり，質量分析器に送る前に荷電変換と分子イオンの分解を行い，高精度測定を可能にする。

### 荷電スペクトル

**charge spectrum**

壊変<sup>\*</sup>により生じる娘核種<sup>\*</sup>の電荷分布スペクトル。1960 年前後に T. A. Carlson, A. H. Snell および F. Pleasonton らのグループならびに S. Wexler らによって開発されたチャージスペクトロメータによって， $\beta^-$ 壊変<sup>\*</sup>，EC 壊変<sup>\*</sup>，核異性体転移<sup>\*</sup>などを経て生成する娘核種の荷電状態が測定され，壊変<sup>\*</sup>にともなう内部転換<sup>\*</sup>，オージェ効果<sup>\*</sup>，電子揺乱 (electron shake-off) などの現象解明につながった。図参照 (p. 33)。

### 荷電粒子 charged particle

電荷を帯びた粒子の総称。電子<sup>\*</sup> ( $e^-$ )，陽電子<sup>\*</sup> ( $e^+$ )，陽子<sup>\*</sup> ( $p$ )，重陽子<sup>\*</sup> ( $d$ )，三重陽子 ( $t$ )， $\alpha$  粒子<sup>\*</sup> および各種重イオンを指す。

### 荷電粒子励起 X 線分析

**charged particle induced X ray emission**

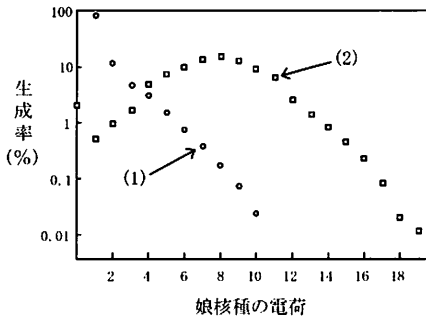
→ 粒子励起 X 線分析

### 過渡平衡 transient equilibrium

→ 放射平衡

### カミオカンデ検出器

**KAMIOKA nucleon decay experiment (KAMIOKANDE)**



### 荷電スペクトルの例

- (1)  $^{85}\text{Kr}$  の  $\beta^-$  壊変で生じる  $^{85}\text{Rb}$  の荷電スペクトル
- (2)  $^{131\text{m}}\text{Xe}$  の核異性体転移で生じる  $^{131}\text{Xe}$  の荷電スペクトル

→ニュートリノ 岐阜県飛騨市神岡町池の山 (標高 1,396 m) の地下 1000 m に設置された大型の水チェレンコフカウンター。陽子崩壊や太陽ニュートリノの観測に用いられた。高さ 16 m, 直径 15.5 m の円筒形の水タンク (水量約 3,000 トン) の周りに設置された約 1000 個の光電子増倍管で、水との相互作用で生成する高速電子が放つチェレンコフ光を観測することによりニュートリノを検出する。1983 年観測を開始し、1987 年 2 月 23 日には大マゼラン星雲で発生した超新星爆発によるニュートリノの検出に史上初めて成功したが、大型のスーパーカミオカンデ検出器の稼働とともに廃止された。研究を指導した小柴昌俊は 2002 年にノーベル物理学賞を受けた。現在カミオカンデ跡地にはカムランド検出器が設置され、スーパーカミオカンデとともにニュートリノの研究に使われている。

### ガモフ・テラーの選択律

#### Gamow-Teller selection rule

$\beta$  壊変の起こり易さの指標で、放出される電子とニュートリノの対がもち去る角運動量  $L$  によって与えられる。  $L=0$  は

許容遷移と呼ばれ、さらに Fermi 遷移と Gamow-Teller 遷移に分けられる。 Fermi 遷移では、電子とニュートリノの対が反平行 (一重項) スピンで放出され、核スピン変化  $\Delta I=0$  のときに大きな遷移確率を示す。壊変に際して電子とニュートリノの対のスピンの平行 (三重項) なら  $\Delta I=\pm 1,0$  であり、これを Gamow-Teller 遷移という。核からもち去られる角運動量が大きくなるに従って壊変率は急激に小さくなる。電子とニュートリノがもち去る角運動量  $L=1, 2, 3$  の遷移をそれぞれ第 1, 第 2, 第 3 禁制遷移と呼ぶ。

### カラークエンチング color quenching

液体シンチレーション測定において、蛍光体 (PPO) が発する蛍光が試料に含まれる有色の物質に吸収され、蛍光の一部が失われる現象。赤色や黄色を呈する試料において強いクエンチングを起こす場合が多い。カラークエンチングを受けている試料では、その作用の程度に応じてパルス信号の高さが低くなり、計数効率<sup>\*</sup>が低下する。特に  $^3\text{H}$  のような低エネルギー  $\beta^-$  放射体の測定には計数効率の補正が十分にされているか否を確かめる必要がある。

### ガラス固化体 glass solidification

→地層処分 使用済核燃料<sup>\*</sup>の再処理<sup>\*</sup>などの後に残る高レベル放射性廃棄物<sup>\*</sup>をガラス原料と共に高温で溶かした後固化させたもので、地層処分<sup>\*</sup>のための固化体。ガラス固化に用いられるホウケイ酸ガラスは、主成分であるケイ素とホウ素とが酸素を介して形成する網目構造を有しており、その中に放射性物質<sup>\*</sup>を均質かつ安定に包含する。放射性物質はガラスと一体化するため、ガラス固化体が破損したとしても外部に流れ出す可能性は低い。地層処分では、この固化体をオーバーパック (炭素鋼の容器) に入れ、放

射線<sup>\*</sup>および放射線による発熱が周辺の人工バリア<sup>\*</sup>に影響を及ぼさなくなるまで地中に閉じ込めておく。

### ガラス線量計 glass dosimeter

放射線照射によるガラスの着色や蛍光中心の生成を利用して個人被ばくなどを測定する線量計<sup>\*</sup>。近年、レーザー技術の発展とともに蛍光現象を利用する線量計として広く利用されている。メタリン酸ガラスに銀を加えると、放射線<sup>\*</sup>の照射により生成する電子<sup>\*</sup>と正孔はガラス中の Ag<sup>+</sup>に捕らえられ蛍光中心となる。これに窒素ガスレーザーを紫外線源として照射し、発する蛍光<sup>\*</sup>を測定する。小型軽量であり、10 μSv から 10 Sv までの線量<sup>\*</sup>を測定可能である。蛍光中心が時間とともに減衰するいわゆるフェーディングが小さく、測定値に対する信頼性も高いという利点をもつ。最大の特徴は、読み取りにより蛍光中心が消滅しないため何度でも読み取り可能で、積算線量を直接測定できることである。

### 殻模型 shell model

原子核<sup>\*</sup>の構造を記述するモデルの一つ。原子<sup>\*</sup>の殻構造の概念と同様な考え方に基づく原子核構造の模型。1949年に M. G. Mayer と O. Haxel らが独立に提唱した。核内に存在する核子<sup>\*</sup>は他の核子がつくる平均的なポテンシャル(平均場)の中で一粒子運動をすとの考えに立ち、スピンと軌道運動の強い相互作用に基づくポテンシャルを仮定し、魔法の数<sup>\*</sup>の導出に成功した。殻模型の成功は核構造物理学という新しい分野を開くことになった。

### カーブプロット Kurie plot

β 壊変<sup>\*</sup>で放出される電子<sup>\*</sup>(または陽電子<sup>\*</sup>)の最大エネルギー ( $E_0$ ) を正確に求める手法。β 線<sup>\*</sup>のエネルギースペクトルは  $P(E)dE \propto F(Z,E)pE(E_0-E)^2dE$  の形をしているので、実験で得られる

$[N(E)/F(Z,E)pE]^{1/2}$  は  $(E_0-E)$  に比例する。ここで、 $p$  は電子の運動量、 $E$  はその全エネルギー、 $F(Z,E)$  はフェルミ関数、 $Z$  は娘核の原子番号<sup>\*</sup>である。 $F(Z,E)$  を  $y$  軸に、 $E$  を  $x$  軸にとったグラフをカーブプロットといい、許容遷移ならば直線となり  $x$  軸との交点は  $E_0$  に相当する。 $E_0$  付近では電子の計測数が少ないので、カーブプロットの直線性を用いて  $E_0$  を精度良く求めることができる。禁制遷移の場合のカーブプロットは直線にならない。

### カリウム - アルゴン法

#### potassium-argon method

年代測定<sup>\*</sup>法の一つ。<sup>40</sup>K は地殻に広く分布する天然放射性核種<sup>\*</sup>(半減期<sup>\*</sup> 1.277 × 10<sup>9</sup> y, EC, β<sup>-</sup>)で <sup>40</sup>Ar と <sup>40</sup>Ca に分岐壊変<sup>\*</sup>する。岩石形成から現在までの  $t$  年間に <sup>40</sup>K の壊変生成物 <sup>40</sup>Ar は岩石中に蓄積されるとすれば、岩石中の <sup>40</sup>K と <sup>40</sup>Ar の原子数から  $t$  は次のように求められる。

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left( 1 + \frac{\lambda [^{40}\text{Ar}]}{\lambda_c [^{40}\text{K}]} \right)$$

ここで、 $\lambda$  は <sup>40</sup>K の全壊変定数、 $\lambda_c$  は EC 壊変<sup>\*</sup>の部分壊変定数<sup>\*</sup>である。数十億年までの岩石の年代を決めることができるが、試料からの <sup>40</sup>Ar 散逸が年代を短く評価することがある。改良法として、試料を中性子照射し、<sup>39</sup>K(n,p)<sup>39</sup>Ar 反応により生成する <sup>39</sup>Ar (半減期 269 年) と <sup>40</sup>Ar を質量分析法により測定して <sup>39</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 比から地質年代を求める <sup>40</sup>Ar - <sup>39</sup>Ar 法がある。

### 環境放射能分析

#### environmental radioactivity analysis

原子力施設周辺の環境モニタリングや自然界に存在する放射性物質<sup>\*</sup>を把握するために広く実施される分析。環境試料では放射能濃度が低いため、放射能測定の前に、試料の濃縮などの前処理をするこ

とが多い。分析する環境試料は大気浮遊じん、降水物、陸水、陸土、海水、海底土、農畜産物、海産物などである。

#### 換算質量 reduced mass

質量が  $m_1$  と  $m_2$  の2つの質点が相互作用している系の状態は、二つの質点の重心を中心に  $\mu = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$  で示される質量  $\mu$  をもつ一つの質点の相互作用に置き換えることができる。この  $\mu$  を換算質量という。 $m_1 = m_2$  の場合、 $\mu$  は  $m_1/2$  である。質量が大きく異なる陽子と電子からなる水素原子では、 $\mu$  は電子の質量に、重心は陽子の座標にほぼ等しい。

#### 乾式再処理法 pyroprocess

使用済核燃料再処理法で、水溶液や有機溶媒を用いる湿式再処理法と違って、放射線に強い無機化合物だけを気体状、粉末状または熔融状で用いる方法の総称。高温でのフッ化物蒸留法、塩化物蒸留法、塩化物熔融塩浴中還元法などがある。(i) 臨界制限が緩やかである、(ii) 有機物を用いないので放射線損傷の影響が少ない、(iii) 工程数が少なく高濃度で処理できるので装置が小さくてすむなどの利点がある。現在、LiCl + KCl などのアルカリ塩化物熔融塩中で金属に電解還元する、あるいは金属リチウムで化学的に還元することによってウランやプルトニウムを核分裂生成物などから分離する方法が検討されている。

#### 慣性核融合

inertia confinement nuclear fusion

→レーザー核融合

#### ガンマ崩変 $\gamma$ decay

→ガンマ遷移

#### ガンマカメラ $\gamma$ camera

$\gamma$ 線を二次元座標で検出し画像化する装置。主に核医学診断で使用する。患者に投与した標識薬剤に含まれる放射性核種からの $\gamma$ 線を検出することによって薬剤の身体中での分布を調べるため、

大面積の検出器を用いて大きな二次元画像を得る。鉛ピンホールコリメータにより位置の解像度を良くする工夫がなされる。腫瘍や炎症、痴呆、狭心症などの診断用標識薬剤として $^{67}\text{Ga}$ (半減期 3.2日)、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (半減期 6.0時間)、 $^{111}\text{In}$ (半減期 2.8日)、 $^{123}\text{I}$ (半減期 13.3時間)、 $^{201}\text{Tl}$ (半減期 3.0日)などの $\gamma$ 線放出核種が用いられる。

#### ガンマ線 $\gamma$ ray

電磁放射線の一種。 $\alpha$ 線、 $\beta$ 線に次いで発見されたので $\gamma$ 線と名づけられ、通常原子核のエネルギー遷移( $\gamma$ 遷移)で生成する電磁放射線を指し、原子の軌道電子の再配列によって発生するX線と区別することが多い。しかし制動放射や陽電子消滅で放出される電磁放射線をX線あるいは $\gamma$ 線と呼ぶなど、X線との区別は多分に慣用的である。 $\gamma$ 線の波長は多くの場合X線よりも短かく( $10^{-10}$  m以下)、また $\alpha$ 線や $\beta$ 線よりも透過力が強い。

#### ガンマ遷移 $\gamma$ transition

原子核が $\gamma$ 線を放出してエネルギーの高い準位から低い準位に遷移すること。放出される $\gamma$ 線のエネルギーは準位間のエネルギー差に等しく、鋭い線スペクトルを与える。この遷移によって核内電荷分布の変化や磁気的性質の変化が起こる。遷移可能な準位が多数存在する場合、非常に短い時間に滝のように $\gamma$ 遷移が起こることがあり、これをカスケード放射と呼ぶ。寿命が $10^{-6}$ 秒程度より長い準安定準位からの遷移を核異性体転移と呼ぶ。

#### ガンマ線スペクトロメトリー

$\gamma$  ray spectrometry

$\gamma$ 線に着目する放射線分光測定。高純度ゲルマニウム検出器の利用や、増幅器と多重波高分析器の性能向上により大きく進歩した。 $\gamma$ 線スペクトル解析ソフト

も充実し、放射化分析<sup>\*</sup>などではほぼ自動的に解析結果を得ることができるシステムが使われる。

### ガンマ線摂動角相関

**perturbed angular correlation (PAC) of  $\gamma$  rays**

→カスケードガンマ線 原子核<sup>\*</sup>から放出される2本のカスケード $\gamma$ 線<sup>\*</sup>の放出角度の相関(角相関)に電場や磁場の影

響(摂動)が加わったもの。原子核がある時間準安定状態にとどまると、環境(電場や磁場)の影響を受け、二つの $\gamma$ 線<sup>\*</sup>の角相関に摂動を受けることがある。この現象を利用すると、原子核のスピンやパリティ<sup>\*</sup>の情報が得られる。

### ガンマ線ラジオグラフィー

**$\gamma$  ray radiography**

→ラジオグラフィー

## き

### 奇核 odd nucleus

→ワイゼッカーの質量式 質量数<sup>\*</sup>( $A$ )が奇数の原子核<sup>\*</sup>、すなわち陽子数と中性子数の一方が偶数で他方が奇数の原子核(偶奇核または奇偶核)。液滴模型<sup>\*</sup>に基づくワイゼッカーの質量式<sup>\*</sup>で表わされるとおり、奇核の安定性は最も安定な偶偶核<sup>\*</sup>と最も不安定な奇奇核<sup>\*</sup>の間にある。

### 奇奇核 odd-odd nucleus

→ワイゼッカーの質量式 陽子数と中性子数がともに奇数の原子核<sup>\*</sup>。奇奇核は偶偶核<sup>\*</sup>や奇核<sup>\*</sup>(偶奇核、奇偶核)に比べて不安定なものが多い。

### 機器放射化分析

**instrumental activation analysis**

中性子<sup>\*</sup>や光子<sup>\*</sup>( $\gamma$ 線<sup>\*</sup>)の照射後に放射化学的分離操作を行わない放射化分析<sup>\*</sup>。操作手順は試料調製、照射、 $\gamma$ 線測定、スペクトル解析などである。

### 基準ピーク効率 standard peak efficiency

$\gamma$ 線スペクトル中の光電ピークに相当する計数値と全計数値の比。検出効率<sup>\*</sup>を決める指標となり、検出器の結晶の大きさや $\gamma$ 線源と検出器の幾何学的配置に依存する。

### 気体拡散法 gas-diffusion method

→ウラン濃縮 同位体分離<sup>\*</sup>法の一つ。同位体<sup>\*</sup>を含む気体を隔膜の細孔(80~100 Å)を透過させ、透過速度の違いを利用して同位体を分離濃縮する。ウラン濃縮<sup>\*</sup>では、気体の六フッ化ウラン<sup>\*</sup>( $UF_6$ )を隔膜の前後に圧力差をつけて細孔を通す。軽い成分のほうが平均運動速度は大きく、 $^{235}U$ の方が $^{238}U$ より大きな速度を得ることから、理論分離係数は $(m_{238}/m_{235})^{1/2} = 1.004$ となる。この手法では、細孔が均一でかつ多量に製造できるか否かが重要であり、材料にニッケル、アルミナまたはポリフッ化エチレンが用いられる。長い円筒状の隔膜を何本も組み合わせてタンク内に納め、ポンプにより加圧、吸引をする。

### 気体検出器 gas detector

気体を充填した検出器の総称。電離箱<sup>\*</sup>、比例計数管<sup>\*</sup>、アヴァランシェ検出器、GM計数管<sup>\*</sup>などがある。

### 気体増幅 gas amplification

→ガイガー放電 ガス増幅ともいう。電離箱<sup>\*</sup>、比例計数管<sup>\*</sup>、GM計数管<sup>\*</sup>のような気体検出器<sup>\*</sup>において、放射線<sup>\*</sup>の電離作用(一次電離)で生成した電荷よりも数桁も多量の電荷が、検出器内の後続の電離反応で生成すること。高い電場

がかかっている検出器内の気体空間内で一次電離によって生成した電子<sup>\*</sup>と陽イオンは、それぞれ電場に沿って移動しながら加速され電極に集められてイオン電流を誘起する。ここで生成した電子の運動エネルギーが気体分子のイオン化エネルギーよりも大きいと、電子はさらに気体分子を電離<sup>\*</sup>する。このような後続の電離反応が連鎖的に起こる結果、イオン電流は通常  $10^3 \sim 10^4$  倍に増幅される。一次電離によって生成した電荷に対する電極に集められた電荷の比を気体増幅率という。

**基底準位 ground level**

分子、原子<sup>\*</sup>、原子核<sup>\*</sup>などのエネルギー準位<sup>\*</sup>のうち、最も低い定常状態の準位。

**軌道角運動量 orbital angular momentum**

軌道運動によりもたらされる角運動量。古典力学では、質量  $m$  の質点の角運動量は位置ベクトル  $r$  と運動量  $p (=mv)$  とのベクトル積で定義される。量子力学では、古典的角運動量の  $x, y, z$  成分の位置と運動量を量子力学演算子に置き換えることによって得られる。例えば、軌道角運動量の  $z$  成分は

$$L_z = \frac{\hbar}{i} \left( x \frac{\partial}{\partial y} - y \frac{\partial}{\partial x} \right)$$

となる。陽子<sup>\*</sup>や中性子<sup>\*</sup>は核内で軌道運動しているので、軌道角運動量をもつ。

**軌道電子 orbital electron**

原子核<sup>\*</sup>に束縛されている電子<sup>\*</sup>で、核外電子 (extranuclear electron) ともいう。原子<sup>\*</sup>内の電子は主量子数 ( $n$ ) と方位量子数 ( $l$ ) によって決まる軌道 (orbital) に配置される。同一の  $n$  に対して電子殻 (electron shell) という表現もあり、主量子数  $n = 1, 2, 3, \dots$  に対応して K 殻, L 殻, M 殻と呼ぶ。それぞれの殻にある電子を K 電子, L 電子, M 電子という。

**軌道電子捕獲 orbital electron capture**

→ EC 壊変

**Q ガス Q gas**

→ ガスフロー計数法 ヘリウム 98% とイソブタン 2% の混合ガス。ガスフロー計数管の放電消滅に用いる。

**吸収曲線 absorption curve**

物質に入射した放射線<sup>\*</sup>の強度の減衰を表す曲線。(1)  $\gamma$  線<sup>\*</sup>の吸収曲線。平行線束の  $\gamma$  線の強度を  $I_0$  とし、厚さ  $x$  の吸収体を通過後の  $\gamma$  線強度を  $I$  とすると  $I = I_0 \exp(-\mu x)$  が成り立つ。ここで  $\mu$  は吸収係数<sup>\*</sup>あるいは線減弱係数<sup>\*</sup>。一般には、 $\gamma$  線の散乱<sup>\*</sup>の影響を考慮した  $I = I_0 B \exp(-\mu x)$  ( $B$  はビルドアップ係数<sup>\*</sup>で 1 より大きい値) が適用される。(2)  $\beta$  線<sup>\*</sup>の吸収曲線。 $\beta$  線は主として電離<sup>\*</sup>・励起作用と制動放射線発生によってエネルギーを失うが、質量が小さいために多重散乱によって屈曲した経路をたどる。 $\beta$  線は連続スペクトルを示すことから、 $\gamma$  線のような指数関数を用いて減弱の様子を書き表わすことはできない。 $\beta$  線のアルミニウム中での最大飛程<sup>\*</sup>  $R$  ( $\text{g cm}^{-2}$ ) と  $\beta$  線の最大エネルギー  $E$  (MeV) との間には次の経験式がある。 $R = 0.542E - 0.133$  ( $0.8 < E < 3$  MeV),  $R = 0.407E^{1.38}$  ( $0.15 < E < 0.8$  MeV)

**吸収係数 absorption coefficient**

X 線<sup>\*</sup>や  $\gamma$  線<sup>\*</sup>が物質中を通過するとき、その強度の減衰の程度を表わす定数。物質に入射した強度  $I_0$  の  $\gamma$  線が物質中を距離  $x$  だけ透過したときの強度を表わす式  $I = I_0 \exp(-\mu x)$  の係数  $\mu$  であり、単位は  $\text{cm}^{-1}$ 。線減弱係数<sup>\*</sup>ともいう。X 線や  $\gamma$  線は物質と光電効果<sup>\*</sup>、コンプトン散乱および電子対生成<sup>\*</sup>による相互作用によってその強度が減少するので、その過程ごとの吸収係数を  $\mu_{\text{ph}}$ ,  $\mu_{\text{comp}}$  および  $\mu_{\text{pair}}$  とすると  $\mu = \mu_{\text{ph}} + \mu_{\text{comp}} + \mu_{\text{pair}}$  である。吸収係数は物質の密度や構成元素の原子

番号\*に依存し、物質に固有である。放射線透過試験(ラジオグラフィ\*)は吸収係数が物質によって異なることを利用する方法で、物質内部の均一性や欠陥の有無などの非破壊検査に利用される。

### 吸収線量 absorbed dose

放射線\*が物質に吸収されたとき、物質の単位質量に与えるエネルギー。質量  $dm$  の物質中で、電離放射線\*によって原子\*または分子の電離\*および励起に使われた(吸収された)エネルギーを  $dE$  とすると、吸収線量( $D$ )は  $D = dE/dm$  で定義される。SI 組立単位としてグレイ(Gy)が用いられ、 $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$  である。単位時間当たりの吸収線量を吸収線量率\*という。

### 吸収線量率 absorbed dose rate

→吸収線量 単位時間当たりの吸収線量\*。

### Q 値 Q value

ターゲット原子核(A)を入射粒子(a)で衝撃し、生成核(B)と放出粒子(b)に変換する核反応\*  $A + a \rightarrow B + b$  において、反応の前後で質量および運動エネルギーが保存されなければならないから、A, B, a, b の原子質量をそれぞれ  $m_A, m_B, m_a, m_b$  とすれば

$$(m_A + m_a) c^2 = (m_B + m_b) c^2 + Q$$

が成立する。ここで  $c$  は真空中の光の速度である。Q は核反応エネルギーで、Q 値とよばれる。Q > 0 であれば発熱反応、Q < 0 であれば吸熱反応である。例えば  $^{27}\text{Al} + ^4\text{He} \rightarrow ^{30}\text{P} + ^1_0\text{n}$  の反応では、Q = -2.64 MeV となる。これは吸熱反応であり、反応が進むためには入射  $\alpha$  粒子の運動エネルギー(E)はある値を越えなければならない。これを“しきい値”(E<sub>th</sub>)といい、運動量保存則より

$$E_{\text{th}} = -Q(1 + m_a/m_A)$$

で与えられる。この核反応の場合には E<sub>th</sub> = 3.03 MeV となる。

### 鏡像核 mirror nuclide

核変換によって、陽子数と中性数が入れ替わる核種\*。  $^{17}_9\text{F} \rightarrow ^{17}_8\text{O} + e^+ + \nu$  がその例である。他にも  $^3\text{H}, ^{11}\text{C}, ^{13}\text{N}, ^{15}\text{O}, ^{19}\text{Ne}, ^{21}\text{Na}, ^{23}\text{Mg}, ^{25}\text{Al}, ^{27}\text{Si}, ^{29}\text{P}, ^{31}\text{S}, ^{33}\text{Cl}, ^{35}\text{Ar}, ^{37}\text{K}, ^{39}\text{Ca}, ^{41}\text{Sc}, ^{43}\text{Ti}$  などが鏡像核であり、いずれも  $f$  値\*が小さい。

### 共鳴吸収 resonance absorption

中性子\*は、熱エネルギー領域(0.025 eV)でもクーロン障壁\*なしに原子核\*と反応し、その核反応断面積\*は多くの場合バーン (=  $10^{-28} \text{ m}^2$ ) 領域の値をもち、中性子のエネルギーが 1 eV 付近までの核反応断面積は中性子の速度  $v$  に反比例する。すなわち  $1/v$  則が成立する。1 eV から 10 keV 付近までの領域では、核反応断面積の鋭い共鳴吸収ピークが複合核\*の励起準位\*に対応して観測される。

### 共鳴散乱 resonance scattering

光子\*や粒子がターゲット物質(散乱体)と衝突してその進路を変える散乱現象において、光子または粒子のエネルギーが散乱体のエネルギー準位\*の差に等しいか、または近い場合に散乱断面積が大きくなる現象を共鳴散乱という。

### 許容被ばく線量 permissible dose

→実効線量限度

### 霧箱 cloud chamber

粒子が過飽和状態の気体中を通過すると、生じたイオンを核として霧が発生する。この原理を利用して荷電粒子\*の飛跡を観測する装置。霧粒の密度や磁場による軌跡のわん曲の度合いから、荷電粒子の速度や運動量などを知ることができ、陽電子\*やミュオン\*の発見にも利用された。英国の物理学者 C. T. R. Wilson が発明したので、ウィルソンの霧箱ともいわれる。

### 銀河宇宙線 galactic cosmic ray

→宇宙線



**クーロン散乱 coulomb scattering**

→ラザフォード散乱

**クーロン障壁 coulomb barrier**

同符号の電荷をもつ粒子の間に存在するエネルギー障壁で、クーロン斥力<sup>\*</sup>に相当する。陽子<sup>\*</sup>やα粒子<sup>\*</sup>など正電荷をもつ粒子による核反応<sup>\*</sup>では、原子核<sup>\*</sup>に近づくためにこのクーロン障壁を越えられるだけのエネルギーを与えてやらなければならない。クーロン障壁の高さは、核半径<sup>\*</sup>を  $a_0$ 、真空中の誘電率を  $\epsilon_0$  とすると  $e/4\pi\epsilon_0 2a_0$  である。一方、電荷をもたない中性子<sup>\*</sup>は、原子核との間にクーロン障壁がないので容易に原子核に近づくことができ、小さな運動エネルギーの中性子でも核反応を起こす。

**クーロン斥力 coulomb repulsion**

同符号の電荷をもつ粒子間に働く静電反発力。固体内の電子<sup>\*</sup>の振るまい、特に磁性や超伝導などを記述するためには、電子の運動エネルギーとともにクーロン斥力による電子間の相互作用を考慮しなければならない。

**クーロン場 coulomb field**

クーロンの法則に従う電場の総称。

**クーロン力 coulomb force**

2つの点電荷間に働く静電的な力。距離が  $r_{12}$  離れ、それぞれ電荷  $q_1$  および  $q_2$  をもつ二つの粒子間に作用するクーロン力 ( $F$ ) は、真空中の誘電率を  $\epsilon_0$  とすると  $F = q_1 q_2 / 4\pi\epsilon_0 r_{12}^2$  で与えられる。

**クーロン励起 coulomb excitation**

原子核<sup>\*</sup>が荷電粒子<sup>\*</sup>と衝突する際に、クーロン力<sup>\*</sup>によって原子核のエネルギー準位<sup>\*</sup>が励起されるか、もしくは励起を伴って非弾性散乱<sup>\*</sup>が起こる現象。原子核が受ける電磁場からの力が時間的に変化するため、γ線<sup>\*</sup>が入射した場合と同様の効果が生じる。振動準位や回転

準位が励起されやすい。クーロン励起の断面積を測定することにより、基底状態や励起状態<sup>\*</sup>のスピンやパリティ<sup>\*</sup>を知ることができる。

**空気吸収線量 air absorption dose**

単位質量の空気中の微小体積要素中において吸収される放射線<sup>\*</sup>のエネルギー。ブラッグ-グレイの空洞原理<sup>\*</sup>により、壁が空気等価物質<sup>\*</sup>でつくられた電離箱<sup>\*</sup>に空気を満たし、電離箱の容積を  $V$  cm<sup>3</sup>、気温  $T$ °C、気圧  $P$  Pa で、毎秒  $Q$  C の電流が流れたとき、空気吸収線量率  $D$  は、電荷量を  $1.6 \times 10^{-19}$  C、空気 1 cm<sup>3</sup> あたりの質量を  $1.3 \times 10^{-6}$  kg とすれば、

$$D = \frac{Q \times 60 \times 60}{1.6 \times 10^{-19}} \times W \text{ Gy h}^{-1}$$

$$= \frac{1.3 \times 10^{-6} \times V \times \frac{273}{173+T} \times \frac{P}{1.013 \times 10^5}}{1.6 \times 10^{-19}} \text{ Gy h}^{-1}$$

で求められる。

**空気シャワー air shower**

一次宇宙線<sup>\*</sup>が大気中に突入すると、大気成分と衝突して核破砕反応<sup>\*</sup>を引き起こしπ中間子<sup>\*</sup>などを発生する。π<sup>0</sup>は平均寿命  $8.3 \times 10^{-17}$  秒で崩壊しγ線<sup>\*</sup> → e<sup>±</sup> → γ線 → e<sup>±</sup> のカスケードで電磁成分を増殖させる。このような過程を電磁カスケードシャワーと呼ぶ。またπ<sup>±</sup>は  $2.6 \times 10^{-8}$  秒でμ粒子とニュートリノ<sup>\*</sup>に崩壊するが、非常に高エネルギー（例えば地上で 10 GeV 以上）の場合には相対論で寿命が延びるため崩壊前に核破砕反応を起こす確率が増え、再びπ中間子を発生させ電磁カスケードシャワーを起こす。このようなシャワーを空気シャワーと呼ぶ。古くは単に「宇宙線シャワー<sup>\*</sup>」とも呼んだ。

**空気等価物質 air equivalent substance**

1 kg の空気中に発生する電荷として定義

される照射線量<sup>\*</sup>を測定するための電離箱<sup>\*</sup>において、箱の内部に空気を満たし、壁材として用いられる空気と同様な放射線<sup>\*</sup>の相互作用をもつ材料、空気等価物質で囲われた容積中では壁材には影響されず、同容積の空気中で発生した電荷と等しい電荷を生じることになる。実際には空気と原子組成が全く等しい物質はないので、光子相互作用、特に低エネルギー領域における光電効果<sup>\*</sup>が空気のそれとほぼ等しいグラファイト、ベークライトあるいは他のプラスチック材料が用いられる。

#### 偶偶核 even-even nucleus

→ワイゼッカーの質量式 陽子数と中性数とともに偶数の原子核<sup>\*</sup>。偶偶核は奇核<sup>\*</sup>（偶奇核、奇偶核）や奇奇核<sup>\*</sup>に比べて安定なものが多い。

#### 空洞原理 cavity principle

通常、ブラッグ-グレイの空洞原理（Bragg-Gray cavity principle）という。物質中の空洞に導入された気体中に生じるイオン対の数 $J_x$ を測定すれば、その物質の吸収線量 $D_m$ は $D_m = J_x W_x s_{mg}$ で与えられるという原理。ここで $W_x$ は $W$ 値<sup>\*</sup>（一対のイオン対を生成させるのに実効的に必要な放射線エネルギー）であり、 $s_{mg}$ は空洞を通過する二次電子<sup>\*</sup>に対する物質と気体の平均質量阻止能の比である。電離箱<sup>\*</sup>はこの原理に基づいて設計されている。

#### 偶発同時計数 accidental coincidence

同時計数<sup>\*</sup>（コインシデンス計数）法において、コインシデンス回路の分解時間内に、同時現象でないものがコインシデンスしているかのように計数されることをいう。例えばポジトロン断層法<sup>\*</sup>（PET）の場合、別々の場所から放射された2組の消滅 $\gamma$ 線<sup>\*</sup>の片方がたまたま同時に1対の検出器で検出され、計数される場合である。なお1対の消滅 $\gamma$ 線が被験体内

で散乱<sup>\*</sup>し、それらが同時に検出される場合を散乱同時計数<sup>\*</sup>という。偶発同時計数の補正は、遅延回路を用いる方法と、2つの検出器のシングル計数率から偶発同時計数率を計算する方法の2通りがある。

#### 空乏層 depletion layer

半導体ダイオードに逆バイアス電圧をかけたとき、pn接合にできる伝導帯に電子<sup>\*</sup>がほとんど存在しない領域を空乏層という。ここを荷電粒子<sup>\*</sup>が通ると、価電子帯の電子を伝導帯に上げて自由電子<sup>\*</sup>ができると同時に電子の抜けた正孔ができる。この電子-正孔対は、半導体にかかる電場にしたがってそれぞれ正極と負極に移動する。そのとき流れる電離電流をパルス信号として取り出すことができる。これが荷電粒子の計測に用いる半導体検出器<sup>\*</sup>の原理である。

#### クエンチング効果 quenching effect

ある現象が、別の作用によって阻害、抑制される効果をいう。例えば気体の共鳴放射が微量の不純物気体の混入によって抑制される効果、蛍光体<sup>\*</sup>の発光効率が温度上昇や不純物の混入、発光中心濃度の増大によって減少する効果（消光）、あるいはGM計数管<sup>\*</sup>で気体の放電が異種気体の混入によって抑制される効果などがある。結晶中の原子<sup>\*</sup>で、電子<sup>\*</sup>の軌道角運動量<sup>\*</sup>に伴う磁気モーメント<sup>\*</sup>が強い結晶場の作用によって消失する効果を指すこともある。

#### クォーク quark

標準模型においてレプトン<sup>\*</sup>とともに物質を構成する基本粒子。スピン1/2のフェルミ粒子で、強い力の相互作用をする。アップ(u)、ダウン(d)、ストレンジ(s)、チャーム(c)、ボトム(b)、トップ(t)の6種類のクォークがあり、反粒子である反クォーク(antiquark)もそれぞれに対応して6種類( $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}, \bar{c}, \bar{b}, \bar{t}$ )ある。

u, c および t の電荷は  $+(2/3)e$  であり, d, s および b の電荷は  $-(1/3)e$  である。クォーク 3 個でバリオン<sup>\*</sup> (陽子<sup>\*</sup> や中性子<sup>\*</sup>) を構成し, クォークと反クォークの対で中間子<sup>\*</sup> を構成する。陽子, 中性子および  $\pi^+$  中間子のクォーク構成はそれぞれ uud, udd および  $u\bar{d}$ , である。1964 年に M. Gell-Mann と G. Zweig が独立にその存在を理論的に予測し, 1968 年から 1977 までの間に 5 種類のクォークが発見された。最も重い t は 1995 年に米国の Fermilab で発見された。u, d, s, c, b および t の質量はそれぞれ 5 MeV, 10 MeV, 100 MeV, 1.5 GeV, 4.7 GeV および 178 GeV である。

### クライン - 仁科の式

#### Klein-Nishina formula

自由電子<sup>\*</sup> に対するコンプトン散乱による電磁波<sup>\*</sup> (X 線<sup>\*</sup>,  $\gamma$  線<sup>\*</sup>) の散乱断面積を与える式。1928 年に O. Klein と仁科芳雄がディラック方程式を用いて導いた。古典的電子半径を  $r_0$  とすれば, 振動数  $\nu$  の入射光子の静止している電子<sup>\*</sup> によるコンプトン散乱の全断面積は

$$\sigma = 2\pi r_0^2 \left[ \frac{1+\gamma}{\gamma^3} \left\{ \frac{2\gamma(1+\gamma)}{1+2\gamma} - \log(1+2\gamma) \right\} + \frac{1}{2\gamma} \log(1+2\gamma) - \frac{1+3\gamma}{(1+2\gamma)^2} \right]$$

となる。  $\gamma$  は入射光子のエネルギーを電子の静止エネルギーで除した値。

### クラスター崩壊 cluster decay

原子核<sup>\*</sup> の中に存在するクラスターの状

態が, 様々な相互作用により変化すること。ここでクラスターとは, 原子核中で一部分の核子<sup>\*</sup> が結びつき, 1つの粒子のように振る舞うものであり,  $\alpha$  粒子<sup>\*</sup> や重陽子<sup>\*</sup> などの重粒子を指す。

### クリアランスレベル clearance level

放射性物質<sup>\*</sup> による汚染の有無を区分するレベル。原子炉施設などから出る廃棄物のうち, あるレベルを超えないものを「放射性物質として扱う必要がない物」とする。原子力安全委員会<sup>\*</sup> が, 原子力利用に伴い発生する廃棄物などの安全かつ合理的な処理, 処分および再利用の観点から検討を進めている。

### クレブシュ - ゴルダン係数

#### Clebsch-Gordan coefficient

量子力学系の角運動量の合成で用いられる係数。ウイグナー係数, ベクトル結合係数ともいう。

### グローブボックス glove box

放射性物質<sup>\*</sup> を閉じ込め, 安全に取り扱うための密閉容器。放射性物質による汚染の防止および取り扱う物質を大気や湿気から隔離するために用いる。容器の側面にはゴムまたはプラスチック製の作業用グローブを取り付け, 側壁の一部を透明にして内部を透視できるようにする。例えばプルトニウム取り扱い用のグローブボックスは, プルトニウムが外部に漏れることを避けるため気密になっており, ボックスの内部を常時水柱 30 mm 程度の負圧に保持する。

### 群分離 group separation

→核種分離

**蛍光 fluorescence**

→ 燐光 放射線<sup>\*</sup> 照射によって、物質を構成する原子<sup>\*</sup>・分子中の電子<sup>\*</sup> が一旦励起された後、励起状態<sup>\*</sup> から基底状態に戻る際、過剰のエネルギーは光または熱として放散される。このとき放出される光を蛍光という。

**蛍光 X 線分析 X ray fluorescence analysis**

物質に X 線<sup>\*</sup> を照射することによって放出される構成原子に固有なエネルギーをもつ特性 X 線<sup>\*</sup> (これを蛍光 X 線と呼ぶ) のエネルギーと強度を測定することによって、物質の構成元素を定性、定量分析する方法。蛍光 X 線のエネルギーを決定する分光系はブラッグの法則により分光する方法 (波長分散型) と高いエネルギー分析能力をもつ半導体検出器<sup>\*</sup> を使用する方法 (エネルギー分散型) の 2 種類に分類される。

**蛍光収率 fluorescent yield**

“蛍光<sup>\*</sup>” の場合には、蛍光体<sup>\*</sup> にエネルギーが与えられて励起状態<sup>\*</sup> が出来たとき、それから蛍光が放出される割合。蛍光量子収率ともいう。“蛍光 X 線<sup>\*</sup>” の場合には、原子<sup>\*</sup> の内殻軌道に空位ができたとき、オージェ電子<sup>\*</sup> ではなく蛍光 X 線<sup>\*</sup> が放出される割合。

**蛍光体 fluorescent substance**

蛍光<sup>\*</sup> を発する物質系の総称。

**軽水炉 light water reactor**

→ 沸騰水型原子炉 → 加圧水型原子炉  
減速材<sup>\*</sup> と冷却材<sup>\*</sup> に軽水 (H<sub>2</sub>O) を使用する発電用原子炉。沸騰水型 (BWR) と加圧水型 (PWR) がある。

**計数効率 counting efficiency**

線源から放出された放射線<sup>\*</sup> の数に対する検出器によって計測された数の比。線源が検出器を見込む立体角、線源と検出器との間に存在する吸収体、検出器に入

射した放射線のうち検出される割合 (固有計数効率) などに依存する。

**計数誤差 counting error**

放射線測定器によって計測された値が含む誤差。

**計数値積算法**

counting value integration method

→ コベル法

**k<sub>0</sub> 法 k<sub>0</sub> method**

中性子放射化分析において、放射化<sup>\*</sup> に関係する因子 (k<sub>0</sub> 値) を定数として与えることによって目的元素を精度よく定量する方法。放射化された核種<sup>\*</sup> からの  $\gamma$  線強度から元素<sup>\*</sup> を定量するとき、核種の生成量は同位体存在比、中性子吸収断面積、生成放射性核種の半減期<sup>\*</sup>、 $\gamma$  線分岐比などの核データ、および中性子フラックス、熱中性子<sup>\*</sup> と熱外中性子の寄与の比などの照射場データから求まるが、これらを代入して放射化量を見積もると誤差の蓄積によって分析精度が低下する。k<sub>0</sub> 法では、金などの標準を試料と同時に照射し、その k<sub>0</sub> 値の比から目的元素を精度よく定量する。全ての目的元素を含む標準試料を用いることなく、多元素同時分析を可能とする。

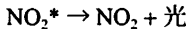
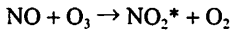
**計量管理 material accountancy**

ウランやプルトニウムなどの核燃料物質<sup>\*</sup> の核兵器<sup>\*</sup> への転用を防ぐため、その数量を厳重に管理すること。再処理施設や燃料加工施設などの核燃料物質取扱施設では、国内法により定められた計量管理規程に従い、同所への搬入・搬出量や施設内での所在と数量を絶えず把握し、国および IAEA の査察に対応できるように計量管理を行なう。

**ケミルミネッセンス chemiluminescence**

化学反応に伴うエネルギーによってつくられる電子励起状態の原子<sup>\*</sup> や分子が基

底状態にもどる際に光を放出すること。化学発光ともいう。例えば、一酸化窒素(NO)と過剰のオゾン(O<sub>3</sub>)との反応で生成する励起状態<sup>\*</sup>の二酸化窒素(NO<sub>2</sub><sup>\*</sup>)はおよそ1200 nmの波長の光を放出する(次式)。



この光の量を測定することによってNOを定量することができる。ケミルミネッセンスに基づく分析法は通常高感度であると同時に励起装置が不要であり、光電子増倍管<sup>\*</sup>などの検出器だけで測定が可能である。蛍が発する光もケミルミネッセンスによるもので、アデノシン3リン酸(adenosine triphosphate, ATP)のエネルギーを利用して酵素ルシフェラーゼ(luciferase)がルシフェリン(luciferin)を分解して励起状態の酸化ルシフェリンを生成し、その励起状態の緩和の際に黄緑色(565 nm)の光を放出する。

### ゲルマニウム(Ge)半導体検出器

#### germanium semiconductor detector

ゲルマニウムの単結晶を検出素子として用いる放射線検出器<sup>\*</sup>。n型ゲルマニウム半導体とp型ゲルマニウム半導体を接合して電圧をかけると、内部に荷電担体のない空乏層<sup>\*</sup>ができる。この層にγ線<sup>\*</sup>などの電離放射線<sup>\*</sup>が入射するとイオン化が起き、生成した正負の電荷(電子<sup>\*</sup>および正孔)は自身の電荷と反対の極にそれぞれ素早く移動して電気信号を与える。電離箱<sup>\*</sup>の中性気体に相当する空乏層は、固体であるゲルマニウム半導体では気体に比べて高い密度を有し、電離能の小さい放射線も高感度かつ高いエネルギー分解能<sup>\*</sup>で検出できる。

### 研究用原子炉 research reactor

→研究炉

### 研究炉 research reactor

→原子炉 核分裂<sup>\*</sup>により発生する中性

子<sup>\*</sup>を研究に利用する原子炉<sup>\*</sup>。理工学、医療、産業での利用および教育、人材育成などの役割を有する。炉心<sup>\*</sup>の核特性研究用の臨界実験装置あるいは高温ガス技術やナトリウム冷却技術開発のための試験炉(実験炉)は狭義の研究炉に含めない。わが国の代表的な研究炉に、重水減速軽水冷却型のJRR-3Mや軽水減速軽水冷却プール型のJRR-4(いずれも東海村の日本原子力研究開発機構内)、近畿大学原子力研究所のUTR-KINKI、京都大学原子炉実験所のKUR、東京大学の高速中性子源炉弥生などがある。

### 原子 atom

→元素 物質の構成要素で原子核<sup>\*</sup>と電子<sup>\*</sup>から成り、10<sup>-10</sup> m程度の大きさを有する。

### 原子核 nucleus

原子<sup>\*</sup>の中心部にあり、まわりの電子<sup>\*</sup>とともに原子を構成する複合粒子。核子<sup>\*</sup>すなわち陽子<sup>\*</sup>と中性子<sup>\*</sup>とから成り、核子間にはたらく核力<sup>\*</sup>によって結合状態が保たれる。大きさは10<sup>-15</sup> m程度であり、原子核<sup>\*</sup>の種類によらずほぼ一定の非常に大きな密度を有する。原子核は陽子数(Z)に比例する陽電荷(Ze)をもつ。Zは原子番号<sup>\*</sup>に等しくZが同じものは同種の元素<sup>\*</sup>に対応し、そのなかで中性子数(N)が異なるものを同位体<sup>\*</sup>という。原子核は陽子数と質量数<sup>\*</sup>A(=Z+N)によって核種<sup>\*</sup>と規定され、元素記号をXとすると、通常<sup>\*</sup>Xと表わす。

### 原子核乾板法 emulsion plate method

放射線測定法の一つ。高濃度の臭化銀を含む写真乳剤をアクリル板などに塗布し乾燥させたもの。検出原理は基本的に写真フィルムと同様で、α粒子<sup>\*</sup>や電子<sup>\*</sup>などの荷電粒子<sup>\*</sup>が乾板を通過するとき乳剤中の物質が電離<sup>\*</sup>して発生する電子が銀イオンを還元する。現像液で乾板を処理すると、荷電粒子の飛跡が銀粒子

による黒い線として目視できる。

### 原子核準位密度 nuclear level density

原子核<sup>\*</sup>の単位エネルギー当たりのエネルギー準位<sup>\*</sup>の数。準位密度  $\rho$  は励起エネルギー  $E$  の増加にともない指数関数的に増加し、最も単純な原子核モデルであるフェルミ気体模型<sup>\*</sup>を用いると、近似的に次式で表される。

$$\rho(E) \approx C \exp(2\sqrt{2V(aE)})$$

ここで  $C$  および  $a$  は定数。  $a$  は準位密度パラメータと呼ばれ質量数<sup>\*</sup>  $A$  に比例する量で、実験値の  $a \approx A/8 \text{ MeV}^{-1}$  が用いられる。原子核の準位密度は低エネルギーの核反応<sup>\*</sup>、たとえば原子炉内での反応の評価・予測などに際して重要な物理量である。

### 原子核反応 nuclear reaction

→核反応

### 原子核物理学 nuclear physics

核物理学ともいう。原子核<sup>\*</sup>の構造や性質、核反応<sup>\*</sup>の機構などを物理的手法に基づいて研究する物理学の一分野。同様の課題を化学的視点で研究する分野を核化学<sup>\*</sup>というが、核物理との区別はむずかしい。放射化学<sup>\*</sup>の分野では、1938年にドイツの化学者ハーン (O. Hahn) とシュトラスマン (F. Strassmann) が中性子<sup>\*</sup>によるウランの核分裂<sup>\*</sup>を発見し、核物理の進展に大きく貢献した。ハーンはこの発見で1944年にノーベル化学賞を受賞した。

### 原子間力顕微鏡

#### atomic force microscope (AFM)

鋭い先端を有するカンチレバーと呼ばれる針のような部分と試料表面との間に生ずる斥力または引力(原子間力)が一定になるように、カンチレバーの高さ方向の位置を制御しながら試料表面を走査することにより、表面の形状を観察する手法。カンチレバーの背面にレーザー光を当て、その反射光を光検出器

(photodetector) でとらえカンチレバーの位置を決定し、画像化する。原子レベルの分解能での表面観察が大気圧下で可能であり、導電性試料のみならず高分子などの絶縁物質にも適用できる。

### 原子質量単位 atomic mass unit (amu)

炭素-12 ( $^{12}\text{C}$ ) 原子1個の質量を12とし、その12分の1を1uとして表す質量単位。  
 $1 \text{ u} = 1.66053873 \times 10^{-27} \text{ kg} = 931.494 \text{ MeV}$  である。

### 原子爆弾 atomic bomb

→核兵器

### 原子番号 atomic number

元素<sup>\*</sup>の識別番号で、原子核<sup>\*</sup>中の陽子<sup>\*</sup>の数に等しく、中性原子の核外電子の数にも等しい。記号は  $Z$ 。原子<sup>\*</sup>の化学的性質は主に核外電子の数で決まるので、元素の分類表(周期表<sup>\*</sup>)において各元素は原子番号順に配置される。

### 減弱係数 attenuation coefficient

→吸収係数

### 検出効率 detection efficiency

→計数効率 放射性核種<sup>\*</sup>の壊変数に対する実際の計数値の百分率。効率がわかれば、計数値から壊変率すなわち放射能<sup>\*</sup>を求めることができる。

### 原子量 atomic weight

元素<sup>\*</sup>の相対原子質量(relative atomic weight)。1961年に、元素の原子量は、質量数<sup>\*</sup>12の炭素( $^{12}\text{C}$ )の質量を12とし、これに対する相対値とすると定められた。原子<sup>\*</sup>の質量は核種<sup>\*</sup>によって異なるが、大部分の元素について同位体<sup>\*</sup>の存在比は一定なので、各元素ごとに平均した原子量を設定することができる。すなわち、原子量  $M$  は、 $M = \sum a_i m_i$  で与えられる ( $a_i$  はある元素の安定同位体<sup>\*</sup>  $i$  の存在比、 $m_i$  はその原子質量)。例えば、塩素の安定同位体には  $^{35}\text{Cl}$  と  $^{37}\text{Cl}$  があり、それぞれの存在比は75.77%と24.23%であるから、塩素の原子量は35.45である。

国際純正・応用化学連合 (IUPAC) の原子量および同位体存在度委員会 (CAWIA) は質量分析法などで新しく測定されたデータの収集と検討を行い、原子量表 (Standard Atomic Weights) を発表している。これを受けて、日本化学会原子量小委員会は、その表をもとに毎年4月に原子量表を発表している。

### 原子力安全委員会

**Nuclear Safety Commission of Japan (NSC)**  
1978年原子力基本法<sup>\*</sup>の改正、原子力委員会<sup>\*</sup>設置法および原子力安全委員会設置法ならびに内閣府設置法に基づいて設置された。文部科学省、経済産業省などの行政庁からの独立性や中立性が保たれるよう、内閣府に置かれている。原子力の安全確保に関する知的基盤の整備、原子力施設の安全確保、原子力災害対策および原子力安全に関する国民との対話の促進の4政策目標を掲げている。委員は、内閣総理大臣が国会の同意を得て任命する5名。

### 原子力委員会

**Atomic Energy Commission (AEC) [1,2]**  
**Atomic Energy Commission of Japan[3]**  
[1] 1946年1月原子力の軍事的利用を管理し平和的開発を促進する目的で国連内にできた委員会であるが、1952年に国連軍縮委員会に吸収された。[2] 原子力の研究、開発、立法、政策を企画、審議、決定、管理する政府機関で、原子力の開発を行っている国々はほとんどこの名称の委員会をもっている。[3] わが国の原子力委員会。1956年1月1日に原子力基本法<sup>\*</sup>および原子力委員会設置法に基づいて、長期計画の策定をはじめ我が国の原子力政策の基本的枠組みなどについて企画、審議し、決定することを目的として内閣府に設置された。5名の委員で構成される。

### 原子力基本法

### Atomic Energy Fundamental Act

1955年12月19日公布、法律186号。原子力の研究、開発および利用を推進して、エネルギー資源を確保し、学術の進歩と産業の振興とを図り、人類社会の福祉と国民生活の水準向上に寄与することを目的としている。原子力に関する基本方針については、第2条に「原子力の研究、開発および利用は平和目的に限り、安全の確保を旨として、民主的な運営の下に、自主的に行うものとし、その成果を公表し、進んで国際協力に資するものとする」と明記されている。これがわが国の原子力3原則 (平和・民主・自主) となっている。

### 原子力政策大綱

#### Framework for Nuclear Energy Policy

従来の原子力長期計画<sup>\*</sup>が名称変更されたもので、10年程度の期間を目安とする国の原子力政策の基本方針。2005年10月11日に原子力委員会<sup>\*</sup>で決定され、同14日に閣議決定された。

### 原子力船

#### nuclear ship または atomic-powered ship

原子炉<sup>\*</sup>を駆動機関 (動力源) とする船舶。核燃料<sup>\*</sup>を使用するので少ない燃料積載量で高出力と長い航続距離が得られ、しかも核燃料の燃焼に酸素を必要としないという利点をもつため、航海条件のよい潜水船としての運行が可能であり、現存する原子力船舶の多くは潜水艦である。一般商船として、原子力砕氷船レーニン号 (旧ソ連、1959年)、原子力貨客船サバナ号 (米国、1962年)、鉍石貨物運搬船オットー・ハーン号 (旧西ドイツ、1968年) が建造され、実験航海あるいは商業航海が行なわれた。わが国では、日本原子力船開発事業団で1969年6月に貨物船むつを進水させた。1974年8月に原子力商船として初臨界を達成したが、9月に原子炉出力を1.4%に上

昇させた時点で原子炉ハッチ付近で放射線漏れ(警報設定値 0.1 mR/h)が検知され、試験は中止された。遮蔽体改修工事の後、洋上試験と実験航海を 1991 年 12 月まで行ない、1992 年 1 月に原子炉を停止しその役目を終えた。

## 原子力長期計画

### Long Term Plan for Atomic Energy

正式名称は「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」で、原子力委員会\*が 1956 年から概ね 5 年ごとに策定してきた。2005 年に、「原子力政策大綱」に改められた。

## 原子力発電

nuclear power generation または atomic power generation

原子炉\*で発生する核分裂\*エネルギーを利用する発電。火力発電と同様に連続定負荷運転が可能であるが、固定費が高く燃料費が安いという経済的特性からベース供給力に適した電源である。また、発電の段階で二酸化炭素を排出しない特徴をもつ。わが国の商業用原子力発電は、2006 年 1 月時点で 55 基が運転中、1 基が建設中であり、その発電量は国内総発電量の約 30%強を占める。

## 原子炉 nuclear reactor

制御された核分裂連鎖反応\*が持続できるように燃料棒\*、制御棒\*その他の原子炉構成材料を配置した装置。動力利用と非動力利用に大別される。動力利用は実用炉(発電、船や宇宙用ロケットなどの推進、製鉄、海水淡水化、化学工業、暖房など)と開発試験炉(実験炉、原型炉)に分類され、非動力利用は生産炉(核燃料プルトニウムやラジオアイソトープの生産)および研究炉\*(一般研究、材料試験、医療、教育訓練など)に分類される。動力利用炉において、冷却材\*を高温・高圧に保持するため原子炉構成材料を一つの容器内にまとめて収容する炉型を圧

力容器型炉という。形式で分類すると、軽水炉\*、重水炉\*、高温ガス炉\*、高速炉などに分類される。軽水炉には、加圧水型原子炉\*(PWR)と沸騰水型原子炉\*(BWR)がある。いくつかの原子炉事故をきっかけに、固有の安全性をもつことを設計の理念とする固有安全炉\*が提案されている。

## 原子炉压力容器 pressurized vessel

→压力容器

## 原子炉等規制法

### The Nuclear Reactor Regulation Law

正式には「核原料物質、核燃料物質及び原子炉\*の規制に関する法律」といい、1957 年に定められた。原子力基本法\*の精神に則り、核原料物質、核燃料物質および原子炉\*に関し、(1) 平和利用に限定、(2) 計画的利用実施の確保、(3) 災害防止と安全確保のための規制を定めている。国際規制物資\*に関し、原子力の研究開発および利用に関する条約、その他の国際約束を実施するための規制も定めている。

## 原子炉物理学 reactor physics

原子力工学あるいは原子炉工学の基礎となる学問分野。原子炉\*の設計や炉心解析、安全性研究などに不可欠である。

## 元素 element

→原子 化学元素(chemical element)ともいう。原子番号\*によって分類した原子\*の種類であり、同一原子番号をもつ原子の集合を指す。現在、原子番号 1 の水素(H)から原子番号 111 のレントゲニウム(Rg)までの元素に名称と記号が定められている。そのうち、原子番号 43 のテクネチウム(Tc)と 61 のプロメチウム(Pm)を除き、92 番のウラン(U)までの 90 種の元素が天然に存在する。原子番号 93 のネプツニウム(Np)以降は加速器\*などを利用してつくられた人工元素であり、最近では原子番号 112 から 116 まで



と118番元素の合成が報告されている。

### 減速材 moderator

核分裂<sup>\*</sup>によって発生する高速中性子<sup>\*</sup>を遅い中性子<sup>\*</sup>(熱中性子<sup>\*</sup>)にまで減速するために使用する原子炉構成材料の一つ。ウラン-235 ( $^{235}\text{U}$ )は熱中性子と衝突すると核分裂し易い性質があるので、核分裂を効率よく起こさせるために、高速中性子を減速させる。減速材には、中性子の速度を散乱<sup>\*</sup>によって落とす減速能力が優れ、中性子の吸収が少ない物質が望ましい。このための被衝突原子として軽い原子<sup>\*</sup>が望ましく、軽水素、重水素、黒鉛、ベリリウムなどから成る物質が用いられる。軽水( $\text{H}_2\text{O}$ )は安価で、入手が容易で取扱技術も確立されているので軽水炉<sup>\*</sup>で広く使われている。

### 減損ウラン depleted uranium

→劣化ウラン 核燃料<sup>\*</sup>として使用した

濃縮ウラン<sup>\*</sup>中の $^{235}\text{U}$ の濃度が、核分裂<sup>\*</sup>のため当初濃縮度(3%程度)より減少したもの。減損ウランは再濃縮して軽水炉<sup>\*</sup>の燃料に再利用できる。濃縮工程で排出される廃材の劣化ウラン<sup>\*</sup>は $^{235}\text{U}$ を0.2%程度しか含まない。

### 現地査察 on-site inspections (OSI)

包括的核実験禁止条約<sup>\*</sup>違反の疑いが発生した場合、それを検証するために対象地域で実施する調査。査察団によって、上空飛行などによる目視、ビデオおよび写真撮影、マルチスペクトル画像撮影、 $\gamma$ 線測定とそのエネルギー解析、環境試料の採取と分析、受動的な地震学的余震の監視、共鳴地震計測および能動的な地震探査、磁場および重力場調査、地中レーダー測定、電気伝導度測定、掘削による放射性試料の採取・分析などが行われる。

## こ

### コールドホール炉 Calder Hall reactor

英国のカンバーランド州コールドホールに建設された原子炉<sup>\*</sup>をプロトタイプとする天然ウラン黒鉛減速ガス冷却型の原子炉であり、プルトニウムの生産を主目的とし、電力の生産を従とする。発電を主目的とする改良コールドホール炉は、核燃料<sup>\*</sup>の被覆材にマグノックス(magnox)を用いるガス冷却炉であり、マグノックス炉とも呼ばれる。日本原子力発電(株)の東海1号炉はマグノックス炉である。マグノックスとはマグネシウム合金の一種で、マグネシウムにアルミニウム、ベリリウムなどが少量添加されている。酸化しないマグネシウムという英名に因んだ名である。この原子炉では核燃料に天然ウランを、減速材<sup>\*</sup>と反射材<sup>\*</sup>に黒鉛を、

冷却材<sup>\*</sup>に炭酸ガスを用いる

### コールドフィンガー cold finger

半導体検出器<sup>\*</sup>や赤外線検出器の感知素子を適切な温度(77 K以下)に保つため、検知器の組立底部に装備する低温冷却部品を指す。液体ヘリウムを使用する極低温での試料冷却を実現するミニチュレータや連続流型クライオスタットなどに用いられる。

### 高温ガス炉

high temperature (gas) reactor (HTR)または high temperature gas-cooled reactor (HTGR) 高温ガス冷却炉ともいう。英国などで開発された黒鉛減速-炭酸ガス冷却天然ウラン炉(コールドホール炉<sup>\*</sup>)を原型として発展させた黒鉛減速-ヘリウム冷却炉。減速材<sup>\*</sup>と炉内構造材には熱に強い

黒鉛を用い、冷却材としてヘリウムを使用する。核燃料（濃縮ウランやトリウムの酸化物）を熱に強い炭素や炭化ケイ素で被覆した被覆粒子燃料を用いる。この燃料粒子を集合して核燃料要素とする方式に、球状燃料要素とブロック型燃料要素の2種類があり、いずれも黒鉛粉と混合焼結成形したものである。球状燃料の交換は原子炉運転中に連続的に行い、ブロック型燃料は原子炉停止時に交換する。炉心で発生する熱はヘリウムで輸送し、出口ガス温度700℃以上という他の形式の原子炉では得られない高温を得ることができ、安全性にも優れている。水素製造、合成燃料製造プロセスなどの化学プロセス用熱源、排熱を利用するガスタービン・蒸気タービン発電、地域暖房など多段階に複数の用途に利用できる炉型である。わが国では、日本原子力研究開発機構の高温工学試験研究炉（HTTR）が1998年に初臨界を達成し、出力上昇試験を経て各種試験研究に用いられている。

#### 光化学反応 photochemical reaction

→放射線化学 光照射によって起る化学反応。可視光または紫外光を照射することによって物質の軌道電子が励起され、その結果、分解、合成、異性化、酸化、重合などの反応が起こる。放射線化学反応では、エネルギーの高い電磁波（X線、γ線）や荷電粒子による励起やイオン化により様々なレベルに誘起されるのに比べて、光化学反応では入射する光エネルギーに対応した励起のみが起こるので、反応の選択性が高く解析も容易である。

#### 光子 photon

→素粒子 電磁波（光）を粒子と捉える場合の名称で、力を伝えるゲージ粒子の一つ。エネルギーは  $E = h\nu$  ( $h$ , プランク定数;  $\nu$ , 振動数) で表わされる。光子であるγ線と物質の相互作用には光

電効果、コンプトン効果および電子対生成がある。

#### 高速増殖炉 fast breeder reactor (FBR)

高速中性子による核分裂連鎖反応を利用する原子炉。原子炉内で消費される核燃料よりも、原子炉内で同時に生産される核燃料の方が多くなるように設計される。核燃料としてMOX燃料（ウラン-プルトニウム混合酸化物燃料）を使用し、減速材を使用せず高速中性子によるプルトニウムの核分裂を利用する。新たな燃料の生産は、 $^{238}\text{U}$ を親物質とする  $^{238}\text{U} + n \rightarrow ^{239}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Np} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$  なる反応による。生成した $^{239}\text{Pu}$ の一部が中性子を捕獲すると $^{240}\text{Pu}$ ができるが、これも核分裂性物質である。親物質をブランケット燃料と称し、増殖ブランケットは炉心周辺区画に置かれる。ウラン系の親物質として劣化ウランが用いられる。わが国が研究・開発を進めている「もんじゅ」は高速増殖炉の原型炉であり、炉内で核分裂により消費される核分裂性物質（ $^{235}\text{U} + ^{239}\text{Pu}$ ）に対する新たに生産される核分裂性物質（ $^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$ ）の比（増殖比）が約1.2になる増殖性能を目標としている。冷却材として液体金属ナトリウムを使用することにより冷却系を高温低圧で運転できる利点はあるが、化学的に活性なナトリウムの管理が重要な課題である。

#### 高速中性子 fast neutron

速い中性子。区分は明確でないが、100 keV程度以上の運動エネルギーをもつ中性子を指す。核分裂で発生する中性子は、十数 MeV からおよそ数 meV 以下までの幅広いエネルギー範囲にある。それらはエネルギーが高い順に高速中性子、熱外中性子、熱中性子、冷中性子と呼ばれる。コッククロフト-ウオルトン加速器、バン・デ・グラフ加速器、サイクロトロン加速器などを利用して高速

中性子を発生させることもできる。日本原子力研究開発機構の大強度陽子加速器<sup>\*</sup> (J-PARC) では、大ビーム強度の高速中性子 (5MW 程度) を発生させる。

**光電効果 photoelectric effect**

光子<sup>\*</sup> が物質に入射したとき、その構成原子から軌道電子<sup>\*</sup> が放出される現象。放出される電子<sup>\*</sup> を光電子<sup>\*</sup> という。軌道電子の束縛エネルギーを  $E_0$  とすると、光電子の運動エネルギーは  $E_e = h\nu - E_0$  ( $h$ , プランク定数<sup>\*</sup>;  $\nu$ , 光の振動数) で与えられる。

**光電子 photoelectron**

→光電効果 物質に光 (電子殻の束縛エネルギー以上の十分なエネルギーをもつ光子<sup>\*</sup>) を照射したとき、光電効果<sup>\*</sup> によって原子<sup>\*</sup> から放出される電子<sup>\*</sup>。

**光電子増倍管 photomultiplier**

光電子<sup>\*</sup> により光電流を増幅させる 2 次電子増倍管。図のように光子<sup>\*</sup> 1 個が光電子増倍管に入射すると、(1) アルカリ金属元素を含む蒸着膜から成る光電面での光子の電子<sup>\*</sup> への変換、(2) 直流電圧が印加された光電面と第 1 ダイノード間での電子の集束、加速、(3) 電子のダイノードへの衝突による数倍個数の二次電子<sup>\*</sup> の発生、(4) 次のダイノードに向かった電子の集束、加速、およびダイノードでのさらに数倍の二次電子の発生、(5) 多段のダイノードでの過程、(4) の繰り返し

返しによる多量の二次電子の発生、(6) 集電極<sup>\*</sup> (アノード) での大きな電流信号の獲得、の過程を経て、光子の数に比例した大きな増幅電流信号が得られる。ダイノードの電極表面物質として BeO, MgO, Cs<sub>3</sub>Sb, GaP などが用いられる。10 万～100 万倍程度の高い増幅率が得られると同時に、雑音が少ないという特徴をもつ。図参照。

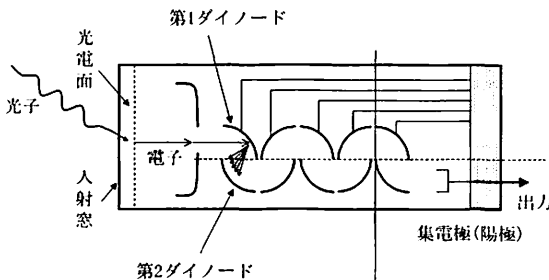
**公認実験施設**

**certified radionuclide laboratory**

包括的核実験禁止条約機関<sup>\*</sup> より認証を受けて放射性核種監視観測所を支援する施設。観測所の品質管理のための測定、核爆発起源の核分裂生成核種の有無を検証するための詳細測定を行う。世界に 16 カ国 16 施設があり、東海公認施設が日本原子力研究機構内に設置されている。

**後方散乱 back scattering**

一般的に、線源から出る放射線<sup>\*</sup> が線源の周りにある物質によって後方に散乱<sup>\*</sup> される現象をさす。放射線計測においては、この現象により計数値は大きくなる。散乱の様子は線源の保持の仕方や散乱体および支持体と検出器との幾何配置などに依存する。後方散乱がある場合と無い場合との計数率の比を後方散乱係数 (backscattering coefficient) といい、1 より大きな値である。後方散乱係数は、散乱体の原子番号<sup>\*</sup>、厚さ、放射線のエ



光電子増倍管。ボックス型ダイノード光電子増倍管の構造。

エネルギーに依存し、散乱体の厚さとともに増加し、最大飛程付近で飽和に達する。この飽和値を飽和後方散乱係数 (saturated backscattering coefficient) あるいは飽和散乱係数という。この係数は原子番号とともに増加するので、平均原子番号の決定に利用できる。

### 光量子エスケープピーク

#### photon escape peak

$\gamma$ 線スペクトル上で、もとの $\gamma$ 線より0.511 MeVあるいは1.022 MeV低いところに出現するピーク。1.022 MeV以上の $\gamma$ 線がシンチレータや半導体検出器に入射すると、原子核のクーロン場で電子対生成が起こる。このとき生成する陽電子は電子と対消滅して0.511 MeVの $\gamma$ 線を2本放出するが、消滅 $\gamma$ 線が検出器の外に逃げると光量子エスケープピークが出現する。1光量子エスケープピーク (single photon escape peak) と両光量子エスケープピーク (double photon escape peak) がある。図参照。

### 光量子放射化分析

#### light quantum activation analysis

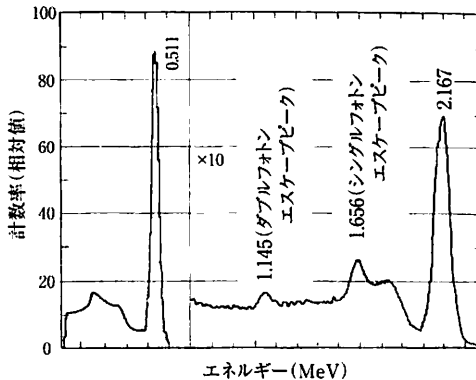
光核反応で生成する核種からの放射線を測定し、試料中の元素を分析す

る方法。光核反応とは、高エネルギーの光子 ( $\gamma$ 線) と原子核との反応である。光子の波長が原子核の大きさに近づくと、双極子共鳴によって光エネルギーを吸収する「巨大共鳴」が起こる。この共鳴が起きるエネルギー領域は、軽核では20数 MeV 強、重核では10 MeV 強である。共鳴励起では原子核から中性子や陽子が1~2個放出される。本法では ( $\gamma, n$ ) 反応が最も多く利用され、次のような特徴を有する分析が可能である。  
 (1) 高エネルギー光子は物質中の透過性が大きく種々のマトリックスの試料全体を放射化できるので、物質全体の情報が得られる。  
 (2) 中性子放射化分析では難点となる特定核種の反応断面積が大きいために起こる自己遮蔽や、強い生成放射能に起因する微量元素分析への妨害が回避できる。

### 高レベル放射性廃棄物

#### high level radioactive waste (HLW)

→ 深地層処分 使用済核燃料の再処理工程において排出される放射能レベルの高い廃液、またはその固化体をいう。再処理工程で硝酸溶液からウランとプルトニウムを抽出したのちに排出され



光電子エスケープピークの例。

Nal(Tl) シンチレーション検出器による  $^{38}\text{K}$  ( $\gamma$ 線のエネルギー: 2.167 MeV) の $\gamma$ 線スペクトル。

る溶液で、核分裂生成物<sup>\*</sup> (FP)の大部分とNp, Am, Cmなどのアクチノイド元素を含む。高いレベルの放射能<sup>\*</sup>を有し、大量の崩壊熱<sup>\*</sup>を出す。100万kW級原子力発電所から年間約30トンの使用済核燃料が発生し、これを再処理すると約15m<sup>3</sup>の高レベル放射性廃液を生じ、さらにこれをガラス固化すると110Lキャニスターで約30本の固化体が生じる。わが国では、固化体を冷却するため30～50年間貯蔵し、その後地下の深層中に処分(地層処分<sup>\*</sup>)することが計画されている。ガラス固化体<sup>\*</sup>中に含まれる放射能は時間の経過とともに減衰し、1000年後には数千分の1に低下すると見積もられる。その後は、半減期<sup>\*</sup>の長い放射性核種<sup>\*</sup>が残存するが、数万年後にはウラン鉱石<sup>\*</sup>の放射能と同レベルにまで低減する。

#### 黒鉛減速炉 graphite-moderated reactor

減速材<sup>\*</sup>として黒鉛(graphite)を用いる原子炉<sup>\*</sup>。核燃料<sup>\*</sup>および冷却材<sup>\*</sup>の組み合わせによって、天然ウラン黒鉛減速炉、濃縮ウラン黒鉛減速炉、黒鉛減速ナトリウム冷却炉などがある。黒鉛減速炉には英国の黒鉛減速ガス冷却炉(コールドホール炉<sup>\*</sup>)、マグノックス炉、改良型ガス冷却炉(AGR)、旧ソ連邦の黒鉛減速軽水冷却炉など様々な原子炉型があり、諸外国で多くの発電実績を有している。1986年に大事故を起したチェルノブイル原子力発電所4号機は黒鉛減速軽水冷却炉の一つで、旧ソ連邦独特の黒鉛減速沸騰水冷却炉圧力管型炉(RBMK)であった。この原子炉は構造上の特殊性から、制御棒<sup>\*</sup>の挿入に時間がかかること、低出力運転中には出力が増加するとさらに出力が増加する正のフィードバック特性があるなど安全上の課題もあった。事故後国際原子力機関<sup>\*</sup>(IAEA)の勧告を受け、課題改善の努力が払われている。黒

鉛減速ガス冷却炉の中には、北朝鮮が所有しているような出力は小さいものの純度の高いプルトニウムを生産することができるものもある。

#### 国際監視制度

##### international monitoring system

包括的核実験禁止条約<sup>\*</sup>(CTBT)は、締約国の義務として、核兵器<sup>\*</sup>の全ての実験的爆発および他の核爆発を禁止している。仮に、これらが実施された場合には、国際的な監視制度による監視活動と現地査察<sup>\*</sup>により、核爆発の事実を確認する仕組みを規定している。CTBTは米国などの批准が得られず未発効だが、CTBT機構(事務局ウィーン)は核実験<sup>\*</sup>の探知を目的に、地震波、大気中の放射性核種<sup>\*</sup>、海中音波、微気圧振動を測定する国際監視システムの構築を進めている。4種類の監視技術を用いる監視観測所網を設置し、データを国際データセンターに24時間提供するものである。

#### 国際規制物資

##### international restriction goods

原子力の研究開発、利用に関する条約あるいは国際約束に基づく保障措置<sup>\*</sup>の適用およびその他の規制を受ける核原料物質、核燃料物質<sup>\*</sup>、原子炉<sup>\*</sup>などの資材または設備を指す。その使用に当たっては「国際規制物質の使用に関する規制」が適用される。

#### 国際原子力機関

##### International Atomic Energy Agency (IAEA)

1953年の国連総会におけるアイゼンハワー-米国大統領による演説(Atoms for Peace 演説)を直接の契機として、国際原子力機関創設の気運が高まり、国連におけるIAEA憲章の協議を経て、1957年7月29日に発足した。IAEAは原子力の平和的利用を促進するとともに、原子力が平和利用から軍事利用に転用されることを防止することを目的としている。原

子力施設の査察は良く知られているが、IAEAは様々な権限を有している。長年の世界平和への大きな貢献が認められ、2005年にIAEAおよびエルバラダイ事務局長にノーベル平和賞が授与された。

### 国際熱核融合実験炉

#### International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)

1988年に日本、米国、EU、旧ソ連の4極が国際協力で開始した熱核融合炉開発計画において建設するトカマク型実験炉。1990年までの概念設計活動(CDA)、1992年から2001年までの工学設計活動(EDA)、2002年からの調整技術活動(CTA)、そして建設開始までの過渡期活動(ITA)が進められた。ITERは熱出力約50万kWと300秒以上の本格的DTプラズマ燃焼を世界で始めて実現するとともに、大型超伝導コイルやブランケット、中性子工学など将来の核融合炉が必要となる全ての工学技術要素を総合的に試験することを目的とする。2003年以来、六ヶ所村とカダラッシュ(フランス)の間で争われていた建設地は2005年6月28日にモスクワで開催された閣僚級会議で後者に決定した。現在では韓国、中国、インドの3ヶ国が加わり、2015年頃の稼働をめざす。

### 国際放射線単位測定委員会

#### International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU)

放射線と放射性物質の量、単位および測定に関する国際的な統一と規格化を図るための国際組織。1925年の第1回国際放射線医学会議(ICR)で国際X線単位委員会として設立された。現在までに放射線および放射能の量と単位に関する勧告、診断と治療の放射線医学、放射線生物学および工業利用における関連諸量の計測と適用上の適正な手順書作りならびに必要な基礎物理学データの整備を行

うとともに、放射線測定と線量計測上の課題に関連する最新のデータと情報を収集し、現在利用できるものとして最も受け入れられる値および技術を報告書およびICRU定期刊行物として出版している。

### 国際放射線防護委員会

#### International Commission on Radiological Protection (ICRP)

放射線防護に関する勧告を行う国際組織。1928年の第2回国際放射線医学会総会で設置された委員会、第1から第4までの専門委員会が設けられ放射線防護の基本的な考え方、防護基準、放射線防護の方策などの重要な放射線防護の諸問題および課題について検討し、検討結果を勧告あるいは報告(Publication)という形で公表し、各国の放射線防護基準の規範となっている。

### 国内データセンター

#### national data centre (NDC)

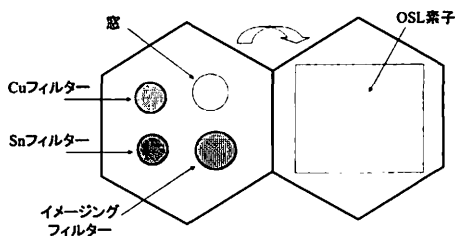
包括的核実験禁止条約(CTBT)の締結国に設置されるデータセンター。わが国では(財)日本気象協会および日本原子力研究開発機構に整備中。条約上の規約規定はないが、国内で取得した監視データを独自に解析し、現地査察の要請があった場合に適切に対応できるよう準備する。また、現地査察の要請があった際に協力することを任務とする。

### 個人被ばく線量計

#### individual exposure dosimeter

個人外部被ばくモニタリングに利用される測定器。ガラス線量計、熱ルミネセンス線量計(TLD)、光刺激ルミネセンス線量計(OSL)、フィルムバッジ、電離箱式線量計、電子式線量計などがあり、使用目的、対象線種などに応じて使い分ける。個人線量計には、1ヶ月ないし3ヶ月間連続して使用し、その測定値を公式な被ばく線量として記録する基本線量計がある。基本線量計は、放射

線作業現場のいろいろな種類とエネルギーの放射線量を測定する目的を有し、複数の素子(マルチエレメント)による測定方式をとる。フィルムバッジ、熱ルミネッセンス線量計、OSL線量計などは電源を必要とせず、また長期間の安定性に優れているので、基本線量計として利用される。図参照。



個人被ばく線量計。市販のOSL線量計の構造。  
OSL素子：炭素を添加した酸化アルミニウム

### 固体飛跡法 solid track method

重い荷電粒子<sup>\*</sup>の検出法の一つ。重荷電粒子である $\alpha$ 線<sup>\*</sup>や核分裂片などがポリカーボネートなどの絶縁性固体中を通過し、その経路近傍において固体に付与するエネルギーが一定の値(しきい値)を超えると、固体中に損傷(飛跡)が形成される。この損傷を化学的に腐食して拡大し、光学顕微鏡を用いて損傷数を数える。中性子<sup>\*</sup>の測定に固体飛跡検出器を使用する場合には、中性子との核反応<sup>\*</sup>によって重荷電粒子を放出するコンバータ(ラジエータともいう)と荷電粒子の飛跡を検出する絶縁性固体を組み合わせて用いる。速中性子の測定にはコンバータとしてポリエチレンフィルムを使用する。

### 黒化作用 blackening action

放射線<sup>\*</sup>により写真フィルムが黒化する作用。フィルム乳剤中に入射した放射線は可視光の場合と同様にハロゲン化銀分

子との相互作用により、乳剤中に飛跡の潜像をつくる。これを現像すると黒化する。黒化度は線量<sup>\*</sup>に比例するので、フィルムバッジ<sup>\*</sup>として被ばく線量<sup>\*</sup>の測定(個人モニタリング)にも使われる。 $\gamma(X)$ 線<sup>\*</sup>、 $\beta$ 線<sup>\*</sup>および熱中性子線などがフィルムバッジに入射する場合、材質の異なるフィルタを通してできるフィルムの黒化度の差を利用して被ばく線量を評価し、かつ放射線の種類および入射エネルギーを推定することが可能である。なお、速中性子の黒化作用はきわめて小さいので、原子核乳剤を塗布した速中性子線フィルムを用いる。速中性子が乳剤、フィルムベースおよび包装材料中の水素の原子核<sup>\*</sup>を反跳<sup>\*</sup>し、この反跳陽子<sup>\*</sup>が乳剤中に飛跡の潜像を生成することを利用する。

### コッククロフト・ウォルトン加速器

#### Cockcroft-Walton accelerator

イギリスの物理学者コッククロフト(J. D. Cockcroft)とウォルトン(E. T. S. Walton)が考案した加速器<sup>\*</sup>。高電圧整流型加速器とも呼ばれる。倍電圧回路と呼ばれる整流回路を用いて発生させる直流高電圧によって強い電場を作り、イオン源から出てきた荷電粒子<sup>\*</sup>を加速する。加速される荷電粒子のエネルギーは最高で2~3 MeVである。1932年に彼らは600 kV整流型加速器によって陽子<sup>\*</sup>を加速してリチウムに当て、2個のヘリウムを発生させる核変換<sup>\*</sup>に成功し、加速器利用の分野が脚光を浴びる契機となった。この功績により両氏は、1951年にノーベル物理学賞を受けた。

### 骨シンチグラフィ bone scintigraphy

シンチレーション検出器<sup>\*</sup>を用いて得られる放射線強度分布を画像化し、骨腫瘍部位などを探る診断法。病巣に集積される性質をもつラジオアイソトープ標識薬剤(<sup>99m</sup>Tc標識リン酸化合物)を患者に注

射し、数時間後にシンチレーション検出器で放射線を測定する。骨腫瘍、骨髄炎、骨折、関節炎などの診断に用いられ、特に悪性腫瘍の骨転移の診断に極めて有用である。

**コヒーレント散乱 coherent scattering**

入射光子の物質による弾性散乱現象のこと。光子が物質に入射した際に、そのエネルギーを損失することなく小角散乱し、その方向を変える散乱現象をいう。

**コベル法 Covell method**

あるエネルギーの放射線を適当なエネルギー分解能を有する検出器により測定すると、通常幅をもつエネルギー分布が観察される。エネルギー分布幅内でエネルギーチャンネルごとの計数値の積算値をそのエネルギーを有する放射線の量とする計数値積算法。この方法では、他の核種からの放射線のピーク分布に重なりがない場合には計算が容易で信頼性の高い結果が得られる。ピークが重なる場合には精度が低下するため、関数適合法という手法が用いられる。

**固有安全炉 inherent safe reactor**

1972年に起きた米国スリーマイルアイランド原子炉(TMI-2)の事故(スリーマイル島事故)を契機として、より安全な原子炉を模索する研究開発の一環として検討されている原子炉概念。炉心構成要素およびその形状から定まる固有の特性により、静的機器のみで安全性を確保できることを特徴とする原子炉。例えば、炉心を強制冷却しなくても自然循環あるいは熱伝導により崩壊熱を除去することができ、あるいは炉心出力が急激に上昇すると負の反応度フィードバックによる出力抑制効果により反応度事故を防止できるような特性を有する。高温ガス炉は、減速材に耐熱性の高い黒鉛を使用するので炉心溶融がなく、冷却材にHeを使用するので核燃料や構

造材との化学反応がなく、固有安全性が高い原子炉といわれている。

**コリメータ collimator**

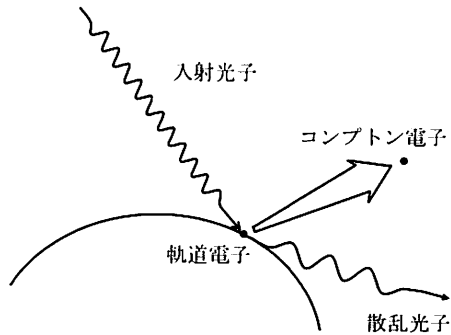
粒子線または放射線を用いる実験の際、ビームを細く絞ってすべての粒子の経路を平行にし、定まった立体角内におさめるようにする装置。可視光や紫外光などの低エネルギー光線に対しては光学ガラス製のレンズが、粒子線や高エネルギー放射線に対しては鉛、鉄、コンクリートなどの遮蔽体を並べて構成するコリメータが用いられる。

**混合酸化物燃料 mixed oxide fuel (MOX)**

ウラン-プルトニウム混合酸化物燃料のことで、MOX燃料ともいう。核分裂性の<sup>235</sup>Uの代わりにプルトニウムを二酸化ウランに少量加えて熱中性子炉の燃料とするプルサーマル燃料と、20%程度のプルトニウムをウランと混合する高速炉用燃料に大別される。プルサーマル燃料の大きさや形は、原子力発電所で使われているウラン燃料と同じである。高速炉が開発段階にある現時点では、MOX燃料を熱中性子炉で使用するプルサーマルが核燃料再処理から発生するプルトニウムの唯一の使い道となっている。

**コンプトン効果 Compton effect**

あるエネルギーをもつ光子(電磁波)が電子と衝突したとき、入射光はより



コンプトン効果の原理



エネルギーの低い散乱光にかわり、電子は反跳電子(コンプトン電子と呼ぶ)として運動エネルギーをもって飛び出す現象。1923年に米国のコンプトン(A. H. Compton)が発見し、1927年にノーベル物理学賞を受賞した。この現象は光と電子の間の弾性衝突であり、衝突の前後において入射光、散乱光および反跳電子の

間でエネルギーと運動量が保存される。それゆえに、コンプトン効果の発見は光が粒子性を有することの証明となった。コンプトン効果の全断面積や散乱光の角度分布はクライン-仁科の式\*で計算できる。入射光のエネルギーが大きくなるほど前方散乱が多くなる。

さ

サーベイメータ survey meter

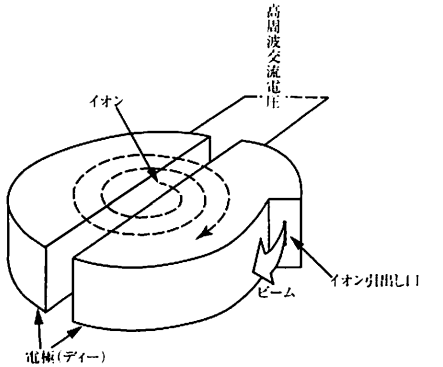
空間線量率または表面汚染の測定を目的とする携帯用放射線測定機器。電離箱\*式、GM管式およびNaIシンチレーション式サーベイメータが一般的である。電離箱式は比較的高 $\gamma$ 線量場に適用しており、エネルギー特性\*も良好である。GM管式は $\alpha$ 線\*以外の放射線\*を検出可能であり、比較的高感度だが高放射線場では窒息現象に注意を要する。NaIシンチレーション式は $\gamma$ 線\*に対して最も高感度であり、低線量場での使用に適するが $\beta$ 線\*は検出しない。それぞれ特性が異なるため、使用環境に応じたサーベイメータを選択する必要がある。

サイクロトロン加速器

cyclotron accelerator

1930年に米国のローレンス(E. O. Lawrence, 1939年ノーベル物理学賞)によって考案された加速器\*。線形加速器\*で高エネルギー粒子を得るには数kmの長さを必要とするが、磁場を用いることによりこの問題を解決した。直流電磁石がつくる一様な磁場に対して垂直な面内に中空のディーとよばれる半円形の電極を2つ向かい合わせて設置し、これに高周波電圧をかける。この電極中に置かれたイオンは円運動を行い、片方の電極

からもう一方の電極に移るたびに加速され、エネルギーが増すとともに回転半径が大きくなっていく。その結果、イオンは2つの電極内をらせん運動しながら円周部に近づき、最終的には外に引き出される。この原理に従ったものは普通型サイクロトロンと呼ばれ、粒子を相対論的効果の少ない数MeVないし数十MeVに加速するのに適している。より高いエネルギーに粒子を加速するためには、軌道半径とともに磁場を変化させるAVFサイクロトロンやリングサイクロトロン、高周波を変化させるシンクロサイクロトロンやシンクロトロンがある。図参照。



サイクロトロン加速器の原理

## 再結合係数 recombination coefficient

電離箱<sup>\*</sup>などに入射した放射線<sup>\*</sup>が気体分子を電離<sup>\*</sup>して陽イオンと電子<sup>\*</sup>の対を生じるとき、電離箱中の電場が弱いと、生成した陽イオンと電子が再結合して分子にもどる。再結合が起こると電離箱の回路に流れる電流が少なくなり、放射線の量またはエネルギーが小さめに評価されることになる。この再結合による陽イオン密度  $N(+)$  と電子もしくは陰イオン密度  $N(-)$  の時間減少率は  $dN(+)/dt = dN(-)/dt = -\alpha \times N(+)\times N(-)$  と記述される。この係数  $\alpha$  ( $<1$ ) を再結合係数と呼ぶ。再結合の起こりやすさを表し気体の種類、温度および圧力に依存する。陽イオンと電子の再結合係数は  $10^{-10}$  程度である。

## 再処理 reprocessing

→核燃料再処理

## 再生係数 buildup factor

→ビルドアップ係数

## 最大許容線量当量

maximum permissible dose (MPD)

→線量当量限度 1958年にICRPによって規定された、特定の期間内に許容しうる被ばく線量<sup>\*</sup>の最大値。例えば放射線作業従事者の全身被ばくについては3 rem / 3ヶ月、皮膚の被ばくについては8 rem / 3ヶ月など。1977年にはICRPによってこれにかわる線量当量限度<sup>\*</sup>の規定が発表され、現在わが国では、これを用いている。

## 最大飛程 maximum range

物質に入射した放射線<sup>\*</sup>が、通り抜けることができる物質の最大の厚さ。単に飛程<sup>\*</sup>ということもある。放射線の種類に依存する。また放射線のエネルギーが高いほど、物質の原子密度が低いほど、あるいは物質を構成する原子<sup>\*</sup>の原子番号<sup>\*</sup>が小さいほど、飛程は大きい。 $\alpha$ 線<sup>\*</sup>は物質と強く相互作用してエネルギー

を失い易いので飛程は短い。エネルギーが  $E$  (MeV) の  $\alpha$  線の空気中の飛程  $R$  (cm) は  $R = 0.323E^{3/2}$  で近似できる。また連続スペクトルのエネルギーをもつ  $\beta$  線<sup>\*</sup>の飛程は、物質中を最大エネルギーの  $\beta$  粒子が直進したときの飛程に相当する。 $\beta$  線の最大飛程  $R_{\max}$  ( $g\text{ cm}^{-2}$ ) とエネルギー  $E_{\max}$  (MeV) との間には  $R_{\max} = 0.543E_{\max} - 0.160$  が成り立つ(フェザーの式<sup>\*</sup>と呼ばれる)。 $\beta$  線の最大飛程は同じエネルギーの  $\alpha$  線の数百倍にも達し、空気中では約150 cm ( $E_{\max}$  が0.5 MeVの時)あるいは約850 cm ( $E_{\max}$  が2 MeVの時)である。

## 再転換 reconversion

核燃料製造工程のひとつ。濃縮工程で濃縮ウラン<sup>\*</sup>(濃縮度2~4%)にした六フッ化ウラン<sup>\*</sup>  $UF_6$  を化学処理により粉末の二酸化ウラン  $UO_2$  に変換する工程。最も代表的な方法は、気体状の  $UF_6$  を純水と反応させてウラニル溶液としたのち、アンモニアを加え重ウラン酸アンモニウム (ADU) 沈殿にするいわゆるADU法。その沈殿を仮焼し、さらに還元して二酸化ウラン粉末を得る。

## サム効果 sum effect

複数の  $\gamma$  線<sup>\*</sup> をカスケードに放出する核種<sup>\*</sup> の  $\gamma$  線スペクトルに、エネルギーの異なる2本の  $\gamma$  線のエネルギーの合計に相当するエネルギーにピークが現れる現象。2本の  $\gamma$  線が測定器の分解時間内の極めて短い時間間隔で放出されると出現する。 $^{60}Co$  の測定では1.17と1.33 MeVの  $\gamma$  線に対応する2つの全吸収ピークのほかに  $1.17 + 1.33 = 2.5$  MeV に相当するサムピーク<sup>\*</sup> が現れる。井戸型検出器などの幾何学的計数効率の高い検出器を用いる場合にサム効果が起こる可能性が増す。空間線量の測定などの際には、線量<sup>\*</sup> を真値よりも低めに見積もることがないようにサム効果の補正が必要である。

### サムピーク sum peak

→サム効果  $\gamma$ 線スペクトル中に観測されるサム効果\*によるピーク。

### 酸化ウラン uranium oxide

ウランの酸化物で、多くの種類が報告されているが、その構造や性質が明らかになっていないものも多い。原子力分野で最も重要な酸化物は軽水炉\*の核燃料\*として用いられる二酸化ウラン  $UO_2$  である。ウランの酸化数は+4で、蛍石構造をとり、空気中でも安定(融点  $2750^\circ C$ 、比重 10.97)である。硝酸や濃塩酸に可溶で、濃硫酸には溶けにくい。一方、空気中で最も安定なウラン酸化物は八酸化三ウラン  $U_3O_8$  であり、他のいかなる酸化物も空気中で  $650^\circ C$  以上で加熱すれば  $U_3O_8$  になる。ウランの酸化数は+4と+6が混在すると考えられており、酸に可溶である。三酸化ウラン  $UO_3$  は酸化数+6の酸化物であり、いくつかの結晶構造をもつが、大部分はウラニル ( $UO_2^{2+}$ ) が酸素により架橋された構造を含む。

### 三体核分裂 ternary fission

核分裂\*において、確率は低いですが、2つの重い原子核\*と軽い原子核の3つに分裂すること。通常の核分裂では、原子核がほぼ同程度の質量数\*をもつ2つの原子核に分裂する。例えば、 $^{235}U$  の核分裂片の大半は質量数がほぼ95と140になるが、約0.3%の割合で三体核分裂が起こり、原子炉中でのヘリウム ( $^4He$ ) やトリチウム ( $^3H$ ) 発生の一因となる。

### g 因子 g-factor

電子\*の軌道運動またはスピンによる角運動量を有するとき、これにより生ずる磁気モーメント\*と角運動量の比、ある

### 3 mm 線量当量

#### 3-millimeter dose equivalent

身体表面から3mmの深さの線量当量\*。目の水晶体の線量当量の指標として用いられ、特に $\beta$ 線\*あるいは40 keV未満のエネルギーを有するX線\*や $\gamma$ 線\*などの透過力の弱い放射線\*を取扱う場合に3mm線量当量の評価を考慮する必要がある。

### 散乱 scattering

粒子線\*や放射線\*が物質に入射、衝突し、その運動方向やエネルギーを変える現象。衝突の前後で入射した粒子の進行方向のみ変わり、エネルギーや運動量が保存される散乱を弾性散乱\*といい、これらが保存されない散乱を非弾性散乱\*という。

### 散乱ガンマ線 scattered gamma ray

$\gamma$ 線\*が物質に入射したときに散乱\*によって生じる $\gamma$ 線。散乱 $\gamma$ 線のエネルギーが変わらず進行方向のみが変わるレイリー散乱\*と、エネルギーと進行方向の双方が変わるコンプトン散乱\*がある。

### 散乱係数 scattering coefficient

入射放射線が物質中を1m進む際に散乱\*される割合。単位は  $m^{-1}$ 。原子番号\*が大きい原子\*で構成される物質中ほど放射線\*は散乱され易く、散乱係数は大きい。

### 散乱同時計数

#### scattering coincidence counting

→偶発同時計数

し

いは外部磁場によるゼーマン効果を持つときこの関係の特徴づける因子。

### G 値 G value

→放射線化学収率

## CTBT 国際検証体制

### CTBT verification regime

包括的核実験禁止条約<sup>\*</sup> (Comprehensive Test Ban Treaty, CTBT) を守るために設立された検証体制。この体制は (1) 地震学的監視, 放射性核種監視, 水中音響監視, 微気圧変動監視をすること (2) 締約国間又は機構と共にこの条約の義務に違反する可能性を協議し説明すること (3) 現地査察<sup>\*</sup> にて核爆発が規定に違反して行われたか可能性を明らかにすること (4) 機構や他の締約国と協力すること, の4つの要素からなる。

### JCO 臨界事故 JCO criticality accident

1999年9月30日, 茨城県東海村 株式会社ジェー・シー・オー (JCO) にて起きた日本で初の臨界<sup>\*</sup> 事故。作業員が多量の被ばくをして2名が死亡し, また周辺の地域にも被ばくした人がいた。JCOは濃縮された六フッ化ウラン<sup>\*</sup> を二酸化ウランにかえる作業を行う会社であるが, この事故のときは, ウラン濃縮度18.8%の硝酸ウラニル水溶液を, 手順書を無視して沈殿槽に制限値の約7倍も投入したため核分裂<sup>\*</sup> が急激に進み臨界になったと考えられている。

### 磁気多重極モーメント

#### magnetic multipole moment

原子核<sup>\*</sup> の中で電荷の流れによって磁気モーメント<sup>\*</sup> が生じるが,  $\gamma$  壊変<sup>\*</sup> の際, 角運動量保存則より壊変前と壊変後の核スピン<sup>\*</sup> の変化に対応して, 放出される $\gamma$  線<sup>\*</sup> の持ち去る角運動量 (多重極) が決っている。それらの壊変<sup>\*</sup> のうち磁気多重極モーメントの変化に由来するものを磁気多極性遷移<sup>\*</sup> といい, M1, M2, M3などの記号で表す。

### 磁気分裂 magnetic splitting

磁場と核磁気モーメント<sup>\*</sup> の相互作用による準位の分裂。核スピン<sup>\*</sup> 量  $I \geq 1/2$  のとき核は磁気モーメント<sup>\*</sup> をもつので,

核位置に磁場があれば許容される遷移則にしたがってエネルギー準位<sup>\*</sup> の分裂が起こる。メスバウアー分光<sup>\*</sup> において, もし励起準位<sup>\*</sup> が核スピンをもっているとき, それに対応したスペクトルが現れるので, 励起準位の磁気モーメントを知ることができる。

### 磁気モーメント magnetic moment

磁石の強さを表す量。磁石の負極から正極の方向を向き磁極の強さを大きさとして持つベクトルで表される。また, 電荷の円運動によっても磁気モーメントが生じ, 電荷の角運動量に磁気モーメントは比例する。奇核<sup>\*</sup> の原子核<sup>\*</sup> は磁気モーメントを持つが, その値は単純なモデルでは予測ができず, 原子核は複雑な構造をしていることを意味している。

### 四極子分裂 quadrupole splitting

核スピン量子数  $I$  が1以上の核は, 核の正電荷の分布が球対称ではなく, 四極子モーメントをもつ。この核四極子モーメントが原子核<sup>\*</sup> の位置にある電場勾配と相互作用 (電気四重極子相互作用と呼ぶ) して, 核のエネルギー準位<sup>\*</sup> の分裂をもたらす。メスバウアー分光<sup>\*</sup> でピークの分裂として観測される。これを四極子分裂と呼び, その大きさは核の周りの電場勾配の目安になる。

### 自己拡散 self diffusion

拡散現象の一種であり, 同種粒子からなる物質内で, その粒子自身が拡散する現象。その拡散のしやすさは自己拡散係数で表わす。放射性同位元素<sup>\*</sup> をマーカーとして用い, その拡散を調べることで自己拡散係数を決定することができる。

### 自己吸収 self absorption

$\alpha$  線<sup>\*</sup>,  $\beta$  線<sup>\*</sup>,  $\gamma$  線<sup>\*</sup>, X線<sup>\*</sup>などの放射線<sup>\*</sup> が放出された際に, その放射線が放射線源自身によって吸収されること。自己吸収の大きさは, 放射線源の元素組成や厚さによって変わり, 薄いものほど自己吸

収は小さい。

### 自然放射線 natural radiation

天然放射性核種<sup>\*</sup>から放出される放射線<sup>\*</sup>。天然性核種には地殻に含まれているものと宇宙線<sup>\*</sup>によって生じるものがある。地殻に含まれている核種<sup>\*</sup>は<sup>40</sup>K ( $t_{1/2} = 1.277 \times 10^9$ y), <sup>87</sup>Rb ( $t_{1/2} = 4.75 \times 10^{10}$ y), <sup>238</sup>U ( $t_{1/2} = 4.468 \times 10^9$ y)などで、地球誕生時から存在している半減期<sup>\*</sup>の長い核種である。また、宇宙線によって生じる核種には<sup>3</sup>H ( $t_{1/2} = 12.33$ y), <sup>14</sup>C ( $t_{1/2} = 5730$ y), <sup>22</sup>Na ( $t_{1/2} = 2.609$ y)などがある。放射線の量は場所により異なるが、自然放射線によって1人が1年間に受ける被ばく線量<sup>\*</sup>の平均は約2.4 mSvである。

### 実効原子番号 effective atomic number

X線<sup>\*</sup>やγ線<sup>\*</sup>の吸収は、吸収する元素<sup>\*</sup>の原子番号<sup>\*</sup>によって異なるので、混合物や化合物の場合にそれぞれの元素の原子数割合で換算した原子番号を実効原子番号と言う。

### 実効線量当量 effective dose equivalent

ICRPの1977年勧告で導入されたもので、放射線被ばくによる組織ごとの健康影響を全身のそれに換算して評価するための量をいう。実効線量当量 ( $H_E$ ) は、組織  $T$  当たりの線量当量<sup>\*</sup> ( $H_T$ ) に組織荷重係数<sup>\*</sup> ( $W_T$ ) を掛けたものを、各組織で足して算出される。単位は、シーベルト (Sv) である。なお、平成12年の法令改正以後、実効線量当量は実効線量と呼ばれる。

### 実効線量当量限度

#### effective dose equivalent limit

ICRPの1977年勧告で定められた被ばくの制限値をいう。1年間の実効線量当量<sup>\*</sup>で、放射線業務従事者は50 mSv、一般人は1 mSv、とそれぞれ定められている。なお、平成12年の法令改正以後、実効線量当量限度は実効線量限度と呼ばれる。

### 湿式再処理法

#### wet reprocessing process

→核燃料再処理 →ピューレックス法  
原子力発電<sup>\*</sup>では燃料として<sup>235</sup>Uを用いるが、これは天然ウラン中に0.7%しか存在せず、資源の枯渇が懸念されている。そこで、エネルギー源として利用できる、発電過程で燃え残ったウランや生成されたプルトニウムを回収し、リサイクルする必要がある。その再処理<sup>\*</sup>の過程で硝酸や有機溶媒を使用し、生成物を溶液として分離する方法を湿式再処理法という。実用化されている再処理法の例として、使用済核燃料<sup>\*</sup>からウランやプルトニウムを分離するためにリン酸トリブチル (TBP) を用いるピューレックス (PUREX) 法<sup>\*</sup>がある。

### ジッター jitter

例えば電圧変化をパルスとして取り出すとすると、電圧が変化してからその情報を測定機器が処理し始めるまでの時間は、ノイズや電圧変化が一定ではないので、多少のばらつきを持っている。したがって、得られるパルスの時間情報に揺れが生じている。このような、時間的なばらつきや揺れのことを、ジッターという。特に、信号の大きさが変動することによってタイミングが変動することをウォークという。

### 質量エネルギー吸収係数

#### mass energy absorption coefficient

放射線<sup>\*</sup>のエネルギーが物質に吸収されるとき、同じ線量<sup>\*</sup>でも物質によってエネルギーを吸収する量は異なる。物質がもつ吸収の度合いを面密度単位で表したものが質量エネルギー吸収係数であり、 $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ の単位をもつ。X線<sup>\*</sup>やγ線<sup>\*</sup>など間接電離放射線<sup>\*</sup>に対して用いられる。

### 質量過剰 mass excess

原子質量 ( $M$ ) と質量数<sup>\*</sup> ( $A$ ) の差 ( $\Delta = M - A$ ) と定義される量で、質量偏差ともい

う。異なる原子核<sup>\*</sup>の結合エネルギーの差や原子核反応<sup>\*</sup>の $Q$ 値<sup>\*</sup>の計算をするのに便利である。

**質量吸収係数 mass absorption coefficient**

→質量減弱係数

**質量欠損 mass defect**

もともとは Aston が質量分析において、原子質量 ( $M$ ) と質量数<sup>\*</sup> ( $A$ ) の差 ( $\Delta = M - A$ ) を示すために使った。中性子<sup>\*</sup>と陽子<sup>\*</sup>の結合によって原子核<sup>\*</sup>が作られると、結合前の質量より質量の減少が起こる。質量とエネルギーの等価性から、原子核はこの質量の減少に相当する静止エネルギーだけ、個々の核子<sup>\*</sup>が独立に存在する状態よりも低いエネルギー状態になる。(核子結合エネルギー) この意味で、原子核の構成粒子が独立に存在するときの質量の和から原子核の質量を引いたものを質量欠損と定義している場合もある。また、 $M - A$  の符号を変えた  $A - M$  と定義されている場合もある。現在では、質量偏差を  $\Delta = M - A$  と定義して、こちらの方を用いる場合が多いようである。

**質量減弱係数 mass attenuation coefficient**

吸収係数<sup>\*</sup>  $\mu$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) を密度  $\rho$  で除したものの、 $\mu_m$  で表わす。線減弱係数<sup>\*</sup>は物質の密度に比例するため、物質がおかれている環境の影響を受ける。環境に依存しない量を表すのが質量減弱係数であり、入射する X 線<sup>\*</sup>や  $\gamma$  線<sup>\*</sup>のエネルギーのみに依存する。

**質量数 mass number**

原子核<sup>\*</sup>を構成する中性子数と陽子数の和、すなわち核子<sup>\*</sup>の総和であり、その原子核のおおよその質量を原子質量単位<sup>\*</sup>で表している。質量数は原子<sup>\*</sup>、同位体<sup>\*</sup>(isotope)を区別するのに利用され、 ${}^A M$  ( $A$ :質量数,  $M$ :元素記号)のように核種<sup>\*</sup>を表す。

**質量阻止能 mass stopping power**

→阻止能 物質に入射した荷電粒子<sup>\*</sup>が、物質中を進行するとき、物質単位長さ当たりに失う平均エネルギー、すなわち阻止能<sup>\*</sup>を、物質の質量で除した値。

**自発核分裂 spontaneous fission**

外部からの刺激なしに自然に起こる核分裂<sup>\*</sup>。 ${}^{238}\text{U}$ のような重い原子核<sup>\*</sup>で起こるが、その確率は  $\alpha$  壊変<sup>\*</sup>が起こる確率よりはるかに小さい。自発核分裂の起こり易さは原子番号<sup>\*</sup>が大きくなると急激に増す。

**遮蔽 shielding**

放射線<sup>\*</sup>の遮蔽。(1)放射線測定において、検出器に外部から不必要に入る放射線を防ぐこと、あるいは(2)放射線源と人との間に物体(遮蔽体)を置き人体の外部被ばく<sup>\*</sup>を防御すること。遮蔽体の材質は対象とする放射線の種類により異なる。透過力の大きい X 線<sup>\*</sup>や  $\gamma$  線<sup>\*</sup>の場合、原子番号<sup>\*</sup>の大きい元素<sup>\*</sup>ほど遮蔽効果は大きく、鉄や鉛を含む密度の大きい物質が選ばれる。

**遮蔽核種 shielded nuclide**

遮蔽核ともいう。奇奇核<sup>\*</sup>で最も結合エネルギーの大きな核種<sup>\*</sup>1個(まれに2個)が、 $\beta^-$ 壊変<sup>\*</sup>と EC (または  $\beta^+$ )壊変<sup>\*</sup>で偶偶核<sup>\*</sup>の安定核種に壊変<sup>\*</sup>することが起こる。このような場合、奇奇核の最も結合エネルギーの大きな核種は、 $\beta$ 壊変連鎖では生成しないので遮蔽核種と呼ばれる。 ${}^{134}\text{Cs}$ ,  ${}^{152}\text{Eu}$ などが遮蔽核種である。核分裂生成物<sup>\*</sup>の  $\beta^-$ 壊変連鎖に遮蔽核種はないので、環境中に遮蔽核種が見出される場合、核爆発起源ではなく原子炉<sup>\*</sup>起源であることの証拠になる。

**重イオン核反応 heavy ion nuclear reaction**

重荷電粒子<sup>\*</sup>の入射によって引き起こされる核反応<sup>\*</sup>。

**重イオン線形加速器**

**heavy ion linear accelerator**

→線形加速器 重荷電粒子<sup>\*</sup>の加速に使

う線形加速器。

**重荷電粒子**

heavy charged particle または heavy ion

原子番号<sup>\*</sup>が3以上の荷電粒子<sup>\*</sup>。重イオンともいう。水素の原子核<sup>\*</sup>である陽子<sup>\*</sup>(p)、重陽子<sup>\*</sup>(d)、三重陽子<sup>\*</sup>(t)やヘリウムの原子核(α粒子<sup>\*</sup>、<sup>4</sup>Heの原子核)ではイオン源に気体を供給でき、加速粒子の電荷の規定が容易であるが、リチウム以上の原子<sup>\*</sup>ではイオン源物質や加速粒子の電荷の制御が複雑になるため、習慣的に水素とヘリウムを除いた荷電粒子を指す。

**周期表 periodic table**

元素<sup>\*</sup>を原子番号<sup>\*</sup>の順に並べ、化学的性質が類似する元素(1~18族)が縦一列になるように配列した表。1869年にロシアのメンデレーエフ(D. I. Mendeleev)が、元素を原子量<sup>\*</sup>の順に並べたときに周期的に性質が似かよった元素が現れること(周期律)を発見し、空欄の未発見元素の性質を予言した。それ

以来、多くの改良が加えられ現在広く使われている形になった。図参照。

**重心系 center-of-mass system**

2粒子の衝突において、重心を原点とする座標系。2粒子の実験室系での並進運動を除いた運動を抽出したことになり、衝突パラメータの計算が簡単になる。3体以上にも拡張できる。

**重水炉 heavy water reactor (HWR)**

重水を減速材<sup>\*</sup>とする原子炉<sup>\*</sup>で、重水減速型炉の略称。重水は軽水に比べて中性子<sup>\*</sup>を吸収しにくいいため、優れた中性子経済性を有するのが特徴。軽水炉<sup>\*</sup>では3~4%濃縮ウラン<sup>\*</sup>を用いるのに対して、重水炉では濃縮度がより低いウランや天然ウランを使用できる。ふげんやCANDU炉(Canadian Deuterium Uranium Reactor)などがある。

**集積被ばく線量 accumulated exposed dose**

→線量 個人の被ばく線量<sup>\*</sup>の積分値。

**集電極 anode**

気体計数管において、電離<sup>\*</sup>によって発

1																	18
1 H	2															2 He	
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 112	113 113	114 114	115 115	116 116	118 118	

→ 超アクチニド元素(超重元素, SHE)

ランタニド元素

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

アクチニド元素

90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr
----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

→ 超ウラン元素(TRU)

**周期表**

生した電子<sup>\*</sup>を捕集する電極。捕集電極とも呼ぶ。陽イオンより電子の方が移動度が大きく短時間で捕集することができるので、一般的に陽極を集電極とする。

### 自由電子 free electron

真空中あるいは物質中を自由に運動する電子<sup>\*</sup>。金属では、金属結合を形成する。自由電子の存在によって金属の展性、延性、大きな電気伝導度や熱伝導度、電磁波<sup>\*</sup>の遮蔽作用などを説明することができる。

### 重陽子 deuteron

重水素<sup>2</sup>Hの原子核<sup>\*</sup>。記号はd。中性子<sup>1</sup>1個と陽子<sup>1</sup>1個から成る。結合エネルギーが2.3 MeVと比較的小さいため、核反応断面積<sup>\*</sup>は大きい。

### シュタルク効果 Stark effect

原子<sup>\*</sup>中で縮退している電子<sup>\*</sup>のエネルギー準位<sup>\*</sup>が磁場により複数の準位に分裂すること。名称は、ドイツのシュタルク(J. Stark)が1913年に水素の原子スペクトルが電場中で分裂することを発見したことに因む。

### 準安定核 metastable nucleus

→核異性体 原子核<sup>\*</sup>の励起状態<sup>\*</sup>のうち寿命が比較的長いもの。寿命に特に基準はない。<sup>60m</sup>Co(半減期<sup>\*</sup>10.5分)のように質量数<sup>\*</sup>のあとにmをつける。準安定核が複数あるときには、<sup>152m1</sup>Eu(半減期9.3時間)、<sup>152m2</sup>Eu(半減期96分)のように、励起エネルギーの低い方からm<sub>1</sub>、m<sub>2</sub>、…と記す。通常、準安定核の寿命は基底状態に比べて短い。質量数180のTaでは<sup>180m</sup>Taが天然に存在し、<sup>180</sup>Taの半減期は8.1時間しかない。

### 常温核融合 cold nuclear fusion

1989年3月に英国のフライシュマン(M. Fleischmann)と米国のポンズ(S. Pons)がパラジウムを電極として重水を電気分解したところ、核融合<sup>\*</sup>によると思われる過剰の発熱を観測したと発表した。米国

のジョーンズ(S. E. Jones)らも同様の実験を行って極微弱な中性子<sup>\*</sup>を検出したと報告した。世界中に衝撃を巻き起こし、各国の研究機関で直ちに追試が行われたが、核融合反応の確証は得られなかった。

### 生涯平均年間線量

#### life averaged exposed dose

集積ばく線量<sup>\*</sup>を年齢で除した値。

### 消光作用 quenching effect

液体シンチレーション法で放射線<sup>\*</sup>を測定する際に、液体中に混在する物質によってシンチレーター<sup>\*</sup>の蛍光<sup>\*</sup>の量子収率が低下する現象。ハロゲン化物などが強い消光効果をもつ。

### 照射線量 exposed dose

X線<sup>\*</sup>またはγ線<sup>\*</sup>による照射の量に関する概念で、その照射場の空気中に生成するイオン対の量で表す。単位はC/kg。旧単位はレントゲン(R; 1 R = 2.58×10<sup>-4</sup> C/kg)。

### 照射誘起応力腐食割れ

#### irradiation assisted stress corrosion cracking (IASCC)

放射線照射下で起こる応力腐食割れのこと。中性子<sup>\*</sup>やγ線<sup>\*</sup>の照射によって材料の組成や微細構造が変化することに起因して金属の脆性破壊が促進される。

### 使用済核燃料 spent nuclear fuel

原子炉<sup>\*</sup>で一定期間燃焼した核燃料<sup>\*</sup>のこと。ウランやプルトニウムなどの核分裂<sup>\*</sup>反応で生じた核分裂生成物<sup>\*</sup>や、ウランなどの中性子捕獲反応<sup>\*</sup>によって生じた超ウラン元素などが含まれ、高い放射能<sup>\*</sup>および崩壊熱<sup>\*</sup>を有する。わが国では、使用済燃料は原子力発電所内の貯蔵施設内で一定期間、冷却のために保管した後、再処理<sup>\*</sup>し、ウランやプルトニウムを回収して再利用する。再処理せずに高レベル放射性廃棄物<sup>\*</sup>として直接処分する国もある。

### 晶析 crystallization



多種類で比較的高濃度の溶質（イオンや分子など）を含む溶液から特定の溶質を分離するために、溶液相に温度勾配、あるいは濃度勾配などを与えて目的の溶質を結晶化させること。再処理工程の高度化のための要素技術のひとつとして注目されており、高濃度のウラン(VI)イオンなどを含む使用済核燃料溶解液からウランなどを晶析させて分離する方法が研究されている。回収率および選択性は溶媒抽出法に劣るが、主成分であるウランを簡単な操作で粗分離し、後段の溶媒抽出工程の負担を低減するのに有効な方法であるとされる。

#### 衝突阻止能 collision stopping power

荷電粒子<sup>\*</sup>が、物質の中を通過する過程で電離<sup>\*</sup>や励起によって失う平均運動エネルギーの単位長さあたりの大きさ。

#### 消滅ガス quenching gas

GM 計数管<sup>\*</sup>の連続放電を止めるために封入する気体。アルゴンなどの不活性ガスのみを封入した場合には、荷電粒子<sup>\*</sup>によって引き起こされた放電は止まらない。希ガスにイソブタンなどの有機分子気体を2%程度混合する。

#### 消滅ガンマ線 annihilation $\gamma$ ray

→陽電子消滅

#### 消滅放射性核種 extinct radionuclide

→天然放射性核種 宇宙における元素合成(nucleosynthesis)過程で生成したが放射性壊変により消滅した半減期<sup>\*</sup>が $10^7$ から $10^8$ 年の放射性核種<sup>\*</sup>で、現在得られる試料中に壊変生成物が見出され、存在が確認できる核種<sup>\*</sup>。 $^{26}\text{Al}$ 、 $^{53}\text{Mn}$ 、 $^{107}\text{Pd}$ 、 $^{146}\text{Sm}$ 、 $^{129}\text{I}$ および $^{244}\text{Pu}$ などはかつて太陽系に存在していた可能性が高いと考えられる。

#### 除染 decontamination

放射性物質<sup>\*</sup>で汚染されているものから、放射性物質を取り除く操作。身体汚染の除去や汚染の拡大防止、汚染された機器

や資材などの再利用、施設や装置の解体作業者の被ばく低減などのために実施する。除染法は主に化学的除染と物理的除染法がある。化学的除染は、酸、アルカリ、酸化還元剤、有機溶剤、洗剤などの除染剤を用いて放射性物質を除去する方法であり、電気化学的処理を併用することもある。物理的除染には、砂や高圧水を用いたブラスト法、レーザー法、ふき取り法などがある。

#### 除染係数 decontamination factor

→除染 除染前の放射能<sup>\*</sup>濃度を除染後の残存放射能濃度で除した値。

#### シラード-チャルマース効果

##### Szilard-Chalmers effect

→ホットアトム効果 核反応<sup>\*</sup>により生成する原子<sup>\*</sup>の核反跳<sup>\*</sup>の化学効果のひとつ。1934年にL. SzilardとT. A. Chalmersが、ヨウ化エチル( $\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$ )を中性子照射し、 $^{127}\text{I}(n, \gamma)^{128}\text{I}$ 反応によって生成した $^{128}\text{I}$ を水相に濃縮することに成功したことに由来する。この核反応で生成する $^{128}\text{I}$ は $\gamma$ 線放出に伴う反跳<sup>\*</sup>により最大200 eVの運動エネルギーを得て分子中のC-I結合を切断し、水溶性の $^{128}\text{I}^-$ イオンになるため、有機相にとどまる他のヨウ素( $\text{C}_2\text{H}_5^{127}\text{I}$ )と分離することができる。この効果は高比放射能ラジオアイソトープの製造にも利用されている。

#### シリコン(Si)半導体検出器

##### silicon semiconductor detector

シリコン(Si)半導体を用いる放射線検出器<sup>\*</sup>。ゲルマニウム検出器<sup>\*</sup>に比べてX線エスケープピーク<sup>\*</sup>が小さい、原子番号<sup>\*</sup>が小さいため検出器による全エネルギー吸収が小さい、後方散乱<sup>\*</sup>電子が少ないなどの特徴がある。それゆえ、低エネルギーの $\gamma$ 線<sup>\*</sup>(あるいはX線<sup>\*</sup>)ならびに $\beta$ 線<sup>\*</sup>または外部から入射する電子<sup>\*</sup>のスペクトル測定に使われる。近年

普及しているシリコンドリフト検出器 (SDD) は、ペルチェ冷凍機を用いた Si 半導体 X 線検出器で、液体窒素冷却の Si (Li) 半導体検出器\* に劣らないエネルギー分解能\* を有し、高効率測定が可能である。

### シングルフォトンエスケープピーク

single photon escape peak

→光子エスケープピーク

### シンクロトロン放射光

synchrotron radiation

→放射光

### 人工バリア engineered barrier

→深地層処分 放射性廃棄物\* を処分する際に、廃棄物から環境中への放射性物質\* の漏洩を防ぐために人工的な物質で放射性廃棄物を包むもの。放射性廃棄物を梱包する金属容器 (オーバーパック) やそのまわりを取り囲むベントナイドなどの粘土 (緩衝材) などがこれにあたる。放射性廃棄物をガラス固化体\* などの安定な形状として処分する場合には、ガラス固化体も人工バリアの働きをする。人工バリアの外側をさらに覆う岩盤などを天然バリア\* と呼ぶ。

### 人工放射性核種 artificial radionuclide

→天然放射性核種 核変換\* により人工的につくられた放射性核種\* で、もともと天然に存在しないもの。

### シンチグラフィ scintigraphy

放射性核種\* で標識した化合物 (標識薬剤) を体内に注入し、その体内での分布を追跡する検査法。腫瘍の早期発見や転移、循環器病や代謝障害など多くの疾病の診断に利用する。生体の透過性が高く、吸収性が低い  $\gamma$  線\* が用いられる。放射性核種としては  $^{131}\text{I}$ 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 $^{24}\text{Na}$ 、 $^{87\text{m}}\text{Sr}$  など比較的半減期\* が短いものが使われる。

### シンチスキャナ scintiscanner

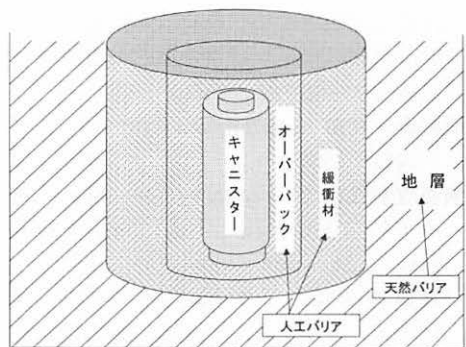
シンチグラフィ\* のための測定機器。

シンチカメラ、 $\gamma$ カメラ\* と呼ぶ。シンチレーション検出器\* を備え、身体のみを走査しながら放射線\* を測定し、結果を画像処理して出力する。得られた画像をシンチグラムと呼ぶ。カメラを回転させて測定し、断層像を測定することも可能である (single photon emission computed tomography, SPECT)。

### 深地層処分 geological disposal

→地層処分

使用済核燃料\* や高レベル放射性廃棄物\*、TRU 廃棄物などを地層中に埋設し、放射性物質\* が生活圏に漏洩することを防ぐこと。地層処分\* と略すこともある。わが国においては、高レベル放射性廃棄物をガラス固化体\* などの処分体にした後、地下数百メートルの安定な岩盤中に建設した処分場に収納し、人工バリア\* および天然バリア\* の多重バリア効果によって生活圏から隔離する計画が進んでいる。図参照。



深地層処分の概要。

### シンチレーション検出器

scintillation detector

放射線\* がシンチレーター\* に入射したときに発する蛍光\* を光電子増倍管\* で増幅し電流パルスとして計測する装置。パルス高はシンチレーター中で失われる

エネルギーにほぼ比例する。

### シンチレーター scintillator

光や放射線<sup>\*</sup>があたると蛍光<sup>\*</sup>を出す物質。γ線測定用のNaI(Tl)やBGO(bismuth-germanium oxide)などの無機結晶、*p*-ターフェニルのような有機結晶あるいは液体シンチレーションカウンター<sup>\*</sup>に用いるPPO(2,5ジフェニルオキサゾール)のような有機液体など色々な物質がある。有機シンチレーターは比重が小さくγ線測定用には適さない。ポリ

スチレンなどの高分子の中に蛍光物質を溶かし込んだプラスチックシンチレーター<sup>\*</sup>は荷電粒子<sup>\*</sup>の測定に使われる。

### 深部非弾性散乱 deep-inelastic collision

高エネルギーの電子<sup>\*</sup>や重粒子を陽子<sup>\*</sup>や中性子<sup>\*</sup>に衝突させたときに起こる、その運動エネルギーの移行によりこれら粒子がバラバラに壊れるような非弾性散乱<sup>\*</sup>。クォーク<sup>\*</sup>の存在の証明やハドロン構造の解明などにつながっている。

## す

### スーパーカミオカンデ Super-Kamiokande

→カミオカンデ Super KAMIOKA Nucleon Decay Experiment のこと。ニュートリノ<sup>\*</sup>研究のため岐阜県神岡鉱山地下1000 mにつくられた直径40 m、高さ40 mのタンクに5万トンの水と11,200本の光電子増倍管<sup>\*</sup>を備えたチェレンコフ検出器。前身のカミオカンデ<sup>\*</sup>を引き継ぎ、1996年から使用されている。

### スーパーフェニックス Superphenix

ヨーロッパ5ヶ国による国際プロジェクトとしてフランスのリヨン郊外に建設された高速増殖炉<sup>\*</sup>の実証炉。電気出力124万kW、熱出力300万kWで、1985年に初臨界、1986年に出力100%を達成した。幾度かの事故により一旦停止したが、1994年に再稼働し、再度1997年に停止した。研究炉<sup>\*</sup>への計画変更が検討されたが、1998年に廃止が決定した。フランスにおける高速増殖炉はこの他に、実験炉ラブソディ、原型炉フェニックスがあり、わが国には、原型炉もんじゅがある。

### スカベンジャー scavenger

→保持担体 複数の放射性核種<sup>\*</sup>が混在

する溶液などから、不必要な核種<sup>\*</sup>を除去するために加える担体<sup>\*</sup>。たとえば<sup>140</sup>Ba - <sup>140</sup>La 溶液から<sup>140</sup>Laを除去する場合に鉄を担体として加え、<sup>140</sup>Laを鉄の水酸化物と共沈させ分離する。この鉄担体をスカベンジャーという。

### スパー spur

放射線<sup>\*</sup>が物質に入射すると、分子と衝突するごとに空間に離散的に物質にエネルギーが与えられる。凝集状態ではこのエネルギーが与えられた場所にイオン化や励起状態<sup>\*</sup>が存在し、それはスパー(痕跡)と呼ばれる。電子線や高エネルギー電磁放射線(X線<sup>\*</sup>やγ線<sup>\*</sup>)の照射では二次電子<sup>\*</sup>(デルタ線<sup>\*</sup>)がスパー形成の主役であり、スパーの間隔は数千Å程度である。この電子<sup>\*</sup>が1 keV程度までエネルギーを失うと、スパー間の距離が短くなりかつ電子が散乱<sup>\*</sup>される角度が大きくなるので、スパーが重なり合ってプロブ<sup>\*</sup>と呼ばれる末端スパーを形成する。陽子ビーム、α線<sup>\*</sup>、重粒子線<sup>\*</sup>のように線エネルギー付与<sup>\*</sup>(LET)が大きい粒子が作るスパーは、特にトラック<sup>\*</sup>と呼ばれる。

### スパーモデル spur model

陽電子<sup>\*</sup> ( $e^+$ )あるいは正ミュオン ( $\mu^+$ ) が物質 (M) に入射すると、物質中の電子<sup>\*</sup> と結合して中性の水素様原子であるポジトロニウム<sup>\*</sup>  $Ps(e^+e^-)$  あるいはミュオニウム<sup>\*</sup>  $Mu(\mu^+e^-)$  を生成する。Ps や Mu の成因に関する2つのモデルがある。エピソードモデルでは、 $e^+(\mu^+) + M \rightarrow Ps(Mu) + M^+$  のようにエネルギーの高い  $e^+$  や  $\mu^+$  が電子を引き抜くためと考える。一方、スパーモデルでは、エネルギーの高い  $e^+$  や  $\mu^+$  の末端のスパー<sup>\*</sup> の中で、イオン化で叩き出された電子が  $e^+$  や  $\mu^+$  と結合するためと考える。凝集状態におけるポジトロニウム形成ではスパーモデルが、ミュオニウム形成ではエピソードモデルが有効とされる。

### スパイク spike

→同位体希釈法 同位体希釈分析で用いる、濃度とその同位体比が既知の分析対象元素を含む標準試薬。

### スリーマイル島事故

### Three Mile Island nuclear accident

→炉心溶融 1979年3月28日に米国ペンシルバニア州サスケハナ川のスリーマイル島(中州)にある原子力発電所で起きた事故。事故が起きた2号機(TIM-2)は加圧水型軽水炉で、複数の装置故障と誤操作が重なり最終的には部分的炉心溶融にいたった。大気中にクリプトン( $^{83m}Kr$ )、キセノン( $^{133}Xe$ ,  $^{133m}Xe$ )、ヨウ素( $^{131}I$ )などの放射性核種<sup>\*</sup>が放出されたが、周辺の公衆が受けた放射線<sup>\*</sup>の量は最大でも1 mSv(平均0.015 mSv)と健康に影響のない低いレベルで済んだ。この事故によりソフトとハード両面の危機管理の重要性が認識された。

### スワイプ試料 swipe sample

核物質査察のための保障措置環境試料分析<sup>\*</sup>では、各国の原子力施設の内外から採取した環境試料を分析対象とするが、そのうち原子力施設内で装置などに付着している埃などを拭き取った綿布試料のこと。

## せ

### 制御棒 control rod

原子炉<sup>\*</sup>の出力を調整(制御)するため、原子炉上部または下部から炉心<sup>\*</sup>に挿入する棒状装置。熱中性子<sup>\*</sup>を吸収しやすい物質が用いられる。研究用原子炉<sup>\*</sup>では、板状のカドミウム金属などが用いられることが多く、制御板とも呼ばれる。発電用軽水炉では、沸騰水型原子炉<sup>\*</sup>(BWR)では炭化ホウ素が、加圧水型原子炉<sup>\*</sup>(PWR)ではカドミウムと銀の合金が使用されている。

### 静止質量 rest mass

物体が静止しているとき(速度0)の質量( $m_0$ )。特殊相対性理論では、質量( $m$ )は

速度( $v$ )の関数として次式で表される( $c$ は光の速度)。

$$m = m_0 / \sqrt{1 - (v/c)^2}$$

静止質量はニュートン力学の質量と同じものとして扱われる。原子核<sup>\*</sup>や素粒子<sup>\*</sup>の反応では、静止エネルギー( $E = m_0c^2$ )を考慮した上でエネルギー保存則が成り立つ。素粒子実験などではエネルギーあるいは運動量から逆算して静止質量を決定する場合が多い。

### 静電気除去装置

#### apparatus for removing static electricity

静電気を除去するため放射線<sup>\*</sup>の電離効果を利用する装置。電離効果の大きな $\alpha$

線<sup>\*</sup>を放出する核種<sup>\*</sup>が使用され、<sup>210</sup>Poなどがその代表核種である。

### 制動放射 bremsstrahlung

高速で運動する荷電粒子<sup>\*</sup>が減速または加速されるときに電磁波<sup>\*</sup>を放射する現象。放出される電磁波を制動放射線<sup>\*</sup>という。制動放射の確率は荷電粒子の質量の2乗に反比例するので、電子<sup>\*</sup>のような質量の小さな荷電粒子で起きやすい。高速の電子が原子核<sup>\*</sup>の近傍を通過すると、原子核のクーロン場<sup>\*</sup>に引きつけられて進路を曲げ、その際、接線方向に連続エネルギーの電磁放射線を放出する。放射光<sup>\*</sup>は高速電子の進路を偏向電磁石、ウィグラー、アンジュレーターなどを用いて意図的に曲げたとき出る制動放射線である。電子ライナック (electron linear accelerator) を用いて電子を数十 MeV に加速し、コンバーター (1 mm 厚の白金板など) に当てることにより高エネルギー制動放射線を発生させることができる。制動放射によるエネルギー損失は荷電粒子のエネルギーに比例し、通過する物質を構成する原子<sup>\*</sup>の原子番号<sup>\*</sup>の2乗にほぼ比例する。したがって、β線<sup>\*</sup>の遮蔽<sup>\*</sup>には原子番号の小さい物質を線源側におき、制動放射線を遮蔽する物質を外側に置くのがよい。

### 生物学的効果 biological effect

放射線<sup>\*</sup>が生物に与える効果は、同一の吸収線量<sup>\*</sup>であっても放射線の種類や線量率<sup>\*</sup>によって異なる。低線量率で長時間照射したときに受ける効果は、高線量率で短時間照射したときに比べて小さい。これを線量率効果<sup>\*</sup>という。線量<sup>\*</sup>と線量率が同じでも、小線量に分け間隔をあけて照射した場合の効果は小さい。これは照射中あるいは照射後の細胞の回復によると考えられている。放射線の種類による違いを表す指標として、X線<sup>\*</sup>またはγ線<sup>\*</sup>を基準放射線とする

生物学的効果比 RBE (relative biological effectiveness) が用いられる。生物学的効果比は線エネルギー付与<sup>\*</sup> (LET) に大きく依存する。放射線防護<sup>\*</sup>の目的では、異なった放射線のいろいろな生物学的効果比を考慮して危険度を計算するため、目的とする放射線の LET によって線質係数<sup>\*</sup>を定めている。α線<sup>\*</sup>などの高 LET 放射線は障害の面では重大な影響を及ぼすが、この生物学的作用の特徴を活かして、がんの治療などの医学利用に役立つ。

### 生物学的効果比

relative biological effectiveness (RBE)

→生物学的効果 →相対的生物作用

### 世界保健機構

World Health Organization (WHO)

1946年に設立されたジュネーブに本部を置く国際機関。世界のすべての人々に可能な限り高い水準の健康をもたらすことが目標。活動範囲も伝染病の撲滅や公衆衛生の向上のほか、麻薬取り締まり規則の確立や環境問題など多彩である。放射線障害<sup>\*</sup>に関する活動も含まれ、チェルノブイリ事故後のロシア、ベラルーシおよびウクライナにおける甲状腺異常などの放射線障害の調査や対策に貢献した。

### 絶対年代測定 absolute dating

→年代測定 考古学や地球科学における年代の絶対値を求める方法。通常、年代の推定は遺跡の地層の新旧関係、土器など遺物の型式編年などにより決定するが、これは相対年代である。絶対年代を与える測定法には自然界の放射性物質<sup>\*</sup>を利用する方法が多く、放射年代測定法と呼ばれる。放射性核種<sup>\*</sup>の壊変<sup>\*</sup>を利用する方法と放射線<sup>\*</sup>が結晶に与える物理的現象を利用する方法に分類される。前者には放射性炭素法、Rb-Sr法<sup>\*</sup>、U-Th-Pb法<sup>\*</sup>、K-Ar法<sup>\*</sup>などがあり、後者には熱(光)ルミネッセンス法、フィッ

シヨントラック<sup>\*</sup>法、電子スピン共鳴<sup>\*</sup>法などがある。

## Z 粒子 Z particle (Z boson)

→素粒子 弱い相互作用を媒介するゲージ粒子の1つ。記号は $Z^0$ 。スピン0。1983年にヨーロッパ合同素粒子原子核研究機構(CERN)の反陽子<sup>\*</sup>-陽子<sup>\*</sup>衝突実験で実在が確認され、その後質量が91.187 GeVと求められた。

## 線エネルギー付与

### linear energy transfer (LET)

放射線<sup>\*</sup>が物質に入射したとき、その飛跡に沿う単位長さ当りの物質に与えられるエネルギー量。大まかには放射線エネルギーを飛程<sup>\*</sup>で除した値であるが、同一の粒子についても飛跡に沿ってエネルギーが減速していくので局所的なLETは大きくなる。電子<sup>\*</sup>のLETは数百keVでは0.2 keV/ $\mu\text{m}$ 程度であるが、エネルギーが小さくなると10 keV/ $\mu\text{m}$ にもなる。重い荷電粒子<sup>\*</sup>ではイオン化と励起が密度高く起こるのでLETは数十keV/ $\mu\text{m}$ と大きい。LETが大きい放射線ほど生物への照射効果が大きい傾向がある。

## 全角運動量 total angular momentum

電子のスピン角運動量(S)と軌道角運動量(L)をz軸方向にベクトル合成したもの。

## 線形加速器 linear accelerator

LINAC(ライナック、リニアック)ともいい、電子<sup>\*</sup>またはイオンを直線に走らせながら加速する装置。電子またはイオ

ンの走行時間に合わせて電極を並べ、電極に供給する高周波電場を利用して加速する。小型のものは医療、滅菌、工業などにも使われている。図参照。

## 線減弱係数 linear attenuation coefficient

→吸収係数

## 全効率 total efficiency

放射線検出器<sup>\*</sup>が計測する全スペクトルの入射 $\gamma$ 線の線量<sup>\*</sup>に対する効率である。厳密には、エネルギー一定の平行 $\gamma$ 線束を入射させ、そのエネルギーに対する検出器の線減弱係数<sup>\*</sup>を用いて算出される。一般的には標準線源<sup>\*</sup>を用いて効率曲線を求め、未知試料の測定値と比較して絶対値に換算する方法が用いられている。

## 線質係数 quality factor

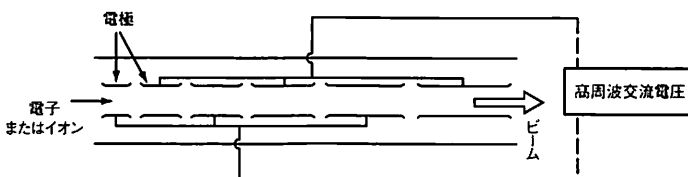
放射線<sup>\*</sup>が生体系に与える影響は、吸収線量<sup>\*</sup>が同じでも放射線の種類(線質)によって異なる。この線質による違いをこれまでは線質係数<sup>\*</sup>といったが、国際放射線防護委員会<sup>\*</sup>(ICRP)は1990年の勧告(Publ. 60)で、これに替わる用語として放射線過重係数<sup>\*</sup>を用いることを勧告した。

## 線吸収係数 linear absorption coefficient

→吸収係数

## 染色体異常 chromosome aberration

染色体の構造に欠失、重複、逆位、転座などの大きな変化が生じること。細胞はDNA合成期と分裂期を繰り返しながら増殖する。これを細胞周期といい、DNA合成期をS期、分裂期をM期と呼ぶ。染色体は細胞周期のM期に観察で



線形加速器の原理

き、染色体異常もこの期に観察する必要がある。染色体異常としては2箇所の切断と誤った再結合から生じるリング染色体(環状染色体)や2動原体染色体が観察される。染色体異常には放射線被ばく後も長期にわたって存在する安定型と、比較的短期間で消失する不安定型とがある。欠失や転座は安定型で、リングや2動原体染色体は不安定型である。

#### 線束密度 flux density

空間または物質中のある場所における放射線の強さ。対象とする点を中心とする小さな球を単位時間内に通過する粒子線の数をその球の最大断面積で割った量として定義する。単位は $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。線束密度は中性子や $\gamma$ 線によく用いられ、フルエンスとも呼ばれる。

#### 浅地層処分 shallow land disposal

→深地層処分 →余裕深度処分 低レベル放射性廃棄物の中で最も放射能濃度の低いクラスの廃棄物の処分法で、覆土層が数メートル程度の浅地層に埋設する方法。処分とは回収不可能な廃棄方法とされるが、回収可能な状態で浅地層に埋めている国もある。わが国では、日本原燃株式会社が青森県六ヶ所村の低レベル放射性廃棄物埋設センターにおいて、原子力発電所からの低レベル廃棄物(使用済みの樹脂、焼却灰、金属、プラスチック、フィルターなど)を対象に実施している。廃棄物を200Lのドラム缶にセメントまたはモルタルで固型化し、それをコンクリート製の埋設スペースに定置する。廃棄体の隙間にモルタルを充填し、最後に鉄筋コンクリートで覆う。周囲をベントナイト混合土で覆い、その上部は4m以上の土砂覆土層とし植生を施す。六ヶ所村では、より放射能濃度が高い低レベル放射性廃棄物の処分のために、余裕深度処分施設の開発が行われている。

#### 線量 radiation dose

ある空間における放射線の量の多さあるいは放射線場の強さ、または放射線が物質に与えるエネルギーの大きさを表す量。前者には粒子フルエンスが、後者には照射線量(C/kg)、吸収線量(J/kg)、等価線量(Sv)、実効線量(Sv)などがある。生体におよぼす放射線の影響を取り扱う際には、物質が放射線から受け取ったエネルギーを知る必要があることから、吸収線量を用いる。放射線防護では、放射線の種類、阻止能、対象とする組織の種類などを考慮した線量当量(dose equivalent)を用いる。

#### 線量換算係数 dose conversion coefficient

→カーマ 空気カーマ または粒子フルエンスから実効線量を算出する際に用いる換算係数。ICRP Pub. 74に、空気カーマが1 GyであるときのX線や $\gamma$ 線について、あるいは空気中の粒子フルエンスが $10^{12}\text{cm}^{-2}$ の中性子線について、放射線のエネルギーの関数として実効線量(Sv)が与えられている。

#### 線量計 dosimeter

放射線の線量を計測するための測定器。線量を直接測るには、主に電離箱が用いられる。照射線量(C/kg)の測定には自由空気電離箱、空洞電離箱あるいはコンデンサ電離箱を用いる。吸収線量(J/kg, Gy)の測定器には化学線量計が古くから利用され、その他に外挿形電離箱、空洞電離箱、熱量計なども広く用いられる。標準器による校正が可能であれば、蛍光ガラス線量計、熱ルミネッセンス線量計(TLD)、エキゾ電子線量計も利用できる。

#### 線量係数 dose coefficient

ICRPが勧告した内部被ばくによる預託実効線量を求めるための係数(Sv/Bq)。被ばく線量を求める際に用いる線量換算係数の一つ。1 Bqを経口または吸入により摂取した人の預託実効線量で、作

業者 (ICRP Publ. 68) および子供 (3 ヶ月, 1 歳, 5 歳, 10 歳, 15 歳) と成人 (ICRP Publ. 72) に対して示されている。

### 線量限度 dose limit

→実効線量限度 放射線被ばくの制限値。現行法令は 1990 年の ICRP 勧告に基づき実効線量限度<sup>\*</sup>を定めている。

### 線量当量 dose equivalent

→等価線量

### 線量当量限度 dose equivalent limit

→実効線量当量限度 →組織線量当量限度

### 線量率 dose rate

放射線<sup>\*</sup>の単位時間当たりの線量<sup>\*</sup>のこと。

### 線量率効果 dose rate effect

→生物学的効果 物質や生体に一定の

放射線量を照射するとき、低い線量率で長時間照射した場合と高い線量率で短時間に照射した場合で効果に差があるとき、線量率効果があるという。放射線化学では、高い線量率で照射すると、先行して起こっている反応系に次の照射が重なることによって線量率効果が現れることがある。生体への放射線効果では、低線量率で長時間被ばくした場合の方が、高線量率で短時間被ばくしたときより小さくなることが知られている。これは分子または細胞レベルでの修復や回復によって放射線<sup>\*</sup>の影響が軽減されることによる。低い線エネルギー付与<sup>\*</sup> (LET) の放射線の影響においてより顕著にあらわれる効果。

## そ

### 走査電子顕微鏡

#### scanning electron microscope

電子顕微鏡の一種。電子銃からの電子ビームを試料表面に集束、走査し、照射点から放出される電子<sup>\*</sup> (二次電子<sup>\*</sup>, 反射電子) を検出器に受け、電気信号として増幅・同期してディスプレイに像を得る。これとは別の透過電子顕微鏡があり、分解能 (倍率) は後者 (~ 150 万倍) の方が優れている。走査電子顕微鏡を用いると、試料表面の形状 (凹凸) や構成原子の組成の情報が得られる。同装置は電子を取り扱うので高真空系が要求され、試料により高真空型、低真空型、クライオ型 (凍結試料) がある。電子だけではなく、試料から発生する特性 X 線<sup>\*</sup> や蛍光<sup>\*</sup> を同時に検出するように工夫されている装置もある。

### 増殖ブランケット breeding blanket

高速増殖炉<sup>\*</sup>あるいは核融合炉<sup>\*</sup>におい

て、燃料を増殖するために設ける外套部。高速炉では 1 回の核分裂<sup>\*</sup> 当たり発生する中性子<sup>\*</sup> は 2 ~ 3 個であり、これをできるだけ効果的に親物質 (<sup>238</sup>U) に吸収させて <sup>239</sup>Pu を生成させ、増殖比を高める。高速増殖炉では、親物質から成るブランケット燃料集合体を、核分裂性物質<sup>\*</sup> を含む炉心燃料集合体とは別の領域に配置する。配置方式により均質炉心、径方向非均質炉心、軸方向非均質炉心などがある。高速増殖原型炉「もんじゅ」の場合には、U-Pu-MOX から成る炉心燃料集合体 198 体で 2 領域均質炉心を構成し、その周囲に劣化ウラン<sup>\*</sup> UO<sub>2</sub> のブランケット燃料集合体 172 体を配置している。一方、核融合炉ではリチウム含有物質を充填したブランケットを炉心の周りに配置し、D-T 核融合反応で発生する 14-MeV の中性子<sup>\*</sup> とリチウムの反応により燃料トリチウム (T) を増殖する。核融合炉プ



ランケットは、核エネルギーの熱への変換ならびに超伝導磁石の遮蔽体の役割も担う。

### 増殖炉 breeder reactor

原子炉<sup>\*</sup>では、<sup>235</sup>U、<sup>239</sup>Puなどの核分裂性物質<sup>\*</sup>の核分裂連鎖反応<sup>\*</sup>を利用して核エネルギーを取り出す。1回の核分裂反応では2～3個の中性子<sup>\*</sup>が放出される。この中粒子は1)核分裂性物質に吸収されて次の核分裂反応を起こす、2)核分裂性物質に吸収されて<sup>236</sup>Uのような重い核を生成する、3)周囲の原子炉材料に吸収される、4)炉体系から漏れ出る、5)<sup>238</sup>Uのような親物質に吸収されて<sup>239</sup>Puなどの核分裂性物質を生成する、などを経て消費される。1回の核分裂<sup>\*</sup>により5)の反応が1回以上起きると、核分裂性物質は増えることとなる。このことを増殖比が1以上であるといい、それを実現する原子炉が増殖炉である。増殖炉の条件は、核分裂性物質の核分裂反応断面積が大きく、1回の核分裂反応により放出する中粒子の数が2個以上であることと、親物質による中粒子捕獲断面積が大きいことである。増殖炉の可能性を有するのは、トリウム-ウラン-233系(熱中粒子<sup>\*</sup>-溶融塩炉)およびウラン-プルトニウム系(高速中粒子炉)である。

### 相対性理論 theory of relativity

A. Einsteinが1905年に発表した特殊相対性理論と1915-1916年に発表した一般相対性理論。前者は慣性系(非加速、等速運動系)を対象にしたものであり、後者は加速系にも拡大した理論。特殊相対性理論は、あらゆる運動が相対的であり(絶対座標軸は無い)、全ての基本的物理法則は同一の形をもつという「相対性原理」を電磁気学にも適用し、「光速不変の原理」を基に空間と時間を統一した(四次元のミンコフスキー空間)。特殊相

対性理論から、エネルギーと質量の等価公式  $E = mc^2$  が導かれる。一般相対性理論は、上述の「相対性原理」とともに重力(万有引力)と加速度/慣性力の「等価原理」を基にしており、万有引力は時空の曲がりであって(リーマン幾何学で表現)、光もその重力場により曲がることを示した。そこから「アインシュタイン方程式」が導かれた。一般相対性理論からはさらに1)引力は光速で伝播する、2)二物体間の引力の大きさには両者の相対速度が影響するなどが導かれる。

### 相対的生物作用

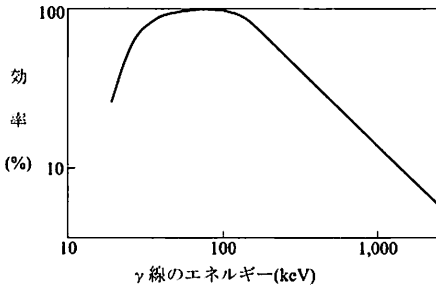
#### relative biological effectiveness (RBE)

放射線生物学において、放射線<sup>\*</sup>の質の違い(線エネルギー付与<sup>\*</sup> LET)による生物学的効果<sup>\*</sup>の違いを表す。RBE値は、同一の照射条件において同じ特定生物影響を引き起こすような2種類の放射線の吸収線量<sup>\*</sup>の比として与えられる。すなわち、標準の放射線を $\gamma$ 線<sup>\*</sup>あるいはX線<sup>\*</sup>とし、対象とする放射線が標準の放射線が生体に及ぼす影響と等しい影響を与えるときの両者の吸収線量の比である。例えば、ある生物の致死吸収線量が、 $\gamma$ 線では10 Gyであり、中粒子線では5 Gyであるとする、この中粒子線のRBEは2となる。全てのエネルギー領域について、光子<sup>\*</sup>、電子<sup>\*</sup>およびミュー粒子のRBE値は1に規格化されている。RBE値は、生物影響の種類、組織または細胞の型、線量<sup>\*</sup>と線量率<sup>\*</sup>などに依存する。したがって放射線の種類とエネルギーを特定してもある幅をもつ。1990年のICRP勧告によれば、臓器あるいは組織の平均吸収線量( $D_{TR}$ ; Gy)と放射線荷重係数<sup>\*</sup>( $w_R$ )の積を等価線量<sup>\*</sup>( $H_T$ ; Sv)としている。

#### 相対ピーク効率 relative peak efficiency

$\gamma$ 線<sup>\*</sup>(X線<sup>\*</sup>)スペクトロスコーピーにおいて、光電ピークの計数値(積算面積)か

ら線源の放射能<sup>\*</sup>を求める場合、ピーク計数率に対する計数効率<sup>\*</sup>を知る必要がある。この計数効率はピーク効率ともいわれ、通常、標準線源<sup>\*</sup>を用いて個々の検出器に特有の性質として実験的に求める。ピーク効率は線源と検出器との幾何学的配置、放射線<sup>\*</sup>と相互作用をする周囲の物質、線源材料と検出器の特性、放射線のエネルギーなどに依存する。ある特定の検出器システムについて、ピーク効率の $\gamma$ 線エネルギー依存性を図示したものをピーク効率曲線<sup>\*</sup>という。ピーク効率曲線において、ある基準のエネルギーにおいて1に規格化したピーク効率に対するあるエネルギーの $\gamma$ 線のピーク効率を相対ピーク効率<sup>\*</sup>という。図参照。



相対ピーク効率。ウェル型 Ge 検出器のピーク効率曲線

### 相対論効果 relativistic effect

原子内の軌道電子<sup>\*</sup>のエネルギーは内殻の軌道ほど高く、電子<sup>\*</sup>の速度は大きくなる。その結果、電子質量は相対論的に増大し、軌道半径は収縮する。この相対論的収縮は s 軌道や p 軌道に見られる。d 軌道、f 軌道などのより外殻の軌道電子から見た場合、内殻軌道が収縮すると原子核<sup>\*</sup>の電荷はより効果的に遮蔽される。その結果、外殻軌道は外側に膨張し不安定化する。s 軌道以外の角運動量が 0 でない軌道電子の場合、相対性理論<sup>\*</sup>

から、スピン-軌道相互作用によりエネルギー準位<sup>\*</sup>の分裂が導かれる。これらの「相対論効果」は、原子番号<sup>\*</sup>が大きいほど大きくなり、原子間距離、光電子スペクトル、イオン半径などに影響を与える。金の「金色」や水銀の「低い融点」も相対論効果によることが解っている。ランタノイド収縮やアクチノイド収縮は現象論的には非相対論によっても説明できるが、その大きさ(実測値)は相対論効果を考慮しなければ説明できない。超重元素<sup>\*</sup>の化学的性質の研究では、相対論効果を無視できない。

### 相対論的質量増加 relativistic mass increase

特殊相対性理論では、ある物質に加速度(エネルギー)を加え続けるとその物質の速度は光速に近づくが、決して光速を越えない。エネルギー不変の法則と、エネルギーと質量の等価公式  $E = mc^2$  から、加えたエネルギーはその物質の質量を増大させると結論される。

### 相対論的重イオン衝突

#### relativistic heavy-ion collision

陽子<sup>\*</sup>はクォーク<sup>\*</sup>やグルーオンなどの素粒子<sup>\*</sup>から成り立っている。このクォークを陽子から開放して自由クォークを取り出すことができれば、クォークを粒子の中に閉じ込めている本質を解明できる。そこで、できるだけ重い原子核<sup>\*</sup>を光速に近い高エネルギーで衝突させ、衝突によって起こる現象を調べる研究が 1985 年より開始された。1999 年に実験施設として相対論的重イオン衝突型加速器 RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) が米国ブルックヘブン国立研究所に建設され、2000 年には金ビーム同士の衝突に成功した。わが国からは、文部科学省日米科学技術協力事業(高エネルギー物理学分野)の一環として、高エネルギー加速器研究機構など 7 機関が大型国際共同実験 PHENIX に参加している。

## 速度弁別型質量分析装置

time-of-flight mass spectrometer

→飛行時間質量分析

## 即発ガンマ線分析

prompt gamma ray analysis

中性子捕獲 $\gamma$ 線などの即発 $\gamma$ 線を測定することにより試料中の元素<sup>\*</sup>を分析する方法。一般的に用いられている中性子放射化分析法では分析が困難な軽元素(H, B, N, S, Siなど)やCd, Gdなどの多くの元素の分析が可能である。中性子源<sup>\*</sup>として、高い中性子束が得られる原子炉<sup>\*</sup>が最も有用であり、<sup>252</sup>Cf線源あるいは加速器<sup>\*</sup>も用いられる。バックグランドの低減には、冷中性子<sup>\*</sup>の利用が有効である。日本原子力研究開発機構のJRR-3Mの冷中性子ガイドビーム(中性子束： $\sim 10^8 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )には即発 $\gamma$ 線分析装置が設置されている。中性子捕獲即発 $\gamma$ 線は、通常の壊変 $\gamma$ 線と比べ、エネルギーが高い多種類の $\gamma$ 線<sup>\*</sup>から成るので、他の共存元素の妨害を防ぐためには、適切な $\gamma$ 線エネルギーを選ぶ必要がある。

## 即発中性子 prompt neutron

核分裂<sup>\*</sup>とほぼ同時( $\sim 10^{-14}$ 秒)に放出される中性子<sup>\*</sup>。全中性子発生数の99%以上を占め、短時間で核反応<sup>\*</sup>を起こして消滅する。これとは別に核分裂片の生成から0.2秒～数分遅れて放出される中性子もあり、これを遅発中性子<sup>\*</sup>という。例えば<sup>235</sup>Uの核分裂では、1反応当たり0.016個の遅発中性子が生じる。短時間で変化する即発中性子のみで到達した臨界状態を即発臨界<sup>\*</sup>という。それに対し、通常の運転状態にある原子炉<sup>\*</sup>は即発中性子および遅発中性子の和の収支により臨界状態が維持される。原子炉では制御棒<sup>\*</sup>を用いて遅発中性子を制御して臨界状態を保つので、核分裂を制御する時間的余裕が大きくなり、原子炉の安全性が向上する。

## 即発臨界 prompt criticality

→即発中性子 核分裂<sup>\*</sup>とほぼ同時に放出される即発中性子<sup>\*</sup>のみで到達する臨界状態。

## 組織荷重係数 tissue weighting factor

等価線量<sup>\*</sup>から実効線量を算出する際に用いる組織ごとの係数。臓器や組織により放射線被ばくによるがんの発生や遺伝的影響の程度が異なることを補正するために用いる。放射線<sup>\*</sup>の確率的影響<sup>\*</sup>による組織や臓器の損傷の割合を身体の全損傷に対して算出する。その値は1990年のICRP勧告に示されており、生殖腺、骨髄、甲状腺、あるいは皮膚のそれぞれの値は0.20, 0.12, 0.05, あるいは0.01などである。

## 組織線量当量限度

tissue dose equivalent limit

人体が放射線<sup>\*</sup>で照射されたとき、組織ごとの生物学的効果<sup>\*</sup>を考慮した線量<sup>\*</sup>の限度をいい、放射線による皮膚障害、白内障、組織障害、個体死などの確定的影響が生じることのない“しきい値”以下の線量としてICRPが勧告している。放射線作業従事者については、通常組織に対して500 mSv/年、水晶体に対して150 mSv/年が、一般公衆については水晶体に対して15 mSv、皮膚に対して50 mSv/年が組織線量当量限度として定められている。

## 阻止能 stopping power

荷電粒子<sup>\*</sup>が物質中を通過するとき、物質との相互作用によって単位進行長あたりに失う平均エネルギーを阻止能(S)といい、 $S = -dE/dx$ で与えられる。エネルギー損失過程には、入射粒子と物質を構成する原子<sup>\*</sup>との弾性衝突と非弾性衝突とがあり、前者によるものを核的阻止能<sup>\*</sup>(nuclear stopping power)、後者によるものを電子的阻止能<sup>\*</sup>(electronic stopping power)という。制動放射<sup>\*</sup>やチェ

レンコフ放射が関与するものを放射阻止能<sup>\*</sup> (radiative stopping power) といい、これらを加え合わせたものを全阻止能という。一般に、粒子のエネルギーが低い場合には弾性衝突が優勢であり、エネルギーが高くなると非弾性衝突が優勢になる。阻止能は物質中での粒子の飛程<sup>\*</sup>を決めるだけでなく、粒子からのエネルギー付与の空間分布を決める重要な因子である。阻止能は、薄膜を通過する際の粒子のエネルギー損失の測定あるいは薄膜に吸収されたエネルギーの測定により求める。Sを物質の密度で除した値を質量阻止能という。質量阻止能に対して、Sを線阻止能と呼ぶこともある。

### 素粒子 elementary particle

### 大気浮遊塵 airborne dust

大気中に浮遊する微粒子状物質のことで、エアロゾル<sup>\*</sup> (aerosol) とも呼ばれる。主成分は土壌粒子、海塩粒子、煤、スモッグなどである。自然起源と人為起源がある。砂漠などの乾燥地域から舞い上がり風送される自然起源浮遊塵については、発生地域だけにとどまらず気候変動などの地球規模での環境への影響が懸念されている。そのような観点から、大気浮遊塵の粒径、化学成分、濃度ならびにその季節変動の監視が重要視されている。大気中に放出された放射性物質<sup>\*</sup>の移動媒体としての役割も見逃がせない。

### 大強度陽子加速器

#### high intensity proton accelerator

日本原子力研究開発機構 (JAEA) と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) が事業主体となり、茨城県東海村に建設を進め

物質を構成し内部構造をもたない最も基本的な粒子。素粒子の定義は、素粒子物理学や高エネルギー物理学の進歩とともに変遷したが、標準モデル (standard model) によると、物質を構成する素粒子として6種のレプトン<sup>\*</sup> (電子<sup>\*</sup>, ミュオン<sup>\*</sup>, タウ粒子<sup>\*</sup>, 電子ニュートリノ, ミュオンニュートリノ, タウニュートリノ) と6種のクォーク<sup>\*</sup> (ダウン, アップ, ストレインジ, チャーム, ボトム, トップ) がある。力を伝える粒子をゲージ粒子といい、電磁力を伝える光子<sup>\*</sup>, 弱い力を伝えるW粒子<sup>\*</sup>とZ粒子<sup>\*</sup>, 強い力を伝える8種のグルオンがある。重力を伝える粒子 (重力子) の存在も予測されているが、未だ確認されていない。

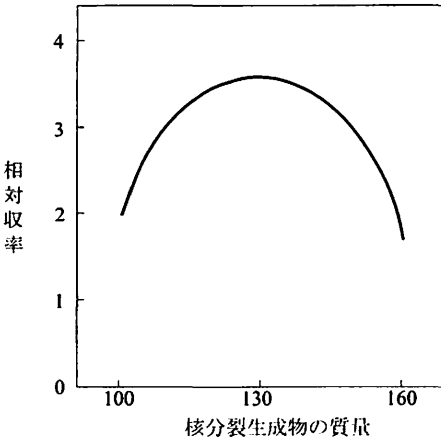
## た

ている世界最高レベルのビーム強度を有する直線形加速器、3 GeV シンクロトロンおよび50 GeV シンクロトロンから成る陽子加速器施設群。高エネルギーの陽子<sup>\*</sup>を標的の原子核<sup>\*</sup>に衝突させたときに発生する中性子<sup>\*</sup>,  $\pi$ 中間子<sup>\*</sup>, ミュオン<sup>\*</sup>, ニュートリノ<sup>\*</sup>, 反陽子<sup>\*</sup>などの二次粒子を用いて、基礎から産業利用に至る広範な視点から①物質科学および生命科学, ②原子核と素粒子<sup>\*</sup>物理学, ③核変換<sup>\*</sup>技術の3領域の研究開発を進める。2006年2月にはJAEAとKEKを主体とするJ-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) が設立され、2008年度の運用開始をめざす。

### 対称核分裂 symmetric fission

→核分裂モード 核分裂<sup>\*</sup>は重い原子核<sup>\*</sup> (親核) が二つの分裂片 (娘核) に分かれる反応であり、親核の質量のほぼ半分

相当する二つの娘核が生じる対称核分裂と、娘核のひとつが重くもう一方が軽い非対称核分裂とがある。娘核の質量分布が対称になるか非対称になるかは親核の原子番号 $Z$ に依存する。 $Z > 90$ では励起エネルギーが小さい場合は主に非対称核分裂が起こるが、励起エネルギーの増加とともに対称核分裂の割合が増加する。図参照。



対称核分裂の質量分布 (模式図)

$^{246}\text{Cm}$  に  $^{18}\text{O}$  (約 100 MeV) を照射して生じる複合核の核分裂

**大統一理論 grand unified theory (GUT)**

素粒子であるレプトンとクォークは何個か複合して粒子を形成する。結びつける力には、強い力、電磁力、弱い力、重力の4つがある。理論物理学の世界では4つの力を統一して扱うことができることの証明が大きな課題である。1967年に米国のワインバーグ (S. Weinberg) とパキスタンのサラム (A. Salam) は、このうち電磁力と弱い力を統一し、電弱力とした。次の目標は、この電弱力と強い力を統一する「大統一理論」を完成させることである。しかし、その証明となる陽子崩壊はまだ観測されていない。さらに、

重力をも統一した「超大統一理論」の仮説も出されている。こうした力の大統一によって、宇宙の創生と進化に関わる謎が解けると考えられている。根源的には統一的な一つの力しかなく、そこから枝別れてして宇宙が進化してきたということを実証できる点に力の大統一の意義がある。ちなみに、電磁力は電気力と磁気力の“統一”であり、これは19世紀にマクスウェルによる電磁気学の大系化においてなされた。

**太陽ニュートリノ solar neutrino**

太陽で起こる核融合反応によって大量の熱エネルギーとともに放出される電子ニュートリノ ( $\nu_e$ )。1968年に米国のデービス (R. Davis, Jr.) によって初めて観測されたが、太陽ニュートリノフラックスの観測結果は放出される熱から予測される値の1/3以下であった。この「消えた太陽ニュートリノの謎」は30年間解決されず「太陽ニュートリノ欠損問題」と呼ばれてきた。1990年代に、太陽から放出された電子ニュートリノが、別の(観測にかからない)ニュートリノへと変化するという仮説が出された。これをニュートリノ振動仮説という。素粒子のレプトンには、電子、ミュオンおよびタウ粒子とそれぞれに対応する3種類のニュートリノがある。ニュートリノ振動とは、3種のニュートリノが相互に変化する現象である。2002年にカナダの重水を用いた実験で電子ニュートリノが他の種類のニュートリノに転換する現象が発見され、ニュートリノ振動が原因である可能性が強まった。2005年になり、カムランド (KamLAND, Kamioka Liquid Scintillator Anti-Neutrino Detector) の観測で得た振動パラメーターが太陽ニュートリノの振動パラメーターと一致することが確認され、太陽ニュートリノ欠損問題は解決した。



## タウ粒子 tau( $\tau$ ) particle

→素粒子 レプトン<sup>\*</sup>のひとつであり負電荷をもつ。同じレプトンである電子<sup>\*</sup>の3560倍の質量をもち、平均寿命は $3.4 \times 10^{-13}$ 秒である。

## タウンゼントなだれ Townsend avalanche

→ガイガー-ミュラー (GM) 計数管 →ガイガー-ミュラー領域 気体検出器<sup>\*</sup>に入射した荷電粒子<sup>\*</sup>あるいは $\gamma$ 線<sup>\*</sup>やX線<sup>\*</sup>によって電離<sup>\*</sup>される一次電子は陽極と陰極間の電場によって加速され、陽極に向かって移動する。このとき、十分に高いエネルギーをもつ電子<sup>\*</sup>は、原子<sup>\*</sup>や分子の電離、励起を引き起こす。電離により発生する電子もまた電場によって加速され、さらに電離、励起を引き起こす。これが繰り返して起こり、電子なだれ<sup>\*</sup>に発展する。このカスケード的なだれ現象はアイルランドの物理学者タウンゼントにより1915年に確立された概念であり、タウンゼントなだれと呼ばれる。タウンゼントなだれは電気パルスとして検出され、ガイガー-ミュラー (GM) 計数管<sup>\*</sup>の基盤となった。

## 多重ガンマ線検出分析

### multi-gamma ray detection analysis

多重 $\gamma$ 線計測法と放射化分析<sup>\*</sup>法を組み合わせた高感度元素分析法。2本以上の

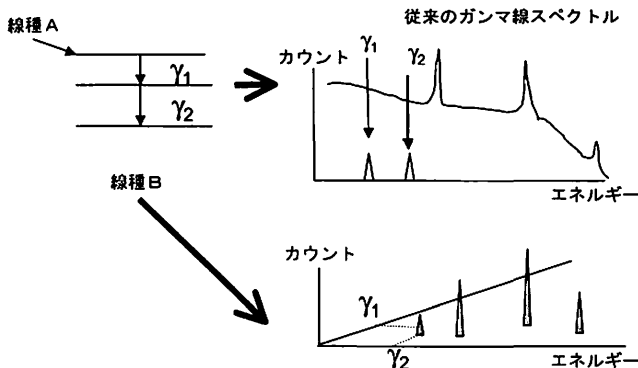
$\gamma$ 線<sup>\*</sup>を連続して放出する放射性核種<sup>\*</sup>の計測において、複数の検出器でこれらの $\gamma$ 線を同時測定し、得られた $\gamma$ 線の対を二次元にプロットすることにより低バックグラウンドでの $\gamma$ 線の高感度検出を可能とする。通常の放射化分析法では困難な $^{191}\text{Ir}$ や $^{129}\text{I}$ の超高感度分析に利用されている。図参照。

## 多重中性子捕獲 multi-neutron capture

→ $r$ 過程 中性子捕獲反応<sup>\*</sup>につづく生成核の壊変<sup>\*</sup>前に次の中性子<sup>\*</sup>が多重に捕獲される反応のこと。多重中性子捕獲反応により原子番号<sup>\*</sup>が大きい元素<sup>\*</sup>が生成する。宇宙では、ビッグバン<sup>\*</sup>の後100秒ほどの間に水素とヘリウム、そして少量のリチウムが合成され、それ以外の元素は恒星内部での核合成<sup>\*</sup>や超新星<sup>\*</sup>爆発によって合成されたと考えられている。鉄より重い元素は超新星爆発にともなう多重中性子捕獲反応( $r$ 過程<sup>\*</sup>)によって合成される。

## W値 W value

荷電粒子<sup>\*</sup>の照射によって、物質中に一对の陽イオンと電子<sup>\*</sup>を生成させるのに実効的に必要なエネルギー。運動エネルギー $E$ の荷電粒子が物質中で完全に止められたとき、その飛跡に沿って物質中に $N$ 個のイオン対が生成したとすると、



多重 $\gamma$ 線検出分析の原理

$W = E/N$ で表わされる。Nには、二次的に生じるイオンも含める。多くの気体、液体について、W値は25～35 eVの範囲にある。

### W粒子 W particle

→素粒子 1983年に発見されたゲージ粒子。Z粒子とともに、弱い相互作用の力を媒介する粒子である。

### ダブルフォトンエスケープピーク

double photon escape peak

→光子エスケープピーク

### 単一原子化学 atom-at-a-time chemistry

重イオン核反応で生成する原子番号が100以上の重元素の原子は、ほとんどの場合数分間に1個ないしそれ以下の頻度でしか生成せず、生成核は短寿命(数秒から数十秒の半減期)である。このような重元素を対象として、一度に取り扱える原子が1個であるような厳しい条件下で、数十秒の間にすばやく分離分析して化学的性質を決める化学操作を単一原子化学と呼ぶ。日本原子力研究開発機構の超重元素研究を例にあげると、核反応で合成した超重元素(原子)をガスジェット搬送装置によって2～3秒のうちに化学実験室に搬送し、化学分離装置へと導く。この迅速化学分離装置は、微量(200～300  $\mu$ L)な試料溶液を用いて直径1.6 mm、長さ7.0 mmのマикроカラムで効果的にイオン交換分離できるよう設計されており、イオン交換分離から $\alpha$ 線測定までの一連の操作をコンピュータ制御で自動的に繰り返し行う。例えば、 $^{261}\text{Rf}$  ( $t_{1/2} = 78$  秒)を化学分離に要する時間は約20秒で、核反応生成物を捕集してから約1分後に放射線測定を開始することができる。この分離操作を数千回繰り返し、超重元素の化学的性質を調べる。

### 単一光子放射コンピュータ断層撮影

single photon emission computed tomography

### (SPECT)

コンピュータ断層診断技術の一つ。単一エネルギー $\gamma$ 線放出核種で標識した放射性薬剤を体内に投入し、放射性薬剤の臓器への集積状態や代謝過程をガンマカメラを用いて画像化し、腫瘍や疾患部位を診断する。 $\gamma$ 線放出核種として $^{67}\text{Ga}$ (半減期3.2日)、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (半減期6.0時間)、 $^{111}\text{In}$ (半減期2.8日)、 $^{123}\text{I}$ (半減期13.3時間)、 $^{201}\text{Tl}$ (半減期3.0日)などが用いられる。

### 弾性散乱 elastic scattering

$\alpha$ 線、 $\beta$ 線などの荷電粒子が物質中に入射したとき、周囲の電子や原子核とのクーロン反発などの電気的な相互作用により、その進路が大きく曲げられる現象。電磁散乱あるいはクーロン散乱ともいう。これに対して物質中の原子の電離や励起をとまなう相互作用を非弾性散乱と総称する。

### 炭素-14年代測定 carbon-14 dating

→年代測定 生物や炭素化合物中の炭素の放射性同位体 $^{14}\text{C}$ が、 $\beta$ 崩壊により5,730年の半減期で減じていく性質を利用し、考古学や地質学的試料の年代を定める絶対年代測定法の一つ。米国のリビー(W. F. Libby)が開発し、1960年にノーベル化学賞を受賞した。 $^{14}\text{C}$ は大気上層で宇宙線による $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ 反応で絶えず生成しており、生命体中の $^{14}\text{C}$ の存在比は環境(大気中の炭素同位体は $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} \sim 1.2 \times 10^{-12}$ と概ね一定)と平衡状態にあるが、生命体の死により取り込みが停止したときから $^{14}\text{C}$ は半減期に従い減衰するので、試料中の $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ を測定することによって、取り込み停止後の経過時間を決定することができる。遺跡試料中の炭素同位体比の測定には、試料から炭素を抽出したのちベンゼンなどに変換して放射能を測る方法や、加速器質量分析法(AMS)を用いる。前

者では数 g ～数 10 g の比較的多量の試料が必要であり、測定可能な年代は半減期の数倍程度の約 1 ～ 2 万年である。後者は極めて高感度で  $^{14}\text{C}$  を精度よく定量できるため、試料量は数 mg で十分であり、測定可能な年代も 10 万年程度まで広がる。

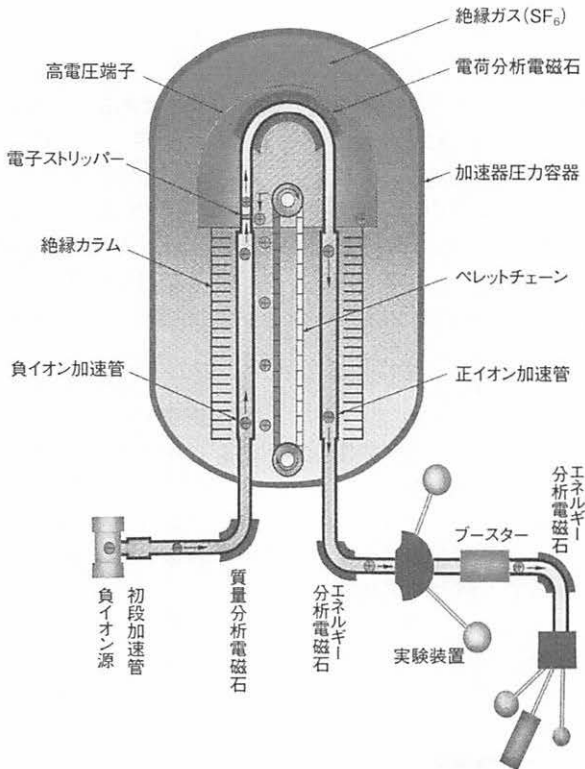
**担体 carrier**

溶液中の極低濃度の元素\* を沈殿法や樹脂吸着法で分離、濃縮するとき、試料溶液に加える目的元素と化学的挙動が等しいか極めて類似した元素あるいはそれを含む物質、極低濃度の元素に特異的な沈殿挙動、吸着挙動などのために元素の分離効率や回収率が低下するのを防ぐ。放射性核種\* の担体としては、その安定

同位体\* を用いる場合が多い。溶液中から不必要な元素を除去するために加える担体をスカベンジャー\* と呼び、目的元素が吸着または共沈法で他の成分に伴って除かれるのを防ぐために加える担体を保持担体\* と呼ぶ。

**タンデム加速器 tandem accelerator**

バン・デ・グラフ加速器\* の一種。イオン源で負イオンを発生させ、高圧電極に向けて一度加速する。その途中で電荷を剥ぎ取って陽イオンに変え、次いで高圧電極側から接地側に再加速する。バン・デ・グラフ加速器を 2 段に分けて使用することから 2 頭立ての馬車にちなんでタンデム型と名づけられた。図参照。



タンデム加速器の概要



## チェルノブイリ原子力発電所事故

### Chernobyl accident

1986年4月26日、旧ソ連ウクライナ共和国西部にあるチェルノブイリ原子力発電所4号炉が動作試験中に制御不能に陥り、炉心が融解し、蒸気爆発した史上最大規模の原子炉事故。同炉は、旧ソ連が開発した黒鉛減速沸騰軽水圧力管型原子炉と呼ばれる商業用発電原子炉(RBMK-1000型、電気出力100万kW)で、中性子の減速材として黒鉛、冷却材として軽水が用いられていた。沸騰水型原子炉(BWR)と違い、出力上昇にともなう自己制御性をもたないという原理的な安全設計上の問題に加えて、運転員の規則違反という複合的要因により事故に至ったとされる。大量に放出された $^{131}\text{I}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ などの放射性物質が地球規模で拡散し、事故処理に当たった多くの労働者と周辺地域の住民に重篤な健康影響を生じた。

### チェレンコフ効果 Cherenkov radiation

高速の荷電粒子が屈折率 $n$ の透明な媒体中を通過するとき、この粒子の速度 $v$ が媒体内の光の速度( $=c/n$ 、 $c$ は真空中の光の速度)より大きい場合、光が放射

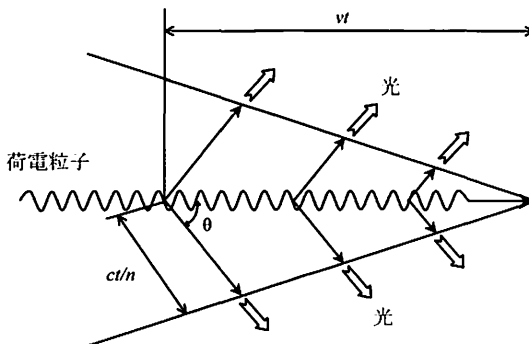
される。1934年、旧ソ連のチェレンコフ(P. A. Cherenkov)が $\gamma$ 線と水との反応で発生した高速電子による発光現象を発見したことから、チェレンコフ効果またはチェレンコフ放射と呼ばれる。媒体中の周りの原子が誘電分極し、荷電粒子通過後にその分極が解かれることにより、荷電粒子の進行方向に対して放射角 $\theta$ ( $\cos\theta = c/v$ )の円錐面上にチェレンコフ光が放射される。軽水減速型研究用原子炉の炉心周囲や原子力発電所の使用済核燃料格納用プールにおいて、青白いチェレンコフ光を見ることができる。図参照。

### 致死線量 lethal dose

放射線被ばくにより死亡に至る線量。被ばくした者の50%が死亡する線量で表わし、それを50%致死線量(半致死線量、LD50)という。動物実験では、放射線に被ばくした個体の半数が造血障害によって30日経過後に死亡する線量をLD50(30)と表わす。

### 地層処分 geological disposal

→深地層処分 数千年以上にわたって人間社会から隔離する必要がある高レベル放射性廃棄物やTRU廃棄物を、地下数百メートルの地層岩盤内に設置した処



チェレンコフ効果の原理図

分場に人による管理から外した状態で処分すること。

### 遅発核分裂 delayed fission

近年、重元素の不安定核領域で非常に低い確率で観測された特異な壊変様式で遅延核分裂ともいう。親核から $\beta$ 壊変を経て娘核の励起準位より核分裂する $\beta$ 遅発核分裂( $\beta$ -delayed fission)とEC壊変を経るEC遅発核分裂(EC-delayed fission)が知られている。娘核の励起準位が、娘核の核分裂障壁よりも高いか同程度の場合に起きる。遅発核分裂は、超新星爆発時の元素合成過程(r過程)で、ウランより重い元素に至る $\beta$ 壊変連鎖を断ち切るものとされ、この壊変の割合を調べることは、地球上にウランより重い元素が存在しない理由を解明する糸口になると考えられている。遅発核分裂の系統的研究は、大きく変形した原子核の構造や安定領域から離れた核の核分裂障壁や核分裂モードの研究にも役立つ。

### 遅発中性子 delayed neutron

→即発中性子 遅延中性子ともいう。核分裂の際、核分裂直後に放出される即発中性子のほか、核分裂生成物の一部が $\beta$ 壊変に伴って中性子を放出する。このように遅れて発生する中性子を遅発中性子と呼ぶ。その発生割合は、壊変核種の半減期が増すとともに減る。

### 中間子 meson

強い相互作用をする粒子のうち、バリオン数が0の粒子の総称。代表的な中間子である $\pi$ 中間子は1934年に湯川秀樹により核力と $\beta$ 壊変を媒介する新しい場の粒子として理論的に導入され、1947年に発見された。C. P. RochesterとC. C. Butlerは宇宙線霧箱写真からK中間子を発見した(1947年)。現在では高エネルギー加速器を用いた実験で $\eta$ ,  $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\psi$ などの中間子が見出されている。標

準模型では一対のクォークと反クォークから成るハドロンを中間子と呼ぶ。 $\pi^+$ のクォーク構成は $u\bar{d}$ 、Kのそれは $\bar{s}u$ である。チャームクォーク(c)やボトムクォーク(b)などを含む中間子も見られている。

### 中間貯蔵

interim storageまたはtransitional storage  
原子力発電炉から取り出した使用済核燃料を再処理あるいは直接処分するまでの間、発電所敷地内や中間貯蔵施設に保管すること。プール水中に貯蔵する湿式貯蔵と金属キャスク貯蔵方式、コンクリートモジュール方式、ボルト貯蔵方式などの乾式貯蔵がある。輸送キャスクをそのまま貯蔵に使用する金属キャスク貯蔵方式は、搬入搬出時に使用済核燃料を直接取扱う必要がなく施設拡張の容易さなどの利点があり、ドイツのゴアレーベンやスイスのヴェーレンリンゲンにある中間貯蔵施設で用いられている。わが国においても、幾つかの原子力発電所の敷地内にこの方式の施設が設置されている。2005年12月には、東京電力と日本原電の共同出資会社(リサイクル燃料貯蔵(株)、RFS)が設立され、青森県むつ市に中間貯蔵施設を建設することになった。

### 中性子 neutron

nと表記。核子の一つで、陽子とともに原子核を構成する。1932年にJ. Chadwickによって発見された。質量は $1.6749 \times 10^{-27}$  kgであり陽子よりやや重く、電荷は0、スピンは1/2、核磁気モーメントは $-1.9313043 \mu_N$ である。また、-1/2のアイソスピン、0のストレンジネス、1/2の超電荷をもつ。原子核の外で単独では不安定であり、半減期12.4分で $\beta$ 壊変し、陽子、電子および反電子ニュートリノを与える。運動エネルギーによって、冷中性子、熱中性子、熱外中性子、

高速中性子<sup>\*</sup>などと呼ぶ。低速中性子、中速中性子などと呼ぶこともある。電荷をもたないため、物質を透過する力は強いが、原子番号<sup>\*</sup>の小さい水素やホウ素などとの弾性散乱<sup>\*</sup>で減速される。研究面では、放射化分析<sup>\*</sup>あるいは回折や散乱<sup>\*</sup>を利用する物性測定などに広く用いられ、中性子誘起核破砕反応は使用済核燃料<sup>\*</sup>中に生成する長寿命核種の短寿命化(核変換<sup>\*</sup>)にも利用される。

#### 中性子源 neutron source

中性子<sup>\*</sup>を発生する線源または装置。α線<sup>\*</sup>を低原子番号の元素<sup>\*</sup>に照射する(α, n)反応を利用する<sup>241</sup>Am/Be線源は、約5 MeVの中速中性子を放出するため、中性子非弾性散乱γ線による分析などに用いられるが、中性子発生効率あまり高くない。自発核分裂性核種である<sup>252</sup>Cf(半減期<sup>\*</sup>2.65年)は、核分裂<sup>\*</sup>あたり約4個の中中性子を放出し、熱中性子ラジオグラフィ、放射化分析<sup>\*</sup>、即発γ線分析、中性子吸収・散乱・減速などの計測に用いられる。静電加速によるD-DあるいはD-T反応を利用する中性子発生装置や線形加速による中性子発生装置もある。原子炉<sup>\*</sup>は高速中性子<sup>\*</sup>、熱中性子<sup>\*</sup>、冷中性子<sup>\*</sup>などのさまざまなエネルギーの中中性子源として利用されている。

#### 中性子スキン neutron skin

→中性子ハロー 中性子過剰原子核において、陽子<sup>\*</sup>と中性子<sup>\*</sup>が共存する領域の周りにできる中性子の層。中性子のフェルミレベルが陽子のそれより浅いため、中性子と陽子の密度分布が大きく異なることに起因する。

#### 中性子ハロー neutron halo

原子核内の中性子<sup>\*</sup>と陽子<sup>\*</sup>の密度分布が不均一であることにより、核が異常に大きな径をもつ構造。人工的に合成された不安定な中性子過剰の原子核<sup>\*</sup>にみられる。天然に存在する軽元素の安定核が

均一に分布した同数の中性子と陽子から成るのに対して、中性子過剰核では、安定核の中中性子と陽子を含む“コア”の周りに余剰な中性子が薄く大きく広がる構造をとる。月(コアに相当)にかかる“かさ”に例えられてこう呼ばれる。ハローを形成する中性子の束縛エネルギーは非常に小さい。中性子スキン<sup>\*</sup>はコアの周りの余剰中性子の分布の外側境界が明確なのに対し、中性子ハローは遠方まで分布する。中性子ハローをもつ原子核として<sup>6</sup>He, <sup>8</sup>He, <sup>11</sup>Li, <sup>11</sup>Be, <sup>14</sup>Be, <sup>17</sup>B, <sup>19</sup>Cなどがある。

#### 中性微子 neutrino

→ニュートリノ

#### 中性子捕獲反応 neutron capture reaction

→熱中性子捕獲

#### 中性子ラジオグラフィー

neutron radiography

→ラジオグラフィー

#### 超重元素 super heavy elements

原子番号<sup>\*</sup>104以上の重い元素<sup>\*</sup>で超アクチノイド元素をさす。天然には存在せず、すべて人工的に合成された。主な合成反応として冷たい核融合反応(cold fusion reaction)と熱い核融合反応(hot fusion reaction)がある。前者は金属原子に別の金属のイオンビームを衝突させるもの、後者はアクチノイド元素に軽元素のイオンビームを衝突させるもので、後者の方が高いエネルギー状態に励起された複合核<sup>\*</sup>を生じる。主な研究グループは米国LBNL、ドイツGSI、ロシアのJINR、わが国の原子力機構と理研など数カ所に限られる。核反応<sup>\*</sup>で合成される超重核の数は極めて少ないため、超重元素の化学研究はモル量単位で原子<sup>\*</sup>を扱う通常の化学とは異なり、単一原子化学<sup>\*</sup>と呼ばれている。化学結合に関与する電子軌道への相対論効果<sup>\*</sup>が大きくなるため、原子番号と周期表<sup>\*</sup>上の位置づけにも関心

が寄せられている。

### 超重元素の島 island of superheavy elements

縦軸に陽子数 ( $Z$ )、横軸に中性子数 ( $N$ ) をとる核図表に現在知られている核種<sup>\*</sup>を図示すると、安定核種 ( $Z \leq 20$  では  $Z/N = 1$ ,  $Z > 20$  では  $Z$  の増加とともに  $Z/N = 1$  から漸次増大する) に沿って带状に延びる領域に多くの核種が存在する。このような領域を安定性の島 (island of stability) と呼び、その先にあると予想される超重核 ( $Z \geq 104$ ) の安定性の島を超重元素<sup>\*</sup>の島と呼ぶ。陽子数と中性子数が共に魔法の数<sup>\*</sup>をとるような超重核は二重閉核構造となるため、比較的長い半減期<sup>\*</sup>をもつと考えられる。理論的には、超重元素領域の魔法数は陽子<sup>\*</sup>で 114 と 126、中性子<sup>\*</sup>では 184 と予測されている。

### 超新星 supernova

重い恒星の進化の最終段階で暴走的な核反応<sup>\*</sup>が起り、星全体が大爆発する現象。爆発の際に、太陽が生涯をかけて放出する量に匹敵する巨大なエネルギーが放出される。スペクトルに水素の吸収線が見られない I 型と、水素の吸収線が見られる II 型に大別される。I 型超新星は太陽質量の 4 ~ 8 倍の星で見られる。このような星では、中心核の核融合<sup>\*</sup>は酸素と炭素の生成までで止まり、水素から成る外層を恒星風として放出しきった後は白

色矮星となる。白色矮星は内部のエネルギーを放出しながら次第に冷えていく。しかし、連星系を成す白色矮星の場合、相手の星から降り積った水素ガスによって再び核融合反応が生じ中心核の温度が上昇する。それとともに質量が増加する。高密度の中心核は自らの重力で収縮しようとするが、電子<sup>\*</sup>の縮退圧によって支えられているが、太陽質量の 1.4 倍(チャンドラセカール限界質量)まで増加すると、縮退圧では支えきれなくなり星がつぶれ始める。このとき炭素の核融合が暴走し、星全体が爆発してしまう。一方、太陽の 8 倍よりも重い星では、酸素や炭素よりもさらに重い元素<sup>\*</sup>が合成され、鉄まで進む。中心核が鉄で占められると、巨大な質量のため重力により収縮し、温度が上昇する。温度が  $5 \times 10^9$  K を超えると鉄の原子核<sup>\*</sup>は光分解によって  $\alpha$  粒子<sup>\*</sup>と中性子<sup>\*</sup>に分解する。 $\alpha$  粒子はさらに中性子と陽子<sup>\*</sup>に分解し、陽子は直ちに電子<sup>\*</sup>を捕獲して中性子となる。これらの吸熱反応により中心核は温度と圧力が急激に下がり重力崩壊を起こし、解放された重力エネルギーは外層物質を一気に吹き飛ばす。これが II 型超新星爆発であり、爆発の残骸が中性子星やブラックホール<sup>\*</sup>として残る。

## つ

### 対消滅 pair annihilation

対生成の逆の過程。粒子とその反粒子が合体して消滅し、エネルギーあるいは他の粒子になること。電子<sup>\*</sup> ( $e^-$ ) と陽電子<sup>\*</sup> ( $e^+$ ) の対消滅では、通常 2 個または 3 個

の光子<sup>\*</sup>が発生する。陽子<sup>\*</sup> ( $p$ ) と反陽子<sup>\*</sup> ( $\bar{p}$ ) の対消滅では、 $p + \bar{p} \rightarrow 2\pi^+ + 2\pi^- + \pi^0$  のように多くのハドロン群が発生する。

**低濃縮ウラン low enriched uranium**

$^{235}\text{U}$ の含有率を天然ウランのそれ以上に高めた濃縮ウラン<sup>\*</sup>のうち、 $^{235}\text{U}$ 含有率が0.7～20%のものを指し、原子力発電<sup>\*</sup>や研究用原子炉<sup>\*</sup>の核燃料<sup>\*</sup>に用いる。わが国の発電用の軽水炉<sup>\*</sup>で現在使用されているのは3～5%の低濃縮ウランである。 $^{235}\text{U}$ 濃度が20%を超えるものを高濃縮ウランという。

**低レベル放射性廃棄物****low-level radioactive waste**

放射性廃棄物<sup>\*</sup>のうち、再処理施設で発生する放射能レベルの極めて高い高レベル放射性廃棄物<sup>\*</sup>以外のものを指す。原子力発電所からは、極低レベルの廃棄物(コンクリート、金属など)、比較的レベルの低い廃棄物(廃液、フィルター、廃器材、消耗品など)および比較的レベルの高い廃棄物(制御棒<sup>\*</sup>、炉内構造物など)が発生する。ウラン濃縮<sup>\*</sup>や燃料加工施設からはウラン廃棄物<sup>\*</sup>(消耗品、スラッジ、廃器材など)が、再処理<sup>\*</sup>やMOX燃料<sup>\*</sup>加工施設からは超ウラン核種を含む廃棄物(燃料棒<sup>\*</sup>の部品、廃液、フィルターなど)が発生する。放射性物質<sup>\*</sup>を扱う医療施設や研究機関などからも低レベル廃棄物が発生する。

**デコミッションング decommissioning**

耐用年数が過ぎたり、使用の目的が終了したりした原子力施設及び放射性元素取扱い施設の廃止措置。主に密閉管理、遮蔽管理および解体撤去の三つの方法がある。密閉管理は施設から核燃料物質<sup>\*</sup>や放射性物質<sup>\*</sup>を移動した後、汚染されている部分を除染<sup>\*</sup>し、施設を閉鎖して環境監視をする方法。遮蔽管理は、放射化<sup>\*</sup>されている部分や汚染除去が困難な部分をコンクリートなどの遮蔽壁を用いて閉じこめ、点検管理する方法。解体撤

去は、すべての構造物を解体し、解体によって発生する汚染物質は別途管理し、敷地を再利用する方法である。

**鉄線量計 iron dosimeter**

→フリッケ線量計

**デルタ線  $\delta$  ray**

電離<sup>\*</sup>や励起を引き起こすのに十分なエネルギーを有する二次電子<sup>\*</sup>。放射線照射により発生する $\delta$ 線は、入射した放射線<sup>\*</sup>の飛跡から短く枝分かれしたような飛跡を示す。

**電荷担体 charge carrier**

固体中での電気伝導に寄与する電子(伝導電子)、正孔(ホール)のこと。

**転換比 conversion ratio**

原子炉<sup>\*</sup>で燃焼によって消費された核分裂性物質<sup>\*</sup>の量に対する生成した核分裂性物質の量の割合。ウラン燃料では $^{235}\text{U}$ が核分裂<sup>\*</sup>を起こすと同時に、非核分裂性の $^{238}\text{U}$ が中性子<sup>\*</sup>を吸収し核分裂性の $^{239}\text{Pu}$ を生じる。この場合転換比は、初期に燃料に含まれていた $^{235}\text{U}$ の量と生成した $^{239}\text{Pu}$ の量の比である。軽水炉<sup>\*</sup>では転換比は約0.6、高速増殖炉<sup>\*</sup>の転換比(増殖比)は約1.2である。

**転換炉 converter**

核分裂反応によるエネルギー生産と同時に燃料となる核分裂性物質<sup>\*</sup>の生産を目的とする原子炉<sup>\*</sup>。高速増殖炉<sup>\*</sup>は転換炉の一種である。わが国では、CANDU(Canadian Deuterium Uranium)炉を基に、重水減速沸騰軽水冷却型の新型転換炉(Advanced Thermal Reactor, ATR)が開発された。減速材<sup>\*</sup>として軽水よりも中性子<sup>\*</sup>を吸収しにくい重水を使用するため、燃料の使用効率が高い。転換比<sup>\*</sup>は0.6～0.8であり軽水炉<sup>\*</sup>の0.6よりも高い。福井県敦賀に建設された新型転換炉の原型炉「ふげん」は、1979年から本格運転

を開始し、燃料・材料の開発、運転・保守性の向上などの技術開発を行いながら、世界に先駆けてプルトニウムの利用技術の確立に貢献した。1995年に原子力委員会<sup>\*</sup>は電気事業連合会の申し入れを受け、主に経済性を理由に実証炉の建設中止を決定し、ふげんは2003年に運転を停止した。

## 電子 electron

→素粒子 レプトン<sup>\*</sup>に属する素粒子<sup>\*</sup>。記号は $e^-$ 。負の単位電荷( $-1.60217733 \times 10^{-19} \text{ C}$ )をもち、静止質量<sup>\*</sup>( $m_e$ )は $9.1093897 \times 10^{-31} \text{ kg} = 5.485 \times 10^{-4} \text{ u} = 0.511 \text{ MeV}$ である。スピン量子数は $1/2$ 、磁気モーメント<sup>\*</sup>は $1.00116$  ボア磁子。反粒子 $e^+$ は陽電子<sup>\*</sup>(positron)と呼ばれる。

## 電子スピン共鳴

### electron spin resonance (ESR)

強い静磁場中にある電子<sup>\*</sup>のスピンが振動磁場または電磁波<sup>\*</sup>(主にマイクロ波)を加えたときに示す共鳴現象。これを分光学に応用したものが電子スピン共鳴法である。電磁波の共鳴吸収スペクトルは物質中の不対電子の数およびその周囲の構造に依存するため、試料中のラジカルや格子欠陥の定量に用いられる。

## 電子対生成 electron pair production

→対消滅 電子対創生(pair production)ともいう。1.022 MeV以上のエネルギーをもつ $\gamma$ 線<sup>\*</sup>が原子核<sup>\*</sup>の近傍を通過する際、原子核のクーロン場<sup>\*</sup>で光子<sup>\*</sup>が消滅し電子<sup>\*</sup>( $e^-$ )と陽電子<sup>\*</sup>( $e^+$ )の対を生成する現象。

## 電子的阻止能 electronic stopping power

→阻止能

## 電子なだれ avalanche of electrons

→タウンゼントなだれ 物質(固体、液体、気体)中の電子<sup>\*</sup>が強い電場によって加速されると、電子が移動する際に衝突した原子<sup>\*</sup>にエネルギーを与え、原子をイオン化し新しい電子(二次電子<sup>\*</sup>)を

生じる。その二次電子も加速されて次々にイオン化を繰り返すため電子の数が指数関数的に増加する現象。気体中での電子なだれをタウンゼントなだれ<sup>\*</sup>とも呼ぶ。半導体中で電子なだれが発生すると、放電管に似た特性が現れることがある。絶縁体に高電圧をかけて電子なだれを起こし放電させることを絶縁破壊という。この原理を用いて電子を電圧パルスとして増幅するものにアバランシェフォトダイオードがある。

## 電磁波 electromagnetic wave

電場と磁場がその時間的な変動により空間的に離れた場所まで伝播する波動現象。真空中では光速で伝播し、電場と磁場とは直交する。1864年、英国のマクスウェル(J. C. Maxwell)がその存在を理論的に示し(マクスウェルの電磁理論)、1888年にドイツのヘルツ(H. R. Hertz)による実験で確認された。電波のほかに光(紫外線、可視光線、赤外線)も電磁波<sup>\*</sup>であり、 $\gamma$ 線<sup>\*</sup>やX線<sup>\*</sup>も含まれる。

## 天然バリア natural barrier

→深地層処分 放射性廃棄物<sup>\*</sup>の埋設処分に際し、放射性物質<sup>\*</sup>の漏えいが人間の生活環境に影響を及ぼすことがないように設ける障壁(バリア)。金属製容器や緩衝材のような人工バリア<sup>\*</sup>に対し、天然の安定した地層を天然バリア<sup>\*</sup>という。天然バリアは人工バリアの外側に位置し、人工バリアの劣化などにより放射性物質の周囲への汚染を防ぎきれないとき、放射性物質の保持あるいは希釈分散によりその危険性を低減する役割を果たす。

## 天然放射性核種 natural radionuclide

→壊変系列 天然に存在する放射性核種<sup>\*</sup>の総称。一次放射性核種<sup>\*</sup>(primary radionuclide)、二次放射性核種<sup>\*</sup>(secondary radionuclide)、誘導放射性核種<sup>\*</sup>(induced radionuclide)、消滅放射性核種<sup>\*</sup>(extinct

radiouclide)に分類される。一次放射性核種は、地球が誕生した46億年前から存在した長寿命核種で、壊変系列\*をつくる $^{238}\text{U}$ (ウラン系列\*)、 $^{232}\text{Th}$ (トリウム系列\*)、 $^{235}\text{U}$ (アクチニウム系列\*)などと、系列をつくらない $^{40}\text{K}$ や $^{87}\text{Rb}$ などの核種\*がある。壊変系列の途中で出現する $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{227}\text{Ac}$ 、 $^{231}\text{Pa}$ 、 $^{210}\text{Po}$ のような短寿命の核種を二次放射性核種という。地球外から到達する宇宙線\*などによる核反応\*の結果として大気や隕石中に存在する $^3\text{H}$ 、 $^{10}\text{Be}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{26}\text{Al}$ などを誘導放射性核種という。消滅放射性核種とは、 $^{92}\text{Nb}$ 、 $^{129}\text{I}$ 、 $^{146}\text{Sm}$ のように半減期\*が $10^7$ から $10^8$ 年の放射性核種で、惑星や隕石の形成過程である時期まで存在し、現在得られる試料ではその壊変生成物である娘核種\* ( $^{92}\text{Zr}$ 、 $^{129}\text{Xe}$ 、 $^{142}\text{Nd}$ )のみが見出されるもの。

## 電離 ionization

→電離放射線 イオン化のこと。放射線\*と物質の相互作用では、物質をイオン化し、イオン対をつくることを指す。

## 電離箱 ionization chamber

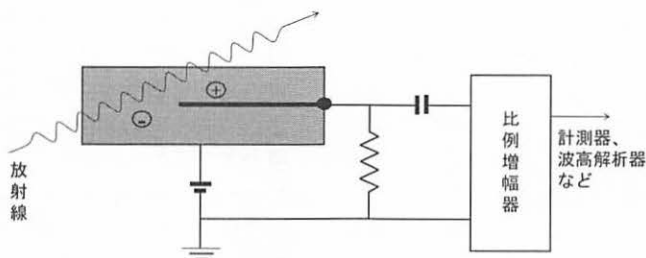
放射線計測装置の一種。空気または他の気体を入れた箱の中に正負一對の電極を置き電場をかけると、放射線\*の電離作用によって生成するイオン対がそれぞれ電場に従って移動し、電極間に電流が生じる。この電流値(電離電流)を測定し、放射線を計測する。電極の形や出力波形によって平行平板形、円筒形、直流型、パルス型、積分型などがある。図参照。

## 電離放射線 ionization radiation

物質に電離作用を及ぼす放射線\*。単に放射線と呼ぶことが多い。電子\*、陽子\*、 $\alpha$ 粒子\*などの荷電粒子\*と $\gamma$ 線\*やX線\*といった高エネルギーの電磁波\*がこれに相当する。中性子\*は電荷をもたないが、二次的に電離作用を及ぼすので電離放射線である。

## 電離密度 ionization density

線エネルギー付与\*(LET)と同義。放射線\*による単位長さあたりの物質の電離\*の大きさあるいはエネルギー損失の大きさを表す。



電離箱(パルス型)の原理

**ド・ブロイ波 de Broglie wave**

物質のもつ波としての性質。物質波ともいう。1924年にフランスのド・ブロイ(L.-V. de Broglie)によって提唱された。波長は $\lambda = h/p$  ( $h$ , プランク定数;  $p$ , 物質の運動量)で表わされる。物質の波としての性質は、加速した電子<sup>\*</sup>や中性子<sup>\*</sup>の回折あるいは干渉により実験的に確認されている。

**同位体 isotope**

同一原子番号で質量数<sup>\*</sup>の異なる核種<sup>\*</sup>の呼称。すなわち、陽子数が等しく、中性子数の異なる核種。非放射性的の同位体を安定同位体<sup>\*</sup>、放射性的のものを放射性同位体<sup>\*</sup>と呼ぶ。例えば、水素(<sup>1</sup>H)、重水素(<sup>2</sup>HもしくはD)、三重水素(<sup>3</sup>HもしくはT)はそれぞれ同位体の関係にあり、HとDは安定同位体、T(半減期<sup>\*</sup>13.3年、 $\beta$ 壊変<sup>\*</sup>)は放射性同位体である。

**同位体化学 isotope chemistry**

同位体<sup>\*</sup>を扱う化学の総称。具体的には同位体効果<sup>\*</sup>やそれによる同位体分離<sup>\*</sup>などを対象とする化学。広義には、トレーサー<sup>\*</sup>を用いる化学を含めることもある。

**同位体希釈分析 isotope dilution analysis**

元素<sup>\*</sup>Xを含む試料に、同位体比の異なる当該元素の一定量(スパイク<sup>\*</sup>という)を添加した後にXを化学分離し、分離前後の同位体比の変化を測定してもともと試料中にあったXを定量する方法。分析精度が最も高い方法の一つであり、核燃料物質<sup>\*</sup>の保障措置<sup>\*</sup>用の分析法としても用いられている。同位体比の測定に表面電離型質量分析装置やICP-MS装置などを用いる場合にとくに同位体希釈質量分析(IDMS)と呼ぶ。スパイクは、定量したいXと同じ存在状態、化学構造をもつ必要がある。非放射性的試料に放射性的の化合物を加える直接希釈法や、放

射性試料に非放射性的の化合物を加える間接希釈法などがある。

**同位体効果 isotope effect**

同位体<sup>\*</sup>の質量の違いに起因する物理的、化学的効果。同位体は通常はほぼ同じ化学的性質を示すが、質量の違いから挙動にわずかではあるが違いがみられることがある。熱力学的性質や反応速度の違いとして現れ、原子番号<sup>\*</sup>の小さな元素<sup>\*</sup>ほどその効果は大きい。水素(H)と三重水素(<sup>3</sup>HもしくはT)との間で最も大きな効果がみられ、分子振動や反応速度定数に現れる相対的同位体効果は $v_H : v_D : v_T \approx 1 : 2^{-1/2} : 3^{-1/2}$ になる。

**同位体シフト isotope shift**

同位体効果<sup>\*</sup>の一つ。原子<sup>\*</sup>や分子の各種スペクトルに現れる波長の同位体間のずれあるいはその量。原子の同位体シフトは、同位体間の質量差による質量効果と核の電荷分布の違いによる体積効果により生じる電子状態の差に起因する。質量効果は軽い核において大きく、体積効果は重い核において大きくなる傾向がある。後者の大きさから核半径<sup>\*</sup>の差を見積もることができる。分子では、質量の違いによる慣性モーメント、固有振動数、重心位置などの変化により生じる電子状態の差を反映する。

**同位体分離 isotope separation**

同位体<sup>\*</sup>のうちのある特定の同位体を分離すること。電磁分離法<sup>\*</sup>、気体拡散法<sup>\*</sup>、遠心分離法<sup>\*</sup>、熱拡散法<sup>\*</sup>、レーザー法<sup>\*</sup>、分子蒸留法<sup>\*</sup>、電気泳動法<sup>\*</sup>などの物理的方法と化学交換反応法<sup>\*</sup>、反応速度法<sup>\*</sup>などの化学的方法がある。

**等価線量 equivalent dose**

→実効線量当量 人体が放射線<sup>\*</sup>を浴びたときに誘発されるがんなどの確率的影響<sup>\*</sup>の生物学的効果比<sup>\*</sup>を考慮して、臓



器，組織にわたって平均した吸収線量<sup>\*</sup>。ICRPの1990年の勧告で導入された概念。組織Tの等価線量 $H_T$ （単位はSv）は組織，臓器の放射線荷重係数<sup>\*</sup> $\omega_R$ と組織，臓器Tについて平均化された放射線Rに起因する吸収線量 $D_{TR}$ を用いて， $H_T = \sum \omega_R \cdot D_{TR}$ で与えられる。

#### 同時回路 coincidence circuit

2個またはそれ以上の入力回路からのパルスが同時に，あるいは一定の限られた時間内に入ったときだけ出力信号を送り出すようにつくられた電子回路。

#### 同時計数 coincidence counting

→反（逆）同時計数 コインシデンス計数ともいう。2個の独立した検出器に入る2本の放射線<sup>\*</sup>のうち同時に起る事象のみを選択して計数する。2個の検出器からの出力をコインシデンス回路（同時計数回路）に取り込み，ある時間間隔（分解時間あるいはゲートパルス）内に入った信号を計数する。コインシデンス法は，ある特定の事象だけを選別するのに有効であることから，アンチコンプトン $\gamma$ 線スペクトロメータ，ペアスペクトロメータ，テレスコープ型検出器系， $\gamma$ 線掠動角相関<sup>\*</sup>測定や $\beta$ - $\gamma$ 同時計数法を利用する放射能絶対測定などに用いられる。

#### 同重体 isobar

同一質量数で原子番号<sup>\*</sup>の異なる核種<sup>\*</sup>の総称。すなわち，陽子数<sup>\*</sup>は異なるが，陽子数と中性子数の和が等しい核種。例えば， $^{14}\text{C}$ と $^{14}\text{N}$ 。

#### トカマク tokamak

核融合<sup>\*</sup>研究に用いるプラズマ<sup>\*</sup>閉じ込め方式の一つ。初期に旧ソ連のグループにより研究され，名称はロシア語の電流，容器，磁石，コイルに由来する合成語。ドーナツ（円環）状の真空容器内に水素同位体プラズマを発生させ強い円環状磁場（トロイダル磁場）をかけると，プラズマはプラズマ電流<sup>\*</sup>がつくるポロイダル

磁場とトロイダル磁場とによってつくられる螺旋状磁場（ヘリカル磁場）に巻付いて運動する。その結果，高温プラズマはいつまでもドーナツに沿ってまわり，外部にもれることなく安定に閉じ込められる。国際熱核融合実験炉<sup>\*</sup>（ITER）や日本原子力研究開発機構那珂研究所の大型プラズマ実験装置JT-60もこの方式を採用している。

#### 特性X線 characteristic X ray

原子核<sup>\*</sup>に近い軌道にある電子<sup>\*</sup>が，その結合エネルギーより大きなエネルギーを得て軌道外に飛び出し，その後に残された空孔に外側の軌道にある電子が遷移する際に放出される電磁波<sup>\*</sup>（X線<sup>\*</sup>）。そのエネルギーは二つの軌道エネルギーの差に相当し，元素<sup>\*</sup>それぞれに固有の値である。試料にX線を照射した際に放出される特性X線を蛍光X線<sup>\*</sup>といい，その強度を測定することによって試料の成分元素を定量する方法を蛍光X線分析<sup>\*</sup>法という。

#### 独立粒子模型 independent-particle model

原子核<sup>\*</sup>を構成している核子<sup>\*</sup>（陽子<sup>\*</sup>と中性子<sup>\*</sup>）が原子核内で独立に運動しているとする原子核模型。フェルミ気体模型<sup>\*</sup>，殻模型<sup>\*</sup>，ニルソン模型<sup>\*</sup>などがその代表例。

#### ドップラー効果 Doppler effect

→メスバウアー分光 音波，光，電波などの振動数が，発生源と観測者の相対的速度によって異なって観測される現象。1842年にドップラー（C. J. Doppler）が見出した。（1）メスバウアー分光<sup>\*</sup>では，ドップラー効果に基づいて線源を $\gamma$ 線<sup>\*</sup>の進行方向に移動させることで $\gamma$ 線のエネルギー（ $E_\gamma$ ）を $\Delta E_D = (v/c) E_\gamma$ のように変化させ， $\gamma$ 線共鳴吸収スペクトルを記録する。ここで $v$ は線源の速度， $c$ は真空中の光の速度である。（2）原子炉<sup>\*</sup>では，炉内の温度が上昇すると非核分裂

性の<sup>238</sup>Uの中性子<sup>\*</sup>の吸収が増大することによって<sup>235</sup>Uの中性子吸収が減少し、核分裂<sup>\*</sup>反応が抑制される。これにより反応度が減少することをドップラー効果と呼ぶ。ポイド効果とともに原子炉の自己抑制効果のひとつである。

### ドップラー幅測定 (陽電子消滅の)

#### Doppler broadening (of positron annihilation radiation)

陽電子消滅 $\gamma$ 線スペクトルを測定し、511 keVを中心とするピークの形状からドップラー幅( $\Delta E$ )を求めること。これにより、電子<sup>-</sup>陽電子<sup>+</sup>対の運動量に関する情報が得られる。2本の消滅 $\gamma$ 線<sup>\*</sup>は正反対の向きから微小角ずれて電子-陽電子対の運動量( $p$ )を保存するが、同時にエネルギー保存の結果として、光子<sup>\*</sup>のエネルギー( $E_\gamma$ )は次式で与えられる( $m_e$ は電子の質量、 $c$ は光の速度)。

$$E_\gamma = m_e c^2 + \frac{cp}{2} = 511 \text{ keV} + \Delta E$$

検出器方向のドップラー幅( $\Delta E_x = cp_x/2$ )は数keV以内の値となり、 $\Delta E_x$ から $p_x$ を知ることができる。角相関測定<sup>\*</sup>と等価な情報が得られるが、 $\gamma$ 線スペクトロメトリー<sup>\*</sup>で用いられているGe半導体検出器<sup>\*</sup>のエネルギー分解能<sup>\*</sup>(1 keV程度)では角相関測定法の分解能に及ばない。しかし、高計数率での測定が可能なので、統計精度の高いデータが得られ、固体の空孔型欠陥の解析などに利用される。

### トムソン散乱 Thomson scattering

自由電子<sup>\*</sup>による長波長光の散乱<sup>\*</sup>。短波長光によるコンプトン散乱の低エネルギーでの極限に対応する。

### トラック track

→スパー 高エネルギーの重粒子イオンは線エネルギー付与<sup>\*</sup>(LET)が大きいので、凝集状態の物質に入射すると、粒子

の飛跡に沿ってイオン化や励起が円筒状に密集して起こる。このような構造をトラックまたは放射線トラック (radiation track) と呼ぶ。

### トリウム系列 thorium decay series

→アクチニウム系列 →ウラン系列 →ネプツニウム系列 天然放射性核種<sup>\*</sup>である<sup>232</sup>Th(半減期<sup>\*</sup>140億年)を親核種<sup>\*</sup>として、 $\alpha$ 壊変<sup>\*</sup>および $\beta$ 壊変<sup>\*</sup>を繰り返しながら安定な<sup>208</sup>Pbを生成する壊変系列<sup>\*</sup>。系列に含まれる全核種の質量数<sup>\*</sup>が4の倍数であることに因んで、 $4n$ 系列とも呼ばれる。図参照(p. 89)。

### ドリップライン drip line

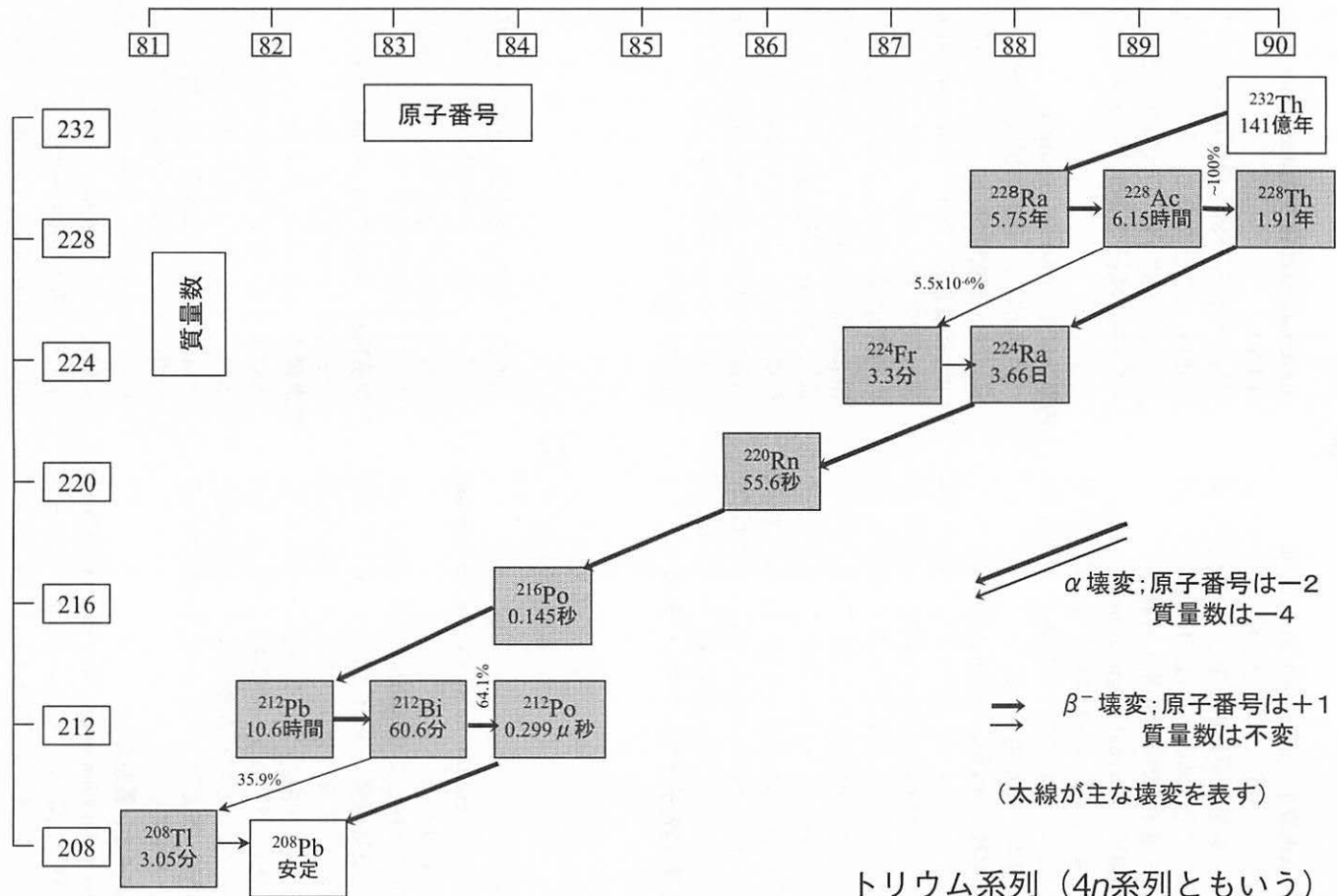
中性子ドリップラインと陽子ドリップライン<sup>\*</sup>がある。安定な原子核<sup>\*</sup>に比べて中性子<sup>\*</sup>(陽子<sup>\*</sup>)を多く含む核を中性子(陽子)過剰核という。このような過剰核は $\beta$ 壊変<sup>\*</sup>しやすく、不安定核と呼ばれる。このような原子核は中性子(陽子)数が過剰になるほど不安定である。これ以上中性子数(陽子数)が大きくなると原子核として存在できなくなる限界を中性子(陽子)ドリップラインという。

### トレーサー tracer

ある対象の挙動や分布を調べるために添加して目印とする物質。対象を構成する元素<sup>\*</sup>の同位体<sup>\*</sup>や標識化合物<sup>\*</sup>が使われる。放射性同位体<sup>\*</sup>を用いる場合、放射性トレーサー (radiotracer) ということもある。

### トロン toron

トリウム系列<sup>\*</sup>に含まれる<sup>224</sup>Ra(半減期<sup>\*</sup>3.66日)の $\alpha$ 壊変<sup>\*</sup>で生じる<sup>220</sup>Rnの別名。55.6秒の半減期で $\alpha$ 壊変する。ラドンは希ガスであり、ウラン系列<sup>\*</sup>に含まれる<sup>222</sup>Rn(半減期3.82日)と同様に吸入による人体の内部被ばく<sup>\*</sup>の主要な源である。



$\swarrow$   $\alpha$  壊変; 原子番号は-2  
 質量数は-4  
 $\rightarrow$   $\beta^-$  壊変; 原子番号は+1  
 質量数は不変  
 (太線が主な壊変を表す)

トリウム系列 (4n系列ともいう)



**内殻軌道電子 inner-orbital electron**

原子<sup>\*</sup>は中心にある原子核<sup>\*</sup>とそのまわりの軌道を運動する電子<sup>\*</sup>から成り、原子核に近い軌道(K殻, L殻など)を占める電子を内殻軌道電子という。

**内部磁場 internal magnetic field**

物質内部にその物質の本性として存在する磁場。これに対して物質に外からかかる磁場を外部磁場という。

**内部転換 internal conversion**

原子核<sup>\*</sup>が励起状態<sup>\*</sup>からより低いエネルギー状態に移る際に、光子<sup>\*</sup>の代わりに軌道電子<sup>\*</sup>を放出する現象。この時に放出される電子<sup>\*</sup>を転換電子(conversion electron)という。電子と光子の強度比( $\alpha = e/\gamma$ )は内部転換係数(internal conversion coefficient)と呼ばれ、K電子の内部転換係数( $\alpha_K$ )が大きい。

**内部転換電子メスバウアー分光法****conversion electron Mössbauer spectroscopy (CEMS)**

吸収体核が無反跳 $\gamma$ 線を共鳴吸収<sup>\*</sup>して励起核<sup>\*</sup>となったあと、ふたたび基底状態に戻る際に $\gamma$ 線<sup>\*</sup>の代わりに放出される内部転換電子を測定するメスバウアー分光<sup>\*</sup>法。

**内部被ばく internal exposure**

→外部被ばく 体内に摂取した放射性物質<sup>\*</sup>からの放射線照射による身体の被ばく。

**70  $\mu$ m 線量当量 70- $\mu$ m dose equivalent**

放射線管理<sup>\*</sup>において被ばく管理のための実用量として、1 cm 線量当量<sup>\*</sup>と70  $\mu$ m 線量当量がある。皮膚の等価線量<sup>\*</sup>は70  $\mu$ m 線量当量で管理する。実効線量と腹部表面の等価線量は1 cm 線量当量で、水晶体の等価線量は1 cm 線量当量と70  $\mu$ m 線量当量のいずれか適切な方で管理する。

**ニート****nuclear excitation by electron transition (NEET)**

電子遷移による核励起のこと。原子<sup>\*</sup>の内殻軌道電子<sup>\*</sup>のイオン化に続く電子遷移にともなう過剰エネルギーは、通常X線<sup>\*</sup>、転換電子あるいはオージェ電子<sup>\*</sup>放出に使われる。頻度は低いが、このX線のエネルギーが原子核<sup>\*</sup>のエネルギー準位<sup>\*</sup>幅に近いと原子核が励起されることがある。

**二次イオン質量分析****secondary ion mass spectrometry (SIMS)**

試料にAr<sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>, Cs<sup>+</sup>などのイオンビーム(一次イオン)を照射したときに放出されるイオン(二次イオン)を質量分析す

る方法。通常、固体試料表面の元素分析に用いられる。液体マトリックスを用いて有機化合物を測定するliquid SIMSと呼ばれる方法もある。

**二次宇宙線 secondary cosmic rays**

→宇宙線 →空気シャワー

**二次電子 secondary electron**

入射電子(一次電子)が分子と衝突した結果、改めてはじき出される電子<sup>\*</sup>を二次電子という。二次電子は、物質内部では更にイオン化や励起を繰り返してスパー<sup>\*</sup>を形成する。物質の表面近傍では、入射電子が物質を構成する原子<sup>\*</sup>中の電子に与えるエネルギーがしきい値(20~30 eV)を超えると、二次電子は表面から放出される。入射電子のエネルギーが数

keV のとき二次電子は 1 ~ 50 eV の領域に分布する。数十~数 keV の入射電子では、電子の多重非弾性散乱によりエネルギーを損失したものやオージェ電子<sup>\*</sup>が放出される。数 keV 以上の電子の照射では、入射電子の弾性散乱<sup>\*</sup>や非弾性散乱<sup>\*</sup>による電子が二次電子となる。固体試料に電子を照射したときの二次電子の収率は、入射電子のエネルギーが高く、入射角度が試料に平行に近く、試料の原子番号<sup>\*</sup>が大きいほど大きい。二次電子は、ブラウン管としての利用をはじめ、走査電子顕微鏡<sup>\*</sup> (SEM) や走査プローブ顕微鏡 (SPM) などに利用される。

## 二次電子平衡

### secondary electron equilibrium

一次放射線で生成した電荷量を測定するときに、測定領域とその周囲とで二次電子<sup>\*</sup>の出入数の平衡が保たれている状態。平衡状態では、測定領域から周囲に電子<sup>\*</sup>が移動しても、それと同数の電子がこの領域に周囲から補充される。放射線量測定で考慮しなければならない重要な因子である。γ線<sup>\*</sup>や X 線<sup>\*</sup>の空気中の照射線量<sup>\*</sup>を空気電離箱で測定するには、測定領域に生成した全てのイオン対を集める必要がある。実際には測定領域で生成した電子が同領域外の空間に飛び出すことがあるが、測定領域に同数の電子が補充されることによってその効果を無視できる。

## 二次放射性核種 secondary radionuclide

→天然放射性核種 天然に存在する放射性核種<sup>\*</sup>のうち、<sup>238</sup>U、<sup>232</sup>Th あるいは <sup>235</sup>U などの長寿命の一次放射性核種<sup>\*</sup>が壊変<sup>\*</sup>するときの系列(ウラン系列<sup>\*</sup>、トリウム系列<sup>\*</sup>あるいはアクチニウム系列<sup>\*</sup>)の途中で生成する <sup>226</sup>Ra、<sup>227</sup>Ac、<sup>231</sup>Pa、<sup>210</sup>Po などの短寿命核種。

## 二重ベータ壊変 double beta decay

原子核<sup>\*</sup>内で β 壊変<sup>\*</sup>が続けて 2 回起こ

る現象。一般的な β 壊変である β<sup>-</sup>: (A, Z) → (A, Z+1) + ν<sub>e</sub> + e<sup>-</sup> あるいは β<sup>+</sup>: (A, Z) → (A, Z-1) + ν<sub>e</sub> + e<sup>+</sup> に続いて起こる β 壊変は (A, Z+1) → (A, Z+2) + ν<sub>e</sub> + e<sup>-</sup> あるいは (A, Z-1) → (A, Z-2) + ν<sub>e</sub> + e<sup>+</sup> で表される。これらが同時に起こるので、β<sup>-</sup>: (A, Z) → (A, Z+2) + 2ν<sub>e</sub> + 2e<sup>-</sup>, β<sup>+</sup>: (A, Z) → (A, Z-2) + 2ν<sub>e</sub> + 2e<sup>+</sup> のように 2 個の ν が放出される。上記の反応は ν の粒子と反粒子が異なるディラック粒子の場合である。ν が反粒子と粒子の両方の性質を持っているというマヨナラ粒子であれば、2 個放出される ν はお互いに粒子と反粒子として振る舞い消滅するため、(A, Z) → (A, Z+2) + 2e<sup>-</sup> や (A, Z) → (A, Z-2) + 2e<sup>+</sup> のように ν が放出されない反応が起こる。二重 β 壊変の例として <sup>48</sup>Ca → <sup>48</sup>Ti および <sup>50</sup>Cr → <sup>50</sup>Ti がある。また、<sup>76</sup>Ge、<sup>82</sup>Se、<sup>96</sup>Zr、<sup>100</sup>Mo、<sup>128</sup>Te、<sup>136</sup>Xe など多くの核種<sup>\*</sup>について下限値が観測されているが、半減期<sup>\*</sup>が 10<sup>19</sup> ~ 10<sup>24</sup> 年の範囲にある稀な現象である。

## 二重モード核分裂 bimodal fission

フェルミウム(原子番号<sup>\*</sup>100)やメンデレビウム(原子番号<sup>\*</sup>101)などの重い原子核<sup>\*</sup>の自発核分裂<sup>\*</sup>で観測される特異な質量分割様式のこと。核分裂生成物<sup>\*</sup>の質量収率は分裂する核がちょうど半分に分かれるような一つ山の質量分布を示す(対称質量分割)が、核分裂片の運動エネルギー (total kinetic energy: TKE) 分布には高エネルギーおよび低エネルギー成分の二つの構造が存在する。TKE は主として二つに分裂する際の原子核間のクーロン斥力<sup>\*</sup>に相当する。したがって、高い TKE 成分は分裂寸前に核分裂片同士がより接近した状態にあることを示し、低い TKE 成分は二つの原子核の中心間距離がより離れた状態からの分裂と考えられる。また、核分裂片からの中性子放出数の測定によって、低い TKE

成分の分裂片は高い TKE 成分のそれより高い励起エネルギー状態にあることが確認されている。このように、TKE の大小で核分裂<sup>\*</sup>の様相が異なるため、二種類の分裂モードが存在すると解釈されている。すなわち、一つのモードは核分裂片が原子核の殻構造の影響を受けて安定化し励起エネルギーが小さく分裂片の形状も球形に近い場合、TKE は大きくなる。これは、生成する核分裂片が原子番号 50 と中性子数 82 の二重魔法数領域に相当していることと関連している。もう一つのモードでは、分裂片が液滴的な性質で大きく伸びた形で分裂していくため、TKE は小さくなる。最近、ウランやトリウム領域などの軽いアクチノイド核で観測される対称核分裂<sup>\*</sup>および非対称核分裂<sup>\*</sup>モードとの関連でも議論されている。

## 二次冷却材 secondary coolant

発電用原子炉で、炉心<sup>\*</sup>を冷却する一次冷却系から熱を取り出すため熱交換器を介して二次冷却系を循環する冷却材<sup>\*</sup>。

## ニッポニウム nipponium

東北帝国大学教授の小川正孝(1865-1930)は、英国のラムゼーの下に留学中の研究成果としてモンモリロナイト鉱の中に 43 番元素を発見したと 1908 年に東京化学雑誌に報告し、“日本”に因んでニッポニウム(Np)と名づけた。当時、その存在は確認されないままであったが、2003 年に吉原賢二(東北大名誉教授)が小川の遺品の中にあつた X 線写真を分析し、小川が発見したのは 75 番元素のレニウムであったことを突き止めた。レニウムは 1925 年にドイツのノダック(W. Noddack)とタッケ(I. Tacke)によって発見されたので、もし 1908 年に小川がその元素<sup>\*</sup>を周期表<sup>\*</sup>の 75 番目に位置づけていたなら、レニウムかわりにニッポニウムという元素名が周期表

に残った可能性もある。なお、小川が発見したとした 43 番元素は天然に存在しない元素で、1937 年にイタリアのセグレ(E. Segre)とペリエ(C. Perrier)によりバークレーのサイクロトロン加速器<sup>\*</sup>を使う  $^{96,97}\text{Mo}(d, xn)^{97\text{m}}\text{Tc}$  反応によって初めて合成され、“人工的につくられた”元素という意味でテクネチウムと命名された。

## 乳化シンチレータ emulsive scintillator

水溶性試料の液体シンチレーション法で用いる液体シンチレータ<sup>\*</sup>で、溶媒、第 1 溶質、第 2 溶質および界面活性剤を混合して調製する。放射線エネルギーを吸収した溶媒分子は励起され、余分なエネルギーを第 1 溶質に与えることによって発光する。この発光スペクトルが溶媒の吸収スペクトルや光電子増倍管<sup>\*</sup>の入射窓(光電面)などの吸収スペクトルと重なるとクエンチングを起こすため、シンチレーターに第 2 溶質を混合して発光スペクトルを長波長側にシフトさせる。疎水性試料にはトルエン、キシレンなどの有機溶媒を使った液体シンチレータが適している。市販されているものに AQUASOL-2 や ULTIMA GOLD LLT などがあり、前者は ethoxylated alkyl phenol, o-xylene, trimethylbenzene (pseudocumene) などに少量の diphenyloxazole (PPO) や bis (2-methylstyryl) benzene (bis-MSB) を加えたもので、後者は diisopropyl naphthalene (DIN), ethoxylated alkyl phenol, (butoxyethoxy) ethanol などに少量の fatty alcoholethoxylate, diphenyloxazole (PPO) あるいは bis (2-methylstyryl) benzene (bis-MSB) を加えたものである。乳化シンチレータは計数効率<sup>\*</sup>が高く、多量の水溶性試料の使用が可能であるなどの特徴を備えている。

## ニュートリノ neutrino

→素粒子 レプトン<sup>\*</sup>(軽粒子)族に属し、

中性微子<sup>\*</sup>とも呼ばれる。スピンは1/2で電荷は0。β壊変<sup>\*</sup>、パイオンの崩壊、ミュオン<sup>\*</sup>の崩壊などでレプトン数保存の法則に従い電子<sup>\*</sup>やミュオンと対になって生成する。1931年にパウリ(W. Pauli)によって理論的にその存在が予測された。1934年にはフェルミ(E. Fermi)が原子核<sup>\*</sup>の中で起こるβ壊変を、質量が0か非常に小さいパウリの予言した中性の粒子の放出を使って説明することに成功した。ニュートリノの名称はフェルミが“little neutral one”の意味をなすように提案したことによる。ニュートリノと物質との相互作用は非常に小さいため発見が遅れたが、パウリの予測から25年後の1956年に、米国のライネス(F. Reines)とコーワン(C. Cowan, Jr)が原子炉<sup>\*</sup>の中で起こる核分裂生成物<sup>\*</sup>のβ壊変で発生する反電子ニュートリノを発見した。1962年には、BNLとCERNの加速器<sup>\*</sup>を使って、ミュオンと同時に生成するミュオンニュートリノが確認された。2000年には、フェルミ研究所で800 GeVに加速した陽子<sup>\*</sup>をタンゲステンに照射し、タウニュートリノを観測することに成功したことによって、標準モデルで予想された6個のレプトンが出揃った。電子、ミュオン、

タウ粒子<sup>\*</sup>と対になって生成するものをそれぞれ電子ニュートリノ( $\nu_e$ )、ミュオンニュートリノ( $\nu_\mu$ )、タウニュートリノ( $\nu_\tau$ )と呼び、それぞれの粒子に反粒子がある。最近のニュートリノ振動実験によって、2種類のニュートリノの質量差は求められているが、個々のニュートリノの質量についてはまだ上限値 $\nu_e < 5\text{eV}$ 、 $\nu_\mu < 0.3\text{ MeV}$  および  $\nu_\tau < 30\text{ MeV}$  が与えられている段階である。

#### ニルソンポテンシャル Nilsson potential

変形核の核子<sup>\*</sup>の状態を記述するポテンシャルで1955年ニルソンによって提唱された。魔法の数<sup>\*</sup>(2, 8, 20, 28, 50, 82)の陽子<sup>\*</sup>と中性子<sup>\*</sup>をもつ原子核<sup>\*</sup>は球形に近く、これらの核子<sup>\*</sup>の状態は球形の対称な殻模型<sup>\*</sup>によって説明できる。他方、魔法数から離れた中重核や重い核の状態について、ニルソンは変形度を考慮した軸対称変形調和振動子(modified harmonic-oscillator potential)ポテンシャル(ニルソンポテンシャル)の殻模型(ニルソン模型)によって求めた。原子核が変形した場合に1粒子軌道にどれだけの影響を与えるかを考慮した項を加えたポテンシャルである。

## ね

### 熱拡散 thermal diffusion

数種類の原子<sup>\*</sup>や分子が混在する流体や気体の温度が均一でないとき、高温側と低温側に別々の成分が拡散する現象。同位体<sup>\*</sup>を含む物質の質量差に基づく熱拡散の度合いの差を利用する同位体濃縮法がある。質量比が大きい軽元素同位体の濃縮に適しており、トリチウムの分離に有用である。TH-D<sub>2</sub>、TD-D<sub>2</sub>、T<sub>2</sub>-<sup>4</sup>Heな

どの混合ガスを熱拡散塔内に閉じこめ、一方の板を加熱し他方を冷却すると、トリチウムを含んだガスは塔の下方に濃縮される。1940年代に熱拡散を利用するウラン濃縮<sup>\*</sup>が試みられたが、効率が悪く実用にはならなかった。

### 熱核融合反応

thermonuclear fusion reaction

→核融合

## 熱中性子 thermal neutron

→中性子 室温において熱運動平衡にある中性子をいう。20℃で熱運動している中性子の速度は2200 m/s、運動エネルギーはマクスウェル分布し0.025 eVである。原子炉の中で核分裂により生成する高速中性子(運動エネルギーは約2 MeV)は減速して熱中性子になり、 $^{235}\text{U}$ などの熱中性子吸収断面積の大きい核燃料に吸収されて核分裂連鎖反応を起こす。このように高速中性子が物質との相互作用によりエネルギーを失い、物質の温度と熱平衡状態になる過程を熱化(thermalization)という。また、多くの核種と熱中性子捕獲反応を起こすので、放射化分析やラジオアイソトープ製造に利用される。中性子散乱の研究分野では、冷中性子0.1～10 meV(1～120 K)、熱中性子5～100 meV(60～1000 K)のように分類する場合もある。冷中性子は液体ヘリウム中で熱平衡状態になるときなどに得られる。

## 熱中性子放射化分析

### thermal neutron activation analysis

→放射化分析 熱中性子を用いる放射化分析。熱中性子源としては原子炉が使われるが、加速器(大強度陽子加速器 J-PARC)を用いる計画もある。

## 熱中性子捕獲 thermal neutron capture

原子核が熱中性子を捕獲する反応。中性子を捕獲した原子核は励起状態になり、基底状態に戻る過程で原子核に固有のエネルギーをもつ $\gamma$ 線を放出する。これを捕獲 $\gamma$ 線あるいは即発 $\gamma$ 線と呼ぶ。その $\gamma$ 線のエネルギーを測定することによって核種を同定できるので核種分析が可能であり、これを即発 $\gamma$ 線分析という。一方、軽い核では、中性子を捕獲した後にいくつかの粒子に分裂する反応がある。 $^{10}\text{B}$ が熱中性子を捕獲(中性子捕獲断面積3837 バーン)する

と、1.47 MeVのエネルギーをもつ $\alpha$ 粒子と0.64 MeVの $^7\text{Li}$ が生成する。この $\alpha$ 粒子と $^7\text{Li}$ を利用する脳腫瘍治療のためのホウ素中性子捕捉療法(boron neutron capture therapy, BNCT)がある。

## 熱中性子炉 thermal reactor

核分裂反応で生成する速中性子を熱中性子に減速し、核燃料に吸収させ核分裂連鎖反応を持続させる原子炉。核燃料として、3～5%に濃縮した $^{235}\text{U}$ を用いる。 $^{235}\text{U}$ は熱中性子を吸収して核分裂を起こすと2～3個の中性子を発生する。この中性子のエネルギーは約2 MeVであり、連鎖反応(chain reaction)を持続させるためには、熱中性子にまで減速する必要がある。商業用発電炉の一つである軽水炉では、軽水を減速材として用いる。このような原子炉は濃縮ウラン軽水炉型熱中性子炉と呼ばれる。減速材として他に、重水、黒鉛、ベリリウムなども用いられる。重水を用いる原子炉は重水炉と呼ばれ、カナダで多く採用されている。黒鉛を用いる原子炉はコールダーホール炉と呼ばれ、炭酸ガスを冷却材として用いる。この型の原子炉は1966年にわが国で最初の発電用原子炉として東海村に建設され商業運転を続けていたが、1998年に使命を終えて運転を停止した。1942年にシカゴ大学につくられた世界初の原子炉も黒鉛炉であった。

## 熱電子 thermoelectron

固体の導体または半導体を高温に熱したときに固体の表面から放出される電子。仕事関数が小さい金属ほど放出し易い。宇宙・海洋開発などのための可搬用電源として有用な熱電子発電がある。真空中または低圧気体雰囲気中に仕事関数の大きい陰極と小さい陽極とを置き、陰極を加熱して放出される熱電子を陽極に流入させることを原理とする。



## 熱ルミネッセンス線量計

### thermoluminescence dosimeter (TLD)

特定の材料に放射線<sup>\*</sup>を照射した後に加熱し、放射線に相関する強度で発生する熱蛍光(ルミネッセンス)を測定することを原理とする放射線線量計。Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>、LiF、CaF<sub>2</sub>、Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>あるいはCaSO<sub>4</sub>などの材料にCu、Mg、Ti、Dy、Tbなどの不純物を少量添加した蛍光材料を用いる。放射線照射によって材料中に自由電子<sup>\*</sup>と正孔が生成し、一部の自由電子と正孔は材料中の欠陥(捕獲中心)に捕獲され、準安定状態として長期間存在できる。加熱すると、加熱温度に依存する発光スペクトルが得られ、その強度は照射量との相関を示す。TLDから線量<sup>\*</sup>を読み取る場合、室温から300℃くらいまでステップ状に加熱し、各ステップで短時間(20～60秒)保持したときに出る発光量を記録し、温度に対するグラフ(グローカーブ)を得る。このグラフを一定の温度範囲で積分した量を発光量とする。TLDは、高温に加熱してアニールすると初期の状態に戻るため、繰り返し使用できる。線量測定範囲が広く(10<sup>-6</sup>～10<sup>4</sup>Gy)、取扱が簡単であるなどの利点があり、放射線作業従事者の被ばく線量<sup>\*</sup>の測定や放射線場の作業環境測定、周辺環境のバックグラウンド測定などに用いられる。

### ネプツニウム系列 neptunium series

→アクチニウム系列 →ウラン系列  
→トリウム系列 天然放射性核種<sup>\*</sup>で、<sup>237</sup>Np(Z=93)から始まり<sup>209</sup>Bi(Z=83)で終わる質量数<sup>\*</sup>4n+1の壊変系列<sup>\*</sup>に属する一連の放射性核種<sup>\*</sup>をいう。<sup>209</sup>Biは無窮大に近い半減期<sup>\*</sup>(2×10<sup>18</sup>年)をもつため、安定核種と考えてよい。<sup>237</sup>Npの半減期(214万年)は地球の年齢の46億年に比べ短いので、地球誕生の時につくられた<sup>237</sup>Npは現在の地球上には存在しない。<sup>209</sup>Biは天然に存在するが、系

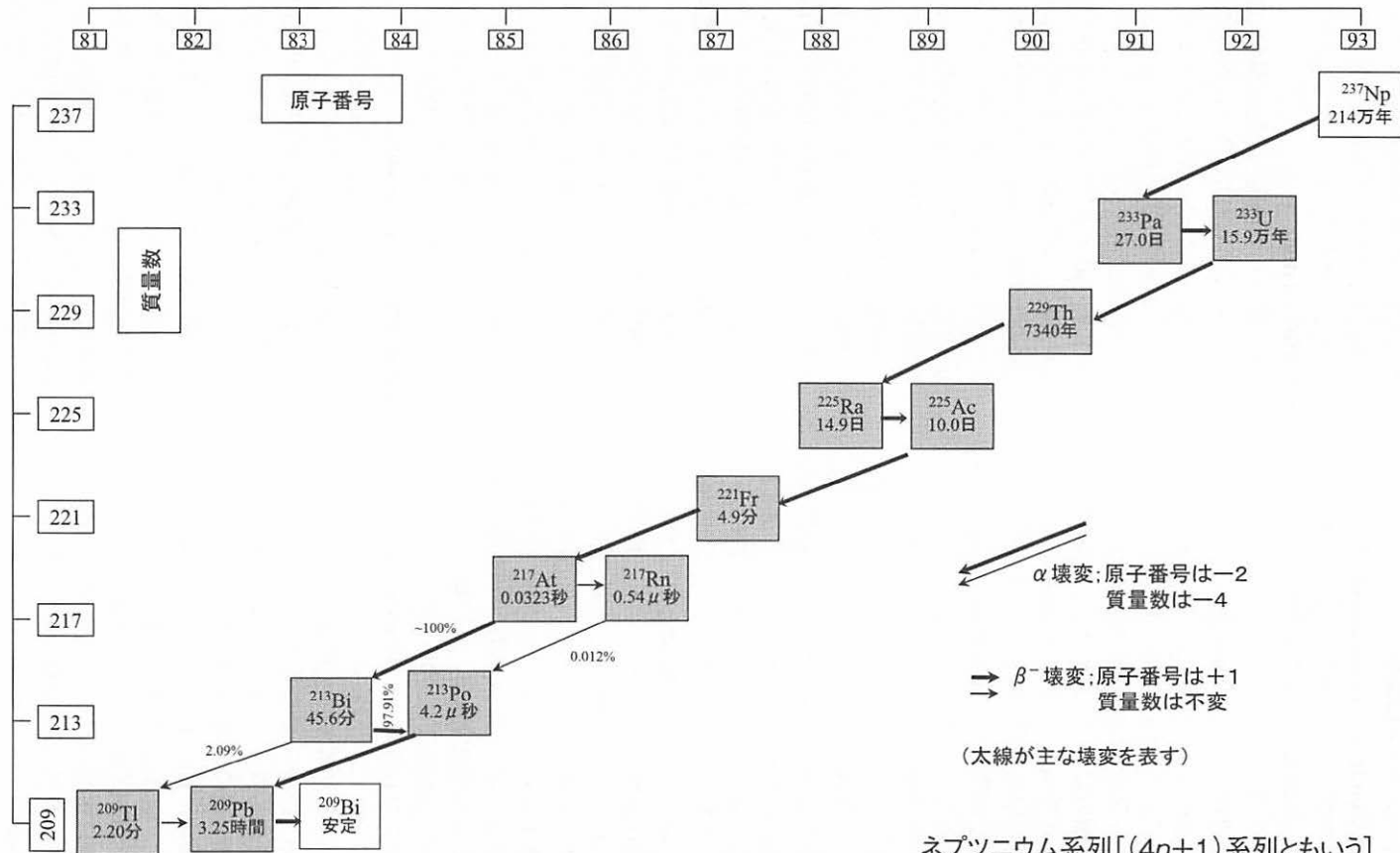
列に属する他の一連の核種<sup>\*</sup>は天然には存在せず、原子炉<sup>\*</sup>などでつくられる。図参照(p.96)

### 年代測定 dating

→炭素-14年代測定法 地球科学や惑星科学、人類学や考古学などにおいて、対象とする試料の時間軸を定めること。放射性核種<sup>\*</sup>の同位体<sup>\*</sup>測定法、熱ルミネッセンス(TL)法、フィッシュントラック<sup>\*</sup>(FT)法、電子スピン共鳴<sup>\*</sup>(ESR)法などがある。古代遺跡の発掘物や動植物の化石などの年代測定には、炭素-14の同位体比を測定する方法がよく用いられる。またトリチウム(<sup>3</sup>H、半減期<sup>\*</sup>13.3年)を利用する方法は地下水の年代測定に用いられる。ウラン系列<sup>\*</sup>、トリウム系列<sup>\*</sup>、アクチニウム系列<sup>\*</sup>などの放射平衡<sup>\*</sup>にある系列の放射性核種を利用する方法もある。また、系列をつくらぬ<sup>40</sup>K-<sup>40</sup>Arや<sup>87</sup>Rb-<sup>87</sup>Srの壊変<sup>\*</sup>を利用する方法もある。これらの方法によって数十億年という地球の年代や数百年の範囲の年代測定が可能である。岩石の年代測定には、<sup>238</sup>U(半減期9.3×10<sup>16</sup>年)の自発核分裂<sup>\*</sup>を利用する方法がある。熱ルミネッセンス法では、鉱石などが放射線照射を受けると電子と正孔が結晶内にトラップされ、これを加熱すると蛍光<sup>\*</sup>(ルミネッセンス)を発することを利用する。

### 燃料集合体 fuel assembly

核燃料<sup>\*</sup>ペレットを充填した燃料棒<sup>\*</sup>を等間隔で配置し、原子炉<sup>\*</sup>の炉心に装荷する集合体。沸騰水型原子炉<sup>\*</sup>(BWR)の場合、粉末のUO<sub>2</sub>を高温で焼結してつくるペレットの大きさは直径約10mm、長さ約10mmである。燃料棒は、ペレットをジルカロイ製の円筒状の燃料被覆管に充填したものである。燃料集合体は、燃料棒を等間隔に8本×8本あるいは9本×9本の正方格子状に配置して支持格子で支え、スペーサを使っ



て燃料棒がお互いに接触しないようにする。燃料部分の長さは約 3.7 m, 燃料棒の全長は約 4.5 m である。110 万 kW 級の BWR 発電所では, 764 体の燃料集合体を炉心に装荷する。加圧水型原子炉<sup>\*</sup> (PWR) の燃料棒も BWR と同じような構造で, 燃料ペレットは直径約 8 mm, 長さ約 12 mm で, 燃料部分の長さは約 3.7 m, 全長は約 4.1 m である。このような燃料棒を 17 本×17 本の格子状に配置し, 燃料集合体をつくる。120 万 kW 級の PWR 発電所では, 193 体の燃料集

合体を炉心に装荷する。

### 燃料棒 fuel rod

発電用原子炉で使用する円柱形棒状に成型加工した燃料。数パーセントの低濃縮ウランの二酸化物を小さなペレット状に焼結, 成型し, ジルコニウム合金製の被覆管内に充填する。ペレットは直径約 10 mm, 高さ約 10 mm の円柱状で, 燃料棒は長さ約 4 m, 直径約 1 cm である。加圧水型原子炉<sup>\*</sup> (PWR) 用燃料棒と沸騰水型原子炉<sup>\*</sup> (BWR) 用燃料棒では, サイズが異なる。

## の

### 濃縮ウラン enriched uranium

濃縮によって<sup>235</sup>Uの濃度を高めたウラン。天然に存在するウランの同位体比は<sup>234</sup>U 0.0055%, <sup>235</sup>U 0.7200%, <sup>238</sup>U 99.2745% である。濃縮ウラン中の<sup>234</sup>Uの同位体比も, 天然ウランに比べ増大している。<sup>235</sup>Uの濃度が0.72%~20%までのウランを低濃縮ウラン, 20%以上のウランを高濃縮

ウランと呼ぶ。商業用発電炉に用いられ核燃料<sup>\*</sup>の多くには, 3~5%の濃縮ウランが使用されている。

### 濃縮同位体 enriched isotope

天然に存在する元素<sup>\*</sup>の同位体比を目的に応じて人工的に変化させ, 天然存在比よりも高い濃度に濃縮した同位体<sup>\*</sup>。

## は

### π中間子 π meson

→中間子 中間子<sup>\*</sup>の一種。電荷の異なる $\pi^0$ ,  $\pi^+$ および $\pi^-$ がある。電子<sup>\*</sup>の約270倍の静止質量<sup>\*</sup>をもち, スピンは0。人工的には, シンクロトロン加速器などを用いて高エネルギーの陽子<sup>\*</sup>(>280 MeV)をベリリウム標的に衝突させ発生させる。 $\pi^0$ は極めて短い寿命( $8.4 \times 10^{-17}$ 秒)で壊変<sup>\*</sup>し2本の $\gamma$ 線<sup>\*</sup>を放出する( $\pi^+ \rightarrow 2\gamma$ )。 $\pi^+$ と $\pi^-$ は寿命 $2.6 \times 10^{-8}$ 秒で壊変してミュオン<sup>\*</sup>( $\mu^+$ )を生ずる( $\pi^+ \rightarrow \mu$

$+ \nu_\mu$  あるいは  $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ )。

### 爆縮 implosion

→レーザー核融合

### バックエンド back end

核燃料サイクル<sup>\*</sup>において, ウラン燃料の原子炉<sup>\*</sup>での燃焼以降の工程の総称でダウンストリームともいう。主に使用済核燃料<sup>\*</sup>の冷却, 再処理<sup>\*</sup>, 回収ウランおよびプルトニウムの再加工, 工程間の放射性物質<sup>\*</sup>の輸送, 施設の廃止措置(解体, 除染)および各工程から発生する放

ね  
の  
は

射性廃棄物<sup>\*</sup>の処理処分から成る。ウラン燃料の製造加工から原子炉での燃焼までをフロントエンド(あるいはアップストリーム)という。

**パラポジトロニウム parapositronium (p-Ps)**  
→ポジトロニウム 陽電子<sup>\*</sup>と電子<sup>\*</sup>のスピンの反平行(S=0)で結合したポジトロニウム<sup>\*</sup>。

**バリオン baryon**  
→素粒子 核子<sup>\*</sup>および核子よりも重いスピンの半整数の重粒子で、3個のクォーク<sup>\*</sup>から成る。陽子<sup>\*</sup>p(uud)、中性子<sup>\*</sup>n(udd)、 $\Delta$ 粒子(uuu)、 $\Lambda$ 粒子(uds)、 $\Sigma^0$ 粒子(uus)などがあり、陽子を除き全て不安定である。

**パリティ parity**  
複合粒子の内部状態を表す波動関数は、空間座標を反転したときに符号が元と同じか反対かのどちらかであり、その符号をパリティという。構成粒子の座標の符号を変えるとき、全波動関数の符号が変わらなければ+、変われば-と定義する。強い相互作用や電磁相互作用が関与する過程ではパリティは保存されるが、弱い相互作用では保存されない。このパリティ非保存は、リー(T.-D. Lee)とヤン(C.-N. Yang)による理論の提案(1956年)の後、 $^{60}\text{Co}$ の $\beta$ 壊変<sup>\*</sup>の実験でウー(C.-H. Wu)らによって実証された(1957年)。

**バン・デ・グラフ加速器 van de Graaf accelerator**  
R. J. van de Graafが開発したベルト式高電圧発生装置を利用する荷電粒子加速器。絶縁ベルトによって電荷を電極に運び、高電圧を発生させ荷電粒子<sup>\*</sup>を加速する。この方式を改良したものにタンデム型バンデグラフ加速器がある。図参照。

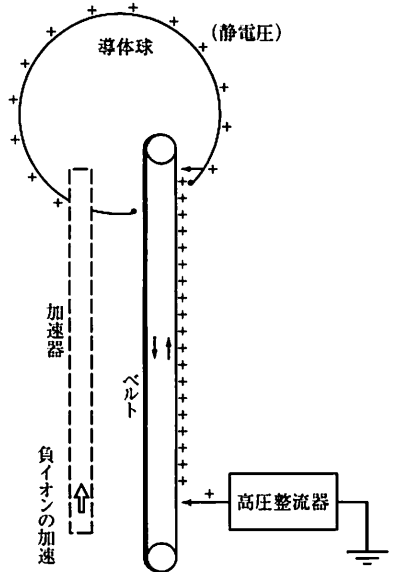
**半価層 half-value thickness**  
→吸収係数 X線<sup>\*</sup>や $\gamma$ 線<sup>\*</sup>の物質中での減弱を表す式 $I = I_0 \exp(-\mu x)$ において、Iが $I_0$ の半分になるのに必要な厚さ $x_{1/2}$

をいい、 $\mu = 0.693 / x_{1/2}$ で表わす。

**半減期 half-life**  
放射性核種<sup>\*</sup>や素粒子<sup>\*</sup>などの不安定な粒子が壊変<sup>\*</sup>して安定化するとき、粒子の数が当初の1/2にまで減少するのに要する時間。半減期 $t_{1/2}$ は、壊変定数<sup>\*</sup>を $\lambda$ とすると $t_{1/2} = \ln 2 / \lambda \approx 0.693 / \lambda$ となる。

**反射材 reflector**  
原子炉<sup>\*</sup>の炉心部からの中性子漏出を低減する目的で、中性子<sup>\*</sup>を炉心方向に反射するための材料。反射体ともいう。減速材<sup>\*</sup>と同様に、中性子吸収断面積が小さく、散乱断面積が大きい軽水、重水、ベリリウム、黒鉛などの物質が適する。反射材は、炉心周辺部における中性子密度を増大させるため、炉心全体にわたり中性子束分布を平均化する役目も果たす。

**反水素 antihydrogen**  
水素(H)の反物質<sup>\*</sup>で、反陽子<sup>\*</sup>( $\bar{P}$ )を原子核<sup>\*</sup>とし陽電子<sup>\*</sup>( $e^+$ )を核外電子に



バン・デ・グラフ加速器の原理

もつ原子<sup>\*</sup>。元素記号  $\bar{H}$ 、原子番号<sup>\*</sup> -1、電荷 -1 で質量は H に等しいとされる。1995 年に欧州合同原子核研究所 (CERN) で初めて 11 個の  $\bar{H}$  が観測された。2002 年には約 50,000 個の  $\bar{H}$  がつくられ真空中の電磁トラップに捕捉された。

#### 半値幅 full width at half maximum (FWHM)

放射線測定器で  $\alpha$  線<sup>\*</sup> や  $\gamma$  線<sup>\*</sup> のエネルギーを測定すると、エネルギー分解能<sup>\*</sup> に応じた山型のスペクトルが得られる。このエネルギー  $E$  のピークの 1/2 の高さにおけるスペクトルの幅 ( $\delta E$ ) を半値幅という。この幅が小さい検出器ほどエネルギー分解能が高い。ピークの 1/10 の高さでの幅を 1/10 値幅 (FW1/10M) といひ、この値が小さいほどバックグラウンドから分離しやすい。

#### 反中性子 antineutron

中性子<sup>\*</sup> の反粒子。記号は、 $\bar{n}$

#### 反跳 recoil

→ホットアトム 原子核<sup>\*</sup> A が壊変<sup>\*</sup> する過程で運動エネルギーをもった粒子 B が放出されたり、運動している粒子 C が原子核 D や粒子 E に衝突して散乱<sup>\*</sup> するとき、運動量保存則にしたがって A、D あるいは E が運動エネルギーを得る現象。反跳された原子核や粒子を反跳核、反跳原子、反跳粒子などと呼ぶ。

#### 反跳核分離装置 recoil separator

核反応<sup>\*</sup> によって標的 (ターゲット) 内に生成し、反跳<sup>\*</sup> で飛び出す原子核<sup>\*</sup> を、その運動エネルギー、運動量あるいは電荷を利用して、電場や磁場下で分離・収集する装置。短寿命核の核構造研究や、新同位体の探索あるいは超重金属<sup>\*</sup> の合成研究で用いる。生成核を直接分離装置へと導くためきわめて短時間で分離できる。異なった方式の装置があるが、理化学研究所での超重金属の合成実験に用いられているガス充填型装置は磁場中に希薄なガスを充填して分離する。ドイツ

重イオン研究所 (GSI) の SHIP (separator for heavy ion reaction products) では生成核の速度の違いを利用する速度フィルター型分離装置が、また日本原子力研究開発機構タンデム加速器施設には電場・磁場・電場を組み合わせたエネルギー収束型分離装置が設置されている。

#### 反跳陽子 recoil proton

高エネルギーの中性子<sup>\*</sup> が水素を含む物質に入射して質量のほぼ等しい陽子<sup>\*</sup> と弾性衝突するとき、中性子の運動エネルギーを受け取って生成する高エネルギーの陽子<sup>\*</sup> のこと。それ自身が高エネルギーの荷電粒子<sup>\*</sup> として物質と相互作用し、二次的な電離作用を引き起こす。この電離作用を利用する高速中性子測定用の反跳陽子比例計数管がある。生体に対する高速中性子<sup>\*</sup> の放射線影響を評価する上で重要な因子でもある。

#### 反同時計数 anticoincidence counting

→同時計数 2 個以上の入力端子のうち的一方にパルスが入力し、他方にはパルスが入力しない場合にのみ信号を計測する方法。バックグラウンドの低減やコンプトン連続部の低減に用いられる。

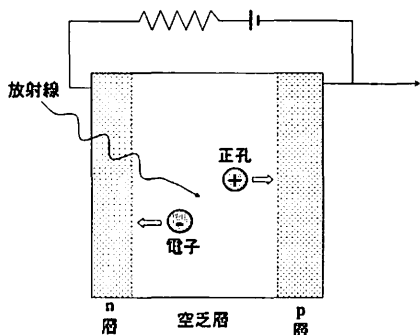
#### 半導体検出器 semiconductor detector

Si や Ge などの半導体を用いる放射線検出器<sup>\*</sup> で固体検出器 (solid state detector SSD) とも呼ばれる。荷電粒子<sup>\*</sup>、X 線<sup>\*</sup>、 $\gamma$  線<sup>\*</sup> などによって放出された電子<sup>\*</sup> が逆バイアスをかけた pn 接合の空乏層<sup>\*</sup> を通過すると、電子 - 正孔対が発生し p または n 極に集められる。これらの電荷を増幅して電気量を測定すると、空乏層内で荷電粒子が失ったエネルギーがわかる。高いエネルギー分解能<sup>\*</sup> をもち、X 線や低エネルギー  $\gamma$  線の検出器として広く使われる。図参照 (p. 100)。

#### 反バリオン antibaryon

→バリオン バリオン<sup>\*</sup> の反粒子の総称。カリフォルニア大学の陽子加速器

は



半導体検出器 (pn 接合型) の原理

Bevatron を用いた実験により、1955 年に反陽子<sup>\*</sup>の存在が、1956 年には反中性子<sup>\*</sup>の存在が確認された。

### 反物質 antimatter

1930 年頃に英国の P. M. A. Dirac の相対論的電子の量子論に基づいて導入された概念で、陽子<sup>\*</sup>、中性子<sup>\*</sup>、電子<sup>\*</sup>などで作られる通常物質に対して、その反粒子(反陽子<sup>\*</sup>、反中性子<sup>\*</sup>、陽電子<sup>\*</sup>)で作られる物質。これまで発見された反粒子と粒子のほとんどに物理法則の対称性があてはまることから、反粒子のみで構成される物質があってもよいとされ

る。1996 年に欧州合同原子核研究機関 (CERN) の研究グループが、反水素<sup>\*</sup>原子 ( $\bar{H}$ ) を世界で初めて合成した。そのときは 10 個程度で原子の寿命も短かったが、2002 年に CERN の二つの国際研究グループ [ATHENA (東大も参加) と ATRAP (ハーバード大など)] が相次いで大量 (50000 個以上) の  $\bar{H}$  をつくり出すことに成功した。反陽子減速器を使って反陽子 ( $\bar{P}$ ) を極低温状態 (15 K) で電磁とラップに閉じ込め、これに  $^{22}\text{Na}$  から取り出した陽電子 ( $e^+$ ) を加えて合成した。

### 反陽子 antiproton

陽子<sup>\*</sup>の反粒子。  $\bar{p}$  と表わす。陽子と同じ質量をもち負電荷 ( $-e$ ) をもつ。1955 年、セグレ (E. Segrè) とチェンバレン (O. Chamberlain) がカリフォルニア大学の 6.2 GeV の陽子加速器 Bevatron を用いた実験により発見した。欧州合同原子核研究機関 (CERN) では、陽子シンクロトロンと反陽子減速器 (antiproton decelerator) の組合せによって 100 秒間に  $2 \times 10^7$  個の  $\bar{p}$  がつくられ各種実験に利用されている。

## ひ

### PR ガス PR gas

→ 比例計数管 アルゴン 90% とメタン 10% の混合ガスで、主に比例計数管<sup>\*</sup>の充填ガスとして使われる。P-10 ガスともいう。比例計数管のガス増幅は、電子<sup>\*</sup>が中性ガス分子に衝突して起きる二次電離が連鎖的に生じる電子なだれ<sup>\*</sup>によるが、電離<sup>\*</sup>は起きずにガス分子の励起のみが起きる場合がある。この励起分子は電子なだれには寄与せず、可視光や紫外光を放出して基底状態に戻る。この発光

は比例計数管の比例性を失わせることがあり好ましくない。アルゴンなどの充填ガスに多原子気体を少量添加するとこの光子<sup>\*</sup>を吸収し、その影響を抑制することができる。PR ガスに混合されているメタンも同様な効果を与える。長時間の使用による多原子気体の分解が計数管の性能を劣化させるため、一定の速度で充填ガスをゆっくり流して用いることもあり、ガスフロー型比例計数管と呼ばれる。PR ガス以外に、希ガスと多原子気体の混

合ガスを用いる代表例として、ヘリウムとイソブタンを混合するQガス<sup>\*</sup>がある。

### BGO シンチレーション検出器

#### BGO scintillation detector

固体シンチレーション検出器の一種。ゲルマン酸ビスマス ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ , BGO) をシンチレーター<sup>\*</sup>とする。NaI(Tl) シンチレーション検出器に比べて高密度である。残光が少ない、潮解性がない、へき開が少なく加工性に優れる、放射線<sup>\*</sup>や熱衝撃に強いなどの利点をもつ。実効原子番号<sup>\*</sup>が大きい<sup>\*</sup>ため、NaI(Tl) 検出器<sup>\*</sup>に比べてコンプトン効果<sup>\*</sup>に対する光電効果<sup>\*</sup>の割合が高く、小さなサイズの結晶でも検出効率<sup>\*</sup>が高い。

### 比エネルギー損失 specific energy loss

→ 阻止能 エネルギー損失率 (rate of energy loss) と呼ばれる。物質中での荷電粒子<sup>\*</sup>の単位長さ当りのエネルギー損失量をいう。

### 比較法 (放射化分析の)

#### comparison method (of activation analysis)

中性子放射化分析において、定量したい元素<sup>\*</sup>を既知量含む標準試料と分析試料を同時に照射し、 $\gamma$ 線ピークの強度比から目的元素を定量する方法。原理的に明瞭であり、放射化<sup>\*</sup>と $\gamma$ 線測定に關与する多くのパラメータを知ることなく分析値が得られるので、最もよく利用される。

### 非確率的影響 non-stochastic effect

→ 確率的影響 放射線<sup>\*</sup>の健康影響のうち、その影響 (障害) の発生率に最低の線量<sup>\*</sup> (しきい値) が存在するときの影響を指し、確定的影響ともいう。この種の影響は、重症度が放射線量の大きさとともに増加するという特徴を有する。白内障、骨髓細胞の枯渇、皮膚の紅斑、脱毛、不妊などがこの種の影響であると考えられる。放射線防護<sup>\*</sup>の観点からは、被ばく量をしきい値以下に抑えることにより非確率的影響の発生が抑えられるとされ

る。しきい値は国際放射線防護委員会<sup>\*</sup> (ICRP) の勧告などに示されている。

### 光核反応 photonuclear reaction

高エネルギーの光子<sup>\*</sup> ( $\gamma$ 線<sup>\*</sup>) が原子核<sup>\*</sup>に衝突したときに起こる核反応<sup>\*</sup>の総称。例えば、 $\gamma$ 線を吸収して励起した原子核において、その励起エネルギーが核子<sup>\*</sup>の結合エネルギーを超えると、中性子<sup>\*</sup>、陽子<sup>\*</sup>、重陽子<sup>\*</sup>、 $\alpha$ 粒子<sup>\*</sup>などの放出や核分裂<sup>\*</sup>反応が起こる。 $\gamma$ 線の散乱<sup>\*</sup>や巨大共鳴も起きる。 $\gamma$ 線と原子核との電磁相互作用に基づくこれらの反応を調べることによって、原子核の構造に関する情報が得られる。

### ビキニ環礁 Bikini Atoll

マーシャル諸島共和国に属する小さな環礁で、1946年から1958年の間に、米国の多数の核実験<sup>\*</sup>を行った場所。1954年3月1日、日本のマグロ漁船第5福竜丸 (乗組員23名) がビキニ環礁の東方160 kmの地点で操業中に水爆実験に遭遇し、多量の放射性核種<sup>\*</sup>を含む灰を浴びた。半年後には乗組員1名が放射線被ばくによる肝臓障害で死亡した。マーシャル諸島の住民や米国の観測兵も被ばくし、多くの被害がでた。これを契機に、魚類、雨水、塵などの放射性核種の分析や、放射性物質<sup>\*</sup>の拡散、生物への濃縮などに関する研究が行われるようになった。

### 飛行時間質量分析

#### time-of-flight mass spectrometry (TOF-MS)

粒子が一定の距離を移動するのに要する時間を測定することにより、その粒子のエネルギーや質量などを測定する方法。時間的に短いパルス状に入射した粒子の集団を一定距離離れた2個の検出器で観測し、通過時刻の差を測定する。電荷をもたないため他の方法では測定が困難な中性子<sup>\*</sup>のエネルギー測定の方法としても重要である。加速電圧  $V$  で加

速された質量  $m$ ，荷電  $z$  のイオンが距離  $L$  を飛行する時間  $t$  は  $t = L\sqrt{m/2zV}$  となるので， $t$  の測定からイオンの  $m/z$  値が得られ，質量分析計として用いることもできる。TOF-MS の長所は，入射したイオンの全てが有効な信号として検出され，ミリ秒以下の短時間測定ができる点にある。

### 非常用炉心冷却装置

#### emergency core cooling system (ECCS)

原子炉冷却系の配管が破断し冷却材が喪失するような事故が起きたとき，直ちに冷却材を炉心に注入する安全システム。原子炉の運転中に冷却水が喪失すると，炉心溶融などの事故に進展する恐れがある。緊急時に原子炉が停止しても燃料体に熱が残り，核分裂生成物の壊変による熱も発生するので，燃料体を冷却し炉心の過熱を防止する。

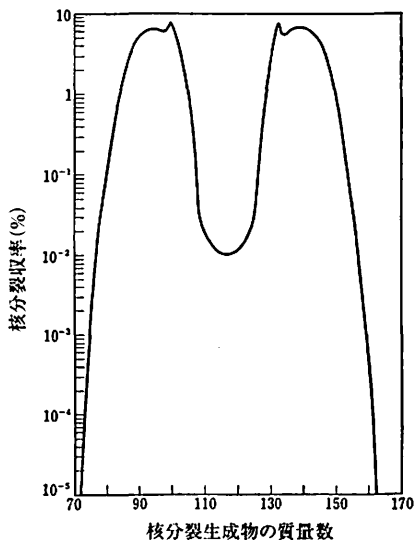
### 非対称核分裂 asymmetric fission

→核分裂モード 核分裂の際に生じる2つの娘核種の質量が互いに異なるような核分裂の様式。 $^{235}\text{U}$  の核分裂がその代表例であり，核分裂生成物の質量は2つの最大値を形成するように分布する。図参照。

### 非弾性散乱 inelastic scattering

→弾性散乱 入射粒子（あるいは光）と散乱体の間でエネルギーの授受が生じ，散乱前後で散乱体や入射粒子（あるいは光）のエネルギーが変わる散乱過程。非弾性散乱が生じる原因は，散乱体の特性や入射粒子のエネルギー領域によって様々である。(i) 光の散乱では，単色光が散乱体によって散乱される場合，その散乱光には入射光の振動数に等しい成分（弾性散乱）以外に，振動数が変化した成分（非弾性散乱）が見られる。この散乱にはブリルアン散乱とラマン散乱があり，散乱体の格子振動の情報などが得られる。(ii) 電子の散乱で

は，散乱体の結晶内電子の励起によるものとフォノンの励起によるものがあり，表面の研究などに用いられる。(iii) 中性子の散乱では，低速中性子が散乱体と衝突する際に入射エネルギーの一部が吸収されるか，あるいは散乱体が中性子にエネルギーを与える。熱中性子のエネルギーあるいは波長が，散乱体である原子・分子の熱振動および原子間距離と同程度であるため，非弾性散乱波の干渉を調べることにより格子振動に関する情報が得られる。(iv) 原子核や素粒子の散乱では，入射粒子 A が標的核 B に衝突したときに，A と B の片方または両方が励起状態になる非弾性散乱が起きる。励起状態にある A や B は，通常  $\gamma$  線を放出して基底状態に戻る。最も一般的な例は  $A + B \rightarrow A + B^*$  ( $B^*$  は励起状態を表す) の反応である。この型の非弾性散乱は，残留核  $B^*$  の励起準位の性質を調べるために重要である。



非対称核分裂の例。熱中性子による  $^{235}\text{U}$  の核分裂生成物の収率。



## ピックアップ反応 pick-up reaction

粒子移行を伴う原子核反応<sup>\*</sup>(粒子移行反応)の一種。標的核<sup>\*</sup>Aがごく少数の核子<sup>\*</sup>bと残留核Bからなるとき、入射粒子<sup>\*</sup>aがbを奪って放出粒子(a+b)となる反応のことで、 $a+A \rightarrow (a+b) + B$ と表わされる。標的核の中のごく少数の核子が入射粒子と相互作用する直接過程の一つで、ストリップ反応の逆過程である。この反応は、Aにおけるbの状態やBの中の空孔状態を調べるのに有効である。代表的な例として(p, d), (p, t), (n, d)反応などがあげられる。

## ピックオフ消滅 pick-off annihilation

→オルトポジトロニウム

## ビッグバン big bang

宇宙膨張の観測事実から、約137億年前に宇宙が高温・高密度状態から爆発的に膨張し、その膨張過程で宇宙の様々な構造が形成されたと考えられている。このような宇宙モデルをビッグバン宇宙といい、宇宙初期の爆発のことをビッグバンと呼ぶ。1940年代後半にG. Gamowなどにより提案された。1965年には米国のA. A. PenziasとR. W. Wilsonによって高温( $>10^{12}$  K)だったビッグバンの名残の3 Kマイクロ波背景放射が観測され(1978年ノーベル物理学賞)、その存在が実証された。

## ピッチブレンド pitchblende

濃青ウラン鉱のこと。閃ウラン鉱の一亜種で、酸化ウラン<sup>\*</sup>を主成分とする。低結晶度、低比重で閃ウラン鉱に比べて不純物が多く、品位は低い。ウランやラジウムの原料鉱石であり、主な産地は米国、カナダ、南アフリカ連邦、ニジェール、ナミビア、フランス、オーストラリア、ガボンなど。マリー・キュリー(Marie Curie)とピエール・キュリー(Pierre Curie)が1898年にピッチブレンドの中にポロニウムとラジウムを発見したこと

で有名。

## 飛程 range

荷電粒子<sup>\*</sup>が物質中を進行して止まるまでの距離。吸収体の厚さに対する粒子の透過率の変化曲線(吸収曲線)において、粒子の透過率が0.5になる吸収体の厚さを平均飛程R、吸収曲線の下降部分を外挿し横軸(透過率=0)と交わる点を補外飛程あるいは外挿飛程 $R_{ex}$ 、透過率が0.1%あるいは0.01%となる厚さを最大飛程 $R_{max}$ と呼ぶ。長さxあたりのエネルギーEの損失である阻止能 $S$ ( $=-dE/dx$ )が分かっている場合、Rは粒子のエネルギー $E_0$ に対して

$$R = \int_0^{E_0} \frac{dE}{S}$$

と計算できる。 $\alpha$ 粒子<sup>\*</sup>や陽子<sup>\*</sup>に代表される荷電粒子は、通過する物質中を直進し、物質を構成する原子<sup>\*</sup>との電気的な相互作用によりエネルギーを失う。このときのエネルギー損失は、通過する物質の原子番号<sup>\*</sup>や入射荷電粒子の電荷、質量およびエネルギーによって決まり、入射エネルギーが一定なら同一物質中の飛程はほぼ一定である。したがって、飛程を測れば入射エネルギーを知ることができる。電子線や $\beta$ 線<sup>\*</sup>では、質量が小さいため多重散乱によって屈曲した飛跡をたどるため個々の粒子による到達距離がばらつき、平均の到達距離にはあまり意味がなく、飛程としては $R_{ex}$ や $R_{max}$ が用いられる。

## 被ばく線量 dose

人体が浴びた放射線量。

## 比放射能 specific radioactivity

ある元素<sup>\*</sup>またはその化合物の単位重量あたりに含まれる放射性核種<sup>\*</sup>の放射能<sup>\*</sup>を示し、SI単位ではBq/kgで表す(Bqは1秒当りの壊変数)。化合物(あるいは単体)の単位モル数当りの放射能、あ

るいは対象とする元素の放射性同位体<sup>\*</sup>とその元素の全原子数の比で表すこともある。化合物(あるいは単体)が、対象とする放射性核種の安定同位体<sup>\*</sup>を含まないとき、無担体<sup>\*</sup>であるといい、その比放射能は極めて高く、対象元素の濃度を低く抑えてのトレーサー<sup>\*</sup>実験などに適している。無担体ラジオアイソトープの製造には(n, p), (p, n), (d, 2n)のように、核反応<sup>\*</sup>の標的と異なる原子番号<sup>\*</sup>の放射性核種を生成する反応を利用する。反跳<sup>\*</sup>を利用すると(n,  $\gamma$ )反応によっても高比放射能ラジオアイソトープを製造することができ、高比放射能の<sup>64</sup>Cuや<sup>51</sup>Crの製造に実用されている。

#### ピューレックス法 Purex process

Plutonium Uranium Redox Extractionの略。原子炉<sup>\*</sup>の使用済核燃料<sup>\*</sup>からウランやプルトニウムを回収する再処理<sup>\*</sup>の代表的な方法で、現在実用化されている唯一の方法。使用済核燃料を6 mol·dm<sup>-3</sup>程度の硝酸に溶かしたのち30% TBP-ケロシン溶液を用いて溶媒抽出し、99.5%以上のウランとプルトニウム(それぞれ6価および4価)を有機相に回収する。他の核分裂生成物<sup>\*</sup>の99%以上は水相中に残る。次にPu(IV)をPu(III)に還元し、プルトニウムを新たな水相に逆抽出してウランから分離する。次に有機相中のウランを希硝酸で逆抽出して回収する。わが国で初の日本原燃(株)六ヶ所再処理工場もピューレックス法を原理とする。図参照(p. 105)。

#### 標識化合物 labeled compound

化合物中の特定の原子<sup>\*</sup>をその安定同位体<sup>\*</sup>または放射性同位体<sup>\*</sup>で置き換えたもの。化合物の挙動を調べるトレーサー<sup>\*</sup>実験などに用いられる。放射性同位体の標識化合物は、放射線測定器やオートラジオグラフィ<sup>\*</sup>によって容易にその分布を知ることができる。医療で使われる放

射性同位体標識化合物は放射性医薬品<sup>\*</sup>と呼ばれ、診断に使われる<sup>99m</sup>Tc(半減期<sup>\*</sup>6.0時間)の標識化合物は、現在世界で最も多量に利用されている。

#### 標準線源 standard source

放射線測定において測定器の校正に用いられる基準となる線源。比較的半減期<sup>\*</sup>の長い放射性核種<sup>\*</sup>が使われ、放出される放射線<sup>\*</sup>のエネルギーや強度の絶対値が与えられている。種々の放射線の種類( $\alpha$ 線<sup>\*</sup>,  $\gamma$ 線<sup>\*</sup>,  $\beta$ 線<sup>\*</sup>, X線<sup>\*</sup>, 中性子線<sup>\*</sup>), 形状(点, 面, 体積), 物理的性状(固体, 液体, 気体)の標準線源がある。

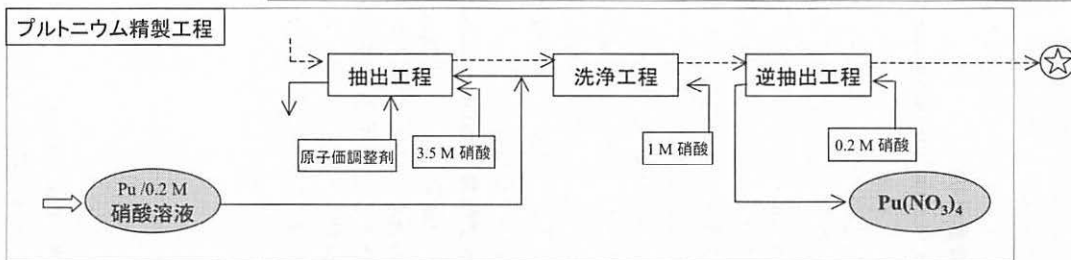
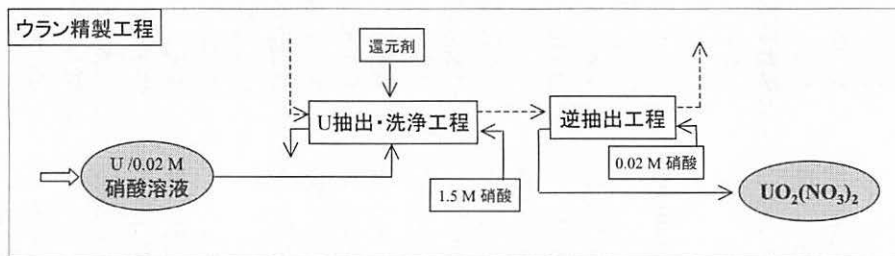
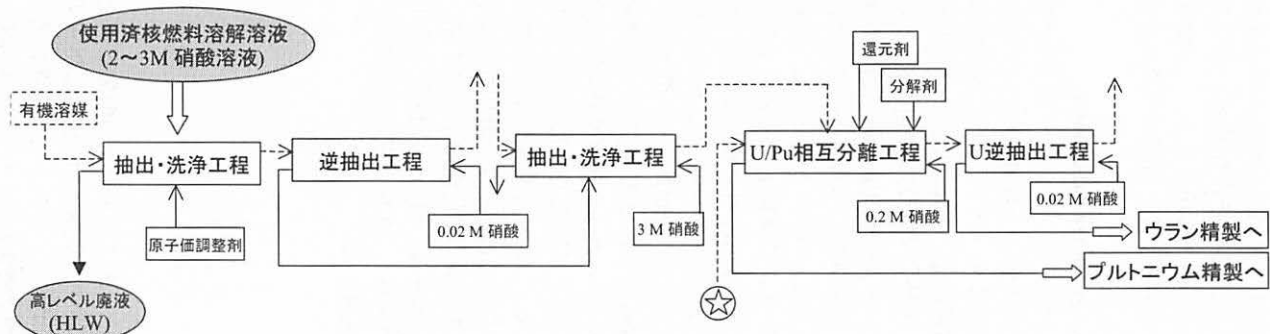
#### 標的核 target nucleus

荷電粒子<sup>\*</sup>, 中性子<sup>\*</sup>, 光子<sup>\*</sup>などによって照射する対象の原子核<sup>\*</sup>。核反応<sup>\*</sup>により、特定の核種<sup>\*</sup>の生成を目的にする場合は、目的核種の生成確率の高い標的核を選ぶ。標的核の天然同位体比が小さい場合には、濃縮同位体<sup>\*</sup>を用いることもある。入射粒子のエネルギー損失や核反応にともない発生する熱で、標的核を含む物質は照射の際に発熱することが多い。発熱が問題になる場合には、熱伝導性の高い物質を選び、冷却しながら照射する。照射後の目的核種の取り出し方法を考慮して適切な化合物を選ぶことが重要である。

#### 表面障壁型 Si 検出器

##### Si surface barrier detector (SSBD)

ケイ素(Si)ウエハーの表面に金属を蒸着し、半導体であるSiと金属との接合部に電子<sup>\*</sup>と正孔の移動に対する障壁(ショットキー障壁)を形成することにより、固体電離箱として働く放射線検出器<sup>\*</sup>。ショットキー障壁はn型Siと金、またはp型Siとアルミニウムで形成され、キャリアー(電子, 正孔)のない空乏層<sup>\*</sup>として働く。ショットキー障壁は整流作用をもち、エレクトロニクスではGHz領域の高周波交流に対しても



ピューレックス法による再処理工程のフローシート概要

—→ 水相

-----> 有機相  
(30%TBP+70%ドデカン)

作動するダイオードとして用いられる。SSBDでは、逆バイアス電圧をかけて空乏層に放射線のエネルギー損失で生じた電子と正孔を電極に集め、電流パルスとする。空乏層の厚さは印加する逆バイアス電圧の平方根に比例する。SSBDは空乏層が他の半導体検出器に比べて薄く、主に陽子、 $\alpha$ 粒子、重イオンなどの荷電粒子の検出に用いられる。

### 表面電離質量分析

#### thermal ionization mass spectrometry (TIMS)

質量分析法の一つで、試料のイオン化に表面電離を用いる方式。表面電離は、熱した金属表面に原子または分子を接触させると熱イオン化が起きる現象で、その効率は金属の仕事関数、その表面温度、試料のイオン化エネルギーなどに依存する。金属の仕事関数より原子のイオン化エネルギーが小さい場合に電離が効率よく起きるので、同法はアルカリ金属元素、アルカリ土類金属元素、希土類元素の分析によく用いられる。

### ビルドアップ係数 buildup factor

放射線の遮蔽あるいは減衰計算の際に用いる係数。 $\gamma$ 線が物質と相互作用して減衰するとき、物質の厚さを $x(\text{cm})$ 、線吸収係数を $\mu(\text{cm}^{-1})$ とすると、入射前の強度 $I_0$ と透過後の強度 $I$ の関係は $I = I_0 e^{-\mu x}$ となる。しかし、広い線束の $\gamma$

線の場合にはコンプトン散乱によってエネルギーが低下した散乱線の一部が入射 $\gamma$ 線に混入するため、この効果の補正が必要になる。この補正係数 $B$ を再生係数といい、1以上の値をとる。この効果を加味した強度 $I$ は $I = I_0 B e^{-\mu x}$ で表わされる。

### 比例計数管 proportional counter

電離箱やガイガーミュラー(GM)計数管と同様のガス入り計数管で、放射線により生成するイオンと電子を電極に集め、電離電流計測またはパルス計測をする。比例計数管はガス増幅度が一定の値( $10^2 \sim 10^3$ )を保つ印加電圧領域で用いられ、放射線のエネルギー損失に比例した波高の出力パルスが得られる。比例計数管は、主に荷電粒子( $\alpha$ 線、 $\beta$ 線)と中性子の検出に用いられる。比例計数管にはPRガス(90% Ar, 10%  $\text{CH}_4$ )やキセノンガスを充填する。低エネルギー $\beta$ 線の測定にはガスフロー型比例計数管が用いられる。空気や計数管の窓による吸収を避けるために試料を計数管内に入れ、PRガスを流しながら測定する。中性子の検出では、計数管内に中性子との核反応で荷電粒子を発生する気体を封入する。 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応を利用して熱中性子を検出する場合には、 $\text{BF}_3$ ガスを用いる。

## ふ

### ファノ係数 Fano factor

放射線検出器のエネルギー分解能に関係する因子。あるエネルギーの放射線がガス入り検出器に入射したときに生成するイオン対(固体半導体検出器であれば電子-正孔対、シンチレーショ

ン検出器であれば光子)の個数を $N$ とすると、ファノ係数 $F$ は(観測した $N$ の分散)/(ポアソン分布から予測される $N$ の分散)で定義される。 $F=1$ は各事象が互いに独立のポアソン分布の場合に相当し、 $0 < F < 1$ は事象間に相関がある

ことを示す。Fの値は、ガス入り検出器や半導体検出器<sup>\*</sup>では0.2～0.1、シンチレーション検出器では1である。

### フィッショントラック fission track

核分裂片が岩石などの固体に残す飛跡。核分裂片の線エネルギー付与<sup>\*</sup> (LET) が大きいことにより生じる。フィッショントラックを化学的エッチングによって拡大し(エッチピットという)、その数や長さを光学顕微鏡によって観察する。岩石の年代測定<sup>\*</sup>にも使われる。岩石に含まれる<sup>238</sup>Uが自発核分裂<sup>\*</sup>によって残したフィッショントラック(<sup>235</sup>Uも自発核分裂するが、<sup>238</sup>Uの自発核分裂に比べて確率が4桁程度低いので無視できる)の数と<sup>238</sup>Uの濃度から年代を決定する。<sup>238</sup>Uの濃度は、<sup>238</sup>U/<sup>235</sup>U比が既知であることを利用して、<sup>235</sup>Uの濃度から間接的に求める。<sup>235</sup>Uの濃度は、試料岩石を加熱して<sup>238</sup>Uのフィッショントラックを消去した後、原子炉<sup>\*</sup>で熱中性子<sup>\*</sup>を照射し、<sup>235</sup>Uの熱中性子誘起核分裂で生じたフィッショントラックの数から求める。この原理を用いる固体飛跡検出器が熱中性子束の測定に利用される。

### フィルムバッジ film badge

X線フィルム<sup>\*</sup>を収めた個人被ばく線量計<sup>\*</sup>。一定期間(1ヶ月など)の放射線作業による被ばく線量<sup>\*</sup>をモニターするために用いる。感度の異なるフィルムを同時に用いて測定可能線量範囲を拡大し、バッジのケースに種々のフィルターを組み込んでX線<sup>\*</sup>、γ線<sup>\*</sup>および熱中性子<sup>\*</sup>線を同時にモニターする。速中性子<sup>\*</sup>に対しては、中性子<sup>\*</sup>による散乱<sup>\*</sup>で乳剤中に発生する反跳陽子<sup>\*</sup>の飛跡を光学顕微鏡で観測する。フィルムバッジは長い間使われてきたが、近年、デジタルデータ処理が可能で繰り返し利用できるなどの特徴をもつ蛍光ガラス線量計(ガラスバッジ)、熱ルミネッセンス線量計<sup>\*</sup>

(TLD)、光刺激ルミネッセンス線量計(OSLD)などに置き換えられている。

### フェザーの式 Feather's formula

物質中のβ線<sup>\*</sup>の飛程<sup>\*</sup>を与える経験式。N. Featherが1938年に導いた。連続スペクトルであるβ線の最大エネルギーE(MeV)に対応するアルミニウム中の最大飛程<sup>\*</sup>R(cm)は、アルミニウムの密度をρ(g/cm<sup>3</sup>)とすると

$$R\rho = 0.543E - 0.16 \quad (E > 0.8 \text{ MeV})$$

と表わされる。なお、L. E. Glendeninによって改良された式は次のようになる。

$$R\rho = 0.407E^{1.33}$$

$$(0.15 \text{ MeV} < E < 0.8 \text{ MeV})$$

$$R\rho = 0.542E - 0.133$$

$$(0.8 \text{ MeV} < E < 3 \text{ MeV})$$

### フェルミ-ディラック統計

#### Fermi-Dirac statistics

パウリの排他原理を取り入れてフェルミとディラックが独立につくり出した統計力学。例えば、同種の2粒子1と2を二つの可能な状態aとbに入れる場合、古典的統計では同種粒子であっても互いに区別できるので、a(1)a(2)、a(1)b(2)、b(1)a(2)およびb(1)b(2)の4つの状態が可能である。フェルミ-ディラック統計では同種の粒子は同じ状態には入れず、状態を表す波動関数が2粒子の交換によって符号を変える(反対称という)ので、a(1)b(2) - b(1)a(2)という1つの状態のみが可能になる。この統計に従うのは電子<sup>\*</sup>、陽子<sup>\*</sup>、中性子<sup>\*</sup>など半整数のスピンのもつ粒子であり、フェルミオン(Fermion)と呼ばれる。一方、ボソン<sup>\*</sup>(Boson)と呼ばれる整数のスピンのもつ光子<sup>\*</sup>などはボース-アインシュタイン統計<sup>\*</sup>に従い、状態を表す波動関数は2粒子を交換しても不変で符号を変えないので、a(1)a(2)、a(1)b(2) + b(1)a(2)およびb(1)b(2)の3つの状態が可能である。フェルミ-ディラック統

計は粒子が同じ状態に集まることを妨げるのに対し、ボース-アインシュタイン統計は粒子を集めるように働く。

### フェルミ気体模型 Fermi-gas model

原子核模型の一つ。原子核<sup>\*</sup>では中性子<sup>\*</sup>と陽子<sup>\*</sup>が井戸型のポテンシャル中を気体分子のように自由に運動するという模型で、基底状態や比較的低い励起状態<sup>\*</sup>の平均的な性質を説明できる。基底状態は絶対零度のフェルミ気体であって、中性子と陽子がパウリの排他律に従って状態を占めると考え、結合エネルギーが求められる。励起状態の単位密度は、核の温度が上昇し、いくつかの中性子と陽子が励起された状態にあるとして求められる。

### フェルミの黄金律 Fermi's golden rule

量子力学において、摂動論から導かれる単位時間当たりの遷移確率の式  $w = (2\pi/\hbar)|\langle \eta|H|i\rangle|^2\rho_f(E)$ 。ここで、 $\langle \eta|H|i\rangle$  は摂動  $H$  によって遷移  $|i\rangle \rightarrow |\eta\rangle$  が起こるときの行列要素で、 $\rho_f(E)$  はエネルギー  $E$  における終状態のエネルギー状態密度である。この式は原子核<sup>\*</sup>の  $\beta$  壊変<sup>\*</sup>や  $\gamma$  遷移<sup>\*</sup>の確率の算出に用いられる。

### フォールアウト fallout

放射性降下物<sup>\*</sup>のこと。成層圏および対流圏から地上に直接または雨とともに降下する原水爆実験などに起因する放射性物質<sup>\*</sup>。1940年代後半から1950年代の大気圏原水爆実験や1986年に起きたチェルノブイル原子力発電所事故<sup>\*</sup>において多量の放射性物質が大気圏に放出され、対流により全世界に飛散した。わが国では「環境放射能水準に関する調査」として、全都道府県においてフォールアウトの分析が行われている。主な核種<sup>\*</sup>は核分裂生成物<sup>\*</sup>の<sup>137</sup>Csや<sup>90</sup>Srであるが、爆発が地表面近くで起きた場合には中性子<sup>\*</sup>による誘導放射性核種も混入する。

### 不感時間 dead time

→回復時間 放射線<sup>\*</sup>をパルス測定するタイプの放射線検出器<sup>\*</sup>で、放射線が検出・分析されている間に次の放射線が入射しても数え落とされる時間のこと。GM管では回復時間<sup>\*</sup>、 $\gamma$ 線スペクトロメータでは処理時間がそれにあたる。単位時間における全不感時間の割合(%)として定義することが多く、不感時間は放射線フルエンス<sup>\*</sup>とともに増大してこの割合だけ放射線を数え落としていることになる。

### 複合核 compound nucleus

→複合核反応 →複合核モデル

### 複合核反応 compound nucleus reaction

核反応<sup>\*</sup> $A(a, b)B$ の途中で、 $A$ と $a$ が融合した複合核<sup>\*</sup> $C$ が形成されてから粒子 $b$ が放出され、残留核 $B$ を生成する反応。直接反応では入射粒子と標的核<sup>\*</sup>中の核子<sup>\*</sup>との衝突は1~2回であるのに対し、複合核反応では入射粒子と標的核内の核子とが多数回衝突する。複合核反応は中性子捕獲反応<sup>\*</sup>や中程度のエネルギーまでの軽イオンおよび重イオン核反応<sup>\*</sup>で見られる。複合核は寿命 $\Delta t$ が長いいため、時間とエネルギーの不確定性原理 $\Delta t \cdot \Delta E \geq (\hbar/2\pi)$ から $\Delta E$ が小さくなり、中性子捕獲反応や低エネルギーの荷電粒子反応の励起関数<sup>\*</sup>(断面積のエネルギー依存性)に鋭いピークが現れる。

### 複合核モデル compound nucleus model

複合核<sup>\*</sup>の生成を考慮する核反応模型。核反応<sup>\*</sup> $A(a, b)B$ において、入射粒子 $a$ が標的核<sup>\*</sup> $A$ 内の核子<sup>\*</sup>と多数回衝突(強い力による相互作用)し、 $A$ と $a$ が融合した状態を複合核と呼ぶ。複合核は多くの核子が励起された状態で、一種の熱平衡状態にある。そのため、特定の核子や $\alpha$ 粒子<sup>\*</sup>などにエネルギーが集中して原子核<sup>\*</sup>の外に飛び出す確率は非常に小さく、複合核の寿命は長い。粒子の核外への放出過程は粒子蒸発と呼ばれ、統計的

に取り扱われるので、複合核モデルは統計モデルとも呼ばれる。

### 不足当量法 substoichiometry

放射分析\*のひとつ。試料中の物質を試料から全量を分離することなく定量することに特色がある。分析試料中の定量目的物質 X の未知量を  $W_X$  モルとする。この試料に、目的物質と同一の化学形をもつ放射能\*  $a_0$  の標識化合物\*  $X^*$  を  $W_0$  モル加える。さらに、分離のための試薬 Y を  $W_X + W_0$  に対して当量に近い不足量 ( $W_Y$  モル) 加え、反応生成物  $(X + X^*)Y$  を分離する。生成物に含まれる放射能が  $a_1$  であり、X と Y の反応は定量的に進行するものとする、生成物  $(X + X^*)Y$  の量は  $W_Y$  モルになる。Y を加える前後のモル当りの比放射能\* は変化しないので

$$\frac{a_0}{W_X + W_0} = \frac{a_1}{W_Y}$$

と表わされ、求める  $W_X$  は

$$W_X = \frac{a_0}{a_1} W_Y - W_0$$

となる。反応生成物  $(X + X^*)Y$  の分離には溶媒抽出法などが用いられる。

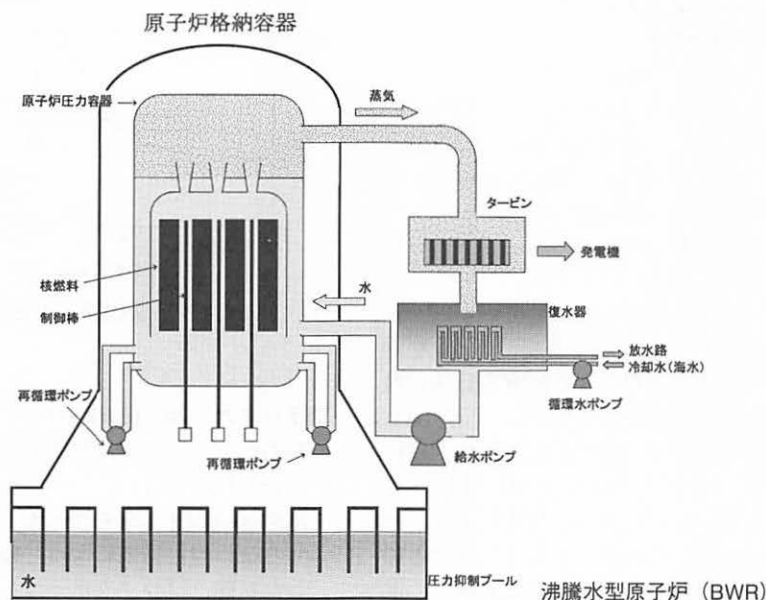
### 沸騰水型原子炉

#### boiling water reactor (BWR)

→加圧水型原子炉 軽水を減速材\* および冷却材\* とし、濃縮ウラン\* を燃料に用いる発電用軽水炉の一つの型。核分裂\* による熱で発生する水蒸気を熱交換器を通さずに直接蒸気タービンに導いて発電する。約 70 気圧に保たれた原子炉容器内で水が沸騰し、発生する蒸気(約 290°C) は気水分離器と蒸気乾燥器を経てタービンに送られる。沸騰によって冷却材中に生じる蒸気泡(ボイド)は、その量により原子炉出力を自己制御する性質を有するが、蒸気が放射性になるため保守に難しさがある。安全性の向上や作業者の被ばく線量\* の低減を図った改良型 (ABWR) も含めてわが国では現在 33 基が稼働している。図参照。

#### 部分壊変定数 partial decay constant

→壊変定数 分岐壊変\* において、 $i$  番



目の様式の壊変定数 $\lambda_i$ を部分壊変定数という。全壊変定数( $\lambda$ )との関係は $\lambda = \sum \lambda_i$ である。

### 部分的核実験禁止条約

**Partial Nuclear -Test- Ban Treaty (PTBT)**

→包括的核実験禁止条約

### ブライト・ウィグナーの公式

**Breit-Wigner formula**

共鳴領域における核反応断面積 $\sigma$ のエネルギー依存性を表す式。中性子断面積を説明するモデルの一つになっている。あるエネルギー $E_0$ をもつ粒子 $a$ が標的核 $X$ と反応し、複合核 $C$ を経由して $Y$ と $b$ に壊変 $\sigma$ する場合の反応式は $X + a \rightarrow C \rightarrow Y + b$ と表される。粒子 $a$ のエネルギー $E_0$ がちょうど複合核の共鳴領域にある励起エネルギー準位 $E$ に相当するとき、 $a$ は高い確率で $X$ に吸収される。これを共鳴現象と呼ぶ。

### フラグメンテーション反応

**fragmentation reaction**

重い原子核 $\sigma$ の核反応 $\sigma$ によって質量数 $20 \sim 30$ の核破片が多数生成する反応。

### プラスチックシンチレータ

**plastic scintillator**

シンチレータ $\sigma$ をポリスチレンなどのプラスチックの中に溶かし込んだもの。いろいろな形状に加工できるという特徴をもち、低バックグランド放射線検出器の外部放射線逆(反)同時計数用の検出器などに使われることが多い。

### プラズマ plasma

全体としては電氣的に中性であるが、高密度の正荷電粒子群(高度に電子 $\sigma$ を剥ぎ取られた原子群)と高密度の負荷電粒子群(自由な電子群)がバラバラに激しく運動している集団のこと。固体、液体、気体につぐ物質の第四の状態(相)とも言われる。気体を封入し放電状態にした放電管、恒星の大気、高温の気体などに存在する。核融合 $\sigma$ の実現に向けて、高

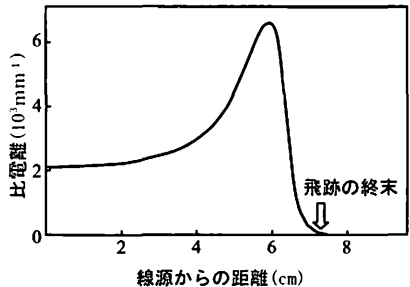
温プラズマを局限空間に長時間閉じ込める研究が精力的に展開されている。

### プラズマ核融合 plasma nuclear fusion

→核融合 水素同位体のプラズマ $\sigma$ を高温(1億度以上)に保ち核融合 $\sigma$ を起こさせること。高温のプラズマをつくり一定時間維持する方法として、トカマク $\sigma$ 装置のように磁場で閉じ込める方式とレーザー核融合 $\sigma$ のような慣性閉じ込め方式があり、前者をプラズマ核融合といふことがある。

### ブラッグ曲線 Bragg curve

単一エネルギーの正荷電粒子が物質を通過したとき、その飛跡沿いの単位長さ当たりにつくられた平均イオン数(平均比電離)を示す曲線。横軸に線源からの距離、縦軸に比電離をとる。 $\alpha$ 粒子 $\sigma$ が物質中(例えば空気中)で単位長さ当たり失うエネルギーは $\alpha$ 粒子の速度の2乗に反比例する。したがって飛跡の終末に近づくにつれてエネルギー損失が最大になる。図参照。



ブラッグ曲線(空気中の $\alpha$ 粒子)

### ブラックホール black hole

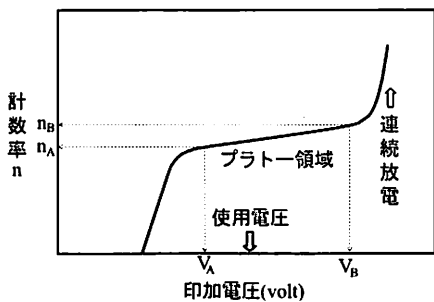
重力が非常に強く、物質も光も脱出できない暗黒の天体のこと。巨大な質量(太陽の8倍以上)をもつ星が超新星 $\sigma$ 爆発した後、自己重力によって極限まで収縮した状態。ブラックホールそれ自体は不



可視だが、ブラックホールが物質を吸い込む際に降着円盤を形成するので、そこから出る X 線<sup>\*</sup> や  $\gamma$  線<sup>\*</sup> ( $\gamma$  線バースト) などによって観測が可能である。

### プラトー特性 plateau characteristic

ガイガーミュラー (GM) 計数管<sup>\*</sup> や比例計数管<sup>\*</sup> による放射線測定において、印加電圧を横軸にとり、計数率を縦軸にとって両者の関係を図示したとき、印加電圧を変化させても計数率がほとんど変化しない平坦部をプラトーといい、その傾斜 (100 V 当たりの計数率増加率) や長さ (プラトー部の開始電圧  $V_A$  と終端電圧  $V_B$  の差) をプラトー特性という。図参照。



プラトー特性 (GM 計数管)

### プランク定数 Planck constant

“エネルギー”と“時間”の積で定義される作用量は量子性をもつ (飛び飛びの値をとる) という着想から導かれた基礎物理定数。記号は  $h$  で、その値は  $6.6260693(11) \times 10^{-34}$  Js.  $h/2\pi$  で定義され、記号  $\hbar$  で表される Planck constant, reduced もよく用いられる。

### フリーラジカル free radical

遊離基ともいう。分子の熱分解、光分解、放射線分解<sup>\*</sup> などによって化学結合が切断されて生じる不対電子をもつ化学種。寿命は短いが化学的反応性がきわめ

て高い。水の放射線分解では、放射線<sup>\*</sup> の電離<sup>\*</sup> 作用によって生成した  $H_2O^+$  から遊離基 ( $\cdot OH$ ) が生じる。この遊離基の DNA などとの反応は放射線の生体影響の素過程である。

### フリッケ線量計 Fricke dosimeter

$Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$  の変化量から線量<sup>\*</sup> を求める化学線量計。鉄線量計<sup>\*</sup> とも呼ばれる。空気または酸素を飽和した硫酸鉄 (II) の希硫酸溶液に  $\gamma$  線<sup>\*</sup> を照射すると、水の放射線分解<sup>\*</sup> で生じる OH ラジカル ( $\cdot OH$ ) によって酸化反応  $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$  が起こることを原理とする。大線量 ( $10^5 \sim 10^6$  rad) の測定に適する。1929 年に Fricke が X 線量を算定する方法として開発したのでフリッケ線量計と呼ばれる。

### フルエンス fluence

→線束密度

### ブルサーマル

“plutonium thermal use”を意味する和製造語。プルトニウム (plutonium) を熱中性子炉<sup>\*</sup> (thermal neutron reactor) の燃料として使用すること。使用済核燃料<sup>\*</sup> から分離したプルトニウムを有効利用するためにウランと混合して加工した混合酸化物燃料<sup>\*</sup> (MOX 燃料) を軽水炉<sup>\*</sup> の燃料として使用する。

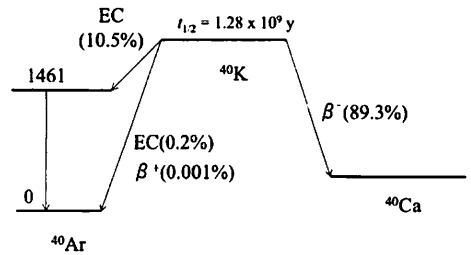
### プロブ blob

凝集状態の物質に入射した高エネルギーの電子<sup>\*</sup> (または陽電子<sup>\*</sup>) は、イオン化や励起を起こして空間的にとびとびにスパ<sup>\*</sup> (spur) を形成しつつ減速する。エネルギーがおよそ 1 keV 以下になると、スパ<sup>\*</sup>間の距離が短くなりかつランダムウォークのように配置され、50 個ほどのイオンや二次電子<sup>\*</sup> が数 nm の大きさの中に密集したマイクロなプラズマ状になると考えられる。これをプロブといい、スパ<sup>\*</sup>の末端に出来る特異な構造である。

### 分岐壊変 branching decay

1 種類の放射性核種<sup>\*</sup> が 2 つ以上の異な

る様式で壊変すること。例えば、 $^{40}\text{K}$  は EC 壊変、 $\beta^+$  壊変、 $\beta^-$  壊変の3種類の壊変をする。壊変様式1の壊変定数を $\lambda_1$ とし、壊変様式2の壊変定数を $\lambda_2$ とすると、全壊変定数 $\lambda$ は $\lambda_1 + \lambda_2$ となる。 $\lambda_1$ と $\lambda_2$ は部分壊変定数と呼ばれる。図参照。



### 分岐比 branching ratio

分岐壊変において、1つの壊変様式による壊変が全体の壊変に占める割合。

分岐壊変 ( $^{40}\text{K}$ 、エネルギーの単位は keV)

### ベータ壊変 $\beta$ decay または $\beta$ disintegration

原子核が陽電子 ( $e^+$ ) を放出する  $\beta^+$  壊変と、電子 ( $e^-$ ) を放出する  $\beta^-$  壊変がある。(i)  $\beta^+$  壊変；素過程は  $p \rightarrow n + \beta^+ + \nu$  と記述される。ここで  $p, n, \nu$  はそれぞれ陽子、中性子、ニュートリノを示す。 $\beta^+$  壊変の前後で質量数は変わらず、原子番号は1減少する。ニュートリノの放出をとまなうため、 $\beta^+$  線のエネルギーは連続スペクトルになる。中性子数が安定核種より小さい核種で起こる。 $\beta^+$  壊変のみで壊変する核種は少なく、軌道電子捕獲 (EC) を伴うことが多いが、原子番号の増加とともに EC の確率が高くなる。 $\beta^+$  壊変核種はすべて人工放射性核種であり、 $^{22}\text{Na}$  や  $^{64}\text{Cu}$  がある。(ii)  $\beta^-$  壊変；素過程は、 $n \rightarrow p + \beta^- + \bar{\nu}$  と記述される。ここで  $\bar{\nu}$  は反ニュートリノを示す。 $\beta^-$  壊変の前後で質量数は変わらず、原子番号は1増加する。 $\beta^-$  線のエネルギーは連続スペクトルである。 $\beta^-$  壊変核種として  $^{24}\text{Na}$  や  $^{60}\text{Co}$  がある。

### ベータ線 $\beta$ ray

→ベータ壊変 原子核から放出される高エネルギーの電子 (または陽電子)。 $\beta$  線が放出されると同時に放出さ

れるニュートリノがいろいろな割合でエネルギーをもち去るので、 $\beta$  線のエネルギーはゼロから最大エネルギーにわたる連続スペクトルを示す。

### ベータトロロン betatron

電子線加速器の一種。ドーナツ型真空加速管の中で、電子をその運動面に垂直な磁場で円軌道に保ち、時間的に変化する磁束により加速する。300 MeV 程度まで加速することができ、かつては原子核の研究や医療に広く用いられた。

### 閉核 closed-shell nucleus

原子核の殻模型において、殻が核子で満たされた原子核のこと。すなわち、魔法の数 (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126) の陽子または中性子によって構成される安定性の高い原子核。

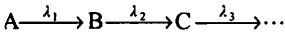
### 平均自由行程 mean free path

平均自由行程ともいう。ある粒子が他の粒子と衝突を繰り返しながら進むとき、最初の衝突から次の衝突までに進む距離の平均値。

### ベイトマンの式 Bateman's equation

天然に存在するウラン ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ) やトリウム ( $^{232}\text{Th}$ ) のように長寿命の放射性核種は、つぎつぎに壊変して多数の

放射性核種を生成する。このような一連の壊変を逐次壊変または壊変系列\*をつくるという。親核種\*Aが



と逐次壊変する場合、時間  $t=0$  の核種\* A の原子数を  $N_1^0$  とすると、壊変系列の  $i$  番目の原子数は

$$N_i = N_1^0 \left[ \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{i-1}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_i - \lambda_1)} \cdot e^{-\lambda_i t} + \dots + \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{i-1}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_2 - \lambda_3) \dots (\lambda_{i-1} - \lambda_i)} \cdot e^{-\lambda_i t} \right]$$

と表すことができる。これをベイトマンの式という。親核種の半減期\*が他の核

種に比べてはるかに長い場合には

$$e^{-\lambda_i t} \gg e^{-\lambda_j t}$$

となり、十分長い時間が経過すると永続平衡\*が成立するので

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots = \lambda_i N_i$$

という関係になる。

### ペンタクォーク penta-quark

5 個のクォーク\* でできた粒子。2005 年、大型放射光施設 Spring-8 のレーザー電子光施設における  $\gamma + n \rightarrow K^- + \Theta^+ \rightarrow K^- + (K^+ + n)$  反応によってペンタクォーク ( $\Theta^+$ ) が確認された。この粒子の質量は  $1.54 \overline{\text{GeV}}$  で、クォークの組み合わせは  $uudd\bar{s}$  である。他の実験施設から否定的な結果も報告されており、その存在については現在も議論が続いている。

## ほ

### ボーア半径 Bohr radius

ボーア (Niels Henrik David Bohr 1885-1962) の原子理論で考えられた水素原子の電子軌道のうち最小のものの半径。すなわち、最も低いエネルギーをもつ円軌道の半径で、ボーア半径  $a_0$  はプランク定数\*  $h$ 、電子\* の静止質量\*  $m_e$ 、電気素量  $e$ 、真空誘電率  $\epsilon_0$  を用いて  $a_0 = \epsilon_0 h^2 / \pi m_e e^2 = 5.29177249 \times 10^{-11} \text{ m}$  と表わされる。この値は、原子軌道の大きさの単位として用いられ、 $h/2\pi = e = m_e = 1$  とおくハートリー原子単位では  $a_0 = 1 \text{ a.u.}$  である。

### ボース-アインシュタイン統計

#### Bose-Einstein statistics

→フェルミ-ディラック統計

### 崩壊熱 decay heat

放射性核種\* の壊変\* (崩壊) によって生ずる熱。放射性核種は  $\alpha$  線\*、 $\beta$  線\* あ

るいは  $\gamma$  線\* などを放出して崩壊するが、放射線\* は周辺物質と相互作用を起し、そのエネルギーは熱に変わる。原子炉\* は、運転停止後も崩壊熱のために燃料が発熱し続けるため、これを取り除くための継続的な冷却を必要とする。崩壊熱はアイソトープ電池\* の熱源にもなる。単一核種の発熱量から放射能\* を求めることも可能であり、 $\alpha$  線や軟  $\beta$  線を放出する核種\* の放射能の絶対測定に有効である。核融合\* 研究では、大量のトリチウム ( $^3\text{H}$ , 911 aW/Bq) の測定に利用されている。

### 包括的核実験禁止条約

#### Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT)

部分的核実験禁止条約\* (PTBT) が対象としていなかった地下核実験を含め、宇



宙空間、大気圏、水中、地下のあらゆる空間での核実験<sup>\*</sup> 禁止を目的とする国際条約。2005年5月現在、日本を含む175カ国が署名し、121ヶ国が批准している。しかし、条約発効には特定の44ヶ国(発効要件国)すべての批准が必要であり、米国、中国、インド、パキスタンなど12ヶ国が批准していないため未発効のままである。

### 包括的核実験禁止条約機関

#### Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO)

包括的核実験禁止条約<sup>\*</sup>の趣旨および目的を達成し、条約の規定の実施を確保し、締約国間の協議および協力のための場を提供するために条約に基づき設立されることとなっている機関。締約国会議、執行理事会および技術事務局で構成される。現在、準備委員会がウィーンに設置され、設備の整備を進めている。仮に実験的核爆発および他の核爆発が行われた場合には、国際的な監視制度による監視活動と現地査察<sup>\*</sup>により、核爆発の事実を確認することとそれに関連する協議が行われる。

### 放射化 activation

安定核種の原子核<sup>\*</sup>が陽子<sup>\*</sup>、重イオン、中性子<sup>\*</sup>、光子<sup>\*</sup>などと核反応<sup>\*</sup>した結果として放射性核種<sup>\*</sup>が生成する現象。ラジオアイソトープの製造や放射化分析<sup>\*</sup>に広範に利用される。

### 放射壊変 radioactive decay

→壊変 放射性核種<sup>\*</sup>の原子核<sup>\*</sup>が $\alpha$ 線<sup>\*</sup>、 $\beta$ 線<sup>\*</sup>、 $\gamma$ 線<sup>\*</sup>などを放出して核種<sup>\*</sup>に固有の速度で他の核種に変換すること。

### 放射化学 radiochemistry

放射性元素、放射性核種<sup>\*</sup>を対象とする化学。元素<sup>\*</sup>や化合物を対象とする化学の枠を核種<sup>\*</sup>(現在約3000核種<sup>\*</sup>が知られている)にまで広げ、核現象や放射線<sup>\*</sup>の化学効果までも含めて研究する物理学

と化学の境界に位置する学問分野。歴史的には、19世紀末に輝かしい成果を取めたキュリー夫妻のラジウムの発見などに源を発する。わが国では、原子核<sup>\*</sup>の構造や核反応機構を化学的視点から研究する核化学<sup>\*</sup>(nuclear chemistry)も含めた広い分野を意味する。放射性物質<sup>\*</sup>を扱う化学全般を指すこともある。具体的には、人工元素の製造や核データの研究、加速器化学、同位体分離<sup>\*</sup>と濃縮、放射化分析<sup>\*</sup>や放射能分析、ラジオアイソトープ製造と標識化合物<sup>\*</sup>の合成、超ウラン元素や超重元素<sup>\*</sup>の研究などがあり、原子力をはじめ物質科学、宇宙科学、地球科学、考古学、環境科学、生命科学などとの接点をもつ。

### 放射化学分析 radiochemical analysis

ある系における元素<sup>\*</sup>を放射化学的な手法で分析すること。化学分析、分光分析、電気化学分析、質量分析などと並んで称される。もともと試料中に含まれる放射性核種<sup>\*</sup>や原子炉<sup>\*</sup>などを用いて放射化<sup>\*</sup>した目的元素を化学的に分離、精製する過程を経る。一般的に放射能測定の検出感度は他の分析手法に比較して高く、分析値の確度も高い。

### 放射化学分離 radiochemical separation

放射性核種<sup>\*</sup>を含む試料から、それ自身あるいは娘核種<sup>\*</sup>を分離すること。対象とする放射性核種の量が通常の化学分離における量よりはるかに少ないことが特徴。

### 放射化分析 activation analysis

試料に中性子<sup>\*</sup>、陽子<sup>\*</sup>や重陽子<sup>\*</sup>などの荷電粒子<sup>\*</sup>、あるいは光子<sup>\*</sup>を照射して試料に含まれる原子核<sup>\*</sup>を放射化<sup>\*</sup>し、放出される放射線<sup>\*</sup>を測定して元素<sup>\*</sup>を定量する方法。照射源により、中性子放射化分析(neutron activation analysis, NAA)、荷電粒子放射化分析、光子放射化分析<sup>\*</sup>がある。原子炉<sup>\*</sup>の中性子を利用す

る NAA が最も一般的である。検出感度に優れ、極微量の元素の種類と濃度を知らることが可能である。放射化した核種<sup>\*</sup>を放射化学的手法により分離・精製した後、放射能測定<sup>\*</sup>する放射化学放射化分析と、分解能の高い検出器と波高分析器を組み合わせ放射能測定することにより化学分離操作をせずに多元素の同時測定が可能な機器放射化分析<sup>\*</sup>に分類される。特に後者は、試料を非破壊で分析できる特徴を有する。自然科学、工学、医学、考古学、環境科学などの幅広い分野で利用されている。

### 放射光 synchrotron radiation

光速に近い速さで直進する電子<sup>\*</sup>が、その進行方向(軌道)を磁場によって変えられたとき、軌道の接線方向に発生する電磁波<sup>\*</sup>。シンクロトロン放射光<sup>\*</sup>(SR)あるいはシンクロトロン軌道放射(Synchrotron Orbit Radiation : SOR)ともいう。放射光は、電子のエネルギーが高いほど指向性の強い明るい光となり、進む方向の変化が大きいかほど短い波長の光を含むようになる。放射光は、輝度が高い、指向性が強い、X線<sup>\*</sup>～赤外線までの幅広い波長領域を含む、偏向特性がある、短いパルス光として得られるなどの特徴をもち、物性をはじめ様々の研究に利用される。わが国には高輝度光科学研究センターの SPring-8 (Super Photon Ring 8 GeV) や高エネルギー加速器研究機構の PF (Photon Factory) などがある。

### 放射性医薬品 radioactive medicine

放射性同位元素<sup>\*</sup>を使用した医薬品で、日本薬局方、放射性医薬品基準および放射性医薬品製造規則に記載されたものをいう。放射性核種<sup>\*</sup>で標識した化合物のなかで、診療に利用するものを放射性薬剤という。放射性医薬品は薬事法により厚生労働大臣から製造(輸入)を承認された医薬品であり、薬事法の規制は受け

るが、放射線障害防止法<sup>\*</sup>の規制対象とはならない。人体や動物に投与し、陽電子放出トモグラフィー<sup>\*</sup>(PET)や単一光子放射型コンピュータ断層法(SPECT)などの核医学<sup>\*</sup>診断装置を用いる診断に供するもの(体内診断用放射性医薬品)と血液に含まれる微量の物質を体外で測定するもの(体外診断用放射性医薬品)がある。治療用放射性医薬品の使用の歴史は長い。現在、わが国で広く使用されている治療は<sup>131</sup>Iのβ線<sup>\*</sup>による転移性甲状腺がんや甲状腺機能亢進症の治療のみである。近年、β線<sup>\*</sup>やα線<sup>\*</sup>を放出する放射性核種(<sup>186</sup>Re, <sup>188</sup>Re, <sup>211</sup>Atなど)で標識したモノクローナル抗体によるがん治療や悪性腫瘍に特異的に集積する標識医薬品(<sup>131</sup>I-MIBGなど)や、転移がんの疼痛軽減に有効な疼痛緩和薬剤(<sup>89</sup>Srなど)の研究開発が進んでいる。

### 放射性核種 radionuclide

放射壊変<sup>\*</sup>をする核種<sup>\*</sup>。

### 放射性降下物 radioactive fallout

核実験<sup>\*</sup>や原子力発電所の事故などによって放射性物質<sup>\*</sup>が大気中に飛散し、地表に降下したもの。フォールアウト<sup>\*</sup>ともいう。<sup>239</sup>Pu, <sup>240</sup>Pu, <sup>241</sup>Amなどの超ウラン元素や<sup>90</sup>Sr, <sup>137</sup>Csなどの核分裂生成物<sup>\*</sup>などがある。

### 放射性同位元素 radioisotope

→放射性同位体

### 放射性同位体 radioisotope

原子番号<sup>\*</sup>Zが等しく質量数<sup>\*</sup>の異なる核種<sup>\*</sup>(同位体<sup>\*</sup>)のうち、放射壊変<sup>\*</sup>をする核種。例えば、原子番号19の天然カリウムには<sup>39</sup>K(93.2581%)、<sup>40</sup>K(0.0117%)および<sup>41</sup>K(6.7302%)の3つの同位体が存在するが、このうち<sup>39</sup>Kと<sup>41</sup>Kは安定核種であり、<sup>40</sup>Kは半減期<sup>\*</sup>12.8億年でβ壊変<sup>\*</sup>(89.33%)、EC壊変<sup>\*</sup>(10.67%)およびβ<sup>+</sup>壊変(0.001%)をする放射性核種<sup>\*</sup>であり、これをカリウムの放射性同

位体あるいは放射性同位元素<sup>\*</sup>という。

### 放射性廃棄物 radioactive waste

原子力発電所、原子炉<sup>\*</sup>施設、核燃料サイクル<sup>\*</sup>施設、医療機関、研究所や大学などのラジオアイソトープ使用施設などから発生する規定濃度以上の放射性物質<sup>\*</sup>を含む廃棄物のこと。放射能レベル(低、高レベル)、含まれる放射性核種<sup>\*</sup>と放射線特性( $\alpha$ 線<sup>\*</sup>、 $\beta$ 線<sup>\*</sup>、 $\gamma$ 線<sup>\*</sup>)、物理的形狀(気体、液体、固体)などによって分類され、それに応じて処分される。国内の原子力発電所で発生する低レベル放射性廃棄物<sup>\*</sup>の固化体は、日本原燃(株)六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センターで処分される。

### 放射性ハロー radioactive halo

中性子<sup>\*</sup>や陽子<sup>\*</sup>が原子核<sup>\*</sup>の中ではなく、その周囲を回っている状態。ハローは、おぼろ月のまわりにみられるようなぼんやりした笠を意味する。中性子過剰核などで見られる現象で、中性子の場合には中性子ハロー<sup>\*</sup>と呼ばれる。この現象はフェルミ面近傍の中性子が軌道角運動量<sup>\*</sup>の小さいs軌道やp軌道を占有し、分離エネルギーがゼロに近づいたとき、この軌道の波動関数が原子核の外側に大きく広がるために見られる。陽子にはクーロン力<sup>\*</sup>がはたらくため、陽子ハローは形成されにくい。天然に存在する軽い原子核の中性子数と陽子数<sup>\*</sup>の比はほぼ1であり、中性子と陽子の密度分布の形はほとんど同じである。しかし、<sup>11</sup>Li(陽子3個、中性子8個)の原子核では、中性子が普通の原子核と同様の構造をもつ芯のまわりに薄く広がったような構造(中性子ハロー構造)をもつことが知られている。

### 放射性ビーム radioactive beam

放射性核種<sup>\*</sup>を加速器<sup>\*</sup>で加速して得られるビーム。不安定核ビームあるいはRIビームともいう。このビームに用い

る放射性核種は、加速した重イオンを標的原子核に衝突させる核破砕反応<sup>\*</sup>によってつくられる。破砕片は任意の方向に任意の速度で飛び散るが、その中から特定の運動量と速度をもつ破砕片を磁場中や電場中での偏向を利用して選別し、純度の高い放射性ビームを得る。放射性ビームを用いる実験は、単に特定の放射性核種の性質を知ることだけではない。宇宙での元素合成過程では不安定核を経由する反応が重要な役割を演じたと考えられるので、現在の宇宙の実態を解明するためにも興味深い実験である。

### 放射性物質 radioactive material

放射能<sup>\*</sup>をもつ物質の総称で、放射性核種<sup>\*</sup>の単体や化合物。放射化<sup>\*</sup>された物質や原子力施設などで発生する放射性廃棄物<sup>\*</sup>などもこれに当たる。

### 放射線 radiation

空間を伝播し移動するエネルギー(>数十eV)の流れで、電磁放射線(X線<sup>\*</sup>、 $\gamma$ 線<sup>\*</sup>)、荷電粒子<sup>\*</sup>線( $\alpha$ 線<sup>\*</sup>、 $\beta$ 線<sup>\*</sup>、重イオン)、電荷をもたない粒子線(中性子線)に分類される。電離放射線<sup>\*</sup>の意味で使われることもある。X線には原子中の軌道電子<sup>\*</sup>のエネルギー状態の変化にともなって放出される特性X線<sup>\*</sup>と電子<sup>\*</sup>や陽電子<sup>\*</sup>などが原子核<sup>\*</sup>の近傍で大きな力を受けるときに放出される制動X線がある。 $\gamma$ 線は原子核のエネルギー状態の変化にともなって放出される。 $\alpha$ 線は原子核から放出されるヘリウムの原子核(<sup>4</sup>He<sup>2+</sup>)であり、 $\beta^-$ 線は原子核から放出される電子(e<sup>-</sup>)である。原子核から放出される陽電子(e<sup>+</sup>)は $\beta^+$ 線と呼ばれる。加速器<sup>\*</sup>でつくられる放射線<sup>\*</sup>として陽子線(p)や重陽子線(d)をはじめ多くの重イオンおよびパイオンやミュオン<sup>\*</sup>がある。中性子<sup>\*</sup>は主に原子炉<sup>\*</sup>や加速器で核分裂<sup>\*</sup>や核融合<sup>\*</sup>反応を利用してつくられる。そのほか、地球外から飛来す

る宇宙線<sup>\*</sup>がある。

### 放射線化学 radiation chemistry

放射線<sup>\*</sup>による作用によって引き起こされる化学的効果について研究する学問分野。放射線化学では、放射線を照射した物質中での原子<sup>\*</sup>や分子の電離<sup>\*</sup>あるいは励起<sup>\*</sup>にともなう化学反応を扱う。電離や励起にともない発生する電子<sup>\*</sup>（溶媒和電子）、イオン、ラジカルなどの短寿命活性種は反応性が高く、酸化還元や複雑な化学反応を引き起こす。放射線化学によって引き起こされる放射線分解<sup>\*</sup>、放射線重合<sup>\*</sup>、放射線架橋<sup>\*</sup>などは多くの放射線の産業利用の基礎になっている。また、放射線化学反応は、放射線の生物影響を理解するための基礎としても重要である。

### 放射線化学収率 radiation chemical yield

放射線<sup>\*</sup>の化学作用の効率を定量的に表す尺度。吸収エネルギー 100 eV あたりの分解もしくは生成する分子の数のことで、反応の G 値<sup>\*</sup>と呼ばれる。たとえば、純水の γ 線照射で生じるヒドロキシルラジカルの G 値 ( $G_{OH}$ ) は 2.8 である。G 値の 1 単位は、付与されたエネルギー 1 J (ジュール) 当たりに換算すると、ある化学種  $1.0364 \times 10^{-7}$  モルの生成量に相当する。

### 放射線架橋 radiation cross-linking

高分子鎖が末端以外の位置で化学的に互いに結合することを架橋<sup>\*</sup>といい、放射線照射により生じる架橋を放射線架橋<sup>\*</sup>という。高分子に放射線<sup>\*</sup>を照射すると、分子中にラジカルが生じ、このラジカル同士が結合することにより高分子が架橋する。工業分野では、電子線照射による熱収縮チューブ、耐熱電線、タイヤなどの高分子材料の改質、改良法に広く利用されている。

### 放射線荷重係数 radiation weighting factor

→等価線量 人体が放射線<sup>\*</sup>に照射され

たとき、組織と臓器の平均吸収線量から、等価線量<sup>\*</sup>を算出する際に用いる係数。ICRP による 1990 年の勧告で、全てのエネルギーの光子<sup>\*</sup>、電子<sup>\*</sup>について 1, 10 keV 未満の中性子<sup>\*</sup>について 5, 10-100 keV および 2-20 MeV の中性子について 10, 100 keV-2 MeV の中性子について 20, α 粒子<sup>\*</sup>や核分裂片について 20 などの値が定められている。

### 放射線管理 radiation control

放射線防護<sup>\*</sup>のための実務。法令、規定などに基ついで公衆および原子力施設などでの業務に従事する者の放射線被ばくを低減するため、主として放射線管理区域への出入管理、原子力施設内および周辺の放射線量の測定と監視、作業者の内部および外部被ばく線量の管理、放射線管理区域内での作業の安全管理、施設外の環境放射線の測定と監視、放射線異常が発生した場合の緊急措置などを適切に行うこと。

### 放射線検出器 radiation detector

放射線<sup>\*</sup>を検出する機器の総称。放射線の種類に応じて、①光学方式（泡検出器<sup>\*</sup>、霧箱<sup>\*</sup>、ガラス線量計<sup>\*</sup>、シンチレーション検出器<sup>\*</sup>、NaI(Tl) 検出器<sup>\*</sup>、BGO シンチレーション検出器、液体シンチレーションカウンター<sup>\*</sup>、熱ルミネッセンス線量計<sup>\*</sup>など）、②電離方式（気体計数管、ガイガーミュラー (GM) 計数管<sup>\*</sup>、比例計数管<sup>\*</sup>、位置感応型検出器<sup>\*</sup>、電離箱<sup>\*</sup>、ローリッツェン検電器<sup>\*</sup>など）、③半導体方式（半導体検出器<sup>\*</sup>、ゲルマニウム検出器<sup>\*</sup>、表面障壁型 Si 検出器<sup>\*</sup>、α 線検出器<sup>\*</sup>など）、④化学方式（X 線フィルム<sup>\*</sup>、フィルムバッジ<sup>\*</sup>、フリッケ線量計<sup>\*</sup>など）、⑤熱方式（カロリメータ）など多様な検出器がある。

### 放射線事故 radiation accident

放射性物質<sup>\*</sup>や放射線<sup>\*</sup>が管理状態から外れ、環境と人に影響や障害をもたらす

ほ

事態、あるいはその可能性がある事態、臨界事故（原子炉事故を含む）、放射線発生装置に関わる事故、放射性核種の漏えいなどがある。

### 放射線重合

#### radiation induced polymerization

→放射線化学 放射線照射によって単量体 (monomer) を重合させ、高分子 (polymer) をつくること。エチレンやアクリル酸などのような二重結合を有する分子 (単量体) に放射線を照射すると、二重結合が開裂して単量体同士が繋がり高分子になる。これを重合反応という。放射線源として<sup>60</sup>Coあるいは<sup>137</sup>Csのγ線、加速器で発生させた10 MeV以下の電子線などを利用する。

### 放射線障害 radiation hazard

電離放射線の生物学的作用により生体内で細胞の分裂障害、変異、死滅あるいは組織の破壊などが直接的あるいは間接的な原因として生じる障害のこと。放射線被ばくのち比較的早期に発現する早発性障害と、ある程度の期間を経てから現れる晩発的障害がある。前者には吐き気、嘔吐、全身倦怠、白血球増加、リンパ球増加、白血球減少、皮膚の色素沈着、脱毛、紅斑などが、後者には老化現象、発、寿命短縮、悪性貧血、白血病、赤血球減少、血小板減少、皮膚の萎縮白斑などがある。急性あるいは慢性、確率的あるいは確定的、身体的あるいは遺伝的、分子あるいは細胞・臓器という区別もある。

### 放射線障害防止法

#### Law Concerning Prevention from Radiation Hazards Due to Radioisotopes

昭和32年(1957年)に制定された「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律」の略称。原子力基本法(昭和30年制定)の精神に則り、放射性同位元素の使用、販売、賃貸、廃棄、そ

の他の取扱い、放射線発生装置の使用および放射性同位元素によって汚染された物の廃棄その他の取扱いを規制することにより、放射線障害を防止し、公共安全を確保することを目的としている。

### 放射線損傷 radiation damage

放射線を照射された物質がマイクロなレベルで損傷を受け、マクロな諸特性に様々な変化をもたらすこと。損傷の中身は、無機固体では格子欠陥やボイドの生成、原子の変位などがあり、有機化合物や生体では化学結合の切断、DNA損傷(塩基損傷、鎖切断、架橋形成など)などがある。

### 放射線治療 radiation therapy

放射線がもつ生理学的作用を利用してがんや悪性腫瘍などの疾患を治療すること。悪性腫瘍細胞は正常な細胞に比べて放射線に対する感受性が高いので、これに大量の放射線を照射すると悪性腫瘍細胞が壊死する。正常組織への障害を少なくするため、放射線の種類を選び、照射方向を変えながら照射するなどの対策がとられる。放射線として、<sup>60</sup>Coや<sup>192</sup>Irなどから出るγ線、リニアックやサイクロトロンなどの放射線発生装置からの電子線、陽子線、重粒子線などが用いられる。原子炉の中性子を用いる脳腫瘍病治療(ホウ素中性子捕捉療法、BNCT)や放射性医療品を用いる治療もある。

### 放射線取扱主任者

#### radiation protection supervisor

事業所内における放射性物質および放射線の取扱いが法令を遵守して正しく行われ、放射線障害が発生しないように監督するため、法令の定めに従って選任された放射線の取扱いおよび管理に必要な専門知識と経験を有する者。放射線取扱主任者免状は、国家試験に合格し講習を修了した者に交付される第1種および



び第2種（一般および放射性同位元素装備機器名）免状と、講習を修了した者に交付される第3種免状に区分される。

### 放射線分解 radiolysis

放射線の化学効果によって分子が分解すること。電離放射線による化学効果は分子の電離、励起、解離により、効果の大きさは吸収した全エネルギーや線量率によって決まる。水溶液中では、放射線のエネルギーがまず水分子に吸収され、ヒドロキシルラジカル ( $\text{HO}\cdot$ )、水素ラジカル ( $\text{H}\cdot$ )、水和電子 ( $e_{\text{aq}}^-$ )、 $\text{H}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$  などのラジカルあるいは分子生成物が生じ、それらの活性種が溶液中で溶質分子を分解する。

### 放射線防護 radiation protection

人間とその環境を放射線被ばくや放射性物質による汚染から防護し、放射線障害の発生を防止すること。国際放射線防護委員会 (ICRP) は放射線障害を放射線誘発がんや突然変異のような確率的影響と放射線誘発皮膚炎や白内障のような確定的影響（あるいは非確率的影響）の二つに分け、確定的な有害な影響についてはこれを防止し、確率的影響についてはこれを容認できるとされるレベルにまで制限することにより被ばくをともなう行為が確実に正当化できるようにすることを放射線防護の目的としている。わが国では、「放射線障害防止法」、  
「労働安全衛生法」および関連する告示に放射線防護についての規定がある。

### 放射線滅菌 radiation sterilization

放射線の作用を利用して食品、医薬品、医療器具などの滅菌（殺菌）を行うこと。有害な薬品を使用しない、熱の発生が少ない、透過力が大きなγ線やX線を用いれば細部まで滅菌や殺菌が可能である。包装や充填した状態でも滅菌できるので二次汚染を防ぐことができるなどの利点を有する。食品に付着している害虫

や寄生虫の死滅あるいは微生物の殺菌に際しては、放射化が起こらないエネルギー領域に限って電子線、X線あるいはγ線を0.1～10 kGyの範囲で照射する。

### 放射線阻止能 radiative stopping power

→阻止能 荷電粒子が物質中を通過するときに失うエネルギー（阻止能）のうち、制動放射やチェレンコフ放射が関与するもの。

### 放射線滴定 radiotitration

→放射分析 滴定における終点を放射能測定によって決定する滴定法。放射分析の一つ。

### 放射能 radioactivity

放射性核種の単位時間あたりの壊変数。単位はBq（ベクレル）。放射性核種の原子数を $N$ 、壊変定数を $\lambda$ とすると、放射能 ( $A$ ) は  $A = -dN/dt = \lambda N$  となる。1 Bq は毎秒1個の壊変を表す。古くは、Ci（キュリー）という単位が用いられたが現在は用いない。1 Ci は1 gの $^{226}\text{Ra}$ が有する放射能を表し、 $3.7 \times 10^{10}$  Bqに相当する。また“放射能”はもともと“放射性核種がもつ放射線を放出する能力”を表わしそのような意で使われることもある。

### 放射能測定 radioactivity measurement

放射能を測定すること。放射性核種から放出されるα線、β線、γ線などの放射線を、放射線検出器を用いて測定し、その計数率から検出効率などを考慮して放射能を求める。

### 放射分析 radiometric analysis

放射線測定による分析。分析対象物質に、これと化学量論的に結合する放射性同位体標識化合物あるいはイオンを過剰量反応させ、反応生成物の放射能測定により目的物を定量する分析法。

### 放射平衡 radioactive equilibrium

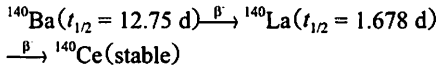
放射性核種Xが壊変して娘核種Yに変換し、Yも放射性でさらにZに壊変

ほ

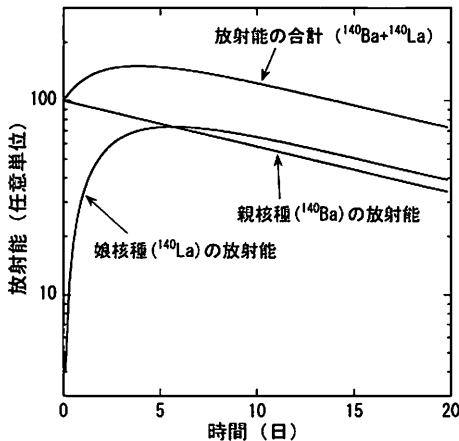
するような逐次壊変において、親核種<sup>\*</sup>Xの半減期が娘核種<sup>\*</sup>Yの半減期に比べて長い場合(Xの壊変定数 $\lambda_1$ がYの壊変定数 $\lambda_2$ より小さい場合)、核種<sup>\*</sup>Xの放射能 $A_1$ と核種<sup>\*</sup>Yの放射能 $A_2$ の間に次のような関係が成り立つ。

$$A_2/A_1 = \lambda_2/(\lambda_2 - \lambda_1)$$

親核種の放射能に対する娘核種の放射能の比が一定になるので、放射平衡という。放射平衡が成り立つ系では、娘核種の放射能は親核種の半減期にしたがって減少する。この状態は過渡平衡<sup>\*</sup>(transient equilibrium)と呼ばれ、その例として



の系における過渡平衡の様子を図に示す。 $\lambda_1 \ll \lambda_2$ の場合には $A_1 = A_2$ となり、永続平衡<sup>\*</sup>(secular equilibrium)という。図参照。



放射平衡。 $^{140}\text{Ba} \rightarrow ^{140}\text{La}$ 壊変において過渡平衡が達成される様子

### 放射免疫分析 radioimmunoassay (RIA)

放射性核種<sup>\*</sup>で標識した抗原を用いた、生体内における抗原抗体反応を利用するホルモン、タンパク質、ステロイドなど

の定量法。1956年に Berson と Yalow によって開発された。種々の成分が多量に含まれている生体試料中に ng ~ pg の極微量存在するホルモンのような特定物質の選択的定量に適している。検体中に含まれる抗原を測定する場合、放射性核種で標識した一定量の抗原を検体中に入れ、抗体と反応させる。その後、抗体と結合した抗原あるいは結合しなかった抗原の放射能<sup>\*</sup>を測定し、検体中の抗原を定量する。結合した抗原抗体は、結合しない抗原や抗体などから容易に分離することができる。臨床診断や内分泌学の基礎研究に広く利用され、放射性核種として $^{125}\text{I}$ が最もよく用いられる。

### ホウ素中性子捕捉療法

#### boron neutron capture therapy (BNCT)

原子炉<sup>\*</sup>の熱中性子<sup>\*</sup>とがん組織に取り込まれたホウ素化合物との核反応<sup>\*</sup>を利用してがん細胞を死滅させる治療法。悪性腫瘍細胞に取り込まれ、正常細胞には取り込まれにくいホウ素化合物をあらかじめ患者に投与し、がん細胞にホウ素化合物が蓄積した時点で中性子<sup>\*</sup>を照射する。ホウ素と中性子の核反応 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ によって $\alpha$ 粒子<sup>\*</sup>と $^7\text{Li}$ 粒子が生じる。これらの粒子の細胞組織内での飛程<sup>\*</sup>は 10  $\mu\text{m}$ 程度で、ホウ素化合物を取り込んだがん細胞のみが選択的に死滅する。わが国では京大炉や JRR-4 などを用いて悪性脳腫瘍や皮膚がんの治療が行われている。図参照 (p. 121)。

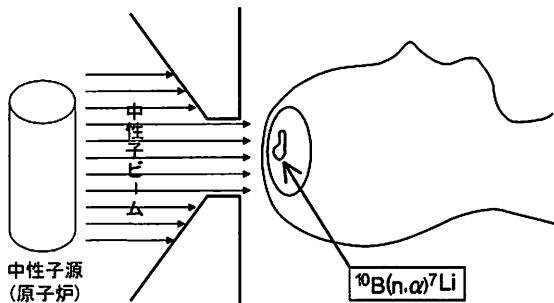
### 飽和後方散乱係数

#### saturated scattering coefficient

→後方散乱

### 捕捉ガンマ線 capture gamma ray

→即発ガンマ線分析法 中性子捕捉反応<sup>\*</sup>にともなって放出される $\gamma$ 線<sup>\*</sup>。原子核<sup>\*</sup>が中性子<sup>\*</sup>を捕捉(吸収)して励起状態<sup>\*</sup>になった複合核<sup>\*</sup>は $10^{-14}$ 秒程度で $\gamma$ 線を放出して基底状態にもどる。このと



ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) の原理

き放出される  $\gamma$  線であり、核種<sup>\*</sup> に固有のエネルギーをもつので、核種分析に利用される。

### ポケット線量計 pocket dosimeter

ポケットに入る程度の大きさの積算型の線量計<sup>\*</sup>。古くはあらかじめ電荷を与えておく箔検電器と組み合わせた小型電離箱が使用されていた。現在では、デジタル式の半導体検出器<sup>\*</sup>を用いる電子ポケット線量計が広く使われている。警報付きもあり、個人の外部被ばく<sup>\*</sup>線量の測定に用いられる。

### 保持担体 hold-back carrier

→担体 →スカベンジャー 溶液中の極低濃度の放射性核種<sup>\*</sup>を沈殿法などによって他の成分から分離する際、目的核種が他の成分に伴って除かれるのを防ぐために加える担体<sup>\*</sup>をいう。

### ポジトロニウム positronium

→ポジトロン 熱エネルギー状態のポジトロン<sup>\*</sup>(陽電子<sup>\*</sup>,  $e^+$ )は電子<sup>\*</sup>( $e^-$ )と結合し、ポジトロニウム(Ps)と呼ばれる束縛状態( $e^+e^-$ )を形成する。Psは水素原子の陽子<sup>\*</sup>(プロトン)をポジトロンで置き換えた水素の最も軽い放射性同位体<sup>\*</sup>と考えることもできる。Psの軌道半径は水素の2倍( $1.06 \times 10^{-10}$  m)、イオン化エネルギーは水素の1/2(6.8 eV)である。Psには、陽電子と電子のスピンの向きによりオルトポジトロニウム<sup>\*</sup>

(*o*-Ps, スピン平行)とパラポジトロニウム<sup>\*</sup>(*p*-Ps, スピン逆方向)の2種類がある。スピン統計によって*o*-Psと*p*-Psは3対1の割合で生成する。*p*-Psは $1.3 \times 10^{-10}$ 秒の寿命で消滅し、180度方向に2本の $\gamma$ 線<sup>\*</sup>(511 keV)を放出する。*o*-Psは真空中で $1.4 \times 10^{-7}$ 秒の寿命で消滅し、3本の $\gamma$ 線を放出する。媒体中で、*o*-Psは周辺の分子などとの衝突や化学反応による電子授受を経て、*p*-Psや裸の $e^+$ (自由陽電子)になるため、化学環境により寿命が変化する。Psの寿命(PAL)、生成比、運動量など調べ、Ps生成機構や同位体効果<sup>\*</sup>、物質の電子状態、固相の相転移、格子欠陥の状態などを研究する分野をポジトロニウム化学という。PALは高分子材料中の空孔径測定にも利用されている。陽電子源として $^{22}\text{Na}$ (半減期<sup>\*</sup>2.6年)がよく使われる。

### ポジトロン positron

→ポジトロニウム 正の電荷をもつ電子<sup>\*</sup>のこと。電子の反粒子で、陽電子<sup>\*</sup>とも呼ばれ $e^+$ と記す。プラスの単位電荷( $1.6021773 \times 10^{-19}$  C)をもち、静止質量<sup>\*</sup> $9.109390 \times 10^{-31}$  kgの軽粒子(レプトン<sup>\*</sup>)。 $\beta^+$ 壊変<sup>\*</sup>により原子核<sup>\*</sup>から放出される。陽電子線源として $^{22}\text{Na}$ (半減期<sup>\*</sup>2.6年)が広く用いられる。加速器<sup>\*</sup>を用いて高エネルギーの電子を白金などの標的に照射すると、制動放射線( $\gamma$ 線<sup>\*</sup>)の電子対

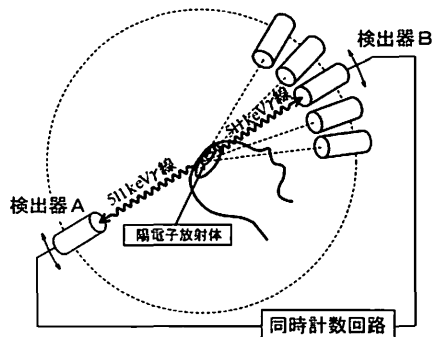
ほ

生成により、陽電子を発生させることもできる。ポジトロンは物質中では電子と対消滅する。物質中でのポジトロンの寿命は電子密度によって異なり、多くの純金属中では0.1-0.2 ns程度である。

### ポジトロン断層法

#### positron emission tomography (PET)

陽電子<sup>+</sup>の放出にともなう消滅 $\gamma$ 線<sup>\*</sup>(511 keV)の検出を利用するコンピューター断層診断技術。SPECT (single-photon emission computed tomography) と並んで、臨床核医学や基礎医学分野で広く使われている。放射性核種<sup>\*</sup>で標識した薬剤を体内に投与し、その分布状態やダイナミクスを断層画像として描出する。PETは主に中枢神経系の代謝レベルを観察するのに用いられてきたが、近年、FDG (<sup>18</sup>F-デオキシグルコース)の開発によって、腫瘍組織におけるブドウ糖代謝レベルの上昇を検出することにより、がんの早期診断にも利用される。最近、PETとX線CTを一体化した装置PET/CTも開発されている。図参照。



ポジトロン断層法の原理

### 保障措置 safeguards (SG)

核不拡散条約<sup>\*</sup>保障措置協定に基づき、核物質が核兵器<sup>\*</sup>やその他核爆弾装置に転用されていないことを検認する制度。

国際保障措置制度とはIAEAが対象国に転用がなかったことを検認する制度。また国内保障措置制度とは国が国内の核施設で転用がないことを検認する制度。計量管理<sup>\*</sup>を基本的な手段とし、封じ込めおよび監視を重要な補助手段とする。また、未申告施設や未申告活動の検認のための強化保障措置により、保障措置環境試料分析<sup>\*</sup>も導入されている。

### 保障措置環境試料分析

#### safeguards environmental sample analysis

→保障措置 保障措置強化策の一環として導入された方法。世界各国の原子力施設の内外から採取された環境試料中のウランおよびプルトニウムの同位体比を測定することにより未申告施設や未申告活動を検認する。バルク分析法とパーティクル分析法がある。バルク分析ではスワイプ(拭取り)試料<sup>\*</sup>や土壌などを試料として、試料を酸分解などで前処理し、必要に応じて化学分離後、質量分析装置で同位体組成分析や定量分析を行う。短半減期核種は放射線測定により定量する。パーティクル分析では、スワイプ試料中の塵一つ一つについて、その中に含まれる核物質の同位体組成分析を行う。

### 捕捉電子 trapped electron

凝縮相で放射線<sup>\*</sup>による電離<sup>\*</sup>で生成する二次電子<sup>\*</sup>( $\delta$ 線<sup>\*</sup>)は周辺の分子と衝突を繰り返しながら減速し、最後に熱エネルギー状態になる。これらの電子<sup>\*</sup>の一部で、低温の固相中浅い電位のくぼみに捕まった電子を捕捉電子という。

### ボソン boson

→フェルミオン ボース粒子(bose particle)ともいい、ボース-アインシュタイン統計<sup>\*</sup>に従う粒子。光子<sup>\*</sup>、フォノン(音子または音響子)、励起子、クーパー対などがこれに属する。ボース-アインシュタイン統計は、整数のスピンを

もつボース粒子からなる系が従う量子統計である。この系の波動関数は、任意の2個の粒子のスピンの座標の交換に対して対称でなければならない。このため、ボース理想気体では一つの量子状態を占める粒子の数の制限のない特有な分布則が成り立つ。また、ボース理想気体は低温でボース凝縮を起こし、液体ヘリウム(<sup>4</sup>He)の近似的なモデルとみなされる。金属内伝導電子系では電子間に引力が働くので、逆平行スピンをもった電子<sup>\*</sup>の対(クーパー対)が準ボース粒子として振るまい、超伝導現象を引き起こす。光子やフォノンもボース粒子であるが、粒子の生成と消滅が起こるため、ボース凝縮は起きない。

#### ホットアトム hot atom

→反跳 熱平衡状態にある原子<sup>\*</sup>よりかなり大きな運動エネルギーあるいは高い電荷をもつ原子、分子の光解離(エネルギーは数eV)や核変換<sup>\*</sup>(エネルギーは数eV~数keV)などで生成する。核変換(核反応<sup>\*</sup>および核壊変)にともなって生成する反跳原子は高い運動エネルギーと高電荷をもち、特異な化学挙動を示す。核反跳<sup>\*</sup>の化学効果をホットアトム効果

(hot-atom effect)あるいはシラード-チャルマース効果<sup>\*</sup>と呼ぶことが多い。1934年にシラード(L. Szilard)とチャルマース(T. A. Chalmers)がC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>I(有機相)を中性子照射し、<sup>127</sup>I(n, γ)<sup>128</sup>I反応によって生成した<sup>128</sup>Iを水相に濃縮することに成功したことに由来する。この核反応で生成するホットアトム(<sup>128</sup>I)は最大200eV程度の運動エネルギーをもつので分子中のC-I結合を切断し、<sup>128</sup>I<sup>m+</sup>イオンとして水相に分離される。ホットアトム効果はラジオアイソトープ製造にも利用され、高比放射能<sup>51</sup>Crや<sup>64</sup>Cuが市場に供給されている。

#### ポテンシャル障壁 potential barrier

電荷をもつ分子、原子<sup>\*</sup>、素粒子<sup>\*</sup>などの粒子が同符号の電荷をもつ標的に衝突する時、近距離では強い相互作用による引力が、遠距離ではクーロン斥力<sup>\*</sup>が働くため、ポテンシャル曲線は距離に対して凸型になる。したがって、粒子は斥力ポテンシャルを超えるエネルギーをもたなければ標的に接近することができない。この斥力をポテンシャル障壁(クーロン障壁<sup>\*</sup>)という。

ほ  
ま

## ま

#### マイクロチャンネルプレート

##### micro channel plate (MCP)

内径数十μmの鉛ガラスの細管を100万本以上束ねて板状にした電子増倍デバイス。一つ一つの細管がマイクロサイズの光電子増倍管<sup>\*</sup>として機能し、増倍率が高くパルスの立ち上がりが早く、アノード側を位置検出型にすれば位置感応型検出器<sup>\*</sup>としても使える。MCPを数枚重ねて増倍率を高めることも可能である。

#### マイナーアクチノイド minor actinide

アクチノイド15元素のうち、ネプツニウム(原子番号<sup>\*</sup>93)およびアメリシウム(原子番号95)~ローレンシウム(原子番号103)の合計10元素の総称。主に発電用原子炉で燃焼した後の使用済核燃料<sup>\*</sup>中の主成分であるウランおよびプルトニウム以外の少量のアクチノイドの意。

#### 前平衡過程反応 pre-equilibrium process

標的核<sup>\*</sup>に粒子が衝突する際、直接核

子<sup>\*</sup>と衝突し粒子放出が生じる直接過程と複合核<sup>\*</sup>を形成して粒子が放出される複合核過程の中間の反応。直接過程に比べ、放出粒子のエネルギーは低く、核分布に特徴的な回折パターンはないが前方にピークをもつ。入射エネルギーが高くなるとともに、この過程の寄与が大きくなる。

#### マスバイアス mass bias

質量分析計によって元素<sup>\*</sup>の同位体比を測定する際の機器に依存する測定値の偏差。分析計固有の特性によって各同位体の計数がそのまま同位体比として得られないことがある。同位体比が正確に知られている標準試料を測定してこれを補正する。

#### 魔法の数 magic number

原子核<sup>\*</sup>を構成する陽子<sup>\*</sup>の数( $Z$ )と中性子<sup>\*</sup>の数( $N$ )に与えられる特定の数で、2, 8, 20, 28, 50, 82 および 126 が知られている。 $Z$ あるいは $N$ または両者がこの数の原子核は特に安定であることから、この数を魔法の数と呼ぶ。原子核の殻模型<sup>\*</sup>(shell model)から導出される。

#### マルチトレーサー multitracer

放射性トレーサーの一種で、2種類以上

の放射性核種<sup>\*</sup>を含むトレーサー<sup>\*</sup>のこと。一度に複数の元素<sup>\*</sup>の挙動を調べたい場合などに用いる。理化学研究所の安部文敏らによって考案され、マルチトレーサーと名付けられた。金、銀、ゲルマニウムなどの薄い箔にサイクロトロンで加速したイオンビームを照射し、核破碎反応<sup>\*</sup>によって得られる。マルチトレーサーを利用する利点として、同じ環境で、一度の実験で、複数の元素の挙動についての情報が得られる点が挙げられ、生物、医学、農学、環境科学など様々な分野で利用されている。

#### マンハッタン計画 Manhattan Project

第二次世界大戦中の1942年9月に、米国がルーズベルト(F. D. Roosevelt)大統領の決定の下に原子爆弾<sup>\*</sup>の製造を目的として、オッペンハイマー(J. R. Oppenheimer)をリーダーに物理学者、化学者、技術者らを動員して多額の資金を投入して開始した国家プロジェクト。ウラン濃縮<sup>\*</sup>とプルトニウムの生産を推進し、世界で初めて原爆の開発に成功した。製造した原爆は1945年に広島と長崎に投下された。

## み

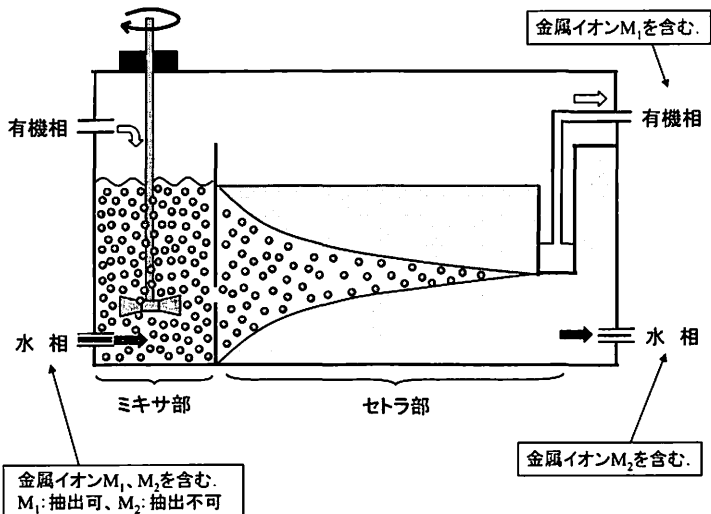
#### ミキサセトラ mixer-settler

多段槽型の連続溶媒抽出装置。使用済核燃料<sup>\*</sup>の再処理<sup>\*</sup>のためのピューレックス工程などで用いられる。有機相と水相を攪はんして混合するミキサ部と、両相を静置して分相するセトラ部で1段を構成し、通常これを水平方向に複数段連結して用いる。有機相と水相はミキサセトラ内を逆方向に流れ、溶媒抽出反応は主にミキサ部で進む。操作の安定性に優れ

る。図参照(p.125)。

#### 密度計 density meter

$\gamma$ 線<sup>\*</sup>の透過性の差を利用して、液体、スラリー、粉末、粒状固体などの密度を測定する装置。密封線源<sup>\*</sup>を測定物質の片側に置き、反対側に検出器を置いて放射線<sup>\*</sup>の強度を測定する。試料の厚さが一定の場合には、吸収係数を求め、密度に換算する。非接触法であるため測定対象が腐食性のもの、高温または高圧のも



ミキサセトラの概念図

の場合にも利用できる。X線\*のように電圧の変動に影響されないため自動化しやすい。

#### 密封線源 sealed radiation source

放射性核種\*から放出される放射線\*を利用するため、放射性物質\*を容器に密封した線源。容器には、通常の使用では壊れないことと封入した放射性物質が浸み出さないことが要求される。放射線照射治療などの医学利用、密度計\*、厚み計\*、レベル計、煙感知器などの工業利用、放射線育种などの農学利用に広く利用される。また、放射線計測器の較正などにも使用される。

#### ミュー中間子 mu meson

ミュオン\*( $\mu$ 粒子)のこと。ミュオンは中間子\*ではないがこう呼ばれることがある。

#### ミュエスアール $\mu$ SR

ミュオンスピン回転法(muon spin rotation), ミュオンスピン緩和法(muon spin relaxation) およびミュオンスピン共鳴法(muon spin resonance)の総称。ミュ

オン\*( $\mu^+$ )がパイオン( $\pi^+$ )の壊変\*によって誕生するとき、スピンは100%進行方向を向く(偏極する)。その偏極は物質中で減速する際にも維持される。正のミュオン( $\mu^+$ )が格子間位置に止まるときの偏極度は100%であり、ミュオニウム\*(Mu)を生ずるときは50%になる。 $\mu^-$ がつくるミュオン原子\*が基底状態に到達するときの偏極度は18%程度になる。いずれにせよ、ミュオンの崩壊によって発生する陽電子\*( $e^+$ )や電子\*( $e^-$ )はミュオンのスピン方向に沿って異方的に放出される。回転法、緩和法あるいは共鳴法によって $e^+$ あるいは $e^-$ 放出の異方性を測定することにより、物質の微視的磁性、Muの化学反応、原子核\*近傍の電子構造などの知見が得られ、様々の研究に利用される。

#### ミュオニウム muonium

正のミュオン\*( $\mu^+$ )と電子\*( $e^-$ )との束縛系( $\mu^+e^-$ )。記号はMu。水素原子(H)と同様に陽電荷をもつミュオンの周りを電子が回っているとみなすことができる。

み

重い希ガス、飽和水素化物、非金属固体(酸化物)などに $\mu^+$ を打込むと生成する。Muは質量が水素の1/9の軽い同位体として同位体効果の研究に用いられ、気相中でのハロゲン原子との反応などで大きな同位体効果が知られている。質量が小さいので、低温でのトンネル効果が顕著に現れる。

### ミュオン muon

→素粒子 レプトンに属する第二世代の素粒子。質量 105.66 MeV (= 206.768  $m_e$ )、スピン 1/2 のフェルミ粒子。記号  $\mu$ 。正の電荷をもつ  $\mu^+$  と負の電荷をもつ  $\mu^-$  があり、真空中では 2.2  $\mu\text{s}$  の寿命で電子と二つのニュートリノになる。 $\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_e + \bar{\nu}_\mu$  あるいは  $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ 。1937年にアンダーソン(C. D. Anderson)とネッターマイヤー(S. H. Neddermeyer)により宇宙線中に発見され、当初は中間子と混同されたが、後にレプトンであることが判明した。実験に用いるミュオンは、陽子加速器( $E_p \geq 500$  MeV)で発生するパイオン(寿命 26 ns)の壊変( $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$  あるいは  $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ )から得る。原子力機構のJ-PARCにもミュオン実験施設が用意される。 $\mu^+$ と $\mu^-$ とは、物質中での存在状態に大きな違いがある。 $\mu^+$ は自由なミュオン( $\mu^+$ )かミュオニウム(Mu)になる。 $\mu^-$ は電子と同様に原子核に束縛されてミュオン原子になる。 $\mu^-$ は電子の207倍の質量をもつ重い電子としてふるまい、 $D_2$ - $T_2$  ターゲットなどに打込むと、ミュオン触媒核融合反応(muon-catalyzed nuclear fusion,  $\mu\text{CF}$ )を起こす。物質中でのミュオンの三態はミュエスアール( $\mu\text{SR}$ )により識別することができ、物性研究に役立つ。

### ミュオン原子 muonic atom

ミュオニック原子ともいう。負のミュオン( $\mu^-$ )が原子中の電子と交換してつくるエキゾチック原子。高いエネ

ギーの $\mu^-$ が物質中に入ると、周囲の原子をイオン化してエネルギーを失い、数keVになると原子中の電子と交換して $p\mu$ (すなわち $H^+\mu^-$ )や $\alpha\mu$ (すなわち $\text{He}^{2+}\mu^-$ )のようなミュオン原子を形成する。 $\mu^-$ は電子の207倍の質量をもつ重い電子としてふるまい、ミュオン原子の大きさは通常の原子の1/207となる。

### ミュオン触媒核融合

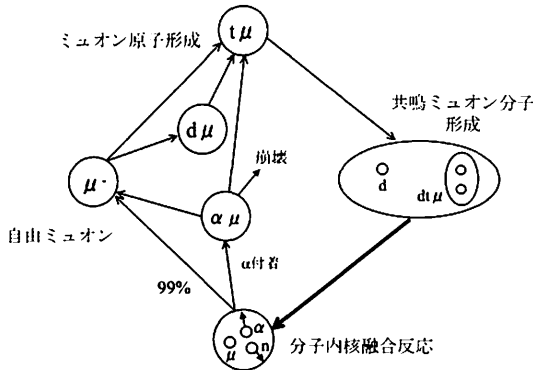
#### muon catalyzed fusion ( $\mu\text{CF}$ )

→核融合 電子の207倍の質量をもつ負のミュオン( $\mu^-$ )を重水素(D)とトリチウム(T)の混合系に打込むと、d-t 核間距離が通常のDT分子に比べて1/207程度に接近する $[(d\mu)d2e^-]$ 分子が共鳴的に形成され、 $d\mu \rightarrow 4\text{He} + n + \mu^- + 17.6$  MeVで示される分子内核融合反応が起きる。反応後、 $d\mu$ から離れ自由になった $\mu^-$ は再び $d\mu$ を形成し、核融合反応を繰り返す。この $\mu\text{CF}$ サイクルは、 $\mu^-$ の寿命(2.2  $\mu\text{s}$ )の間に最大200回ほど続く。 $\mu^-$ が触媒のような役割を演ずることからミュオン触媒核融合反応と呼ばれる。実験に用いる $\mu^-$ は、高エネルギー( $\geq 500$  MeV)陽子加速器から得る。図参照(p.127)。

### ミルクィング milking

放射平衡が成立している系において、壊変生成物である娘核種を適当な時間間隔で何度でも繰り返し分離抽出する操作。例えば、親核種をイオン交換樹脂などに保持し、そこに娘核種のみを溶解する液を流して分離する。搾乳操作にたとえてミルクィングといい、親核種はジェネレータ(generator)と呼ばれる。世界で最も大量に使われている $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (半減期 6.0時間)ジェネレータの場合には、親核種である高比放射能の $^{99\text{m}}\text{Mo}$ (半減期 60時間)がアルミナカラムに吸着された状態で供給され、医療現場などで生理食塩水を用いて $^{99\text{m}}\text{Tc}$ を溶離して使用





ミュオン触媒核融合の原理

する。23時間ほどで再び放射平衡に達するので、 $^{99}\text{Mo}$ の減衰があってもほぼ1週間にわたって何回でも $^{99\text{m}}\text{Tc}$ を溶離(ミルクキング操作)して使うことができる。他に、 $^{42}\text{Ar}$ (半減期33年) $\rightarrow$  $^{42}\text{K}$ (半

減期12.4時間),  $^{68}\text{Ge}$ (半減期288日) $\rightarrow$  $^{68}\text{Ga}$ (半減期68.3分),  $^{81}\text{Rb}$ (半減期4.6時間) $\rightarrow$  $^{81\text{m}}\text{Kr}$ (半減期13.3秒),  $^{87}\text{Y}$ (半減期33年) $\rightarrow$  $^{87\text{m}}\text{Sr}$ (半減期2.8時間)などの系がミルクキングに利用できる。

## む

### 娘核種 daughter nuclide

$\rightarrow$ 親核種 放射性核種\*の壊変\*によって生じる核種\*。例えば $^{226}\text{Ra}$ の $\alpha$ 壊変\*で生じる $^{222}\text{Rn}$ を娘核種といい、前者を親核種\*という

### 無担体 carrier free

単体あるいは化合物の中で、ある放射性核種\*がその同位体\*(一般的には安定同位体\*)を伴わずに単独に存在する状態。

## め

### メスbauer効果 Mössbauer effect

1958年にドイツのメスbauer(R. L. Mössbauer)によって $^{191}\text{Ir}$ を用いる実験により発見された無反跳 $\gamma$ 線共鳴吸収、すなわち原子核\*から放出される $\gamma$ 線\*が同種の原子核によって共鳴的に吸収される現象(メスbauer-遷移)。 $\gamma$ 線放出による原子核の反跳\*が無視できないの

で、その反跳エネルギーが $\gamma$ 線の自然幅より小さい場合にのみ起きる。 $^{57}\text{Co}$ (半減期\*271.8日)のEC壊変\*に伴う $^{57}\text{Fe}$ の14 keV $\gamma$ 線をはじめ、 $^{119}\text{Sn}$ ( $^{119\text{m}}\text{Sn}$ からの23.8 keV $\gamma$ 線)など約70核種でメスbauer効果が観測されている。

### メスbauerスペクトル

Mössbauer spectrum メスbauer-効

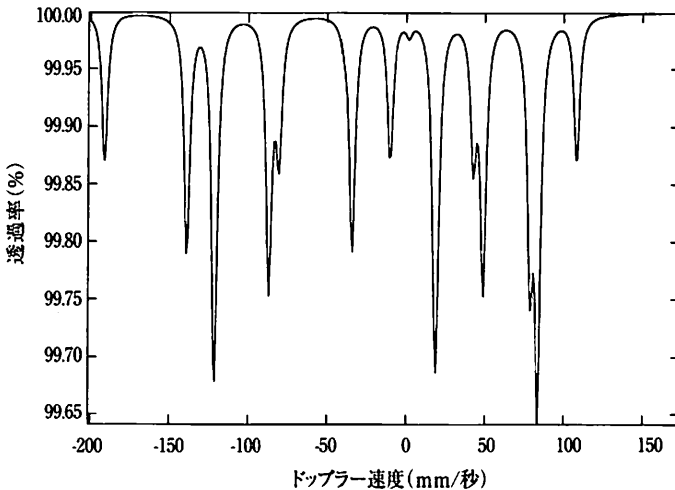
果<sup>\*</sup>の帰結として得られる吸収または発光スペクトル。γ線放出による反跳<sup>\*</sup>を最小限に抑えたγ線源に対し小さな立体角で見込む位置に固体試料を(吸収体)を置き、線源あるいは吸収体のどちらか一方をmm/s領域の速度で動かし、ドップラー効果<sup>\*</sup>を利用して共鳴吸収<sup>\*</sup>の位置と幅を求める。横軸にその線速度を、縦軸に透過γ線強度を記録する。このスペクトルは試料の核位置のs電子密度を反映する同位体シフト<sup>\*</sup>、内部磁場<sup>\*</sup>による核スピン<sup>\*</sup>のゼーマン効果、結晶の電場勾配によって生じる四極子分裂<sup>\*</sup>などを含むので、原子核近傍の電場、磁場あるいは固体の原子配置や結合に関する情報が得られる。これをメスバウアー一分

光という。図参照。

**メスバウアー分光 Mössbauer spectroscopy**  
→メスバウアースペクトル

**メソン meson**

中間子<sup>\*</sup>。強い相互作用をする粒子のうちで、クォーク<sup>\*</sup>と反クォークからなるバリオン数0の粒子。π<sup>+</sup>, π<sup>0</sup>, π<sup>-</sup>, η<sup>0</sup>, K<sup>+</sup>, K<sup>-</sup>などがあり、例えばπ<sup>+</sup>のクォーク構成はu $\bar{d}$ である。原子核内の核子<sup>\*</sup>の結合を媒介する粒子として1934年に湯川秀樹によって理論的に予言され、1937年に米国のアンダーソン(C. D. Anderson)が宇宙線<sup>\*</sup>の中に発見した。名称はバリオン<sup>\*</sup>(重粒子)とレプトン<sup>\*</sup>(軽粒子)の中間の質量をもつことに由来する。



メスバウアースペクトル。Np(V)フタル酸塩を試料とするメスバウアースペクトル。  
(温度：11 K)

## も

### MOX 燃料 mixed oxide fuel

→混合酸化物燃料 ウランとプルトニウムの混合酸化物で、プルサーマル\*や高速増殖炉\*の燃料。ウランに対するプルトニウムの割合は、プルサーマル燃料では数%以下、高速炉燃料では約20%である。

### モナズ石 monazite

軽希土類とトリウムの原料鉱石。主成分は単斜晶系の(Ce, Y) PO<sub>4</sub>で、組成は(Ce, La, Th) PO<sub>4</sub>。10数%のトリウムのケイ酸塩を含み、しばしばウラン(U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)も含まれる。主産地はブラジル、インド、東南アジア。

## ゆ

### 有機蛍光体 organic fluorescent substance

蛍光\*を発する有機物質で、アントラセン、スチルベンなどの芳香族化合物からなるものが多い。その分子結晶あるいはプラスチックや有機溶媒に溶かしたものがシンチレータ\*やイメージングプレート\*に利用される。

### 有効中性子数 effective neutron number

1個の核分裂性原子核は1回の熱中性子誘起核分裂で通常2個以上の速中性子を放出する。この速中性子の個数を $\nu$ とすると、熱中性子誘起核分裂を起こす有限量の核分裂性物質\*を含む核燃料\*の集合体系において、中性子\*1個が吸収されるにつき発生する核分裂中性子の個数( $\eta$ )は、体系の巨視的捕獲断面積を $\Sigma_c$ 、巨視的核分裂断面積を $\Sigma_f$ として $\eta = \nu \Sigma_f / (\Sigma_f + \Sigma_c)$ で与えられる。これを有効中性子数と呼び、四因子公式\*によって体系の核分裂連鎖反応\*を評価する場合に現れるパラメータである。

### 誘導核分裂 induced nuclear fission

中性子\*、荷電粒子\*、高エネルギー光子などを照射した場合に起こる核分裂\*。超ウラン元素などの非常に重い原子核\*において支配的な自発核分裂\*

(spontaneous fission)と区別する。

### 誘導結合プラズマ

#### inductively coupled plasma

数MHzから数十MHzの高周波により誘導コイル内に発生する誘導電流でアルゴンガスなどをイオン化して発生するプラズマ\*。温度が5,000~7,000 Kに達するので、プラズマ中に導入した試料は原子状態にまで分解されイオン化する。

### 誘導結合プラズマ質量分析

#### inductively coupled plasma mass spectroscopy (ICP-MS)

質量分析法の一つ。試料のイオン化に誘導結合プラズマ\*を用いる。イオン化効率がよく、極微量分析に適している。

### 誘導結合プラズマ発光分析

#### inductively coupled plasma emission spectroscopy

誘導結合プラズマ\*中のイオンからの固有発光を利用する元素分析法。

### 誘導放射性核種

#### induced natural radionuclide

→天然放射性核種 大気や地殻中の元素\*と宇宙線\*またはその二次粒子との核反応\*により生成する<sup>3</sup>H, <sup>7</sup>Be, <sup>14</sup>C, <sup>22</sup>Naなどの比較的寿命の短い天然放射性核種\*。

も  
ゆ

**陽子 proton**

→核子 プラスの単位電荷 ( $1.6021773 \times 10^{-19}$  C) をもち、静止質量 $1.672623 \times 10^{-27}$  kgの重粒子(バリオン)。記号は p. アップクォーク (u) 2個とダウンクォーク (d) 1個で構成され、スピンは 1/2. 原子核 $^+$ の電荷は陽子 $^+$ の電荷の和である。標準模型では、原子核に束縛されていない自由な状態では安定な粒子とされるが、大統一理論 $^+$ 候補の SU(5) 理論では  $10^{30}$  年程度で崩壊するとされる。その崩壊を確認する実験がスーパーカミオカンデ $^+$ などで行なわれており、少なくとも  $10^{33}$  年以上の寿命をもつとのデータが得られている。

**陽子数 proton number**

原子核 $^+$ 内に存在する陽子 $^+$ の個数。原子番号 $^+$ (Z)に同じ。

**陽子ドリップライン proton drip line**

→ドリップライン

**陽子放出壊変 proton decay**

陽子ドリップライン $^+$ の近傍の核種 $^+$ で観測される陽子 $^+$ を放出する壊変 $^+$ 。

**陽電子 positron**

→ポジトロン

**陽電子消滅 positron annihilation**

陽電子 $^+$ の対消滅 $^+$ 。陽電子が物質中で運動エネルギーを失いほとんど静止するとき、近傍にある電子 $^-$ と消滅する現象。このとき、電子の静止質量 $^+$ に相当する 0.51 MeV の  $\gamma$ 線 $^+$ が 2 本ほぼ 180 度の方向に放出される。この  $\gamma$ 線は、消滅  $\gamma$ 線 $^+$ と呼ばれ、ポジトロン断層法 $^+$ (PET)にも利用される。陽電子がポジトロニウム $^+$ (Ps)形成を経て消滅する過程もある。物質中での自由陽電子の寿命は 0.1 ~ 0.5 ns であるが、パラポジトロニウム $^+$ (p-Ps)を形成すると 0.13 ns に縮む。オルトポジトロニウム $^+$ (o-Ps)を形成すると

140 ns に延びるが、物質中の電子を拾うピックオフ消滅 $^+$ (pick-off annihilation)が起き、寿命は 1 ~ 5 ns 程度になる。

**陽電子消滅ガンマ線****positron annihilation gamma ray**

→陽電子消滅

**陽電子消滅寿命測定****positron annihilation lifetime (PAL) measurement**

→陽電子消滅 陽電子 $^+$ が物質中で対消滅 $^+$ するまでの時間(寿命)の測定。陽電子の挙動やマイクロ環境での物性を調べることができる。一般的に、 $^{22}\text{Na}$ の  $\beta^+$ 壊変 $^+$ に伴って放出される 1275 keV の  $\gamma$ 線 $^+$ をスタート信号(時間 0)として、511 keV の消滅  $\gamma$ 線 $^+$ を高速プラスチックシンチレータ(または BaF<sub>2</sub> シンチレータ)で検出する。その出力波形を微分型波高弁別器(CFDD)で整形した後に時間波高変換器(TAC)と多重波高分析器(MCA)で分析し、消滅寿命を求める。最近では、2つのシンチレータ $^+$ の出力波形を高速のストレージオシロスコープに記録し、その時間差を保存した波形データから読みとる方法もある。

**陽電子消滅誘起オージェ分光****positron-annihilation induced Auger spectroscopy**

→オージェ電子分光 陽電子消滅 $^+$ を利用してオージェ効果 $^+$ を引き起こし、分光する方法。高いエネルギーの電子線を用いると、二次電子 $^-$ が多数放出されてバックグラウンドとなるが、陽電子消滅を用いると原理的に二次電子は発生しないので、スペクトルが簡単になる。陽電子 $^+$ 自身の特徴から、最も表面に近い部分の元素組成の選択的分光ができる。

**陽電子消滅誘起分光****positron-annihilation induced spectroscopy**

陽電子消滅<sup>\*</sup>にともなうイオン化を利用する分光法。陽電子消滅では物質中の電子<sup>\*</sup>が一つ消し去られるため、物質側がイオン化される。このイオン化は、放射線<sup>\*</sup>の照射による通常のイオン化と異なり、余分なエネルギーが物質に持ち込まれず“静かに”イオン化される。陽電子消滅誘起オージェ電子分光<sup>\*</sup>や陽電子消滅誘起質量分析があり、後者では生じた陽イオンの分解が少なく、スペクトルが簡単になる場合がある。

#### 陽電子ビーム positron beam

陽電子放出核種や電子対生成<sup>\*</sup>で発生する陽電子<sup>\*</sup>はエネルギーと運動の方向が拡がる。これを一度物質中で減速させてから一方向に引き出すと、エネルギーと方向の揃ったビームにすることができる。例えば、タンゲステン箔に陽電子を入射して減速させ、表面近傍で止まった陽電子が“陽電子に対する負の仕事関数”によって放出されるものをビームとして引き出す。数 eV の低エネルギーの陽電子が得られるので、低速陽電子ビーム (slow positron beam) とも呼ばれる。陽電子ビームへの変換効率は  $10^{-3}$  以下であるためビーム強度は低いが、陽電子消滅<sup>\*</sup>研究のためのビーム源として広く使われている。

#### 預託実効線量 committed effective dose

預託等価線量<sup>\*</sup>  $H_T(\tau)$  に組織荷重係数<sup>\*</sup>  $W_T$  を乗じて加算した値。

$$E(\tau) = \sum W_T H_T(\tau)$$

#### 預託等価線量 committed equivalent dose

体内に摂取した放射性核種<sup>\*</sup>の壊変<sup>\*</sup>によって組織や臓器が受ける等価線量率<sup>\*</sup>の摂取後  $\tau$  年にわたる全積分量。ある時刻  $t_0$  において 1 回摂取したとき、ある組織 T の預託等価線量  $H_T(\tau)$  は

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} H_T(t) dt$$

となる。ここで、 $H_T(t)$  はある組織 T の時刻  $t$  の等価線量率である。 $\tau$  は成人に

対して 50 年、子供に対しては 70 年とする。

#### 余裕深度処分

##### disposal below the generally used depth

低レベル放射性廃棄物<sup>\*</sup> (LLW) 処分法の一つで、LLW のうちでも比較的レベルが高いものについて検討されている。極めて低いレベルの LLW は浅地層処分<sup>\*</sup>される。通常の地下利用よりも十分に余裕をもった深さ (地下 50 ~ 100 m) にトンネル型やサイロ型の空洞をつくり、その中に処分する。対象とする廃棄物は原子力発電所の運転や解体から生じる炉心等廃棄物、再処理<sup>\*</sup>施設からの TRU 廃棄物、ウラン濃縮<sup>\*</sup>施設からのウラン廃棄物<sup>\*</sup>などがある。わが国では、六ヶ所村の日本原燃が処分場の開発を行っている。廃棄物はドラム缶や角形容器に入れてコンクリート固化し、その周囲を人工バリア<sup>\*</sup>材 (ベントナイト系材料またはセメント系材料)、コンクリートピット、低透水層、低拡散層などで囲む方法が検討されている。

#### 四因子公式 four-factor formula

中性子誘起核分裂連鎖反応における増倍率  $k$  は次のように定義される。 $k = (\text{ある世代で起こった全核分裂数}) / (\text{1 世代前に起こった全核分裂数})$ 。核分裂<sup>\*</sup>反応で生成した中性子<sup>\*</sup>の系外へのもれがない場合を仮定したとき、 $k$  は次の四因子公式 $k = \eta f \epsilon p$  で表される。ここで  $\eta$  は核分裂で放出される平均の中性子数であり、中性子が核分裂性核種である  $^{235}\text{U}$  や  $^{239}\text{Pu}$  に吸収された際に、崩壊して中性子を放出する場合と崩壊しない場合との割合を考慮した因子である ( $^{235}\text{U}$  では 2.07)。 $f$  は熱中性子<sup>\*</sup>利用率で、炉心<sup>\*</sup>内にある物質のうち核燃料<sup>\*</sup>に熱中性子が吸収される割合を示す。 $\epsilon$  は速い中性子による核分裂係数であり、核分裂で生成した速い中性子の一部が減速材<sup>\*</sup>により減速されないうちに  $^{238}\text{U}$  等の核分裂を

引き起こし、速い中性子を増倍させる因子である。p は速中性子が共鳴吸収を

逃れる確率で、減速の途中で  $^{238}\text{U}$  などによる共鳴捕獲を受けない割合を示す。

## 5

### ラザフォード散乱 Rutherford scattering

荷電粒子が物質中の原子核のクーロン力の影響で進行方向を変え、散乱する現象。ともに正電荷もつ  $\alpha$  粒子と原子核が接近するとクーロン斥力により互いに反発しあい散乱が起こる。ラザフォード (E. Rutherford) が英国のキャヴェンディッシュ研究所でガイガー (H. Geiger) とマースデン (P. L. Marsden) と共に研究を發展させたことからその名がついた。ラザフォードは 1911 年に、この散乱現象に基づいて、原子の正電荷はその中心に集中しているとする有核原子模型を提唱した。

### ラジオイムノアッセイ

radioimmunoassay

→放射免疫分析

### ラジオグラフィー radiography

→オートラジオグラフィー 検体に平行性の良い放射線 (ビーム) を照射し、その透過像から検体の形や内部構造を知る手法。X 線透視は最初のラジオグラフィーである。X 線や  $\gamma$  線を用いるラジオグラフィーでは、密度の大きな元素を透過しにくいことを利用して人体の骨格、コンクリート中の鉄筋、航空機部品の欠陥などの透視画像を得る。中性

子ラジオグラフィーでは、中性子が特に水素、次いで炭素や酸素などの軽元素を透過しにくいことを利用して、生体組織の構造や構造体内部の流体を可視化することができる。放射線の強度が十分大きければ短時間に像を得て、動的過程を調べることも可能である。

### ラジオコロイド radiocolloid

溶液中のコロイド状物質に放射性核種が付着したもの。中性またはアルカリ性溶液中では加水分解生成物としてのコロイド状物質が形成されやすく、共存する放射性核種がこれに吸着するため、放射性核種自身によるコロイド形成と誤認されることがある。溶液の pH を十分に低く保ち、コロイド集合体の濃度を低くすることにより、ラジオコロイドの形成を抑えることができる。

### ラジオレセプターアッセイ

radioreceptor assay

目的とする物質に放射性同位体で標識したレセプターを結合させ、その反応性により目的物質を定量する方法。特定のビタミンやホルモンなどがそのレセプターと結合することで活性を示す性質を利用する。放射線検出による高感度な微量成分の分析が可能である。

**粒子加速器**

particle accelerator

→加速器

**粒子線 corpuscular beam**

高い電離能を有する高エネルギーの電子線、 $\alpha$ 線、陽子線などの総称。主に加速器を用いて得られる。中性子線も粒子線の一種であるが、直接には電離作用を及ぼさない。 $\alpha$ 線や陽子線のような重粒子線は飛程の末端において大きな電離作用を与えるため、腫瘍部位に集中して照射する放射線治療に利用される。

**粒子トラック法 particle track method**

核分裂片、反跳原子、 $\alpha$ 線などが物質中を透過するとき形成する飛跡数を直接計数することによって、核分裂性核種あるいは $\alpha$ 放射体を定量する方法。核分裂で放出される高エネルギーの核分裂片は、白雲母やガラスなどの絶縁性物質に衝突すると飛跡に沿って大きな損傷を残す。この核分裂片飛跡(フィッシュントラックという)をフッ化水素酸などでエッチング処理したのち、光学顕微鏡を用いて計数する。ウランの自発核分裂による飛跡を観察するフィッシュントラック法で岩石中あるいは鉱物中の微量ウランを定量する方法は、それらの年代測定に利用される。また、中性子、陽子などを照射して生じる核分裂による飛跡から、物質中の微量ウランやトリウムを定量できる。 $\alpha$ 壊変の際の反跳原子による $\alpha$ 反跳トラックも白雲母表面に飛跡を残す。さらに、 $\alpha$ 粒子自身もセルロイドなどの有機ポリマー表面にエッチング可能なトラックを残すので、同様な原理の $\alpha$ 放出核種の定量が可能である。

**粒子フルエンス particle fluence**

放射線場の強さを表す概念。断面積が

$\Delta\alpha$ の小さな球状の空間を $\Delta N$ 個の粒子が横切るとき、粒子フルエンス $\phi$ は $\Delta N/\Delta\alpha$ で与えられる。単位時間当たりの粒子フルエンスを粒子フルエンス率という。

**粒子励起 X線分析****particle induced X ray emission (PIXE)**

陽子や $\alpha$ 粒子などの荷電粒子を加速器で数 MeV に加速して試料に照射し、その結果発生する元素の特性 X 線を測定して、試料中に含まれる元素を定量する方法。分析感度が高く  $10^{-9}$  g ~  $10^{-12}$  g の元素の分析が可能であり、数  $\mu$ g の試料でも分析できる。原子番号が小さな元素を除く多元素(Na から U まで)の迅速な同時非破壊分析が可能であるという特徴をもつ。細胞レベルの生物試料等に対してはマイクロビームを用いる走査分析も可能であり、環境科学、宇宙科学、地球科学、医学、生物学、考古学、文化財調査、資源探査、犯罪捜査、半導体や金属学、宇宙塵の研究などの分析に幅広く利用されている。

**臨界 criticality**

核分裂反応系において、核分裂反応で生成する中性子の数と消失する中性子の数の均衡が保たれた状態をいう。反応系から外部に漏れる中性子も考慮した中性子の増倍率を実効増倍率( $k_{eff}$ )といい、臨界状態では $k_{eff}$ は1である。臨界に達しない状態を未臨界、臨界を超えた状態を超臨界という。例えば発電用の軽水型原子炉内では、 $^{235}\text{U}$ が1個の中性子を捕獲して核分裂し2~3個の中性子が生じる。生成した中性子は、制御棒、減速材、燃料中の核分裂生成物などに吸収され、また系外にも漏れるが、一部が再び核分裂に寄与する。運転中の原子炉では中性子増倍率が1を超え核分裂連鎖反応が継続するよう、核燃料、減速材、

構造材、冷却材<sup>\*</sup>の量や性質と幾何的配置、反射材<sup>\*</sup>などの条件を調整して臨界状態を維持する。

### 臨界質量 critical mass

核分裂性物質<sup>\*</sup>で集合体を形成したとき、中性子<sup>\*</sup>の増倍率が1を超えて自然に核分裂連鎖反応<sup>\*</sup>が進むのに必要な最小の質量。核分裂性物質の核特性、形状および周囲の物体の密度、組成、形状ならびに両者の幾何学的配置などに依存する。

球形の<sup>235</sup>U金属では約20 kg, <sup>239</sup>Pu金属で約5 kgである。

### 燐光 phosphorescence

→蛍光 放射線<sup>\*</sup>や光照射で生成する励起分子の多くは一重項状態でns程度の寿命で光を放出する(蛍光<sup>\*</sup>)か熱的に失活する。部分的に三重項の励起状態<sup>\*</sup>が生成することがあるが、これは光学的な遷移が禁制されているのでより長い寿命で発光失活する。これを燐光という。

## る

### ルビジウム-ストロンチウム法

#### rubidium-strontium method

→年代測定 試料中の<sup>87</sup>Rb(半減期<sup>\*</sup>488億年)の量と、そのβ<sup>-</sup>壊変<sup>\*</sup>により生じる<sup>87</sup>Srの量から岩石の年代を測定する方

法。実際には、岩石生成時に既に存在した<sup>87</sup>Srの寄与を補正する。火成岩、変成岩、雲母類、長石類などのルビジウムやカリウムを含む鉱物に適用され、10<sup>6</sup>年までの年代測定に有効である。

## れ

### レーザー核融合 laser nuclear fusion

→核融合 高出力のレーザー光を使用する慣性核融合<sup>\*</sup>(inertia confinement fusion)。重水素(D<sub>2</sub>)とトリチウム(T<sub>2</sub>)を直径数mmのガラス球に充填した燃料ペレットに高出力のレーザー光を均一に照射すると、高温になった表面が瞬時に蒸発し急に膨張する。その時、慣性による反作用で燃料ペレットは内部に急激に圧縮され(爆縮)、高温高密度のプラズマ<sup>\*</sup>が発生し核融合反応(DT反応)が起きる。爆縮には高い対称性が求められるので、燃料ペレットは真球状であることが必要。

### レーザー同位体分離 laser isotope separation

レーザー光の照射により、特定の同位

体<sup>\*</sup>だけを選択的に励起させてイオン化反応や分解反応を誘起することによって、同位体を分離する方法。ウラン同位体の分離では、金属ウランを蒸発させる原子法と六フッ化ウラン<sup>\*</sup>(UF<sub>6</sub>)を用いる分子法がある。UF<sub>6</sub>を用いる分子法では、気体のUF<sub>6</sub>分子に赤外レーザー光を照射し、<sup>235</sup>UF<sub>6</sub>(g) → <sup>235</sup>UF<sub>5</sub>(s)+F(g)の解離反応で生成する固体状の<sup>235</sup>UF<sub>5</sub>(s)を気体の<sup>238</sup>UF<sub>6</sub>(g)から分離する。

### レーザーブレイクダウン分光

#### laser induced breakdown spectroscopy

レーザー光を物質に照射したときに生成するプラズマ<sup>\*</sup>の発光を測定して元素<sup>\*</sup>を分析する方法。レーザー光を集光して物質に照射すると、焦点付近では高温か



つ高密度のプラズマが生成する。この現象をブレークダウンという。励起状態<sup>\*</sup>のプラズマの脱励起過程で元素に固有の光が放射されるので、これを分光することによって元素の分析が可能である。実時間測定が可能であることから、有害物質監視や微量汚染物質監視などにも利用される。

### レーザー誘起分光

#### laser induced spectroscopy

レーザー光を物質に照射したときに物質が発する蛍光<sup>\*</sup>、熱、音響などを測定することによって、物質中の原子<sup>\*</sup>、分子、イオンなどの濃度や結合状態などを分析する方法。レーザー光の照射により生成する励起種からの蛍光を測定するレーザー誘起蛍光分光法や音波を測定するレーザー光音響分光法などがある。時間分解レーザー誘起蛍光法を用いてランタノイドやアクノイドの内圏水和分子数を求めることができる。

### 励起核 excited nucleus

原子核内の核子<sup>\*</sup>（陽子<sup>\*</sup>と中性子<sup>\*</sup>）は核種<sup>\*</sup>に固有なエネルギー準位<sup>\*</sup>におさまっている。通常の原子核<sup>\*</sup>では最も低いエネルギー準位から順にすき間なく核子が詰まっている。このとき原子核は基底状態であるという。これに対して、1個または複数の核子が基底状態よりも上のエネルギー準位、すなわち励起準位<sup>\*</sup>を占めている原子核を励起核という。励起核は不安定であり、短時間で $\gamma$ 線<sup>\*</sup>や内部転換電子を放出して基底状態に移る。放出される $\gamma$ 線や内部転換電子のエネルギーは核種に固有の値をもつ。励起核は色々な反応過程を通して形成されるが、 $\alpha$ 壊変<sup>\*</sup>、 $\beta$ 壊変<sup>\*</sup>、軌道電子捕獲<sup>\*</sup>などによって生成する娘核種<sup>\*</sup>が励起核になる場合や、原子核が $\gamma$ 線を共鳴吸収<sup>\*</sup>して励起核になる（メスバウアー効果<sup>\*</sup>として知られている）場合などがある。

### 励起関数 excitation function

標的核<sup>\*</sup>に粒子を衝突させたときに生じる励起の断面積を、入射粒子のエネルギーを変数として表した関数。標的核および入射粒子の種類に依存する。

### 励起準位 excitation level

→励起状態

### 励起状態 excited state

一般的には、量子力学的な系の定常状態のうち最も低いエネルギー準位<sup>\*</sup>の基底状態より高いエネルギーの状態を指す。通常、励起状態はより低いエネルギー準位に遷移するが、それが禁制遷移である場合には比較的長寿命の準安定状態となる。原子核<sup>\*</sup>の励起状態は、核子<sup>\*</sup>当たりの結合エネルギーが小さく、不安定な核の状態である。励起状態にある原子核は $\alpha$ 線<sup>\*</sup>、 $\beta$ 線<sup>\*</sup>、 $\gamma$ 線<sup>\*</sup>などの放射線<sup>\*</sup>を放出して励起エネルギーを消費しより安定になる。また放射線が物質に入射したとき、放射線は種々の相互作用を生じながらエネルギーを失うが、その過程で物質を構成する原子<sup>\*</sup>の励起状態を誘起する。

### 冷却材 coolant

原子炉<sup>\*</sup>構成材料の一つで、核分裂連鎖反応<sup>\*</sup>によって燃料中に発生した熱を除く役目をもつ。一般に冷却材に要求される優れた熱的性質、化学的性質、安全性、経済性などの他に、中性子<sup>\*</sup>の散乱<sup>\*</sup>や吸収の程度、放射化<sup>\*</sup>によって生成する誘導放射能<sup>\*</sup>の程度や放射線分解<sup>\*</sup>特性が考慮される。液体では水（軽水および重水）、気体では二酸化炭素やヘリウム、液体金属ではナトリウムがある。冷却材中の微量不純物によって構造材が腐食される場合があるため、冷却材の純度を保つことが重要である。また、冷却材によって原子炉の動作温度が決まることがある。冷却材として用いる水は、減速材<sup>\*</sup>および放射線遮蔽材としての役目も果たす。

## 冷中性子 cold neutron

5 meV 以下のエネルギー（波長では 0.4 nm 以上）の中性子。冷中性子を得るには、熱中性子から速度の遅い成分をフィルターを通して取り出す方法や、熱中性子を液体水素など極低温の物質中で減速させる方法がある。後者が実用化されており、日本原子力研究開発機構の JRR-3 などに設置されている。冷中性子はガイド管を通してビームとして原子炉や加速器室の外に導き出され、中性子散乱や即発γ線分析のような物性研究、分析に用いられる。

## レイリー散乱 Rayleigh scattering

コヒーレント散乱とも言う。光の波長  $\lambda$  に比べて十分に小さい粒子 ( $\lambda/10$  以下程度) 中を光が通過する場合に、光の波長は変わらず、進行方向が変化する現象。散乱光の強度は波長の 4 乗に反比例する。レイリー散乱の確率は吸収体の原子番号の 2 乗に比例して増加し、光のエネルギーに比例して減少する。

## 劣化ウラン depleted uranium

$^{235}\text{U}$  の含有量が天然ウランより少ないウラン。天然ウランの同位体組成は  $^{235}\text{U}$  が 0.7%、 $^{238}\text{U}$  が 99.3% であり、核燃料として利用するために  $^{235}\text{U}$  を濃縮するが、濃縮後に残るウランは天然ウランのそれよりも高い濃度の  $^{238}\text{U}$  を含む。比重が大きいことを利用して、遮蔽材や劣化ウラン弾の素材にもなっている。

## レプトン lepton

→素粒子 →ミュオン →ニュートリノ  
強い相互作用をせず、電磁相互作用と弱い相互作用をするフェルミ粒子で軽粒子とも呼ばれる。電子 ( $e^-$ )、ミュオン ( $\mu^-$ )、およびタウ粒子 ( $\tau^-$ ) とそれぞれに対応する電子ニュートリノ ( $\nu_e$ )、ミュオンニュートリノ ( $\nu_\mu$ ) およびタウニュートリノ ( $\nu_\tau$ ) の 6 種があり、それぞれの反粒子を加えると 12 種が知られている。これに対し、強い相互作用をするフェルミ粒子をクォークという。

# ろ

## ローソンパラメータ Lawson product

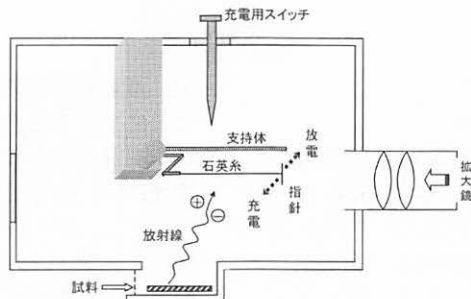
→プラズマ核融合 プラズマ粒子密度 ( $n/\text{cm}^3$ ) と閉じ込め時間 ( $\tau/\text{s}$ ) の積。ローソン条件とも呼ばれ、プラズマ核融合実験装置の性能を表す指標とされる。自発的に核融合反応が持続するための自己点火条件は、プラズマ温度が 1~10 億度、ローソンパラメータが  $10^{13} \sim 10^{14} \text{ s/cm}^3$  以上とされる。プラズマ実験装置である JT-60 (日本) と JET (欧州) は、入力したエネルギーにほぼ等しいエネルギーをつくり出す臨界プラズマ条件を達成した。国際熱核融合実験炉 (ITER) は自己点火条件の達成を目指す。

## ローリッツェン検電器

### Lauritsen-type electroscopes

石英糸の位置の時間変化を拡大鏡で読み取り放射線量を測定する装置。外部電池によりあらかじめ石英糸とその支持体に初期電位を与えておくと、電荷の反発により石英糸と支持体は離れた位置をとる (開く)。放射線で発生した電荷が石英糸と支持体に捕集されると、電荷の一部が中和されて電位が下がり、石英糸と支持体の間隔が狭まる (閉じる)。石英糸と支持体の間隔は捕集された電気量すなわち線量に比例する。図参照 (p. 137)。

## 六フッ化ウラン uranium(VI) fluoride



ローリツェン検電器の原理

フッ化ウラン(VI). 化学式は  $UF_6$ . 常温では無色の結晶であるが、 $56.5^\circ C$  で昇華する. 気体の  $UF_6$  は空気中の水分と反応して腐食性のフッ化水素 (HF) を生成するので、取扱いに注意を要する. 室温 ( $18.2^\circ C$ ) で  $13.3\text{ kPa}$  の蒸気圧を与えるため、遠心分離法\*によるウラン濃縮\*に用いられる. レーザー同位体分離\* (分子法) でも使用する.

#### ロジックパルス logic pulse

→同時回路 同時回路\*における放射線測定のための信号処理の一方法. ある短い時間間隔、すなわちほぼ同時に信号を得たとき、その信号を有効もしくは無効として処理する. 例えば、 $^{60}Co$  は  $1.17\text{ MeV}$  と  $1.33\text{ MeV}$  の  $\gamma$  線\* をカスケードに放出して壊変\* するが、これらの  $\gamma$  線の信号がほぼ同時に検出されたときの信号を有効とし、 $^{60}Co$  からの  $\gamma$  線として計数する (同時計数\*). 一方、試料からの放射線\* を測定する主検出器とそれを取り囲むガード検出器からの信号がほぼ同時に検出されたときは、外部からの放射線が主検出器でも検出されたとしてこの信号を無効にする (逆同時計数).

#### 炉心 core

核燃料\*、減速材\*、冷却材\*、制御棒\*などを収容する原子炉\*の中心部. 核燃料は通常、燃料集合体\*を一つの単位とし

て炉心内に格子状に配置される. 加圧水型原子炉\*や沸騰水型原子炉\*では正方格子状に、高速増殖炉\*では六方格子状に配置される.

#### 炉心溶融 core meltdown

原子炉\*の炉心\*が高温になり溶融し破損すること. 原子力事故の中では最も深刻なものとされている. 軽水炉\*の炉心の回りを循環する水は冷却と中性子減速の役割を担うが、その水が喪失されるような事故が起こると炉心が十分に冷却されなくなり、炉心溶融に至る. 1979年3月の米国スリーマイル島2号機 (TMI-2) の冷却材\*喪失、および1986年4月の旧ソ連チェルノブイル4号炉の暴走事故で発生した.

#### 六ヶ所再処理工場

##### Rokkasho nuclear fuel reprocessing plant

→核燃料再処理 →ピューレックス法  
青森県六ヶ所村にある日本原燃 (株) が運営する核燃料再処理\*施設. ピューレックス法\*による. わが国の商業用核燃料サイクルの中核を占める施設で、年間最大  $800$  トンのウランを処理する能力がある. 六ヶ所村にはこの他に核燃料サイクル関連施設として、高レベル放射性廃棄物\*貯蔵管理センター、ウラン濃縮\*工場および低レベル放射性廃棄物\*埋設センターなどがある.

## ワイゼッカーの質量式

## Weizsacker mass formula

液滴模型<sup>\*</sup>に基づいて導かれた原子核<sup>\*</sup>の結合エネルギー ( $E_b$ ; 単位 MeV) を与える半経験式. 特に質量数<sup>\*</sup>が 40 以上の核について良い近似を与える. 質量数を  $A$ , 原子番号<sup>\*</sup>を  $Z$ , 中性子数を  $N$  とすると  $E_b$  は次式で表わされる.

$$E_b(Z, N) = 14.1A - 13A^{2/3} - 0.595Z^2A^{-1/3} \\ - 19(A-2Z)^2A^{-1} + 34\epsilon A^{-3/4}$$

右辺第 1 項, 2 項, 3 項および 4 項はそれぞれ, 核子<sup>\*</sup>相互の引力に関する体積

項, 液滴表面にある核子の結合が弱まることに関する表面積項, 陽子<sup>\*</sup>同士のクーロン反発に関する項, および原子番号の増加に伴う中性子過剰に起因する効果の項である. 第 5 項は対称エネルギーに対応し, 定数  $\epsilon$  は, 陽子数および中性子数がともに偶数のとき +1, とともに奇数のとき -1, また一方のみが奇数(すなわち質量数が奇数)のとき 0 である. 偶偶核<sup>\*</sup>の安定性, 奇奇核<sup>\*</sup>の不安定な特性に対応する.

# 付 録

1. 代表的な元素, 核種など ..... 付-1
2. 顕著な業績を挙げた研究者 ..... 付-16
3. よく使われる略記号 ..... 付-24
4. 単位と記号 ..... 付-33

## 付録 1 代表的な元素、核種など

**重水素 deuterium ( $^2\text{H}$  または  $\text{D}$ )** 水素の安定同位体で天然存在度は 0.0115%。原子核は重陽子 (deuteron) と呼び、 $d$  と表記。米国の H. C. Urey らは、電気分解後の水溶液のスペクトル中に、水素のバルマー系列の  $\text{H}_\beta$  線に近接する線 ( $^2\text{D}$  線) を発見し、deuterium (“2” を意味するギリシア語に由来) と命名 (1931)。太陽など恒星の中心部では  $\text{D}$  の核融合が起こっている。人工の“核融合炉”は  $\text{D-D}$  反応あるいは  $\text{T-D}$  反応に基づく。原子核 deuteron ( $d$ ) は陽子 1 個と中性子 1 個からなり、結合エネルギーは 2.2 MeV と小さく、低エネルギー核反応では核子の一方のみが標的核内に入る反応 (オッペンハイマー・フィリップス過程) が起こる。重水は原子炉の冷却材として用いられるが、中性子吸収断面積が小さいので軽水よりも減速特性に優れる。重水の化学的性質は通常の軽水と同様だが、大きな質量依存の同位体効果が観測される。

**トリチウム (三重水素) tritium ( $^3\text{H}$  または  $\text{T}$ )** 水素の放射性同位体 (半減期 12.3 年) で低エネルギー  $\beta^-$  線を放出する。原子核は三重陽子 (triton) と呼び、 $t$  と表記。米国の L. W. Alvarez らは、( $\text{D} + d$ ) 反応で  $^3\text{He}$  と  $^3\text{H}$  を合成し、 $^3\text{H}$  が  $\beta^-$  放射体であると報告した (1938)。高層大気中で宇宙線による  $^{14}\text{N}(n, ^3\text{H})^{12}\text{C}$  反応で約  $0.5$  個/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$  の割合で生成し、地球上の水循環に加わる。天然の  $\text{T/H}$  比は  $10^{-17} \sim 10^{-18}$  程度であり、原子比  $\text{T/H} = 10^{-18}$  を 1 トリチウム単位 (TU) という。大気中のトリチウム濃度は 1950 年代前半の水爆実験の影響で一時 2500 TU にまで上昇したが、その後次第に減少した。地球上の濃度分布は、赤道付近で低く、高緯度になるとともに高くなる。雨水のみが  $^3\text{H}$  の供給源であった頃には、陸水や極地方の氷の年代測定に有効であったが、現在では難しい。低バックグラウンドの液体シンチレーション計測法や AMS (加速器質量分析) を用いて測定する。原子炉中では  $^{235}\text{U}$  の三体核分裂で生成し、原子力発電所からは約  $40 \text{ TBq/GWe} \cdot \text{y}$ 、再処理施設からは約  $600 \text{ TBq/GWe} \cdot \text{y}$  の  $^3\text{H}$  が放出される。DT 核融合炉の燃料トリチウムは、原子炉中で  $\text{Li-Al}$  合金などを照射し  $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$  反応により製造する。ITER (国際熱核融合実験炉) では  $3 \sim 5 \text{ kg}$  ( $\sim 10^{18} \text{ Bq}$ ) の  $^3\text{H}$  が必要とされる。

**ベリリウム-7, -10 beryllium-7, -10 ( $^7\text{Be}$ ,  $^{10}\text{Be}$ )** 米国の R. B. Roberts らが、 $^6\text{Li} + d \rightarrow ^7\text{Be} + n$  反応で  $^7\text{Be}$  を発見した (1938)。 $^7,^{10}\text{Be}$  は、大気成層圏中の  $^{14}\text{N}$  や  $^{16}\text{O}$  の銀河宇宙線による核破砕反応によって生成する。 $^7,^{10}\text{Be}$  の大気および海水中での滞留時間は短く、土壌や海底土に蓄積するので、堆積速度が小さい ( $\sim 1 \text{ mm}/10^3 \text{ y}$ ) 海底堆積物中の  $^{10}\text{Be}$  から宇宙線の長期変動や堆積環境がわかる。考古学では遺物の埋没年代、地層剝削速度の研究に有力である。隕石中の最も始原的な白色包含相の諸鉱物中に  $^{10}\text{B}/^{11}\text{B}$  比、 $^7\text{Li}/^6\text{Li}$  比の変動が見出され、これに基づく惑星形成過程の研究が進んでいる。

**炭素-14 carbon-14 ( $^{14}\text{C}$ )** 米国の S. Ruben らは照射グラファイトから炭素を精製・分離して、 $^{14}\text{C}$  が  $\beta^-$  放射体であることを見出した (1940)。Libby らはメタンガス中に、二次宇宙線の中性子と大気窒素との反応  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$  を確認 (1946) するとともに、 $^{14}\text{C}$  による年代測定法を開発した。 $^{14}\text{C}$  とともに、炭素化合物に標識され、有機化学、生物化学、

薬学などに利用される。 $^{14}\text{CO}_2$ を用いた M. Calvin による植物光合成の解明研究 (1957) が著名。定量には逆同時計数遮蔽を用いたガイガー計数法 ( $^{14}\text{CO}_2$ )、比例計数法 ( $^{14}\text{CH}_4$ ) あるいは液体シンチレーション計数法が多用され、近年では AMS (加速器質量分析) が年代測定のための少量試料中の極微量定量に用いられる。

**アルミニウム-26 aluminium-26 ( $^{26}\text{Al}$ )** 米国の T. P. Kohman らが  $^{25}\text{Mg}(d, n)^{26}\text{Al}$ ,  $^{26}\text{Mg}(d, 2n)^{26}\text{Al}$  反応で合成し (1954), 次いで Kohman らがその壊変関\*を確立した (1959).  $^{26}\text{Al}$  が注目されたのは、惑星母天体形成後の 500 万~1 億年の間に、マントル・核の分別に必要な 2000-3000°C に加熱する熱源として  $^{26}\text{Al}$  の寄与が指摘された (1960) ことによる。高エネルギー銀河宇宙線\*による大気中での核破碎, 低エネルギー太陽宇宙線による宇宙塵物質との核反応\*で生成し、地球上では深海堆積物に蓄積する。近年、地上近傍での  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  比の一定性に基づく人骨化石の埋没年代測定が注目されている。

**ケイ素-32 silicon-32 ( $^{32}\text{Si}$ )** 米国の M. Lindner が  $^{37}\text{Cl}(p, \alpha 2p)$  反応を見出し、娘核種\*の  $^{32}\text{P}$  の成長を観測した (1953).  $\beta^-$  線\*の測定が容易でないため、その後に報告された半減期\*の値は 100 ~ 700 年の範囲で分散した。大気中で宇宙線\*による Ar の核破碎によって生成し、水文学を含む地球化学的関心が高い。

**リン-32 phosphorus-32 ( $^{32}\text{P}$ )** イタリアの E. Fermi, E. Segrè のグループが 1934 年より開始した一連の中性子放射化の研究で、 $^{32}\text{S}$  の (n,p) 反応で生成する  $^{32}\text{P}$  を発見した。 $^{92}\text{Y}$  とともに高エネルギーの純  $\beta^-$  放射体で測定しやすく、半減期\*が適度であることから  $\beta^-$  線\*の標準や放射化学\*の基礎実験に有効である。原子炉\*で大量に製造でき、生物化学の分野で  $^3\text{H}$ ,  $^{11}\text{C}$ ,  $^{35}\text{S}$  とともにトレーサー\*としてリン酸基標識などに広く用いられる。

**塩素-36 chlorine-36 ( $^{36}\text{Cl}$ )** 米国の D. C. Graham と英国の H. J. Walke は  $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)$  反応で生成した  $^{36}\text{Cl}$  を発見した (1941).  $^{38}\text{Cl}$  とともに生物科学分野などでトレーサー\*として利用される。隕石中では  $^{56}\text{Fe}(p, X)^{36}\text{Cl}$  反応で生成し、宇宙線照射年代の知見を与える。地球上では高エネルギー宇宙線による K, Ca, および Ar の核破碎, 遅い中性子\*による Ar の核反応\*。ならびに熱中性子\*による  $^{35,37}\text{Cl}(n, \gamma)$  反応,  $^{40}\text{Ca}(\mu, \alpha)$  反応で生成する。地下深部やウランの多い地域では、 $^{238}\text{U}$  の自発核分裂\*からの中性子の捕獲反応も起こる。近年、AMS (加速器質量分析) による分析が可能となり、環境水や大気循環のトレーサーなどに利用される。

**カリウム-40 potassium-40 ( $^{40}\text{K}$ )** 英国の J. J. Thomson がカリウムからの  $\beta^-$  線\*を発見し (1905), G. Hevesy らが  $^{40}\text{K}$  に帰属した (1935). 岩石鉱物中の  $^{40}\text{K}$  から生じる  $^{40}\text{Ar}$  の蓄積量から地球岩石や隕石の固化年代を決定する方法 (Nier, 1948) が進歩した。鉱物試料を中性子照射し  $^{39}\text{K}(n, p)^{39}\text{Ar}$  で生成する  $^{39}\text{Ar}$  と  $^{40}\text{Ar}$  の比を質量分析する Ar-Ar 年代測定\*法が確立された。海水中の  $^{40}\text{K}$  は約 20 Bq/L で、K/Na 比は岩石平均の 1/30 程度。体重 70 kg のヒト体内には必須元素として約 140 g のカリウムが存在し、 $^{40}\text{K}$  は  $10^4$  Bq 程度。それによる内部被ばくは軟組織で約 0.2 mSv/y である。

**カルシウム-41 calcium-41 ( $^{41}\text{Ca}$ )** カナダの L. Yaffe らが発見した (1950-53). 放射性トレーサーとして用いることができるが測定は容易でない. 自然界での  $^{40}\text{Ca}(n, \gamma)^{41}\text{Ca}$  反応は生物科学, 地球科学の観点から興味深い, 目立った研究はまだない. 原子力施設などのコンクリート廃材中に含まれる  $^{41}\text{Ca}$  がクリアランスの観点から重要核種である.

**マンガン-53 manganese-53 ( $^{53}\text{Mn}$ )** J. R. Wilkinson は  $^{53}\text{Cr}$  を陽子ビームで照射して  $^{53}\text{Mn}$  を検出した (1955). 鉄隕石中には宇宙線\* による  $^{56}\text{Fe}(p, \alpha)^{53}\text{Mn}$  および  $\text{Fe}(p, \text{spall})^{53}\text{Mn}$  反応で生成すると考えられ, これによって数 100 万年にわたる宇宙空間での宇宙線照射歴や宇宙線強度の長期変動の知見が得られる. 本田雅健らは初めて鉄隕石中に検出した (1960-61). 宇宙塵起源の深海底土中での探索が成功し, 宇宙塵の流入に関する知見が得られた (今村峯雄ら, 1978). 近年, 隕石などの中に娘核種\* の  $^{53}\text{Cr}$  が検出され, その 100 万年スケールでの形成過程が議論されている.

**コバルト-60 cobalt-60 ( $^{60}\text{Co}$ )** F. W. Aston らは, Co の中性子吸収によって生成する放射能\* は  $^{60}\text{Co}$  によると考えた (1934-1935). 後に M. B. Sampson らはこれを確認した (1936). カスケード状に放出する  $\gamma$  線\* ( $1173.2 \text{ keV}$ ,  $1332.5 \text{ keV}$ ) は,  $\gamma$  線エネルギーや放射能強度の標準として, また方向角相関の基準として用いられる. トレーサー\* としての利用も多彩で, 大量の  $^{60}\text{Co}$  線源は原子炉\* での中性子照射による  $^{59}\text{Co}(n, \gamma)$  反応で調製され, 医療器具, 薬品, 食品などの滅菌, 農作物の品種改良などに利用される. また, がん治療のための線源として広く使用されている.

**クリプトン-85 krypton-85 ( $^{85}\text{Kr}$ )** カナダの H. G. Thode らは, 原子炉照射したウランの板から Kr と Xe を抽出して質量分析し,  $^{83-86}\text{Kr}$  を検出するとともに  $^{85}\text{Kr}$  が放射性であることを発見した (1945).  $^{235}\text{U}$  の核分裂\* における  $^{85}\text{Kr}$  ( $t_{1/2} = 10.76 \text{ y}$ ) の同位体収率は 1.319% で, 原子炉\* 運転中の廃ガス中に残り, また使用済核燃料\* の再処理\* によっても大気中に放出される. 希ガスのために生体濃縮は起こらない. 純  $\beta$  核種のためにヒトの皮膚への影響が考えられるが, 問題は少ないとされている.

**ルビジウム-87 rubidium-87 ( $^{87}\text{Rb}$ )** 英国の J. J. Thomson は K と Rb が  $\beta$ -線\* を放出することに気づき (1905), このような軽い元素\* にも自然放射能\* があることを発見した. ドイツの O. Hahn らは半減期\* を測定する (1919) とともに,  $^{87}\text{Rb}$ - $^{87}\text{Sr}$  対による年代測定\* を提唱した (1937).  $^{87}\text{Rb}$ - $^{87}\text{Sr}$  対を利用する隕石, 月, 地球の岩石鉱物などの生成年代の測定法は,  $^{238,235}\text{U}$ - $^{232}\text{Th}$ - $^{206,207,208}\text{Pb}$  対,  $^{40}\text{K}$ - $^{40}\text{Ar}$  対,  $^{147}\text{Sm}$ - $^{143}\text{Nd}$  対,  $^{187}\text{Re}$ - $^{187}\text{Os}$  対,  $^{176}\text{Lu}$ - $^{176}\text{Hf}$  対などと同様に重要であり, 半減期の再測定と評価が今なお課題とされている.

**ストロンチウム-90 strontium-90 ( $^{90}\text{Sr}$ )** C. D. Coryell が  $^{235}\text{U}$  の核分裂生成物\* である  $^{90}\text{Sr}$  の半減期\* を測定した (1943).  $^{235,233}\text{U}$  および  $^{239}\text{Pu}$  の核分裂\* によって,  $^{137}\text{Cs}$  とともに高い収率で生成する. 両核種とも核分裂後 10 年以上経過したときの放射能\* は, 核分裂生成物の中で最も優先的になる. 娘核種\*  $^{90}\text{Y}$  と約 3 週間で永続平衡\* になる. ミルキング\* した  $^{90}\text{Y}$  から放出される高エネルギー  $\beta$ -線\* を測定して  $^{90}\text{Sr}$  を定量する方法は精度も高く, 大気圏核実験由来の環境中  $^{90}\text{Sr}$  の食物連鎖の観点からの調査研究に用いられる. スト



ロンチウムはヒトの体内では骨に濃集するので、土壌—牧草—牛乳—人骨などに含まれる<sup>90</sup>Sr濃度が詳しく調べられてきた。

**モリブデン-99 molybdenum-99 (<sup>99</sup>Mo)** 嵯峨根遼吉は高速中性子<sup>\*</sup>で照射した Y, Zr, Nb および Mo が放射化<sup>\*</sup>して生じる<sup>99</sup>Mo を発見した (1937-38)。G. T. Seaborg らは d ビームを照射して Tc を発見するとともに、これが<sup>99</sup>Mo から成長すること、<sup>99</sup>Tc の核異性体<sup>\*</sup>(<sup>99m</sup>Tc) で基底状態は長寿命ないし安定であることを証明した。<sup>99</sup>Mo—<sup>99m</sup>Tc 壊変は約 10 時間で過渡平衡<sup>\*</sup>に達する。<sup>99</sup>Mo からミルキング<sup>\*</sup>で<sup>99m</sup>Tc を分離して核医学診断利用に供する。ミルキングにはイオン交換が使われ、<sup>99m</sup>Tc の溶離には生理食塩水を用いる。現在では原子炉<sup>\*</sup>を用いる<sup>98</sup>Mo(n, γ)あるいは<sup>235</sup>U(n, f)により大量に生産・頒布されている。

**テクネチウム technetium (Tc)** 人工放射性元素。イタリアの E. G. Segrè らがパークレーのサイクロトロンで使用した Mo 製偏向板中に<sup>66,97</sup>Mo(d, xn)反応 (x = 1, 2) で生成した<sup>97m</sup>Tc ( $t_{1/2} = 91$  d) を発見した (1936)。最初の人工元素であることから、人工的という意味のギリシャ語 *technikos* に因んで命名された (1947)。同位体<sup>\*</sup>として<sup>86</sup>Tc ~ <sup>114</sup>Tc があり、そのすべてが放射性である。特にベータ安定谷に位置する<sup>97</sup>Tc, <sup>98</sup>Tc および<sup>99</sup>Tc は長寿命である。化学的性質は Re に類似しており、イオンは -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6, +7 の酸化数をとる。安定な酸化物は TcO<sub>2</sub> で、酸化性水溶液中では TcO<sub>4</sub><sup>-</sup> が安定。多様な標識化合物<sup>\*</sup>が合成され、放射性診断薬として広く利用されている。<sup>99m</sup>Tc の半減期<sup>\*</sup>(6.0 h) と γ 線エネルギーが体内投与および外部検出に適するためと、<sup>99m</sup>Tc が<sup>99</sup>Mo からミルキングで容易に入手できるためである。<sup>99</sup>Tc ( $t_{1/2} = 2.11 \times 10^5$  y) は核燃料中に大量に生成(<sup>235</sup>U の核分裂生成物<sup>\*</sup>の約 6%) するため、環境中での挙動が注目されている。

**ヨウ素-129 iodine-129 (<sup>129</sup>I)** 米国の G. T. Seaborg らは、放射性 Sb, Te および I の中に質量数<sup>\*</sup>129 の同重体<sup>\*</sup>の壊変鎖を発見した。地球上では宇宙線<sup>\*</sup>と大気中の Xe との反応や地殻中のウランの自発核分裂<sup>\*</sup>で生成し、定常状態の海洋では<sup>129</sup>I/<sup>127</sup>I =  $1.5 \times 10^{-12}$  とされる。ヨウ素が海底堆積物に取り込まれると<sup>129</sup>I の供給が止まるため<sup>129</sup>I/<sup>127</sup>I 比は<sup>129</sup>I の半減期<sup>\*</sup>に従って減衰するので、年代測定<sup>\*</sup>に利用できる。大気圏核実験や再処理<sup>\*</sup>で環境に放出され広く分布する。自然界のヨウ素サイクルで微生物の作用は大きく、拡散濃縮過程の研究が重視され、原子力施設近傍のモニタリングだけではなく地球規模での挙動や生物との関わりが究明されつつある。

**ヨウ素-131 iodine-131 (<sup>131</sup>I)** 米国の P. Abelson は中性子照射したウラン化合物から Se, Te および I を化学分離し、<sup>131</sup>I を発見した (1939)。無担体<sup>\*</sup>で大量に調製でき、トレーサー<sup>\*</sup>として利用される。医学利用では甲状腺機能亢進症や甲状腺癌の治療用に用いられる。大気圏核実験 (1945-62) や原子力発電所の事故 (チェルノブイリ, 1986) で環境中に大量に放出された。植物表面に沈着し、家畜が摂取して牛乳や乳製品に入り、ヒトの甲状腺に集まる可能性がある。事故に備えて原子炉施設周辺住民に対してヨウ素を配備しておくのは、甲状腺に集まった<sup>131</sup>I を置換排除するためである。

**セシウム-137 cesium-137 (<sup>137</sup>Cs)** 米国のマンハッタン計画<sup>\*</sup>の初期に、<sup>235</sup>U ならび

に  $^{239}\text{U}$  の主な核分裂生成物\*の一つとして発見された。安定核は  $^{133}\text{Cs}$  (100%) であるが、 $^{137}\text{Cs}$  は中性子数 82 の魔法数で、間にはさまれた同位体\*  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ ,  $^{136}\text{Cs}$  などと近辺の同重体\* が核分裂収率の高いグループを形成する。γ線計測における標準線源\* として、あるいは照射用大量線源として利用される。 $^{137}\text{Cs}$  からの  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  のミルキング\* は、 $^{140}\text{Ba}$ - $^{140}\text{La}$  や  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  とともに放射化学\* の基礎実験教材である。大気圏核実験 (1945-63) で環境中に大量放出され、陸上・海域を問わず世界各地で  $^{137}\text{Cs}$  が観測された。現在、降下物としては観測されなくなったが、地上からの再浮上 (例えば中国での黄砂に随伴) の観測が注目されている。土壌中では殆ど移動しない。動物の体内摂取の 60% は筋肉に分布し、生物的半減期は 50 ~ 150 日 (子供で 44 日) と見積もられている。

**プロメチウム promethium (Pm)** 人工放射性元素。米国の J. A. Marinsky らは、ウランの核分裂生成物\* から  $^{147}\text{Pm}$  を発見し (1947)、ギリシャ神話の火の神 (Prometheus) にちなんで命名した。F. Weigel は 750-1090°C の高真空中で  $\text{PmF}_3$  を Li で還元して金属を得た (1963)。同位体\* として  $^{128}\text{Pm}$  ~  $^{145}\text{Pm}$  があり、長寿命核種は  $^{145}\text{Pm}$ ,  $^{146}\text{Pm}$  および  $^{147}\text{Pm}$  である。 $^{147}\text{Pm}$  ( $t_{1/2} = 2.623$  y) は薄青から黄緑に光る夜光塗料に利用され、寿命約 5 年のミニ電池として誘導ミサイル、時計、ペースメーカー、ラジオなどに用いられる。β-放射体は厚み計\* の線源として用いられる。

**サマリウム-146, -147 samarium-146, -147 ( $^{146}\text{Sm}$ ,  $^{147}\text{Sm}$ )** 天然サマリウムは中性子魔法数 82 をもつ  $^{144}\text{Sm}$  (3.07%) の他に、 $^{147-150}\text{Sm}$ ,  $^{152}\text{Sm}$  および  $^{154}\text{Sm}$  からなり、これらに挟まれる  $^{145}\text{Sm}$ ,  $^{146}\text{Sm}$ ,  $^{151}\text{Sm}$  と  $^{153}\text{Sm}$  は長寿命である。星内元素合成の p 過程核  $^{146}\text{Sm}$  が消滅核種かどうかの研究が、野津憲治らによってなされた (1974)。隕石中の ( $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ) 対 ( $^{144}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ ) 等時線から隕石固化時の  $^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Sm}$  比が解明された。火星起源の隕石について  $^{146}\text{Sm}$  起源の  $^{142}\text{Nd}$  が測定され、火星の初期のマグマ分化史が追求されている。 $^{146}\text{Sm}$ - $^{142}\text{Nd}$  対と同様に、 $^{147}\text{Sm}$  も娘核の  $^{143}\text{Nd}$  と共に岩石生成後の二次影響に対して閉鎖性を保ちやすいことから、U, Th, Rb などのように太陽系の年齢や全地球規模での初生の  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  比の議論が盛んである。

**ルテチウム-176 lutetium-176 ( $^{176}\text{Lu}$ )** M. Hayden らは、カシオペウム Cp (ルテチウムの旧名称) の天然 β 放射能を発見し (1938)、その放射能\* が  $^{177}\text{Cp}$  によると報告したが、J. Mattauach らはその放射能は  $^{176}\text{Cp}$  によるとした (1938)。W. F. Libby は同 β 線\* を測定し (1939)、 $^{176}\text{Lu}$  の半減期\* を決めた。J. R. Arnold らが壊変図\* を提案し (1954)、立本光信らが隕石の年代測定\* に適用した (1980)。坂本浩 (1967)、小村和久ら (1972)、佐藤純ら (1983) が半減期を精密測定した。半減期の統計的差異が鉍物の冷却速度や形成環境の違いを反映すると考えられており、 $^{176}\text{Lu}$ - $^{176}\text{Hf}$  対による年代測定の研究が今後進展すると予測される。β-壊変系列で  $^{176}\text{Yb}$  が遮蔽核のために  $^{176}\text{Lu}$  は星内元素合成 r 過程\* では合成されず、唯一純粋な長寿命 s 過程核として注目されてきた。r 過程が起こる超新星\* 爆発より以前の赤色巨星の段階の元素合成過程を探る手段となる。

**ハフニウム-182 hafnium-182 ( $^{182}\text{Hf}$ )** 天然には  $^{174}\text{Hf}$  (同位体存在度 0.16% ;  $t_{1/2} = 2.0 \times 10^{15}$  y の α 放射体)、 $^{176}\text{Hf}$  (5.26%)、 $^{177}\text{Hf}$  (18.60%)、 $^{178}\text{Hf}$  (27.28%)、 $^{179}\text{Hf}$  (13.62%) お

よび  $^{180}\text{Hf}$  (35.08%) がある。米国の J. Wing らは、 $^{180}\text{Hf}$  (93%濃縮) 酸化物を照射し二重中性子捕獲反応で  $^{182}\text{Hf}$  ( $t_{1/2} = 9 \times 10^6 \text{ y}$ ) を合成した。 $^{182}\text{Hf}$  は  $^{182}\text{Ta}$  を経て  $^{182}\text{W}$  (安定) に壊変する。これらの3元素とも耐火性が高く、高温でも地球化学過程に影響され難い。親石元素の Hf と親鉄性が高い W は、惑星の融解・コア形成時には分離し Hf はケイ酸塩部分に、W はコア部分に濃集する。そのため  $^{182}\text{Hf}$  が残存すれば  $^{182}\text{Hf}$  起源の  $^{182}\text{W}$  がケイ酸部で過剰になると予想されることから、ユニークな消滅核種対として注目される。米国の D.-C. Lee ら (1995) および C. L. Harper ら (1996) が、鉄隕石中の  $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$  比を基に、地球の微惑星集積・コア分別の時期や月の形成について議論の道を拓いた。

**レニウム-187 rhenium-187 ( $^{187}\text{Re}$ )** レニウムの天然放射性核種。天然同位体は  $^{185}\text{Re}$  (37.40%) と  $^{187}\text{Re}$  (62.60%) で、後者は長寿命 ( $t_{1/2} = 4.4 \times 10^{10} \text{ y}$ ) の  $\beta^-$  放射体である (N. Sugarman らおよび S. N. Naldrett ら)。D. D. Clayton が 1964 年に提唱して始まった太陽系初期の年代学への応用や多くの隕石・地球岩石の年代測定への応用が進んだ。 $^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re}$  比は r 過程の頻度と期間を表す生成関数に依存するため、元素合成モデルの検証ができる。レニウムは地球岩石中には極微量ながら一様に分布し、輝モリブデン鉱に多量 ( $5 \times 10^{-3} \sim 10^{-7} \text{ g/g}$ ) に含まれる。 $^{187}\text{Re}$  起源の  $^{187}\text{Os}$  が卓越する場合があります、鉱物生成年代が容易に求められる。精度の高い半減期の測定の努力は今なお続いている。

**ポロニウム polonium (Po)** 天然放射性元素。1898 年 7 月 M. S. Curie と P. Curie は、ピッチブレンドに含まれる U より強放射性的の新元素を分離し M. Curie の母国ポーランドに因んで命名した。M. Curie と A. L. Debierne はウラン鉱石から 0.1 mg (0.45 Ci) の Po を含む試料を用いてスペクトルを観測した (1910)。I. J. Curie と J. F. J. Curie は化学分離法を開発しつつ  $\alpha$  線の性質を調べ、強力な  $^{210}\text{Po}$  線源 (40–200 mCi ; 1 mCi =  $3.7 \times 10^7 \text{ Bq}$ ) の調製にも成功した。同位体は  $^{188}\text{Po} \sim ^{218}\text{Po}$  であり、 $^{210}\text{Po}$  はウラン系列核種で RaF と呼ばれた。この系列には  $^{218}\text{Po}$  と  $^{214}\text{Po}$  が含まれ、アクチニウム系列には  $^{215}\text{Po}$  と  $^{211}\text{Po}$  が、トリウム系列には  $^{216}\text{Po}$  が含まれる。最長寿命核種は  $^{209}\text{Po}$  ( $t_{1/2} = 102 \text{ y}$ ) で  $^{209}\text{Bi}(\text{p}, \text{n})$  反応で生成するが、現在では  $^{209}\text{Bi}(\text{n}, \gamma\beta^-)$  反応で調製する。人工衛星の軽量熱源に利用された。Po は既知化学物質中で最も毒性が強いとされ、人体安全負荷量は 7  $\mu\text{g}$  である。特定の臓器に濃集することはないが、強力な  $\alpha$  放射体のため DNA 損傷が発がんの原因となるとの指摘もある。

**アスタチン astatine (At)** D. R. Corson らは、 $^{209}\text{Bi}(\alpha, 2\text{n})^{211}\text{At}$  反応で 85 番元素の合成に成功し (1940)、ギリシャ語の不安定の意 (astatos) の元素名を提案した (1947)。 $^{194}\text{At} \sim ^{212}\text{At}$  の 29 同位体が知られており、最長寿命核種は  $^{210}\text{At}$  ( $t_{1/2} = 8.1 \text{ h}$ )。天然にはウラン系列中に  $^{218}\text{At}$ 、アクチニウム系列中に  $^{215}\text{At}$  と  $^{219}\text{At}$  が含まれる。トレーサー量 ( $10^{-11} \sim 10^{-15}$  モル) でしか入手できないが、単体は揮発性で水に少し溶け、ベンゼンや四塩化炭素に抽出できる。 $^{211}\text{At}$  は 5.867 MeV の  $\alpha$  線を放出し、がん治療への応用が検討されている。

**ラドン radon (Rn)** E. Rutherford は、Th 化合物から放射性の粒子が放出されることを見出しエマネーション (発散) と呼んだ (1899)。Curie 夫妻は Ra 試料の周辺のものに放射能が誘導されることを観察した。Rutherford と F. Soddy はエマネーションが重い不活性気体

であることを見出し、Th からトロン<sup>\*</sup>(Tn:  $^{220}\text{Rn}$ )、 $^{226}\text{Ra}$  からラドン (Rn:  $^{222}\text{Rn}$ )、Ac からアクチノン (An:  $^{219}\text{Rn}$ ) が発生することを明らかにした。ドイツの F. E. Dorn は Rn が放射性気体であることを発見した(1900)。McGill 大学の H. Brooks は Rn に曝された物体の上に薄い層として生成する短寿命の放射性付着物を見出した。Rutherford は RaA, B および C が生成することを見出し、さらに長寿命付着物の中に RaD, E および F を発見した。名称がラジウムから生成する希ガスという意味で「ラドン」に統一されたのは 1923 年である。同位体<sup>\*</sup> は  $^{195}\text{Rn} \sim ^{228}\text{Rn}$  であり、最長寿命核種は  $^{222}\text{Rn}(t_{1/2} = 3.824 \text{ d})$ 。融点は  $-71^\circ\text{C}$ 、沸点は  $-62^\circ\text{C}$  で、融点以下にすると鮮やかな燐光<sup>\*</sup>が見られる。ラドンからの放射線被ばくは、自然放射線<sup>\*</sup>からの年間平均線量  $2.4 \text{ mSv}$  の約半分を占める。1980 年代から 90 年代に、地下のウラン鉱山労働者や花崗岩製の建物内の住人へのラドンの影響が注目され、ウラン鉱山労働者については肺癌との有意な関係が認められた。1 グラムの  $^{226}\text{Ra}$  から  $0.001 \text{ cm}^3$  の Rn が発生するが、Ra との平衡量より多く Rn 含む鉱泉や温泉を“ラドン泉”、そうでない場合を“ラジウム泉”と称する。ラドンを含む気体を吸入する療法もある。

**フランシウム francium (Fr)** フランスの M. Perey は、精製した  $^{227}\text{Ac}$  から飛程<sup>\*</sup>  $3.5 \text{ cm}$  の  $\alpha$  線<sup>\*</sup>を確認し、さらに新しい  $\beta$ -放射能が速やかに復活すること(1939)およびこの  $\beta$ -放射体の化学的性質が Cs に似ていることを見出した。すなわち、 $^{227}\text{Ac}$  の大部分 (98.8%) が  $\beta$ -壊変<sup>\*</sup>して  $\text{RdAc}(^{227}\text{Th})$  となり、残り ( $1.2 \pm 0.1\%$ ) が  $\alpha$  壊変<sup>\*</sup>して新元素  $^{223}[87]$  になることを明らかにした。Perey は新元素を精密に分離してその化学的特性を調べ、アルカリ金属の性質をもつことを証明し、祖国に因む名称を提案した(1946)。同位体<sup>\*</sup>として  $^{199}\text{Fr} \sim ^{232}\text{Fr}$  があるが、原子番号<sup>\*</sup>  $1 \sim 92$  の元素<sup>\*</sup>の中で唯一、半減期<sup>\*</sup> 25 分以上の同位体をもたない。最長寿命核種は  $^{223}\text{Fr}(t_{1/2} = 21.8 \text{ min})$ 。

**ラジウム radium (Ra)** P. Curie, M. Curie および G. Bémont は“ピッチブレンド<sup>\*</sup>に含まれる高放射性的の新物質”という論文を、radium (光のラテン語 radius: 暗所で青く輝く)の名称とともに報告した(1898)。彼らはピッチブレンドの塩酸溶解液から硫化物沈殿をつくったとき、沈殿しない Ba と挙動を同じくする高放射性的の成分の存在を見出し、“放射性塩化バリウム”からウランの 60 ~ 900 倍の放射性物質<sup>\*</sup>を分離する事に成功した。これらの試料を用いて A. Demarcay が発光スペクトルを測定し、新しい複数のラインを検知した。M. Curie は、P. Curie がセント・ヨハミスタール (現在のチェコ) から入手した大量のピッチブレンドを化学処理して  $120 \text{ g}$  の純粋な  $\text{RaCl}_2$  ( $\text{Ra}/\text{Ba} = 106$ , 放射能比  $\text{Ra}/\text{U} = 10^6$ ) を回収した。これを用いて原子量<sup>\*</sup>  $225 \pm 1$  を確認し、周期表<sup>\*</sup>中の位置を確定した(1902)。同位体<sup>\*</sup>  $^{195}\text{Ra} \sim ^{234}\text{Ra}$  のすべてが放射性である。最長寿命核種は  $^{226}\text{Ra}(t_{1/2} = 1.60 \times 10^3 \text{ y})$  でウラン系列<sup>\*</sup>に属する。アクチニウム系列<sup>\*</sup>に  $^{223}\text{Ra}$ 、トリウム系列<sup>\*</sup>に  $^{228}\text{Ra}$  と  $^{224}\text{Ra}$  が含まれる。20 世紀はじめより  $^{226}\text{Ra}$  と Be の混合物は携帯用中性子源として、 $\text{RaBr}_2$  と  $\text{ZnS}$  の混合物は蛍光性夜光塗料として、 $\text{RaCl}_2$  あるいは  $\text{RaBr}_2$  は“ラジウム針”として癌治療に用いられた。これらの製品の製造作業従事者には、放射線障害<sup>\*</sup>のため血球減少や死に至る病を得た者もいた。化学的性質は Ba に似ているが揮発性はより高く、酸素や水と反応し易い。Ba や Ra の分離には、現在ではイオン交換法が利用される。

**アクチノイド actinides** 原子番号<sup>\*</sup>  $89(\text{Ac})$  から  $103(\text{Lr})$  までの 15 元素<sup>\*</sup>の総称。  $_{89}\text{Ac}$ ,

<sup>90</sup>Th, <sup>91</sup>Pa, <sup>92</sup>U, <sup>93</sup>Np および <sup>94</sup>Pu は単独 (Th, U) ないしそれらの壊変\* (Ac, Pa) または核反応生成物 (Np, Pu) として天然に存在。95 番の Am 以降は人工元素。アクチノイドはランタノイドとともに f 軌道に電子\* をもつ。f-ブロックの概念は 1944 年 G. T. Seaborg の超ウラン元素と希土類元素との類似点を基にしたアクチノイド仮説に始まる。当時 Pu までしか知られていなかったが、この年の暮れに <sup>95</sup>Am が、1947 年に <sup>96</sup>Cm が、1950 年に <sup>97</sup>Bk と <sup>98</sup>Cf が発見された。1954 年以降 1961 年まで続く <sup>99</sup>Es, <sup>100</sup>Fm, <sup>101</sup>Md, <sup>102</sup>No および <sup>103</sup>Lr (いずれも偉大な科学者 A. Einstein, E. Fermi, D. I. Medeleev, E. O. Lawrence に因み命名) の発見でアクチノイドが完結した。Ac ~ Am の酸化状態は La ~ Eu と較べて多様である。化学的には Ac は La 類似であるが、Th, Pa および U はそれぞれ IV, V, VI 価が安定で 5d 元素の Hf, Ta および W に近く、Cm 以降は Gd 以降と類似する。4f, 5d 軌道に比し 5f, 6d 軌道が接近しているためである。アクチノイドのイオン半径は原子番号と共に減少し、ランタノイドと同様に“収縮”が見られる。

**アクチニウム actinium (Ac)** A. L. Debierne がピッチブレンド\* から U, Ra および Po を除去した残渣中に Th に似た高放射性新元素を発見し (1899), 化合物が暗所で光ることから akits あるいは actions (光線の意) から命名した。アクチニウム系列\* の <sup>227</sup>Ac もトリウム系列\* の <sup>228</sup>Ac も β-放射体であり当時は測定が困難で、娘核種\* RdAc(<sup>227</sup>Th), RdTh(<sup>228</sup>Th) 以下の系列核種の生長による放射能\* (α) の検出によった。同位体\* は、これら天然 2 核種の他に人工合成された <sup>207</sup>Ac ~ <sup>234</sup>Ac がある。金属は銀白色で水と反応すると水素ガスを発生し、Ac<sub>2</sub>O<sub>3</sub> となる。3 価の Ac 溶液は無色で、化合物はすべて白色。La と化学的挙動が似ているため、市販の La 化合物には Ac とその系列核種が含まれている。最長寿命核種は <sup>227</sup>Ac (*t*<sub>1/2</sub> = 21.77 y)。

**トリウム thorium (Th)** スウェーデンの J. J. Berzelius はガドリウム石類似の鉱物中に新元素を発見した (1829)。名称は古代スカンジナビア神話の雷神 Thor に因む。ドイツの G. S. Schmidt とフランスの M. S. Curie は独立に、トリウムに放射能\* があることを発見した (1898)。トリウム系列\* 壊変の大要が 1913 年までにほぼ確立した。同位体\* として <sup>209</sup>Th ~ <sup>238</sup>Th があり、<sup>209</sup>Th ~ <sup>230</sup>Th の殆どが α 放射体である。最長寿命核種は <sup>232</sup>Th (*t*<sub>1/2</sub> = 1.40 × 10<sup>10</sup> y)。ウラン系列\* に含まれる <sup>230</sup>Th は年代測定\* に用いられる。金属は銀白色で空气中で酸化被膜を形成。酸化数は +2, +3, +4 価が知られており、前 2 者は不安定。地殻中にはトール石、ウラントール石 (Th, U)SiO<sub>4</sub> あるいは方トリウム石 ThO<sub>2</sub> の形で平均 12ppm (U の 4 倍以上) 存在する。モナズ石\* (12% ThO<sub>2</sub>) などには商業採算量が含まれ、全世界で年間約 3 万トンの生産がある。古くから Th 化合物は多方面で利用され、中でもガス燈のマントルには大量に用いられ、20 世紀初めには練り歯磨きとして市場に出た。酸化トリウム ThO<sub>2</sub> は高融点 (3390℃) であるため、耐火材やアーク溶接の電極に、また石油精製や硝酸合成の触媒、熱電子\* 放射材、光電素子などに利用されている。

**プロトアクチニウム protactinium (Pa)** O. Hahn と L. Meitner は、瀝青ウラン鉱の熱濃硝酸処理で生じる不溶性残渣中に Ta に似た新元素を発見し、protactinium (アクチニウムの元の意) と命名した (1917)。Hahn らはさらに、天然に存在する核異性体\* である <sup>234m</sup>Pa と <sup>234</sup>Pa の対を発見した。Hahn の協力者 A. V. Grosse は、リン酸ジルコニウム共沈法を

使って 2 mg の白色  $\text{Pa}_2\text{O}_5$  の調製に成功し (1927),  $\text{Pa}_2\text{O}_5$  を還元して原子量を決定した (1934). このようにして天然放射性壊変系列の中に 3 種の Pa 核種が見出されたが, 現在では  $^{212}\text{Pa} \sim ^{238}\text{Pa}$  が知られ, 最長寿命核種は  $^{231}\text{Pa}$  ( $t_{1/2} = 3.28 \times 10^4 \text{ y}$ ) である. Pa の荷電子は ( $5f^2 6d^1 7s^2$ ) で 5f と 6d のレベルが近接しており, Ta と化学的性質が類似する. 金属の融点は  $1840^\circ\text{C}$ , 沸点は  $4000^\circ\text{C}$  であり, Ta に比べて低い. 酸素, 水あるいは酸に侵されるが耐アルカリ性である.

**ウラン uranium (U)** ドイツの M. H. Klaproth がピッチブレンド\* から分離し, 天王星 (Uranus) に因んで命名した (1789). その後, フランスの E. M. Peligot が金属の調製に成功した (1841). 19 世紀には陶磁器やガラスの着色に用いられた. A. H. Becquerel によって放射性であることが発見された (1896). 同位体\* として  $^{220}\text{U} \sim ^{221}\text{U}$  と,  $^{241}\text{U}$  を除く  $^{217}\text{U} \sim ^{242}\text{U}$  があり, 最長寿命核種は  $^{238}\text{U}$  ( $t_{1/2} = 4.468 \times 10^9 \text{ y}$ ) で, 天然には  $^{238}\text{U}$  (99.274%),  $^{235}\text{U}$  (0.7200%) および  $^{234}\text{U}$  (0.0055%) が存在する.  $^{238}\text{U}$  はウラン系列\* を形成する.  $^{235}\text{U}$  はアクチニウム系列\* に含まれる. ウランは地殻中に 2.4 ppm, 海水中で 3.3  $\mu\text{g/L}$  程度含まれる. 主な鉱物は閃ウラン鉱, カルノー石, リン灰ウラン鉱など. ウランの酸化数は +2 ~ +6 価であるが, +4 価と +6 価が安定で, ハロゲン化合物は揮発性である. B. B. Boltwood は, 古い層位の鉱物ほど鉛/ウラン比が高いことを見出し, 同一鉱物中の U, Th および Pb の量から鉱物の生成年代が決定できる事を指摘した (1905). A. O. Nier は鉛鉱物の同位体組成が一定でないことを見出し (1939), これを基に  $^{238}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}$  対や  $^{235}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}$  対による年代測定\* 法が発展した. P. B. Price らは  $^{238}\text{U}$  の自発核分裂\* による核分裂片飛跡測定による年代測定法を開発した (1964).  $^{235,238}\text{U}$  に基づく年代測定は, 地球の年令, 地殻の岩石・鉱物や隕石, 月の石などの年令だけでなく, 元素\* の星内合成過程や太陽系の歴史, 地球, 月, 隕石などの起源や進化の解明に有効である.  $^{238}\text{U}$  および  $^{235}\text{U}$  の半減期\* として A. H. Jaffey らによる値 (1971) が国際地質学連合地球年代学委員会 (1976) で推奨されているが, 再評価が議論されている.

**ネプツニウム neptunium (Np)** 米国の E. M. McMillan は中性子照射した酸化ウラン薄層から反跳\* で飛び出す核分裂生成物\* の反跳エネルギーを測定する実験において, ウラン試料中に  $\beta^-$  放出核種である  $^{239}\text{U}$  とその娘核種\*  $^{239}\text{[93]}$  を発見した (1939). 次いで, P. H. Abelson と共にその化学的性質と壊変系列\* を調べて 93 番元素の発見を確信し, これを海王星 (Neptune) に因んで neptunium と名付けた (1940). ロシアの K. Starke は酢酸ウランニルベンゾイルの中性子照射で  $^{239}\text{U}$  を集め (シラード・チャルマース反応), 娘核種  $^{239}\text{Np}$  の生成を確認した. Hahn らも大量の照射ウランから  $^{239}\text{Np}$  を化学分離し生成を確認した.  $^{226}\text{Np} \sim ^{42}\text{Np}$  の同位体\* があり, 最長寿命核種は  $^{237}\text{Np}$  ( $t_{1/2} = 2.14 \times 10^6 \text{ y}$ ) である. 原子炉\* で大量につくられる. 天然には僅かではあるが, 消滅核種としてウラン鉱物中に存在する.  $^{237}\text{Np}$  はネプツニウム系列\* に含まれる. 金属は銀白色で  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  の三態が知られる. 常温では金属の表面は空気酸化され易く, 酸化性の試薬に溶解する. 酸化数は +2 ~ +7 価が知られているが +2 および +7 は不安定である.

**プルトニウム plutonium (Pu)** 原子番号\* 94 の人工放射性元素. 米国の G. T. Seaborg らは  $^{238}\text{U}(\text{d}, 2\text{n})^{238}\text{Np}$  反応で生成する  $^{238}\text{Np}$  の  $\beta^-$  壊変生成物として  $^{238}\text{[94]}$  を発見し (1940),

冥王星 (Pluto) に因んで plutonium と命名した。これより先、Seaborg らはカナダ産ピッチブレンド中に天然の Pu を発見し (1942),  $^{238}\text{U}$  の自発核分裂で発生する中性子と  $^{238}\text{U}$  との反応で生成するとして。同位体は  $^{228}\text{Pu} \sim ^{247}\text{Pu}$ 。最長寿命核種は  $^{244}\text{Pu}$  ( $t_{1/2} = 8.08 \times 10^7 \text{ y}$ ) であり、熱核爆発の破片中に  $^{246}\text{Pu}$  とともに発見された (1952)。黒田和夫は隕石中の Xe 同位体組成への  $^{244}\text{Pu}$  の自発核分裂の寄与を予言し (1960)、実際にパサモンテ隕石中に痕跡を発見した (1964)。これを基に、太陽系形成時に  $^{244}\text{Pu}$  が存在したことを示す。超新星爆発時に生成した  $^{244}\text{Pu}$  を基に太陽系構成元素の年齢が決定できることを示した。酸化数は +2 ~ +7 が知られているが、水溶液中では +3 ~ +6 でそれぞれ特徴的な呈色 (青 → 黄・赤褐 → 淡紫 → ピンク・橙赤) を示す。金属は銀白色で反応性が高く、空气中で酸化され発火する。Pu は核燃料としてだけでなく、 $^{238}\text{Pu}$  は原子力電池として人工衛星用電源や心臓ペースメーカー電源として用いられる。Pu は化学的にも毒性が高く取り扱いには特別の防護が必要である。大規模核実験 (1945-63) によって大量の Pu が環境に放出された。また、インド洋上で大気圏に再突入し破壊した SNAP 搭載衛星からの  $^{238}\text{Pu}$  が南太平洋に拡散した (1964)。1970 年代以降には、英国のセラフィールドとフランスのラ・アーグの再処理工場からの放出や、米国スリーマイル島 (1979) と旧ソ連チェルノブイル (1986) の原発事故による環境への放出があった。Pu は陸上では土壤に吸着し、海洋では浮遊塵などに吸着するが海底堆積物への沈降も早い。

**アメリカシウム americium (Am)** 原子番号 95 の人工放射性元素。米国の G. T. Seaborg らは、多重中性子捕獲反応  $^{239}\text{Pu}(n, \gamma)^{240}\text{Pu}(n, \gamma)^{241}\text{Pu}$  で生じる  $^{241}\text{Pu}$  の  $\beta^-$  壊変の娘核種として  $^{241}\text{Am}$  を発見し (1945)、アメリカ大陸に因んで命名した。同位体  $^{232}\text{Am} \sim ^{247}\text{Am}$  があり、最長寿命の  $^{243}\text{Am}$  ( $t_{1/2} = 7.38 \times 10^3 \text{ y}$ ) は原子炉内で  $^{241}\text{Am}$  および  $^{239}\text{Pu}$  の中性子捕獲反応で生成する。物理や化学の実験には  $^{241}\text{Am}$  が用いられる。金属は銀白色で融点は  $1170^\circ\text{C}$ 、沸点は  $\geq 2000^\circ\text{C}$  である。+2 から +6 価の酸化状態をとるが、+3 価が特に安定。 $^{241}\text{Am}$  は  $\alpha$  線源として厚み計、煙探知機、蛍光 X 線源に、また  $^{241}\text{Am}-\text{Be}$  混合物は中性子源として利用される。

**キュリウム curium (Cm)** 原子番号 96 の人工放射性元素。米国の G. T. Seaborg らは、 $^{239}\text{Pu}(\alpha, n)^{242}\text{Cm}$  反応による 96 番元素を発見し (1944)、Curie 夫妻に因んで命名した。同位体として  $^{238}\text{Cm} \sim ^{251}\text{Cm}$  があり、最長寿命核種は  $^{247}\text{Cm}$  ( $t_{1/2} = 1.56 \times 10^7 \text{ y}$ )。物理や化学の実験には  $^{241}\text{Am}$  の原子炉中性子照射で生じる  $^{242}\text{Cm}$  が用いられたが、最近では  $^{239}\text{Pu}$  の多重中性子捕獲反応で生成する  $^{244}\text{Cm}$  が用いられる。金属の性質は Am と類似しており、酸化状態は +2 ~ +4 価をとるが +3 価が安定である。 $^{242}\text{Cm}$  は  $^{244, 245}\text{Cm}$  とともに月探査ロケットに搭載され、 $\alpha$  線源として月岩石の分析に利用された。発熱を利用してペースメーカーや航海用パイの電源などにも用いられた。

**バークリウム berkelium (Bk)** 原子番号 97 の人工放射性元素。米国の A. Ghiorso らは、 $^{241}\text{Am}(\alpha, 2n)^{243}\text{Bk}$  反応で生じる Bk を発見し (1949)、バークレー (大学の所在地) に因んで命名した。同位体として  $^{238}\text{Bk} \sim ^{251}\text{Bk}$  があり、最長寿命は  $^{247}\text{Bk}$  ( $t_{1/2} = 1.4 \times 10^3 \text{ y}$ )。物理や化学の実験では  $^{239}\text{Pu}$  の多重中性子捕獲と  $\beta^-$  壊変で生成する  $^{249}\text{Bk}$  が用いられる。金属は銀色で空気酸化を受け易い。+2 ~ +4 の酸化状態をとることができるが、水溶液

中では +3 価が安定で黄緑色を呈する。+4 も比較的安定だが、+2 価は BkO の化学形でのみ存在する。陽イオン交換樹脂法、溶媒抽出法などが分離に用いられる。

**カリホルニウム californium (Cf)** 原子番号\*98 の人工放射性元素。米国の S. G. Thompson らは、 $^{242}\text{Cm}(\alpha, n)^{245}\text{Cf}$  反応で生成する 98 番元素を発見し (1950)、カリフォルニアに因んで命名した。同位体\*として  $^{237}\text{Cf} \sim ^{256}\text{Cf}$  があり、最長寿命核種は  $^{251}\text{Cf}$  ( $t_{1/2} = 9.0 \times 10^2 \text{ y}$ )。これらの同位体は重イオン核反応\*で生成するが、質量数\*250 以上の同位体は原子炉内での  $^{239}\text{Pu}$  の多重中性子捕獲\*で生成する。ミリグラム量の  $^{252}\text{Cf}$  が容易に合成でき、自発核分裂\*によって発生する中性子\*を利用する可搬中性子源として有効である。石油井戸のボーリングコア分析、金鉱探索の放射化分析\*や悪性腫瘍の治療などに利用されている。物理や化学の実験には  $^{249}\text{Bk}$  の  $\beta^-$  壊変の娘核種\*である  $^{249}\text{Cf}$  が用いられる。金属は銀色で空気中の酸素および水分によって酸化され易い。水溶液中では +2 ~ +4 の酸化状態を取りうるが +3 価が安定である。

**アインシュタインウム einsteinium (Es)** 原子番号\*99 の人工放射性元素。水爆実験 "Mike" (1952 年 11 月 1 日) で生じた放射性塵中に、米国のチームが 100 番元素 Fm とともに発見し (1954)、A. Einstein に因んで命名した。ウランや超ウラン元素の原子核\*に、加速器\*で加速した  $\alpha$  粒子\*や重陽子\* (d)、あるいは原子炉中性子を照射して合成する。同位体\*として  $^{241}\text{Es} \sim ^{257}\text{Es}$  があり、 $^{253}\text{Es}$  と  $^{254}\text{Es}$  はミリグラム量を得ることができる。金属は銀色で空気酸化を受け易い。水溶液中では +3 価 (緑色) が安定であるが、強い還元条件下では +2 価も存在する。

**フェルミウム fermium (Fm)** 原子番号\*100 番の人工放射性元素。水爆実験 "Mike" (1952 年 11 月 1 日) で生じた放射性塵中に、米国のチームが 99 番元素 Es とともに発見し (1954)、E. Fermi に因んで命名した。次いで、スウェーデンのノーベル物理学研究所で  $^{238}\text{U}(^{18}\text{O}, 3n)^{253}\text{Fm}$  反応で合成に成功した (1953-4)。同位体\*として  $^{242}\text{Fm} \sim ^{260}\text{Fm}$  があり、最長寿命は  $^{257}\text{Fm}$  ( $t_{1/2} = 101 \text{ d}$ )。中性子捕獲反応\*で  $^{258}\text{Fm}$  までの核種\*が生成し、これより重い核種はサイクロトロンを用いる核反応\*による。化学的性質の研究は進んでいないが、+3 価が安定。強い還元条件下では +2 価も存在する。

**メンデレビウム mendeleevium (Md)** 原子番号\*101 番の人工放射性元素。米国の G. T. Seaborg らは、 $^{253}\text{Es}(\alpha, n)^{256}\text{Md}$  反応で 1 回 ( $10^4 \text{ s}$ ) の照射あたり 1 個の 101 番元素が生成することを発見した (1955)。その後、3 回の照射実験で 5 個の 101 番元素の自発核分裂\*事象を観測し (1955)、D. I. Mendeleev に因んで命名した。後に Es を増量して合成した数千個の Md 原子を用いた実験で、新元素の化学的挙動が典型的な +3 価アクチノイドイオンのそれと同様であることを示した。強い還元条件下では +2 と +1 の存在も確認されている。 $^{245}\text{Md} \sim ^{260}\text{Md}$  の同位体\*が既知で、最長寿命は  $^{258}\text{Md}$  ( $t_{1/2} = 55 \text{ d}$ ) で  $^{255}\text{Es}(\alpha, n)$  反応で合成される。

**ノーベリウム nobelium (No)** 原子番号\*102 の人工放射性元素。米国、英国、スウェーデンの合同チームは  $^{244}\text{Cm} + ^{13}\text{C}$  反応を調べ、半減期\*約 10 分の 8.5 MeV $\alpha$  放射体である



$^{253}[102]$  および  $^{251}[102]$  を発見し (1957), A. Nobel に因む名称 nobelium を提案した。一方米国の A. Ghiorso らおよび旧ソ連の G. N. Flerov らは同反応を追試確認ができないと報告した。次いで, Ghiorso らは  $^{244}\text{Cm} + ^{12}\text{C}$  反応により  $^{252}[102]$  の合成に成功した (1958)。旧ソ連の D. Donets らは  $^{256}\text{No}$  を同定した (1964)。G. T. Seaborg によると, 発見者は米ソの両グループであるとされたが, 関係グループの合意により nobelium の名称が残った。同位体\*として  $^{250}\text{No} \sim ^{260}\text{No}$  があり, 最長寿命核種は  $^{259}\text{No}$  ( $t_{1/2} = 58 \text{ min}$ )。酸化数は +2 と +3 価をとるが, +2 価がより安定である。最近米国で,  $\text{Pb} + \text{Ca}$  反応で  $^{254}\text{No}$  を 1 原子合成し, 同原子核がつぶれた球形の高スピン状態にあると報告した (1998)。

**ローレンシウム lawrencium (Lr)** 原子番号\* 103 の人工放射性元素。米国の A. Ghiorso らは, Cf 同位体\* (質量数\* が 249, 250, 251 および 252) の混合物を  $^{10}\text{B}$ ,  $^{11}\text{B}$  ビームで照射し,  $\alpha$  線\* を放出する新核種を発見した。これが  $^{257}\text{Lr}$  (後に  $^{258}\text{Lr}$  と修正) であると報告した (1961)。旧ソ連の D. Donets らは  $^{243}\text{Am} + ^{18}\text{O}$  反応で生成する  $^{256}\text{Lr}$  を発見した (1965)。E. O. Lawrence に因んで命名された。同位体\*として  $^{252}\text{Lr} \sim ^{262}\text{Lr}$  が知られ, 最長寿命核種は  $^{262}\text{Lr}$  ( $t_{1/2} = 3.6 \text{ h}$ ) である。Ghiorso は比較的長寿命の  $^{256}\text{Lr}$  を用いて +3 価の酸化状態が安定であることを確認した (1970)。

**超アクチニド (元素) transactinides または超重元素 superheavy elements (SHE)** 原子番号\* 104 番の Rf からはじまる第 7 周期 4 族以上の元素\* の総称。2005 年 12 月現在, 原子番号 104 ~ 116 までの元素が合成されている。原子番号 112 ~ 116 の 5 元素については発見の報告はあるが, 命名されていない。米, 独, 日, 仏, スイス他で新元素合成の研究が進められている。研究拠点として, 米国の LBNL 重イオン線形加速器 HILAC (1951-), Super HILAC および 88" サイクロトロン (-1992), ロシアのドブナ合同原子核研究所 (JINR) の U-300 (1960-), U-400 (1981-) およびサイクロトロン, スイスのポールシェラー研究所 (PSI) の Philips サイクロトロン, ドイツの重イオン研究所 (GSI) の線形加速器 UNILAC (-1976), フランスの GANIL, わが国の JAEA タンデム加速器\* および理研の重イオン線形加速器\* RILAC などがある。超アクチノイド元素の気相化学や溶液化学の研究が進んでおり, いずれも 1 個原子の壊変\* に基づく単一原子化学\* "atom-at-a-time chemistry" の特殊な学問領域を形成している。

**ラザホージウム rutherfordium (Rf)** 原子番号\* 104 の人工放射性元素。旧ソ連の G. N. Flerov らは,  $^{244}\text{Pu}(^{22}\text{Ne}, 5n)^{259}[104]$  反応で [104] を合成し, I. Kurchatov に因んで kurchatovium (Ku) と命名した (1964)。一方, 米国の A. Ghiorso らは  $^{249}\text{Cf}(^{12}\text{C}, 4n)^{257}[104]$  および  $^{249}\text{Cf}(^{13}\text{C}, 3n)^{259}[104]$  反応で [104] を  $10^3$  個合成し, これを E. Rutherford に因んで rutherfordium と命名した (1969)。最終的には, 後者が IUPAC によって認められた (1997)。超アクチノイドの最初の元素\*, すなわち新たに 6d 遷移が始まる元素として Zr や Hf と同じ 4 族に属し, 互いの化学的類似性も証明されている。同位体\*として  $^{253}\text{Rf} \sim ^{262}\text{Rf}$  があり, 最長寿命核種  $^{261}\text{Rf}$  ( $t_{1/2} = 78 \text{ s}$ ) は  $^{248}\text{Cm}(^{18}\text{O}, 5n)$  反応で合成される。

**ドブニウム dubnium (Db)** 原子番号\* 105 の人工放射性元素。旧ソ連の G. N. Flerov らは,  $^{243}\text{Am}(^{22}\text{Ne}, 5-6n)^{260,261}[105]$  反応で [105] を発見したと報告し (1967), N. H. D. Bohr に因

む名称 nielsbohrium (Ns) を提案した。一方、米国の A. Ghiorso らは、 $^{249}\text{Cf}(^{15}\text{N}, 4n)^{260}$  [105] 反応で [105] を合成し (1970), O. Hahn に因んで hahnium (Ha) を提案した。その後、IUPAC はロシアの発見場所に因んで dubnium と決定した (1997)。同位体\*として  $^{255}\text{Db}$ ,  $^{256}\text{Db}$ ,  $^{257\text{m.g}}\text{Db}$ ,  $^{258}\text{Db} \sim ^{263}\text{Db}$  および  $^{267}\text{Db}$  が発見されている。 $^{243}\text{Am}(^{22}\text{Ne}, 4n)^{261}\text{Db}$  あるいは  $^{249}\text{Bk}(^{18}\text{O}, 5n)^{262}\text{Db}$  反応で生成する Db を用いて気相化学, 溶液化学の研究が進められている。

**シーボーギウム seaborgium (Sg)** 原子番号\*106 の人工放射性元素。旧ソ連の G. N. Flerov らは、 $^{207, 208}\text{Pb}(^{54}\text{Cr}, 1-2n)^{259, 260, 261}$  [106] 反応で  $^{259, 260}$  [106] が生成すると報告した (1974)。一方、米国の A. Ghiorso らは  $^{18}\text{O}$  ビームで  $^{249}\text{Cf}$  を照射し、 $^{263}$  [106] が生成すると報告した (1974)。次いでドイツの G. Münzenberg らは  $^{260}$  [106] が 50% SF, 50%  $\alpha$  の分岐壊変\* をすること (1984), 旧ソ連のグループは  $^{260}$  [106] の娘核種\* である  $^{256}$  [104] の自発核分裂\* を観測したこと (1994) を報告した。さらに米国では 1 時間あたり 1 原子の [106] が生成することが、また旧ソ連では  $^{248}\text{Cm}(^{22}\text{Ne}, 4-5n)^{265, 266}$  [106] 反応が確認された。Giorso らが G. T. Seaborg に因む名称を提案し (1994), IUPAC がこれを採用した (1997)。同位体\* として  $^{258}\text{Sg} \sim ^{263}\text{Sg}$ ,  $^{265}\text{Sg}$ ,  $^{266}\text{Sg}$  が知られており、最長寿命核種は  $^{263}\text{Sg}$ 。米, 独, スイス国際チームは Sg の揮発性は周期表\* 中でもっとも低いことを示し、ドイツチームは Sg が 6 族に典型的な溶液化学的挙動を示すことを明らかにした (1995-1996)。

**ボーリウム bohrium (Bh)** 原子番号\*107 の人工放射性元素。ドイツの S. Hofmann らは、冷たい核融合\* 反応による原子番号 107 ~ 109 の新元素合成に成功し (1981-1984), 既知の子孫核種を含む壊変系列\*  $^{209}\text{Bi}(^{54}\text{Cr}, n)^{262}\text{Bh} \rightarrow ^{258}\text{Db} \rightarrow ^{250}\text{Md} \rightarrow ^{246}\text{Es} \rightarrow$  を 5 回観測した (1982)。次いで  $^{209}\text{Bi}(^{54}\text{Cr}, 2n)^{261}\text{Bh}$  の  $\alpha$  壊変系列を 9 回観測した (1985, 1987)。これより前に、旧ソ連の Y. Oganessian らは同反応系で  $^{261}$  [107] とその娘核種\*  $^{257}$  [105] の自発核分裂\* を報告した (1976) が、十分な説得力はなかった。 $^{262}\text{Bh}$  については、壊変系列が 29 例観測された。 $^{262}\text{Bh}$  は  $^{266}\text{Mt}$  発見時にその娘核種として (1982, 1997), また  $^{264}\text{Bh}$  は  $^{272}\text{Rg}$  発見時に孫娘核種として発見された (1994, 2000)。IUPAC が N. Borh に因んで命名した (1997)。後に  $^{266}\text{Bh}$  と  $^{267}\text{Bh}$  がドイツ, スイス, 米国合同チームによる熱い融合反応  $^{249}\text{Bk}(^{22}\text{Ne}, 4-5n)$  で合成され (1999), 気相化学分離で Bh が 7 族元素であることが確認された。化学実験には ( $^{249}\text{Bk} + ^{22}\text{Ne}$ ) 反応による  $^{266, 267}\text{Bh}$  と ( $^{254}\text{Es} + ^{16}\text{O}$ ) 反応による  $^{265, 266}\text{Bh}$  が用いられる。ロシアの I. Zvara らやドイツの M. Schädel らにより気相化学の研究が、米国のグループにより溶液化学の研究が続けられている。

**ハッシウム hassium (Hs)** 原子番号\*108 の人工放射性元素。ドイツの G. Münzenberg らは  $^{208}\text{Pb}(^{58}\text{Fe}, n)^{265}\text{Hs}$  反応の 3 事象を観測し (1984), さらに  $^{207}\text{Pb}(^{58}\text{Fe}, n)^{264}\text{Hs}$  反応の  $\alpha$  壊変系列 1 事象を発見し (1986)。名称はドイツのヘッセン州の中世の地名 "Hassia" に因んで提案され、IUPAC-IUPAP が承認した (1997)。森田浩介らは  $^{208}\text{Pb}(^{58}\text{Fe}, n)^{265}\text{Hs}$  反応を 3 日間で 10 事象を観測した (2002)。質量数\* 264, 265, 266, 267, 269, 270 および 275 の同位体\* が発見されている。 $^{267}\text{Hs}$  と  $^{269}\text{Hs}$  は、それぞれ  $^{271}\text{Ds}$  と  $^{277}$  [112] の娘核種\* および孫核種としてドイツ-ロシア合同チームによって発見された (1994)。これとは別に、ロシアのグループは  $^{238}\text{U}(^{34}\text{S}, 5n)$  反応で  $^{267}\text{Hs}$  を確認した (1994)。ドイツの A. Tüler らは

$^{248}\text{Cm}$  ( $^{26}\text{Mg}$ , 4n) 反応で  $^{270}\text{Hs}$  を合成した (2001). ドイツ, スイス, 米国, ロシア, 中国の合同チームは  $^{248}\text{Cm}$  ( $^{26}\text{Mg}$ , 4-5n) 反応で 7 原子の  $^{270, 269}\text{Hs}$  を合成し,  $\text{HsO}_4$  が  $\text{OsO}_4$  と似た揮発性を示すことを見出し, Os と同じ 8 族元素であるとした (2001).

**マイトネリウム meitnerium (Mt)** 原子番号\*109の人工放射性元素. ドイツの G. Münzenberg らは,  $^{209}\text{Bi}$  ( $^{58}\text{Fe}$ , n)  $^{266}$  [109]  $\rightarrow$  ( $\alpha$ )  $\rightarrow$   $^{262}\text{Bh}$  ( $\alpha$ )  $\rightarrow$   $^{258}\text{Db}$  ( $\alpha$ )  $\rightarrow$   $^{254}\text{Lr}$  (EC)  $\rightarrow$   $^{254}\text{No}$  の  $\alpha$  壊変系列を 1 回観測し (1982), 次いで 2 つの  $\alpha$  壊変系列を同定した (1988). 名称は L. Meitner に因んで提案され, IUPAC-IUPAP が承認した (1997). その後 12 回の  $\alpha$  壊変系列が確認され, 半減期\*と生成励起関数が得られた (1997).  $^{272}$  [111] の  $\alpha$  系列中により長寿命の新しい核種\*  $^{268}\text{Mt}$  が 6 回観測された (1994, 2000). 質量数\* 266, 268, 270 および 275 の同位体\* が報告されている.  $^{270}\text{Mt}$  は  $^{278}$  [113] の,  $^{275}\text{Mt}$  は  $^{283}$  [113] の壊変系列\* 中に検出された. いずれも半減期が短く, 化学実験は困難である.

**ダームスタチウム darmstadtium (Ds)** 原子番号\*110の人工放射性元素. ドイツの S. Hofmann らは, 冷い核融合\* 反応  $^{208}\text{Pb}$  ( $^{62}\text{Ni}$ , n)  $^{269}$  [110]  $\rightarrow$   $^{265}\text{Hs}$   $\rightarrow$   $^{261}\text{Sg}$   $\rightarrow$   $^{257}\text{Rf}$   $\rightarrow$   $^{253}\text{No}$  . . . のうち  $^{261}\text{Sg}$  までの生成を観測した (1994). 引き続き同じ  $\alpha$  壊変系列を 3 回観測し, そのうちの 2 回は  $^{249}\text{Fm}$  まで追跡することに成功し, 発見を確かなものとした. さらに  $^{208}\text{Pb}$  ( $^{64}\text{Ni}$ , n)  $^{271}$  [110] の  $\alpha$  壊変系列を 6 回, 次いで 1 回観測し, 2 つ目の同位体\* を発見した. 一方, 米国の A. Ghiorso らは  $^{209}\text{Bi}$  ( $^{59}\text{Co}$ , n)  $^{267}$  [110] 反応を, ロシアの Y. A. Lazarev らは熱い核融合反応  $^{244}\text{Pu}$  ( $^{34}\text{S}$ , 5n)  $^{273}$  [110] をほぼ同時期に報告した (1994-1996). 名称はドイツの Darmstadt (GSI がある町) に因んで提案され, IUPAC-IUPAP が承認した (2003). 森田浩介らは,  $^{208}\text{Pb}$  ( $^{64}\text{Ni}$ , n)  $^{271}\text{Ds}$  の 14 例を観測して核異性体\* の存在を確認した (2003).  $^{270}\text{Ds}$  は Hofmann らにより  $^{207}\text{Pb}$  ( $^{64}\text{Ni}$ , n) 反応で合成され (2001),  $\alpha$  壊変系列中に新核種  $^{266}\text{Hs}$ ,  $^{262}\text{Sg}$  が見ついている. 質量数\* が 267, 269, 270, 271, 273, 279, 281 および 282 の同位体が報告されている. これらは短寿命, 低断面積であり, 化学的性質の研究結果はない.

**レントゲニウム roentgenium (Rg)** 原子番号\*111の人工放射性元素. ドイツの S. Hofmann らは,  $^{209}\text{Bi}$  ( $^{64}\text{Ni}$ , n)  $^{272}$  [111] の  $\alpha$  壊変系列を 3 例 (うち 1 例は既知核  $^{256}\text{Lr}$  まで) を観測し (1994), さらに 3 例を追加した (2000). 名称は W. C. Röntgen に因んで提案され, IUPAC-IUPAP が認めた (2003). 森田浩介らは 14 原子の  $^{272}\text{Rg}$  を合成し半減期\* や壊変エネルギー\* を測定するとともに,  $\alpha$  壊変系列中の  $^{264}\text{Bh}$  が自発核分裂\* または EC 壊変\* の分岐をもつことを発見した (2004). 現在発見されている同位体\* は,  $^{272}\text{Rg}$  の他, 森田らが 2004 年に発見した  $^{278}$  [113] の娘核種\*  $^{274}\text{Rg}$ , ロシアのグループが発見した  $^{287, 286}$  [115] の娘核種  $^{279}\text{Rg}$  および  $^{280}\text{Rg}$  である.

**ウンウンビウム ununbium (Uub)** 原子番号\*112の人工放射性元素. 元素名はまだない. ドイツの S. Hofmann らは 24 日間にわたる  $3.4 \times 10^{18}$  個の  $^{70}\text{Zn}$  の照射で, 速度フィルター SHIP により  $^{208}\text{Pb}$  ( $^{70}\text{Zn}$ , n)  $^{277}$  [112]  $\rightarrow$   $^{273}\text{Rg}$   $\rightarrow$   $^{269}\text{Hs}$   $\rightarrow$   $^{265}\text{Sg}$   $\rightarrow$   $^{261}\text{Rf}$   $\rightarrow$   $^{257}\text{No}$   $\rightarrow$   $^{253}\text{Fm}$  の  $\alpha$  壊変系列を 1 回観測した (1996). 森田浩介らは, 理研重イオン線形加速器\* RILAC で  $4.4 \times 10^{18}$  個の  $^{70}\text{Zn}$  (349.5 MeV) ビームで 2 つの  $^{277}$  [112] の  $\alpha$  壊変系列を確認し, S. Hofmann

らの結果を追認した (2004). S. Hofmann ら (2004 年 11 月) によると, 質量数<sup>\*</sup>  $^{277}$  [112],  $^{283}$  [112],  $^{284}$  [112],  $^{285}$  [112] および  $^{286}$  [112] の半減期<sup>\*</sup> はそれぞれ 0.7 ms, 4.0 s, 101 ms, 34 s および 11 min とされている.

**ウンウントリウム ununtrium (Uut)** 原子番号<sup>\*</sup> 113 の人工放射性元素. 元素名はまだない. 森田浩介らの日中共同研究グループは, 理研の重イオン線形加速器<sup>\*</sup> RILAC で気体充填型反跳分離器 GARIS を用い,  $^{209}\text{Bi}(^{70}\text{Zn}, n)^{278}$  [113]  $\rightarrow$   $^{274}\text{Rg}$   $\rightarrow$   $^{270}\text{Mt}$   $\rightarrow$   $^{266}\text{Bh}$   $\rightarrow$   $^{262}\text{Db}$  の壊変系列<sup>\*</sup> を 1 事象発見した (2004).  $^{266}\text{Bh}$  以下は既知核で, 先立つ 3 核種が新発見となる. 核反応断面積<sup>\*</sup> は  $(55^{+154}_{-47})$  fb で, 最低 (最高感度) の世界記録である. 2005 年に実施した再実験でさらに 1 事象の  $\alpha$  壊変系列を確認し, 新元素承認の条件を満たしつつある. ロシアの Y. T. Oganessian らが  $^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca}, 3-4n)^{288, 287}$  [115] のそれぞれ 3 事象と 1 事象を見出し,  $\alpha$  壊変系列で娘核  $^{284, 283}$  [113] を経由したと報告した (2004) が, いずれの系列にも既知核種がないので実証条件を満たしていない.

**ウンウンクアジウム ununquadium (Uuq)** 原子番号<sup>\*</sup> 114 の人工放射性元素. 元素名はまだない. ロシアの Y. T. Oganessian らは, U400 サイクロトロンと反跳分離器 VASSILISA を用いて  $^{242}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 3n)^{287}$  [114] の 4 事象を報告した (1999). 一方, 米国のグループと協同で U400 に付設の気体充填反跳分離器 DGFRS を用いて  $^{244}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 3n)^{289}$  [114] の  $\alpha$  壊変系列 1 事象を (1998), 次いで 2 事象を (1999) 観測し, 後者は  $^{244}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 4n)^{288}$  [114] によるとしたがまだ確認には至らない.

**ウンウンペンチウム ununpentium (Uup)** 原子番号<sup>\*</sup> 115 の人工放射性元素. 元素名はまだない. ロシアの Y. T. Oganessian らは U400 サイクロトロンで加速した  $^{48}\text{Ca}$  イオンを  $^{243}\text{Am}$  標的に照射し,  $^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca}, 3n)^{288}$  [115] 反応で生成する  $^{288}$  [115] を 3 事象発見したと報告した (2003).  $^{288}$  [115] は,  $^{288}$  [115]  $\rightarrow$   $^{284}$  [113]  $\rightarrow$   $^{280}$  [111]  $\rightarrow$   $^{276}$  [109]  $\rightarrow$   $^{272}$  [107]  $\rightarrow$  のように  $\alpha$  壊変<sup>\*</sup> し,  $^{268}\text{Db}$  の自発核分裂<sup>\*</sup> に至った. 同位体<sup>\*</sup> として,  $^{288}$  [115] と同じ実験の  $^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca}, 4n)^{287}$  [115] 反応で生成する  $^{287}$  [115] が 1 事象知られている.

**ウンウンヘキシウム ununhexium (Uuh)** 原子番号<sup>\*</sup> 116 の人工放射性元素. 元素名はまだない. ロシアの Y. T. Oganessian らは U400 サイクロトロン照射で  $^{248}\text{Cm}(^{48}\text{Ca}, 3n)^{292}$  [116] の 1 事象 (2000), 後に 2 事象 (2001) を発見したと報告した. ただし, 同系列は既知核種を含まないため確認には至っていない.  $^{291}$  [116] と  $^{293}$  [116] の合成も報告されている.

## 付録 2 顕著な業績を挙げた研究者

**アインシュタイン, アルバート**

**Albert Einstein (1879-1955)**

ドイツ→スイス→アメリカの物理学者。1905年に特殊相対性理論を発表。質量とエネルギーの等価性  $E = mc^2$  ( $E$ : エネルギー,  $m$ : 質量,  $c$ : 光の速度) を示した。1921年ノーベル物理学賞。

**アストン, フランシス**

**Francis William Aston (1877-1945)**

イギリスの物理学者, 化学者。1919年に質量分析器を製作し, 一定の質量のイオンを写真フィルムのある一定の線に集中させることに成功した。ネオンについて, 2つの黒化度から質量20と22の同位体存在比および質量欠損を測定した。1922年ノーベル化学賞。

**アンダーソン, カール**

**Carl David Anderson (1905-1991)**

アメリカの物理学者。1932年, ウィルソン霧箱によって宇宙線<sup>\*</sup>を研究中に陽電子<sup>\*</sup>を発見した。1937年ノーベル物理学賞。

**ドビエルヌ, アンドレ・ルイ**

**Andre Louis Debirne (1874-1949)**

フランスの化学者。1900年にピッチブレンド<sup>\*</sup>から新元素アクチニウムを発見。1905年には, アクチニウムから放射性気体(アクチノン, アクチニウムエマナチオン)ができることを発見。1910年にマリー・キュリーとともに初めて金属ラジウムの単離に成功。

**飯盛 里安 (1885-1982)**

理化学研究所主任研究員。1920年にオックスフォード大学のソディ (F. Soddy) のもとで放射化学<sup>\*</sup>を学ぶ。帰国後新設の理研

飯盛研究室主任, 東京帝国大学で最初の放射化学の講義を行い, “同位元素”の用語の提案, 放射性鉱物の研究, 微量放射能の迅速定量, 光, 熱, 陰極線による鉱物の発光, 蛍光<sup>\*</sup>, 燐光<sup>\*</sup>の解析など放射能研究開拓者としての多くの業績を残した。また, 天然水中のラドンの測定用にIM泉効計を考案した。

**石橋 雅義 (1896-1978)**

京都大学教授。ヘヴェシー (G. C. von Hevesy) のもとでX線分光法や同位体<sup>\*</sup>をトレーサー<sup>\*</sup>として化学反応の研究に利用する放射分析<sup>\*</sup>化学を修め, 放射性核種<sup>\*</sup>の分離・分析の研究で放射化学<sup>\*</sup>の発展に貢献した。海洋化学研究所を設立した。

**ウォルトン, アーネスト**

**Ernest Thomas Sinton Walton (1903-1995)**

アイルランドの物理学者。1932年にコッククロフトと共同で, 倍電圧整流を用いる静電型加速器で陽子<sup>\*</sup>を700 keVに加速してリチウムに照射し, 初めて人工的に原子核<sup>\*</sup>を破壊することに成功。1951年ノーベル物理学賞。

**エーベルソン, フィリップ**

**Philip Hugel Abelson (1913- )**

アメリカの化学者。1940年にマクミラン (E. M. McMillan) と共同でバークレーのサイクロトロンからの中性子<sup>\*</sup>をウランに照射して超ウラン元素のネプツニウムを最初につくった。また, 熱拡散法を用いて<sup>238</sup>Uと<sup>235</sup>Uの同位体分離<sup>\*</sup>を行った。

**エルスター, ユリウス**

**Julius Elstre (1854-1920)**

ドイツの物理学者。ガイテル (H. F. Geitel)

とともに実用的光電管、光電光度計およびテスラ変圧器を製作。大気の伝導性は放射性物質\*により発生するイオンによることを見出した。

#### オッペンハイマー、ジョン

##### John Robert Oppenheimer (1904-1967)

アメリカの物理学者。1942年にマンハッタン計画\* (原子爆弾製造計画) に参加し、ロス・アラモス研究所長として世界で初めての原子爆弾\* を完成。1953年マッカシーズムの影響により公職から追放された。

#### 音在 清輝 (1918-1999)

大阪大学教授。核化学\* の研究および電子遷移による原子核励起 (Nuclear Excitation by Electron Transition, NEET) の研究で放射化学\* の発展に貢献した。

#### ガイテル、ハンス

##### Hans Friedrich Geitel (1855-1923)

ドイツの物理学者。エルスター (J. Elstre) と協力してアルカリ金属を用いた光電池、光度計およびテスラ変圧器を発明。気体の電気伝導度やイオン化について研究。

#### ガモフ、ジョージ

##### George Gamow (1904-1968)

ウクライナ→アメリカの物理学者。原子核\* の崩壊に量子力学を適用し、経験則であるガイガー-ヌッタル則\* を説明。1948年に天体の構造や元素\* の起源についてビッグバン\* 理論を「 $\alpha\beta$ 論文」に発表。

#### 木村 健二郎 (1896-1988)

東京大学教授。1935年ごろから本邦産岩石、鉱物、天然水とくに鉱泉水と広範囲な天然放射能の研究を行った。1936年に理化学研究所の仁科芳雄と協力して、サイクロトロンを使用し原子核反応\* を研究。ウランの新核種 ( $^{237}\text{U}$ ) を発見し、「対称核分

裂\*」の存在を提唱。広島、長崎の爆弾が原子爆弾\* であることを確認。

#### キュリー、ピエール

##### Pierre Curie (1859-1906)

フランスの物理学者。マリー・キュリーの夫。1880年に圧電効果 (piezoelectricity) を発見。この効果を用いて小さな電流を測定するための電位計を考案し、放射能測定\* に応用した。1986年に新元素ラジウムとポロニウムを発見。1903年ノーベル物理学賞。

#### キュリー、マリー

##### Marie Sklodowska Curie (1867-1934)

ポーランド→フランスの物理学者・化学者。1898年にビスマスと化学的に類似性があるポロニウムとバリウム成分に伴う放射性元素のラジウムを発見した。1898年から1902年まで、5トンの鉱石残渣から純粋なラジウム0.1グラムを分離し、原子量\* を225と決定した。1903年ノーベル物理学賞、1911年ノーベル化学賞。

#### 黒田 和夫

##### Paul Kazuo Kuroda (1917-2001)

日本→アメリカの化学者。1956年に天然原子炉を予言し、ガボン共和国のオクロ鉱山で17億年前に核分裂連鎖反応\* が起きたことを実証した。また、太陽系初期における消滅核種  $^{24}\text{Pu}$  の存在の証明など、放射性核種\* の地球化学・宇宙化学に貢献した。

#### ゲルマン、マレー

##### Murray Gell-Mann (1929- )

アメリカの物理学者。1954年素粒子\* の強い相互作用に新しい保存量を発見し、ストレンジネスと名付けた。クォーク\* (Quark) の概念や量子色力学 (QCD) の発展に貢献。1969年ノーベル物理学賞。

### 小柴 昌俊 (1926- )

東京大学教授。1986年にカミオカンデで超新星・爆発により発生したニュートリノ<sup>\*</sup>を検出。2002年ノーベル物理学賞。

### コッククロフト, ジョン

#### John Douglas Cockcroft (1897-1967)

イギリスの物理学者。1932年にコッククロフト-ウォルトン加速器<sup>\*</sup>を用い高電圧で加速した陽子<sup>\*</sup>をリチウムに照射し、原子核変換に初めて成功。1951年ノーベル物理学賞。

### コンプトン, アーサー

#### Arthur Holly Compton (1892-1962)

アメリカの物理学者。1923年に物質によって散乱<sup>\*</sup>されたX線<sup>\*</sup>の中に入射X線の波長より長いものが含まれている現象(コンプトン効果<sup>\*</sup>)を発見。量子論の新展開を導く。1927年ノーベル物理学賞。

### 斉藤 信房 (1916- )

東京大学教授。同位体化学<sup>\*</sup>、特に反跳化学および同位体分離<sup>\*</sup>、放射性元素<sup>\*</sup>の地球化学の研究で放射化学<sup>\*</sup>の発展に貢献した。1957年に第1回放射化学討論会を東京で開催した。

### 阪上 正信 (1921-2002)

金沢大学教授。放射化学<sup>\*</sup>・核地球化学の分野で先導的かつ広範な研究を展開し、放射化学の発展に貢献した。また、化学史や化学教育などの教育活動を精力的に行った。

### 塩川 孝信 (1917-1995)

東北大学教授。1954年に第五福竜丸の「ビキニの灰」の調査研究に従事、放射性核種<sup>\*</sup>の分離、反跳化学の研究で放射化学<sup>\*</sup>の発展に貢献した。

### シーボーグ, グレン

#### Glenn Theodore Seaborg (1912-1999)

アメリカの化学者。1940年に94番元素プルトニウムを発見し、単離して化学的性質を解明した。超ウラン元素(95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102番)を発見し、希土類元素との化学的類似性を明らかにした。1951年ノーベル化学賞。

### シュトラスマン, フリッツ

#### Fritz Strassmann (1902-1980)

ドイツの化学者。1938年にハーン(O. Hahn)と共に原子核分裂を実証する実験を最初に行った。

### ジョリオ-キュリー, イレーヌ

#### Irène Joliot-Curie (1897-1956)

フランスの物理学者。ピエールとマリー・キュリー夫妻の長女。1934年に人工放射能を発見。フレデリック・ジョリオ(F. Joliot)と共同でホウ素、マグネシウムおよびアルミニウムに放射性同位体<sup>\*</sup>からの速い $\alpha$ 粒子<sup>\*</sup>を照射して人工的に放射性の窒素、ケイ素およびリンを生成。1935年夫フレデリックと共にノーベル化学賞。

### ジョリオ-キュリー, フレデリック

#### Jean Frédéric Joliot-Curie (1900-1958)

フランスの物理学者。1934年にホウ素、マグネシウムおよびアルミニウムに速い $\alpha$ 粒子<sup>\*</sup>を照射して人工的に窒素、ケイ素、リンの放射性同位体<sup>\*</sup>を生成。1935年に妻イレーヌと共にノーベル化学賞。

### セグレ, エミリオ

#### Emilio Gino Segrè (1905-1989)

イタリア→アメリカの物理学者。1939年にモリブデンに重水素を照射してテクネチウムを人工的に生成。1940年にビスマスに $\alpha$ 線<sup>\*</sup>を照射してアスタチンを生成。1955年にチェンバレン(Owen

Chamberlain) と共同で陽子<sup>\*</sup>を銅に照射して反陽子<sup>\*</sup>を発見。チェンバレンと共に1959年ノーベル物理学賞。

### ソディー, フレデリック

**Frederick Soddy (1877-1966)**

イギリスの化学者。1901年にラジウム塩からヘリウムが生成することから、放射性同位体<sup>\*</sup>は一連の壊変過程を経て別の元素<sup>\*</sup>に変換していくことの確証を得た。「アイソトープ (同位元素)」の名称を提案。「ソディ-ファヤンスの法則」の発見。1921年ノーベル化学賞。

### チェレンコフ, パーヴェル

**Pavel Alekseyevich Cherenkov (1904-1990)**

ロシアの物理学者。1934年に高速の電子<sup>\*</sup>が水の中を走るとき、青白い光を発することを発見した。その後、フランク (I. M. Frank) とタム (I. E. Tamm) によりその発生原理が解明され、チェレンコフ効果<sup>\*</sup>と名付けられた。この3名は1958年ノーベル物理学賞。

### チャドウィック, シン

**Sin James Chadwick (1891-1974)**

イギリスの物理学者。1932年に中性子<sup>\*</sup>を発見。α粒子<sup>\*</sup>による原子核反応<sup>\*</sup>で発生するエネルギーの大きな放射線<sup>\*</sup>がBeの板を通過する際に高エネルギー陽子が放出される実験から、原子核内からの中性子放出との確証を得た。1935年ノーベル物理学賞。

### ディラック, ポール

**Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984)**

イギリスの理論物理学者。1928年に電子<sup>\*</sup>に対する相対論的波動方程式 (ディラック方程式) を発表。1930年にこの方程式に電子のエネルギーが負になる解もあることから空孔理論を発表し、反粒子の存在を予

言した。電子の反粒子である陽電子<sup>\*</sup> (ポジトロン<sup>\*</sup>) が1932年アンダーソン (C. D. Anderson) によって宇宙線<sup>\*</sup>中に発見された。1933年ノーベル物理学賞。

### 寺田 寅彦 (1878-1935)

東京帝国大学教授。ドイツに留学した前後の1905年にアインシュタインが「特殊相対性理論」を、1913年にはボーアが「原子構造の量子論」を発表した時期に、X線<sup>\*</sup>を使って結晶のラウエ斑点の写真的研究を始め、日本における原子物理学研究の先駆けとなった。

### トムソン, ジョセフ

**Joseph John Thomson (1856-1940)**

イギリスの物理学者。1897年に電子<sup>\*</sup>を発見。陰極線粒子の電荷 ( $e$ ) と質量 ( $m$ ) の比の値を測定し、陰極線粒子の質量は水素原子の質量の約1/1000であることを示した。この粒子は後に電子と呼ばれた。1906年ノーベル物理学賞。

### 朝永 振一郎 (1906-1979)

東京教育大学教授。1941年に新たな量子電磁気学を展開し、従来の理論と事実との矛盾を「繰り込み理論」によって解決した。湯川秀樹の創刊したProgress in Theoretical Physicsに発表。1965年ノーベル物理学賞。

### 長岡 半太郎 (1865-1950)

東京帝国大学教授。大阪帝国大学初代総長。1903年に発表した土星型原子模型は原子物理学の発展に貢献した。磁気歪の研究から始まって原子論、地球物理学、弾性論、流体力学、電磁気学、光学などの分野を研究。

### 仁科 芳雄 (1890-1951)

理化学研究所長。1937年に磁石の重量23トンの日本最初のサイクロトロンを完成。



1944年に磁石の重さ200トンのサイクロトロンにより高エネルギーの重陽子ビームを得る。サイクロトロンから二次的に得られる中性子<sup>\*</sup>を、ウラン、トリウムに照射して得られる人工放射能に関する研究。ウィルソン霧箱による宇宙線<sup>\*</sup>中の中間子<sup>\*</sup>の発見とその質量の測定。1946年文化勲章。

#### バークラ, チャールズ

**Charles Glover Barkla (1877-1944)**

イギリスの物理学者。1907年に特性X線<sup>\*</sup>を発見。1917年ノーベル物理学賞。

#### ハーン, オットー

**Otto Hahn (1879-1968)**

ドイツの化学者。1917年にプロトアクチニウムを発見。1921年に核異性体<sup>\*</sup>を発見。1938年にウランを遅速中性子で照射し、核分裂<sup>\*</sup>の現象を発見。1944年ノーベル化学賞。

#### バン・デ・グラーフ, ロバート

**Robert Jemison van de Graff (1901-1967)**

アメリカの物理学者。1931年に絶縁した布のベルトによって電荷を中空の球に運び、球の外部表面にためる8万ボルトの静電型高圧発生装置を開発。粒子加速器を使用するための起電機も開発。

#### ファヤンス, カシミール

**Kasimir Fajians (1887-1975)**

ポーランド→アメリカの化学者。1913年に原子<sup>\*</sup>は $\alpha$ 粒子<sup>\*</sup>を放出して原子番号<sup>\*</sup>が2、質量数<sup>\*</sup>が4だけ減少した別の原子(核種<sup>\*</sup>)になる。 $\beta$ 粒子の放出では質量数は不変で原子番号が1だけ増加するという「ファヤンスの法則」を発表。

#### フェルミ, エンリコ

**Enrico Fermi (1901-1954)**

イタリア→アメリカの物理学者。1934年に

$\beta$ 崩壊の理論を立てた。1938年にアメリカに渡り、1942年にシカゴ大学構内に初めて「原子炉<sup>\*</sup>」を建設し、試運転に成功。中性子<sup>\*</sup>の減速材<sup>\*</sup>として黒鉛を、核分裂物質として濃縮ウラン<sup>\*</sup>を使用し、遅い中性子による核分裂<sup>\*</sup>が特に顕著であることを見出した。1938年ノーベル物理学賞。

#### プランク, マックス

**Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947)**

ドイツの物理学者。1900年に物体の熱放射スペクトルを説明するために、電磁的振動子のエネルギーと振動数の間に成り立つ関係式 $E = nh\nu$ ( $h$ は比例定数、 $\nu$ は振動数、 $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ )を仮定。エネルギーの不連続性を表す「基本的な作用量子」の概念を初めて導入した。 $h$ はプランク定数<sup>\*</sup>と呼ばれる。1918年ノーベル物理学賞。

#### ヘヴェシー, ゲオルグ

**Georg Carles von Hevesy (1885-1966)**

ハンガリー→スウェーデンの化学者。1911年、鉛の試料からラジウムD( $^{210}\text{Pb}$ )を分離。鉛やビスマスの放射性同位体<sup>\*</sup>をトレーサー<sup>\*</sup>として、これらの金属イオンの難溶性沈殿の溶解度を測定。初めて生体トレーサーとして $^{212}\text{Pb}$ を使用。1943年ノーベル化学賞。

#### ヘス, ビクトル

**Victor Francis Hess (1883-1964)**

オーストリア→ロシア→アメリカの物理学者。1911年から、放射線測定器を積んだ気球を上げ放射線<sup>\*</sup>の観測を行った。海拔約五千メートル上空で零メートルの地点より4倍の放射線が昼夜を問わず存在することを発見し、地球外から由来するものとした。ミリカン(R. A. Millikan)は、これを宇宙線<sup>\*</sup>と呼んだ。1936年ノーベル物理学賞。

### ベックレル, アンリ

**Antoine Henri Becquerel (1852-1908)**

フランスの物理学者。1896年に蛍光物質である硫酸ウラニルカリウムの結晶による写真乾板の感光から放射線\*を発見。このウラン化合物から放出される放射線をベックレル線と命名。1903年ノーベル物理学賞。

### ベーテ, ハンス

**Hans Albrecht Bethe (1906-2005)**

ドイツ→アメリカの物理学者。1938年に太陽熱源の原子核反応説で恒星のエネルギー発生源を説明。炭素サイクル(あるいはCNOサイクル)を提案。このサイクルは水素原子核と炭素-12原子核から始まり6段階を経る。1967年ノーベル物理学賞。

### ボーア, ニールス

**Niels Henrik David Bohr (1885-1962)**

デンマークの物理学者。1913年に電子\*の「定常状態」軌道の存在を提唱。電子が特定の角運動量  $h/2\pi, 2h/2\pi, 3h/2\pi, \dots$  ( $h$  はプランク定数\*)をもつ軌道に存在すると仮定し、軌道電子\*のエネルギー( $E_1, E_2, E_3, \dots$ )を計算。原子\*から放出あるいは原子に吸収される光のエネルギーは電子軌道間のエネルギー差に相当するとして、水素原子の線スペクトルを説明。1936年に原子核\*の液滴模型\*に基礎をおく複合核\*や核分裂\*の理論を発表。1922年ノーベル物理学賞。

### ボース, サチエンドラ

**Satyendra Nath Bose (1894-1974)**

インドの物理学者。1924年にアインシュタインに送った、プランクの放射法則と光子量子仮説に関する論文の中に含まれる統計法(ボース統計)が高く評価され、ボース-アインシュタイン凝縮などに発展した。

### マイトナー, リーゼ

**Lise Meitner (1878-1968)**

オーストリア→スウェーデンの物理学者。1918年プロトアクチニウムを発見。1935年にハーン(O. Hahn)と共同で、ウランに中性子\*を照射して核変換\*を研究。ウランの原子核\*が中性子を吸収し、不安定になった核がほぼ等しい大きさの原子核に分裂し、この際2ないし3個の中性子が放出されることを明らかにした。この現象を核分裂\*と命名。

### マクミラン, エドウィン

**Edwin Mattison McMillan (1907-1991)**

アメリカの物理学者。1940年に93番元素ネプツニウムを発見。1954年に位相安定の理論で高エネルギー加速器シンクロトロンに貢献。1951年にシーボーグ(G. T. Seaborg)と共同でプルトニウムを発見。1951年ノーベル化学賞。

### 三宅 泰雄 (1908-1990)

東京教育大学教授。標準海水委員会を設置して標準海水の国内需要を満たし、わが国の海洋研究に貢献した。1954年のビキニ事件以来、大気と海洋の放射能汚染の調査研究は国際的にも高く評価された。1973年に(財)第五福竜丸平和協会を設立し、都立第五福竜丸展示館の館長を務めた。

### メスバウアー, ルドルフ

**Rudolf Ludwig Mössbauer (1929- )**

ドイツの物理学者。1953年以来取り組んだ<sup>191</sup>Irを用いる実験により無反跳ガンマ線共鳴吸収現象を発見し、理論的に解明した。この現象はメスバウアー効果\*と呼ばれる。1961年ノーベル物理学賞。

### メンデレーエフ, ドミトリ

**Dmitri Ivanovich Mendeleev (1834-1907)**

ロシアの化学者。1869年に63種の元素\*

を原子量<sup>\*</sup>の順に並べた元素の周期表<sup>\*</sup>を  
発表。類似の元素を縦に並べ、空所を3箇  
所設けて未知の元素とし、その物理、化学  
的性質を予言。その後、その空所に当ては  
まる元素 Ga, Sc, Ge が発見され、周期律の  
考えが確かめられた。

#### 山田 延男 (1896-1927)

東京帝国大学助教授。1923年にパリのラ  
ジウム研究所に留学し、マリー・キュリー  
(M. Curie) の指導を受けてポロニウム、ラ  
ジウム、トリウムなどから放出される $\alpha$ 線<sup>\*</sup>  
の飛程<sup>\*</sup>について研究した。放射線障害<sup>\*</sup>  
により31歳で他界したが、わが国の放射  
化学<sup>\*</sup>の先達の1人であった。

#### ヤン, チェンニン

#### Chen-Ning Yang 楊 振寧 (1922- )

中国→アメリカの理論物理学者。1956年  
にリー (T.-D. Lee) とともに素粒子<sup>\*</sup>の弱い  
相互作用においてはバリティ<sup>\*</sup>が保存しな  
いという理論を提出。1957年ノーベル物  
理学賞。

#### 湯川 秀樹 (1907-1981)

京都大学教授。1934年に日本数学物理学  
会で中間子<sup>\*</sup>( $\pi$ 粒子)仮説を発表。1937  
年にアンダーソン (C. D. Anderson) が宇宙  
線<sup>\*</sup>の飛跡の中に中間子( $\mu$ 粒子)の発見し、  
中間子の存在が実証された。1946年に欧  
文誌 Progress of Theoretical Physics を創刊  
した。1949年ノーベル物理学賞。

#### ラザフォード, アーネスト

#### Ernest Rutherford, Lord of Nelson (1871-1937)

ニュージーランド→イギリスの物理学  
者。1898年にウランから放出される放射  
線<sup>\*</sup>は $\alpha$ 線<sup>\*</sup>と $\beta$ 線<sup>\*</sup>と発表。1902年にソ  
ディ (F. Soddy) と共に原子崩壊説を立て、  
1910年に $\alpha$ 線はヘリウム原子核であるこ  
と、1911年に局在した原子核<sup>\*</sup>を中心に電

子<sup>\*</sup>が分布する原子モデルを発表。1919年  
に放射性元素から放出される $\alpha$ 線をチッ  
素原子に照射して人工的核変換を初めて  
行った。1908年ノーベル化学賞。

#### リー, チュンタオ

#### Tsung-Dao Lee 李 政道 (1926- )

中国→アメリカの理論物理学者。1956年  
ヤン (C.-N. Yang) とともに素粒子<sup>\*</sup>の弱い  
相互作用においてはバリティ<sup>\*</sup>が保存し  
ないという理論を提出。1957年ノーベル  
物理学賞。

#### リー, ユアン

#### Yuan Tseh Lee 李 遠哲 (1936- )

台湾→アメリカの化学者。ハーバード大  
学のハーシュバック (D. R. Herschbach) の  
研究室で分子線交差法に質量分析器を加  
えて高性能化し、非アルカリ中性ビームの  
実験に成功。ホットアトム<sup>\*</sup>化学にも関心  
を寄せた。1986年にハーシュバックおよ  
びポラーニ (J. C. Polanyi) と共に「化学反  
応素過程の動力学的研究の寄与」でノー  
ベル化学賞を受賞。1994年に台湾に戻り、  
アカデミアシニカの総裁に就任。

#### リビー, ウィラード

#### Willard Frank Libby (1908-1980)

アメリカの化学者。1947年に高感度の $\beta$   
線<sup>\*</sup>測定器を開発し、放射性炭素による年  
代測定<sup>\*</sup>法を発表。約7万年までの試料の  
年代測定ができ、地質学、考古学などの分  
野の発展に貢献。1960年ノーベル化学賞。

#### レナルト, フィリップ

#### Philip Eduard Anton Lenard (1862-1947)

スロヴェニア→ドイツの物理学者。クル  
ックス管から出る陰極線の性質、金属薄膜  
の透過、空気中における飛程<sup>\*</sup>、空気の荷  
電などを研究。X線<sup>\*</sup>の発見の途を開いた。  
1905年ノーベル物理学賞。

### **レントゲン, ウィルヘルム**

**Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1823)**

ドイツの物理学者。1895年にクルックス管を用いて真空放電を研究している際に、近くにあった蛍光物質(白金シアン化バリウム板)が輝いていることに気づく。この線が黒紙や木片, 筋肉を透過することを発見し, X線\*(レントゲン線)と命名。1901年最初のノーベル物理学賞。

### **ローランド, フランク**

**Frank Scherwood Rowland (1927- )**

アメリカの化学者。トリチウムやハロゲンの反跳化学で顕著な功績を残し放射化学\*界をリードした。1995年オランダのクルツェン(P. J. Crutzen)およびアメリカのモ

リナ(M. J. Molina)と共に「オゾンの形成と分解に関する大気化学的研究」でノーベル化学賞。

### **ローレンス, アーネスト**

**Ernest Orlando Lawrence (1901-1958)**

アメリカの物理学者。1930年にリビングストン(M. S. Livingston)と共に垂直磁場と二つのD(ディー)の間の高周波電場によって荷電粒子\*を加速する円形の新型加速器(サイクロトロン)を考案。1931年に直径4インチの最初の装置で, 1.3万電子ボルトの陽子加速に成功。その後次々と改良を加え, 1939年には60インチのサイクロトロンをつくり核物理学の発展に貢献した。1939年ノーベル物理学賞。

### 付録 3 よく使われる略記号

注) まだ一般化されていない語も含まれています。それらの使用に当たっては、原語を併記するなどの配慮が必要です。

#### [団体等]

- ACS; American Chemical Society 米国化学会  
AIST; National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (独)産業技術総合研究所  
AEC; Atomic Energy Commission 原子力委員会  
AECL; Atomic Energy of Canada Limited カナダ原子力公社  
ANL; Argonne National Laboratory アルゴンヌ国立研究所(米国)  
APSORC; Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry アジア・太平洋放射化学・シンポジウム  
ASTM; American Society for Testing and Materials 米国検査・物質協会  
BNFL; British Nuclear Fuels Limited 英国核燃料会社  
BNL; Brookhaven National Laboratory ブルックヘブン国立研究所(米国)  
CEA; Commissariat à l'Énergie Atomique 原子力庁(仏国)  
CERN; European Organization for Nuclear Research 欧州原子核研究機構  
CSJ; The Chemical Society of Japan 日本化学会  
CRIEPI; Central Research Institute of Electric Power Industry (財)電力中央研究所  
CTBTO; Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization 包括的核実験禁止条約機構  
DOE; US Department of Energy 米国エネルギー省  
EPA; US Environmental Protection Agency 米国環境保護局  
EPRI; Electric Power Research Institute 電力研究所(米国)  
EU; European Union 欧州連合  
EURATOM; European Atomic Energy Community 欧州原子力共同体(ユーラトム)  
FAO; Food and Agriculture Organization 国連食糧農業機関  
FZJ; Forschungszentrum Jülich ユーリッヒ研究センター(ドイツ)  
FZK; Forschungszentrum Karlsruhe カールスルーエ研究センター(ドイツ)  
GSI; Gesellschaft für Schwerionenforschung mbH 重イオン研究所(ドイツ)  
IAEA; International Atomic Energy Agency 国際原子力機関  
ICRP; International Commission on Radiation Protection 国際放射線防護委員会  
ICRR; Institute for Cosmic Ray Research 神岡宇宙素粒子研究施設(東京大学宇宙研究所)  
ICRU; International Commission on Radiation Units and Measurements, Inc. 国際放射線単位測定委員会  
IEA; International Energy Agency 国際エネルギー機関(OECD)  
INEL; Idaho National Engineering Laboratory アイダホ国立工学研究所(米国)

- INIS**; International Nuclear Information System 国際原子力情報システム (IAEA)
- IPSN**; Institut de Protection et de Surete Nucleaire フランス原子力庁原子力安全防護研究所
- IRPA**; International Radiation Protection Association 国際放射線防護学会
- IRSN**; French Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety フランス放射線防護・原子力安全研究所
- ITU**; Institute for Transuranium Elements EU 超ウラン元素研究所
- IUPAB**; International Union of Pure and Applied Biophysics 国際純正および応用生物物理学連合
- IUPAC**; International Union of Pure and Applied Chemistry 国際純正および応用化学連合
- IUPAP**; International Union of Pure and Applied Physics 国際純正および応用物理学連合
- IUR**; International Union of Radioecology 国際放射生態学連合
- JAEA**; Japan Atomic Energy Agency (独)日本原子力研究開発機構
- JINR**; Joint Institute for Nuclear Research 合同原子核研究所 (ロシア)
- JPS**; The Physical Society of Japan 日本物理学会
- JRNS**; Japan Radiochemical Nuclear Sciences 日本放射化学会
- JSRC**; Japanese Society of Radiation Chemistry 日本放射線化学会
- JST**; Japan Science and Technology Agency (独)科学技術振興機構
- KAERI**; Korean Atomic Energy Research Institute 韓国原子力研究所
- KEK**; High Energy Accelerator Research Organization 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構
- LANL**; Los Alamos National Laboratory ロスアラモス国立研究所 (米国)
- LBNL**; Lawrence Berkeley National Laboratory ローレンスバークレー国立研究所 (米国)
- LLNL**; Lawrence Livermore National Laboratory ローレンスリバモア国立研究所 (米国)
- MIT**; Massachusetts Institute of Technology マサチューセッツ工科大学 (米国)
- MEL**; IAEA Marine Environment Laboratory Monaco モナコ海洋環境研究所 (IAEA)
- METI**; Ministry of Economy, Trade and Industry 経済産業省
- MEXT**; Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology 文部科学省
- NEA**; Nuclear Energy Agency 原子力機関 (OECD)
- NIES**; National Institute for Environmental Studies (独)国立環境研究所
- NIM**; National Institute for Materials Science (独)物質・材料研究機構
- NIRS**; National Institute of Radiological Science (独)放射線医学総合研究所
- NIST**; US National Institute of Standard and Technology 国立標準技術研究所(米国)
- NRC**; National Research Council 米国学術会議
- NRPB**; National Radiological Protection Board 英国放射線防護・局 (注:2005年4月1日より Health Protection Agency の Radiation Protection Division に改組)
- OECD**; Organization for Economic Co-operation and Development 経済協力開発機構

- ORNL; Oak Ridge National Laboratory オークリッジ国立研究所 (米国)  
 PNL; Princeton National Laboratory プリンストン国立研究所 (米国)  
 PSI; Paul Scherrer Institute ポールシェラー研究所 (スイス)  
 RIKEN; (独)理化学研究所  
 SCJ; Science Council of Japan 日本学術会議  
 SNL; Sandia National Laboratories サンディア国立研究所 (米国)  
 UKAEA; United Kingdom Atomic Energy Authority 英国原子力公社  
 UNSCEAR; The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation  
 原子放射線・の影響に関する国連科学委員会  
 USNRC; United States Nuclear Regulatory Commission 米国原子力規制委員会  
 WHO; World Health Organization 世界保健機構 (国連)

[施設・設備等]

- ABWR; advanced boiling water reactor 改良沸騰水型原子炉・  
 AGR; advanced gas-cooled reactor 新型ガス冷却炉  
 ATR; advanced thermal reactor 新型転換炉  
 AVF cyclotron; azimuthally varying field cyclotron 方位磁場制御型サイクロトロン  
 BWR; boiling water reactor 沸騰水型原子炉・  
 CANDU; Canadian deuterium uranium reactor カナダ型重水炉  
 ECCS; emergency core cooling system 非常用炉心冷却系 (発電用原子炉の)  
 FBR; fast breeder reactor 高速増殖炉  
 FR; fast reactor 高速炉  
 GARIS; Gas-filled Recoil Separator 気体充填型反跳分離装置 (理研)  
 GCFR; gas-cooled fast reactor ガス冷却高速炉  
 HIFER; High Flux Isotope Reactor 高フラックス同位体炉 (ORNL)  
 HILAC; heavy ion linear accelerator 重イオン線型加速器  
 HIMAC; Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba 重粒子線がん治療装置 (放医研)  
 HTGR; high temperature gas-cooled reactor 高温ガス冷却型原子炉  
 HTTR; High Temperature Engineering Test Reactor 高温工学試験研究炉 (JAEA)  
 HWGCR; heavy water moderated gas-cooled reactor 重水減速ガス冷却炉  
 ITER; International Thermonuclear Experimental Reactor 国際熱核融合実験炉  
 JET; Joint European Torus ヨーロッパ共同トラス装置  
 JMTR; Japan Materials Testing Reactor 材料試験炉 (JAEA)  
 JRR-3; Japan Research Reactor -3 研究炉-3 (JAEA)  
 JRR-4; Japan Research Reactor -4 研究炉-4 (JAEA)  
 JT-60; JAERI Tokamak-60 臨界プラズマ実験装置 (JAEA)  
 KAMIOKANDE; Kamioka Nucleon Decay Experiment 神岡核子崩壊実験  
 KamLAND; Kamioka Liquid-scintillator Anti-neutrino Detector 神岡液体シンチレーター  
 反ニュートリノ探知器 (東北大)  
 KENS; Neutron Science Laboratory KEK 中性子科学研究施設

- KUR**; Kyoto University Research Reactor 京都大学研究用原子炉 (京大原子炉実験所)
- LLRL**; Low Level Radioactivity Laboratory 低レベル放射能実験施設 (金沢大)
- LWR**; light water reactor 軽水炉
- NSRR**; Nuclear Safety Research Reactor 安全性試験炉 (JAEA)
- OUL**; Okoya Underground Laboratory 尾小屋地下測定施設
- PWR**; pressurized water reactor 加圧水型原子炉
- RBMK**; Reaktory Bolshoi Moshchnosti Kanalnyne (ロシア語, 英訳 high-power pressure tube reactors, 高出力圧力管原子炉) 黒鉛減速沸騰軽水圧力管型原子炉
- RIPS**; RIKEN Projectile-fragment Separator 理研入射核 - 生成核分離装置 (理研)
- RNB**; radioactive nuclides beam 短寿命核ビーム
- SPRING8**; Super Photon Ring-8 大型放射光施設
- TIARA**; Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation 高崎イオン照射研究施設 (JAEA)
- TRIAC**; Tokai Radioactive Ion Accelerator Complex 東海放射性核種ビーム加速実験装置 (JAEA)

[分析法, 測定器等]

- AAS**; atomic absorption spectrometry 原子吸光分析法
- ADC**; analog to digital converter アナログデジタル変換器
- AES**; atomic emission spectroscopy 原子発光分光法
- AFM**; atomic force microscope 原子間力顕微鏡
- AMS**; accelerator mass spectrometry 加速器質量分析
- BGO**; bismuth-germanium oxide ビスマス-ゲルマニウム酸化物 ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ )
- CDBS**; coincidence Doppler broadening spectroscopy 同時計数ドップラー広がり分光
- CT**; computed tomography コンピュータ解析トモグラフィ
- CVD**; chemical vapor deposition 化学蒸着
- CZE**; capillary zone electrophoresis キャピラリーゾーン電気泳動
- EPMA**; electron-probe micro analyzer 電子線プローブマイクロアナライザー
- ESCA**; electron spectroscopy for chemical analysis X線光電子分光
- ESR**; electron spin resonance 電子スピン共鳴
- EXAFS**; extended X ray absorption fine structure X線吸収広域微細構造
- FET**; field effect transistor 電界効果トランジスタ
- FE-TEM**; field emission-transmission electron microscope 電界放出型透過電子顕微鏡
- FIA**; flow-injection analysis フローインジェクション分析
- FIM**; field ion microscope 電界イオン顕微鏡
- FT**; fission track フィッショントラック
- FT-IR**; Fourier transform infrared spectroscopy フーリエ変換赤外分光
- FT-NMR**; Fourier transform nuclear magnetic resonance フーリエ変換核磁気共鳴



- GC-MS**; gas-chromatographic mass spectrometry ガスクロマトグラフィー質量分析
- GM**; Geiger-Mueller ガイガー - ミューラー (カウンター等)
- HPLC**; high performance liquid chromatography 高速液体クロマトグラフィー
- HR-ICP-MS**; high resolution ICP-MS 高分解能誘導結合プラズマ質量分析
- IC**; ion chromatography イオンクロマトグラフィー
- IC-MS**; ion-chromatographic mass spectrometry イオンクロマトグラフィー質量分析
- ICP-AES**; inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy 誘導結合プラズマ発光分光分析
- ICP-MS**; inductively coupled plasma mass spectrometry 誘導結合プラズマ質量分析
- IDA**; isotope dilution analysis 同位体希釈分析
- ID-MS**; isotope dilution mass spectrometry 同位体希釈質量分析
- INAA**; instrumental neutron activation analysis 機器中性子放射化分析
- IR**; infrared spectroscopy 赤外分光
- ISOL**; isotope separation on-line オンライン同位体分離 (装置)
- LC**; liquid chromatography 液体クロマトグラフィー
- LC-MS**; liquid chromatographic mass spectrometry 液体クロマトグラフィー質量分析
- LEED**; low energy electron diffraction 低速電子線回折
- LFS**; laser-induced fluorescence spectroscopy レーザー誘起蛍光分光
- LINAC**; linear accelerator 線型加速器
- LIPAS**または**LPAS**; laser-induced photo acoustic spectrometry レーザー誘起光音響分光
- LSC**; liquid scintillation counter 液体シンチレーションカウンター
- MALDI**; matrix assisted laser desorption / ionization マトリックス支援レーザー脱離イオン化
- MCA**; multi-channel analyzer マルチチャンネル波高分析器
- MC-ICP-MS**; multi-collector ICP-MS マルチコレクター型誘導結合プラズマ質量分析
- MEED**; moderate energy electron diffraction 中速電子線回折
- MRI**; magnetic resonance imaging 磁気共鳴画像
- μSR**; muon spin rotation, relaxation and resonance ミューオンスピン回転, 緩和および共鳴あるいはそれらの総称
- MSR**; muonium spin rotation ミュオニウムスピン回転
- NAA**; neutron activation analysis 中性子放射化分析
- NDA**; non-destructive analysis 非破壊測定 (保障措置のための)
- NEXAFS**; near-edge XAFS 吸収端近傍 X 線吸収微細構造
- NMR**; nuclear magnetic resonance 核磁気共鳴
- NMR-CT**; nuclear magnetic resonance-computed tomography 核磁気共鳴コンピュータ断層撮影
- NQR**; nuclear quadrupole resonance 核四極共鳴
- OSL**; optically stimulated luminescence 光励起蛍光
- OSLD**; optically stimulated luminescence dosimeter 光励起蛍光線量計

- PA**; pre-amplifier 前置増幅器 (プリアンプ)
- PAGE**; polyacrylamide gel electrophoresis ポリアクリルアミドゲル電気泳動
- PAS**; photo acoustic spectroscopy 光音響分光
- PECVD**; plasma enhanced chemical vapor deposition プラズマ化学蒸着
- PET**; positron emission tomography 陽電子放出断層診断
- PETT**; positron emission transaxial tomography 陽電子放出断層診断
- PGA**; prompt gamma analysis 即発中性子分析
- PHA**; pulse height analyzer 波高分析器
- PIXE**; particle induced X ray emission 荷電粒子誘起 X 線分光
- PMT**; photo-multiplier tube 光電子増倍管
- PSD**; pulse shape discrimination 波形弁別 (回路)
- QMS**; quadrupole mass spectrometer 四重極子質量分析計
- RAC**; risetime to amplitude converter ライズタイム・波高変換器
- REMPI**; resonance enhanced multi photon ionization 共鳴多光子イオン化
- RHEED**; reflection high energy electron diffraction 反射高速電子線回折
- RIA**; radioimmunoassay 放射免疫分析
- RNAA**; radiochemical neutron activation analysis 放射化学的中性子放射化分析
- ROI**; region of interest 対象領域
- SANS**; small angle neutron scattering 小角中性子散乱
- SCA**; single channel analyzer シングルチャンネル波高分析器
- SEM**; scanning electron microscope 走査電子顕微鏡
- SEXAFS**; surface EXAFS 表面 EXAFS
- SIMS**; secondary ionization mass spectrometry 二次イオン質量分析\*
- SPEEDI**; System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information 緊急時環境線量情報予測システム
- SQUID**; superconducting quantum interference device 超伝導量子干渉計
- SSD**; solid-state detector 固体検出器
- TGA**; thermo-gravimetric analysis 熱重量分析
- TIMS**; thermal ionization mass spectrometry 熱イオン化 (または表面電離) 質量分析
- TLD**; thermoluminescence dosimeter 熱ルミネッセンス線量計
- TOF**; time-of-flight 飛行時間
- XAFS**; X ray absorption fine structure X 線吸収微細構造
- XANES**; X ray absorption near-edge structure X 線吸収端近傍構造
- XMA**; X ray microanalyzer X 線マイクロアナライザー
- XPS**; X ray photo-electron spectroscopy X 線光電子分光
- XRD**; X ray diffraction X 線回折
- XRF**; X ray fluorescence 蛍光 X 線

[一般用語等]

- ADI**; acceptable daily intake 許容1日摂取量
- ALARA**; as low as reasonably achievable 国際放射線防護委員会が1977年勧告で示した放射線防護の基本的考え方を示す概念
- ADS**; accelerator driven system 加速器駆動システム(核変換のための)
- BEAGLE 2003**; 南半球世界一周航海(海洋開発研究機構・みらい)
- B.G.**; background バックグラウンド
- BOD**; biochemical oxygen demand 生物化学的酸素要求量
- b.p.**; boiling point 沸点
- BRIS**; Bioavailability of Radionuclides in Soils (EU project)
- CEC**; cation exchange capacity 陽イオン交換容量
- CF**; concentration factor 濃縮係数
- CI**; confidential interval 信頼区間
- CN**; coordination number 配位数
- COD**; chemical oxygen demand 化学的酸素要求量
- CRM**; certified reference material 標準物質
- CRUD**; Chalk River unidentified deposit クラッド
- CTBT**; Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty 包括核実験禁止条約
- DF**; decontamination factor 除染係数
- DL**; detection limit 検出限界
- DU**; depleted uranium 劣化ウラン
- EC**; orbital electron capture 軌道電子捕獲
- EC50**; 50% effect concentration 半数影響濃度
- EMRAS**; Environmental Modeling for Radiation Safety (IAEA project)
- ERICA**; Environmental Risk from Ionizing Contaminants: Assessment and Management (EU-funded project)
- EU**; enriched uranium 濃縮ウラン
- FASSET**; Framework for Assessment of Environmental Impact (EU-funded project)
- FIMA**; fissions per initial metal atom 重金属原子当たりの核分裂の割合
- FP**; fission product 核分裂生成物
- FT**; Fourier transform フーリエ変換
- FWHM**; full width at half maximum 半値幅
- GPS**; global positioning system 全地球測位システム
- GUT**; grand unified theory 大統一理論
- HEPA**; high efficiency particulate air filter 超高性能エアフィルター
- HLLW**; high level liquid waste 高レベル放射性液体廃棄物
- HLW**; high level waste 高レベル放射性廃棄物
- HOMO**; highest occupied molecular orbital 最高被占分子軌道
- HWHM**; half width at half maximum 半値半幅
- HV**; high voltage 高電圧
- IASCC**; irradiation assisted stress corrosion cracking 照射誘起応力腐食割れ

- ICE**; internal conversion electron 内部転換電子
- INES**; international nuclear event scale 国際原子力事象評価尺度
- I.S.**; isomer shift 核異性体シフト
- IT**; Isomeric Transition 核異性体転移
- JIS**; Japanese Industrial Standards 日本工業規格
- JENDL**; Japanese Evaluated Nuclear Data Library 評価済み核データライブラリー (日本)
- JOIS**; JST Online Information System (財)科学技術振興機構のオンライン情報システム
- LC50**; 50% lethal concentration 半致死濃度
- LD50**; lethal dose fifty 半致死線量
- LET**; linear energy transfer 線エネルギー付与
- LLW**; low level waste 低レベル放射性廃棄物
- LOCA**; loss of coolant accident 冷却材喪失事故
- LUMO**; lowest unoccupied molecular orbital 最低空分子軌道
- MO**; molecular orbital 分子軌道
- MOS**; metal-oxide semiconductor 金属酸化物半導体
- MOS-FET**; metal oxide semiconductor-field effect transistor 金属酸化物半導体 - 電界効果トランジスター
- MOX**; mixed oxide 混合酸化物 (通常ウランとプルトニウムの混合酸化物)
- m.p.**; melting point 融点
- MTD**; maximum tolerated dose 最大耐用線量
- Mu**; muonium ミュオニウム
- N.D.**; not detected 検出されず
- NEET**; nuclear excitation by electron transition 電子遷移による核励起
- NIM**; Nuclear Instrumentation Module system ニム規格
- NOAEL**; no observed adverse effect level 無毒性量
- NOEC**; no observed effect concentration 無影響濃度
- NPT**; The Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons 核兵器不拡散条約
- OBT**; organically bound tritium 有機結合型トリチウム
- OM**; organic matter 有機物
- PEC**; predicted environmental concentration 予測環境中濃度
- PENEC**; predicted no effect concentration 予測無影響濃度
- Ps**; positronium ポジトロニウム
- PSA**; probabilistic safety assessment 確率論的安全評価
- PT**; partitioning-transmutation 分離変換
- PUREX**; plutonium uranium recovery by extraction ピューレックス法 (使用済み核燃料再処理法)
- Q.S.**; quadrupole split 四極子分裂 (メスバウアースペクトルの)
- RBE**; relative biological effectiveness 生物学的効果比
- RO**; reverse osmosis 逆浸透

**SCC**; stress corrosion cracking 応力腐食割れ  
**SF**; spontaneous fission 自発核分裂  
**SF**; separation factor 分離係数  
**SG**; safeguard 保障措置  
**SHE**; superheavy elements 超重元素  
**SI**; International System of Units 国際単位系  
**S/N**; signal/noise ratio 信号／ノイズ比  
**SNAP**; system for nuclear auxiliary power 原子力利用補助電源  
**SOR**; synchrotron orbital radiation シンクロトン軌道放射光  
**SRM**; standard reference material 比較標準物質  
**TBP**; tributyl phosphate トリブチルリン酸  
**TF**; transfer factor 移行係数  
**TL**; thermoluminescence 光ルミネッセンス  
**TMI**; Three Mile Island スリーマイル島  
**TRU**; transuranium 超ウラン元素  
**UV**; ultra-violet (region) 紫外光 (領域)  
**Vis**; visible (region) 可視光 (領域)  
**YAG**; yttrium aluminium garnet YAG (レーザー)

## 付録 4 単位と記号

**SI 国際単位系** (Le Système International d'Unités) のこと。エスアイと読む。1960年の国際度量衡委員会 (CGPM) で採択され、世界共通の SI という略称を与えた。1971年に、国際標準化機構 (ISO) 規格への採用とその優先使用勧告により、世界各国に急速に普及した。基本単位、補助単位、組立単位および SI 接頭語から成る。ただし、補助単位は 1995年の国際度量衡委員会で廃止された。

**SI 基本単位 fundamental unit** SI では、m, kg, s, A, K, cd, mol の 7 種を基本単位としている (→付表 1)。その他に補助単位 (2 個) と組立単位 (固有の名称をもつものは 19 種) がある。

**SI 組立単位 derived unit** 基本単位同士あるいは基本単位と補助単位との積または商で示した単位。例えば、速さを表わす  $\text{m s}^{-1}$  や物質の濃度を表わす  $\text{mol m}^{-3}$  など。SI では、実用上の便宜のため、19 種類の「固有の名称をもつ組立単位」を特別に与えている (→付表 2)。

**SI 接頭語** SI 単位では、すべての量の間の換算係数が 1 となるように関連づけられるが、実用上便利な大きさであるとはいえない。例えば、従来 Ci で表わした値は、SI では  $3.7 \times 10^{10}$  Bq と大変大きな数になる。そこで、きわめて大きな量やきわめて小さな量を表現するために採り入れられた。  $10^6$  倍を表わすメガ (M) や  $10^{-3}$  倍を表わすミリ (m) などである (→付表 3)。

**SI 単位 SI unit** SI で用いる単位。

**SI と併用してよい単位** (→付表 4)

**SI 補助単位 supplementary unit** SI では、基本単位と組立単位の他に、よく使われる平面角 (radian, rad) と立体角 (steradian, sr) を次元のない補助単位として設けていたが、1995年の国際度量衡委員会で廃止された。

**キュリー curie (Ci)** 放射能<sup>\*</sup>の旧単位。現在はベクレル (Bq) を用いる。毎秒の壊変<sup>\*</sup>数が  $3.7 \times 10^{10}$  個であるときの放射能を 1 Ci という。SI 単位との換算は  $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10}$  Bq。1 g のラジウム ( $^{226}\text{Ra}$ ) の放射能はほぼ 1 Ci である。

**クーロン coulomb (C)** 電気量の SI 単位。  $1 \text{ C} = 1 \text{ A s}$ 。

**グレイ gray (Gy)** 放射線<sup>\*</sup>の吸収線量<sup>\*</sup>の SI 単位。1 kg 当たり 1 J のエネルギーが物質に与えられるときの吸収線量<sup>\*</sup>を 1 Gy とする。旧単位ラド (rad) とは  $1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy}$  の関係にある。

**原子質量単位 atomic mass unit (u)** 原子<sup>\*</sup>や素粒子<sup>\*</sup>の質量を表わす単位の一つ。<sup>12</sup>Cの原子1個の質量の1/12に相当する。すなわち、 $1.6605402 \times 10^{-27}$  kg に等しい。また、核物理学では粒子の質量をエネルギーで表わすことが多く、 $1 \text{ u} = 931.49432(28) \text{ MeV}$  の関係にある。

**原子単位 atomic unit** 電子<sup>\*</sup>の静止質量<sup>\*</sup> ( $m_e$ )、電子の電荷の絶対値 ( $e$ ) およびプランク定数<sup>\*</sup> ( $h$ ) の  $1/2\pi$  倍である  $\hbar$  を基本単位としてつくられる質量、長さ、時間などの各種単位 (→付表5)。量子力学計算に便利で、波動関数の計算に広く使われる。

**シーベルト sievert (Sv)** 電離放射線<sup>\*</sup>の生物への効果を考慮した吸収線量<sup>\*</sup>、いわゆる線量当量<sup>\*</sup> ( $H$ ) または等価線量<sup>\*</sup>のSI単位。X線<sup>\*</sup>と $\gamma$ 線<sup>\*</sup>については、グレイ (gray) に等しい ( $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J kg}^{-1}$ )。旧単位レムとの関係は  $1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Sv}$ 。

**ジュール joule (J)** エネルギーのSI組立単位。  $\text{J} = \text{Nm} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2} = \text{CV} = \text{Pa m}^3$ 。

**マッヘ mache** 空気や温泉水などに含まれるラドン (<sup>222</sup>Rn) やトロン<sup>\*</sup> (<sup>220</sup>Rn) の濃度を表わす単位。1 マッヘは  $13.3 \text{ Bq L}^{-1}$  のラドンあるいは  $11.7 \text{ Bq L}^{-1}$  のトロン<sup>\*</sup> に相当する。

**ラド rad** 電離放射線<sup>\*</sup>の吸収線量<sup>\*</sup>の旧単位。現在では、SI単位のグレイ (Gy) を用いる。 $1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy}$ 。

**レム rem (rentgen-equivalent-man)** 生物への効果を考慮した電離放射線<sup>\*</sup>の吸収線量<sup>\*</sup>の旧単位。現在では、SI単位のシーベルト (Sv) を用いる。 $100 \text{ rem} = 1 \text{ Sv}$ 。

**レントゲン rentgen (R)** 放射線<sup>\*</sup>の空間線量の旧単位。現在では、SI単位を組み合わせで用い、 $1 \text{ R} = 2.580 \times 10^{-4} \text{ C kg}^{-1}$  である。 $1 \text{ mCi}$  の<sup>60</sup>Co線源から1 mの距離の空間線量率は毎時約0.85 mRである。

## [記号]

**cpm** 計数率 count per minute の略。放射線検出器<sup>\*</sup>で放射能<sup>\*</sup>を測定したときの毎分当たりの計数値につける記号。

**cps** 計数率 count per second の略。放射線検出器<sup>\*</sup>で放射能<sup>\*</sup>を測定したときの毎秒当たりの計数値につける記号。

**dpm** 壊変率 disintegration per minute の略。毎分当たり放射性核種<sup>\*</sup>が壊変<sup>\*</sup>する絶対的計数値につける記号。

**dps** 壊変率 disintegration per second の略。毎秒当たり放射性核種<sup>\*</sup>が壊変<sup>\*</sup>する絶対的計数値につける記号。ベクレルに等しい。

付表 1 SI 基本単位

量	名 称	記号	定 義
長さ (length)	metre	m	メートルは、1 秒の $1/299792458$ の時間に光が真空中を伝わる行程の長さ。
質量 (mass)	kilogram	kg	キログラムは、国際キログラム原器の質量に等しい。
時間 (time)	second	s	秒は、 $^{133}\text{Cs}$ の原子の基底状態の二つの超微細準位の間の遷移に対応する放射の $9192631770$ 周期の継続時間。
電流 (electric current)	ampere	A	アンペアは、真空中に $1\text{ m}$ の間隔で平行に置く無限に小さい円形断面積をもつ無限に長い 2 本の直線状導体のそれぞれを流れ、これらの導体の長さ $1\text{ m}$ ごとに $2 \times 10^{-7}\text{ N}$ の力を及ぼし合う不変の電流。
熱力学温度 (thermodynamic temperature)	kelvin	K	ケルビンは、水の三重点の熱力学温度の $1/273.16$ 。
物質 量 (amount of substance)	mole	mol	モルは、 $0.012\text{ kg}$ の $^{12}\text{C}$ の中に存在する原子の数と等しい数の要素粒子または要素粒子の集合体。(要素粒子とは、原子、分子、イオン、電子などのこと)
光度 (luminous intensity)	candela	cd	カンデラは、周波数 $540 \times 10^{12}\text{ Hz}$ の単色放射を放出し、所定の方向におけるその放射強度が $1/683\text{ W sr}^{-1}$ である光源の、その方向における光度。



付表 2 固有の名称をもつ SI 組立単位

量	単位の名称	単位記号	他の SI 単位 による表し方	基本単位 による表し方
周波数 (frequency)	hertz	Hz	$s^{-1}$	
力 (force)	newton	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力, 応力 (pressure, stress)	pascal	Pa	$N\ m^{-2}$	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー, 仕事, 熱量 (energy, work, heat)	joule	J	$N\ m$	$m^2\ kg\ s^{-2}$
工率, 放射束 (power, radiant flux)	watt	W	$J\ s^{-1}$	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷 (electric charge)	coulomb	C	$A\ s$	
電圧, 電位 (electric potential)	volt	V	$J\ C^{-1}$	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電気抵抗 (electric resistance)	ohm	$\Omega$	$V\ A^{-1}$	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス (electric conductance)	siemens	S	$\Omega^{-1}$	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
静電容量 (electric capacitance)	farad	F	$C\ V^{-1}$	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
磁束密度 (magnetic flux density)	tesla	T	$V\ s\ m^{-2}$	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束 (magnetic flux)	weber	Wb	$V\ s$	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス (inductance)	henry	H	$V\ A^{-1}\ s$	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度 (Celsius temperature)	$^{\circ}C$	K		
光束 (luminous flux)	lumen	lm	$cd\ sr$	
照度 (illuminance)	lux	lx	$cd\ sr\ m^{-2}$	
放射能 (radioactivity)	becquerel	Bq	$s^{-1}$	
吸収線量 (adsorbed dose)	gray	Gy	$J\ kg^{-1}$	$m^2\ s^{-2}$
線量当量 (dose equivalent)	sievert	Sv	$J\ kg^{-1}$	$m^2\ s^{-2}$

付表3 SI接頭語

単位に乗ぜられる倍数	名称	記号	単位に乗ぜられる倍数	名称	記号
$10^{-1}$	desi	d	10	deca	da
$10^{-2}$	centi	c	$10^2$	hecto	h
$10^{-3}$	milli	m	$10^3$	kilo	k
$10^{-6}$	micro	$\mu$	$10^6$	mega	M
$10^{-9}$	nano	n	$10^9$	giga	G
$10^{-12}$	pico	p	$10^{12}$	tera	T
$10^{-15}$	femto	f	$10^{15}$	peta	P
$10^{-18}$	atto	a	$10^{18}$	exa	E
$10^{-21}$	zepto	z	$10^{21}$	zetta	Z
$10^{-24}$	yocto	y	$10^{24}$	yotta	Y

付表 4 SI と併用してよい単位

量	単位の名称	記号	定義
時間 (time)	分 (minute) 時 (hour) 日 (day)	min h d	1 min = 60 s 1 h = 60 min 1 d = 24 h
平面角 (plane angle)	度 (degree) 分 (minute) 秒 (second)	° ' "	1° = (π/180)rad 1' = (1/60)° 1" = (1/60)'
体積 (volume)	リットル (litre)	L, l	1 L = 1 dm <sup>3</sup>
質量 (mass)	トン (tonne)	t	1 t = 10 <sup>3</sup> kg
長さ (length)	オンゲストローム (ångström)	Å	1 Å = 10 <sup>-10</sup> m
圧力 (pressure)	バー (bar)	bar	1 bar = 10 <sup>5</sup> Pa
面積 (area)	バーン (barn)	b	1 b = 10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
エネルギー (energy)	電子ボルト (electronvolt)	eV	1 eV = 1.60218 × 10 <sup>-19</sup> J
質量 (mass)	統一原子質量単位 (unified atomic mass unit)	u	1 u ≈ 1.6605655 × 10 <sup>-27</sup> kg

付表 5 原子単位

量	名称	記号	定義
質量 (mass)	electron rest mass	$m_e$	$m_e \approx 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$
電荷 (charge)	elementary charge	$e$	$e \approx 1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$
作用 (action)	Planck constant/ $2\pi$	$\hbar$	$\hbar = h/2\pi \approx 1.0546 \times 10^{-34} \text{ J s}$
長さ (length)	bohr	$a_0$	$4\pi\epsilon_0 \hbar^2/m_e e^2 \approx 5.2918 \times 10^{-11} \text{ m}$
エネルギー (energy)	hartree	$E_h$	$\hbar^2/m_e a_0^2 \approx 4.359 \times 10^{-18} \text{ J}$
時間 (time)	au of time	$\hbar/E_h$	$\approx 2.4189 \times 10^{-17} \text{ s}$
速さ (velocity)	au of velocity	$a_0 E_h/\hbar$	$\approx 2.1877 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}$
力 (force)	au of force	$E_h/a_0$	$\approx 8.2389 \times 10^{-8} \text{ N}$
運動量 (momentum)	au of momentum	$\hbar/a_0$	$\approx 1.9929 \times 10^{-24} \text{ N s}$
電流 (electric current)	au of current	$eE_h/\hbar$	$\approx 6.6236 \times 10^{-3} \text{ A}$
電場 (electric field)	au of electric field	$E_h/ea_0$	$\approx 5.1422 \times 10^{11} \text{ V m}^{-1}$
電気双極子モーメント (electric dipole moment)	au of electric dipole moment	$ea_0$	$\approx 8.4784 \times 10^{-30} \text{ C m}$
磁気束密度 (magnetic flux density)	au of magnetic flux density	$\hbar/ea_0$	$\approx 2.3505 \times 10^5 \text{ T}$
磁気双極子モーメント (magnetic dipole moment)	au of magnetic dipole moment	$e\hbar/m_e$	$= 2\mu_B \approx 1.8548 \times 10^{-23} \text{ J T}^{-1}$

## 放射化学用語辞典 2006年版

---

**編集人** 日本放射化学会  
放射化学討論会 50周年記念事業 「放射化学用語辞典」編集委員会

**発行人** 日本放射化学会  
事務局所在地：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方2-4  
日本原子力研究開発機構 高度環境分析研究棟内  
E-mail: [jnrs.office@radiochem.org](mailto:jnrs.office@radiochem.org)  
Web: <http://www.radiochem.org/> または <http://wwwsoc.nii.ac.jp/jnrs>

**印刷** 松枝印刷株式会社  
〒303-0034 茨城県常総市水海道天満町2438

発行日 平成18年10月24日

©2006 日本放射化学会

本誌掲載記事の著作権は日本放射化学会に帰属します。

