

1 エネルギーの科学

2

3 江尻宏泰

4

5 素粒子核物理

6 大阪大学名誉・特任教授、プラハ大学客員教授

7 元カルフォルニア大学・ワシントン大学客員教授

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32 はしがき

33

34 プロローグ エネルギーを科学の目で見る

35

36 1章 エネルギーの正体と原理

37 1.1. エネルギーの正体

38 1.2. エネルギーの原理

39 1.3. エネルギー保存則とエネルギーサイクル

40

41 2章 日常のエネルギー

42 2.1. 日常のさまざまなエネルギー

43 2.2. エネルギーの活用

44 2.3. エネルギー問題の科学

45

46 3章 地球のエネルギー

47 3.1. 地球のエネルギー

48 3.2. 地表におけるさまざまなエネルギー

49 3.3. 天地と世界のエネルギー異変

50

51 4章 物体のエネルギー

52 4.1. 物体の内部エネルギー

53 4.2. 燃焼のエネルギー

54 4.3. 物体の変形と内部エネルギー

55

56 5章 原子と電子のエネルギー

57 5.1. 原子の成り立ちと電子のエネルギー

58 5.2. 原子の中の電子と光のエネルギー

59 5.3. 電磁波のエネルギー

60

61 6章 原子核のエネルギー

62 6.1 原子核のエネルギーと原子力

63 6.2. 太陽エネルギーと原子核融合反応

64 6.3. 原子力エネルギーの活用

65

66 7章 放射線のエネルギー

67 7.1. 放射性変換と弱い力

68 7.2. 放射線のエネルギー

69 7.3. 放射線エネルギーの活用

70

71 8章 素粒子と宇宙のエネルギー

72 8.1. 素粒子のエネルギー

73 8.2. 宇宙のエネルギー

74 8.3. 未知のエネルギーへ挑戦

75

76 9章 さまざまなエネルギーの単位と比較

77

78

79

80

## はしがき

81

82

83 エネルギーはどこにでもあり、エネルギーは日常の生活を支え  
84 ている。何をするにもエネルギーがいる。

85 南海トラフ、石油資源、温暖化ガス、高気温、山火事、炭素、  
86 原子力、再生、省エネ、飢餓、肥満、核ミサイル。世間はさまざま  
87 まなエネルギーの話題で過熱している。

88 日常なじみ深いはずのエネルギーだが、実はどこにどんな姿形  
89 であるのか、正体がはっきりしない。

90 コロナウイルスはエネルギーッシュに拡散する。全容は電子顕微  
91 鏡写真でわかるが、そのエネルギーの所在は見えない。

92

93 自然界にはさまざまなエネルギーがある。ブラックホール、太  
94 陽、森林、火山、温泉、台風、高気温、等々。

95 プレートの歪みのエネルギーが地震と津波となり、余震がたえ  
96 ない。エネルギー異変は忘れる間もなく起こる。

97 世の中の多くの物は動いている。動物、車、風、光、電波、全  
98 て動きに応じて、運動エネルギーがある。

99 エネルギーの形は変化する。太陽内の核エネルギーは、太陽光  
100 になり、海水温が上がり豪雨になって山を崩す。

101 火、水車、蒸気、内燃機関、電気、電子、原子核（力）、スマ  
102 ホ電波。種々のエネルギー革新が文明を築いた。

103 エネルギーは現代の生活必需品だ。日常生活は、石油や穀物な  
104 どの炭素（電子）の電気エネルギーと、太陽やウラニウムなど  
105 の原子核（力）エネルギーが支えている。

106 一方で、資源の偏在、食料危機、温暖化、地球汚染などの重大  
107 危機は、エネルギーに起因する。

108 1世紀の間に、エネルギー消費は15倍に増大、それに応じて廃  
109 棄物も増え、文明を発展させる筈のエネルギーが、文明を亡ぼ  
110 し、地球を破滅しかねない。

111

112 全ての質量（重さ）がある物体には、巨大な静止質量エネルギ  
113 ーがある。運動すると運動エネルギーが加わる。

114 物体内の質量エネルギーの一部が、重力エネルギー、電気エネ  
115 ルギー、原子核（力）エネルギー、放射線エネルギーだ。それら  
116 のエネルギーの一部を取り出して活用する。

117 太陽内の水素から核エネルギーが生まれ、太陽光エネルギーに  
118 なる。火力発電所では石油の炭素内の電気エネルギーで発電、高  
119 圧の電気エネルギーにして街に送電される。

120 エネルギーは変化するが、エネルギー保存則があり、場所や形  
121 は変わっても、総量は変わらない。エントロピーの法則があり、  
122 熱エネルギーは高温から低温の方向に移動する。

123 物体の質量に潜むエネルギーと運動によるエネルギーを正しく  
124 理解し、その基本法則に則って考察することが肝要だ。

125 エネルギーは、理工、農水林、医薬などの全ての経済活動の基  
126 になる。多様多岐にわたるエネルギーの基本を一つのコンセプト  
127 で考え、合理的に活用することが大事である。

128 石油 10 トンの炭素のエネルギーを取り出すと、30 トン程の二  
129 酸化炭素が排出される。同じエネルギーを核（原子力）エネ  
130 ルギーから取り出すと、ウラニウムも放射性廃棄物も数グラムで済  
131 む。

132 太陽はゆっくり燃え、太陽光のエネルギー強度は弱くほのかに  
133 暖かい。それが短時間に燃やすのが原爆だ。セシウムの放射線  
134 （光）は少しずつ出るので、大変弱く暖かさを感じない。雨の強  
135 度の場合、短時間の集中豪雨は極めて危険だ。

136 エネルギーの量と強度を正しく理解し、適正に行動することが  
137 大事だ。科学無視の対応と風評が破滅と悲劇を生む。

138

139 本書の目的は、どこにでもあり千変万化するさまざまなエネ  
140 ルギーを、科学の視点から平易に解説することである。

141 筆者は現在まで 60 年余、国内と海外の大学・大学院で、素粒  
142 子・原子核の研究と研究指導に励んでいる。

143 素粒子・原子核物理は、全ての物や事象を、基本の要素と基本  
144 の力の原点に立って考察する基礎科学である。

145 本書は、エネルギーの基礎である物の基本の要素と基本の力に  
146 基づいて、さまざまなエネルギーの基礎をわかりやすく説明する  
147 ことに重点を置いている。

148 エネルギーの科学を脳心体で正しく理解し、科学的考察に基づ  
149 いて適正に行動する上で、参考になれば幸いである。

150

151

152

153

154

155

156

157

158

159

160

161

162

163

164

165

166

167

168

169

170

171

172

173

174

175

176

177

178

179



213 一方、地球では地下プレートの歪と地震・津波、火山と温泉、  
214 豪雨と台風、猛暑に酷暑、山林火災、等々がある。これらは地球  
215 を取り巻くエネルギー異変だ。

216 化石燃料の炭素、原子核、X線や放射線、太陽光、テレビ電  
217 波、熱情と熱心、等々は日常のエネルギーだ

218 化学合成、燃焼、電池、弓、ばね、等のエネルギーは、物体内  
219 部の分子・原子周辺の電子のエネルギーが基になる。

220 超ミクロの原子核には、巨大な核エネルギーが潜み、その解放  
221 によって炭素の数百万倍のエネルギーが出現した。

222 生命活動もエネルギーが基礎になる。植物は太陽光のエネルギ  
223 ーで葉をしげらせ実を実らせる。動物はそれを摂取して活動のエ  
224 ネルギー源にする。

225 新型コロナウイルスは人からエネルギーをもらって増殖し、  
226 精力的に拡散し、ある時は変異する。

227

228 世の中の多くの物は動いている。宇宙は膨張し、地球は自転・  
229 公転、光やニュートリノや電波は光速で飛び交う。

230 惑星、生物、車、風、海流、等々は全て動いている。ジェット  
231 機は高速で大洋を渡り、情報は光速で地球をめぐる。それぞれ  
232 に、動きに応じた運動エネルギーがある。

233 自然界や社会の諸々の現象や運動の基には、それらを動かして  
234 いるエネルギーがある。したがってそれらに共通するエネルギー  
235 の視点でとらえることが可能だ。

236

## 237 エネルギーは千変万化する

238

239 エネルギーは、所在も形もはっきりしていないが、所を変えて  
240 移動し、時と共に変節する。

241 地下に埋もれた石油に内蔵する電気エネルギーは、燃えて熱エ  
242 ネルギーとなり、温暖化ガスとなって地球に還る。

243 太陽内の水素核の核（原子力）エネルギーは太陽光エネルギー  
244 になり、そのエネルギーで稲が育ち、人は米のカロリーを活動エ  
245 ネルギーに変え、ある時は恋に燃える。

246 ウラニウム金属内の原子核の核エネルギーや化石燃料内の電  
247 子の電気エネルギーは、発電所で高電圧の電気エネルギーにな

248 り、街に送電され、各家庭でスマホを充電、電波の情報エネルギー  
249 一になって各地を巡る。

250 武漢のコロナは世界をめぐり、変異しても姿はコロナだが、エ  
251 ネルギーは全く変わり、元の面影を残さない。

252

253 入力エネルギー＝有効活用エネルギー＋廃棄エネルギーの等式  
254 が成り立つ。活用されたエネルギーは、活用後に捨てられ、活用  
255 されないエネルギーはそのまま捨てられる。

256 LED 電球の場合、入力電気エネルギーの40%くらいが光のエネ  
257 ルギーに変わり、あとは熱エネルギーになる。。

258 世の中のさまざまなエネルギーは、移動し変貌するが、それら  
259 の変化は、エネルギーの科学を基に理解できる。

260

## 261 エネルギー文明と地球の危機

262

263 文明はエネルギーと共に発展してきた。蒸気エネルギーによる  
264 産業革命、電気と電子エネルギー革命、原子核（力）によるエネ  
265 ルギー革新、電波エネルギーによる IT/AI 革命。

266 エネルギー革新によって、生産、消費、日常の諸活動が一新し  
267 た。現代文明はエネルギーに支えられている。

268 最近の100年で世界のエネルギー消費は14倍に急増。人口は  
269 3.5倍で、1人当たりのエネルギー消費は4倍増。同じくエネ  
270 ルギー廃棄も急増。まさにエネルギーの大異変だ。

271 一方、エネルギーが原因で地球と文明が危機にある。石油等の  
272 資源の枯渇、大気と海の汚染、二酸化炭素の急増、常態化した異  
273 常気象、電力危機、食料不足と飢饉。いずれもエネルギーに起因  
274 する深刻な危機だ。

275

276 高所にあるダムの水の重力エネルギーは、発電所で電気エネ  
277 ルギーに変わり、同量の水が下流に廃棄される。

278 石炭の炭素は電気エネルギーが高い。それを燃焼させて取り出  
279 すと、あとにエネルギーの低い二酸化炭素が残る。

280 水が高きから低きに流れるように、エネルギーは高い状態から  
281 低い状態に移る。その際にエネルギーの一部が文明の維持発展に  
282 活用され、残りが地球に廃棄される。

283 現代文明はエネルギーによって栄え、21世紀の地球はエネルギー  
284 によって存亡の危機にある。

285 自然界の生物の一種として、80億人の人間は、その他の多くの  
286 生命体と一つの地球で生き、生かされている。

287 生命現象は、有効なエネルギーを消費し、無用になったエネル  
288 ギーを廃棄するというエネルギーサイクルだ。エネルギーについ  
289 ての正しい科学の認識と科学に基づく適正な行動が、エネルギー  
290 と地球との共存に肝要だ。

291

## 292 エネルギーには科学の法則がある

293

294 20世紀の初め、アインシュタインはエネルギーの基本を明らか  
295 にした。それは質量のある物体に内在する静止質量エネルギー  
296 と、動く物体にある運動エネルギーだ。

297 20世紀には量子力学が確立し、原子、分子、電子、光と電波、  
298 素粒子、原子核、宇宙の基礎科学が大きな進歩を遂げ、エネルギ  
299 ーの基が明らかにされた。

300 物体の基の要素には、分子、原子、電子、原子核、等々の基本  
301 の要素がある。それらには固有のエネルギーがある。

302 エネルギーの基は、重力、電気力、核力、弱い力の四つの力  
303 だ。それに基づく重力エネルギー、電気エネルギー、原子核  
304 (力) エネルギー、放射線エネルギーがある。

305

306 エネルギーには科学の法則がある。エネルギー保存則があり、  
307 エネルギーの形や質は変わっても、エネルギーの総量は変わらない。  
308 エネルギーの入力なしに、エネルギー機関を永遠に作動させ  
309 ることはできない。

310 熱エネルギーの流れ(変化)にはエントロピーの法則があり、  
311 高温から低温に熱エネルギーは移動する。

312 物体の質量に潜む巨大なエネルギー、運動によるエネルギー、  
313 エネルギーを生む基本の力。これらを正しく理解し、エネルギー  
314 の基本法則に則って考えることが肝要だ

315

## 316 自然と生活の多様なエネルギー

317

318 エネルギーは、自然と生活のあらゆる分野に關与している。物  
319 理、化学、生命、地学、等の理学と、電気通信、機械、原子力、  
320 等の工学の広い学問分野が關係している。

321 農水産、医薬、工業、等の各種の産業、IT/AI 情報、消費と生  
322 産、経済、レジャー、スポーツ、研究開発、等々の諸活動は、全  
323 てエネルギーが基になる。

324 さまざまなエネルギーの科学やエネルギー問題は、個々の分  
325 野、業界、問題ごとに、個々に論じられている。

326

327 実際、さまざまなエネルギーに応じて、各学会や各業界ごと  
328 に、独自のエネルギーをはかる物差しと呼び方がある。

329 仕事のエネルギーはジュールとエルグ、仕事をするのに必要な  
330 糖分や脂肪は大カロリーだ。

331 電力エネルギーの強さと量はワットとワット時で、電力を使っ  
332 て灯す LED の光のエネルギー強度はルーメン。

333 地震はマグニチュード、津波は高さ X メートル（註 2）、噴火  
334 の大きさは噴火物（溶岩）の体積でいう。

335 気象の場合、大気と海水は温度、豪雨は 1 時間当たりミリメー  
336 トル、豪雪はある時間の積雪センチメートル、台風はヘクトパス  
337 カル。毎年の異常気象は何十年に一度。

338 同じ光や電波のエネルギーでも、さまざまな呼び方をする。太  
339 陽光は 1 平米のキロワット、星の光は X 等星、可視光は赤から紫  
340 の 7 色、スマホの電波（光子）はギガヘルツ、放射線（光）はベ  
341 クレルとシイベルト。一方音波の高さはドレミファで強さはデシ  
342 ベル。

343 100 種のエネルギーの量や強度に 100 種の呼び方がある。日常  
344 生活に便利な呼び方と合わせて、科学としての統一した量と強度  
345 の認識と理解が必要だ。

346 さまざまなエネルギーに共通するエネルギーを、一つの科学の  
347 視点で論ずることが大事である。

348

## 349 エネルギーの科学

350

351 「エネルギーの科学」では多種で多様なエネルギーを、科学の  
352 一つのコンセプトとしてとらえ、あらゆる物体や運動にある、さ

353 まざまなエネルギーの量と変化を、科学の法則に則って考察す  
354 る。

355 本書は9章から成る。第1章はエネルギーの基礎だ。基本の要  
356 素、基本の力、基本の法則について解説する。

357 次の第2章では、日常の熱・電気エネルギーや太陽（原子力・  
358 核）エネルギーについて述べ、石油（炭素）、電気、核エネルギ  
359 ーの有効活用と、資源や廃棄物の問題に触れる。

360 第3章以下は各エネルギーについての解説だ。第3章では私た  
361 ちの地球をめぐるさまざまなエネルギーを紹介し、天地異変のエ  
362 ネルギー、エネルギー資源、地球温暖化を論ずる。

363 物体内の電子の電気エネルギーは、石油や糖分の炭素エネルギ  
364 ー、ばねの弾性エネルギー、海水や気温エネルギーなどに現れ  
365 る。第4章ではこれらの電気エネルギーを述べる。

366 第5章は原子分子内の電子のエネルギーと電子の動きによる光  
367 や電波のエネルギーについて説明する。

368 原子核と太陽エネルギーと放射線のエネルギー（註3）は、原  
369 子核エネルギーだ。原子核と放射線のエネルギーの仕組みと活用  
370 について、それぞれ第6章と第7章でわかり易く解説する。

371 素粒子と宇宙はエネルギーの最前線である。ニュートリノの質  
372 量エネルギー、未知の素粒子のエネルギー、その究明に向けて挑  
373 戦が続く。

374 宇宙は無限に近い物質やエネルギーが満ちている。殆どがダー  
375 クマターやダークエネルギーで、見えない未知のエネルギーだ。  
376 これらの最先端のエネルギーを第8章で述べる。

377 最後の9章でさまざまなエネルギーの換算や比較表を示す。全  
378 く違う形のエネルギーを一つの物差しで見る。

379

380 註1. 宇宙全体のエネルギーの大部分は、見えない物質のダークマ  
381 ター（暗黒物質）や見えないエネルギーのダークエネルギー  
382 （暗黒エネルギー）だ。第8章で詳しく述べる。

383

384 註2. 3.11の宮古市の田老地区。10メートルの巨大防潮堤内の  
385 街中、広報車の「津波は4メートル」という情報に多くの住民  
386 は安堵した。実際の津波は、全てを破壊し、140トンの巨石を  
387 内陸に押し上げた。現在は新設の15メートルの超巨大防潮堤

388 内の街中、津波報道は前と同じく高さをメートルでいう。巨大  
389 なエネルギーを伝えるべきだ。

390

391 註3．原子核や放射線は、世界の主要エネルギーの一つだ。それ  
392 らの科学を脳心体で適正に理解する人は、政界、官界、学界に  
393 極めて少なく、科学に基づかないことによって、毎年多くの犠  
394 牲が払われている。

395

396

397

398

399

400

401

402

403

404

405

406

407

408

409

410

411

412

413

414

415

416

417

418

419

420

421

422

## 423 1.1. エネルギーの正体

424

### 425 1.1.1. エネルギーの正体と科学

426

427 自然界の森羅万象や日常の諸活動は、エネルギーが基になって  
428 いる。しかしエネルギーは目で見たり手に取ってみることができ  
429 ない。まさに捕らえどころのない「もの」だ。

430 太陽エネルギー、原子力エネルギー、化石燃料（石油・石炭）  
431 エネルギー、食糧エネルギー、等々のさまざまなエネルギーがあ  
432 る。それらは、全く異なっているように見える。しかし、どれに  
433 も「エネルギー」という共通するものがある。

434 可視光線は見えるが、赤外線や放射線は見えない。いずれも光  
435 でエネルギーがあり、ある程度のエネルギー量があれば、暖かく  
436 感ずる。熱意のエネルギーは、見えないが人をうごかす。

437 地下に潜んでいる高温のマグマやプレートの歪のエネルギー  
438 は、突如、火山爆発や地震となって巨大な姿を現す。

439 一方、エネルギーは姿形こそさまざまだが、その量ははっきり  
440 していて、一つの物差しで測ることができる。全てのエネルギー  
441 の単位にジュールやカロリーがつかわれる。エネルギーは、数量  
442 化できる科学の概念（コンセプト）だ。

443

444 数十億トンの石油・石炭は1キログラムのウラニウムと同じ  
445 有効エネルギーを持ち、相互に代替できる。

446 放射線、紫外線、電波などは、いずれも光の一種で、そのエネ  
447 ルギーの量の大小や強弱を比較できる。

448 宇宙や地球はエネルギーに満ちている。輝く銀河、燃える太  
449 陽、公転と自転をする惑星、地球内のエネルギー資源。

450 天地異変もエネルギーが基になる。台風、異常気象、地球温暖  
451 化、天災、等々、全てエネルギー異変が惨禍をもたらす。

452 全ての物体は、基本になる粒子（要素）からなる。アルコール  
453 分子、炭素原子、ウラニウム原子核、電子、光子などの各要素  
454 は、全て固有のエネルギーをもっている。

455

456 文明発展の歴史は、エネルギーの活用の進化の歴史ともいえ  
457 る。化学エネルギー（火）の利用、蒸気エネルギーの変換、電気  
458 エネルギーと IT・AI、原子核（力）と放射線エネルギー、等々の  
459 エネルギー革新が新時代を拓いた。

460 自然と生活のありとあらゆる現象に、エネルギーが深くかかわ  
461 っている。それらを引き起こすのがエネルギーだ。

462 さまざまなエネルギーの正体は何か、どこにどのような形でど  
463 のくらいの量のエネルギーが存在し、それはどのように変わる  
464 か。それらのエネルギーには、どのような法則があるのか。

465 さまざまなエネルギーを一つの科学コンセプトとして、その内  
466 容と量を科学的に考察するのがエネルギーの科学だ。

467

### 468 1.1.2. エネルギーを生む力と運動

469

470 エネルギーの形はさまざまで、時と共に変わる。いずれのエネ  
471 ルギも「力と運動」が基本になる。したがってそれらのエネルギ  
472 ー量は、力と運動の量として、科学的に考察できる。

473 地球上の重さのある物体には、引力、すなわち重力が作用して  
474 いる。地上の石は、質量(重さ)に比例して地球の引力（重力）の  
475 力を受けている。それを同じ力で持ち上げて屋上にあげると、石  
476 にはその力に高さを掛けただけの重力エネルギーが加わる。

477 屋上から石を落とすと、しだいに落下速度が増え、屋上での重  
478 力エネルギーは、落下する石の運動エネルギーに変わる。

479 ダムの水を下に落として発電するのも同じだ。この場合、落下  
480 した水の運動エネルギーは電気エネルギーに変わる。

481 電気のと電気エネルギーは随所にみられる。ガソリンの分  
482 子の中の炭素や水素の周りの電子は、電気のとで結ばれていて、  
483 電気エネルギーを持っている。

484 ガソリンが酸素と化学反応して燃える場合、燃えた後の二酸化  
485 炭素（炭酸ガス）内の電子の電気エネルギーは、燃える前のガソ  
486 リン内の電子の電気エネルギーよりも若干少ない。

487 燃焼の前と燃焼の後の電気エネルギーの差が、化学反応エネル  
488 ギーで、燃えた後では二酸化炭素の運動エネルギーになり、ピス  
489 トンを動かし、車が動く運動エネルギーになる。

490 弓には、引く力と引く長さをかけた弾性エネルギーが蓄えられ  
491 る。そのエネルギーの基は弓の内部の各分子が電気力で引き合  
492 っている電気エネルギーだ。矢を放つと、弓の弾性(電気)エネ  
493 ルギーは矢の運動エネルギーに変わり、矢が飛ぶ。

494

495 原子力は、20世紀に発見された新しい核力という力が基にな  
496 る。核力が作用して原子核(力)エネルギーが生まれる。

497 ウラニウム核内には235個の核子があり、相互に大変強い核  
498 力という力で結びついている。その原子核(力)エネルギーは、  
499 ガソリンの電気エネルギーの数百万倍におよぶ。

500 ウラニウム核は分裂してエネルギーの低い状態になる。分裂前  
501 と分裂後の原子核エネルギーの差が核分裂エネルギーで、分裂核  
502 の運動エネルギーに変わる。そのエネルギー量は、燃焼の際の化  
503 学(電気)エネルギーより数百万倍多い。

504 原子力発電では、超高速の核分裂核の運動エネルギーを、発電  
505 機を通して電気エネルギーに変える。火力発電では、石油などの  
506 燃焼による二酸化炭素の運動エネルギーを発電機を通して電気エ  
507 ネルギーに変える。同じ電気エネルギーを発電するのに、ウラニ  
508 ユウムの数百万倍の重量の石油を要する。

509 太陽の内部では水素核が強力な核力で結合し、原子核エネルギ  
510 ーがある。水素核が融合して燃えると、水素核内の核(原子力)  
511 エネルギーが解放され、それが運動エネルギーに変わり、熱エネ  
512 ルギーに変わり、太陽光エネルギーとなって地球に注ぐ。

513 地球は太陽の引力を受けて、太陽の周りを公転し、太陽系は銀  
514 河の重力を受けて超高速でまわる。したがって、地球や太陽はそ  
515 の質量と回転の速さに応じて、運動エネルギーを持っている。

516

### 517 1.1.3. 物質の成り立ちとエネルギー

518

519 全ての物にはエネルギーがある。宇宙、地球、山海、動植物、  
520 風雨。それぞれに固有のエネルギーがある。それらの物は何で  
521 できており、どこにどんなエネルギーがあるのだろうか？

522 全ての物は基本要素の原子から成り、原子は、中心の原子核と  
523 その周りの電子からなる。さらに原子核は核子から、核子はクオ  
524 ークからなる。これらの各々にエネルギーが潜んでいる

525

526 日常どこにでもある水の場合、コップ一杯の水は、6兆の1兆  
527 倍くらいの水分子からなる。1つの水分子は1つの酸素原子と2  
528 つの水素原子からなる。

529 世の中には約100種類の原子がある。原子は1億分の数センチ  
530 メートル程度大きさの微小な粒子だ。いくつかの原子が組み合わ  
531 かって多種の分子ができ、分子が沢山が集まって物質になる。

532 それぞれの原子の中心には、その原子固有の原子核がある。原  
533 子核の大きさは、直径が1兆分の1センチメートルくらいの超微  
534 小粒子だ。原子の体積は殆どが原子核の周りの電子が占め、原子  
535 核の体積は原子の体積の1兆分の1くらいだ。

536 一方、原子核の質量（重さ）は、周りの全電子の質量の5000  
537 倍程度で、原子の質量の99.9%は原子核の質量である。

538 原子核はいくつかの陽子といくつかの中性子という2種の核子  
539 から成り、核子は3つのクォークからなる。

540 電子は電気があるが、電子の仲間のニュートリノには電気がない。  
541 電子とニュートリノをレプトン（軽い素粒子）という。

542 現在、クォークとレプトンが物質を構成する基本の要素の素粒  
543 子と考えられている。

544 物質のエネルギーは、それを構成する分子、原子、電子、原子  
545 核などの基本の要素のエネルギーとして考えることができる。

546

547 ダムの水の各水分子は、地球と水分子の間の引力に逆らって引  
548 き上げられているので、高さに比例する位置のエネルギーを持っ  
549 ている。ダムから放流されると高速で落下し、位置のエネルギー  
550 は水分子の運動エネルギーになり、水力発電機のタービンをまわ  
551 して電気エネルギーに変わる。

552 水分子内では、酸素と水素の原子内の電子が電気の力で結合  
553 し、電気のエネルギーを持つ。原子内の電子は原子の中心にある  
554 原子核の周りをまわり、位置と運動エネルギーをもっている。

555 太陽内では、水素の中心にある水素核内にある原子核（原子  
556 力）エネルギーが解放され、原子核や電子の運動エネルギーにな  
557 り、やがて太陽光のエネルギーになって四方に放出される。

558

559

#### 560 1.1.4. 基本の力とエネルギー

561

562 世の中の物体内にあるエネルギーは、物体内の力と運動に基づ  
563 いている。物体には基本の要素（粒子）があるように、それらに  
564 作用する力には、四つの基本の力がある。

565 基本の力は、重力、電気の力、核力、弱い力の四つだ。基本の  
566 粒子に基本の力が作用して、基本のエネルギーになる。

567 重力は万有引力としてよく知られている。ある物体 A の周辺に  
568 はその質量に比例して重力が作用する重力の場があり、ある質量  
569 の物体 B は重力の作用で A に引かれる。

570 重力の大きさは、A と B の質量の積に比例し、距離の 2 乗に半  
571 比例する。重力の場のエネルギーは、2 つの質量の積に比例し、  
572 距離に半比例する。重力を伝えるのが重力子だ。

573 地球は太陽の重力場で引力を受けながら公転する。人 (B) が  
574 体重を感じるのは地球 (A) の重力による。地球より軽い月では  
575 人は軽くなり、それだけ高くジャンプできる。

576 A と B の間の引（重）力は大変小さいので、B が引力を感じ  
577 るのは A が地球や月のように大変大きな質量の場合にかぎられる。

578 電気の力は、電荷のある物体の間に作用する。2 つの物体の電  
579 荷の積に比例し、距離の 2 乗に半比例するのは重力と同じだ。2  
580 つの電荷が正 (+) と負 (-) の場合に引き合い、+ と + や - と  
581 - のように同じ符号だと反発する。電気のエネルギーを伝える光  
582 子は、光や電波の基になる粒子だ。

583 ばね、ガソリン、栄養ドリンク、等々の日常の物エネルギーは  
584 電気のエネルギーだ。それらの物のなかの分子や原子内にある電  
585 子は、電気の力の作用で電気のエネルギーをもっている。

586 一方、原子力の基になる核力は、20 世紀になって登場した原子  
587 核に特有な力だ。核力は強い力といわれ、力は大変強いが、超微  
588 小の原子核の世界でだけ作用する原子核特有の力だ。

589 原子核内の核力の基づく原子核エネルギーを取り出して活用す  
590 るのが原子力で、20 世紀後半から広く利用されている。

591 強い力は、原子核の基本粒子である核子を構成しているクオー  
592 クの「色」に作用するので「色の力」といわれる。色の力を伝え  
593 る基本の粒子をグルオンという。

594 弱い力は、原子核内の核エネルギー（ばね）の留め金はず  
595 し、原子核を放射性変換（崩壊）させる。ダムの水門を開いて水  
596 を崩落させることに相当する。

597 原子核の放射線崩壊では、原子核内の原子核（力）エネルギー  
598 が解放され、高い運動エネルギーの放射線が放出され、理、医、  
599 農、工、商、などに広く活用されている。

600 弱い力を伝える基本の粒子は「弱ボソン」で、原子核のような  
601 超微小空間内でだけ作用する。

602

## 603 1.2. エネルギーの原理と変化

604

### 605 1.2.1. アインシュタインの等価原理

606

607 アインシュタインは20世紀初頭の論文で「質量とエネルギー  
608 の等価性」を明らかにした。こうしてエネルギーの基本原理がわ  
609 かり、エネルギー科学の基礎が確立した。

610 物体の全エネルギーは質量に光速  $c$  の2乗をかけた値である。  
611 静止している場合の質量エネルギーは、その質量  $m_0$  を用いて、

612

$$E = m_0 c^2$$

613 となる。物体の静止質量は慣性質量といわれる。

614

615 質量エネルギーは、光速の2乗に比例するので、光速よりもは  
616 るかに遅い日常の運動エネルギーに比べると、極めて大きい。

617 時速40キロメートルの車の運動エネルギーは、車の質量エネ  
618 ルギーの10兆分の1ほどだ。ただし、目に見えるエネルギーは  
619 質量エネルギーではなく、走る車の運動エネルギーである。

620 物質内に潜む巨大な質量エネルギーは、エネルギーとしてでは  
621 なく、ある力で押した場合に、車がどれだけ動き（加速され）に  
622 くいかという慣性質量としてあらわれる。

623 物を動かす場合に必要な力は慣性質量と加速度の積になる。あ  
624 る力を加えて加速する場合、静止質量が大きいほど、慣性が大き  
625 く動きが変わりにくい。動いている物体を停止させようとする  
626 と、質量（慣性）が大きいほど大きな力が要る。

627

628 静止質量エネルギーは、物体自体がその内部に持っているエネ  
629 ルギーだ。1 キログラムの質量の物体は、その内部に1 兆ジュー  
630 ルの1 0 万倍のエネルギーを質量エネルギーとして持っている。

631 エネルギー資源の場合、その物体に内在する質量エネルギーの  
632 一部を、物体の外に取り出し、エネルギーとして活用する。

633 物体内では、物体を構成する分子、原子、原子核、素粒子がそ  
634 れぞれ固有の力のばねで結びついている。そのエネルギーが全体  
635 として物体の質量となっている。

636 物体の質量エネルギーの利用の割合は、物体内のどの部分のエ  
637 ネルギー（質量）を取り出すかによる。化石燃料は内部の電気エ  
638 ネルギーを、原子力は内部の核エネルギーを取り出す。

639 火力発電の場合は石油や石炭の質量エネルギーの100 億分の1  
640 を、原子力発電の場合、原子核燃料の質量エネルギーの1 万分の  
641 3 を、電気エネルギーに変えて利用する。変換効率は、原子力の  
642 ほうが300 万倍大きい。

643

#### 644 1.2.2. 全エネルギーと運動エネルギー

645

646 静止している物体に力を加えると加速されて動き出し、運動エ  
647 ネルギーの分だけ全体のエネルギーが増える。

648 加速された物体の運動エネルギーは、加えた力と動かした距離  
649 の積になる。全エネルギーは、静止質量のエネルギーと運動エネ  
650 ルギーの和になる。

651 アインシュタインの特殊相対論により、全エネルギーは全質量  
652  $m$  を用いて  $mc^2$  で表され、運動量  $p$  を用いて  $(m_0^2c^4+p^2c^2)$  の平  
653 方根で書ける（註1）。 $m$  は運動によって  $m_0$  より増える。

654 運動量  $p$  は速さ  $v$  を用いて  $p=mv$  で、日常の運動エネルギー  
655 は  $mv^2/2$  で書けることはよく知られている。

656

657 日常のマクロの世界では、物体の速さは光速よりもかなり遅  
658 い。したがって、全エネルギーの殆どが静止質量エネルギー、す  
659 なわち物体内部のエネルギーだ。物体が運動しても、運動エネ  
660 ルギーによる全エネルギーの増加は微々たるものである。

661 高速で走行中の新幹線の運動エネルギーは大変大きい。それで  
662 も、その速さは秒速100mくらいで、光速（秒速3億m）の千万

663 分の3くらいだ。したがって新幹線の運動エネルギーは、質量エ  
664 ネルギーの100兆分の5くらいで、その割合は極めて少ない。

665 超音速ジェット機の最高記録はマッハ6.7で、光速の10万分  
666 の7程度である。それでも運動エネルギーは静止質量エネルギーの  
667 分の1兆分の3程度で、全質量は殆ど変わらない。

668

669 一方、ミクロの世界の原子核や素粒子の世界では、全エネルギ  
670 ーと静止エネルギーの関係は一変する。

671 水素の原子核（陽子）を光速の30%くらいまで加速して原子  
672 核の研究を行う場合、陽子の全質量エネルギーは、静止している  
673 ときよりも5%くらい増える。したがって、それだけ重くなり、  
674 加速陽子を制御するには質量の増加分だけ余分に力が要る。

675 電子は大変軽い粒子で、静止質量エネルギーは陽子の2000分  
676 の1程度だ。したがって、中高エネルギーの電子の全エネルギー  
677 は、静止質量エネルギーに比べて大変大きくなる。

678 電子加速器で電子を光速の99%くらいまで加速する場合、電子  
679 の全エネルギーは静止質量エネルギーの6倍くらいになる。

680 原子核や素粒子の実験では、光速の99.9999%から99.999999%  
681 くらいの超高速の電子を使う。その全エネルギーは静止質量エネ  
682 ルギーの700倍から7000倍になり、陽子並みの重さになる。

683 一方、ニュートリノは電子と同じ仲間の軽い素粒子だが、電気  
684 がなく、その重さ（静止質量）は電子の百万分の1以下である。  
685 したがって、その速さは限りなく光速に近く、静止質量エネルギ  
686 ーは、全エネルギーの数百万分の1以下である。

687 尚、光の要素である光子の静止質量は0で、光速で飛ぶ。すな  
688 わち、光子のエネルギーは全て運動エネルギーで、静止質量エネ  
689 ルギーは0である。

690

691 註1. 速さが $v$ の場合の質量は、光速との比の $\beta=v/c$ を用いて、  
692  $m=m_0 / (1-\beta^2)^{1/2}$ と表される。

693

### 694 1.2.3. 質量エネルギーと結合エネルギー

695

696 物体は、基本の要素（粒子）から成り立ち、それらが相互に結  
697 び合っている。物体を構成する全粒子の質量エネルギーとそれら

698 が結合する際の結合エネルギーの総和が、物体の内部エネルギー  
699 一、すなわち物体の静止質量エネルギーになる。

700 物体は分子から、分子は原子から、原子は電子と原子核から、  
701 原子核は核子（陽子と中性子）から成り立っている。それぞれの  
702 各粒子に、静止質量エネルギーと結合エネルギーがある。

703

704 液体の水の分子（静止質量エネルギー170 億電子ボルト 註  
705 1）は電気ので相互に0.4 電子ボルトくらいのエネルギーで結  
706 合している。水に熱エネルギーを与えて水分子の相互の結合を振  
707 り切って蒸発させると、蒸気の水分子の質量エネルギーは、0.4  
708 電子ボルトくらい増え、水中より千億分の2くらい重くなる。

709 塩化水素（塩酸）の分子（静止質量エネルギー350 億電子ボル  
710 ト）は、塩素と水素の原子が電気ので結合している。結合エネ  
711 ルギーは4.3 電子ボルト程だ。塩化水素分子の質量エネルギー  
712 は、塩素原子と水素原子の質量エネルギーの和よりも、結合エネ  
713 ルギー分（百億分の1くらい）だけ少ない。

714 原子は中心の原子核とその周りを回るいくつかの電子から成  
715 り、電子は原子核と電気ので結ばれている。原子内の電子の質  
716 量は、原子核との結合エネルギーの分だけ、電子本来の（原子核  
717 外での）質量より軽くなっている。

718 金の原子内には79 個の電子があり、その電子の結合エネルギ  
719 ーの総和は200 キロ電子ボルトにおよぶ。

720 鉛原子の質量は鉛原子核の質量と自由な（原子内に束縛されて  
721 ない）電子の質量の和よりも、電子の結合エネルギーの分（自由  
722 電子の静止質量の総和の0.5%）ほど軽い。

723 物体の質量の殆どは原子核と電子の静止質量である。分子や原  
724 子内の電子の結合エネルギーに相当する部分は物体の全質量のエ  
725 ネルギーに比べての6－8桁くらい小さい。

726 原子核は核子（陽子と中性子）から成り、原子核内で核子は核  
727 力という強い力で結びあっている。したがって原子核内の核子  
728 は、原子核外の自由空間にいる時の本来の質量（10 億電子ボル  
729 ト）よりも、結合エネルギー（千万電子ボルト）の分だけ軽い。  
730 すなわち、原子核内では1%くらい軽くなっている。

731 核子は3 個のクォークからなるが、クォークは核子の中に閉じ  
732 込められていて、外に取り出すことができない。

733 最近、核子内の3つのクォークの質量の和が核子の質量の数%  
734 に過ぎないことが解った。核子の主な質量は、核子を構成するク  
735 オークの本来の質量ではなく、クォークを閉じ込めている強いば  
736 ねの結合エネルギーによる。

737  
738 註1. エネルギーの単位。1ボルトの電位差で加速した電子のエ  
739 ネルギー。1電子ボルト =  $1.6 \times 10^{-19}$  ジュール。

#### 740 741 1.2.4. 物質の創成と消滅

742  
743 アインシュタンの「質量とエネルギーの等価性」が最も端的に  
744 現れている現象は、物質の創成と消滅である。

745 エネルギーだけを入力して、それを質量に変えて物質を創成す  
746 る。あるいは質量のある物質を消滅させて、その質量をエネルギ  
747 ーに変える。

748 エネルギーの高い光子（ガンマ線）を物質に照射すると、電子  
749 と陽電子（註1）が創成される。ガンマ線のエネルギーの1部は  
750 電子と陽電子を創成するための質量エネルギー（各々50万電子  
751 ボルト）になり、残りは電子と陽電子の運動エネルギーになる。

752 放射性原子核から放射される陽電子は物質中で止まり、原子内  
753 の電子と合体して消滅する。この際、電子と陽電子の質量エネル  
754 ギー（各50万電子ボルト）のエネルギーの各50万電子ボルトの  
755 二つの光子（ガンマ線）が放出される。

756 水素の原子核である陽子を加測器を用いて加速し、高エネルギ  
757 ーの陽子を物質中の水素核（陽子）に衝突させると、陽子と反陽  
758 子（電荷がマイナスの陽子）が創成される（註2）。

759 高エネルギーの陽子の運動エネルギーの1部は、陽子と反陽子  
760 の質量エネルギー（各10億電子ボルト）になる。

761 陽子と反陽子は消滅して数個の中間子になる。陽子と反陽子の  
762 質量エネルギーの和（20億電子ボルト）は中間子の質量と運動エ  
763 ネルギーに変わる。

764 物質の創成と消滅は、素粒子の世界でも頻繁に行われている。  
765 クォークと反クォークの対である中性の中間子は消滅して、2つ  
766 の高エネルギー光子になる。

768 物質の創成と消滅は、電子と陽電子、陽子と反陽子、クオーク  
769 と反クオークのように、粒子と反粒子の対で行われる。粒子の粒  
770 子数を1、反粒子の粒子数を-1とすると、粒子数は+と-で相  
771 殺して変わらない。いつの場合も、粒子数は保存している。

772 現在、粒子数が増えたり減ったりすることがないかどうか研究  
773 が盛んにおこなわれている。

774

775 註1. 1932年、C. アンダーソンが宇宙線の中から発見。1936年に  
776 ノーベル物理学賞。

777 註2. 1955年にE. セグレとO. チェンバレンはベバトロン加速器  
778 を用いて反陽子を発見。1959年にノーベル物理学賞。

779

780

781 1.3. エネルギー保存則とエネルギーサイクル

782

783 1.3.1. エネルギー保存則とエネルギーの形

784

785 物理学の最も基本になる法則に、エネルギーの保存則がある。  
786 エネルギーは、増えることも減ることもない。エネルギーの総量  
787 は、どこでも何時でも変わらず、常に不変で、保存している。

788 エネルギー保存、すなわちエネルギーの総量不変の法則は、宇  
789 宙空間のどの場所でもどの時でも成り立つ原則だ。

790 エネルギーはいろいろな姿形をしている。運動エネルギー、位  
791 置のエネルギー、熱エネルギー、電気エネルギー、栄養ドリンク  
792 のカロリー、放射線エネルギー、原子力エネルギー、アインシュ  
793 タインの云う質量エネルギー、等々。実に多種多様だ。

794 星の光のように見えるエネルギーもあれば、放射線の光のよう  
795 に見えないエネルギーもある。

796 いずれのエネルギーも測ることができる。エネルギーのある場  
797 所や形は変わっても、エネルギーの総量は同じだ。

798

799 坂の上のボールは位置のエネルギーを持っている。その量は、  
800 人が地球の重力（万有引力）に打ち勝ってボールを引き上げたエ  
801 ネルギー入力量（仕事量）と同じだ。

802 ボールが摩擦のない滑らかな坂の下まで転がり落ちる。位置の  
803 エネルギーが運動エネルギーに変わり、ボールは運動する。運動  
804 エネルギーは位置エネルギーに等しく、保存している。

805 ボールは坂の下の面を転がりながらやがて止まる。運動エネル  
806 ギーは全て、地面とボールの摩擦熱に変わり、地球に還る。

807 人工衛星には、地表からの高さの位置エネルギーと、軌道を回  
808 る運動エネルギーがある。人工衛星のエネルギーは、打ち上げロ  
809 ケットのエネルギーの1部が人工衛星に移ったものである。ロケ  
810 ットのエネルギーは、燃料内の電気エネルギーが基になる。

811 原子力船の場合、ウラニウム核燃料の原子核（力）エネルギ  
812 ーは、原子核の質量として、核内に蓄えられている。それを取り  
813 出して熱エネルギーにして船のエンジンを動かし、スクリュウを  
814 回して船の運動エネルギーに変える。

815 原子力船の1連のエネルギー変換の各過程で、変換の効率は  
816 100%ではなく、ロスがかなりあるが、それはエンジンの熱エネ  
817 ルギーになる。航海中、船が海水の摩擦で減速しないように、常  
818 時エンジンに核エネルギーを入力する。

819 エネルギー保存則によって、ウラニウム核の質量エネルギー  
820 入力（質量減少）＝船の運動エネルギーの増加＋エンジンや海水  
821 の摩擦熱エネルギーロスと書ける。

822 原子核の質量エネルギーは、石油の数百万倍も大きいので、航  
823 海に要する核燃料の重量は、石油の数百万倍少なくて済む。した  
824 がって、原子力船は少量の核燃料を積み込むと、数年は燃料の補  
825 給をしなくてもよい。

826

### 827 1.3.2. 時計と永久機関

828

829 エネルギー保存則とエネルギーの流れを考える上で、時計と永  
830 久機関は、いろいろなヒントに富んでいる。

831 振り子時計の振り子は、一番端に振れた時が位置のエネルギー  
832 が最大で、中央に来た時に運動エネルギーが最大になり、エネ  
833 ルギーの形が交互に入れ替わる。

834 振り子の振動はやがて止まるのは、エネルギーが少しずつ心棒  
835 や空気との摩擦で熱となって損失するからである。

836 機械式の振り子時計ではゼンマイで、電池式の振り子時計では  
837 電池のエネルギーを注入してエネルギー損失を補う。

838 ソーラー時計には、太陽からの光のエネルギーを電気のエネル  
839 ギーに変えて充電し、電気の力で針を動かす。摩擦によるエネル  
840 ギー損失は太陽光エネルギーで補う。

841 太陽光は、太陽内の原子核エネルギーを源だ。太陽内の水素核  
842 燃料は 50 億年位は長持ちするが、永遠ではない。

843 エネルギーの補給なしに永久に動いて仕事をする永久機関はな  
844 い。エネルギー保存則により、エネルギー出力とエネルギー損失  
845 の和に相当するエネルギー入力が必要だ。

846 原子内の電子は、固有の軌道を一定の周期で永遠に回りつづけ  
847 るが、それだけでは光の信号を発しないので時刻が解らない。

848 原子時計では、一定のエネルギー（振動数）の光が放出・吸収  
849 する場合の振動数を基に時間の情報を得る。この場合も常に電気  
850 エネルギーを入力し、光の情報出力が得られるようにする。

851

852 物質があるかぎり信号を出し続ける原子核時計がある。筆者が  
853 考案し実証した。100 キログラムのモリブデン原子核は、宇宙の  
854 年齢（135 億年）の 10 億倍の年月にわたって、二重ベータ線とい  
855 う電子の信号を出しつづける。ほぼ永久に近い。

856 信号は毎秒 2 個くらいの電子で、1 兆分の 5 ワットという超微  
857 小信号だ。筆者はその信号をキャッチすることに成功した。

858 原子核時計は永久機関ではなく、毎秒当たり 1 億分の 1 グラム  
859 の更に 100 兆分の 1 くらいの質量エネルギーが入力エネルギー  
860 だ。その内の半分のエネルギーが電子信号にかわり、あとの半分  
861 はニュートリノ（電気のない電子）として逃げてゆく。

862 モリブデン原子核時計のポイントは、原子核エネルギーという  
863 超巨大エネルギーをエネルギー源とし、電子信号という超微小出  
864 力を使うことにある。したがって持続年数が大変長い。

865

### 866 1.3.3. エネルギーの変化と行く末

867

868 エネルギーは保存し、形を変えるだけで、エネルギーの総量は  
869 減らないとしたら、エネルギーは結局どうなるのだろうか。

870 ハイブリッド車にガソリンを 50 リットル満タンにして横浜を  
871 出発し、福島の新大塚山まで往復する場合を考えてみよう。。

872 ガソリンのエネルギーは、ガソリンの分子内の電子に電気エネ  
873 ルギーとして蓄えられている。ガソリンはエンジン内で燃えて二  
874 酸化炭素（炭酸ガス）になり、ガソリン内の電子のエネルギーは  
875 二酸化炭素の気体の運動エネルギー、すなわち熱エネルギーとな  
876 り、エンジンのピストンを動かす。

877 ピストンの運動エネルギーは、車を走らせ車の運動エネルギー  
878 に変換される。二酸化炭素の余熱は地球に廃棄される。

879 山頂で駐車した時点で、それまで消費したガソリンのエネルギー  
880 の 1 部は、山頂の車の位置のエネルギーとして車に蓄えられる  
881 が、殆どはエンジンやタイヤの摩擦による熱エネルギーとして放  
882 出され、道路や周辺をあたためるのに消費される。

883 帰りは山を下るので位置エネルギーの 1 部を車のバッテリーに  
884 戻すので燃費が良くなる。帰宅して駐車した時、車の位置のエネ  
885 ルギーも運動のエネルギーも 0 だ。

886 ガソリンも空、バッテリーの充電状況も出発前と同じとする。  
887 結局 50 リットルのガソリン内の電気エネルギーは、地球と周り  
888 の空気を暖める熱エネルギーに変わったことになる。

889 ガソリンが燃える際に排出される二酸化炭素ガスは地球の熱を  
890 閉じ込め、深刻な温暖化をもたらす。

891 温まった空気中の個々の酸素や窒素の分子は、高速で縦横に飛  
892 び回り、運動しており、熱エネルギーの形をしている。

893 空気中の熱エネルギーを再活用して、もとの車のエンジンのピ  
894 ストンを動かしたり、タービンを回して発電して電気エネルギー  
895 に変えることは、現実的にはできない。

896 一旦地球の放出された低温の熱エネルギーは、それを集めて有  
897 効利用できない（註 1）。

898 EV の場合は、帰宅時の電池の電気が 0 とすると、充電した電気  
899 エネルギーと同量のエネルギーが地球に廃棄され地球を暖める。  
900 充電に火力発電所で発電される電気を使用する EV の場合、ハイ  
901 ブリッド車と同程度の二酸化炭素が地球に排出される。

902 エネルギーは、各過程で形を変えながら変化してゆく。エネ  
903 ルギー総量は保存し変わらないが、有効に活用できるエネルギーは

904 次第に減少し、不要（あるいは有害）な排熱エネルギーが増加す  
905 る。これが文明世界のエネルギー問題だ。

906  
907 註 1. 熱力学の第 2 法則、ないしエントロピー増大の法則。実際  
908 （現実）の世界における法則。詳しくは 4 章で述べる。

909  
910 1.3.4. エネルギー保存則とニュートリノの登場

911  
912 エネルギー保存則は不変不動のものと考えられているが、それ  
913 が確立したのは 20 世紀も後半になってからである。

914 20 世紀の初めに原子核が発見され、放射性原子核 A がベータ線  
915 （電子線）を放出して原子核 B に変換する場合、ベータ線の運動  
916 エネルギーが問題になった。

917 エネルギー保存則により、ベータ線の運動エネルギーは、原子  
918 核 A の質量エネルギーから原子核 B の質量エネルギーと電子の質  
919 量エネルギーを引いた値になると予想される。

920 実測の結果、ベータ線のエネルギーは予想値よりも少く、測る  
921 度にエネルギーの値が変わることが解った。

922 ボーアは（註 1）、ベータ崩壊ではエネルギー保存則が成り立  
923 っていない可能性があると考えた。

924 一方、パウリは（註 2）ベータ崩壊の際に、エネルギーを持っ  
925 て観測器をすりぬけてゆく粒子があると考えた。電気がない中性  
926 の微粒子、すなわちニュートリノだ。

927 パウリの予言から四半世紀後の 1956 年になり、ライネスとコ  
928 ーワンが原子炉から出るニュートリノの測定に成功、ニュートリ  
929 ノが存在することが実証された。

930 観測器を素通りしていたニュートリノのエネルギーを考慮に入  
931 れることによって、エネルギー保存則は、原子核のベータ変換の  
932 際も成り立つことが解った。

933 ニュートリノはレプトンといわれる軽い素粒子の一つで、電子  
934 と同じ仲間だ。電気がないがエネルギーと運動量をもっている。

935 電気がないニュートリノには、電気の力は作用せず、核力も作  
936 用しない。したがって物質中で電気力や核力のブレーキが作用せ  
937 ず、ほとんど減速されることなくすり抜ける。

938 放射核から放出されたニュートリノは、鉛の囲いを通り抜け、  
939 地球を通り抜け、超高速で宇宙のかなたに去って行く。

940 放射性核から放出されるニュートリノの全エネルギーは、数百  
941 万電子ボルト程度だ。そのほとんどが運動エネルギーで、静止質  
942 量エネルギーはその1億分の5以下である。

943 ニュートリノは光速に近い速さで宇宙空間を自由に飛び交って  
944 いるが、その質量は小さすぎて、まだ測られていない。

945 現在、筆者らのグループを含め、世界各地でニュートリノ質量  
946 測定が鋭意進行中だ。

947 ニュートリノは極めて特異な素粒子で、日常生活には殆ど顔  
948 出さないが、宇宙の成り立ちに関与している大変重要な粒子であ  
949 る。第8章で詳しく述べる。

950

951 註1. N. ボーア 1922年 ノーベル物理学賞

952 註2. W.E. パウリ 1945年 ノーベル物理学賞

953

954

## 955 2章 日常のエネルギー

956

### 957 2.1. 日常のさまざまなエネルギー

958

#### 959 2.1.1. 重力と重力エネルギー

960

961 重力エネルギーは、物体Aと物体Bの間の重力に基づくエネル  
962 ギーで、物体Aの質量と物体Bの質量の積に比例する。

963 重力は、質量のある物体間では、地上の物と地球の間でも、惑  
964 星と太陽の間でも、あるいは宇宙の物質でも、同じく作用する力  
965 で、万有引力として知られている。

966 地上の物体Aと物体Bの間の重力は、日常の電気や磁気の力に  
967 比べると、数十桁も小さいので、普段は意識することがない。

968 一方、物体Bの質量が地球や月のように大変大きくなると、物体  
969 AとBとの間の重力は、物体Aの重さとして実感する。

970 1969年、アームストロングとオルドリンはアポロ11号で月面  
971 に降り、人類として初めて地球以外の月による重力を経験した。

972

973 地球上の人間は、地上の物や自分自身と巨大な地球との間の重  
974 力と重力エネルギーに深くかかわってきた。

975 体重 60 キログラムの人には、地球の中心方向に 600 ニュート  
976 ン程の重力が作用している。10 メートルの丘に登るには 6000 ジ  
977 ュールのエネルギーを要する。それだけその人の重力エネルギー  
978 が増える。丘を降りた場合は重力エネルギーが減り元に戻る。

979 重力エネルギーは地球の水平面からの高さ、すなわち位置によ  
980 るので、位置のエネルギーといわれてる。

981 人間は質量があるので、動くたびに運動エネルギーが増減す  
982 る。時速 5 キロメートルで歩き出すには 60 ジュール、時速 25 キ  
983 ロメートルで走るには、1500 ジュールの運動エネルギーが増え  
984 る。走ったり歩いたりするたびに、運動エネルギーが変わる。

985 朝起きて一日活動中の人は、常に数千ジュール程度の重力エネ  
986 ルギーと運動エネルギーが増えたり減ったりしている。ただし、  
987 就寝時には、二つのエネルギーの増減は 0 になる。

988 普通の人、活動のための 1 日 8 百万ジュール (2000 キロカロ  
989 リー) のエネルギーを使う。消費したエネルギーは、主に熱エネ  
990 ルギーとなって地球に放出される。

991 高さが 5m の木の枝にある 200 グラムのリンゴの重力エネルギ  
992 ーは 10 ジュール、下に落ちる瞬間は秒速 10 メートルの速さで、  
993 運動エネルギーは同じ 10 ジュールだ。地面に落ちた後は 10 ジュ  
994 ウルの熱エネルギーに変わる。

995 剛腕ピッチャーが投げた時速 150 キロメートルのボールは 120  
996 ジュールの運動エネルギーがある。もし真上に投げれば 85 メー  
997 トルまで上がって、運動エネルギーは全て重力エネルギーに変  
998 り、地表に落ちた後は、主として熱エネルギーになる。

999 地球の外に目を向ければ、重力と重力エネルギーの例は、太陽  
1000 という巨大な重力エネルギーの場で回る地球やその他の惑星、地  
1001 球の重力エネルギー場で回る月や人工衛星など、多々ある。

1002 地球上の人が太陽の重力を感じないのは、太陽を回る際の遠心  
1003 力と相殺するからである。人工衛星内では、地球による重力と、  
1004 地球の周りを回る際の遠心力の和が 0 になり、無重力の状態にな  
1005 っているように感ずる。

## 1006 1007 2.1.2. 熱エネルギーと温度

1008

1009 熱エネルギーは、日常生活のどこにでもあり、広く活用されて  
1010 いる。熱エネルギーの多寡は温度で表される。

1011 燃える火の温度、気温、海水温、体温、地球内のマグマ、  
1012 等々。物体の熱エネルギーは温度を計れば解る。星の光のエネル  
1013 ギーや太陽光のエネルギーも星や太陽の温度を反映している。

1014 暖炉の薪や石油ストーブに灯油を燃やして、各燃料のエネルギ  
1015 ーを入力（消費）して部屋を暖める。燃料のエネルギーに効率を  
1016 かけたエネルギーが部屋の空気の各分子の運動エネルギーにな  
1017 り、空気の熱エネルギーとなり気温が上がる。

1018

1019 気体中の各分子の運動エネルギーは、絶対温度（摂氏温度＋  
1020 273）に比例し、温度が1度増えると1万分の1電子ボルト程度  
1021 の運動エネルギーが増える。

1022 個体や液体の場合も、気体と同じように、原子や分子の種々の  
1023 振動などの運動エネルギーの総和が熱エネルギーとなる。各原子  
1024 や分子の運動エネルギー、すなわち熱エネルギーは、気体の場合  
1025 と同じように、絶対温度で表される。

1026 高温の蒸気の熱（運動）エネルギーをピストンの運動エネルギ  
1027 ーに変えるのが蒸気機関だ。ワットが考案した。

1028 石油や石炭などの燃焼による高温ガスの熱（運動）エネルギー  
1029 を、ピストン運動に変えて動くのが、ガソリン車や船舶である。  
1030 ジェット機は高温ガスの熱運動が機体を前に押す。

1031 人間自身が仕事や運動をする場合の運動エネルギーも、エネル  
1032 ギーが基になっている。毎日の3度の食事から、2千キロカロリ  
1033 ーほどのエネルギーを体内に入力し、体の各組織の電気エネルギ  
1034 ーを経由して、体が動く運動エネルギーに変わる。

1035

1036 物体の基本要素である各原子や分子の運動エネルギー（熱エネ  
1037 ルギー）表す温度は、その物体の状態をエネルギーの視点から計  
1038 った量で、正常か異常かの診断に使われる。

1039 部屋の温度、四季の気温、海水温、体温、これらは日常使われ  
1040 る各分子当たりの熱エネルギーの指標である。それらが1度（絶  
1041 対温度の0.3%）ほど正常値より高いと、熱中症、地球温暖化、  
1042 超大型台風、コロナ感染などの危険信号になる。

1043 高温の物体内では、電荷のある格子や粒子が振動運動をして、  
1044 輻射光が放出される。物体内の振動運動エネルギーは絶対温度に  
1045 比例し、輻射光のエネルギーは絶対温度の 4 乗に比例する。

1046 輻射光は、白熱電球の光、暖炉からの赤外線、太陽や星の光、  
1047 等々があり、日常なじみが深い。

1048 熱意、情熱、熱い恋といった心の状態を表すのにも、熱という  
1049 エネルギー表記を用いる。これらの「心の熱」は脳細胞のどこか  
1050 にある電気エネルギーと考えられるが、その温度の計測法は研究  
1051 中だ。AI（人工知能）に期待したい。

### 1052 1053 2.1.3. 電気と磁気のエネルギー

1054  
1055 電気を利用したエネルギー革命は、現代の文明を築き、日常生  
1056 活を一新し、新しい未来を造りつつある。

1057 19 世紀に始まった電気や磁気のエネルギー革命、20 世紀の半  
1058 導体と電波利用による IT（Information Technology 情報技術）  
1059 革新、更に 21 世紀の AI 登場。電気エネルギーによる革命と革新  
1060 は現在も進行中である。

1061 エネルギーを、必要なときに必要な場所で必要な形で活用でき  
1062 るようにしたのが、電気エネルギー革命のポイントだ。すなわ  
1063 ち、エネルギーを自由にコントロールできるようになった。

1064  
1065 19 世紀のファラデー等による電磁誘導を活用することによっ  
1066 て、水力、風力、火力、原子力などのエネルギーは、それぞれの  
1067 発電所で電気エネルギー変えられ、いたるところで常時、電気エ  
1068 ネルギーとして供給され、活用されている。

1069 19 世紀半ばのスワンの電球の実現や、エジソンによる改良によ  
1070 って、電気エネルギーは光エネルギーに変換され、昼夜を問わ  
1071 ず、各所で必要な時に照明光が得られている。

1072 テスラやマルコに一等によって、電気エネルギーの 1 部は電波  
1073 のエネルギーに変換され、通信革命がもたらされた。

1074 蓄電池や乾電池の実現によって、どこでもいつでも電気が得ら  
1075 れる。リチウム電池によって、パソコンやスマホが長時間使用で  
1076 き、情報の受信、発信、処理が常時できる。

1078 現代の情報革命は、20世紀半ばの半導体の発見と、それに続く  
1079 科学・技術の進歩による。IT機器の諸素子の高速化と大容量化  
1080 は、大量データの高速処理が可能にし、IT革命がもたらされた。

1081 20世紀後半、交通と通信の進歩によって、グローバル化  
1082 が進んだ。それを進めたのが電波を駆使したIT革新だ。

1083 世界のどこにいても常時コミュニケーションが取れる。書庫や図  
1084 書館が消え、固定したオフィスも消えようとしている。

1085 最近のAIの急速な進歩は、ある部分で人間の脳の働きを超え  
1086 ようとしている。AIは自ら学び、論理的に考える力を身につけ、  
1087 独創性を発揮し、独自の進歩をする。

1088 21世紀、ITとAIはエネルギー改革を主導し、新しい日常が造  
1089 られつつある。それにCOVID-19が拍車をかけた。ITとAIとの共  
1090 存が必須である。

#### 1091 1092 2.1.4. 太陽光と星の光のエネルギー

1093  
1094 太陽光は、古今東西、いつの時代もあまねく地球上に降り注い  
1095 でいる。全ての生物は、太陽光とそのエネルギーによって、活動  
1096 し命をつないでいる。人類の文明も、直接ないし間接的に、太陽  
1097 光と太陽エネルギーに支えられている。

1098 日常の明るさは、昼は太陽からの可視光による。山間の夜道の  
1099 明るさは太陽光の月面反射光に、新月の夜は星の光による。

1100 太陽光のエネルギーを受けて、大気や地表の分子の運動エネル  
1101 ギーが増えて空気が温まる。太陽光によるエネルギーと地球の放  
1102 熱とのバランスで、地上の温度が適正に保たれてきた。

1103 近年は化石燃料による温暖化ガスの急増で、地球の放熱が妨げ  
1104 られ、バランスが崩れて、世界各地で異常気象が続いている。

1105 地球の公転で、太陽光エネルギーが変化し、四季がある。太陽  
1106 光エネルギーによって風雨があり、太陽光エネルギーは、海洋を  
1107 暖め、台風や集中豪雨のエネルギー源となる。

1108 人々の生命維持のためのエネルギーや日常活動のエネルギー  
1109 は、主に農作物の食物のエネルギーから得る。農作物は、太陽エ  
1110 ネルギーの光合成によって造られる。

1112 日常のエネルギーの殆どは、原子力を除いて、化石燃料や農作  
1113 物の有機体の炭素から得られるが、廃棄物としてその3倍の2酸  
1114 化炭素ガスが排出される。それを森林の葉緑体による光合成で有  
1115 機体の戻すのも、太陽光の重要な役割である。

1116 太陽が西の沈むと、太陽光の反射を受けて月が輝きだす。月の  
1117 視光度（見える明るさの光のエネルギー）は太陽より14等級大  
1118 きい。すなわち太陽の40万分に1くらいの明るさだ。

1119 星には惑星と恒星がある。惑星は太陽の周りを公転するので、  
1120 地球から見ると、さまよえる星に見える。惑星の光も太陽の反射  
1121 光で、金星の明るさは月の2000分の1くらいである。

1122 恒星は太陽と同じで、自分で輝いている。1等星、2等星等、  
1123 明るさによってさまざまな星が沢山ある。

1124 星の等級が1小さくなると2.5倍明るくなる。恒星には数十光  
1125 年の近くにある星もあれば、数十万光年の遠くの星もある。

1126 地球に近くの星程、地球の人に見える光が増え、明るく見え  
1127 る。恒星から発する光量やエネルギーが大きくても、遠いとかす  
1128 かに見える。恒星は殆ど動かないので航海に利用されてきた。

1129  
1130 太陽光も恒星の光もそのエネルギーの基は、太陽や星の中心で  
1131 燃えている水素の原子核（力）のエネルギーだ。

1132 水素の原子核が核融合反応を起こして重水素核になる際に、原  
1133 子核エネルギーが解放され、それが熱エネルギーになり、太陽表  
1134 面から太陽光が輻射される。

1135 尚、太陽光と地球放熱については3.2節で、太陽エネルギーと  
1136 核融合反応については6.2節で、恒星のエネルギーについては、  
1137 8.2節で詳しく述べる。

## 1138 1139 2.2. エネルギーの活用

### 1140 1141 2.2.1. 重力エネルギーの活用

1142  
1143 自然界にはさまざまなエネルギーがある。個々のエネルギーの  
1144 量は保存し変わらないが、エネルギーの形や質が変わる。

1145 人類は、種々のエネルギーを、利用しやすい形に変えてエネル  
1146 ギーの質を向上させて有効活用し、文明を発展させてきた。

1147 河川の水は、上流では高さに応じて重力（位置）エネルギーを  
1148 持ち、下流の水は重力エネルギーは少ない。いずれも相応の運動  
1149 エネルギーを持つ。人々は有史以来、河川の水のエネルギーを水  
1150 車の回転運動エネルギーに変えて利用してきた。

1151 水力発電は、上流の水をダムに蓄え、下流に流し、タービンを  
1152 回して発電する。水 1 トン当たり、100 メートルの落差の場合、  
1153 秒速 45 メートル（超大型台風並み）の高速でタービンの羽根に  
1154 あたり、千キロワット近い電力エネルギーを得る。

1155 高所のダム湖の水の位置エネルギーは、100 メートルの落差の  
1156 場合、1 分子当たり 1 万分の 2 電子ボルトで、100 度 C の水蒸気  
1157 と比べて 2 桁以上小さい。1 グラム当たりのエネルギーは、1  
1158 ジュールで、石油の 5 万ジュールに比べると 4-5 桁少ない。

1159 水の重力エネルギーの場合、分子当たりや重さ当たりのエネル  
1160 ギーの少いが、エネルギー源である水の量は数億トン程度で十分  
1161 に大量なので、有用なエネルギー源である。その水は、太陽が海  
1162 の水を蒸発させ、雨を降らせて高所のダムまでに運んでくれる。

1163 ダムの水量や電力需要に応じて、取水口での水量やダムの放流  
1164 を調整し、発電量をコントロールする。

1165 水力エネルギー、変換効率が 80%位で電力という形に変えら  
1166 れ、大変活用しやすい。ただし膨大な自然破壊と森林喪失が伴う  
1167 場合が少なくなく、二酸化ガスの吸収が減って温暖化が進む。

1168 黒部ダムによる同第 4 発電所は、戦後の産業復興に大きな貢献  
1169 をした。尊い犠牲のもとに、1963 年に完成、545m の落差があ  
1170 り、3 億ワットの発電能力がある第 1 級の水力発電だ。現在、日  
1171 本の水力発電の 1 %、日本全体の 0.1% の電力を提供している。

1172  
1173 最近の統計によると、日本の電力需要の 8 % くらいが水力発電  
1174 による。世界全体では、16%程度が水力発電によるので、日本の  
1175 場合、水力の占める割合は世界平均の半分である。スイスやカナ  
1176 ダやブラジルは全需要の 60%程度を、ベトナムは 45%程度の電  
1177 力を水力発電で得ている。

1178 潮汐発電は、月と地球の重力（万有引力）と地球の自転のエン  
1179 ERGYの活用だ。潮汐を利用して満潮時に貯水槽に海水を満た  
1180 し、干潮時に海水を流して発電する。

## 2.2.2. 炭素と火のエネルギーの活用

古来、人々が使用してきたエネルギーは火である。薪を燃やして暖を取り、ある時は肉を焼いて、人間らしい生活を始めた。

近世になり石炭や石油を燃やして大々的に火のエネルギーを利用して、産業革命を起こし近代文明を築いた。

火の利用は、物体内の電気のエネルギーの活用だ。薪や石炭や石油などの燃料内の分子の中には炭素原子が沢山あり、炭素原子の周りの電子には大きな電気エネルギーがある。それを燃やして炭素と酸素を合体させて取り出す。

物体の要素である原子や分子内には、いくつかの電子があり、さまざまな運動をしている。したがって電子の状態（位置や運動）に応じて、電気や磁気のエネルギーが存在している。

物体の原子や分子当たりの電子のエネルギーは、その原子や分子の重力エネルギーよりも4-5桁大きい。

原子や分子内の電子のエネルギーを取り出すには、燃焼という化学反応を用いて、原子や分子の表層にある、エネルギーの高い状態の電子を、エネルギーの低い別の状態に変える。

燃焼の前後の電子の状態のエネルギー差が、化学反応ないし燃焼エネルギーで、燃焼後の物体内の分子や二酸化炭素の分子の運動エネルギーになり、熱エネルギーとして活用される。

物体内の電気エネルギーから得られる熱エネルギーは、数千度—数百度の高温なエネルギーで、大変有用（良質）なエネルギーとして活用される。活用後は、多くの場合は常温の無用の廃熱エネルギーとなって地球に放出される。

物体内の電子の電気エネルギーとして、実生活に活用されてきたのは、主として有機物内の炭素と水素の表層電子だ。

近世までは、主として薪や油の分子の炭素が使われてきたが、現在はもっぱら化石燃料（石油、石炭、天然ガス）やバイオマスなどの有機体分子内の炭素と水素が使われている。

有機体中の炭素と水素を外気からの酸素と化学反応（燃焼）させて、二酸化炭素と水に変える。この反応に関与する電子のエネルギー変化、すなわちエネルギー差を二酸化炭素分子と水分子の運動（熱）エネルギーに変える。

1217 エネルギー活用としては、専ら炭素と酸素の電子エネルギーが  
1218 活要されているのは、炭素や酸素が大量にあることと、電子が高  
1219 いエネルギー状態にあることとによる。豊富な水が、山間の高所  
1220 のダムにあることに対応している。

1221 炭素の酸化反応以外にも、鉄の酸化熱利用や、溶解熱利用など  
1222 がある。いずれも電子のエネルギー落差を利用するが、特殊利用  
1223 に限られ、エネルギー量としては微々たるものである。

1224 最近の統計によると、日本の1次エネルギーの使用量は  $1.3 \times$   
1225  $10^{16}$  キロジュールで、その内の90%程度が化石燃料だ。一次エネ  
1226 ルギーの内、フランスでは50%程度、カナダは65%程度、ドイ  
1227 ツでは80%程度が化石燃料による。日本の化石燃料が突出し、し  
1228 たがって温暖化ガスの排出が大変多い。

### 1230 2.2.3. 発電と電気エネルギー

1232 現代文明は電気エネルギーの活用によって拓かれた。現代のIT  
1233 も最近のAIも、電気エネルギーの革新に基づいている。

1234 発電所では、燃焼気体の運動エネルギーを電気エネルギーに変  
1235 え、EV車では電気エネルギーをモーターを通して車の運動エネ  
1236 ルギーに変えることが可能になった。

1237 現在、種々の一次エネルギーの多くの部分は、発電機を通して  
1238 電気エネルギーに変換され、各方面に活用されている。

1239 太陽光発電の場合は光エネルギーが直接電気エネルギー変え  
1240 る。水力発電、原子力発電、火力発電の場合は、それぞれ、重力  
1241 エネルギー、原子核エネルギー、電気エネルギーを一旦運動  
1242 (熱) エネルギーに変える。それらの熱エネルギーをさらに発電  
1243 機の回転運動エネルギー変えて、それを電気エネルギーに変え  
1244 る。

1245 日本の場合、年間3.6兆キロワット時程度の1次エネルギーの  
1246 内、大半を発電用に使用し、1兆キロワット時程度の電力にして  
1247 活用している。そのために使用される1次エネルギーは、80%が  
1248 化石燃料で、原子力、水力、太陽光などのクリーン燃料は20%に  
1249 満たない(註1)。

1250 1次エネルギーを電気エネルギーに変換する場合、30-50%のエ  
1251 ネルギーが、電気エネルギーという極めて利用性の高い、すなわ

1252 ち良質なエネルギーに変わる（註2）。残りの70-50%は、無用な  
1253 熱エネルギーとして地球に放出される。

1254 発電所から各地に送られた電気エネルギーは、産業、交通、  
1255 家庭など、活用されている。発電された電気エネルギーのある部  
1256 分は電池に蓄えられ、ある部分は電波として利用される。

1257 1次エネルギーを発電というエネルギー変換によって、エネル  
1258 ギーの総量は減るが、エネルギーの質を何倍も高めることによっ  
1259 て、現代のエネルギー環境が一新された。

1260 一方で、有効活用電力エネルギーの3倍程度のエネルギー  
1261 が、発電や送電の際に失われている。

1262  
1263 註1. 2017年の資源エネルギー庁統計による

1264 註2. 水力発電の場合、落下して一定方向に流れる水の運動エネ  
1265 ルギーを電力に変えるので、80%が電力に変換される。化石  
1266 燃料や原子力の場合は、方向が揃っていない熱エネルギーを  
1267 電力に変えるので、効率が30-50%程度なる。

#### 1268 1269 2.2.4. 太陽光と原子の活用

1270  
1271 太陽光のエネルギーは、1平方メートル当たり1キロワット程  
1272 度だ。古来、人々は生きるために必要なエネルギーを、太陽光で  
1273 育った動植物を食料として摂取してきた（註1）。

1274 太陽光エネルギーを電力エネルギーに変換して活用するのは、  
1275 20世紀の終わりからである。

1276 太陽光発電では、太陽光エネルギーを使って半導体のエネルギ  
1277 ーの低い状態にある電子を、エネルギーの高い状態に引き上げ、  
1278 電流を流れるようにして直流の電気を得る。（註1）家庭では、  
1279 直流をコンバーターで交流に変えて使用する。

1280 風力も太陽光による。昼間は太陽光によって陸地が暖められ気  
1281 流が上昇、海から風が吹く。夜は逆に海から風が吹く。

1282 風の中の空気分子の運動エネルギーを回転エネルギーに変える  
1283 風力利用の歴史も古い。中世から近世にわたって風車として世界  
1284 各地で利用されてきた。

1285 風の中の分子が風力発電の羽に与えるエネルギーは風速の 2 乗  
1286 に比例し、毎秒当たりの分子の数は風速に比例するので、発電の  
1287 エネルギーは風速の 3 乗に比例する。。

1288 風力を利用した発電としては、19 世紀の終わりに 3 - 12 キロ  
1289 ワットの発電に成功した。21 世紀になり、風力発電は、自然のク  
1290 リーンエネルギーとして、急成長している。

1291 太陽光エネルギー、風力エネルギー、2.2.1 節で述べた水力エ  
1292 ネルギーは、自然エネルギーといわれる。いずれも太陽光エネル  
1293 ギーを基にしており、太陽光は太陽内の原子核（原子力）エネル  
1294 ギーによって供給される。

1295 現在の地球上での原子核（原子力）エネルギーは、原子力発電  
1296 により電気エネルギーに変えて、広く活用されている。

1297 原子力発電は、従来の化学反応・電気エネルギーに対して、原子  
1298 当たり数千万倍のエネルギーを常時どこでも提供する。

1299 原子核（原子力）エネルギーの実現によって、輸送、資源、廃  
1300 棄物といった従来のエネルギーの諸問題が一掃された。

1301 放射線は、原子核エネルギーをもつ粒子線で、科学、産業、医  
1302 学、農業等々の広い分野の技術革新をもたらした。

1303  
1304 尚、最近の日本の電力の内、太陽光が 8%程度、水力が 7.5%程  
1305 度、風力が 1%程度、原子力が 6%程度で、合わせて 23%くらいが  
1306 原子核系のエネルギーで、残りの 78%くらいが炭素系の化石燃料  
1307 (75%) とバイオマス (3%) による (註 2)。

1308 世界の 2017 年の統計では、太陽光が 2%程度、水力が 16%、  
1309 風力が 4%程度、原子力が 10%程度で、合わせて 32%くらいが原  
1310 子核系のエネルギーで、残りの 68%くらいが炭素系（主として化  
1311 石燃料）だ (註 1)。

1312 尚、原子核（原子力、太陽）と放射線の各エネルギーの科学に  
1313 ついては、それぞれ第 6 章と 7 章で詳しく述べる。

1314  
1315 註 1. 水力発電の場合の、位置（重力）のエネルギーの高い高所  
1316 のダムの水を、下に流して発電することに相当する。

1317 註 2. 資源エネルギー庁 HP 2019 のエネルギー資料

1318  
1319 2.3. エネルギー問題の科学

1320

### 1321 2.3.1. エネルギー資源

1322

1323 エネルギー保存則により、地球内外にあるエネルギーの総量は  
1324 変わらない。しかし、エネルギーの活用法によって、エネルギー  
1325 の状態(質)が変わる。

1326 有用で活用しやすい状態(良質)のエネルギーは、種々の活動  
1327 に利用され、無用な状態(劣質)のエネルギーに変わる。

1328 有用な状態のエネルギーがエネルギー資源となる。一般に、燃  
1329 料の要素である原子や分子当たりのエネルギーが大きい(高温)  
1330 ほど活用しやすく、有効なエネルギー資源である。エントロピー  
1331 の法則に基づいて、熱は高温から低温に流れて仕事をする。

1332 太陽光の要素である光子のエネルギーは、太陽表面の高温を反  
1333 映して、数電子ボルトで、大変良質なエネルギー資源だ。

1334 太陽光エネルギー資源の量は、年間 50 億ペタジュール(ペタ  
1335 は千兆)程度で、世界の年間の消費エネルギーの 1 万倍だ。

1336 現在の太陽光利用は、直接利用による発電の 2700 ペタジュー  
1337 ルと、間接利用の風力発電と水力発電を合わせて、年間 2 万 3 千  
1338 ペタジュール程度で、入力エネルギーの 10 万分の 5 程度だ。

1339 化石燃料(石油、天然ガス、石炭)の場合は、過去の太陽光エ  
1340 ネルギーによって生成された生物(有機物)内の炭素や水素の電  
1341 気エネルギーを利用する。組成は主に(80%程度)が炭素なの  
1342 で、炭素系のエネルギー源だ。

1343 炭素原子当たり 5-6 電子ボルトの高いエネルギーを持った良  
1344 質のエネルギーで、燃焼熱や発電に使われている。

1345 化石燃料のエネルギー資源の量は、石油と天然ガスが 1 千万ペ  
1346 タジュール、石炭が 4 千万ペタジュール程度で、石油と天然ガス  
1347 で 50 年、石炭で 100 年程度の資源量だ。

1348 オイルシェールやオイルサンドが注目され、アメリカなどで活用  
1349 されている。資源量は石油の 2.5 倍程度である。

1350

1351 原子核(原子力)エネルギー資源として、ウラニウムの核分裂  
1352 エネルギーが活用されている。ウラニウム 1 原子(核)当たり  
1353 2 億電子ボルトの超良質のエネルギー源で、ウラニウム 1 トン  
1354 で石油 200 万トン分に相当する。

1355 ウラニウムは比較的多量にある金属で、活用できる資源量は  
1356 600 万トン程度、エネルギーにして5億ペタジュールくらいだ。  
1357 現在の世界の1次エネルギーの700年分に相当する。

1358 海中のウラニウム45億トン、350億ペタジュールを含めると、  
1359 資源量は無限に近い。

1360 現在使用しているウラニウム235は、天然のウラニウムの  
1361 0.7%に過ぎない。天然のウラニウムの主成分のウラニウム  
1362 238を活用するには、高速増殖炉を使う。

1363 高速増殖炉は、脱炭素の依って地球を救い、エネルギー問題を  
1364 解決する現実的方法である。原子核物理の研究は進んだが、実用  
1365 化に向けて、鋭意開発研究が進められている。

1366 新たな原子核（原子力）エネルギー活用として核融合エネルギー  
1367 がある。原子核物理の視点からは、核融合反応や核融合エネルギー  
1368 の基礎研究が進んだ。

1369 現在、世界で核融合エネルギーの実用化に向けて、応用研究が  
1370 進行中だ。重水素資源は海中の重水からほぼ無限に得られる。

### 1373 2.3.2. 廃棄物と温暖化ガス

1375 エネルギーの活用は、ある状態のエネルギー源Sを別な状態R  
1376 に変換する際のエネルギー差Eを利用する。残留物Rは廃棄される  
1377 のので廃棄物といわれる。

1378 エネルギー資源の有効利用にあたっては、残留物ないし廃棄物  
1379 について十分考察することが大切だ。

1380 太陽光エネルギーの場合は、光子のエネルギーが半導体を通して  
1381 電気エネルギーに変る。半導体は触媒として使われるので、残  
1382 留物はない。最後に設備の廃棄を要する。

1383 水力発電の場合は、高所のエネルギーの高い（良質な）水資源  
1384 が、発電に使用された後、エネルギーが吸い取られた状態の（劣  
1385 質な）残存の水として放流される。環境に対する好影響が減退す  
1386 るので、ある意味で環境負荷となる。風力も同様である。

1387 化石燃料（石油、天然ガス、石炭）の場合は、エネルギー資源  
1388 の有機体（炭素、水素）が酸素と化学反応（燃焼）して、二酸化  
1389 炭素と水の残留物が廃棄物となる。

1390 有機体の炭素を利用する化石エネルギーの特徴は、有機体の燃  
1391 料の重さの3倍の重さの二酸化炭素が排出され、そのまま地球に  
1392 排出されることである。1000キロワット時あたり150立方メー  
1393 トルくらいの膨大な廃棄ガスの量である。

1394 原子核（原子力）燃料の場合は、ウラニウム核が分裂し、2  
1395 つの原子核になるので、ほぼ同じ量の残留核が残る。

1396 核分裂の残留核の多くは放射性核だが、時間がたてば放射能は  
1397 自然に消える。ただし、15%位はセシウム137やストロンチウム  
1398 90のように数十年は放射能がのこる。

1399 放射性物質の量は、核エネルギー1000キロワット時あたり千分  
1400 の7グラム程度で極めて微量なので、十分管理できる。

1401  
1402 現在のエネルギー資源の大半は炭素を主とする化石燃料に依存  
1403 し、世界では毎年320億トン、日本では毎年9億トン程度の二酸  
1404 化炭素が空中に廃棄されている。その他の温暖化ガスを含めると、  
1405 二酸化炭素換算で、世界で500億トン、日本では13億トン  
1406 程度になり、世界中が多大な犠牲を強いられている。

1407 一方、原子核エネルギー利用は、世界的にも日本でもまだわず  
1408 かで、放射性物質の量は、世界では毎年数十トン程度、日本から  
1409 は毎年数百キログラム程度で、種々の方法で管理されている。将  
1410 来の発展に備えて、管理法の開発が進められている。

1411 現在、各国で二酸化炭素の管理法や処理法の開発研究が行われ  
1412 ている。緊急事態に鑑み、省エネルギー化と脱炭素化共に、太陽  
1413 内と地球内の核燃料への切り替えることが望まれる。既に多くの  
1414 先進国では、エネルギー資源の大半を原子核エネルギー（太陽  
1415 光、風水力、核分裂）に切り替えている。

### 1416 1417 2.3.3. エネルギー変換効率

1418  
1419 エネルギーの活用の際し、エネルギー活用率がポイントだ。活  
1420 用率は活用エネルギーと入力エネルギーの比で表される。

1421 一次エネルギーを入力して発電する場合、エネルギー変換効率  
1422 として、電力出力と入力の比が用いられている。

1423 エネルギー変換率は活用率の1部で、実際は、種々のエネルギ  
1424 ー入力が必要で、また活用できるのは、発電出力より少ない。

1425 現在の主な活用エネルギーである電力の場合、入力エネルギー  
1426 は、化石燃料（1次）エネルギーの他に、発電所建設エネルギー  
1427 ー、石油などの場合は中東地区からの輸送エネルギー、廃棄物  
1428 （温暖化ガス等）処理エネルギー等がある。ある期間使用后、発  
1429 電所やダムを閉鎖する場合、そのエネルギーも必要だ。

1430 発電所からの出力エネルギーは、各地で種々の電気機器を通し  
1431 て活用エネルギーとなる。したがって、送電ロスや各電気機器の  
1432 ロスの分だけ活用されるエネルギーは少なくなる。

1433  
1434 エネルギーの効率には、種々の必要な入力エネルギーと出力エネ  
1435 ルギーのロスを科学的に考察することが肝要である。それらは、  
1436 入力エネルギーの種類と活用する場所と時間による。

1437 水力エネルギーの場合、ダムの水は大陽光が海から運んでくれ  
1438 るので、エネルギーを要しない。ただし、ダム建設や発電終了後  
1439 のダム撤収に大きなエネルギー入力を要する。

1440 化石燃料のエネルギーの場合、二酸化炭素（温暖化ガス）の管  
1441 理・処理が未だ実現していない。そのためにどのくらいのエネ  
1442 ルギーが必要か定かでない。早急に科学的検討を要する。

1443 原子核エネルギーの場合、1定のエネルギー出力を得るために  
1444 必要な核燃料（ウラニウム）の重量は、化石燃料の数百万分の  
1445 1である。したがって、燃料輸送、貯蓄、廃棄物、廃炉などのた  
1446 めの必要エネルギーも、5-6桁少ない。

1447 一次エネルギーを入力して発電する場合、狭義のエネルギー効  
1448 率、すなわち入力と出力の比の発電効率が使われる。

1449 水力発電の場合、水の方角の揃った運動エネルギーを使うの  
1450 で、発電効率は80%になる。

1451 尚、需要の少ない夜間電力を使って、需要の多い昼間電力を発  
1452 電する揚水発電がある。この場合、発電エネルギーの何倍もの入  
1453 力エネルギーが必要になるが、価値の低い夜間電力が、高価値の  
1454 昼間電力に変換されることがポイントだ。

1455 化石燃料や原子核燃料は、燃料内の電気エネルギーや原子核エ  
1456 ネルギーを一旦熱エネルギーにして発電する。化石燃料の効率は  
1457 40-50%、原子核燃料は33%程度である。

1458 太陽光の場合、光子のエネルギーは、紫外線、可視光線、赤外  
1459 線まで広い範囲にわたり、発電に利用しているには光子のエネ

1460 ギーの高い成分だけである。したがって、発電効率は10%位でか  
1461 なり低い。太陽光で温水を造る利用では、赤外線部も利用するの  
1462 で、効率は50%位になる。

1463 エネルギー活用の過程では、活用されなかったエネルギーも活  
1464 用後のエネルギーも、多くの場合、低温（劣質）熱エネルギーと  
1465 して地球に放出される。

#### 1467 2.3.4. エネルギー問題の科学

1469 自然界に存在する種々のエネルギーは、人々の生産と消費の諸  
1470 活動をささえ、文化と文明を発展させてきた。エネルギーの合理  
1471 的で且つ適正な活用が人々の円滑な活動に必須だ。

1472 一方、エネルギーの不合理的な利用や不適切な乱用によって、  
1473 人々の生活は混乱し、多くの不幸がもたらされている。

1474 エネルギー禁輸、エネルギー資源を求めての戦火、火器エネル  
1475 ギーによる犠牲、食料エネルギー不足による飢餓、等々だ。

1476 現代文明は、電気エネルギーや原子核エネルギーによるエネル  
1477 ギー革新によって一新された。それが過剰な化石燃料の消費によ  
1478 る二酸化炭素等の温暖化（温室効果）廃棄ガス急増によって、破  
1479 滅の危機にある。

1481 エネルギーには種々の形や種類ある。それらは、重力、電気  
1482 力、原子核力という基本の力に基づく。

1483 さまざまなエネルギーには、決まった「量」があり、エネルギ  
1484 ーと質量の等価の原理やエネルギー保存とエントロピー法則とい  
1485 う基本の法則がある。

1486 エネルギーの形、量、法則の基本を心脳体で正しく理解し、科  
1487 学に基づいて合理的にエネルギーを活用することが大切である。

1488 エネルギーの基礎となる科学についての無理解と、科学に基づ  
1489 かない不適正な行動は、地球と人類を破滅に導く。放射線の風評  
1490 被害も科学無視によるもので、深刻な犠牲をもたらしている。

1491 世界各国で、エネルギー資源の開発、効率化と省エネルギー  
1492 化、排気ガス処理、等々の問題解決に向けて努力中だ。

1494 現在の深刻なエネルギー問題については、次の3つの科学の視  
1495 点がキーポイントになる。

1496 1. 太陽光発電による太陽（核）エネルギーの広範な活用。地球  
1497 上のどこでもある豊かなエネルギー源で、エネルギー資源、輸  
1498 送、廃棄物等の問題がない。太陽熱（赤外線部）利用も有望だ。  
1499 エネルギー出力は、昼間に限られ天候に左右されるので、蓄電の  
1500 開発を要する。現存のダムは蓄電として活用できる。

1501 2. 原子力発電による核エネルギーの広範な活用。化石燃料の  
1502 数百万倍の核エネルギーの利用により、有効エネルギー当たり  
1503 の、核エネルギー資源、輸送、廃棄物等の重量も、化石燃料の場  
1504 合の数百万分の1になり、多くの問題が解消する。

1505 現にフランスでは電力の80%を原子力から得ている。日本の原  
1506 子力とエネルギー政策は、80%を化石燃料へのシフトをもたら  
1507 し、世界の人類の危機を招いている。

1508 日本では、毎年熱中症や異常気象で千人程度の犠牲者が出てい  
1509 る。広域の住民の避難が必要だが避難する場所がない。

1510 3. IT/AI 活用による脱エネルギー化。世界や日本のエネルギー  
1511 と温暖化ガスの問題は、ごく最近の半世紀のことである。GDP の  
1512 急成長と共に、エネルギーも急成長した。エネルギー過剰消費や  
1513 二酸化炭素の急増を招き、文明が急衰退しつつある。

1514 IT/AI の急成長により、COVID19 にも刺激され、テレワーク  
1515 （ワーク at ホーム）が日常になった。通勤や集会のための交通  
1516 機関、仕事のためのオフィス、情報伝達のための紙、等々の大量  
1517 のエネルギーを要する諸々の物が姿を消しつつある。

1518 GDP や文明にエネルギーは必須であるが、必要なものはエネル  
1519 ギーの量ではない。エネルギーの適正な活用だ。

1520 21 世紀のエネルギーを考える上で、エネルギーについての科学  
1521 的理解と意識の革新が肝要である。

## 1522 3 章 地球のエネルギー

### 1523 3.1. 地球のエネルギー

#### 1524 1525 3.1.1. 地球の質量エネルギーと重力エネルギー

1529 地球は太陽系の1惑星で、その質量は太陽の百万分の3程度で  
1530 ある。地球星には種々のエネルギーがある。

1531 地球自身のエネルギーの殆どは、地球の質量エネルギー（静止  
1532 質量エネルギー）だ。地球の質量は60億トンの1兆倍くらい  
1533 で、質量エネルギーは $5.4 \times 10^{41}$ ジュールである（註1）。

1534 太陽系の中では、巨大惑星の木星の質量は地球の320倍くら  
1535 い、近くの火星の質量は地球の8分の1くらいだ。それぞれ質量  
1536 に応じた質量エネルギーがある。

1537 地球の質量エネルギーは、地球への主なエネルギー入力である  
1538 太陽光エネルギーの10億年分の1兆倍に相当する。

1539 地球は90数種の原子から成り、原子の質量の99.98%は、原子  
1540 の中心にある原子核の質量である。したがって地球の質量エネル  
1541 ギーの殆どは、地球内の原子核の質量エネルギーである。

1542 地球の主成分は鉄と酸素で、中心から3400キロメートルくら  
1543 いまでの核（内核と外核）は、主として鉄が占めている。鉄の原  
1544 子核の内では核子が固く結ばれ、安定している。

1545  
1546 地球は、その質量に応じて重力エネルギーを持っている。地球  
1547 内の各原子は、その質量に応じて相互に重力（万有引力）によっ  
1548 て固く結ばれ、それだけ重力エネルギーが低い状態にある。

1549 地球内の各原子が無限のかなたから半径R内の地球に集まって  
1550 くと、その重力エネルギーWは $0.6 \times GM^2/R$ になる。

1551 で表される。ここでGは重力定数、Mは地球の質量である。地球  
1552 の重力エネルギーは $W=4 \times 10^{32}$ ジュール程度になる。

1553 地球の重力エネルギー自体は巨大だが、質量エネルギーの100  
1554 億分の7程度で、質量エネルギーより9桁程度小さい。

1555 地球内の各原子内には負（-）電荷の電子があり、中心の正  
1556 （+）電荷の原子核と電気力で固く結ばれている。すなわち電  
1557 気の力による結合エネルギーの分だけエネルギーの低い状態にあ  
1558 る。この電気の結合エネルギーの総量は地球の質量エネルギーの  
1559 7桁（1千万分の1）くらい小さい。

1560 地球内の原子の中心にある原子核内では、いくつかの核子が核  
1561 力（原子力）で固く結ばれている。すなわち核力の結合エネルギ  
1562 ー分だけエネルギーの低い状態にある。そのエネルギーは、地球  
1563 の質量エネルギーより2桁（百分の1）程小さい。

1564 地球内の核エネルギーは2桁程度、電気エネルギーは7桁程  
1565 度、重力エネルギーは9桁程度、太陽光10億年のエネルギーは  
1566 12桁程度、地球の質量エネルギーより少ない。

1567  
1568 註1.  $10^{41}$ は10の41乗で、1の次に0が41個付く。 $10^4$ は  
1569 10000で1万、 $10^8$ は1億、 $10^{12}$ は1兆になる。

### 1570 1571 3.1.2. 地球と月の運動エネルギー

1572  
1573 太陽系内で、地球は公転と自転をしており、それぞれの公転と  
1574 自転の回転運動エネルギーがある。月も同じく自転をし、地球の  
1575 周りを回っており、回転運動エネルギーがある。

1576 太陽系自身も銀河の中に回転しており、地球も太陽系と共に  
1577 銀河内で回転運動をし、その回転運動エネルギーがある。

1578 地球の自転による地表の速さは、赤道面で秒速450メートル程  
1579 度で、光速の百万分の1.5程度である。ジェット機より1.5倍く  
1580 らい速い。地球の緯度が高くなると地表の速さは遅くなる。

1581 自転のエネルギーは $2 \times 10^{29}$ ジュールくらいで、地球の質量  
1582 エネルギーより12桁少なく、重力エネルギーより3桁少い。

1583 地球の公転の速さは、秒速30キロメートルくらいで、光速の  
1584 1万分の1位の速さで、マッハ100の超高速だ。

1585 公転の運動エネルギーは $2.7 \times 10^{35}$ ジュールくらいで、自転の  
1586 エネルギーの100万倍、地球の質量エネルギーの100万分の0.5  
1587 にくらくなる。地球の重力エネルギーの10倍ほどだ。

1588 太陽系は銀河のなかで、秒速240キロメートルの超々高速で回  
1589 転している。地球の公転の8倍の速さで、音速の800倍である。  
1590 それでも、光速の千分の1くらいで、光速よりはるかに遅い。

1591 太陽の運動エネルギーは、 $6 \times 10^{40}$ ジュールくらいで、質量エ  
1592 ネルギーの千万分の3くらいになる。

1593  
1594 地球圏にある物体の主なものは月で、質量は7300万トンの1  
1595 兆倍くらいで、質量エネルギーは $6.5 \times 10^{39}$ ジュール、地球の質  
1596 量エネルギーの1%強だ。月は地球と共に太陽の周りと同じく回る。

1597 月自身が地球の周りを秒速1キロメートル、マッハ3くらいの  
1598 超高速で回転運動をしている。ジェット機の4倍くらいの速さだ  
1599 が、地球を1周するのに28日かかる。

1600 月が地球を周回するエネルギーは $3.6 \times 10^{28}$ ジュールで、月の  
1601 質量エネルギーの1兆分の5くらいで極めて小さい。

1602 月は地球の重力圏にあり、 $7 \times 10^{28}$ ジュール程度の重力エネル  
1603 ギー、すなわち位置のエネルギーを持っている。月は無限遠にあ  
1604 るときよりも、地球に近づいて（落下して）いるので、それだけ  
1605 位置のエネルギーが低い。

1606 月が公転する場合、遠心力と地球に引かれる重力が釣り合っ  
1607 ている。したがって月の公転運動エネルギーは、地球による重力エ  
1608 ネルギーの半分である。

1609 尚、地球上の人々は、地球と共に公転と自転をしながら高速運  
1610 動している。しかし特に風を切るわけでもなく、その運動を意識  
1611 することはない。巡行するジェット機内と同じだ。

### 1612 1613 3.1.3. 地球内のミクロなエネルギー

1614  
1615 地球の公転と自転の回転運動は、太陽系というマクロな世界の  
1616 高速運動だが、地球内のミクロの世界でも種々の粒子があるエネ  
1617 ルギーを持って高速運動をしている。

1618 常温の大気中の気体分子は秒速500メートル程度の速さで縦横  
1619 に運動している。マッハ1.5の高速で、地球の自転の速さと同じ  
1620 くらいの速さだ。海中の水の分子も種々の運動をしている。

1621 大気や海水の各分子の運動は、上下左右の乱雑な運動で、その  
1622 運動エネルギーは、熱エネルギーとして温度で表される。

1623 大気も海水も、その総重量は地球の質量に比べて無視できるく  
1624 らい小さい。また大気や海の分子の運動エネルギーもそれらの分  
1625 子の質量エネルギーに比べて無視できる位小さい。詳しくは次の  
1626 3.2節で述べる。

1627  
1628 地球内部はいくつかの層からなる。表層の岩石部の下に、約35  
1629 キロメートルの深さまで地殻ある。その温度は数百度程度だ。

1630 地殻の層の下には、深さが 2900 キロメートル位まで、高温のマ  
1631 ントル層がある。マントル層は、地球の体積の 83%を占め、成分  
1632 は主に珪酸塩の岩石で、温度は数百度から 3500 度くらいだ。

1633 マントルの下には、中心まで鉄の核が存在している。地球の体  
1634 積の 16%をしめ、液状の外核と個体の内核からなる。

1635 地球の内部を占める鉄の核の温度は 3500 度から 5700 度におよ  
1636 ぶ。中心部は 350 万気圧の超高压で、温度も太陽表面の温度に近  
1637 い超高温である。

1638 地球の総熱量は  $1.3 \times 10^{31}$  ジュール程度と考えられている。地  
1639 球の質量エネルギーの 1 兆分の 25 位で、公転の運動エネルギー  
1640 の千分の 5、自転エネルギーの 50 倍程度である。

1641 地球内部の熱エネルギーは、主として高温のマントルにあり、  
1642 後の残りの熱エネルギーは超高温の核にある。マントルは総体積  
1643 が大きいので、それだけ熱エネルギーの量が大きい。

1644 分子レベルでいえば、地球内の熱エネルギーは、地球内の各成  
1645 分の分子の振動エネルギーなどの運動エネルギーである。

1646 地球内のある部分が 2000 度の場合、その中の分子の熱運動エ  
1647 ネルギーは 0.3-0.4 電子ボルト程度である。分子の熱エネルギー  
1648 は、分子内の電子のエネルギーの十分の 1 程度だ。そのエネルギ  
1649 ーは、化石燃料（電子のエネルギー）より 1 桁小さい。

1650  
1651 地球内の原子や原子核のようなミクロの世界では、原子内の電  
1652 子や原子核内の核子は、超々高速の運動をしている。

1653 原子の表層近くで運動している電子の運動エネルギーは、数電  
1654 子ボルトで、質量エネルギーの 10 万分の 1 程度になる。その速  
1655 さは秒速 1500 キロメートルくらいで、光速の千分の 5 くらい  
1656 だ。

1657 原子の内部で原子核の近くの軌道を回る電子の運動エネルギー  
1658 は、ケイ素で 1.5 キロ電子ボルト、鉄の場合は 8 電子ボルトで、  
1659 速さはそれぞれ光速の 8%と 17%になる。

1660 原子の中心にある原子核内で回る核子の速さは光速の 10%程  
1661 で、大変早い。核子の運動エネルギーも 3 千万電子ボルトキロく  
1662 らいになり、質量エネルギーの 3%位になる。

### 1663 1664 3. 1. 4. 地球内の放射線のエネルギー

1665

1666 地球の創成時には、地球内には種々の放射性原子核が存在して  
1667 いた。放射性原子核はエネルギーの高い状態にある不安定な原子  
1668 核で、年月と共に、放射線を放出してエネルギーの低い状態の安  
1669 定な原子核に変わって現在に至っている。

1670 放射線を出して変わることは、崖が崩れることに例えて、崩壊  
1671 するという。崩壊の前と後のエネルギーの差が崩壊エネルギー  
1672 で、放射線の運動エネルギーになる。

1673 地球誕生以来 45 億年たった現在、大方の不安定な放射性原子  
1674 核は、放射線を放出して崩壊してしまっ、現存するのは殆どが  
1675 安定な原子核である。

1676 放射性崩壊では、崩壊後の原子核や放射線の質量の和は、崩壊  
1677 前の質量よりも若干軽くなる。

1678

1679 放射性核の質量エネルギーは、原子核（原子力）エネルギー  
1680 で、放射性崩壊の前後での原子核の質量差のエネルギーが、放射  
1681 線の運動エネルギーに変わる。

1682 放射線のエネルギーは、巨大な原子核（原子力）エネルギーを  
1683 反映して、大変大きい。詳しくは 7 章で述べる。

1684 放射性核には、平均寿命があり、平均寿命が長いほど、崩壊し  
1685 にくい。現在まで地球内に残っている放射性核は、主に平均寿命  
1686 が地球の年齢程度の放射性核である。

1687

1688 放射性核の崩壊エネルギーは、放射線のエネルギーとして原子  
1689 核外に放出され、熱エネルギーとなって周辺の原子を暖める。地  
1690 球自身は、地球内部に残存している放射性核からの放射線のエネ  
1691 ルギーの供給を受けていることになる。

1692 現在の地球内に残存している放射性原子核には、半減期（寿  
1693 命）の長い放射性核で、ウラニウム 238（註 1）、ウラニウム  
1694 235、トリウム 232、カリウム 40 などがある。

1695 ウラニウム 238 はウラニウム核の主成分で、半減期は 45  
1696 億年なので地球生成以来半減した。

1697 ウラニウム 235 は、半減期は 7 億年でウラニウム 238 核よ  
1698 り 6 倍短い。それだけ崩壊確率が高く、地球誕生以来、殆どは

1699 (99%) 崩壊してしまっている。現在のウラニウム 235 の 0.7% がウ  
1700 ラニウム 235 である。

1701 トリウム 232 は半減期が 140 億年で大変永く、地球誕生以来ほと  
1702 んど (80% 程度) が崩壊せずに残っている。

1703 ウラニウムもトリウムも、アルファ線、ベータ線、ガンマ線  
1704 という放射線を放出して、安定な鉛の原子核になる。

1705 崩壊エネルギー、すなわち放射線のエネルギーの総和は、放射性  
1706 核当たり 4 千万電子ボルトくらいで、大変大きい。

1707 一方、カリウム 40 は、半減期が 13 億年で、地球創成以来 80%  
1708 くらいが崩壊、20% くらいが残っている。放射線は主にベータ線  
1709 とガンマ線で、そのエネルギーは百万電子ボルト程度である。天  
1710 然にあるカリウムの 0.01% が放射性カリウム 40 である。

1711 地球内の放射性核からの総エネルギー入力 は 20 兆ワット程度  
1712 で、地球内の発熱量の 50% 程度に相当する。その量は地球に入力  
1713 する太陽光エネルギーの 0.01% に相当する。

1714

1715 註 1. 半減期は、放射性核の数が崩壊によって半分になる年月  
1716 で、永いほど、崩壊確率は大きく、早く崩壊する。第 7 章参照

1717 註 2. 原子核の付記する数 (238) は、原子核内の核子の数。

1718

1719 3.2. 地表におけるさまざまなエネルギー

1720

1721 3.2.1. 太陽光エネルギーの収支

1722

1723 地球という半径 6400 キロメートルの惑星において、人々の生  
1724 活に直接かかっているのは、地表の数十キロメートルの大気、  
1725 海、地殻の部分である。ここでの主なエネルギーの入力は太陽光  
1726 である。

1727 太陽光の地球圏へエネルギーの全量は 174 ペタワット (ペタ =  
1728 千兆) である。地球内の放射性原子核は、放射線を出して地球に  
1729 熱エネルギーを供給しているが、そのエネルギー入力は、太陽光  
1730 エネルギー入力の 0.03% 程度で極めて少ない。

1731 太陽光の内、30% 程度は大気と雲と地表からの反射され、宇宙  
1732 に放出される。したがって地球圏へのエネルギー入力は 70% 減の  
1733 140 ペタワット、1 平方メートル当たり 1.1 キロワットになる。

1734 エネルギー入力の内、大気や雲による吸収が 20%位で、残りの  
1735 50%が地球に吸収される。地球に吸収されたエネルギーの半分  
1736 が、海水を暖め、海水を蒸発する時に気化熱に使われ、水蒸気が  
1737 雨になるときに凝縮熱となり大気に還元される。

1738 大気、雲、地球に吸収されたエネルギーの殆どは最終的には宇  
1739 宙の放出される。したがって、太陽光によるエネルギー入力と宇  
1740 宙へのエネルギー放出がほぼ同じで、収支 0 のバランスが保たれ  
1741 ていた。近年そのバランスが崩れだしたのが温暖化問題だ。

1742  
1743 太陽光の内、エネルギーの高い成分は、主として 25-30 キロ  
1744 メートルの高さにあるオゾン層で吸収される。実際に地球に入射  
1745 する太陽光は、可視光線の他に、赤外線と紫外線がある。

1746 光のエネルギーは、光子（光の粒子）のエネルギーと光子の量  
1747 の積で表される。光子のエネルギーが高いほど波長が短い。

1748 可視光のエネルギーは太陽光エネルギーの 52%程度で、波長に  
1749 して 400-800 nメートル（n=ナノ 10 億分の 1）、光子のエネル  
1750 ギーは 3-1.5 電子ボルトである。

1751 赤外線は太陽光エネルギーの 42%程度である。波長は 800-  
1752 2500 nメートルの領域で、目に見えないが熱量は可視光と同くら  
1753 いある。赤外線の光子のエネルギーは可視光の半分くらいの 1.5-  
1754 0.5 電子ボルトであるが、光子の量は倍くらい多い。。

1755 紫外線のエネルギーは太陽光のエネルギーの 6%程度で、エネ  
1756 ルギーは少ないが、波長が 280-400 nメートルで短く、光子の  
1757 エネルギーは 4.5-3 電子ボルトで可視光より大きい。

1758 紫外線のうち、0.5%が波長が短く光子のエネルギーの高い UVB  
1759 である（註 1）。それよりエネルギーの高い UVC 紫外線は、オゾ  
1760 ン層や大気で吸収され地球には届かない。

1761 尚、宇宙からの宇宙線の場合、個々の粒子のエネルギーは太陽  
1762 光の光子のエネルギーの 6 桁ほど大きい、粒子の数が太陽光の  
1763 光子数に比べて極めて少なく、エネルギーは、12 桁位少ない。

1764  
1765 註 1. 地球上での UVB 紫外線がオゾン層の破壊によって増えて、  
1766 問題になっている。年間 10 億ミリグレイだ。我が国で問題  
1767 にしている福島放射線のエネルギー量の 1 億倍である。

### 3.2.2. 大気と海の熱エネルギー

地球に入力する太陽光エネルギーの内、70%程度が海や陸地に、30%程度が大気や雲に吸収される。

海は地表の70%を占め、平均深さが3800メートル、総質量が $1.4 \times 10^{18}$ トンだ。水の比熱は、4.2ジュールで陸地の比熱の5倍くらいある。したがって、海の熱容量は陸地よりも数桁大きく、海水が地球へのエネルギーの主な受容体になる。

海水に入力した太陽エネルギーは、主として(7割程度)蒸発熱として、液体の状態から、気体の状態に変える際に放出される。その他は大気や宇宙に放出される

海への太陽光エネルギー入力と放出のバランスが崩れ、入力が増えると海水温が上昇し、地球温暖化や異常気象をもたらす。

海水温が変わるのは海面から500メートルくらいの表層海水で、温度は季節によって10-30度くらいだ。1000メートルくらいで3度くらいになり、深海では1.5度くらいである。

20世紀後半から、表層海水の温度が急上昇し、問題になっている。100年で0.5度程度で、1年当たり0.005度の上昇になる。

表層から主水層にわたる0-500メートルまでの海水の場合に、海水の総量は $2.5 \times 10^{17}$ トンなので、毎年0.005度とすると、毎年 $5 \times 10^{21}$ ジュール程度の熱エネルギーになる。

海水に蓄積されたエネルギー量は、地球に吸収されるエネルギー量の0.2%に相当し、大変な入力超である。

大気は太陽光の16%を吸収する。大気の総質量は1平方メートル当たり10トンで、10メートルの水に相当する。地球全体で $5 \times 10^{15}$ トンで、海水の千分の3くらいだ。

気体の熱エネルギーは、分子の運動エネルギーが基で、絶対温度に比例する。比熱は1グラム当たり1ジュールくらいで、水の比熱の1/4くらいだ。

気体の熱容量は1度当たり $5 \times 10^{21}$ ジュールだ。海水の千分の1程度で大変小さいので、気温は天候によって敏感に変わる。世界の平均気温は最近の100年で0.75度くらい急上昇している。

大気の熱エネルギーの増加は、毎年 $3.5 \times 10^{19}$ ジュールで、海水の熱エネルギーの変化量よりも2桁ほど少ない。大気の熱容量は

1804 海水の熱容量よりも 3 桁ほど小さいので気温の変化は、海水温の  
1805 変化より 10 倍大きい。

1806 地球温暖化は、海水と大気の熱エネルギーと温度の急上昇に現  
1807 れている。この問題は 3.2.4 節で詳しく述べる。

1808

1809 海水には黒潮などの海流があり、大気には偏西風などの風があ  
1810 り、いずれも地球スケールで運動をしている。

1811 海流は秒速数メートルで、その運動エネルギーは、1 キログラ  
1812 ム当たり数ジュールになる。海流のエネルギーは、海水の熱エネ  
1813 ルギーに比べ大変小さい。

1814 偏西風はジェット気流といわれ、場所により秒速 100 メートル  
1815 になる。その運動エネルギーは、気体分子の熱運動のエネルギー  
1816 の数%で、大気的全運動（熱）エネルギーよりもはるかに少な  
1817 い。

1818

### 1819 3.2.3. 海水と地殻の原子核エネルギー

1820

1821 地球には最も軽い水素 1（核子数 1）からウラニウム 238  
1822（核子数 238）まで、さまざまな原子核が存在する。

1823 原子核を構成する核子数が中程度（50 前後）の場合、核子の結  
1824 びつきが強く、質量エネルギーが低く安定している。

1825 核子数が少ない軽い原子核や核子数が多い重い原子核は、核子  
1826 の結びつきが弱く、それだけエネルギーが高い。

1827 軽い 2 つの核は融合するによって、1 つの重い核は 2 つの核に  
1828 分裂することによって、より核子の結びつきが強くエネルギーの  
1829 低い安定な原子核になることができる。

1830 原子核の融合や分裂によって、エネルギー高い原子核からエネ  
1831 ルギーの低い原子核になる場合、そのエネルギーの差を活用する  
1832 のが原子力である。詳しくは 6.3 節で述べる。

1833 重水素核は核子数 2（陽子 1 と中性子 1）からなる大変軽い原  
1834 子核で、核子の結びつきが弱い。2 つの重水素核が融合して核子  
1835 数が 3 の原子核と核子数が 1 の原子核になると、核子の結びつき  
1836 が強まり、エネルギーが低くて安定な原子核になる。

1837      ウラニウムのような重い原子核は、核子の結びつきが弱くエ  
1838      ネルギーが高い。2つに分裂して核子数が90位と140位の核にな  
1839      ると、安定な原子核になる。

1840  
1841      重水素核は、重水素原子にある原子核である。普通の水の分子  
1842      は酸素原子と2つの水素原子からなるが、重水の分子は酸素原子  
1843      と2つの重水素原子からなる。

1844      海中の水分子の0.015%は重水である。重水素原子の総量は  
1845       $2.2 \times 10^{16}$  キログラムである。海水中の重水素核の核融合エネル  
1846      ギーは $2 \times 10^{30}$  ジュウルで、巨大なエネルギーが海水の重水にあ  
1847      る。このエネルギーは太陽光入力エネルギーの60万年分で、海水  
1848      の温度1度当たりの熱エネルギーの百万倍に相当する。

1849      ウラニウム238は海水に $4.5 \times 10^{12}$  キログラムほど含まれてい  
1850      る。重水素核の1万分の2くらいで大変少ない。

1851      海中のウラニウム核の量は少なく、ウラニウムの核分裂によ  
1852      るエネルギーは、 $3.6 \times 10^{26}$  ジュウルで、重水素核の融合エネル  
1853      ギーの1万分の2程度になる。

1854      ウラニウムは地殻に $10^{17}$  キログラム程度あると考えられている。  
1855      エネルギーにすると $10^{28}$  ジュウル程度になる。

1856      ウラニウム235の量はウラニウム238核の0.7%で大変少な  
1857      いので、それだけエネルギーの量も少ない。現在活用されている  
1858      のはウラニウム235の核分裂エネルギーである。

1859      トリウム232核も重い原子核で、ウラニウム核の場合と同じ  
1860      ように、核分裂によって核エネルギーが解放される。地殻にはウ  
1861      ラニウムの1/4くらいのトリウム235核があり、 $2 \times 10^{27}$  ジュ  
1862      ウル程度のエネルギーがある。

#### 1863 1864      3.2.4. 地球温暖化と二酸化炭素

1865  
1866      地球では、種々の生物が共存しながら生命活動をしている。そ  
1867      れを維持するには、地球の熱エネルギー環境の安定が必須であ  
1868      る。エネルギー環境の大きな変化は、大気や海水の温度を変え、  
1869      森林の破壊や生物の絶滅を招く。

1870 地表の熱エネルギー環境は、太陽光によるエネルギー入力と地  
1871 球からのエネルギー放出のバランスで保たれている。バランスが  
1872 崩れると、地表の平均気温の変化となって現れる。

1873 最近の大気や海水の温度上昇が問題になっている。世界の平均  
1874 気温は 1880 年から現在までに 1.2 度上昇し、最近の 50 年で 0.7  
1875 度程の急上昇している。年当たり 0.012 度だ。

1876 海水は熱容量が大きい、水温は 1880 年以降 0.65 度、最近の  
1877 50 年で 0.5 度、年当たり 0.01 度の急上昇している。

1878 海水の温度の急上昇は、海面の急上昇（0.2 メートル）、極地  
1879 での緑地急増、冰山急減、毎年の異常気象、集中豪雨、森林火  
1880 災、熱中症、等々の深刻な被害と犠牲をもたらしている。

1881 地球温暖化の原因として考えられているのが二酸化炭素やメタ  
1882 ン等の温暖化ガスの温室（グリーンハウス）効果だ。

1883 地球からの放出された熱の 1 部は温暖化ガスに吸収され、再放  
1884 出されることによって、地球に熱エネルギーを与える。その結  
1885 果、宇宙への放熱量が減少し、太陽光エネルギーの入力超とな  
1886 り、年々地球に蓄熱され、気温や海水温が上がる。

1887  
1888 温暖化ガスは、76%が二酸化炭素で 16%がメタンである。これ  
1889 らのガス量が産業革命以来増加している。最近の二酸化炭素とメ  
1890 タンガスの濃度は、それぞれ 400ppm 程度と 0.2ppm 程度で、最近  
1891 の 100 年で 30-40%程の急上昇だ。

1892 二酸化炭素の内、化石燃料の残留ガスが 65%を占め、あとは森  
1893 林火災などによる。温暖化で森林火災が急増し温暖化がを加速す  
1894 る。化石燃料による温暖化ガスの縮減が急務である。

1895 最近の世界の二酸化炭素の排出量は毎年 330 億トンで、一人当  
1896 たり年 4.4 トンである。中国が 7 トン、アメリカが 15 トン、日  
1897 本が 9 トン、ロシアが 11 トンで大変大きい。

1898 日本とフランスを比較すると、日本の二酸化炭素排出量は、一  
1899 人当たりでフランスの 3 倍程度、国としては 6 倍程度で、異常に  
1900 大量の温暖化ガスを地球に放出している。主な要因は原子力から  
1901 化石燃料に大きくシフトしたことにある。

1902 太陽から地球へのエネルギーの入超は、主として海水に蓄熱さ  
1903 れる。表層 700 メートルの海水の年当たり 0.01 度の温度変化  
1904 は、20 兆ワットに相当、太陽光入力の千分の 1 だ。

1905 二酸化炭素の年 0.4%の急増が、太陽光エネルギーの年 0.1%  
1906 の入超となり、気温の年 0.015 度の急増をもたらしている。二酸  
1907 化炭素と炭素の燃焼については、4.2 節で詳しく述べる。

1908  
1909 現在、温暖化対策として、化石燃料から原子核エネルギー（原  
1910 子力、太陽光）へのシフトと共に、森林育成が期待される。ま  
1911 た、二酸化炭素の有効利用と貯蔵も有意義だ（註 1）。

1912 尚、原子核、太陽光、化石燃料などの、人々が利用するエネル  
1913 ギーは、同じエネルギーが、熱エネルギーとして地球に放出され  
1914 る。そのエネルギー量は 20 兆ワット程度で、太陽光の入力エネ  
1915 ルギーの 1 万分の 1 程度だ。

1916  
1917 註 1. CCUS (Carbon dioxide Utilization Storage)。原子力エネ  
1918 ルギーでは廃棄物の量が微量なので当初から実現している。

### 1919 1920 1921 3.3. 天地と世界のエネルギー異変

#### 1922 1923 3.1.1. 地震と津波のエネルギー

1924  
1925 地下に潜んでいるエネルギーは、ある日に突如地上に姿を表  
1926 す。エネルギーの量は保存していて同じだが、地上では形を変え  
1927 て大きな天地異変をもたらす。

1928 地殻・プレートの弾性エネルギー（物体内の歪の電気エネルギー）  
1929 は、地殻の振動エネルギーや海水の重力エネルギーに変換さ  
1930 れ、地上では地震や津波になってあらわれる。

1931 地球の表層の地殻やプレートは動いており（註 1）、それに伴  
1932 って歪（エネルギー）が蓄積される。ひずみがある限界を超え  
1933 と、破壊が生じて断層ができたり、プレートが跳ね上がる。それ  
1934 に伴って地殻が振動し、地震波として伝搬する。

1935 地震のエネルギーの量  $E$  はマグニチュード  $M$  をもちいて、  
1936  $\text{Log}E=4.8+1.5M$  で表される。マグニチュード 5 が  $2 \times 10^{12}$  (2  
1937 兆) ジュールになる。マグニチュードが 1 増えると 31 倍、2 増  
1938 えると 1000 倍のエネルギーになる。

1939 地震のエネルギーは、プレートなどの弾性体の歪のエネルギー  
1940 を反映し、関与する地殻の岩石の量と歪に比例する。

1941 歪の変形が千分の1の場合、20立方キロメートルに蓄積された  
1942 エネルギーは $3 \times 10^{17}$  ジュウル程度になり、マグニチュード8.5  
1943 の地震に相当する。

1944 2011年の3.11東日本の地震のエネルギーは、 $2 \times 10^{18}$  ジュウ  
1945 ルで、マグニチュード9相当だ。21年の2.17余震はマグニチュ  
1946 ウド6前後で、本震の千分の1前後の歪エネルギーが解放れた。

1947 チリの地震は、 $2 \times 10^{19}$  ジュウル、マグニチュード9.5で、  
1948 長さ1000キロメートル、幅200キロメートル、滑り20メートル  
1949 の規模の地殻変動による。世界の最大規模の地震だ。

1950

1951 海底で地震が起こると、その地殻変動の規模に応じて広い範囲  
1952 の海面が数メートル上下する。すなわち地殻変動のエネルギー  
1953 の1部が海水の重力エネルギーに変わる。

1954 海水が長さ100キロメートルで幅2キロメートルにわたって、  
1955 高さ5メートルに持ち上げられる場合、その重力エネルギーは $5$   
1956  $\times 10^{13}$  ジュウル程度でM6の地震エネルギーに相当する。

1957 海水の上下は波として伝搬され津波になる。津波の伝搬速度は  
1958 海が深いほど速い。深さが4000メートルの場合、秒速200メー  
1959 トルくらいで、ジェット機並みの速さだ。

1960 大きなうねりの高速の波は、陸地に近くなると速さが遅くな  
1961 り、波長は短くなり、波高は高くなる。リアス式海岸のように狭  
1962 隘になると、幅が狭くなっただけ高さが増える。

1963 津波のエネルギーは、エネルギー保存則に従い、海岸や陸地の  
1964 地形によって、各地点での重力エネルギー（位置のエネルギー）  
1965 と運動エネルギーが変わる。

1966 海岸で15メートルの高さの海水の1部が、大きな運動エネル  
1967 ギーをもって陸上を30メートル遡上することは十分ある。海水  
1968 量10トンで高さが10メートルの場合の重力エネルギーは、時  
1969 速50キロの10トン車の運動エネルギーに相当する。

1970 津波は、各地点の観測を基に、シミュレーション可能だ。津波  
1971 の到達時間は数分以上のものが多く、予測が十分できる。

1972 津波で重要なのは、時間と場所ごとのエネルギーの情報であ  
1973 る。遠海での波高の情報は、防波堤の高さと比較され、大きな誤  
1974 解を生み、深刻な被害をもたらしている。

1975  
1976 註 1. 地球表層では各プレートが動いている。太平洋プレート  
1977 は時速 10 ミクロンだ。その運動エネルギーは小さいが、陸のプ  
1978 レートの下にはいり、大きな歪エネルギーが生じた。。

### 1981 3.3.2. 火山噴火のエネルギー

1982  
1983 火山噴火では、地球内のマグマの熱エネルギーが、地表に放出  
1984 される。噴火にはマグマ噴火と水蒸気噴火がある。

1985 マグマ噴火では、高熱のマグマを溶岩として地表に放出する。  
1986 水蒸気噴火では、地下水がマグマの熱によって体積が急上昇して  
1987 爆発的に噴火し、水蒸気や岩石を放出する。また、マグマと水蒸  
1988 気を放出する、マグマ水蒸気噴火がある。

1989 高温の溶岩や火砕流のエネルギーは、マグマの温度が 1000 度  
1990 程度の場合、1 キログラム当たり百万ジュール程度だ。

1991 火山灰や噴石等は高く舞い上がり周辺に散布されるが、その重  
1992 力エネルギーや運動エネルギーは 1 キログラム当たり 1 万ジュ  
1993 ル程度で、溶岩の熱エネルギーに比べると小さい。

1994 火山の噴火の大きさを表すのに火山爆発指数 VEI が使われる。  
1995 放出溶岩の体積  $V$  立方メートルの場合、 $VEI = \log V - 4$  である。

1996 溶岩の量が一億 ( $V=10^8$ ) 立方メートルの場合が  $VEI=4$  で、体  
1997 積が 10 倍増えると  $VEI$  が 1 増える。最大級の噴火で溶岩が一兆  
1998 ( $V=10^{12}$ ) 立方メートルくらいの場合、 $VEI$  は 8 になる。

1999 同じ体積の噴火量であっても、比重の軽い火山灰の場合の重量  
2000 は、溶岩の場合の 1/4 程度になる。そこで溶岩に換算した場合の  
2001  $VEI$  として DRE (Dense Rock Equivalent) を付記する。

2002 阿蘇山の大噴火や富士の宝永大噴火の場合は  $VEI$  が 7 と 5 だ。  
2003 最近では、1991-1995 の雲仙普賢岳の  $VEI=4.3$  やピナツボ火山  
2004 の  $VEI=6$  がある。220 万年前にイエローストーンで超大型の  
2005  $VEI=8$  級の噴火があった。

2007 火山爆発指数 VEI の場合、噴火エネルギーE (ジュール) は log  
2008  $E=13.4 + VEI$  で表される。

2009 マグマ噴火の場合、マグマの温度が 600–1200 度程度で比重を  
2010 2.5 トン/立方メートル、比熱を 1 ジュウル/度とすると、雲仙で  
2011  $5 \times 10^{17}$  ジュウル, ピナツボで  $10^{19}$  ジュウルになる。このエネ  
2012 ルギーは大規模地震のエネルギーに匹敵する。

2013 超大規模のイエロストーン噴火のエネルギーと超大型のチリの  
2014 地震エネルギーがともに  $2 \times 10^{21}$  ジュウル程度である。このエネ  
2015 ルギーは、100 km 四方に注ぐ太陽光エネルギーの 40 年分だ。  
2016 ーが地表の放出されるが、太陽光の入力エネルギーと同程度だ。

2017 火山噴火の場合も、地震の場合と同様に、地球内のエネルギー  
2018 の変換なので、エネルギーの量と強度について、シュミレーショ  
2019 ンを行って、溶岩や火山灰の状況を公表することが望まれる。

2020

### 2021 3.3.3. 台風と豪雨のエネルギー

2022

2023 大気エネルギーの天地異変として、台風や集中豪雨がある。い  
2024 ずれも太陽光エネルギーが形を変えたものである。

2025 台風の主なエネルギーは、太陽光で暖められた海水の蒸発熱  
2026 で、海水 1 トン当たり  $2.3 \times 10^9$  ジュウルになる。

2027 大型台風として、半径 400 キロメートル、高さ 7 キロメート  
2028 ル、気温 25 度、湿度 100% の台風圏を考えてみる。この領域内の  
2029 水蒸気の量は  $9 \times 10^{10}$  トンになり、エネルギーは  $2 \times 10^{20}$  ジュウル  
2030 くらいで、赤道下での同じ面積の海域の 2 日間の太陽光エネルギ  
2031 ーに相当する。

2032 台風圏内の大気に含まれる水蒸気の熱エネルギーは、雨になる  
2033 際に凝縮熱として大気に還元される。水蒸気が全て同じ領域の雨  
2034 になるとすると、総雨量は 200 ミリメートルくらいになる。

2035 台風は毎秒数十メートルの風を伴う。秒速 30 メートルの場  
2036 合、風の運動エネルギーは大気 1 トン当たり  $5 \times 10^5$  ジュウル程  
2037 度で、水蒸気の熱エネルギーに比べると大変小さい。

2038 常温の大気の気体分子は秒速 500 メートルくらいで高速運動を  
2039 しており、その運動 (熱) エネルギーは水蒸気の熱エネルギーの  
2040 5% くらいだ。台風の主なエネルギーは、飽和に近い水蒸気の熱  
2041 エネルギーである。

2042 台風は、移動の途中で高温の海水から水蒸気を受け入れ、熱エ  
2043 ネルギーを増大させ大型に発達する。あるところに長期間滞在す  
2044 ると、その間海水からエネルギー供給を受け、水蒸気の量が増  
2045 え、大量の雨を降らす。

2046 1976年の台風17号の場合、長期間停滞して、840億トンの大  
2047 量の雨が降った。エネルギーにして $2 \times 10^{20}$ ジュール程度で、初  
2048 めに挙げた大型台風のエネルギーに相当する。

2049 2019年は台風15号と台風19号による強風と豪雨によって大  
2050 きな被害が出た。いずれも $10^{20}$ ジュールくらいのエネルギーの大  
2051 型台風だ。

2052  
2053 豪雨も大気熱エネルギーの異変である。半径数キロメートル  
2054 のスポットだけの集中豪雨の場合もあれば、半径数百キロメー  
2055 ル広い領域に大雨を降らせる場合もある。

2056 豪雨は1時間当たり50ミリメートル前後の強雨を伴い、総雨量  
2057 は300-800ミリメートルにおよぶ。

2058 集中豪雨の場合、局地的に温まった水蒸気を含む空気が上昇気  
2059 流となり、周辺の空気を巻き込んで積乱雲が急速に発達する。上  
2060 空で冷たい空気に接して水滴となって急落下する。

2061 梅雨前線が停滞し、そこに積乱雲が発生して、線状降水帯がで  
2062 きることがある。この場合はその地域に1日500ミリメートル前  
2063 後の雨が降る。

2064 豪雨のエネルギーは、雨量と領域の広さによる。500ミリメー  
2065 トルの雨量が300キロメートル四方に降る場合、そのエネルギー  
2066 は $10^{20}$ ジュール程度になり、大型台風並みだ。

2067 豪雨は、太陽が広領域から永い時間をかけて集めた大量のエネ  
2068 ルギーを、狭い領域と短時間に集中することにある。

2069 1時間に100ミリメートルの集中豪雨のエネルギーは、同じ面  
2070 積の太陽光エネルギーの60時間分だ。エネルギーの集中が大災  
2071 害となる。

#### 2072 2073 3.3.4. 世界のエネルギー異変

2074  
2075 エネルギーは人間の生活にとって大変重要であるが、一方でエ  
2076 ネルギーの偏在や異変は日常の生活に大きな影響をおよぼす。

2077 人々の活動に必要なエネルギーは、一人当たり 8000-10000 ジ  
2078 ュウルである。世界の1年間の穀物生産は26億トン程度だ。そ  
2079 のエネルギーを世界の人口で割ると、1人1日当たり10000 ジュ  
2080 ウルになり、十分足りる筈である。

2081 実際は、食料のエネルギーは先進国に偏在し、且つ1/3のエネ  
2082 ルギーが使用されずに破棄されている。一方世界の人口の12%  
2083 人々が食料不足で生存の危機にある。

2084 一次エネルギーや電力エネルギーは、どの国にとっても生命活動  
2085 の維持に必須である。しかし化石燃料（石油、石炭、天然ガス）  
2086 などのエネルギー資源は、アメリカ、ロシア、中東、中国、その  
2087 他のいくつかの国に偏在し、大きな問題になっている。

2088 エネルギー資源の問題は、これまでの多くの国家間の争いの主  
2089 因であった。第二次大戦もエネルギー資源に起因する。エネルギ  
2090 ー大国がエネルギーのない国をエネルギー禁輸で締め付けた。

2091 戦争では、火器や爆薬を使い、極めて短時間に局所的にエネル  
2092 ギーを集中させる。爆薬は大量のエネルギーを一瞬に放出する。

2093 爆発のエネルギーとして、TNT（トリニトロトルエン）1グラ  
2094 ム当たり1000カロリーのエネルギーを基準に使う。1 TNT トンは  
2095  $4.2 \times 10^9$  ジュウルになる。

2096 爆発エネルギーはダイナマイトや火薬など、広く活用されてい  
2097 る。これを兵器として使うのが爆弾である。

2098 原子核（原子力）エネルギーを1瞬に開放するのが原子爆弾  
2099 （原爆）だ。米国が1942年からマンハッタン計画で開発し、  
2100 1945年8月6日に広島に、9日に長崎に投下した。

2101 広島の上空では、ウランニウム235の核分裂エネルギー $6.3 \times$   
2102  $10^{13}$  ジュウル（TNT 15キロトン）、長崎の上空では、プルトニウ  
2103 ム240の核分裂エネルギー $8.8 \times 10^{13}$  ジュウル（TNT 21キロト  
2104 ン）が一瞬に放出された。

2105 原爆では、膨大な核エネルギーは、主として熱エネルギーに変  
2106 換され、数千度の超高温の熱エネルギーになり、広島では10万  
2107 人、長崎では7万人ほどの一般市民が犠牲になった。

2108 原爆の熱エネルギーは、同じ地域の太陽光の数時間分の熱エネ  
2109 ルギーを一瞬に受けたことに相当する。その後、放射線エネルギ  
2110 ーの放出がしばらく続いた。

2111 水素爆弾では、核分裂エネルギーを起爆剤として、水素核の融  
2112 合反応を行い、その際に放出される中性子で、ウラニウムの核  
2113 分裂を促進させ、エネルギーは TNT 百万トンにおよぶ（註1）。

2114 焼夷弾の場合は、その中の燃料が点火剤となり、家屋等の木材  
2115 が主燃料となる。一度に多くの焼夷弾を散布し、多数の家屋に点  
2116 火し、消化不能にして広域の住居を燃えつくす。

2117 1945年3月10日の東京大空襲では、1665トンの焼夷弾の点火  
2118 によって27万戸の民家（400万トン程度の木材）が燃焼し、 $7 \times 10^{16}$   
2119 ジュウル程度の熱エネルギーが短時間に放出された。

2120 一夜にして40平方キロメートルの住宅街が焼け野原になり、  
2121 10万人の一般市民が犠牲になった。400時間の太陽光エネルギー  
2122 がわずか5時間ほどに集中したことになる。

2123 世界にあまねく存在する太陽光と原子力エネルギーの適正利用  
2124 が、偏在するエネルギー資源、不適切なエネルギー使用、増え続  
2125 ける廃ガス、等の諸問題を解決することを期待したい。

2126  
2127 註1. 米ソ他の核保有国は、全部で1400発程度の核弾頭を保有。

## 2128 2129 4章 物体のエネルギー

### 2130 2131 4.1.1. 物体の内部エネルギー

#### 2132 2133 4.1.1. 物体を構成する原子と分子

2134  
2135 物体には、物体の位置や運動によるマクロなエネルギーと、物  
2136 体内部にあるミクロなエネルギーがある。

2137 マクロなエネルギーとして、地上の物体には、質量と高さに応  
2138 じて、地球の引力による位置のエネルギーがある。動く物体に  
2139 は、質量と速さに応じて運動エネルギーがある。

2140 ミクロなエネルギーとして、物体の内部には、種々のエネルギ  
2141 ーがあり、時と場合によって変化する。内部のエネルギーは、物  
2142 体を構成する要素の視点から考えられる。

2143 物体の要素は原子と分子で、分子はいくつかの原子からなる。  
2144 空気中の酸素分子は2つの酸素原子からなり、アルコール分子は  
2145 いくつかの水素と炭素と酸素の原子からなる。

2146 物体内の原子内には、いくつかの電子があり、原子の中心の原  
2147 子核と電気力で結ばれている。

2148 原子の表層の電子は、原子核との結びつきが弱く、身軽に動  
2149 き、隣や周辺の原子の電子と結びついたり相互に作用しあう。

2150 分子の場合、いくつかの原子の表層の電子のあいだで電気力が  
2151 が作用し、原子が結び合っている。このさい、各原子の電子の電  
2152 気エネルギーが変わる。

2153 物体内の分子や結晶体の場合も、原子や分子の表面の比較的身  
2154 軽な電子の運動や分布が変わると、それに応じて電気エネルギー  
2155 が新たに生まれたり変化したりする。

2156 誘電体や磁性体に、外部から電気や磁気の力を作用させると、  
2157 それらの物体内の身軽な電子の分布や運動が変わり、それに応じ  
2158 て電気や磁気のエネルギーが変わる。

2159 外から力を加えてゴム紐を伸ばすと、力と長さに応じ、ゴムの  
2160 中の各分子内にある身軽な電子の配置や運動が変わる。それにゴ  
2161 ム紐内部の電気エネルギーが増える。

2162 気体中の各分子は、その温度に相当する運動エネルギーをもつ  
2163 て縦横に運動をしている。低温の気体に高温の熱風を吹き込む  
2164 と、相互の衝突によって、高温の気体分子から、低温の気体分子  
2165 に、運動エネルギーの1部が移り、温度が平均化される。

2166 日本酒を電子レンジで温めると、日本酒内の水の各分子は、電  
2167 気の力を受けて運動エネルギーが増え、酒が温まる。

2168 物体内の分子に赤外線（電磁波の1種）を照射して電気のエネ  
2169 ルギーを注入すると、物体内の分子が電気力で刺激され、分子  
2170 が振動運動や回転運動を始める場合、物体の温度が上がる。

2171

2172 尚、物体には質量があり、質量エネルギーがある。物体を構成  
2173 する原子・分子の物体内での質量の総和が物体の質量になる。

2174 物体（物質）内の電子、原子、分子の電気エネルギーは、質量  
2175 エネルギーに反映されている。

2176 物体の質量エネルギーの殆ど（99.98%）は原子の中心にある原  
2177 子核の質量エネルギーで残りは電子の静止質量エネルギーだ。上  
2178 に述べた物体内の電気エネルギーや熱エネルギーの割合は、物体  
2179 の質量エネルギーの10億分の1程度である。

2180

#### 2181 4. 1. 2. 化学反応のエネルギー

2182  
2183 物体（物質）内のエネルギーは、種々の反応や作用で変わる。  
2184 物質中の原子の中心にある原子核、その周りの電子、原子が組み  
2185 合わさってできる分子、それらの1部が変わると、物質が変わ  
2186 り、それに応じて物質のエネルギーが変わる

2187 原子や分子が関与する化学反応では、電気の力によって、原子  
2188 の組み合わせが変わり、分子が変わり、物質が変わる。それに  
2189 応じて1原子当たり数電子ボルトの電気エネルギーが出入りする。

2190 一方、原子核が関与する核反応では、核力の力によって、原子  
2191 内の原子核が変わり、1原子核当たり数千万電子ボルトの原子力  
2192 エネルギーの出入りする。第6章で原子核反応を詳しく述べる。

2193  
2194 化学反応では、原子の表面近くの身軽な（あまり強く束縛され  
2195 ていない）電子が反応に関与する。

2196 原子内では、いくつかの電子が原子核の周りの各軌道を回って  
2197 いる。軌道には一定の数の席がある。

2198 ナトリウム原子の場合、一番外側の軌道には1つの電子が回っ  
2199 ている。その電子に少々エネルギーを注入して刺激すると、ジャン  
2200 プして軌道の外に飛び出す。

2201 塩素原子の場合、一番外側の席数8の軌道には7つの電子があ  
2202 り、1つが空席だ。そこに、別の原子内から1つの電子を受け入  
2203 れ、定席を満たすと安定になる。

2204 塩化ナトリウム分子は、電子が飛び出したあとの正（+）ナト  
2205 リウムイオンと、その電子を受け入れた負（-）塩素イオンから  
2206 なる。+と-のイオンが結びつくのでイオン結合という。

2207 炭素原子の一番外側の軌道には席数が8あり、4つの電子が回  
2208 っている。水素原子では席数が2の軌道を1つの電子が回る。

2209 アンモニア分子は、1炭素原子と4水素原子が、それぞれの電  
2210 子を共有して共有結合をしている。炭素の4電子と4つの水素原  
2211 子の各1電子が1つずつ対になり、4つの電子対ができる。炭素  
2212 は4つの対で8電子になり満席、水素原子の方も、おのおの1対  
2213 の2電子で満席、どちらも安定する。

2214 イオン結合や共有結合による化学反応では、反応の前後で、電  
2215 子の運動が若干変わることによって、電気エネルギーが変わり、  
2216 それが化学反応エネルギーとなる。

2217 A原子とB原子が化学反応をしてC分子を造る場合、AとBの  
2218 原子内の電子のエネルギーの和がC分子の電子のエネルギーより  
2219 も大きい場合は、余分のエネルギーを放出する。すなわち発熱反  
2220 応である。逆に少ない場合はエネルギーを入力して反応を起こ  
2221 す。すなわち吸熱反応になる。

#### 2222 2223 4.1.3. 栄養のカロリーとエネルギー

2224  
2225 人々が生命を維持し活動を続けるには、常にエネルギーが必要  
2226 である。そのためのエネルギーは、食品の中にある栄養素から体  
2227 内に取り入れる。緊急のばあは点滴でエネルギーを注入する。

2228 入力エネルギーは、主として栄養素内の分子の周りにある電子  
2229 のエネルギーで、体内での種々の化学反応を通して取り出す。

2230 栄養素のエネルギーや活動に要するエネルギーの場合、単位と  
2231 してカロリーを使う。1カロリーは4.2ジュールだ。

2232 栄養素として、大きく分類して、炭水化物ないし糖分、脂肪、  
2233 タンパク質がある。いずれも水素、炭素、酸素の原子を含む分子  
2234 の電気エネルギーがもとになる。

2235 食品内の各分子は、呼吸で取り入れた酸素と化学反応して（燃  
2236 えて）二酸化炭素と水になる場合、各分子内の電気エネルギーの  
2237 1部が二酸化炭素や水の分子の運動エネルギーに変わる。

2238 脂肪1分子は酸素分子と反応して16の二酸化炭素分子と16  
2239 の水分子になる場合、脂肪1グラム当たり9キロカロリーを出  
2240 力。ブドウ糖1分子は酸素分子と反応して6の二酸化炭素分子と  
2241 6の水分子になり、1グラム当たり4キロカロリーを出力。

2242 たんぱく質の分子の場合、炭素、水素、酸素の他に窒素原子が  
2243 ある。脂肪や糖分と同様な化学反応により1グラム当たり4キロ  
2244 カロリーのエネルギーを出力。

2245 栄養素という生命エンジンの燃料も、ガソリンなどの車のエン  
2246 ジンの燃料も、いずれも有機体で、その中の炭素や水素の原子内  
2247 にある電子の電気エネルギーを利用する点で共通している。

2248 石油の分子が酸素と反応して二酸化炭素と水になる場合のエネ  
2249 ルギー出力の場合も 1 グラム当たり 4.2 キロカロリー程だ。

2250  
2251 人体内では、種々の栄養素から取り出されたエネルギーは、さ  
2252 まざまな化学反応を通して、基礎代謝や種々の生体活動に使われ  
2253 る。この場合、栄養素の分子内の電気エネルギーが、生命活動に  
2254 必要な種々の電気エネルギーと運動エネルギーになる。

2255 筋肉を動かして運動エネルギーに変える場合は、脂肪と糖分か  
2256 ら造られるアデノシン 3 リン酸がそのエネルギー源になる。

2257 生体活動には、記憶・計算・決断などの脳活動、恋愛や情熱な  
2258 どの熱い心の活動など、多岐にわたる。いずれも体内の諸分子の  
2259 電気エネルギーだ。

2260 体重や活動量によってエネルギー消費量は異なるが、1 日 2000  
2261 -2500 キロカロリー程度が必要だ。1 日 3 食、毎食 700 キロカ  
2262 ロリー程度になるが、入力エネルギーが消費エネルギーより多け  
2263 れば、体内脂肪やその他に蓄積され、エネルギーは保存される。

#### 2264 2265 4.1.4. 仕事とエネルギー

2266  
2267 人間がある物体を持ち上げて「仕事」をする場合、人は自分  
2268 の体内のエネルギーを消費し、物体はそのエネルギーを得る。

2269 物体 A がそのエネルギーを使って物体 B にエネルギーを与える  
2270 ことを「仕事をする」という。

2271 物体 A の持っているエネルギーの 1 部が物体 B に移る。A と B  
2272 のエネルギーの総量は変わらないが、エネルギーのある場所が A  
2273 から B に変わり、エネルギーの形も変わることが多い。

2274  
2275 ある人が「ばね」に 10 ニュートンの力（牛乳 1 リットルの重  
2276 さに相当）を加えて 0.3 メートル伸ばすと、ばねの内部に 3 ジュ  
2277 ールのエネルギーが増える。人はこの仕事をするために、砂糖に  
2278 して 1 万分の 2 グラム相当のエネルギーを消費する。

2279 1 キログラムの荷物をエレベーターで 100 メートルのビルの屋  
2280 上に上げると、1 キロジュールの位置のエネルギーが増える。エ  
2281 レベーターはそのために、0.3 キロワット時の電力を使う。

2282 1トンの車を時速50キロメートルまで加速するには、100キロ  
2283 ジュールのエネルギーが必要だ。その仕事をするると6グラムのガ  
2284 ソリンが減る。人が車を押した場合は、そのエネルギーを生み出  
2285 すのに、角砂糖1個分を消費する。

2286 実際に仕事をする場合は、仕事に要したエネルギーの1部は、  
2287 摩擦などの熱エネルギーとして地球のどこかに逃げてゆくので、  
2288 それだけ多くのエネルギーの入力を要する。

2289 仕事がされた結果、ばねの中の電気エネルギー、屋上の物体の位  
2290 置エネルギー、車の運動エネルギーなどが増大する。仕事をする  
2291 側は、人体内の糖分、発電所の石炭、ガソリントankの石油など  
2292 の分子内の電気エネルギーが減少する。

2293 物体内の分子の電気エネルギーは、分子を構成する1原子当  
2294 たり、数電子ボルトで（乾電池の電圧×電子の電荷）だ。分子がた  
2295 くさん集まって500グラムになると、1万キロジュールになり、  
2296 1人の1日の活動に必要なエネルギー量に相当する

2297  
2298 エネルギーと質量の等価の原理によると、仕事をする側はその  
2299 エネルギーに相当する質量だけ軽くなり、仕事をされたが側はそ  
2300 れだけ質量が増えて重くなる。

2301 質量とエネルギーの換算率は、1キロジュール当たり千億分の  
2302 1グラムに相当するので、エネルギーの増減による質量の増減は  
2303 殆ど無視できるくらい微々たるもので、殆ど気が付かない。

## 2304 2305 2306 4.2. 燃焼のエネルギー

### 2307 2308 4.2.1. 火と燃焼のエネルギー

2309  
2310 人類の文明をもたらした第1のエネルギー革命は、火の使用、  
2311 すなわち燃焼エネルギーの活用だ。火の使用の歴史は古い。50万  
2312 年前とも100万年前ともいわれている。

2313 燃料として使われてきたのは、主として木材で、近世になって  
2314 石油や石炭、天然ガスなどのいわゆる化石燃料の活用が進んだ。  
2315 いずれも炭素や水素を含む有機化合物である。

2316 火のエネルギー源として使用される燃料は、人々の食品にある  
2317 有機化合物と同類のもので、生物が生まれて以来、そのエネルギー  
2318 源として使用してきたものである。

2319 火の活用で、たくさんの燃料を体外で燃やすことが可能になり、  
2320 体内に取り入れて燃やす食料の何十倍ものエネルギーが利用  
2321 できるようになった。

2322 木材、石油・石炭などの有機物内の炭素や水素の周りの電子  
2323 は、ゆるく結ばれて、エネルギーが高い状態にある。

2324 炭素と水素は、天然に多量に存在し、各原子内の電子は、高い  
2325 電気エネルギーを持っているので大変有用だ（註1.）。

2326 有機体内の炭素に、外から酸素を供給し、あるエネルギーを注  
2327 入して点火すると、炭素と水素は酸素と化学反応をして、二酸化  
2328 炭素や水になり、それぞれの電子は固く結ばれ、エネルギーの低  
2329 い安定な状態に変わる。その際、余分のエネルギーを放出する。

2330  
2331 有機体内の炭素は、ダム内の水のように、エネルギーが高い状  
2332 態にある。二酸化炭素内の炭素は、ダム下の川の水のようにエネ  
2333 ルギーが低い。そのエネルギーの差を活用するのが燃焼だ。

2334 炭素の燃焼熱で発電することは、落差による水の運動エネルギー  
2335 で発電する水力発電に相当する。

2336 有機化合物の燃料の場合、エネルギーの量は1炭素原子当たり  
2337 5-6電子ボルト程度で、食品と同程度のエネルギーだ。

2338 炭素の燃焼エネルギーは、二酸化炭素の運動エネルギーとな  
2339 り、周りの物体と衝突を繰り返して、熱エネルギーになる。

2340 熱エネルギーによって物体は高温になり、400度Cくらいで5  
2341 ミクロンくらいの波長の赤外線（輻射光）が放出される。

2342 薪や炭火や石油などの燃焼による熱エネルギーは、焼肉、部屋  
2343 の暖房、火力発電等、多方面に活用されている。

2344 燃焼によって得られたエネルギー熱は高温の状態にあるが、エ  
2345 ネルギーの使用後は地球に拡散して常温となる。

2346  
2347 森林では、太陽エネルギーを入力して有機化合物の燃料の生産  
2348 が行われている。燃料を生産する化学反応は、燃料を消費する反  
2349 応の逆の化学反応である。

2350 空気中の二酸化炭素と木の根から吸い上げた水を合成させて、  
2351 炭水化物である有機化合物と酸素を造る。この際、太陽からの光  
2352 のエネルギーを使って、二酸化炭素内のエネルギーの低い状態の  
2353 電子を、有機体内のエネルギーの高い状態に引き上げる。

2354 太陽光の光子は、5800度という高温の太陽表面から放射され  
2355 るので、数電子ボルトのエネルギーを持っているので、二酸化炭  
2356 素内の電子状態を変えて、有機化合物を合成することができる。

2357 生命体はある期間、有機体の化学反応エネルギーを使って秩序  
2358 ある（生命）活動を行い、やがて寿命が尽きて無秩序に帰る。

2359  
2360 註1. 炭素の燃焼 ( $C+O_2=CO_2$ ) では4電子ボルト程、水素の燃  
2361 焼 ( $2H_2+O_2=2H_2O$ ) では水素原子当たり0.75電子ボルトの  
2362 エネルギーを放出。この電位差はダム落差に相当する。

#### 2363 2364 4.2.2. ガソリン車のエネルギーの流れ

2365  
2366 ガソリン車は、ガソリンを燃焼させて、ガソリンの分子内電子  
2367 の電気エネルギーを熱エネルギーに変え、そのエネルギーを車の  
2368 運動エネルギーに変える。

2369 ガソリンの分子内では、炭素原子や水素原子の周りの電子の結  
2370 びつきが弱く、電気の結合エネルギーが小さい。

2371 ガソリンと酸素が化学反応をして燃焼すると、二酸化炭素と水  
2372 になるが、特に二酸化炭素分子の中の炭素と酸素は固く結ばれ、  
2373 電気エネルギーが低（少ない）。

2374 ガソリン分子と酸素分子内の電子のエネルギーの和は、燃焼後  
2375 の二酸化炭素と水の分子内の電子のエネルギーの和よりも多く、  
2376 その差がガソリンの燃焼エネルギーとなる。

2377 燃焼エネルギーは、ガソリン1グラム当たり42キロジュール  
2378 程で、1炭素原子（水素込み）当たり6電子ボルトくらいだ。

2379 燃焼エネルギーは、燃焼で生成された高温の二酸化炭素と水の  
2380 各分子の運動エネルギーになり、エンジンのピストンに衝突し、  
2381 ピストンを押してピストンを動かす。

2382 高温の二酸化炭素と水の分子は、その熱エネルギーでピストン  
2383 を動かした後、大方の熱エネルギーを使い果たし、低温の二酸化  
2384 炭素と水となって、車外の空中に放出される。

2385 ピストンの運動は、車軸を通して車輪を回し、車を動かす。燃  
2386 料の分子内の電気エネルギーは、車の運動エネルギーに変換され  
2387 るが、変換効率は30%前後である。

2388 燃焼によって排出される二酸化炭素は、ガソリン1グラム当た  
2389 り3グラムくらいで、炭素原子と二酸化炭素分子の質量比が3で  
2390 あることを反映している。

2391 大量の二酸化炭素放出は、有機体の炭素を利用する化石燃料の  
2392 共通する。地球温暖化の元凶として問題になっている。

2393  
2394 電気エネルギーを利用するEV車の場合は、電池の分子内の電  
2395 子の電気エネルギーをモーターの回転運動エネルギーに変換し、  
2396 そのエネルギーを車の運動エネルギーに変える。

2397 EV車の電池の電気は、街のスタンドなどで充電して得られる  
2398 が、元は各地の発電所から送られてくる。日本の場合、殆どが石  
2399 油などの化石燃料を用いて発電した電気だ。

2400 EVの場合、発電や送電などの中間過程があるので、その際の二  
2401 酸化炭素の排出とエネルギーロスを考慮する必要がある。

2402 EVの蓄電池に蓄える電気とEV生産のためのエネルギー源とし  
2403 て、原子力発電や太陽光発電を利用する場合、二酸化炭素の排出  
2404 がなく、地球環境にやさしい車になる。水素を燃料とする車の場  
2405 合も、水素燃料の生産に電力を使う場合、原子力と太陽光発電に  
2406 限ることが望まれる。

#### 2407 2408 2409 4.2.3. 燃焼のコントロール

2410  
2411 エネルギー活用の三条件は、物体内に閉じ込められているエネ  
2412 ルギーを解放すること、それを持続させること、そしてコントロ  
2413ール（制御）することである。

2414 燃焼の場合、燃料に点火してエネルギーを取り出すこと、一旦  
2415 火が付いたら継続して燃えるようにすること、そして火加減（火  
2416 の強弱）を調整することが必須の三条件だ。

2417 燃料（木材、石油等）内では、炭素や水素の周りの電子は、あ  
2418 る電気の障壁内にあつて、エネルギーの高い状態にある。

2419 エネルギーの高い電子を、障壁を超えて解放し、二酸化炭素や  
2420 水の中のエネルギーの低い状態に移すには、外からあるエネルギ  
2421 ーを注入する。すなわち点火である。

2422 燃料内の電子は、ダム湖の水位の高い水に相当する。ダム内の  
2423 水に波を立ててダムを超えて放流を促すのが点火である。

2424 点火のエネルギーとして、昔は棒をきり揉みして摩擦熱を使っ  
2425 たが、いまはマッチの火や電気の火花がよく使われる。

2426 燃料体の中のある炭素の周りの電子のエネルギーが解放される  
2427 と、そのエネルギーで周りの燃料の炭素に火がつき（点火し）、  
2428 電気エネルギーが解放され、順次に燃焼が広がる。

2429 燃料として利用できるためには、点火の入力エネルギーより燃  
2430 焼の出力のエネルギーが大きいことが必要である。また燃焼を持  
2431 続させるには、常に周りに燃料があることが条件だ。

2432 一旦燃え出した燃料の燃焼エネルギーが、急速に周りの燃料に  
2433 点火すると、燃焼は一気に燃料全体に広がる。すなわち爆発す  
2434 る。短時間に大きなエネルギーを生むので、ダイナマイトのよう  
2435 に岩盤などを破壊するのに利用される。

2436 燃焼によって、必要な時に必要な量のエネルギーを取り出すに  
2437 は、燃焼が広がる速さをコントロールする。すなわち燃焼の化学  
2438 反応に必要な炭素や水素の燃料や酸素の供給を増減する。

2439 ガソリン車の場合はアクセルを踏んだり離したりしてガソリン  
2440 の量を調整する。暖炉の場合は、薪の量や空気（酸素）の量を増  
2441 減する。どちらかを断てば、燃焼は止まる。

2442 火事を消すのに水をかけるのは、ある部分の燃焼エネルギーを  
2443 水に移し、周りの部分の点火を避けるためである。エネルギーを  
2444 移された水は蒸発し、100度以上にならないので、家や家財を点  
2445 火することができない。

2446 化石燃料のエネルギーで発電して、そのエネルギーを電気エネ  
2447 ルギーに変換することによって、エネルギーのコントロールが大  
2448 変容易になる。

2449 太陽や原子発電での原子核エネルギーの活用も、核燃焼のコン  
2450 トロールがポイントになる。詳しくは第6章で述べる。

2451

2452 4.2.4. 水素と炭素のエネルギー収支

2453

2454 燃焼エネルギーの有効活用には、燃料の生産（生成）、エネルギー  
2455 ギーの効率、廃熱と廃棄物の三つがポイントになる。

2456 有機化合物（木材、石油などの化石燃料、バイオ、など）の場  
2457 合は、太陽光のエネルギーを使って、森林の葉緑素の助けを借り  
2458 て、二酸化炭素内のエネルギーの低い炭素を、有機体内のエネル  
2459 ギーの高い炭素に移し、燃料を生成する。

2460 太陽光はもともと原子力で、燃料生産に使う材料も二酸化炭素  
2461 と水なので、どちらも十分あることが、森林がポイントになる。  
2462 水力エネルギーの場合は、太陽光で海水を蒸発させて、雨を降ら  
2463 せて水を位置エネルギーの高いダムに移す。

2464 炭素燃料を燃焼させてエネルギーを得る場合、燃料内の炭素を  
2465 二酸化炭素内のエネルギーの低い炭素に移すので、二酸化炭素の  
2466 排出が避けられない。これが温暖化ガス問題だ。

2467 二酸化炭素は地球のエネルギー放出を妨げ、地球温暖化をもた  
2468 らし、多くの人々がその犠牲になっている。

2469  
2470 温暖化ガスの削減には、太陽光のエネルギーを活用して、森林  
2471 の助けを借りて、燃焼利用後の二酸化炭素内の炭素を、燃焼利用  
2472 前の有機体燃料内の炭素に戻すことが有効である。

2473 太陽光と森林による有機体燃料の再生は、ダムの水を発電に使  
2474 った後、川から海に流れた水を、太陽光を使って蒸発させ雨を降  
2475 らせてダムに戻すことに相当する。

2476 二酸化炭素などのガスの発生を伴わない、新たな燃焼（電子エ  
2477 ネルギー変換）法の開発が望まれる。脱炭素の燃料だ。

2478 温暖化ガス問題解決の現実的方法は、原子核内の核エネルギー  
2479 の活用で、核燃料も廃棄物も有機体の炭素の電気エネルギーに比  
2480 べて数百万分の1で済み、問題にならない。核燃料については第  
2481 6章で、放射能については第7章で述べる。

2482  
2483 エネルギー問題のもう一つのポイントは効率の問題である。有  
2484 機体内の炭素の電子の電気エネルギーは、燃焼によって発電に使  
2485 われたり、エンジンを動かすことなどに活用されるが、有効エネ  
2486 ルギーに使われる割合はその半分以下のことが多い。

2487 燃料内のエネルギーの内、有効に使われなかった部分は廃棄熱  
2488 として地球に放出される。また有効に使われた後も、廃熱として  
2489 地球に放出される。

2490 エネルギー利用に際しての効率と廃熱の問題は、太陽光、原子  
2491 力、化石燃料、水力等、全てに共通する問題である。効率向上と  
2492 廃熱再利用などが必要だ。

#### 2493 2494 4.3. 物体の変形と内部エネルギー

##### 2495 2496 4.3.1. 固体の変形のエネルギー

2497  
2498 固体内の原子や分子の周りには、いくつかの電子が特定の位置  
2499 に配列されていて、それぞれに固有の電気エネルギーがある。

2500 各々の個体は、固有な電子配列の応じて、固有な電気エネルギー  
2501 をもち、固有な体積、形、固さを保持している。

2502 個体に外力を加えて伸ばしたり縮めたりすると、電子の配列が  
2503 変わり、形や体積が変わり、それに応じてエネルギーが変わる。

2504  
2505 弾性体の場合、フックの法則によって、力に比例して伸び縮み  
2506 する。3倍の力を加えれば3倍伸び、3倍エネルギーが増える。  
2507 力を加えるのをやめると、元に戻る。

2508 弾性体の伸び縮みに要する力と伸び縮みの割合をヤング率とい  
2509 う。ヤング率はG（ギガ=10億）パスカルの単位で、タングステ  
2510 ンは350、銅は100、ゴムは0.01くらいである。

2511 ヤング率の大きなタングステンは固く1%伸ばすにも大きな力  
2512 が必要だが、ゴムは少しの力で2-3倍に伸びる。

2513 長さ1m、直径1mmの銅線の場合、100N（N=ニュートン）、す  
2514 なわち10キログラムの重さに相当する力を加えると、1.3mmく  
2515 らい伸び、エネルギーは0.13ジュール増える。

2516 弓は、弓の弾性体内の電気エネルギーを、矢の運動エネルギー  
2517 に変える。平均10キログラム（100N）の力で30cm引くと、弓  
2518 の弾性体には30ジュールの電気エネルギーが増える。そのエネ  
2519 ルギーは、弓から放たれた20グラムの矢の運動エネルギーとな  
2520 り、矢は時速200キロメートルで飛ぶ。

2521 弓矢の場合は、人間が1秒くらいの時間をかけて体内の化学エ  
2522 ネルギーを弓の弾性体のエネルギーに変換し、矢を放った瞬時  
2523 に、矢の運動エネルギーに変る。

2524 機械式の時計はエネルギー源としてゼンマイ（渦巻状のばね  
2525 板）を使う。数秒かけてヤング率に高い材質のゼンマイを巻き、  
2526 エネルギーを入力する。

2527 ゼンマイ板に蓄えられたエネルギーは1週から数週間の時間を  
2528 かけてゆっくりと時計の針を動かすことに使われる。

2529  
2530 弾性体のエネルギーは、物体内の各電子（電荷）の相対位置の  
2531 変化による電気エネルギーで、大変小さい。

2532 弓や時計のゼンマイの場合、1原子当たり数万分の1電子ボル  
2533 トで、原子や分子内の電子の軌道を変える化学反応に比べ、数万  
2534 分の1である。

2535 弾性体を伸縮させると、弾性体内のエネルギーは増え、質量が  
2536 少し増えるが、質量の変化の割合は、千兆分の1程度である。

2537 弾性体の変形エネルギーの活用は、多くの技術革新をもたらし  
2538 た。弓矢による狩猟の革新は、十数万年前にさかのぼる。ゼンマ  
2539 イ時計の利用による機械文明の開化は15世紀からで、蒸気機関  
2540 の数世紀も前である。

#### 2541 2542 4.3.2. 気体と液体のエネルギー

2543  
2544 気体や液体の中にある原子や分子は、常時動いている。各々の  
2545 原子や分子には、それぞれの内部にある電子の電気エネルギーの  
2546 他に、原子や分子の運動エネルギーがある。

2547 気体原子の運動エネルギーの平均値は、絶対温度  $T$  の場合  $1.5$   
2548  $\times kT$  になる。 $k$  はボルツマン定数で、1万分の  $0.86$  電子ボルト  
2549 だ。常温では、運動エネルギーは  $0.04$  電子ボルト程度になる。

2550 気体内にある原子・分子の運動エネルギーは、その質量に関係  
2551 なく一定である。したがって速さは質量が軽いほど速い。1気圧  
2552 で常温の気体の場合、水素分子は秒速2キロメートル程度、窒素  
2553 分子や酸素分子は秒速  $0.5$  キロメートル程度だ。

2554 音は気体分子の疎密波で、音速は気体分子の速さより遅く、1  
2555 気圧で常温の空気中では、秒速  $0.34$  キロメートルくらいだ。

2556 気体の中に平板をおくと、気体分子は平板に衝突して運動量の  
2557 向きが変わり、平板に圧力をおよぼす。1分子の圧力Pは、運動  
2558 量（質量×速さ）と衝突回数に比例し、衝突回数は速さに比例す  
2559 る。したがってPは質量×速さの2乗、すなわちエネルギーkT  
2560 に比例する。また、体積をV、分子の総数をNとすると、単位体  
2561 積当たりの分子数N/Vに比例する。

2562 理想気体の圧力は1分子の圧力と分子数の積、 $P = nRT/V$ とな  
2563 り、よく知られたボイル・シャルとゲイリュサックの関係式  
2564 になる。ここで、nは原子・分子のモル数で比例係数Rが気体定  
2565 数になる。実際の気体の分子の速さは、平均の速さの周りに分布  
2566 している。また単原子でない場合、回転運動などがある。

2567  
2568 液体内の各原子や分子は相互に電気力（ファンデルワールス  
2569 の力 註1）をおよぼし合い、上下左右に動き、ある場合は流れ  
2570 るが、全体として一定の体積を保つ。

2571 液体にエネルギーを注入して高温にすると、液体中の分子はエ  
2572 ネルギーを得て、周りの液体分子の力を振り切って蒸発し、自由  
2573 に飛びまわる。すなわちエネルギーの高い状態の気体になる。

2574 液体から気体になるのに必要なエネルギーを気化熱という。逆  
2575 に、気体から液体になる際は、凝縮熱として、同じエネルギーを  
2576 放出する。常温常圧の水の気化熱は1モル当たり44キロジュール  
2577 で、1分子当たり0.4電子ボルト程度だ。

2578 金属のような個体が熱エネルギーによって蒸気（気体）になる  
2579 ことを昇華という。金属内では原子の結びつきは固く、その束縛  
2580 から解放して気体にするには、1原子当たり数電子ボルトの昇華  
2581 エネルギーを要する。

2582 蒸気機関は、石炭などの化学エネルギーで水を気体（蒸気）に  
2583 し、気体分子の運動エネルギーをピストンの運動エネルギーに変  
2584 える。1769年、ジェイムズワットは、効率の良い蒸気機関を造  
2585 ることに成功し、産業革命をもたらした。

2586  
2587 註1. 中性の分子の電気双極子などの間に作用する電気力。

#### 2588 2589 4.3.3. 熱気球とロケット 2590

2591 物体内の電気エネルギーを取り出し、気体分子の運動エネルギー  
2592 ー（熱エネルギー）に変えて、空を飛ぶことができる。熱気球と  
2593 ロケットは気体のエネルギーで飛ぶ。

2594 熱気球の場合、プロパンを燃焼させて、プロパン内の電気エネ  
2595 ルギーを気球内の気体分子の運動エネルギーに移す。その結果、  
2596 運動エネルギーが増えて、気体の温度が上がる。

2597 気球内の気体が温まり運動エネルギーが増すと、気体は膨ら  
2598 み、体積当たりの重さ（比重）が軽くなる。熱気球の重さが、同  
2599 じ体積の空気よりも軽くなると、気球を上から押さえつける空気  
2600 の圧力よりも、気球を下から押し上げる空気の圧力が大きくな  
2601 る。その圧力の差が浮力となり気球が上昇する。

2602 熱気球が上昇する原理は、地上の空気が温まると上昇気流とな  
2603 って上がるのと同である。上昇気流の運動エネルギーを直接利用  
2604 して飛ぶのがパラグライダーだ。

2605  
2606 ロケットの場合、主として液体燃料と酸素を化学反応（燃焼）  
2607 させて、液体燃料内の電気エネルギーを、高温の気体分子の運動  
2608 エネルギーに変える。

2609 ジェットエンジン内の高速の気体分子は、エンジンの上部の内  
2610 壁に衝突し、ロケットに上向きの運動量を与える。エンジンの下  
2611 部は穴が開いているので、気体分子はそのまま外に排出され、ロ  
2612 ケットに力を与えない。

2613 ロケットには、高温気体からの運動量移行により、上向きに加  
2614 速され、燃料を消費した分だけ軽くなり、上昇する。

2615 通常の場合、第2弾ロケットの噴射、分離、最終段  
2616 階での人工衛星の噴射などがあるが、全体の運動量は変わらず、  
2617 エネルギーも燃料内の電気エネルギーを加えれば変わらない。最  
2618 終的には、ロケット燃料のエネルギーの1部が、人工衛星の位置  
2619 のエネルギーと運動エネルギーに変換され、地球を回る。

2620 ロケットの場合は、燃焼によって放出される気体分子の運動エ  
2621 ネルギーを直接利用するので、熱気球の場合のように、周りの空  
2622 気を必要としない。燃料さえ残っていれば、空気のない惑星に行  
2623 って帰ってくるることができる。

2624 ジェット機はジェットエンジン内の気体分子の運動エネルギー  
2625 を使って前進するが、周りの空気の分子の運動エネルギーを利用  
2626 して浮力を得て高度を維持する。

2627 ペットボトル内に沢山の空気をいれて圧力をあげてエネルギー  
2628 を注入し、ペットボトルを逆さにしてふたを開ける。ボトルの内  
2629 側からボトルの底に衝突する空気分子数は、ボトルの外側から衝  
2630 突する空気分子の数よりも多いので、ペットボトルは上昇する。

#### 2631 2632 4. 3. 4. 熱エネルギーの流れとエントロピー

2633  
2634 蒸気機関や内燃機関のように、熱エネルギーを用いて仕事をす  
2635 る場合、熱エネルギーの移動には、決まった法則がある。熱は必  
2636 ず高温から低温のほうに移る。

2637 エネルギー保存則だけを考えれば、熱エネルギー $Q$ は低温部と  
2638 高温部の間でどちらからどちらに移動してもよい。実際は高温部  
2639 から低温部に移動する。

2640 温度 $T$ で熱量 $Q$ の熱の移動は、熱力学第2法則のエントロピー  
2641  $S=Q/T$ の増大の法則にしたがう。

2642 熱量 $Q$ が低温側( $T'$ )に移った場合のエントロピー $S'=Q/T'$   
2643 は、同じ熱量を高温側( $T$ )が受けた場合のエントロピー $S=Q/T$ よ  
2644 り、 $T'$ が $T$ より低い(小さい)だけ大きい。すなわち、エント  
2645 ロピー $S$ が増大する方の低温側に熱は移動する。

2646 暖房した部屋の窓を開けると、熱は寒い外気の方へ逃げてゆ  
2647 く。湯水に氷を入れると、熱は氷の方に流れて氷が融ける。

2648 熱機関で仕事をさせる場合、高温 $T$ から熱量 $Q$ を入力し、低温  
2649  $T'$ へ熱量 $Q'$ を放出し、 $Q-Q'$ の仕事させる。仕事の効率 $(Q-$   
2650  $Q')/Q$ は最大効率 $(T-T')/T$ より少ない。すなわち $Q'/T'$ は  
2651  $Q/T$ より大きく、エントロピーは増大する。

2652  
2653 エントロピーは状態の数の対数であらわされ、整然とした状態  
2654 から、乱雑で沢山の状態がある方向に変化する。

2655 エンジンからの排気ガスである二酸化炭素を空気中に放出する  
2656 と、二酸化炭素は自然に拡散し、再びもとに戻らない。放出され  
2657 た二酸化炭素の回収には、更にエネルギーの入力を要する。

2658 整理された部屋は、次第に散らかって乱雑になる。ただし、人  
2659 為的整理によって、エントロピーは減少し、整然となる。

2660  
2661 エントロピー、熱、温度といったエルギーに関するマクロの概  
2662 念は、多くの粒子が集まった集合体で成り立つ。

2663 物体の物性の場合、分子数はアボガドロ数（1兆個の1兆くら  
2664 い）のマクロの世界なので、問題ない。

2665 原子核のようなミクロの世界でも、粒子数が100くらいの系に  
2666 なると、ある程度の統計処理が可能になり、熱や温度といったマ  
2667 クロの概念が適用されている。

2668 素粒子や少数系の原子核は、ミクロの世界で、粒子数は数個か  
2669 ら十数個の場合が多く、熱や温度のようなマクロの世界の概念は  
2670 適用できなくなる（註2）。

2671  
2672 註1. エントロピーは統計力学では  $S=k\ln W$  で表される。k はボル  
2673 ツマン定数、W は状態数で、ln は自然対数である。

2674 註2. 左右の箱の赤玉4個と白玉4個を混合させた場合、左右の  
2675 箱が均等に赤玉2個と白玉2個になるとは限らない。3個の赤  
2676 玉が左に集まる場合もあれば、赤玉が1個の場合もある。少数  
2677 系ではエントロピーの概念は使えない。

## 2678 2679 5章 原子と電子のエネルギー

### 2680 2681 5.1. 原子の成り立ちと電子のエネルギー

#### 2682 2683 5.1.1. 原子の成り立ち

2684  
2685 ギリシャの哲人、デモクリトスは、全ての物はその基本となるアト  
2686 ムから成り立っていると考えた。

2687 アトムはこれ以上分割できない要素だ。19世紀までは、原子＝アト  
2688 ムは物質の基本の要素の粒子であると考えられた。

2689 20世紀になり、原子は基本の要素ではなく、原子の中心にある極微  
2690 の原子核とその周りをまわる電子からなることがわかった。

2691 現在の地球上には 92 種類の原子があり、原子番号を付けて呼ぶ。原  
2692 子番号が  $Z$  の原子の中心には、電子の電荷を単位として、正電荷が  $Z$   
2693 の原子核と、その周りをまわる  $Z$  個の負電荷 1 の電子からなる。

2694 原子核は極微小の堅い核で、電気の障壁に囲まれていて日常は殆ど  
2695 顔を出さない。日常のエネルギーに関与するのは、原子内の電子だ。

2696

2697 最も軽い原子は、原子番号が 1 の水素原子で、正電荷 1 の水素核と  
2698 1 つの電子からなる。電池に使われるリチウムは原子番号が 3 で、リ  
2699 チウム核の周りに 3 つの電子がある。

2700 原子番号が 13 のアルミニウムは軽い金属で、+13 の電荷のアル  
2701 ミニウム核と 13 個の電子からなる。一方、重い金属の鉛は+82 の電  
2702 荷の鉛核の周りに、82 個の電子がまわっている。

2703 天然に存在する最も重い原子はウラニウム原子で、+92 の正電荷  
2704 のウラニウム核の周りを 92 個の負電荷の電子がまわっている。

2705 ウラニウムより重い原子核として、数十種の原子核が人工的に造ら  
2706 れている。それらは不安定な原子核で、放射線を出して若干軽い安定  
2707 な原子核に変換（崩壊）する。

2708

2709 原子のエネルギーとして、原子固有の内部エネルギーである質量エ  
2710 ネルギー、原子が運動をしている場合は運動のエネルギー、原子に電  
2711 気力などが作用している場合は電気エネルギーがある。。

2712 原子の質量エネルギーは、原子内にある原子核の質量エネルギーと  
2713 その周りの電子の質量エネルギーの和になる。

2714 原子核は電子に比べて大変重く、原子の質量は殆ど原子核の質量で  
2715 ある。原子核の質量エネルギーを取り出したのが原子核（原子力）エ  
2716 ネルギーで、大変大きい。詳しくは第 6 章で述べる。

2717 原子内の電子には、電子固有の質量エネルギー、原子核の周りを回  
2718 る運動エネルギー、正電荷の原子核との間の電気エネルギーがある。

2719 原子内の電子が関与するエネルギーは、原子の内部エネルギーとし  
2720 て、原子の質量エネルギーに反映されている。

2721

## 2722 5.1.2. 原子内の電子のエネルギー

2723

2724 原子の中心には、正電荷  $Z$  の原子核があるので、その周りには、電  
2725 気の力場の場、すなわち電場がある。

2726 電場の強さは、中心の原子核の電荷  $Z$  に比例して強くなり、中心か  
2727 らの距離の 2 乗に半比例して弱くなる。

2728 電場にある電子は、電場の電気力で、中心の原子核のほうに引き付  
2729 けられている。

2730 原子番号が  $Z$  の原子の場合、正電荷  $Z$  の原子核の周りの電場では、 $Z$   
2731 個の電子が電気力を受けながら原子核の周りを回っている。

2732 原子核の周りの電気場にある電子が原子核に引かれる電気力は、太  
2733 陽の重力場にある地球が太陽に引かれる万有引力に相当している。

2734 原子内の電子は、原子核と電気力によって結ばれている。その力を  
2735 振り切って電子を原子の外に取り出すには、エネルギーが要る。

2736 原子核内に束縛（結合）された電子は、原子核外の自由な電子より  
2737 もエネルギーが少ない。その分の束縛ないし結合エネルギーを入力す  
2738 ると、電子は原子核の束縛から解放されて外に出る。。

2739 電子の束縛エネルギーは、原子番号や電子の束縛の状態によって大  
2740 きく変わる。原子番号が大きいほど、中心の原子核の正電荷が大き  
2741 く、それだけ電気力場が強く、束縛エネルギーは大きい。

2742 電子の軌道が、原子の内部にあって中心の原子核に近い程、原子核  
2743 に引かれる電気力場が大きくなり、束縛（結合）エネルギーは大きい。軌  
2744 道が外側で、原子核に遠い場合は、原子核に引かれる電気力場は弱く  
2745 なり、束縛エネルギーも少なくなる。

2746

2747 原子番号 8 の酸素原子の場合、酸素核の電荷は +8 で、最も内部に  
2748 ある電子の束縛エネルギーは千電子ボルト程度である。

2749 原子番号が 82 の鉛の原子の場合、鉛核の電荷は +82 で、最も内  
2750 部にある電子の束縛エネルギーは、10 万電子ボルト程度だ。鉛原子の  
2751 表面に近い所（外側）の電子は、鉛原子の中心の原子核から遠く、距  
2752 離に逆比例して束縛エネルギーは少ない。

2753 原子内に束縛されていない（自由な）電子の質量は、エネルギーに  
2754 換算すると51万電子ボルトである。

2755 原子内に束縛されると、束縛エネルギーの分だけ、質量エネルギー  
2756 が少なくなる。すなわち軽くなる。

2757 原子内に5万電子ボルトの束縛エネルギーで束縛されている電子の  
2758 質量エネルギーは46万電子ボルトで、1割程度軽い。鉛の最内部の  
2759 電子の場合、自由電子よりも2割ほど軽い。

### 2762 5.1.3. 原子内の電子軌道とエネルギー

2764 原子や原子核のようなミクロ（微小）の世界は、量子の世界で、量  
2765 子力学が適用される（註1）。

2766 量子力学では、全ての粒子は、粒子と波の両面をもっている。原子  
2767 内の電子も、粒子であると同時に波のようにも振る舞う。物質波と呼  
2768 ばれ、波の振動数はエネルギーに比例する（註2）。

2769 原子核の周りを回る電子の軌道の1週の長さは、電子の波長の整数  
2770 倍で、波の山から出発して軌道を1周すると波の山になる。原子内の  
2771 電子の軌道は、このような条件を満たす軌道に限られる。

2772 原子内には、いくつかの決まった軌道がある。最内部の軌道、その  
2773 外側の別の軌道、さらにその外側に別の軌道がある。

2774 原子の内側の軌道の電子は、原子核に引かれる電気の力が大きく、  
2775 束縛エネルギーが大きい。外側になる程束縛エネルギーは小さくな  
2776 る。電子の各軌道に応じて、軌道に固有の束縛エネルギーがある。

2777 各軌道には決まった数の席（定数）があり、一つの席に就けるのは  
2778 一つの電子だけである。このことをパウリの排他率という。

2779 原子内の電子は、まず一番内側の軌道の席についてまわり、その軌  
2780 道の全席が満席になると、その外側の軌道の席についてまわる。こ  
2781 うして内側の席から順番に席につく。

2782 電子の軌道の席の数は、一番内側の軌道の席数が2で、その外側の  
2783 軌道は全部で8つの席、更に外側の軌道には全部で18席ある。外側の  
2784 軌道ほど大きく、それだけ席数も増える。

2785 酸素原子内の8つの電子の内、2つの電子が席数（定員）が2の一  
2786 番内側の軌道を回り、残りの6つの電子がその外側の軌道をまわって  
2787 いる。外側の軌道の席数は8あるので、2つが空席だ。

2788 アルミニウム原子の13の電子の場合、2つの電子が一番内側の軌道  
2789 を、8つの電子がその外側の軌道をまわり、満席になっている。残り  
2790 の3つの電子は更に外側の軌道の席について回る。

2791 電子は自転運動をしている。自転運動をスピンという。ある軌道で  
2792 は、左回りに自転しながら軌道を左周りに周り、ある軌道では、右回  
2793 りに自転しながら軌道を左周りに周る。

2794 電子の各軌道をまわる電子はまとまって、殻を形成している。一番  
2795 内側にある軌道をK殻、その外側にある軌道をL殻、さらにその外側  
2796 の軌道をM殻という。

2797  
2798 註1. 惑星や野球ボールのような、マクロの世界での運動は、ニ  
2799 ュートン（古典）力学の法則に従う。一方、原子や原子核よ  
2800 うなミクロの量子の世界では量子力学に従って運動する。

2801 註2. 光にも、波と粒子の二重性があり、光の粒子を光子とう。  
2802 光子のエネルギーは振動数に比例する。

#### 2803 2804 5.1.4. 原子イオンと反応のエネルギー

2805  
2806 原子番号がZの原子の電荷は、電子の電荷を単位にして、中心にあ  
2807 るZの+電荷の原子核と、その周りを回るZ個の-電荷の電子とで、  
2808 丁度0になっている。すなわち中性である。

2809 原子内の電子にエネルギーを与え、電子を原子の外に放逐すると、  
2810 電子の数はZ-1になり、原子核の電荷+Zと合わせて原子の電荷は+  
2811 1になる。2つの電子が放逐されると、原子の電荷は+2になる。

2812 原子の外側の軌道に空席がある場合、外からその原子に電子を1つ  
2813 入れると、電子の数は  $Z+1$  になり、原子の電荷は  $-1$  になる。

2814 電荷をもった原子をイオンという。電子数が原子核の電荷  $Z$  より少  
2815 ない場合は正イオン、 $Z$  より多い場合は負イオンである。

2816 原子内の内側の軌道の電子  $A$  が放逐された場合、その電子が占めて  
2817 いた軌道の席  $A$  は空席になる。その外側の軌道にある電子  $B$  は、内側  
2818 の軌道の席  $A$  に移る。その結果その席  $B$  が空席になり、更に外側の軌  
2819 道の電子  $C$  が席  $B$  に移る。こうして順次電子が移り、一番外側の軌道  
2820 に空席ができ、電荷が  $+1$  のイオンになる。

2821 原子内の一番外側の軌道の電子を、原子の束縛（結合）から解放し  
2822 て外にとりだしイオンを造るには、その電子の束縛エネルギーより大  
2823 きなエネルギーを与える必要がある。そのエネルギーをイオン化エネ  
2824 ルギーという。

2825 イオン化エネルギーは、数電子ボルトから十数電子ボルトで、原子  
2826 の一番外側の軌道の電子の結合エネルギーを反映している。

2827  
2828 リチウムやナトリウムような金属の原子の場合、一番外側の軌道に  
2829 は一つの電子があるだけで、他の席は空席だ。したがって、その電子  
2830 の束縛エネルギーが小さく、イオン化エネルギーは低く、5電子ボル  
2831 ト程度のエネルギーを入力すると、イオンになる。

2832 一方、ネオンやアルゴンのような不活性ガスの場合、一番外側の軌  
2833 道の席は全て電子で占められていて、空席がない。そこで電子は安定  
2834 し、固く結合している。したがって、電子を放逐してイオンを造るに  
2835 は15電子ボルトくらい大きなイオン化エネルギーが要る。

2836 ある原子  $A$  が原子  $B$  と化学反応する場合、一番外側の軌道の電子が  
2837 移動しやすく、反応に主要な役割を果たす。

2838 ナトリウムのようなイオン化エネルギーの小さい原子は、他の原子  
2839 と反応しやすく活性があり、他の原子と結びつきやすい。

2840 ネオンやアルゴンは、不活性ガスといわれ、電子は固く結ばれ、イ  
2841 オン化エネルギーは大きい。したがって、普段は他の原子と反応と反  
2842 応せず、単体でいる。

2843

## 2844 5.2. 原子の中の電子と光のエネルギー

2845

### 2846 5.2.1. 光と電子

2847

2848 電気力は、エネルギーの基本となる四つの力の一つで、光と電子  
2849 は電気に力の基本要素である。光は電気力を伝え、電子は電気力が  
2850 作用する基である電気（電荷）を持つ。

2851 光は波で電磁波といわれ、電気や磁気のある波である。一方、光を  
2852 量子化したものが光子で、一定の運動量とエネルギーを持った粒子と  
2853 して振る舞う。量子力学でいう波と粒子の二重性格で、5.1. で述べた  
2854 電子の粒子と波の二重性格に相通ずる。

2855 光子の運動量はプランク定数を波長で割った値になり、エネルギー  
2856 はプランク定数に振動数をかけた値になる。この関係は、電子と電子  
2857 の波との関係と同じである。

2858 光の粒子としての振る舞いは、光子が電子にあたって電子を跳ね飛  
2859 ばす光電効果（註1）に表れる。電子は光子の運動量とエネルギーを  
2860 もらい、飛び出す。

2861 電荷 A の周りには、電気力の場があり電気の場を量子化したのが  
2862 光子である。光子は質量が0の身軽な粒子で、どこまでも飛んで行っ  
2863 て電気力を伝える。

2864 電子は電荷をもつ基本粒子の一つで、最も軽い。物質を構成する基  
2865 本要素である原子の内にある。

2866

2867 原子内の電子の中で、内側の電子は原子核と強く結ばれているの  
2868 で、いつもは身を閉ざして動かない。原子の反応や性質に関係するの  
2869 は外側の身軽な電子だ。

2870 原子が集まって、原子内の外側の電子との電気力で結びついて、  
2871 分子ができる。たくさんの分子が電気力で集まって種々の個体や液  
2872 体の物質ができる。

2873 温度が高くなると、個々の原子や分子は、熱運動が活発になり、相  
2874 互の電気の力を振り切って気体になって、自由に運動する。

2875 物質の諸現象、諸反応、諸性質は、物質の中の電子とそれに作用す  
2876 る電気の力を伝える光子による。

2877 原子番号  $Z$  の原子内の  $Z$  個の電子は、中心の  $+Z$  の電荷の原子核の  
2878 間で引力が、 $-$ の電荷の電子の間では斥力が作用しあって、ある軌道  
2879 を運動をしている。電気の引力や斥力は光子が伝える。

2880 原子内の電子も原子核もそれぞれ質量があるので、重力（万有引  
2881 力）が作用するが、電気力に比べて何十桁も小さいので無視できる。  
2882 同様に原子や分子の間の重力も無視できるくらい小さい。

2883  
2884 註 1. 1987 年に H. R. ヘルツによって見いだされ、アインシュタイン  
2885 によって光子と電子の衝突として説明された。

## 2886 2887 5. 2. 2. 原子分光と電子のエネルギー

2888  
2889 原子の中心にある原子核の周りには、電気の場があり、その周りには  
2890 はいくつかの軌道がある。各電子は原子核や周りの電子との電気の力の  
2891 の作用を受けながら、決まった軌道を回っている。

2892 水素原子の場合、中心の電荷が  $+1$  の水素核（陽子）の周りには、  
2893 いくつかの電子の軌道がある。水素原子内の  $1$  つの電子は、普段は一  
2894 番内側の軌道 A をまわっている。最も束縛エネルギーが大きく、安定  
2895 しているからである。

2896 水素原子に外部から光を当てると、軌道 A の電子は光子を吸収し、  
2897 エネルギーを得て外側の軌道 B にジャンプする。ここで、軌道 B の電  
2898 子と軌道 A の電子エネルギーの差が光子のエネルギーになる。

2899 水素核には、エネルギーの低い順から A, B, C, D などのいくつかの軌  
2900 道があり、どのようなエネルギーの光子を吸収したかを調べれば、各  
2901 軌道の電子のエネルギーがわかる。

2902 水素内の電子は刺激されて外側の軌道 C を回っている場合、原子核  
2903 との間の電気の力で、内側の軌道 B や軌道 A に移る。この際、軌道 C

2904 のエネルギーと軌道 B や軌道 A とのエネルギー差に相当するエネルギー  
2905 の光子を放出する。

2906

2907 原子番号が  $Z$  の原子内の  $Z$  個の電子は、内側から A, B, C, D などの軌  
2908 道を回っている。A, B, C の各軌道の全席は電子で占められ、D 軌道の席  
2909 は満席ではなく、まだ空席がある場合を考える。

2910 原子の軌道 B の電子に光を照射すると、その電子は空席のある軌道  
2911 D にジャンプできる。その結果 B 軌道に 1 空席ができ、D 軌道の電子は  
2912 光を放出して、軌道 B に移ることができる。

2913 光の吸収と放出は、種々の軌道間で行われ、光子のエネルギーは、  
2914 関与する軌道のエネルギー差を反映する。

2915 原子に光を当てて吸収する光子や放出される光子のエネルギーはその  
2916 波長を調べればわかる。このように光を分光分析して原子内の原子  
2917 内の電子の軌道を調べる方法を原子分光という。

2918 原子分光の際の光のエネルギーないし波長は、その原子特有の電子  
2919 軌道のエネルギーを反映し、原子特有のものだ。

2920 精密原子分光法を用いて、どんな電子軌道があるかがわかり、どの  
2921 ような原子があるかがわかる。

2922

### 2923 5. 2. 3. X 線と制動輻射

2924

2925 原子番号  $Z$  が大きな重い原子の場合、その周りの電場は、中心の原  
2926 子核の電荷  $Z$  に比例して強く、内部の電子の束縛エネルギーはそれだ  
2927 け大きく、固く結ばれている。

2928 固い束縛を振り切って、内部の電子を解放するには、それを上回る  
2929 大きなエネルギーの光子を照射する必要がある。また、重い原子の内  
2930 側の軌道に空席ができた場合、外側の軌道を回る電子が内側の軌道に  
2931 移る際に放出される光子のエネルギーも大きい。

2932 銀や錫のような原子番号が 50 程度の原子の場合、原子の内部の軌道  
2933 を回る電子に関与する光子のエネルギーは 3 万電子ボルト程度にな

2934 る。金や鉛のような原子番号が 80 程度の重金属の場合、そのエネルギーは 10 万電子ボルト程度だ。

2936 原子内部の軌道の電子が関与する光（光子）のエネルギーは、日常  
2937 の可視光線エネルギーに比べて、数万倍大きく、それに反比例して波  
2938 長も数万倍短い。このようなエネルギーの高い（波長が短い）光を X  
2939 線という。

2940 原子内のある軌道の電子が、内側の空席のある軌道に移る際に放出  
2941 される X 線は、その原子特有のエネルギーを持ち、特殊 X 線といわ  
2942 れ、どのような原子があるかを調べるのに使われる。

2943 外から高いエネルギーの高い X 線を打ち込み、特殊 X 線を分析して  
2944 原子の電子軌道を調べる方法を蛍光 X 線法という。

2945 特殊 X 線は、原子の 1 番内側の K 殻の軌道の席に移る際に放出され  
2946 る X を K-X 線、次の L 殻の軌道の席に移る際の X 線を L-X 線、次の  
2947 M 殻の場合は M-X 線という。

2948 特殊 X 線のエネルギーは、それぞれの殻の軌道の束縛エネルギーを  
2949 反映し、K-X 線が一番エネルギーが高く、L、M、N と外側の殻の X 線  
2950 程、エネルギーは低くなる。

2951  
2952 金属の標的に、あるエネルギーの電子を打ち込むと、電子は金属中  
2953 の原子核の周りの強い電場の力により、急速に減速し、光子を放出す  
2954 る。これを制動輻射という。

2955 入射電子のエネルギーと減速した後の電子のエネルギーの差が、制  
2956 動輻射の光子のエネルギーになる。

2957 電子を発生させる電子銃と標的の銅板の間に 10 万ボルトの電圧を  
2958 かけると、電子は 10 万ボルトに加速される。電子は銅板にあたっ  
2959 て、数万電子ボルトのエネルギーの制動輻射 X 線が放出される。  
2960 エネルギーの高い X 線は、主に制動輻射で得られる。

#### 2961 2962 5.2.4. レーザー光

2963

20世紀後半に登場した新しい光に、レーザー光がある。1958年、C. H. タウンズと A. L. ショウロウが理論的にレーザー光があることを明らかにし、1960年に T. H. メイコンがルビー結晶を用いてレーザー光を実証した。

レーザー光は、人工的に作られる特殊な光で、特定の原子が集まってできる分子や結晶の中の電子が放出する光が基になる。

物体内のあるエネルギーの状態 A にある電子が、一定のエネルギー E の光を吸収し、エネルギーの高い状態 B に移る（励起する）。B の状態から元の状態 A に移る際に、B の状態と A の状態のエネルギーの差の E のエネルギーの光子を放出する。

B から放出された光子が、別の分子や結晶の状態 B にある電子を誘発し、その電子が同じエネルギー E の光子を放出して A の状態に変わる。誘発されて放出される光子を誘導輻射という。誘発によって、初めの光子と誘発された光子で、合わせて2つの光子が放出される。

誘導輻射を繰り返すごとに、光子の数は増える。光子が吸収されて光子数が減少するよりも、誘導輻射で光子数が増大する割合が大きいと、光子の数は益々増える。これがレーザー光である。

実際のレーザー光では、2つの鏡を向き合うように置いて、共振器とし、その間を光子が往復し定常波を造る。共振器の中に、ある媒質を置き、光の誘導で光が生み、それを繰り返して増幅され発振するようにする。

鏡の一部を半透明にして、レーザー光が一部透過するようにすると、レーザー光は共振器から外部にでて利用される。

レーザー光の特徴は、各光子が波として同じ位相で、波の山がそろっていることである。したがって相互に強め合い、指向性が高い。特定方向に放出されるので、遠くまで届く強い光だ

一方、普通の光は、位相が揃っていなく、四方に放出されるので、遠くでは弱くなる。

現在、各種のエネルギーないし波長をもったレーザーが開発され、加工や通信など広く活用されている。

2995 YAG レーザーの波長は 1.06 マイクロ（百万分の 1）メートルで、赤  
2996 い光より若干長い。光子エネルギーは約 1.2 電子ボルトだ。

2997 炭酸ガスレーザーは波長が一桁長い 10.6 マイクロメートル、エネル  
2998 ギーは一桁低い約 0.1 電子ボルトである。

## 3000 5.3. 電磁波のエネルギー

### 3002 5.3.1. 電磁波

3004 電気の力を伝える光子は、電子と同じように、粒子と波の二重性格  
3005 を持つ。日常では、主として波の面が現れることが多い。

3006 光の波を電磁波という。光子は電磁波の量子である。電荷の周りに  
3007 電気の力（電場）ができ、電荷が動いて電流になると、その周り  
3008 に磁気（磁場）ができる。したがって、光が進む場合、常に  
3009 電場と磁場を伴い、一緒に進む。

3010 電磁波のエネルギーは、電気の場  $E$  と磁気（磁場）の場  $H$  の積  $P=E \times B$  にな  
3011 る。電磁波の振動数は、光子のエネルギーをプランク定数で割った値  
3012 になり、電磁波の波長は光速  $c$  を振動数で割った値になる（註 1）。  
3013 この関係は電子の波の場合と同じだ。

3014 電磁波が伝搬する速さ、すなわち光子の速さは、何もない真空中で  
3015 は光速  $c$  であるが、物質中ではそれより遅い。物質の密度が大きいほ  
3016 ど、遅くなる。

3017 物質中には原子や分子やその周辺に沢山の電子があり、電子や電子  
3018 の運動によって、電気や磁気がある。

3019 電磁波は、物質中では、それらの電子と相互に力をおよぼし合いな  
3020 がら伝搬する。電磁波の量子である光子は、物質中の電子と衝突し、  
3021 相互に作用し合いながら進む。したがって、電磁波（光子）の速さは  
3022 それだけ遅くなる。光が物質に入ると屈折するのも、物質中で速さが  
3023 遅くなるからである（註 2）。

3024

3025 電磁波は、電荷の振動に伴って発生し、その振動によって種々の振  
3026 動数の電磁波がある。振動数に応じて、種々のエネルギーの光子があ  
3027 り、種々の波長の電磁波がある。

3028 日常の電波、レーザー光、太陽光、原子の光、X線、さらに次章で  
3029 述べる原子核の光や放射線のガンマ線など、さまざまな波長の電磁波  
3030 がある。太陽光の1部である可視光は、通称光と呼ばれることが多い  
3031 が、いずれの電磁波も光で、電磁波の量子は光子だ。

3032 電磁波の波長はその世界のスケール（大きさ）を反映している。分  
3033 子や原子の世界よりも、原子核や素粒子の世界は何桁の微小な世界な  
3034 ので、それだけ原子核から出る電磁波（ガンマ線）の波長は短く、そ  
3035 の量子（光子）エネルギーは大きい。

3036  
3037 註1. プランク定数  $h \sim$  千兆分の4電子ボルト/秒。光速  $c \sim$  3億メー  
3038 トル/秒。3電子ボルトのエネルギーの光子は、波長が400ナノメ  
3039 ートル=千万分の4メートルの緑の光だ。

3040 註2. 電磁波の速さは屈折率に反比例している。また、物質中の  
3041 電磁波の速さは、物質内の電子の電気や磁気を誘発する誘電率と透  
3042 磁率の積の平方根に反比例して遅くなる。

### 3043 3044 5.3.2. 電波のエネルギー

3045  
3046 電波は日常生活に広く活用されている電磁波だ。共振回路の電場と  
3047 磁場が1定の振動数で振動すると、回路の中の電子は1定の周期で加  
3048 速と減速を繰り返し、その振動数の電波を放出する。

3049 1895年にマルコーニは電波を利用した無線通信に成功した。それ以  
3050 来、電波利用は急速に進み、20世紀の通信革命をもたらした。

3051 現在はスマホやPCの普及により、電波が通信の主流だ。電波は、  
3052 COVID19後の21世紀のテレワークを支えている。

3053 電波には種々の振動数の電波があり、種々の放送や通信に使われて  
3054 いる。アンテナの長さはその電波の波長を反映している。

3055 AM や FM の放送には 1 M (M=メガは百万) ヘルツ程度の中波と 100M  
3056 ヘルツ程度の振動数の VHF 波が使われる。電波の波長は、それぞれ  
3057 300 メートルと 3 メートル程度である。

3058 地デジテレビ、携帯電話、スマホ、無線等には 0.5G (G=ギガは 10  
3059 億) ヘルツから 2G ヘルツ程度の振動数の UHF 波が使われる。波長は  
3060 50-15 センチメートルくらいだ。

3061 BS テレビの電波は、振動数が高く 10G ヘルツ程度で、波長は短く 3  
3062 センチメートルくらいである。

3063 電子レンジも電磁波利用だ。2.5G ヘルツ程度の振動数の電磁波を照  
3064 射して物質中の水分子などの電子を刺激して分子にエネルギーを与  
3065 え、そのエネルギーは熱エネルギーとなり、温度が上がる。

3066 電波望遠鏡では、宇宙にある低温の星間ガスなどからの電波を地上  
3067 で観測し、ガスの振動や温度を調べる。

3068 星間ガスの温度は、絶対温度で 1-10 度くらいで、そこから放出さ  
3069 れる 30 G ヘルツから 300 G ヘルツ程度、波長にして 1 mm から 1 cm の  
3070 電波をとらえる。電波の光子のエネルギーは、1 万分の 1 から千分の  
3071 1 電子ボルトである。

3072  
3073 通信に使われる電波の波長は、数百 m から数 c m で、日常の長さな  
3074 ので理解しやすい。

3075 一方、電波の量子である光子のエネルギーは 1 億分の 1 から 1 万分  
3076 の 1 電子ボルト程度で、極めて微小だ。

3077 電波のエネルギーは、電波の要素の光子のエネルギーと、電波に含  
3078 まれる光子の数の積になる。

3079 1G ヘルツの携帯電話やスマートフォンの場合、通常の街角では、1  
3080 平方 m 当たり毎秒、2 千億の 1 兆倍くらいの光子がやってきている。  
3081 それに光子のエネルギーの百万分の 4 電子ボルトをかけると、1 平方  
3082 メートル当たり 0.1 ワットのエネルギーだ。

### 3083 3084 5.3.3. 分子の運動と電磁波

3085

3086 物体中のミクロの世界の運動には、分子やイオンの振動運動や回転  
3087 運動がある。

3088 ミクロの世界での分子の振動運動や回転運動は量子状態にあり、固  
3089 有のエネルギーを持っている。

3090 低いエネルギーの運動状からエネルギーの高い状態に変わる際、そ  
3091 のエネルギー差に相当するエネルギーの電磁波を吸収する。エネルギー  
3092 の低い状態に変わる場合は、同じエネルギーの電磁波を放出する。

3093 物体内の分子の運動は、分子の質量が大きいので、ゆっくりしてい  
3094 て運動のエネルギーも小さい。したがって、電磁波のエネルギーは小  
3095 さく波長が長い。

3096 二酸化炭素の分子振動の場合、その振動による電磁波のエネルギー  
3097 は0.3電子ボルトくらいで、波長は4.3ミクロンくらいの赤外部の光  
3098 だ。可視光よりエネルギーが一桁少なく、波長は一桁大きい。

3099 高温の物体中の各分子は、乱雑な運動をしている。乱雑な運動のエ  
3100 ネルギーは熱エネルギーとして、物体の温度に反映されている。

3101 分子の熱エネルギーは、絶対温度にボルツマン定数をかけた値で、  
3102 常温では0.03電子ボルト程度になる（註1）。

3103  
3104 物質中の電子のさまざまな加速・減速の運動によって、さまざまな  
3105 エネルギーの光子が放出される。すなわち、さまざまな振動数の電磁  
3106 波で、黒体輻射という（註2）。

3107 輻射のエネルギーは、物体の分子などの熱運動を反映し、高温にな  
3108 る程、エネルギーが高く、波長が短い。

3109 物体の温度が3000度、5000度、10000度の場合、黒体輻射の電磁波  
3110 の波長は、それぞれ赤外線（1ミクロン）、可視光線（0.6ミクロ  
3111 ン）、紫外線（0.3ミクロン）の周りに分布している。

3112 太陽光は、5800度の太陽表面からの黒体輻射で、光子エネルギーは  
3113 2電子ボルト程度の可視光を中心に、紫外線から赤外線まで、0.5-4  
3114 電子ボルトの範囲に分布している。

3115 熱中症は、室内外の30度C（絶対温度303度）の物体からの輻  
3116 射光（赤外線）のエネルギーによる。

3117

3118 註 1. 絶対温度 = 摂氏温度 + 273. 1 万度は 1 電子ボルトに相当。

3119 註 2. 黒い物体は、外部からの光を反射しないので、放射され  
3120 る電磁波は、物体内部からの輻射である。

3121

#### 3122 5.3.4. 放射光とレーザー電子光

3123

3124 放射光やレーザー電子光は、高エネルギー電子が発する人工光で、エ  
3125 ネルギーが高く指向性があり、強度が強い。

3126 高エネルギーの電子が円形軌道を描いて周回する際に加速度を受け  
3127 て、接線方向に放射され光が放射光である。

3128 アンジュレーターという磁場の向きが交互に変わる磁石を並べて、  
3129 電子を磁気力で蛇行させると、曲がる度に放射光が放出され、光が  
3130 一層強まる。

3131 周回する電子のエネルギーが高いほど、放射光のエネルギーは高  
3132 く、エネルギーは数十電子ボルトから数万電子ボルトにおよぶ。

3133 エネルギーの高い光は、それに反比例して波長が短く、微細な結晶  
3134 内の構造を調べるのに使う。強力なパルス光を使うことによって、物  
3135 質や生命体の電子の動きが解る。

3136 放射光の利用は 20 世紀後半から急速に開発が進んだ。現在、物理、  
3137 化学、生物などの基礎科学と医薬、農業、工業などの応用科学と産業  
3138 の広い分野で活用されている。

3139 高エネルギー電子シンクロトロンと電子リングによる放射光とし  
3140 て、ヨーロッパでは 60 億電子ボルトの ESRF が、アメリカでは 70 億電  
3141 子ボルトの APS が、日本では 80 億電子ボルトの Spring-8 がある。

3142

3143 20 世紀から 21 世紀にかけて、超高エネルギーのレーザー電子光が  
3144 開発され、素粒子・原子核の研究に供されている。

3145 レーザー電子光は、レーザー光を高エネルギー電子に正面衝突さ  
3146 せ、跳ね返ってくる超高エネルギーの光だ。

3147 高エネルギー電子との衝突の際、電子のエネルギーの1部がレーザー  
3148 光に移るので、10億電子ボルト領域の超高エネルギー光が得られ  
3149 る。波長は10兆分の1cm程度で大変短いので、超ミクロの核子の構  
3150 造が研究ができる。

3151 大阪大学の核物理研究センターでは、筆者がセンター長を務めた時  
3152 にSpring-8や国内外の大学と協力で、Spring-8にレーザー電子光  
3153 (註1)を実現させた。現在、海外からも研究者が参加し、素粒子核  
3154 の研究が活発に行われている。

3155  
3156 註1. LEPS(laser Electron Photon at Spring8). 数十億電子ボルト  
3157 の超高エネルギーの電磁波(光)を用いる基礎研究プロジェクト。

## 3158 3159 6. 原子核のエネルギー

### 3160 3161 6.1 原子核のエネルギーと原子力

#### 3162 3163 6.1.1. 原子核の世紀のはじまり

3164  
3165 20世紀になり、原子の中心に超微小の原子核が発見され、豊穡  
3166 な原子核(原子力)エネルギーの世界が拓かれた。

3167 原子核は、大きさが1兆分の1cmという小ささで、原子の1万  
3168 分の1くらいだ。原子核はあまりに小さいので普段は気が付か  
3169 ず、また高い「電気の城壁」に囲まれていて、普通の方法では近  
3170 づけない。

3171 1911年、ラザフォード(註1)は強力なエネルギーを持った放  
3172 射線を使って原子核を発見した。

3173 アルファ線という放射線が、原子核を囲んでいる電気の壁で反  
3174 発されることから、原子核の存在を確かめた。超高エネルギーの  
3175 原子核の世紀の幕開けだ。

3176 全ての原子の中心には、原子核という微小な核が存在し、原子  
3177 核はいくつかの核子からなる。核子は10兆分の1cmという超々微

3178 小の粒子で、核子には電子の電荷を単位にして+1 の電気を持った  
3179 陽子と電気が 0 の中性子がある。

3180

3181 原子番号が 1 の水素原子の中心にある水素核は、主として 1 の  
3182 陽子からなる。鉄の原子の中心にある鉄核は、26 個の陽子と主と  
3183 して 30 個の中性子からなる。

3184 ウラニウム核は大変重い原子核で、92 個の陽子と主として 146  
3185 個の中性子よりなる。

3186 原子力発電の燃料に利用されているのは、特別なウラニウム核  
3187 で、92 個の陽子と 143 個の中性子よりなる。

3188 原子番号が  $Z$  の原子の中心にある原子核は、 $Z$  個の陽子と  $N$  個の  
3189 中性子からなる。したがって、原子核の電荷は  $+Z$  で、質量は核子  
3190 数  $A=Z+N$  に比例している。

3191 原子番号  $Z$  の原子内には、 $Z$  個の負電荷の電子があり、原子核内  
3192 の  $Z$  個の正電荷の陽子と合わせて、原子の電荷は 0 だ。電子の質量  
3193 は核子の質量の 2000 分の 1 くらいで、核子に比べて大変軽い。し  
3194 たがって原子の質量の殆ど (99.98%) は、中心にある超微小核の  
3195 原子核である。

3196 原子核内では、核子 (陽子と中性子) は核力という強力なばね  
3197 の力で結ばれていて、その中に豊かな核エネルギーを蓄えてい  
3198 る。原子や分子内の電気のエネルギーに比べて、原子核内の核エ  
3199 ネルギー (原子力) は数百万倍大きい。

3200

3201 註 1 1908 年ノーベル化学賞 1911 年に原子核を発見

3202

### 3203 6.1.2. 原子核エネルギーの基になる強い核力

3204

3205 全てのエネルギーは力が基になっている。重いものを持ち上げる  
3206 際に、重力 (物と地球の間の万有引力) に逆らって仕事をする  
3207 のが重力エネルギーで、電気や磁気の力が作用して電車が動きロ  
3208 ケットが上がるのが電磁エネルギーである。

3209 一方、原子核のエネルギーは、これまでの重力や電磁力とは全  
3210 く別の、新しい力である「核力」が基になる。

3211 核力は、20世紀に原子核と共に登場した力である。電磁力より  
3212 百倍くらい強いので「強い力」という。

3213 核力の特徴は、力が大変強く、原子核や核子が1兆分の1cmと  
3214 いう極めて近くで作用することである。

3215 通常物質では、原子核は原子の中心にあり、隣の原子核とは1  
3216 億分の1cmくらい離れている。したがって、相互に全く核力がお  
3217 よばない。地上の物体と地球の間や地球と太陽の間では、万有引  
3218 力は作用するが、核力は全く作用しない。

3219 一方、原子核という1兆分の1cmくらいの極小空間内では、陽  
3220 子や中性子が相互に数兆分の1cmくらいの近距離にあり、相互に  
3221 核力を作用しあっている。

3222 核力は、陽子も中性子も同じだ。但し、陽子はプラスの電荷が  
3223 あるので、陽子と陽子の間では、核力の他に電気の反発力が作用  
3224 している。

3225 核力は原子核間でも作用しあう。原子核Aと原子核Bが相互に  
3226 1兆分の1cmくらい接近すると、それぞれの原子核内の核子が相  
3227 互に作用しあい、原子核Aと原子核Bの間で核力が作用しあう。

3228

3229 核力の場合も、重力や電磁力の場合と同じように、力を伝達す  
3230 る役の粒子がある。中間子という粒子で、電磁力を伝達する光子  
3231 に相当する粒子である。

3232 中間子は湯川博士（註1）が予言し、その後実験で確かめられ  
3233 た。中間子は、核子の重さの6分の1程度の中間の重だ。

3234 中間子は重さがあるので、1兆分の1cmくらいの近くまでしか  
3235 飛べない。したがって核子と核子の間で核力がおよぶのは、相互  
3236 に1兆分の1cmくらい近くにいる場合だけである。

3237 原子核は直径が1兆分の1cmくらいの大きさなので、その中の  
3238 各核子間では中間子が飛び交い、核力が作用し合っている。

3239

3240 註1.H.湯川 大阪大学で研究し、中間子説を提唱。1948年に  
3241 ノーベル物理学賞。

### 3243 6.1.3. 原子核エネルギーの基は結合エネルギー

3244  
3245 原子核内では、いくつかの核子（陽子と中性子）が相互に核力  
3246 という強い力で結び合っている。

3247 核子の結びつきのエネルギーを結合エネルギー、ないし束縛エ  
3248 ネルギーという。そのエネルギーの一部は、核エネルギー（原子  
3249 力）として広く活用されている。

3250 原子核内では、いくつかの核子が互いに核力で強く結ばれてい  
3251 る。ある核子を、他の核子との結合を振り切って引き離そうとす  
3252 ると、結合力に相当する強力な力と、結合エネルギーに相当する  
3253 大きなエネルギーが要る。

3254 原子核内の一つの核子を取り出すのに必要なエネルギー、すな  
3255 わち結合エネルギーは約1千万電子ボルト程度で大変大きい。原  
3256 子内に結合している一つの電子を取り出すのに必要な電気のエネ  
3257 ルギーの百万倍くらい大きい。

3258 第4章で述べたガソリンのエネルギーや栄養のカロリーは、全  
3259 て原子や分子内の電気エネルギーで、原子当たり数電子ボルト  
3260 だ。一方原子核の核エネルギーは数百万電子ボルトで、同じ重さ  
3261 の燃料当たりで比較すると、原子核燃料は百万倍効率が良い。

3262 原子核内で強く結合している核子は、深い井戸の中の物に例え  
3263 られる。井戸（原子核）から一つの物（核子）を井戸の外に取り  
3264 出すには、井戸の深さに相当する大きなエネルギーが要る。

3265 井戸の深さはエネルギーにして数千万電子ボルト程度で大変深  
3266 く、核子を外に取り出すのにそれだけ大きなエネルギーが要る。

3267  
3268 原子核の結合エネルギーは、アインシュタインのエネルギーと質  
3269 量の関係で理解することができる。

3270 原子核の外にある核子の質量は、エネルギーに換算すると約 9  
3271 億 4 千万電子ボルトである。その核子が原子核内に入って他の核  
3272 子と結合すると、約 3%ほど軽くなり、9 億 1 千万電子ボルトくら  
3273 いになる。その差の 1 千万電子ボルトが結合エネルギーになる。

3274 実際、中性子が原子核に吸収されて核内に取り込まれる（結合  
3275 する）と、質量差の 1 千万ボルトの光（ガンマ線）が放出され  
3276 る。原子核内に 1 千万電子ボルト程度の光（ガンマ線）を入射す  
3277 ると、中性子は結合を振りほどいて、原子核外に放出される。

3278 原子核の中の核子の結合エネルギーは、質量換算で 1%程度で、  
3279 目に見えるほど大きい。したがって、原子核反応で核子が入り  
3280 出す場合、核子の質量の変化を十分考慮する必要がある。

3281 原子内の電子の場合は、電子の結合エネルギーは、核子の結合  
3282 エネルギーの百万分の 1 程度である。電子の質量の 0.001%くら  
3283 いに相当し、目に見えないくらい小さいので、化学反応で電子が  
3284 入り出す場合は、電子の質量の変化のことは考えずにすむ。

#### 3285 3286 6.1.4 原子核反応のエネルギー

3287  
3288 原子核の場合は、核力の作用によってさまざま原子核反応が起  
3289 こる。2つの原子核が衝突すると、原子核反応が起こり、相互の原  
3290 子核内の核子（陽子と中性子）が移動し、それぞれの原子核の陽  
3291 子数、中性子数が変わることがある。

3292 炭素核（陽子数  $Z=6$ 、中性子数  $N=6$ 、核子数  $A=12$ ）と酸素核  
3293 ( $Z=8$ 、 $N=8$ 、 $A=16$ ) が反応し、ヘリウム核 ( $Z=2$ 、 $N=2$ 、 $A=4$ )  
3294 とマグネシウム核 ( $Z=12$ 、 $N=12$ 、 $A=24$ ) になる。

3295 原子核反応の前後では、陽子の総数、中性子の総数、その和の  
3296 核子の総数は変わらないが、組み合わせが変わる。

3297 原子核反応で生成されたヘリウム核とマグネシウム核を中心  
3298 に、それぞれ 2つの電子と 12の電子が集まり、ヘリウムとマグネ  
3299 シウムの原子が生成される。

3300 一方、炭素原子と酸素原子が電気力で反応を起こす化学反応で  
3301 は、炭素原子と2つの酸素原子が組み合わさって2酸化炭素（炭  
3302 酸ガス）の分子が生成される。

3303 化学反応で生成された2酸化炭素の分子内では、炭素原子も酸  
3304 素原子も原型を保ったままで、原子そのものは変わらず、周りの  
3305 電子の配列が若干かわる。

3306  
3307 強い核力で起こる原子核反応は、エネルギーの出入りが、数百  
3308 万電子ボルトから数億電子ボルトにおよぶ。核反応エネルギー  
3309 は、電気力によって電子の配列だけが変わる化学反応（燃焼な  
3310 ど）に比べて6-8桁大きい。

3311 原子核反応で、相互の原子核の周りの電気の障壁を乗り越えて  
3312 核反応を起こすには、数百万電子ボルトのエネルギーを要する。

3313 A核とB核が反応してC核とD核が生成される場合、A核とB核  
3314 の質量の和がC核とD核の質量の和よりも大きいと、余分の質量  
3315 がC核やD核の運動エネルギーになる。

3316 生成核（CやD）の運動エネルギーは、反応前後の質量エネルギ  
3317 ーの差を反映して、大変大きく、原子核（原子力）エネルギーと  
3318 して活用される。

3319 原子核反応では、原子核が変わり、原子が変わる。原子が集ま  
3320 れば物質になるので、新元素の新物質が生成される。

3321 鉛元素から金元素を生産することも実際可能である。但しコス  
3322 トが高く極めて少量だ。

3323 化学反応では、原子の組み合わせが変わるだけで、原子そのも  
3324 のは変わらない。銅と亜鉛を合わせて真鍮という合金ができる  
3325 が、二つの金属が組み合わさっただけで、金ではない。

3326 元々地球に現存する元素（原子核）は、宇宙で種々の原子核反応  
3327 によって生成された地球の中の温度はあまり高くなくエネルギー  
3328 も少ないので、原子核を生成できない。

3329 原子核反応では、種々の放射性原子核を生成できる。現在、多  
3330 種多様な放射性原子核（元素）が核反応によって生成され、医

3331 学、工学、農業等、広い分野で活用されている。放射性核について  
3332 では第7章で詳しくのべる。

## 3333 3334 6.2. 太陽エネルギーの基は原子核融合反応

### 3335 3336 6.2.1. 太陽内の原子核融合反応

3337  
3338 太陽エネルギーの基は、原子核反応のエネルギーである。太陽  
3339 内では主として水素の原子核が融合反応を起こして燃え、核エネ  
3340 ルギーを生み出している。

3341 太陽の中心は、温度は1600万度くらい、圧力は2500億気圧く  
3342 らいで、大変高温高压の状態にある。そこでは、主として水素の  
3343 原子核（陽子）が激しく熱運動している。

3344 高温の状態にある2つの水素核（陽子）AとBが衝突すると、  
3345 はじめに陽子Aは弱い力の作用で中性子となり、陽電子（+の電  
3346 荷をもった電子）とニュートリノ（電荷のない電子）を放出す  
3347 る。次に、その中性子と陽子Bが強い力の核力の作用で合体し、  
3348 重陽子が生成される。すなわち、2つの陽子AとBが核融合する。

3349 太陽内の核融合のポイントは、第1段階で陽子が中性子になる  
3350 反応が「弱い力」で極めてゆっくりと時間をかけて進むことであ  
3351 る（註1）。したがって、核融合反応自体がゆっくり進む。このこ  
3352 とが太陽が一瞬に爆発せず、何十億年もゆっくりと燃え続けてい  
3353 る理由である。

3354  
3355 核融合の際に放出される陽電子とニュートリノの運動エネルギー  
3356 の和は、420万電子ボルトくらいで、2つの陽子が重陽子になる  
3357 場合の質量の差に相当している。生成された重陽子はさらに陽子  
3358 やその他の原子核と核反応をする。

3359 太陽内の核反応は、初めは2つの陽子の反応から始まるが、  
3360 種々の核反応や放射性変換を通して、主としてヘリウム核が生成

3361 される。すなわち1つの核子（陽子）からなる水素核が4つ燃え  
3362 て、4つの核子（陽子2、中性子2）からなるヘリウム核になる。

3363 太陽内の特異な核反応に、触媒反応がある。4つの水素核が炭素  
3364 核を触媒として核反応を起こし、ヘリウム核になる反応である。

3365 太陽内では、水素核（陽子）の核融合反応をはじめ、種々の核  
3366 反応や放射性変換を通して、電子、陽電子、ニュートリノ、ガン  
3367 マ線、核子（陽子と中性子）などの、種々の放射線や粒子が放出  
3368 される。これらの放射線や粒子の運動エネルギーが全部合わさっ  
3369 で、太陽エネルギーの出力となる。

3370 太陽は95%は水素という核燃料でできている。残りの5%が水  
3371 素が燃えた残留物質であるヘリウムである。巨大な核燃料の塊の  
3372 太陽は、「弱い力」の制御により、爆発的に燃え尽きることな  
3373 く、50億年は燃え続け、さらに50年くらい燃える。

3374 太陽光エネルギーは、太陽内の核融合エネルギーを光のエネル  
3375 ギーに変えて利用する。一方、地球上で核融合とそのエネルギー  
3376 活用は、現在研究中である。

3377  
3378 註1. 「弱い力」は重力、電磁力、核力にたいして第4の力と  
3379 いわれ、力が極めて弱反応い。詳しくは第7章で述る。

### 3380 3381 6.2.2. 太陽エネルギー

3382  
3383 太陽系の中心にある太陽は、燃える（輝く）恒星で、46億年前  
3384 に誕生した。その回りの惑星は、恒星のように自分自身で燃える  
3385 ことなく、太陽光を受けて輝いている

3386 太陽の総エネルギーは385兆TW（テラワット T=テラは1  
3387 兆）だ。その50億分の1の18万TWが太陽光として地球に注ぐ。

3388 地球が受ける太陽エネルギーは、世界全体で使用する一次エネ  
3389 ルギー（20TW程度）の1万倍に相当する。

3390 太陽エネルギーを質量に換算すると、毎年 150 兆トンの質量が  
3391 消費されエネルギーに変わっている。太陽全体の質量の 6 兆分の 1  
3392 程度である。太陽は当分は燃え尽きることなく燃え続ける。

3393 太陽内の主な燃料は水素核で、4 個の水素核が融合してヘリウム  
3394 核になる際に発生するエネルギーは、水素核 1 個当たり約 400 万  
3395 電子ボルトである。

3396 水素核の質量エネルギーは 9.4 億電子ボルトで、その 0.4%程が  
3397 太陽光エネルギーに変換される。

3398 太陽の中心部で起こっている核反応や放射性変換によって生成さ  
3399 れた電子、陽電子、ガンマ線、核子は、太陽内で他の粒子と衝突を  
3400 繰り返し、それらの運動エネルギーは熱エネルギーとして次第に太  
3401 陽表面に伝達さる。

3402 熱エネルギーは数十万年後に最終的に太陽表面に達し、高温の太  
3403 陽表面から主として太陽光として放射される。したがって、地球上  
3404 に届くエネルギーは、主として太陽光のエネルギーだ。

3405 一方、太陽で生成されたニュートリノは例外で、大変透過力が  
3406 あるので、太陽外に放出される。20 世紀の終わりから 21 世紀にか  
3407 けて、太陽ニュートリノを直接関することに成功した。詳しくは  
3408 次節で述べる。

3409 太陽光エネルギーは、1 平方 m 当たり 1.4 kW くらいで、太陽光  
3410 の光子のエネルギーは、数電子ボルト程度だ。

3411 太陽光のスペクトルは、太陽の表面温度 5800 度黒体輻射を反映  
3412 して、波長では 400-2000 nm (n=ナノ 10 億分の 1), エネルギー  
3413 で 3-0.6 電子ボルトに広がっている。

3414 可視光線 (波長 400-600nm) が主だが、可視光線より波長の短  
3415 く光子のエネルギーが高い紫外線と、可視光線より波長の長く光  
3416 子のエネルギーが低い赤外線がある。

3417 太陽光で日焼けするの 1 光子のエネルギーが高い紫外線によ  
3418 る。また太陽光が暖かいのは、1 光子のエネルギーは低いが、光  
3419 子の量が多く、光子のエネルギーに光子の量を掛けた光の全部の

3420 エネルギーが多い赤外線による。熱中症もエネルギー量が多い赤  
3421 外線が主な要因である。

### 3422 6.2.3. 太陽ニュートリノ

3423  
3424  
3425 太陽の中心部は超高温で、主に水素核（陽子）が融合して燃  
3426 え、2つの陽子が融合する際に、20万電子ボルト程度のエネルギ  
3427 ーのニュートリノが放出される。

3428 陽子の融合反応の他にも、核反応で生成された放射性核のベ  
3429 タ崩壊の際に、80万～1400万電子ボルトのエネルギーの種々の  
3430 ニュートリノが放出される。

3431 ニュートリノは電気のない電子で、太陽内の物質との間で、電  
3432 気力も核力も作用せず、弱い力だけが作用する。したがっ  
3433 て、太陽中心部の融合反応で発生したニュートリノは、太陽内を  
3434 通過して太陽外の放出される。

3435 太陽内から宇宙に放出されたニュートリノの1部は、地球に到  
3436 着し、地球の物質と反応する力が大変弱いので、殆どは地球を素  
3437 通りして宇宙のかなたに飛び去る。

3438 1968年、アメリカのデイビス（註1）たちは太陽からのニュー  
3439 トリノ観測に初めて成功した。

3440 ニュートリノは、水素核の核反応によって生成される粒子であ  
3441 る。太陽からのニュートリノ観測によって、太陽内では実際に原  
3442 子核の融合反応がおこり、太陽エネルギーの基は原子核（原子  
3443 力）エネルギーであることが実証された。

3444 20世紀後半から21世紀にかけて、日本、欧州、北米等のグル  
3445 ープによって太陽ニュートリノ観測が行われた。

3446 太陽からのニュートリノ研究によって、太陽内でどのような核  
3447 反応や核変換が起きているかが明らかにされた。

3448 太陽ニュートリノ研究は、素粒子物理に大きな進歩をもたらした。  
3449 ニュートリノには電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、

3450 タウニュートリノの3種があり、太陽で生成されるのは電子ニュ  
3451 ウトリノだ。

3452 観測された電子ニュートリノ量が、太陽光のエネルギーの量か  
3453 ら予想されるより量の30-50%くらいであることから、太陽で生  
3454 成された電子ニュートリノは、太陽を通過中に別の種類のニュ  
3455 トリノに変化していることがわかった。

3456 ニュートリノの種類の変化は、振りが左から右に振れて位置  
3457 が変化することに相当し、ニュートリノ振動と呼ばれている。ニ  
3458 ュートリノ振動については第7章で述べる。

3459 地球上にやってくる太陽ニュートリノの総量は、変化した分を  
3460 含めて、1平方メートル当たり毎秒約600兆個だ。

3461 太陽ニュートリノの総エネルギーは、太陽で発生するエネルギ  
3462 ーの3%程度で、宇宙のかなたに消える。

3463 太陽内の水素核燃料による原子核（原子力）エネルギーの96%  
3464 は、太陽光に変換される。太陽は大変効率のよい熱機関である。

3465  
3466 註1. R. デビス 2006年ノーベル物理学賞

#### 3467 3468 6.2.4. 太陽エネルギーの活用

3469  
3470 太陽内の原子核反応で発生した原子核（力）エネルギーは、太  
3471 陽光という電磁エネルギーに変換され四方に放射される。その一  
3472 部が地球上に注ぐ。

3473 地球圏に到着した太陽光エネルギーの半分は大気や雲で反射・  
3474 吸収され、残りの半分が実際に地球表面に到達する。

3475 地表が受けるエネルギーの総量は約10万TW（兆ワット）で、殆  
3476 どは海水や大気を暖め、やがては宇宙に再放射される。その過程  
3477 で、1部は台風、豪雨、地球温暖化、等の天地異変のエネルギーに  
3478 なる（第4章参照）。

3479 太陽光エネルギーの内、わずかの部分は、農業や発電に活用さ  
3480 れる。太陽光の基は原子核エネルギーなので、地球温暖化ガス（2  
3481 酸化炭素）がなく、クリーンエネルギーだ。

3482  
3483 日本の場合、地上に注ぐ太陽光エネルギーは、昼夜や緯度によ  
3484 る影響を考慮して、年平均して1平方メートル当たり0.35KW程  
3485 度、日本全体で130TWだ。

3486 太陽光の入射エネルギーは、現在の日本の総発電量0.12TWの千  
3487 倍になる。太陽光の0.1%が有効活用できれば、あとは原子力など  
3488 のクリーンエネルギーで日本の電力問題は解決する。

3489 太陽光の直接利用は、太陽光発電だ。太陽光を半導体に照射  
3490 し、太陽光の光子の運動エネルギーを半導体内の電気エネルギー  
3491 （電圧）にかえて、電力を取り出す。

3492 現在、日本の太陽光発電は総発電量の6.5%、太陽光の10万分  
3493 の5くらいが活用されている。

3494 太陽光の間接利用の一つは風力発電だ。太陽光のエネルギーで  
3495 地上に温度差と圧力差を作り、風を起こし、空気分子を風車の羽  
3496 に衝突させて発電機を回転させて電気を起こす。

3497 日本の総発電の約0.6%が風力発電だ。日本には常時風の吹く適  
3498 地が少なく、風速によって大きく変わるが、洋上風力などで将来  
3499 の発展が期待されている。2050年には300-450万KWの洋上発電  
3500 の実現を目指す。建設と風の吹かない期間のエネルギー補完に要  
3501 するコストと二酸化炭素が問題である。

3502 水力発電も太陽光の間接利用にあたる。太陽光で海水を暖め、  
3503 水蒸気が雲となって山地に雨を降らせ、ダムに水を貯える。水が  
3504 落下する時、水的位置エネルギーは運動エネルギーにかわり、タ  
3505 ービンを回転させて電気を起こす。日本の電力の約8%の電力が水  
3506 力発電である。

3507 バイオマス発電は、太陽光で育った木材や生物からの発酵ガス  
3508 を燃焼させて発電する。石炭は太陽光で育った植物を利用する太  
3509 陽光エネルギー利用だ。いずれも燃料の2倍の二酸化炭素（温暖

3510 化ガス)が発生する。但し、森林を育成につながるバイオマス  
3511 発電は、一つの再生エネルギーだ。

3512 太陽光のエネルギーは原子核エネルギーなので、太陽光発電  
3513 も、太陽光エネルギーを基にする風力発電や水力発電も、原子核  
3514 エネルギー利用のクリーンエネルギーだ。但し、一旦太陽という  
3515 媒体を通すので、季節や昼夜の変動が大きい。

## 3516 6.3. 原子力エネルギーの活用

### 3517 6.3.1. 原子核分裂

3518  
3519  
3520  
3521 原子核内には、超微小空間に核エネルギーという超巨大なエネ  
3522 ルギーが詰まっている、いわばエネルギーの塊だ。そのエネルギ  
3523 ーの1部を取り出して有効活用するのが原子力エネルギーだ。

3524 原子核内では、いくつかの核子が強い核力で結合しあってい  
3525 る。原子核を反応させて、核子の結合の仕方を変えることによっ  
3526 て、結合エネルギーの変化分を取り出して活用できる。

3527 原子核からエネルギーを取り出すのに有効核な核反応に、原子  
3528 核分裂反応と原子核融合反応がある。

3529 原子核分裂反応は、物理学上の研究に続いて20世紀半ばには実  
3530 用化に向けての研究が進み、半世紀以上にわたって広く世界のク  
3531 リーエネルギーとして多方面に活用されている。

3532 一方、原子核融合反応は、原子核物理学上は20世紀半ばに研究  
3533 され、太陽内では実現しているが、地球上では未だ活用されてい  
3534 なく、実用化に向けて研究中だ。

3535  
3536 1938年、ハーンはウラニウム235(235の核子からなるウラニ  
3537 ユウム核)が分裂することを発見した(註1)。

3538 ウラニウム235の核内では、2つの核子グループが核力とい  
3539 うばねで結びあっている。そこに外部から中性子を当てて刺激す

3540 ると、ばねの留め金がはずれて分裂し、それぞれが逆方向に飛び  
3541 出す。分裂の際、2つの中性子が放出される。。

3542 核分裂後の2つの核と2つの中性子の質量の和は、分裂前のウ  
3543 ラニウム核の質量より0.1%くらい軽い。

3544 質量の減った分の質量エネルギーが、核分裂エネルギーにな  
3545 る。それは主に分裂片である2つの核の運動エネルギーで、約2  
3546 億電子ボルトくらいである

3547 原子核の中で作用する核力は大変強力な力で、原子や分子内の  
3548 電子に作用する電気力の1千万倍くらい大きい。

3549 原子核分裂では核力に基づく核エネルギーが解放される。TNT爆  
3550 薬の爆発では、電気力に基づく電気エネルギーが解放される。同  
3551 じ重さの核燃料とTNT爆薬場合、核分裂エネルギーはTNT爆発エ  
3552 ネルギーと比べて、2千万倍くらい大きい。

3553 核分裂は、ウラニウム235核の他にも、いくつかの重い核で  
3554 起こる。また、核分裂は同じ質量の核に分裂することはあまりな  
3555 く、分裂核の一方がもう一方より重い。

3556 核分裂によって生成された分裂片の原子核は、放射性核である  
3557 ことが多く、セシウム核やコバルト核などには数十年から数年の  
3558 寿命の放射性核がある。核分裂は有用な放射核生成にも使われて  
3559 いる。放射性核については、第7章で詳しく述べる。

3560  
3561 註1 0.ハーン 1944年ノーベル化学賞

## 3562 3563 6,3,2. 連鎖反応と原子力

3564  
3565 原子核分裂エネルギーを取り出して有効活用するには、点火し  
3566 た原子力の火（核分裂）が消えることなく燃え続けることと、火  
3567 が弱まったり暴走したりしないように、火加減を十分制御（コン  
3568 トロール）できることが肝要だ。

3569 核分裂を持続させるには、連鎖反応を使う。低速中性子をウラ  
3570 ニウム 235 に照射して吸収させると、ウラニウム核は刺激さ  
3571 れ、点火して核分裂が起き燃え出す。

3572 核分裂の際に、分裂核と共に高速中性子が放出される。その中  
3573 性を減速して低速にし、別のウラニウム 235 に吸収されると、  
3574 その核が点火され核分裂を起こし燃える。その際に 2 つの中性を  
3575 が放出される。

3576 中性子の放出と吸収を通して、ウラニウム 235 核が次々に核分  
3577 裂し、核分裂が持続する。ウラニウム核が中性子の鎖を通して  
3578 連なって分裂反応をするので、連鎖反応という。

3579 中性子の減速には主として水を使う。核分裂で放出された高速  
3580 中性子は、水分子の水素の核（陽子）に衝突し、陽子にエネルギ  
3581 ーを与える。中性子は次第にエネルギーを失い低速になり、近く  
3582 のウラニウム核に吸収され、その核が核分裂を起こす。

3583 核分裂が暴走しないように制御するには、中性子による連鎖反  
3584 応があまり進まないように、中性子を炭素のような吸収剤で吸収  
3585 して、中性子数を減らす。

3586 具体的には、吸収剤を含む制御棒をウラニウム燃料内に出し  
3587 入れして、核分裂の起こり方を制御する。

3588 天然に存在するウラニウムの中でウラニウム 235 は、わず  
3589 か 0.6% に過ぎない。そこで効率よく核分裂反応を起こすよう  
3590 に、遠心分離機を用いて質量の軽いウラニウム 235 を分離して  
3591 その割合を増やす。このことを濃縮するという。

3592  
3593 フェルミは 1942 年 12 月、シカゴ大学に原子炉を作り、ウラニ  
3594 ヴウムの連鎖反応に成功した（註 2）。

3595 核内に閉じ込められていた原子核エネルギーを人々に解放し  
3596 た。クリーンエネルギーの原子力時代の夜明だ。

3597 一方、原子核爆弾（註 2）は、制御された連鎖反応で順番に核  
3598 分裂を起こすのではなく、一度にまわりのウラニウム 235 核に

3599 核分裂を広げ爆発させる。化学反応を一気に広げて瞬時に大きな  
3600 エネルギーを取り出す爆弾に相当する。

3601  
3602 註1. E. フェルミ 1938年ノーベル物理学賞

3603 註2. アメリカは科学者を総動員して1945年に原爆に成功、  
3604 原爆の熱エネルギーは、総量がが大変多く、且つ温度が極めて  
3605 高いので、広島と長崎に大きな不幸をもたらせた。米軍が広島  
3606 に投下した原爆は高濃縮ウラニウム235を使用した。約50  
3607 兆ジュールで、TNT爆薬1万トンに相当する。

3608  
3609 6.3.2. 原子力エネルギー利用と原子力発電

3610  
3611 原子核の分裂によって解放された核エネルギーは、主として原  
3612 子力発電により電気のエネルギー変えて、日常の生活や各種産業  
3613 などによろ活用されている。

3614 原子核分裂によって、2つの分裂核は1億電子ボルト程度の運  
3615 動エネルギーをもって飛び出し、周辺の物質と電気の力で衝突を  
3616 繰り返して止まる。衝突を繰り返す過程で、分裂核の運動エネル  
3617 ギーは周辺物質の熱エネルギーに変わる。

3618 核分裂片の原子核は放射性核の場合が多い。放射性核は、運動  
3619 が停止したのち、放射性核の寿命に相当する時間を経て、放射線  
3620 を出してやがて安定な原子核に変わる。

3621 放射性核のエネルギーは主としてベータ線（電子、陽電子）や  
3622 ガンマ線（電磁波）として放出され、周辺の物質中でとまる。そ  
3623 の際、放射線のエネルギーは、物質の熱エネルギーに変わる。

3624  
3625 原子核分裂に基づく種々の熱エネルギーを電気のエネルギーに  
3626 変える原子力発電の方法は、化学反応で発生した熱エネルギーを  
3627 電気エネルギーに変える火力発電の場合と同じだ。

3628 沸騰水型原子炉では、核分裂に基づく熱エネルギーで直接水を  
3629 高温に暖め、蒸気を発生させて蒸気の運動エネルギーに変え、発  
3630 電機のタービンを回して発電する。

3631 加圧水型原子炉では、核分裂に基づく熱エネルギーで高温・高  
3632 圧の水を造り、それを蒸気発生機に導いて蒸気を発生させ、蒸気  
3633 でタービンを回して発電する。

3634 現在の原子炉は 100 万キロワットクラスの大型のものが主だ  
3635 が、欧米日で開発中の数万—数十万キロワットの小型モジュール  
3636 炉は、安全性とコストの面で有望なエネルギー源だ。

3637 最近、高温ガス炉が注目を浴びている。水の代わりに高温（700  
3638 度超）のヘリウムを用いて熱を取り出すので、効率がよく、水素  
3639 爆発も起こらない。我が国も英国と共同で開発に取り組む。

3640 核燃料による原子力発電は、化石燃料による火力発電と比べ  
3641 て、同じエネルギーを得るのに、核燃料も核廃棄物も数百万分の  
3642 1 かそれ以下で済むクリーンエネルギー源だ。

3643 原子核分裂によって生成される放射性核や中性子線の活用につ  
3644 いては、第 6 章で述べる。

3645 原子核内の核エネルギーの解放は、エネルギー解放の歴史の中で  
3646 大きな革命をもたらした（註 1）。20 世紀半ばに登場した原子力  
3647 は、一挙に数百万倍のエネルギーを供給することによって、エネ  
3648 ルギー問題を一変させた（註 2）。

3649  
3650 註 1. 原子核物理学者によって 1938 年に原子核分裂が発見され、  
3651 1942 年に連鎖反応によって核エネルギーを解放し持続的に活  
3652 用する道が拓かれた。アメリカによる 1945 の原爆使用があっ  
3653 たが、1951 にはアメリカで、1954 にはソ連で原子力発電がお  
3654 こなわれ、わずか 10 数年で百万倍のエネルギーを実用化した  
3655 ことは、人類史上唯一の大きな急革新といえる。

3656 註 2. 現在、主なエネルギー源は化石燃料だが、燃料供給、輸送、  
3657 廃棄物（地球温暖化ガス）の問題が未解決だ。  
3658

### 6.3.3 高速増殖炉

天然のウラニウムは、99%は、核子数が238のウラニウム238核で、現在、原子力活用に実用化されているウラニウム235核は、0.6%に過ぎない。

将来のウラニウム資源の面から、主成分のウラニウム238を有効利用することが望まれる。

ウラニウム238核は、ウラニウム235核の核分裂で放出される中性子を吸収してネプチウム239核になり、さらにベータ崩壊してプルトニウム239核になる。

プルトニウム239核に、ウラニウム核分裂の際に放出された高速中性子が衝突し吸収されると、留め金がはずれて核分裂が起き、プルトニウムの核エネルギーが解放される。

プルトニウム239核は、ウラニウム235核の核燃料を使用しながら、生産される核燃料なので、核燃料が増殖する。

プルトニウム239核を活用する原子炉を、高速中性子を利用し、核分裂燃料が増えるので、高速増殖炉という。

核分裂の際に放出される高速中性子が、あまり減速されないように、水の代わりに液体ナトリウムを使う。

ナトリウム核は中性子より20倍くらい重いので、ナトリウム核に衝突した高速中性子は速さを失わずに跳ね返ってきて、周りのプルトニウム239核に衝突し、核分裂させる。

高速増殖炉の場合は、利用するウラニウム核燃料が15倍増え、資源の問題はなくなる。夢の原子炉といわれる。

現在、高速増殖炉は、高速中性子やナトリウムを使用するにあたって、技術的問題が多々あり、開発中だ。フランスではフェニックス計画で高速増殖炉がある時期に稼働した。日本ではもんじゅが高速増殖炉の試運転を行ったが、2016年に廃炉になった。

21世紀になり、二酸化炭素過剰により地球を滅させることなく文明を維持するエネルギー源として、原子力の活用、特に高速増殖炉によるクリーンエネルギーの実用化が認識されつつある。

3690 2022 年になり、EU はタクソノミー規則を発表、原子力の再活用  
3691 でカーボンニュートラルの実現を目指す。日米は学術協力によっ  
3692 て、次世代の高速増殖炉の開発することになった。日本の常陽炉  
3693 ともんじゅ炉の技術を生かし、協同で開発し実用化を目指す。

3694  
3695 プルトニウム 239 核は半減期が 2400 年くらいの放射性核で、  
3696 地球生成以来の年月の間に殆どが崩壊してしまい、現在の地球に  
3697 は残っていない。

3698 ウラニウムを使う原子炉内では、ウラニウム 235 の核分裂  
3699 の際に放出される高速中性子でプルトニウム 239（註 1）が生産  
3700 される。それを濃縮して、ウラニウム 235 核と混合したのが MOX  
3701（混合酸化ウラニウム）燃料だ。プルサーマル計画は、ウラニ  
3702 ユーム核燃料と MOX 核燃料を混合して使う。日本でもいくつかの  
3703 原子力発電で実現している。

3704  
3705  
3706  
3707  
3708  
3709 註 1. プルトニウム 239 は、長崎の原爆に使用された。通常  
3710 の原子炉運転で生産されるので厳重な規制がある。

#### 3711 3712 6.3.4. 核融合反応の活用

3713  
3714 ウラニウム核のような重い原子核は 2 つに分裂して核エネル  
3715 ギーが解放されるが、水素のような軽い 2 つの核は融合する際に  
3716 核エネルギーが解放される。太陽の中心部のような高温高圧下で  
3717 は、水素核の核融合反応が実現している。

3718 水素の中心にある原子核は、1 の陽子から成りるが、重水素の中  
3719 心にある重陽子は、1 つの陽子と 1 つの中性子からなる。

3720 天然にある水素は殆どが陽子を核とする水素だが、重陽子を核  
3721 とする重水素は 0.015% くらい存在する。

3722 重陽子 A と B が核融合すると、重陽子 A から中性子が重陽子 B  
3723 に移り、陽子と三重陽子（1 陽子と 2 中性子）が放出される。

3724 重陽子の融合では、300－400 万電子ボルトの重陽子内の結合エ  
3725 ネルギーが解放され、陽子と三重陽子の運動エネルギーになる。

3726 核融合反応で放出された陽子と三重陽子は、周りの物質と衝突  
3727 を繰り返して止まり、その過程で陽子と三重陽子の運動エネルギ  
3728 ーは熱エネルギーに変わる。その熱エネルギーを利用して発電す  
3729 るのが核融合発電だ。

3730 重水素はいくらでも海中から得られるので、核融合のエネルギ  
3731 ーの活用が実現すれば、エネルギー資源の問題はない。

3732 重陽子と三重陽子が核融合すると、陽子とヘリウム核が放出さ  
3733 れ、2 千万電子ボルト程度の結合エネルギーが解放され、高速の陽  
3734 子とヘリウム核が放出される。

3735 放出された陽子とヘリウム核の運動エネルギーが熱エネルギー  
3736 になり、発電に使われるのは、重陽子同志の核融合の場合と同じ  
3737 だ。三重陽子は三重水素核で、リチウムに中性子を当てて造る。

3738 核融合する前の 2 原子核の質量の和 A は、融合後の 2 原子核の  
3739 質量の和 B より多い。その差の  $A - B$  の質量エネルギーが核融合  
3740 エネルギーだ。重陽子同志の融合では 0.1% 程度の質量が、重陽子  
3741 と三重陽子の融合では 0.4% 程度の質量エネルギーが解放される。

3742 核融合反応の場合、石油などの化石燃料の反応に比べて、エネ  
3743 ルギーが百万倍大きい。したがって、エネルギー資源や廃棄物の  
3744 量も、化石燃料に比べて数百万分の 1 で済むことは、原子核分裂  
3745 の場合と同じだ。

3746  
3747 原子核は高い電気エネルギーの障壁で囲まれているので、普通  
3748 の状態では、接近して融合することはない。

3749 核融合を起こすためには、太陽のような高温高密度のプラズマ  
3750 状態を造り、ある時間持続させ、2つの核がそれぞれの電気の障壁  
3751 を乗り越えて核融合反応を起こさせる。

3752 核分裂の場合、原子核物理の研究を基に応用研究が進み10年余  
3753 で核分裂エネルギーが実用化された。一方、核融合の場合、原子  
3754 核物理の研究から半世紀を超えるが、そのエネルギーの実用に至  
3755 っていない。

3756 日本では原研や核融合研、東大、九大等で、世界でも各国で鋭  
3757 意研究中だ。国際共同のITER計画（フランス）では、重陽子と三  
3758 重陽子の核融合させて50万KWの出力を目指す。

## 3759 7 放射線のエネルギー

### 3760 7.1 放射性変換と弱い力

#### 3761 3762 7.1.1. 放射線と「弱い力」

3763 3764 3765 19世紀末の1896年、ベクレルは放射線を発見、続いて1898年  
3766 にはキュリー夫妻が放射性元素ラジウムを発見し、放射線時代の  
3767 幕が開かれた。

3768 3769 放射線は、原子核から放出される数百万電子ボルト位のエネル  
3770 ギーの高い粒子線である。放射線を放出する原子核を放射能（放  
3771 射線を放出する能力）のある核ないし放射性核という。放射線の  
3772 エネルギーは、放射性核内の結合エネルギーの1部が解放され、放  
3773 射線の運動エネルギーになったものである。

3774 放射性核が放射線を放出して別の原子核に変わることを、放射性  
3775 変換という。原子核はエネルギーの高い状態から、放射線を出して  
3776 エネルギーの低い状態に崩壊するので、放射性崩壊ともいう。

3777 最も基本となる放射性変換は、核子数1の放射核である中  
3778 性子が電子とニュートリノを放出して陽子になるベータ変換

3779 である。放出される電子をベータ線といい、ベータ線を出す  
3780 変換をベータ変換ないしベータ崩壊という。

3781 放射性変換前の中性子の質量は、変換後の陽子と電子とニ  
3782 ュートリノの質量の和よりも 0.15%ほど大きい。この質量の  
3783 差は、エネルギーにすると 130 万電子ボルト程度で、放出さ  
3784 れた電子とニュートリノの運動エネルギーとなる。

3785 ベータ放射性変換を起こすのは「弱い力」ある。弱い力  
3786 は、重力、電気力、核力（強い力）の三つの力とは異種の新  
3787 しい力で、第四の力といわれている。

3788 「弱い力」の大きさは、強い力の核力の 10 万分の 1 くらい  
3789 で、大変弱く、変換を起こすのに時間がかかる。中性子のベ  
3790 ータ変換では、15 分くらいの時間で陽子に変わる。

3791 強い核力で瞬時（1 兆分の 1 秒の更に 1 兆分の 1 くらい）  
3792 で起こる起こる核反応に比べて、放射性変換は、数分から数  
3793 年といった長い時間がかかる。

3794 「弱い力」を伝える粒子は弱ボソン（註 2）である。電気  
3795 の力を伝える光子は重さがなく、電波としてどこまでも飛んで行  
3796 けるが、弱ボソンは陽子の 100 倍くらいの質量があり、飛ん  
3797 でいける距離は百万分の 1 ナノメートルくらいだ。したがっ  
3798 て、相互に最接近した場合だけ作用する大変弱い力だ。

3799  
3800 註 1. A. ベクレル、P. キューリー、M. キューリー。1903 年ノ  
3801 ーベル化学賞。

3802 註 2. 電荷が + と - と 0 の弱ボソンがあり、質量は 800 億電  
3803 子程度。グラショウ、サラム、ワインバーグ（1979 年ノ  
3804 ーベル物理学賞）によって予言され、1983 年に CERN 研究  
3805 所の大型加速器を用いて発見された。C ルビアらはその功  
3806 績で 1984 年にノーベル物理学賞。

### 3807 3808 7.1.2. 放射性変換

3809  
3810 「弱い力」による原子核のベータ変換（崩壊）には、原子核  
3811 内の中性子が陽子に変わり、電子とニュートリノが放出され  
3812 る場合と、原子核内の陽子が中性子に変わり陽電子とニュー  
3813 トリノが放出される場合がある。

3814 放射性核 A 内の陽子と中性子が入れ替わることによって、  
3815 放射性核 A は、多くの場合は、放射性でない核 B に変わる。

3816 放射性変換  $A \rightarrow B$  では、変換する前の原子核 A の質量が変換  
3817 後の原子核 B の質量と放出される電子ないし陽電子の質量の  
3818 和よりも大きい。

3819 変換前の放射核 A の質量が大きいということは、核子（陽  
3820 子と中性子）が緩く結合し、ばねでいえば伸びた状態にあ  
3821 り、結合エネルギーが高い。変換後は核子が固く結合し、ば  
3822 ねは縮まり、結合エネルギーが低い。

3823 放射性核 A のばねの留め金が、弱い力の作用ではずれて原  
3824 子核 B になり、A と B の結合エネルギーの差が、電子ないし陽  
3825 電子の質量エネルギーと電子ないし陽電子とニュートリノの  
3826 運動エネルギーに変わる。

3827 放射性変換後の原子核 B が励起している場合、その励起エ  
3828 ネルギーのガンマ線が放出される。ガンマ線はエネルギーの  
3829 高い光の一種で、エネルギーは数百万電子ボルト程度だ。

3830 放射性変換には、強い核力によっておこるアルファ変換が  
3831 ある。重い原子核内の 2 つの陽子と 2 つの中性子がまとまっ  
3832 て、アルファ線（陽子数 2、中性子数、ヘリウムの原子核）  
3833 として放出される。変換前と後の原子核の質量差がアルファ  
3834 線の運動エネルギーとなる。

3835 重い核は陽子数が多くそれだけ電荷が多い。アルファ変換  
3836 （崩壊）の場合、原子核の電荷とアルファ線の電荷が電気の  
3837 力で反発しあい、アルファ線は原子核の電気の壁を乗り越え  
3838 がたい。したがって、アルファ変換は強い力の作用起こる  
3839 が、変換（崩壊）に長い年月を要する。

3840 質量エネルギーの高い不安定な原子核が、質量エネルギー  
3841 が低い安定な原子核に変換する放射性変換は、崖の上にある  
3842 大きな石が崖下に落ちる崩壊に相当する。質量エネルギーの  
3843 差が崖の高さがその位置のエネルギーに相応し、崖の上で大き  
3844 な石を 1 時支えている小石が弱い力の作用ではずれる。

### 3845 3846 7. 1. 3. 放射線の透過力 3847

放射線には、弱い力で起こるベータ変換の際に放出されるベータ（電子）線とニュートリノ線、電気ので起こるガンマ（光）線、強い力で起こるアルファ線がある。さらに特殊な原子核では強い力で陽子線が放出される。

放射性変換で解放されるエネルギーは、原子核内の核子を強い核力で結び付けている結合エネルギー（原子核の質量エネルギー）を反映して、数十万から数百万電子ボルトにおよぶ。化学反応（燃焼、爆発）の数百万倍だ。

放射線は、エネルギーが大きいので、それだけ透過力がある。放射線を遮蔽するには、放射線の種類とエネルギーに応じて、相当の厚さの遮蔽板がいる。

ベータ線は電気を持った粒子なので、物質の原子内の電子とベータ線の間で電気の力が作用し、それがブレーキとなって減速し止まる。1千万電子ボルトのベータ線は約6mmくらいの銅板で止めることができる。

アルファ線も電気を持った粒子だが、電子に比べて約1万倍重い。したがって、同じエネルギーでも、速さが100倍遅い。その分、物質中の原子内の電子との電気の力が長い時間作用するので、短い距離で止まる。同じ1千万電子ボルトのアルファ線の場合、0.03mmくらいの厚さの板で止まる。

ガンマ線には電気はないが、物質中の原子内の電子を電気の力で突き飛ばす光電効果で、相手の電子に全エネルギーを与える場合と、電子と散乱するコンプトン散乱で電子にエネルギーの一部を与える場合がある。ガンマ線は、この種の電子との衝突を繰り返し、やがてエネルギーを失い消滅する。

エネルギーの高いガンマ線は、正と負の電子に変換されて、それらの電子は物質中の電子と衝突して止まる。

ガンマ線の遮蔽には、鉛のような重金属を使う。百万電子ボルトのガンマ線の場合、3cmの鉛板で30分の1くらいに、10cmの鉛のブロックで千分の1くらいに減る。

放射線の中でもニュートリノは特異な粒子である。電気がないので、物質中の原子内の電子との間で電気の力が作用しない。また、物質中に原子核の間で核力も作用しない。

ニュートリノと物質中の電子や原子核との間では「弱い力」だけが作用する。その力は大変弱く、殆どブレーキが利

3883 かずに物質を素通りする。地上の放射性核からでたニュート  
3884 リノは、地球をすり抜けて宇宙のかなたに飛び去る。

3885 超透過力をもって地球を素通りするニュートリノは、まさ  
3886 に捕らえどころのない粒子であるので、放射線として認知さ  
3887 れず無視されることが少なくない。しかし、電子と同じ仲間  
3888 で、ベータ崩壊では、電子と同程度の運動エネルギーをもつ  
3889 て放出される放射線である。

3890

#### 3891 7.1.4. 放射線の強度と半減期

3892

3893 放射性核は、各々の核に特有なある確率で放射線を出して  
3894 変換ないし崩壊する。放射性核が毎時 10 分の 1 (1 割) の変  
3895 換確率で変換する場合を考えてみる。

3896 初めに 1000 個の放射核があると、1 時間で 1 割の 100 個が  
3897 放射線 (電子) を放出して変換し、1 時間後には放射核は 1  
3898 割減の 900 個に減る。放射線の強度 (時間当たりの放射線  
3899 数) は、1 時間当たり 100 である。

3900 次の 1 時間にも同じ変換確率の 10 分の 1 で変換するので、  
3901 放射性核の数は 900 の 1 割減のほぼ 810、放射線の強度は 1 時  
3902 間当たり約 90 になる。こうして毎時 1 割減ると約 7 時間後  
3903 には、放射性核の数は半数の 500 くらいになり、放射線の強度  
3904 も毎時 50 個程度に半減する。

3905 放射核は 1 定の割合で減るが、あくまで確率で起こるの  
3906 で、放射核の個数、変換後の核の個数、放射線の数は概数で  
3907 ある。実際の数場合は場合によって若干変わる。

3908 放射性核の数や放射線の強度が半減する時間を、半減期と  
3909 いう。ある放射核の半減期を 5 時間とすると、初めの 5 時間  
3910 で放射核数も放射線強度も半減、次の 5 時間で更に半減して  
3911 初めの 4 分の 1 になる。

3912 放射性核の変換 (崩壊) 確率が大きいほどその放射核が崩  
3913 壊しないで生き続ける寿命も半減する時間も短い。前に出し  
3914 た例の、1 時間に 1 割が崩壊する場合、平均寿命は 10 時間、  
3915 半減期は 7 時間程になる。

3916 放射性核の変換確率や半減期は、放射線のエネルギーや放  
3917 射線の種類によって大きく変わる。一般に、エネルギーが大

3918 きいほど、確率が増え半減期が減る。弱い力によって起こる  
3919 ベータ変換は、変換確率が小さく、半減期は永い。1秒くらい  
3920 のもあれば、数十年におよぶものもある。

3921 重い核のアルファ崩壊の場合、電気の障壁が高いのでアル  
3922 ファ線放出に大変時間がかかり、半減期は数年から数億年  
3923 におよぶ。一方、電気の力で起こるガンマ変換は、数十億分の  
3924 1秒くらいの短い半減期で変換する。

3925 放射性変換の確率は、核力の作用で起こる核反応（核変  
3926 換）確率の何十桁も小さく、それに応じて、放射性変換の半  
3927 減期は、核変換に比べて何十桁も永い。

3928 放射性核の特徴は、半減期の何倍かの時間がたてば、いず  
3929 れ消滅することと、半減期程度の永い期間にゆっくりと変換  
3930 するので、その際に放出される放射線の強度（毎秒当たりの  
3931 放射線数）は大変弱いことである。

## 3932 3933 7.2. 放射線のエネルギー

### 3934 3935 7.2.1. ベータ線のエネルギー

3936  
3937 放射性変換では、原子核の質量エネルギーの1部の結合エ  
3938 ネルギーが解放されて、放射線のエネルギーになる。

3939 放射性核の変換前と変換後の原子核の質量エネルギー（質  
3940 量に光速をかけた値）の差が、解放されるエネルギーとな  
3941 る。質量差が大きいほど、結合のエネルギーの差が大きく、  
3942 それだけ大きなエネルギーが解放される。

3943 解放されたエネルギーは、主に放射線の運動エネルギーに  
3944 なる。放射線の放出に際し、その反動で原子核も若干動くが  
3945 そのエネルギーはわずかである。

3946  
3947 ベータ変換の場合、放射線のエネルギーはベータ線（電子  
3948 ないし陽電子）とニュートリノの運動エネルギーとベータ線  
3949 の質量エネルギーになる。ここでベータ線の質量エネルギー  
3950 は約50万電子ボルトである。ニュートリノの質量は大変小さ  
3951 く、そのエネルギーは0.2電子ボルト以下である。

3952 ベータ変換で解放されたエネルギーが 550 万電子ボルトの  
3953 場合、50 万電子ボルトは電子ないし陽電子を生み出すのに使  
3954 われ、500 万電子ボルトがベータ線とニュートリノの運動エネ  
3955 ルギーになる。半分程度がベータ線の運動エネルギーになる  
3956 が、実際は、50-450 万電子ボルトの範囲に分布している。

3957  
3958 ホウ素 12 核（陽子数 5、中性子数 7）は、500-700 万電子  
3959 ボルト位のエネルギーのベータ線を放出して、百分の 1 秒く  
3960 らいの半減期で炭素 12 核（陽子数 6、中性子数 6）変る。

3961 セシウム 137 核（陽子数 55、中性子数 72）は、50-100  
3962 万電子ボルトくらいのベータ線を出して約 30 年の半減期でバ  
3963 リウム 137 核（陽子数 56、中性子数 71）に変換する。

3964 カリウム 40 核（陽子数 19、中性子数 21）は天然に存在す  
3965 る放射性核で、主として 30-100 万電子ボルトのベータ線を  
3966 放出してカルシウム 40 核（陽子数 20、中性子数 20）に変  
3967 わる。半減期は 13 億年くらいで永く、地球が誕生して以来、  
3968 20%くらいが変換（崩壊）しないで残っている。

### 3969 3970 7.2.2. アルファ線のエネルギー

3971  
3972 核力で起こるアルファ放射線変換のばあい、変換前の放  
3973 射性核内の結合エネルギーが 1 部解放されて、アルファ線の  
3974 運動エネルギーになる。

3975 核子数  $A$ （陽子数  $Z$ 、中性子数  $N$ ）の放射性核の場合、核子  
3976 数 4 のアルファ線（陽子数 2、中性子数 2）を放出して核子数  
3977 が  $A-4$  の核（陽子数  $Z-2$ 、中性子数  $N-2$ ）になる。

3978 アルファ変換前の核の質量は、変換後の核の質量とアルフ  
3979 ア線の質量の和よりも若干大きい。その質量エネルギーの差  
3980 が主としてアルファ線の運動エネルギーになる。アルファ線  
3981 のエネルギーは数百万電子ボルト程度から 1 千万電子ボル  
3982 ト程度である。

3983 アルファ線放出の際、その反動で、変換後の原子核はアル  
3984 ファ線と逆の方向に動く。原子核の重さが重いので、それだ  
3985 け反動で動く速さもエネルギーも小さい。

3986 アルファ変換（崩壊）する原子核には核子数や陽子数が大  
3987 きい核、いわゆる重い核が多い。核子や陽子がたくさんある  
3988 と不安定（質量エネルギーが高い）で、アルファ線を放出し  
3989 て、核子数や陽子数の少ない安定な（質量エネルギーの少な  
3990 い）核に変わろうとする。

3991 重い核は陽子数に相当する電荷が多く、電気の障壁が高  
3992 い。したがって、アルファ線が電気の障壁を超える際に時間  
3993 がかかり、半減期は永くなる。アルファ線のエネルギーが低  
3994 くなるほど、半減期は永い。

3995  
3996 ウラニウム 238 核（陽子数 92、中性子数 146）の場合、  
3997 45 億年くらいの半減期で、430 万電子ボルトのアルファ線を  
3998 放出してトリウム 234 核（陽子数 90、中性子数 144）に変わ  
3999 る。地球の年齢が 45 億年くらいなので、地球生成時のウラニ  
4000 ユーム 238 核の半分くらいは崩壊せずに現存する。

4001 ラジウム 224 核（陽子数 88、中性子数 136）は 3.6 日くら  
4002 いの半減期で、580 万電子ボルトのアルファ線を出してラドン  
4003 220 核（陽子数 86、中性子数 134）になる。エネルギーが大き  
4004 いだけ、電気の障壁を乗り越えやすく、半減期が短い。

4005 尚、ウラニウム 238 核は、系列をなしてアルファ崩壊や  
4006 ベータ崩壊をし、最後には、鉛 206（陽子数 82、中性子数  
4007 124）の安定核になる。トリウム 232 核（陽子数 90、中性子数  
4008 142）は系列をなしてアルファ崩壊やベータ崩壊をし、最後  
4009 には安定な鉛 208 核（陽子数 82、中性子数 128）になる。

### 4010 4011 7.2.3. ガンマ線のエネルギー

4012  
4013 放射性核がベータ変換する際に、変換後の原子核が励起し  
4014 ている場合がある。励起している核は、核内のバネが少々伸  
4015 びていてエネルギーが高い。

4016 励起している核は、電気力の作用でガンマ線を放出してば  
4017 ねが縮み、エネルギーの低い安定な核になる。この時、励起  
4018 エネルギーはガンマ線のエネルギーとして放出される。ガン  
4019 マ線は光や電波と同じ電磁波で、その量子は光子だ。

4020 ガンマ線は電気の力で放出されるので、弱い力で放出され  
4021 るベータ線に比べて、放出確率は大きく、半減期は短い。

4022 放射性核がベータ変換に続いてガンマ変換をして安定核に  
4023 なる場合、放射性核と変換後の安定核の質量エネルギーの差  
4024 が、ベータ線（電子）とニュートリノとガンマ線の全エネル  
4025 ギーになる。

4026  
4027 セシウム137核（陽子数55、中性子数82）は、ベータ崩  
4028 壊して、一旦励起したバリウム137核（陽子数56、中性子数  
4029 81）になる。次に励起エネルギーの66万電子ボルト程度ガン  
4030 マ線を放出して、安定なバリウム137核になる。ベータ崩壊  
4031 の半減期は30年ほどで永いが、ベータ変換が起こると直ぐに  
4032 2.5分の半減期でガンマ変換が起こる。

4033 セシウム核は原子力発電に使われるウラニウム235核  
4034 の核分裂の際の生成される放射核として知られている。問題  
4035 になるガンマ線の数も強度もベータ線と同じで、30年かけて  
4036 放出されるので、毎時当たりの強度は極めて小さい。

4037 コバルト60核（陽子数27、中性子数33）は、5年程度の半  
4038 減期でニッケル60核（陽子数28、中性子数32）の励起した  
4039 核になる。ベータ線放出後、直ちに120万電子ボルトのガン  
4040 マ線と130万電子ボルトのガンマ線を放出して安定なニッケ  
4041 ル60核になる。

4042 天然に存在するコバルト59核（陽子数27、中性子数32）  
4043 に、原子炉の核分裂の際に出る中性子を吸収させて、放射性  
4044 のコバルト60核を造る。

4045 ガンマ線は、7.3節で述べるように、科学、工業、医学、  
4046 農業等に広く活用され、現代文明を支えている。

4047 特にコバルト60核は、半減期やガンマ線のエネルギーが適  
4048 しているので、広くガンマ線源として利用されている。

#### 4049 4050 7.2.4. ニュートリノのエネルギー

4051  
4052 ニュートリノは放射線変換の際のエネルギー保存則を満た  
4053 すべく、1930年代の初めに予言され、1950年代の半ばに実証  
4054 された放射線である。

4055 ベータ変換でベータ線と共に放出されるニュートリノは、  
4056 ベータ線と同程度のエネルギーと運動量を持つ。

4057 放射性核のベータ変換の場合、エネルギー保存則によれ  
4058 ば、変換前と変換後の原子核の質量エネルギーの差がベータ  
4059 線の全エネルギー（質量エネルギーと運動エネルギーの和）  
4060 とニュートリノの全エネルギー（質量エネルギーと運動エネ  
4061 ルギーの和）になる。

4062 ニュートリノは弱い相互作用しかしないので、殆どが地球  
4063 を素通りし、実験室で測定するのが大変難しい。そこで、ベ  
4064 ータ線のエネルギーを測定し、放射性変換前後の質量エネ  
4065 ルギーの差と比べて、ニュートリノの全エネルギーを求める。

4066 実験の結果、ニュートリノの全エネルギーは、殆どが運動  
4067 エネルギーであり、ニュートリノの質量エネルギーは0に近  
4068 いことが解った。現在、超微小のニュートリノ質量測定が進  
4069 行中だ。詳しくは8.2.3節で述べる。

4070 ベータ放射性変換で放出されるベータ線とニュートリノの  
4071 運動エネルギーの和は一定で、数百万電子ボルト程度だ。ベ  
4072 ータ線のエネルギーが大きい場合は、ニュートリノのエネ  
4073 ルギーは小さくなり、ベータ線のエネルギーが小さい場合は、  
4074 ニュートリノのエネルギーが大きい。

4075  
4076 ニュートリノは、地球内外の放射性物質のベータ変換、太  
4077 陽内の水素核融合反応や放射性核のベータ変換、宇宙線と大気  
4078 の反応、等のベータ変換や反応の際に生成され、さまざまなエ  
4079 ネルギーのニュートリノが地上にやってくる。

4080 太陽からは常時20-1000万電子ボルト程度のニュートリノ  
4081 が、宇宙線と大気の反応からは数億から数十億電子ボルトのニ  
4082 ュートリノが地球にやってきている。

4083 ニュートリノのエネルギーの総量は大変大きいですが、殆どが何  
4084 の反応もせず人々の体や地球を素通りするので、そのエネ  
4085 ルギーを実感することはない。

4086  
4087 ニュートリノは、光子や電子などと同じく、粒子と波の二  
4088 重性質を持つ。質量がほぼ0なので、光の場合のように、ニ

4089 ユートリノのエネルギーはプランク定数に振動数を掛けた量  
4090 になり、運動量はエネルギーを光速で割った量になる。

4091 。

### 4093 7.3. 放射線エネルギーの活用

#### 4094 7.3.1. 放射線のエネルギーと活用

4095  
4096  
4097 放射線は、これまでの電子線や光線のエネルギーの数百万  
4098 倍のエネルギーを持っているので、医、農、工、その他の広  
4099 い分野で技術革新をもたらし、有効に活用されている。放射  
4100 線は次の5つの特性をもっている。

4101 1. 放射性変換で放出されるアルファ線、ベータ線、ガン  
4102 マ線の個々の粒子のエネルギーは、原子核（原子力）エネ  
4103 ルギーを反映して、数百万電にボルトにおよぶ。そのエネ  
4104 ルギーは日常の電気や光の個々の電子や光子のエネルギーの数百  
4105 万倍、燃焼や爆発などの化学エネルギーの個々の分子のエネ  
4106 ルギーの数億倍におよぶ。

4107 2. 放射線は個々の粒子のエネルギーに応じて、絶大な透  
4108 過力がある。ベータ線の場合、数センチメートルの金属板を  
4109 透過、ガンマ線の場合は30センチメートルのコンクリートの  
4110 ブロックも突き抜ける場合がある。

4111 アルファ線の場合、数十マイクロン（1マイクロンは千分の1  
4112 mm）のアルミニウムのフォイルでとまるが、止まった時に  
4113 百万電子ボルトくらいの大きな熱エネルギーを与える。

4114 3. 放射線の各粒子はエネルギーが高いので、一つ一つの  
4115 粒子が検出できる。ベータ線の場合は各々の電子が、ガンマ  
4116 線の場合は各々の光子が検出できる。したがって、どんなに  
4117 微量でも検出でき、放射能の存在がわかる。

4118 4. 放射性核は、その核固有の半減期程度の時間、放射能  
4119 を維持し、放射線を出し続ける。一旦放射線源を生成する  
4120 と、半減期の数倍の期間、放射線を利用できる。コバルト60  
4121 の半減期は5年なので、5-10年にわたってガンマ線が利用で  
4122 きる。毎日充電が必要なスマホと大違いである。このこと

4123 は、一旦核燃料を入れると何年もエネルギーを発電する原子  
4124 力発電、給油なしに航海する原子力船と同じだ。

4125 5. 放射性核は極微量で大量の放射線を出す。ある微量の  
4126 放射核をあるところで製造し、それを細分割して全世界の多  
4127 くの病院や研究者に配分し利用することができる。極めて微  
4128 量なので、放射能の資源や輸送の問題がない。

4129 放射能は、半減期の 10 倍もすれば放射能は千分の 1 にな  
4130 り、やがて消滅する。放射性核も極微量だが、利用後に残る  
4131 廃棄物も同じく極微量で、しかも放射能を殆ど持たない。

### 4132 4133 7.3.2. 放射線の医療利用

4134  
4135 放射線は、X 線（レントゲン線）と同様に、広く診断や治療  
4136 に使用されている。ここでは放射性核からのガンマ線の医療  
4137 利用として、診断への利用例と治療の利用例を述べる。

4138 放射性核からの単一ガンマ線利用は SPECT と呼ばれ、体内  
4139 の病巣の診断に使われる。テクネチウムやタリウムの放射性  
4140 核を混入した薬剤を体外から注入し、それらが病巣に集ま  
4141 り、そこから放射性変換で放出されるガンマ線を体外で測定  
4142 し、病巣の位置を診断する。

4143 最も広く医療に利用されているのがテクネチウム 99 核（陽  
4144 子数 43、中性子数 56）だ。モリブデン 99 核（陽子数 42、中  
4145 性子数 57）は放射性核で、3 日くらいの半減期でベータ変換  
4146 して、不安定な（励起した）テクネチウム 99 になり、6 時間  
4147 くらいの半減期で、14 万電子ボルトガンマ線を放出して安定  
4148 なテクネチウム 99 核に変わる。このガンマ線を診断使う。

4149 モリブデン 99 の放射核は、原子炉内でできる核分裂核の一  
4150 つで、世界のいくつかの原子炉で製作され、世界各地の病院  
4151 に提供されている。

4152 放射性核のベータ変換の際に、正電荷のベータ線（陽電  
4153 子）が放出される場合、陽電子は周りの物質の電子と合体し  
4154 て、50 万電子ボルトのガンマ線の対（ペア）放出して消滅す  
4155 る。このガンマ線を体外で測定する方法は、PET といわれ、  
4156 SPECT と同様に広く診断に使われている。

4157 実際には PET に使用される放射核には、炭素 11 核（陽子数  
4158 6、中性子数 5）やフッ素 18 核（陽子数 9、中性子数 9）な  
4159 どがある。これらの放射性核は寿命（半減期の 1.5 倍）が永  
4160 くないので、使用する病院内か近隣の加速器で核反応を用い  
4161 て生成されることが多い。癌などの病巣の場所が解る。

4162  
4163 一方、原子炉内で製造されるコバルト 60 核から放出される  
4164 ガンマ線は癌などの治療に使われている。

4165 体内の癌のある場所を狙って、体外から集中的にガンマ線  
4166 を照射すると、ガンマ線はそこで電子に衝突し、電子にエネ  
4167 ルギーを与える。この電子のエネルギーが熱エネルギーに変  
4168 わる際の熱を利用して癌を焼き切る。

4169 ガンマ線による治療は、外科手術と異なり、体を傷つけない  
4170 メス「ガンマナイフ」として活用されている。

### 4171 4172 7.3.3. 放射線エネルギーの産業利用

4173  
4174 放射線のエネルギーは、放射線の透過力を生かし、各産業  
4175 に活用されている。農業利用と工業利用の例を述べる。

4176 ガンマ線が生物内の分子の電子に衝突すると、光電効果や  
4177 電子散乱によって、ガンマ線のエネルギーは電子に移り、エ  
4178 ネルギーの高い電子が放出される。その電子は生物内の酸素  
4179 を活性化したり、電子にエネルギーを与えて、遺伝子を変え  
4180 育種や品種改良などに利用される。

4181 生物内の分子に、ガンマ線からエネルギーをもらった電子  
4182 が衝突し、分子が壊れ、生物としての機能が消滅すれば、殺  
4183 菌や消毒に利用できる。

4184 ガンマ線からエネルギーをもらった電子が、ジャガイモの  
4185 芽にあたると、細胞分裂が止まり発芽しなくなる。この方法  
4186 は害虫除去にも有効である。

4187 コバルト 60 核やセシウム 137 核のベータ変換に伴って放  
4188 出されるガンマ線は百万電子ボルトのエネルギーがあり、生  
4189 物内い数十センチ入り込むことができるので、生物関係に広  
4190 く利用されている。

4192 高いエネルギーの電子線は、半導体の電子回路の作成や物  
4193 資の強化など、工業利用も多岐におよぶ。

4194 半導体に、ある型のマスクをして、外部から電子線を照射  
4195 すれば、電子の当たった部分の性質が変わり、電子回路が製  
4196 作できる。

4197 タイヤのゴム内に電子線を打ち込み、電子線の電気ので  
4198 ゴム内の分子の結びつきを強め、ゴムを強化する。プラスチ  
4199 ックに照射すれば、プラスチック内の高分子の電気の結合が  
4200 強まり、強化プラスチックができる。

4201 工業に利用される電子ビームは、加速器を利用して電子を  
4202 加速し、電子線として利用される場合が多い。

4203 高電圧の加速器をもちいて、電気ので電子を加速すれ  
4204 ば、放射核の核力で加速された放射核のベータ線と同じ  
4205 くらいのエネルギーの電子線が得られる。

#### 4206 4207 7.3.4. 自然界の放射線と放射線防護

4208  
4209 自然界にはさまざまな放射性核が存在し、放射線を放出し  
4210 ている。もともと地球生成時には多種の放射核があったが、  
4211 その多くは年代がたつにつれて放射線を出して変換し、安定  
4212 な原子核になっている。

4213 現在は、地球の年齢の45億年と同程度かそれより長い放射  
4214 性核が天然に残存している。

4215 ウラニウム系列やトリウム系列の放射核は、日常生活の  
4216 どこにでもある放射性核である。

4217 自然界には、宇宙線が大気中や地上の原子核と衝突し、原  
4218 子核反応によって常時生成されている放射核がある。炭素14  
4219 核（陽子数6、中性子数8）は宇宙線と大気中の窒素との核反  
4220 応で生成されている。

4221 一方、セシウム137核のように核保有国の原水爆の実験の  
4222 際に生成され、地球上に拡散している放射性核もある。

4223 放射線の強度をベクレルで表す。毎秒1回の放射性変換の  
4224 強度を1ベクレルという。毎秒10回、すなわち毎時36000回  
4225 のベータ線を出す放射性核は、10ベクレルの放射能をもつ。

4226 10 ベクレルのセシウム137 からのベータ線（電子線）を  
4227 電流に直すと、1 兆分の 1 の更に百万分の 1 アンペアにな  
4228 る。放射線の全エネルギーは、1 兆分の 1 ワットだ。限りな  
4229 く 0 に近い。セシウム核の個数にすると、100 億個だが、グ  
4230 ラムにすると 10 兆分の 2 グラム程度になる。

4231  
4232 放射線エネルギー世界は、日常のエネルギーの 10 桁くらい  
4233 微弱な、極微小エネルギーの世界である。

4234 放射線が人体に与える影響をエネルギーの単位で表して、  
4235 1 k g 当たり 1 ジュール相当のエネルギーを与える放射線量  
4236 を 1 グレイといい、1 グレイと同じ影響を与える放射線量を  
4237 1 シーベルトという。その千分の 1 がミリシーベルトだ。日  
4238 本人は年間約 2.4 ミリシーベルトの放射線を受けている。

4239 放射性核のカリウムは殆どの野菜にあり、人体内にも 6000  
4240 ベクレルほどあり、毎時 2 百万個の放射線をあびている。年  
4241 間 0.2 ミリシーベルトだ。

4242 福島原発近くでは 20 ミリグレイないし 20 ミリシーベルト  
4243 におよぶ。ただし、危険な紫外線の年間 10 億ミリグレイ相当  
4244 や月の光の千万ミリグレイ相当のエネルギーと比べて、限り  
4245 なく 0 に近い（註 1）。

4246  
4247 註 1. 放射線に関する国連科学委員会は、2021. 3. 9 に福島原発  
4248 事故後の放射線被ばく線量は高くないと推定した。したが  
4249 って被曝を直接原因とする健康影響の増加は低いと予測し  
4250 た。ただし、不適切な避難による間接被害は続いている。

## 4251 4252 8 章 素粒子と宇宙のエネルギー

### 4253 4254 8.1. 素粒子のエネルギー

#### 4255 4256 8.1.1. 物質の基本となる素粒子

4257  
4258

4259 エネルギーの基本は、、どのような基本の素粒子が、どのよう  
4260 な基本の力で結びつき、どのような基本のエネルギーをもつ  
4261 て、どのような基本の運動をしているかである。

4262 20 世紀になり、原子核が発見され、素粒子が次々に発見され  
4263 た。またそれらを結び付ける基本の力を伝達する粒子が明らか  
4264 にされた。こうして 20 世紀末には、素粒子とその基本の力につ  
4265 いての標準理論が確立された。物質を構成する基本の素粒子は  
4266 クォークとレプトンで、それぞれ 3 世代ある。

4267 クォークの第 1 世代は u クォークと d クォークの対から、第  
4268 2 世代は c クォークと s クォークの対から、第 3 世代は t クォ  
4269 ークと b クォークの対からなる。

4270 第 1 世代の 2 つの u クォークと 1 つの d クォークが集まり電荷  
4271 が +1 の核子（陽子）となり、1 つの u クォークと 2 つの d ク  
4272 ォークで電荷が 0 の核子（中性子）となる。

4273 核子が集まって原子核になる。現存する原子核は第 1 世代の  
4274 クォークからなる核子で構成され、第 1 世代の原子核だ。

4275 第 2 世代の s クォークと第 1 世代の 2 つのクォークが集まっ  
4276 て第 2 世代のハイパー核子ができ、ハイパー核子と第 1 世代の  
4277 核子が集まって第 2 世代のハイパー原子核ができる。

4278 第 2 世代のハイパー核子やハイパー原子核は、エネルギーの  
4279 高い状態にあり、しばらくすると、粒子を放出してエネルギー  
4280 の低い状態の第 1 世代の核子や原子核に変わる。

4281  
4282 レプトン対は、第 1 世代の電子と電子ニュートリノ、第 2 世  
4283 代のミュー粒子とミューニュートリノ、第 3 世代のタウ粒子と  
4284 タウニュートリノである。電子、ミュー粒子、タウ粒子の電荷  
4285 は -1 で、各世代のニュートリノの電荷は 0 だ。

4286 第 2 世代のミュー粒子や第 3 世代のタウ粒子は、エネルギー  
4287 の高い状態のレプトンで、しばらくするとエネルギーを放出し  
4288 てエネルギーの低い状態のレプトンに変わる。

クオークもレプトンも粒子の世界の素粒子である。反粒子の世界があり、反粒子の電荷は正負が逆になる。第一世代の反クオークが3つ集まると反陽子や反中性子になる。

中間子は、クオークと反クオークに対からなる。+電荷のパイ中間子は、uクオークと反dクオークから成り、-電荷のパイ中間子は、反uクオークとdクオークからなる。

反電子は+電荷の電子で、陽電子という。ニュートリノは電荷が0なので、反ニュートリノも電荷が0で、ニュートリノと反ニュートリノは同じ粒子の可能性はある。

### 8.1.2. 基本の力を伝える素粒子

エネルギーの基になる基本の力は、重力、電気力、強い力(核力)、弱い力で、それぞれに力を伝える粒子がある。

素粒子の電荷Aの周りには、電荷Aに比例する電気場ができる。そこに別の電荷Bの粒子があると電気場と電荷Bに比例する電気のエネルギーが生まれる。

電気の力の場を量子化したのが光子で、質量が0なので身軽にどこまでも自由に飛んでいって電気の力を伝える。

弱い力は、放射性変換を起す力だ。力の強さは電気の力より千倍くらい弱いので、放射性変換はゆっくり行われる。

クオークやレプトンには弱荷があり、その周りに弱い力の場ができる。弱い力の場に別のクオークやレプトンがあるとエネルギーが生じる。弱い力の場を量子化したのが弱ボソンで、弱い力を伝える。

弱ボソンの質量は大変重く  $80G-90G$  ( $G=10^9$ ) 電子ボルトくらいで、1983年にCERNの陽子加速器で発見された。重いので自由に飛ぶことができず、弱荷を持った素粒子が至近距離に来た時にだけ、弱い力が伝えられ、弱い力が作用する。

クオークは3種ある。それを赤、緑、青の3色に例え、色を持っており色の力が作用するという。クオークに作用する力は、電気の力の100倍くらい強いので、強い力といわれる。

4322 色の力はグルオンが伝える。クオークの間の色の力が基にな  
4323 って、クオークの集まりの核子の間の核力が生まれる。核力  
4324 は、原子核内で核子が結びつけ、核反応を起こす。

4325 重力は電気の力よりも 36 桁くらい小さい力で、一方が地球の  
4326 ように極めて重い（質量が大きい）場合にあらわれる。地球の  
4327 周りには重力場ができ、質量あるものには重力が作用する。

4328 重力場を量子化したのが重力子で、質量は 0 なので遠くまで  
4329 重力を伝える。現在、重力子の探索がすすめられている。

4330  
4331 素粒子は、自発的対称性の破れによって質量をもつ。すなわ  
4332 ちヒッグス機構である。2012 年にヒッグス粒子が発見され、ヒ  
4333 ックス機構（註 2）が正しいことが実証された。

4334 尚、宇宙の何も無い真空は相転移により、対称性が敗れた  
4335 （一方的に偏った）状態にあり、それによって動きにくくな  
4336 り、質量が生ずるという考えは、南部博士が提案によるもので  
4337 （註 3）、ヒッグス機構の基になった。

4338  
4339 註 1. 電気の力と弱い力は、電弱統一理論で定式化できるこ  
4340 とが、1968 年に S. ワイバーグ、A. サラム、S. グラシヨウ  
4341 （1983 年ノーベル物理学賞）によって理論的に示され、1983  
4342 年に C. ルビア等（1984 年ノーベル物理学賞）によって弱ボ  
4343 ソンが発見され、電弱統一理論が実証された。

4344 註 2. F. アングレーと P. ヒッグス 2013 年ノーベル物理学賞。

4345 註 3. Y. 南部 2008 年ノーベル物理学賞。

### 4346 4347 8.1.3. ニュートリノの質量エネルギー

4348  
4349 20 世紀ばに実証されたニュートリノは、現在まで世界各地で  
4350 鋭意研究がすすめられたが、いまだにの正体や質量（エネルギ  
4351 ー）は未知である。

4352 ニュートリノは弱い力によるベータ線を放出する放射性変換  
4353 の際に現れる。ベータ線のエネルギーを精密に測定し、ニュー

4354 トリノの全エネルギーが、ニュートリノの質量エネルギーを含  
4355 んでいるかどうかを調べる実験が行われた。

4356 ロシアのとドイツの実験グループは三重水素のベータ変換に  
4357 伴って放出されるベータ線を測定し、ニュートリノの質量はあ  
4358 るとしても、質量エネルギーは2電子ボルト（電子の質量の10  
4359 万分の4）程度以下であることを示した。

4360 ドイツのカールスルーエ研究所で、三重水素のベータ線の精  
4361 密測定が進行中だ。電子の質量の千万分の5程度の微小質量  
4362 （エネルギー）の検証を目指す。

4363  
4364 二重ベータ崩壊の測定から、ニュートリノの質量を測定する  
4365 ことができる。一般の二重ベータ崩壊では一つの原子核内で二  
4366 重にベータ線と二つのニュートリノは放出される。

4367 ニュートリノに質量がある場合は、二つのニュートリノが出  
4368 会って消滅し、二つのベータ線だけが放出されることがある。  
4369 ニュートリノの出ない特異な二重ベータ崩壊である。

4370 特異な二重ベータ崩壊は、ニュートリノと反ニュートリノが  
4371 同じ粒子で、ニュートリノに質量がある場合に起こる。

4372 世界のいくつかの研究グループが独自の測定装置を開発し、  
4373 ニュートリノの出ない二重ベータ崩壊の研究に挑んだ。

4374 筆者のグループはエレガント分光器（Electron Gamma-ray  
4375 Neutrino Telescope）を開発し、ニュートリノの質量は1.5電  
4376 子ボルト（電子質量の百万分の3）以下であることを示した。

4377 最近の研究では、ニュートリノ質量エネルギーは0.2電子ボ  
4378 ルトより少なく、質量は電子の百万分の1より小さい。 $5 \times 10^{-19}$   
4379 ジュール以下である。最も小さい質量エネルギーだ。

4380 現在、世界の研究グループは、超高感度の測定装置を開発  
4381 し、質量エネルギーで0.05電子ボルト領域、電子の千万分の1  
4382 の超微量質量の測定に挑んでいる。

4383 一方、3世代のニュートリノは相互に混合しており、世代交  
4384 代を行うことが、神岡グループをはじめ、いくつかの研究グル  
4385 ープによって確立された（註1）。ニュートリノの各世代の相  
4386 互の混合はニュートリノに質量があることを示す。

4387  
4388 註 1. T. 梶田と A. マクドナルド ニュートリノ振動で  
4389 ノーベル物理学賞。

#### 4390 8. 1. 4. 新粒子と加速器のエネルギー 4391

4392  
4393 20 世紀はじめ、ラザフォードは自然界にあるエネルギーの高  
4394 い放射線を用いて、原子核を発見し、原子核反応を研究した。  
4395 その後、人工的に粒子を高エネルギー加速する加測器が開発さ  
4396 れ、素粒子・原子核の世界が拓かれて行った。

4397 コッククロフトとワルトン型の加速器やヴァンデグラフ型の  
4398 加速器では、高電圧で荷電粒子を加速する。サイクロトロンで  
4399 は高周波で繰り返し加速する。これらの加速器で加速された加  
4400 速ビームを用いて、原子核の研究が進められている。

4401 日本では、筆者が 1990 年代にセンター長を務めた核物理研究  
4402 センターでは、リング型のサイクロトロンを用い、軽イオンビ  
4403 ームによる活発な原子核研究が行われている。また、理研や欧  
4404 米では、重イオンビームによる研究が進行中だ。

4405 高エネルギーの素粒子の研究には、シンクロトロンを用い  
4406 る。加速によってエネルギーが高くなると質量が重くなること  
4407 を考慮し、磁場や周波数を調整しながら加速する。

4408  
4409 高エネルギー  $E$  の加速粒子  $A$  の全質量エネルギーは、運動エ  
4410 ネルギー  $E$  が大きい分、大変大きく（重く）なっている。した  
4411 がって入射粒子  $A$  は静止粒子  $B$  に衝突後も、 $B$  を突き飛ばして  
4412 そのまま運動を続け、エネルギー  $E$  を粒子  $B$  に入力できない。

4413 加速粒子  $A$  の高エネルギー  $E$  を、効率よく標的粒子  $B$  入力す  
4414 るには、粒子と反粒子を加速し、正面衝突させる。

4415 加速エネルギー  $E$  の粒子  $A$  と  $B$  が正面衝突すれば、2 倍のエネ  
4416 ルギー  $2E$  が有効に入力され、質量エネルギーの高い状態にあ  
4417 る新粒子が生成される。

4418 衝突型のシンクロトロン加測器を用いて、素粒子や原子核研  
4419 究が盛んにおこなわれ、いくつかの新粒子が発見された。

4420 アメリカのフェルミ研究所では、周長 6.3k メートルのテバ  
4421 トロン加速器で 1T (T=1 兆) 電子ボルトの陽子と反陽子の衝突  
4422 実験が行われ、質量エネルギー1720 億電子ボルトのトップクオ  
4423 ークが発見された。陽子の質量エネルギーの約 200 倍である。

4424 欧州の CERN では E=4500 億電子ボルト SPS の陽子と反陽子の  
4425 衝突型加測器によって弱ボソン W と Z が発見された。

4426 周長 27k メートルの電子と陽電子の衝突型加測器 LEP (註  
4427 1) によって新しい素粒子研究が活発に行われた。LEP は各々 7  
4428 兆電子ボルトの陽子と反陽子衝突型加速器 LHC に改良され、素  
4429 粒子物理の最前線で活躍中である。

4430 日本では KEK のトリスタンや B ファクトリーの衝突型電子・  
4431 陽電子加測器で、素粒子研究がおこなわれている。

4432  
4433 註 1. SPS : Super Proton Synchrotron. LEP: Large Electron  
4434 Positron Collider. LHC: Large Hadron Collider.

## 4435 4436 8.2. 宇宙のエネルギー

### 4437 4438 8.2.1. 宇宙のエネルギーと宇宙創成

4439  
4440 宇宙には、沢山の銀河団があり、各銀河団は数百から数千個  
4441 の銀河からなる。銀河には数十億から数千億の星がある。

4442 宇宙には、観測可能な星の数として、 $2.5 \times 10^{22}$  くらいの数の  
4443 太陽のような恒星があるすると、総質量は  $5 \times 10^{52}$ k グラムくら  
4444 い、質量エネルギーで  $5 \times 10^{69}$  ジュウルくらいである。

4445 私たちの銀河の質量は  $5 \times 10^{41}$ k グラムくらいで、質量エネル  
4446 ギーは  $5 \times 10^{58}$  ジュウル、宇宙の 10 兆分の 1 くらいだ。

4447 銀河の一恒星である太陽は、質量が  $2 \times 10^{30}$ k グラム、質量エ  
4448 ネルギーは  $2 \times 10^{47}$  ジュウル、銀河の 1 兆分の 4 くらいにな  
4449 る。太陽系の 1 惑星の地球は、質量が  $6 \times 10^{24}$ k グラム、質量エ  
4450 ネルギーが  $5 \times 10^{41}$  ジュウルで、太陽の 10 万分の 4 程度だ。

4451 太陽のような恒星も、地球のような惑星も、そのエネルギー  
4452 は主に静止質量エネルギーで、その 99.95%は原子核である。  
4453 宇宙の星のエネルギーの殆どは原子核エネルギーだ。

4454  
4455 現在の宇宙の生成は、135 億年前のビッグバンによる。高エ  
4456 ネルギー超微小球のビッグバンによって、宇宙が創成され、1  
4457 万分に1秒くらいたつと数兆度の超高温のクオークグルオン  
4458 プラズマ相ができた。物質の基本となる素粒子の誕生だ。

4459 超高温の宇宙は急速に膨張して冷却し、0.1 秒後には 100—  
4460 300 億度の高温の核子、電子、ニュートリノ相になった。

4461 ビッグバンから数秒後には、更に膨張してエネルギー密度  
4462 が下がり、温度が数億度くらいまで下がり、核子（陽子や中性  
4463 子）が集まって原子核相になる。

4464 宇宙創成から 10 万年後には、温度が 4000 度、エネルギーに  
4465 して 0.5 電子ボルトくらいになり、電子は電気ので原子核に  
4466 結びつき、物質の基になる原子ができた。

4467 原子は重力で引きあって集まり、密度の高い分子雲が形成さ  
4468 れる。密度の揺らぎができると、重力による収縮が起こり、温  
4469 度が上がり、輝く原始星が形成された。

4470 温度が 1000 万度ていどになると、水素核の核融合反応が起  
4471 き、燃えて輝く恒星になる。

4472  
4473 宇宙のビッグバンから 40 万年後には、宇宙は晴れ上がり、銀  
4474 河団、銀河、恒星が形成された。恒星内では核融合反応で、軽  
4475 い核が造られ、恒星が燃え尽きて超新星爆発を起こすと、種々  
4476 の重い原子核が形成された。

4477 太陽や地球は、46 億年ほど前に形成された。星間物質の軽い  
4478 原子核や超新星爆発の際にできた重い原子核からなる。

4479 宇宙には恒星のように輝いている物質の他に、見えない物質  
4480 やエネルギーが存在する。宇宙の全エネルギーの 95%は見えな  
4481 いエネルギーと見えない物質で、現在探索中だ。詳しくは 8.3  
4482 節で述べる。

## 8.2.2. 星のエネルギー。

宇宙には、太陽のような輝く恒星が、まさに星の数ほど輝いている。銀河系に限っても、2000 億くらいある。

恒星内では、太陽と同じ水素核が燃えて、膨大な核（原子力）エネルギーが、光のエネルギーとして放出されている。

星の光の総エネルギー（光量）はさまざまで、太陽の百万倍の恒星もあれば、太陽より少ない恒星もある。

高温の恒星から放出される光は黒体輻射である。輻射熱エネルギー  $L$  を輻射絶対等級  $M_B$  で表すと（註 1）

$$M_B = -2.5 \log(L) + 71.2$$

となる。エネルギー  $L$  が 2.5 倍減るごとに等級が 1 増える。

恒星の温度は 3 千度から 3 万度くらいで、太陽の 6000 度くらいより低温の星は赤く見え、高温の星は青く見える。

恒星の輻射エネルギーの量は絶対温度の 4 乗と表面積に比例する。同じ大きさでも、温度が 2 倍高い星は 16 倍明るく輝き、したがって等級が約 3 減る。

日常の星の等級は見かけの輝きの明るさ  $I$  をいう。見かけの明るさを視等級といい、 $m = -2.5 \log(I) + C$  で表す。最も明るい星は  $m = -1$  で 2 つあり、次の  $m = 0$  等星が 7 つ、1 等星は 12 あり、7 等星は 16000 個ほどある。

地球のすぐ近くにある太陽は、距離の 2 乗に逆比例して見かけは大変明るく見え、 $-27$  等星に相当する。

恒星には、さまざまな質量、直径、温度の恒星がある。それらに応じて、さまざまな輻射エネルギーと輻射等級の星がある、地球からの距離によって、さまざまな視等級の星がある。

身近な恒星の太陽は、輻射等級  $M_B = 4.8$ 、輻射エネルギー  $4 \times 10^{26}$  ワット、表面温度が 5800 度の恒星である。質量と質量エネルギーは 8.2.1 で述べた。

恒星 136a1 は輻射絶対等級が  $-12.5$  で、放出エネルギーが太陽の 9 百万倍ある。温度が 5 万度を超え太陽より 10 倍高く、質量が太陽の 300 倍で、超巨大な高温の恒星である。

4517 北極星は輻射エネルギーが太陽の 1300 倍ほどで輻射絶対等級  
4518 は-2.9、質量は太陽の 5 倍ほどある巨星だ。

4519 シリウス A は、温度は 1 万度、直径は太陽の 1.7 倍、質量は  
4520 太陽の 2 倍で、輻射エネルギーは太陽の 25 倍程度である。視等  
4521 級が-1.5 で最も明るい星である。

4522 さそり座の $\alpha$ 星は輻射エネルギー、直径、質量が、それぞれ太  
4523 陽の 8 万倍、700 倍、14 倍の巨星だ。温度は 3700 度くらいでか  
4524 なり低く、視等級が 1.1 の赤色に輝く明るい星である。

4525  
4526 註 1. 星のエネルギー強度を表す輻射等級は、視等級に準じて  
4527 10 倍減るごとに 2.5 級上がる。地震のエネルギーは 1000  
4528 倍減るごとにマグニチュードは 2 減る。いずれもエネル  
4529 ギーなので統一することが望まれる。

### 4530 4531 8.2.3. 宇宙エネルギー劇場のスター：超新星

4532  
4533 超新星は、宇宙のエネルギー劇場で演ずる、巨大なエネルギ  
4534 ー変換のショーだ。

4535 太陽の質量エネルギーくらいのエネルギーが、爆発によって  
4536 ニュートリノやその他のエネルギーに変わる。

4537 質量が太陽より 1 桁程度以上の重い恒星は、燃え尽きると爆  
4538 発して果て、四方に巨大な質量エネルギーを放出する。

4539 爆発による星の一生の終焉は、新しい星が誕生したかのよう  
4540 に輝き出すので、超新星といわれてきた。

4541 超新星 (Super-Nova SN) は、観測された年 (西暦) をつけ  
4542 て呼ばれ、SN185 以来いくつかの超新星の記録がある。

4543 恒星は原子核を燃料とした核融合反応によて、燃えている。  
4544 重い恒星では、水素核の融合から始まって、ヘリウム、炭素、  
4545 ケイ素 (質量数 28) と軽い原子核から順次に、エネルギーの低  
4546 い状態の原子核へと融合反応が進む。最後に鉄の原子核にな  
4547 る。鉄はいわばエネルギーの谷底にある。

4548 燃え尽きた恒星の内部は 1 万度くらいの高温の鉄で、その外  
4549 側にケイ素、炭素、ヘリウム、水素などの層がある。

4550 内側の鉄は外側の物質の重さを支えきれず、重力崩壊が始ま  
4551 る。そのエネルギーで内部は更に高温になり、輻射光エネルギー  
4552 で、鉄の原子核が分解され、重力崩壊が進む。

4553 超新星の爆発では、重力崩壊による衝撃波によって周辺の物  
4554 質は吹き飛ばされる。この過程で、核子（陽子と中性子）、軽  
4555 い原子核、電子、ニュートリノなどが相互に衝突し、核反応を  
4556 行い、種々の原子核が生成される。

4557  
4558 恒星の質量が太陽の 10 倍くらいの場合、全質量エネルギーは  
4559  $2 \times 10^{48}$  ジュウルの、その内の  $10^{46}$  ジュウルの程度がニュートリ  
4560 ノの運動エネルギーとなって放出され、 $10^{44}$  ジュウルの程度が物  
4561 質として放出される。

4562 超新星爆発の後には、中性の（電気の無い）核子がたくさん  
4563 集まって中性子星になる。太陽の 1.5 倍くらいの質量で、直径  
4564 10 km くらいで大変小さいが、密度は 7 億トン/cc で、  
4565 超高密度の星だ。原子核の 3 倍くらいの密度である。

4566 太陽の質量の 20 倍以上の超新星では、燃え尽きて超新星爆発  
4567 の後にブラックホールが残る。

4568 ケプラー新星 SN1604 は私たちが住む銀河で超新星としては最  
4569 も新しい。2 万光年の距離にありながら、金星に次ぐ明るさの  
4570 視等級が -3 で、1 年以上にわたって輝いた。

4571 最近の超新星 SN1987A は、視等級 2.9、距離 17 万光年の超新  
4572 星で、マゼラン星雲にある青色巨星の爆発による。質量エネル  
4573 ギー  $4 \times 10^{48}$  ジュウルの 2.5% に当たる  $10^{47}$  ジュウルのエネルギ  
4574 ーが、主として (99%) ニュートリノ運動エネルギーに変換され  
4575 た。1987 年 2 月に東大の神岡グループがニュートリノ観測に成  
4576 功、ニュートリノ天文学を拓いた（註 1）。

4577  
4578 註 1. M. 小柴 2002 年ノーベル物理学賞

4579  
4580 8.2.4. 宇宙線のエネルギー

4581

4582 宇宙からは、高いエネルギーをもったさまざまな粒子が一次  
4583 宇宙線として地球に飛来する（註1）。

4584 一次宇宙線は、大気の窒素や酸素の原子核と衝突し、原子核  
4585 反応によって、さまざまな粒子が発生する。その中のいくつか  
4586 の粒子は、二次宇宙線として地球に注ぐ。

4587 一次宇宙線の90%は水素核の陽子（電荷+1の核子）で、あ  
4588 との8%がヘリウム核のアルファ線である。。

4589 二次宇宙線にはさまざまな粒子が含まれる。陽子、中性子、  
4590 アルファ線、各種原子核、パイ中間子、ミュー粒子、ガンマ  
4591 線、電子線、ニュートリノ等々である。

4592 二次宇宙線の中で、核子、電子、ガンマ線などは、大気の前  
4593 子核や原子との衝突を繰り返し、エネルギーを失う。パイ中間  
4594 子は短寿命で直ぐにミュー粒子とニュートリノに変わる。

4595 ミュー粒子は、宇宙線の中から発見された（註2）。もとも  
4596 と寿命が長く、高速になると相対性理論の効果でさらに寿命が  
4597 伸び、崩壊せずに地表に到達する割合が多い。

4598 現在の最高エネルギーの宇宙線は $3 \times 10^{20}$ 電子ボルト程度  
4599 で、地上で加速される最高エネルギーの10兆電子ボルトより3  
4600 億倍くらい大きい。大気の原子核に衝突し、そこで生成された  
4601 粒子が次々に衝突を繰り返し、巨大な粒子線シャワーが観測れ  
4602 た。その超高エネルギーの起源は未知だ。

4603 宇宙線の中には、大量の太陽ニュートリノ、一次宇宙線に由  
4604 来する大気ニュートリノ、超新星からのニュートリノ等、さま  
4605 ざまなニュートリノがある。

4606 超高エネルギーのニュートリノが、南極のアイスキューブ検  
4607 出器で研究されている。ニュートリノが南極の氷と反応する  
4608 と、ミュウ粒子生成される。そのミュウ粒子が氷の層を通過す  
4609 る際に発するチェレンコフ光を観測する。

4610 2017年には、ブラックホールに起因する天体から、超高エネ  
4611 ルギーニュートリノが観測された。

4612 宇宙のからの大量のガンマ線が数十秒の間に降り注ぐガンマ  
4613 線バーストが観測されている。ガンマ線のエネルギーを総計す  
4614 ると超新星並みの超高エネルギーになる。

4615 2016年、宇宙のかなたからの重力波がアメリカのLIGO干渉  
4616 計で観測された。重力波は、アインシュタインが予言した。観  
4617 測されたの重力波は、巨大なブラックホールが合体した際の重  
4618 力場のゆがみによるものと考えられる（註3）。

4619  
4620 註1. S. ヘス 宇宙線は1912年に気球を使って観測で宇宙線  
4621 を発見、1936年ノーベル物理学賞

4622 註2. C. アンダーソンとS. ネダーマイヤー。アンダーソンは  
4623 1936年に陽電子の発見でノーベル物理学賞

4624 註3. R. ワイス、B. バリッシュ、K. トルネ、2017年ノーベ物  
4625 理学賞

## 4626 4627 8.3. 未知のエネルギーへ挑戦

### 4628 4629 8.3.1. 宇宙のダークエネルギー

4630  
4631 宇宙は未知のエネルギーや未知の物質で満ちている。見えな  
4632 い（暗い）ので、それぞれ、ダークエネルギー（暗黒エネルギ  
4633 ー）とダークマター（暗黒物質）という。

4634 最近のプランク衛星をつかって観測した背景輻射（CMB 註  
4635 1）のデータによると、宇宙全体のエネルギーの68.3%がダ  
4636 クエネルギーで、26.8%がダークマターだ。恒星のように輝い  
4637 て見える物質は4.9%である。

4638 我々が知っている物質（質量エネルギー）は、全体の5%に  
4639 過ぎず、殆どが未知のエネルギーや物質である。

4640 宇宙の背景輻射は、絶対温度2.7度、中心波長が2mmくらい  
4641 の黒体輻射だ。ビッグバンから40万年後に宇宙がはれ上がり、  
4642 更に宇宙膨張で温度が下がり、現在の背景輻射となった。

4643 背景輻射のわずかの非等方性から、宇宙初期の量子のゆらぎ  
4644 が解り、宇宙の初期のエネルギーや質量が解った。

4645 20世紀初め、アインシュタインは、宇宙は静止しているとい  
4646 う考えに基づいて、宇宙が重力で引きあって潰れてしまうこと  
4647 を防ぐために、引力と反対の符号の宇宙項を導入した。

4648 1929 年になり、ハッブルは宇宙が膨張していることを発見し  
4649 た。宇宙はビッグバンから膨張を続けている。

4650 宇宙内の物質が重力によって引き合って膨張が減速すること  
4651 が想定されるが、実際は膨張を続けている。

4652 20 世紀末の 1998 年、Ia 型の超新星の赤方偏移（註 2）か  
4653 ら、宇宙が加速膨張していることが解った。

4654 Ia 型の超新星は白色矮星の連星からの降下物で、質量がチャ  
4655 ンドラセカール限界に達して超新星爆発する。したがってエネ  
4656 ルギーや絶対光度が解り、測定した光度から、その距離が解  
4657 る。また赤方偏移から遠ざかる速さが解る。

4658 宇宙が加速膨張していることは、宇宙にはダークエネルギー  
4659 で満ちていることを意味する。膨張してもエネルギー密度は減  
4660 らず、負の圧力が働いて、膨張が加速される。

4661 ダークエネルギーは、我々が知る最も大きなエネルギーだ。  
4662 その起因の解明にむけて研究が進められている。

4663  
4664 註 1. CMB: Cosmic Microwave Background. 1964 年に A. ペンジャ  
4665 スと R. ウィルソンが発見、1978 年にノーベル物理学。エネ  
4666 ルギー分布は 2.7 度の黒体輻射で、中心波長は 2mm で  
4667 160GHz（ギガヘルツ）の電波。

4668 註 2. S. パールマッター、B. シュミット、A. リース。2011 年  
4669 ノーベル物理学賞。

### 4670 4671 8.3.2. ダークマター究明への挑戦

4672  
4673 宇宙の全エネルギーの 1/3 は宇宙に存在する物質の質量エネ  
4674 ルギーである。その 80% くらいは未知の見えない物質、いわゆ  
4675 るダークマター（暗黒物質）だ。

4676 宇宙には、恒星のように光っている物質の他にも、見えない  
4677 が質量のある物質があると考えられている。

4678 銀河の星間物質の水素原子からの輝線を分析した結果、星間  
4679 物質の回転速度が距離と共に変わらないことが解った。

4680 回転の速さは、遠心力と引力のバランスできまり、遠い物体  
4681 は引力が小さく、回転速度が遅くなる筈である。回転の速さが  
4682 遠くでも変わらないことは、遠くに行っても見えない物質が存  
4683 在し、引力が小さくならないことを意味する。

4684 星間に見えない物質があることは、重力レンズの効果で光が  
4685 曲がることや、宇宙の大規模構造から示唆されてる。

4686 最近の宇宙の背景輻射の研究から、宇宙のエネルギーの 27%  
4687 はダークマター（見えない物質）であることが解った。

4688 ダークマターの正体は、宇宙物理と素粒子物理の両面から探  
4689 究されている。宇宙物理の方からは、ブラックホール、白色矮  
4690 星、中性子星などが考えられるが、いずれも宇宙の 1/4 の質量  
4691 エネルギーに相当するほどの量はない。

4692 高速で飛び交う軽い素粒子として、ニュートリノが考えられ  
4693 た。20 世紀末の三重水素核や二重ベータ崩壊の測定の結果、ニ  
4694 ュートリノ質量は 2 電子ボルト以下で、ダークマターの候補と  
4695 しては質量が小さすぎる（8.1 節参照）。

4696 アクシオンは質量エネルギーが千分の 1 から百万分の 1 電子  
4697 ボルトていどの軽い粒子で、目下研究中だ。

4698 ダークマターの候補として、低速の重い素粒子の可能性があ  
4699 る。その一つはニュートラリーノという超対称性粒子だ。

4700 標準理論では、物質を構成するクォークや電子などのフェル  
4701 ミ粒子と力を伝える光子や弱ボソンのようなボーズ粒子があ  
4702 る。超対称理論では、フェルミ粒子に対して超対称のボーズ粒  
4703 子を、ボーズ粒子に対して超対称のフェルミ粒子を考える。

4704 ニュートラリーノは、ボーズ粒子に対する超対称のフェルミ粒  
4705 子である。電荷 0 で相互作用が弱く、現在の宇宙に存在する可  
4706 能性があり、ダークマターの有力候補と考えられる。

4707 ダークマターは、ニュートリノのように相互作用が大変弱  
4708 く、殆どの物体を素通りする。したがって、ダークマターを捉  
4709 えて測定することが大変難しい。更に、信号が微弱で、雑音と  
4710 の区別が至難である。

4711 現在、世界の多くのグループがダークマターの検出・測定に  
4712 取り組んでいる。検出には、ゲルマニウムの半導体検出器  
4713 や、キセノンのイオン・蛍光検出器などが使われている。

4714 ダークマターがゲルマニウムやキセノンの原子核に衝突  
4715 し、その反動で動く原子核のエネルギーを測定する。

### 4716 4717 8.3.3. 物質の質量は消滅するか

4718  
4719 現在の素粒子と力を基にする標準理論では、素粒子には、ク  
4720 オークとレプトンがある。uクオークとdクオークが3つ集ま  
4721 って核子（陽子と中性子）になる。レプトンには電子やニュー  
4722 トリノ（電気のない電子）がある。

4723 素粒子に作用する力には、電気の力、弱い力、強い力の3つ  
4724 のコホンの力がある。素粒子に力が作用すると変化する。

4725 中性子は弱い力の作用で陽子に変換したり、陽子は強い力の  
4726 作用でパイ中間子を吸収して中性子になる。これらの反応で、  
4727 中性子と陽子は相互に変換することがあっても、消滅したり、  
4728 新しく生成されることはない。

4729 。

4730 陽子や中性子は、消滅したりレプトン（電子やニュートリ  
4731 ノ）に変わることはなく、同じく、電子やニュートリノも  
4732 消滅したり陽子や中性子に変わることはない。

4733 陽子や中性子は不滅である。陽子と中性子からなる原子核  
4734 も、放射性変換で、別の原子核に変わることがあっても、消滅  
4735 することはない。したがって、原子核と電子からなる原子も不  
4736 滅で、原子からなる物質も消滅することはない。

4737 一方、大統一理論は、標準理論を超える理論で、現在の電磁  
4738 力、弱い力、強い力の3つの基本の力が高温（高エネルギー）  
4739 の世界では統一されると考える。クオークとレプトンの間には  
4740 橋があり、相互に行き来する。

4741 陽子（3クオーク）も永遠不滅ではなく、陽子内のクオーク  
4742 がレプトンにかわり、陽子が崩壊することが可能になる。  
4743 元々、陽子や物質はビッグバンでエネルギーから生まれた。

4744 大統一理論では、陽子は  $10^{32-35}$  年程度の寿命で電子や中性の  
4745 パイ中間子に崩壊すると考えられている。中性パイ中間子はす  
4746 ぐ光子に変わる。陽子や陽子内のクオークが消滅する。

4747 理論的に予想される陽子の寿命は、宇宙の年齢の  $1.3 \times 10^{10}$  年  
4748 より 1 兆の 1 兆倍も永い。寿命を測るには、 $10^{32-34}$  個くらいの  
4749 大量の陽子を集めて、その内の何個が崩壊するかを計る。

4750 現在まで、世界のいくつかの実験グループが大量の水チェレ  
4751 ンコフ検出器を用いて、水分子の中の水素核（陽子）や酸素核  
4752 内の陽子が崩壊するかどうかを調べた。

4753 観測の結果、陽子崩壊の信号は検出されず、陽子の寿命は  
4754  $10^{32}$  年の数倍より永いことが解った。

4755 スーパー神岡グループは、5 万トンの大型水チェレンコフ検  
4756 出器を用いて、12 年間にわたって観測し、陽子崩壊の信号がな  
4757 かったことから、陽子の寿命は  $10^{34}$  年より永いことを示した。

4758 ハイパー神岡計画は、さらに 10 倍の超大型の検出器を新設し  
4759 て、 $10^{35}$  年の領域で超長寿命の陽子崩壊の探索する。

#### 4760 4761 8.3.4. 大統一理論への挑戦

4762  
4763 宇宙は、138 億年前のビッグバンに始まり、超高密度・超高  
4764 温の状態から急膨張し冷却した。現在の宇宙は、エネルギー密  
4765 度の低い低温状態にあり、膨張を続けている。

4766 素粒子やその集まりの物体は、電気の力、弱い力、強い力、  
4767 重力の 4 つの力によって変換したり動いたりしている。それぞ  
4768 れに力を伝えるボソンがある。

4769 弱い力を伝える弱ボソンの質量は 1000 億電子ボルト程度で、  
4770 大変重く身動きが鈍い。したがって至近距離でしか力をおよば  
4771 ず、力が大変弱い。

4772 質量が重いのは、偶発的に対称性が破れ自由に身動きができ  
4773 なく（質量が重く）なったからであると考えられる。

4774 宇宙創成からまもなくの百億分の 1 秒くらいのころは、数千  
4775 兆度くらいの超高温状態で、エネルギーは数千億電子ボルトよ  
4776 り高く、弱ボソンの質量エネルギーを超える。

4777 弱ボソンは、その質量を超える超高温の宇宙では、自由に動  
4778 けるようになり、質量はなくなり、電気の力と同じようにな  
4779 り、電弱の力として統一されると考えられる。

4780 更に時間をさかのぼって、宇宙創成からすぐの  $10^{-36}$  秒後の頃  
4781 は、温度は  $10^{20}$  度 (1 兆度の 1 億倍) くらいで、エネルギーは  
4782  $10^{24}$  電子ボルト (1 兆の 1 兆倍) くらいの超々高温・高密度の状態  
4783 だ。そこでは、電気の力、弱の力、強い力の力が同じになる大  
4784 統一理論の世界が実現すると考えられる。

4785 宇宙創成の瞬間は、プランクエネルギーの  $10^{28}$  (100 兆の 100  
4786 兆倍) 電子ボルトくらいの超々々高エネルギーの世界でであ  
4787 る。この時期は、重力を含めて 4 つの基本の力が統一された世  
4788 界になっていることが考えられる。

4789 現在、素粒子に作用する 3 つの基本の力を統一する大統一理  
4790 論、さらに重力まで統一して考える大統一理論などの新しい理  
4791 論が研究中でだ。

4792 超対称性理論、超紐理論、多次元理論等々、標準理論を超える  
4793 新たな理論の構築が試みられている。

4794 一方、実験の面では、陽子崩壊による大統一理論の検証、ダ  
4795 ークマター探索、超高エネルギー加測器による超対称粒子探  
4796 索、二重ベータ崩壊によるニュートリノの正体と質量の検証  
4797 等々、新たな素粒子像の探索が進行中である。

4798  
4799 20 世紀の初めに、原子核の発見で素粒子核物理が始まり、1  
4800 世紀を経てヒッグス粒子の発見で標準理論が完結した。

4801 21 世紀、標準理論を超える宇宙素粒子像とその基礎となる新  
4802 しいエネルギー像の新展開を期待したい。

## 4803 4804 第 9 章 さまざまなエネルギーの単位と比較

### 4805 4806 9.1. エネルギーの単位と換算

4807  
4808 エネルギーは、科学的に定義できる「概念」で、一つの科学的  
4809 な「量」であるので、統一した表現や単位で表すことができる。

4810 一方、エネルギーは、宇宙創成以来、超ミクロの素粒子から広  
4811 大な宇宙に至るあらゆるものに時空を超えて存在し、さまざまな  
4812 科学、技術、産業、等々のあらゆる分野にあらわれる。したがっ  
4813 て、それに応じてさまざまなエネルギーの表現があり、種々の単  
4814 位が用いられている。

4815  
4816 エネルギーEの量の単位として、力Fを長さL作用して仕事  
4817 (エネルギー入力)をした場合のエネルギーは

$$4818 \quad E \text{ (ジュール)} = F \text{ (ニュートン)} \times L \text{ (メートル)}。$$

4819 Fは重力(万有引力)、電気力(磁力、弓力、人力、他)核力  
4820 (原子力)、弱い力(放射線を出す力)のいずれでも共通であ  
4821 る。

4822 力は $F = \text{運動量の時間(秒)当たりの変化} \sim \text{質量} \times \text{加速度}$ で表  
4823 される。質量はk(キロ)グラム、加速度は時間(秒)当たりの  
4824 速さ(距離(m)/秒)の変化。尚、質量をグラム、長さをcmで  
4825 表すと、エネルギーはエルグになる。

$$4826 \quad 1 \text{ ジュール} = 10^7 \text{ エルグ}$$

4827 となる。 $10^7$ は1の次に0が7つつく数で、1千万だ。 $10^6$ は百  
4828 万、 $10^8$ は1億、 $10^{12}$ は1兆になる。

4829 熱エネルギーや食品栄養エネルギーの場合、カロリーが用いら  
4830 れている。1カロリーは1リットルの水を1度(C)挙げるのに  
4831 必要なエネルギー入力。

$$4832 \quad 1 \text{ カロリー} = 4.185 \text{ ジュール}$$

4833 尚、食品については大カロリー(キロカロリー)が慣用されて  
4834 いる。脂肪1グラムあたり9カロリーは約4.2キロジュールだ。

4835  
4836 全ての物体は、質量があり、静止質量エネルギーがある。質量  
4837 MとそのエネルギーEの換算は光速cを用いてアインシュタイン  
4838 の関係式 $E = Mc^2$ で与えられる。

$$4839 \quad 1 \text{ kg (キログラム)} = 9 \times 10^{16} \text{ J (ジュール)}$$

4840 1グラム当たり約100兆ジュールだ。

4841 素粒子や原子核のようなミクロの世界では、電子の電荷eの粒  
4842 子を1ボルトで加速した場合のエネルギーを単位に使う。1電子  
4843 ボルト(eV)のエネルギーは、

$$4844 \quad 1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} = 1.78 \times 10^{-36} \text{ kg}。$$

4845 ここで  $10^{-19}$  は小数点以下 19 位の数である。  $10^{-1}$  は 0.1、  $10^{-6}$   
4846 は 0.000001, すなわち百万分の 1。  $10^{-12}$  は 1 兆分の 1 だ。

4847

## 4848 9.2. 素粒子と原子核の質量エネルギー

4849

4850 物体は基本の要素である素粒子からなる。素粒子には、軽い素  
4851 粒子として電子とニュートリノ（電気がない電子）がある。

4852 原子は、中心の原子核とその周りをまわる電子からなる。原子  
4853 核は核子（陽子と中性子）から成り、核子は 3 つのクォーク（素  
4854 粒子）からなる。

4855 軽い素粒子と核子と原子核(核子数)の電荷  $Q$ 、質量数  $A$ 、静止  
4856 質量エネルギー  $E$  を次に示す。電荷は電子の電荷を 1 とする単位  
4857 で、質量数は核子の数である。

4858

4859	ニュートリノ	$Q=0$	$E < 0.2 \text{ eV}$	$< 3 \times 10^{-20} \text{ J}$
4860	電子	$Q=-1$	$E=5.1 \times 10^5 \text{ eV}$	$8.2 \times 10^{-14} \text{ J}$
4861				
4862	陽子	$Q=+1$	$E=9.38 \times 10^8 \text{ eV}$	$1.5 \times 10^{-10} \text{ J}$
4863	中性子	$Q=0$	$E=9.40 \times 10^8 \text{ eV}$	$1.5 \times 10^{-10} \text{ J}$
4864	炭素 (12)	$Q=6$	$E=1.1 \times 10^{10} \text{ eV}$	$1.8 \times 10^{-9} \text{ J}$
4865	鉄(56)	$Q=26$	$E=5.2 \times 10^{10} \text{ eV}$	$8.3 \times 10^{-9} \text{ J}$
4866	U(235)	$Q=92$	$E=2.2 \times 10^{11} \text{ eV}$	$3.5 \times 10^{-8} \text{ J}$

4867

4868 尚、原子内に束縛されている電子は、自由な電子よりも若干軽  
4869 く（質量エネルギーが少なく）、原子核内の陽子や中性子も、単  
4870 独で存在する場合より数%軽い。

4871 炭素(12)と鉄(56)は炭素と鉄の原子核の主成分。U(235)は、原  
4872 子力発電に使われているウラニウム原子核で、ウラニウム  
4873 原子核の主成分はウラニウム (238) だ。

4874 1 モルの水素、炭素、鉄、ウラニウムの原子は、それぞれ 1  
4875 グラム、12 グラム、56 グラム、238 グラムで、アボガドロ数の  $6$   
4876  $\times 10^{23}$  個の原子ないし分子からなる。したがって、上記の原子核  
4877 の質量エネルギーの  $6 \times 10^{23}$  倍が、それぞれの 1 モルの静止質量  
4878 エネルギーになる。水素分子の場合はその 2 倍になる。

4879

4880 エネルギーの基本の電気・磁気力、原子核力、および放射  
 4881 線を出す「弱い力」を伝える力の粒子は光子、中間子、弱ボソン  
 4882 だ。それらの電荷  $Q$  と静止質量エネルギー  $E$  は、

4883

4884	光子	$Q=0$	$E=0$ eV	$0$ J
4885	パイ中間子	$Q=+1, 0, -1$	$E=1.4 \times 10^5$ eV	$2.2 \times 10^{-11}$ J
4886	弱ボソン	$Q=+1, 0, -1$	$E=8-9 \times 10^{10}$ eV	$1.4 \times 10^{-8}$ J

4887

4888

### 4889 9.3. 光と電波のエネルギー

4890

4891 光や電波は電磁波で、その量子は光子である。光子は、質量=  
 4892 0の粒子で、質量エネルギーはなく、そのエネルギーは全て運動  
 4893 エネルギーである。

4894 光は、光子として粒子の性質としての運動エネルギーと、電磁  
 4895 波の波の性質として波長  $\lambda$  と振動数  $\nu$  がある。

4896 物質中では光子は物質内の電子と相互に反応しながら進むの  
 4897 で、速さは遅くなる。

4898 日常の光や電磁波宇宙マイクロ波背景放射 (CMBR) の例を記  
 4899 す。ガンマ線は、日常の食品や体内に常在する放射線の例で、\*  
 4900 は宇宙からのガンマ線の例。

4901

4902	スマホ電波	$\lambda=1.5 \times 10^{-1}$ m	$\nu=2 \times 10^9$ /s	$E=8 \times 10^{-6}$ eV
4903	地デジ電波	$\lambda=6 \times 10^{-1}$ m	$\nu=5 \times 10^8$ /s	$E=2 \times 10^{-6}$ eV
4904	宇宙 CMBR	$\lambda=1.5 \times 10^{-3}$ m	$\nu=2 \times 10^{11}$ /s	$E=8 \times 10^{-4}$ eV
4905	赤外線	$\lambda=1 \times 10^{-5}$ m	$\nu=3 \times 10^{13}$ /s	$E=1.3 \times 10^{-1}$ eV
4906	可視光 (赤)	$\lambda=8 \times 10^{-7}$ m	$\nu=4 \times 10^{14}$ /s	$E=1.6$ eV
4907	可視光 (紫)	$\lambda=4 \times 10^{-7}$ m	$\nu=8 \times 10^{14}$ /s	$E=3.2$ eV
4908	紫外線	$\lambda=2 \times 10^{-7}$ m	$\nu=1.6 \times 10^{15}$ /s	$E=6.5$ eV
4909	X線	$\lambda=1.6 \times 10^{-10}$ m	$\nu=1.9 \times 10^{18}$ /s	$E=8$ keV
4910	X線(高)	$\lambda=1.6 \times 10^{-11}$ m	$\nu=1.9 \times 10^{19}$ /s	$E=80$ keV
4911	ガンマ線	$\lambda=1.3 \times 10^{-12}$ m	$\nu=2.3 \times 10^{20}$ /s	$E=1$ MeV
4912	ガンマ線*	$\lambda=1.3 \times 10^{-15}$ m	$\nu=2.3 \times 10^{23}$ /s	$E=1$ GeV

4913

4914 これらは光や電波の1光子のエネルギーであるが、光や電波の  
4915 総エネルギーは、光子のエネルギーと光子の量の積になる。日常  
4916 の総エネルギー強度  $T$  ( $1\text{ m}^2$ と1秒当たりのエネルギー量)を示  
4917 す。ワット  $W$ はエネルギー強度 ( $1\text{ W}=\text{毎秒}1\text{ ジュール}$ )。

4918

4919	晴れた日の太陽の光	$T=1 \times 10^3\text{ W/m}^2$
4920	満月の光	$T=2.8 \times 10^{-3}\text{ W/m}^2$
4921	6WのLEDの部屋	$T=1 \times 10^{-1}\text{ W/m}^2$
4922	福島帰宅困難地域 セシウム光	$T=1 \times 10^{-9}\text{ W/m}^2$

4923

4924 放射線のエネルギーの強度は満月の光の100万分の1程度で、  
4925 極めて少ないので、エネルギーとしては無視できる(註1)。

4926 太陽光の基は超巨大な水素核(原子力)エネルギーだが、100  
4927 億年という長い時間にわたって太陽系という広い空間の放射され  
4928 るので、 $1\text{ m}^2$ 当たりのエネルギー強度は強くないが、日焼けと  
4929 熱中症に要注意。

4930 尚、太陽光のエネルギーの強さは、福島のセシウム放射線の  
4931 光の1兆倍だが帰宅可。LED光は福島の放射線の光の1億倍強い  
4932 が、夜間の仕事は可(註1)。

4933

4934 **註1.** 原発事故はあってはならない。同じく、科学無視の規制  
4935 による化石燃料へシフトはあってはならない。放射能の数  
4936 十億倍の熱エネルギーによる異常気象・常高温で、世界  
4937 中に犠牲者が絶えない。世界人々の安全のために、原子力  
4938 と化石燃料の適正な規制と活用が大事だ。

4939

4940

4941

#### 4942 9.4. エネルギーの活用率

4943

4944 物体の内部には質量エネルギーとして巨大なエネルギーが  
4945 ある。 $1\text{ kg}$ 当たり  $9 \times 10^{16}\text{ J}$ で、日本の年間消費電力は、1兆kwh  
4946 (キロワット時)、すなわち  $3.6 \times 10^{18}\text{ J}$ なので40kgの静止質量  
4947 エネルギーに相当する。

4948 実際には、その 20 億倍 くらいの重量の化石燃料等を消費し、  
4949 その質量エネルギーのほんの 1 部（100 億分の 5）を活用し、殆  
4950 どを二酸化炭素にして地球に廃棄している。排気ガス処理の研究  
4951 開発中だが、見通しは立っていない。

4952 単位質量 kg 当たりの活用エネルギー E、静止質量エネルギーに  
4953 対する活用率を下記に示す。

4954

4955	糖分（炭素）	電気	$E=1.6 \times 10^7 \text{ J}$	活用率= $2 \times 10^{-10}$
4956	石油（炭素）	電気	$E=4.4 \times 10^7 \text{ J}$	活用率= $5 \times 10^{-10}$
4957	ウラニウム核分裂	核	$E=7 \times 10^{13} \text{ J}$	活用率= $8 \times 10^{-4}$
4958	重水素核融合	核	$E=8 \times 10^{13} \text{ J}$	活用率= $9 \times 10^{-4}$
4959	水力（落下運動）	重力	$E=4.9 \times 10^3 \text{ J}$	活用率= $5 \times 10^{-14}$
4960	風力（空気運動）	重力	$E=5.0 \times 10^1 \text{ J}$	活用率= $5 \times 10^{-16}$

4961

4962 糖分、石油などはその主成分の炭素原子の周りの電子の電気エ  
4963 ネルギーを利用する。活用率は 100 億分の 2-5 程度だ。

4964 ウラニウムや重水素の場合、それぞれの原子核内の核（原子  
4965 力）エネルギーを利用する。活用率は千分の 1 程度で、炭素原子  
4966 に比べて、6 桁（100 万倍）大きい。

4967 水力も風力も元は太陽光（核融合エネルギー）によって雨が降  
4968 り、風が起きて、エネルギー源となる。運動エネルギーを利用す  
4969 るので、活用率は炭素の電気エネルギーの場合に比べて 4-6 桁  
4970 小さい。

4971 これらのエネルギーは、多くの場合に発電に利用され、電気エ  
4972 ネルギーとして活用されている。発電の際の効率や送電のロス  
4973 を含めると、実際の活用率は更に 1/3 くらい減る。

4974

4975

## 4976 9. 5. 天地異変と人為異変のエネルギー

4977

4978 地球誕生以来 45 億年、地球はその中に大きな熱源を擁し、太  
4979 陽からは日々大量の熱エネルギーの供給を受けている。そのエネ  
4980 ルギーのわずかなゆらぎは大きな天地異変をもたらす。

4981 プレートエネルギー異変による地震・津波と地球内熱エネルギー  
4982 異変による火山噴火がある。国内外の大地震と大噴火の例を示  
4983 す。Mは地震のマグニチュード、エネルギーEはジュールJ。

4984

4985	チリ地震	1960年	M=9.5	E=2×10 <sup>19</sup> J
4986	スマトラ沖地震	2004年	M=9.1	E=1×10 <sup>19</sup> J
4987	阪神淡路大震災	1995年	M=7.3	E=3×10 <sup>8</sup> J
4988	東日本大震災	2011年	M=9	E=2×10 <sup>18</sup> J

4989

4990	イエローストーン	220万年前	VEI=8	E=2×10 <sup>21</sup> J
4991	セントヘレンズ	1980	VEI=5	E=3×10 <sup>18</sup> J
4992	阿蘇	9万年前	VEI=7	E=3×10 <sup>20</sup> J
4993	雲仙	1990-1995	VEI=4	E=5×10 <sup>17</sup> J

4994

4995 地球のエネルギーの収支は太陽光によるエネルギー入力と、地  
4996 球からのエネルギー放出のバランスの基に成り立つ。

4997 人間や動植物によるエネルギー消費は、太陽光のエネルギー入  
4998 力に比べて、極めて微小で、無視できる。

4999 最近、地球のエネルギーの収支に異常が起きている。二酸化炭  
5000 素ガスの異常増大により、地球からの放熱が減り、エネルギーの  
5001 バランスが入超、すなわち地球温暖化だ。

5002 エネルギーの入超により、種々の異変が起きている。この異変  
5003 は、炭素エネルギー使用による二酸化炭素の過剰放出によるもの  
5004 で、天災というより人災である。人為異変だ。

5005

5006	海水温上昇	0.005度/年	E=5×10 <sup>21</sup> J/年
5007	カルフォニア山火事	2020	E=1×10 <sup>19</sup> J
5008	豪雨と大雨	1976年	E=2×10 <sup>20</sup> J

5009

5010 戦禍や原水爆の実験では、大きなエネルギーが「短時間」に顕  
5011 れる。その最たるものは一般人民が受ける「極めて密度の大き  
5012 い」爆撃によるエネルギー集中だ。

5013

5014	ビキニ水爆実験	1954年	E=1×10 <sup>17</sup> J
5015	広島と長崎への原爆投下	1945年	E=1.5×10 <sup>14</sup> J

5016 東京大空襲 1945 年  $E = 7 \times 10^{16} \text{ J}$

5017 福島原発事故 2011 年  $E = 2 \times 10^{12} \text{ J}$

5018

5019 広島原爆のエネルギーの総量は、東京大空襲の 27 万戸の建物  
5020 の木材エネルギーの千分の 1 程度だが、一瞬で放出されたので、  
5021 同程度の痛ましい犠牲者が出た。

5022 福島原発事故（2011）では、原爆の百分の 1 程度のセシウム  
5023 の放射能エネルギーが放出されるが、50 年にわたって放出される  
5024 ので、エネルギー強度は超微小で、放射線による犠牲のエビデン  
5025 スはない。但し、不適切な避難で多数の犠牲（9.3 節参照）。

5026

5027

5028

5029

5030

5031

5032

5033

5034

5035

5036

5037

5038

5039

5040

5041

5042

5043

5044

5045

5046

5047

5048

5049

5050

5051

5052

5053

5054

5055

5056

5057

5058

5059

5060

5061

5062

5063

5064

5065

5066

5067

5068

5069

5070

5071

5072

5073

5074

5075

5076

5077

5078

5079

5080

5081

5082

5083

5084

5085

5086

5087

5088

5089

5090

5091

5092

5093

5094

5095

5096

5097

5098

5099

5100

5101

5102

5103

5104

5105