

2018 年度前期 科目名 原子力・放射能基礎論 (関連講座 VT465b)

第 1 回講義: 「物理と化学 (1)」

講師: 化学工学会 SCE・Net 郷 茂夫

<講義の目標>

原子力と放射能(放射線)を正確に理解するには、それに関連する物理と化学の勉強から入るのが有効である。この講義は、「物理と化学 その 1」で、かつて高校や大学初年の頃に学んだ物理と化学の単なる復習ではなく、原子力と放射線との係わりにおいて、その物理・化学的な考え方や実際データを身につけることを目標とする。原子力や放射線は「怖い」という受け取り方は自然と思うが、どういう事情で「怖い」ものなのかを理解するための基礎知識を提供することを目的とする。

<講義概要>

1. よく使う物理, 化学の単位と定数

原子、原子核や放射線を扱う分野では、10 の 20 乗とか 30 乗などという超巨桁な数をよく使うが、超々微視的世界を覗くわけだから、数字が大きくなっても仕方ないことではある。そういう巨桁数字に慣れることが望ましい。ここでは、物理や化学でよく使う単位と定数を復習する。

2. 原子模型 (イメージ)

小学生の頃からしばしば目にしていると思うが、1 個の原子の中の構造をイメージ的に正しく理解する。原子核、その中の陽子、中性子の組み合わせ (数の比率)、外側の電子の殻構造、それらのエネルギーレベルの差を知る。また、原子や核子の大きさや質量、およびそれを知る方法、さらに、原子記号の表示との関連を学ぶ。

3. 化学周期表

中高校生の頃に、この世のものはすべて 100 種類程度の元素から成り立っていると習ったと思うが、それを表す化学周期表にはどういう意味があるかについて復習する。今でも、新しい元素の発見が報告されるが、ということなのだろうか。また、人体と地球の元素構成はどうなっているのだろうか？両者は無関係ではない。我々はいつも空気、水、無機物、有機物を取り入れているのだから。

4. 元素・核種・同位体

周期表で 100 程度の「元素」の種類を見たが、実際の「原子」の種類 (「核種」という) は、2000 種類以上も知られている。そして、その内約 270 種類だけが安定原子であり、それらは地球上に存在しており、それ以外は不安定原子なのである。ただ、不安定原子もかなりの数が地球に存在している。陽子と中性子の組み合わせで表現したものが「核種表」であり、核種表の見方をしっかり理解することが本講義の最重要テーマである。また、同位体(アイソトープ)の定義を学ぶが、核種表により理解は容易となろう。

5. 放射線の基礎の基礎

上記の不安定原子は、原子核内部のエネルギーが不必要に高いので、何かアクションを起こして「安定」なものに変わろうとするが、それは自然の原理である。そのアクションが、高エネルギーの放射線を外部に放出して、自身は安定になることである。その放射線には、いくつか種類がある。アルファ線 (粒子)、

ベータ線（電子）、ガンマ（線電磁波）、エックス線（電磁波）などである。放射線の詳細解説は講義 2 で行うが、ここでは何故に放射線が出るのか、出どころ、主な種類を知る。

6. 不安定核種の原子核壊変（崩壊現象）と放射線の放出

不安定原子は放射線を放出して核子、電子やエネルギーを失い、別の原子に変わったり、同じ原子でも安定状態に移行する。それを「壊変又は崩壊」という。この壊変の様子を表した壊変図を理解する。また、壊変の物理法則としての半減期則と壊変方式（核種表で学んだこと）、さらに壊変による発熱の程度を知る（福島原発の炉心溶融とはこのことである）。

7. 天然に存在する放射性同位体

天然放射線の身体被ばく量は、講義 2 で学ぶが、この地球上には大昔から放射性物質が存在しており、地下、地上構造物や空から放射線が飛んでくる。そのような天然の放射性物質にはどんなものがあるかを学ぶ。1 つの例として、地球の地下深くのマグマなどの内部高熱を維持している主たる要因は、放射性物質のウランやカリウムが地下に存在しているからであることも解説する。

8. 強い放射線とは一体何か

放射線の健康影響には誰もが関心を持つ。健康に悪影響が大きいものを「強い放射線」とすると、それを決める因子にはどのようなものがあるだろうか。放射線の詳しい性質は講義 2 で学ぶが、強い放射線の因子を定性的に把握しておく、放射線の実態もスムーズに理解できると思われる。ざっと挙げれば、時間当たり本数、線種、エネルギー、物理半減期、透過力（飛程）、体内半減期、内部、外部などの組み合わせで強さが決まるのである。

9. 放射線による水分子分解、活性化－極初期段階の化学反応

放射線の健康影響については、後続の講義で詳しく扱うが、身体の 7 割は水でできているので、放射線はまず水とぶつかり反応し、水を活性化する。その反応は瞬時に起こる化学反応である。その結果の反応生成物が、ある確率で、後々身体の DNA や染色体に影響を及ぼす。その極初期の水との反応過程を解説する。

10. 放射線の利用

放射線は、あなたの周囲でも、広く利用されている。医療（がん治療、各種診断、遺伝子解析など）、農林水産（害虫駆除、品種改良）、工業（計測、透視検査など）、食品業（滅菌など）、環境（分析用）、研究者向け、その他日常生活における利用例を、具体的事例を引いて解説する。なお、放射線をどのようにして製造、生成するのか、どこから持ってくるのかは、講義 3（物理と化学その 2）で行う。

11. 放射線の利用量＝供給量として

国内における放射線の利用量はどの程度のものかを解説する。放射線の利用量を放射性物質の重さで測ることは難しい。同じ 1 kg の放射性物質でも、発する放射線の強さは千差万別であるからである。利用量は放射性物質の供給時の「ベクレル＝1 秒間あたりに発する放射線の本数」で表すのが妥当であり、放射線の使用量統計もそれによる。利用分野ごとの特定線源とそのベクレル数を知る。最も多いのは、ガンマ線照射（器具滅菌、農林向け）に用いるコバルト 60 である。

以上」

科目名 原子力・放射能基礎論
講義 No.2「放射線と防護」(2018. 6. 2)

講師： 青山 敬

＜講義の目標＞

放射線は単位の理解が難しい。

ミリシーベルト (mSv)、ギガベクレル (GBq)、ナノグレイ (nGy) とは？

法令で一般公衆の線量限度が年間 1 mSv に基準として設定されている。仮にその 2 倍の 2 mSv はどんなレベルになり、実際に測定ができるのか？

放射線は測定された結果の単位の意味を十分理解されないと、わからないと心配になる。情報伝達によって数値が一人歩きして“基準を超えると危険”と誤解もされる。

今回の講義は、年間 1 mSv は意味やその数値の大きさについて正しく理解してもらうことが目標である。ギガベクレル (GBq)、ナノグレイ (nGy) も意味を考える。

また、講義 No.10 では放射線測定器を用いた実習を交えながら、線量 1mSv を実感して頂くことが目標とする。

＜講義概要＞

自然環境中には宇宙線や天然由来の放射線が存在している。自然放射線からの年間線量は 2 mSv である。

一方、原子力施設からの影響は、国際基準 (ICRP) 及び法令によって一般公衆に対する線量限度は年間 1 mSv と定められている。

福島原子力発電所事故対応で環境省は事故由来分を“追加被ばく線量年間 1 mSv”と表現し、土壌除染の目標にもされている。

原子力施設を安全に管理する上で、放射線防護のための放射線測定は重要な役割を占める。放射線測定装置は、その目的に応じて、様々なタイプのものが開発されている。本講義においては、放射線の種類 (法令上の定義との違いを含む)、放射線と物質との相互作用、被ばく線量 (自然由来や原子力施設からの由来)、宇宙線、天然放射線 (温泉を含む)、航空機被ばくについて考える。また、最近の話題として除染作業の汚染測定、汚染水測定とトリチウムの問題についても簡単にふれる。

1) 放射線の基礎知識

放射線を計測する、という観点から、改めて、「放射能」と「放射線」の違い、放射線の単位、アルファ線、ベータ線、ガンマ線、中性子などの放射線の種類、空気・水・コンクリート等の材質中のそれぞれの透過力や物質との相互作用について解説する。

2) 放射線測定器の種類

放射線と物質の相互作用を測定原理に利用することになるが、さらに、測定の目的によっても計測方法が異なる。①原子力関連施設向けモニタの設置例、②医療関連施設向けモニタの設置例、③空間線量の測定、④排気・空気中や排水中の放射性物質の測定、⑤人・物の表面汚染測定、

⑥人の外部被ばく線量を測定する個人線量計⑦サーベイメータ類等の測定の目的に応じて用いられる測定器を紹介する。

3) 放射線の検出原理

測定された数値を理解する上で、基本的な放射線の検出原理を理解しておくことは意義がある。それは、気体の電離作用を利用するもの、固体の電離作用を利用するもの、蛍光作用を利用するものに大別される。さらに代表的なものとして、①電離箱式検出器の構造、②GM計数管の構造、③半導体検出器の構造、④シンチレーション検出器の構造を用い、放射線がどのようにして電気的な信号に変換され、線量 (mSv) や放射能 (Bq) を測定するのか解説する。

<主な内容>

放射線の用語と単位、放射線のものさし?、自然界からの被ばく線量 mSv/y、霧箱による放射線の観察-国立科学博物館- 11. 線量限度、一般公衆に対する線量限度 (年間 1 mSv) の根拠について考える。アルファ線、ベータ線、ガンマ線の放射線の種類毎に測定する測定器の原理を学ぶ。例として、 γ 線はシンチレーションサーベイメータを用い、放射性線源の核種は、放射性同位元素 ^{137}Cs (セシウム 137) を用いる。

2. 線量を表す用語いろいろ

物理的な量

- 放射能: Bq ベクレル
- 照射線量: C(クーロン≡A・s)/kg
- 吸収線量 D: 1Gy(グレイ)=1J/kg

直接は測れない

防護のための量

- 等価線量: H_T : 本来は J/kg → Sv(シーベルト) 放射線荷重係数 w_R 使用
- 実効線量: E : 単位 Sv, 組織荷重係数 w_T 使用
- その他、預託線量
- 線量当量: H : Sv, 吸収線量 D と線質係数 Q の積
- 10mm / 70μm 当量線量 など

確定的影響
単位が同じ!
人体への影響の評価に主眼をおいた「防護量」
健康影響の目安!
確率的影響
測定に主眼をおいた「実用量」

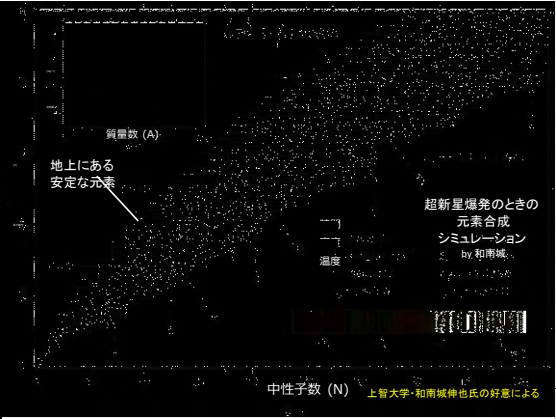
5. 放射線のものさし?

1mSv, 10mSv とは、その大きさは?

自然放射線 (バックグラウンドという、**大地と宇宙**から) はサーベイメータで測ると $0.05 \mu\text{Sv/h}$ ぐらい。それを年間線量に換算すると

$$0.05 \times 24 (\text{時間}) \times 365 \text{日} = 0.05 \times 8760 = 525.6 \mu\text{Sv} = 0.5 \text{mSv}$$

ちょっと**天然**の何かを加えると・・・
キャンプ用品のガスマントル (ガスランプの芯) を加えると、サーベイメータは $1.4 \mu\text{Sv/h}$ になった。
年間線量は $1.4 \times 8760 = 12264 \mu\text{Sv} = 12 \text{mSv}$
硝酸トリウムを繊維に含浸させ、高い融点から強い発光をだす。トリウムは天然だが、放射性同位体。



6.自然界からの被ばく線量 mSv/y



* 日本人は食物の摂取量が多く、平均して210pCiの放射性物質を摂取している。
210pCi = 0.58mSv/y

公衆の曝露限度1mSvは国際放射線防護委員会(ICRP)1990年勧告による。この勧告は英文(難解)だが、和文はアイソトープ協会がICRP勧告をネット公開。1990年以前は5mSv(作業従事者の1/10)、米国では現在も5mSv > 1. 自然放射線曝露の変動範囲内ならば社会的許容(受容性)。
2. 自然放射線曝露は約1mSv(右図の宇宙、大地、食物の放射線)。ラドン(気体)は変動が大きくかつ対策可能であるため除く。高放射能の地帯(イタリア等)では少なくとも2倍(2mSv)である。
この受容性から曝露限度を1mSvに勧告。世界の地理差の範囲内とは2mSv-1mSv=1mSvとして、これらは誰でも目標できるレベルとした。

8. 霧箱による放射線の観察-国立科学博物館-



放射線に関心がある方に国立科学博物館(上野)の地下3階にある霧箱見学をおススメします。地下20mでも宇宙線はものすごい量で降り注ぎます。その飛跡は長く、シャワーのようで、しばらく時間を忘れて見入ってしまいました。第3目の講義で学びますが、生命は放射線によってダメージを受けながらも、このレベルの低線量では修復しながら、気付かずに生きていきます。
YouTubeに有りますが、解像度が悪くて実感がわきません。是非、実物見学を推奨します。

11.線量限度(法令) - ICRP1990年勧告を採用 -

区分	実効線量限度(全身)	等価線量限度(組織・臓器)
放射線業務従事者	平常時 100mSv/5年 ¹⁾ 50mSv/年 ²⁾ 女子 5mSv/3月 ³⁾ 妊娠中の女子 1mSv (出産までの間の内部被ばく)	眼の水晶体 150mSv/年 ⁴⁾ 皮膚 500mSv/年 ⁴⁾ 妊娠中の女子 2mSv (出産までの間の腹部表面)
	緊急時 100mSv ⁴⁾	眼の水晶体 300mSv 皮膚 150 ⁵⁾
一般公衆	平常時 1mSv/年 ⁶⁾	眼の水晶体 15mSv/年 ⁷⁾ 皮膚 50mSv/年 ⁷⁾

(注) 1) 2) 3) 4) 5) 6) 7) 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) 33) 34) 35) 36) 37) 38) 39) 40) 41) 42) 43) 44) 45) 46) 47) 48) 49) 50) 51) 52) 53) 54) 55) 56) 57) 58) 59) 60) 61) 62) 63) 64) 65) 66) 67) 68) 69) 70) 71) 72) 73) 74) 75) 76) 77) 78) 79) 80) 81) 82) 83) 84) 85) 86) 87) 88) 89) 90) 91) 92) 93) 94) 95) 96) 97) 98) 99) 100) 101) 102) 103) 104) 105) 106) 107) 108) 109) 110) 111) 112) 113) 114) 115) 116) 117) 118) 119) 120) 121) 122) 123) 124) 125) 126) 127) 128) 129) 130) 131) 132) 133) 134) 135) 136) 137) 138) 139) 140) 141) 142) 143) 144) 145) 146) 147) 148) 149) 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) 180) 181) 182) 183) 184) 185) 186) 187) 188) 189) 190) 191) 192) 193) 194) 195) 196) 197) 198) 199) 200) 201) 202) 203) 204) 205) 206) 207) 208) 209) 210) 211) 212) 213) 214) 215) 216) 217) 218) 219) 220) 221) 222) 223) 224) 225) 226) 227) 228) 229) 230) 231) 232) 233) 234) 235) 236) 237) 238) 239) 240) 241) 242) 243) 244) 245) 246) 247) 248) 249) 250) 251) 252) 253) 254) 255) 256) 257) 258) 259) 260) 261) 262) 263) 264) 265) 266) 267) 268) 269) 270) 271) 272) 273) 274) 275) 276) 277) 278) 279) 280) 281) 282) 283) 284) 285) 286) 287) 288) 289) 290) 291) 292) 293) 294) 295) 296) 297) 298) 299) 300) 301) 302) 303) 304) 305) 306) 307) 308) 309) 310) 311) 312) 313) 314) 315) 316) 317) 318) 319) 320) 321) 322) 323) 324) 325) 326) 327) 328) 329) 330) 331) 332) 333) 334) 335) 336) 337) 338) 339) 340) 341) 342) 343) 344) 345) 346) 347) 348) 349) 350) 351) 352) 353) 354) 355) 356) 357) 358) 359) 360) 361) 362) 363) 364) 365) 366) 367) 368) 369) 370) 371) 372) 373) 374) 375) 376) 377) 378) 379) 380) 381) 382) 383) 384) 385) 386) 387) 388) 389) 390) 391) 392) 393) 394) 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) 424) 425) 426) 427) 428) 429) 430) 431) 432) 433) 434) 435) 436) 437) 438) 439) 440) 441) 442) 443) 444) 445) 446) 447) 448) 449) 450) 451) 452) 453) 454) 455) 456) 457) 458) 459) 460) 461) 462) 463) 464) 465) 466) 467) 468) 469) 470) 471) 472) 473) 474) 475) 476) 477) 478) 479) 480) 481) 482) 483) 484) 485) 486) 487) 488) 489) 490) 491) 492) 493) 494) 495) 496) 497) 498) 499) 500) 501) 502) 503) 504) 505) 506) 507) 508) 509) 510) 511) 512) 513) 514) 515) 516) 517) 518) 519) 520) 521) 522) 523) 524) 525) 526) 527) 528) 529) 530) 531) 532) 533) 534) 535) 536) 537) 538) 539) 540) 541) 542) 543) 544) 545) 546) 547) 548) 549) 550) 551) 552) 553) 554) 555) 556) 557) 558) 559) 560) 561) 562) 563) 564) 565) 566) 567) 568) 569) 570) 571) 572) 573) 574) 575) 576) 577) 578) 579) 580) 581) 582) 583) 584) 585) 586) 587) 588) 589) 590) 591) 592) 593) 594) 595) 596) 597) 598) 599) 600) 601) 602) 603) 604) 605) 606) 607) 608) 609) 610) 611) 612) 613) 614) 615) 616) 617) 618) 619) 620) 621) 622) 623) 624) 625) 626) 627) 628) 629) 630) 631) 632) 633) 634) 635) 636) 637) 638) 639) 640) 641) 642) 643) 644) 645) 646) 647) 648) 649) 650) 651) 652) 653) 654) 655) 656) 657) 658) 659) 660) 661) 662) 663) 664) 665) 666) 667) 668) 669) 670) 671) 672) 673) 674) 675) 676) 677) 678) 679) 680) 681) 682) 683) 684) 685) 686) 687) 688) 689) 690) 691) 692) 693) 694) 695) 696) 697) 698) 699) 700) 701) 702) 703) 704) 705) 706) 707) 708) 709) 710) 711) 712) 713) 714) 715) 716) 717) 718) 719) 720) 721) 722) 723) 724) 725) 726) 727) 728) 729) 730) 731) 732) 733) 734) 735) 736) 737) 738) 739) 740) 741) 742) 743) 744) 745) 746) 747) 748) 749) 750) 751) 752) 753) 754) 755) 756) 757) 758) 759) 760) 761) 762) 763) 764) 765) 766) 767) 768) 769) 770) 771) 772) 773) 774) 775) 776) 777) 778) 779) 780) 781) 782) 783) 784) 785) 786) 787) 788) 789) 790) 791) 792) 793) 794) 795) 796) 797) 798) 799) 800) 801) 802) 803) 804) 805) 806) 807) 808) 809) 810) 811) 812) 813) 814) 815) 816) 817) 818) 819) 820) 821) 822) 823) 824) 825) 826) 827) 828) 829) 830) 831) 832) 833) 834) 835) 836) 837) 838) 839) 840) 841) 842) 843) 844) 845) 846) 847) 848) 849) 850) 851) 852) 853) 854) 855) 856) 857) 858) 859) 860) 861) 862) 863) 864) 865) 866) 867) 868) 869) 870) 871) 872) 873) 874) 875) 876) 877) 878) 879) 880) 881) 882) 883) 884) 885) 886) 887) 888) 889) 890) 891) 892) 893) 894) 895) 896) 897) 898) 899) 900) 901) 902) 903) 904) 905) 906) 907) 908) 909) 910) 911) 912) 913) 914) 915) 916) 917) 918) 919) 920) 921) 922) 923) 924) 925) 926) 927) 928) 929) 930) 931) 932) 933) 934) 935) 936) 937) 938) 939) 940) 941) 942) 943) 944) 945) 946) 947) 948) 949) 950) 951) 952) 953) 954) 955) 956) 957) 958) 959) 960) 961) 962) 963) 964) 965) 966) 967) 968) 969) 970) 971) 972) 973) 974) 975) 976) 977) 978) 979) 980) 981) 982) 983) 984) 985) 986) 987) 988) 989) 990) 991) 992) 993) 994) 995) 996) 997) 998) 999) 1000) 1001) 1002) 1003) 1004) 1005) 1006) 1007) 1008) 1009) 1010) 1011) 1012) 1013) 1014) 1015) 1016) 1017) 1018) 1019) 1020) 1021) 1022) 1023) 1024) 1025) 1026) 1027) 1028) 1029) 1030) 1031) 1032) 1033) 1034) 1035) 1036) 1037) 1038) 1039) 1040) 1041) 1042) 1043) 1044) 1045) 1046) 1047) 1048) 1049) 1050) 1051) 1052) 1053) 1054) 1055) 1056) 1057) 1058) 1059) 1060) 1061) 1062) 1063) 1064) 1065) 1066) 1067) 1068) 1069) 1070) 1071) 1072) 1073) 1074) 1075) 1076) 1077) 1078) 1079) 1080) 1081) 1082) 1083) 1084) 1085) 1086) 1087) 1088) 1089) 1090) 1091) 1092) 1093) 1094) 1095) 1096) 1097) 1098) 1099) 1100) 1101) 1102) 1103) 1104) 1105) 1106) 1107) 1108) 1109) 1110) 1111) 1112) 1113) 1114) 1115) 1116) 1117) 1118) 1119) 1120) 1121) 1122) 1123) 1124) 1125) 1126) 1127) 1128) 1129) 1130) 1131) 1132) 1133) 1134) 1135) 1136) 1137) 1138) 1139) 1140) 1141) 1142) 1143) 1144) 1145) 1146) 1147) 1148) 1149) 1150) 1151) 1152) 1153) 1154) 1155) 1156) 1157) 1158) 1159) 1160) 1161) 1162) 1163) 1164) 1165) 1166) 1167) 1168) 1169) 1170) 1171) 1172) 1173) 1174) 1175) 1176) 1177) 1178) 1179) 1180) 1181) 1182) 1183) 1184) 1185) 1186) 1187) 1188) 1189) 1190) 1191) 1192) 1193) 1194) 1195) 1196) 1197) 1198) 1199) 1200) 1201) 1202) 1203) 1204) 1205) 1206) 1207) 1208) 1209) 1210) 1211) 1212) 1213) 1214) 1215) 1216) 1217) 1218) 1219) 1220) 1221) 1222) 1223) 1224) 1225) 1226) 1227) 1228) 1229) 1230) 1231) 1232) 1233) 1234) 1235) 1236) 1237) 1238) 1239) 1240) 1241) 1242) 1243) 1244) 1245) 1246) 1247) 1248) 1249) 1250) 1251) 1252) 1253) 1254) 1255) 1256) 1257) 1258) 1259) 1260) 1261) 1262) 1263) 1264) 1265) 1266) 1267) 1268) 1269) 1270) 1271) 1272) 1273) 1274) 1275) 1276) 1277) 1278) 1279) 1280) 1281) 1282) 1283) 1284) 1285) 1286) 1287) 1288) 1289) 1290) 1291) 1292) 1293) 1294) 1295) 1296) 1297) 1298) 1299) 1300) 1301) 1302) 1303) 1304) 1305) 1306) 1307) 1308) 1309) 1310) 1311) 1312) 1313) 1314) 1315) 1316) 1317) 1318) 1319) 1320) 1321) 1322) 1323) 1324) 1325) 1326) 1327) 1328) 1329) 1330) 1331) 1332) 1333) 1334) 1335) 1336) 1337) 1338) 1339) 1340) 1341) 1342) 1343) 1344) 1345) 1346) 1347) 1348) 1349) 1350) 1351) 1352) 1353) 1354) 1355) 1356) 1357) 1358) 1359) 1360) 1361) 1362) 1363) 1364) 1365) 1366) 1367) 1368) 1369) 1370) 1371) 1372) 1373) 1374) 1375) 1376) 1377) 1378) 1379) 1380) 1381) 1382) 1383) 1384) 1385) 1386) 1387) 1388) 1389) 1390) 1391) 1392) 1393) 1394) 1395) 1396) 1397) 1398) 1399) 1400) 1401) 1402) 1403) 1404) 1405) 1406) 1407) 1408) 1409) 1410) 1411) 1412) 1413) 1414) 1415) 1416) 1417) 1418) 1419) 1420) 1421) 1422) 1423) 1424) 1425) 1426) 1427) 1428) 1429) 1430) 1431) 1432) 1433) 1434) 1435) 1436) 1437) 1438) 1439) 1440) 1441) 1442) 1443) 1444) 1445) 1446) 1447) 1448) 1449) 1450) 1451) 1452) 1453) 1454) 1455) 1456) 1457) 1458) 1459) 1460) 1461) 1462) 1463) 1464) 1465) 1466) 1467) 1468) 1469) 1470) 1471) 1472) 1473) 1474) 1475) 1476) 1477) 1478) 1479) 1480) 1481) 1482) 1483) 1484) 1485) 1486) 1487) 1488) 1489) 1490) 1491) 1492) 1493) 1494) 1495) 1496) 1497) 1498) 1499) 1500) 1501) 1502) 1503) 1504) 1505) 1506) 1507) 1508) 1509) 1510) 1511) 1512) 1513) 1514) 1515) 1516) 1517) 1518) 1519) 1520) 1521) 1522) 1523) 1524) 1525) 1526) 1527) 1528) 1529) 1530) 1531) 1532) 1533) 1534) 1535) 1536) 1537) 1538) 1539) 1540) 1541) 1542) 1543) 1544) 1545) 1546) 1547) 1548) 1549) 1550) 1551) 1552) 1553) 1554) 1555) 1556) 1557) 1558) 1559) 1560) 1561) 1562) 1563) 1564) 1565) 1566) 1567) 1568) 1569) 1570) 1571) 1572) 1573) 1574) 1575) 1576) 1577) 1578) 1579) 1580) 1581) 1582) 1583) 1584) 1585) 1586) 1587) 1588) 1589) 1590) 1591) 1592) 1593) 1594) 1595) 1596) 1597) 1598) 1599) 1600) 1601) 1602) 1603) 1604) 1605) 1606) 1607) 1608) 1609) 1610) 1611) 1612) 1613) 1614) 1615) 1616) 1617) 1618) 1619) 1620) 1621) 1622) 1623) 1624) 1625) 1626) 1627) 1628) 1629) 1630) 1631) 1632) 1633) 1634) 1635) 1636) 1637) 1638) 1639) 1640) 1641) 1642) 1643) 1644) 1645) 1646) 1647) 1648) 1649) 1650) 1651) 1652) 1653) 1654) 1655) 1656) 1657) 1658) 1659) 1660) 1661) 1662) 1663) 1664) 1665) 1666) 1667) 1668) 1669) 1670) 1671) 1672) 1673) 1674) 1675) 1676) 1677) 1678) 1679) 1680) 1681) 1682) 1683) 1684) 1685) 1686) 1687) 1688) 1689) 1690) 1691) 1692) 1693) 1694) 1695) 1696) 1697) 1698) 1699) 1700) 1701) 1702) 1703) 1704) 1705) 1706) 1707) 1708) 1709) 1710) 1711) 1712) 1713) 1714) 1715) 1716) 1717) 1718) 1719) 1720) 1721) 1722) 1723) 1724) 1725) 1726) 1727) 1728) 1729) 1730) 1731) 1732) 1733) 1734) 1735) 1736) 1737) 1738) 1739) 1740) 1741) 1742) 1743) 1744) 1745) 1746) 1747) 1748) 1749) 1750) 1751) 1752) 1753) 1754) 1755) 1756) 1757) 1758) 1759) 1760) 1761) 1762) 1763) 1764) 1765) 1766) 1767) 1768) 1769) 1770) 1771) 1772) 1773) 1774) 1775) 1776) 1777) 1778) 1779) 1780) 1781) 1782) 1783) 1784) 1785) 1786) 1787) 1788) 1789) 1790) 1791) 1792) 1793) 1794) 1795) 1796) 1797) 1798) 1799) 1800) 1801) 1802) 1803) 1804) 1805) 1806) 1807) 1808) 1809) 1810) 1811) 1812) 1813) 1814) 1815) 1816) 1817) 1818) 1819) 1820) 1821) 1822) 1823) 1824) 1825) 1826) 1827) 1828) 1829) 1830) 1831) 1832) 1833) 1834) 1835) 1836) 1837) 1838) 1839) 1840) 1841) 1842) 1843) 1844) 1845) 1846) 1847) 1848) 1849) 1850) 1851) 1852) 1853) 1854) 1855) 1856) 1857) 1858) 1859) 1860) 1861) 1862) 1863) 1864) 1865) 1866) 1867) 1868) 1869) 1870) 1871) 1872) 1873) 1874) 1875) 1876) 1877) 1878) 1879) 1880) 1881) 1882) 1883) 1884) 1885) 1886) 1887) 1888) 1889) 1890) 1891) 1892) 1893) 1894) 1895) 1896) 1897) 1898) 1899) 1900) 1901) 1902) 1903) 1904) 1905) 1906) 1907) 1908) 1909) 1910) 1911) 1912) 1913) 1914) 1915) 1916) 1917) 1918) 1919) 1920) 1921) 1922) 1923) 1924) 1925) 1926) 1927) 1928) 1929) 1930) 1931) 1932) 1933) 1934) 1935) 1936) 1937) 1938) 1939) 1940) 1941) 1942) 1943) 1944) 1945) 1946) 1947) 1948) 1949) 1950) 1951) 1952) 1953) 1954) 1955) 1956) 1957) 1958) 1959) 1960) 1961) 1962) 1963) 1964) 1965) 1966) 1967) 1968) 1969) 1970) 1971) 1972) 1973) 1974) 1975) 1976) 1977) 1978) 1979) 1980) 1981) 1982) 1983) 1984) 1985) 1986) 1987) 1988) 1989) 1990) 1991) 1992) 1993) 1994) 1995) 1996) 1997) 1998) 1999) 2000) 2001) 2002) 2003) 2004) 2005) 2006) 2007) 2008) 2009) 2010) 2011) 2012) 2

科目名 原子力・放射能基礎論
—原子力と放射線の今、そしてこれから—
講義 No.3 「物理と化学（2）」

技術士（原子力・放射線／総合技術監理） 横堀 仁

1. 講義の目標

講義 No.1 「物理と化学（1）」では、物質の基本構成要素である原子や原子核とアルファ線、ベータ線、ガンマ線などの放射線との違いについて学習した。本講義では、中性子と原子核との反応（核反応）のメカニズムと核分裂反応によってエネルギーが放出される原理を学ぶ。また、多様な核反応や核分裂反応の結果として生成される放射化生成物や核分裂生成物（FP:fission product）の特性について理解を深めることを目的とする。

2. 講義の概要

（1）中性子と原子核との反応

原子番号 Z 、質量数 A の原子は、 Z 個の陽子を含む原子核（ $+Z$ の電荷）とその廻りを取り囲む Z 個の電子（ $-Z$ の電荷）で構成され、電気的な中性が保たれている。原子核は Z 個の陽子と $(A-Z)$ 個の中性子で構成され、原子の中心部の限られた領域（原子の大きさの 10 万分の 1 ）に存在する。そのため、陽子やアルファ線のような正の荷電粒子が原子核に近づくには電気的な反発力（クーロン障壁）を乗り越えるだけの運動エネルギーが必要となる。また、原子核に近づく前に、周辺の電子との電気的な相互作用を起こしてしまうため、原子核に近づくことができるのは一部のものとなる。一方、中性子には電荷がなく、原子核周辺の電子や原子核との電気的な相互作用がないので、荷電粒子よりも容易に原子核に近づくことができる。中性子が原子核と衝突すると、入射した中性子は原子核により散乱又は吸収される。質量数 A の原子核に入射中性子が吸収されると、一旦、質量数 $(A+1)$ の複合核の状態となり、複合核状態のエネルギー的な不安定な度合いに応じて次のような反応を起こして安定に向かう。

- ① 質量数 $A+1$ の複合核のまま収まる。余分なエネルギーはガンマ線の形で放出：中性子捕獲反応
- ② 複合核の状態から入射中性子の代わりに陽子やアルファ粒子を放出して収まる：

(n,p)反応、(n,α)反応など

- ③ 複合核の状態から二つの原子核に分裂して収まる；核分裂反応

上記①②の核反応は、どのような原子核の場合にも発生する。③核分裂反応は、質量数の大きな原子核の場合にしか起らないが、原子力エネルギーを理解する上では重要な反応である。

（2）反応断面積

ガンマ線や中性子が物質中を通過する際に相互作用する程度を表すのに、反応断面積という概念が用いられている。反応断面積の大きさは、物質の種類に依存することはもとより、放射線の入射エネルギーや反応の種類によって異なっている。ガンマ線に関しては、軌道電子との相互作用であることから、反応断面積は理論的に解明されている。一方、中性子に関しては、原子核の構造についての理論的解明が不十分であることから反応断面積は測定に頼っている。そして、測定値がないものは理論的な推定値が用いられる。このように、反応断面積の測定値や推定値を収集した膨大なデータは核データファイルという形で編集されている。日本原子力研究開発機構の核データセンターがまとめている JENDL ファイルがその一例である。原子炉を含む各種の原子力関連施設の設計解析においては、核データファイルは重要な役割を果たしている。

（3）質量欠損と結合エネルギー

原子核内に核子を安定に閉じ込めるために結合エネルギーが使われるので、原子核の質量は構成要素である中性子と陽子の各質量の合計よりも小さい。両者の差が質量欠損とよばれるものであり、結合エネルギーに相当している。原子核の全結合エネルギーをその核子数で割って得られる1個あたりの平均結合エネルギーは、非常に軽い原子核を除いて、約800万電子ボルトであるが、詳細にみると、核子数の増加とともに増加し、鉄の原子核（核子数56）を頂点としてふたたび減少していく。この事実は、鉄よりも軽い原子核同士は融合することで、一方、ウランのように重い原子核は二つの原子核に分裂することでエネルギーが放出されることを意味する。この事実が、重水素や三重水素の核融合により、また、ウランの核分裂によって核エネルギーが放出される基本原理となっている。これら、核分裂や核融合反応で放出されるエネルギーは1反応あたり MeV ($1\text{eV}=1.6\times 10^{-19}\text{J}$) のオーダーである。一方、化学反応で放出されるエネルギーが1反応あたり eV のオーダーであるので、両者には6桁程の隔りがある。

(4) 放射化生成物や核分裂生成物の特性

安定核種から放射性核種が生じる反応を放射化反応という。先の中性子と原子核との核反応では中性捕獲反応 $[(n, \gamma) \text{ 反応}]$ 、中性子吸収反応 $[(n, p) (n, \alpha) \text{ 反応}]$ が相当する。原子炉で放射化反応の代表的なものとしては、 $\text{Co}59(n, \gamma)\text{Co}60$ 、 $\text{Ni}60(n, p)\text{Co}60$ 、 $\text{Fe}54(n, p)\text{Mn}54$ などがある。原子炉の運転中は中性子が多数存在するため、原子炉構造材の Fe, Ni などが放射化される。

一方、ウラン等の原子核が分裂することにより1回の核分裂あたり2個の分裂生成物が発生する。原子核の構成要素である核子（中性子や陽子）の間には核力が働き、原子核の安定性が保たれている。原子核の中の中性子数と陽子数は質量数が大きくなる程中性子が多くなる傾向にある。このことから、ウランが二つの原子核に分裂してできるとどちらの原子核も陽子数に比べて中性子数が過剰な状態になる。このことが、核分裂生成物の多くが放射性核種となる理由である。中性子と陽子の数のバランスが崩れた原子核においては、放射線を自発的に放出することで安定性の回復が図られている。これを原子核の崩壊という。陽子よりも中性子が過剰な原子核では、原子核内で中性子が陽子に変化して原子番号の1つ多い元素に変化することでバランスを回復している。これを、ベータ崩壊という。放射性元素は自然に崩壊することでその数が減少してゆく。その数を1/2に減少する期間を半減期という。半減期は1秒未満から1億年を超えるものまで幅広いものがある。原子核の崩壊に伴って、アルファ線、ベータ線やガンマ線の形で放出されるエネルギーを崩壊熱という。原子炉の運転により、多様な放射性物質が蓄積されるが原子炉を停止した後もこれら放射性物質の崩壊が続くため崩壊熱の発生は持続する。

(5) 放射性同位元素 (RI) の製造と利用

原子炉の運転に伴って生成される放射化生成物や核分裂生成物はそれらが放射性であるが故に取り扱い過程において放射線被ばくをもたらすなど、負の側面が強いが、反面、医療や農業、工業など多方面で放射線源として用いられるという正の側面もある。また、核分裂生成物の中には原子炉の運転制御に欠く事ができないものも含まれているという事も述べておきたい。RI利用の放射線源は発電用原子炉ではなく、専用の研究用原子炉で生産されている。また、原子炉の代わりに加速器を用いて RI の製造が行われている。

1. 講義の目標

人類は長い生物進化の過程で、放射線に対する耐性を獲得してきたと言われる。遺伝情報をもっている DNA に変化が起きたことには間違いなさそうである。放射線のエネルギーが DNA に吸収されると、DNA に化学変化が起きる。この化学変化を DNA 損傷という。細胞は非常に多くの数の DNA 損傷を修復することができ、たまたま修復できなかったものが、突然変異や細胞死を誘導し組織や器官に障害をもたらしたり、がんにつながる。したがって、放射線の細胞への影響を考えると、DNA 損傷の生成だけでなく、その修復にも注目しなければならない。今回は、DNA 損傷の生成、突然変異誘発までの話を主にして、シラバスでふれた“細胞応答”については第 11 回の講義に廻し、放射線影響の全体像に迫る。

2. 講義の概要

1) 生命の基本構造

① DNA と染色体

DNA の基本構造は 2 重らせん構造である。片方の鎖に結合している塩基と向かい合う鎖の塩基との間の水素結合で構造が維持され、4 種類の塩基の並び方に遺伝情報が保持されている。細胞の中の核には、DNA がヒストン（タンパク質）に巻き付いた染色体が存在する。

② 細胞の重要機能：転写、翻訳、複製

細胞は自らを維持し子孫を増やすには 3 つの機能が必要となる。一つは DNA 塩基配列を RNA に読み取る転写機能で、二つ目は RNA をもとにタンパク質をつくる翻訳機能である。もう一つは複製機能で、染色体 DNA をコピーしてもう 1 セットづくり、子孫細胞にわたす。

2) 放射線と生命との関り

① DNA 損傷

どのような DNA 損傷が生成されるのか、放射線に特有な DNA 損傷はあるのか、DNA 損傷が、何故、身体の障害につながるのかといった問題について考える。（転写・複製の阻害）

② 突然変異

突然変異とは DNA の塩基配列が変化することで、その変化が遺伝子内に留まると遺伝子突然変異と呼ばれ、染色体にまで及ぶと染色体異常と呼ばれる。（遺伝情報の変化）

3) 生体への影響

放射線によって誘発される突然変異や細胞死が、体細胞に起こると身体的障害、生殖細胞に起こると被ばく者の子孫に遺伝性(的)障害を起こすと考えられる。身体的障害の殆どは被ばく後早期に発症するが、発がんや白内障・再生不良貧血などは発症が遅れる。なお、ヒト集団（原爆被爆者含む）では、放射線誘発遺伝疾患は実証されていない。

－原子力・放射能基礎論－

No. 5 原子力発電の歴史

河田 東海夫

（１）世界における原子力発電技術の発祥・発展経緯

人類による核分裂エネルギーの利用は原爆というまことに不幸なことで始まった。1942年12月、米国シカゴ大学でCP-1と呼ばれる実験装置で核分裂連鎖反応が達成され、人類最初の原子炉が産声を上げた。この原子炉は、原爆開発の極秘計画「マンハッタン計画」において、天然ウランを燃料とする原子炉中で核分裂性のプルトニウムを生産できることを原理実証するための実験であった。その成果をもとに、本格的なプルトニウム生産炉が建設され、長崎原爆用のプルトニウムが生産された。これと並行して、電磁分離法とガス拡散法という2つの濃縮技術が開発され、巨大な濃縮工場で広島原爆用の高濃縮ウランが生産された。

米国では、戦後直ちに軍事・平和利用両面の原子力開発・利用を統括する強力な原子力委員会が設立され、動力用原子炉の実用化を目指した広範な研究開発が進められた。当時ウランは希少資源とみなされており、核分裂で大量の発電を行うためには、天然ウランの99.3%を占める非核分裂性のウラン238を核分裂性のプルトニウムに変換できる増殖炉技術の開発が不可欠と考えられていた。こうして最初的高速実験炉EBR-Iがアイダホ州アルコに建設され、1951年12月に小規模の発電実験を行い、4個の電灯を灯すことに成功した。人類最初の原子力発電は高速増殖炉によるものであった。

一方、海軍では、ハイマン・リコーバー大佐（のちに提督）の強力な指導の下で、潜水艦の動力用原子炉の開発が進められた。原子炉としては、小型で高出力を得るために、燃料には高濃縮ウランを、また減速・冷却材には水（軽水）を使用する原子炉が開発された。水の沸騰を抑えて運転を安定化させるために原子炉は加圧された。加圧水型軽水炉（PWR）の原型である。こうして世界初の原子力潜水艦ノーチラス号が完成し、1955年1月に就航した。その原子炉を大型化し、陸上の発電用に転用したのが米国最初のPWR原子力発電所 Shippingportで、原子炉の製造はウェスチングハウス社が担当して1957年12月に送電を開始した。これと並行し、アルゴンヌ国立研究所では、PWRよりも構造が簡単な沸騰水型軽水炉（BWR）の開発が進められた。その技術を実用化したのがGE社で、最初のBWR原子力発電所がイリノイ州ドレスデンに建設され、1960年6月に送電を開始した。こうして米国では代表的な2つの原子炉PWRとBWRの実用化時代を迎えた。

戦後しばらくの間、米国以外の国では濃縮ウランは入手不能だったことから、原子炉は天然ウランを燃料とすることが前提となり、そのため減速材としては中性子吸収が小さい黒鉛または重水を利用する道をとることとなった。

旧ソ連は、米国の原爆成功後直ちに自らの核開発計画を立ち上げ、1949年8月に最初の核実験を成功させた。実験に使われたプルトニウムは、スパイが入手した米国情報をもとに設計・建設したプルトニウム生産炉で生産された。その原子炉を発電用に発展させたのがチェルノブイリ原子力発電所などで採用されている黒鉛減速軽水冷却の RBMK 型炉である。RBMK 型の最初の原子力発電所は 1954 年 6 月に送電を開始しており、世界最初の実用原子力発電所となった（米国の SHIPPINGPORT 運開の 3 年半前）。

英国とフランスは、戦後それぞれ独自に黒鉛減速炉を開発し、英国では 1956 年 10 月に、またフランスでは 1959 年 3 月に発送電を開始している。

天然ウランを燃料とする黒鉛減速炉は、燃料を長く燃やせず経済性に劣るので、旧ソ連やフランスでは、その後自ら濃縮技術を持つと、燃料に低濃縮ウランを用い、よりコンパクトで経済性に優れる軽水炉に移行していった。

カナダは、戦時中フランスから逃れた研究者を中心に重水炉の研究が進められていたことから、重水と天然ウランの体系を用いて、米国外では最も早く、1945 年 9 月に臨界実験に成功した。その後いくつかの実験用原子炉を作り、CANDU と呼ばれる独自の設計の原子炉の実用化に成功した。

（2）核燃料サイクルの発展経過

戦後しばらくの間、ウランは希少資源とみなされており、それを有効利用するために、使用済燃料再処理でウランやプルトニウムを回収し再利用することは必須の要件と考えられていた。核兵器製造で再処理技術を手にしていた米英仏では、その技術の民生利用が早くから始まり、1970 年代には日独も小規模再処理を開始した。しかし、1974 年にインドが自国の小型再処理工場で生産したプルトニウムで核実験を行ったことから、特に米国では核拡散防止重視の立場から、再処理を中心とする民生用プルトニウム利用を禁止すべきとの論が興った。こうした中 1977 年に発足した民主党カーター政権は、ほぼ完成していた大型商業用再処理工場を放棄し、使用済燃料は直接処分にするという原子力政策の大転換を図った。さらに各国が米国に追従することを期待して、国際核燃料サイクル評価（INFCE）という大会議を招集し、2 年以上にわたる検討作業を行ったが、最終的には、英仏独日連合による「厳格な保障措置の適用でプルトニウムの民生利用と核不拡散は両立しうる」との主張が通り、カーター政権の目論見は失敗に終わった。しかしながらその後ドイツは反核運動の高まりやチェルノブイリ事故影響などを受けて再処理路線から撤退した。一方、フ

ランスは着実にプルトニウム民生利用体系の整備を続け、今日では、再処理で回収されるプルトニウムの全量を軽水炉で燃やし、回収ウランについても相当部分をリサイクル利用できる状態を達成している。現在主流の再処理技術はピュレックス法という化学分離法（溶媒抽出法）であるが、今日では、核拡散抵抗性を高めるため、ウランとプルトニウムを分離せずにそのまま回収する方法などの開発も進んでいる。ほかに将来技術としては電気精錬的な技術開発も進んでいる。

軽水炉では低濃縮ウランを使用するが、当初の低濃縮ウラン供給は、軍事用に建設されたガス拡散方式の濃縮工場を持つ米仏などに限られていた。その後英独蘭 3 国が設立したウレンコ社が遠心分離法による濃縮工場を稼働させたことで、濃縮事業は完全商業化し国際競争時代を迎えた。わが国も独自技術で遠心濃縮技術を完成させ、日本原燃の濃縮工場が 1990 年代初めに操業を開始した。遠心濃縮技術は技術体系としては比較的単純であり、少ない投資で手に入れることができるため、再処理技術に比べると核拡散に対する障壁が相対的に低い。そのため、現実には核拡散問題が発生しており、本講義ではそうした問題についても触れることにする。

原子力・放射能基礎論（2018 年度）No. 6 原子力発電のしくみと核燃料サイクル

技術士（原子力・放射線部門） 岡村 章

1. 講義の目標

原子力（核エネルギー）の利用形態には核分裂反応によるものと核融合反応によるものがある。核兵器を除き現在実用化されているのは、核分裂による発電（原子力発電）と熱供給のみで、核融合は研究開発段階にある。ちなみに、代表的な自然エネルギーの一つである太陽光は、太陽内部での水素原子の核融合反応によりエネルギーを持続的に発生・放出するものである。

本講義では、現在、原子力発電の主流となっている軽水炉と、ウラン資源の利用効率を飛躍的に高めることのできる高速増殖炉を中心にして、そのしくみを解説し、併せて、核燃料サイクルについて、その利点や課題について概説する。

2. 講義概要

（1）原子力発電のしくみ

発電用原子炉は、核分裂により発生した中性子（高速中性子）を減速し核分裂の連鎖反応を効率よく起こさせるための減速材の種類と、原子炉から熱を取り出す冷却材の種類により、軽水炉、重水炉、黒鉛炉（軽水冷却、ガス冷却）、高速炉等に区分される。経済性に優れていることなどから、現在世界で稼働している原子力発電所の 80%以上は軽水炉である。軽水炉には、原子炉圧力容器内で直接蒸気をつくりタービン発電機を回す直接サイクルの沸騰水型原子炉（BWR）と、炉心を通過した 1 次冷却水の熱を蒸気発生器を介し 2 次冷却水に伝え蒸気をつくる間接サイクルの加圧水型原子炉（PWR）とがある。後述する高速炉は、高速中性子を減速せずに核分裂連鎖反応を起こさせる原子炉である。

原子力発電には、①燃料となるウランは石油、天然ガスに比べ、供給地が比較的分散しているため、供給安定性に優れている。②石油、天然ガス、石炭に比べ同じ発電量を得るために必要となる燃料が少なく、燃料交換後 1～2 年間は発電を継続できるなど備蓄効果が高い。③発電過程において二酸化炭素を殆ど排出しない、といった長所を有する一方、④重大事故が起きた際の被害範囲が大きく、影響が長期化する。⑤高レベル放射性廃棄物（使用済燃料）の最終処分が未解決、といった欠点もある。

（2）核燃料サイクル

軽水炉の燃料には、天然ウランに約 0.7%含まれる核分裂性のウラン 235 の割合を数%に高めた濃縮ウランが用いられる。濃縮工場でウラン 235 を濃縮し、成型加工工場で燃料体に加工して原子炉に装荷する。原子炉で燃焼した後、燃料交換により取り出された使用済燃料中には、残存しているウラン 235 や、新たに生成したプルトニウムなどが含まれている。これらの再利用可能な核原料物質は、再処理工場で処理し、廃棄物（燃料被覆管、核分裂生成物等）と分離して取り出し、再び燃料に加工して原子炉で利用することが可能である。これらの原子燃料に関する一連の循環過程を核燃料サイクル（原子燃料サイクル）という。（広義には、ウラン鉱石の採掘から精錬、放射性廃棄物の処理・処分といった発電の上流・下流の工程を含む。）

核燃料サイクルは、ウラン資源の節約になる、エネルギー・セキュリティを高める（燃料の輸入依存度の低減、準国産化）、高レベル廃棄物の量（容積）を減少させる、（既に存在する）余剰プルトニウムを

原子力・放射能基礎論（2018 年度） No. 7 原子力発電の安全性

技術士（原子力・放射線部門） 岡村 章

1. 講義の目標

福島第一原発事故は、想定を超える地震と津波により、発電所の非常用電源が機能喪失し原子炉を冷却する手段がなくなった結果、炉心溶融（メルトダウン）に至ったものである。同事故を踏まえ制定された新規制基準により今後は重大事故の再発を防ぎ得るか、残された課題は何かについて考える。

2. 講義概要

（1）福島第一原発事故を踏まえ制定された新規制基準

福島第一原発事故の起因は、地震・津波という自然現象であり、炉心溶融という重大事故に至った直接原因は長時間の電源喪失による炉心冷却機能の喪失である。また、事故が拡大した要因として重大事故に対する備えが不十分であったことも指摘されている。

国は、原子力規制体制を見直し、許認可権を基本的に原子力規制委員会に一元化するとともに、同事故の教訓を踏まえ、国際基準も参考として、深層防護の考え方を徹底し見直し強化した原子力規制基準を策定した。新規制基準は、地震、津波、火山といった自然現象の想定を厳格化し、自然現象以外にも火災や洪水といった複数の安全設備が同時に故障する事象（共通要因故障）に対する備えが強化された。その結果、新規制基準への適合性審査に合格した原子力発電所では、地震を例にとると、想定する基準地震動が従来の 1.5 倍から 2 倍程度に引き上げられることとなった。重大事故対策に関しては、炉心損傷防止対策や炉心損傷時の格納容器の破損防止対策として、代替電源、代替冷却設備等の配備を要求し、さらに、意図的な大型航空機衝突等のテロに対する対策等を講じることも求めている。この他、常に最新の規制基準に適合することを求めるバックフィット制度を導入するとともに、原子力発電所の耐用年数を原則として 40 年に限定した（ただし、条件を満たせば 20 年の運転延長が認められる。）。これらの規制強化に対応するためには大幅な対策費が必要となり、初期に建設された出力が比較的小さい原子炉では、電力会社の経営判断として廃炉を選択するケースも出てきている。

また、重大事故により発電所周辺に放射性物質が多量に放出されるような事態に対する備えである原子力災害対策については、国の防災体制を強化するとともに、重点的に防災対策を講じる範囲が、従来の発電所から概ね半径 10 km の範囲から概ね半径 30 km の範囲に拡大するなど制度が見直された。

（2）残された課題

新規制基準施行後、7 基の発電用原子炉が再稼働を果たし、更に 7 基が適合性審査に

合格しており、12 基が適合性審査中であるが（2018 年年 3 月末現在）、総じて審査期間が長期化している。

福島第一原発事故後、各電力会社や国を相手に再稼働の差止め等を求める訴訟が全国各地で相次いで提起され、原告の請求を認める判決も幾つか出されている。また、原発が立地する自治体や周辺自治体の安全協定に関する同意や避難計画の策定が再稼働の足かせとなっている地点もある。

これまでの適合性審査における主要な論点は、原子炉の基礎地盤の地質構造、基準地震動想定の妥当性（活断層の認定、地震動評価式の保守性等）、火山噴火に対する備え、重大事故対策の有効性などである。規制制度に関しては、米国を参考とした合理的な検査制度への改革が進められており、また、安全目標（原発に求められる安全性の水準）に照らした確率論的安全評価（PRA）の、規制や保安活動への導入が検討されている。

以上

科目名 原子力・放射能基礎論

—原子力と放射線の今、そしてこれから—

講義 No. 8 「福島原発オンサイトの現況と廃炉」

技術士（原子力・放射線／総合技術監理） 横堀 仁

1. 講義の目標

東日本大震災の発生から7年経過しましたが、東京電力福島第一原子力発電所（以下1Fとする）の事故の影響からの復旧には多くの資材と労力ががつぎ込まれてきています。本講義では1F（オンサイト）での活動に着目し、事故の経過や汚染水対策と廃炉計画の現状について、国や関係機関からの情報を分かりやすく整理してお伝えし、1Fの現状について共に学ぶことを目標とします。

2. 講義の概要

（1）原子炉の状況

全電源喪失と津波の浸水により冷却機能を失った1～3号機は崩壊熱を除熱できなくなりほぼ全炉心燃料の溶融に至った。溶融燃料は原子炉压力容器（RPV）の底部を貫通し原子炉格納容器（PCV）の底部にまで拡散している。その後、崩壊熱を除去するためRPV内への冷却水の注水が絶えることなく継続されている。

（2）汚染水対策

注水した冷却水はRPV破損部からPCVへと漏洩し、更にPCV破損部から建屋地下へと漏れでており、建屋地下の滞留水を汲み上げて浄化後、炉心冷却水として再利用する循環炉心冷却システムが構築された。これにより、汚染水の増加を食い止める事ができるものと期待されたが、地下水が建屋に侵入し循環炉心冷却水に混入していることで汚染水の増加をとめることができなかった。汚染水対策が焦眉の急となり、汚染水の増加対策として次々に貯水タンクを増設することが余儀なくされた。大量の汚染水の処理対策として多核種放射能除去システム（ALPS）を設置することで、貯留水中の放射能濃度が低減され、放射能漏洩事故のリスクを回避でき現在に至っている。

（3）廃炉計画

① 廃炉計画実施に向けた事前準備

2021年からの燃料デブリ（以下デブリ）取り出しに向けて作業環境を整えるため、空間線量率分布の把握や原子炉建屋内の除染などの準備作業が実施された。また、使用済み燃料プール内の燃料取り出しは、4号炉については2015年末に完了している。今後、1～3号炉の使用済み燃料プールからの燃料取り出しを行ってゆく。並行して、PCV、RPVの破損箇所の調査、デブリの状態や存在場所の特定を行い、デブリ取り出し方法を決定することが大きな課題であり、デブリの存在場所を調査を目的としたミュオン測定やロボットをPCV内に投入した調査が行われている。

② 本格的廃炉計画の実施

国のロードマップでは、2021年からの開始を計画している。まずは、PCV、RPVの破損箇所を修理して、地下水の混入と隔離した炉心冷却システムを完成することが第一歩である。デブリを取り出すこと、更には、大型機器の解体撤去や取り出した廃棄物の処理・処分が残されている。実施は容易ではないことが予想されており、具体的な解決方法についての課題を紹介する。

科目名 原子力・放射能基礎論
－原子力と放射線の今を考える－

講義 8 「トリチウム問題」

講師：戸井田 良晴

I. 講義の目標

福島原発から放出された放射性核種のうち、現行の技術で処理が困難と言われているトリチウムについて、その物理・化学的性質、現存するトリチウムの起源と存在量、過去および現在の用途、人体への影響について学びます。また、従来から知られてる水とトリチウムを分離する方法、福島事故以降考案された分離法を紹介します。最後にロシア企業から提案されたトリチウム分離・固定化方法について説明します。

II. 講義の概要

トリチウム問題

1. トリチウムとは

- ・核が陽子 1 個と 2 個の中性子で構成される水素の同位体
- ・質量が水素の 3 倍であるため、融点や沸点などの物理物性が異なる。
- ・分子の電子構造が同じため、化学的物性は類似する。
- ・半減期 12.32 年で最大 18.59 keV、平均 5.7 keV の低エネルギーの β 線を放出して ^3He に壊変。

2. トリチウムの起源と存在量

- ・宇宙線由来 : 宇宙線と大気中の酸素・窒素が反応し生成
平衡存在量は約 5 kg / 全世界
- ・地殻由来 : 地殻中の放射性物質由来で生成
- ・核実験由来 : 原爆の核反応で生成、水爆は爆発原料としてトリチウムを使用
平衡存在量の約 200 倍を放出
- ・原子力発電由来 : 重水炉や” ふげん ” 等から、10 kg / 年程度を生成

3. トリチウムの用途

- ・1950 年代に水素爆弾の材料に使われたが、現在は他の材料に置き換えられた。
- ・現在は主に生体分子や医薬品で軽水素の一部をトリチウムに置き換え、それら分子の代謝研究などに使用される。
- ・将来は核融合の原料 (3 kg / 1 炉を使用) としての用途が期待されてい。

4. トリチウムの人体への影響

- ・トリチウムの β 線のエネルギーが小さいため外部被ばくは生じない、また

内部被ばくも比較的小さいと考えられている。

- ・ただし、過去4回の事故で死者4名、負傷者7名が生じている。
- ・トリチウムの生体への影響は他の核種と異なるとする意見が存在。

5. 福島原発汚染水の課題

既存の除去装置ではトリチウムは取り除けず、処理水として残る

処理水の量が多くなりすぎ、敷地内で保存するのが困難に

海に放出するには濃度が高すぎ、また、総量が多すぎる。

化学工学的には半導体材料中の不純物（p p b、p p t）の濃度レベル

6. 既知トリチウムの分離技術

- ・原子・分子状態での分離 : レーザー照射／磁気分離
- ・ガス状態での分離 : 遠心分離／熱拡散法
: ガスクロマトグラフ法（水素ガス）
- ・液体状態での分離
蒸留 : 水素同位体ガスの深冷蒸留法、水素同位体水の減圧蒸留
電気分解 : 水素同位体水の電気分解法
- ・化学分離 : 同位体交換法（気相法、液相法）
- ・二重温度交換法（G i r d l e r－S p e v a c k法）
- ・メンブラン・フィルター
その他の手法
・吸着法（ゼオライトや水素吸蔵金属等への吸着）

7. 出願特許などからみた福島事故以後の分離技術

- ・既知分離技術の条件最適化
- ・既知技術の組み合わせ
- ・他産業の技術応用

8. ロシア ロスアトム社の分離・固定技術

- ・原子力潜水艦の原子炉廃液の処理技術応用
- ・各種分離・固定技術の組み合わせ
 - ・蒸留法による不純物の除去
 - ・電気分解によるトリチウム濃縮
 - ・水素吸蔵合金によるトリチウムの固定
- ・課題
 - ・高システム・運用コスト／水素吸蔵合金の保存

<講義の目的>

放射線の測定は自然環境のバックグラウンドのレベルが非常に低く、そのバラツキが大きい。国際規格 ISO ではバックグラウンド測定において放射線が無いのに有ると誤検出する確率から決定しきい値を求め、試料測定において放射線が有るのに無いと誤検出する確率から検出限界を求めます。この決定しきい値と検出限界の両者の概念を正しく理解することが必要です。

「無いのに有る、有るのに無い」まるで禅問答のようにややこしいですね。

バックグラウンドの影響を受けないようにするため何トンもある分厚い鉛しゃへいを用いる場合があります、測定条件の正確さと測定結果の意味を十分理解しないと見誤る。

自然環境の十倍以上の放射線が測定されたとマスコミ報道で騒ぐが、自然環境は絶えず変動しており、10 倍（1 桁）、100 倍（2 桁）の変動はよくあり得るので、数値が一人歩きしないように取扱注意が必要である。

今回の講義は年間 1mSv の線量限度の意味やその数値の大きさについて正しく理解できるように実習を交えながら、1mSv を実感してもらうことが目標である。

<講義概要>

No2. の講義で自然放射線からの年間線量は世界平均で 2. 4mSv であることを学んだが、このレベルの放射線測定について実習を通してその意味を考える。

放射線測定器を使用する上での留意点や校正の重要性についても学ぶ。

個人の被ばく線量を管理する個人線量計を装着してもらい、測定される数値や線量計そのモノの大きさを実感する。

第一部 基礎編

1) 放射線の検出原理

測定された数値を理解する上で、基本的な放射線の検出原理を理解しておくことは意義がある。それは、気体の電離作用を利用するもの、固体の電離作用を利用するもの、蛍光作用を利用するものに大別される。さらに代表的なものとして、①電離箱式検出器の構造、②GM 計数管の構造、③半導体検出器の構造、④シンチレーション検出器の構造を用い、放射線がどのようにして電気的な信号に変換され、線量（mSv）や放射能（Bq）を測定するのか解説する。

2) 測定上の留意点

実習に先立ち、測定器の特徴や測定上の留意点について解説する。

- ① サーベイメータによる空間線量率の測定においては、実習に用いる、NaI シンチレーション式サーベイメータの特徴、検出器の有感部分、各スイッチや表示の意味について解説する
- ② 表面汚染の測定においては、実習に用いる半導体式サーベイメータに関して、検出面の有

感部、各スイッチや表示の意味について解説する。また、衣服などの表面汚染を実際に測定する際の留意点を説明するとともに、測定によって得られた数値から、「表面汚染放射能 (Bq)」や「表面汚染密度 (Bq/cm²)」を算出する手順を解説する。

第二部 実習

いくつかのグループに分かれ、実際に測定器を用い、測定や単位換算の実習を行い、その作業を通じて、放射線測定についての理解を深める。

1) シンチレーションサーベイメータによる実習

シンチレーションサーベイメータを用い、①バックグラウンド線量率の測定、②いろんなところで測定してみる、③土壌等の簡易測定を体験する。

2) 表面汚染サーベイメータによる実習

半導体式サーベイメータを用い、①バックグラウンド計数率の測定、②表面汚染密度測定、③放射能表面汚染密度の計算までを体験し、測定の結果得られた計数率を使い、表面汚染密度 (Bq/cm²) までを算出する実習を行う。

*** 注意事項 ; 講義参加者は、四則演算ができる程度の電卓をご持参願います。**

第三部 講習

1) 放射線測定器を選定する上での留意点

市中に出回っている種々の測定器のばらつきが話題になることがある。その一例を解説する。また、放射性測定器を選定する上での留意点として、①時定数について、②エネルギー感度、③検出器の方向特性について解説する。さらに、測定器の定期的な校正の必要性について触れる。

<主な内容>

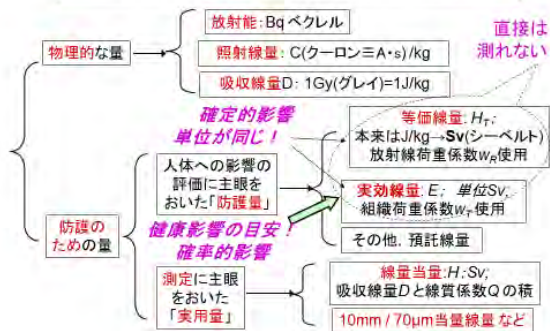
I 放射線測定器を用いた実習 (測定上の留意点を含む)

- ・ γ 線シンチレーションサーベイメータによる実習
 - : 空間線量率を測定する。マントルの線量率測定 単位 mSv/h
- ・ 表面汚染サーベイメータによる実習
 - : 減塩の計数率測定 単位 cps 、天然鉱石 単位 Bq
- ・ 個人線量計
 - : バックグラウンド線量率測定 μ Sv/h
 - 積算線量 mSv

放射性線源の核種は、一般に ^{137}Cs (セシウム 137) の線源を用いる。

実習では ^{137}Cs 線源の代わりに放射線を発する天然鉱石やマントル (キャンプで使うガスランプの芯) を用いる。

2.線量を表わす用語いろいろ



5. 放射線のものさし?

1mSv、10mSv とは、その大きさは?

自然放射線 (バックグラウンドという、大地と宇宙から) はサーベイメータで測ると $0.05 \mu\text{Sv/h}$ くらい。それを年間線量に換算すると

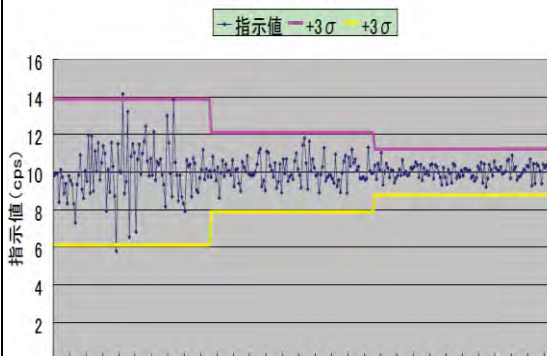
$$0.05 \times 24 (\text{時間}) \times 365 \text{日} = 0.05 \times 8760 = 525.6 \mu\text{Sv} = 0.5 \text{mSv}$$

ちょっと天然の何かを加えると・・・
キャンプ用品のガスマントル (ガスランプの芯) を加えると、サーベイメータは $1.4 \mu\text{Sv/h}$ になった。
年間線量は $1.4 \times 8760 = 12264 \mu\text{Sv} = 12 \text{mSv}$
硝酸トリウムを繊維に含浸させ、高い融点から強い発光をだす。トリウムは天然だが、放射性同位体。

GM サーベイメータ



時定数と指示変動の関係



24. サーベイメータ類



個人線量計



1. 講義の目標

自然放射線被ばくは健康に良い影響をもたらすが、人工放射線被ばくは害を及ぼすという認識が広く浸透している。このような認識には、被ばくによって健康影響をもたらすメカニズムが深く絡んでいる。つまり、障害を誘発する過程だけではなく、放射線障害から身体を守る仕組みがキーになっている。前者は第 4 回講義でもふれたので、今回は後者の説明に重きをおく。また、自然放射線による低線量・低線量率被ばくによる健康影響についても述べる。次回の講義で、人工放射線（原子力事故など）による被ばくについて考える。

2. 講義の概要

1) 放射線から身体を守る仕組み

① DNA 損傷の修復（細胞死の回避や突然変異誘発の抑制）

DNA 損傷が修復されないと細胞死や突然変異の誘発が起こる。修復されにくいとされる DNA 損傷、例えば DNA2 本鎖切断に対しても修復率は高い（数十個 / 細胞）。

② 細胞死の誘導（がん化の回避）

DNA 損傷の修復に失敗しても、アポトーシスの誘導によって損傷を持つ細胞を死滅させ組織や器官を守る。修復もアポトーシスも免疫応答（後述）もシグナル伝達機構（細胞応答）と呼ばれる仕組みによって制御され、何重にも身体を守る仕組みが働く

③ 免疫応答（がん細胞の駆逐）

動物には、病原体に対する生体防御システムとして、免疫応答が備わっている。修復やアポトーシスがうまく機能せずにがん細胞になった場合、それまでとは異なる抗原（タンパク質）を細胞表面に提示して、免疫細胞（リンパ球）に駆逐してもらう。

2) 自然放射線による低線量・低線量率被ばく

自然放射線被ばくが平均より 10～20 倍も高い地域が世界には 4 つある。その中で、中国とインドを例にあげ、住民に対する健康影響の疫学調査から低線量被ばくについて考える。

- ① 中国（広東省）：地域住民（約 9 万人）のがん死亡発生率についての疫学調査では、対象地域（普通環境：約 3 万 5 千人）の住民に比べて高い値は示さなかった。その後、血液の染色体異常が調べられ、放射線被ばくによる異常の増加はみられたものの、この程度の放射線影響は、他の種々の変異原から受ける影響の個人差の範囲内と推測された。
- ② インド（ケララ州）：固形がん（胃、肺、大腸、肝臓、乳房、子宮など形のある臓器に塊となって発生するがん）の相対リスクは、統計的に有意に 1 より高い値を示さなかった。その後、地域住民の末梢血の単球細胞を用いて DNA2 重鎖切断（DSB）の誘発についても調べられたが、やはり、DSB の増加はみられなかった。

1. 講義の目標

自然放射線だけでなく人工放射線も含めて、放射線のもたらしてきた人類への恩恵は計り知れないものがある。しかしながら、一度、原子力発電所の事故などが起こると、健康影響が最大の懸念となる。今までに起きた原子力関連の事故例を挙げて、その疫学調査結果などからどのような健康影響を及ぼしたかについて話をする。また、この種の疫学調査から健康リスクを推定し、放射線防御の施策に役立てるための施策についても解説する。

2. 講義の概要

1) 健康障害の発生事例

① 原爆被爆：広島、長崎での原爆被爆者や原子炉事故後の復旧作業員（高線量被ばく者）と（低線量・低線量率）自然放射線被ばくの住民とでは、発生した障害が大きく異なる。原爆被ばく者に対する疫学追跡調査では白血病の発生は被ばく後 2～3 年で増加し 6～8 年でピークとなり、固形がん発症のリスクの増加は被ばく約 10 年後に始まったとされている。

② 原子力事故：1986 年に起きた旧ソ連のチェルノブイリでの原子力発電所での事故、2011 年 3 月の東日本大震災時の東京電力福島第一原子力発電所で起こった事故などによる、放射線被ばくについて説明する。なお、これら大事故以外にも数多くの事故が起きている。

2) 健康リスクの推定

① 放射線障害の発生リスクを予測するためのモデル：しきい線量のない確率的影響に対しては Linear No Threshold (LNT) モデルが提唱され、放射線発がん率が線量に対して直線的に増加する L モデルや線量の二乗に比例する部分もある LQ モデルなどがある。

② 放射線防護の施策：1950 年代に、放射線作業員よりはるかに人数の多い一般市民に対して、一般の人と放射線作業員の遺伝線量が公平になるように、放射線作業員の線量限度 50 mSv/年の 1/10 の 5 mSv/年が公衆被ばくの線量限度と設定され、その後 1985 年に現在の 1 mSv/年に下げられた。放射線作業員の線量限度も 100 mSv/5 年と制限が設けられた。

③ 疫学調査の利用：発がん遺伝性(的)影響を合わせたリスク推定結果が ICRP (2007 年) によって報告された。この報告では、がんについては死亡だけでなく罹患も含まれ、全集団と成人集団に分けてリスクが見積られている。具体的には、1 Sv 被ばくすると、がん遺伝的リスクを合わせると、全集団で 5.7%、成人集団で 4.2%との報告である。なお、このリスクの推測には、線量・線量率効果係数(DDREF)が考慮されている。

－原子力・放射能基礎論－

No. 13 放射性廃棄物処分問題

河田東海夫

講義の概要

1. 放射性廃棄物の特徴と処分の一般原則

放射性廃棄物は、その有害性が十分低減するまでには、長期の時間がかかるため、それを発生させた現世代は、安全な処分を進めることで、将来世代への負担押しつけを回避する責任を有する。その推進に当たっては、① 発生者責任の原則、② 放射性廃棄物最小化の原則、③ 合理的な処理・処分の原則、④ 国民との相互理解に基づく実施の原則の4つの原則を守ることが重要。

2. 放射性廃棄物の形態と区分

使用済燃料を再処理してウランとプルトニウムを回収すると、その後に核分裂生成物を主成分とする放射能レベルのきわめて高い廃液が残る。我が国では、その廃液をガラスに溶かし込んで固めた「ガラス固化体」を「高レベル放射性廃棄物」とし、それ以外の放射性廃棄物はすべて「低レベル放射性廃棄物」に区分される。「低レベル放射性廃棄物」は、発生場所や放射能レベルによって、さらにいくつかの区分に分けられ、管理される。

一般に、液体状の放射性廃棄物は、低レベルの場合はセメントなどで固め、また高レベルの場合はガラス固化するなどして、固体状に安定化させる。固体廃棄物は様々な形態や種類があるが、可燃性のものは焼却するなどして、極力減容化を図る。低レベル放射性廃棄物は、通常は200リットルのドラム缶に封入されるが、大きさや形状によっては、専用の角型容器に封入される場合もある。高レベル放射性廃棄物は、直径約40cm、高さ約1.3m(一部これより短いものもある)の円筒容器内でガラスに固められる。

放射性廃棄物は、原子力発電やそれに伴う核燃料サイクル関連施設の操業や解体で生ずるほか、研究活動や医療活動によっても生じる。

なお、原子力関連施設などで発生する廃棄物であっても、放射能レベルがある一定値(この値をクリアランスレベルという)以下のものは、放射性廃棄物として扱う必要がない。

放射性廃棄物の処分方法は、「管理型処分」と「隔離型処分」に大別され、前者は低レベル放射性廃棄物の処分に、また後者は高レベル放射性廃棄物の処分に適用される。

3. 低レベル放射性廃棄物の処分と安全確保の考え方

低レベル放射性廃棄物は、「管理型処分」という方法で処分される。

「管理型処分」は、廃棄物の放射能が時間とともに減衰し、一定期間経過後には安全上支障のないレベルになることが期待できることを前提とした処分方法である。この処分法では、廃棄物は、

雨水や地下水の浸透を防ぐ人工構築物内に埋設して、一定期間の閉じ込めを確保しつつ、環境放射線モニタリングや立入制限などの管理を行い、放射能の減衰に合わせて段階的に管理を緩め、最終的に自然放射線レベル以下になった時点で、すべての管理をなくす。管理型処分の実際の方式としては、①浅地中トレンチ処分、②浅地中ピット処分、③余裕深度処分といった方式があり、後者に行くほど埋設深度が深くなり、閉じ込め機能も強化される。わが国では、日本原燃(株)が1992年より六ヶ所村で②の方式による低レベル放射性廃棄物処分場の操業を行っている。また①の方式については1990年前半に日本原子力研究開発機構が試験用原子炉の解体廃棄物を試験埋設した例がある。

4. 高レベル放射性廃棄物の処分と安全確保の考え方

高レベル放射性廃棄物は「隔離型処分」という方法で処分される。この方式では、放射性廃棄物を人間の生活環境から空間的・物理的に十分隔離できる性能を有する場所に定置して、含有する放射性核種の人間の生活環境圏への移行を抑え、被ばくリスクを許容値以下まで下げる。この方式の具体例が地層処分である。地下深部は、酸素が欠乏し、還元状態にあるため、腐食や溶解などの化学反応が極めて起こりにくいため、「ガラス固化体」からの放射性核種溶出は極めて低く抑えられる。また、動水勾配が小さいため、地下水の動きは極めて遅い。こうした特徴により、地下深部は物質を長期にわたって物質を安定に閉じ込める固有の性質を有する。地層処分は、地下深部のこうした特性を利用した処分方法であり、人間の能動的な管理に依存せず、受動的に安全な処分を実現する方法である。

5. 高レベル放射性廃棄物処分計画：我が国における現状と海外における進捗状況

高レベル放射性廃棄物の地層処分については、我が国では平成12年(2000年)に制度化されたが、候補地選定の第一段階の文献調査の開始が大幅に遅れている。地層処分は、世界的にもまだ実現に至っていないが、処分場のサイトが決まり、処分場建設が開始された国もある。我が国を含む主要国における計画の進捗状況を紹介し、いくつかの課題についても考察してみる。

6. 福島除染廃棄物の現状と課題

福島第一原発事故から7年が経過し、高汚染地域でも国の直轄除染が進み、昨年度ははじめまでに帰還困難区域(および双葉・大熊の全域)以外のすべての地域で避難指示解除が行われた。避難指示区域外の低汚染地域でもほとんどの地域で自治体による除染が完了し、実質年間1mSv未満が達成できた。こうした除染で回収された汚染土壌や廃棄物は各地の仮置き場に一時保管されているが、大熊町と双葉町にまたがって建設が進められている中間貯蔵施設が一部操業を開始し、汚染土壌等の仮置き場からの搬出も進み始めている。こうした現地の状況を報告するとともに、今後に向かた課題についても考察をする。

(以上)

原子力・放射能基礎論（2018 年度） No.14 原子力発電の現状と将来技術

技術士（原子力・放射線部門） 岡村 章

技術士（原子力・放射線部門） 横堀 仁

1. 講義の目標

原子力開発の今後の見通しを考える観点から、日本における既設原子力発電所の再稼働や新規発電所建設の状況、また、米国、欧州、アジアなど海外の原子力開発の現状を分析し、さらに、各国で取り組まれている高速炉他の第4世代炉や核融合等の将来技術について紹介する。

2. 講義の概要

(1) 国内及び海外の原子力発電の現状

国内の実用発電用原子炉は、2018年3月末現在で、運転段階のものが38基（BWR22基、PWR17基）、建設段階（本体工事着工済）が3基である。運転段階の原子炉のうち、運転開始後40年を超えた原子炉が3基、30年を超えた原子炉が15基となっており、福島第一原発事故後、9基が廃炉となっている。新規規制基準適用後、再稼働した炉が7基、適合性審査に合格しているものが7基、審査中が12基となっている。建設中の炉は、大間（Jパワー）、東通1号（東京電力）、島根3号（中国電力）の3基である。2014年に国が取り纏めた「エネルギー基本計画」では、原子力発電の依存度可能な限り低減していくとしつつも、今後も重要なベースロード電源と位置づけ、2030年時点で20%～22%の比率を維持していく方針が示されているが、これを達成するためには、設置変更許可未申請の炉（福島第二の4基を含む。）の申請・許可、高経年化炉の運転期間の延長、建設段階の3基の運転開始等が必要であり、実現は容易ではない。

世界では、現在、約430基の発電用原子炉が稼働している。日本の約40基は、米国の100基、フランスの約60基に次ぐ規模で、中国と同程度となっている。米国では、4基が建設中であるが、廃炉も多く、当面は現状維持と予想される。欧州では、福島事故後、ドイツが2020年末までに原子力発電から撤退を、また、フランスが原子力発電の縮小を決定した。英国、フランス、フィンランド、スロバキアで新規プラントが建設中であるが、今後耐用年数を迎える原発が増えていくことから長期的には基数は減少していくと予想される。一方、経済成長率の高いアジアにおいては、中国及びインドで、現在約20基が建設中であり、今後も多数の建設計画がある。ベトナム、タイも原子力発電の導入を検討している。化石燃料の豊富なサウジアラビア、UAE等中東の国々も、将来の資源減少に備え、原子力発電の導入計画が進められている。国際原子力機関(IAEA)は、世界の原子力発電設備量は、2030年には2016年に比し、低予測ケースで約12%減、高予測ケースで42%増になると推定している。

現在、運転中の発電用原子炉は、殆どが第1世代炉、第2世代炉と呼ばれるものであるが、新型の第3世代炉も一部が実用化されている。第3世代炉は第2世代軽水炉の改良型として開発され、ABWR、APWR、System80+、AP1000、EPR（欧州加圧水型炉）、APR（韓国型加圧水型炉）等があり、新型燃料、受動的安全システムの採用、熱効率の向上、建設・運転コストの低減などが特徴となっている。第3世代炉は、ABWRが日本で4基、APRが韓国で1基運転開始されている他、米

国、英国、フランス、フィンランド、中国で建設中である。テロ対策や福島事故の影響等で安全対策が強化され、全般的に建設が遅れている。

(2) 高速炉他の第4世代炉や核融合等の将来技術

2030年以降も長期的に原子力利用を継続するには、燃料の効率的利用、核廃棄物の最小化、核拡散抵抗性の確保等エネルギー源としての持続可能性に優れ、炉心損傷頻度の飛躍的低減や敷地外の緊急時対応の必要性排除など安全性／信頼性が高く、さらに、一層優れた経済性を有する原子炉が必要である。こうした要件を満たす原子炉を第4世代炉と呼んでいる。第4世代原子炉の開発には大きな費用とリスクを伴うため、2001年7月に米国、日本、英国、韓国、南アフリカ、フランス、カナダ、ブラジル、アルゼンチンの9か国による第4世代国際フォーラム(GIF: Generation IV International Forum)が発足した。その後、スイス、欧州原子力共同体、中国、ロシアも加わり12か国1国際機関の参加となった。また、2017年からはオーストラリアが参加している。事務局はOECD/NEAに設置されている。ガス冷却高速炉(GFR)、鉛冷却高速炉(LFR)、ナトリウム冷却高速炉(SFR)、熔融塩炉(MSR)、超臨界水冷却炉(SCWR)、超高温炉(VHTR)の6個の原子炉システムを第4世代炉の有力な候補としている。

高速炉はウラン資源の利用効率を飛躍的に高めることから、米国、英国、ロシア、フランス、日本他で開発が進められたが、技術的課題や経済性、政策変更等から英国や米国では撤退又は中断している。現在は、ロシア、中国、インドで積極的な開発が継続されている。フランスは、増殖から放射性廃棄物対策へ主眼を移し、ASTRID計画によるナトリウム冷却高速実証炉の建設を目指している。日本では、原型炉「もんじゅ」の廃炉を決定したことを受け、今後10年程度の開発作業を特定する「戦略ロードマップ」の策定に向けて、実務レベルで技術的な検討を行うため、高速炉開発会議の下に「戦略ワーキンググループ」が設置され現在検討が進められている。

燃料が豊富で廃棄物発生が少なく重大事故も起きないという特長を有し、将来のエネルギー源の本命として期待されている核融合炉については、トカマク型の実験炉 IETR が、国際的な枠組みで、2020年代の運開を目指しフランスにおいて建設中である。この他、各国において、2040～2050年代の実用化を目標に、ヘリカル方式や高速点火レーザービーム型の核融合炉の研究も進められている。

以上

科目名 原子力・放射能基礎論

ー原子力と放射線の今、そしてこれからー

講義「これからのエネルギーの選択肢と総合ディスカッション」

(時間は2時間+2時間です)

講師：技術士（原子力・放射線部門）、博士 亀山 雅司

1. 講義の目標

私達の生活のエネルギー価格は高いのでしょうか？安いのでしょうか？また、エネルギー価格の変化で私達の将来にどのような影響が起こりつつあるのでしょうか？

この講義では、エネルギー供給に関わる各エネルギーの特徴と長所、短所、生活・社会への影響を把握します。そして皆さんと一緒にこれからのエネルギーの選択肢について検討します。

2. 講義概要

(1) 生活とエネルギー

世界のエネルギー消費量、私達が1日に使うエネルギー量、各種エネルギーの割合、エネルギー価格の変動、エコ活動で低減できるエネルギー量について具体的な数値の概要を共有します。私たちは一人一日平均で約10kgの石油相当のエネルギーを消費しています。もし、お米で同じエネルギーを供給するとおおよそ3倍、30kgの量が必要になります。

仮に、一人一日にお米30kgの費用を支払うと、家庭の支出は幾らになるでしょう？

私達の生活は、生物が生み出せるエネルギー価格より極めて低い価格で潤沢に供給されることを前提に成り立っています。

(2) 無料のエネルギーの終わり

エネルギーのうち、例えば石油は「無料」、太陽光発電は「有料」だと聞いたら、あなたは感じるのでしょうか？

太陽光や風力によるエネルギーの増加に伴い、電気料金の上乗せ価格が上昇しています。なぜ「燃料が無料の太自然エネルギーを導入すると電気料金が上がる」のでしょうか？

価格の原理を理解することで、エネルギーが私達の生活に与える影響を考えます。

(3) 自然エネルギー

植物による燃料生産について、食料生産との比較で検討します。食料を燃やして全てエネルギー供給に投入しても、私たちが使用しているエネルギーの1/100程度の量です。また、食料生産はこれ以上の生産拡大余力が少ない状態なので、食料生産と競合する大量のバイオエネルギーの生産拡大は難しく、無理な拡大は環境バランスを乱してしまいます。

近年増加している太陽光発電や風力によるエネルギー生産について、その規模を把握します。

私たちが所費しているエネルギーは、幾らの電力をどれくらいの時間使用したか（ $\text{kW} \cdot \text{h}$ ：キロワット・アワー）であらわされますが、太陽光発電や風力は設備が出せる出力の大きさ（ kW ）で表示されており、設備の稼働率は10%程度しかないことに注意が必要です。（これがコスト高に繋がっています）。

供給安定化の対策はこれから本格化し、今後、そのコストが上乗せされることとなります。これまで電気は生活に必要な量と比べると「貯められない」ものでしたが、様々な技術が開発されてきています。

これら技術のキーとなる情報と現状と将来の見込みについて理解します。

（４）効率化と節約

電気供給の原則は、供給量＝消費量です。つまり、エネルギーの生産を増やすことは難しいのですが、消費分を減らす方法もあります。つまり、節電や効率化です。ここ数年、エネルギーの使用量が減少し、二酸化炭素排出量も減少しています。

また、エネルギーは、質の高いエネルギーで質の低いエネルギーを沢山集めることが可能です。エネルギー保存の法則があるので、新たなエネルギーを生み出したり消滅させたりできませんが、エネルギーを集めることは法則に反しません。

質の高い電気エネルギーを利用して、私たちの生活で需要の多い質の低いエネルギー（数十度のお湯や空調）を、例えばヒートポンプを用いて集めることが可能です。

この他に、LED 照明などの使用によって、従来より少ないエネルギーで過ごすことができます。照明は電球のフィラメントの加熱により発光しますが、LED は電子のエネルギーを効率よく（電球の 1/10 程度の消費電力）発光します。

自動車のエンジンのエネルギー効率も改良が続いています。

（５）原子力エネルギー

PWR（加圧水型原子炉）、BWR（沸騰水型原子炉）、高速増殖炉のエネルギーの規模と質、メリットとなど原子力の全般的な情報を把握（振り返り）します。

3. 総合ディスカッション

（１）ディスカッションの目的

皆さん、一連の受講の前後で、原子力やその他のエネルギーの大局観をつかまれた方、一層の理解を深められた方や新たな興味や気付きを持たれた方もいると思います。

最終の講義では、皆さんが得たもの、感じたこと、これから進めたいことを皆さんとシェアし、理解の深化を図ります。

（２）感じていることのシェア

皆さんの参加の動機は何でしょうか？ 講義が終了した今日、感じていることは何でしょうか？
簡単な問いに思えますが、実際にその問いに明確に答えられる人は意外に多くないようです。
自分の発言を自分が聴くことで新たな気づきを得ることがよくあります。
講義を振り返って、期待していたこと、結果についてなど、感じたことを話してみましょう。
人前で話すのが苦手、まとまった話し方が苦手？大丈夫です。
皆さんが困らないようにしっかり会話をサポート致します。

（３）気づきと理解

同じデータを見ても結果をネガティブに捕らえる人もいれば、ポジティブに捕らえる人もいます。
そのどちらが正しいということはなく、そう考えているという「事実」があるのです。
同じ情報に対して他の人の考え方が異なること(多様性)に驚くかも知れません。
皆さんの多様性がお互いの新たな気づきや多面的な捉え方を助けてくれます。

皆様とお会いできますこと、楽しみにしています。