2017 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: 「原子力・放射能の物理と化学」

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。この講義では、かっ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, 化学定数とエネルギーの単位の意味とデータを思い出す;原子力や放射線物理では, 10 の 20 乗とか 30 乗などという超巨大な数をよく使うが, 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.
- 2.1個の原子の中の構造,周期表,核種表,同位体を知る.この世のものはすべて100種類程度元素で成り立っていると小中学生の頃習ったが、実際の原子の種類(核種)は、2000種類以上も知られている.そして、その内270種類だけが安定であり、他は不安定原子なのである.
- 3. 地殻と人体の組成を見て、身体の中や周囲の環境中には大昔から放射性元素が存在していたことを再認識する. 微量だが、身体中には放射性カリウムがあり、あなたの家の庭にはウランもある.
- 4. 不安定核種の原子核壊変(崩壊)と放射線の放出現象

不安定原子はエネルギーを放出して壊変し、やがて安定原子に移って行くというのが自然の法則である。 つまり、壊変時に大きなエネルギーを持つ放射線(α線、β線、γ線など)を放出する。この壊変の様子と壊変図を理解する。壊変の半減期則と壊変方式、崩壊(壊変)による発熱の程度を知る。

5. 放射線の一生と物理的実態

放射線とはわかったようでわかりにくい面があるので頭を整理する. α線, β線, γ線が生まれてから死ぬまでの一生の姿を見て,放射線の物理的実体を知る. 放射線はどう変わるのか,残留するのか.

6. 放射線と物質の相互作用と放射線の性質

放射線が物体に当たると、その物体にエネルギーを与えて熱を発生すると同時に、化学的変化も引き起こす。その相互作用のメカニズムを知る。放射線の性質(エネルギー、発熱、飛程、透過度、物体内の軌跡、起こる化学反応)を学び、「強い放射線」とは一体何なのかを定義する。

8. 化学反応と核反応の違い

人間が太古より親しんできた燃焼や爆発の化学反応(火)と、扱い始めてからまだたった 100 年ほどしかたたない核反応の違いを学ぶ、この両者には大差があり、ざっと百万倍違うことを客観的に理解する。今、原子力・放射線は避けられる傾向が強いが、人間の遠い将来は、この「原子力が生むエネルギー」をうまく制御して使わなければ、他に生きる道は無いことを認識したい。

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 2 「放射線と生命 (1)」 講師: 谷田貝 文夫

1. 講義の目標

(電離)人口放射線だけではなく、自然放射線にも注目したい。私たちの身体は、外部からだけではなく内部で発生した自然放射線に絶えず曝されているからである。長い生物進化の過程で人類は放射線に対する様々な耐性の仕組みを獲得してきたが、その多くは自然放射線、人口放射線のいずれに対しても働く。何重にもなっている、これらの仕組みが働かないと生体は正常に機能できなくなり、組織・器官に障害が発生したり、がんになる。今回は、細胞にまで遡って、"放射線から身を守る仕組み"の基礎について学ぶ。

2. 講義の概要

- 1) 放射線の細胞への影響
- ① DNA 損傷と修復

重篤な DNA 損傷が生成されると細胞死を高頻度に起こしたり、突然変異に繋がることが懸念されるが、損傷の修復がこれらの効果を起こすか起こさないで済むかのキーになっていることが重要である。

② 突然変異と染色体異常

DNAに保持されている遺伝情報が子孫細胞に間違って伝わることが突然変異で、染色体レベルで大きな変化が起きる場合を染色体異常という。このように情報の伝達に間違いが起きると、がんを誘発するだけでなく、継世代的な影響も及ぼす。

③ アポトーシス (細胞応答)

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て、組織の機能を守る。つまり、生体を守る仕組みと考えられる。

2) 人体への影響

① 身体的障害と遺伝性(的)障害

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ではなくその子孫に遺伝性(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。しかしながら、原爆被ばく者の集団も含めてヒト集団では、放射線誘発遺伝疾患は実証されていない。

② 免疫応答

動物には様々な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。 非特異的防御は自然防御とも呼ばれ、生まれつき備わったシステムであり、特異的防 御は適応防御とも呼ばれ、構築に時間がかかる。放射線による免疫応答を考えてみる。

<u>科目名 原子力・放射能基礎論</u> - 原子力と放射線の今を考える - 講義 3 「放射線と生命 (2)」 講師: 谷田貝 文夫

1. 講義の目標

(電離)自然放射線、人工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、放射線が健康障害をもたらすリスクの見積もり方や放射線防御の施策などについて解説する。

2. 講義の概要

1) 健康障害の発生

① 原爆被爆

広島、長崎での原爆の爆心地やその周辺に住んでいた人や原子炉事故などの作業員や 復旧にあたった人(高線量被ばく者)に発症した障害と、低線量・低線量率被ばくを受 けた住民とでは障害が大きく異なる。原爆被ばく者に対する易学的追跡調査では、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、また、固形がん発症のリ スク増加は被ばくの約10年後に始まったと報告されている。

② 原子力施設

1986年に起きたロシアのチェルノブイリでの原子力発電所での事故、2011年3月の東日本大地震によって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、放射線被ばくの実態についての説明を主にする。このように大きな事故以外にも数多くの事故のあることにも留意して欲しい。

2) 放射線防護

① リスクの算定

しきい線量のない確率的影響に対しては、放射線障害の発生リスクを予測するために Linear No Threshold (LNT) モデルが提唱されている。LNT モデルには、放射線発がん率 が線量に対して直線的に増加する L モデルと、線量の二乗に比例する部分もある LQ モデルの 2 つがある。低線量域では白血病のリスクは LQ モデルに、固形がん(白血病以外のがん)のリスクは L モデルにフィットする。

② 放射線防護の施策

1950 年代に、放射線作業者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者の遺伝線量が公平になるように、放射線作業者の線量限度 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。放射線作業者の線量限度も 100 mSv/5 年という注釈も付けられた。このような法的規制に至る経緯だけでなく、放射線防護の基本的な考え方を学ぶ。

一原子力・放射能基礎論-No. 4 核燃料サイクルの現状

河田東海夫

1. 講義の目標

福島第一原子力発電所の事故以来、我が国のエネルギー政策における原子力の位置づけは大きくゆらいできた。2014年のエネルギー基本計画で原子力は「重要なベースロード電源」と位置付けられ、新規制基準に適合した原発の再稼働が徐々に進み始めたものの、原子力発電を支える核燃料サイクルのあり方については、その要である六ヶ所再処理工場の竣工の大幅な遅れなど、様々な問題を抱えており、将来が十分見通せない状況にある。本講義では、我が国や海外における核燃料サイクルの歴史的経緯や、いくつかの選択肢の比較などを紹介し、この問題を多面的にとらえ、考えるための基本情報を提供する。

2. 講義概要

原子炉を運転するためには、ウラン鉱石の精錬で得られるウラン原料を燃料に加工して安定的に供給するとともに、燃焼後の燃料を適切に処理し、発生する放射性廃棄物を安全に処分する必要がある。こうした原子炉の燃料の全体の流れ(ゆりかごから墓場まで)を「核燃料サイクル」と呼ぶ。そのうち前半のウラン採鉱から核燃料に仕上げるまでを「フロントエンド」、また後半の使用済燃料の後始末段階全体についてを「バックエンド」と呼ぶ。

今日のわが国の実用原子力発電所ではすべてが「軽水炉」と呼ばれる型式の原子炉を使用している。そこで、本講義では、軽水炉燃料の核燃料サイクルを中心に、その技術や課題などについて紹介する。

軽水炉燃料は通常3~5%程度燃焼が進むと核分裂効率が落ちるため、新燃料と入れ替えつれ、取り出された燃料は使用済燃料と呼ばれる。使用済燃料中には90%以上のウランが未使用のまま残存するとともに、副産物として核分裂性のプルトニウムが1%弱生成する。こうした使用済燃料の後始末に関しては、それをそのまま廃棄物として捨ててしまう「直接処分」という方式と、それを化学分離して残存するウランや新たに生成したプルトニウムを再利用するため回収し、その後に残る核分裂性物質(放射能レベルがきわめて高い)のみを廃棄物として処分する「再処理・リサイクル方式」(あるいは単に「再処理方式」)がある。

原子力発電を行う各国で、フロントエンドについては、国産か輸入かの違い はあるものの基本的な流れは各国共通であるが、バックエンド(使用済燃料の

科目名 原子力と放射能基礎論 ~原子力と放射線の今を考える~ 講義 No. 5「核分裂と原子力発電」

講師:桑江 良明

【0.講義の目的】

原子力発電は原子力平和利用の中心的な一形態である。我が国では水力発電・火力発電とともに原子力発電が基幹電源の一翼を担い、経済の成長と安定を支えた。そして、近年の地球環境問題への関心の高まりから、さらなる期待が寄せられていた(H22.6「エネルギー基本計画」等)。そのような状況の中で、福島第一原子力発電所の事故が発生し、今後原子力発電をエネルギー政策上どのように位置づけるかが国民的議論となっている。国民が将来的にどのような選択をするにせよ、その議論の前提として、原子力発電に関する客観的で正確な知識と理解が必要となる。

【1. 原子と原子核】

全ての物質は原子からなり、原子は原子核とその周りをとりまく電子からなる。さらに原子核は正の電荷を持つ陽子と電気的に中性な中性子からなる。陽子と中性子を総称して核子という。ある原子核の陽子数を Z、中性子数を Z とすると、両者の和すなわち核子の総数 Z を質量数という。原子の化学的な性質は陽子の数で決まることから Z を原子番号と呼ぶ。特定の原子番号 Z および特定の質量数 Z をもつ原子核 Z を核種といい、Z を移動して、Z を表わす(Z は元素記号)。たとえば質量数 Z の炭素は Z の炭素は Z の炭素は Z をなる。 Z が等しく Z が異なる核種を同位体と呼ぶ。

【2. 質量欠損と結合エネルギー】

陽子、中性子、電子の質量を原子質量単位 (amu) で表わすと次のようになる (ここで、原子質量単位はC-12原子の質量を正確に 12[amu]とする質量の単位である)。

陽子の質量 m_p =1.007276[amu],中性子の質量 m_n =1.008665[amu],電子の質量 m_e =0.000549[amu] ここで、C-12 原子を構成する粒子、すなわち 6 個の陽子と 6 個の中性子と 6 個の電子それぞれの質量の総和を計算してみると、6 m_p +6 m_n +6 m_e =12.09894[amu]となる。

しかし、C-12 原子の質量は原子質量単位の定義から 12.00000 [amu] であり、この原子の質量は構成粒子の質量の総和より、0.09894 [amu] だけ小さいことになる。

一般に、質量数A、原子番号Zの原子は、Z個の陽子、Z個の電子および(A-Z)個の中性子からなるが、この原子の質量M[amu]は、個々の粒子の総和 $(Z\times m_p+(A-Z)\times m_n+Z\times m_e)$ とはならず、それよりも小さくなる。この質量の差を**質量欠損**と呼ぶ。

アインシュタインは質量とエネルギーは等価であるとし、光速 c 、質量m、エネルギーEの間に E=m c^2 の関係を与えている。

個々の粒子がばらばらで在るよりも原子核を構成した状態の方が安定でありエネルギーの低い状態にあるといえる。質量欠損に相当するエネルギーは、原子核を構成する核子相互間の結合の程度を与えるものであり、これを**結合エネルギー**と呼ぶ。

【3. 核分裂と核融合】

科目名 原子力・放射能基礎論 講義 No.6「放射線測定の基礎」

講師: 青山 敬

<講義の目的>

放射線は単位を理解することが難しく、測定された結果の意味が十分理解されないままで 数値が一人歩きしてよく問題になっている。

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してもらい、かつ実習を交えながえら線量 1mSv を実感して頂くことが目的である。

<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世界平均では 2.4mSv (日本平均では 2.1mSv)である。一方、原子力施設からの影響は国際基準(ICRP)によって一般公衆に対する線量限度は年間 1mSv 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 1mSv"と表示している。

原子力施設を安全に管理する上で、放射線の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述べる。

次に、放射線測定器の種類や目的、測定原理、測定条件など実際に測定で留意すべきことを述べ、実際に測定を体験する。また、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述べる。最後に、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触れる。

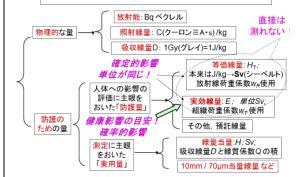
〈主な内容〉

I 講義

- 2. 放射線の用語と単位、5. 放射線のものさし? 6. 自然界からの被ばく線量 mSv/y
- 8. 霧箱による放射線の観察-国立科学博物館-11. 線量限度、公衆 1mSv の根拠
- Ⅱ 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 : マントルの線量率測定 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 cps

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(バッククランドという、大地と宇宙から)はサーベイメータで測ると $0.05\,\mu\,\mathrm{Sv/h}$ ぐらい。それを年間線量に換算すると

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

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1.4μSv/hになった。

年間線量は1.4×8760=12264 μSv =12mSv 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



2196、058mSw/ 公乗の種類はTmSkは国際放射線改議者会のCP1990年動电によるくこの設性は英文(機能)だが、和文はフィ ソトープ協会がCP19性にちゃった効果は、1950年加速はmSv (作業収集者の1/10)、米国では現在も5mSv > 1自然設保施の交換制制加Sv1在台外の認可(受容性) 2自然の保険が交換制制のなどに合意の認可(空音性) 2自然の保険が変換制が1mSv (石図のデ用、大阪、食物の乳、ラドン内部をはくは安静が大きくかつ対策可能であるため除 く)であり、角板の高、地形以及がある地域(イタリア等)では少なくたら近回(2mSv To ある。 この受情だから健康現在と1mSv1制に、世界の地球法の範囲内とは2mSv - 1mSv - 1mSv - 1mSvとして、これならは確 でも目的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-



放射総に関心がある方に国立科学時物館(上野)の地下3階にある際能見学をおススメ します。地下20mでも宇宙線はものすごい量で降り注ざます。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回の講論で学びますが、 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 -

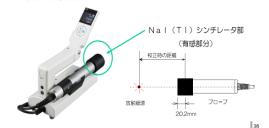
区分		実効線量限度(全身)	等価線量限度(組織・臓器)
放射線業務従事者	平常時	100mSv/5年*1 50mSv/年*2 女子 5mSv/3月間*3 妊娠中の女子 1mSv (出産までの間の内部被ばく)	駅の水晶体 150mSv/年 ^{□2} 皮膚 500mSv/年 ^{□2} 妊娠中の女子 2mSv (出産までの間の腹部表面)
事者	緊急時	100mSv*4	眼の水晶体 300mSv 皮膚 1Sv*5
一般公衆	平常時	1mSv/年*2	眼の水晶体 15mSv/年*2 皮膚 50mSv/年*2

- ※3 4月1日、7月1日、1月1日を輸売とする名3月間 84 平成23年3月、4日に福島前・毎子力技業所の第合作業に従事する者は、250m3vに引き上げられた(平成23年12月16日廃土) 45、18以 5~ベルト) = 1,000 m8以 2リシーベルト) = 1,000,000 nSu(ツイクロケーベルト)
- ICRP1990年動告(日本語順)は日本アイソトープ協会から無償でダウンロード司(1mSv/yは55頁の190,191/パラグラフ参照)http://www.iriasor.io/books/cat/sub1-01/101-14.html

33.サーベイメータでの空間線量率の測定

シンチレーション式サーベイメータでの空間線量率測定 検出器の位置

 先端部に1インチΦ×1インチの円筒形Na I (TI)シンチレータを内蔵 (先端部が有感部分)



.

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 No. 7「福島原発の現況(オンサイトの状況)」

講師: 横堀 仁

1. 講義の目標

東日本大震災の発生から6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、復興は多くの課題を残したままでいます。本講義では1F(オンサイト)での活動に着目し、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することで、皆さんと一緒に1Fの現状について学ぶことを目標とします。

2. 講義の概要

(1) 汚染水対策

崩壊熱を除去するため原子炉容器 (RPV) 内への冷却水の注水が事故後絶えることなく継続されている。注水した冷却水は RPV 破損部から原子炉格納容器 (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が、トリチウム以外の放射性核種が除去された大量の処理水(トリチウム水)の保管・管理が今後の課題である。講義では、これら汚染水対策の状況について紹介する。

(2) 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ー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 k e V、平均5.7 k e Vの低エネルギーの β 線を放出して 3 H e 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 k g/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、10kg/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かえられた。
- ・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(3kg/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

ー原子力・放射能基礎論-No. 9 除染と廃棄物処理(オフサイトの状況)

河田東海夫

1. 講義の目標

福島第一原発事故から6年が経過した。福島県内では広範囲にわたる放射能汚染が発生し、11の市町村に避難指示が出され、避難者数は自主避難者も含め一時は16万人を超えた。その後環境省の主導のもとで大々的な除染作業が進められた結果、平成28年度末までに7つの市町村で避難指示が解除されている。避難指示区域外で重点調査地区に指定された34の市町村でも28年度末までに除染作業がほぼ完了している。こうした努力の結果、現在の避難者数はピーク時の約半分に減っている。本講義では、こうした現地の現状を報告するとともし、直面している様々な課題についても紹介し、今後の進むべき方向性についてともに考えることにしたい。

2. 講義概要

福島県内の除染は、避難指示が出され住民が避難した地域(20 km圏内および 平成23年4月時点で年間20mSv以上の被ばくの恐れがある地域)は「除染特別地域」と呼ばれ、国が直轄で除染を行うこととし、それ以外の地域では国の財政支援のもとで各市町村がそれぞれ除染を行うこととした。

自治体が除染を行う地域では、28年度末までに公共施設や住宅地域の除染がほぼ完了し、年間の追加被ばく線量1mSv未満が達成されている。除染の結果出た汚染土壌などはフレコンバッグと呼ばれる袋に詰められ、各自治体が決めた仮置き場等で保管されている。これらは当初3年以内に中間貯蔵施設に運ぶとされ、その建設予定地も決まってはいるが、全体的に計画は遅れこんでいる。

一方除染特別地域でも、「帰宅困難区域」とされる地域以外では除染が進み、28年度末までに田村市、川内村(一部を除く)、楢葉町、葛尾村、南相馬市、飯館村、川俣町の7市町村で避難指示が解除された。しかしこれまでのところ避難住民の帰還率は全体平均で13%程度に留まっている。こうした背景には、いわゆる1mSvの呪縛(年間1mSv以下でなければ危険という誤解)のほか、避難生活の長期化に伴う避難先での生活定着の進行など、様々な問題が複雑に絡んでいる。

これまで手が付けられていなかった「帰還困難区域」に関しても、政府は昨年8月末に、同区域内に各市町村の実情に応じて「復興拠点」を設け、周辺の

除染やインフラの整備を一体的に進めたうえで5年後をめどにその部分の避難 指示を解除する方針を示した。

事故後福島県では全県民を対象に「県民健康調査」と称して、事後後4カ月の行動調査に基づく事故時被ばく線量評価や、ホールボディカウンタによる内部被ばく調査などが行われている。その結果、被ばくはチェルノブイリ事故に比べ1ケタないし2ケタ低いことが確認されており、健康影響を心配するレベルには至らなかったことが明らかになっている。

事故後福島県内では、土壌から農産物へのセシウム移行特性の調査などを進める一方で、食品の汚染検査体制の整備を鋭意進め、現在では通常の野菜や果物の汚染コントロールにほぼ完全に成功している。しかし、一般消費者の福島産農産物忌避の傾向はまだ歴然と残っている。また魚介類についても試験操業でほとんど魚種で基準を十分下回ることが確認されているが、まだ本格漁再開には至っていない。

以上述べたような福島の現況を、除染問題と放射線問題を中心に、幅広く紹介し、解説する。

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 10「低線量被ばくの健康影響」 講師: 谷田貝 文夫

1. 講義の目標

(電離)多くの人が懸念を抱いているのは、低線量被ばくによる健康影響であろう。世界には、自然放射線被ばくが平均より10~20倍も高い地域が4つある。このような高自然放射線地域の住民に対する健康影響の疫学的調査は、低線量被ばくの健康を見積もる上で大いに役立つ。ここでは、この種の疫学調査の有効性について論じ、科学的根拠を追求する試みも紹介する。

2. 講義の概要

- 1) 高自然放射線地域に住む住民
- ① 中国

中国高自然放射線地域に住む住民に対して血液の染色体異常を調べる疫学調査が行われ、普通の環境の 3~5 倍程度の放射線の被曝による影響がみられた。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であり、がんや白血病や先天異常の有意な増加は、いくら調査人数を増やしても検出できないと予測されている。

② インド

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)で、白血病を除くがんです。白血病については原爆被ばく者では、もっと高い線量を被ばくした場合のリスクになるのですが、もともと白血病は少ないので、はっきりしたことは分かりませんでした。少なくとも増えているとも減っているともインドのケララ州・カルナガパリ地区では言えません。

- 2) 疫学調査と科学的データ
- ① 疫学調査の有効性

発がんと遺伝性(的)影響を合わせてのリスク推測結果が ICRP (2007年) によって報告されている。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、1Sv 被ばくすると、がんと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。講義3で説明したリスク値には、線量・線量率効果係数(DDREF)が考慮されていることに留意して欲しい。

② 科学的データとの対応

上記の中国での疫学調査は、以前は住民に対するがん死亡率についての疫学調査が行われたのに引き続いて染色体異常が調べられている。まさに、少しでも、科学的なデータと関連付けたいという現れといえる。このような流れは、ベルギーの原子力施設での作業者に対する血液検査で微小核の出現を指標に調べたといった試みからも伺える。ここでは、細胞や動物実験による線量率効果についてのデータとの対応についても話をしたい。

原子力・放射能基礎論 No.11 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

福島第一原子力発電所事故は、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り炉心溶融(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のか、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

東京電力㈱福島第一原子力発電所事故の起因は、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、同事故の教訓を踏まえ、原子力規制基準を大幅に見直し強化した。地震・津波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溢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)に対する対策が強化された。重大事故対策に関しても、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、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。さらに、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も、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を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、数年の審査を経て幾つかの原子力発電所が適合性審査に合格し再稼働を果たした。しかしながら、事故後、各電力会社や国を相手に、各地で相次いで提起された再稼働阻止等を求める訴訟において、原告の主張を認める判決(決定)も出されており、また、原発が立地する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障害となっている例もある。

論点となっている課題は、運転許可判断の手続の在り方、原発に求められる安全性の 水準(安全目標)、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、テロ対策、地域防災計画の実効性など である。

これらの論点を解説し、原子力発電所の安全性は確保され得るかについて、共考する。

一原子力・放射能基礎論一 No. 12 原子力開発の歴史と将来

河田 東海夫岡村 章

1. 講義の目標

原子力開発の将来を考える上で、海外及び日本における原子力開発の歴史を振り返り、どのような 経緯をたどり今日に至ったかを学ぶ。また、世界各国で取り組まれている新型炉開発の動向や核融合 開発の現状について紹介する。

2. 講義の概要

(1) 世界の原子炉開発の歴史

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かたちで始まった。1942年12月、米国シカゴ大学でCP-1と呼ばれる黒鉛減速の実験装置で持続的な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、副産物として核分裂性のプルトニウムが生まれ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、本格的な黒鉛減速水冷却型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、天然ウランのほとんど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。こうして最初の高速実験炉 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原子力発電所シッピングポートで、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(米国のシッピングポート運開の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) 新型炉開発の動向

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、最新型の第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)等があり、最新型燃料、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。このうち、ABWRは日本で4基が運転開始されている他、日本、米国、英国で建設・計画中である。他の炉も日本、米国、韓国、中国、欧州等で建設・計画が進められているが、福島第一原発事故の影響等で全般的に工程が遅れている。

2030年以降の新たな炉概念である第4世代原子炉の研究が、日本、米国、フランス、ロシアなど 12ヶ国とEUにより結成された第4世代国際フォーラム(GIF)で進められている。ナトリウム冷却 高速炉、超高温ガス炉、ガス冷却高速炉、超臨界水冷却炉、鉛冷却高速炉、溶融塩炉を開発対象としており、主な開発目標は、高い安全性、核拡散抵抗性、廃棄物と天然資源利用量の最小化、原子炉の建設・運転費用の低減である。

高速増殖炉(FBR)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、日本他でナトリウム冷却型炉の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、インドで積極的に開発が継続されており、日本及びフランスは、増殖から放射性廃棄物対策へ主眼を移し開発を継続することとしている。

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、 $2040\sim2050$ 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。

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「これからのエネルギーの選択肢」

講師:技術士(原子力・放射線部門) 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考えたいと思います。

2. 講義概要

(1) 私達とエネルギー

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11kg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以上の量が必要になります。仮に、一人一日にお米30kgが必要だとすると、家庭の支出は幾らになるでしょう?私達の生活は、高エネルギーの石油が極めて低い価格で潤沢に供給されることを前提にしています。

(2) エネルギーのコスト

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 たはどう感じるでしょうか?

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、まかなえるのは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いと思われます。

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(k W・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 (k W) 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になります。

なお、太陽光発電の設備が 10%程度の利用になるのは、曇りや雨で発電できない期間 があることが原因です。そこで、宇宙に太陽光発電所をつくる構想が昔から検討されています。

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) ネガティブ・エネルギー

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。

ここで少し不思議な(しかし当たり前の)現象が起こります。コップ 1 杯の 100 $\mathbb C$ のお 湯があればカップ麺を作れますが、お風呂いっぱいのお湯があっても 1 杯のカップ麺を作ることはできません。エネルギーは量と質の問題があるのです。

この質と量の関係を利用して、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。

これらの省エネは一つのエネルギー供給方法に匹敵する量(10-20%)になります。

(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。

(6) エネルギーの選択肢

現在のエネルギー、未来のエネルギーを対象に、エネルギーの選択について皆さんと 一緒に考えたいと思います。

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ー 講義「総合ディスカッション」

出 席:講師一同

ファシリテート: 亀山 雅司

1. 講義の目標

皆さん、一連の受講の前後で、原子力の理解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、新たな気付きや理解の深化を図りたいと考えています。

2. 講義の概要

1)振り返り

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付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サポート致します。

2) 理解の共有と気付き

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付きや多面的な捉え方を助けてくれます。

3) 貢献と定着

皆さんが他の出席の方に自分の理解をシエアすることは、自分の理解を深めると共に、皆さん全体の理解の向上に貢献します。

また、学んだ内容のほとんどは時とともに忘れられてしまいますが、シエアは記憶の定着にも有効です。

皆様と最終講義でお会いできますこと、講師一同楽しみにしています。

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「これからのエネルギーの選択肢」

講師:技術士(原子力・放射線部門) 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考えたいと思います。

2. 講義概要

(1) 私達とエネルギー

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11kg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以上の量が必要になります。仮に、一人一日にお米30kgが必要だとすると、家庭の支出は幾らになるでしょう?私達の生活は、高エネルギーの石油が極めて低い価格で潤沢に供給されることを前提にしています。

(2) エネルギーのコスト

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 たはどう感じるでしょうか?

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、まかなえるのは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いと思われます。

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(k W・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 (k W) 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になります。

なお、太陽光発電の設備が 10%程度の利用になるのは、曇りや雨で発電できない期間 があることが原因です。そこで、宇宙に太陽光発電所をつくる構想が昔から検討されています。

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) ネガティブ・エネルギー

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。

ここで少し不思議な(しかし当たり前の)現象が起こります。コップ 1 杯の 100 $\mathbb C$ のお 湯があればカップ麺を作れますが、お風呂いっぱいのお湯があっても 1 杯のカップ麺を作ることはできません。エネルギーは量と質の問題があるのです。

この質と量の関係を利用して、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。

これらの省エネは一つのエネルギー供給方法に匹敵する量(10-20%)になります。

(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。

(6) エネルギーの選択肢

現在のエネルギー、未来のエネルギーを対象に、エネルギーの選択について皆さんと 一緒に考えたいと思います。