RADIATION EDUCATION

放射線教育

特集：放射線・原子力の歴史的点描

2005

VOL. 9 NO. 1

放射線教育フォーラム

Radiation Education Forum

放射線教育
Radiation Education
Vol. 9 No. 1

目次

1__【巻頭言】 安全と危険の間の難しさ *砂屋敷忠*

特集 放射線・原子力の歴史的点描

3__特集「放射線・原子力の歴史的点描」にあたって *小高正敬*

5__原子の内部構造を探る：放射線発見を引き継ぐ第二世代の研究者たち *大野新一*

15__放射線単位ことはじめ *村主 進*

23__アメリカ軍による理化学研究所のサイクロトロンの破壊と関連したいくつかの事実 *今村 昌*

31__ラドン、トロン、ラジウム研究の一世紀 環境放射能の誕生 *堀内公子*

41__放射線加工処理の進展と積み残された問題
放射線化学実用化の50年を振り返って *田村直幸*

51__ビキニ事件がもたらしたもの *長谷川圀彦*

57__研究炉の歩み（歴史） *苫米地顯*

67__わが国の原子力発電の歩み *宅間正夫*

75__原子力安全研究のあゆみ *佐藤一男*

83__人類繁栄の歴史と科学・技術が果たす役割
－エネルギー・地球環境問題への新しい視点－ *大野新一*

93__［ホームページ紹介］航路線量計算システム（JISCARD） *坂内忠明*

95__［書評］「安全」のためのリスク学入門／放射線および環境化学物質による発がん *坂内忠明*

97__「放射線教育」投稿規定、原稿の書き方

102__編集後記

発行：2005年3月30日， NPO法人 放射線教育フォーラム
〒100-0013 東京都千代田区霞ヶ関3-3-1 尚友会館B1F
Tel: 03-3591-5366 FAX: 03-3591-5367
E-mail mt01-ref@kt.rim.or.jp, *HP*: http://www.ref.or.jp

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 9 No. 1, p. 1-2 (2005)

［巻頭言］

安全と危険の間の難しさ

放射線教育フォーラム幹事　砂屋敷　忠

わが国土の美しさは、海に囲まれた島国であると同時に、季節ごとに装いを変える自然の美しさに代表される。この四季について、昨年あたりから夏・冬の二季に変わったのではないかと指摘する声が聞かれるようになってきた。春や秋の期間が短く、1年の暑さ寒さの変化が急なように感じられる点でこの指摘には同感である。ある人達は、エネルギー消費による地球温暖化の影響と言い、他の人達は、地球の長期にわたる温暖周期の一場面と説明している。地球のとてつもない長い営みを一言で説明することは出来ないにしろ、20世紀後半での急激な温暖化は前者の指摘のように過去に見られない大量のエネルギー消費に関係がないとは言えまい。とはいえ、ただ一つの事柄に原因を求めるのは早計である。

放射線について市民に説明する際、しばしば簡略化されるので、後々大きな誤解を生むことになる。端的に表現することは仕方ないこともあり、マスコミの報道などにも見られることではあるが、時には問題と思われる場面に遭遇する。その一例を示し皆さんの判断を仰ぎたい。引用は、山田真著、福音館書店『はじめてであう小児科の本』で、血液の病気のなかの白血病についての章の一部である。「・・・・白血病が放射線によって起こることもわかりました。これは、あの広島や長崎への原爆投下という恐るべき大規模な「実験」によって証明されたのです。わたしたち日本人が、多くの同胞を放射線により失うという体験を持ちながら、例えばレントゲン検査をしょっちゅう受けたりすることにあまり抵抗がないように思われるのはとても残念なことです。だってレントゲン検査をすることは小さな原爆をおとされているようなものですから。（中略）胃のレントゲン検査についても、がんの早期発見ということばかりが騒がれて、放射線がからだに与える害についてあまり問題にされていず、これは危険です。原発の問題などを考えるのと同時にレントゲン検査のことも考えるべきで、これはもっとひろく議論されてよいと思います。」

この本は、2002 年発行の第3版で市立図書館の棚にあり、かなり人気のある本と思う。この本を開くのは病気を心配するときであろうから、自分や子供の健康と放射線の関係については、特に関心深いことでもあり、読者は検査によって白血病になるのではないかと気遣うであろう。放射線は怖いと言う概念はこうしたことを契機に強まると考える。

わが国の国民1人あたりの医療被ばくは年間で約 2.4mSv と報告されている。この量が多いか少ないかは自然放射線被ばくの約 1.5mSv であることや、100mSv 以下の低線量でリスクの有意な増加はみられないことと比較してみる方法もある。また、医療では被ばくした本人に大きな利益があること、全身被ばくでないこと、管理（計画）された被ばくであることなどを考慮してみる必要がある。世界一の医療被ばく大国という見出しで報道されたこの値についても、一面では、検査漬け医療への警鐘ではあるが、国民皆保健制度の恩恵とも言えるし、貧富の差なく、CT 検査をはじめ必要とする放射線検査が受けられることの結果である。検査あたりの被ばく量は可能な限り低くなるように努力されている。診断用X線による発がんリスクが、がん罹患率の３％に寄与しているとの報道に、放射線検査を受けるとがんになるので検査を躊躇するという人も現れたということである。私は診療放射線技師として、臨床現場で働いてきた経験から、放射線の人体影響を理解してもらうの

に心を配ってきたが、国民全体として負担すべき被ばく（国民線量）と個人の被ばくリスク（それによる利益を考えないで）、同じ「のもさし」で比較しては読者が混乱するのは当然である。

これらを通じて、放射線の性質と量の概念を初等教育から学ぶことは、現代に生きるわれわれに不可欠である。単に放射線にとどまらず、これまで身の回りになかった物質が日常生活の中に持ち込まれる時代に、危険と安全、社会的利益のかねあいを冷静に見極めるセンスを養うことは大切であると考える。

私の住む広島は原爆被災をうけた街でもあり、放射線については特別な思いを持った人が多い。原爆を通して平和を学ぶことはきわめて大切なことであるが、被災の惨状をもって放射線の利用が人類にとって極めて危険であるかのごとく論評されることは不幸なことである。被ばくの量と影響の程度、有害物質が管理されているか無秩序に利用されているかの違いを認識することが肝要である。人びとの考え方は、時に安全と危険の２極のみで論じようとされるが、二つの間には幾つもの段階あることを、学校教育、社会教育のなかで学習することが大切である。

（放射線影響研究所臨床研究部顧問）

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 9 No. 1, p. 3－4 (2005)

特集「放射線・原子力の歴史的点描」にあたって

編集委員長　小高正敬

放射線教育 Vol.9 No.1 は「放射線・原子力の歴史的点描」特集号としました。会員の皆様が活動されるときに、この特集号が少しでもお役に立てば幸いです。

先日、学会の座長を仰せ付かって、名古屋大学へ久しぶりに行ってきました。若い研究者達の話を聞くのはとても楽しい。しかし気がかりなこともありました。今回の学会に限らないのですが、最近学会で、実験条件や測定精度、それから研究の歴史の話をしない研究発表が以前より多くなったと思います。話はしなくても研究発表要旨集のなかに書いてあるかと読んでみても、それらしきことが見当たりません。私の若い頃、実験条件と測定精度を押えておくことは、研究の基礎の基礎で大変大事なことと、恩師から厳しく指導されたものです。実験条件と測定精度が明確であってはじめて、実験結果は信頼されるし、貴重なデータとなると思います。実験条件と精度のあやふやな実験データは討論や考察の対象にはなりません。殆ど何の役にも立ちません。また、新しい研究を始めるときは、まずは図書館に籠り、過去に行なわれた関連ある研究を全て調べ上げるのが研究者の常識でした。先人の行なった研究の内容を吟味すると、これらから始める研究に役立つことが見出され、また研究を進めて行くべき方向が定まって、非常に有り難かったのを覚えています。

昔から温故知新と言われていますが、研究の歴史を調べることは大変大事なことだと思います。研究で得られた発見や発明について詳しく調べることは当然ですが、それに加えて発見発明にいたった経緯や、研究者の思考過程まで調べられれば素晴らしいと思います。それは難しいことかも知れませんが、何とか明らかにして若い人々に伝えていきたいものです。

放射線・原子力に関する研究につてもその歴史を調べれば、多くの研究がなされ、それらの研究は互いに競い合い、ある時は助け合って発展していったことが分かります。またそれぞれの研究には興味あるドラマやエピソードがあるのに気付くことでしょう。例えば、原子力時代の幕を開いた元素ウランは、１７８９年にドイツの化学者クラプロートによって、発見されました。彼はピッチブレンドを化学的処理して得られた黒色の粉末を、今まで知られていなかった新元素の単体であると考えました。そして８年前に新惑星天王星（Uranus）が発見され話題になっていたことから、新元素の名前をウラン（Uranium）としました。ところが彼が新元素の単体と思った黒色の粉末は実は二酸化ウランであったことが後で分かりました。フランスの化学者ペリゴーによってウランの単体が単離されたのは、それから約５０年後の１８４１年でした。この時点ではウランは他の元素とは特別違った性質を持っているとは思われていなかったようです。さらに約５０年経った１８９５年にドイツの物理学者レントゲンによって放射線（X 線）が発見されました。丁度其の頃、フランスの物理学者ベクレルはウラン化合物から発生する蛍光について研究していましたが、偶然にそのウラン化合物から蛍光ではなく放射線が発生しているのを、翌年１８９６年に発見しました。ウ

ランは歴史上最初に発見された放射性元素となったのです。さらに約５０年が過ぎた１９３９年には、ドイツの物理化学者ハーン及び化学者シュトラスマン、オーストリアの物理学者マイトナーらによって、ウランに低エネルギーの熱中性子を照射すると、ウランが核分裂反応を起こすことが発見されました。この発見は論文として公表される前に、広く知れ渡ってしまったそうで、それだけ大発見であったわけです。ウランは歴史上最初に発見された核分裂反応を起こす元素という名誉ある名称も手に入れました。この様にウランは放射線・原子力の歴史上で大きな役割を何度も演じてきたのです。ウラン発見から数えても約２００年、放射線発見からは僅か約１００年しか経っていないのに、現在は放射線・原子力の研究から得られた成果が人間の生活の多方面で大いに役立っているのには驚くばかりです。

教育の現場では既に行なわれていることでしょうが、小学校、中学校、高校の生徒たちに、放射線・原子力に関する研究の歴史について教えるとき、研究に纏わるエピソードなども含めた話を聞かせるのが良いのではないでしょうか。そうすれば、生徒たちも面白がって耳を傾けてくれて、授業で聞いたことが心に残るでしょう。また生徒たらは放射線、原子力、そして科学一般に興味を持つようになり、科学者への道に進んでくれて、将来人間の生活を豊かにする研究を行ってくれると思います。

この特集号には会員の方々のお力を拝借して、放射線・原子力の歴史につての１０篇の論文を掲載できました。会員の皆様は、放射線あるいは原子力についてお話される機会をお持ちになることがあると思いますが、その時にこれらの論文を参考文献としてお役に立てて頂ければ嬉しい限りです。

（立教大学大学院化学専攻兼任講師、2006 年 3 月 20 日 記）

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 9 No. 1, p. 5 – 14 (2005)

原子の内部構造を探る：
放射線発見を引き継ぐ第二世代の研究者たち

大野新一
理論放射線研究所
〒227-0054 横浜市青葉区しらとり台 12-5
（2006 年 2 月 7 日　受理）

要旨　レントゲンによる X 線の発見、ベクレルによる放射能の発見、キュリー夫妻によるラジウムとポロニウムの発見、トムソンによる電子の発見などがおよそ 100 年前になされたが、発見された放射線は物質の根源を極める研究をスタートさせることとなった。すなわちラザフォードによる原子核の発見、ボーアによる原子構造モデルの提案などである。彼らを第一世代の原子の研究者と呼ぶならば、その後継者であるジョリオ・キュリー夫妻、チャドゥイック、フェルミらは第二世代の研究者と呼ぶことができよう。本報告は、第二世代の研究者たちが第一世代の研究者から引き継いだものを中心に考察し、それをどのように活用して、原子の内部構造の探求へとつなげて行ったかをまとめる。

1　原子研究以前

目に見えるあらゆる物質がことごとく原子からできていることはギリシャ人たちが考えたことである（いまから 2000－2500 年前）。彼らは水が蒸発し、消えたかのように感じられても、実際には冷たい空気にふれると凝縮して再び水をつくること、鉄鉱石を炭と一緒に強く熱すると真っ赤なドロドロした液体が流れ出すが、それが冷えて固まって有用な農具や武器をつくる材料となる、しかし空気中でやがて錆びて赤くボロボロになることなどを注意深く観察し、こうした物質変化のなかにも不変のものが存在することに注目し、それを原子と呼んだ。

近代になると、自然現象を観測するのに計測器具を用い、定量的な研究が可能になってきた。すなわち天秤を用いた質量の変化、気体反応における圧力・体積の測定である。こうした 19 世紀の化学者のたゆまざる努力は、ギリシャ人が考えた丸くて堅くて決して壊れることのない原子の存在を確認させるものであった。19 世紀はまた真空や電磁気の技術が進展した世紀でもある。真空ポンプと電池を組み合せた真空放電の実験は、オーロラや雷の研究のために盛んであったが、偶然のことから放射線の発見をもたらした（レントゲン W. C. Röntgen, 1895）。このときの放射線は、実はまだ発見されていなかった電子が放電管内を走ってガラス壁内の原子核の電荷によって曲げられるときに発生する電磁波（＝X 線）であった。ガラス壁の光っている箇所から X 線が発生することから、X 線発生はケイ光現象と関係があるのではないかと考えたベクレル(A. H. Becquerel; 1852-1908) は、ケイ光性鉱物を調べているうちにウラン鉱石からはいつも放射線がでていることを発見した(1896)。

ここで 19 世紀末当時の原子と放射線についての科学者たちの知識を整理しよう。原子については、質量の順に並べると化学的な性質がくり返し現われるという周期律が確かめら

れ、また多くの化学的な実験事実ならびに気体運動論は原子（および分子）の存在を疑い得ないものとしていた。しかし物理学者の中には、そもそも測定可能量に基づいて科学理論はつくられるべきであり、存在を確かめることのできないものにもとづく原子論を容認できないとする意見が強かった。一方、発見されて間もない放射線は、物体を通りぬけ、物体の後ろに置いたケイ光板を光らせたり、写真乾板を感光させる。しかも物体中に何らかの変化を起こすことが分りつつあった。物体を通り抜けるということは実は物体をつくる原子そのものの中を通り抜けることであり、原子内で何かの変化を起こすことは原子内部を調べる手段が存在することを意味していた。

2　原子の研究の始まり

真空放電中のガラス壁から発生する物質透過性の放射線（=X 線）の発見は、1895 年 12 月に２つの論文で報告された。不思議な X 線に関係するニュースは世界中に伝わり、研究論文も 1 年間に 1000 報を超える有様であった。物質構造の研究の立場からは、その中で２つの研究が重要である。１つはイギリスのトムソン(J. J. Thomson; 1856-1940) やラザフォード(E. Rutherford; 1871-1937) による X 線照射によって空気が電気伝導性になること（＝空気の電離）の詳細な研究、もう 1 つはフランスのベクレルによる X 線発生の原因を突き止めようとする研究であった。ベクレルは、黒い紙に包んだ写真乾板をウラン鉱石の近くに置くとき乾板が感光することを発見した（1896.3 月; ウラン線とかベクレル線とよばれた）が、あまり注目されなかった。ベクレルの研究室（パリ植物園）のすぐ近くの学校で勉学中であったワルシャワ生まれのマリー・キュリー(M. Curie; 1867-1934) (=マーニャ・スクロドフスカ）はベクレル線に関心をもち、ウラン鉱石だけでなくトリウム鉱石からもベクレル線がでていることを見つけた(1898)。さらにつぎつぎと調べた天然の鉱石の中には純粋な U (ウラン) や Th (トリウム)の含有量から計算されるよりもはるかに強い放射線を出している鉱石試料があり、未発見の放射性元素が存在することを推論した。彼女はパリ市立物理化学学校に勤務していた夫ピエール・キュリー(P. Curie; 1859-1906) の協力を得て、閃ウラン鉱（ピッチブレンド）を化学分離してどこから放射線がでているかを追跡し、ついに 1898 年、塩酸溶液から Bi（ビスマス）とともに硫化物として沈殿し、その後に水酸化物として Bi から分別沈殿する元素 Po（ポロニウム）を単離した。また Bi とは別に Ba (バリウム)と似た化学的性質を示す放射性物質（0.1 g の塩化ラジウム）をくり返し精製してとりだし、これまでに知られているものとは異なる新しい発光スペクトル線を見出し、その元素に対して Ra (ラジウム) と命名した。その後に、さらに Ra の原子量はじめ物理的・化学的な性質を決定するために 1 g の純粋な Ra を得たのであるが、そのためにウラン鉱山からの何トンもの抽出残さを粗末な倉庫の部屋で化学処理をしなければならなかった。彼らにとって幸いしたことは、実験物理学者ピエールの優れた放射線検出の技術（気体電離量をエレクトロメータによって測定する）を定量的なものにしたことである。キュリー夫妻はさらに Ra からの放射線が磁場によって影響を受ける成分と受けない成分があること、放射線によって発熱が起こることなどを調べた（１ g の Ra から放出されるエネルギーは 1 時間で 100 カロリー)。1905 年に発表されたアインシュタイン(A. Einstein; 1879-1955) の特殊相対性理論によれば、原子変換に伴う大きなエネルギーをもつ放射線の放出は[原子の内部エネルギー変化/(光速)^2] に等しい質量変化を伴うこととして理解される。またラザフォードらは、

存在する３種類の放射線のうち、巧妙な実験手段を用いて１つはα粒子であり、放出されたα粒子を集めて発光分析することからその実体がヘリウム気体に他ならないこと示した。2番目は電子で、とりわけ負電荷をもち、トムソンが示したものと同じ[電荷/質量]比をもつこと、３番目が電荷のない電磁波であることを示した。また 1911 年、ラザフォードは Ra からでるα粒子が物質（いろいろな薄膜）を通過するさいの飛跡を解析することによって、物質を構成する原子がその原子番号に等しい単位の陽電荷を有する小さい散乱体（＝原子核）をもつことを示した。こうしてトムソンが発見した電子の存在とあわせて、原子の構造が具体性をもって姿を現してきた。

放射線発見の第一世代の研究:

天然に存在する放射線は、フランスで発見され、イギリスでその性質が明確にされた。その放射線は、化学的な状態に無関係に、ある種の原子（U、Th、Ra など）から発生し、物質中の分子をイオン化し、気体を導電性にしたり、固体を発光させたりする。またその種類はα線（He 原子になるもの）、β線（電子）、γ線(電磁波)があることなどがわかった。また原子崩壊にともなう変換則も提出され、原子の構造がおぼろげながら解明され始めたといえる。すなわち原子内には小さな核が存在し、原子番号に等しい単位の陽電荷をもち、その周りには負電荷をもつ軽い電子がちょうど核の電荷を中和するように存在して全体として電気的に中性を保つ。あらゆる原子に含まれる普遍的な電子は、ケンブリッジ大学のトムソンが真空放電の実験を用いて発見した(1897)ものであり、また原子核の存在はその後継者ラザフォードがα線散乱の実験により発見(1911)、さらにラザフォードの学生モーズリー（H. G. J. Moseley; 1887-1915 第一次世界大戦で戦死）は、ボーア(N. Bohr; 1885-1962) の水素原子の理論(1913)を聞いた後、原子番号 Z の原子を高速電子によって励起するときに放出する特性 (固有) X 線の波長λが $\lambda^{-1} \propto (Z - s)^2$ として表されること（=Moseley の法則; 1913）を見つけた。こうして電子がエネルギー的に一定の規則にしたがって原子内に存在することが明らかになってきた。その規則こそ 1900-1925 年にかけて完成された量子力学によって理解されるもので、これにより原子核の周りを運動する複数個の電子がどのようにして安定な軌道を形成し、安定な原子をつくるかが理解されたのである。

３　原子核を構成する粒子の探索とその研究—イレーヌ・キュリー、フレデリック・ジョリオ、チャドウィック、フェルミ—

チャドウィック（J. Chadwick; 1891-1974）はマンチェスターに生まれ、マンチェスター大学では、ちょうどラザフォードが放射線を使った原子構造の研究を始めた時期に重なり、師から多くを学んだ。有名なラザフォードの原子核の存在を確認した研究(1907 – 1911)は、学生ガイガー(J. W. Geiger; 1882-1945) やマルスデン(E. Marsden; 1889-1970) の協力を得て行われた:「原子番号 Z の原子の原子核は＋Z の点状(原子の大きさに比して無視してよいほどの大きさ)の電荷をもつ」が結論である。またケンブリッジのトムソンの研究室では真空放電の実験で陽極線の質量分析が進展し、原子番号 Z の原子の質量が水素原子の質量のほぼ２Z 倍であることなどが分かってきた。

(i)　　原子核の中に陽子がある

α 線は紙 1 枚でさえぎられるといわれるように、Ra や Po の粉末を金属箔で包むとα 粒子はでてこない。ところが金属箔の種類によっては近くに置いた ZnS を光らせるような放射線が検出されることをラザフォードは以前から気づいていた。チャドウィックに指示して、真空にした小さな箱のなかの Ra からでるα 粒子を銀ホイルの窓を通して ZnS で検出し、銀ホイル窓と検出器の間にいろいろな物体を挿入して検出頻度をしらべる実験をしていた。真空の代わりに空気を入れたら ZnS の光る数が増加、それは空気中の酸素でなく窒素のためであることを確認し、さらに次の反応が起こり：

$$\alpha + N \rightarrow O + p(\text{陽子}) \qquad (1)$$

そして p がα 粒子よりも透過性が大きいためであると結論した(1919)。つづいて多くの元素 B、 N、 F、 Ne、 Na、 Al、 Si、 P、 S、 Cl、 Ar、 K についてしらべ、重い元素の原子核は電荷が大きいため α 粒子は近づくことが出来ないが、軽い元素の原子核に対しては反応が起こり p（陽子）が飛びでると考えた。すなわち「すべての元素の原子核は水素原子核（＝陽子）と電子から構成される」ことを確認した。たとえば原子量が 4 で原子番号が 2 の He の原子核は陽子 4 個と電子 2 個から成るというように。とくに陽子 1 個に電子 1 個から成る仮想上の電気的に中性の原子核(＝中性子)の存在を考えた(1920)。しかしどうして電子はあるときは陽子の中に入って中性の核をつくり、また別のときは陽子の外側をまわって普通の水素原子をつくるのかは説明できなかった。ラザフォードが 1919 年にトムソンの後を継いでキャベンディシュ研究所の教授になったとき、チャドウィックもキャベンディシュ研究所に移った。

イレーヌ・キュリー（Irene Curie; 1897-1956）は 1918 年に母親の実験助手として、またフレデリック・ジョリオ(Frederic Joliot; 1900-1958) は 1925 年にマリー・キュリーの実験助手として、二人ともパリのラジウム研究所に入所、キュリー夫人の指導の下で、寿命の長い自然放射性元素からでる放射線の検出、飛程、エネルギーなどの測定、化学分離・分析の技術を修得した。1925 年に結婚、イレーヌは Po のα 粒子に関する研究で学位論文(1925)、またフレデリックは放射性物質の電気化学的研究で学位論文を書いた(1930)。彼らの利点は、なによりも両親が残してくれた強力なα 線源（Ra および Po）を所有していたこと、また父親ピエールの実験物理学者としての卓越した才能によって整備された数々の放射線の定量的な測定技術（例：気体の電離量の測定にエレクトロメーターを用いる）が利用できたことである。

フェルミ(E. Fermi:1901-1954) は、イタリアの生んだ卓越した才能の持ち主である。数学・物理に秀で、ピサ大学卒業後は理論家として統計物理学、ベータ崩壊理論の仕事をしてローマ大学教授に迎えられた。イレーヌとフレデリック・ジョリオ・キュリーの人工放射性元素の発見に触発されてローマ大学で中性子による核反応の実験を開始した(後述)。

(ii) 原子核の中に中性子がある

1930 年、ドイツのボーテ（W. W. G. Bothe; 1891-1957）とベッカー（H. Becker）は Po からでるα 粒子と Be の衝突からでてくる放射線の飛程が大きく、(1) 式の反応で出てくる陽子ではなく、もっと透過性の大きいγ線であろうと報告した（図－1）。パリのキュリー研究

所のジョリオ・キュリー夫妻は、両親が残してくれた強力なPo線源を用いて精度の高い実験を行ない（1931.12.21報告）、この“γ線”が電気的に中性で金属板を容易に透過する一方で、パラフィンなど水素を含む物質を通るときに陽子をはじき飛ばすことを報告した（1932.1.18報告）。このときの陽子の運動エネルギーを測定してみると、入射α粒子のエネルギーの10倍も大きいことが分かり(1932.2.22報告)、おそらくエネルギー保存則が破れているとした。この報告を読んだチャドウィックは、ここで問題とされている“γ線”とは、師のラザフォードが言っていた中性子であると正しく解釈した（1932.2.17報告）。“γ線”による陽子のはじき出しは電子がコンプトン効果によってはじき出されるのと同じ過程であろうとジョリオ・キュリー夫妻は考えたが、チャドウィックによると実は重大な困難があるという。陽子の飛程から推定される“γ線”のエネルギー50 MeVがPoのα粒子のエネルギー5MeVの10倍ということに加えて、コンプトン散乱の起こる頻度が理論（Klein・仁科の式）よりも数千倍も大きいからである。そこでチャドウィックはPo-α＋Be反応からの放射線（質量M、 速度V）がパラフィン中の水素原子核(質量1)を弾き飛ばしたとして期待される陽子の最大エネルギーは5.5 MeV、するとこれまで知られていたデータから空気中の飛程40 cmがよく説明できることを示した。またPo-α＋Be反応からの放射線が空気中の窒素（N原子）をはじきとばすときのエネルギーは1.6 MeVで、飛程3 mm、そして電離箱内でのイオン対生成数30,000-40,000という結果もよく理解できることを示した。ただしチャドウィックは中性子というものの実は陽子と電子が結びついたものと考えていたようである。

（iii）中性子発見の波及的効果—原子核構造模型

中性子発見後直ちに提出されたのが、陽子と中性子とから原子核が構成されるという核構造模型（Iwanenko; 1932）およびハイゼンベルグ(W. K. Heisenberg; 1901-1976) やフェルミ(E.Fermi; 1901-1954) のβ崩壊理論である。イワネンコ(D. Iwanenko; 1904-)は質量数A、原子番号Zの元素の原子核はZ個の陽子と（A－Z）個の中性子から成るとしてスピンと統計の関係が都合よくなることを議論した。また核崩壊については、α崩壊が量子力学的なトンネル効果として核から外に透過することとして1928年にガモフ(G. Gamow; 1904-1968)らによって説明されていたが、β崩壊はβ線（電子の放出）のエネルギーが特定の値でなく連続的に分布している（チャドウィックが発見; 1914）ことから長い間なぞとされていた。チャドウィックの中性子発見の知らせを聞いた量子力学の創設者の一人といわれるハイゼンベルクは、原子核内で陽子と中性子が電子を交換することによって互いに結びついているという考えを出した。フェルミの理論（1933）では、陽子や中性子はともに素粒子であり弱い相互作用によって互いに変換するが、そのさいに電子（または陽電子）とニュートリノの生成を伴うというものである。チャドウィックやジョリオ・キュリー夫妻は、その後、γ線を使って重水素核を陽子と中性子に破壊する実験を開始し、中性子の質量が（陽子+電子）の質量よりわずかに大きいことを発見し、中性子が陽子と電子の複合物である考えを捨てなければならないことを証明した。湯川秀樹は、陽子や中性子などの核子の間に働く力を導入し、その力を媒介する（ちょうどクーロン力を媒介する光子のような）粒子として、到達距離が核子の大きさに相当する 10^{-14} m になるような質量をもつ中間子（電子の200倍の質量）を考えた（1934）。するとβ崩壊では、核子が中性子（あるいは陽子）の状態か

ら陽子（あるいは中性子）の状態に移るときに放出される量子が負のエネルギー状態の軽い粒子（中性微子；ニュートリノ）に吸収され、その結果、正のエネルギーを持った電子（あるいは陽電子）と反ニュートリノの状態が現れて核外に放出されることになる。

(v) 人工放射性元素の発見

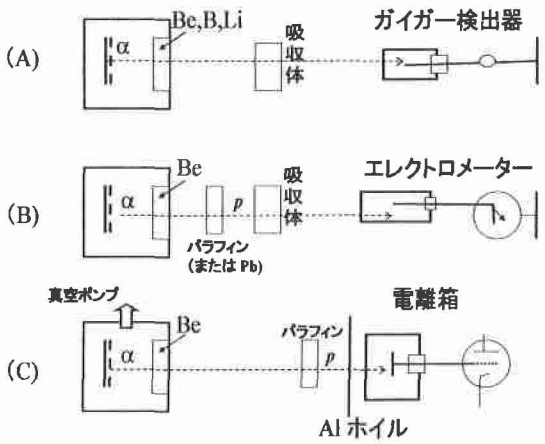
ジョリオ・キュリー夫妻が Po からのβ線を研究する目的で、磁場をかけたウィルソン霧箱の薄い Al 板の窓の近くに強い Po 線源を持ってきた（薄い Al 板はα線を吸収してβ線の飛跡だけが見えるようにする）ときに、霧箱のなかに正と負の電子と思われる粒子の飛跡をみつけた。これまでよく研究された(1)の反応であれば

$$\alpha + \text{Al-27} \rightarrow \text{Si-30} + \text{p (陽子)} \qquad (1')$$

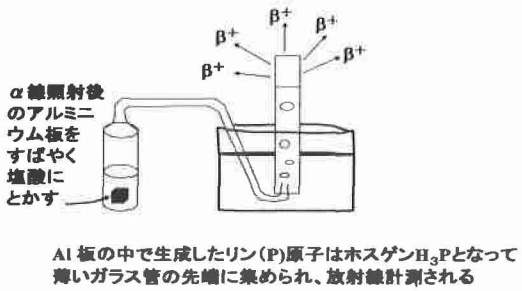
であり、+電荷の電子の生成反応は理解できない。夫妻は新しい反応

$$\alpha + \text{Al-27} \rightarrow \text{P-30} + \text{n(中性子)} \qquad (2)$$

が起こり、生成したリン（P-30）の核が陽子過剰のために不安定で陽電子を放出すると解釈した。これを示すために、図－2 に示すような装置で 3 分以内に化学分離して P-30 から陽電子(β^+)が放出されることを確認した。さらに霧箱の窓をホウ素、マグネシウムなどに置き換えα照射を止めてからも暫く放射線放出を確認した(1934.1 月)。こうしてこの年の 11 月には 50 以上の人工放射性元素がつくられた。



図－1 (A) ボーテ、ベッカー（1930）が Po からのα線を Be, B, Li にあてると、放射線が出ること、この放射線が鉛を透過することからγ線と報告
(B) ジョリオ・キュリー夫妻（1932）がこの 'γ線' が 50MeV でパラフィンから陽子をたたき出すと報告、
(C) チャドウィック（1932）が'γ線' でなく、中性子であると報告



図－2 ジョリオ・キュリー夫妻による最初の人工放射性元素の発見(1934). Al 板を Po-α で照射するとき Al 板が放射化される。半減期 3 分程度の P(リン)の生成を迅速に化学分離して実証した

(iv) 中性子発見の波及的効果—核反応の新たな進展

もう１つは、これまでのα線による原子核破壊に代わって、中性子を用いる核反応の研究である。中性子は単に現象を説明するための観念的な粒子ではなく、物的な感覚的な存在となった。それはクーロン反発力がなく、自由に原子核に近づき得る粒子である。ローマ大学のフェルミらはα線放出元素としてローマ大学地下倉庫に置かれていた１ｇのRaから崩壊生成物として出てくる Rn (ラドン) 気体を必要に応じてガラス管を外側から挿入して集め、線源として用いた。Rn-α+Be からの中性子を使って周期表の順にすべての元素で試み、ついに原子番号 92 の U (ウラン)まで達した。その途中で水素などの軽い原子核の衝突によってエネルギーを失った"遅い中性子"による核反応効率の著しい増大、いわゆる減速材効果を発見した。また、もし照射ウランがβ崩壊を起こせば 93 番、さらには 94 番の元素が合成されたことになる。時あたかも加速器がつくられ始めたころで、加速器を用いて発生させた中性子（陽子やヘリウム原子核を軽元素に照射して発生させる）を使った核反応の研究が短い期間に世界中で広まった (表－1 参照)。

表－１　中性子による原子核反応の研究

年　月	研究者	核反応
(1934年)		
1月	Joliot-Curie	α + (B, N, Mg, Na, Al, P)
2月	Cockcroft/Walton	p + C
	Lawrence	p + P
3月	Fermi	n + (Al, B)
4月	Fermi	n + (Fe, Si, P, Cl, V, Cu, As, Ag, I, Cr, Ba, Na, Ti)
5月	Fermi	n + (Mg, S, Mn, Co, Zn, Ga, Br, Pd, Pr, Nd, Sm, Au, U)
6月	Fermi	n + (Mo, Rh, Ir)
おそい中性子 n との反応		
(1934年)		
10月	Fermi	n + Ag (**水，パラフィンの存在で放射能が急増**)
9月	Fermi	n + U, Th (**b崩壊，超ウラン元素合成？**)
(1939年)	Hahn	**核分裂の発見**
	Bohr	**液滴モデルによる核分裂の説明**

4. まとめ

新しい発見は予期できない現象の中にひそんでいる。それが重大なことなのか、あるいはちょっとした手違いから生じたことなのかを見極める能力と解明までの徹底した根気強さが鍵をにぎる。ここにあげた放射線発見の第一世代の研究者、すなわちレントゲン、ベクレル、キュリー夫妻、トムソン、ラザフォードらはみなそうした人たちであった。その後継者ジョリオ・キュリー夫妻とチャドウィックは、それぞれマリー・キュリーとラザフォードから直接に指導を受けた。前者が引き継いだものは、高価で希少な Po や Ra の強い線源と放射線の量を電気的に(定量的に) 測定する技術であった（文献 4）参照)。後者が引き継いだものは、「物質がどのようにつくられているか」を追い求めるキャベンディシュ研究所の伝統であった（文献 1、 2、 3 を参照されるとよい）といえる。たとえば、後からみれば、ジョリオ・キュリー夫妻は誰の目にも明らかに中性子を発見していた(1932)のであ

る。この報告を聞いてチャドウィックはすぐさまラザフォードが語っていた(1920)中性子を思いつき、栄冠を勝ち得た(1932)。このことの述懐とも推察されるジョリオの言葉が残されている：

「古い伝統ある研究室に出入りする者はしばしば自分でも知らぬ間に隠れた財宝から利益を受ける。優れた研究者や研究指導者によってその研究室でかつて述べられた考えが人々の会話の中にくりかえし定期的に出てきて、意識的あるいは無意識的に若い研究者の頭の中におさめられる。研究の途中で、こうした知識が正しい解釈をたすけ、ときには新たな発見を容易にする。ある特定の発見がある特定の実験室でなされる機会が他の場所より多い理由がこれでわかるであろう。」(1958年6月F. ジョリオの講演「オルセー原子核研究センターの設置と研究者の育成」より；文献5、p. 839)

中性子発見の栄誉を逃したジョリオ・キュリー夫妻は、くやしがる暇もなしに、小さな霧箱に映る陽電子のかすかな飛跡を頼りに人工放射性元素の合成という人類にはかり知れない財宝を残し、チャドウィックとともに1935年度のノーベル賞に輝いた。理論家であったフェルミも、複雑に絡んださまざまな報告が伝えられてくる中から中性子（α＋Beで発生させる）による核反応の重要性を捉えて体系化する決断を行い(1934)、1938年度のノーベル賞を受けた。以後、中性子による核反応の研究に関しては、ラザフォードの弟子であったO. ハーンはL. マイトナー、F. シュトラスマンとともにベルリンで、イレーヌ・キュリーとサビッチらはパリでそれぞれ独立に研究を続け、ついに核分裂の発見(O. Hahn: 1939)にいたった。核分裂の利用方法の研究・開発に対しては、各国とも軍事機密下ですすめ、原子力時代に向かうのである。まずフェルミは、夫人がユダヤ人であったことからストックホルムでの授賞式からそのままアメリカにわたり、シカゴ大学で人類最初の原子炉をつくり(1942)、その後シカゴ大学教授となった。イレーヌはパリ大学教授に、またフレデリックは、ナチスに対するレジスタンス運動に参加、戦後はフランス原子力委員会長官となり、原子炉（酸化ウラン・重水減速・出力ゼロ）ZOEを組み立て(1948)、以後、サクレーやオルセー研究施設などの設立を指導した。この3人はいずれも50代半ばで亡くなっている。チャドウィックはリバプール大学教授に就任、大戦中は米国ロスアラモスで原子力兵器の研究に従事した。恐らくは放射線障害が原因ではないかと思わせるような、平均よりも短く、そして人類を不幸にした大戦のさなかでの苦労多い人生であった半面、輝かしいまれにみる劇的な研究生活を送ることのできた生涯であったと推察される。

放射線発見第一世代が独仏英で活躍したように、第二世代も英仏伊独にまたがって互いの競争のなかで活躍した(1930-1945)。彼らの実験装置は机の上にのる程度の手つくりである。第2次世界大戦後に発展した大掛かりな実験設備とは異なる。

参考文献

1) 電子と原子核の発見、S. ワインバーグ著、本間三郎訳、日経サイエンス社(1986)
2) From X-rays to Quarks, E. Segre, Freeman&Co (1980)
3) A Hundred Years and More of Cambridge Physics, Univ. Press, Cambridge (1998)
(キャベンデッシュ研究所歴代所長を紹介する小冊子 pp. 47)
4) F. et I. Joliot-Curie, OEUVRS Scientifiques Completes, Pres. Univ. France (1961)
(フレデリックおよびイレーヌ・ジョリオ・キュリーの学術論文全集 pp. 915)

5) Travaux Pratiques de Physique Nucleaire et de Radiochimie, Masson et Cie (1960)
(F.ジョリオの亡くなる数ヶ月前の要望により準備されたパリ大学理学部学生向け実験指導書 pp.324、キュリー夫妻、ジョリオ・キュリー夫妻の実験など 40 項目を含む)
6) Les Radioelements Naturels, Hermann et Cie (1946), イレーヌの教科書
7) ジョリオ・キュリー伝、M. シャリスコリスカヤ著、高倉太郎訳、理論社 (1961)
8) キュリー家の人々、E. コットン著、杉　訳、岩波新書 539（1963）
9) 原子力の父・フェルミの生涯、L. フェルミ著、崎川範行訳、法政大学 (1955)
10) エンリーコ・フェルミ、P.ド・ラティル著、遠藤真二訳、河出書房 (1969)
11）物理学古典論文叢書 7 「放射能」、物理学史研究刊行会編、東海大学出版会 (1970)
Röntgen、Becquerel、Curies、Rutherford、Soddy らの原論文が訳出されている

ページの余白に

筆者は、1962-1963 にかけて 1 年数ヶ月間、フランス政府給費留学生としてパリ大学ラジウム研究所（キュリー研究所）に滞在、パリ大学放射化学教授 M. Haisinsky 先生の指導の下、触媒化学反応に対する放射線照射効果の研究にたずさわる機会を得た。かつての所長であったマリー・キュリーは 1934 年に、またイレーヌ・キュリーは 1956 年に、その後継を勤められたジョリオ・キュリーも 1958 年に亡くなっており、Haissinsky 先生がキュリー研究所の所長とパリ大学の放射化学教授を勤められていた。先生のお部屋は（日本流では）4 階の狭い屋根裏部屋にあり、隣りの広い化学実験室では年配の女性がいつも先生の指示により実験をしていた。到着後 1 週間ほどは、ここが筆者の居場所だった。先生だけは専用の小さいエレベーターを使っておられたが、秘書の話によると研究所の近くに秘密の休息用の部屋を借りておられ、疲れたときはここで休まれるとのこと。いつもだれかれ構わずに冗談を言って楽しんでおられ、筆者が「Bonjour Monsieur. Comment allez-vous ?」仏語教室で習ったとおりの挨拶をすれば、「Je vais toujours très mal（私はいつも悪い）」。返事に困ってキョトンとしているとニヤリと笑いながら立ち去る。やがて 1 階の中庭に面した小さな実験室が私の実験場所と定められたが、ここが実はマリー・キュリー以来の歴代所長の化学実験室、「薬品戸棚には手を触れないように、壁に赤く丸印のところは近づかないように」との注意をうける、放射能で汚染されているという。先生は外国からの訪問客をよく案内して来られ、その度に握手をさせられた。実験で右手が塞がれているときは「左手の握手は特に親しい間柄どうしの握手だ」とか、またあるときは「君の友達を連れてきた」といいながら見知らぬインド人を連れてこられ、「化学実験台はα汚染が大変で上からタイル張りをした」（英語の説明で理解できた）など自慢げに説明し、帰りしなに早口で「友達の友達はみな友達だ」（これはフランス語で）とかいうセリフを残す。実験室からガラスの重いドアを押して中庭にでるとテラスがあり、「このテラスの鉄の手すりに寄りかかって写真を撮ることは禁物」（これは別の同僚から注意されたこと）。キュリー夫人が好んだ場所であり、同じポーズで立つのは恐れ多いのだそうだ。この実験室に隣接して器具整理の小部屋、それから広い物理測定室（1962 年当時は研究所の事務室として使用されていた）、並行して書斎、浴室、キッチン、休息室などのキュリー夫人の生活空間。反対側に廊下、左右に会議室や討論室が続き奥に階段教室（講義室）。講義室の横の壁一面に大きな周期表が書かれ

ており、それがちょっと変則の周期表であった。中性子が希ガスの上にあり、アクチニド族の代わりにウラニド族（U、 Np、 Pu、 Am）とキュリド族（Cm 以降 103 番元素まで）が分類されている。あるとき先生に質問した。先生は多く語らず「世界中が同じ周期表を使っていたら進歩が止まる！」とのこと。建物の２、３階は実験室と図書館、研究者は女性が 6－7 割程度、多くの部屋にイレーヌ、あるいはジョリオの、年配の人だとマリーの写真が飾られていた。Haissinsky 先生の部屋には Lavoisier の写真。建物の地下は工作室、ナチス占領下時代にはレジスタンス運動用のプラスチック爆弾をここでつくっていたという。石の階段は人が多く踏んだ箇所は深くへこみ、木製の階段の手すりは黒ぴかりして、多くの研究者・訪問者の足跡が思いやられる。あるとき F. ジョリオの映画があるというので見に行った。多分 1940 年の話、ドイツ軍がベルギーからフランスに侵入をはじめ、ジョリオの指示で弟子たちが貴重な重水と実験データ（書類）を持ってイギリスへ逃れる。P. ランジュバン教授もでてきて逮捕されたりする、そんな映画であった。また別の日、ルーブルの絵画をごっそりとドイツ軍が運び去ろうとするのをフランス鉄道員たちが連絡を取り合いドイツ兵を欺いて列車がまったく別方向へと走っていく、映画も観た。

1970 年に再訪したときのパリの街はすっかり明るくなってびっくりした。以前は、建物のすべては黒ずんで煤けていた。洗浄すべきかどうか議論が噴出していたことを思い出す。キュリー研究所も外観はきれいになり、内部も変わり、徐々にこの研究所の主力はパリ郊外オルセー地区に移転しつつあった。それから 10 年ほど後、オルセーのソー公園にある先生の墓参りをして、同じ墓地にあるキュリー夫妻とジョリオ・キュリー夫妻のごく普通のつつましやかなご一家のお墓をお参りすることができた。また 10 年ほど後、テレビニュースでキュリー夫人の墓がパリ市内大学地区にあるパンテオン（フランスのために尽くした偉人を祀るところ）に移されたことを知り、ソー公園にあった以前のお墓はどうなったのか心配になり確かめに赴いた。そこは以前のままで、パンテオンに移したという小さい説明が添えられていた。研究所の現在は、ラジウム 100 年記念祭の後のせいもあって、きれいな博物館に改装され、周期表はもう消されていたが、講義室はまだセミナーなどに使われているという。若い案内人に爆薬を製造したそうだけどと尋ねてもとても信じようとしない。付近一帯の市立物理化学学校、その他キュリー夫妻に関係があったところはすべてきれいに整備されていた。

ロンドンの科学博物館には、原子の内部を探る実験装置、電磁波の実験、中性子発見の装置など分かりやすく展示してある。ケンブリッジに足を伸ばすとキャベンディッシュ研究所も郊外に移転し、新しい建物は Rutherford とか、Bragg とか名前がついている。中に入るとすぐに展示コーナーになっていて、装置の見本や当時の写真が展示されている。ロンドンに戻ってウェストミンスター寺院の中に入ると、有名なニュートンの墓がある。その近くに J. K. Maxwell、それから J. J. Thomson、E. Rutherford、P. A. M. Dirac、J. Chadwick の名前も読み取れる。第２世代も第１世代と同じように大切に祀られていることが分かる。

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 9 No. 1, p. 15－22 (2005)

放射線単位ことはじめ

村主（すぐり） 進

原子力システム研究懇話会
東京都港区虎ノ門1－7－6

(2006 年 3 月 11 日 受理)

〔要約〕1895 年にレントゲンが X 線を発見してまもなく、放射線には医療効果と放射線障害のあることが認識された。効果的な医療と放射線障害防止のために放射線の量（線量）を正確に測る必要がある。また放射性物質の量も規定する必要がある。このために放射線、放射能の標準単位を確立するための努力が如何になされたかを放射線、放射能の発見の歴史とともに解説する。

1．はじめに

時間、長さ、重さなどの標準（単位）が人の生活に必要欠くべからざるものであることは言うまでもない。放射線についてもその標準は必要欠くべからざるものである。医療効果を高めたり、国内および国際的に医療効果の比較検討する場合においても、放射線障害の有無ないしは障害の程度を検討する場合においても、放射線の被ばく線量抜きで論じることはできない。

明治より昭和にかけての放射線標準に関する解説はあまり見当たらない。従ってこの機会に筆者が工業技術院電気試験所[1]で経験した事項および当時の研究室長の伊藤岳郎先生より教えられた昔の出来事などを中心として放射線単位の歴史およびこれに関連した内外の事情を述べたい。

2. 放射線計測に関連する歴史

1895 年に Roentgen が X 線を発見し、3 年後の 1898 年に Curie 夫人がラジウムを発見した。それ以降の放射線計測に関する事項を、関連する事項も含めて、主なものを列挙すると表 1 のようになる。

列挙する事項は年代により頻度が異なるので、10 年ごとに横線の枠で区切り、各事項の前に、事項の起こった年を示すことにした。また第 2 欄に世界の動き、第 3 欄に国内の動きを示した。

この年表には 1963 年までの出来事を示す。以下に記載する内容はこの表を参照して、前後関係を考えながら読んでもらいたい。

3．X 線およびラジウムの発見

放射線の中で最初に発見されたのは X 線である。1895 年 Roentgen が暗室の中で放電管の実験をしているときに、傍に置いた蛍光体が発光している現象を見つけ、放電管から放射されているものを X 線と名づけた。

---

[1] 1891 年（明治 24 年）逓信省に電気試験所が創設される。1948 年（昭和 23 年）に通産省の所管となる。1970 年（昭和 45 年）に電子技術総合研究所と改称。2001 年（平成 13 年）に工業技術院の他の研究所と統合して独立行政法人・産業技術総合研究所となる。現在放射線および放射能の国家標準の維持および研究は産業技術総合研究所で行われている。

X線が発見されると、間もなく医学的診断の目的に利用されたが、初期には骨折や脱臼程度の診断に限られていたようである。また早くからX線には生物学的作用があることが経験的に見出され、1896年初頭にはガンの治療にX線照射が試みられたとの記録もある。そしてX線の照射を受けた患者の皮膚障害や脱毛が認められ、この他の色々な経験よりX線は医療効果があるものの放射線障害の危険を伴うものであることが知られた。

一方、1896年になるが、レントゲンがX線を発見して3ヵ月後には、Becquerelがウラン鉱より放射線が出ていることを発見している。放射能の発見である。そしてCurie夫人が純粋のウランよりもピッチブレンドのようなウラン鉱石のほうが放射能が高いことを見出し、ピッチブレンドにウランよりも放射能が高い物質があることに気づいた。Curie夫妻はピッチブレンドを化学処理して、1898年にポロニウムを、ついでラジウムを発見した。

ラジウムも放射線治療に用いられたが、当初はラジウムは放射線障害を起こさず安全なものといわれていた。これは使用経験と認識の不足によるもので、その後すべての放射線は医療効果と放射線障害があることが認識された。

4．放射線単位および放射能標準の動き

4.1 放射線標準の動向

放射線の量を測定する方法は、化学作用、蛍光作用、電気抵抗の変化および電離作用を利用する方法がある。初期の頃は化学作用、蛍光作用や電気抵抗の変化で測定する試みも多くなされていたが、何れも精度が低いことや反復性のないなどの欠点があった。

一方、フランスの物理学者Villardは1908年に、電離により標準状態の温度圧力のもとに空気1ccに1静電単位の電気量を生じるような線量の単位を提唱した。

各種の論議を経て、1924年にドイツのPTR[2]のBehnkenが線量の単位は「温度18℃、圧力水銀柱760mmの空気1ccを照射し空気中に放出された電子を完全に利用し且つ槽壁の作用を除去して、飽和電流において一静電単位の電気量となるべき伝導性を付与するX線のエネルギー」と定義した。ドイツのレントゲン学会はこの単位とともにその測定方式を採用しR(レントゲン)と称した。

当時フランスにはソロモン単位というものがあり、1gのラジウム元素のγ線を0.5mmの白金でろ過したばあい2.0cmの距離における放射線の強さを単位として、フランスのレントゲン学会が採用していた。

また米国ではDuaneにより、いわゆるDuane単位とその測定方式が完成され採用されていた。

このような状況のもとで国際的な線量の単位を確立する動きが高まり、1925年の第1回国際放射線学会[3](ICR)において線量単位の国際的協定の必要性が論じられた。

1927年にはBehnkenが指頭型電離箱を使って、ドイツのゲッチンゲン大学、ボルン大学、米国のクリーブランド大学、ハーバート大学のそれぞれの線量標準器の相互比較を実施している。そして1928年の第2回ICRUにおいて、およそBehnkenの定義に従い、ただ18℃を0℃に変

---

[2] PTR：physikalisch-Technische Reichsanstalt。現在はPTB（physikalisch-Technische Bundesanstalt）。

[3] International Congress of Radiology(ICR)は1925年に発足した。このとき下部組織のInternational Commission of Radiological Units and Measurement(ICRU)の第1回会合も開かれた。International Commission of Radiation Protection（ICRP）の前身International Commission of X-ray and Radium Protection(ICXRP)はICRの下部組織として1928年に第1回会合が開かれた。

表 1 放射線計測に関連する年表

年	世界の動き	国内の動き
1891～1,900	(1895)Roentgen の X 線の発見 (1898)M.Curie のラヂウムの発見	
1901～1910	(1908) Villard の X 線量の単位の提案	(1909)医療用 X 線装置の国産
1911～1920	(1912) 国際ラジウム原器ができる (1913) ドイツで最初の放射線規制 (1915) イギリスで最初の放射線規制	(1913) ラジウム副標準が東北大、理学部へ
1921～1930	(1924) Behnken：X 線量の単位の提案 標準電離箱完成．独レ学会採用 (1925) Mutcheller が紅斑線量に基づく危害予防の基準を提案 (1925) 第 1 回 ICR で X 線量の単位の国際的協定の必要性が論議 (1927) Behnken が独米の線量の単位の標準器の相互比較 (1928) 第 2 回 ICRU が X 線量単位を定義 (1928) 第 1 回 ICRP (ICXRP) が開催 (1929) 英国が X 線量単位の国家標準完成 (1929) 米国が X 線量単位の国家標準完成 (1930) Lawrence サイクロトロンを考案	(1929～) X 線量の標準測定の研究(安達嘉一、電気試験所)
1931～1940	(1934) Joliot 夫妻による人工放射能発見 (1934) 第 3 回 ICXRP が耐容線量を 0.2r/日とする (1937) 第 5 回 ICRU がレントゲン単位をγ線にも適用	(1934) 台北大、阪大でコッククロフト・ウォルトン型加速器の完成 (1937) 阪大で 25 トン,理研で 23 トンのサイクロトロン完成 (1937) 日本が X 線量単位の国家標準完成(伊藤努、伊藤岳郎：電気試験所) (1937) 内務省令、診療用 X 線装置取締規則 (1937) 逓信省令、X 線量計検定規則
1941～1950	(1942) CP-1 で核分裂連鎖反応の制御に成功 (1950) 第 6 回 ICRU、rad,Ci 単位の採用 (1950) ICRP 300mr/週を勧告	(1944) 理研で 220 トン大型サイクロトロン完成 (1945) 広島、長崎に原爆 (1945) 理研、京大、阪大のサイクロトロン、米軍により破壊 (1950) 米国より仁科博士に RI の寄贈
1951～1960	(1958)ICRP　5(N－18)rem を勧告 N：年齢	(1952) 理研が 26 インチサイクロトロン再建、試運転 (1954) 第 5 福竜丸、ビキニ米水爆実験により被ばく (1957) 原子炉等規正法成立 (1957) 放射線障害防止法成立 (1957) JRR－1 臨界（日本原子力研究所）
1961～1970		(1963) JPDR 初発電（日本原子力研究所）

更したものをもって単位とし、r(レントゲン)で表わすこととした。

その後レントゲン単位は、ICRU において色々な表現に変更されたが、表現が変わっただけで、この定義のものが照射線量の単位として用いられている。また 1937 年の第 5 回 ICRU ではレント

ゲン単位をγ線にも適用することとした。

ICRUのレントゲン単位を現示する国家標準としての標準電離箱はドイツのPTRに続き、米国NBS[4]および英国NPL[5]が1929年に国家標準としての標準電離箱を完成している。

4.2 放射能標準の動向

放射能標準については、Curie夫人がラジウムを発見して12年目の1910年にCongress of Radiology and Electricity(Brussels)が開催され、ここで国際ラヂウム原器と副原器を設定すべきことが提案された。

1911年にはCurie夫人により21.99mg、Otto Hoenigschmidにより10.11mg、31.17mg、40.43mgのラジウム標準が作成された。

1912年にラジウム標準の相互比較が行なわれた結果、Curieの21.99mgがラジウム原器としてSevresの国際度量衡局に保管され、Hoenigschmidの31.17mgが副原器としてウイーンのInstitut of Radium-Forschungに保管されることになった。そして各国にはラヂウム副標準が配布された。わが国には1913年(大正2年)にラジウムの副標準が東北大学理学部に送られた。

放射能の単位は当初はラジウムの量で定義されていた[6]が、人工放射性同位元素が作られるようになり、毎秒3.7×10^{10}の崩壊率の放射性物質の量を1キュリーと定義されるようになった。この新しいキュリー単位は1950年の第6回ICRUにおいて正式に採用された。

人工放射性同位元素の放射能標準については、1951年に米、英およびカナダの3国間で国際標準を設定すべきことが協議され、米国のNBSで製作された試料について各国で測定する相互測定方式が採用実施された。これにより各国の放射能標準の検定に用いる$4\pi\beta$カウンター、β-γ同時計数管、液体シンチレーションカウンターの測定精度の相互比較が行なわれた。

5. 国内における動向

レントゲンがX線を発見したのは1895年(明治28年)11月8日であるが、この情報が日本に伝わったのは早く、翌年の明治29年2月20日頃であったとのことである。そしてこの年には関東では東京帝大理科大学の山川健次郎教授、第一高等学校の水野敏之亟教授らによって、また関西では第三高等学校の村岡範為馳教授、島津製作所の島津源蔵氏らによってX線写真の撮影に成功したとの記録がある（このときはまだ京都帝大は設立されていなかった)。

X線はわが国においても主として医療用に利用されて、1909年(明治42年)には島津製作所によりわが国最初の医療用X線装置が製作され、国府台陸軍衛戍病院に納入された。

1913年以前のX線管はガス入りX線管（管内を低い真空度に保ち管内のガスを電離して加速し陽極に衝突させてX線を発生させるもの）であったが、1913年(大正2年)米国のGE社[7]のCoolidgeが高真空度の熱電子X線管(クーリッジX線管)を発明して以来、管電圧と管電流を別々に制御できるようになり、X線発生装置は飛躍的に進歩した。

1920年(大正9年)に東京電気（東芝の前身）がGE社よりクーリッジX線管の特許を買い、クーリッジX線管が国産されるようになった。そして大正11年～13年にかけて管電圧200kVな

---

4 NBS : National Bureau of Standards. 現在はNIST(National Institute of Standards and Technology)

5 NPL : National Physical Laboratory

6 1グラムのラジウムの放射能を1キュリーとした。1グラムのラジウムの崩壊率は3.7×10^{10}崩壊/秒である。

7 General Electric 社

いし 300kV、管電流 10mA 前後の X 線装置が販売され、X 線装置が飛躍的に普及するようになった。

医療への X 線の利用が普及するにつれて、X 線量計の重要性が認識されてきた。X 線量計は当初は輸入されたものが使用されていたが、島津製作所および東京電気は 1936 年（昭和 11 年）頃より X 線量計の国産化の研究開発を行い、後述の昭和 12 年の X 線量計の検定制度発足の後に検定済みの国産 X 線量計が市販されている。

X 線の工業利用は医療利用に比べて進歩が遅く、島津製作所が 1933 年(昭和 8 年)に非破壊検査用の工業用 X 線装置の製造、販売を開始する程度であった。その後需要は増大したが、1945 年(昭和 20 年)の敗戦後暫くの間は産業界は疲弊沈滞した。

1951 年（昭和 26 年）頃より造船、橋梁などの非破壊検査の需要が増大し、1952 年(昭和 27 年)には日本非破壊検査協会が設立された。

6．わが国における X 線線量の標準

欧米が X 線量の国家標準を確立した頃、日本では電気試験所の安達嘉一氏が 1927 年(昭和 2 年)より X 線標準測定の文献調査を開始し、1929 年(昭和 4 年)頃より Behnken が採用した高気圧型電離箱を用いて X 線量の標準測定の研究を行なっている。ついで 1934 年(昭和 9 年)、東京電気研究所の田中正道、野中到両氏による高気圧型電離箱の研究成果が発表されている。

高気圧型電離箱は形状を小さくできたが、標準測定に用いるには種々の欠点があり、1934 年(昭和 9 年)に東京大学の西川正治、中泉正徳、持田信男の 3 氏により、1938 年(昭和 13 年)に九州大学医学部の入江英雄氏により、それぞれ大気圧型電離箱による研究が行なわれた。

一方、医療用 X 線装置が初めて国産されたのは 1909 年（明治 42 年）であるが、X 線装置の普及とともに X 線による災害防止の問題が喧しく論じられるようになった。内務省では 1937 年（昭和 12 年）に診療用 X 線装置取締規則を制定し、X 線管最大使用電圧 135kV 以上のものに対しては国家検定に合格した X 線量計でもって X 線量を測定するように規制することになった。これと呼応して逓信省では X 線量検定規則を制定した。

これに先立ち、電気試験所の伊藤努、伊藤岳郎両氏が 1936 年度(昭和 11 年度)初頭より大気圧型の標準電離箱の開発にあたり、1937 年(昭和 12 年)にこれを完成させた。これによりわが国の X 線量の国家標準が確立され、これにより市販の線量計が検定されるようになった。日本の国家標準は欧米に遅れること約 10 年である。

X 線量を正確に測定する理由は、当初はガンの治療における適切な線量の設定とともに、患者の放射線被害（被ばくによる皮膚の紅斑）を避けるのが主な目的であった。また各国において治療経験を交換するためにも国際的に統一された線量の単位が必要であった。

7．標準電離箱および標準測定

1928 年(昭和 3 年)に Stockholm で開かれた第 2 回 ICRU で決定された線量の単位の定義を示すと次のとおりである。1 r（レントゲン）とは「温度摂氏 0℃、気圧水銀柱 760mm のときに 2 次電子を完全に利用し電離箱壁の影響を除いた状態において、飽和電流のもとに空気 1cc について 1 静電単位の電荷を生じる X 線の量」をいう。

このような定義を現示できる測定器は、電離箱壁が空気でできていて空気の壁厚は 2 次電子の到達距離より大きいものでなければならない。また電離箱の寸法がはっきり分かるものではならない。このような電離箱を標準電離箱という。そこで伊藤努、伊藤岳郎両氏が開発し、わが国の標

準器となった大気圧型標準電離箱について説明する。

図1および図2に標準電離箱の電極構造および断面図を示す。

図1および図2に示すように、電極構造は一対の正しく平行に対立するAl板よりなる。一方の電極C（高さ30cm、長さ75cm、厚さ5mm)は高圧電極である。他方の電極D、D'は3枚のAl板よりなる。中央のAl板D（高さ30cm、長さ15cm、厚さ5mm)は測定電極であり、その両翼に測定電極と同じ高さで同じ厚さのそれぞれ長さ29.9cmの2枚の補助電極D'がある。

測定電極と補助電極との間隙は1mmで、測定電極はアンブロイド(高純度琥珀)絶縁物により補助電極と同一平面状に正しく固定され、且つ補助電極と絶縁されている。補助電極は常時接地されて使用される。平行に対立する電極の内壁には空気の実効原子番号に近い原子番号であるグラファイトが塗布されている。

図2に示すように、鉛遮蔽箱の一側面にはX線入射用絞りを設け、入射X線の線束の面積を規制している。また反対側の側面にはX線束の逃し窓がある。

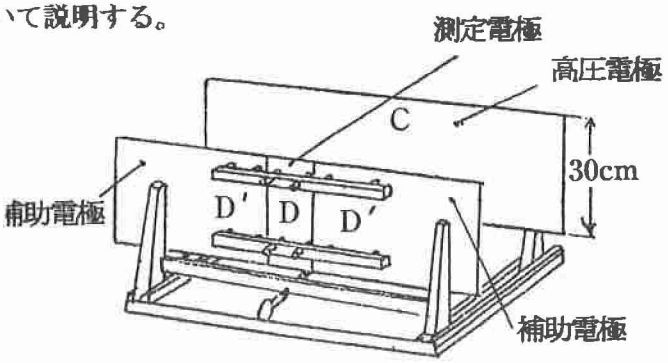


図1　標準電離箱の電極の配置図

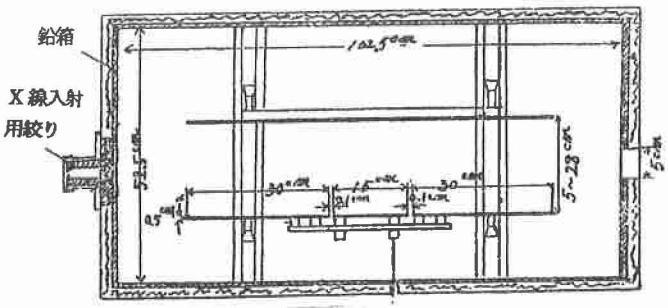


図2　標準電離箱鳥瞰図

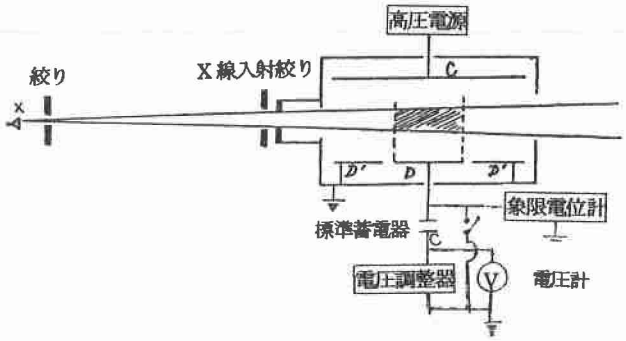


図3　標準電離箱の測定系

なお両電極の間隔は5～28cmの範囲内で任意に調節できるようになっているが、これは電極間隔の影響を調べるためのもので、通常の場合は電極間隔28cmで使用する。

次に電離電流の測定法としては零電位法を用いる。まず図3の測定電極Dに電気容量のはっきり分かった標準蓄電器Cと象限電位計をつなぎ、他方に任意の電圧を与えることのできる電圧調整器と電圧計Vを平行につなぐ。電圧計の一端は接地する。

標準電離箱の平行に対立する電極間に電離電流が流れると、測定電極Dに接続した標準蓄電器を充電して、電位(電圧)があがるが、ここの電位が常に零(接地電位)になるように、蓄電器Cの他方の電極に電圧調整器で電圧を与える。測定電極Dの電位を常に零することは、電圧調整期を調整しながら象限電位計でもって監視することによって達成できる。

零電位法によって電離電流を測定すると、測定電極Dの電位は常に接地電位と等しいので補助電極D'の電位と等しくなる。その場合は電力線が測定線束の位置では電極に垂直であるので、測定電極に集まる電離電流は、電極に垂直な面で限定されたものとなる。

すなわち図3の斜線部分が空気壁で囲まれた電離箱となり、電離槽壁の影響はなくなる。また

電極間隔を十分に取れば2次電子を完全に利用した測定となる。また標準蓄電器の両極間の電圧と標準蓄電器の電気容量より、測定電極に集められた電荷が正確に求められる。したがって標準電離箱を使用し、零電位法で電荷を測定すれば、レントゲン単位を完全に実現した測定となる。

この伊藤努氏、伊藤岳郎氏の開発した標準電離箱はX線管電圧300kV迄のX線に対して0.17%の確度を有して、レントゲン単位を表すことができる。

なお現在は2代目の標準電離箱が標準器として使用され、両伊藤氏の開発した標準電離箱は国立科学博物館の地下室に保管されている。

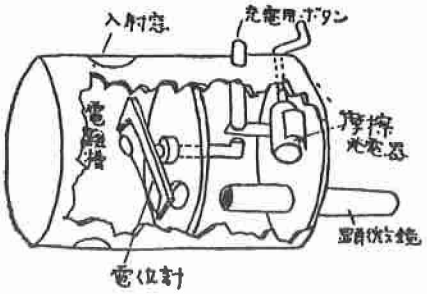


図4　桶型電離箱線量計

8．放射線計測器とそのエネルギー特性

(1) 線量計

放射線治療における患者の患部への被ばく線量を測定するためには線量計が必要になる。当初は輸入品を用いていたが、1938年（昭和13年）頃には島津製作所および東京電気(東芝の前身)で線量計の市販を開始している。

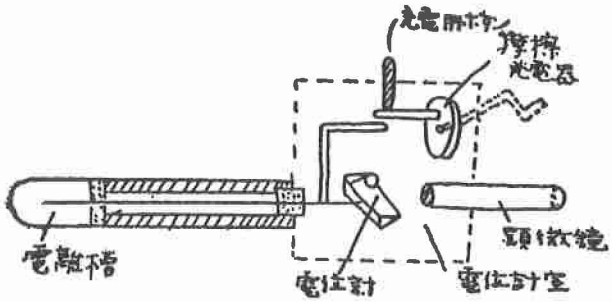
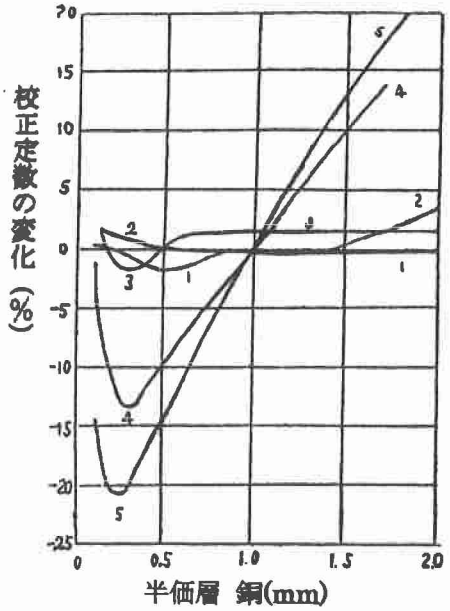


図5　指頭型電離箱線量計

1938年（昭和13年）頃の線量計の形式は大別して2種類ある。一つは図4に示すような桶型電離箱線量計で、他は図5に示すような指頭型電離箱線量計である。どちらも摩擦発電機で検電器(電位計)を充電して、放射線による電離電荷量を検電器の指示の変移で観測するものである。

線量計は電離箱の大きさが壁面で限られ、壁の材料が空気の実効的な原子番号と異なる。したがって標準電離箱と比較すると、X(γ)線のエネルギーに依存した感度特性を有する。1938年頃に用いられた線量計のレントゲン単位での校正定数の変化を図6に示す。曲線1および2は桶型電離箱線量計の、3、4および5は指頭型電離箱線量計の校正定数の変化である（校正定数は感度の逆数である)。

また図では銅の半価層でX(γ)線のエネルギーの大きさを表わしている。図にみるようにこれらの線量計は、使用範囲では最大±20%程度の感度変化がある。



1：キュストナー・アイヒスタンドグレード
2：島津標準型線量測定器
3：マツダγメータ
4：マルチウス・イオニメータ
5：島津イオニメータ

図6　線量計の校正定数

(2)放射線サーベイメーター類

GM管式サーベイメータは1952年(昭和27年)には国産品が市販されている。その後、まもなく国産の電離箱型サーベイメータも市販された。

これらは昭和初期の前述の線量計が検電器を用いて電荷を測定しているのに対して電子回路を用いており、より微量の電荷の測定が可能になり、感度は大いに向上している。

放射線サーベイメーターについても、X（γ）線エネルギー感度特性は同様であるが、0.3MeV以上のガンマ線に対してはコンプトン吸収が顕著になるので、測定器の壁材料の原子番号に影響されることが少なく、エネルギー感度特性の変化は少ない。

9．あとがき

以上放射線標準を中心として1970年頃までの事情を述べた。

最近はγ線を利用することが多く、ガンマ線はエネルギーが高いので、２次電子の到達距離が大きく、標準電離箱は標準測定に向かなくなる。そこで、エネルギーの高いγ線の線量標準にはグラファイト壁の空洞電離箱を用いている。空気とグラファイトの電子発生量の違いに対する補正を行い、またグラファイトによるガンマ線の散乱や減衰に対する補正も計算によって行っている。グラファイト壁空洞電離箱による標準測定については誰かに纏めてもらいたいものである。

実用的にはエネルギーの高いγ線に対する線量測定では、エネルギー感度特性はあまり気にする必要がないが、X線とか低エネルギーγ線を取り扱う場合には留意する必要がある。

なお本論文は2003年に(株)千代田テクノルの放射線防護研究会において講演した内容の一部を纏めたものである。

参考文献：

（1） 電気試験所：電気試験所50年史（1944）

（2） 電子技術総合研究所：電子技術総合研究所100年史(1995)

（3） 伊藤岳郎：日本における放射線単位,放射能標準の歴史、日本保健物理協議会ニュース No.5(1963)

（4） 江藤秀雄：人体と放射線、岩波全書(1951)

（5） 伊藤岳郎、村主 進、田中五郎 他：診療X線技術学 第2巻、新日本社（1953)

（6） 島津製作所：レントゲン回顧（1994)

（7） 島津製作所：島津製作所史（1967)

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 9 No. 1, p. 23－30 (2005)

アメリカ軍による理化学研究所のサイクロトロンの破壊と関連したいくつかの事実

今村　昌
理化学研究所　名誉研究員
〒353-0004　埼玉県志木市本町 3-11-15
（2006 年　3 月　8 日　受理）

要約

太平洋戦争終結後日本に進駐したアメリカ軍は、設置されていた 5 台のサイクロトロンを破壊した。ここでは、理化学研究所のサイクロトロンについて、日本の文献および当時の New York Times の記事をもとに、今まで知られていなかった事実も含めてまとめてみた。

1. はじめに

1945 年 8 月 15 日に日本は連合軍に無条件降伏し、連合軍に占領された。占領軍は日本の潜在的軍事能力、とくに原子爆弾製造能力を根絶しようと考えた。日本には原爆の原料となるウランは殆ど産出せず、原爆の製造が不可能なことは明らかであった。しかし、日本には原子核実験に用いていたサイクロトロンが理化学研究所と大阪帝国大学にそれぞれ 2 台、京都帝国大学に 1 台設置されていた。しかも理化学研究所には、アメリカの研究者にもなじみのある仁科芳雄博士が活発な研究を行っていた。アメリカの研究者は日本の原爆製造能力が脅威になるとは考えていなかったであろう。しかし、東京の連合軍総司令部（General　Headquarters：GHQ）は将来これらのサイクロトロンが原爆製造の原動力になると考えたのであろう。

GHQ は 1945 年 11 月 24 日突然理化学研究所のサイクロトロンを急襲して破壊し、残骸を東京湾へ投棄した。このニュースは、戦乱で疲弊困憊した一般の国民にとっては注目に値するものではなかったであろう。しかし、サイクロトロンを建設し、これを用いて研究をしていた仁科博士のグループの落胆は想像に難くない。しかもこのニュースはアメリカの科学者に大きな衝撃を与え、即刻大統領や国防長官に激しい抗議の書簡を送っている。

アメリカ軍によって破壊される前後の状況、破壊後のアメリカの科学者や軍部の反応については当時の報道記事をもとに辿ってみるが、当時のわが国における詳細な記録は得難いので、Argonne 国立研究所の井口道生博士にお願いして入手した当時の New York Times の記事をもとにすることにした。なお同じような趣旨の小文は既に発表済みである。[1,2]

2. 仁科芳雄博士によるサイクロトロンの建設

1890 年 12 月 6 日に岡山県で生まれた仁科芳雄は、1918 年東京帝国大学工科大学電気工学科を首席で卒業した後すぐ理化学研究所へ入所した。その後 1921 年からヨーロッパへの留学に旅立ち、Cambridge 大学 Cavendish 研究所の Rutherford の下で研究を行った後、ドイツを経て、当時新しい流れの量子力学の中心であったデンマークの Copenhagen 大学へ行き、

1923年4月から5.5年間Niels Bohrの下で最先端の物理学の研究を行った。[3)]

最新の知識と経験と多くの優れた新進物理学者の知己を得て帰国した仁科は、1931年7月理化学研究所の主任研究員に任命された。新しい研究室の研究テーマとして仁科の挙げたのは、（1）量子論、（2）宇宙線、(3)核物理学と（4）生物学であった。[4)]

仁科研究室の第4のテーマである生物学は物理学からかけ離れているように見えるが、仁科はサイクロトロンを用いて放射性元素をつくり、これを生物学の研究に利用しようとしたのである。おそらく日本ではじめての放射線生物学の研究である。サイクロトロンは、1931年カリフォルニア大学のErnest O. Lawrence とM. S. Livingston.が創案したイオン加速器である。Livingston がつくったサイクロトロンの原理を見て、仁科も早速建設に取り掛かった。このサイクロトロンの電磁石は日本無線電信会社から貰い受けた23トンという小型のものであったが、1937年4月にわが国最初のサイクロトロンが誕生した。

小さいながらもサイクロトロンの建造に成功した仁科は、もっと高速のイオンビームが得られるサイクロトロンの建設を計画した。しかし、単に小型のものをスケールアップするだけではうまくいかなかった。Lawrenceはこのとき既に大型のものをつくっていたので、仁科は彼に設計上の助言を求めたようである。大サイクロトロンには均一な磁場を持つ大きな電磁石が必要であったが、国産品でつくることが無理だとわかると、Lawrenceの助言に従って、彼のサイクロトロンに使われたものと同じ電磁石を日本学術振興会の援助を得て、GE から購入することにした。ディー電極の高周波発振器と真空箱は国内の会社で作り、その他の部品は理化学研究所の工作部で作られた。

仁科はこの大サイクロトロンでより高速の加速イオンをつくり、研究を拡大しようと大変な意気込みであった。多くの困難を克服してようやく、この大サイクロトロンから最初の水素イオンビームを取り出すことに成功したのは1944年2月15日であった。[5)]

このとき戦争はすでに終盤に近づいていた。この大サイクロトロンの建設は戦時研究である「に号研究」の一端を担っていた。中性子を用いるウランの研究がそのテーマであったようであるが、資材、電力の不足などからか、その成果のほどは明らかでない。

3. サイクロトロンを用いた仁科の研究—核分裂と本邦最初の放射線生物学

人工的に元素を変換させようとする試みに最初に成功したのは、仁科の留学していたことのあるイギリスのRutherfordである。1919年、彼は天然のポロニウムの壊変によって放射されるα粒子をいろいろな元素に当てると、水素の原子核(^{1}H)が飛び出してくるのを見つけた。これが最初の人工的な原子核変換である。Rutherfordの研究室では、CockcroftとWaltonは高電圧加速器によって加速した陽子をリチウムに当て、α粒子をつくることに成功した。このような変換反応では、正に帯電している原子核に打ち込む原子核も同じように正に帯電しているため、正に帯電している粒子間の大きな反発力に打ち勝つためには打ち込む原子核には極めて高い運動エネルギーを与えてやらなければならない。これに対して、電荷をもたない中性子は容易に原子核のなかに入り込めるので、原子核変換を容易に起こすことができる。仁科はこの中性子をサイクロトロンで加速した重水素原子核（^{2}H）をベリリウム金属にぶつけることによってつくった。[4)]

仁科はこのような方法によって多くの原子核変換の実験を行った。変換によってできたアイソトープは多くの場合不安定で、特有の放射線を出して壊変し他の原子核に変化する。

このような放射線を測定することによって、原子核の状態に関する研究を行った。また、これらのラジオアイソトープを生物体に吸収させ、その行方を放射線測定から追跡するという生物学の実験も行っている。日本における放射線生物学の先駆的研究であった。[4,6,7]

中性子による核変換の研究は 1938 年のウラン核分裂の発見で大きな転機を迎えることになった。中性子によってウランより重い超ウラン原子の研究を行っていたドイツの化学者 Otto Hahn と F. Strassmann は、ウラン原子核が中性子によって二つの大きな部分に分裂することを示唆する実験事実を得た。この事実は、以前は共同研究者であったが、ユダヤ人だったためドイツから逃避した女性物理学者の Lise Meitner によって理論づけされ、このとき人類は初めて原子力を手に入れたのである。この 1938 年はまた、GE に注文していた仁科の大サイクロトロンの電磁石がアメリカから到着した年でもあった。

核分裂の発見直後アメリカは研究を始め、1942 年 12 月 2 日にはシカゴ大学の構内に Fermi らによって建設された最初の原子炉に原子力の火が灯った。ウランの連鎖核分裂を起させるためには、天然のウラン中に僅か 0.72% しか含まれていないアイソトープの ^{235}U を濃縮しなければならない。こうしてアメリカは 1945 年 6 月、Los Alamos で ^{235}U および原子炉内で ^{238}U からできたプルトニウム ^{239}Pu を用いて原子爆弾を完成させた。

仁科はウランの核分裂に大いに興味を持ったに違いない。しかし、ウランを大量に産出しない日本では、原子炉はおろか、原子爆弾などを作れないことは明らかである。原子爆弾に対して日本軍部は興味を示さず、科学者もただ拱手傍観するだけであった。アメリカもこのことをよく知っていた。New York Times 社説にも次のようなセンテンスがある。[8]

"Japanese physicists, among them the distinguished Professor Nishina, twiddled their thumbs during the war."

サイクロトロンでウランに関する基礎研究を行ったところで、ウランを大量に産出しない日本が原子爆弾をつくれないことをよく知っていたアメリカが、なぜサイクロトロンを破壊しなければならなかったのか。仁科の目にはただ暴挙としか映らなかったに違いない。

4. 仁科の抗議

1980 年の 4 月、戦時中の Manhattan 計画に参加されていた故 Milton Burton 教授（1980 年当時 Notre Dame 大学、Radiation Laboratory）が筆者の研究室に来訪されたとき、サイクロトロンの破壊に対してアメリカ政府筋に強力な抗議をされたいきさつを話された。日本でその当時の記録を知ることは困難だったので、前述のように、井口博士にお願いして入手した当時の New York Times の記事から当時の様子を知ることができた。

アメリカ軍によるサイクロトロン破壊の第一報は、New York Times の 11 月 24 日の紙面に 11 月 23 日東京発 Lindesay Parrot の記事[9]であった。実際に破壊の始まったのは 11 月 24 日の早朝であるから、この記事はスクープであった。しかも破壊することはこの日まで日本政府には秘密にされていたのである。Parrot はその記事の中で、理化学研究所のサイクロトロンの解説とともに、破壊に至るまでの経緯についても述べている。

破壊は 11 月 24 日の朝 8 時 30 分、GHQ の O'Hearn 少佐からの突然の通告とともに、第 8 軍の兵士によって始められ、5 日をかけた解体の末、サイクロトロンは東京湾へ投棄された。トーチを手に解体している兵士の傍らに立って抗議を続ける仁科の姿や、東京湾に投棄される情景を撮影した写真は 12 月 24 日のライフ誌[10]に掲載されているが、日本の科学

者にとっては涙無くしては見ておれない。同誌はまた「これは私の 10 年の生活そのものだった」という仁科の言葉をのせ、写真の説明には“His wife and secretary swept quietly”と付記している。この 2 ページにわたるライフの記事は、筆者にとっては戦勝国の行動を誇示するというより、軍の行動に対するジャーナリストの静かな反論と思えてならない。その後仁科は、原爆調査団の一員として来日した Paul S. Henshaw に一通の手紙を渡している。この手紙は程なく公表されたが、この中で仁科は以下のような事実を指摘して激しい憤りを述べている。[11)]

戦争が終わって 2 ヶ月後の 10 月 15 日、仁科は戦火を免れた 2 台のサイクロトロンを生物学、医学、化学、および金属の研究に用いたいという請願書を GHQ に提出し、程なく許可された。しかしその後暫くして、研究分野を生物学と医学だけに制限すると通告してきた。GHQ は化学と金属の研究が軍事力に関連すると考えたからであろう。仁科研究室はこの使用許可にもとづいて研究を開始するための準備をしていた。ところが突然、11 月 20 日に研究室は GHQ の査察を受け、続いて 11 月 22 日の夕方 Central Liaison Office から、先に出した使用許可を取り消し、研究を中止せよとの命令が出された。そして 23 日には GHQ から破壊の命令が出され、翌 24 日に実行に移されたのである。

仁科は解体が開始された 24 日の夕方 Central Liaison Office へ出かけ、さらに Iguchi 事務局長とともに GHQ へ赴いた。ここで仁科は、Rider 大佐と O'Hearn 少佐にサイクロトロン破壊の理由を問いただしたが、答えは「アメリカ政府の指令によるのだ」というだけだった。仁科はさらに「政府がアメリカ科学者の意見を十分考慮に入れた結果なのか」と問いただしたが、少佐の答えは“Yes, of course”で、さらに「最近日本を訪れた Compton 博士の意見も政府は聞いている」と付け加えた。しかし、このような返事に仁科は全く納得することはできなかった。

仁科は手紙の中で次のように激しく反論する。「サイクロトロンの破壊は、アメリカ政府、とくに軍部が原子爆弾製造にサイクロトロンが不可欠であると考えたからであろう。しかし、サイクロトロンは原子爆弾を作るための基礎的な研究には重要な役割を果たすかも知れないが、原子爆弾が既につくられてしまった今となっては、最早その必要性はなくなっている。原子爆弾をつくるには多量のウランがあればよいだけで、サイクロトロンを必要とはしない。サイクロトロンが何台あっても、ウランがなければ原子爆弾はつくれない。日本には原子爆弾をつくるだけのウランを産出しないことは明らかな事実である。」さらに、「いくら GHQ が禁止しようとも、また仮に日本に大量のウランが産出するとしても、日本に原子爆弾をつくる工業力のないことは明らかである。これらの点をアメリカ軍部はなにも考慮に入れていない。」と仁科は強調している。

仁科が GHQ にサイクロトロンの使用を請願したのは、農業、林業、畜産、漁業および医学治療の分野で新しい方法を見つけ、戦後の荒廃した日本の民生を安定させ、発展させることを目的としたからに他ならない。これらの目的にサイクロトロンを用いる研究には、仁科はすでに戦前から先鞭をつけていたのである。

仁科のこのような目的を GHQ の科学視察団の団長として来日した Compton やほかの科学者もよく理解し、MacArthur にサイクロトロンの利用を認めるように勧告していた。それにもかかわらず、サイクロトロンの破壊がかくも唐突に行われたのは何故であろうか。

5. アメリカ科学者の抗議

戦時中アメリカでは、Manhattan 計画の名のもとに科学者が動員されていた。Los Alamos では、原子爆弾の製造が、Oak Ridge の研究所では ^{235}U の濃縮や放射線の生物・化学的影響の研究が行われていた。

理化学研究所のサイクロトロン破壊の第一報を聞いた Oak Ridge の研究者たちは激高した。そして、一夜のうちに抗議の声明書をつくり、Truman 大統領をはじめ政府の高官へ送りつけた。11 月 26 日の New York Times [12]によればこの声明書の内容は次のようなものである。「サイクロトロンの破壊は、1914 年と 1940 年にドイツ軍が行った Louvain 図書館の焼き討ちに匹敵するような蛮行で、人類に対する犯罪である」ときめつけ、さらに「サイクロトロンは原爆をつくるための機器ではなく、たとえこれを何ヶ月運転しても、目に見えるか見えない程度の原爆用ウランしかつくることはできない」と理由を説明している。声明書は「こんな略奪行為をした者を懲戒に処する」よう要求し、つぎのような激烈な、壊された方が驚くようなセンテンスで結んでいる。

“Men who cannot distinguish between the usefulness of the research machine and the military importance of a 16-inch gun have no place in positions of authority.”

大統領や Patterson 国防長官への抗議はこのほか MIT や Harvard 大学の研究者からも送られている。一般の市民からの破壊に対する疑念と抗議の投書も New York Times に掲載されている。[13]

Irvin Langmuir（1932 年ノーベル化学賞受賞者）は、12 月 3 日上院の特別委員会における証言で、この破壊行為を Hitler の暴挙、進化論を教えることを法律で禁止した Tennessee 州の行為に例えている。そして最後に “You can’t gain atomic bombs from cyclotrons. You gain knowledge.”と皮肉っている。[14]

当時 MIT の学長であった Karl T. Compton は、Patterson 長官に宛てた 12 月 4 日付の抗議の手紙を 12 月 6 日付の New York Times で公開している。[15] Compton はサイクロトロン破壊のニュースを旅先のイギリスで知り、12 月 4 日に帰国するとすぐこの手紙を書いた。Compton は早くから原子爆弾開発計画に参画し、指導的立場を占めていた。戦後いち早く科学調査団の団長として日本を訪れ、仁科に対してサイクロトロンの運転を許可してもよいと GHQ に勧告している。彼はこの手紙の中で、アメリカ軍によるサイクロトロンの破壊を “an act of utter stupidity”と極めつけ、「これによってアメリカ軍の（戦争中）5 年間に築いた輝かしい成果と国民の信頼は一挙に崩れ去った。この愚かな行為は、日本の友人たちの反感だけでなく、全世界の知識人の非難と嘲笑を招くだけである」と述べている。

Compton はさらに「サイクロトロンは軍艦に比べればはるかに precious で、つくるのはもっと難しく、社会に対する価値も比べものにならないくらい大きい」と評価し、「こういうことのわからない官僚をその任から外せ」と国防省内の “housecleaning”を Patterson 長官に要求している。このような激しい科学者の抗議、マスコミの報道に対して、アメリカ軍部はどんな対応をしただろうか。また、破壊が実行されたのは何故だったのだろうか。

6. アメリカ軍部の対応

サイクロトロン破壊に対する批判と非難の声が強くなったため、GHQ は声明を発表し、「破壊は MacArthur 総司令官が決定したものではなく、上部からの命令によるのだ」と主張した。[16] New York Times はまた「最近参謀総長になったばかりの Eisenhour 将軍が、

サイクロトロン1台をそのままアメリカへ移送せよと命令したが、これはサイクロトロンが破壊された後だった」という事実をスクープしている。この命令の行き違いをアメリカのマスコミがこぞって取り上げ、東京と Washington の間で論争が続いた。たまりかねた参謀本部は、12 月 3 日、MacArthur が命令を忠実に実行したが、Washington からの指令と整合性がよくなかったことを認め、論争は一応収まった。

しかし、GHQ はあくまで破壊の責任を国防長官 Patterson に押し付けようとして「技術や実験のデータを押収した後、サイクロトロンを破壊せよという 11 月 9 日の長官の命令に従った」ことを声明している。[17] この GHQ の声明に答える形で、Patterson 長官は記者会見を行い、「サイクロトロンの破壊命令は長官の名前で出したのであるが、この命令書に目を通すことができなかったこと、事前に科学者の意見を聞くべきであったが、命令を十分検討しないまま出したのは誤りであった」と驚くほど率直に非を認めたのである。[18]

Patterson 長官は翌年 1 月来日し、記者会見でも同様な答えをして陳謝している。[19] この率直な陳謝は記者たちにとっても大きな驚きであったようである。しかし、このような誤りは何故起こったのだろうか。Manhattan 計画の長であった Leslie R. Groves（退役陸軍中将）の書いた回顧録[20] から推測してみよう。

事の起こりは GHQ が指摘している参謀本部からの命令である。この命令は、平和的な用途に使われるものを除き、戦争に関係するものはすべて破壊せよと指示している。統合参謀本部は 10 月 30 日、この命令をさらに拡張し、原子力関係の施設を抑え、この研究に従事したすべての者を拘留せよとの命令を太平洋地域の各司令官に伝達している。

この命令に基づいて、MacArthur 宛てのメッセージが 11 月 7 日に作製され、翌日 Patterson 長官のオフィスを “routine matter”として経由し、誰の注意も引かず、長官の目にも触れないまま送られてしまった。このメッセージには「すべての技術的データと実験データを確保した後、5 台のサイクロトロンを破壊せよ」との命令が書かれていたのである。

11 月 24 日、GHQ から 24 日に破壊を開始したい旨の電報が参謀本部に届いた。この電報のコピーは 9 部つくられ、Groves を含む 9 人に渡っていた。Groves は 10 月 30 日の参謀本部からの命令を見て、かねてからよく知っている日本の 5 台のサイクロトロンは破壊しないで適当に保護すべきであると考えていたが、このとき自分の考えを明確にしなかったことを認めている。GHQ から「破壊を開始したい」という電報を見た Groves は「このとき破壊を中止させることができた」と述懐しているが、誰も中止させなかった。電報のコピーは部下の者によってファイルされただけで、責任者は誰も読んでいなかったからである。MacArthur からの電報は、破壊が参謀本部の命令（10 月 30 日）によるとしているが、この命令には押収はしても破壊せよとは書かれていなかったのである。

このような誤りは Groves によれば、処理に不慣れな（無能な）部下のせいで、Partterson は日に何百と来る書類に一々目を通すことができなかったからだと述べている。大まかなことさえ決めておけば、サイクロトロンのような研究機器の処理は部下に任せておけばよいと考えてからであろうか。上から来た命令でも、気になることは申し出る勇気が必要なことを Groves の述懐は教えてくれる。Groves は、科学者やマスコミの激しい攻撃に対する答えを何度も書き換えた末、潔くその非を認めた Patterson 長官の勇気は賞賛に値するとも述べ、「***非はいち早く謝罪するのが最良の方法である***」と当時を思い出して述べている。

7. サイクロトロン破壊後日談

激しい空襲にも耐えて残った理化学研究所のサイクロトロンは、仁科の切実な訴えにもかかわらず、占領軍であるアメリカ軍によって破壊され、東京湾の藻屑と消えてしまった。サイクロトロンという研究のための機器に対する考え方が、軍人と科学者では全く異なっていたことは明白である。まして原爆という新しい、しかも絶大な威力を発揮した兵器を念頭に置けば、原子力に関する研究施設を徹底的に破壊しようとするアメリカ軍の意図は理解することもできよう。しかし、軍人にとっては重要な行動に対して、アメリカの有力新聞、通信社はこぞって報道し、その真相を執拗に追求しつづけ、科学者だけではなく一般の市民の間にも大きな衝撃と反響を巻き起こしたことに大きな感銘を受けるのである。

とくに科学者、原子力関係だけでなく一般の多くの科学者、に与えた衝撃は大きかった。日本に原子爆弾を投下したということとも深く関連して、軍に原子力の管理を任せられるのか、さらに軍は基礎研究をどう考えているのかという問題にまで進展した。Harold G. Urey（1934年ノーベル化学賞授賞）は、原子力を軍の管理下に置こうとして議会に提案された原子力エネルギー法を「かって見ない全体主義的で、Communist bill または Nazi bill と呼んでもよい」と激しく非難している。[21]

アメリカの科学者のあるグループの人たちは、破壊したサイクロトロンを再建することを真剣に考え、そのための資金を募集することまで考えた。募金の相談を受けた国務省は、アメリカ国民やアジア各国の反応を考慮して、日本の教育、とくに基礎研究の振興に努力するという代案を示し、[22]このプログラムは、MacArthurの科学顧問として1946年から1950年にかけて日本に滞在し、戦後の日本の科学振興に大きな足跡を残したHarry Kellyの派遣という形で実現した。[23] Kellyの尽力もあって理化学研究所は存続し、仁科は1946年に理化学研究所の所長、1948年に株式会社科学研究所に改組されるとともに同社社長に就任し、戦後の復興に並々ならぬ貢献をされた。この間、1946年には文化勲章を受章され、1948年には日本学士院会員に推挙されている。

1951年5月に来日したLawrenceの勧めもあって、理化学研究所では破壊を免れた小サイクロトロンの23トン電磁石を用いたサイクロトロンの再建が始まった。1952年、戦後初めてのビームを取り出すことに成功したが、仁科はこの成功を見ることなく、既に1951年1月10日肝臓ガンで60歳の波乱に満ちた生涯を終えていた。

仁科の情熱は現在の理化学研究所に着実に引き継がれた。1960年には上坪宏道主任研究員のグループによって大型のサイクロトロンの建設が始まり、1966年に完成した。このサイクロトロンも物理学だけでなく、ひろく化学、生物学、医学の研究にも解放された。筆者も、このサイクロトロンを用いて種々の加速イオンによる放射線化学の実験を行う幸運に恵まれた。1990年春、このサイクロトロンも24年の使命を終え、より巨大な、通称リング・サイクロトロンにバトンを譲って現在に至っている。

8. おわりに

1960年に理化学研究所に入所した筆者はもちろん破壊の事情を知るよしはなかった。この問題に強い関心を持ったのは故Milton Burton教授のお陰であり、アメリカ側の事情を知ることの出来たのは井口道生博士の尽力によるところが大きい。また、仁科博士に関する

資料は、秘書であった故横山すみ氏に生前見せていただいた。この小稿を終えるに当たってこれら３氏に心からお礼を申しあげたい。

引用文献

1. M. Imamura, "Cyclotrons at The Institute of Physical and Chemical Research. A Cyclotron Can be Destroyed, but not Defeated", Early Developments in Radiation Chemistry, J. Kroh,Ed., Royal Soc. Chemistry, Cambridge (1989), p. 245-255.
2. 今村　昌,「科学史の一断面。理化学研究所サイクロトロンの破壊とアメリカ科学者の反撃」, 経営情報科学, **3,** 171-180(1991).
3. 無限大, No.85, 特集　核物理誕生に立会った人, 日本アイ・ビー・エム(1990).
4. Y. Nishina , "Nishina Laboratory",Sci. Papers Inst. Phys. Chem. Res., **34**, 1842-9(1938); "Advanced Research at the Nishina Laboratory", Contemporary Japan, **10**, 1-8(1941).
5. 田島英三,「理研サイクロトロン物語」, 日本物理学会誌, **45,** 734-7(1990).
6. 斎藤信房,「仁科芳雄とアイソトープ」, 日本物理学会誌, **45,** 738-40(1990).
7. 森脇大五郎,「仁科先生と放射線生物学」, 日本物理学会誌, **45,** 740-3(1990).
8. The New York Times, Nov. 24, 1945, p.18.
9. The New York Times, Nov.24, 1945, p.3.
10. Life, Dec. 24, 1945, p.26-7.
11. Y. Nishina, "A Japanese Scientist Describes the Destruction of His Cyclotron", Bull. Atomic Scientists, **3,** 145(1947).
12. The New York Times, Nov. 26, 1945, p.2.
13. The New York Times, Nov. 28, 1945, p.5.
14. The New York Times, Dec. 1 , 1945, p.5.
15. The New York Times, Dec. 6, 1945, p.3.
16. The New York Times, Nov. 29, 1945, p.2.
17. The New York Times, Dec. 14, 1945, p.3.
18. The New York Times, Dec. 15, 1945,p.3.
19. The New York Times, Jan. 12 ,1946,p.6.
20. L.R.Groves, "Now It Can Be Told. The Story of the Manhattan Project", Harper & Brothers, New York(1962), p. 367.
21. D. S. Greenberg, "The Politics of Pure Science",The New American Library, New York (1967), p. 118.
22. A.K. Smith, "A Peril and a Hope. The Scientists' Movement in America: 1945-47", The Univ. Chicago Press, Chicago (1965), p.325-356.
23. 中山　茂,「スキャンダルの科学史」,「科学朝日」編, 朝日新聞社(1989), p.84.

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 9 No. 1, p. 31－40 (2005)

ラドン、トロン、ラジウム研究の一世紀

環境放射能の誕生

堀内　公子
大妻女子大学社会情報学部
〒206-8540　多摩市唐木田 2-7-1
(2006 年 3 月 18 日　受理)

［要　約］最初にラドン、トロン発見の経緯と黎明期の研究で新元素の解明がどこまで進んでいたかをまとめた。次いで欧州で新元素が自然環境の中で発見されたことを受けてわが国でもまずは自然環境における新元素発見の研究が始まった状況、及び初期のラドン、トロン、ラジウム研究の流れをまとめた。そして最後に 1960 年代以降から現在までの水中におけるラドン、トロン、ラジウム研究の測定法に関する研究の流れを元素毎にまとめた。

1. はじめに

放射線・放射能発見からほぼ一世紀のときが流れた。放射線は目に見えず味も匂いも形もない。そのため発見は大変遅かったが、発見と同時に今まで説明のつかなかった多くの現象が解明できるようになった。第二次世界大戦では不幸にして兵器として開発されたために根強い悪感情を人々に植え付けてしまった。しかし多くの人々の努力の結果、現在の人々の豊かな生活は、放射線なくしては考えられないまでに、目に見えないところで浸透している。また人々の日々の暮らしも、実態を感知することの出来ない多くの自然放射線に取り巻かれて成り立っている。

自然界には天然、人工を含め沢山の種類の放射性元素、環境放射能が存在する。しかし、ラドン研究にとって注目すべきことは、そもそも環境放射能の研究が、一般環境中のラドンの研究に端を発していることである。ラドンが一般環境にも存在することが確認され、はじめて環境放射能が発見されたのである。

ここでは環境放射能ラドン、トロン、ラジウム研究の一世紀の流れを追った。

2. ラドン、トロン発見の黎明期と環境放射能の発見 [1)]

2.1 ラドン、トロンの発見（於実験室）

新放射性物質としてはトロンの発見の方が早く、ラザフォードとオーエンは，ウランの放射能に続いて、トリウム酸化物（1898 年キュリー夫妻により放射能発見）についての放射線測定を行っているとき、トリウムからの放射線強度が扉の開閉など空気の流れに影響されることに気付き、研究を始めた。そして 1899 年トリウムから直接放出される放射線のほかに、綿栓などのイオン・トラップを通過する放射性ガスのトリウム・エマネーション（トロン）を見出した。しかしウランではトリウムと同様の性質は持たぬように思えるとも述べている（1900 年 Phil. Mag. 誌）。

この報告をきっかけに、ドーンは研究所にあった放射性物質：ウラン金属粉末、酸化トリウム、ラジウムを含む放射性臭化バリウムなどについて、ラザフォードと同様の実験を行い、

金属ウラニウムやポロニウムからは認められなかったが、ラジウムからはトリウムの場合とは異なる減衰特性を示すエマネーション（ラドン）を発見し、それを1900年に自然科学者研究会で口頭発表した。

その後ラザフォードは放射性気体ラドン、トロンへの関心を深め、エマネーションの加熱による変化、拡散実験による分子量の推算、二次放射能すなわち娘核種 RaA…RaF、ThA、ThB（後の ThB、ThC）の研究等を進展させた。またラドンが活性炭（特に椰子殻炭）によく吸着し、加熱するとラドンを放出すること、エマネーションが Ar と同じく化学的に不活性な気体であり、液体空気冷却の液化エチレンに浸した銅管内で液化することをも見出した。

1910年ラムゼーとグレイによってこれらのエマネーションは最も重い希ガス（ニトン）であることが示された。多くの科学者はこの気体に様々な名称を与えたが、1923年の国際会議でラジウムの壊変によって生成することから正式にラドンと命名された。

＊ラジウム発見に関してはあまりに有名であるため割愛した。

2.2 環境放射能の発見（於自然界）

放射能が発見された 19 世紀の終わりごろドイツの高等中学校の教師であったエルスターとガイテルとは金箔検電器（1787年英国ベンネット考案）を用いて、空気の電気現象の研究を行っていた。携帯用の金箔検電気付の杖を持って旅行し、いろいろな場所で測定を行った結果、特に洞穴や地下室では空気の電気伝導性が異常に高いことを見出した。そこで洞穴内に長く針金を張り約2000Vの負の高電圧をかけ、針金に捕集される放射能の減衰を金箔検電器で測定した。そしてそれが当時実験室でラジウムに由来するものとして発見されていた放射性ガス：ラジウム・エマネーション（現在のラドン：当時二次放射能とされていた）の減衰と同じであることから、一般環境にもラドンが存在することを確認した（1902 年）。これが世界最初の環境放射能に関する研究である。

エルスターとガイテルによる一般環境（大気中）に寿命がそれほど長くない放射性物質ラドン（半減期：3.825 日）存在の発見は、より長寿命の親核種ラジウム（半減期：1600 年）が一般環境（大地）に存在することを推定させた。また大気圧が低いと大気中へのラドン放出が高まることも認められた。そして二人は1904～05年にかけて放射能の高い鉱泉沈殿物や、各種の土壌・岩石にも低濃度ながら広く放射能が存在することを確認した。

英国では1902年、大気中の電気現象を研究していたウィルソン（後に霧箱を考案）が、雨水を蒸発するとかなり強い放射能のあることを認めた。1903年 J. J. トムソン（陰極線の研究：電子の発見）はケンブリッジのトリニティー・カレジの井戸水等が放射性気体を含むことを見出し、アダムズはそれがラドンであることを確認した。同じく1903年アレンはバースのキングズ・スプリングの鉱泉水を調べ、ラドンとトロンの中間の特性を持った放射性気体を見出し、鉱泉水の治療効果は放射性気体による可能性があると示唆したので、医学者もこれに関心を持つようになった。

1904 年ウィーン大学のマッヘによりバドガスタインの温泉沈殿物中でラジウムが発見され、また諸源泉についての測定結果の報告など、各地の温・鉱泉水中のラドンの調査研究が始まった。1904～05 年頃マッヘによりラドン(^{222}Rn)濃度を表す単位としてマッヘ（Mache）が定められ、広く使われ始めた。わが国では今でも温泉関係者の間ではマッヘ単位の方が通り易い場合が多い。

＊マッヘ：水 1L 中に含まれるラドンによる飽和電離電流が 10^{-3}e.s.u.である時これを 1 マッヘとする。

3. わが国におけるラドン、トロン、ラジウム研究（スタートから 1950 年代の終わりまで）

わが国におけるラドン研究は 1909 年 12 月から 1910 年 1 月にかけて石谷傳市郎、眞鍋嘉一郎により湯河原、伊豆山・熱海の温泉水、1911 年には飯坂、有馬、城崎、道後、別府、飯綱山麓の温泉について測定が行われた。初期の頃の測定はテントをはって泊り込みで行われたとも言われている。1913～1915 年にかけて石津耕作、衣笠豊等による全国各地約 600 の温（鉱）泉のラドン濃度が測定され、1915 年パナマ万国平和博覧会を契機に刊行された「The Mineral Springs of Japan」に我が国初の温泉の測定値が記載されている。これらの測定には 1905 年にドイツのエングラーとジーベキングが開発した泉効計が使用された。これは試料水を一定量採取した後、水中のラドンを電離槽に追い出し、上部に設置した金箔検電器により容器中の空気の電離度を測定する方式である。

1911 年木下季吉は長さ約 30m の金属線を地上 3m の高さに張り、それに負の高電圧をかけて大気中から放射性沈積物を捕集し、それを時々巻き取っては金箔検電器で放射能測定を行った。その計測からα線による電流が測定され、得られた減衰曲線から RaA(^{218}Po)、ThA(^{216}Po)が捕集されたことが判った。

1931 年飯盛里安により IM 泉効計が開発され、水中のラドン濃度測定に広く使用されるようになった。従来の電離槽を改良し、酸化ウランの代用標準も設定し簡便で、正確な測定を可能にした。IM 泉効計は持ち運びに便利で現地測定が出来る。また 1951 年に定められた温泉分析法指針（現鉱泉分析法指針）に取り入れられ全国的に普及し、特に温泉分析を中心に今も現役で使用されている息の長い測定器となった。

1937 年ローリツェンが開発した携帯に便利な検電器を、1948 年に黒田和夫と横山祐之はラドン測定も可能なように改良し、いわゆる K. Y 式ローリツェン型ラドン計を考案した。そして次第にラドンとその娘諸核種との平衡関係についての検討も行われるようになった。1942 年下方鉱蔵は ^{224}Ra(ThX)より生じたトロンを、恒圧の空気を流して改良した IM 泉効計に送り込んで測定する、恒気流法を開発した。また 1948 年黒田は IM 泉効計を用いて鉱泉水中のラドン/トロン比よりトロンを算出している。

その他、白鳥勝義は 1925 年の但馬地震直後、温泉水中の放射能変動を観察し、地震予知への可能性を示唆した。それにつづく一連の研究として、1944 年の東南海地震の際の初田甚一郎による地中空気中ラドン濃度の変化の観測、1950 年代の初田、岡部茂等による断層、地下構造の研究は地震予知の観点からのラドン測定への関心を集めた。これらの成果は 1995 年の阪神大震災に際し、地下水（西宮市内井戸等）[2] や空気中（神戸薬大）[3] のラドン濃度連続測定による地震の前駆的異常の記録へと繋がり、地震予知対策に向けてラドンは積極的に利用すべき興味ある研究分野と考えられるに至った。

1940 年中井敏夫は試料水をキュリー瓶に封じ込んで貯蔵し、ラジウムと放射平衡に達したラドンを追い出して精密ラドン計を用いて測定し、ラジウムを定量した[4]。全国 477 ヶ所の温・鉱泉と 15 の石油及び天然ガス地域に於ける試料水のラジウム測定データを発表したが、全国最高値を示したのは有馬温泉地域の温泉であった。これはラジウム測定データとして現在までに最もまとまった報告であるが、同時に我が国のラジウム資源を鉱泉に求めるには経済的価値の低いことも述べられている。

4. わが国における水中のラドン、トロン、ラジウム研究（1960年代以降）[5) 6)]

4.1 ラドン（^{222}Rn、^{220}Rn： Tn）

放射性希ガスラドンは一般には^{222}Rnを指すが，天然にはそのほかに^{220}Rn（トロン），^{219}Rn（アクチノン）が存在し，いずれもウラン，トリウム，アクチニウム系列の壊変生成物である。そのうち半減期の短い（4.0秒）^{219}Rnは研究の対象にはされていない。

下にラドン、トロンの崩壊図を簡単に示した。

$^{238}U \rightarrow \rightarrow {}^{226}Ra \rightarrow {}^{222}Rn \rightarrow {}^{218}Po \rightarrow {}^{214}Pb \rightarrow {}^{214}Bi \rightarrow {}^{210}Po \rightarrow \rightarrow {}^{206}Pb$

ラドン

$^{232}Th \rightarrow \rightarrow {}^{228}Ra \rightarrow {}^{224}Ra \rightarrow {}^{220}Rn \rightarrow {}^{216}Po \rightarrow {}^{212}Pb \rightarrow {}^{212}Bi \rightarrow {}^{208}Pb$

トロン

4.1.1 液体シンチレーションカウンター（LSC）

放射能研究に測定器の開発は重要であるが LSC が開発され水中のラドン計測に導入されたことは、その後のラドン研究の発展と方向性を定めたと言っても過言ではない。

エネルギーの低い軟β線測定用に開発されたLSCが1960年代にラドン計測に導入された。LSC によるα線計測は自己吸収や外部吸収は殆ど無視することが出来、4π計数が可能であり計数効率100%で定量できる。

ラドンが有機溶媒によく溶けることは知られていたが、溶解度の違いを利用して水中のラドンを有機溶媒に抽出して LSC で測定することが検討された。1964 年野口正安、村上悠紀雄により日本化学会年会で報告され[7)]、野口により LSC 測定上の諸問題も明らかにされた[8)]この斬新なアイディアは日本発の水中のラドン測定法の基本として広く世界中で利用されている。1977 年本間義夫は LSC の独立 3 チャンネルを利用して低エネルギー側のノイズをさけてウィンドウ幅を設定し、全てのパルスを計数する積分計数法を複数の放射性核種が放射平衡に達しているような系（ラドンがその娘核種と放射平衡に達している状態）に適用し[9)]、ラドンの絶対測定が可能になった。1977 年堀内公子、村上は積分計数法を用いた天然試料水中のラドン濃度測定のための諸条件を検討し、ルーチンで測定できる「トルエン抽出-LSC 測定法」（LSC 法又は抽出法）を提案した[10)]。1L の試料水を用いた抽出法の測定下限は 0.02Bq/L である。この方法は 1978 年改定された鉱泉分析法指針にも取り入れられ利用されるようになった。1977 年百島則幸は低バックグランド LSC を用いたラドン濃度測定を検討した。1982 年柴田せつ子は室内装置であるマルチチャンネル波高分析器（MCA）内蔵型 2 チャンネル方式の機種でラドンを測定する場合、積分計数法によるよりも、0～2000keV 全領域の測定を行うほうがよいと報告した。その場合、2000keV を超えるβ線による^{214}Biの計数率の0.87%の減少の補正が必要となる。

ガスフロー計数管と NaI(Tl)シンチレータを併用してβ、γを同時計数することの出来る効率トレーサー法の応用測定として、液体シンチレーター（LS）を検出器として用いた研究が早くから行われていた。1970 年石河寛昭により LSC に MCA を接続した系を用いた効率トレーサー法が提案された[11)]。1985 年以降に市販された LSC に MCA とデータ処理機が内蔵されるようになって自動効率トレーサー法として実用化され普及した。

1980 年本間は LSC 測定法における娘核種のバイアル壁への吸着・体積の影響・温度効果等の検討を報告した。

斉藤正明は 1983 年抽出にポリボトルを用いた場合の吸着について報告し、次いでラドンを吸収させたポリスチレンを LS に溶解し、ラドンを計測する吸収型高分子溶解液体シンチレーション法（APDLS 法：1999 年）及びプラスチックシンチレーター内部にラドンを吸着させて測る吸収型プラスチックシンチレーション法（APS 法：2001 年、2006 年）へと発展せしめた[12]。また 1996 年には分配計数の計算法に関して抽出法の修正式を提案した[13]。しかし、結果には大きな差がないことも明らかにされている。

1988 年仲川隆夫は 100ml のテフロンバイアルを用いて地滑り地帯の地下水 50ml に乳化シンチレータ 50ml を添加して直接測定した。1994 年堀内は市販の PICO RAD ソフトを使用してバイアル内に LS10mL に試料水 10mL を共存させた水中のラドン測定法を検討した。2004 年安岡由実は ASTM の方法に基づき，LSC 用のバイアル内でトルエン系 LS10mL と試料水 10mL を振とうし、水中のラドンを LS へ抽出して測定した（直接法）[14]。ラドン計測は LSC により積分バイアス曲線を用いて絶対測定を行い、本法による検出下限は 1Bq/L であった。本法は操作が簡単で少ない試料で測定出来、廃液も少ない有効な方法である。

4.1.2 α、β分離計測法

時間の関数としての液体シンチレーションには速い成分と遅い成分がある。α粒子はβ粒子よりも電離能がはるかに大きいので、α粒子による遅い成分の発光量はβ粒子よりはるかに多い。1983 年この特性を利用して LSC にパルス波形弁別装置を接続して計測するラドン濃度測定法に関する多くの報告がなされた。佐藤兼章、野口、荘司準、遠藤和豊、早乙女忠史、橋本哲夫等により、測定回路、試料の調整、その他が検討された。野口、佐藤はパルス波形弁別の分解能の向上には LS にナフタレンを 5～30%程度添加するのがよいと報告した。またラドン計測の際、^{222}Rn+ ^{218}Po：^{214}Po のピーク面積の比は 2：0.78（佐藤）、2：0.94（早乙女）になるとも述べ、娘核種の沈降や、バイアル壁への吸着がその原因と考えられるとしている（佐藤）。

1989～91 年橋本はパルス時間間隔解析（TIA）法により温泉水中の Th 系列天然放射性核種は簡便かつ選択的に測定できると報告した。まず，過剰量存在する ^{224}Ra を測定し、^{228}Th は ^{224}Ra が完全に減衰した後に LSC で測定する。測定は 100ml テフロン製バイアルを用い、試料水 45ml、乳化シンチレータ 55ml で行った。又、この方法により温・鉱泉水中の Th 系列の中でトロン：トロン（54.5 秒）→ ^{216}Po（0.145 秒）→ ^{212}Pb の比較的短時間に起こるα壊変事象のみを特異的に抽出測定し、その結果得られるトロン成分の定量値から Th 系列内のトロン関連核種を絶対測定している。

2005 年可搬式パルス波形弁別式 LSC を用いて浜田浩正、堀内等は地下水中、或いは東京名湧水中のラドン濃度等を測定した。何れも従来の LSC 法で得られた値との相関で求めたグラフから濃度を求めているが、絶対測定も可能で、そのときの計数効率は測定器の技術報告によると約 90%である[15]。またこの測定器は小型・軽量（本体のみで 9kg）であり、パソコンにデータを落とせばその場でスペクトルの形状が見られ、データ解析も可能であるため野外調査等にも有効である。

4.1.3 空気ルミネッセンス

α粒子が空気中の窒素分子を励起した時に発生するルミネッセンスは LSC により計測できる。1987 年本間は空気中のラドンによるルミネッセンスを LSC により測定した。同一試料に LS を加え、積分係数法による測定を行って両者を比較し、計数効率 42%±0.2%を得ている。また空気ルミネッセンスのスペクトルが 0〜18keV の極めて低エネルギーの部分に存在するため、LSC による ^{3}H、^{14}C などの軟β放射線測定の際バイアルの空気層にラドン、トロンが存在した場合誤差の原因となり得ると述べている。

2000 年堀内はプラスチックミニバイアルを利用し空気ルミネッセンス法を用いて濃度を定めたラドンを IM 泉効計の電離槽内にいれ LSC による測定値との比較の行い、LSC の方が〜6%高い結果を得たことを報告した[16]。

4.1.4 IM 泉効計（IM 法）

LSC 法が普及して来ると LSC 法と IM 法のデータの相互比較が 1982 年大沼章子、1992 年歳弘克史等によって報告された。その他の研究者によっても行われているが、相関の比率は〜1、0.78、0.56 等と何れも IM 法の値の方が高く、一定していない。1982 年古野勝志は同一試料水中のラドンの測定を LSC 法と IM 法及び振動容量型電位計法で行い，LSC 法の定量値との相互比較を行って〜1 の結果を得ている。

1983 年波多江一八郎は IM 法を用いて地下水中のラドン濃度連続測定を報告した。電離槽中に直接試料を導入せず他の容器内に試料水をフローさせながらバブリングし、駆出したラドンを電離槽中へ導くことによって測定する方法の検討である。フロー開始から一定時間後に検電器の読みが一定になり、この時の放射能が殆ど ^{218}Po であったと報告している。1991、93 年長谷川圀彦は IM 法を用いて静岡県下の深井戸 247 箇所の中から地震について有感と考えられる 50 井を選び二年間ラドンの連続測定を行い、夏季に極大値、冬季極小値を示し、降水量、化学成分との相関を認めた。また、波多江は同一地域の約 13 年間の連続測定値を解析し、変動パターンを類型化し、東海大地震には 200 年の長期地盤変動が連動している可能性があると述べている。

1994、95 年大野敦史、矢永誠人は IM 法と LSC による直接法、抽出法の測定値の比較検討を行った。その結果直接法と抽出法の値はほぼ一致したが IM 法はより大きな値を示した。また同時に 100ml バイアルに試料水 50、乳化シンチレータ 50 を入れた場合のクエンチャーの影響も検討した。

2004 年日本保健物理学会「水中ラドンに関する専門研究会」は LSC 法、IM 法、アルファガード（後述）、RAD7（後述）による測定値の比較をまとめた。この場合も IM 法が他の測定法に比べ 1.22 から 1.42 倍の値を示したと報告している[17]。

4.1.5 ポータブル

地震予知、環境問題の研究が盛んになると、水中のラドンの定量もクローズアップされてきた。水中のラドンの測定は LSC 法が一般化したが、大型の測定装置が必要であった。

1980 年佐藤純はラドンの野外実験に適応するようにポータブル LSC を試作した。重量は検出部，回路部を含めて約 8kg，計数効率 90%、カウントの表示はデカトロン方式、バックグランドは積分計数値で 3 チャンネル方式の室内装置の約 6 倍であった。

1983 年吉川英樹は野外で半減期 54.5 秒のトロンの減衰をとらえ、トロンを絶対測定するトロン測定用のポータブル LSC を試作した。独立 3 チャンネル方式で積分計数法の適用が可能であり、プリセットタイマーが 9999 秒まで 1 秒ステップで設定でき、自動計数時にはプリントアウトもできる。これによりトロン含量の高い試料でその急激な減衰をとらえることが出来た。検出部と測定部とに分かれているので、持ち運びに便利で、火山ガス、温泉ガス、温泉水中のラドン、トロンが測定できた。測定下限はラドン 1.4×10^{-11}Ci/L、トロン 1.8×10^{-10}Ci/L である。

1983 年矢永はα線のみに応答するポータブル半導体検出器を用いて温泉水および温泉ガス中のラドン濃度測定法を検討した。

4.1.6 その他の水中ラドン濃度測定

1978 年矢野倉実は温泉水、地熱井の凝縮水、非凝縮ガス中のラドンを LS で抽出しγ線測定で定量した。Ge（Li）（40cm^3）半導体検出器に 2048 チャンネル MCA を接続し、γ線スペクトロメトリーを行った。ラドン、トロンの娘核種 ^{214}Pb、^{214}Bi（ウラン系列）、^{212}Pb（トリウム系列）は 10 時間計測し、3.54、3.41、2.67×10^{-12}Ci の検出限界であった。この方法はトルエンなど有機溶媒に溶ける Ar、Kr、Xe などγ放出体への利用が可能である。

1983 年牧康行は銀薄膜を表面に蒸着した固体飛跡検出器 CR-39 をラドンを含む水中に入れて銀薄膜にラドン娘核種を付着せしめ ^{218}Po、^{214}Po から放出するα粒子が銀薄膜を通過して CR-39 に作るトラック（αトラック法）を利用して水中のラドン濃度を測定するユニークな方法を報告した。

1988 年道広憲秀は地下水 2.0L を塩ビ製容器に採取して密封し、ラドン濃度を Ge（Li）半導体検出器で測定した。測定結果は LSC による結果とよく一致した。

1992 年田坂茂樹は PIN フォトダイオード（PD）を用いた静電捕集型のラドン検出器を開発した。この検出器はラドンの娘核種 ^{218}Po、^{214}Po が崩壊するときに放出するα線のエネルギーを PD で捕えて、そのとき生成した電子を増幅器で電圧に変換して測定するものである。1994 年には地下水中のラドンの挙動解析が出来るよう改良し、1996 年には小型化に成功した[18]。これは PD 型ラドン検出器に機能性ガス分離膜を取り付け、水中に沈めた状態で水中ラドン濃度を測定することが出来る水没型・小型原位置水中ラドン検出器である。毎分約 1L の割合で地下水を検出器に導入し、測定容器とその中に組み込んだ PD の間に-120V の電位差をかけて、正に帯電しているラドンの娘核種を PD の表面に捕集し、そのα線エネルギーからラドンを評価するものである。計測データは 1 時間に 1 回、接続されたパソコンに転送・保存される形式で、データを長期間得ることが出来る。阪神大震災で大きな被害の出た兵庫県西宮市の井戸で地震前に地下水のラドン濃度が急激に上昇して通常の 10 倍以上に達していたことを記録したのもこの測定器である。この結果は直ちに速報誌 Science に掲載された[2]。

2004 年石川徹夫は空気中ラドン濃度の測定に広く使用されているパルス型電離箱式ラドンモニタ（アルファガード）及び静電捕集式ラドンモニタ（RAD7）にバブリングキットを接続して水中のラドン濃度を測定した。(1) バブリングによって、水中のラドンを気中に追い出す、(2) 閉鎖系を作ってポンプで空気を循環させ、追い出したラドンを電離箱内或いは電界のかかったチェンバー内に導く、(3) ラドン或いは娘核種 ^{218}Po の放出するα線による電離から生じたパルスを計数し、単位時間あたりのカウント数からラドン濃度を評価すると

いう原理である[19]。

4.2 ラドン、トロン共存系（$^{222}Rn + ^{220}Rn$）

1976 年矢野倉はトルエンで抽出したラドン、トロン試料を Ge(Li)半導体検出器と LSC で測定し両者のメリット、デメリットの比較検討を行った。

1979 年堀内は半減期の異なるラドン（3.825 日）とトロン（54.5 秒）が共存する場合，トルエン抽出した試料を連続測定し、得られた崩壊曲線をバネープロット法で解析し、トロンの定量を検討した[20]。この方法はラドン抽出後ラドン及びトロンの娘核種 ^{212}Pb（ThB : 10.64 時間）がそれ以下の娘核種と放射平衡に達した後の約 4 時間以後から測定を行えばよく、野外抽出、実験室測定が可能な簡便な方法である。測定下限はラドン 0.5×10^{-12}Ci/L、トロン 6.8×10^{-10}Ci/L である。1981 年伊藤淋典と柴田は LSC 法による水中のラドン、トロン共存する系の定量でラドンと ^{212}Pb がまだ娘核種と放射平衡に達していない系での非平衡時測定法を検討した。

4.3 ラジウム（^{226}Ra、^{228}Ra）

ラジウムはラドンの親核種で天然には ^{226}Ra、^{224}Ra、^{228}Ra、^{223}Ra が存在し、^{228}Ra のみが β 壊変する。従来鉱泉水中のラジウムの測定はほとんど ^{226}Ra の定量であり、放射平衡に達したラドンを測定するエマネーション法によっていた。天然試料中のラジウムはごく微量であるため測定及び核種の解析に如何にして可能な量を得るかが第一の問題であり、通常測定はラジウム直接ではなく放射平衡にある娘核種を測定して評価するため放射平衡が成立するまでの期間約 1 ヵ月如何に効率よく密封状態に保つかが第二のポイントになる。

液体シンチレーションカウンター(LSC)が開発されると，1978 年に堀内は同一試料中のラジウム、ラドンを測定し 119 の温泉につき報告した[21]。抽出法でラドンを抽出した後の試料水 1L に N_2 ガスを吹き込んで残存するラドンや有機溶媒等を除去し、Ba キャリヤーを加えてラジウムを $BaSO_4$ に共沈させた後、沈殿は加温した EDTA で溶解しキュリー瓶に封じ込んで貯蔵した。ラジウムと放射平衡になったラドンを循環でドライアイス、アルコールで冷却した LS で捕集し、LSC で測定した。従来、温泉水中のラドンは親核種ラジウムとは非平衡に多く存在することが知られているが、ここでもそれが証明されている。また 1981 年にはラジウムから生成するラドンを直接 LS に抽出して LSC 法で定量を行った。試料水 1L をテフロン栓で密封できるガラス瓶に取り、N_2 ガスをバブリングさせて溶存しているラドンを追い出した後、一定量の LS を加えてテフロン栓で密栓し、生成してくるラドンが逸散しないよう倒立させ、ラジウムとラドンが放射平衡に達するまで放置し、LSC で測定する方法を検討した。

1980 年坂本浩はラジウムと平衡に達したラドンを試料水中に He ガスを吹き込んで気密系に追い出し、コールドトラップと活性炭への着脱を経過させて精製し、ルーカス型カウンターで α 線測定しをラジウム定量した。

1983 年亀谷勝昭は塩酸酸性とした試料水 10～20L をアンバーライト CG120（H 型，3cm ϕ ×10cm）を通してラジウムをイオン交換樹脂に吸着後樹脂を灰化し、塩酸に溶解し蒸発乾固する。乾固物に少量の塩酸と水を加えて溶解し、Ba キャリヤーを加えて硫酸バリウムに共沈させて放置し、生成した ^{226}Ra 及び ^{228}Ra の娘核種の γ 線を Ge（Li）半導体検出器で測定し

た。この方法の検出限界は 0.2pCi/L である。

1988 年加藤武雄は $Pb(NO_3)_2$ 担体法を用い、温泉水から RaB(ThB)を硫化物として沈殿させ、分離後乾燥して β-放射能を GM 計数管を用いて現地で計測している。半減期から RaB（ThB）を確認し，RaDEF 標準線源で校正し，湧出時における RaB（ThB）の放射能を求めている。

1992 年矢板毅は試料水中のラジウムを Ba キャリヤーを加えて硫酸ラジウムとして沈殿させ、石英アンプルに封入し、約 30 日後に ^{228}Ac 及び ^{214}Pb のγ線を測定することにより定量した。

1994 年山本政儀は温泉水 5L を用いてラジウムを定量した。HCl 酸性で Ba^{2+} 300mg を加え、$(NH_4)_2SO_4$ によりラジウムを $BaSO_4$ に共沈させた。沈殿を 0.45μm ミリポアフィルターでろ別した後 110℃で乾燥し、沈殿をポリエチレン袋に入れ約一ヶ月放置し、ラジウムと放射平衡に達した娘核種、^{226}Ra の場合には ^{214}Pb、^{228}Ra の場合には ^{228}Ac のγ線スペクトロメトリーにより定量した。

2000 年百島は温泉水 90L を採取後直ちに Ba^{2+} と Pb^{2+} キャリヤーを加えて冷却し、H_2SO_4 を添加してラジウムを $BaSO_4$ に共沈させた。沈殿を 0.45μm のメンブランフィルター上に集めて乾燥させ、放射能測定用の容器に完全密封する。沈殿回収後直ちにγ線を測定し、一ヶ月後に二回目の測定する。一回目の測定で ^{224}Ra と ^{228}Ra を、二回目の測定で ^{226}Ra 濃度を、放射平衡に達したそれぞれの娘核種の放射能から定量している。また 2003 年には可搬式パルス波形弁別式 LSC を用いて 10L 試料水中のラジウムを定量した。$BaSO_4$ に共沈させたラジウムを EDTA を用いて溶解し、ラドン・バブラーに入れて密閉して 30 日間放置し、ラジウムと放射平衡になったラドンを液体窒素温度に冷却した透明なガラスビーズに付着固化せしめビーズごと測定バイアルに入れて LS を加え、測定している。この方法による回収率は 63.9%と報告した[22]。

2002 年斉藤敬は酸濃度を 0.1M-HCl に調整した温泉水に陽イオン交換樹脂をバッチ法で用い、二回の回収操作で回収量を求め、ラジウム濃度を計算した。また樹脂に回収された ^{226}Ra と ^{228}Ra の量は娘核種のγ線スペクトロメトリーによっている。ラジウムが吸着した樹脂を一ヶ月保管する容器はブリキ製のコンテナーがよくラジウム含有量として 10mBq/L 以上では 5L、1mBq/L 以下の濃度のでは 50L の試料水を用いるのがよいとしている。

2003 年太田朋子は 35 g の陽イオン交換樹脂と 30 g の Mn-浸漬アクリル繊維を温泉水中に長時間浸けて、ラジウム同位体を捕集した。Mn-浸漬アクリル繊維は、100 g のアクリル繊維を 50℃に加温した 0.3M-1L の $KMnO_4$ 溶液に 12 時間浸漬後、よく洗浄し、50℃で完全に乾燥して調製した（1976 年 Moore）。陽イオン交換樹脂と乾燥した Mn-浸漬アクリル繊維は測定用の密閉型錫缶に密閉し、測定まで一ヶ月保存した。

5. 終わりに

発見から一世紀を経て、水中のラドン、トロン、ラジウムに関する研究が数多く存在する。ここでは一つの流れを追ったに過ぎないが、環境放射能ラドン、トロン、ラジウムはいまや存在量だけではなく地球化学、環境化学、水文学、温泉化学、断層・ウラン探査、保健物理、医学・健康学等の幅広い分野で研究されている。ラドン、トロン、ラジウムは自然環境の何処にでも在り、人々は日常それらにとりまかれて暮らしている。従って人々が気軽に身の回りの環境放射能：ラドン、トロン、ラジウム等と付き合って行くためには、これからも沢山

のデータの集積、簡単な測定・利用方法の開発、健康との関連解明など、環境放射能研究が益々発展し、環境放射能への人々の理解が深まることが重要である。

＊本稿は日本放射化学会50周年のあゆみのラドン、トロンの原稿に加筆したもので、網羅仕切れていないことをおことわり致します。

6. 参考文献

1) 阪上正信：ラドン研究の源流と現状；日本分析センター広報　No.28　16-22（1996）
2) Igarashi, G., Saeki,S.,Takahata, N., Sumikawa, K., Tasaka, S., Sasakai, Y., Takahashi, M. and Sano, Y. : Science, **269**, 60-61 (1995)
3) 安岡由実、志野木正樹：大気中のラドン族と環境放射能　III,　204-206　（1995）
4) 中井敏夫：Bull. Chem. Soc. Japan, **15**, 333 (1940)
5) 放射化学討論会講演要旨集　第1集（1957）～第49集（2005）
6) 堀内公子、甘露寺泰雄：進歩総説　温泉水の分析；ぶんせき　99-103（1985）；372-377（1992）；680-684（2005）
7) 野口正安、村上悠紀雄：日本化学会第17年会　p 107　（1964）
8) 野口正安：*Radioisotopes*, **13**, 362 (1964)
9) Y. Homma, Y. Murakami : J. Radioanal. Chem., 36, 173-184 (1977)；本間義夫、村上悠紀雄：分析機器、**15**、227-232、（1977）
10) 堀内公子、村上悠紀雄：温泉科学　**28**、39-52、（1977）；温泉工学会誌、**13**、95-103（1978）
11) 石河寛昭：最新液体シンチレーション測定法、p 117　南山堂（1992）
12) Saito, M.: *Radioisotopes*, 32, 109-112 (1983) ; *Radioisotopes*, **55**, 55-60 (2006)
13) 斉藤正明：「天然水中ラドン」専門研究会報告書、KURRI-KR-6　p5（1996）
14) Yasuoka, Y., Ishii, T., Kataoka, Y., Kubo. T., Suda, H., Tokonmi, S., Ishikawa, T., and Shinogi, M.: *Radioisotopes*, **53**, 123-131 (2004)
15) Hidex Oy, TURKU, Finland http://www.hidex.com/uranium.html (2001)
16) 堀内公子、高野聖子、田中昭、甘露寺泰雄：大妻女子大学紀要「社会情報学研究」**9**、83-88（2000）
17) 日本保健物理学会「水中のラドンに関する専門研究会」活動報告書、(2004)
18) 田坂茂樹、佐々木嘉三、岡沢裕子、中川雅人：*Radioisotopes*, **43**, 125-133 (1994)；*Radioisotopes*, **45**, 741-752 (1996)；
19) 石川徹夫、安岡由実、楢崎幸範、床次真司、石井忠、須田博文、山田祐司：*Radioisotopes*, **53**, 133-140 (2004)
20) 堀内公子、村上悠紀雄：分析化学、**28**、661-665（1979）；*Radioisotopes*, **28**, 508 (1979)
21) 堀内公子、村上悠紀雄：温泉科学　**29**、68-75、（1978）
22) Momoshima, N. and Zhang, H.: JAERI-Conf. 2003-010 343-347 (2003)

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 9 No. 1, p. 41 – 50 (2005)

放射線加工処理の進展と積み残された問題
－放射線化学実用化の50年を振り返って－

田村直幸
元日本原子力研究所
〒167-0021 東京都杉並区井草3-10-15（自宅）
（2006 年 3月 10日 受理）

［要約］ 放射線化学の研究が始められてから50年ほど経つ。特異な放射線化学反応が見出されなかったのと照射施設のコストが高いため、数多くの研究開発が行われたが当初期待された放射線化学工業は実現しなかった。しかし、放射線が固体中でも密閉された系でも容易に透過して活性種を生成し、化学反応や殺菌等の加工処理ができる特長を持つこと、照射を依頼できる受託照射施設が普及したことなどから、企業ニーズに基づく放射線加工処理の実用化が進んだ。一方、研究機関の役割が先端研究に移行したこともあって放射線加工処理の基礎的な問題を取り上げる人材が次第に不足していることや、中立機関が行うべき線量計測トレーサビリティが未整備であるなどの問題が残されている。

1. 放射線化学の研究開始から実用化へ

1950年代に、英国の Charlesby らがポリエチレンに放射線を照射すると分子間架橋が起きて耐熱性が向上することを見出し、高分子の性質の改善に放射線が有効であると報告した。日本の各分野の研究者は色めき立ち、1956年頃から入手できる^{60}Co、電子加速器などの放射線源を利用し、有望とされた高分子分野を中心に放射線化学の研究が各所で開始された。一方、米国で実用化した医療用具の放射線滅菌や食品照射などについてもわが国での実用化を目指した検討が進められた。

1963年に、化学工業分野ではそれまで各研究機関で行われた基礎研究の中から有望とされた放射線重合、グラフト重合に関する四つの研究が選ばれ、スケールアップした開発試験を行うため日本原子力研究所高崎研究所（原研高崎研）が設立された。1964 年に^{60}Co 大線源、電子加速器などの大型照射施設が建設され選ばれた四つのテーマについて長期間に亘る開発試験が行われた。しかし、いずれも実用化につながることはなかった。結局、放射線の役割は化学反応を起す活性種をつくるだけで特異な反応は見つからず、化学工業を従来法から放射線法に置き換えるのは夢に終わった。放射線化学研究者の興味は次第に放射線化学初期課程の解明へと移って行った。

しかし、放射線が物質中を容易に透過し、結晶のような固体中でも、密封された物体中でも、低温凍結状態でも活性種を容易に生成して化学反応を引き起こすことから、このような放射線の特長を活かした数多くの用途が見出されてきた。高分子材料の架橋・分子切断、捕捉ラジカルによるグラフト重合、塗装・接着等の薄層硬化、医療用具の滅菌、食品の殺菌・殺虫・発芽抑制による保蔵などが挙げられる。このような放射線化学反応を利用した分野は放射線加工処理（Radiation Processing）と呼ばれ、今や幅広い分野の企業で電

子線、γ線による加工処理法が普及しているといってよい。

電子線、γ線による加工処理の開発、実用化が企業で普及するにつれて、公的研究機関の研究対象は当然のことながらイオンビーム利用などの先端研究へと移って行った。しかし、中立機関が行うべき線量計測トレーサビリティシステムは未だに整備されていない。また、企業に定着したと思われる電子線、γ線についても基礎的な照射効果の検討が必要な場合があるが、人材が次第に不足しつつある。

この報告は放射線化学実用化のすべてを取り上げてレビューするのではなく、筆者の今までの経験を通して、放射線化学研究開発のうち実用化に成功したものと実用化が困難であったものから代表的なものを取り上げるとともに、さらにわが国で積み残された問題などについて述べたい。また、加工処理分野ではないが、高分子の照射効果に関連して原子炉の放射線場で使用される電線絶縁材料の耐放射線性研究についてもふれる。しかし、企業で始められ企業で活発に実用化研究が行われた低エネルギー電子線を利用する塗装・接着などの電子線硬化については割愛する。

なお、筆者は 1956 年に科学研究所（現在の理研）の篠原健一先生の研究室に入り、高高分子照射効果の研究に携わった。その後放射線高分子研究協会東京研究所を経て原研高崎研に加わり、高分子放射線化学の研究、線量計の開発、電子加速器照射施設の建設、ウリミバエ不妊化など外部照射施設の建設への協力、原子炉用電線材料の耐放射線性試験法の研究などで活動したほか、1988 年から技術者の原子力研修、放射線利用の普及活動、東南アジア諸国との原子力協力などに携わった。

2. 実用化した放射線加工処理

2.1 実用化例と必要吸収線量

^{60}Coγ線及び加速器電子線により現在までに実用化した放射線加工処理を必要吸収線量の順に表 1 に示す。電子線はγ線より透過力に劣るが、電子加速器の方が出力あたりのコストが安い。従って使用する電子線のエネルギーで透過できる試料については、電子線による方が有利である。実用化例の多くが自社照射施設よりもむしろ他社の受託照射施設を利用している。

表 1 の中にある実用化製品はほとんど企業のニーズから生まれたものといってよい。公的研究機関の役割は、物質中での放射線の挙動、結果として起こる化学変化、生物変化を明らかにすることと、物質中での吸収線量の正確な評価と照射技術などである。企業が持ち込むニーズと研究機関、企業双方の研究者の知識とアイデアとが結びついて実用化が成功することが多い。

2.2 高分子の架橋・分解による性質改善

ポリエチレンなどの高分子に放射線を照射すると耐熱性が向上することが 1950 年代に英米で報告されて以来、放射線高分子反応は放射線化学の応用の最も有望なものとして国内外で研究が進められた。このうち早くから実用化されたのは、電子線による高分子の架橋を利用したものである。現在までに耐熱性電線、発泡ポリエチレン、熱収縮性チューブ、タイヤゴムシート（強度向上）などが工業的に製造されている。この分野は海外で実用化が有望なものとされ、日本ではニーズを認識した関係企業が真っ先に開発を進めた。一方、

表 1　放射線加工処理の実用化例

必要吸収線量 Gy	利用対象分野・品目	使用放射線 γ線	電子線
10	害虫の不妊化	γ	
100	食品保蔵（ジャガイモ発芽抑制）	γ	
	*食品保蔵（殺虫）	γ	
1k	*食品保蔵（殺菌）	γ	
10k	医療用具の滅菌	γ	e
	医療品（不織布ガウン等）の滅菌	γ	e
	*宇宙食、病院食	γ	
	無菌動物飼料	γ	
	装飾品（真珠、水晶）の着色	γ	
	固体潤滑剤（テトラフルオロエチレン樹脂）	γ	e
	高分子グラフト　電池用隔膜		e
	脱臭剤		e
	水溶性ジェル（PVA）　創傷被覆材		e
	電子線硬化　塗装（トンネル内装板、アートタイル）		e
	磁気材料バインダー		e
	印刷（フィルム、包装材）		e
	接着（ラミネート鋼鈑）		e
100k	高分子架橋　発泡プラスチック		e
	熱収縮性チューブ		e
	タイヤゴムシート		e
	耐熱性電線		e
	古文化財補修用材料（絹、檜）	γ	e
1M			
10M	炭化珪素繊維		e

*日本ではまだ行われていない

研究機関では架橋・分解の機構解明、生成ラジカル等活性種の挙動など基盤的な研究が中心であった。架橋・分解は必ずしも高分子の種類によって決まらないこと、高分子の持つ特有の物理状態や雰囲気によって変わるなど、多くの研究がなされたが、架橋・分解の機構が完全に解明されぬまま実用化は進んで行った。

ポリテトラフルオロエチレン（PTFE）が、融点よりやや高い温度域で照射すると架橋することは比較的最近明らかにされたが、初期の頃は放射線で分子切断を起す典型的なものとされていた。実際に室温で照射された PTFE は微粉末化し固体潤滑剤として産業機材用

に使用されている。PTFE が照射により微粉末化するのは分子切断だけでは考えられず、分子切断に伴って非晶域が結晶化を起すためであろう。

ポリビニルアルコール（PVA）も室温照射では分解型の高分子であるが、水溶液で照射すると容易に架橋反応を起しハイドロゲルを生成する。この現象は放射線化学研究の初期の頃団野博士[1]によって見出されたのであるが、最近になって創傷被覆材[2]として実用化されたのは感慨深い。放射線法は架橋剤を使用せずにハイドロゲルができるため残留架橋剤の心配がなく医療用として使用可能だという。

2.3 前照射グラフト重合による機能性高分子材料

放射線グラフト重合の方法には同時照射グラフトと前照射グラフトがある。実用化されたのは照射により結晶性高分子の結晶領域に捕捉されたフリーラジカルを利用する前照射グラフト法である。

結晶性高分子であるポリエチレンに放射線を照射すると主にアルキルラジカルが生成する。非晶域に生成されたアルキルラジカルは室温では分子運動が活発なため寿命は短いが、結晶域では分子運動が束縛されているため寿命は比較的長く、結晶内をゆっくりと移動する。結晶の表面に現れたところでモノマーのような反応性物質に出会うと反応してグラフト重合を引き起こす。また、空気中の酸素が入り込んでいると酸化反応が急速に起こる。この現象はESRにより明らかにされ[3]、前照射グラフト重合の実用化の基盤となった。反応性の物質がない場合にはラジカルによる架橋反応が起こるものと考えられる。

この捕捉ラジカルを利用する前照射グラフト法が、同時照射法に比べて実用化に有利なのはホモポリマーの生成が少ないこともあるが、決定的だったのは費用のかかる照射施設を自社内に設置する必要がなかったことである。照射だけを他の受託照射施設に依頼し、生成ラジカルを含む照射物を自社に持ち帰ってグラフト反応を起させることによりグラフト物の製造が可能になった。電池用隔膜、吸着脱臭剤などの機能性高分子材料の実用化は前照射グラフト法による成果である。

なお、初期の放射線化学の教科書には前照射グラフトの方法として、空気中で照射して過酸化物をつくり、これを熱的に分解して生成するラジカルを利用する方法が代表的な例として挙げられていた。しかし、その後実用化したのは照射による捕捉ラジカルの挙動を巧妙に利用する方法であった。

2.4 医療用具放射線滅菌の普及

放射線による医療用具滅菌の研究は欧米で1950年代に始められ、1958年にエチコン社（米）が腸線縫合糸の滅菌に放射線法を用いて実用化した。その後滅菌済み使い捨て医療用具の進歩、普及とともに、放射線滅菌が次第に普及した。日本では欧米よりも遅れて1970年に放射線滅菌に関する厚生省告示がなされ、1971年に注射筒、注射針などで実用化が始った。滅菌用放射線としては日本では当初^{60}Coγ線のみが許可されていたが、1988年に当時の国立衛生試験所、原研高崎研、東京都立アイソトープ総合研究所の協力に基づいて電子線滅菌についてのガイドラインがつくられ、電子線滅菌の利用も可能になった。1997年には滅菌バリデーション基準が通達されわが国でも放射線滅菌のガイドラインが示された。

現在^{60}Coγ線照射施設では8社（自社施設4社、受託施設4社）、11基の装置が稼動し

ている。また、電子線照射施設では、不織布ガウン等の医療品も含めて 7 社（自社施設 3 社、受託施設 4 社)、9 基の装置が稼動している。^{60}Co 線源は現在すべて輸入に頼っている。また、厚い物体の照射を要求される滅菌用電子加速器は、加速電圧 10MeV（LINAC とロードトロン）か 5MeV（静電型）の高エネルギー加速器が多い。滅菌法として認められているエチレンガス滅菌、高圧蒸気滅菌、放射線滅菌の中で、放射線滅菌の割合は 60% 以上に達している。

放射線滅菌では照射物品が的確に照射されたかの保障は吸収線量の評価によっており（ドシメトリックリリース)、高精度の参照標準線量計による計測値が滅菌線量を充足していることを、査察を受けて確認される必要がある。しかし後述のように、わが国では加工処理レベルの線量計測トレーサビリティが未整備であるため、残念ながらすでに制度が整備されている外国に保障を頼らざるをえない状況にある。

2.5 不妊虫放飼による害虫防除の成功

放射線で不妊化した害虫を放飼することによる害虫防除は 1950 年以降、海外で研究が進められた。最初の成功例は 1955 年、ベネズエラ沖にあるキュラソー島のラセンウジバエの根絶である。その後、各国でミバエ類を対象に不妊虫放飼法が適用された。

不妊虫放飼法が成功するためには、(1)野生の虫と変わらない交尾能力をもつ虫の生態の調査と大量飼育技術、(2)交尾能力に影響せず不妊化のみできる条件での放射線照射技術、(3)自然界に放飼された不妊雄が十分に分散して野生雌と交尾できる放飼技術、(4) 防除しようとする野生の虫の数よりも放飼する不妊虫の数が多い必要があり、野生の虫の数の評価技術、などを総合的に検討する必要がある。不妊虫放飼法の成功はそう簡単なことではなく、むしろ失敗例の方が多い。国内の成功例では沖縄群島、奄美群島のウリミバエ不妊虫放飼事業が挙げられる。

ウリミバエは第二次大戦前に沖縄県の宮古群島で発生が確認されていたが、1970 年に久米島で発生する事態になった。沖縄県では 1972 年本土復帰の事業として不妊虫放飼による久米島のウリミバエ根絶を取り上げ、1973 年に小規模の^{60}Co 照射装置が沖縄県農業試験場に設置された。不妊虫をつくるのに最適の線量 70Gy を見出し、久米島に対し不妊虫蛹の放飼を行い 1977 年に根絶に成功した。この間ウリミバエは沖縄本島でも発生し、さらに南西諸島を北上して奄美群島まで棲息するようになった。久米島での成功に基づいて、南西諸島全域のウリミバエ根絶のため、1981 年奄美大島に週 4 千万匹の蛹を、1983 年に沖縄本島に週 1 億匹の蛹を処理できる大量増殖施設と原研高崎研の技術協力による^{60}Co 照射施設が完成し、ウリミバエ根絶事業が進められた。 1990 年に最大の面積をもつ沖縄本島で根絶に成功し、1993 年に最後の八重山群島で根絶に成功した[4]。

施設の建設に当たっては、久米島の成功を基に沖縄県農業試験場の昆虫研究者がウリミバエの生態を十分に調べて大量増殖施設を建設し、不妊化照射施設については蛹が呼吸できる照射容器、許容できる線量範囲、蛹の処理量等の照射条件を検討して施設設計に反映させた。失敗例が多いといわれる不妊虫放飼法が沖縄県で成功したのは、適切な大量増殖、不妊化照射によってつくった不妊虫蛹の広範囲にわたる放飼が粘り強く行われたことによる。沖縄県では、現在も再侵入防止のための防除事業が行われている。

2.6 加工処理用線量計の整備

放射線加工処理の特長は物質中の吸収線量を正確に評価できることで、所定の線量均一度で材料を照射できるという信頼できる加工処理法である。高分子架橋などの材料照射では線量測定は照射条件を決めるための手段だが、放射線滅菌や食品照射では吸収線量が照射の保障になっているため、便利で精度のよい実用線量計が不可欠である。この分野では欧米が先行したため、着色 PMMA（ポリメチルメタクリレート）線量計、ラジオクロミックフィルム線量計などの外国製の線量計が使われている。

日本は放射線化学の研究、実用化には熱心だったが、線量評価のような規格、基準を重要視していなかった。国内の放射線化学の中心機関とみなされていた原研高崎研は、医療用具の滅菌に関する研究は対象外であり、線量測定の研究は正式テーマにはなかった。しかし、外部の照射企業・機関の要請を認識した研究者の努力で研究が進められた。

わが国で開発し、諸外国で使われている実用線量計としては CTA（三酢酸セルロース）線量計が挙げられる[5]。CTA 線量計は日仏研究協力で始められ、当初フランス Numelec 社の CTA フィルムを使うように要請があった。しかし、Numelec フィルムは厚さにむらがあり精確さが要求される線量計としては使い物にならなかった。このため富士写真フイルム社がその製造を引き受けることになった。線量測定用に TPP（トリフェニルフォスフェート）だけを添加剤として入れて製造された CTA フィルムは、厚さの精度もよく、現在、加工処理用線量計として国内外で広く使用されている。このほか、国産の線量計にはラジエ工業㈱の Radix 線量計（無色 PMMA）がある。

わが国では産業技術総合研究所（産総研）が放射線量の国家標準を保持しているが、加工処理レベルの高線量率を産総研の標準設備ではカバーできないため、実際には産総研のγ線標準場で校正された原研高崎研の高線量率用平行平板電離箱が国内の標準線量計的な役割を果たしている。また、高崎研のコバルト照射室の一つが加工処理レベルの実質的なγ線標準照射場としての役割になっている。また、電子線量については産総研には標準器は設定されていない。このため高崎研の電子流密度測定器が所内標準器として整備され、これに基づいて CTA 線量計等の電子線用ルーチン線量計の校正が行われている。しかし、こうした線量校正業務は実質的なものであり、国家標準とのトレーサビリティを保障するものではない。

3. 放射線化学の実用化が難しい分野

3.1 精力的に研究された放射線重合

放射線化学の研究の中で放射線重合は最も精力的に行われた研究分野である。高分子学会の研究発表の重要なセッションの一つになっていた時代もあった。気相重合、溶液重合、固相重合などについて多くの興味ある研究が行われた。気相重合ではエチレン重合について、固相重合ではトリオキサンの重合について原研高崎研のパイロット規模の開発試験に取り上げられ、最重要課題として放射線重合物の特徴が組織的に調べられたが結局実用化までには至らなかった。

エチレンの放射線重合では、重合して得られる粉末状のポリエチレンが他の方法では得られない性質を有するのではないかと形態・物性の研究が組織的に進められ、粉末状の試料には結晶領域が欠陥を多く含むなどの特徴が見出されたが、実はこれは重合したままの

試料の特徴であって放射線重合の特徴ではなかった。放射線重合が実用化に至らなかった最大の理由は開始剤により重合してえられた重合物にくらべて特徴が見出されなかったことで、大型の照射施設を必要としコスト的に不利な放射線照射法からは次第に企業の興味は離れて行った。

3.2 進展しない日本の食品照射

日本は「ジャガイモの発芽抑制」を対象に食品照射を真っ先に商業化した国である。1967年に国の原子力特定総合研究に指定された食品照射7品目のうちの一つであった。1973年末に北海道の士幌町農業協同組合が^{60}Co 約 10PBq のジャガイモ専用大型照射施設を建設した。大型の搬送用金網ケージ（1.7m×1.4m×1.0m）の中に積み込まれた1.5tonのジャガイモを所定の線量（上限150Gy）及び線量均一度で照射する必要がある。線量測定にはフリッケ線量計が使用され、正確に処理できる放射線法の優位性が示された。この照射施設が、線源利用効率が悪いにも拘わらずコスト的に成立したのは、士幌農協がジャガイモ加工コンビナートの一環としてγ線照射による発芽抑制施設を位置づけたからである。照射事業開始後２，３年経った頃から消費者団体から反対運動が始まり、このため市場が制限を受けることになったが、ジャガイモの大量照射は士幌農協によって現在まで毎年続けられている。

消費者団体等による照射食品反対運動はその後も続き、わが国の食品照射の進展は停滞し、許可されている品目は未だにジャガイモの発芽抑制だけである。一方、海外では香辛料、乾燥野菜、食肉、魚介類などが広く認可、実用化されており、放射線による殺菌、殺虫法は一般に受け入れられているといってよい。わが国でも全日本スパイス協会が香辛料の微生物汚染低減を目的とした放射線照射の許可申請を平成12年に行っているが、まだ認可されていない。日本だけが世界の情勢から取り残されてしまっているように思われる。筆者が滞在していたインドネシアでは米国向けの冷凍えびは微生物汚染を低減してから船に積み込むことが要求されるようになってから、受託照射会社の活動が活発になったと聞いている。

真っ先に食品照射を実用化した日本がその後 30 年以上経って世界から取り残されているのは残念である。反対運動のためもあろうが、食品照射の専門家がもっと自信を持ってその有用性を発言する必要があると思う。“放射線”ということばが消費者にとってイメージがよくないからと、“低エネルギー電子線”を“ソフトエレクトロン”と置き換えたら理解されるという話ではない。

3.3 排煙処理実用化の可能性

石炭あるいは重油燃焼排煙中の硫黄酸化物、窒素酸化物が放射線照射により分解することが最初に荏原製作所で見出され、1972年から原研高崎研との共同研究で排煙処理の実用化へ向けて開発が進められた。アンモニア添加により硫酸ミスト、硝酸ミストをそれぞれ硫安、硝安に変え、粉末状生成物を捕集することにより脱硫脱硝が達成できた。その後原研、荏原、中部電力の三社によるパイロット試験の結果を踏まえて、中部電力は西名古屋火力発電所に排煙処理実証プラントを1999年に建設した。

電子線排煙処理の実用化で大きな問題は、電子加速器のコストだった。実証プラントで

は排ガス処理量がパイロットプラントに比べて極めて大きいことと、電子加速器の単機出力には限界があることから、複数台の加速器を設置する必要がある。中部電力の実証プラントでは、加速電圧 800kV で製作可能なビーム電流 500mA を発生する加速器を 6 台設置した[6]。しかし、その後この実証試験は中止になったと聞いている。電子加速器の価格は主に電圧できまることから、コスト削減のためできるだけ電流を大きくして 6 台で済ませたのだが、結局電流 500mA の発生装置は信頼性の点から無理だったのだろう。電流を下げれば加速器台数を増やさざるをえず、実用化は難しいように思われる。

なお、電子線排煙処理は IAEA の協力でポーランド、中国などの火力発電所でパイロット規模で稼動し成果をあげているといわれる。また、筆者が滞在していたインドネシアでも国営電力会社の石炭火力発電所で実証試験を行う予定だと最近聞いた。心配なのはコストの点もさることながら、何台もの大型電子加速器の維持管理がインドネシアでうまく行くだろうかという点だ。実用化の場合の採算の問題や従来法との比較などインドネシア側は十分に検討したのであろうか。まだ実用化の保証のないうちに途上国に安易に導入を勧めるべきではないと思う。

4. 高分子材料の耐放射線性

4.1 耐放射線性研究の対象分野

高分子材料の耐放射線性は放射線加工処理の定義からははずれるが、高分子の照射効果という点からは加工処理と共通した研究分野である。放射線による高分子の架橋・分解は加工処理では改質だが、耐放射線性の観点からは劣化になる。

放射線化学の研究が始められた 1950 年代、耐放射線性という観点から各種プラスチックの機械的性質の変化などが米国で報告されたが、当時はまだ温度、雰囲気、線量率などの照射条件の影響などはわからなかった。わが国で高分子材料の耐放射線性の研究が取り上げられたのは 1970 年代になってからである。原研高崎研の^{60}Co 大線源照射施設が、原子炉の放射線場で使用される材料の耐放射線性を調べる格好の施設であったことから、原子力関係機関の要請に応じて研究が行われた。耐放射線性の研究はその後、原子炉用に加えて宇宙環境、核融合炉などで使用される芳香族ポリイミドなどの耐放射線性有機材料の研究[7]へ発展した。

放射線滅菌の対象となる医療用具ではプラスチック材料が使われており、滅菌線量が低いとはいえ、材料によっては酸化劣化、着色、臭いなどの耐放射線性が問題になることがある。欧米では医療用具を対象とした耐放射線性の研究は現在も行われている。わが国でも高分子の照射効果をよく熟知した研究者がこの分野に目を向ける必要があろう。

4.2 原子炉用電線ケーブルの健全性試験法の研究

軽水炉の格納容器で使用される電線ケーブルについて米国 IEEE 試験基準が設けられ、わが国でも米国基準を参考にして 1978 年から電気学会の原子力発電所用電線ケーブル調査専門委員会で審議が行われ、推奨案が 1982 年に刊行された。1977 年に関係企業の要請によって原研高崎研に「原子力発電所用電線ケーブルの健全性試験法に関する研究」が発足した。材料は実際に軽水炉で使用する耐熱性、耐放射線性電線ケーブル被覆材・絶縁材である。原子力配合の材料提供には大手の電線メーカー6 社が参加した。

試験法は原子炉の(1)事故時における健全性と(2)通常運転時における信頼性の評価である。事故時試験法については、^{60}Co 大線源照射施設の中に放射線・熱・蒸気の複合環境を同時に与えられる原子炉用電線材料健全性試験装置 SEAMATE (Simulated Environmental Apparatus for Material Testing) -II を製作し、電気学会推奨案である放射線と熱・蒸気環境とを別々に与える逐次試験法の妥当性を評価することを目的とした。SEAMATE-II はわが国で唯一の同時試験ができる装置であるが、その役割は試験法を評価するためであって試験そのものではない。その後同時試験と逐次試験の比較を中心に各種絶縁・被覆材料について膨大な劣化データが蓄積された。放射線を照射してから熱・蒸気環境に晒す逐次環境試験がもっとも苛酷な試験法であり、放射線酸化劣化を受けた高分子材料の挙動によって説明された。

通常運転時試験法の研究は、原子炉の寿命とされる期間（当時 40 年間）に受ける線量（100kGy）による材料劣化の評価である。問題はこのような低線量率で長時間、空気中で起こる酸化劣化を、実際に試験可能な高線量率短時間で模擬する方法である。高線量率では酸化劣化は試料の表面だけになり低線量率の実環境よりも劣化しにくい。高線量率でも加圧酸素下で照射すれば試料内部まで酸化劣化を起す方法や試料内部の酸化領域を測定する方法などが開発された。ここで行われた研究は、電気絶縁材料の耐放射線性試験法の JEC 規格, JEC-6152 (1996) に採用されている。

5. 放射線加工処理実用化で残されている課題

5.1 線量計測トレーサビリティシステム

放射線滅菌や食品照射では、照射物品が所定どおり的確に照射されたかどうかの保障は吸収線量の評価によっており、欧米先進国では公的機関による線量計測トレーサビリティが整備されている。英国の NPL（国立物理研究所）、フランス CEA 傘下の LMRI（放射線計測研究所）などが代表的な機関である。

NPL を例にとると、一次標準線量計は電離箱とグラファイトカロリメーターがあり、防護レベル、治療レベル、加工処理レベルのすべての線量範囲をカバーしている。加工処理レベルについては吸収線量を基準としていることから、γ線一次標準計としてグラファイトマイクロカロリメーターを位置づけている。NPL の線量校正サービスは、参照標準線量計である化学線量計によっており、アラニン線量計が広い線量範囲でγ線、電子線の両方に利用できることから、医療用具滅菌用として位置づけている。

わが国で医療用具滅菌の企業現場の線量測定と国家標準との公的なトレーサビリティが未整備なことから、放射線滅菌企業ではやむをえず海外の校正機関に線量校正を依頼せざるをえない状況にあり、その際英国 NPL 製のアラニン線量計が参照標準用としてγ線にも電子線にも使われている。わが国でも参照標準用を目的として開発、製造されたアラニン線量計が、2001 年 JIS「Z4571 アラニン線量測定装置」[8]として制定され、トレーサビリティ整備のお膳立ては揃っている。長年の懸案の解決が待たれる。

因みに、先進国ばかりでなく、マレーシアでも MINT（マレーシア原子力研究所）にある SSDL（2 次標準線量計測センター）[9]は、2 次標準線量計測機関として国際的に認められ、所有する標準 X 線源は年に 1 回 IAEA の標準アラニン線量計で郵送による線量相互比較を実施している。加工処理レベルについてもフリッケ等の化学線量計と日本の CTA 線量

計を使用し国内の加工処理施設の線量校正を行っている。

5.2 積み残された基礎研究

電子線、γ線による加工処理の実用化が企業で進むにつれて、研究機関はそれぞれの役割に応じて別々な方向を取ることになる。

原研高崎研では電子線、γ線による機能性高分子材料、耐放射線性有機材料などの研究が続けられていたが、国の予算を使う研究所としては今までの延長線上の研究ではなくて、先端的な研究を立ち上げる必要が出てきた。このような事情で高崎研に 1991 年に新たにイオン照射研究施設が建設され、それとともに電子線、γ線に関する研究は次第に縮小し、主に企業、外部機関との協力で進められることになった。当然ながら若い研究者は先端研究を目指し、一方、高分子、線量計測、照射技術などの分野の第一線で活躍していた人材が次第に引退して行くのは将来を考えると気がかりである。このような傾向は大なり小なり公的な研究機関で見られるが、放射線滅菌で当初から活動している都立産業技術研究所が放射線滅菌、電子線硬化などの分野で依然として活動を保っているのは心強い。

高分子の照射効果についても照射温度、照射後の熱履歴など条件を変えて形態、物性の変化を調べることにより、劣化あるいは改質についての新しい知見がえられるものと考えられる[10]。海外の論文には今でも高分子照射の基礎研究が発表されている。

謝辞

最近の動向について瀬口忠男、田中隆一、伊藤　均、貴家恒男、小嶋拓治の各氏にいろいろお教え頂き、また、幕内恵三氏の著書[11]は大変参考になった。感謝の意を表したい。

引用文献

1) Danno, A. Gel formation of aqueous solution of polyvinyl alcohol irradiated by gamma rays from cobalt-60. J.Phys.Soc.Japan, **13**, 722-727 (1958)
2) 磯部一樹, 電子線を利用したハイドロゲル創傷被覆材の開発, 第 11 回放射線プロセスシンポジウム講演要旨集, 36-39 (2005)
3) Seguchi, T. and Tamura, N. Electron spin resonance studies on radiation graft copolymerization. I. Grafting initiated by alkyl radicals trapped in irradiated polyethylene. J.Polymer Sci. Chem.ed., 12, 1671-1682 (1974)
4) 沖縄県農林水産部, 沖縄県ミバエ根絶記念誌 (1994)
5) 田中隆一, 三友昭市, 須永博美, 松田光司, 田村直幸, CTA 線量計マニュアル, JAERI-M 82-142 (1982)
6) 北村孝幸, 放射線と産業, 中部電力㈱電子ビーム重油燃焼排煙処理研究装置建設の現状, No.82, 14-17 (1999)
7) 瀬口忠男, 放射線と産業, 耐放射線性有機材料, No.66, 4-8 (1995)
8) 小嶋拓治, 放射線と産業, 放射線利用における線量計測の現状, No.89, 4-7 (2001)
9) 田村直幸, Isotope News, マレーシア原子力研究所, 16-22 (2004)
10) 貴家恒男, 放射線と産業, 高分子材料の放射線劣化と改質, No.108, 44-50 (2005)
11) 幕内恵三, ポリマーの放射線加工, ラバーダイジェスト社 (2000)

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 9 No. 1, p. 51－56 (2005)

ビキニ事件がもたらしたもの

長谷川圀彦
NPO 法人放射線教育フォーラム
〒100-0013 東京都千代田区霞ヶ関3-3-1 尚友会館B1F
(2006年3月16日 受理)

要約 第五福竜丸が被曝したビキニ事件が発生してからすでに半世紀あまりが過ぎた。原水爆による被災のさいに、「広島、長崎、そしてビキニ」と言われる、この事件は、世界中に衝撃を与えるものであった。このビキニ事件を振り返るとともにその後この事件を契機としてできた静岡大学放射化学研究施設とその施設における放射線教育の取り組みなどについて記したい。

静岡県焼津市は、静岡市の南東２０キロメートルの静岡県中央部に位置し遠洋マグロ本拠地（１９５４年（昭和２９年）当時の人口は約７万人足らず）の街である。その港を母港とする第五福龍丸が１９５４年3月１４日に帰港し、乗組員がもち帰った爆発の灰を分析した結果、新型の水素爆弾（3F爆弾）とわかり一般市民を巻き込むこととなったこの事件は世界中に衝撃を与えた。

第二次世界大戦後、１９５０年代では、アメリカ、ソ連、イギリスなどの国は核兵器開発のための核爆発実験を大気圏内で盛んに行っていた。アメリカは１９４６年からマーシャル諸島で実験を始め、ビキニ、エニウェトク環礁などで計６７回の核爆発実験を繰り返し行っていた。１９５４年3月１日早朝、焼津のマグロ漁船である第五福龍丸はビキニ環礁北東の公海上でアメリカの核実験に遭遇し、「死の灰」が長時間にわたり船と乗組員の上に降りそそぎ、乗組員の体に異変が起きた。焼津に帰港した乗組員２３人は直ちに病院の検査の結果、東大病院と国立東京第一病院（現、国際医療センター）入院し治療を受けた。乗組員全員の身体露出部に色素の沈着が認められ、かゆみと痛みがあり、目に疼痛と結膜炎の症状、頭髪が抜けている人が多かった。第五福竜丸が捕ってきた魚から放射能が検出され、放射能汚染された魚はただちに廃棄処分とされた。

世界で最初に原子爆弾を開発し、広島・長崎に投下したアメリカは、その後もさらに強力な核兵器の開発を進めた。ソ連が原爆実験に成功してからはさらに実験に推し進めた。ビキニ実験にいたる米・ソ連の動きを年代別に追ってみると次のようになる。

１９４１年１２月　米、原爆開発計画発足
１９４５年７月　　米、ニューメキシコ州アラモゴート砂漠で世界最初の原爆実験
１９４５年８月　　米、広島、長崎に原子爆弾投下
１９４８年７月　　米、ビキニ・エニウェトク環礁で原爆実験開始
１９５０年１月　　ソ連、最初の原爆実験
１９５２年１月　　米、トルーマン米大統領水爆製造命令
１９５２年１１月　米、エニウェトク環礁で最初の水爆実験
１９５３年８月　　ソ連、最初の水爆実験
１９５４年３月１日　米、ビキニ環礁で水爆実験開始、第五福竜丸被災、マーシャル諸島島民被曝
１９５４年３月１４日　第五福竜丸、焼津港に帰港
１９５４年３月１６日　読売新聞朝刊、第五福竜丸被災を報道、静岡大学塩川教授ら第五福竜丸の放射能調査、原爆マグロ騒動

それ以後の３月中のできごと
東京大学都築名誉教授ら乗組員の症状を「急性放射能症」と命名、東京大学木村研究室「死の灰」の第一次分析結果発表

乗組員、東大病院、国立東京第一病院へ入院

１９５４年（昭和２９年）３月の第五福竜丸が被災した南太平洋ビキニ環礁におけるアメリカ熱核兵器（水素爆弾）は、１９５２年の実験では、６０トンもある実験装置でなくブラボー爆弾（ブラボーには、でかしたまたは、刺客等の意味がある。）と命名された最初の実戦的な水素爆弾、３Ｆ爆弾（Fision(Pu-239) + Fision(Li-6D) + Fision (U-238.タンパー)）で あった。その爆弾の爆発力は、TNT火薬に換算すると約１５メガトンと推定され、広島に投下された原子爆弾（約１３キロトン）の１０００倍に余る爆発力をもっている。ブラボー爆弾は、ビキニ環礁北部のナム島に建てられた５０メートルの鉄塔の上で行われためサンゴ礁の島を吹き飛ばし大量の放射性降下物「死の灰」を撒き散らした。３５キロメートルにおよぶきのこ雲の灰の高さとなり第五福竜丸の上にも降り注いだ。

この「死の灰」を浴びたのは、第五福竜丸だけではなく、国はこの年（１９５４年）に放射能汚染魚を廃棄した漁船数は、８５６隻と発表した。しかしこれらの船体や乗組員、漁具、漁獲物などの汚染状態について不明のままになっている。また、一定の基準以上の放射能汚染が認められた魚は、地中に埋められ、あるいは沖合に廃棄処分された。処分さ

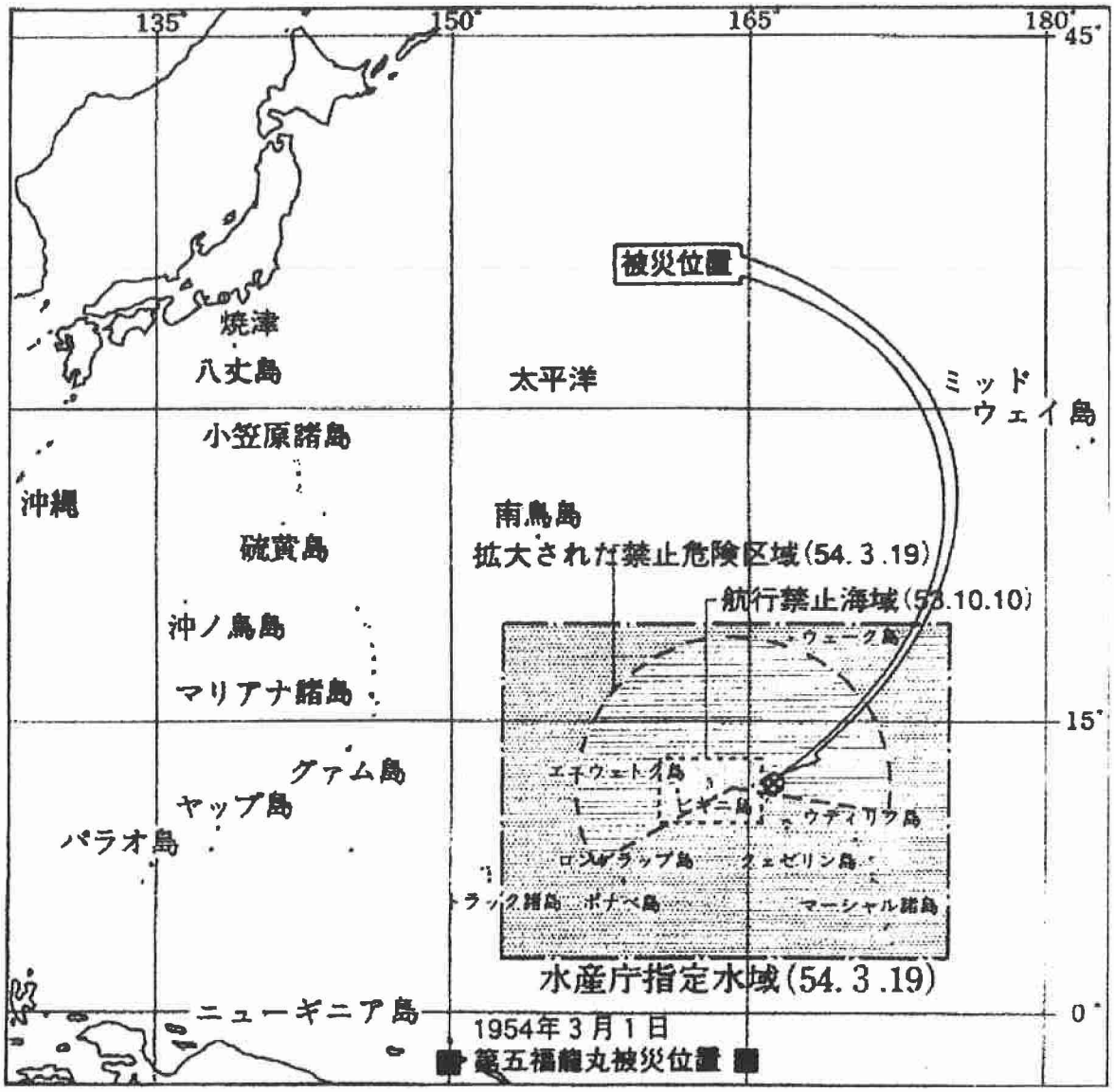


図1　第五福竜丸が被災した場所

れたマグロ類は、４５７トンにも達した。刺身の量とすれば約２５０万人分であった。

「死の灰」の分析結果は、炭酸カルシウムと水酸化カルシウム灰が主成分で、その灰に核分裂生成物が付着していた。このビキニの灰の分析に参加したおもな研究室は、東京大学木村健二郎・南英一両研究室、静岡大学塩川孝信研究室、金沢大学木羽敏泰研究室、大阪市立大学山寺秀雄（フォーラム顧問）研究室などである。このほか京都大学清水栄研究室を中心として物理、化学グループが分析を行った結果、ビキニの灰の試料から少なくとも２６種の核分裂生成物とP-32、S-35、Ca-45およびU-237、Pu-239が検出されている。第五福竜丸が焼津に帰港した月の１８日ごろから分析が行われたが、静岡大学塩川研究室では、National Nuclear Energy Series 中の Coyrell, Sugarman の Radiochemical Studies; Fision Products の全３冊が有用な分析の助けとなった。灰の分析手法は、それぞれの研究室で、担体および 捕集剤などを用いた沈殿法、イオン交換法および溶媒抽出法などが用いられた。また、第五福竜丸の船上に降り注いだ「死の灰」は、１平方メートルあたり０．５～５グラムであった。そのときの放射能は、１グラムあたり平均５２０ベクレルであったと推定された。乗組員の受けた被曝量を推定するのに船上の放射能の減衰をはかりその補外値から、船が焼津港に入港するまでの２週間に受けた線量がほぼ２シーベルトに相当することが明らかにし被曝船員の治療の参考となった。乗組員の被災時の年齢は、18才から39才で、平均年齢は２５才であった。２００４年現在、乗組員２３名中半数余の１２名が死亡している。

この事件が発生してから２００４年３月１日で５０年が経過した年、焼津では、原水爆の実験禁止を要望する決議、核兵器廃絶を願う焼津宣言、平和都市焼津宣言などがだされ、６月には被災５０年特別展「第五福龍丸－平和の願い－」が開催された。ビキニ事件に関連した多くの催し、また多くの出版物が刊行さている（ビキニ事件の参考図書類を参照）。

当時この事件に実際に携わった静岡大学のおもな関係者は、すでに故人（塩川孝信、神原富尚、八木益男）となってしまった。このビキニ事件には直接的に関係しておらず、ただ周囲にいたのみで、少ない見聞しかなく、実体験の記事として執筆することができないことを、あらかじめご容赦を頂きたい。

静岡大学における放射化学及び放射線利用の研究は、１９５１年に始まり、１９５４年１月に放射性同位元素研究会が設けられた。建物の一部にラジオアイソトープ実験室が設置され、共同利用に使用されていた。同年３月、第五福龍丸のビキニ環礁における船員の被災事件が発生し、その放射能汚染状況の調査研究を行うことになり、その研究範囲及び実験量が飛躍的に増大した。このビキニ事件を契機として、種々の分析的な手法を用いた核分裂生成物の系統的な分離などが行われた。また、環境放射能問題の分野でもフォールアウト（放射性降下物）の測定に成果をあげた。１９５４年は、ビキニ事件とともに重要なことは、わが国の原子力開発の国是が決まり、最初の原子力予算が国会を通過し、原子力時代の幕開けの年であった。引き続いて特殊法人日本原子力研究所が開設され、ビキニ事件をきっかけとして当時の科学技術庁の付属機関として放射線医学総合研究所が発足した。日本で最初の原子炉が東海村で完成し、運転を開始したのがビキニ事件の３年後であった。

一方、おもに静岡大学の文理学部を構成している物理、化学、生物及び地学教室では、放射化学・放射線化学の研究が進展し、必然的に設備人員の拡充が要望された。
１９５６年度に放射化学研究施設の設置の議が起こり、文部省との折衝の末、１９５８年文理学部付属施設として、第１部門（放射体化学及び核化学）の設置が認可された。その部門には、教官３名（塩川孝信教授、波多江一八郎助教授、八木益男助手）と事務官１名であった。

１９５７年に第１回放射化学討論会が東京で開催され、第２回討論会（京都）に引き続いて第３回放射化学討論会（討論主題：放射性核種の分離・分析、廃棄処理、塩川世話人）が１９５９年に静岡大学で開催された。当時はビキニ事件のことが一段落したしたあとであったが、大学関係者の放射能に対する関心は高く大学あげての騒ぎであった。また、報道関係席も設けられる状況であった。この討論会の出席者の中には、アメリカのローラン

ド教授（１９９５年「オゾンの形成と分解に関する大気化学的研究」でノーベル化学賞受賞）の姿があり、初の来日で、特別講演「トリチウムの化学」があった。
１９５８年に、静岡大学神原尚講師（当時）が、カンサス大学の教授のもとに日本人として始めての留学であった。その後多くの日本人研究者が教授のもとに留学され、放射化学討論会、国際シンポジウムや日米セミナーと、日本の放射化学にとって極めて縁の深い存在となった。

１９６５年学部の改組に伴って理学部付属施設に改められ、その３年後の１９６８年に第２部門（同位体化学、波多江一八郎教授、菅沼英夫助手（１９７０年に赴任））が設置され、２部門に拡大された。その後、静岡大学のキャンパスは、現在の大谷地区の場所に移転し、新しい研究施設で活動を続け、理学部のみならず全学の放射能利用研究活動の中心としての役割を果たしてきた。研究教育面では、化学科の学生の一部を卒業研究生として受け入れていた。講義の面では放射化学、同位体化学及び放射線化学を担当してきた。１９７６年度に大学院理学研究科修士課程が新設され、両部門は化学専攻の講座に属して講義及び研究指導を行ってきた。

静岡大学としては、２回目の放射化学討論会（第２０回、討論主題：環境放射能、神原世話人）が１９７６年に開催され、討論主題として環境放射能が盛り込まれた。

さらに、１９９４年（平成６年）には第３８回放射化学討論会（討論主題：放射能・放射線とその周辺分野、長谷川世話人）が静岡キャンパスで開催された。この年は、くしくもビキニ事件から４０周年の年であって、大学にとってもまことに意義深いものであった。討論会開催日の前日には記念講演会として２つの講演を企画し、東北大学名誉教授塩川孝信、立教大学名誉教授松浦辰男（フォーラム事務局長）によって行われた。　１９９６年度に理学研究科の改組によって理工学研究科が発足し、両部門は博士後期課程では物質科学専攻物質構造科学講座に、博士課程前期課程では化学専攻機能科学講座に属して、引き続き大学院の研究教育を担当している。この間多くの原子力関連の研究者や技術者を育成し、また多くの教育関連の人材を社会に送り出してきた。

ビキニ事件直後の十数年間は、全国の理学部に放射化学講座あるいは放射線化学講座が新設され、工学部には原子力工学関連の講座が設置された。その後しばらくして放射能・放射線関連の講座の改組、改廃、名称の変更などによって、新設時の名称を維持しているところは数えるほどに減少した。この間、放射化学研究施設においても例外ではなかったが、改組・改廃だけは免れた。

図2　第五福竜丸の乗組員がもち帰ったビキニの灰（右端）とドラム缶に付着していた灰
（これらの資料は、静岡大学から（財）第五福竜丸平和協会に永久貸与したもの）

２００２年度には放射化学研究棟及び実験棟の全面改修が行われ、別の場所にあった２つの ＲＩ実験室の管理区域を統合し、使用核種数及び使用数量を増やして施設の建物を一体化して機能的なものとし、全館を管理区域とした新たな名称を放射科学実験棟とした。放射化学研究施設の教官研究室及び事務室などは実験棟とは別棟に移転し、教育研究の更なる発展充実をはかった。

大学の放射線教育が全国的に衰退し、将来的に放射線・原子力に関わる人材が不足する恐れが懸念されている。２００４年から国立大学法人化に伴い、静岡大学として放射化学研究施設が中心となって、全理学的な放射線教育を行うことによりエネルギー環境問題、放射線・原子力問題の分野における将来の人材の確保と育成のための教育をめざし、実施し始めている。

１９８６年、旧ソ連ウクライナ共和国で発生したチェルノブイリ原発事故、１９９９年、茨城県東海村で発生した ＪＣＯ 臨界事故等は技術的な欠如の問題の事故であってビキニ事件とは異質である。第五福竜丸の乗組員の不慮、かつ不幸なビキニ事件は、科学の世界のみにとどまらず国際的、社会的、政治的等いろいろな面で問題をもたらし、さらに将来的にもさまざまな教訓としてもたらし続けるだろう。

ビキニ事件の参考図書類

- 第五福竜丸事件編集委員会編『第五福竜丸事件』焼津市、１９７６年
- 三宅泰雄、他監修・第五福竜丸平和協会編集『ビキニ水爆被災資料』東大出版会、１９７６年
- 近藤康男編『水爆実験と日本漁業』東大出版会、１９５８年
- 『外交記録文書：第五福竜丸その他ビキニ原爆被災事件関係一件（C’4.2.1.5）』マイクロフィルム　リールNo.C-0002）外務省文書課・外交資料館、１９９１年公開
- 『焼津市史　資料編　５（漁業）』焼津市、２００４年
- Ｓ．Ｇ．ファンティ（宮城音也訳）『現代人は狂っている』毎日新聞社、１９５７年
- 黒石一夫監修・文献情報研究会編著『原爆文献大事典』日本図書センター、２００４年
- 橘爪健『奪う者は誰か：第五福竜丸船員の手記から』東都書房、１９５８年
- ラルフ・Ｅ・ラップ（八木勇訳）『福竜丸』みすず書房、１９５８年
- 谷口利雄・駒野鎌吉『われら水爆の海へ：俊鶻丸ビキニ報告』日本織物出版社、１９５４年
- 武谷三男『死の灰』岩波新書、１９５４年
- 三宅泰雄『死の灰と闘う科学者』岩波新書、１９７２年
- 「ひかりのばら」編集委員会（安斎郁郎監修）『ひかりのばら　－　第五福竜丸ものがたり』かもがわ出版、１９９４年
- 河井智康『漁船「第五福竜丸」：それは世界を動かした』同時代者、１９９７年
- 赤坂三好『わすれないで：第五福竜丸物語』金の星社、１９８９年
- 森哲郎『第五福竜丸』記録出版工房、１９８４年
- 第五福竜丸平和協会編『第五福竜丸：母と子でみる』草土文化、１９８５年
- 桐生広人『南の島のヒバクシャ』リベルタ出版、１９９０年
- 大石又七『死の灰を背負って：私の人生を変えた第五福竜丸』新潮社、１９９１年
- 大石又七『ビキニ事件の真実：いのちの岐路で』みすず書房、２００３年
- 島田興生『還らざる楽園』小学館、１９９４年
- 飯塚利弘『死の灰を越えて：久保山すずさんの道』かもがわ出版、１９９９年
- 飯塚利弘『久保山愛吉物語』かもがわ出版、２００１年
- 長谷川潮『死の海をゆく：第五福竜丸物語』文研出版、１９８４年

・ 川崎昭一郎『第五福竜丸とともに：被曝者から２１世紀の君たちへ』新科学出版、２００１年
・ 広田重道『第五福竜丸保存運動史』白石書店、１９８１年
・ 徳田純宏『熊野からの手紙：熊野でつくられた第五福竜丸の記録』編集工房ノア、１９８４年
・ 川井竜介、斗ケ沢秀俊、他『水爆実験との遭遇：ビキニ事件と第五福竜丸』三一書房、１９８５年
・ 松井康博『原爆裁判：核兵器廃絶と被爆者援護の法理』未来社、１９８６年
・ 『被爆５０年国際シンポジウム　報告集』被爆５０年国際シンポジウム日本準備委員会、１９９６年
・ 第五福竜丸平和協会編『第五福竜丸ものがたり：この船の名を告げ合おう』（パンフレット）第五福竜丸平和協会、２０００年
・ 鈴木光治／スーザン村田編著・庄子信監修『第五福竜丸：Ｔｈｅ　Ｌｕｃｋｙ　Ｄｒａｇｏｎ』三友社出版、１９８６年
・ 檜山義夫編『放射線影響の研究』東大出版会、１９７８年
・ 前田哲夫『新編　棄民の群島』筑摩書房、１９９１年
・ 『焼津漁業誌』焼津漁業共同組合、１９６４年
・ 高田純『世界の放射線被爆地調査』講談社、２００２年
・ 梅本哲也『核兵器と国際政治』日本国際問題研究所、１９９６年
・ 『ビキニ事件三浦の記録』三浦市、１９９６年
・ 『沈めてよいか第五福竜丸：武藤宏一氏遺稿追悼集』追悼文集編集委員会、１９８３年
・ 杉末席『はばたけ紀伊半島から：第五福竜丸エンジン引き揚げ』海南タイムズ社、２００１年
・ 豊崎博光『グッドバイロンゲラップ：放射能におおわれた島』築地書館、１９８６年
・ 豊崎博光『ビキニ水爆被災５０年：マーシャル諸島と日本』（原水禁パンフレット）２００４年
・ 豊崎博光・安田和也『水爆ブラボー　３月１日ビキニ環礁・第五福竜丸』草の根出版会、２００４年
・ 『第五福竜丸　心の航跡』静岡新聞社、２００４年
・ 枝村三郎『平和をもたらした龍』自費出版、２００４年
・ 『写真でたどる第五福竜丸』（ビキニ水爆実験被災５０周年記念）第五福竜丸平和協会、２００４年
・ 安斎育郎・竹峰誠一郎『ヒバクの島マーシャルの証言：いま、ビキニ水爆被災事件を学ぶ』かもがわ出版、２００４年
・ 高知県ビキニ水爆実験被災調査団編『もうひとつのビキニ事件　１０００隻をこえる被災船を追う』平和文化、２００４年
・ 川崎昭一郎『第五福竜丸：ビキニ事件を現代に問う』岩波ブックレット、２００４年
・ 『第五福龍丸　２００４年、平和の願い』（パンフレット・資料解説）焼津市歴史民俗資料館、２００４年

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 9 No. 1, p. 57－66 (2005)

研究炉の歩み (歴史)

苫米地顕
三鷹市中原 4-15-14
(2006 年 3 月 7 日 受理)

［要旨］我が国が原子力の研究開発を開始してから約半世紀を経た今日までに日本に建設された研究用の原子炉、即ち一般に研究炉と呼ばれているものの他、実験炉と呼ばれるものや臨界実験装置と呼ばれるものなどをも含めて、それらを時系列的に記述し、それらの施設がどのような研究や実験に利用され、役立って来たかに就いて述べる。

1．日本に於ける原子力研究の始まり

周知のように、日本が戦争に敗れて、1945 年 8 月 15 日に米、英、中国などの連合国に降伏して第二次世界大戦が終わったのだが、その直前の 6 日に広島へ、9 日には長崎へと、立て続けに投下された二発の原子爆弾と言う原子核反応を用いた爆弾によって、これらの二つの大きな都市が一瞬にして壊滅したのであった。このような、歴史上類を見ない悲惨な経験をしたことから、日本人の間には戦後も長い間原子力に対する恐怖と拒絶感が漲っていた。それに加えて、当時世界の最先端の原子核実験装置の一つであった理化学研究所のサイクロトロンが、1945 年 11 月に無惨にも占領軍によって破壊されて横浜の海に投棄されたことなどから、我が国の多くの学者の間にも原子力を研究することに対する強い抵抗感が渦巻いていた。

実際、戦後 7 年と言う長い年月が過ぎた 1952 年に、サンフランシスコで米、英などと平和条約が締結されて日本は漸く独立国となったので、日本学術会議で茅誠司、伏見康二の両氏によって「日本でも原子力研究を再開すべし・・」と言う提案がなされたが、強硬な反対に遭い、原子力研究開始へ向けての実質的な機運の醸成には至らなかった。

然し、翌年の 1953 年 12 月 8 日に米国のアイゼンハワー大統領が国連総会で提唱した、「我々が手にした原子力エネルギーを平和の為に役立てよう」と言う「Atoms for Peace」の演説は、広く世界の人々に歓迎され、多くの非核保有国でも原子力の研究が開始されることになった。

我が国においてもこの新たな世界の潮流を踏まえて、1954 年 3 月に、突如、中曽根康弘議員を中心とする先覚者達の働きかけによって、当時の自由党、改進党、日本民主党の三党の共同提案として、金額が核分裂性のウラン ^{235}U の質量数に因んだと言われた 2 億 3 千 5 百万円の特別予算「原子炉築造基礎研究調査費」が国会に提出されて承認された。

国会でのこの突然の出来事は、原子力に就いて大きな心の痛手を負っている国民を抱える我が国が、将来どのような考え方で原子力の研究を如何に行うべきかと言うことに大きな関心を寄せ、活溌な議論を闘わせていた日本学術会議や言論界などからの反撥を招いたが、結果としてこれが我が国に於いて原子力研究が開始される口火を切ることになったと言うのは事実と言うべきであろう。

この予算を基に、1954 年には、政府に原子力利用準備調査会が設けられるなどして、我が国の原子力研究を如何に進めるべきかの検討が公式に開始された。そして、その年の年末には原子力の平和利用に関する海外調査団が派遣されるなどした結果、開発のための統轄機関と実施機関を早急に創設することとなった。このような中、一方では 1955 年 8 月には、初めての原子力の平和利用国際会議がジュネーブで開催され、その多くがそれまで秘密のヴェールに包まれていた原子力の平和

利用に関する広範な知識と技術が一斉に公表されて、世界中に大きな刺激を与えた。

このような情勢を踏まえて、原子力利用準備調査会は、我が国に設置すべき原子炉として濃縮ウランを使用するウォーターボイラー型炉と CP-5 型炉とを選定し、これらの原子炉の開発計画を立案したが、それはこの計画策定と時を同じくして日米両国の政府間で原子力協定が締結され、原子力研究のために米国から我が国に濃縮ウランが貸与されることになると言う情勢を見越してのことであった。それまでは、核兵器を持っている戦勝国以外全く手にすることが出来なかった濃縮ウランを米国が日本に貸与すると言う報道を耳にした時「ああ、世の中が間違いなく変わりつつあるのだ・・」と感じたことを覚えている。

このような経過を辿って、1955 年 11 月 30 日には、原子力研究を実施する機関として財団法人日本原子力研究所(以下、原研と略称)が設立された。更に 12 月 19 日には「平和利用及び安全確保を旨として、民主的自主的に研究開発利用を行い、成果を公開し、進んで国際協力に資する」を原則とする原子力基本法が制定され、それに基づいて、翌 1956 年の 1 月には、原子力委員会が発足し、我が国に於ける原子力研究が開始された。

そして、原子力研究を実施するための新しい研究所を設置する敷地の選定が行われ、習志野、水戸、榛名山麓、富士吉田、武山、観音崎、岩鼻、川越などが候補地に名乗りを挙げたが、結局 1956 年 4 月 6 日に、東海村にあった約 100 万坪の国有林が我が国の原子力研究を実施する場所として選定された。

2．日本最初の原子炉 JRR-1

原研は、原子力研究の具体的な進め方を検討し、先ずウラン溶液を燃料とするウォーターボイラー型原子炉を米国から輸入して原子炉の基本的な仕組みを学び、次に高性能の研究炉 CP-5 型炉を作って各種の研究に役立て、それらの成果を踏まえながら国産の天然ウラン重水減速炉を建設して原子力の知識と技術を養い、動力炉へと進むという計画を立てた。

そして、1956 年 3 月 26 日には、米国のノースアメリカン社から出力 50 kW のウォーターボイラー型炉を 25 万 8 千ドル(当時は 1 ドル 360 円)で輸入する契約を結んだ。その後、原研は 6 月 15 日に特殊法人に衣替えをし、8 月 10 日には東海村でこの炉の建設工事を開始した。

我が国に建設される最初の原子炉としてこのウォーターボイラー型炉が選ばれた主な理由は、次のようなものであった。

(1) 当時の大方の原子炉の燃料は、製造上の秘密を伴うものであったが、このウォーターボイラー型炉の燃料はウラン化合物の水溶液なので、製造上に全く秘密がなかったこと。
(2) 米国から借用できる濃縮ウランは ^{235}U の総量で 6 kg とされていたので、できるだけ多くの量を次に作る高性能の CP-5 型原子炉用に充当するために、一号炉はできるだけ少ない ^{235}U 量で稼働するものが望ましかったこと。
(3) ウォーターボイラー型の原子炉は、米国で作られた同型の KEWB と呼ばれた炉で多くの暴走実験を繰り返し行って、その安全性が充分に確認されていたこと。
(4) さらにこの炉は、短期間で建設が可能であると考えられたこと。

今これらの事柄を眺めれば、濃縮ウラン燃料を右から左へと自由に扱える今日では、到底想像すら出来ない程のことで、正に今昔の念を禁じ得ない。

このウォーターボイラー型炉は、直径40 cmの球形のステンレス製容器に、濃縮度20%のウラン化合物を水に溶かした硫酸ウラニル水溶液を入れて連鎖反応を起こさせるもので、炉心部の周囲には炉心から漏れ出る中性子を炉心に反射させるための黒鉛が配置され、炉心部での連鎖反応は、炉心部に挿入される4本の炭化硼素棒を抜き差しする事で調節される構造となっていた。上述のように、この炉では水溶液中で連鎖反応を起こさせるので、高出力運転時には、核分裂時の強力な放射線が引き起こす水の分解によって酸素と水素が泡状に発生し、恰も水が沸騰しているような様相を呈することから、英語で「ウォーターボイラー」型、つまり「湯沸かし」型と呼ばれたのである。

この炉の建設は、いわば突貫工事で進められ、建設開始から僅か一年程と言う、今では到底信じられない程の短期間で完成した。そして、1957年8月26日から燃料溶液を少しずつ炉心タンクに注入しては連鎖反応を起こさせることを試みると言う、所謂臨界実験の作業を開始し、翌27日の早朝7回目の燃料溶液追加で、午前5時23分に、日本で初めて核分裂の連鎖反応を起こさせることに成功した。偶々筆者は、この原子炉の制御系の建設に従事したことから、この臨界実験では終始制御棒を操作して原子炉を運転する役割を担ったが、原子炉が臨界状態に達して、制御棒の操作を止めていてもぐんぐんと上昇をし続ける原子炉の出力計を見守った時の感動は、制御棒を操作するスイッチを握った右手の指の感触と共に、生涯忘れ得ぬ記憶である。

この臨界実験には、東京などからも大勢の報道陣が詰めかけて、徹夜で行われた我々の臨界実験作業を終始窓越しに見守り続け、翌日は一斉に各紙とも一面のトップ記事で連鎖反応の成功を大々的に報じた。この熱気を帯びた新聞等の報道を契機に、以後、我が国に於ける原子力の研究が国民の間でも広く受け入れられるようになっていったと言うことが出来よう。

そしてこの炉は、翌月には50 kWの全出力運転に成功し、9月15日にはこの原子炉の建屋前で完成式典が行われて、JRR-1と命名された。その後直ちに、この炉は原子炉に関連する原子炉物理の研究や、放射性同位元素(ラジオアイソトープ)の製造などの様々な研究や実験の他、原研以外の研究者の教育訓練などにも広く活用された。

3．その後に作られた研究用原子炉

その後、原研は当初に計画した通り、本格的な研究炉である出力10 MWの濃縮ウラン重水型炉CP-5を米国のAMF社より輸入し、東海村に建設してJRR-2と命名し、中性子を用いる各種の試験研究や、本格的なラジオアイソトープの製造などへの利用を1960年に開始した。こうして、我が国の原子力研究が本格的に開始されることとなり、我が国の原子力研究の進展に合わせて、日米の原子力協定も順次改訂されて行った。

そして原研は、10 MW出力の天然ウラン重水型炉を日本人の手で設計し、国産の一号原子炉として建設し、JRR-3と命名して、1962年にラジオアイソトープの製造などへの利用を開始した。

更に、その頃に建造が計画されていた原子力船の原子炉の遮蔽実験などを行うため、濃縮ウランを用いたスイミングプール型と呼ばれる原子炉を建設してJRR-4と命名し、1965年に実験を開始した。このスイミング型炉と言うのは、深いプールの上に渡した橋から原子炉の炉心部をプールの底に吊り下げるように作られた原子炉で、試験する為の遮蔽物などを炉心部の周りに自由に配置することが出来、また原子炉の運転中もプールの上から炉心部を眺めることの出来る構造となっている炉である。

東海村で行われるようになった、このような研究炉を用いた全く新しい実験や研究は国内の多

くの科学者や技術者達にも大きな刺激を与えて、上に述べた原研の原子炉の建設と併行する形で、方々の大学や民間企業などでも原子炉の建設が行われ、活用されることとなった。

まず、近畿大学が小出力のアメリカ製の研究炉を輸入し、東大阪市小若江に建設して、UTR と名付けて、実験や教育に用いることを 1961 年に開始した。それとほぼ並行して、立教大学が横須賀市長坂に出力 100 kW の米国製研究炉を建設して RUR と名付け、同じ 1961 年に研究や教育に用い始めた。また、武蔵工業大学は川崎市王禅寺に 100 kW の研究炉を建設し、1963 年に実験を開始した。更にそれに引き続いて、京都大学は 5 MW の本格的な研究炉を大阪府熊取町に建設して KUR と名付け、1964 年に研究や教育に活用し始めた。

このように、僅か 3 年足らずの間に、四つの大学がそれぞれ自分達の原子炉を建設し、それらを教育や研究に用い始めたのである。

一方、産業界では、1961 年に日立製作所が川崎市王禅寺に出力 100 kW のスイミングプール型の原子炉 HTR を建設して訓練に用い始め、翌 1962 年には東芝が川崎市浮島町に出力 100 kW の原子炉 TRR-1 を建設して、利用を開始した。

その後原研では、原子炉内の強い放射線下に於ける燃料や材料などの挙動を調べるための 50 MW の高出力の材料試験炉 JMTR を大洗町に建設して、1968 年に利用を開始した。また、原子炉が暴走を起こした場合の原子炉の燃料や材料の挙動を調べるための、尖頭値 23000 MW の高パルス出力を発生できる特殊な原子炉 NSRR を東海研究所に建設し、1975 年に原子炉用燃料などの試験を開始した。更に、東海研究所の JRR-3 を 20 %の濃縮ウランを用いる出力 20 MW の高性能研究炉に改造して、1990 年春には中性子散乱実験などの高度の研究分野を含めた各方面への利用を開始した。その後、1000 ℃ の高温を発生して、水から水素を製造するなどの実験に用いることの出来る、出力 30 MW の高温ガス試験炉 VHTR を大洗町に建設し、1998 年に実験を開始した。

この間、東京大学では高速中性子炉の研究をするための出力 20 kW の高速炉 YAYOI を東海村に建設して、1971 年に実験を開始し、学生の教育にも用いることを開始した。また、動力炉・核燃料開発事業団(以下、動燃事業団と略称)では、出力 100 MW の高速実験炉 JOYO を設計し、大洗町に建設して、将来実用化が期待されている高速増殖炉の開発のための実験を 1977 年に開始した。

以上、これまでに我が国に建設された研究用原子炉を、ほぼ時系列的に簡単に述べたが、それらの原子炉の概要は表 1 に纏めて示してある。この表に見る通り、我が国に作られた初期の原子炉の JRR-1 や JRR-２などは既にその役目を終えて、監督官庁に解体届けが出されて、解体されている。同じように、日立や東芝の原子炉や、立教大学と武蔵工大の原子炉も解体届けが出されて、解体作業が行われている。しかしながら、これまでに作られた研究用原子炉の約半数は、原研や大学などで現在も様々な分野での研究のために活発に活用され続けている。

４．臨界実験装置

以上述べた研究炉や実験炉などの他に、臨界実験装置と呼ばれる小出力の連鎖反応を起こさせるための研究装置も、原研のみならず、産業界や大学などでも建設されて、それぞれの目的に活用された。

この臨界実験装置とは、実際に原子炉を建設する前に、設計された通りに連鎖反応が起こるのか、或いは設計通りに連鎖反応を制御する事が出来るのか、又は炉内の連鎖反応の強度がどのような分布をしているのかなどを、小出力で連鎖反応を起こすことのできる装置を作って、実験によって調べるのを主な目的とするものである。換言すれば、この臨界実験装置による実験結果と

設計計算データを突き合わせることによって、設計方法の妥当性などを検証でき、或いはより精度の高い設計手法の開発へと発展させることができるのである。

原研では、ウランの微小球を黒鉛中に分散させた燃料を用いる、半均質型炉と呼ばれる原子炉の開発研究のために、SHE と呼ばれる臨界実験装置を東海研究所に建設して、1961 年に実験を開始した。そして翌1962 年には、軽水型原子炉を研究するための臨界実験装置 TCA を建設して、後に作られることが計画されていた沸騰軽水型発電炉 JPDR へ向けての研究を開始した。更に、1967 年には、高速炉を研究するための臨界実験装置 FCA を建設して、後に動燃事業団によって建設されることになった高速実験炉 JOYO などのための連鎖反応実験を開始した。この間、1965 年には、原子炉用の燃料や材料などを研究するための本格的な材料試験炉 JMTR を設計建設するため、臨界実験装置 JMTRC を大洗研究所に建設して、研究を開始した。

一方東芝では、低濃縮ウランを用いた軽水型炉の研究のための臨界実験装置 NCA を川崎市の浮島町に建設し、1963 年に実験を開始した。また動燃事業団では、低濃縮ウラン重水型動力炉の研究のための臨界実験装置 DCA を大洗工学センターに建設し、後に作られることになった重水型発電炉 FUGEN のための研究を 1969 年に開始した。

さらに、京都大学では高濃縮ウランを用いた軽水減速型炉の連鎖反応特性を研究する臨界実験装置 KUCA を大阪府熊取町に建設し、1974 年に実験を開始した。

このように我が国では、1960 年代初めから 70 年代半ばにかけて、各種の臨界実験装置が建設され、それぞれの目的のために活用されたのである。

1980 年代になって、原研ではそれまでの臨界実験装置 SHE を高温がス炉の開発のために大幅に改造して、低濃縮酸化ウランの微小粒子被覆燃料を黒鉛に分散させたものを燃料とする臨界実験装置 VHTRC を作り、1985 年に研究を開始した。また 1990 年代には、使用済み核燃料の再処理時に取り扱われる様々な核燃料溶液の臨界特性などを調べるための二つの臨界実験装置、STACY 及び TRACY と名付けられた装置を東海研究所に建設し、1995 年にこれらを用いた実験を開始した。

以上がこれまで我が国に建設された臨界実験装置であるが、それらの装置の概要は表２に示してある。これらの臨界実験装置のうち、原研の JMTRC と VHTRC 並びに動燃事業団の DCA はその役目を終え、それぞれ 1989 年、1999 年、2002 年に監督官庁に解体届けが出されて、装置が解体される作業が行われているが、それ以外の臨界実験装置は現在も各種の研究に活用されている。

５．研究炉の役割

次に、上述の研究炉や実験炉などが、各種の研究分野において活用されている事例について簡単に述べて見る。一言で言うならば、それは原子炉の中で発生する大量の中性子を各種の研究に役立てることである。それらの研究分野について、具体例を挙げながら簡単に示すならば、以下のようになる。

(1) 原子炉用燃料材料の研究

発電用原子炉などに用いられる燃料や材料などが原子炉内でどのように振る舞うのかを、実際の使用条件に近い状態のもとで調べて、それらの使用限界などを明らかにする。また、燃料などのより良い製造方法の開発や、新しい燃料や材料の開発を試みるためなどに用いられる。

(2) 大口径シリコン半導体の製造

原子炉内で単結晶のシリコンを照射すれば、シリコンの原子に中性子が当たることによってシ

リコンの原子がリンの原子に変換される。従って、シリコン中に均一にリン原子を作ることができるので、大きな半導体を作ることができる。この技術は、パワートランジスター、高電圧大電流のサイリスタ、ビデオカメラ用のCCDの製作などに応用されている。

(3) 中性子による放射化分析

物質に中性子を当てると、その物質に特有の放射線が放出される。従って、それらの放射線を精密に測定すれば、その物質を構成している元素や微量の不純物などを調べることが出来る。例えば、環境から採取された試料中の微量の不純物の分析や、工業用材料中の不純物の測定などを行うことができる。

(4) 中性子ビームを用いる散乱実験

中性子のビームを物質に当てると、その物質を構成している原子によって中性子が特定の方向に散乱される。従って、それを精密に観測すれば、その物質を構成している原子の位置などが分かり、物質の構造を解明することができる。例えば、超伝導体や磁性材料の構造、高分子の構造などの解明が可能である。特に、極低温に冷却した場所で作られた冷中性子と呼ばれる中性子のビームを用いると、大きな分子構造を持った物質の構造解明などが可能である。

(5) 中性子ラジオグラフィー

中性子ラジオグラフィーとは、中性子が物質を透過する能力を利用した非破壊検査法の一種である。中性子は、物質を透過する時に一部吸収されたり反射されたりする。鉛や鉄などではこうした吸収などが少ない半面、水素ではかなり起こるので、この方法によればX線検査では見えにくい物の検査が可能である。

(6) 医療照射や生物の照射

脳腫瘍や皮膚癌などの治療に、原子炉からの中性子が利用されている。癌細胞に集まり易い硼素化合物を血管から注射して、癌細胞に硼素が集まった時に、そこに熱中性子を照射すれば、中性子が当たった硼素はアルファー粒子とリチウムの原子核になって飛び散るので、癌細胞を大きく傷つけることができるのである。

また、生物に中性子などが当たった時の様々な影響の研究にも用いられている。

(7) ラジオアイソトープの生産

研究炉で発生する中性子を用いて、医学、薬学、理学、農業、工業などの様々な分野で使用される各種の放射線源、ラジオアイソトープを作ることができる。それらの目的に応じて、ラジオアイソトープの線源や、精製されたラジオアイソトープが作られて、各方面での使用に提供されている。また、ガンマー線測定機に用いられる、校正用線源も作られている。

以上、研究炉の代表的な利用分野について簡単に述べたが、原子炉が発生する中性子を用いた研究は、他の方法では見られない大きな特徴を持っており、今後も新しい分野を含めた研究炉の活用が期待されている。

6．研究炉の利用状況

原研は、昨年の10月1日に動燃事業団の後身の核燃料サイクル開発機構と統合して日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構と略称)となったが、上に述べた研究炉JRR-3、JRR-4、JMTR等は国内の研究者の利用に開放されており、その窓口に申し込めばそれらの炉を利用する実験が可能である。つまり、それらの研究炉の利用を希望する人は、その旨を申し込めば、原子力機構の担当者

との相談の上で具体的な利用の計画が作成され、利用が行われることになる。また、原子炉で照射した後に、照射した試料について特定の試験したい場合にも、原子力機構にそれを実施するために利用可能な設備がある場合には、それを利用することも可能である。

少し古い統計になるが、1995年から1997年にかけてJRR-3とJRR-4の二つの研究炉を利用した状況は、以下の通りであった。

(1) 利用した機関の数

大学関係(67の大学)の学部、学科数	107
原研(16の部)の課室数	46
民間企業の数	16

(2) 利用目的別の百分率

実験への利用

中性子散乱実験	85%
中性子ラジオグラフィー	5%
即発ガンマー線分析	4%
遮蔽実験	2%
その他	4%

照射への利用

放射化分析	74%
シリコンの照射	10%
ラジオアイソトープの製造	9%
原子炉用燃料、材料	4%
その他の照射	3%

以上の統計から明らかなように、これらの原子炉を利用した機関の数としては、原研自身の研究者達のそれよりも方々の大学の先生達の所属機関数の方が圧倒的に多く、また利用の分野としては、中性子の散乱実験と放射化分析のためへの利用が共に大きな割合を占めている。

7．結言

これまで述べたように、我が国には過去約半世紀の間に多くの研究炉や実験炉などが作られ、原子力発電のためだけにではなく、多くの科学技術分野の新しい研究や実験のためにも活用されてきた。

これからの人類の将来を見通した時、我々の子孫は原子力エネルギーを賢く利用して繁栄を続けて欲しいと願うと共に、原子核反応を上手に利用することによって暮らしを豊かにするために、様々な分野でこの有用な研究炉を活用して行って欲しいと切に願うものである。

謝辞 この解説を書くに当たり、日本原子力研究開発機構の丸尾毅氏に多くの資料を戴いた。ここに記して、謝意を表する。

参考文献

1．Directory of Nuclear Reactors, Vol. II－X. IAEA, 1959－1976

2．広報誌「研究用原子炉」、日本原子力研究所東海研究所、1999年7月

表1　我が国に建設された研究用原子炉の概要

設置者、名称	設置場所	炉型	運転開始	出力	燃料	制御棒	炉構造	備考
原研 JRR-1	茨城県 東海村	20% 濃縮 U 軽水減速冷却型	1957.8.27	50 kW	硫酸ウラニル水溶液	炭化硼素	SS 球形タンク	1969 年解体届け
原研 JRR-2	茨城県 東海村	45% 濃縮 U 重水減速冷却型	1960.10.1	10 MW	U.Al 分散型合金 Al 合金被覆	カドミウム SS 被覆	Al タンク型	1996 年解体届け
近畿大学 UTR	東大阪市 小若江	90% 濃縮 U 軽水減速冷却型	1961.11.11	0.1 W	U.Al 合金 Al 被覆	カドミウム	Al タンク型	
立教大学炉 RUR	横須賀市 長坂	20% 濃縮 U 水素化 Zr 減速軽水冷却型	1961.12.8	100 kW	U 水素化 Zr 合金 Al.SS 被覆	炭化硼素	Al タンク型	2002 年解体届け
日立 HTR	川崎市 王禅寺	10% 濃縮 U 軽水減速冷却型	1961.12.25	100 kW	UO_2 ペレット燃料 Al 合金被覆	硼素鋼	プール型	1975 年解体届け
東芝 TRR-1	川崎市 浮島町	20% 濃縮 U 軽水減速冷却型	1962.3.13	100 kW	U.Al 合金、 Al 合金被覆	硼素鋼 SS 鋼	プール型	2001 年解体届け
原研 JRR-3	茨城県 東海村	天然 U 重水減速冷却型	1962.9.12	10 MW	金属 U Al 被覆	カドミウム Al 被覆	Al タンク型	1990 年改造開始
武蔵工大炉	川崎市 王禅寺	20% 濃縮 U 水素化 Zr 減速軽水冷却型	1963.1.30	100 kW	U 水素化 Z 合金、 Al.SS 被覆	炭化硼素	Al タンク型	2004 年解体届け
京都大学 KUR	大阪府 熊取町	93% 濃縮 U 軽水減速冷却型	1964.6.25	5 MW	U.Al 分散型合金 Al 合金被覆	硼素入り SS	タンク型	
原研 JRR-4	茨城県 東海村	20% 濃縮 U 軽水減速冷却型	1965.1.28	3.5 MW	U.Si.Al 分散型合金 Al 合金被覆	硼素入り SS	プール型	
原研 JMTR	茨城県 大洗町	93% 濃縮 U 軽水減速冷却型	1968.3.30	50 MW	U.Al.Si 分散型合金 Al 合金被覆	ハフニウム	タンク型	1994 年、燃料を 20% 濃縮 U に変更
東京大学 YAYOI	茨城県 東海村	93% 濃縮 U 空気冷却、高速炉	1971.4.10	20 kW	金属 U SS 被覆	劣化 U 金属	タンク型	
原研 NSRR	茨城県 東海村	20% 濃縮 U 水素化 Zr 減速 軽水冷却型、パルス炉	1975.6.30	300 kW	U 水素化 Zr 合金 SS 被覆	炭化硼素	プール型	
動燃事業団 JOYO	茨城県 大洗町	23% 濃縮 U・18% Pu 混合酸化物 Na 冷却、高速炉	1974.4.24	100 MW	U、Pu 混合酸化物 SS 被覆	^{10}B 濃縮炭化硼素	タンク型	2003 年 7 月 2 日、改造後 の 140 MW 運転開始
原研 JRR-3M	茨城県 東海村	20% 濃縮 U 軽水減速冷却型	1990.3.22	20 MW	U_3Si_2.Al 分散型 Al 合金被覆	ハフニウム	タンク型	
原研 HTTR	茨城県 大洗町	3-10%、平均約 6% 濃縮 U 黒鉛減速、He 冷却型	1998.10.11	30 MW	U.Th 酸化物粒状 セラミックス被覆	炭化硼素	タンク型	

表２　我が国に建設された臨界実験装置の概要

設置者、名称	設置場所	炉型	運転開始	出力	燃料	制御棒	炉構造	備考
原研 SHE	茨城県 東海村	20% 濃縮 U 黒鉛減速型	1961.1.25	10 W	濃縮 U 粉末と黒鉛粉末の圧力成型 黒鉛鞘入り	カドミウム	水平二分割型の移動架台	1983 年 VHTRC へ大改造
原研 TCA	茨城県 東海村	2.6% 濃縮 U、天然 U、Th、U.Pu 等、軽水減速型	1962.8.23	200 W	酸化物ペレット Al 或いはジルカロイ被覆	B4 C−Al、及びカドミウム	SS タンク型	
東芝 NCA	川崎市 浮島町	0.1−4.9% 濃縮 U 軽水減速型	1963.12.11	200 W	酸化物ペレット プラスチック、又は Al 被覆	カドミウム SS 被覆	Al タンク型	
原研 JMTRC	茨城県 大洗町	90% 濃縮 U 軽水、Be 減速型	1965.10.1	100 W	U.Al 分散合金 Al 合金被覆	20 % 硼素 SS カドミウム	Al タンク型	1989 年解体届け
原研 FCA	茨城県 東海村	2%と 93% 濃縮 U 金属、Pu.Al 合金、高速炉	1967.4.29	2 kW	金属 U 及び Pu.Al 合金 樹脂又は SS 被覆	天然 U、濃縮 U	水平二分割型の移動架台	
動燃 DCA	茨城県 大洗町	低濃縮 U、Pu 混合酸化物 重水減速型	1969.12.28	1 kW	酸化 U、U.Pu 混合酸化物 Al 又はジルカロイ被覆	カドミウム	タンク型	2002 年解体届け
京都大学 KUCA	大阪府 熊取町	93% & 45% 濃縮 U 軽水減速型	1974.8.6	100 W	93% U.Al 合金、45 % U.Al 分散型合金 プラスチック又は Al 被覆	カドミウム 硼素	タンク型	
原研 VHTRC	茨城県 大洗町	2%, 4%, 6% の濃縮 U 黒鉛減速型	1985.5.13	10 W	酸化物粒子 セラミック被覆	カドミウム	水平二分割型の移動架台	1999 年解体届け
原研 STACY	茨城県 東海村	低濃縮 U, Pu の硝酸溶液、及びそれらの混合溶液	1995.2.23	200 W	U 硝酸水溶液、Pu 硝酸水溶液と、それらの混合溶液、Zr 被覆棒状燃料	炭化硼素 カドミウム	SS 製タンク	
原研 TRACY	茨城県 東海村	10% 濃縮 U 軽水減速型、パルス炉	1995.12.20	10 kW	U 硝酸水溶液	炭化硼素	SS 製タンク	

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 9 No. 1, p. 67－74 (2005)

わが国の原子力発電の歩み

宅間正夫
（社）日本原子力産業会議
東京都港区新橋 2-1-3 新橋富士ビル
（2006年 3月 9日 受理）

［要約］わが国の原子力発電について、海外の状況に触れながら、限られた紙面の中で過去を振り返り、現在を直視し、将来を展望してみる。
以下の7節に分けて述べる。
1．夢と期待の技術に挑戦 2．原子力技術の導入 3．軽水炉による原子力発電のスタート 4．国内自主技術による軽水炉技術の定着と日本型プラントの開発へ 5．原子炉事故からの教訓 6．わが国の原子力発電の今後 7．低迷を克服して新たな飛躍を目指すわが国の原子力発電。

1. 夢と期待の技術に挑戦

わが国の原子力発電は、ほぼ半世紀前の 1953 年（昭和 28 年）12 月の国連総会における米国アイゼンハワー大統領の「原子力平和利用提案」（「Atoms for Peace」）の演説から始まった。この演説がおこなわれた背景には、米国原子力産業界の圧力だとか米国の原子力技術の独占の意図だといった説があるが、真意は、第二次世界大戦の早期終結と平和の到来を望んで開発したはずの原爆が広島・長崎で実際に使われたときの惨禍を目の当たりに見て、原爆開発に当たった科学者・技術者たちの深い悔恨が、国際管理の下に原子力エネルギーを平和利用することによって真の世界平和を実現したいという強い意志になってあらたれたもの、と考えられる。旧ソ連の反対で否決された、原子力の国際管理を提案した終戦直後の 1946 年の国連での米国の「バルーク」提案がこの背景にあると思われるのである。

わが国では 1945 年 8 月の原爆から 10 年も経っていない時期であるにもかかわらず、1951 年に漫画「鉄腕アトム」が登場したように、原子力エネルギーが夢と期待の時代であった。

これが、原子力という科学技術とその社会への適用において、「放射能災害の防止」と「平和利用に限定」に最重点をおくこと、さらにその科学技術を担う専門家の倫理と行動を「自主・民主・公開」原則によって規定することなどを大前提に、国連演説のわずか 2 年後の 1955 年の「原子力基本法」の成立につながった。

1945 年 8 月 15 日の終戦後、わが国は、経済・産業の復興のために石炭と鉄鋼産業への傾斜投資による増産とそれを基にした電力増産をおこなった。

1951 年には戦時中から続いた電力の国家管理（国営の日本発送電会社と民営の 9 配電会社の体制）が終り、電気事業再編成によって現在の発送配電一貫の民営 9 電力会社（現在は沖縄電力を加えて 10 社）と国営の電源開発会社（現在は民営化）が誕生した。供給区域独占であるが、当時は水力発電が主であったため、水力発電可能地点の分布や戦前からの水利権・既設送電線の存在などが考慮されて、発電所の立地は供給区域に拘束されないこととなった。これが後に原子力発電所が技術的・社会的な立地事情から自社の供給区域外に立地されるケースを生むこととなった。

戦後の電力事情は極めて悪く、停電や電休日などが恒常的であったため、これら電力会社は発足早々から「白い石炭」といわれた大規模水力発電や石炭火力の新増設に必死に取り組んでいた。

まさにこの頃に「原子力平和利用」すなわち「原子力発電」への道の可能性が開かれたのである。中東の豊富で安価な石油はまだ世界市場に登場していない。

戦前、資本主義的経済発展を目指したわが国の国内エネルギー資源の不足が、市場開拓とあいまって力による国外進出の一因ともなり、太平洋戦争に突入していった苦い歴史を顧みたとき、戦後復興の鍵となる電力増産に向けてこの新しい技術「原子力発電」への挑戦は、国家としても、電力会社にとっても、喫緊の課題だったのである。

2. 原子力技術の導入

米国はその頃、戦後の好景気の中で豊富な資金と原爆開発を基盤とした高い技術力をもっていたため、いくつかの国立研究所や民間のメーカーがさまざまな型式の原子炉や設備をつくって実験研究を行い、原子力発電技術の可能性や最適な原子炉の模索、安全性の確認などを進めていた。

わが国でも、戦前には原子物理学分野では世界的レベルの研究もなされていたが、原子力発電技術については、1952年のサンフランシスコ平和条約（日米講和条約）で独立を回復した後、米国の対日原子力研究支援によって米国から導入した技術と貸与されたウランによって、1956年茨城県東海村に設立された日本原子力研究所で原子力発電の研究が始められた。同研究所は小型研究用原子炉JRR１，２，３および動力試験炉JPDRを建設し、これらはわが国の原子力発電の商用化と国産化、ならびにそれを担う技術者の育成に大きく寄与した。

1954年には旧ソ連が独自のチャンネル型黒鉛減速軽水沸騰水炉で世界初の原子力発電所（5000キロワット）を完成させた。これを急速に大型化した原子炉が後に（1986年）チェルノブイルで大事故をを起こしている。1956年には英国が世界最初の商業発電用の黒鉛減速炭酸ガス冷却炉（コルダーホール改良型炉、6万キロワット）を完成させていた。

そこでわが国は、わが国同様エネルギー資源の乏しい英国（北海油田はまだ発見されていない）が開発したこの型式の炉を輸入することとなった。その建設主体として、いわゆる「正力・河野論争」といわれる民間会社か国営会社かの対立があったが、最終的には民営色の強い国策会社「日本原子力発電会社」が官民により設立された。國の重要エネルギー政策である原子力発電を民営の効率経営のもとでおこなうというこの方針は、原子力開発におけるわが国のいわゆる「国策民営」の嚆矢、といってもよい。これがその後に続く民営９電力会社による大規模な原子力発電開発の進展につながっていった。

また、原子力プラントメーカーなどの民間の原子力産業においても、高度かつ広範囲な原子力技術にかかわる技術の総合化と、巨額な必要資金の調達・結集を目指して５つの原子力グループが結成されていた。三菱グループ、住友グループ、三井グループ、東京原子力グループおよび第一原子力グループである。そして、わが国最初の商用炉は富士電機・第一原子力グループを主契約者とする日本原子力発電会社による英国コルダーホール型ガス炉発電プラントであったが、それに続く米国型軽水炉発電プラントの建設にあたっては、初号機の輸入に続く国産化では、加圧水炉（PWR）は米国ウエスティングハウス（WH）社と技術提携した三菱重工が、また沸騰水炉（BWR）は同じく米国のジェネラルエレクトリック社（GE）と提携した東芝と日立が、それぞれ主契約者となっていった。その他の原子力関連の産業・企業も原子燃料や機器製造、建設工事・保守工事などの広範な分野に参加して質の高い仕事をしている。

このようにしてわが国初の商業用原子力プラント、東海原子力発電所（16万6000キロワット）は1960年着工、1966年に運転を開始し、32年近く運転されて1993年３月に停止、現在解体工事中である。

ここで、草創期の原子力発電におけるわが国への英国の影響や諸外国の原子力の初期事情について触れておく。

米国で開発された軽水炉の今日の隆盛を見れば、なぜわが国が初めての発電炉として英国型の天然ウラン燃料の炉を選択したのか、疑問に思う向きもあろう。しかし当時の日本の見方は、米国は原爆を開発したが原子力発電の開発には遅れている、英国は核兵器用のプルトニウム生産炉に適した天然ウラン・黒鉛減速炉をいち早く商業用に改良したので原子力発電では英国こそが世界のトップ、というものであった。商用化のためにマグネシウム合金を使った原子燃料を新たに開発したのでマグノックス炉ともいわれる。こんなことからも当時のわが国が英国の原子力技術を高く評価していたのであろう。

さらに、現在でこそウラン濃縮事業は商業化されているが、当時は濃縮技術は米国の独占であり、このため英国は天然ウランを使う原子炉を選択せざるを得なかった。石炭しかないという国内エネルギー資源事情から言えば、当時のわが国も英国と同じであったため、英国型天然ウラン炉を選択したもの、と考えられる。英国が世界に先駆けて第1期500万キロワットという意欲的な原子力開発計画を公表していた。

また国内資源に乏しい英国は原子力発電を準国産エネルギーと位置づけて、当初から使用済み燃料の再処理と高速炉によるプルトニウム増殖利用を原子力開発の中軸とし、途中、これを補完するSGHWR（重水減速水冷却炉）も開発するが、その後北海油田の発見や俗に英国病といわれる経済の低迷によって、この炉も高速炉も開発が中止された。わが国もある面英国を手本にして、軽水炉（熱中性子炉）から高速炉への路線の中でこれを補完するATR（新型転換炉、英国のSGHWRと類似）の原型炉を自主開発するが、その後の軽水炉の成熟のなかで必要性が薄れてきたため、実証炉建設に至らなかった。しかしわが国は高速炉については、実験炉「常陽」から原型炉「もんじゅ」まで開発してきた。「もんじゅ」は10年前の二次系配管のナトリウム漏洩事故以来停止していたが、再開に向けて改造工事中である。

国内にウラン資源を豊富に持つカナダは英国と同じく天然ウランを使った原子炉を選択したが、天然ウランをもっとも効率よく使うために減速材に重水を採用して独自の「CANDU」炉を開発し、海外にも輸出している。「CANDU」とは「カナダ型重水炉」の意味の他に「われわれもできる（CAN DO）」という意味があるそうだ。

フランスもはじめは天然ウラン燃料の黒鉛減速炭酸ガス冷却炉を開発したが、大戦前の植民地を失うとともに国内エネルギー資源の乏しい國として輸入の化石燃料に頼らずに、新設発電プラントをすべて原子力とする決断に基づいて、米国から導入した軽水炉技術を国産化し、現在は電力供給の７５％を原子力でまかなっている。

3. 軽水炉による原子力発電のスタート

昭和30年(1955)代に入ると米国は、それまでの政府と民間による技術開発の成果として商業用プラント向けにガス炉に比べてコンパクトでかつ出力のスケールメリットを追求した大型の軽水炉を、GE社は沸騰水炉（(BWR)、WH社は加圧水炉（PWR）として市場に参入してきた。PWRの商用炉１号機はシッピングポート１号（10万キロワット、1957.12運転開始、ペンシルバニア州）、BWRのそれはドレスデン１号（20万キロワット、1960.6運転開始、イリノイ州）である。

米国での初期の軽水炉プラントの経済性の実績などを見て、わが国の電気事業者は、英国型炉の建設中の不具合などの経験からして軽水炉の導入に傾いていった。日本原子力発電会社による

敦賀 1 号機(BWR、35 万 7000 キロワット、1970.3 運転開始)の先駆的な導入に続き、関西電力美浜 1 号機（PWR、34 万キロワット、1970.11 運転開始)、東京電力福島第一 1 号機（BWR、46 万キロワット、1971.3 運転開始）が導入され、原子力発電の本格的な商業利用の時代に入った。

電気事業者が高度経済成長期の電力需要の急増に対応するには、プラントの単機出力の増大にともなうスケールメリットに限界があったガス炉に代えて軽水炉が選択された、といえる。燃料を含む運転費に比べて設備など資本費の大きい原子力発電はスケールメリットを追及せざるを得ず、初期の 30～40 万から急速に 100 万、130 万キロワットへとスケールアップしていった。急増する電力需要に対して、燃料のウランの調達にもあまりわずらわされずに容易に出力アップできる濃縮ウランを使った軽水炉は最適な選択だった、ともいえよう。この点で天然ウランのガス炉は、スケールアップすればそれだけ発電設備も巨大になり、ウラン燃料の量も多くなる。まして化石燃料の火力発電ではスケールアップにともない燃料消費量は膨大になってしまう。

PWR と BWR とでは、同じ軽水炉であるため、技術面、経済面で本質的な違いはなく、その選択については、原子力導入に先行した火力発電プラントなど電力用機器の発受注を通じて培われたそれぞれの電気事業者とプラントメーカーとの歴史的な信頼関係が、PWR か BWR か電気事業者の選択に少なからず影響していると考えられる。

2004 年 12 月末現在、世界の原子力発電プラントは 434 基、3 億 7920 万キロワットで、その 3 分の 2 以上が PWR と、わが国では BWR の方が多いが世界的には PWR が主流になっている。その理由を推測すれば次のようにいえるだろう。原子炉は最初原子力潜水艦の動力に使われたが、それは、船の揺れを考慮して加圧して自由水面を無くしかつコンパクト化できる加圧水炉が採用された、その炉を陸上において発電用に使ったのが PWR 型発電炉。それに対して BWR は最初から陸上設置の設計なので自由水面が許容され、無理にコンパクト化せずに PWR に比べて 2 分の 1 位の低い圧力の大量の水の中に原子炉をゆったりと置いたもの。それぞれに長所短所があるが本質的な違いは無い。技術的な面について 1 点触れるならば、原子炉から蒸気タービンに送られる主蒸気中の放射能を抑えるため、PWR は原子炉水（一次系）と主蒸気（二次系）を大型の蒸気発生器で分離しているためこの熱交換器の細管からの漏洩防止に万全を尽くし、BWR では原子炉水が直接タービンに送られるので炉心の燃料の破損防止に万全をつくしている。PWR と BWR の普及度の違いは、あえて言うなら前述のような電力会社の好みや信頼関係、あるいは PWR のメーカーWH 社と BWR メーカーGE 社の営業力の違いと言える。

4. 国内自主技術による軽水炉技術の定着と日本型原子力プラントの開発へ

エネルギー資源に乏しいわが国は、ウラン資源についても同様に軽水炉の燃料もほとんど全量輸入に頼らざるを得ない。そのために、使用済みのウラン燃料を国内で再処理し、燃え残りのウランとプルトニウムを燃料資源としてリサイクルすることにより一度輸入したウランを国産資源に変えてゆくこと（準国産エネルギー資源化）は、わが国の原子力発電開発の当初からの國の方針であった（これは昨年閣議決定された原子力委員会の「原子力政策大綱」でも、六ヶ所再処理施設のアクテイブ試験入りを前に改めて再確認された)。

このことは同時に、将来のわが国のエネルギーの中核となるべき原子力発電の技術、原子力プラントなどの機器・設備を基本的にすべて国産化して、自主技術化を目指すことでもあった。これは米国の軽水炉技術を導入し、国産化して国内原子力プラントメーカーを輸出産業として育て

ようとしていたドイツ、フランスの戦略と軌を一にするものであった。

このため初期に米国から輸入した新鋭火力発電プラントの国産化戦略と同様に、初号機を輸入、2号機目は原則同じ設計で機器・設備を国産、3号機目以降から設計を含めすべてを国産化することとし、その過程で米国生まれの原子力技術を、建設主体である電気事業者が習得するとともに米国メーカーと国内メーカーに技術提携をしてもらって、国内技術の育成を図った。

しかし急速に発展した新しい技術であったため、初期の商業用プラントにPWR、BWRともにいくつかの初期故障が発生した。その時期が折りしも1973、1978年の石油危機に重なった。それに伴い世界的に石油火力の新設が原則禁止がルール化されたため、原子力発電は國の脱石油政策の中で石炭・天然ガスと並んで「脱石油3本柱」の重要なひとつと位置づけられたのである。

このため初期故障を一刻も早く克服し、軽水炉発電技術の安全性・信頼性を向上させ、国内自主技術としての定着が急がれることとなり、産・官・学挙げての協力の下に1975年から1985年にかけての10年間、3次にわたって「軽水炉改良標準化計画」が展開された。この中で、従来米国技術に依存していた軽水炉にわが国の技術伝統や技術管理システムおよびわが国の研究・技術開発成果を適用して、いわば「日本の標準型軽水炉」へと育てていった。その成果が次第に、故障率低減、利用率向上、作業員線量減少などで世界トップレベルの運転実績となって表れ、さらにBWRユーザー・メーカーの国際的な共同作業による改良型沸騰水炉（ABWR）として結実し、世界最初の炉として東京電力の柏崎刈羽6・7号機（各136.5万キロワット、1996, 97年運転開始）が建設されたのである。

わが国では現在、54基、4850.7万キロワット、うちBWR・ABWRが29基、2914.1万キロワット、PWRは23基、1936.6万キロワットが運転している。

5. 原子炉事故からの教訓

原子力発電にかかわる安全技術や設計思想に大きな影響を与えた2つの発電プラントの事故における主な教訓に焦点を絞って記してみる。

1979年3月の米国スリーマイルアイランド2号機（PWR、95.9万キロワット）の事故は、運転員の規則違反と設計の不備と運転員のプラント状況の誤認が重なって原子炉内の冷却水が失われたために燃料棒が過熱して多くの燃料棒が損傷したが、周辺への放射性物質の放出はわずかであった。この事故は「燃料棒を冷却する」ことには失敗したが「放射性物質の閉じ込めにはほぼ成功した、といえる事故であった。見方を変えると“技術”が発信した情報を“人間”が的確に受け止められず（炉内の水量の確認）、また“人間”が“技術”に適切に介入できなかった（自動運転した非常用炉心冷却ポンプをわざわざ手で止めた）ことが、最初の小さな計装系のトラブルを事故にまで拡大させてしまった、といえる。このために人間と機械との接点「マン－マシンインターフェース」の問題が、事故の教訓を踏まえて改めて真剣に再検討されてわが国はじめ世界中でプラントの制御室・監視制御盤・装置の大幅な改良につながった。

1986年4月の旧ソ連チェルノブイル4号機（RBMK、100万キロワット）の事故は、設計上の欠陥、不十分な深層防護設計、それに重大な運転マニュアル・運転規則違反が重なって、炉内の核分裂が急増したにもかかわらずこれを急速停止できず、これによって破損した圧力管から漏れ出した高温の水蒸気が、これも高温の黒鉛減速材と反応して水蒸気爆発・水素爆発を起こし、原子炉全体が破壊されて放射性物質が周辺環境に大量に放出された事故である。これは「核分裂を止めること」に失敗して、その結果「放射性物質の閉じ込め機能」までも失われてしまったもの、といえる。事故原因にはヒューマンファクター、特に旧ソ連の原子力開発体制下にあった技

術者・関係者の心と行動の要因が極めて大きいとされて、原子力に携わる世界中の関係者に「安全を最大の目標」と改めて認識を深めるよう「原子力安全文化」を徹底させる努力が開始された。これは“技術”を扱う“人間”に対して「技術を扱う心」にまで踏み込んだ安全の施策が必要であることを示したものといえる。

原子力発電の安全の3原則「止める・冷やす・閉じ込める」のそれぞれについて、原子力関係者は残念ながらこうした失敗を経験した、という意味でこの二つの事故はその後の原子力発電の安全にとって極めて大きな教訓となったのである。その結果チェルノブイル事故後、民営・官営を問わず各国で実際にプラントの運営に当たる事業者による「原子力安全文化の浸透と向上」のための国際的なネットワーク組織「世界原子力発電事業者協会（WANO）」が発足し、事業者同志の迅速な情報交換・相互研修など「世界の事業者による原子力安全文化の共有」が進んでいる。またチェルノブイル事故後、各国政府ベースの既存の「国際原子力機関（IAEA）」の安全活動に加えて新たに「原子力安全条約」が国際条約として締結されるなど、原子力の国際的な安全性向上に向けたフレームワークができている。

原子力発電所の事故ではないが、1999年9月の東海村での原子燃料加工施設でのJCO事故は、安全第一に細心の注意を払うべき作業にあたっての技術者・関係者の技術を扱う専門家としての倫理、および危険性を伴う事業の経営にあたる経営者としての倫理が問われ、その前後に起こった事業者のデータ改ざん問題とも合わせ、技術者倫理・経営者倫理の重要性が改めて浮き彫りにされ、日本原子力学会など学協会が倫理規定の整備などに取り組んできている。

6. わが国の原子力発電の今後

「長期エネルギー見通し」（2004.10　総合資源エネルギー調査会需給部会）によると、2010年度における原子力発電によるエネルギー供給は8700万キロリッター（原油換算）で一次エネルギーの約15%、発電設備5014万キロワットで3872億KWH、全電力量の約36.5%、このために今後10年で10から13基のプラント新設が必要、とされている。

2005年10月、原子力委員会の「原子力政策大綱」（旧「原子力長期計画」）が史上はじめて閣議決定されて公表された。これには、具体的な目標として「2030年以後も原子力発電は総発電量の30～40%程度という現在水準かそれ以上を目指すのが適切」、と記されており、また「2030年ごろからはじまると見られる既存発電炉のリプレースに関しては現行の軽水炉の改良型で、スケールメリットの観点から大型炉を中心とするが、需要規模、投資規模などから標準化された中型炉も選択肢となりうる」、とされている。

電力自由化のもとで大型投資がやりにくい、しかし需要は小幅ではあるが着実に増加する、また温室効果ガスの排出抑制から脱炭素系燃料による発電へと電源の質の転換が迫られることなどから、原子力がこれに対応するためには中小型炉でかつスケールメリットを上回る「標準化による量産の経済的メリット、国際入札も含む調達の経済的メリットを追及し、さらには本質安全思想を基本としたつくりやすく、運転・保守しやすく、工場プレファブ化可能な、シンプルな設計」を、国外市場も視野に入れて、実現する必要がある。国際的な「第4世代原子炉開発」に見るようにその可能性は十分にある、と考えられる。

「第4世代原子炉炉開発」は2030年ごろの実用化を目指して米国エネルギー省が提唱したもので、米国・日本・英国・フランス・カナダ・韓国・南アフリカ・スイス・ブラジル・アルゼンチンの10ケ国からなる第4世代国際フォーラム（GIF）によって進められている。臨界圧軽水冷却炉（SCWR）、ナトリウム冷却高速炉（SFR）、鉛合金冷却高速炉（LFR）、超高温ガス炉（VHTR）、

ガス冷却高速炉（GFR）、溶融塩炉（MSR）の、6 つの概念が選択されている。また国際原子力機関（IAEA）ベースではロシア、インドなどによる共同開発（INPRO）も進んでいる。

燃料取替えが数 10 年に 1 度という原子力電池に類する原子炉の開発もわが国でおこなわれており、海外の関心を呼んでいる。

また「原子力政策大綱」には高速炉について「2050 年ごろからの商用ベースの導入を目指すが、遅れる場合には改良型軽水炉の導入を継続」とされている。

技術的に成熟段階に達した現在の軽水炉も今後、不断の進化が進むであろう。高速炉も軽水炉との競合の中で一層の技術開発が進むであろう。現実にはウラン資源のうちのわずか 0.7%のウラン 235 を燃料とする軽水炉と、99%以上のウラン 238 を利用できる高速炉が共存するハイブリッドで柔軟性ある原子力発電体系が比較的長く継続すると思われる。

高速炉は増殖機能のみならず、軽水炉運転に伴って生じる長半減期の核種も燃料としてエネルギー化できるとともにこれらを短半減期化でき、これによって将来の地層処分における環境負荷を低減できる可能性がある。

7. 低迷を克服して新たな飛躍を目指すわが国の原子力発電

わが国の原子力発電は先述のように、紆余曲折を経ながら半世紀経って軽水炉技術において一応の成熟に達した。しかし 20 世紀末になって残念ながら以下のような状況になってしまった。

① 成熟の過程で技術を囲い込んだ官民の閉鎖的な原子力界に生じた内部矛盾・制度疲労とその顕在化

② この半世紀間に社会の仕組み・意識などが大きく変化したにもかかわらず、うちうちの専門家の閉鎖社会に閉じこもったがゆえに近年のこうした変化に鈍感で、対応を誤ったがゆえに生じた「社会と原子力」の不整合

③ 本来公益的な技術であり産業である原子力について、電力自由化に直面した電気事業者が短期的視野に陥りがちで、半世紀前に行われた電気事業再編成で激しく論議されたような私企業としての公益を担う精神の希薄化

こうしたことから、原子力と社会が次第に乖離し、原子力界は残念ながら世紀末に至って社会からの「技術に対する不安感」と「技術者・関係者に対する不信感」に直面することになってしまった。

しかし物事は弁証法に言うように、発展の中に矛盾の芽が生まれ、これが克服されるなかに新たな発展の機会が生まれる、という。その意味で今の低迷は次の発展に向けての「創造的破壊」の段階にある、と考えられる。そして原子力技術・産業の発展の条件は、今、世界的にもその条件が整いつつある。

特記すべきは、2005 年 8 月、米国はブッシュ政権下で「包括エネルギー法」が成立し、ここには“原子力ルネッサンス”に向けて軽水炉発電プラントの運転期間延長、出力増強、プラントの新増設などに向けた國の制度的な支援策、さらにカーター政権時代に封印された商業用再処理・プルトニウム利用についても技術開発に取り組む方向が言及されていることである。

こうした原子力の再活性化の「チャンスの前髪」をわが国の原子力界がつかめるか、つかむだけの気概があるか、であり、これに向けて民間原子力産業団体も大きな改革を進めており、これは原子力産業界全体の改革、そして原子力産業の基盤強化と再活性化につながっていくものと考えている。

わが国の原子力発電は、ここ当面は安全を第一に既存の多くの発電設備の稼働率を向上させ、さらに高経年プラントのより有効かつ効率的な長期的活用を図る必要がある。このために運転・保守技術の技術的・制度的な高度化を達成し、これによって社会の信頼を回復し、社会の支持を得なければならない。

50年前の世界人口は25億、現在は63億、そして50年後は90億といわれる。予想される資源制約・環境制約の克服をめぐる国際的・社会的な緊張を少しでも緩和し、世界の平和と地球上の生きとし生けるものの生命の持続性を維持するには、基本的に原子力技術・原子力エネルギーの賢明な活用無しには他に有力な手段はありえない。

先述のようにわが国は、国内需要に向けて原子力開発を進めてきたと同時に、プラントメーカーなど原子力産業を育成してきた。上記のような地球規模・世界規模での原子力発電、発電のみならず淡水製造や水素製造の必要に応じるだけの実力はわが国にある。

平和利用一筋で進めてきたわが国が、今、その技術や技術管理システム、人材の育成、発電プラントなどの国際的な展開を積極的に図ることは、わが国の国際貢献であり、国際的な責務と考えられるのである。

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 9 No. 1, p. 75－82 (2005)

原子力安全研究のあゆみ

佐藤　一男
（財）原子力安全研究協会
東京都港区新橋５丁目１８番７号
（2006年3月15日　受理）

［要旨］原子力の利用のために不可欠な安全を確保するための知見を供給する安全研究の重要性は、ますます高まっている。この安全研究は、原子力の安全の姿すなわち安全像の認識を反映して、その重点項目が変遷してきた。これを主として軽水炉の安全研究について振り返り、今後の課題を探ることにする。

1．はじめに

平和利用の原子力は、今日では世界的にも無視できない基幹エネルギーとなっているが、その草創期から、安全を重視しこれに対処してきたという、他の技術分野に比べても誇るべき伝統を持っている。1942年12月、米国のシカゴ大学の構内で、人類最初の原子炉CP-1が臨界になった時も、出力の急上昇、すなわち反応度事故に備えて、極めて原始的なものではあったが、複数の緊急停止装置が、多様性を以て準備されていたことなどは、実に象徴的なことであった。

だが、原子力のそもそもの発祥であった軍事利用の面では、安全性が十分に重視されていたとは決して断言できなかった。東西冷戦によって軍事利用が最重要とされた頃には、ウインズケール炉の事故、SL-1事故、更にはその被害状況は見方によっては後述するチェルノブイリ事故を上回るところもあると伝えられる「ウラルの悲劇」こと旧ソ連のチェリャビンスクの放射能放出等は、軍事利用に関連して発生したものである。しかし1950年半ばから本格的に開始された平和利用の分野では、公衆、従事者及び環境を適切に保護するという安全性の確保は、最優先事項とされ、これを支えるための安全研究も開始されるようになったのである。

爾来、今日まで、様々な安全研究が行なわれ、それに基づいて安全確保の対策が取られてきた。原子力平和利用の意義、必要性は、一般公衆の多くがこれを認めるようになってきたが、安全性に対する懸念は依然として根強く存在している。安全性に対して正しい知識を提供して公衆の理解を獲得し、更に安全性を向上して原子力の一層の発展を遂げるために、安全研究は不可欠のものである。

それればかりではない。科学技術というものは、常に向上を目指し、新しい知見を創造し反映していかないと、たちまち内容を失ってドグマと化し、形骸化してしまうものなのである。更につけ加えれば、安全研究の実施によってこの分野の専門家が多数育成され、安全確保のために不可欠な健全な技術基盤が形成されてきた。1999年のJCO事故の際に、当時の原研やサイクル機構で溶液系の臨界の研究をしていた専門家たちの活躍によって、臨界状態終息の手段の確認が、驚くべき短時間で実行されたことなどは、いまだに記憶に残

るところである。実は当時の原研でこの研究を行っていたＮＵＣＥＦと言う装置は、予算のつき方が遅れて、完成したのは六ケ所の再処理施設の許可が下りた後だった。「いまさら何をするつもりだ」などとずいぶん悪口も言われたものである。しかし、そこで地道な研究を積み重ねていた専門家の知見が、あの事故の終息に大きな力となったのである。「百年兵を養うは、ただ今日あるがためなり」という言葉が全くその通りと実感されたのである。

これらの経験からも、安全研究を今後とも強力に実施していくことが、現在の安全のレベルを維持するためにも必要なことであることは明らかである。以下では、これらの安全研究の歴史を簡単に振り返り、更にこれを踏まえて今後我々が特に留意すべき点を指摘したいと思う。

今日、「原子力安全研究」と呼ばれているものは、非常に広い範囲に渡っている。原子力安全委員会が「重点安全研究計画」として、平成18年度以降の研究の重点分野として示しているものだけでも、原子炉安全、核燃料サイクル、廃棄物、放射線影響などとともに、共通する分野としてリスクとシビアアクシデント、廃止措置その他の項目が示されている。また、これらの研究を実施する機関として、原子力研究開発機構、原子力安全基盤機構、放射線医学総合研究所その他の独立行政法人研究機関に加えて、大学、財団・社団法人、更に産業界の貢献も期待されているところである。

これらのうち、ここでは主として原子炉、特に軽水炉の安全研究を中心とし、併せてその他の施設等に関連する研究の歴史を紹介することにする。というのは、原子力の安全の考え方、そしてそれを実現するための研究は、何といっても原子炉に関するものが中心となって今日まで展開されてきたからである。

当然のことながら、研究の重点も時代とともに変遷してきた。これは、それぞれの時点での、原子力安全というものに対する認識、すなわち原子力の「安全像」、あるいはこれを裏返した原子力の「リスク・プロファイル」の変遷を反映したものである。

2．黎明期

1950年代の終わりごろ、既に運転を停止している日本原子力発電株式会社の東海1号炉（コールダーホール型）の導入が計画された時に、この炉の耐震性が問題となり、様々な検討が加えられた。というのは、この炉の炉心は、極めて多数の黒鉛のブロックを積み重ねたもので、地震のような震動に耐えるかどうかが懸念されたからである。設計用地震の想定の一部に統計的手法が導入され、まだ定着していなかった動的設計の考え方も取り入れられ、当時としては大型の振動台による実験に基づいて、黒鉛ブロックの形状が一部変更されるなどした。当時は、今日に比べれば地震に関する知見も十分でなく、断層が動いて地震になるのか、地震の結果断層が動くのかが専門家の間で論争となっていた時代なのであるが、安全上特に重要と思われる部分は、一般の構築物等の3倍の地震力に耐える強度を要求するなど、画期的な考え方が打ち出された。今日でも耐震に関する研究は熱心に進められ、これに基づく耐震設計審査指針なども近く大幅に改訂されようとしているが、東海1号炉はその先駆となったものといえる。

しかしそれでもまだ、原子炉にどのような危険性すなわちリスクがあるかを全体として捉え、体系的に研究課題を選定して研究計画を構築するには到底至っていなかった。すな

わち、リスク・プロファイルが明確に意識されるにいたらなかったのである。例えば、この炉は格納容器がないことを問題と指摘した人はいたが、それではそれによってどれほど危険性が増大するのかは明らかではなく、またこれに関連する研究も行なわれなかった。

1961 年、米国の SL-1 という実験炉が深夜突然暴走し、作業員 3 名が死亡するという事故 が起こった。これまで例がないほどの大暴走で、いろいろ予想しなかった事象も観察されたことから、反応度事故の研究をする必要が感じられた。米国で SPERT などの炉を使用した研究が開始され、日本でも NSRR が 1975 年に運転を開始して、今日まで研究が続けられている。これらの研究から、反応度制御装置等の設計要件などが明確にされ、また、わが国では反応度事故に対する審査指針が策定されたが、ここでも、反応度事故というものが、原子炉のリスク全体の中でどのような位置を占めるかは、あまり明確に意識されていなかった。

1960 年代になると、軽水炉の開発が進み、その経済性にも見通しが立つようになって、軽水炉時代が到来することが予見されるようになった。また、安全性についても、軽水炉には全体としてどのようなリスクがあるのか、そのリスクに対処すべき安全対策の全体の姿はどのようなものか、すなわちリスクプロファイルあるいは安全像を明確にしようという考え方も、次第に姿を現してきた。

1960 年代半ばまでの軽水炉の安全像は、頑丈な格納容器に原子炉を収容することにより、どんな事故でも放射性物質をこの中に閉込めておけるから、公衆や環境を危険にさらすことはない、という極めて単純で分かりやすいものであった。

しかしこのような「格納容器万能」的な安全像とは対照的に、日本では、JPDR の導入決定を契機として、1960 年代前半から、体系的な軽水炉の安全研究が、世界で初めて発足した。すなわち、軽水炉の配管等が損傷すると、高温高圧の冷却材が失われ、炉心の冷却ができなくなる、これがリスクの最も主要な源であるという考えで、一連の冷却材喪失事故(LOCA)の研究が開始されたのである。この研究は「SAFE Project」と呼ばれ、現在から見れば小規模であるが、システム・ブローダウン実験、炉心スプレイによる燃料冷却実験、冷却材喪失時の格納容器の内圧挙動などの実験と実験式の導出がなされた。これは世界的にも極めて先駆的なものであったが、残念ながらその後のフォローアップがなく、その後間もなく日本は米国等の後塵を拝することになってしまった。この頃は、安全研究などは、国民の不安をあおり、原子力のアクセプタンスに有害であると言う考えが、電力を中心とする産業界に多かったのである。

3. LOCA/ECCS

1960 年代後半になると、軽水炉で冷却材が喪失して炉心が溶融すると、この溶融物が格納容器を破壊してしまう可能性が米国で指摘された。溶融した炉心は格納容器の底を貫き、更に岩盤も溶かして地球の裏側に達する、そこは中国だからこれを チャイナ・シンドローム という、などというブラックジョークが広まり、これは後に映画の題名にもなったほどであった。これは、格納容器万能とも言える安全像の、全面的な改定を迫るものであった。原子炉の安全を最終的に確保するためには「停止・冷却・閉込め」の 3 点が不可欠であること、したがって、LOCA（冷却材喪失事故）が発生した場合には、炉心を冷却することが

必要であることが認識され、原子炉の安全研究計画が先ず米国で立てられた。この計画の中には、日本のSAFE Projectの結果がいくつか引用されているのだが、このことさえ、当時の日本ではほとんど知る人がいなかったのである。いずれにしても米国を中心として、LOCAを中心とする研究が開始された。ECCS(非常用炉心冷却系)という用語が登場したのはこのころのことである。

ECCSに関連するある実験結果が、現在では当然と受け取られる結果であったのだが、当時の予想とは異なったことから、これがきっかけになって1960年代末から70年代初頭にかけて、ECCSの有効性について大論争が起こった。

この論争の意義は極めて大きいものがあった。すなわち、それまで一部の専門家の関心事であった安全性が、社会的な関心事になるきっかけになった。さらに、安全性は、単に直観的にそう信ずるだけでなく、研究結果に基づいて科学的に論証されなければならないことが、次第に共通の認識となり始めたのである。すなわち「信仰から科学へ」と言う動きが出始めたのである。安全の論理を構築しようとする試みもこのころから始まった。DBA(設計基準事故)とか Defense in Depth(多重防護あるいは深層防護)などの用語が登場し たのは、1970年代初頭のことである。

このころは、軽水炉のリスクはLOCAで代表されると思われており、更にLOCAは大口径配管の瞬時両端破断による、いわゆる大破断LOCAが最も過酷で、したがってリスクも大きいだろうから、安全対策や安全研究もこれに焦点を合わせておけばその他の事故は十分包絡できるはずだと、と考えられていた。このような考え方は「上限評価」と呼ばれるもので、多くの場合正しいのであるが、時にはこれが我々の判断を誤らせることがある。

60年代末には、小破断LOCAにも気をつけなければならないことは意識はされていたが、「上限評価」の考え方を覆すようなことにはならなかった。当時の日本のROSA計画、また、2D-3D計画(PWRのLOCSでの再冠水現象を研究するため、日・米・独が分担協力して、大規模な実験と解析を行なったもの)、そして米国主催からOECD主催の国際プロジェクトになって研究内容にも変化が生じたが、LOFT計画(小型ではあったが本物のPWRでLOCAを起こさせて、ECCS の効果を実証しようとしたもの)などは、この時代の考え方を反映した大規模な研究の代表的なものである。そして、これらの大規模な研究には、いくつかの国が共同して必要な資源を負担するという、国際協力研究が盛んに行なわれるようになった。ちなみに、OECD主催になってからのLOFT計画には、10ケ国が加盟して共同運営を行ない、大きな成果を上げた。

また、当時著しい進歩を遂げた計算機と解析技術を駆使して、大型の計算コードが次々に作成された。これらの計算コードの使用法に熟達すると同時に、その能力の限界を探るような計画も実施された、その代表的なものとしては、OECD NEA CSNI が行なった「国際標準問題」があり、これは世界の代表的な実験を選んで、各国が解析を試みて、その結果を比較するというもので、解析技術の評価と向上に大きな役割を果たした。また、新たに開発されるべき計算コードの検証や試計算等にも使用できるように、代表的な実験結果も収集され編集された。例えば、OECD NEAの「Code Validation Matrix」などである。

このような研究に比べれば少々地味な印象であったが、燃料の燃焼挙動とその健全性の研究や、配管や容器などの構造物の信頼性と破壊挙動などの研究、あるいは核分裂生成物

(FP)の挙動の研究、放射線の医学・生物学的影響の研究などが、息長く続けられ、これが設計、製作、運転保守、評価などの場にフィードバックされた例は非常に多い。

このような多彩な活動によって、当時懸案となっていた問題は次々に解決されるかに見え、一部には安堵感が漂いはじめた。ただしこれには、安全研究に巨額の予算と人員が投入される様になったと言うことによる、一種の安心感のようなものもあったと思われる。このような風潮に警鐘を鳴らしたのが、次に述べるWASH-1400だったのである。

4. WASH-1400

1970年代前半に、米国で、原子力損害賠償保険の料率を適正に定める目的で、原子力発電所の総合的なリスクを解析的に評価する最初の試みが、MIT教授のNorman Rasmussenと、当時のAECの研究局次長であったSaul Levinによって組織された。この研究の報告書がいわゆるラスムセン報告、WASH-1400と呼ばれるもので、1974年に報告書の原案が公開されて意見を公募し、1975年に最終版が公表された。この報告書は、付録も含めて3000ページにのぼる大部のもので、これを全部読んだ人は世界のどこにもいないなどと冗談がかわされていたものである。

この研究の結論は極めて衝撃的なものであった。まず、原子力発電所のような巨大で複雑なプラントのリスクを、解析的・定量的に評価するなどは、到底不可能であると当時までは思われていたのであるが、技術的にはいくつかの問題点はあったものの、とにかく可能であることを実際に示したのである。また、軽水炉プラントのリスクの大部分は、設計の範囲を超えた事故によるもので、これはそれまでの安全の考察の範囲を超えており、当然研究の対象にもなっていなかった。しかも、このような事故が起こる確率は、当時まで何となく信じられていたよりも2桁程度は高いこと、大破断LOCAよりも小破断LOCAやその他のトランジエントの方が全体のリスクへの寄与は大きいこと(これはすなわち上限評価の考え方の否定である)、しかし、事故が設計の範囲を超えても、その結果はそれこそ千差万別であること(したがって、設計の範囲を超えた事故の研究が必要なこと)、人間の信頼性が極めて重要なこと、など、今では常識となっていることがはじめて解析的に明確に示されたのである。WASH-1400はこのようなリスク評価の最初の試みであったから、技術的にはいくつかの問題点を抱えていたのはむしろ当然であるが、ここに述べた重要な結論は、今日のより進歩し改良された手法による解析結果でも、変っていないのである。

ところで、WASH-1400の前から、事故が設計の範囲を超える可能性がある、ということは意識はされていた。たとえば、当時米国の環境保護法に基づく環境影響報告書の記載要領案では、事故は9つのクラスに分類され、そのうちクラス8までは設計の範囲として対応し評価するけれども、最後の設計の範囲を超えるクラス9事故は、「結果はより過酷であるがその可能性は極めて低く、したがってリスクも低いから評価に及ばない」とされており、これがすなわち1970年代半ばまでの軽水炉のリスクプロファイルだったのである。リスクが低く、かつ評価もしなくてよいというのであるから、当然研究の対象にはなっていなかった。だが、これに対する厳密な論証などはなく、逆にWASH-1400のような反証は既に存在していたのである。すなわちWASH-1400は、このような「信仰」とも言うべき安全像を、根底から覆すものだったのである。

科学技術的な報告書で、WASH-1400 ほど内容の理解が不十分な毀誉褒貶が多かったものはあまり例がない。これで原子炉の安全問題は全て解決した、とばかりに持ち上げる人もいる一方で、この報告書が指摘している設計の範囲を超える事故などは、純理論的、思弁的産物で、実際には起こり得ないとして、これまでの安全像にこだわり続ける人も沢山いた。当時の NRC もそうで、1978 年 3 月には、WASH-1400 のいくつかの技術的問題点を理由として、確率論的安全評価に対して極めて否定的な政策声明を発表した。このような混乱に終止符を打たせたのが、この政策声明の 1 年後の 1979 年 3 月に発生したスリーマイルアイランド発電所の事故、いわゆる TMI 事故であった。

5. TMI 事故/シビアアクシデント

TMI 事故は、軽水炉の歴史では今日まで最大の事故であるが、何より衝撃的であったのは、設計の範囲を大きく超えるいわゆるシビアアクシデントが、現実に発生し得ることを実証したことであった。また、この事故は小破断 LOCA の一種あるいは給水喪失と見ることができ、このような小破断 LOCA やトランジエントの方が、大破断よりもリスクへの寄与が大きいという WASH-1400 の結論の通りになったのである。それまでの安全像を基本的に見直す必要があることが痛感され、当然のことながら安全研究にも大きな影響を与えた。

これに比べると、1986 年に発生したチェルノブイリ事故は、事故の規模や被害ははるかに重大であったが、安全の考え方や研究の方向には、TMI 事故の教訓も既に活かされていてあまりつけ加えることがなく、反面教師的役割を果たしたにとどまったといってよいであろう。すなわち、安全確保のためには、なによりも安全を最優先するという意識が全ての個人と組織に浸透している必要があるという、セーフティ・カルチュアが重要性が認識されたことが、最大の教訓といえるであろう。

TMI 事故の結果、まず、設計の範囲を大きく超えるシビアアクシデント(この用語は、TMI 事故後の安全研究の進め方を検討した、OECD NEA CSNI の上級専門家グループが「発明」したものである)を含めて、事故のスペクトル全体を視野に入れたリスク・プロファイルが描かれ、研究の基本戦略が見直された。それまで大破断が中心であった LOCA については、中小破断時の事象が重要であることが認識され、わが国の当時の安全研究年次計画を急遽変更して発足した ROSA-4 による研究などは、世界を代表するものであった。わが国では 1981 年に、これらの研究結果を踏まえて、それまで大破断をもっぱら対象としていた ECCS の性能評価指針が、中小破断も含めて事故の全スペクトルをカバーする様に全面的に改訂されたが、これは世界に先駆けたもので、我々が誇りにしても良いものであろう。

また、シビアアクシデントに関する研究も体系的に開始された。前にも紹介した OECD・LOFT 計画は、いくつかの実験をシビアアクシデントに充て、最後の実験では、LOCA 時に ECCS のスタートが大幅に遅れた場合に、炉心のある部分だけを損傷させ、他の部分の健全性 は維持されるという条件を設定し、計画とおりの結果を得たことなどが、特筆すべき成果である。これによって、当時の解析技術が十分信頼できるものであることが実証されたと評価されている。

これに加えて、溶融炉心による水蒸気爆発、溶融炉心とコンクリートとの相互作用、金属-水反応等によって発生する水素の燃焼爆発等々を考慮に入れた、格納容器の健全性研究、

シビアアクシデントの環境下でのFPの挙動の研究など、シビアアクシデント時の現象の解明の研究は、枚挙に暇がないほどである。

また、事故が設計の範囲を超えるような場合の、現場での知識ベースに基づく臨機の処置、すなわちアクシデント・マネージメントが重要であることも、先に述べたCSNIの専門家グループによって指摘されて広く認識され、わが国のROSA-5.計画などが発足した。これらの研究を踏まえ、わが国では事業者の責任でアクシデント・マネージメント策を策定すべきことが強く推奨され、各電力会社は、それぞれのプラント個別のPSAの結果などを参照して、アクシデント・マネージメント策を策定しはじめた。

これに加えて、TMI 事故では、運転員の誤った状況判断が決定的な役割を果たしたことから、それまでややもすると「安全」とは安全系の設備のこと、と短絡する傾向があったのが、「安全運転」も重視されるようになり、認知心理学などを取り込んだ人間工学的考察を踏まえ、更に技術の進歩も反映して、制御室のマンマシンインターフェイスの設計などは、従来のものに比して面目を一新するほどになった。

また、TMI事故、チェルノブイリ事故そして1999年のJCO事故などで、原子力防災対策と、放射線災害発生時の医療活動の重要性が意識され、これらを充実させるための研究も開始されている。

6. リスクを考慮した安全管理

このような状況を見ると、先に紹介したWASH-1400の結論が、極めて正しかったことが改めて分かる。当然、確率論的安全評価(PSA)の価値が再認識され、手法の改良や拡張の研究が一層活発に行なわれるとともに、個々の軽水炉プラントにこの手法を適用することによって、それぞれのプラントの固有のリスク支配因子を摘出すること等が進められている。また、こうしてそれぞれのプラントのリスクが定量的に評価できるようになってきたことを踏まえ、「リスクを考慮した安全規制」「リスクを考慮した安全管理」等の新しいアプローチが各国で追求されている。また、社会が受け容れることができるほど十分に低いリスクを目指して努力するための「安全目標」策定の動きが、わが国でも始められている。平成11年版の原子力安全白書では、JCO事故後の政策として「リスク評価の概念に基づく安全確保を目指し・・・検討を進める」と述べられ、これがその後のわが国の原子力安全の基本政策の一つになっているところである。

このような政策が考慮されるようになった背景には、リスク評価手法が次第に成熟してきたことがある。現在、日本の軽水炉は全てプラント固有のPSAを行なっている。そもそも安全対策というのは、施設のリスクを正確に認識しこれに対処して危険性を軽減するというのが目標で、それは従来の決定論的手法でも変わるところはないのであるが、この新しいアプローチは、成熟度を増し信頼度を高めてきた最近のリスク評価結果を、より直接的・明示的に意志決定の根拠としようとするものである。

だが、これまでのPSAのほとんどは、起因事象がプラントの内部にあるものを対象とした、いわゆる内部事象PSAであって、炉心損傷あるいは格納容器損傷までを評価するレベル1あるいは2に留まっている。さらに、軽水炉でも、地震などの外部事象を考慮に入れたPSAは、まだ不確定性が多く、成熟という段階に達したとは言いかねる。

軽水炉以外の核燃料施設、更には放射性物質の廃棄に係る活動に関するPSA等は、わが国でも六ケ所村の再処理施設についてPSAが試みられ、また米国などでは濃縮施設や廃棄物処分のリスク評価も試みた例がある。しかし、これらについては、まだ解析例もこれらに対するピアレビューも十分な段階に達しておらず、更に慎重に検討すべき段階と思われる。

このような、未成熟なPSAがまだ存在していることの問題点は以下の通りである。すなわち、リスクを考慮に入れた安全管理あるいは安全規制は、PSAのみにたよるというものではないが、それにしてもPSAが中心的存在であることは明らかである。例えば、軽水炉のPSAで地震などの外部事象の取扱が十分成熟していないとすると、これによって形成されるリスク・プロファイルあるいは安全像が不正確なものになり、ゆがんだ姿になってしまうかもしれない。それでは、これからの安全研究、したがって安全性の姿が、良くバランスのとれた健全なものでなくなるおそれがある。軽水炉の外部事象のリスク評価手法を充実し、更にまた軽水炉以外の原子力施設や活動に対するリスク評価が十分信頼できるものになるように、一層の研究開発が望まれるところである。

また、特にわが国で高速炉もんじゅのナトリウム漏洩事故の時に体験されたことであるが、これまで原子力安全とは直接関係がないと思われていた技術分野の知見が、事故時の事象解明とその対策に必須のものであったことが発見され、他分野との情報交流とそれに基づくより広い問題意識の育成が必要であるとことが痛感された。

もともと安全研究は、その黎明期においては、何か新しいことが見いだされるとそれに対して極めて即物的な答が求められ、学問として根の座った発展をするのはそれから後でという感じがあった。かつてECCSの効果に疑問が生じた頃、ECCSの冷却効果を予測する実験式を定めるために行なわれたFLECHT実験などはその典型的なもので、現象の理解は二の次でともかくどれだけ冷えるかを数値的に予測することだけが追求されたのである。しかし、今や安全研究はこのような言わば原始的段階を脱却して、「学問」としてかなり成熟した段階に達し、他分野との交流もその意味で必要にもなったし、また容易にもなったと思われる。

これと関連して、これまで安全研究というものは、全くの技術的分野、つまり自然科学の分野に属すると思われていたのであるが、原子力が社会に定着するにつれて、社会科学、人文科学との交流も必要であることが感じられている。例えば1999年に発生したJCO事故に対する原子力安全委員会の調査特別委員会は、委員の約40%が社会科学・人文科学の専門家で、このような分野からの提言もまた極めて貴重なものとして報告書に記載されている。このような「学際」を埋めるような研究活動も、安全研究の一環としてその必要度が増加していくと思われる。

「放射線教育」 Radiation Education
Vol. 9 No. 1, p. 83－92 (2005)

人類繁栄の歴史と科学・技術が果たす役割

――エネルギー・地球環境問題への新しい視点――

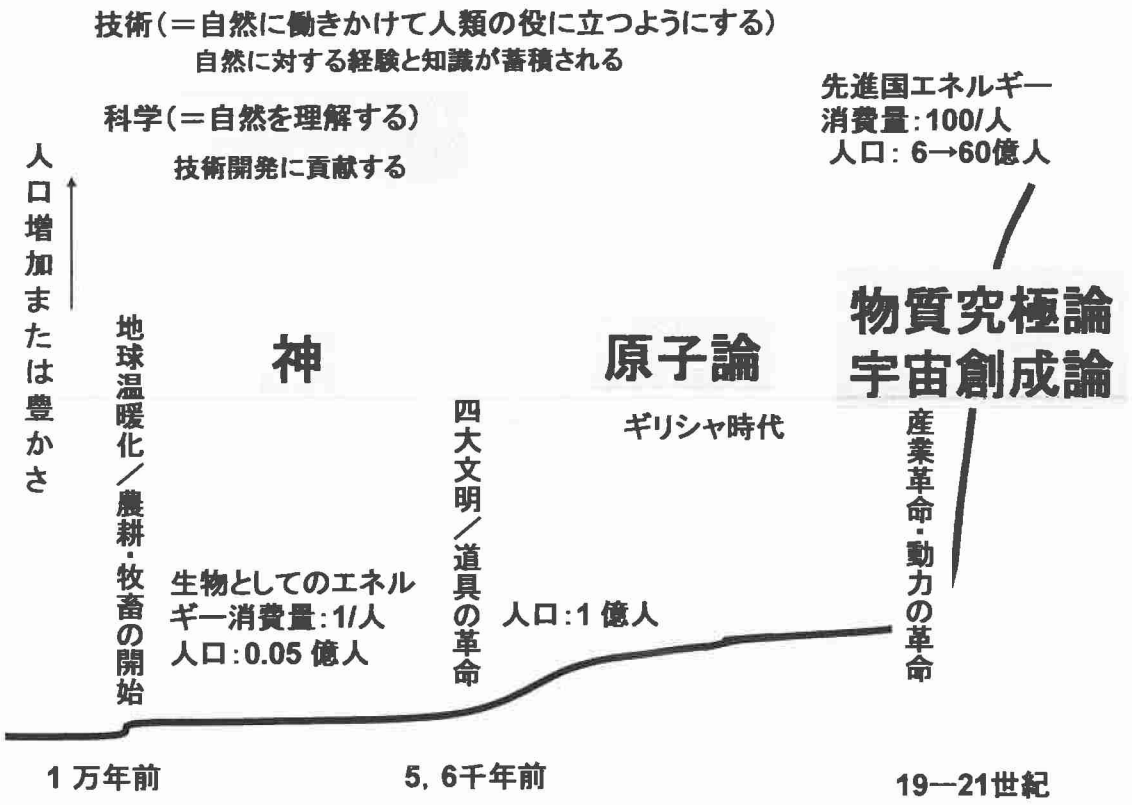
大野新一
理論放射線研究所
〒227-0054 横浜市青葉区しらとり台１２－５
(2006年２月７日　受理)

[要旨] およそ１万年前に始まった人類の文明は、２つの大きな技術革新(それぞれ四大文明および産業革命によって代表される)を経て人類の繁栄をもたらした。本稿は、人類の繁栄に寄与した２つの技術革新の特徴を復習する。ついで人類全体を１つの生命体（熱機関）として捉え、この生命体が外界(自然)からエネルギーと物質をとりこみ、生命体の活動・繁栄のために利用し、不要になったエネルギーと物質をふたたび外界に排出するさいに、その効率を高めることが科学と技術の果たす役割であることを指摘する。人類の繁栄を支えるエネルギー・物質の必要量と廃棄量は、世界人口や豊かさとともに増大し、必然的に地球環境の変動を余儀なくすることを確認する。人類繁栄という目的のための科学と技術はやがてその役割を終え、人類は宇宙の目的および人類存在の意義を問うことになるであろう。

１．　人類繁栄の歴史

人類繁栄の指標として、ここでは世界人口およびエネルギー消費量を選ぶことにする。ヒトは体温36℃を維持するために食物の形でエネルギーを摂取しなければならない。このエネルギー消費量を１としよう。現代のアメリカ・日本などでは、豊かな生活を維持するために、大量のエネルギーが使われており、その消費量はおよそ100である。

人類の誕生はおよそ700万年前といわれるが、われわれの先祖である現代人（ホモサピエンス）の出現は、10～20万年ほど前であるといわれる。自然環境の中で他の多くの生物と同じように狩猟採集にたよって、つまり他の生物(=食料)を取り入れることによって生きていたが、われわれの先祖は食料となる動物を追って地球上各地に広がっていった。およそ１万年前になると、地球表面の環境が、気候変動が激しかった氷河期を終え、比較的安定な温暖の時代になり現在まで続いている。安定な気候はやがて農耕牧畜をもたらす。食料の蓄積が可能になり、人々の暮らしに時間の余裕が出来たことが文明を生むことになったといわれる[1)]。農耕に用いられる道具は木や石を加工したものであったが、特別の鉱石を強熱することによって金属（青銅、鉄）を得るすべを学ぶ。これによりスキ、クワ、カマなどの農機具が普及し、農業の生産効率が飛躍的に増大し、これが四大文明を生むきっかけとなったと思われる。世界人口も500万人程度であったものが、この第１の技術革新によって10倍から100倍に増加したものと推定される。第２の技術革新は産業革命の時代から今日もなお続いているものであるが、ここでは動力源が人力、畜力、水力、風力などから石炭・石油そして原子力などへと変化したことが特筆される。地球の地下資源を掘り出し、その反応熱（化学反応や核反応）を利用するのである。これによって生産力、物資の輸送量、情報伝達能力（動力を利用するときは電気として、また情報交換には電子や電



図－1　２つの技術革新と人類の豊かさの歴史

磁波を用いる）が増大し、人々の生活は豊かに、そして世界人口は大幅に増大しつつある。

２　人類繁栄における科学と技術の役割

２－１　科学と技術の進歩

まず科学（＝自然を理解する）と技術（＝自然に働きかけて、人間の生活の豊かさに役立つようにする）を区別してほしい。農耕牧畜時代になっても、地震、雷、火山噴火、津波などの自然災害に遭遇した祖先は、これを神のなせる業と理解した。

第１の技術革新（四大文明のころ）では，道具作製の材料が木，石，土から金属，土器（セラミックス）に変わり，生産力は高くなり、生活も豊かになった。こうした技術は親から子に、そして人から人へと伝えられ、人々の自然に対する知識・経験が深められた。この知識・経験を基にして、ギリシャを中心に物質変化を理解するための「原子論」と自然現象に「法則性」が存在することを議論する科学が誕生した。創造主としての「神」は認めるが、自然現象を惹き起こす意思をもつ神の存在をみとめない科学の誕生である。

第２の技術革新（産業革命）では，人類は、動力源を化石資源から得るだけでなく、望遠鏡・顕微鏡の発明で視野を広げ、自然を観察し物事を観るときに質量・長さ・大きさ・時間・温度・圧力を計測する技術を身につけ、自然に対する知識と経験を深めた。

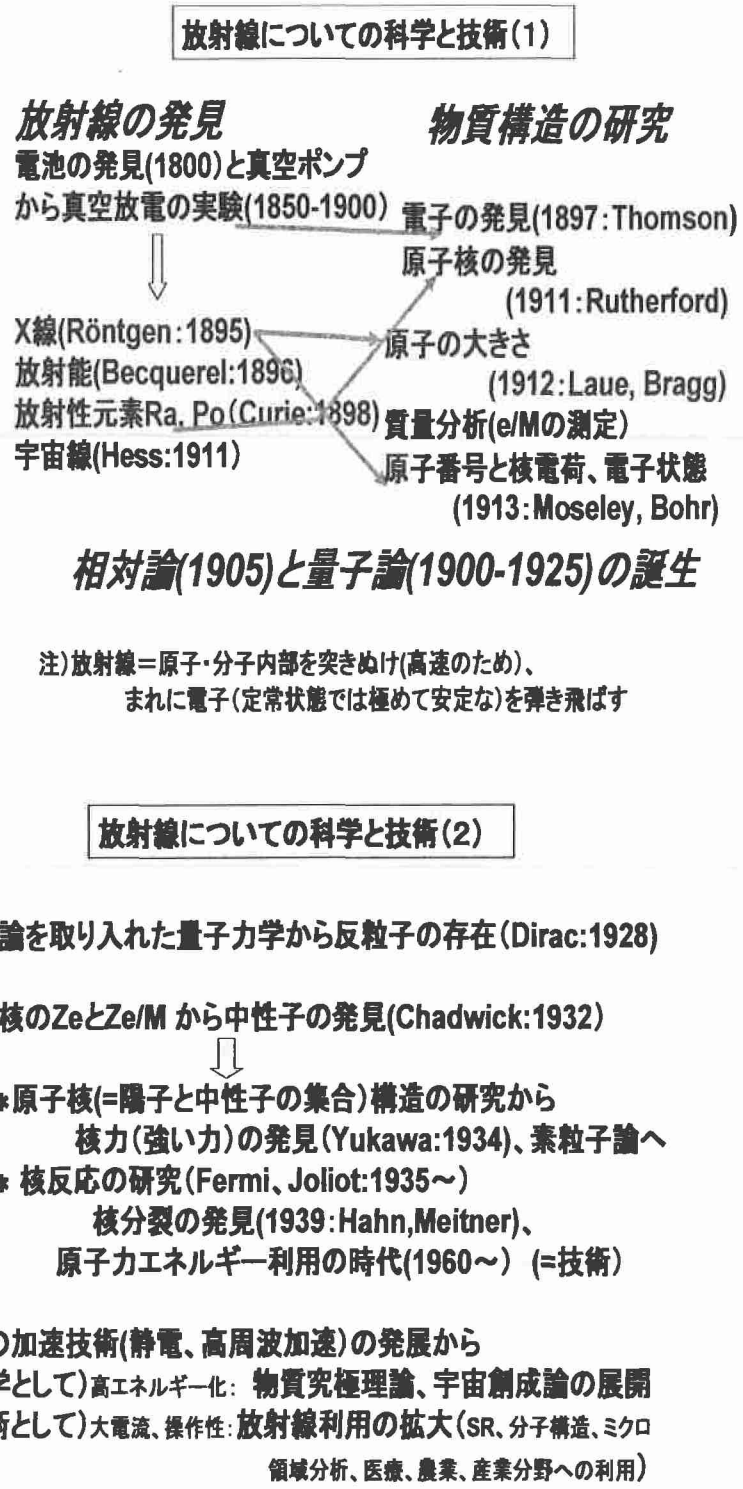
２－２　第２の技術革新における科学と技術の相互の関係（放射線と物質構造の場合を例として考察）

技術（＝自然に働きかけて、人間の生活の豊かさに役立つようにする）の進歩は、科学（＝自然を理解する）と密接に結びつき、科学と技術は互いに作用しあい加速度的に発展するようになった。ここでは物質構造にかかわる科学と放射線利用の技術・原子力エネルギー利用の技術の場合を例として、第2の技術革新における科学と技術のかかわりを考察してみよう。

まず精密な定量的自然観測が定着したことによって、ボイル(R. Boyle)やラボアジェ(A. Lavoisier)から始まる定量的な化学反応の研究がすすみ、その結果、19世紀末までに、決して壊れることのない「安定な原子」の存在が確認された[2)]。その一方で、ボルタ(A. Volta)電池の発明（1800）と真空ポンプの組み合わせである真空放電の実験は、雷やオーロラの研究のために19世紀を通して盛んであったが、ついに放射線の発見と物質の普遍的な構成要素(=電子ならびに原子核、中性子)の発見をもたらした[3)]。

真空放電にさいして陰極からでる荷電粒子の電荷/質量の比が電極材料の種類によらずに一定であることから、トムソン(J. J. Thomson) はあらゆる原子に共通に含まれている電子の存在を確信した(1897)。また高エネルギーの陰極線(=電子)が放電管壁に衝突したところから物体を透過する電磁波（＝X線）が発生することをレントゲン(W. C. Röntgen) が見出した(1895)。X線発生の機構を調べようとしたベクレル(H. Becquerel) は天然の鉱物から常にでている放射線を発見(1896)、またその放射線を放出するような物質の分離の実験からキュリー夫妻(M. et P. Curie) はポロニウム及びラジウムを発見(1898)、その後ラザフォード(E. Rutherford) らの研究により、放射線の物体に対する性質が明らかになり、写真作用、蛍光作用が解明され、また気体電離を利用した放射線検出法が開発された。さらに結晶格子によるX線の干渉効果も発見され、ここでX線の波長・結晶格子の間隔・散乱角度の3つの間の関係式が提出された（W. H. Bragg: 1911）。原子内部を走るα線の飛跡を解析することから、原子の構成要素として正電荷をもつ原子核の存在（E. Rutherford:1911）、さらに原子番号Zの原子核がZ個の単位の陽電荷を有すること、また高エネルギーの電子衝撃を受けた原子から放出されるX線(=特性X線)の波長と原子番号Zとの間の関係（H. G. J. Moseley: 1913）も明らかにされ、原子中の電子の運動状態が理解できる準備が整った。こうして微細な高速粒子(＝放射線)と原子・分子との相互作用に関する知見が得られるにつれて、その記述にふさわしい新しい力学理論が必要となってきた。すなわち量子論（1900－1925）と相対論（1905－1915）である。

放射線は物体の内部を透過し、同時に物体の内部で化学反応を誘起しつつ減衰する。その性質は発見直後からX線による透視写真や腫瘍治療などの医療技術などに応用されたが、結局は科学（＝「万物はどのようにつくられているか」）を進展させた。量子論によって原子の安定性が理解され、また相対論は時空間の構造と質量-エネルギーの関係を明確にした。原子番号Zの原子核の電荷(Rutherford及びMoseleyの方法)と質量(Thomsonおよび Astonの質量分析）を比較することから原子核中に陽子と同じ質量の中性の粒子の存在が予想され、これを確認したのがチャドウィック(J. Chadwick)の中性子発見(1932)である。つぎの課題は原子核を結びつける力であり、相対論と量子論に基づいた湯川秀樹の中間子予言(1934)と素粒子物理の展開、さらに加速器技術の展開を急速に促した。他方、中性子は原子核の変換反応の研究を容易にし(E. Fermi, F. Joliot)、核分裂の発見(1939)とともに超ウラン元素の合成への関心を引き起こした。また相対論と矛盾しない量子論の研究からは反粒



図－２　放射線についての科学と技術の関係

子の存在が予言され(Dirac:1928)、陽電子が発見された(1932)。すなわち技術から発見された放射線は、医療技術などに使われる一方で物質構造の研究に決定的な役割を果たすとともに、核分裂や核融合の研究を通してエネルギー発生の技術(=原子力発電)を生むことに大きく貢献した。さらに加速器技術の進展は、われわれに多数の素粒子の存在を認識させる

結果をもたらし、それを整理する試みとして、例えばクォーク理論やひも理論が提出されている。さらに加速器技術の応用は華々しく、ミクロン領域の化学分析や同位体分析、多数の原子・分子の同時分析を可能にし、広く科学・技術の分野（医療診断、産業における非破壊検査、トレーサー利用、農業における品種改良、太陽系の年代、地球に含まれる岩石の歴史、考古学資料の年代測定など）で使われている。また、さまざまな粒子を高エネルギーに加速して超高エネルギー密度の空間をつくり、宇宙の起源、とりわけ物質の起源（星における元素合成、星間分子の合成）を解明することに貢献している。

2－3 2つの技術革新の特徴

ここで2つの技術革新の特徴を考えてみる。第1の技術革新は、過酷な自然に立ち向かって人間が生きるために必要であったもので、新しい材料の出現により生産効率の飛躍的進歩をもたらし、社会体制を変え、科学を生んだ。その科学は、自然を観察し、知識を蓄えるという類のものであったが、ギリシャ人の科学は一歩踏み込んで自然現象に対する考え方を論じたもので、それまでの「神」に代わって、「原子論」による物質理論へと導いた。第2の技術革新では、地球に蓄積されていた資源をエネルギー源とし、定量的な自然観測結果を基礎に、自然に対するわれわれの理解・経験は大いに進展しつつある。第1の技術革新（四大文明）と科学（原子論）誕生の場所が距離的にも時間的にも互いに遠く離れていたことと比べて、第2の技術革新では科学と技術の展開はほとんど同時進行である。科学と技術は相互に密接に関連し、また特定分野の科学及び技術は直ちに多くの分野に浸透し、統一されつつある。21 世紀には、「原子論」に代わる「物質究極理論」と「宇宙創成論」がうまれ，やがて科学は完成に至るであろう。技術は複雑な問題をはらむために、さらに時間を要することは充分に予想される。

ここで決して忘れてはならないことがある。「科学」による自然の理解も、また「技術」による知識と経験の増大も、それだけでは豊かな生活や人口増加をもたらさないことである。人類は大量の物質とエネルギーを地球から取り込み、そして不要になった廃棄物を地球に戻す。それが地球の環境や他の生物の生存にどのように影響するのか、差し当り解決しなければならない問題であろう。これをつぎに考えたい。

3 人類繁栄の基礎

3－1 宇宙・生命の進化

できるだけ原理的に考察したいので、人類を含む生命（生物）、さらに生命を含む宇宙の進化についてまず考えることにする。

宇宙は高温の平衡状態から始まったが、137 億年後の現在では、大規模構造、銀河団、銀河、星、惑星などの構造をもち、多様性に満ちている。このような進化の要因として、重力が作用することと宇宙が膨張することの２つが挙げられる[4)]。物質に質量がある限り重力相互作用が働き、たとえば星の場合では、重力収縮に伴い重力エネルギーの解放が起こり、星の中心部は常により高温になる。熱は高温(星の中心)から低温（星の表面）に流れ（不可逆過程）、発生するエントロピーは光として宇宙空間に捨てられる。膨張する宇宙空間は大量のエントロピーを受けとる場となる。星団、銀河、銀河団など、いたるところで同様のメカニズムにより宇宙に構造と多様性がもたらされ、宇宙進化が可能となる。

われわれ人類は、1つの生命体（熱機関、反応系）である。
科学と技術の役割は？

地球環境問題：　エネルギーと物質をどこから得るか？
廃熱と廃棄物質をどこへ捨てるか？

図－3　人類の豊かさを保障する物質とエネルギーの流れ
科学は自然を理解し、技術は自然からエネルギーと物質を取りだし、また不要になったエネルギーと物質を自然に戻すさいの方法・効率をきめる

宇宙では、銀河、星、惑星、生命（微生物、植物、動物）が、過酷な自然環境の中で繁栄を競っている
生命（微生物、植物、動物、人類）は、相互依存しつつ、太陽輻射と地球の排熱・物質の流れを利用しながら繁栄
人類は、技術により、地球に蓄積されている「エネルギーと物質」を使う

例
- **エネルギー源（化石資源、太陽輻射、地熱、原子力）は充分にあるが経済競争、国際問題がある**
- **廃熱量（人類の排熱速度≪地球本来の冷却速度であるべき）**

- **物質源　食料、水：　太陽輻射と地球（陸地）表面積できまる**
  資源：　地球に蓄積されているものから
- **廃棄量　地球に新たな廃棄物質を蓄積する**

図－4　宇宙、生命、人類のそれぞれの繁栄に必要なエネルギーと物質の流れ

この宇宙の進化に伴って物質が誕生し、そしてまた進化してきた。すなわち137億年前のビッグバン当時に存在した物質は水素とヘリウム等の軽元素、それにまだ正体不明のダークマター、夥しい量の光などであったが、星形成以後には星の内部で起こる核融合反応によってさまざまの元素が合成され、宇宙空間に放出される。そして光あるいは宇宙線の作用による分子の合成、さらに複雑な有機高分子などへの化学進化がすすんだ。この時点（いまから46億年前）で太陽系が形成され、地球も誕生した。地球が誕生してから数億年

後、いまからおよそ40億年前に最初の生命活動が始まったと考えられている[5]。ここでいう生命活動とは、アミノ酸やタンパク質などの大きい分子が組織化され、外界から独立して自己と同じ分子系を増殖することである。

生命は、現在の地球上では、その種類は数千万とも言われるが、地球のごく表面（大気、海洋、地殻）に生存している。すべての生物は共通の著しい特徴をもつ。その特徴とは、①細胞を構成単位とする、②DNA(核酸分子)が遺伝情報をもち、その情報は4種類（A、T、G、C）の塩基成分の配列で決まる、③細胞内の化学反応は酵素（＝タンパク質）を触媒として行われ、そのタンパク質は20種類のL-型アミノ酸だけを利用して作られる、④細胞内のエネルギーのやりとりには ATP（アデノシン三リン酸）が利用される、などである。このように多種多様の生物がすべて同じ化学的性質をもつ物質を用いて活動を営むことは、生命が共通の１つの祖先から進化して現在に至っていることを強く示唆している。

最初の生命[5]は、深海底のおそらく熱水噴出孔の場所に生存し、地球内部から流出してくる熱エネルギー（200～350℃の高圧熱水）と物質（水素、アンモニア、メタン、硫化水素、鉄やマンガンなどの金属硫化物）を利用して生命活動に適する機能を次第に獲得し、遺伝子を進化させてきたと思われる。生命進化のなかで特記すべきことは、①冷却を続ける地球中心部の金属鉄の一部が固化することにより、地球磁化が誘起され（およそ27億年前）、これにより地球表面に到達する宇宙放射線量が激減し、生命はようやく深海底から太陽光の降り注ぐ浅海に移動できたこと、②浅海では太陽光をエネルギー源として利用するシアノバクテリアが繁殖し、その廃棄物といえる酸素から身を護るために真核細胞が誕生、さらには活動を有利に進めるために多細胞化が起きたこと、③地球大気に酸素が蓄積したことから太陽光からの紫外線を吸収するオゾン層が形成され、これにより生物が海から陸地に上陸できるようになった（５億年前）ことである[5]。こうした生命が獲得した能力はすべて遺伝子（DNA）に記録されて子孫に引き継がれる。いわば繁栄するための技術であるが、この技術（遺伝子）だけでは繁栄は約束されず、細胞をつくる材料(物質)とエネルギーが必要であることを忘れてはならない。

ここで生命が利用できるエネルギーと物質源について考える。太陽から地球に入射するエネルギーは[7]、太陽－地球間の平均距離（$=1.5\times10^{11}$ m）において 1.37×10^{3} W/m^2（人工衛星による測定値）であることが知られている。このうちの30%が大気や地表面による散乱と反射で宇宙空間に戻り、20%が大気中のオゾン・水蒸気・エアロゾルや雲によって、50%が地表面によって吸収される。地表面に吸収されたエネルギーは、大気・海洋の運動を引き起こしたり、生物による光合成活動の源になったりするが、地球の岩石の熱伝導率が小さいため最終的にはすべて地球から宇宙空間に赤外線として放射される。これに比して地球内部から流出してくる熱エネルギー（地殻熱流量）は 87×10^{-3} W/m^2 であり、太陽から受けるエネルギーの4000分の１でしかない。太陽から地球に入射する全エネルギーは地球断面積 1.3×10^{14} m^2 を用いて 1.8×10^{17} W/m^2 と計算される。

３－２ 人類繁栄の可能性（図－３，４）

人類は700万年前に誕生したといわれるが、現代人の誕生は10ないし20万年前である。また１で述べたように農耕牧畜が始まったのはおよそ１万年前からである。地球環境の立場からすれば、それ以前の人類は他の多くの動物と同じような生活をしていた。文明時代になり、さらに道具の革新が起こり、食料の生産効率が増加したが、動力源は依然として

人力・畜力であり、広い意味での太陽エネルギーであった。大きな変革は第２の技術革新によってである。ここでは動力源としては地球の地下資源（化石燃料・ウラン鉱石）を掘り出し、それを電力に変換して利用する。人口増加によって必要となった食料は農耕牧畜を効率よく進めることによりまかなわれようとしているが、限界があるのは明らかである。以下では、食料とエネルギーの２点に分けて人類が繁栄するための可能性を検討してみよう。

人類が利用できるエネルギー源は以前に見積もった[7]ように人類にとって充分な量が存在するといえる。たとえば今後100億人の世界人口になったとして１千年間にわたり現代のアメリカ並みのエネルギー消費量を続けるときの必要エネルギーは3×10^{24}Jである。それに対して地球のもつ熱エネルギー10^{31}J、ウランおよびトリウムの原子力エネルギー10^{30}J、化石エネルギー6×10^{24}Jである[7]。ただこれがそのまま全部使えるというのでなく、そのためには技術開発や経済性の問題を解決する必要がある。さらに人類が必要なエネルギーを使ったあとで排熱をどこへ捨てるかを考えなければならない。熱力学の教えるところでは吸収したエネルギーと同量が系から出て行かなければならない。上限を決める上で参考になるのは地球内部からの地殻熱流量（地球本来の冷却速度）87×10^{-3} W/m^2(全地球では4.2×10^{13} W、１千年間では1.3×10^{24} J)の数値である。人類のエネルギー消費速度がこの値を超えるときは地球環境に大きな異変が起こることは明らかであろう。

つぎの問題は物質についてであるが、そのうちの食料・水は地球上の全生命にとって等しく欠くべからざるものである。動物にとっての食料は、結局のところ、他の生物もしくはその生物体の一部にほかならない。地球上の生物は太陽からの放射エネルギーを利用する植物の光合成に依存して繁栄しているといえる。光合成の生産量の上限値は、地球の表面積と太陽からの地球の位置における太陽放射強度によって決められる。そこで生物としての人類の増加は、他の生物の犠牲によってのみ可能である。水は、太陽エネルギーによって蒸発した海水が雨となるのを利用するか、あるいは限りある地下水を利用するので食料についてと同じことが言える。また食料以外の物質量は地球資源から好きなだけ得られようが、環境変動とくに不要物質の廃棄が地球環境に与える影響を考えなければならない。

4　まとめ

人類の繁栄ぶりを評価する方法として、本稿では、世界人口とエネルギー消費量をみることにした。そのために必要な物質・エネルギー量の確保と不要になった物質（廃棄物）・エネルギー（排熱）の放出が問題である。科学・技術は物質・エネルギーの採取・運搬・利用・廃棄を促進する役割を果たすが、物質・エネルギーを新しく生産したり、消失させることは出来ない。生物にとって必要な物質のうち、水と食料は、太陽放射と地球表面積が一定である限り、上限値が存在する。特定の生物種(たとえば人類)が際立って繁栄できるためには、他の生物の生存が大きく影響をうけることになるのである。食料･水以外の物質については、地球内部に蓄積されている資源に頼ることが考えられるが、廃棄物質を地球に戻すことを考慮しなければならない。なかでもエネルギー資源については、経済性の問題、とくに国家間の経済競争が問題を複雑にしている。しかし技術開発が進むならば、人類に必要とされるエネルギー資源は充分に存在する[7]。排熱問題としては、現在の地球表面から宇宙空間に放出されている地球冷却速度4.2×10^{13} Wを上回る速度で人類の排熱がすすむならば地球環境に問題が生じることは自明であろう。

ま と め: 21世の科学とは

人類の豊かさをきめるもの:
科学(自然を理解する)や
技術(自然に働きかけて人間の役に立つ)の進歩 から
エネルギーと物質を自然から取りこみ
不要物質と排エネルギーを自然に戻すさいの
地球環境の変化との折り合い に変わる

豊かさ(1人当たりのエネルギー・物質の消費量)と人口を
適切な値に設定するための合意形成が必要

そのための科学:
宇宙の目的と人類存在の意義を解明する

図−5 まとめ

21 世紀の科学・技術に対しては、以上のような問題を解決することが求められる。この際に他の生物や地球環境に対する影響をどのように受け止めるべきかを考えなければならない。それは結局のところ、人類の豊かさ・繁栄そのものに影響がふりかかってくるからである。地球環境問題といっても、地球にとって、とくに地球内部の地球本来の活動にとっては何の影響もなく、地球表面の様子がごく僅かに変化するだけであろう。地球環境問題の影響をまともに受けるのは人類である。地球環境問題は、あるいはまた生命進化（新しい生物種の出現）を促す原因にもなるかもしれない。

21 世紀には、「原子論」に代わる「物質究極理論」と「宇宙創成論」が生まれ，やがて完成に至るであろう。すると宇宙の最初から現在まで、そしてこれからの宇宙の行く末までの全体が把握できるようになる。そこで始めて人類自身を自然の一部として客観的にとらえる,新しい科学が誕生するであろう。すなわち「この宇宙はどのようになっているか？」、「物質はどのようにしてできたのか？」を理解した人類が、これまでに獲得した技術を駆使して繁栄を謳歌するには、地球（あるいは太陽系）からの大量のエネルギー・物質の取り出しと使用後の廃棄を地球環境問題と両立させ得るか否かにかかっている。それがいかにして可能であるかを考えることが 21 世紀における科学・技術の第 1 の課題であろう。第 2 の課題は、宇宙進化と人間存在の意義を考えることであろう。人類存在の意義が、出来るだけ長期間にわたる人類存亡にあるのか、あるいは地球ないしは太陽系に変動を加えて新しい生物種の出現を実現させる（＝生命進化の促進）にあるのか、を研究することであろう。

参考文献

1）松井孝典：宇宙人としての生き方、岩波新書 839（2003）

2）大野新一："原子（分子）の存在はどのようにして実証されたか―放射線の理解を促進するために", 放射線教育、**8**, 3 (2004)

3）大野新一: "放射線発見の科学史的意義、" 放射線教育、**3**（1）、67 (1999)

4）杉本大一郎、吉岡一男：進化する宇宙、放送大学教育振興会（2005）

5）丸山重徳、磯崎行雄：生命と地球の歴史、岩波新書 543（1998）

6）松井、田近、高橋、柳川、安部：地球惑星科学入門、岩波講座地球惑星科学 **1**（1996）

7）大野新一、清水三郎：エネルギー資源並びに人類のエネルギー消費量の予測―地球史から考える―、放射線教育 **7**（1）、21 (2003); S. Ohno and S. Shimizu: Energy Resources for Mankind Considered from the Earth Evolution, JAERI-Conf 2005-001 (ISRE04), p 313 (2005)

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 9 No. 1, p. 93-94 (2005)

［ホームページ紹介］

航路線量計算システム（JISCARD）

http://www.nirs.go.jp:8080/jiscard/index.htm

昨年の海外旅行者数は、延べ1700万人[1]であった。過去に政情不安や伝染病に対する不安等から一時落ち込みはあったものの、今後も海外旅行者数は現状維持若しくは増加するのではなかろうか。海外旅行も旅行業者が企画した団体旅行だけでなく、インターネットを活用して旅行者が自ら企画した旅行も手軽にできるようになった。海外旅行のスタイルもより身近で個性的なものに変わりつつある。また、高校生の修学旅行も海外というのは今や珍しいものではなくなりつつある。

日本の場合、海で囲まれていることもあり、海外旅行は飛行機か船で移動することになるが、経費や日程の都合で飛行機が大半であろう。そのため、飛行機を使用することにより高高度飛行に伴う宇宙線の被曝の機会が増えることになる。

国際放射線防護委員会(ICRP)は、1990年勧告[2]等において、ジェット機の利用時等における宇宙放射線による被ばくを放射線防護の対象として考える必要性を指摘しており、日本でも2004年6月より、文部科学省において航空機乗務員等の宇宙線被ばくの取り扱い等に関する検討が行われてきた[3]。近々、航空会社に自主管理を求めることを柱とする指針が示される予定である。

この対象は乗務員であるが、乗務員に限らず、乗客の中にも宇宙放射線の線量に不安を覚える人もいるのではなかろうか？

このホームページは、サイトの所有者、放射線医学総合研究所の航空機搭乗時の宇宙放射線による被曝の研究の成果の一環として一般に公開している。

タイトルのJISCARDはJapanese Internet System for CAlculation of Route Doses）からとった。2005年9月16日より一般向けに公開され、現在（2006年2月現在）、このページへは、放射線医学総合研究所のトップページからバナーをクリックして直接行くことができる。

FLASHを使うことが前提であるが、使えないパソコンのためにテキスト版も用意されている。

このサイトのトップページから「航路線量計算」のボタンをクリックし、出発空港（成田空港または関西空港）、到着都市(現在35都市)、飛行時期を選択し、それでよければ確認を押すと線量計算の結果が出てくる。線量は、標準的な高度を通った場合、最低高度を通った場合、最高高度を通った場合の値が示される。

線量は発着空港名により航路(+飛行時間）が定め、宇宙放射線に大きな影響を与える太陽活動の状態を飛行時期で定めて計算する。現在、太陽活動のデータは2005年2月以降は近似予測を用いているが、定期的に実測に基づく値に置き換えていくことになろう。航路等の条件については、条件説明のページで詳細を説明している。条件説明等の語句でわからないところがあれば、「語句説明」があるので、そこで調べることができる。

結果として線量が出たとしても、おそらく普通の人々はその線量がどの程度のものであるかわからない可能性が高い。そのため値を出したページからリン

クを貼り、日常被曝との対比ということで、年間に 2.4mSv 被曝していることや一般の公衆被曝限度（医療を除いたもの)が 1mSv であること等を示している。飛行機に年間に一往復や二往復乗っても数百μSv であり、健康影響が生じるリスクは無視出来る程度の大きさであることが分かる。詳細な情報は「関連情報」のページで得られるようになっており、そこでは原爆被爆者の疫学研究で得られている知見から 100mSv 以下の被ばくでは有意な健康影響の発現は認められていないこと等が書かれている。

普通の人が、1mSv を越えるような回数の個人旅行をするというのは、非常に難しいであろう（例えば 2006 年 3 月の実効線量を JISCARD で調べてみると、成田・ホノルル往復が 45μSv、成田・ニューヨーク往復が 180μSv、成田・パリ往復で 159μSv。1mSv を越えるには成田・ニューヨーク間でも 5 往復半必要である)。では、何故その程度なのに示しているか。どのくらいか示すことができなければ、「この程度でしかない」ということもできない。大した線量ではないと言われても、線量そのものがわからなければ、安心できないという人もいるであろう。そのために、このホームページは有効に活用することができるであろう。

実際、JISCARD へのアクセス数（30 分以内の再アクセスは除く）は公開後 3 ヶ月で 1 万件を超えており、一般の人々が航空機での被ばくに高い関心を持っていることがうかがえる。

低い線量でも、どうしても気になる人であれば、航路を極圏近くを通らないコースに変えることにより、線量を低くすることができるであろう。ただ残念なことに現在はそれだけのデータを示せていない。

環境中の放射能に関するデータや、原子力関連施設付近の放射線に関するデータは、インターネットで公開しているところが多いため、そのようなデータは容易に入手できるが、飛行機に搭乗した場合の宇宙線線量のデータは文献でも集めにくい。

自然放射線による被曝の実態を知るために、このサイトのデータを活用することも可能ではなかろうか。

なるべく軽くなるようにしてあるので、実際に使用してみると、サクサク動くはずである。

質問があれば、ホームページの左下に問い合わせ先が掲載されているので、それを活用していただきたい。

（引用文献）

1) 平成１７年における外国人入国者数及び日本人出国者数について（速報）http://www.moj.go.jp/PRESS/060106-1.pdf
2) 国際放射線防護委員会(ICRP)1990 年勧告、日本アイソトープ協会〔訳編〕日本アイソトープ協会（東京） 236p、1991
3) 原子力安全規制等懇談会 第 1 回航空機乗務員等の宇宙線被ばくに関する検討ワーキンググループ議事次第 http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/gijyutu/004/shiryo/006/04070501.htm

尚、この JISCARD 及び航空機搭乗時の宇宙放射線被ばくについては、下記の文献を参考されたい。

・ 保田 浩志: 放医研が開発した航路線量計算システム（JISCARD）について、放射線科学、48(11)、389-395、2005
・ 保田 浩志: 航空機搭乗時の宇宙放射線による被ばくについて、放射線科学、48(9)、317-326、2005

（坂内忠明、保田浩志 放射線医学総合研究所）

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 9 No. 1, p. 95－96 (2005)

［書評］

「安全」のためのリスク学入門

菅原　努　著

この本の著者はもともとは放射線科の医師であったが、物理がわかる医者ということで遺伝研に移り、京都大学医学部長等を歴任した後、80年代からリスクについての研究も行っている。

この本は放射線のリスクを中心に社会での受容という視点から論じている。第二章では歴史的側面を取り上げ、医療として放射線を適正に利用することがそのままリスクの研究に繋がっていった事を示し、第三章では環境中の放射線や紫外線とそのリスクについて述べている。放射線というリスクは、自然環境中にいるという段階ですでに0ではない。説明はわかりやすく丁寧に書かれているが、読者が放射線の歴史や環境放射線について熟知しているのであれば、ここで退屈されてしまっては困るので、第二章と第三章は読み飛ばした方が良いかもしれない。

第四章は昨年問題になったBSEや診断被ばくの問題を取り上げている。診断被ばくでは医療被ばくに関する誤解の他、リスクとベネフィットの比較も取り上げている。

第五章はリスク認知因子の問題や不適切な統計により、リスクの誤解を招く事があることを示している。また、マスコミが農薬の不安を高め、通常の使用では問題のない農薬を危険であると大衆に認知させてしまった例や、宣伝で故意に『問題点』を煽り、商品を売る例も紹介している。研究者の中にも、そうやって研究費を取る例が無いとは言えないが、ここでは述べられていない。

第六章では、国民が勘違いしそうな「安全と安心は全く別の問題であること」を説明している。リスク論からいえば、ゼロリスクはありえないのであるから、「安心」して、警戒を怠ったら「安全」ではなくなるということである。そして、区別をせずに表現している行政を批判し、最近刊行された安全に関する三つの著書について紹介を行っている。

ただ、これに関連していくつか論じてほしかったことがある。ひとつは明らかに「杞憂」と思われることは、どうするか。リスク論では0にはならないが、ほぼ完全に0になることを0ではないからといって心配しているのを放置すべきか。もう一つは、事象に直接関与する人の安全・安心と事象に間接的にしか関与しない人の安全・安心に差はないのか、ということである。トラックの運転手にとって高速道路のリスクは0ではないので安全と安心は両立しないが、その人の家族にとっては、運転手が安全であれば、安心なのである。放射線や原子力についても、当事者かどうかによって見方が変わってくることもあるのではないかと思う。

第七章では、まとめとして、喩えの利用、トレードオフ、QOL などをリスク論とからめて展開している。これらはリスクコミュニケーションでは非常に重要になる点であろう。

この本は放射線のリスク学の入門としては面白いと感じるであろう。専門家には少し物足りない感じがするかもしれないが、一般向けには、適切な情報量であると思われる。

（220 頁、1600 円＋税、昭和堂 ISBN：4-8122-0528-X 発行年月 ： 2005 年 8 月 A5 判）

放射線医学総合研究所　坂内忠明

［書評］

放射線および環境化学物質による発がん

佐渡敏彦　福島昭治　甲斐　倫明　編

この本は低線量の放射線のみならず、低濃度の環境化学物質による発がんについて最近の成果をまとめたものである。従来の本では低線量放射線の影響のみか、環境化学物質の影響のみについて書かれている場合が多いが、この本は放射線と環境化学物質について、並べて記載することで、比較リスクの問題やそれぞれの発がんに関する生物学的なアプローチなどがわかりやすくなっている。執筆者には放射線を専門としている人が多いため、放射線生物学からの視点の話が多い。

第一章では、リスク評価について述べ、リスクの限界がわかるように分かりやすく書かれている。第二章ではがんの原因についての研究史について書かれている。化学物質による発がん及び放射線による発がんの他に体質面、心理的な影響についても述べられている。心因性による発がんは、発がん研究の今後の課題となろう。

第三章に環境化学物質による発がんについて、第四章に放射線による発がんについて、実験方法や制限値の決め方について書かれている。環境化学物質についても、放射線と同じようにしきい値論があるが、この本では非常に詳しく書かれている。第五章で放射線及び化学物質の生物作用についてまとめるかのように、突然変異について書かれている。この章までが遺伝子を傷つけるまでの話である。第六章は「発がんのメカニズム」という題で、傷つけられた遺伝子がどのように癌にかかわってくるのかについて、現在までわかっていることをまとめている。

第七章は発がんと自然突然変異についてであるが、あまり研究が進んでいないためかページ数も少ない。今後の研究に期待したいところである。

第八章は、放射線の生物影響研究として最近特に注目を浴びている５つの対象（DNA損傷の修復と細胞周期の制御、アポトーシス、バイスタンダー効果、放射線誘発遺伝的不安定性、適応応答）について簡単にまとめて述べている。ただ、この章の執筆者は放射線により誘発された長寿命ラジカルによる変異研究の第一人者であるので、それについても書いてもらえれば良かった気がする。

第九章は「生物進化の視点から見たがんに対する生体防御システム」と題している。これは非常に大きなテーマであるが、「なぜ、生物は遺伝子を修復できるのか」という基本的な疑問には必要な観点である。誌面の都合上、免疫系の話ができなかったのは非常に残念である。

第十章にこの本の執筆者の総合討論が掲載されている。非常に面白くここだけ読んでもかなり役立つであろう。ここで「しきい値があるかないかではなくて、きわめてリスクが小さいを強調すべきだ」という意見が述べられている。検証がしにくく、反論も出しやすい直線仮説があっているかどうかにこだわり過ぎて、そのリスクが受け入れられるものかどうか、安全基準として適切かどうかという視点が抜けているのでは、と憂慮している。リスクの説明を国民に理解してもらうことは難しいが、それを避けるがために、国民に「直線仮説の否定に強硬な態度をとっている」と思われてしまうのも得策とは思えない。放射線教育の観点からも一考に値するのではなかろうか？

この本は放射線のリスク学としては非常に有益であると考えられるが、放射線生物学を学んでいない人にとってはかなり難しいと感じるかもしれない。しかし、それだけの価値は十分にある本である。

（269頁、3800円+税、医療科学社
ISBN：4-86003-337-X
発行年月　：　2005年　12月　A4判）

放射線医学総合研究所　坂内忠明

「放射線教育」投稿規定

NPO 法人放射線教育フォーラム発行の論文集「放射線教育」では、広く放射線教育に有益と考えられる内容の投稿論文を募集する。

1. 投稿資格

本誌への投稿資格は特定しない。「放射線教育」の内容及び体裁に合えば、誰でも投稿できるものとする。

2. 掲載する論文について

内容としては、放射線教育、エネルギー・環境教育の進展に寄与すると思われるもので、長さ、新規性により研究報告、ノート、解説、資料、意見、諸報に分かれる。詳細については別紙に定める。原則として未発表のものとするが編集委員会の判断によっては転載を認める。原稿の書き方は別に定める。

3. 論文の審査

編集委員会は、論文の審査を複数の専門家に依頼する。その結果、内容・体裁に問題があると判断した場合にはその旨を著者に伝え、修正を求める。受理できないと判断した場合は、理由を明記して、論文を著者に返送する。

4. 論文の版権

掲載された論文の版権は放射線教育フォーラムに属するが、論文内容についての責任は著者にあるものとする。

5. 論文の別刷

掲載された論文の著者には、表紙付きの別刷３０部を無料で提供する。

6. 論文の送付

印刷用原稿の体裁を備えた論文を下記あて送付する。またフロッピーの同封、もしくは編集委員宛の E-mail による論文の送付を歓迎する。審査の結果、掲載を認められた最終的な論文はプリントアウトをして下記に送付する。毎年 1 月 31 日をその年度の締切とする。

（送付先）〒100-0013　東京都千代田区霞ヶ関 3-3-1　尚友会館 B1F
放射線教育フォーラム編集委員会
（封筒に「放射線教育投稿論文」と朱書する）
E-mail　：mt01-ref@kt.rim.or.jp

論文の分類

研究報告（10 ページ以下）

結果と考察を含み、十分な意義があるもの

a)放射線教育、エネルギー・環境教育の進展に寄与すると思われる、独創性のある研究論文。実験、調査、比較研究なども含む、

b)放射線教育、エネルギー・環境教育の進展に寄与すると思われる教育実践の報告

c)新規に開発した教材・実験方法・器具の報告

ノート（1ー2 ページ）

a)放射線の理論や現象に関する新規の解釈

b)新規性の高い教材・実験方法・器具の報告

c)新規な実験データ及び考察

d)新規に考案した指導法、授業展開法、評価法など

e)放射線教育、エネルギー・環境教育に関する授業実践、イベント実践の報告

総説（10 ページ以下）

原則として編集委員会の依頼によるものとする。

各専門分野の研究について、その方面の進歩の状況、現状、将来への展望などを放射線教育若しくはエネルギー環境問題、放射線及び原子力問題に関連させてまとめたもの。

資料（10 ページ以下）

実験ならびに調査の結果または統計などをまとめたもので放射線教育、エネルギー・環境教育に利用できるもの（含む科学史研究）

意見（1ー2 ページ）

放射線教育、エネルギー・環境教育、放射線に関する制度、教育制度などに関する種々の提案・意見など

諸報（1ー2 ページ）

a)会議報告（放射線、エネルギー・環境教育に関連する会議に参加した報告で、教育的価値が高いもの）

b)訪問記（放射線、エネルギー・環境教育に関連する施設に訪問若しくはイベントに参加した報告で、教育的価値が高いもの）

c)ニュース（放射線、エネルギー・環境教育、理科教育に関連するニュースの紹介）

d)書評（放射線教育、エネルギー・環境教育、理科教育に資する書籍の紹介）

e)製品紹介（放射線教育、エネルギー・環境教育、理科教育に資する製品の紹介）

f)サイト紹介（放射線教育、エネルギー・環境教育に資するホームページの紹介）

「放射線教育」原稿の書き方

放射線教育フォーラム編集委員会
放射線教育フォーラム
〒100-0013　東京都千代田区霞ヶ関3-3-1　尚友会館B1F

［要約］　「放射線教育」の投稿にあたって原稿の書き方を紹介する。

1. 使用言語

使用言語は日本語とする。

2. 使用ソフト及び保存ファイル

原稿はそのまま印刷できるようにMS-Word (Microsoft) で作成する。他のソフトを利用した際は，docファイルで保存する。それができない場合は，文章をtextファイルで，図をJPEG若しくは，GIFで保存する。

3. 用紙

3.1 用紙の設定

用紙はA4を用い，1ページに40字 40行，上下それぞれ30mm，左右それぞれ25mm以上を空ける。意見，諸報は二段組にし，1段に17字入れる。

3.2 枚数制限

研究報告，総説，資料は原則として10ページ以内にまとめる。ノート，意見，諸報は2ページ以内とする。別刷り作成に便利なように諸報以外は偶数ページの原稿となることが望ましい。

4. フォント

日本語のフォントは明朝体，英語はTimesを用い，研究報告，総説，資料の場合，大きさは表題のみ16ポイント太字，その他は10.5ポイントとし，見出しは太字，本文は標準とする。意見，諸報は表題のみ12ポイント太字，その他は10.5ポイントとする。

5. 図表

図表のタイトルは太字とする。図は，図1，図2と，表は表1，表2と番号を振る。図表は上下左右のいずれかの欄に沿う状態で体裁を整える。図のタイトルは図の下に置き，表のタイトルは表の上に置く。表は縦線がない方が望ましい。

表1　図表の書き方

	番号の振り方	タイトルの位置	Word に入らない時の保存形式
表	表1，表2……	表の上	表を送付し，TEXT 若しくは DOC
図	図1，図2……	図の下	JPEG 若しくは，GIF

6. 表題，要約及び見出し

研究報告，総説，資料の場合，1ページ目の第1行目に表題，2行目を空けて，3行目に氏名，4行目に所属，5行目に住所を書く。ここまでは各行の中央にそれぞれ記載する。6行目、7行目を空けて，8 行目から[要約] (50-200 字程度) をつける。所属が複数になる場合、右肩にアルファベットを上付で付け、アルファベット毎に所属と住所をつける。

本文の大見出し，中見出し，小見出しはpoint　system とし，1.，1.1，1.1.1 等のように書く。

意見，諸報の場合は，要約を書く必要がない。

7. 数値，単位，核種の表記

数値は，桁数が多くなる場合は，なるべく 10 の乗数を用いる。

例：370000 Bq　→3.7×10^5 Bq

単位は SI 単位を使用する。古い文献を引用するため，SI 単位以外の単位を用いなければならないときは，その単位を使用した後に，SI 単位に換算した値を示す。

例：検出された放射能は 1 nCi (=37 Bq) であった。

核種の質量数は ^{60}Co，^{131}I のように元素記号左肩に上付きで表記する。

8. 引用文献

引用文献は番号に片かっこを付して本文の右肩につける。

引用文献は下の形式で原稿の最後に一括すること。ただし，文献のタイトル記載については，著者の判断に任せる。雑誌のタイトルは省略形を用いても構わない。

〔雑　誌〕著者名，タイトル，雑誌名，**巻数**，ページ (西暦発行年)

日本語の論文の場合，著者は全員の名前を書くようにする。英語の論文の場合，名前はファミリーネームとイニシャルを用いる。ページは最初のページと最後のページをハイフンで結ぶ。

例) 坂内忠明，霧箱の歴史，放射線教育，**4**，4-17 (2000)

Ban-nai, T., Muramatsu, Y. and Yoshida, S. Concentration of ^{137}Cs and ^{40}K in edible mushroom collected in Japan and radiation dose due to their consumption. Health physics, **72**, 384-389 (1996)

〔単行本〕著者名，タイトル，編者名，「書名」，ページ，発行所，発行地 (西暦発行年)

タイトルと編者名はある場合のみ。

例) 松浦辰男，「放射性元素物語」，154p，研成社，東京 (1992)

渡利一夫，放射性セシウム，青木芳朗，渡利一夫編，「人体内放射能の除去技術：挙動と除染のメカニズム」，7-10，講談社，東京 (1996)

9. その他の注意

1) 用語はなるべく各学会制定の用語を用い，翻訳不能の学術語，日本語化しない固有名詞に限り原語（活字体）のまま用いる。数字はアラビア数字を用いること。

2) 文献でない備考，注などは，*，**を右肩につけ，説明を脚注とし，その原稿用紙の下部に書くこと。

【編集後記】

今回は「放射線に関する歴史」について特集を組みました。初めての企画であり、成功するか心配でした。募集をかけてからあまり時間が無かったにもかかわらず、多くの論文が集まり、編集者一同、喜んでいます。放射線の歴史はまだ110年程度しかありませんが、多くの人の尽力により放射線により得られた知識は、素粒子の大きさから宇宙の大きさまで、時間的には宇宙の黎明から太陽系の終焉までの広がりを見せています。また医学、工学としての利用のみならず、エネルギー源（原子力）としての利用も世界の電力の16%（1999年）を占めています。

ヘレン・ケラーは自伝の中で「人類を進歩させた思想や行いを知ることは、何世紀にもわたる人類の偉大な『心臓の鼓動』を感じることでもある」と書いていますが、今回の特集で、たくさんの鼓動を感じることができたのではないでしょうか？

その少し前の文章でヘレンはこのようにも書いています。「『知は力なり』という。しかし私は、知識は幸福だと思う。」

多くの幸福が、今号でもたらされるのであれば、これ以上の編集委員としての幸福はありません。次号もまた会員の皆様からの多数の投稿論文が、編集委員会に届くのを楽しみにしております。

（坂内　忠明）

放射線教育　Vol. 9, No. 1 (2005)

発行日　2006年3月

発行者　NPO法人放射線教育フォーラム（会長　有馬朗人）
URL：http://www.ref.or.jp

編集者　放射線教育フォーラム編集委員会
小高正敬（委員長）、坂内忠明（副委員長）、今村　昌、大野新一、大橋國雄
菊池文誠、村主　進、堀内公子、村石幸正

事務局　〒105-0001　東京都千代田区霞ヶ関　3－3－1　尚友会館 B1F
放射線教育フォーラム
Tel：　03 – 3591 – 5366,　Fax：03 – 3591 – 5367
E-mail：mt01-ref@kt.rim.or.jp

Japan Association for Promotion
of Science Education and Equipment

明日の地球を担うサイエンティストたち
みんなの好奇心を応援します。

（社）日本理科教育振興協会は、学校教育用理科機器・算数数学機器およびそれらの関連教材の健全な発達と普及を図り、わが国の学校理科教育の振興に寄与する事を目的とする、文部科学省主管の公益法人です。会員数は全国約1,800社、文部科学省委嘱事業をはじめ各種展示会・講習会等、教育用理化機器の普及・啓発に関する幅広い活動を行っています。

協会証紙のついた製品の品質はメーカー保証に併せ、さらに協会の保証が約束されております。理化学機器のご購入にあたっては、信頼ある理振協会会員にご用命ください

社団法人 日本理科教育振興協会

〒101-0052　東京都千代田区神田小川町3-28（昇龍館ビル4F）
TEL. 03-3294-0715　FAX. 03-3294-0716
URL: http://www.japse.or.jp

下北半島の六ヶ所村に、電気のリサイクルのための「再処理工場」が建設されています。

三沢から北へ、ナガイモ畑が続く道を行くと、そこは「むつ小川原工業地帯」…「六ヶ所村」の名前でおなじみの、原子燃料サイクル施設や石油備蓄基地などが広がる、日本のエネルギー事業の中心地です。

日本の電気の約30%は原子力発電でつくられていますが、原子力発電の燃料となるウランも、約85年後には世界的に不足すると予測されています。

そこで、"再利用できる"というウラン燃料のメリットをいかした電気のリサイクル「プルサーマル」の実施を、日本でも進めています。

このたび、この六ヶ所村に建設されている「再処理工場」は、発電に使われた燃料から、まだ使えるウランやプルトニウムをとり出し、新しい燃料(MOX燃料)として使えるようにするための工場なのです。

限りある資源をムダなく利用する…明日への確かな第一歩が青森の地に刻まれたといえるでしょう。

エネルギーから あなたへ

電気のリサイクル

全国10の電力会社でつくる

電気事業連合会

ホームページにもぜひアクセスを…

http://www.fepc.or.jp/

いま、青森で…

リンゴのふるさと青森県は、ナガイモやニンニクの生産でも日本一です。

弘前のサクラ、奥入瀬のせせらぎ、白神山地のブナ林などなど…
自然の美しさもさることながら、青森にはおいしいものがたくさんありますね。
注目すべきは、野菜の出荷量の多いこと。なんと、ゴボウは全国第2位。
ダイコンは第3位。ニンジンは第4位。夏でも涼しい青森の気候が、すぐれた品質のおいしい野菜を育てるのだとか。
第1位の白くて大きいニンニクはスーパーでよく見かけますが
ナガイモが第1位で青森県産野菜のエースとは知りませんでした。
さて、海山の幸を日本全国に出荷している青森ですが、"暮らしのエネルギー・電気"の分野でも日本のために活躍していること、ごぞんじですか。

六ヶ所村

原子力・放射線をテーマに

資源・エネルギ教育、環境教育の題材を提供・・・
－見て、聞いて、触れて、考える、教員のための研修－

文部科学省委託事業
原子力体験セミナー

本セミナーは、文部科学省の委託事業として財団法人放射線利用振興協会が実施する小学校、中学校、高等学校の教職員及びこれに準ずる教育関係者を対象とした研修です。

日本原子力研究開発機構の研究所等を主会場として全国の先生方を対象に開催するコースと、全国各地に出張して１～２日間で開催する「地域コース」「文系コース」があります。内容は、講義、実験・実習、施設見学、ワークショップで構成され、基礎的知識や科学的知識を獲得するコース、資源・エネルギー・環境・防災教育といった「総合的な学習の時間」等へも役立てていただける内容のコースまで、担当教科や興味・関心に応じてご参加いただけます。また、教材も提供しています。

ここでの体験や専門家とのふれあいから、２１世紀を担う児童・生徒達にとって魅力ある教育を探っていただければ幸いです。

- 参加資格：主として小学校・中学校・高等学校の教職員及びこれに準ずる教育関係者
- 参加費用：セミナーの参加に要する旅費、宿泊費等は主催者の規定により支給します。
- セミナーの予定やカリキュラムの詳細については下記にお問い合せください。

RADA

財団法人　放射線利用振興協会
国際原子力技術協力センター　国内研修部
〒319-1106　茨城県那珂郡東海村白方白根２－４
ホームページ：http://www.rada.or.jp/taiken/
E-mail:tokai-taiken@jaea.go.jp

放射線測定の信頼性向上に　作業環境の安全確保に

(はかるくん)

計量法による認定事業者

作業環境測定機関
(放射性物質取扱作業室)

- 放射線測定器の点検校正●
- 放射線測定器の基準照射●
- 作業環境測定●
- 「はかるくん」無料貸出●

高度な計測技術に基づいてそれぞれの業務を行っています。

- ●放射線測定器の特性試験
- ●放射線計測技術の調査及び試験研究
- ●放射線(能)測定
- ●原子力関係要員の研修

財団法人 放射線計測協会

〒319-1106 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4(独立行政法人日本原子力研究開発機構内)
http://www.irm.or.jp/ TEL 029-282-5546 FAX 029-283-2157

社団法人 日本電気協会
JAPAN ELECTRIC ASSOCIATION

日本電気協会は大正10年に設立された、日本で唯一の電気関係総合団体です
電気の生産から消費に関わる幅広い会員を有し、電気関係事業の健全なる発展に寄与しております

電気の今を学ぶために

あなたの知りたいこと
－電気事業について43の質問と答－
本体価格510円＋消費税25円 送料290円 A5判・158頁
一般社会人，学生などを対象に，電気の生産，供給をになう電気事業者(電力会社等)の今日のありのままの姿や当面する諸問題について知っていただくために，Q＆A方式で図表を多く取り入れ，2色刷りでわかりやすく説明しています

東海林のり子の
電気事故リポート
－突然の災害から身を守るために－
本体価格28,572円＋消費税1,428円 VHS・18分
災害が起こった時，あなたは冷静に対処できますか？このビデオは，災害で起こる電気事故から日常生活まで，家庭で必要な電気安全知識をわかりやすく紹介しています。テレビでおなじみの東海林のり子さんがリポートします！

他にも多数の電気関係書籍・ビデオを発行しております

お問い合わせは 出版部 03－4283－2002
または下記ウェブサイトから！

電気の今を知るために

電気新聞は電力，電機，情報通信分野における日刊専門紙です
原子力関係も最新のニュースを提供しています

購読のお申し込みは 新聞部 フリーダイヤル 0120－39－1551
または下記ウェブサイトから！

購読料
1ヶ月 3,990円
(本体価格3,800円＋消費税190円)

www.denki.or.jp

インターネットで原子力のことを学ぼう！

原子力図書館 げんしろう

原子力百科事典 ATOMICA

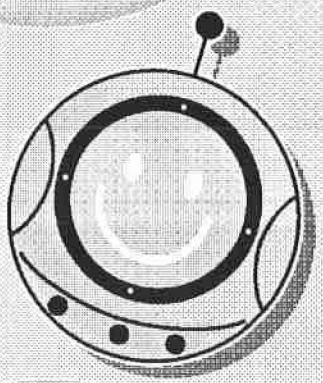
収録数2500件を超すデータベース形式の百科事典です。世界の原子力や放射線など最新情報を豊富な図版とともにていねいに解説します。

文献データベース NUCLEN

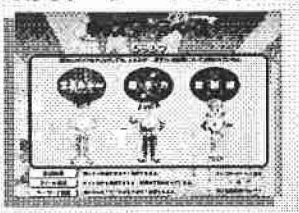
一般から専門家にも役立つ収録数63万件を超す文献データベースです。世界中の原子力やエネルギー関係の文献に日本語の要約をつけて解りやすくしています。

もっと知りたい
もっと考えたい
原子力のこと

原子力に関連する最新情報、さまざまなデータ、解説、クイズなどをインターネットで提供しているバーチャル図書館です。



エネルギー・原子力・放射線の3つのテーマについて小学生向けにわかりやすく解説してあるデータベースです。



調べ学習にも最適!! キッズデータベース

原子力・放射線・環境・エネルギーをテーマに小・中学生でも楽しめるクイズです。

君は、どこからチャレンジする? げんしろうクイズ

http://mext-atm.jst.go.jp

●「原子力図書館げんしろう」は、文部科学省から委託され科学技術振興機構(JST)が行っている原子力情報普及業務です。

独立行政法人
科学技術振興機構 文献情報部 受託出版課
TEL:03-5210-4962 E-mail:helpdesk@mr.jst.go.jp

三菱重工

地球の熱さまし。
温暖化による“発熱”によく効きます。

いま、地球が"温暖化"という病気にかかりかけています。早めに治すには、省エネルギーや新エネルギーとともに、CO_2を排出しない原子力がよく効きます。美しい地球を健康のまま未来にのこすために、私たちは、これからも安全で信頼できる原子力発電プラントを提供してまいります。

STOP! 温暖化

三菱PWR原子力発電プラント

三菱重工業株式会社

本社　原子力事業本部　〒108-8215　東京都港区港南2-16-5　☎(03)6716-3111　支社　関西 / 中部 /九州 /北海道 /中国 /東北 /北陸 / 四国

東京書籍　〒114-8524 東京都北区堀船2-17-1
TEL.03-5390-7331　FAX.03-5390-6014
http://www.tokyo-shoseki.co.jp　東書Eネット…http://ten.tokyo-shoseki.co.jp

日本の原点と未来を求めて
教育と文化シリーズ 全4巻

各巻B5判／4色刷　定価：各巻本体1500円（税別）

第2巻 探究のあしあと
霧の中の先駆者たち―日本人科学者

世界に先駆けた日本人科学者・技術者たち20余名の発見や発明の影に隠れたエピソードを豊富に掲載。科学がもっと楽しくなる1冊。

■著者：結城千代子（埼玉大学講師）／
田中幸（慶応義塾高等学校講師）

第3巻 子どもに教えたい技術の話
―技術立国日本の肖像

日本の産業，経済を支えてきたものづくり。寝食を忘れ，ものづくりに挑戦し続けた人々の，開発の背景や技術の仕組みをわかりやすく解説。21世紀を担う中学生にぜひ読んでもらいたい1冊。

■編著：「子どもに教えたい技術の話」編集委員会

新 観察・実験大事典 全4編

「新 観察・実験大事典」編集委員会 編
定価：各編12,600円(税込)　各編 全3巻(分売不可)

●物理編　●生物編
●化学編　●地学編

ふたたび…ボトルに生まれ変わってお会いしましょう。

電気にも〝リサイクル〟が求められています。

スイッチひとつで、電気は、暑い夏を涼しく快適にしてくれる素晴らしい存在ですね。しかし、その電気をつくるためのエネルギー資源を日本は海外から買わなくてはなりません。日本の電力の約1/3は原子力によってつくられていますが、原子力発電の燃料であるウランには、〝再利用できる〟というメリットがあります。発電に使われた燃料から、まだ使える部分をとり出し再利用する…

電気も〝リサイクル〟の時代を迎えようとしています。

ペットボトルは
使い終わったら…
①キャップをはずして
②中をすすいで水切りし
③ラベルをはずして ④横につぶし
⑤市町村の指定収集日に出す

エネルギーから
あなたへ

全国10の電力会社でつくる
電気事業連合会

ホームページにもぜひアクセスを…
http://www.fepc.or.jp/