RADIATION EDUCATION

放射線教育

特別寄稿：2008年のノーベル物理学賞受賞の栄誉に寄せて
特　　集：我が国の原子力・放射化学研究の夜明け

2008

VOL. 12 NO. 1

放射線教育フォーラム
Radiation Education Forum

放射線教育
Radiation Education
Vol. 12 No. 1

目次

【巻頭言】 1__単眼複眼 長谷川圀彦

【特別企画】 3__特別寄稿・特集掲載にあたって 編集委員会

【特別寄稿】 5__物理法則における対称性の破れに関する研究の跡をたどる
—2008年ノーベル物理学賞の栄誉に寄せて— 玉垣良三

【特集】 17__核分裂連鎖反応50周年に思う 伏見康治

25__日本における放射化学の黎明と進展（1907-1957） 斎藤信房

【原著論文】 33__放射線教育の立場から地球温暖化を考える 大野新一

41__ルミネッセンス観測は放射線教育に使えるか？ 橋本哲夫

51__原子衝突と放射線作用
—自然のしくみを理解するための加速器利用— 大野新一

【解説】 61__放射線防護体系の進化 金子正人

67__新エネルギーと原子力 —持続可能な未来のために— 工藤博司

【実践報告】 75__青森支部2008年度の活動の記録 笹川澄子

85__放射線教育の実践と課題 —安全と安心のはざ間に揺れるもの— 大島 浩

【論説】 93__「放射線の性質と利用」学習の対象となる基礎知識について 田中隆一

103__基礎から考える核分裂片
—高レベル放射性廃棄物に関する閉塞状態突破のために— 荒谷美智

【ノート】 109__放射線検出器により時間tの測定で計数ゼロを得たときの入手情報
加藤和明

113__「放射線教育」投稿規定、原稿の書き方
118__編集後記

発行：2009年3月31日， NPO法人 放射線教育フォーラム
〒105-0003 東京都港区西新橋3-23-6 白川ビル5F
Tel: 03-3433-0308 FAX: 03-3433-4308
E-mail mt01-ref@kt.rim.or.jp, HP：http://www.ref.or.jp

「放射線教育」Radiation Education
Vol.12 No.1, p. 1 - 2 (2008)

【巻頭言】

単 眼 複 眼

長谷川 圀彦

NPO 法人放射線教育フォーラム理事・副会長

大変、変転、変化、異変 ・・・・など、昨年来の流行漢字、変な漢字が溢れ、景気が大変なときを迎えている。当初は、アメリカのヴァーチュアルな資産形成分が潰れた現象であると、たかを括っていたが、ビックスリーの崩壊、円高破滅、企業の大量リストラなどの社会的・経済的問題としてメディアによって報道され、100年に一度という経済危機に直面していることを実感している。

このような情況をかかえ、人類は、自然と人間との跛行の関係をはらみながら、ときを刻んでいる。今日的問題として、人口問題、環境問題、食糧問題、エネルギー問題などが、相互に関連し合いながら、それぞれ個々に解決を迫る難問をかかえている。なかでも、エネルギー問題と環境問題は、緊急に科学的解決をせまられている問題である。これらの問題の解決を図るには、教育が基盤となることは云うまでもない。

身近な教育情況を振り返ってみると、２００２年度から学校五日制が始まり、同時に新学習指導要領にもとづいて教育が行われた。しかし当時から、この教育改革によって生じる学力低下を懸念する声が多方面から出されていた。また、放射線教育フォーラムは、２００１年度から、小・中・高校の教職員を対象とした「エネルギー・環境・放射線セミナー」を実施し、「ゆとりのなかで生きる力」の育成を求めるとともに各教科の横断的、総合的な指導を推進するための「総合的学習の時間」の創設が盛り込まれた。教育分野において、特にそうであると考えられるのは、教育現場を重視することによって物事の本質を見抜き、現象の変化を感じ取ることができ、問題の解決の鍵を見出せると考え、セミナーの現場での資料提供や題材提示

を行ってきた。しかし、「ゆとり教育」や「総合的学習の時間」は、時代に応じ学力低下の理由から薄れつつあるのは残念である。

ところで、１９９４年に設立された放射線教育フォーラムは、２０００年に NPO 法人の認証を受け、今年で設立１５周年を迎えた。この間、エネルギー・環境・放射線・原子力の正しい知識の普及させることを目的として諸活動を行い、実績を積み重ねてきた。この機会に、設立記念事業として、原初にさかのぼって現在までの歩んできた道のりを辿りながら、今後の放射線教育のあり方について討論会をもつのも一法と考えている。学術のみならず教育の分野においても、内容の高質化にきわめて有効な改革の手法として、問題点の指摘だけでなく、原因や理由の分析、改善策の研究など、いわゆる CAPD（問題抽出　Check,　原因分析　Action,　改善計画　Plan,　改善策実施　Do）の展開を行うことが望まれる。

（静岡大学名誉教授）

『放射線教育』 Radiation Education
Vol. 12 No. 1, p. 3 - 4 (2008)

【特別企画】

特別寄稿「2008年のノーベル物理学賞受賞の栄誉に寄せて」の掲載にあたって

編集委員会委員長　堀内公子

2008年秋、我が国はノーベル賞受賞者の報に沸き立ちました。物理と化学二部門で四人の方の受賞が報じられたのです。特に物理学は1949年日本最初のノーベル賞受賞者湯川秀樹博士の「中間子論」の流れをくむ「素粒子」の分野での快挙で、南部、小林、益川の三人の先生方が受賞されました。

近年の理科学離れを憂いていた編集委員会ではこのビックニュースを学校教育の場で何とか利用できないかと考え、湯川先生から繋がる「素粒子」関連の一般向け解説を「放射線教育」12巻に掲載する事を話し合いました。そして執筆は湯川先生の教えを受けられた播磨良子監事にお願いする事になりました。その後、播磨先生から、より適切な執筆担当者として京都大学名誉教授　玉垣良三先生が推薦され今日の運びとなりました。

理論分野は実験分野と違って将来霧箱のように学校教育の現場で楽しく実践に利用される機会はそうあるとは考えられません。専門家によって一般向けに取りまとめて頂いたとは言っても誰もが片手間によんで理解できるものではありませんが、最先端科学の総説が「放射線教育」に掲載され得たことは非常に喜ばしいことと考えます。幅広い会員層からなるフォーラム会員各位が本論文を通して原子核物理学に通じる「素粒子」に馴染んで下さると同時に一つの理論が結実するまでにいかに多くの理論が土台になり、長い時間がかかっているのか等を感じ取って頂ければ幸甚です。

ご執筆の労を取られました玉垣良三先生に厚く御礼申し上げます。

特集「我が国の原子力・放射化学研究の夜明け」にあたって

(伏見先生・斉藤先生の原稿転載について)

編集委員会副委員長　大野新一

放射線教育フォーラムの顧問として私たちを長年にわたって指導して来られた伏見康治先生は2008年5月8日に、また斉藤信房先生は2007年12月19日にお亡くなりになられました。両先生の業績の一端については、ニュースレター No. 40、および No. 41 でご紹介致しましたが、「放射線教育」誌でもお二人の先生を偲ぶために、膨大な数の講演録・論文の中から放射線教育

フォーラムの会員にとって特に興味を持って読んでいただけそうなものを各1編ずつ編集委員会で選び、それを転載することにしました。

伏見康治先生「核分裂連鎖反応50周年に思う」Lynx Lyceum 通信 No. 24 (1993)
斉藤信房先生「日本における放射化学の黎明と進展（1907-1957）」第50回放射化学討論会予稿集(2006)

伏見先生の原稿は、1993年2月15日に開催された「第31回:原子力総合シンポジウム」における講演に手を加えられたものとのことです。実は、このシンポジウムは50年前シカゴ大学の構内でE.フェルミが原子核分裂の連鎖反応実験に成功し、いわゆる原子力時代の幕開けとなってからの50周年を記念して開催されたものでした。連鎖反応実験から数年後の1945年には原子爆弾が投下されています。それからさらに12年後の1957年には、茨城県東海村の日本原子力研究所にアメリカから研究用原子炉（JRR-1）が輸入され、日本の原子力研究がスタートしました。核分裂のニュースが報告された1939年から原子炉が輸入されるまでの間、日本におけるこの分野の研究の様子の多くは知られていません。伏見先生の上記のご講演は日本の原子力時代の夜明け時代を伺わせてくれます。なお、日本原子力学会誌 Vol. 34、No. 11 (1992）の巻頭言にも「原子炉が誕生して50年」と題して、また同誌 Vol. 27, No. 1 (1985) の巻頭言にも「彦坂先生の知られざる業績」と題して伏見先生は執筆されておられます。そこには50年前に共に研究に励まれておられた彦坂忠義先生のことが紹介されています。そして同じく日本原子力学会誌の Vol. 34, No. 11 の号には彦坂先生の「原子核エネルギー利用の一方法に就て」（1944年11月）の論文復刻版が何人かの方の解説と共に掲載されています。

一方、斉藤先生は、19世紀末のベクレルによる放射能の発見やキュリーによるポロニウム・ラジウムの発見に刺激を受けた日本の科学者たちの動向と研究への取組み、原爆投下後の広島における化学分析、理研サイクロトロンからの高速中性子とウランとの核反応の研究、1950年に日本に最初に輸入されたアイソトープの利用研究、ビキニ環礁での核実験の影響など、半世紀にわたる日本の放射性元素の研究の有様が丁寧に語られています。

両先生の論文は、日本の原子力研究開発・放射線・アイソトープ利用の研究の発展を知る上でたいへんに貴重なものと考え、放射線教育フォーラム会員諸氏の便宜のためにここに掲載しました。快く転載の許諾を与えてくださった「Lynx Lyceum 通信」編集部ならびに日本放射化学会に対して深甚の謝意を表します。

「放射線教育」Radiation Education
Vol.12 No.1, p. 5 - 16 (2008)

【特別寄稿】

物理法則における対称性の破れに関する研究の跡をたどる —２００８年ノーベル物理学賞の栄誉に寄せて—

玉垣良三
京都大学(名誉教授)
京都市左京区上高野前田町26－5
(2009年2月24日受理)

[要旨]2008年のノーベル物理学賞は、物理法則における対称性の破れに関する研究業績に対し、日本出身の南部陽一郎博士及び日本の小林誠博士・益川敏英博士に授与された。ここでは、素粒子物理学の基礎に位置する対称性の問題において受賞対象となった研究への足跡をたどりつつ、業績の意義について述べる。

1．まえがき

受賞理由は、南部博士については「素粒子物理学における自発的な対称性の破れの機構の発見」、小林・益川両博士については「クォークが自然界に少なくとも三世代以上あることを予言する対称性の破れの起源の発見」である。お三方の受賞記念のノーベル講演のタイトルは参考文献の最初に挙げておく [1, 2, 3]。編集委員会から伺った趣旨は、湯川博士の中間子論から今回の受賞対象になった業績の結実に至る過程を踏まえ、その意義を分かりやすく解説する、ということであった。隣接分野の原子核物理の理論研究者であった自分は、放射線と素粒子物理の両分野の中間に位置し、素粒子物理分野の発展に息吹きと興味を感じつつ過ごしてきたので、十全でなくても理解の橋渡し役としていささかの貢献が出来るかと考え、本稿を書くことにした[1]。　素粒子物理学の研究で多用される用語の説明が必要なので、先ずそれから始める。

1.1 四つの力　1930 年代に人知が原子核の世界に至ったとき、今まで知られていた重力、電磁力の他に、新たな力—原子核を作る強い力と原子核を変えるベータ崩壊をもたらす弱い力—が登場する。これから問題にする微視的世界（原子、原子核、素粒子、… ）において、この基本になる四つの力の強さの程度を無次元の量で比べる。

強い力 (SI)	電磁力	弱い力 (WI)	重力
1	10^{-2}	10^{-5}	10^{-39}

電磁力の強さの程度を微細構造定数（$e^2/4\pi\hbar c \simeq 1/137$) の桁数で表わし、それとの比較で示した。(e は電気素量、$\hbar$ = プランク定数 $/2\pi \simeq 1.05 \times 10^{-34}$J·s, c は光速である）重力は微視的世界では非常に弱いので、ここでは考慮からはずす。素粒子に関する問題では、主に強い力と弱い力が関与する。素粒子物理では「力」よりは「相互作用」という用語がよく用いられるので、以後はそれにならう。本稿では、強い相互作用 (strong interaction) を SI、弱い相互作用 (weak interaction) を WI と略記する。

1.2 対称性と保存則　ここでいう対称性とは何だろうか。私たちが日常経験する世界（巨視的世界）では多くの対称でない事例を見聞する。時間・空間の等質性から、原点の取り方を変えること（系全体の一様な平行移動）はなんら系に変化を与えないから、系のエネル

[1]科学論文の慣行にならい、以下では敬称は書かない。

ギー・運動量は保存される。また空間の等方性から、系全体の回転（座標系の回転という変換）では、その角運動量が保存される。一例として太陽の周りを廻る一つの星（惑星、彗星、など）の運動を考えてみる。相互作用は球対称な万有引力ポテンシャルで与えられるから、角運動量保存則により、軌道面は角運動量に垂直な面になり、星はその面上を一定の面積速度で運動する。対称性に由来する保存則が与えるのはここ迄である。非対称に見える多様な軌道は初期条件の違いからくる。いわば偶然による。法則自身における対称性の問題は、それがもたらす保存則に関する問題と言い換えるほうが分かりやすい。巨視的世界を記述する古典物理学では、常に連続量を扱い、重要な保存則は上記のエネルギー、運動量、角運動量に関するもの、即ち連続変換に関する法則の対称性に由来するものである。

1.3 量子力学系における不連続変換と対称性 量子力学で記述される微視的世界では、上記の保存則は勿論常に成り立つが、加えて不連続変換に対する対称性が重要になる。不連続変換として空間反転を考える。これは空間ベクトルの $\mathbf{r} \to -\mathbf{r}$ の変換であり、鏡映変換 (= 右手系 $\leftrightarrow$ 左手系) ともいう。空間反転に関する対称性は、パリティ (P) の保存則を与える。パリティP の固有値は $P = +$（偶)、$P = -$（奇）の二つの値をとるので、パリティは偶奇性とも呼ばれる。しばしばパリティの P をとって空間反転を P 変換と略称する。空間反転における対称性の破れは 1956 年 WI が関与する過程（ベータ崩壊など）で初めて認識された。パリティ非保存の発見である。同様な不連続変換として、時間反転の変換（T 変換と略記)、粒子 $\leftrightarrow$ 反粒子の変換（荷電共役変換とも言い、C 変換と略記）があり[2]、 WI はこれらの変換においても対称性が破れている。弱い相互作用が関与する過程は不連続変換での対称性の破れの問題の主舞台であり、小林・益川理論はここに関係する研究である [4]。

1.4 対称性の自発的破れ 電磁相互作用や核力をはじめとする SI では、上記の不連続変換でも対称性が保存される。ここでは対称性の破れに無縁かといえばそうではない。電磁力で構成される物質（電子が主役の物性系）における 40 余年も未解決の難問であった超伝導の解明が 1957 年になされたことは、物性分野での画期的な進歩であったのみならず、そこで発見された論理は物理分野に大きい影響を与えた。特に、南部によって超伝導の本質はゲージ変換（粒子数保存に関係する）対称性の自発的破れであることが明らかにされ [5]、更に SI をするハドロン系の基礎論に論理が展開された [6]。こうして南部理論は素粒子物理の新たな展開への礎石となったのである。

1.5 同種粒子の対称性 量子力学には同種粒子（区別のつかない粒子）の入れ替えという変換に対する対称性がある。原子を構成する Z（原子番号）個の電子は同種粒子である。電子は一つの量子状態に 1 個しか入れない規則（パウリ排他律）に従う。これは、元素の周期表の元になっている法則である。この性質を持つ量子をフェルミ粒子（フェルミオン）と呼ぶ。原子核を構成する陽子、中性子もフェルミ粒子である。他方、一つの量子状態に何個でも入れる粒子はボーズ粒子（ボソン）と呼ばれる。光子、α 粒子、中間子はボーズ粒子である。巨視的な数のボソンが一つの量子状態を占める場合をボーズ凝縮という。上記のフェルミ粒子、ボーズ粒子という性質は常に不変に保たれ、フェルミ粒子系（ボーズ粒子系）の波

[2]反粒子：ディラックの相対論的電子理論では、正のエネルギーと対称的に負のエネルギーが現れる。フェルミ粒子のパウリ排他律に従い完全に電子が負のエネルギー状態を占め、正エネルギー状態に電子がない状況を真空とみなす。ある負のエネルギー状態を占めていた電子が 1 個欠けた状態は、電荷，エネルギー、運動量の符号を変えた粒子が現れたと解釈できる。これを反電子（陽電子）という。同様に他のフェルミ－粒子についても反粒子を考える。通常反粒子を表わすのに粒子記号の上にバーを引く。但し、電荷をもつ粒子では逆符号の電荷で表わすことが多い。

動関数は同種粒子の任意の２個の入れ替えに対して反対称（対称）であると記述される。この同種粒子の対称性 (統計性ともいう) は量子力学で記述される系の基本的性質である。

2. 湯川中間子論

2.1 素粒子物理を拓いた中間子論　中性子の発見 (1932) によって原子核が核子（陽子 p、中性子 n の総称）からなる量子多体系であることが確立した原子核物理の黎明期、核力の成因とベータ崩壊の謎が大きな問題であった。湯川は、電磁力が電磁場の量子である光子 (γ) が荷電粒子間に交換 (図 1 a 参照) されて生じる記述を、場と粒子の間に広く成り立つ場の量子論の核心ととらえ、核力を生む場の粒子（湯川ははじめ U と記したが後に π 中間子と名がつく）を導入し、SI と WI の難問を一挙に解決するべく中間子論を提唱した。当時阪大講師、27 歳の若さであった。核力の到達距離 $\lambda_\pi \sim 2\mathrm{fm}$ が中間子の質量に反比例する関係；$\lambda_\pi = \frac{\hbar}{m_\pi c}$ に着想し、中間子の質量 m_π を約 100MeV と推定した (fm$\equiv 10^{-15}$m) [3]。

中間子論では、陽子 p と中性子 n の間に働く核力は電荷をもつ中間子 $\pi^\pm$（ボーズ粒子）の交換により生じると考える：$\mathrm{n} \leftrightarrow \mathrm{p} + \pi^-$, $\mathrm{p} \leftrightarrow \mathrm{n} + \pi^+$ (図 1-b)。ベータ崩壊は核子より放出された中間子が電子と中性微子（ν; ニュートリノ）に崩壊する過程とみなした（図 1-d)。ニュートリノ ν は、ベータ崩壊の説明のためにパウリが仮説的に導入した粒子で、質量はきわめて小さく電荷をもたない。反応式で書けば、

$$\beta^- : \mathrm{n} \to \mathrm{p} + \pi^- \to \mathrm{p} + \mathrm{e}^- + \bar{\nu}, \quad \beta^+ : \mathrm{p} \to \mathrm{n} + \pi^+ \to \mathrm{n} + \mathrm{e}^+ + \nu,$$

である。ここで、e^+ は電子 e^- の反粒子、$\bar{\nu}$ は ν の反粒子である。n は p より質量（エネルギー）が 1.25MeV 高く、単独でも β^- の過程が起こるが、p 単独では β^+ は起こらない。ベータ崩壊する n が安定に原子核中に存在するのも、原子核中では β^+ の過程が起こるのも、そうなることが原子核のエネルギーとして有利だからである。

湯川自身が言ったように「中間子論は当時の（核物理で新たに登場した SI と WI の）統一理論であった」のである。中間子論は、原子核を構成する核力の成因を明らかにしたと共に、上記の過程で現れるすべての粒子は常に生成・消滅により変化するという視点を開いた。これが素粒子の本質であり、その意味で中間子論は素粒子物理を拓いたと言える。

核力は中間子交換によるとの視点はそのまま現在に引き継がれ、原子核を構成する力を与える。他方，ベータ崩壊を含む WI は湯川の考えたような記述でなく、フェルミ型相互作用（図 1-e）が (弱電磁統一理論が出る 1970 年頃まで) 専ら用いられることになった。

2.2 二中間子論　1937 年に湯川の予言に対応する質量の粒子（宇宙線 “中間子” と呼ばれた、現在の μ 粒子) が観測された。研究が進むにつれて湯川中間子と同定するのは困難になった。この困難は坂田、井上の二中間子論により解決の方向が示された (1942)：宇宙線 “中間子” をフェルミ粒子とし、核力中間子 π の崩壊で生じた粒子と考えたのである。この二中間子論の考えは、戦後パウエルらの観測により確認され（1947), 湯川中間子は実験的に確証された。そして、核力中間子に π（パイ中間子), 宇宙線 “中間子” に μ の記号がつけられ、この記法が定着した。従って、$\pi^+ \to \mu^+ + \nu$, $\pi^- \to \mu^- + \bar{\nu}$ である。μ^+ は μ^- の反粒子である。$\mu^\pm$ は $e^\pm$ を重くしたような粒子であり、電子と並ぶレプトンの一種である。

---

[3] 本稿で用いるエネルギーと長さの単位：エネルギーの単位は、MeV=10^6eV=1.602x10^{-13}J, または GeV=10^9eV を用いる。質量の数値は c^2 をかけた静止エネルギーで表わす。核子の質量は約 0.94GeV/c^2 $\simeq$ 1GeV/c^2 である。長さの単位としては、フェムトメートル fm=10^{-15}m を用いる。この単位では、核子半径は $\simeq$ 0.8fm。換算には、$\hbar c \simeq 197.3\mathrm{MeV \cdot fm}$ を用いると便利である。

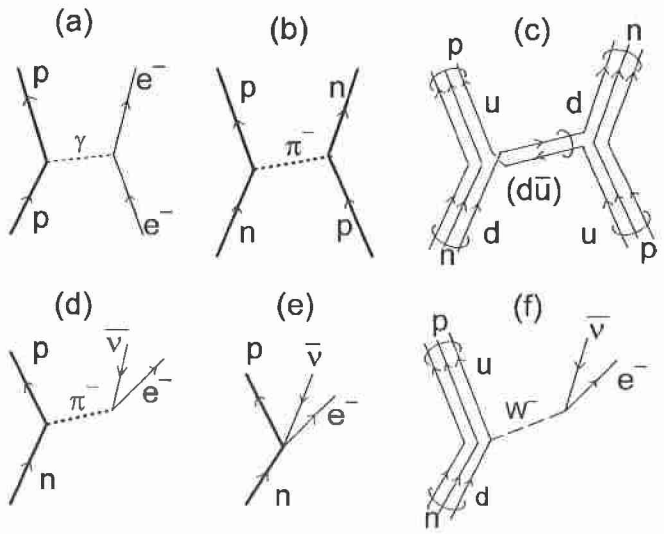


図 1: 相互作用過程の概念図（(a) 以外は負電荷の移行の場合）。矢印は時間経過を（下から上へ）、太線はハドロンを示す。(a)：電磁力を生む光子 (γ) 交換の例示。(b)：湯川中間子論による π^- 中間子交換が核力を生む過程。(c)：対応する現代的視点からみた図。同じ向きの 3 線で示す核子（n, p)、逆向きの 2 線で示す π^- 中間子はクォークからなる複合粒子であり、輪は複合粒子内部でクォークが閉じ込められている状況を示す。(d)：湯川中間子論による β^- 崩壊の模式図。中間子 π^- が媒介役をする。反粒子（ここでは $\bar{\nu}$) は逆向き（上から下へ）の矢印で示す。(f)：対応する現代的視点から見た β^- の模式図で、媒介役の粒子は弱ボソンの W^- である。(e)：W^- の波線を一点まで縮めると, (f) はこの図になる。

2.3 パイ中間子 (π) の性質 その後核力の研究から、p-p, n-n 間にも同様な核力が働くことから中性の π^0 の存在が明らかになり、π は (π^+, π^0, π^-) と三つ組をなす。p と n は質量は殆ど同じで、スピンも同じ $\pm\frac{1}{2}$ をとるので、同じ核子の荷電が違った 2 重項とみなせる。スピンにならい、荷電スピン（アイソスピン）と呼び、p(n) を $I = \frac{1}{2}$, $I_3 = +\frac{1}{2}(I_3 = -\frac{1}{2})$ の状態とみなす。核子の電荷は e を単位に、$Q = (I_3 + \frac{1}{2})$ と表わされる。この言い方によれば、π は $I = 1$、成分 $I_3 = +1, 0, -1$(荷電は $Q = I_3$) の 3 重項をなす。アイソスピンは SI では良い近似で保存されるので、活用される量子数である。

1950 年代に入ると加速器により π が人工的に生成され、π の固有の性質が明らかになる。即ち、スピン $J = 0$、パリティ $P = -$ である。今後粒子のスピン・パリティをまとめて $J^P = 0^-$ のように表わす。これをギスカラーの粒子とよぶ。あとで π のギスカラー性と小さい質量（$m_\pi \simeq 140$MeV）は重要な意味をもってくる。以後になって新しく登場する中間子はもっと質量は大きい。同様な記法で、他の型の中間子は、$J^P = 0^+$ はスカラー粒子、$J^P = 1^-$ はベクトル粒子、$J^P = 1^+$ はギベクトル粒子と呼ばれる。

2.4 現代的視点から見た湯川中間子論 先取りする形になるが、湯川中間子論の発想と現在の素粒子物理の到達点（標準理論といわれる）の視点を比較する（図 1 参照)。核力については、湯川中間子論で素粒子と考えられていた核子 (n,p)、中間子（図 1-b) は、クォークと呼ばれる基本粒子の複合粒子である（図 1-c)。そのクォークは単独で外には出ない（“閉じ込められている”）ので、それを輪で示した。しかし、図 1-c の素過程は、図 1-b で n→d,p→u と置換えたものになっている。ベータ崩壊についても、(図 1-d) で同様の置き換

えと $\pi^- \to W^-$ とすると、現代的視点の（図 1- f) の素過程が得られる。WI もボーズ粒子が媒介するという湯川の発想が内容が変わって甦ったとも言える。WI を媒介する W（弱ボソンと呼ばれる）は大質量なのでその到達距離は極端に短く、一点で相互作用すると見ると、フェルミ型相互作用と呼ぶ (図 1-e) となる。(移行電荷が違う過程は、n⇌p, $\pi^- \to \pi^+$, u⇌d, $W^- \to W^+$ の置換えをすれば得られる。)

3. ハドロンの複合模型—坂田模型からクォーク模型へ—

ハドロンとは SI をする粒子の総称である。レプトン（軽粒子の意味）は WI をし、SI をしない粒子の総称である。光子は荷電をもつならハドロンともレプトンとも相互作用する。1950 年代に入ると宇宙線の観測に " 奇妙 " な粒子が続々登場する。このような状況を含め今まで述べたことの要点をまとめると以下のようになる。これから度々登場する新粒子 Λ と K は書き加えた。右端の EMI は電磁相互作用を示す。ニュートリノに添え字を付した。

ハドロン	重粒子（バリオン）; p,n,Λ, $\cdots$	フェルミ粒子	$J^P = \frac{1}{2}^{\pm}, \frac{3}{2}^{\pm}, \cdots$	SI,WI, EMI
〃	中間子（メソン）; $\pi, K, \cdots$	ボーズ粒子	$J^P = 0^{\pm}, 1^{\pm}, \cdots$	SI,WI,EMI
フォトン	光子 ; γ	ボーズ粒子	$J^P = 1^-$	EMI
レプトン	電子族 (e, ν_e), μ 族 (μ, ν_μ)	フェルミ粒子	$J = \frac{1}{2}$	WI, EMI

3.1 NNG 則　新粒子は高い頻度で作られるが、それにもかかわらず寿命が長い。その理解に、量子数ストレンジネス S を導入し、現象論的な選択則（NNG 則、1953）が示される。それは次の式で表わされる。ハドロンのアイソスピンの大きさを I とし、成分 $I_3 = I, I-1, \cdots, -I$ で与えられる $(2I+1)$ 個の荷電多重項に属するハドロンの電荷 Q を

$$Q = I_3 + (B+S)/2 \quad (B \text{ はバリオン数。核子は } B=1, S=0,\ \pi \text{ は } B=0, S=0)$$

と表わす。S は SI では加算的に保存し、WI では絶対値が 1 まで変化する。相互作用の強（弱）に対する S の変化の無 (有) が NNG 則である。

3.2 坂田模型の提唱—階層性の視点から—　これらの粒子をすべて素粒子とみなすには余りに数が多い。1955 年坂田昌一（名古屋大学）は NNG 則の成立の根拠を問う課題意識から、ハドロンの複合模型を提唱する。背景には坂田が「階層性の論理」と言った思想があった[4]。

坂田はこの思想を研究方針として具体化する際、原子核物理の黎明期における中性子の発見が果たした役割を想起し、NNG 則における S の担い手として Λ 粒子（$B=1,\ S=-1,\ J^P = \frac{1}{2}^+$）を位置づけた。基本粒子として (p,n,Λ) を選び、これとその反粒子を用いてハドロン系（重粒子、中間子）を構成するという着想であった。坂田模型のすぐれた点は、NNG 則の起源を見事に理解できる点である。坂田はこれを「形の論理を物の論理へ」と言った。

提唱当時外国では（特に米を中心に）SI の理論として分散公式を用いる研究が盛んで、ハドロンはどれが主でどれが従とは言いがたく互いに他を作る（“particle democracy”）とい

[4]坂田は晩年ＮＨＫラジオの「私の古典」という番組で「エンゲルスの自然弁証法」をとりあげ、「私の 40 年にわたる研究生活の中でにつねに珠玉のような貴い光をなげかけてくれた」と言い、その中の「現代の原子論の特徴は、物質が単に不連続だと主張するのではなく、これらの不連続部分、原子—分子—物体—天体などが一般的な物質の諸々の質的な存在様式を制約する結節点だと主張している点にある」を強調した。また、湯川中間子論の展開段階（第 3,4 論文）で共に協力者であった武谷三男の「自然の認識は、現象論—実体論—本質論の三段階をへて行われる」という「三段階論」に共感していた。更に、研究上の討論は何のわだかまりもなく自由に行われるべきと考え、研究室民主主義の重要性をつとに強調した。

う視点からの研究が潮流をなしていた。当然日本でもその影響は強かった。日本においても坂田模型に対してはかなり批判的な空気が強かったのである。

3.3 坂田模型の成功と困難 坂田模型はハドロンを以下のように記述する。以後、説明の便宜上、基本粒子を基本3重項（fundamental triplet）の意味で、t と書く。即ち、t≡(p,n,Λ)。中間子は t とその反粒子 $\bar{\mathrm{t}}$ の結合状態（複合粒子）、$\mathrm{t}\bar{\mathrm{t}}$ である。重粒子は、基本粒子そのもの場合と基本粒子に中間子の“着物”を着た複合粒子 $\mathrm{t}(\mathrm{t}\bar{\mathrm{t}})$ の場合がある。

Λ の特殊性の強調と共に、原子核では n と p の同質性から有用な規則性が得られたことから、基本3粒子 (p,n,Λ) の同質性から引き出される性質に着目する視点が小川修三（当時広島大学）から提起され、群論を用いた状態分類の研究が進められた (1959)。こういう研究から π 中間子の同族となるエネルギーが最低の中間子の一群—ギスカラー8重項—が作られることが示され、実験とのよい対応が示された：その中で η 中間子 ($I = 0$ 以外 π と同じ) は坂田模型で初めて予言され、後に実験で確認された。複合模型の現実性が示された。

他方、核子と同族の重粒子（バリオン）については、実験が示す最低の状態群として $J^P = \frac{1}{2}^+$ の8重項を与えることは、いろいろの試みがなされたが困難であることがわかった。こういう状況で、坂田は基本粒子について、(p,n,Λ) をも複合粒子とする元の基本粒子（元 p、元 n、元 Λ) の探求を次の研究課題にするという視点を述べている (1963)。階層性の言葉で言えば、すべてのハドロンを複合粒子とし、基本粒子をハドロンよりもう一層深いレベルに位置づける視点である、即ち、—原子—原子核—ハドロン—基本粒子 · · · である。

3.4 Eightfold way（八道説） 重粒子にも8重項を与えるようにするには、はじめから8重項の表現を指定する方法が最良と思われた。Gell-Mann は SU(3) 群の対称性を採用し、エネルギーの低い重粒子、ギスカラー中間子、ベクトル中間子についてこれを適用する Eightfold way（八道説）を提唱した (1961)。このときハドロンの基本3粒子を設定しなかったので、これは複合模型というよりは対称性による理論であった。中間子はバリオン数を持たないので、坂田模型の予言と同じになる。問題は重粒子である。この枠組みで、8重項のほかに、重粒子の励起状態に $J^P = \frac{3}{2}^+$ の10重項を組むと期待された一群があり、そこで未発見のストレンジネス量子数 $S = -3$ の粒子 Ω^- の存在を質量値を含めて予言した。この予言が実験的に確かめられたことで、八道説は強い信頼を得ることになった (1964)。

3.5 クォーク模型 Ω^- の実験的確認の直後、Gell-Mann と Zweig は独立にクォーク（Zweig はエースと呼んだが）模型を提唱する (1964)。基本3粒子として、坂田模型から p→u, n→d,Λ →s と置換え、t≡(u,d,s) をとる[5]。中間子には $\mathrm{t}\bar{\mathrm{t}}$、重粒子には ttt を設定する。$B = 1$ の重粒子は3個のクォークからなるので、t のバリオン数は $\frac{1}{3}$ となり、NNG 則から電荷 Q も分数値をとる：$Q(u) = +\frac{2}{3}$, $Q(d) = Q(s) = -\frac{1}{3}$。ストレンジネス S は s クォークのみが担う: $S(u) = S(d) = 0$, $S(s) = -1$。アイソスピンは u,d がもつ。状態分類上のメリットは大きいが、実体と見たとき分数荷電は今まで確立してきた電気素量の知識に反する。クォークは観測されるものか？坂田模型では、実体としての基本粒子は観測されるものという前提に立っていたのと大きく違う点である。認識論にかかわる問題である。クォーク模型を提唱した Gell-Mann 自身も、クォークの役割は理論構築上の手段以上のものでなく用が済めば棄てるものであるような言い方で、実体については言及を避けている。坂田はこの新しい要素を彼の階層論の立場に沿うものとしてすんなり受け入れ、むしろその実在性を

[5] クォークの名前は、u は up、d は down、s は strange の頭文字。

ないがしろにする Gell-Mann を批判した [7]。

3.6 矛盾に満ちたクォーク　クォークが実体として確立していくには、1960 年代後半から 1970 年代前半にかけて多くの研究があった。それはクォークが抱える矛盾に見える側面を如何に統一的に理解するかという課題であった。その矛盾とは：• 上記の分数荷電、分数のバリオン数の問題。• クォーク探しはどれも成功せず。• 簡単には観測されない程重いのか？その質量を打ち消し、外に出られないほどの引力とは？• 核子質量の $\frac{1}{3}$ 程度に軽いと考えた方がよい（磁気能率など）と考えられる側面。• 高エネルギー電子の散乱の実験からは、核子内部には軽い粒子が殆ど自由に動いている描像が得られた。• バリオンにおける統計性との矛盾、など。

3.7 統計性の問題—“色”の自由度の導入—　3 個のクオークからなるバリオンの 10 重項 $J^P = \frac{3}{2}^+$ の状態を考える。説明が簡単な核子の励起状態 Δ^{++} をとりあげ、構成する 3 個のクォークの 2 個の入れ替えについての対称性を扱う。これは（uuu) なので対称、スピンは $\frac{3}{2}$ なので (↑↑↑) で対称、空間的な状態は最低 s 状態を占めるとして対称、だから全体で対称な状態になる。これは **1.5** で述べた同種粒子の対称性から言うと、ボーズ粒子になる。ところで、バリオンはフェルミ粒子であるから波動関数は反対称であるべきだから、矛盾である。この困難を解決するべく提唱されたのは、クォークはもう一つの内部（固有）自由度 (3 個の要素からなる SU(3) 群として記述される）をもち、その自由度について反対称（1 重項）になっている（従って全体で反対称になる)、という考えである（Greenberg, Han －南部, 1964)。この自由度は “色（color)” と呼ばれる。現実に観測されるハドロンは “色” の自由度について 1 重項（“白色”）になっていると考える。現実の色とはなにも関係がないが、三原色が合わさって白色光となる類似で名付けた記号である。そして今までの (u,d,s) の自由度は “香”（flavor) という名で呼ぶ慣習が定着した。

4. 弱い相互作用における対称性の破れ—パリテイ非保存、更にＣＰ変換保存則の破れ

問題の起こりは 1950 年代の新粒子の登場に遡る。

4.1 パリティ非保存の発見 端緒はストレンジネスをもつ K 中間子の崩壊現象であった。宇宙線の観測において、荷電をもつ新中間子が 2 個の π に崩壊するものと 3 個の π 崩壊するものが観測されるが、その粒子の質量、寿命共に極めてよく一致していた：$K^{\pm}_{2\pi} \to \pi^{\pm} + \pi^0$, $K^{\pm}_{3\pi} \to \pi^{\pm} + \pi^+ + \pi^-$, 左辺は両者ともスピン＝０とわかり、$\pi$ 中間子の固有パリティは $P(\pi) = -$ なので、右辺のパリティは各 π のパリティの積で決まるから、パリティ保存からは $P(K^{\pm}_{2\pi}) = +$、$P(K^{\pm}_{3\pi}) = -$ となる。しかし、質量、寿命の一致からは両者を同一の粒子と考えるのが自然である。Lee-Yang はこれを WI でのパリティ保存則の破れの現れとみなし、若しそうなら WI が関係する過程で普遍的にパリティ保存の破れがあるはずであり、それを検証する実験を提案した (1956)。最初のパリティ保存の破れの発見は、Wu らによって偏極した ^{60}Co 核からのベータ崩壊で成された (1956)。パリティ保存の寄与と非保存の寄与が同程度であり、その破れは最大であった。他のいくつかの検証実験でもこのことは確認された。WI の過程では空間反転での対称性は成り立たないことが明らかになった。

パリティ非保存であるならば、それ以外の不連続変換、**1.3** で述べた C 変換（荷電共役変換、粒子反粒子変換)、T 変換（時間反転変換）に対する保存則はどうなっているかが問題になる。検討の結果，当時の段階では、CP 変換での保存則は破れていないと判断された。

4.2 中性 K 中間子の崩壊での CP 変換保存則の破れ　今度は中性K中間子が登場する。崩壊モードに着目すると、中性のK中間子には 2 個の π に崩壊する短寿命の K_S^0 と 3 個の π に崩壊する長寿命の K_L^0 がある。K_L^0 は K_S^0 より 500 倍ほど寿命が長い。CP 変換に対する性質を調べると、WI が CP 変換に対し対称ならば，K_S^0 は 2π 崩壊のみであり (CP=+)、K_L^0 は 3π 系崩壊のみ (CP=−) のはずである。

CP が保存しておれば 3π 崩壊モードだけのはずの K_L^0 にわずかではあるが 2π 崩壊モードが混じっていることが発見された (Cronin, Fitch ら,1964)。CP 保存の破れ、即ち CP 変換での対称性の破れの発見である。崩壊率は K_S^0 の 2π 崩壊に比べて、5×10^{-6} 倍小さいので、CP 保存の破れは小さい。破れは小さくとも基礎法則に関わるから重要な問題であり、いろんな議論があった。WI の枠内で説明できる問題なのか，今まで四つの相互作用といってきたが未発見の第五の「力」が現れたのかなどに至るまで。小林・益川の 6 元クォーク模型はこれへの解答である（後出)。

5．強・弱相互作用を含む坂田学派の統一模型－名古屋模型とその発展－

1960 年に入ると、坂田模型の発展として WI も取り入れた名古屋模型が登場する。小林・益川理論の背景となる進展である。その頃までに得られた重要な認識として：(i) レプトン数保存 (e,ν_e に $L_e=+1$, μ,ν_μ に $L_\mu=+1$、各反粒子に -1 を付与)。(ii) 弱い相互作用の普遍性：弱い相互作用はレプトンの関与の違いで 3 種類あるが、相互作用が同じ形（流れ積）に書け且その結合定数が殆ど同じである。(iii) WI の到達距離の極端な短距離性。

5.1 レプトンーハドロン対応 レプトンとハドロンの間の対応の最初の認識は次のように示された（1959)：WI は坂田模型の基本粒子の triplet (p, n, Λ) $\rightleftharpoons$ (ν, e, μ) の入れ替えで対称である。名古屋のグループはこの対応を重視し、次のような視点を提出した。基本粒子の triplet (p, n, Λ) は (ν, e, μ) と電荷+e を帯びる B 物質と呼ぶボソンとの結合状態をなす: p=(νB^+), n=($e^- B^+$), $\Lambda=(\mu B^+)$。B 物質が SI を担い、WI はレプトンが担う。この名古屋模型は坂田学派の素粒子の統一模型の提唱であった。

5.2 新名古屋模型へ　1962 年に二つのニュートリノ ($\nu_\mu \neq \nu_e$) が実験で確認されると、名古屋模型はこれを取り入れるように拡張された：ν_e と ν_μ の重ね合わせ質量固有状態 ν_1 と ν_2 をつくり、$(\nu_1, e, \mu, \nu_2)+B^+ \rightarrow$ (p,n,Λ,p') と拡張する。更に、「より基本的な粒子 (従来の p,n,Λ もこれよりつくられる意味で）の探求が次の課題」(坂田、1963) を志向して、基本粒子は 3 元 (t) から、一層深いレベルの 4 元（quartet) へと移行した模型の探求が始まり (牧、1964)、新名古屋模型に進展する（牧、益川ら、1971)。この 4 元を $q\equiv p,n,\lambda,\zeta$ (p' に対応するものを ζ と記し、新基本粒子をイタリックで示す）とする。ここに至って、WI における族構造が具体的に明瞭になる。即ち、電子族 $(p,n)(\nu_e$,e), μ 粒子族 $(\zeta,\lambda)(\nu_\mu,\mu)$ の組み合わせが重要な意味をもつ。

5.3 小林・益川理論—ＣＰ対称性の破れの考究から６元模型の提唱 やっと小林・益川理論の提唱 [4] に話が及ぶことになる。しかし未だ前段がある。(i) WI の理論的枠組みとして、レプトンに関する部分について、Weinberg と Salam により弱電磁相互作用の非可換ゲージ場による統一理論が出された (1967、1968)。(ii) この統一理論の繰り込み可能性が'tHooft により証明された (1971)。(iii) 名大丹生潔らの宇宙線グループが新名古屋模型の第 4 番目の基本粒子 (p' 乃至 ζ) に対応するらしき粒子を観測し、小川がその意義を強調した (1971)、

など。

益川は名大坂田研究室で大学院終了後助手、1970 年に京大物理学第二教室素粒子論研究室に移り、1972 年に名大坂田研で共同研究をしたことのある 5 年若い小林が同じ京大素粒子論研究室の助手に着任する。ここで CP 保存の破れの問題で二人の共同研究が始まる[6]。

1972 年当時、弱電磁統一ゲージ理論はまだレプトンの理論として提出されたばかりで、強い相互作用をする基本粒子は含まれていなかった。小林・益川理論はまず基本粒子をどのように入れるかを明らかにした上で、CP 対称性の破れを説明するメカニズムを考案したのである。基本粒子に新名古屋模型の 4 元模型を採用し、(i) quartet の第 4 メンバー (ζ) の質量は十分に大きい、(ii) 模型が semi-leptonic 過程[7]の確立した知見と整合する, という条件の下で、CP 対称性の破れが起こる原因を考究し、4 元模型の枠内では CP 対称性の破れを説明することは出来ないと結論した。その上で、可能性の一つとして、基本粒子 6 個を採る 6 元模型を採用すれば、三世代のクォークの WI の構造そのものの中にあるメカニズムにより、CP 対称性の破れを説明できることを示した [2]。ここに現代の素粒子物理の標準理論の骨格をなす三世代（6 クォーク・6 レプトン）の構造が示されたのである。現在慣用の記号で書けば、第 1 世代＝電子族 (u,d;ν_e,e)、第 2 世代＝μ 粒子族 (c,s;ν_μ, μ)、第 3 世代＝τ 粒子族 (t,b;ν_τ, τ) である。

5.4 坂田学派の伝統 益川はノーベル講演 [3] において「4 元模型ではどうしても駄目と分かったとき、それを結論とする論文を書こうと思った。そのとき 4 元模型へのこだわりが消えて、それなら 6 元模型にしようという新しい発想が生まれた。6 元模型を採ればうまくいくことはこれまでの研究ですぐに分かった。」と述べている。当時は 3 種類のクォーク (u,d,s) の存在しか知られておらず、6 種類ものクォークがあるというのは革命的な提言であった。第 4 クォークの存在を予見していた坂田学派の人たちでさえ 4 元模型から 6 元模型への飛躍は驚きであったのではなかろうか。

4 元模型から 6 元模型への発想の切り替えがすばやく出来たことには、既に述べてきたような坂田学派の学問的な背景と伝統が大きな意味をもったであろう。何故なら、伝統とは決定的なときに意識下から湧き出てくる力のようなものと思うからである。

受賞対象になった論文 [4] は当初引用は少なかったが、1975 年に菅原-Pakvasa の論文に引用されて以来増加し、現在の引用は 5500 件を超えているとのことである。素粒子物理学の教科書の標準理論の中で、小林・益川理論は必ず記載されるようになってきて久しい。

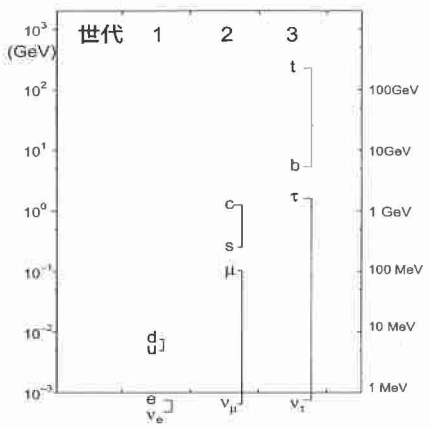


図 2: 各世代のクォーク、レプトンの質量（対数目盛）

5.5 6 元模型に対する実験的検証 1970 年代

[6]名大坂田研究室の頃 (1962-70) を回想し「南部さんの論文をしゃぶり尽くすほどに読んだ」と益川は語る。素粒子の複合模型の進展はあった一方、場の理論への不信感がなお残っていた時期のことである。京大着任当時は大学紛争の余波がまだ強かった。しかし京大物理教室においても、戦後の民主化により博士課程の院生以上は研究者としては対等の立場であったから、京大素粒子研究室の雰囲気は坂田研究室のそれとさほど落差のない状況であったと想像される。

[7]レプトンとハドロンが両方関与する WI の過程；例えば、重粒子のベータ崩壊、中間子の崩壊。

半ばから、小林・益川の６元模型の正しさを示す
大型加速器を用いた実験結果が相次いで報告される[8]。
• J/ψ 粒子の発見 (1974)：新しい “香り”の c クォーク（charm) とその反粒子 $\bar{c}$ よりなる中間子、$m_c \simeq 1.5$GeV。更に $c, \bar{c}$ を含む中間子も観測された。新名古屋模型で予見していた第４番目の基本粒子である。
• τ 粒子の発見 (1975)：第３世代のレプトンの存在 ($m_\tau \simeq 1.8$GeV) が明らかになった。
• 中間子 Υ(ウプシロン) の発見 (1977)：J/ψ 粒子の上で 9.5GeV あたりに現れた中間子で、第３世代の b クォーク (bottom) を含む。第３世代５番目のクォークの存在を示す ($m_b \simeq 4.8$GeV)。B 中間子 (b または $\bar{\text{b}}$ を含む) も観測された。
• t クォーク (top) の存在の知見 (1994)：大質量でなかなか観測が難しかったが、第３世代６番目のクォークの存在 ($m_t \simeq 174$GeV) が遂に示された。
• B 中間子における CP 非対称の発見 (2001-2002)：日本及び米国の B-factory での実験により、B 中間子系における CP 変換での対称性の破れの実験的確証が得られた。

こうして、小林・益川の予言した６元模型のすべてのメンバーが実験的根拠を得たのである。その質量の分布は図２のように非常に広がっている。

6. 対称性の自発的破れの南部理論

対称性の自発的破れ (SSB と略記) とは、基本的な法則は対称性をもっているが、その対称性の破れた状態が基底状態に実現する場合をいう。日常的な例として、強磁性をもつ磁石では特定の方向に電子のスピンに比例す磁気能率の方向が揃っているが、その系の元の相互作用には特定の方向性を決める要素はない。原子核では、回転に対して対称な相互作用の下にあるが、きれいな回転スペクトルが見られる（陽子数、中性子数の）領域があり、そこでは原子核が変形する（回転対称性が破れる）方が基底状態のエネルギーが低くなる。そして基底状態やその近傍に回転状態系列が回転対称性の自発的破れの回復として現れる。

超伝導現象の発見から半世紀近くたった 1950 年後半に、難問であった超伝導を解明する BCS(Bardeen-Cooper-Schrieffer) 理論が発表された (1957)。坂田模型が登場しパリティ非保存が発見される頃、1960 年少し前の頃である。その理論は今までにないやり方で金属の基底状態を記述していた。即ち、フェルミ面近傍の２個の電子が特定の状態で対 (クーパー対と呼ぶ）を作り、その対の凝縮状態 (condensate) になっている。これは電子数が異なる（電荷も異なる）状態の重ね合わせであるから、電子数の保存（ゲージ対称性）の破れた状態である。SSB については、南部自身が日本物理学会誌 (2002) に書いた「素粒子物理の青春を回顧する」[8] の中で述べている言葉で紹介する。

シカゴ大学のセミナーでイリノイ大学の院生 Schrieffer が来て BCS 理論の紹介したときのことを回想し、次のように述べる:「私が SSB の概念を見つけたのは偶然のできごとであるが、私が東大時代に培われた物性論への興味と、BCS 理論の生誕地がたまたま近くにあったおかげでもあったと思う。」「このセミナーの印象は感動と疑問の混じったものだった。彼らが仮定した波動関数が凝縮状態を作りエネルギーギャップを生むのには感心した一方、それが電荷の固有状態でなく、ゲージ不変性を破っていることにすぐ気がついた。」「BCS 理論が数学的に正しいと確信するようになるまでには２年ほどかかったが、結局ある集団運動

[8] 小林・益川理論をめぐる研究の流れについては、小林のノーベル講演 [2] 参照。

モードがWard-高橋の恒等式を満たして電流の保存を回復しゲージ不変性を救うことに気がついた。電磁場がSSBの結果プラズモン[9]になって質量を持つということも分った。これは2つのゼロ質量のモード（クーロン場と南部-Goldstone(NG)ボソン）とが混じるために起きる現象である。（中略）私は量子場の理論を使ってこれを数学的に明確な形で示すことができたことを非常に満足に思った。」[5]

SIをするハドロンの問題にSSBの論理を適用する研究を行って得た成果のうち、受賞理由に関係する研究[6]（当時ローマから来ていた若い研究員G. Jona-Lasinioとの共著論文；NJLと略称される）について、1960年代をふりかえり「その間にSU(3)対称性が発見され、クォークモデルが現れた。NJLの論文では核子を基本場と扱ったものだが、核子をクォークに変えても、また現在のQCDにも有効理論として適用できる。60年代には私はもっぱら強い相互作用にかかわっていた。これがまず解決すべき問題で、SSBを弱い相互作用に応用することは考えなかった。ゲージ場の量子論を強い力に如何に適用するか未だ分からなかった。」と述べている。南部が構築したSSBの概念と論理は、多くの研究者によって用いられ、WIにおいてゲージ場の弱電磁統一理論の基礎を提供し、またSIでは軽い(u,d,s)クォークの有効質量の大部分がSSBで力学的に生成された質量であるとの理解を導くのである。その意味で、南部のSSBの理論は現代の素粒子物理の理論的背骨を与えたのである[10]。

7. ハドロンの基礎理論—量子色力学(QCD)—

以上で、2008年ノーベル物理学賞の受賞理由となる研究の跡をたどるという役目は果たしたのであるが、ハドロンの物理については中途半端に終わっている。つまり、1960年代における矛盾に満ちたクォーク像から抜け出す道として、クォークが“色”の自由度をもち、観測される複合粒子のハドロンはそれについて“無色”（1重項）という考えが出たところで切れている。その続きについて簡単に触れておく。

7.1 漸近的自由性とクォークの閉じ込め 1973年頃になると、クォークはハドロン内部に閉じ込められており、内部ではほぼ自由に振舞うという描像に根拠を与える理論が示される。クォークに働く有効力は、短距離では弱く、長距離では紐状に強くなる性質の発見であり、漸近自由性という。クォークの色が相互作用で変わることが力の源泉なら、それを媒介する色つきの粒子（グルーオンと呼ぶ；膠の意味）があり、グルーオン場（8種類）が存在するはず。グルーオンは電磁場の光子とは違い、自身も色をもつのでクォークの色を変えるし、自身からグルーオンを生成・消滅させることが出来る（非可換ゲージ場）。この性質が漸近自由性をもたらす。また紐状に働く力の実体として、完全反誘電体中に置かれたクォークから伸びる色電束が伸びると紐状に絞られる様相（超伝導体におかれた磁極の間に絞られた磁力線が走る描像に類似）が示される。こうした研究の蓄積から1970年代後半には、ハドロンを構成する力は色の自由度をもつグルーオン場（粒子）によるとの認識が確立していく。この理論的枠組みを量子色力学(QCD)という。核力をはじめ無色の複合粒子であるハドロン間の相互作用は、強い力ではあるがハドロン構成力よりはるかに弱く、分子間の相互作用のように、一般には単純でない性質をもつことになる。

7.2 カイラル対称性の破れ, 構成質量, 原子核 対称性の自発的破れ(SSB)は、超伝導の

[9]物質内の電子の集団運動であるプラズマ振動を量子化したもの。

[10]南部のSSB理論の紹介としては簡単すぎるのは承知しているが、これ以上のことは南部自身の回想録[8]を読むことをお勧めする。

ときは電荷の保存に関して起こったが、SIをするハドロンの問題では今度はカイラル対称性が関与する。(カイラルとは右利き、左利きの区別の意味) このSSBはクォークqとその反粒子$\bar{q}$が対を形成して凝縮し真空(物理的真空)を作っている。そこで一つの対を壊すと、エネルギーギャップで表わされる力学的に生じた質量が付与された準クォークと反準クォークが現れる。この準クォークの構成的質量は核子質量≃940MeVの約$\frac{1}{3}$≃330MeVである。零質量のNGボソンは$J^P = 0^-$(ギスカラー)粒子であり、質量が他のハドロンに比して極めて軽いパイ中間子(π)に対応するとみなせる。質量が軽いπは湯川の核力中間子であり、核力の到達距離が大きく、この引力効果により原子核が作られる。上述したようにSSBで生じた構成的質量を加えると軽いクォーク(u,d,s)の有効質量に極端な差はなく、ハドロンにおけるフレーバー対称性が近似的に成立する根拠となる。

8. おわりに

以上、2008年のノーベル物理学賞の研究の足跡をたどってみるのは、研究業績の内容と高さから見て、隣接分野である原子核理論の研究者であった自分には容易ではなかった。本稿が編集者の期待にどれだけ応えられたか、また読者にどれほどお役に立っかについては自信はない。不足感を感じられた場合は、インターネットでノーベル講演を聞くことができるし、講演要旨をダウンロードして入手可能であるので、利用されたい。また受賞者のお三方はそれぞれ一般向けに優れた本を書かれており、現在容易に入手できる状況にある。末尾に参考文献として挙げたので[9, 10, 11, 12]それらを参照されたい。

参考文献

[1] Yoichiro Nambu, Spontaneous Symmetry Breaking in Particle Physics: a Case of Cross Fertilization, Nobel Lecture, December 8, 2008 (presented by Giovanni Jona-Lasinio)

[2] Makoto Kobayashi, CP Violation and Flavor Mixing, Nobel Lecture, December 8, 2008

[3] Toshihide Maskawa, What Does CP Violation Tell Us?, Nobel Lecture, December 8, 2008

[4] M. Kobayashi and T. Maskawa, CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction, Prog. Theor. Phys. **49** 652-657 (1973)

[5] Y. Nambu, Quasi-Particles and Gauge Invariance in the Theory of Superconductivity, Phys. Rev. **117** 648-663 (1960),

[6] Y. Nambu and G. Jona-Lasinio, Dynamical Model of Elementary Particles Based on Analogy with Superconductivity. I, Phys. Rev. **122** 345-358 (1961)

[7] 小川修三, 坂田学派と素粒子模型の進展、日本物理学会誌、**51**, 90-94 (2002)

[8] 南部陽一郎, 素粒子物理の青春を回顧する、日本物理学会誌、**57**, 2-8 (2002)

[9] 南部陽一郎、「クォーク—素粒子物理の最前線—」, 251p, 講談社, 東京 (1981)

[10] 小林誠、「消えた反物質—素粒子物理が解く宇宙進化の謎—」, 203p, 講談社, 東京 (1997)

[11] 益川敏英、「現代の物質観とアインシュタインの夢」、118p, 岩波書店 (1995)

[12] 益川敏英、 「いま、もう一つの素粒子論入門」, 165p, 丸善, 東京 (1988)

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 12, No. 1, p.17 - 24 (2008)

【特集】

Lynx Lyceum通信 1993年 No. 24

二四三五六

伏見記録

伏見康治

核分裂連鎖反応50周年に思う*

§　彦坂忠義さん－原子力の先駆的仕事

司会者の住田健二さんは、昔大阪大学で教えたことのある方で、色々借りがあるものですから、講演をしろという御命令を受けますと簡単には断われない。もともと私は「来るものは拒まず、去るものは追わず」という性格なものですから、うっかり引き受けてしまいました。しかし年をとりまして、色々仕事をこなす速度が極端に遅くなってしまいましたので、いつまでも構想がまとまりません。

遂に、年末〆切の予稿が書けず、予稿集には私の分は白紙になっているという醜態になった次第です。

数日前になって住田さんから手紙がきました。

～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～

*本号は、１９９３年2月１５日に開催された「第３１回：原子力綜合シンポジウム」における講演に手を入れたものです。

音沙汰がないので、御心配になったのでしょう。原子力学会誌１９８５年正月号の巻頭言として、私は、彦坂忠義さんの原子力の基礎になる業績について書きました。これだけ原子力の出発点となる立派な仕事をされたにもかかわらず、世間から全く忘れ去られてしまっているのが、私にとって不満であったのです。この巻頭言の影響でしょうか、名古屋大学におられた福井崇時さんが、科学史家の立場から、彦坂さんの残された論文を追求されて、色々なものが発掘され、他の方々もそれを追ったものです。住田さんもその一人で、そもそも私を今日ここに引っぱり出されたのも、彦坂さんについて何か語れということなのでしょう。最近の住田さんの手紙というのは、彦坂さんについての新しい情報ともいうべきもので、それを知ったら伏見が何かを考え出すきっかけになるのでないかとお考えになってのことなのでしょう。

私は前の原子力学会誌巻頭言の終りに、これ

だけ原子力に打ちこんでおられた彦坂さんが、なぜ終戦間際になって大連に行くようになったのか、終戦後彦坂さんは原子力について何をされていたのかという疑問を呈出して置いたのです。住田さんはその疑問に答えを求めて、彦坂未亡人の京さんに手紙を書いて、その点について尋ねた由です。それに対する京さんのお返事の写しを住田さんが送って下すったというわけです。恐らく住田さんは、それが刺激になって伏見の頭が廻転を始めるのではないかと思われたのではないでしょうか。確かにそうなったようです。

未亡人の手紙によると、彦坂さんは大連で広島の原子爆弾の話を聞くと、「原爆を造るのは大変な大事業であって、戦争に間に合せようと大急ぎで作ったのに違いないだろうから、原爆のスットクなどまだできているはずがない。広島の後は当分の間新しい原爆が落ちてくる惧れはないのだから、日本国民として余り驚いたり騒いだりしない方がよい」と言われた由です。その時点の判断としては、頗る見透しの良い話だったと思います。もちろん、別の型の、つまりプルトニウムを使った第２の原爆が長崎に落ちたとしても、彦坂さんの論旨に替りはないわけです。　本場のアメリカではどうであったか？初代の原子力委員長になったリリエンソール（ニューディール時代にテネシー渓谷開発会社：ＴＶＡの長であった行政家）は、やはり広島・長崎以後の原子爆弾がまだ出来ていない、アメリカはこれからの対ソ政略の瀬戸際で実は原爆の手持ちがないと聞かされて、トルーマン大統領ともどもびっくりしたと、その回顧録に書いています。 ── 彦坂さんの洞察力の深さに驚かされます。

§§　彦坂さんと私：原子力時代前夜

さていきなり彦坂さんの話を始めてしまって、御存知ない方にはチンプンカンプンでしょうから、彦坂さんと私とのかかわりを簡単にお話して置きましょう。先程、司会者の住田さんは、私を紹介して下さったとき、昔大阪大学で理論の先生をしていたと説明されましたが、大阪大学へ助手としてまいりましたとき、菊池正士少壮教授に誘惑されまして、原子核実験の世界へはいりました。１９３４年のことです。やらされましたのは、重水素核を重水素核にぶつけて、出てくる中性子の作用を研究することで、イタリヤのエンリコ・フェルミー派がやっていた実験の後を追う形のものでした。中性子を色々な物質に衝撃しましてその衝突吸収の断面積、また中性子が核に捕獲されて出るガンマ線の量子エネルギーを測定するのが役目でした。 ── 少し脱線しますと、今になって考えてなぜ私がウラン核の分裂を発見しなかったか、その条件は整っていたわけで、中性子を照射するターゲットとしてウランをとり上げさえすれば、あんなに目覚ましい現象なのですから、すぐ発見したはずなのに、それをしなかった。残念です。申し訳はいくつかありますが省略します ──

ウラン核分裂が発見された数ヶ月前に、私は結婚し助教授になり、翌年教授になって菊池研究室から独立し、それから実験をやめて、司会の住田さんが言われたように理論専門になったのです。しかし原子核実験にたずさわっていて、原子力時代の一歩手前まで行っていたという経歴がなければ、原子炉５０周年にあたって何かしゃべる理由もないわけでしょう。

ちょうど私が実験から理論へ移った頃、彦坂

さんが阪大に現れたのでした。彦坂さんは東北大で修業されたのち山口高校の先生になられ、近くということもあって、阪大菊池研究室に内地留学でやってこられたのでした。浅田常三郎教授の下で、質量分析器を作っておられた奥田毅さんが同じ仙台出でしたから、奥田さんの部屋で雑誌を読んでおられました。彦坂さんが核の殻構造論を進めていることは知っていましたが、私自信はボーアの核の液滴模型にほれこんでしまっていましたから、話が噛み合わなかったとは言えるでしょう。ところが丁度彦坂さんの出遇いの時にウラン核の分裂が発見されたのですから、私は彦坂さんに挑戦して、核分裂の液滴模型による理論計算をしようでないかと吹っかけたのでした。その暫く前に発行されたアイアリングの「絶対反応速度論」というのがあって、反応粒子間のポテンシャル面を描き、その上を代表点が走り抜ける確率を計算するという手法が完成していましたから、計算の方法ははっきりしていたわけです。彦坂さんと私はその方針の下に計算をすすめる準備を整えたのですが、それがまだ完成しない間に、ボーア・ホィーラーの有名な論文が現れました。考えてみると、液滴模型を唱えたボーアは核分裂の話をマイトナーとフリッシュから聞いて、液滴模型から当然予想されることをなぜ考えなかったかと、非常にくやしがったと言うことですから、若くて有能な、お弟子ホィーラーを使って、精力的に核分裂の理論を作り上げるというのは、当然予想されることで、それを考えなかった伏見は、まあ世間知らずだったと言えるのでしょうか ── 実は同じような話がその数年前にありました。D＋D反応を使って中性子を出していたのですが、一体陽子と中性子とが結び付いてできているとされている重陽子がどういう量子力学的構造をしているのだろう。理論家伏見が重陽子相手の実験をしていて、その構造の理論を作らないのはおかしいと考え、陽子と中性子の間に、短い有効伝達距離の引力を想像して、波動関数を解いてみたのです。面白いことに伝達距離が十分短かければ、ポテンシャルの形がどうであっても、結論に変りがないという点でした。それで少し元気が出て、菊池先生にお許しを乞うて雑誌に投稿する原稿を書いたところで、ロイヤルソサイエチー紀要にベーテとハイトラーの同じテーマの論文が出てしまったのを発見したのでした。

はやりそうなテーマは採り上げると損をするというのが、私の実感です。

彦坂さんは、この液滴模型の失敗のあと、原子炉理論にとりかかりました。私自信は実験の経験上から、「遅い中性子」の作用がいかに大きいかを身にしみていましたから、遅い中性子を媒介とする連鎖反応しか考えませんでした。彦坂さんも始めはそうでしたが、Ｕ２３８の共鳴吸収が邪魔をすることを一早く察知して、それを避けるには、燃料とモデレーター（その頃まだそんな言葉は知りませんでした、減速材と書くべきでした）とが均質に混合しているものを避けて、その両者を空間的に分離した「非均質炉」を作るべきだという結論を出されました。私はこの点彦坂さんに一歩先んぜられたと感じて、良く覚えております。後年シラードとフェルミが、非均質炉のアイデアで特許を採っており、大分儲けたという話を雑誌で読んで、彦坂さんも特許をとって置くべきだったと思ったものでした。

この点、私の記憶に生き残っているだけで、

福井崇時さんや、その他の方々の彦坂論文の捜索にもかかわらず、該当論文が発見できません。むしろ発見されたのは、速い中性子のままで連鎖反応が可能かどうかを調べた論文があるだけです。この論文は、それを現代的な立場から検討された桂木学さんの論文とともに日本原子力学会誌１９９２年 Vol.34 、No.11 の巻末に附録として掲載されていますので、興味のある方はそれで御検討下さい。

さて彦坂さんは、１９４３年には山口高校からまた仙台にかえられて第２高校の先生になられましたが、１９４５年の終戦直前に（もちろん事前にそれが、つまり終戦が、きまっていたわけではありませんが、諸般の事情から言ってそれは必然でした）、旅順工大に移られました。僅か３ヶ月の後に広島に原爆が落ち、（その時に、前に述べた名言があったのですが）８月１２日には赤紙が廻ってきました。留守宅ではまず旅順工大のロシア軍占領があり、次に日本の敗戦、京さんが大変な苦境に陥った時に、神は見捨てず、彦坂忠義さんが苦労して帰ってきました。召集は誤りということで、途中から単独引き返してきたのでした。それから旅順から大連に移され、医者と学者は中国人によって抑留され、彦坂さんは４年間大連で教育に従事したのでした。

住田さんは、前述の原子力学会誌の記念特集の中で、彦坂さんのような仕事がありながら、戦前戦中の日本の原子核研究の成果は忘れ去られ、戦後日本の原子力研究は全く輸入学問として成長してしまったと嘆いておられるが、そしてその通りだとは思うが、しかし戦後の日本が置かれた状況も考えて欲しいと思う。敗戦国日本の核物理屋は占領軍指令部ＧＨＱからの命令で、原子力研究はもちろん禁止され、原子核基礎研究さえ監視されていたのです。理研や阪大のサイクロトロンが破壊されたことはよく知られている通りです。１９５２年のサンフランシスコ条約発効の年まで、７年間日本の原子核物理学者たちは何かしようとしても何もできなかったのでした。そして一方広島長崎の原子爆弾の悲劇は日本国民一般に、深く広く侵透してしまっていて、原子力について何かすることは罪悪感なしにはできなかったのでないでしょうか。４年間の抑留から帰国された彦坂先生御自身がもはや原子力について語るのを避けてこられたのではないでしょうか。

そしてその間に多くのことが忘れ去られていったのではないでしょうか。サンフランシスコ条約発効の年に、茅誠司先生と私伏見とが、日本学術会議の席で、原子力研究を始めようと提案したのは、その占領下のタブーを打ち破るための試みで、しかもそれは失敗したのでした。

日本人はいわゆる平和ぼけになっていて、原子力も平和利用に限定してそれで済んでいると思っている人が多いのですが、原子力は今でも軍事と密接に結び付いており、その面を忘れずに平和利用をすすめなければならないのです。彦坂さんのお仕事が暫く埋れていたのも、歴史の移り変りの中で理解すべきではないでしょうか。

彦坂さんの御長男に彦坂諦（タイ）という方が居られます。敗戦の時点では１２才の中学生で、４年間の抑留生活の中で苦労されたことと思います。しかし戦場に行かれた経験はないはずであるのに、戦場における兵士の思想と行動についてすさまじいばかりの関心があり、色々分析を加えられた著書があります。

『ある無能兵士の軌跡』

第１部　「ひとはどのようにして
兵となるのか」上下

第２部　「兵士はどのようにして
殺されるのか」上下

第２部別巻「餓島１９８４←→１９４２」

（餓島とはもちろんガダルカナル島をさしています）

さらにこの日曜日の朝日新聞の読書欄を見ますと、諦さんの

『餓死の研究』

というのが載せられているのを見ました。彦坂末亡人京さんは歌人で、歌集も出しておられますから、諦さんの筆力は母上から受けつがれたものでしょうか、いずれにせよ、原子力の基礎を掘った忠義さんの御子息がこんなにも戦争について強い関心をお持ちなのは、何か偶然でないものを感じさせます。

それで少し、原子力のもたらした社会的側面をながめてみたいと思います。

§§§　原子力のもたらした遺産

シラードは、ハーンによる核分裂発見が、フェルミによる超ウラン核の発見の直後に行われたとしてもおかしくないのに、なぜあんなに遅れたのか、歴史の不思議だといっております。もし核分裂が数年前に発見されていたら、ヒトラーは当然原子爆弾計画に乗り出していたのに違いないし、第２次大戦の帰結がどうなったか、全くわからないことになります。そもそもシラードが核分裂の可能性に思い至らなかったのが不思議です。と言うのは、シラードは中性子を媒介とする原子核の連鎖反応が可能なはずだと長い間考えていたからです。有名な「シラード・チャルマーの方法」というのが、その探求の副産物なのです。

核の連鎖反応実現の５０周年ということで雑誌にはＣＰ－１パイルの建設の話など色々と物語られています。それをここにくり返す積りはありません。しかしこの点だけは言って置きたいのです。シラードとか、フェルミとか、ウィグナーとか、あるいはイギリスでいち早く連鎖反応の理論を組み立てたパイエルスとか、みんなナチスに追われて、西側に逃れてきた亡命科学者が多いことです。原子爆弾が第２次世界大戦を背景として作られたことはいうまでもありませんが、それを実際に遂行したマンハッタン計画の緒を作ったのは、これらの亡命科学者であって、この人達は流れてきた国に対して何らかの忠誠心を表わさなければならなかったこと、原爆を作ってみせることでその国での社会的地位が確保できたことにあったと解釈できます。

この人たちは一応原爆の原理を示してみせると、実際にそれを作るというところまではおつき合いをしないで、さっさと基礎研究生活へ、つまり大学生活へ戻って行きました。テラーの様な狂信的なソ連打倒論者を除いては、話が工業的段階にはいると、もう出番ではないと自覚してもとのアカデミズムに帰ったのです。そして一部の学者たちは原爆の効果の恐しさを予感して、原爆ができてもそれを使うなとか、使うにしてももっと慎重であるべきだとか、どこかの無人島で多勢の国々の人達の見る前でその威力をデモンステレイトすべきだとか言い出しました。この人達の最終結論ともいうべきものは、核兵器の知識を世界の共通財産とし、核兵器の国際管理を行うというものでした。

ニールス・ボーアはこの思想に一番熱心な科学者だったと言えます。核分裂理論の完成者としての責任感、マンハッタン計画にたずさわった多くの科学者を育てたという責任感から言っても、何か政治的発言をせざるを得なかったのでしょう。ソ連側に早く核兵器の秘密を知らせ、国際管理の道へすすむべきだと考えて、米英の首脳部に接触したのです。しかしウィンストン・チャーチルは、基礎科学の知識は人類共通の財産であることを理解できず、むしろボーアは最高の軍事機密を敵つまりソ連に渡そうとするスパイだとさえ看做したのでした。

１９８５年ボーアの生誕１００年の集りがコペンハーゲンであったとき、イギリスの女流科学史家マーガレット・ガウイングが当時の話をした際、私は質問して、なぜボーアはチャーチルを説得できなかったのかと質問したものです。彼女の答えが、半ば予期したように、ボーアは英語が下手で、それで十分チャーチルを説得できなかったのであろうというので、私はこのような人類全体の平和に関する重大な問題の議論に英語の上手下手がものを言うのは信ぜられないと言ったのを覚えています。

ボーアがチャーチルに科学の国際性を教えることができなかったとしても、実はマンハッタン計画自身が科学の国際性の説明のようなものでした。シラードやウィグナーはハンガリー出のユダヤ人ですし、フェルミはイタリヤ人ですし、テラーを助けて水爆を完成したウーラムはポーランド人ですし、昔「不思議の国のトムキンス氏」を著したガモフはいうまでもなくロシヤ人でした。そう言えば、アメリカ自身が人種の坩堝なのでした。科学の国際性を言うのは、日本は単一人種の国で、何事も民族性の立場からしか、物を考えないからです。

マンハッタン計画のもう一つの大きな遺産は「巨大科学」ではないでしょうか、中でも加速器の建設が次々と大型化していった歴史は誠に眼を見張るばかりでした。サイクロトロンが、加速すべき粒子のエネルギーが大きくなると、いわゆる相対論的質量の増大によって、共鳴条件が破れてしまい、使いものにならなくなるとされていました。その難点を戦後マクミランが発見した「位相安定の原理」の出現によって突破できることになりシンクロサイクロトロンや、シンクロトロンが誕生するのでした。さらにその後「強収斂の原理」が案出されて、壮大な規模の加速器でも、ビーム強度を減らさずに済むようになりました。このようにして加速技術が進む毎に、それで加速した粒子による新しい素粒子の発見があり、それによってノーベル賞をもらう人が続出し、大加速器建設競争が続くことになりました。その最後（恐らく！）の段階のものが、今取り沙汰されているＳＳＣで、クリントン政権がこの金喰い虫をどう処置するのか、皆が片唾を飲んで眺めているところです。

この様に大加速器が、比較的容易に作られるようになったのは、主として原子核物理学者が原子爆弾を作るのに成功したことに対する、ご褒美であったろうと思います。アメリカでは大加速器の予算は、それが基礎研究の場合でも、原子力委員会（ＡＥＣ）の後身であるエネルギー省（ＤＯＥ）が賄うことになっているのが、その証拠になると思います。── 日米科学技術協力協定というのがありまして、その中にエネルギー分野というのがありました。その中のテーマにたとえば石炭液化問題というのがあるのは至極当然ですが、高エネルギー加速器という

のも含まれていて、エネルギーとパワーとを混同したような話でおかしいと思ったのですが、アメリカの役所の所掌から言えば、ＤＯＥが加速器をとり扱うのは当然なのでした。因みに国立科学財団ＮＳＦも小型の加速器には金を出しています。注意したいのは、原子力に直接関係するのは数ＭｅＶの加速器であって、数ＧｅＶとよばれるようなエネルギー領域は原子力とは直接の関係がないということです。

原子炉のいくつかは中性子源としての実験道具となり、大学で中性子実験をやるための炉を備えることがあり、巨大科学の仲間入りをしました。しかし科学研究用としては、加速器を使う中性子源の方が価値があると考えられているようです。とかくする内に、磁気閉じこめ核融合装置が巨大科学の仲間入りをしてきました。プリンストンのステラレーターとか、色々ありますが、現在ではロシヤの生み出したトカマク型の核融合装置が主流になっていますが、形は大きくなる一方です。さらに強力なレーザー光を一点に集中して高温高圧を発生しようという「慣性核融合」も巨大科学の仲間入りをしました。一方宇宙技術ではロケットと人工衛星が華々しい成果をあげており、２０世紀後半の天文学は一大躍進を遂げたと言えるでしょうし、衛星から地上を眺めるリモートセンシングも、環境破壊を何とか回避しようとするこれからの地球科学にとって重要な手段になるでしょう。

巨大科学 big science という言葉は、恐らくオークリッヂ研究所の所長であったワインバーグが使い始めたものと思いますが、彼は原子力関係の研究者達が巨額の金をかけた大型装置を作ることに負目を感じていたようです。零細科学の研究者に対して、済まないと感じ、これに対するお返しとして、原子力関係者は実に様々な放射性アイソトープを作り出し、他分野の科学者にトレーサーとして提供していると言い訳をしています。

しかしワインバーグのように禮儀正しい人はむしろ希で、巨大科学がいかに科学者をスポイルするかが、色々と語られています。原子力関係研究所から大学に舞い降りてきた一人の教授がいたそうです。この人着任するとすぐ学長にかけ合って、助教授２名助手５名をつけろと要求した由です。── 住田さんが原研から阪大に移られた際、巨大科学から零細科学に移るのにどんなに苦労されたかが想像できます。

アトム・フォア・ピースで有名なアイゼンハウアー大統領が退任するときの演説で、「軍産複合体」の弊害を説いたことはよく知られていますが、このとき大統領は巨大科学の弊害にも説き及んでいるのです。「大学や会社の実験室でこつこつ、孤立して研究していた発明家たちは、科学者群の組織された軍団で置き換えられるようになった。巨額研究費のせいであろうが、政府との契約が、知的好奇心の代りをするようになってしまった。…科学的探求や発見を重視する余り、重視するのは当然ではあるが、われわれは同じように重要な危険を冒しているのかも知れない、科学技術のエリートたちの捕虜になってしまうかも」この最後の言葉はことによるとテラーに対して警戒すべきだと言ったのかも知れません。レーガンやブッシュは明らかにテラーの犠牲者でした。

巨大科学のもたらした色々な喜劇の一つは論文の著者名欄に何十人もの名前がずらりと並ぶことです。大きな装置の極く一部を担当しても論文に名を連ねるのは、むしろ悪しき民主主義

というべきだと言えないでしょうか。重いボゾンを発見したのはＣＥＲＮ全体の仕事であったにしても、ノーベル賞をもらうのがルビヤ一人であって、ふしぎでないでしょう。

巨大科学の、それに参加する人々にとっての、欠陥は、その巨大装置が完成するのに、何年も、時には１０年もかかることです。それに参加した若い研究者は、その大きな組織の極一部を担当して、何が核心であるかを掴めないままに、年をとってしまう。自立の精神が養われないままに過してしまう。

長年月かかるということは、計画全体についても大きな弱点になります。その長期間の内に、環境条件が大きく変ることがあるからです。たとえば超伝導コイルの技術は、現行のものではなくて、高温超伝体のものに置きかえられるかも知れません。また他の競争者の研究が進んでしまって、今作りつつある装置の科学的価値が半減してしまうかも知れません。巨大科学は巨費科学ですから、その財源が全く関係のない政治的要因で途絶するかも知れません。お金以外の政治的環境の変化で、苦しめられることもあるでしょう。 ― 原子力船むつの運命がその一つの標本になります。

恐らく巨大科学にとって一番深刻な問題というのは、そのプロゼクトが終ったときにその膨大な組織をどう解体するかにあるのではないでしょうか。すべての組織がそうであるように初期の目的を果した後も、その存続維持を図るために、次々と新しいプロゼクトが打ち出されて行くのではないでしょうか。当初の計画が不十分な結果にしか到達できなかったとすれば、もちろんもっとよい成果を得るための企画が練られるでしょうし、もし当初計画が華々しい成果を挙げたとすれば、もちろん次の新しい計画が打ち出されるでしょうから。

こういう色々な厄介なことがあるから巨大科学はやめる方がよいとは、私は申しません。すべてこれらの弱点があることを承知して、それに対する手当てをしてとりかかって下さいと言いたいのです。

原子力は色々な意味で、プラスにもマイナスにも働く大きな遺産を残しました。戦争か平和かという問いかけの外にも、考えるべきことが沢山あるのです。□

(「Lynx Lyceum 通信」編集部の許可を得て Lynx Lyceum 通信 No. 24 (1993)より転載)

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 12, No. 1, p. 25 - 32 (2008)

【特集】

日本における放射化学の黎明と進展（1907-1957）

斎藤　信房

（1）　放射化学研究のあけぼの

H. A. Becquerel によるウラン化合物からの放射線の発見以来，日本の多くの化学者の放射能に対する関心は高まり，Curie 夫妻によるRa, Po の発見（1898），A. Debierne によるAc の発見（1899）については，当時一高教授であった松原行一（のちに東京帝国大学教授）が，いち早く，1898 ～ 99 年に，東京化学雑誌にこれを紹介している。

一方，化学者以外の研究者により行なわれた早期の研究・調査のうち，歴史に残る貴重な業績としては，物理学者 石谷伝一郎，医学者 眞鍋嘉一郎による福島県飯坂温泉および兵庫県城崎温泉中のラドンの測定（1910），物理学者 木下季吉，西川正治，小野澄之助による大気中の放射性沈積物の研究（1911），物理学者 木下季吉，池内本による写真感光膜における□線飛跡に関する研究（1913），内務省衛生試験所の石津利作，衣笠豊による多数の温泉中のラドンの測定（1913），および台湾総督府に在職した岡本要八郎による北投温泉における放射性沈殿物の発見（1906）などがある。

これらの研究のうち，日本の化学者が最も強い関心を示したのは，北投温泉における沈殿物の発見であった。この沈殿物の放射能は，当時放射線の写真作用によって確かめられたが，鉱物としての特色は，重晶石に類似するものであった。その後この鉱物は東京帝国大学（以下，職名を除き東大と略記）の神保小虎教授に送られ，神保は1911 年に北投温泉を調査し，のちにこの鉱物を北投石（Hokutolite）と命名した（1922）。化学教室においては，いち早く，北投石の分析が垪和為昌教授の指導の下に，化学科の学生であった飯盛里安，柿内三郎，青木芳彦の三名により行なわれた（1907）。その分析値は，“日本鉱物誌（第2 版）”（1916）に掲載されている。この分析ではウランは検出されず，垪和教授は，「この鉱物は水成鉱物であるので，ラジウムだけが，偶然ウランから離れて沈積したものであろう。」との意見を持たれたが，この意見は今日から見ても卓見である。北投石の主成分は（ Ba, Pb）S04 であるが，その鉛の原子量は，その後にT. W. Richards と鮫島實三郎（米国留学中）によって測定され，その値は207.3 で，普通の鉛（common lead）であることが示された（1920）。

学生時代に北投石の分析を行なった飯盛は放射化学に興味をもち，垪和教授指導のもとに分析化学を専攻した。1910 年大学を卒業したのち，しばらくは東大および第一高等学校において教育に従事したが，1917 年9 月に新しく設立された財団法人理化学研究所（以下，理研と略記）に研究員補として入所し，その後同所において長年にわたる研究活動のスタートを切ることになる。

歴史的に見て，飯盛の日本の放射化学教育に対する貢献は大きい。まず，1918 年12 月にロンドン化学会でOxford 大学のF. Soddy が行なった画期的な講演は，その要旨が，「放射変化の研究により拡張せられたる化学元素の概念に就て」の題目で東京化学雑誌

に抄録された（1919）。その内容は日本の化学者の多大の関心を呼んだが，東大の雑誌会においても検討された。その席上，飯盛は“ISOTOPE”の邦訳として“同位元素”を提案し，櫻井錠二教授，池田菊苗教授，松原行一教授，柴田雄次教授列席の上で，承認された。

つぎに，飯盛は，大学において，長年にわたり放射化学の基礎を“放射体化学”の名称で講義を行ない，この講義は1922 年から1943 年まで22 年間に及んだことは特筆に値する。この講義の第1 章　名称は，F. Soddy の著書，「The Chemistry of the Radioelements」（1915）に由来している。

東大理学部化学教室における初期の放射化学的研究としては，北投石の研究につづき，柴田雄次研究室による含希元素鉱石の研究がある。化学科の学生，木村健二郎は化学教室の柴田雄次教授の研究室に入り，第3 学年の化学特別問題研究（いわゆる卒論）では，希元素鉱石に関する研究テーマを与えられた。

1920 年東京化学会（日本化学会の前身）の第一回講演では2 件の講演が行なわれたが，そのひとつは柴田雄次，木村健二郎による東洋産含希元素鉱石の研究である。この研究は，「東洋産含希元素鑛石の化学的研究（其一），美濃苗木産苗木石，ソェルグソン石及びモナズ石の分析（豫報）」（ 1921）として，柴田，木村の連名で印刷公表されている。

この仕事では，研究対象が放射性鉱物であるので放射能の測定が必要であったが，これについては物理学教室の木下季吉に教えを乞い，アルミはく験電器を使用した。木村は，1922 年4 月からは分析化学の講義と実験指導を開始し，同年11 月には東京帝国大学助教授として，分析化学講座を分担した。

第一次大戦（1914－1918）のあと，放射性元素の研究を熱望する日本の有能な化学者は，櫻井錠二教授をはじめとする多くの指導者の応援を得て，欧州に渡り，F. Soddy，G. v. Hevesy などの泰斗に師事した。

飯盛里安は，1919 年6 月末日本を出発，1 ヶ月半の旅程を経てロンドンに到着したが，当時Oxford 大学に着任したばかりのSoddy 教授からは研究設備の整うまで1 年間は来室を待つように指示された。そのため，最初の1 年間はCambridge 大学のHeycock 教授の下で分析化学の研究に従事したが，1920 年10 月からは，Soddy 研究室において放射化学研究の指導を受けることができた。研究内容は，ウラン，トリウムの定量法及び放射性指示薬の使用法などであった。後年，飯盛は当時の実験をふまえて，ウランX1 を指示薬（トレーサ）とするトリウムの分析法を日本化学会誌に発表している（1929）。これは日本における放射性トレーサを用いた最初の研究である。飯盛は1921 年11 月に日本にもどり，理研における研究活動をはじめた。

1922 年，Copenhagen 大学理論物理学研究所のN. Bohr が原子構造論を発表し，つづいてG. v. Hevesy とD. Coster がこの理論の証明となる72 番元素ハフニウムの発見を1923 年1 月にNature 誌上に報じたが，東大の木村健二郎はこれに感銘を受け，Bohr 研究所への留学を希望した。木村は，1925 年1 月，北野丸に乗船し，40 日間の航海ののち，マルセイユから汽車で3 月5 日コペンハーゲンに到着した。木村はHevesy の指導によりジルコニウムとハフニウムの化学分析法を研究したが，まもなく7 月にHevesy がドイツのFreiburg 大学に赴任したので，その後は，同研究所に滞在していた

仁科芳雄と共にX線分光学の研究を行なった。X線分光法によるハフニウムの定量，X線吸収スペクトルの化学結合依存性の研究などはその時の仕事である。Hevesy との共著「The solubilities of the phosphates of zirconium and hafnium」は1925 年に，J. Am. Chem. Soc. に発表されている。1927 年4 月までコペンハーゲンに滞在した木村は7 月に帰国し，8 月には分析化学講座担任を命じられ，1933 年東京帝国大学教授に任命された。

1930 年代には，Freiburg 大学教授となったG. v. Hevesy の許に，京都大学の石橋雅義および東京大学の宗宮尚行が留学し，放射性指示薬などについて指導を受けた。

なおHevesy 教授は1931 年に来日し，各地における講演を通じて，日本の化学者に放射化学の最先端の話題を提供し，この分野への関心を喚起したことは喜ばしい出来事であった。

（2） 天然放射能に関する研究

昭和初期から戦後に至るまで，日本における天然放射能の研究は順調に発展した。人工放射能の場合と異なり，GHQ の指令などにほとんど影響されなかったことが幸せであった。この分野では，放射化学者のみでなく，地球化学者も大きな役割を果している。

（2-1）理研における研究

Oxford 大学より帰国した飯盛里安は，早速研究体制を整え，1922 年よりは，理研の飯盛研究室を主宰し，天然放射能の研究および放射線測定装置の開発に多くの業績を挙げた。日本産の鉱物中に含まれるウラン，トリウム，ラジウムの研究，天然水中のラドンの研究はよく知られているが，特に滋賀県田ノ上山産の放射性マンガンノジュール中のラジウムの分析（1926）は，日本における鉱物中のラジウム定量の最初の報告として高く評価されている。

飯盛は，また，理研工作部の協力を得て放射線測定装置の製作に熱心に取り組んだ。その際，ラジウム標準としてはSoddy 教授から分譲されたラジウム含有塩化バリウム製剤およびラジウム／ウラン比が精密に決定された英国コーンウォール産の閃ウラン鉱，また，トリウム標準としてはセイロン島産トリアナイトが大いに役立った。理研製の放射線測定装置としてはIM 泉効計（IM は飯盛の姓のイニシャル。ラドン測定用）および理研製精密ラドン計（ラジウム測定用）などが研究用として最もよく用いられ，日本の放射化学者により多くのラドン，ラジウムの測定データが得られた。

（2-2）大学における研究

東大の木村健二郎研究室の行なった天然放射能の研究には，まず，柴田研究室から引き継いだ希元素を含む鉱物の研究がある。木村の門下生として最初に卒業研究を行なったのは篠田 栄（のちに九州大学教授）であるが，木村，篠田は連名で「東洋産含稀元素鉱石の化学的研究（其十六），朝鮮順安産モナズ石の分析」（ 1931）を発表した。この研究は，鉱物成分の分析のみでなく，ウラン，トリウム及び鉛の分析値を用い，鉛法によって鉱物の年代決定を試みている点に特色がある。この系列の報文（其

十八）では木村，三宅泰雄（のちに東京教育大学教授）により苗木石の年代決定が報告された（1932）。これらの研究では鉛についてcommon lead の補正を行なっていないので，得られた年令は最大値を示すにすぎないが，我が国における放射能年代測定（radioactive dating）のさきがけとして評価できる。希元素鉱石についての一連の研究は，その後も門下生によって長年に亘り続けられ，1975 年までに第66 報まで発表されたことは注目に値する。

1937 年ごろから木村研究室は日本の温（鉱）泉水中の微量成分の研究に着手したが，温（鉱）泉中の天然放射能に関する研究はその一環をなすものである。この領域における最初の研究は，門下生 中井敏夫による日本の温（鉱）泉および石油井湧出水のラジウムの定量（1937）であるが，中井はさらに約500 の日本の温（鉱）泉につきラジウムを，また一部の温（鉱）泉につきラドンを定量し，95 ページに及ぶ報文「Radium Content of Mineral Springs in Japan」（1940）をBull. Chem. Soc. Jpn. に発表した。これらの研究により，ラジウム含量の高い日本の温（鉱）泉は，兵庫県有馬新温泉を最高に，山梨県増富鉱泉，島根県の池田ラジウム鉱泉および湯抱温泉，鳥取県三朝温泉などであることが明らかになった。

ラジウムの定量は，温（鉱）泉のみでなく，日本および朝鮮半島の岩石，海底土，温泉沈殿物などについても広く行なわれた。

ラドンについては，放射能泉に関する一連の研究が特に優れている。黒田和夫（のちに米国のArkansas 大学教授）は増富温泉においてラドン含量の極めて高い泉を見いだし，この泉を詳細に研究した（1943）。さらに，木村，黒田，横山祐之（のちにフランスのSaclay 研究所主任研究員）は，放射能泉におけるラジウム，ラドンとその壊変生成物の間における放射非平衡の問題，ラドン源の問題について興味ある考察を行なっている。木村，黒田，横山の報文，「強放射能泉中におけるラドンとその壊変生成物との平衡関係」(1948)，黒田，横山の報文「On the Equilibrium of Radioactive Elements in the Hydrosphere」（1948）において得られた結論は，次の通りである。1）泉水中のラドン，RaA，RaB，RaC の含量から計算すると，ラドンがその源から泉の湧出口に到達するのに要する時間は数分ないし数十分に過ぎない。2）ラドンの主たる供給源は温泉沈殿物と推定される。

ウラン，とくに微量ウランの分析は，ラジウムの分析より遅れていたが，門下生 中西正城は，海水，温（鉱）泉水，温泉沈殿物などのウラン含量を報告した（1947）。

1950 年ごろから東大南英一研究室は，他大学からの研究協力者と共に，秋田県仙北郡の玉川温泉及び北投石について総合的な研究を行なった。

1898 年，櫻井広三郎は玉川温泉（当時は渋黒温泉）において，新奇な鉱物を採取，東大地質学教室に保存されていたが，この鉱物は，神保教授により台湾産の北投石と同質とみなされて北投石の名称を与えられた。現在，北投石の結晶は天然記念物として特別許可なしには玉川温泉における採取が禁止されている。南グループの研究成果としては温泉水および北投石中のウラン，トリウム系の放射性元素の定量，北投石の成長速度の推定，玉川温泉の沈殿物硫黄華に含まれる北投石微晶（いわゆる“baby 北投石”）の発見などがある。また，北投石中の鉛は台湾産と同様に普通の鉛（common lead）であることも明らかにされた。これらの成果は南英一教授退官記念論文集

「Geochemistry of the Tamagawa Hot Springs」（ 1963）にまとめられている。

放射性の温泉沈殿物については，北投石の研究以外に，いくつかの注目すべき研究がある。 九州大学の岩崎岩次研究室は，「強放射能泉の地球化学的研究（第一報）」（1946）とその続報において，放射性沈殿物からのラドンの放出，温泉沈殿物へのラジウムの共沈のメカニズムなどにつき興味ある説を提出した。

また，岡山大学温泉研究所では，斎藤信房（東大と兼務）と芦澤 峻が，それまで日本において知られていなかった，マンガンを主成分とし，極めて高いラジウム含有量を示す沈殿物を三朝温泉において見出し，その化学組成とラジウム含有量（11800×10-12 gRa/g）を報告した（1957）。

火山ガス中に含まれるラドン，トロンについては，岩崎岩次研究室と他大学の共同研究者が，多数の火山について研究し，その結果をまとめて，「Radioactivity of Volcanic Gases in Japan」（1956）の報文として，国際火山学会で公表した。

（2-3） 天然放射能の利用

天然放射能の利用として重要なものにトレーサの利用がある。飯盛の行なったUX1をトレーサとするトリウム分析法については既に述べたが，Freiburg 大学のHevesy 教授の許に留学した，宗宮尚行，石橋雅義の両名もこの領域ですぐれた研究を行なった。宗宮は，Hevesy と連名の報文「Über Platinschwartz」（1934）をZ. Phys. Chem. に発表している。この研究は白金黒製造の際の鉛の挙動をThB をトレーサとして追跡したものである。また，石橋雅義研究室では，ThB をトレーサとして使用し，「放射性指示作用による分析化学的研究（第一報），鉛サリチルアルドキシム塩の溶解度測定」（ 1934）を日本化学雑誌に報告している。同研究室はその後もこの系列の研究を少なくとも13 報発表しており，多くの成果を挙げている。

（3） 人工放射能に関する研究

（3-1） 理研及び東大における人工放射能に関する研究

1937 年，理研の1 号サイクロトロン（65 センチ，23 トン）が稼働してから，仁科芳雄らは早速人工放射能の研究を始めたが，核反応の研究では，照射されるターゲットを純粋にしたり，照射後ターゲットから生成物質を分離したりする化学的操作が必要である。仁科は，このような仕事を物理学者と協力して行なうパートナーとして，コペンハーゲン以来の親友である木村健二郎を選んだ。当時，木村研究室には井川正雄という化学分析の達人がおり，木村は仁科との共同研究に彼を参加させた。

そのころ，外国では，ウラン，トリウムなどを中性子照射してウランよりも高い元素番号を持つ元素や新しい放射能を見出そうとする試みが行なわれていたが，仁科，木村もサイクロトロンから二次的に得られる中性子でトリウム，ウランを照射する実験を1938 年ごろから開始した。この実験に参加した研究者は，物理グループでは仁科，矢崎為一，江副博彦，化学グループでは東大の木村と井川であった。なお，1939 ～ 1940年には，東大木村研究室の卒論学生であった斎藤信房と松浦二郎は，木村教授から卒論のテーマとして，「中性子によるウランの核分裂について」および「 第93 番元素

の生成」を与えられ，井川正雄の実験補佐として化学グループに参加した。

仁科らの研究の特色は，遅い中性子でなく，サイクロトロンからの速い中性子を用いた点にある。研究の内容は三つに大別できる。

(a)　トリウムに中性子をあててTh-231 を作る研究。

この研究では(n, 2n)反応によってTh-231 が生まれるのであるが，トリウム系列(4n)からアクチニウム系列（4n+3）の核種が生成し，系列の転換が行なわれた点が重要である。

(b)　ウランに中性子をあてて，（n, 2n）反応によってウランの新核種U-237 を発見した研究。

この仕事は，当時は天然に存在しないと考えられていた（4n+1）系列（今はネプツニウム系列とよばれる）の核種を最初につくった点でも注目に値する。

(c)　速い中性子によるウランの核分裂の研究。

この研究は，速い中性子を用いたために，外国の研究とは異なる結果が得られ，中程度の質量数を持つ新しい核分裂生成物が発見されている。それらは，ルテニウム，ロジウム，パラジウム，銀，カドミウム，インジウムおよびスズの7 元素に属する放射性核種である。

これらの研究のうち，（b）については，新核種U-237 がベータ崩壊することが実験で確かめられたので，当然93 番元素の生成が期待された。しかし，93 番元素の化学的性質についての予想が正しくなかったので，レニウム担体を用いる93 番元素の捕集は不成功に終った。

（c）の研究は，同じころ米国でE. Segre とG. T. Seaborg が研究を進めていた速い中性子によるウランの対称核分裂の研究に先行したものであることはSeaborg 自身が認めている。

また，仁科，木村のグループは，核分裂の発見の報が日本に届く前から，照射実験を行なっており，中性子照射したターゲットを溶解して化学分離を行なうと，いろいろの元素のフラクションに放射能が散ってしまうことを知って困惑していたが，それが核分裂現象のためであることには気付かなかった。日本の研究は核分裂発見にあと一歩のところまで進んでいたわけである。

仁科，木村の研究は，日本の放射化学の歴史上で，最も高い国際的評価を受けているので，関係の文献を記述しておく。

（a）の研究：Y. Nishina, T. Yasaki, K. Kimura, M. Ikawa, Nature, **142**, 874（1938）.

（b）の研究：Y. Nishina, T. Yasaki, H. Ezoe, K. Kimura, M. Ikawa, Phys. Rev., **57**, 1182（1940）.

（c）の研究

（1）：Y. Nishina, T. Yasaki, H. Ezoe, K. Kimura, Nature, **144**, 547（1939）; **146**, 24（1940）.

（2）：Y. Nishina, T. Yasaki, K. Kimura, M. Ikawa, Phys. Rev., **58**, 660（1940）; **59**, 323, 677（1941）.

（3）：Y. Nishina, K. Kimura, T. Yasaki, M. Ikawa, Z. Phys., **119**, 195（1942）.

なお，日本で痕跡量のプルトニウムがつくられたのは，戦後再建された科研（株式

会社科学研究所）のサイクロトロンによるウランの照射によってである。日本原子力研究所の木村健二郎と東大の斎藤信房研究室の共同研究であった。この研究は，第1 回原子力シンポジウムにおいて報告され，この会合の報文集に印刷公表されている（1957）。

（3-2） 核爆発に伴う放射能に関する研究。

歴史的に見て重要なものとしては，広島，長崎の原爆に伴う残留放射能，大気圏核爆発に伴う放射性降下物および“ビキニの灰”の放射化学分析がある。この分野では日本の放射化学者の活躍が目覚しい。

広島，長崎の放射性降下物の分析は，まず，木村健二郎研究室において行なわれ，広島高須の試料についてはSr-89，Ba-140，La-140 およびおそらくZr-95，Nb-95，Y-91の存在が，また長崎西山の試料については，Sr-89，Ba-140，Ce-144，Pr-144 およびY-91の存在が確かめられた（1945）。その後長崎の試料は再び分析され，Cs-137，Ba-137m，Sr-90，Y-90，Ce-144，Pr-144 が確認されると共に，Pu-239 も検出された（1951）。

“ビキニの灰”の分析は，1954 年，日本全国の放射化学者の総力をあげて行なわれた。この分析に参加した主要な研究室は，東大の木村健二郎，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研究室などである。このほか京都大学では清水栄研究室を中心として物理，化学グループが分析に従事している。その結果，“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。木村健二郎は，「ビキニの灰の分析をめぐって」と題する解説（1954）の中で，戦前に理研で行なったウラン，トリウムの中性子照射実験を回顧し，「今回の実験で，はからずもその時みつけた核種Ru-108 やU-237 にふたたびめぐり会い，誠に感慨無量であった」と述べている。実は，U-237 の検出は極めて重要な結果で，ビキニ環礁における実験に使用された爆弾が3F爆弾であったことを示す証拠として国際的に注目を集めた。

大気圏核爆発に伴う降下物の分析については，“ビキニの灰”の場合よりも多数の大学の化学者が参加し，優れた業績を挙げた。特に，東京教育大学三宅泰雄研究室および金沢大学木羽敏泰研究室の貢献は大きい。

（3-3）人工放射能（アイソトープ）の利用

1950 年に米国産アイソトープが輸入（別に本書に記載）されたのちには，化学者の間でアイソトープ利用についての関心が急速に高まった。1951 年には，文部省科学研究費による“人工放射性同位元素総合研究”（委員長 木村健二郎）が発足し，放射化学者も多数参加した。研究成果は「Annual Report of the Research Committee on the Application of Radioactive Isotopes in Japan」［ Vol. I, Part 1（ 1951）およびPart 2（ 1951）; Vol. II（1952）; Vol. III（1956）］に収録されている。

（4） 放射化学討論会の発足

1950 年代の後半は，日本の原子力研究の黎明期で，1956 年には東京大学原子核研

究所が設立され，また日本原子力研究所が発足した。さらに1957 年には日本原子力研究所のJRR-1 原子炉が臨界に達した。この時期に，東京大学では原子力の研究・教育を全学の関係学部・学科が協力して行なうための総合計画が決定し，その一環として放射化学講座が設立された。この講座は国内における最初の放射化学の講座である。その初代教授（併任）となった斎藤信房は，放射性元素の研究に関心がある国内の科学者に，放射化学に関する討論会を開くことを提案した。アンケートの結果，柴田雄次教授をはじめとする38 名の指導的化学者，応用化学者，地質学者などの賛同を得て，第一回討論会は同年12 月20，21，22 日に日本化学会，日本化学会関東支部の共催により学士会館において開催された。

討論課題は，（1）天然放射能，（2）放射性同位体の製造，（3）放射能測定，（4）放射化分析および放射化学分析，（ 5）ホットアトム化学，（ 6）核燃料再処理および廃棄物処理における放射化学的問題，（7）放射性フォールアウトおよび汚染された物質中の放射性核種の分離・定量に関する問題，（8）その他一般，である。3 日間に及ぶ会合では，特別講演1 件，“総説講演”9 件，一般の研究発表43 件があった。また，参加者間の討論も極めて活発であった。その際の出席者の要望に応えて，討論会はその後も毎年1 回開かれ，今日に至っている。

（日本放射化学会の許可を得て第 50 回放射化学討論会予稿集(2006)より転載）

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 12, No. 1, p.33 – 40 (2008)

【原著論文】

放射線教育の立場から地球温暖化を考える

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
TEL 045-981-8752 FAX 045-981-7950 E-mail: ohno-trl@01.246.ne.jp
（2009 年 3 月 10 日受理）

[要旨]
地球温暖化の原因として人類が放出する二酸化炭素であるという考えの根拠が極めて薄いことを指摘する。科学・技術に関係する様々な場において地球温暖化問題の議論を試みることを提案する。とくに学校教育の場では、教科書に書かれ、新聞・テレビで宣伝される結論そのものでなく、そこに至る道筋を考えることを学生・生徒に伝え、そこに学ぶことの意義・科学の面白さがあることを理解させる、その意味で地球温暖化問題はめったにない絶好の教材であることを報告する。

はじめに

過去 150 年間の地球温暖化の傾向については多くの人が容認している。その原因については、地球公転軌道半径の周期的変化（10 万年、４万年、２万年の周期が存在）によるという古くからの説明（メランコヴィッチ説）のほか、科学者の側からは人類が放出する二酸化炭素であるという考えと宇宙線強度の変化であるという考えが提出されてきた。ところが新聞・雑誌・テレビあるいは政治・経済関係者からの発言は二酸化炭素を原因とする説に偏っている。科学者の場合は、それぞれが信ずる根拠に基づいての発言であろうから、ここで問題としない。科学者以外の場合、とくに学校教育に携わる人たちの場合は問題が簡単ではない。客観的なものの見方をすることなく、あるいは少なくとも自ら考えることなく、「地球温暖化は人類の放出する二酸化炭素が原因である」として、この説を人から人へと流布させるだけの場合では、何らかの意図をもつ特定の人たちの策略に加担することになりかねない。

われわれはいま人類の未来に深刻に関わるとされる地球環境問題に直面し、差し当っては 21 世紀の経済と社会の発展のあり方について選択を迫られているとされる。21 世紀のいまでは、われわれは基本的な自然の理解に充分なだけの智の集積のなかにいる。議論すべき問題の出発点を正しく認識してそれを共有すること、これを次代に伝えるべきである。本稿では、地球表面の温度が何によって決まるかを概観し、そのなかで二酸化炭素がどのような働きをするのか、地球温暖化をもたらすとされている根拠を検証する。とくに二酸化炭素の赤外吸収スペクトルをしらべ、大気中の二酸化炭素が地球温暖化の原因となる可能性が極めて低いことを報告する。

I. 地球温暖化の原因は二酸化炭素だろうか？

1．地球表面の気温を支配するもの

地球は半径 6,371 km の固体球でその周りを厚さ～数 100 km の大気が覆っている。固体

球の内部は、大きく分けて、コアとよばれる半径 3,480 km、温度 4,000－6,000 ℃の金属鉄の部分、その周りにマントルとよばれる厚さ 2,880 km の岩石（金属およびケイ素の酸化物）、その外側に薄い地殻（6－35 km)からできている。地表の 70%は海洋、30%は陸地であり、そして大気の大部分（質量 5.2×10^{18} kg）は地上 11 km までの対流圏（温度が高さとともに低下）に存在する。さらに上空へと成層圏（50 km まで)、中間圏（温度が高さとともに低下する)、その上の熱圏、そして磁気圏がつづく。80－90 km までは二酸化炭素濃度は 0.03%、水蒸気濃度は 0.1～4%である。分子密度は地上で 10^{25} 個/m^3 ,地上 100 km 上空で 10^{18} 個/m^3 である。オゾンは地上 10-50 km に分布し、高度 25 km で酸素とオゾンによる太陽からの紫外線吸収が最大になっている。

地球の誕生時に微惑星の衝突で地球が獲得した熱エネルギーは、いまなお地球内部に膨大な熱エネルギーとして蓄積されている。さらに岩石に含まれていた放射性元素からの壊変エネルギーも蓄えられる。これらの熱エネルギーは岩石(マントル）の熱絶縁性のために地球表面まで伝導してくる地殻熱流量は 87×10^{-3} J/m^2s と小さい値である。火山、温泉・地熱・地震などによる熱流量はさらにその数%以下である。

太陽の放射エネルギーは 5,780 K の熱輻射による。その強度は太陽 - 地球の位置(1.5×10^{11} m) において 1.37×10^3 J/m^2 s（人工衛星による測定値）である。また太陽からの全放射エネルギー 1.37×10^3 J/m^2 s $\times4\pi$ $(1.5\times10^{11}$ m$)^2$ $=3.9\times10^{26}$ J/s が得られる（太陽風のエネルギーは放射エネルギーに比して 6 桁以下）。その放射エネルギーは波長 200－4,000 nm にわたって広く分布し、可視領域（～0.48 μm) にピークをもつ。そのうちのおよそ 30% は大気や地表面による散乱・反射で宇宙空間に戻され、20% は大気中のオゾン・水蒸気・エアロゾル・雲によって吸収され、残りの 50% が地表面（海・陸に 7 : 3 の割合、さらにわずかながら生物）に吸収される。吸収さ

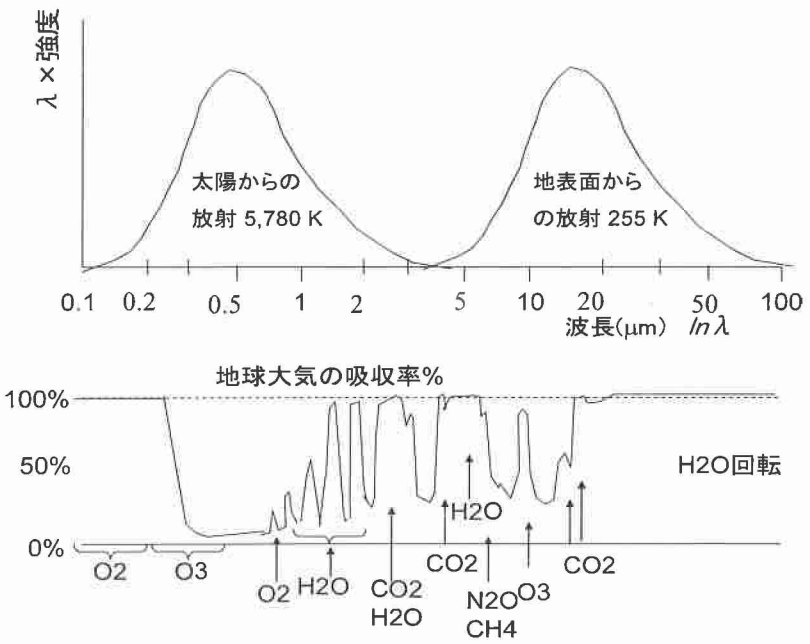


図 1.　太陽（温度 5,780 K) と地表面 (温度 255 K) からの放射スペクトル、並びに気体分子の吸収の波長位置を示す概念図

(上図）放射スペクトルは、波長(μm ）の対数に対して(波長×放射強度）をプロットしてある。これにより曲線の下と波長範囲で囲まれる面積が放射エネルギーをあらわす。太陽からの吸収と地球からの放射エネルギーが等しいことに注意。(下図）地球大気が吸収するスペクトル成分。波長 0.3 μm 以下の太陽放射は O_2、O_3 により、また波長 15 μm 以上の地表面放射は CO_2、H_2O により吸収される。安田延壽「基礎大気科学」(1994、朝倉書店）の図を基に作成。

れた放射エネルギーは種々の緩和過程を経て熱エネルギー化され、熱輻射として宇宙空間に放出される。ここで地球全体のエネルギー収支を考える。地球の平均半径 6,371 km を用いて地球が受ける太陽からの放射エネルギーは $1.37\times10^{3} J/m^{2}s\times\pi(6{,}371\ km)^{2}$、この 70% が地球表面に吸収される。そして等量のエネルギーが地球の表面積 $4\pi(6{,}371\ km)^{2}$ から有効放射温度 T_e (K)で宇宙に放出される。Stefan-Boltzmann 式によって

$$4\pi(6{,}371\ km)^{2}\sigma T_e^{4} = (70/100)\times1.37\times10^{3} J/m^{2}s\times\pi(6{,}371\ km)^{2} \qquad (1)$$

量子論で知られている $\sigma = 5.67051\times10^{-8} J/(s\ m^{2}K^{4})$ を使って T_e=255 K=−18 ℃を得る。この温度の熱放射は、波長～15 μm をピークとする赤外領域の電磁波である（図 1 上図）。地球に入射する太陽放射（200 - 4000 nm）のうち、ほとんどの可視光線は大気を通過し、また大部分の紫外線と特定波長の赤外線は大気中の極性分子（CO_2, H_2O, CH_4, O_3, N_2O など）に吸収される（図 1 下）。それに対して地球表面から放出される熱放射のほとんどは赤外領域にあり、分子振動の励起のさいに電気双極子モーメントの変化を伴うような分子に吸収されて地球の再加熱に寄与できる可能性がある。

2．二酸化炭素原因説の根拠とそれに対するコメント

(i) ここ数十年間におけるハワイマウナロアにおける二酸化炭素濃度の観測値の変化と各地の地球気温の変化に相関関係がみられることについて多くの報告がある。しかしながら両者の間の因果関係の有無については何の情報もない。

(ii) 地球物理、惑星科学の分野の教科書によると、金星、地球、火星の３惑星の表面温度の違いはそれぞれの惑星の太陽からの距離の違いだけではなく、惑星大気の組成を考えて初めて理解されるという。すなわち二酸化炭素の温室効果によるものとして理解されている。ただし圧力の違いによる効果については明確でない。

	軌道長半径 AU	大気圧 bar	大気組成	表面温度 ℃
金星	0.723	90	CO_2(96.5%),N_2(3.5%), H_2O(0.015%)	480
地球	1	1	N_2(78%),O_2(21%),H_2O(0.3%),CO_2(0.03%)	22
火星	1.524	0.07	CO_2(95.3%),N_2(2.7%),H_2O(0.03%)	-23

(iii) 原始地球では太陽からのエネルギー流入量が現在よりも 20～40% 少なかったと考えられているが、それにも拘わらず海が凍結したという地質学的証拠は残っていない。これは原始地球の大気に二酸化炭素が多かったため、完全凍結に至らなかったと説明されている。

(iv) 二酸化炭素は可視光に対して透明であるが、赤外線に対しては波長 2.0、2.7、4.3、15 μm の位置に吸収をもつ。二酸化炭素が空気中に含まれるとき、暖められた地球表面から放射される赤外線のある部分が吸収される。その過程で地球が再加熱される。次節で定量的に検討する。

３．大気中二酸化炭素による赤外線の吸収

温室効果ガスとしての二酸化炭素の有効性を検討するためには、地球放射（実質的には5～50 μm の範囲）に対する二酸化炭素の吸収効率を知る必要がある。15 μm 吸収のバンド幅と吸収係数がわかればよい。図 3 のデータからはバンド幅は 14.9 から 15.1 μm の範囲内に、そして最大吸光度 0.03 を読みとることができる。空気密度 1.295 kg/m^3 中の 357 ppm CO_2 濃度は 0.01034 mol/m^3、セル長 0.1 m、吸光度 0.03（強度 I_0 の電磁波が吸収係数 μ、濃度 C、距離 x を走って強度 I であるとき、吸光度 $I/I_0=10^{-\mu Cx}$ の関係がある）より、吸収係数 μ= 29.0 m^2/mol at 15 μm を得る。大気はこの密度で 8,400 m の上空までつづくと仮定して

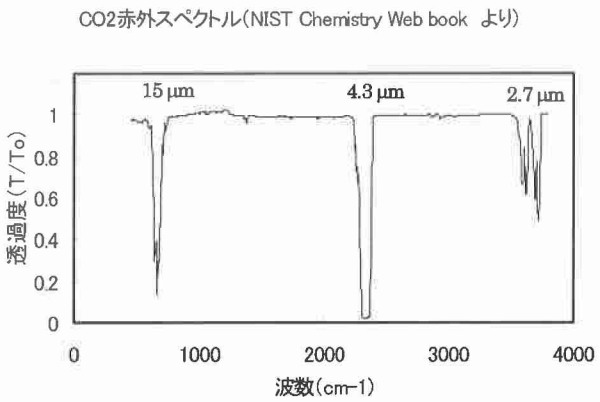


図 2. NIST からの CO_2 赤外データ
200 mmHg CO_2 を N_2 ガスで 600 mmHg に希釈して測定
(4/cm)

（空気中 350 ppm 濃度の CO_2 の場合）波長 15 μm の透過率：
0.1% at 10 m ; 10^{-30} at 100 m
（空気中 700 ppm 濃度の CO_2 の場合）波長 15 μm の透過率：
0.0001% at 10 m
すなわち大気中の距離 10 m で波長 15 μm の赤外線の大部分は吸収される。地球が放出する全放射エネルギーのうちで波長 15 μm の赤外線が占める割合はおそらく 10% に満たない（図 1 の上右図で、曲線の下の全体の面積に対する 15 μm 吸収(波長幅 1 μm 以下）の面積を見積もる）。しかも現在の大気中 CO_2 濃度 0.03%（＝300ppm）ですでに吸収が飽和しているので、将来、CO_2 濃度が 2 倍、3 倍に増加しても CO_2 による温室効果の程度には影響しない。さらに、地球大気の温室効果としては CO_2 よりも H_2O がはるかに大きな効果を有することも図 1 から分かる。

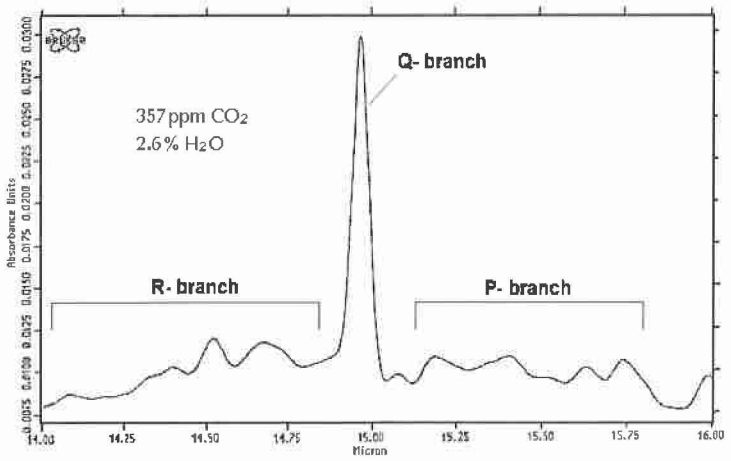


図 3. Hug による 15 μm CO_2 吸収スペクトル
10 cm 長セル (150 cm3) 中の乾燥空気に 357 ppm CO_2 および 2.6 % H_2O を添加して FT-IR で測定.
(2/cm)

４．これまでのまとめ

(i) 地球表面の温度を維持しているのは太陽からくる電磁波である。（太陽風、地球内部からの熱伝導ははるかに小さい）。

(ii) 暖められた（温度 T_e ）地球表面からは宇宙空間に向かって温度 T_e の熱放射を行う。

(iii) 太陽から地球に入るエネルギーと地球から宇宙に放出されるエネルギーは釣り合う。

(iv) 太陽からの電磁波を吸収するのは、地球表面の物質(水、大地、生物など）及び大気中の分子（O_2、H_2O、O_3、CO_2、CH_4など）である。地球及び大気からの熱放射(赤外線）は CO_2、O_3、H_2O によって吸収されるが、H_2O がもっとも大きい効果をもつ。

(v) 将来、大気中の CO_2 の濃度が仮に２倍、３倍と増加しても地球放射の赤外線(15 □m)を吸収する量に変化はない。すでに吸収は飽和されているからである。

(vi) 0.03% の CO_2 が原因で地球-宇宙間の熱平衡を不安定にする機構は考えられない。

(vii) 以上により、地球温暖化の原因が CO_2 であるとする根拠はないといえる。

II. 問題点の指摘と考察

地球表面の温度は地球が受け取る太陽からの放射エネルギーの変動に依存する。太陽放射が一定でも、太陽-地球間の距離に変動がある場合、また大気中の雲の量や氷河の面積が変化して太陽放射の反射量に変動がある場合には、地球が受け取るエネルギーは変動する。実は、太陽磁場は周期的に変動する（11 年周期がよく知られている)。太陽の磁場活動が強いと地球表面に降り注ぐ宇宙線強度が弱くなり、大気中の雲の形成が抑えられ、地球が受け取る太陽放射が増加する。

ここで幾つかの問題点を指摘する。

(i) 太陽放射の吸収

太陽光強度を S、太陽-地球の距離を x、地球の半径を R としたとき、地球が太陽光を吸収する割合は $S\cdot(3.14)R^2/4\pi x^2$ であるが（(1)式）R として固体地球の半径をとるのか地球大気を含んだ半径をとるかが問題である。紫外線に対しては酸素・オゾンを含む大気の厚さ(10～500 km）を考えるべきであるが、可視光線に対しては固体地球の半径を考えるべきであると考えられる(図 1 参照)。

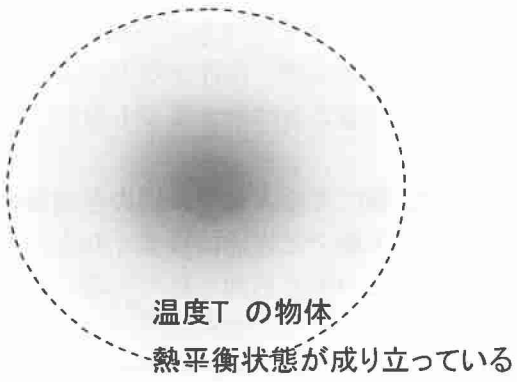


図 4. 熱平衡状態にある温度 T_e の壁(点線).
壁から外に(宇宙空間に) 向かって単位面積当たり毎秒 $u=\sigma T_e^4$ の放射が放出される。全放出エネルギーは壁の半径を R としてこの $4\pi R^2$ 倍である。

(ii) 地球による太陽光の反射

太陽光は地球大気に浮かぶ雲、ダスト、分子、氷などによって一部が反射してそのまま宇宙空間に逃れる。その量はおよそ30%とされる。

(iii) 熱放射式の適用について

平均温度 T_e の地球からの熱放射を考える場合に地球半径をどのように選ぶかが問題となる。物理の教科書の黒体輻射の項をしらべると、一定温度 T_e に保たれた壁に囲まれた一定体積の空間（いまの場合、大気の高さ 500 km で地球全体を囲む大きな球）を考え、壁が熱的に平衡状態にあるときこの空間中に存在する一定密度の放射エネルギーのスペクトルと全エネルギー密度 $u = \sigma T_e^4$ が与えられている。このとき壁から外に放出されるエネルギーは $u \cdot 4\pi(6{,}371\ \mathrm{km} + 500\ \mathrm{km})^2$ であり、これが外から壁内に入射してくるエネルギー（地球及びその大気が受ける太陽エネルギーのうち反射される 30%を除いたもの）と等しくなければならない（(1)式の成立）。ここから得られる T_e は 255 K である。

つぎに地表付近の温度を見積もるために壁の大きさを小さくとり、ほぼ固体地球（半径 6,371 km）が収まる程度の部分としよう。ここからの熱放射は $u \cdot 4\pi(6{,}371\ \mathrm{km})^2$ であるが、この部分が吸収するエネルギーは太陽放射 $(50/100)\times 1.37\times 10^3\ \mathrm{J/m^2} \times \pi(6{,}371\ \mathrm{km})^2$ だけでなく、大気からの熱伝導（大気の対流もふくむ）で入ってくるエネルギーがある。これには太陽放射のうちの 20%と地球放射のうち大気が吸収する部分とがある。前者は $(20/100)\times 1.37\times 10^3\ \mathrm{J/m^2} \times \pi(6{,}371\ \mathrm{km})^2$、後者は図 1 の大気中の気体（水蒸気、オゾン、二酸化炭素）が吸収する赤外スペクトルを考慮して波長 15μm 以上の部分、すなわち固体地球からの熱放射 $u \cdot 4\pi(6{,}371\ \mathrm{km})^2$ のうちのおよそ半分と見積もることにする。(1) 式に相当する関係は

$$
\begin{aligned}
& u \cdot 4\pi(6{,}371\ \mathrm{km})^2 \\
= \ & (50/100)\times 1.37\times 10^3\ \mathrm{J/m^2\,s} \times \pi(6{,}371\ \mathrm{km})^2 \\
+ \ & (20/100)\times 1.37\times 10^3\ \mathrm{J/m^2\,s} \times \pi(6{,}371\ \mathrm{km})^2 + 1/2 \cdot u \cdot 4\pi(6{,}371\ \mathrm{km})^2 \qquad (2)
\end{aligned}
$$

となる。ここから $(1/2)\,u \cdot 4 = (70/100) \times 1.37\times 10^3\ \mathrm{J/m^2\,s}$、さらに $u = 274\ \mathrm{J/m^2 s}$、そして $u = \sigma T_e^4$ であるから $T_e = 303$ K を得る。

しかし地球とその大気が平衡状態にあるという近似がどこまで成立しているか、赤道と極地方や砂漠上空と海洋上などの違いを平均値で取り扱うことがどこまで許されるかなどの問題が残ることは言うまでもない。

(iv) 宇宙線による大気中の雲の生成量の見積もり方

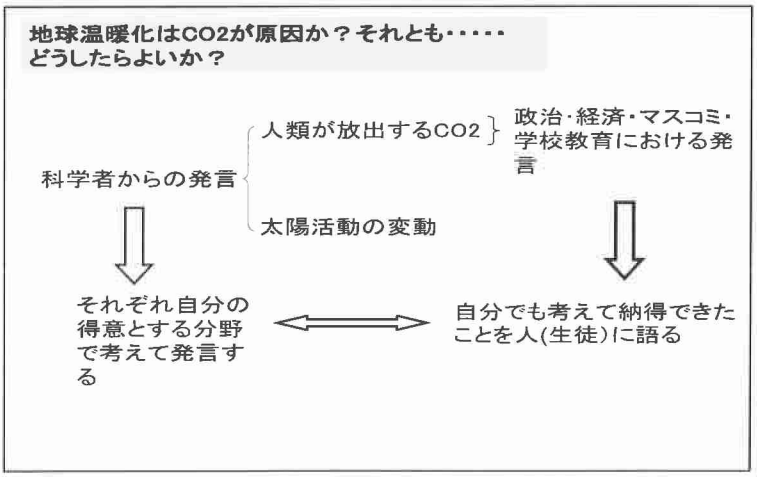
霧箱の実験で定性的にはよく知られている現象ではあるが、この問題を定量的に考える方法はいまのところ知られていないのではなかろうか。

（参考資料）・地球惑星・太陽系に関するデータ：岩波講座「地球惑星科学入門」（岩波、1996）.
・地球表面温度を支配する因子：安田延壽「基礎大気科学」(1994、朝倉書店).
・赤外スペクトルのデータ：NIST Chemistry WebBook; http://nov55.com/ntyg.htm.
・宇宙線と地球温暖化の関係：日本地球惑星科学連合大会(2008.5.25) 特別セッション（幕張メッセ).
・丸山茂徳：「地球温暖化論」に騙されるな、講談社(2008).

III. 学校教育への提案

本稿では、地球温暖化の原因として人類が放出する二酸化炭素であるとする根拠が薄いのではないかという考えを述べてきた。科学者からの発言は、過去150年間の地球温暖化の傾向は確かに存在するものの、その原因については、地球公転軌道半径の周期的変化（10万年、４万年、２万年の周期が存在）によるという説明（メランコヴィッチ説）のほか、人類が放出する二酸化炭素であるという考えと宇宙線強度の変化であるという考えが提出されている。ところが新聞・雑誌・テレビあるいは政治・経済関係者からの発言は二酸化炭素を原因とする説に極端に偏っている。科学者の場合は、それぞれが信ずる根拠に基づいての発言であろうから、ここで問題としない。科学者以外の場合、とくに学校教育に携わる人たちの場合は問題が簡単ではない。客観的なものの見方をすることなく、あるいは少なくとも自ら考えることなく、「地球温暖化は人類の放出する二酸化炭素が原因である」として、この説を子どもたちに一方的に教えるだけの場合では、将来において重大な問題を起こしかねないのではないであろうか。

そこで本稿では、広く科学・技術に関係する様々な場において地球温暖化問題の議論を試みることを提案する。とくに学校教育の場では、教科書に書かれ、新聞・テレビで紹介される結論そのものでなく、そこに至る道筋を考えることを学生・生徒に教え、そこに学ぶことの意義・科学の面白さがあることを理解させる、その意味で地球温暖化問題はめったにない絶好の教材である。



[学校における自由研究・総合学習の時間における課題例]

１．太陽光の強度と太陽－地球間の距離が与えられたときに地球が受ける太陽光のエネルギーを求めること

２．太陽光をスペクトルに分けて理解すること。とくに特定の分子が特定の波長（周波数）の光だけを吸収すること、またその吸収と分子の濃度との関係

３．分子が光を吸収することからその分子の化学反応・エネルギー吸収が起こること

４．過去の気象状態(気温）を知る方法を調べること。なかでも反応の同位体効果を利用す

る方法が重要である。H2O や CO2 などは水の蒸発や二酸化炭素の光合成反応に関係し、その結果が南極の氷床や屋久杉などの植物体中に保存されている。水や二酸化炭素には O16 のほかに O18 が、また C12 のほかに C13 などわずかに質量の大きい分子が含まれている。気温が高いときにはこれらの質量の違いは影響が小さいが、気温が低いときには質量の違いがあらわれることを利用して、古い時代の気温が推定できる。

５．人類の文明と気候変動の関係。いまのわれわれの先祖である現代人（ホモサピエンス）が誕生したのは 10～15 万年前といわれる。地球はほぼ 10 万年の周期で温暖期があらわれるのでホモサピエンスにとって現在の温暖期がはじめて迎えるものである。現在の温暖期は 1 万年前から始まり、これに伴い農耕などの人類の文明(四大文明）が始まり現在に続いているとされている。日本史および世界史においても規模は小さいが特に温暖であった時代と寒冷であった時代が繰り返されている。各時代の気象状態からその時代に特有な社会現象を関連付けて理解することができると思われる。例：江戸時代の飢饉、ロンドンテムズ川の凍結、縄文時代の温暖気候、飛鳥奈良時代の寒冷気候、平安時代の温暖期など

６．地球の温暖化と寒冷化は、人類にとってどちらが好ましいか比較検討する。とくに農耕･牧畜の観点から食糧確保の点から考える。

７．雲量と日射量の関係、雲量と気温変化の関係をしらべる

８．磁場によって荷電粒子の運動が影響を受けること

９．地球に降り注ぐ宇宙線量の変化と雲の発生量の関係を調べる。

宇宙線による C-14 の生成過程を学び、さらに古代杉の年輪に含まれる C-14 濃度から過去の時代の宇宙線量を推定できることを学ぶ。

10．霧箱を用いた放射線飛跡観察

【原著論文】

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 12 No. 1, p. 41 - 50 (2008)

ルミネッセンス観測は放射線教育に使えるか？

橋本哲夫
新潟大学名誉教授、NRI研究所代表
〒950-2053 新潟市西区寺尾前通2-2-10
（2009年3月15日受理）

[要約] 放射線教育の参加者に興味を持ってもらう為の工夫として、放射線と物質の相互作用として観察されるルミネッセンス観測を提案したい。ルミネッセンス現象は従来の霧箱同様放射線現象の可視化とともに、個々の放射線の観察でなく蓄積した放射線現象を二次元カラー写真として観察できるので、情報量は多く多方面に発展できる。ルミネッセンス現象の基礎や原理から始め、その応用としてのルミネッセンス年代測定法を解説し、ついで、ルミネッセンス現象を放射線教育に使うための一例として、岩石片からの燐光（アフターグロー）画像撮影法について述べる。

1. はじめに

放射線は人の五感に感じられないので当然ながら目に見えない。したがって放射線教育の実習での放射線検知には特殊な工夫とか専用の測定機器が必要である。一般の人が放射線の存在を容易に理解するためには、放射線作用を可視化することが必要であり、そのために種々工夫されている。

「エネルギー・環境・放射線教育セミナー」において、実習としてしばしば採用されている霧箱が放射線可視化に向けた試みの一つである。αやβ線が過飽和アルコール状態を通過した時生成する霧状の飛跡を眼で観察するのである。そのほかに、放射線飛跡が作る電気的な短絡（ショート）光を観測するスパークチェンバーや蛍光管を並べて蛍光として放射線飛跡を観測するとともに、過飽和液体を用いた泡箱や、プラスチックや絶縁性固体を用いたトラック法などが放射線の可視化に用いられている。

これらの放射線飛跡の可視化は、個々の放射線のイオン化や励起作用現象に基づいている。個々の放射線現象は放射線の基礎的学習には欠かすことができない。しかしながら、自然界での放射線影響や医療診断や原子力関連施設など放射線利用の現場では蓄積放射線作用の観察が一般的である。

蓄積放射線の観測には、イオン化で生じた全体の電気量を蓄積電気量（励起状態）として計測する積算型電離箱やポケットチェンバーがある。また励起状態が脱励起（定常状態）へ戻る時に発生するエネルギーを光（ルミネッセンス）として測定する方法があり、これがガラス線量計や熱ルミネッセンス線量計(TLD)の原理である。しかしながらこれらの場合放射線教育にとって必要な放射線の可視化の観点が失われてしまい、放射線作用

過程がブラックボックス化する欠点とともに、放射線教育の実習としては高価な装置が必要であるため経済的な問題も残る。

そこで、ここでは放射線教育の少し進んだ人たちへの実習教材として、新たに岩石や化石薄片への蓄積放射線の脱励起過程を利用した、簡便なルミネッセンスカラー写真観察法を提案したい。カラー写真は情報として、2次元(平面)でのカラー情報を捉えることができ、その利用は考古学や放射線照射による滅菌・殺菌などを含めた全ての科学分野に亘っているため受講者が興味を持つことが期待できる[1,2]

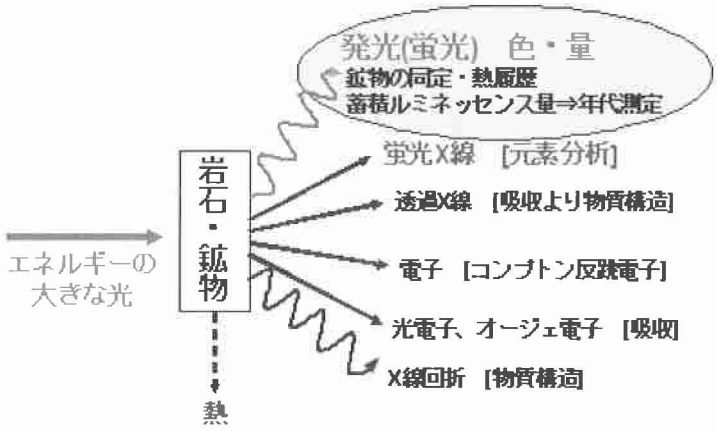


図1 岩石や鉱物との放射線作用を利用した物性測定

2. 放射線の岩石や鉱物との相互作用

ここではエネルギーの大きな電磁波(光)であるエックス(X)線やガンマー(γ)線を典型的な放射線として説明に用いることとする。β線もα線も絶縁性固体への放射線の初期過程は密度に違いがあるものの、γ線の場合とほぼ同じと考えられている。図1に示すように、放射線が岩石や鉱物(岩石を構成する成分)に照射された時、相互作用として一次的にはイオン化や励起現象が生じるが、外部からの観察では一次作用よりはむしろ二次作用としての脱励起に伴う現象が観察でき、それらは標的物質の物性観測に使われている。たとえば、蛍光X線は放射線が作用した元素に固有な特性X線なので、元素分析に用いることができ、また放射線として一定波長のX線を作用させ、物質通過後に得られるX線回折パターン(像)から、物質の構造を解析できる。

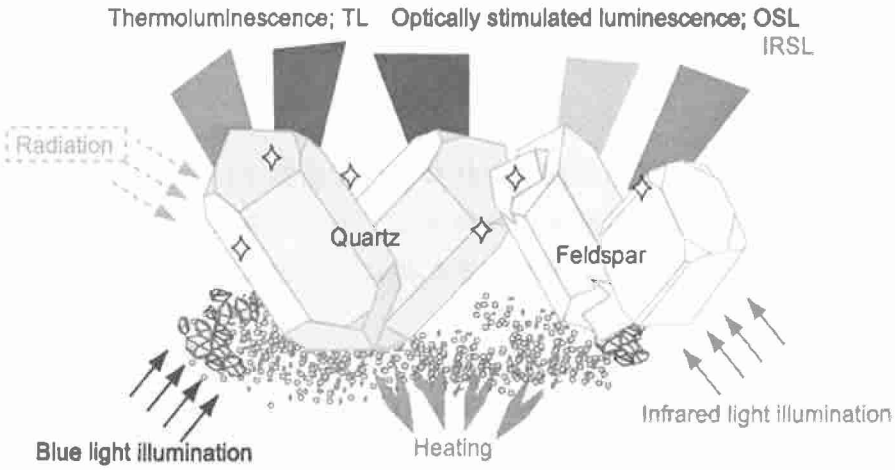


図2 白色鉱物(石英・長石類)からの放射線由来のルミネッセンス

ここでは、放射線作用後の脱励起に伴う、エネルギー放出としての光(ルミネッセンス)に注目し、鉱物の熱履歴を調べるとともに、放射線の蓄積量(放射線線量)を測定する方法などについて述べて行く[1,2]。

ルミネッセンスを観測するには、図 2 に示すように光透過性の良好な白色鉱物が適している。代表的な鉱物としては、地上に普遍的に存在している石英や長石を挙げることができる。前者は風化に強い鉱物のため、ほぼ全ての土壌に含まれているし、長石は地殻に多量に存在する鉱物成分であり、かつルミネッセンス感度(応答性)が高い特徴を有している。従って、石英粒子からの微弱ルミネッセンスの正確な測定には、汚染源としての長石粒子の寄与を排除する必要がある[3,4]。

3. ルミネッセンス現象の基礎

3・1 光のエネルギーと色(カラー)の性質

光も X 線・ガンマー線も波動性を有する電磁波であるため、光量子(波と粒子の性質を併せ持つための光の呼称)当たりのエネルギー(E)は振動数（ν＝光速(C)/波長）に比例し、一方波長(λ)に逆比例する。これらの関係は $E=h\nu=C/\lambda$ で表され、プランク定数(h)が関与する。

図 3（最後のカラーのページにまとめた）に光量子のエネルギーの大小と振動数や波長の関係とともに、エネルギー領域の一般的な名称を記した。目で見える可視光の波長域は 700 ナノメートル(nm)の赤色域(長波長側)から 400nm の紫色域(短波長側)に亘っており、その間に橙･黄･緑・青・藍色が連続変化しており、いわゆる 7 色虹色の変化となっている。赤色と紫色域の外側に赤外線と紫外線域が存在している。すなわち、長波長の赤外線のほうが短波長の紫外線よりも光量子のエネルギーが低い。

先ほど放射線の代表とした X 線やγ線は、この順に波長が短くなっており、紫外線よりもエネルギーが高くなっている。紫外線は滅菌･殺菌に用いられているように、生物細胞膜を透過でき DNA を傷つけ細胞を死滅させる。より大きなエネルギーを有する X 線やγ線はより高い物質透過能を持っており、健康診断や癌の放射線治療（がん細胞の死滅）や滅菌･殺菌処理に用いられている。

3.2 ルミネッセンスの名称

図 1,2 や 2 章で鉱物に放射線が作用した時、ルミネッセンス(発光)現象が観察されることを述べてきた。実はルミネッセンスには放射線作用、作用後の経過時間や励起状態を緩和する(脱励起)に由来する名称が図 4 のように付いている。放射線照

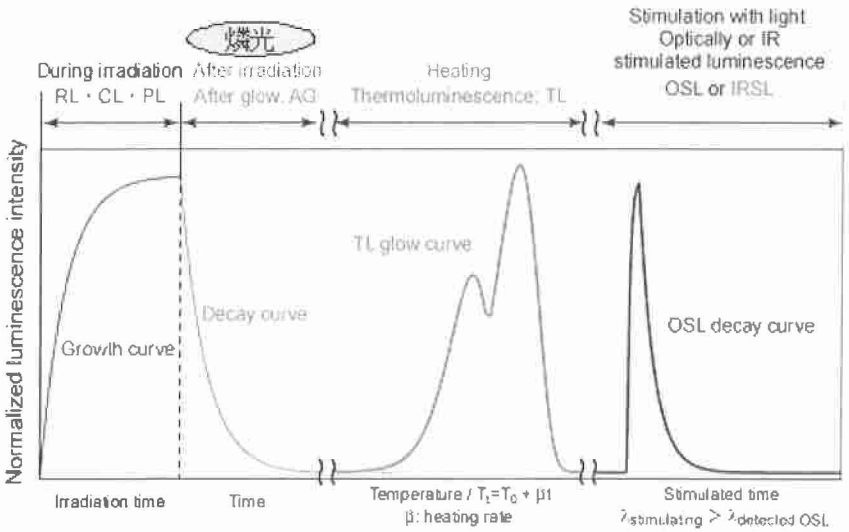


図 4 白色鉱物などへの放射線照射で観測される各種ルミネッセンス

射中のルミネッセンスはブラウン管テレビ画像上で、電子が蛍光物質に当たって光る現象として見ている。

これらは、フォト-・陰極線-ルミネッセンスやラジオ-ルミネッセンスとも呼ばれる。また、テレビや蛍光灯の電源を消した直後でも、蛍光面はかすかな光を放っており、時間とともに次第に消えて見えなくなることは誰もが経験しているであろう。この減衰してゆく光が、アフターグローとか燐光と呼ばれるルミネッセンスである。過去の放射線作用を蓄積した鉱物(励起状態)を、加熱により脱励起させるとき熱ルミネッセンス(thermoluminescence, TL) が観測できる。励起鉱物に与える刺激(または励起)源を熱から光に変えても、脱励起に由来するルミネッセンスが測定でき、この発光は光励起ルミネッセンス(optically stimulated luminescence, OSL)と呼ばれ、天然鉱物を使ったOSL年代測定や人工素子(炭素を賦活材とした酸化アルミニウム(アルミナ)のペレット)によるOSL線量測定が行われている。これらルミネッセンスは輝尽発光とも呼ばれており、放射線照射により繰り返し発光する性質を持つ[5]。

3.3 ルミネッセンス(発光)のメカニズム

放射線誘起ルミネッセンスの簡単な発光機構の説明には、単純なバンドモデルが多用される[1-4]。絶縁性固体では、原子団の最外殻電子軌道は固有のエネルギー準位(レベル)をとっていることが知られている。電子が充満している価電子(拘束電子)領域の上方に数eV以上の電子が存在できない禁制帯を挟み、更にその上に伝導（電子が自由に移動できる）領域が存在しているエネルギー状態を絶縁物質の電子が取ると考えられる。図5により理解し易いようにバンドモデルに基づいたルミネッセンス発光機構をアニメーションで描いた[1]。赤鬼と青鬼の子供（ルミネッセンス材の構成原子）が安全な場所（価電子領域）で、鞠（電子）で遊んでいる。しかしながら、雷鳴や稲妻（放射線照射）が鳴ると、子鬼は驚いて鞠（電子）を放り投げて安全な場所へ移動する。鞠(電子)の一部は、立木の枝（鉱物結晶の不純物や格子欠陥）に捉えられ落下できない。この状態が捕捉電子の蓄積される励起状態である。しかしながら、木の枝を風や大雨（加熱や刺激光照射に相当）が揺する(刺激)と、鞠(電子)は捕捉状態が解けて落下する。この鞠が元の子鬼に戻るときのエネルギーが発光（ルミネッセンス）となる。単純化のため2個の鞠(電子)のみを取り扱ったが、木の枝に捉えられ

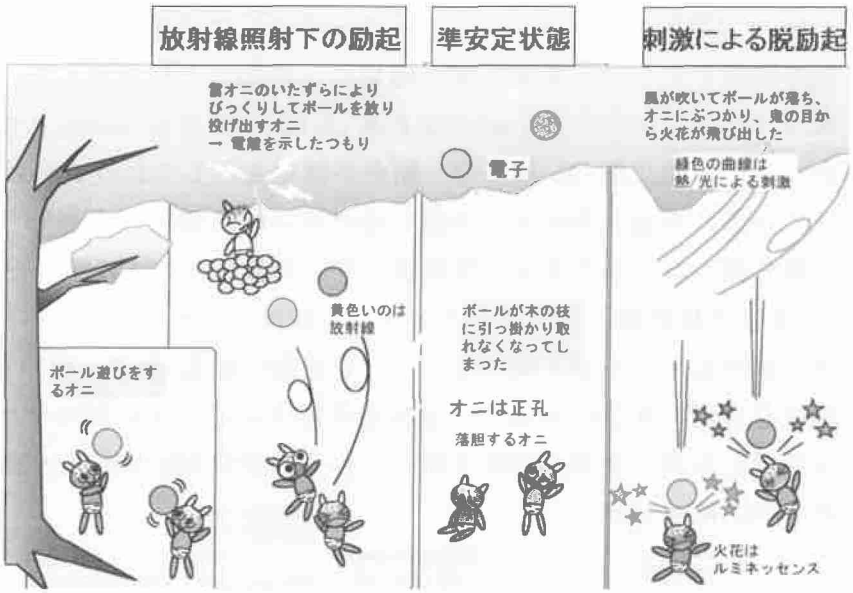


図5 アニメで示すバンドモデルに基づくルミネッセンス発光機構

る鞠の数(捕捉電子数)は稲妻数（蓄積放射線線量）と子鬼や枝の数（捕捉部位としての結晶欠陥や不純物数など）に依存することは言うまでもない。赤･青鬼としたのは、鞠（電子）がそれぞれ元の子鬼（電子のない状態を正孔という）に戻った時、赤・青の固有の発光を示すことを意味する。

4. 岩石・鉱物試料からのルミネッセンスカラー画像観察

図 6 (a)－(e)(最後のカラーページにまとめた)にルミネッセンス年代測定に多用される石英粒子、岩石鉱物薄片や長石粒子からのルミネッセンスカラー画像(color imaging から CI と名付けた)を示した。ルミネッセンスの多彩性は鉱物に含まれる不純物元素や熱履歴などに伴う結晶欠陥など多様なルミネッセンス正孔の特性を反映する。

ルミネッセンスカラー画像を 1980 年代初期に私どもの研究室が世界に先駆けて発表できた。暗室での写真撮影という単純な方法で微弱な放射線誘起ルミネッセンスをカラー画像として観測できたのは、当時国内フイルムメーカ 2 社と外国メーカ 1 社の熾烈な高感度化の競争が行われていたことが幸いした。ルミネッセンスのカラー画像化は最初熱ルミネッセンスカラー画像(thermo-luminescence color images, TLCI)で成功した。この TLCI 法で新潟砂丘の石英粒子から、従来知られていた青色 TL(blue TL, BTL)以外に赤色 TL(red TL, RTL)を有する石英粒子が半分以上を占めていた[6]。その TLCI が図 6-(b)である。この石英粒子からの RTL 現象の発見は世界のルミネッセンス研究者の注目を浴びることとなった。砂丘砂の供給源である信濃川や阿賀野川に沿って川砂中の石英粒子の BTL と RTL を調査した結果、RTL 粒子は火山灰起源の石英に由来しており、火山の多いわが国には普遍的に見出された[7]。図 6-(a)が RTL 粒子のみよりなる秋田県田沢湖湖岸砂からの TLCI である。一方、典型的な石英鉱物である水晶薄片の TLCI からは(c)に見られるような濃淡を示す BTL のみが観察され、この薄片の加熱処理により(d)に見られるように部分的に BTL から RTL への変化が生じていることが分かる。すなわち、高温での熱処理過程が不純物含量の多い部分を RTL 化しており、火山灰起源石英が RTL 特性を有するのが熱履歴に由来することで説明ができた。一連の RTL 実験結果から、土器片・窯跡・陶磁器片や瓦片など焼成考古遺物から抽出した石英粒子も RTL の性質を有

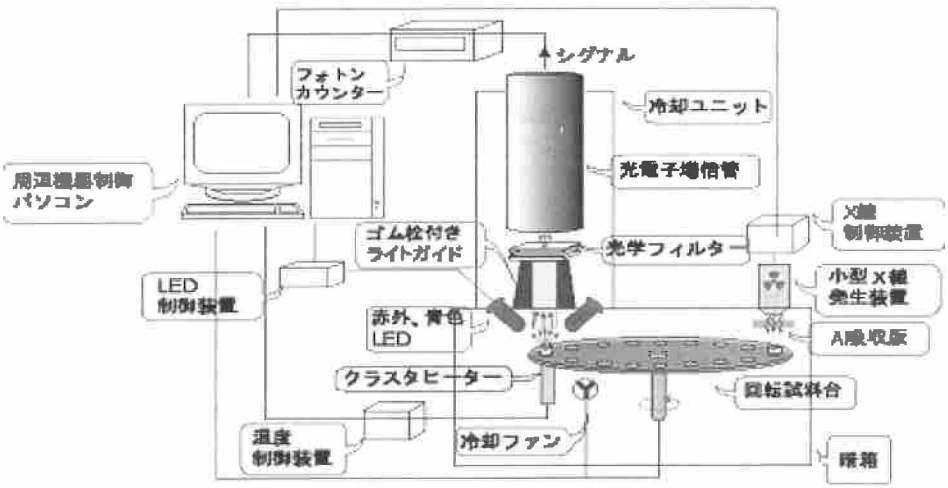


図7 ルミネッセンス(TL & OSL)自動測定システム

することが予想できた。実際に、これまで試みた焼成考古遺物からの石英粒子は全てRTL特性を示しており、RTLの測定で焼成以来受けてきた天然蓄積放射線線量やその結果を用いるRTL年代測定が不可欠なことを明かにした[1,2,8]。

5. ルミネッセンス年代測定法の原理と実際

5.1 ルミネッセンス自動測定装置

TLCIからは定性的な放射線作用部位の情報は得られるが、蓄積放射線線量測定のためには定量的なルミネッセンス測定が必要になる。ルミネッセンス量から蓄積放射線線量を見積もるには、線量強度の分かった人工放射線照射を一定の条件の下で行う必要がある。そのために、小型X線照射装置を搭載したルミネッセンス自動測定システムを製作した。そのシステムの概念図を図7に示す。

本システムの特長は焼成考古遺物や火山灰層からの石英粒子に対応したRTLの高感度測定を可能にしたことである。赤色領域は図2からも理解できるように、エネルギーの低い光量子の領域であり、ヒータのような加熱物質表面から300℃以上で低エネルギー光量子(赤外光)である熱線がバックグランドに寄与する。したがって高感度RTLの測定には、熱線除去のためRTL検出用光電子増倍管(PM)をできるだけ加熱源から離し、かつ光電(PM)面からの雑音低下のため冷却槽内に設置して冷却する必要が有る。これら二重の困難を克服するため、光源から離れたPM面に断熱状態で効率よく微弱なルミネッセンスを導くのに、ガラス製コアーロッド(棒芯)状のライトパイプ(光導管)を用いて成功した。更にPM面と向き合う加熱ヒータ面積を最小にするためにセラミックス加熱部位とし、試料皿も黒雲母はっと付の銀板を用いた。その結果、新潟砂丘砂の一粒(ほぼ径が0.2mm以上)のRTL測定(数グレイ照射済み)が可能になった。

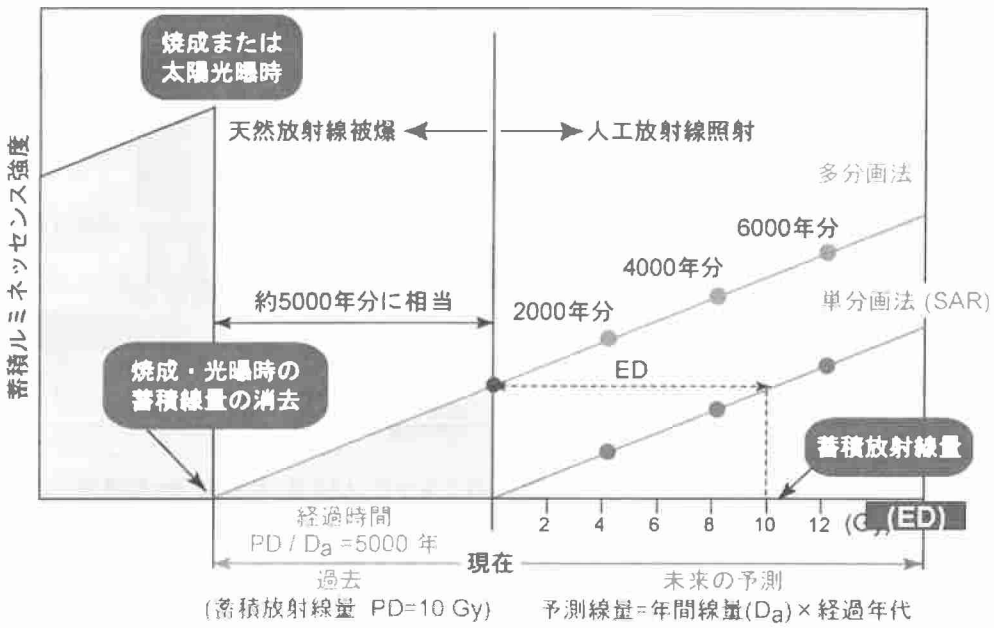


図8 単分画再現(SAR)法による蓄積線量(ED)評価

シスステム全体は、パーソナルコンピュタで自動制御し、一度に16試料の測定が可能である[2,9]。

5.2　ルミネッセンス測定による蓄積線量の評価と年代測定

図8にルミネッセンス年代測定の概念図を示す。長寿命なカリウム-40以外にウランやトリウムを親核種とし子孫に放射性核種を従属させる壊変系列核種が存在しており、これら放射性核種の壊変に伴って放出される放射線と宇宙線からの放射線が自然放射線として普遍的に環境放射線として存在する。鉱物へのこれら自然放射線作用による放射線損傷が鉱物の生成以来蓄積されているが、加熱（土器などの焼成作用）や太陽光曝によりゼロセット（消去）され、年代とともに再度蓄積を始める。

ゼロセット後の経過（過去）年代と遺物の埋まっていた箇所の年間放射線線量(Annual Dose, AD)との積である蓄積放射線線量（考古線量、Paleo Dose, PD, または当量線量, ED)が現時点での観測ルミネッセンス強度に比例する。そこで、放射線線量の既知の位置で人工照射を行い、その後ルミネッセンス測定を行う操作を数回繰り返すことにより、線量応答曲線を作成する。この応答曲線に蓄積ルミネッセンス強度(R_N, L_N)を内挿することでPDを求める。このPDをADで除することにより、焼成考古遺物の焼成以降の年代が評価できる。線量応答曲線の作成法には、多分画付加線量(MAAD)法や単分画再現(SAR) 法が開発されており、SAR法が今日では多用されている[2)]。

ADは、試料発掘箇所の土壌に含まれる放射核種の化学分析またはγ線スペクトル測定や、発掘現場に埋めた放射線線量計によるその場測定により求める[10)]。

6.　RTLとOSLによる新薬師寺古代瓦の年代測定

先述のように1980年代初頭に、新潟砂丘砂より抽出した石英粒子からRTL粒子の存在を発見し、ついで旧石器・縄文・弥生・奈良時代の瓦片を含む焼成考古遺物からの抽出石英粒子でも例外なくRTL特性を有していることを見出した。320℃以上の高温側のRTL線量応答性は良好な直線性を有しているので、焼成考古遺物のルミネッセンス年代測定法には、RTLの適用が不可欠であると考えた。

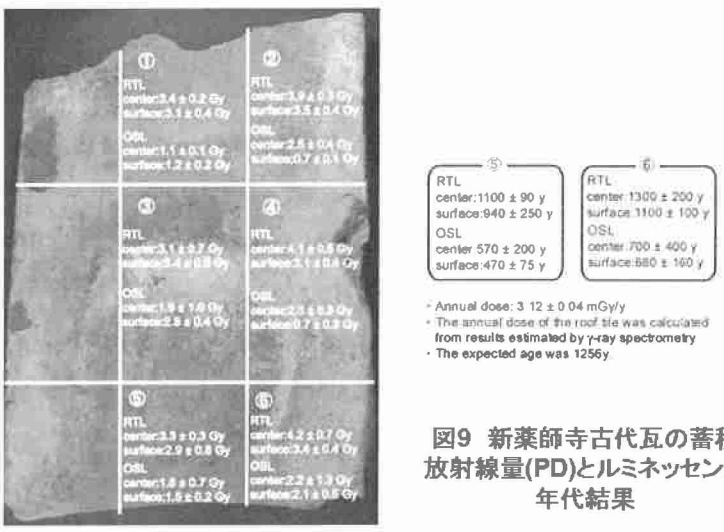


図9 新薬師寺古代瓦の蓄積放射線量(PD)とルミネッセンス年代結果

図9に奈良市新薬師寺の古代瓦を6分割して、抽出石英粒子各々に付いてRTLとOSLにより、考古放射線量(PD)を測定した結果とともに、右方に2試料片については年代評価の結果を示しておいた。PDの結果の変動は瓦の重なり具合相違に拠ると考えた。瓦表面のPDが内部のそれより低いのは太陽光の影響であろう。瓦下部の内部からのPD年代測定値はRTLでは1,300～1,100年の値も得られており、奈良遷都から来年度が1,300年

を迎えることから、新薬師寺もほぼ遷都時に建立されたことと調和している。OSL からの年代値は太陽光被曝による影響のためか、若く評価されている。このことから、RTL 年代測定法（良好な適用範囲は 100 年程度から 10 数万年）が焼成考古遺物の年代測定に有用であると結論できた[1,2,8,10]。ルミネッセンス年代測定法は現在のところ 10～15%の誤差を含んでいる。また本法は C-14 年代が適応不可能な場合でも、被熱や太陽光被曝を受けた試料を使えば、第四紀の年代評価が可能なため注目されている[1-4]。

7. アフターグローカラー画像の撮影と利用

図 4 で見てきたように、アフターグロー(燐光、afterglow　AG と略記)は放射線照射後に直ちに減衰する光として観察できる。岩石や土器薄片とか化石薄片に X 線や軟 X 線を照射後直ちに、図 10 に示すような暗袋中に移し、通常のカラーネガフィルム(ISO-400)の表面に置くことにより簡単に AG のカラー画像(AGCI)を撮影できた。このようにして得られた須恵器薄片からの AGCI を図 11(カラーのページにまとめた)に示す。須恵器薄片に含まれる、主に長石鉱物由来の多彩なルミネッセンスが観察できる。放射線の照射なしではカラー画像は得られないので、放射線が長石鉱物に作用した結果であると確認できる。

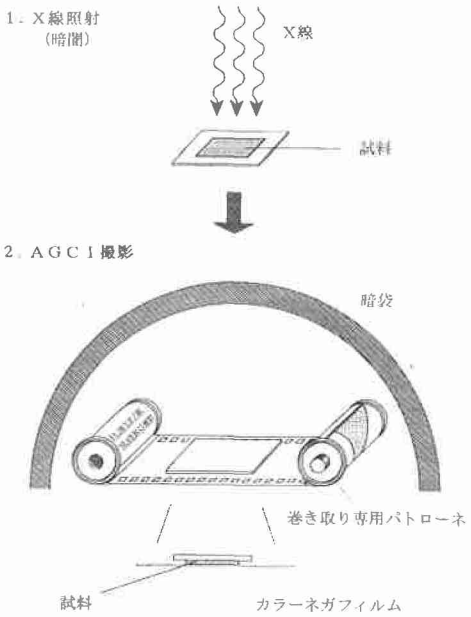


図10　燐光(アフターグロー)画像の撮影法

軟 X 線の照射装置は木の葉や昆虫の観察のために、従来は学校教育現場でも手軽に利用できた。それで高校教員の方にアンモナイト化石片の AGCI を撮影実験を試みて頂いたところ、鮮明なオレンジ色の化石由来のルミネッセンス像を観察できた[11]。花崗岩薄片でも長石部位由来の多彩な強いルミネッセンスと石英部位由来の青色の弱いルミネッセンス画像を鮮明な画像として観察できた。また、照射後の経過時間に伴う AGCI の観察からおおよその減衰時間を見積もることができた。

高校生を対象とした理科演示実験現場での AGCI の観測には、インスタントカメラのフイルムが適していた。放射線リテラシーや教育のためには、その場での X 線照射がより効果的であるが、手軽に X 線照射装置を利用できない場合には、放射線照射済みの岩石薄片を暗袋中に取り込みカラーフイルム上に置き、更にその上に電気アイロンによる加熱で励起するとか、岩石薄片に一瞬光で刺激し生ずるルミネッセンスを写真撮影することを勧めたい。この実験方法だと個々の参加者に実習して貰えるので参加者に喜ばれると考えられる。より詳細な実験手法などについては何れ報告したい。

「百聞は一見にしかず」蓄積した放射線現象をカラー画像としてルミネッセンス観測

する方法は、見た目にも鮮やかであり、誰も見たこともない個々の岩石薄片に秘められたパターンを観察できるので、霧箱実験よりも一歩進んだ放射線教育の教材になりうるであろう。

8. おわりに

今回放射線教育フォーラム理事に選ばれたので、これまで培ってきたルミネッセンスや環境放射能測定に関する研究成果を、簡単な演示教育に役立てることにも力を注ぎたい。

謝辞：原稿をお読み頂き有益な助言や指摘を頂いた名古屋大学名誉教授の森千鶴夫先生に感謝いたします。

引用文献

1) 橋本哲夫「ルミネッセンス（発光）で探る古代情報」 ブックレット新潟大学, 新潟日報事業社, 新潟 (2005)

2) T.Hashimoto, An overview of red-thdermoluminescence (RTL) studies on heated quartz and RTL-application to dosimetry and dating, Geochlonometria, 30, 9-16(2008)

3) Aitken, M. J. Thermoluminescence Dating, Academic Press, London (1985)

4) Aitken, M. J. Introduction to Optical Dating, Oxford University Press (1998)

5) Bøtter-Jensen, M. J., S. W. S. McKeever, and A. G. Wintle, Optically Stimulated Luminescence Dosimetry, Elsevier, Amsterdam (2003)

6) T.Hashimoto, Y. Hayashi, K. Yokosaka and A. Koyanagi, K. Kimura, Red and blue colouration of thermoluminescence from natural quartz sands, Nuclear Tracks Radiat. Measur., 11, 229-235(1986)

7) T.Hashimoto, K. Yokosaka and H. Habuki, Emission properties of thermoluminescence from natural quartz —Blue and red TL-response to absorbed dose, Nuclear Tracks Radiat. Measur., 13, 57-66(1987)

8) 橋本哲夫 「さまざまな年代測定・判定方法、(6)ルミネッセンス法」『考古学と自然科学④』pp. 84-98, 同成社, 東京(1999)

9) Hashimoto, T., T. Nakagawa, D. G. Hong and M. Takano, An automated system for both red/blue thermo- luminescence (TL) and optically stimulated luminescence (OSL) measurement, J. Nucl. Sci. Technol. **39**, pp. 108-109(2002)

10) 橋本哲夫, 熱および光励起ルミネッセンス観測による焼成考古遺物の蓄積放射線線量と石英からの赤色熱ルミネッセンス年代測定の重要性, 考古学と自然科学, 55, 31-44(2007)

11) 川村幸生, 橋本哲夫, アフターグローカラー画像(AGCI)自動撮影システムの製作, Radioisotopes, 44. 182-186(1995)

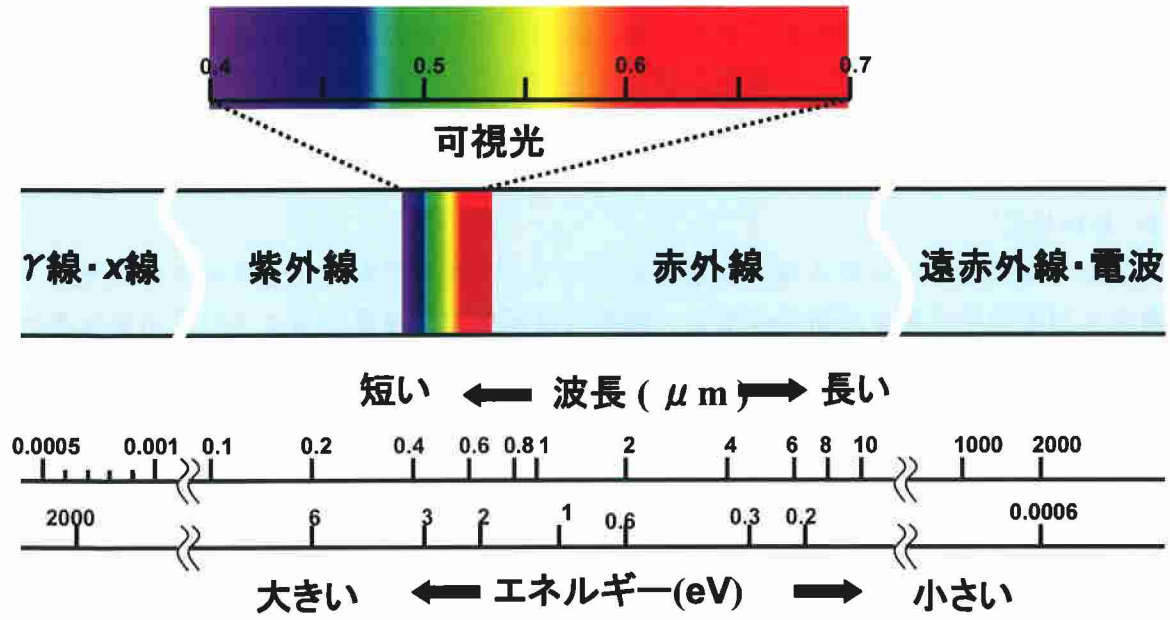


図 3　光のスペクトルおよび名称と波長域

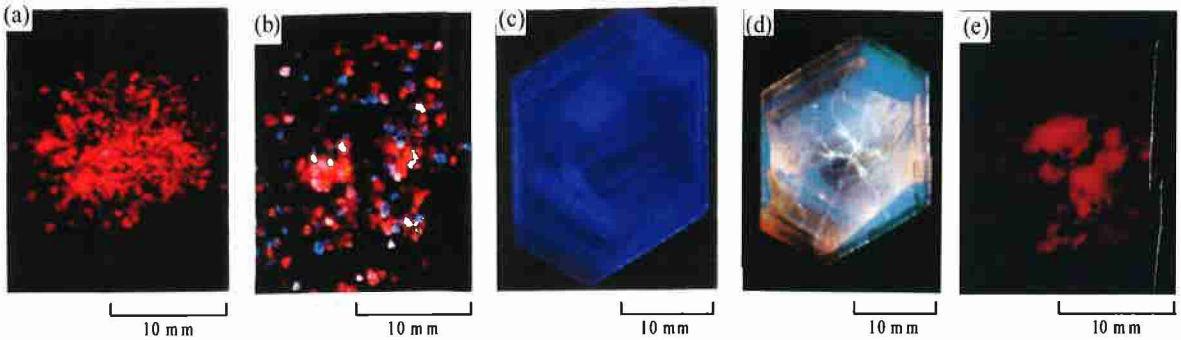
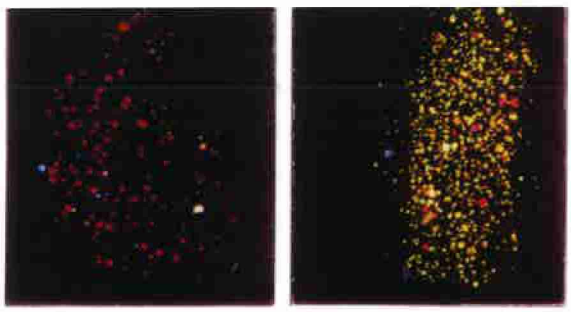


図 6 ルミネッセンスカラー画像

(a) 田沢湖岸砂（火口湖）, (b) 新潟砂丘砂からの抽出石英粒子, (c)マダガスカル産 水晶Z-カット薄片, (d) 左の水晶薄片を1000℃で1日熱処理したもの, (e) 焼成試料の長石成分の赤外光励起ルミネッセンス[1)]



大阪府陶邑　　福岡県朝倉

図11　須恵器片からのAGCl

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 12, No. 1, p. 51 – 60 (2008)

【原著論文】

原子衝突と放射線作用
—自然のしくみを理解するための加速器利用—

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
E-mail: ohno-trl@01.246.ne.jp
(2009 年 3 月 21 日受理)

[要旨] 変転極まりない万物流転の世界のなかで不変の粒子として認識されたのが原子であったが、20 世紀の科学は放射線（原子よりもさらに微細な高速で走る粒子）を道具としてその原子の構造のみならず、原子の構成粒子を次々と明らかにした。その道具となる高エネルギー粒子加速器は大型化して限界に達しつつある。物質の究極の姿、それは宇宙の誕生とともに始まった物質創生の物語であり、21 世紀には完結されるものと期待される。ここでは物語の主役である加速器利用について紹介する。

１．はじめに

前回[1]は、運動エネルギーをもつ微細な粒子（=放射線）が物質中の電子をはじき飛ばすような衝突、すなわち粒子間の力学的な衝突に基づいて放射線の産業利用(高分子材料の架橋・グラフトによる改質)、がん治療、植物の品種改良、医療器具の滅菌、食品保存などを統一的に理解できることを示した。今回は、微細な粒子の運動エネルギーをさらに高くすることにより、自然のしくみを理解するための放射線利用（加速器を利用する）をまとめる。ここで自然のしくみとは、物質がどのようにつくられているか、この宇宙はどのようにして誕生し、どのような法則によって支配されているかなどをいう。

２．自然放射線を用いた原子・原子核の構造の研究

ギリシャ人たちはすべての物質が原子からできていると考えた。19 世紀の化学者たちは、物質の化学的な変化を定量的にしらべ（質量、体積、圧力などの測定)、あらゆる物質が原子からできている、普通にみられる物体（数十グラムていど）を取り上げてもそこに含まれる原子の個数は 10^{24} 個（アボガドロ数）という膨大な数になること、原子の種類はといえば百種たらずであるが種類ごとに質量と化学的な性質を異にすること、そしてそれぞれの原子は永久に不変で壊れることが決してないものと結論した。実は、この 19 世紀の末に、自然放射線が発見され、20 世紀の幕開けと共に新たな展開がはじまる。

異なる陰極材料から全く同じ（質量と電荷が等しい）微細な粒子（実は電子）がでてくることを見つけた Thomson の真空放電の実験(1897)、金箔に α 線をぶつけるときほとんどはそのまま通過するが極くまれに大きく曲げられるものがあることを見つけた Rutherford の α 線散乱実験(1911)、この２つの実験の結果を解析して得られた結論は、どの原子もそのなかはほとんど真空であり、中心にごく小さいが原子の質量のほとんどすべてを担って

いる正電荷の核（原子核）が存在し、その周りを負電荷の電子が囲んでいて全体として電気的に中性を保つということであった。これにより原子構造が認識されたのである。

続いて、原子が吸収・放出する特有の光の波長（エネルギー）が原子の種類によってなぜ一定なのかを解明するために原子核に束縛される電子の運動状態の研究がはじまり（1912～1924）、微細な粒子の運動を説明するために、Newton 力学に代わる量子力学が完成した。その考え方は、電子のような微細な粒子の運動は波であらわされるような運動をすること、その波が原子内のように束縛されるときは定まったいくつかの定在波として存在すること、他の粒子との間でエネルギーをやり取りするような衝突をするときには波でなく粒子の性質を発揮することとして理解されたのである。

X 線を使った結晶回折から原子の大きさがわかる一方で、原子の質量を測定する質量分析の技術も進展した。またα粒子を衝撃した原子核からでてくる粒子を霧箱などによってしらべる実験では、原子核中に陽子だけでなく、電気的に中性の粒子も存在することをしめす結果(1932）が得られ、原子核が陽子と中性子から構成されることがわかった。ここまでの研究に使用された放射線はX線とα粒子が主なものであった。X線は真空放電で高速電子線が物質中の原子核などの近くを走るときに発生するものであり、またα粒子は天然に存在する放射性原子（ラジウムやポロニウム）の崩壊で放出される自然放射線である。研究手段としては、強度、そしてなによりもα粒子の運動エネルギーに制約(数 MeV）があった。標的となる粒子が大きい電荷をもつ場合には低いエネルギーの天然α粒子は一定距離以内に近づくことができないのである。これを克服するためにα粒子や陽子を電場によって加速する技術が開発される（加速器)。なお、1932 年に発見された中性子は障壁なく原子核に近づくことができるので、加速器の実現を待つことなく、Fermi や Joliot などにより中性子と種々の原子核との反応が研究され(1933－1940)、その結果としてウランの核分裂の発見､そして原子爆弾･原子力発電へとつながったことはよく知られた事実である。

この間に標的粒子と放射線（高速粒子）の衝突実験の解析に不可欠のアインシュタインの特殊相対論(1905)および一般相対論(1916)の発表があったことも特記されることである。ここでは静止粒子に衝突する粒子(光子も含む）の運動量･運動エネルギーを考える際の座標の選び方が問題となるが、物理法則は座標の選び方によらないこと、光子の速度は座標系によらないことを相対論が保証する。物理法則の例として、1 粒子の運動量 p・運動エネルギー Eの間に

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2 \qquad (1)$$

の関係が成立する。ここで m は粒子の質量である。なお、光子とニュートリノの場合の質量はゼロである。静止した質量 m の物体がもつエネルギーが mc^2 であることも導かれた。また空間の運動を議論するときには一般相対論を使う。

３．量子論と相対論に基づく物質凝集力の研究

電子を原子核のまわりに束縛する力は、両者の間に働く電磁力である。相対論により、その力が瞬時に作用するという古典的描像は修正され、代わって力を媒介する電磁場が導入された。一方の荷電体の運動にともなう周りの電磁場の振動は波として空間を光速で伝

わる。別の荷電粒子はその電磁場の振動を受けて力を受ける。表現を変えれば、電磁場を通して荷電粒子から荷電粒子へとエネルギーと運動量が伝わる。量子論では、電磁場のエネルギーは光子によって運ばれる。そこで“２つの荷電粒子は光子の交換によって相互作用する”という表現が使われる。

湯川秀樹は、1935 年、この考え方を原子核内の中性子や陽子の間に作用する力に拡張した。相対性理論で導かれている式 (1) に量子力学を適用して得られる波動方程式（クライン - ゴルドン式）の場は新しい粒子（後でπ中間子とよばれる）の存在を予言する。ここで量子論の不確定性原理（$\Delta t \cdot \Delta E > h/2\pi$）に基づいて、陽子が π^+を放出して中性子になるときエネルギー保存の破れ（おおざっぱに言って陽子のほかに放出されるパイ中間子の質量に相当するエネルギーだけの差異が生じる）は短時間 $\Delta t \sim h/\Delta E$ であれば許される。この許される短時間に光速で走る粒子（π中間子）の到達距離として $c \cdot \Delta t$ 、これが中性子や陽子の半径と同じ程度であろうとして中間子の質量 100 MeV/c^2 （陽子のおよそ 1/10）が予言された。

1936 年に宇宙線を霧箱写真で受けた中で質量が 100 MeV に相当する粒子を捉えたと Anderson らが報告した。その性質は湯川が予想したことと矛盾するものであった。1942 年に実は中間子には 2 種類あるという説が出されたりしたが、1947 年に宇宙線の中で湯川が予言した新粒子が発見された。研究の結果、宇宙線は高エネルギー(1000 MeV 以上）の

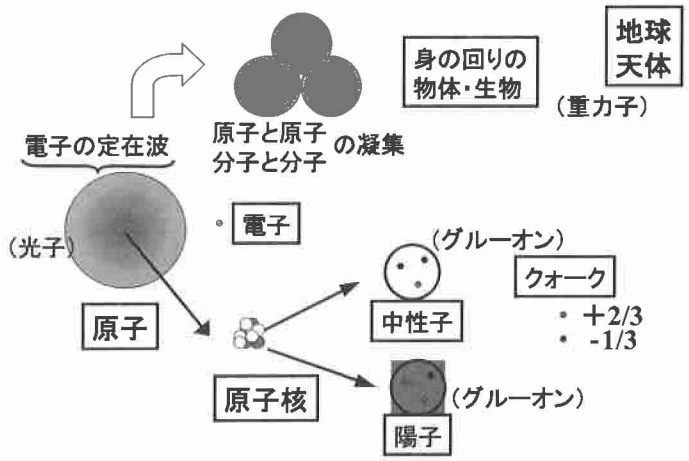


図 1. 物質をつくる粒子と４つの力

微細な粒子が集まって物質ができるためには互いに引き合う力が必要である。力をつかさどる粒子によって，3 種類の力，すなわち強い力（グルーオンによる），電磁力（光子による），重力（重力子による）が知られている。この他にクォーク相互の変化（したがって中性子と陽子の間の変換）にかかわる弱い力が存在するので、自然界に 4 種類の力が存在する。

陽子であり、宇宙から地球大気に突入して空気をつくる原子核に衝突し、そこで陽子の 1/10 の質量のパイオン π^+、π^-、π^0 を放出、このパイオンは寿命 26 ns（ナノ秒）で崩壊してミュオン μ^+、μ^-、μ^0 (と同時に質量がほとんどゼロのニュートリノ）を生成する。パイオンが湯川粒子であり、その崩壊生成物である寿命 2.2 μs のミュオンがもう一つの中間子と考えられた粒子であり、高速で相対論効果により寿命が延びて大気上空から地上にまで到達

するものとして理解された。

宇宙線（9 割が陽子、残りはヘリウム、その他の原子核）のエネルギーは 10^9-10^{21} eV まで分布することが知られている。歴史的には自然放射線の次に高エネルギー粒子線として物質構造の研究に貢献したのである。写真乾板と組み合わせて、多くの粒子が発見され、1960 年代の終わりまでには数百という新粒子が知られるようになった。これが全部基本粒子のはずはない。多くの粒子は他の粒子と粒子の複合したものと理解された。一方で、加速器を用いて詳しい性質が明らかになるとともに粒子の分類がすすみ、現在では表１と表２に示すように整理されている。[2)]

表 1. ４つの力を媒介する粒子

力の種類	媒介する粒子(場)	質量(GeV/c²)
弱い力	W^+、W^-、Z^0	約 100
電磁力	光子	0
強い力	グルオン	0
重力	重力子	0

表２．フェルミ粒子の世界

	第１世代　質量	第２世代　質量	第３世代　質量
レプトン	ν_e　15 eV/c² 以下	ν_μ	ν_τ
	e　0.51 MeV/c²	μ	τ　1.78 GeV/c²
クオーク	u　1.5~5 MeV/c²	c	t
	d　3~9 MeV/c²	s	b　4 GeV/c²

電荷は、ν_e(電子ニュートリノ)、ν_μ(μニュートリノ)、ν_τ（τニュートリノ）：0

e(電子)、μ(ミュオン)、τ(τ粒子)：－e；それぞれの反粒子は＋e

u(アップクオーク)、c（チャームクオーク)、t(トップクーク)：＋(2/3)e

d（ダウンクオーク)、s（ストレンジクオーク)、b（ボトムクオーク)：－(1/3)e

紙数の関係で詳細を述べることは出来ないが、表１、２の粒子は電荷のほかにスピン、さらにカラー（色)、フレーバー（香り）などの新しい荷電をもつ。これらを分類するときに「世代（generation)」または「族（family)」を用いて整理される。図１で示した普通の物質をつくる粒子は、表２の第１世代のレプトンとクォークの４種である。星の中や宇宙誕生のさいの高エネルギー現象の際には第２世代、第３世代の粒子が発生したと考えられ、それを加速器実験で再現しようとしている。中性子も陽子も３個のクオークの複合粒子(陽子は uud、中性子は udd の３クオーク)、またパイ中間子はクオークと反クオークの複合粒子であるとされる。力（フェルミ粒子間の相互作用）をうけもつ粒子は、弱い力の場合のウィークボソンの質量が大きく、短距離に働く。重力子、光子の質量はゼロであり、よく知られているように遠隔力である。強い力に関わるグルオンの質量はゼロであるが、真空に凝縮したヒッグス粒子と相互作用して、結果として質量をもつように見える。

４．高エネルギー粒子による物質基本粒子の研究

(i) 加速器利用の原理

加速器を使って高エネルギーの粒子をつくり、物質の構造を調べる方法を図２に示す。

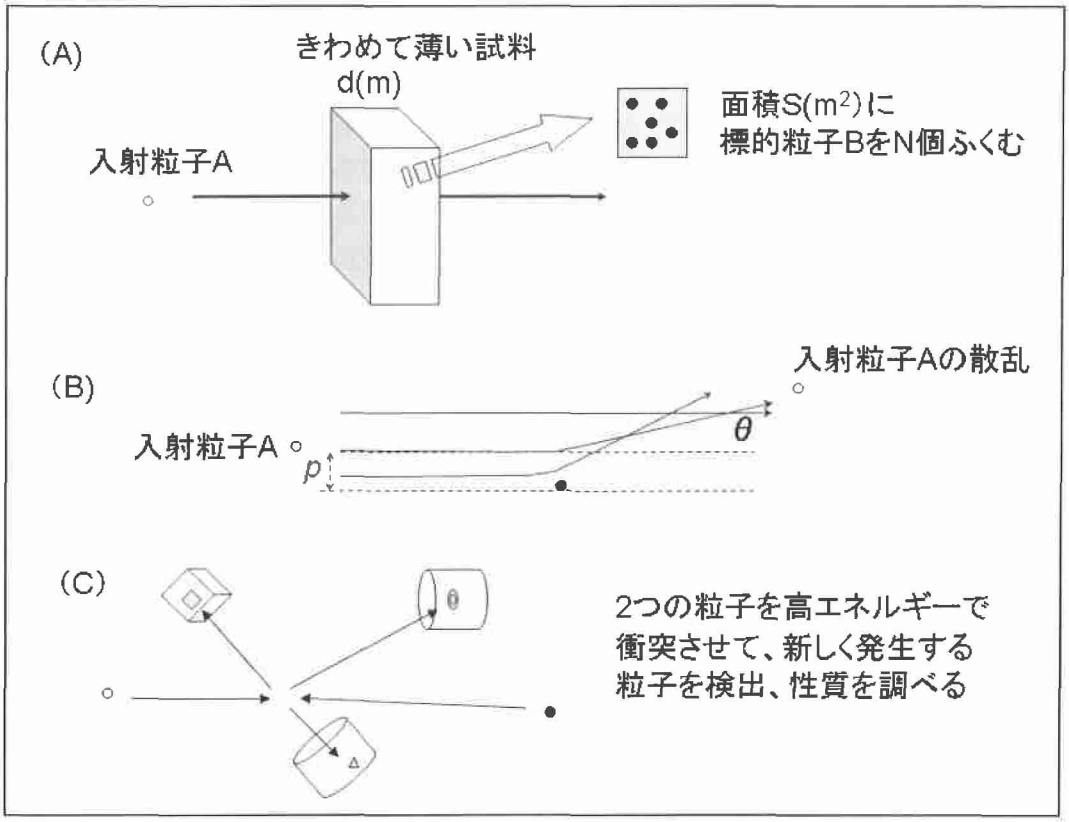


図２．加速器によって何がわかるのか

(A) 面積 S(m²) の中に B 粒子 N 個が含まれている。ここに照射される A の総数 X のうち B によって散乱されないで試料をそのまま透過する個数を x とすれば $\sigma N/S = 1 - x/X$ の関係が得られる。σ (単位 m²) は A と B の衝突断面積とよばれる。

(B) 衝突実験のデータを整理して A の進路から B までの距離 p と A の散乱角度 θ の関係が抽出されると A と B の間に働く力の情報を得ることが出来る。

(C) 衝突により A と B の構成粒子が放出される場合のほかに、２粒子の運動エネルギーが解放されて新粒子が放出される場合もある。これらの放出粒子の質量、電荷、エネルギー などを検出器により測定する。

その方法の１つは、物質に粒子を照射し、その粒子が散乱を受けずに試料を透過する確率を測定する、あるいは散乱される様子（飛跡）を観測することから物質の構造をきめるもので Rutherford の原子構造の研究がその例である。他は、高エネルギー粒子を衝突させ（あるいは衝突させないでも自然に崩壊する場合もあるが）、新たに発生した粒子(２次粒子)を測定して粒子間の相互作用や粒子の性質をしらべる分光学的方法である。

新しいとくに質量 M の大きい粒子を発生させたいときは（反粒子も同時に生成する）必要なエネルギーは $2Mc^2$ 以上でなければならない。さらによりミクロな構造を調べるときは照射する粒子ビームの波長(～hc/E)が小さいことが要求される。他方、調べる粒子が小さ

い（衝突確率が小さい）と衝突頻度はそれだけ低いものになる。そのため粒子ビームの強度を上げる必要がでてくる。粒子ビームの高エネルギー化とビーム強度を上げるという２つの要求は相補的なものである。

高エネルギー加速器では、陽子や電子などの荷電粒子を電場によって加速する。加速の電位差をＶ、電場の大きさをE、加速される距離をdとすれば、E＝V/d、加速粒子の電荷をqとすると、粒子の運動エネルギーはqV＝q E dである。実用上は電場の強さに限界がある（加速電圧は加速管１m あたり 10 MV＝10^7 V が限界である）ため長い加速距離をもつ線形加速器、または加速粒子を円運動させ繰り返し加速する方法を工夫する円形加速器（サイクロトロン、シンクロトロン）がある。さらに電位差によって加速するさいに静電圧を用いる場合と高周波をかける場合とがある。

標的の粒子B (その１個の広がりをσ (m^2) とする）を密度N (/m^2) で含む薄い厚さdx (m) の板に垂直に加速粒子Aを照射する。Aの進路がBとぶつかる割合はσ･(厚さdxの試料内のBの個数)/(試料面積）である。AがBに衝突しないでdxを素通りする確率は

$$\text{AがBによる散乱を受けずに距離 dx をすすむ確率} = 1 - \sigma N\, dx \qquad (2)$$

AがBによる散乱を受けずに距離xをすすむ確率P(x) を求める。そのためにAがBによる散乱を受けずに距離x + dxをすすむ確率P(x + dx) が２つの確率の積P(x)･(1－σ N dx) であることを利用する：

$$P(x + dx) = P(x)\cdot(1 - \sigma N\, dx) \qquad (3)$$

より、dP(x) / P(x) = －σ N dx、P(x)～exp(－σ N x)．最初の入射粒子の密度をN(0) とすれば、距離xすすんだときの粒子数はN(x) = N(0) exp(－σ N x) となる。

(ii) 加速器を用いた物質基本粒子の発見 [3,4]

まず陽子 - 陽子の衝突（図２(A)の断面積を求める）実験で、衝撃する陽子のエネルギーが１GeV～10^4 GeV 程度の広い範囲で断面積 40 mb (バーン) = 40×10^{-31} m^2 が得られている。ここから求められた陽子半径は 1.1×10^{-15} m である。同じ衝突エネルギー範囲で陽子 - パイ中間子の断面積は 20 mb、陽子に電子を照射して電荷の広がりをしらべると 0.8×10^{-15} m であり、陽子は点粒子でなく、複合粒子あると考えられる。しかし陽子の静止質量の 60 倍のエネルギーをつぎ込んでも陽子はこわれない。世界各国で大型加速器の建設と新粒子発見が始まった。新しいとくに質量Mの大きい粒子を発生させたいときは（反粒子も同時に生成する）必要なエネルギーは２Mc^2 以上でなければならない。1974 年に SLAC 線型コライダー（45 GeV、3 km 加速管、電子－陽電子、衝突エネルギー 90 GeV）によりc（チャームクオーク)を含む J/ψ 粒子が発見され、1977 年にはb（ボトムクオーク)を含むウプシロン粒子が発見され、標準理論の予言どおりの質量も確認された。そこで残る第３世代のクオークt（トップクオーク）の探索と第３世代の完成に努力が向けられた。1983 年、CERN（ヨーロッパ原子核研究機構）の LEP（90 GeV 陽子－反陽子衝突）で理論予測どおりの質量をもつ弱い力のボソン W^+, W^-, Z^0 が発見された。1994 年には国立フェルミ研究

所 400 名の実験グループからｔ（トップクオーク、176 GeV を使用）の発見が報告され、第３世代まで完成した。なお、標準理論で質量ゼロのボソン W、Z 粒子が現実世界では陽子の 100 倍の質量をもってあらわれてくる。このギャップを埋めるのが真空に凝縮されているというヒッグス粒子であり、ヒッグス粒子の発見が待たれている。

５．加速器を用いた宇宙のしくみの解明

宇宙がどのようにして誕生し、これからどのように進化するかの問題は、現在、もっとも広く関心がもたれている自然科学の一研究部門である。また現代の宇宙論は、物質構造論に対しても深くかかわりを持つにいたっている。そのなかから２，３の例を取り上げて紹介する。

(i) ビッグバン元素合成[5)]

われわれの身のまわりに存在する安定な物体は負電荷（電子など）と陽電荷（原子核など）をもつ微細な粒子を含んでおり、物体の温度に応じて電荷をもつ粒子相互の位置関係が絶えず変化（運動）している。このような物体を外からみると、物体の表面から電磁波が放出され、物体の温度に特徴的なスペクトルを有する熱放射を行う。ビッグバンモデルでも、高温高密度の状態から放射され、宇宙膨張とともにドプラー効果で赤方偏移した電磁波が３K 宇宙背景放射として観測される。ビッグバンから 1～1000 秒になると（冷却がすすみ）陽子と中性子を出発とする元素合成が始まった。このときの元素合成理論(Gamov)は、その時点における中性子および陽子の濃度と輻射密度が与えられると計算することができる。(輻射密度の値からは温度がわかり、また宇宙の膨張速度が分かる。また中性子と陽子、あるいは陽子と陽子がそのときの温度（粒子の速度が決まる）で互いに衝突してより大きな粒子を生成する確率は予め加速器を用いた実験によって得られている。)こうして幾つかの軽い元素（H, D, ^{3}He, ^{4}He, ^{7}Li など）の存在比を予測することができる。最初のビッグバン時(１秒以内）における粒子密度を仮定して、そこから経過した時間の関数として元素の存在比を計算してプロットする。それを最近の天体観測技術による現在の宇宙における元素組成の結果と比較することが可能である。理論から予測値を得るに必要な代入すべき数値はすべて加速器を用いる実験から得られている。すなわち元素合成理論によれば、最初(１秒以内）同数の中性子と陽子は、そのわずかな質量の違い(安定な陽子より 0.1%だけ重い中性子は半減期 15 分で陽子に崩壊する)が原因で温度 100 億 K では陽子/中性子＝３、10 億 K では陽子/中性子＝７のようにその比が変化し、ここに至って(ビッグバン後約３分経過）ビッグバン元素合成が終わった。そしてすべての中性子が ^{4}He の生成に消費されたとすると、^{4}He は全原子の質量の約 1/４になり観測地 20～30%に一致する。また D、^{3}He、^{7}Li についても観測値との一致は良好である。

なお、ビッグバン以後、およそ 38 万年を経て宇宙の温度も冷え、陽子やヘリウム原子核などの正電荷と電子がクーロン力で結びつき、電気的に中性の原子が漂うようになると重力が効いてくる。ほぼ４億年を経て宇宙に漂っていた粒子から重力により星が形成され、重力収縮による温度上昇にともないヘリウムから炭素、酸素、などと核融合反応が起こり、鉄までの重い原子が生成される。星の重力収縮はさらに続き、ついに重力崩壊を起こして星が爆発するとき（超新星爆発）、それまでに生成された原子核は大量の中性子とともに宇宙空間に飛び散る。ここで次々と起こる中性子捕獲反応によって鉄以上の重い原子、とく

にウランや超ウラン原子などが生成された。現在、世界中の多くの研究所でこのプロセスの核反応データが加速器を用いて盛んにしらべられている。日本では理化学研究所（和光市）の重イオン加速用サイクロトロン、とくに核反応で生成した短寿命の不安定核種を加速できるRIビームファクトリーが稼動中である。[5)]

(ii) 基本粒子の世代数

宇宙論の予言の中でとくに重要なことは、「基本粒子の種類には限りがある」ということである。現在、物質をつくる基本粒子（フェルミ粒子）としては6個のクオークと6個のレプトンが知られている（このほかに粒子間の力をになうボース粒子が存在)。例えば、いまこの宇宙に見られる普通の粒子は、アップクオーク、ダウンクオーク、電子、電子ニュートリノの4個で第1世代のグループをつくっている(図1)。第2世代（ミュオン族）はチャームクオーク、ストレンジクオーク、ミュオン、ミュオンニュートリノである。第3世代はトップクオーク、ボトムクオーク、タウ粒子、タウニュートリノである。現代宇宙論は、こうした世代の種類は仮にあるとしてもあと1つだけであることを主張する。前節の^{4}Heの存在量の計算には、光子、電子、陽電子、3種のニュートリノと3種の反ニュートリノの計9個が考慮された。もし新しい世代があったとしても、計算に影響するのは輻射密度に影響を与えるニュートリノだけである。輻射密度は輻射の種類の数に比例する。また輻射密度は当時の（ビッグバン直後の軽元素合成の時代の）宇宙の膨張率を決めるので元素合成に関係する。しかしこの余分のニュートリノと反ニュートリノが存在すれば、膨張率はもっと大きくなり、中性子が陽子に崩壊するための時間はもっと短いものになり、より多くの中性子が残されることになる。したがって^{4}Heが多くなってしまう。現在の宇宙に残る^{4}Heの存在量からニュートリノの数、したがって基本粒子の世代数は2、ないし3、許されても4までであることがわかる。

(iii) Z^0ボソンの寿命測定から

未知のニュートリノを探すこれまでの実験はまず付随するレプトンをつくることであった。レプトンをつくるには膨大なエネルギーが必要である。たとえばタウ粒子はSLAC(スタンフォード線形加速器センター）では数十GeV(10^{13} K) が必要であった。ニュートリノを探す別の加速器はCERNで開発されたLEP(電子－陽電子コライダー）である。ここで弱い相互作用を媒介する3個のボソンW^+、W^-、Z^0の存在が報告された。このうちのZ^0がここで重要である。Z^0は中性なので、その崩壊は電子‐陽電子対、upクオーク‐反upクオーク対、downクオーク‐反downクオーク対など以外にもニュートリノ‐反ニュートリノ対になるものも含む。世代の数が多くなればそれだけZ^0ボソンの崩壊様式が増加し、それに応じてZ^0の寿命が短くなる。Z^0の寿命測定からニュートリノの数(世代の数）が3と予測されている。

2008年のノーベル物理学賞に輝いた小林･益川理論によれば、宇宙(空間と時間）の誕生に続いて真空の相転移から誕生した粒子と反粒子のうち現在は粒子だけが残っていることは、基本粒子の世代の数が3以上(クオークの種類で6以上）であれば説明可能であるというものであった。現在は、世代の数は3として考えられている。[3)]

一方、天体の運動の観測も行われている。銀河や銀河団の回転運動の観測などからその中心に存在する質量を見積もることができるが、その質量はこれまで観測されている星など光を発するものの質量の50倍ほどである。つまり陽子・中性子･電子などなじみのある

粒子以外に（光を放出吸収することはないが質量をもつ）物質の存在が推定されている。これを暗黒物質（ダークマター）とよぶ。さらに宇宙全体がビッグバン以降に膨張を続けているが、最近の新しい望遠鏡の開発による遠方の超新星を観測することから過去の宇宙膨張の速度が現在よりも遅かった、つまり宇宙は加速しながら膨張を続けていることがわかってきている。加速させるためのエネルギーの存在がなければならず、それは暗黒エネルギーと呼ばれている。またビッグバン直後の光で満たされていた宇宙の時代、それから冷えて38万年後には陽子などと電子が結合して中性原子の時代(宇宙の暗黒時代の始まり、宇宙の晴れ上がり）が３－４億年続いて星が形成されて再び光輝く宇宙があらわれた。８－10 億年後には星から出る紫外線で宇宙に存在する中性原子はすべて再電離されたと考えられるが、この38万年後から10億年後までの時代は観測する手段がまだないために天文学での暗黒時代と呼ばれている。現在、宇宙のエネルギーの72%は暗黒エネルギー、23%は暗黒物質、残り5%がわれわれの知る複合粒子（ハドロン）（陽子、中性子、パイオン）とされている。３つの問題（暗黒物質、暗黒エネルギー、暗黒時代）の解明は、21世紀における物理学と天文学の最大の課題であると考えられている。[6)]

表 1、２では、既知の基本粒子の質量の値（実験的な測定値）が記されている。標準理論によれば、光子、ニュートリノの質量はゼロであるが、ニュートリノにわずかな質量があるという測定結果が報告されている。東海村の原子力研究機構 - KEK 高エネルギー加速器研究機構で建設中の J-PARC では、高強度の 50 GeV 陽子から強い中性子ビームをつくり生体分子の構造解析などへの利用をすすめているが、それとともにニュートリノの強いビームを岐阜県にあるカミオカンデ検出器に向けて飛ばし、ニュートリノの正確な質量の決定を目指している。質量が確定すれば現在の基本粒子に関する標準モデルの修正が必要となるかもしれない。

(iv) 太陽系の元素組成および新しい元素の合成

普通に地球上（あるいは太陽系）でみられる物質を構成する原子そのものを人工的に合成する研究についても触れておきたい。原子はすべてビッグバンの直後の軽原子合成のほか星の中の核融合(Fe まで)、さらには超新星爆発（中性子捕獲反応、ニュートリノ - 陽子反応などによる重原子の合成）により宇宙空間に放出され、これらが46億年前に収縮して太陽系が形成された。太陽系の元素組成は太陽から光のスペクトルをしらべるとわかる。一方、加速器を使って核反応データを整備し、実際の元素組成が再現できるかどうかのシミュレーションが進められている。[5)]

また、新しい元素を合成する研究は原子番号が93番～103番元素まではカリフォルニア大学バークレー校で原子炉の中性子捕獲反応でつくられていたが、それ以上の重い元素合成はもっぱら重いイオンを加速できる重イオン加速器を利用して進められている。アメリカに加えロシアの Debna 加速器センター、さらに原子番号 105～110 の合成はドイツの GSI 国立研究所、その後も 118 番元素までの報告がある。日本でも理化学研究所 RILAC（線型加速器）で核種 Zn-70 を標的核 Bi-209 に注意深くエネルギーを選んで照射し核融合させて113番元素の合成に成功している。[5)]

６．おわりに

長い氷河期を終えて地球温暖化が始まった1万年前、それまでの砕いた石と木切れだけを道具とした狩猟・採集生活から農耕・牧畜へと生活を変える人たちが出現した。ここでは、道具は粘土でつくった容器を焼き固めたり、岩石から好みの形の金属器具(農具や武器)を作りだす技術が生まれた。やがて物質の変化を注意深く見つめ、変化の前後で不変のものが存在することに気付く者が現れ、それを原子と呼んだ。以後、自然からの物質に手を加えて人間の役に立つものをつくる技術は進歩を続け、ついに人類史上顕著な技術革命(産業革命）を迎える。ここでは自然から道具をつくる原料とエネルギー源の化石燃料を掘り出し、人類は蒸気機関による大量の輸送手段とあいまって生産の一大効率化の時代を迎えた。物質変化の科学も質量・体積･圧力・温度の定量的な測定が加わり、19 世紀の化学者はすべての物質は100種類ほどの原子からできていること、原子自体は永久に壊れることのない安定なものであるが原子相互の組み合わせの変化によって多種多様な性質をもつ物質が生まれるものと考えるようになった。

19世紀の終わり、偶然のことからX線が発見され（真空放電の実験中)、それをきっかけとして鉱石中に存在する自然放射線が発見され、これを用いることによって原子の内部構造の研究が可能であることがわかった。本稿では、これ以後の20世紀における自然放射線を使った物質構造の研究について、また荷電粒子を人工的に加速する加速器を用いることによる物質構造の研究のあらましを説明してきた。そして加速器が大型化するとともに、物質構造の研究も原子から陽子・中性子の構造、そしてクオークの発見、力を司るゲージ粒子の発見とつづき、最近は宇宙の創生の問題へとつながってきている。「物質はどのようにつくられたか」から「宇宙はどのようになっているか」の問題になっている。放射線とは、物質をつくる微細粒子が走っている状態なのである。そのエネルギーを他の粒子に移す働きもするが、その相互作用の仕方をしらべることによって「物質の根源」そして「宇宙の成り立ち」を知る楽しみをわれわれに与えてくれる。

【参考文献】

1) 大野新一：「原子衝突と放射線利用—日常生活にかかわりの深い放射線利用の理解のために」、放射線教育、11、3 (2007).
2) 原 康夫、稲美武夫、青木健一郎：「素粒子物理学」、朝倉書店（2000).
3) 益川敏英：「現代の物質観とアインシュタインの夢」、岩波科学ライブラリー32（岩波書店（1995).
4) 南部陽一郎：「クオーク—素粒子物理の最前線」、BLUE BACKS、講談社（1981).
5) 谷畑勇夫：「宇宙核物理学入門」BLUE BACKS、講談社（2002).
6) 自然科学研究機構：「宇宙究極の謎」2008年9月23日一般講演会予稿集（出版印刷の予定).

「放射線教育」Radiation Education
【解説】 Vol. 12, No. 1, p. 61 - 66 (2008)

放射線防護体系の進化

金子正人
（財）放射線影響協会
101-0044 東京都千代田区鍛冶町１－９－16　丸石第２ビル５階
e-mail: mkaneko@rea.or.jp
（2008年３月10日受理）

[要旨] 現在の放射線防護体系は、「しきい値のない直線」（LNT）仮説に基づいて、作業者および一般公衆が受ける線量の最小化に大きな貢献をしてきた。しかしながら、LNT仮説は、放射線はどんなに少なくても有害であることを意味するため、放射線恐怖症（ラジオフォービア）や、過剰な規制による資源の浪費にもつながる。

著者は、放射線作業者の主要な疫学調査を含む放射線の影響研究の結果を検討したが、２０世紀の後半、世界中で採用された線量限度（作業者 50 mSv/年、公衆 5 mSv/年）以下の放射線被ばくでは、有害な健康影響のはっきりした証拠は見られない。DNA損傷の修復、アポトーシス、適応応答のような生体防御機構の存在が認識されるようになってきた現在では、直線性の仮説は“科学的”とは言えない。放射線リスクには、しきい値効果があるという多くの証拠が出てきており、放射線防護の体系に、“実際的な”しきい値、あるいは“実質安全線量”といった概念を導入し、低線量問題を解決する必要があると思われる。

1．はじめに

将来に向けて必要なエネルギーをいかに確保するかは、解決すべき大きな問題である。原子力は、炭酸ガスや硫黄酸化物のようなガスを放出せず、化石燃料を燃やして発電する危険な発電方式に代わる唯一の“安全で、経済的で、実用的な”代替方式である。

もし人々が少量の放射線の健康影響についての真実を知り、放射線に対する不必要な恐怖を抱かなくなれば、放射性廃棄物処分は解決困難な問題でなくなり、放射線の医学的利用の恩恵をさらに享受できるであろう。本稿で著者は、低レベル放射線の健康影響に関する最新の知見に鑑み、進化し、単純化した放射線防護体系を提案することとしたい。

２．現在の放射線防護体系

国際放射線防護委員会（ICRP）は、現行法令が依拠している1990年勧告を改訂し、2007年新しい勧告（Publication 103）を刊行した[1]。新しい勧告の主な特徴は以下のとおりである。

１）最新の知見に基づき、放射線加重係数、組織加重係数及び放射線のデトリメント（損害）を見直した。
２）放射線防護の基本となる３原則、すなわち、「正当化」、「最適化」（被ばくは合理的に達成できる限り低く、というALARA）および「線量限度の適用」を堅持した。
３）行為（被ばくを増やす）と介入（被ばくを減らす）というプロセスをベースにした以前のアプローチから、状況（計画被ばく、緊急被ばく、現存被ばく）をベースにしたアプローチに進化した。
４）実効線量と等価線量に対する個人線量限度を残した。
５）防護の最適化原則を強化した。
６）環境の放射線防護を証明する枠組みを構築するアプローチを含めた。

ICRPは、例外のあることは認めるが、放射線防護の目的のためには、基本的な細胞過程と線量―反応データに関する証拠の重み付けは、およそ100mSv未満の低線量域では、がんや遺伝的影響の発生は、臓器・組織の等価線量に比例して増加すると想定するのが科学的にもっともらしいという見解を支持していると判断している。

この見解（LNT モデル）は、原子放射線の影響に関する国連科学委員会報告（UNSCEAR2000）、米国放射線防護測定審議会報告（NCRP2002）および米国科学アカデミー/研究審議会報告（NAS/NRC2006）と同じであるが、フランスの科学・医学アカデミー報告は、放射線の発がんリスクには、実際的なしきい値があると主張している。

低線量における健康影響には不確実さがあるため、非常に小さな放射線量を多くの人が非常に長期間にわたって受けるような場合に、公衆保健の計画のために、がんや遺伝的疾患の仮想的な症例数を計算することは、適切ではないと ICRP は判断する。

全集団（個人ではない）に適用する名目リスク係数は見直し後も、Sv あたり約 5 %と変わらないため、作業者および公衆に対する線量限度の勧告値は 1990 年勧告を変えない。

3．LNT 仮説

3.1 LNT の利点

LNT 仮説は、線量の加算性を仮定しているおかげで、放射線防護において、被ばく線量の管理と記録を単純にしている。この仮説のもうひとつの利点は、人々に被ばくを低減しようというインセンティブを与えることができることである。

3.2 LNT の欠点

どんなレベルの線量でも有害という仮定が、世論、マスコミ、規制当局、さらに、多くの科学者によって証明された事実と見なされ、人々の間に“放射線恐怖症“を生じさせている。

1999 年 9 月 30 日に東海村の JCO 核燃料加工工場で発生した臨界事故は、近隣の住民の大部分は 1mSv 未満というごくわずかな線量しか受けなかったにもかかわらず、人々に心理的な不安を与えた。放射線を恐れることの方が放射線自身よりもずっと健康に有害であることを証明した。

規制者は、線量限度を低くすればするほど人々は安心と感じると誤解しがちである。線量限度を下げることは、むしろ放射線に対する不安を増加させることになるのに。

4．低線量放射線の健康影響についての証拠

4.1 遺伝への影響

広島・長崎の原爆による遺伝的影響についての 40 年間にわたる追跡調査は、両親の 0.4 から 0.6 Gy の被ばくでは統計的に有意な影響がなかったということを示している [2]。

4.2 発がんへの影響

(a) OECD/NEA の専門家グループの報告書によれば、広島・長崎の原爆被曝者の寿命調査で放射線リスクが統計的に有意と観察された最小の線量は、200 mSv とされている [3]。

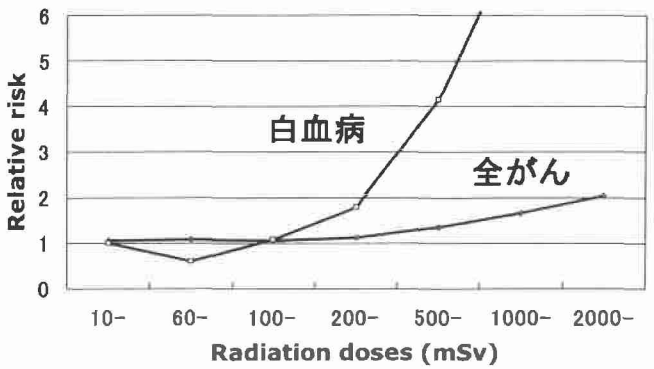


図 1 （参考）原爆被爆者集団のがん死亡の相対リスク
（国連科学委員会の 1994 年報告 Annex A 表 17 より作図）

(b)それ以下では腫瘍の有意な増加は観察されなかったという最大の線量を“非腫瘍線量”と定義すると、急性照射の場合、その値は低 LET 放射線については 0.1 Gy、高 LET 放射線については 0.01 Gy であった。また、低線量率、慢性照射あるいは身体の部分照射での“非腫瘍線量”は、これらの線量よりもはるかに高い値であった[4]。

(c)インド、ブラジル、イランには、10 mSv/年をこえる高放射線地域があるが、自然放射線が住民の健康に悪い影響を与えているという証拠はない。

インド西南端にあるKerala州の人口40万人のカルナガパリ地区（taluk）の12の行政区（panchayat）には、それぞれ2～4万人が住んでいる。各行政区の外部放射線の最大年線量は、4 mGy（屋内）から70mGy(屋外)に及ぶ。屋内および屋外の年線量の中央値を平均（屋内外の滞在を半々と仮定）した値をその行政区の年線量として、男女別のがん罹患率を示したのが図2である。高い自然放射線レベルによってがん罹患率が上昇するという証拠は見られない[5]。なお、被ばくはガンマ線によるものであるため、年線量の1Gyは、ほぼ1mSvと考えてよい。

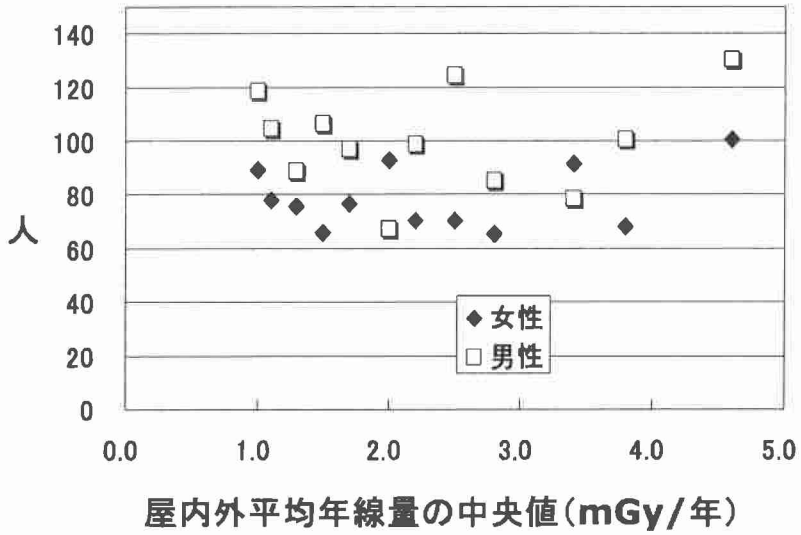


図 2 インド Kerala 州カルナガパリ地区の人口 10 万人あたりのがん罹患数
（1990 年～1996 年）

(d) 日本の原子力産業従事者の死亡調査の第 2 回目の解析結果は、低レベルの職業被ばくが、がんの死亡率を増加させたというはっきりした証拠を示さなかった[6]。

(e)米国原子力船造船所作業者に関する大型研究（米国エネルギー省支援）の最終報告は、被ばくグループ（5 mSv 未満、5 mSv 以上とも）の方が、同様の業務に従事した非放射線作業者よりも死亡率（全死因）が有意に低かった[7]。

(f) 米国、英国、カナダ 3 カ国の約 96,000 人の原子力従事者のデータを合同解析した結果、全がん死亡について放射線による過剰リスクは示されなかった[8]。

放射線従事者のがんによる死亡率が累積線量によって増加するかどうかを解析したグラフが図 3 である。400 mSv 以上被ばくした人たちに観察されたがん死亡数は 56 例であり、期待死亡数の 67.3 より少ない。統計学的に有意ではないが、累積線量が大きいほど、がん死亡リスクが小さい（過剰相対リスクが 1 Sv あたりマイナス 0.07）という傾向がある。

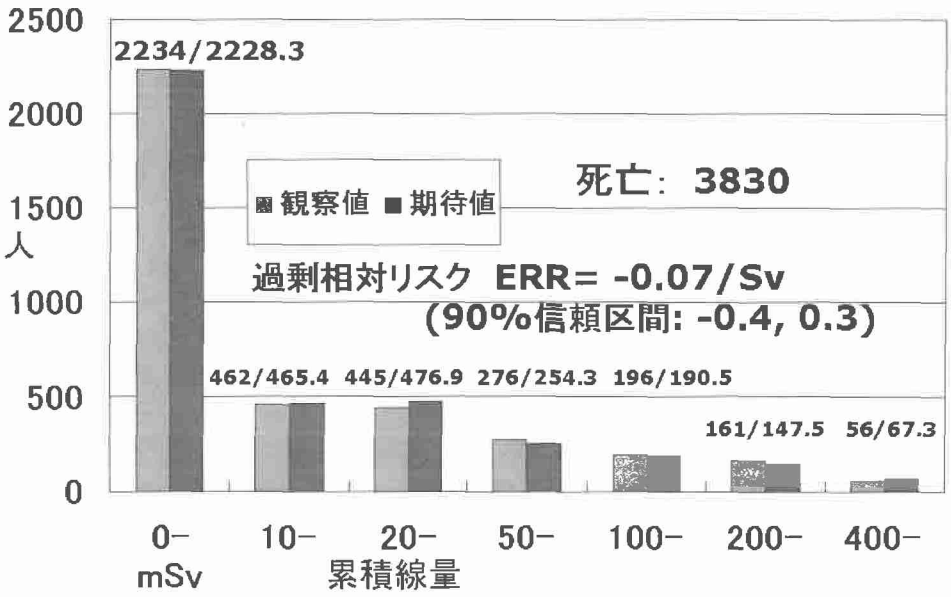


図３　３カ国の原子力従事者の全がん死亡（白血病を除く）

(g)英国の放射線科医の 100 年間におよぶ調査の結果、1920 年以降に登録された放射線科医は、他の医師と比較して、がんによる死亡率の増加は統計的に有意ではなく、すべての原因による死亡率は有意に低いことが示された。さらに、平均生涯線量が 20 Sv と推定される初期の放射線科医においても、がん以外の疾患に放射線の影響があったという証拠はなかった[9]。

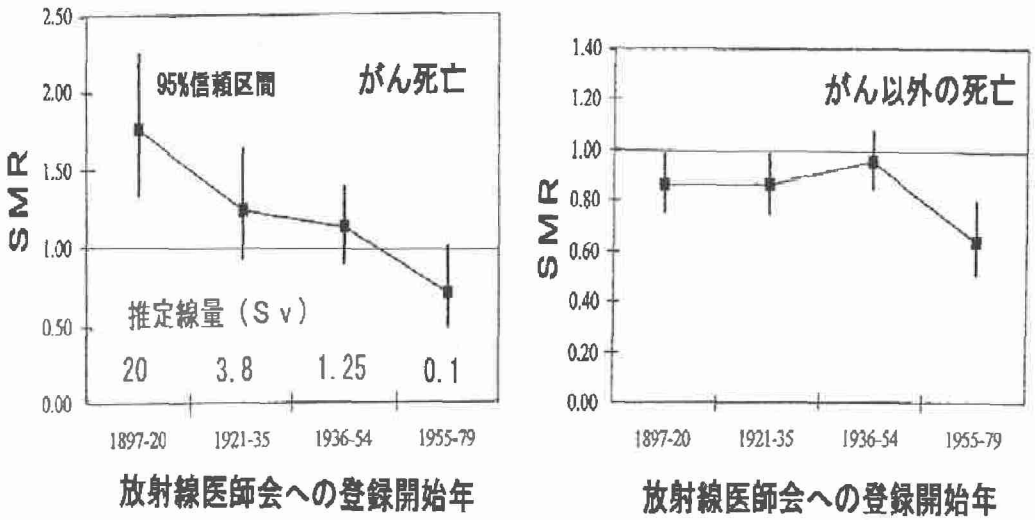


図４　英国放射線科医の一般臨床医との比較による標準化死亡比（SMR）

５．進化した放射線防護体系の提案

5.1 新体系は健全な科学に基づかなければならない

DNA 修復、アポトーシス、適応応答、免疫系というような生体防護機構の存在がよく認識されるようになった現在、すべての線量レベルで直線性があるという仮説は“非科学的”と言える。LNT 仮説と矛盾する低線量放射線の健康影響データは豊富にあり、生物学的に有益な“ホルミシス”まである[10]。証拠は、ますます放射線のリスクには、しきい値効果があることを示している[2]。

Calabrese と Baldwin は、線量―応答関係の最も基本的な形は、しきい値でも直線でもなく、U 字形（ホルミシス的）であり、特に、直線モデルによる低線量リスクの推定値は信頼できないという[11]。

米国の保健物理学会は、1996 年に声明（2004 年に改訂）を発表し、（バックグラウンド放射線に加えて）年線量 5 rem（50 mSv）あるいは生涯線量 10 rem（100 mSv）未満で放射線リスクの定量的な評価を行うことに反対しているが、その理由は、10 rem（100 mSv）未満では健康影響のリスクが小さすぎて観察されないか、あるいは存在しないからとしている[12]。

5.2 新体系は、他の“有害”物質と調和がとれていなければならない

もし、電離放射線が、これまで毒性学の原則であった Paracelsus (1493-1541)の下記の金言の例外ではないと考えるならば、新体系を紫外線や毒性のある化学物質のような健康に害を与えるものと調和をとることができる。

“全てのものは毒である。毒でないものは存在しない。毒になるか薬になるかは正しい量であるかどうかで分かれる。”

5.3 “実際的”しきい値の意味合い

“実際的”しきい値を、それ以下では検出できるような放射線による発がんや遺伝的影響は期待されない被ばくレベルと定義する[13]。

被ばくが、“実際的”しきい値以下に保たれているかぎり、行為の「正当化」も防護の「最適化」 (ALARA)も必要ではなくなる。それゆえ、個人への放射線の害が社会への便益で相殺することを許すという「正当化」の倫理上の問題を解決することができる。また、健康あるいは安全を経済的な利得と交換するという「最適化」の倫理上の問題をも解決できる。

すなわち、“実際的”しきい値という概念の導入は、個人尊重の考え方に立っており、“実際的”しきい値以下の線量を受けた人のリスクを平等に negligible と扱うことができるのである。

5.4 線量限度の提案

２０世紀の後半、世界中で採用された全身被ばく線量の限度（作業者 50 mSv/年、公衆 5 mSv/年）以下の放射線被ばくでは、有害な健康影響のはっきりした証拠は見られていない。このため次の線量限度は、“実際的”しきい値以下であると想定する。

－作業者：50 mGy/年
（身体の部分あるいは１つの臓器の被ばくについては、500 mGy/年）
－公 衆：5 mGy/年
（身体の部分あるいは１つの臓器の被ばくについては、50 mGy/年）

なお、アルファ線、中性子線のような高 LET 放射線の場合には、上記線量限度に 10 分の 1 を乗じる。

6．結語

ICRP は、「電離放射線は恐怖でなく注意をもって取り扱う必要があり、放射線のリスクは他のリスクと釣り合いを保つべきである」という見解を 1990 年勧告（14 項)において強調している。

放射線防護の専門家は、科学者を納得させる必要はないが、恐れ、悩み、自分で判断し、決定しようとしている一般の人々を納得させる必要がある。

放射線防護は、健康障害の原因となるようなことをしてはならない。

参考文献

1) ICRP: The 2007 Recommendations of the International *Annals of the ICRP*, 37, No. 2-4 (2007)
2) Kondo S: Evidence That There are Threshold Effects in Risk of Radiation *J. Nuclear Science & Technology* 36 1-9 (1999)
3) OECD/NEA: Developments in Radiation Health Science and Their Impact on Radiation Protection *Report of The WGST-RHS*, p.14 (1998)
4) Tanooka H: Threshold dose-response in radiation carcinogenesis: an approach from chronic β -irradiation experiments and a review of non-tumor doses Int. *J. of Radiat.Biol.* 77 541-551 (2001)
5) Krishnan Nair M et al.: Population Study in the High Natural Background Radiation Area in Kerala, India *Radiation Research* 152 S145-S148 (1999)
6) Iwasaki T et al.: Second Analysis of Mortality of Nuclear Industry Workers in Japan 1986-1997 *Radiation Research* 159 228-238 (2003)
7) Matanoski GM: Health Effects of Low-Level Radiation in Shipyard Workers, Final Report *DOE/EV/10095-T2*, National Technical Information Service, Springfield, Virginia (1991)
8) Cardis E et al.: Effects of low doses and low dose rates of external ionizing radiation: cancer mortality among nuclear industry workers in three countries *Radiat.Res* 142 117-132 (1995)
9) Berrington A et al.: 100 years of observation on British radiologists: mortality from cancer and other causes 1897-1997 *British J. of Radiology* 74 507-519 (2001)
10) Luckey TD: Physiological Benefits from Low Levels of Ionizing Radiation *Health Physics* 41 771 –789 (1982)
11) Calabrese EJ and Baldwin LA Toxicology rethinks its central belief *Nature* 421 691-692 (2003)
12) Health Physics Society: Radiation Risk in Perspective (Position Statement) *Health Physics News October 2004,* 15-16 (2004)
13) Jaworowski Z : Radiation Risk and Ethics *Physics Today* 52 (9), 24-29 (1999)

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 12, No. 1, p. 67 - 74 (2008)

【解説】

新エネルギーと原子力
— 持続可能な未来のために —

工藤博司
東北放射線科学センター
〒980-0811 仙台市青葉区一番町 1-1-30
E-mail: gencon-kudo@m1.bstream.jp
(2009年3月12日受理)

【要旨】地球温暖化を抑制し持続可能な未来を手に入れるため，現代に生きる我々は温室効果ガスを排出しないエネルギーの使用を求められている。化石燃料に代わるエネルギー源として，新エネルギー (再生可能エネルギー) に関心が寄せられ，近年の風力および太陽光利用の急激な拡大には目を見張るものがある。一方，発電時に温室効果ガスを排出しない原子力の“ベースロード電力”としての役割も見直され，各国で原子力発電所の新規建設計画が具体化されつつある。原子力と再生可能エネルギーの共存は，今世紀半ばには90億人を超えると予測される人類の文化的生活を支えるエネルギー源の確保につながるとの考えに立ち，エネルギー利用の将来を展望する。また，再生可能エネルギー高度利用技術開発ならびに究極のエネルギー源と期待される核融合炉開発の現状を紹介する。

1. まえがき

世界の人口が67億人を突破し (2008年)，地球環境の保全と食糧，資源・エネルギーの確保が重要な課題になっている。特に地球温暖化については，気候変動に関する政府間パネル (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change) が2007年に発表した第4次評価報告書 (AR4)[1] の中で「地球温暖化の進行は疑いの無い事実であり，その主たる要因は産業革命以降の人間活動により排出された二酸化炭素 (CO_2)，メタン (CH_4)，一酸化二窒素 (N_2O) などの温室効果ガス (GHG) の大気中濃度の上昇にある」と述べている。そして，持続発展社会を維持するためには，今世紀末の世界の平均気温の上昇を2℃以内に抑える必要があり，そのためには，人為起源GHGの排出量を2050年までに現在 (CO_2 換算約49 Gt/y) の50%以下に抑えなければならないとしている。

人為起源のGHGは主にエネルギー源として石炭，石油，天然ガスなどの化石燃料を使用することにより発生する (ただし CH_4 と N_2O は農業による排出が主な要因)。現代社会にあってエネルギー利用の抑制は容易に受け入れられるものではなく，化石燃料の使用を直ちに止めることはできない。大気中のGHG濃度を減少させるためには，太陽光，風力，小規模水力，地熱さらには原子力などの脱炭素エネルギーの利用拡大が現実的である。従来型大規模水力の利用はほぼ飽和状態にあり，地熱の利用は特定の地域に限られ利用拡大は緩やかである。しかし後者は，新たに提案されている高度利用システム (EGS: Enhanced Geothermal System) の開発によって，大幅な利用拡大の可能性を秘めている。海洋エネルギーの利用にも大きな関心が払われているが，現在のところの研究開発に大きな進展は見られない。

本稿は第4回放射線教育国際シンポジウム (2008年12月18-19日，台湾新竹市・国立清華大学) で基調講演として発表した。

太陽から地球に届くエネルギー量 (100 PW) は，1 時間で人類が 1 年間に消費する量を上回ると見積もられ，太陽光や風力の有効利用に大きな関心が寄せられている。本稿では，脱炭素エネルギーとして期待が寄せられている太陽光と風力ならびに原子力に的を絞り，その現状と将来のあるべき姿を描いてみる。また，将来に期待がかかる海洋エネルギーの利用，地熱高度利用システム (EGS) および人工光合成の研究に加え，究極のエネルギー源としてその実現が望まれる核融合炉開発の現状を紹介する。

2. 太陽光・風力と原子力の共存

図 1 に，世界で使われている最終消費エネルギーの内訳 (A)と発電に占める各種エネルギー源の割合 (B) を示す (2006 年時点の統計)[2]。再生可能エネルギーの利用は 18%とかなり高いように見えるが，その大半 (13%) は旧来のバイオマスの利用 (主に調理と暖房) であり，最新の再生可能エネルギーの割合は 2.4%に過ぎない (バイオ燃料 0.3%，発電 0.8%，給湯・暖房 1.3%)。発電に占める再生可能エネルギーの割合は 3.4%程度である。

太陽光と風力の利用が急激に伸びたのはここ数年のことである。特に風力発電の拡大はめざましく，その設備容量の伸び率は最近 5 年間で毎年約 25%に達している[3]。拡大の中心はドイツ，米国，スペイン，インド，中国などである。世界風力エネルギー協会 (GWEC: Global Wind Energy Council, Belgium) の本年 2 月の発表によれば，2008 年の世界の風力発電総設備容量は前年比 1.3 倍の 120.8 GW に達し，この年の新規設置容量が 8.36 GW であった米国がドイツを抜いてトップに躍り出た[4] (表 1)。また，総設備容量が 4 年連続で前年の 2 倍の伸び率で約 12.2 GW になった中国は，このペースでいくと 2010 年には

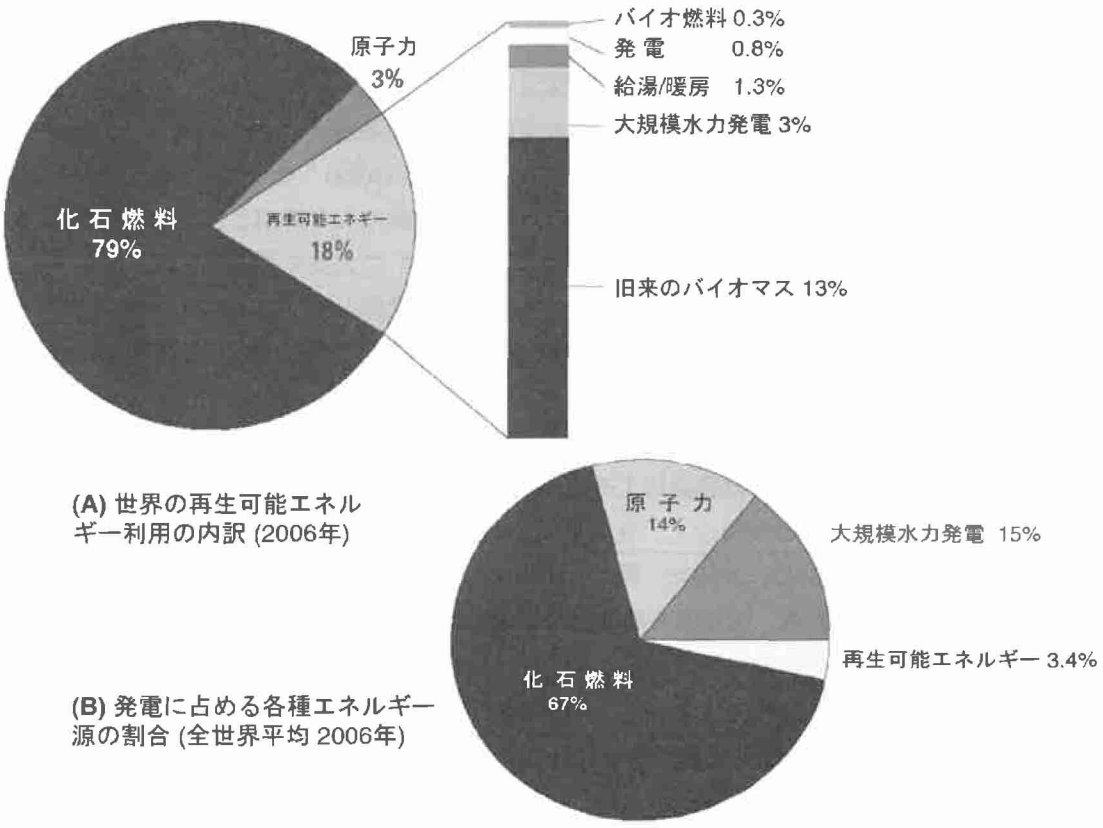


図 1　世界の最終消費エネルギーの内訳

表 1　風力および太陽光発電設備容量上位5ヵ国

風力 (2008年)		太陽光 [電池] (2006年)	
1. 米国	25.17	1. ドイツ	2.86
2. ドイツ	23.90	2. 日本	1.71
3. スペイン	16.75	3. 米国	0.62
4. 中国	12.21	4. スペイン	0.12
5. インド	9.65	5. オーストラリア	0.07
⋮		全世界	5.10
13. 日本	1.88		~9 (2007)
全世界	120.8		

単位: GW

ドイツとスペインを抜き，世界第 2 位になると予想される。日本の総設備容量は前年比 23%増で 1.88 GW になったが，世界では 13 位にとどまっている。

太陽光の利用 (ドイツ，日本，米国，スペインなど) も急増しているが，世界の総設備容量は 2007 年で約 9 GW であり，その年の風力の総設備容量 (95 GW) の 1/10 程度である [2, 4-7]。米国のオバマ大統領はグリーン・ニューディール構想を唱え，再生可能エネルギーが米国の電力全体に占める比率を 2012 年に 10%，2025 年に 25%とするという目標を掲げている。それを受けて，数年先には風力や太陽光利用は大きく様変わりするだろうが，課題も少なくない。

表 2 に，電源別発電原価と設備利用率を示す [8]。風力の発電単価はキロワット時当たり 10~14 円で原子力の 2 倍程度であるが，太陽電池による発電単価は約 46 円と最も高い。ただし，太陽光集光発電の単価は風力と同程度と見積もられており，大規模太陽光発電に適すると考えられている。原子力の発電単価は，核燃料再処理や高レベル放射性廃棄物最終処分の費用を見込んでも 5~6 円である。なお，燃料電池の発電単価は約 22 円，廃棄物を燃料とする発電は 9~10 円と試算されている。

発電単価の問題は，設備の普及と技術革新により解決されると期待されるが，太陽光発電と風力発電の新たな展開に適する土地の確保が次第に困難になりつつある。両者ともエネルギー密度が低く，広大な用地を必要とするためである。ちなみに，100 万キロワット級の原子力発電所の建設に必要な土地の

表 2　電源別発電原価 (試算) と設備利用率[8]

電源	発電単価 (円/kWh)	設備利用率 (%)
水力	8.2~13.3	45
石油	10.0~17.3	30~80
天然ガス (LNG)	5.8~7.1	60~80
石炭	5.0~6.5	70~80
原子力	4.8~6.2	70~85
太陽光	46	12
風力	10~14	20

広さは野球場やサッカースタジアム程度で足りるが，同じ出力の太陽光発電では約 67 km^2 (JR 山手線 1 周の内側の面積に相当)，風力発電のためには約 246 km^2 (同 3 個半に相当) の面積が必要である。

太陽光は夜間には発電できず，曇天時には出力が低下する。風が止めば風力発電は稼働しない。実際，表 2 (右欄) に示すように，太陽光と風力の設備利用率はそれぞれ 12%および 20%とかなり低い。この欠点は，蓄電池の利用によって克服できると考えられているが，“ベースロード (base load) 電力” の活用も効果的である。脱炭素エネルギーのなかで，原子力は大容量のベースロード電力の供給に適するエネルギー源であることを忘れてはならない (逆に，起動・停止の繰り返しには不向き)。そこには相補性があり，太陽光発電や風力発電が増えれば増えるほど，電力の安定供給で果たす原子力の役割はますます大きくなると言ってよい。

2006 年末現在，世界には 438 基の発電用原子炉があり約 370 GW の設備容量を有しているが [9] (表 3 参照)，脱炭素時代を迎え，今後 20 年でさらに 150 基の発電用原子炉が建設されるとの予測もある [3]。わが国では，石油危機後の 1980 年に制定された石油代替エネルギー促進法により，エネルギーの石油依存を 1980 年当時の 80%から現在の 50%弱まで下げることに成功した。最近，「脱化石燃料」に向けた法改正の論議も進んでおり，「原子力を軸にしながら太陽光や風力への転換を進める」という考えも提案されている。再生可能エネルギーと原子力の共存は，持続可能な未来につながる有益な施策である。

原子力にも解決すべき課題が少なくない。例えば，ウラン資源は無尽蔵ではなく，現在の確認埋蔵量 (4.7 Mt) は 85 年分と推定されている。しかし，高速増殖炉 (FBR) が実用化されれば，プルトニウム利用により，ウランの利用年数は 2000 年以上に延びると計算される。わが国は高速炉増殖炉の開発で世界の先頭に立っているが，昨年 10 月に予定されていた実証炉“ふげん”の運転再開は度々延期されており，商用炉の運転までにはまだ数十年以上かかりそうである。その間，プルトニウムとウランの混合酸化物 (MOX) 燃料を通常の発電用軽水炉で用いる計画が進んでいるが，核燃料サイクルの確立で重要な役割

表3　主要国の原子力発電の現状[9]

	原発の規模 2006年(MW)	稼働中の原子炉数	国内発電に占める割合 (%)
米国	100,582	104	19.4
フランス	63,260	59	76.9
日本	47,587	55	27.5
ロシア	21,743	31	16.0
ドイツ	20,470	17	27.3
韓国	17,451	20	35.3
ウクライナ	13,107	15	48.1
カナダ	12,621	18	14.7
英国	10,222	19	15.1
スウェーデン	8,995	10	46.1
世界合計	371,675	438	

をもつ六ヶ所村の再処理工場の完成も遅れている。試運転が始まって3年以上になるが，トラブルや不具合が重なり，2007年8月に予定されていた本格操業開始は本年下期以降になりそうである。

核燃料サイクルの一翼を担う高レベル放射性廃棄物 (HLW: High-Level Radioactive Waste) の最終処分地の見通しも立たない。最終処分では，ガラス固化したHLW を地下300メートル以深の安定な地層に埋設し，長期間 (天然のウラン鉱石の10倍程度の放射能に達するまで約1000年を要する) 管理することになるが，わが国だけではなく，米国をはじめ多くの国々が様々な課題を抱えている。HLWの最終処分を円滑に実施するためには，技術的課題の解決はもとより，“世代を越えた理解の構築”という社会科学的課題を解決しなければならない。昨年は紫式部が「源氏物語」を執筆してから千年目に当たるといわれ，様々の記念行事が催された。この例は，文化の継承にとって1000年が途方もない歳月ではないことを示しており，HLWの管理を将来の世代に委ねるための知恵もあるに違いない。

3. 再生可能エネルギー高度利用技術の開発

将来に向けては，海洋エネルギー，地熱高度利用システム (EGS: Enhanced Geothermal System)，人工光合成などの実用化にも期待がかかる[3]。海洋エネルギーとして我々が利用できるのは潮力と波力である。現時点で世界最大の潮力発電所は，フランスのランス (Rance) 潮力発電所 (定格出力 240 MW) であるが実用にはほど遠く，波力を利用する技術の大半は研究・試験段階にとどまっている[10]。最近では，スコットランド政府が海洋再生エネルギー事業に積極的であり，サルタイヤ賞 (Saltire Prize) を創設し，波力・潮力エネルギーの革新技術開発に力を入れている。

地熱高度利用システム (EGS) は，米国エネルギー省 (DOE) の支援もあり，その技術開発が注目されている[11]。地熱発電は，地球内部にある莫大な量のエネルギーを有効利用するものであるが，従来の地熱利用は温泉が豊富に湧き出している場所など，特殊な地域に限られていた。実際，地熱発電を実施しているのは20ヵ国ほどで，国内の電力の15%以上をこの方法で賄っているのはコスタリカ，エルサルバドル，アイスランド，ケニア，フィリピンの5ヵ国しかない。世界の地熱発電の総設備容量は約10 GWである。現時点では太陽光発電の設備容量に匹敵するが，その伸びは緩やか (過去5年間に3%程度) である。我が国には18の地熱発電所がある。その総設備容量は約 0.5 MW と小規模であるが，火山国であるわが国の地熱資源量は米国，インドネシアに次いで世界3位である。

EGSは限られた地域の地熱利用とは異なり，地下3~10 km に地上から水を (ポンプで) 注入し，熱水 (>150℃) として取り出し発電機に導く方式である。それゆえ，ある特定の場所に限らず地熱発電が可能になる。マサチューセッツ工科大学 (MIT) の研究によれば，米国内だけでも100 GWの発電が可能であると試算されている[12]。

MITのNoceraら[13]は最近，夜でもエネルギー供給を可能にする太陽光利用に関する研究を発表し，画期的な方法として関心を呼んでいる。植物の光合成にヒントを得たもので，“人工光合成 (artificial photosynthesis)”とも言われる。具体的には，太陽光を使い電気分解によって水から水素 (H_2) と酸素 (O_2) を発生させ，保存する。その水素と酸素を燃料電池内で再結合させて発電するため，昼夜を問わず発電が可能になる。鍵となるのは，水の電気分解のために新たに開発した触媒である。コバルト (Co^+) とリン酸塩を含む水溶液に電極を入れ通電すると，コバルトとリン酸から成る触媒の薄膜が電極表面に形成され，それと同時に酸素 (O_2) が発生する。この触媒と白金などから成る水素発生用触媒を組み合わせることによって，光合成の過程でみられる水の分解反応を再現することができた。しかも，この分解反応は中性 (pH 7) の室温の水の中で起きるのでコストは低く，高効率で太陽光エネルギーを保存できる可能性が高いと期待されている。

4. 核融合炉実現への道

核融合は究極のエネルギー源と考えられる。太陽 (星) のエネルギー源は水素の核融合反応であり，これを地上に制御核融合炉 (CTR: Controlled Thermonuclear Reactor) として実現することは人類の夢である。核融合の研究は 1950 年代前半に開始された。1955 年にウィーンで開催された第 1 回原子力平和利用国際会議の場で，議長は「核融合炉は 20 年以内に実現するだろう」と述べたが，50 年以上を経た現在でも核融合炉は存在しない。高温のプラズマを閉じ込めることは予想以上に難題であった。

太陽の核融合は，その膨大な重力場が引き起こす

$$4\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + 2(e^{+} + \nu + \gamma) + 24\ \mathrm{MeV} \qquad (1)$$

反応である。この反応をそのまま地球上に再現することはできないが，重水素 (D≡^{2}H) とトリチウム (T≡^{3}H) のプラズマを 1 億度以上に加熱すると，D-T 反応と呼ばれる

$$\mathrm{D} + \mathrm{T} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + \mathrm{n} + 17.58\ \mathrm{MeV} \qquad (2)$$

を起こすことができる。重水素とトリチウムの混合燃料 1 グラムから石油 8 トン分のエネルギーが得られる勘定である。これは 1 グラムの ^{235}U が原子炉内で発生するエネルギー量の 5 倍に相当する。燃料である重水素の天然存在比は 0.0153%と小さいものの，海水中には莫大な量の重水素が含まれるので資源の問題はない。トリチウムは天然にほとんど存在しない [H に対し$(5\pm3)\times10^{-18}$] ことと放射性であるため，その確保と安全取扱いに課題は残るが，技術的に解決できる問題である [14]。また，核融合炉で発生する長半減期放射性廃棄物の量は，原子炉に比べ格段に少ないと見積もられている。

1980 年代後半に，JT-60 (日本)，JET (EU)，TFTR (米国) などの大型トカマク実験装置によるプラズマの加熱および閉じ込めの研究に大きな前進がみられ (現在，最高温度は約 2 億度，最長閉じ込め時間は約 30 秒)，核融合炉実現の可能性は高まったが，多くの工学的課題は残されたままであった。転機は 1985 年に開催されたレーガン大統領とゴルバチョフ大統領の米ソ首脳会談の成果の一つとしてもたらされた。核融合炉の実現を目指す国際共同研究の実施である。米・ロ・日・欧の 4 極が参加し，国際原子力機関 (IAEA) の支援のもとに，国際熱核融合実験炉 (ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor) の共同設計作業が 1988 年に開始された。1990 年代の工学設計活動を経て，今世紀に入って ITER の建設に向けた作業へと移行した。建設地の選定では欧州と日本の間に激しい誘致合戦が続いたが，2005 年に ITER 本体はフランスのカダラッシュ (Cadarache) に建設することが決まり，六ヶ所村にも関連施設が建設されることになった。この ITER プロジェクトには現在，従来の 4 極に加えて韓国，中国およびインドも参加している。

ITER では，プラズマ核融合反応を 400 秒間以上持続させ，加熱に要するエネルギーの 10 倍のエネルギーを発生させることを目標にしている。2007 年に建設を開始し，2016 年にはプラズマ実験を開始する予定であったが，当初約 8000 億円と見積もられていた建設費が 30%近く膨張したこともあり，着工は 2010 年以降になる見込みである [15]。ITER 関連の長期計画では，最初の商用核融合炉の運転開始を 2050 年としているが [16] (図 2)，計画の具体化には至っていない。商用炉の建設までには，高温プラズマの制御に加え，反応 (2) で発生する高速中性子 (14 MeV) の照射に耐える材料の開発など多くの課題を解決しなければならないが，研究開始から既に 50 年を経て，今なお実現の見通しが立たないのは残念なことである。さらに英知を結集し，“地上に太陽を!” の夢の実現に向かって前進して欲しい。

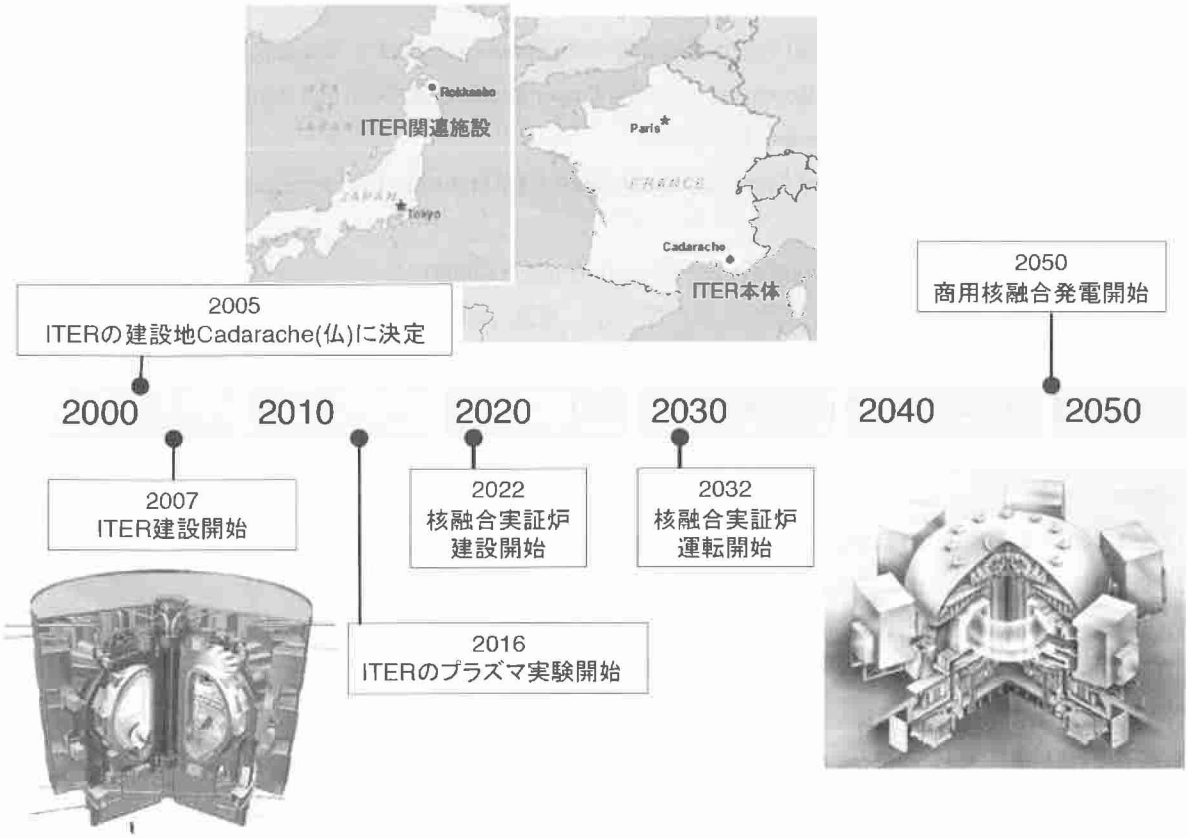


図2　ITER計画が描く核融合炉開発

5. あとがき

近年，風力と太陽光の利用はめざましい勢いで拡大している。両者は地球温暖化を回避し，持続的発展社会を維持するための脱炭素エネルギーのエースと目されるが，無限に拡大可能なものではない。風力や太陽光はエネルギー密度が低く，大量の電力を得るためには広大な土地を必要とする。設置に適する土地の多くは既に利用され，新たな好適地の確保は次第に難しくなりつつある。脱炭素エネルギーの一つである原子力は高密度エネルギー源であり，風力や太陽光の欠点を補うことができる。風力や太陽光と原子力の共存こそ，今世紀半ばには 90 億人を超すと予測される人類の文化的生活を支えることにつながる現実的な方策の一つである。勿論，核拡散防止や安全確保に留意することが前提になる。

海洋エネルギーや地熱高度利用 (EGS) などの研究も進められているが，実用化はまだ先になる。究極のエネルギー源と言われる核融合炉の実現は人類の夢であるが，国際熱核融合実験炉 (ITER) の着工の遅れもあり，実現の見通しはなお不透明である。

参考資料

1) Climate Change 2007: AR4 of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, Qin, S.D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor. M. and Miller, H.L. (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA (2007)

2) Renewable 2007: Global Status Report, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), www.ren21.net (2008)

3) Schiermeier, Q., Tollefson, J., Scully, T., A. Witze, A. and Morton, O., Electricity without carbon, Nature **454,**

816-823 (2008)
4) Latest News 02/02/2009, Global Wind Energy Council <http://www.gwec.net/>, Brussels, Belgium (2009).
5) Wiser. R. and Bolinger, M., Annual Report on US Wind Power Installation, Cost, and Performance Trends 2007, U.S. Department of Energy, Washington, DC (2008)
6) Renewable Energy Consumption and Electricity Preliminary 2007 Statistics, US Department of Energy, Washington, DC (2008)
7) Global Wind 2007 Report, Global Wind Energy Council, Brussels (2008)
8) 「平成 19 年度エネルギー白書」資源エネルギー庁, 東京 (2008)
9) IAEA Report 2007, IAEA, Vienna (2007)
10) E. Gallaway, To catch a wave, Nature **450**, 156159 (2007)
11)An Evaluation of Enhanced Geothermal Systems Technology, U.S. Department of Energy, Washington, DC (2008)
12) The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century, Massachusetts Institute of Technology (2006)
13) Kanan, M.W. and Nocera, D.G, In situ formation of an oxygen-evolving catalyst in neutral water containing phosphate and CO^{2+}, Science **321**, 1072-1075 (2008)
14) Kudo, H., Radioactivity and fusion Energy, Radiochim. Acta **70/71**, 403-412 (1995)
15) Brufiel, G., Fusion Reactor faces cost hike, Nature **453**, 829 (2008)
16) Clery, D., ITER's $12 billion gamble, Science **321**, 238-242 (2006)

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 12, No. 1, p. 75 – 84 (2008)

【実践報告】

青森支部 2008 年度の活動の記録

笹川澄子
NPO 法人放射線教育フォーラム青森支部
〒033-0023 三沢市下久保 1-3-6-C
（2009 年 3 月 15 受理）

［要約］設立 2 年度目の青森支部は支部活動の中心であるセミナー開催を、予定よりも 1 回多く 3 回行った。これらの概要を述べる。人々の発意・発露を促し、双方向コミュニケーションを図るという目標に、僅かながら近づいていると感じられた。しかし、その方法論には決定的なものは無く、試行錯誤が必要な課題であり続けている。

1. はじめに

NPO 法人放射線教育フォーラム青森支部は、千葉支部に続く 2 番目の支部として、関係各位のご理解とご支援を賜り 2007 年度に設立がかなった。青森支部は、様々な分野で活躍する地元住民をはじめ多くの方々とともに、遍く住民の関心事を考え理解を深め、とりわけ原子力や放射線に関しては、住民の日常生活の中に安全安心が醸成されていくことを目指している。そのためにセミナー開催を主な活動に掲げ、初年度は設立記念セミナー（第 1 回セミナー）および第 2 回セミナーを六ヶ所村で開催した [1]。本稿は 2008 年度の活動の結果を報告するものである。今年度は当初 2 回のセミナー開催を予定していたが、要請されて、さしずめ「出前セミナー」にもなる第 5 回セミナーを追加開催した。この波及効果ともいえる出来事は今年度の特筆である。まず、各セミナーの概要（含セミナー開催周知）を記述し、次に、セミナー参加者にお願いしたアンケート回答の分析結果を記述する。

セミナーの様子は折り折りに支部ホームページに資料（pdf）とともに公開しているので、閲覧されたい（http://www.jomon.ne.jp/~ssgw/）。なお、セミナーは第 2 回以降「あおもり県民カレッジ」認定講座に登録されている [1]。

2. 結果と考察

第 3 回セミナーの概要 [2]

日　　時：2008 年 7 月 11 日（金）・12 日（土）13:30～15:30
場　　所：（独）日本原子力研究開発機構・青森研究開発センター2 階会議室
テ　ー　マ：放射線利用
参　加　者：約 60 名（2 日間の延べ人数）
プログラム：講演の部：講演「放射線利用」（柳澤和章博士）
　　討論の部：参加者全員による討論・企業相談・製品紹介・パネル説明

セミナー開催の周知は、チラシを支部友 [1] や地域の方々への郵送、e-mail 添付送信、直接手渡しなどで行った。また、地元六ヶ所村が発行するタウン紙「広報ろっかしょ」や、

県内に配布されている新聞の情報・催し物欄の掲載で行った。余談になるが、新聞に報道された第1日目のセミナーの様子[3),4)]を見て翌2日目（同じプログラムの繰り返し）に参加した方がおられた。

セミナーは支部長挨拶、来賓の六ヶ所村長・古川健治氏、経済産業省資源エネルギー庁六ヶ所連絡室室長・西谷　剛氏、そして日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）青森研究開発センター所長・鈴木　侃氏のご挨拶をいただきスタートした。

今回の目的は次のようである。放射線はエネルギー分野、医療、農業、工業など様々な分野で利用されるようになって久しく、我々の日常生活に深く必要なものになっているにもかかわらず、そのことの認知度が低い。放射線がどこでどのように利用され役立っているか、メカニズムや経済効果も含めて学ぶことにある。

このため、いわゆる労働（就労）年齢層（一般的に 15～64 歳）の方々に職務の一環として参加できるように、これまで週末土曜日の午後1回限りであったが、週日と週末の午後を当てた。併せて、質疑応答や討論だけでなく、さながら見本市のように、放射線照射によって製造された製品やパネルの展示も行った。また、原子力機構の技術を地元青森県や六ヶ所村の各種産業に移転することの可能性を求めた「企業相談」も設けた。このように、内容は今までになく盛りだくさんにすることができた。この陰にはご講演いただいた柳澤和章博士を始め、原子力機構産学連携推進部や青森研究開発センターの関係各位が事前の用意を整えて下さり、そして2日間に渡り参加者兼説明者になって地元参加者の方々と交流していただくなど多大なご努力を賜ったことを申し添えなければならない。質疑応答も活発に行われ、最後は自由解散にして、時間の許す限りパネルや製品の説明、交流、質疑応答をしていただいた。セミナーの様子は地元紙に報道された[3),4)]。

これらの波及効果を述べる。セミナーに参加された方に、五所川原でもこれと同じようなセミナーを開催して欲しいと、後日請われた。五所川原地域は農業地域であるため、特に農業利用を分かりやすく学びたいということであった。この依頼を何とか実現したいと、その後、予算面や講師選定などに工夫を講じ、年2回開催としていたセミナーをさらに1回の追加開催に漕ぎ着けた。後述の第5回セミナー概要を参照されたい。

反省点は、技術移転の可能性に関することで、企業相談は残念ながら利用頂けなかったようである。後日、「六ヶ所村には製造業はまだ根付いていないので、具体的な技術移転はできない」と知人から聞かされた。時期尚早であったという見方も出来るかも知れないが、ニュートリノを検出し2003年ノーベル物理学賞受賞の小柴昌俊博士がTV等でよく話されているように、「常に準備しておかなければ幸運はない」ではないだろうか。

第4回セミナーの概要[5)]

日　　時：2008年11月15日（土）13:30～15:30
場　　所：六ヶ所村中央公民館1階会議室
テ　ー　マ：「活断層」今昔話
参　加　者：約50名
プログラム：講演の部
　　昔話「地震・雷・火事・親父～庶民の知恵あれこれ～」（三村三千代客員教授）
　　今話「活断層」（島崎邦彦教授）

セミナー開催の周知は、第3回と同様に、チラシ配布や、「広報ろっかしょ」、新聞の催し物欄への掲載で行った。今回は、六ヶ所村近隣の町村（野辺地町、横浜町、東通村）在住の県民カレッジの学生さんへの呼びかけも試みた。具体的には把握できなかったが何人か参加されていたようである。

支部長挨拶に続いて、講演の部に入った。今回のセミナーの趣旨は次のようである。活断層は、1995年1月17日の阪神淡路大地震の震源として報じられた野島断層で広く知られ、身近になった。東日本でいえば、2007年の能登半島地震、新潟県中越沖地震、2008年の岩手・宮城内陸地震の震源としてさらに周知されることとなった。しかし、地震国日本にあっては、古来、地震など自然災害は民話や古文書、古典文学に語られてきたであろうと容易に想像できる。そこで、昔はどう語られてきたか、そして、今時の「活断層」を学ぼうと企画した。講師はそれぞれふさわしい方にお願いした。以下に、両講師とも本フォーラム会員ではないため簡単な紹介を含めて、セミナーの様子を記述する。

三村三千代氏：古典文学を専門（文学修士）とし、地元の大学の客員教授である。結婚を機に青森県民になられた。以来、ＮＨＫ文化センター（青森市、八戸市、弘前市）やエルム文化センター（五所川原市）等で講師を務めてこられた。また県内各市町村における市民大学等でも古典文学の講師を務められ、若々しく分かりやすく滑らかで興味をそそる語り口はつとに有名で、好評を博しておられる。今回の講演もその通りであった。前評判として、「三村三千代先生のお話しだったら聴きたい」という声を随分聞いた。地元密着対応型ともいえる。会場はかなり満杯状態になり、用意されていた机が足りなくなった。

島崎邦彦博士：地震発生の長期予測論を研究分野とする、東大地震研地球流動破壊部門教授である。講演では、今時の話題としてだけでなく、本県下北半島地域においても地元民には気がかりとなっている活断層を、現場写真や調査風景写真、青森県の活断層写真、図解なども提示なさって実に分かりやすくお話しになった。また、地元の方から要望があった当地六ヶ所村の活断層にも分かりやすく言及された。講演の随所に織り込まれた古典文学との共振は、大変良い雰囲気をもたらした。

このように、セミナーは古典文学と現代自然科学の地震学が融合し、老若男女が参集し、地方・中央交流型が同席した恰好になった。特に「活断層」は自然災害に対する知識情報の習得の時宜を得た事例であり、叫ばれて久しい「リスクコミュニケーション」の一例として実現されたのではないかと思われた。とりわけ原子力分野では、今後の原子力推進政策を円滑に実施していくためには、遍く国民や地元民の理解をどのように円滑に得るかが必須かつ緊急の課題である。質疑応答の時間が足りなかったというお叱りがあり、主催者にとって嬉しい悲鳴であった。

第5回セミナーの概要 [6)]

日　　時：2009年2月22日（日）10:00～12:30
場　　所：五所川原地域職業訓練センター2階視聴覚室
テ　ー　マ：農業における放射線の利用
　　（五所川原はつらつ虹の会　女も学ぼうシリーズ1）
参　加　者：約40名

プログラム：講演 1「わが国の放射線利用とその経済規模」（柳澤和章博士）
講演 2「農業における放射線の利用」（小林泰彦博士）
参加者全員による討論と製品紹介・パネル説明

セミナー開催の周知は、これまでと同様に、チラシ配布、六ヶ所村のタウン紙に替わって五所川原市発行の「広報ごしょがわら」への掲載、新聞の催し物欄への掲載で行った。

今回は、第 3 回セミナー（テーマ「放射線利用」）に参加された五所川原市の方が、五所川原市でも「放射線利用」のセミナーを開いて欲しいと依頼されてきたのを受けて開催したものである。当地がリンゴや米等を主な生産物とする本県津軽地方の主要農業地帯で、そのため放射線を用いた農作物品種改良を専門家と対面して直接学びたいということで、特に農業利用に焦点を当てた。対象は、共催の五所川原はつらつ虹の会（会長　境谷葉子）の会員（約 30 名、主に女性農業者）を主とし、会員外でも当日受付の参加費無料で参加できるように広報した。事務局は予算面や講師人選等を担当し、共催者は地元五所川原市との連携や会場確保、広報活動を担当した。余談であるが、設立間もない青森支部は拠点を六ヶ所村においているが、その活動を村外にも広げるきっかけともなった。現段階ではさしずめ「出前セミナー」であるが、近い将来「出前」が外れ、青森県一円が活動対象になればと願っている。

セミナーは、支部長挨拶に続き、後援をいただいた五所川原市の副市長・三上裕行氏（公務重複で来場いただけなかった市長・平山誠敏氏の代理）による市長挨拶代読でスタートした。

講演の部では、柳澤和章博士に「わが国の放射線利用とその経済規模」をお話し頂いた。次の小林泰彦博士には農業利用に焦点をおいて、特にご自身の経験や専門のイオンビームにも言及いただいた。お二人の講演は、概論と各論の組み合わせとなっており、このような組み合わせは、初めて聴く方にも理解しやすかったようであった。

討論・展示製品・パネル説明の部では、第 3 回セミナーと同様に、会場に放射線照射で作られた様々な工業製品、農産品、パネルを展示した。製品紹介やパネル説明に、参加者は大いに興味を示し熱心に聴き、質問をしていた。今回の展示製品の中に、青森市の木材会社が原子力機構と共同開発し製品化販売に至っている、天然青森ヒバ油を活用した消臭スプレーがあり、参加者の注目を集めた。

アンケート分析結果

アンケートの内容は 3 回とも昨年度と同様である[1]ので省略する。アンケートの回収率は第 3 回約 62%、第 4 回約 74%、第 5 回約 63%であった。以下に分析結果を記述する。

参加者の居住地：図 1 に示す。第 3 回と第 4 回は六ヶ所村だけでなく周辺市町村にも及んでおり、テーマと講師に対する地域の方々の関心の程度が示された。第 5 回は地元五所川原市が多くなった。

参加者の年齢層：図 2 に示す。3 回とも若年者や年配者というよりも、50 歳代、60 歳代が主となる傾向にあった。この年代の職業や家庭における地位など一般的な社会的状況を反映しているかも知れない。

参加者の男女比：第 3 回は男性 54%、女性 41%、無回答 2%、第 4 回は各々73%、27%、

0%、第5回は各々25%、54%、21%であった。第4回は第3回、第5回に比べて男性が多く、第5回は共催が地元の女性団体であるので、女性の比率が高くなった。

セミナー情報入手：図3に示す。3回のセミナーに共通することは、何らかの方法で配布したチラシがかなり有力な情報入手手段となっていることである。つまり、face-to-faceが大事であることがまたもや示された[1]。新聞の催し物欄掲載はセミナー参加を促す最も有力な手段とは必ずしも成り得ないようであるが、先述のように、新聞に報道された第1日目のセミナーを見て翌2日目（同じプログラムの繰り返し）に参加した方がおられたということは、マスメディアの影響力の大きさを感じさせるものである。

個別設問について記述する。日時の設定や会場設定、支部友制度に関する回答は前報[1]と概ね同様の傾向であった。

テーマ設定、講演、討論は、全てに概ね良い評価をいただいた。テーマ設定に主催者は慎重を期せねばならず苦悩もあるが、特に第4回のテーマ「『活断層』今昔話」は時宜を得たものとして多いに歓迎され、安堵している。討論や質疑応答には時間が足りないというお叱りもあったほどで、今後は講演後の討論時間をより長く設定し、講師と聴き手が思う存分直接話し合いできるようにしたい。また、このような機会こそが、敢えて構えない自然体のリスクコミュニケーションというものであろうし、人々の発意・発露も自然に促すことになる。発展して、話す側と聴く側の間を仕切らず全員参加型の、リラックスして学べる「サイエンスカフェ」[7]になるとよいと願っている。

アンケートの自由記述（表1、表2、表3）には地元の方々の発意・発露が見て取れた。例えば、大規模なものよりも小規模で専門家から直に知識情報を得られる形態が好まれているようである。「講演はもっと長くて良かった」「討論をもっとやりたかった」「時間が足りない」などは嬉しい誤算であろう。スタッフの充実を図れない事務局の力不足や不手際も指摘されていて、多いに反省している。

今後の希望テーマも、昨年度よりもずっと多く、多様なものが提案された。自由記述に現れたこのような「ボトムアップ」「アイデンティティの発露」[8]は今後多いに取り入れるべきであると考える。今年度の特徴は、その発意・発露が発端となった波及効果であろう。自由記述（表2）にもあるように、青森支部のセミナーを六ヶ所村以外の別の場所でも開催して欲しいという要望が、第5回セミナーとして実現した。

青森支部の活動の中心はセミナー形式の勉強会で、目指すところは双方向コミュニケーション、話す側と聴く側の垣根を取り払った「サイエンスカフェ」である。人々の発意・発露を促し芸術や文学などとも交流を図ることによって、自然な形で科学技術情報に親しんでいこうというものである。その上に立ってようやく原子力・放射線に関する教育やPAが成立するのである。

謝辞

ご講演いただいた柳澤和章先生、三村三千代先生、島崎邦彦先生、小林泰彦先生、そしてお名前はあげませんが多くの関係各位に心より感謝申し上げます。製品やパネルの展示・紹介等にご協力いただいた原子力機構、講師派遣にご協力いただいた（財）日本原子力文化振興財団およびエネルギー環境教育情報センターに謝意を表します。手薄な事務局を担うフォーラム会員や個人支部友並びに団体支部友に謝意を表します。

引用文献
1) 笹川澄子，新設なった青森支部 2007 年活動と反省の記録，放射線教育　11：41-52，2007
2) 青森支部第 3 回セミナー配付資料
3) デーリー東北 2008 年 7 月 12 日 21 頁掲載記事
4) 東奥日報 2008 年 7 月 12 日 2 頁掲載記事
5) 青森支部第 4 回セミナー配付資料
6) 青森支部第 5 回セミナー配付資料
7) 渡辺政隆，科学技術コミュニケーションどう図るか　一方通行の時代から双方向の時代へ，科学技術ジャーナル　2005 年 4 月号 20-21
8) 笹川澄子，原子力時代に期待される教育・PA，放射線教育 3：43-50（1999）

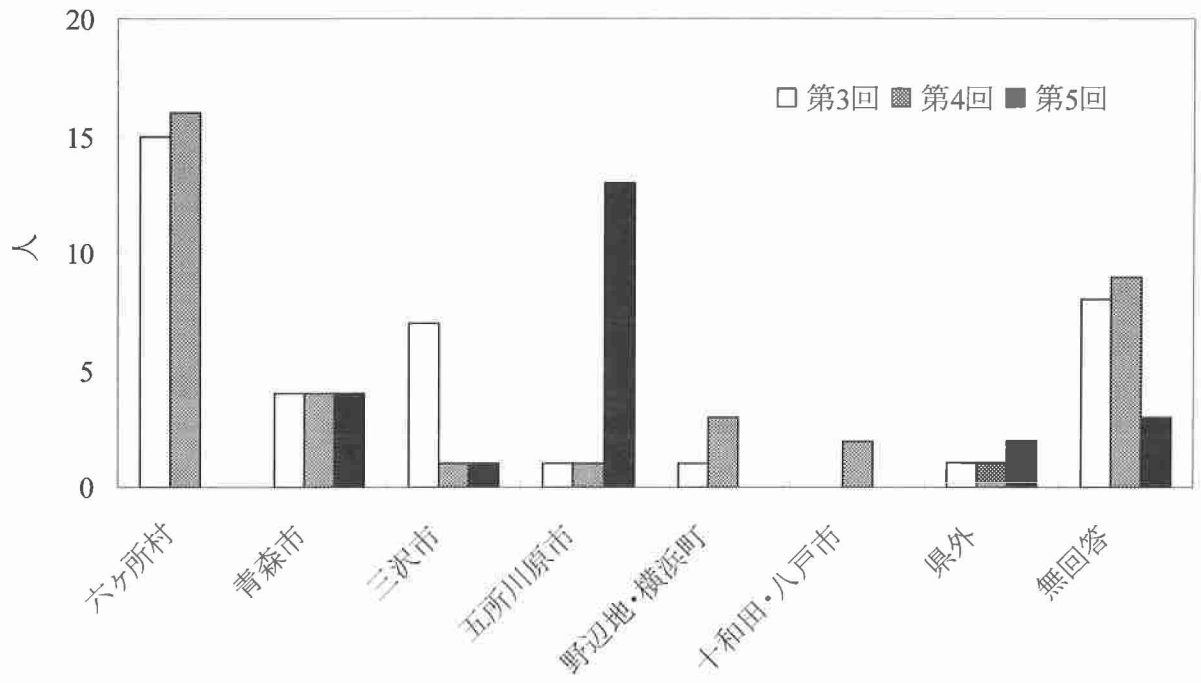


図 1.　第 3 回、第 4 回および第 5 回セミナー参加者の居住地分布

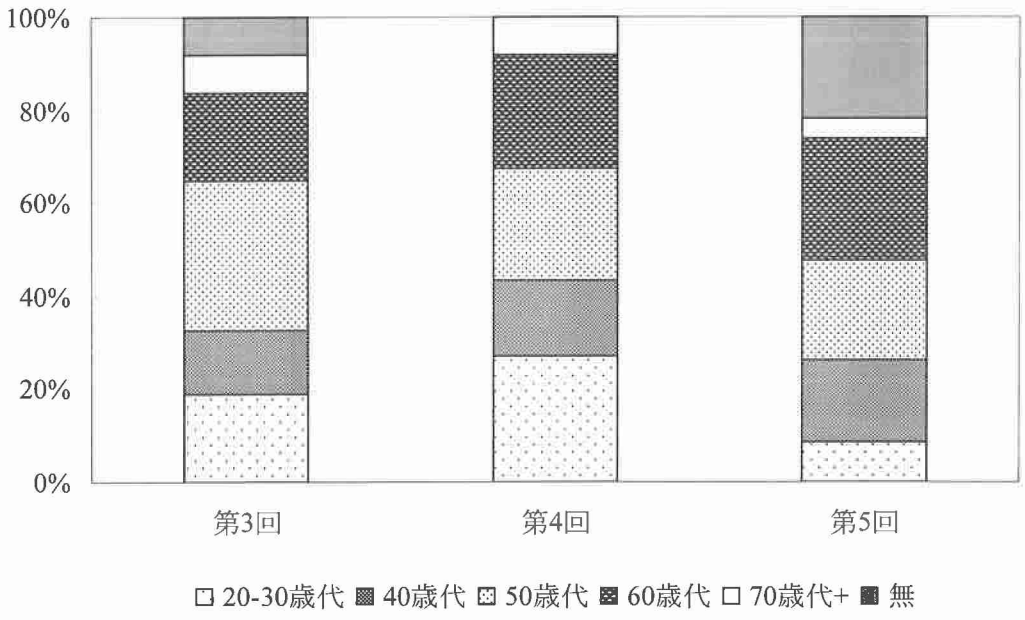


図 2.　第 3 回、第 4 回および第 5 回セミナー参加者の年代分布

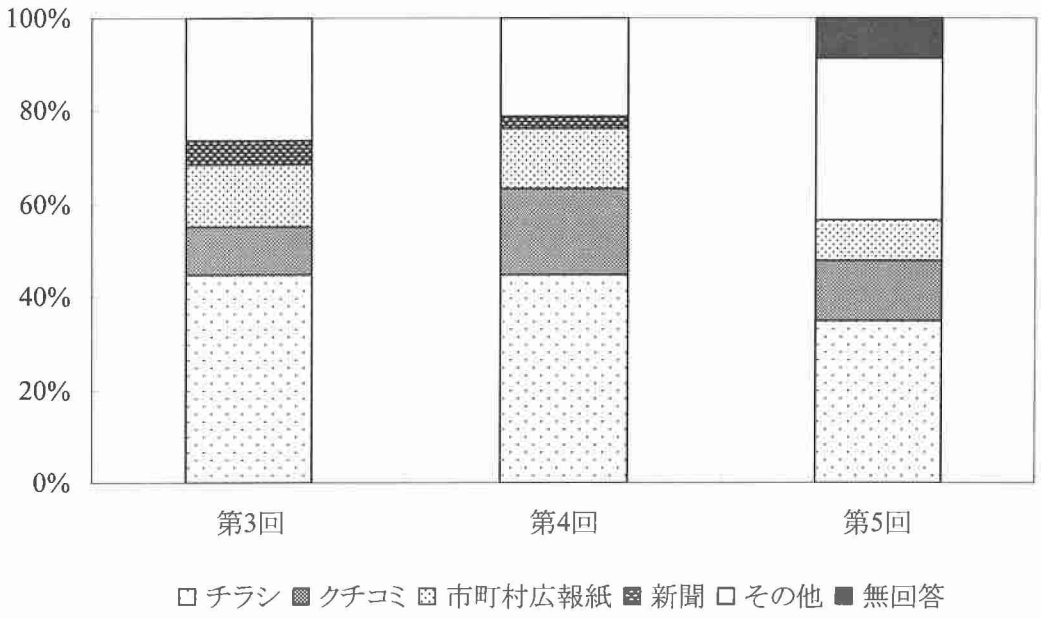


図 3.　セミナー情報入手経路

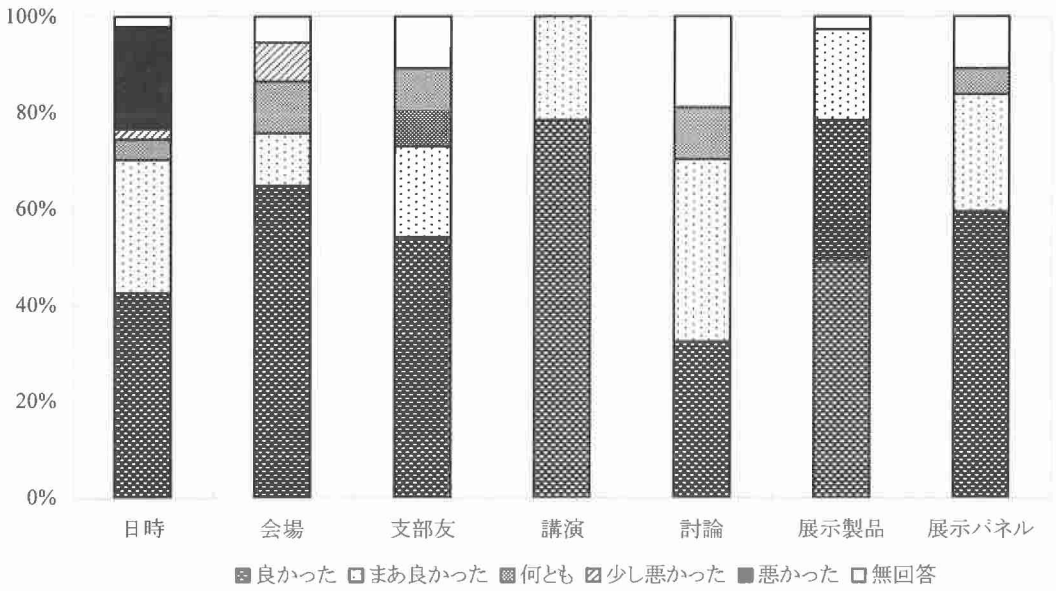


図 4.　第 3 回セミナーアンケートの回答

表 1.　第 3 セミナーアンケートの自由記述欄（カッコ内は件数）

【意見・感想】
立派な講演ありがとうございます
ありがとうございました（4）
よく理解出来た
大変よい学びになりました（2）
講演内容には驚いた
放射線照射で発芽防止や沖縄のハエなどを絶滅でき、利用のすばらしさを強く感じた
こわい放射線で潤っている私もいるのが不思議です
青森県の農業も放射線の恩恵を受けていることがよく分かった
討論が活発でよかった・面白かった（2）
パネル展示をじっくり見たかったが都合が悪くてだめだった
パネル展示と説明は解りやすくすぐ使いたいものもありました
討論時間をもっと取れたらよかった
会場スペースがもう少し広いと良い(4)
階段の昇降が大変な方がいた
クーラーが強い
生活感、地域産業に繋がるアイデア提供が大切と思う
会場を尾駮レイクタウンのセンター地区にするとよい
日時の設定は午前中がよい（2）
がんばって下さい
【今後の希望テーマ】
健康、環境と放射線、その中での六ヶ所村
放射線利用の個別課題にしぼって詳しく（2）
本日みたいなやり方で良いと思います
支部でやるやり方で良いと思います

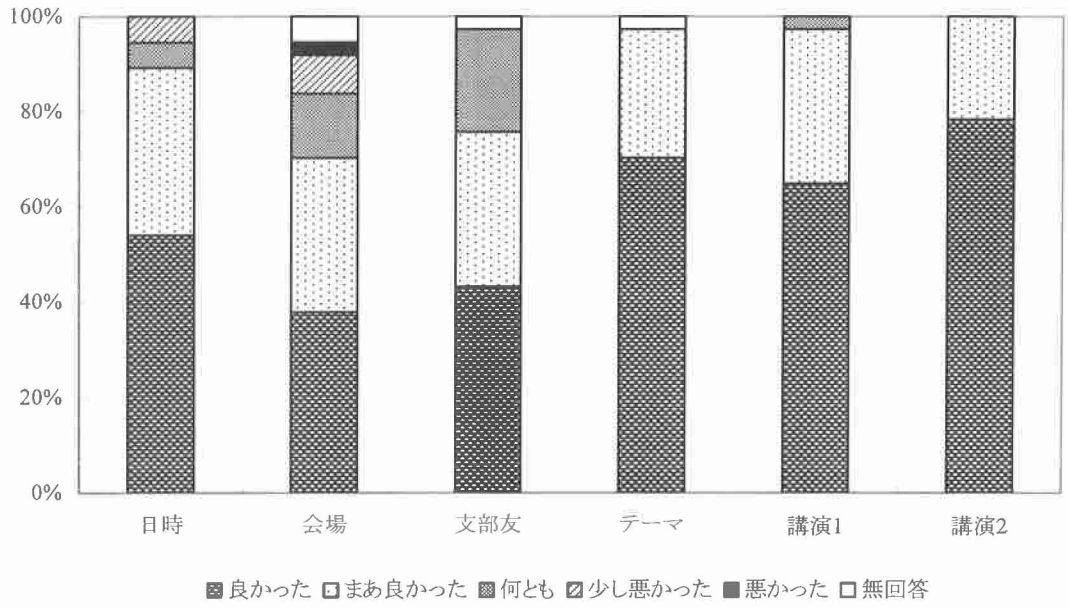


図 5.　第 4 回セミナーアンケートの回答

表 2.　第 4 回セミナーアンケートの自由記述欄（カッコ内の数字は件数）

【意見・感想】
今日はとても得した気分
ありがとうございます、とてもよかった（2）
（今日の話は）暗くないのが幸い
断層を知らなかったが、今後は少し興味を持って地域を回ってみたい
講演１は楽しい昔話で良かった
三村先生の話と資料はとてもためになった
島崎先生の活断層はとても為になり勉強になった
会場はマイクがなくて聞き取りにくいところがあった（マイクが必要）（3）
初めて参加したが、内容・時間とも適切で面白かった
今話題の活断層のリアルな話が聞けて参考になった
両先生とも貴重なお話しで為になり、「知らない」ことは怖いと知っただけでもよかった
三村先生の話がとてもユーモアがあり（次の）科学的な難しい内容を和らげ大変良かった
未知の内容だったので良かった
質問時間をもう少し長くして欲しい
講演１は「そうなんだ」という感じを受けた
講演２は研究第一線の先生が判りやすく、また最新の知見もうかがえた
三村先生と島崎先生の話が共鳴して面白かった
今日のセミナーは新鮮で、この種のセミナー・シンポジウムが望まれる
両先生の話は聞きやすく判りやすく大変為になった
【今後の希望テーマ】
経済効果（青森県の経済に関連した）講演
核融合
放射線とエネルギーの関係
放射線のリスク、リスク（自然災害、原子力災害など）への対応の仕方など
幅広いエネルギーに関する事柄、太陽エネルギー
少しでも六ヶ所村に関係あればより都合のよい勉強会になる
為になるなら何でも

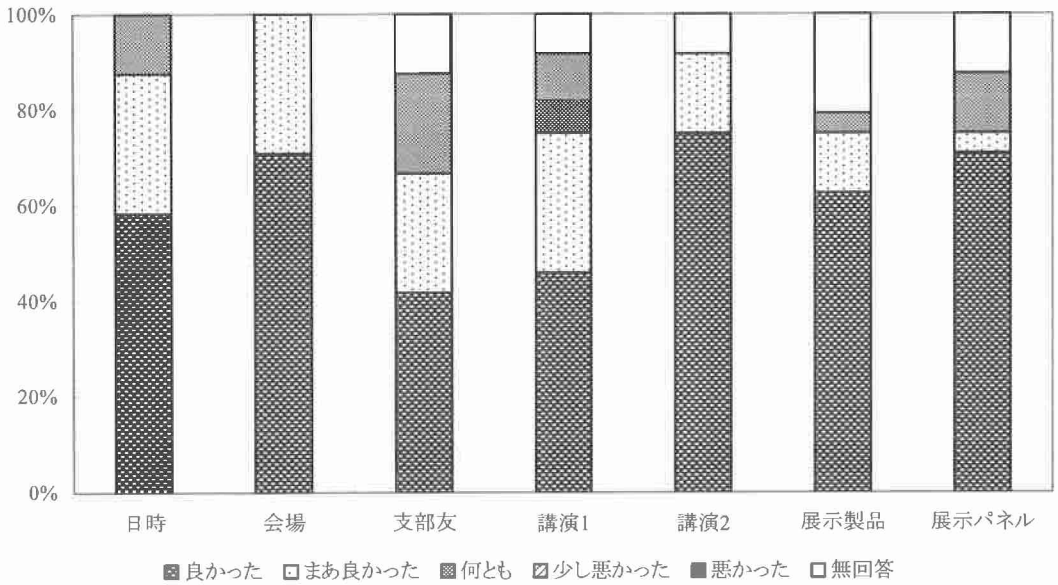


図 6.　第 5 回セミナーアンケートの回答

表 3.　第 5 回セミナーアンケートの自由記述欄

【意見・感想】
セミナー開催は午後1時頃からが良い
会場が寒かった、暖房設定に注意して
展示パネルはよくわかった
パネルの展示方法を多少工夫した方がよい
講演者が複数の場合、一人は女性がよい
津軽地方の様子が分かって良かった
まだまだ認識不足の放射線、本当に必要と思う（理解出来る）人たちを多くしたい
放射線がどのように使用されているかが良くわかった
市の広報誌でもっと宣伝するとよい
今回は一人で参加したが、次回は友達や仲間達と参加して学習したい
【今後の希望テーマ】
放射線や原子力の安全性にスポットを当てたテーマ
分かりやすい原子力・放射線の利用
放射線と健康の関係
放射性廃棄物の処分・処理方法
高齢化社会で、高齢者に対する放射線利用（病気、食品、衛生等々）に関する事

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 12, No. 1, p. 85 –92 (2008)

【実践報告】

放射線教育の実践と課題
—安全と安心のはざ間に揺れるもの—

大島　浩
佐野日本大学中学校・高等学校教諭
〒３２７－０８４３　栃木県佐野市石塚町 2,555
（2009 年 3 月 26 日受理）

[要約]　日常生活において放射線技術の利用が急速に拡大しているにも関わらず、放射線に対する市民の認識は低い。市民が放射線に対する負のイメージや感情的反発を引き起こす前に、放射線および放射線の利用を理解させる学校教育が求められる。放射線のような技術利用を含む教科内容に対して、どのように授業で取り扱ったならば効果的か、高校での授業実践を報告したい。

１．放射線をどのように扱うか

学校教育で放射線を扱う場合、以下のような課題が指摘される。

(1)放射線は五感で捉えられず、また安全に扱うには専門家の支援が必要である。
(2)放射線そのものが児童生徒の日常生活に直接結びつかず、内容が高度である。
(3)授業時数には限りがあり、扱う内容の構成をどのようにすれば効果的か事例が少ない。
(4)取り扱いによっては、感情的反発が予想される。

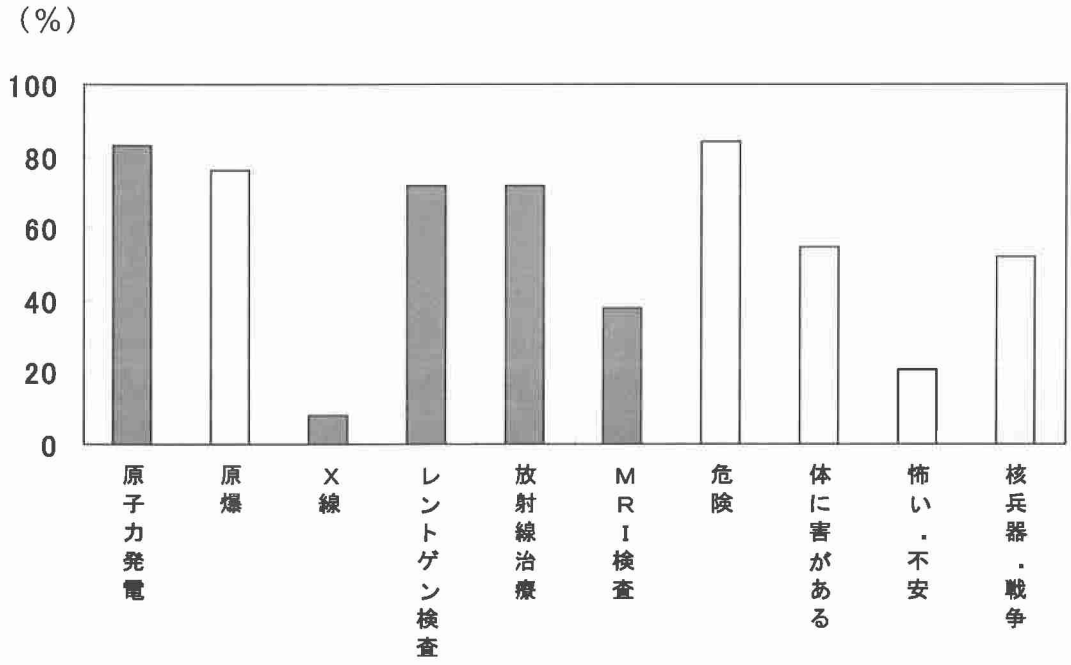
また、高校科目の理科総合 A と物理において指導項目になっていても、選択科目であることや内容の関連性の上から、取り扱いが最後尾になっていることで、指導がなされていないことが指摘されている。この中で、(1)、(2) は教科の指導法の問題であり、(3)、(4) は放射線利用が日常生活に浸透している現実への理解不足に起因すると思われる。しかしこれらの要因を克服すれば放射線への理解は深まり、放射線教育は進むのであろうか。

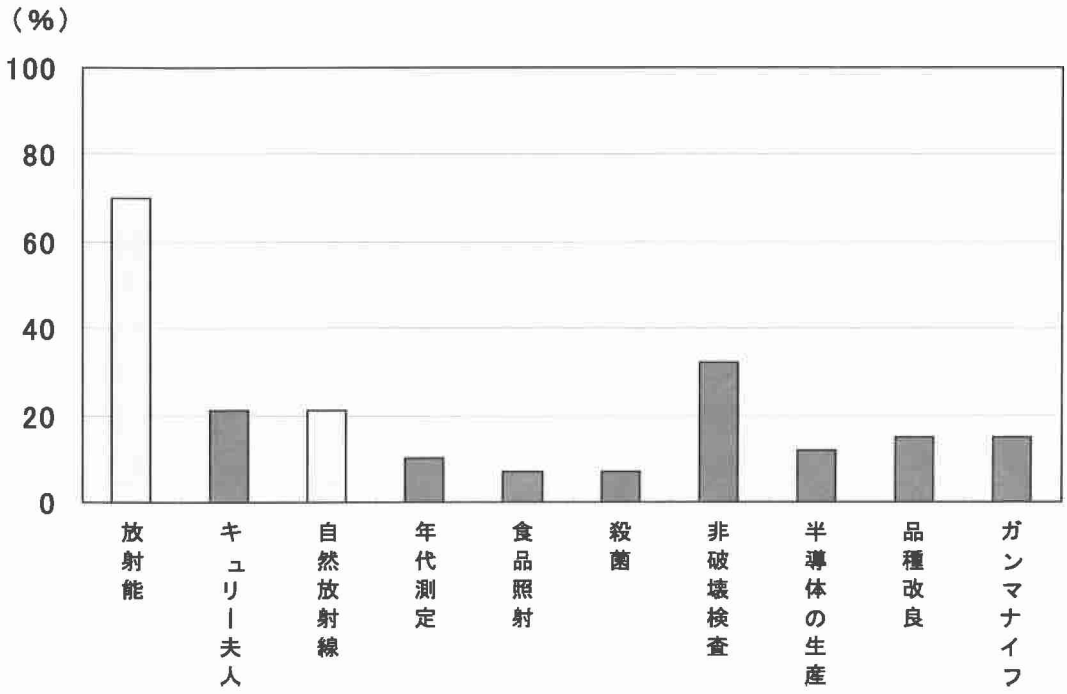
学校教育において放射線を扱う際、放射線の物理的性質の紹介だけではなく技術利用の有用性を理解させることを目標とするならば科学的合理性に基づいた判断力(科学リテラシー)とともに、社会的合意形成を目指す能力を育てることが必要である。最近、科学リテラシーを育てなければならないとよく言われるが、科学リテラシーとは「自然界および人間の活動によって起こる自然界の変化について理解し、意思決定するために、科学的知識を使用し、課題を明確にし、証拠に基づく結論を導き出す能力であり、かつ実行する能力」であり、現代に生きる人々がぜひ身に付けなければならない能力であるからである。

２．安全と安心の乖離

ところで放射線に限らず科学技術の利用に対する社会の受け止め方には、専門家と一般(非専門家)における理解のしかたの違いが指摘されている。図 1 は原子力文化振興財団が 2001 年に行った、「「放射線」と言う言葉に対する意識調査」[1] と同様の、放射線という言葉のイメージを勤務校の高校 1 年生 102 名（男 77 名、女子 25 名）に調査した結果を示す。

（1）あなたが“放射線”という言葉を聞いて、思い浮かぶものを選んでください。





（2）胸部X線撮影はX線を用いているので、なるべく避けたほうがよい。

（3）MRI検査は高度な医療器械なので、安心して検査を受けられる

（4）放射線は人体に有害なものなので、病院での放射線検査や治療はなるべく避けたほうがよい

（5）女性の放射線関連従事者には、奇形児の生れる確率が高い

（6）ジャガイモの発芽防止（保存）や殺菌、農作物の品種改良に放射線照射が利用されているが、残留放射線の影響が心配である

（7）放射線について勉強したい

（8）科学技術として放射線の利用は、私たちの生活に活用されている

図１．高校１年生を対象とした放射線に関する意識調査

高校１年生では小学校、中学校で具体的な放射線や放射線の利用については学習をしていない。それにも関わらず(1)放射線について思いえがくこと（イメージ）を問うと、肯定的イメージと否定的イメージが同じような割合で回答され、相半ばするイメージを持っていることが分かる。(2)～(8)の問においては、放射線の利用がどのように教えられてきたか（主に学校教育以外でどのように形づくられてきたか）聞いている。レントゲン検診をはじめとして生徒自身が経験していることについては、80%が有用性を認め肯定的に捉えるとともに、経験がないこと、予備知識のない放射線利用については判断を保留している。放射線学習に入る前のレディネスとして調べたものであるが、否定的に語られた語句からは情緒的・否定的なイメージがつくられ（再生産され）、具体的な活用例や経験から肯定的な受け止め（イメージ）がつくられることが伺える。

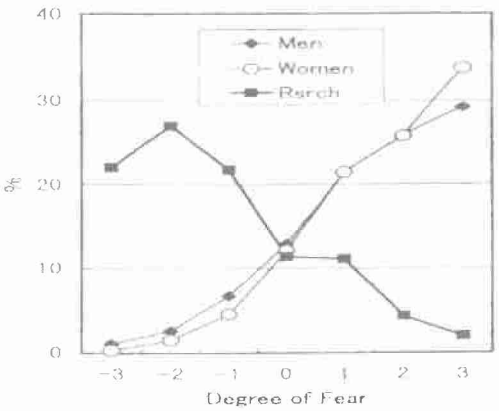


図２　原子力発電に対する恐怖心

図２は、（財）電子科学研究所および若狭湾エネルギー研究センターの辻本忠氏は 1998 年に原子力研究者と一般生活者を対象にして原子力発電に関する意識調査を行った。その調査結果を「安全と安心の乖離（一般生活者と原子力研究者の意識調査）」[2] という論文にまとめられ、保物セミナーin 若狭（1999 年 10 月）で発表された。図２はその論文中に示されているもので、一般生活者と原子力研究者の「原子力発電に対する恐怖心」を比較したものである。母集団の R srch は全国の原子力研究者 350 名、Man, Women は、福井県および近畿圏都市部居住の 2500 名を示す。横軸は恐怖心を感じる程度を評定尺度７段階に区分し、－３は恐怖を感じない、＋３は恐怖を感じる、－２～＋２はその中間の度合いを表し、縦軸は回答の割合を%で示していると読み取ると、原子力発電に対して恐怖心を感じる割合が、予備知識を持っていることにより低くなることが分かる。一般男女と原子力従事者の技術に対する「恐怖心」という感情を比較すると、知識を持っていることが安心感を導くことになる。一方でこの意識調査[2]の「原子力発電に対する知識量と恐怖感」の分析結果では、「女性は知識量の増大に伴って恐怖感は大きくなっていく。」との報告があるが、精査が必要であると思われる。

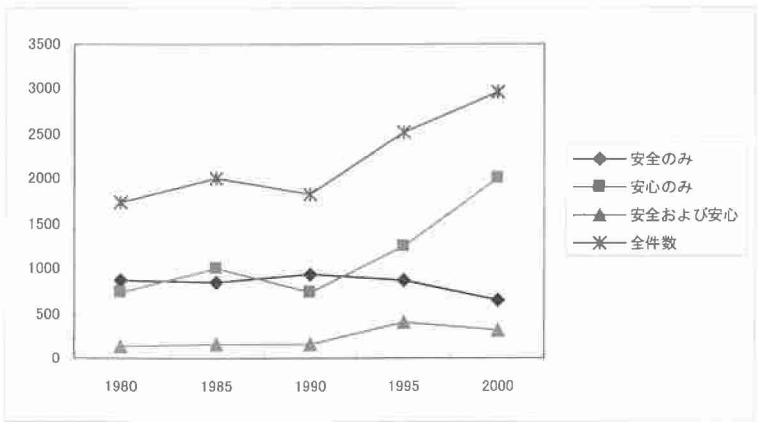


図３．新聞広告に見る安全と安心の経年変化

図３は宮城学院女子大学の大橋氏他が調査した、「新聞広告に見る「安全」と「安心」（についての語句使用）の変遷」[3] と題した調査報告である。1980 年から 2000 年までの、１年間に全国紙に掲載された新聞広告の「安全」と「安心」という言葉の使用件数を表している。90 年代以降、人々の求めるものが「安全」を所与のものとして、さらに「安心」であることが分か

る。

3．学校教育での系統的な実施

以上を踏まえると放射線の利用や原子力エネルギーの認知と推進を図るためには、放射線や放射線利用の有用性と安全を理解させるだけでなく、安心感を導く指導の工夫が必要あることが分かる。それでは安全と安心の違いとは何だろうか。「安全」とは自分の外から保証されている状態であると言われる。それに対して「安心」とは安全を知ることにより、自分の内から保証されている意識的状態である(4)といわれる。従って、安全であることを伝える側が理性的に説明できたとしても、直ちに「安心」という納得につながらない。科学的合理性（安全）に基づいて日頃から、放射線の日常生活での利用などを知ることが重要である。

その中で、表1のような発達段階ごとの「見て、聞いて、触れて、考える」放射線教育の配列を考え、その高等学校段階として、放射線利用の社会的側面を考える授業を実施した。

表1　発達段階を考慮した学校教育での放射線の取り扱い案

（小学校家庭科）　役に立つ放射線の技術

項　目	指　導　内　容
(1)くらしのなかの放射線	病気の診断・治療に役立つ放射線
	電気をつくる原子力
(2)身近にある放射線	放射線を調べてみよう
	安全に管理されている放射線

（中学校）　科学技術とわたしたち（4）

項　目	指　導　内　容	教　科
(1)くらしの中の放射線技術	さまざまな産業分野で利用される放射線	技家
	未来をひらくエネルギーと新技術（新素材）	理科
	医療で役立つ放射線	保健
	エネルギーと環境	公民
(2)調べてみよう放射線	放射線の性質を調べてみよう	理科
(3)安全に管理される放射線	放射線がもつ問題点を話し合おう	理科

（高等学校）　科学技術と社会

項　目	指　導　内　容	教　科
(1)身のまわりの物質	さまざまな産業分野で利用される放射線と新素材	理総A
(2)エネルギー資源とその問題	原子力発電のしくみと放射線の安全管理・放射性廃棄物の処理	理総A
(1)医療で利用される放射線	診断・治療で利用される放射線技術	保健
(1)くらしの中の放射線技術	さまざまな産業分野で利用される放射線	物理Ⅰ
(2)くらしの中のエネルギー	放射線の性質と原子力発電のしくみ	物理Ⅰ
(1)原子と原子核	放射線の物理的性質・安全管理・放射線の利用	物理Ⅱ
(1)原子	同位体、放射性同位体による年代測定、放射化	化学Ⅰ

	分析	

※ 科目理科総合Ａ，Ｂは選択必修。

配列の主眼は、放射線の技術開発の理解から始まることである。児童生徒が日常生活において放射線に触れるのは検査や医療、製品を通してであり、管理区域に立ち入ることは全くない。放射線が適正かつ安全に管理されていることを学習し、その後、取り扱いの誤りによっては障害を引き起こすことを学習させるようにしたい。高等学校での取り扱いにおいては、“責任選択”の考え方を身につけさせる配慮(5)、(6)を取り入れ、社会的責任という視点も考えさせた。

４．授業プランの作成と評価の視点

【興味・関心】　放射線・原子力発電などの視聴覚教材の利用

（1）　原子力・放射線のさまざまな利用を知る。・・分からなかったことの、分かる面白さ

（2）資源・エネルギーの問題に関心を持つ。

【知識】

（1）放射線と放射能について知る。

（2）身のまわりの放射線の利用、新技術と新素材（先人の知恵　道具を作る力）。

（3）エネルギーをつくる　原子力発電のしくみ・安全を守るしくみ。

（4）エネルギー資源の利用とその課題。

（5）世界の中の日本　エネルギー問題と地球環境。

【技能】　情報の処理と活用

（1）自然放射線を調べてみる（簡易霧箱を作成して、放射線の飛跡を調べよう）

（2）インターネットでエネルギー資源について調べてみよう。

（3）グラフ・図表を正しく読み取る。資料の調べ方を身に付ける。

（4）疑問なことを調べてみる。多面的、客観的な見方を身に付ける。

【表現力・客観的判断】

（1）科学的合理性に基づいて自分の考えを発表できる。

（2）プレゼンテーションソフトなどを利用して、発表に工夫ができる。

（3）反対意見にも耳を傾け、多面的、客観的な見方ができる。

以上を設けて、理科総合Ａの授業時間に「エネルギー資源の利用とその問題」という章立ての時間（配当２時間）に授業を実施した。

本時は半導体検出器を用いて線源の位置を探す、室内の自然放射線を計ることの実習を行い、放射線の性質を知るための学習指導案（2時間配当）を示す。

表２　放射線を取り扱った学習指導案(２時間配当)例

実施期日　2007年２月９日（金）午後１時30分～３時10分（第１物理室・ＣＡＩ教室）

時間	展　　開	留意点と評価
10分	（１時限目） 放射線を調べてみよう １．身近にある放射線を挙げてみよう ２．放射線を見つけてみよう	放射線の利用については知られていないので、簡単な資料を用意する。
25分 15分	「はかる君」の操作のしかた 線源の位置を調べ、結果を発表しよう 校舎内外の放射線を計ってみよう	授業では放射線利用振興協会のはかる君を利用した。
25分	（２時限目） 放射線の安全性について調べる 放射線の安全性について調べたことを発表する ３．放射線について、インターネットを使って調べてみよう 放射線の性質について調べる 放射線の利用について調べる	放射線の利用については、事前に課題として調べている。
25分	４．放射線の性質について調べたことを発表する 放射線の利用について調べたことを発表する	放射線の性質については、透過性、核種のちがいによる半減期について理科総合の教科書で学習している。
評価	放射線の性質、日常生活での利用、安全性について発表することができる。	

５．生徒の反応と授業評価

(生徒アンケートの結果)

(1) 放射線が鉛のブロックでさえぎられることが分かった。

(2)室内でも自然放射線が測定できることが分かった。

(3)放射線が医療の現場以外にも広く使われていることが分かった。

(4)放射線が安全に管理され、利用されていることが分かった。

(5)地震などで原子力発電所が災害に遭うと、放射線漏れが心配だ。

図４　実験室での放射線測定のようす

(授業の評価)

本授業は日本大学理工学部の興治文子助教とチームティーチングで、1 時限目の放射線の測定は興治が、2 時限目の放射線の性質と利用は筆者が行い、授業モデルを開発しようと試みたものであるが、単独でも実施できる授業である。

1 時限目は放射線および自然放射線が身近にあることや測定可能であることを体験させることとし、2 時限目は放射線が日常生活で有用なものとして、広範囲に利用されている事実を理解させることを目的として、事前打ち合わせを行った。放射線利用振興協会の簡易霧箱キットの工作によって、直接見ることが有効と考えたが費用を考えて検出器による計測で実施した。室内や庭園の置石からも放射線が計測されることや、医療以外にも放射線利用が進んでいることなど､自ら調べて発表できたことに対する学習の効果は大きかったようである。事後の学習アンケートにも記述されていた。ワークシートによって、学習事項（放射線の性質）の定着を見る簡単なテストを、事後に実施した。系統的な学習を推し進めることによって、市民としての理解と科学技術（放射線）のコミュニケーターとしての活躍を期待するならば、学習結果に資格を付与するようなことを検討すれば、さらに学習者の意識付けを図れる。

一方、放射線利用の安全性を理解させ、引いては安心感を導く学習指導の課題に対しては不満の残る結果である。放射線の健康に対する影響の取り扱いについては次回報告したい。

謝辞

小論を記すに当たり、(財)電子科学研究所の辻本忠先生、宮城学院女子大学大橋智樹先生には調査結果の引用をご許可いただきました。厚くお礼申し上げます。

引用文献

（1）　原子力文化振興財団　『原子力文化振興財団 2001』　放射線と言う言葉に対する意識調査
（2）　辻本　忠　『安全と安心の乖離（一般生活者と原子力研究者の意識調査)』保物セミナーin 若狭要旨集（1999)
（3）　酒井　幸美・守川伸一・大橋智樹・ハフシ　メッド（2002)『新聞広告に見る「安全」と「安心」の変遷』産業・組織心理学会第 18 回大会論文集ｐ１５０－１５３
（4）　村上　陽一郎　『安全と安心の科学』ｐ３７－３９　集英社新書(2005)
（5）　鈴木　勲編『学力向上に役立つ理科の題材』　東京法令出版（2005）
（6）　大島　浩　『放射線教育』Vol.8,No.1,25-30(2004)
（7）　放射線利用振興協会『セミナー通信』No.25(2005)ｐ10－12

「放射線教育」Radiation Education
【論説】 Vol. 12, No. 1, p. 93 - 102 (2008)

「放射線の性質と利用」学習の対象となる基礎知識に関する考察

田中　隆一
ＮＰＯ法人放射線教育フォーラム
（2009 年 3 月 15 日受理）

１．はじめに

中学校の学習指導要領の平成 20 年度改訂によって、理科第１分野では「科学技術と人間」のエネルギー資源の項目にかかわる「内容の取扱い」のなかで「放射線の性質と利用にも触れること」という記述が加わった[1)]。控えめな扱いではあるが、約 30 年ぶりに放射線についての学習指導が復活することとなった。また、新学習指導要領の解説では、「放射線は透過性をもち、その性質を医療や製造業などにも利用していることにも触れる。」と述べており、利用分野までも示された。特に、製造業で放射線を利用した製品の普及によって放射線が日常生活のなかに深く浸透している実状が国民に知られていないことを考えると、有用性も含めた放射線に関する多面的な基礎知識が学校で教えられることの意義は大きい。30 年間という一世代に相当する教育の空白があったことを考慮して、原子力や放射線にかかわる学習指導要領の記述が辿った変遷[2)]も踏まえて、改訂された指導内容を位置づけたいと考える。

基礎知識に関して考察するうえでの第一のポイントは、放射線利用を科学技術の発展という視点で扱うことである。理科第１分野の学習指導要領における「科学技術と人間」の目標は、科学的に考える態度を養う方法について、旧版では「日常生活と関連付ける」に止まっていたが、新版では、「科学技術の発展と人間生活とのかかわりについて認識を深め、・・・」と踏み込んだ表現となった。エネルギー資源の学習についてもこの認識が求められている。原子力エネルギー利用における放射線のもつデメリットを放射線利用のもつメリットが補う、というように、放射線を原子力の枠内だけで扱うのでなく、放射線を手段とする新しい科学技術の発展が人間生活や社会にどのようにかかわってきたか、という認識が大切である。この認識に立つと、放射線の発生源として放射性同位体を学ぶだけでなく、加速器という存在まで理解を及ぼすべきである。

第二のポイントは、上記の解説のなかで、「放射線の性質と利用にも触れる」とあるので、単に利用事例を学ばせるだけではなく、性質が利用に結びつくように科学的に理解することが求められていることである。このため、利用だけではなく性質についての考察も試みた。

ここでは、中学校理科の学習指導要領の変遷を踏まえた 2008 年に公示された学習指導要領に基づいた放射線の利用に関する学習に加えて、放射線の性質及び利用の学習についての考え方、発展的な探求活動のための課題例、放射線学習全体のなかでの位置づけなどについても述べる。また、放射線の利用事例、放射線源としての加速器、及び放射線利用の安全性についての学習内容を参考資料として本文の後に補足的に付け加えた。

ここに書かれたことのなかには、中学生が身につけるべき標準的な知識レベルを超える内容も含まれる。しかし、放射線の利用については、現在改訂審議中の高校理科の新科目である物理基礎でも扱われるものと思われるので、中学校、高校を含めて広く考察したいと考える。中学校理科の学習内容よりも広くかつ高度な視野から放射線の性質と利用を先生方がよ

く理解したうえで、授業計画を立てることが望ましいと考える。

２．中学校理科の学習指導要領における放射線の性質と利用の位置づけ[3)]

放射線が学習指導要領で最初に扱われたのは 1951 年（試案の改訂版）である。「科学技術の発展によって見える世界はどのように広がったか」という捉え方でＸ線の性質や利用の生活単元学習の目標のなかに設定された。電波と並んで、発展した科学の身近な応用であるＸ線写真を通して、放射線の性質である透過性や「はたらき」を学習することが指導された。放射線の応用が科学技術の発展を示す具体例として取扱われ、放射線に関わるキーワードとして、性質、透過、作用などのキーワードが学習指導要領ですでに登場していた。

しかし、生活単元学習が体系的でないため基礎学力の低下を招いたとの批判があり、生徒の能力の発達に合わせた系統的な学習を新しい目標とする改訂が 1958 年に実施された。この改訂では、わが国が原子力平和利用の推進を着手したことを背景に、放射線については、原子の構造を学ぶ過程で放射性同位体から放出されるものとして取扱われるようになった。つまり、Ｘ線の発見に始まる放射線にかかわる科学技術の発展という観点よりも原子力エネルギー開発の観点と結びついた。

この学習指導は続く 1969 年の改訂において踏襲されたが、いわゆるゆとり教育の導入となった 1977 年の改訂において、取扱いが高度になりがちな内容である「放射線」は「原子の構造」とともに削除され、放射線の学習指導に空白期が始まった。

こうして、近年のゆとり教育見直しの流れのなかで、2008 年の改訂においてエネルギー資源の項目のなかで復活するに至った。学習指導要領における放射線の取扱いの変遷を大きな流れとして図１に示す[4)]。

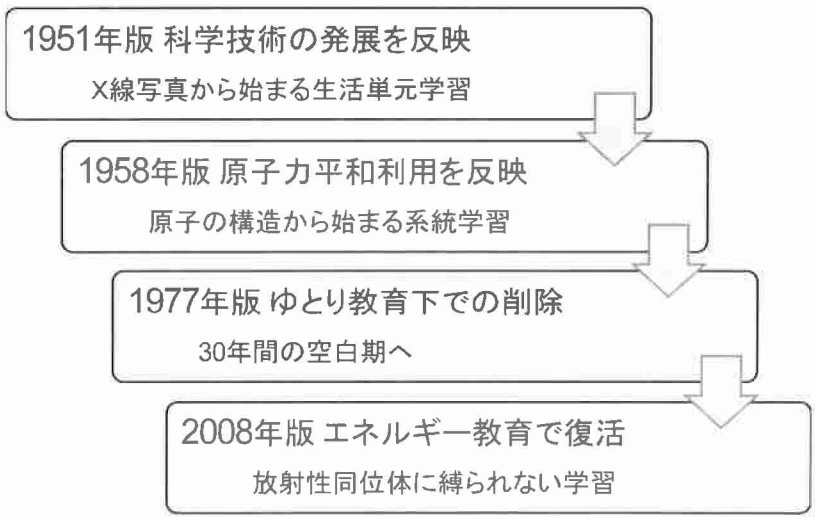


図１　中学校理科の学習指導要領における放射線の取扱いの変遷

以上述べたとおり、中学校における放射線学習は、原子力平和利用の開発にわが国が着手する前から、科学技術の発展が人間生活に大きくかかわるという観点での学習指導のなかに取り入れられていたが、原子力の登場によって放射性同位体を発生源とする放射線が扱われるようになった。

30 年の空白を経て「エネルギー資源」の項目のなかで放射線にも触れることとなったが、空白期以前の指導と違うのは放射線の発生源が示されていないことである。これによって放射線の取扱いについては空白期以前よりも自由度が高くなったと言える。エネルギー資源とのつながりを維持しながらも、科学技術が人間生活にどのようにかかわるかという観点が放射線の学習において重要となったと考えられる。

過剰な不安や恐怖がもたれがちな放射線や放射能についての認知を科学的な知識に基づかせることによって、原子力エネルギーについてバランスのとれた知識をもたせることがエネルギー資源の学習においても必要である[5]。一方、X線の発見以来発展してきた放射線利用の普及については、エネルギー資源の観点とは別に、放射線の利用と人間生活のかかわりについての認識を深めるという観点が必要である。

3．放射線の性質とその学習について

(1) 放射線の性質と利用へ橋渡しについて

放射線の性質の学習について考察する前に、その基本を簡単に述べる。放射線には様々な種類があり、それらの諸性質は放射線の種類に依存するが、それらに共通する性質は、透過と「はたらき」（物質とのかかわりにおける「はたらき」）である

透過という性質はX線検査の結果の観察や放射線の透過実験から理解できるが、「はたらき」という物理的な内容を中学校においてよく理解させるのは難しい。「はたらき」のうち最も重要なものは電離であり、これが放射線による人体への影響や放射線利用を基礎づける重要なキーワードである。電離の本質を理解するためには、原子の構造とともに、放射線がエネルギーの一形態であることの知識が必要であり、中学校理科で取扱う範囲を超えているという見方もできる[6]。

放射線の透過度が放射線の種類によって異なることは放射線の「はたらき」方の違いを表す放射線の性質であるが、その違いは電離度の放射線による違いだけでは説明できない。また、荷電粒子では粒子が大きいほど透過力が弱いといった説明は間違いであるので注意を要する。放射線の強度が線源からの距離の二乗に反比例することも放射線の性質であるが、これは放射線源が点状の放射性同位体の属性であって、放射線のもつ普遍的な性質ではない。

放射線という語感からは、放射線を四方八方に出す放射性同位体が放射線源であって、等方的に放射線を出さない加速器は放射線の発生源ではないと誤解されやすいが、電離する能力をもつすべての電磁波や粒子線を放射線と見なしているので、「放射」という言葉に囚われるべきではない。

どのような放射線の利用においても、透過と「はたらき」の両性質が利用されている。X線検査は放射線の透過性を利用しているとよく書かれているが、透過したX線を検知する「はたらき」も利用することによって検査が可能であることを同様に認識するべきである。これとは逆に、放射線治療は「はたらき」を利用しているとよく書かれているが、放射線の透過性も利用しているからこそ、外科手術なしに治療できることを認識するべきである。性質の両面を理解することによって、医療や製造業などでの放射線の利用や人体への放射線の影響についての理解が深められる。

放射線の「はたらき」は、一方において人体あるいは生体に有害な「影響」をもたらすが、他方において放射線が有益とみなされる主な理由は、放射線の透過と「はたらき」によって有益な「効果」も生む場合もあるからである。その「影響」や「効果」の大きさを表すため

の客観的な尺度として、シーベルトやグレイを単位とする放射線量が使われている。

(2) 「放射線の性質」学習への三つのアプローチ

放射線の性質の学習のポイントは「はたらき」をどこまで、あるいは、どのように理解するかである。放射線のどのような性質を利用しているのかを物理的に理解するには、「はたらき」のなかでも電離の学習が重要であるが、それは中学校の学習指導要領の範囲を超えていると見られるかもしれない。しかし、電離を知らなくとも「はたらき」の意味を包含的に理解することは可能である。したがって、「放射線の性質」の学習には複数のアプローチがある。ここでは以下の三つのアプローチを参考として示す。

(イ) 原子の構造から説き起こす系統学習 (58 年型)

原子の構造、及び放射線がエネルギーの一形態であることの基礎的な理解のうえに立って、電離という「はたらき」などのキーワードを物理的に理解させる。

(ロ) 身近な放射線利用事例を通しての学習 (51 年型)

たとえば、X線検査で得られた透視画像の濃淡が「はたらき」度の違いを表すことを理解させる。この学習では「はたらき」を包含的に (ミクロではなくマクロに) 理解させる。実験を伴わないのでアプローチが比較的に容易である。

(ハ) 透過実験をもとにした学習

電離概念を素通りして「はたらき」を理解させることでは、(2)のアプローチと同様であるが、放射性物質や計器を用いて、透過後の放射線強度の減弱を通して経験的に「はたらき」を理解させる。これは光の反射や屈折の規則性を身近な物理現象の実験を通して学ばせるアプローチと同様である。

4. 放射線の利用の学習について

放射線が利用されて人間生活に貢献していることについての国民の認知度は原子力エネルギーの利用に比べて非常に低い。これまで、放射線が役に立っている実例について知識普及の努力はなされてきたが、放射線が人間生活の役に貢献している事実を学校で学ばせる意義は大きい。個々の利用事例の詳細についてはすでに本誌で報告した[7]が、豊富な利用事例に関する知識は情報通信ネットワーク、デジタル教材、参考書[8-10]、パンフレットなどから手軽に入手可能であるので、ここでは個別的事例については詳しく述べない。

放射線利用の学習について指摘しておくべきことは、放射線が役立っている個々の事例のみを取り扱う学習に偏ると、放射線利用を一つの科学技術として捉えることがおろそかになるという問題がある。「科学技術と人間」のテーマにふさわしい放射線利用についての理解として、放射線の性質についての理解をベースに、その性質をどのように利用しているのか、どのような放射線及びその発生源が使われているか、利用することの共通的な利点と欠点はなにか、どのように安全性が確保されているか、などの放射線利用という科学技術に関わる共通的な知識も重要である。ただし、中学校では学習するべき内容に限界があることを考慮して、ここでは参考資料として補足的に述べるに止めた。それらのうち、基本となる利用形態、放射線利用の発展の大筋、及び放射線利用における共通的なメリットとデメリットについては、前報[11]のなかですでに述べた。

放射線の利用の学習においては、利用に供される放射線源にも触れておく必要がある。放射線源としては原子炉、放射性同位体、及び加速器がある。よく知られているα、β、γ線

は放射性同位体が発生源であるが、医療、産業及び学術分野における放射線利用[12]の主役は近年においてはむしろ加速器である。加速器そのものは核エネルギー（原子力）に依存する技術ではないことも認識しておく必要がある。

５．放射線の性質と利用の学習の全体的な位置づけ

放射線の利用の学習を放射線学習全体のなかでの位置づける考え方の一例を図２に示す[1]。放射線の性質については、放射線の利用事例を学習する過程においても学べるが、自然放射線・放射能及び放射線計器等の実験教材を活かすことによっても効果的に学べる。

放射線の性質についての理解をベースに、放射線が人体に及ぼす影響や放射線の防護について学び、それを原子力エネルギーに関わる安全性の学習に結びつけることによって、放射線にかかわる知識をエネルギー資源の学習のなかに活かすことができる。人体への影響については、特に、自然放射線も含めた少量の放射線を受けたときの健康影響についての正しい理解が大切である。自然放射能及びＧＭカウンタ、線量計（「はかるくん」など）等の教材は放射線の防護についての学習にも活用できる。これらの学習に共通して、放射線量についての最小限の理解も大切であり、放射線量と放射線が人体に及ぼす影響との関係についての量的な認識が、安全にかかわる学習だけではなく、個人的及び社会的に望ましくない事象を起こす可能性を表す「リスク」の学習へ発展することが期待される[13]。

図５の右側は左側にある習得知識の活用と探究につながる発展的な学習内容を表す。放射線の学習は科学的合理性の基盤となる正しい知識の習得に加えて、個人の価値観にも依存する社会的合理性に立った判断を促す方向を目指すべきである[14]。新学習指導要領が強調する思考力、判断力、表現力等の育成のためには、こうした発展的な学習も合わせもつことが望まれる。そのためには、小中高における原子力問題及び原爆・核問題についてのバランスとれた知識内容の学習が求められるが、そのなかでも放射線にかかわる客観的な認識は重要な位置づけにある。

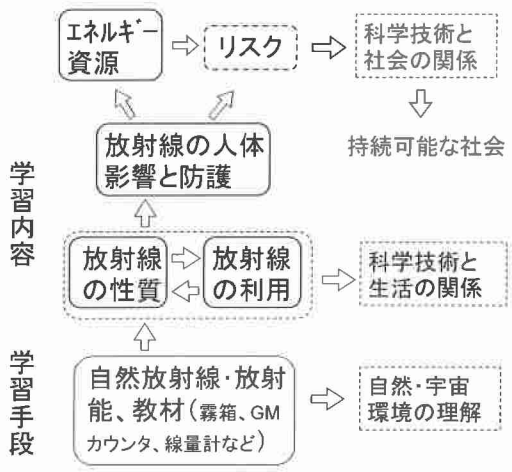


図２　「放射線の利用」学習の連関と発展

６．放射線の利用に関する探究活動について

放射線学習にかかわる探究活動については、放射線の利用の学習では観察や実験を取り入れにくいので、授業で習得した基礎知識の活用として、放射線の有用性等に関して課題を設

定し、個々の利用事例を、情報通信ネットワーク、参考資料、デジタル教材で調べるような発展的な学習が格好のテーマとなり得る。放射線のリスクに加えてその有用性を具体的に認識することによって、放射線や原子力にかかわる科学的な思考力や総合的な判断力の育成できるだけでなく、科学技術の発展が人間生活や社会にどのようにかかわるかを認識することができる。調べ学習に止まらず、探究活動の一環として放射線を使用する事業施設や研究施設の見学も推奨される。

探究活動において参考になるであろうと考えられる典型的な課題例を以下に示す。

① 放射線は日常生活にどのように役立っているか
② 身の回りにどんな放射線利用製品があるか
③ 放射線による診断は健康を守るためにどのように役立っているか
④ がん医療に放射線はどのように役立っているか
⑤ 製造業ではどんな目的に放射線を利用しているか
⑥ 食品の安全に放射線照射はどのようにかかわっているか
⑦ 放射線の利用は人間生活をどのように変えてきたか
⑧ 利用に供されている人工放射線源にはどんなものがあるか
⑨ 個々の利用事例において放射線を用いることメリットとデメリットは何か
⑩ 個々の利用事例において放射線に対する安全性はどのように確保されているか

7．あとがき

以上、中学校理科の新しい学習指導要領に基づいて、放射線の利用を中心に放射線に関わる学習指導について述べた。これらの知識内容は高校での放射線の学習指導とも重なり合う。特に取扱いが高度になりがちな放射線の知識について、中学校のレベルを超えない範囲で包含的に理解させるには若干の工夫が必要であろう。

これまで述べた放射線利用の学習における重要なポイントとしては、

①放射線の学習にはエネルギー資源と科学技術の発展という２つの視点があること、
②放射線の利用や影響を学ぶための基礎となる放射線の「はたらき」を中学生にどのように理解させるかという選択肢があること、
③医療や産業（製造業）における放射線発生源の主役は放射性同位体ではなく加速器（X線発生装置を含める）であること、

などである。

ポイント①に関連して、個別的な放射線利用についての知識だけでなく、利用の形態、発展の大筋、なぜ放射線が有用なのか、放射線利用の安全性など、放射線利用という科学技術の理解が大切である。

ポイント③では、加速器と一口で言っても多種多様であり、その学習には工夫を要するが、科学技術文明の貴重な所産でもある加速器を学校教育でいかに扱うかを今後の課題として捉えたいと考える。これについては後述の参考資料のなかでさらに詳しく述べる。

参考文献

(1) 文部科学省：文部科学省中学校学習指導要領及び解説（2008）
(2) 教育情報ナショナルセンター：過去の学習指導要領（2008）

(3) 飯利雄一、廣瀬正美、伊藤武、橋本健夫:「理科教育 理論と実践」 p.36, 東京図書(1991)
(4) 田中隆一:エネルギー環境教育研究 Vol.3 No.2 (2009) (校正中)
(5) 松浦辰男:放射線と産業 No.105, 28 (2000)
(6) 山際隆 編:「中学校新学習指導要領の展開 理科編」 明治図書 (2009)
(7) 田中:放射線教育 Vol.10 No.1, 59 (2006)
(8) 岩崎民子:「知っていますか? 放射線の利用」 丸善 (2003)
(9) 日本原子力学会 編:「原子力がひらく世紀」(改訂版) 日本原子力学会 (2004)
(10) 町末男、佐々木康人 監修:「放射線の世界」 日本原子力文化振興財団 (2008)
(11) 田中隆一:放射線教育 Vol.11 No.1, 67 (2007)
(12) 田中隆一:放射線と産業, Vol.120, 35 (2008)
(13) 田中隆一:広領域教育 No.68, 20 (2008)
(14) 大島 浩:放射線教育 Vol.8 No.1, 25-30 (2004)

参考資料1 放射線の利用事例の学習について

放射線利用に関して最も行きわたっている知識内容は、放射線が実際にどのように利用されているかを具体的に示す実例の数々であり、主要な利用事例を知ることは放射線利用に関する学習内容のコアとなる部分である。診断や治療などの医療分野、工業及び農業の産業分野、様々な学術分野など、放射線の利用分野は多岐にわたっている[8-11]。

放射線の主な利用事例を分野別および利用形態別[11]に示した一覧表を表1に示す。利用形態については、みる(観る)ことに象徴される計量・観察・診断利用とつくるあるいはなおすことに象徴される加工・治療利用に分けて示した。個々の利用事例の基本知識については、情報通信ネットワーク、デジタル教材、単行本、小冊子などの容易に入手可能な数多くの参考資料に記載されている。ここでは、科学技術と人間生活のかかわりに着目したとき、個々の主な利用分野についてどのような視点で扱ったらよいかを参考までに例示した。

最も広く認知されている放射線の利用分野は医療、特に診断利用としてのX線検査であり、生徒の身近にある体験話を「放射線の性質と利用」の基本学習に活かせる最適な利用事例である。放射線を利用するがんの診断・治療技術は低年齢の生徒にとって関心度の高いテーマではないかもしれないが、近年目覚ましく発展し、その普及が急速に進みつつあり、いまや国民のＱＯＬを向上させる先端科学技術として学ぶのに適する。

医療利用は放射線による人体への影響の学習とも関係づけて扱うことができる。とくに、放射線診断のメリットと診断に伴う被曝リスクは多くの人々にとって関心の高い内容であり、被曝リスクを正しく認識し適切に対応する考え方を学ぶことも含めて、発展的な探究学習に適した内容である。

経済規模が最も大きい製造業を中心とする産業分野での放射線利用は、空港での手荷物検査、非破壊検査などの一部の例外を除いて、その認知度が極めて低い。クルマ、パソコン、衛生用品などの製造に放射線が使われ、放射線が日常生活に深くかかわっているという事実はほとんど知られていない。これは,生産者が生活用品の製造に放射線を利用している事実の公表について消極的な傾向があること、完成品を構成する部品の製造工程がブラックボックス化し、消費者も製造手段に関心が薄い、などの社会的な背景があるからである。

製造業における利用のうちで特に注意を払う必要があるのは経済規模の大きな半導体製造である。半導体製品はいまでは日常生活に最も深く浸透しているありふれた道具であるが、その製造や品質管理には放射線利用が欠かせない役割を担っている。シリコンなどの素材に微細かつ精緻な加工を施した集積回路の製造における様々な工程で放射線が使われている。集積回路の製造技術は写真製版と比較されるが、その品質を決定づける極めて高い解像度を実現するために、10億分の1メートルのビーム寸法をもつ電子線の利用が欠かせない役割を担っている[12]。こうした先端技術がナノテクノロジーを支える基盤として21世紀の将来に向けてさらに発展しつつある。半導体製造は日常生活が先端技術によって支えられ、その技術を放射線が支えていることを学習する好事例である。

表1　放射線の主な利用事例一覧

利用形態 ＼ 利用分野		計量・観察・診断（みる）	加工・治療（つくる・なおす）
医療		X線検査 CT検査 核医学検査（PET、ガンマカメラ）	がん治療：X線・電子線治療（加速器） ガンマナイフ 陽子線・重粒子線治療 小線源治療 輸血用血液の滅菌
産業・製造業	工業	工程・品質管理計測（製鉄、製紙等） 非破壊検査・分析（技術の安全性等） 空港手荷物検査 耐放射線試験（宇宙開発事業、原子力施設）	半導体の製造（エレクトロニクス） 医療用具滅菌 高分子加工（タイヤ、耐熱電線、表面処理） 排煙処理（環境保全）
	農業		食品照射（保存、殺虫、殺菌） 品種改良（放射線育種） 害虫防除（不妊虫放飼法）
学術		考古学試料、文化財等の年代測定 トレーサー利用分析 放射光利用分析（蛋白質の構造等） 中性子利用分析	

製造業におけるもう一つの特徴的な利用は食品照射である。衛生的な食糧の安定供給が将来的に不安視されるなかで、食品の安全と損耗防止対策として放射線による殺菌、検疫のための殺虫などを推進するため、WHOやFAOなどの国際機関は、食品安全のため膨大な試験データをもとに、照射食品の普及と流通を世界的に推進しており、多くの国で食品照射が実施されるようになってきた。しかし、わが国では少なからぬ消費者が安全性等を疑問視している現状に対応して、国も今後の食品照射の許可に慎重な姿勢を取っている。

食品照射や医療被曝など科学技術と社会にかかわる問題に対しては、原子力エネルギー問

題にも見られるように、正しい科学的知識の普及に加えて、個人の価値判断にも依存する社会的な意思決定が必要である。新しい教育基本法ではこうした意思決定に参加できるような国民の資質を義務教育の段階から養うことが謳われている。放射線の利用の学習は社会的な合意形成に向けての総合的な判断力の育成にも寄与できる可能性も併せ持っている。

このように、日常生活から最先端のナノテクノロジーまで広いスコープをもつ放射線利用の学習を通して、この新しい科学技術が、ＱＯＬの向上、安全・安心、社会的合意形成等の視点で、人間生活や社会にかかわることの認識を深めることができる。

参考資料２　放射線源としての加速器について

放射線利用に供される人工放射線源には、放射性同位体、原子炉、加速器、Ｘ線発生装置などがある。放射性同位体は原子炉や加速器を用いて製造されている。加速器は電子やイオンなどの電荷を帯びた粒子を加速して高いエネルギーを与える装置である。Ｘ線発生装置は高電圧装置を用いて加速した電子を金属板に当てることによってＸ線を発生する装置であるので、原理的には加速器の範疇に含めることができる。

加速器という名称は、電子やイオンなどの荷電粒子を加速して原子核に衝突させ、人工原子核反応を起こした装置に与えられてきた歴史的な経緯がある。しかし、原理的には原子核反応にこだわる理由はない。むしろ、レントゲンがＸ線の発見へと導いた高電圧装置付きの陰極線管を加速器の原型と見なすべきであると考える。つまり、陰極線管という加速器の使用がＸ線の発見を導いたと言うべきかもしれない。

ノーベル賞に挑戦するような物質の究極を解明する素粒子研究に使用される巨大な装置を加速器のイメージとして思い浮かべる人も多い。しかし、現在では卓上の超小型のものまで含めて、加速器には多種多様で大小様々なものがある。普及度の高いものは、Ｘ線発生装置も含めて、医療及び産業用として使われている比較的小型の加速器であり、これらが放射線利用の経済規模の大部分をカバーしている。加速器を用いた放射線利用は、従来の電子やイオンなどの荷電粒子やＸ線の利用から、近年では、放射光、レーザー、中性子線等の利用開発へと発展しており、ナノテクノロジー、ライフサイエンスなど21世紀の革新的な科学技術が医療、産業及び学術の分野で開拓されることが期待されている。

放射線がエネルギーの一形態（粒子の場合、運動エネルギー）であることを考えると、加速器は電気エネルギーを放射線エネルギーに変換する装置であると見なせる。一部の産業用加速器ではエネルギー変換効率は50%以上のものもある。新学習指導要領で強調されているエネルギー変換の学習においては、運動、位置、電気、化学等の様々なエネルギーに加えて、放射線エネルギーまで含めて発展的に理解させることが望ましいと考える。加速器は20世紀の科学技術の発展をリードしてきた象徴的な道具の一つでもあるので、発展的な探究活動にもふさわしいテーマである。

参考資料３　放射線利用の安全性について

放射線は五感で感じることができない危険なものと認知されており、科学的な事実を踏まえない過剰な不安、恐怖、忌避感が依然として強い。一方、アルコール、食塩、くすりなどは怖くないのかと言えば、通常の生活のなかで摂取している量の10倍程度を短時間でとると、

人は死ぬことさえもある。しかし、放射線については、1年間に受ける自然放射線の1000倍程度を短時間で受けないと死ぬことはない。もちろん、だからと言って、放射線を怖がる必要はないということにはならない。要は、そこに放射線があるかないかではなく、どれだけあるかということを知って、正しく怖がることが大切である。他のものと違って、幸いに、放射線はどんなに微量でも測ることができる。

いずれにしても、放射線の利用は、原子力エネルギーの場合と同様に、その利便性と引き換えに安全上のリスクを負っている。放射線の利用には3つの特徴的なリスク（危険の可能性）がある。一つは放射線の利用事業に伴う職業的な放射線業務従事者と住民の放射線被曝であり、二番目は放射線で加工された製品及び放射性物質が使用されている製品等に関わるリスクである。もう一つは、医療や製造業に使用されている放射性物質の厳しい防護システムを破って悪用するテロ発生の可能性という潜在的な新しいリスクである。

第一のリスクへの対処については、自然放射線の被曝や医療における放射線被曝を除く人工放射線による被曝線量の上限値が職業人と一般の人々に分けて法令で定められている。医療被曝を除く理由は医療行為を受けた個人はそれによって直接に便益を受けることになるので、その便益と被曝のリスクはバランスし得ると判断されるからである。

医療施設、放射線を利用する産業施設等においては、医者、看護婦、放射線技術者等の職業人の被曝線量は法令による上限値より低くなるように管理されている。これらの施設については、周辺住民の安全のために、敷地境界での放射線、放射能の漏れが法令で定める一定値以下になるように管理することが定められている。実態としては、周辺の住民が受ける被曝線量に漏れの影響はほとんどなく、その周辺に居住しない一般人が受ける自然放射線による被曝線量と変わりない。

放射線施設における被曝事故及び放射線源の誤った取扱いによる被曝事故は近年いくつかの事例が諸外国で報告されている。いずれも安全管理上のミスによる業務従事者や立ち入り作業者の被曝である。わが国では開発や実用化の初期段階を除いて、それ以後の約30年間以上被曝事故は起きていない。こうした事故は絶えず放射線を発生している放射性同位体の利用において起きやすく、加速器の場合は電源を切ることによって放射線の発生を止めることができるので事故発生のリスクは小さい。

一方、第二の放射線加工製品及び放射性物質が使用されている製品のリスクとしては、食品照射及び夜光時計や煙感知器が挙げられる。食品照射においては、人為的に放射線を照射した食品を摂取することは人類が過去に経験しなかったので、その安全性については、毒性、発ガン性、生殖器官への影響、遺伝的障害の危険性、栄養成分への影響などのたくさんの項目にわたる試験が主として動物を対象に繰り返し行われ、これまで膨大なデータが国際機関等で解析されてきた。その結果、悪影響を示唆する証拠はこれまで見出されていない。

食品照射の安全性については、照射によって食品中に放射性物質が生成するのではないかという疑問がもたれている。放射線のエネルギーが非常に高い場合、食品中に含まれる微量物質の一部を放射性に変えるはたらきが起きる可能性がある。しかし、照射に用いる電子線とX線のエネルギーの上限値が規定され、その安全性が確保されている。夜光時計や煙感知器に使用される放射性物質は微量なので法令による規制の対象外とされている。

もう一つの放射性物質を悪用するテロについては、未然防止のための厳しい防護対策はとられているが、緊急時対策についての周知や教育訓練などの課題が残されている。

[放射線教育] Radiation Education
Vol. 12 No. 1, p. 103 - 108 (2008)

【論説】

基礎から考える核分裂片
―高レベル放射性廃棄物に関する閉塞状態突破のために―

荒谷　美智

六ヶ所村文化協会
〒039－3212 青森県上北郡六ヶ所村尾駮字野附 1－8 六ヶ所村文化交流プラザ
TEL 0175-72-3400　FAX 0175-72-3404
E-mail: suwany97@jomon.ne.jp
（2009 年 3 月 27 日受理）

[要旨] 高レベル放射性廃棄物をめぐる状況は技術的にはさて置き、社会的に見て明らかに閉塞状態にある。問題物質とされているものの実体は科学的に見れば核分裂片ＦＦ（Fission Fragment）であり、ベータ壊変核種である。ベータ壊変は、核分裂に比べエネルギー的には微々たるものであるが、エントロピー的には使用済み核燃料の商業的規模における再処理過程を経て充分減少している。換言すれば、本質的に未利用エネルギー資源であるものが、不用意に「核のごみ」呼ばわりされる結果、科学的に対処されることなく、社会的には、あたかも疫病神のごとく爪弾きされる結果となっている。これは恐らく政策推進者にとって意図したことと反対の（負の）思いがけない結果{セレンディピティ(serendipity）)であると思われる。科学的基礎に戻って考え直し、再出発すべきである。

はじめに

現在行なわれている原子力 PA（Public Acceptance）は、これまでの数十年間で既に限界・飽和に達しており、少なくとも、いわゆる高レベル放射性廃棄物について、技術的な問題はさて置き、社会的には明らかに一種の閉塞状態（2005－2007 荒谷）にある。この先、何らかの発想法の転換がなければ、堂々巡りが繰り返されるだけであろう。

高レベル放射性廃棄物については必ずしも我国ばかりでなく、米国においても事情は似たり寄ったりの状況にある。ヤッカマウンテンという既設のサイトがあるにもかかわらず、大統領が代わる度に振り出しに戻ることがあり、地元の上院議員はサイトに反対の訴訟を起こしている。しかしながら、我国だけは原子力が厳密に平和利用、民生利用に限定されており、ＩＡＥＡの査察も優等生的に受けているため、我国の高レベル放射性廃棄物は、核兵器保有国において、軍事的な秘密過程から出てくる得体の知れない核廃棄物と質的に異なる。即ち、我国で核分裂片といえば極めて単純明快に文字通り核分裂片ＦＦであると考えてよい。但し、使用済み核燃料の再処理過程においてウランとプルトニウムを回収した後、超ウラン元素を分離しておくことが必須条件である。その理由は、超ウラン元素は、ある種の原子炉で核燃料として使用でき、取り出し可能な状態で資源という意味で保管すべきである。事実、英国では超ウラン元素を高レベル廃棄物とは見なしていないことに我々は留意すべきである。また、これらが混入したままにして置くと、当然含まれる自発核分裂核種からの中性子によって全体が中性子源となってしまい、長期間にわたって問題を複雑にする結果となる。

超ウラン元素を分離・除去した核分裂片ＦＦ、純粋なベータ壊変核種について、日本がモンスーン地帯に位置する火山列島・地震列島であるという条件を充分考慮して、相応しい遮蔽施設に保管・配置・監視しつつ電子源・熱源として使用する方法を考えるべきである。即ち、保管場所が同時に

ミニ発電所、またはミニ熱源となるように計らうべきである。これらの施策の実施については、既存の特定機関がトップダウンに降ろして民意を問う、というこれまでの方式ではなく、かつてフランスが空中窒素固定法で行なったように懸賞という方法で民間からの提案を募集し、応募案の公開討論によって最終案を採用することが望ましい。このための必要な知識については正統的で権威ある講習会を開催し、その基礎課程を修了した者が懸賞に応募できるものとする。これによって、例えば、必要以上に立派すぎる、その実、読まれることのない無数の印刷物、等に国民の富が浪費されるような事態はなくなり、採用に値する提案が必ずや出現するであろう。また、仮に早急に出現することがなくても、これまで社会的なジョーカー札のように常に敬遠され続けるという袋小路からは脱出出来るであろう。また、何よりも上からの押し付け感なくなって、費用が国民の科学的素養に還元されることは明白である。

Ⅰ．４種の放射線

今、放射線としてアルファ線（ヘリウム）、ベータ線（電子）、ガンマ線（電磁波）、中性子線（中性子）の４種を考えることとする。これらが放出される源である放射性物質としてアルファ壊変核種（放射体）、ベータ壊変核種（放射体）、自発核分裂核種（2000－2004 荒谷）を考えておけば充分である。ガンマ線については純粋にガンマ線しか放出しないケースもあるが、通常、アルファ・ベータのいずれにも伴って放出されるものと考えることとする。アルファ放射体と自発核分裂核種は超ウラン元素の分画に含まれるので、使用済み核燃料の再処理過程では残りはすべてベータ放射体である。これにガンマ線が伴うものとしてそのエネルギーの最高のものでも 1.5 メートルのコンクリート、また、それ相当の水で充分遮蔽される。遮蔽は電子源として使うか、熱源として使うかによって当然変ってくる。それらについては各項において後述する。

いずれにしても基本的にこのようなベータ・ガンマ放射体を、原理的に地下水が満ち満ちている筈の地下何百メートルに永久的に埋設・廃棄してしまうというのは、日本列島の成り立ちから見てあまりに短絡的思考ではないだろうか。

何故かといえば今、日本中の原子力発電所において使用済み核燃料はプールに貯蔵されている。これは別の言い方をすれば、地下何百メートルではなく、地表において水で遮蔽している、ということである。日本の原子力発電は 1963 年 10 月 26 日に始まったとして 45 年、つまり半世紀近くこの地表において水で遮蔽してきたのが我々の原子力発電の歴史である、ということである。そして、重要な点はこのことが誰にも問題視されていないということである。一刻も早くどこかに搬出してくれという声も聞かれないし、速やかに再処理に廻してくれという要望もない。この事実は、これはこれで安全と見做されているということであり、現実的、且つそれなりに健全な措置であるとしか考えられない。

また、今、むつ市関根浜に計画されている使用済み核燃料中間貯蔵施設についていえば、再処理を施す順番が廻ってきた時に任意に取り出せるよう地表の建屋（乾燥状態）で中性子遮蔽容器に入れて保管・監視する施設である。そして重要なことは、これが、国や業者が上から押し付けたものではなく、見識あるいは素養から、または助言者かブレインか、そういう詳細は不明だが、前むつ市長（故人）がむつ市の財政上の見地という苦衷の中から呻吟・発案し、積極的に誘致したものである。勿論、後に市議会も賛成に廻っている。この場合も、アルファ、ベータ、ガンマ線に加えて中性子まで出ているものでも、中性子遮蔽容器なら地表の建屋でも安全と考えてのことだからである。否、地表で保管・監視するからこそこれ以上の安全・安心はないということであろう。

ベータ、ガンマのみ放出と判っている核分裂片ＦＦと、現にアルファ、ベータ、ガンマに加えて中性子も出ている使用済み核燃料と、一体どちらが安全であろうか。まして前者が３０年～５０年後に半減期で減衰することを考慮すれば、後者が地表の施設で保管して安全と見做されるなら、前者を地表の施設で保管するのも同様、またはそれ以上に安全であろう。それが実際にはこじれにこ

じれている。四国の東洋町長の例もその一例である。地上の乾燥した施設で適切な遮蔽のもとに保管することは３０年でも５０年でも、プールで５０年保管することから見れば、はるかに安全であろう。むつ市における使用済み核燃料の中間貯蔵施設は、このような判断から積極的に誘致された施設である。

現実にこういう事態が進行してきたのが、正に我国の原子力発電半世紀の歴史である。この事実の科学的根拠は、特定の放射線に対して適切な遮蔽を施し、地上の施設で監視しながら保管するのが理に適っているということに他ならない。

Ⅱ．電子源としての利用

ベータ壊変核種は高エネルギー電子を放出して原子番号が１だけ大きい元素に変わる。この電子は高エネルギーとはいえ、ガンマ線や中性子に比べれば容易に遮蔽されてしまうため電子源として使用する場合には形状を塊状にしてはならない。

電子源としてのベータ壊変核種は、現在、工業的に最も多用されているのは厚さ計としてあるが、この用途についてはすでに周知のことであると思われ、ここでは、むしろ電源としてのベータ壊変核種、また将来に向けての可能な利用法の方向性について述べたい。

送電線が設置されていないような野外で用いる小型ポータブル機器（小型ガスクロマトグラフ、小型質量分析計）などで、薄い板状に成型したいわゆる密封線源の形で電源（電子源）としてしばしば利用されている。核種としてしばしば使われているのは、ニッケル６３、トリチウムである。密封というのは下地の金属板の上にベータ壊変核種を固体ならば電着、気体ならばスパッタリングなどの方法で薄く析出または埋め込み、さらにその上に、保護とエネルギー調整のため金属薄膜で被覆した状態のものである。エネルギー、強度、半減期など、様々な用途のものが市販されている。これらは、しかしながら、どちらかといえば研究室レベルの用途に留まっている。固体での一例であるが、ベータ壊変核種を細線の先端に析出させて銅製の球の中心に配置したものは、球状電源として充分に機能した（1963 荒谷）。細線のまま使用すると、正イオンによるスパタリンでベータ壊変核種が消失して危険である。

今後、商業的規模において産出されてくるベータ壊変核種について用途の開発は、これからの課題であり、目的意識を持って取り組むべきであろう。放出されるのが電子であり、6×10^{23} ベータ崩変/秒 で１Ａとなる。これが、より生産的な方向で、何のための電源として使用可能か考えることが課題である。これまでの小規模利用では固体の形態に限られていたが、これからの商業的規模におけるベータ壊変核種は、分離過程でウラン、プルトニウム、さらに他の超ウラン元素から溶媒抽出が行われ、残留成分としてのベータ壊変核種も当然、液体状態として大量に産出される。このため液体状態から電子を取り出すことが生産的であると考えられる。現在はこれをガラス粉と混ぜて溶融し、ガラス固化体として保存することが考えられているが、これは一つには、使用済み核燃料を外国に依頼した場合の運搬（フランスまたは英国から海路日本まで）上の安全性と関連していると考えられるので、この問題はさておき、この方式では、熱源としては兎に角、電子源としては“殺して”いることになるのみならず、保存だけのために莫大なエネルギーが使われることになるが、如何なものであろうか。

一例として、水の電気分解の電源にエネルギー源として使用し水素ガスを得る（当然、酸素ガスも得られる）場合について考えてみる。先ず金属板で長い円筒を作製し、中心線の位置にベータ壊変核種溶液の微細な液滴の落下、または細流の形成により全方向（４π）に放出される電子は、金属の円筒内面に必ず到達するから莫大な電流が得られる。溶液の濃度・粘度などを調整し、落下（重力の利用）による速度の制御で任意の電流が得られる。また、逆抽出により水溶液としてから電気化学的置換（イオン化傾向の差の利用）により表面上に大面積で析出・展開するのも生産的であろう。小規模には、これらは、既に、密封線源として小型ポータブル機器の電源として利用されてい

ることは上述したが、発想法を転換し、より大型のものが容易く得られる筈である。要するに目的に応じ個々に工夫することで有用な電子源を創出できるということである。このような試みは未だ本格的に行われていない。それは核分裂のエネルギーに比べ、ベータ壊変のエネルギーが微々たるものと見なされたからである。しかしながら、それは一刻も早く核兵器を創りたかった人間集団の観点であって、彼らにとっては、まことにその通りであったろうが、民生利用では、使えるものは有効に使い尽くすというのが理に適ったことである。ある時代の米国人は、鯨から鯨油を取ることしか考えていなかったが、日本人は鯨のすべてを利用し尽したことを想起しよう。限られたエネルギー資源としてのウランの使い方、考え方につい同様でありたい。

Ⅲ．熱源としての利用方針

一般に熱源として使用する場合には、設計は、はるかに容易である。熱源の場合は、何を加熱する施設にするかによって自由度がある。既に熱帯植物園、温室など実用化されているものも少なくないと考えられる。実際、高レベル放射性廃棄物としてフランス、あるいは英国から使用済み核燃料の再処理回収物に付随して返還されたガラス固化体は容器表面で４００℃程度であることから、貯蔵施設において少なくとも空気加熱材および乾燥剤、周辺材料加熱材および乾燥剤として機能していることは明白である。六ヶ所村の地域住民は、むつ小川原港にそれらが搬入されて貯蔵施設に運ばれていく途中たまたま雨が降っていて容器から盛んに湯気が出ているのをしばしば目撃している。立派な熱源なのである。しかしながら、それらは廃棄物としてただ保管されているのみであり、一次熱源として考えられてはいない。

だが、これらをまず一次熱源、周辺空気を二次熱源と考え、それを熱媒体として循環させることで民生用の温水製造は充分可能であると考えられる。但し、この場合も再処理に際して超ウラン元素を分離してあることが必要条件である。もし超ウラン元素が存在しているなら、その中の自発核分裂核種が中性子源として機能し、空気中にある中性子放射化断面積の大きい元素、例えばアルゴン４０などがアルゴン４１になり、それがベータ壊変してカリウム４１になるということもあり得ると考えられる。この問題がなければ有用な熱源といえる。とはいえ生成するカリウム４１は自然放射能であるから生物影響の点では何ら問題にならないと思われる。

また、周辺材料加熱材および乾燥材として機能していることも明白であり、この問題は、石油採掘場でのガス爆発を避けるため火を燃やすことに相当すると考えられる。しかし、これは無益な二酸化炭素発生であり、山火事も同様である。核燃料の場合、カスケード的に微弱熱源まで使用し尽くさないと、二酸化炭素は発生しないものの人為的な地殻温暖化をもたらすことになる。貴重な機会であるので、高レベル放射性廃棄物貯蔵施設周辺および使用済み核燃料中間貯蔵施設周辺の微気象について、細な測定に基づく基礎研究がなされるべきであろう。熱源として利用するに際してもエネルギーの使用を最小化することが必要条件であることに変りはないが、あらゆる放射線はもとより、すべての種類のエネルギーが最終的には熱になってしまうことを考慮し、遮蔽材に加え断熱材の研究開発もとりわけ重要であろう。

Ⅳ．考察

ここで問題として取り上げているのは、いわゆる地層処分の技術的側面ではない。そうではなくて、地下何百メートルに永久的に埋設・廃棄する場所とするから応募しなさい、というかねがねなされている上からの提案に対し、実際問題として真面目に、ということは科学的事実を踏まえて、という意味であるが、そのように討議されたケースはこれまで皆無である、という社会的側面を問題にしているのである。これまで、常に、残念ながら賛成派と反対派の修羅場を現出するのみの結果となっており、上からの説明が文字通りに受け取られたためしがない。こういう事態に関係者が一刻も早く気付いてほしい、と願うものである。一般民衆の気分や思いは《なんでそんな深い所に埋め

なければならないの？　安全だという言葉に反して本当は危険だからだ！　そんなに危険ならどうなる知れたものではない！　いやだ！》と、いうようなところであろうと思われる。また、好んでそのような言説によって民衆の不安をかき立てる人々もある。大深度地下という言葉そのものが、結果として上記の反応を必然的に引き出してしまう言外の意味を含んでいるのだ、たとえ発意者＝為政者が意図しなくても、である。それ故、この問題は科学的・技術的レベルの問題であるにもかかわらず、実際には、社会心理学的、呪術的レベルの問題になってしまっている。呪術的というのは、いわゆる言霊のさきはう国柄、古代的な発想が現実に活きて罷り通っているというからである。そこで、なされるべき対策は人間というものの存在を深く考慮した上で、尚且つそれに見合った提案がなされるべきであり、その一例が先に述べた懸賞である。

必ずしも適切な例とは言えないかも知れないが、我々日本人は、ハンセン病患者に対し過去において同種の過ちを犯している。生物学的、細菌学的な問題であったにもかかわらず、決して科学的に対処することなく、彼らを疫病神のごとく社会的に排除した。物体であるならば排除・隔離で済むが、人格的存在に対してであったから社会的抹殺という取り返しのつかない道義的問題にまで至ったのであった。

現実には、原子力発電始まって以来数十年来の地表におけるプール貯蔵（全国各原子力発電所構内）、英仏で再処理され返還された高レベル放射性廃棄物の３０年～５０年にわたる地表の貯蔵施設での一時保管（六ヶ所村）、地表の建屋による３０年～５０年の中間貯蔵（むつ市でこれから始まる）、これが、平和利用原子力発電半世紀にわたる使用済み核燃料および廃棄物の、現実の在りようである。民衆は、大深度地下永久埋設廃棄を望んでいない。上記のように３０年～５０年、そして地表なら了承してきたのだ（2005～2007 荒谷）。３０年～５０年というのは一世代としては充分長い。しかし、親子二世代としてなら短い。
それが、半永久、末代までとなると想像力が及ばないのが当然であろう。フランスでは、取り出し可能な隔離方法が模索されるようになっているが、この発端は民衆からの発案であると言われている。考えてみれば、当然過ぎる位、当然のことである。

廃棄物 waste という言葉は、核兵器保有国に由来する言葉である。100%に近いウラン２３５やプルトニウム２３９が緊急に欲しかった国では、それ以外のものは当然、不要物であった。それ故 waste である。しかしながら、無資源国日本の平和利用ではウランも外来資源でなく、ただプルトニウム２３９はじめ再処理で得られるものだけが純国産エネルギーなのである。超ウラン元素も、ベータ壊変各核種も、分ければ資源であり、木炭の時代にも炭団があったように如何に粉々で微々たるものであっても工夫してカスケードに
利用しつくすべきものである。炭団や消し炭、火消し壺を工夫したのが我々日本人の慎ましい在りようだったからには、ベータ壊変核種を丁寧に利用することは当然ではあっても不思議はない。また、このことは何も放射性物質に限ったことではない。一般廃棄物についても「混ぜ混ぜはゴミ、分ければ資源」であることは同じである。

原子炉中で生成する超ウラン元素も核分裂片ＦＰも共に立派な未利用エネルギー資源に他ならない。新大統領によって予算を大幅にカットされ、振り出しに戻ったようで、地元の訴訟者（上院議員）と住民は大よろこびのヤッカマウンテンサイトであるが、このサイトの特徴、というか利点は、これまで保管してあるもの、軍事・平和利用の廃棄物双方とり混ぜ、すべて取り出し可能な構造になっていることである。その理由は米国では、無資源国日本と違って、はじめ、いわゆるワン・スルー方式で再処理なしという政策から出発したことによる。とはいえ、未利用ウランと生成プルトニウムが含まれているので、将来の政策変更も考慮すれば、とりあえず出し入れ可能にして措かざるを得ないということであろう。フランスの事情とは異なるが、想像力に限りある人間の営為として銘記すべきであろう。

まとめ

平和利用に徹した日本、慎ましい無資源国日本にあっては未利用ウランと生成プルトニウムを再処理で取り出し、他の超ウラン元素も分離、純核分裂片ＦＦについて基礎から勉強した上で、考え直し、ゆっくり３０年～５０年かけて国民の誰もが納得できる方策を模索しつつ、より良い懸賞案の出現を待つことが相応しい在り方と考えられる。

謝辞

本報告は筆者の単名となっていますが、これは主として文責を明確にするため以上のものでなく、地域の様々な関連団体や個人の方々との間でなされた日常の座談、討論や活動、また、学会発表における質疑応答やその後の自由討論、メール、などが基になっています。ここでは団体名やお一人お一人のお名前を列挙することは取りやめますが、とくに中性子臨界事故後において、この問題に関する多くの方々の関心と関与に深く謝意を表します。

参考文献

1963 荒谷美智「東京大学原子核研究所同位体室　二次電子関連未発表データ」

2000 荒谷美智「宇宙線中性子地表連続測定から環境中性子全方向連続測定へ―歴史と展望」Proceedings of the First Workshop on Environmental Radioactivity 65-72, KEK, Tsukuba

2000 荒谷美智「JCO 事故後の下北半島市民による自主的な科学活動の計画」Proceedings of the Second Workshop of Environmental Radioactivity, 249-256, KEK, Tsukuba

2000 荒谷美智「中性子と私たち＝日本人 ―歴史と展望―」放射線教育、Vol.4, 68-78

2001 Aratani, M. Osani, Y. et al: A New Periodic Table for Radiochemistry, Proceedings of Asia Pacific Symposium on Radiochemistry, Fukuoka

2001 荒谷美智「消滅核種（ネプツニウム系列）の核を燃料に使う意義」放射線教育フォーラムニュースレターNo.21,11

2001 荒谷美智「中性子を含む周期表について」放射線教育 Vol.5, 37

2002 荒谷美智「アクチニドをめぐる下北半島市民の自主的な動き」Proceedings of the Third Workshop of Environmental Radioactivity, 19-26, KEK, Tsukuba

2004 荒谷美智「いつ･どこで･誰が･何を･何のために･どう測るか―環境放射能の原点を考える」Proceedings of the Fifth Workshop on Environmental Radioactivity, 351-353, KEK, Tsukuba

2004 荒谷美智, 長内侑子他「放射線教育に対する周期律使用の有効性」第３回放射線教育国際シンポジウム、長崎、"Periodic Table as a Powerful Tool for Radiation Education", Proceeding of the Third International Symposium on Radiation Education, 407-414, Nagasaki

2005 荒谷美智「歴史と教育『エネルギー基地「新天領」論』」放射化学ニュース第 11 号 37-42

2007 荒谷美智「高レベル放射性廃棄物の最終処分場決定をめぐる最近の状況」Proceedings of the Eighth Workshop on Environmental Radioactivity, 197-198, KEK, Tsukuba

2007 荒谷美智「行政への提言：人間と地域の復興に関する基礎科学の貢献－核概念確立の歴史と地震災害－、地球科学 61 巻５号 401～40

2007 荒谷美智「高レベル放射性廃棄物の保管・監視に国家直轄地を設定すべし」放射線教育 Vol.11, No.1, 61-66

2008 荒谷美智「高レベル放射性廃棄物の扱いに関する混迷と提案」第９回「環境放射能」研究会要旨論文集、放射線科学センター、つくば

2009 荒谷美智「再処理工場立地地域における『環境放射能』理解活動１０年の総括」第１０回「環境放射能」研究会要旨論文集、放射線科学センター、つくば

「放射線教育」Radiation Education
Vol. 12, No. 1, p. 109 - 112 (2008)

【ノート】

放射線検出器により時間ｔの測定で計数ゼロを得たときの入手情報

加藤 和明
洗練課題研究所（Research Institute of Sophisticated Subjects）
〒305-0817 つくば市研究学園 D4－3－211
kk-riss@niftycom

（2009 年 3 月 27 日受理）

要旨：アプリオリ（先験的）に放射線が存在しないという知見を得ていない限り、ある時間放射線を計測して応答がなかったからといって“放射線が存在しない”ということにはならない。放射線が微弱である場合、時間を十分長くとれば何がしかの計数が得られる筈だからである。若しも、得られた計数を測定に費やした時間で除して計数率を評価してよい、とするなら、測定対象の計数率がある基準の計数率以下（もしくは未満）であることを確かめる仕事においては、計数時間をできるだけ短くとればよいということになる。一般的にいって、測定によって得られた結果からある量の評価を行う場合、その評価の“品質”は精度と確度である。本論文では、時間ｔの測定において得られた計数の値が N=0 であった場合に汲み出すことのできた情報の内容と品質を考察する。

１． 緒言

放射線検出器は、入射する放射線粒子をその有感部における“物質との相互作用”の結果生成される“信号”に変換することにより、検出することを目的としている。

放射線検出器を作動させて直接的に得る測定量は、ある時間(ｔ)の作動に対して得られる計数(N)から算出される、単位時間当たりに得られる計数の割合、計数率である。

非常に特殊で稀な場合を除き、検出器に到来する放射線粒子は互いに独立であり、また多くの場合検出器に到来した放射線粒子が信号に変換される確率は１より遥かに小さいので、信号の生成は直前（及びそれ以前）の信号生成の影響を一切受けない。議論の本筋には関係ないことであるが、検出器が入射放射線に感応して信号を生成するのに何がしかの時間を要するので、その間（不感時間）検出器が“放射線検知能力”を喪失するということを無視できない場合があり、その場合には作動時間の見積もりに注意が必要となる。

さて、このような事情から、得られる計数／計数時間の比は、一般的に試行の都度異なる。理屈の上では無限回の試行を行って得られる平均値を以て計数率の期待値とすればよ

いのであるが、それを実際に行うことはできず、実務の世界では複数回の試行すら困難となる場合がある。

そこで、極端な場合として1回の試行を含む、有限回の試行で得られたデータの集まりから、評価目標値である「計数率の期待値」をどのように評価し、その品質を推し量ったらよいかが問題となる。ここで“品質”と呼んだのは数値で表した量の値の“精度”と“確度”である。検出器の性能に関する信頼度の保持は、勿論、確認済みであるものとする。

以下では、放射線検出器を使って、微弱な放射線を検出しようとする時に、得られる応答から求めたい情報である計数率の値とその品質をどのように評価すべきかについて、述べたいのであるが、許される紙面のスペースを考え、「時間Tの測定に対し得られた計数Nがゼロであった」という最も極端なケースを取り上げる。

2. Poisson分布

検出器の信号生成が、その直前を含め、過去の信号生成とは全く無関係になされると分っており、計数率の期待値が既知で $\dot{m}$ で与えられるとき、時間tの測定で計数Nを得る確率 $P(m=\dot{m}t, N)$ は

$$P(m, N) = \exp(-m) \cdot m^N/N! \qquad (1)$$

で与えられ、Poissonの確率分布関数と呼ばれる。ここで、mは非負の実数、Nは非負の整数であり、N！はNの階乗である。

確率分布関数が（1）式で表されるというのは、事象の生起が決定論的因果関係で記述できないということであり、「このような原因があったらこのような結果が“確実に（＝確率100%）”起きる」ということではないことを示している。これは、“巨視的世界”で日常的に経験する、原因と結果の間を結ぶ“決定的論理”とは全く性質を異にするもので、支配する論理は“蓋然性の論理”と呼ばれる。このことは、例えば $m = 1.0$ としたとき、N＝0を得る確率が約37%もあることをチェックすれば簡単に分ることである。

実務の世界で必要とされる(1)式の利用は、mが与えられたとき得られるNの値（の値やそのバラツキ）を推測することだけではない。特に放射線（の安全）管理の実務においては、Nという結果からmの値（の値やそのバラツキ）を推測することである。前者は「順問題」、後者は「逆問題」と呼ばれる。

順問題として（1）式を解くとき、$dP/dm = 0$ を解くことによって得られる、Nの最確値

$$m\,(\text{最確値}) = N$$

を用いることが多く、情報処理の技術用語では“最尤法”と呼ばれる。

しかし、逆問題を解くときにこの手法を、漫然と惰性的に流用してはならない。それは $m > 0$ であっても $N = 0$ という手応えを得ることが少なくない、という、誰しも経験するところから簡単に分ることである。

以下では、 N＝0 という結果を得たとき、そこから“汲み出す事の出来る情報”が何であるかを考察してみたい。

3．　計数測定で得られる情報とその品質

対象とする確率事象の確率分布関数が Poisson 分布に従う場合、測定時間 t の測定で計数 N＝0 が得られたときには、期待値 m＝ $\dot{m}$ t に対して実際の計数 N が N＝0 となる確率 P(m, N=0) は、exp(－m) であり、N が N ≧ 1 である確率は

$$P(m, N \geqq 1) = 1 - \exp(-m)$$

となる。従って、

$$P(m, N=0) = P(m, N \geqq 1) = 1/2 = 0.5$$

となるのは、m= $ln2$ ≒ 0.693 のときである。言うまでもなく、この場合に対応する $\dot{m}$ の期待値 $<\dot{m}>$ は

$$<\dot{m}> = ln2 / t \fallingdotseq 0.693 / t$$

である。

このような試行を K 回繰り返し、いずれの試行においても N＝0 という結果を得たとする。このとき観察対象は“確度” $\eta = 1-(1/2^K)$ で $<\dot{m}> \geqq ln2/t \fallingdotseq 0.693/t$ であると見做すことができる。 施行の結果 <m> ≧ m_0 であることが確率 η で確認できたときには、状態は 2 つの状態、<m> ≧ m_0 と <m> ＜ m_0 が η と 1－η の割合で混在していると見做すこともできるが、状態は確度 η で<m> ≧ m_0 であると規定することもできるからである（事後確率による状態規定）。

上で述べた議論は、測定時間を t → Kt として 1 回測定し N＝0 の結果を得た場合にも当然当てはまる。従って、時間 T の測定で N=0 を得たときには、『観察対象は確度

$$\eta = 1 - (1/2^K)$$

で、$<\dot{m}> \geqq ln2/(t/K) = K \cdot ln2 / t$

である』という情報を入手できたことになる。K は任意の整数である。K＝1 にとるときには状態が ≧ $ln2$/t である確率と ＜ln2 である確率は even、すなわち 50%対 50%であって、状態判定には無力となる。K の値を大きく取れば、状態規定の品質、ひいてはそれに基づいての判定確度は、それに応じて向上することになる。

数学的には

$$1 - (1/2^K) = 1 - \exp(-K \cdot ln2)$$

の関係があり、右辺の第 2 項は Poisson 分布 P(m, N) において m＝K･$ln2$ のとき N＝0 を得る確率となっている。

Poisson 分布において、計数 N は整数であるが期待値 m は非負の実数である。判定結果出現の事後確率で以て状態を規定するため、上では整数 K を用いたが、これを実数 k に置き換えることにより、上記の確度制御は自由度を高めることができる。

4．　結論

時間 t の測定で計数 N=0 を得たときに、計数率についての情報として組み出したものは

“計数率の期待値 が　$<\dot{m}> \geqq k \cdot ln2 / t$ であることを、確度 $\eta = 1 - \exp(-k \cdot ln2)$ で言える”

という知見である。

短時間の測定で計数ゼロを得たからといって $<\dot{m}> = 0$ としてはいけないのである。

「放射線教育」の投稿規定

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原稿の投稿を募集している。

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. 原稿の審査

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、報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. 原稿の送付

そのまま印刷される図表つきの原稿本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 による本文の送付を歓迎する。最終的な原稿はプリントアウトをして下記に送る。毎年 1 月 31 日をその年度の締切とする。

（送付先）〒105-0003　東京都港区西新橋 3-23-6　第一白川ビル５Ｆ
放射線教育フォーラム編集委員会
（封筒に「放射線教育投稿原稿」と朱書する）

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
〒105-0003　東京都港区西新橋3-23-6　第一白川ビル5Ｆ

［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。図表は原則として、白黒とするが、編集委員会が認めたときに限りカラーの使用を認める。カラーページの印刷費は、原則として全額を投稿者が負担する。

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】

「檻の中のライオンがいつのまにか格子を通りぬけて出てくる」という物理学のおとぎ話を読んだのは、筆者が阪大入学早々だった。これによって筆者の量子力学への最初の興味が生まれたと言っていいだろう。この本「不思議の国のトムキンス」の訳者が若き日の伏見先生であった。それから50年後、フォーラムで再び先生からいろいろ教わるという幸運にめぐり会うことになった。しかし、昨年幽明境を異にすることになり、本号には一昨年亡くなられた斎藤信房先生とともに先生を偲ぶ記事が掲載されている。筆者もこの欄を借りて両先生に特別な感謝の気持ちを捧げたい。さらにつけ加えると、難しいことを平易な言葉で表現できる学者を失ったことは大変な損失である。フォーラムにとってこういう研究者、教育者が不可欠なことは言うまでもない。

（今村　昌）

放射線教育　Vol. 12, No. 1 (2008)

発行日：　2009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
堀内公子（委員長）、大野新一（副委員長）、小高正敬（副委員長）、
今村　昌、岩崎民子、大橋國雄、菊池文誠、村主　進、坂内忠明、細渕安弘、
村石幸正

事務局：　〒105-0003　東京都港区西新橋3− 23− 6　第一白川ビル５F
放射線教育フォーラム
Tel: 03-3433-0308　　FAX: 03-3433-4308,
E-mail：mt01-ref@kt.rim.or.jp

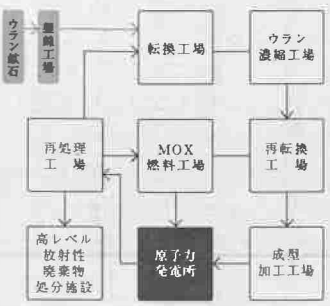
大豆5%、エネルギー4%。なくてはならない、このふたつ。自給率は、意外と低い。

日本には、ウラン資源を有効に活用できる「原子燃料サイクル」の確立が不可欠です。

豆腐や味噌などの原料として、暮らしにとても身近な大豆。同じように、暮らしに欠かせないエネルギー資源もそのほとんどを輸入に頼っています。そこで今、エネルギー資源を将来にわたって確保するため、使用済の原子燃料を再処理し、再び燃料として活用する「原子燃料サイクル」の確立がすすめられています。ウラン資源をリサイクルすることでエネルギー自給率は向上し、長期的かつ安定したエネルギー供給に貢献します。

※大豆5%…食料需給表（平成19年度版）活版本
エネルギー4%…エネルギー白書2008

［原子燃料サイクルの工程］



エネルギーの安定供給と地球環境保護のため、「原子燃料サイクル」を推進しています。

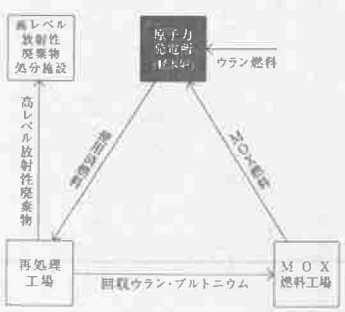
全国10の電力会社でつくる **電気事業連合会** http://www.fepc.or.jp

工夫して、有効活用。
それが、今の時代の考え方です。

ウラン資源も、リサイクルして有効活用。「プルサーマル」が可能にします。

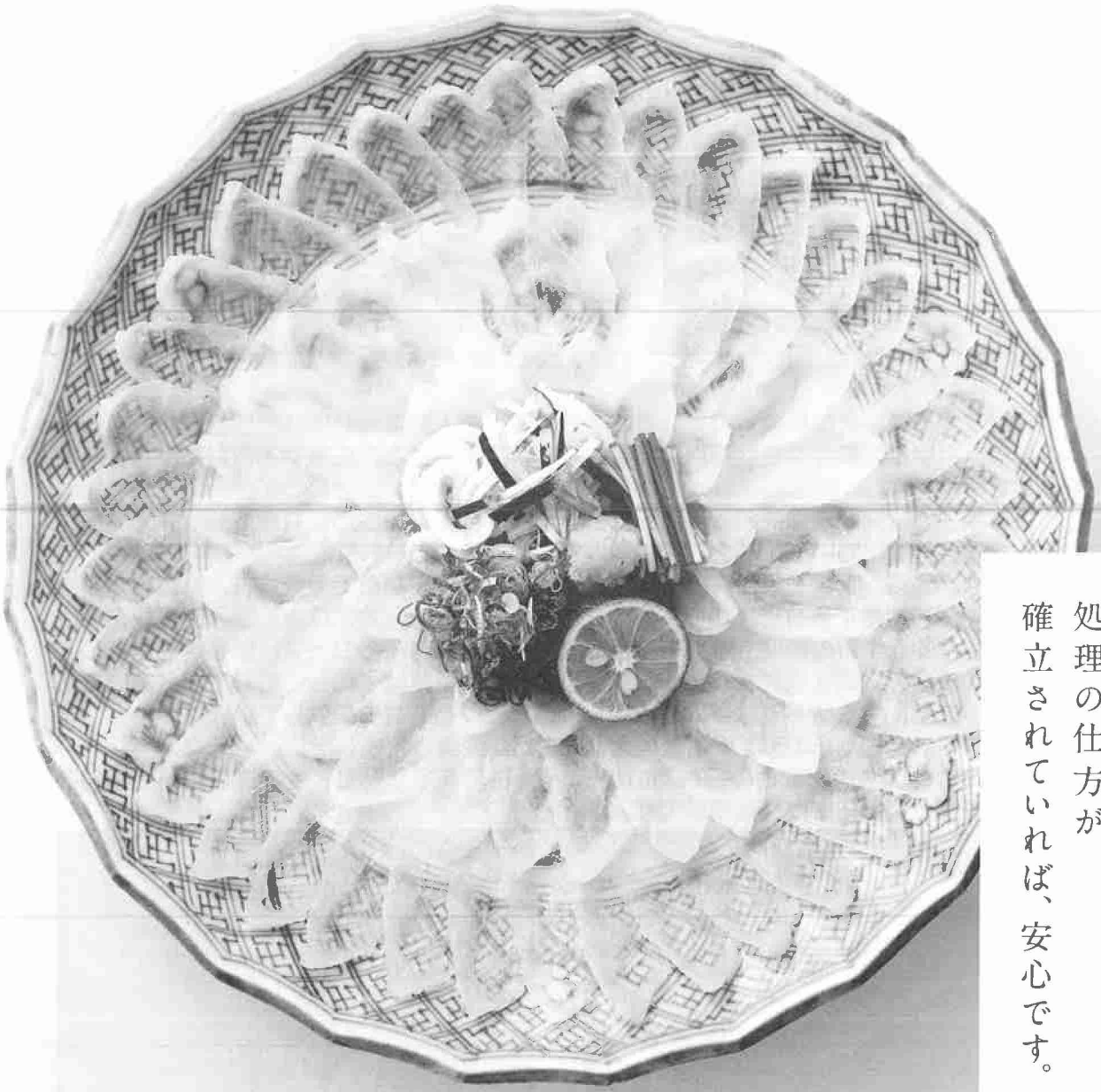
大根の葉は普段は捨ててしまいがちですが、炒めものや味噌汁などに利用できます。同じように、原子力発電の使用済燃料も、貴重な資源として再利用できるのです。使用済燃料に含まれる燃え残りのウランと生成されたプルトニウムを混ぜ合わせたMOX燃料を使うことを「プルサーマル」といいます。このようなウラン資源のリサイクルは、エネルギー自給率の向上という点でとても重要なことなのです。

［プルサーマルのしくみ］



エネルギーの安定供給と地球環境保護のため、「原子燃料サイクル」を推進しています。

全国10の電力会社でつくる **電気事業連合会** http://www.fepc.or.jp

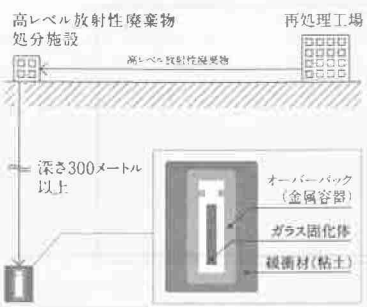


処理の仕方が確立されていれば、安心です。

リサイクルしても
残ってしまう
高レベルの放射性廃棄物。
厳重な管理のもと、
適切に処分します。

安全にそして安心して食べられるように、ふぐの毒はしっかりとした技術で取り除かれます。原子力発電でも、使用済燃料の再処理過程で出る「高レベル放射性廃棄物」は、何重ものバリアで閉じ込められ、さらに、三百メートル以上の地下にしっかりと処分されます。この処分方法は地層処分と呼ばれ、「高レベル放射性廃棄物」を安全・確実に隔離し、生活環境から半永久的に遠ざけることを可能にするのです。

［高レベル放射性廃棄物の処分方法］



エネルギーの安定供給と地球環境保護のため、「原子燃料サイクル」を推進しています。

全国10の電力会社でつくる **電気事業連合会** http://www.fepc.or.jp

原子力・放射線をテーマに

資源・エネルギー教育、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～

原子力体験セミナー

主　催　文部科学省

企画・運営　(財)放射線利用振興協会

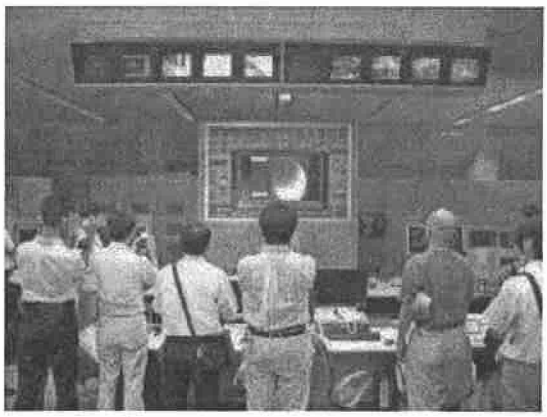
本セミナーは、文部科学省の委託事業として財団法人放射線利用振興協会が実施する、小学校、中学校、高等学校、特別支援学校等の教職員及びこれに準ずる教育関係者を対象とした研修です。

日本原子力研究開発機構の各拠点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、全国各地に出向いて１～２日間で開催するコースがあります。

内容は、講義、実験・実習、施設見学、ワークショップなどで構成され、基礎的知識や科学的知識を習得するコースから、資源・エネルギー問題、地球環境問題、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、原子炉を運転しての実習や授業の実践を検討するコースまで、担当教科や興味・関心に応じてご参加いただけます。また、セミナーでは学校で活用していただける教材も提供しています。

これまでに全国から15,000名を超える先生方が受講されました。

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：小・中・高・特別支援学校等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交通費、宿泊費は当財団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わせください。

RADA
RADIATION UTILIZATION DEVELOPMENT ASSOCIATION

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：taiken@rada.or.jp

文部科学省委託事業

誰でも簡単に使える簡易放射線測定器

はかるくんで放射線を測ってみよう!

無料貸出中

わたしたちの身近に存在する自然放射線を測ってみませんか？グループで模造紙に測定結果をまとめたもの、「はかるくん」を使った実習の新しい展開、自由研究や指導案など、「はかるくん」の活用事例を実践・研究作品として募集していますので、ぜひご応募ください。

詳しくは‥ はかるくん 検索

夏休みの自由研究に!

電車の中は車体の金属によって放射線が弱められているよ!

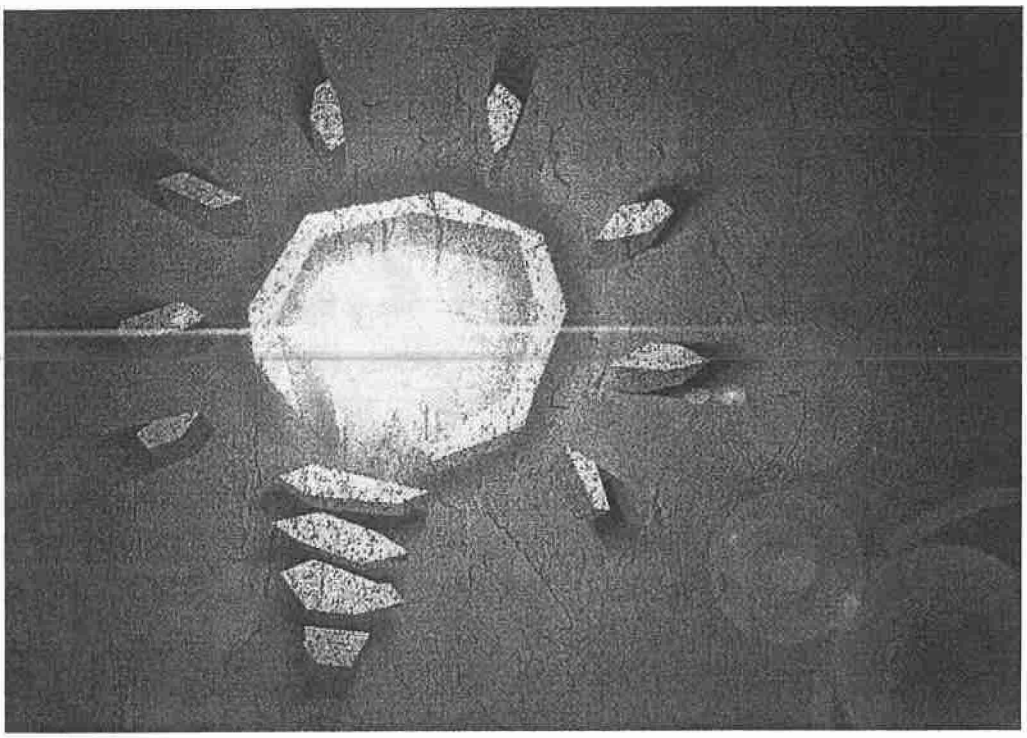
自然界にも放射線があることを知ろう!

水の量が多いほど放射線はさえぎられるよ!

ラドン温泉では、放射線がたくさん出ているよ!

■□問い合わせ□■
財団法人 日本科学技術振興財団
情報システム開発部 「はかるくん」係
〒102-0091 東京都千代田区北の丸公園２－１
TEL：03-3212-8504 FAX：03-3212-8596
http://hakarukun.go.jp/

資源・エネルギー・原子力・環境について
知りたいこと、疑問に思うことは
ありませんか？



日本原子力文化振興財団では、
中・高校生や先生方に対して
様々な協力活動を行なっています。

❶10月26日の「原子力の日」を記念して、
作文・論文の募集と表彰

❷**放射線実習セミナーの開催**

❸先生方を対象とした
「エネルギーと環境」講座の開催

❹エネルギーや原子力などの
ビデオや写真の貸し出し

●放射線実習セミナーの経費は無料です
●お問い合わせは電話、FAX、URLなどからお願いいたします

財団法人 日本原子力文化振興財団

〒108-0023　東京都港区芝浦2-3-31　第2高取ビル5階

TEL 03-6891-1572　　FAX 03-6891-1575　　URL http://www.jaero.or.jp/

この星に、たしかな未来を。
Dramatic Technologies
三菱重工

未来が未来で
なくなる前に、
私たちにできることを
考えたい。

私たちの生活にとって
欠くことのできない電気。
今、その電気を生み出す
貴重なエネルギー資源が、
確実になくなりつつあります。
原子力発電所の使用済み燃料を
リサイクル利用するプルサーマル。
それは、豊かな未来をひらく
テクノロジーです。
未来を閉ざさないために――
三菱重工は、プルサーマルの実現を
サポートしています。

三菱PWR原子力発電プラント

豊かな未来をひらく、プルサーマル

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 TEL.(03)6716-3111
支社　関西/中部/九州/北海道/中国/東北/北陸/四国

原子力の今を学ぶために

原子力ポケットブック
本体価格6000円＋消費税300円

1964年に初版が刊行されて以来、その後のアイソトープ利用の拡大や原子力発電の導入などによって、年々その対象分野を広げ、「知りたい情報を簡便に」得られるデータ・バンクとして高い評価を受けております。
エネルギー・原子力行政に携わる人はもとより、原子力従事者、地方自治体やマスコミ関係者の座右の一冊です。

電力・エネルギー時事用語事典
本体価格2,667円＋消費税133円

「電気新聞」が日々新たな情報を提供する中で蓄積された情報を生かし、電力・エネルギーの世界で起こる事象を的確に理解いただくために必要な用語をわかりやすく解説したものです。その時々に時代を読み解くための情報として必要なキーワードを集め、理解に役立つ最新のニュース情報とともに解説しています。

電氣新聞
ENERGY & ELECTRICITY

原子力の今を知るために

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）

ほか多数の原子力関係書籍を販売しております！
詳しくは下記ウェブサイトをご覧ください

社団法人 日本電気協会
JAPAN ELECTRIC ASSOCIATION
www.shimbun.denki.or.jp

ウチダパソコン計測システム
Science Mate® SL-4（データロガー付き）

UCHIDA

」3つの使い方（単体計測・PC接続計測・データロガー解析）
」屋外での環境測定に最適（データロガー解析）
」グループ実験もできる、充実したアプリケーション!!

ラボセンサーセット

8-100-2001 SL-4 ラボセンサーセット
・・・・・・・・¥48,000（税込¥50,400）

●セット内容：本体（サイエンスキャプチャ）、ソフトウェアCD、USBケーブル、ACアダプター、ストラップ、気温センサー（1個）＋液温センサー（1個）＋光センサー（1個）

◆計測端末（サイエンスキャプチャ）と理科実験用センサーのセットです。
気温・液温・光のON/OFFが計測でき、温度変化や振り子の周期などが測定できます。

◆オプションセンサーを組合わせて、電流・電圧の計測や気象の計測もできます。

内田洋行
教育システム事業部

ウチダホームページアドレス
▶http://school.uchida.co.jp/

■東　京　〒135-8730 東京都江東区潮見2-9-15
東日本機器営業部 ☎03(5634)6280　ICT東日本第1営業部 ☎03(5634)6402
施設設備営業部 ☎03(5634)6318　ICT東日本第2営業部 ☎03(5634)6406
■大　阪　〒540-8520 大阪市中央区和泉町2-2-2
西日本機器営業部 ☎06(6920)2480　ICT西日本営業部 ☎06(6920)2641
施設設備営業部 ☎06(6920)2491
■名古屋　〒460-0002 名古屋市中区丸の内1-17-19 キリックス丸の内ビル2階
中部営業部 ☎052(222)7255
■北海道支社　〒060-0041　札幌市中央区大通り東3-1　☎011(214)8611
■九州支社　〒812-8692　福岡市博多区博多駅南1-14-14　☎092(482)5850

各省庁研究費公募及び配分、内容等も紹介

我が国唯一の基礎科学専門紙

研究助成団体の募集及び結果
文部科学省等の情報
教授人事、国際会議派遣、大学ニュース、研究成果など
海外科学ニュース
海外雑誌を航空便で取り寄せ翻訳速報
その他の主な内容
人物紹介、海外出張者、国内科学ニュースダイジェスト、学協会行事、科学雑誌・学協会誌目次総覧、外国雑誌、新刊案内、書評、新製品紹介、研究所紹介、科学読物、教授・准教授等募集、科学者が語る自伝

科学新聞
週刊（金曜日発行）

1カ月　2,100円
6カ月　11,340円（前納）
1カ年　21,000円（前納）
（送料・消費税込）

科研費の第一人者・飯田益雄先生の書き下ろしによる待望の新刊。
科研費の史的変遷を語る上で欠かせない一冊！

科研費ヒストリー
科学政策にみる科研費の制度と運営の実際
飯田益雄 著（元 文部省主任学術調査官）／四六判並製本230ページ／定価（本体2,200円＋税）

株式会社 科学新聞社
東京都港区浜松町1－8－1（〒105-0013）
TEL 03-3434-3741(代)　FAX 03-3434-3745
http://www.sci-news.co.jp