RADIATION EDUCATION

放射線教育

2001

VOL. 5 NO. 1

放射線教育フォーラム
Radiation Education Forum

放射線教育
Radiation Education
Vol. 5　　No. 1

目　次

1__【巻頭言】科学者の伝記を読もう　*井口道生*

5__【特別寄稿】我が国の科学教育の危機　*細矢治夫*

11__中学生のためのエネルギー環境体験学習会　*岩倉三好*

21__放射線安全管理のトリアージ　*加藤和明*

25__全国民に放射線の個人線量計を　*加藤和明*

27__新聞報道にみる原子力：予備的調査　*笹川澄子*

35__『コペンハーゲン』を観劇して　*白形弘文*

37__中性子を含む周期表について　*荒谷美智*

41__自然放射線被ばくによる線量の理解―宇宙線ならびに岩石中の放射性元素の起源に関する研究　*大野新一，八木国光，新井英彦*

51__科学技術と社会　*更田豊治郎*

61__放射線影響研究所と竹原石炭火力発電所を見学して　*関本順子*

67__モナザイトを用いた放射線実験例　*菊池文誠，堀内公子，横田繁照，村石幸正*

73__原子炉のエネルギーと恒星のエネルギー　*大橋國雄*

81__元素とエネルギーのルーツ　*中西　孝*

87__放射線と物質の相互作用　*中村眞基*

94__編集委員会からのお知らせ

95__投稿規程

96__編集後記　*小高正敬*

発行: 2002 年 3 月 30 日，NPO 法人 放射線教育フォーラム
〒105-0001 東京都港区虎ノ門 1-7-6 升本ビル 2 階
Tel/FAX: 03-3591-5366, *E-mail*: mt01-ref@kt.rim.or.jp, *HP*: http://www.ref.or.jp

放射線教育 Radiation Education
Vol. 5, No. 1, p. 1—4 (2001)

【巻頭言】

科学者の伝記を読もう

井口道生
アルゴンヌ国立研究所
Mitio Inokuti, Physics Division, Argonne National Laboratory,
9700 South Cass Avenue, Argonne, Illinois 60439, U. S. A. 〈inokuti@anl.gov〉

放射線を始め、現代の自然科学や技術に関することを一般の人々が理解するために、我々科学者は大いに努力すべきことは今さらいうまでもない。そのために役に立つと考えられることの一つを指摘しよう。それは、著名な科学者の伝記や科学・技術の歴史を読むことである。

科学や技術に関する学校教育では、一定の基礎知識を説明することが中心になるのは、時間の制約などのために当然である。そして、取り扱う材料は整理されたものに限られ、科学や技術の面白さと人間臭さが十分には伝わらないことがある。実は科学も技術も、それを創り出した人間と社会をも考えて始めて、適切に理解できるものである。文学、音楽、絵画などの芸術を鑑賞するために、それを創り出した人々とその社会に関する知識が大きな役割を担っているのと、似ていると思う。

科学が生きた人間の創り出したものであることを、私も高等学校の学生だった頃まではしっかり理解していなかったと思う。当時の私にとって目から鱗が落ちる思いをさせてくれたのは、高木貞治の「近世数学史談」[1] であった。ガウスに始まる、18 世紀以後の数学者の伝記を解説し、同時にその仕事の意義を説明したものである。さすがに数学の大家

が書いたものだけに、叙述は簡潔でしかも含蓄の深いものであるから、今まで何度読んだか判らない。でもその結果、数学についてかなりの理解を得たのは確かである。

原子力と放射線に関することを初めてしっかり読んで、強い興味とある程度の深さの理解を得たのは、スマイス報告[2]であった。第二次世界大戦後すぐ出た本で、アメリカの原子爆弾の研究と開発の歴史を述べた、マンハッタン計画の正式の報告書である。広島の爆撃があって、この計画が公表されたその日に、指導的な科学者であったフェルミの夫人が「今まで4年もどんな仕事をしていたのか、ちっとも説明してくれなかった」と、夫に不満をうちあけた。これに対して、フェルミは「機密だったので、しかたがなかった。これを読んでくれ」といって夫人に渡したのが、この本の原稿であった。科学の教養があった夫人は、これを一気に読み通したという。フェルミの生涯と仕事については、夫人ラウラの回想記[3]が、人間味溢れる、素晴しい読み物である。本格的な伝記は、セグレ[4]が書いている。

最近出版されたので、早速読んで見たのは、テラーの自叙伝[5]である。テラーは、1908年にハンガリーで生まれ、ドイツで学んだ物理学者であり、1935年以来アメリカで活動し、今も健在である。この人は、核分裂による原子爆弾ができる前から、核融合を利用する研究をしたので、「水素爆弾の父」と呼ばれる。(彼はこのあだ名は嫌だという。)そして、1954年にオッペンハイマーの「国家機密に関与する資格審査」のときに、オッペンハイマーにとって不利な証言をしたというので、多くの科学者に敵視された。というわけで、一般には評判の良くない人である。しかし、化学物理、核物理、計算物理などでの立派な業績や、優れた著書によって、大いに尊敬に値する学者だと、私は考えている。

500頁を超える自叙伝の内容を総括するのは簡単ではない。ここではたくさんの話のごく一部を紹介しよう。ブダペストで高等学校に通った頃から数学などで優れていた他、ピアノを習って生涯の趣味を身につけた。ドイツのカールスルーエの工科大学で化学を学んだのち、ミュンヘン大学へ移り物理に転じたのが1928年、量子力学が誕生した直後であった。ここで当時の有名な理論家ゾンマーフェルトについたけれども、余りにも系統的かつ厳格で、正確を旨とする、この先生の学風に馴染めなかった。それでライプチッヒに行って、新進の教授ハイゼンベルクについたら、今度は全面的に尊敬できる先生であった。同時に弟子として滞在していた人々と友達になれたし、その多くは後に著名な学者になった。例えば、ロシヤ人のランダウ、アメリカ人のマリケン、日本人の菊池正士、藤岡由夫などである。テラーは、水素分子イオンの電子的なエネルギーを計算するという問題をハイゼンベルクからもらって、現在の量子化学の端緒になる仕事をして、学位をもらった。色々な電子準位についての膨大な計算で、どこまでやっても終わりにならないと感じていたけれども、意外な終結を迎えた。というのは、手動計算機を使って仕事していた部屋の真上がハイゼンベルク先生の寝室であって、先生は毎晩のひどい雑音で眠れなくて参っていた。ある晩やってきて「もう計算は十分だ。直ぐ学位論文を書け」ということになったそうである。

その後、ゲッチンゲン大学で物理化学者オイケンの助手になったが、フランク、ヘルツベルクなどとも協力して、分子分光学で重要な仕事をした。また1932年には3ヶ月にわたってローマでフェルミを訪ね、ここで核物理、なかんずく中性子の核による散乱と反応について学んだ。1933年には、コペンハーゲンでボーアにも学んでいる。

このようにいうと、いかにも幸福で愉快な青年時代のように見えるけれども、実はそう

ではなかった。ハンガリーにいた時代には、政情不安定で一時は共産党の支配もあった。ドイツにいた時代にはナチスが勢力を伸ばしついには政権を握ることになった。この間の色々な経験から、テラーは全体主義、あるいは反民主的な政治に強い嫌悪感をもつようになった。また、ミュンヘンで交通事故にあって、片方の足を失って義足を使うことになったという不幸もあった。

ブダペスト時代以来の恋人ミッチとやっと結婚したテラーは、ヨーロッパ大陸での今後の生活に不安を感じて、1934 年にはロンドンに移る。イギリスでは、大陸からのユダヤ人の移住を援助する組織が活動していたおかげであった。ロンドンで、旧知のハンガリー人シラードに出会い、ウランのなかでの中性子による核分裂連鎖反応の可能性を聴いた。シラードは、この着想に関する特許を取ったところであった。1935 年に、テラーはアメリカに移住し、まずワシントンに住んで、ガモフと協力して核物理を研究した。1941 年にはニューヨークのコロンビア大学で働き、フェルミとも再会した。これが核分裂の研究の始まりである。このような研究が国の大計画になったのは、ローズベルト大統領あてのアインシュタインの手紙によるところが多い。（日本では「ルーズベルト」と書くのが普通であるが、英語の発音はむしろ「ローズベルト」に近い。）この手紙は実はシラードの発案であって、そのために彼がアインシュタインを別荘に訪ねたときには、テラーは運転手を勤めた。

その後のマンハッタン計画や、ロスアラモス研究所、リヴァモア研究所のことは詳しく紹介する余裕が無いので割愛する。テラーがこれほど熱心に核兵器の研究に努力したのは、どうしてだろうか。これについて彼は次のように説明している。核兵器およびその輸送手段としてのミサイルに関する、最高の技術がもし全体主義的な国の独占になったとすれば、世界の民主主義のためにはどう見ても好ましくないであろうというのである。彼はこの考えを詳しく述べている。

テラーは、世界のエネルギー供給の問題についても、ずいぶん立ち入った考察をしている。さらに、核分裂のエネルギーの利用、すなわち原子炉の安全性や、放射線の人体への影響についても、半世紀に亘って詳しく考えてきたことを述べている。その上に、現代の科学・技術について、一般社会の人々に正しい知識を提供することの必要性を説いている。これに関連して、現在のハンガリーの指導的な物理学者である、マルクス(George Marx)との交流の話も出てくる。1990 年にテラー夫妻が何と 54 年ぶりに故郷ブダペストを訪ねたのは、マルクスの招きによるものだった。1998 年に葉山で開かれた、第１回の放射線教育国際シンポジウムのときに私もお目にかかって強い印象を受けた人である。そして、第２回のシンポジウムの主催者を勤める人である。

著名な科学者の伝記で読むに値するものは他にもたくさんある。パイスが書いた、アインシュタインの伝記[6]も、ボーアの伝記[7]も、十数人の列伝[8]も、真に読みごたえがある。このような大掛かりな本を読む閑がないという方には、www.nobel.se というウエブ・サイトを薦める。ノーベル賞受賞者の、短い伝記を始め、業績の解説などを読むことができる。

以上に挙げたような本や資料を読むのは、科学者としての我々の教養になり、見識を広めるのに有用である。それに加えて、一般の人々に科学や技術のことを語る時に、この上ない良い材料を得ることになる。それを大いに利用して、なるべく大勢の人々に興味をもって聴いてもらえるような話をしようと、私は心掛けている。

引用文献

（1）高木貞治「近世数学史談」、3版、共立出版、1970年

（2）H. D. Smyth, Atomic Energy for Military Purposes, Princeton University Press, 1945；H.D.スマイス著、杉本朝雄、田島英三、川崎栄一訳「原子爆弾の完成—スマイス報告」、岩波書店、1951年

（3）L. Fermi, Atoms in the Family: My Life with Enrico Fermi, The University of Chicago Press, 1954；ラウラ・フェルミ著、崎川範行訳「フェルミの生涯　新装版—家族の中の原子」、教養選書34、法政大学出版局、1977年

（4）E. Segre, Enrico Fermi. Physicist, The University of Chicago Press, Chicago, 1970；エミリオ・セグレ著、久保亮五、久保千鶴子訳「エンリコ・フェルミ伝：原子の火を点じた人」みすず書房、1976年

（5）E. Teller, Memoirs. A Twentieth-Century Journey in Science and Technology, Persus Publishing, Cambridge, Massachusetts, 2001

（6）A. Pais, 'Subtle is the Lord ...' The Science and the Life of Albert Einstein, Oxford University Press, Oxford, 1982; エイブラハム・パイス著、岡村浩、太田忠之、西島和彦訳「神は老獪にして…アインシュタインの人と学問」、産業図書、1987年

（7）A. Pais, Niels Bohr's Times, In Physics, Philosophy, and Polity, Clarendon Press, Oxford, 1991

（8）A. Pais, The Genius of Science. A Portrait Gallery, Oxford University Press, Oxford, 2000

(2002年2月26日受理)

放射線教育 Radiation Education
Vol. 5, No. 1, p. 5—10 (2001)

【特別寄稿】

我が国の科学教育の危機

細矢治夫
お茶の水女子大学理学部
(〒112-8610 東京都文京区大塚 2-1-1)

【要旨】文科省は、学習指導要領を通して、我が国の初中等教育に関する行政を司っているが、その方針は一部の官僚の独断によって決められているところに問題がある。それに対して文科相の最近の発言は、教育政策について、我が国と諸外国の間の大きな違いを認識したためであると推論した。その他にも、科学や教育に関しての彼我の差の具体例を検証しながら、我が国の科学教育の問題点や科学者側の反省点について議論をしている。

§ 1　遠山文科相のあせり

1 月 17 日の朝刊各紙に、「確かな学力の向上のための 2002 アピール『学びのすすめ』」という遠山文科相のアピールが公表された。これは、過去二十数年来の文部省、文科省から発信されたものとしては異例の前向きの姿勢のものである。しかも、同日に行われた全国都道府県教育委員会連合会総会での大臣の発表以前に、このメッセージが報道機関へレリースされていることに注目したい。文科省は、その後もウエブサイト（ホームページ）を使って、この大方針転換の PR に努めている。つまり、宿題、課題、朝の読書、放課後の補習などによって、学ぶことの楽しさを生徒に体験させ、学習意欲を高めるという、これまでの文部省、文科省のベクトルの向きとは 180 度違うものである。

そして、2 月 26 日の文科相の記者会見では、新学習指導要領は学力の低下を意図したものではなく、この「学びのすすめ」も学力の低下に陥らないように、日本中の学校に対応してもらいたいからだと弁解がましく表明している。既に 1 月 17 日の文科省のウエブサイトには、「アメリカ、イギリス、フランスをはじめとする欧米諸国やアジアの国々などにおいても、教育こそが一国の未来にとっての最重要課題であるとして、国を挙げて児童生徒の学力の向上等に向けた教育改革が推進されているところです。」という一文が「学びのすすめ」の序文の中で目を引いている。

遠山文科相のこのあせりはどこからきているのだろうか。以下、私の独断的な推論を御披露させていただこう。

時は更に 1 週間逆上るが、1 月 9 日の米国の各テレビ局はブッシュ大統領の演説を大々的に報じた。「エドワード・ケネディーは敵にまわすと手ごわいが、味方につけると大変頼りがいのある人だ」と笑いを誘いつつ、1965 年ジョンソン以来という初中等教育の超党派による大改革案を公表した。全米の公立の小中 9 年制の学校で、3 年生から 8 年生（日本の中 2）に毎年、国語と数学の学力テストを実施し、成績の良くない学校には、種々の予算措置をして成績が上がるようにするが、それでも駄目な場合は、先生の入れ替えも行う、という激しいものである。この措置は、教育に関して貧者と富者の間の差を解消することが目的であるという。この改革のために、年間予算を 2 割増しして、年に 3 兆 5 千億円相当の巨額の予算を当てるという、日本の側から見ても見過ごすことのできないビッグ

ニュースだった。

ところが翌日の朝は、英字新聞には載ったが、毎日新聞に米国特派員からの短い報告記事が紹介されただけで、他の全国紙では完全に無視されてしてしまった。その後のフォローもされていないようである。我が国の児童生徒の学力の低下傾向を憂い恐れるという観点から、最近いくつかの全国紙が教育問題に多くの紙面をさき始めたのは良い傾向だと見ていたのに、ブッシュ政権の大きな方向転換の重大局面を日本のジャーナリズムは一斉に見落としてしまったのである。テレビ局も同罪を犯している。クリントン、ゴア路線の民主党が言いだした、この初等中等教育のてこ入れ策は、米国内の世論を巻き込み、1年以上もかけて議論を続け、ついに超党派の立法が成立したという事実の認識が全くないことは恐ろしい。

敗戦の大きなダメッジを乗り越え、優秀な工業製品の生産を中心にして、日本が経済大国といわれるまでに復興成長したのは、その高度な理数科教育のたまものだという認識のもとに、米国がこういう形の挽回策をとり始めたということに疑いの余地はない。

一方英国のブレア首相は、もう何年も前から、教育、特に科学教育の重要性を認め、大口の教育予算の増加を実現させている。この立法措置も、一時の教育の軽視からきた失敗に対する英国全体の反省の上に立っている。更にアジア諸国でのエリート教育の大きな動きも、我が国の教育界を脅かしている。これら諸外国の教育改革の動きが、何れも我が国の教育水準の高さに追いつこうとしたことに原因があるということに気がつかなかったのが、当時の文部省だけだったということが実に悲しいことである。

現に文部省がやったことは、1970 年代の中頃から理数科教育の授業時間数と水準を一定の速度で下げ始めたという、とんでもないことである。その理由は、その頃から顕在化し始めた、登校拒否、家庭内暴力、学級崩壊にある。この右下がり傾向にある教育を文部省は、「量の教育から質の教育への大転換」という言葉で正当化しようとした。それから 10 年毎に学習指導要領の改訂がこの方向に進み、遂に今回、完全 5 日制の導入と「総合的な学習の時間」という現場の教師を混乱に陥れている新教科を割り込ませることによって、一気に3割の時間数を削減してしまった。このため、我が国の義務教育における理数系の授業時間が 30 年前の半分近くになってしまったのである。この暴挙は、既に多くの人の指摘により読者も御存じであろう。このような「教科の厳選」によって、「自ら課題を見付け、自ら学び、自ら考え、主体的に判断し、よりよく問題を解決する資質や能力を育て」、「生きる力を育む」ことができるというのが、現在文科省の中の一握りのオピニオンリーダーの唱えるお題目である。「だれもが 100 点をとれる教育が理想の教育である」というとんでもない絵空事を、東大の教育学部を出たお役人がしゃーしゃーと公言して、そういう施策を着々と実行しつつあり、それを今まで誰も止めることができなかったのである。それにやっと遠山文科相が気がついた、というのが、冒頭に述べた私の独断的な推論の大筋である。

§ 2　日本の将来を誰が決めるのか

遠山文科相は、先のブッシュの演説ではたと気がついたのである。新学習指導要領のはらんでいる大きな危険性に。そして、一寸先に何が起きるかわからないという政界のこわさにも。自分もいつ大臣を辞めさせられるかわからない、という不安がある。今直ぐにでも、自分が大臣を辞めてしまったならば、また、文科省のあの人達が今まで通りのやり方

で突き進むに違いない。大臣も官僚の出身である。だから、人より余計に官僚政治の強さとこわさを知っている。そこで必死になって、文科相からのメッセージとして、消すことのできないかたちの発言を続けているのであろう。

官僚政治のこわさ、特に我が国の教育に関する問題で、私の最近感じたこわさを、敢えてここに紹介したい。

先般の学習指導要領は、平成 10 年7月に出た教育課程審議会の「教育課程の基準の改善について」の方針に従って、文部省の指名した協力者会議の各専門教科の委員達が1年間かけて原案をつくり、それを担当の役人が文言と体裁の調整を行った後に、平成 10 年から 11 年にかけて、文部大臣が公布したものである。特に中学校の理科と数学におけるレベルダウンには目を覆いたくなるものがある。例えば、数学では二次方程式の解の一般公式、物理分野では 1 点にはたらく三つの力の釣り合いや電力量（ワット時）、化学ではイオンなどの重要なキーワードを、それぞれの科目の教科書から抹殺してしまうという、極めて由々しい改訂である。

このような教科項目の削減を、文科省は「厳選」と呼んでいる。では、どういう基準で誰が厳選したのか。特に中学校を例にとれば、学習指導要領の専門委員会が動きだす1年も前の 9 年 11 月の教育課程審議会の「中間まとめ」で、厳選案はできていたのである。審議会はその半年前から発足していたのだが、毎回長時間をかけて、様々な分野から出た学識経験者の教育論についてのガス抜きが行われ、7月 28 日に起草委員が指名され、9月5日には抹殺項目の原案を盛り込んだ「中間まとめ」の骨子がほぼでき上がっていたのである。このたたき台は文部省のお役人がつくったに違いない。教育課程審議会の委員の先生方は、それをオーソライズするための道具に使われたに過ぎない。ごく少数の委員は懸命に反対意見を述べたが、大部分の委員はそれらの項目の削減が如何に重大な問題であるかの認識が全くないままに、盲目的に官僚案を承認してしまったのである。

科学に深い理解をもたない文部官僚が提案した削減項目は、文部省の外郭団体の行った不十分な「達成度」調査の中のワースト項目の上の方から機械的に取り上げたものに過ぎないのである。つまり、中高生がアンケートで「わからなかった」とか、「もう忘れてしまった」と最も多く答えた項目を機械的に消しただけなのである。わかり難いことと、重要でないことは同じでないのに、乱暴にもこの両者を同一視して、中学校の理数科の重要な項目を教科書から抹殺してしまったのである。

ここで「抹殺」というきつい言葉を何度も使ったが、その理由を説明しよう。学習指導要領に、例えば「イオン」という語は教えない、と書かれていると、その語を教科書の中で決して使ってはいけないし、上級学校への入学試験にも出してはいけない、という意味なのである。しかも、その教科書の検定官は、この「おふれ」を忠実に、かつ厳格に守る役を仰せつかっており、そういう忠僕が選ばれることになっている。この教科書検定も大変大きな問題をはらんでいるが、紙面の関係でここでは省略せざるを得ない。

さて文科省は、「学習指導要領にのっていないことも、個別のクラスで各先生の判断で自由に教えてよい。」と再三宣言しているが、大部分の教師は生徒の生活指導や日常的な激務に追われて、教科書にないことまでを教える時間も意欲ももたないというのが現実である。

学習指導要領というのは、本の目次のようなもので、しかも極く限られた字数の中に必要最小限のキーワードをダブリなく羅列してできあがっているものである。それを決める

協力者会議では、そういう制約の下で、前回の学習指導要領にはあっても、今回は止むなく消えてしまったキーワードでも、実質的には、その言葉を含んだかたちで教科書を書いてもよいという議論をし、そのことを「学習指導要領解説」の中でじっくり書き込むというプロセスが毎回とられている。しかるに今回は、そういう「解説」の中の記述は全く考慮されずに、ただ機械的に検定作業が行われた。そのため、数多くの教科書がやり玉に上がり、意欲的な記述の教科書がいくつか検定不合格になってしまった。

社会科の教科書の検定では、政治的な主張や見解の相違が争点になることが多いが、理数科の場合には、学問的に全く正しい重要な定理や法則であっても、「教えることまかりならぬ」という封建時代の高札まがいの悪政が通用しているのである。教科書執筆者の熱意がどんなに強く、論理がどんなに美しくても、学習指導要領に載っていない言葉や概念を説明することは例外なく禁じられている。

§3　日本の将来に責任をもつのは誰か

このように重要な役割をもつ教育課程審議会のメンバーの構成だけでなく、議論のまとめかたに大きな問題がある。それは、インターネットで公開されているこの委員会の議事録から推測されることである。発言者の名前は特定できないが、各委員の発言がかなり詳しく収録されている。委員会は、毎月2回ほどそれぞれ長時間かけて開かれたが、初めの十回ほどは各委員が自分の受けてきた教育や経験をもとに「私の教育論」を披露しあっていた。その中でかなり多くの人が、理数系統の学科が不得意だったり、理科や科学が好きでないと告白していたことに驚かされる。もちろん、理数系の先生や研究者も多少はいるが、大部分の委員は教育にも科学にも素人という感じの人達である。そういう何とも頼りない「学識経験者」の集まりが、すでに紹介したように、お役人の書き上げた文部大臣宛の答申を承認してしまったのである。その答申は、科学技術立国日本を背負って立つ若者達の受ける教育、特に科学教育の水準から内容を決める大事なものなのである。こんな乱暴な、筋の通らない官僚主導の行政機構が、どうして我が国では容認されてしまっているのだろうか。

我が国が近代の歴史で直面した危機が過去に2度ある。最初は明治維新で、2度目は第2次大戦での敗戦である。明治維新の場合には、一握りのリーダー格の人間がどんなに頑張っても日本の改革は断行できないという当時の施政者達の判断で、できるだけ多くの若い人間に西洋の事物を学ばせたり、勢いのある西洋の教師を大勢高給で雇い、我が国の若者たちに活を入れてもらうという方針が実行にうつされ、その目的も果たされた。同時に国民の識字率も100パーセントに限りなく近いところにまで引き上げることに成功した。日本人の勤勉な性格、平均的な知的水準や処理能力の高さなども、徐々に西洋の人々に知れわたるようになり、今日に至っている。

更に第2次大戦の敗戦時には、米国のGHQが、日本人の理数系の実力を下げるために社会科を新たに導入し、理数系の授業時間を極端に短くしてしまった。それに対して当時の文部省は、教育の専門家と共闘を組み、1970年代の半ばまでは、10年毎の学習指導要領の改訂の度に、じわじわと理数系の授業時間数を上げて行き、我が国の科学教育の水準を引き上げた。そのような教育を受けた人達が核となり、現在のような科学技術立国日本という世界の中での地位が獲得されたのである。

我が国にとって、この2度の大試練は国の存亡にかかわる大変な出来事だったが、何れ

も国を挙げての教育の改革によって無事に切り抜けることができたのである。それに比べて、この 30 年間の文部省、文科省が自発的に独断的に強行している教育改革は、如何なる動機と理論的根拠に基づくもので、その結果我が国にとってどのような利得が得られるものなのか、更に日本の国際的な地位と競争力にどのような展望が開けるものなのか、全く理解に苦しむ施策である。

もう一つ今回の教育改革が前２回と大きく違っているのは、一部の文部官僚の独善的かつ強権的な暴走を行っているということである。また既に述べたように、1970 年代の文部省の方向転換は、高度な教育水準について来れなくなった児童生徒の救済のための、一つの打開策に過ぎない。つまり、文科省の唱える「生きる力」や「総合的な学習」は、弱者を救う対策の方に教育施策の重心を引き寄せてしまったので、人類の生存と繁栄のための科学の発展や、国際競争の中を生き抜く力の養成などを全然考慮に入れず、無人島に漂着した人間に役に立つような力の養成を目指しているとしか思えないのである。日本の将来のために我々が何をなすべきかは、日本人全体が議論をして、合意し、決めるべきものであるのに、このプロセスは全然とられていない。

§ 4　科学を知らぬ者の怖さ

教育課程審議会が、中学校の学習指導要領の各科目の専門委員会の発足以前に削減を決めた項目の一つに、二次方程式の解の公式がある。三浦朱門審議会長は、自分の意見でなく、夫人の曽野綾子氏が、中学卒業以来一度も使ったこともない公式など教える必要がないと主張しているとして、文部官僚の試案を強く支持したため、新しい中学校の数学の教科書と授業は骨抜きになってしまった。中学校の新学習指導要領は、この他にも禁止項目が多過ぎるなどの理由から、恥ずかしくて、英語に翻訳して外国に紹介することなどできない代物になってしまった。これは、指導要領作成に協力した委員の責任では全くない。その責任の全ては、数学や科学についての正しい理解をもたない文部官僚にある。

数年前、私は日英米独の４ヵ国の化学会会長会議に陪席する機会に恵まれた。そのとき各国化学会に共通する問題に関する声明文がまとめられた。そのどの項目にも、国の行政府に対して専門家集団の立場からのアドバイスや勧告をするという一文が必ず入っていたことが強く印象に残っている。

科学者集団、あるいはそれぞれの分野での専門家集団は、国の行政や立法の府に、それぞれの立場から勧告をすることが、西欧諸国での当たり前のカルチャーになっている。然るに我が国のお役人は、専門学会の存在意義を正当に認めず、口うるさく、金をせびる厄介な人間の集まり程度の認識しかもたない者が多いところに大きな問題がある。

先の会長会議はロンドンの郊外で開かれたのだが、その時私は”Science in London"というしゃれた本を手に入れた。グリニッチ天文台は、もうその使命は終えたが、地球の経度の中心となる場所であることには変わりない。ニュートンやファラデー等の歴史上の人物としても著名な科学者やその発見にまつわる建物、或いは産業革命に関わる名所など、ロンドンという都市は、科学の発展の歴史で満ち満ちているのである。この本は、そういうことがぎっしりと詰まった、ユニークなロンドンの観光案内書である。ヨーロッパにはロンドンと似たような性格をもった都市が沢山見られる。一方歴史の浅い米国には、博物館や開かれた大学を通して、科学が堂々と市民権を主張している大小の都市がいろいろある。これらと比較すると、日本はまだ科学の後進国なのかなという悲しい気持ちになってしま

う。

それが端的に現れていることが、「科学技術」という言葉の横行である。これは本来、science and technology の訳語なのに、我が国ではほとんどの場合、「科学」が形容詞となって scientific technology という意味で使われてしまっている。

私は今回の高等学校の理科の学習指導要領の改訂の協力者会議の委員に選ばれ、新科目の「理科基礎」と「理科総合AおよびB」についての議論にも一部参加させてもらった。そのとき「科学技術」という言葉は、「科学・技術」と直すべきだと発議し、理科の委員会の大方の賛同を得た。ところが後日、文部省の上層部から、「科学技術」という言葉は既に世の中に定着しているので、間に点を入れることはまかりならぬと一蹴されてしまった。その上層部の人達のほとんどは、いわゆる文系で占められている。その人達も一昨年の機構改革で、文部事務官から文部科学事務官という肩書に替わっており、「科学の本質を理解していないのに文部科学事務官とはこれ如何に」と言ってあげたいのが私の本心である。

米国の National Research Council が 1996 年に「全米科学教育スタンダード」という日本の学習指導要領の専門家集団による非政府版のような報告書を公表した。この中で目についたのは、小中高の 12 年間を通じて、「科学と技術は異なる目的に対して追求されるものである。科学的探究は自然界の理解への欲求によって促進され、技術的設計は人類の要求を満たし人類の問題解決のための必要性によって促進される」というように、科学と技術の違いと関係を徹底的に教え込むことが示唆されていることだった。

科学と技術の違いに対する一般的な認識が我が国より進んでいると思われる米国においても、このことがくどいように繰り返し述べられていることに注目してほしい。邦訳でA5版で 250 ページの長い報告書に「科学技術」という言葉は一度も出てきていないのである。

一方我が国では、中学校の理科の第1分野の最後に「科学技術と人間」という数ページの章が突然現れるだけで、本文のどこにも「科学」と「技術」の説明がない。だから、一般の人はもちろん、お役人から政治家、更にジャーナリストにも理解されていないのだと変な納得の仕方をしてしまう。

§5　科学者の側からの反省

これまで、科学者は被害者という立場で主に論を進めてきたが、科学の側の者にも考えるべきことがいくつかあるので、最後に、この問題を指摘しておきたい。非科学者が科学や科学者を理解しようとしない我が国の風潮には、前項で述べたようにいろいろな原因が考えられるが、それに追い打ちをかけるかのような「オウムの悲劇」が起こった。

我が国の一流大学の理系を出た何人もの者が、オウム教団の犯した犯罪の中で重要な役割を積極的に果してしまった。

またある調査によると、専門書以外の平均的読書量の一番少ないのが工学部の学生という結果が出たという。専門を究めるためには馬鹿にならなければできないと言われるが、専門馬鹿になってしまっては何にもならない。科学を専門とする者は、社会と対する時だけでなく、常にこれらの問題を深刻に考えて行動すべきである。自戒も含めて、科学者の側からの反省が望まれる。

(2002 年 3 月 25 日受理)

放射線教育 Radiation Education
Vol. 5, No. 1, p. 11—19 (2001)

中学生のためのエネルギー環境体験学習会

岩倉　三好
東京都立三田高等学校教諭　環境カウンセラー（市民部門）
（〒２７０－２２２４　千葉県松戸市大橋１０９５.番地）

［要約］
私はエネルギー環境教育情報センター主催による中学生のためのエネルギー環境体験学習会に同行し、生徒の指導と学習会の指導の協力を行なった。エネルギーの開発や効率利用、環境問題への対応を実際に見学・体験することで、自分自身の問題として考え、日常生活を見直すための機会を提供する。体験学習会への参加で生徒はいろいろな経験をして、考えた。今回の学習会の内容と結果、進め方や今後の課題などについて報告する。

１．はじめに

私は、都立の高等学校で理科、生物を教えています。また、環境教育の分野でも長年にわたりいくつかの実践に取り組んで来ました。（参考文献１～９）　環境省から環境カウンセラー（市民部門）の登録を受けている。

そのような事で、今回、私は財団法人社会経済生産性本部、エネルギー環境教育情報センターから依頼を受け、同センター主催による平成１３年度関東地区中学生のためのエネルギー環境体験学習会に同行しました。依頼の内容は生徒の指導と夜の学習会の指導（各班の指導、最後のまとめの言葉）の協力でした。

学習会は３日間にわたって実施されましたが、私は最初の一日目だけに同行しました。

この学習会は全国市町村教育委員会連合会、社団法人日本ＰＴＡ全国協議会、社団法人全国子ども会連合会の後援を得ています。また、この事業は、経済産業省資源エネルギー庁の委託により行なわれています。本年は同様の小中学生のためのエネルギー環境体験学習会が全国９地域で実施される。

次に、その体験学習会の実施の内容や同行結果、学習会の進め方や今後の課題などについてまとめて報告します。

なお、この報告は既に発表した「夏休みの中学生のためのエネルギー環境体験学習会に同行して」（参考文献１０）を基に、学習会の内容と結果、進め方や今後の課題を更に詳しく、書き加えたものである。

２．体験学習会について

（１）体験学習会の実施の内容

次に、配布された案内より開催趣旨、月日、対象・定員、日程などをその一部抜粋して省略した形で載せます。

（A）開催趣旨

近年、エネルギーの大量消費に伴う地球規模での環境問題が顕在化しており、その解決に向けた国際的な枠組み作りや各国、各地域における様々な対策が始まっています。これらの対策には、私たち一人ひとりがこの問題を自分自身の問題として認識し、これまでの大量生産・大量消費・大量廃棄などのライフスタイルの見直しも含めた長期的かつ地道な取り組みが不可欠であり、特に、次代を担う子供たちへのエネルギー・環境教育が、極めて重要な意義を持つと考えます。

「中学生のためのエネルギー環境体験学習会」は夏期休暇を利用して、生徒がエネルギーの開発や効率利用、および環境問題への対応を実際に見学・体験することによって、エネルギー・環境問題を自分自身の問題として考え、日常生活を見直すための機会を提供することを目的として開催するものです。

（B）月日　平成１３年８月２８日（火）～８月３０日（木）　２泊３日

（C）対象・定員　東京都、千葉県、神奈川県、埼玉県、群馬県の中学生　６０名

（当日の欠席が６人あり、実際の参加者は５４人であった。男女別は男３１人、女２３人であった。。学年別の人数では１年１８、２年２６、３年１０であった。）

（D）日程

第１日目を詳しく載せ、第２日目と第３日目は省略した形で載せます。

第１日目：８月２８日（火）

８時１５分	東京駅集合（貸し切りバスにて移動）
８時３０分	出発
９時３０分～１１時３０分	日本鋼管（株）京浜製鉄所見学
	昼食
１３時００分～１５時００分	横浜市環境事業局鶴見工場見学（清掃工場）
１５時１０分～１７時００分	東京ガス（株）環境エネルギー館見学
１７時３０分	宿泊先到着（横浜市、旅館松島）
１８時１０分	夕食
１９時４５分～２０時４５分	学習会
２２時００分	就寝

第２日目：８月２９日（水）

東京電力・横浜火力発電所見学

バス移動、宿泊先到着

学習会

第３日目：８月２９日（木）

東京電力・福島第二原子力発電所見学

バス移動

上野駅到着・解散

体験学習終了後に感想文を提出する。８００字程度（原稿用紙２枚）　体験学習で学んだことをもとに書いて下さい。

テーマ例「私たちのくらしとエネルギー」、「○○を見学して思ったこと」、「環境を守るためにできること」など

（２）体験学習会の同行結果

次に同行した一日目を中心に日程順に内容や感想を載せます。

（ａ）東京駅集合　八重州中央口の改札を出たところに集合した。大部分の参加者は定刻に集合したが、一部の人が遅れた。ほとんど全員が初めて会った。緊張が見られる。保護者が送って来た人もかなりいた。説明も静かに、良く聞いていた。
（ｂ）出発　離れているバスの止まっている所まで歩いて行き、乗り込んだ。天気は曇りである。それほど暑い日でない。
２台のバスに分乗した。なお、参加者は１０人ずつにわけて、Ａ～Ｆの６グループを作った。また、６人のグループリーダーが同行し、各グループに一人のグループリーダーが付いて、指導した。ほかにセンターから４人が事務局として同行した。
出発は少し遅れた。バスの中で予定の説明や注意などがあった。事務局の挨拶や参加者などの紹介などがあり、不安げなみんなの顔が少しずつうちとけて来た。グループリーダーを中心とした働きも大きい。

（ｃ）日本鋼管（株）京浜製鉄所見学

見学目的「私たちの生活になくてはならない鉄が鉄鉱石や石炭などの原料からダイナミックに造られる様子を見学します。また、工場ではどんな省エネルギー、環境対策をしているか調べましょう。」
出発の関係で少し遅れて到着した。係の人からホールで映画「未来をつくる、海に浮かぶ製鉄所」が上映され、パンフレットなども用いて、工場の沿革と業務内容、省エネルギー、環境対策についての説明があった。専門用語も多く、少し難しく感じられた。
その後、ヘルメットをかぶり、バスに乗って圧延工場の近くまで行った。列になって工場内を見学した。圧延する現場では熱せられた鉄の放射熱を肌で感じた。また表面の汚れを落とすために吹きつけられる水の音と発生する水蒸気の量には圧倒させられた。参加者は説明を熱心に聞き入っていた。中には質問したり、メモをとっていた。その後、バスに乗ったままで、鉄鉱石や石炭の置場、溶鉱炉、船着き岸壁などの工場現場を説明を受けながら見学した。
見学後、別の映画が上映され、係の人からさらに説明を受けた。
最後にもうけられた質問の時間では次から次に熱心にたくさんの質問をしていた。内容は、例えば使われている水の種類と量、水の再利用、働いている人の数、停電の時のバックアップ体制などがあげられる。参加者の積極性と理科への好奇心を感じられた。
見る、聞く、触れるなどの五感を通しての体験学習は印象が強いと見学を終えて考えた。
（ｄ）昼食　１２時に説明のあったホールで全員が昼食をした。
（ｅ）出発　１２時３０分にバスに乗り、次の目的地に向かった。バスの中では各グループ内でお互いの紹介の続きが行なわれた。また、夜の学習会で発表のために、与えられている各グループのテーマを考えながら、見学するようにとの説明が行なわれた。

（ｆ）横浜市環境事業局鶴見工場見学（清掃工場）

見学目的「ゴミ処理施設を見学します。私たちの家から出されたゴミがどのように処理されているのか学習しましょう。また、ゴミ処理を通してのエネルギーや資源の有効な循環利用についても学習しましょう。」

工場には１２時５５分に着いた。最初、ホールにて係の人からビデオ上映とパンフレットを用いて鶴見工場のあらましと工場の特徴についての説明があった。ゴミを燃やすのは埋立地がない、燃やすことで量を減らせるからとのことであった。

その後、二班に分かれて工場のごみクレーン、投入ステージ、蒸気タービン発電機などの各場所を説明を受けながら見学した。工場の見学路は臭いもなく、とてもきれいな印象であった。その間、参加者は疑問に思った点を係に質問していた。

続いて、ホールに戻り、ビデオ上映とパンフレットを用いて、鶴見資源化センターの説明を受けた。少しでも多くの資源を有効にリサイクルさせている。その後、二班に分かれてセンターを見学した。粗大ゴミを破砕、せん断するのに用いるカッターがすり減っている実物展示には驚かされる。また、人によるガラスの分別過程の大変さは考えさせられた。

（ｇ）東京ガス（株）環境エネルギー館見学

見学目的「エネルギー・環境・都市をテーマにした体験学習の場です。見て触れて、参加する体験学習を通じて、環境やエネルギーについて学習しましょう。」

環境エネルギー館には予定通り到着した。ここまでの所少し日程がきついと思われたがみんなは疲れも感じさせず、元気である。さすがに参加者の若さを感じた。この頃になるとみんなも会話も盛んで、大分仲良くなったようである。この環境エネルギー館はいままでの施設と異なり、展示室、屋上ビオトープ、環境情報センター、休憩室があり、各自が自分の興味やペースで体験学習をしていた。なかには情報センターにて、グループリーダーと一緒に夜の学習会のために本やコンピューターで熱心に調べたりしていた参加者もいた。いろいろな点でここを見学地に加えたことはまとめる点からも良かったと思える。

（ｈ）宿泊先到着・夕食

ほぼ予定通り、旅館に着いた後、数人ずつに分かれた各自の部屋に荷物を置いた。その後、全員で大広間にて夕食をした。

（ｉ）学習会

学習会の進め方や考え方は次の通りである。

目的：見学を通じて得た知識を体系づける、印象に残ったことを思い起こすことなどにより、基礎知識としてエネルギー環境問題を身につけ、今後生きていく上で役立てられるようにする。また、発表を通じて、他人に説明することにより自分の分からないことを明確にする。

方法：グループごとに課題を与え、約１時間をかけて討議、まとめを行なう。その際に、見学先で得た知識、資料、副読本を利用する。なるべく課題を明確にさせ、取り組みやすいようにする。また、社会問題を考えさせることにより、好奇心を与える。この間、各グループリーダー、センター職員は相談、助言を行なう。

次に、まとめた内容に関して各グループに５分程度、皆で協力し、創意工夫して発表させる。グループ毎の発表後にセンター職員が講評を行なう。

講評：何が問題になっているか、どのような対策が考えられるかを繰り返し述べることで、知識をより確実なものとする。見学と結びつけて、その意味づけを図る。

上に述べた考え方に基づいて、具体的に参加者へ伝えた内容は次の通りである。

それぞれのグループに与えられたエネルギー環境問題について、１．原因（理由）、２．現状（影響）、３．今後の課題（対策）を図にして描いてください。

・見学した所で得た知識や教材を使って調べ、模造紙にまとめてください。
・各グループごとに発表してもらいます。発表する人は聞いている人に教えてあげるつもりで分かりやすく説明してください。
・わからないことは、グループリーダーやセンター職員に聞いてください。
・発表する人はどのように発表するのか、まえもってメモをしておくといいかもしれません。

各グループの課題

Ａグループ　地球の温暖化
Ｂグループ　酸性雨
Ｃグループ　ごみの埋立地の減少・逼迫
Ｄグループ　エネルギー消費の急激な増加
Ｅグループ　日本での原子力エネルギーの利用の拡大
Ｆグループ　新エネルギーの利用の拡大

学習会の結果

グループの討議は最初、手間取ったが、しだいに活発になり、熱心であった。まとめの作業もみんなで手分けして行なわれた。また、発表のやり方、手順も話し合い、練習までしていた。その結果、予定の時間には出来なくて１時間４５分位かかった。発表は真剣で、内容も充実して、バラエテイに富んで、聞いていて分かりやすかった。

センター職員が事前に準備していた講評のポイントを次に載せる。実際の講評はこれに沿う形で行なわれたが、時間が余りなかったためにその一部分を適宜用いたり、または省略された内容で手短に、簡単に行なわれた。

Ａグループ　地球の温暖化

原因　（化石）エネルギーの大量消費、経済発展とライフスタイルの変化

現状　産業革命以降に温暖化が急激に進んだ。ＩＰＣＣの予測によると２１世紀までに

１．４度～５．８度温暖化が進むといわれている。
　対策：国際的な取り組み（京都議定書）、国内での取り組み（産業、運輸、民生各分野での取り組みー省エネルギー、リサイクル）やエネルギー転換
　産業分野での省エネ、リサイクル、ＮＫＫでの取り組み

Ｂグループ　酸性雨
　原因　化石エネルギーの大量消費
　現状　酸性雨、酸性湖など
　　日本でも中国の工業化によって影響を受けている。（日本の酸性雨の３分の１は中国からのＳＯｘ、ＮＯｘが原因）
　対策　国際的な取り決めー長距離越境大気汚染条約（欧州）、東アジア酸性雨モニタリングネットワーク、環境保全技術の支援
　　国内ー脱硫・脱硝装置の発達
　　横浜火力発電所での脱硫・脱硝装置

Ｃグループ　ごみの埋立地の減少・逼迫
　原因　大量生産、大量消費、大量廃棄の社会システム
　現状　ごみの最終処分場の減少
　対策　循環型社会の形成が求められている。３Ｒ（ｒｅｄｕｃｅ，ｒｅｕｓｅ，ｒｅｃｙｃｌｅ）、個別リサイクル法の制定
　　家庭での取り組みーごみを減らす、分別収集
　　企業での取り組みー同上（ゼロ・エミッション、リサイクル）
　　行政の負担が大きい、拡大製造者責任の考え方の導入の必要
　　清掃局でのリサイクル、ＮＫＫでのリサイクルの取り組み

Ｄグループ　エネルギー消費の急激な増加
　原因　人口増加、経済発展
　現状　エネルギー資源の枯渇の懸念（化石エネルギーの可採年数）
　対策　エネルギーの多様化、ライフスタイルの見直し、経済社会システムの見直し（持続可能な社会経済システム）

Ｅグループ　日本での原子力エネルギーの利用の拡大
　理由　エネルギー消費の拡大、資源小国としての準国産エネルギーとしての期待、地球温暖化防止、発電コスト
　現状　日本の全発電量の約３割を担っている。
　課題　安全性の向上、国や事業者への信頼性の向上
　　福島第二発電所

Ｆグループ　新エネルギーの利用の拡大
　理由　無尽蔵のエネルギー源、国産エネルギーとしての期待、クリーンエネルギーとし

ての期待

現状　日本の１次エネルギー消費の１％程度、地域での補完的エネルギー源

課題　安定性、コスト

地球の温暖化では次の様なまとめの仕方が一例としてあげられる。

原因　エネルギーの大量消費→化石燃料の消費→二酸化炭素の増加

↓

地球温暖化

↓

影響　島国が海底に沈む→難民

生態系が変化→飢餓

伝染病が増加

対策　エネルギーを無駄に使わない等

全体の時間は講評、私のまとめを含めて、２時間３０分かかった。

熱心に討議、発表が行なわれたためもあり、終了時刻が予定の時刻より大分遅くなってしまった。この点については、次回の体験学習会を実施する上で、日程や見学場所と数、時間配分、進行の仕方を考えるなどが検討課題と思う。

最後のまとめとして、私が話した要旨は次である。

「地球環境の破壊が予想以上の速さで進んでいる。今年の夏の高温など温暖化の例がある。今すぐに環境対策を実施していかなければならない時期にきている。エネルギー環境は水や空気のように普段あまり意識していないが生活に不可欠で大切なものである。この環境体験学習会で色々な体験や学習をして、環境について理解を深め、考えて欲しい。

発表の内容は全体に優れていて、十分な検討の後が感じられて、みんな良かった。発表の形式も各グループが工夫をしていて、全員の協力しあう態度もとても良かった。異なった学校、学年の中学生が一緒に施設を見学して、宿泊して同じテーマで環境問題について話あう今回のような体験学習は普段の学校生活ではあまり経験する機会がなく、有意義であったと考える。今日の学習を明日以降の第２日目、３日目の発電所の見学やエネルギー環境の体験学習に生かし、つなげて行ってください。

また、この体験学習会で関心や興味を持った事を、今後更に自分で調べてみて下さい。環境問題の解決には実行が大切なので、自分で出来るみじかな事、ゴミの分別や電気の節電など出来る所から取り組んでいくことが必要です。」

３．おわりに

今回のエネルギー環境体験学習会には全体の３日間の日程の初日の一日に同行した。従って、この報告は第一日目の内容と結果に関するものである。

そこから思ったことは、異なった学校、学年の中学生が宿泊をともなったこの体験学習

会に参加し、エネルギーや環境問題についていろいろな体験をし、一緒に考え、話あったことは貴重であり、こういう機会はあまりないと思う。

今回のエネルギー環境問題の学習内容は多少難しく、学年によっては全ては理解出来なかったかもしれない。しかし、この経験は今後、エネルギー環境やその問題の解決を考えていく点で基礎となり、役立つと思う。そのような観点からこの体験学習会に参加することは有意義であると思う。

参考文献

１．岩倉三好　植物と人間についての環境教育、エネルギー環境教育ジャーナル、エネルギー環境教育情報センター、１９９５／７．Ｖｏｌ．６－Ｎｏ１
２．岩倉三好　人間と動物の関わり合いについての教育、エネルギー環境教育ジャーナル、エネルギー環境教育情報センター、１９９６／２．Ｖｏｌ．６－Ｎｏ４
３．岩倉三好　放射線についての環境教育、都生研会誌、東京都生物教育研究会、平成９年３月、第３３号、１５～１８頁
４．（岩倉三好）　「ＮＩＥ教育に新聞を」　ニュースの選択、毎日新聞、平成９年９月２７日朝刊４頁
５．岩倉三好　放送を取り入れた生物の授業ー生きもの地球紀行を視聴させてー、放送教育、日本放送教育協会、平成１０年５月、第５３巻２号、６６～６９頁
６．岩倉三好　メディアを組み合わせ、活用した生きもの探究、視聴覚教育、日本視聴覚教育協会、平成１０年３月、第５２巻３号、７６～７９頁
７．岩倉三好　放送と新聞を利用した生きもの探究、視聴覚教育、日本視聴覚教育協会、平成１０年８月、第５２巻８号、４４～４７頁
８．岩倉三好　新聞と放送を活用した環境学習、第２回視聴覚教育総合全国大会、東京大会、会場　工学院大学、平成１０年８月２８日、日本視聴覚教育協会・高等学校視聴覚教育研究会
９．岩倉三好　新聞を活用した環境教育、第９回東京都高等学校ＮＩＥ研究発表大会、会場　日本プレスセンター、平成１０年１１月２１日、東京都ＮＩＥ推進協議会・東京都高等学校新聞教材開発研究会
１０．岩倉三好　夏休みの中学生のためのエネルギー環境体験学習会に同行して　月刊ホームルーム　学事出版　２００１年１１月号　２６～２９頁

（2001年10月24日受理）

写真　学習会でのまとめ

写真　学習会での発表

編集委員会からのお知らせ

「放射線教育」別刷制度

放射線教育フォーラム発行の論文週「放射線教育」では，今回発行の Vol. 5 より，著者に 30 部の表紙付き別刷を無料で提供いたします。広く放射線教育に有益であると考えられる内容の原稿をお寄せください。編集委員会で審査の上，採用の可否を決めます。投稿規程は巻末のページをご覧ください。

著者へのお願い

つきましては別刷作成の都合上，原稿はできるだけ偶数ページにまとめてくださるようにご協力をお願いいたします。各論文が奇数ページから始まり，偶数ページで終わることになると好都合です。電子メールによる原稿提出またはフロッピーディスク付きでご提出された原稿は，こちらでページ数についての多少の調整をさせていただくことがありますのでご留意ください。

放射線教育 Radiation Education
Vol. 5, No. 1, p. 21—24 (2001)

放射線安全管理のトリアージ

加藤　和明
茨城県立医療大学・放射線技術科学科/同大学院・放射線技術科学専攻
〒300-0394　茨城県稲敷郡阿見町阿見 4669-2

[要旨] 国民を放射線の望ましくない影響から守るために国が採っている方策は、諸外国同様、放射線の使用を規制することではなく、特定の放射線源の使用を規制することである。これら特定線源の齎す放射線被曝への現行管理基準は、言って見れば、極めて高質の生活維持を目指すものであり、平和を前提としている。事故やテロ・戦争、あるいは自然の齎す災害などでこれら放射線源の健全性維持が損なわれたとき、放射線に限らず色々のリスク要因が顕在化したり齎すリスクの値を変える。リスク要因の間の trade-off が複雑に変化するので、放射線安全管理の具体的内容もこのような非常時には重要性の順位が平和時のそれとは大きく異なる可能性がある。放射線施設の管理者は勿論、一般国民も、緊急時のトリアージ（選択順位）を平和なときに検討しておく必要がある。
keywords: 放射線施設、災害、安全管理、トリアージ

１．はじめに

医療の世界でトリアージという言葉が使われることがある。戦時の野戦病院や大規模の災害発生時の救急病院で、治療の処理能力を大幅に上回る患者が殺到したとき、治療効果が最大になるように患者を分類し処置の順番を付けることである。triage というのはフランス語で「選別」とか「仕分け」という意味である。

放射線を使用する施設では、放射線を積極的に利用するものであれ、副次的に放射線の発生を伴うものであれ、放射線の安全管理が必要である。そのためのシステムは、通常の使用形態を前提として設計され運用される。しかし、放射線の安全管理は、事故や災害が発生した時にも必要であり、その際に必要となる項目や重要性の順位は、重複するものもあるけれども、平常時のそれとは一般的に異なっている。時間的制約の下で諸々の判断を下さなければならないというのは、実学である放射線安全管理の特質であるが、緊急時に置いてはこの制約が平常時のそれとは比較にならないほど厳しくなる。

これまで、原子力施設等の大規模放射線施設では、事故は起きない、起こさない、ことを前提に、使用の認可がなされ、また呼応して、放射線安全管理のシステムも平常時を主たる対象に設計されて来た。しかし、1986 年のチェルノブイリ原発事故や 1999 年の JCO 臨界事故により、世間のいわゆる「安全神話」は崩壊し、放射線安全管理システムは、ICRP のいう潜在被曝をも対象に組み込む必要性のあることが強く認識されるに至った。このような背景から、RI・加速器等の利用施設を含めた大型放射線施設の、災害発生時等の非常時における放射線安全管理のあり方を検討してみる。

２．基本的人権としての便益追及とリスク回避

人を含み、およそ生命を有するもの、すなわち生物というものにとっては、その生命を（失わず）維持することが、他の全てに優先する最重要事であり、生物は、理性と本能の

働きを駆使して生命の維持を図る。我々は生の営みを続けるに際し、様々の“意思決定”をしつつ行動しているが、何れの行動にも、必ず何がしかの便益（benefit）とリスク（risk）が付随する。ここでは簡単に、便益とは生の営みにとって望ましいこと、リスクとは生の営みにとって好ましくないこと、としておく。便益もリスクも、未来に係ることであり、一般に不確実性・不確定性を伴うのが特徴である。

さて、我々がある行為・行動をとるのは、それが何らかの便益を齎すと期待するからである。その際、付随して、関連する様々のリスク源の齎すリスクが増減し、便益とリスクの間に様々の相補的関係、trade-off を生ずる。リスクの減少は一種の便益に他ならず、また期待する便益の可能性の消滅もしくは減少は一種のリスクである。便益の追及とリスクの回避は本能の要求するところのものであり、基本的人権の一つといえる。

３．平常時と緊急時における放射線防護の方策と管理基準

事故や災害が発生し、平常時の管理目標が保持不能となったとき、これを緊急時と呼ぶことにする。放射線防護でリスク管理の対象としているものと、他のリスク要因との相補関係は平常時と緊急時では大幅に変化するのが通例であり、そのときには管理対象間の重要性の順位も大きく変わる。

放射線施設における平常時の放射線安全管理は、□．放射線源の健全性維持、□．施設敷地内に存在する全ての人についての被曝線量の低減化と限度内抑制、□．施設敷地内外の環境保全、□．（一定限度を越える）放射性物質の管理下保持、の４項目にその内容を大別できる。緊急の事態は、何らかの理由で□□の管理目標が達成できなくなって出現するものであり、□や□の破れはそれに付随する結果として生起することが多い。

平常時における放射線防護の目標は、職業人、一般人の別を問わず、確定的影響については完全阻止、確率的影響についてはそれに付随するリスクの限度内抑制である。後者の限度は、職業人と一般人それぞれ個別に定められている。前者については共通の限度値として良い筈であるが、法令はこれも別立てとしている。緊急時には、被曝の管理対象がより限定的となり、その管理基準も別のものが用意されている。

４．緊急時における放射線安全管理項目の優先順位と管理の目標

平常時というのは非日常的なリスク要因のない状態であり、存在するリスク要因への対応が静的・安定的に採られている状態といえる。従って、平常時におけるリスク管理というのは、高質の生活維持という性格が強いものとなる。実際、平常時の放射線安全管理においては、その目標が確定的影響の完全阻止と確率的影響の発症に係るリスクの一定限度内抑制とされているにも拘らず、実質的に後者のみが目標とされ、しかも管理目標値は低ければ低いほど良いとされている。つまり、平常時においては急性の死に対するリスク対策を優先し、それへの対応が採り切れていることを前提に、緩慢の死に対するリスクの低減化を日常的に図っているのだといえる。

緊急時におけるリスク管理も、急性死の回避を最優先とするのが自然であり、合理的であると考えられる。従って、この視点から、緊急時に考えられるリスク要因の大きさ、リスク削減策の技術的可能性と経済的効果費を事前に評価し、検討に割く時間を極力節減することが望ましい。緊急時には、平常時にもまして時間との戦いが厳しくなるからである。緊急時には、「高質の生活維持」の希求は一時的に保留されるべきなのである。

健全性の損なわれた線源や事故・災害等により新たに生じた線源に対する“健全性”確

保も重要であるが、原因や様態など依存因子が多く、一般に多大の時間を要する仕事となる。そこで人々を“線源”から隔離し、先ずは過剰被曝による急性死の数の最小化に努めることが大切である。自力で危険区域から脱出・避難できない人々を救出することも含まれる。既に、不可避的に被曝してしまった者の被曝線量を下げることは不可能であるが、生命を保っているものについては救命のための治療やホスピスの仕事が続く。体内に取り込んでしまった放射性物質を人為的に排泄させることは特別の場合を除き困難もしくは不可能なことであるが、僅かにでも可能性がある場合にはその努力も必要であるが、この場合も活用できる人的資源の量、技術的可能性、期待できる効果を総合的に判断してトリアージすることが求められる。このとき、被曝線量の推定・評価が大変に重要となる。

平常時には、急性死以外の確定的影響についても、絶対阻止が目標とされているが、緊急時には、一時苦痛を伴うけれど、適切な治療を受けることにより治癒可能なものについては、緊急時の急性死最小化対策上不可欠なものは、許されて良いのではないかと考える。この意味で、現行の法体系が緊急時の被曝線量管理基準を、確率的影響に対する管理用の線量である実効線量で表現しているのは問題である。先ずは急性死防止を目標とし、そのための管理に適した線量を使用すべきである。また、このような作業に社会として最もその活動を期待している消防隊員や自衛隊員について、放射線防護にかかる現行法では何の手立ても施して居らず、これも大きな問題である。

既に述べたように、一般人への、確率的影響に伴う寄与リスク最小化対策は、重要性において上記対策を凌ぐものではない。緊急時には、平常時に存在しない新種のリスク源が複数出現しているのが普通であり、放射線被曝に伴うリスクの、他リスク源の齎すリスクとの trade-off 関係は大幅に異ったり、新しい関係が出現している可能性が高い。放射線安全管理システムを平常時用と緊急時用に分けざるを得ない理由はここに在る。「放射線の被曝量は少なければ少ないほど良い」といった考え方は、少なくとも緊急時には放棄しなければならない。さもなければ、小さなリスクを避けるため少なからぬ時間と労力・経費を掛けた挙句、別のリスク要因から多大のリスクを受けることになりかねないからである。一般人に対する年限度（１mSv）は、緊急時に置いては、棚上げしてよいことを関係者に周知する必要がある。これに関連しての環境保全、すなわち、一般人の生活空間の放射線レベル・放射性汚染の監視についても同様である。繰り返しになるが、緊急時には質の高い生活の持続は諦めねばならないのである。

５．おわりに

放射線施設においても事故や災害は絶対的に避け得ないものであるとの認識に立つ必要があり、法の整備も含め、緊急時用放射線安全管理システムの構築を急がねばならない。それには、平常時用のシステム構築用にも増して、安全の哲学と安全の対策が必要となる。逆説的であるが、緊急時の対策を真剣に考察することにより、これまで必ずしも十分でないといわれて来た、平常時のシステム設計・運用に必要な「安全哲学」の考察も進むであろう。

JCO 事故の後、国の方策の改善が検討され、新たな法令(原子力防護法)もつくられて改革が進められたわけであるが、件の事故が核燃料を取扱う施設であったため、主な対象が原子炉及びこれに関連する核燃料施設に限定され、国全体の放射線安全対策の視点から万全のものとなっていない。

現状においては現実問題として原子力との付き合いを止めることができないのであるが,

仮にこの付き合いを止めたとしても我々は放射線との付き合いは止められない。そうであるにも拘わらず、現在国が持っている「国民を放射線の害から守るための方策」は歴史的事情から原子力の傘の下につくられている。

国の方策は基本に立戻って見直すべきかと考える。

6．謝辞

草稿に目を通し貴重なご意見を下さった木村昌弘、中野昭二郎の両氏に感謝申し上げる。

（2002年2月8日受理）

放射線教育 Radiation Education
Vol. 5, No. 1, p. 25—26 (2001)

全国民に放射線の個人線量計を

加藤　和明
茨城県立医療大学・放射線技術科学科/同大学院・放射線技術科学専攻
〒300-0394　茨城県稲敷郡阿見町阿見 4669-2

[要約]：大雑把に言って、国民が全体として受けている放射線の被曝量の約 2/3 は医療行為に伴うもの（医療被曝）であり、約 1/3 は自然界にある放射線からの被曝であり、国が使用を規制している特定の放射線源から受ける被曝量は 1%に満たない。JCO の臨界事故で、1 ﾐﾘｼｰﾍﾞﾙﾄという線量値が関心を集めたが、その意味するところを正しく理解している人は少ないようである。1 ﾐﾘｼｰﾍﾞﾙﾄの実効線量というのは、上記特定放射線源の発する放射線への公衆被曝年間管理基準値である。放射線を必要以上に怖がることを避けるには、日常の生活において、被曝管理の行われていない放射線にどれだけ身をさらしているかを、身をもって知ることが役立つ。そこで、積算被曝線量を記憶している情報を破壊することなく随時読み出すことの出来る個人線量計を、希望する国民に提供する仕組みの構築を提案する。

先人の努力と苦労の上にこれまで築き上げてきた文化・文明を慈しみ、現在の生活の質を曲がりなりにも維持して生の営みを続けようとすれば、食料とエネルギー資源の枯渇を恐れなければならない。原子力の平和利用は文化・文明の発展に寄与して来ただけでなく、高度に発展した文明生活の維持にも大きく貢献している。電力の約 4 割を原子力に頼っている現状を考えれば、実際問題として、少なくとも当面原子力との付合いなしに私たちの生活は成り立たない。

ところが、世の中には「ﾆｭｰｸﾘｱﾌｫﾋﾞｱ（原子力嫌悪症）」とか「ﾚｨﾃﾞｨｵﾌｫﾋﾞｱ（放射線嫌悪症）」と呼ばれる、一種のｲｱﾄﾛｹﾞﾆｯｸ（医原病）が存在する。人々の原子力に対する怖れはつまるところ放射線被曝への怖れであるので、両者の根は同じである。JCO 臨界事故（平成 11 年 9 月）の際、住民が受けた被曝線量の値は身体に即発性の、目に見えるような影響は出るはずのないものであったが、実際にはその住民の中に健康を損ねた者が出た。思いこみによる心身症である。

放射線が人体に及ぼす害には、血球の数が変化したり、皮膚に火傷のような傷害が現れたり、目の水晶体が濁る（白内障）といった目に見えるものと、がんに罹る確率や子孫に遺伝障害を齎す確率がといった未来に係る不確実で目に見えないものの２種類あり、前者、つまり即発性の目に見える影響を確定的影響、後者を確率的影響という。確定的影響は、光や熱の場合と同じく、放射線の量がある値（閾値）を越えなければ絶対に現れることがなく、後者も（国際放射線防護委員会 ICRP が創り出し勧告している放射線防護のシステムではどんな微量の放射線でも何がしかの影響を齎すことを仮定しているが）実際上は放射線の量に閾値が存在するといって良い。

現在、国（政府）が国民を放射線の害から守るために採っている方策は、結果として ICRP が創り出し勧告しているものに準拠しているが、それは、放射線そのものの使用ではなく、放射線を出す源の使用を規制することとしており、これらの源から放出される放射線の被曝量を制限するというものである。その目標とするところは、確定的影響については完全

阻止、確率的影響についてはそれの齎すリスクの限度内抑制であり、線量の制限値として考慮する影響ごとに、職業人向けと一般人向けの２種類が用意されている。職業人の放射線被曝量は個人線量計で個別に計量管理され、管理基準を超えることのないように監視されることで安全が担保されるが、一般人については、環境が保全の基準を逸脱しないことを監視することで安全の担保がなされる仕組みとなっている。実は、誰しも、日常の生活において、これら使用を規制されている放射線源と関りのない放射線にも身を曝し続けているのであるが、上記の管理対象放射線の計量にはこれらを含めないこととしていて、しかもその量は、通常、一般人に対する管理基準値より高いのである。計量に含められないものの代表は、医療行為に伴うものと自然にある放射線への被曝であるが、国民全体が実際に受けている被曝の内、計量対象とされているものの割合は 1%にはるか及ばないものである。

JCO の事故が起きたとき、放射線の量として、一般人に対する年限度である１ﾐﾘｼｰﾍﾞﾙﾄという値が脚光を浴びた。政府は、受けた放射線の量がこの値を越えたと推定された者に「被ばく者」のレッテルを貼り、経費を負担して毎年健康診断を行っているし、事故の後つくられた「原子力災害特別措置法」では、原子力施設の事故等で周辺の住民に 0.5 ﾐﾘｼｰﾍﾞﾙﾄを越える被曝の恐れがあるときには内閣総理大臣が「緊急事態」の宣言を発することが決められている。

１ﾐﾘｼｰﾍﾞﾙﾄという大きさの線量は、法的には「一般公衆に対する（特定線源からの放射線）被曝管理の基準値としての年限度」という意味を持つが、学術的意味合いとしては「（確定的影響は勿論）確率的影響についても閾値未満のもの」であり、この事実が国民に正しく理解されていないことは国益を大いに損ねる結果を招いている。

放射線は怖がらな過ぎても困るが怖がり過ぎても困るという意味で適切に怖がる必要があるが、放射線が五感に感じない上に、放射線との付合いが日常の生活で意識されることがないこともあって、線量の概念やその単位の意味するところが理解され難く、これが上記の問題を産み出している大きな一つの要因となっている。

このような状況を打破するため、使用を規制している放射線源に付随する被曝管理とは別に、希望する国民が誰でも、そしていつでも、自然界にある放射線等への被曝を含め、実際に受けたそれまでの放射線被曝量を、簡単に知ることができるよう国が手を貸すことを提案したい。規制線源の使用に伴って測定されている個人被曝線量の測定は、今日主として専門業者のサービスによって行われて居り、年間約 50 万件の依頼がある。経費は、線量計貸与、月１回の測定で 1k¥/ 回 程度である。個人被曝線量の測定は、写真フイルムを転用した方式が昨年まで主流を占めていたが、現在は、小型で安価な上、感度も優れて長期間使用にたえる堅固なガラス線量計などに取って代わられている。ガラス線量計はフィルム方式のものと違って、積算被曝線量の情報を破壊することなく高い信頼度で繰り返し読みとることが可能であるのが、大きな長所となっている。国が、希望する国民に、貸与するなり経費の全額ないしは一部を負担することで、線量計を持たせ、自然放射線等の寄与をも含め実際にどれくらいの放射線を身に浴びているかを知って貰うのである。読取りに要する経費は個人負担でもよい。因みに、2002 年度の国の予算案では「原子力防災対策」に 96.4 億円、（原子力政策関連での）「広報・立地」に 1251.4 億円が計上されている。10 億円の予算で年間１万人程度のサービスが可能となり、公共投資による景気浮揚策としての効果も期待できるという余得がある。

(2002 年 2 月 8 日受理)

放射線教育 Radiation Education
Vol. 5, No. 1, p. 27—34 (2001)

新聞報道にみる原子力：予備的調査

笹 川 澄 子
（財）環境科学技術研究所
（〒039-3212 青森県上北郡六ヶ所村　e-mail: ssgw@ies.or.jp）

［要　約］
2001 年 4 月から 12 月に青森県内で配布された新聞のうち入手できた朝日、東奥日報（朝刊）およびデーリー東北の 3 紙に掲載された原子力関連の記事を収集した。それらを月毎に集計した結果、プルサーマル導入の是非を問う住民投票が一時期の記事件数に反映していたものの、ほぼ一定して推移していた。記事の内容を核燃料サイクル施設に関係するものなど数種のカテゴリーを設定して分類し月別に集計することを試みた。その結果、カテゴリー別の記事の件数は、住民投票はもちろん、原子力事故や自治体首長の選挙など社会的政治的な出来事を反映して推移した。これらの結果は予想されたが、記事の内容をデータベース化し、原子力に関わる広報のあり方を考える上での材料にしたいと考えている。

はじめに

著者の所属する研究所では、朝日などの全国紙、東奥日報などの地方紙、電気新聞などの業界紙を購読し、掲載された原子力関連記事や地元六ヶ所村関連記事を掲示し所員に供覧している。それらを目にする度、記事の数の多さと内容の多様さに驚いてきた。平成 13 年 4 月に新たに広報・研究情報室（1）が発足し、著者はそこに配属され広報を担当する立場となった。そこで、あらためて原子力関連の記事の数や内容等を一度分析して実態を確認したいと考えた。ここでは、短期間ではあるが予備的な調査の結果を報告し、先輩諸氏の批判を仰ぐとともにご指導を賜りたい。

方　法

青森県内で配布された新聞で、全国紙の朝日新聞、青森県の地方紙の東奥日報、デーリー東北を調査対象とした。全国紙の読売新聞や毎日新聞などは入手できなかった期間があるため、そして青森県の地方紙として弘前域を主な配布範囲としている陸奥新報と東奥日報の夕刊は入手できなかった時期があるため対象に入れなかった。

平成 13 年 4 月 1 日から 12 月 31 日までの上記新聞に掲載された原子力関連記事を可能な限り収集した。それらを概観し以下の 7 つのカテゴリーに分類した、すなわち、六ヶ所村に立地する日本原燃株式会社に関係するもの（JNFL と記す。以下、カッコ内文言を同様に分類名とする）、むつ市の原子力船「むつ」および使用済み核燃料中間貯蔵施設に関係するもの（Mutsu）、青森県が誘致運動している国際熱核融合実験炉に関係するもの（ITER）、その他青森県内および国内外の原子力問題に関係するもの（Other(I+M)）、原子力に反対する政治政党や市民グループの活動に関係するもの（Anti）、特集ものや記者、評論家あるいは専門家の論評記事、科学記事など（CR）、新潟県刈羽村と三重県海山町の住民投票に関

係するもの（Kariwa+Miyama）である。なお、この予備的調査では、ITER 記事を原子力関連記事とすることや分類方法に個人的趣向が入っていること等、いくつかの問題がある。

結果と考察

平成 13 年 4 月および 11 月の記事をリストにして示した（表 1、2）。上記分類を問わず、原子力関連記事の総件数を新聞別、月別に集計し図に表した（図 1）。記事の内容を上記カテゴリーに分類し月別に集計した（図 2）。

6 月は総数 200 件以上となり突出した（図 1）。これは 5 月下旬に新潟県刈羽村で行われたプルサーマル導入の是非を問う住民投票に関連する記事が多かったことを反映している。8 月は夏休み、12 月は年末や新宮様誕生などがあって少なかったのかも知れない。4、5、7、9、10、11 月はほぼ同レベルの記事件数であった。新聞別にみても顕著な違いはみられない。全国紙よりも地方紙の方が掲載数が多い傾向があって、これは核燃料サイクル施設立地等を抱える県としては当然といえるかも知れない。記事の内容別にみると（図 2）、9 月は 30 日に行われたむつ市長選挙とそれに直結する使用済み核燃料中間貯蔵施設誘致を巡る記事、11 日朝（日本時間）ニューヨークで起きた同時多発テロ事件につながる世界の核施設の危機管理に関連する記事が多かった。10 月もそれらを引きずっていた。11 月は浜岡原発事故の記事や三重県海山町の原子力発電所誘致を巡る住民投票の記事が多かった。六ヶ所村にある核燃料サイクル施設関連は事故を報じる記事と実施事業に伴う定例的な情報公開記事が同レベルで通年を推移した。原子力に反対するグループの行動を報じる記事は当該出来事を報じる記事に付随して散見された。

その他、同じ事柄でも見出しの記述が新聞によって違い、例えば「核燃料」あるいは「燃料」と「核物質」、「MOX 加工」と「MOX 燃料加工」、「MOX 加工場」と「MOX 加工工場」、「再処理施設」と「再処理工場」、「廃棄物」と「放射性廃棄物」、「六ヶ所村」と「六ヶ所」、「原発解体」と「商用原発解体」、「原船むつ」と「旧原子力船むつ」などがあった。新聞各紙がそれぞれの特徴をだす工夫と受けとめているが、紛らわしさを感じた。

原子力関連記事の数と内容が事故、住民投票あるいは自治体首長選挙など社会的政治的な出来事に呼応して変化するのは、その度に議論される原子力利用に関わる「安全性」や「経済性」等の問題が、「科学技術」上の問題というよりもむしろ社会的経済的な問題として情報を発信する側も受け取る側も認識していることを反映しているからにほかならないだろう。しかし、技術の「安全性」に関する問題は、原子力に限らず、科学的にあるいは技術的に評価する性質のものである。このような点を考えると、議論の種となる問題を読者が判断しうる客観的な評価あるいは科学的技術的な評価を提供することも新聞報道の責務になると考えられる。

一方、平成 13 年 5 月に行われた新潟県刈羽村の住民投票の結果は、従来の原子力広報のやり方に大きな疑問を投げかけた。広報あるいは放射線教育の本来の役割の一つは、新聞などのメディアがもたらす様々な情報を正しく評価し取捨選択すること、つまり「メディアリテラシー」という考えを地域住民を始め広く一般公衆に導きその能力を醸成していくことではないだろうか。これはメディアの特質や影響力に関する知識を習得することも含み、様々な研究や試行錯誤も要求される息の長い課題になるだろう。担当者にはそれなりの能力さらには資質といったものも要求されてくるかも知れない。21 世紀の広報あるい

は放射線教育は、科学リテラシーを一方の、メディアリテラシーをもう一方とする両輪に位置づけ、敢えてこの課題に挑戦し、その方向に自らの活動の価値を見いだすことが大切ではないだろうか。

今回の結果は予想されるものであり、記事の収集と分類に不慣れなことなどもあって詳細な分析に至らなかった。しかし今後の課題として、多種多様な記事をデータベース化し、原子力に関わる広報のあり方を考える上での材料にできればよいと考えている。先輩諸氏の批判を仰ぐとともにご指導を賜れれば幸甚である。

参考資料

1) 笹川澄子「広報・研究情報室」発足、放射線教育フォーラムニュースレター、No.20、6頁、2001.7

(2002年2月12日受理)

図1　青森県内で配布された新聞に掲載の原子力関連記事の数(2001年)

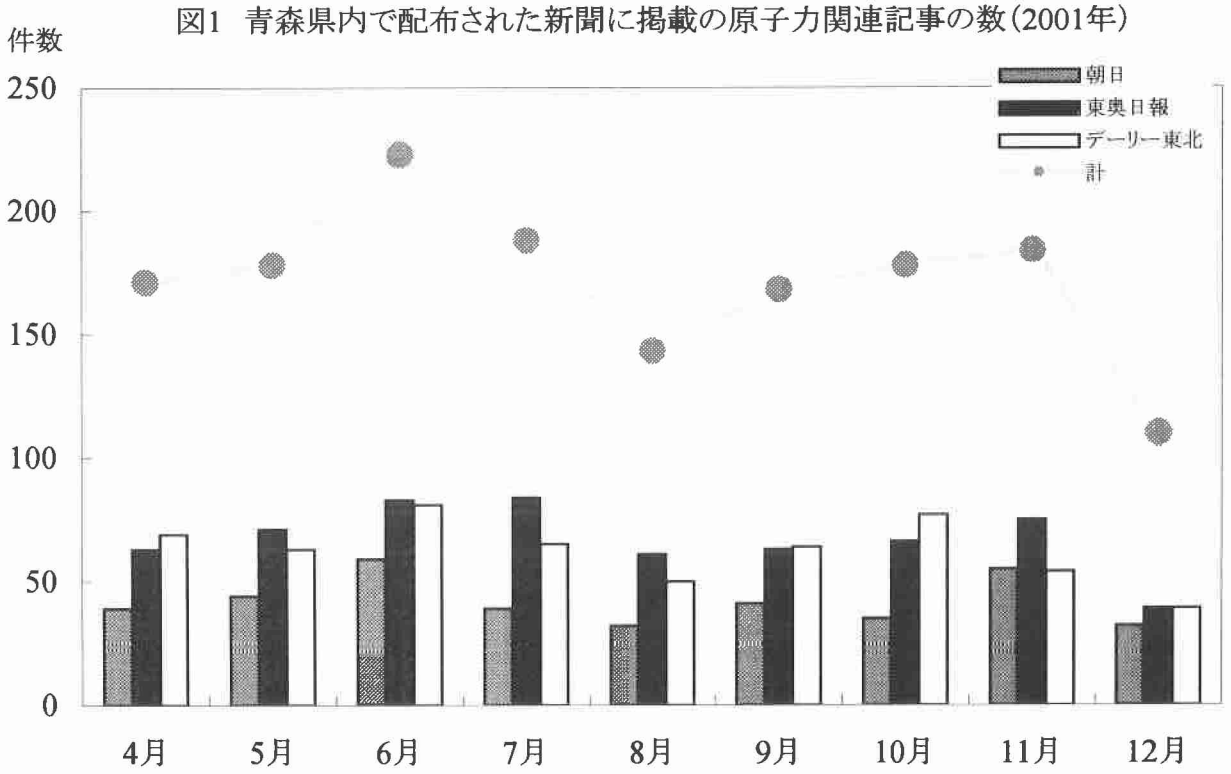


図2　青森県内で配布された新聞に掲載の記事の内容別件数(2001年)

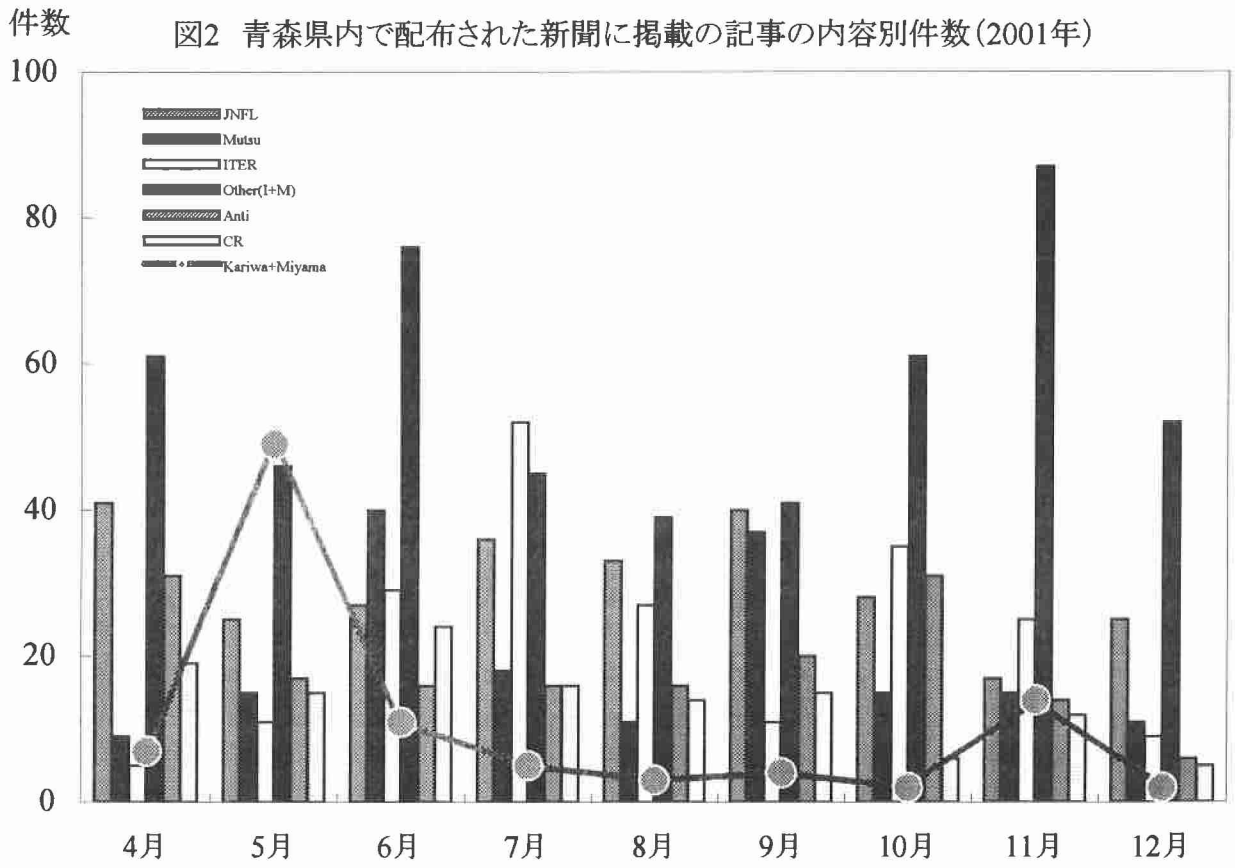


表1. 青森県内で配布された新聞に掲載の原子力関連記事：2001年4月

表1. 青森県内で配布された新聞に掲載の原子力関連記事：2001年4月

新聞	発行日	頁	面	見出し
注意：東奥；東奥日報、デリ；デーリー東北				
東奥	2	5		中間貯蔵施設に反対市民団体が講演会．5日・大畑町
朝日	3	16	科学	核廃棄物返送．独へ3年ぶり
デリ	3	1		原燃マシナリー業務を大幅縮小．遠心分離機開発から撤退
デリ	3	2		ITER国内誘致に意欲．笹川科技担当相
デリ	3	7	検証・むつ小川原の30年	第1部破たんした夢(31) 見直し論争．バックギアは許されぬ．開発の空中分解恐れた県
デリ	3	18		福島第一原発定期検査へ．MOX燃料利用を見送り
東奥	3	3		ITERの誘致に意欲．笹川科学技術担当相
東奥	3	3		原燃の完全子会社に．「遠心分離機」から撤退．マシナリー
東奥	3	3		女川原発3号機へ新燃料取り付け開始
デリ	4	2		プルサーマル見守る．並行在来線運賃改定3セク設立前に．木村知事
デリ	4	20		核燃基地とわずか13キロ．反核燃団体「心配が現実に」
デリ	4	20		ITERの意見募集
デリ	4	20		MOX燃料の取り出し公開．東電柏崎刈羽原発
東奥	5	2		県防災計画修正案に民意反映を求め抗議．社民県連など
東奥	5	18		核燃建設中止求め県など三者に抗議文．原子力資料情報室
朝日	6	4	総合	原発設備利用が高率
東奥	6	3		「立地調査説明会を」むつ市の中間貯蔵施設・大畑町長が要望へ
東奥	7	27		F16墜落事故受け核燃の白紙撤回要求．1万人訴訟原告団
東奥	8	4	あおもり目曜エコノミー	あおもり経済．この人に聞く53回．電気事業変遷の行方は。分散供給の時代到来か
朝日	10	31	青森	核燃料協議会開催を要請．知事、科技庁担当者に
朝日	10	31	青森	全国から千人．反核燃で集会．青森
デリ	10	2		ITER誘致を要請．知事と六ヶ所村長 来県の科技相に
デリ	10	2		高レベル廃棄物最終処分地 15道県が受け入れ拒否．市民団体調査
デリ	10	2		使用済み核燃料搬入凍結を要請．青森県に福島の市民団体
デリ	10	2		反核燃団体が青森で集会
デリ	10	7	検証・むつ小川原の30年	第1部破たんした夢(32) もう一つの開発．振り回された小川原湖．淡水化は白紙、治水も停滞
東奥	10	2		原発反対運動を継続．県反核実行委青森で集会
東奥	10	2		高レベル処分受け入れ．本県など15道府県拒否．市民団体アンケート結果公表
東奥	10	2		使用済み核燃料受け入れ凍結を．福島の市民団体県に要請書提出
東奥	10	2		中間貯蔵誘致許すな．下北反核実行委むつで集会
朝日	11	34	第2社会	米核融合施設に部品納入．HOYAに抗議．反核団体
東奥	11	2		プルトニウム単体粉末、MOX原料として考慮．六ヶ所村への加工場立地計画・原子力安全委「現在は白紙」議論も
朝日	12	13	経済	かつては「聖域」だった・・・が原子力産業に効率化の波．軸足移すメーカー重電よりIT
デリ	12	1	2001むつ小川原	動き出すクリスタルバレイ．1．構想提言．安田私案が急展開．液晶関連業種を照準に
デリ	12	1		柏崎刈羽原発も見送り決める．プルサーマル計画で東電
デリ	12	1		送風機が一時停止．六ヶ所の再処理工場電源切り替えミスで
東奥	12	2		「MOX加工事業従来通り進める」プルサーマル柏崎刈羽見送り・原燃が見解．「計画断念とは聞いていない」平山新潟県知事
東奥	12	2		使用済み核燃料搬入作業を延期．六ヶ所施設トラブル・知事立ち入り
東奥	12	2		むつ中間貯蔵施設で町が来月10日説明会．大畑
東奥	12	17	家庭・暮らし	県内・しなやかに転機を生きる(15) 核燃の村をとり続けて15年．「現場にいたい」と転居
東奥	12	17		六ヶ所・使用済み燃料貯蔵施設・送風機が一時停止・操作ミス
朝日	13	27	青森	「遺憾」「早い解決を」六ヶ所村長・立地村の苦渋のぞく
朝日	13	27	青森	再発防止に手順改訂．事故後総点検で原燃

表1. 青森県内で配布された新聞に掲載の原子力関連記事：2001年4月

新聞	発行日	頁	面	見出し
注意：東奥；東奥日報、デリ；デーリー東北				
朝日	13	27	青森	視察中にもトラブル．知事、核燃料搬入「待った」．「結論」は持ち越し．原燃が対応に追われる
朝日	13	27	青森	独自調査を県に求める．社民県連・平和労組
朝日	13	27	青森	輸送容器の安全は確認
朝日	13	30	第2社会	使用済み核燃、搬入延期．青森・六ヶ所村・再処理施設の停電で
デリ	13	1		使用済み核燃料・本格搬入初の延期．再処理工場・新たなトラブル判明．輸送船接岸・知事、きょう可否判断
デリ	13	3	2001むつ小川原	動き出すクリスタルバレイ(2) 構想の原点．立地適性ある液晶．100ヘクタールに10-15企業誘致
デリ	13	22		どうなる核物質搬入．日程見通し立たず．機器トラブルで延期は初．原燃・操作マニュアル見直し．再発防止策を県に報告
デリ	13	22		どうなる核物質搬入．搬入中止申し入れ．社民が県に
デリ	13	23		安全性に大きな不安．原燃トラブル復旧時期は不透明．視察の知事、強い不満．「原因を明確に」と厳しい指摘・六ヶ所村長
東奥	13	1		搬入きょう判断．六ヶ所・使用済み核燃料貯蔵施設・発電機も変調、修復へ．知事、安全性に疑問
東奥	13	2		使用済み核燃料・相次ぐ施設のトラブル．荷揚げ初の持ち越し
東奥	13	2		使用済み核燃料搬入県に中止を申し入れ．社民県連と県平和労組
東奥	13	21		放射能漏れ想定・陸自が事故訓練．山形
朝日	14	27	青森	「安全性疑問」70人抗議集会．県庁前で反核実行委など
朝日	14	27	青森	知事「安全性確認された」．核燃搬入、原燃に許可．管理徹底を要請．国へ監督強化申し入れ
朝日	14	27	青森	日没挟み陸送作業．反対派静観
デリ	14	1		使用済み核燃料1日遅れ搬入終了．「安全性確認された」知事、輸送船接岸を許可．再処理工場機器故障・原因は特定できず
デリ	14	2		MOX燃料合格証を交付．安全・保安院が柏崎刈羽原発で
デリ	14	2	解説	県民と意識のズレ露呈．送風機停止事後・深刻な事態に直結も
デリ	14	2		使用済み核燃料夕方までに搬入．六ヶ所
デリ	14	2		搬入中止求め県庁前で集会．社民青森県連
デリ	14	3	2001むつ小川原	動き出すクリスタルバレイ(3) 貸工場制度．初期投資を大幅減．県の損失補償に課題も
東奥	14	1		使用済み核燃料・六ヶ所・貯蔵施設に搬入．安全性確認、知事が許可．相次ぐミス 深まる疑念
東奥	14	2		「プルサーマル実施は厳しい」新潟県知事
東奥	14	2		大間原発準備工事を中断．電発・用地買収めど立たず
東奥	14	2		東電・柏崎刈羽原発MOX燃料に合格証．原子力安全・保安院
東奥	14	2		搬入中止申し入れ．原燃に社民県連など
東奥	14	23		多くの写真が語る核燃・原発の是非．青森で作品展
朝日	15	29	青森	大間原発準備工事を中断．用地買収優先が理由
デリ	15	3	2001むつ小川原	動き出すクリスタルバレイ(4) 液晶の将来性．4年後には10億個に．新技術台頭や景気も影響
デリ	15	5	時評	再処理工場．揺らぐ安全性と位置づけ
東奥	15	2		中間貯蔵施設反対、21日、住民の集い、むつ
東奥	17	2		分離建屋建設に従事．六ヶ所・再処理工場JCOの出向社員
東奥	17	2		貯蔵施設トラブルで再処理工場中止要請．県などに市民団体
東奥	17	2		木村知事、日本原研のITER施設を視察．茨城・那珂
東奥	17	3		原燃がレク施設建設．六ヶ所ファームランド構想の一部．事業費30億円、03年開業
朝日	18	27	青森	阻止実行委が県に抗議文．核燃施設トラブル
デリ	18	1		再処理工場20日から通水作動試験．機器健全性などチェック
デリ	18	2		20日掘削調査を開始．東電．中間貯蔵施設立地で．むつ市関根浜
デリ	18	2		柏崎刈羽原発で定期検査開始．MOX燃料導入は未定
デリ	18	2		使用済み燃料搬入で抗議文．県と原燃に核燃料廃棄物阻止実行委
デリ	18	3	2001むつ小川原	動き出すクリスタルバレイ(7) 居住環境．周辺で誘致の動きも．六ヶ所は独自に方向模索
東奥	18	2		県と日本原燃に抗議．核燃料廃棄物搬入阻止実行委

表1. 青森県内で配布された新聞に掲載の原子力関連記事：2001年4月

新聞	発行日	頁	面		見出し
注意：東奥；東奥日報、デリ；デーリー東北					
東奥	18	2			地質調査20日から．むつ・中間貯蔵施設・十数カ所ボーリング
東奥	18	2			六ヶ所・20日から通水試験．日本原燃、前処理建屋で
朝日	19	25		科学	米社が新型原発を計画．高温ガス炉の安全性に注目．小型で効率の良さ魅力．日本でも研究炉で実験
朝日	19	34	第2社会		プルサーマル・住民投票案再び可決．新潟・刈羽村
デリ	19	2			住民投票条例案2度目の可決．プルサーマルで新潟・刈羽村議会
デリ	19	3		2001むつ小川原	動き出すクリスタルバレイ(8) 企業誘致．インフラ整備が急務．短期間での実行体制必要
東奥	19	2			20日は大安だから？施設試験、住民向けイベント・・原子力関連行事が集中．六ヶ所・むつ
東奥	19	2			住民投票条例案議会で再度可決．プルサーマルで新潟・刈羽村
東奥	19	8			使用済み核燃料輸入法案．ロシア下院採択
朝日	20	11	経済		あてない核燃サイクル．六ヶ所村・再処理工場稼働へきょう通水試験．高負担に業界「二の足」
朝日	20	29	第3社会		高浜原発で大量漏水
朝日	20	31	社会		JCO臨界事故．起訴事実認める方針．23日に全被告、情状訴えへ
デリ	20	2			25日から原産年次大会．県内初開催六ヶ所も会場に
デリ	20	2			高レベル廃棄物最終処分地選定．概要調査は5カ所程度．具体的手順を年度内公表へ
デリ	20	3		2001むつ小川原	動き出すクリスタルバレイ(9) 雇用効果．若者の流出に危機感．製造業集積で衰退歯止め
東奥	20	3			概要調査地区5カ所を予定．高レベル廃棄物処分原発環境整備機構
東奥	20	3			六ヶ所も会場に．原産年次大会
朝日	21	31	青森		通水作動試験始まる．原燃・六ヶ所再処理工場・操業へ向け本格化
朝日	21	31	青森		中間貯蔵施設でボーリング調査．むつで東電
朝日	21	34	第2社会		原燃工場で通水試験開始
デリ	21	2			貯蔵プールでのトラブルに批判
デリ	21	2			通水作動試験始まる．六ヶ所の再処理工場．初日は脱湿装置点検．40項目で異常なしと原燃
デリ	21	2			東電以外が先行も．プルサーマルで電事連
デリ	21	3		2001むつ小川原	動き出すクリスタルバレイ(10) エアカーゴ．24時間の通関空港．企業が集まる条件を先に
東奥	21	1			東電以外が先行も．電事連・プルサーマルで見解
東奥	21	3			むつ・中間貯蔵施設立地判断へ．ボーリング調査着手
朝日	22	3	総合		六ヶ所村再処理、実施困難なら「核燃料、搬出要請へ」．青森知事
朝日	22	33	青森		核燃料サイクル 知事に聞く．国の政策を見極めて総合判断の時がく
デリ	22	2			新反核燃団体が誕生．むつ・学習会などの運動展開
デリ	22	19			「臨界事故」あす初公判
東奥	22	22			プルサーマル計画理解求め意見交換へ．本県などで原子力委
東奥	22	22			臨界事故あす初公判．違法作業への関与度焦点
東奥	23	17			チェルノブイリ事故避難女性が悲劇訴え．大阪で交流集会
東奥	23	17			チェルノブイリ風化させない集い．26日・青森
朝日	24	1			JCO事故初公判．安全軽視体質を指摘．前所長ら全被告・起訴事実認
朝日	24	33	第3社会		罪状「争いたくない」．JCO事故初公判．隣にいた部下失った．家族に「傍聴に来ないで」
デリ	24	1			全被告 起訴事実認める．検察側・事業所ぐるみの違法指摘．東海村臨界事故初公判
デリ	24	2			むつ市議会・一般市民の傍聴認める．中間貯蔵施設問題で特別委
デリ	24	7		検証・むつ小川原の30年	第1部破たんした夢(34) 政府の責任．消えたマスタープラン．国策か地域開発か疑問符
デリ	24	18			東海村長「今も腹立たしい」 ずさん管理に怒りあらわ
デリ	24	18			法廷に謝罪の言葉響く
デリ	24	18			臨界事故の起訴事実要旨
デリ	24	19			臨界事故から1年７カ月・社員らの思い複雑．出向、転勤に不安の声．まだ続く遺族への補償交渉

表1. 青森県内で配布された新聞に掲載の原子力関連記事：2001年4月

新聞	発行日	頁	面		見出し
生意：東奥；東奥日報、デリ；デーリー東北					
東奥	24	3			原発計画受け入れ．山口県知事
東奥	24	3			電力側の説明先送り．中間貯蔵施設問題・むつ市特別委で異論
東奥	24	4			女性の立場からの原子力広報推進．「WIN」青森で大会
朝日	25	3	総合		プルサーマル・初の住民投票へ．新潟・刈羽村来月27日に・村長、条例案を受諾
朝日	25	11	経済		核サイクルに業界また難題．プルサーマル住民投票
朝日	25	31	青森		原子力産業会議が大会．青森で27日まで・六ヶ所村でも意見交換
デリ	25	2			プルサーマル・国の責任で推進を．木村知事・エネ庁長官らに要望
デリ	25	2			プルサーマル住民投票へ．新潟県刈羽村来月27日実施
デリ	25	4			MOX加工工場・立地要請、来月以降に．原燃「基本設計に時間必
デリ	25	4			遠心分離機停止．1-3月で587基．ウラン濃縮工場
デリ	25	4			講演会実施など事業計画決める．六ヶ所・サイクル施設対策協が総会
デリ	25	4			再処理工場の設計変更認可
東奥	25	1			プルサーマル・国が指導、責任を．推進へ木村知事が要望
東奥	25	1			プルサーマルで来月に住民東京．新潟・刈羽村全国で初めて
東奥	25	1			六ヶ所立地要請6月ごろまでに．原燃副社長が見通し．MOX加工場
東奥	25	2			技術職員の担当期間「今度は長期化」．原子力安全・保安院
東奥	25	2			濃縮工場遠心分離機587台の停止発表．日本原燃
東奥	25	2			六ヶ所再処理工場の設計・工事変更認可．経済産業省
朝日	26	31	青森		「原子力撤退の覚悟も必要」．原産会議で電力関係者
デリ	26	2			原子力平和利用広く討論．青森主会場に原産年次大会開幕．10カ国・地域から1470人参加
デリ	26	4			チェルノブイリ事故から15年．被ばく者の健康、「石棺」老朽化・・依然深刻な問題残る
デリ	26	19			「情報公開足りない」．原産年次大会意見交換会・市民から不満の声．青森
東奥	26	3			地球環境保全へ共同声明．青森で原産大会・市民と意見交換も
東奥	26	7			チェルノブイリ事故から15年．風化する記憶、問題なお山積
朝日	27	35	青森		核燃や原発反対の集会．青森．チェルノブイリ15年
朝日	27	35	青森		東通電原発計画で東電．環境影響来月から調査
朝日	27	35	青森		六ヶ所村民と意見交換．原産会議・都市との落差など議論
デリ	27	4			トラブル続きに反省、改善促す．サイクル施設環境放射線監視評価委
デリ	27	20			核燃ストップ、脱原発を確認．県反核実行委が青森集会
デリ	27	20			地域共生テーマに意見交換．六ヶ所村長「さらなる防災対策を」．原産年次大会
東奥	27	2			核燃施設との共生は？原産大会2日目．六ヶ所村民らが発言
東奥	27	2			チェルノブイリの事故風化させるな．県反核実行委青森で集会
朝日	28	31	青森		安全審査などの資料．国側が提出．核燃サイクル訴訟
朝日	28	31	青森		高レベル廃棄物処分めぐり討論．原産年次大会が閉会
デリ	28	8		学芸・文化	新刊紹介「六ヶ所村―核燃基地のある村と人々」写真・文 島田恵
デリ	28	24			「市民の理解不可欠」．最終処分問題など討議．原産年次大会閉幕
デリ	28	25			原子力保安院が一時不明書類提出．核燃阻止一万人訴訟
東奥	28	3			核燃料サイクル関連4施設とも異常なし
東奥	28	3			住民への情報公開不可欠．最終処分選定で討議．原産大会閉幕
東奥	28	24			見落とした資料提出．核燃サイクル訴訟・口頭弁論．国から経緯の説明なし
朝日	29	33	青森		再処理施設の建設中にほや．六ヶ所
デリ	29	19			核燃再処理工場建設現場でほや
東奥	29	21			六ヶ所の再処理施設・建設現場でぼや．通報1時間後、連絡ミス．緊張と責任感を．木村守男知事の話
デリ	30	2		むつ小川原開発月間リポート	2001年4月．安全性認識でずれ．原燃への信頼回復遠のく

表2.　青森県内で配布された新聞に掲載の原子力関連記事：2001年11月

表2.　青森県内で配布された新聞に掲載の原子力関連記事：2001年11月

新聞	発行日	頁	面	見出し
注意：東奥；東奥日報、デリ；デーリー東北				
デリ	1	4		原発上空の通過を禁止．米連邦航空局
デリ	1	23		「常陽」の建屋で火災．放射能漏れの恐れなし．茨城
東奥	1	2		ITER誘致で県に公開質問状．反核燃行動実行委
東奥	1	9		原発上空の通過禁止．米連邦航空局
東奥	1	22		実験炉「常陽」建屋で火災．茨城
朝日	2	31	社会	核燃実験炉「常陽」施設で火災
デリ	2	2		核ジャック防止へ．国内輸送も防護．IAEA、条約改正を検討
デリ	2	23		ナトリウム自然発火の可能性も．茨城県警など常陽建屋を実況見分
東奥	2	1		核物質輸送でIAEA．「国内」も防護義務付け．テロ防止へ条約改正
東奥	2	2		IAEA条約改正検討．核テロへ危機感．旧ソ連から流失懸念
朝日	3	3	総合	核テロ可能性「増大」と警告．IAEA
デリ	3	2		県、5日の議員総会で正式説明．ITER誘致地元負担問題
東奥	3	2		「財政的支援」問題自民特別委に説明．ITER誘致で県
デリ	4	21		建屋火災で調査委設置へ
東奥	4	3		放射能漏れ核燃料東海村へ海上輸送．美浜原発
朝日	5	27	社会	核燃・原研の低レベル廃棄物．30万本、保管費60億円．検査院調べ
朝日	5	27	社会	低レベル放射性廃棄物
東奥	5	2		低レベル廃棄物．最終処分対策進まず．会計検査院・核燃機構、原研を検査
東奥	5	2		15日から最後の搬出．旧原船「むつ」の使用済み核燃料
朝日	6	31	青森	ITER送電線費用負担へ．県、自民に誘致策説明
デリ	6	2		説明不足、自民に陳謝．ITER送電線整備県、一部負担を明言
デリ	6	2		ITER誘致など県に反対申し入れ．共産党青森県委員会と党県議団
デリ	6	2		使用済み核燃料きょう通算12度目の搬入
東奥	6	1		県、ITER誘致経費を試算．住宅整備170億円　建設用地80億円．建設用送電線国へ財政負担確約．自民県議説明不足と批判
東奥	6	2		「記事が県民惑わす」ITERめぐり報道批判．議員総会で大見県議
東奥	6	3		使用済み核燃料積み輸送船が12回目接岸．むつ小川原港
東奥	6	3		ITERの本県誘致取りやめを県に要請．共産党県議団
朝日	7	25	青森	8回目の核燃料搬入．社民県連合など集会や申し入れ
デリ	7	2		ITER・あすから公式政府間協議．建設地など来年半ば結論
デリ	7	2		地元負担を受け入れ．ITER誘致で木村知事
東奥	7	2		提案書提出段階で確認．ITER誘致財政負担．支出規模を抑制．知事
東奥	7	2		ITER・あすから政府間協議．トロント来年半ば合意目指す
東奥	7	2		使用済み核燃料搬入に抗議集会．青森などで反核実行委
デリ	8	19		浜岡原発で配管一部破断．静岡、放射能含む蒸気漏れる
東奥	8	3		原子炉を停止．配管破断の浜岡原発
東奥	8	21		放射能含む蒸気漏れる．静岡・浜岡原発配管の一部破断
朝日	9	1		緊急冷却の配管破断．浜岡原発建屋内に放射能漏れ
朝日	9	30		浜岡原発事故・配管内の水が膨張？腐食原因との見方も
デリ	9	23		配管が瞬時に破断か．静岡・浜岡原発事故
朝日	10	3	総合	浜岡原発1号機事故．「とりで」破断広がる不安
朝日	10	3	総合	原発「長寿化」浮かんだ課題
朝日	10	12	科学	「国産MOXは高価」日米市民団体ウラン燃料の20倍
朝日	10	12	科学	夢中人　「2つの再処理工場」止めたい　ナタリー・ゲイスマールさ
朝日	10	31	青森	ITER誘致県、議会に説明
デリ	10	2		低レベル廃棄物本年度3回目搬入作業終了
デリ	10	3		ITER送電線で東北電力・整備費の一部負担に言及
デリ	10	3		県が各会派に説明．ITER誘致の地元負担問題で
デリ	10	3		ITER協議次回は東京で
東奥	10	3		放射能含む水漏れ．静岡・浜岡原発1号機原子炉内部から直接

表2.　青森県内で配布された新聞に掲載の原子力関連記事：2001年11月

新聞	発行日	頁	面	見出し
注意：東奥；東奥日報、デリ；デーリー東北				
東奥	10	3		浜岡原発配管破断事故．構造上の欠陥が原因か．経産省・同型の緊急点検検討
東奥	10	3		一部負担の見通し示す．ITER建設用送電線で東北電力
東奥	10	3		低レベル廃棄物センターに搬入．日本原燃が3回目
東奥	10	3		六ヶ所村長選討論会を検証
朝日	11	34	第2社会	浜岡原発・制御棒駆動部付近、水漏れ．放射能帯びる・国、老朽化問題視野に
朝日	11	34	第2社会	事故の国際尺度最も低いレベル．原子力安全・保安院
デリ	11	21		原子炉から放射能水漏れ．中部電力浜岡原発・1号機またトラブル
朝日	13	34	第2社会	浜岡原発水漏れ事故・運転停止は半年以上．ほかの原発への波及必至
デリ	13	19		重大なトラブルと認識．浜岡原発漏水事故・経産業省・保安院が調査
デリ	13	19		原発立地14道県が安全対策を要望へ
東奥	13	20		漏水事故の浜岡原発2号機配管も設計変更．水たまりやすい構造に
東奥	13	20		本県など14道県安全対策要望へ
朝日	14	31	青森	ITER誘致反対．財政負担批判し知事に申し入れ
朝日	14	34	第2社会	浜岡原発事故・2号機も運転停止へ．過去、1号機と同一個所で配管交換・中電、異例の判断
朝日	14	34	第2社会	漏えい監視装置働かず．88年の水漏れ事故で設置
朝日	14	34	第2社会	原発推進派主導住民投票が告示
デリ	14	2		原発めぐる住民投票告示．三重・海山町
デリ	14	2		県にITER誘致見直しを申し入れ．核燃施設立地反対連絡協
デリ	14	21		浜岡2号機も運転停止へ．中電
東奥	14	2		六ヶ所村長選．激戦迫る(2)
東奥	14	2		ITER白紙撤回を．市民団体が県へ申し入れ
東奥	14	2		MOX仮処分申請19、20日に口頭審理．国際海洋法裁判所
東奥	14	19		浜岡原発相次ぐ事故．国、電力への信頼揺らぐ．原因未解明のまま．連絡遅れ住民の不満噴出
朝日	15	15	オピニオン	劣化対策の再検討を．浜岡原発事故に見る補修・点検体制の不備
朝日	15	38	第2社会	他3基も形状変更．福島第一と女川原発「浜岡」配管と同様に
朝日	15	38	第2社会	ナトリウムが発火源の疑い．「常陽」施設火災
デリ	15	1		MOX輸送は「テロ標的」環境団体が反対声明
東奥	15	2		六ヶ所村長選．激戦迫る(3)
東奥	15	2		原発誘致反対派が総決起集会開く．三重・海山町
東奥	15	2		最後の搬出始まる．旧原船「むつ」使用済み核燃料
東奥	15	7		MOX輸送「テロ格好の標的」環境団体が反対声明発表
東奥	15	20		「常陽」の火災原因はナトリウム発火が有力
朝日	16	1		浜岡原発漏水・異常、二重に見逃し．中電・湿度・流量監視装置で
朝日	16	31	青森	原子力船むつ核燃最後の搬出．激動の30年思い交錯
朝日	16	34	第2社会	旧原子力船「むつ」使用済み核燃料最後の搬出作業
デリ	16	2		最後の搬出始まる．旧原船「むつ」使用済み核燃料
デリ	16	21		浜岡原発1号機・運転中の夏から漏水か．中電の判断ミスの可能性も
東奥	16	2		六ヶ所村長選　激戦迫る(4)
東奥	16	2		使用済み核燃料搬入「安全確保が不十分」阻止実行委が県に抗議文
東奥	16	3		三重県海山町・住民投票（下）　開けぬ原発立地の展望．切迫感見られぬ中部電力
東奥	16	3		県が立ち入り調査．静岡浜岡原発
東奥	16	9		英がMOX差し止め請求を却下
東奥	16	24		漏水は7月から運転中に発生か．浜岡原発1号機事故．判断ミスで見逃す？中部電力全燃料取り出し調査
朝日	17	25	青森	反核燃団体など高田氏を擁立．六ヶ所村長選
朝日	17	25	青森	市民団体県に抗議
朝日	17	30		浜岡原発事故「破断、複合的原因で」原子力安全委現地に立ち入り調
朝日	17	30		炉心冷却の試験記録．同型14原発で経産省調査へ．
朝日	17	30		プルサーマルの影響避けられぬ．電事連会長

表2. 青森県内で配布された新聞に掲載の原子力関連記事：2001年11月

新聞	発行日	頁	面		見出し
注意：東奥；東奥日報、デリ；デーリー東北					
デリ	17	2			新たな選択　01"六ヶ所村長選（下）さながら"核燃城下町"
デリ	17	2			使用済み核燃料搬入で県に抗議．サイクル立地反対連絡会議
デリ	17	2			反核燃陣営から高田氏出馬へ．六ヶ所村長選
東奥	17	2			六ヶ所村長選．激戦迫る(5)
東奥	17	2			反核燃・高田氏出馬へ．六ヶ所村長選
東奥	17	3			使用済み核燃料搬入県に抗議の申し入れ．核燃サイクル反対会議
朝日	18	1		天声人語	
朝日	18	33	青森		旧原子力船「むつ」最後の核燃料輸送船が出港
デリ	18	2			反核燃の高田氏出馬へ．六ヶ所村長選
デリ	18	2			「むつ」核燃料最後の搬出．原研東海研に向け関根浜港を出港
デリ	18	19			原発誘致で住民投票．賛成派の主導できょう．三重県海山町
東奥	18	1			原船「むつ」の使用済み核燃料撤去作業が完了
東奥	18	3			「むつ」使用済み核燃料全量撤去．「原子力計画に貢献」「いがみ合いもう嫌」関係者の思いさまざま．
東奥	18	3			「原子力手帳」を配布．中間貯蔵施設誘致でむつ市・是非判定の資料
東奥	18	3			原発誘致を問いきょう住民投票．三重県海山町
朝日	19	1			原発誘致反対が過半数．三重・海山町で住民投票
朝日	19	35	社会		破断配管の形状変更工事．弁の蒸気漏れが原因．浜岡原発
デリ	19	19			「3連敗」に打つ手なし．三重・海山町原発住民投票・平静さ装う経
デリ	19	19			燃料取り出し作業始まる．水漏れ事故で浜岡原発1号機
東奥	19	1			原発誘致めぐる住民投票．反対票6割超す．三重・海山町
東奥	19	3			芦浜の二の舞避ける．海山町住民投票・浜岡原発事故も影響
東奥	19	3			ITER誘致、賛成16.5%．県民意識調査285人回答「反対」の半分未満
東奥	19	18			浜岡原発1号機で燃料取り出し作業開始
朝日	20	2	総合	社説	原発住民投票　海山町が残した課題
朝日	20	8	経済		海山町で住民投票　また反対多数．原発新設さらに厳しく
デリ	20	2			報告書　次年度ずれ込みも．MOX工場安全性検討会・青森県が席上
デリ	20	2			フッ化水素モニター増設で設工認申請．原燃
デリ	20	2			青森市で来月15日MOX学習会開催．反核燃団体質問を公募
東奥	20	2			臨界事故教育が必要．MOX工場安全性検討会・事業者に委員指摘
東奥	20	2			六ヶ所ウラン工場のモニター更新を申請．経産省に原燃
東奥	20	2			来月15日に青森でMOX学習会
朝日	21	35	青森		ITER結局賛成少数．地域社会研調査・集計に県クレーム．詳細データ再広報
朝日	21	35	青森		旧原子力船「むつ」核燃の搬入完了
デリ	21	2			原子力施設誘致による恩恵強調．市議会特別委でむつ市長
デリ	21	2			使用済み核燃料輸送作業が終了．旧原船むつ
デリ	21	5		時評	原発建設計画の再考必要
デリ	21	38			配管内滞留物除去4電力会社に指示．経産省
東奥	21	2			むつ市の「原子力手帳」中間貯蔵の必要性力説する必要ない．調査特別委で疑問の声
東奥	21	2			「むつ」使用済み核燃料輸送終了
朝日	22	30	第2青森		りんごの目
朝日	22	31	青森		原燃の専用道路完成．六ヶ所
朝日	22	35	社会		原研廃棄物処理棟・装置が破損消却灰充満．報知器鳴る
デリ	22	3			第2専用道路ほぼ完成．日本原燃が報道陣に公開・来月に本格供用へ．六ヶ所
東奥	22	2			ITER県民意識．民間の調査法批判．県「設問ち密さ欠く」
東奥	22	2			候補地・県「来月決定も」．地元負担説明遅れ陳謝
東奥	22	2			第2専用道路完成．放射性物質搬入で原燃．六ヶ所
東奥	22	2			変換ガラス固化体1月ごろ六ヶ所搬入．原燃
朝日	23	30	第2社会		核燃料取り出し作業を終える．浜岡原発
東奥	24	2			電源開発・豊岡常務に聞く．用地買収解決へ糸口見えず．どうなる大間原発計画．中止・撤廃「絶対ない」

表2. 青森県内で配布された新聞に掲載の原子力関連記事：2001年11月

新聞	発行日	頁	面		見出し
注意：東奥；東奥日報、デリ；デーリー東北					
朝日	25	3	総合		国際熱核融合実験炉・誘致国の負担、7000億円．政府資産・立候補時期、曖しく
朝日	25	3	総合		ITER計画
デリ	25	2			ITER国内誘致．関係国の動向を注視．先送り続く政府判断．国内候補地選定　越年も
デリ	25	4			ロ原発が緊急停止
東奥	25	6			MOX燃料工場閉鎖求めアイルランド政府が全面広告
東奥	25	6		2001断面	北海道幌延町の深地層研究所．核抜き施設に矛盾．消えぬ最終処分場の不安
朝日	26	3	総合		英のMOX工場閉鎖求める広告．アイルランド与党
朝日	26	30	青森		六ヶ所村長に橋本氏．核燃「共存」2氏破り再選 住民投票反対多数で
朝日	26	30	青森		「反核燃の火は消さぬ」挑戦三たび、77歳高田氏
デリ	26	2			「知っている」2割以下．青銀シンクタンク調査．県民の理解度低い
デリ	26	3			核抜き施設に矛盾浮上．幌延町の深地層研．最終処分場の可能性も
デリ	26	3		時評	カヤの外に置かれた県民
東奥	26	1			六ヶ所村長選．橋本氏大差で再選．古舘氏に3200票差・核燃争点にな
東奥	26	2			六ヶ所村長選．橋本氏が再選．核燃との共存選択．「反対派」の活動に影響も
東奥	26	2			原発議論は終了．塩谷龍生三重県海山町長
東奥	26	2			8300人参加し原子力防災訓練．佐賀・玄海原発
朝日	27	34	第2社会		浜岡原発事故・炉内溶接部に亀裂．長さ2~4センチ国内に例なし
朝日	27	34	第2社会		ナトリウムの発火か
デリ	27	19			圧力容器との溶接部に亀裂．中部電力・浜岡1号機の漏水事故
東奥	27	18			溶接部に亀裂．浜岡原発漏水事故
東奥	27	18			「常陽」建屋火災ナトリウム原因
朝日	28	11	経済		「原発新設には公的支援必要」業界出資の研究所　電力自由化で報告
朝日	28	15	オピニ	私の視点	自然エネルギー促進は社会的な合意で．日本総合研究所主任研究員・飯田哲也
東奥	28	3			来年3月の会合で基本設計を確定．むつ小川原放射光・県の整備検討
朝日	29	31	青森		英核燃会社が技術を指導へ．再処理工場試運転
朝日	29	34	第2社会		浜岡原発事故「爆発現象」で破断．中電、飛散の5破片回収
デリ	29	2			原燃、BNFLと廃液処理で契約．再処理工場・操業へ技術支援体制整
デリ	29	2			原子力の周辺環境「大変厳しい状況」．原燃副社長が認識
デリ	29	2			原発誘致反対請願を採択へ．住民投票を受け三重・海山町議会
デリ	29	2			新潟県も引き上げへ．核燃料税福井に続き、10%に
東奥	29	2			六ヶ所・再処理工場の試運転．英会社が技術支援．原燃契約
東奥	29	2			核燃料税の引き上げ新潟県も議会提出へ
東奥	29	2			原発誘致反対請願・本会議で採択へ．三重・海山町議会
朝日	30	31	青森		放射性廃棄物変換作業．六ヶ所の施設で来年1月前後に
デリ	30	1			原発上空を飛行禁止に．テロ対策でIAEA・保有国に義務化検討
デリ	30	2		むつ小川原開発・月間リポート2001年11月	来年度以降にずれ込み．MOX加工施設立地・県の総合判断時期
東奥	30	2			高レベル核廃棄物来月6日に搬出か．グリーンピース声明
東奥	30	22			MOX輸送容器1基に変形発見．国交省、不使用指示

放射線教育 Radiation Education
Vol. 5, No. 1, p. 35—36 (2001)

『コペンハーゲン』を観劇して

白形　弘文
日本エクス･クロン株式会社
〒310-0801 茨城県水戸市桜川１-１-25 大同生命水戸ビル７F

要旨　評価の高い劇『コペンハーゲン』を観て、自然・人文科学と芸術の考え方に、多くの共通点があることが分かった。放射線教育の改善に資するところがあると思 い、随想としてまとめた。

昨年１１月、東京の新国立劇場小劇場で上演されたマイケル・フレイン作『コペンハーゲン』（平川大作訳、鵜山仁演出）を観劇した。科学に興味のある方なら直感的にお分かりと思うが、ご存知ボーアとハイゼンベルクにまつわる話である。現代物理学を構築した人物名や物理用語が飛び交う、時空を越えた対話劇である。出演者は、わずか三人である。

先ず、この劇のあらすじを、劇場発行のパンフレットの文章を引用して紹介しよう。

> “ ナチスの恐怖が欧州を覆う 1941 年のコペンハーゲン。盗聴器を仕掛けられた過酷な条件下で語られたボーア（＝江守徹）、ハイゼンベルク（＝今井朋彦）、ボーアの妻マルグレーテ（＝新井純）の会話の真相とは？ 三人は死後の世界からこの「謎の一日」を再現しようとする。原爆製造へのかかわり、祖国への忠誠心、ヒューマニズム、物理学者のエゴとプライド。人間の深層心理へと奥深く切り込んでいく数々の記憶が蘇る。しかし相補性原理や不確定性原理といった彼等の理論そのままに、語れば語るほど記憶は曖昧なものとなっていく。 ”

実に良く内容をまとめてあり、筆者の下手な要約によって紹介するより良いと思ったので、出典[1] を明らかにして、引用させて頂いた。

公演は、２時間を越す長時間、シュレーディンガー、アインシュタイン、ボルン、ガモフといった人名、また、相補性原理、不確定性原理のほか、波動方程式、原子炉、核分裂、連鎖反応、臨界量計算、コペンハーゲン解釈、粒子と波に関する２スリットの実験などの物理用語が飛び交う、息をもつかせぬ対話劇であった。三人の俳優の方々の熱演はすばらしく、筆者もいつのまにか芝居に引き込まれ、江守さんがボーア先生に見えてきた。他のお二人も同様であった。物理用語もわかりやすく訳され、「物理の世界もエンターテイメントになる」ことを実感した。

驚いたことは、このような科学の世界を描いた公演に、400 席もの劇場が満員だったことである（公演数は 20 回）。しかも、休憩中の観客の会話を聞いても、多くの人々が自然科学の関係者とは思えない演劇愛好家だったことである。更に、これらの人々のこの公演に関する感想が非常に良かったのである。さすが東京とも思ったが、本来、市井の人々は科学嫌いではないのだ。我々理系教育・研究関係者は、もっと自信を持つべきだ。

この戯曲『コペンハーゲン』は、演劇関係者の間では、以前から注目を集め有名になっていたものだ。1998 年ロンドンで初演され、続いてパリ（1999 年）、ニューヨーク（2000 年）、ベルリン（2001 年）で上演され、数多くの演劇賞を受賞している。今回の日本公演

についても最近演劇関係の賞が与えられている。

原作者のマイケル・フレインは、イギリスの劇作家でチェーホフの翻訳家としても著名な方であるが、自然科学者ではない。この戯曲は、膨大な資料の綿密な調査と物理学者の通読を経て完成している。更に、劇作家としての豊かな創造性をも加味したすばらしい作品となっている。筆者は、もっと詳しく作品の内容を知りたいと思い、休憩時にこの戯曲の翻訳本[2]を購入した。この本も特徴があり、戯曲部分のほか、約60頁もの「作者あとがき」が付いている。そこには、戯曲完成までの作者の調査経緯と引用文献が、詳しく記述されている。立派な自然科学の論説ともなっているユニークな本だ。

この様な一連の状況をみると、演劇関係者のみならず、文系の人々の多くは、自然科学の面白さ、すばらしさを理解する能力を持っていることが分かる。我々自然科学関連の業務に従事している人々の何割が、この様な事実を理解しているのだろうか。我々が、専門家集団という閉鎖社会に閉じこもり、いたずらに世間の（文系関係者の？）無理解を嘆き、若者の理科離れを愁い慌てふためく様は、あまり格好の良いものではない。

この『コペンハーゲン』の上演を契機に、内外の自然科学者の間で、科学史的観点から、「1941年のハイゼンベルクの訪問目的は何だったのか？」の議論が再燃している。その中で、原作者フレインの解釈が間違っている云々の議論がなされているようだ。若し、自然科学者の興味が、このような科学史的詮索のみにあるとするなら、それはあまりにも狭量な考え方で、この戯曲上演の本当の意義を見失うのではないかと筆者は思っている。何故なら、前述の翻訳本の「作者あとがき」でフセインは、これまでの科学史家・評論家がこの1941年の出来事をどの様に評価しているか、特にハイゼンベルクの評価は史家・評論家によって大幅に異なっていることを出典に基づいて詳細に調べている。その上で、この戯曲の1941年のくだりには、作者としてのフィクションが含まれていることが明言されている。そこには、不確定要素があり相補的なコペンハーゲン解釈がある。自然科学者の立場から見ても、実に明快な論理構成になっていると筆者は感じたからである。

そんなことよりも、この演劇を見て筆者が最も大切だと思ったことは、文系・理系を問わず、創造的な仕事をするには、「**とことん対話（ダイアローグ）する**」ことの必要性を再認識させられた点にある。我々自然科学の仕事に従事している者は、専門家集団の中では真剣な討論をしているが、文系の人や一般市井の人々の中で、本当に真摯な態度で専門の話をしたことがあっただろうか。

現在、我々は、放射線教育を一般社会に普及する努力を続けているが、理系志望者向けのPA活動が中心になっているように思う。今後は、文系志望者にも興味を持ってもらい、あわよくば理系志望に転向してもらえるようなPA活動もすべきだと思う。そういえば、筆者が、寺田寅彦先生の名前を知ったのは、小学生時代に随筆「どんぐり」を読んだ時であり、伏見康治先生の名前を知ったのは、中学生時代に読んだ「驢馬電子」であった。そのおかげで、物理学に興味をもつことができた。

参考文献

1）新国立劇場発行：上演予告チラシ、及びパンフレット『コペンハーゲン』（2001）
2）マイケル・フレイン作、小田島恒志訳『コペンハーゲン』劇書房刊

（2002年2月20日受理）

放射線教育 Radiation Education
Vol. 5, No. 1, p. 37—40 (2001)

中性子を含む周期表について

荒谷 美智
財団法人　環境科学技術研究所
（〒039-3212 青森県上北郡六ヶ所村大字尾駮字家ノ前１番７）

要旨　一般人を対象とした放射線教育の幾つかの場で、物質を形づくっている基本的粒子の一つとしての中性子について、より普遍的な理解のための手段として中性子を含む周期表を試みに用いたところ好評を得た。その後、イレーヌ・ジョリオーキュリーによる自然放射性元素に関する教科書（1946）や日本の原子物理学の教科書（1952）に中性子を含む周期表が採用されていることが判明した。既に核文明時代に突入している現代社会、および現在到達している物質観・宇宙観との両面から中性子を含む周期表の必要性の根拠について略説する。

中性子というものが過日、大きな社会問題になった際に、職務柄一般市民とともに中性子を語る、という立場に度々立たされることになった。そして、いろいろ考察を進めていく過程で、特に中性子自身がベータ壊変して水素になる点に着目し、元素の周期表で水素の左側に中性子の位置を設けて説明することを試みた。その結果、一般市民からの反響は極めて良好であり、全物質（単体＝化学元素）と中性子の関係が明確に理解できた[1]と歓迎された。

このことがあってから、第０族元素（希土類元素）全体を最右端から最左端に移動してヘリウムの上に中性子を置いた周期表を作成し、つくばで行われた第 1 回「環境放射能」研究会で口頭発表[2]した。概して「よい考えだ」という声の中に「ラジカルだ！」という声があった。しかし、間違っているという意見はなかった。さらに、放射化学討論会にもポスター発表[3]してみたところ外国の参加者からも理解が得られ、概して「良い考えだ」という手応えで「大いに推進するように」という諸先生からのお励ましの言葉もいただいた。しかし、やはり公式見解ともなると「ラジカル！」というのが底流にあるように思われる。

そうこうしているうちに１月下旬、たまたま、放射線教育フォーラムで会合があり、会議室に入ろうとすると「一番お見せしたい人がきた」と一枚のコピー[4]とともに一冊の教科書[5]が手渡された。コピーのほうは中性子を含む周期表であった。その周期表では、右端に第０族が配置されていることは通常の周期表と同じであるが、第０族のヘリウムの上、第０周期に中性子が Nn という記号で置かれている。Nn としてあるのは化学元素の記号体系における整合性から「大文字＋小文字」の体裁をとったものであろう。核子としての中性子 n とは区別して考えていることが判る。その後、このフランス語の教科書に載っている周期表は、1946 年にイレーヌ・Ｊ・キュリーによって書かれた小冊子に由来することが判明した[6]。なお、1)では口頭だけの説明、2) では n 、7) では、特に一般市民のための周期表であることを考慮し、全化学元素が日本語で表示されてあり、中性子についても「中性子」と表示されている。このフランスの周期表のもう一つの特徴として、

アクチニドが無くてその替りにウラニドとキュリドになっていることであるが、この点に関しては問題が別なので今ここでは特に述べない。また、1 月末には「中性子を周期表に含めるという考えは基本的には了解できるが、希ガスのヘリウムの上に置くのはどうだろうか、むしろ全く独立に欄外に置いたほうがよいのではないか」という助言もいただいた[8]。

さらに、6) と関連したことであるが、昭和 20 年代の後半に出版された武谷三男編『原子物理学』という教科書では、周期表の欄外に中性子を独立に配置してあった、というお話も伺った[9]。これは正に、8) と同じ考え方であると、興味ふかく感じたことであった。武谷編『原子物理学』の同時代で少し後に出た『現代化学』の中に槌田龍太郎による周期律の歴史に関する総論があり、いろいろな考えに基づく周期表に言及がなされているが、中性子を考慮しているものについては一つも含まれていない[10]。同じ化学者でも、錯体化学者と核・放射化学者では考え方に隔たりがあっても不思議はないと思われる。

ここで元素という言葉についてであるが、最近、一般市民向け 1 枚ものの科学普及用パンフレット[11] と関連して執筆者と校閲者の間で「古代の四元素説」を巡って意見の相違したことがあった。科学普及上の文書の中に哲学上の用語が出てくるのは如何なものか、という校閲者の意見に対して、執筆者は古代の四元素説は科学の本の中にも書いてある、と引用文献を引いて対応していたが、双方引かなかった。理由が何であれ刊行が遅れることは実務上困るので「元素」を「要素」とする、ことで双方にご了解いただく、という一幕があった。確かに、土は化合物の混合物、水は化合物、大気も単体や化合物の混合物、火は物質ではなく光（エネルギー）であり、決してこれらが化学元素でないことは皆、それなりに承知していると思われるが、現代の環境問題においても明らかなように、土（土壌）、水、大気、エネルギーが、依然として四つの大きな要素であることもまた明白である。

古来、地上の物質と天上の物質は同じではないと考えられ、地上の物質は土、水、大気、火の四つの元素から成るが、月より上の世界ではもの（星、太陽など）は聖なる第五元素エーテルから成る、と考えられた。アリストテレスもそう考えたのであり、19 世紀末、レントゲンの世界観の中でもエーテルはまだ残存していた[12]。しかしながら、さすがに現代では地球も太陽系も全宇宙も同じ物質で出来ているという認識に到達しており、宇宙では、中性子星やブラックホールという物質の極限状態が知られ、また、極めて短寿命ではあるが、水素 5[13]のように核の外にまでかなり中性子ハロー（かさ）[14] が拡がっている核種が、地上でも、ある種の加速器の中で発見される時代となった。中性子星は殆ど中性子から成り、水素原子核は高々20％といわれており[13]、これまで地上では実験不可能と考えられていたが、ようやく何とかその実体に迫れそうな時代になってきた。このような時にあってもなお中性子を原子番号 0、電子数 0 の元素として周期表に記載することは、抵抗感のあることであろうか。

特別な場合を除いては同位体を分離する必要は全く無く、化学人が、実用的な意味で化学的原子量を定義したことは合理的であり、今後ともその事情は変らないであろう。一方、広島・長崎で象徴的に、且つ、不可避的に示されたように、核エネルギーが実用段階に入ったわれわれの生活空間で、自然源の中性子に加えて人間活動源の中性子が漸増していくであろうことは考えられる。それは、ちょうど大気中の二酸化炭素が産業革命以後急増し

たことに対応して類推されることである。核燃料加工工場 JCO の工場内でも周辺でも常時、中性子を観測していたならば、あのような不幸な事態にはなり得なかったことであろう。中性子を含む周期表をめぐっては、主要な問題は基礎的・理論的または教育的な問題であるが、それ以上に、この現代にあっては極めて実用的な問題も根拠にあることを指摘しておきたい。1993 年以後、六ヶ所村で原子力も含めた科学普及の仕事に従事してきたが、文頭に記したように、ここで述べたような問題もそもそものきっかけは、一般市民の側の、理解したいというある種の力にあった。例えは良くないかも知れないが、牛に引かれて善光寺参り、というのは案外こういうことであろうか。

注）引用文献６）による周期表を表１に、９）による周期表を表 2 に示す。いずれも大野新一氏私信による。

引用文献

1) 荒谷美智: 環境中性子モニタリングの意義, 日本女性科学者の会 出前理科実験教室, 「もっと知りたい身近な放射能」: 千葉, 2000

2) 荒谷美智: Proceedings of the First Workshop on Environmental Radioactivity, p.70, KEK, Tsukuba, Japan,March 30-31, 2000

3) Aratani, M.: A New Periodic Table for Radiochemistry, J. Nuclear & Radiochemical Sci., 2, Supplement, 121, 2001

4) 大野新一、私信、2002 年 1 月 25 日

5) M. Duquesne, R. Gregoire, and M. Lefort (Laboratoire Curie, Institut du Radium, Paris): Travaux Pratiques du Physique Nucleaire et de Radiochemie, Detection des Rayonnements et Methodes de la Structure Nucleaire, MASSON ET Cie EDITEURS, 1960

6) Irene Joliot-Curie "Les Radioelements Naturels" HERMANN et Cie, 1946

7) 荒谷美智：中性子と私たち＝日本人, 放射線教育 4, 72, 2000

8) 中原弘道、私信、2002 年 1 月 31 日

9) 武谷三男編：「原子物理学」東大出版会(1952)、米国移住前の南部陽一郎も分担執筆しているところがある。

10) 槌田竜太郎：岩波講座「現代化学」, 無機化学概論, 1960

11）環境研ミニ百科、最近号

12）環境研ミニ百科、第８号、Ｘ線発見１００年

13）谷畑勇夫、理研ニュース、No.246, Dec. 2001

14）谷畑勇夫、理研ニュース、No.176, Nov. 1995

（2002 年 2 月 27 日受理）

表 1. Irene Joliot-Curie による周期表 [6] (1946)

TABLEAU III

CLASSIFICATION PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

	a GROUPE I b	a GROUPE II b	a GROUPE III b	a GROUPE IV b	a GROUPE V b	a GROUPE VI b	c GROUPE VII b	GROUPE VIII	GR. 0	
0				MASSE ATOMIQUE CHIMIQUE RAPPORTÉE A O=16 0000					0 Nn NEUTRON 1,0087	0
1	1 H HYDROGÈNE 1,0081								2 He HÉLIUM 4,003	1
2	3 Li LITHIUM 6,940	4 Gl (Be) GLUCINIUM 9,02	5 B BORE 10,82	6 C CARBONE 12,010	7 N AZOTE 14,008	8 O OXYGÈNE 16,0000	9 F FLUOR 19,00		10 Ne NÉON 20,183	2
3	11 Na SODIUM 22,997	12 Mg MAGNÉSIUM 24,32	13 Al ALUMINIUM 26,97	14 Si SILICIUM 28,06	15 P PHOSPHORE 30,974	16 S SOUFRE 32,066	17 Cl CHLORE 35,457		18 A ARGON 39,944	3
4	19 K POTASSIUM 39,096 / 29 Cu CUIVRE 63,542	20 Ca CALCIUM 40,08 / 30 Zn ZINC 65,377	21 Sc SCANDIUM 45,10 / 31 Ga GALLIUM 69,72	22 Ti TITANE 47,90 / 32 Ge GERMANIUM 72,60	23 V VANADIUM 50,95 / 33 As ARSENIC 74,91	24 Cr CHROME 52,01 / 34 Se SÉLÉNIUM 78,96	25 Mn MANGANÈSE 54,93 / 35 Br BROME 79,916	26 Fe FER 55,84 / 27 Co COBALT 58,94 / 28 Ni NICKEL 58,69 / 36 Kr KRYPTON 83,7		4
5	37 Rb RUBIDIUM 85,48 / 47 Ag ARGENT 107,880	38 Sr STRONTIUM 87,63 / 48 Cd CADMIUM 112,41	39 Y YTTRIUM 88,92 / 49 In INDIUM 114,76	40 Zr ZIRCONIUM 91,22 / 50 Sn ÉTAIN 118,70	41 Nb NIOBIUM 92,91 / 51 Sb ANTIMOINE 121,76	42 Mo MOLYBDÈNE 95,95 / 52 Te TELLURE 127,61	43 / 53 I IODE 126,92	44 Ru RUTHÉNIUM 101,08 / 45 Rh RHODIUM 102,91 / 46 Pd PALLADIUM 106,7 / 54 Xe XÉNON 131,3		5
6	55 Cs CŒSIUM 132,91 / 79 Au OR 197,2	56 Ba BARYUM 137,36 / 80 Hg MERCURE 200,61	57 La 71 (Lanthanides) LANTHANE 138,9 / 81 Tl THALLIUM 204,39	72 Hf HAFNIUM 178,6 / 82 Pb PLOMB 207,21	73 Ta TANTALE 180,00 / 83 Bi BISMUTH 209,00	74 W TUNGSTÈNE 183,92 / 84 Po POLONIUM 210	75 Re RHÉNIUM 186,31 / 85	76 Os OSMIUM 190,2 / 77 Ir IRIDIUM 193,1 / 78 Pt PLATINE 195,23 / 86 Rn RADON 222		6
7	87 AcK ACTINIUM K 223	88 Ra RADIUM 226,05	89 Ac ACTINIUM 227	90 Th THORIUM 232,12	91 Pa PROTACTINIUM 231	92 U 93 a ? (Uranides) URANIUM 238,07				7

LANTHANIDES ou TERRES RARES	58 Ce CÉRIUM 140,13	59 Pr PRASÉODYME 140,92	60 Nd NÉODYME 144,27	61	62 Sm SAMARIUM 150,33	63 Eu EUROPIUM 152,0	64 Gd GADOLINIUM 156,9	65 Tb TERBIUM 159,2	66 Dy DYSPROSIUM 162,46	67 Ho HOLMIUM 164,94	68 Er ERBIUM 167,2	69 Tm THULIUM 169,4	70 Yb YTTERBIUM 173,04	71 Lu LUTÉCIUM 175,0
URANIDES	93 Np NEPTUNIUM 239	94												

表 2. 武谷編の教科書における周期表 [9] (1952)

元 素 の 周 期 律

(左上の数字は原子番號，下の数字は原子量，括弧内は不安定元素中，寿命の最も長いものの質量数を表わす)

	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
1	0 n 1.00899	1 H 1.0080							2 He 4.003	第1周期の終り 2＝2 K
2		3 Li 6.940	4 Be 9.013	5 B 10.82	6 C 12.010	7 N 14.008	8 O 16.000	9 F 19.00	10 Ne 20.183	第2周期の終り 10＝2＝8 K L
3		11 Na 22.997	12 Mg 24.32	13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.975	16 S 32.066	17 Cl 35.457	18 A 39.944	第3周期の終り 18＝2＋8＋8 K L M
4		19 K 39.100	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.90	23 V 50.95	24 Cr 52.01	25 Mn 54.93	26 Fe 55.85 / 27 Co 58.94 / 28 Ni 58.69	
		29 Cu 63.54	30 Zn 65.38	31 Ga 69.72	32 Ge 72.60	33 As 74.91	34 Se 78.96	35 Br 79.916	36 Kr 83.80	第4周期の終り 36＝2＋8＋18＋8 K L M N
5		37 Rb 85.48	38 Sr 87.63	39 Y 88.92	40 Zr 91.22	41 Cb 92.91	42 Mo 95.95	43 Tc (99)	44 Ru 101.7 / 45 Rh 102.91 / 46 Pd 105.7	
		47 Ag 107.880	48 Cd 112.41	49 In 114.76	50 Sn 118.70	51 Sb 121.76	52 Te 127.61	53 I 126.92	54 Xe 131.3	第5周期の終り 54＝2＋8＋18＋18＋8 K L M N O
6		55 Cs 132.91	56 Ba 137.36	57 La 178.92	72 Hf 178.6	73 Ta 180.88	74 W 183.92	75 Re 186.31	76 Os 190.2 / 77 Ir 193.1 / 78 Pt 195.23	
		79 Au 197.2	80 Hg 200.61	81 Tl 204.39	82 Pb 207.21	83 Bi 209.00	84 Po 210.	85 At (210)	86 Rn 222.	第6周期の終り 86＝2＋8＋18＋32＋18＋8 K L M N O P
7		87 Fa (223)	88 Ra 226.05	89 Ac 227						

* 58—71 稀土類 (4f型)	58 Ce 140.13	59 Pr 140.92	60 Nd 144.27	61 Pm (145)	62 Sm 150.43	63 Eu 152.0	64 Gd 156.9	65 Tb 159.2	66 Dy 162.46	67 Ho 164.94	68 Er 167.2	69 Tm 169.4	70 Yb 173.04	71 Lu 174.99
** 90—103 稀土類 (5f型)	90 Th 232.12	91 Pa 231	92 U 238.07	93 Np (237)	94 Pu (242)	95 Am (243)	96 Cm (243)	97 Bk (245)	98 Cf (246)					

超ウラン元素

93 Np： Neptunium

94 Pu： Plutonium

95 Am： Americium

96 Cm： Curium

97 Bk： Berkelium

98 Cf： Californium

1 51年度国際原子量（国際化学連合の原子量委員会）

放射線教育 Radiation Education
Vol. 5, No. 1, p. 41—50 (2001)

自然放射線被ばくによる線量の理解
—宇宙線ならびに岩石中の放射性元素の起源に関する考察

大野新一，八木国光，新井英彦
理論放射線研究所
（〒227-0054 横浜市青葉区しらとり台 12-5）

要旨　地球表面で生活するわれわれが自然界から受ける年間放射線被ばく線量はおよそ 1 ミリシーベルト（mSv）であるといわれる。この数値は多くの放射線セミナーなどで紹介されるが，その根拠となる放射線の起源についての説明はされないのが通常である。本報告では，現在広く受け容れられている宇宙モデルにもとづいて，超新星爆発ならびにγ線バーストによる地球表面における放射線強度，そして太陽系における元素存在度から見積もることのできる長寿命放射性同位元素量の算出を試み，現在の地球表面においてわれわれが受ける被ばく線量等量を推定した。このような計算は，自然放射線の理解および放射線にかかわる自然現象への関心を喚起するのに有益であると考えられる。

1. 緒言

水素，ヘリウムなどの軽元素を除いてほとんどの元素は星内部の核融合および超新星爆発のさいに合成され宇宙空間に放出された。その元素を含むダストとガスから成る星雲がもとになって 46 億年前に太陽系が形成され，地球もつくられた。合成された元素のうちで放射性のものは，以後$N=N_0\exp(-\lambda t)$の法則にしたがって減衰し，これが大地からの放射線でわれわれが外部被ばくを受ける主な原因となる。また体内にとりこまれた放射性物質は内部からの被ばく原因となる。宇宙では，超新星爆発は現在でも起こっている普遍的な現象である。重力エネルギーの解放による質量の高エネルギー放出は，その後磁場などの作用で加速され宇宙放射線になると考えられている。そのうちでも数十 GeV 以上の高エネルギー成分が地球磁場によるしゃへいと大気による吸収をまぬがれて地球表面に到達する。すなわち 46 億年前に合成された長寿命の放射性元素と宇宙空間における超新星爆発がいわゆる自然放射線の起源である。

本報告では，宇宙における超新星爆発の頻度から見積もる宇宙線強度と太陽系元素存在度から推定する地球岩石中の放射能から，自然放射線の起源を可能な限り定量的に考察し，それがわれわれに対する被ばく線量 1 ミリシーベルト/年の値を説明するものであることを示す。

2．宇宙線の起源

宇宙では，さまざまな機構による高エネルギー放射線の発生がみられ [1]，またその放射線を観測する場所での磁場の存在や大気の存在により複雑な様相を呈する。ここでは地球

表面における放射線被ばく線量を考える。宇宙から地球表面にふりそそぐ高エネルギー粒子(=60 GeV 以上の荷電粒子；遠く太陽系の外から来る一次宇宙線としての中性子はその寿命が短いために重要でなくなる)および高エネルギー電磁波（γ 線，X 線）は超新星爆発（supernova）と γ 線バースト（GRB）と呼ばれる 2 つの高エネルギー現象に基づいて起こる。太陽からくる荷電粒子(太陽風)はエネルギーが低いので，わずかに地球両極に舞い込みオーロラ現象などの原因となるほかは，大部分は地球磁場に捕捉されていわゆるバンアレン帯を形成する。太陽からのエネルギー放出は，太陽表面の温度 6000 K に相当する熱輻射，すなわち主として可視光領域の電磁波として地球にやってくる。ここでは宇宙空間における超新星爆発と GRB の頻度とその放出エネルギーから地球表面に降りそそがれるエネルギー付与量を推定する。

（a）超新星爆発[1)]

超新星は，太陽の約 1.4 倍以上の質量をもつ星が核融合反応のエネルギー源（鉄核よりも小さい原子核）を消費した後なお重力による収縮を続けるさいに，星の外層部を外部の空間に撒き散らす現象である。外層部は 10～100 億度に加熱されるので，光，ニュートリノ，原子核などの放出が起こる。いまたとえば太陽と同じ質量が重力収縮して半径 10 km の中性子星になるときに放出される重力エネルギーは $GM^2/R = 6.7\times10^{-11}\ N.m^2/kg^2\times(2\times10^{30}\ kg)^2/10^4\ m = 2.7\times10^{46} J$ と見積もることができる。またこの際に大量に発生する中性子による元素合成も起こり，これが次章で考察する自然放射性元素の起源となる。光放出の極大では 10^{36} から 10^{37} J/s が観測され，その時間変化から光エネルギー放出は 10^{43} から 10^{44} J，ほかにニュートリノのエネルギーもあるがほとんどは粒子放出の運動エネルギーが超新星爆発のエネルギーである。(1/2)(太陽質量) $v^2 = 10^{46}$ J とおくと $v = 10^8$ m/s となり，高エネルギーで飛びだす宇宙線になることが理解できる。無限に続く宇宙で超新星爆発が数密度 n で分布しているとする。地球から半径 r の球面と r + dr の球面に挟まれた球殻の間にある超新星の数 dn は $dn = 4\pi r^2 n\ dr$，いっぽう距離 r だけ離れた点から発生した 10^{46} J のエネルギーが均一に広がって地球にまで到達するときには $10^{46}\ J / 4\pi r^2$ になる。われわれの住む天の川銀河系で観測される超新星爆発は 200 年から 300 年に 1 回程度であるが，実際には 10 年に 1 個くらいの割合で発生していると推測される[1)]。宇宙には数千億個の銀河があると考えられるので，宇宙全体では 10^{10}/年が超新星発生頻度である。これを宇宙の大きさ $(4/3)\pi(150億光年)^3$ で割って $n=10^{10}/4(150\times10^8\times3\times10^7 s\times3\times10^8 m/s)^3=10^{-68}$/年・$m^3$ が求める超新星発生頻度である。結局，地球大気の上部にふりそそぐ超新星爆発からのエネルギー流入の積算は

$$\int_0^{1.4\times10^{26}} 10^{46}\ dn/4\pi r^2 = \int_0^{1.4\times10^{26}} 10^{46}\cdot10^{-68} dr = 10^{-22}\ [R]$$

（積分範囲は 0～宇宙半径 1.4×10^{26} m）

$=1.4\times10^4\ J/m^2$/年

問題は，このうちどれほどの割合が地球磁場の影響と大気による吸収を受けないで地表面にまで達するかであるが，これについては(c)で考察する。

(b) γ 線バースト

γ 線バーストは連星系のいっぽうの膨大な質量が他方の星のたとえばブラックホールになっているところに落ちこむときに X 線や γ 線が放出するもの(hypernova)であるが発生の頻度は 1 つの銀河系で 10^6 年に 1 回程度とされているので超新星爆発による放射線量に比べて考慮しなくてもよい程度と考えられる。

(c) 地球磁場による影響とガス粒子による減衰

宇宙における全質量 2×10^{53} kg を宇宙空間の全体積$(4/3\,\pi R^3)$で割ると宇宙の平均密度 $d=1.6\times10^{-26}$ kg/m^3 がもとめられる。仮にこの密度で続く空間を断面積 1 cm^2 で宇宙の果て（150 億光年の距離）まで見通すとその中に原子（ほとんどが水素原子）が 1.3×10^{23} 個(0.2 g)存在するという希薄さである。よって宇宙空間を伝播する宇宙放射線の物質との相互作用によるエネルギー損失はないものと考えることにする。エネルギーはむしろまだよくは解明されていない，恐らくは銀河系の関係する磁気的作用によって，10^9 から 10^{20} eV にまで加速されることが考えられている。

地球は 1 つの磁石であり，赤道付近の地表における磁束密度(磁場の強さ)は $B=0.3\times10^{-4}$ T (=0.3G)で地球から遠ざかるにつれて距離の 3 乗に比例して弱くなる。宇宙を走ってくる運動量 p のプロトン($e=1.6\times10^{-19}$C)が地表からの高さ 6400 km 以下の範囲で B によって大きく曲げられるとき（$evB = mv^2/R$ の曲率半径 R が地球半径 R_0 より小さいとき）に地球磁場によって地球に侵入できないとみて $p=mv=BeR_0=0.3\times10^{-4}\,T\times1.6\times10^{-19}\,C\times6.4\times10^6 m=3.1\times10^{-17}$ kg m/s，よって $E\sim pc=9\times10^{-9}J=5.6\times10^{10}$ eV，すなわち約 60 GeV 以上のプロトンなら地球磁場をくぐりぬけて地表に達するであろう。

地表面では大気の密度は 1 kg/m^3 であるが，高さが 20 km で 10^{-1}，50 km では 10^{-3}，100 km で 10^{-6}，400 km で 2×10^{-11} と低下する[6]。ここでは大気が同じ密度でできていると考えて，高さはほぼ 10 km であるとする。あるいは 10 m の液体の水(1 kg/cm^2 の厚さ)で置きかえてもよい。高エネルギー陽子は大気に突入して酸素や窒素の原子中の電子と相互作用してエネルギーを次第に失う。陽子と電子との間には衝突距離を b としたときクーロン力 e^2/b^2 がごく短い時間 2b/v だけ働き，その結果，電子に陽子の進行方向に対して垂直方向に運動量 $\Delta p = \int F dt$=(クーロン力)×(衝突時間)$=2e^2/vb$，あるいは電子が受け取るエネルギーは$(\Delta p)^2/2m_e$，物質 1 kg 中に存在する電子数を N とすれば，衝突距離が b と b + db との間にある物質の厚さ 1 kg/m^2 あたり電子数は $2\pi Nbdb$ であるから，陽子の飛程 1 m あたりのエネルギー損失は

$$-dE/dx = 4\pi e^4 N / m_e v^2 \cdot \int (1/b)db = 4\pi e^4 N / m_e v^2 \log (b_{max}/b_{min})$$

ここで移行エネルギー $= (\Delta p)^2/2m_e$ と $\Delta p=2e^2/vb$ の関係を用いて log の中の (b_{max}/b_{min}) を $(E_{max}/E_{min})^{1/2}$ で置きかえることができる。E_{max} は運動力学的考察から得られる最大移行可能エネルギーは $2m_ev^2$ (=$2m_ec^2$= 1 MeV）の数倍程度と考えられ[4]，また E_{min} には分子の励起エネルギー 10 eV を入れると $\log (E_{max} / E_{min})^{1/2} = \log (4\ MeV/10\ eV)^{1/2} = 6.4$ がわかる。 N =

$1000\times(7/14)\times6\times10^{23}$/kg, $e^4=(1.44\times10^{-9}$ eV m$)^2$, $m_e v^2=0.5$ MeV を代入して,

$$-dE/dx=12.6\times2\times10^{-18}\times6\times10^{26}\times6.4/0.5\ \text{MeV}=1.9\times10^5\ \text{eV/kg/m}^2$$

大気の厚さは密度 1 kg/m^3 で 10 km の厚さ，あるいは 10^4 kg/m^2 の厚さに相当するので，大気突入前で 60 GeV であったプロトンが大気通過によりおよそ 2 GeV だけエネルギー損失を起こすと考えられる。

銀河宇宙線のエネルギー分布の測定結果によれば，500 MeV あたりにピークがあってそれ以上のエネルギーでは $E^{-2.7}$ で減少している[1)]。そこで 1.4×10^4 J/m^2 のうち 60 GeV 以上のエネルギーをもつ割合をもとめる。それにはエネルギースペクトルの $E^{-2.7}$ に E をかけて ln E に対して縦軸に $E\times E^{-2.7}$ を直線スケールでプロットすると 500 MeV=0.5 GeV に鋭いピークをもつ左右対称な曲線が得られるので全体の面積に対する 60 GeV 以上の部分を占める面積の割合を求める。すなわち

60 GeV 以上の陽子が占めるエネルギーの割合

$$=\int_{60}^{\infty}E^{-1.7}dE\,/\,2\int_{0.5}^{\infty}E^{-1.7}dE\ =\ 1.75\times10^{-2}$$

は 1.75/100 の程度と考えてよさそうなので，宇宙から地表に到達する 60 GeV 以上のエネルギーの陽子は $1.4\times10^4\times1.75\times10^{-2}=245$ J/m^2/年であると考えられる。この陽子による物質 1 kg へのエネルギー付与は上の見積もりから 60 GeV が 10^4 m 厚さの空気に対して 2 GeV のエネルギー付与，したがって 1 m の厚さの空気層に対しては 0.2 MeV のエネルギー付与, すなわち 0.2 MeV/60 GeV = 3×10^{-6} であるから $245\times3\times10^{-6}\ =\ 7\times10^{-4}$ J/kg/年 が得られる。すなわち 0.7 ミリシーベルト/年となる。

(d)太陽風

太陽から常時ふきだしているプラズマ(=太陽風）が，太陽表面の爆発現象フレアに伴って放出される太陽宇宙線である。太陽宇宙線も銀河宇宙線と同様に主成分は陽子であるが，エネルギーは 10^6-10^{10}eV であり， 地球大気による吸収をこえて地表に到達できるのは 10^9 eV 以上の成分である。太陽宇宙線でこのような高エネルギー粒子の発生する頻度は平均で年に 1 回程度であり，そのエネルギースペクトルも一定でなく，現象ごとに異なるのが普通である。大部分を占める低エネルギーの電子や陽子は地球磁場によって地球の(赤道面上で) 500 km から数千 km の高度に捕捉されている。いわゆる放射線帯（バンアレン帯)とよばれ，ここでの粒子のエネルギーは高くはない(MeV 領域）が、その強度はきわめて高い。放射線を捕捉する磁気圏 (magnetosphere) の形状そのものは地球双極子磁場と太陽風プラズマ圧力との相互作用によって決まる。

3．地球岩石に含まれる放射性元素量

現在の標準的な宇宙進化ならびに元素合成モデルによれば[1,2)]，太陽系にみられる元素

は，水素，ヘリウムなどの軽元素を除いて，いずれも星の中の核融合反応と星末期の超新星爆発などにともなって合成・宇宙空間に放出されたものである。温度が下がるにつれてさまざまな鉱物が凝縮し，ダスト(金属・岩石などの成分を核とした数マイクロメートル以下の固体粒子)とガス分子(ガス分子の質量がダスト成分の質量の 100 倍であるとみられている [1])の集まりである原始太陽系星雲ができる。その星雲がいまから 46 億年前の超新星爆発による衝撃波に触発されて集積を始め太陽系を形成する。現在の太陽系の構造は，中心に太陽系全質量の 99.8%をしめる太陽があり，太陽に近い側から地球型惑星（水星，金星，地球，火星，小惑星）が分布し，その外側に木星型惑星（木星，土星，天王星，海王星），さらにその外側に彗星の源と考えられるカイパー帯とオールト雲がとりまく。

(a) 地球をつくった材料物質

太陽系をつくった素材物質（原始太陽系星雲）にふくまれる元素の存在度は，太陽フレアの発光スペクトル分析，宇宙線成分の測定，隕石の化学分析の結果を総合して得られる。Anders and Crevesse が 1989 年にまとめたものから主な元素について**表 1** に示す。この分布は太陽系全体の元素分布をあらわすものであるが，地球における元素分布については太陽系形成のシナリオを考えることから推定する。地球型惑星は基本的に岩石と金属鉄からなり，中心に金属鉄のコア，その周りを岩石のマントルと地殻が覆い，さらに大気で覆われている。この大気は原始太陽系星雲ガスでなく，地球が微惑星の集積によって成長する過程で衝突による脱ガス大気である。つまり原始太陽系星雲ガスが失われた後に地球型惑星が形成されたものである。これに対して木星型惑星は星雲ガスの中で形成されたと考えられる [2]。したがって地球における元素分布は，表 1 から揮発性成分を除いたものとなる(**表 2**)。

表 2 の最後の欄から酸素と鉄のそれぞれが地球の質量のおよそ 32%ずつを占め，またマグネシウムとケイ素もそれぞれ 15%を占めていることが分かる。残りの 5%をアルミニウム，カルシウム，ニッケルが占め，以下硫黄，クロム，マンガン，チタン，コバルトなどの金属，そして塩素，カリウム，リンなどが続く。本研究で検討の対象としている長寿命放射性同位元素をふくむ元素 K，Th，U の重量%はそれぞれ 0.0226 %，4.09×10^{-6} %，1.13×10^{-6} %である。地球の質量 6.0×10^{24} kg を用いて長寿命放射性同位元素の原子数は**表 3** に示すようになる。

(計算式)

元素 K の地球含有量＝6.0×10^{24} kg ×0.0226%＝1.356×10^{24} g

K-40 の原子数＝1.356×10^{24} g×0.0117%×$6.02\times10^{23}/40=2.4\times10^{42}$ 個

元素 Th の地球含有量＝6.0×10^{24} kg ×4.09×10^{-6} %＝2.45×10^{20} g

Th-232 の原子数＝2.45×10^{20} ×100%×$6.02\times10^{23}/232=6.36\times10^{41}$ 個

元素 U の地球含有量＝6.0×10^{24} kg ×1.13×10^{-6} %＝6.78×10^{19} g

U-235 の原子数＝6.78×10^{19} ×0.72%×$6.02\times10^{23}/235=1.26\times10^{39}$ 個

U-238 の原子数＝6.78×10^{19} ×99.27%×$6.02\times10^{23}/238=1.70\times10^{41}$ 個

表 1. 太陽系元素存在度
松井孝典，地球惑星科学入門，p.24(1996) 岩波書店.

元素	存在度
H	2.8×10^{10}
He	2.7×10^{9}
C	1.0×10^{7}
N	3.1×10^{6}
O	2.4×10^{7}
Mg	1.1×10^{6}
Al	8.5×10^{4}
Si	1.0×10^{6}
P	1.0×10^{4}
S	5.2×10^{5}
Cl	5240
Ar	1.0×10^{5}
K	3770
Ca	6.1×10^{4}
Fe	9.0×10^{5}
Ni	4.9×10^{4}
Pb	3.2
Th	0.0335
U	0.0090

表 2. 地球における主な元素の分布
阿部　豊，地球進化論，p.12(1997)，岩波書店.
(データは Kargel and Lews, 1993 に基づく)

元素	質量数	存在度 ($Si=10^6$)	(**) 質量分布
O	16	3.8×10^{6}	6.1×10^{7}
Mg	24	1.2×10^{6}	2.9×10^{7}
Si	28	1.0×10^{6}	2.8×10^{7}
Fe	55.8	1.1×10^{6}	6.1×10^{7}
Al	27	1.0×10^{5}	2.7×10^{6}
Ca	40	8×10^{4}	3.2×10^{6}
Na	23	2.1×10^{4}	4.8×10^{5}
Cr	52	1.3×10^{4}	6.8×10^{5}
H	1	7.0×10^{3}	7.0×10^{3}
Ni	58.7	5.6×10^{4}	3.3×10^{6}
Ti	47.9	3.2×10^{3}	1.5×10^{5}
Mn	55	7.2×10^{3}	4.0×10^{5}
S	32	5.4×10^{4}	1.7×10^{6}
K	39	1.1×10^{3}	4.29×10^{4}
C	12	7.1×10^{2}	8.5×10^{3}
P	31	7.3×10^{3}	2.3×10^{4}
Co	59	2.6×10^{3}	1.5×10^{5}
Cl	35.5	1.5×10^{3}	5.3×10^{4}
Th(*)	232	0.0335	7.77
U (*)	238	0.0090	2.14

(*) Th および U についての数値は，本研究において表 1 のデータから類推して用いた。
(注)質量分布＝質量数×存在度

(b) 放射性元素から放出される放射線

それぞれの放射性原子核が 1 年間に崩壊する個数は ΔN=(崩壊定数)×原子数×Δt の式に Δt=1 年，(崩壊定数)=0.693/(半減期)を用いて計算できる。また崩壊のさいに放出するエネルギーはハンドブック [4]から求めることができる。ただし Th-232，U-235，U-238 は 1 回の崩壊によりそれぞれ $6\alpha + 4\beta$，$7\alpha + 4\beta$，$8\alpha + 6\beta$の放出を行うこと，それぞれの崩壊系列において親原子核の質量数が小さくなるとともに放出される粒子のエネルギーは次第に大きくなり 7 MeV 程度になることが知られている[7]。そこで崩壊系列における全放出エネルギーは最初の崩壊エネルギーに（粒子数×1.5）を乗じたものを近似的に用いることにする。またこれらの結果を表 4 にまとめてある。表 4 には，46 億年前の崩壊エネル

ギーについても載せてあるが，放射性壊変の式 $dN/dt = N(t)\ \exp(-\lambda t)$に，現在を t=0 とし 46 億年前を t=−46 億年として同様に求められる。

(計算式)：

K-40：1.30×10^{33}，壊変数×(0.89×1.33 MeV β + 0.11×1.46 MeV γ)

$=2.46\times10^{20}$ J (β) + 3.34×10^{19} J (γ)

Th-232：3.13×10^{31}，壊変数×(3.99 MeV α + 0.23×0.059MeV (γ)

$=2.0\times10^{19}$ J (α) + 6.8×10^{16} J (γ)

Th-232 は引き続き崩壊をくりかえし，α粒子は 6 個放出される。

U-235：1.24×10^{30}，壊変数×(4.4 MeV α + 0.2 MeV γ)

$=8.73\times10^{17}$ J (α) + 3.97×10^{16} J (γ)

U-235 はひきつづき崩壊をくりかえし，α粒子は 7 個放出される。

U-238：2.63×10^{31}，壊変数×(4.2 MeV α + 0.23 ×0.05 MeV γ)

$=1.77\times10^{19}$ J (α) + 4.84 $\times10^{16}$ J (γ)

U-238 は引き続き崩壊をくりかえし，α粒子は 8 個放出される。

表 3. K-40, Th-232, U-235, U-238 の崩壊特性と地球における推定存在量

	半減期	壊変形式	放出エネルギー (MeV)	原子百分率 (%)	地球における存在量 (個)
K-40	1.28×10^{9} y	β(0.89%) EC(0.11%)	0.89×1.33 MeV β +0.11×1.46 MeV γ	0.0117	2.4×10^{42}
Th-232	1.41×10^{10} y	α (6α + 4β)	3.99 MeV α +0.23×0.059MeV γ	100	6.36×10^{41}
U-235	7.04×10^{8} y	α (7α + 4β)	4.4 MeV α + 0.2 MeV γ	0.72	1.26×10^{39}
U-238	4.47×10^{9} y	α (8α + 6β)	4.2 MeV α +0.23×0.05MeV γ	99.27	1.70×10^{41}

表 4. 現在および 46 億年前における各放射性元素による 1 年間の放出エネルギー

	現在の放出エネルギー		46 億年前の放出エネルギー	
	αおよびβ粒子 (J/年)	γ線 (J/年)	αおよびβ粒子 (J/年)	γ線 (J/年)
K-40	2.46×10^{20}	3.34×10^{19}	2.97×10^{21}	4.03×10^{20}
Th-232	1.8 $\times10^{20}$	6.12×10^{17}	2.26×10^{20}	7.65×10^{17}
U-235	9.17×10^{18}	4.17×10^{17}	8.49×10^{20}	3.86×10^{19}
U-238	2.12×10^{20}	5.8 $\times10^{17}$	4.33×10^{20}	1.18×10^{18}

(c) 地球における放射性元素の分布

放射能の合計でみると現在では 6.82×10^{20}J/年，46 億年前では 4.92×10^{21}J/年でおよそ 7 倍の強さが得られるがもちろんより短寿命の放射性元素が多数存在したはずである。これらの放射性元素が地球全体に均一に存在しているならば，現在で 6.82×10^{20} J／6.0×10^{24} kg $=1.14\times10^{-4}$ Gy となる。しかしながら地球は形成のときから主として金属鉄からなるコア，酸化物などの岩石からなるマントルに分化し，さらには，地殻，海洋，大気などという構造をもつにいたっている。K，Th，U などの親石元素がコアには存在しないでマントル（4×10^{24} kg）と地殻（$0.03\times\times10^{24}$ kg）に均一に存在していると考えると，6.8×10^{20}J/(4×10^{24} kg)=1.7×10^{-4} Gy である。あるいはさらに極端に考えて，これらの放射性元素がすべて地殻に存在すると考えれば，地殻内での線量は 6.8×10^{20}J/(0.03×10^{24} kg)=0.023 Gy，コアやマントルでは線量はないことになる。ただ注意しなければいけないことは，α線やβ線の飛程が岩石中で 1 mm 以下であるのでその放出エネルギーは放射線としてでなく熱源として作用するであろうことである。その意味で γ 線による線量を計算すると，3.5×10^{19}J/(0.03×10^{24} kg)=1.17×10^{-3} Gy が得られる。また地殻の岩石内でなく地表における線量としては，地表面の片側からだけの被ばくになるのでこの 1/2 を取るべきである。したがって本計算で用いた仮定の範囲では，地表面において 0.6 mGy，すなわちが 0.6 ミリシーベルトが大地からの γ 線による被ばく線量である。

(d) 地表面からの高さによる減衰

つぎに地表面からの高さ h の点における被ばく線量を考える。この場合は大地からの γ 線が空気層によって吸収されて減衰する。底面積 1 cm^2，高さ h cm の 1 気圧の空気(主として窒素分子) h cm^3 を考えてその中に含まれている電子

個数：$[h/(22.4\times1000)]\times6.02\times10^{23}\times14$

その γ 線散乱の有効断面積：$\pi(2.8\times10^{-13}\ cm)^2$

を考える。ただしいわゆる電子の古典半径を用いて断面積とした。すると高さ h cm の空気による γ 線のコンプトン散乱の確率が 9.3×10^{-5} h と求められる。地表面から垂直上方向に放出する γ 線による線量は地上からの高さ h cm では $D(h)=0.6\exp(-9.3\times10^{-5}h)$ mGy となる。すなわち地上から 1 mの位置で 0.59 ミリシーベルト/年，地上から 100 m の位置で 0.24 ミリシーベルト/年となる。

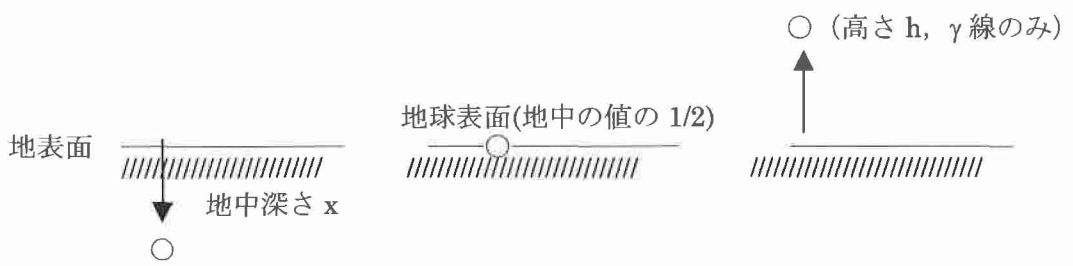


図 1. 地球表面における放射線被ばく線量の計算（○点の線量をもとめる）

(e) 体内の K-40 による被ばく線量の見積もり

通常のヒト（70 kg）の体内にはおよそ 0.140 kg のカリウムが含まれている[5]。1 崩壊あたり 1.3 MeV のベータ線放出を行い，このエネルギーがすべて体内で消滅すると考える。年間の被ばく線量はこれまでと同様の計算により，$[140\times0.0117\%\times6.02\times10^{23}/40]\times[0.693/(1.28\times10^{9})]\times1.3\ \mathrm{MeV}/70\ \mathrm{kg}=3.9\times10^{-4}$ Gy となる。

(f) 体内にとりこまれる Th や U の崩壊系列に属する元素の見積もり

Th や U は，K と違って，直接にヒトが摂取することはないが，崩壊の途中で出現する Rn-222(希ガスであり，かつ寿命が比較的に長く半減期は 3.7 日)は地殻から遊離して大気に移行し呼吸によって生物圏に移行する。このことによる被ばく線量の見積もりは極めて難しいが，地殻と大気が接する面積（地球表面積）で厚さ 1 cm の部分から放出されるものと仮定しよう。地殻における U-238 の崩壊による全放出エネルギー/年のうちの 1/8 に相当する $2.12\times10^{20}\mathrm{J}\times(1/8)=0.265\times10^{20}$ J のうち（全地球表面の 1cm 厚さ部分の質量）/(地殻全質量)$=(3.49\times10^{15})/(2.6\times10^{22})=1.34\times10^{-7}$ の割合が大気（5.1×10^{18} kg）に移行するとすれば空気中での Rn-222 からの被ばく線量として（3.55×10^{12})/(5.1×10^{18})$=7\times10^{-7}$ J/kg となり，地殻から直接に受ける γ 線被ばく線量に比べて無視してよさそうな結果が得られる。しかしながら洞窟や建物（高さ 10 m）に閉ざされた場所では大気全体に広がるのでなくその約 1000 倍に濃集されると考えられる。すると 0.7 mGy/年(α粒子の線質ファクターを 20 とすれば 14 ミリシーベルト/年にもなる)というもっともらしい値になる。

4. 考察

本研究では，宇宙にあまねく分布する超新星爆発がわれわれの被ばくの原因となる宇宙線の起源であるとの仮定から出発し，地球磁場と大気による吸収効果を考慮することによって，年間被ばく線量 0.7 ミリシーベルトを算出した。地球磁場による効果がなければこの線量はおよそ 50 倍の増加となる。また 46 億年から 50 億年前に起きた超新星爆発のさいに合成された太陽系構成の元素組成から出発し，地球進化の過程で起きたコア，マントル，地殻の分化によってウラン，トリウム，カリウムをふくむ鉱物の集積を考慮することによって地表における線量等量 0.6 ミリシーベルトとカリウムによる内部被ばく 0.4 ミリシーベルトが説明された。本研究で用いた大雑把な仮定と計算手法を考慮すれば，いずれも満足できる結果を得たものと考えられる。

しかしながら宇宙線による地球表面における線量は 10^{9} eV 以上の銀河宇宙線から大気中でつくられる二次放射線によるものである。二次放射線は最初の段階ではパイ中間子、陽子、中性子が主であるが、つぎの段階ではミュー中間子、光子、電子が主になる。ミュー成分はさらに電子成分に変わる。このほかに核破砕(spallation）や中性子捕獲によってさまざまな放射性核種が生成され、環境放射線としてかかわってくる。また陽子だけでなく 15-20%のアルファ粒子，さらに重粒子，そして電子による寄与も考慮していない。さらに超新星爆発のエネルギーはすべて高エネルギー粒子の発生として考えたが，光子(γ

線，X 線)の発生も考慮すべきであろう。また地球における海洋および陸地の地殻，そして花崗岩や玄武岩への集積の違いなどを考慮することなく，地殻ではすべての放射性元素が均一に分布すると仮定したが明らかに無理があるといえる。それにも係わらず，本研究の結果は自然放射線の起源を理解しやすい形で説明し，放射線教育に関連して有用な情報を与えるものと言えよう。

参考文献

1) 桜井邦朋：天体物理学の基礎，地人書館，1993
2) 松井孝典：地球惑星科学入門，p.24，岩波書店，1996
3) 阿部　豊：地球進化論，p.12，岩波書店，1997
4) 大野新一：異なる放射線による照射効果の理解，放射線化学，No.73，p. 1，2001
5) 桜井弘：元素 111 の新知識，講談社，ブルーバックス，1997
6) 国立天文台編：理科年表，丸善，2002
7) M. Haissinsky, Nuclear Chemistry and its Applications, Addison-Wesley, 1964, p. 88.

(2002 年 3 月 15 日受理)

放射線教育 Radiation Education
Vol. 5, No. 1, p. 51—60 (2001)

科学技術と社会

更田豊治郎
（財）日本海洋科学振興財団
（〒110-0008 東京都台東区池之端 1-1-1 池之端ビル 4 階）

[要約] 科学技術に関連する世界の現状を概観しながら、科学技術と社会の関係について考察し、学校の初等・中等教育において理科教育の比重を高めるべきことを強調する。

１．はじめに

教育にも世相が反映するのは自然なことであるが、中・長期的に世相を改善するために教育の改善が必要である。教育は学校のみならず、家庭や社会においても重要であって、学校教育における教科種目の時間配分や教科内容、個性尊重方策、入試制度などの多少の改善などで総合的に顕著な改善効果が期待山来るほど容易な問題ではない。人類社会が繁栄し複雑化すればするほど、あらゆる社会活動において総じて個人や特定の集団の利益から独立した是々非々の精神と程度問題の判断が大切であり、それは教育改革を考える場合にも肝要である。

今日、日本の電力消費量の約 35％は原子力発電が供給している。これは政府が一貫して原子力発電推進の政策を維持し国民の支持があったからである。また、戦後経済もまだ脆弱な状況で、当初は主として米国からの導入技術に依存していたものを十分に自家薬籠中の物としたのは、元々戦前から日本の教育水準が高く、科学技術の素地もしっかりしており総じて勤勉だったからである。

日本政府は地球環境保全のためにも原子力発電をさらに増進すべきであるとの政策を堅持しており、我々はこれを正しいと思っているが、これに反対し、世界の大勢も反対の側にあると宣伝する勢力も軽視できない。もちろん、長所だけという制度も装置も無いし、例えば総合的かつ長期的観点から、チェルノブイリ事故をはじめこれまでの全ての事故を考慮に入れた現実の原子力発電の安全性は、同量の電力を他の方法で発電する場合の安全性と比較して優るとも劣らないと我々は考えているが、起こる確率がいくら小さくても、仮想的に重大な事故が起これば大きな災害となる潜在的危険が無いと断言できない限り、原子力発電反対の勢力があることは無理の無いことであり、何事にもある程度の反対勢力があることは社会の民主的健全性を表すものとも言えよう。しかし、科学的に間違った情報が広がりすぎることは大きな社会的被害をもたらす危険をはらんでいる。国策に関する正論がより多くの国民に理解される程度は国民の教養水準に依存するから、教育改善努力はどこまでも続けられねばならない。

過度のいじめや不登校問題、少年犯罪の凶悪化などの深刻な教育問題をここで論ずる余裕はないが、生徒の理科離れ傾向も重大であり他の教育問題と無関係ではない。既に生徒の負担軽減のために最も基礎的な物理などが必修で無くなっている上に、週休 2 日による授業時間短縮の影響を補うために総合学習の時間が設けられるという状況を聞いて心配は減らない。（総合学習の時間の考え方は理想的であるが、全授業時間短縮によって必修的基礎教育が弱まることを補うための苦肉の策のように思えるのは残念である。しかし決

まったからには総合学習の時間を大いに活用してもらいたいものである。校外の資源も利用するなど知恵を働かせるにしても、先生方が一層勉強をしなければならないという実質的負担は増えるが、これは先生方自身への建設的負担と言うべきであろう。この論説の部分部分で、総合学習の時間を構築する上でヒントになるものが入れられればと意識しているつもりである。）筆者が小学 6 年のときに小学校が国民学校と改称し太平洋戦争が起こり、学徒動員令による軍需工場での労働を経験して中学 4 年で終戦を迎えた。自分で戦前派と戦後派に挟まれた戦中派と思っているが、既に古い人間のためか、いくら社会が進歩し複雑化して教科の内容も量も変わったといっても、初等中等教育における生徒の負担が戦前と戦後でそれ程大きく異なるはずがあるかという疑問を持っている。初等中等教育においてこそ均衡の取れた教科編成が必要という観点から、倫理や情操教育の重要性と共に理科教育に一層の重点が置かれるべきであり、例えば、放射線という自然の最も基本的存在について理科教育の中で長期にわたって妥当に扱われなかったようなところが改善されるべきである。なお、この論説での主張は必ずしも理工系専攻の人を増やしたいためのものではないことを念のため付言しておきたい。

以上の考えを背景として、主眼を「学校の初等中等教育では理科教育の比重を大きくすべきである」との主張にしぼり、その根拠に関して表題について考察する。

2．科学技術の進歩と人類社会

科学技術の進歩に重点を置いて世界の現状を概観しながら科学技術と社会の関係について考察する。

1）20 世紀における科学技術の進歩が産業の急速な増大をもたらし、それによって天然資源とエネルギーの消費が急増した。その中でも化石燃料の消費がずば抜けている。人類の生活水準は格段に向上し、平均寿命も伸びているが、他方、地域的な公害問題が増え、大気中の CO_2 など温室効果ガス濃度の上昇など**地球規模の環境が問題**になってきている。地球温暖化に国際的に対応するための気候変動枠組条約（地球温暖化防止条約）（1994 年 3 月発効）のもとで 1997 年 12 月に京都で開催された気候変動枠組み条約第 3 回締約国会議（COP3: The Third Conference of Parties to the UN Convention on Climate Change ）から COP6 までの経過からも判るように、地球の自然環境という人類全体の問題に対する合理的対策についても各国の国益がからんで世界的合意を得ることは至難である。世界全体の生活水準が改善されていても、地域的・国際的な格差や対立意識などはなかなか改善されず、利害衝突や紛争が絶えない。

地球環境とエネルギーの問題をここで解説する余裕はないが、この問題の理解と対応に科学技術が多面的に大きく関与することを感じてもらう狙いで、関連する事項あるいは主要語を 1 頁に配置したものを**第 1 図**に示す。第 1 図について少しだけ付言する。**アボガドロ数**は 1 モル（原子量 A の原子だけの集団なら A グラムが 1 モル（1 グラム原子）；例えば、水素の 1 モルは 1.0079 g、天然ウランの 1 モルは 238.03 g）の単一物質の中に含まれるその物質の最小単位粒子（原子、分子、など）の数である。アボガドロ数の大きさは 1 個の原子の小ささを表しているとも言える。今日の科学技術の理解には**ミクロの世界**についての理解が大切であり、地球規模の環境問題を考えるにも、アボガドロ数などの基礎物理定数についての基礎的知識などが重要になる。

[補足] アボガドロ数などの基礎知識は理科で順を追って教えるのが望ましいのは当然であるが、授業の構成によっては年次的に早すぎても先生の扱い方次第で断片的基礎知識が入ることがあってもよいと思う。そのアボガドロ数について次のような寓話がある。

「ナポレオンの時代から現在まで地球の大気の全分子が不変だという無理な仮定をし、ナポレオン1世の臨終の吐息（200 cc とする）の分子に印を付けたと（これも不可能な）仮定をして、それが大気によく混ざり十分に拡散したとする。今、あなたが息を吸い込んだら（Y=1 ℓ とする）、その中に印の付いた分子が 1 つでも入っていると思うか。」という問題である。

普通、素直に直感的には入っているとは思えないだろうが、そういう質問をするのだから入っているとするのが正解なのだろうと勘を働かせる人もいるだろう。実際に計算してみよう。地球の大気の量は 5.3×10^{21} g と国立天文台編の理科年表に載っている。（余談：この値がどの様にして求められたかは知らないが、地球の表面積 $=5.1\times10^{8}\,km^2=5.1\times10^{18}\,cm^2$ に 1 atm = 1.033 kgf/cm^2 を乗じた値と一致する。）大気の組成を窒素 78%、酸素 21%、アルゴン 0.9%として、平均の分子量を求めると 28.95 である。この平均分子量での大気のモル数は $5.3\times10^{21}\div28.95=1.83\times10^{20}$ mol となり、これに 22.4 ℓ を乗じて、標準状態（0℃、1 気圧）としての大気の体積は 4.1×10^{21} ℓ となる。200 cc（0℃、1 気圧）中の分子の数=（アボガドロ数=$6.022\times10^{23}\,mol^{-1}$）$\times0.2\div22.4=5.4\times10^{21}$ 。吸気 Y の中に入っているナポレオンの印の付いた分子の数は $(5.4\times10^{21})\div(4.1\times10^{21})=1.3$。すなわち、1 個は入っていることになる。

これはアボガドロ数が如何に大きな数であるかを認識するのに良い例え話であろう。チェルノブイリ原発事故は多量の放射能が大気に放出され広い範囲に被害が及んだ二度と起こしてはならない史上最悪の原発事故である。この様な異常事態については事実についての客観的な分析評価が肝要で、許すべからざる悪事でも、その影響を事実からかけ離れて過大に宣伝することは他の健全な事業の発展を不当に抑圧するなど、結果として社会の損失を招きかねない。チェルノブイリ原発事故で放出された放射能が日本でも検出されたことが大きく報道されたが、大量の空気をフィルターに通して微粒子を捕集して高感度の放射線検出器で測定した結果、微量のチェルノブイリ事故からの放射能が日本で検出されたことだけでは驚くには当たらないことが、上記の寓話から類推されよう。

[余談] 例えば、アボガドロ数や或る元素の1モルが何グラムか、などをどの程度の精度で知る必要があるかは、その数値を使って計算する問題が要求している精度次第であり、一般知識としてなら、概数であることさえ心得ていれば、アボガドロ数は $6.02\times10^{23}\,mol^{-1}$ でも $6\times10^{23}\,mol^{-1}$ でもよいだろう。10^{23} の方が大事である。円周率を 3.14 として、あるいは 3 として計算するかの問題は、例えば面積の計算をするときに要求される精度如何であるという意味では、前述のことと同様である。しかし、円周率はπで表される数学で重要な定数であり無理数であることは早晩学ぶ必要の大きいことであるので、低学年でも長らく 3.14 で教えてきたものを、負担軽減のためか 3 で教えるというのは大いに疑問である。

2) 人類は２０世紀に２度にわたる世界大戦を経験し多大の損害を被った。戦争の動機・功罪・結果などの評価を安易にすべきではないが、結果として植民地が無くなり、民主化が広まった２０世紀後半の世界の状況は、概して人類の進歩と言えるであろう。科学技術の進歩は兵器の強力化・高度化も促進し、安全保障を困難にしている所がある。広島・長崎の原爆被爆で膨大な数の非戦闘員・一般市民が死傷したが、世界は未だ核兵器の廃絶あるいは確実な凍結への道を確立していない。このことが原子力平和利用の発展を阻害しているところがある。

原子力の平和利用では当初、その主目的とされた原子力発電は化石燃料を燃焼する火力発電（大気中の二酸化炭素濃度上昇の問題が表面化する以前に、主として化石燃料供給の先行き不安から）に取って代わる本命として急速に開発利用が進んだが、チェルノブイリ原発事故（1986 年）を最大の契機として、原発利用を増進する政策には世界的にブレーキがかかったままである。原子力の平和利用は広い意味では**第２図**に示すように、大量のエネルギー源としての利用[A]以外にも広い領域[B]を包含している。この[B]の領域は全般に目覚しい進歩発展を続けており、社会に多大な貢献をしている。しかし一部では、**放射線・放射能**についての理解不足や、低線量の放射線被曝を過剰に恐れることが不合理で無意味なことについての理解が行き届いていないために、食品照射のように安全性も高く、明らかに有利な利用が進められていないといった実情もある。

[補足]「原子力」は atomic energy の訳語と言ってよいだろうが、この atomic energy は核反応の一種である核分裂で発生するエネルギーであるから元々nuclear energy（**核エネルギー** // 核分裂エネルギーnuclear fission energy あるいは単に fission energy）と呼び、原子爆弾 atomic bomb は nuclear bomb と言うほうが適切だった。ただし、nuclear は nucleus の形容詞で、単に nucleus と言えば、物理・化学では原子核 atomic nucleus（ほかに環式化合物の環を例えばベンゼン核 benzene nucleus など）、生物学では細胞核 cell nucleus、解剖学では神経核 nucleus in the central nervous system、天文学では彗星の核、を言うなどである。当初から原子力という用語が定着したのを必ずしも不自然とは言えない。**用語**は必要に応じて確かめておくことが肝要である。

核分裂で発生するエネルギーと、化石燃料の燃焼により発生するエネルギー（原子・分子が反応して発生する化学エネルギー）とを、反応に関与する物質の同じ質量当たりに発生するエネルギー量で比較すると、前者は後者の百万倍以上も大きい。それ程**巨大な潜在エネルギー**を持っているものを燃料（同じ「燃料」という語を使っていても、核燃料と化学燃料とでは燃焼の機構が全く異なる。）にしていて、「原子炉は間違っても原爆のような桁違いに強力な爆発を起こすことは無い。」と言われても容易に納得出来ないのは無理の無いことである。原子炉の中でどの様に反応が進行していて、その複雑な反応が単純な方法でどの様に巧妙に制御されているかは、余程丁寧に判り易く説明しなければ納得し難いであろう。この様なことに理解の進む程度は、説明の巧拙は勿論ながら、説明を受ける側の理科の素養と説明者の信用度も関係している。

20 世紀に物理学が比類ない飛躍的進歩発展を遂げたことは疑う余地が無い。20 世紀に物理学は**分子・原子・原子核・素粒子**とミクロ世界を究明し、**相対性理論と量子力学**を生み、それらは人間の五感で認識できるマクロ世界で成り立つ古典物

理学と矛盾なくつながっている。そればかりでなく、天体観測の進歩と共に、ミクロ世界の物理が天体物理学・宇宙論の発展にも役立っていることは目覚しい。また、相対性理論から導かれた「質量とエネルギーの同等（あるいは等価）原理」$E = mc^2$が厳密に成り立っていることを原子力で実感できるのも素晴らしい。

物理学の大枠は素晴らしく進歩したが、他方、科学的に判っていないことは限りなく多い。原子力の基礎である原子核自体の性質について充分には解明されていないことも少なくないにもかかわらず、高性能の原子炉を開発し利用出来るのは、理論的に完全に解明されていなくても、核物理実験に基づく膨大なデータ（核データ）を使って解析・計算し、核データのみならず材料についてなど諸々の基礎データの精度・信頼度に応じて工学的に安全余裕をとるなどして、さらに模擬実験なども行って、新しい原子炉を作り上げるからである。これは、自然科学と工学・技術との関係を示す**良い例**である。

3) **生物学**でも、分子レベルのミクロの基礎研究の進歩によって生命**機構**の解明が進んでおり、医学と共に今世紀に一層急速な進歩を遂げるに違いない。しかし、生物工学・生体工学の適用は、合理的かつ慎重な倫理的判断に基づいた法律で規制されなければならないと考える。生物学関連分野は倫理面で原子力よりも厳しく難しい問題を含んでいるように思われる。

4) 物性物理学の進歩が電子工学とコンピューター工学の進歩を促進し、それがまた、科学技術全体の進歩を加速してきた。コンピューターと通信技術の進歩による**通信・情報**の世界の大きな変化は、卑近なところでインターネットと携帯電話によって象徴されるが、情報流通（情報化?）は今世紀にさらに目覚しく発展するに違いない。テレビが普及始めた初期に評論家大宅壮一が、テレビの普及によって「一億総白痴化」するという様なことを言ったが、高度な情報化がもたらす多面的効能の危険な一面を看破した至言であろう。既に情報化の進んでいる現在、必要な情報の公開に欠けている部分もあるけれども、宣伝・扇動や不正確・不公正・誇張・曲解などのものを含めて**情報は氾濫**している。経済優先の現代、マスコミの社会的責任を訴え、営利主義の自粛や、報道の早さよりも公正さ・正確さ等を期待しても無理と言わざるを得ない状況がある。この様な状況が改善される見通しは暗いが、言論・報道の自由は守らなければならない。公衆や青少年が不公正な情報に迷わされないようにするには、各分野の専門家個人による正確な情報の発信が必要なことは言うまでもないが、よく調査・検討・評価された公正な情報が普及するように、責任ある公的機関が積極的に活動すべきことと、公衆・青少年の教養を高めること、そのための学校の**初等・中等教育の重要性**などを特に強調したい。

5) 人類社会の繁栄に伴って社会全般に**道徳・倫理**が低下しているのではないかという心配がある。この論説でこの問題に立ち入る余裕はないが、これにやや関連する問題として、この節までに述べてきた事柄も含めて、人類の繁栄に役立ってきた科学技術発展結果の功罪から、特定の科学技術について「負の遺産」とか「影の部分」とかの表現で暗示し、科学技術そのものに**善悪**が内在しているかの様に論じる人もいる。この事について私は次の様に単純に考えている。

科学の進歩が工学・技術の進歩を加速し、その逆もまた同様である。この様に科学と技術は密接に関係してはいるが別物である。科学は善悪の概念と無関係であるが、工学・技術の適用・利用では善悪・功罪が起こり得る。誰かの言葉であるが、文明の利器を有意義に利用するか、悪用するかは、結局それを使う人間次第である。例えば、科学研究活動に競争意識が入り得るが、それは科学の部分的進行の速度に影響し得るのみである。時として、誤った理論やデータが生まれ、科学に関する活動で不正行為さえ起こることがあるが、科学には基本的に**実証**を要求することが内在しているから、科学における誤りは、あまり長期にわたらない内に正される。科学は**着実な積み上げ**の学問である。科学におけるブレークスルー（breakthrough＝（難関などの）突破、（難問解決による）顕著な進歩）は、それ以前に確立された理論や構築されてきた体系と滑らかに（無理なく）つながるはずのものである。それについて 2) の[補足]でも述べたが、原子核のようなミクロの世界の現象は古典物理学からは想像出来なかったようなことで、それを説明するのにニュートン力学は無力で、量子力学が必要になったからといって、マクロの世界でのニュートン力学の正しさはいささかも色褪せるところが無い。

6) **民主主義社会**においては、大規模の研究開発事業や産業は、その必要性と安全性について公衆の大多数の理解と受容・支持が得られなければ推進できない。その妥当な理解を得るためには、殆どの場合に特に科学技術についての**公衆の素養**が望まれる。その素養は、あらかじめ最新の科学技術についてある程度の予備知識があると言う様なことよりは、当面の事業計画について当事者・専門家の賛否両論を聞いて、それについて先入観等に囚われず、扇動や甘言などに惑わされず、合理的な判断を持てる程度を高める様な基礎的な素養でありたい。

7) 「**学問**」という語感は少々堅苦しく感じられるように思える。英語の learning の方が素直で平易な語感がするように思う。それは余計なこととして、広辞苑（第四版）では：

> がく・もん [学問・学文] ① 勉学すること。武芸などに対して、学芸を修めると。② (science(s)) 一定の理論に基づいて体系化された知識と方法。哲学・史学・文学・社会科学・自然科学などの総称。学。 { 例文など省略した。}

とある。私は、この②の「一定の理論に基づいて」は削除すべきだと思う。或る学問の部分の或る過程あるいは時期においては、上記の括弧内を付けたままでよいこともあろうが、「学問」あるいは「science(s)」の語義として②は適切さに欠けると思う。知識の集積とその体系化から理論が生まれ、検証されて、より一般性のある理論が形成されるのであって、全般に、初めに理論があり、それに基づくものとするのは、平たく言って教条主義的ではないだろうか。

[補足] 用語について 2)の補足で触れたが、一般に、語義を短い記述で正確に表すことは難しいことであり、さらに、語義そのものも変遷しうるものである。従って、上述の私の指摘も、教条主義的という表現など、些か適切さを欠くところがあるかもしれない。くどくなるが、私は広辞苑を座右において活用しており、常々辞書の類の適切な記述に感銘を受けているが、辞書でも例外的なことが起こりうることを述べて置きたかったのである。

同じ広辞苑で、「科学」について次のように記されている。

か・がく [科学] (science フランス・イギリス・ Wissenschaft ドイツ) ① 世界と現象の一部を対象領域とする、経験的に論証できる系統的な合理的認識。研究の対象あるいは方法によって種々に分類される（自然科学と社会科学、自然科学と精神科学、自然科学と文化科学など）。通常は哲学とは区別されるが、哲学も科学と同様な確実性をもつべきだという考えから、科学的哲学とか、哲学的科学とかいう用法もある。② 狭義では自然科学と同義。

この①の方が、前述の [学問・学文] の②として、より適当と思う。

さらに、新明解国語辞典第五版（三省堂）では、「学問」について「①（学校で）今まで知らなかった知識を教わり覚えること。（中略）②基礎から積み重ねられた、体系的な専門知識。」とある。これは、短く平易で的確な記述である。

自然科学に限らずあらゆる学問が人類文明・文化の進歩と共に難しくなっているのは自然であり、**複雑化し専門が分化**して、同じ分野でも専門が異なると互いによく知らない状況が広がり深くなってきている。科学技術の進歩によって、製品の故障頻度が激減したが、テレビや自動車は昔はちょっとした故障なら素人にも応急処置が出来たものが今日では歯が立たない。パソコンの機能も飛躍的に向上し、提供されているオペレーティングシステム（OS）も一般人に使い易い方向に開発されているのだろうが、一般人にはマニュアルに従うだけでも時間がかかり、何故ある操作をするとある機能が果たせるのに、在るはずの機能が同様の簡単な操作で果たせないのか、など殆どの操作が**ブラックボックス**を通している感じである。若者ほど理屈ぬきで操作を覚え使いこなすのが早いが、基礎的知識や訓練の集積を省略して、操作だけを覚える傾向が増えすぎるのは心配である。もっとも、学校で教育しなくても、コンピューター**おたく**から、社会に害をなすハッカーが派生するようなところもあるが、**健全な技術の進歩に貢献できる者を育てるような基礎重視の教育が望まれる。専門家**でも同類分野内の他の専門のことをよく知らなくなっている位だから、公衆に判らないことが多くなっているのは無理の無いことで、特定分野全般について、あるいは広い分野にわたって解説し批評する**評論家**の社会的役割の重要性が増している。公衆にとって政治家・官僚・学問的権威・専門家などの信用が低下しているのは大いに憂えるべき実情だが、それ故にこそ評論家やマスコミの公正さ・倫理性が要求される。市民に味方する市民科学者を名乗って社会的大事業の成り行きを批判する評論家がマスコミにもてはやされても不思議ではないが、その評論が本当に市民のためのものなのか、その評論の公正さはどうかなどは、関係する分野の専門家でなければよく評価できないというジレンマがある。社会が複雑になればなるほど、学校の初等・中等教育では、現実に意見が分かれているような社会的問題（言はば難解な応用問題）に触れるのは極めて慎重でなければならず、むしろ**基礎教科に一層の重点が置かれる**べきだと思う。

3．おわりに

社会現象は、歴史・経済・政治などを背景として、それぞれ自我・意思・感情・教養・健康・生活条件などの異なる個人の活動の集合によって引き起こされるから、社会現象が人間（人間も自然の存在ではあるが）の介在しない自然現象よりも格段に複雑なのは当然である（自然である）。ある社会現象について良い対策を見出すためには、その社会現象がいかほど複雑であっても、それに関する事実関係のデータ（fact data）を出来る限り調

調査して分析評価し、信頼度の高いファクトデータベースを構築し、それに基づいて先入観や不確実な情報に基づく過剰な感情などに影響されないで、判定は現実についての合理的かつ科学的な審査によって行われるべきである。言い換えればそのような社会のために、科学的に明確なことを尊重し、根拠の曖昧な俗説に惑わされず、偏狭な教条主義的・原理主義的観念にとらわれない若者が育つような教育を望みたい。

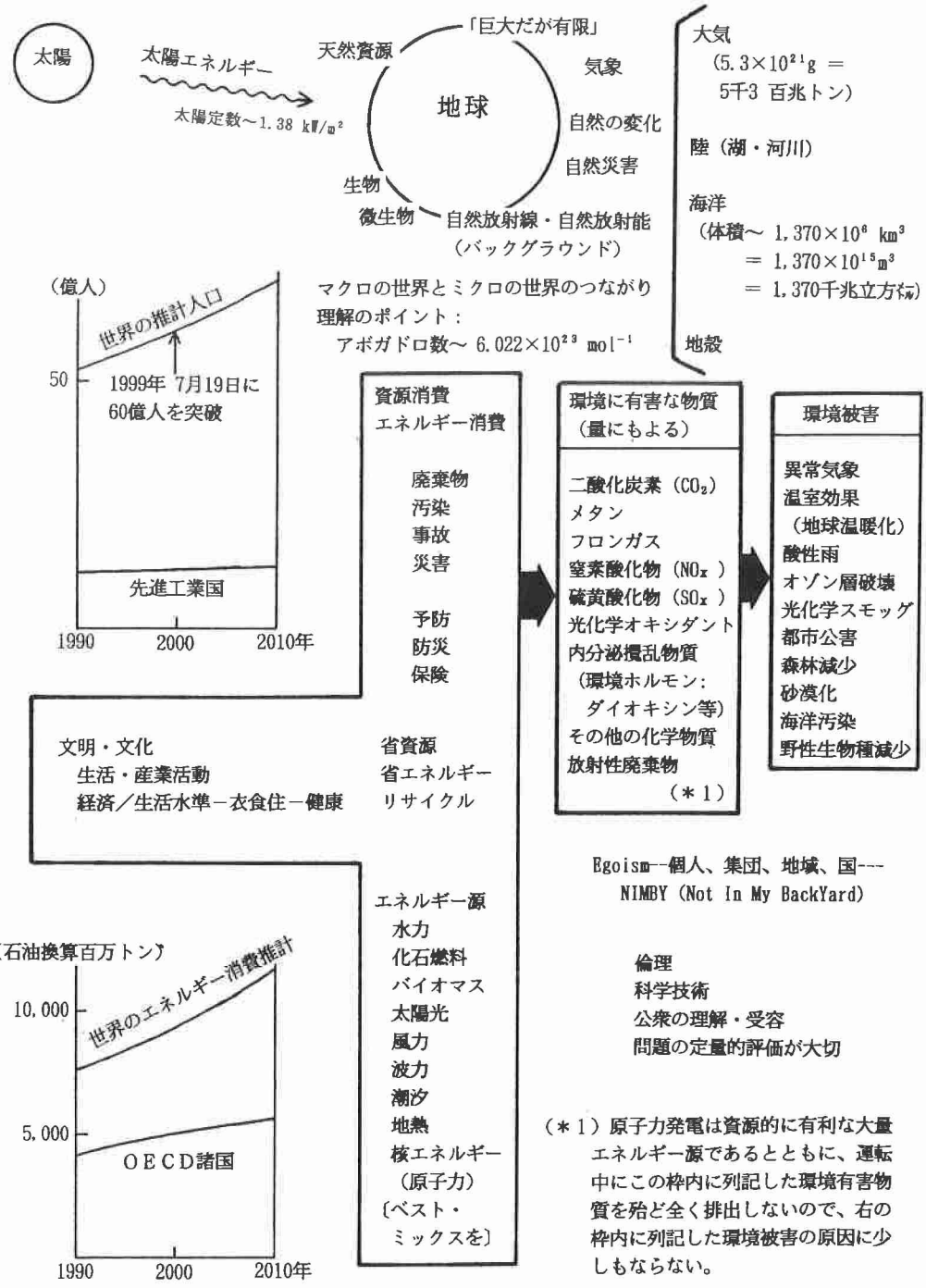
私は自然科学が万能とは思わないが、もっとも着実で信頼できる学問だと思っている。科学は善悪に無関係と言ったが、正しいか正しくないかでは純粋に是々非々である。科学は現象を定量的に説明し、また、ある現象の理解できない程度も評価することが出来る。科学では説明できないことは出来ないとはっきり言う。科学は自然の仕組みをどこまでも追及するが、ついには究極的仕組みを説明できても、その仕組みがなぜ存在するのかということに答えられるとは思えない。究極的な **how** には答えられるとしても、究極の **why** に人智で答えが見つかるとは思えない。自然をどこまでも知りたいという科学の心は、神（宗教を特定するかしないかにかかわらず、人間が論述できる概念を超える）を信じる心と矛盾しない。

人類文明・文化の現在の繁栄に欠けているものの一つが、自然科学・人文科学・社会科学・その他の科学の全体の**整合と統合**であると思われる。その整合と統合が、21 世紀中に多くの人に感知されるほどに進むことを期待したい。

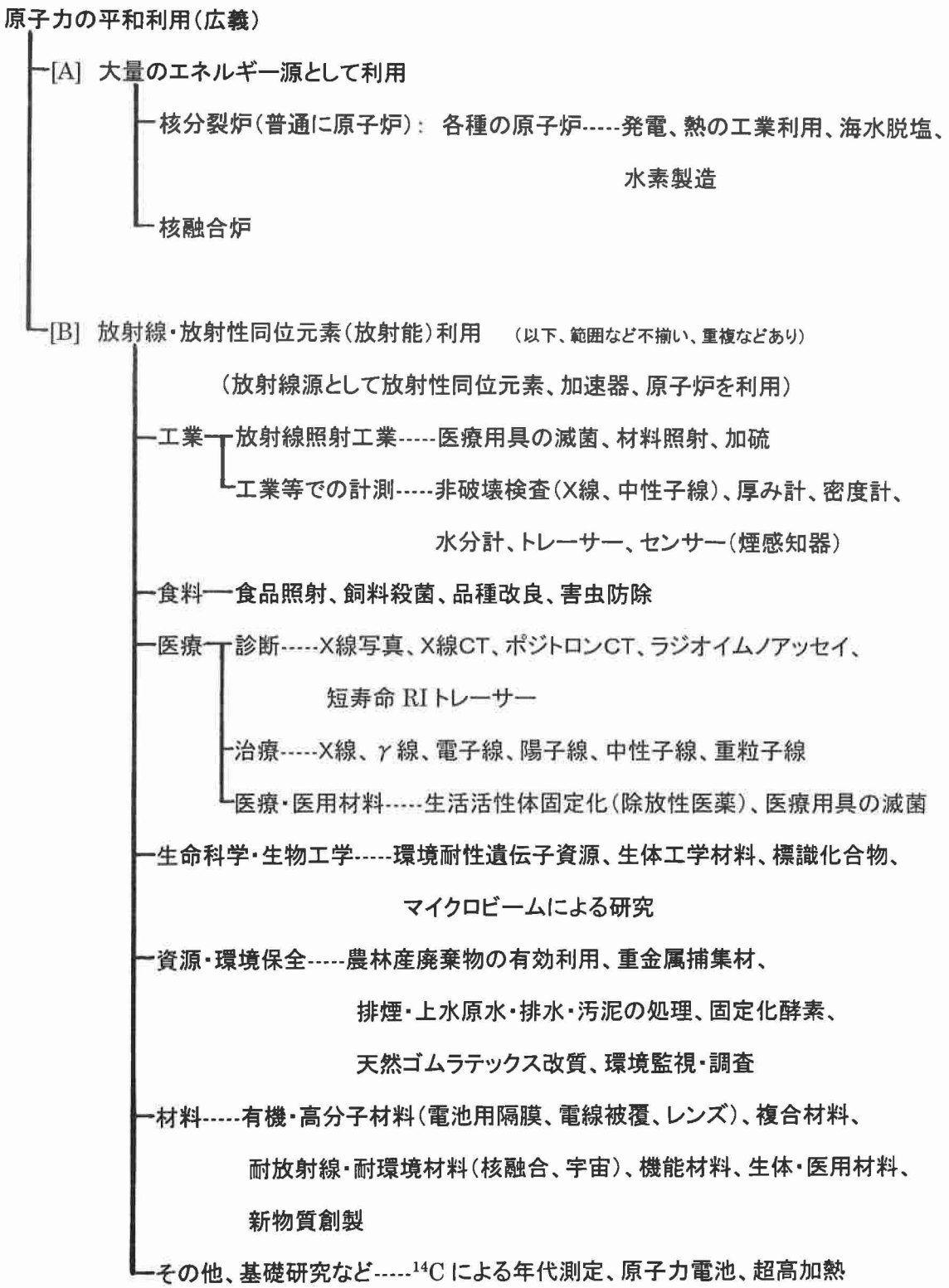
倫理についても触れたが、社会全体の状況が社会全般の倫理水準に反映することは避けられず、分野によって倫理水準が大きく違ってよいといったものではない。職業に貴賤は無いという面を尊重したいと共に、今日の**聖職**の最たるものの一つが義務教育の教師だと思う。幼い頭脳に基本的知識を教えるという比類ない職業ほど聖職と言うにふさわしいものは無い。

(2002 年 3 月 16 日受理)

第１図「地球環境とエネルギー」に関連する事項



（＊1）原子力発電は資源的に有利な大量エネルギー源であるとともに、運転中にこの枠内に列記した環境有害物質を殆ど全く排出しないので、右の枠内に列記した環境被害の原因に少しもならない。



第2図 原子力の平和利用

放射線教育 Radiation Education
Vol. 5, No. 1, p. 61−66 (2001)

放射線影響研究所と竹原石炭火力発電所を見学して

関本　順子
原子力 P.A.を考える会
〒177−0054　東京都練馬区立野町 4 - 6

1．広島への旅—2002 年早春

私達「原子力 P.A.を考える会」のメンバーは、昨年の勉強会で、広島・長崎に落とされた原子爆弾のこと、放射線影響研究所で続けられている疫学調査のことを勉強しました。ぜひ広島を訪れたいという気持ちが自然に起こり、今年の 1 月下旬に、暖かな広島の町を訪問しました。

図1　　広島の町

2．放射線影響研究所

太田川の河口に広がる三角州に発展した広島市は起伏もなく、太田川の支流が何本も流れていて、とても近代的な地方都市でした。唐突ですが、「胡」はどう読むかご存知ですか？「えびす」と読みます。胡通り商店街を歩いていて、私は初めて知りました。三越デパートの前からタクシーに乗り、タクシーで走りながらふっと目の前に広がった緑のゆるやかな丘が比治山でした。比治山には、現在広島市まんが図書館、広島市現代美術館が建設され、全体が比治山公園になっています。放射線影響研究所までの道のりは結構な上り坂で、これでは歩くのは大変です。研究所の近くにはレストランも見当たりません。比治山公園の中でひっそりと存在しているという感じでした。しかしまっさおな青空にかまぼこ型の屋根が映えて、日本にはない独特の雰囲気でした。沖縄から運んだ砂をコンクリートに混ぜて作ったそうです。コンクリートも屋根の鉄板も分厚くて、当時のアメリカの豊かさを感じました。振りかえると眼下には広島の町が広がっています。広島の町を見渡せるこの丘は、広島の人達にとってどのような存在だったのでしょうか。ふっとそんなことが頭をよぎりました。

放射線影響研究所の前身は原爆障害調査委員会（Atomic Bomb Casualty Commission）です。アメリカが 1947 年に広島、1948 年に長崎に設置した機関で、1948 年からは日本も参加して原爆被爆者の調査が行われました。予算は大部分をアメリカが負担していました。当時アメリカにはすでに疫学という学問がありました。原爆放射線をたくさん受けたグループとほとんど受けなかったグループとの間で、病気になった人の割合が違うかどうかという比較をする学問です。一定の固定集団を長期にわたって追跡する疫学は、その当時日本にはまだありませんでした。アメリカの提案によって始まったこの調査は、ヒトにおける放射線影響に関する世界で最も大きな疫学調査です。

被爆と被ばくの違いを説明しておきましょう。原子爆弾の被害にあったことを「被爆」。原子爆弾に限らず放射線を体に受けたことを「被ばく」と書きます。

１９５０年の国勢調査の時に行われた原爆被爆者調査から得られた資料をもとに、ABCCは１９５５年に疫学調査の固定集団になりえる人々の名簿を作りました。１９５０年の国勢調査から２８万４千人の日本人被爆者が確認され、その中の２０万人は当時広島・長崎に住んでいました。この時、すでに被爆後１０年が経過していました。この２０万人の中から選ばれた人々の協力のもと、寿命調査・・１２万人、成人健康調査・・２万３千人　が行われ、現在でも継続されています。現在、被爆者の平均年齢が６０代後半ということですので、まだまだこの調査は続けられます。被爆した人達の９０％強については被爆線量推定値が得られていて、聞き取り調査には大変ご苦労されたようです。被爆後１０年も経過していると、誰でも記憶の薄らぐ部分もかなりあるでしょう。その聞き取り調査の紙も見せていただきました。詳細に建物の形やせん光の入射方向が書かれていて、地道に聞き取りを続けた職員やアルバイトの方々のご苦労がしのばれました。しかしそれ以上に、被爆者でありながら調査に協力した市民の方々は立派だと思いました。その協力があってこそ、放射線被ばくや放射線防護の学問が進歩したといっても過言ではないでしょう。

１９７５年からは、ABCC は放射線影響研究所となり、日本とアメリカで予算を半分づつ負担し、運営も両国の合意によって行われるようになり、やっと日米対等の立場になりました。すでに戦後３０年が経過していました。

疫学調査としては他に胎内被爆者（お母さんのおなかの中で被爆した人達）と被爆二世について行われています。胎内被爆者の調査対象は３千６百人。細胞分裂の激しい妊娠初期に胎内で被爆した人達に障害の現れるリスクが高くなりました。現在は胎内被爆者の死亡率とがん罹患率の調査が続けられています。被爆二世については、障害が現れるのではないかと、被爆後早い時期から心配されていました。そこで、両親のどちらかが爆心地から２ｋｍ以内で被爆したグループを中心グループとして、両親のどちらかが爆心地から２．５ｋｍ～１０ｋｍで被爆したグループ、両親とも爆心地から１０ｋｍ以上離れていたグループの３つの集団（年齢、性別は同じようにする）が選ばれ、細胞遺伝学調査・遺伝生化学調査などが行われています。これらの項目について、原爆放射線によって被爆二世の人達に異常が増えたという結果は得られていないということです。

放射線によってひきおこされる病気として私達素人が真っ先に思い浮かべるのが、がんです。「放射線に被ばくすると必ずがんになる」と思いこんでいる人々もかなりいると思われます。広島長崎の被爆者の方たちは、その答えを教えてくれています。

放射性物質の原子核が壊変（安定した原子核になるまで放射線を出しながら変わっていくこと）する時、ガンマ線（波長が紫外線よりももっと短くて、光と同じ仲間）が出ます。原爆が炸裂した時もガンマ線と中性子線（原子核の中の中性子がたくさんのエネルギーを持って飛び出したもの）が大量にでました。ガンマ線や中性子線は体を突き抜けたり、体の細胞にぶつかったりします。かなりな量の放射線を一度に受けると細胞分裂の盛んな若い細胞は死んでしまいます。骨髄や腸管、毛根などがだめになって急性放射線症状(嘔吐、下痢、出血、脱毛など)が起こります。広島では爆心地から９００ｍぐらいといわれています。放射線量は２００ｍ離れると１／２になるため（図２）、爆心地から２ｋｍ離れると急性の影響はなくなり、３ｋｍ離れると原爆の放射線の影響はなくなります。爆心地に近いほど放射線のほかに爆風による建物の倒壊、熱線によるやけどの被害が大きくなりました。私の小さなやけどでもかなりつらかったのに、全身を激しくやけどした上に多量の放射線に被ばくするとどんなにつらかっただろうかと、思わず目を閉じてしまいました。

少ない量の放射線に被ばくすると細胞は死ななくても細胞内に突然変異（細胞の核の中にある遺伝情報を持つ DNA に異常が起こり、異常な細胞ができる）が起きることがあります。突然変異は、放射線以外にも化学物質（発がん剤や活性酸素など）によっても起こりますし、自然にも起こります。ストレスが引きがねとなることが、最近よく言われています。一つの細胞が異常を起こしてもふつうは周囲の正常細胞が取り囲んで異常細胞を殺してしまうのですが（健康な私達の体の中でもしょっちゅう異常細胞が生まれては、健康細胞に殺されているそうです)、異常細胞が異常に増殖してしまうとがんになる（といっていいでしょうか）のです。でもそこまでには長ーい時間がかかります。原爆に直接被爆しなくてもそのあと広島の町に入った人達も、残留放射線によって被爆しました。残留放射線とはいわゆる「死の灰」からの放射線と、原爆から飛び出した中性子線によって放射化された空気や土、金属などから出る誘導放射線とがあります。その放射線は一週間後には1/10以下になったと考えられています。

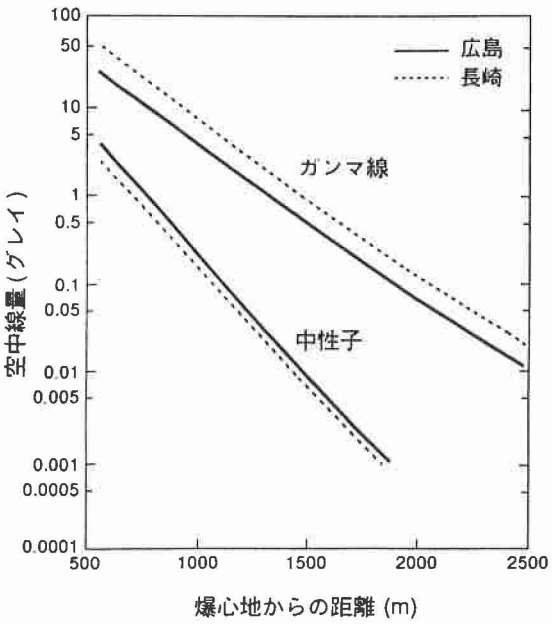


図２．爆心地からの距離と空中線量
（無遮蔽）

原爆からの放射線によって引き起こされたがんは、自然に生じたがんと区別はできません。放射線によって起こる特別の病気というのは知

られていないからです。そこで被爆したグループとほとんど被爆していないグループとを比較する疫学調査が役に立っています。被爆２年後から白血病が増え始め、６～７年でピークになり、２５年後にはほとんどなくなりました。そのほかのがんは１０年後から増え始め今でも発生が続いています。爆心地近くでかなり被爆した人達を除き、爆心地から２．５ｋｍ以内で直接に被爆した人達については、白血病は約２倍、その他のがんは約１．１倍の増加になっています。さらに被爆線量が増えるとがん発生のリスクも増えていきます。さらに、被爆した年齢が若いほど細胞分裂がさかんなためがんになるリスクが高くなります。ですから「放射線に被ばくすると**必ず**がんになる」ということはないのです。原爆被爆時に１０歳以下だった人達は今６０歳前後になっています。がんになりやすい年齢なので早期発見・早期治療が大切です。

放射線影響研究所には上記の疫学部のほかに、統計部（統計学的な研究、被爆者の受けた放射線の量の計算を含む線量測定全般）、臨床研究部（２年に一度の成人健康調査）、遺伝学部（細胞遺伝学調査；染色体異常による被爆者の個人別被爆線量の推定、分子遺伝学調査；親の被爆が子供の突然変異に影響するかどうかの DNA レベルでの研究）、放射線生物学部（広島・長崎で集められた腫瘍試料を最新の分子生物学的手法で分析；体細胞突然変異頻度、発がん遺伝子・がん抑制遺伝子、放射線が体の免疫に及ぼす影響の研究）、情報技術部（コンピューターシステム・データベースの管理、新しい技術の導入、インターネットとの接続等）、資料センター（出版物の配布、放影研の調査結果を学会及び一般市民に知らせる）があります。

夕方６時。元安川に浮かぶ「かき船」に乗りました。あの時は水を求め、熱さに耐えきれず多くの人々が飛び込んで死んでいった川です。今は静かに、夕闇の中を流れていました。２時間くらいかけて、ゆっくりかき尽しのお食事をいただき、アルコールも入ってちょっといい気持ち。歩いてホテルに帰ることにしました。

途中、島病院の爆心地の石碑を見て天を見上げ、元安川のたもとで闇に沈む原爆ドームを眺めました。

“明日は朝早く起きて、原爆ドームと平和記念公園を歩こう。”

朝の平和公園では、掃除のおばさんたちがせっせとお掃除をしていました。原爆死没者慰霊碑に新しい花を供えていました。私は初めての広島です。いつも８月６日にテレビで見る光景を、やっと実際に見ることができました。広島平和記念資料館に一番に入場して、さーと見て回りました。悲惨でした。中学生の子供達の服が、今の小学２～３年生ぐらい小さいので驚きました。食べ物がなくて体格が小さかったのでしょうか。爆撃による火事の延焼を防ぐため家を取り壊す作業に中学生が学徒動員され、多くの中学生が犠牲になったそうです。かわいそうに。中学生の息子がいる私には耐えられない思いがします。

３．電源開発竹原火力発電所

今日は竹原までの汽車の旅です。呉線は広島から海沿いを走ります。ところが天気は下り坂。途中から雨が降り始めました。天気がよければきれいな瀬戸内海が楽しめたのに…。まあ仕方ありません。子供のように後ろを向いて座りたいのを我慢して、１時間半の汽車を楽しみました。

安芸長浜駅で降りてすぐ目の前が、電源開発竹原火力発電所です。背の高い煙突が２本もくもくとものすごい勢いで水蒸気を吐き出しています。今日は寒いから、鉛色の空に上る白い水蒸気が目立ちます。

竹原火力発電所は石炭を燃やしています。出力２５万ｋＷ の１号機は国内の石炭産業を助けるために、昭和４２年に完成しました。その後環境問題が大きく取り上げられるようになり、昭和５２年に排煙脱硫装置が、昭和５６年に排煙脱硝装置が設置されました。

高度成長期に突入しエネルギーの需要が増えて、昭和４９年に出力３５万ｋＷ の石油を燃やす２号機が完成しました。その後２号機は海外から輸入した石炭用に改造されました。

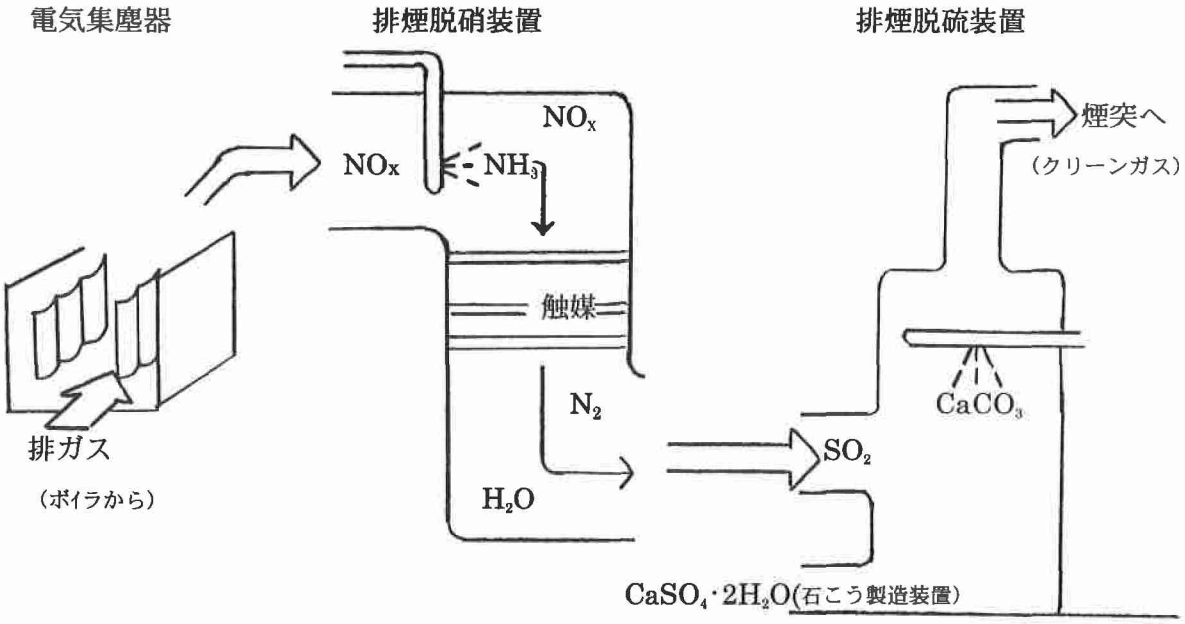
出力７０万ｋＷの３号炉は海外からの輸入炭の増加に伴い、昭和５８年に完成しました。

３号炉の建屋の屋上に上りました。１号炉の貯炭場は屋外に、２号炉・３号炉は大きな室内運動場のような貯炭場があります。ブルドーザーが真っ黒の石炭をベルトコンベアーに落としています。石炭というと太古の植物が長い長い時間をかけてできたものでなんとなく塊のイメージがあったのですが、貯炭場の石炭は黒い土のようでした。

ところで人間が石炭を燃料として大量に使うようになったのは、１８世紀の産業革命からです。なんだか意外ですよね。そういえばフランスのお城の暖炉に積んであったのは丸太でした。丸太を燃やしても燃えにくいし、炎や煙はでるし煙たいし、なかなか暖かくならなかったでしょう。黒い石が燃えるなんて、一体誰が見つけたのかしら。石炭は地球上に広く埋蔵されています。夢の新エネルギーが見つかるまで、大事に使っていきたい貴重な資源です。

ベルトコンベアーに乗った石炭は大きなコーヒーミルのような機械で細かーく粉末にされます。このほうがよく燃えます。小麦粉ぐらいにして空気と一緒にボイラーに吹き込み、１２００度の高温で燃焼させます。ボイラーの側面や天井部分には水の流れる管が張り巡らされていて（ちょうどやかんの水みたいなもの）、ちんちんに沸騰して高温の蒸気をシューシューだします。圧力をかけて沸点を高くし、より高温・高圧の蒸気にして、まず高圧タービンを回します。少し圧力・温度の下がった蒸気をもう一度ボイラーの中を通してまた勢いをつけ、今度は中圧タービンを回します。そして最後に低圧タービンを回して蒸気のお仕事は終わり。冷たい海水で冷やされてお水に戻りほっとする間もなく、またボイラーの管へ送られてお湯になり蒸気に変身するのです。

燃やすとでる煙は集められてまず電気集塵機を通ります。（図３）そこで集められる灰はセメントの原料などになります。次に排煙脱硝装置を通ります。窒素酸化物を含んだ排ガスにアンモニアを噴霧し、特殊な触媒の中を通すと、窒素酸化物が触媒の働きで化学反応を起こし気体の窒素と水に分解されます。次に排煙脱硫装置を通ります。石灰石を水に



$6NO_2+8NH_3 \rightarrow 7N_2+12H_2O$

$2SO_2+CaCO_3+3H_2O+O_2 \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O+H_2SO_4+CO_2$

図３．排煙処理の概略図

溶かして、硫黄酸化物を含む排ガスに噴霧すると、石こうができます。石こうボードなどの建材になります。これらの装置を通すことによって、９割以上の窒素酸化物や硫黄酸化物が除かれるようです。大量にでる煙を通すためでしょう。集塵機も排煙脱硝装置も排煙脱硫装置もかなり大きな建物でした。

１２００度のボイラーの中を見せていただきました。「炎が飛び出すんではないか！？」と一瞬たじろいたのですが、ボイラーの中を低圧にしてあると聞いて安心しました。白に近いオレンジでブォーブォーと燃えていました。ボイラーのある建物の中は暖かく、寒かったのでちょうどよかったのですが、夏は大変ということでした。

見学のあと竹原の古い町並みを散策しました。雨が降り寒くて観光客は一人もいません。竹原は京都の下鴨神社の荘園として栄え、江戸時代には製塩で栄えました。「瀬戸内の小京都」として知られています。ふと見上げると、看板に“西山理髪店”とあります。私の京都の家の隣は“バーバー西山”です。「いや～、偶然の一致だ。」と思ったら、“西方寺”というお寺があります。「え～、京都のお寺も西方寺だ！」。なんとも偶然の一致が二つも重なり、竹原は私にとって忘れられない町となりました。

１泊２日の旅行でしたが、実に充実した、実りの多い旅でした。たくさんの方々にお世話になりました。皆様に心から御礼申し上げます。

参考資料
１）(財)放射線影響研究所要覧　（財）放射線影響研究所発行
２）「放射線影響研究所のご案内」　（財）放射線影響研究所発行
３）「でんぱつ　竹原火力発電所」　（株）電源開発発行

(2002年3月22日受理)

放射線教育 Radiation Education
Vol. 5, No. 1, p. 67—72 (2001)

モナザイトを用いた放射線実験例

菊池文誠*1，堀内公子*2，横田繁昭*3，村石幸正*4
東海大学理学部*1，大妻女子大学社会情報学部*2，東海大学放射線管理センター*3，
東京大学教育学部附属中等教育学校*4
（〒259-1207 平塚市北金目1117　東海大学理学部）

（要旨）モナザイトはトリウム232 を少量含む天然の放射性鉱物である。教育用線源としての特性と具体的な実験に活用する方法について検討した。一般の線源としてだけでなく、連続崩壊の途中で発生するラドン以下を切り離して使用することが可能である。これにより放射性物質の生成、半減期、放射平衡などの概念が理解でき、教育上きわめて有用な線源である。

1．はじめに

放射線教育において、目に見えない放射線を理解するのには自分で測定してみることがもっとも有効な手段である。ところが学校で放射線の実験を行うことは現実には、測定器が高価であるのに加え、放射線源の入手が困難であることが大きな妨げになっている。

その結果、高校では放射線の実験はほとんど実施されていないばかりか、理科系の教員でさえ放射線を測った経験がないというのがほとんどである。そして過半数の高校生がバックグラウンド（自然放射線）の存在すら知らないのが現状である。[1)]

2000年6月、全国各地で大量に発見され、大きな社会問題となったモナザイトは、現在文部科学省の管理下にあるが、具体的な処理方法も不明で、事実上放置状態にある。

放射線教育フォーラムの実験教材検討委員会では、このモナザイトについての研究グループを発足させ、モナザイトの特性とこれの有効活用の道として学校その他における実験用線源として利用する方法を検討した。なお、ここで使用したモナザイトは人工のラドン温泉用として使用されているものを別のルートから入手したものである。

2．モナザイトの特性

モナザイトとは花崗岩に微量含まれるモナズ石と呼ばれる鉱物で、化学的成分としてはランタン、セリウム、ネオジウムなどの希土類元素が主成分のリン酸塩で、組成式は（Ce,La,Nd）PO_4である。微量成分として酸化トリウムを含んでいる。つまり放射線源としてはトリウム232である。この核種は半減期141億年でアルファ崩壊ベータ崩壊を繰り返し最終的に鉛208 で安定になる。連続崩壊の途中で常温で気体のラドン220 を生じるのが大きな特徴である。これはラドン220以下の崩壊はすべて空気中で起きることを意味し、環境放射能の大きな要因となっている。図１にトリウム系列の崩壊図を示す。また、図２はゲルマニウム半導体検出費によるトリウム232の連続崩壊によって放出されるガンマ線スペクトルである。

現行法ではトリウムは核原料物質に指定され、放射線障害防止法の規制対象外である。しかし原子力基本法に基づく政令と核原料、核燃料物質および原子炉の規制に関する法律

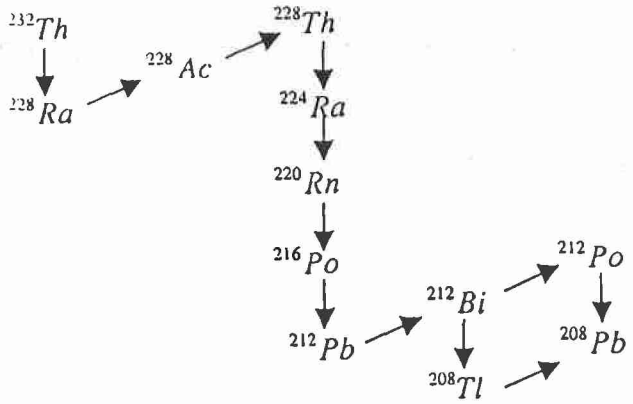


図１．トリウム系列の崩壊図（^{220}Rn 以下）

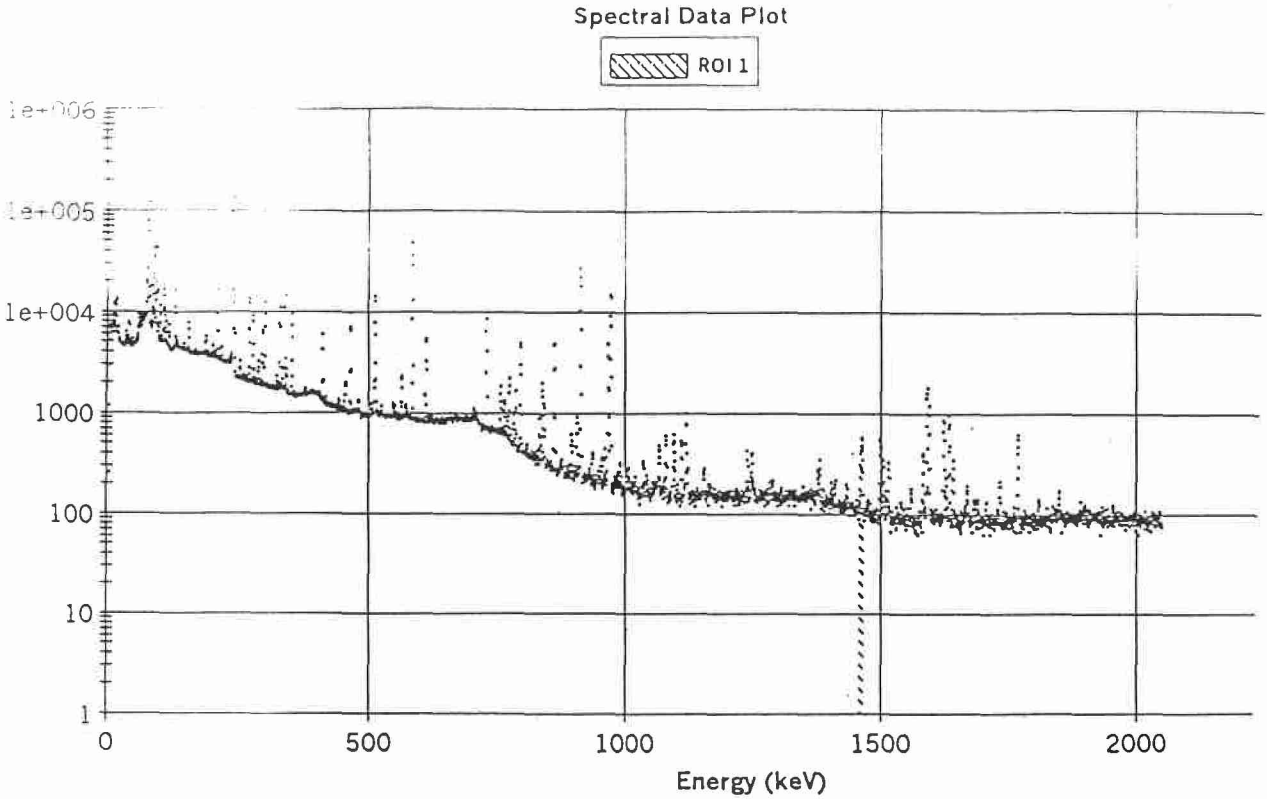


図２．トリウム232のガンマ線スペクトル

施行令の規制を受け、その所持および移動には厳しい制限がある。規制の対象となるその濃度は１ｇにつき370ベクレルを越えるもので、トリウムの数量としては900ｇを越えるものとなっている。トリウム232の１モルは232 gであり、半減期は141億年であるからトリウム232の１グラムはおよそ4000ベクレルであるがモナザイトに含まれている量の最大限の10パーセントとしても放射能は400ベクレルであるが平均的に見れば、濃度として法的規制値を越えることはないと考えられる。また、モナザイトに含まれるトリウムは４～10％であるからおよそ10 kg以下であれば問題はない。

また、天然の放射性物質であり、法的規制の対象とならない少量でも充分各種の実験が可能である。モナザイトを用いてそのまま小容器に入れて線源としてベータ線およびガンマ線の計測をしたり、ラドンガスを霧箱に注入してアルファ線の飛跡が観測出来る。大学等で波高分析器や液体シンチレーションカウンターが使用可能であれば、さらに高度なことができる。トリウムが連続崩壊する途中で生じるラドンの段階で空中に放出される性質を利用してラドンを切り離して取り出せることは他の線源にない大きな特徴である。

3．実験の具体例

3－1　高校レベルの実験－特に霧箱について

高校レベルの実験としては、少量のモナザイトを小さな容器にに入れ、そのまま線源とすれば、しゃへい（吸収）や距離による逆二乗法則の実験ができる。ドライアイスを用いる拡散霧箱は簡単に自作出来るのでモナザイトを入れた容器の空間にたまるラドンガスを霧箱内に注入すればアルファ線の飛跡が観測できる。この飛跡を連続して（例えば10秒ごとに）写真撮影をして、経過時間に対する飛跡の数の減少を調べれば半減期が得られる。ラドン220の半減期は55秒と短いので授業時間内でもできる。

写真撮影の場合、焦点深度を深めるため、絞りを絞り込んでスローシャッターを用いるのが一般的なのでカメラは旧式のマニュアルの一眼レフが望ましく、フイルムはISO400やISO800などの高感度のものを使用する。また、照明によっては反射光などもあるので偏光フィルターを準備した方がよい。

カメラによる写真撮影以外でもビデオ撮影やデジカメの活用なども考えられるので指導者の工夫次第でいろいろな展開が可能である。

モナザイトを紙の上に広げて備長炭を近づけておくとラドンガスが吸着し、娘核種の鉛212 の半減期を求めることができる。

3－2　静電捕集法による娘核種の抽出

ラドン220 の娘核のポロニウム216 が空気との非弾性散乱の結果陽イオンになっていることに着目すれば、静電場で捕集する事ができる[2)]。図３のように空き瓶に電極を取り付け、モナザイトを入れ、電圧をかけ２日間放置すれば陰極にポロニウム216 の娘核種の鉛212 が付着する。電界強度は 25 V/cm 程度が適当で、ここでは電極間距離が４cmなので直流電源として22.5Vの乾電池を４本直列につないだ。この場合、イオンは電気力線に沿って移動するので電気力線を集中させるため、集電極となる陰極は2 cm×2 cmの円錐形にした。図４は等電位線作成法により得られた電気力線の様子である。

この電極を取り外し、ガイガーカウンターでベータ線の減衰を計測すれば鉛212の半減期が求められる。また、シリコン半導体検出器を用いて図５のようにビスマス212およびポロニウム212のアルファ線のスペクトルが得られる。

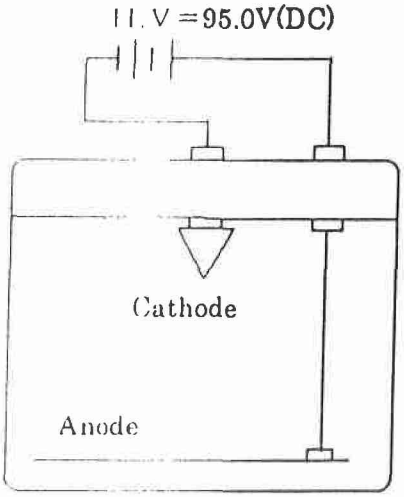


図３．静電捕集装置

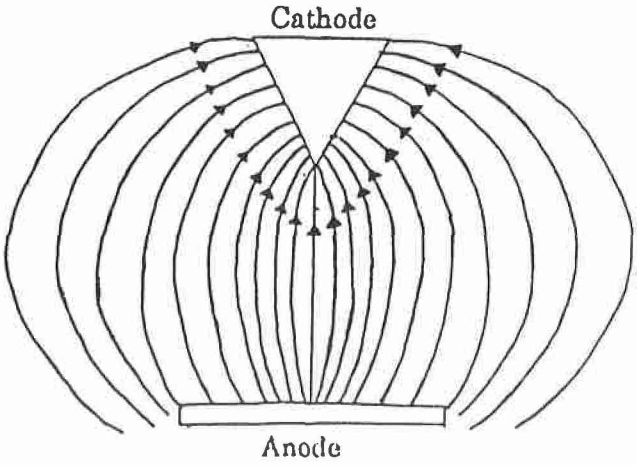


図４．電極間の電気力線

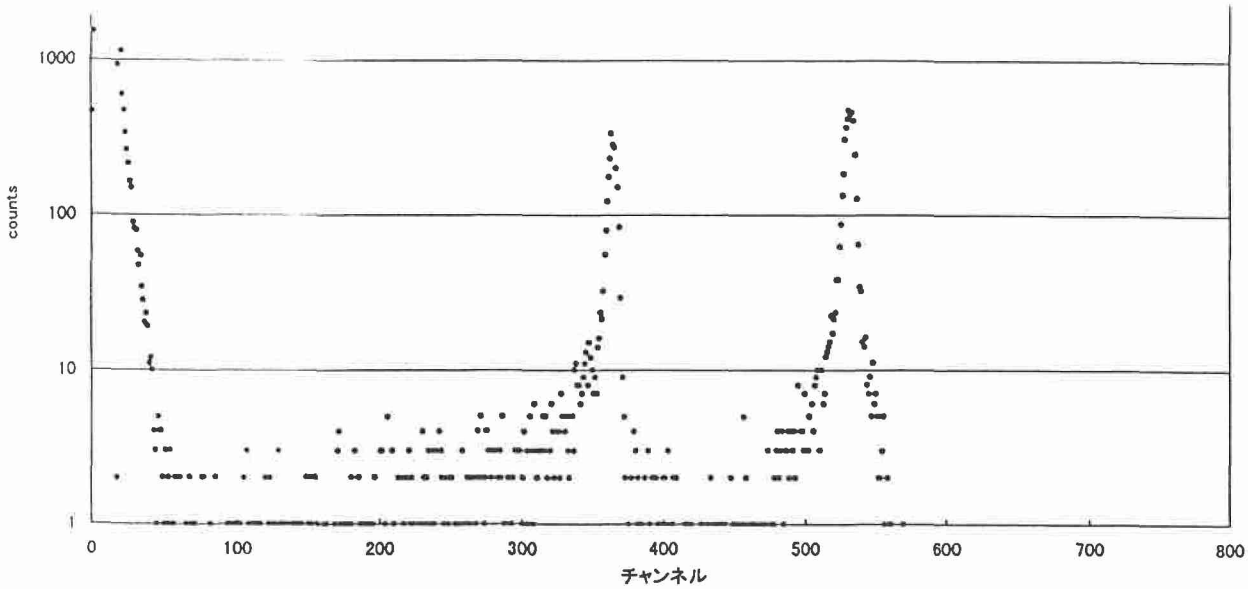


図５．シリコン半導体検出器による ^{212}Biおよび ^{212}Poのアルファ線スペクトル

３－３　液体シンチレーションカウンターを用いた実験例

^{220}Rn(トロン）は有機溶媒によく溶けることを利用して液体シンチレーションカウンター（以下LSC）で計測することができる。アルファ線試料を液体シンチレーターに溶解すると４πg計数が可能となり、計数効率100%、測定精度0.1%以下で定量することが出来る。LSCの機種によっては自動計数効率トレーサー法がプログラムされているものもあるのでこれを利用すれば、トロンとその崩壊生成物の全放射能を容易に求めることができる。

LSC測定用20mlバイアルに(DPO:4g＋popop:0.1)g/l　をトルエン又はキシレンに溶解した液体シンチレーターを入れ、モナザイトから生じたトロンガスを直接注射器で採取して溶かし込み、直ちにLSCで測定する。図１に示したトロンおよび崩壊生成物のアルファ線スペクトルの時間経過によるスペクトル変化をみると図６のようになる。

トロンの半減期は極めて短い(55 秒)ので、スペクトルの形状は急速に変化する。これらの状況は他の方法で捉えることは極めて困難であるが、LSCを用いると刻々の変化を容

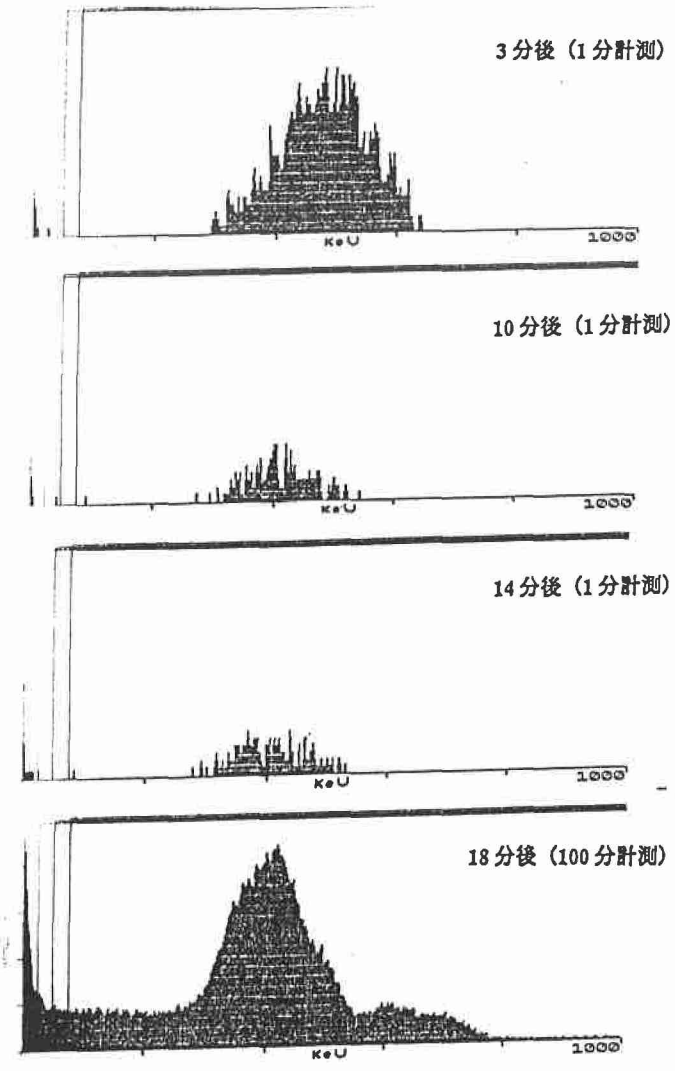


図６．LSCによるトロン崩壊核種のアルファ線スペクトルの時間変化

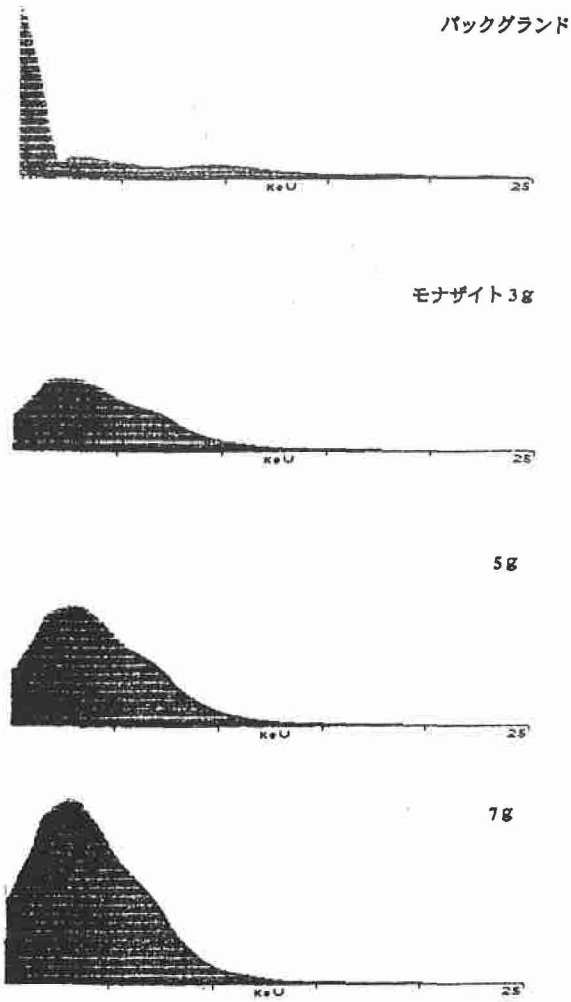


図７．アルファ線の空気ルミネッセンス測定例

易に観察することができる。

また、アルファ線は空気に当たると発光する。すなわち、空気がアルファ線の検出体となり得る。これを空気ルミネッセンスと呼ぶ。 空気中には窒素が78%の割合で存在しており、窒素はアルファ線とのそうごさようにより励起状態になる。励起状態の窒素が基底状態あるいは低エネルギー状態に遷移するときに光を放出する[3]。

バイアルにモナザイトを3g. 5g, 7g をそれぞれ入れ、上部に溜まったトロンガスを同量づつ注射器で採取し、別の空のバイアルにに入れアルファ線の空気ルミネッセンスをLSCで測定する。10分間測定した例を図７に示す。封じ込めたモナザイトの量によるスペクトルの面積の違いをみることができる。

モナザイトは取り扱いが簡単なのでここに紹介した実験はLSC取り扱いの初心者のトレーニングの課題としても好適である。

４．おわりに

このようにモナザイトは安全に取り扱える実験用線源として価値のきわめて高いものである。一般の線源のように計測実験はもとより、ラドンおよびその連続崩壊核種を簡単に抽出することが可能なので放射性物質の生成、崩壊、半減期、放射平衡などの概念を取り扱うことができる。これはは放射線教育にとって大きな意義があるといえる。

現在事実上放置状態にある大量のモナザイトはこれを少量づつに小分けして学校教育や社会教育に活用して、広く放射線に対する正しい知識と理解を求めることは放射線教育上の大きな課題である。また、現在そのチャンスでもあることを提言するとともに関係各位のご理解とご支援をお願いしたい。線源の入手に困難を感じている教育現場にとってはぜひ普及させたい教材である。

本研究を進めるにあたり、ＮＰＯ法人放射線教育フォーラムの実験教材検討委員会のメンバー各位との討論などのご支援に感謝する。また、実験の一部については再現性のチェックなどについて東海大学物理学科菊池研究室の平成13年度卒研生の野崎桂子さん、日向隆士君のご協力ことにお礼を申し上げる。

（参考文献）

1) 谷野祐子、村石幸正：放射線教育、VOL.**4**. NO 1 (2000) 53..
2) 菊池文誠：日本物理教育学会誌、**39**巻(1991)136.
3) Takiue.M, and Ishikawa.H; Nuclear Instrum. Method, **159**, (1979)139.

（2002年3月22日受理）

放射線教育 Radiation Education
Vol. 5, No. 1, p. 73—80 (2001)

原子炉のエネルギーと恒星のエネルギー

大橋　國雄
NPO 法人放射線教育フォーラム
〒105-0001 東京都港区虎ノ門 1-7-6 升本ビル

はじめに

地球は，その誕生から太陽のエネルギーを受けて，化学変化や物理変化等原子現象が主役の生物の生息可能な自然をつくりだしてきた。およそ 12 万年前に終わった間氷期の後，幾度か繰り返された弱い氷期と間氷期を抜け，現在は 2 万年程前に始まった温暖な間氷期にあるといわれている。その中で人類はおよそ 1 万年前に農耕を始め，現代に繋がる文明を築いてきた。万物の基本的構成要素としての元素という概念はすでにギリシャ時代にたてられたが，地球上の生物にとって日常的な原子現象とは比較にならない巨大なエネルギーをもつ原子核現象の発見は，およそ 1 世紀前 1996 年のベクレル(A. H. Becquerel)による放射能の発見に始まる。宇宙を見れば，そこは核現象が活動する舞台であり，恒星の発するエネルギーは，特にわれわれの太陽においてはおよそ 50 億年にもなるが，長期にわたり安定した核融合によることがわかっている。原子炉も元来人間の創造物ではなく，約 20 億年前の地球上でウランからの核エネルギーの放出が何十万年もの間続いていたことが知られている。

日本原子力文化振興財団が，1992 年に日本とヨーロッパ 6 ケ国の 15 歳から 18 歳までの生徒を対象に「エネルギーと環境」に対する意識調査を行った。そのなかで原子力発電の仕組み，すなわちウランの核分裂によって発生する熱を利用するという正解率は，ヨーロッパ諸国ではスイスの 89.8%を筆頭に最低のフランスで 60.0%，日本では 38.3%であった。同財団が 1997 年に日本の高校生だけに同じ設問で再び調査をした結果，正解率は 1%の増加にとどまったということである。

この解説の中では，核分裂や核融合，すなわち核現象によるエネルギー発生のメカニズムとその大きさについて原子現象によるものとの比較において考えて見たい。原子核のような巨大なエネルギーを秘めた極微の世界，星のように巨大で地球上の生物の経験をはるかに越えた高温高圧の非日常的世界が，生物の生存を許す日常世界を支えていることを思うと興味は尽きないものがある。

物質の変化とエネルギー

化学変化は化学結合の組み替えによって新しい物質が生成される変化をいい，それに対して物理変化は物質の変化を伴わない形状や状態の変化をいう。前者の例には水素と酸素の反応による水の生成などがあり，後者には液体の水の凍結による氷への変化などがある。これらの変化は原子に属する電子の関与によるものであって，原子核の変化は伴わない。放射壊変に見られるような原子核の変化を伴う核現象と対比して上のような変化を原子現象と呼んで区別することがある。化学結合も分子間結合もその本性は静電力である。

原子現象における物質の変化とそれに伴うエネルギー変化を水素１モル(2g)と酸素 1/2 モル(16 g)の反応による水１モル(18 g)の生成を例にとると熱化学反応式は,

$$H_2(g) + (1/2)O_2(g) \rightarrow H_2O(g) + 241.8\ kJ$$

となる。反応熱は反応系と生成系の間で起こる結合の組み替えの結果与えられる（図１）。反応前後において原子数に変化はないから,結合の組み替えに際して原子自身に質量変化が起こらないとすれば反応前後において質量は保存される。化学反応における質量保存則は, ラボアジェ(A.L. Lavoisier 1743-1794)によって見いだされ近代化学の誕生のきっかけになった。エネルギー保存則は, マイヤー(J.R. Mayer 1814-1878)とヘルムホルツ(H.L.F. von Helmholtz 1821-1894)らによって提唱された。これによると上の反応では水素と酸素の反応による結合の組み替えの結果, 反応前より 241.8 kJ だけ低い, すなわち生成物は安定な状態にあることになる。この法則は熱力学の普遍原理として一般的に受け入れられている。1905年になると, アインシュタイン(A. Einstein)はエネルギーと質量の等価性を発見し $E = mc^2$ の関係を発表した。これによれば質量(m)とエネルギー(E)は同じものの別な側面に過ぎない。c は光速度、3.998 x 10^8 m s^{-1} である。この式から 241.8 kJ を質量に換算すると,

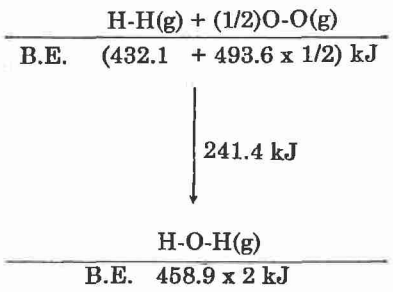


図１　結合の組み替えによる生成熱の発生（B.E.;結合エネルギー）

$$m = 241.8\ kJ/(2.998 \times 10^8\ m\ s^{-1})^2$$
$$= 2.69 \times 10^{-12}\ kg$$

であって, 水素 2g と酸素 16 g の反応から 2.69 x 10^{-9} g の減少量はあまりにも小さく, 現在このような微少な変化の測定手段は持たない。化学反応の例のようにエネルギー変化が微小な場合には, エネルギーと質量の保存則が別々に成立すると考える。分子間力によって決まる物質の状態変化に伴うエネルギーは, 氷の融解熱が 6.01 kJ mol^{-1}, 沸点における水の蒸発熱が 40.66 kJ mol^{-1} 程度で化学反応におけるものよりさらにに小さい。

国際単位系(SI)におけるエネルギーの単位はジュール(J)であるが, 原子核, 原子, 分子等の分野では一般に電子ボルト(eV)を用いる。これは電気素量の電荷をもつ粒子, 例えば電子が真空中で電位差 1 V の２点間で加速されるとき獲得するエネルギーであって, 1.602 x 10^{-19} J に相当する。化学結合の結合エネルギーは数 eV 程度である。水素結合のエネルギーの多くは 0.2 eV 程度, 太陽からの放射エネルギーは地表にはほとんど光として到達するが, 波長 500 nm の可視光線の光子のエネルギーは 2.5 eV[1], 原子の第一イオン化エネルギーは最も高いヘリウムで約 25 eV, 不活性気体のそれを除くと多くは 5～10 数 eV に入る。熱平衡下にある気体分子の運動エネルギーの平均値にいたっては 300 K(室温)で 0.04 eV に過ぎない。われわれが日常この地球上で経験するエネルギーの大きさ(強度)はこの程度である。

1)　光子のエネルギー　$E = h\nu = hc/\lambda$　　h = プランク定数,　ν = 光の振動数
c = 光速度、　λ = 波長

$$E = 6.63 \times 10^{-34}\ J\ s \times 3.00 \times 10^8\ m\ s^{-1} / 500 \times 10^{-9}\ m$$

$= 3.98 \times 10^{-19}$ J

$\cong 2.5$ eV

原子核とその安定性

原子核は原子の中心を成し，大きさ（半径）は原子の一万分の一から十万分の一程度であって原子に比べて極めて小さい。ある原子において原子核のもつ陽子数と周囲に配置される電子数は等しく原子は電気的に中性である。電子配置は原子核が支配し，原子の化学的性質はその電子配置によって決まる。静電力が支配する原子に対して原子核ははるかに複雑で，それが示すすべての性質を現在単一の模型で説明することはできない。

1932 年に中性子が発見され，同じ年にハイゼンベルク(W.K. Heisenberg)が原子核は陽子と中性子とから成るという考えを提出した。陽子と中性子を総称して核子といい，両者の和を質量数と呼ぶ。原子核の種類は，陽子数(Z)，中性子数(N)およびエネルギーの状態で決まる。これを核種と呼び，元素記号(X)，質量数(A)を用いて ${}^{A}_{Z}X$ と表す。励起状態が存在するものには m(metastable)を用いて区別し ${}^{Am}_{Z}X$ とする。陽子と中性子の質量はほぼ等しく，原子質量単位($1\ u = 1.66032 \times 10^{-27}$ kg)を用いると核種の質量は極めて整数に近い値となり，質量数は近似的に核種の相対的質量を表す。核子の質量は電子質量のおよそ 2000 倍であるから小さい原子でさえその質量の 99.95%以上を原子核が占める。原子核の大きさの測定から，容積(V)は種類によらずほぼ質量数に比例する。従って，

$V \propto A$,　半径(R)は，$R \propto V^{1/3}$ であるから、$R = r_0 A^{1/3}$,

となる。通常，$r_0 = 1.2$f (f = 10^{-15} m, 1 fm; femtometer 或いは,1 F; Fermi と呼ぶ)である。原子核の密度 ρ は，原子核を半径 R の球と考え，m を核子の平均質量とすると，

$$\rho = mA/\{(4/3)\pi R^3\} = m/\{(4/3)\pi r_0^3\} \cong 2 \times 10^{11} \text{ kg cm}^{-3}$$

となり，原子核中の核子のつまり具合はその大きさに依らずほぼ一定である。

核子はばらばらでいるよりは結合することによって原子核としてエネルギーの低い安定な状態を得る。これを質量についてみると質量数 A の原子核の質量 M_A は，それを構成する単独の核子の質量の総和より小さくなる。陽子数を Z，中性子数を N，陽子と中性子の質量をそれぞれ M_p および M_n とすると，

$$\Delta M = Z M_p + N M_n - M_A > 0,$$

ここで $E = mc^2$ を適用して，$E = \Delta Mc^2 = B$，B を核の全結合エネルギーという。原子核から核子一個を引き離すに要するエネルギーは、電子を介した原子ー原子の結合エネルギーのおよそ 100 万倍の大きさである。例えば、一個の中性子(質量 $M_n = 1.008665$ u)と一個の水素原子(質量 $M_{1H} = 1.007825$ u)が結合して重水素原子($M_{2H} = 2.014102$ u)が形成されると、

$$B = M_n + M_{1H} - M_{2H} = 0.002388 \text{ u} = 2.22 \text{ MeV}$$

のエネルギーの放出がある。同様にして、^{4}He の場合には、B = 28.3MeV である。核子一個当たりの平均結合エネルギーB/A は ^{2}H で 1.11 MeV, ^{4}He で約 7 MeV である。安定な原子核の B/A を質量数 A に対してプロットすると図２が得られる。図は軽い最初の幾つかの例を除くと B/A はほぼ 8 MeV 程度の一定の値をとり，B は A におよそ比例することを示す。この事実や原子核のつまり具合が核種によらず一定であることなどから，原子核をまとめている力(核力という)はクーロン力と違って，隣接した核子同士の間の距離にしか働かな

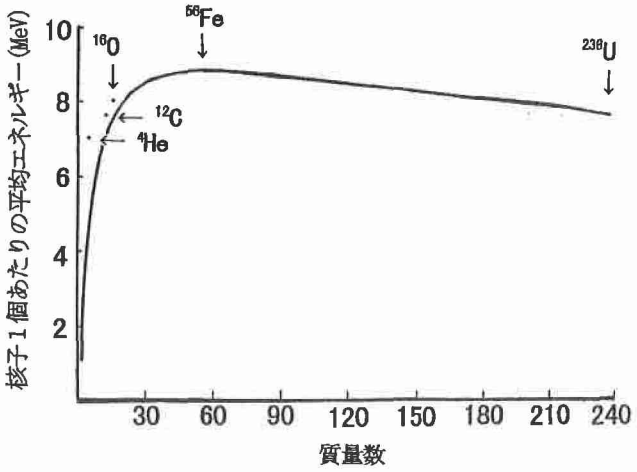


図２　核子１個当たりの結合エネルギー

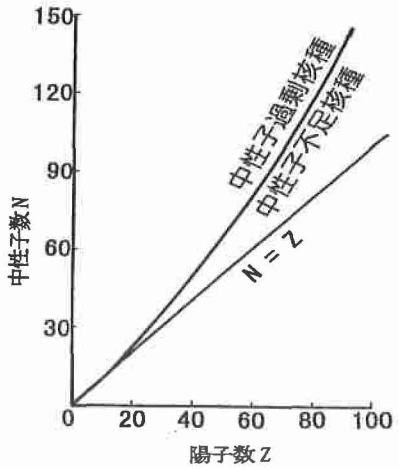


図３　原子核の安定性

い近距離力であると考えられる。しかし，原子核内には陽子間に働くクーロン反発力もあり、詳しくみるとその安定性に違いが見られる。分子で構成される非圧縮性の液滴を核のモデルとし（原子核の液滴模型），核の安定性を左右するその他の補正項を加えた半経験的な質量式が 1935 年，ワイゼッカー(C. von Weizsacker)によって提案された。このモデルでは原子核は非圧縮性の核子の集合体であって，内部のエネルギーは均一であり，液滴がもつ表面効果のような性質に基づいて説明される。第一近似では全結合エネルギーが質量数に比例するとする。各項の係数 a，b，c，d，δは実験値に合うように定められる。エネルギー(MeV)で表したこの式は，

$$B(Z,A) = aA - bA^{2/3} - cZ(Z-1)A^{-1/3} - d(N-Z)^2A^{-1} + (+,-,0)\,\delta A^{-1} \quad (MeV)$$

である。第二項は表面効果と呼ぶ。核の表面に存在する核子は，内部に存在する核子に比べて結合する核子の数が少ない。そのために結合エネルギーに対する寄与は少ないと予想される。第三項は陽子－陽子間のクーロン反発力に関する補正である。陽子は原子核内に一様に分布すると仮定する。第四項は陽子，中性子数のバランスに関する効果である。小さい原子核では N≒Z （≒A/2)が安定核であり，Z = 92 に向かって N/Z = 1.6 に近づく。これから外れるものほど不安定になる。図３では曲線に沿って安定核が存在し，曲線の上方に中性子過剰（β^- 壊変核種），下方に中性子不足（β^+及び EC〈電子捕獲〉壊変核種）による不安定核種が分布する。 Z=83 を越えるともはや安定核は存在しない。最後の項は，陽子と中性数の偶奇に関する効果で，符号は，偶偶核で＋，偶奇または奇偶のとき 0，奇奇核で－である。対効果と呼ばれる。事実，安定な原子核の中で偶偶核が 60%を占め，偶奇および奇遇核で 40%，奇奇核は ^2H, ^6Li, ^{10}B, ^{14}N の 4 種に過ぎない。特に，陽子や中性子数が魔法の数(magic number)と呼ばれる 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 などのときに安定な核ができやすい。殻模型で説明される。原子では，電子が対を形成しつつ殻構造を成して充填されていることはよく知られている。同様に，殻模型では陽子と中性子がそれぞれ対を形成しながらそれぞれのエネルー準位に配置される。この半経験式は，一部の軽い核を除き実験値を極めてよく再現する。

図２から核子一個当たりの平均結合エネルギーは、傾向として質量数 60 の鉄，ニッケルまでは上昇する。従って，小さな原子核が融合して質量数 60 以下の原子核ができる場合には，その反応は発熱的であり，核融合反応としてエネルギーを取り出すことができる。質量数が 60 を越えると融合反応は吸熱的に変わる。逆に，質量数が 60 を越えて大きな原子核が質量数のほぼ等しい２個に分裂して鉄，ニッケルに近い質量数の原子核が生成するとネルギーの放出が起こる。これが原子炉におけるエネルギー利用である。

核分裂のエネルギー

核分裂は，原子核が二個の原子核に分裂する変化であり、放射壊変の一つの様式として自発的に起こるもの（自発核分裂）と中性子や陽子などの粒子の衝撃によって起こる誘導核分裂とがある。重い核で起こりやすい。特に自発核分裂は周期表でトリウム領域より後の原子核で観測され，半減期は ^{238}U で 6.5×10^{15} 年，^{238}Pu で 4.9×10^{10} 年，^{244}Cm で 1.17×10^{7} 年，^{252}Cf では 85 年と質量数の増加と共に急速にに短くなる。

フェルミ(E. Fermi)は、ウランに中性子を照射すると，

$$ {}^{A}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{A+1}_{92}U \rightarrow {}^{A+1}_{93}X + \beta^{-} $$

中性子を吸収してさらに中性子過剰となりそれが β^- 壊変して，原子番号が一つ高い未知の元素(現在知られている $^{239}_{93}Np$)ができることを期待して 1934 年に実験を行った。照射による生成物は事実 β^- 放射体であった。その後ウランに対する中性子照射実験が数多く行われたが，1938 年になってハーン(O. Hahn) とシュトラスマン(F. Strassmann) の二人の化学者は，生成物はフェルミが期待していた $Z \geqq 93$ の元素でも Ra, Ac, Th, や Pa でもなく，Ba や La などの β^- 放射体であるという分析結果を発表した。これはウランの原子核が二つの原子核に分裂したと考えざるを得ない結果であった。天然ウランは、現在では ^{238}U(半減期　4.468×10^{9} 年)；99.275%，^{235}U(7.038×10^{8} 年)；0.720%，^{234}U(2.446×10^{5} 年)；0.0054%の同位体組成をもつ。室温で熱平行状態にある気体分子と同様，その平均の運動エネルギーが 0.04 eV 程度の熱中性子(thermal neutron)によって起きたこの核分裂は，その後天然ウランの三種の同位体のうちの ^{235}U によるものであることが分かった。核分裂は液滴模型によって説明された。 粒子の衝撃によって原子核に与えられる励起エネルギーは，粒子の持ち込んだ運動エネルギーと入射粒子が核子として結合したときの結合エネルギーの和である。1 u = 931.5 MeV であるから，^{235}U の熱中性子捕獲反応，

$$ {}^{235}U + {}^{1}n \rightarrow {}^{236}U + Q $$

においてＱ値は，

$$ \begin{aligned} Q &= [(M_{235U} + M_{1n}) - M_{236U}] \times 931 \\ &= [(235.043925 + 1.008665) - 236.045563] \times 931.5 \\ &= 6.54 \text{ MeV} \end{aligned} $$

である。入射中性子の運動エネルギーはゼロに近いから、これだけのエネルギーが捕獲された中性子の結合エネルギーとして放出され核の励起に与えられる。この励起エネルギーは直ちに核全体に広り，核は振動を始め最初の球状（A 点）から回転楕円体（B 点）を経て亜鈴型になる。この過程でポテンシャルエネルギーは増大するが，γ線の形でエネルギーを失うことなくさらに変形が進むと核分裂障壁，すなわちポテンシャルエネルギーの最も高い位置（サドル点）を超え核は再び球形に戻ることなく二つに分裂する（図４）。こ

の過程は極めて短時間に起こる。^{236}U では与えられた励起エネルギーが 6.54 MeV でありサドル点のエネルギーの 5.3 MeV を越えるので分裂が可能である。事実，^{235}U は熱中性子によって核分裂する。

^{235}U の N/Z 比は約 1.6 であって、中性子過剰である。分裂の際に平均 2.5 個の中性子が放出されるが，分裂生成物のなかに数えられる Ba や Kr の安定核では N/Z 比はおおよそ 1.3 であるから，生成核はさらに中性子過剰となり，安定核に達するまで β^- 壊変を繰り返す。今，^{235}U の熱中性子による核分裂で 2 個の中性子が放出され，最初の分裂生成物が β^- 壊変を繰り返して最終的な安定核として ^{139}La と ^{95}Mo が得られたとするとこの核反応から放出されるエネルギーは，

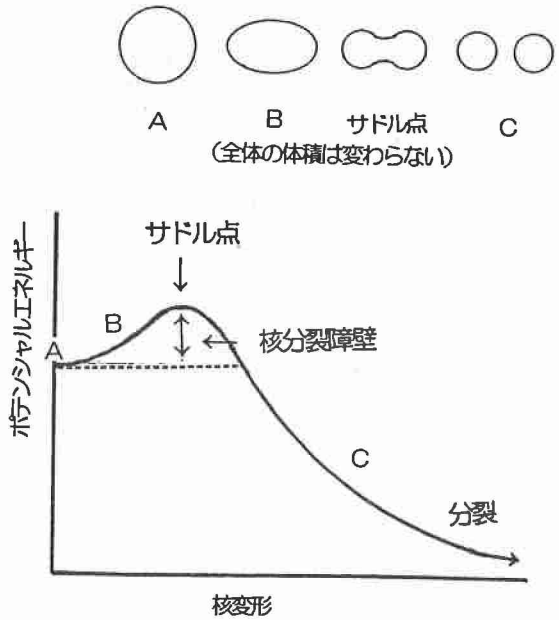


図4　液的模型における振動による核分裂過程の諸段階の核の形状と核の変形に伴うポテンシャルエネルギーの変化の模型図

反応系の質量	生成系の質量	
^{235}U = 235.0439	^{139}La = 138.9064	ΔM = 236.0526 − 235.8296
^{1}n = 1.0087	^{95}Mo = 94.9058	= 0.2230 amu
236.0526	$2^{1}n$ = 2.0174	ΔMc^2 = 0.2230 x 931
	235.8296	= 208 MeV

208 MeV である。通常の化学反応における分子当たりおよそ数 eV の放出エネルギーと比べると，核分裂で放出されるエネルギーがいかに大きいかが分かる。1940 年当時すでにこの核分裂エネルギーを熱エネルギーとして利用することが考えられていたということである。このエネルギーには，核分裂片の運動エネルギー，核分裂で放出される中性子の運動エネルギー，分裂片からと分裂の際に放出される放射線エネルギーが含まれる。熱的測定によれば，このうち熱エネルギーとして利用できるものは 180 MeV 程度であることが示されている。熱中性子による ^{235}U の核分裂では ^{72}Zn から ^{161}Tb に至る多くの種類の生成物が生じ，A = 140 と A =100 付近に二つの極大をもつ特徴ある収率分布曲線(非対称分布)が与えられる。核分裂生成核は β^- 壊変核種であるから，壊変に伴って時間の経過とともに原子番号は変わるが質量数は変化しない。高エネルギー粒子による核分裂では極大は一つになる分布(対象分布)が最も起こり易い分布となる。

天然ウランの同位体組成の 99%以上を占める ^{238}U が熱中性子を吸収して生成した偶奇核の ^{239}U では，その中性子の結合エネルギー，従って励起エネルギーは ^{235}U の熱中性子照射で生成した偶偶核の ^{236}U の 6.45 MeV に比べて 4.9 MeV に過ぎない。これに対してサドル点のエネルギーは 5.5 MeV であるから，核分裂を起こすにいたらず励起エネルギーは γ 線放射として失われる。^{238}U の分裂には 1 MeV 程度の速い中性子の照射が必要である。

核融合のエネルギー

生物がその発生から現在に至るまで恩恵にあずかりまた利用してきた地球上のエネルギーは，放射壊変から生ずる地熱エネルギーも少しはあるが，地球生物の長い歴史を通じて変わることなくほとんどが太陽によって光として与えられてきた。太陽エネルギーの源については，ギリシャ人は太陽を灼熱の鉄球と考えていたということであるし，近代になってからは，全部が石炭でできていると仮定した計算，重力収縮によるエネルギー放出としてなされた計算もあるが，結果はいずれも生物進化に要する時間の長さ（約 40 億年）を説明するには遠く及ぶものではなかった。それが水素の核融合反応によるものであることは，1938 年ベーテ（H.A. Bethe）とワイゼッカーの独立の研究によって初めて突きとめられた。この考えが確信を持って天文学者の間に受け入れられたのは 1950 年代に入ってからだということである。太陽は主系列上にある標準的な恒星の一つであって，巨大なガスの塊である。太陽は太陽系の中心をなし，地球はその第３惑星であって，その間の平均距離は約１億 5000 万 km（１天文単位）である。半径は約 69 万 6000 km（地球の約 109 倍），質量は 2.0×10^{27} トン(地球の約 33 万倍)，温度は中心部に近づくにつれて高くなり，表面で 6000 度，中心部で 1500 万度に達する。太陽表面から放射されるエネルギーは，太陽を中心に球面状に広がり，地球大気圏の直ぐ外の頂上では 1.96 cal cm^{-2} min である。この値は太陽定数と呼ばれる。現在の太陽の構成成分は，水素が 73%，ヘリウムが 25%，その他 2%であるという。太陽放射エネルギーは，内部の高温・高圧下で核融合反応により４個の陽子(水素の原子核)から最終的には１個のヘリウム原子核が生成することによって生じ，この核融合反応でおよそ 0.7%の質量がエネルギーに変換され放出される。いってみれば地球上の生物は巨大な核融合炉と向き合いそのエネルギーの恩恵を受けて進化を続け生きてきたことになる。

宇宙の中にガスの濃い部分ができ重力によって次第に大きな集合体となり，やがて重力収縮によって高温が生じ，原子はすべての電子をはぎ取られ電子とイオンのプラズマとなって核融合（熱核反応）が始まった。太陽内部の核融合反応は，陽子－陽子反応鎖(p-p チェイン)と呼ばれ，先ず 2 個の陽子の融合反応により重水素核が形成されることから始まる。このとき陽電子（e^+）とニュートリノ(ν)が放出される。次にこの重水素核と陽子が反応してヘリウム-3 の原子核が生成し，最後にその 2 個が融合反応により安定なヘリウム-4 となって２個の陽子が放出される。

$$^1H + {}^1H \rightarrow {}^2H + e^+ + \nu$$
$$^2H + {}^1H \rightarrow {}^3He + \gamma$$
$$^3He + {}^3He \rightarrow {}^4He + 2\,{}^1H$$

中間生成物を消去すると，この一巡の反応（$4\,{}^1H \rightarrow {}^4He + 2e^+ + 2\nu$）で放出されるエネルギーは約 27 MeV である。太陽の質量は 2.0×10^{27} トンであり、その 73%が水素であるという。上の核融合反応サイクルによって 1 g の水素から 6×10^{11} J のエネルギーが発生する。しかも，陽子同士がクーロン力に打ち勝って接近し反応するためには太陽中心の 1500 万 K という温度は極めて不十分で [1]，この反応は極めてゆっくりと進む。このために地球上の生物は進化に必要な十分なエネルギーと時間を利用することができたのである。質量が太陽より大きく，中心温度の高い恒星では核融合反応は速く進み，質量が大きいにも拘わらず短い時間で燃え尽きてしまう。さらに融合反応が進んで ^{14}C がつくられ，温度

が少し高くなるとC-Nサイクルと呼ばれる一連のサイクルが起こる。現在エネルギー利用のため実現を目指して研究されている核融合反応は，反応率（断面積）も高くエネルギー出力（Q値）も大きな反応，

$$^{2}H + {}^{3}H = {}^{4}He + {}^{1}n + 17.6\ MeV$$

である。

1） 陽子の半径を $R = 1.2 \times 10^{-15}$ m，電荷を 1.60×10^{-19} C とすると，２個の陽子が丁度接した状態（陽子の半径；$R = r_0A^{1/3}$，$A = 1$，中心間の距離；2R）でクーロン障壁[2]を計算すると，

$$V = e^2/(4\pi\varepsilon_0 \times 2R) = 9.63 \times 10^{-14}\ J$$
$$= 9.63 \times 10^{-14}\ J \qquad (= 601\ keV)$$

このエネルギーに相当する温度をボルツマン分布から計算すると、

$$(3/2)kT = 9.63 \times 10^{-14}\ J$$ k；ボルツマン定数

$$T = 9.63 \times 10^{-14}\ J\ /\ (2/3) \times 1.38 \times 10^{-23}\ J\ K^{-1}$$
$$\cong 1 \times 10^{10}\ K$$

陽子同士がクーロン力にうち勝って反応を起こすためには，これだけの温度が必要である。しかし、この温度はボルツマン分布の平均値からの計算であって、太陽の中心の1500万Kという温度でも僅かではあるが数百 KeV を越えるエネルギーの陽子もあり、しかもトンネル効果[3]でクーロン障壁を通り抜ける確率もあるので，太陽の中心の1500万Kという低い温度でも反応は極めてゆっくりではあるが進むことができる。太陽より質量の大きな恒星ほど中心部の温度は高くなり，核融合の効率が大きく寿命は短くなる。太陽の寿命の100億年に対して，質量が太陽の10倍の星では2600万年，100倍の星では270万年と言われる。

２） 一般に入射粒子２に対する標的核１のクーロン障壁Vは，次のように計算される（図５）。

$$V = Z_1Z_2e^2/(R_1 + R_2),\quad R = r_0A^{1/3}$$

３） ポテンシャル障壁の一方の側にあり，その障壁の高さより小さな運動エネルギーしかもたない粒子が障壁の反対側に，ある確率で現れる現象であって，マクロの力学系では観測されない量子力学的効果である。電子，核子，α粒子などの粒子が波動性を示すことによる。α壊変や自発核分裂はトンネル効果で進むため一般に半減期は極めて長い。

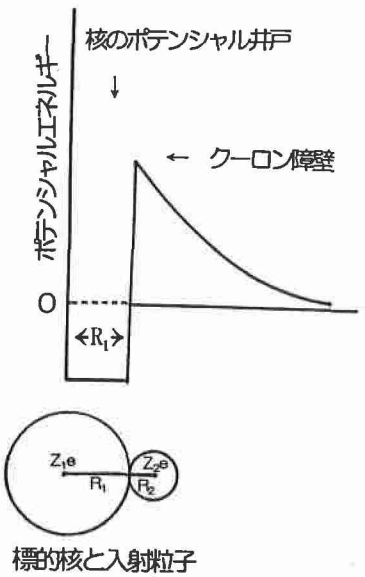


図5　クーロン障壁

参考文献

1）松浦辰男：放射性元素物語（研成社，1993）

2）G.R.Choppin（今村　昌訳）：核化学入門（化学同人，1965）

3）B.G.Harvey（奥野久輝訳）：核化学（東京化学同人，1968）

4）木越邦彦：放射化学概説（培風館，1970）

5）R.H.Lapp,H.L.Andrews: nuclear Radiation Physics(PRENTICE-HALL,INC., 1972)

6）R. Fifield 編（土井恒成訳）：何が宇宙をつくっているか－暗黒物質からクオークまで（丸善，1997）

7）富永　健，佐野博敏：放射化学概論　第２版（東京大学出版会，1999）

(2002年3月22日受理)

放射線教育 Radiation Education
Vol. 5, No. 1, p. 81—86 (2001)

元素とエネルギーのルーツ

中　西　　孝
金沢大学理学部化学科
（〒920-1192　石川県 金沢市 角間町）

［要約］我々の身の回りの様々な物質を構成している諸元素は，我々の宇宙を誕生させたビッグバンとその後の星（恒星）の誕生・進化・最期の過程や宇宙空間において起こった原子核反応の産物である。我々は物質の様々な変化に伴って発生するエネルギーを利用しているわけであるが，物質を構成している元素のルーツと表裏一体でエネルギーのルーツもたどることができる。

1．はじめに

化学の授業では，普通は「物質ありき」・「元素ありき」から話が始まる。しかし，大学の核・放射化学や宇宙地球化学の授業では，放射壊変や核反応など原子核に関する一通りの学習の延長線上において，元素の起源にまで話を遡らせることができる。ところが，原子核に関する系統的学習をしたことが無い一般市民や高校生および中・小学生にも，厳密さをまったく犠牲にするが，元素の起源の話には興味をもってもらえることが分かった。イヤラシイ（と一般には思われている）放射線を出す物質が人類が地球上に出現する以前から天然に存在する理由や，なぜ・どこから放射線が出てくるのかを一般市民に説明しているうちに脱線して宇宙の歴史や元素の起源も噛み砕いて話してみたら，それが結構受けたのである。約150億年前のビッグバン（我々の宇宙の誕生時）の産物，さらに太陽系誕生（約46億年前）の引き金になった星（恒星）の進化と超新星爆発（約50億年前）の産物が太陽系および地球に存在する種々の元素であり，宇宙の壮大な歴史が我々の身体に元素および元素の化合物というかたちで宿っているのだと語ったら，みんなから「へー」と感動されてしまった次第である。さらに調子に乗って物質（元素）の起源に資源・エネルギー問題をダブらせてみた結果，これも好評であった。

そこで，放射線・放射能および資源・エネルギー・原子力・環境などについて一般市民や児童・生徒に話（解説）をされる多くの先生方に元素とエネルギーのルーツについても話を展開することをおすすめしたいと考え，筆者が話していることの概略を紹介させていただくことにする。

2．元素の起源

原子核・原子核現象に関する理解と元素・同位体の太陽系存在度に関する理解が深まるにつれて太陽系及び地球に存在する元素の由来が次第にはっきりしてきた。元素の起源を我々が現在観ている宇宙の歴史と重ねて理解することができるようになった。我々が知っている元素のすべてが宇宙に最初から完成品として存在していたわけではなく，最も軽い水素を基にして次々と重い元素がつくられたことが分かってきた。元素の合成反応は原子核反応であるが，その反応の重要な部分は以下に略述するとおり我々の宇宙を誕生させたビッグバンと星（恒星）の進化・最期の過程において起こった。

約 150 億年前（120 億年～130 億年前という説もある）のビッグバンによって我々の宇宙の空間・時間・物質・エネルギー・力が生み出された。宇宙誕生の約１秒後には陽子，中性子，電子，ニュートリノ，光子が存在したといわれている。さらに，その後の約 10 分間でヘリウム（He/H 原子数比～1:10，宇宙の質量の～27 %がヘリウム）や少量の重水素，リチウム-7 までがつくられた。

ビッグバン後の宇宙の膨張過程で水素を主成分とするガス雲のところどころで重力収縮が起こり，十分高温（～10^7 K）になったところで水素原子核の核融合反応が始まって第一世代の星（恒星）が誕生した。水素の核融合反応（水素燃焼とも呼ばれる）は発熱反応であり，この反応によってヘリウムがつくられた。さらに，ヘリウム燃焼（^{4}He → ^{12}C，^{16}O，^{20}Ne）（発熱反応），α過程（^{12}C，^{16}O，^{20}Ne とα粒子との反応でマグネシウム～硫黄がつくられる）（発熱反応）が続き，e過程（3×10^9 Kの熱平衡状態）でマグネシウム～硫黄から出発して鉄・ニッケルまでの元素がつくられた。また，ゆっくりとした中性子捕獲反応及びβ^-壊変（s過程）によってビスマスまでの重元素も少量であるが合成された。このような進化の道をたどった星の中心核には相当量の鉄がたまり，中心核の収縮と温度上昇が起こると最期に暴走的な超新星爆発に至る。超新星爆発の過程において，短時間に多重中性子捕獲反応及びβ^-壊変（r過程）やp過程（陽子捕獲反応など）が起こって鉄以上の重元素が合成された（吸熱反応）。なお，どのような星でも新星爆発・超新星爆発で最期を迎えるわけではなく，星の質量や伴星の存在などの条件が満たされたときにのみ新星爆発や超新星爆発が起こる（太陽が新星・超新星になることはない）。また，星の寿命はその星の質量に依存し，質量が小さいほど長寿命である（太陽の 10 倍の質量をもつ星で～２千万年，太陽程度の質量をもつ星で～140 億年といわれている）。

超新星爆発を起こした星は物質を宇宙空間に放出し，その一部が未収縮の水素を主成分とするガス雲（ビッグバンの名残）にショックを与えて収縮を開始させることにより第二世代の星が誕生する。我々の太陽は第二世代以降の星の一つであり，太陽系及び地球に存在する諸元素（水素とヘリウムの一部を除く）は，水素燃焼で始まって超新星爆発で一生を閉じた星（太陽よりも一世代前の星）の中でつくられたものである。その超新星爆発の時期は，元素合成モデルと重元素の長半減期同位体を用いる年代測定に基づいて約 50 億年前と推論されており，太陽系の誕生は始源的隕石の年代測定に基づいて約 46 億年前と推論されている。なお，太陽系の質量の約 99.87 %は太陽に集中しており，元素の質量比は，水素～70.7 %，ヘリウム～27.4 %，リチウムからウランまで～1.9 %である。

以上概略的に述べた過程をさらに簡単に模式的に図１に示す。

３．エネルギーの起源

ビッグバン及び星の中でつくられた元素によって太陽系及び地球ができ上がっている。太陽に集まった水素（ビッグバンに伴って出現）は，現在，核融合反応を起こしてエネルギーを放出している。また，地球には太陽の前世代の星でつくられた諸元素とビッグバンに由来する水素が存在し，そのような由来の元素から岩石や水（海）や大気物質などができ上がり，さらに生命が誕生して大気に酸素も加わった。植物の中では，ビッグ

バンに由来する水素と星の中でつくられた炭素などの元素と太陽のエネルギーを使って有機化合物が合成されている。そして我々は様々な物質の変化過程（分子レベルと原子核レベル）や循環過程からエネルギーを得て利用しているわけであり，物質とエネルギーは表裏一体の関係にある。したがって，物質を構成している元素の起源に関する知識を活用しながらエネルギーの起源を考えることができる（図２）。

図２を用いながら現在の日本の発電用のエネルギー源の由来について手短に考えてみよう。現在もっとも発電電力量が多いのは火力発電で，化石燃料（天然ガス，石炭，石油）を燃焼（化学反応）させて熱エネルギーを得ている。次は原子力で，ウラン-235 を核分裂（原子核反応）させて熱エネルギーを得ている。火力発電も原子力発電も発生した熱で水蒸気をつくり発電機のタービンを回している。３番目は水力発電である。高所に溜めた水の位置エネルギーを水の運動エネルギーに換えて発電機に連結している水車を回している。

例１：火力

火力発電では，生物起源の炭化水素の化石化したもの（天然ガス，石炭，石油）の燃焼（化学反応）に伴って発生する熱エネルギーを利用している。化石燃料は昔の生物が元素と太陽エネルギーを使って合成した有機物に由来し，太陽エネルギーの貯金箱ということができる。太陽エネルギーは水素の核融合反応に由来する。太陽に存在する水素はビッグバンの産物（エネルギー → 物質）であるから，火力発電のエネルギー源をビッグバンのエネルギーにまで遡ることができる。

例２：原子力（核分裂）

原子力発電の現在の主流はウラン-235 の核分裂エネルギーの利用である。ウランのような重元素は超新星爆発のときに大部分が合成され，その極一部が地球に分配されたのである。ウラン-235 が核分裂すると何故エネルギーが出るかについては省略するが，簡単にいえばウラン-235 の原子核の中に超新星爆発のエネルギーの一部が貯えられており，そのエネルギーを取り出すために核分裂させているのである（核分裂に伴って質量の一部がエネルギーに変わる）。超新星爆発のエネルギー源は発熱的な星内元素合成反応であり，さらにビッグバンにまで遡ることができる。

例３：水力

水力発電では，重力の存在下で水を高い位置から低い位置に落して得られる運動エネルギーで発電機に連結している水車を回す。高い位置に水を運んだのは太陽の熱エネルギーである。すなわち，低地の水が太陽エネルギーを吸収して蒸発し，上空で雲となり雨となって高地に水が溜まったのである。水力発電は，太陽エネルギーによって起こる水の重力方向の循環過程を利用しているのである。また，水力を発現する重力の起源は地球という惑星の質量である。太陽エネルギーの起源から先は火力について述べたとおりであり，地球の質量の原因である物質については，起源を星そしてビッグバンと遡ることができる。

なお，風力発電は太陽エネルギーによって起こる大気循環過程の利用である。

例４：地熱

地熱源の一つは長半減期放射性核種の壊変エネルギーであると考えられている。したがって，長半減期放射性核種を合成した星へとエネルギー源を遡ることができる。

今日の資源・エネルギー・環境問題の解決にはほとんど役に立ちそうもない話であるが，エネルギーに関する現状や問題点について話す中でエネルギーの由来にも言及すれば短調さ・退屈さから幾分かは脱却できると考えられる。

４．おわりに

平成１３年度原子力体験セミナー「文系・東北地区コース」（平成 13 年 12 月 22 日，仙台市）において「くらしの中の放射線」という題目で話をさせていただくことができたが，いつもの悪い癖が出て脱線をしてしまい，‘エネルギーの故郷’という余計な話をしてしまった。それを聞いてくださった放射線教育フォーラム編集委員会の先生から‘エネルギーの故郷’の類の題目で「放射線教育」誌への投稿をとお誘いをいただいた。何度も喋ってきたことなので直ぐに原稿を書くことができると思い，やはり，いつもの悪い癖で安請け合いをしてしまった。しかし，何かの機会に活用していただける程度に丁寧に書き上げるには至らなかった。図版だけはご利用いただきたいと考えて丁寧につくったつもりなので，さらに改善も施して自由にお使いいただけたら幸甚である。

参考文献

・マーカス・チャウン 著，糸川　洋訳「僕らは星のかけら 原子をつくった魔法の炉を探して」（無名舎，2000）．
・ステン.F. オデンワルド 著，塩原通緒 訳，加藤賢一 監修「宇宙 300 の大疑問」（講談社 ブルーバックス，2000）．
・国立天文台編「理科年表」（丸善）．
・P.A. Cox「The Elements　Their origin, abundance and distribution」（Oxford University Press, 1989）．
・W.S. Broecker「How to Build a Habitable Planet」（Lamont-Doherty Geological Observatory of Columbia University, 1985）．

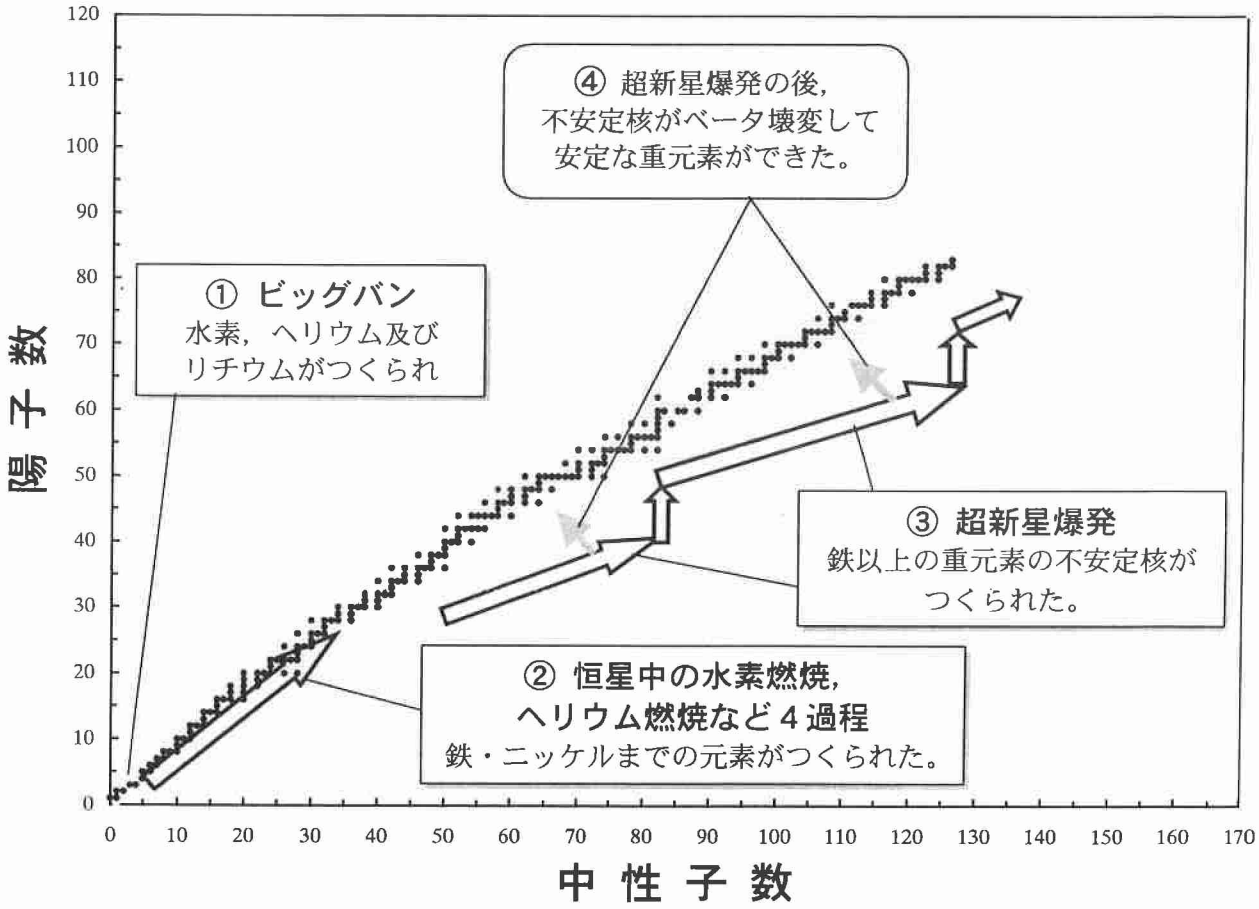


図１　現在知られている核種（●は安定核種，その他は放射性核種）と元素合成過程

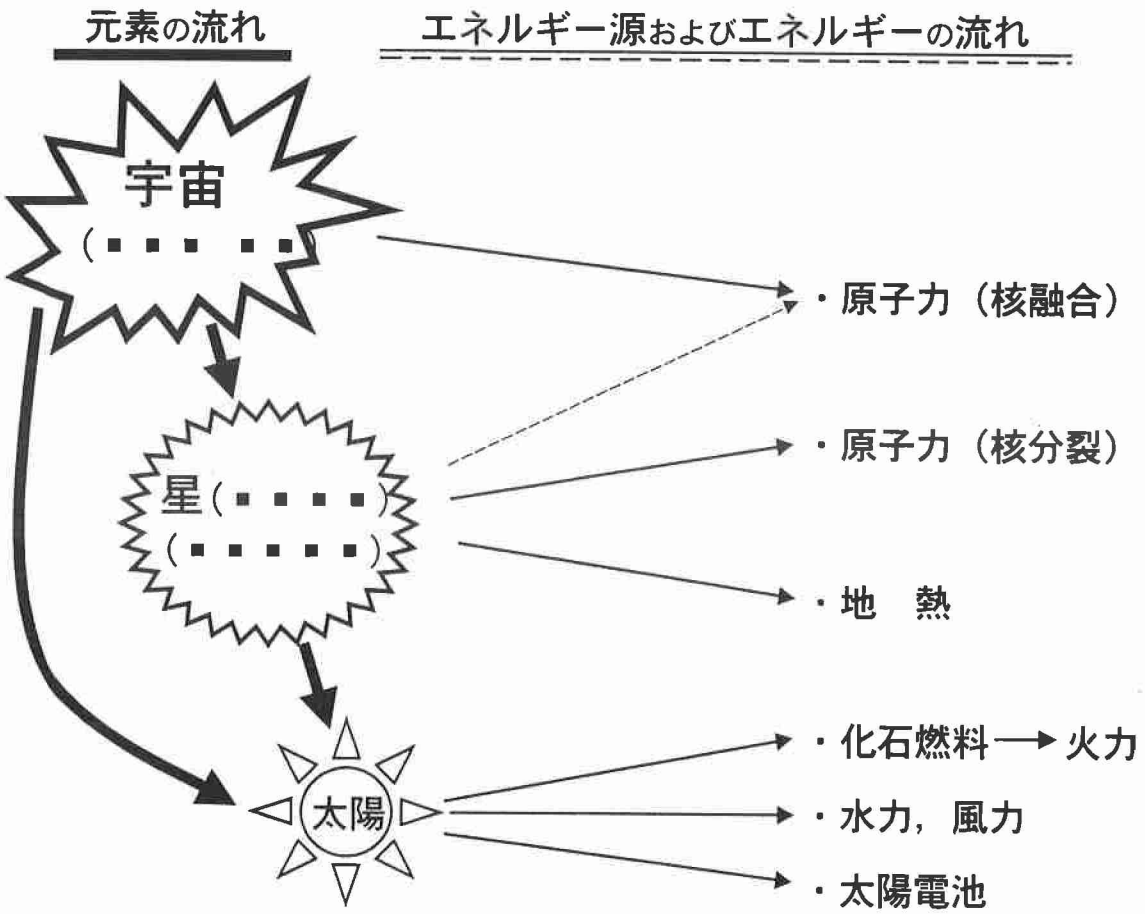


図２　元素とエネルギーのルーツ

放射線教育 Radiation Education
Vol. 5, No. 1, p. 87—93 (2001)

放射線と物質の相互作用

中村真基
放射線教育フオーラム
〒１０５－０００１　東京都虎ノ門１－７－６升本ビル２階

〔要旨〕
放射線の効果を正しく理解するためには、放射線が物質を構成する原子や分子に、どの様にしてエネルギーを与え、エネルギーを受けとつた原子なり分子がその後、どの様に振る舞つて物質変化を起こすのか知らねばならない。これらは原子レベルの現象であり、正しい理解に到達するには量子力学に頼らねばならない。しかし、少し条件をゆるめれば、意外と古典物理学の知識でも実像に迫ることができるのである。このことは誠に教育的であると言える。物理学の発展の仕方では、新しい分野が切り開かれる時、そこで使用出来る武器は古い理論体系だけである。これを用いて、どこまで新しい現象が説明出来るのか、何が説明できないのか、が明確にされて、総てが矛盾なく説明出来る新しい理論体系が再構築される。いわゆる、パラダイムの変換がはかられる。そのことを高等学校レベルの物理と数学の知識を基にして、放射線と物質の相互作用の問題で辿つて見ようと思う。そして高校レベルの知識でも正しく理解していれば、現代の自然科学の問題に対しても肉薄する事が出来る、と言うことを示そうと思い、どこまで成功するかは疑問であるが筆をおこした。

はじめに

放射線を物質に照射すると、その物質に種々の変化を引き起こします。この変化は放射線が物質を構成している原子や分子にエネルギーを付与する事から始まります。これを放射線と物質の相互作用の物理過程とか一次過程といいます。このエネルギー付与の仕方は、放射線の種類により、また放射線のエネルギーの大小により異なります。原子に対するエネルギー付与の仕方から、放射線の種類を分類する事が出来ます。

１　重荷電粒子　　水素の原子核（陽子）及びそれより重いイオン化された原子を加速器で加速したもの、放射能をもつ原子から放射されるα線もこの仲間です。

２　電子線　　電子を加速器で加速したもの、放射性原子からのβ線もこの仲間です。

３　X線、γ線　　波長λの短い光です。$\lambda \leqq 10^{-10}$mの範囲です。ちなみに可視光の波長は10^{-7}m程度です。γ線は不安定な原子核から放出される単色の光です。

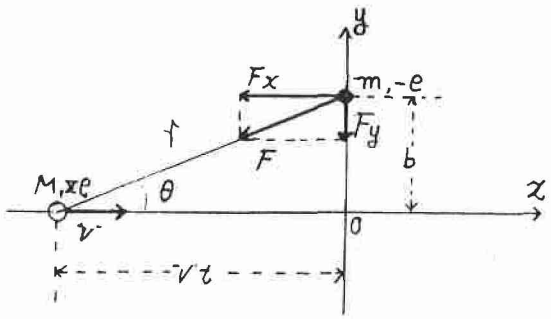
４　中性子線　　核反応や核分裂の際に放出される核構成粒子です。質量は陽子にほぼ等しく、電荷は０で加速器で加速することは出来ません。

これらの放射線と物質の相互作用を順次見てゆきましょう。

高速重荷電粒子（　イオン　）と物質の相互作用

加速器で加速された高速イオン粒子が物質に打ち込まれた時、その物質に種々の変化を起こさせますが、これは高速イオン粒子が物質を構成している原子にエネルギーを付与することから始まります。これを一次過程と言います。ではどのようにして高速イオン粒子は原子にエネルギーを与えるのでしょうか。私たちの体験出来る世界では物と物が直接ぶつかり合つてエネルギーのやり取りをするのですが原子を構成するような極微な粒子では、直接粒子同士が衝突する様な場合は極めて稀にしかおこりません。しかしこれらの微粒子は電気を帯びていますから、その電荷の間に働く力；クーロン力をとおしてエネルギーのやり取りが可能になるのです。では、その様子を具体的に見てゆきましょう。

加速された高速イオン粒子が原子の側を飛んでゆくのですが、原子はその中心に＋に帯電した原子核があり、その周りを原子核の電荷をうち消すだけの電子が取り囲んでいるので、まず、一個の入射イオン粒子と一個の電子の相互作用を考えましょう。物理学では、この様な複雑な現象を扱う場合、重要な要素だけを残して、出来るだけ簡単なモデルを考え、おおよその見当をつけてから実際の状況に近附けてゆく方法を取ります。電子は原子の内部で運動をしていますが、入射粒子の速度Ｖが電子の速度に比べて非常に早ければ、入射粒子が電子の側を通り抜ける間は電子はほとんど動いていないと見なして差し支えありません。また、入射粒子の質量Ｍは電子の質量ｍに比べて約１８００倍以上あるので相互作用の反作用によつても、入射粒子の運動方向に変化はほとんどなく直進すると考えてよいでしょう。そこで、入射粒子の運動方向をｘ軸とした座標を取りｙ軸上の原点からｂだけ離れた点に電子が静止しており、時間は入射粒子がｘ軸の原点を通過する瞬間を
ｔ＝０　として測ることにします。そうすると－ｔの時刻には入射粒子はｘ軸上原点より左側　Ｖ×ｔ　の位置にあることになり、この瞬間の状況を図で示すと図１の様になります。図中ｒはＭとｍの直線距離、θはｒとｘ軸の間の角、イオンの電荷は電子の電荷－ｅのｚ倍の＋ｚｅとします。この時ＭとｍのクーロンFは｛（１）式｝が作用しますが、このＦをｘ成分｛（２）式｝とｙ成分｛（３）式｝に分解しておきます。



$$F = -k\frac{z\,e^2}{r^2} \qquad (1)$$

$$F_x = -k\frac{ze^2}{r^2}\cos\theta \qquad (2)$$

$$F_y = -k\frac{ze^2}{r^2}\sin\theta \qquad (3)$$

図　1

これらの力の成分の効果をそれぞれ評価して、その結果を合成すれば実際の効果が得られます。ニュートンの運動の第二法則によれば、質量mの物体に力fが働けば運動の状態が変わり、加速運動を生じます。今Δt秒間力fが作用し、速度vがΔvだけ変化したならば加速度aは　$a=\Delta v/\Delta t$　と書けるので、両辺にmを掛けると　$ma=m\Delta v/\Delta t$　となり、左辺のmaはfに等しく，右辺の$m\Delta v$はfによる運動量の変化分　$\Delta P=m\Delta v$　ですから　$f=\Delta P/\Delta t$　となり、また　$\Delta P=f\Delta t$　と書き直せます。この　$f\Delta t$　と言う量は、力積と言われる量で運動量の変化分に等しいものです。したがつて、力積が計算出来れば運動量と運動エネルギーの関係　$E=P^2/2m$　より、力の作用によりmに与えられた運動エネルギーが計算出来ます。そこで、この考えを入射粒子Mと電子mの相互作用に適用しましょう。図（1）でMがx軸上を右方え移動すれば、rもθも変化しますが移動時間Δtが極めて短かければ、その変化も極めて小さくΔtの間fは一定の値を保つと考えて力積$f\Delta t$を計算します。いまの計算はx軸上　$-Vt$　の位置についてのものですからx軸を小さい区間に分けて、各区間毎に力積を計算しその合計をもとめます。これは大変面倒な計算ですが積分を使えば簡単です。電子の運動量の変化分のx成分及びy成分は次のようになります。

$$\Delta P_x=\int_{-\infty}^{\infty} F_x\,dt \qquad (4)、\qquad \Delta P_y=\int_{-\infty}^{\infty} F_y\,dt \qquad (5)$$

積分の下限及び上限がそれぞれ$-\infty$及び∞なのは入射粒子が無限の彼方の位置から電子に接近してきて、また、無限の彼方に遠ざかることに対応しています。この計算を実行するために（2）、（3）式の書き換えをします。図1で分かる様に$r\times\sin\theta=b$ですから

$r=b/\sin\theta$，　したがつて

$F_x=-kze^2\sin^2\theta\cos\theta/b^2$（2 ‘）、　$F_y=-kze^2\sin^3\theta/b^2$　（3’）。

また、$\tan\theta=b/vt$　ですから　$t=b/v\ \tan\theta$、両辺をθで微分すると　$dt/d\theta=-b/v\ \sin^2\theta$　となり、　$dt=-(b/v\ \sin^2\theta)\,d\theta$　（6）

と置き換えられるので、（2 ‘）、（3’）及び（6）式で（4）、（5）式を書き換えると

$$\Delta P_x=\int_{-\infty}^{\infty} F_x\,dt=\int_0^{\pi}\left(-k\frac{ze^2\sin^2\theta\cos\theta}{b^2}\right)\left(-\frac{b}{v\sin^2\theta}\right)d\theta$$

$$=k\frac{ze^2}{vb}\int_0^{\pi}\cos\theta\,d\theta=k\frac{ze^2}{vb}\left[\sin\theta\right]_0^{\pi}=0$$

$$\Delta P_y=\int_{-\infty}^{\infty} F_y\,dt=\int_0^{\pi}\left(-k\frac{ze^2\sin^3\theta}{b^2}\right)\left(-\frac{b}{v\sin^2\theta}\right)d\theta$$

$$=k\frac{ze^2}{vb}\int_0^{\pi}\sin\theta\,d\theta=k\frac{ze^2}{vb}\left[-\cos\theta\right]_0^{\pi}=-2k\frac{ze^2}{vb}$$

積分の下限及び上限が－∞、＋∞から０、πに変わつたのはｔ→－∞でｘ→－∞、その時θ→０、ｔ→∞でｘ→∞、そのときθ→πとなるからです。

以上の計算でｙ軸方向のみに運動量の変化が現れる事が分かりました。したがつてｂの位置にある電子の得る運動エネルギーｄＥ（ｂ）は

$$dE(b) = \frac{\Delta P_y^{\,2}}{2m} = \frac{1}{2m}\left\{-2\frac{kze^2}{vb}\right\}^2 = \frac{2k^2z^2e^4}{mv^2b^2} \qquad (7)$$

と得られます。この値を具体的に当たつて見ましょう。入射粒子はプロトン（水素の原子核　ｚ＝１，Ｍ＝１．６７×１０$^{-27}$　ｋｇ）で１００万ボルトに加速したとします。（7）式の分子、分母に（１／２）Ｍを掛けてやれば（Ｍは入射粒子の質量）、分母に（１／２）Ｍｖ^2（＝Ｅ）とゆう入射粒子の運動エネルギーを表す項を作り出す事が出来、この運動エネルギーは加速器の加速電圧　Ｖ（ｖｏｌｔ）により付与されたものですから、
Ｅ＝ｚｅＶで（ｚは加速粒子のイオン価）

$$dE(b) = \frac{Mk^2z^2e^4}{m(1/2)Mv^2b^2} = \frac{Mk^2z^2e^4}{mEb^2} = \frac{Mk^2z^2e^4}{mzeVb^2} = \left(\frac{M}{m}\right)\frac{k^2ze^3}{Vb^2} \quad (\text{joule})$$

$$= \left(\frac{M}{m}\right)\frac{k^2ze^2}{Vb^2} = 2.1\times10^{-18}\times\left(\frac{M}{m}\right)\frac{z}{Vb^2} \quad (\text{eV}) \qquad (8)$$

これで入射粒子の質量　Ｍ（kg）、イオン価　ｚ及び加速電圧　Ｖ（volt）をきめ、ｂ（ｍ）を指定したときに電子の受け取るエネルギーを　ｅＶ単位*1で表す式が得られました。そこでプロトン加速の例では、（Ｍ／ｍ）＝１．８３×１０^3、ｚ＝１，Ｖ＝１０^6　(volt)，ｂを水素原子の直径の１／１０，すなわち１０$^{-11}$（ｍ）に取るとｄＥ（ｂ）≒３８ｅＶと成り、水素原子のイオン化に必要な１３．６ｅＶをはるかに越え、電離することができます。また、ｂの値が少し大きくなりｄＥの値が小さくなつても原子を励起して活生化することは出来ます。

＊１：ｑクーロンノ帯電体がＶボルトの電位差を通過するとき電場によりされる仕事Ｗは
Ｗ＝ｑ×Ｖ（クーロン×ボルト＝ジュール）で、これがこの帯電体の運動エネルギーの増加分になる。そこでｑ＝ｅ（素電荷　１．６０×１０$^{-19}$クーロン）とし、Ｖ＝１ボルトにしたときの帯電体の運動エネルギーの増加分１．６０×１０$^{-19}$ジュールを新しく単位に取り　１eV（　１エレクトロンボルト　）と呼ぶ。

（7）式より分かるように、ｄＥ（ｂ）はｂの二乗に逆比例するので、ｂがあまり大きくなると電子は運動エネルギーを受け取る事が出来なくなります。ｂのその限界は何処らと考えれば良いのでしょうか。

（7）式を導く際に１つの前提がありました。それは、入射粒子が電子の側を通過する間は、電子は動かない。と言うものでした。そこで、入射粒子が通過する時間というのは、クーロン力が有効に作用する時間（τとします）と考えると　$\tau = b / v$　程度です。電子は原子内で軌道運動をしていますからその周期をＴとすると、　$T > \tau$　ならば　前提条件は満たされると考えて良いでしょう。しかし、不等号でははつきりしませんしここでは大凡のｂの最大値（b_{max}）を知れば良いのですから　$T \geqq \tau$と考えて、$T = \tau$　を条件とします。電子の軌道運動の角速度（電子が軌道上を一秒間に移動する時の中心角　ω）とＴの間には、$T = 2\pi / \omega$　の関係がありますので　$2\pi / \omega = b_{max} / v$，すなわち、$b_{max} = 2\pi v / \omega$　と与える事が出来ます。　$T < \tau$　の場合では、入射粒子の速度が電子の速度に比べ遅い場合に相当するのですからクーロン力の変化も遅く、電子に作用する力も衝撃力とならず、原子核と電子の間に働くクーロン力を平均として弱める様に作用し電子の軌道をずらせますが、入射粒子が遠ざかると元の状態に戻るため電子にエネルギーを与えることが出来ないのです。

さて、今までの議論は、個々の電子に与えるエネルギーについてでしたが、今度は、入射粒子が物質の中を通過するときどれだけエネルギーを失うかを検討してみましょう。物質は原子番号Ｚ、原子量Ａ，の単体で厚さは薄くｄｘとします。入射粒子はこの物質薄板に垂直に入射するとします。入射粒子の通路（飛跡と言います）に沿つてｘ軸をとり、ｘ軸からｂとｂより僅かだけ遠い点ｂ＋ｄｂを半径としてｘ軸を３６０度回転させると、薄板の中に図２の様な領域が出来ます。この領域の体積V_bは$2\pi b \cdot db \cdot dx$ですが、V_bの中に存在する電子は総てｚ軸からの距離をｂと見なします。そうすると、この物質１ｇの中に存在する原子数はアボガドロ数（N_A）を原子量（Ａ）で割つたものですから１cm^3中に含まれる原子数は、この物質の密度をρとすれば$N_A \times \rho / A$、１原子当たりＺ個の電子が含まれるのでV_bの中に含まれる電子数は$(N_A \rho Z / A) \times V_b$と成ります。これらの電子は総てｘ軸からｂの距離に在ると見なされますからV_bの中にある電子総てに与えるエネルギーdE_bは

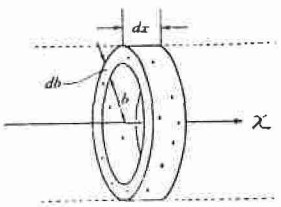


図　２

$$dE_b = (N_A \rho Z / A) \times (2\pi b \cdot db \cdot dx) \times (2k^2 z^2 e^4 / m v^2 b^2)$$
$$= (4\pi k^2 z^2 e^4 / m v^2) \cdot (N_A \rho Z / A) \cdot (db / b)\, dx$$

となります。したがつて総ての領域に存在する電子に与えるエネルギーｄＥは、dE_bの式のｂについて０から∞まで積分すれば得られますが、既に述べた様にｂには上限b_{max}があり、また、下限にも原子レベルの世界の特殊性（量子効果）から来る限界（b_{min}としま

す）があるので*2、積分範囲はb_{min}からb_{max}までとなります。よつて

$$dE=\int_{bmin}^{bmax} dE_b = \frac{4\pi k^2 z^2 e^4}{mv^2}\frac{N_A\rho}{A} Z dx \int_{bmin}^{bmax}\frac{db}{b}$$

$$=\frac{4\pi k^2 z^2 e^4}{mv^2}\frac{N_A\rho}{A} Z dx \cdot \log_e\left[\frac{b_{max}}{b_{min}}\right]$$

$b_{min}=$ h/mv で与えられます*2: ここで h はプランクの定数、vは入射粒子の速度、mは速度vで運動している電子の質量です。$b_{max}=2\pi v/\omega$ なので

$$dE=\frac{4\pi k^2 z^2 e^4}{mv^2}\frac{N_A\rho}{A} Z dx \cdot \log_e\left[\frac{(2\pi v/\omega)}{(h/mv)}\right]$$

$$=\frac{4\pi k^2 z^2 e^4}{mv^2}\frac{N_A\rho}{A} Z dx \cdot \log_e\left[\frac{mv^2}{(h/2\pi)\omega}\right] \qquad (9)$$

入射粒子は厚さdxの物質層を通過するとき、物質中の電子にこれだけエネルギーを与えたのですから、これは入射粒子がこの物質層を通過したときのエネルギー損失量でもあるわけです。（9）式の両辺をdxで割り損失を表すー記号を付すと、入射粒子の単位通過距離当たりのエネルギー損失の式が得られます。

$$-\frac{dE}{dx}=\frac{4\pi k^2 z^2 e^4}{mv^2}\frac{N_A\rho}{A} Z \log_e\left[\frac{mv^2}{(h/2\pi)\omega}\right] \qquad (10)$$

dE／dx の単位は ジュール／cm です。それは電子数を求めるとき、体積V_bの計算で b、db、dxの単位にcmを、アボガドロ数N_Aに 原子数／mol，原子量Aに g／mol，物質の密度ρに g/cm^3 を使用したからです。

＊２： 衝突問題を扱う時、衝突する物体（Aとする）と衝突される物体（B）の重心の位置でこの現象を眺めると、現象が簡単に扱える。すなわち、AとBは一直線上を重心に向かつて飛来し、衝突後は、また一直線上を遠ざかる様に見える。Aの質量をm_A、Bの質量をm_Bとし、最初Bは静止しているとすれば重心の位置から見たAの速度V_{AG}および Bの速度V_{BG}は、それぞれ $V_{AG}=(m_B V_A)/(m_A+m_B)$、 $V_{BG}=(-m_A V_A)/(m_A+m_B)$ と表される（Aの進む方向を＋に取る）。 もし $m_A \gg m_B$ ならば $V_{AG}\fallingdotseq(m_B/m_A)V_A$、 $V_{BG}\fallingdotseq-(m_A/m_A)V_A=-V_A$ となる。今の場合m_Aは入射荷電粒子、m_Bは電子だからm_Aはm_Bの１８００倍以上あり、重心の位置は入射荷電

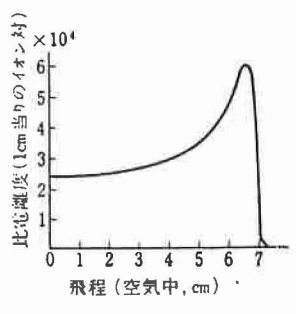
粒子の上にあり、$V_{AG} \fallingdotseq 0$、$V_{BG} \fallingdotseq -V_A = -v$　となり、入射荷電粒子は静止し、電子が入射荷電粒子の速さで入射荷電粒子に向かつて飛んでくる様に見える。原子規模の世界では電子の様な粒子は波動性を持つとされ（物質波）、その波長λはプランクの定数ｈを電子の運動量　ｍｖで割つた量、すなわち　$\lambda = h / (mv)$ で与えられる。したがつて、この衝突現象を二粒子の重心の位置から眺めれば、静止した荷電粒子に向かい波長λの電子波が押し寄せると言う図になる。ただし、ここで言う電子波は連続して空間に広がる波ではなく、空間に局在する、いわゆる波束と言われるもので物質波の波長の近傍だけに存在し、この波束の移動速度が粒子としての電子の速度に対応する。また、電子の位置に関して云々する場合、波束内の何処に存在するかは確率的なことしか言えず、存在範囲の限界として波長で指定する事が出来るだけである。このことより　$b_{min} \fallingdotseq \lambda = h / mv$ とされるのである。

以上で高速荷電粒子のエネルギー損失を表す式が得られましたが、これは古典力学を基礎として導出しました。正しくは、原子の世界を記述する量子力学によつて式を立てなければなりませんが、（１０）式が正しい式とどの程度異なるか比較のため、正しい式を次に掲げます。

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi k^2 z^2 e^4}{mv^2} \frac{N_A}{A} \rho Z \log_e \left[\frac{2mv^2}{(h/2\pi)\,\omega} \right] \qquad (11)$$

ただし、相対論の効果は無視しました。（１０）式と（１１）式ではｌｏｇのカツコの中に２が入るか入らないかの違いだけで，数値的には（１０）式のｌｏｇの値に０．６９３が加算されるだけの違いにすぎません。ですから、原子の世界を考えるのに或程度古典力学的に扱つても通用する部分も在る訳です。

（１０）式、或いは（１１）式から次のことが言えます。重荷電粒子は物質中を走行中、エネルギーを損失して速度ｖが小さくなり、それにに連れてそのエネルギー損失量はv^2に　逆比例して増大していきます。そして荷電粒子が止まる直前に最大となり、以後急速に減少し０となります。これは荷電粒子の速度が小さくなると近傍の電子を捕獲してイオン価を減少させ、遂に電荷０の中性原子になつてしまうからです。この性質は、重荷電粒子 を利用する上で非常に重要な事柄なのです。この様子を図示したのが図３です。この曲線をブラッグ曲線と言います。一つ注意を加えておきます。（１１）式のｌｏｇの分子にv^2の項が含まれていますが、ｌｏｇ内の変化は、それほど顕著に結果に響かないのです。



RaC′のα粒子のブラッグ曲線

図　３

未完，次号に続く（2002年3月22日受理）

編集委員会からのお知らせ

前号の訂正

「放射線教育」Vol. 4, No. 1 の記事の中で次のような誤りがありましたので訂正をお願いします。

1. p. 26，本文初めから 2 行目：
   「NPO 法人として環境庁に認可・・」
   ⇒「NPO 法人として経済企画庁に認可・・」
2. p. 78，参考文献 34)，
   「谷畑　功」⇒「谷畑勇夫」

著者へのお願い

「放射線教育」では，今回より著者に別刷 30 部をお届けいたします。つきましては別刷作成の都合上，原稿はできるだけ偶数ページにまとめてくださるようにご協力をお願いいたします。各論文が奇数ページから始まり，偶数ページで終わることになると好都合です。電子メールによる原稿提出またはフロッピーディスク付きでご提出された原稿は，こちらでページ数についての多少の調整をさせていただくことがありますのでご留意ください。

「放射線教育」投稿規定

2002.3.27.

（１）掲載論文の種類

①投稿論文　　会員（または非会員）の投稿論文。
②依頼論文　　編集委員会が執筆を依頼した論文。
③転載論文　　他誌からの転載で編集委員会が必要な手続きをとるもの。

（２）掲載する論文の内容

① 放射線、放射能、およびこれに関連の深い事項（エネルギー、環境、リスクなど）に関する分かりやすい論説、解説。
② 放射線教育に関する実践報告、提案、批判など。
③ 放射線教育に役立つと思われる論文、書籍などの紹介。

（３）原稿の書き方

①原稿はそのまま印刷できるようにワードプロセッサーで作成する。
②用紙はA4、１ページに40字x40行で上下左右30mm空ける。
③フォントは表題のみ16ポイント太字、その他（本文）10.5ポイント標準とする。
④１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行目に住所をカッコをつけて書く。ここまでは各行の中央にそれぞれ記載する。
⑤６行目を空けて、７行目から[要約]（150―200字程度）をつける。
⑥原稿は原則として１０ページ以内とする。別刷り作成に便利なように偶数ページの原稿としてください。
⑦使用言語は日本語とする。

（４）掲載までの手順

①編集委員会は、差読者に査読を依頼し、著者に修正を求めたり、掲載をお断わりすることもある。

（５）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。

（６）原稿の送付

そのまま印刷できる図表つきの原稿を下記あてに送付する。またフロッピーの同封、もしくは編集委員宛てE-mailによる原稿の送付を歓迎する。

（送付先）〒105-0001東京都港区虎ノ門1-7-6　升本ビル 2F
放射線教育フォーラム編集委員会
（封筒の表に「放射線教育投稿原稿」と朱書する）

【編集後記】

放射線教育フォーラムの目的の１つは、放射線についての基礎知識を正しく的確に、子供達に伝えることだと思います。しかしこれだけで良いでしょうか。基礎知識に加えて、放射線に関連した最先端の研究から得られた最新の知識や、研究の面白さ大切さ、また今まで知られていなかったことを発見したときの感動や、研究に夢を持つことの楽しさなどを、話して聞かせることも大切と考えます。

その方が聞いている子供達も退屈せず楽しいのではないでしょうか。そして、放射線に関連したことに興味がわいてきたり、心の中に何か夢が芽生えたりして、勉学に勤しむようになり、自然に正しい放射線の知識が子供達の身につくのではないかと思いますが、如何でしょうか。

本号から別刷りを作成することになりました。これから投稿される方には、別刷りが簡単に作れるように、出来るだけ偶数ページの原稿をお願い致します。

会員の皆様から放射線教育に関する論文が、多数届くのを楽しみにしております。

（小高正敬）

放射線教育　Vol. 5, No. 1 (2001)

発行日　2002年3月

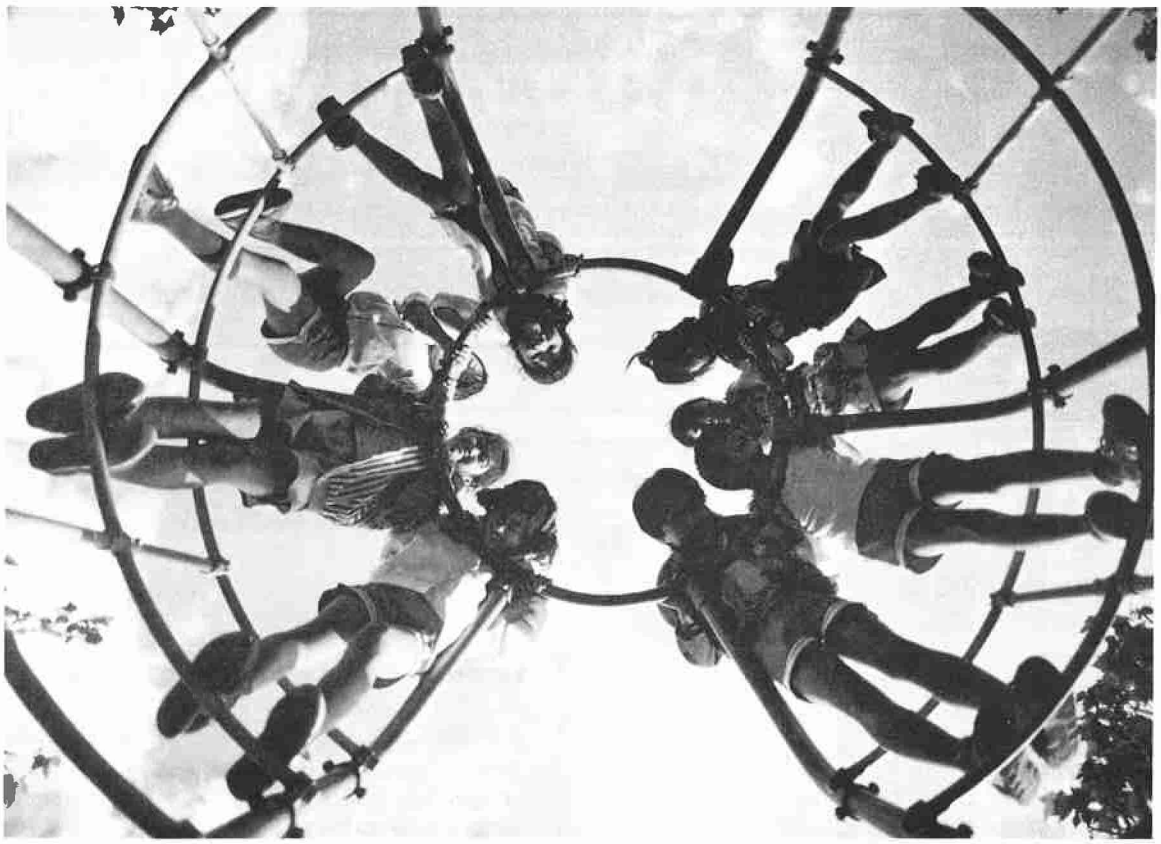
発行者　NPO法人放射線教育フォーラム（会長　有馬朗人）
URL：http://www.ref.or.jp

編集者　放射線教育フォーラム編集委員会
大野新一（委員長、理論放射線研究所）、今村　昌（理化学研究所名誉研究員）
大橋國雄（千葉大学名誉教授）、菊池文誠（東海大学理学部）
小高正敬（若狭湾エネルギー研究センター）、村主　進（原子力システム研究懇談会）
坂内忠明（放射線医学総合研究所）、村石幸正（東京大学教育学部附属中・高校）
渡利一夫（放射線医学総合研究所特別研究員）

事務局　〒105-0001　東京都港区虎ノ門　1－7－6　升本ビル2F
放射線教育フォーラム
Tel/Fax：　03 － 3591 － 5366,　E-mail：mt01-ref@kt.rim.or.jp
（編集委員長直通 E-mail: ohno-trl@01.246.ne.jp）

Japan Association for Promotion
of Science Education and Equipment

明日の地球を担うサイエンティストたち
みんなの好奇心を応援します。



(社)日本理科教育振興協会は，学校教育用理科機器・算数数学機器およびそれらの関連教材の健全な発達と普及を図り，わが国の学校理科教育の振興に寄与する事を目的とする，文部科学省主管の公益法人です。会員数は全国約2,000社，文部科学省委託事業をはじめ各種展示会・講習会等，教育用理科機器の普及・啓発に関する幅広い活動を行っています。

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

社団法人 日本理科教育振興協会

〒101-0052 東京都千代田区神田小川町3-26(山本ビル3F)
TEL. 03-3294-0715 FAX. 03-3294-0716
URL：http:/www.vinet.or.jp/japse

電気事業連合会のポータルサイト

「エネルギー

電気事業連合会および電力各社では、「総合的な学習の時間」での
ご用意しております。 調べ学習や課外活動などにご利用いただけ

http://www.fepc-

北海道電力（株）
http://www.hepco.co.jp/kids/index.html

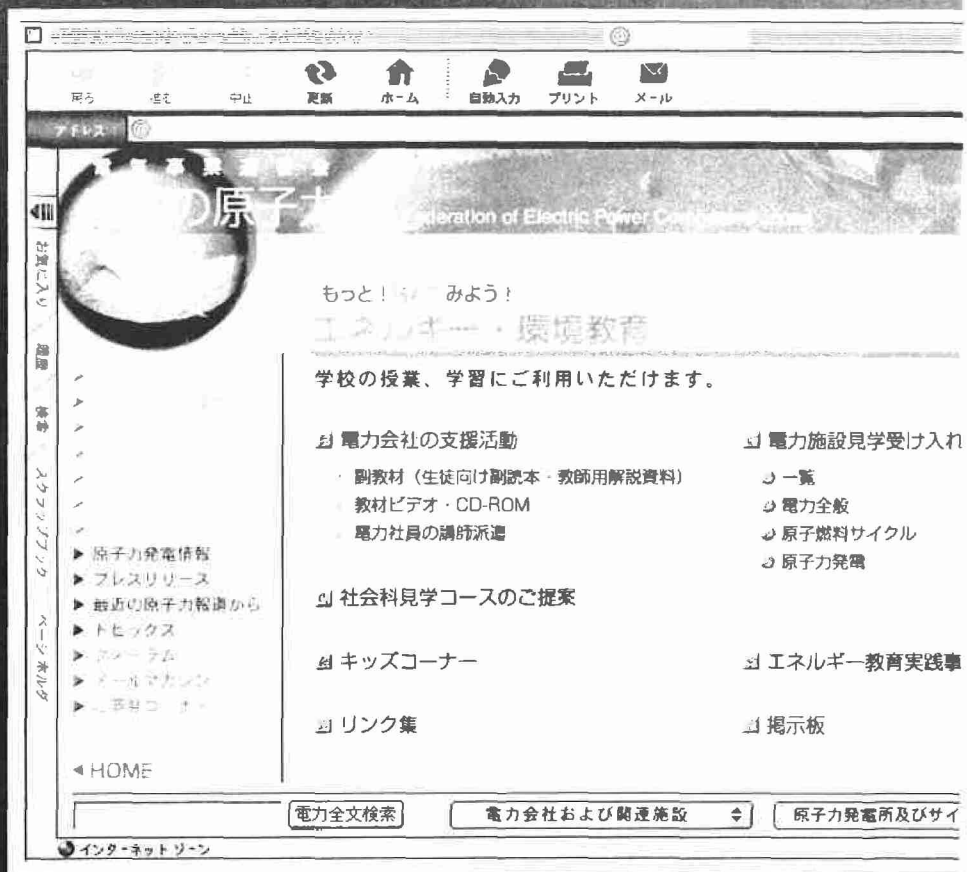
東北電力（株）
http://www.tohoku-epco.co.jp/nazenet/

東京電力（株）
http://www.tepco.co.jp/nuclear/atomic-guide/ag-top-j.html

中部電力（株）
http://www.chuden.co.jp/kids/index.html

北陸電力（株）
http://www.rikuden.co.jp/common/links/shika.htm

関西電力（株）
http://www.kepco.co.jp/pr/mihama/index.htm
http://www.kepco.co.jp/pr/ohi/index.htm

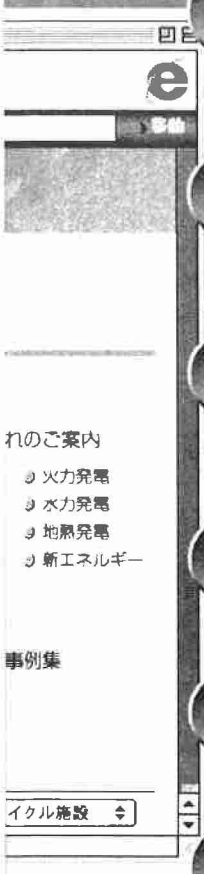


電気事業連合会　[Tel] 03-3279-2190

「日本の原子力」
・環境教育」

エネルギー・環境教育にお役立ていただける教育支援メニューを
れば幸いです。

atomic.jp/kyouiku/



1 電力会社の支援活動

副教材、教材ビデオ、CD-ROM、講師派遣など、授業をわかりやすく
楽しくバックアップ！

2 社会科見学コースのご提案

地元の原子力発電所や関連施設を効率よく見学できる社会科見学の
モデルコースをご紹介！

3 キッズコーナー

パズル、クイズ、イラストを使って楽しみながら電力の知識が身に
付けられる工夫を凝らしたコンテンツ！

4 電力施設見学受け入れのご案内

原子力・火力など、発電設備のPR館・資料館をリストアップ！

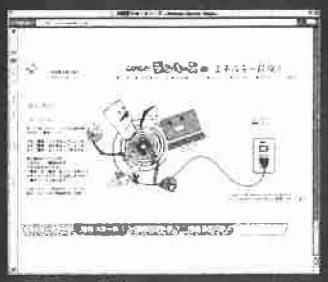
5 エネルギー教育実践事例集

エネルギー教育についての授業事例および指導方法等についてご紹介！

6 掲示板

先生方をはじめ、児童・生徒が自由に書き込める掲示板。放射線の測定
機材等の貸出も行います！

中国電力（株）
http://www.energia.co.jp/energiaj/company/atom/tanken/index.html



四国電力（株）
http://www.yonden.co.jp/kids/index.html

九州電力（株）
http://www.n-kyuden.com/atom/point/index.html

日本原子力発電（株）
http://www.japc.co.jp/kids/index.htm

日本原燃（株）
http://www.jnfl.co.jp/kids/index.html

電気事業連合会
http://www.fepc.or.jp/monoshiri/index.html

【住所】〒100-8118 東京都千代田区大手町 1丁目9番4号 経団連会館ビル

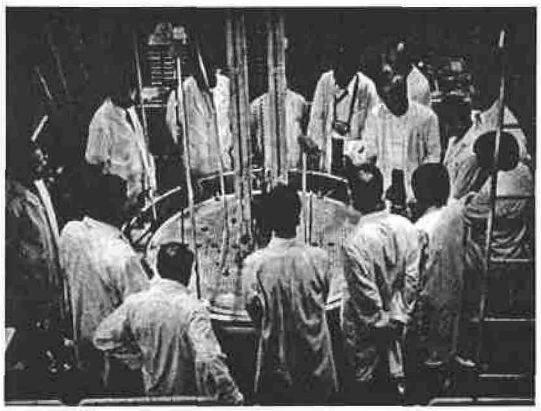
原子力・放射線をテーマに
資源・エネルギー・環境教育の教材を提供・・・
見て、聞いて、触れて、考える、教員のための研修

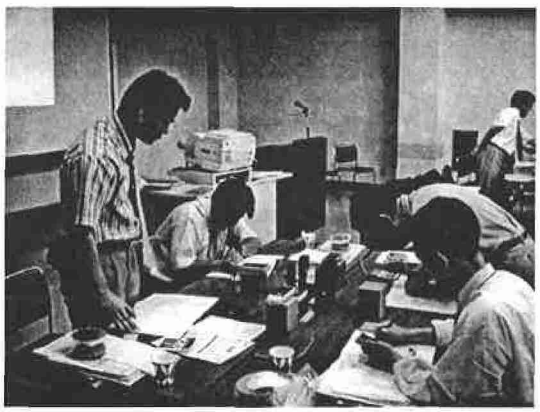
文部科学省受託事業

原子力体験セミナー

本セミナーは国の原子力総合研究機関である日本原子力研究所を主会場として全国の先生方を対象に実施するコースと、全国各地に講師陣が出張して1～2日間で実施する「地域コース」・「文系コース」から成り立っており、内容は、講義、実験・実習、施設見学等を柱に、理科系の専門的な科学的知識の取得を目的としたコースから、資源・エネルギー・環境・防災教育といった「総合的な学習の時間」等へもお役立ていただける内容のコースまで、担当教科や興味・関心に応じてご参加いただける講座と教材を幅広く提供しています。

ここでの体験や専門家との触れ合いから、21世紀を担う児童・生徒たちにとって魅力ある教育を探っていただければ幸いです。





●参加資格：主として小・中・高等学校の教職員及びこれらに準ずる教育関係者
●参加費用：セミナーの参加に要する旅費、宿泊費（対象者）並びに実習教材費、テキスト代等は主催者が負担します。
●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下さい

RADA
RADIATION APPLICATION DEVELOPMENT ASSOCIATION

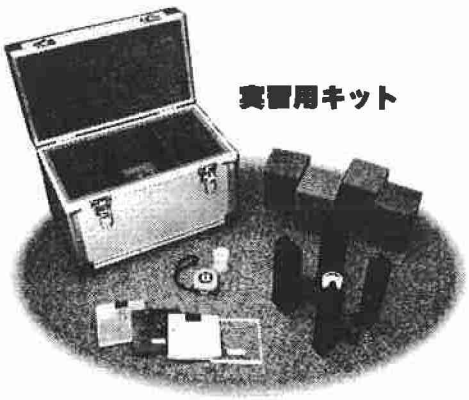
財団法人 放射線利用振興協会
国際原子力技術協力センター　国内研修部
〒319-1106　茨城県那珂郡東海村白方白根2－4
Tel　029(282)6884　　Fax　029(282)6731
ﾎｰﾑﾍﾟｰｼﾞ：http://www.rada.or.jp　　E-mail：taiken@popx.tokai.jaeri.go.jp

「はかるくん」

を、申し込むと・・・

こんなモノが
宅配便で届きます

※「はかるくん」は
身の回りの自然放射線（ガンマ線）を簡単に測定できる簡易放射線測定器です。



実習用キット

この実習用キットを使うと・・・

- ●距離の違いによる、減衰
- ●遮へい材の厚みの違いによる、減衰
- ●遮へい材の材質の違いによる、遮へい効果

等の実験ができます。

お申し込みは

または

で

◆以下の項目を必ず明記してください◆

①名前（ふりがな）	⑤職業
②性別・年令	⑥貸出希望台数
③〒 住所	⑦使用期間(最長 2ヶ月)
④電話、FAX 番号	

詳しくは

してね！

電話 029-282-0421

FAX 029-283-2157

財団法人 放射線計測協会・業務課

http://www.irm.or.jp/

原子力図書館 げんしろう

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

解説や論文、クイズ、最新動向など
原子力に関する情報がギッシリ!!

原子力百科事典 ATOMICA

収録数2,000件を超すデータベース形式の百科事典です。世界の原子力や放射線など最新情報を豊富な図版とともにていねいに解説します。

文献データベース NUCLEN

一般から専門家にも役立つ収録数50万件を超す文献データベースです。世界中の原子力やエネルギー関係の文献に日本語の要約をつけてわかりやすくしています。

君は、どこからチャレンジする? げんしろうクイズ

エネルギー、環境、原子力、放射線をテーマに小・中学校生でも楽しめるクイズです。子供達の学習に活用できるコーナーです。

原子力の今を知りたい方をサポート

原子力の最新動向

- **原子力委員会**
  我が国の原子力政策がわかる原子力委員会や専門部会の動きを知ることができます。
- **原子力安全委員会**
- **トピックス**
- **イベント情報**

（原子力委員会、原子力安全委員会は内閣府からのリンクで掲載しています。）

科学技術振興事業団
受託出版課 ☎03-5210-4962

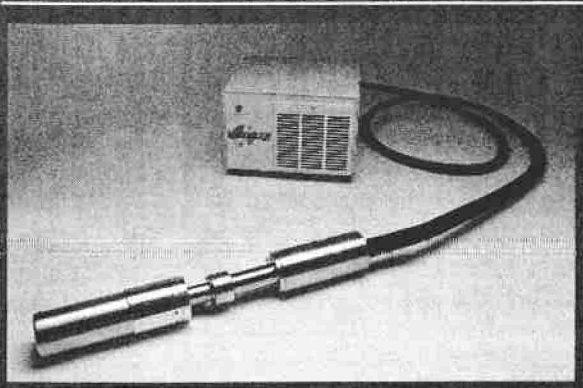
ORTEC®

PerkinElmer™ instruments.

ORTEC新時代！

X-COOLER™

半導体検出器冷却技術の革命！
ついに液体窒素デュワ相当のパフォーマンスを達成したHPGe用電気冷却機!!!



電気冷却なら：

- ●液体窒素不要！
- ●電源があればどこでもHPGeを使用可能！
- ●液体窒素切れ用の安全装置が不要！
- ●液体窒素保存用タンク・配管が不要！

X-COOLERは従来の電気冷却と違います…

- ●液体窒素相当のランニングコストが可能です
- ●低価格です ⇒本体価格は30lデュワ水平型クライオスタットの約2倍（当社価格比）
- ●低電力です ⇒300W以下
- ●検出器の体勢を問わず使用できます
- ●最大効率90%のHPGe検出器に対応します
- ●PopTop検出器ですから交換やメンテナンスが簡単です
- ●軽量、コンパクトなデザインで場所を取りません
  コンプレッサ寸法：30X27X22cm
  総重量：約20kg（冷却ヘッド含む）
- ●低ノイズで≧500keVでは液体窒素並の分解能を保証します
  （<500keVでは分解能の低下は10%以下）

digiDART™

頑丈！軽量！DSP!!
デジタルポータブルHPGeスペクトロスコピ

- ◎高性能、高耐久性、16kチャネルMCA!
  （オプションで32kチャネル有り）
- ◎デジタル処理なので安定：長時間測定・温度変化に強い!
- ◎パソコン無しで操作できます!
- ◎内蔵バックライト付LCDディスプレイ!
- ◎データのリアルタイム表示!
- ◎9つのROIに核種同定と放射能計算!
- ◎ハイスループット（100,000パルス／秒）!
- ◎小型軽量（重量840g）なので片手で持てます!
- ◎23の16kスペクトルを内部メモリに保存可能!
- ◎バッテリー駆動時間≧9時間!
- ◎パソコンとUSB通信!
- ◎スペクトルデータへのID機能!

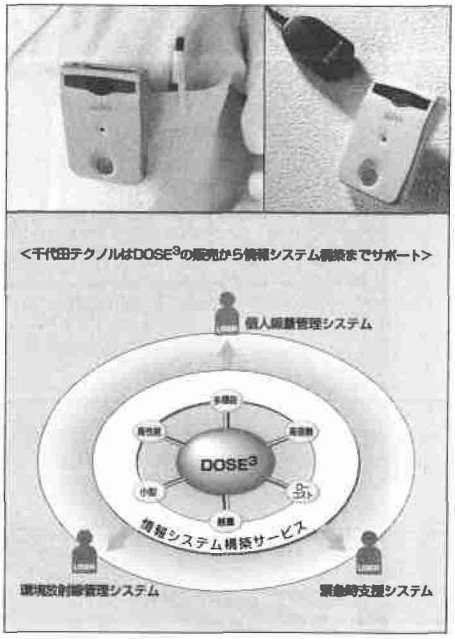
SII

セイコー・イージーアンドジー株式会社
本社／営業部　放射線営業課
〒270-2222 千葉県松戸市高塚新田563　☎047-392-7888 FAX047-391-0985
技術部　☎047-392-7818 FAX047-391-0985
大阪☎(06)6397-6023　名古屋☎(052)935-8515　水戸☎(029)227-4474
筑波☎(0298)24-2271　札　幌☎(011)552-2558
http://www.sii.co.jp/segg/　e-mail info.segg@sii.co.jp

多機能電子線量計 DOSE^3

ドーズキューブ

DESE^{3}は、放射線測定で求められる機能を情報時代の線量計としてコンパクトに凝縮しました。



DOSE^3 の特徴

- 国際規格IECに適合。
- 国際特許のLED発光式
  検出素子診断機能。
- 広範囲なエネルギー帯域に対応。
- PHSなどの高周波障害に対する耐性を強化。
- データは不揮発性メモリーに記録。
  各月の線量を保存。放射線変化を時系列に記録するトレンド機能。
- 赤外線通信機能。本体のみでアラームの設定が可能。単三電池（3.6V）で4ヶ月動作し、市販の1.5V電池も使用できます。

TECHNOL
CHIYODA TECHNOL CORPORATION

株式会社千代田テクノル 営業部
〒113-8681 東京都文京区湯島1-7-12 千代田御茶の水ビル TEL.03-3816-1163 FAX.03-5803-1939
営業所：東京TEL.03-3816-2931 茨城TEL.029-266-3111 横浜TEL.045-821-6031 筑波TEL.0298-34-2231 大宮TEL.048-667-4412 千葉TEL.043-241-9261 大阪TEL.06-6369-1565
仙台TEL.022-224-1113 福島TEL.0240-22-5541 新潟TEL.0257-22-3334 札幌TEL.011-733-1501 青森TEL.0175-72-3730 名古屋TEL.052-331-3168 敦賀TEL.0770-23-3466
静岡TEL.054-272-5882 金沢TEL.076-231-6789 四国TEL.0894-24-4072 島根TEL.0852-22-0291 福岡TEL.092-262-2233 広島TEL.082-261-8401 鹿児島TEL.099-257-2541
青森駐在員事務所TEL.0177-36-6644 女川駐在員事務所TEL.0225-50-2377 盛岡駐在員事務所TEL.019-604-1071 高松駐在員事務所TEL.087-863-3478 大洗研究所029-266-3113

三菱重工

地球の熱さまし。
温暖化による“発熱”によく効きます。

いま、地球が“温暖化”という病気にかかりかけています。早めに治すには、省エネルギーや新エネルギーとともに、CO_2を排出しない原子力がよく効きます。美しい地球を健康のまま21世紀にのこすために、私たちは、これからも安全で信頼できる原子力発電プラントを提供してまいります。

STOP! 温暖化

三菱PWR原子力発電プラント

三菱重工業株式会社
本社 原子力事業本部・鉄構建設事業本部 〒100-8315 東京都千代田区丸の内2-5-1 ☎(03)3212-3111
支社 関西／中部／九州／北海道／中国／東北／北陸／四国

国際会議
（準備・運営）
BILINGUAL GROUP
通訳、翻訳
24ケ国語対応

米国戦略爆撃調査報告書

原爆投下後五十年がたった年に、それまでワシントンの国立公文書館に眠っていた調査報告書（部分）を和訳しようという計画が実行に移された。私はその時に翻訳のお手伝いをさせていただくという、稀有（けう）な経験を与えられた一人である。

約二千ページの英文を和訳した上で、すべての英語による図表を日本語で打ち直して完成するのに、ほぼ一年を費やした。約十人の翻訳者・コンピューター作業者が取り組んだ結果は、二冊の分厚い本になっている。

終戦直後に、米国から数多くの軍関係者に加えて、百十人以上の専門家（技術者、建築家、火災の専門家、経済学者、医師、写真家、製図工ら）が長崎にやってきて、二カ月以上かけて徹底的に原爆の結果を検証した。

被爆者への聞き取り調査においては、日本人が怒りや憎悪を表現するのを当然と受けとめた上で、意外にも「仕方ない」と答えた人が相当数あったことに米国人は驚いたようだ。諦観（ていかん）に通ずるその一言は、英語で表現するのが難しいらしく、アルファベットで「シカタナイ」と書かれてあり、解説がつけてあった。

長崎新聞の記事によれば、原爆投下についての最近のアンケートでも「仕方なかった」と答えた人が半数近くに上ったという。日本人にとって、あきらめるのは一種の美徳になっているのだろうか。

一九六七年に東京で開かれた原子核構造国際会議の運営を担当した私は、米国のジェリー・ブラウン教授が閉会の辞で、「日本にきてみて、善良な国民性に感銘を受けました。このような人々の上に、われわれが原爆を投下したことを、本当にすまなく思います」と心をこめてわびられるのを聞いた。

米国戦略爆撃調査報告書巻頭の総論は次のように結んである。

「平和を求め、平和のための国際機構を築こうとするときに、広島・長崎の破壊の惨状以上に説得力のある材料はない。米国はこの不吉な兵器の開発者および使用者として、原爆が将来使用されるのを防ぐ国際的な保障制度とコントロールシステムを確立し実践する上で指導的役割を果たすという、逃れる事の出来ない責任を負っているのである」

米国自身の言葉として歴代大統領に引き継いでいただきたい一節である。

株式会社 バイリンガル・グループ 〒102-0074 東京都千代田区九段南4-7-22-2F
取締役社長 郷農 彬子<akko@bilingualgroup.co.jp>TEL: (03) 3263-1261（代） FAX: (03) 3263-1264（代）

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・助教授等公募、科学者が語る自伝

科学新聞
週刊（金曜日発行）
1カ月 1,835円
6カ月 9,700円(前納)
1カ年 18,350円(前納)
（送料・消費税込）

科学・技術・医学用語など69万語の辞書を装備！！
米国商務省・日英科学文献機械翻訳センターで採用！ 文部科学省・科学技術振興調整費による成果！
パソコン用ソフト 科学と技術の翻訳パートナー －日英－ Ver1.1
Windows版(バージョンアップ版) —— 定価(本体 95,000円＋税 買換価格20,000円＋税)
Macintosh版 —— 定価(本体120,000円＋税)
(CD-ROM1枚、ユーザーズ・マニュアル1冊)

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

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?

①「**エネルギーと環境**」**講座**では、学校の先生方に最新の情報を提供しています。

②10月26日の「原子力の日」を記念して、**中学生や高校生から作文・論文を募集**し、入選者を表彰式と施設見学会にご招待します。

③高校生を対象に**放射線実習セミナー**を開催し、放射線に関する基礎的知識を講義と実習を通じて習得できるように、お手伝いします。

④先生方の研究会や勉強会に**講師を派遣**したり、発電所などの**施設見学会の開催**をお手伝いします。

⑤エネルギー、原子力などに関する、**ビデオや写真を貸し出し**ています。

●講師派遣などの経費は無料です。
●お問合せは、電話、FAX、または手紙でお願いします。

財団法人 日本原子力文化振興財団

〒103-0012　東京都中央区日本橋堀留町 2-8-4　　Tel：03-5651-1570　Fax：03-3639-6636