

■教育論文■

数理・物理学科における物理学実験での放射線教育の実践例

星野 靖^{1,2}

Experimental Physics to Examine Radiation
in Department of Mathematics and Physics in Kanagawa University

Yasushi Hoshino^{1,2}

¹ Department of Mathematics and Physics, Faculty of Science, Kanagawa University, Hiratsuka City, Kanagawa 259-1293, Japan

² To whom correspondence should be addressed. E-mail: yhoshino@kanagawa-u.ac.jp

Abstract: The fundamental properties of radiation such as alpha, beta, and gamma radiation are systematically learned in the class of experimental physics prepared for students majoring in physics every year. I think that the learning of accurate knowledge and correct handling of radiation is ethically meaningful for students, especially those studying physics. This paper briefly introduces education programs for radiation physics in classes of experimental physics: experimental method in basic physics, experiments in physics I, and experiments in physics II

Keywords: experiments in physics, radioactivity, radioisotopes, energy spectrum

はじめに

自然科学の学問領域において、物理学が対象とする時間的・空間的・エネルギー的スケールは他の分野に比べて極めて広い。特に高エネルギー領域を対象とする種々の研究テーマは、まさに物理学の醍醐味を味わえる代表的な研究対象となっている。高エネルギーの粒子や電磁波は、素粒子や原子核の反応（壊変や融合など）を起源としたものが多く、自然の根源を理解する上でこれまで非常に重要な学術的役割を果たしてきた。今日では、加速器により人工的に高エネルギー粒子や電磁波を生み出すことができるようになり、それらは様々な物質の改質や物性・構造解析などに応用され、現代の科学技術を支える重要なツールにもなっている。

ところで、このような不安定核の遷移により発生した高エネルギーの粒子や電磁波のことを「放射線」と呼び、歴史的に見れば発見されて100年余りとなるが、今の社会情勢などから「原子核(力)」や「放射線」という言葉自体はあまり好意的には使わない傾向になってきた。しかしながら、物理学や材料科学あるいは生命科学・医学などの分野においては、安全を第一に確保した上で放射線を利用するという事は避けて通れない。特に物理実験系の研究室では卒業研究や大学院での研究の場において、実際に

高エネルギーの粒子や電磁波を用いた研究が日常的に行われている。

このような背景の中で特に物理学を専攻する者にとっては、放射線に関する正しい科学的知識を身につけ、安全にそれらを取り扱うことができる人材を育てることは教育倫理上意義深いものと考えられる。実際に数理・物理学科 物理コースにおいては、1年次から毎年実験科目（基礎物理学実験法(1年次)、物理学実験 I (2年次) と物理学実験 II (3年次)）の中で放射線に関するテーマを設け、系統的に理解を深めることができるような教育プログラムが組まれている。また講義においても、4年次に原子核・素粒子物理学という科目が用意され、より深く学修できる体系となっている。本稿では、実験分野における放射線物理に関する教育の取り組みについて簡単に紹介したい。

基礎物理学実験法

この科目は1年生後学期に配当され、2年次から始まる物理学実験やその後の卒業研究などにおいて実験・実習を安全に行うためのスキル、取得したデータを統計的に処理するノウハウ、各種計測機器の基本的な取り扱い方、数値シミュレーションなどを実

験・演習・講義を交えて学修する内容となっている。本稿に関連するものとしては、各種放射線の発生起源と種類・特徴やそれらの安全な取り扱い方について、実験を通して学んでいくテーマが挙げられる。実際これらは高等学校の物理の教科書の範疇でもあるが、高校における授業時間の制約や大学入試の出題範囲などの状況からあまり詳しく学んできていないのが本学学生の現状である。

まず放射線について割りと身近な存在であることを実感してもらうために、ガイガカウンタを用いて私たちの生活している環境における放射線量（自然放射線）を計測することから始める。カウンタ表示によると、おおよそ1~2 マイクロシーベルト毎時というガンマ線量が計測され、計数される毎にピーピーといった大きな音が発せられる。この生活環境において、カウンタブルな量として自然に放射線が飛び交っていることに最初は驚く学生もいる。ただこれが現実であるが、科学者にとってはこの程度に放射線カウンタがピーピー鳴るのは特に驚くほどのことでもない自然な現象である。

次に、代表的な放射線として知られている”アルファ線”、”ベータ線”、”ガンマ線”についてそれぞれの特徴を遮蔽効果という点から簡単な計測実験によ

りまず実感してもらう。具体的には、放射線源と検出器の間に厚さの異なるさまざまな材質の遮蔽物を挿入した時の線量率の変化を計測し、その材料の種類や厚さによる遮蔽効果（透過率）の違いを考察する。さらに、それぞれの放射線の実体が何であるかということ踏まえ、観測された現象を定性的に説明することを試みる。

最後に、霧箱を用いて実際に放射線が飛び交っている様子を目で観察し、その特徴を体感する。各地の科学博物館にはたいてい大型の霧箱が設置されており、毎年数人の学生は博物館などで観察した経験があるようである。長い物理学の歴史の中で見れば、これまで霧箱や泡箱、原子核乾板などいわゆる放射線の飛跡を直接記録する手法はさまざまなシーンで活躍してきた実験ツールでもある。

図1に、実際に霧箱を用いて観察した放射線の軌跡を、デジタルカメラを用いて露光時間1秒程度で撮影したものを示す。中央には磁石を設置した。矢印で示すように、放射線の通ったところに、細い筋状の白い雲が観測される。放射線の種類やエネルギーによっては、図1(b)に示すように偏向するものも稀に観測される。放射線の種類に応じた軌跡の形状(太さ・長さ)、偏向の角度や方向などについて考えるのも、1年生にとっては教育的かもしれない。

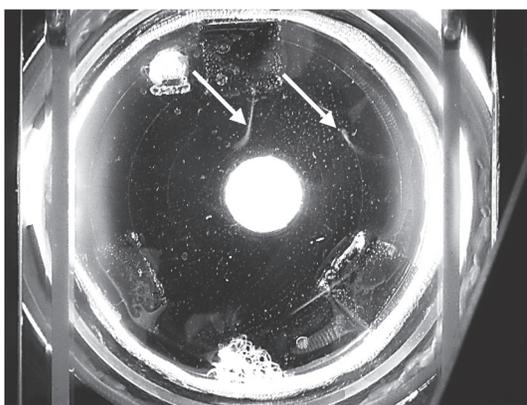
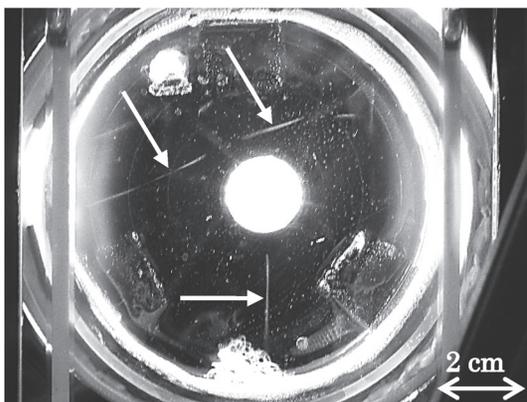


図1. 高温拡散霧箱を用いて観察した放射線の飛跡。中央の白い円形物は1000 G程度の磁石である。

物理学実験 I

次に2年次に配当される物理学実験 I では、ガイガカウンタを用いて ^{137}Cs から放射されるベータ線とガンマ線を種々の膜厚のアルミ箔を通して計数率測定する。アルミ箔の面密度(厚さ)に対して単位時間当たりの検出カウント数を対数プロットすることにより、アルミニウムによるベータ線とガンマ線の吸収率の違いについて定量的に議論する。放射性同位元素の壊変は、確率統計的に言えばポアソン過程に従う良い例として知られているが、この実験においても平均値や分散といった量についても触れながら統計的現象に関する理解を深める。最後に、空気層や検出器雲母窓の面密度、検出立体角などを適当に仮定することにより、真の放射能の決定を行う。1年次に比べやや発展的な内容になっている。

物理学実験 II

これまでの実験では主に放射線の計数に着目して行ってきたが、物理学実験 II では更に放射線(アルファ、ベータ、ガンマ線)のエネルギー分析を行うことでエネルギースペクトルを取得し、それらを解析することを主題とする。良く知られているように、放射線のエネルギーは、発生する原子核種固有であ

るので、エネルギー分析によってその起源を知ることができる。

まず導入として、学生が放射線の持つエネルギーについて考えるきっかけとなるよう、一つの思考実験クイズを出してみる。図2に示すように、質量天秤の左側の皿に陽子○と中性子●を1個ずつ乗せ、右側には陽子1個と中性子1個から構成される重水素原子核を1個乗せる。この天秤は一体どちらに傾くか？あるいは傾かないか？ということを探る(あくまでも思考実験として)。すると素直な多くの学生はどちらにも傾かないと答える。

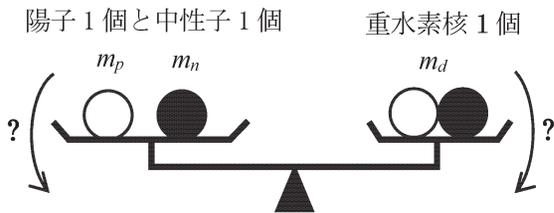


図2. 左側の皿に陽子○と中性子●を1個ずつ乗せ、右側に重水素原子核を1個乗せた質量天秤の模式図。

しかし、質量天秤は左側に傾く。ここで、陽子、中性子、重水素核それぞれの質量を m_p 、 m_n 、 m_d とすれば、つまり

$$m_p + m_n > m_d$$

という関係になっていることが分かる。実際これらの質量は、次の表1のような値として知られている。

表1. 核子の質量

陽子 (m_p)	$1.6726... \times 10^{-27}$ (kg)
中性子 (m_n)	$1.6749... \times 10^{-27}$ (kg)
重水素核 (m_d)	$3.3427... \times 10^{-27}$ (kg)

つまり構成核子をばらばらにおいた方が質量が大きいという結果になる。一方、原子番号の大きなウラン原子核1個とこれを構成する核子をばらばらに置いた天秤では、逆にウラン原子核1個の方に天秤は傾くであろう。

では次に、エネルギーを測定できる天秤なるものを頭の中に用意しよう。物理的には反応前後での全エネルギーは保存するので、例えば陽子1つと中性子1つが融合し重水素を形成したときでも、エネルギー天秤は傾かないはずである。したがって、これらの核子の反応に対して、次のようなエネルギー保存の関係が成り立ち、

$$m_p c^2 + m_n c^2 = m_d c^2 + Q$$

陽子と中性子の融合において Q なるエネルギーが余剰となり何かの形で放出されることが分かる。ここで、 Q 値はおおよそ MeV のオーダーである。もちろん化学反応にでも熱の放出や吸収によってエネルギーの散逸が起こるが、高々 eV 程度であろう。

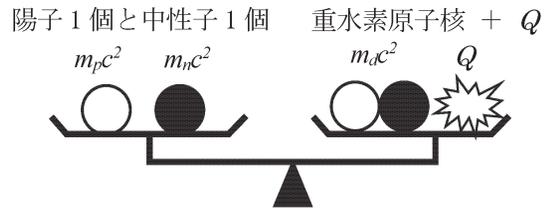


図3. 左側の皿に陽子○と中性子●を1個ずつ乗せ、右側に重水素原子核を1個乗せたエネルギー天秤の模式図。

これは核反応における Q 値と呼ばれ、まさにエネルギー発生の原因となるものであり、原子力の素である。このエネルギーを受け取って放出された粒子や電磁波がアルファ、ベータ、ガンマ線に代表される放射線である。

次節に示すアルファ線のエネルギースペクトル測定実験において、質量欠損から計算される Q 値と放出される放射線のエネルギーを比較することで、これらが確かに対応していることが定量的にも容易に確かめられ、学生自身も腑に落ちることとなる。

^{226}Ra からのアルファ線エネルギースペクトル解析

自然放射線の代表的な壊変過程であるウラン系列において形成される ^{226}Ra は、その崩壊過程において主に以下に示す5種類のアルファ線を放出する。核反応の Q 値も併せて示す。

- ① $^{226}\text{Ra} \rightarrow ^{222}\text{Rn} + ^4\text{He}$ $Q = 4870.63 \text{ keV}$
- ② $^{222}\text{Rn} \rightarrow ^{218}\text{Po} + ^4\text{He}$ $Q = 5590.30 \text{ keV}$
- ③ $^{218}\text{Po} \rightarrow ^{214}\text{Pb} + ^4\text{He}$ $Q = 6114.63 \text{ keV}$
- ...
- ④ $^{214}\text{Po} \rightarrow ^{210}\text{Pb} + ^4\text{He}$ $Q = 7833.46 \text{ keV}$
- ...
- ⑤ $^{210}\text{Po} \rightarrow ^{206}\text{Pb} + ^4\text{He}$ $Q = 5407.46 \text{ keV}$

図4に ^{226}Ra から放出されるアルファ線のエネルギースペクトルを示す。なお反応式②と⑤の Q 値は、分解能に比べて値が近いので、スペクトル上では分離されていない。アルファ線のエネルギーがほぼ Q 値と一致していることが分かる。(実際には、運動量保存の関係からアルファ線の運動エネルギーは Q 値よりも若干小さくなることも確かめられる)。

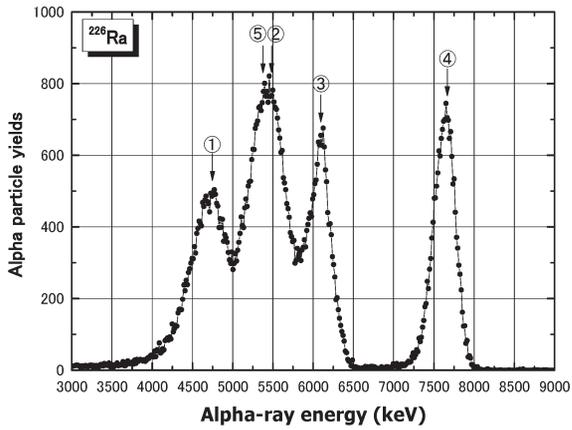


図4. ²²⁶Raからのアルファ線スペクトル.

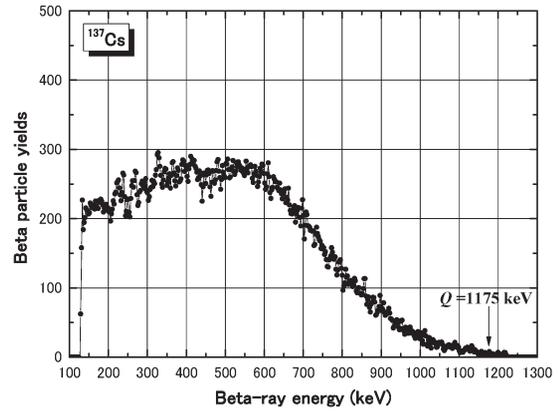


図6. ¹³⁷Csからのベータ線スペクトル.

¹³⁷Csからのベータ線エネルギースペクトル解析

¹³⁷Csは、図5に示すようなβ⁻崩壊によって安定な¹³⁷Baに遷移する。この核反応におけるQ値は1175.63 keVである。したがって、上に示したアルファ崩壊の考え方を適用すれば、放出されるベータ線のエネルギーはQ値1175.63 keV程度となり、エネルギースペクトルにもQ値付近にピークが観測される筈である。

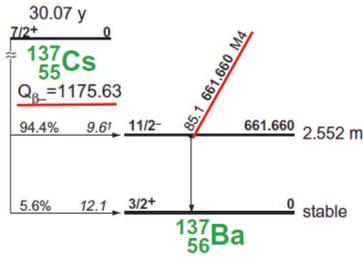
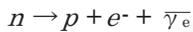


図5. ¹³⁷Csのβ⁻崩壊遷移図.

図6に¹³⁷Csからのベータ線スペクトルを示す。なお、ガンマ線由来のバックグラウンドは引いてある。図からわかるように得られるスペクトルはアルファ線スペクトルとは異なり、連続スペクトルとなる。ここで、β⁻崩壊の反応式は、一般的に次のようになることが分かっている。



つまりβ⁻崩壊では、ベータ線のほかに反電子ニュートリノが放出される。よって、アルファ崩壊とは異なり、3体の粒子が関わる反応となることから、ベータ線のエネルギーは定まらなくなり、連続スペクトルとなることが理解できる。

自然放射線（ガンマ線）のエネルギースペクトル測定と発生源の同定

この課題では、ガンマ線に代表される自然放射線のエネルギースペクトル測定をNaIシンチレーション検出器と高純度Ge半導体検出器を用いて行い、自然放射線の起源を同定する。またガンマ線と物質との相互作用として(1)光電効果、(2)コンプトン効果、(3)電子・陽電子対生成などがあるが、実際に測定スペクトルを解析しながら、それぞれの特徴について理解を深める。

図7に高純度Ge半導体検出器を用いて得られたエネルギースペクトルの一例を示す。ピークのエネルギーから放射性核種を決定し、(1)⁴⁰K系列、(2)ウラン系列、(3)トリウム系列、あるいは(4)人工放射線のどれに属するか調べる。図7に示したスペクトルで観測されたピークとその起源を表2に示す。

身近な材料や食物に含まれる放射線（ガンマ線）の検出と核種同定

最後に、身近な食品である食塩から放出される放射線（ガンマ線）を2種類の製法の異なる食塩に対し

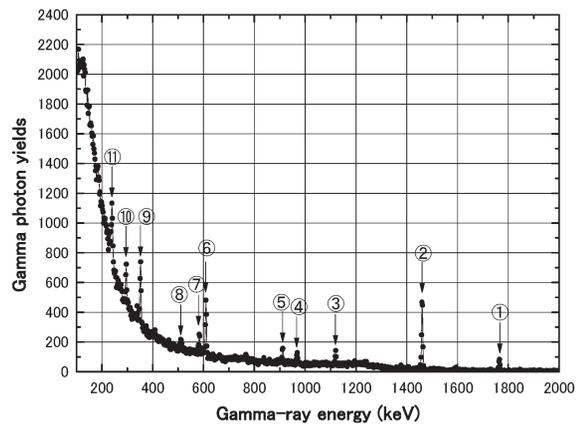


図7. Ge半導体検出器によって測定した自然由来のガンマ線スペクトルとその起源.

表 2. 自然放射線の典型的な起源と系列

Energy (keV)	起源	崩壊系列
① 1764.50	$^{214}\text{Bi} \rightarrow ^{214}\text{Po}$	ウラン
② 1460.86	$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca}$	カリウム
③ 1120.29	$^{214}\text{Bi} \rightarrow ^{214}\text{Po}$	ウラン
④ 968.77	$^{228}\text{Ac} \rightarrow ^{228}\text{Th}$	トリウム
⑤ 911.21	$^{228}\text{Ac} \rightarrow ^{228}\text{Th}$	トリウム
⑥ 609.32	$^{214}\text{Bi} \rightarrow ^{214}\text{Po}$	ウラン
⑦ 583.19	$^{208}\text{Tl} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$	トリウム
⑧ 510.77 511.0	$^{208}\text{Tl} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$ $e^- e^+$ 対消滅	——
⑨ 351.92	$^{214}\text{Pb} \rightarrow ^{214}\text{Bi}$	ウラン
⑩ 295.21	$^{214}\text{Pb} \rightarrow ^{214}\text{Bi}$	ウラン
⑪ 238.63	$^{212}\text{Pb} \rightarrow ^{212}\text{Bi}$	トリウム

て測定し、放射能の違いについて考える。まず1つ目のサンプルとして通常の食塩を用意する。2つ目として、いわゆる減塩処理をした食塩を用意する。学生にとっては、非常に身近な食品であるため、その違いに興味は湧いているようである。成分表示によると、減塩食塩は約50%のNaをKに置き換えた構成になっており、通常食塩に比べてKの含有量は約1000倍である。よく知られているように自然界に存在するK同位体で質量数40のKは放射性であり、図8に示すように崩壊する。したがって、Kを多く含む食品からは、必然的に ^{40}K が放出するベータ線やガンマ線が多く検出される筈である。蛇足であるが、地球の大気成分にArが1%ほど含まれるのは、 ^{40}K の電子捕獲EC壊変により日々生成されていることに因る。

図9に通常食塩(a)と減塩食塩(b)からのガンマ線スペクトルを示す。なお通常食塩にはほとんどKが含まれていないため、通常食塩に見られるKのピークは自然放射線由来のものであると考えてよい。両者を比較すると、減塩食塩からは ^{40}K 由来のガンマ線がより多く検出されていることが分かり、学生自身も一瞬驚くが、その合理的な理由に”なるほど”と納得しているようである。

ところで、Kは動植物が生きていくうえで不可欠

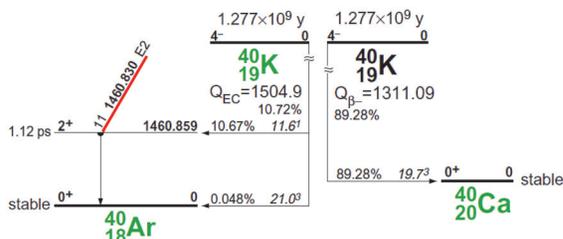


図 8. 原子核のエネルギー準位と ^{40}K の崩壊遷移図。

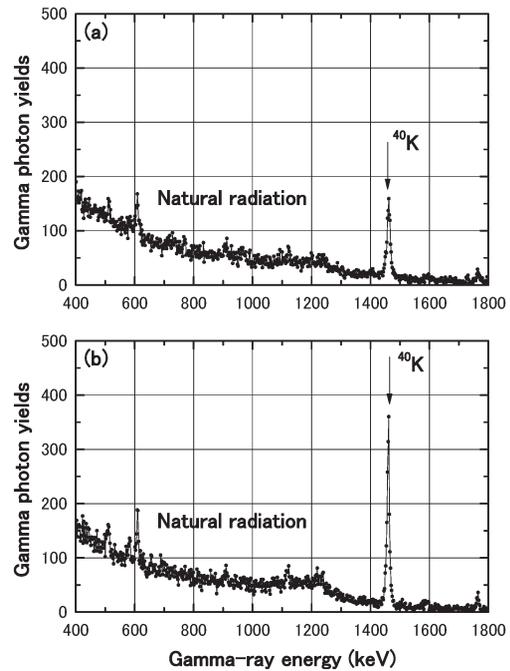


図 9. 通常食塩 (a) と減塩食塩 (b) からのガンマ線エネルギースペクトル。

なミネラル分である。厚生労働省によると、毎日2g程度のKを摂取するのがよいとされている。当然、人間の体内の組織の中にも多くのKが含まれている。その量は、おおよそ100g(2.5mol)と言われている。自然含有比で ^{40}K の割合は0.012%であるから、私たちの身体の中のKのうち0.0003mol(1.8×10^{20} 個)は放射性 ^{40}K ということになる。 ^{40}K の半減期は約13億年であるので、1秒間に人間は、

$$\begin{aligned}
 -\frac{dN(t)}{dt} &= \frac{\ln 2}{T} N(t) \\
 &= \frac{\ln 2}{(13 \times 10^8) \times (365 \times 24 \times 3600)} \times 1.8 \times 10^{20} \\
 &\approx 3000 \text{ Bq}
 \end{aligned}$$

の放射線(ベータ線と1.46MeVのガンマ線)を周囲に放出していることになる。

これまでの説明で通常食塩に比べ放射能の高い減塩食塩を取ることをためらう人もいるかもしれない。しかし、例えば毎日10gの減塩食塩を取ったときの ^{40}K の摂取量を実際に計算してみるとよい。そもそも体内のミネラル量はほぼ一定に保たれているので、摂取したKが体内に蓄積されることはないのだが…。それ以上に、循環器系にとって塩分控えめの医学的効果は大きいということであろう。

他の例も見てみよう。例えば、普通の牛乳1000ml中に含まれるカリウムは成分表に約1.5gと記載されている。この中の0.012%、つまり0.18mg(2.7

× 10^{18} 個) は放射性 K となる。簡単な計算により、市販されている牛乳 1000 ml の放射能は、必然的に約 45 Bq となることが分かる。また、有機物を構成する炭素の極々一部は放射性炭素 14 (^{14}C) であり、ベータ線を放出する。そのような意味で放射線は、意外と身近なものであることが理解できよう。

結び

数理・物理学科実験分野における放射線物理に関する教育の取り組みについて簡単に紹介した。3年間

にわたる実験プログラムでは、放射線に関する正しい理解を深めることができるよう年次ごとに適切なテーマを段階的に配置し、効果的に学修できるよう構成されている。学修内容も、なるべく身近な話題や関心事をテーマに織り込みつつ、客観的解析と科学的解釈が身に付くよう工夫している。特に毎回の実験が、「単なる計測・集計作業」で終わらないよう、なるべく学生にとっての驚きと発見そして興味と探究へと繋がるような有意義な内容を是非とも提供したい。