

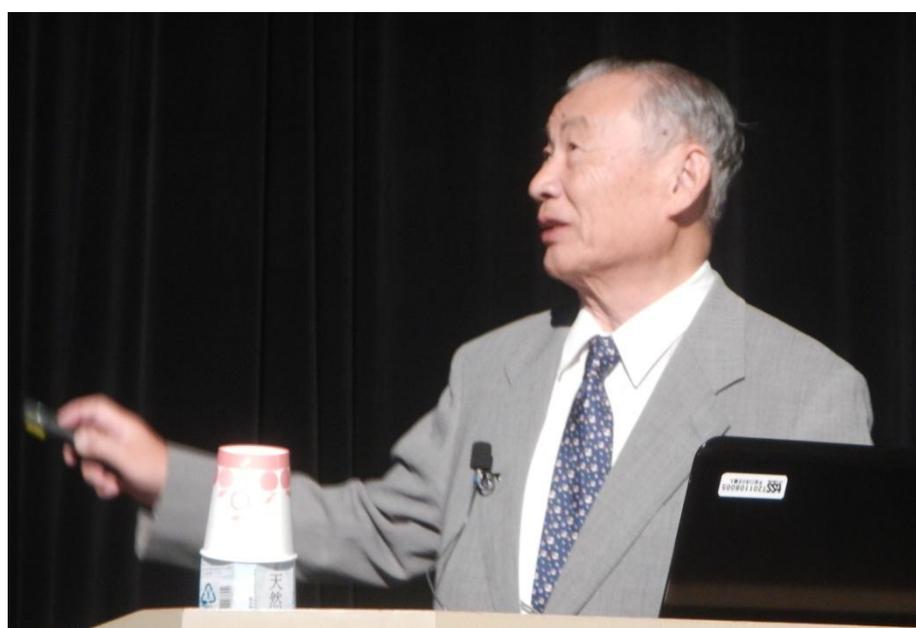


原子力への科学者の旅

西川恭治（広島大学名誉教授）

はじめに

皆さんこんにちは、西川でございます。本日は、昨年来大きな話題になっております原子力について科学者がこれまでどのように取り組んできたか、その歴史と課題についてお話をさせていただきます。



2012年10月16日 TSS文化大学で講演する筆者（本文末尾に著者紹介）

17世紀のニュートンによる力学の法則の確立以来、18世紀から19世紀にかけて、自然界の多くの現象が、その力学の法則に基づいてほとんどすべて矛盾なく説明できることが明らかになり、また、それを使った様々な技術が開発されて産業革命を生み出し、人間生活全般にわたって大きな変革をもたらしました。しかも、その力学の理論体系が、数学的に美しい形に表されるため、この世のすべてのことは力学によって説明できるという「**力学的世界観**」が確立されてきました。それとともに、すべての物質は原子からなるという「**原子論**」が支配的になり、電気や磁気や光や熱の本体も解き明かされてゆき、さらに19世紀の末には、真空放電の中で、電気の担い手としての「**電子**」が発見されるなど、自然界の謎を解く鍵が次々と出そろってきました。そして、20世紀になり、**放射線**の発見がなされ、物質の根源を探る研究に新たな一步が踏み出されました。その結果、それまでの人類の想像を絶する膨大なエネルギーの元となる**原子力エネルギー**の解放が可能になりました。不幸にも、それが第2次世界大戦の最中になされ、その後、核兵器を背景とした東西冷戦時代へと進んでいったため、原子力の謎の解明に取り組んできた科学者は、大きな苦悩を背負うこととなりました。そして、原子力を人類の生活を豊かにするために活用しようという目的で、原子力発電が開発されましたが、それが、今回の原子力発電所の事故を受けて、科学者の苦悩は、さらに深刻なものとなってきています。それと同時に、より安全な新しい原子力エネルギーの開発に向けた研究も始められています。今日は、このあたりのことをお話しさせていただくことにいたします。

放射線の発見——偶然からの科学

科学の発見の中には、偶然によるものが数多くあります。放射線の発見はその典型的なものです。1896年、ドイツのウルツブルグ大学の**レントゲン**博士は、いつもの暗室で高電圧(10kV)での真空放電の実験をしていたところ、その近くに置いてあった蛍光板が何やらポーッと光っているのに偶然気付きました。そういう現象自体はそれ以前にも気づいていた人がいたようですが、誰もそれ以上気にはかけませんでした。しかし、レントゲンは、その光の原因を探るために、蛍光板の前に、放電管から来る光をさえぎるため、物を置いたり、レンズやプリズムを置いたりしてみたのですが、蛍光板の光はその影響を受けませんでした。しかし放電管の電源を切ると、その光は消えることを確かめました。ということは、何か不思議な透過力の強い光のようなものが放電管から出ていると思い、それを**X線**と名付けました。そして、蛍光板を写真乾板に変えてその前に自分の手を置いて、後で写真乾板を現像してみたところ、驚いたことに、手の骨が写っていたのです。この話は瞬く間に世界中に伝わり、いろいろな騒動が起こったそうです。レントゲンは、この発見で**初代ノーベル物理学賞**の受賞者となりました。

その頃、パリ大学の**ベックレル**は、ウラン化合物の**放射能**を発見しました。ある種の物質は、日光にさらすと後で光をだします。これは**燐光**現象として知られていましたが、ベックレルは、日光の代わりにX線を当てても燐光を起こすことを知り、逆に燐光物質を太陽にさらすとX線を出すのではないかと考えました。そこで、太陽光にさらした燐光物質の下に、黒い紙で覆って通常の光を遮った写真乾板を置いておいたところ、予想通り後で写真乾板が感光しました。通常の光は黒い紙で遮られているので、これは、燐光物質からX線が出たものと思いました。しかし、念のためもう一度実験を行おうとしましたが、生憎の雨続きで、実験ができず、黒い紙で包まれた写真乾板は、その上に燐光物質を乗せたまま、数日間暗い戸棚の中に放置されていました。久しぶりに天候が回

復したので、それを取り出したところ、燐光物質はポーッと光っており、さらに写真看板を現像してみたら、驚くことに、乾板は最初の実験よりもはるかにはっきりと感光していました。この実験に用いられた燐光物質はウランの硫酸塩でした。他の燐光物質ではこのようなことは起らなかったもので、これはウラン化合物から何か不思議な強い光のようなものが出ているのだと考え、**ウラン線**と名付けました。この不思議なウラン線を詳しく調べて、博士論文に仕上げたのが当時学生だった**キュリー夫人**です。彼女は、夫のピエール・キュリーと共にその詳しい性質を調べ、それを**放射線**と名付け、さらに、ウランを含む鉱物であるピッチブレンドの方が純粋のウランより少し強い放射線を出すことに注目して、その正体を突き止めるため、ピッチブレンド(約1トン)を細かく砕いて、非常に強い放射線を出す**ラジウム**と**ポロニウム**を発見しました。放射線はほとんど永遠に出続けること、しかもとても透過力が強く、鉛以外のものはほとんどすべて通り抜けてしまうこと、などを突き止め、さらに、鉛の容器に小さな穴をあけ、その中に収めたラジウムから出る放射線に磁場をかけてその影響を調べることにより、正の電気を持つもの、負の電気を持つもの、電氣的に中性のもの3種類の放射線があることを突き止め、それぞれ **α 線**、 **β 線**、 **γ 線**と名付けました。この一連の研究により、キュリー夫妻はベックレル博士と共にノーベル物理学賞を受賞しました。キュリー夫人は、さらにいろいろ工夫をして**ラジウム単体の結晶**を作ることに成功しました。この結晶の一部はベックレル博士に送り、さらに一部を、当時オーストラリアから出てきた若手俊秀の物理学者アーネスト・ラザフォードに送りました。これが後の原子核研究の発展に重要な寄与を果たしたのです。なお、キュリー夫人は、ラジウムの結晶化によりノーベル化学賞も受賞しています。

原子の構造と元素の周期律表・同位体

中世のヨーロッパでは、例えば鉛のような物質を熱したり加工したりすることによって、金を作り出そうという「**錬金術**」が、およそ1000年にもわたって試みられましたが、それはすべて失敗に終わりました。しかし、これにより、物質とその化学的性質に関する基礎的知識が蓄積され、さらに、たとえ、どんなに熱しても、加工しても、またどんな化学反応で処理しても、これ以上変えられない物質があることが分かり、それは**元素**と名付けられました。当時知られていた元素としては、金、鉛、鉄、銅、炭素など限られたものでした。18世紀末には、ラボアジエの燃焼の実験に始まり、化学反応の定量的分析が行われるようになりました。それにより、物質はすべて**元素**から成っていること、元素の質量は化学反応では変化しないこと、化学反応では反応前と後で、いろいろな元素の混ざる割合に一定のルールがあることなどが明らかになりました。そして、ドルトン、アヴォガドロなどの研究により、元素はすべてこれ以上分解できない究極の微粒子である(元素固有の)**原子**から構成されており、その原子同士や異なる原子が一定の割合で結合して**分子**ができているということ、などが明らかになってきました。

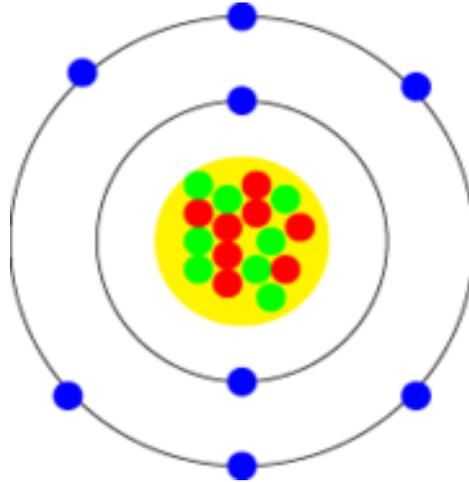
それらの元素の質量(例えば、一定温度、一定圧力の気体状態での一定体積の質量)は、水素の質量のほぼ整数倍になっており、それを質量の軽い順に並べて1番軽い水素から順番に番号を付けたものを元素の**原子番号**と呼びます。すると、ある周期で、似たような性質の元素が並ぶことが分かり、元素の**周期律表**が作られました(第1図)。当初、その周期律表には、空欄がいくつかありましたが、新たな元素の発見が進むことにより、その空欄もほぼ埋め尽くされてきました。

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 <u>H</u>																	2 <u>He</u>
3 <u>Li</u>	4 <u>Be</u>											5 <u>B</u>	6 <u>C</u>	7 <u>N</u>	8 <u>O</u>	9 <u>F</u>	10 <u>Ne</u>
11 <u>Na</u>	12 <u>Mg</u>											13 <u>Al</u>	14 <u>Si</u>	15 <u>P</u>	16 <u>S</u>	17 <u>Cl</u>	18 <u>Ar</u>
19 <u>K</u>	20 <u>Ca</u>	21 <u>Sc</u>	22 <u>Ti</u>	23 <u>V</u>	24 <u>Cr</u>	25 <u>Mn</u>	26 <u>Fe</u>	27 <u>Co</u>	28 <u>Ni</u>	29 <u>Cu</u>	30 <u>Zn</u>	31 <u>Ga</u>	32 <u>Ge</u>	33 <u>As</u>	34 <u>Se</u>	35 <u>Br</u>	36 <u>Kr</u>
37 <u>Rb</u>	38 <u>Sr</u>	39 <u>Y</u>	40 <u>Zr</u>	41 <u>Nb</u>	42 <u>Mo</u>	43 <u>Tc</u>	44 <u>Ru</u>	45 <u>Rh</u>	46 <u>Pd</u>	47 <u>Ag</u>	48 <u>Cd</u>	49 <u>In</u>	50 <u>Sn</u>	51 <u>Sb</u>	52 <u>Te</u>	53 <u>I</u>	54 <u>Xe</u>
55 <u>Cs</u>	56 <u>Ba</u>	*1	72 <u>Hf</u>	73 <u>Ta</u>	74 <u>W</u>	75 <u>Re</u>	76 <u>Os</u>	77 <u>Ir</u>	78 <u>Pt</u>	79 <u>Au</u>	80 <u>Hg</u>	81 <u>Tl</u>	82 <u>Pb</u>	83 <u>Bi</u>	84 <u>Po</u>	85 <u>At</u>	86 <u>Rn</u>
87 <u>Fr</u>	88 <u>Ra</u>	*2	104 <u>Rf</u>	105 <u>Db</u>	106 <u>Sg</u>	107 <u>Bh</u>	108 <u>Hs</u>	109 <u>Mt</u>	110 <u>Ds</u>	111 <u>Rg</u>	112 <u>Cn</u>	113 <u>Uut</u>	114 <u>Uuq</u>	115 <u>Uup</u>	116 <u>Uuh</u>	117 <u>Uus</u>	118 <u>Uuo</u>

*1 <u>ランタノイド</u> :	57 <u>La</u>	58 <u>Ce</u>	59 <u>Pr</u>	60 <u>Nd</u>	61 <u>Pm</u>	62 <u>Sm</u>	63 <u>Eu</u>	64 <u>Gd</u>	65 <u>Tb</u>	66 <u>Dy</u>	67 <u>Ho</u>	68 <u>Er</u>	69 <u>Tm</u>	70 <u>Yb</u>	71 <u>Lu</u>
*2 <u>アクチノイド</u> :	89 <u>Ac</u>	90 <u>Th</u>	91 <u>Pa</u>	92 <u>U</u>	93 <u>Np</u>	94 <u>Pu</u>	95 <u>Am</u>	96 <u>Cm</u>	97 <u>Bk</u>	98 <u>Cf</u>	99 <u>Es</u>	100 <u>Fm</u>	101 <u>Md</u>	102 <u>No</u>	103 <u>Lr</u>

第1図：周期律表

こうして、物質の究極の構成要素が分かってきたのですが、それらは電気を持たないので、電気の担い手が分からずにいました。19世紀末、J. J. トムソンによって、高圧真空放電管の中で、電流の担い手である電子が発見されました。その電子は負の電気を持ち、通常は、原子の中に存在することが分かりました。ただし、電子の質量は極めて小さく、一番軽い原子である水素原子の質量の約2000分の1に過ぎません。それなら電子はどのような状態で原子の中に存在するのでしょうか、そして、原子の質量はどこにあるのでしょうか？いくつかのモデルが提案され、最終的に、ラザフォードによるα線を使った実験で、原子の中心には正の電気を持ち、原子のほとんどの質量を担う小さな核があり、その外側を軽い負の電気をもつ電子が覆っている、という原子の構造が解明されました（第2図）。



第2図：一般的な原子の模式図：青丸は電子

最も軽い原子は水素原子で、その核は陽子と呼ばれ、電子と反対符号（正）で大きさが同じ電気を持ちます。他の原子の核は、陽子の整数倍の大きさの正の電気と陽子のほぼ整数倍の質量を持ち、その周りを、核のもつ正の電気を丁度打ち消すだけの数の電子が覆っています。元素の原子番号というのは、その核の電気が陽子何個分になるか、言い換えれば、核の周りを覆う電子の数を表しているのです。この核というのは、従来のどんな方法でも、またどんな化学反応でも傷つけることができません、それが元素を決めているのです。化学反応では、核の周りを覆う電子の配置が変わるだけです。ちなみに、原子の大きさは、半径が約 100 億分の 1 メートルで、核の大きさは、その更に千分の 1 という小さなものです。一方、原子の質量は、陽子の質量のほぼ整数倍ですが、陽子の数の 2 倍くらいあります。水素の次に軽いヘリウムの場合ですと、核は陽子のほぼ 4 倍の質量をもちます。**α線**はこのヘリウムの核からなっています。後に分かったことですが、核の中には陽子のほかに、陽子とほぼ同じ質量の電氣的に中性な粒子が含まれています（第 3 図）。これは、**中性子**と言って、後にラザフォードの弟子のチャドウィックによって発見されました。また、元素としては同じ（つまり核の中の陽子の数は同じ）でも、中性子の数が異なるものもあります。これを**同位体**と言います。例えば、水素の中には、通常の水素より 2 倍の質量のものがあり、重水素と呼ばれます。これは、陽子 1 個と中性子 1 個からなる水素の同位体です。



原子番号：陽子の数

核の質量：(陽子数+中性子数) × (陽子の質量)

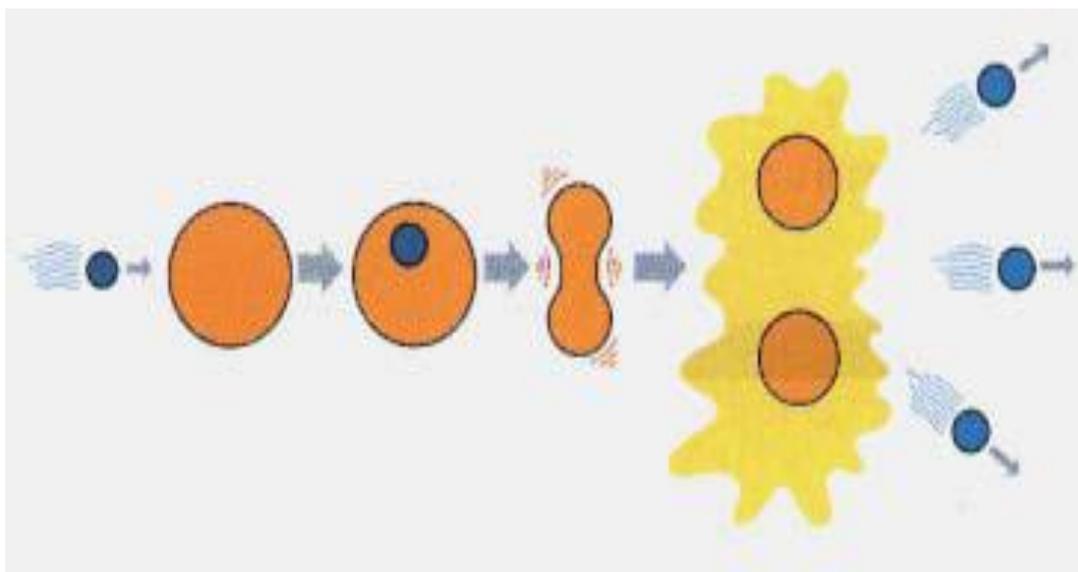
第3図：核の模式図

核の崩壊

さて、ウランやラジウムから出る放射線は、そのエネルギーの大きさから考えて、核から出てくると考えられます。つまり、化学反応では壊れなかった核が壊れてその一部が放射線として外へ出てくるのです。 α 線が出れば、核の電気量は陽子2個分減りますから、原子番号も2つ減りますし、 β 線が出れば、核の電気量は電子1個分減る、つまり核の中の中性子が電子を出して陽子に変わり、核の電気量は陽子1個分増えて、原子番号が一つ増します。こうして α 線や β 線を出すことによって、元素は別の元素に変換されることとなります。ラザフォードは、放射線を出して元素が別の元素に代わるとすれば、逆に核に外から α 線のような大きなエネルギーを持つ放射線をぶつけることによって、その核を壊し、新しい核、つまり新しい元素を人工的に作ることもできるのではないかと考えました。しかし、それには、ラジウムから出る α 線にさらに大きなエネルギーを持たせる必要がありました。というのは、ターゲットとなる核は正の電気を持ち、 α 粒子も同じ正の電気を持つので、両者が近づくと、強い電氣的な反発力が働き、なかなか両者が接近出来ないからです。ラザフォードの弟子たちは、 α 線の代わりにそれより軽い陽子を使い、それを現在の線形加速器に相当するもので高エネルギーに加速して、リチウムに当てることにより、リチウムを高エネルギーのアルファ粒子2個に変換することに成功しました。カリフォルニア大学のローレンスは、陽子をさらに効率的に加速する装置として、サイクロトロンと言われる円形の加速器を作りました。しかし、これらの装置は大型で、その建設には高額のコストが必要でした。

一方、当時研究費の少なかったイタリア・ローマ大学のフェルミは、発見されたばかりの中性子をいろいろな核に当てる実験を始めました。中性子は電氣的に中性ですから、相手の核に電氣的に反発されることはなく、そのすぐ近くまで行って核を破壊することができる考えたのです。中性子は、ポロニウムから出る α 線をベリリウムに当てることによって比較的簡単に手に入ります。しかし、こうして出てきた中性子は、大きなエネルギーを持っているので、相手の核に接近しても、素通りしてしまうことが多いのです。核を壊すには、中性子を減速する必要があります。フェルミは、中性子の弾と標的の核の間に軽い元素から成るガスを置いて、その中を弾が潜り抜ける間に減速されるようにして、標的に当てました。核に取り込まれた中性子は β 線を出して陽子に変わり、標的の原子を原子番号の一つ大きい原子に転換します。実験は、標的として、フッ素から始めて、次第に重い元素にし、やがて、白金に当てて金を作ることに成功しました。ついに錬金術に成功したのです。標的をさらに重い物質にして、実験を続けてゆき、ついに1番重いウランに達したとき、何かわけのわからない現象が起きていることに気づきました。その直後、ユダヤ人である妻にヒトラーの恐怖が襲ってきて、フェルミはアメリカへ逃亡しました。

その頃、ヒトラー支配下のドイツのカイザー・ウィルヘルム研究所では、オット・ハーン、シュトラスマン、マイトナー夫人、フリッシュ等により、ウラン 235 という同位体に中性子を当てた後の反応生成物の分析が行われ、ウランの半分くらいの質量のバリウムなどを検出し、ウランの核がほぼ同じくらいの大きさの二つの核に分解したことを突き止めました。その際、大きなエネルギーを持つ中性子が3個くらい出てくることも分かりました(第4図)。これがウランの核分裂という現象です。マイトナー夫人とフリッシュはユダヤ人だったので、その直後、デンマークに逃亡し、著名な理論物理学者であるニールス・ボーア博士に結果を報告しました。ボーアは、核分裂の前後でのエネルギー測定を指示して、その結果をアインシュタインに報告しました。



第4図：ウラン 235 の核分裂：

アインシュタインの相対性理論： $E = m c^2$

19世紀末には、ニュートン力学に基づき、電気・磁気・光・熱などに関する物理学全般の体系がほぼ完成したと思われていましたが、光の伝わる速さ（**光速**）に関する謎だけが残っていました。それまでの理論体系では、時の刻みや、物の長さ、質量は、どこでどんな状態で測っても同じであるとされていました。すると、物の伝わる速度は、観測する人の運動によって変わってくるようになります。例えば、道路を走る車の速さは、隣を並走している車から見るときと、路上に立って見るときとは、明らかに異なって見えます。ところが光速に関しては、どこでどのように観測してもあらゆる方向に常に一定なことが分かったのです。アインシュタインは、これを観測事実として受け入れ、その代り時の進み方や、物の長さ、さらに質量までもが、厳密には、観測する人の運動によって変わると考えることによって説明できることを示したのです。この理論は、**相対性理論**として知られています。ただし、観測者の運動する速さが、光の伝わる速さに比べて十分小さければ、これらは誰が測っても同じと考えてよいのです。だから、通常の観測では、これまでの理論で差支えないのですが、光速に近い速さで走る観測者から見ると、時の刻みは遅くなり、物の長さは短くなり、物体の質量は重くなるというのです。

ここで、**エネルギー**について考えてみましょう。日常生活でエネルギーと言えば、電力とか、私たち生命の活力を想像することでしょう。電力は発電所で作られます。石油や石炭、天然ガスなどを燃やす火力発電では、燃料を高い温度に熱して、その熱エネルギーによって熱機関を動かして電力を作り出します。水力発電では、高い所から水を落として水車を回して電力を取り出します。これは、水が高所にあることによって持つ位置のエネルギーというものを利用しているのです。風というのは、空気の集団の運動で、それに伴う運動エネルギーを電力に変えるのが風力発電です。こうして得られた電力は、物を動かす運動エネルギーや、熱を発生させて熱エネルギーに変換されたりして、私たちの生活に活かされています。人間を含む生物体のエネルギーは、食物として摂取した化学物質の体内での化学反応で発生するエネルギーです。このようにして、エネルギーというのは、いろいろ形態を変えてそれぞれの用途に応じた形に変換されてゆくのですが、しかし、何もの

い所からエネルギーを取り出すことはできません。いろいろな形態のエネルギーの総和は永劫不変で一定なのです。このことは、永久機関を作ろうという長い人類の試みの蓄積の上に、19世紀中頃に明らかになり、**エネルギー保存の法則**と呼ばれています。なお、エネルギー消費というのは、例えば、高温の使いやすいエネルギーの形態から排熱のような使いにくい形態のエネルギーに変換されてゆくことです。

アインシュタインの相対性理論が明らかにしたのは、実は、質量そのものが、エネルギーの一つの形態であるということです。それは、エネルギーE、質量m、光速cを使って、

$$E = m c^2$$

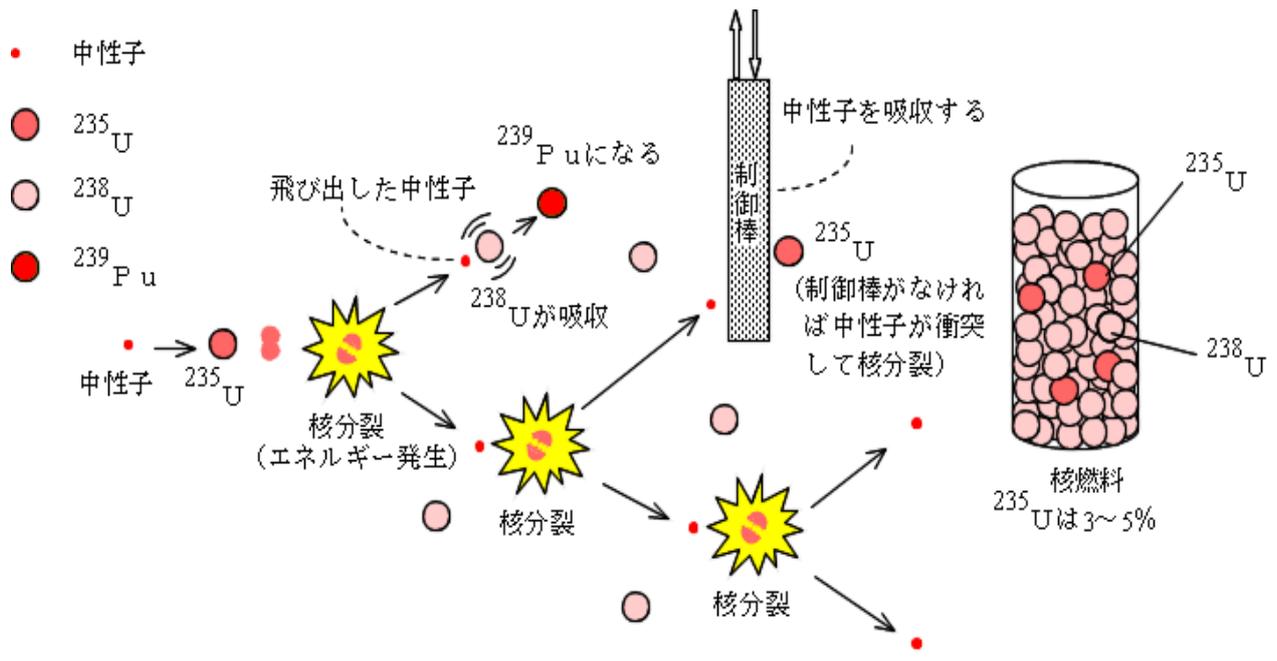
という**アインシュタインの公式**で表されます。ラボアジェ以来、物質の質量保存の法則（どんな化学反応によっても反応の前後で質量は一定である）が信じられてきましたが、それは、光速に近い速さで運動する物体に対してはもはや成り立ちません。アインシュタインの公式は、質量が別の形の膨大なエネルギーに転換される可能性を示唆しています。例えば、仮に1ミリグラムの質量が熱エネルギーに代わったとすると、その値は、200億キロカロリーになります。

さて、ウランの核が中性子によって核分裂を起こしたとき、生成した核と中性子の質量の和は、分裂前のウランと中性子の質量に比べて、少し減っており、その差に伴うエネルギーが、同時に出てきた3個の中性子の運動エネルギーになったと考え、アインシュタインの公式にほぼ符合することが明らかになったのです。これは、アインシュタインの相対性理論を裏付ける重要な結果であるとともに、ついに物質の質量保存則が破られ、原子核に質量という形で潜んでいる膨大なエネルギーを、通常の力学的エネルギーに変換することができたことを意味します。そういうわけで、ボーア博士はこの結果をアインシュタイン博士にまず報告したのです。

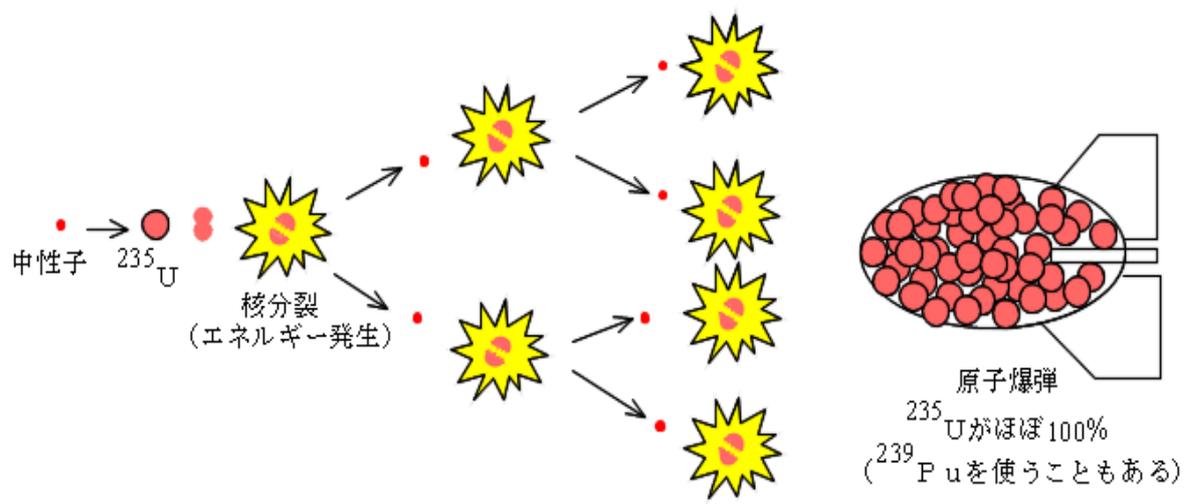
質量から大量のエネルギーを取り出す——ウランの連鎖反応とその制御

ウランの核分裂によってエネルギーを取り出すといっても、核というのはごく小さなもので、1個のウランの核分裂で失われる質量はほんの僅かにすぎません。それに伴って発生するエネルギーは、熱にして、わずか1千億分の1カロリー程度にしかありません。それでも、1グラムにすると、約1億キロカロリーになります。これが**原子力エネルギー（核エネルギー）**です。

問題は、どうやって数多くのウランの核分裂を起こさせるかということになります。幸いウランの核分裂に伴って、2個乃至3個の中性子が出てきますから、それらを次の核分裂に利用できれば、うまくゆけばネズミ算式に大量の核分裂を起こさせることができそうです。例えば、60回これを繰り返せば、約百兆個のウランの核分裂を起こし、1千万キロカロリーものエネルギーを一気に取り出すことができます。これを**ウランの連鎖反応**と言います（第5回下段）。時あたかも第2次世界大戦の最中でした。ドイツのカイザー・ウィルヘルム研究所では、ヒトラーの指示で秘密裏に研究が進められました。しかし、それにはいくつかの難題が控えていました。



原子炉：核分裂の連鎖反応を制御しながらゆっくり進める
 (どうしても ^{239}Pu ができてしまう)



原子爆弾：核分裂の連鎖反応をほぼ瞬間的に行わせる

第 5 図：ウラン 235 の核分裂の連鎖反応

最初の課題は、ウランの連鎖反応に適しているのが、天然ウランの中にわずか 0.7% しか含まれていないウランの同位体 ^{235}U だけだということです。そのため、仮に 1 個の ^{235}U が核分裂をしたとしても、生成された中性子はほとんどが圧倒的に数の多い天然ウランの主要成分である ^{238}U に吸収されてしまい、連鎖反応には寄与しないのです。連鎖反応を起こさせるためには、天然ウランの中から、核分裂を起こす ^{235}U を分離・濃縮させる必要があるのです (ウラン濃縮)。しかし、同位体というのは化学的性質が全く同じですから、それを化学的方法で分離することは不可能です。唯一の分離方

法は、 U^{238} と U^{235} とでその質量が 1.2% だけ異なるということを利用することです。しかし、これは大変難しいことです。さらに、かりに U^{235} を 100% 近くまで濃縮できたとしても、核分裂で生じる中性子のエネルギーは、 U^{235} の核分裂には大きすぎるので、望むような連鎖反応を起こさせるには、中性子を減速しなければなりません。その減速材の開発がもう一つの必須課題で、それには重水が最適で、次に炭素が適していることなどが明らかになりました。当時、重水の製造工場は、ノルウェーにしかありませんでした。そこで、ナチスドイツは直ちにノルウェーに侵攻し、占領して、重水を独占してしまいました。イギリス・フランスなどの連合軍は、直ちにこの工場を爆撃して破壊し、以後重水が作れないようにしました。その他、発生した中性子の中には、次の核分裂反応を起こす前に、燃料ウラン塊の外に出て行ってしまうものがあります。それを少なくして、連鎖的に反応が起こるようにするためには、ウラン塊をある大きさ（**臨界質量**）以上にしなければなりません。

マンハッタン計画と原爆投下

一方、アメリカでは、ナチスドイツによる核燃料開発計画が進められていることに危機感を感じた亡命ユダヤ人科学者たちが動き出しました。

1939 年、アインシュタインは、ルーズベルト大統領に書簡を送り、新しい非常に強力な爆弾ができる可能性があること、ナチスドイツでその研究がすでに始められていること、これを阻止するためには、アメリカで先に核爆弾の製造を成功させ、ナチスドイツに核爆弾製造を諦めさせることが必要だ、と指摘しました。この指摘を受けて検討した大統領は、1942 年、もろもろの課題を克服して、一刻も早くウランの連鎖反応を実現し、原子爆弾をナチスドイツに先駆けて作るべく、一大国家プロジェクトを始めました。当初ニューヨーク州のマンハッタンで始められたので、これは**マンハッタン計画**と呼ばれています。

計画は、ニューメキシコ州のロスアラモスや、テネシー州のオークリッジ、ワシントン州のハンフォードなどの荒野に巨大な設備を作って外部と隔離した状態で秘密裏に進められました。多くのアメリカの優れた科学者・技術者それに何十万人という労働者が訳も分からないまま人里離れた荒野へ連れて行かれ、たちまち荒野に大きな町ができました。彼らは大量の機材の運搬や建物の建造に動員されました。しかし、建造物ができても、何一つ製品ができない不思議な作業でした。何を作っているのか？「アイスクリームか、靴か、いや郵便馬車の車輪だ」などと言われたそうです。その間に、研究者達は、無数の細かい部屋に分離して配置され、それぞれ少しずつ異なる試料や条件のもとでテストを行い、ウラン濃縮や減速材についての絨毯爆撃的な開発研究に取り組むことによって、しらみつぶしに最適な方法を探り出してゆきました。その結果、必要な課題を次々に解決してゆき、まず減速材として炭素が適当なことを突き止め、さらに 3 年後の 1945 年夏までにはウラン濃縮にもほぼ成功しました。その過程で、高速中性子を吸収して、 U^{235} の連鎖反応を妨げると思われていた U^{238} が、中性子を吸収した後 β 線を出して**プルトニウム**という新しい元素になり、それが、 U^{235} と同じように連鎖反応に適した元素であることを突き止めました。ナチスドイツでは、それを突き止めることができぬまま終わりました。

こうしてアメリカでは、1945 年 7 月、まずプルトニウムを用いた原子爆弾の実験を成功させ、8 月に濃縮ウランによる原子爆弾と、プルトニウムによる原子爆弾が作られ、それぞれ 1 個ずつが広島と長崎に落とされました。

科学者の苦悩——ラッセル・アインシュタイン宣言とパグウォッシュ会議

マンハッタン計画は、当初、ナチスドイツに先駆けて核兵器製造を実現し、ナチスドイツの核兵器製造計画をあきらめさせること（いわゆる**核抑止**）が目的でした。ナチスドイツは、1945年5月に連合軍に降伏し、滅びたので、この段階でマンハッタン計画の所期の目的は果たせたと言えます。しかし、日本の真珠湾攻撃により、対日戦争に総力をあげていたアメリカでは、ナチスドイツが降伏後も、勢いに乗って計画を進め、日本への原爆投下に至ったのです。マンハッタン計画に参加した科学者の中には、これに納得できなかった人も多くいたようです。イギリスのロートブラット博士はその一人で、ドイツ降伏後、密かにマンハッタン計画から脱出して、ソ連大使館の助けを受けてモスクワ経由でイギリスへ帰り、各地で核兵器が人類を滅亡させる可能性を訴えました。この間、ロートブラット博士は、アメリカの秘密警察からソ連のスパイ容疑で指名手配され、何度か危機を間一髪切り抜けてきたということです。

しかし、戦後の東西冷戦対立の中で、核兵器の一層の強力化と大量製造が進められることに危惧を感じた博士は、著名な哲学者であるバートランド・ラッセル卿に働きかけて、「核兵器の発達の結果生じた人類存続の危機に対して」警告を発し、この技術を人類が手に入れた今となつては、「いかなる紛争も平和的に解決する方法を見出すように」呼びかける声明文を起草し、それを、アインシュタイン博士をはじめとする世界の著名な物理学者に送り署名を集めました。その結果、アインシュタイン博士や湯川秀樹博士、ジョリオ・キュリー博士などノーベル物理学者を中心に、11名の署名が集まり、1955年7月9日、**ラッセル・アインシュタイン宣言**として公表されました。アインシュタイン博士は、この宣言文に署名後まもなく死亡しました。実は、宣言への署名がラッセル卿に届く前に、アインシュタイン博士が死亡したニュースが先に流れたのだそうです。そういう意味で、この宣言は、アインシュタイン博士の遺言と考えられます。

ラッセル・アインシュタイン宣言を受けて、1957年7月、宣言に署名した科学者をはじめ、朝永振一郎博士等、ノーベル賞学者を中心に、カナダのパグウォッシュに世界10ヶ国22人の科学者が集まって、「科学と世界のための**パグウォッシュ会議**」が開催されました。この会議は、以後毎年開かれ、世界の多くの科学者が個人の資格で集まって、核兵器と戦争の廃絶に向けて科学と世界の諸問題を協力して解決するための討議を重ね、究極的な解決を目指すとともに、多くの現実的で重要な提言をしてきました。その間、東西冷戦対決の影響で、意見が分かれることもしばしばありましたが、その厳しい議論を通じてまとめられた提言の中には、核実験停止条約、核不拡散条約、非核兵器地帯、生物兵器・化学兵器禁止条約、ヨーロッパの安全保障、発展途上国の諸問題、環境問題など、その後の国際連合などの国際社会の中で採択・実現されてきたものを多く含んでいます。当初から、この会議の日本開催が望まれていましたが、当時南アフリカが人種差別政策を取っていたため、日本政府は南アフリカの科学者の入国を認めませんでした。これが、パグウォッシュ会議の、いかなる国の科学者であれ、個人としての参加は認めるべきだという方針と相容れず、1994年南アフリカで人種差別が廃止されるまで、日本開催は実現しませんでした。そして、1995年7月、広島・長崎50周年、ラッセル・アインシュタイン宣言40周年を記念して、初めて日本で、それも広島で年次大会が開かれ、包括的核実験停止条約の締結を呼びかけるなど、様々な提言を取りまとめました。これを受けて、同年、パグウォッシュ会議は、ロートブラット会長とともに、**ノーベル平和賞**に輝きました。

日本における原子力エネルギーの導入——学術会議3原則

欧米で核エネルギーに関する研究が始められたころ、日本でも、理化学研究所や京都帝国大学にサイクロトロンが建設されて、核分裂や、ウラン濃縮などに関する研究が始められましたが、連鎖反応を実現するには至りませんでした。終戦と同時に、占領軍により、理化学研究所と京都大学のサイクロトロンは破壊され、占領下での核に関する一切の実験的研究が禁止されました。その間、日本の原子物理学者は、主に理論面での原子核に関する研究に従事してきました。

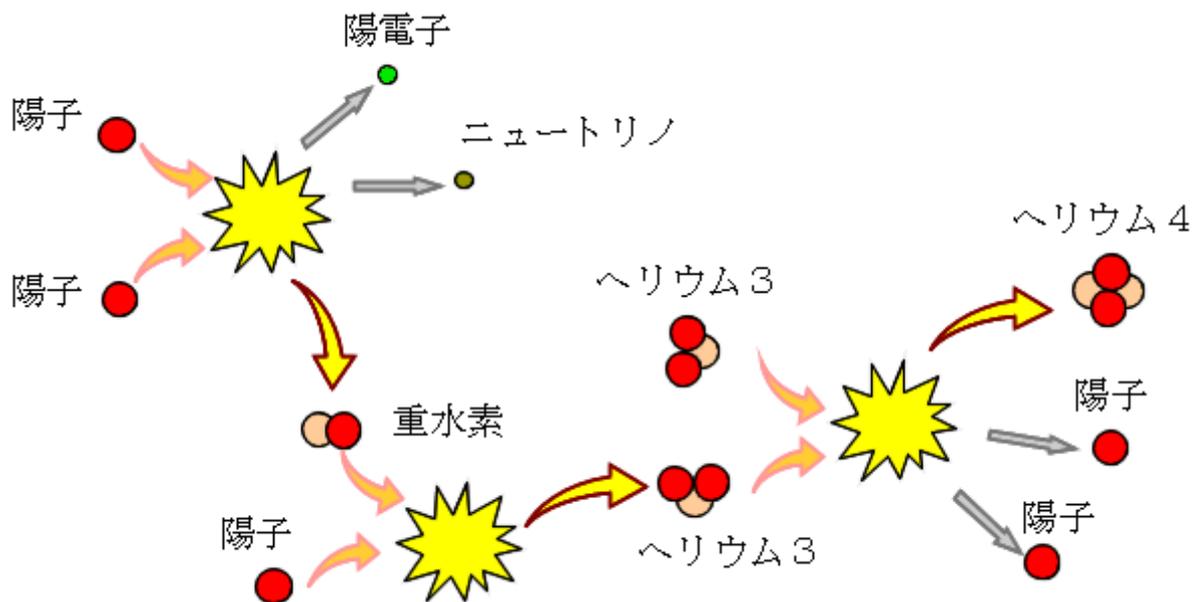
1951年のサンフランシスコ講和条約の締結で日本が独立すると、研究者の間では、平和憲法のもとで、原子力の研究を基礎段階から日本独自に始めるべきだという動きが起こり、学術会議を中心にその進め方に関する議論が行われていました。その最中、1954年3月、突如、原子炉築造予算2億3千5百万円が国会に提出され、自民・改進黨・日本自由3党の賛成で、可決されました。これに対して、研究者たちは、我が国の原子核研究が戦後途絶えていて、未熟な段階にあること、現段階で原子炉築造となると、先進国の技術に頼らなければならないこと、折しも朝鮮戦争がはじまり、東西冷戦の最中、大型核兵器の開発製造競争が行われていることなどを勘案すると、原子力の平和利用が我が国の繁栄に資することは期待できるものの、現状では時期尚早であるとして、強く反発しました。学術会議はこれに呼応して、核兵器研究の拒否と、①研究は**民主的な運営**のもとに行われるべきこと、②日本国民の**自主的な運営**により進められるべきこと、③**一切の情報**を完全に公開すること、の**学術会議3原則**の声明を、10月の総会で可決しました。しかし、すでに予算化された原子炉築造計画は進められることになり、当時の文部省は、原子力に関する技術者を養成すべく、東京大学などの主要大学工学部に原子力工学科を創設しました。が、その講座を担当する専門家が不足し、それに代わって核物理学者が多く教員に採用されたため、原子核物理学に関する教育が中心になり、技術者の養成は遅れがちになりました。1956年には、政府は、大学や関係研究機関を担当する文部省とは別に、主に原子力開発を担当する政府機関として、**科学技術庁**を設置しました。これにより、大学等の研究者の意見は、原子力政策に反映しにくくなりました。その後、科学技術庁は、2001年の省庁再編で、文部省と統合され、文部科学省となりました。

ここで、原子力発電のためのウランの連鎖反応についてその原理を簡単に説明しておきましょう(第5図上段)。原子爆弾の場合には、とにかく臨界量以上の濃縮されたウランを、適当な中性子減速材で覆ってやればよいのですが、原子炉の中で定常的にエネルギーを取り出すとなると、連鎖反応が爆発的に進まないように制御してやる必要があります。まず、濃縮ウランの濃縮度は、爆弾よりはるかに薄く2~4%くらいですみます。しかし、連鎖反応は、1個のウラン U^{235} の核分裂で出てくる中性子のうち、ちょうど1個だけが次のウラン U^{235} の核分裂に使われるように、有効な中性子の量を制御してやらなければなりません。それには、過剰に発生した中性子を吸収して、次の反応に寄与しないようにします。それを行うのが、**制御棒**というもので、通常カドミウム合金からなり、炉の中に出し入れすることにより、中性子の量を一定に保たせるのです。さらに、今回の福島の事故でも明らかになったように、核分裂で発生するのは、高レベルの放射性廃棄物で、その処理も大きな問題となっています。

核融合への挑戦と課題：太陽・星のエネルギー源、高温プラズマの制御

——魅力と不安——

宇宙の星や太陽のエネルギー源が、水素などの軽い原子核の融合の際わずかに減少する質量エネルギーであることは、第2次大戦前から知られていました。これを**核融合反応**と言います。太陽のエネルギー源となっているのは、4個の陽子が融合してヘリウム核になる核融合反応です(第6図)。ウランのような重い原子核の核分裂に伴う質量エネルギーの代わりに、核融合反応に伴う質量エネルギーを使った爆弾(原子爆弾を起爆剤とした水素爆弾)の製造は、大戦後まもなく米・ソ両国で始められました。ただし、太陽での核融合反応は大変遅く、陽子4個がヘリウム核になるまでには



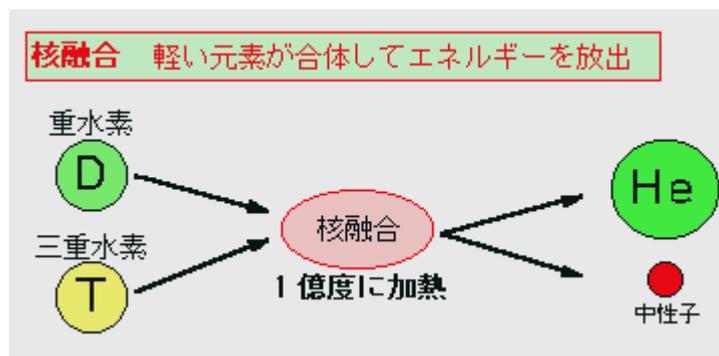
第6図：太陽での核融合反応

数億年もかかると言われています。それでも太陽は膨大な量の水素から成っていますから(太陽の質量は、地球の質量の33万倍もあります)、太陽全体としては、太陽系を照らし続けるだけの大きなエネルギーを発生できているのです。しかし、地上ではこんな遅い反応は役に立ちません。そこで、地上で核融合反応を活用するためには、反応の早い重水素と3重水素の核融合反応(第7図)を使います。

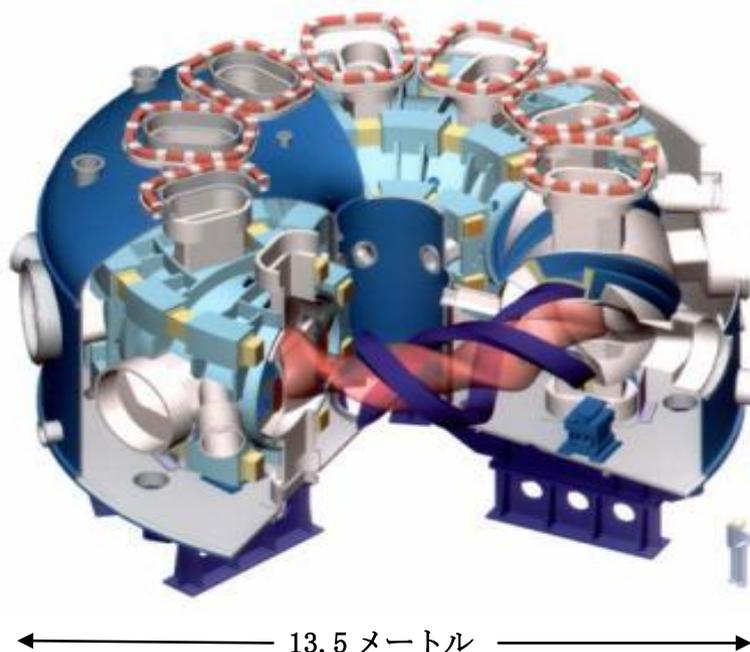
と同時に、これを核融合発電として平和利用できないかという基礎研究も始まりました。二つの原子核を融合させるには、それらを衝突させる必要があります。前にも述べましたが、正の電気を持つ原子核同士を接近させて、衝突させるには、原子核に大きなエネルギーを与える必要があります。仮に、加速器で加速してそれができたとしても、たった2個の原子核の融合では、発電には程遠いエネルギーにしかなりません。発電に有効なエネルギーを取り出すには、大量の原子核の融合が必要です。それには、重水素と3重水素の混合気体を、何億度という超高温度に熱する必要があります。仮にそれができたとしても、その気体を制御する必要があります。このような超高温度状態では、気体を構成する原子は、中心の原子核とその周りの電子とがばらばらにはがれて激しく運動する状態になります。このような状態のガスを、**高温プラズマ**と言います。従って、まず取り組ま

ねばならない課題は、高温プラズマを生成し、それを高温状態で制御することです。高温プラズマの制御には、強力な磁場が用いられてきましたが、当初予想したよりもはるかに難しいことが、研究を進めて行くうちに分かってきました。研究はまず核融合反応を伴わない状態の水素気体を使って始められたのですが、それから60年たった現在でも、まだ完全には制御できていません。

しかし、アメリカ、ヨーロッパ、ロシア、日本などで膨大な予算をつぎ込んだ研究の結果、現在では、ほぼそのような高温プラズマの生成・制御に成功するに至りました。そのなかでも、我が国の核融合科学研究所で行われている大型ヘリカル装置（第8図）による研究が、世界最先端の研究の一翼を担っています。

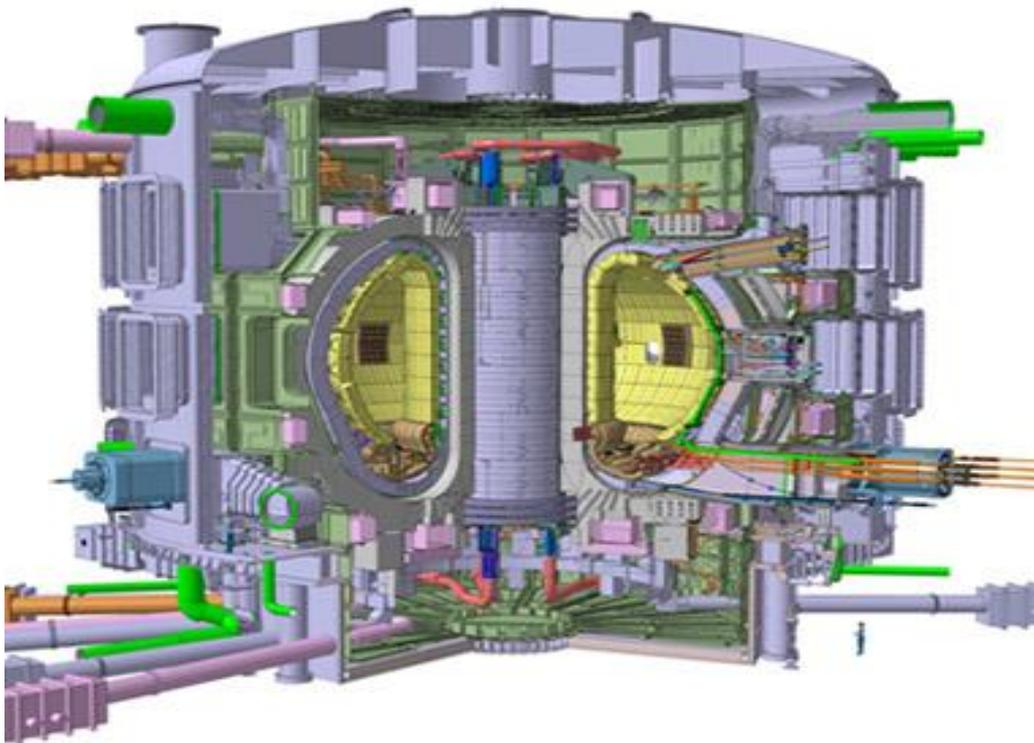


第7図：地上でのエネルギーとしての核融合反応



第8図：核融合科学研究所大型ヘリカル装置

一方、重水素を使って実際に核融合反応を起こさせたプラズマの制御を目指す研究では、IAEA（国際原子力機構）のもとで、ヨーロッパ・日本・ロシア・アメリカ・韓国・中国・インドの国際協力です。この研究では、重水素を燃料としてつぎ込み、実際に核融合反応を起こして、それに伴うプラズマの振舞いや、反応で生成した中性子の制御、炉材料の研究、放射性3重水素の取り扱いなど、炉工学的研究も行われる予定です。



第9図：ITER

直径 26m、高さ 14.5m、体積 4250m³、重量 90 トン



第10図 米国国立レーザー核融合点火装置 (National Ignition Facility)

一方、アメリカを中心として、プラズマを磁場で制御するのではなく、超高強度のレーザー光を使って、燃料を超高密度に爆縮して核融合反応を起こさせる方法が研究されています。アメリカでは、すでにこの方式で192本の強力レーザー光を用いた核融合点火燃焼実験装置（第10図）が作られ、10年後の実用化を目指していますが、その中身は非公開の部分が多く、よく分かりません。

わが国でも、大阪大学で、これよりはるかに小型の基礎研究として、12本のレーザー光を爆縮に用いた研究が行われていますが、これはすべての研究内容を公開し、さらに宇宙における超高温・超高密度ガスの実験室でのシミュレーション研究にも使われています。

このように、核融合反応による発電を目指した研究は、現状ではまだ多くの課題に直面しています。しかし、これが実現すると、放射性反応生成物がほとんど生じず、そして暴発の危険性もなく、しかも海水中に豊富に存在する重水素を主たる燃料として利用できるため、これからの人類にとって夢の究極的エネルギー源となる可能性をひそめています。問題点として、燃料に使う三重水素が放射性物質であること、反応で生じる高速中性子が壁材料に当たって壁材料の放射化を起こす危険性があることなどがありますが、これらは、現在の原子炉で出る高レベル放射性廃棄物とは異なり、その取扱いは比較的容易で、今後の技術開発によって十分に安全に制御できると考えられています。そのため、世界の科学者達は、安全でほとんど無尽蔵なエネルギー資源となり得る可能性を有する核融合炉の実用化に向けて、夢を描いて研究に取り組んでいます。

（本稿は平成24年10月16日にTSS文化大学で行われた講演の概要である。）



<著者紹介>

西川恭治（1934年生れ）

広島大学での最終所属部局：大学院理学研究科

専攻分野：プラズマ物理学

国内外での活動歴：各種学会活動、各種審議会委員、各種役員等

地域での活動歴：広島県物理教育研究推進会会長・広島県かるた協会会長、他