

# 「無害な原子炉」?

—— 原子炉工学研究所 ~ 赤塚研究室 ——



赤塚 洋 助教授

近年、相次ぐ不祥事でとかく悪いように言われがちな原子力。しかし、日本の発電の約4割もの割合を占めるようになった原子力は、もはや我々の生活に不可欠なものになりつつある。

このたび我々は、日々原子力の研究に熱意を注いでいる原子炉工学研究所の中にある赤塚研を訪れた。ここでは様々なことが研究されているが、少し前に理論が完成したという「無害な原子力～自ら整合性を有する原子力」について紹介していこう。



## 原子力エネルギーの源・質量欠損

「1gの物質の質量は215億kcalに等しい」  
(アインシュタインの相対性理論より)

現在、日本の電力のおよそ4割が原子力発電によってまかなわれている。もはや電気を作る際に必要不可欠である原子力だが、これを語るにはまず質量欠損という現象を説明しなければならない。

一般に原子は陽子・中性子・電子から成っている。原子をこれら構成要素から作ることができる」と仮定してみよう。

これらの粒子の質量を量るために考えられた単位 原子質量単位(a.m.u)を使って各粒子の質量を表してみると、中性子は1.00898、陽子は1.00759、電子は0.00055である。これを用いて原子番号が6である炭素原子の質量を推測してみると、表1のように12.10272になる。しかし、実際に炭素原子の質量を量ってみると12.00382しかない。このような理論上の質量と実際の質量の差のことを質量欠損という。この質量欠損はどの原子にも存在する。いくつかの例を表2に挙げよう。

表1

粒子	質量	数	計
中性子	1.00898	6	6.05388
陽子	1.00759	6	6.04554
電子	0.00055	6	0.00330
計			12.10272
実際			12.00382
質量欠損			0.09890

単位は a.m.u.

表2

元素	質量数	質量欠損
重水素	2	0.0024
トリチウム	3	0.009
ヘリウム	4	0.03
リチウム	6	0.034
モリブデン	96	0.88
ランタン	139	1.23
ウラン	235	1.91

単位は a.m.u.

冒頭に挙げた相対性理論の一文は、この質量欠損によって失われた質量はエネルギーへと変換されることを示している。原子炉の内部でもこの理論に基づいてエネルギーを作り出している。先に挙げた表2を使って考えよう。

モリブデン(原子量96)とランタン(原子量139)とを結合させて質量数が235の元素をつくると、それはウラン235になる。さて、この反応における質量欠損を計算してみると、次のようになる。

$$1.91 \text{ (ウラン)} - \{0.88 \text{ (モリブデン)} + 1.23 \text{ (ランタン)}\} = -0.2$$

反応後の質量欠損から反応前の質量欠損を引いたわけだが、結果が負になっている。これではエネルギーを作り出すどころか、消費してしまう。し

かし、この反応を逆に起こすことを考えてみよう。つまりウランをモリブデンとランタンに分裂させてみるとどうだろうか。

$$\{1.23 + 0.88\} - 1.91 = 0.2$$

この反応では、質量欠損が増大する。つまり、反応に伴ってエネルギーが放出されるのである。この核分裂という反応こそが現在の原子炉に利用されている反応なのである。また、核分裂反応と化学反応とで発生させることのできるエネルギーを比較すると、

$$U^{235} \quad 19,700,000 \text{ kcal/g (核分裂)}$$

$$C + O_2 \quad 7 \text{ kcal/g (炭素の燃焼)}$$

となる。いかに核分裂反応で発生するエネルギーが大きいものであるかが、お分かりいただけると思う。



## 原子力の主役、ウラン

原子力の源となっているのは質量欠損であると前節で述べた。では、一体どのような原子が使われているのだろうか。

原子核を構成する粒子の中で、中性子はともかく陽子は自身の正電荷のために互いに反発しあわずである。原子核は中性子と陽子とから成っているが何故バラバラにならないのだろうか。

原子核の内部には核力という、ごく近距離でしか働かない引力がある。だが、原子核の内部では中性子・陽子が絶えず運動をしており、これらの粒子の運動によるエネルギーは原子核を内部から分裂させる力になりうる。普段は核力が陽子の反発力と粒子の運動による力を越えているので、原子は自壊しないのである。

もし外部からエネルギーが加えられて、原子核が余分なエネルギーを得たとすると、粒子はより速く運動を始める。そして核力に打ち勝って原子核を内部から割ることができる。この原子核を割るために必要エネルギーの値を幾つかの原子について挙げたのが表3である。この表を見ても分かるように質量数が多い原子ほど容易に割ることができる。つまり、核分裂反応は質量数の大きな原子であるほど起こしやすい、ということになる。

では、どうやって表3のようなエネルギーを原子核に与えるのか。ここでは、原子として質量数が235であるウランを例に取ってみよう。現在行われているのは、中性子をぶつけるという方法である。

表3

質量数	140	200	236
核分裂に必要なエネルギー	62	40	5
核分裂で生じるエネルギー	48	135	205

エネルギーの単位は MeV

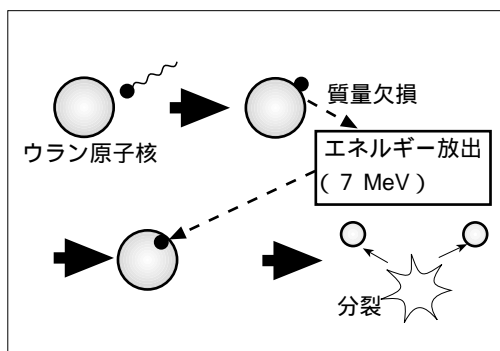


図1 ウランの分裂

中性子をぶつけるだけで分裂に必要な 5 MeV のエネルギーを得ようとすると、理論上その速度を 30000km/sec にしなければならない。しかし、ウランの原子核に中性子がくつつく際に、質量欠損が起こり 7 MeV のエネルギーが放出される。ここで放出されるエネルギーは外部に漏れる前に、

原子核分裂に利用される。つまり、ウランを分裂させる場合、図 1 のように中性子をくつつけるだけで十分なのである。

これが、原子炉にウランがよく利用される理由であるといえよう。

### 3 「無害な原子炉」への道

前述のように、原子番号がウランより大きい原子は核分裂を起こしうる。また、同位体と呼ばれる原子番号が同じで中性子の数だけが違う原子も存在し、その違いによっても核分裂のしやすさは異なるのである。それらの原子は核分裂を起こす際、エネルギーを放出すると同時に、放射線をも放出する。

原子炉の内部では、質量数の大きな原子に中性子を当て核分裂反応を誘発している。この際に核分裂生成物ができるのだが、この中には放射性を持つものもある。原子炉の外部にこれらの放射性物質を持ち出すことが、原子炉に対する世間の評判の悪い理由であろう。

しかし、原子炉の内部で放射能を完全に（正確には日常我々が浴びている程度のレベル 例えばコンクリート、あるいは宇宙から放射されているレベルまで）消すことが出来れば、その悪評も薄れるのではなからうか。そして、それこそが赤塚助教授ら原子炉工学研究所の方々が考案した方法である。

すでに述べたように、原子炉の内部では中性子を照射することによって、核分裂を起こさせている。分裂した後に放射性を持っている物質があるでしょう。これらは、さらに原子炉の中に入れておくことで、放射性を持たない物質、または半減期（自然崩壊を起こして、放射性同位体の数が半分に減るまでの時間）の短い物質、になることがあり、放射性同位体の数はどんどん減っていくようになる(図 2)。このような手段を講じることで、原子炉の内部にある物質の多くを放射性を持たない物質にすることが可能なのである。

しかし、ただ原子炉内に入れておくだけでは、放射性同位体はなくなる。せつかく放射性を失った物質までも、中性子を照射された際に、その中性子をくつつけて放射性同位体になってしま

うことがあるからだ。このような理由から、核分裂生成物を一度放射性を持つものと持たないものに分離してやり、持たないものだけを原子炉の外へ出してやる必要がある。

これらを分離するには、2 段階の手順がある。まずは元素ごとの分離、次に同位体ごとの分離である。

また、元素ごとの分離にも湿式処理と乾式処理という 2 種類の方法がある。前者は核分裂生成物を細かく砕いた後に硝酸の中に入れ、さらに目的の物質のみを溶かす特殊な溶媒を加え、硝酸に溶けている物質と溶媒に溶けている物質とを分離する方法である。後者は使用済み燃料をフッ化物の塩の形にして熔融塩をつくり、アルミの精錬のように電気を流してやる、というものである。アルミの精錬とは、アルミを含んでいるボーキサイトを溶液にしてから電流を流し、電極に物質を析出させる方法である。

この 2 種類の方法のうちどちらがより好ましい方法か、というと将来的には後者であると考えられている。なぜなら、前者では水を入れておくタンクなどが必要になり、放射性を持った水を扱っていくうちにいずれ放射性廃棄物になってしまう

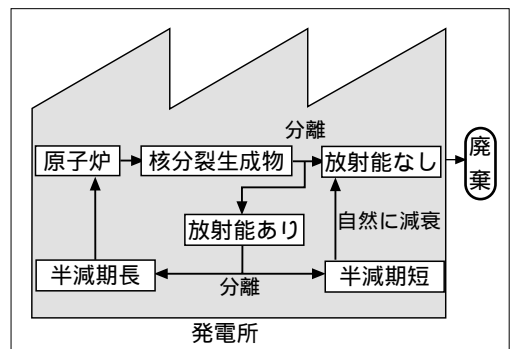


図 2 廃棄までの行程

物質が出てきてしまうからだ。

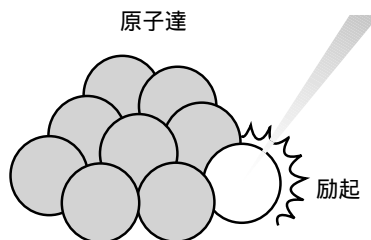
元素ごとに分離した後は、それが放射性同位体であることがあるので、同位体ごとに分離する。この分離にはいくつかの方法があるが、赤塚助教授らはレーザーによる分離を選んだ。この方法は元素の励起状態が同位体ごとに少しずつ違うことを利用している。ある波長のレーザーを元素に当ててやるとある特定の同位体のみを励起することが出来る。励起したもののみをイオンにすることは可能なので、後は電極を用いてイオンを引きつけるだけで特定の同位体のみを分離することができる。

こうして、核分裂生成物を放射性の有無により分離することができる。そして、放射性を持った物質は原子炉の中へ、持たない物質は原子炉の外へ移動させればよい。

ここで一つ疑問が持ち上がるかも知れない。「レーザーを使うには多量のエネルギーが必要なのは？ レーザーを作り出すためのエネルギーが原子炉で発生させるそれよりも大きかったら、

この仕組みは意味を成さないのでは？」と。しかし心配は無用である。赤塚助教授らの計算によると、全処理にかかるエネルギーは発生させるエネルギーの1%ほどでしかないということである。これならば原子炉はほとんど現状通りの運転が出来るといえる。

これら全ての分離・移動作業を原子力システムの内部で行うことが出来れば、外部に放射能を漏らすことのない、まさにクリーンな原子力であるといえるだろう。



## あとは実践を残すだけだが...

この無害な原子力システムの理論はすでに学会で発表されており、世界中の科学者達が非常に注目したようだ。赤塚助教授は学会に集まった研究者らの中でもとりわけ若く、はじめは厳しい顔で見られていた。しかし、発表が終わる頃、その厳しい顔はすべて笑顔に変わっていたというから、世界の反応は並々ならないものがある。

しかし、理論的研究はすでに一段落したのだが、様々な理由から実験的研究が行えない、というのが現状である。理由の一つとして、世間の原子炉に対する認識が挙げられる。原子炉を作ろうとしたら、たとえそれが実験用とはいえ、「原子炉は危険だ」「廃棄物はどうするんだ」「爆発でも起こしたらどうするんだ」などと周囲の人々から反対の声が挙がるだろう。安全であることを説明しよう

としても人々は「原子炉は危険である」という先入観を持っているため、なかなか納得してくれないだろう。動燃における種々のトラブルが一般の人々の認識を固定してしまったようにも思われる。

赤塚助教授はこうおっしゃった。「たとえ原子力に関する研究が進もうとも、世間の原子力に対する悪評が消えない限り、原子力の未来はあまり良いものとは言えないだろう。まずは、動燃を始め我々原子力を研究するものが誠実に現状を公開して、それにより人々の認識の問題を解決することが大切だ」

原子力の未来には、技術上の問題もさることながら、人々の精神面および心理面（安全と安心の差）に関する問題という大きな壁が立ちふさがっているようだ。

赤塚先生は現在、原子力の理想的な姿を追求するための研究を行っているようだ。特にレーザーを用いた研究が主で、大きな業績も上げている。今回紹介した内容はその一環で、レーザーの応用の一つであるようだ。この「無害な原子炉」がそ

う遠くない未来に実現することを我々はいかに期待している。

最後になりましたが、実験等でお忙しい中取材に応じて下さった赤塚先生にお礼を申し上げます。

(竹林 隆)